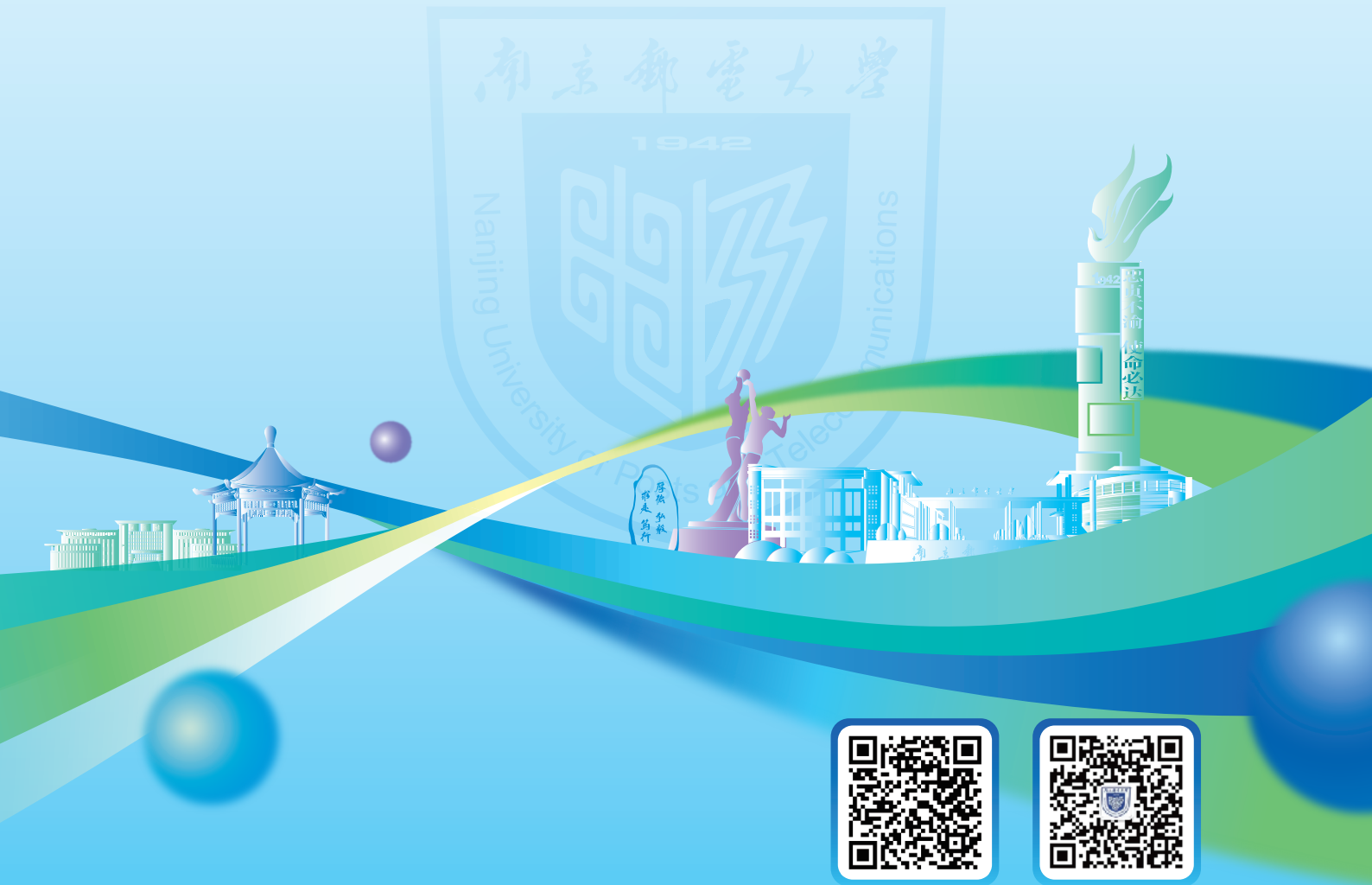
南京郵電大學
Nanjing University of Posts and Telecommunications

2026版

科研成果汇编

COMPILATION OF
SCIENTIFIC TECHNOLOGICAL ACHIEVEMENTS



南京邮电大学科研成果汇编
电子书（2026版）

南京邮电大学产业合作处
微信公众号

前 言

QIAN YAN

南京邮电大学是国家“双一流”建设高校和江苏高水平大学高峰计划A类建设高校。学校始终坚持“四个面向”，构建“信息材料、信息器件、信息系统、信息网络、信息应用”五位一体的大信息发展格局，在新一代移动通信、物联网、移动互联网、大数据、云计算、网络空间安全、有机电子与信息显示、集成电路与微组装、智能电网、光通信、智能制造、现代邮政等研究领域处于国内先进水平。学校实施“一市一院”校地特色化合作战略和“一技一企”校企协同创新战略，持续推进校地校企协同创新与深度融合，不断提升科技创新水平和社会服务能力，助力发展新质生产力。

为了宣传和推广学校最新科技成果，促进科技成果转化，我们编制了2026年学校科技成果目录。成果实用性强、技术较成熟、应用前景较广，涵盖先进通信、电子与光学、集成电路、先进计算与信息安全、高端软件及信息服务、人工智能与机器人、新型电力（智能电网）、智能制造装备、新能源、前沿新材料、生物医药、物联网与工业互联网、智能交通、资源与环境、低空经济等领域。热忱欢迎社会各界与我校加强产学研合作，协同创新，合作共赢！

南京邮电大学产业合作处

（国家大学科技园管理办公室、技术转移中心）



目录

CONTENTS



1 先进通信

01.广义奇偶模理论框架下的多模谐振天线设计方法 001

02.一种基于互质阵列的非对称大规模MIMO信道估计方法 004

03.一种SNR-MCS动态映射表格设计方法 006

04.一种堆叠BD-RIS辅助MIMO系统的相移和发送协方差矩阵设计方法 008

05.一种MIMO散射信道估计方法、介质及设备 010

06.一种非对称架构中基于深度学习的信道估计方法 012

07.一种基于大规模MIMO双基站系统的3D多目标定位方法及介质 015

08.一种面向近场通感一体化系统的相移和时延计算方法及系统 017

09.一种卫星下行无线传输方法、装置、设备及存储介质 019

10.全光无线通信系统及网络 022

11.多协议兼容量子密码系统 024

12.一种用于生物遥测应用的三维植入式多输入多输出天线 025

13.自供电摩擦电触摸面板研发 028

14.基于深度学习差异矩阵度量构建信道图的全局定位方法 030

15.全空间卫星异构网络关键技术及应急通信终端研发 032

16.一种Modbus远程操作控制系统 034

17.基于混合深度强化学习的NOMA-MEC系统用户分组与资源分配方法 037

18.无线毫米波可选的基于Overlay的数据中心网络组播算法 039

2 电子与光学

01.金刚石NV色心量子磁强计 041

02.基于逆向设计的零近似介电常数宽带非互易热辐射器，采用混合深度学习框架 044

03.横向磁极化和电极化情况下的同步宽带非互易热辐射 046

04.基于多层斜排列光栅结构的超小入射角非互易热辐射装置 049

05.受中国虎符启发的动态可调圆二色性光学加密策略 051

06.面向5G/WiMAX通信的多模工作频率可重构天线 054

07.基于各向异性光子时间晶体的时间逻辑与编码功能理论策略 057

08.整数约束下各向异性光子时间晶体中的光角梳 060

09.FSS0-1光纤智能鞋垫 063
10.全固态高性能轻量化微片皮秒激光器 066
11.用于吞咽障碍治疗与检测的传感雷达及新一代治疗仪器 068
12.异质螺旋包层大模场单模激光增益光纤 070
13.基于扫描成像的光电器件大面积高分辨缺陷检测系统 071
14.基于盲源分离从多角度投影提取聚焦层的DBT重建 073
15.直写印刷单晶组装钙钛矿X射线探测器 076
16.具有强伸缩性的柔性自供电可监测人体运动信号的肌肉贴 078
17.柔性可重构多波束透射/反射天线阵列 081
18.可拉伸人工磁导体快速制备与低SAR天线集成技术 083
19.面向边缘检测应用的电编程相变纳米光子电路 085
20.基于相变光子集成电路的可编程全光非线性激活函数器件 087
21.交互式智能终端显示系统 090
22.绿色溶剂体系合成深蓝光钙钛矿量子点及LEDs制备 092
23.应用于OLED显示的高效稳定发光墨水 095
24.一种本征可拉伸发光弹性体及其制备方法与应用 097
25.一种印刷制备大面积图案化有机发光薄膜的方法 100
26.一种芘基有机半导体激光材料及其制备方法与应用 103
27.一种红光材料及其制备方法与应用 106
28.一种可印刷红光聚合物及其制备方法 108
29.纳米孔单分子传感设计与应用 111

3 集成电路

01.宽频带高灵敏度低频电场探头 113
02.低功耗零误码亚阈值PUF芯片（65nm） 115
03.国内首款MRAM PUF芯片（40nm） 117
04.高能效高吞吐动态混合TRNG 119
05.共掺氧化镓光电存储技术 121
06.一种通过非均匀型沟槽场限环（TFLRs）终端结构设计的氧化镓肖特基二极管 123

07.一种高抗浪涌电流的氧化镓肖特基二极管 125
08.集成续流二极管氧化镓横向MOSFET 127
09.热阻调控氧化镓日盲紫外微纳谐振传感器 130
10.基于反馈控制的氧化锌纳米线谐振器的气体分子质量传感器 132
11.超低功耗IGZO光电突触晶体管及其神经形态计算中的应用 134
12.CdS-QDs修饰IGZO突触晶体管及其在仿生彩色图像灰度化中的应用 137
13.基于p型TeSeOx的多光感知突触晶体管及其在多级伤害感受器的应用 140
14.多栅可调InZnO晶体管的信息整合及其在混沌时间序列预测中的应用 143
15.TeSeO/InZnO光电突触晶体管在宽带紫外-可见-近红外感知与多功能储备池计算中的应用 145
16.高密度近红外单光子激光雷达阵列探测器芯片 148
17.高精度全集成3D角度传感器芯片 151
18.锁相环时钟芯片 154
19.基于交叉电极与集成微加热器的相变纳米光子电路 156
20.晶格工程调控的高性能β-Ga_2O_3忆阻器及其图像处理应用 158
21.一种集成SECE和FOCV MPPT技术的自启动低静态电流三源能量收集电路设计 160
22.一种集成可重构电荷泵和MPPT技术的全集成混合电源转换器设计 163
23.28 GBaud NRZ/PAM4双模SerDes收发机设计 166
24.一种基于RO–MMCM边沿竞争机制的免校准FPGA真随机数发生器 169
25.一种具备输出信号相位同步和调频连续波功能的小数分频频率综合器 171
26.基于氧化物忆阻器的高速射频开关特性研究 174
27.面向ATE应用的高速高精度时序生成芯片应用验证 175

4 先进计算与信息安全

01.处理器自动化漏洞挖掘EDA工具 177
02.基于氧化镓忆阻器的光电调制人工突触及类脑计算技术 180
03.云数据中心综合监控与分析技术及应用 183
04.一种面向RGB-D的多尺度融合与边缘加强目标检测方法 184
05.一种基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法及系统 187
06.一种面向无损网络的细粒度流量控制方法 189

07.一种基于混合差分隐私的区域计数查询方法及系统 191
08.基于AR设备的机房运维管理方法及系统 193
09.一种基于纹理特征的图像压缩感知自适应重构方法及装置 195
10.基于私有信息检索的区块链智能停车管理系统 196
11.CapNet——基于可解释AI的高效DDoS攻击检测方法 198

5 高端软件及信息服务

01.iHOS智慧医院操作系统 201
02.边缘智能边擎算法推理系统 203
03.全链式养老服务平台 206
04.骨质疏松症骨小梁评分系统 209
05.扫描探针显微镜成像分析与数字图像处理 210
06.评估近似算术单元错误纠正能力的新型度量指标及应用 213
07.一种基于深度特征、信息检索和软件工程领域特征的方法级软件缺陷定位方法 215
08.一种针对智能家居确保设备安全访问与操作的方法 217
09.三维工业产品缺陷检测软件研发及产业化 221
10.面向智算共享租赁的算力资源调度平台研发与产业化 222
11.基于脊谷特征与深度特征描述符的点云单点对齐方法 224
12.管道损伤定位评估与数据压缩与方法 226
13.硬件在环小步长实时仿真平台 228
14.一种星载立体SAR线约束点散射体三维定位方法及系统 230
15.一种基于GPU快速优化运算基因共表达网络方法 232
16.一种柔索驱动连续体关节形状估计方法 234
17.一种基于CSI的跌倒检测方法、装置及存储介质 236
18.一种面向FPGA部署的ResNet网络量化与仿真推理方法 238
19.一种多分辨率数字高程模型三维可视化方法及装置 240
20.基于区块链和无线充电赋能的边缘卸载方法 242
21.基于轻量化模型的高效个性化联邦学习系统 244
22.一种轻量化的火灾烟雾检测方法、终端设备及存储介质 245

23.一种图像深度伪造检测方法 247
24.基于状态空间模型的人脸图像复原方法 249
25.一种复杂天气下障碍物检测方法及装置 251
26.一种人脸伪造主动防御图像生成方法、系统及介质 253
27.一种基于空间信息语义分割模型的不透水面提取系统及方法 255
28.一种互联网秒杀抢购方法和系统 257
29.二维材料计算机模拟与分析技术开发 259
30.云网运营专业模型关键技术研究 260
31.一种面向多源移动应用知识图谱构建方法 265
32.团体运动技战术实时分析系统 267

6 人工智能与机器人

01.情绪及抑郁症状态监测 269
02.基于多模态融合的人工智能工业巡检云平台的研发及产业化 271
03.远距离酒驾检测仪研究及其产业化 272
04.智能工厂的数字孪生管控平台 274
05.基于计算机听觉的机械设备故障声跨域智能检测 276
06.面向复杂环境的动态实时环境感知系统及产业化 278
07.面向室内动态场景的SLAM系统 279
08.一种基于多视图转换的双目标域个性化物品推荐方法及装置 281
09.垂直领域多模态精神/心理健康辅助诊断设备 283
10.面向企业私有化部署的大模型关键技术研究与产业化 284
11.桥梁拉索检测机器人（自动化装备） 286
12.软体康复、抓取机器人 287
13.粗糙壁面检测机器人 289
14.机器人视触觉传感系统 291
15.飞机场场面夜晚视频监控实时增强系统 293
16.药箱、监测与聊天一体化的家庭服务机器人 295
17.基于深度学习的视觉SLAM动态特征点去除方法 296

18.一种基于稀疏约束重构胶囊网络的图像识别方法、装置及介质 298
19.一种预设时间下的UAV-UGV最优控制方法及系统 300
20.热电供暖智慧管控平台 302
21.机器狗智能巡检平台 304
22.基于二级RAG的知识库检索系统 306
23.可信大模型网关系统 308
24.一种基于Transformer的综合特征网络流量分类方法 310
25.一种基于Transformer可形变注意力模块的安全帽检测方法 312
26.面向裸眼3D立体显示应用的视点AI重建技术研究及产业化 314

7 新型电力（智能电网）

01.面向智能变电站的TSN流量调度技术 315
02.新型配电网承载力评估系统 317
03.功率电子电路及其故障诊断的硬件在环仿真技术 319
04.海量分布式光伏设备在线检测中心 321
05.电动汽车充电枪的安全锁紧装置 323
06.不确定性环境下智慧家庭在线能量管理方法 325
07.基于虚拟电压的多港区岸电系统完全分布式优化调度方法 327
08.针对网络攻击下配电网风险级联的安全风险评估方法 329
09.基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法 331
10.网络攻击下基于动态博弈的配电网防御策略设计方法 333
11.考虑最优防御资源分配的配电网风险评估模型 335
12.计及量测终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制方法 337
13.基于5G通信的高耗能可调负荷调峰调频协调控制策略研究 339
14.用于漏电流抑制的箝位型三相光伏逆变器 341
15.面向台区的集群空调与电动汽车协同优化方法 343

8 智能制造装备

01.Fiber-Hydro：基于AI赋能的电解槽运行状态感知系统 345

02.面向机器人无感电机的关键技术研究与产业化 347
03.大型结构安全智能监测和预警关键技术 348
04.自动折弯加装备及控制系统 350
05.便携式足底压力测量系统 353
06.量程可调式共振触觉传感系统 355
07.航天器快速故障诊断与容错控制技术 357
08.基于TDE的灵巧手指自适应滑模跟踪控制方法 359
09.一种永磁体在转子上的半自由度混合型轴向磁轴承 361
10.面向气-电互联综合能源系统的脆弱线路和脆弱负荷节点辨识技术 363
11.一种仿人机器人步行运动控制器 365
12.高集成高速磁悬浮电机驱动系统 367
13.基于高频脉冲注入的无轴承开关磁阻电机的优化控制方法 369
14.基于车轮安装低成本微型IMU的车辆高精度定位设备 371
15.基于切换仿射模型的涡轮风扇发动机抗干扰切换控制策略 373

9 新能源

01.人工智能辅助的新能源预测、故障检测和优化方案 375
02.柔性锌离子电池 377
03.基于混合并联变换器的功率硬件在环模拟系统 379
04.防撞最优车距的控制方法 381
05.低载波比逆变器电流解耦控制方法 383
06.面向交通电气化耦合系统的电动汽车双层决策引导方法 385
07.面向高性能锂金属电池应用的三维多孔铜集流体研制 387
08.二维磷硫化锡修饰的高效氧化锡电子传输层构筑及n-i-p型钙钛矿光伏器件应用 389
09.水系锌电池用高稳定大晶粒尺寸单一(002)织构锌金属负极高效制备 391
10.面向光电子芯片的供能的钙钛矿光伏电池 393
11.钙钛矿光伏用自组装单分子层（SAM）空穴传输材料 396
12.水系锌二次电池用超长循环稳定性铟晶界填充（002）织构锌金属负极 398
13.一种柔性透明薄膜电极及其制作方法 400

14.柔性MOF电解质的构筑与应用性能研究 402
15.充电设施智能健康评估诊断系统 403
16.充电设施智能实时预警系统 406

10 前沿新材料

01.面向亚5nm MOSFET的MNH_2二维半导体材料及器件技术 409
02.一种通过氧气流量调控择优生长ε相氧化镓外延薄膜的方法 412
03.免键合SOI新工艺 414
04.一种超薄氧化物修饰的半导体电极的制备方法 416
05.三氰基化9-苯基芴类高效发光材料 418
06.钙钛矿光伏材料及薄膜制备技术 420
07.高性能有机长余辉复合材料 422
08.智能伤口愈合材料及应用 424
09.具有高穿透深度的近红外二区荧光发射纳米诊疗试剂 427
10.单组份刺激响应聚合物长余辉材料 430
11.多彩圆偏振有机长持续发光材料应用于成像、加密和照明 431
12.高氧空位钛酸盐纳米材料及其绿色高效制备技术 433
13.柔性透气电加热薄膜 435
14.自粘结型聚离子液体电解质材料 437
15.机器视觉光感材料 439
16.面向水质净化的新型硫化钨光热材料及其制备和应用 440
17.配体限域策略构筑快衰减Cu-I链闪烁体：实现高分辨X射线成像与三维断层扫描 442
18.一种检测水解奶粉的复合纳米材料及其制备方法与应用 444
19.同时提高有机膦盐掺杂聚乙烯醇薄膜的室温磷光效率和寿命的策略 446
20.低成本、良品率高的非能量传递型高效白光OLED材料与器件 448
21.手性有机长余辉材料 450
22.低成本且高稳定性的钙钛矿光伏墨水 451
23.有机发光自由基闪烁体 453
24.卟啉格子化分子光电性质的预测方法 455

25.水凝胶修复/载体材料 459
26.高亮度NIR-II共轭高分子影像材料 461
27.高稳定性深蓝光聚合物及其大面积柔性PLED 462
28.一种无金属催化多孔有机荧光聚合物 464
29.具有高偏振和可调谐发射的增强光激活有机余晖 466
30.TiCu-HHTP双金属有机框架材料 468
31.一种基于SFX合成实验的虚拟仿真系统 470
32.含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能预测方法及其预测模型训练方法 472
33.一种面向螺芴氧杂蒽的微流自动化投料装置及方法 474
34.基于九苯基芴PF单取代或双取代咔唑Cz的有机纳米材料及其制备方法和应用 476
35.一种氰基取代的螺环芳烃分子分形晶体及其制备方法和应用 478
36.一种聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜及其制备方法 480
37.一种自光聚合物材料及其制备方法与应用 482
38.一种本征可拉伸n型界面材料及其制备方法与应用 485
39.一种茚衍生物材料及其制备方法与应用 487
40.一种有机纳米聚合物的制备方法 489
41.近红外发射电刺激响应型铱（Ⅲ）配合物及其制备方法和应用 491
42.一类电刺激响应型铱（Ⅲ）配合物及其应用 493
43.面向下一代信息技术的高导电油墨—墨水配制、丝网印刷、图案化 495

11 生物医药

01.基于知识图谱和深度学习的糖尿病预测系统 497
02.一种COVID-19医学影像检测分类方法及装置 500
03.一种光治疗试剂及其制备方法和应用 502
04.Pt-Ni合金珊瑚纳米团簇催化氧还原驱动的绿色电化学发光体系及乳腺癌精准诊断应用 504
05.近红外光一区介导的复合纳米棒光热材料及其制备方法 506
06.一种纳米马达载药颗粒及其制备方法和应用 508
07.一种高灵敏度近红外二区荧光探针用于肝损伤中过氧化氢的实时监测 510
08.口服益生菌凝胶微泡 512

09.面向多种肿瘤标志物的纸基电致化学发光生物传感器 513
10.水溶性近红外二区荧光探针 515
11.快速自凝止血粉末（GH粉末） 517
12.高性能一氧化氮双比率型荧光探针 519
13.用于增强光动力治疗的CT成像纳米造影剂 521
14.超声响应抗菌剂 523
15.近红外二区成像引导的线粒体靶向光动力治疗及其多通路细胞死亡机制研究 525
16.便携式病毒核酸检测生物传感器 527
17.智能DNA溶栓纳米机器 529
18.纳米POCT传感器件在重大疾病早期检测中的应用 530
19.一类多目标同时检测的荧光/磷光发光寿命聚合物探针及其应用 532
20.一类检测氧气的荧光/磷光发光寿命聚合物探针及其应用 534
21.同时检测HClO和pH的荧光/磷光发光寿命响应型聚合物探针及其应用 536
22.基于多视图动态加权的自适应脑电信号识别方法及系统 538
23.基于联合训练的蛋白质交互作用类别预测 540

12 物联网与工业互联网

01.广域无源物联网感通系统 543
02.群智服务的感知接入系统 546
03.面向低轨高动态特征的LoRa体制卫星物联网终端及网关研制 548
04.空地无人装备一体化智能物联管控系统 550
05.基于泛在物联网多模态感控的食药安全智能冷链物流及其产业化 552
06.一种基于服务器策略制定的物联网设备流量混淆方法 555
07.一种基于分簇算法的物联网中节点失效检测方法 557
08.面向车路云协同的5G移动物联网确定性服务系统 559
09.无线网络测试系统产品系列 561
10.企业安全生产隐患排查系统 564
11.面向自智网络的边缘智能内生AI智能体插件及管理平台 566
12.高效能物联网感知理论与关键技术 568

13 智能交通

01.一种针对车联网的多维车辆信任评估方法 571
02.车货匹配货源信息挖掘 577
03.一种基于WEB的道路检测实时查看和操作的方法 579
04.智能驾驶场景下的行人检测方法研究 581
05.一种DoS攻击下的多Euler-Lagrange系统事件触发一致性控制方法 583
06.一种可感知车辆移动的路边单元内容编码放置方法 585
07.一种交通标志牌限速限高限重信息提取方法、系统和存储介质 587
08.无人机辅助下铁路列控数据的高可靠传输技术 590
09.复杂海况下的船舶变速航线智能规划方法 592
10.基于改进CycleGAN数据增强的行人重识别方法 594
11.智慧车管云平台 596
12.一种改进模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法 599
13.一种地铁-公交复合网络关键站点识别方法 602
14.一种动态巡游公交动态调度及路径规划方法 605

14 资源与环境

01.基于MOF衍生传感界面的智能电子平台用于PFAS现场快速检测 607
02.基于卫星、无人机的空天地一体高光谱大数据环境遥感监测技术 609
03.一种基于GNSS和地面气象站观测的实时ZTD区域建模方法 612
04.毫米波机载InSAR高精度地形测绘关键技术 614
05.基于多源遥感数据监测河流水位动态变化 617
06.顾及POI点局部空间分布差异的自适应KDE方法与系统 619
07.基于多基线SAR数据的林下地形提取方法、装置 621
08.一种基于量子计算的地理选址方法 624
09.一种顾及城市水文和交通流特征的暴雨积水路段识别方法 625
10.基于时空信息融合的径流智能预测方法 627
11.基于多尺度视角的社会水循环碳排放测算与预测方法 629

15 低空经济

01.基于独立分控离子风推进器的多自由度微型飞行器 631

02.基于大模型与区块链的低空智联网系统 633

03.无人机一网统飞管理系统 636

04.一种变载四旋翼无人机容错控制方法 638

05.一种多四旋翼无人机的固定时间姿态一致性控制方法 640

06.一种基于事件触发的多四旋翼无人机固定事件编队方法 642

07.基于饱和受限情况下的无人机自适应跟踪控制算法 644

08.基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制方法 646

09.基于事件的无人机编队间歇控制方法、系统、设备及介质 648

10.高精度无源测向与定位 650

11.基于通感算控一体化的低空智联网协同调度技术 652

12.多无人机辅助无线缓存网络时延优化方法、系统及设备 654

13.一种无人机辅助联邦学习的方法 657

广义奇偶模理论框架下的多模谐振天线设计方法

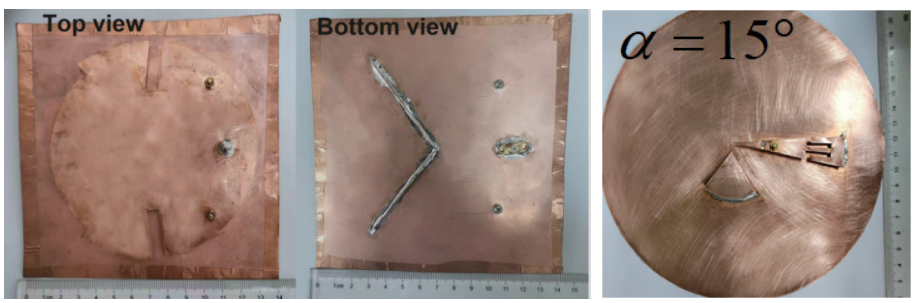
成果完成人	吕文俊	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	微波通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信与信息系统
应用行业	无线通信、移动通信、车载通信、卫星通信、雷达、射频识别等。				
核心专利号	ZL201910773228.7，ZL202110813629.8，ZL202210659731.1，ZL202210659615.X，ZL202210659701.0等				

成果概述

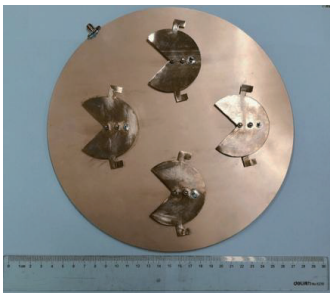
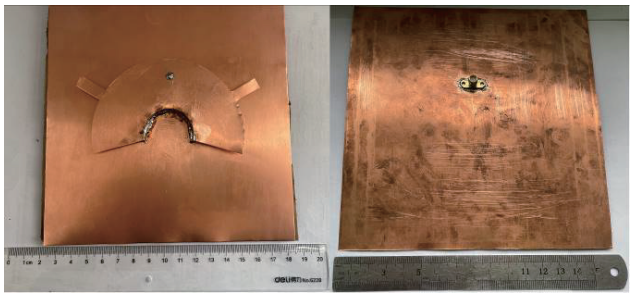
新一代无线通信和移动通信对高性能宽带天线需求日益增加。以移动基站天线的成本控制、重量、非线性互调等综合因素为例，探索实现结构简洁、成本低廉、便于制作和批量生产的轻质化宽带基站天线，是业界高度关注的难题。该成果在广义奇偶模理论框架内揭示天线系统中不平衡电流分量产生的数理机制，以原型振子为模式调节工具，通过解析闭式揭示天线工作原理、确定其激励方式并估算其关键参数，再结合数值分析进行优化设计，分别研制并实现宽波束、高增益、斜波束圆极化、双极化、零向频率扫描、波束频率扫描等不同性能的宽带单元天线原型样机，单元天线可用带宽从15%到4倍频程不等。

关键技术/创新要点

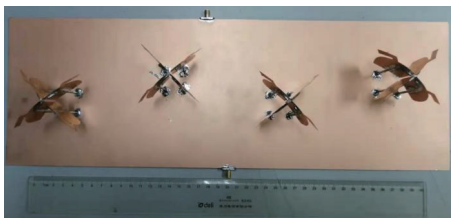
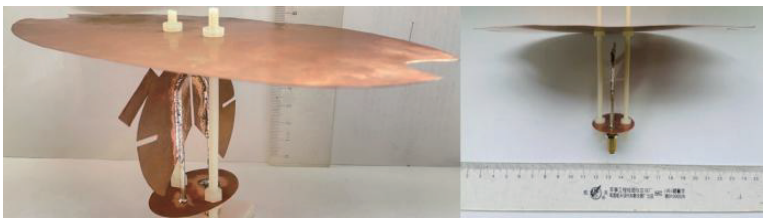
该成果在多模谐振天线的广义奇偶模理论统一框架方面取得突破性进展，研发了基于原型振子的模式综合天线设计法，成功实现了单元天线辐射色散的按需精密调控。分别研制了宽带零向频率扫描贴片单元天线、4单元高增益微带贴片阵列、4单元双极化扇形全波振子阵列等一系列天线样品及原型样机。主要性能如下。



（1）辐射零向频率扫描贴片单元天线：工作带宽达24%以上。可按原型振子分别位于半径、圆周方向进行设计，俯仰面内零向扫描范围可达114度、水平面内零向扫描范围可达135度，未来有望用作移动通信测量中的空间陷波（干扰抑制）天线。

(2)4单元高增益微带贴片固定波束阵列天线的增益可达16dBi以上(单元增益10dBi以上),剖面高度仅为0.03-0.04波长,可用带宽超过12%,比同等高度上的常规贴片单元天线增益提升2dBi以上,带宽提升一倍以上。近期改进设计的单元天线增益可达11dBi以上,且极化纯度更高、剖面仍低于0.05波长,预计4单元组阵增益能达到17dBi以上。进一步调节其工作模式,还能产生波束频率扫描功能。

(3)4单元双极化扇形全波振子阵列可以实现1.7-2.7GHz频段的宽频带覆盖,主波束内交叉极化电平低于-24dB,带内视轴增益波动不大于2.2dB,可直接与同轴线匹配而无需外加匹配网络或调谐元件,构成双极化天线时的正交通道隔离度大于35dB,性能远优于常规半波或全波振子天线。这是最简结构的二维电振子天线,结构简单,性能优良,是未来移动基站天线的重要设计原型。另外,扇形全波振子还能用于低成本抛物面宽带馈源天线的设计,通过微调多个谐振模式的组合、结合反射器的形状调整,能够分别实现倍频程等化波束、宽带等化及高频段反锥削补偿波束等不同性能。

技术指标/优势

该成果目前已获得授权中国发明专利20余项、美国发明专利4项,部分成果曾获江苏省科学技术三等奖。主要技术指标优势包括(但不限于)以下方面。

(1)可用带宽大:起步带宽不低于15%,可按需实现高达4倍频程的相对带宽。

(2)高增益:单元天线增益可达11dBi以上、高于常规天线2～3dBi。

(3)单元天线具备阵列功能:单元天线可实现零向/波束频率扫描功能,且扫描角度可按需调节,有利于缩减阵列天线规模或简化天线系统。

(4)性能指标正向定量可控:利用原型振子和解析公式,正向指导性能优化。

(5)极化纯度高:双极化扇形振子正交极化通道隔离度可达35dB以上、优于常规天线的30dB;互补结构多模谐振天线共址配置,端口隔离度可高达60dB以上。

(6)低剖面背射增强覆盖:在平行于金属反射底板的方向上,多模谐振天线能产生4～7dBi的辐射增益,远优于常规微带天线,特别有利于车载应用。

(7)半解析方法:数理基础严格、工作机制清晰,有解析闭式估算天线关键尺寸初值、便于用户实际应用,为后续数值优化设计奠定理论基础。

(8)轻质高效低成本:所得天线为最简/次最简结构,无需借助复杂工艺或依赖先进材料,制作公差松、电气性能优良,部分类型天线可一次成型免调试,便于大批量生产、定型和成本控制。

应用领域和市场前景

与传统单模谐振天线相比,团队研发的天线均为多模谐振天线,带宽至少比常规单元天线提升一倍以上。另一方面,团队提出的天线结构均为最简或次最简的平衡对称馈电结构,关键尺寸参数均可用闭合表达式精确估算(误差低于10%),不仅能够显著降低结构复杂度、有利于成本控制、工艺简化和降低不必要的耦合,也为高性能天线系统的研制和批量生产奠定了扎实的理论基础。具体应用场景包括(但不限于)移动通信基站、各类固定或便携式移动通信终端(电视、折叠屏平板或手机、笔记本电脑等)、抛物反射面天线系统、射频识别系统、车载通信系统等。

一种基于互质阵列的非对称大规模MIMO信道估计方法

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	12261660(PCT授权号)；CN114401171B(国内授权号)				

成果概述

5G通信中大规模MIMO技术是提升传输性能的核心手段，全数字大规模MIMO架构因硬件成本、数据处理负担及功耗问题发展受限，非对称收发架构虽能降低上行接收压力，却因上下行天线数量差异，造成角度分辨能力不均，下行信道估计不准确，无法直接将上行信道用于下行预编码。因此，研发非对称架构下高精度的MIMO信道估计技术迫在眉睫。

本研究提出基于互质阵列的非对称大规模MIMO信道估计方法，通过构造虚拟线性均匀阵列，结合压缩感知的群最小绝对收缩选择算子与ADMM优化框架估计来波方向，再重构阵列流形估计路径增益，最终回复完整下行信道。该方法利用互质阵列高角度分辨率特性，突破非对称架构信道估计的技术瓶颈，实现以部分天线精准估计完整下行信道，有效降低上行链路接收压力，大幅提升信道恢复准确性，为非对称大规模MIMO系统的工程化应用提供关键技术支撑，具有重要的实际应用价值。

关键技术/创新要点

本成果针对非对称架构下大规模MIMO系统信道估计难题，融合互质阵列设计与压缩感知优化算法，创新提出一套高精度、低成本的信道估计技术方案，核心技术的创新点围绕阵列架构设计与信道参数估计优化展开，兼具硬件实现可行性与算法估计精准性。

在硬件层面，该成果利用基于互质阵列的上下行非对称收发架构设计，按照$M=mn+1$、$N=m+n-1$ 的互质关系配置基站天线，仅选取少量天线用于上行信号接收，在大幅减少上行射频链路的硬件成本与数据处理压力的同时，依托互质阵列的高角度分辨率特性，从硬件层面消除上下行天线数差异导致的空间分辨能力不对称问题。在算法层面，该成果结合虚拟阵列构造与群稀疏压缩感知算法，将上行部分天线的频域信号经自相关处理、筛选重排后构造虚拟线性均匀阵列，在来波方向估计能力上突破了物理天线数的限制。在ADMM优化框架下引入群最小绝对收缩选择算子，充分挖掘空间信号的群稀疏特性，精准估计来波方向与路径增益，最终实现由部分上行信道参数重构完整下行信道。

此外，针对宽带多频点通信的频域偏移问题，利用多频点群稀疏特性提升估计精度，实现从信道参数估计到完整下行信道复原的全流程优化，让上行部分天线的观测数据可直接支撑下行精准预编码，兼顾系统硬件开销与通信传输性能。

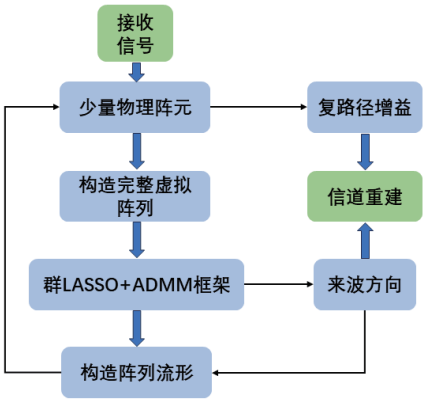


图1 成果信道重建完整流程示意图

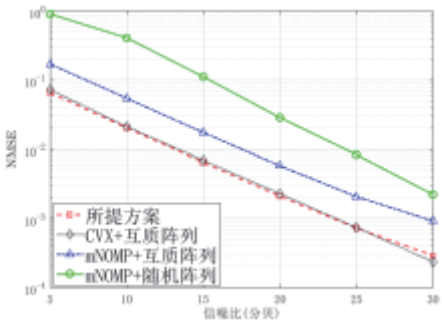


图2 所提方案与不同算法方案重建信道误差对比

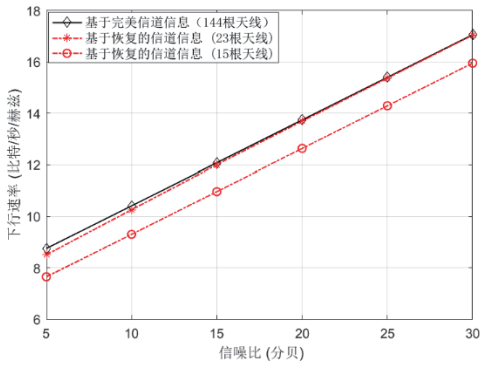


图3 基于不同天线数重建信道的下行传输效果

技术指标/优势

与传统的信道估计方案相比，该成果能有效利用少量射频链和天线，为非对称架构阵列恢复出数倍于自身天线数的完整阵列上的宽带信道信息，相比直接采用完整全数字阵列，该成果部署成本更低，还能有效降低上行链路接收压力，且估计出的信道信息精度能逼近完整全数字阵列估计出的效果。该专利还申请了审核标准严格的美国PCT专利保护，有利于保护范围全球化，实现技术在美国及其他国家的知识产权布局，为该成果的海外商业化与国际合作提供法律保障。

应用领域和市场前景

该成果可以为无线通信行业的基站设计、信号传输优化等相关方面提供高效的技术支持，如：基于非对称架构的大规模MIMO基站信道精准估计，能够在降低上行链路的硬件与处理压力的同时，保障下行信号的高效传输，这是5G及后续移动通信系统的重要技术支撑，也是超大规模天线阵列工程落地应用的重要技术手段。由于该方法适配宽带多频点通信场景，可有效解决非对称收发架构的信道估计难题，成果有望应用于5G宏基站、微基站及未来6G通信系统的基站信号处理模块，对物联网、毫米波通信等对传输速率和硬件成本有双重要求的无线通信场景也同样适用，市场应用场景广泛，产业化前景良好。

一种SNR-MCS动态映射表格设计方法

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	202510820870.1				

成果概述

随着5G及未来6G无线通信技术的快速发展，复杂时变信道条件下的高效可靠传输已成为提升系统性能的重要问题。在TDD制式下的单用户MIMO系统中，信道状态随时间不断变化，SNR波动明显，传统自适应调制编码方法往往难以及时、准确地完成传输参数匹配。因此，开发一种兼具动态适应能力、泛化能力与计算高效性的AMC技术显得尤为重要。

本团队自主提出了一种基于在线深度学习的SNR-MCS动态映射表格设计方法。该方法面向TDD制式下的单用户MIMO通信系统，利用轻量级神经网络对SNR与MCS之间的非线性映射关系进行动态建模，并结合在线学习机制，根据实时信道反馈持续优化映射表格。相较于传统方法，该技术充分发挥深度学习处理复杂非线性问题的优势，在无需大量预先设计调制编码组合、无需提前获取海量训练数据的前提下，实现了SNR-MCS映射关系的动态优化，在提升无线通信系统频谱效率和传输可靠性方面具有良好的应用前景。

关键技术/创新要点

作为无线通信系统中的关键链路自适应技术，自适应调制编码具有提升频谱效率、增强系统可靠性和实现动态资源优化等优点。尤其是在TDD制式和单用户MIMO场景下，信道状态随时间快速变化，对传输参数的实时匹配提出了更高要求。与传统基于固定映射或参数调节的方法相比，基于数据驱动的动态映射技术能够更有效地刻画SNR与MCS之间的复杂非线性关系，在提高决策精度的同时降低对人工经验和静态设计的依赖，有利于在复杂时变信道中实现更稳定的性能表现，同时也为后续智能化链路优化提供了良好的技术基础。

团队采用轻量级深度神经网络构建SNR-MCS动态映射模型，并结合在线学习机制实现映射关系的持续优化。具体而言，通过利用神经网络对历史与当前信道信息的建模能力，动态预测合适的MCS选择策略，并在系统运行过程中基于实时反馈对模型参数进行自适应更新。该方法在结构设计上避免复杂网络带来的高计算开销，在训练过程中无需依赖大规模离线数据，同时通过在线迭代不断修正映射误差，实现对信道变化的快速响应。此外，通过引入低复杂度推理与快速收敛机制，使模型能够在实际系统时延约束下稳定运行，从而在保证系统复杂度可控的前提下，有效提升无线通信系统的吞吐性能与传输可靠性。

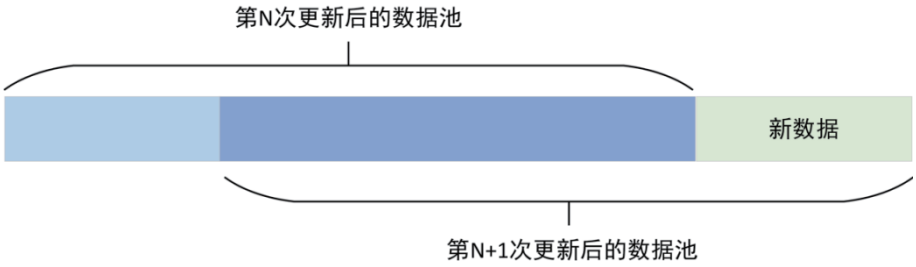


图1 数据池更新机制

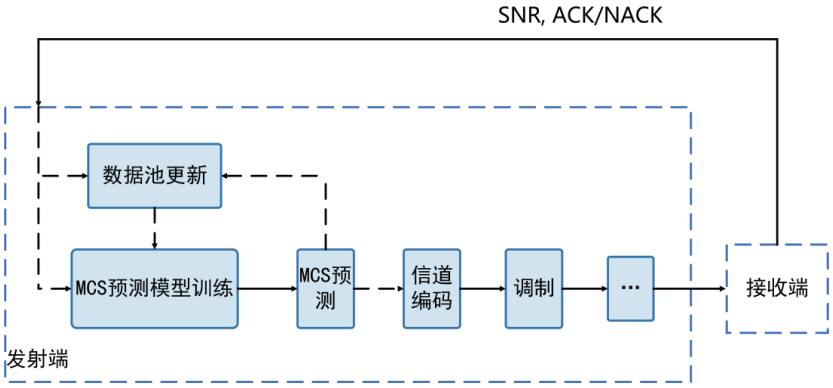


图2 流程示意图

技术指标/优势

与传统基于固定映射表、经验参数调节或单一反馈修正的AMC方法相比，该成果实现了对SNR-MCS映射关系的在线动态优化，能够根据时变信道条件实时调整MCS选择策略，提高链路自适应的准确性与灵活性；在保证较低计算复杂度和较快收敛速度的基础上，提升无线通信系统的频谱效率和传输可靠性，并降低对大量离线训练数据、复杂参数预设计及静态场景假设的依赖。同时，该方法适用于TDD制式下的单用户MIMO系统，具备较好的工程可实现性、场景适应能力和推广应用前景。

应用领域和市场前景

该成果可为新一代无线通信系统中的链路自适应与资源调度提供高效的技术支持，适用于5G及未来6G通信网络中的基站侧调度优化、终端自适应传输以及高可靠低时延通信等关键场景。例如，在高速移动、复杂干扰或信道快速变化的环境下，基于该方法实现的SNR-MCS动态映射能够有效提升传输稳定性和吞吐性能，降低误码率和重传开销，这不仅是提升网络性能的重要手段，也是实现智能化无线网络的重要基础能力。由于该方法具备良好的泛化能力和较低实现复杂度，可广泛应用于单用户及多用户MIMO系统、边缘计算节点以及智能基站设备中，未来有望在运营商网络优化、工业互联网、车联网及低空通信等领域实现规模化部署，具有良好的市场推广价值和应用前景。

一种堆叠BD-RIS辅助MIMO系统的相移和发送协方差矩阵设计方法

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	CN120110452B				

成果概述

随着无线通信系统向大规模多天线、智能超表面辅助和波域处理方向演进，传统仅依赖收发端优化的设计方式已难以充分释放系统性能。传统RIS受对角相移结构限制，主要完成相位调控，难以兼顾幅度分配与更复杂的波束控制；在多层堆叠智能超表面场景下，现有方法也难以适配超对角连接结构带来的更高设计复杂度。

基于此，本成果提出一种面向堆叠BD-RIS辅助MIMO系统的相移和发送协方差矩阵联合设计方法。该方法以系统容量最大化为目标，先初始化相移矩阵与发送协方差矩阵，再按照“设计发送端相移矩阵—设计接收端相移矩阵—设计发送协方差矩阵”的流程开展迭代优化，直至系统容量收敛，最终得到最优相移矩阵和最优发送协方差矩阵。该成果充分利用堆叠BD-RIS的多层结构和元件间连接特性，实现对入射信号相位与幅度的灵活调控，可显著增强波域内信号处理能力并提高整体系统容量。

关键技术/创新要点

成果面向具有组连接结构的堆叠BD-RIS系统，围绕其高维、强耦合、非凸的相移矩阵优化难题，构建了发送端与接收端相移矩阵的分层分组迭代优化框架。针对每一层、每一组相移矩阵，首先利用Takagi分解将结构约束下的复对称矩阵表示为相应的复数酉矩阵形式，在此基础上结合酉空间流形优化思想，沿共轭梯度方向进行投影更新，实现对优化变量的稳定迭代求解。通过逐组、逐层交替更新发送端与接收端相移矩阵，该方法能够有效适配不同元件连接方式和组连接拓扑结构，为堆叠BD-RIS复杂相移矩阵的工程化设计提供了统一且可实施的技术路径。

在发送协方差矩阵设计方面，本成果在完成发送端与接收端相移矩阵优化后，进一步对等效相关矩阵进行特征值分解，并结合最优功率分配策略求解发送协方差矩阵，从而实现传播环境重构与发射统计特性配置的协同优化。该方法突破了传统分步独立设计的局限，使BD-RIS相移调控与发射资源分配能够相互匹配、协同增益，从整体上提升系统容量和传输性能。与此同时，该成果主要基于统计信道状态信息开展优化设计，无需依赖高开销的瞬时信道状态信息获取，也避免了复杂的实时信号处理过程，因而在保证性能提升的同时，有助于降低系统硬件复杂度、反馈开销与实现成本，具有良好的工程应用前景和推广价值。

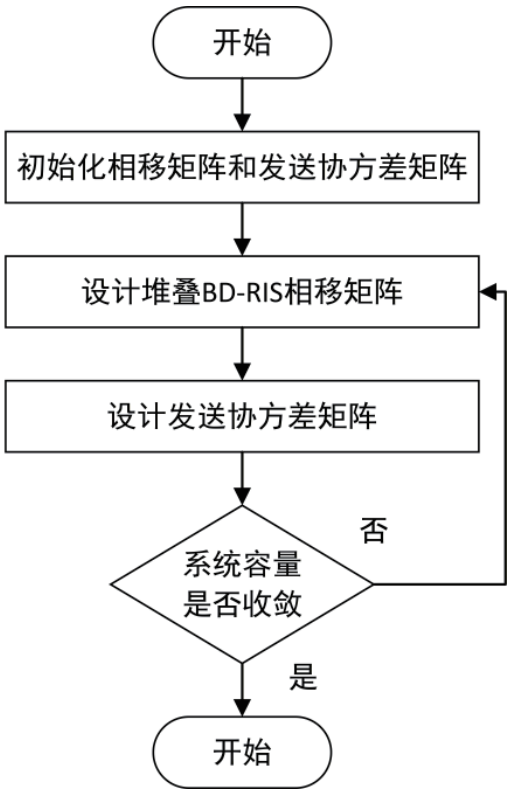


图1 堆叠BD-RIS辅助MIMO系统相移和发送协方差矩阵设计方法流程图

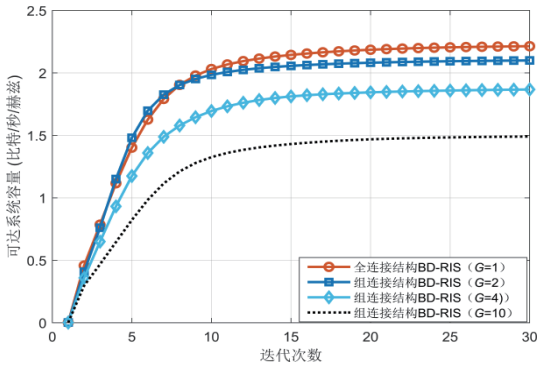


图2 所提迭代算法的收敛结果图

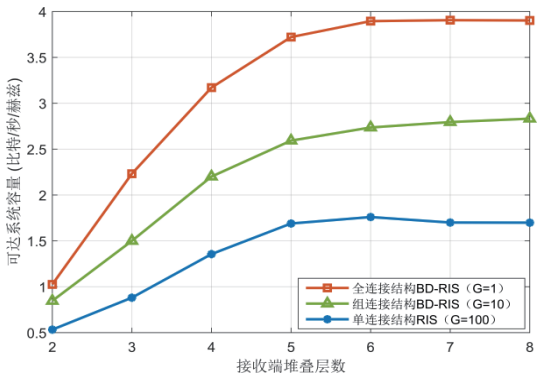


图3 不同接收端堆叠层数下的系统容量对比图

技术指标/优势

与传统堆叠RIS结构相比，本成果通过引入BD-RIS元件间的灵活连接方式，突破了单纯对角相移调控的限制，不仅能够调节入射信号相位，还可对信号幅度在不同元件间的分配进行优化，从而显著提升波域信号处理能力。仿真结果表明，所提算法具有良好的收敛性能，可在约20次迭代内实现稳定收敛。同时，随着元件间连接数量增加，系统可达容量稳步提升，在接收端堆叠层数增加时，堆叠BD-RIS相较于传统堆叠RIS展现出更明显的容量增益。此外，本成果采用发送端相移矩阵、接收端相移矩阵和发送协方差矩阵的联合优化策略，相较于仅优化单一环节的方案，更能充分挖掘堆叠BD-RIS辅助MIMO系统的性能潜力，具有较好的可扩展性和工程应用价值。

应用领域和市场前景

本成果可应用于6G及下一代移动通信中的高容量MIMO传输、智能超表面辅助无线覆盖增强、室内外复杂传播环境下的波束优化以及面向热点区域的高速低时延链路构建等场景。对于需要高频谱效率、高可靠传输和更强环境可控性的系统，该方法具有较强的适用性。随着6G、智能超表面、波域信号处理和大规模MIMO技术的持续发展，堆叠BD-RIS辅助通信有望在高性能无线接入、回传与前传增强、工业互联网、沉浸式通信等新型无线场景中发挥重要作用。本成果为复杂可重构无线传播环境下的系统优化提供了新的技术路径，具备较好的研究推广价值和产业化前景。

一种MIMO散射信道估计方法、介质及设备

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	202510788150.1				

成果概述

本成果面向无线通信系统中复杂传播环境下的信道估计问题，提出了一种面向多输入多输出（MIMO）散射信道的高精度估计方法。在强散射及非理想观测条件下，传统信道估计方法依赖先验模型或线性假设，难以准确刻画信道的非线性动态变化特性，导致估计精度和鲁棒性不足。针对上述问题，本成果引入深度学习思想，构建了一种基于生成式模型的信道建模与重建框架，通过学习信道的隐含结构特征，实现对复杂散射信道的高精度恢复。该方法融合时空特征提取机制与概率生成建模能力，在有限导频开销条件下显著提升信道估计性能，同时具备良好的泛化能力。实验结果表明，该方法在多种信噪比及动态场景下均优于传统方法和主流数据驱动的神经网络模型，在估计精度和抗噪能力方面表现突出，具有较高的工程应用价值和推广潜力。

关键技术/创新要点

区别于传统将信道估计建模为确定性回归问题的方法，本成果创新性地引入生成式扩散模型，将信道估计转化为从噪声分布逐步恢复真实信道的生成过程。通过构建前向加噪与反向去噪两个阶段，模型能够显式学习MIMO散射信道的高维分布特性，从而突破传统方法在复杂散射环境下建模能力不足的问题。

在前向加噪过程中（如图1所示），通过逐步向原始信道状态中注入高斯噪声，构建包含不同时间步的含噪信道样本序列，用于刻画信道从“有序结构”向“随机分布”的演化过程。第时间步的含噪信道状态矩阵可以表示为

$$\mathbf{H}_t=\sqrt{\bar{\alpha}_t}\mathbf{H}_0+\sqrt{1-\bar{\alpha}_t}\boldsymbol{\epsilon}_t,\boldsymbol{\epsilon}_t\sim N(\mathbf{0},\mathbf{I}),\bar{\alpha}_t=\prod_{k=1}^{t}\alpha_k,\alpha_t=1-\beta_t, \quad (1)$$

其中，β_t表示在第t次加入高斯噪声的方差，$\mathbf{H}_t$表示时间步t对应的信道状态矩阵。

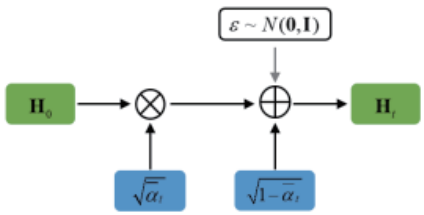


图1 前向加噪过程

在反向去噪过程中(如图2所示),根据当前信噪比条件确定反向扩散的起始时间步$\hat{t}$,并通过训练得到的去噪网络逐步去除噪声,从而生成真实信道得到信道估计结果。



图2 反向去噪过程

在去噪网络设计方面,本成果采用Transformer结构作为反向过程的核心模型。考虑到角域中典型MIMO散射信道具有稀疏分布特性,Transformer凭借其全局建模能力,能够有效捕捉信道矩阵中的结构特征。具体而言,Transformer模块主要由输入拼接层、多头注意力机制以及前馈网络组成,其中含噪信道H_t和时间步长t共同作为网络的输入。多头注意力作为Transformer的核心组件,用于用于建模信道矩阵内部各元素之间的相关性,并刻画其与时间步之间的耦合关系从而实现对当前时间步噪声分量的精准预测。

技术指标/优势

为了验证本成果的性能,采用归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE)作为评估指标。对MIMO散射信道估计精度进行定量分析,其定义如下

$$\mathrm{NMSE}=\frac{\mathbb{E}\left\{\left\|\mathbf{H}_0-\mathbf{H}_0\right\|_F^2\right\}}{\mathbb{E}\left\{\left\|\mathbf{H}_0\right\|_F^2\right\}}, \tag{1}$$

其中,$\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示期望运算,$\|\cdot\|_F$ 表示Frobenius范数。实验结果表明,与传统最小二乘算法及其他基于深度学习的信道估计方法相比,本成果在估计精度方面具有显著提升。同时,由于该方法通过建模信道的分布特性进行估计,而非单纯依赖特定数据集进行拟合,因此在不同信道环境下表现出更强的鲁棒性与泛化能力。

目前,该成果已形成发明专利《一种MIMO散射信道估计方法、介质及设备》,并已获得授权。

应用领域和市场前景

本成果属于无线通信系统中的基础信号处理方法,主要用于多输入多输出(MIMO)系统中的信道估计,为后续的波束成形、功率分配及资源调度等关键模块提供高精度信道状态信息支撑。通过提高信道估计的准确性,可间接提升系统传输可靠性与频谱利用效率。

在应用场景方面,该方法适用于具有稳定或准静态信道特性的无线通信系统,如室内通信、固定无线接入以及部分低速移动场景。在多径散射明显的环境中,本方法能够有效刻画信道结构特征,提升传统估计方法难以处理的复杂信道建模能力。

从技术发展角度看,随着无线通信系统向大规模天线和智能化方向演进,对高精度信道获取方法的需求持续增长。基于深度学习与生成模型的信道估计技术,正逐步成为重要研究方向之一。本成果在复杂信道建模方面具有一定优势,可为相关通信系统的性能优化提供技术支撑,具有良好的研究价值和应用潜力。

一种非对称架构中基于深度学习的信道估计方法

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	ZL202410794527.X				

成果概述

由于5G/6G通信中对高传输速率与低功耗的平衡需求，针对非对称系统（上下行射频链数量不一致）导致的时分双工互易性失效导致下行信道估计困难的挑战，提出了一种基于非对称架构的深度学习信道估计方法。该方法通过设计嵌套稀疏阵列拓扑结构的上行接收阵列，并结合创新的两步角度估计网络（Ts-AEnet），实现了高精度的信号到达角（DoA）估计与下行信道重建。该成果处于行业领先水平，有效解决了传统迭代算法（如牛顿化正交匹配追踪）计算复杂度过高、难以在实际通信场景中部署的瓶颈问题，在保证估计精度的同时显著降低了基站的硬件成本与运行能耗。

关键技术/创新要点

1.嵌套稀疏阵列拓扑架构设计：在非对称系统中设计了由两个子阵列组成的嵌套阵列结构，通过特定的天线索引分布（如图1所示，子阵列1为均匀阵，子阵列2的两个相邻天线元件之间刚好能够嵌套进一个子阵列1），在接收端仅需少量射频链即可覆盖较大维度的虚拟阵列空间。为了解决稀疏阵列元件不连续所造成的信息损失问题，利用虚拟阵列插值方法填补因天线缺失形成的“信号空洞”，充分将稀疏信号携带的位置信息用于信道估计中。

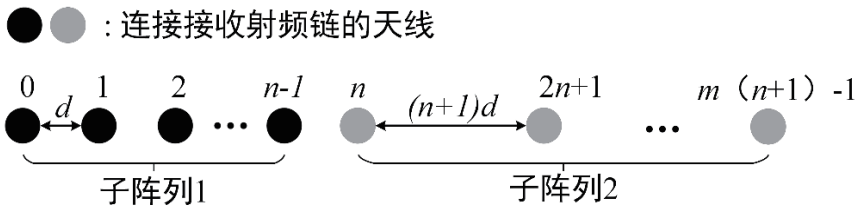


图1 特定天线索引分布图

2.Ts-AEnet两步深度学习角度估计网络：创新性地将DoA估计分解为“在网格”与“离网格”两步，“在网格”角度估计设计为分类问题，而“离网格”角度估计中由于方向角度联系设计为回归问题，并针对这两种角度估计形式设计了专用的子神经网络进行处理。如图2所示，在网格网络由预处理层、输入层、四个卷

积层、一个全连接层和输出层组成。其中卷积层用于提取信号特征，解决粗略角度分类问题；离网格网络则通过深度神经网络进行回归运算，补偿泰勒公式分解产生的偏差，从而在连续角度空间内实现极高精度的匹配。

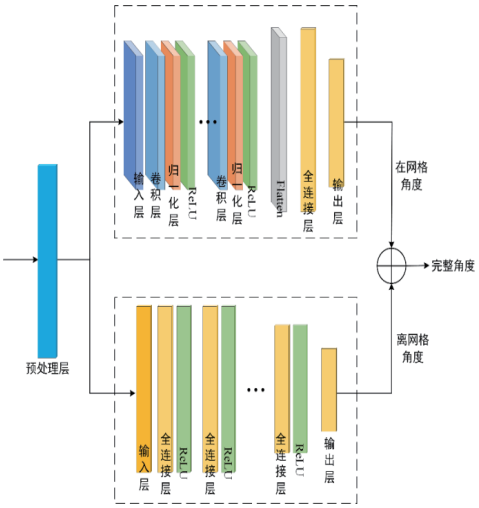


图2 Ts-AEnet结构示意图

3.基于泰勒级数展开的信号分解机制：通过一阶泰勒公式将接收信号进行解构，转化为包含在网格部分和偏离网格部分，为后续神经网络的离线训练与在线部署提供了清晰的物理模型支撑。在离线训练阶段，采用有监督学习方式训练神经网络；在线推理阶段，利用训练好的Ts-AEnet估计信号角度，并求解最小二乘问题估计信号路径增益，重建下行信道。

技术指标/优势

本成果与随机方案（随机选取上行接收天线得到的信道估计性能结果）、牛顿化正交匹配追踪算法方案、多重信号分类算法方案进行比较。为了验证本成果的性能，采用均方根误差（RMSE）评估角度计算的准确性，采用归一化均方误差（NMSE）评估下行信道重建性能，公式如下

$$\mathrm{RMSE}(\hat{\theta},\theta)=\sqrt{\frac{1}{LT}\sum_{t=1}^{T}\sum_{l=1}^{L}(\hat{\theta}_{l,t}-\theta_l)^2}, \tag{1}$$

$$\mathrm{NMSE}(\hat{\mathbf{h}}_{\mathrm{DL}},\mathbf{h}_{\mathrm{DL}})=\frac{\mathbb{E}\left\{\left\|\hat{\mathbf{h}}_{\mathrm{DL}}-\mathbf{h}_{\mathrm{DL}}\right\|_F^2\right\}}{\mathbb{E}\left\{\left\|\mathbf{h}_{\mathrm{DL}}\right\|_F^2\right\}}, \tag{2}$$

其中，T为蒙特卡洛实验的次数，L为信号路径数，$\hat{\theta}_{l,t}$ 为第l条路径第t次实验的预测角度，θ_l 为第条路径DoA的真实值，$\hat{\mathbf{h}}_{\mathrm{DL}}$为下行信道状态信息（CSI）的估计值，$\hat{\mathbf{h}}_{\mathrm{DL}}$ 为CSI的真实值，$\|\cdot\|_F$表示Frobenius范数。

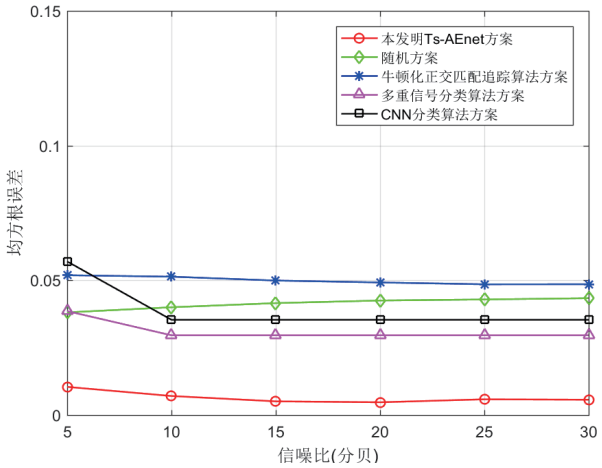


图3 均方根误差对比图

图3展示了Ts-AEnet在角度估计方面与其他方法对比的优势。随着信噪比(SNR)的增加, Ts-AEnet的均方根误差持续下降, 而其他方法很快进入性能平台期。这证明Ts-AEnet通过“离网格”残差补偿技术提升了角度估计的精准度。

图4展示了Ts-AEnet的信道重建性能。随着信噪比的增加, 所有方法的信道重建性能都产生下滑, 但与其他方法相比, Ts-AEnet是信道重建效果最好的, 这得益于其优秀的角度估计方法。

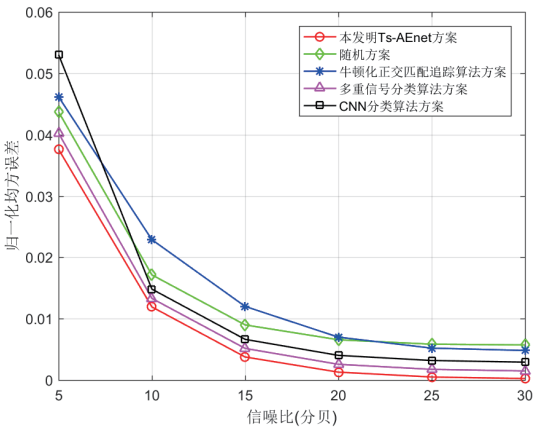


图4 归一化均方根误差对比图

目前该成果已写成专利《一种非对称架构中基于深度学习的信道估计方法》并授权。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于6G移动通信基站、卫星移动通信以及毫米波车联网等领域, 特别是在大规模MIMO基站部署中。随着未来6G对超大规模天线阵列的需求增加, 非对称架构结合深度学习的信道估计方案将成为行业主流。市场前景方面, 随着全球绿色节能通信和低成本基站覆盖的需求激增, 该技术在提升网络频谱效率、延长基站设备寿命及支持大规模低功耗接入方面具有巨大的商用潜力, 有望在未来的无线通信基础设施升级中占据核心竞争优势。

一种基于大规模MIMO双基站系统的3D多目标定位方法及介质

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	ZL202510091631.7				

成果概述

第六代移动通信（6G）旨在构建万物智联的新时代。为支撑智能家居、车联网以及低空经济等新兴业务，6G系统需要具备大容量的通信与高精度的感知能力。然而，在大规模多输入多输出（MIMO）系统中，传统基于多信号分类或最小方差无畸变响应的角度估计算法面临计算复杂度随天线数目急剧增加的问题，难以满足远场多用户实时准确定位的需求。

为突破这一瓶颈，本团队提出了一种基于大规模MIMO双基站系统的3D多目标定位方法。该方法引入可控的三维波束斜视策略，通过配置主基站与辅助基站的三维波束成形器，利用空间波束聚焦方向与子载波频率的确定性映射关系，依次估计非合作目标相对于基站的空间俯仰角与方位角。在此基础上，系统采用角度匹配算法将双基站获取的物理俯仰角与方位角进行有效配对，最终实现对多个远场非合作目标的高精度三维空间定位。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于提出了一种分层串行的三维波束成形器硬件架构及相匹配的多目标角度估计与配对算法。在硬件架构层面，主辅基站均部署了包含移相器层和两层时延器架构的三维波束成形器。其中第一层时延器专用于控制空间方位角方向的时延，第二层时延器专用于控制空间俯仰角方向的时延。各时延器层内的单元采用串行配置，即每个单元的输出时延累积前一个单元的时延，以此完成三维波束成形。在算法层面，本技术利用波束聚焦方向与正交频分复用信号子载波频率间的物理联系，将角度估计转化为接收功率频谱的峰值搜索问题。完成独立的角度探测后，算法计算目标至主基站的复信道增益以及基于估计角度所得的复信道增益，通过最小化两者差值的绝对值，在目标参数集合中进行全局搜索配对，从而精准确定各目标的三维物理坐标。

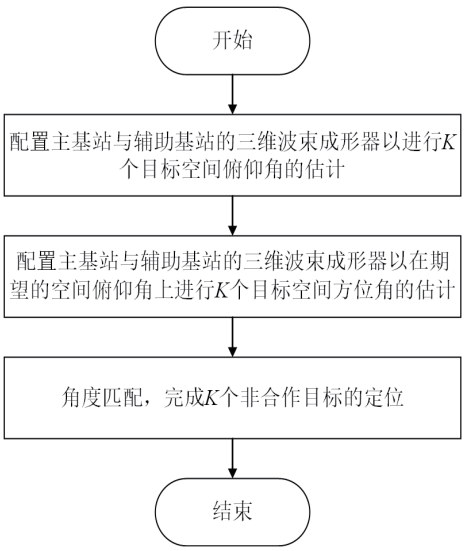


图1 一种基于大规模MIMO双基站系统的3D多目标定位方法的流程示意图

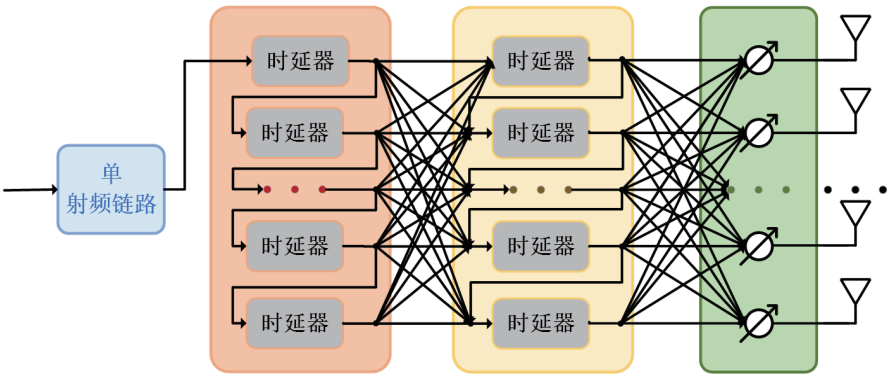


图2 三维波束成形器结构示意图

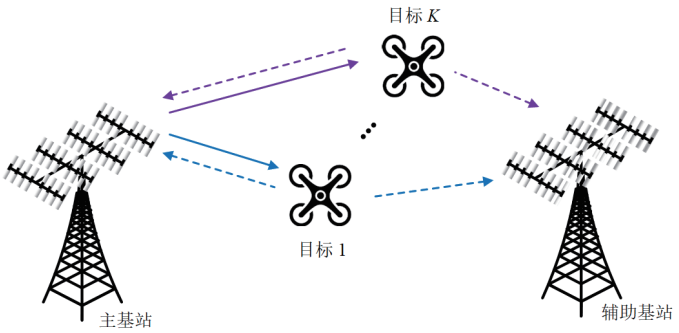


图3 基于大规模MIMO双基站系统的模型架构示意图

技术指标/优势

与传统远场高精度定位技术相比，本成果所部署的三维波束斜视策略大幅降低了多目标定位过程中波束训练的计算复杂度，在不同发射信噪比和不同角度条件下均能获得极小的均方误差，具有显著的鲁棒性与先进性。所提出的两层串联时延器架构通过累加机制，有效扩展了系统可实现的时延动态范围。该设计显著减轻了系统对单个时延器最大时延的硬件性能要求，使得基站能够在采用低成本器件的条件下实现大规模MIMO的高性能波束成形，大幅降低了系统整体构建成本。

应用领域和市场前景

本成果提供的高精度、低计算复杂度3D多目标定位技术高度契合6G通信与感知一体化的发展演进方向，可直接部署于远场非合作目标检测与实时定位场景。该方案在车联网的高动态车辆精确定位、低空经济中无人机群的三维轨迹管控以及智能家居场景内的深度感知等前沿领域展现出广阔的市场潜力。作为底层核心定位模块，本专利技术有望集成于未来的下一代通信基站与雷达系统中，为万物智联时代提供高可靠泛在感知能力与技术支持。

一种面向近场通感一体化系统的相移和时延计算方法及系统

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	ZL202411467867.8				

成果概述

第六代移动通信（6G）推动了通信感知一体化技术的发展。在引入超大规模多输入多输出（MIMO）与高频段通信技术后，系统面临近场信道建模与波束斜视效应带来的双重挑战。

本团队提出了一种面向近场通感一体化系统的相移和时延计算方法及系统。该方法通过配置时延-相移架构的三维波束成形器，结合预设的系统感知覆盖范围与感知分辨率要求，依次计算并配置系统各移相器的相移与各时延器模块的时延，实现在近场正交频分复用系统中生成可控的波束斜视，从而在满足感知服务性能要求的前提下，最大化系统通信用户的可达速率。

关键技术/创新要点

本成果创新性地利用波束斜视效应同时执行通信与感知进程。在硬件架构上，基站配置了两层时延器层与一层移相器层级联的三维波束成形器。在算法设计上，首先依据预设的感知角度域和距离域覆盖范围、天线间距及系统频段等参数，计算系统各移相器的相移与时延器模块的初始时延可行范围。随后，引入波束宽度与波束深度约束，结合预设的感知角度域与距离域分辨率，计算各时延器模块的最终时延范围。最后，通过分析相移和时延对通信和感知性能的耦合影响，在满足上述感知覆盖与分辨率约束的最终时延范围内，求解通信用户可达速率最大化所对应的最优时延配置。

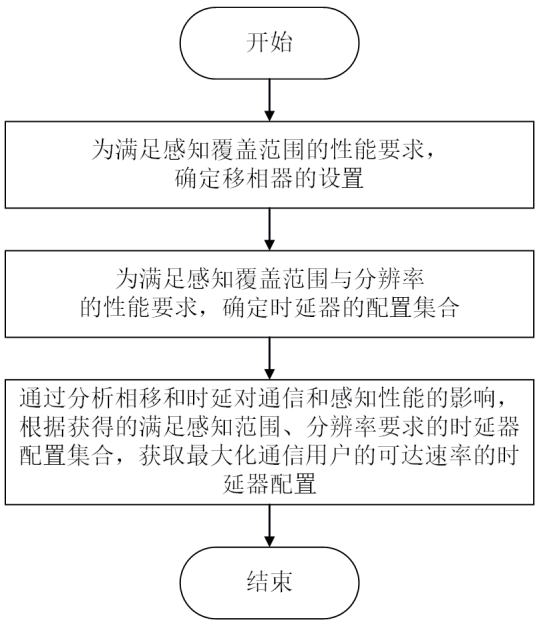


图1 面向近场通感一体化系统的
相移和时延计算方法流程示意图

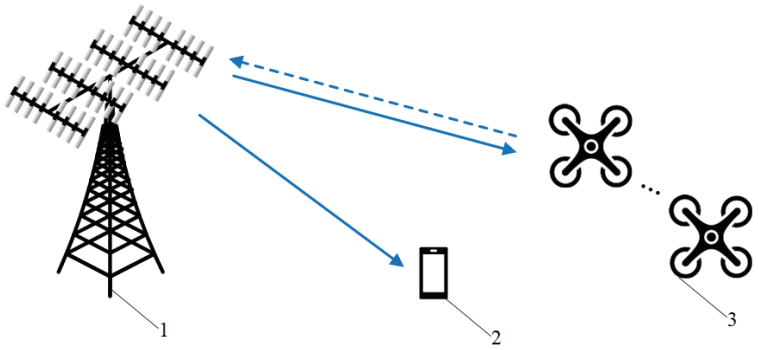


图2 近场通感一体化系统示意图(1:基站, 2:通信用户, 3:感知目标)

技术指标/优势

本成果有效解决了传统方案中波束斜视造成的能量泄漏问题, 将其转化为提升环境感知能力的可用信道资源。通过综合考虑感知角度域与距离域的双重分辨率约束, 该方法能够在保证系统具备足够感知覆盖范围和高感知分辨率的条件下, 最大化通信用户的可达速率。仿真验证表明, 与传统的基于时域波束扫描的计算方法相比, 本方法在相同发射信噪比下实现了通信速率的大幅提升, 具有显著的理论先进性与方案有效性。

应用领域和市场前景

本技术成果直接面向6G超大规模MIMO与毫米波通信场景, 为近场通信感知一体化系统提供了底层的波束赋形架构与传输理论支撑。该技术可广泛应用于需要同时具备可靠低延迟通信链路与高精度三维空间定位服务的场景, 为未来车联网的高动态目标感知、低空经济中的飞行器轨迹监控等新兴应用提供高数据速率与鲁棒的环境感知能力, 具有重要的工程应用价值与广阔的市场前景。

一种卫星下行无线传输方法、装置、设备及存储介质

成果完成人	张军	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信				
核心专利号	ZL202511344342.X				

成果概述

在空天地海一体化网络中，低轨卫星通信面临几个突出问题：信号易受地形遮挡，信道变化快，瞬时信道状态信息难以准确获取。针对这些挑战，本团队提出了一种基于统计CSI的卫星下行传输方法，用于无人机辅助的大规模MIMO低轨卫星下行通信。该方法中采用无人机作为中继节点，当卫星与地面用户之间的直达链路因遮挡而中断时，由无人机帮助构建一条稳定的双跳传输通道。同时，考虑到卫星高速运动所带来的多普勒效应，以及大规模天线阵列下瞬时CSI反馈开销过高的问题，本方案转而采用变化更缓慢、也更容易获得的统计CSI来传输设计。

在具体技术实现上，本成果面向“卫星-无人机-用户”双跳通信场景，构建了基于统计信道状态信息的传输优化方案。针对传统方法依赖大量随机信道样本平均、实现复杂度较高的问题，本方法采用可直接用于系统设计与参数配置的遍历速率解析表达形式，从而显著降低了计算开销。进一步地，结合卫星侧链路特征，采用单流传输方式完成卫星端发送设计，并结合无人机中继放大处理机制，形成了卫星发射协方差矩阵与无人机中继放大矩阵的联合优化实现方案。仿真的结果表明，在仅依赖统计CSI的条件下，本方法能够有效提升系统遍历速率，并以较低计算复杂度获得接近基于瞬时CSI方案的性能，具有较好的工程可实现性和应用价值。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新主要体现在以下几个方面。

首先，针对低轨卫星高速运动、多普勒效应显著以及瞬时信道状态信息难以及时准确获取的问题，提出了一种基于统计信道状态信息的传输设计方案。与依赖瞬时CSI的传统方法相比，该方案仅利用信道的长期统计特征完成系统建模与参数优化，更适用于低轨卫星大规模MIMO通信场景，能够有效降低反馈开销，提高系统运行的稳定性与实用性。

其次，面向无人机辅助双跳传输场景，构建了卫星-无人机链路和无人机-用户链路的统计信道模型。其中，卫星-无人机链路重点刻画强视距传播特性，无人机-用户链路综合考虑莱斯衰落特性和空间相关特性，从而能够更准确地反映复杂城市遮挡环境下的实际传播规律，为后续传输设计提供更贴近工程应用的信道基础。

再次，针对传统遍历速率评估方法依赖大量随机信道样本平均、实现复杂度较高的问题，本成果构建了适用于大规模天线条件下的遍历速率解析表达形式，使随机性能指标能够以确定化形式参与系统设计与迭代优化，从而显著降低了计算复杂度，提高了参数配置效率和工程实现效率。

最后，针对卫星发送协方差矩阵与无人机中继放大矩阵之间相互耦合、联合优化难度较大的问题，提出了一种交替优化实现机制：在固定无人机中继矩阵的条件下完成卫星端发送协方差矩阵更新，在固定发送矩阵的条件下完成无人机中继放大矩阵更新，并结合类注水更新策略与梯度迭代机制实现高效求解。该方案兼顾了系统性能与实现复杂度。进一步地，结合系统结构特征，卫星端采用单流传输方式完成发送设计，从而使系统实现更加简洁，硬件与计算代价更低。

综上，本成果在降低反馈开销的同时，兼顾了系统可靠性、实现复杂度与传输性能，具有良好的工程可实现性和推广应用前景。

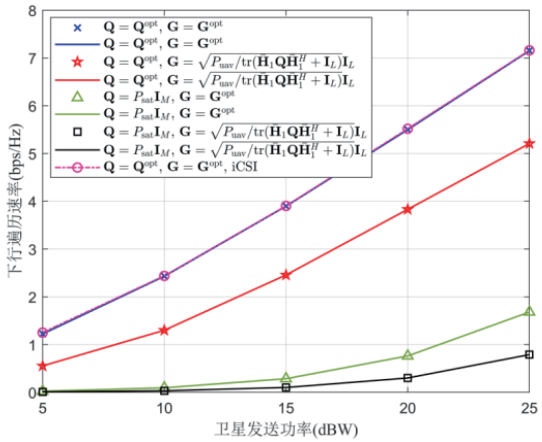


图1 不同优化方案下的下行可达遍历速率及其确定性等价解析结果

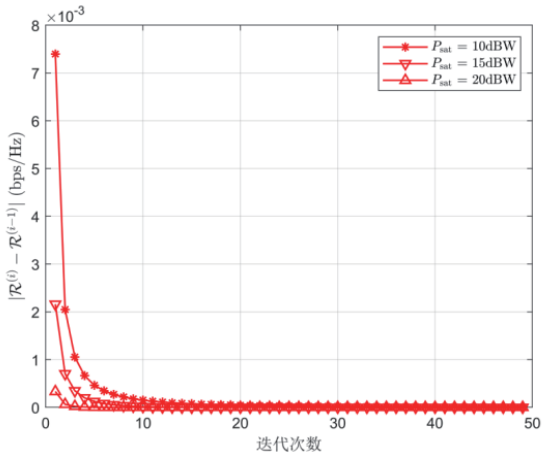


图2 所提算法的收敛性

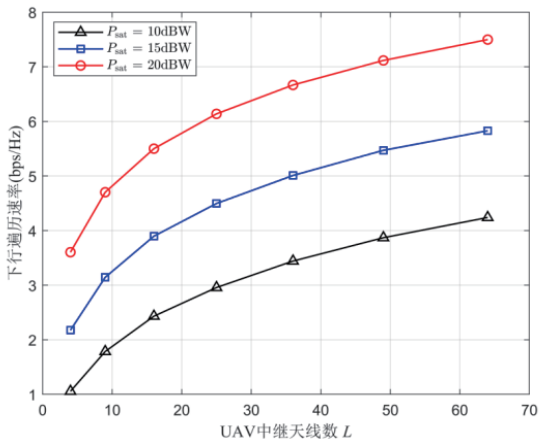


图3 遍历速率与 UAV 中继天线数的关系

技术指标/优势

1.在技术实现上，仅依赖统计CSI即可完成传输优化，明显降低了大规模MIMO卫星通信中的信道估计与反馈开销。

2.通过构建遍历速率确定性等价表达，避免了大量蒙特卡洛平均带来的高计算复杂度，提升了求解效率。

3.通过交替优化算法联合设计发送协方差矩阵与中继放大矩阵，算法具有良好收敛性；实验仿真结果也显示，在不同发射功率下可以在较少迭代次数内收敛。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于低轨卫星互联网、应急通信、海洋通信、边远地区宽带接入、灾后临时组网、城市复杂遮挡场景覆盖增强等领域。特别是在地面基站建设困难或覆盖不足的场景中，无人机可CSI获取成本实现较高的传输性能，兼具理论先进性和工程可实现性，预计在卫星通信设备和空中中继平台等方向具有良好的应用前景和产业转化价值。作为灵活部署的空中中继节点，与低轨卫星形成快速接入链路，有效提升通信连续性和服务质量。

全光无线通信系统及网络

成果完成人	王永进	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	光传输系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术

成果概述

面向无线光通信链路难以对准、运动中难以维持的难题，团队在全光无线通信网络的基础上结合图像识别技术，进一步研制出移动无线光通信系统，实现无线光通信链路在运动过程中的自动维持，搭载无人机、移动小车、水上浮标等移动载具，团队建立了空天地海一体化全光移动通信网络，实现多个场景下的移动互联互通。此外，基于发光谱与探测谱重叠现象，团队研制出同质集成氮化镓光电子集成芯片，将发射器、光波导、调制器、接收器集成在同一片内，基于全光无线通信网络的研究基础，团队在片内使用波导完成全双工的数据传输，实现了全光无线通信网络与氮化镓光电子集成的融合，基于TCP/IP协议，在氮化镓光电子集成芯片内建立了光通信网络，实现不同格式的文件传输和资源共享。这项工作为未来构建高速光子处理器、光子CPU提供了关键的实践基础。

关键技术/创新要点

本项目团队自主研发，集成白光无线通信系统、水下蓝光无线通信系统、日盲深紫外无线通信系统和激光无线光通信系统，各通信系统已分别在陆地、水下和空间等不同环境中完成了相关实验验证，具有成熟市场化的前提。其中水下蓝光通信系统使用蓝光LED作为发射器件，在0.4dB/m的水质中完成了不低于4Mbps/50m的通信实验验证，该指标在国内外水下无线光通信研究中属世界前列，具备极高实际应用基础；深紫外无线光通信系统在日光下完成了全双工日盲通信实验验证，传输速率10Mbps，该成果属国内首次；全光无线通信网络已完成多节点间不同格式文件传输的实验验证。综上，本团队自主研发的空天地海全光无线通信系统与网络项目已具备一定成熟度，具备进一步推广应用的前提。

本项目提出的全光无线通信系统以绿色、节能的LED作为发射器件，采用光波作为信息传输介质，通信成本低的同时对生态保护也有重大意义，以水下蓝光通信系统为例，取代传统的声纳通信技术有助于保护海洋中的鱼类生态，维持生态平衡。另一方面，本项目团队能够从软硬件开发、器件设计方面完全自主研发，投入产出比高，技术水平高，发展前景优异。

应用领域和市场前景

以水下蓝光通信系统为例，其主要的军用目标市场是水下潜艇、水下无人潜航器、部署在水下的固定式水下传感器、水上浮标、水面舰艇、航空母舰等场所；而白光通信系统可应用于民用方面，如室内定位和导航、室内通信、智能照明、安全监控等；深紫外日盲无线光通信系统属于国内首创，在强日光照射下能够不受日光干扰，实现全双工隐秘数据传输，具有重大的军事应用价值。目前我国各类舰艇总数在160余艘左右，以每艘船装备2套该设备来评估，该市场规模在3000万-6000万之间。该设备后续存在定期维保和更新换代的需求，因此预计每年的市场规模在5000万左右。在民用领域市场，我国目前在长江黄河流域沿岸以及沿海城市都成立了水面搜救队，部分省会城市还以消防为基础成立了水上救援队，还有很多消防局也都存在水下救援、易燃易爆环境下无电磁辐射的通信需求。预计该便携式可见光通信终端售价在1-2万元人民币一套，因此以市场规模5万套来计算，该部分市场规模在10亿元左右。

多协议兼容量子密码系统

成果完成人	王琴	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	光传输系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	城域量子网、量子骨干网、行业专网				

成果概述

本研发团队长期致力于量子密码基础理论与关键技术研究，围绕光路架构、控制算法与应用模式开展系统性创新，自主研发的多协议兼容量子密码系统具有具有高鲁棒性、高集成度与高适应性等优点，并能够适用于基于量子加密的邮件收发和身份认证等应用场景，满足多场景安全通信需求，在国内和国际处于先进水平。本项目前期研究已取得二十余项中国发明专利和三项美国专利授权，为系统实现奠定了坚实基础。

关键技术/创新要点

研发团队自主设计多协议兼容光路结构，率先实现同一设备支持BB84、RFI、六态和SARG四种主流协议的自动切换；结合随机森林与LSTM等人工智能算法，开发出系统参数智能辅助控制模块，显著提升系统的自动化率与运行效率，由于传统需人工配置的系统。

与国际同类技术相比，项目在系统性能与稳定性方面处于领先地位。在50km传输条件下，系统密钥率≥5Kbps，密钥抖动率≤5%（行业常见为12%~18%），整体性能提升超过50%。基于多协议联网优化模型，资源配置效率提高70%，业务阻塞率降低至0.2以下，有效提升网络承载能力和服务质量。

应用领域和市场前景

市场拓展方面，项目聚焦城域量子网、量子骨干网与行业专网三大方向，计划深入政务网络、电网调度、金融机构等高价值场景应用。

一种用于生物遥测应用的三维植入式多输入多输出天线

成果完成人	Tahir Bashir	职称	博士后	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	生物医学应用的植入式装置				

成果概述

近年来，植入式生物医疗设备（如胶囊内窥镜与无导线起搏器）在疾病诊断与健康监测中得到广泛应用，对无线通信系统提出了小型化、高可靠性与高数据速率的迫切需求。然而，人体组织环境复杂，电磁波传播损耗大，传统天线在尺寸、带宽及多路径通信能力方面面临显著挑战。

针对上述问题，本研究提出了一种紧凑型双频三维多输入多输出（3D MIMO）植入式天线系统。该研究结合高介电常数材料、小型化辐射单元设计及多单元空间构型优化，通过在辐射贴片中引入多槽结构与短路针，实现了工作频率的精确调谐及双频特性。同时，采用三维立体布局将四个天线单元布置于立方体不同表面，结合电流分布调控与结构对称设计，实现了无需额外解耦结构的高隔离性能与辐射多样性。此外，通过等效电路建模、多组织环境仿真及实验验证，系统分析了天线在复杂人体环境中的电磁特性与安全性能。

研究结果表明，该天线在1.3975 GHz和2.45 GHz频段均具有良好的阻抗匹配、低包络相关系数和高分集增益，满足高数据速率无线遥测需求，同时比吸收率（SAR）符合国际安全标准。该成果在植入式无线通信、小型化医疗电子系统及脑机接口等领域具有重要应用价值，整体技术达到国际先进水平。

关键技术/创新要点

本研究围绕植入式医疗设备中无线通信受限于尺寸、带宽及体内复杂环境的问题，提出了一种面向高可靠通信的紧凑型双频三维多输入多输出（3D MIMO）天线关键技术体系。首先，通过电磁仿真与参数优化相结合的方法，对单天线辐射单元进行了系统设计。基于方形贴片结构，引入多方向矩形开槽与短路针加载技术，有效延长电流路径，在极小尺寸条件下实现低频谐振，同时完成双频（1.3975 GHz和2.45 GHz）精确调谐。经优化后，天线在目标频段的反射系数均优于−18 dB，显著提升了阻抗匹配性能与辐射效率，为小型化植入式设备提供了高性能天线解决方案。

在此基础上，研究进一步提出三维多天线集成与空间解耦关键技术。通过将四个优化后的天线单元布置在立方体不同表面，构建三维空间正交分布结构，实现多方向辐射覆盖与空间分集。结合对称结构设计与电流分布调控，使相邻单元之间形成反向电流区域，从而在无需额外解耦结构的情况下实现优异的隔离性能（低于−20 dB）。该方法有效降低了系统复杂度，同时显著提升了信号稳定性与抗多径干扰能力，为高数据速率体内通信提供了关键支撑。

此外，针对人体复杂电磁环境，本研究构建了多层组织仿真模型，并结合高介电常数生物兼容材料，对天线在不同植入深度及组织条件下的性能进行了系统验证。结果表明，该天线在保证小型化的同时，仍可实现稳定辐射与高效传输，并满足国际电磁安全标准（SAR限制）。同时，通过链路预算分析与实验测试，验证了该系统在体内外通信中的高可靠性，可支持高达100 Mbps的数据传输速率。

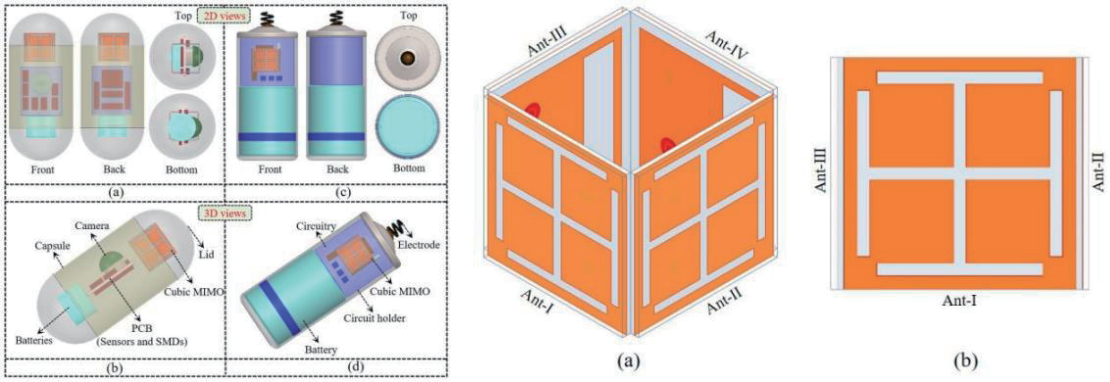


图1 植入式设备的详细结构示意图：(a) 植入式设备整体布局；(b) 胃肠道（GI）胶囊设备的不同视图；(c) 心脏无导线起搏器设备的不同视图（左）；提出的立方体MIMO结构：(a) 三维视图，(b) 正视图（右）。

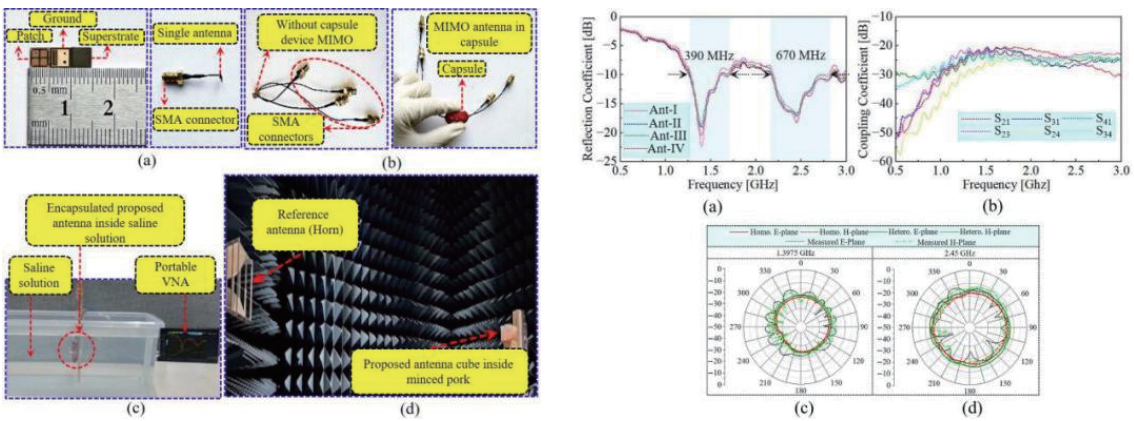


图2（左）(a) 单天线（SISO）实物原型；(b) 立方体MIMO天线原型（带封装与不带封装）；(c) 与 (d) 分别为散射参数和辐射方向图的实验测试装置；（右）所提出立方体MIMO天线的实测性能：(a) 反射系数，(b) 耦合系数，(c) Ant-I 在1.3975 GHz下的辐射方向图，(d) 在2.45 GHz下的辐射方向图。

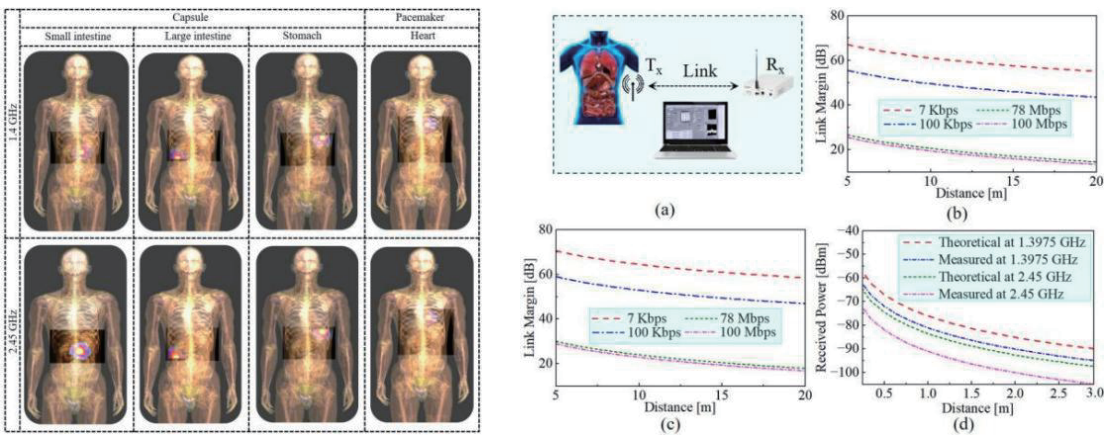


图3（左）所提出MIMO天线在不同人体组织中于1.4 GHz和2.5 GHz下的归一化10 g比吸收率（SAR）分布；（右）(a) 无线通信链路分析概念模型，(b) 1.3975 GHz下的链路裕量，(c) 2.45 GHz下的链路裕量，(d) 理论与实验接收功率对比。

技术指标/优势

本成果提出的三维多输入多输出(3D MIMO)植入式天线在关键技术指标与综合性能方面具有显著优势。天线在1.3975 GHz和2.45 GHz实现稳定双频工作,反射系数(|S11|)分别优于−26 dB和−38 dB,表明阻抗匹配良好;天线单元间隔离度分别低于−25 dB和−20 dB,具有优异的自解耦能力。包络相关系数(ECC)低于0.2和0.1,分集增益(DG)大于9 dB,信道容量损耗(CCL)小于0.12 bps/Hz,总有源反射系数(TARC)低于−10 dB,电压驻波比(VSWR)小于2,整体多天线性能优良。同时,在植入深度变化条件下仍保持稳定通信能力,支持最高约100 Mbps的数据传输速率。比吸收率(SAR)满足IEEE C95.1-2019标准(1 g:1.6 W/kg,10 g:2 W/kg),确保生物安全性。

相比传统单天线或二维MIMO结构,本成果通过三维立体布局实现空间分集,在无需额外解耦结构的情况下获得高隔离性能,降低系统复杂度;通过多槽结构与短路针加载实现小型化与双频特性兼顾;在复杂人体组织环境中具有更强的抗频偏能力和通信稳定性。该技术适用于胶囊内窥镜、无导线起搏器及脑机接口等高集成医疗设备,具有良好的应用前景,并具备专利转化与推广价值。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于植入式医疗电子与无线体内通信领域,尤其适用于胶囊内窥镜、无导线心脏起搏器、脑机接口(BCI)、可吞服传感器以及长期健康监测设备等场景。在这些应用中,设备通常工作于复杂的人体组织环境,对天线的小型化、高可靠通信以及多方向稳定连接提出了严格要求。本研究提出的三维MIMO植入式天线能够在有限空间内实现双频通信与空间分集,有效提升数据传输速率与链路稳定性,特别适用于高数据量传输场景,如高清内窥成像与脑电信号采集。

在市场前景方面,随着精准医疗、远程医疗及智能可穿戴设备的快速发展,植入式医疗器件市场持续扩大。尤其是在消化道疾病筛查、心血管疾病监测及神经接口技术领域,对高性能无线通信模块的需求不断增长。本成果具备小型化、高隔离、高稳定性等优势,可有效提升设备性能与患者体验,具有良好的产业化潜力。同时,该技术也可拓展至生物传感网络、人体物联网(IoB)等新兴方向,市场应用空间广阔,具备显著的经济价值与社会效益。

自供电摩擦电触摸面板研发

成果完成人	李卫	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	/
应用行业	智能控制与机器人、可穿戴与智能家居、智能座舱与汽车				

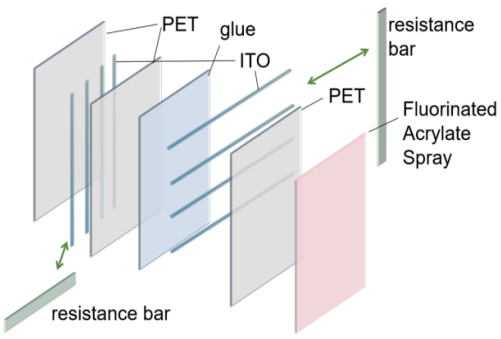
成果概述

触摸面板作为人机交互的关键部件，在人工智能驱动的电子设备发展中扮演着重要角色。针对当前自供电触摸面板在小型化、低功耗和高鲁棒性方面的迫切需求，本研究提出并实现了一种新型自供电摩擦电触摸面板。该面板采用创新的电阻条结构，将传统阵列式设计所需的信号通道数从M×N大幅减少至仅4路，实现了模拟式触摸定位。同时，通过引入氟化丙烯酸酯-PET双层结构与电润湿辅助电荷注入技术，显著提升了摩擦电信号的强度与稳定性，在潮湿环境下仍保持优异性能。在此基础上，研究进一步构建了基于二维卷积神经网络的智能信号处理系统，实现了对四通道摩擦电波形的直接识别，完成了手写数字的高精度分类。该成果为构建小型化、低功耗、高鲁棒性的自供电人机交互界面提供了新的技术路径。

关键技术/创新要点

（1）电阻条模拟定位结构

传统摩擦电触摸阵列需对每个像素点进行独立信号采集，信号通道数随分辨率线性增长，极大限制了设备的小型化。本研究提出一种电阻条结构，通过将触摸位置与电阻分段相关联，实现模拟式定位。该设计仅需4路信号通道即可完成二维位置识别，显著简化了信号采集系统，为高密度、低功耗触摸面板的集成提供了基础。

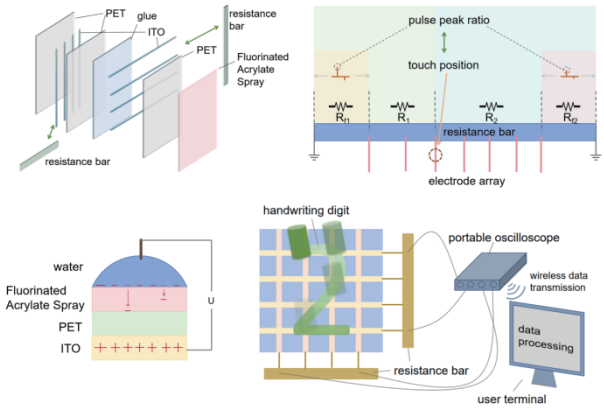


（2）高鲁棒性信号增强机制

为解决微型化设备中信号强度下降的问题，研究构建了氟化丙烯酸酯-PET双层结构，在材料界面形成富含缺陷的电荷存储层。结合电润湿辅助电荷注入技术，实现了电荷在材料体内的有效注入，避免了表面电荷在潮湿环境中的快速耗散。该机制使器件在5000次接触-分离循环后性能下降仅15%，在高湿环境下输出下降控制在26%以内，显著提升了传感器的环境适应性与长期稳定性。

(3)基于二维CNN的端到端信号识别

区别于传统方法先将摩擦电信号还原为轨迹再进行识别，本研究提出直接对四通道原始波形进行处理。通过二维卷积神经网络提取不同通道间电压波形中隐含的手写数字特征，实现了高效的端到端识别。该方法减少了信号格式转换带来的信息损失与处理延迟，为摩擦电信号在AI系统中的高效利用提供了新范式。



技术指标/优势

技术指标：

信号通道数：4路(实现二维触摸定位)；

耐久性：5000次接触-分离循环后性能下降 ≤ 15%；

湿度适应性：高湿环境下输出下降 ≤ 26%；

信号增强：通过EWCI与双层结构实现体内电荷注入，增强信号稳定性。

优势：

相比传统阵列式结构(如M×N像素需M+N通道)，本设计将信号通道数降至4，极大简化了系统复杂度，利于小型化集成；

采用电荷体内存储机制，克服了传统电晕充电在潮湿环境下易失效的问题；

引入AI直接处理原始波形，提升识别效率与系统智能化水平；

本成果相关技术已形成完整的传感器设计与信号处理方案，具备良好的可扩展性与通用性。

应用领域和市场前景

该自供电摩擦电触摸面板兼具小型化、低功耗、高环境适应性和智能识别能力，尤其适用于对设备体积和功耗敏感的领域。在机器人领域，可作为柔性、轻量化的触觉感知界面，提升机器人与环境交互的自然性与精度；在物联网设备中，可集成于智能家居、可穿戴设备等终端，实现低功耗、无电池的触控交互功能。此外，该技术在工业控制、智能医疗设备、便携式消费电子等领域也具有广阔的应用潜力。随着AI向边缘设备下沉，具备本地信号处理能力的自供电传感器将成为下一代智能交互系统的核心组件，市场前景广阔。

基于深度学习差异矩阵度量构建信道图的全局定位方法

成果完成人	张海涛	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	移动通信、物联网、智慧城市、室内外定位与导航				
核心专利号	ZL202510585645.4				

成果概述

本成果针对未来无线通信系统在大规模 MIMO (mMIMO) 场景下，用户设备 (UE)高精度、高普适性全局定位的需求，提出了一种创新的信道图定位方法。该方法旨在解决传统基于特定信道特征（如幅度、相位）的定位技术环境依赖性强、普适性不足的问题。核心技术包括：（1）利用深度神经网络(DNN)构建不依赖特定场景特征的差异性度量模型，以高维信道状态信息(CSI)的自相关特征为输入，以采集时间真实差异为监督信号进行训练；（2）基于该模型预测的多基站全局差异性矩阵，采用多维缩放(MDS)流形学习技术自动构建反映用户设备移动轨迹的二维信道图；（3）通过结合基站参考信号接收功率(RSRP)估计的信道图锚点，对信道图进行旋转、共形及仿射变换，最终实现用户设备在地图空间中的精准全局定位。实验表明，该方法具有较高的定位精度和良好的普适性。

关键技术/创新要点

（1）基于深度学习的普适性差异性度量

创新性地设计了一个深度神经网络模型，其输入是经过特征工程（计算自相关特征并向量化）的时域信道状态信息(CSI)，输出为两个采集时刻CSI数据差异的估计值。模型的损失函数基于估计差异与真实时间戳差异的归一化均方误差(NMSE)构建。该方法不依赖于幅度衰减、相位变化等易受环境影响的特定信道特征，而是让模型从数据中自动学习普适的差异度量，从根本上提升了方法的鲁棒性和环境适应性。

（2）多基站可见性加权的全局差异性矩阵构建

在多个基站的部署场景下，考虑到用户设备并非在所有时刻对所有基站均可见（视距传播），提出了基于可见性加权的多基站差异性矩阵融合方法。通过定义用户设备对基站的可见性标识，对多个基站的差异性度量矩阵进行加权平均，得到更稳健的全局差异性矩阵，为后续构建准确的信道图奠定基础。

（3）“差异性矩阵→信道图→地图空间”的变换定位

构建了一套完整的定位流程。首先，利用多维缩放(MDS)将高维全局差异性矩阵降维，构建出保持原始数据点对间差异关系的二维信道图。然后，同步利用基站的参考信号接收功率(RSRP)数据，估计出各个基站在该信道图中的对应位置，作为空间锚点。最后，通过计算旋转角度、进行共形变换消除图形畸变，并求解仿射变换矩阵，将信道图中的所有用户轨迹点精准映射到真实的地图坐标空间中，实现全局定位。

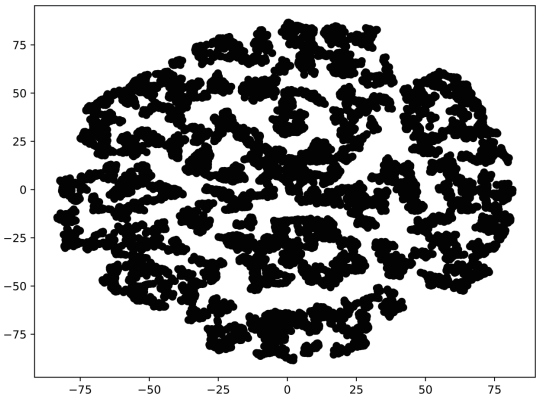


图1 基于多维缩放流形学习构建的信道图

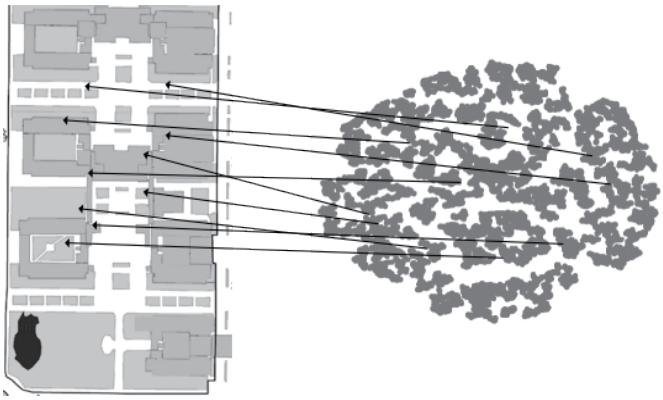


图2 基于仿射变换矩阵的信道图中共形变换点在地图空间中全局定位

技术指标/优势

(1)技术指标

该方法可实现用户设备的全局定位,其定位精度通过均方根误差(RMS)进行评估。文档中实例数据显示,基于10个样本点构建的模型,在应用于2250个测试点时,RMS总误差为0.1695(单位应与地图坐标单位一致,如米),展示了较高的定位精度。

(2)技术优势

高普适性:核心的差异性度量基于深度学习模型,摆脱了对特定、易变信道特征的依赖,使其在不同无线环境下的适用性更强。

无需密集位置标签:属于自监督或弱监督学习范式,主要利用信道状态信息及其采集时间戳,无需大量已知的精确地理位置标签进行模型训练,降低了数据获取成本。

支持多基站融合:能够有效融合来自多个基站的CSI数据,并通过可见性机制处理非视距情况,提升了在复杂部署环境下的定位可靠性。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于所有需要精准位置服务的领域。在智慧城市中,可用于人群监控、车辆导航、应急救援;在物联网(IoT)领域,适用于资产追踪、智能制造中的物料定位;在移动通信网络自身优化中,可用于用户行为分析、网络规划和优化。随着5G-A/6G、大规模MIMO和室内外无缝定位需求的爆发式增长,本技术提供了一种不依赖GPS、精度高、普适性强的解决方案,在公共安全、商业零售、工业互联网、智能交通等多个市场具有广阔的应用前景和产业化潜力。

全空间卫星异构网络关键技术及应急通信终端研发

成果完成人	张海涛	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	卫星通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	应急通信				
核心专利号	CN202411758498.8；CN202411758499.2				

成果概述

应急通信是防灾减灾、重大事件保障的核心支撑，而偏远地区、极端灾害场景下常出现地面通信基础设施缺失或损毁的问题，传统单一卫星通信网络又面临拓扑结构动态变化、业务服务质量需求多样、异构资源调度低效、多体制网元协同困难等痛点，难以实现全空间连续无缝的通信覆盖，无法满足复杂场景下的海量通信服务需求。本团队联合南京控维通信科技有限公司等单位，在国家自然科学基金、江苏省重点研发计划等项目支持下，针对空天地海卫星异构网络的技术瓶颈开展联合攻关，成功研发出全空间（空天地海）卫星异构网络关键技术及系列应急通信终端产品。团队创新提出四项核心关键技术，构建了多体制融合的卫星异构网络体系，实现了异构网络的动态组网、高效链路传输、智能资源调度和全局智慧运维。该成果经院士团队鉴定达到国际先进、国内领先水平，获2024年中国通信学会科学技术二等奖，已为多项国家重大事件、百余家政企单位提供通信保障，实现了规模化产业化应用。

关键技术/创新要点

卫星异构网络融合了高中低轨卫星、空中通信平台及陆海各类通信网络的优势，是实现全空间通信覆盖的核心范式，但复杂的网络架构和多变的应用场景，对其组网、传输、调度、运维能力提出了极高要求。

针对偏远地区和应急场景的网络基础设施失效问题，团队研发了拓扑结构弹性适变的动态组网技术。以卫星通信终端为核心网关，从时域、频域、空域三维维度规划弹性网络拓扑，确保最优拓扑规划概率达90%以上；同时设计多模态路由策略，结合多径路由与节点缓存技术，让网络主动适配拓扑、速率和负载变化，实现选路过程快速收敛，将卫星波束、信关站的切换时延降至原有技术的 20%左右，大幅提升了网络的鲁棒性和覆盖能力。



图1 参与研制的卫星终端和获得的奖励

针对卫星异构网络多制式系统传输性能差异的问题，团队创新了异构融合的高谱效链路自适应技术。构建分层融合的多体制卫星网络架构，融合快速 Aloha、帧长可变时分多址等技术，实现单通道 500MHz 带宽和 2.4Kbps-1.77Gbps 的宽范围接入速率；研发基于复用帧结构的缝隙通信技术，精准检测直升机旋翼缝隙并设计三方协同定时方法，将遮挡信道转为准时分多址信道，使无人直升机卫星通信接入速率提升至 8-34Mbps，频带利用率达 2-3bps/Hz，同时结合资源重用技术将全链路丢包率控制在 0.001%以下。

针对高动态环境下卫星异构网络资源受限的问题，团队提出按需调度的智能多域资源分配技术。设计资源面、认知面、决策面三面解耦的逻辑架构，实现跨地理域的虚拟资源池共享和场景环境的精准感知；融合联邦学习与双深度强化学习算法，采用“集中式训练、分布式执行”的模式实现星地资源联合优化，同时通过模糊逻辑控制器+深度确定性策略梯度的组合方法，有效降低了移动边缘计算的任务卸载时延，提升了网络切片的用户接入能力。

针对多体制卫星网络运维差异、异构网元协同困难的问题，团队构建了任务知识双驱动的智慧运维管控技术。建立统一的多体制卫星通信系统知识模型，研发异构网络融合网关，集成接入控制、无线适配等核心模块；搭建任务知识双驱动的运维管控引擎，融合自上而下与自下而上的并发知识推理技术，实现卫星多体制网络全局“一张图”运维和池化卫星资源“一体化”融合调度，大幅提升了异构网络的运维效率和协同能力。

技术指标/优势

与传统卫星通信技术、单一应急通信解决方案相比，本成果突破了空天地海异构网络融合的技术瓶颈，实现了从“单一组网”到“全空间动态组网”、从“低效传输”到“高谱效自适应链路”、从“人工调度”到“智能资源分配”、从“分散运维”到“全局智慧管控”的全方位升级，解决了传统方案在应急场景下部署慢、适配性差、资源利用率低、运维难度大等问题。成果核心技术指标达行业先进水平：卫星网络最优拓扑规划概率≥90%，系统切换时延降至传统技术的20%；全链路丢包率<0.001%，时分多址帧效率达98.7%，频偏利用率从3.56bps/Hz提升至7.11bps/Hz；直升机机载卫星通信频带利用率2-3bps/Hz，接入速率8-34Mbps；卫星便携站可在-40℃~60℃极端温度下稳定工作，船载站、应急卫星设备实现实际应用零故障率。同时成果拥有完全自主知识产权，获授权国家发明专利40项、论文及软件著作权42项，研发的系列产品具备小型化、高可靠性、快速部署的特点，可在应急场景下快速搭建卫星通信链路，满足“即插即用”的通信保障需求。

应用领域和市场前景

本成果可为应急通信、卫星互联网、低空经济等领域提供高可靠性、高性价比的全空间卫星异构网络完整解决方案，是数字经济发展和国家通信基础设施建设的重要技术支撑。在应急通信核心场景中，成果可实现灾害地区的可靠组网、救援力量的快速部署和应急物资的跟踪调度，成为应急救援的“通信生命线”。除核心应急通信领域外，成果可为国土、规划、交通等领域的跨区域通信提供技术支持其技术体系可赋能5G-A、卫星物联网、低空经济等国家重点发展领域，实现全空间信息系统的多网融合。在空天地海一体化通信网络建设的背景下，极端场景通信保障、跨境行业通信、低空经济配套等市场需求持续增长，本成果的自主可控技术和全系列产品具备广阔的产业化推广空间，将持续为国家通信基础设施建设和应急保障体系完善提供核心支撑，经济与社会效益潜力巨大。

一种Modbus远程操作控制系统

成果完成人	闵丽娟	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	工程应用开发				
核心专利号	ZL2021112213704				

成果概述

Modbus是一种工业上应用广泛的上下位机之间通信接口协议，但通过Modbus协议进行的连接在范围上是受限制的，例如，通过RS-485串口进行通信的Modbus-RTU或 Modbus-ASCII的连接范围一般不超过1千米。虽然理论上，Modbus-TCP或Modbus-RTU over TCP设备可以在整个Internet范围内接入一个指定的主站或从站，但在当前IPv4地址资源紧张的情况下，广泛使用这种接入是不现实的。因此实际情况是在工业环境下对Modbus-TCP设备的接入一般仅限于同一局域网的范围，技术人员无法直接通过广域网远程对设备进行测试和调试。本成果通过在现场和客户端端设置Modbus接口代理的方式，在物联网基本系统的支持下，将处于现场的Modbus设备和远程的应用程序连接起来，完成透明的Modbus传输。很好地解决了Modbus协议的远程接入和操作的问题。

关键技术/创新要点

关键技术：通过在现场和客户端端设置Modbus接口代理的方式，在物联网基本系统的支持下，将处于现场的Modbus设备和远程的应用程序连接起来，完成透明的Modbus传输。

创新要点：

1、本成果由客户端Modbus接口代理、Modbus设备配置服务、物联网服务器端软件、具有Modbus接口的物联网网关、边缘Modbus接口代理五部分组成，如图 1 所示；

2、通过Modbus接口代理，将处于现场的Modbus设备经由广域网接入远程接口服务系统，由该系统提供北向Modbus应用服务，形成虚拟的远程Modbus接口。

3、在本系统的支持下，用户可以通过人机界面、控制反馈等应用程序，在广域网的任意位置实现对Modbus设备的远程交互应用，使用者可以在远程如同在现场一样透明地接入和操作Modbus设备，如图 2 所示。

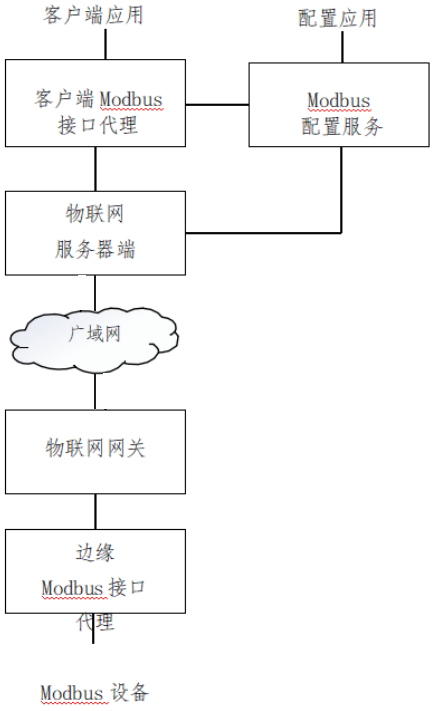


图 1 远程操作控制系统示意图

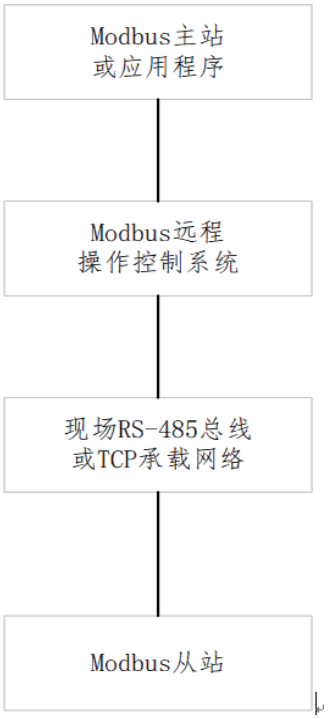


图 2 远程操作示意图

技术指标/优势

(1)可以在整个广域互联网Internet范围内定义和使用任意已经接入系统的Modbus 设备;

(2)可以在整个Internet范围内, 对已经定义的Modbus设备进行寻址和定位;

(3)可以透明地处理包括Modbus-RTU、Modbus-TCP、Modbus-ASCII的不同Modbus变种形式, 远程用户可以以他们原有本地接入的方式接入远程的 Modbus 设备;

(4)可以实现所有在本地处理能够实现的Modbus功能, 例如, 数据的交换、接口的管理等;

(5)可以在本地控制源(发送主站命令)和远端应用控制源之间进行动态的切换, 适应不同的应用场景;

在此基础上, 可以实现所有本地能够实现的应用功能, 例如, 数据的采集、控制执行命令的下发、接口的管理控制等;此外, 客户端Modbus接口代理可以和任何原用于现场的第三方Modbus应用程序接口, 后者不必作任何修改。

应用领域和市场前景

该技术精准切中工业远程运维的痛点, 在智能制造、新能源、市政等多领域拥有刚性需求, 市场前景广阔。

一、应用领域

1.智能制造与智慧工厂:工程师无需亲临产线, 即可对 PLC、变频器等设备进行远程调试与程序升级, 大幅提升运维效率。

2.新能源设施运维:针对光伏、风电场及储能站等偏远分散的站点, 实现逆变器、电池管理系统的远程监控与故障处理, 减少人员长途奔波。

3.市政与基础设施：应用于城市供水、供热、燃气及电梯等公共服务设施，保障关键设备的远程调控与实时响应。

4.农业自动化：将分散的农业大棚、养殖场环境控制柜接入云端，便于技术人员远程调节温湿度等参数。

5.设备制造商售后服务：帮助大型设备厂商建立远程运维平台，变“被动派工”为“主动在线诊断”，显著降低售后成本。

二、市场前景

1.契合工业互联网战略：作为底层设备上云的关键连接器，该技术以低门槛、高兼容性打通数据孤岛，是数字化转型的基础设施。

2.降本增效的刚性需求：面对人力成本上升与工程师资源集中化趋势，远程运维能大幅削减差旅开支、缩短设备停机时间，已成为市场刚需。

3.存量改造空间巨大：大量老旧设备仅支持Modbus-RTU且难以进行网络改造，即插即用的远程模块或嵌入式方案拥有庞大的存量市场。

4.兼顾安全与便捷：相比传统公网映射或虚拟专用网络方式，该技术可提供无需公网IP、具备加密隧道的透传方案，填补了便捷性与安全性之间的市场空白。

5.商业模式多样：既可销售硬件网关，也可按设备连接数收取SaaS服务费，后续运维收入稳定，具备从工具产品向工业互联网入口演进的潜力。

基于混合深度强化学习的NOMA-MEC系统用户分组与资源分配方法

成果完成人	赵莎莎	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子与通信技术其他学科
应用行业	5G/6G 通信系统				
核心专利号	PCT/CN2022/127173				

成果概述

随着移动设备数量激增与数据流量爆炸式增长，用户设备面临计算资源与能量资源的双重约束。移动边缘计算（MEC）通过将任务卸载至网络边缘提升处理效率，而非正交多址接入（NOMA）技术则可有效缓解频谱资源紧张问题。然而，传统优化方法在动态环境下存在计算复杂度高、实时性差等不足。

本成果提出一种基于混合深度强化学习的用户分组与资源分配方法，通过融合深度确定性策略梯度（DDPG）与深度Q网络（DQN），实现对连续动作（带宽分配）与离散动作（用户分组、卸载决策）的协同优化。该方法可根据时变信道状态实时调度资源，最大化系统能量效率，具备良好的动态适应能力与决策精度。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于构建了一种面向混合动作空间的深度强化学习框架，解决传统单一强化学习方法难以同时处理连续与离散动作的难题。具体包括：

1、混合动作空间建模

将系统动作拆分为连续部分（带宽分配比例）与离散部分（子信道分配与卸载决策），分别由DDPG和DQN网络进行优化，实现了对复杂决策问题的统一建模。

2、分层决策与问题分解

在确定带宽分配与用户分组后，将整体能效优化问题分解为各子信道的独立优化问题，通过枚举卸载决策组合（共4种可能）快速确定最优卸载方案，降低了决策复杂度。

3、动态环境自适应学习

利用经验回放与目标网络软更新机制，使模型能够适应信道状态的时变特性，在动态NOMA-MEC系统中实现实时、稳定的资源调度。

技术指标/优势

1、技术指标

●支持动态时隙系统，时隙数T可灵活配置

●每个子信道最多支持2个用户同时传输

●系统能效定义为所有用户计算速率与计算功率比值的总和

●动作空间包含连续变量（带宽分配）与离散变量（用户分组、卸载决策）

2、优势

●混合动作处理能力：首次将DDPG与DQN协同应用于NOMA-MEC场景，解决了传统深度强化学习难以同时处理连续与离散动作的问题

●动态自适应性强：可根据信道状态实时调整策略，优于传统迭代或启发式算法

●决策效率高：通过问题分解与枚举优化，在保证解质量的同时降低计算复杂度

●能效优化显著：以系统能量效率为优化目标，兼顾计算速率与功耗，提升整体资源利用效率

相关发明专利已授权，技术方案完整，具备自主知识产权。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于5G/6G通信系统中的边缘计算与资源调度场景，具体包括：

●移动边缘计算网络：为物联网终端、智能设备提供任务卸载与资源分配优化，提升计算效率与能效

●多用户接入系统：支持大规模用户同时接入场景下的频谱资源动态分配，缓解频谱短缺问题

●动态通信环境：适用于信道条件快速变化的场景，如车联网、无人机通信等

随着边缘计算与NOMA技术在5G/6G中的深入应用，对动态、高效、智能的资源调度方案需求日益迫切。本成果具备良好的实时性与适应性，在基站侧、边缘服务器侧具有广阔的应用前景，可有效提升网络运营效率与用户体验。

无线毫米波可选的基于Overlay的数据中心网络组播算法

成果完成人	王怿	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	网络应用技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机科学技术基础学科
应用行业	计算机网络				

成果概述

数据中心网络需高效支持组播以满足大数据系统的高带宽需求，通常采用Overlay架构实现，挑战在于精确推断包含有线和无线毫米波（MMW）链路的DC网络拓扑，并设计相应组播算法。本研究提出了一种无线毫米波可选的基于Overlay的数据中心网络组播算法，首先使用层次聚类方法精确推断网络拓扑，然后提出跨机架优先组播（IRFM）算法，适应DC拓扑的扇入特性。实验表明，IRFM在纯有线场景下速度提升3.7至11.2倍，在MMW增强场景下提升4.8至14.6倍。

关键技术/创新要点

我们针对大数据系统中的基于覆盖的多播进行研究,所提出的多播算法的调度目标是尽量减少平均多播完成时间（MCCT）。算法的主要内容体现在三个方面。首先，我们利用层次聚类来准确推断数据中心网络的拓扑结构，即使在有线和无线混合的环境下也能奏效。其次，我们提出了跨机架优先多播（Inter-Rack First Multicast，IRFM）算法，该算法与数据中心拓扑的扇入特性相匹配，并为两种不同场景推导出最优参数设置。最后，我们进行了大规模的NS3仿真模拟，以评估我们算法的性能。结果显示，在纯有线情况下，我们的多播方案（IRFM）比朴素的多播实现快3.7到11.2倍；而在采用毫米波无线技术增强的情况下，速度优势更是达到4.8到14.6倍。

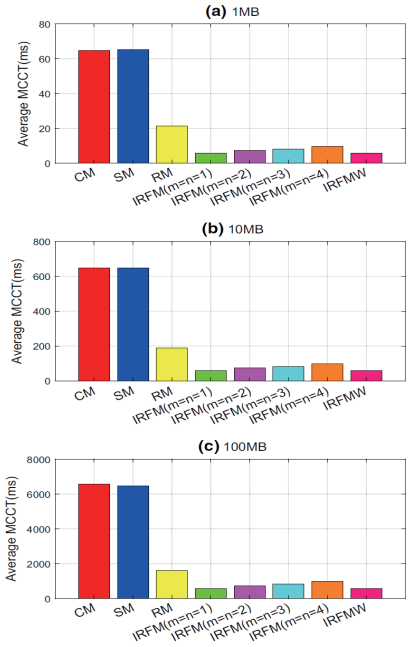


图1 无背景流量情况单个多播平均MCCT

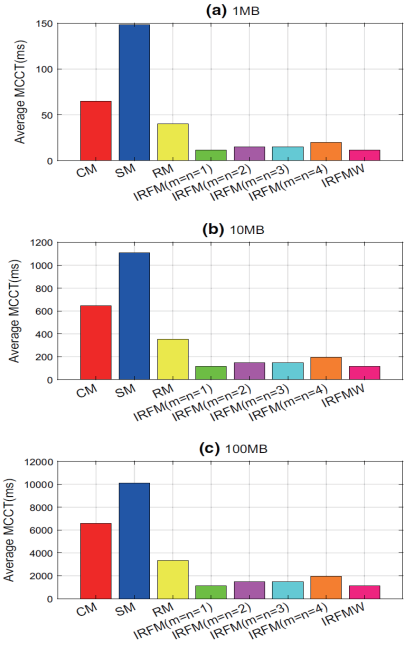


图2 无背景流量情况双多播平均MCCT

技术指标/优势

我们的研究针对的是数据中心网络中的多播应用，这一技术在众多应用场景中十分普遍。我们的多播算法IRFM充分利用了数据中心网络中的带宽和拓扑结构。实验结果显示，我们的多播算法IRFM在纯有线环境下比朴素的多播实现快3.7到11.2倍，在采用毫米波无线技术加强的情况下，速度提升更是达到了4.8到14.6倍。

应用领域和市场前景

高效多播支持在数据中心(DC)网络中非常重要，应用领域主要集中在需要高效数据分发和同步的大规模计算和数据存储环境中，如：大规模并行计算如今已经成为处理复杂计算任务的重要手段，IRFM算法通过优化多播路径选择，减少数据传输的延迟和带宽消耗，可提升并行计算任务的执行效率；分布式存储系统中，在数据同步和备份过程中，IRFM算法能够高效地将更新后的数据多播到所有相关的存储节点，确保数据的一致性和完整性；实时数据流处理场景中，数据需要实时地从多个源头传输到处理中心进行分析和决策，IRFM算法能够确保这些数据流在多播过程中保持低延迟和高可靠性，从而支持实时数据处理和响应。

金刚石NV色心量子磁强计

成果完成人	杜关祥	职称	副教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	应用物理学
应用行业	量子计量、科学研究、医疗影像、集成电路测试				
核心专利号	ZL202210862955.2、ZL2018109157270				

成果概述

随着芯片制程不断向纳米级发展、磁性材料性能持续提升，高精度磁场测量已成为半导体制造、新材料研发和高端装备领域的核心需求。传统磁强计在空间分辨率、量程覆盖和环境适应性等方面存在明显局限，难以满足微米级显微测量和复杂磁场环境的测试要求。

本科研团队历经多年技术攻关，成功研制出基于金刚石氮空位（NV）色心的量子磁强计，实现了1mT至3T宽量程磁场的微米级精密测量。该成果创新性地将量子传感技术与工业应用需求深度融合，解决了芯片表面电磁场高分辨精密测量、磁性材料微观磁畴成像、宽量程磁场量子计量等关键技术难题。

该成果的核心技术通过中国计量科学研究院严格校准，性能指标达到国际领先水平。2020年，“芯片表面微波磁场高分辨精密测量关键技术”通过权威科技评价，获得专家高度认可。2025年，该成果荣获中国仪器仪表学会科技进步奖，并入选“2025中国物联网大会物联网领域十大科技进展”提名。



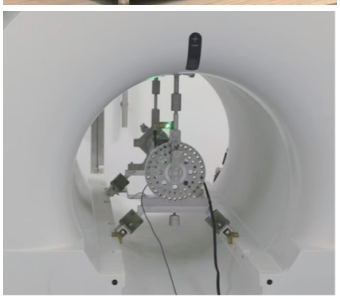


图1 金刚石NV色心量子磁强计产品实物图和医疗影像MRI应用现场

关键技术/创新要点

金刚石NV色心是一种独特的固态量子体系，其电子自旋状态对磁场具有极高灵敏度。团队通过激光激发使NV色心自旋极化，利用微波调控实现自旋态跃迁，通过荧光强度变化精确测量磁场引起的能级分裂，从而实现磁场的量子精密测量。

该成果在2020年“芯片表面微波磁场高分辨精密测量关键技术”科技评价中，被专家组认定为达到国际先进水平，主要创新点包括：

1. 宽量程单探头测量技术

突破传统核磁共振磁强计需多探头切换的技术局限，研发出单一探头覆盖0.01T-1.5T连续磁场范围的量子磁强计系统。通过优化金刚石NV色心制备工艺，实现了不同磁场强度下的量子态稳定调控，解决了低场信噪比不足与高场饱和的技术矛盾，无需更换探头即可完成全量程测量，操作效率大幅提升。

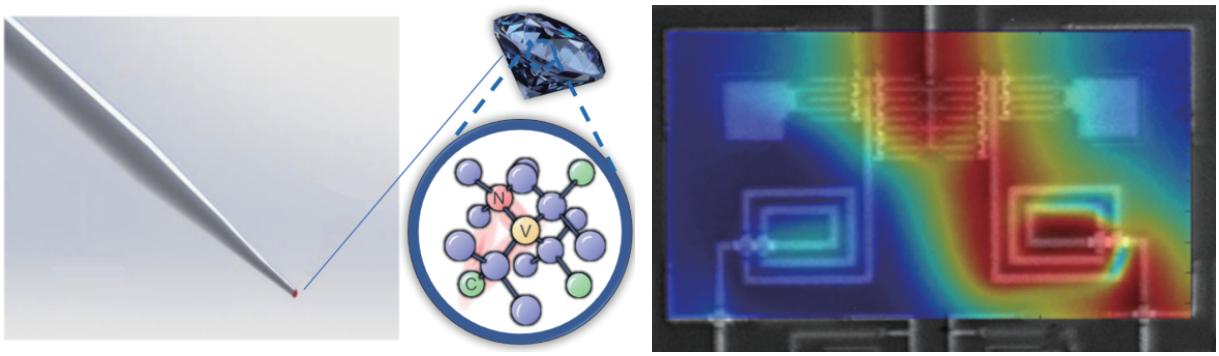


图2 独创光纤金刚石NV色心探头示意图和芯片表面微波磁场分布

2. 微米级空间分辨率成像

创新性开发锥形光纤量子探头，将荧光收集效率提升15倍，空间分辨率达到微米级，较传统毫米级探头实现量级突破。该技术可直接观测芯片表面电磁场分布和磁性材料微观磁畴结构，为半导体失效分析和新材料研发提供了"量子级"观测手段。

3. 高效量子态调控与信号处理

提出量子态脉冲副载波调制方法，在快速扫描过程中实现信噪比显著提升；采用FPGA集成化处理与锁频技术，将测量效率提升近百倍，满足工业在线检测的实时性要求。

4. 量子自校准与多物理量测量

基于NV色心电子自旋的量子特性，实现磁场绝对测量，无需定期校准，长期稳定性优异。同时可在磁场测量基础上，同步实现温度、应力等物理量检测，为多场耦合研究提供创新工具。

技术指标/优势

与传统磁强计相比，该成果具有以下显著优势：

1. 宽量程覆盖

测量范围0.001T-3T，填补了传统核磁共振磁强计在低场段的测量盲区，单一探头即可覆盖全量程。

2. 高空间分辨率

空间分辨率达到微米级，可直接观测芯片表面的微细电磁场分布和磁性材料的微观磁畴结构。

3. 高精度测量

在1.0-1.5T范围内准确度优于13 ppm，达到国际先进水平，满足精密测量和计量校准需求。

4. 高测量效率

采用先进的信号处理技术，测量速率和效率较传统设备提升近百倍，可实现快速扫描和在线检测。

5. 环境适应性强

可测量大梯度磁场（1-10、cm），解决核磁共振磁强计对磁场均匀性要求严苛（小于0.001/cm）的问题，适应更复杂工业现场环境。

应用领域和市场前景

该成果在芯片测试、磁性材料显微测试、宽量程磁场显微量子计量等领域具有广泛的应用价值，已与多家行业龙头企业开展示范应用：

1. 芯片测试与失效分析

该技术已成功应用于华为、中兴微电子等龙头企业的芯片电磁兼容测试和失效分析，实现晶圆级电磁场分布成像，温度和电磁场异常的定位精度达亚微米级，为芯片设计和测试企业提升芯片研发效率和良品率和故障排查提供了全新的利器。

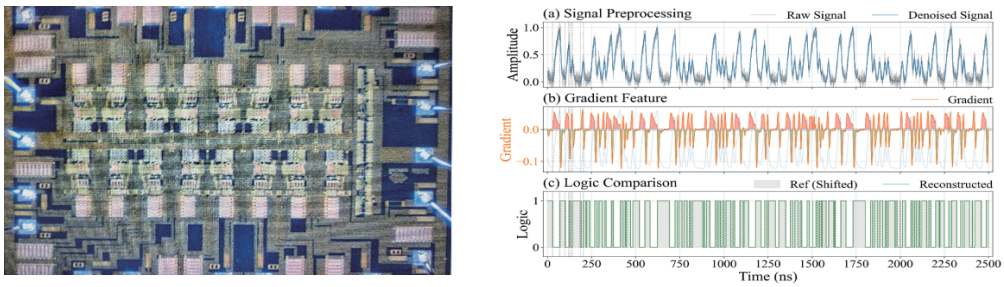


图3 待测数字芯片和采用微米光纤金刚石NV色心探头探测到的芯片表面纳秒短脉冲，
从上到下：荧光信号、光信号对时间微分、还原的数字逻辑序列。

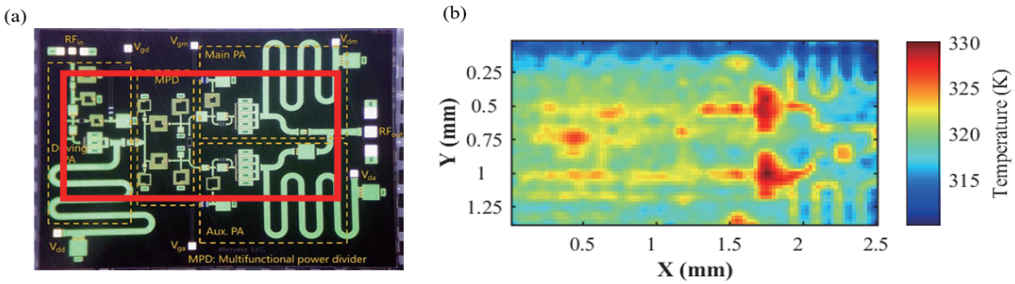


图4 芯片表面温度接触式微米级显微和微秒级快速测量

2. 磁性材料显微表征

实现高端永磁材料表面磁场的自溯源显微测量，空间分辨率达微米级，为稀土永磁材料的性能优化提供关键数据，在低温漂系数磁性材料研究测试中解决了磁场和温度同时定量测量的难题。

3. 宽量程磁场量子计量

金刚石NV色心量子磁强计严格遵循JJF1832-2020磁强计校准规范，经过中国计量科学研究院的严格校准，确保了测量结果的精度。经PT2025校准后，磁强计在1.0–1.5T范围的准确度优于13ppm，这一精度水平在国际上首次被报道，与磁场计量的黄金标准——Metrolab PT系列核磁共振磁强计相媲美。与PT系列核磁共振磁强计不同，后者在0.05T至1.5T的范围内需要更换三种不同量程的探头，而金刚石NV色心量子磁强计单一探头就能够覆盖0.01T至1.5T的连续磁场范围，这大大简化了测量过程并提高了效率，延伸拓展了核磁共振磁强计的测量范围。

4. 医疗影像装备研发

为低场MRI设备开发提供磁场均匀性实时监测，帮助医疗设备企业提升成像质量，降低系统成本。

该成果不仅填补了我国在宽量程微米分辨磁强计领域的技术空白，更在芯片测试、磁性材料等关键领域打破国外技术垄断，为我国高端制造业提供了“量子级”质量控制手段。随着量子技术的产业化推进，该成果在半导体、新材料、医疗设备等领域的应用前景广阔，有望推动我国高端测量仪器国产化进程，助力实现科技自立自强。

基于逆向设计的零近似介电常数宽带非互易热辐射器，采用混合深度学习框架

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	微波通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	航天航空、能源领域				

成果概述

辐射传热在热工程系统中起着至关重要的作用。非互易热辐射通过打破基尔霍夫定律，解耦了材料的吸收率和发射率，为高级热管理和辐射制冷提供了强大的解决方案。然而，现有技术往往受限于极窄的工作频带，且缺乏动态可调性，难以适应复杂的应用场景。此外，在复杂光学器件的逆向设计中，传统的深度学习方法常常面临“一多对应”（不同结构产生相同光谱）的物理映射难题，且需要极其庞大的数据集来克服训练噪声，计算成本极高。

本团队创新性地提出了一种混合深度学习框架，成功实现了基于磁化梯度近零介电常数（ENZ）砷化铟（InAs）多层膜的高效逆向设计。该成果不仅突破了宽带非互易热辐射的设计瓶颈，极大提升了逆向设计算法的准确性与数据利用效率，还赋予了器件通过外部磁场进行动态控制的能力。

关键技术/创新要点

传统神经网络在设计复杂器件时容易“迷失”方向。团队巧妙地将人工兔子优化（ARO）算法与多任务串联神经网络（TNN）相结合。ARO算法充当了“智能采矿机”，在庞大的多维参数空间中精准收集高质量的训练数据，将数据噪声率大幅降至仅3.2%，彻底避免了对海量随机盲目采样的依赖。随后，TNN通过串联的正向预测和逆向生成模块，成功解决了非唯一映射的难题，将预测代价函数降至惊人的0.086，实现了物理结构的精准反推。

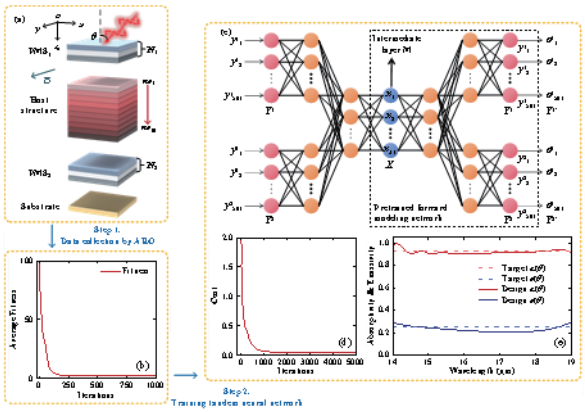


图1 磁化梯度ENZ InAs多层膜优化与反设计原理图

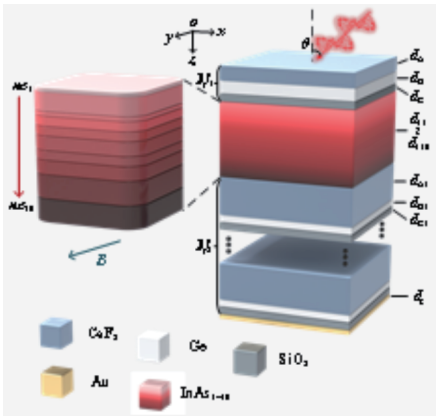


图2 反设计InAs/介电多层膜原理图

为实现宽频带的非互易辐射，团队设计了包含10层载流子浓度呈梯度变化的InAs堆叠薄膜。当电磁波进入时，这些浓度各异的薄膜能够在不同频段分别激发出一种特殊的“布儒斯特漏能模式”（Brewster modes）。通过精密的厚度与浓度排布，这些原本孤立的窄频带共振被完美缝合，形成了一个连续且宽广的高效响应带。

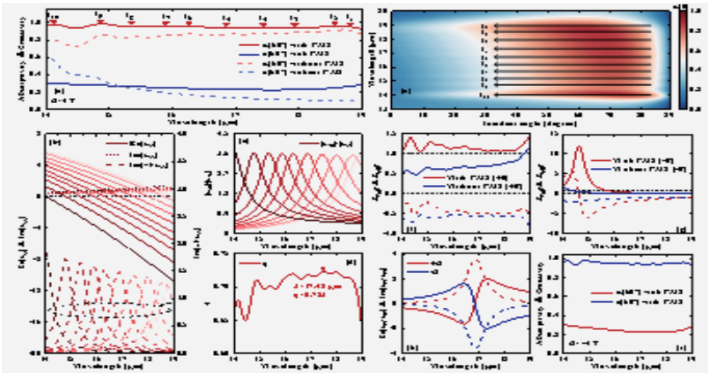


图3 磁场可调谐宽带非互易热辐射的总体设计原则

该结构的另一大技术亮点是其灵活的动态响应。利用InAs材料在磁场下的磁光效应，用户仅需反转外部磁场的方向（例如从+4 T 切换为-4 T），器件内部电子的运动轨迹就会反转。这使得该辐射器在同一红外波段内的“吸收率”和“发射率”发生完全的对调，宛如一个可以随时翻转的“热学开关”。

技术指标/优势

在14-19μm的红外宽波段内，系统实现了极高的非互易性（η参数始终大于0.637，峰值高达0.723），性能表现显著优越于现有依赖导模共振的窄带器件。

提出的混合AI框架将数据集的噪声从26.4%缩减至3.2%，不仅避免了单向神经网络不收敛的致命缺陷，更以极少的数据量实现了高精度的器件设计，大幅缩短了研发周期。

在外部磁场翻转下，器件能够在“高吸收/低发射”与“低吸收/高发射”两种极端状态间进行近乎完美的全频带切换。

相比难以加工的外尔半金属等特殊材料，本成果采用的InAs多层膜结构在当前的分子束外延工艺下更易于实现规模化扩展。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于航天器、高密度电子元件以及智能建筑的热管理。由于其可以根据外界磁场动态改变自身向外散热的能力，能够实现按需降温或保温，这对于下一代高能效热控系统至关重要。

在国防装备领域，本成果允许载具在不改变自身物理温度的前提下，通过电磁调控自由改变对外的红外辐射特征，从而在敌方红外热像仪前实现环境融入与自适应热隐身。

团队开发的高数据效率人工智能框架具有极强的通用性，未来有望转化为商用逆向设计软件模块，赋能更广泛的超材料与纳米光子器件的研发，商业转化潜力巨大。

横向磁极化和电极化情况下的同步宽带非互易热辐射

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	微波通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	新能源、先进热管理等高端制造领域				

成果概述

打破基尔霍夫热辐射定律的非互易热辐射（NTR）技术，能够解耦材料的吸收率和发射率，为辐射制冷和光子能量转换系统逼近热力学极限（如Landsberg极限）提供了核心前提。此前，利用磁化近零介电常数（ENZ）材料（如砷化铟或外尔半金属）已能克服传统器件频带极窄的限制，实现宽带NTR。然而，受限于材料内秉属性，这些宽带NTR仅能在横磁（TM）模式下实现，横电（TE）模式的缺失从根本上限制了双偏振条件下的热力学效率与能量利用率。

本成果首次创新性地将多层梯度ENZ外尔半金属（WSMs）与超表面几何构型相结合，成功突破了单一偏振模式的物理瓶颈。该技术在8-14μm的宽红外波段内，同步实现了TM和TE双偏振模式下的显著宽带非互易热辐射。该成果不仅具有极强的偏振适应性，还对入射波方向性表现出极佳的鲁棒性，填补了多偏振态下高效收集与调控热辐射能量的技术空白。

关键技术/创新要点

团队通过精密调节外尔半金属的费米能级（从底部165meV梯度降低至顶部92meV），构建了具有梯度ENZ特性的七层薄膜。这种梯度设计能够在其内部依次激发一系列布儒斯特漏能模式（Berreman模式），从而在8-14μm的宽光谱范围内实现极高的电磁能量吸收。

针对传统结构下TE偏振波无法产生磁光耦合的物理瓶颈，本团队设计了以45度倾斜放置的WSMs-金复合超表面单元。该单元侧面覆盖有L型的金包覆层，与底部金层共同构成等离激元纳米天线。这种非对称几何结构在电磁波入射时引发强烈的偏振转换，为原本互易的TE波赋予了耦合所需的分量，成功克服了TE模式的偏振失配问题，使其能够耦合进材料内部激发出强烈的非互易性。

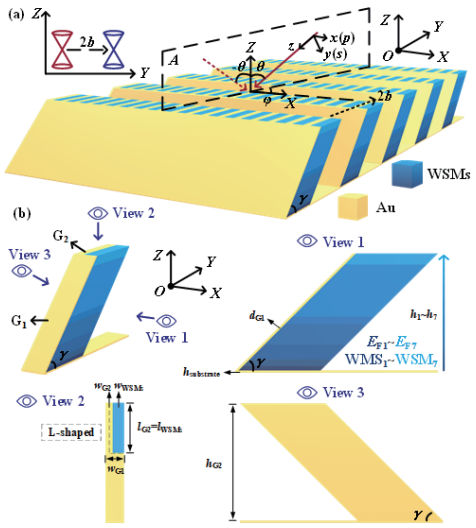


图1 所提出的超表面的示意图以及超原子结构的详细信息

在器件运行过程中，由于金薄膜内表面的表面等离激元（SPPs）与外表面的电磁屏蔽效应协同作用，不仅实现了宽频吸收与发射的极度不对称，还使得TM模式和TE模式的首选发射方向在空间上实现了完全分离。这种奇特的物理现象使得该超表面不仅是一个辐射器，更是一个高效的“热学偏振分束器”。

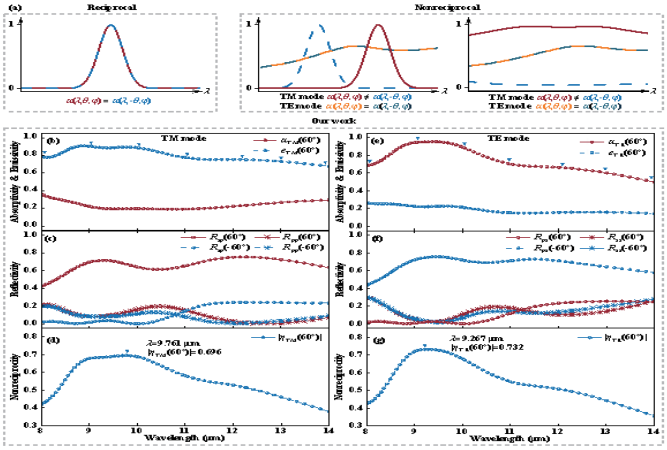


图2 宽带NTR在TM和TE模式下的示意图

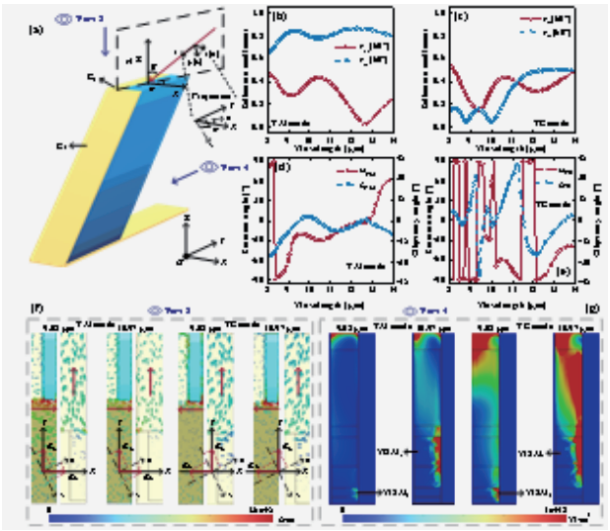


图3 倾斜式WSMs -金组件在θ=60°和φ=26°时的性能分析

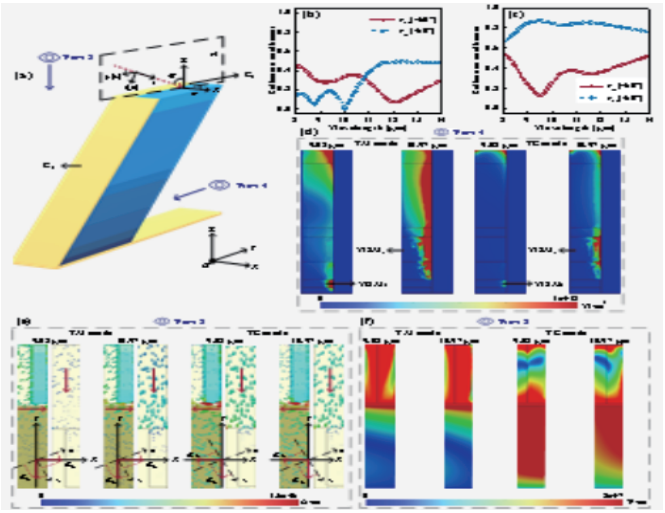


图4 倾斜式WSMs -金组件在θ=-60°和φ=26°时的性能分析

技术指标/优势

突破了以往宽带NTR仅限TM偏振的限制，在8-14μm宽频带内同步实现了双模式的强非互易性。其中，TM模式非互易性参数峰值达0.696，TE模式峰值高达0.732。

利用外尔半金属独特的节点动量分离特性，将其作为内置“磁场”，无需任何外加高耗能磁场设备即可打破洛伦兹互易性，大幅降低了系统复杂性与能耗。

面对微纳制造中常见的薄膜厚度偏差（具有-15%至30%的误差容限），器件的非互易性参数依然稳定保持在0.5以上，展现出极高的工程化生产潜力与容错率。

能够将TE偏振热辐射引导至特定空间通道，将TM偏振热辐射引导至反向通道，大幅减少了交叉偏振损耗并简化了集能器的光学光路设计。

应用领域和市场前景

传统的热光伏能量收集系统受到互易性原理束缚。该器件可作为新一代热源辐射器，通过双通道空间分离器分别独立收集TE和TM偏振的能量，大幅削减能量在发射端的无效损耗，有望将能量收集效率推向全新的热力学极限。

利用其偏振敏感和空间分束的双重特性，可开发出能够同时识别光谱与偏振态的新型多维红外探测器；在军事领域，也可作为智能涂层，实现具有方向和偏振选择性的自适应红外热隐身。

针对航空航天器及高密度芯片集群，该技术能有效实现高效的定向红外散热，同时由于发射率和吸收率解耦，能有效屏蔽来自周围环境有害的热辐射回流，成为维持核心器件恒温运行的理想方案。

基于多层斜排列光栅结构的超小入射角非互易热辐射装置

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	微波通信系统	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	能量转换与存储				
核心专利号	CN202511927521.6				

成果概述

随着信息时代的迅速发展，能源消耗随之日益剧增，给可持续发展和环境保护带来了巨大挑战。太阳能作为清洁能源以及其巨大储量成为了解决上述问题的关键途径。为了提升太阳能的收集和热量管理效率，近年来发展出了一系列小入射角下的非互易热辐射器件。然而，现有的器件往往依赖于特殊磁光介质，且具有制造成本高、效率较低、工作入射角较大等局限性，限制了其广泛应用。

本团队提出了一种基于多层斜排列光栅结构的超小入射角非互易热辐射装置，在不使用磁光介质的情况下，实现了超小入射角下的强非互易热辐射。同时，该器件还支持前后双向的非互易热辐射以及TE/TM双电磁波模式下的强非互易热辐射，从而提升了该器件在太阳能收集和辐射冷却等邻域的应用价值。

关键技术/创新要点

作为非互易热辐射器件，其关键在于打破传统的基尔霍夫定律，并在长幅射波长范围内实现电磁波非互易的吸收和辐射。此外，更小的入射角能提升器件的工作效率。与传统使用磁光介质实现的方式相比，本团队提出的多层斜排列光栅结构仅使用普通介质和金属，且具有成本更低、效率更高、工作环境不受限、非互易维度更多等优势。在不使用磁光介质的情况下，该器件对TM模电磁波实现了0.3度入射角下的0.98非互易性，对TE模电磁波实现了0.985的强非互易性。通过对该结构的原理分析，其非互易性来源于连续体束缚态驱动的拓扑相位奇点对（BIC-driven TPSPs），这与传统的非互易磁光介质器件表现类似。表明该成果不仅在太阳能收集和辐射冷却等领域具有应用优势，还可能成为一种非互易器件设计的新思路。

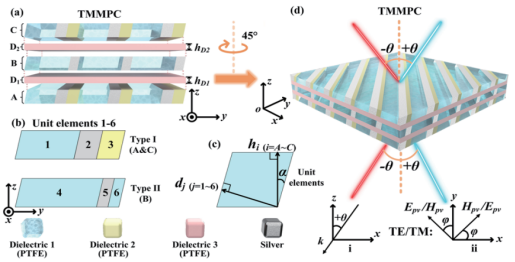


图1 该成果的结构示意图

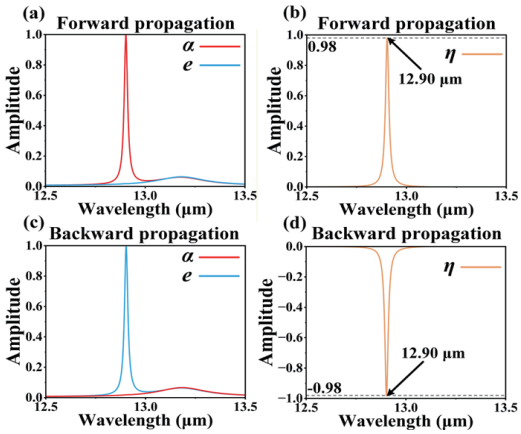


图2 TM模式红外电磁波照射下吸收、辐射和非互易性的幅值

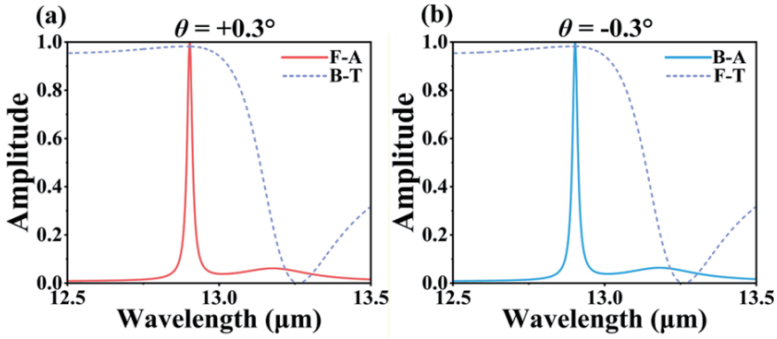


图3 前(F)后(B)向红外电磁波吸收(A)、透射(T)的幅值

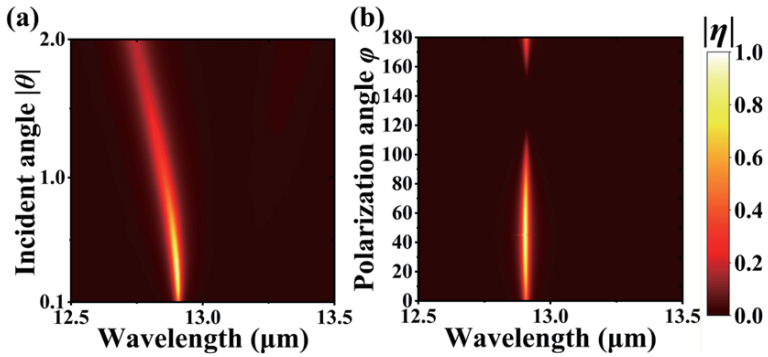


图4 不同入射角、极化角红外电磁波照射下的非互易性

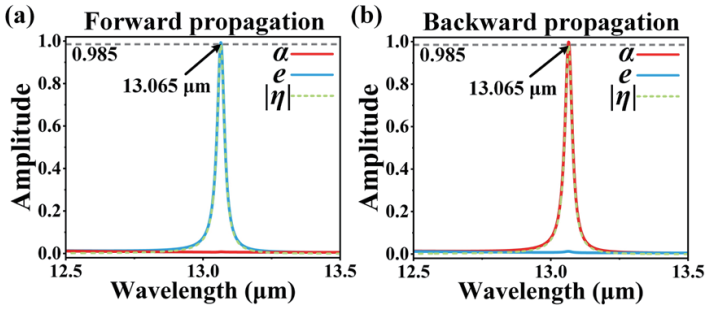


图5 TE模式红外电磁波照射下吸收、辐射和非互易性的幅值

技术指标/优势

该成果通过多层斜排列光栅结构实现了前后双向, TE/TM双模式的超小入射角非互易热辐射, 最小入射角在0.3°, 非互易性达到0.98。与传统非互易热辐射器件相比, 该成果非互易性更强, 入射角更小, 且未使用磁光介质, 提升了工作效率, 降低了成本, 拓宽了工作环境。

应用领域和市场前景

该成果可用于太阳能收集、热量管理和辐射冷却的相关领域。通过对红外电磁波的单向吸收/辐射, 能够有效提升热量的收集效率和存储效率, 有望解决太阳能器件收集、存储效率低等限制, 提高热量管理能力, 合理高效传输和收集红外辐射能, 缓解能源不可持续等问题。

受中国虎符启发的动态可调圆二色性光学加密策略

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	宽带无线通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息通信技术
应用行业	电子信息				
核心专利号	CN120802520A				

成果概述

信息安全与加密传输是现代通信、数据存储和防伪认证等领域的重要基础。传统加密方法多依赖计算复杂度实现信息保护，通常存在物理层防护不足、密钥维度有限以及抗篡改能力不强等问题。针对上述问题，本团队受中国古代虎符验证机制启发，提出了一种基于动态可调圆二色性的红外光学加密策略。该技术通过构建Z形手性结构与倾斜层状排布体系，结合倾角、旋转角和入射角等多维参数调控，实现了连续可调的圆二色性响应，并建立了面向图像与文本的双重加密机制。研究结果表明，该体系可产生8种稳定编码状态，在195 THz处对应圆二色性值由0.06到0.80近线性分布，最大响应达到0.82；同时依托TST1与TST2严格匹配机制，实现了较强的抗暴力破解、抗侧信道攻击和抗篡改能力。该成果为高安全光学加密、防伪鉴别及偏振编码通信提供了新的技术路径。

关键技术/创新要点

现有信息加密技术大多依赖数学算法或单一光学调制方式，普遍存在密钥维度有限、物理层防护不足、易被复制或破解等问题，难以满足高安全等级信息存储与传输的需求。针对上述问题，本团队提出了一种受中国古代虎符验符机制启发的动态可调圆二色性光学加密技术，将虎符的认证思想与现代光子结构设计相结合，构建了兼具物理认证与信息加密能力的双重防护体系。

该成果的关键技术在于：首先，通过设计具有手性响应的结构，实现了对左右旋圆偏振光选择性透射的精确调控，从而在红外频段获得连续可调的圆二色性响应。该体系可在175～215THz范围内实现动态调控，并在195THz附近形成稳定有效的编码窗口。其次，团队利用多参数协同控制机制，将结构的倾角ϕ、旋转角δ以及入射角θ共同作为光学密钥，构建多维密钥空间，显著提高了系统的保密能力。再次，研究结合Arnold变换的数字加密方法，实现了“物理光学调控+计算编码”的双重加密模式，可同时支持图像和文本信息的安全加密。

本成果的创新点主要体现在三个方面：一是将古代虎符双边匹配验证机制引入光学加密设计，形成了只有TST1与TST2严格匹配时才能正确解密的物理认证逻辑；二是实现了8种稳定编码状态，在195THz下圆二色性值可由约0.06至0.80分级变化，具备良好的可区分性和编码能力；三是结合结构难复制、难篡改的物理特性与参数密钥、数字映射机制，构建了多层次安全保护体系，在抗伪造和抗破解方面具有明显优势。

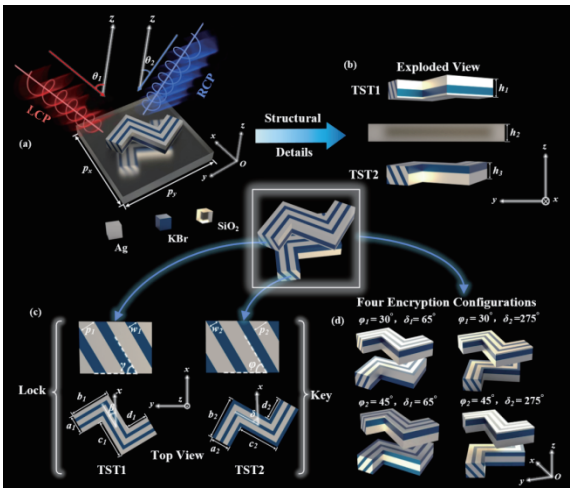


图1 基于虎符匹配机制的动态圆二色性光学加密结构示意图

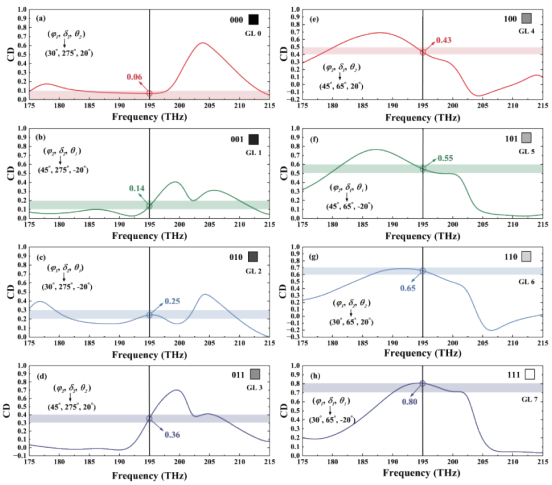


图2 不同结构参数和入射条件下的圆二色性动态调控特性

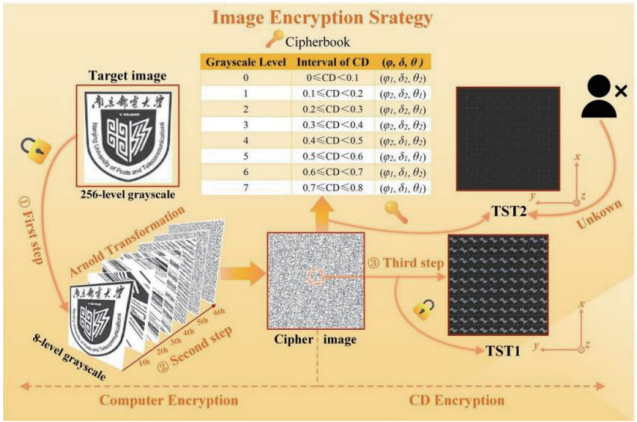


图3 基于动态圆二色性的光学信息加密流程示意图

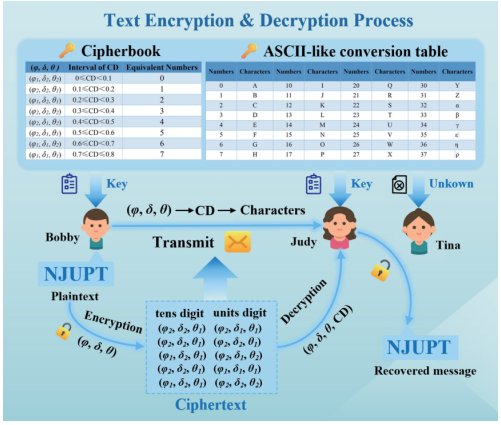


图4 基于动态圆二色性的文本信息加密与解密流程示意图

技术指标/优势

与传统电子加密和静态光学加密技术相比，该成果基于虎符结构仿生设计，构建了集偏振调控、圆二色性响应与信息加密于一体的动态光学安全系统。通过倾斜角、旋转角和入射角三维参数协同调控，实现密钥匹配式加密与解密，显著提升了信息传输的安全性、隐蔽性和抗破解能力。

该成果在175–215THz近红外频段内可实现动态可调圆二色性响应，形成8种稳定编码状态，对应0–0.8的CD调控区间。在特定参数条件下，器件在193 THz处的CD峰值可达0.82，其中右旋圆偏振光透射率为0.87，左旋圆偏振光透射率仅为0.05，表现出优异的手性选择透射特性。基于CD值与数字、字母之间的映射关系，该器件能够实现完整的信息加密与解密过程。

相比同类技术，该成果具有以下优势：一是采用仿生虎符式双层结构设计，仅在参数完全匹配时才能实现正确解密，安全性更高；二是通过多参数耦合构建高维光学密钥空间，增强了编码容量和系统鲁棒性；三是兼具偏振调控与信息加密双重功能，在光学安全通信、防伪识别和信息隐写等领域具有良好的应用前景。相关成果已发表论文，并申请发明专利，具有较强的创新性和成果转化潜力。

应用领域和市场前景

该成果可为信息安全、光通信、防伪识别和智能光学器件等领域提供高效的技术支撑，如：在保密通信场景中，可利用其对圆极化波的差异化响应和多参数密钥匹配机制，实现敏感信息的高安全传输与隐写存储；在高端防伪领域，可通过特定圆二色性响应构建难以复制的光学标签，为证件防伪和重要信息认证提供技术保障；在偏振探测与光学调控领域，该成果还可应用于新型偏振器件、光学传感和集成光子系统设计。由于该装置兼具动态可调圆二色性、偏振选择透射和多维密钥编码等特性，能够满足未来信息安全技术向高维度、动态化、物理层加密方向发展的需求。随着光学加密、安全通信、先进制造与新型显示等产业的快速发展，该成果有望在光学信息处理、国防安全、数据存储及高端防伪市场形成较好的应用前景，并具备进一步开展器件集成和成果转化的潜力。

面向5G/WiMAX通信的多模工作频率可重构天线

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	宽带无线通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电磁场与微波技术
应用行业	通信设备制造、物联网、便携式移动终端制造				

成果概述

当前5G、WiMAX、WLAN等异构通信融合发展，对天线的多频段适配、敏捷切换能力提出高要求，传统可重构天线存在调谐带宽不足、辐射效率受元件插入损耗影响大、结构复杂难集成等问题，难以满足便携式设备的应用需求。本成果研发出一款三叉形结构的多模频率可重构微带天线，集成两个P-I-N二极管，通过外部电压控制实现四种工作模式（单频/双频/三频/三频）的切换，覆盖5G、WiMAX、WLAN主流通信频段；采用曲折辐射单元和瓶形接地平面设计，实现天线小型化与阻抗匹配优化，成品尺寸仅30mm×37mm×1.6mm。实测该天线工作频段最大增益达4.1dBi，辐射性能优异，解决了传统天线多模实现成本高、集成性差的痛点，在无线通信终端领域具备良好应用前景。

关键技术/创新要点

本天线仅通过2个P-I-N二极管实现四种工作模式，大幅减少开关数量，降低系统插入损耗与复杂度；基于FR4基板加工，成品尺寸仅0.21λ0×0.26λ0，远小于同类可重构天线，集成性优异，适配便携式设备。通过两个开关不同状态组合，天线具备四种不同的工作模式：模式1（单频）：2.81~3.21GHz；模式2（三频）：1.97~2.22/2.85~4.11/5.19~6.00GHz；模式3（双频）：3.03~3.48/4.52~5.53GHz；模式4（三频）：2.02~2.29/2.87~3.28/4.56~5.75GHz。天线在工作频段处最大增益为4.1dBi，带内增益范围为0.6~3.9 dBi。方向图在XOZ平面呈全向辐射特性，在YOZ平面呈“8”字形定向辐射特性。所具备创新要点如下：

1.三叉形多分支辐射结构设计：采用倒L形馈电主分支+两个不等尺寸倒U形侧分支的三叉形结构，三个分支分别对应 2.2 GHz、3.1 GHz、4.6 GHz 三个谐振频率，通过分支组合实现多频段覆盖，利用不同长度辐射臂的谐振特性，独立驱动不同频率，实现频分复用。

2.双 P-I-N 二极管偏置控制技术：在副分支与主传输线接口处集成2个BAR64-02V P-I-N二极管，设计双DC偏置电路（V1、V2），通过0V/1.5V电压切换二极管通断状态，实现四种工作模式的无缝切换，二极管等效电路精准建模保障模式切换稳定性。

3. 小型化与阻抗匹配优化技术：采用曲折辐射单元缩减天线物理尺寸，将接地平面设计为瓶形（切角+叠加小矩形），延长电流路径，使4.5~6 GHz频段阻抗带宽提升至36.4%，解决多模天线阻抗匹配差的问题；利用高频片式电容/电感实现DC信号阻断和AC泄漏抑制，保障射频性能。

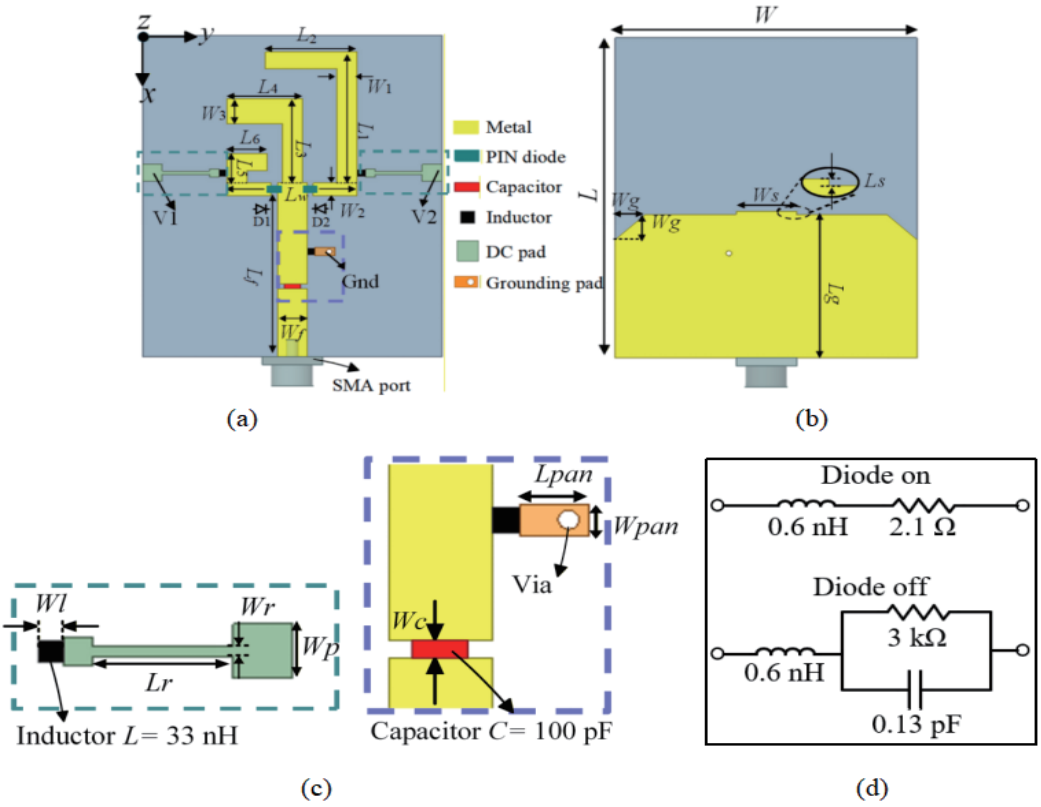


图1. 所示天线的基本结构。(a) 上视图；(b) 下视图；(c) 直流偏置线；(d) 导通/断开状态下P-I-N二极管等效电路。

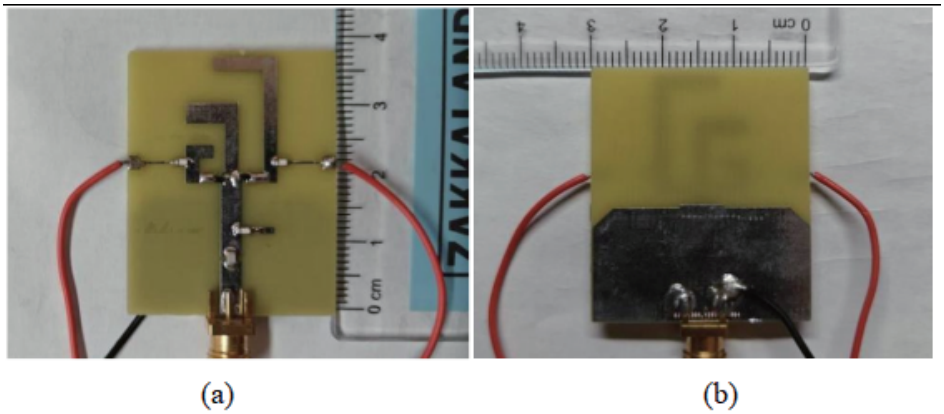


图2. 所提出天线的制造实物。(a) 上视图；(b) 下视图。

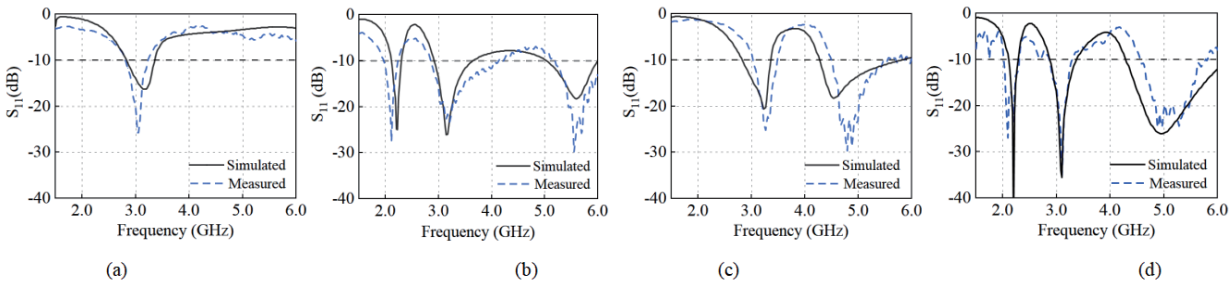


图3. 模式1~4的模拟与实测反射系数曲线。(a) 模式1；(b) 模式2；(c) 模式3；(d) 模式4。

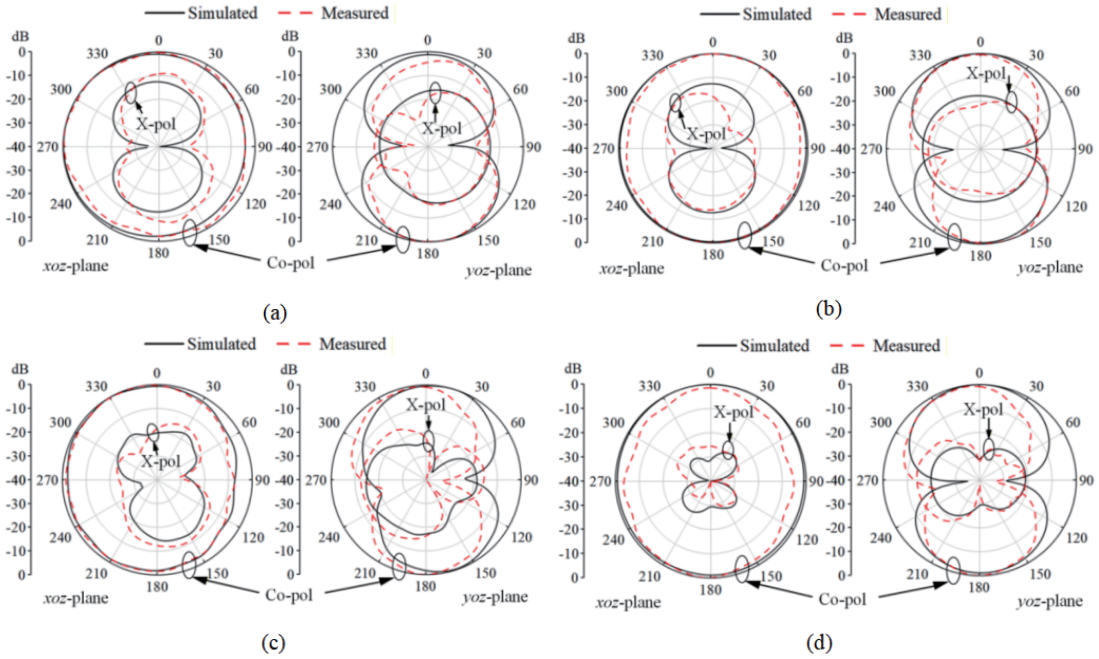


图4. 天线仿真与实测辐射结果对比。(a) 3.16 GHz时的模式1；(b) 2.16 GHz时的模式2；(c) 4.8 GHz时的模式3；(d) 3.16 GHz时的模式4。

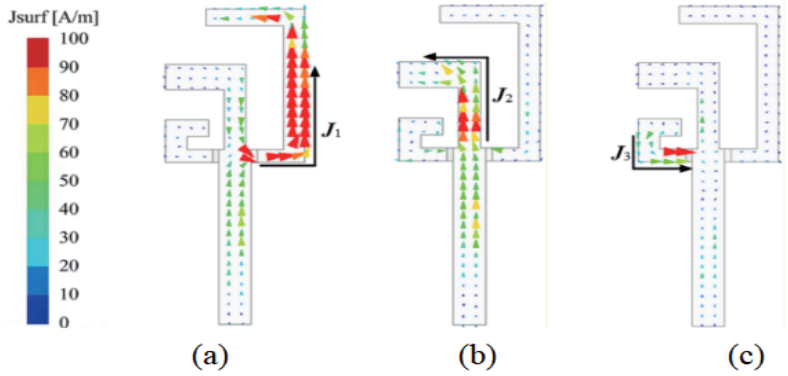


图5. 频点处表面电流的分布情况。(a) 2.2 GHz；(b) 3.1 GHz；(c) 4.6 GHz。

技术指标/优势

与传统可重构天线相比，本成果使用的开关数量少、引入插入损耗低，有效提升辐射效率；小型化设计大幅降低体积，易与便携式终端集成；基于常规FR4基板加工，制作工艺简单、成本低廉；多模式全覆盖5G/WiMAX/WLAN频段，可实现频谱资源高效利用，适配多场景无线通信需求。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于5G通信终端、WiMAX/WLAN无线设备、工业物联网终端、便携式移动设备、自适应无线传感系统等领域，具体适用于5G Sub-6GHz手机、无线基站、物联网智能感知终端、工业环境多参数监测设备、便携式无线通信终端等产品的研发与生产。在5G通信领域，可实现多频段敏捷切换，提升设备频谱利用率；在工业物联网中，能兼顾5G/WLAN的高速数据传输和低频窄带的低功耗远距离传感，满足多场景监测需求。

基于各向异性光子时间晶体的时间逻辑与编码功能理论策略

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	电子信息、通信设备制造、物联网、便携式移动终端制造				
核心专利号	CN120802520A				

成果概述

随着信息技术的高速发展，传统电子逻辑与加密器件面临速度瓶颈、功耗增加和电磁干扰等问题，光计算与光信息处理成为重要的替代方案。然而，现有光子逻辑器件大多基于空间结构（如光子晶体、谐振腔等），存在集成度低、可重构性差等局限。如何在时间维度上实现动态、可编程的光逻辑与编码功能，是该领域的前沿挑战。

本团队创新性地提出并实现了一种基于各向异性光子时间晶体的时间逻辑与编码功能器件。光子时间晶体是一种介电常数随时间周期性变化的人工电磁材料，具有独特的动量带隙和波放大效应。团队通过精确调控光子时间晶体中两个时间层的相位参数（δ_1和δ_2），成功实现了角度放大窗口在角域内的可控移动。基于这一物理机制，团队设计了2位二进制编码器、NOR和AND逻辑门，并进一步构建了相位加密系统。

该成果首次将光子时间晶体的应用拓展至信息编码与加密领域，实现了在时间维度上的并行逻辑运算和动态加密，为新一代光子逻辑器件和信息安全技术提供了全新的理论平台。

关键技术/创新要点

该成果基于各向异性光子时间晶体提出了一种实现时间逻辑与编码功能的理论策略。通过调控光子时间晶体中两个时间层的相位参数，可在角域内形成位置可精确移动的角度放大窗口，并据此设计出2位二进制编码器、NOR与AND逻辑门，进而构建动态相位加密系统。该工作将光子时间晶体的应用拓展至信息编码与加密领域，为新一代光子逻辑器件和信息安全技术提供了全新平台。

该成果的关键技术在于：采用传输矩阵法和时域有限差分法对各向异性光子时间晶体进行系统的理论建模与数值验证；所提出的结构由两种不同介电张量的各向异性时间层在时间域上周期性交替排列构成，电磁波以横磁波形式斜入射，通过时间界面发生分裂和指数放大，形成角度依赖的透射增强窗口；通过独立调控两个时间层的相位参数δ_1和δ_2（对应输入电平I_1和I_2），实现角度放大窗口在角域内的精确位移；基于此物理机制，进一步设计了2位二进制编码器、NOR/AND逻辑门以及相位加密系统，并通过误差分析和对比度计算验证了器件的鲁棒性与性能优势。

本成果的创新点主要体现在以下几个方面：一是角度放大窗口位置的可控移动机制，当相位(δ_1,δ_2)取四种组合时，窗口中心分别位于四个角度区域，实现了四态可重构输出；二是2位二进制编码器，在角域上划分四个独立输出区域，每个区域对应唯一的输入组合，当窗口落在某一区域时该区域输出“1”、其余输出“0”，具有空间分离、无串扰的并行输出特性；三是NOR与AND逻辑门的角域实现，选取两个特定角度区间，在同一器件上同时实现NOR和AND两种逻辑功能，展示了单结构执行多种逻辑运算的能力；四是基于动态相位映射的信息加密系统，将二进制明文按2位分组，利用主密钥实时生成的二级密钥动态选择相位映射规则，将明文映射到不同角度区域，接收方通过检测窗口位置恢复明文，实现高安全性加密。

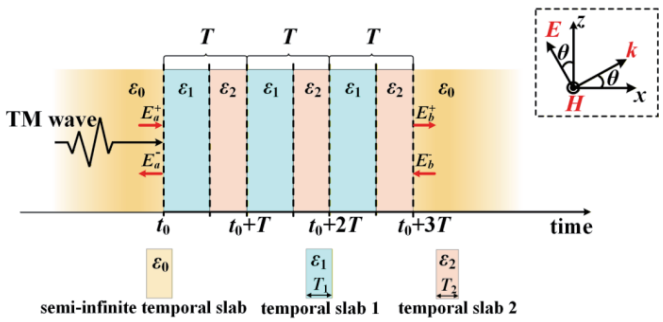


图1 各向异性光子时间晶体结构示意图

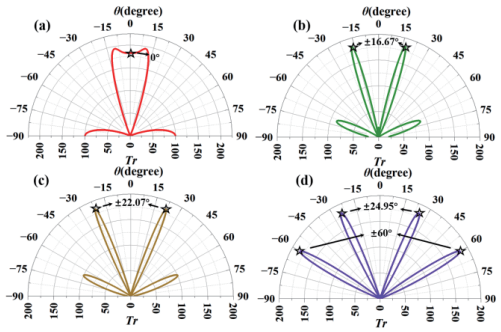


图2 四种相位组合下角度域内的放大窗口

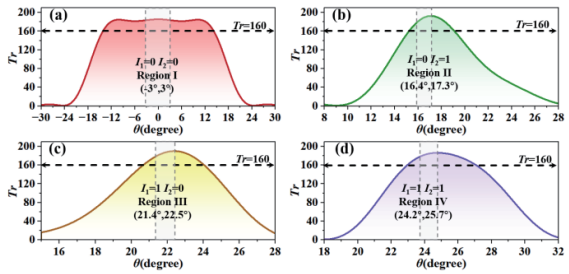


图3 改变相位组合在角度域I~IV内的图谱实现两位编码

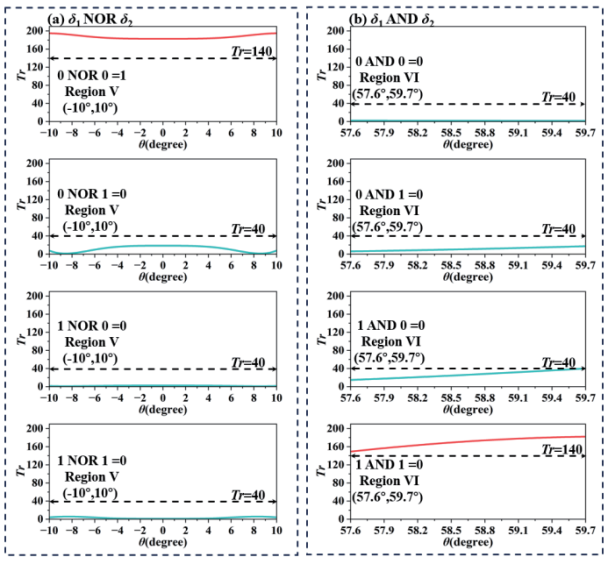
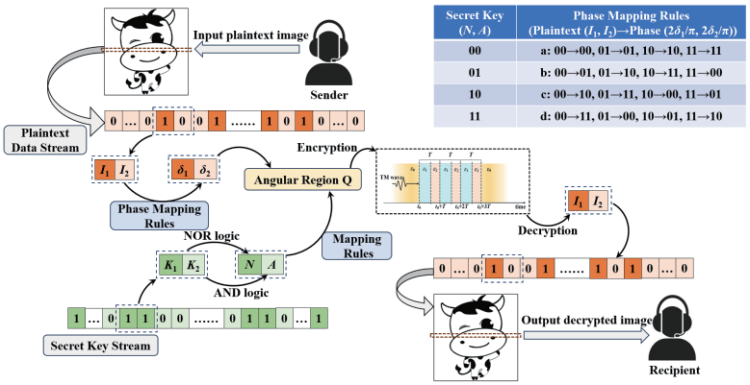


图4 改变相位组合在角度域V和VI内的图谱实现NOR和AND功能



Secret Key (N, A)	Phase Mapping Rules (Plaintext (I_1, I_2)→Phase ($2\delta_1/\pi$, $2\delta_2/\pi$))
00	a: 00→00, 01→01, 10→10, 11→11
01	b: 00→01, 01→10, 10→11, 11→00
10	c: 00→10, 01→11, 10→00, 11→01
11	d: 00→11, 01→00, 10→01, 11→10

图5 基于编码和逻辑门的相位加密系统

技术指标/优势

单个光子时间晶体结构可同时实现2位编码器、NOR门和AND门，并可进一步构建加密系统，体现了高度的功能集成性。

所提出的相位加密系统利用动态映射规则，每次传输的映射关系均可通过密钥流实时改变，增强了信息安全性。与传统的固定编码方式相比，具有更强的抗破解能力。

传统光逻辑器件依赖空间结构，通道间易产生串扰。本成果基于时间调制，逻辑和编码功能在角域上空间分离，可实现并行输出，且通过简单的相位调节可重构功能。

应用领域和市场前景

该成果可在光计算与光信息处理、光通信与信息安全等领域提供高效的技术支撑。如：在下一代高速光计算机、光神经网络和光信号处理器中，本成果提供的可重构逻辑门和编码器可作为基本运算单元，实现超快、低功耗的光学逻辑运算，突破电子器件的速度瓶颈；所提出的相位加密系统可用于光纤通信和自由空间光通信中的物理层加密，通过动态角度映射实现一次一密的安全传输。与传统电域加密相比，光域加密具有更高的速率和更低的延迟。光子时间晶体的实验实现已在光学频段取得重要突破。本成果所提出的理论模型具备向实验平台转化的潜力。随着时变超材料和光子时间晶体制备技术的成熟，基于光子时间晶体的逻辑与编码器件有望成为未来光计算和光信息安全的核心组件，在数据中心、高速通信网络等市场展现出广阔的应用前景。

整数约束下各向异性光子时间晶体中的光角梳

成果完成人	章海锋	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	电子信息、通信设备制造、物联网、便携式移动终端制造				
核心专利号	CN120802520A				

成果概述

角度测量在工业、汽车和机器人领域需求旺盛，并在精密制造中发挥着关键作用，实现了当前高精度、大范围的测量，这正是角度测量领域的发展趋势。传统的光学频率梳在频域上提供了精确的等间距频率标记，推动了精密计量和光谱学的发展。然而，在角域上实现类似“梳状”分布的光学信号放大窗口用于角度测量与复用仍面临挑战。

本团队创新性地提出并实现了一种基于各向异性光子时间晶体的光角梳。光子时间晶体是近年来兴起的新型人工电磁材料，其介电常数随时间周期性变化，能够产生动量带隙并对电磁波进行放大。团队通过精确调控光子时间晶体的介电张量、调制周期、相位参数以及各向异性折射率分量比等关键参量，成功将光子时间晶体的带隙放大效应从频域拓展至角域，在角度空间内实现了多个等间距、梳状分布的角度放大窗口。研究还发现，通过整数约束条件（相位参数K和各向异性折射率分量比q均为整数），可以精确控制角度放大窗口的数量，从而形成完整的光角梳。该成果首次在角域上实现了类似频率梳的梳状光谱分布，为高精度角度测量、空间光信息复用以及多通道光谱分析提供了全新的技术路径。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种基于各向异性光子时间晶体实现光角梳的理论方法。通过调控光子时间晶体的相位参数与各向异性折射率分量比，成功将动量带隙放大效应从频域推广至角域，在角度空间内生成了等间距、梳状分布的多通道角度放大窗口，并实现了窗口数量、强度与宽度的独立可控调节。该成果为高精度角度测量、空间光信息复用和多通道光谱分析提供了全新的技术路径。

该成果的关键技术在于：采用传输矩阵法和时域有限差分法对各向异性光子时间晶体进行系统的理论建模与数值验证；所提出的结构由两种不同介电张量的各向异性时间层在时间域上周期性交替排列构成，电磁波以斜入射方式进入该结构后，在时间界面发生分裂和放大，形成角度依赖的透射增强窗口；通过调控相位参数K和各向异性折射率分量比q（二者均需满足整数约束），精确控制角域内放大窗口的数量；通过增加周期数N或调节介电张量比值γ提高放大窗口的峰值高度，并通过引入中间时域场使介电张量阶跃变为近似平滑变化，从而压缩动量带隙宽度、收窄窗口、提升品质因子；独立开发时域有限差分求解器，与传输矩阵法计算结果进行系统性对比，验证了模型的准确性与可靠性。

本成果的创新点主要体现在以下几个方面:一是角域放大窗口的多通道调控,揭示了光子时间晶体的动量带隙放大效应可从频域推广到角域,当K=21时在-90°至90°范围内形成21个等间距离散角度放大窗口,局部角度区间呈现规整梳状谱特征;二是放大窗口强度与宽度的独立可调性,增加周期数N或调制强度M可显著提高窗口峰值高度而对窗口数量影响甚微,在时间层间引入中间时域场可使Q值从1.99提升至200,实现极高分辨率的角域信号输出;三是整数约束下的光角梳生成机制,相位参数K与折射率分量比q均需满足整数条件才能形成完整等间距光角梳,梳齿间距可达0.6°,峰值透射率达182.7,且梳齿宽度可进一步调控;四是理论模型与数值验证的高度一致性,在K=1至4的不同条件下,传输矩阵法与时域有限差分法在全角度范围内均表现出高度吻合,验证了所提模型的准确性和可靠性。

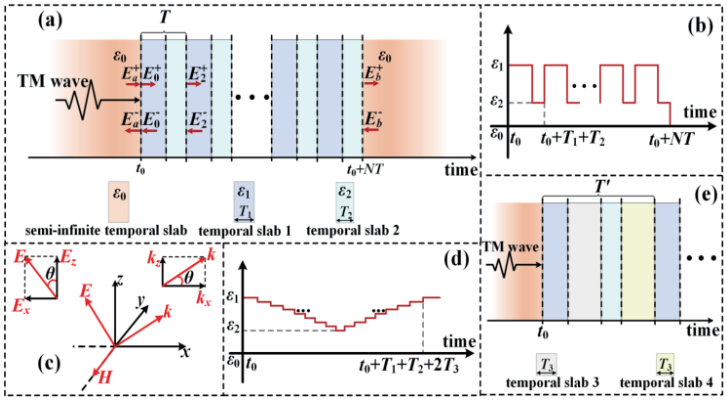


图1 各向异性光子时间晶体结构示意图

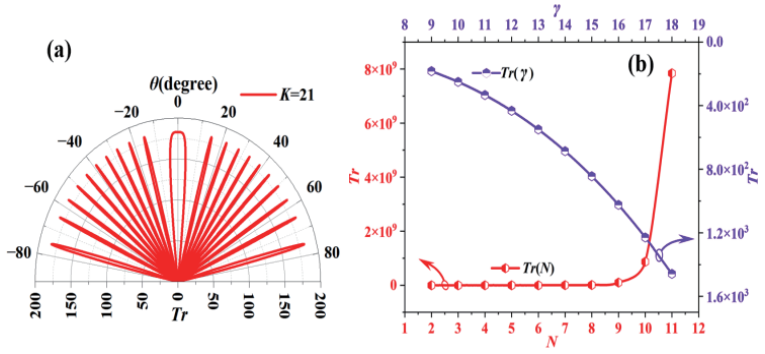


图2 当K=21时OAC的形成图谱。(b)当K=1且q=2时,
N和γ的变化会影响单个AMW在0°处的透射率变化。

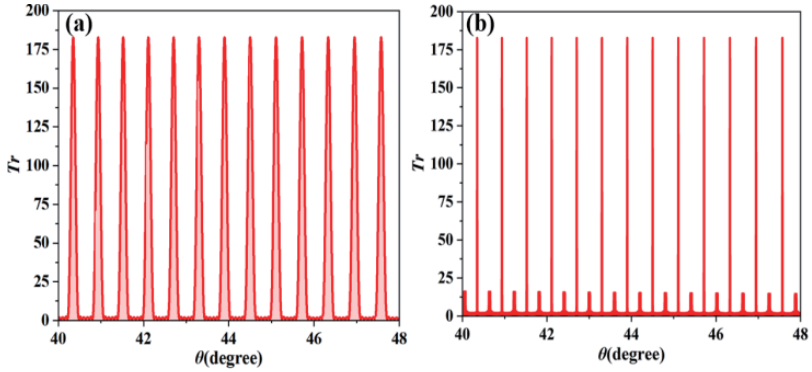


图3 局部角度范围内的OAC以及加入中间时域场后OAC的变化。

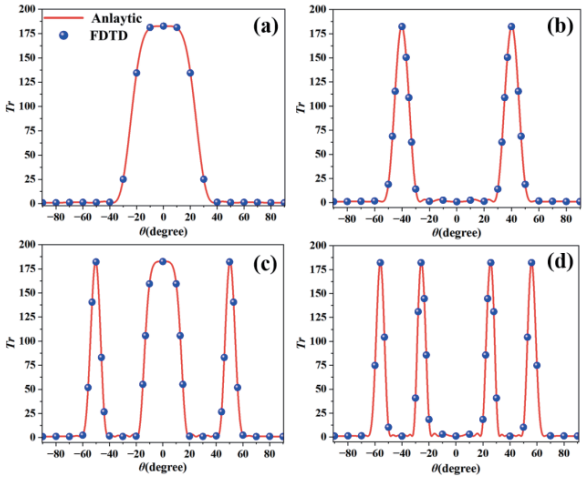


图4 时域有限差分法和传输矩阵法结果验证。

技术指标/优势

光角梳可在同一时刻提供多个等角度间隔的放大窗口，每个窗口均可独立用于角度信息探测或信号传输，极大提升了角度域的信息容量和处理效率。

通过中间时域场平滑处理，角度放大窗口的半高宽可被大幅压缩，品质因子Q值最高可达200以上，对应的角度分辨精度远优于传统机械或光学角度测量方法。

角度放大窗口的数量（由K和q的整数组合决定）、强度（由周期数N和调制强度M决定）和宽度（由时间平滑阶梯数决定）均可独立调节，具有很强的设计灵活性和场景适应性。

应用领域和市场前景

该成果可在角度测量、光通信、光计算等领域提供高效的技术支撑。如：在机器人关节角度反馈、精密转台控制等场景中，光角梳能够提供实时、高分辨率的角度信息，且不受电磁干扰影响，可显著提升系统的定位精度和可靠性；在光通信、光计算等领域，光角梳可实现角分复用技术，即在不同的角度通道上同时传输多路独立信号，提高通信容量和频谱效率；光角梳的等角度间隔特性使其适用于并行探测多个角度分辨的光谱信号，可用于激光雷达、光学相干层析成像、多角度散射测量等场景。目前，光子时间晶体的实验实现已在光学频段取得重要突破，本成果所提出的理论模型具备向实验平台转化的潜力。光角梳有望成为下一代高精度角度测量与光信息处理的核心器件，在工业自动化、光通信等市场具备广阔的应用潜力。

FSS0-1光纤智能鞋垫

成果完成人	孙兵	职称	副教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	光传输系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	电子信息，柔性可穿戴，医疗器械				
核心专利号	CN202510673104.7				

成果概述

FSSO-1光纤智能鞋垫是一款面向智慧健康、运动监测、康复辅助及老年看护等场景开发的智能穿戴产品。该成果依托塑料光纤传感技术，将柔性光纤传感、信号处理、状态识别与远程控制功能集成于鞋垫之中，可实现足底压力感知、步态分析、异常状态识别及智能家居交互控制等功能。

随着健康监测和智能穿戴产业快速发展，传统鞋垫产品已难以满足足底压力检测、步态评估、异常行为识别等应用需求；同时，常见电阻式、电容式传感方案在抗干扰能力、柔性适配和长期稳定性方面存在一定不足。针对上述问题，江西大圣塑料光纤有限公司依托在塑料光纤制备、封装与应用领域的技术积累，开展了FSSO-1光纤智能鞋垫项目研发，并完成了从传感结构设计、样机试制、系统集成到功能验证的完整研发过程。

该项目已列入江西省2025年度省级新产品试制计划，目前产品已具备验收条件和产业化基础。

关键技术/创新要点

1. 创新采用D型侧抛塑料光纤传感结构

项目在硅胶柔性鞋垫正面布设四组D型光纤传感器，对脚掌、脚掌心、脚后跟等关键重心区域进行压力分布检测。通过四轴抛磨机制备D型侧抛塑料光纤，优化光在光纤中的传播路径，使鞋垫在微小形变下即可产生明显光强变化，提高了传感灵敏度。

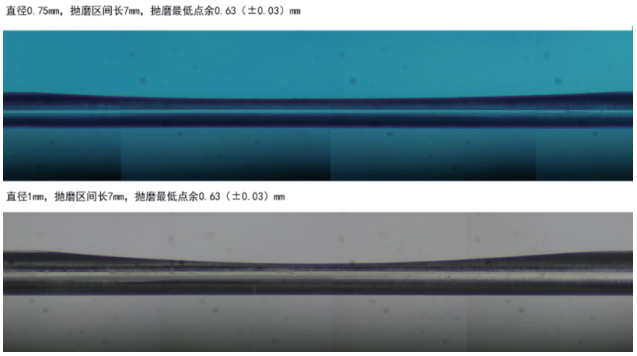


图1 D型光纤传感结构

2. 构建稳定可靠的柔性封装与固定工艺

采用紫外胶封装固定技术，并结合热缩管预固定工艺，使光纤抛磨面与传感区域紧密贴合，显著提升了信号采集稳定性和长期使用可靠性。

3. 以塑料光纤为全光传输介质，抗干扰能力强

系统采用塑料光纤（POF）作为核心传输介质，具有无电磁干扰、柔性好、耐弯折、寿命长等优势，弯折寿命可达10^4次以上，更适合复杂动态穿戴场景。可见光波段还可直观显示光传输路径，便于判断系统工作状态。

4. 实现多功能融合应用

在硬件层面，系统将LED光源、红外摄像头、电源模组集成于鞋垫结构之中；在软件层面，基于Java平台开发多线程信号处理系统，融合光斑滤波、曲线平滑、OpenCV图像分割和深度学习模式匹配算法，实现了步态监测、压力成像、状态识别及红外遥控等多项功能。

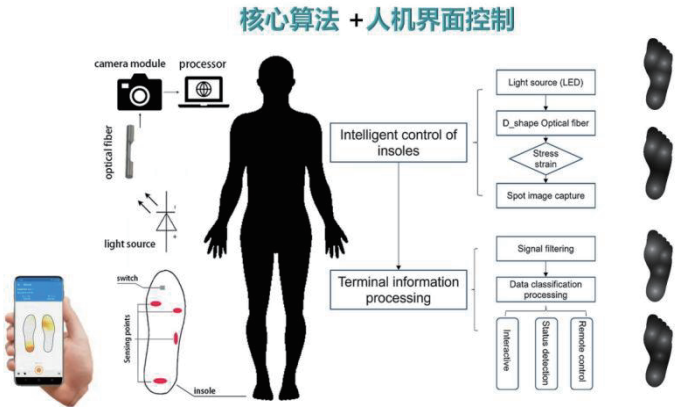


图2 红外遥控空调控制

5. 具备开放式开发与场景拓展能力

系统通过串口调试接口和开发者API，支持用户自定义传感器阈值和控制逻辑，可灵活拓展至健康监测、康复辅助、居家看护和智能家居控制等多种应用场景。

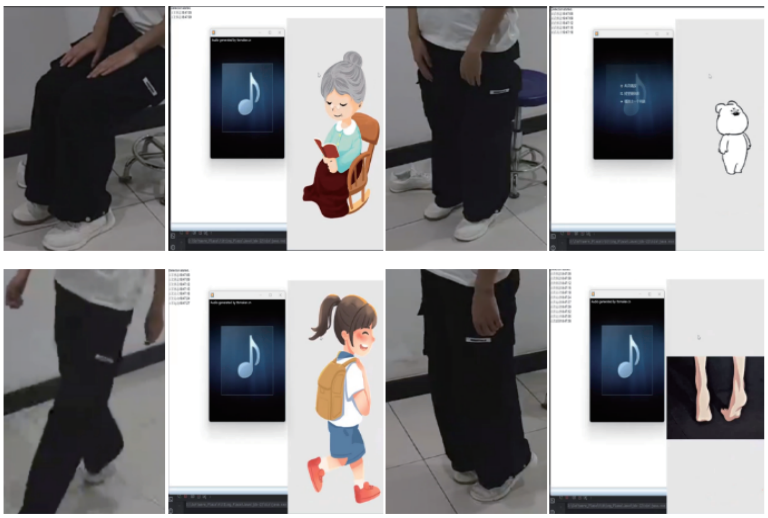


图3 状态检测功能文本与语音播报

技术指标/优势

FSSO-1光纤智能鞋垫主要技术指标如下：

1.光纤直径：0.75–1.0mm

2.抛磨后剩余厚度：0.50–0.66mm

3.抛磨长度：60–80mm

4.采样频率：100Hz

5.信噪比：≥42dB

6.步态识别准确率：≥92%

7.异常识别误判率：≤0.04

8.塑料光纤抗弯折寿命：$\geq 10^4$次

与传统电阻式、电容式智能鞋垫相比，FSSO-1光纤智能鞋垫具有以下优势：

1.抗干扰性能强：采用光学传输方式，不受电磁环境影响。

2.灵敏度高：对微小形变响应明显，适用于精细化压力检测。

3.柔性与舒适性好：塑料光纤柔韧性较强，更适合穿戴使用。

4.耐久性优：可反复弯折，不易疲劳断裂，长期使用稳定性更高。

5.集成度高：实现光源、摄像模组、电源与鞋垫本体的一体化设计。

6.应用功能丰富：兼具健康监测、状态识别与智能家居控制能力。

7.具备产业化条件：工程实现路径清晰，具备批量生产和市场推广基础。

应用领域和市场前景

随着智能穿戴、数字健康和智慧养老市场不断扩大，具备连续监测、状态识别和交互控制能力的智能鞋垫产品具有较大的市场需求。FSSO-1光纤智能鞋垫兼具技术创新性、工程可行性和产业落地能力，能够满足健康监测、康复辅助和智能交互等多场景需求。

依托企业现有塑料光纤产业基础、生产车间和渠道体系，该成果已具备规模化生产保障。未来，产品有望成为企业新的业务增长点，并进一步带动光纤传感、智能穿戴与传统鞋服产业的融合升级，具有较好的经济效益和推广价值。

全固态高性能轻量化微片皮秒激光器

成果完成人	沈建平	职称	副教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	半导体发光技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术

成果概述

激光加工技术与激光检测技术自诞生以来在工业制造和科研中显示出低成本、高效率以及应用领域广泛优势，受到制造界与学界的高度重视。而传统硬脆材料加工所用的激光器为纳秒激光器体积庞大，对环境要求高，稳定性差，且热效应较大，对于很多材料的加工效果并不理想。此外，皮秒、飞秒激光器在微加工性能虽然较好，但系统装备复杂和笨重，而且价格昂贵。如今急需一款体积小、重量轻、便于集成、宽温度工作范围、脉冲宽度窄、峰值功率高的高性价比激光器。

本项目主要开发一款全固态高性能轻量化微片皮秒激光器，具有窄脉宽、高峰值功率、高重复频率、多波长可选、宽工作温度范围、低能耗和高稳定性等特点，同时还需要对整机进行紧凑化轻量化设计。需要解决以下主要问题：

1、高增益谐振腔优化设计，包括增益晶体和饱和吸收体的长度与浓度；

2、高精度的系统温度控制，需要对整机进行完整的热力学仿真和计算；

3、高效率频率变换，通过仿真与计算在保证能长时间稳定运行的情况下使频率变换效率最高；

4、整体激光系统紧凑化设计与轻量化设计。

关键技术/创新要点

本项目设计的全固态高性能轻量化微片皮秒激光器，创新采用具有偏振选择的激光晶体，通过设计谐振腔长度和饱和吸收体的初始透过率，在0-7kHz重频范围内实现脉冲宽度小于360ps的激光输出，同时对增益晶体的长度和掺杂浓度进行仿真计算与优化实验，实现百毫瓦级偏振激光输出。在此基础上，应用抗灰迹效应KTP晶体实现长时间运行的绿光532nm或紫外355nm激光输出。进一步完成整体激光系统紧凑化设计与轻量化设计，有效缩减激光头体积与重量，激光头尺寸控制在130mm*90mm*50mm之内。通过热力学仿真，对激光器整机的温度进行精确控制，实现在宽温度区间范围内的正常工作，并且利用高效率风冷散热结构进一步缩减激光系统体积与重量以及提高激光工作效能。

技术指标/优势

1、应用激光测距和激光雷达光源，相比于传统激光光源，探测距离更远，精确度更高，体积小重量轻便于集成，功耗低续航时间长，尤其是远距离飞行场景下的无人机激光光源系统。

2、应用于微纳加工、材料表征与探测系统光源，相比于传统的超快激光器，具有加工精度高，微纳材料产生的热效应低、系统装备电负载较小、在复杂系统上易于集成、综合性价比高等特点。

应用领域和市场前景

目前市场上主流的高端微片激光器主要从欧洲与北美的激光器公司进口，尤其是集成于医疗装备、工业加工系统、生物与材料表征系统中的激光器，例如 LEUKOS、BATOP、Bright Solutions、Laser Peak、Teem Photonics、Advanced Photonic Sciences、CryLaS、ALPHALAS。除此之外国产激光器厂商也占有一定市场，例如杏林睿光、芯飞睿、富泰等。

市场上同类成熟产品主要分为两类，窄脉宽低重频和宽脉宽高重频，本方案的产品兼顾两者优势，能够输出窄脉宽高重频的激光脉冲，具有一定产品竞争优势。

用于吞咽障碍治疗与检测的传感雷达及新一代治疗仪器

成果完成人	郝学元	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	半导体发光技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	医疗机构、养老机构、家庭用户				

成果概述

本科研团队创新性的提出基于厘米波雷达反射技术方案，并基于此原理成功研制出了传感单元，目前已经通过技术验证，对比测试表明，此技术方案灵敏度高，识别准确，且不受呼吸音等外部声音信号干扰。结合前期研制的治疗仪器，形成了吞咽治疗与检测的闭环系统，目前已经初步完成样机研制，并在南京脑科医院进行临床使用，初步使用结果表明，此仪器具备治疗和检测一体化功能，个性化治疗效果显著提升，相关技术突破已被学院网站报道，报道新闻参见：http://eoe.njupt.edu.cn/2025/0428/c9497a282626/page.htm。

关键技术/创新要点

1、核心技术

(1)厘米雷达探测技术：创新性的提出通过厘米波雷达非接触式捕捉患者的吞咽动作，包括舌部运动、喉部提升等关键指标，样机验证技术方案可行，指标先进。

(2)智能识别算法：基于机器学习和深度学习算法，对雷达信号进行特征提取与模式识别，实现对吞咽动作的精准分类（如正常吞咽、误吸、呛咳等）。

(3)个性化治疗方案：结合患者的吞咽特征和康复目标，自动生成个性化的训练参数（如刺激频率、强度等），并实时调整和反馈。

2、创新点

(1)首次将雷达探测技术应用于吞咽障碍的诊断与治疗领域，实现无创、精准的监测。

(2)结合智能算法，提供实时反馈和个性化治疗方案，显著提升康复效果。

(3)设备操作简便，可适用于医院、康复中心及家庭场景。

技术指标/优势

本设备在核心技术上达到国际领先水平：

(1)雷达探测精度可达毫米级，配合识别算法，可满足吞咽动作的高精度监测需求。

(2)智能算法的准确率达到99%以上，远高于现有同类产品的技术水平。

(3)系统具备高度可扩展性，未来可集成更多传感器和功能模块。

应用领域和市场前景

1、应用领域

本设备主要面向以下用户群体：

(1)医疗机构：包括综合性医院、康复专科医院等，用于吞咽障碍患者的诊断与治疗。

(2)养老机构：为高龄患者提供便捷的康复服务。

(3)家庭用户：适用于需要长期康复训练的患者。

2、市场前景

根据相关数据，中国65岁以上人口已超过2亿，吞咽障碍的发生率约为10%-15%。预计未来市场规模将达到数十亿元。此外，随着人们对健康需求的提升，家庭医疗设备的市场需求也将快速增长。

异质螺旋包层大模场单模激光增益光纤

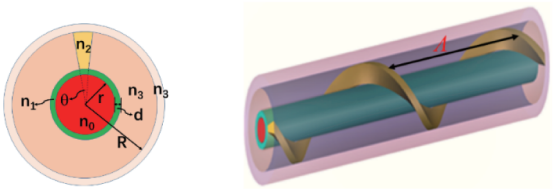
成果完成人	沈骁	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	光传输系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	光纤激光器制造公司				

成果概述

增加纤芯面积可以有效降低纤芯功率密度，减轻非线性效应和光学损伤，但又会导致光束质量恶化。所以，实现一种高性能大模场单模增益光纤产品是该领域产业化高质量发展的重点和难点。鉴于此，本团队前几年首次提出一种全新的全固态异质螺旋包层结构的大模场单模增益光纤，可在增加有效模场面积的同时保持激光的单模运转。团队成功设计了一种结构简单的大模场单模增益光纤，单模芯径达到60微米，是目前国际主流商业光纤的三倍。可以有效降低纤芯内的功率密度，理论上可以提升激光功率的运行上限至9倍。该项目获得了国家自然科学基金面上项目的资助，经过4年的研究，完成了理论和实验样品的制备和验证，获得了理想的研究结果。

关键技术/创新要点

本项目光纤已经获得国家发明专利的授权。本项目光纤结构如图1所示，国际上首次采用异质螺旋包层结构设计方案，可以高效过滤高阶模；采用全固态结构，便于光纤的制备、切割和熔接，有利于实现全光纤化系统集成。



（a）光纤端面示意图　　（b）光纤三维透视图

图1 异质螺旋包层大模场单模增益光纤结构示意图

应用领域和市场前景

国内2025年光纤激光器市场规模达到139亿元，预计2025-2029年复合增长率保持约8.4%，2029年有望突破192亿元。增益光纤作为光纤激光器的核心组件，占到激光器成本约25%，所以增益光纤的市场规模前景广阔，预计主要面向国内各家研究机构和光纤激光器制造公司进行销售。

基于扫描成像的光电器件大面积高分辨缺陷检测系统

成果完成人	胡二涛	职称	副教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	科学分析仪器/检测仪器	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电探测器、太阳能电池				
核心专利号	202510054083.0				

成果概述

光电性能测试对太阳能电池、光电探测器（尤其新型低维材料器件）至关重要。传统光电流成像技术主要分为两类：（1）位移台驱动样品移动，需焊接引线，影响检测效率与一致性；（2）振镜扫描光斑，虽支持探针电极利于快速检测，但存在扫描范围小、图像畸变、光路复杂等缺陷。

本团队提出移动光学组件光束扫描法，通过双反射镜线性移动光束，样品固定，兼容焊接导线与探针电极，解决了振镜法的扫描范围受限与图像畸变问题。该方案具备亚微米级空间分辨率与大范围扫描能力，且结构简化，显著降低系统成本，为光电响应器件的性能表征提供高效、精准的解决方案。

关键技术/创新要点

本团队所研制的光电流mapping系统实物如图1所示，主要由光束扫描组件、三维样品台、探针台、源表和电动控制终端组成，其中光束扫描组件由高精度二维平移台、反射镜、半透半反镜、物镜和相机组成，两个电动位移台驱动光束在x和y方向移动。光束扫描组件的内部光路为入射激光经反射镜和半透半反镜依次反射发生90°转折，进入物镜照射到样品上，返回光透过半透半反镜进入相机，用于观察照射位置和光斑大小。样品放置于三维调节样品台上，通过调节样品相对于物镜的距离并结合相机实时拍摄光斑的大小，实现光斑聚焦（大小约为2mm）。

为了验证系统的测量性能以及数据采集和自动化控制程序的可靠性，对具有图形化特征的硅光电池及$Cu_2ZnSn(S,Se)_4$电池进行了测量。图2（A）为硅光电池的光电流图像，扫描范围为$11\times11mm^2$。清晰的显示了“山”字形电极，电流较大的区域与电池的实际感光面积相符，证实了系统的大范围扫描能力。对表面覆盖有“南”字打印纸的硅光电池进行成像检测，扫描范围为$3\times3mm^2$，步长为75mm。图2（B）为扫描的图像，显示出清晰的“南”字，且大小与字体实际大小基本一致。使用线数为360的光栅条覆盖于硅光电池表面，并采集其光电流图像，扫描步长为0.625μm，扫描范围为$0.1\times0.1mm^2$，如图2（C）所示。图像呈现出清晰的光栅结构，线条的重复周期约为72.4μm，与光栅条的显微照片（73.8mm）及理论值70.6mm基本一致。光栅条亮区和暗区的光电流比值约为53，而透射率比值为67，二者基本相符，证明了光电流测试结果的准确性。对$Cu_2ZnSn(S,Se)_4$太阳能电池的表面光电流图像进行了测试。偏压设置为0V，步长为0.025mm，

扫描范围设置为1×1mm², 如图2(D)所示, 其表面光电流均匀, 清晰显示了电极结构及部分缺陷。这些结果为改进电池的制备工艺和提高其光电转换效率提供了有效助力。

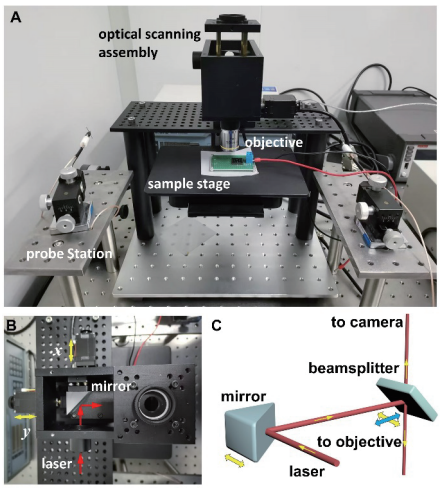


图1 研制的光电流扫描成像系统。(A)实物图;
(B)由光学组件组成的光束扫描组件的内部结构;
(C)光束扫描组件的内部光路示意图

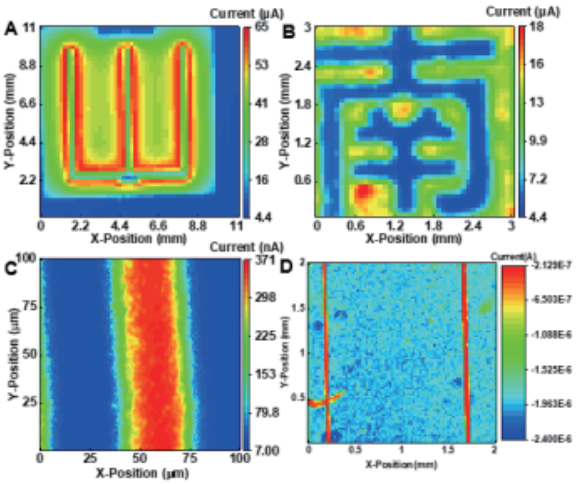


图2(A)硅光电池的光电流图像;(B)打印“南”字的光电流图像;
(C)覆盖有光栅条的硅光电池的光电流扫描结果;
(D)$Cu_2ZnSn(S, Se)_4$太阳能电池的光电流扫描图像

技术指标/优势

传统振镜驱动光束的扫描方式存在扫描范围受限和图像畸变问题。本项目采用光学组件扫描方式, 成像范围大(大于10×10mm²)、空间分辨高(2μm)、稳定性高、成本低, 高细分模式可实现亚微米级几何定位, 整体结构简单, 极大降低了扫描成像系统的成本。

应用领域和市场前景

本产品“基于扫描成像的光电器件大面积高分辨缺陷检测系统”面向大面积光电器件光电响应一致性的检测需求, 有望在光电探测器、太阳能电池开发等领域获得应用。

基于盲源分离从多角度投影提取聚焦层的DBT重建

成果完成人	喻春雨	职称	副教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	生物医学工程		高技术领域（三级）	医学图像处理	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术	二级学科	信息处理技术	
应用行业	用于乳腺癌检测的新型医学三维影像重建				
核心专利号	PCT/CN2024/135333；CN202411719632.3；CN202311606533.X；CN202010668016.5；CN202010977821.6				

成果概述

乳腺癌是全球女性致死率最高的恶性肿瘤之一，早期精准诊断对降低死亡率至关重要。数字乳腺层析合成摄影（DBT）作为一种新兴三维成像技术，能够通过有限角度投影重建乳腺断层图像，减少组织重叠问题，提升微小钙化点、囊肿等病灶的检出率。然而，DBT商用重建算法（滤波反投影FBP）存在伪影严重、图像对比度低、重建速度慢等瓶颈，影响临床诊断效率。

提出了一套创新的DBT重建技术，通过三维坐标变换优化投影配准精度，结合压缩感知（CS）与盲源分离（BSS）理论实现快速高质量重建。该技术有效解决了传统方法因忽略成像几何关系导致的伪影增强、边缘模糊等问题，显著提升了图像清晰度与病灶聚焦能力，同时大幅缩短重建时间，为乳腺癌早期筛查和精准诊断提供了高效可靠的技术支持，优于国际上商用重建方法FBP。

关键技术/创新要点

1、三维坐标变换配准技术

提出基于等中心模型的多角度投影三维坐标变换方法，在x-y-z三个方向进行位移校正，克服传统二维校正的局限性。通过几何关系精确计算不同深度层的投影位移量，实现放大率标准化，使重建层结构更聚焦，伪影显著减少。

2、WASOBI&CS融合加速重建

将权值调整二阶盲辨识（WASOBI）与压缩感知（CS）结合，利用Symlet小波基对投影数据进行稀疏表示，通过正交匹配追踪（OMP）重构信号。该方法在保留WASOBI高精度分离能力的基础上，数据处理时间减少，内存占用降低。

3、梯度插值与背景分割预处理

采用基于梯度的插值算法填补缺失数据，结合SAM语义分割模型快速分离乳腺组织与背景，避免传统插值导致的边界模糊问题。预处理阶段通过傅里叶域滤波与直方图均衡化增强图像对比度，提升后续重建效率。

4、自回归源移动平均动态优化

在重建阶段引入自回归模型（AR）与滑动平均算法，动态估计信号特性，优化协方差矩阵联合对角化过程，使病灶区域信噪比（PSNR）与对比度噪声比（CNR）均显著提高。

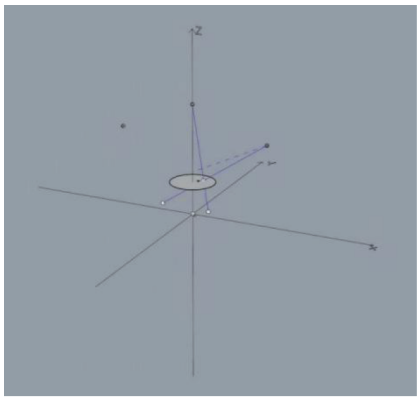


图1 DBT扫描三维简单示意图

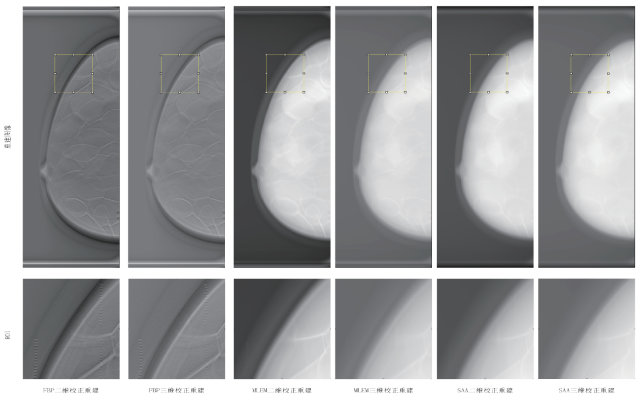


图2 所提出三维位移变换与目前二维坐标变换效果对比

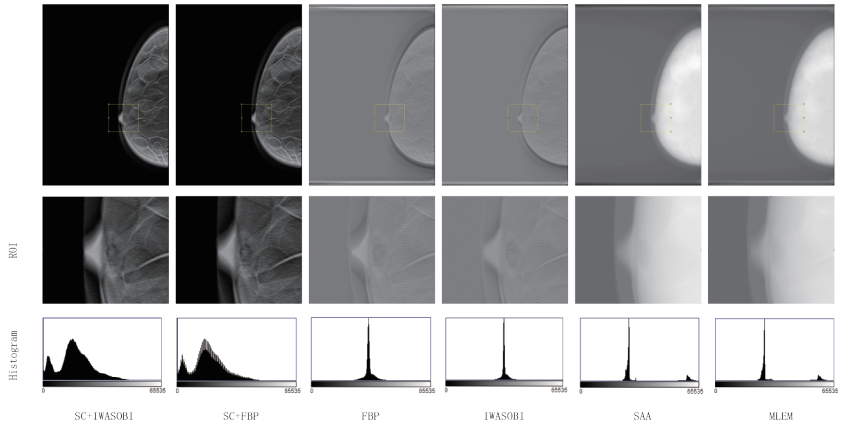


图3 所提算法SCI+WASOBI与经典重建算法的对比(ROI、直方图)

技术指标/优势

技术优势:

1.高精度:三维坐标变换与动态优化算法使病灶边缘清晰度提升,同时伪影扩散函数(ASF)达成理想的曲线变化。

2.低伪影:通过稀疏表示与盲源分离,金属伪影显著减少;

3.高效率:GPU加速预处理与CS稀疏化技术,支持实时重建,满足临床快速诊断需求。

发明专利授权:

1.基于三维坐标位移的DBT重建方法、介质与电子设备(CN202411719632.3)

2.一种多角度投影配准的DBT重建法(CN202311606533.X、PCT/CN2024/135333)

3.一种基于权值调整二阶盲辨识的数字乳腺层析合成摄影的重建方法(CN202010668016.5)

4.基于非参数核密度估计的数字乳腺层析合成摄影重建方法(CN202010977821.6)

计算机软件著作权:

1.数字乳腺断层摄影(DBT)重建与增强处理系统 V1.0(2025SR0409146)

应用领域和市场前景

本技术可广泛应用于乳腺癌筛查、术前病灶定位及术后疗效评估，尤其适用于国人致密型乳腺组织的精准成像。其核心优势包括：

临床诊断：为医生提供高对比度、低伪影的断层图像，助力早期微小病灶识别；

科研支持：结合仿真乳腺模型与金属球标记，可用于成像算法优化与设备性能评估；

产业化潜力：适配主流DBT系统（如Hologic），通过软件升级即可部署，市场推广成本低。

随着全球乳腺癌筛查普及率提升，DBT技术逐步替代传统二维乳腺摄影，预计未来五年市场规模将突破百亿元。本成果通过算法创新与工程优化，在提升诊断准确性的同时降低硬件依赖，具备显著的临床应用价值与商业竞争力。

直写印刷单晶组装钙钛矿X射线探测器

成果完成人	徐修文	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	辐射场所剂量监测、工业无损检测、医学成像				
核心专利号	202311372174.6				

成果概述

X射线探测器在医学成像、工业无损检测、安检和辐射剂量监测等领域具有重要的应用。近年来，钙钛矿因兼具较大的X射线吸收系数、优异的载流子传输特性和溶液可加工性等优势，重启了停滞了近二十年的新型X射线直接探测材料的研究，被认为是下一代直接型X射线探测器的理想材料。然而，兼容商业电子读出背板（如TFT等）的高质量钙钛矿厚膜的可控制备是限制其发展的关键瓶颈难题。有鉴于此，本团队自主发展了一种浆料直写印刷（direct-ink writing）钙钛矿厚膜制备工艺，实现了钙钛矿与TFT阵列的集成，率先研制出单晶组装钙钛矿X射线面阵探测器。该探测器展现出具有世界先进水平的X射线探测性能，实现了近乎TFT理论极限的X射线成像分辨率。

关键技术/创新要点

当前钙钛矿X射线面阵探测器均是基于其多晶厚膜，存在材料缺陷密度高等固有限制，从而影响了探测器的综合性能。鉴于此，本团队自主研发了一种新型的直写印刷钙钛矿工艺（原料利用率达100%），率先报道了具有独特单晶组装形貌的钙钛矿厚膜（图1）。

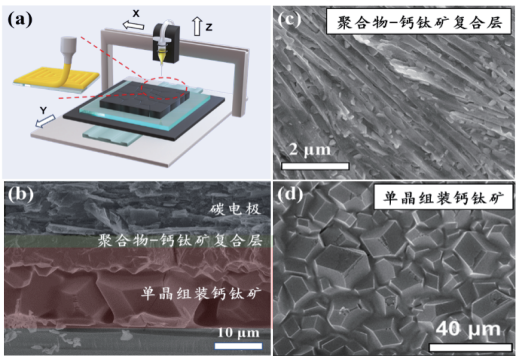


图1 直写印刷单晶组装钙钛矿厚膜示意图

与传统多晶钙钛矿由取向各异的晶畴组成不同，单晶组装钙钛矿的晶粒均是具有明确晶面的小尺寸单晶，因此展现出比多晶钙钛矿低4个量级的缺陷密度；尽管较之单晶块体，其缺陷密度较高，但单晶块体难以实现大尺寸制备（图2），因此，本团队所研制的单晶组装钙钛矿厚膜是当前钙钛矿X射线面阵探测器突破其根植于多晶特性上性能瓶颈的最佳选择。

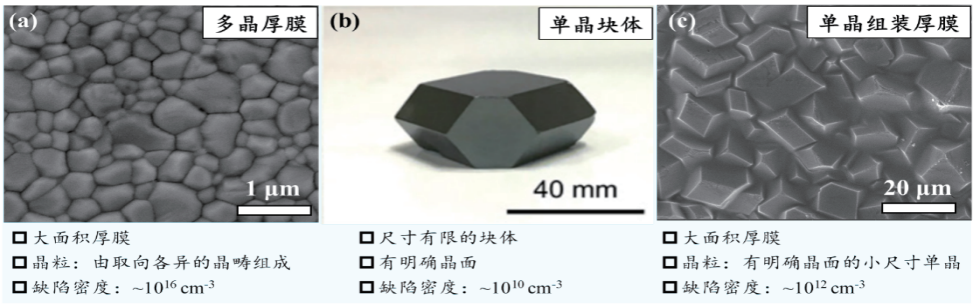


图2 不同材料形态的钙钛矿对比

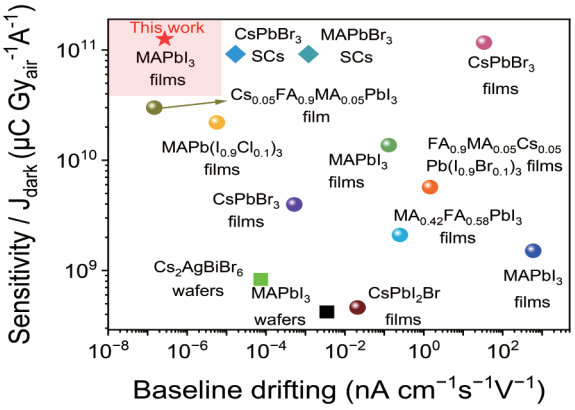


图3 单晶组装钙钛矿X射线探测器关键性能与现有报道对比

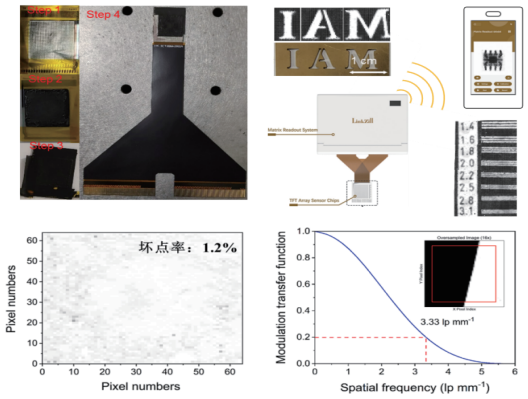


图4 单晶组装钙钛矿与商业TFT集成制备X射线面阵探测器

受益于单晶组装钙钛矿本征优异的光电性质，所制备的单像素X射线探测器展现出世界先进水平的综合性能。同时，基于商业TFT电子读取背板（像素尺寸：150μm）的单晶组装钙钛矿面阵探测器展现出1.2%的坏点率，并实现了对不同物体的X射线成像，展现出近乎TFT理论极限的成像分辨率（3.3 lp mm^{-1}），如图3-4所示。

技术指标/优势

（1）暗电流：100 nA cm^{-2}，灵敏度：11412 μC Gy_{air}^{-1} cm^{-2}（比商用非晶硒探测器高20倍）；

（2）探测低限：114.2 nGy_{air} s^{-1}（医学成像标准：< 5 μGy_{air} s^{-1}）；

（3）基线漂移：0.27 $fAcm^{-1}$ s^{-1} V^{-1}（当前钙钛矿X射线探测器最先进水平）；

（4）面阵探测器坏点率：1.2%；空间分辨率：3.3 lp mm^{-1}（150 μm像素TFT的理论极限）。

应用领域和市场前景

该成果在X射线高灵敏探测与高分辨成像领域具有广阔的前景，可用于辐射场所剂量监测、工业无损检测、医学成像和安检等多个应用场景。截止2023年，全球X射线探测器市场规模已达220.75亿元，并呈现出持续增长的发展态势。

具有强伸缩性的柔性自供电可监测人体运动信号的肌肉贴

成果完成人	李巍	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	敏感元器件与传感器	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	可穿戴传感设备				
核心专利号	CN119279568A				

成果概述

随着智慧体育与康复医疗的快速发展，实时监测人体运动信息已成为优化运动表现与健康管理的核心需求。传统监测设备（如智能手表或专业硬质传感器）往往存在穿戴不适、需外部供电、灵敏度低以及无法精准贴附复杂肌肉群等局限。本成果提出了一种基于铁电驻极体纳米发电机技术的新型柔性自供电肌肉贴。该器件采用三层结构，以含有随机分布孔洞的高分子聚合物Ecoflex作为功能层，结合激光诱导石墨烯（Laser-Induced Graphene, LIG）作为电极层。关键技术在于通过掺杂无水乙醇并在高温固化、高压极化后，使材料内部形成巨型偶极子，从而获得良好的压电驻极体特性。基于高拉伸性铁电驻极体纳米发电机（Highly Stretchable Ferroelectret Nanogenerator, HS-FENG），该成果成功解决了柔性传感器在强拉伸状态下保持高灵敏度与自供电稳定性的难题，技术水平处于可穿戴柔性电子领域前沿。

关键技术/创新要点

1. 自供电铁电驻极体发电机技术

通过将高分子聚合物Ecoflex与无水乙醇按50:1的质量比混合、高速搅拌并在135℃下固化，基底内部生成了大量大小不一、随机分布的孔洞（图1）。在20kV高电压极化处理后，孔洞内部形成高度定向的巨型偶极子，从而使非极性高分子材料获得压电驻极体特性。

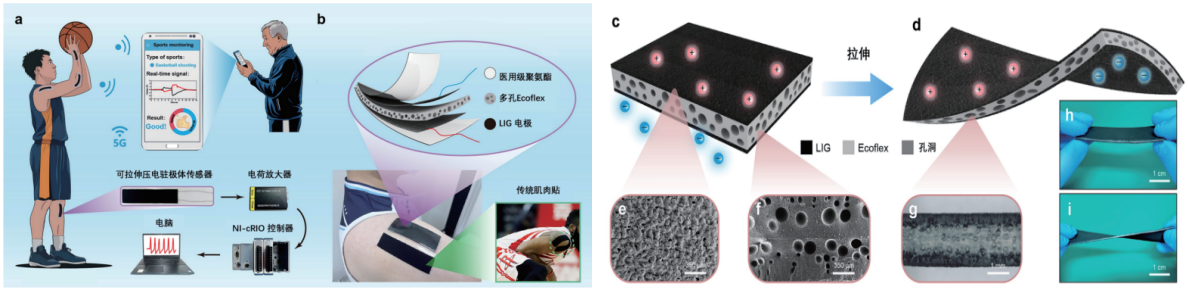


图1. 基于HS-FENG的智能运动肌内效贴应用。(a)篮球运动员佩戴智能肌内效贴采集运动信号、教练员无线监测指导的未来应用场景；(b)传统与智能肌内效贴的对比及封装后智能肌内效贴的结构示意图；(c)(d)分别为松弛初始状态、拉伸扭转变形下HS-FENG的结构示意图；(e)LIG电极表面SEM 图像；(f)HS-FENG 多孔结构的SEM 截面图；(g)HS-FENG三层夹心结构的光学显微截面图；(h)(i) 分别为松弛状态、外力变形下HS-FENG的实物照片。

2. 柔性激光诱导石墨烯电极制备技术

针对弹性Ecoflex与传统金属电极力学匹配的难题，本技术利用二氧化碳激光切割机对聚酰亚胺（Polyimide，PI）薄膜进行原位灼烧，制备出“绒状”结构的激光诱导石墨烯（图2）。这种“森林”状石墨烯电极在大幅拉伸和扭曲状态下仍能维持良好的电导通性，进一步强化了器件整体的拉伸极限与耐久性。

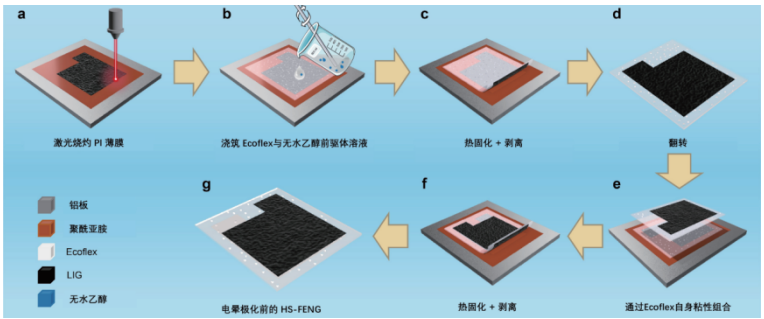


图2. HS-FENG 的制备流程示意图。(a) CO_2激光刻蚀聚酰亚胺薄膜制备激光诱导石墨烯（LIG）图案；(b) 滴铸充分混匀的 Ecoflex - 无水乙醇混合溶液；(c) 薄膜热固化后从基底剥离；(d) 翻转后的 HS-FENG 上层结构示意；(e) 固化上层与同结构未固化底层键合；(f) HS-FENG 整体热固化后从基底剥离；(g) 极化前 HS-FENG 的多层含孔隙结构示意图。

3. 多维高灵敏压电响应机制

传统硬质压电材料仅具纵向压电效应，而常规柔性压电聚合物延展性差导致横向响应极弱。本成果制备的柔性铁电驻极体同时兼顾了纵向与横向压电效应。当肌肉或关节发生多维度的复杂形变（拉伸、扭曲）时，孔洞结构由球体变为椭球体引发偶极矩变化，从而产生高精度的压电信号，大幅提升了运动信号监测的灵敏度。

4. 灵敏度定量调控机制

该器件的对外部压力的灵敏度与人造孔洞的数量紧密相关。通过精准控制无水乙醇的添加量，可灵活控制铁电驻极体内孔洞的密度，从而实现对纳米发电机压电效应强度的有效调控，以适配不同物理场景对传感器灵敏度的差异化需求。

技术指标/优势

（1）技术优势：

·极致柔性与强伸缩性：能够像人造电子皮肤一样无缝贴附于人体关节或肌肉表面，不限制肢体活动，有效避免姿态错误造成的运动伤害。

·低碳自供电：无需电池等外部供电模块，显著降低了系统的体积、功耗及维护成本，具有极高的环境适应性。

·高防护与生物相容性：外部采用聚氨酯（PU）医用黏性透明防水薄膜封装，既保证了稳定的电气性能，又具备防汗防水功能，贴附稳定性强。

·低成本制造：采用常规的高分子聚合物与PI薄膜，结合激光切割与加热固化工艺，材料成本低且加工流程具备规模化量产潜力。

（2）知识产权：该项核心技术已成功申请中国国家发明专利（专利名称：具有强伸缩性的柔性自供电可监测人体运动信号的肌肉贴，公开号：CN119279568A）。

应用领域和市场前景

(1)应用领域:

该成果的核心应用场景涵盖体育竞技与大众健身,通过贴附于运动员关键发力部位,实时比对标准动作数据进行姿态修正;在医疗康复领域,可为残障人士或骨科术后患者提供持续的康复训练量化评估。此外,基于其优异的力变化传感特性,该技术还可向外延伸应用于动物行为学监测及海底设备稳定性勘测等特种微机电应用场景。

(2)市场前景:

当前,随着运动健康理念的普及和智慧医疗的深入发展,市场对高精度、无感化、自供电的可穿戴电子设备需求呈井喷趋势。本成果有效解决了传统运动监测系统传感器繁多、连接复杂、灵敏度低的核心痛点。凭借其成本低、耐用性强且兼顾物理防护与信号监测的双重功能,该肌肉贴有望在运动消费电子、专业医疗器械及物联网智能穿戴市场实现大规模商业转化,展现出广阔的市场蓝海前景。

柔性可重构多波束透射/反射天线阵列

成果完成人	于映	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	片式和集成无源元件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	射频通信与天线				

成果概述

随着5G技术、卫星通信技术和移动通信技术的快速发展，可重构超表面作为一种新型的二维人工电磁结构，在电磁信息调控上具有高效率、低成本和低功耗等优势，因而备受研究人员的关注。可重构超表面仅需在单元结构上加载PIN二极管、变容二极管或其它有源元件，通过MCU，FPGA等的控制实现多种电磁调控功能，在电磁辐射和散射调控上展现出优异的特性。透/反射阵天线是一种空间馈电架构，若利用可重构超表面作为辐射口径，可实现动态波束赋形功能。这类阵列天线能够直接应用于现有通信系统中，而无需昂贵和复杂的收发（Transmitter/Receiver,T/R）组件。相比于传统的MIMO天线，它在成本、功耗和系统复杂性上都具有明显优势。

目前所推出的基于二维人工电磁结构的透/反射阵是采用硬质基板材料来实现的，对于各种不规则的表面，基于柔性材料的透反射阵列具有更大的灵活性，柔性可重构透/反射阵列可共形于各种形状的曲面，具有更多的应用场景。我们采用性能稳定、易制备的PDMS材料作为阵列天线的基板，将透反射阵列通过印刷的方式制备在柔性基板上，基板材料的柔性程度可通过工艺进行调节，同时还可以将PIN二极管制备到透反射阵列中，从而实现柔性阵列天线的透/反射多波束的扫描。

关键技术/创新要点

柔性可重构多波束透/反射阵列天线关键技术为：

采用智能超表面构成透/反射阵列，并通过PIN二极管形成1位可调相位阵列，从而实现透/反射波束的±60°的波束扫描，采用相位合成的方法实现多波束，由此可实现透/反射多波束的扫描功能。

采用性能优良的柔性介质基板如PDMS，PI等，通过印刷技术将各阵列单元印制在柔性基板上，并将可调元件PIN二极管连接在各阵列单元所需位置，通过引线引出与控制电路相连，实现1位波束可重构的柔性透/反射多波束阵列天线。

技术指标/优势

与通常采用硬质基板制备的天线阵列相比，基于智能超表面的柔性可重构透/反射天线阵列具有相同的波束扫描范围和扫描精度，其多波束的扫描范围可达到±60°，弯曲中心角度在45°时与平直状态下的扫描精度相当；同时还具备了贴附于各种规则/不规则表面的特性，应用场景多，灵活度高。

应用领域和市场前景

柔性可重构透/反射天线阵列具有多波束的宽扫描范围，适用于5G、6G通信、卫星通信、舰船通信、导弹制导、无人机通信、可穿戴设备等各类军事和民用场景，对于一些不规则的难以贴装天线的物体表面具有特别的优势，不但可以通过天线进行通信，还可以实现波束的扫描以实现不同位置和不同角度的通信，为各类应用的实时通信提供更大的灵活性。

可拉伸人工磁导体快速制备与低SAR天线集成技术

成果完成人	李若舟	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	片式和集成无源元件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）				

成果概述

可穿戴设备的普及使其天线靠近人体工作时的电磁辐射比吸收率（SAR）成为重要的健康安全需要考虑的问题。本团队自主研发了一种基于液态金属的激光直写图案化技术，用于制备可拉伸的人工磁导体（AMC）结构，并将其与超宽带柔性天线集成。该技术利用高精度纳秒激光，在覆有液态金属薄膜的柔性PDMS基板上进行高速、精密的烧蚀与图案化，直接制造出周期性结构。所得的可拉伸AMC如同智能“电磁反射镜”，在3.4至8GHz的超宽带内，能将天线辐射波有效导向远离人体的方向，从而将SAR值降低超过一个数量级，且不影响天线自身的辐射效率。整个系统柔韧性优异，在经受50%拉伸或弯曲时性能保持稳定，为实现下一代高安全、高舒适性的可穿戴无线通信提供了关键技术。

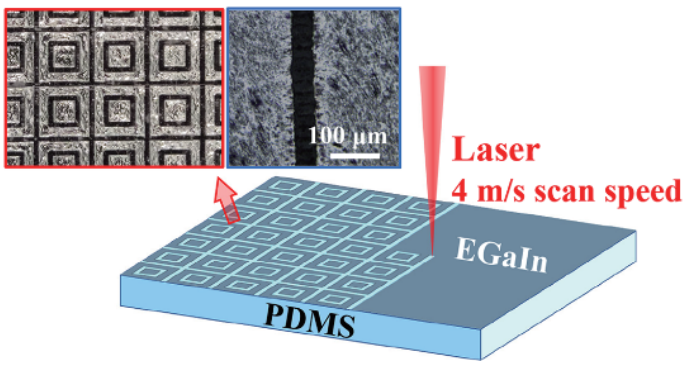


图1 激光制备工艺示意图

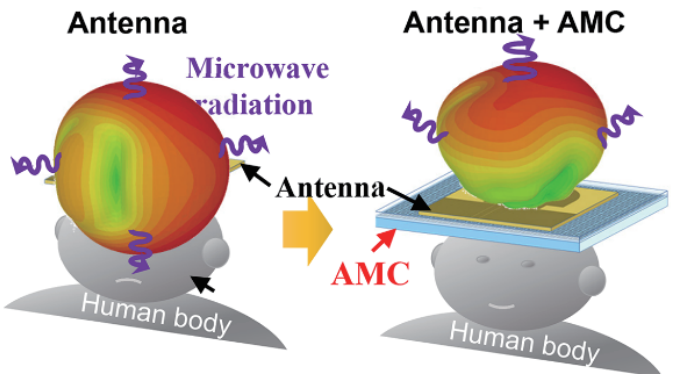


图2 低SAR概念图

关键技术/创新要点

核心创新在于“材料-工艺-设计”的协同突破。关键技术首先体现在选择了兼具高导电性与流体般形变能力的液态金属，这为制造可拉伸电极奠定了基础。其次，我们采用了无需掩模的激光直写工艺，聚焦的纳秒激光可对液态金属薄膜进行高速、选择性的精密烧蚀，直接实现复杂微结构的图案化，该方法比传统印刷或蚀刻工艺更灵活、精度更高。最后，我们创新性地将这种工艺制备出的可拉伸周期性结构设计为人工磁导体，通过其独特的电磁特性重构天线辐射方向图，将全向辐射转变为定向背向辐射，从而在源头屏蔽对人体辐射。整个过程实现了从柔性导电材料、到精密增材制造、再到高性能电磁结构设计的全链条创新。

技术指标/优势

本成果的主要技术指标包括：在3.4-8GHz的超宽带范围内工作，峰值SAR降低36.5%，整体降低超过10倍；激光加工精度达64μm，扫描速度4m/s；具备优异的机械稳健性，在50%拉伸应变或25mm弯曲半径下，SAR降低特性与天线性能（低S11）保持不变。与同类技术相比，其综合优势显著：一是安全与性能的统一，在大幅降低对人体辐射的同时，未牺牲天线自身的宽带匹配与辐射效率；二是真正的柔性可拉伸，突破了传统刚性或仅可弯曲AMC的局限，可贴合人体曲面适应动态形变；三是工艺高效精密，激光直写无需掩模，步骤简捷，适用于柔性电子元件的快速定制化制备。

应用领域和市场前景

该成果为需要高安全性无线连接的可穿戴与柔性电子设备提供了直接解决方案。其首要应用场景是智能穿戴设备，如智能手表、腕带、智能服装等，可显著提升其内置天线的电磁安全等级。其次，在柔性医疗电子领域，可用于表皮健康监测贴片、植入式设备等，确保其无线通信链路对人体更安全。此外，在特殊柔性平台如可变形机器人、柔性传感器网络中也有应用潜力。随着5G/6G、物联网及个性化健康管理的快速发展，市场对高性能、高生物兼容性柔性无线设备的需求激增。本成果提供的“高性能柔性天线与内置电磁防护”一体化方案，直击可穿戴设备向更安全、更舒适、更集成演进的核心需求，不仅能够提升现有产品的竞争力，更有望催生新一代可适应各种形变的无线设备，具有广阔的产业化前景和市场价值。

面向边缘检测应用的电编程相变纳米光子电路

成果完成人	王磊	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	神经形态计算				

成果概述

全光集成相变存储器不仅在传统存储领域受到关注，在神经形态计算等新兴领域也展现出巨大潜力。然而，传统全光调控方案存在可扩展性弱、编程复杂等问题，限制了其向大规模系统级应用的发展。

本成果在前期提出的交叉电极与微加热器集成相变光子电路基础上，建立了完整的电-热-相变多物理场模型，系统评估了器件的编程性能。仿真结果表明，该器件具有超低编程能耗、超快开关速度以及多级存储能力等优势。进一步地，利用该器件的多级光传输特性，构建了系统级光子行为模型，成功实现了手写数字图像的边缘检测功能，并基于此搭建了光子卷积神经网络，在手写数字识别任务中取得了与软件算法相当的识别精度。该成果为大规模片上光子计算芯片的实用化开辟了新路径。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于建立了完整的电-热-相变多物理场模型，系统揭示了交叉电极与微加热器集成相变光子电路的性能优势，并首次将其应用于边缘检测任务。器件采用铂交叉电极与氧化铟锡微加热器集成结构，当在行电极与列电极之间施加电脉冲时，微加热器产生焦耳热，热量传递至相变材料层引起其晶态与非晶态之间的转变，从而改变材料的折射率，进而影响通过波导耦合的光信号强度。图1展示了器件在电脉冲激励下的温度分布情况，可以看出最高温度出现在定向耦合器的尖锐边缘处，这是由于该区域电压梯度较大，电场更强，有利于形成局部热点，实现高效的相变调控。

通过优化加热层与相变材料层的厚度以及脉冲参数，可获得优异的编程性能。尤为重要的是，该器件具备良好的多级存储能力。如图2所示，通过调节编程脉冲的幅值，可以获得从部分结晶到完全结晶的多种中间结晶状态，结晶从边缘开始逐渐向中心扩展。不同的结晶分数对应不同的光传输率，如图3所示，多种稳定的传输状态为实现高精度矩阵乘法提供了基础。

基于上述多级特性，本成果进一步探索了其在边缘检测中的应用。如图4所示，利用该器件构建的光子电路，成功实现了对MNIST数据集中手写数字“4”的边缘检测，通过阈值分割可清晰呈现数字的完整轮廓，验证了其在神经形态计算领域的应用潜力。

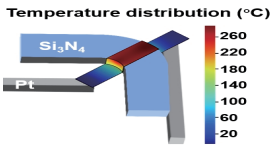


图1 器件在电脉冲激励下的温度分布云图

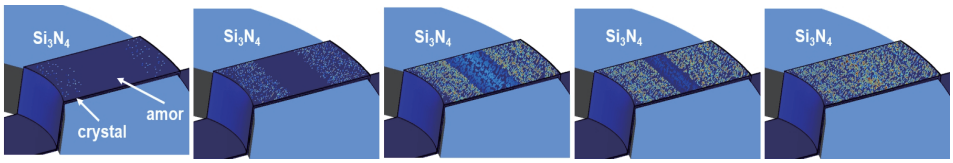


图2 不同编程脉冲幅值下获得的多种中间结晶状态示意图

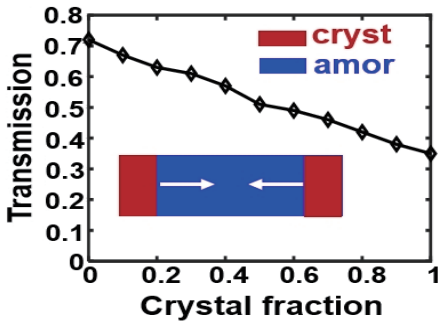


图3 不同结晶分数对应的光传输率变化曲线

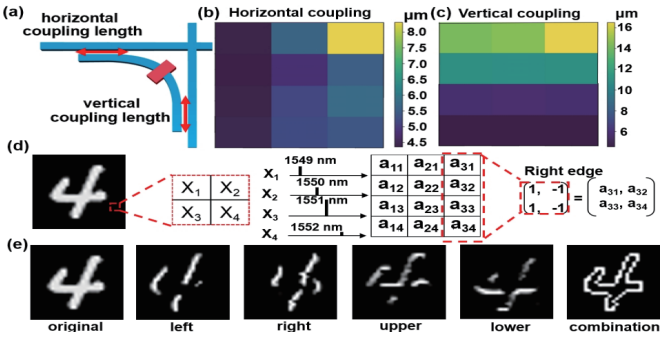


图4 手写数字“4”的边缘检测结果及阈值分割后图像

技术指标/优势

本成果提出的相变光子电路架构在多项关键指标上展现出明显优势。在编程能耗方面，通过优化加热层材料与结构设计，结晶能耗和熔化能耗均显著低于已报道的多种微加热器方案。在开关速度方面，采用电热编程方式，相变材料可在纳秒量级完成状态切换，响应速度快。在多级存储能力方面，通过调节电脉冲参数可获得多个稳定的中间结晶状态，实现光传输率的连续可调，为高精度光学矩阵乘法提供了基础。在系统可扩展性方面，采用交叉电极结构实现了随机寻址功能，可方便地扩展至大规模阵列。基于该器件构建的光子卷积神经网络，在手写数字识别任务中取得了与软件算法相当的识别精度，验证了其在实际应用中的可行性。

应用领域和市场前景

本成果可为光子神经形态计算芯片、光学图像处理系统以及可重构光子信号处理平台等领域提供关键技术支撑。在神经形态计算方面，基于相变材料的多级光传输特性，可构建光子突触阵列，结合光子神经元的超快响应特性，实现高并行度、低能耗的神经网络计算，适用于图像识别、目标检测等人工智能任务。在光学图像处理方面，该器件可直接在光域完成边缘检测等图像预处理操作，避免光-电-光转换带来的延迟和能耗，适用于实时机器视觉、自动驾驶感知等场景。在可重构光子信号处理方面，该器件的电编程随机寻址能力，可用于构建可编程光子滤波器、光开关阵列等，提升光通信系统的灵活性和可重构性。随着人工智能算力需求的持续增长和光子计算技术的不断成熟，具备高可扩展性和低能耗优势的电编程相变光子技术展现出良好的成果转化潜力。

基于相变光子集成电路的可编程全光非线性激活函数器件

成果完成人	王磊	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	神经形态计算				

成果概述

光子神经网络因其超快计算速度、大带宽和并行处理能力，成为人工智能硬件加速器的重要发展方向。然而，与成熟的电子非线性激活函数相比，高效且易于实现的全光非线性激活函数进展缓慢，制约了全光神经网络的发展。

本成果提出了一种基于硅基微环谐振器与硒化锑（Sb_2Se_3）相变材料集成的可编程、低损耗全光非线性激活函数器件，采用氧化铟锡作为微加热器实现电编程调控。通过自研的相变动力学与光学耦合模型，成功模拟了Sb_2Se_3的相变行为，并利用器件在不同相变程度下的光学响应差异，实现了ELU、ReLU和径向基函数三种不同非线性激活函数。在Fashion-MNIST服饰数据集分类任务中，基于该器件构建的光学神经网络取得了与经典激活函数相近的识别精度。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于将Sb_2Se_3相变材料与硅基微环谐振器相结合，通过电热编程实现三种不同非线性激活函数的可重构切换，解决了全光神经网络中非线性功能硬件实现的难题。器件结构如图1所示，微环谐振器上覆盖Sb_2Se_3薄膜，其上方为氧化铟锡微加热器。当对电极施加电脉冲时，微加热器产生焦耳热，诱导Sb_2Se_3发生晶态与非晶态之间的转变，从而改变微环的有效折射率，进而调控器件的非线性光学响应。

通过自研的电-热-相变多物理场模型，系统优化了Sb_2Se_3薄膜厚度。如图2a至图2c所示，当Sb_2Se_3厚度为20nm时，器件在不同结晶程度下呈现出清晰可辨的输入-输出响应曲线，且与经典激活函数形状高度吻合。图2f展示了随着Sb_2Se_3结晶程度增加，微环谐振波长发生红移，但器件传输特性保持稳定，为可编程激活函数提供了基础。

基于上述优化，通过精确调控Sb_2Se_3的结晶程度，可分别实现三种不同的非线性激活函数。如图2g所示，当Sb_2Se_3处于非晶态时，器件输出响应与ELU激活函数高度吻合；当结晶程度达到10%时，器件呈现ReLU激活函数特性，输出在低输入功率时保持为零，超过阈值后线性增长（图2h）；当结晶程度达到20%时，器件输出呈钟形曲线，与径向基函数特性一致（图2i）。由于Sb_2Se_3相变材料具有非易失性，激活函数配置完成后无需额外功耗维持状态，具备低功耗优势。

将该器件构建的光学神经网络应用于Fashion-MNIST服饰分类任务，如图3b至图3d所示，三种光学激活函数均取得了与经典激活函数相近的识别精度，最高达到88.26%，验证了其在实际应用中的可行性。

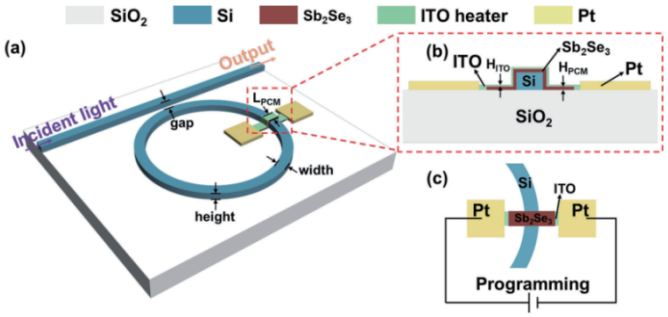


图1 集成透明微加热器的相变光子微环谐振器三维结构及横截面示意图

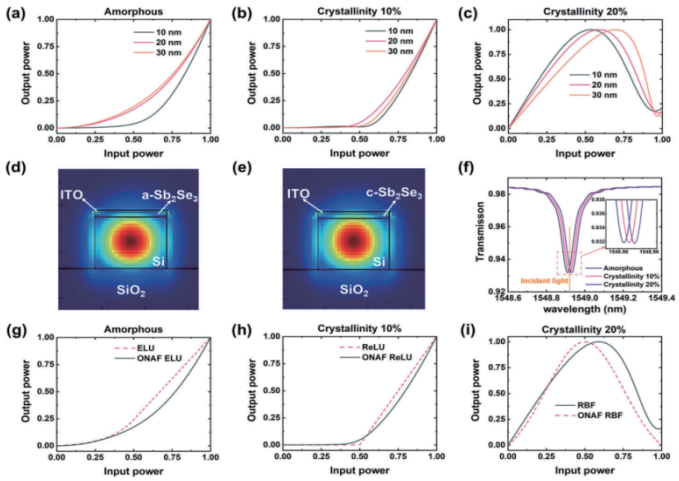


图2 新型相变材料在不同结晶状态下模拟多种全光非线性激活函数的输入输出响应曲线

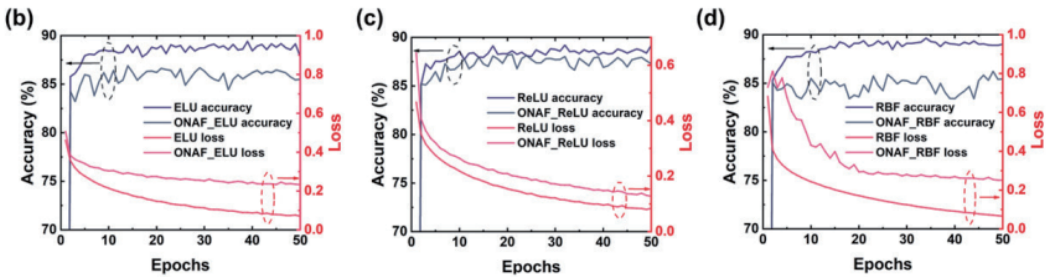


图3 基于不同激活函数的网络训练精度与损失曲线

技术指标/优势

本成果提出的全光非线性激活函数器件在多项关键指标上展现出明显优势。在可编程性方面，通过电热调控Sb_2Se_3的结晶程度，可在同一器件上实现ELU、ReLU、径向基函数三种不同激活函数的切换，而多数已报道方案仅能实现单一功能。在功耗方面，采用电热编程方式，编程能耗较低，且由于Sb_2Se_3相变材料具有非易失性，激活函数配置完成后无需额外功耗维持状态，相较需要持续供电的易失性方案具有显著优势。在可扩展性方面，采用交叉电极与微加热器集成架构，便于扩展至大规模阵列，实现多器件并行配置。在光学损耗方面，Sb_2Se_3在通讯波段吸收系数极低，相比传统相变材料（如GST）显著降低了器件插入损耗。基于该器件构建的光学神经网络，在Fashion-MNIST分类任务中取得了与经典激活函数相当的识别精度，验证了其在实际应用中的可行性。

应用领域和市场前景

本成果可为全光神经网络芯片、光子人工智能加速器以及可重构光子信号处理平台等领域提供关键技术支撑。在全光神经网络方面，该器件可作为非线性激活层的关键元件，与光子矩阵乘法单元协同工作，构建完整的全光神经网络，用于图像识别、语音处理等人工智能任务，充分发挥光子计算的高带宽、低延迟优势。在光子人工智能加速器方面，该器件的可编程特性和非易失性使其适用于边缘端AI推理场景，可在低功耗条件下完成复杂的非线性变换。在可重构光子信号处理方面，该器件可用于构建可编程光子滤波器、光脉冲整形器等，提升光通信和光信号处理系统的灵活性。随着人工智能算力需求的持续增长和光子计算技术的不断成熟，具备可编程、低功耗、非易失性优势的全光非线性激活函数器件展现出良好的成果转化潜力。

交互式智能终端显示系统

成果完成人	王德波	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	嵌入式软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	电力设备、充电桩设备、医用医疗设备、工业自动化设备、环保环监设备				

成果概述

本项目主要研发和生产工业交互式智能显示终端及其配套的上位机软件（HMI人机界面）。该智能显示终端主要是由TFT-LCD液晶模组、底板控制器和核心板（中央处理器）三部分组成。解决了客户在开发人机界面时研发难度大、开发周期长、成本高以及对研发人员专业能力要求高等诸多市场痛点。

关键技术/创新要点

项目关键技术：

（1）采用尖端芯片掩膜技术，大幅度提高硬件运算速度，嵌入式软件高度集成为GUS系统，实现客户零代码操作；

（2）采用ARM高速处理器，软硬件有机结合的方式，嵌入100多种功能算法，形成图形组态软件系统，实现智能化自主运行。

技术创新点：

（1）移植性好、开发周期短：本项目彻底打破了传统的显示理念，将客户控制和显示部分分离，客户无需更改自己的硬件平台和核心控制代码，也不必花太多的精力去选择并熟悉一个全新的研发环境，只需在原来的代码基础上增加串口发送接收函数，即可快速升级到新的平台。

（2）自主知识产权及壁垒：本项目的技术开发需要有相当专业的技术门槛和市场积累，资金投入大，有完整自主知识产权，自主研发了“NGUS”系统，很难被模仿和抄袭。

（3）界面友好、成本低：使用简便明了，稳定性强，实用性强，成本低廉，是传统常规工控机成本的10%~15%。

技术指标/优势

(1)集成度高、零代码实现:智能型平板显示终端集成了100多个功能的显示算法,引入了“宁和图形应用软件”的上位机,通过串口线就可以直接把智能终端连接到PC上进行调试仿真,给客户提供了一个方便简洁的调试演示平台,通过上位机软件参数配置使显示终端智能自主运行,客户产品显示功能上做到零代码编程,实现“傻瓜式”研发管理。

(2)效率高:能做到“即开即显”,不用安装其他方操作系统,无需长时间等待启动。用户界面程序实现了与硬件无关联性,具备良好的可移植性,一次开发,可以应用在多个产品平台,可建立UI设计的平台化,系列化。编译文件后PC自动生成工程文件,使用SD卡下载到智能终端中自动运行。

(3)移植性好、开发周期短:本项目彻底打破了传统的显示理念,将客户控制和显示部分分离出来,客户无需更改自己的硬件平台和核心控制代码,也不必花太多的精力去选择并熟悉一个全新的研发环境,只需在原来的代码基础上增加串口发送接收函数,即可快速升级到新的平台。

(4)界面友好、成本低:界面环境友好,使用简便明了,稳定性强,实用性强,编码工作量少。采用高速率ARM内核处理器,支持各种高清显示,支持文本、图形、动画等功能运算,且内置本地界面处理能力,深度挖掘资源研发,成本可以做到市场产品的40%,竞争力强。

应用领域和市场前景

本项目应用行业广泛,前景明朗,目标市场众多,如电力设备、充电桩设备、医用医疗设备、工业自动化设备、环保环监设备、消防安控设备、矿用设备、金融设备、车载设备、纺织印刷机械设备等等。

绿色溶剂体系合成深蓝光钙钛矿量子点及LEDs制备

成果完成人	陈淑芬	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	平板显示器件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	高端显示、照明、通信及下一代太阳能电池等领域				
核心专利号	ZL202210409019.6				

成果概述

钙钛矿量子点发光二极管(QLEDs)具有半峰宽较窄、颜色饱和度高、显示色域广(～140%)和可溶液加工等优点，被认为广色域、超高清显示的理想发光元件之一。目前，绿光和红光QLEDs的外量子效率(EQE)均已超过26%。然而，作为三基色之一的蓝光QLEDs，尤其是深蓝光QLEDs面临EQE低、光谱稳定性差和运行寿命短等问题。此外，小尺寸的蓝光钙钛矿量子点(PQDs)由于自身大的比表面积和表面的长链烷基配体，从而显著降低了QLEDs的器件性能。针对以上问题，本团队选用绿色无毒的乙酸乙酯作为不良溶剂，利用短链配体丙酸、叔丁胺和辛胺来钝化PQDs的表面，首次使用全绿色极性溶剂制备出深蓝光钙钛矿PQDs，所制备的PQDs发光峰位于454nm，PLQY为48.4%。进一步，并制备了相应的深蓝光LEDs，其EQE高达4.39%。这为实现高质量PQDs和高清全彩显示提供了一条环保且简易的设计思路。

关键技术/创新要点

绿色溶剂合成深蓝光PQDs：蓝光QLEDs是实现全彩显示的重要组成部分，但是蓝光PQDs存在比表面积较大和价带能级较深等问题。因此，为了实现高效稳定的QLEDs，本团队以短链的辛胺、丙酸和叔丁胺为配体，采用配体辅助再沉淀法在室温下合成了高质量的深蓝光PQDs，从而有效地钝化了PQDs表面的缺陷态，其具有优异的光物理性质和稳定性。

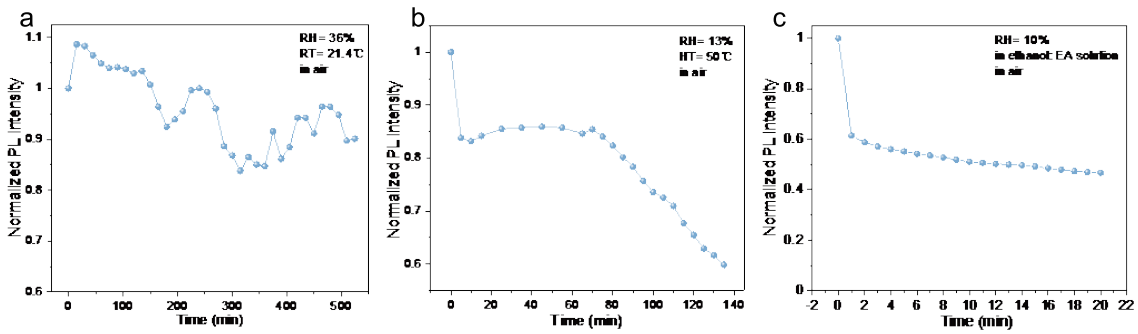


图1 深蓝光$CsPbBr_3$ PQDs在室温、高温和乙醇中的稳定性

所制备的PQDs在空气中存储8.7h后，其PL强度仍为初始的90%；在50℃下加热老化2.3h后，其PL强度仅降低为其初始的60%。此外，为了改善载流子注入平衡，进一步采用了PEABr为插入层，有效地降低了空穴注入势垒，从而平衡了载流子的注入，实现了EL峰位为454nm，最大EQE为4.39%的深蓝光QLEDs。

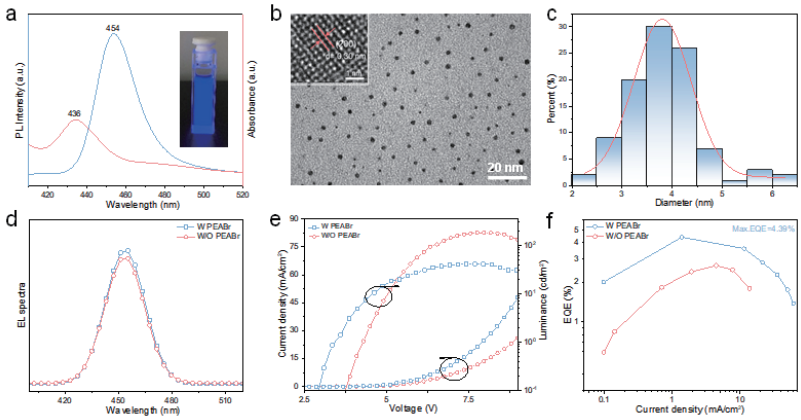


图2 绿色溶剂中合成$CsPbBr_3$ PQDs示意图，TEM图及器件性能图

Z型配体制备量子点：强极性溶剂容易诱导低维钙钛矿等副产物的形成，从而导致多峰发射、色漂移、低效的能量转移和较低的PLQY。同时，超小尺寸的蓝光钙钛矿材料由于自身较大的比表面积和表面胺类配体的富集，会形成大量的表面缺陷态，进一步导致量子点的PLQY低和稳定性较差。针对以上问题，我们进一步地选用非质子型的乙酸乙酯作为不良溶剂和分散剂，利用新型的短链Z型配体（辛酸锌）、辛胺来钝化钙钛矿量子点。其中，Z型配体能够与量子点表面的溴离子形成牢固的共价键，同时维持量子点表面的酸碱平衡，最终制备出了形貌均一、单分散、强限域效应的超小量子点。

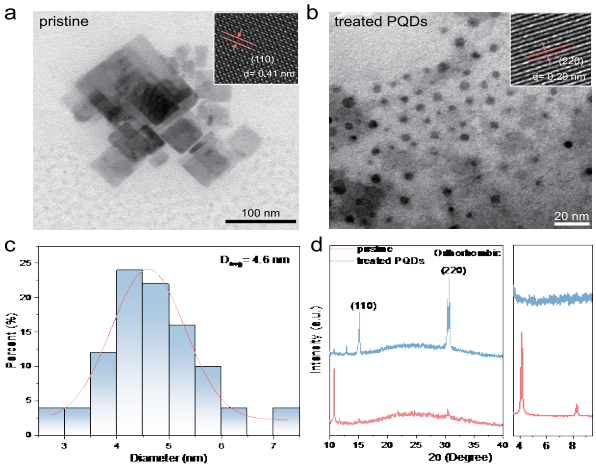


图3 量子点的形貌和结构

采用Z型配体所制备的量子点发光峰位为463nm，平均尺寸为4.60±0.06nm，PLQY高达73%。进一步，基于此材料制备了深蓝光LEDs，最终实现了EQE为5.46%的深蓝光钙钛矿LEDs，CIE坐标为（0.137，0.049），非常接近Rec. 2020蓝光标准，其半衰期寿命长达14min。

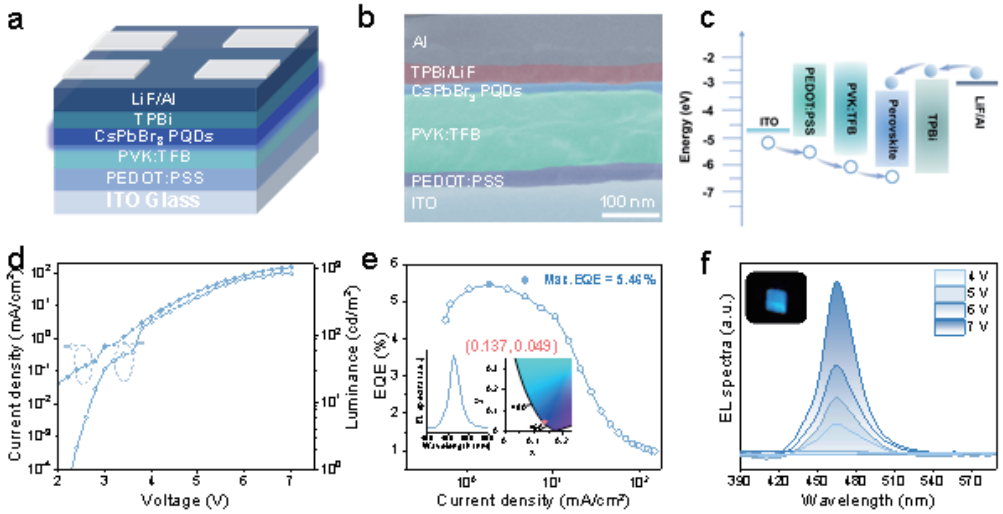


图4 Z型配体钝化合成$CsPbBr_3$ PQDs示意图和器件性能图

技术指标/优势

1、相关技术专利已获授权，具有自主知识产权（ZL202210409019.6）；

2、相关研究成果已发表于Advanced Optical Materials (Adv. Optical Mater. 2023, 11, 2300473)和ACS Applied Materials & Interfaces (DOI: 10.1021/acsami.4c01824)上；

3、器件性能为2023年深蓝光QLEDs的记录效率（Nano Energy 2024, 121, 109263）；

4、合成方法简单、节能环保、原料成本低、易于推广。

应用领域和市场前景

该成果可为超高清全彩显示、固态照明、太阳能电池、激光应用、光电探测器、生物荧光标记等领域提供高效的技术支持。由于绿色环保的溶剂体系，所制备的量子点墨水有望用于大规模、柔性印刷和喷墨打印技术。

应用于OLED显示的高效稳定发光墨水

成果完成人	刘利会	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	平板显示器件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	显示面板、照明				
核心专利号	ZL202011028710.7；ZL202011036817.6；ZL202110578972.9；ZL202011353496.2				

成果概述

有机发光二极管(OLED)显示具有自发光、响应速度快、轻薄、易于柔性制备等优点，目前已成为主流显示技术。喷墨印刷OLED具有低成本、大面积、高分辨等优势，有望取代传统真空热蒸镀制备技术。针对目前印刷OLED中发光油墨性能低、稳定性差的问题，本团队在印刷油墨流变性调控、液滴形成过程以及干燥成膜机理等方面进行了长期的研究，积累了丰富的理论和实践经验，具体技术如下：(1)开发的墨水粘度在0.1-100cP范围可调，存储稳定性超过180天，可满足不同型号的喷墨打印设备需求；(2)开发了具有交联能力的有机发光油墨，可成功解决多层印刷时的层间互溶问题。

关键技术/创新要点

高性能发光油墨：通过对发光油墨中溶剂的调控来实现油墨流变性的调节。甲苯、氯苯、对二甲苯和邻二氯苯作低沸点主溶剂，氯萘作高沸点主溶剂。不同主溶剂的墨水表面张力大小依次为邻二氯苯>氯苯>对二甲苯>甲苯，墨水的表面张力和粘度随着氯萘量的增加呈增长趋势，z值随着氯萘含量的增加而降低。基于此原理开发了一个普适性发光墨水体系，发展双极传输型二元小分子共主体，结合磷光染料配置了高效红、绿、蓝三色发光墨水，可用于印刷制备OLED显示器。

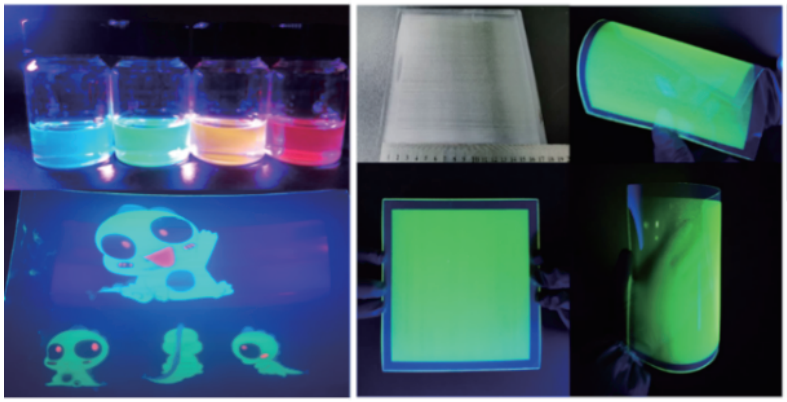


图1 发光墨水与喷墨印刷样品

可原位交联油墨:层间互溶现象是印刷制备多层OLED器件过程中的关键因素,一般可通过使用交叉溶剂或发展交联技术来解决。我们选用磷钼酸(PMA)对空穴传输材料聚乙烯咔唑(PVK)进行掺杂,使PVK在喷墨印刷成膜过程中发生交联,形成耐溶剂的交联层。在此基础上,我们选用邻二氯苯、环己基苯、苯甲酸丁酯和氯萘四种高沸点溶剂来调节马朗戈尼流,抑制咖啡环的形成。最后对该印刷制备的PVK薄膜进行耐溶剂测试,该PVK薄膜经过氯苯、邻二氯苯和甲苯等溶剂旋洗后膜层厚度不变,成功研发了适用于喷墨打印技术的原位交联空穴传输材料墨水配方。

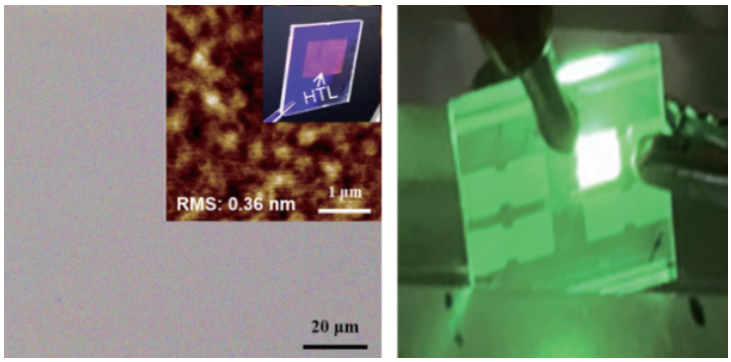


图2 喷墨打印交联PVK空穴传输层

技术指标/优势

1、相关技术专利已获授权,具有自主知识产权(ZL202011028710.7;ZL202011036817.6;ZL202110578972.9;ZL202011353496.2);

2、使用开发的交联空穴传输油墨和发光油墨喷墨打印的薄膜均一性好,可有效消除印刷显示屏中的mura现象;

3、方法简单、原料成本低、易于推广。

应用领域和市场前景

该成果可为印刷电子相关领域提供高效的技术支持,开发的高导电油墨在柔性显示面板领域具有很高的应用价值;掌握的喷墨打印大面积、厚度均一薄膜制备技术可应用至柔性面板制造领域。

一种本征可拉伸发光弹性体及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	半导体发光技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	高储能和关键电子材料制造，纳米材料制造，稀土新材料制造				
核心专利号	CN113444207B				

成果概述

本成果提出一种本征可拉伸发光弹性体及其制备方法与应用。该弹性体是由有机发光单体、(4-乙烯基苯基)甲醇、2-溴异丁酰溴、丙烯酸丁酯为原料，通过原子转移自由基聚合的方式制备而成。本成果以接枝共聚的方式，将具有拉伸性的弹性体长链聚合在发光单元构筑的刚性骨架上，制备得到的发光弹性体不仅具有超高拉伸性及断裂韧性，同时能够实现高效率的有机电致发光。本成果解决了传统的刚性发光材料无法实现可拉伸发光的问题，同时为可拉伸电子照明和可拉伸电子显示的应用奠定了基础；该类发光弹性体作为发光功能层材料，可应用于制备可拉伸柔性有机电致发光器件。

关键技术/创新要点

本成果提供一种本征可拉伸发光弹性体，并将其作为可拉伸功能层应用于可拉伸光电功能器件中。将弹性体长链通过原子转移自由基聚合的方式与刚性的发光单元聚合设计制备的本征可拉伸发光弹性体具有优异的拉伸性能，同时减弱了发光单元的结晶性，发光弹性体呈无定型态，具有良好的溶解性和成膜性。本成果同时解决了刚性发光单元不具有可拉伸发光的问题与传统弹性体不具有光电性能的问题。将该弹性体作为本征可拉伸发光材料，应用于可拉伸柔性发光器件、柔性传感器件、生物医疗或柔性可穿戴器件中，具有优异的器件稳定性。图1为弹性体P1作为发光层的有机电致发光器件结构实例图。

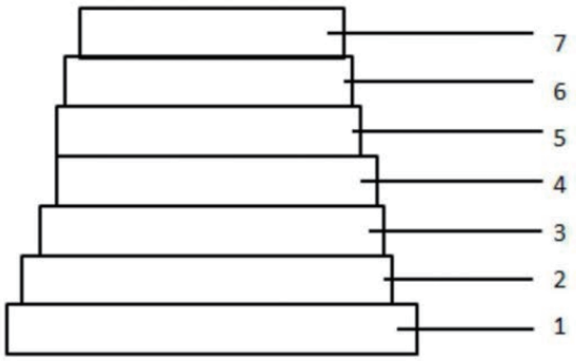
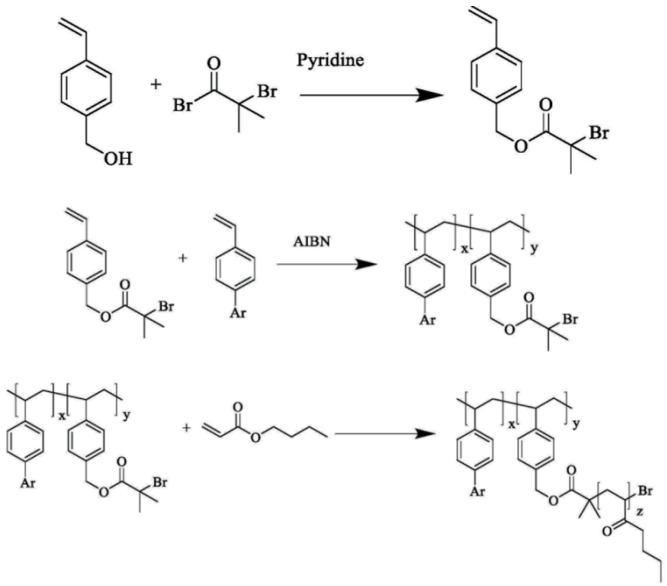
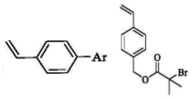
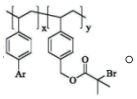


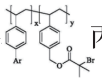
图1 弹性体P1作为发光层的有机电致发光器件结构实例图

在实施例中，所述本征可拉伸发光弹性体的制备方法按照如下步骤进行：



(1)在0℃下，将(4-乙烯基苯基)甲醇和2-溴-2-甲基丙酰溴溶解于有机溶剂中，加入超干吡啶，冰水浴条件下反应3-4h，过滤、柱层析得到  ；

(2)将  溶解于有机溶液，加入少量偶氮二异丁腈(AIBN)，无水无氧70-75℃条件下反应48-72h，通过重结晶提纯  。

(3)将  丙烯酸丁酯、溴化亚铜和五甲基二乙烯三胺(PMDETA)溶解于5-30mL有机溶剂，无水无氧70-75℃条件下反应12-24h，将反应液冷却至室温，并逐滴滴加在大量冰甲醇中进行重结晶。然后通过过滤、干燥后得到的弹性体即为目标产物。

技术指标/优势

通过对弹性体P1的热重测试如图2所示可知，本申请提供的弹性体P1具有较好的热力学稳定性，热分解温度在344摄氏度以上；通过对弹性体P1的荧光光谱的测试分析，如图3所示，P1的荧光发射峰为438纳米，为蓝光发射；图4为弹性体P1的力学测试，测试结果显示P1弹性体的拉伸倍数在40倍以上，具有超高的可拉伸性；通过将不同的弹性体作为发光层制备OLED电子器件，并测试器件的启亮电压、荧光亮度等数据，得到表1，表1中数据表明，制备的OLED器件具有超高的荧光亮度和较低启亮电压。

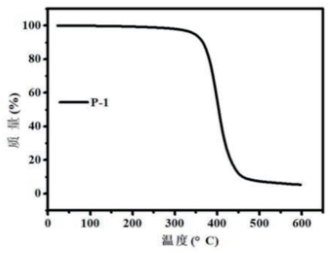


图2

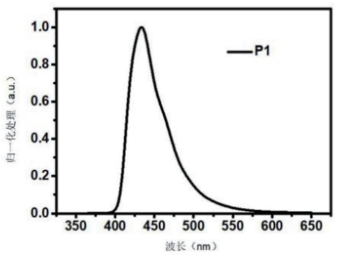


图3

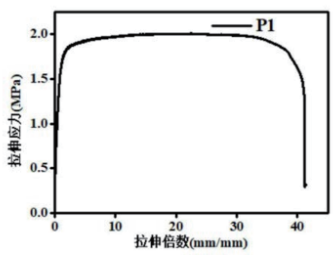


图4

表1

实施例	发光弹性体	弹性体拉伸倍数	启亮电压(V)	荧光亮度(cd/m^2)
2-1	P1	40	3.2	7634
2-2	P4	47	5.6	4789
2-3	P8	55	4.3	8963
2-4	P14	45	4.5	5672
2-5	P22	45	5.1	7653
2-6	P23	34	4.2	5673
2-7	P28	43	3.6	4578
2-8	P51	34	5.7	6674

应用领域和市场前景

可拉伸电子技术作为一种新兴电子技术广泛应用于光电显示、医疗保健、可穿戴电子技术、可拉伸传感器等各个方面。可拉伸有机发光二极管(OLED)作为光电显示中的核心领域因其具有本征发光、能耗低、使用寿命长等优势备受关注。实现OLED器件的柔性可拉伸，要求组成器件的每一层都具有可拉伸性。经过科研人员的长期实践探索，已经实现了可拉伸电极、可拉伸衬底、可拉伸电子/空穴注入层。对于可拉伸OLED中的核心发光功能层的可拉伸性研究，目前并没有相关报道，亟需展开系统性研究。在研究中，通常采用材料创新和结构创新实现电子产品的拉伸性。材料创新是通过设计合成新型可形变材料或使用弹性材料实现电子产品的可拉伸效果；结构创新通常使用特殊设计的形状和结构将材料中整体应变转化为可拉伸电子产品的强度。与不可拉伸的同类电子产品相比，使用材料创新的方式制备的可拉伸电子产品需要通过调整材料的含量比例兼顾优异的机械性能和光电性能。

一种印刷制备大面积图案化有机发光薄膜的方法

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN108032641B				

成果概述

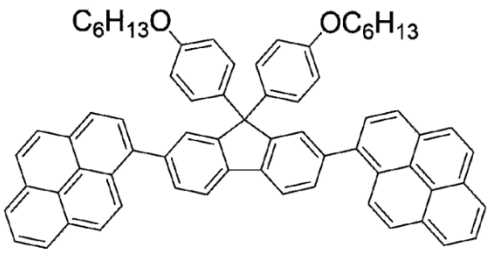
本成果提供一种印刷制膜的方法，具体是一种采用喷墨打印技术印刷制备大面积图案化有机发光薄膜的方法，解决印刷过程中有机小分子发光材料喷墨不稳定和成膜质量差的问题，属于印刷电子及其应用技术领域。室温下，通过双溶剂体系抑制墨水边缘流动、衬底表面处理控制小分子发光材料分布和墨水干燥调控抑制小分子发光材料团聚等步骤，获得了高质量大面积图案化的有机小分子发光薄膜。按本成果提出的方法制备得到的大面积图案化有机小分子发光薄膜具有良好的表面形貌和均匀的薄膜分布，可实现高效率大面积有机光电器件的高质量印刷制备。

关键技术/创新要点

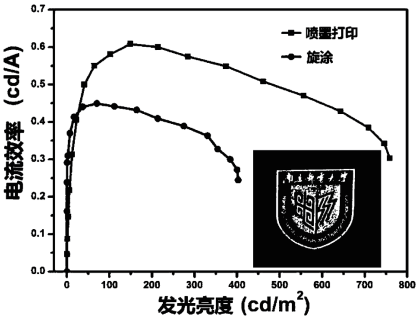
溶液加工是有机光电器件能够低成本商业化的根本途径，在溶液法制备有机光电器件的过程中，喷墨打印技术因为其无接触、无掩膜、大面积制备、膜厚可控，节省材料等特点受到业内的广泛关注。对于层状结构的有机光电器件来说，喷墨打印有机功能层的成膜质量对器件性能至关重要。影响喷墨打印成膜质量的因素有很多，如墨水的表面张力、黏度、密度和挥发速度，以及环境湿度与温度、衬底表面张力和打印参数设置等，导致喷墨打印有机功能层成膜性的研究多集中在聚合物方面，关于小分子成膜性的研究很少。因为聚合物在溶液化的过程中，比小分子呈现出更好的成膜性。但是小分子和聚合物相比，有更高的纯度和更优分子结构设计，更容易获得高效率长寿命的喷墨打印有机发光二极管。而且小分子溶液的粘度、密度和表面张力等性能参数受其浓度变化的影响较小，更容易实现喷墨打印的墨水化。因此喷墨打印小分子发光材料的成膜过程具有非常重要的研究价值。然而小分子发光材料的低溶解性、再结晶、相分离和咖啡环效应也极大了阻碍了小分子薄膜均匀性的提高。目前关于喷墨打印小分子发光层制备有机光电器件的报道中，多采用衬底结构化和双溶剂墨水体系的方法来提高小分子薄膜的均匀性，然而制备出的器件效率仍然不及旋涂工艺。

本成果提出的一种印刷制备大面积图案化有机发光薄膜的方法，采用喷墨打印技术印刷制备大面积图案化有机小分子发光薄膜，该方法包含双溶剂体系抑制墨水边缘流动、衬底表面处理控制小分子发光材料分布和墨水干燥调控抑制小分子发光材料团聚的步骤；1.将一种有机小分子发光材料墨水化；2.将所述

墨水装于喷墨打印机的墨盒中，经喷墨打印机在衬底上进行图案化；形成图案化的有机小分子薄膜；所述的图案化有机小分子发光薄膜是由计算机辅助设计的任意平面结构图案；3.烘烤图案化的有机小分子薄膜，在衬底表面上获得大面积图案化的均匀有机小分子发光薄膜。



PFP-3



技术指标/优势

采用喷墨打印技术印刷制备大面积图案化有机小分子发光薄膜，该方法包含双溶剂体系抑制墨水边缘流动、衬底表面处理控制小分子发光材料分布和墨水干燥调控抑制小分子发光材料团聚等步骤。通过双溶剂体系的有效调控，克服有机小分子发光材料在喷墨打印过程中墨滴偏移、拖尾、颤抖和散点等问题，获得稳定均匀的喷墨液滴；同时抑制了墨水的边缘流动，减弱咖啡环效应，提高了打印有机小分子薄膜的成膜质量。通过衬底表面处理，有效调控衬底表面张力分布与数值，以及衬底表面形貌和分子结构，控制墨水在衬底表面上的流动速度和方向，进而控制小分子发光材料分布，克服小分子的团聚和咖啡环现象，极大的提高了打印薄膜的成膜质量。通过墨水干燥调控溶质挥发速度，抑制了小分子材料在印刷轨迹上的聚集，从而获得了获得大面积图案化的均匀有机小分子发光薄膜。另外，喷墨打印是溶液加工、增材制造方式，节约材料，成本低，特别适用于溶液法低成本大面积有机光电器件的制备和应用。采用喷墨打印有机小分子发光层的有机发光二极管具备比采用旋涂有机小分子发光层的有机发光二极管更高的电流效率。

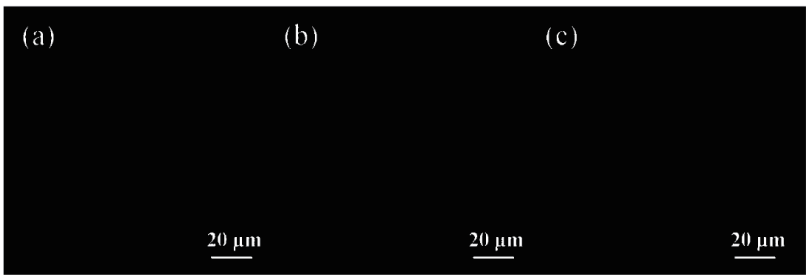


图1 小分子发光材料墨水配方对打印有机小分子发光材料成膜性的影响；

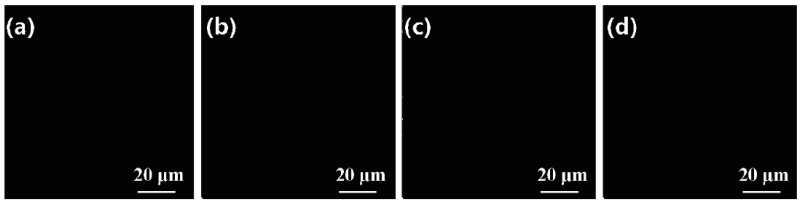


图2 不同衬底表面对打印有机小分子发光材料成膜性的影响；

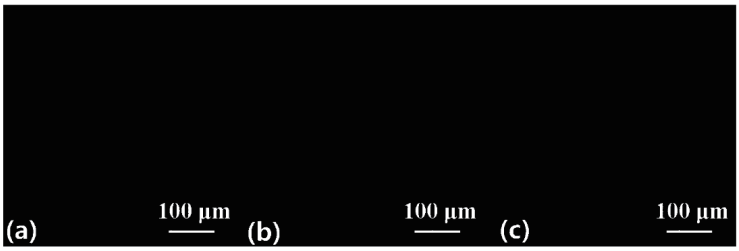


图3 退火温度对打印有机小分子发光材料成膜性的影响;

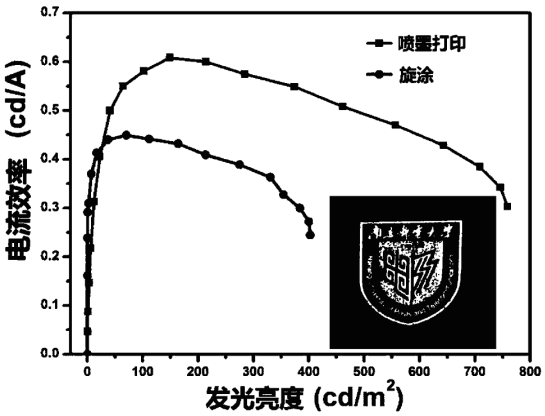


图4 采用喷墨打印有机小分子发光层的有机发光二极管与采用旋涂有机小分子发光层的
有机发光二极管电流效率对比曲线图以及图案化的喷墨打印有机小分子发光层的有机发光二极管

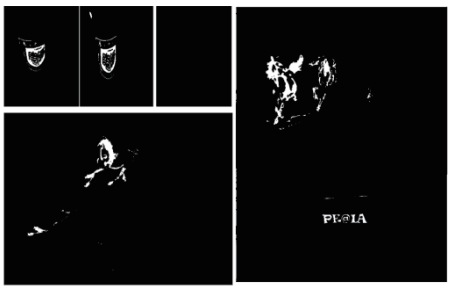


图5 大面积图案化的喷墨打印有机小分子发光薄膜

应用领域和市场前景

溶液加工是有机光电器件能够低成本商业化的根本途径, 在溶液法制备有机光电器件的过程中, 喷墨打印技术因为其无接触、无掩膜、大面积制备、膜厚可控, 节省材料等特点受到业内的广泛关注。对于层状结构的有机光电器件来说, 喷墨打印有机功能层的成膜质量对器件性能至关重要。

一种芘基有机半导体激光材料及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN107162917B				

成果概述

本成果提出了一种芘基有机半导体激光材料及其制备方法与应用，该材料是以芘为核，二苯胺基团为封端单元，以不同链长芴基为桥连单元，四取代对称芘为核的蝶形结构，该材料具有如下式所示的结构通式：其中，R为C1-C30的直链或支链烷基或烷氧基；n为1-5的自然数。本成果的材料制备简单，中间体成本低廉，反应过程容易控制，产品易于分离、收率高、纯度高；该材料不仅在有机激光器件中表现出良好的热稳定性、低阈值、低的水氧敏感性和高发光强度，而且在有机电致发光器件中表现出超低的启亮电压、优异的发光亮度和效率；在有机半导体激光器件和有机电致发光器件方面展现出重要的应用潜力。

关键技术/创新要点

本成果提出一种芘基有机半导体激光材料及其制备方法与应用，以解决目前光增益介质阈值高、稳定性差、电学性能不好、材料制备复杂的问题，克服有机半导体激光材料在保证光物理性能优异的情况下电学性能有效调控的难题。

为实现上述目的，本成果采用的技术方案是：一种芘基有机半导体激光材料，该材料以芘为核，以二苯胺基团为封端单元，以不同链长芴基为桥连单元，具有如下图1所示的结构通式，其中，R为C1-C30的直链或支链烷基或烷氧基；n为1-5的自然数；N是氮原子；H是氢原子。更具体地，所述的R为甲基、乙基、正己基、正辛基或异辛基中的一种。芘基有机半导体激光材料的制备方法，该材料的合成路线为：图2。

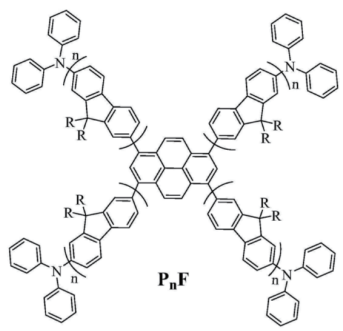


图1 结构通式

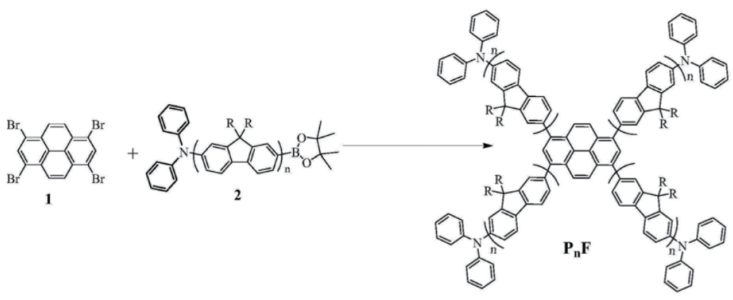


图2 芘基有机半导体激光材料合成路径

目标化合物PnF制备：在N_2保护下，将3,8,14,19四溴芘核(1)、二苯胺端基修饰的芴单硼酸酯(2)、碱性化合物与相转移催化剂置于微波反应器中，抽换N2后，进行避光处理，加入催化剂，进行反应，反应结束柱色谱纯化得目标化合物PnF。

技术指标/优势

有机半导体材料由于其良好的光学及电学性能、简单的制备过程以及结构和性能的可调制性，在有机发光二极管(OLED)，有机场效应晶体管(OFET)，有机太阳能电池(OPV)及有机激光(Organic Lasers)等领域得到了广泛的应用，已经成为有机光电子学研究的重要内容。近年来，结构紧凑、价格低廉(甚至可以弃置)的有机半导体激光的研究引起人们的浓厚兴趣。与染料激光器相比，有机半导体材料除了具有有机激光染料的优点(高的发光效率，可调光谱范围宽，可视为四能级系统等)外，还具有高的固态发光效率，载流子传输及成膜性好等使其在激光应用方面受到广泛的关注。然而，由于有机激光在电泵浦下高的激光阈值、低的净增益系数和相对较差的电学性能导致电泵浦有机半导体激光一直难以实现，这也成为一直困扰有机半导体激光发展的瓶颈问题。为降低激光阈值，人们通过优化分子结构设计合成出包括小分子材料、聚合物材料及高分子材料等在内的有机半导体材料。其中具有多维空间拓扑结构单分散大分子，不但可以像小分子那样使用常规的硅胶柱层析进行提纯，还具有类似聚合物的良好的成膜性能。此外，由于它们所具有的空间多维结构减弱了分子间的相互作用，使得它们在溶剂中往往具有更好的溶解性形成表面形貌规整、均一的薄膜，同时该类材料还具有各向同性的光电性能。

对于共轭大分子而言，通过改变臂或核以及对分子端基修饰进行优化分子结构，可以有效的实现材料光电性能的优化与提高。其中寡聚芴由于其高的荧光量子效率，好的光谱稳定性以及成膜性被广泛的作为臂结构应用在有机光电器件中。芘具有大的π-共轭大平面结构体系，较好的刚性共面性，玻璃化温度高，热稳定性好，薄膜形态稳定性好，荧光效率高。二苯胺作为强的给电子基团，通过二苯胺端基修饰可以进一步改善分子的电学性能。目前未见任何文献或专利报道二苯胺端基修饰的多臂结构芘基材料在有机半导体激光中的应用。聚合物虽可以较好地获得低阈值有机半导体材料，但其结构具有不确定性，而且分散性差；小分子虽然结构确定也具有良好的分散性，但是其具有差热稳定，高的水氧敏感使得其器件稳定性和重复性不理想。通过设计合成二苯胺端基修饰的以芘为核的四取代蝶形结构材料，既具有小分子结构明确的优点又具有聚合物低阈值、可溶液加工的特性，而且形成二苯胺-芘核的给受体结构，可以有效实现多臂结构材料的电学特性调控，使其在有机半导体激光和有机电致发光领域具有重要的应用价值。

本成果制备的P1F、P2F和P3F，具有优异的热稳定性能、成膜稳定性、低阈值特性和高发光强度，能够作为发光激光增益介质或发光材料应用于有机半导体激光器件或有机电致发光器件中。在有机电致发光器件中也展现出超低的启动电压和优异的电致发光性能。

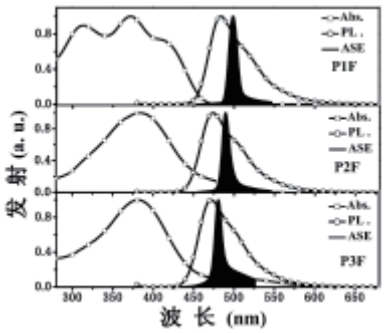


图3 目标分子P1F、P2F和P3F在溶液和薄膜下的吸收、发射和ASE光谱

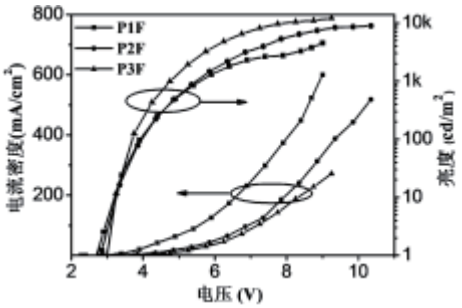


图4 目标分子P1F、P2F和P3F在
不同电压下发光亮度和电流密度的变化曲线通式

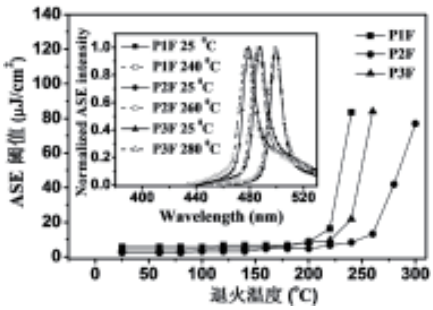


图5 目标分子P1F、P2F和P3F在不同退火温度下
放大自辐射(ASE)阈值的变化曲线

应用领域和市场前景

通过设计合成二苯胺端基修饰的以芘为核的四取代蝶形结构材料，既具有小分子结　构明确的优点又具有聚合物低阈值、可溶液加工的特性，而且形成二苯胺-芘核的给受体结构，可以有效实现多臂结构材料的电学特性调控，使其在有机半导体激光和有机电致发光领域具有重要的应用价值。

本成果的材料制备方法简单，中间体成本低廉，反应过程容易控制，产品易于分离、收率高、纯度高。本成果制备的P1F、P2F和P3F，具有优异的热稳定性能、成膜稳定性、低阈值特性和高发光强度，能够作为发光激光增益介质或发光材料应用于有机半导体激光器件或有机电致发光器件中。在有机电致发光器件中也展现出超低的启动电压和优异的电致发光性能；在有机半导体激光和有机电致发光方面具有潜在的应用价值。

一种红光材料及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN103555318B				

成果概述

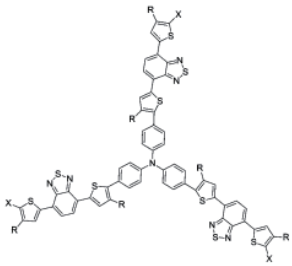
有机/高分子电致发光器件（Organic/Polymer Light-Emitting Device, OLED/PLED）是当前科学界和产业界研究的热点之一，它在信息显示和固体照明等领域表现出广阔的应用前景。红色发光材料是实现信息显示和固体照明必不可少的三基色（红、绿、蓝）材料之一，但是红光材料相对于蓝光和绿光材料而言发展比较缓慢。因此开发稳定、高效的红光材料，进一步提高其发光亮度和效率，仍然是有机电致发光领域具有挑战性的课题。

本成果属光电材料与应用技术领域，具体涉及一种有机电致发光材料，更具体地涉及一种多臂结构材料及其制备方法与应用；该材料是以三苯胺为核，以噻吩-苯噻唑衍生物为枝臂的多取代化合物，该材料具有易于纯化、非晶态特性、良好的溶解性、可逆的电化学氧化还原特性、可通过简易的柱层析方法得到高的化学纯度等特点，可作为活性材料广泛应用于有机发光器件，特别是稳定高效的红色有机电致发光器件。

关键技术/创新要点

本成果通过分子结构优化设计，开发新型的红光材料，并达到改善红光的光谱稳定性和提高其器件性能的目的。对于红光材料而言，将分子设计成多臂结构，有利于防止分子间的紧密堆积，有效地抑制材料的结晶性，提高无定形性能，同时降低材料在固态时的淬灭作用，增强目标材料的固态光发射性能。结合前期工作基础，本成果设计合成了一种以三苯胺为核、噻吩-苯噻唑衍生物为枝臂、拉电子和中性基团封端的多臂红光材料。其中三苯胺为核作为电子给体合成星形材料大多是无定形态，不易结晶，具有可溶液加工性。另外，三苯胺还具有溶解性好、易于化学修饰等优点；苯并噻二唑是一种典型的受体基团；噻吩-苯并噻二唑衍生物具有较好的荧光量子效率；刚性的萘和芘的中性基团有利于材料具有非晶态特性；噻吩环上引入烷基链可增强材料的溶解性。这类材料可以通过简易的溶液成膜方式制备有机电子薄膜器件。

本成果提出一种红光材料，该材料以三苯胺为核、噻吩-苯并噻唑衍生物为枝臂、拉电子或中性基团封端的多臂结构化合物，其通式结构如下式1所示：



式1 多臂结构化合物通式结构，
其中，X为封端基团，选自以下基团之一：

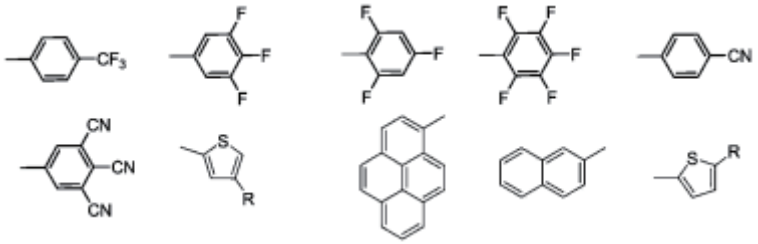


图1 封端基团，R为C1-C12的烷基；N为氮原子，
S为硫原子，F为氟原子，-CN为氰基。

技术指标/优势

本成果通过分子结构优化设计，开发新型的红光材料，并达到改善红光的光谱稳定性和提高其器件性能的目的。本成果提出的多臂结构噻吩衍生物红光材料具有以下特点：(1)材料的多臂结构增加了它的空间位阻效应，有利于防止分子间的紧密堆积，抑制材料的结晶性，提高无定形性能，同时降低了材料在固态时的淬灭作用，显著增强了目标材料的固态光发射性能；(2)噻吩-苯并噻二唑衍生物具有较好的荧光量子效率，可增强分子的发光强度；(3)该材料能形成均匀致密的无定型薄膜；(4)可以通过简易的溶液成膜方式制备薄膜器件。

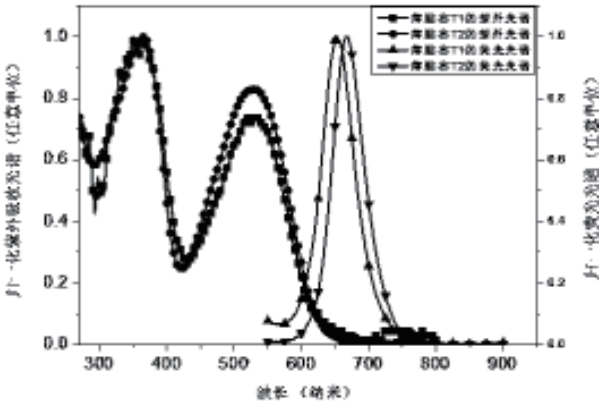


图2 红光材料在薄膜态下的紫外吸收光谱和荧光发射光谱

应用领域和市场前景

由于在红光材料中存在较强的π-π相互作用和电荷转移特性，容易出现由浓度猝灭而导致的荧光量子产率降低。因此，设计合成出溶解性好、具有空间位阻效应的可溶液加工的红光材料是避免其浓度淬灭和降低器件生产成本的有效途径之一。本成果提供了一种红色有机电致发光材料及其制备方法，使红光材料的荧光量子效率、成膜性、热稳定性、色纯度等得到大幅提升。可作为活性材料应用于制备稳定高效的红光有机电致发光薄膜器件，使用该材料作为发光层的有机电致发光器件可以获得高效稳定的红光发射、优异的光谱及稳定器件性能，是一种具有重要应用前景的有机电致红光材料。

一种可印刷红光聚合物及其制备方法

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN105732956B				

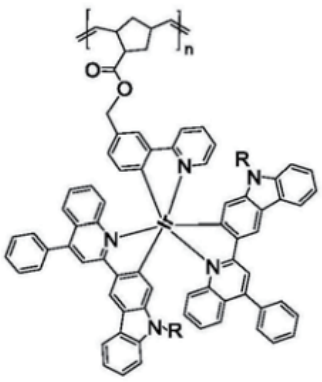
成果概述

本成果提出了一种可印刷红光聚合物及其制备方法。红光聚合物通过开环易位聚合制得，具有降冰片烯衍生主链，且其侧链上含有红光铱配合物。柔性的聚合物主链有利于提高材料的粘度、成膜性和柔性，使所得材料更适合喷墨打印制膜，可实现大面积柔性器件的制备；红光铱配合物有助于实现高效发光，并且其中的增溶基团在提高材料溶解性的同时，也可以有效的控制分子间的相互作用，从而抑制三线态-三线态湮灭，提高发光效率。本成果材料具有易纯化、产率高、热稳定性高和成膜性好等特点。可利用喷墨打印的方法来实现大面积柔性器件的制备。

关键技术/创新要点

目前制备OLED发光层的方法有蒸镀法和溶液法。基于小分子铱配合物的OLED发光层主要是通过蒸镀制得，而基于树枝状分子和聚合物的发光层一般通过溶液法制得。相较于蒸镀法，溶液法可以简化大面积OLED的构造和降低成本。其中，喷墨打印一次可沉积多个材料，简化了处理步骤，更适合大规模生产。但是，喷墨打印对材料的粘度有很高的要求。而相对小分子，聚合物具备更适宜的粘度，因此基于聚合物的铱配合物更适合喷墨打印制膜。

本成果通过对分子结构的优化设计，开发出了新型的可印刷红光聚合物，本成果的可印刷红光聚合物通过开环易位聚合而制得，具有降冰片烯衍生主链和连有红光铱配合物的侧链。聚合物主链有利于提高材料的粘度和成膜性，从而使材料更适合于喷墨印刷方式制膜，可实现大面积柔性器件的制备；红光铱配合物可实现高效发光，并且其中的增溶基团在提高材料的溶解性的同时，也可以有效的控制分子间的相互作用，抑制三线态-三线态湮灭，提高发光效率。该红光聚合物的结构通式如下：本成果提出一种红光材料，该材料以三苯胺为核、噻吩-苯并噻唑衍生物为枝臂、拉电子或中性基团封端的多臂结构化合物，其通式结构如下式1所示：



Ir-P

式1 红光聚合物的结构通式

其中0 ⩽ n ⩽ 100, 且为自然数, R选自如下的一种结构, 1 ⩽ m ⩽ 10, 且m为自然数,



图1 R的结构

该红光聚合物通过开环易位聚合制得, 其合成路线如下:



图2 该红光聚合物合成路线

技术指标/优势

本成果通过对分子结构的优化设计, 开发出了新型的可印刷红光聚合物, 并在柔性基底上成功打印了该聚合物。该红光聚合物是通过开环易位聚合制得, 具有降冰片烯衍生主链和连有红光铱配合物的侧链。

本成果提出的的可印刷红光聚合物具备以下几个优势:1)聚合物主链有利于提高材料的粘度、成膜性, 从而使材料更适合于喷墨印刷方式制膜, 可实现大面积柔性器件的制备;2)侧链的红光铱配合物有助于实现高效率的发光;3)侧链上红光铱配合物中的增溶基团在提高材料溶解性的同时, 也可以有效的控制分子间的相互作用, 抑制三线态-三线态湮灭, 提高发光效率。

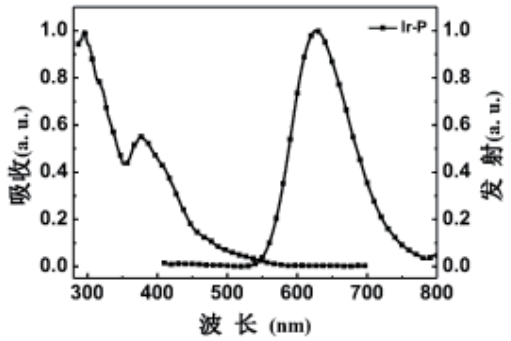


图3 Ir-P在二氯甲烷溶液中的吸收和发射光谱

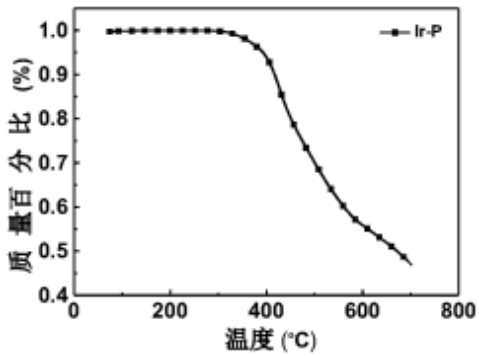


图4 Ir-P的热失重曲线

应用领域和市场前景

目前制备OLED发光层的方法有蒸镀法和溶液法。基于小分子铱配合物的OLED发光层主要是通过蒸镀制得，而基于树枝状分子和聚合物的发光层一般通过溶液法制得。相较于蒸镀法，溶液法可以简化大面积OLED的构造和降低成本。其中，喷墨打印一次可沉积多个材料，简化了处理步骤，更适合大规模生产。但是，喷墨打印对材料的粘度有很高的要求。而相对小分子，聚合物具备更适宜的粘度，因此基于聚合物的铱配合物更适合喷墨打印制膜。

本成果通过对分子结构的优化设计，开发出了新型的可印刷红光聚合物，并在柔性基底上成功打印了该聚合物。该红光聚合物是通过开环易位聚合制得，具有降冰片烯衍生主链和连有红光铱配合物的侧链。聚合物主链有利于提高材料的粘度、成膜性和柔性，从而使材料更加适合喷墨打印，可实现大面积柔性器件的制备；红光铱配合物有助于实现高效发光，且其中的增溶基团在提高材料的溶解性的同时，也可以有效的控制分子间的相互作用，抑制三线态-三线态湮灭，提高发光效率。

纳米孔单分子传感设计与应用

成果完成人	武灵芝	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	敏感元器件与传感器	
所属学科方向	一级学科	自然科学相关工程与技术		二级学科	生物医学工程学
应用行业	医疗健康、产品制造、环境安全等				
核心专利号	202111647633.8,202210163808.6,202210163804.8,202110154325.5, 202010478189.0,216688083U,2024062801504270,2024R11L1216750				

成果概述

纳米孔单分子传感技术具有无标记、高灵敏和低成本的优势，在医疗诊断、产品质检、环境监测等领域具有重大的应用前景。该研究以固态纳米孔传感平台为基础，针对纳米孔芯片的制备精度要求高、背景噪音大及信号难以识别等问题，通过信号的放大、背景降噪以及载体设计等关键技术，突破纳米孔尺寸的限制，将单分子的识别转换为单颗粒的信号放大，提高信噪比，实现不同分子，特别是低丰度、异质性小分子的高灵敏检测。同时该传感系统基于固态纳米孔芯片尺寸可控和机械稳定性强等特色，进行集成和拓展，实现lab-on-chip的便携化和简单操作，为多场景下精准检测提供技术基础。

关键技术/创新要点

(1)通过离子束、介电击穿等技术制备高精度的氮化硅纳米孔并且具有良好的重复性，同时设计微纳流体池，实现器件的精密组装和可控监测。

(2)通芯片设计、硬件架构和信号软件处理等多技术结合，解决纳米孔离子通道高强噪音背景，提高信号信噪比。

(3)通过分子探针、载体设计等技术进行信号放大和单分子特异性识别，实现对低丰度、异质性的靶标物的高灵敏和高通量检测。

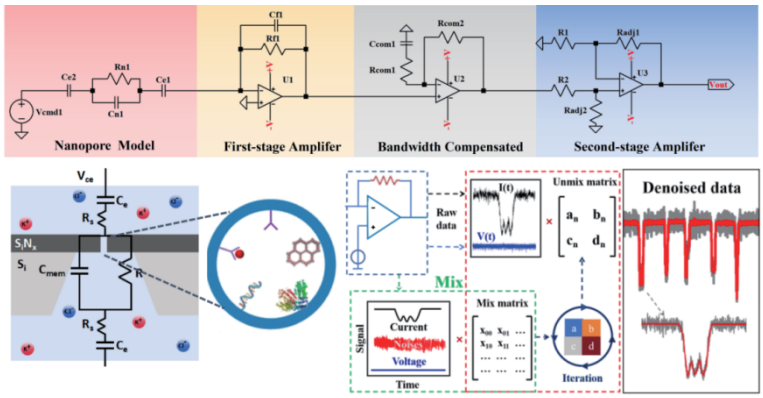


图1 纳米孔单分子传感平台设计

技术指标/优势

通过纳米孔功能化设计和信号放大等技术创新，建立一个稳定可控、高信噪比的纳米孔单分子检测平台，实现对多元靶标物的低成本、高灵敏的检测需求。与价格昂贵、性能单一和配置要求高的商用平台相比，该自主设计的分子器件便于集成和拓展，致力于传感器的小型化，便携化以及无线传输设计，让纳米孔单分子器件向着低噪音、低功耗、便携式方向发展，适应多环境的即时检测需求。

应用领域和市场前景

固态纳米孔是一个拓展性的检测平台，它能实现快速、无标记检测和单分子分析，可以作为纳米尺度下溶液界面和电子电路系统的接口，与大规模集成电路拓展，获得一个可靠、价格适中、可大量生产的微纳传感器，实现精准测量和大规模快速即时监测。这项技术不仅用于医疗健康，如疾病靶标分子的痕量检测和药物筛选等，同时在工业质量监控、环境卫生以及国家安全等领域都具有重要的应用前景，建立一个高效、精准的信息监测服务系统。

宽频带高灵敏度低频电场探头

成果完成人	王正斌	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	微波通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	电磁感知、电磁兼容（EMC）测试、电磁安全监测				

成果概述

当前电磁兼容(EMC)测试、电磁安全监测及科研领域对1-30MHz频段的近场测量需求日益增长，但该频段长期存在探头技术“空档”：现售近场探头组大多从30MHz起测，30MHz以下灵敏度骤降；而直流-数百kHz的工频探头在高于1MHz后因线圈自谐振、分布电容等效应迅速失效。同时，高端场探头长期依赖进口，存在供货周期长、价格高昂、技术受制于人等问题。

本成果针对上述痛点，自主研制了一款宽频带、低驻波、高灵敏度的低频电场探头，实现了该频段场探头产品的国产化替代。该探头采用单管有源阻抗匹配电路设计，在100kHz-57MHz频段内驻波比优于2，灵敏度可达-40dBm，关键性能指标达到或优于同类进口产品水平。

关键技术/创新要点

1. 单管有源宽带阻抗匹配技术

针对1米长杆天线在低频段输入阻抗高、随频率变化剧烈的特点，突破传统无源匹配网络带宽受限的瓶颈，采用单管BJT有源匹配电路，通过动态调整输入阻抗，实现超宽带低驻波匹配。

2. 国产化天线因子标定技术

建立基于等效电容法的天线因子测试体系，自主设计测试夹具，摆脱对国外校准系统和标准探头的依赖，形成完整的性能自主验证能力。

3. 低噪声前端电路设计技术

优化单管放大电路的偏置点设计，在宽带匹配的前提下控制电路噪声系数，改善低频段信噪比性能。

技术指标/优势

驻波比方面，本成果在100kHz-40MHz频段内实测驻波比优于1.2，100kHz-70MHz优于1.5，苏州赛宝实测9kHz-57MHz频段内优于2；相比之下，某进口场探头在100kHz-30MHz内驻波比优于1.5，但37MHz后已恶化至2以上，本成果有效工作带宽较其提升约54%。灵敏度方面，两探头测试底噪均为-40dBm，在5-15MHz低频段具有约10dB的灵敏度优势，而且在56MHz内保持可用，进口产品40MHz后已失效。实测数据表明，本成果在1-30MHz频段内实现了更低的驻波比与略高的接收灵敏度，在带宽覆盖范围上也具有一定优势。低驻波比保证了信号传输的稳定性，高灵敏度则提升了弱信号场景下的测量能力，两项关键指标的协同优化使本探头在核心性能上优于所对比的国外产品，并可以替代进口。

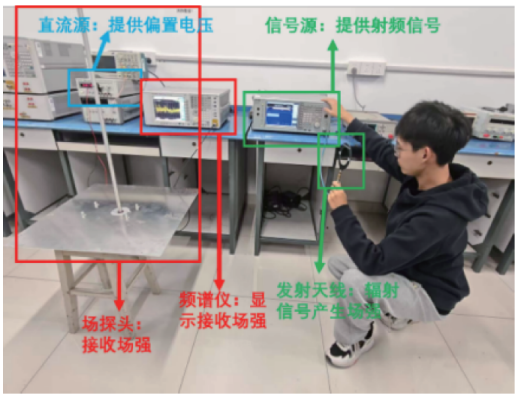


图1 场探头测试环境展示

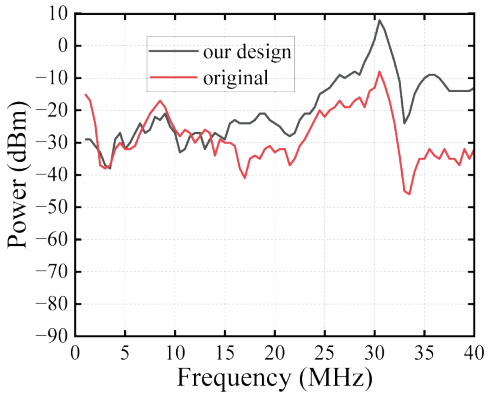
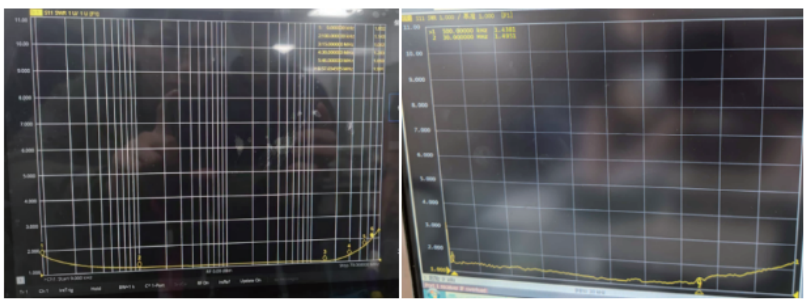


图2 场强探头接收场强实测图



（a）　　（b）

图3 场强探头驻波实测图(a)本成果(b)国外某产品

应用领域和市场前景

该探头可广泛应用于电磁兼容预兼容测试、近场电磁干扰定位、通信设备电磁安全评估、射频识别系统调试、深部地球物理勘探及油气核磁共振检测等场景。其低驻波、高灵敏度和宽频带特性，使其特别适用于对低频段近场测量有严格要求的科研与工程领域。

当前国内低频近场探头市场长期被进口产品主导，且普遍存在低频段性能薄弱、指标不透明等问题。本成果实现了关键频段内的性能突破，具备明确的国产替代能力，可降低对进口探头的依赖，并为后续形成系列化、标准化的国产近场测量工具奠定基础。

低功耗零误码亚阈值PUF芯片（65nm）

成果完成人	张吉良	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	消费电子、物联网、汽车电子、金融支付				

成果概述

PUF可靠性问题是影响其应用部署的关键难题，而现有可靠性提升技术普遍存在硬件开销大、功耗高等问题。为此，本团队在65nm工艺下成功流片了一款低功耗零误码亚阈值PUF芯片。

所提出的亚阈值PUF将传统的双稳态SRAM PUF结构设计为单稳态结构，使交叉耦合PMOS工作在亚阈值区，利用亚阈值电流对工艺偏差的放大效果，同时结合低增益设计，有效提高了PUF的可靠性并降低了功耗。基于PUF单元的失配与泄漏时间差之间的正指数关系，设计了一次性测试掩码方案，该方案仅在测试阶段引入一次性开销，无需复杂的纠错电路，以较低硬件开销成功实现零误码。

关键技术/创新要点

为解决CMOS PUF的可靠性问题，本团队提出一种低功耗亚阈值S2RAM PUF单元设计和一种高效一次性检测屏蔽方案，在65nm CMOS工艺下完成流片，以极低功耗和面积开销实现了零误码。提出的S2RAM PUF利用晶体管制造过程中的不可避免的随机工艺偏差，并将这些工艺偏差放大，转化生成电路可检测和读出的随机比特，从而生成PUF响应。由于晶体管在亚阈值区工作时，对工艺偏差极其敏感，使得MOS管的阈值电压偏差较大。如图1所示，本设计利用一对交叉耦合的PMOS管工作在亚阈值区，将微小的工艺偏差映射为较大的电流差异，从而在保持低功耗的同时，有效提升PUF的可靠性。

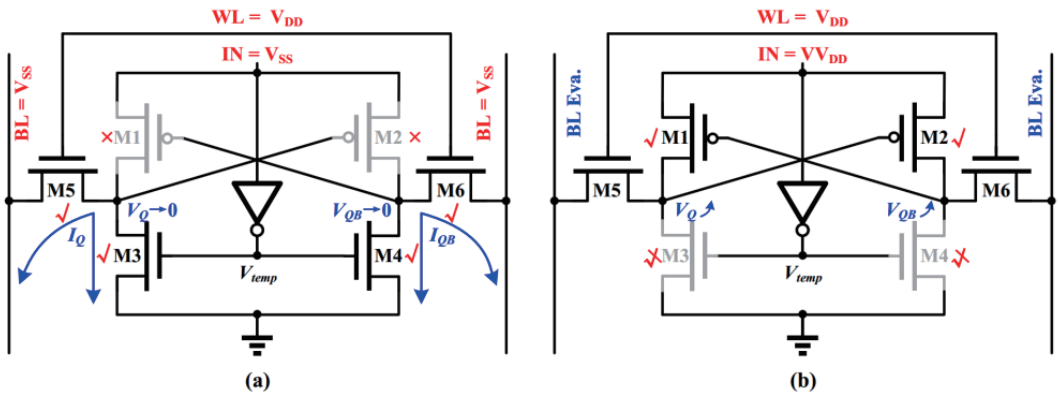


图1 亚阈值SRAM PUF单元电路图：(a)预放电阶段；(b)评估阶段

由于MOS管工艺偏差越大，PUF单元位线电压差就越大。因此通过提取电压泄漏时间更大的响应，可有效提升PUF的可靠性。基于该特性，本团队提出一次性测试屏蔽方案，通过设定时间阈值，将漏电时间差过小的单元识别为不可靠位，并将其屏蔽，从而进一步提升PUF可靠性。该PUF设计的电路架构、芯片及实验平台如图2所示，在65nm CMOS工艺下完成流片，每比特能耗仅3.12fJ且成功实现零误码。

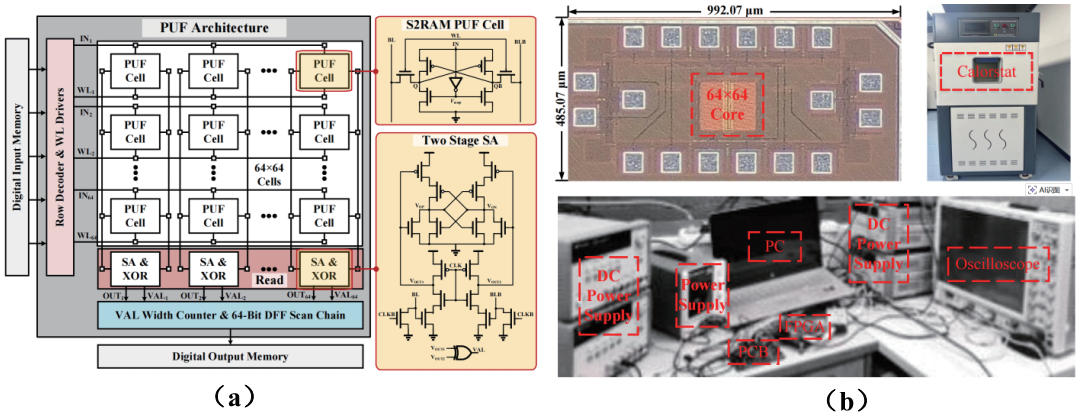


图2 (a)PUF电路架构；(b)芯片及实验平台

技术指标/优势

该成果已在65nm CMOS工艺下完成流片，PUF芯片样片平均片间汉明距离为0.5007，接近理想值；在0.5V工作电压下的能耗低至3.12fJ/bit；且在-40°C~120°C、0.5V~0.8V的工作范围内成功实现零误码。该成果在PUF可靠性和功耗方面处于国际领先水平。

应用领域和市场前景

所提出的亚阈值PUF凭借其固有的极高可靠性和超低功耗特性，可应用于物联网和边缘设备进行硬件安全保护。由于物联网设备面对海量部署、资源受限、电池供电的终端设备，传统的软件加密方案或需要复杂纠错电路的安全模块往往硬件面积和功耗较高。S2RAM PUF凭借其零误码和低开销优势，可为此类资源受限设备提供更加安全可靠的轻量级密钥生成方案，从而为物联网提供有效的安全保护。

国内首款MRAM PUF芯片（40nm）

成果完成人	张吉良	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	消费电子、物联网、汽车电子、航空航天				

成果概述

新型存储器MRAM凭借其低面积、低功耗等优势成为设计PUF的一种轻量级熵源，但温度、电压等外部环境变化会改变MRAM磁阻状态，从而影响PUF可靠性。为此，本团队在40nm工艺下成功设计并流片了国内首款MRAM PUF芯片。该MRAM PUF芯片通过自旋极化电子的隧穿效应，能够根据自身工艺偏差成功实现自写入，完成MRAM阻态自动翻转，从而扩大位线间的电流差，最终输出完全可靠的PUF响应。

关键技术/创新要点

为解决MRAM PUF的可靠性问题，本团队在40nm工艺下成功流片了国内首款MRAM PUF芯片。所设计的轻量级自写入电路，能够根据芯片制造过程中的自身工艺偏差，放大PUF单元位线间的电流差异，从而以极低的硬件开销有效提升PUF的可靠性。

由于MRAM器件制造过程中固有的工艺偏差，MRAM单元高低阻态的电阻值会在一定范围内波动，通过电流型灵敏放大器可将阻值差异转变为并行支路电流差异。PUF单元自写入原理如图1所示，先将MRAM统一写为高阻态，由于阻值固有差异，其中一条支路上的电流更大，从而将该MRAM自动写为低阻态，进一步扩大两条支路上的电流差，从而大幅提升MRAM PUF的可靠性。在外部环境变化时，该MRAM PUF依然可以保持稳定的比特输出。同时此MRAM PUF没有复杂的存储单元结构，在不需要实现认证注册任务时，可以正常存储数据，且面积和功耗开销比传统CMOS大幅减少。

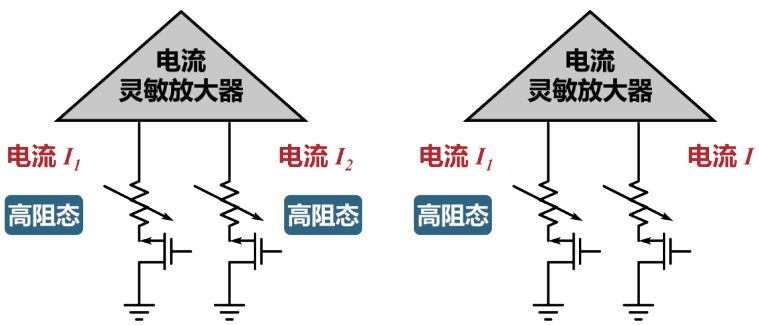


图1 PUF单元自写入机制图

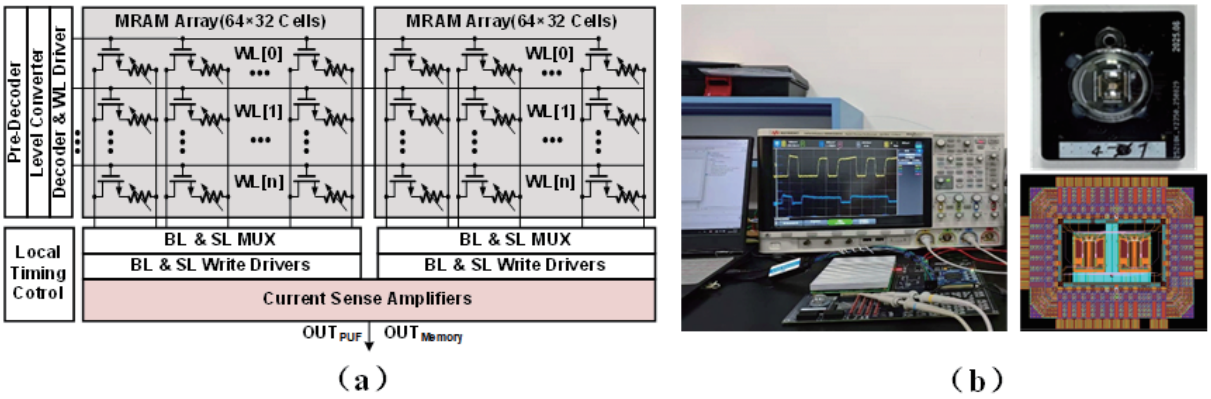


图2 (a)PUF电路架构;(b)芯片及实验平台

技术指标/优势

该成果为国内首款MRAM PUF芯片。通过在40nm SMIC工艺下流片,经权威第三方机构测试,该MRAM PUF成功实现零误码率;平均片间汉明距离为0.49996,接近理想值0.5;可靠性与唯一性均达国际领先水平。

应用领域和市场前景

在航空航天领域中,传统基于电荷存储的存储器(如闪存、动态随机存取存储器)易受单粒子效应等干扰,导致数据易损坏或丢失。MRAM PUF芯片凭借其非易失、高速及强抗辐射的特性,成为保障航空领域硬件安全的有效解决方案。并且,高端工业控制、轨道计算、在轨服务等领域需要芯片能在极端温度下保持长期稳定。因此,MRAM PUF芯片以高安全性、高稳定性等优势,可为此类场景提供有效安全保护。

高能效高吞吐动态混合TRNG

成果完成人	张吉良	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	消费电子、物联网、通信与数据中心				

成果概述

作为构建硬件可信根的关键安全原语，真随机数发生器（TRNG）通过提取物理随机事件生成无法预测的真随机数，相比伪随机数发生器具有更高安全级别。然而由于单一熵源随机性不足，且当前TRNG采样电路存在熵损失，影响TRNG的随机性。虽然增加熵源数量可有效提升随机性，但会导致硬件开销成倍增加。

本团队自主研发了一种高能效高吞吐动态混合TRNG。该动态混合熵源电路，通过环形振荡器间的相互激励，实现振荡模式的动态切换，从而提取抖动和亚稳态两种熵源，在保持高频采样的同时显著提升随机性。通过熵源耦合和输出反馈，进一步强化随机性，并通过电路优化减少整体硬件面积，从而以低硬件开销实现吞吐量的大幅提升。

关键技术/创新要点

为解决TRNG设计中高吞吐量和硬件开销之间的矛盾问题，本团队提出了一种高能效高吞吐的动态混合TRNG。通过图1所示环形振荡器间的相互激励，进行振荡模式的动态切换。由于振荡信号受外界物理噪声影响，翻转边沿会产生随机的时间抖动，通过触发器对抖动随机性进行采样量化。同时利用该随机信号控制振荡器，使其在不同状态之间动态切换，从而提高亚稳态的采样概率。最后，利用异或门同时提取抖动和亚稳态，从而大幅提升熵源随机性。

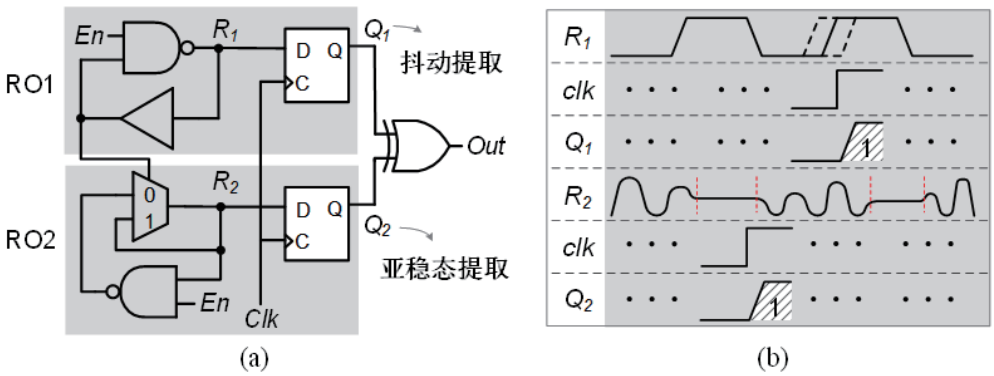


图1 (a) 动态混合熵单元结构 (b) 随机提取原理

本团队提出基于耦合与反馈的随机性强化策略，将熵单元反向嵌套构建耦合环，使得振荡信号相互扰动和叠加，实现逻辑状态随机切换，从而提高输出的随机性。并且，通过将最终输出反馈回中心异或环，对系统初始状态进行随机化，提升系统的混沌程度，从而在使用较少的熵源数量并保持较低功耗的前提下，有效提升TRNG的吞吐量。

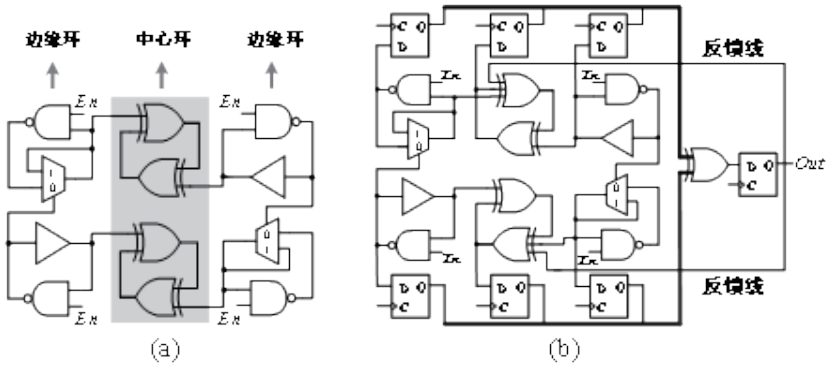


图2 (a) 耦合策略 (b) 反馈策略

技术指标/优势

动态混合TRNG无需任何后处理即可通过NIST、AIS-31和国密等标准化随机性测试，在Xilinx Artix-7 FPGA上实现了620 Mbps的超高吞吐量，硬件面积仅为8个Slice，关键性能指标吞吐量/(面积×功耗)达到1139.7，比当前最优设计提升2.63倍，保持当前公开文献中FPGA TRNG的最高记录。

应用领域和市场前景

该成果可为信息安全、边缘计算、高端通信等领域提供高能效、高吞吐的真随机数生成技术。在物联网安全中，其低功耗与高速特性可满足海量终端设备的身份认证与密钥生成需求；在5G/6G通信与数据中心领域，可作为硬件信任根支撑高速加解密通道的可靠运行；在人工智能场景中，可为差分隐私、联邦学习等机制提供高质量随机源，保障隐私计算安全。由于该TRNG兼具高吞吐量与低能耗优势，且具备更高的密码学安全级别，在系统级芯片、安全芯片、车规级电子设备中具有良好的领用前景。

共掺氧化镓光电存储技术

成果完成人	杨莉莉	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	深紫外光电探测、光电突触、图像存储、智能传感等领域				

成果概述

氧化镓（Ga_2O_3）作为一种宽禁带半导体材料，在深紫外探测领域具有天然优势，但其导电性差、载流子浓度低的问题限制了实际应用。针对这一问题，本成果提出铟锡共掺杂（InSn-Ga_2O_3）方案，采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）技术在蓝宝石衬底上制备出高质量薄膜。共掺杂在材料中引入了多重浅能级杂质能级，有效调控了能带结构，使载流子浓度显著提升。实验发现，共掺杂后的Ga_2O_3在深紫外光照后恢复时间明显延长，呈现出类记忆效应和学习功能。结合第一性原理计算，研究进一步揭示了共掺杂对能带结构和光生载流子复合过程的调控机制。该工作为氧化镓材料在光电突触、图像存储等新型器件中的应用提供了可行的技术路径。

关键技术/创新要点

1.铟锡共掺杂设计

针对单元素掺杂效果有限的问题，本工作采用In和Sn两种元素共掺杂。Sn作为常用n型掺杂剂可有效提升载流子浓度，In则起到调控能带结构的作用。两者协同在带边引入多重浅能级，既改善了材料导电性，又延长了光生载流子的复合时间，为记忆功能的实现提供了基础。

2.PECVD薄膜制备工艺

采用等离子体增强化学气相沉积技术在c面蓝宝石衬底上制备InSn-Ga_2O_3薄膜。该方法成本较低、沉积速率快、薄膜均匀性好，制备出的薄膜结晶质量良好，为器件性能提供了材料保障。

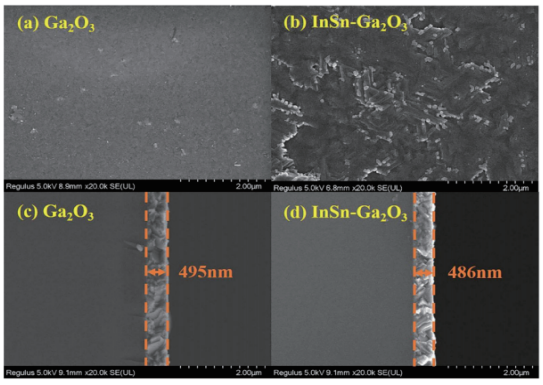


图1 纯Ga_2O_3与InSn-Ga_2O_3薄膜的SEM表面形貌与截面结构

3.缺陷调控实现记忆效应

共掺杂过程中引入了适量的缺陷和表面态，这些缺陷减缓了光生载流子的复合过程，使器件在光照停止后仍能保持较长时间的电信号响应。这一特性使InSn-Ga_2O_3具备了类似生物突触的学习与记忆功能，可应用于光电突触和图像存储器件。

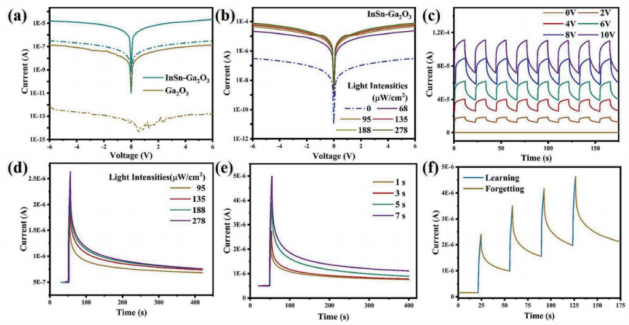


图2 InSn-Ga_2O_3器件在光脉冲刺激下的
电流响应特性及学习-遗忘曲线

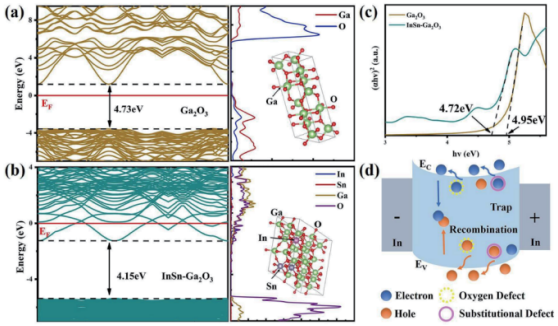


图3 结合第一性原理计算，
从能带结构角度验证了共掺杂的调控机制

技术指标/优势

1.光学带隙由4.91 eV降至4.78 eV，光吸收范围有所拓宽；

2.光电流提升约两个数量级，暗电流提升约五个数量级；

3.光照停止后恢复时间显著延长，具备明显的记忆效应；

4.载流子浓度显著提升，材料导电性能明显改善；

5.与单一元素掺杂相比，本成果在导电性提升和记忆功能实现方面具有明显优势；

6.相关成果已发表于《Science China Technological Sciences》。

应用领域和市场前景

本成果可应用于深紫外光电探测、光电突触、图像存储、智能传感等领域。在类脑计算和神经形态芯片方面，InSn-Ga_2O_3材料能够模拟生物突触的短时可塑性，为低功耗光电神经形态计算单元提供材料基础。此外，该材料在紫外图像传感器、智能安防、火焰探测、空间通信等场景中也有应用潜力。随着人工智能、物联网、智能感知等技术的快速发展，具备记忆功能的光电探测器件需求持续增长，本成果具备较好的产业化前景。

一种通过非均匀型沟槽场限环（TFLRs）终端结构设计的氧化镓肖特基二极管

成果完成人	季学强	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	半导体行业				

成果概述

超宽禁带半导体氧化镓（Ga_2O_3）具有宽的禁带、高的击穿场强、高的巴利加优值以及优异的物理化学稳定性，在超高功率电子器件中具有不可替代的应用。但是，由于肖特基二极管存在电场集中效应，在肖特基金属边缘处很容易聚集电场，产生一个尖峰场强，导致二极管在此位置提前击穿。

针对上述问题，本团队基于低掺杂浓度和高膜厚的Ga_2O_3外延薄膜，设计合适的非均匀型沟槽场限环（TFLRs）终端结构，并利用成熟的微加工工艺制备了高性能的Ga_2O_3肖特基二极管。器件具有较好的正向导通特性，由于TFLRs结构的加入，Ga_2O_3肖特基二极管的反向耐压显著的提高，反向漏电进一步降低。同时，TCAD仿真模拟结果进一步说明带有TFLRs的器件阳极边缘尖峰电场得到有效的抑制。

关键技术/创新要点

目前大部分沟槽或fin结构都位于肖特基金属下方，这样情况下由于沟槽的界面态的捕获作用会造成正向电流滞后现象。另外由于沟槽的侧壁与底部通道的性能不一致性，会使得Ga_2O_3表面态分布不均匀，这样会对Ga_2O_3肖特基二极管的正向电流传输特性的表现造成严重的影响，另外常规的沟槽MOS结构对电流通道具有一定的隔离作用。为了避免沟槽结构对正向导通电流的影响，我们将沟槽结构设计到肖特基金属的两侧去减少对正向导通的电流通道的占用。另外，我们结合边缘FLRs结构，开发了沟槽场限环（TFLRs）终端结构的Ga_2O_3肖特基二极管。将沟槽结构设计到终端位置，避免了对器件正向电流输运的影响，使得器件依然保持大的正向电流密度和小的比导通电阻。另外，TFLRs结构一方面保留了FLRs对电场的调制效应，另一方面沟槽结构使得电场集中效应得到有效减缓。

整体来看，本团队通过在Ga_2O_3外延薄膜设计合适非均匀型场限环的终端结构，并利用成熟的微加工工艺制备了高性能Ga_2O_3垂直TFLRs二极管。在保证器件正向导通特性没有减弱的基础上，器件的反向耐压显著的提高。这项工作为更高功率Ga_2O_3肖特基二极管的设计和开发提供了很好的实验基础。

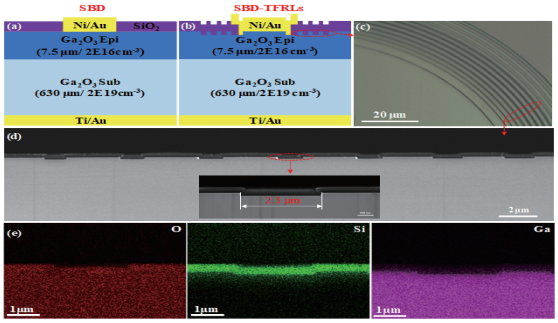
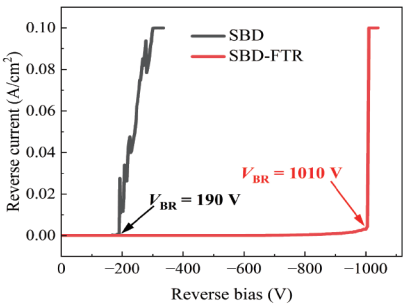


图1 制备的TFLRs结构示意图及显微镜图像和横截面SEM图像



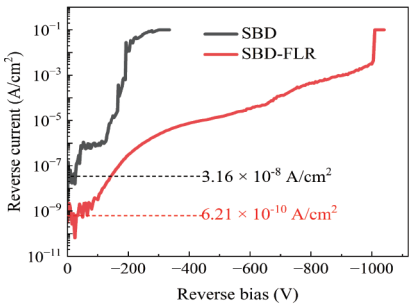


图2 TFLRs结构氧化镓SBD的反向漏电和耐压性能

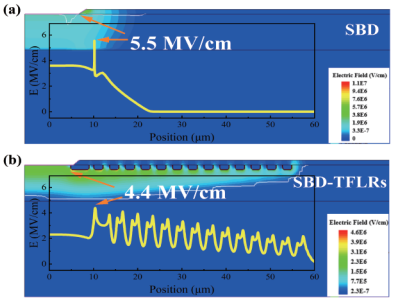


图3 TFLRs结构氧化镓SBD的TCAD仿真电场分布

技术指标/优势

技术指标：本成果建立了FLRs间距设计思路，并参考成熟的功率器件加工工艺规则，采用非均匀分布结构。第一个和第二个沟槽之间的间距设置为1.2μm，之后每个间距增加0.07μm。沟槽内部被SiO_2介质层填满。Ga_2O_3的漂移区掺杂浓度数量级设置为$1016cm^{-3}$。衬底掺杂为均匀分布，浓度为$2.9\times10^{19}cm^{-3}$。

与同类技术或产品相比的优势：与大部分沟槽或fin结构都位于肖特基金属下方，这样情况下由于沟槽的界面态的捕获作用会造成正向电流滞后现象。另外由于沟槽的侧壁与底部通道的性能不一致性，会使得Ga_2O_3表面态分布不均匀，这样会对Ga_2O_3肖特基二极管的正向电流传输特性的表现造成严重的影响，另外常规的沟槽MOS结构对电流通道具有一定的隔离作用。本成果结合边缘FLRs结构，开发了沟槽场限环（TFLRs）终端结构的Ga_2O_3肖特基二极管。将沟槽结构设计到终端位置，避免了对器件正向电流输运的影响，使得器件依然保持大的正向电流密度和小的比导通电阻。另外，TFLRs结构一方面保留了FLRs对电场的调制效应，另一方面沟槽结构使得电场集中效应得到有效减缓。

相关成果已发表于《IEEE Transactions on Electron Devices》。

应用领域和市场前景

该成果可主要应用于高压功率半导体器件领域，特别适用于新一代超宽禁带半导体（氧化镓）电力电子设备。具体场景包括：新能源汽车的车载充电系统与主驱逆变器、高压快充电源、5G通信基站电源、工业电机驱动器及智能电网的并网变换器等。其市场前景广阔：凭借所提出的沟槽场限环（TFLRs）终端结构，成果有效解决了传统沟槽结构因界面态捕获导致的正向电流滞后问题，在保持高耐压的同时实现了大电流密度与低比导通电阻。这种兼顾高可靠性、高电流能力与低损耗的特性，契合功率器件向高效率、小型化发展的迫切需求。在氧化镓材料逐步替代硅基、碳化硅的产业化趋势下，该技术有望显著提升器件良率与性能，加速氧化镓肖特基二极管的商用进程，在中高压功率市场占据重要份额，形成显著的经济与战略效益。

一种高抗浪涌电流的氧化镓肖特基二极管

成果完成人	季学强	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术	二级学科	半导体技术	
应用行业	半导体行业				

成果概述

超宽禁带半导体氧化镓（Ga_2O_3）肖特基二极管在超高功率应用中面临两大核心挑战：一是传统终端结构（如场限环）虽能缓解阳极边缘电场集中，但浪涌电流下器件有源区仍易发生局部过热失效；二是单极型器件缺乏电导调制效应，正向浪涌能力通常弱于双极型器件。因此，在维持高耐压、低漏电的同时提升抗浪涌电流能力，成为推动Ga_2O_3功率器件实用化的关键。

针对上述问题，本团队通过在Ga_2O_3肖特基二极管中引入不同尺寸p-NiO柱区交替排列的混合阳极结构，在不牺牲反向耐压的前提下，实现了抗浪涌能力的显著提升。该设计为超宽禁带半导体功率器件在极端电热应力下的可靠性优化提供了新路径，尤其适用于电动汽车、智能电网等对浪涌耐受性要求严苛的高功率应用场景。

关键技术/创新要点

本团队提出一种基于p型氧化镍（p-NiO）与n型Ga_2O_3异质结的混合阳极肖特基二极管。其核心结构特征为：在肖特基阳极金属下方及外围区域，采用不同横向尺寸的p-NiO柱区交替排布，形成非均匀分布的p-NiO/n-Ga_2O_3嵌入式异质结阵列。首次提出在氧化镓肖特基二极管中引入不同横向尺寸的p-NiO柱区交替排布，形成非均匀嵌入式异质结阵列。利用小尺寸p-NiO柱区在大电流下率先开启、大尺寸柱区随后参与的空穴注入顺序，实现电导调制的分级响应，有效降低浪涌过程中的微分电阻与正向压降，避免单一尺寸p-NiO结构在注入开启瞬间产生的电流拥挤问题。通过交替分布的p-NiO区域，将传统肖特基二极管中集中于阳极边缘的电流强制分散至多个异质结通道，从几何上重构了电流分布。针对Ga_2O_3低热导率、难以实现双极型掺杂的特点，采用宽禁带p-NiO（禁带宽度~3.6eV）作为空穴注入源，形成异质结而非同质p-n结，规避了Ga_2O_3缺乏稳定p型掺杂的瓶颈。同时，p-NiO的化学稳定性与Ga_2O_3良好的界面特性保证了器件在高温、高电场下的可靠性。



图 1制备的氧化镓JBS结构显微镜图像

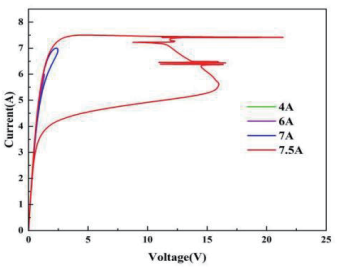


图2 制备的氧化镓JBS浪涌电流性能

技术指标/优势

技术指标：

本技术在正向浪涌耐受能力方面取得显著突破，浪涌电流密度相较于常规氧化镓肖特基二极管提升了三倍以上。在反向耐压特性上，器件保持了1.5至2.0千伏的高击穿电压，在正向导通特性方面，器件的正向压降在每平方厘米1安培电流密度下为1.2至1.5伏，略高于常规结构，但在浪涌脉冲条件下正向压降增幅控制在百分之十以内。热特性方面，浪涌脉冲期间有源区峰值温度较传统结构降低了百分之二十五至百分之三十。

与同类技术或产品相比的优势：

在抗浪涌能力方面，本结构通过分级空穴注入实现电导调制效应，使氧化镓肖特基二极管的浪涌耐受能力首次逼近碳化硅器件水平，填补了氧化镓功率器件在强浪涌应用场景下的关键短板。在正向与反向特性的协同优化方面，本设计将p-NiO混合阳极与非均匀沟槽场限环终端进行空间解耦，反向时场限环主导电场屏蔽，正向时p-NiO阵列主导电流扩散，实现了耐压与抗浪涌性能的同时保持，避免了传统结构中性能指标相互制约的问题。在热管理方面，交替分布的p-NiO柱区迫使电流均匀扩展，将热源从阳极边缘集中分布转变为有源区内多点分散分布，有效突破了氧化镓材料低热导率带来的散热瓶颈。在工艺可行性方面，本结构采用宽禁带p-NiO作为空穴注入源，完全规避了氧化镓缺乏稳定p型掺杂的技术难题，且制备工艺与现有微加工平台高度兼容，无需离子注入或高温激活等复杂步骤，具备良好的量产潜力。在结构可拓展性方面，p-NiO柱区的尺寸、间距、深度及分布梯度均可作为设计自由度，通过仿真优化后可适配从600伏至10千伏不同电压等级的应用需求，为后续开发更高耐压等级的氧化镓功率器件提供了通用设计框架。

应用领域和市场前景

本成果采用与现有微加工工艺兼容的p-NiO填充方案，规避了氧化镓p型掺杂难题，具备良好量产性，主要面向电动汽车、智能电网、工业电源等高可靠性功率应用领域，市场前景广阔。

集成续流二极管氧化镓横向MOSFET

成果完成人	张茂林	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	功率电子				

成果概述

针对超宽禁带半导体氧化镓（Ga_2O_3）横向MOSFET因缺乏体二极管而导致反向导通压降高、损耗大的关键问题，本成果实现了一种集成续流二极管（IFD）的新型器件结构。该技术在无需牺牲正向特性和耐压能力的前提下，通过集成肖特基二极管为反向电流提供了低阻抗路径。所研制的IFD MOSFET将反向导通电压显著降低至-0.89V，相较于传统器件降幅达90%-94%，同时保持了108的高开关比和约9V的阈值电压。器件还实现了20μm漂移区下2.5kV的击穿电压，且反向恢复特性对温度不敏感。该成果验证了在Ga_2O_3横向MOSFET中集成续流二极管的可行性，为解决其反向导通损耗难题提供了有效技术路径，推动了Ga_2O_3功率器件向高效、低损耗应用的发展。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于提出了一种面向氧化镓（Ga_2O_3）横向MOSFET的集成续流二极管（IFD）结构，旨在解决该类器件因缺乏体二极管而导致的高反向导通电压和显著反向损耗这一关键难题。该技术的关键在于，在传统Ga_2O_3横向MOSFET的制备流程中，通过选择性的电极沉积与刻蚀工艺，在源极区域集成一个肖特基势垒二极管（SBD），从而为反向电流提供了一条独立的、低阻抗的导通路径。这一设计带来的首要优势是反向导通特性的显著改善：传统器件的反向导通强烈依赖于栅极电压，开启电压通常在−9.3V至−14.15V之间；而IFD MOSFET的反向导通则由集成的SBD主导，反向开启电压被钳制在−0.89V，相较于传统器件实现了90%至94%的显著降低，从而极大抑制了反向导通损耗。其次，该技术采用了共漂移区设计，使主MOSFET与续流二极管共享同一个漂移区域，确保在引入二极管功能的同时，不牺牲器件输出电流能力和阈值电压（保持在约9V），也不削弱其反向耐压性能。该器件在20μm漂移区长度下实现了2.5kV的击穿电压，且正向转移特性（开关比达108）与常规器件基本持平。此外，由于反向电压大幅降低，栅极所承受的电场应力显著减小，使得栅漏电流从传统结构的220pA锐降至9pA，并增强了高温（300K-400K）下的工作稳定性。该成果验证了在Ga_2O_3横向功率器件中集成续流二极管的可行性，为开发高效、低损耗的下一代氧化镓功率开关器件提供了切实可行的技术路径。

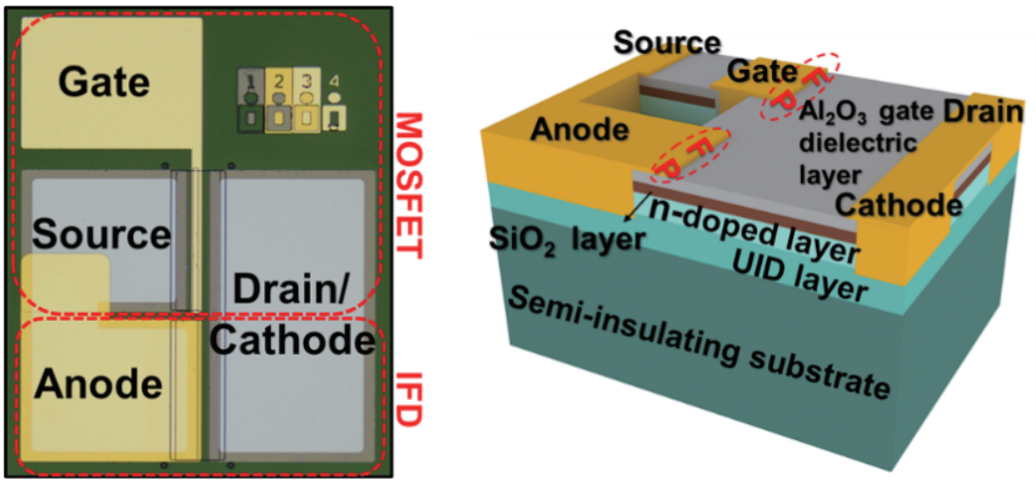
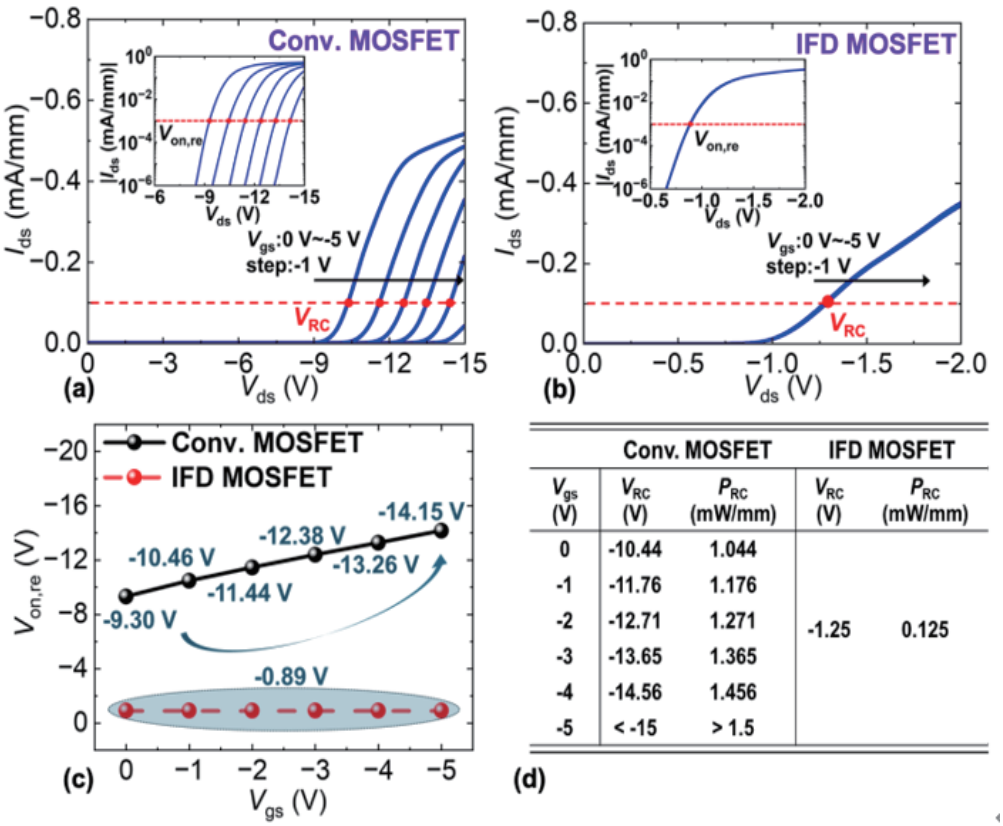


图1 Ga_2O_3 IFD MOSFET的三维结构图(左)及其显微镜照片(右)



	Conv. MOSFET		IFD MOSFET	
V_{gs} (V)	V_{RC} (V)	P_{RC} (mW/mm)	V_{RC} (V)	P_{RC} (mW/mm)
0	-10.44	1.044		
-1	-11.76	1.176		
-2	-12.71	1.271	-1.25	0.125
-3	-13.65	1.365		
-4	-14.56	1.456		
-5	< -15	> 1.5		

图2 (a) 常规 Ga_2O_3 MOSFET的反向导通特性, (b) Ga_2O_3 IFD MOSFET的反向导通特性 ,
(c) 常规Ga_2O_3 MOSFET和IFD MOSFET的反向导通电压($V_{on,re}$)随栅源电压(V_{gs})的变化关系,
(d) 反向导通电压(V_{RC})、反向导通电流(I_{RC})和反向导通损耗(P_{RC})随栅源电压(V_{gs})的变化

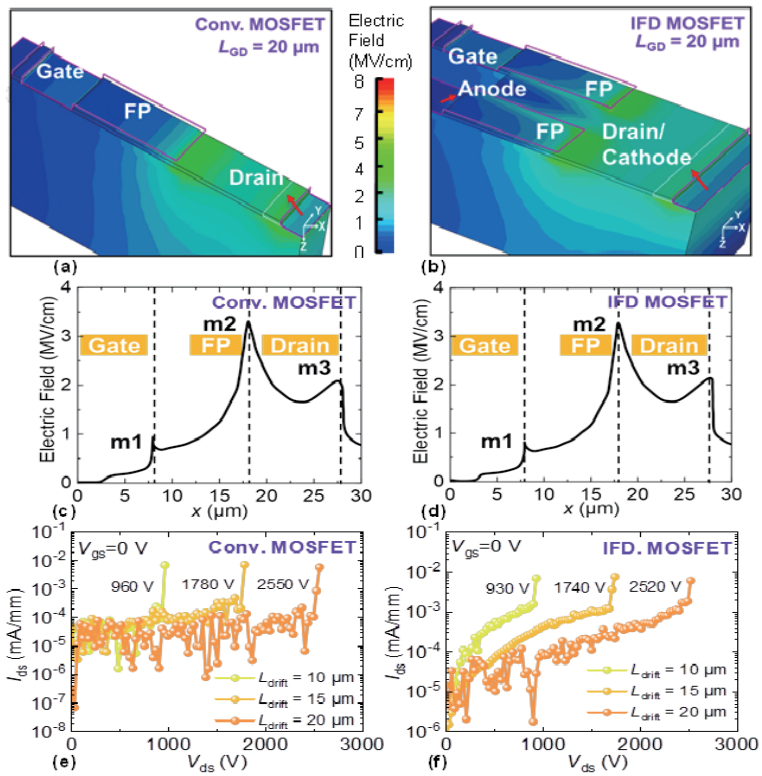


图3 器件击穿电压下的三维电场分布：(a) 传统MOSFET 和 (b) IFD MOSFET。Ga_2O_3层中的二维电场分布：(c) 传统MOSFET 和 (d) IFD MOSFET。器件的击穿特性对比：(e) 传统MOSFET 和 (f) IFD MOSFET。

技术指标/优势

本成果所提出的集成续流二极管Ga_2O_3横向MOSFET在关键性能指标上相较于传统器件具有显著优势。在反向导通特性方面，该器件的反向导通电压低至−0.89V，较传统器件的−9.3V至−14.15V降低了90%~94%，大幅减少了反向导通损耗。在栅极可靠性方面，峰值栅漏电流仅为9pA，远低于传统器件的220 pA，有效降低了栅氧化层的电场应力。在温度稳定性方面，300K至400K升温范围内反向导通电压仅漂移0.27V，远小于传统器件的2.04V，展现出优异的高温工作能力。与此同时，该器件保持了与常规MOSFET相当的正向性能，包括约9V的阈值电压、108的开关比以及20μm漂移区下2.5kV的击穿电压。

应用领域和市场前景

该成果适用于需要高效反向续流的电路拓扑，如开关电源（SMPS）、功率因数校正（PFC）电路、电机驱动器、光伏逆变器以及电动汽车（EV）的车载充电机（OBC）和DC-DC转换器等。与传统硅（Si）和碳化硅（SiC）器件相比，Ga_2O_3材料具有更高的临界击穿电场和更低的材料成本潜力；而本成果解决了Ga_2O_3器件缺乏体二极管导致的高反向损耗难题，使其在高压、低损耗应用中具备了更强的竞争力。随着Ga_2O_3材料热管理问题和衬底尺寸良率问题的逐步解决，该类集成续流二极管结构的功率器件有望在中高压市场（600 V-2.5 kV）实现对SiC和硅基超结MOSFET的部分替代，推动电力电子系统向更高效率、更高功率密度和更低系统成本的方向发展。

热阻调控氧化镓日盲紫外微纳谐振传感器

成果完成人	郑旭骞	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	敏感元器件与传感器	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	航空航天、国防军工、公共安全、环境保护、工业制造				
核心专利号	202510220977.2				

成果概述

针对日盲紫外（SBUV）探测在环境监测、火焰检测等领域的迫切需求，本研究针对传统光电探测器受载流子动力学限制及现有谐振传感器在响应度与响应速度间存在权衡关系的瓶颈，开展了热阻调控氧化镓日盲紫外微纳谐振传感器研究。通过构建双端固支β-Ga_2O_3纳米带谐振结构，创新性地提出将热导作为核心设计参数。研究利用多物理场仿真与实验验证，阐明了通过调控接触热阻及引入电极热分流路径，可实现对器件热流路径的精确工程，从而有效突破灵敏度与速度的制约。最终研制出的传感器实现了微秒级响应速度与高响应度，其噪声等效功率（NEP）达到$2.5\times10^{-13}W/Hz^{1/2}$，为高性能日盲紫外探测提供了新的技术路径。

关键技术/创新要点

本成果聚焦于日盲紫外探测领域，针对传统光电探测器受载流子动力学限制及现有谐振传感器在响应度与响应速度间存在权衡关系的瓶颈，成功研制了热阻调控氧化镓日盲紫外微纳谐振传感器。关键技术主要包括两个方面：一是提出了热阻调控的性能定制化设计技术。该技术将热导作为核心设计变量，通过精确调控谐振器的接触热阻及几何尺寸，实现了对传感器性能的按需定制。研究揭示了接触热阻与器件响应度呈正相关关系，增加接触热阻可有效提升器件的温度响应，从而显著提高灵敏度。同时，通过优化谐振梁厚度与长度，进一步强化了光热-机械信号的转导效率，仿真分析表明在特定厚度范围内器件可获得更高的响应度。二是创新性地引入了电极热分流路径的响应加速技术。该技术在悬空的β-Ga_2O_3谐振梁两端引入金电极，构建了双通道散热机制，通过电极的热分流作用加速热量向衬底的耗散。这一创新设计成功打破了高灵敏度与快速响应难以兼得的困局，在保持较高响应度的同时，将器件的响应时间从毫秒级大幅缩短至微秒级，解决了传统热型传感器响应慢的难题。该成果为高性能日盲紫外探测提供了新的技术路径，在环境监测、火焰探测等领域具有重要的应用价值。

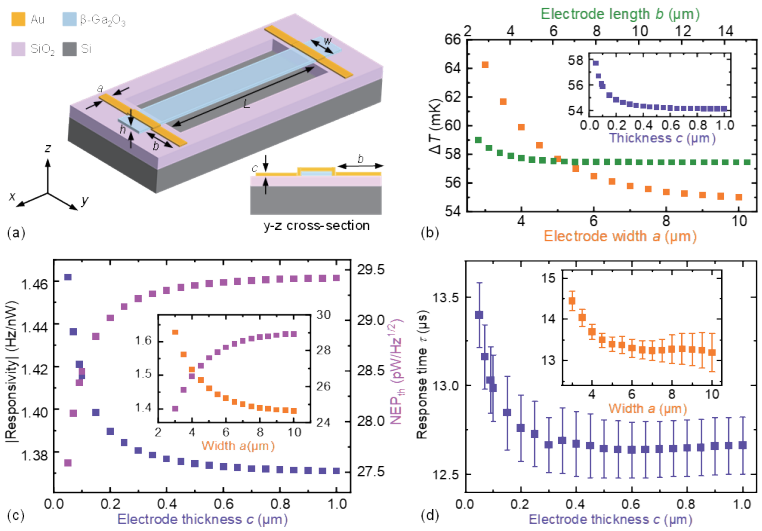


图1 器件结构及关键参数对传感器性能的影响

技术指标/优势

本成果研制的传感器实现了-175.5Hz/nW的高响应度与微秒级的快速响应，其噪声等效功率低至$2.5\times10^{-13}W/Hz^{1/2}$。关键技术优势在于通过热阻调控与电极热分流设计，在保持高灵敏度的同时显著提升了响应速度。相关核心技术已申请国家发明专利。

应用领域和市场前景

本成果研制的β-Ga_2O_3日盲紫外微纳谐振传感器凭借其优异的探测性能，在国防安全与民生领域具有广阔的应用前景。在军事国防方面，该器件可用于导弹尾焰跟踪与火焰探测，利用日盲紫外波段不受太阳辐射干扰的特性，实现高信噪比的预警与监视。在环境监测领域，传感器可用于臭氧层监测与污染物检测，为环境保护提供可靠数据支持。此外，该技术在安全通信、火灾预警系统及生命科学研究中同样具有重要应用价值。由于β-Ga_2O_3材料具有超宽带隙特性，器件无需昂贵的滤光片即可实现日盲紫外波段的选择性探测，且其微纳谐振结构具备体积小、功耗低、易集成的优势。随着工业4.0与物联网的发展，该高性能传感器有望在智能监测网络中实现规模化部署，具备显著的市场竞争力。

基于反馈控制的氧化锌纳米线谐振器的气体分子质量传感器

成果完成人	蔡先法	职称	校聘副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路测试技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	信息与系统科学相关工程与技术其他学科
应用行业	生化分析、环境监测、医疗诊断				

成果概述

微纳米谐振式质量传感器在单分子检测领域潜力巨大，但传统纳米梁传感器因比表面积大、振动稳定性差，通常需在超低温和超高真空环境下运行，严重制约了其在室温生化反应检测中的应用。本成果创新性地将反馈控制技术与氧化锌纳米线（ZnO NW）谐振器相结合，成功研制出一种可在低真空环境下实现单分子检测灵敏度的气体分子质量传感器。团队采用自上而下的加工方法，通过电子束曝光和金属剥离工艺，制作出两端夹紧、结构完整的ZnO NW谐振器，有效减少了加工损伤。在此基础上，构建了基于锁相环和调频技术的闭环检测系统，并引入反馈控制技术，通过调节反馈增益动态改变谐振器的等效质量，从而大幅提升了传感器的灵敏度。利用该传感器，在真空腔中成功实现了对乙醇气体分子的实时吸附检测。本成果为在接近室温环境下实现高精度、低成本的生化分子检测提供了新的有效途径。

关键技术/创新要点

研究团队首先针对传统纳米梁传感器易受损、振动不稳定的问题，采用自上而下的加工方法制作ZnO NW谐振器。通过电子束曝光精准定位，并在纳米梁中点处设置敏感区，既保护了纳米线结构完整，又为后续高精度检测奠定了基础。同时，通过高温回火处理，进一步减少缺陷，提升了器件的品质因子。为了实现单分子级别的灵敏度，团队设计了一套基于反馈控制的等效质量调谐技术。通过将谐振器振动产生的微弱电压信号经反馈放大后，以特定相位（π/2）重新施加到谐振器上，产生一个与惯性力方向相反的反馈力。该反馈力能够有效抵消部分惯性效应，从而动态降低谐振器的等效质量。实验表明，通过调节反馈增益，谐振频率可从初始的10.352MHz大幅提升至349.324MHz，灵敏度相应提升至-2921.42Hz/zg。这种通过电路参数而非物理结构改变等效质量的方法，为传感器灵敏度的便捷、定量调控提供了新思路。基于上述技术，团队研制出完整的闭环检测系统，并实现了对乙醇分子的实时检测。在低真空环境中，传感器成功捕捉到酞菁铜敏感膜对乙醇分子的吸附与脱附过程，单个乙醇分子（0.076zg）的吸附可引起的频率变化，证明了其单分子检测能力。

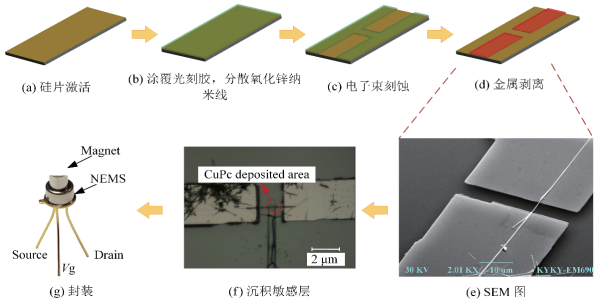


图1 ZnO NW谐振式传感器制作流程

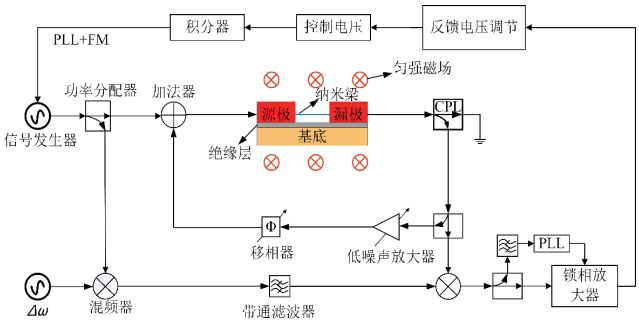


图2 ZnO NW谐振式传感系统的灵敏度增强方案

技术指标/优势

与传统的需要在超低温和超高真空环境下运行的高精度纳米谐振传感器相比，本成果的主要技术指标与优势如下：

1.运行环境要求低：传感器可在低真空（1×10^{-3}Pa）和接近室温（21.0℃~21.2℃）环境下稳定工作，极大降低了系统复杂度和运行成本。

2.灵敏度高：通过反馈控制，灵敏度可达到-2921.42Hz/zg，具备单分子（如乙醇分子，0.076zg）级别的理论检测能力。

3.结构稳定可靠：采用自上而下的加工工艺，避免了湿法刻蚀对纳米梁的损伤，提高了器件的良率和稳定性。

4.灵敏度可调：通过改变反馈电路的增益，即可定量、便捷地调谐传感器灵敏度，无需改变传感器物理结构。

应用领域和市场前景

该成果的核心优势在于实现了在相对宽松环境下（低真空、近室温）的单分子级检测，为诸多依赖高精度生化分析的应用场景打开了新局面。

在生命科学与医疗诊断领域，该传感器可用于疾病早期标志物的超灵敏检测，如通过功能化表面识别特定的癌症抗原或病毒核酸，实现单分子级别的液体活检，有望大幅提升早期诊断的准确性。

在环境监测领域，可实现对大气中痕量有毒有害气体（如乙醇、二氧化氮等）的实时、快速检测，为空气质量监测、化工厂安全预警提供新一代传感器件。

在食品安全领域，可用于快速检测食品中的痕量病原体或残留农药，保障食品安全。此外，该技术为研究分子间相互作用（如抗原-抗体结合、药物筛选）提供了新的工具，在生物制药研发领域也具有广阔的应用前景。其低系统成本和高精度的特点，将有力推动高端分析仪器向小型化、普及化方向发展。

超低功耗IGZO光电突触晶体管及其神经形态计算中的应用

成果完成人	朱力	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	人工智能、集成电路				

成果概述

随着人工智能技术的快速发展，传统冯·诺依曼架构在功耗与串行处理能力方面存在瓶颈。人脑通过神经元与突触构建复杂的神经网络系统，以极低功耗实现高效的并行信息处理，为新型计算系统提供了重要的仿生学启示。光电突触器件因其具备光敏性、低功耗、高带宽和低串扰等优势，成为构建人工视觉感知计算系统的重要方向。

本团队自主设计并制备了一种基于非晶氧化铟镓锌（IGZO）半导体层与高介电常数ZrAlOx栅介质的薄膜晶体管，成功模拟了多种生物突触功能，包括兴奋性突触后电流（EPSC）、双脉冲易化（PPF）、短时程可塑性向长时程可塑性的转变，以及“学习-遗忘-再学习”行为和摩斯密码编码功能。通过构建3×3器件阵列，进一步验证了其在图像识别与存储方面的能力。重要的是，该器件在0.0001V的超低工作电压下仍能实现显著的光电突触响应，单次突触事件能耗低至0.0845fJ，展现出在超低功耗神经形态计算系统中的巨大应用潜力。

关键技术/创新要点

本成果的核心在于通过精妙的材料选择与器件结构设计，实现超低功耗下的高性能光电突触模拟。首先，我们选用了非晶IGZO作为半导体沟道层。IGZO材料具有高载流子迁移率、大面积均匀性好、可低温加工等优点，其内部存在大量氧空位缺陷。这些氧空位在光照下会发生电离，释放出电子，增加沟道电导率；光照停止后，电子与电离的氧空位缓慢复合，电导率逐渐恢复。这是模拟突触可塑性的物理基础。

其次，为了实现低电压驱动，我们利用高k栅介质ZrAlOx，在相同物理厚度下提供更大的电容，从而在更低的栅极电压下诱导出更高的沟道电流，显著降低器件工作电压和功耗。表面粗糙度仅为226pm、高致密ZrAlOx栅介质薄膜，为构建高性能、低漏电的晶体管奠定了基础。在此基础上，我们成功构建了IGZO/ZrAlOx结构的光电突触晶体管。实验结果显示，该器件表现出优异的电学性能，其饱和迁移率高达25.5cm^2/(V·s)，亚阈值摆幅低至69mV/dec，开关比达到1.9×10^8。在405nm光脉冲刺激下，该器件不仅能精确模拟EPSC、PPF等多种突触行为，还能通过调节光脉冲的宽度、数量和强度，模拟人脑“学习-遗忘-再学习”的动态过程。更令人瞩目的是，即使在源漏电压低至0.0001V的极端条件下，器件仍能产生清晰的光电突触响应，单次突触事件能耗仅为0.0845fJ，这一指标优于目前已报道的绝大多数光电突触器件。

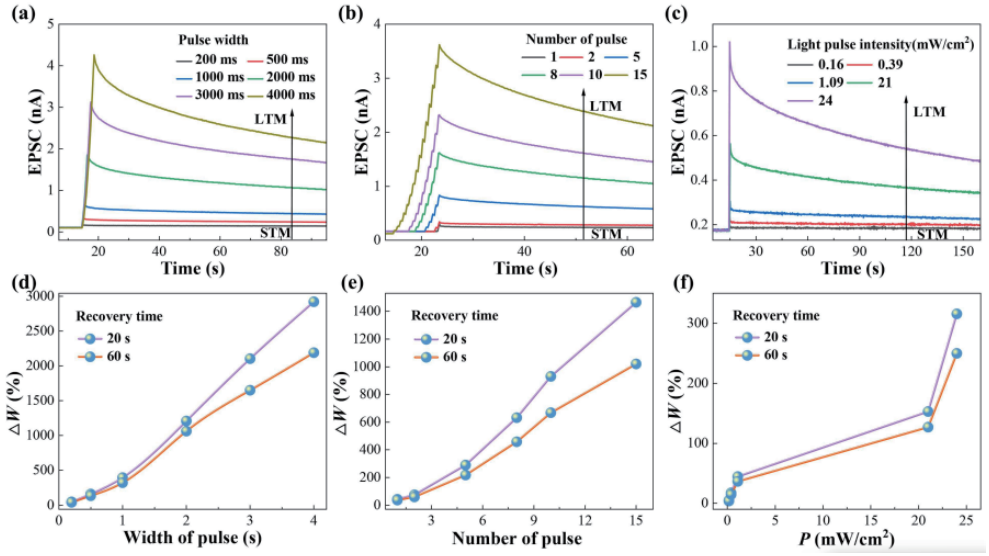


图 1:405 nm光刺激下的突触可塑性调控 (a)光脉冲宽度变化;(b)光脉冲次数影响;(c)器件对光强变化的响应;(d)-(f)移除光脉冲后20秒和60秒的权重变化值统计分析。统计类别对应不同脉冲宽度、脉冲次数和光强条件。

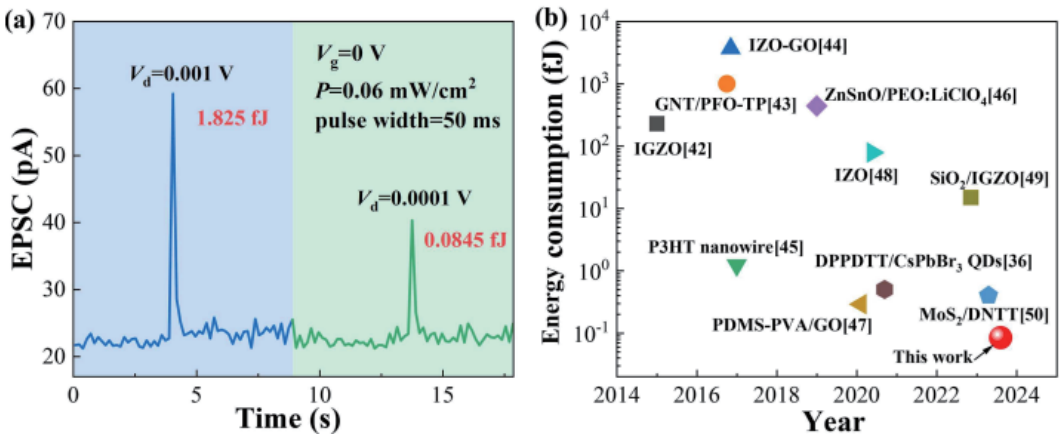


图2:器件超低功耗特性 (a) 在极低源漏电压(0.0001 V)下, 器件仍能产生显著的突触响应;(b) 与已报道的其他光电突触器件相比, 本成果的能量消耗(0.0845 fJ)处于领先水平。

技术指标/优势

该光电突触晶体管在电学性能上表现出优异的特性:饱和迁移率达到25.5cm^2/(V·s), 亚阈值摆幅低至69mV/dec, 开关比高达1.9×10^8, 显示出良好的器件一致性与稳定性。在光电响应方面, 器件在405nm光照下表现出高达40.7A/W的响应度、124.78%的外量子效率和1.547×10^{15}Jones的探测率, 表明其对光信号具有极高的灵敏度。在突触功能模拟方面, 器件成功实现了从短时程可塑性到长时程可塑性的转变, 并通过调控光脉冲参数精确控制记忆行为。其中, 该晶体管在0.0001V的超低源漏电压下仍能实现显著的光电突触响应, 单次突触事件能耗仅为0.0845fJ, 远低于已有文献报道的多数光电突触器件, 为构建超低功耗神经形态计算系统提供了关键技术支持。

应用领域和市场前景

本成果的核心是一种超低功耗、高性能的仿生光电突触器件，其在模拟人类视觉系统方面展现出巨大潜力，应用前景广阔。首先，在神经形态视觉计算领域，该器件可作为人工视觉感知系统的核心单元，构建能够模拟人眼感知、记忆和预处理功能的视觉芯片。这种芯片在图像识别、目标跟踪、自动驾驶等领域，有望突破传统视觉处理技术在功耗和速度上的瓶颈，实现更高效、更智能的视觉信息处理。

其次，该器件的低功耗特性和对光的敏感性使其在边缘计算与物联网领域具有重要应用价值。在智能传感器节点、可穿戴设备等对功耗要求极为苛刻的场景中，集成了该类器件的芯片能够直接对光信号进行预处理和识别，无需将大量数据传输至云端，从而大幅降低系统功耗和延迟，提升响应速度。

此外，该成果还可推动仿生机器人和人机交互技术的发展。通过将光电突触器件阵列与机器人视觉系统结合，可以赋予机器人更接近人类的视觉感知和学习能力。同时，其模拟人脑“学习-遗忘”等动态行为的能力，也为开发更自然、更智能的人机交互界面提供了新的思路。随着人工智能向低功耗、边缘化发展，本成果所代表的超低功耗光电神经形态技术将占据日益重要的市场地位，有望成为下一代智能感知与计算系统的关键核心技术。

CdS-QDs修饰IGZO突触晶体管及其在仿生彩色图像灰度化中的应用

成果完成人	朱力	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	人工智能、集成电路				

成果概述

计算机视觉系统在处理彩色图像时，通常需要对红、绿、蓝三个颜色通道的数据进行独立采集与处理，这不仅带来了巨大的计算能耗和数据存储。人眼对色彩的感知并非简单地对三原色光强进行等权重叠加，而是基于视网膜中三种视锥细胞对不同波长光的敏感度差异，形成独特的亮度感知特性。然而，现有的光电神经形态器件在模拟彩色视觉时，往往仅关注对不同波长光的响应能力，忽略了人眼基于亮度的色彩感知机制，尤其是高效、仿生的彩色图像灰度化功能鲜有报道。

针对上述问题，本团队成功研制了一种基于CdS-QDs修饰的IGZO光电突触晶体管，该器件成功将器件的响应光谱拓宽至可见光区（200-800nm）。此外，团队提出并验证了一种基于光脉冲编码的仿生彩色图像灰度化方法。以及采用该器件对彩色MNIST数据集进行灰度化处理后，后续人工神经网络的识别准确率相比未修饰的IGZO器件提升了34.3%。该成果为神经形态视觉系统赋予了更接近生物视觉的色彩感知能力，并提供了一种低功耗、高生物可信度的彩色图像灰度化新途径。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于通过量子点修饰实现IGZO器件对可见光的宽谱响应，并基于此开发了仿生彩色图像灰度化的脉冲编码方法。该器件在405nm、532nm和655nm光脉冲刺激下表现出差异化的兴奋性突触后电流（EPSC）行为。因此，团队利用响应差异化，提出了一种基于脉冲编码的仿生彩色图像灰度化方法。该方法的核心在于：将彩色图像每个像素的红、绿、蓝三通道灰度值，分别映射为对应波长的光脉冲数量；器件在受到光脉冲后产生的EPSC值作为该像素转换后的灰度值。通过从器件的响应曲线中提取不同波长光脉冲数量与归一化响应之间的关系，利用三种不同的编码方案：方案I基于人眼亮度感知权重，方案II采用等权重，方案III采用固定脉冲数。实验结果表明，方案I转换出的灰度图像最符合人眼视觉特性，蓝色和紫色区域得到了有效抑制，而方案II和III则出现了过曝现象。

最后，团队构建了彩色MNIST手写数字数据集，将原始灰度数字图像中的像素随机替换为红、绿、蓝三色。分别采用IGZO/CdS-QDs/PMMA器件和IGZO器件对彩色图像进行灰度化转换，并将灰度图像输入人工神经网络进行识别。结果显示，基于IGZO/CdS-QDs/PMMA器件的图像识别准确率比IGZO器件提升了34.3%。这一显著提升充分证明了该器件在彩色图像处理中的优越性，其能够更完整地保留原始彩色图像中的有效信息，避免了因光谱响应不足导致的信息丢失。

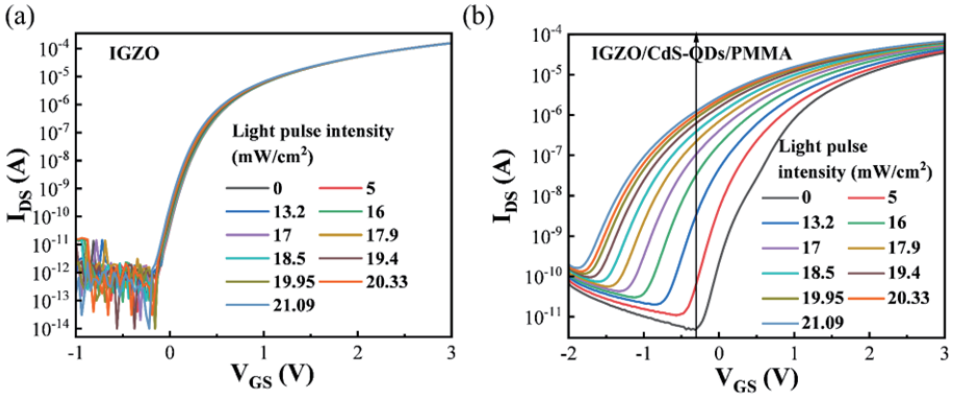


图 1 IGZO和IGZO/CdS-QDs/PMMA光电晶体管在655 nm光刺激的不同光功率密度下的转移曲线

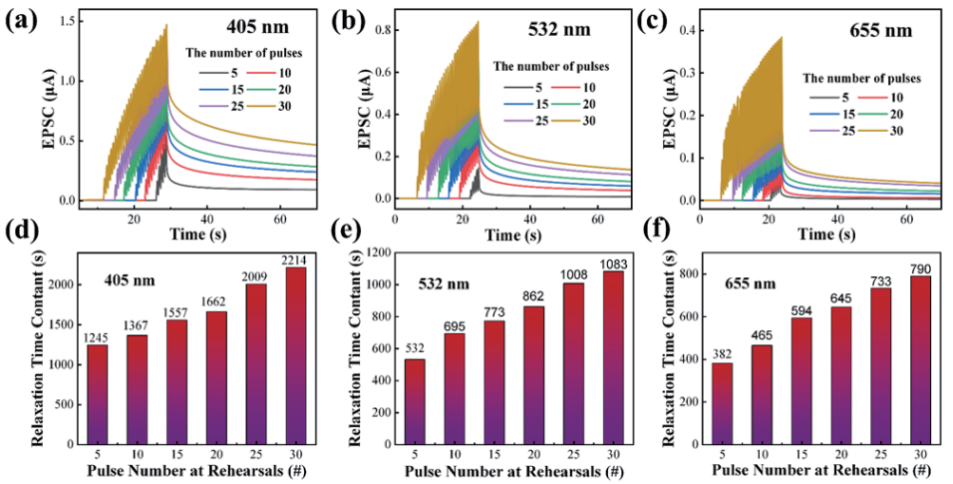


图 2 分别在(a)405 nm、(b)532 nm和(c)655 nm光刺激下对应于5-30个不同脉冲数的EPSC光响应。
分别在(d)405 nm、(e)532 nm和(f)655 nm光刺激下遗忘过程的τ。

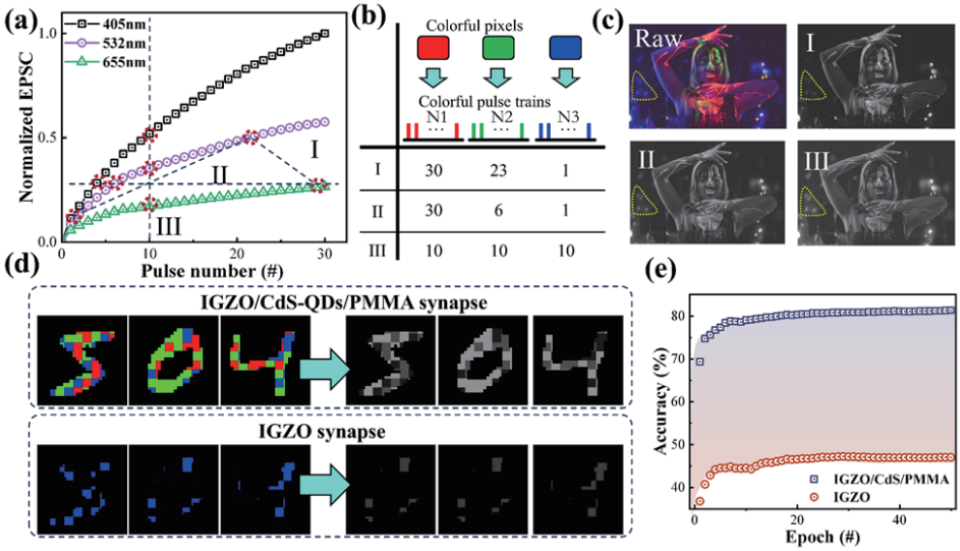


图 3 (a)在不同光照(405、532和655 nm)下, 归一化的EPSC响应与脉冲数量的关系图; (b)三种尖峰编码方法(I、II和III)。
每种方法的脉冲数从图3(a)中提取; (c)标记为“原始”的数字彩色图像, 用于验证图3(b)中概述的方法(I、II和III)的结果;
(d)通过随机将红色、绿色和蓝色像素替代灰色像素, 分别对应“5”、“0”和“4”模式的处理结果。
这些结果被投射到IGZO/CdS-QDs/PMMA突触和IGZO突触的阵列(28×28)上; (e)基于IGZO/CdS-QDs/PMMA突触
和IGZO突触的模式识别准确率分别在(d)405 nm、(e)532 nm和(f)655 nm光刺激下遗忘过程的τ。

技术指标/优势

通过CdS-QD/PMMA/IGZO器件的响应光谱拓宽至200-800nm，在21.09mW/cm^{2}的红光照射下，响应度从0提升至0.0717A/W，外量子效率达到21.98%，并在三种波长光刺激下可以模拟各类突触功能。

团队提出并验证了基于光脉冲编码的彩色图像灰度化方法，利用器件对不同波长光的固有响应差异，实现了符合人眼亮度感知特性的灰度转换。该方法避免了传统数字处理中复杂的加权计算，在器件层面并行完成色彩到灰度的映射，具有低功耗、高生物可信度的优势。同时在彩色MNIST数据集识别任务中，基于该器件转换的灰度图像识别准确率相比未修饰的IGZO器件提升了34.3%，充分验证了其在彩色图像处理中的实际应用价值。

应用领域和市场前景

本成果的核心是一种具备可见光宽谱响应和仿生彩色图像灰度化能力的光电突触晶体管，其应用前景广阔且具有独特的市场价值。首先，在机器视觉与图像处理领域，该器件可用于构建能够直接处理彩色图像的神经形态视觉芯片。传统计算机视觉系统在处理彩色图像时，需要对RGB三个通道进行独立采集、存储和计算，存在大量数据冗余和功耗开销。本成果提出的基于脉冲编码的灰度化方法，在器件层面并行完成色彩到灰度的映射，大幅降低了后续处理的复杂度和功耗，可广泛应用于安防监控、工业检测、自动驾驶等对实时性和能效要求较高的场景。

在智能终端与消费电子领域，该技术可应用于智能手机、数码相机等设备的图像传感器中。通过集成该类器件，可实现相机端对彩色图像的预处理（如灰度化、对比度增强等），减少数据传输带宽和处理器负担，提升成像系统的响应速度和续航能力。特别是在弱光环境下的彩色成像和视频处理中，该技术展现出独特的优势。

基于p型TeSeOx的多光感知突触晶体管及其在多级伤害感受器的应用

成果完成人	朱力	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	人工智能、集成电路				

成果概述

视觉是人类获取外界信息的最主要途径，其中色彩感知能力对于物体识别、场景理解等至关重要。然而，传统的机器视觉系统在处理多光谱信息时，往往面临高功耗、低效率的挑战。受生物视觉系统高效并行处理机制的启发，开发能够模拟人眼色彩感知和信息处理功能的神经形态器件，成为突破现有机器视觉瓶颈的关键。目前，多数光电突触器件仅能响应单一波长，难以高效、全面地模拟复杂的视觉功能。

针对上述问题，本团队成功研制了一种基于新型p型TeSeOx材料的多光谱感知突触晶体管。该器件利用其窄带隙（约1.72eV）的特性，实现了对可见光波段的宽谱响应，解决了传统器件对多波长光信号感知能力不足的问题。基于该器件，我们不仅成功模拟了各类关键突触可塑性功能，还在同一器件上实现了对三原色光“学习-遗忘-再学习”过程以及彩色图像识别与存储的模拟。此外，我们进一步将这一光电突触器件拓展至仿生痛觉感知领域，利用不同波长的光信号模拟不同强度的有害刺激，实现了基于三色光的多级痛觉感知。该成果在智能机器视觉、自动驾驶、人机交互及智能预警系统等领域展现出广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于利用新型p型氧化物TeSeOx，构建了集多光谱感知、突触可塑性与痛觉模拟于一体的多功能神经形态器件。首先，在材料选择上，我们利用p型TeSeOx薄膜作为沟道层。通过热蒸发与后退火工艺制备的TeSeOx薄膜，其表面粗糙度仅为2.65nm，有利于大面积均匀制备。同时，通过紫外-可见光谱测试发现，TeSeOx的光学带隙约为1.72eV，这意味着它能被可见光波段的光子直接激发，为器件实现本征的多光谱响应奠定了物理基础。

其次，利用该器件成功模拟了生物突触的动态可塑性。通过调节光脉冲的宽度、数量和强度，器件在可见光刺激下均能产生典型的兴奋性突触后电流（EPSC），并表现出从短时记忆到长时记忆的转变。同时，我们利用该器件模拟了人脑在三色光感知下的“学习-遗忘-再学习”过程以及通过构建4×4器件阵列，成功演示了在红、绿、蓝三色光刺激下，器件阵列能够清晰感知并存储不同颜色的图案信息，验证了其在彩色图像识别与存储方面的潜力。

最后，团队将光电突触器件拓展至仿生痛觉感知，利用高强度光脉冲模拟对眼睛的有害刺激，成功模拟了痛觉感受器的四大特征即“阈值”特性、“非适应性”、“痛觉敏化”和“异常疼痛”以及“松弛”过程。更重要的是，利用三色光对眼睛的不同损伤程度（蓝光最强、绿光次之、红光最弱），实现了从0级到II级的多级痛觉模拟，并通过调节栅极电压，模拟了佩戴太阳镜的“光防护”效果，展示了该器件在智能光防护与预警系统中的应用潜力。

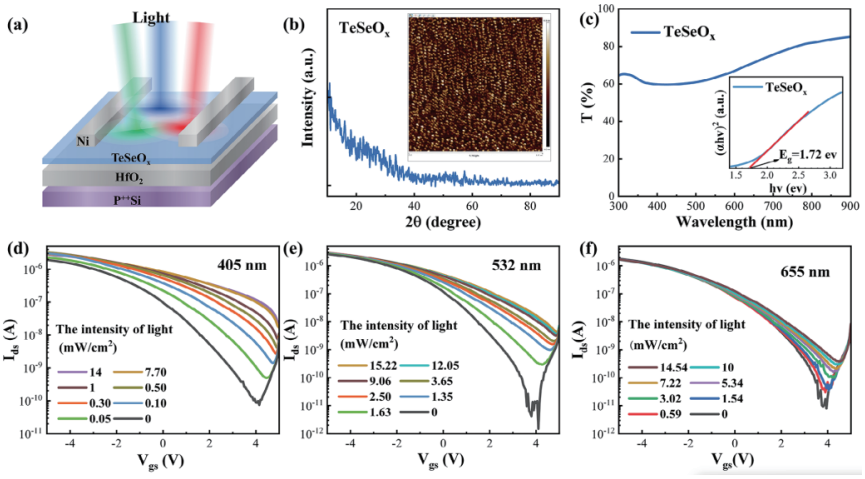


图1 (a) TeSeOx光电器件示意图；(b) TeSeOx薄膜的原子力显微镜图像与X射线衍射图谱；(c) TeSeOx薄膜的透射光谱及从吸收光谱提取的光学带隙；(d-f) 器件分别对不同波长的光响应特性

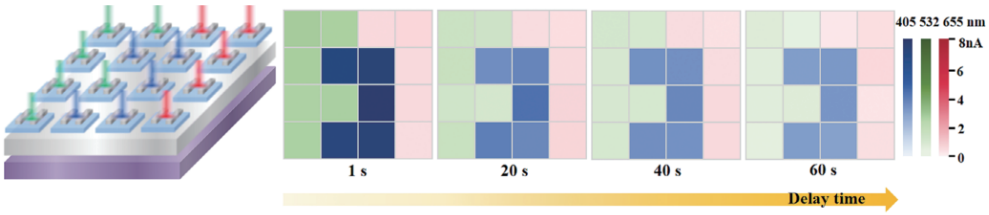


图2 4×4阵列中的多色识别与记忆功能，图像阵列显示不同颜色代表暴露于不同波长的光区域

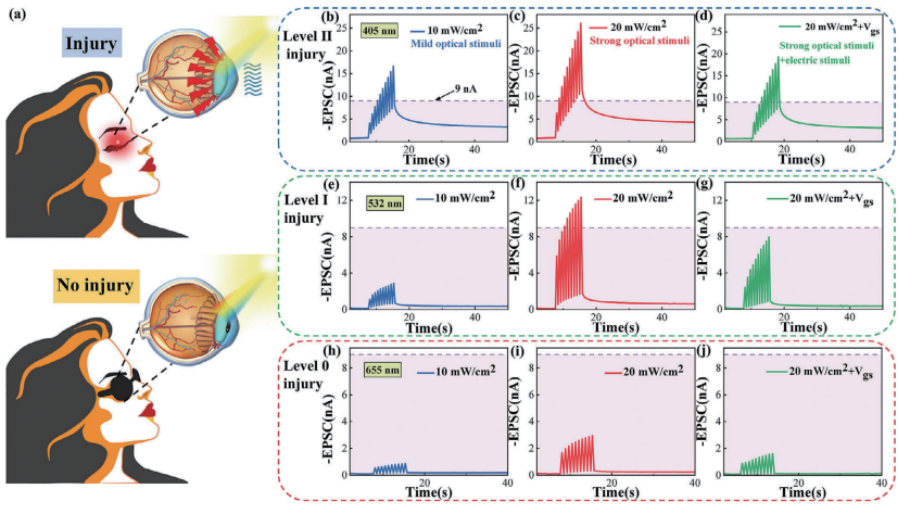


图3 强光导致眼部损伤图；(b-d) 405 nm光造成II级眼损伤的过程；(e-g) 532 nm光造成I级眼损伤的过程；(h-j) 655 nm光造成0级眼损伤的过程

技术指标/优势

基于TeSeOx的窄带隙，实现了器件对可见光波长的本征响应，克服了传统光电器件在单波长光响应局限。同时该器件可以在可见光波刺激下展现出差异化突触后电流，模拟“学习-遗忘-再学习”等关键突触行为。同时，在该器件上实现了对痛觉感受器的模拟，并利用三色光实现了从0级到Ⅱ级的多级痛觉感知，拓展了光电突触器件的应用边界。

应用领域和市场前景

本成果的核心是一种具备多光谱感知和仿生痛觉功能的新型光电突触器件，其应用前景广阔且具有独特优势。首先，在智能机器视觉与自动驾驶领域，该器件可用于构建能够感知和处理彩色信息的视觉芯片。相比现有仅能识别灰度或单色光的系统，搭载该技术的视觉系统能更准确地识别交通信号灯、路标、障碍物等色彩关键信息，显著提升在复杂环境下的感知能力和决策安全性。

此外，该成果在智能光防护与可穿戴设备领域也具有独特价值。通过集成该类器件，可以开发出能够自动感知有害光源强度并动态调节透光率的智能眼镜或车窗。实验已证明，通过栅压调控可模拟“光防护”效果，这为开发新一代自适应光防护产品提供了技术原型。随着人工智能向多模态、低功耗、边缘化发展，本成果所代表的集视觉感知、记忆、计算与自我保护功能于一体的神经形态器件，将在下一代智能感知系统中占据重要地位，推动机器视觉从“看见”向“感知和理解”的跨越。

多栅可调InZnO晶体管的信息整合及其在混沌时间序列预测中的应用

成果完成人	朱力	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	人工智能、集成电路				

成果概述

随着人工智能应用向复杂动态环境拓展，对时间序列数据的实时处理与预测能力提出了更高要求。传统冯·诺依曼架构存在存算分离的瓶颈，而人脑则通过神经元树突的时空信息整合能力，以极低功耗高效处理连续动态信息。储备池计算作为一种受脑启发的计算范式，因其在非线性时序信号处理方面的独特优势而受到广泛关注，但如何在硬件层面高效实现具有丰富动态状态的储备池，仍是该领域面临的关键挑战。

针对上述问题，本团队成功研制了一种基于壳聚糖电解质的InZnO多栅结构晶体管。该器件利用壳聚糖电解质中质子的离子动力学特性，结合多栅极并行调控能力，实现了对沟道电导的协同调制。该晶体管不仅成功模拟了各类基础突触可塑性，还通过在不同共面栅极上施加时序差异的电脉冲，成功模拟了树突分支对输入脉冲序列方向的选择性识别能力。最后，利用共面栅极对沟道电流弛豫时间的可调性，丰富物理储备池状态数，并应用于洛伦兹混沌系统的预测任务。该成果为构建低功耗、高能效的硬件储备池计算系统提供了新的器件基础，在复杂时序信号预测领域展现出广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于利用壳聚糖电解质的离子动力学特性和共面栅极结构，在突触可塑性模拟方面，该器件在电脉冲刺激下成功复现了多种关键突触行为。器件还具备四个共面栅极（G1至G4），通过在不同的共面栅极上施加电压，可以实现对沟道电导的协同调制。此外，团队利用多栅极结构首次在单一晶体管中模拟了树突分支对时空脉冲序列的方向选择性。实现脉冲序列从输入方向输入时，EPSC幅值逐渐增大；而当脉冲序列从输出方向输入时，EPSC幅值逐渐减小。这表明该晶体管可以成功模拟了树突对时空信息的方向选择性功能。

同时，该器件可以应用于储备池计算系统的洛伦兹混沌时间序列预测。通过利用共面栅极电压对沟道电流弛豫时间的可调性，实现了对储备池动态状态的丰富。调节侧向栅极电压，可以获得不同弛豫时间的电流衰减曲线，从而在同一器件中提取出多样化的储层状态。并采用并行虚拟节点架构，将输入数据映射为不同幅值的电脉冲，通过侧向栅极电压调控得到多种电流响应，构建了丰富的储层状态空间。采集到的储层状态经过线性回归输出层处理后，实现了对洛伦兹混沌系统下一时刻状态的精确预测。其预测结果与实际值的归一化均方误差低至8.7×10^{-4}，决定系数R^2达到0.99，验证了该器件在复杂时序信号处理中的卓越性能。

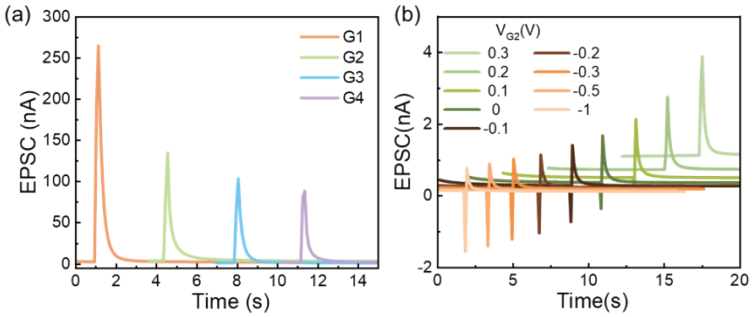


图1（a）不同共面栅极调控下的EPSC响应，栅极电压均为2V；
（b）输入电脉冲G1在不同偏压电压（G2）下的EPSC。

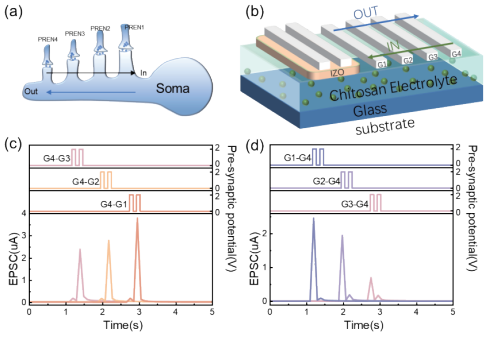


图2 (a) 突触前神经元和突触后神经元时空信息传输整合示意图；
(b) 多栅结构晶体管用于时空信息传递器件示意图；
（c）IN方向上栅极电压脉冲序列激发的EPSC（施加电压2V）；
（d）OUT方向上栅极电压脉冲序列激发的EPSC。

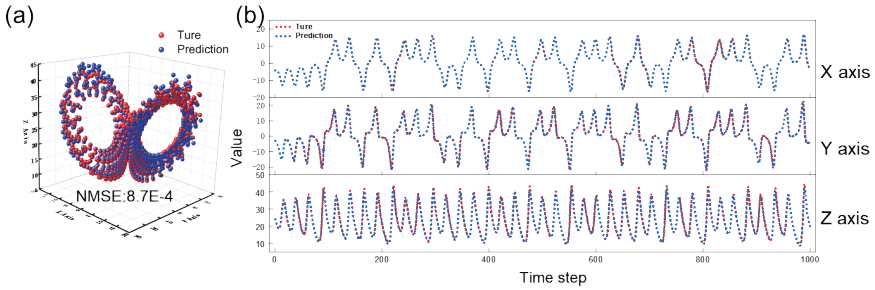


图3（a）Lorenz混沌系统的真实值与预测值3D映射图；（b）Lorenz混沌系统不同分量的真实值与预测值的结果图。

技术指标/优势

与传统底栅顶接触结构晶体管而言，利用壳聚糖中的质子动力学特性，实现多个共面栅对沟道电导的协同调控。该器件通过引入共面栅极结构，实现了在单一晶体管上的树突方向选择性的信息整合处理。基于该器件构建储备池系统，在洛伦兹混沌系统预测任务中取得了优异性能。

应用领域和市场前景

本成果的核心是一种具备树突状时空信息处理能力和可调谐储层状态的多端晶体管，其在复杂时序信号处理领域展现出独特的应用价值。在复杂系统预测领域，该器件可用于构建硬件级储备池计算系统，应用于气象预报（如温度变化、极端天气预警）、工业过程控制（如化工生产参数预测）等场景。相比传统基于软件实现的预测算法，硬件储备池计算具有低功耗、实时性高的优势，尤其适合对响应速度要求苛刻的边缘端应用。

同时，在物联网与智能传感领域，该器件可集成于智能传感器节点中，实现对传感器采集的连续时序信号的实时处理与特征提取。例如，在工业设备故障诊断中，可利用该器件对设备振动信号进行实时分析，提前预警潜在故障；在可穿戴健康监测中，可对心电、脑电等生理信号进行时序特征提取，辅助疾病诊断。该器件在单一芯片上完成信号处理的能力，可显著降低数据传输带宽和云端计算负载。

TeSeO/InZnO光电突触晶体管在宽带紫外-可见-近红外感知与多功能储备池计算中的应用

成果完成人	朱力	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	人工智能、集成电路				

成果概述

人类视觉系统能够感知从紫外到近红外的宽谱光信息，为环境适应、导航和决策提供关键支持。然而，现有的人工视觉系统大多局限于单一波长或窄带光谱的感知，难以模拟生物视觉的多光谱信息处理能力。同时，随着人工智能向边缘端和低功耗方向发展，集感知、存储与计算于一体的神经形态视觉系统成为迫切需求，但如何在单一器件中实现宽带光谱感知、突触可塑性模拟以及复杂时序信息处理，仍是该领域面临的重大挑战。

针对上述挑战，本团队成功研制了一种基于TeSeO/InZnO异质结的全氧化物光电突触晶体管。该器件采用窄带隙TeSeO与宽带隙InZnO的异质结，实现了从紫外到近红外的超宽光谱响应。在光照刺激下，该器件表现出波长、光强、脉冲数等多维度可调的突触可塑性。基于该器件优异的光电特性和非线性动力学响应，进一步构建了物理储备池计算系统，在彩色物体识别任务中实现了93%的准确率，并以4.19×10^{-4}的归一化均方误差（NMSE）成功预测了二阶非线性动力系统。该成果为构建宽谱感知、记忆与计算一体化的神经形态视觉系统提供了新的材料平台和硬件架构。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于通过窄带隙/宽带隙异质结材料耦合策略，在单一晶体管中实现了从紫外到近红外的宽带光电感知与多功能计算能力。利用窄带隙p型氧化物TeSeO与宽带隙n型氧化物InZnO构建异质结。在紫外光激发下，TeSeO和InZnO均产生光生电子-空穴对，在电场作用下电子向InZnO沟道转移，产生强EPSC响应。在可见光激发下，响应主要源于InZnO中氧空位的电离和TeSeO的价带激发，两者协同作用产生EPSC。在近红外光激发下，响应主要由TeSeO中的氧空位电离贡献，电子在电场辅助下注入InZnO沟道。这一多波段协同工作机制，使得器件在360nm至1550nm的宽谱范围内均能产生显著的光电响应，表现出该器件在360nm、405nm、532nm、655nm、905nm和1550nm多种波长光脉冲刺激下，器件均表现出典型的EPSC行为。

最后，基于该器件构建了储备池计算系统，用于彩色物体识别和非线性动力学系统预测。在彩色物体识别任务中，将彩色图像的RGB分量转换为不同波长的光脉冲序列，利用器件对不同波长光的差异化响应构建高维储层状态空间，通过线性回归输出层实现分类识别。实验结果表明，该系统在彩色物体识别中达到了93%的分类准确率，且所需可训练参数数量比传统人工神经网络低两个数量级，展现了储备池计算在资源效率方面的显著优势。在二阶非线性动力学系统预测任务中，该系统成功预测了具有混沌特性的系统输出，归一化均方根误差低至4.19×10^{-4}，优于目前报道的大多数物理储备池系统。

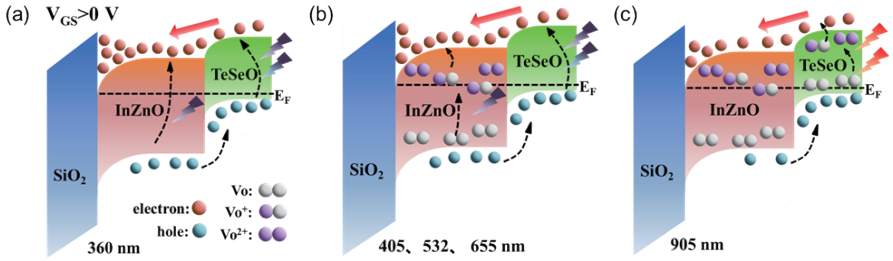


图1 TeSeO/InZnO光电晶体管在(a)紫外360纳米、(b)可见光405、532、655纳米和(c)近红外905、1550纳米照射下的能带图和载流子分布

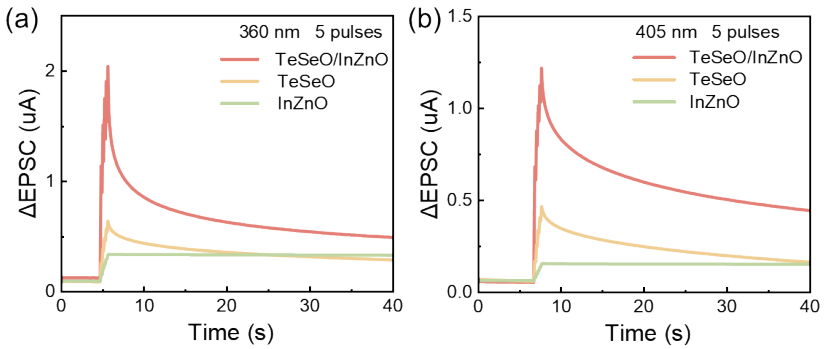


图2 单一TeSeO、InZnO和TeSeO/InZnO晶体管在(a)360 nm和(b)405 nm光刺激(100 ms, 8 mW/cm²)下的ΔEPSC响应。

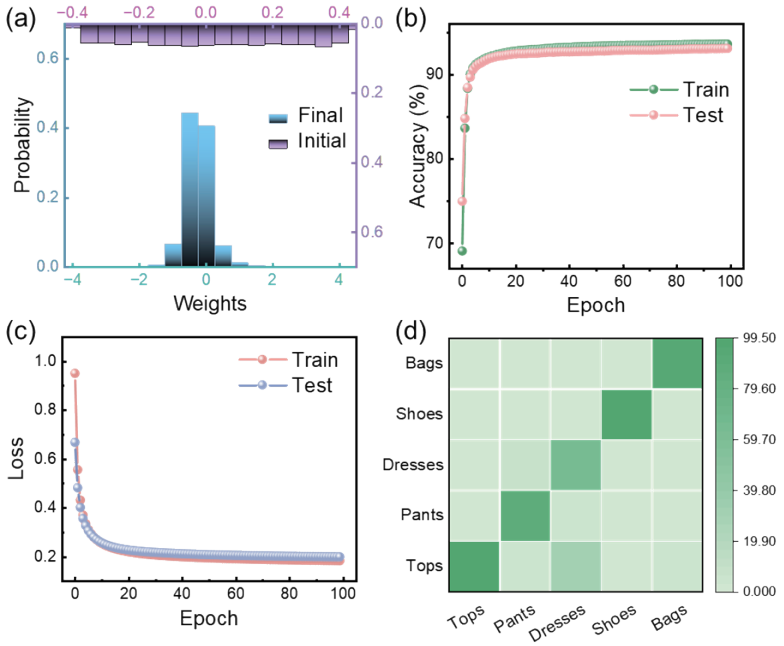


图3 (a)训练前后突触重量的变化；(b)在训练和测试条件下的物体识别、分类精度；(c)训练和测试过程中的损失函数演化；(d)显示实验分类结果的混淆矩阵。

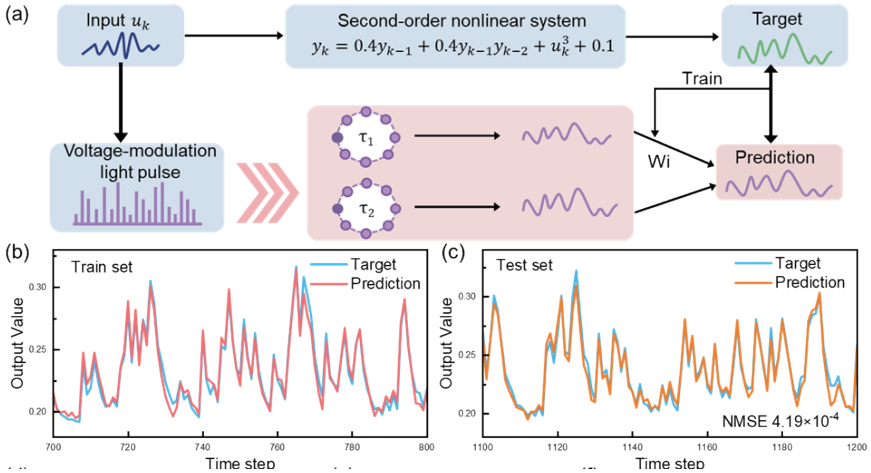


图4 (a)基于TeSeO/InZnO晶体管的计算任务示意图;(b)训练阶段二阶非线性动力系统的目标波形和预测波形;(c)测试阶段二阶非线性动力系统的目标波形和预测波形。

技术指标/优势

基于TeSeOx的窄带隙,实现了器件对可见光波长的本征响应,克服了传统光电器件在单波长光响应局限。同时该器件可以在可见光波刺激下展现出差异化突触后电流,模拟“学习-遗忘-再学习”等关键突触行为。同时,在该器件上实现了对痛觉感受器的模拟,并利用三色光实现了从0级到Ⅱ级的多级痛觉感知,拓展了光电突触器件的应用边界。

应用领域和市场前景

本成果的核心是一种具备超宽光谱感知和储备池计算能力的光电突触晶体管,其在智能感知与复杂计算领域展现出广阔的应用前景。首先,在多光谱成像与智能机器视觉领域,该器件可用于构建感存算一体化的视觉芯片,直接对紫外到近红外波段的光信号进行感知、存储和预处理。这在军事侦察、安防监控、工业检测等需要多波段信息融合的场景中具有独特优势,能够有效降低系统功耗和数据处理延迟,提升目标识别和跟踪的准确性。

其次,在自动驾驶与环境感知领域,该器件可集成于车载视觉系统中,实现对交通信号灯、路标、障碍物等彩色信息的实时识别,同时其对近红外光的响应能力使其在夜间或恶劣天气条件下的感知能力显著增强。基于储备池计算的架构能够高效处理激光雷达、摄像头等多传感器融合的时序数据,提升自动驾驶系统的环境感知和决策能力。

此外,在复杂动态系统预测领域,该器件可作为物理储备池的核心单元,相比传统基于软件实现的预测算法,硬件储备池计算具有低延迟、低功耗的优势,尤其适合边缘端实时预测应用。随着物联网和边缘人工智能的快速发展,本成果所代表的宽谱感知与计算一体化技术,将在智能感知、自主决策和复杂系统建模等领域发挥重要作用。

高密度近红外单光子激光雷达阵列探测器芯片

成果完成人	徐跃	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	自动驾驶行业、消费电子行业				
核心专利号	202111578048.7；202210429363.1；202211136469.9；202311076008.1				

成果概述

随着自动驾驶与机器视觉的发展，Flash型固态激光雷达成为主流方向。然而其规模化应用面临多重瓶颈：不仅硅基SPAD器件在近红外波段探测效率低、抗背景光干扰能力弱；而且在读出电路层面，高精度TDC（时间数字转换器）面积与功耗过大，导致远距离量程与高时间分辨率难以兼得，严重制约了大规模高密度阵列的集成。

本项目基于低成本硅基BCD工艺，创新“p型复合层/高压n阱”等新型SPAD结构与虚拟保护环技术，大幅提升905nm探测效率并降低暗计数。在电路架构上，提出“时间-模数混合转换”新型测距技术突破TDC设计瓶颈，并研发像素级背景光抑制与逐步寻峰直方图电路，成功解决了大量程、高精度与户外强抗干扰的融合难题。该研究最终实现了32×32规模的高密度近红外单光子激光雷达阵列芯片。成果指标优异，为无人驾驶、三维成像等领域提供了低成本、高性能的国产化核心芯片解决方案，具备极高的产业化价值。

关键技术/创新要点

本设计聚焦固态激光雷达在实际应用中的核心瓶颈，基于低成本标准硅基BCD工艺，从底层器件、测距电路到系统架构进行了创新，主要关键技术如下：

1. 低成本、高灵敏度的近红外SPAD器件技术

传统硅基传感器在人眼安全的905nm近红外波段灵敏度低。本项目创新设计了新型SPAD器件结构（p型复合层/高压n阱）。通过构建深且宽的雪崩倍增区，极大地增强了器件对长波光子的捕获与吸收能力。该技术在保持极低暗计数噪声和时间抖动的同时，将905 nm波段的光子探测概率成功提升至11.4%。

2. 兼顾高精度与大量程的混合测距架构技术

在测量光子飞行时间时，传统技术难以兼顾“看得远”与“测得准”。本项目提出了一种“时间-模数混合转换”的新型测距架构。团队研发了基于门控环形振荡器（GRO）的分段式量化技术，将精细的周期划分与大范围的周期累加相结合。这种“粗细结合”的巧妙设计，打破了时间分辨率与动态测量范围之间的矛盾，在不显著增加功耗与芯片面积的前提下，实现了远距离下的皮秒级高精度深度测距。

3. 强背景光抑制与高密度阵列读出技术

针对户外强烈太阳光导致的“致盲”问题，本项目提出了一种像素级的光子事件鉴别技术。通过时间窗口阈值甄别，有效屏蔽随机的背景光噪声，精准提取真实的激光回波。此外，项目解决了大规模信号传输瓶颈，成功集成了32×32规模的高密度读出阵列。结合分布逐步寻峰直方图算法，大幅降低了芯片存储需求。

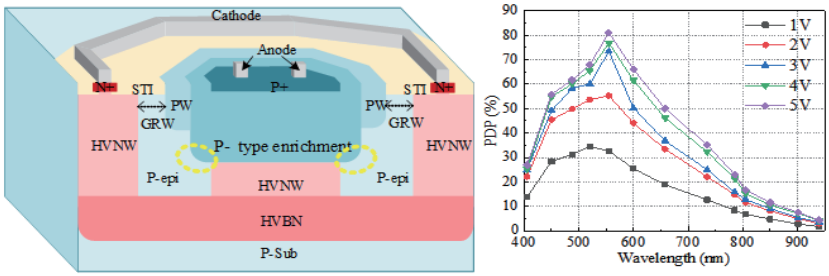


图1 基于标准BCD工艺的高性能近红外SPAD器件结构与探测效率

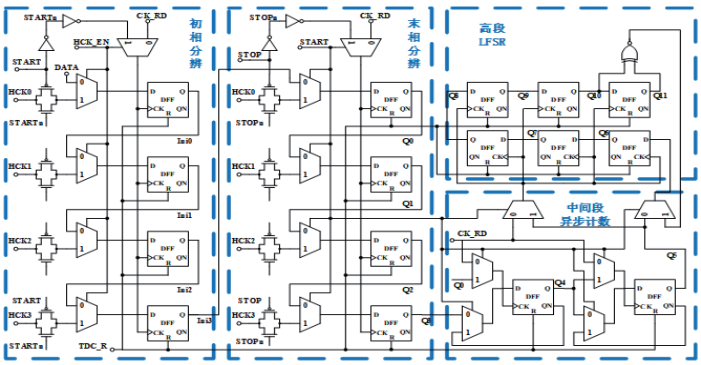


图2 分段式光子飞行时间电路架构

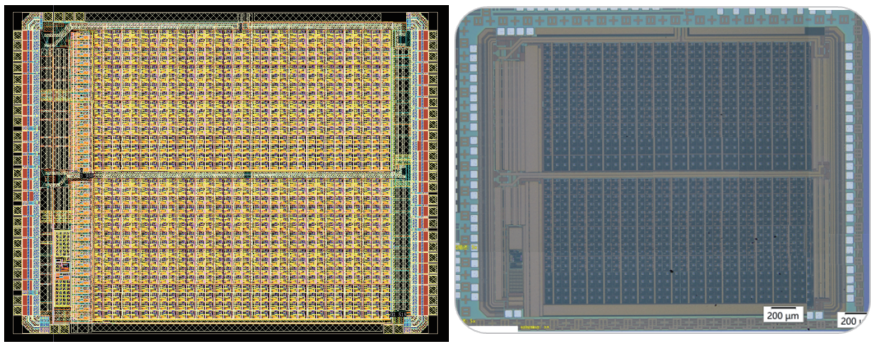


图3 32×32近红外单光子激光雷达阵列版图及显微照片

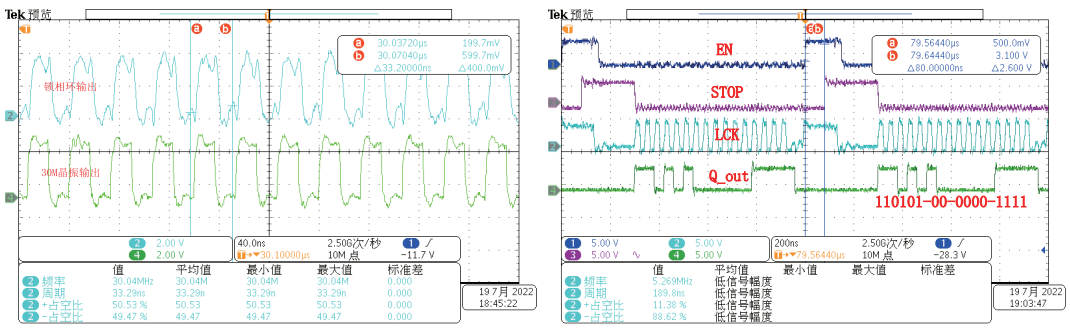


图4 锁相环及TDC示波器测试结果

技术指标/优势

本项目基于0.18μm BCD工艺，成功研制了高性能近红外SPAD及高密度阵列读出芯片，关键指标如下：

1. 光子探测概率：11.4%@905 nm，81%@555 nm.
2. 测量距离：50米
3. 时间分辨率：78.125 ps
4. 阵列规模：32×32
5. 面积：2.5 mm×2.5 mm
6. 平均功耗：54 mW

与同类技术相比，本成果具有显著的综合竞争优势。首先在工艺与成本方面，本项目打破了传统近红外SPAD对背照式工艺的依赖，仅依靠低成本、成熟的0.18μm标准BCD工艺便实现了近红外探测灵敏度的提升。其次在系统架构上，首创的多段式“时间-模数混合转换”电路完美解决了远距离d-ToF探测中高精度、低功耗与芯片小面积难以兼顾的痛点。此外，针对户外强光致盲难题，项目创新性地在像素内部集成了光子事件鉴别电路，配合纳秒级特征筛选消除了光子堆积效应，具备卓越的全天候抗干扰能力。最后，采用独创的分步式逐步逼近寻峰直方图技术，大幅降低了片外传输带宽压力与片内SRAM存储开销，系统读出效率与整体能效远超同类传统架构。

应用领域和市场前景

本成果研发的高性能近红外SPAD激光雷达阵列芯片，凭借大量程、高精度、强抗干扰及低成本等核心优势，具有极广阔的应用空间与商业价值。在应用场景上，该成果不仅可作为车载Flash固态激光雷达的核心传感器，为自动驾驶与智能网联汽车提供复杂路况的三维环境感知与高速避障；还能赋能无人机、工业无人运输车辆等低空经济与机器人产业，实现全天候自主导航与高精度三维建图；此外，也可为AR/VR头显及智能终端提供低功耗的空间建模与手势交互支持。在市场前景方面，随着智能驾驶与人工智能产业爆发，高精度3D视觉传感器需求激增，但高端芯片仍面临成本高、依赖进口等痛点。本项目采用成熟的硅基BCD工艺，攻克了大规模阵列集成与户外强光干扰的技术壁垒，大幅降低了量产成本。成果的落地将有力推动激光雷达向小型化、纯固态化普及，加速核心元器件的国产化替代进程，在千亿级的3D视觉蓝海市场中具备强劲的商业爆发力。

高精度全集成3D角度传感器芯片

成果完成人	徐跃	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	新能源汽车、工业自动化				
核心专利号	202310388847.0；201911271684.8；202411038053.2				

成果概述

高精度3D磁位置及角度感测是航空航天、汽车电子及工业伺服系统的核心技术。长期以来，高性能三维磁感应芯片面临国外技术封锁，国产芯片在感测灵敏度、低噪声模拟前端、以及复杂电磁环境下的杂散磁场抑制能力等方面存在明显短板，难以满足严苛工况下的高鲁棒性要求。因此，研发具备自主知识产权、支持全场景应用的高精度3D全集成角度传感器芯片对实现关键元器件国产化替代具有重要意义。

本团队自主研发了一款集感测、信号链与算法处理于一体的全集成3D磁角度测量SoC。该芯片采用创新的数模混合架构，重点攻克了硅基3D霍尔器件优化、低失调模拟前端感测以及实时数字校准等关键技术。此外，芯片实现了对环境干扰磁场的有效抑制，并具备多模态工作特性，可灵活兼容在轴（On-axis）与离轴（Off-axis）测量模式。成果在保持低功耗、小型化优势的同时，达到了高测量精度与高等级可靠性水平，在航空航天精密姿态控制、新能源汽车系统及工业自动化领域具有广阔的产业化应用前景。

关键技术/创新要点

本项目自主研发了一款高性能3D霍尔器件、超低噪声信号处理电路与片上高精度算法于一体的全集成3D角度传感器，其架构图及版图如图1所示，核心创新点提炼如下：

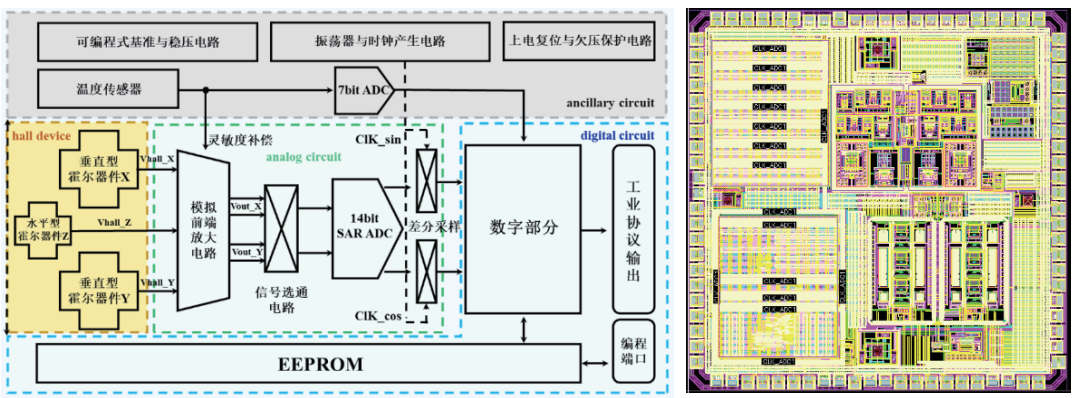


图1 3D角度传感器芯片架构图及芯片版图

1.基于CMOS工艺的高性能3D霍尔器件：突破了国产角度传感器传感元件灵敏度不足、失调大的瓶颈，创新提出全对称3D霍尔器件新结构。对于垂直霍尔器件，采用多层阱堆叠技术，促进载流子纵向流动。该设计显著提升垂直器件电流相关灵敏度至150 V/AT。测试结果表明，残余失调小于10μT，磁场线性度优于99%，低频噪声低至10^{-12} V^2/Hz。

2.低噪声低失调信号链架构：首创应用于电流模式的四相旋转技术与动态误差补偿技术，巧妙结合斩波放大及开关电容滤波器。在极低功耗（4.5mA）限制下，将残余失调降至0.1mT，实现0.2mT的超高分辨率与99.9%的超高线性度。配合片内14-bit SAR ADC，将高线性、高质量的模拟磁感应信号精准数字化，为后端算法提供了高质量的信号源。

3.片上角度解算与动态数字校准补偿算法：片内集成自研CORDIC角度解算、温度分段插值补偿及自适应多模式数字滤波算法。芯片可直接在片上完成高精度角度计算与环境温度自补偿，实现0.3°的超高全量程测量精度，显著降低了系统的复杂度及芯片面积。此外，芯片集成可编程EEPROM接口，支持SPI、PWM、SENT、ABZ等多种工业级标准输出协议的用户可编程，其模拟输出和PWM输出如图2所示，完美适配多元化场景。



图2 3D角度传感器芯片整体模拟输出和PWM输出

技术指标/优势

芯片整体的性能总结和国内外产品对比结果如表格所示，相较于IEEE报道的三款角度传感器，本芯片在完全集成传感元件与读出电路的前提下，实现了0.3°的高精度角度检测，芯片面积仅为5mm^2且功耗优势显著。与国内竞品昆泰芯及国际领先厂商Allegro相比，尽管功耗表现稍逊，但凭借在核心器件设计、模拟电路优化及先进数字校准算法上的创新，成功将角精度提升至0.3°的领先水平。

Parameter	IEEE TIM	IEEE TIE	IEEE Sensor J.	昆泰芯	Allegro(美国)	This work
Process	180nm CMOS	/	180nm CMOS	180nm CMOS	/	180nm BCD
Mechanism	Eddy current	Magnetic	Capacitive	Hall	Hall	Hall
Current (mA)	55	/	50	5	7	**15**
Area (mm^2)	14.45	/	77.4	/	/	**5**
Absolute measure	Yes	Yes	No	360	360	**Yes**
Sensor Type	PCB	MEMS	MEMS	ASIC	ASIC	**ASIC**
Readout Circuit	ASIC	PCB	ASIC	ASIC	ASIC	**ASIC**
Accuracy (°)	0.05	1	0.024	1	0.7	**0.3**

应用领域和市场前景

本成果研发的全集成硅基3D磁角度测量SoC，具备高灵敏度、低噪声及多模态测量的核心优势，其应用领域与市场前景主要体现在以下三个维度：

在汽车电子领域，随着线控底盘与三电系统的深度融合，该芯片可广泛应用于电子挡位器、电子油门/制动踏板及节气门控制。其特有的杂散磁场补偿技术，有效解决了新能源汽车高电流环境下的电磁干扰难题，确保了动力与制动系统的全工况可靠性。在工业机器人与自动化领域，芯片支持的在轴与离轴工作模式可编程选择，能够完美适配伺服电机、协作机器人关节及精密执行机构，助力智能制造实现精密运动控制。此外，在高端装备的姿态感测等高可靠性场景也展现出显著的应用价值。

市场前景方面，高性能3D磁传感器作为位置感知的核心元器件，目前长期依赖进口，面临严峻的供应链安全风险。本产品的研发成功突破了多维度磁场解算与抗干扰补偿等关键技术，不仅实现了核心传感器的国产化自主受控，更凭借高集成度、低功耗与小型化的单芯片方案，在年增长率持续攀升的百亿级全球磁感应市场中具备极强的竞争优势与规模化应用潜力。

锁相环时钟芯片

成果完成人	吉新村	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	通信系统，雷达与仪表				
核心专利号	ZL202210491134.2				

成果概述

本团队自主研发了一款超低噪声频率合成器，能够支持最高26.5GHz的本振（LO）输入。该芯片基于境内高性能硅锗（SiGe）双极互补金属氧化物半导体（BiCMOS）工艺制造，归一化相位噪声基底达-234dBc/Hz。鉴频鉴相器（PFD）在整数N模式下最高工作频率250MHz，小数N模式下125MHz。可变模数∑-Δ调制器采用49-bit小数值，具有极高的频率分辨率。既可用作整数N锁相环，也可作为小数锁相环工作。搭配外部环路滤波器和压控振荡器（VCO）即可构成完整的锁相环本振系统。最高26.5GHz的输入频率无需额外的倍频或分频器，简化了系统架构并降低成本，达到国外同类产品性能。

关键技术/创新要点

1. 优异的带内噪声性能

该芯片在实现了极低的归一化相位噪底（整数模式达-234dBc/Hz，小数模式达-231dBc/Hz）。这得益于其内部优化的高速时钟缓冲器、射频分频器以及低噪声电荷泵的设计。实现了1GHz到26.5GHz全频段一致的低噪声性能，降低了闪烁噪声（1/f噪声）、热噪声和寄生参数导致的相位噪声恶化。

2. 高频率分辨率和低杂散性能

芯片内置49位可变模数Δ-Σ调制器，支持亚赫兹级的频率分辨率。这使得芯片能实现极高的频率精度，得益于内部集成的低杂散小数调制器，测试的亚整数杂散优于-50dBc。

3. 全国产化

芯片采用境内SiGe BiCMOS工艺制造，支持高达250MHz（整数N）或125MHz（小数N）的鉴相频率，具有全国产自主可控的优势。

应用领域和市场前景

支持从Sub-6GHz到毫米波段（26.5GHz）的锁相环（PLL）频率合成器芯片应用广泛，其噪声性能和频率精度是制约系统性能的关键因素。该芯片具有优异的相位噪声性能和极高的频率精度，能够直接驱动低频至Ka波段收发组件，无需额外的倍频或混频级，简化了链路设计，该锁相环芯片可广泛用于微波雷达、卫星载荷及各频段通信模组。

基于交叉电极与集成微加热器的相变纳米光子电路

成果完成人	王磊	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	神经形态计算				

成果概述

光子集成电路凭借低损耗、大带宽和超快处理速度等优势，在数据通信领域占据主导地位。将硫系相变材料与光子器件结合，进一步拓展了其在片上存储、存内计算和类脑计算等新兴领域的应用前景。然而，传统全光调控方式需要复杂的光脉冲设计，且系统级扩展性差，难以实现大规模集成。

本成果首次提出将铂交叉电极与氧化铟锡微加热器集成到相变光子电路中，通过电热方式实现对相变材料的编程调控。建立了完整的三维电-热-光多物理场仿真模型，系统优化了器件结构与材料参数。仿真结果表明，该架构具有良好的可扩展性，可实现随机寻址和多级存储功能，且编程能耗较现有方案显著降低。该成果为构建大规模可编程光子集成回路、实现片上矩阵运算和神经形态计算提供了新的技术路径。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于首次将交叉电极结构与集成微加热器引入相变光子电路中，实现了电学编程与光子读出的有机结合，解决了传统全光调控方案可扩展性差的问题。器件结构如图1所示，铂交叉电极嵌入在绝缘体上硅平台的不同高度层中，避免电极交叉短路；位于交叉点处的氧化铟锡微加热器被包裹在相变材料层周围，当在行电极与列电极之间施加电脉冲时，微加热器产生焦耳热，热量传递至相变材料层引起其晶态与非晶态之间的转变，从而改变材料的折射率。通过光波导耦合的光信号强度随之变化，实现信息的读出。

针对加热层和相变材料层的厚度进行了系统优化。如图2所示，较厚的氧化铟锡加热层可使相变材料层获得更高温度，这是由于加热层增厚后，相变材料层与下方的氮化硅波导距离增加，有效减少了热量向波导的散失。综合考虑加热效率与光传输损耗，选定加热层与相变材料层厚度均为10nm。

基于优化后的器件结构，通过调节电脉冲功率或脉冲宽度，可实现多种结晶程度的精确控制。如图3所示，通过连续调节编程功率，可获得多种不同的中间结晶状态，对应不同的光传输率，展现出优异的多级存储能力。进一步将单器件扩展为2×2阵列，如图4所示，通过对不同行列电极施加电激励，可实现阵列中每个器件的独立编程，验证了随机寻址功能，为构建大规模可编程光子集成回路奠定了基础。

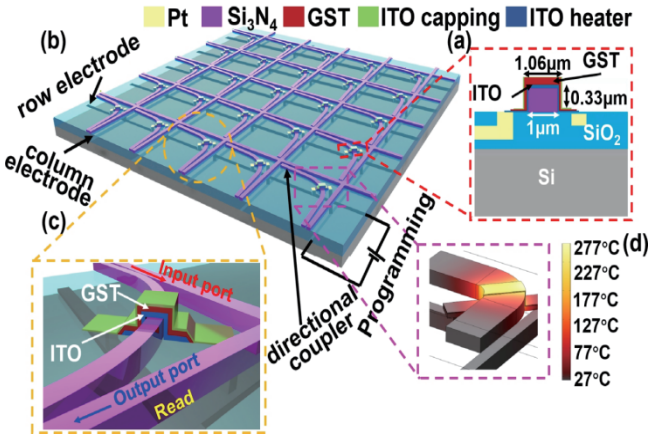


图1 具有交叉杆电极和ITO微加热器的相变单元的横截面视图

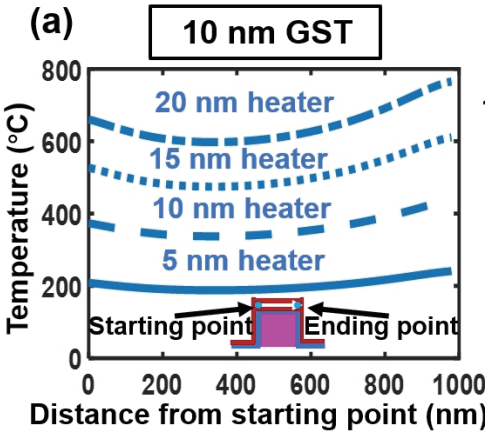


图2 不同加热层厚度下相变材料层水平中心线温度分布曲线

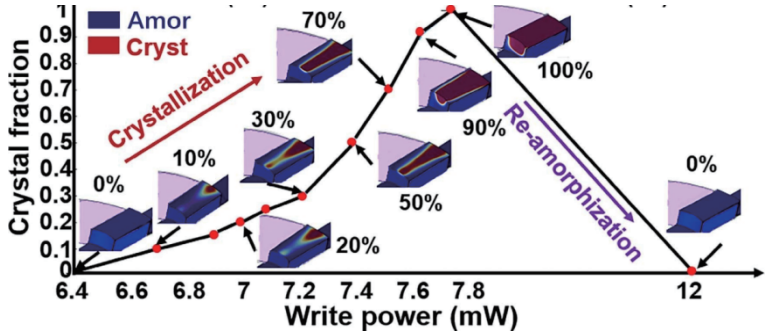


图3 不同编程功率下获得的多种中间结晶状态示意图

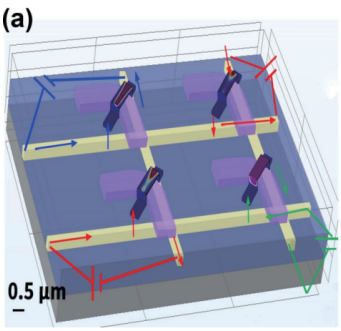


图4 2×2阵列中不同器件独立编程的仿真结果示意图

技术指标/优势

本成果提出的相变光子电路架构在多项关键指标上展现出明显优势。在系统可扩展性方面，采用交叉电极结构实现了随机寻址功能，可方便地扩展至大规模阵列，而现有全光调控方案或单器件集成加热器方案难以实现系统级扩展。在编程能耗方面，通过优化加热层材料和厚度，有效降低了热量向波导的散失，编程能耗较已报道的多种微加热器方案显著降低。在多级存储能力方面，通过调节电脉冲参数可获得多个稳定的中间结晶状态，实现多级光传输调控，为高密度存储和高精度计算提供了基础。在开关速度方面，采用电热编程方式，相变材料可在纳秒量级完成状态切换。

应用领域和市场前景

本成果可为光通信与光计算融合系统、片上矩阵运算加速器以及神经形态计算芯片等领域提供关键技术支撑。在光通信领域，该器件可作为可重构光开关和光衰减器，用于光交换节点和波分复用系统中的动态信道调控，提升光网络的可重构性和灵活性。在光计算方面，基于相变材料的多级光传输特性，可构建非易失的光学矩阵乘法器，用于深度学习中的矩阵运算加速，较传统电学方案具有更高的带宽和更低的能耗。在神经形态计算方面，该器件可作为光子突触器件，利用多级光传输状态模拟突触权重，结合光子神经元的超快响应特性，构建高性能光子神经网络。随着数据中心光互连、人工智能光计算等领域的快速发展，具备高可扩展性和低能耗优势的电编程相变光子技术展现出良好的成果转化潜力。

晶格工程调控的高性能β-Ga_2O_3忆阻器及其图像处理应用

成果完成人	王磊	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	神经形态计算				

成果概述

随着人工智能和图像处理对算力和能效的要求日益提升，传统计算架构面临“存储墙”瓶颈。忆阻器作为新型存储与计算融合器件，是实现高能效存内计算的关键。然而，传统氧化镓忆阻器多采用非晶或多晶薄膜，器件性能受限于材料结晶质量。

本成果基于晶格工程策略，通过牺牲层辅助剥离技术制备出高结晶质量的β-Ga_2O_3单晶薄膜，并构建了垂直结构Ag/β-Ga_2O_3/Pt忆阻器。该器件实现了超过108的超高开关比、低至0.13V的工作电压、10^{-10}A的超低编程电流以及超过4×10^4s的数据保持能力。通过调节限制电流，器件可在易失性与非易失性阻变模式间切换。进一步地，基于该忆阻器设计并仿真了可重构异或逻辑门电路，成功实现了图像的加密/解密与边缘检测功能。该成果为高性能存内计算与硬件级图像安全处理提供了新路径。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于突破了传统氧化镓忆阻器结晶质量差的瓶颈，实现了高性能与多功能集成。团队采用晶格工程策略，在钛酸锶衬底上通过脉冲激光沉积外延生长β-Ga_2O_3薄膜，利用LSMO作为牺牲层，通过化学刻蚀实现薄膜的完整剥离与转移，如图1所示，该过程可将高结晶质量的薄膜完整转移到任意衬底上。所制备的薄膜结晶质量高，氧空位缺陷少，图2的XRD图谱显示出清晰的β-Ga_2O_3衍射峰，证实了其优异的晶体结构，为忆阻器提供了理想的阻变功能层。

基于该高质量薄膜制备的Ag/β-Ga_2O_3/Pt忆阻器，通过调节限制电流可实现易失性与非易失性两种阻变模式的灵活切换。如图3所示，当限制电流较小时，器件表现出易失性开关特性，撤去电压后自动恢复到高阻态，适合模拟神经元行为；而当限制电流增大后，器件转为非易失性开关模式，开关比极高，数据保持时间长，且SET/RESET电压稳定，展现出优异的存储性能。进一步地，团队基于四个忆阻器构建了惠斯通电桥结构的异或逻辑门电路，并利用该电路实现了图像加密与解密功能（图4）：将原始图像与随机密钥进行逐位异或运算，加密后图像呈现为噪声，使用相同密钥再次异或即可完美恢复原始图像。同时，利用该电路对输入电压差敏感的特性，构建并行处理阵列，可同时实现图像的垂直与水平边缘检测，较传统卷积算法具有更高的并行处理速度和能效。

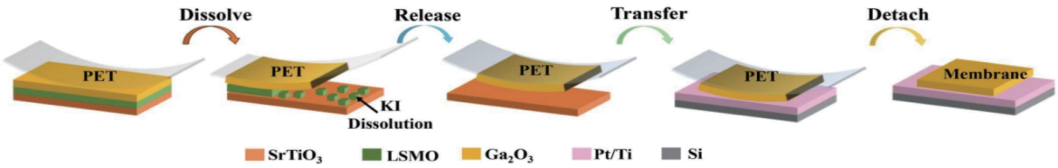


图1 β-Ga_2O_3薄膜的剥离与转移过程示意图

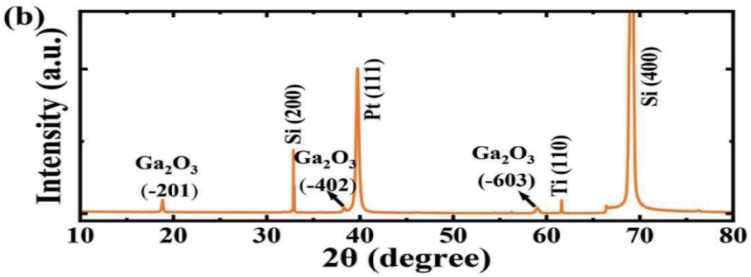


图2 β-Ga_2O_3薄膜的XRD衍射图谱

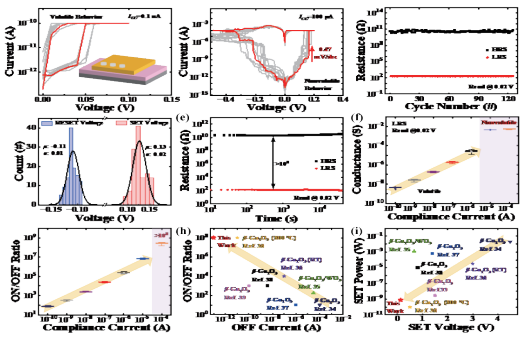


图3 忆阻器的电学特性

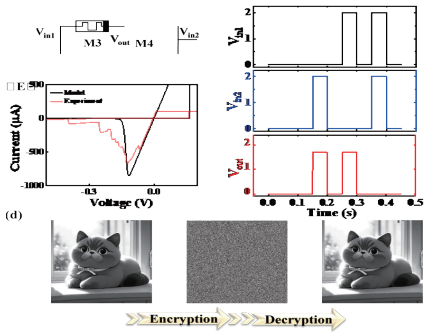


图4 基于忆阻器电路的图像加密与解密效果对比图

技术指标/优势

本成果制备的Ag/β-Ga_2O_3/Pt忆阻器在多项关键指标上全面超越现有同类器件。开关比远超传统β-Ga_2O_3忆阻器，确保逻辑状态清晰可辨；SET电压和RESET电压较同类器件显著降低，大幅减少操作能耗；编程电流极低，较传统器件降低数个数量级，极大减少静态功耗；数据保持时间优异，亚阈值摆幅处于领先水平，均优于目前报道的氧化镓基忆阻器。通过限制电流调节，器件可在易失性与非易失性模式间自由切换，功能集成度高。基于该器件构建的异或逻辑门电路具备良好的抗噪声能力，并已在仿真中验证了图像加密、解密与边缘检测功能。

应用领域和市场前景

本成果可为存内计算芯片、硬件级数据加密模块以及实时图像处理系统等领域提供关键技术支撑。在存内计算方面，超低功耗忆阻器可作为神经网络加速器的核心单元，用于边缘端人工智能推理、智能传感器数据处理等场景，满足物联网设备对低功耗、高能效的需求。在硬件安全方面，基于忆阻器的异或逻辑门电路可用于芯片级加密模块，为智能卡、安全芯片、物联网终端提供轻量化、低功耗的硬件加密解决方案，有效抵御软件层面的侧信道攻击。在图像处理方面，并行忆阻器阵列可实现对图像的边缘检测、特征提取等预处理操作，适用于机器视觉、自动驾驶、安防监控等领域，较传统GPU/CPU方案可降低功耗和处理延迟。据市场研究机构预测，全球忆阻器市场在未来几年将保持高速增长，其中存内计算和硬件安全是主要增长驱动力。本成果作为兼具高性能与多功能集成的新型忆阻器技术，具备良好的成果转化潜力。

一种集成SECE和FOCV MPPT技术的自启动低静态电流三源能量收集电路设计

成果完成人	张长春	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	集成电路				

成果概述

随着物联网技术的蓬勃发展，为可穿戴设备、无线传感器网络等低功耗应用提供持续稳定的能源供应成为关键挑战。传统的电池供电方案在更换维护、使用寿命等方面存在局限，环境能量采集技术应运而生。然而，单一能源采集易受环境变化影响，导致系统供电不稳定。因此，开发能够高效管理多种能源（如振动、光、热）的采集系统具有重要意义。

本项目提出了一种适用于压电、光伏和热电三源能量采集的自启动高效转换器。该转换器采用单电感架构，集成了同步电荷提取（SECE）技术和分数开路电压最大功率点跟踪（FOCV MPPT）技术。SECE技术用于高效采集压电能量，使其转换效率与负载无关；FOCV MPPT技术则用于光伏和热电接口，通过简单的采样保持电路即可实现最大功率点跟踪，显著降低了系统功耗。该成果在0.18μm CMOS工艺下完成流片验证，实现了300nA的超低静态电流和低至100mV的自启动电压，峰值端到端转换效率达到47.4%，为多源能量采集系统提供了一种高可靠性、低功耗的解决方案。

关键技术/创新要点

本项目设计了一种基于单电感的三源能量协同管理与优先级控制架构，如图1所示。通过一个优先级控制器和异步逻辑控制器，实现了对压电、光电和热电三种能源的协同管理。当多个能源同时达到最大功率点时，系统会根据预设的优先级（压电>光电>热电）有序地进行能量提取，避免了资源冲突，确保了系统在不同环境条件下的稳定性和可靠性，并进行了严谨的流片测试（图2）。

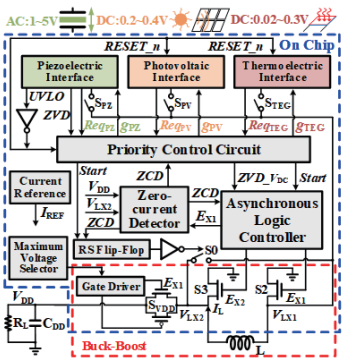


图1 所提出电路的整体架构

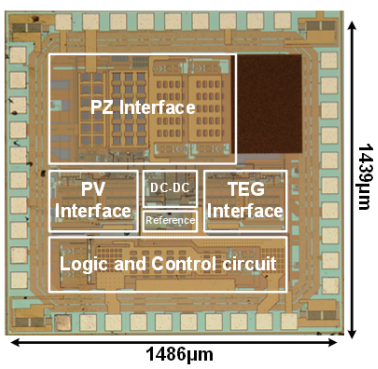


图2 芯片显微照片

针对压电能量弱且不规则的特性，本项目的压电接口采用了高效同步电荷提取（SECE）技术，如图3所示。该技术通过主动整流和电感储能，在压电元件电压峰值时将电荷提取并存储。与传统方法相比，SECE技术使得能量转换效率理论上与负载无关，从而能够最大化地从振动环境中获取能量，特别适合作为多源采集系统的一部分。

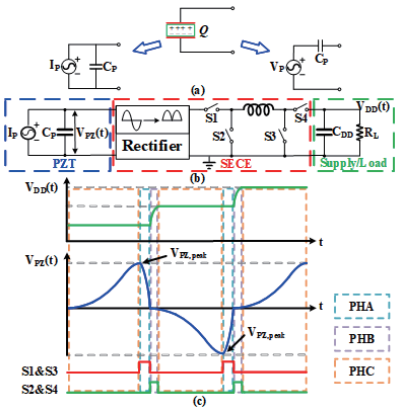


图3（a）压电接口电学模型，（b）SECE电路和（c）具体波形

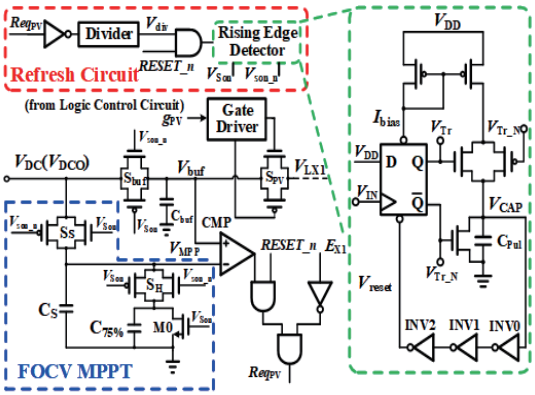


图4 光电/热电能量接口的电路结构

为了以极低的功耗实现光电和热电能源的最大功率点追踪，本项目的光电/热电接口所采用的分数开路电压最大功率点追踪（FOCV　MPPT）技术。该技术利用光伏电池（最大功率点电压约为开路电压的75%）和热电发生器（约为开路电压的50%）的电压比例特性，如图4所示，通过一个简单的采样保持电路和电阻分压器，即可将输入电压稳定在最大功率点附近。这种方式无需复杂的数字控制算法或额外的传感器，大大简化了电路设计并降低了功耗。

为降低系统整体功耗，项目在设计各个子模块时均采用了超低功耗技术。例如，电流基准源工作在亚阈值区，实现了高电源抑制比和低温度漂移，如图5所示；最大电压选择器用于为电平移位器和栅极驱动器供电，确保在不同电压下晶体管能正确导通。这些设计共同作用，使得整个芯片的静态电流低至300nA，为系统的低电压自启动奠定了基础。

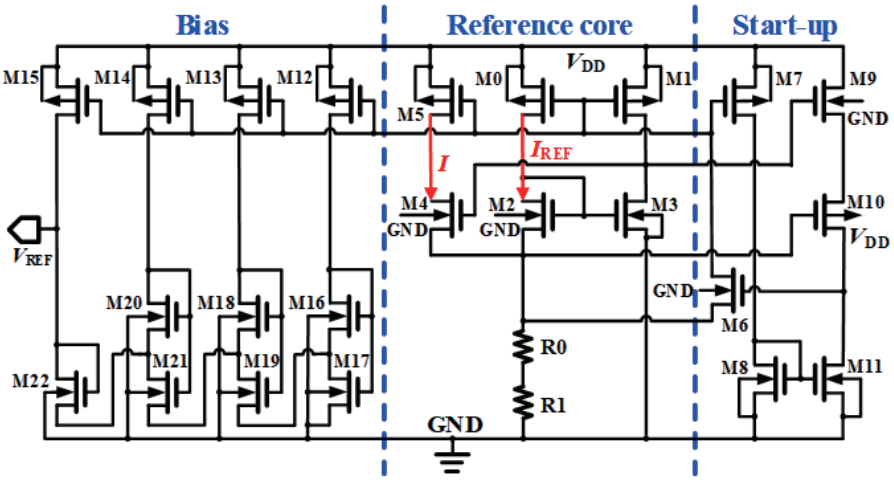


图5 亚阈值基准电流源电路结构

技术指标/优势

芯片实测静态电流仅为300nA，远低于同类多源采集系统，显著降低了系统在无能量采集时的自身功耗。实现了低至100mV的输入自启动电压，无需外部电池辅助，即可从微弱的环境能量中启动系统。

在压电能量采集模式下，峰值端到端转换效率可达47.4%；在光伏/热电能量采集模式下，峰值效率可达36.2%，在多源能量同时采集时效率为29.2%。单芯片集成了三种能源的接口电路，仅需一个片外电感，芯片面积仅为2.1mm^2，减少了外部元件数量，降低了系统成本。

与现有文献中的能量采集器相比，本工作在能量来源多样性（三种）、自启动电压（100mV）和静态功耗（300nA）等方面表现出综合优势，体现了其在超低功耗多源能量管理领域的先进性。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于对功耗和续航有极高要求的物联网终端设备。在可穿戴设备（如智能手表、健康监测贴片）中，可采集人体运动（振动）、体表温度（温差）和周围环境光能，实现设备的免充电或超长待机。在无线传感器网络中，特别是部署于偏远地区或危险环境（如结构健康监测、环境监测）的传感器节点，该技术能够利用环境中的微小能量自供电，摆脱了定期更换电池的维护成本和难题。

随着物联网向更深、更广的领域渗透，数以亿计的传感器节点对免维护、自供电解决方案的需求日益迫切。本成果所展示的高效、低功耗、多源兼容的能量采集技术，为解决这些设备的供电瓶颈提供了关键技术路径，具备广阔的市场应用前景。

一种集成可重构电荷泵和MPPT技术的全集成混合电源转换器设计

成果完成人	张长春	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	集成电路				

成果概述

随着物联网传感器节点的广泛部署，为其提供持久、免维护的供电方案成为关键挑战。单一环境能量采集（如光、热、振动）受环境变化影响大，供电稳定性差。因此，能够同时采集多种能源（如压电、光电、热电、射频）并高效管理的电源转换系统成为研究热点。

本项目提出了一种全集成混合电源转换器，专为压电、光电、热电和射频四源能量采集而设计，如图1所示。该转换器的核心是一个可重构电荷泵（RCP），可在4/3倍至8倍范围内动态切换转换比，有效降低电荷再分配损耗，从而在宽输入电压范围内保持高效能量提升。项目采用二维协同优化的最大功率点跟踪（MPPT）技术，通过联合调节电荷泵的转换比和开关频率，在宽输入功率范围内匹配等效输入阻抗，提升并平坦化转换效率。此外，一种间接功率监测方案复用了恒定导通时间（COT）调节信号，无需功耗较高的电流传感器。基于压电接口的自启动模块确保了系统的全自主初始化。该能量收集电路采用0.18μm CMOS工艺实现，实测峰值端到端效率达49.6%，静态电流低至230nA，为下一代无电池物联网设备提供了高适应性、高效率的电源解决方案。

关键技术/创新要点

针对传统电荷泵转换比固定、输入电压适应范围窄的问题，本项目设计了一种混合级联式可重构电荷泵，如图2所示。该架构通过整数倍升压级与分数倍降压级的组合，实现了从4/3倍至8倍共14种精细转换比。相比仅支持整数或简单分数倍的传统方案，该架构大幅提升了转换分辨率，有效扩展了高效工作区间，使电压转换效率在宽输入电压范围内均保持80%以上。

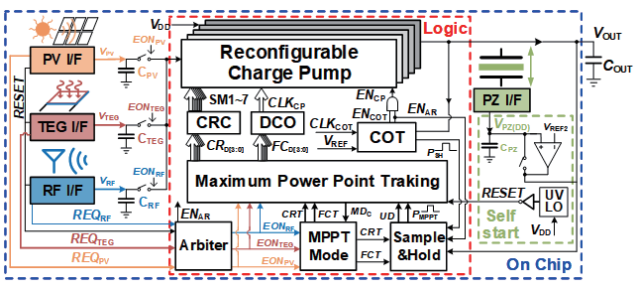


图1 整体系统架构

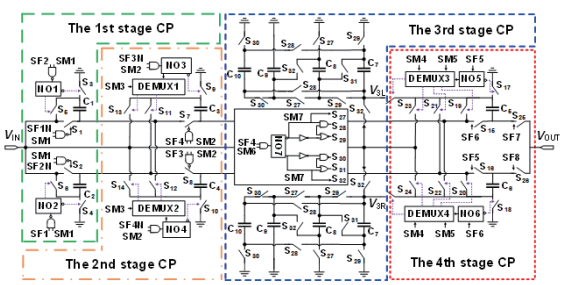


图2 提出的可重构电荷泵结构

为实现不同能量源在变化环境下的最大功率跟踪，本项目提出了一种联合调节转换比和开关频率的二维MPPT算法，如图3所示。该算法将转换比作为粗调参数，通过扫频快速定位局部最大功率点；随后将开关频率作为细调参数，精准收敛至全局最优工作点。这种“粗调+细调”的优化策略，在确保跟踪精度的同时，显著提升了系统在宽输入功率范围内的转换效率。

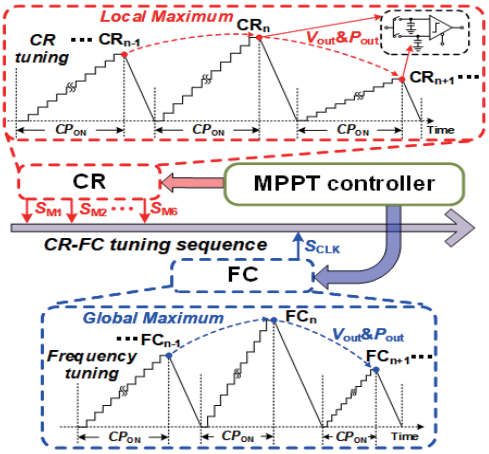


图3 二维MPPT原理

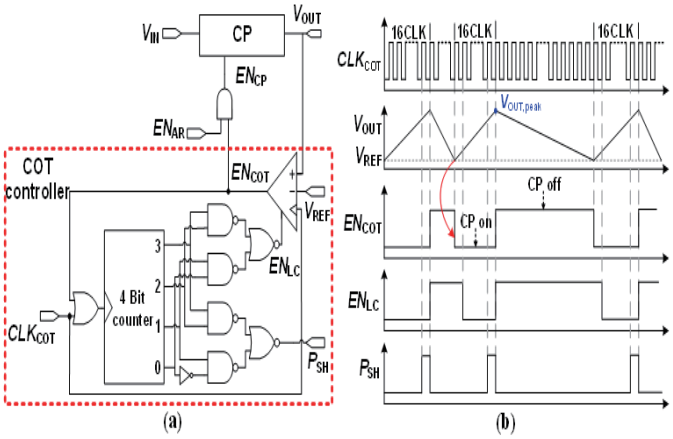


图4 COT电路的(a)结构和(b)波形

为避免使用功耗较大的电流传感器，本项目提出了一种间接功率监测方法，如图4所示。该方法利用恒定导通时间(COT)调节过程中产生的脉冲信号，通过采样并比较输出峰值电压的变化趋势来判断功率变化方向。由于在COT控制下，平均输出功率与输出峰值电压呈单调正相关关系，因此无需直接计算功率即可实现MPPT决策，有效降低了系统功耗和电路复杂度。

为适配不同能量源的电气特性，本项目分别设计了专用整流器前端。对于射频输入，采用带阈值自补偿的八级Dickson电荷泵，在保持NMOS器件优良射频性能的同时，克服了阈值电压造成的效率损失。对于压电输入，采用基于开关电容的同步开关采集(SSHC)整流器，实现了完全集成的电压翻转，提升了能量提取效率。此外，利用压电接口的自启动模块，实现了无需外部电池的100mV低电压自主初始化。

技术指标/优势

本项目中单芯片集成了压电、光电、热电和射频四种能量采集接口，芯片面积仅为4.42mm^2，实现了高度集成的多源能量管理方案。可处理0.1V至3V的宽范围输入电压，适应不同能量源在变化环境下的输出特性，如图5所示。

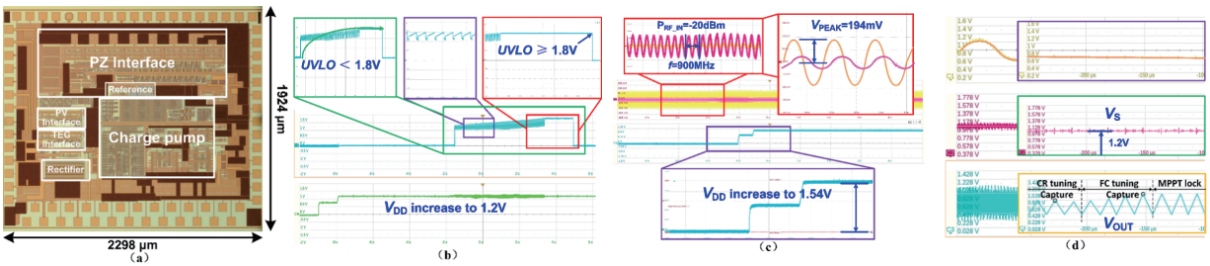


图5 芯片实测图片及波形

芯片实测静态电流低至230nA，远优于多数同类多源采集系统，显著降低了系统在待机或无能量采集时的自身功耗。在压电能量采集模式下峰值端到端效率达49.6%，光伏/热电模式下为41.9%，射频模式下为11.8%，多源同时工作时仍保持35%以上的效率。实现了低至100mV的自启动电压，无需外部电池辅助，即可从微弱的环境能量中启动系统。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于对功耗和续航有极致要求的物联网终端设备。在可穿戴设备（如智能手环、医疗健康贴片）中，可同时采集人体运动（压电）、体表温差（热电）、环境光（光伏）以及周围射频信号，实现设备的真正免充电运行。在工业无线传感器节点中，特别是在难以布线或更换电池的恶劣环境（如结构健康监测、管道监测），该技术能够利用环境中多种微弱能源实现自供电，大幅降低系统维护成本。

随着物联网向海量节点部署发展，无电池、免维护的自主供电方案需求日益迫切。本成果所展示的高效率、低功耗、多源兼容的电源管理技术，为解决物联网节点供电瓶颈提供了关键路径，具备广阔的市场应用前景。

28 GBaud NRZ/PAM4双模SerDes收发机设计

成果完成人	张长春	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	集成电路				
核心专利号	CN121567511A				

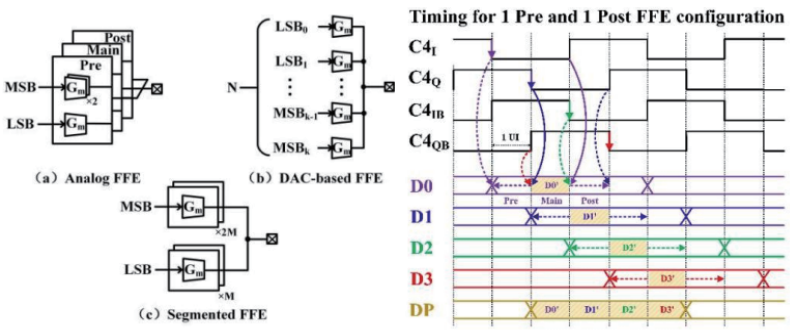
成果概述

近年来，云计算、物联网、无人驾驶、数据中心等领域快速发展，芯片与芯粒互连接口面临更高要求。一方面，信号传输速率不断提升，信道畸变问题愈发突出，需要更先进的技术优化信号传输；另一方面，接口应用场景持续拓展，需兼容多模式、多速率、多标准协议。

本项目设计的双模收发机系统架构，包含具有3抽头FFE的双模发射机与搭载CTLE+2抽头DFE的双模接收机。发射机采用可重构分段式FFE架构，能够灵活改变抽头搭配并调整均衡系数，适配不同传输场景需求。接收机沿用CTLE+2抽头DFE结构，DFE均衡器采用四分之一速率时序交织结构，补偿信道码间干扰，同时降低双模工作功耗；同时包含基于过采样、边沿检测的数据时钟恢复模块，以低功耗产生低抖动时钟；此外还配有低功耗阈值电压校准模块，通过自适应阈值电压校准技术，可解决模拟前端放大器非理想因素导致的PAM4码眼图失真问题，保障信号传输稳定性。

关键技术/创新要点

图1（a）为分段式FFE架构，该架构融合模拟FFE与DAC型FFE的优势，结构和模拟FFE相近，由2N个MSB驱动段与N个LSB驱动段组成，能够在模拟域完成抽头系数调节，同时具备DAC型FFE灵活配置均衡参数的特点。图1（b）是FFE配置为1个前抽头、1个后抽头时，主抽头采样的时序图，通过调整C4时钟相位，能够重新配置FFE段的抽头类型，将采样点向左或向右移动。



（a）　　（b）

图1 可重构FFE：（a）架构图；（b）时序图

如图2所示，接收端通过CTLE和加法器后实现了四路并行判决器路径，其中三路用于数据量化，一路用于波特率CDR中的相位检测。每条路径由一个判决器和一个再生锁存器和一个SR锁存器组成，判决器具有可编程阈值。在PAM4模式下，接收机输入为PAM4模拟信号，通过接收前端进行幅度的调节后供DFE判决。在NRZ模式下，DFE只需开启一路数据比较器进行判决即可。这时用于判决器和PAM4/PAM8相关的解码电路也可以关掉来节省功耗。整体架构实现了硬件复用和灵活性，满足了兼容多种码制模式的设计需求。

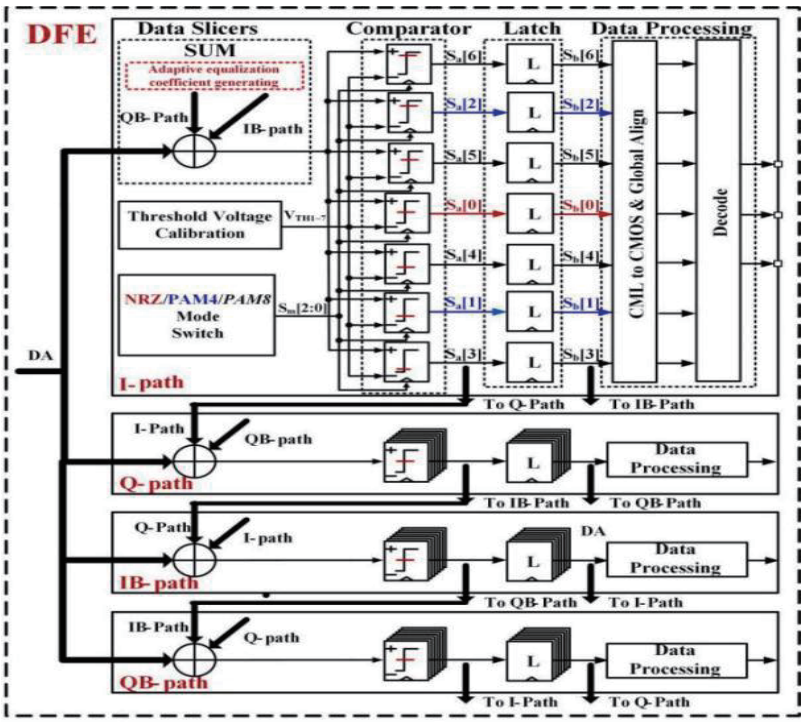


图2 双模低功耗DFE架构

传统阈值电压校准在细调阶段需要额外引入多路比较器进行数据电平跟踪，进而让阈值电压收敛至相邻两数据电平的中值，这会带来极大的功耗面积开销，因此拟提出的PAM4阈值电压跟踪电路在继续根据格雷码解码后的最低有效位占比来进行粗调，在细调阶段放弃了数据电平跟踪功能，而是通过在上下两个眼睛张开的范围内扫描阈值电压，以最上方眼睛为例，阈值电压会从VDH3扫描至VDH4，当结束粗调进入细调阶段，即输出格雷码最低有效位中的0占比从100%开始向50%下降，通过计数器得到当前VDH3对应的扫描数据，随后均匀提升VTH3，当扫描至VDH4时，输出格雷码最低有效位中的1占比从50%开始向100%升高，同样利用计数器得到当前VDH4对应的扫描数据。这样通过扫描的方式获取上下眼皮的数据电平进而取中值得到阈值电压，可以有效降低功耗和面积，并且兼顾上下眼的非线性失真问题，如图3所示。

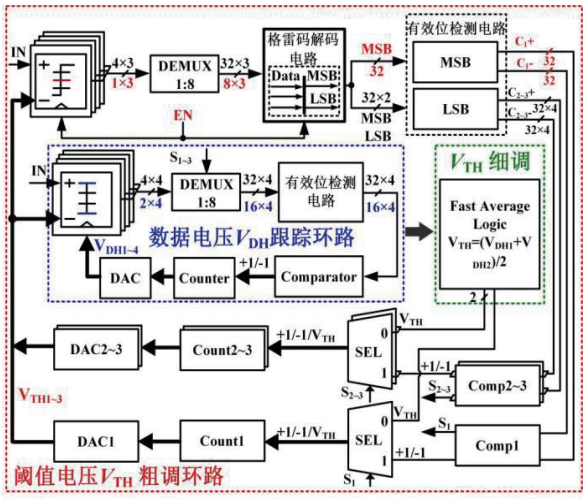


图3 阈值电压校准技术

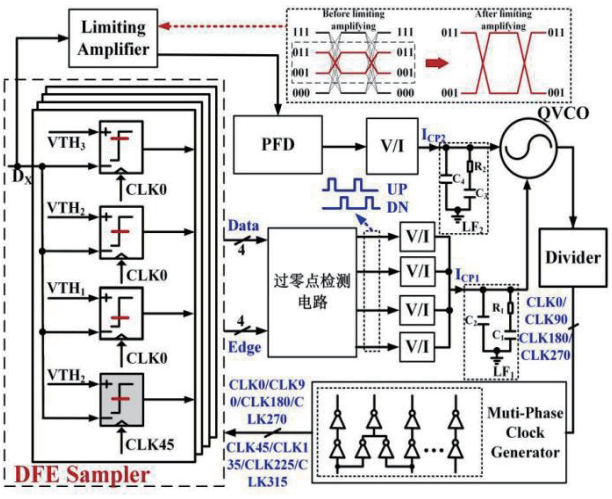


图4 无参考时钟CDR电路

为满足多种码元时钟恢复要求，本文采用无外部参考时钟鉴频、鉴相双环路CDR，如图4所示。鉴频鉴相器和Bang-Bang鉴相器会根据频率误差信息与相位误差信息通过压控振荡器的双压控端进行频率调谐和相位调谐。由于数据模式切换和分布不均匀的跳变沿而导致数据在跳变过程中出现的非对称性转换会给时钟信号引入较大抖动，因此需要在Bang-Bang PD中加入过零点检测电路以过滤掉非对称数据跳变。

技术指标/优势

与传统双模SerDes收发机系统相比，本设计的发射机采用可重构分段式FFE架构，相较于传统模拟架构，可灵活调整抽头搭配方式与均衡系数，能够适配不同场景下的信号传输需求。接收机部分结合低功耗双模DFE技术，提出一种新颖的双模低功耗1/4速率接收机架构，配套设计模式切换电路与自适应实现模块，既实现了电路对多种码元格式的兼容，也有效降低了功耗、面积占用与接收机带宽成本；同时还设计了多速率波特率采样CDR结构，可实现低功耗、低抖动的时钟数据恢复。

应用领域和市场前景

该成果可应用与芯片或芯粒的互联接口以满足对于多种模式的兼容。通过芯粒技术开发的专用异构芯片在工艺制程遭遇瓶颈的情况下，可以有效地解决芯片规模、开发成本和周期等问题，结合2.5D或3D等先进封装技术，兼顾了芯片系统的集成度、面积和功耗需求。与传统的单片系统集成相比，芯粒在保有优势的同时也面临许多挑战：一方面，现阶段异构芯片要求片间接口标准具备一定的灵活性，克服过去芯粒间互联兼容性方面的不足；另一方面，在不同的封装工艺下，需要对不同传输距离、不同信道衰减的芯粒互连接口进行针对性设计，以尽可能低的功耗和面积成本满足信号传输需求。如用于芯粒互联的超短距离串口主要用于2.5D或3D封装，在小于10mm的超短距离下实现芯粒间的硅衬底互连。由于通信距离短，这种接口通过高级编码、多位传输等技术可以显著降低芯片之间互连所需的I/O口数量，取得更好的性能和功耗比。

一种基于RO－MMCM边沿竞争机制的免校准FPGA真随机数发生器

成果完成人	张长春	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	应用安全技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	集成电路				

成果概述

真随机数是密码密钥生成、身份认证、安全通信和可信计算等信息安全系统的重要基础资源，其质量直接关系到系统安全性和可靠性。随着FPGA在嵌入式安全、工业控制和边缘计算等领域的广泛应用，如何在FPGA平台上稳定产生高质量真随机数已成为关键问题。然而，现有FPGA真随机数发生器普遍存在单一抖动源熵不足、依赖频率调节或相位扫描、跨器件适应性差等不足，难以兼顾高吞吐率、强鲁棒性和工程易部署性。

本团队自主研发了一种基于RO-MMCM边沿竞争机制的免校准FPGA真随机数发生器。该设计利用自由运行环形振荡器与混合模式时钟管理器的双抖动源特性，通过随机边沿竞争增强时间不确定性，并结合FPGA片上进位链实现高分辨率时间数字转换，再采用温度计码population count的差分提取方法抑制固定偏移与环境漂移影响，实现无需人工校准的稳定随机数输出。该成果具有随机性质量高、吞吐率高和跨平台适应性强等优点，可广泛应用于密码设备、安全芯片和可信硬件系统。

关键技术/创新要点

作为信息安全系统的基础支撑技术，真随机数发生器在密码密钥生成、身份认证、安全通信和可信计算等场景中具有重要作用。尤其对于FPGA平台而言，真随机数的质量和稳定性直接影响系统的安全性与可靠性。与基于算法的伪随机数不同，真随机数依赖器件内部不可预测的物理噪声，因此其核心在于如何从硬件中稳定提取高质量熵源。现有FPGA随机数方案大多依赖单一环形振荡器抖动，原始随机性有限；而部分基于时钟管理模块或时间数字转换器的方案又往往需要频率配置、相位扫描或抽头校准，导致实现复杂、跨平台适应性差。

针对上述问题，团队提出了一种基于RO-MMCM边沿竞争机制的免校准真随机数设计方法。该方法将自由运行环形振荡器（RO）与混合模式时钟管理器（MMCM）作为双抖动源，其中RO提供相位抖动MMCM提供周期抖动，两者输出边沿在采样过程中形成随机竞争关系，从而增强了输入时间不确定性。为实现对微小时间波动的高精度量化，团队利用 FPGA 片上高速进位链构建时间数字转换器（TDC），将边沿传播位置转换为温度计码。不同于传统方法依赖某一固定抽头、过渡位置或低位比特提取随机性，本成果创新性地采用整条温度计码中“1”的总数，即population count，作为随机性观测量，降低了对局部延迟差异和器件特性的敏感性。

在随机性提取方面，团队进一步提出了相邻采样结果的差分方法。通过对连续两次population count做差，可有效抵消固定延迟偏置以及温度、电压变化带来的慢漂移，使真正由物理抖动产生的随机成分更加突出，实现无需人工调节和复杂校准的稳定随机数输出。

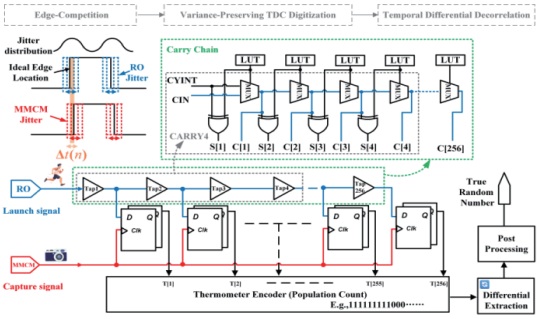


图1 提出的TRNG架构图

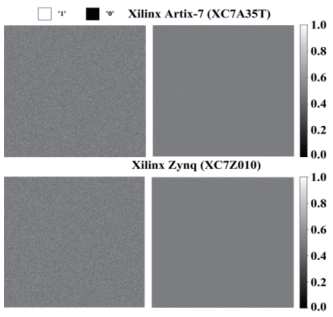


图2 随机数的偏置测试

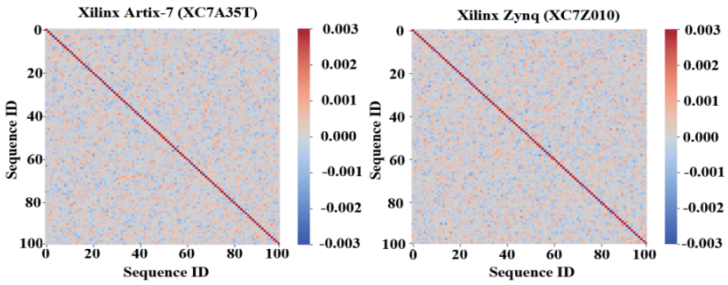


图3 随机数的重启相关性测试

技术指标/优势

与传统FPGA真随机数设计相比，该成果实现了高质量随机性、高吞吐率与免校准部署的统一。系统已在Artix-7和Zynq FPGA平台完成实现，随机数输出速率达到50Mb/s，信息熵达到7.997bits/byte，并通过NIST SP 800-22、NIST SP 800-90B和AIS-31等标准测试。该设计利用RO与MMCM双抖动源形成随机边沿竞争，提升了前端熵源强度；通过基于population count的差分提取方法，有效抑制固定延迟偏移及温度、电压变化引起的慢漂移，避免了频率调节、相位扫描和抽头校准等复杂操作。与现有方案相比，该成果具有高熵、跨平台适应性强和工程部署方便等优势，可稳定为密码设备、安全芯片和可信硬件系统提供高质量真随机数支撑。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于密码芯片、安全通信设备、身份认证系统、可信计算平台、物联网终端、工业控制装置及各类嵌入式安全系统等领域，为密钥生成、随机挑战应答、加密协议和安全认证提供高质量真随机数支撑。在 FPGA 广泛应用的边缘计算、智能制造、国防电子和专用安全设备中，真随机数发生器是保障系统抗攻击能力和信息可信性的关键模块。该成果具有无需复杂校准、跨平台适应性强和工程实现方便等优点，能够降低 FPGA 安全系统的部署门槛和维护成本。随着自主可控信息安全产业、国产密码设备和可信硬件平台的快速发展，高性能、易部署的真随机数技术具有良好的推广应用前景，可为安全芯片、加密模块和可信终端产品提供核心技术支撑，具有较高的市场价值和产业化潜力。

一种具备输出信号相位同步和调频连续波功能的小数分频频率综合器

成果完成人	张长春	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	集成电路				

成果概述

小数分频频率综合器是现代无线通信、雷达及高性能信号处理系统的核心组件。随着6G时代的到来，“通感一体化”（ISAC）已成为全球研究的热点，旨在同一系统内实现高可靠通信与物理世界感知。然而，在多天线技术及多芯片拼接的应用场景中，各芯片内部本振信号的相位不一致性严重制约了波束赋形的效果，导致感知可靠性下降。此外，传统的脉冲雷达信号源存在探测盲区大、对低速目标不敏感等局限，难以满足6G高精度感知的需求。

本团队自主研发了一类具备输出信号相位同步与调频连续波（FMCW）功能的小数分频频率综合器。该成果针对通感一体化系统的核心痛点，通过创新架构实现了多芯片间本振信号的精准相位对齐，有效解决了多通道相位失配对波束赋形的影响。同时，该频率综合器集成了高性能FMCW感知信号产生技术，支持先同步相位、后调频探测的工作模式。相比传统技术，该方案不仅能发射连续低功率信号以降低功耗，还能同时实现对目标距离与速度的高精度测量，且具备无探测盲区、抗干扰能力强等显著优势，为芯片化、小型化的6G通感一体化设备提供了关键的技术支撑。

关键技术/创新要点

相位同步采用直接相位检测同步技术，并提出一种同步算法，该算法利用数控振荡器输出信号和欠采样频率综合器输出信号进行三角函数运算以获取相位差值。最终，DSM持续分配相位以实现相位调整，从而实现其输出分频序列的实时控制。该方法适用于由DSM分频序列偏移引起的相位不一致，以及由工艺、电压和温度等非理想效应（如环路延迟）导致的相位不一致。在外部相位同步信号SYNC的控制下，跟踪相位累加器、相位差检测电路输出跟踪参考相位信号；相位差检测电路根据输入参考相位信号和正交采样器欠采样信号计算相位差；主相位控制器输出主相位信号以实现全局同步；相位调整电路根据输入相位差、主相位信号和跟踪参考相位信号输出非零连续分配信号FADJ<18:0>。随后，包含最终相位调整信息的信号FADJ<18:0>被分配给DSM，通过控制DSM的分数序列实现0°~360°范围内的线性调整。最终，可实现多芯片所有输出时钟信号之间的相位同步。

在外部扫频控制信号CH和外部模式控制信号MODE的控制下，FMCW发生器中的波形发生器根据SPI输出信号，通过选择器将带有FMCW调制信息动态变化的整数值NWG<7:0>和分数值FWG<18:0>信号分配给DSM，从而使频率综合器的压控振荡器输出高频线性调频信号；控制信号MODE分别在高电平和低电平时选择三角波模式和锯齿波模式。当锯齿波频率达到峰值时，使能控制器被激活，触发电荷泵CP2进行短时电流注入，从而加速频率的下降。

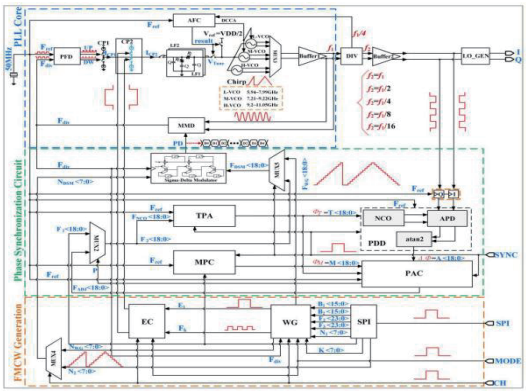


图1 频率综合器整体架构图

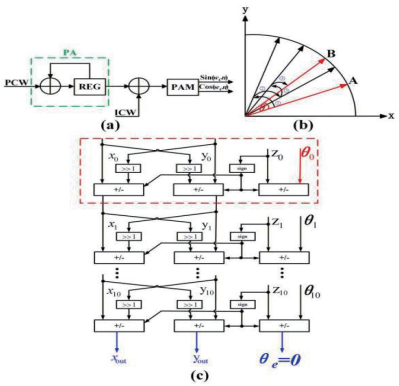


图2 NCO结构和算法(a)NCO结构；
(b)CORDIC算法；(c)11级流水线 CORDIC 结构

传统数控振荡器的结构如图2(a)所示。相位控制字和初始控制字被用作输入信号，这些信号经过相位累加器和相位幅度映射器处理后生成正交三角信号。相位累加器直接由　跟踪相位累加器替代以提供参考相位信号，而相位幅度映射器可通过CORDIC算法实现。该算法原理如图2(b)所示。基于Givens旋转规则，可确定向量A与B之间的相位差θ。当给定点A时，可通过基于旋转规则的连续近似迭代获得点B的坐标。根据上述原理，本研究提出了一种11级流水线结构(图2(c))来实现 CORDIC 算法，其中每个阶段由三个加法器、减法器和两个移位寄存器组成。初始输入值x0和y0与z0一同提供，z0决定了第一阶段的旋转方向。第一阶段经θ0角旋转后，x1和y1的输出值将作为第二阶段的输入值，如此循环直至11级流水线末端，最终获得xout和yout的输出结果。

FMCW系统的可编程啁啾斜率用于在频率扫描过程中更新整数NWG<7:0>和分数值FWG<18:0>。电路逻辑如图26所示。经过数字k分频后，分频时钟Fdiv作为扫描时钟使用，在此期间　FMCW　调制信号CH保持高电平。每个周期中，两个累加器由FS<18:0>和NS<7:0>控制，通过递增或递减频率步长，直至NWG<7:0>与FWG<18:0>之和达到目标峰值或初始扫描频率。频率扫描模块根据输入频率步长Fstep<18:0>、初始整数值N1<7:0>及初始分数值F2<23:0>，向累加器提供分数值FS<18:0>和整数值NS<7:0>。波形选择模块根据输入F2<23:0>、最大分数值F3<23:0>、上升步长B1<15:0>和下降步长B2<15:0>生成Fstep<18:0>的上升与下降啁啾段。根据模式控制信号MODE和减法结束信号E2，切换Fstep<18:0>及增减状态控制信号Se，输出信号J1和J2用于逻辑判断减法与加法端点。加法器结束信号E1、保持信号H、Se协同控制模块及输出信号ASH<1:0>共同控制加法器工作模式选择。

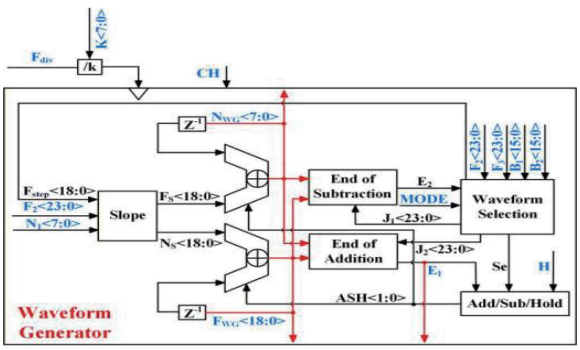


图3 可编程啁啾斜率

技术指标/优势

该小数频率综合器在1.2V供电电压下实现了0.4-11.0 GHz的整体频率范围、小于20.2 μs 的相位同步时间、同步后0.4°的相位误差、9.605–10.885 GHz的啁啾频率范围以及114.3mW的功耗。采用相位同步和线性调频连续波技术的65nm CMOS工艺的小数频率合成器，通过利用数字控制振荡器的输出参考信号以及经参考时钟下采样后的频率合成器输出时钟信号，实现直接相位检测，并同步执行三角函数运算。通过为三阶DSM的一阶累加器提供连续相位调整值，有效解决了由DSM输出序列偏移和非理想因素导致的多芯片输出时钟不一致性问题。基于频率合成器核心，还提出可编程啁啾斜率以使频率合成器输出调频连续波，并在锯齿波下行啁啾段注入额外电流以增加下行啁啾斜率。

应用领域和市场前景

该成果可为6G无线通信、高精度雷达感知及高性能信号源等相关领域提供关键的技术支撑。在6G通感一体化场景中，本振信号的相位同步技术是多芯片拼接与大规模天线阵列的“指挥棒”，能够确保波束赋形的精准指向，从而保障通信的高速率与感知的高可靠性。这不仅是实现6G网络物理世界数字孪生的核心手段，更是未来基站设备实现“全域覆盖、深度感知”的硬件基石。

由于该综合器集成了调频连续波产生功能，其应用前景广阔，可延伸至智能驾驶、工业自动化检测、低空经济（无人机避障）及手势识别等多种高精度探测领域。相比传统脉冲雷达信号源，该成果凭借其“无探测盲区、高灵敏度及抗干扰”的特性，能够像“数字手术刀”一样对近距离目标进行精细化测量。随着通感一体化芯片向小型化和集成化方向演进，该成果有望成为未来智能移动终端、车载雷达及工业传感器的核心频率控制单元，实现对复杂环境的实时、精准示踪与高性能数据传输，具有极高的商业推广价值与战略意义。

基于氧化物忆阻器的高速射频开关特性研究

成果完成人	朱刚毅	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	5G通信				

成果概述

本项目将首先对基于氧化物忆阻器的电阻特性进行了系统研究，研究其导电细丝的可控性和稳定性，设计并制备出低开态电阻及稳定性好的忆阻器；在此基础上进行了氧化物忆阻器射频开关串联和并联结构的制备和性能测试，研制出的具有较低的插损和高隔离度的射频开关，进行基于氧化物忆阻射频开关的概念原理验证，研究其共性普适科学问题，构建忆阻器射频开关动力学模型，获得低插损、高隔离度、高稳定性的非易失性射频开关。该研究对于新一代非易失性可重构射频开关的研发具有重要的研究意义。

关键技术/创新要点

原理创新：氧化物忆阻器通常用来做存储器，本项目基于利用氧化物的突变忆阻特性来控制电阻大小的切换，如图1所示，进而应用到射频开关领域，且采用镀膜工艺来来制备射频开关，器件可靠性高，器件结构稳定，且有利于产业化，在射频开关领域属于原理性的创新。

结构创新：氧化物忆阻器的制备及性能优化。通常，忆阻器采用金属-绝缘层-金属结构，该结构存在开态电阻较大，稳定性差的问题。在底电极与介质层之间增加一层阻挡层，可以使忆阻器的介质层与阻挡层间形成界面效应，该效应能够降低开态电阻，提高器件的稳定性。

本项目验证的射频开关目前从插损、隔离度、开关时间、功率容量以及成本上都有很大的优势，是未来射频开关一种技术方案。目前的技术成熟度还不够高，需要进一步验证，提高其稳定性和技术成熟度。

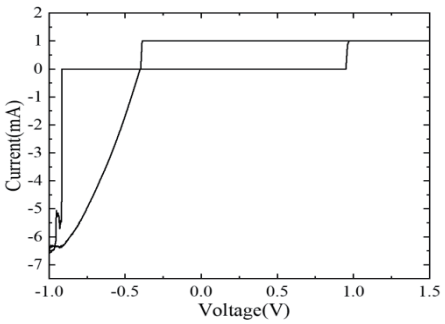


图1 忆阻器突变滞回曲线

应用领域和市场前景

全球移动通信技术快速发展，市场规模快速增长，预测到2026年，全球5G移动通信市场规模将达到数万亿美元。随着5G通信系统中射频芯片数量的增加和5G技术的逐步成熟，射频器件市场规模也将迅速扩大。

本项目研究的基于氧化物忆阻器的非易失性射频开关具有静态零功耗，开关切换速度快、器件工作电压低、截止频率高、工作端口少等特点，属于新一代射频开关，从技术和加工成本上都具有强大的市场竞争力。

面向ATE应用的高速高精度时序生成芯片应用验证

成果完成人	王子轩	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路芯片制造工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	华峰、长川、精测、华兴源创等芯片企业				

成果概述

本项目研发面向ATE（自动测试设备）应用的高速高精度时序生成芯片（TG芯片），旨在解决国产半导体测试设备核心芯片依赖进口的“卡脖子”问题。通过创新性设计高速时域运算技术、时间线性放大技术和双环路误差抵消技术，实现芯片性能突破（最高工作频率1.6Gbps、分辨率10ps、抖动<6ps），显著优于现有FPGA替代方案（如AMDXC7K325T）。项目基于40nmCMOS工艺完成流片，良率达99%，已通过第三方检测（上海华岭），技术成熟度达小试阶段。目标客户包括长川科技、华兴源创等国内头部ATE厂商，填补国产高端TG芯片空白。

关键技术/创新要点

本项目旨在通过架构与电路创新，实现国产芯片在高端 ATE 设备中的自主可控，助力我国半导体产业升级。主要创新技术包括：一是构建高效、可靠的高速芯片设计方法体系，提出了基于时间寄存器和时间-数字转换器的高速时域运算技术，利用高速传输单元实现时间信号的存储与量化，提高了时域运算的稳定性、抖动性能和处理效率，进一步提升了运算的可靠性，为芯片的高速运行奠定坚实基础；二是实现高速芯片在分辨调节上的高精度控制与线性度优化，拟提出基于时域插值和内插方法的高精度时序调节技术，实现信号的高精度重构，拓宽测试机专用芯片的工作频段，确保芯片输出信号的精准性与稳定性。通过以上关键技术突破，将测试速率提升 73.6%，测试精度提升 37.8%。

技术指标/优势

1：高速时域运算技术

本项目设计的延迟模块，采用了高速时域运算技术，显著提升了高速信号传输的稳定性和处理效率。

2：时间线性放大技术

本项目中的细级延迟线采用时间线性放大技术实现可编程时间线性放大与恒定跨导，分辨率提升幅度达 37.8%。该机制在实现延迟时间线性可调的同时，显著提升了延迟线的分辨率。

3：双环路误差抵消技术

本项目中设计的双环路误差抵消电路结构如图3-3所示，基于双环延迟锁定环架构，包含压控延迟线、鉴相器及电荷泵。该设计的核心创新在于误差抵消机制，一方面为CDL提供稳定的控制电压基准，另一方面有效隔离了CDL工作对DLL内部压控延迟线的潜在干扰。

应用领域和市场前景

目前，国内的ATE设备厂商华峰、长川、精测、华兴源创都有强烈的国产化需求。以长川科技为例，每年量产测试机1000多台，每年采购各类ATE专用芯片合计上百万颗。而TG芯片，尤其是高速TG芯片属于高端芯片产品，ADI公司的一颗5Gbps速率的10TG芯片市场售价高达1000美元。因此，研发国产自主可控的高速TG芯片不仅可以解决我国芯片测试领域的“卡脖子”问题，还具有巨大的商机。

处理器自动化漏洞挖掘EDA工具

成果完成人	张吉良	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	安全测评技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机系统结构
应用行业	处理器芯片设计行业				

成果概述

处理器作为计算机系统的核心，承担着计算与控制的关键职责，从根本上影响信息产业的发展与信息系统的安全。然而，早期处理器设计主要关注性能、功耗与面积等指标，未将安全性纳入必须满足的设计目标，导致硬件漏洞频发。这些漏洞具有高复杂性与强隐蔽性，难以通过人工方式排查。因此，开发自动化漏洞挖掘工具对于下一代安全处理器设计与验证至关重要。本团队研发的处理器自动化漏洞挖掘EDA工具，集成了大规模形式化建模、深层关键链路分析与时间信道漏洞挖掘等核心能力，能够从RTL级精准发现违反安全属性的设计缺陷、自动提取硬件安全漏洞的关键链路与快速定位低活性节点，有效解决复杂处理器设计中安全漏洞深埋难察的问题。同时，该工具支持在黑盒环境下自动测试与筛选与时间信道相关的指令序列，显著提升了微架构侧信道漏洞的检测效率与覆盖率，使相关模块的验证与修复周期缩短超30%。

关键技术/创新要点

团队研制的EDA工具可以覆盖处理器中各种功能性和侧信道漏洞。在功能性漏洞检测方面，该工具：1）提出基于量化分析的硬件安全关键链路提取技术。针对RTL级抽象层次电路设计复杂多样性的问题，基于量化分析的安全关键链路提取技术对RTL电路设计信息传播路径进行量化分析，提取与脆弱性相关的安全关键链路；2）提出基于属性自动提取的硬件安全形式化验证技术。分析硬件安全漏洞的基本特性与运行机理，构建基于特征匹配与行为分析的硬件安全属性自动提取方法，实现硬件安全漏洞自动化检测；3）提出基于多RTL设计类型的低活性节点定位技术。采用字级统计特性、比特传输活动性、数据流信号拓扑权重与状态转换控制权重等指标对电路信号活动性进行多维度建模与分析，实现低活性节点的精准定位。在侧信道漏洞检测方面，该工具：1）提出漏洞特征分析与相似性计算方法。通过分析漏洞产生的时间差异来源，结合指令类型、指令数量、突变方向与时间差异等维度计算漏洞的相似性；2）提出基于相似性引导的黑盒模糊测试算法。针对不同漏洞类型实施有约束的突变，并利用相似性计算提供高效反馈，引导模糊器更快地探索可能发生信息泄露的新型指令组合；3）提出多特征融合的聚类与攻击合成方法。结合指令数量、指令类型、突变方向与时间差异对检测到的漏洞进行聚类，在确定可疑指令及其类型后，自动评估能否用于构建高精度的隐蔽信道与瞬态执行攻击。

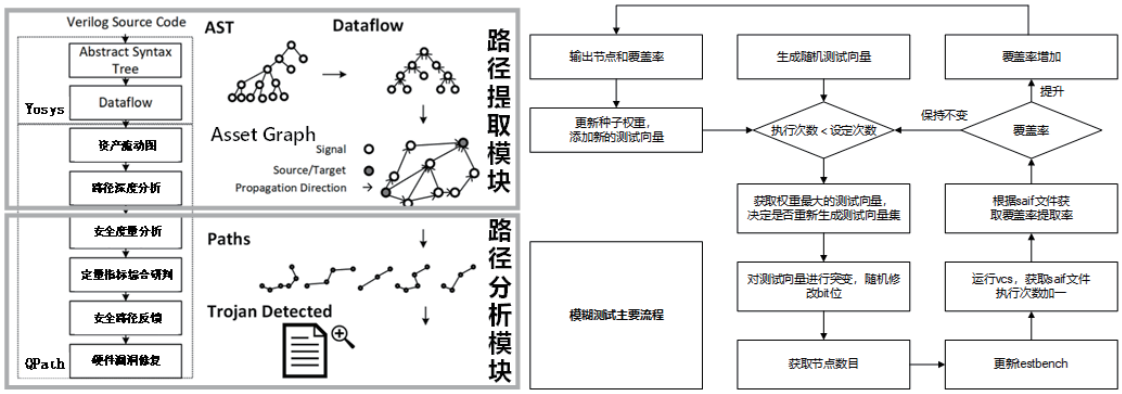


图1 功能性漏洞自动化挖掘框架

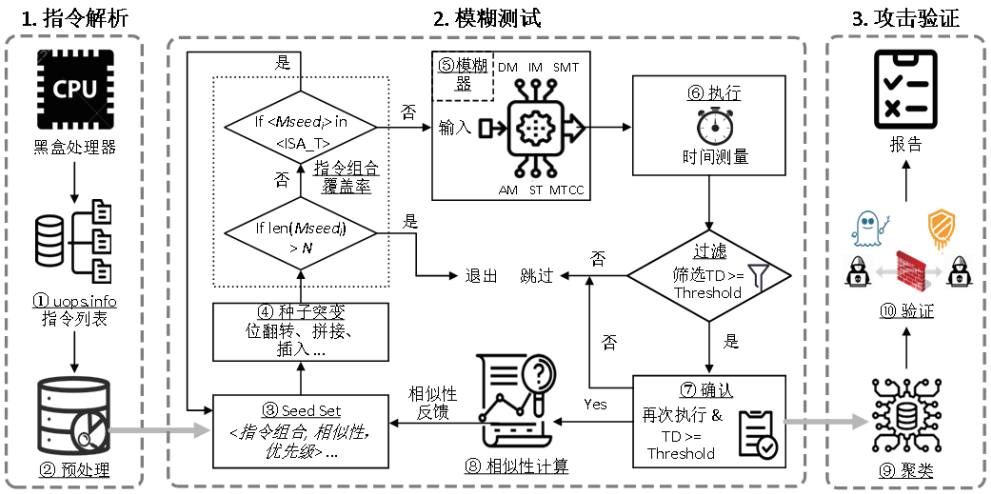


图2 侧信道漏洞自动化挖掘框架

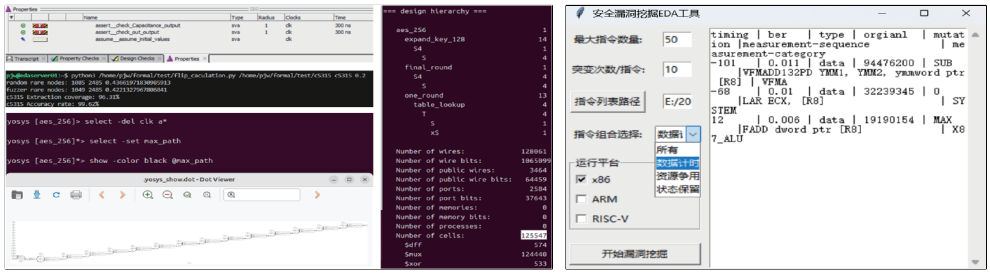


图3 自动化漏洞挖掘EDA工具效果展示

技术指标/优势

与传统的漏洞检测工具相比，该工具首次覆盖了多种功能性漏洞和时间信道漏洞，同时支持X86、ARM和RISC-V架构的处理器漏洞检测。除了覆盖能力更广、该工具还在检测效率、定位精度等方面具有明显优势，主要技术指标如下：

1）提出基于量化分析的硬件安全关键链路提取技术，实现关键链路分析深度最大值为519等效门/bit；

2）提出基于属性自动提取的硬件安全形式化验证技术，形式化建模支持规模超11万门；

3）提出基于多RTL设计类型的低活性节点定位技术，低活性节点提取覆盖率超98.09%；

4）提出基于相似性引导的黑盒模糊测试技术，检测效率相比原有工具提升3倍以上。

应用领域和市场前景

该成果已应用于国防科技大学的某在研国产处理器和上市企业沐曦的核心GPU产品安全验证中，解决了相关国产工具长期缺失的问题，获相关应用单位的良好评价："基于该工具开展的工作使相关模块的安全验证与修复周期缩短超30%，有效降低了处理器开发与验证成本，并支撑在研处理器顺利通过安全验证""为我司自主GPU设计的安全性增强提供了重要技术支撑"。

随着现代处理器普遍引入乱序执行、分支预测、缓存分层等复杂微架构优化，未来该工具可广泛适用于高性能CPU、AI芯片、嵌入式芯片等各类处理器的安全测试与漏洞挖掘，为芯片设计企业、安全评测机构及国防、金融、云计算等关键基础设施领域提供自动化、可扩展的硬件安全验证能力，显著提升安全设计效率，缩短产品上市周期，因此具有广阔的市场应用前景。

基于氧化镓忆阻器的光电调制人工突触及类脑计算技术

成果完成人	王磊	职称	教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	神经形态计算				

成果概述

随着大数据和物联网的飞速发展，传统的冯·诺依曼计算机架构面临着严重的“算力瓶颈”和高能耗问题。受人脑高并行处理和低能耗特性的启发，类脑神经形态计算成为突破这一瓶颈的关键前沿技术。

本团队自主研发了一类基于宽禁带半导体氧化镓（Ga_2O_3）的光电调制忆阻器。该成果采用电子束蒸发技术制备，不仅在电学上展现出优异的存储与开关特性，还能通过光电协同作用高精度地模拟生物大脑突触的“学习与遗忘”功能。基于该器件构建的人工神经网络，在复杂的图像识别任务中展现了极高的准确率。本成果为突破传统计算架构限制、开发下一代高能效“存算一体”芯片和高密度存储器件提供了创新的硬件基础。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于采用电子束蒸发技术制备了Cu/Ga_2O_3/Pt结构忆阻器，实现了电学和光学双模态调制的突触可塑性。器件结构清晰，各层之间界面分明，如图1的截面扫描电镜图像所示，氧化镓功能层厚度均匀，与上下电极形成良好接触，为稳定可靠的阻变行为奠定了基础。

在电学突触功能模拟方面，该器件成功复现了多项关键突触行为。如图2所示，双脉冲易化指数随脉冲间隔增大而递减，与生物突触特性高度吻合；通过调节脉冲幅值或脉冲数量，可实现短时程记忆向长时程记忆的转变；脉冲频率依赖可塑性和脉冲时间依赖可塑性也得到有效模拟，其中脉冲时间依赖可塑性遵循赫布学习规则，当突触前脉冲先于突触后脉冲时，突触权重增加，且时间间隔越小权重变化越大。

尤为突出的是，该器件在紫外光照射下表现出光调制突触可塑性。如图3所示，光照瞬间器件电导迅速上升，撤去光照后缓慢衰减，模拟了生物的学习-遗忘行为；多次重复光照后，电导逐渐累积并稳定在较高水平，实现了短时记忆向长时记忆的转变。这种光电双模态调制能力，为该器件在感知-存储-计算融合的应用场景中提供了独特优势。

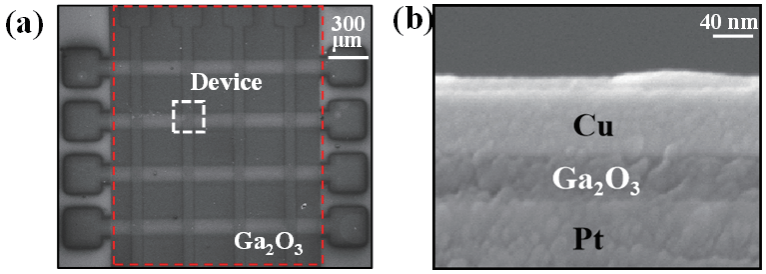


图1 Cu/Ga_2O_3/Pt忆阻器俯视及截面扫描电镜图像

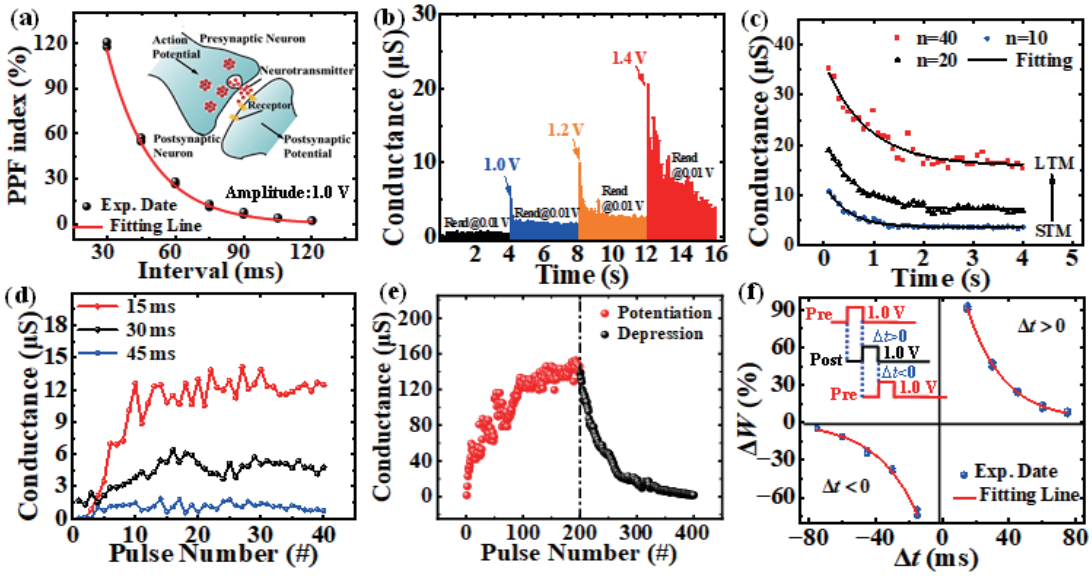


图2 生物响应仿生特性

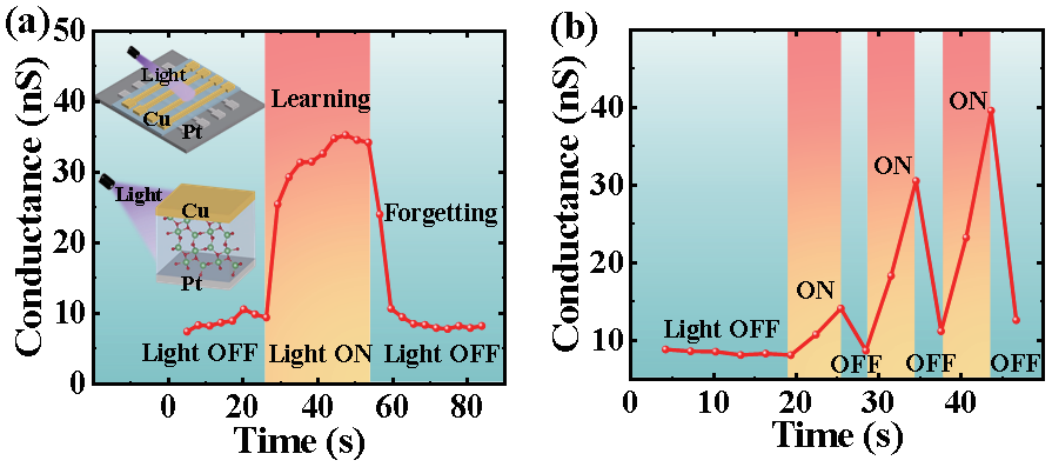


图3 紫外光照射下器件的学习-遗忘行为曲线

技术指标/优势

本成果制备的Cu/Ga_2O_3/Pt忆阻器在多项性能指标上表现优异。开关比优异，能够确保不同电阻状态之间清晰分辨；SET电压和RESET电压均处于较低水平，有助于降低器件操作能耗；循环稳定性良好，可重复开关次数多，且循环过程中电阻波动小；数据保持时间较长，两种电阻状态均能稳定维持。通过调节限制电流，器件可在易失性与非易失性两种阻变模式间自由切换，功能集成度高。在突触功能模拟方面，该器件成功实现了双脉冲易化、脉冲频率依赖可塑性、脉冲时间依赖可塑性、长时程增强与抑制等关键电学突触功能，并首次在氧化镓基忆阻器中实现了光诱导的学习-遗忘行为和短时记忆向长时记忆的转变。基于该器件突触权重构建的神经网络，在MNIST手写数字数据集上识别精度较高，在Fashion-MNIST服饰数据集上也表现出良好的识别能力。

应用领域和市场前景

本成果可为类脑计算芯片、光电融合感知系统以及边缘端人工智能处理器等领域提供关键技术支撑。在类脑计算方面，该器件能够模拟生物突触的关键可塑性功能，可作为神经形态计算系统中的核心单元，用于构建低功耗、高并行度的神经网络硬件，满足智能传感、模式识别等场景对高效能计算的需求。在光电融合感知方面，该器件兼具电学与光学调制能力，可应用于视觉感知与信息处理一体化系统，例如仿生视觉传感器、智能安防监控等场景，实现感知端数据的高效预处理。在边缘端人工智能方面，该器件的低操作电压和良好循环稳定性，使其适用于物联网终端设备中的轻量化神经网络加速器，降低数据传输延迟和功耗。随着类脑计算和边缘智能市场的快速发展，具备光电双模态调制能力的忆阻器技术展现出良好的成果转化潜力。

云数据中心综合监控与分析技术及应用

成果完成人	付雄	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	/
应用行业	计算机应用，能源行业				
核心专利号	ZL201410060472.6				

成果概述

随着云计算、大数据、人工智能等技术的快速发展，数据中心作为数字经济的核心基础设施，其市场规模得到了持续增长，同时数据中心作为耗电大户，其规模增长也带来能耗大幅增长，展开数据中心系统监控研究对数据中心高效运营，建设绿色数据中心有着重要的研究意义。

本团队研究的数据中心综合监控与分析系统对数据中心各种资源使用情况进行监控和预测分析，感知数据中心运营中各种瓶颈，为数据中心运营提供支持，同时通过数据中心能耗模型，分析预测数据中心能耗。该系统包含数据中心资源监控、资源预测、能耗模型等多种关键技术，达到国内领先水平。

关键技术/创新要点

(1)数据中心资源监控和预测技术

该系统能够实现数据中心各种资源的使用情况监控，包括数据中心主机资源，如CPU、内存、磁盘IO、网络流量、GPU等，同时还包括数据中心其他的资源，如网络设备、制冷设备、办公设备等。在此基础上展开各种资源使用预测，智能感知数据中心的资源使用和预警。



图1 数据中心资源使用和预测效果

(2)数据中心能耗分析

在数据中心资源监控与预测的基础上，构建数据中心服务器主机、网络设备、制冷设备、办公设备等主流设备能耗模型，分析数据中心能耗使用情况，为数据中心算力迁移、可调能耗容量计算和新能源消纳分析等提供基础，提高数据中心经济效益。



图2 数据中心能耗分析效果

技术指标/优势

与传统的数据中心监控相比，该系统能够实现数据中心资源使用细粒度监控，同时构建较为完整的设备能耗模型，为数据中心提供更为精确的资源使用监控和能耗预测分析。

应用领域和市场前景

该产品相关技术能够应用在数据中心、算力网络中，该产品能够从细粒度监控和预测数据中心各种资源使用情况，同时展开预测分析，在此基础上分析预测能耗使用情况，提高数据中心、算力网络经济效益，具有较好的应用前景和市场前景。

一种面向RGB-D的多尺度融合与边缘加强目标检测方法

成果完成人	徐鹤	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	智能安防、工业缺陷检测、无人机遥感、医学影像分析				
核心专利号	ZL202510018172.X				

成果概述

在计算机视觉领域，显著目标检测旨在自动识别和分割图像中人眼最感兴趣的区域。然而，当前的常规算法大多面向普通光学摄像头采集的数据，在面对背景复杂、目标边界模糊的情况下，鲁棒性不高，生成的显著性图往往边缘模糊。

本团队研发了一种面向RGB-D的多尺度融合与边缘加强目标检测方法。该成果通过引入深度图像信息填补RGB图像中不够明确的信息，并利用Canny边缘检测算法生成真值图的边缘图作为额外特征，以丰富边缘信息的表达。本成果不仅设计了三种高效融合模块在不同特征层级实现跨模态信息的协同表达，还通过边缘加强机制有效解决了显著目标边界模糊导致的精度下降问题，在自动驾驶、视觉跟踪及图像检索等领域具有广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

作为计算机视觉领域的核心技术，显著目标检测在图像处理中具有极其重要的地位，特别是在背景复杂或目标边界模糊的挑战性场景下，高精度的边缘还原能力显得尤为关键。与传统算法相比，本成果通过多模态特征融合与多尺度边缘加强技术，显著提升了模型在复杂环境下的信噪比、分辨率和检测灵敏度，极大增强了模型对显著区域的深度检测能力。

本团队采用MobileNet作为RGB流主干网络，通过异构编码架构提取多层次特征，并利用基于残差网络ResNet-152的编码器对深度图像及边缘图进行特征抽取。团队创新性地通过Canny边缘检测算法从真值图中生成高质量边缘特征，并将其作为额外信息输入模型，实现了对显著目标关键边缘信息的精准捕捉。这些特征经过精心设计的多尺度感知融合与全局融合模块，在低层与高层特征维度上完成跨模态信息的智能协同，确保了RGB细节与深度空间结构的深度整合。

在解码与特征还原阶段，系统通过逐层穿插的边缘加强融合模块，利用通道注意力与空间注意力机制对融合特征进行智能响应与优化。在模型推理过程中，该架构能够根据特征层次自动调整，利用低层细节增强感知能力，并通过高层语义优化全局表达，从而诱发边缘细节的精准重构。最终，结合深度流与RGB流的联合监督损失函数，实现了对目标的高效识别与分割，使显著性检测在各种复杂应用场景中都能更高效地发挥作用。

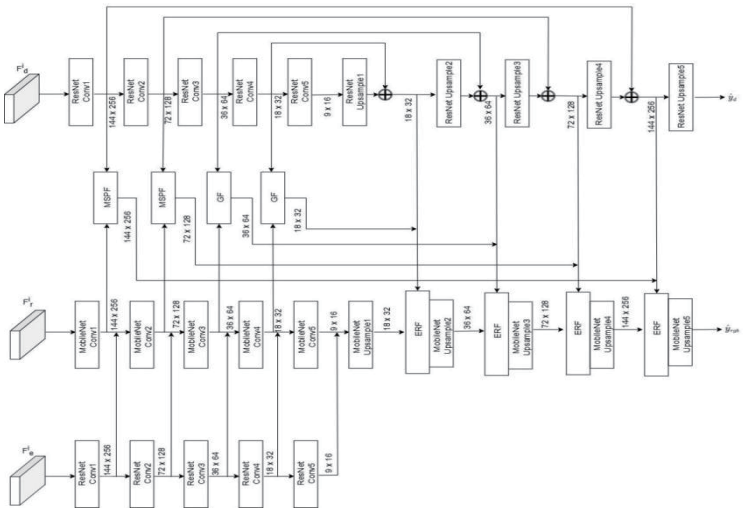


图1 整体网络结构图

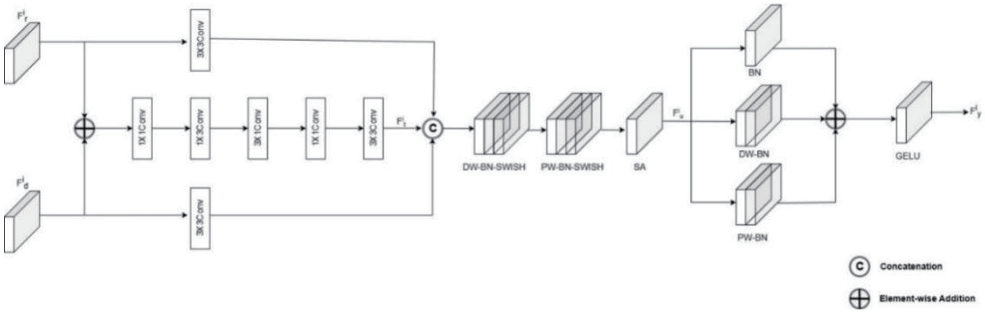


图2 多尺度感知融合模块网络结构图

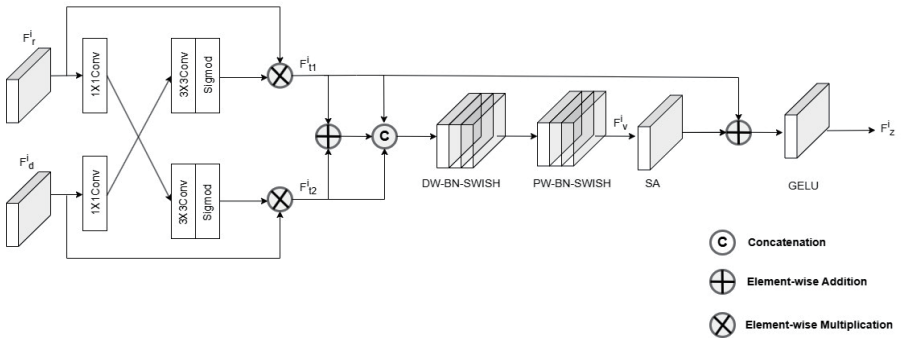


图3 全局融合模块网络结构图

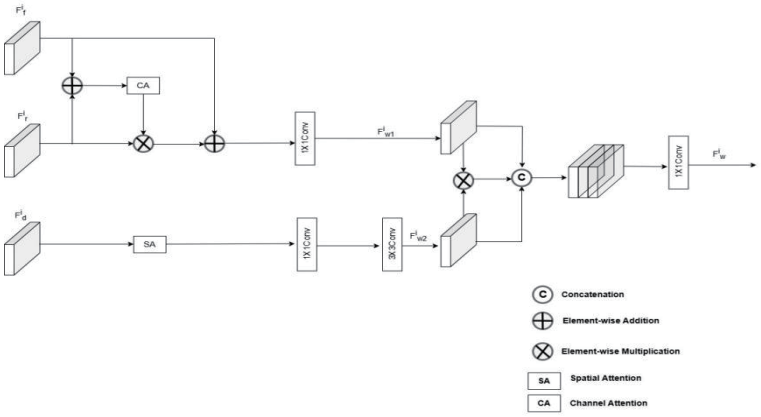


图4边缘加强融合模块网络结构图

技术指标/优势

与传统的显著目标检测算法相比，该成果实现了在复杂背景下的高精度边界定位和多模态特征的深度融合，显著提升了目标检测的鲁棒性并降低了边界模糊导致的误判率。通过低级细节感知与高级全局语义的双模式融合加强检测效果，并实时在线精准还原显著目标的边缘细节、空间结构以及语义分布。

应用领域和市场前景

该成果可为计算机视觉、自动驾驶及智能制造等相关行业提供高效的技术支持。如：显著目标的精准分割能够保障自动驾驶系统对障碍物的准确规避和视觉追踪系统的实时锁定，这不仅是智能系统感知环境的重要手段，也是机器人复杂环境下精准作业的导航。由于本方法具备跨模态融合与边缘加强的普适性，该成果可望用于智能安防、工业缺陷检测、无人机遥感及医学影像分析等多种应用场景中，实现对复杂目标的实时精准示踪、高质量边缘还原以及语义信息的深度分析。

一种基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法及系统

成果完成人	徐小龙	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	软件开发	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	软件开发				
核心专利号	ZL202411148242.5				

成果概述

智慧教育的发展趋势孕育了对课堂教学情况实时监测和评估的迫切需求。作为其中的基础环节，课堂学生姿势识别旨在捕捉学生的投入状态，为后续教学行为分析及师生交互优化奠定基础，其重要性不言而喻。然而，在复杂多变的实际课堂环境中实现高效准确的多目标学生姿势识别，仍然是一项具有极高挑战性的任务。

本团队自主研发了一种基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法。该方法巧妙地结合了卷积神经网络和视觉Transformer两种主流网络架构的优势，有效挖掘和融合多尺度视觉特征，实现了在复杂场景下对多目标学生姿态的精准高效识别；本成果引入注意力机制和轻量化模块优化后，该算法模型不仅检测精度高，且计算速度极快、部署容易，满足了课堂教学对系统实时响应的迫切需求，确保了教学过程的流畅性和连贯性；为提升课堂教学质量奠定了技术基础，具有重要的理论意义和应用价值。

关键技术/创新要点

基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法关键技术流程包括以下环节：首先获取课堂中学生的现场图片或视频，将获取到的图片或视频进行预处理；利用双主干特征提取网络对经过预处理的图片或视频进行特征提取，每个主干分别得到三个尺度不同的特征图；将尺度不同的特征图按照对应比例进行拼接融合，得到三层新特征图；将新特征图输入解耦合头预测结构，进行特征图整合及预测数据解码计算，得到预测边框信息；将预测边框信息进行预处理，得到预测框及置信度，并将所述预测框进行非极大值抑制，得到课堂学生姿势识别结果。本成果结合了卷积神经网络和视觉Transformer两种主流网络架构的优势，有效地挖掘和融合多尺度视觉特征，实现了在复杂场景下对多目标学生姿势的精准高效识别。

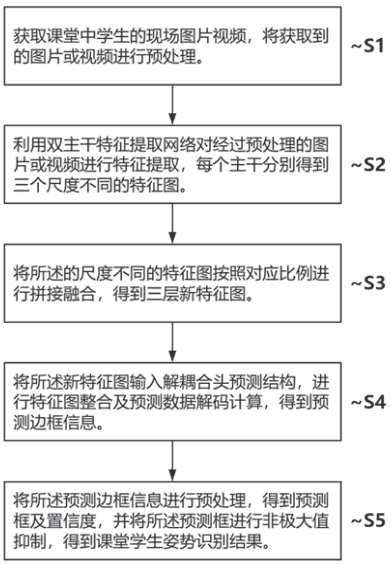


图1 基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法的整体流程图

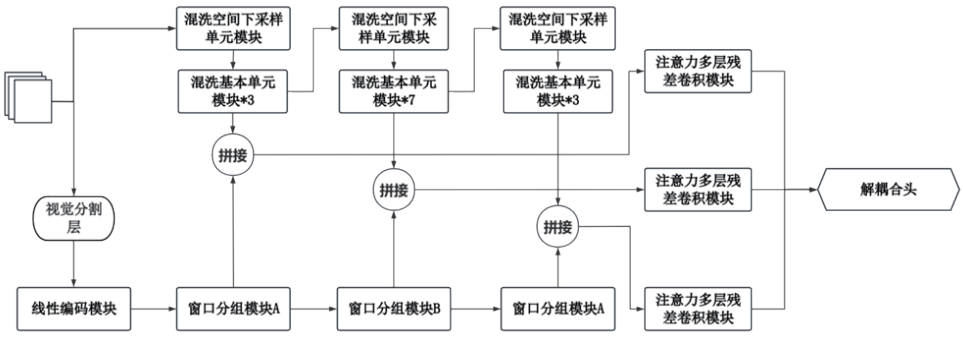


图2 基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法的算法网络结构示意图

技术指标/优势

课堂场景本身具有诸多扰动因素，如光线变化、视角差异、目标遮挡等，给基于计算机视觉的目标检测算法带来了严峻考验。当前，学术界和工业界在该领域的一些初步尝试虽然取得了一定进展，但大多存在模型复杂、计算量大、泛化能力差等缺陷，难以真正满足实际应用需求。部分研究采用注意力机制或多任务学习框架以提高检测精度，但常常是以牺牲效率为代价。另一些工作则直接将现有通用目标检测模型应用于课堂场景，但由于未针对课堂环境的特点进行优化设计，效果也不甚理想。

从实验结果来看，本技术达到了兼顾轻量化、高性能、效果优的设计目标及算法需求。整体来看在模型规模一致，参数量、运算量相当的条件下，本技术相较于当前主流的优势技术均表现出更加优越的识别效果，也进一步验证了本技术基于基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法的创新性、优越性和实际意义。

应用领域和市场前景

全球智慧教育市场规模庞大，国内坐姿监测细分市场年增速近20%，2026年预计达28亿元。基于双主干特征融合的课堂学生姿势识别方法及系统，凭借技术优势，核心应用于智慧校园课堂教学、青少年健康监测，同时向在线教育、职业培训等领域拓展。其可精准识别学生坐姿、趴桌等关键姿势，实现课堂专注度监测、教学质量量化评估，还能实时预警不良姿势，助力青少年脊柱与视力保护，契合健康中国及教育新基建政策需求。该技术相比传统单主干模型，在复杂课堂环境下准确率提升明显，具备高附加值，技术的市场前景广阔。

一种面向无损网络的细粒度流量控制方法

成果完成人	何昕	职称	讲师	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	网络应用技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机科学技术其他学科
应用行业	数据中心网络				
核心专利号	ZL202311701117.8				

成果概述

面向数据中心网络中对高吞吐与低延迟的严苛需求，聚焦无损传输环境下的流量控制问题，提出了一种细粒度、高效的流量控制方法。当前主流方案如PFC存在全局反压和死锁风险，难以精确定位并控制导致拥塞的流，从而影响整体网络性能。为此，设计了多级阈值的队列监控机制，并结合动态流识别与调度策略，精准识别并控制导致拥塞的关键数据流。该方案通过实时监测队列状态、分级暂停流、动态分配空闲队列及恢复机制，实现了更加灵活、精准和稳定的流量管理。实验验证表明，相比传统机制，本成果在降低端口阻塞、提升网络吞吐与短流性能方面具有显著优势，具备良好的实用性与推广价值。

关键技术/创新要点

面向数据中心无损网络中流量控制的核心难题，提出了一种基于多级阈值和动态流识别的细粒度流量控制方法，解决了现有PFC等机制中存在的全局反压、不精准控制、易死锁等问题。其关键技术与创新点主要体现在以下几个方面：

多级阈值队列监控机制：区别于传统单一拥塞阈值机制，在下游交换机的入口队列中设置多个拥塞判断阈值。通过精细化分层控制，能够根据队列压力的实际程度，动态地调整控制强度，实现更平滑、更可控的流量调节过程。

动态流识别与精确暂停控制：在检测到队列长度增长超过不同级别阈值时，系统能够根据当前网络状态和暂停流量需求，实时识别具体导致拥塞的流，而非对所有流进行统一处理。这种选择性暂停机制极大地避免了无效控制与资源浪费，提升了网络资源的使用效率。

流表维护与反馈协调机制：引入流表机制，完整记录流状态及其暂停/恢复操作，使得控制逻辑具备可回溯性和状态一致性。通过在上游交换机与下游交换机之间传递暂停帧与恢复帧，系统实现了跨交换机的精准控制协调，有效防止死锁与反压扩散。

动态队列调度策略：恢复流量发送后，上游交换机通过动态队列调度算法对之前暂停的流进行优先级判断与调度，保证关键流优先恢复，避免资源长时间被占用，从而提升整体调度效率与短流性能。

技术指标/优势

与传统方案相比，该方案具有精准拥塞控制能力，可有效降低端口拥塞的概率，有效提升流完成时间。该方案已申请专利“一种面向无损网络的细粒度流量控制方法”。

应用领域和市场前景

本成果面向新一代无损数据中心网络流量控制需求，具有广泛的应用价值。其核心技术可广泛应用于云计算中心、人工智能训练平台、大规模分布式存储系统、高性能计算（HPC）集群等对网络吞吐和低延迟要求极高的场景。特别是在大模型训练、推理、视频处理等场景中，网络拥塞直接影响系统性能与用户体验，该方案通过细粒度流识别与动态控制，有效提升了系统的稳定性与服务质量。

一种基于混合差分隐私的区域计数查询方法及系统

成果完成人	黄海平	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	应用安全技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	移动设备				
核心专利号	ZL202410789254.X				

成果概述

随着物联网与大数据技术的快速发展，位置数据的广泛应用在提升商业决策能力的同时，也带来了严重的隐私泄露风险。传统差分隐私技术中，本地化差分隐私因过度扰动导致数据可用性低，而中心化差分隐私依赖于可信第三方数据收集者，存在隐私泄露隐患。针对这一矛盾，本研究提出一种基于混合差分隐私的区域计数查询方法及系统，旨在兼顾隐私保护与高数据可用性。

该方法创新性地融合本地化与中心化差分隐私的优势，利用本地化差分隐私保护用户位置从而弥补中心化差分隐私存在的隐私泄露风险，在保护用户位置隐私的同时，显著提升了区域计数查询的准确性。

关键技术/创新要点

（1）本成果设计了混合差分隐私机制，兼顾隐私与精度。传统方法中，用户要么在本地过度扰动数据（隐私强但结果不准），要么依赖可信中心直接处理原始数据（精度高但隐私风险大）。本成果设计“本地+中心化”双扰动机制：用户根据自身位置、所在区域大小及隐私预算，动态生成扰动参数，在本地对位置信息进行保护并上传。分位置收集中心二次加噪：分位置收集中心汇总用户数据后，统计区域内人数，再对总数值添加拉普拉斯噪声。保护区域内的计数值。

（2）本成果对加噪参数进行动态调整，并对数据进行合法性检查，防止不必要的误差累积。在用户本地扰动位置数据阶段，根据用户位置、所在区域大小以及隐私预算动态调整扰动参数。并且，在分位置收集中心以及总位置手机中心添加数据合法性检查，修正非法数据。

（3）本成果设计了一种分布式协同架构。分位置收集中心并行处理：将地图划分为多个子区域，每个分中心独立收集、扰动和校验数据，降低单点计算压力，提升系统吞吐量。总位置收集中心全局协调：汇总分中心数据后，统一响应查询请求，并通过合法性检查确保数据质量。

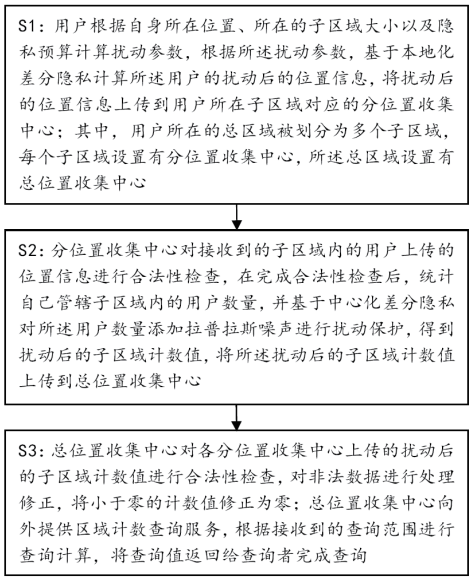


图1 系统流程图

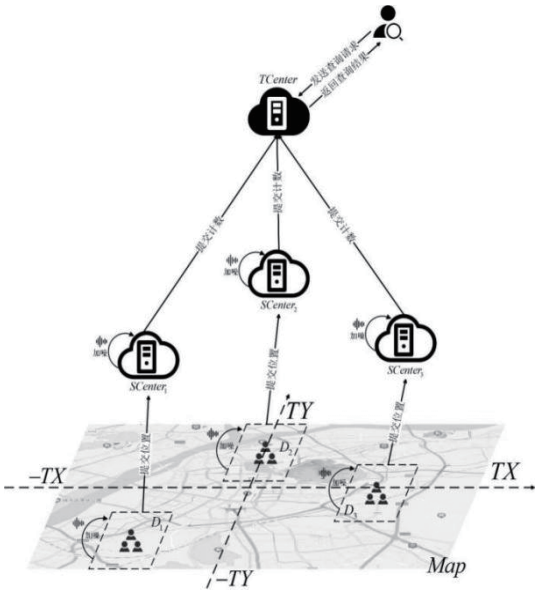


图2 系统结构图

技术指标/优势

(1)隐私与数据可用性相平衡，本成果创新性结合本地和中心化差分隐私，弥补了本地化差分隐私数据可用性差以及中心化差分隐私存在数据泄露风险的问题。在保证数据安全的同时，提升了数据可用性。

(2)加噪参数动态调整，并修正非法数据，本成果在数据加噪阶段动态调整加噪参数，并对收集过程中发现的非法数据进行修正，防止了不必要噪声累积。

(3)本成果设计了一种分布式协同架构，由多个分位置收集中心收集用户数据，并上报至一个总位置收集中心向外提供查询服务，提升系统响应速度。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于智慧城市、商业分析、公共安全及物联网等领域，尤其适用于需平衡隐私保护与数据精度的场景。例如，在智慧交通中实时统计人流车流以优化信号灯配时，避免泄露个体位置；商业场景下匿名分析商场客流热力，辅助店铺选址与促销策略制定，同时规避用户轨迹暴露风险；公共卫生事件中快速统计密接区域人数，确保疫情追踪符合隐私法规；车联网领域匿名处理车辆行驶数据，支持导航优化与拥堵预测等等。

市场前景方面，全球隐私保护需求因法规趋严，个人及国家均越来越重视个人隐私数据的保护。该成果凭借“隐私-精度-成本”三重优势，在智慧城市基建、商业数据分析、应急管理等场景具备强竞争力，可用于公共服务，交通行业等多种领域。

基于AR设备的机房运维管理方法及系统

成果完成人	高浩	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图象处理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	数字孪生和虚拟现实				
核心专利号	202210180987.4				

成果概述

传统的机房巡检方式依靠人工纸质化巡检，使得巡检质量低、巡检数据质量差。当前一些机房巡检引入智能巡检机器人，能够开展一些巡检工作，但巡检不仅依赖于视觉，同时由于机房服务器的安装位置、角度以及尺寸方面的影响，巡检机器人经常出现故障无法识别的现象，巡视读取服务器数据的准确性也无法得到保证。其状况为，机器人巡视完毕后再由运维人员对数据的正确性进行校核，工作繁复。

AR智能终端基于语音图像识别、智能判断、搜索查询、AR技术等，其集成度高、佩戴方便、解放双手、无线传输数据，可使辅助的虚拟场景与实际场景无缝对接，信息得以精准、全面地展示，操作人员可获得丰富的交互体验。在机房巡检作业中，对智能终端的需求可归结为人机交互、智能识别设备、作业流管理、巡检数据交互、远程协助等几个方面。基于此的人机交互、移动互联、数据贯通等推进了机房巡检作业的提升。

关键技术/创新要点

本次所建设的数据中心基础设施AR智能运维管理系统，其建设目的是通过智能化、智慧化的管理工具及手段，实现数据中心运维管理的高效自动化、智能化。我方在本次系统建设方面充分参考了国内外数据中心运维管理方法论及经验，同时通过与客户的交流及互动，率先采用了跨界思维的方式进行方法论提升，充分参考了我国目前用于军事智能化手段的单兵作战系统建设思路，并充分进行市场调研、方法讨论、技术评估与测试，最终形成了一套独特的、可落地的数据中心智能化管理方案。

通过AR技术的辅助：

一线巡检人员扫描工牌的二维码登录巡检平台，后台服务会将日常巡检任务以及设备故障信息推送给一线巡检人员。一线巡检人员佩戴HoloLens设备进行巡检，无需携带纸质表格与标准，也无需携带任何手持设备。

在执行日常巡检任务时，HoloLens自主规划路径，跟着系统导航提示前行。跟随系统提示到达指定地点时，通过预定义的手势进行相对应的操作；设备识别成功后，出现巡视开始的时间以及巡检设备的详细信息，还会把巡检规范推送给一线员工。

一线员工在进行日常巡检或故障维修时，二线专家与领导可以在后台观看一线员工的实时画面，同时二线专家还可以通过界面交互与语音通话给一线员工提供策略指导。

日常巡检完成后，一线员工可以调用上次巡检时的照片记录，以进行复核，当选择调用历史照片时，会显示历史巡检时拍摄的故障照片。

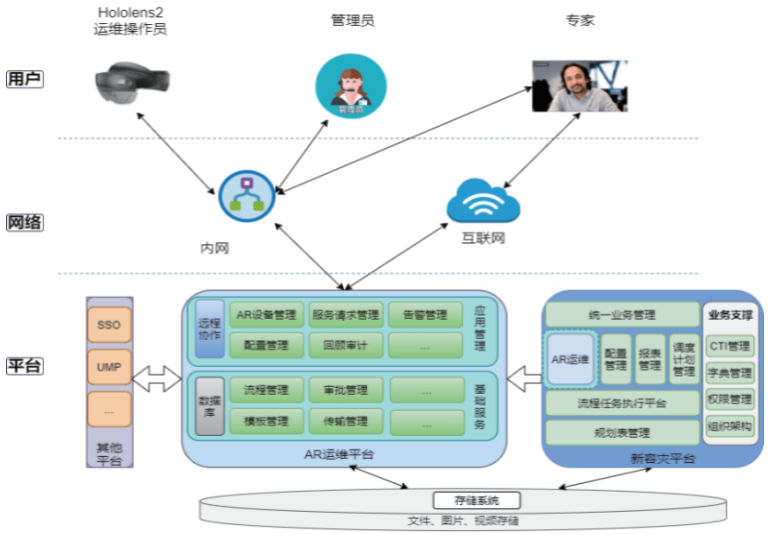


图1 总体设计

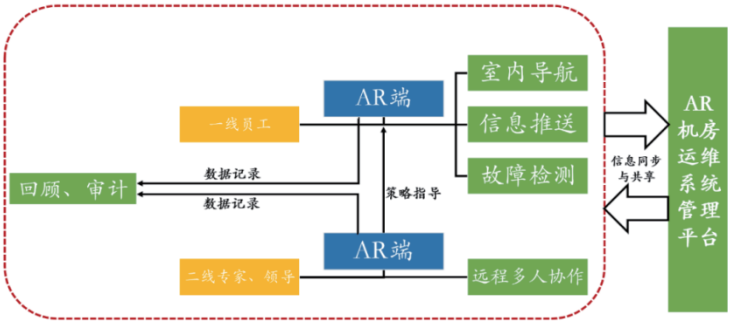


图2 整体功能框架图

技术指标/优势

团队提出了一种基于环境感知系统的机房运维解决方案，利用离线见图的方法重建出高精度的机房模型，并使用联合定位方法计算出一线人员实时位姿。准确的实时位姿保证了AR标记、电子围栏等场景交互三维模型的正确摆放，极大的提高了用户的体验，并减轻了工作量。用户评估证实了本工作具有较好的使用体验。

应用领域和市场前景

该项目可以应用在需要虚拟现实或者混合现实技术的企事业单位。主要包括：职业康复、智能巡检、用户体验、新人训练等。

一种基于纹理特征的图像压缩感知自适应重构方法及装置

成果完成人	陈灿	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	信息科学与系统科学基础学科
应用行业	机器视觉				
核心专利号	ZL202211232232.0				

成果概述

面对大规模视频数据带来的全新挑战，具备硬件友好特性的图像压缩感知应运而生。由于传统基于分析模型的图像压缩感知重构方法计算复杂度高，难以满足实时应用的要求，因此深度学习技术被逐渐引入。然而，现有基于深度学习的重构方法忽略了帧的纹理特征，限制了重构性能。由于同图像组中的视频帧具有较高的相似性，因此可以选择相邻视频帧作为当前视频帧纹理特征的参考。为了解决这个问题，提出一种基于纹理特征的图像压缩感知自适应重构方法及装置。

关键技术/创新要点

方法步骤如下：获取待重构原始图像；对原始图像中的图像块进行压缩感知采样，得到图像块的测量值；将图像块的测量值输入预训练好的重构网络模型，得到重构的图像块；对重构的图像块按照顺序进行拼接，获得最终的重构图像；其中所述重构网络模型包括初始重构子网、门子网和骨干重构子网；利用门子网挖掘初始重构的纹理特征，输出激活向量，以激活骨干重构子网的对应部分，实现对不同图像块的自适应重构，提高重构质量与效率。

技术指标/优势

能够有效提高图像的重构质量与效率。

应用领域和市场前景

该技术适用于资源受限情况下的计算成像和图像处理等领域，例如核磁共振成像，遥感成像和快照压缩成像等。

基于私有信息检索的区块链智能停车管理系统

成果完成人	张海涛	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术	二级学科	测绘科学技术其他学科	
应用行业	智慧城市、智能交通				
核心专利号	ZL202411233350.2				

成果概述

随着我国经济的快速发展，私家车数量快速增长。停车设施建设滞后于汽车保有量的增长、停车设施权属不清、权属相关登记制度不足、缺乏有效管理等原因造成了部分城市“停车难”的问题。构建基于物联网设备无线感知和信息传输技术的智能停车场系统是目前的主要技术解决方案。本成果提供了一种基于私有信息检索的区块链智能停车管理方法，基于区块链系统的多数据副本的账本管理方式，采用信息论私有信息检索技术实现停车用户查询车位信息的保护，以避免后台系统对于停车用户的车位查询信息过度分析。

关键技术/创新要点

技术实现深度融合了多层密码学技术，包括使用椭圆曲线加密为停车场管理员和停车用户生成公私钥对以建立身份体系，在所有交互环节（查询请求、服务器响应、预约确认等）均采用“接收方公钥加密 + 发送方私钥签名”的组合，确保消息的机密性、完整性与不可否认性，且在私有信息检索请求的传递中，还引入了验证节点的私钥进行再次加密，形成安全验证链条。此外，系统结合了物联网与近场通信技术，使停车场服务器能够通过与车位感知设备通信，自动检测车辆的驶入与驶离，并触发车位状态的自动更新与上链广播，以及利用加密二维码匹配机制，在车位预定成功后，将预定信息生成分别用用户和停车场公钥加密的二维码，用于用户到场后的线下安全核验与车位引导，从而构建了一个在保护用户查询隐私的同时，确保整个停车交易数据可靠、流程可信的完整解决方案。

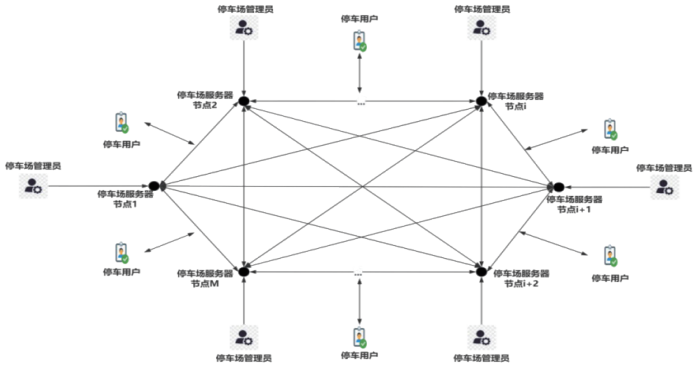


图1 基于联盟链的区块链网络架构

技术指标/优势

本成果能够有效保证停车用户在检索车位信息时的隐私安全；通过采用私有信息检索方法在区块链节点上进行车位信息检索，实现对停车用户检索车位信息隐私的有效保护，避免后台系统对于车位查询信息的过度分析；本成果中存储的车位信息更具有可靠性、完整性；通过对停车过程中交易信息的“上链”管理，实现停车交易过程的公开透明和防篡改，保证停车场系统信息的可靠与完整。

应用领域和市场前景

该方案能够满足日益增长的对数据隐私保护的需求，同时利用区块链的不可篡改和透明特性，提升停车位资源管理的可信度与协同效率，有望应用于商业综合体、交通枢纽、住宅社区等需要对多产权方停车场进行一体化管理与服务的场景，为构建更安全、公平、高效的下一代智能停车系统提供了可行的技术路径。

CapNet——基于可解释AI的高效DDoS攻击检测方法

成果完成人	朱海婷	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	应用安全技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	网络安全				
核心专利号	ZL202411377622.6				

成果概述

随着数字化转型的深入，分布式拒绝服务（DDoS）攻击已成为网络空间最具破坏性的威胁之一。此类攻击通过向目标服务器或网络发送大量流量，使其无法为合法用户提供服务，具有显著的分布性、突发性和隐蔽性特点。传统基于攻击签名的检测系统依赖人工提取已知攻击特征，对新型DDoS攻击难以奏效；而现有深度学习方法虽提升了检测精度，但仍面临梯度消失、模型鲁棒性不足、缺乏可解释性以及计算成本高昂等关键挑战。

本团队自主研发了一种基于可解释人工智能的DDoS攻击检测方法——CapNet。该方法通过优化的ResNet50结构进行一维网络流量的特征提取，结合SelfNet模块进一步优化分类性能，并引入Captum模块计算特征贡献度，实现了模型的透明性和可解释性。CapNet能够在显著降低计算复杂度的同时，保持极高的检测精度，并可有效筛选出最具代表性的关键特征，为解决DDoS攻击检测中的效率与可解释性难题提供了创新性方案。

关键技术/创新要点

传统深度学习模型在处理DDoS攻击检测时，往往存在“黑箱”特性，难以解释分类决策的原因，同时复杂模型带来的高计算成本也限制了其在大规模流量环境中的实时应用。CapNet针对上述问题，从特征提取、分类优化和可解释性三个层面进行了系统性创新。

团队首先对ResNet50模型进行了一维化改造，将其原有的二维卷积层和池化层调整为一维结构，使其能够适配网络流量的时序特征处理。通过保留残差连接，有效缓解了梯度消失问题，确保深层网络训练的稳定性。该一维ResNet50结构在降低计算资源消耗的同时，保持了强大的特征提取能力。

在此基础上，团队引入了SelfNet模块对提取的特征进行深度优化。SelfNet由多层全连接层组成，通过逐层非线性映射，进一步抽象和优化从ResNet50中提取的特征，捕捉复杂特征关系和高层次抽象信息，从而提升模型在复杂流量模式下的分类性能。

为解决深度学习模型缺乏可解释性的根本问题，团队引入了Captum模块。该模块采用集成梯度法（Integrated Gradients），通过选择基线输入、生成插值点、计算梯度并积分累积的方式，量化每个输入特征对模型输出的贡献度。这一机制使得模型的决策过程透明化，用户能够清晰理解哪些特征对检测结果起关键作用。

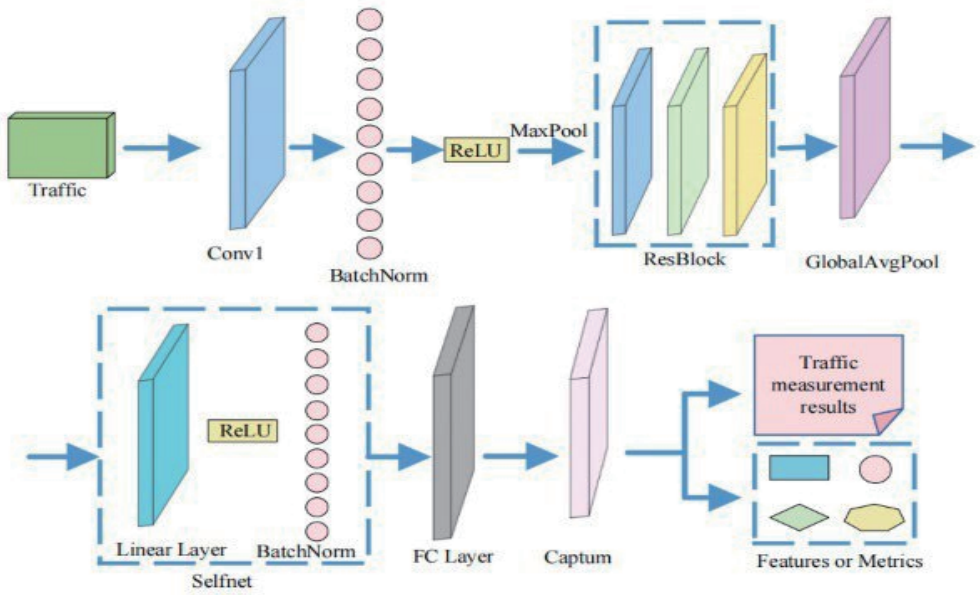


图1 模型整体架构

技术指标/优势

与传统的机器学习检测方法和现有深度学习模型相比，CapNet在检测精度、计算效率和可解释性方面均展现出显著优势。

在检测性能方面，CapNet在二分类和多分类任务中均表现优异。实验结果表明，使用全部79个特征时，模型F1分数超过99.9%；经过特征贡献度分析筛选至15个、4个乃至2个关键特征后，模型仍能保持99%以上的F1分数，展现出极强的特征筛选能力和检测鲁棒性。

在计算效率方面，CapNet 通过特征贡献度分析实现了显著的特征降维。从79个特征逐步筛选至最终的2个最具代表性特征（最大数据包长度和确认标志计数），模型训练时间从2840.63秒缩短至246.77秒，减少近10倍，极大提升了模型的训练效率和计算资源利用率。在可解释性方面，Captum模块使模型具备了高度的透明性。用户可直观了解每个特征对分类结果的贡献度，有效解决了深度学习模型的“黑箱”问题，增强了网络安全管理员对检测结果的信任度。

在多类型攻击检测方面，CapNet在PORTMAP、LDAP、MSSQL、NetBIOS、SYN、UDP、UDPLag等多种DDoS攻击类型的多分类实验中均保持了较高的分类准确率，验证了模型在不同攻击场景下的泛化能力和鲁棒性。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于网络安全领域的DDoS攻击检测场景，为互联网服务提供商、云服务厂商、金融机构及政府机构等提供高效、精准且可解释的攻击检测能力。

随着DDoS攻击手段不断演变且攻击频率持续攀升，传统基于签名的检测系统已难以满足实时防御需求。CapNet通过优化的深度学习架构和特征筛选机制，能够在保持高检测精度的同时大幅降低计算开销，尤其适用于大规模网络流量的实时监控场景。其良好的可解释性使得安全运维人员能够快速理解攻击特征并作出响应，有效提升安全运营效率。

由于DDoS攻击具有跨行业、跨平台的普遍性，该成果可适用于各类网络环境下的攻击检测需求，包括数据中心边界防护、云计算平台流量清洗、工业互联网安全监测等场景。未来，CapNet有望进一步结合边缘计算架构，实现分布式节点上的轻量化部署，为构建高效、可信的网络安全防护体系提供关键技术支撑。

iHOS智慧医院操作系统

成果完成人	郑洁莹	职称	讲师	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	企业管理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	医疗行业				

成果概述

医院数字化转型是提升医疗服务质量与运营效率的重要手段。然而传统医院信息系统普遍面临数据孤岛严重、AI能力叠加而非原生融合、AI辅助临床决策缺乏可解释性等瓶颈，导致信息化投入难以转化为真正的诊疗质量提升。因此，构建一套以AI为核心驱动力、打通全院数据流的新一代智慧医院操作系统显得尤为迫切。

本团队自主研发了iHOS智慧医院操作系统，将医疗大语言模型、影像AI与多模态推理引擎深度融合为统一的AI核心引擎，结合医学本体论语义架构与信创隐私计算基座，突破了传统系统“数据割裂、AI旁挂、数据不敢共享”的根本局限，实现全院数据实时贯通与无感智能交互，在临床辅助决策、智慧运营管理和医疗AI工程实践方面具有广泛的落地应用前景。

关键技术/创新要点

作为医疗行业首个AI原生操作系统，iHOS从根本上区别于传统"功能模块+AI插件"的集成模式，将大语言模型、影像AI、知识图谱等智能能力作为操作系统的基础设施层而非上层应用。系统主动感知临床场景变化，在关键诊疗节点自动激活对应 AI 能力并推送至相关医护人员，实现了从“人找系统、被动操作”到“系统感知、事项主动找人”的根本性转变。

本团队系统创新地引入了医学本体论架构，为全院数据建立统一的语义定义体系。同一医学概念在医生工作站、临床决策系统与运营报表中始终指向唯一的语义根基，从根本上消除了多系统之间“同词异义”的数据孤岛问题。AI推理路径可溯源至具体本体公理，满足临床可解释性与监管合规的双重要求。

此外，团队还构建了以多模态推理引擎为核心的模型即服务（MaaS）平台，将医疗大语言模型、医学影像AI、结构化检验分析模型与连续生命体征预测模型统一纳入服务调度层，根据临床场景主动编排多模型协同推理，将分析结果与待办事项精准推送至责任医护人员。相比传统单一模态系统，多模协同推理在复杂疾病鉴别诊断、危重症早期预警等场景中的综合能力显著提升，并支持新模型的热插拔接入与持续演进。



(a) iHOS 场景以及菜单　　(b) iHOS 临床诊疗二级菜单

图1 iHOS分级菜单



图2 iHOS临床诊疗模块AI高危患者预警系统界面

技术指标/优势

与传统医院信息系统相比，iHOS实现了从数据接入到AI推理的全链路贯通，在临床实时性、诊断准确性与数据安全性三个核心维度均取得显著突破。通过多模态协同推理机制，复杂疾病鉴别诊断与危重症早期预警能力相比单一模态模型大幅提升，有效延长了临床干预的黄金时间窗口。此外，系统采用模块化架构设计，相比传统多系统集成方案可显著降低整体建设与运维成本，综合运营效率得到全面提升。

应用领域和市场前景

iHOS可为医疗行业的临床诊疗、医院运营与区域医疗协同提供系统性智能化支撑。在临床场景中，AI原生的辅助决策能力覆盖急诊救治、危重症预警、慢病管理、影像诊断与合理用药等核心业务，有效提升诊疗质量并降低医疗差错风险。在运营管理场景中，智能床位调度、手术排班优化与供应链预测等能力可显著提升医院整体运营效率。由于iHOS采用开放的模型即服务架构与模块化部署设计，可灵活适配综合性三甲医院、专科医院及区域医联体等不同规模机构。随着国家持续推进医院数字化转型与卫生健康数据要素市场化改革，iHOS在智慧医院建设、区域医疗协同与医疗AI工程化落地等领域具有广阔的市场前景。

边缘智能边擎算法推理系统

成果完成人	孙洪波	职称	实验师	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	企业管理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	医疗行业				

成果概述

随着城市化进程加快和安防需求升级，传统监控系统已难以满足海量视频数据实时智能分析的需求。集中式云计算方案存在网络带宽占用大、响应延迟高、隐私泄露风险等问题。本成果自主研发了面向边缘侧的智能推理系统，通过将AI计算能力下沉至网络边缘，实现视频数据的本地化实时处理与智能分析。

本系统采用多模型并发推理引擎、动态帧率调度算法、视频结构化分析等关键技术，可在低功耗边缘设备上实现多路高清视频流的实时智能分析。成果整体技术水平达到国内领先，在边缘侧多路并发推理能力和动态资源调度方面具有显著优势，已具备规模化部署能力。

关键技术/创新要点

本系统面向边缘计算场景，构建了完整的端边协同智能推理架构，核心技术与创新要点包括：

（1）多模型并发推理引擎：采用TPU/NPU硬件加速技术，支持多种深度学习模型在同一边缘设备上并行执行，通过内存池化管理和计算图优化，实现多路视频流的高效推理处理。

（2）动态帧率调度策略：基于场景复杂度自适应调整抽帧频率，在保障检测精度的前提下显著降低计算负载。对静止场景降低采样率，对运动活跃区域自动提升分析频次，实现算力资源的最优分配。

（3）视频结构化分析：集成行为识别、目标检测与追踪等算法，支持分析区域绘制、屏蔽区域设定、围栏检测等多种空间分析模式，将非结构化视频转化为可检索的结构化数据。

（4）事件驱动告警机制：内置灵活可配的告警规则引擎，支持不限次报警和频控报警两种模式，告警信息包含事件截图、关联视频片段和结构化元数据，便于后续追溯分析。

（5）标准化协议接入：全面支持GB28181国家标准协议，兼容RTSP/RTMP等主流流媒体协议，可无缝对接既有监控系统，无需更换摄像头或重新布线即可实现智能化升级改造。

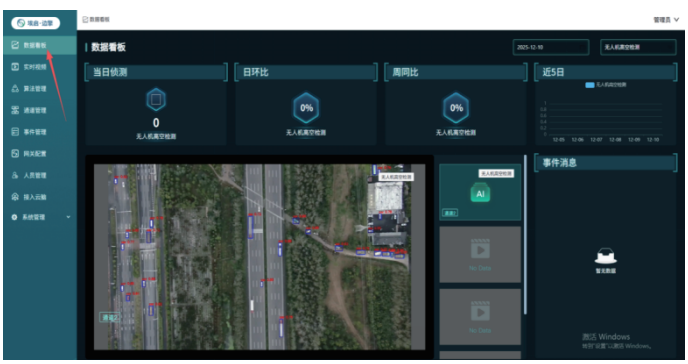


图1 边擎数据看板 — 展示事件统计、实时视频和消息列表

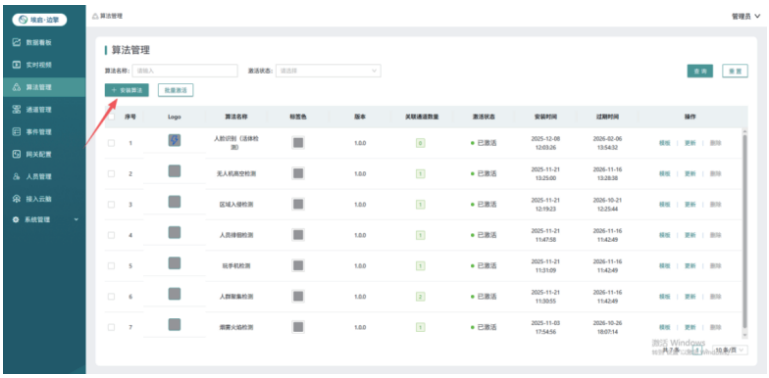


图2 算法管理界面 — 算法安装、激活与参数配置



图3 算法配置界面 — 视频区域绘制与算法参数设置

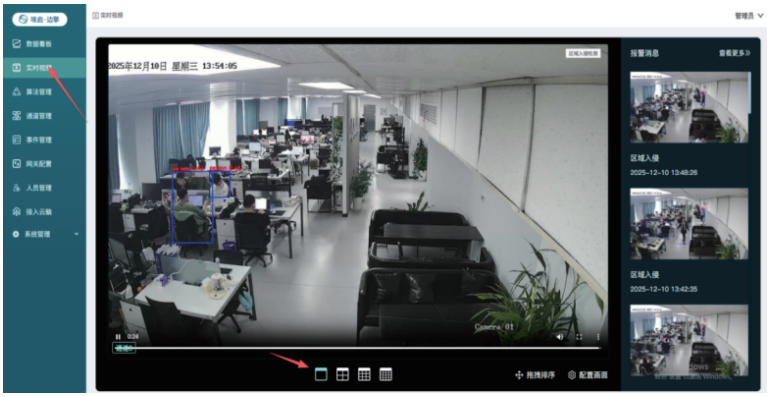


图4 实时识别和报警

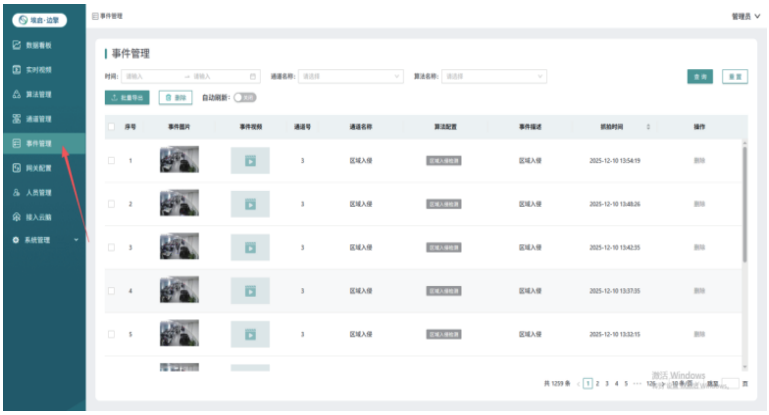


图5 事件管理界面 — 告警事件查看、回放与批量导出

技术指标/优势

一、核心技术指标

1. 单机并发处理能力：支持16路1080P高清视频流同时实时分析

2. 推理响应延迟：单帧推理耗时 < 50ms，满足实时性要求

3. 算法支持种类：涵盖行为分析、目标检测、人脸/人体识别等多类型算法

4. 视频协议兼容：支持GB28181、RTSP、RTMP等主流视频接入协议

5. 数据存储能力：支持事件图片/告警记录本地持久化存储，支持批量导出Excel报表

6. 网络通信能力：支持双网口独立通信，支持内外网隔离部署及MQTT云端上报

7. 资源利用效率：支持TPU/NPU异构加速，多线程并发推理，系统资源动态调度

8. 算法管理能力：支持算法包在线安装/卸载、版本管理、参数模板化配置

二、技术优势

1.即插即用部署：无需更换既有摄像头和线路，通过标准协议接入即可实现智能化升级，大幅降低改造成本

2.边缘本地推理：数据在本地完成分析处理，无需上传云端，有效保障数据隐私安全，同时降低网络带宽需求

3.可视化操作界面：提供直观的Web管理界面，通道配置、算法绑定、区域绘制等操作均可通过图形化界面完成，降低使用门槛

4.云边协同能力：支持与云端管理平台互联，实现算法包远程下发、设备状态集中监控和固件在线升级

5.灵活告警策略：支持不限次报警和频控报警模式，告警间隔、运行时段等参数可精细配置，适配不同场景需求

应用领域和市场前景

本系统可广泛应用于智能安防、智慧社区、智慧园区、智慧工地、智能制造、智慧交通、工业物联、消防应急等多个领域。在安防场景中，可实现周界入侵检测、人员异常行为识别等自动化监控；在工业场景中，支持设备运行状态监测、安全生产规范检测；在消防场景中，可实现烟火检测、消防通道占用预警等功能。

当前AI边缘计算市场正处于高速增长期，随着传统行业数字化转型加速和AI芯片算力持续提升，边缘智能推理需求呈现爆发式增长。本系统以"利旧改造、即插即用"为核心卖点，无需用户更换既有监控设备即可实现智能化升级，具有极低的部署门槛和显著的成本优势，在存量监控设备智能化改造市场中具有广阔的应用前景。同时，系统支持的云边协同架构为后续的算法迭代和功能扩展提供了可持续的商业模式。

全链式养老服务平台

成果完成人	孙洪波	职称	实验师	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	企业管理软件	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	/
应用行业	智慧养老				

成果概述

随着我国人口老龄化加速，截至2024年末，全国60岁及以上老年人口已达2.97亿，占总人口的21.1%。传统养老服务面临资源分散、供需失衡、监管困难等突出矛盾。本团队依托江苏有线网络承载优势，自主研发了全链式智慧养老平台，创新性提出“平台+硬件+运维”一体化解决方案。该平台采用面向全场景融合的全链式养老服务架构、多源异构物联网接入与边缘计算、基于多维数据融合的AI行为监测与异常识别等核心技术，构建覆盖居家、社区、机构三大场景的智慧养老服务体系，实现“机构-社区-居家-老人”全链条服务闭环，打通政策落地“最后一公里”。成果已在南京市鼓楼区等地区推广应用，服务老年人口超过1.9万人，契合国家“十五五”养老服务体系建设战略要求，为应对人口老龄化提供了可复制、可推广的方案。

关键技术/创新要点

本成果面向智慧养老多场景协同与精细化服务需求，构建了基于物联网（IoT）与数据驱动的全链式技术体系，在系统架构、数据融合、智能感知与服务协同等方面形成如下关键技术与创新点：

1.面向全场景融合的全链式养老服务架构技术

围绕“机构-社区-居家”多层级服务体系，构建基于B/S架构与SaaS模式的统一服务平台，采用模块化与微服务化设计思想，对用户管理、服务调度、健康管理等核心功能进行解耦，通过API网关实现服务统一接入与调用；依托数据中台实现多源数据的汇聚与共享，结合缓存机制与分布式调度策略，形成覆盖“需求建模-任务分发-服务执行-结果反馈”的闭环服务链路，支持高并发场景下的稳定运行与弹性扩展。

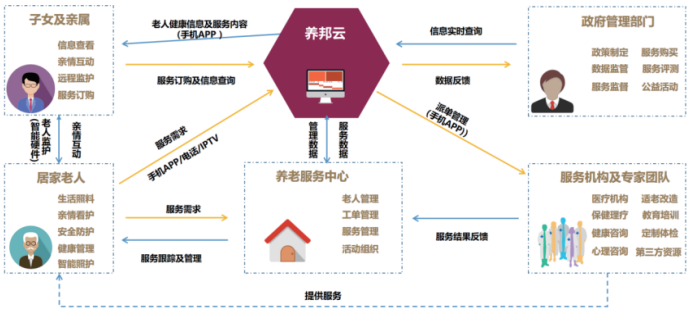


图1 面向全场景融合的全链式养老服务流程示意图

2.多源异构物联网接入与边缘计算技术

构建面向居家养老场景的多源异构感知体系，通过智能网关实现对各类传感设备的统一接入与协议适配，支持MQTT、CoAP、HTTP及WebSocket等通信协议，实现设备数据的低延迟传输与长连接通信；结合边缘计算能力，在网关侧完成数据过滤、异常初筛与本地缓存，提升系统在弱网环境下的可靠性，同时降低中心平台的数据处理压力。



图2 多源异构物联网接入与边缘计算流程示意图

3.基于多维数据融合的AI行为监测与异常识别技术

面向老年人居家安全场景，构建融合环境感知数据、设备状态数据及行为数据的分析机制，基于规则引擎与AI预警模型实现对老人行为特征的持续监测，支持跌倒检测、长时间静止、异常活动轨迹等多类场景精准识别；结合事件驱动架构，通过消息队列实现告警事件的异步处理与服务联动，提升系统在高频事件场景下的处理效率与响应能力。

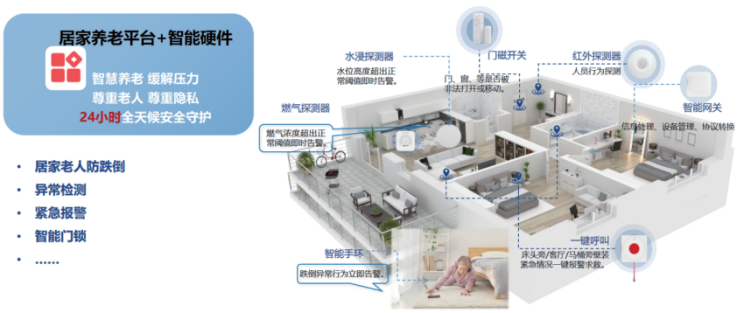


图3 基于多维数据融合的AI行为监测与异常识别场景示意图

技术指标/优势

技术指标：

1.平台单节点并发支撑用户数≥5000，核心服务接口平均响应时间≤200ms。

2.兼容 MQTT、CoAP 等 4 类主流通信协议，可完成≥15 类养老传感设备统一接入与协议适配。

3.跌倒、长时间静止等异常行为 AI 识别准确率≥95%，告警事件响应延迟≤1s。

技术优势：

1.采用 B/S+SaaS 架构与微服务解耦设计，打通机构 - 社区 - 居家全场景服务链路，实现高并发场景下系统稳定运行与灵活弹性扩展。

2.通过智能网关统一适配与边缘侧本地预处理，实现养老 IoT 设备低延迟传输，提升弱网可靠性并显著降低中心平台数据处理压力。

3.融合多维度感知数据构建 AI 预警模型，依托事件驱动架构实现异常高效识别与服务联动，大幅提升居家安全监测的精准度与响应效率。

获奖情况：

1.养邦“全链式”智慧康养平台场景获评2024年江苏省数字消费创新十大典型场景

2.江苏省科技计划（重大科技示范）：社区居家养老健康服务供给关键技术研究与应用示范

3.获评2024年南京市人工智能优秀应用场景及典型案例





15	人工智能	案例	边缘智能研究院南京有限公司	基于人工智能的“全链式”智慧医养生态平台	卫生
16	人工智能	案例	南京硅基智能科技有限公司	硅语元宇宙 AIGC 数字人平台	通用
17	人工智能	案例	智器云南京信息科技有限公司	智器云反洗钱智能监测甄别分析平台	金融
18	人工智能	案例	江苏满运软件科技有限公司	基于人工智能的全国公路干线物流智慧调度平台	交通物流
19	人工智能	案例	江苏高速公路信息工程有限公司	高速公路机电系统智慧监测运维云平台	交通
20	人工智能	案例	南京领行科技股份有限公司	T3 出行车联网大数据应用平台	交通

注：排名不分先后

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于居家养老安全守护、社区养老精准治理、养老机构数字化运营、医养康养结合服务、政府养老监管五大领域，覆盖独居空巢老人、失能半失能老人、高龄老人等重点群体，可直接对接民政、卫健、街道、社区、养老机构、企业等需求主体。我国“十五五”期间将大力推进智慧养老与适老化改造，江苏省老年人口总量居全国前列，市场需求刚性充足。成果依托南京邮电大学科研优势与江苏广电落地资源，可快速在全省乃至全国复制推广，预计可服务千万级老年群体，兼具显著的社会价值与广阔的市场空间，成为积极应对人口老龄化的标杆性科技成果。

骨质疏松症骨小梁评分系统

成果完成人	谢世朋	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	医疗机构				

成果概述

骨质疏松症是全球重大公共卫生问题，随着人口老龄化进程加速而日益突出。传统诊断方法主要依赖双能 X 射线骨密度仪（DXA）测量骨矿物质密度（BMD），但存在漏诊率高，尤其在临界人群中预测效果差的问题。本项目创新开发骨质疏松症骨小梁评分系统，基于常规 DXA 检查的正位脊柱图像，运用高精度图像处理算法和深度学习技术，实现骨小梁微结构精准量化评估，建立多模态评估体系。

关键技术/创新要点

核心技术将二维BMD测量升级为三维微结构分析，通过深度学习构建的三维重建模型，精准量化骨小梁数量、厚度、分离度等形态学参数及结构模型指数、各向异性程度等三维结构特征。独创骨小梁连接性指数和空间分布均匀性指标，首次实现骨微结构力学传导特性的临床量化评估。在风险评估上，将12项骨微结构参数与传统FRAX评分系统整合，开发新一代FRAX-Plus算法，通过特征重要性加权，使参数贡献度更符合生物力学原理，引入时间动态变量预测风险变化轨迹，预留遗传标记物检测接口，为精准医疗奠基。临床验证显示，预测准确率（AUC）达 0.86，临界人群鉴别准确率提升23.5%，检测时间仅3分钟，无额外辐射。

技术指标/优势

系统优势明显：骨折风险预测AUC值达0.86（传统方法0.72），临界值人群鉴别准确率提升23.5%；支持更广BMI检测范围（15 - 37kg/m^2）；单例分析时间缩短至3分钟，无额外辐射。

成本效益方面，基于现有DXA设备升级，硬件投入仅为显微CT的1/10，运行成本降低40%，性能价格比优异。综合来看，本项目在测量精度、适用范围和经济效益等方面超越现有技术，为骨质疏松诊疗提供更精准、经济的解决方案，临床应用前景广阔。

应用领域和市场前景

当前骨质疏松诊疗市场存在三大痛点：传统骨密度检测漏诊率高（30% - 50%）、现有评估工具对临界患者鉴别力不足、精准检测设备昂贵难普及。本项目通过 AI 增强 DXA 设备，以 1/10 显微 CT 成本实现同等精度的骨微结构评估，解决市场痛点。

扫描探针显微镜成像分析与数字图像处理

成果完成人	许杰	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	仪器仪表制造				
核心专利号	ZL202310112555.4；ZL201911079283.2；ZL201711325080.8				

成果概述

扫描探针显微技术是纳米科学领域的核心表征手段，广泛应用于微纳电子材料与器件的电学性质研究。然而，开尔文探针力显微镜（KPFM）和静电力显微镜（EFM）在实际探测中面临信号失真严重、分辨率不足、定量分析困难等共性瓶颈：由于探针与样品间静电力为长程力，探针的有限尺寸效应导致测得的表面电势信号与真实值存在显著偏差；传统分析方法忽略探针侧壁影响，建模精度有限。

南京邮电大学研究团队历经多年系统攻关，围绕“如何从显微探测图像中准确提取样品表面真实电学信息”这一核心科学问题，形成了一套完整的理论建模与信号处理方法体系。该系列成果先后获得四项中国发明专利授权（CN 106802357B、CN 108195921B、CN 110672882B、CN 116183966B），覆盖KPFM信号复原、EFM表面电势提取、介电常数定量探测及基于形貌图像的新型电势提取四个层次，实现了从信号失真修正到全新探测原理的跨越式技术进步，成果整体达到国内领先、国际先进水平。

关键技术/创新要点

1. 基于格林函数的点扩散函数建模与KPFM图像复原

建立了KPFM探测系统的严格数学模型，将探测信号与真实表面电势之间的关系表达为卷积形式，利用格林函数方法推导出系统点扩散函数（PSF）的解析计算方法。针对实际数字图像处理中截断误差和噪声放大问题，创造性地引入“电势均值扣除”策略大幅压缩截断误差，并采用维纳滤波（Wiener Filtering）方案实现鲁棒的反卷积还原。处理后，中心区域电势真实值由约25mV提升至约60mV，信号还原效果显著。

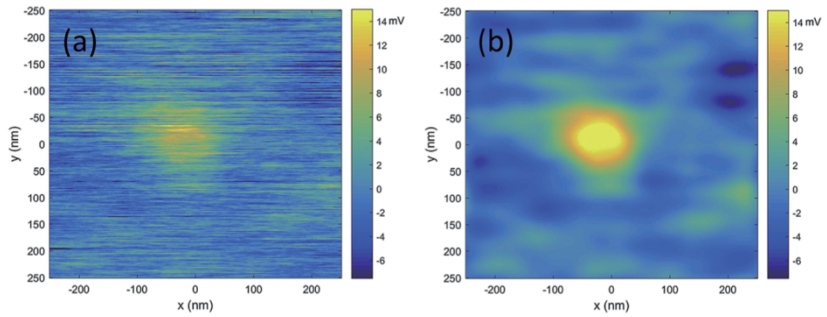


图1 硅量子点浮栅结构KPFM原始信号(a)与复原图(b)

2. 充分考虑探针侧壁效应的EFM定量建模

针对传统方法将探针简化为平行板电容器而忽略侧壁静电力的不足，基于格林函数理论与有限元数值计算，建立了完整考虑探针侧壁贡献的EFM系统传递函数，构建了静电力显微信号与表面电势之间更准确的定量卷积模型。结合离散化处理与频域维纳滤波反卷积，直接从EFM二维图像中提取样品表面电势分布。

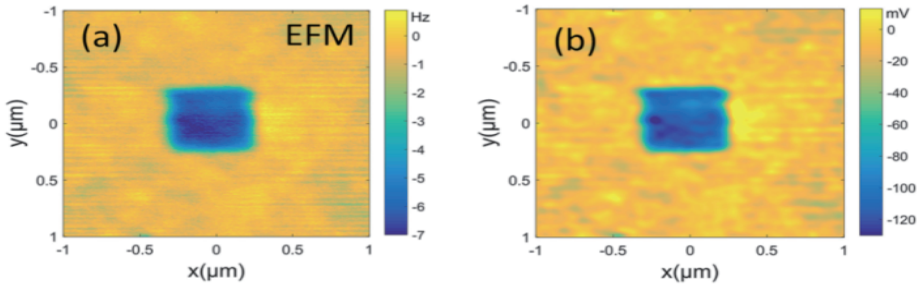


图2 浮栅存储结构EFM频率信号(a)与表面电势预测图(b)

3. 基于镜像电荷法的纳米尺度介电常数探测

提出利用EFM频移信号定量获取探针-样品电容二阶导数（d^2C/dz^2）的实验方法，并创新性地引入镜像电荷法建立电容随介电常数变化的理论模型（C″-ε曲线），通过实验值与理论曲线比对推断材料介电常数。以单晶硅为验证样品，测得介电常数为12.6，与文献值高度吻合，实现了在约20纳米空间分辨率下的无损介电常数表征。

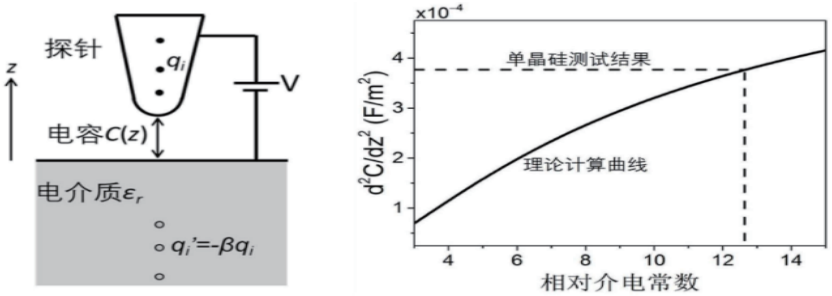


图3 基于静电力显微镜的介电常数测量

4. 从AFM形貌图像中直接提取表面电势的新原理方法

突破传统双程扫描的技术框架，发现并利用表面电势对AFM轻敲模式形貌测量产生可测形貌偏移量（Δd）这一物理效应，基于探针振动动力学模型建立了Δd与表面电势Vs之间的严格定量关系。该方法无需额外电学探测模块，直接从常规形貌图像中提取电势信息，规避了现有KPFM/EFM因探针抬升导致的信号失真，分辨率与形貌成像相当，具有原理性创新价值。

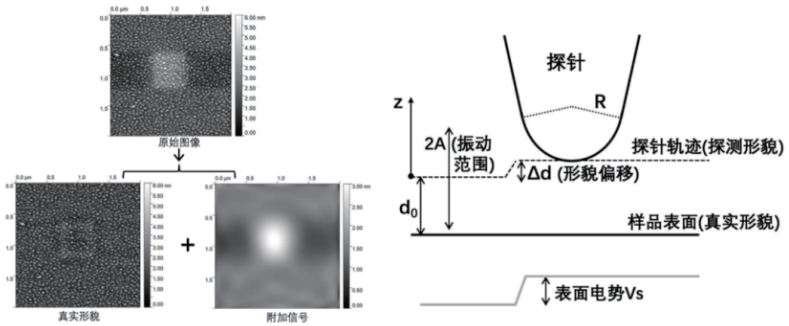


图4 基于原子力显微镜图像的表面电势提取

技术指标/优势

主要技术指标：

· 探针空间分辨率：~25 nm（针尖曲率半径），探测区域覆盖数百纳米至数微米

· 探测模式：非接触/轻敲模式，全程无损伤

· KPFM图像复原精度：电势还原幅度提升2倍以上（-25 mV → ~-60 mV）

· 介电常数测量范围：适用于相对介电常数3～15的宽范围电介质，单晶硅测试值12.6与标准值吻合

· 形貌偏移法电势提取：形貌偏移约1.5 nm对应表面电势约0.32 V，灵敏度高

· 信号处理：MATLAB平台实现，512×512图像点阵，兼容主流AFM系统

相对同类技术的优势：

对比维度	本系列成果	传统 KPFM/EFM 方法
信号失真处理	定量建模+维纳滤波复原	通常不做修正
探针侧壁效应	充分考虑，建模准确	通常忽略
介电常数表征	纳米尺度，无损，~20 nm 分辨率	椭偏仪光斑≥数十微米
电势提取新方法	仅需形貌图像，高分辨，无失真	需抬针，分辨率低，存在失真
技术通用性	适用多种电介质及半导体材料	应用对象相对局限

应用领域和市场前景

本系列成果具有宽泛的应用场景，可在以下领域发挥重要作用：

1.半导体与集成电路领域：随着芯片制程进入深亚微米乃至纳米节点，栅介质层、浮栅存储结构、p-n结等关键结构的电势分布与介电性能表征需求迫切。本成果能够在纳米尺度实现无损定量测量，可有效支撑晶圆级电学失效分析、工艺优化和质量控制。

2.新型存储器件研发：浮栅闪存、相变存储器、铁电存储器等新型非易失存储器的研发高度依赖对存储电荷分布和表面电势状态的精确表征，本成果已在浮栅存储结构薄膜上完成实验验证，具备直接转化条件。

3.有机与钙钛矿光电材料表征：异质结界面电势、载流子分布、材料缺陷态等信息是性能优化的关键，本成果方法的无损、高分辨特性恰好满足这类软物质材料的表征需求。

4.生命科学与生物传感：细胞膜电势、生物分子表面电荷等信号的纳米尺度成像具有重要科学意义，本方法适用于表面电势信号不随时间快速变化的生物样品。

随着全球半导体产业规模持续扩大和纳米材料表征仪器市场快速增长，高精度扫描探针显微分析技术需求旺盛。本成果可作为商业AFM系统的软件算法模块进行推广，亦可支撑高端科研仪器国产化进程，具有良好的产业化前景。

评估近似算术单元错误纠正能力的新型度量指标及应用

成果完成人	窦昱钦	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	人工智能与数据挖掘、多媒体与数字信号处理、消费电子与移动计算、机器人与自动驾驶				

成果概述

在容错应用中使用近似算术单元(AAUs)可以显著降低能耗并提高电路性能。近年来,近似高层次综合(AHLS)被广泛应用于自动生成高质量的系统级近似设计。然而,现有的AHLS研究主要集中在改进搜索算法或误差估计上,往往忽略了近似单元自身固有的错误纠正能力。

本团队针对这一技术盲区,提出了一种用于评估近似算术单元错误纠正能力的新型度量指标(AAUECC)及其系统化的计算方法。通过将该特性整合到AHLS的设计探索中,本项目突破了以往仅靠算法优化的瓶颈,为提高高效能计算系统的近似设计质量提供了全新的视角与理论依据。

关键技术/创新要点

该技术有别于传统电路中通过添加额外的补偿逻辑来纠错的方法,本成果首次提出利用近似单元“自身的计算误差”来主动抵消系统输入误差的机制。设计了综合考量期望改进误差(EIE)、实际改进误差(AIE)以及增加误差(INE)的计算公式:

$$AAU_{ECC} = \frac{(AIE - INE) * (n + m)}{EIE * N}$$

该公式不仅考虑了误差的大小,还引入了误差变化的频率因子(n, m),能够精准反映出近似单元引入的误差中有多少真正对纠错做出了贡献。

并且针对包含多个近似单元的复杂电路设计,团队提出了平均错误纠正指标$\overline{AAU_{ECC}}$,有效实现了从单一单元评估向整体系统纠错能力评估的跨越。论证了AAU_{ECC}指标与电路真实利用率的高度一致性。该技术允许设计者在执行极其复杂的物理综合之前,就能初步筛选出最优的近似单元。

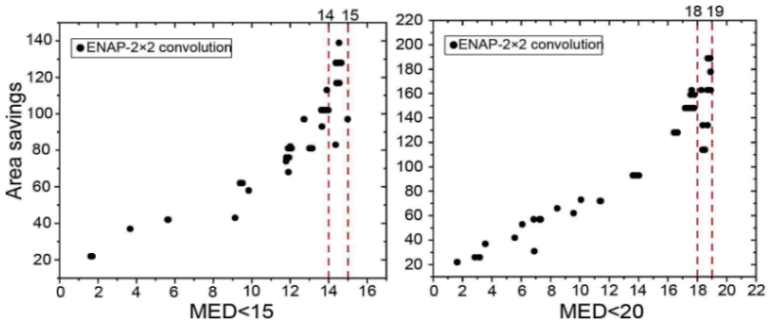


图1 2X2卷积的探索过程

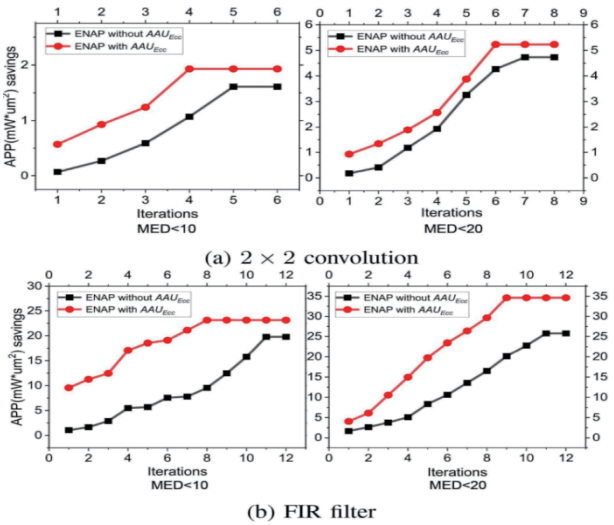


图2 使用不同方法生成初始设计的ENAP搜索结果, (a) 2 X 2 卷积; (b) FIR 滤波器

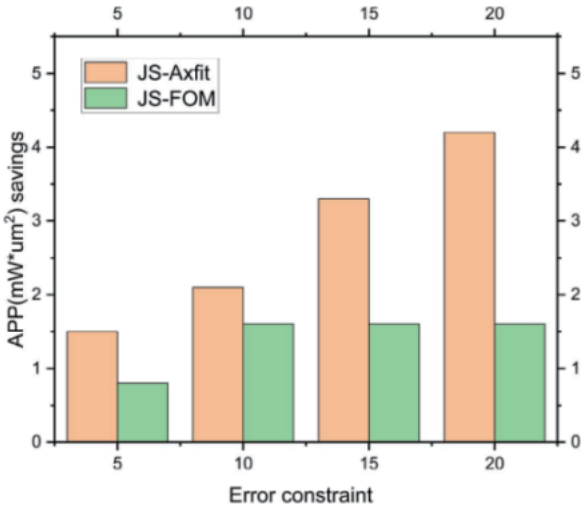


图3 使用两种指标的跳跃搜索搜索结果

技术指标/优势

在针对2×2卷积电路的优化实验中, 将该指标应用于跳跃搜索框架并作为单元选择标准。结果显示, 在特定误差约束下, 基于AAU_{ECC}的面积-功耗乘积节省量达到了传统 FOM (Figure of Merit)度量指标的2倍以上。

在FIR滤波器等应用的测试中, 利用AAU_{ECC}指标辅助生成初始配置, 帮助ENAP搜索框架从更高质量的起点开始探索, 使总迭代次数减少了约3次, 并更快收敛至更优设计。

实验证明, 通过精准匹配高AAU_{ECC}的近似加法器, 不仅能带来更大的硬件面积节省, 还能地让系统的平均误差距离(MED)减少。

应用领域和市场前景

该成果可为集成电路设计行业的芯片功耗优化、算力提升和设计自动化等相关方面提供高效的技术支持, 如:在近似高级综合(AHLS)过程中对算术单元纠错能力的精准评估, 能够保障硬件电路在满足计算精度要求的前提下实现能效的最大化, 是高性能低功耗芯片研发的关键技术。由于近似计算广泛适配多种数据密集型应用场景, 如人工智能推理、图像处理、语音识别和边缘计算等, 该成果可望用于以上这些领域中各类处理器内核的架构优化、能效平衡以及大规模并行计算系统的低功耗定制化开发。

一种基于深度特征、信息检索和软件工程领域特征的方法级软件缺陷定位方法

成果完成人	李云	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	软件开发	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	软件开发				
核心专利号	202410753529.4				

成果概述

在软件开发和维护的过程中，不可避免会出现各种缺陷或错误，例如功能不完善、性能下降、崩溃、安全漏洞等，这些问题都会影响软件的质量和稳定性。对于一些要求高质量和稳定向的软件，一旦在使用过程中产生了意料之外的行为，可能会带来严重的后果。本成果属于机器学习领域在软件缺陷定位方面的应用，特别设计了一种融合了深度特征、信息检索和软件工程领域特征的方法级别缺陷定位方法。

关键技术/创新要点

该方法包含了如下步骤：

步骤一、对数据集中缺陷报告和方法中的内容进行分词、小写化、词形还原和去除停用词，获取预处理后的数据集；

步骤二、使用基于程序依赖图的程序切片方法获取方法的切片；

步骤三、提取两类信息检索特征和两类软工领域特征；

步骤四、构建模型，提取深度特征；

步骤五、使用一个深度神经网络来融合信息检索特征、软件工程领域特征和深度特征，并通过最小化交叉熵损失函数和注意力损失函数之和对模型进行训练；

步骤六、将待定位的缺陷报告输入模型，得到模型所预测并排序的方法列表。本成果提出的方法同时利用了深度特征、信息检索特征和软工领域特征来定位相关缺陷方法，提高了方法级缺陷定位任务的性能。

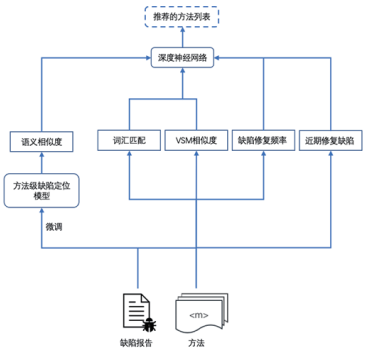


图1 网络结构图

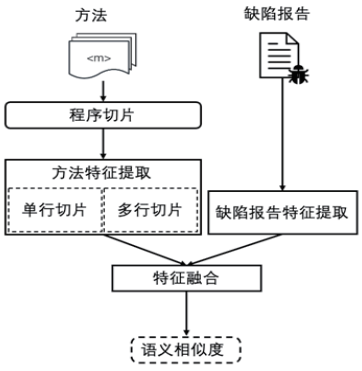


图2 语义提取模块结构图

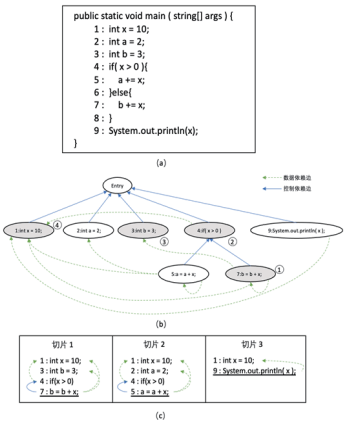


图3 语义提取模块中方法切片的生成流程图

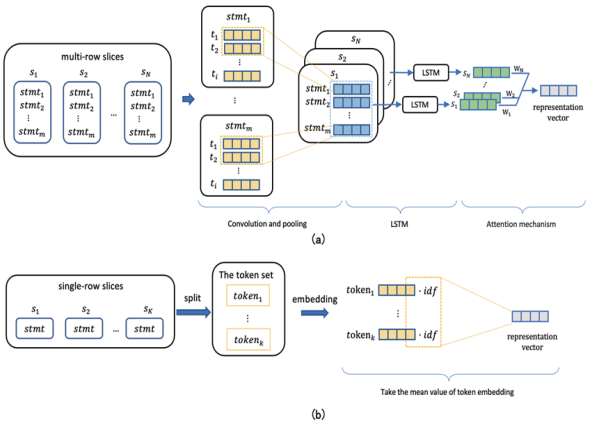


图4 语义提取模块中切片的特征提取流程图

技术指标/优势

虽然现有的文件级别的缺陷定位方法可以根据缺陷报告的内容来推荐包含缺陷相应缺陷行为的文件的推荐列表来减轻软件开发团队的负担，但是这些方法的定位的缺陷粒度是不够的。软件开发团队依然需要去推介的文件列表中去依次检查每个方法，来定位并修复相关缺陷，这依然需要消耗很多精力。

截止目前为止，方法级别的缺陷定位方法主要依赖于信息检索技术。例如FineLocator 使用了查询扩展技术，通过收集与缺陷相关的代码片段来对方法进行扩充。Zhen Ni等人首先使用代码摘要技术来生成每个方法的摘要，之后分别计算缺陷报告与方法内容和方法摘的文本和词向量相似度，最后再组合已修复的缺陷报告特征和方法长度特征来进行缺陷定位。由于缺陷报告是由自然语言所编写，方法是由程序语言编写，它们之间会存在词汇不匹配问题，这限制模型了的信息检索模型的性能。

为了解决现有技术中的不足，本成果提供了一种方法级别的软件缺陷定位方法。相比于现有的方法级缺陷定位方法，它首先使用了深度学习技术来计算缺陷报告和方法之间的语义相似性，从而解决了缺陷报告和方法之间词汇不匹配问题。之后，我们分别计算了两种文本特征：类名和方法名匹配性、rVSM相似性和两种软工领域特征：缺陷修复频率和最近缺陷修复时间用于辅助定位包含缺陷的方法。最后通过组合这五种特征，对于所有方法进行预测和排序从而来定位相关包含缺陷的方法，提高了方法级缺陷定位任务的精度。

应用领域和市场前景

本成果主要应用于软件开发领域。在软件开发和维护的过程中，不可避免会出现各种缺陷或错误。而缺陷报告是对缺陷的具体描述，它记录了关于某个缺陷的详细信息，其中记录了缺陷状态、软件名称、组件名称、软件版本、操作系统平台、缺陷重要性、描述内容、相关人员的评论等信息。软件缺陷跟踪系统用于存储这些缺陷报告，例如Bugzilla系统。在软件测试阶段或者软件运行期间出现，如果发现了程序缺陷，那么关于缺陷的具体会被记录在缺陷报告中，并将它提交到软件缺陷跟踪系统。之后由软件开发团队跟进相关缺陷并进行修复。

对于软件开发团队来说，他们首先需要在软件追踪系统中阅读缺陷报告的内容，之后在源代码文件中来定位相关缺陷。随着软件的不断跟新迭代，软件程序也不可避免的变得更加庞大和复杂。这导致了每日新增的缺陷报告数量增加以及软件开发团队通过人工的方式来定位相关包含缺陷的文件需要消耗的时间和精力更多。本成果可以极大提高缺陷定位的效率，且可以高效实现方法级的缺陷定位。

一种针对智能家居确保设备安全访问与操作的方法

成果完成人	柯昌博	职称	副教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	软件开发				
核心专利号	ZL202211285088.7				

成果概述

本成果提出了一种针对智能家居确保设备安全访问与操作的方法，解决了家居物联网中传统访问控制技术权限分配繁琐、难以捕捉环境状态变化、对个人设备隐私保护力度不足的问题。该模型从设备角度引入设备功能角色和隐私角色，利用功能角色结合上下文属性间的映射关系保证用户权限分配满足环境需求；通过将设备划分到不同的地理域，利用位置参数和设备隐私角色限制用户访问以保证个人设备隐私。模型从功能和隐私两个方面来规范对用户角色的权限分配和使用，既能满足保证用户设备隐私需求，又可避免创建大量的设备角色和环境角色，减轻了权限分配的繁琐。用户请求访问时，需要同时满足用户拥有相关的操作权限和可以访问相应的隐私设备两个方面，才会得到允许。

关键技术/创新要点

技术问题：本成果所要解决的技术问题是设计一种面向位置与安全增强型访问控制模型，解决了家居物联网中传统访问控制技术权限分配繁琐、难以捕捉环境状态变化、对个人设备隐私保护力度不足的问题。

技术方案：为了实现上述目的，本成果采用以下技术方案：

步骤1）建立模型。本成果是基于RBAC基本模型，模型包含基本元素用户(User)、角色(Role)、设备(Device)。针对其中权限分配繁琐、个人设备隐私保护不足等问题，重新进行角色分析并进行扩展。将模型中的智能设备(Device)与操作(Operation)进行组合，标识为权限(Permission)，并将相似的权限集成到设备角色(DeviceRole)；创建环境角色(ER)作为角色行使权限的上下文状态；创建设备隐私角色(DevicePrivacy Role)从隐私保护的角度对智能设备进行分类；创建位置(Location)参数，限制角色对隐私设备的访问。

步骤2）指定约束。在为用户角色分配权限时，需要创建约束以规范权限分配，本模型创建两方面的约束。PRC(Permission-roleconstraint)约束指定用户角色被禁止分配特定权限；PDRC(PrivateDevice role-Roleconstraint)约束规定用户角色不能被分配特定的设备隐私角色。

步骤3）角色分配与权限分配。分配角色之前，用户都需注册为系统的合法用户，管理员根据用户关系给用户分配合适的角色。从两个方面为用户角色分配权限，在隐私保护方面结合位置参数为用户角色分配设备隐私角色，在功能使用方面结合环境角色为用户角色分配设备角色。

步骤 4）访问控制。在模型部署运行后，合法用户发送访问请求，模型内部会根据请求中的参数，结合权限分配时对当前用户持有角色的权限分配结果进行分析验证。验证通过则将操作命令发送到具体的设备实现操作；验证不通过则拒绝访问。

其中所述步骤1）具体如下：

步骤11）首先创建出角色($r_x \in R=\{r_1,r_2..r_x..\}$)、设备($d_j \in D=\{d_1,d_2..d_j..\}$)、操作($op_k=OP=\{op_1,op_2..op_k..\}$)、位置($l_t \in L=\{l_1,l_2..l_t..\}$)。

步骤12）根据成员关系和设备隐私需求，创建设备隐私角色($dpr_y \in DPR=\{dpr_1,dpr_2..dpr_y..\}$)，并对设备进行分类，建立设备D到设备隐私角色DPR的多对一的分配关系($DDPRA \subseteq D \times DPR$)；建立设备D与操作OP之间的关联关系以构建出权限($p_q=op,d,p_q \in P=\{p_1,p_2..p_q..\}$)。创建设备角色($dr_m \in DP=\{dr_1,dr_2..dr_m..\}$)，建立设备角色到权限的多对多分配($PDRA \subseteq P \times DR$)，以将相似权限集成到设备角色上。

步骤13）管理员根据不同的环境属性，设定为不同的环境条件e，然后创建出环境条件集合($EC=\{e_1,e_2..e_n..\}$)；从环境条件集中选取出特定的条件子集，标识为环境角色($er_s=\{e_1,e_2..e_s..\}$，$er_s \subseteq EC$)，作为角色行使权限的上下文状态。

所述步骤2）具体如下：

步骤21）创建PRC约束，表示为$PRC \subseteq 2^P \times 2^R$，建立权限子集到角色子集的多对多关系。其中每一个个$prc=(P_i,R_j)$为每一个$p_m \in P_i$和$r_n \in R_j$指定如下不变式：

$\forall rp_p \in RP, dr_q \in DR(rp_p,dr_q) \in RPDRA \rightarrow (p_m,dr_q) \notin PDRA \vee rp_p.r \neq rn.$

在权限分配过程中不能被违反。

步骤22）创建PDRC约束，建立设备隐私角色子集和角色子集的多对多分配，表示为$PDRC \subseteq 2^{DPR} \times 2^R$，每一个$pdrc=(DPR_i,R_j)$为每一个$dpr_m \in DPR_i$以及$r_n \in R_j$指定下不变式：

$\forall dpr_q \in DPR, rl_p \in RL(rl_p,dpr_q) \in RLDPRA \rightarrow (rl_p,dpr_m) \notin RLDPRA \vee rl_p.r \neq r_n.$

在权限分配过程中不能被违反。

所述步骤 3）具体如下：

步骤31）权限分配包含两个方面。在功能使用方面，以设备角色DR为单位对用户角色进行授权分配。首先建立用户角色R与环境角色ER之间的关联关系，构建出角色对($RP \subseteq R \times ER$)；然后将设备角色DR分配到角色对RP，建立设备角色到角色对RP的多对多分配关系($RPDRA \subseteq RP \times DRA$)。

步骤32）在隐私保护方面，以设备隐私角色DPR为单位对用户角色进行授权分配。首先建立用户角色R与位置L之间的关联关系，构建出角色对($RL \subseteq R \times L$)；然后设备隐私角色DPR分配到角色对RL，建立设备角色DPR到角色对RL的多对多分配关系($RLDPR \subseteq RL \times DPR$)。

所述步骤4）具体如下：

步骤41）用户进行访问请求时，会提交设备参数和操作参数。系统两个方面进行验证：首先系统会检测当前的环境状态，并判断当前环境条件中用户是否拥有对相应设备的操作权限；拥有则继续验证，否则拒绝访问。

步骤42）其次系统会提取用户的访问位置参数，并判断用户能否在该位置上访问相应设备。两者都验证成功则允许访问，任何条件验证不满足都拒绝访问。

有益效果：本成果采用以上技术方案与现有技术相比，具有以下技术效果：

本成果在兼顾简化权限分配的同时还支持了个人设备隐私的保护，具体来说：

（1）本成果扩展设备角色，将相似设备权限进行集成，并以设备角色为单位进行权限分配，简化了用户的权限分配。

（2）本成果扩展环境角色，使得模型能够捕捉访问控制过程中的环境上下文变化和设备特征，增强了模型的灵活性。

（3）本成果扩展设备隐私角色和位置参数，利用设备隐私角色来对智能设备进行分类，确定设备的隐私性质，利用位置参数限制用户对智能设备访问，保证了设备隐私。

附图说明

图1是本成果的组件图。

图2是用户具体的访问控制流程。

具体实施方式下面结合附图对成果的技术方案做进一步详细的说明：

在具体实施中，图1是本访问控制模型所有包含组件及组件关系的示意图。在智能家居领域中，访问控制模型必须保证阻止恶意用户的非法访问以及合法用户的越权访问。但用户之间的社会关系，会带来新的威胁模型，如孩子试图控制兄弟姐妹房间的智能灯，对其造成困扰，因此用户需要保证个人设备隐私安全，以限制其他用户对个人设备的访问。通常个人隐私设备与个人生活习惯相关，因此本模型在原有RBAC模型的基础上进行角色扩展，创建设备隐私角色，借用访问位置来限制用户对个人隐私设备的访问。同时又为了简化权限分配操作，创建设备角色，以集成相似设备权限。最后创建环境角色，指定用户进行访问控制时所需要的特定上下文环境。在此基础上，每一个用户在进行访问设备权限时，都必须通过两个方面的验证。只有用户在当前环境条件下拥有相关设备权限和在当前位置上可以访问该设备，其访问请求才能被允许。

图2 是本成果的访问流程。用户u在进行访问时会提交设备参数d和操作参数op。系统会检查当前用户是否被分配的预定角色，若是被分配了，假定为r；之后系统检查角色r关联的RP角色对集合中是否存在一个角色对rp，该角色对是由角色r和当前活动的环境条件触发的环境角色er组成；若是存在，系统会继续检查角色对rp所关联的设备角色dr中是否包含由设备d和操作op关联而成的权限p；若是均验证通过，则设备权限验证部分通过，否则直接拒绝访问。之后系统检查角色r关联的RL角色对集合中是否存在一个角色对rl，该角色对是由角色r和当前用户访问位置l组成；若是存在，系统会继续检查角色对rl所关联的设备隐私角色dpr中是否包含由设备d；若是均验证通过，则设备隐私验证部分通过，否则直接拒绝访问。只有两个部分均验证通过，则用户访问请求才被允许。

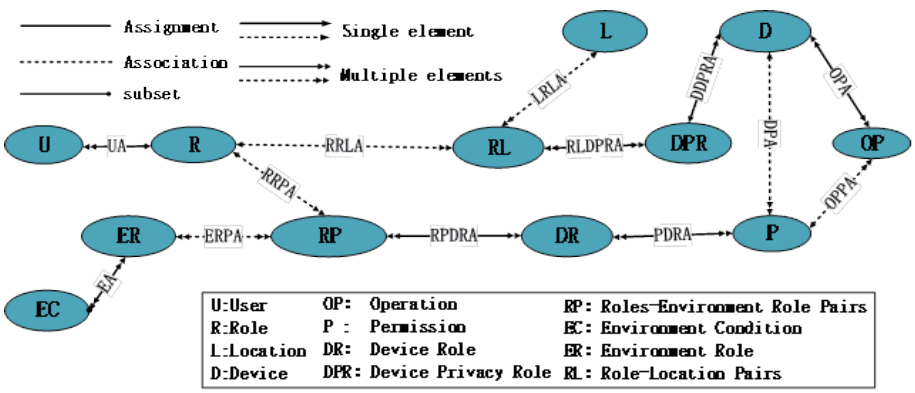


图1

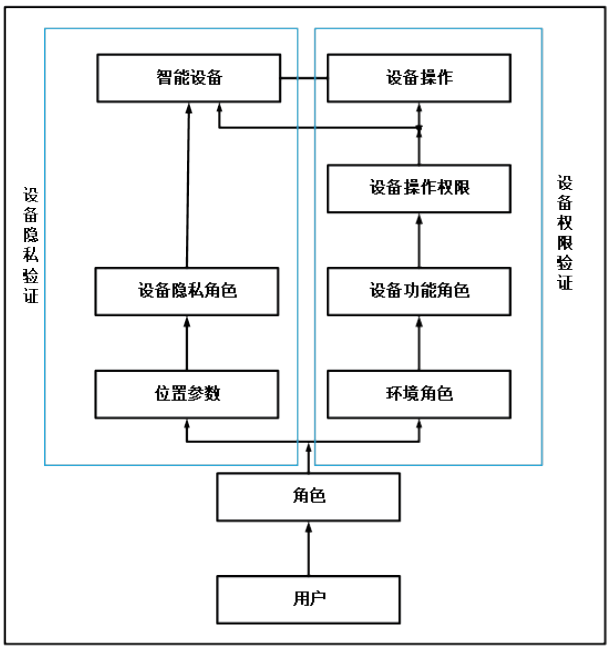


图2

技术指标/优势

有益效果:本成果采用以上技术方案与现有技术相比,具有以下技术效果:

本成果在兼顾简化权限分配的同时还支持了个人设备隐私的保护,具体来说:

(1)本成果扩展设备角色,将相似设备权限进行集成,并以设备角色为单位进行权限分配,简化了用户的权限分配。

(2)本成果扩展环境角色,使得模型能够捕捉访问控制过程中的环境上下文变化和设备特征,增强了模型的灵活性。

(3)本成果扩展设备隐私角色和位置参数,利用设备隐私角色来对智能设备进行分类,确定设备的隐私性质,利用位置参数限制用户对智能设备访问,保证了设备隐私。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于智能家居平台、社区住宅、智慧公寓、养老看护、家庭安防及酒店式公寓等场景,尤其适合存在多用户共享设备、隐私保护要求高、设备种类复杂的家庭物联网环境。其通过将设备功能、环境状态和位置隐私联合纳入访问控制,既能提升设备操作的安全性与灵活性,又能降低权限管理复杂度,具有较强的落地实用价值。随着智能家居设备普及、家庭数据安全需求提升以及智慧社区建设加快,该方法在智能终端厂商、家庭网关平台、物业安防系统和家居云服务市场中具有良好的推广前景与应用潜力。

三维工业产品缺陷检测软件研发及产业化

成果完成人	王磊	职称	副教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机科学技术		高技术领域（三级）	企业管理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	计算机软件
应用行业	汽车制造、电子设备生产、航空航天、船舶工业				

成果概述

在当前工业软件领域，我国在技术和市场份额上与国际领先水平相比依然存在较大差距。然而，在一些特定的垂直场景中，如本项目所专注的工业产品缺陷检测领域，仍然存在巨大的市场机会和技术创新空间。目前，国内市场主要依赖进口的检测软件系统，如蔡司（Zeiss）、GOM等，这些软件虽然在精度和性能方面表现出色，但其价格昂贵，难以被国内中小型企业普遍采用。为此，研发具有自主知识产权、技术水平可与国际接轨的国产替代品，对推动工业软件国产化进程和保障我国关键技术自主可控具有重要的战略意义。

近年来，国家积极鼓励和支持工业软件领域的发展，随着人工智能，机器视觉技术的发展，我们迎来了非常关键的发展窗口期。本项目聚焦于工业产品缺陷检测软件，通过引入先进的图像处理和人工智能技术，实现对产品表面及内部缺陷的高精度、高效率检测，助力企业提升产品质量和生产效率。

关键技术/创新要点

算法优化与智能化：本项目创新性地采用了基于深度学习的缺陷识别算法，结合多维度数据特征分析，实现了从图像采集到缺陷分类的自动化流程。特别地，引入自适应学习机制，能够根据不同的检测对象自动调整检测参数，进一步提高了检测效率和准确性。

模块化架构设计：软件系统采用模块化架构设计，用户可以根据自身需求选择相应的检测模块（如表面裂纹检测、内部气泡检测等），大大增强了系统的灵活性和可扩展性。

实时数据处理与反馈：引入高效的数据处理引擎和分布式计算架构，实现了检测过程中的实时数据处理与反馈功能，减少了检测延迟，满足了工业现场的实时监控需求。

技术指标/优势

高分辨率图像处理技术：采用了最先进的高分辨率图像处理技术，能够精准识别微小的产品缺陷，实现微米级的检测精度。

智能化学习系统：集成了自学习功能，软件能随着检测数据的增多自动优化检测模型，提高未来检测的准确性和效率。

应用领域和市场前景

本项目的研发成果能够有效填补国内工业产品缺陷检测领域的不足，并为企业提供一套集成度高、智能化强的检测解决方案。它可广泛应用于汽车制造、电子设备生产、航空航天、船舶工业等多个领域，帮助企业实现产品质量的全面提升。同时，通过快速检测和反馈机制，可以帮助企业降低生产成本，减少返工率和废品率，提升生产线的运行效率。

面向智算共享租赁的算力资源调度平台研发与产业化

成果完成人	付雄	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	信息技术服务		高技术领域（三级）	云计算服务技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	企业内部数据管理				

成果概述

随着人工智能、大数据等技术的快速发展，智能计算需求呈现爆发式增长，但算力资源的高成本与分布不均导致许多企业及机构面临算力短缺问题。传统算力部署模式存在资源利用率低、运维成本高、弹性不足等痛点，亟需通过共享或者租赁的模式实现资源高效配置，降低使用门槛。面向智算共享租赁的算力资源调度平台通过整合分散的GPU、CPU等异构算力资源，利用虚拟化与分布式调度技术，实现跨地域、跨机构的动态分配与按需供给。其核心目标是解决资源闲置与需求过剩的矛盾，为用户提供弹性、低成本、高可靠的算力服务，同时提升社会整体算力利用效率。

关键技术/创新要点

面向智算共享租赁的算力资源调度平台的创新性主要体现在：(1)基于虚拟机-容器相结合的多模态算力资源绿色高效调度机制；(2)湖仓一体化的数据优化存储与基于RoCE网络的高性能动态网络；(3)基于网络安全、虚拟化安全、数据安全和服务安全为主体的平台安全防护机制，多层次确保算力资源调度平台满足开放环境下海量用户接入的安全需求。

面向智算共享租赁的算力资源调度平台具有良好的技术先进性，在湖仓一体化数据存储方面，提出了完善的数据复制和副本管理方法，包括数据副本放置、缓存替换、一致性维护、数据调度等，在服务器、虚拟机等资源调度方面，提出了多种调度方法，包括虚拟机迁移、虚拟机放置、服务器调度、服务迁移、云计算中心负载平衡等，在平台安全方面，提出了多接入服务器安全调度、恶意网站URL检测方法等。

技术指标/优势

项目组已经完成了“面向智算共享租赁的算力资源调度平台”大部分的关键技术和模块开发，具体如下：

(1)在云计算虚拟机或容器迁移调度方面，项目组先后研究了多项关键技术，并获得多项发明专利授权和软件著作权登记，已经完成了部分关键技术平台的构建；

(2)在大数据存储和处理方面,项目先后研究了云存储,数据湖仓一体化存储等多项关键技术,并获得多项发明专利授权和软件著作权登记,已经完成了部分软件模块的开发;

(3)在平台安全防护方面,项目组已经完成多个安全相关项目,并获得多项发明专利授权和发表学术论文;

(4)在算力资源调度平台方面,项目组已经构建了面向通算的算力资源调度平台,并申请了相关的软件著作权登记;

(5)项目组研发的部分调度策略和算法模块已经通过参与中移(苏州)软件技术有限公司(中国移动云能力中心)承担的苏州市关键核心技术“揭榜挂帅”项目“面向全国一体化算力网的云原生平台研发(SYG2024109)”,在中国移动“移动云”实验环境下进行部分测试和验证。

应用领域和市场前景

随着人工智能的兴起,算力需求爆发式增长,算力租赁成为市场风口。除算力租赁外,企业和组织内部的算力资源共享也是很大的市场,通过算力资源共享,解决企业内部数据管理的难题,提高企业内部资源使用效率,也是本项目重点的市场方向之一。

基于脊谷特征与深度特征描述符的点云单点对齐方法

成果完成人	聂建辉	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	精确制造中的测控仪器仪表	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	先进制造与自动化				
核心专利号	ZL202110016951.8				

成果概述

点云是三维物体表面的一种数据表示，一般由激光扫描仪获得，它广泛应用于逆向工程、生物医疗、虚拟技术等领域。传统点云对齐算法主要分为三类：基于局部特征算法、基于RANSAC算法和基于迭代最近邻算法。它们容易受到低重叠率、噪声、数据缺失等因素的影响，鲁棒性需要进一步提高。本成果提出了基于脊谷特征与深度特征描述符的点云单点对齐方法，用以仅依靠单个对应点即可实现点云对齐，并对噪声、离群点、非均匀采样等具有很强的鲁棒性。同时，采用投影操作，降低训练数据量，显著提高了网络训练和预测的效率。

关键技术/创新要点

点云对齐是实物数字化过程中的必要步骤。传统方法将点云对齐分为粗对齐和精细对齐两个阶段，并采用不同的算法进行处理。本成果提出了一种能够同时完成点云粗对齐和精细对齐的完备对齐方法。该方法首先在整体点云中检测具备稳定方向的特征点；然后借助深度卷积神经网络生成这些点的描述符，并通过描述符匹配求取姿态变换的候选解；最后，利用一种由局部到整体的迭代策略在滤除错误候选解的同时完成点云的精细对齐。由于所选用的特征点均具备稳定的特征走向，因此，将其与法向量结合即可构建出稳定的局部坐标系，进而借助坐标系的映射实现依靠单一特征点的数据对齐。实验表明，我们的方法能够在挑战性场景下取得良好的对齐效果，并对噪声、离群点、非均匀采样等具有很强的鲁棒性。

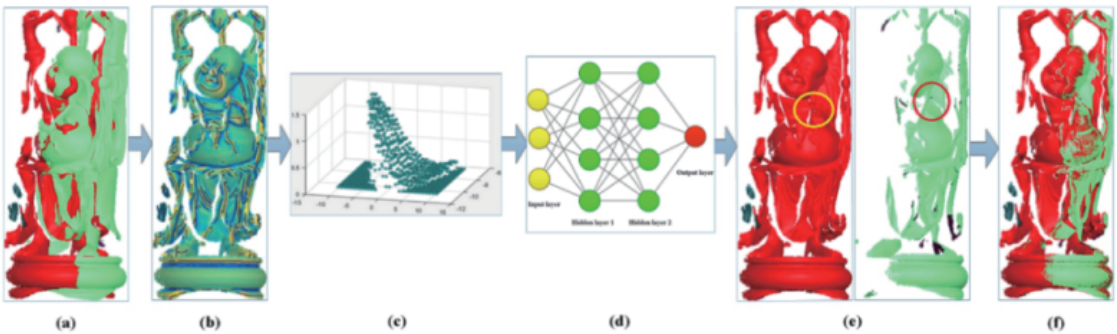


图1 基于脊谷特征与深度特征描述符的点云单点对齐方法。
(a)原始模型 (b)特征提取(c)邻域数据投影(d)PFNet特征描述符(e)匹配与优化(f)对齐结果

技术指标/优势

本方法选用具备稳定特征方向的脊谷特征作为待匹配点，使构建的局部坐标系构建具有很强的稳定性。同时，也使得点云对齐的初始解能够通过局部坐标系之间的映射得到。也就是说，通过结合位置信息、法向信息和特征方向信息，该算法能够将对齐所需的对应点数量减少至1个。这在很大程度上降低了算法对点云数据的要求，尤其是对于缺少复杂特征的点云数据，其对齐效果大大优于现有方法。同时，我们采用多尺度深度神经网络PCPNet计算法向量、曲率等点云几何属性，有效保证了噪声、离群点、非均匀采样情况下求解结果的可靠性。专利授权：ZL202110016951.8。

应用领域和市场前景

应用领域：

遥感和GIS：点云是遥感和GIS中重要的数据类型，用于生成和更新三维城市模型、测绘地形等。本成果提高数据处理的精度和效率。

自动驾驶和机器人导航：自动驾驶汽车和机器人通常使用激光雷达（LIDAR）生成周围环境的点云数据。本成果可以改进其环境感知和导航能力。

AR/VR和游戏设计：在AR/VR和游戏设计中，点云可以用于创建复杂的三维环境和对象。本成果可以提供更高质量的视觉效果，增强用户体验。

工业制造和建筑设计：在工业制造和建筑设计领域，点云数据可以用于进行精确的测量和设计。本成果可以提高工作效率，节省时间和成本。

市场前景：

随着3D技术和点云数据的广泛应用，点云对齐方法可以降低数据处理的复杂性和成本，扩大点云的应用场景，推动相关产品和服务市场的发展。从长远来看，AI，VR/AR，自动驾驶等都是点云对齐方法的潜在应用场景，该方法有助于推动相关行业的进步。

管道损伤定位评估与数据压缩与方法

成果完成人	陶锴	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	仪器科学与技术
应用行业	结构健康监测、城市地下管网				

成果概述

管道损伤会导致城市路面沉降、雨水倒灌等事故。实时监测并定位损伤对保持城市基础设施运转十分关键。一种面向地下管网损伤监测的数据压缩与损伤定位评估方法。首先，在管道上提出坐标变换算法，在曲面坐标系中计算基于相关性的损伤概率密度分布。然后，利用椭圆法对多路径的飞行时间进行定位，作为损伤位置的似然函数。最后，利用贝叶斯法计算后验概率分布，修正损伤定位。此外，采用乐谱采样模型将声呐信号采样为离散化指标，然后采用GMM分析信号多维参数，利用Frechet相似性描述各损伤状态与基准状态的差异，实现损伤评估。

关键技术/创新要点

提出由z和α表示的弯曲坐标系。原始平面坐标到弯曲坐标的变换过程如图1所示。

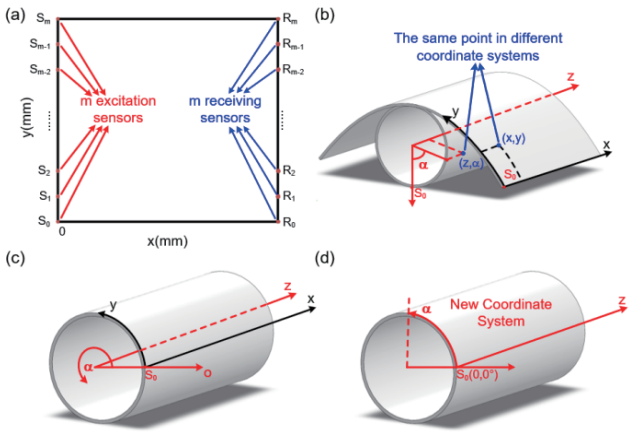


图1 坐标轴变换过程

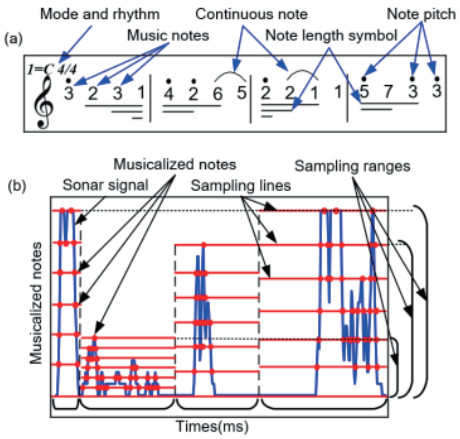


图2

平面可被认为是管道的展开。原始坐标系中的x轴、y轴分别为管道展开平面的两个边。设管道导波激励传感器和接收传感器均为m个，传感器的部署如图所示。以S_0（平面坐标系的原点）与管道截面圆心的连线为o轴。角度变量为点在圆上的投影点与圆心的连线与o轴的夹角。原始坐标系中的(x,y)被转换为(z,α)。点S_0在原始平面坐标系中的坐标为(0,0)，在弯曲坐标系中为(0,0°)。

通过弯曲坐标系建立了导波在管道结构中传播路径的数学描述。此外，用贝叶斯算法修正层析成像和椭圆轨迹的概率密度，利用后验概率定位损伤。

通过对监测信号设置7跟稀疏线采样，将信号编码为4个指标(Fig.1(b))，实现对监测数据的压缩与重建。

把连续的监测信号离散化为4个指标，每个采样点可采用半字节空间存储，极大地压缩了数据量。例如，对于一段由n个采样点组成的声呐回波信号，采样后可编码称为音谱化指标序列 (V,U,θ,λ)，即 $(v_1,u_1,\theta,\lambda),(v_2,u_2,\theta,\lambda),\ldots(v_n,u_n,\theta,\lambda)$。此外，通过音乐指标可将超声信号转化为乐谱，生成可听音频，可用于安全预警。

技术指标/优势

本方法克服了传统导波损伤层析成像在管道结构中存在的传播路径不确定性问题，利用数据驱动的贝叶斯方法实现损伤位置概率化计算与定位。实现结果显示，本方法能有效的定位管道泄漏损伤，比传统RAPID法精度提高了66.5%，比椭圆轨迹法提高49.75%。

本研究用乐谱模型采样声呐环扫信号，将超声信号离散化处理。然后，用GMM分析超声参数，通过Frechet相似性评估管道损伤状态。此种方法对原始监测信号的平均压缩率为30.1%。此外，重构信号与原始信号具有97.39%的相似性。

应用领域和市场前景

本方法可应用于城市地下管网损伤监测与运营管理维护，乐谱模型能够实现监测数据的压缩，同时能保留信号特征，适用于此种无人值守、长周期、恶劣工作环境。GMM方法以数据驱动方法概率化评估声呐信号特征，随着监测数据的增多，模型准确性也越高。本方法可应用于城市地下管网损伤监测与运营管理维护，对保障城市基础设施运转具有工程价值。

硬件在环小步长实时仿真平台

成果完成人	陈轶涵	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	自研半实物开发平台		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	设计服务	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	功率电子变换、智能电网、新能源发电、电动汽车等				

成果概述

本团队成功研发了一套基于LabVIEW FPGA的高性能半实物仿真（HIL）平台。该平台充分利用FPGA的底层硬件并行计算与纳秒级确定性执行优势，突破了传统基于CPU仿真的实时性瓶颈。系统内嵌高精度物理模型解算引擎，配置丰富的高速I/O接口，能够与被测实体控制器无缝对接，实现微秒级的超低延迟闭环仿真。通过自主设计的软硬件架构，该平台不仅具备极高的测试精度和系统稳定性，还具有良好的扩展性与成本优势。该成果可广泛应用于电力系统、电力电子、新能源汽车、工业控制等复杂系统的研发验证环节，有效缩短了产品开发周期并大幅提升控制器的可靠性。

关键技术/创新要点

（1）底层架构创新：软硬件协同的高效平台构建打破传统CPU串行计算的算力瓶颈，创新性地基于LabVIEW FPGA底层硬件架构，构建了高确定性、纳秒级极低延迟的实时执行环境。该平台深度融合了硬件描述逻辑与实时操作系统，实现了底层I/O接口与核心运算引擎的无缝对接，彻底解决了复杂系统闭环测试中的实时性难题。

（2）算法突破：面向硬件特征的离散化建模方式　针对高频动态物理系统，采用了高度适配FPGA并行特性的定制化离散化建模与求解算法。通过对复杂拓扑结构（如电力电子变换器、电机传动系统）的高效数学映射与定点化数据处理，实现了微秒甚至纳秒级的超小步长解算，大幅提升了暂态与稳态情况下的模型逼真度。

（3）架构优化：高度解耦的模块化开发体系　全面引入“积木式”软件工程理念，将平台划分为硬件驱动层、模型解算层与通信协议层。这种高内聚、低耦合的模块化开发架构，不仅支持针对不同测试对象特征库的快速部署，还能在面对全新拓扑需求时实现代码的高效复用与重构，大幅缩短了二次开发周期。

（4）体验升级：强交互的实时可视化监控界面　充分发挥LabVIEW强大的图形化开发优势，深度定制了集数据监控与控制于一体的上位机交互系统。该可视化界面支持多通道高频数据的实时平滑渲染与存储，并允许研发人员在仿真运行状态下对核心物理参数进行在线动态“热更新”，为算法调试提供了极大的直观性与便利性。

(5)生态重塑:核心技术自主与显著的成本优势　实现了从底层架构到上层软件的全面自主可控,能够实现昂贵的商业化实时仿真系统(如dSPACE、RTDS等)的大部分功能。通过深度压榨通用FPGA硬件性能并结合自研系统架构,在保障同等甚至更高测试精度的前提下,将HIL实验室的整体建设与维护成本大幅降低,具备极高的推广应用价值。



图1 自研硬件在环实时仿真平台及其可视化操作界面

技术指标/优势

能够与被测实体控制器无缝对接,实现微秒级的超低延迟闭环仿真。通过自主设计的软硬件架构,该平台不仅具备极高的测试精度和系统稳定性,还具有良好的扩展性与成本优势。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于电力系统、电力电子、新能源汽车、工业控制等复杂系统的研发验证环节,成为商用半实物仿真机的平价替换方案,既能够提供半实物仿真平台也能够提供半实物模型开发服务,有效缩短了产品开发周期并,提升控制器、检测装置以及功率电路的可靠性。

一种星载立体SAR线约束点散射体三维定位方法及系统

成果完成人	张浩	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航天技术		高技术领域（三级）	卫星应用	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感
应用行业	卫星应用行业				
核心专利号	ZL202510526863.0				

成果概述

星载SAR几何模型可以达到分米级甚至厘米级的精度。点散射体作为SAR影像中广泛存在于城市区域的一类重要目标，凭借其相位中心明确、信噪比高的特性，成为高精度三维坐标提取的关键对象。异侧立体观测模式下，得益于优越的几何构型，其三维坐标解算精度较高；相较之下，同侧立体观测受限于几何条件制约，坐标精度较低。突破同侧立体观测的定位精度瓶颈，已成为实现星载SAR沉降监测、控制点提取等应用的核心技术挑战。

对于单个点散射体来说，如果其可以被不同立体条件的SAR影像观测到，那么可以通过联立不同SAR影像的距离多普勒方程，解算其坐标，但受制于几何条件，其坐标精度可能不高。在城市区域高分辨率SAR影像中，点散射体分布经常呈现线分布特点。对于分布在一条线上的点散射体，可以在点散射体的坐标解算过程中进行线特征约束，提高坐标解算的一致性和精度。本成果基于这一特点，设计了一种点散射体定位算法，精度优于传统算法。

关键技术/创新要点

本成果利用线分布特点，约束点散射体三维坐标解算过程，相比传统单点三维坐标计算方法，本成果得到的坐标精度更高。能够有效提高星载立体SAR特别是同侧立体观测条件下点散射体的位置估计精度。

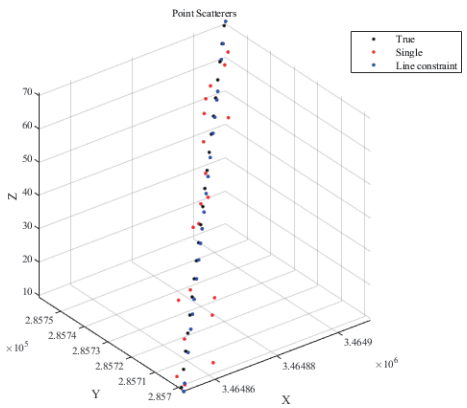


图1 不同方法得到的点散射体三维位置对比示意图

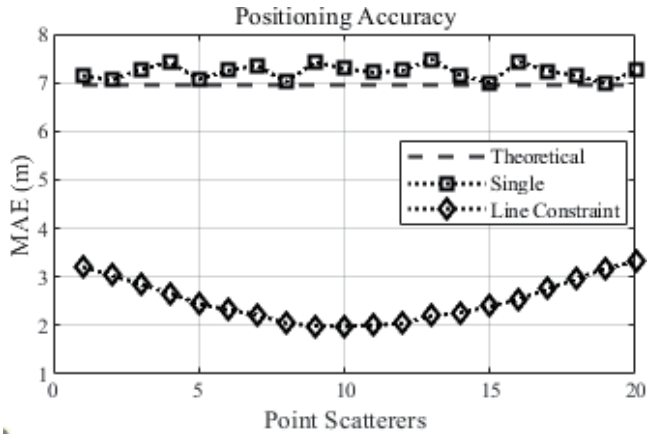


图2 距离向、方位向观测值加入分布为正态分布
(0,1)的随机误差, 不同方法计算得到的各点定位误差统计示意图

技术指标/优势

本成果相比传统单点三维坐标计算方法, 本成果得到的坐标精度更高。本成果通过将问题分解为单点散射体位置初估计、直线中心点位置估计、点线联合解算等子步骤, 避免了同时求解所有参数不收敛、稳健性不高的问题。本成果通过将直线向量表示为球面坐标, 减少了求解参数, 加快了迭代速度。本成果通过将参数求解过程分解为点散射体径向距离求解、直线方向参数求解两个子步骤, 从而避免了参数耦合导致迭代不收敛的问题。

应用领域和市场前景

本成果能够提高星载立体SAR中点散射体的定位精度。点射体能够提供城市区域建筑物等高精度三维信息, 为低空经济相关行业提供空间底座。目前商业航天火热, 本成果能够提升星载SAR的应用效果, 在SAR卫星应用中发挥作用。

一种基于GPU快速优化运算基因共表达网络方法

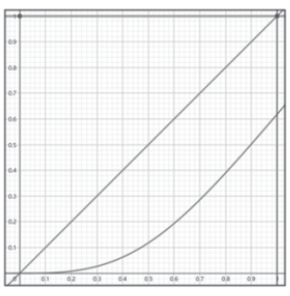
成果完成人	季星来	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	高技术专业化服务		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	生物学		二级学科	遗传学
应用行业	生物数据分析				
核心专利号	ZL202111404214.1				

成果概述

基因共表达网络 (Gene Co-expression Network, GCN) 是一种系统生物学分析方法，用于研究基因之间的相互作用关系。它的核心思想是：如果两个基因在多种不同的样本（如不同的组织、不同的发育阶段、不同的疾病状态或不同的处理条件）中表现出相似的表达模式（即同时升高或同时降低），那么这两个基因很可能在功能上是相关的，或者受共同的调控机制控制。基因共表达网络对于发现关键功能与调控基因以及复杂形状解析具有重要作用。由于基因共表达数据通常是测定几十个样本中成千上万个基因的表达值，对于这么庞大的矩阵，处理基因数据的计算量极大，效率不高。本方法充分利用GPU的多核心算力，通过相关性矩阵系数迭代构建基因共表达网络，显著减少运算时间，提高运行效率。

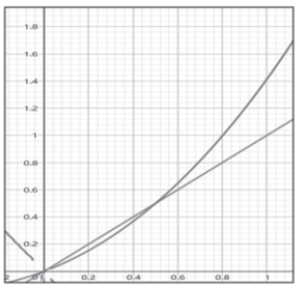
关键技术/创新要点

本方法引入了迭代思想，用旧值递推新值，使其能够适应不同条件下的基因共表达数据，进而构建加权关联网络并获得更具有生物学意义的结果，在具体实施过程中，可分别采用同缩小模型、分隔变化模型和同增大模型进行相关迭代。



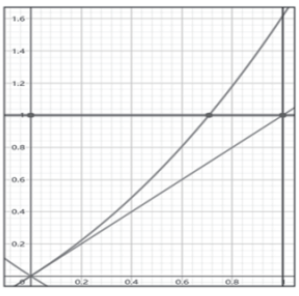
$$y = x \cdot \frac{x}{y + \frac{1}{x}}$$

图 1 同缩小模型



$$y = x^2 + \frac{x^2}{y + x}$$

图 2 分隔变化模型



$$y = x^2 + \frac{x^2}{y}$$

图 3 同增大模型

在计算过程中，鉴于基因数目较多，利用GPU具有多核心的特点，采用CUDA框架，开展并行计算，以达到缩短计算时间，提高运行效率的目的。

技术指标/优势

通过不同模型展开迭代，可以为结果提供多种策略选择。更重要的是，利用GPU进行计算，能够显著提高运行效率。多样本的测试表明，GPU加速能够将运行时间提升10-50倍。

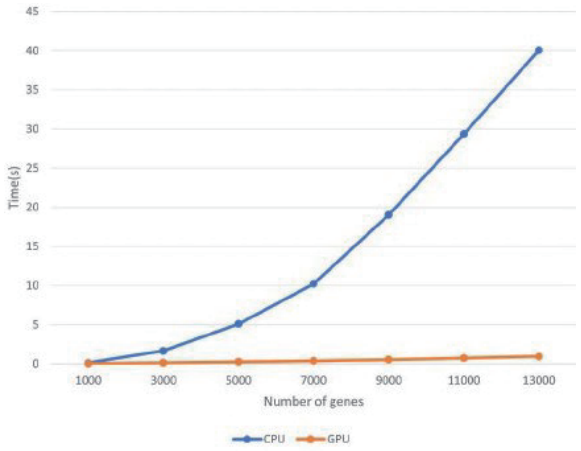


图4 GPU 加速

应用领域和市场前景

本方法主要可以用于生物大数据分析，特别是基于多组学的基因共表达网络构建和关键基因筛选。同时，本方法也可以广泛用于各种相关性网络的构建与分析，在相关性数据分析、关键节点筛选和市场调研等领域具有广泛的应用前景。

一种柔索驱动连续体关节形状估计方法

成果完成人	徐新洲	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	智能医疗				
核心专利号	ZL202410970773.6				

成果概述

连续体机器人具有优越的灵活性和适应性，能够调整关节形状以通过狭窄且曲折的路径到达手术目标部位，并在远端提供足够的力进行手术操作。在手术过程中，准确估计连续体关节的形状是非常重要的。然而，由于连续体关节的复杂变形，很难建立一个精确的运动学模型来估计连续体关节的形状。此外，连续体关节与周围人体组织的碰撞进一步降低了模型估计的准确度。

目前，大多数连续体关节的形状估计研究采用传统运动学方法进行建模。但是，基于运动学方法的建模过程非常复杂，需要进行繁琐的参数识别过程；且由于柔索驱动连续体关节运动的复杂非线性特性，难以得到准确的形状估计模型。不同的是，基于数据驱动的方法是从输入数据中学习复杂的映射关系，可以获得准确度更高的模型并提升建模效率。因此，团队提出了一种基于多通道共同注意力循环神经网络的数据驱动方法，用来对连续体关节的形状进行估计。

关键技术/创新要点

由于连续体关节复杂的形变特性，以及在手术过程中不可避免地与人体组织碰撞而产生的未知形状变化，使得准确和稳定地控制连续体手术机器人的末端执行器变得困难，因此，需要准确估计连续体关节的形状变化来缓解这一问题。针对现有研究中大多采用传统运动学方法对连续体关节形状进行估计，团队提出了一种基于数据驱动的连续体关节形状估计方法。

团队提出了一种柔索驱动连续体关节形状估计方法。该方法首先利用理论角度信息，及连续体关节连杆的末端三维空间中三个方向力和力矩信息，构造训练样本。然后对每个训练样本进行最小最大值归一化预处理以及形状重塑。接着，送入多通道共同注意力循环神经网络模型，结合训练样本标签，训练得到最优神经网络模型。对于使用理论角度信息，及三个方向力和力矩信息进行表示的测试样本，首先对测试样本进行与训练样本相同的最小最大值归一化预处理和形状重塑，然后送入训练得到的最优神经网络模型，以预测测试样本对应时间点的标记点坐标位置信息。实验结果表明，与传统的回归方法相比，该方法具有更好的预测性能，能精确估计连续体关节的形状。

技术指标/优势

现有的柔索驱动连续体关节形状估计研究中大多集中在使用传统运动学方法对关节形状变化进行建模，但是，由于连续体关节灵活的形变能力，使用运动学建模的方法通常需要繁琐的参数识别过程，很难解析出准确的形状估计模型。并且，在实际的手术过程中，连续体关节与人体组织的碰撞而产生未知的形状变化，进一步降低了连续体关节形状估计的准确度，导致对复杂手术环境的适应能力不足。因此，一种柔索驱动连续体关节形状估计方法中采用基于数据驱动的连续体关节形状估计方法。实验结果表明，与传统的回归方法相比，该方法具有更好的估计性能，能够精确估计连续体关节的形状。

应用领域和市场前景

在智能医疗领域，通过对柔索驱动连续体关节形状进行精确估计，能够实现柔索驱动手术机器人在手术过程中的位姿准确判断，从而支撑后续操作；在此基础上，进一步实现对柔索驱动手术机器人的反向精确控制，为机器人手术的成功进行提供更精确的保障。同时，在柔索驱动机器人所涉及的工业制造、航天、智慧家居等领域，该方法同样有着广阔的应用前景。

一种基于CSI的跌倒检测方法、装置及存储介质

成果完成人	张载龙	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	智慧养老与健康监护、智慧医疗（非接触式监测）、智慧家庭/智能家居、安防监控（异常行为检测）、智慧园/社区、物联网感知系统				
核心专利号	202210285268.9				

成果概述

本成果针对传统跌倒检测方法依赖可穿戴设备或视觉设备、存在隐私风险及使用不便的问题，提出了一种基于WiFi信道状态信息（CSI）的非接触式跌倒检测方法。该方法通过采集无线信号在人体活动影响下产生的CSI数据，结合信号预处理、分段及特征提取技术，从时域与频域提取统计特征，并构建基于卷积神经网络的行为识别模型，实现对跌倒、坐下、行走等多类行为的自动分类。同时，引入对抗机器学习方法优化模型训练过程，提高模型在复杂环境下的鲁棒性与泛化能力。实验采用ESP32等低成本设备进行数据采集，并在真实环境中验证系统性能。结果表明，该方法能够有效降低误报率与漏报率，实现稳定可靠的跌倒检测，整体达到工程应用验证水平，具备良好的推广与应用价值。

关键技术/创新要点

1.基于 CSI 的非接触式感知（核心创新）

利用 WiFi 信号在人体运动下的多径变化，CSI 反映人体行为特征。优势：无需摄像头（保护隐私），无需穿戴设备。

2.CSI 信号多阶段预处理机制

关键步骤：Hampel 滤波 → 去除离群点；巴特沃斯低通滤波 → 去噪；线性插值 → 时间对齐。

作用：提高数据稳定性

3.基于子载波相关性的信号分段

利用 OFDM 子载波相关性检测行为变化，自动提取“有效动作片段”。

创新点：动态分段（非固定窗口）

4.时域+频域联合特征提取

时域：均值、方差；频域：FFT 能量、频谱熵。

优势：提高行为区分度

5.对抗机器学习优化模型

引入扰动样本（FGM 方法），优化损失函数。

效果：防止过拟合，提升泛化能力。

6.轻量化采集系统(工程创新)

ESP32 实现 CSI 采集,低成本、易部署。

技术指标/优势

1.检测性能

显著降低:

误报率

漏报率(说明书第[0034]段)

2.系统优势

指标	本专利	传统方法
接触方式	非接触	需穿戴/摄像
隐私性	高	低
成本	低(WiFi 设备)	较高
部署难度	低	中

3.工程优势

低成本硬件(ESP32)

可室内大范围部署

支持实时检测

4.算法优势

对抗学习提升鲁棒性

动态分段提高识别精度

应用领域和市场前景

该成果面向非接触式人体行为识别与健康监测需求,适用于智慧养老、智慧医疗及智能家居等领域。在老龄化社会背景下,跌倒检测成为重要刚需,本技术无需佩戴设备或使用摄像头,能够在保护隐私的前提下实现全天候监测,适合家庭及养老机构部署。在智慧医疗领域,可用于病房监护与康复评估;在安防领域,可实现异常行为检测。随着 WiFi 基础设施的普及及无线感知技术的发展,基于 CSI 的行为识别技术市场需求持续增长。本成果具有低成本、易部署、隐私友好等优势,具备良好的产业化潜力,有望在智能健康监测与物联网感知领域实现规模化应用。

一种面向FPGA部署的ResNet网络量化与仿真推理方法

成果完成人	张载龙	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	人工智能芯片与加速器、边缘计算、嵌入式AI、智能安防（图像识别）、自动驾驶（视觉感知）、智能制造（工业视觉检测）、无人系统（无人机/机器人）				
核心专利号	202411933593.7				

成果概述

本成果面向深度学习模型在FPGA上的高效部署需求，提出了一种ResNet网络量化与仿真推理方法。针对传统量化方法中因直接四舍五入导致的精度损失与数据溢出问题，提出基于均方误差最小化的量化因子自适应优化方法，通过逐层分析网络输入、输出及权重分布，结合反向搜索策略确定最优量化参数。同时，构建 FPGA仿真推理环境，对量化模型进行硬件级行为模拟，实现无需真实硬件即可评估模型性能。实验结果表明，该方法在ImageNet等数据集上量化精度达到70.86%，显著优于传统方法（58.72%），推理延迟缩短至约150ms，满足实时处理需求。整体方案在精度、效率及硬件适配性方面达到工程应用水平，为深度学习模型在FPGA平台上的高效部署提供了可行路径。

关键技术/创新要点

1.量化因子自适应优化（核心创新）

基于均方误差（MSE）最小化，对权重、输入、输出分别计算量化因子，采用±5 范围搜索 + 组合优化。

优点：避免传统四舍五入误差，显著提升量化精度。

2.逐层反向搜索优化机制

从网络最后一层向前逐层优化，当前层最优结果作为前一层约束。

本质：全局优化近似求解。

优点：减少误差累积

3.BN 融合与结构重构

将 BatchNorm 参数融合至卷积层，重构网络结构适配 FPGA。

优势：减少运算复杂度，提升推理效率。

4.FPGA 仿真推理机制（关键工程创新）

使用 PyTorch hook 捕获中间数据，在软件环境模拟 FPGA 计算流程。

作用：无需硬件即可验证，大幅降低开发成本。

5.面向 FPGA 的卷积重构

关键优化：通道扩展为 64 倍对齐，转换为分组卷积，偏置单独存储，数据截断（防溢出）。

典型 FPGA 优化策略

6.整数化推理替换机制

AvgPool → 整数池化替换，实现全整数推理链路。

技术指标/优势

1.精度指标 ImageNet：70.86%（vs 58.72%） CIFAR-10：89.30%

CIFAR-100：65.00%

2.性能指标

推理延迟：≈150 ms

相比传统：200–250 ms

3.工程优势

维度	本专利	传统方法
精度	高	低
延迟	低	高
硬件适配	强	一般
开发成本	低（仿真）	高

4.其他优势

减少 30%开发周期，降低硬件验证成本，提升模型稳定性与泛化能力。

应用领域和市场前景

该成果面向深度学习模型在资源受限硬件上的部署需求，适用于边缘计算、嵌入式人工智能及专用加速器领域。在智能安防、自动驾驶和工业视觉等场景中，FPGA因其低功耗和高并行性成为重要计算平台，但深度模型部署面临精度与效率权衡问题。本成果通过量化优化与仿真推理技术，有效解决模型精度下降和部署成本高的问题，使深度神经网络能够在FPGA上实现高效稳定运行。随着AI芯片与边缘智能市场的快速发展，该技术在智能终端、无人系统及工业自动化等领域具有广阔应用前景，可显著提升国产自主可控AI硬件生态的技术水平和产业竞争力。

一种多分辨率数字高程模型三维可视化方法及装置

成果完成人	张载龙	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	地理信息系统(GIS)软件	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感技术
应用行业	地理信息产业、自然资源与测绘勘察行业、航空航天、智慧城市/数字孪生城市、军事地形分析与仿真、应急管理（灾害模拟、火灾、洪水）				
核心专利号	202211141979.5				

成果概述

本成果针对数字高程模型（DEM）在大规模地形三维可视化中存在的计算量大、实时性差及细节表达不足等问题，提出了一种多分辨率数字高程模型三维可视化方法及装置。该方法首先对DEM数据提取多种地形因子，并通过主成分分析（PCA）构建地形特征综合指标；随后基于多评价准则（树高、地类、视距、视野及特征评价）构建多因子四叉树，实现地形数据的自适应分层组织；在渲染阶段，通过屏幕空间裁剪与遮挡剔除技术减少无效计算，并基于特征评价选择关键点构建TIN模型，最终利用GPU实现高效渲染。实验结果表明，该方法在保证地形细节表达的同时显著提升渲染效率与精度，具有良好的实时性与可扩展性，整体达到工程应用水平，具备推广价值。

关键技术/创新要点

1.多因子融合建模（核心创新）

引入多地形因子（坡度、粗糙度、切割深度等），通过PCA降维构建统一“地形特征综合指标”，解决单一指标导致的地形失真问题。

2.多评价机制四叉树（关键结构创新）

多约束驱动的LOD（Level of Detail）机制：树高评价（控制分辨率层级）、地类评价（区分平原/丘陵/山地）、视距评价（Far/Near模型）、视野评价（中心区/过渡区）、特征评价（重要点保留），相比传统四叉树更智能、自适应。

3.动态更新机制（实时性创新）

相机参数变化 → 实时更新四叉树结构，支持动态LOD切换，实现真正“实时三维地形渲染”。

4.屏幕空间优化（效率创新）

屏幕裁剪（Screen-space culling），遮挡剔除（Occlusion culling），减少GPU计算负担，避免无效绘制。

5.特征驱动 TIN 建模（精度创新）

基于特征阈值选择关键点，构建不规则三角网（TIN），优势：保持地形细节，避免过度平滑。

6.GPU 加速渲染(工程实现)

最终数据送入 GPU 渲染,达到高帧率实时显示。

技术指标/优势

1.精度指标

平均 RMSE 显著降低(如 0.815),VIP 点精度优于传统方法。

2.性能指标

帧率:49–144 FPS(平均 111 FPS),实时性显著提升。

3.数据压缩

数据简化率:约 31.40%

4.对比优势

对比项	本专利	传统方法
精度	高	易平滑
实时性	强	较差
数据量	低	高
自适应能力	强	弱

应用领域和市场前景

该成果面向数字地形建模与三维可视化核心需求,可广泛应用于智慧城市、数字孪生、国土测绘、军事仿真及虚拟现实等领域。在数字孪生城市与自然资源管理中,该技术能够实现大规模地形的实时高精度展示,提升决策支持能力;在应急管理与灾害模拟中,可快速构建真实地形环境,提高预测与响应效率;在游戏及元宇宙领域,可用于高性能地形渲染引擎。随着“新型基础设施”和“数字中国”战略推进,三维地理信息与可视化市场持续增长,该技术具备良好的产业化基础和商业转化潜力,预计在 GIS 软件、仿真系统及数字平台中具有广阔应用前景。

基于区块链和无线充电赋能的边缘卸载方法

成果完成人	许斌	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	边缘计算				
核心专利号	202410836769.0				

成果概述

移动边缘计算（MEC）中设备能源受限与数据安全问题亟待解决。传统方法难以兼顾能耗优化与数据可信性。本成果创新性地融合区块链技术与无线充电技术，构建了区块链赋能的无线充电MEC卸载模型，通过联合优化任务卸载、资源分配及共识机制，实现能耗与延迟的双重降低。

关键技术/创新要点

系统模型：集成无线充电MEC与区块链节点功能，MEC服务器同时提供算力支持、能量传输及区块链交易验证。

RAFT-RRLB共识机制：基于资源信誉与负载均衡动态选举领导者，较传统RAFT降低30%共识开销（图1）。

分布式算法（DPIA-CO）：通过凸优化解耦非凸问题，实现并行迭代求解，能耗低（图2）。

多目标优化：联合优化卸载策略、带宽分配及计算资源分配，确保任务延迟阈值内完成。

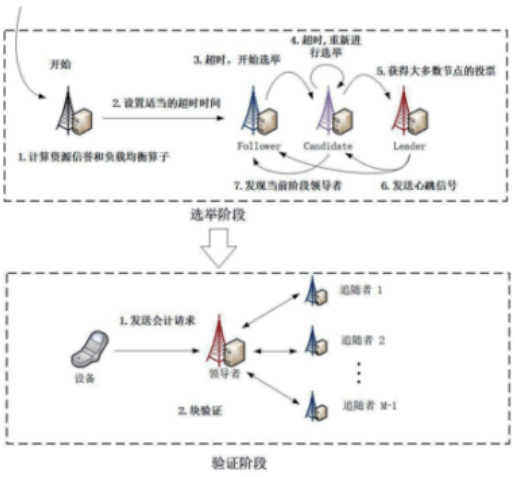


图1

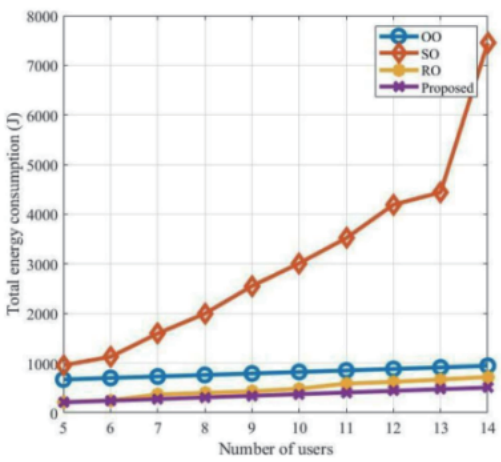


图2

技术指标/优势

1.能耗优化：总能耗较二进制卸载（BCO）方案降低40%（图2）。

2.延迟控制：任务卸载延迟减少35%，适用于实时敏感场景（图3）。

3.可靠性提升：任务失败率下降50%，依赖无线充电与负载均衡机制（图4）。

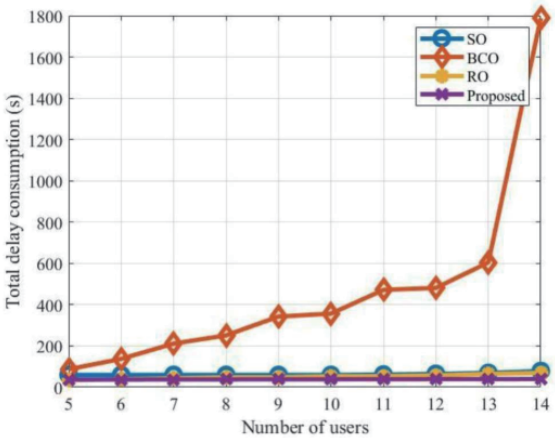


图3

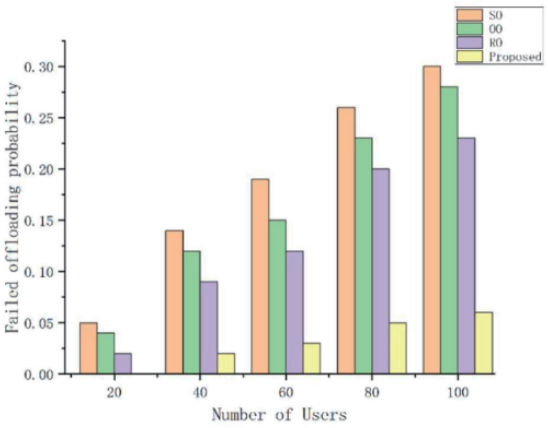


图4

应用领域和市场前景

适用于物联网、智慧医疗等能源敏感领域，尤其适合需高数据可信度的场景（如医疗边缘计算）。未来可扩展至5G/6G网络，市场规模大。

基于轻量化模型的高效个性化联邦学习系统

成果完成人	许斌	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	边缘计算				
核心专利号	202410836828.4				

成果概述

联邦学习中的数据异质性和通信开销是两大核心挑战。本成果提出了一种轻量化模型的高效个性化联邦学习系统，通过保留BN层参数私有化实现个性化建模，结合通道剪枝技术降低通信负载，并采用信誉权重分配和Nadam优化算法提升全局模型性能。

关键技术/创新要点

1.个性化训练：客户端保留BN层的γ、β参数私有，维持本地数据特征。

2.动态剪枝：基于卷积核L1范数剪枝冗余通道，降低通信负载30%以上。

3.信誉权重聚合：综合数据量、多样性和参与度分配权重，提升模型鲁棒性。

4.Nadam优化：融合Nesterov动量与自适应学习率，加速模型收敛27%。

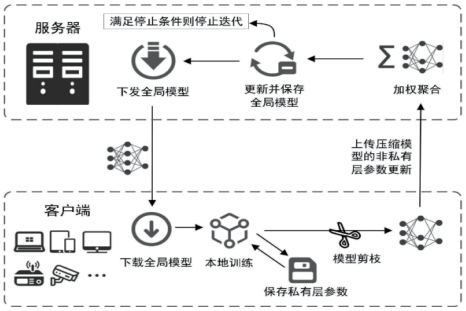


图1 模型架构图

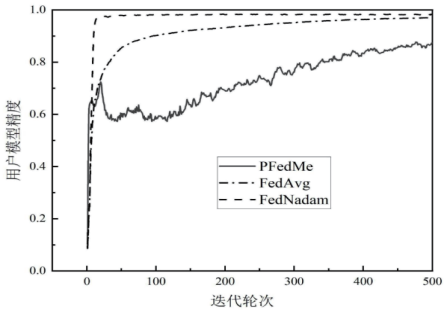


图2 用户模型精度图

技术指标/优势

1.性能提升：在MNIST数据集上，用户模型精度较FedAvg提高12%，训练时间减少35%。

2.通信效率：剪枝后模型参数量减少40%，每轮通信开销降低31%。

3.鲁棒性：非IID数据下的模型泛化误差下降18%。

应用领域和市场前景

适用于医疗、金融等隐私敏感场景的分布式AI训练，支持跨机构数据协作。潜在市场包括智慧医疗、金融风控等领域，预计5年内市场规模超亿元。

一种轻量化的火灾烟雾检测方法、终端设备及存储介质

成果完成人	张登银	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	信息服务，消防预警				
核心专利号	PCT/CN2023/103143；US12475772B2				

成果概述

传统火灾烟雾检测依赖物理传感器，存在探测范围小、易受环境干扰、误报率高、难以适配大范围户外场景等问题，基于深度学习的检测模型又因体积大、算力要求高无法在低配置终端部署。本成果面向户外低算力终端设备的火灾早期预警需求，研发轻量化视频烟雾检测技术，融合混合高斯模型与YUV颜色模型完成前景粗筛选，结合改进型Mobile-YOLOv5实现精准细检测，在保证检测精度的同时大幅降低算力消耗与运行时延，解决了复杂场景下烟雾易误检、难定位、终端难以部署的行业痛点，为户外计算机较低的终端设备进行火灾烟雾检测提供了一个方向，已申请发明专利。

关键技术/创新要点

本成果围绕轻量化、抗干扰、实时性三大核心目标，构建了“预处理粗筛+轻量网络精检”的双层检测架构。通过混合高斯背景建模分离视频动态前景，结合烟雾面积增长特征与YUV颜色特征实现多特征融合预处理，可快速过滤静态干扰、剔除天空云雾等相似干扰物，大幅减少无效检测帧；同时将YOLOv5s主干网络替换为轻量级MobileNetv3，利用深度可分离卷积显著降低模型参数量与计算开销，使其适配边缘端部署；为弥补轻量化带来的精度损失，在主干网络中嵌入SE通道注意力机制强化烟雾关键特征表达，并采用ACON激活函数替代Leaky ReLU构建ACON-CSP模块，实现神经元自适应激活，有效提升特征提取精度；最终通过预筛选与轻量化网络联动，形成先粗筛候选区域、再精确定位烟雾的端到端实时检测流程。在保证了相对精度的同时，提升了检测的速度。

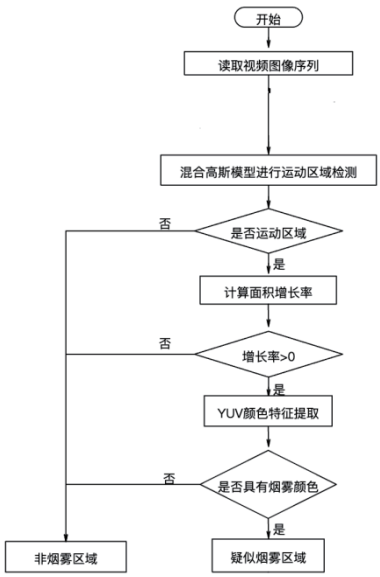


图1 多特征融合视频帧预处理流程

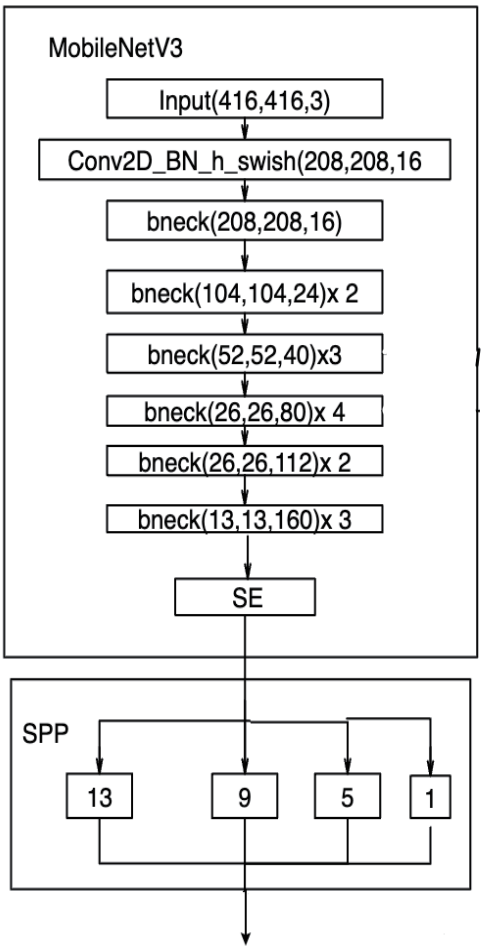


图2 改进型Mobile YOLOv5网络结构

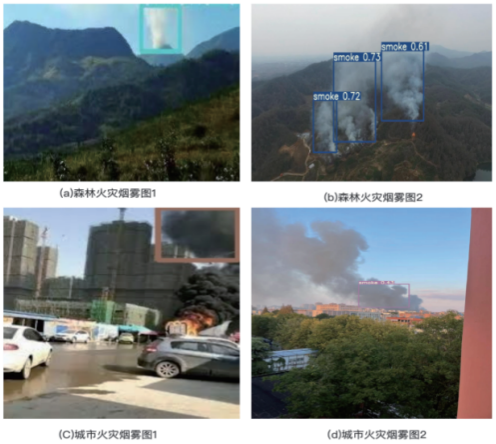


图3 部分火灾烟雾检测

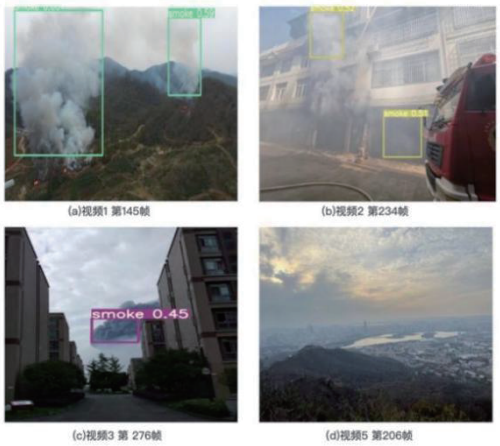


图4 视频烟雾检测结果

技术指标/优势

本成果核心检测性能突出，FPS较原始YOLOv5s提升约17%，mAP提升约1%；模型轻量化程度高，参数量与计算量显著下降，可在嵌入式设备、边缘网关等低算力硬件上实现实时推理；通过运动特征与颜色特征联合预处理，具备强抗干扰能力，能有效区分火灾烟雾与天空云雾，大幅降低误报率；已申请发明专利（一种轻量化的火灾烟雾检测方法、终端设备及存储介质），知识产权清晰；同时可适配森林、城市、厂区等多种户外复杂场景，对光照变化与复杂背景具备良好鲁棒性，实用性强。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于森林消防、工业园区、城市安防、野外矿区、电力廊道等户外火灾监测场景，适配摄像头、无人机、边缘网关、嵌入式巡检设备等硬件平台。

随着智慧消防与安防下沉，低功耗、低成本、实时性强的边缘火灾预警需求快速增长。本成果无需高性能显卡，部署成本低、检测稳定可靠，可实现火灾早期精准预警，大幅降低火灾蔓延风险与财产损失，兼具社会安全价值与商业推广潜力，在户外智能消防监测领域具备广阔市场空间。

一种图像深度伪造检测方法

成果完成人	张登银	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	信息服务				
核心专利号	ZL2025108300888				

成果概述

深度伪造技术通过合成或篡改图像、音频及视频内容来伪造真实人物形象。深度伪造检测方法是对伪造图像进行检测的方法。然而，深度伪造图像主要出现在社交媒体平台或Web应用程序上，而手机或个人计算机等设备计算资源有限，难以进行深度伪造检测。而对计算资源要求较低的深度检测方法，通过降低计算量、减少参数量、加速推理来提高模型处理效率过程中，模型在深度伪造检测任务上的检测精度出现了明显的损失。

团队提出了一种深度伪造检测方法，旨在解决检测效率与检测精度不兼顾的技术问题。其包括：通过二值化卷积提取图像中的特征降低了检测维度，提高了检测效率，满足在低计算能力的设备上适用；通过二值快速傅里叶变换提取频域特征，与空间域特征形成互补，挖掘空间域与频域特征互补增强对高质量伪造内容的辨识力；跳跃连接保留原始信息，权重分布动态强化关键特征，缓解精度损失的问题，且可自由地控制模块堆叠数量，适用于不同的设备。

关键技术/创新要点

作为数字内容安全领域的关键技术，深度伪造检测技术需要具备实时性强、部署灵活、检测精度高和计算成本低等优点。其中，二值化轻量级检测技术更具有优势，与传统的基于3D卷积和transformer的网络相比，模型压缩率大幅提升，推理速度更快，内存占用更低，有利于边缘端部署。

团队创新性地构建了频率再耦合二值网络架构：以二值化卷积为骨干提取基础特征，通过多级串联的频率再耦合模块逐层深化特征表达。每个模块内嵌二值快速傅里叶变换单元，直接在二值域中解耦振幅与相位信息，捕捉伪造痕迹的高频特征；同时设计自适应跳跃连接机制，将原始空间特征与频域特征动态融合，通过通道注意力生成自适应权重，实现关键信息的精准筛选与增强。该架构在保持二值网络极低计算开销的同时，显著提升了模型对细微伪造伪影的感知能力，为实时高精度检测提供了可行的轻量化解决方案。

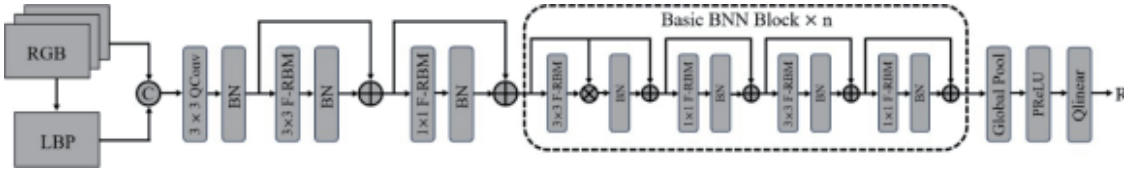


图1 多特征融合视频帧预处理流程

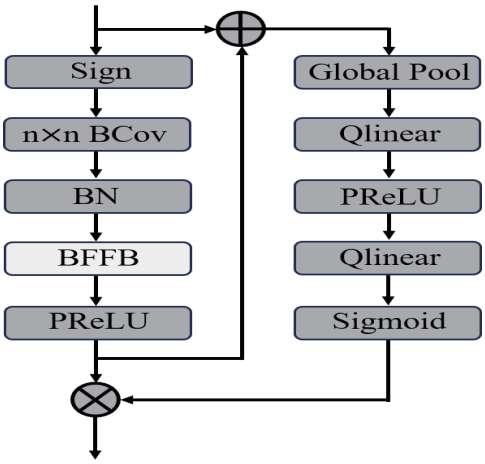


图2 频率再耦合二值模块的框架流程图

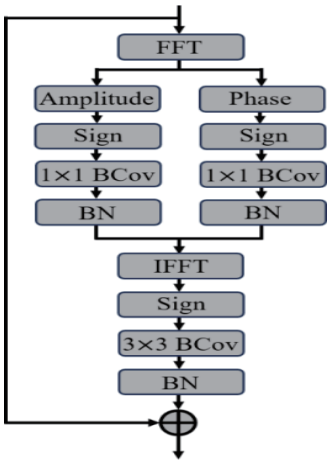


图 3 二值快速傅里叶变换的框架流程图

技术指标/优势

与已有检测手段相比，该成果通过二值化卷积提取图像中的特征降低了检测维度，提高了检测效率，满足在低计算能力的设备上适用；通过二值快速傅里叶变换提取频域特征，与空间域特征形成互补，挖掘空间域与频域特征互补增强对高质量伪造内容的辨识力；跳跃连接保留原始信息，权重分布动态强化关键特征，缓解精度损失的问题，且可自由地控制模块堆叠数量，适用于不同的设备。

应用领域和市场前景

该成果可为数字内容安全领域的身份认证、舆情监管和司法取证等相关方面提供高效的技术支持，如：伪造视频与合成音频的精准识别能够保障网络信息的真实可信和避免虚假内容的大规模传播，这不仅是维护社会信任体系的重要手段，也是打击网络欺诈与信息战的"防线"。由于深度伪造技术已广泛渗透至金融诈骗、政治谣言、证据伪造等多个高风险场景，该成果可望用于以上这些类型安全威胁的实时监测、风险预警以及伪造链条的溯源追踪与证据固化。

基于状态空间模型的人脸图像复原方法

成果完成人	张登银	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	信息服务（身份识别、反诈）				
核心专利号	ZL2024105445185；PCT/CN2024/120396；US12299845B1				

成果概述

高质量的清晰人脸图像不仅能为用户提供良好的视觉观感。由于拍摄条件和图像保存的过程中存在诸多不稳定性因素，如成像设备对焦失败、相机抖动、有损压缩等，会导致图像存在多重干扰引发不同程度的退化。低质量人脸图像提供的有效身份信息十分有限。因此，人脸图像复原技术显得尤为重要。

本团队自主研发了一种基于状态空间模型的人脸图像复原方法。该方法采用开创性的状态空间模型范式作为网络架构，并包含三大创新组件：多尺度学习融合模块、多尺度注意力融合模块以及多尺度状态空间模型。首先，多尺度学习融合模块通过从不同尺度输入中提取图像级全局引导信息，在保持直观感知的同时提升语义理解能力；其次，多尺度注意力融合模动态整合来自各编码器阶段的特征；最后，引入多尺度状态空间为小尺度与大尺度感受野分别设计独立分支，有效促进长距离依赖关系的建模，从而使其能够实现良好的复原效果，在安防监控、医美评估中有着潜在的广泛应用前景。

关键技术/创新要点

作为一种先进的图像生成技术，状态空间模型在人脸图像复原领域具有结构高效、全局感知、细节保真度高、推理速度快等优势。与传统的卷积神经网络或 Transformer 模型相比，能够在保持线性计算复杂度的同时，实现对整幅人脸图像的全局上下文建模，有效避免了长程依赖缺失和二次计算爆炸的问题，显著提升了对复杂模糊核的适应能力、对身份特征的一致保留以及对高频纹理细节的精准恢复，有利于实现高质量、高保真的人脸盲复原。

团队采用开创性的选择性状态空间模型范式作为网络架构，并包含三大创新组件：多尺度学习融合模块、多尺度注意力融合模块以及多尺度状态空间模型。首先，多尺度学习融合模块通过从不同尺度输入中提取图像级全局引导信息，在保持直观感知的同时提升语义理解能力；其次，多尺度注意力融合模动态整合来自各编码器阶段的特征；最后，引入多尺度状态空间为小尺度与大尺度感受野分别设计独立分支，有效促进长距离依赖关系的建模。



图1 在 CelebA 人脸图像公共数据集上的测试效果

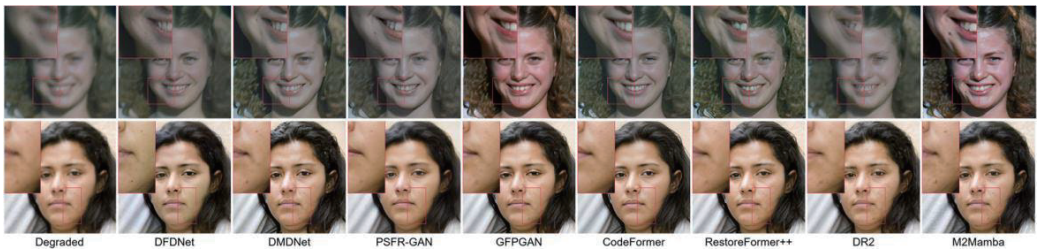


图2 在真实人脸图像数据集上的测试效果

技术指标/优势

与传统的人脸图像复原方法相比，该成果实现了准确还原人脸图像属性组件的真实语义变化，比如：复原出低质量人脸图像中的闭眼状态，而非出现单眼闭合而另一眼睁开的情况，还能够保持虹膜颜色一致性，并保留人脸面部的色斑、避免唇舌出现混淆的异常现象。

应用领域和市场前景

该成果可为安防监控、医美评估、影音娱乐等相关领域提供高质量的技术支撑，如：在安防监控场景中，人脸图像复原技术能够从低分辨率、运动模糊或暗光环境的退化图像中重建出清晰可辨的人脸特征，有效提升身份识别准确率与侦查效率。不仅可以对传动监控系统进行智能化升级，还能为复杂场景下破解身份认定难题、保障公共安全提供给重要技术手段。由于人脸图像复原技术可广泛适配各类图像采集与身份识别系统（如智能门禁、视频侦查、手机解锁等），该成果有望在智慧城市、金融科技、刑事侦查以及内容制作等多个行业实现规模化应用，为视觉信息的采集、处理与应用全链路提供清晰化保障与价值挖掘支撑。

一种复杂天气下障碍物检测方法及装置

成果完成人	张登银	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	自动驾驶、智能交通				
核心专利号	ZL2022110987955；PCT/CN2023/103129；US12469249B2				

成果概述

在降雨、降雪、雾霾、沙尘、强光、夜间等复杂天气条件下，道路图像常出现对比度低、细节模糊、颜色失真等问题，严重影响自动驾驶及辅助驾驶系统对障碍物的检测精度。现有基于深度学习的目标检测算法如YOLOv3在复杂环境下表现不佳，难以兼顾检测速度与精度。

本成果提出了一种融合图像增强与改进YOLOv3网络的复杂天气下障碍物检测方法。该方法首先利用带色彩恢复的多尺度视网膜增强算法（MSRCR）对图像进行预处理，显著提升图像质量；随后通过引入空间金字塔池化（SPP）模块、替换激活函数为ELU、优化数据集及锚框聚类策略，构建了改进型YOLOv3网络。该技术能够在复杂天气条件下实现对车辆、行人等多种障碍物的高效、准确检测，显著提升了模型的鲁棒性和实用性。

关键技术/创新要点

1. 图像增强与检测网络深度融合

本成果创新性地将MSRCR图像增强算法作为前置处理模块，与改进型YOLOv3检测网络相结合。MSRCR通过多尺度高斯滤波与颜色恢复因子，有效改善雨、雪、雾、夜间等场景下图像对比度低、颜色失真的问题，为后续检测提供高质量输入，显著提升检测稳定性。



图1 MSRCR 图像增强效果对比图（左：原始图像，右：增强后图像）

2.引入SPP模块实现多尺度特征融合

在YOLOv3的卷积块中嵌入空间金字塔池化模块（SPP），通过不同尺度池化核提取局部与全局特征，增强模型对多尺度目标的感知能力，尤其适用于道路场景中大小差异显著的障碍物检测。

3.激活函数优化与锚框聚类改进

将原网络中的Leaky-ReLU激活函数替换为ELU，有效避免神经元死亡问题，增强模型对噪声的鲁棒性。同时，采用K-Means++算法替代传统K-Means对锚框进行聚类，提升初始锚框质量，加速训练收敛并提高定位精度。

4.多源数据集融合与增强训练

融合KITTI与CODA数据集，覆盖雨、雪、雾、夜间等多种复杂场景，并通过Mixup、Cutmix等数据增强方式扩充样本，提升模型泛化能力。数据集标签统一为car、pedestrian、cyclist等类别，增强模型在实际场景中的适应性。

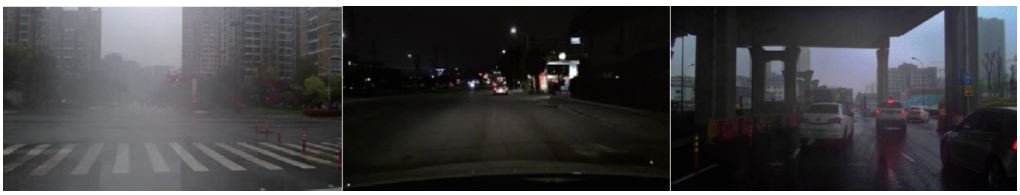


图2 数据集场景示例（雾、夜间、雨典型图像）

技术指标/优势

与现有YOLOv3及主流目标检测方法相比，本成果具有以下技术优势：

1.检测精度显著提升：在复杂天气条件下，障碍物检测的平均精度（mAP）较原YOLOv3提升明显，尤其在低对比度、弱光照场景下表现优异；

2.鲁棒性强：通过ELU激活函数与多样化数据集训练，模型对图像噪声和环境变化具有更强的抗干扰能力；

3.定位更精准：引入SPP模块与 K-Means++聚类优化，提升了目标边界框的回归精度；

4.实时性良好：在保证检测精度的同时，保持了YOLOv3原有的高效推理速度，满足自动驾驶对实时性的要求。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于自动驾驶、智能辅助驾驶、智能交通监控、无人巡检等场景，特别是在复杂天气条件下对道路障碍物的精准识别需求中具有重要价值。随着自动驾驶技术的不断发展和智能交通系统的普及，车辆对环境感知能力的要求日益提高。本成果所提出的方法不仅可提升现有系统的安全性与可靠性，还可为相关设备厂商、算法服务商提供技术支撑，具有广阔的市场应用前景和产业化潜力。

一种人脸伪造主动防御图像生成方法、系统及介质

成果完成人	张登银	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	信息服务（身份识别，反诈）				
核心专利号	ZL2025106701484				

成果概述

人脸深度伪造技术旨在利用深度学习方法对人脸图像的进行属性编辑、篡改，并生成逼真的伪造人脸图像、视频。这一技术的进步也加剧了恶意使用者利用伪造人脸图像从事非法活动的风险，对个人隐私、社会安全构成严重危害。目前，人脸深度伪造防御手段主要采用被动检测，无法从源头上预防伪造人脸图像的传播。因此，研究能够从数据根源进行主动防御的技术显得尤为重要。

本团队自主研发了一种人脸伪造主动防御图像生成方法。该方法通过结合基于动量的梯度攻击算法，利用自适应动量系数动态调整梯度更新方向，在离散小波变换域中迭代训练频率对抗分量，平衡对抗扰动的隐蔽性与攻击性，并充分利用三维人脸重建先验将对抗噪声投影至人脸图像，能够对不同姿态下的人脸图像添加有效的人脸伪造对抗攻击。避免了需要通过静态超参数进行大量重复实验人工调优，大大提升了对抗样本的生成效率，同时还具有很好的防御效果，从而使其在人脸深度伪造主动防御方面有着潜在的广泛应用前景。

关键技术/创新要点

作为人脸深度伪造防御技术，主动防御技术相比被动防御技术具有“事前”防御、阻断伪造图像传播、肖像权保护等功能。尤其是基于对抗攻击的主动方法，与仅用作溯源和“事后”取证的数字隐写水印相比，对抗扰动能够影响人脸深度伪造模型的正常输出，有利于人脸图像的伪造检测。

团队根据三维人脸重建网络获得待保护人脸图像的三维位置参数，将对抗噪声投影至二维参数坐标系，利用自适应动量系数动态调整频率对抗分量的梯度更新方向，对频率分量进行对抗样本攻击，并利用低频增强注意力模块突出区域重要性，可对不同姿态下的人脸图像添加有效的隐蔽攻击，抵御人脸伪造系统生成高质量的篡改图像，具有良好的防御效果。利用低频增强损失限制模型中高频分量的局部扰动范围，并结合一致性损失限制模型中所有分量的全局扰动范围，在保留攻击效果的同时降低高频噪声能量，避免高频区域的对抗扰动局部突变，保持图像视觉上的自然度，从而提升对抗噪声的隐蔽性。

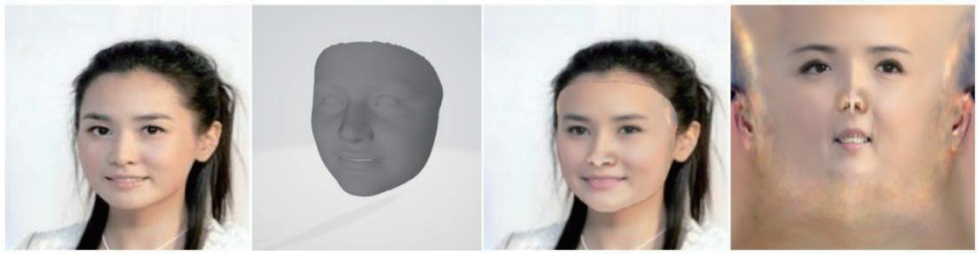


图1 (a)输入图像;(b)三维位置参数;(c)三维重建图像;(d)纹理图像



图2 (a)对抗噪声;(b)对抗样本;(c)原始伪造输出;(d)伪造防御输出

技术指标/优势

与传统的人脸深度伪造防御手段相比,该成果实现了对人脸伪造的主动防御,可对图像中不同姿态下的人脸添加有效的对抗攻击,能够将对抗扰动精准投影至人脸图像深度伪造的关键属性组件上,具有良好的防御效果。

应用领域和市场前景

该成果可为数字安全、金融支付及司法取证等相关领域提供高效的技术支持,如:在人脸身份认证场景中,主动防御技术能够在用户图像源头植入不可见扰动,从根源上阻断攻击者利用窃取的人脸信息生成伪造视频或进行身份冒用。这不仅是对现有身份核验体系的重要补充,也是防范 AI 换脸诈骗、保障交易安全的一道重要防线。由于人脸深度伪造主动防御技术可广泛适配格各类录入人脸图像信息的管理系统(如门禁安防,移动支付等),该成果有望在金融、安防、互联网内容平台以及数字版权保护等多个行业落地应用,并结合数字取证技术实现对用户人脸信息全生命周期的主动防护与精准溯源。

一种基于空间信息语义分割模型的不透水面提取系统及方法

成果完成人	江畅	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	地理信息系统软件	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感技术
应用行业	软件和信息技术服务业				
核心专利号	ZL202310661643.X				

成果概述

针对传统不透水面提取方法效率低、成本高，以及现有深度学习模型在处理中分辨率遥感影像时存在地物边界模糊、空间信息表达不充分、计算量大、易过拟合等问题，本成果提供了一种创新的不透水面提取方法。该方法构建了OCR_CLHRnet语义分割模型，通过引入CLHRnet作为主干网络，结合坐标注意力机制和ShuffleNet，实现了对地物空间信息的高效感知和模型的轻量化，同时引入DropBlock技术有效抑制了过拟合。本成果方法能够利用开源的中分辨率遥感影像（如Sentinel-2）实现高精度的城市不透水面（如道路、房屋）提取，为城市环境监测、空间规划与土地利用分析提供了高效、低成本的技术手段。

关键技术/创新要点

1.构建OCR_CLHRnet新型语义分割模型：本成果将OCR（对象上下文表示）模型与CLHRnet（改进的高分辨率网络）相结合。CLHRnet作为主干网络，通过并行多分辨率分支和多尺度信息融合，有效保留了地物的空间细节信息，解决了传统模型在提取不透水面时边界模糊的问题，实现了对建筑物、道路等目标的精细分割。

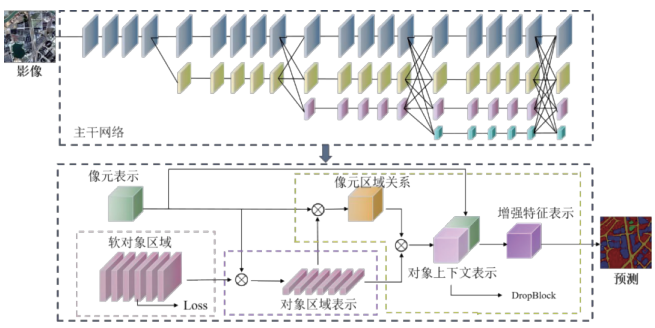


图1 OCR_CLHRnet 模型架构

2.设计空间信息增强模块：在基础模块中引入了5×5深度卷积和坐标注意力机制。5×5卷积扩大了感受野，能捕捉更丰富的上下文信息；坐标注意力机制则通过嵌入坐标信息，增强模型对地物空间位置的感知能力，从而更精准地识别和定位不透水面。

3.优化模型性能与训练效率：首先，利用高分辨率遥感影像（1m）进行预训练，弥补了中分辨率影像在细节上的不足，加速了模型收敛。其次，在OCR模型中引入DropBlock正则化技术，随机屏蔽相邻特征区域，有效防止了模型过拟合。最后，通过融合Channel Shuffle技术，实现了模型轻量化，在保证精度的同时提升了训练和推理速度。

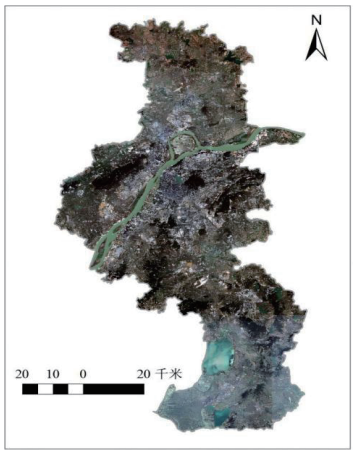


图 2 南京市 Sentinel 卫星影像

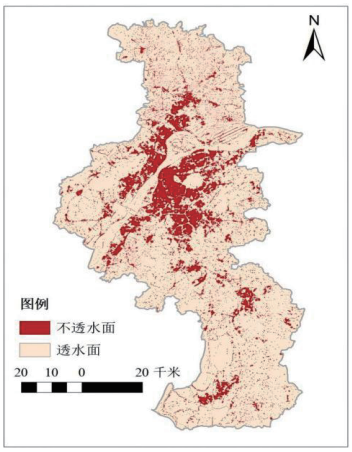


图 3 南京市不透水面提取结果

技术指标/优势

技术指标：

能够基于10米分辨率的中分辨率遥感影像（如Sentinel-2）进行不透水面提取，模型训练参数量相比传统高分辨率模型有效降低，训练速度快，且在测试集上的不透水面提取精度（如交并比、F1分数等指标）优于现有主流语义分割模型。

优势：

① 成本低、可操作性强：使用免费的中分辨率遥感影像，无需高昂的亚米级商业影像，大幅降低了数据获取成本。

② 精度高、泛化能力强：通过引入空间信息增强和过拟合抑制策略，有效解决了地物混淆、边界模糊等问题，模型鲁棒性好。

③ 效率高：模型在保证精度的同时实现了轻量化，能够支撑大规模、精细化的不透水面动态监测任务。

④ 创新性：该专利已获得国家知识产权局授权，技术方案具有原创性和先进性。

应用领域和市场前景

应用领域：

① 城市规划与管理：为城市扩张监测、土地利用变化分析、规划效果评估等提供数据支撑。

② 生态环境监测：评估城市化进程对生态环境的影响，如热岛效应、水循环变化等。

③ 智慧城市建设：作为城市“一张图”的基础数据层，服务于智慧交通、应急管理、基础设施规划等。

④ 农业与自然资源调查：辅助分析非农化、非粮化现象，监测耕地被侵占情况。

市场前景：

随着“数字中国”和“美丽中国”建设的深入推进，对高时效、高精度的城市地表信息的需求日益增长。传统的人工解译和高成本影像获取方式已无法满足当前精细化管理的需求。本成果提供了一种经济、高效、精准的技术解决方案，能够直接服务于各级自然资源部门、城市规划设计院、环境监测机构以及相关科技企业，具有广阔的市场应用前景和商业化价值。

一种互联网秒杀抢购方法和系统

成果完成人	杨立君	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	电子商务软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	互联网、电商平台、票务系统、金融科技等				
核心专利号	ZL202210632417.4				

成果概述

在电商大促、票务抢购等高并发在线交易场景中，瞬时海量用户请求冲击系统，极易导致数据库性能瓶颈、库存数据不一致（如超卖或错卖）等问题，严重影响用户体验和业务可靠性。传统技术方案往往难以兼顾系统的高可用性与数据强一致性，成为制约业务发展的技术痛点。

本成果自主研发了一套智能库存管理技术体系。该体系通过创新的分层架构与可配置策略，针对不同业务场景（如是否允许超卖、库存量大小）智能选择最优技术路径，有效解决了高并发下库存扣减的核心瓶颈。它不仅实现了系统吞吐量的显著提升，保障了交易的准确性与公平性，还能通过实时状态感知优化资源利用，为各类在线抢购、秒杀业务提供了高性能、高可靠、可灵活适配的完整解决方案。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于摒弃了单一技术方案，构建了一个基于业务场景智能决策的技术组合框架。其关键技术要点如下：

1.双模式库存扣减引擎：创新性地根据业务对“超卖”的容忍度，提供两种底层执行引擎。对于虚拟商品等可接受弱一致性的场景，采用高性能内存数据库（如Redis）进行极速扣减，最大化吞吐量；对于稀缺实物等要求强一致性的场景，则确保通过关系型数据库完成原子操作，保证数据绝对准确。

2.库存热点打散技术：针对强一致性场景下单一库存记录成为并发热点的问题，提出了库存拆分方法。将总库存逻辑拆分为多个子库存单元，使并发请求分散到不同的数据库记录上，从根本上避免了行级锁竞争，实现了系统处理能力随拆分单元数近似线性扩展。

3.异步化与智能流量治理：通过引入消息队列，将瞬时海量请求异步化处理，起到“削峰填谷”的作用，保护下游核心业务系统。同时，结合实时状态监听机制，能在库存售罄后快速感知并拦截队列中的无效请求，减少资源浪费，提升系统整体效率。

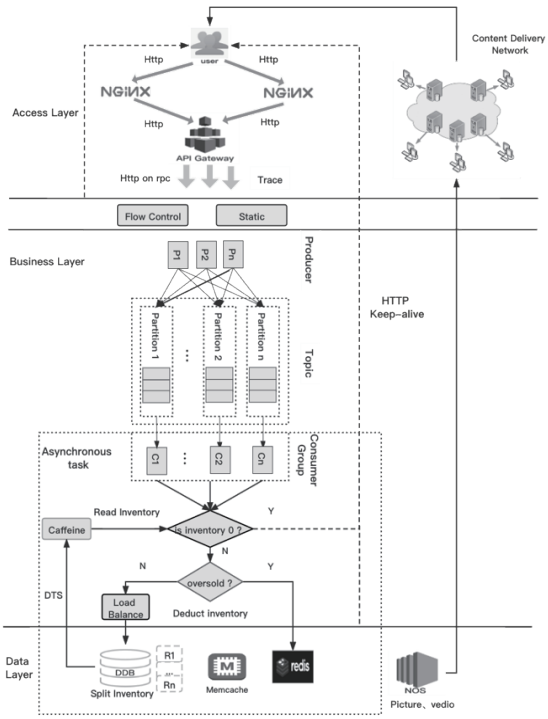


图1 系统示意图

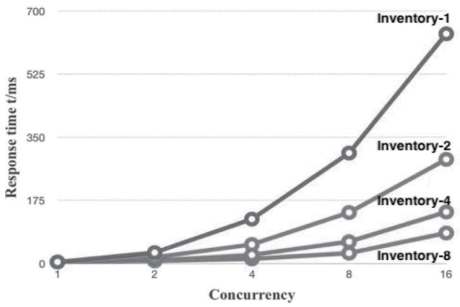


图2 库存拆分策略(拆分为 1、2、4、8)
在高并发下扣减库存的响应时间比较

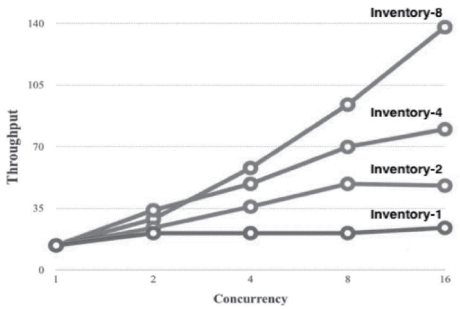


图3 库存拆分策略下系统吞吐量比较

技术指标/优势

与传统的高并发处理方案相比,本成果具有显著优势:

· 高性能:在强一致性要求下,通过库存拆分技术,实测在典型并发场景下系统吞吐量可提升数倍。

· 高可靠:通过双模式引擎和异步架构,确保系统在高压力下保持稳定,数据准确无误。

· 高灵活:技术策略可根据业务需求(一致性要求、库存量)灵活配置,适配性强。

· 可观测:提供对请求队列、库存状态等的实时监控能力,便于系统运维与容量规划。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于所有面临瞬时高并发挑战的在线交易系统,市场前景广阔:

· 电子商务:支撑“双十一”、“618”等大促活动的秒杀、抢购场景。

· 票务系统:用于演唱会、热门赛事、交通票务的集中发售。

· 金融科技:适用于限量理财、优惠券发放等抢购业务。

· 其他领域:任何需要处理热点商品或服务并发访问的在线平台。

该技术体系能够有效提升平台在大流量冲击下的服务能力与用户体验,是构建核心交易系统竞争力的关键技术,具有重要的商业应用价值。

二维材料计算机模拟与分析技术开发

成果完成人	闫巍	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	凝聚态物理学
应用行业	新材料				

成果概述

二维材料，如过渡金属二硫族化物，因其独特的量子限域效应与优异的电学、光学及力学性能，在新一代信息器件与光电器件中具有重要应用前景。然而，其微观物理机制复杂、实验调控难度大，亟需高效、精准的计算机模拟与分析手段作为支撑。本项目围绕二维材料结构调控与物性预测，构建适用于二维材料（的多尺度计算机模拟与性能分析平台，支持玄武莱斯维塔计算机系统服务中心的高性能计算环境。针对二维材料在计算机系统中的应用场景，建立材料性能与微观结构的关联模型。

关键技术/创新要点

本成果围绕二维材料计算机模拟与性能分析的核心需求，提炼并形成了一套具有创新性的关键技术体系。将第一性原理计算、分子动力学模拟与器件级模型有机结合，实现了从原子结构到宏观性能的跨尺度贯通，并针对二维材料中普遍存在的缺陷、界面及范德华异质结构，发展了高精度建模与结构优化技术，显著提升了模拟结果对真实材料体系的描述能力。基于密度泛函理论（DFT）的电子结构计算模型，单胞能量收敛精度≤0.02eV/atom，电子能带计算误差<5%；结合分子动力学（MD）研究材料层间耦合效应，支持>2千原子体系，层间作用力计算误差≤0.1eV/Å。

技术指标/优势

本成果在二维材料计算模拟与分析领域形成了系统化技术优势。构建了覆盖原子尺度至器件尺度的多尺度模拟能力，可处理原子规模达10^4–10^6量级的复杂体系，在复杂结构建模方面精度更高、适用性更强，增强了结果的可解释性与工程指导价值。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于新一代信息技术与先进材料研发领域，主要包括半导体器件设计、光电器件开发、柔性电子与可穿戴设备、传感器技术以及新能源材料等场景。在科研与产业中，可作为虚拟材料设计平台，用于二维材料及其范德华异质结的结构优化、性能预测与器件方案评估，显著减少实验试错成本，提高研发效率。

云网运营专业模型关键技术研究

成果完成人	孙知信	职称	教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	人工智能
应用行业	计算机应用				

成果概述

基于员工画像的人才匹配课题旨在利用大语言模型与层次分析法，为用户提供可以自动化形成人员调配方案的系统，并且可以通过人机交互来对自动生成方案持续优化。本课题在大语言模型微调方面采用了p-turningv2+lora的微调方案。主要完成了员工画像的人才匹配系统以及两篇专利的撰写。

风险操作红绿灯课题旨在构建日志检测模型对设备产生的日志进行检测，同时确保模型能够很好地应用于复杂多变的线上环境。主要完成了基于日志多特征融合的无监督异常检测模型的系统开发和基于适用度和特征偏移分析的日志异常检测自更新方法专利撰写。

配置智能稽核课题旨在面对配置信息复杂多变的背景下，构建了基于SBert模型的SBert_BiGRU_-MA模型，实现了对句子级别嵌入的获取、句子信息的双向处理以及决策过程的可解释性。同时利用Auto-encoder作为智能异常检测器，实现了对配置信息的智能稽核。

设备端口级流量和带宽预测课题旨在解决目前缺乏有效的模型对设备端口级流量进行精准预测的问题。提出一种改进的基于迁移学习和LSTM算法的流量预测方法，在秒级时间内得到平均MAPE值低于5%的预测结果。提供了一种新型的考虑社会性因素的网络流量组合预测模型。

关键技术/创新要点

基于员工画像的人才匹配课题

基于大语言模型和层次分析法的人才匹配模型主要包括以下关键技术点：

1.对大语言模型进行封装形成大语言模型引导器，利用引导器和p-turingv2的微调，即可引导大模型完成之后的一系列操作。引导器结构图如右图



图1 大模型引导器组成图

2.人岗匹配指令识别模块:使用ChatGLM2和word2vec识别指令是否为人岗匹配指令,若是就进一步进行人才评分,否则通过ChatGLM2的自主对话功能。

3.人才评分模块:引导ChatGLM2大模型提取人岗匹配指令之中的岗位需求关键词,使用word2vec和ChatGLM2将关键词与人才库能力项对比,得到评分依据,最终生成员工评分。

4.人才推荐模块:通过使用层次分析法,输入层次分析法需要的能力矩阵和重要性矩阵,精准推荐出合适员工,并且使用p-turingv2微调大模型使其用自然语言输出。

5.方案反馈优化模块:通过识别用户对结果的情感,对推荐结果进行不断优化,直到得到用户满意的结果为止。

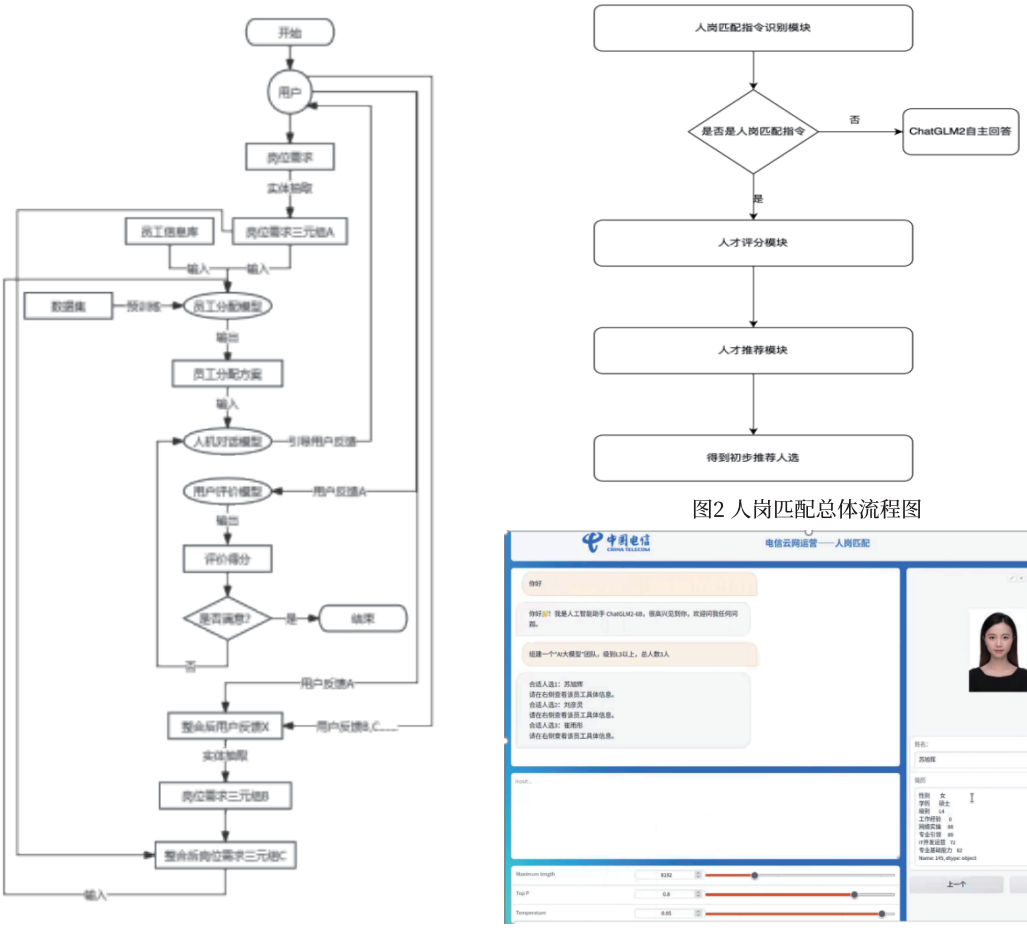


图2 人岗匹配总体流程图

图3 反馈调整流程图

图4 基于员工画像的人才匹配系统界面

风险操作红绿灯课题

基于日志多特征融合的无监督异常检测模型的关键技术点主要包括:基于预训练BERT模型对日志的事件模板进行语义信息提取;利用特征提取器分别对日志的事件,计数,时间和时延序列进行特征提取;将提取到的多维特征输入基于Self-Attention机制的特征融合层,最后将融合后的向量输入分类器进行训练;对日志进行分析,并能够检测出潜在模式偏离正常日志序列的异常。

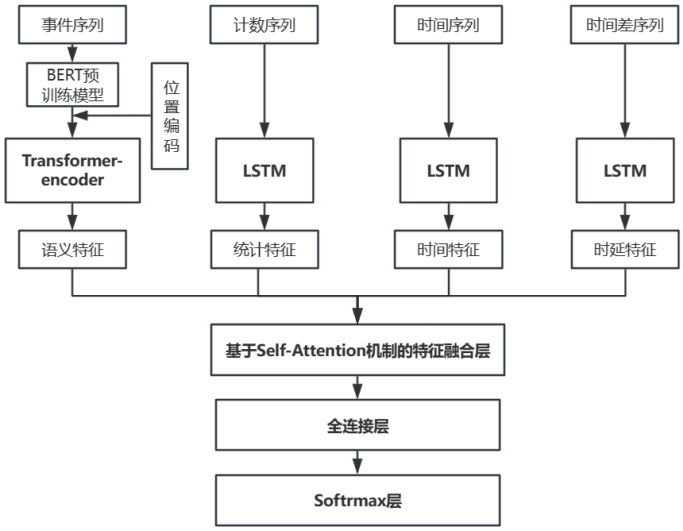


图5 多特征融合的异常检测模型

基于适用度和特征偏移分析的日志异常检测自更新方法。该方法包含四个模块:模型构建模块:根据已有的历史日志数据集构建初始模型;分析检测模块:通过实时监控、评估和决策,在必要时启动自更新检测模块;数据收集模块:构建待检测数据集,以用于自更新检测模块中模型的训练;自更新检测模块:实现对日志异常检测模型的动态优化和适应性调整,以提高模型的准确性、泛化性和实时性。

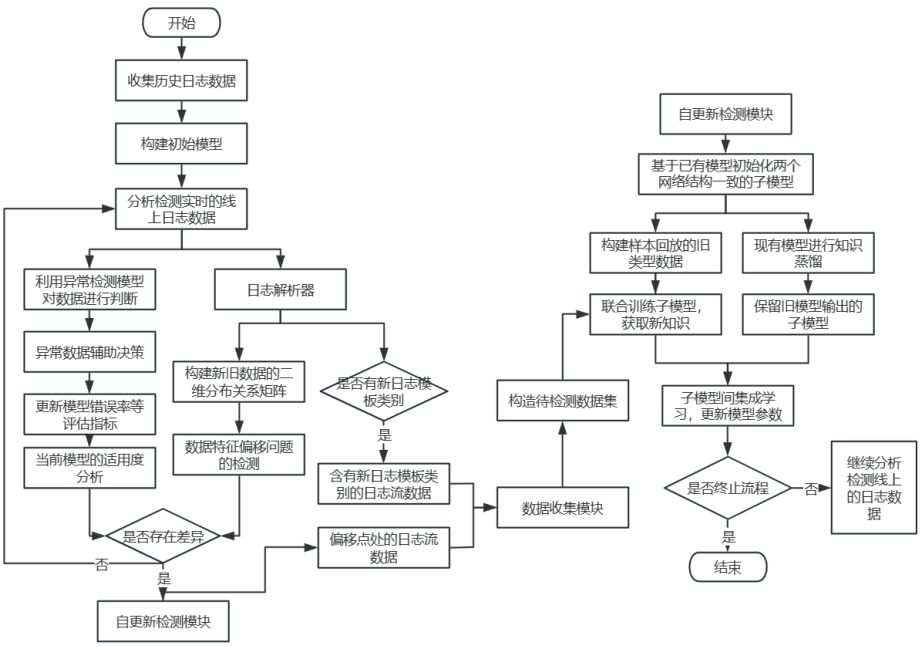


图6 方法流程图

配置智能稽核课题

1.为实现对配置信息特征和结构的深入理解,构建了基于SBert模型的SBert_BiGRU_MA模型。该模型包含三个部分:

①Sentence-BERT:获取句子级别的嵌入,捕获句子中的高级语义信息;

②双向GRU:通过双向GRU处理句子嵌入,模型能够同时考虑前文和后文的信息;

③多头注意力机制：多头注意力不仅提供了改进的性能，也为模型的决策过程增加了一定程度的可解释性。

在配置信息无明确标签的情况下，为实现对配置信息异常内容的智能检测，采用无监督学习的方式，基于Autoencoder作为异常检测器。

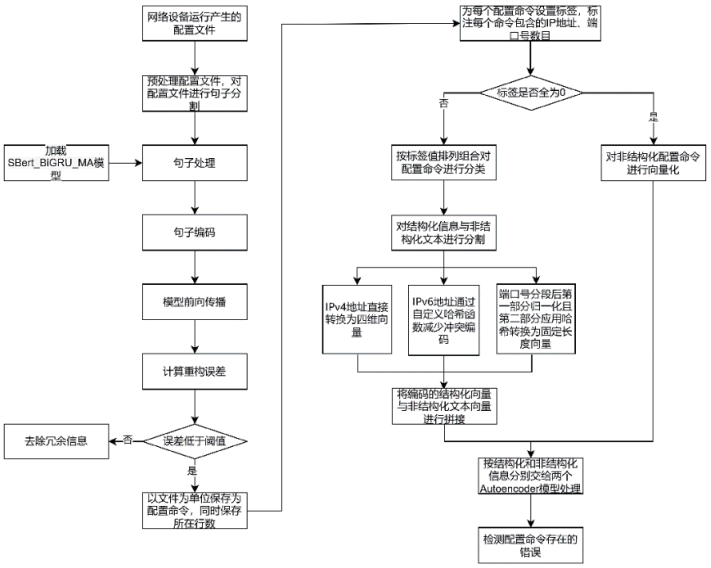


图7 配置检测流程图

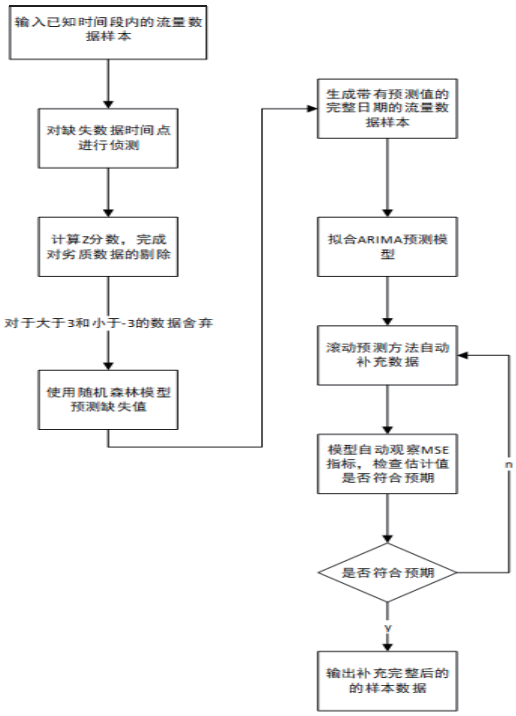


图8 流量预测流程图

设备端口级流量和带宽预测课题

1.长短期记忆网络（LSTM）：LSTM是一种特殊的循环神经网络（RNN），适用于处理和预测时间序列数据。相比于传统的RNN，LSTM通过门控机制可以更有效地捕捉长期依赖关系，避免了梯度消失或爆炸的问题，从而在处理时间序列数据时表现更好。

2.迁移学习：在预测过程中中，首先使用大规模的流量数据集进行预训练，得到初始模型。加载已经训练好的模型参数后，进行其他端口的迁移学习。冻结了LSTM层的参数，只训练全连接层，以节省计算资源并加速训练过程。同时防止了在新任务上过度调整预训练模型的参数，从而丢失了预训练模型已经学到的通用特征。

3.模型对缺失时间段内流量数据的自动补充，对流量预测模型中社会因素所占权重的计算方式定义，自动判断定义的社会因素所占权重的好坏，并进行权重的自动调整。

技术指标/优势

基于员工画像的人才匹配课题

员工画像时效性，即用来衡量画像标签随员工属性信息变化而发生变化的反应时间不超过30秒，其数值越小表明员工画像的时效性越强；匹配方案满意度评分，即用来衡量岗位领导对生成的推荐方案满意程度分数，不低于4.5分（满分5分），其数值越大表明匹配方案越满足岗位需求。

风险操作红绿灯课题

使用准确率、精准率、召回率三项评估标准评估模型性能：日志异常检测模型的准确率为96.457%、精准率为97.188%、召回率为97.381%。

配置智能稽核课题

使用准确率、精准率、召回率三项评估标准评估模型性能：配置异常检测模型的准确率为90%、精准率为90%、召回率为90%。

设备端口级流量和带宽预测课题

在对800、400、300以及200个数据点的小规模数据集进行未来15min的流量预测任务中，可以在1s内完成训练并得到预测结果。预测的平均MAPE值小于5%。

专利为一种新型的考虑社会因素的网络流量预测模型，可以在结合社会因素的影响下对于流量作出更加准确的预测。

应用领域和市场前景

基于员工画像的人才匹配课题的研究成果解决了传统人岗匹配人力资源消耗大的问题，在人岗匹配工程中，全部操作都由大模型来完成，过程实现了全自动化，且可以根据能力项的不同重要程度，精准的推荐员工，防止人工推荐所出现的错误。

风险操作红绿灯课题的研究成果可以在许多领域和场景中发挥作用，特别是那些对系统运行和安全性有高要求的领域，例如可以监测服务器和网络设备的日志，及时发现系统故障或异常行为，确保系统的稳定性和可靠性。

配置智能稽核课题提供的SBert_BiGRU_MA模型和以此为基础的Autoencoder模型可应用于各行业的配置信息管理，提供智能化的异常检测和配置分析，为企业提供高效、准确的数据管理和风险控制。

设备端口级流量和带宽预测课题的研究成果可以用来规划网络容量，确保网络资源能够满足未来的需求。帮助企业和服务调整服务策略和资源分配，还可以用于检测异常流量和网络攻击，提前发现潜在的安全威胁并采取相应措施。

一种面向多源移动应用知识图谱构建方法

成果完成人	李炜卓	职称	副教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	技术转让	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	基础软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件与理论
应用行业	移动应用领域、网络安全领域				
核心专利号	ZL 2022111878131.7				

成果概述

该成果为一种面向多源移动应用知识图谱构建方法，基于获取的来自不同数据源的移动应用数据，生成三元组集合；对实体与关系进行编码，获得对应的向量表示；计算实体向量之间的相似度，将相似度超过设定阈值的向量表示所对应的实体确定为初始语义等价实体对，并确定种子集合；根据元规则从种子集合中推理出潜在语义等价实体对；计算潜在语义等价实体对成立的概率；将计算的概率与设定概率阈值比较，根据比较结果最终确定多源移动应用中实体之间的语义等价关系，进而获得多源移动应用知识图谱。本成果可以显著降低多源数据在知识图谱构建过程中实体语义等价关系的人工标注成本。

关键技术/创新要点

随着越来越多的APP被开发与发布，网络上也存在诸多含有恶意风险的APP，它们或传播不良信息、或侵犯用户隐私，甚至违反国家信息安全法令。对普通的网民来说，构建全面的移动应用知识库信息有助于用户查询和预防APP的欺诈；对网络安全分析人员来说，全面的移动应用知识图谱不仅可以帮助网络安全分析人员更加快速地找出潜在风险，也可以在一定程度上确保移动网络的安全。

尽管在相关领域的研究中，有DREBIN、AndroZoo++、AndroVault等移动应用知识库被学者提出。但这些知识库的来源较为单一：仅考虑了部分安卓应用市场中的APP，属性较为局限：爬取的APP无法较好覆盖场景需要的APP的属性，共享重用缺失：仅对单个APP底层数据进行的分析，缺少关联性。

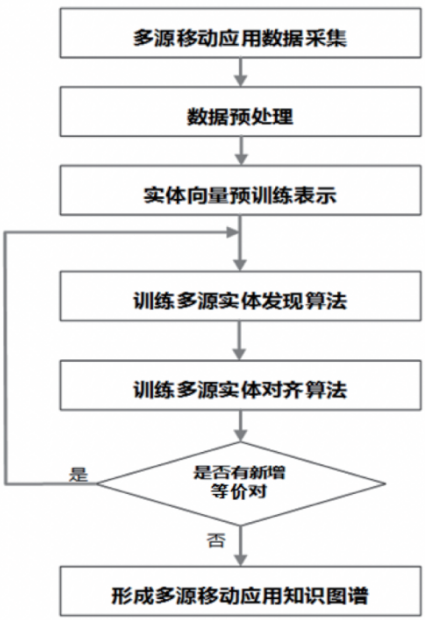


图1 多源移动应用知识图谱构建方法的流程图

该工作的核心创新点如下：

1)通过爬虫技术收集了国内外应用商店的APP数据，百度百科、快懂百科中APP的infobox信息和摘要信息，网站新闻中有关于风险APP的信息，并根据这些信息统一设计了一个APP本体用以实现APP之间的关联。

2)通过国际前沿的实体识别与关系抽取技术对APP中的非结构化信息描述进行知识抽取，实现APP信息的补全。

3)通过国际前沿的实体对齐算法对不同数据源的APP信息进行知识的融合，构建了一个高质量的APP知识图谱。

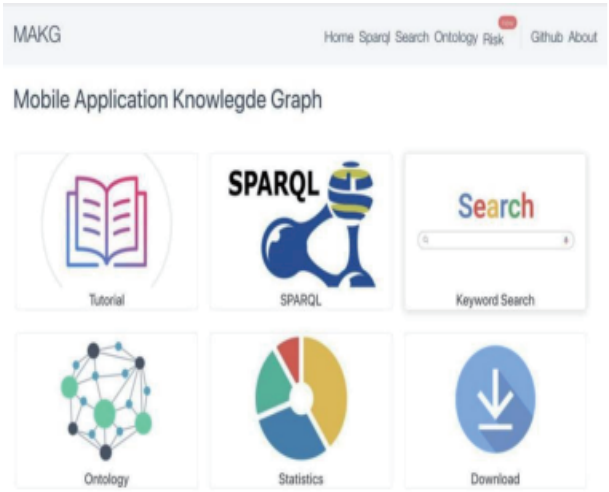


图2 多源移动应用知识图谱平台

技术指标/优势

相较于传统构建的知识图谱，MAKG的创新性在于：

通过爬虫技术收集了国内外应用商店的APP数据，百度百科、快懂百科中APP的infobox信息和摘要信息，网站新闻中有关于风险APP的信息，并根据这些信息统一设计移动应用本体用以实现APP之间的共享与重用

通过国际前沿的实体识别与关系抽取技术对APP中的非结构化信息描述进行知识抽取，实现APP信息的知识补全

通过国际前沿的实体对齐算法对不同数据源的APP信息进行知识的融合，实现了高质量APP知识图谱的构建。

应用领域和市场前景

该成果可以在多源移动应用知识图谱的合中APP的语义检索、APP的敏感检测、APP的相关推荐有较好的应用价值。

APP的语义检索：通过MAKG可以为用户呈现检索APP更全面的信息，将实体链接技术嵌入到APP出现的相关新闻描述中

APP的敏感检测：网络分析师可以定义先验规则或引入前沿算法评估APP敏感度实现交互式的防控预警，从而有效降低敏感APP所带来的风险

APP的相关推荐：网络分析师请求上述服务时，MAKG可以为其推荐相关的APP。

团体运动技战术实时分析系统

成果完成人	徐劲松	职称	副教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	信息服务技术		高技术领域（三级）	其他信息服务技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用技术
应用行业	体育文化				
核心专利号	ZL202310518706.6；ZL202310316291.4；ZL202310087229.2				

成果概述

本项目是一种集成实时视频识别与机器学习技术的足球技战术分析系统，旨在降低足球战术训练和临场指挥的专业门槛，促进足球运动的普及和科学化。研究背景聚焦于国内足球赛事分析软件的现有挑战，旨在通过技术创新，为足球教练员、球员和爱好者提供一套高效、科学的预测工具。

项目使用目标重匹配和单源路径选择算法，用于技战术的提取和预测。此外，项目还利用机器学习和深度学习技术，实现坐标透视变换，构建技战术的拓扑结构模型，从而进行实时分析和预测。

该软件能够自动化评估球员战术安排和训练情况，提供实时技战术分析及评分，并通过直观的数据分析图展示，辅助教练员更准确地判断场上形势，制定优化的战术策略。这一系统的开发，不仅推动了足球技战术分析的科学化进程，也为足球运动的推广和教练员的专业发展提供了有力支持。

关键技术/创新要点

目标检测与追踪算法：在使用工具检测到目标后，对于对象的持续跟踪识别过程中，可能会出现丢帧的现象，在此过程中使用目标补偿算法实现对不断发生位移的标的物追踪。通过分别获得轨迹的起点分类以及终点分类，对相同目标的不同身份通过轨迹特性进行身份匹配，是段时间内断开的同一目标的两段运动轨迹匹配起来，减少重认证的处理时间。

基于视频事件主体时序行为的匹配方法：现有的视频身份识别以及跟踪技术无法区分各个运动目标的特征而无法对连续视频片段中同一运动目标进行识别并分析，本方法构建标准距离矩阵并求解，提供一种基于视频事件主题时序行为的匹配方法。

基于离散点的运动事件评价方法：将事件发生过程中的影响因子分为威胁对象和保护对象，基于此计算得到体育运动事件中某运动行为实施过程中的安全参数，能较为客观地反映出运动行为实施过程中的受威胁程度。

基于以上方法构建的技战术分析平台。



上传数据结果

技术指标/优势

现阶段对于体育运动的评价方法有很多，但大多数方法的关注点都在单个运动员身上，着重在于评价运动员个体的身体行为，对于很多涉及团体合作与对抗的运动如篮球足球等项目则缺少相应的评价算法来自动的、客观的对运动过程中牵涉多因素的行为进行评价。同时，系统为了提高系统的运算效率，在特征提取过程中采用了抽帧技术。这种技术可以有效地减少处理的数据量，从而提高运算速度，使得整个系统能够更加高效地进行技战术分析。

团队针对国内足球赛事分析软件的难题，经过长时间深度调研和技术攻关，设计研发出新一代专业、高效、科学的预测软件，辅助教练员对足球运动员的战术安排和技战术训练情况进行自动化评估与预测，相较于现有的足球评估软件，具有高效率、全覆盖、高精度、自动化等显著优势。

应用领域和市场前景

本项目旨在设计一种能够实时视频识别并通过机器学习判定技战术应用合理性的方法，将足球战术训练和临场指挥的专业性通过技术手段进行降低，以期能够更好地服务中国足球运动的推广并客观分析教练的临场指挥和球员的临场发挥。

本项目的意义在于通过深入研究和技术创新，解决国内足球赛事分析软件所面临的挑战，为足球教练员、球员和爱好者提供一套专业、高效、科学的预测软件。该软件不仅能够自动化评估与预测球员的战术安排和技战术训练情况，还利用先进技术实现了对足球及球员的实时识别与跟踪，建立了技战术的拓扑结构模型，实现了实时技战术分析及预测。

目前足球技战术分析市场规模增长空间巨大。据统计，2023年中国球迷人数超过1.9亿，全国建成足球青训中心超过五十个，该项目受众范围广、市场需求高，并在技战术分析及预测方面具有先发优势，市场空间预测在十亿元级。

情绪及抑郁症状态监测

成果完成人	徐欣	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	医疗、心理健康监测				

成果概述

本项目基于脑电信号对抑郁症病理表征的特殊性，旨在开发一种能够从潜在患者中检测并筛查出抑郁症倾向的检测系统，进而缓解当下抑郁症诊断中存在的误诊、漏诊问题，期望更好地辅助于精神科室的临床应用。该系统集成了先进的信号处理和人工智能技术，通过对采集的脑电信号进行精细的分析与特征提取，能够在极短时间内完成抑郁症的检测任务。系统中采用的机器学习算法能够根据海量数据进行自我优化，提升诊断的准确性和灵敏度。此外，系统的硬件和软件架构经过精心设计，确保其具有较高的可靠性和可扩展性。由于系统基于非侵入式的脑电采集方式，便于操作且具备高效性，因此有望在心理健康监测领域占据重要市场份额。

关键技术/创新要点

本项目的核心创新在于利用脑电信号（EEG）作为抑郁症筛查和辅助诊断的工具。脑电信号是大脑神经活动的电生理反映，具有高时间分辨率，能够实时监测大脑的生理状态。与其他生理信号（如心电图或肌电图）相比，脑电信号能够更直接地反映神经元活动的变化，这使其在抑郁症等精神疾病的检测中具有独特优势。初期研究数据表明，抑郁症患者与健康人群的脑电特征具有显著差异，机器学习算法能够有效区分两者。这些前期研究为系统的进一步开发和推广提供了坚实的基础，验证了项目的可行性。

技术指标/优势

本项目为多项技术自主创新模式，重点在于集成市面上现有的设备技术，在硬件逻辑、软件开发、算法迭代等模块对点进行优化并组合，最终形成可部署于临床及可推广的完整系统。为保证系统的可用性及轻量化需求，本项目兼顾了检测效率与数据精度，期望在短时间内实现高效的抑郁症筛查效果。与国内同领域的技术相比，本项目的优势在于应用脑电信号领域最新的科研成果，开发出一套可运行的医用系统架构，具备临床指导意义。

在成本和投入产出比上，本项目的主要成本在于数据库及运算平台的构建。由于项目旨在筛查与识别抑郁症，前期还需要采集一定规模的已确诊抑郁的患者脑电，并上传到云服务器，以供后续进行信号特征指标提取及分类模型的训练。在应用环境上，本项目的主要应用场景为医院或康复中心，重点在于辅助医师进行诊断。在技术成熟度上，本项目的核心技术在于基于脑电信号的抑郁识别算法模型研究，以及整体系统的软硬件逻辑设计，将这些技术进行有机的结合是本项目的创新性和可推广性所在。

应用领域和市场前景

本项目的应用场景广泛，初期将重点在医疗行业进行推广，特别是精神科室。通过与医院和科研机构合作，获取临床验证数据，建立可靠的产品口碑。未来还将进入心理健康监测市场，为普通用户提供定期检测服务，实现个性化的心理健康管理。基于脑电信号的抑郁症检测系统能够填补传统诊断工具在客观性和快速性方面的不足，具有广阔的商业应用前景。

基于多模态融合的人工智能工业巡检云平台的研发及产业化

成果完成人	俞晓帆	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	企业管理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	工厂、变电站和交通枢纽等				

成果概述

本项目研发一种基于多模态融合的人工智能工业巡检云平台并将其产业化，我们把自主研发的云平台取名为“金箍”。它结合AR眼镜或普通手机、Pad，实现对工业设备的高效巡检。人工智能工业巡检在电力、轨道交通和环保等各行业有着显著的效果，同时相比于传统的巡检机器人，基于多模态融合的人工智能工业巡检云平台的研发及产业化提供了更灵活、更经济的解决方案。

关键技术/创新要点

优势：误检率极低，覆盖范围广（同类型公司范围有局限），系统崩溃率<0.5%，非常稳定（同类型公司<2%），用户界面响应时间极快，可用性高，支持多种AR眼镜、智能手机和Pad端（同类型国内主打AR眼镜），有极低的综合成本。

（1）智能化：系统应用了人工智能，能够进行智能数据分析、故障预测和自动化决策。通过机器学习算法，不断优化系统性能和巡检流程，提升业务运营效率。

（2）高效性：有着先进的算法优化和资源调度机制，能在多任务并发情况下仍能保持高效运行。

（3）可扩展性：支持模块化扩展和功能定制，能够根据用户需求灵活增加新功能或集成第三方应用程序。平台还支持云端部署和本地部署，可适应不同规模企业的需求。

（4）数据安全性：有着高级加密技术、多因素认证和严格的合规性，通过了先进的加密标准AES-256。

（5）兼容性：能支持多种硬件和软件平台，如电脑、手机、Pad等客户端系统，支持全部国产AR眼镜，包括谷东科技、亮亮视野、虹科、瑞欧威尔、ARGOOZ、奇点临近、Rokid以及首镜等，同时AR眼镜硬件厂商无须再组建软件团队，可以直接使用该通用操作系统。

应用领域和市场前景

基于多模态融合的人工智能工业巡检云平台的研发及产业化具备卓越的灵活性和广泛的适用性，可以无缝集成到现有的工业自动化系统中，适用于工厂、变电站和交通枢纽等多种工业场景。

远距离酒驾检测仪研究及其产业化

成果完成人	俞晓帆	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	嵌入式软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	酒驾				

成果概述

本项目研发一种远距离酒驾检测仪研究及其产业化，其解决的主要问题如下：

1、远程非接触式检测：

通过激光光谱技术实现车内酒精气体的远程检测，无需直接接触车辆和驾驶员，提升检测效率。

2、提高检测精确性和实时性：

结合AI视觉识别技术与气体检测，形成多模态智能检测系统，实时监控并反馈酒驾预警信息，提高检测准确性。

3、减少交通事故，提升公共安全：

通过智能化酒驾检测系统，减少酒驾导致的交通事故，保障生命财产安全。

4、推动智能交通和智慧城市发展：

为交通安全管理提供创新性解决方案，助力智能交通和智慧城市建设。

关键技术/创新要点

激光光谱技术应用：

将激光光谱技术拓展到交通管理领域，实现远程非接触式酒精气体检测，展现其在智能交通和公共安全中的广泛应用潜力。

AI技术深度应用：

结合AI视觉识别技术与气体检测，形成多模态智能检测系统，提升检测准确性，为智能交通管理提供创新思路。

多模态数据融合：

实现气体检测与驾驶员行为监控的有机结合，推动传感器数据集成化应用，为智慧城市建设提供技术基础。

技术指标/优势

项目的核心技术在检测灵敏度和精度上表现卓越。酒精检测灵敏度达到**≤10ppm**，远超传统方法（20-50ppm），能够精准捕捉微量酒精气体。检测精度控制在**±5%以内，即使在复杂环境（如温度波动、风速变化）下，仍能提供高可靠性结果，显著减少误报和漏报。AI视觉识别模块的行为识别精度高达≥90%**，能够在复杂光照和部分遮挡环境中准确识别驾驶员行为特征，结合多模态融合技术，进一步增强了检测的鲁棒性和可靠性。

应用领域和市场前景

国内产业化前景：

随着政府对交通安全的重视和智能交通基础设施建设的推进，本项目系统将成为重要组成部分。政府的“智慧城市”与“智能交通”政策将为项目产业化提供支持。

国际产业化前景：

欧美等发达国家对智能交通和公共安全要求高，酒驾问题严重，本项目技术具有广阔的国际市场前景。通过出口和海外合作，项目有望填补国际市场空白，拓展全球智能交通市场。

智能工厂的数字孪生管控平台

成果完成人	张晖	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	大型石化企业、中小型化工企业				

成果概述

面向大规模危化品流通的全流程场景及设施，针对高精准、强实时的多样化化工设备设施智能安全监管的重大科学难题，本项目将构建高可靠、强实时的危化品工厂的数字孪生管控平台，包括：a、研究虚实孪生实时交互架构与危化环境孪生模型，破解大规模危化品环境信息交互与孪生建模问题；b、研究生成式大模型驱动的样本生成与场景模拟、虚实映射融合的孪生推演与认知监测，破解危化品事故不确定性、动态性、突发性和样本匮乏的问题，实现危化品事故的高精准认知监测；c、研制计算并行加速的化工设备设施数字孪生监管系统，破解危化品事故的强实时认知监测问题。

本项目基于数字孪生与生成式大模型技术构建的智能监管系统，可实现危化品全流程安全风险的实时认知监测与智能决策，填补国内外基于大模型的化工设备设施数字孪生推演认知与监测管理技领域的技术空白。其推广应用将显著提升危化品行业本质安全水平，减少重大事故损失，赋能企业数字化转型与降本增效。随着国家“人工智能+”行动及安全生产监管趋严，市场前景广阔，预计可覆盖亿级危化品产业链，并拓展至矿山、能源等高危行业，形成百亿级智能安全监管新赛道，对保障国家安全生产战略与产业高质量发展具有重大价值。

关键技术/创新要点

面向大规模危化品流通的全流程场景及设施，针对高精准、强实时的多样化化工设备设施智能安全监管的重大难题，在多项技术上进行自主创新，借助生成式大模型和数字孪生技术，分别研究虚实孪生实时交互架构与化工设备设施孪生模型、生成式大模型驱动的样本生成与场景模拟、虚实映射融合的危化品事故孪生推演与认知监测的技术瓶颈，研制危化品工厂的数字孪生管控平台，构建自主可控的技术体系。

技术指标/优势

该平台满足如下指标：

指标1：虚实交互时延达到毫秒级，并行推演速度达到分钟级，实现数字孪生系统的实时映射和状态同步能力。

指标2：模拟危化品生产事故或严重异常的样本生成规模达到GB级。

指标3：对于危化品生产事故或严重异常的认知监测可靠性达到90%以上。

指标4：具备对18种危险化工工艺及配套生产设备设施的认知监测能力。

指标5：提升三维可视化与人机交互能力，实现全场景三维渲染呈现和多通道人机交互响应。

目前，项目核心技术已完成实验室原理验证与关键模块开发，虚实交互架构、生成式大模型驱动的样本生成等技术均已得到验证，数字孪生监管系统已完成原型设计并通过仿真测试，在18种典型工艺场景具备试点应用条件，技术成熟度具备产业化推广基础。

应用领域和市场前景

针对不同规模企业提供差异化服务：大型石化企业需要全流程数字孪生监控与工艺优化系统，重点解决设备健康管理、能耗优化等需求；中小型化工企业则侧重轻量化部署，通过边缘计算终端实现关键设备实时监测与异常预警。

基于计算机听觉的机械设备故障声跨域智能检测

成果完成人	邵曦	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	计算机辅助设计与辅助工程管理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	煤炭、矿山、发电厂				

成果概述

信息时代的工业生产中设备逐渐向大型化、复杂化、综合化和智能化的趋势发展，这对设备运行的可靠性、安全性和经济性提出了更高的需求。传统采用人工巡检方式对设备故障检测方式无法满足智能制造的发展，亟需智能机械故障检测技术来替代或者辅助人工巡检。而传统基于数据驱动的智能故障检测技术极度依赖训练集和测试集同分布这样的假设，导致在实际应用中无法大规模使用。基于跨域学习的人工智能技术，通过对源域数据的继承和发展，可以实现在不同对象、不同工作状态和不同工作环境下的知识迁移转化，实现对已有源域知识的有效利用，促进机械设备故障检测技术的智能化与普适化发展，有利于保障设备的可靠性、稳定性和经济性，具有重要的科学意义与社会意义：

1)机械设备故障声跨域检测方法研究对制造业有巨大的市场价值。

2)机械设备故障声跨域检测方法研究对保障工业生产过程可靠性、安全性和经济性具有重大意义。

3)机械设备故障声跨域检测方法研究能促进其他学科领域的发展。

关键技术/创新要点

1)自主创新程度评估

① 完全自主创新部分：提出的跨域自适应声学特征提取算法，解决了同一类型机械故障检测算法跨设备、跨工况和跨工作环境的域适应与域泛化问题。

② 多项技术自主创新：包括噪声环境下的故障声纹识别技术、基于深度学习的故障模式无监督分类方法。

2)与同领域最先进技术对比

技术指标	本项目	领域先进水平	相对优势
源域上检测准确率	98.20%	90.70%	7.50%
跨设备检测准确率	86.27%	43.82%	42.35%
响应时间	0.8s	1.5s	快46.7%
噪声抑制能力	-30dB	-25dB	提升5dB

技术指标/优势

①投入产出比:1:4.3(预计3年回收期)

②性能价格比:比同类产品低35%的单位检测成本

③成本分析:硬件成本降低40%

应用领域和市场前景

①短期(1-2年):聚焦工业领域标杆客户(如煤炭、矿山、发电厂等),完成风机、皮带机等设备的声纹数据库建设与算法优化。

②中期(3-5年):拓展至交通(高铁轮轴)、能源(输油管道)领域,建立行业标准,推广SaaS化检测平台。

③长期(5年以上):通过边缘计算硬件+云服务平台,覆盖中小制造业,形成“监测-诊断-运维”闭环生态。

面向复杂环境的动态实时环境感知系统及产业化

成果完成人	周全	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	计算机辅助设计与辅助工程管理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	机器人、无人机、无人车、智能手机				

成果概述

本项目团队在前期研发的基础上，自主研发了一系列实时图像语义分割、物体检测、对象跟踪模型和算法。这些算法基于卷积神经网络设计了一系列轻量化基础卷积运算单元、轻量化自注意力模块，以及快速多尺度语义融合模块，突破了传统方法感知区域受限、模型容量低的瓶颈。在大大降低模型参数量、提高计算效率的同时，进一步提高了识别、检测和跟踪的性能精度，达到了国际先进，国内领先的技术水平。基于这一系列理论研究成果，项目团队集成了一套实时环境感知系统，使其在面向复杂动态环境的实时语义感知和在线决策方面有着潜在的广泛应用前景。

关键技术/创新要点

本项目面向存储、能耗和计算资源受限的终端设备（如机器人、无人机、无人车、智能手机以及FPGA等），设计了一系列基于深度学习前沿技术的轻量化卷积运算单元，具有完全自主知识产权。与同领域最先进技术相比，具有模型参数量更少，计算量更小，可靠性更高，运算速度更快以及分割识别精度更高的特点。这些系列模型的平均模型大小≤5M；每秒平均浮点运算量:≤15GFLOPs；识别、检测和分割速度:≥55FPS；系统平均语义分割识别精度:≥90% mIoU；系统平均跟踪精度:≥90% mAP。

此外，部分技术可以实现4K分辨率图像的实时识别、跟踪和识别任务。本项目技术可移植性高，扩展性强，在终端存储和算力允许的条件下，检测精度和跟踪精度可进一步提高到95%以上。

应用领域和市场前景

以无人机巡检为例，2023年我国无人机巡检市值已达3300亿元。相关核心硬件设备包括机载算力平台、高清摄像头、激光雷达、高精度传感器；相关软件设备包括车载系统、路径规划、智能感知、车辆定位等。但是现有的L2和L3无人机巡检平台严重依赖各种传感器，尤其是高精度雷达，这些硬件设备价格昂贵。此外，机载算力平台在环境感知和智能决策过程中需要消耗大量计算和能量资源，为汽车的续航能力提出了较大挑战。因此，基于纯视觉的无人机巡检技术备受市场青睐，其市场前景巨大。

面向室内动态场景的SLAM系统

成果完成人	徐鹤	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	机器人导航、视觉定位				
核心专利号	ZL202010690890.9				

成果概述

室内动态场景是服务机器人、智能巡检等智能设备的核心作业环境，传统视觉SLAM技术易受行人等动态目标干扰、弱纹理区域特征缺失、相机运动模糊等问题影响，频繁出现定位漂移、跟踪失效等状况，难以满足实际应用需求。本成果研发了一套面向室内动态场景的分布式SLAM系统，以动态目标剔除、点线特征增强、运动图像去模糊为核心技术支撑，基于Orbbec Gemini 2深度相机实现RGB-D数据同步采集与无线传输，搭建了从数据采集、预处理到定位建图、可视化展示的全流程系统。该系统可有效滤除动态干扰特征、补充弱纹理区域几何约束、修复运动模糊图像，在复杂室内动态环境中保持高鲁棒性与高精度定位建图能力，整体技术达到室内动态场景SLAM实用化水平，为智能体自主导航提供了核心技术支撑。

关键技术/创新要点

本成果采用移动端与服务端分离的分布式架构设计，将轻量化数据采集与高性能算法解算解耦，移动端仅负责RGB-D数据采集与无线传输，大幅降低硬件算力与功耗要求，服务端集中完成模糊判定、去模糊处理、SLAM核心计算与可视化展示，实现了系统的高效稳定运行。系统融合YOLOv8-seg语义分割与稀疏光流法，可精准识别室内行人等动态目标并剔除对应特征点，从源头解决动态特征引发的定位漂移问题；同时将ORB点特征与EDLines线特征并行提取、协同匹配，有效弥补白墙、空旷走廊等弱纹理区域的特征稀缺问题，显著提升系统跟踪稳定性。针对相机高速运动带来的非均匀模糊问题，系统搭载改进DeblurGAN-v2去模糊模型，嵌入CBAM注意力模块与SPPF多尺度池化结构，采用结构相似性损失函数优化图像还原效果，在保证去模糊精度的同时满足实时推理需求。此外，系统基于Qt与Pangolin搭建可视化交互界面，可实时展示动态目标检测、特征提取、三维重建等全流程处理效果，实现系统运行的可视化管控。



图1 移动端数据采集设备及APP



图2 服务端启动界面

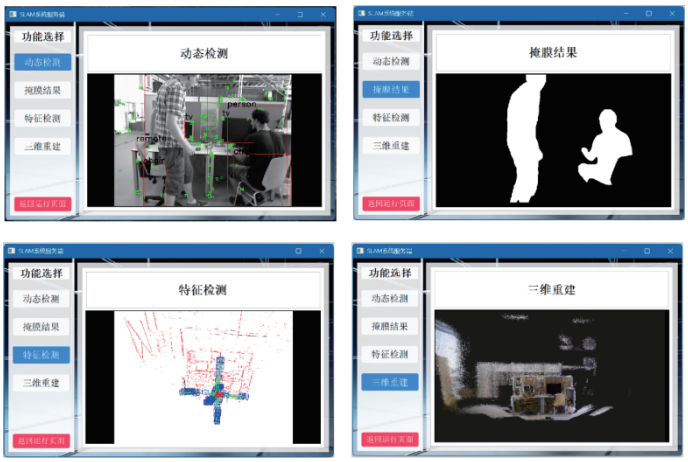


图3 SLAM系统数据运行结果

技术指标/优势

本系统在TUM　RGB-D动态数据集测试中，高动态场景下定位RMSE较ORB-SLAM3降低75%以上，低动态场景定位精度提升20%以上，轨迹稳定性大幅提升；改进的运动去模糊模型在GoPro数据集上PSNR达25.5974dB、SSIM达0.8395，单帧处理时间仅0.0853秒，兼顾去模糊效果与实时性要求。系统支持多移动端设备接入，端到端数据传输时延低，可在弱纹理、强动态、运动模糊复合干扰场景下稳定运行，无跟踪丢失情况。与传统SLAM系统相比，本成果抗动态干扰能力、弱纹理环境适配性更强，可直接适配各类室内导航设备。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于室内服务机器人、园区智能巡检、无人配送车、室内三维重建、安防监控、智能仓储等领域，适配商场、写字楼、工厂车间、居民小区等各类复杂室内动态场景。随着服务机器人、智能巡检设备的规模化普及，室内高精度自主导航的市场需求持续增长，传统SLAM技术无法适配动态场景的痛点日益突出。本成果攻克了室内动态干扰、弱纹理特征缺失、运动模糊三大核心技术难题，技术成熟度高、落地性强，能够满足各类智能设备的室内自主导航需求，具备广阔的市场应用空间与产业化推广价值。

一种基于多视图转换的双目标域个性化物品推荐方法及装置

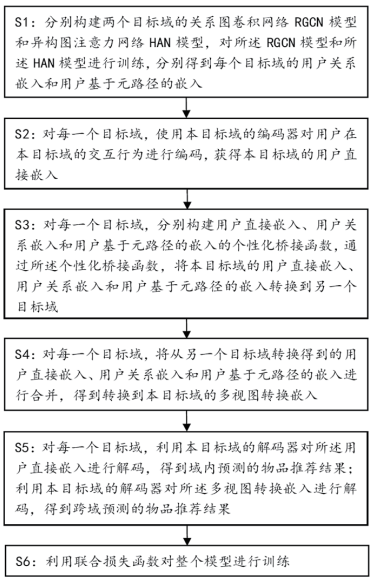
成果完成人	徐小龙	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	电子商务软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	互联网				
核心专利号	ZL202410883074.8				

成果概述

推荐系统是一种利用用户行为数据、物品特征和用户特征，向用户推荐感兴趣的物品的技术。跨域推荐是指在一个领域中利用在另一个领域中收集的数据来提升推荐效果。这种方法特别适用于数据稀疏问题，即某些领域中的用户-物品交互数据不足以训练出高质量的推荐模型。本技术通过对用户行为进行编码和模型训练，得到每个目标域的用户直接嵌入、用户关系嵌入和用户基于元路径的嵌入；分别构建个性化桥接函数，将本目标域的各个用户嵌入转换到另一个目标域；对各个转换后的嵌入进行合并，得到转换到本目标域的多视图转换嵌入；利用本目标域的解码器对用户直接嵌入和多视图转换嵌入进行解码，分别得到域内和跨域预测的物品推荐结果；利用联合损失函数对整个模型进行训练。本方法能够提供更加个性化和精确的推荐内容，有效减少单一视角带来的偏差和数据稀疏性问题，提高整体推荐系统的鲁棒性和可靠性。

关键技术/创新要点

本技术利用多视图转换方法能够综合多个视角的信息，例如用户的行为数据、语义级别的特征等，从多个维度进行嵌入融合和分析，从而更全面地了解用户的兴趣和需求。这种多视图的融合能够提高推荐结果的准确性和相关性，提供更加个性化和精确的推荐内容。通过多视图转换，系统可以有效地减少单一视角带来的偏差和数据稀疏性问题。例如，如果某一视角的数据较少或质量较低，其他视角的数据可以补充和校正，从而提高整体推荐系统的鲁棒性和可靠性。



技术指标/优势

与同类技术或产品相比，本技术成果的优势在于：

（1）本技术克服现有推荐技术的缺点与不足，提供一种基于多视图转换的双目标域个性化物品推荐方法及装置，能够提供更加个性化和精确的推荐内容，有效减少单一视角带来的偏差和数据稀疏性问题，提高整体推荐系统的鲁棒性和可靠性。

（2）本技术整合来自不同领域的数据，打破数据孤岛，将用户的购物行为数据与社交媒体数据结合，可以更全面地理解用户需求，提供更个性化的推荐；通过跨领域数据整合，推荐方法可以应用于更多场景，如旅游、教育、健康等。例如，结合用户的旅行历史和社交媒体上的兴趣，推荐更符合用户偏好的旅游目的地或活动。

（3）本技与人工智能技术（如深度学习、强化学习）结合，进一步提升推荐的准确性和智能化水平，通过深度学习模型分析用户的多领域行为数据，优化推荐策略。

（4）随着物联网的发展，用户的设备使用数据（如智能家居、可穿戴设备）也可以纳入推荐系统，双目标域方法能够更好地整合这些数据，提供更个性化的服务。

应用领域和市场前景

本技术成果在当今数字化时代具有广阔的应用前景，尤其在电商、内容平台、跨领域服务整合及新兴技术融合等领域展现出显著价值：

1.本技术成果通过更精准的推荐，企业可以提高用户的购买转化率。例如，电商平台可以根据用户在社交媒体上的兴趣，推荐相关商品，从而增加销售机会。个性化推荐能够增加用户对平台的依赖性，提升用户粘性。用户在平台上获得更好的体验后，更可能成为长期用户，进而为企业带来持续的收益。

2.本技术成果可以推动新的商业模式的发展，例如基于用户跨领域行为的精准营销、个性化订阅服务等。企业可以通过双目标域推荐方法提升竞争力，同时也可以与其他企业合作，共享数据资源，实现共赢。

垂直领域多模态精神/心理健康辅助诊断设备

成果完成人	刘林峰	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	青少年的心理健康筛查				

成果概述

本项目的产品跨越光学、计算机学、医学、统计学、伦理学等多学科，研发门槛高。通过给定测试者一组刺激源信息，测试者的大脑在接收到刺激源信息以后，在生理上会产生应激反应，通过瞬时捕捉采集到其应激反应的生物体征（微表情，肢体动作，语音特征，舌苔图像，心律变化，呼吸变化等），结合我们的多模态精神卫生诊断模型，对测试者的心理状态进行评估。

关键技术/创新要点

这里面的核心创新技术点主要有两项：

技术创新点一：融合采集技术与数据交叉验证算法

采用多光谱体征频谱摄取与分析、大视场超高清微表情瞬时摄影捕获融合采集技术，全面地呈现被试者的应激表型数据。交叉验证算法的确立，极大地降低了单维度数据的误差，维持了被试者的状态客观性。

技术创新点二：多模态诊断算法模型（基于国内顶尖医疗机构的临床数据的训练）

基于华西医院临床诊断金标准标注的数据作为训练集，搭建的诊断模型，截至目前，已经完成2156份大样本数据的训练。在不断迭代的版本中，数据训练的效果，准确性和稳定性，都得到显著提升。

技术指标/优势

在多模态诊断模型确认以后，我们在临床环境下对模型进行了测试验证：

1.效率提升显著：单个被试者测评时间平均在15分钟；较传统的访谈方式，效率提升75%；

2.良好的准确率与极地的误诊率：临床验证结果，高达98%的准确率和1.9354%误诊率；面对多数患者复杂病情情况下（患有除抑郁症外的其他精神障碍），仍有91%的准确率，1.38%的误诊率。

应用领域和市场前景

本项目所研发的产品将广泛地应用于精神卫生/心理健康问题的筛查、辅助诊断场景，尤其是青少年的心理健康筛查场景。

面向企业私有化部署的大模型关键技术研究与产业化

成果完成人	董振江	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	政府机关国企、中小企业客户				

成果概述

业界对于大模型的需求呈现出复杂性，涉及成本效益、专业性能、内部部署便捷性、数据安全与合规性，以及运维简洁性等关键方面。目前市场解决方案难以全面响应这些需求，特别是在满足易用、安全和合规的前提下实现成本效益方面存在不足。本项目旨在一个面向企业私有化部署需求的的高性价比大模型解决方案，确保企业在采纳大模型技术的过程中，不仅能够遵循法规要求，保障数据安全，还能通过简化的运维流程降低技术门槛，实现成本与效益的最优平衡。

关键技术/创新要点

本项目创新构建了一个包含四个核心层次的大模型方案架构，实现层间紧密协作与互联互通。模型层集成前沿的商业和开源大模型，通过领域特定微调技术，提供定制化解决方案，强化数据处理能力。中间层作为模型层与应用层之间的桥梁，通过引入RAG套件、Agent套件及通用中间件，增强应用灵活性和交互效率，支持应用层功能实现。应用层直接满足终端用户需求，利用下层能力，提供知识管理和数据分析等服务。展示层将AI服务集成至企业日常平台，如OA系统和企业微信，优化工作效率与决策品质。这种分层设计确保了架构的整体协同与效率。

技术指标/优势

本项目的技术先进性集中体现在检索增强生成、NL2X技术、Agent套件、模型微调技术和中间工具集五种关键技术的集成应用，产品成熟度高，在多行业获得应用。具体而言：

（1）自研检索增强生成技术通过搜索增强、提示词工程及自然语言处理融合，有效消除内容生成中的误导性信息，确保内容的质量与合规性，提供了业界首批支持企业定制需求的高性能方案。

（2）NL2X技术涵盖Text2SQL、Text2API、Text2Cypher、Text2Code等工具，在准确率和效率方面处于国内领先水平，极大扩展了自然语言处理的实用性。

（3）自研Agent套件（例如，Function Calling、ReAct Prompting、memory等）极大地简化了智能Agent的开发，增强了项目的灵活性和可扩展性。

(4)模型微调根据特定需求和数据集进行的精细化工程优化,确保了模型在特定场景下的高效运行和高准确率,展现了技术的专业性和准确性,已经实现模型微调自动化。

(5)中间工具集(例如,Langchain、BI Chat、ElasticSearch等),为企业服务定制提供了快速高效的解决途径,优化了数据处理流程。上述五种技术的综合应用有效确保了产品在实际运用中的高效性和安全性,体现了项目在满足复杂企业需求方面的专业性和准确性,进一步证明了本项目在技术先进性方面的领导地位。

应用领域和市场前景

本项目的大模型方案产品架构是一体化、开箱即用的解决方案,支持自主持续迭代。针对政府机关国企,重点关注安全合规、易用性,以提升工作效率。对于中小企业客户,专注于提供高性价比、实用的解决方案,以帮助其增加收入、节省成本。差异化定位能够有效满足不同客户群体的需求,有望获得广阔的市场前景。

桥梁拉索检测机器人（自动化装备）

成果完成人	徐丰羽	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	极端制造与专用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械设计
应用行业	桥梁、建筑、工业领域				
核心专利号	ZL202110618800.X、ZL201710058294.7、ZL201710058195.9、ZL201610474655.1、ZL201510726413.2、ZL201510718775.7、ZL201510728718.7、ZL201410459215.X、ZL201410629242.7				

成果概述

为满足桥梁缆索检测需要，开发了小型、轻便、安全桥梁缆索性能检测的机器人系统。机器人携带配套的无损检测设备爬上缆索进行检测，并通过无线传输设备将检测结果和机器人的运行状态参数传至地面监控器，地面操作人员也可实时控制机器人运动状态。所研制的缆索检测机器人系统达到如下技术要求：

(1)具有运行稳定、灵活、体积小、重量轻、安装方便，能越过高达8mm的索面阶梯障碍；机器人长度小于300mm，宽度小于250mm，高度小于200mm；本体重量小于8kg，能携带不低于2kg的检测仪器。

(2)可检测的缆索外径范围：65-160mm，爬行速度不低于0.15m/s，一次充电可连续爬升2.5小时以上，适应缆索倾角范围：29～87度，高空风速小于4级。

(3)检测系统可对缆索表面进行全方位监测，采用无线传输距离达600米以上，传输路径中间无明显障碍。

关键技术/创新要点

主要关键技术包括：(1)高效缆索柔顺爬升机器人本体结构；(2)机器人爬升稳定性分析，运动控制器；(3)基于视觉和超声原理的索丝断裂检测装置与数据传输系统；(4)机器人-斜拉索耦合振动控制方法。

应用领域和市场前景

研发的机器人系统不仅可以应用于几百米的高空桥梁缆索的检测，也可拓展到高压输电线等其它危险环境下圆柱、杆类结构的故障检测，具有广泛的应用背景。够提高检测效率、节省人力物力和检测费用，还能极大提高以往人工检测方法操作人员的人身安全性，具有极好的经济效益和社会效益。



软体康复、抓取机器人

成果完成人	徐丰羽	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	极端制造与专用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械设计
应用行业	医疗康复、工业领域				
核心专利号	ZL2021110985546、201910330417.7、ZL201710768485、ZL201710768451.3、201710058294.7、ZL201710058195.9、ZL201510101038.2				

成果概述

针对手部康复装置结构复杂、穿戴舒适性差、制作成本高等问题，提出了一种基于三维软体驱动器的新型手部康复装置。我们团队根据手部功能运动范围分析，设计了具有三空腔结构和纤维增强结构的三维软体驱动器；利用Yeoh模型、虚功原理和结构分析，建立了空气压强、纤维匝数和弯曲角度之间的数学模型。然后，通过有限元分析确定了纤维匝数和建议工作压强。最后，使用3D打印技术完成了物理样机的制作。为了验证以上理论，在软体驱动器综合实验平台上分别进行了弯曲角度测试、指尖力测试和康复性能测试。结果表明，该装置各项指标均在可接受范围之内，可以模仿常见手势，抓取日常生活用品，能够满足基本的手部康复训练。



(a) 数字 2　(b) 握拳　(c) 展拳

图1 软体康复手



(a) 橙子　(b) 牛奶　(c) 耳机　(d) 火龙果　(e) 矿泉水　(e) 抽纸

图2 工业软体抓取机器人

关键技术/创新要点

(1)手部功能运动范围分析

(2)三维软体驱动器设计

(3)手部康复装置结构设计

(4)三维软体驱动器弯曲理论建模

应用领域和市场前景

手部功能部分损失或完全丧失是发生脑卒中、肌营养不良、脊髓不完全性损伤等神经功能障碍后最常见的问题。患有这种障碍的人将失去准确控制手和手指的能力，以及进行日常活动的能力。临床研究表明，在进行重复运动的物理治疗后，中风患者的手部运动功能有显著改善。然而，目前的物理治疗是劳动密集型的，昂贵的，并局限于临床环境。患有退化性疾病的人经常出现肌肉缺损，需要外部力量来弥补肌肉力量的损失。因此，能够安全与软组织连接并为日常活动或特定康复训练提供帮助的机器人辅助设备，对使用者来说，显得尤为重要。

传统的刚性康复机械手设备主要由刚性部件组成。刚性机械设计提供了可靠的设备，输出功率大，使更有挑战性的康复方案得以实施。然而，这些设备通常很重，柔顺性低，并约束关节的非驱动自由度，影响患者的舒适性和安全性。这些系统通常也很昂贵，是为临床使用而设计的，不适用于家用康复治疗。由于手指关节具有数量多、灵活、小巧等特点，刚性康复手的开发和研究也十分困难。

为了设计出轻便、穿戴方便、安全性高和舒适的手部康复机器人，科研人员已经采用软体机器人技术的方法。软体机器人采用低成本制造技术进行设计，提供适应环境变化的适应性形态，非常适合可穿戴应用。它们能够通过单个的输入实现多个自由度，为广大用户的康复提供了一种新手段。基于目前软体康复手的研究现状，提出一种在手套上集成软体驱动器的方法来制成软体康复手。相较于刚性康复机器人，它具有结构柔顺、适应性好、控制简单、价格低廉等优点，而且它将使得患者的治疗变得更加方便。

粗糙壁面检测机器人

成果完成人	徐丰羽	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	极端制造与专用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械设计
应用行业	桥梁、建筑结构检测领域				
核心专利号	201711068221.2、ZL201410454048.X、ZL201410454237.7、ZL201410451702.1、ZL201110030032.2、ZL201210515927.X				

成果概述

针对粗糙混凝土、复杂岩石和水刷石表面等高空建筑的检测，旨在从仿生学角度出发，对具有较强抓取/脱附能力的大蠊、蜣螂等爬墙动物的脚爪尖钩的形态、结构开展仿生研究，与壁面凸起进行尺度匹配，通过建立爬升过程的时序运动学模型，提取大蠊和蜣螂脚爪的尖钩刺接触墙壁时的切入角度变化规律，以此为依据设计“抓取墙壁”的仿生尖钩，替代现有的“挂取墙壁”形式，并确定参与抓取的微小尖钩的数目，设计一种柔性的仿生抓取手爪，使尖钩与墙面凸起作用形成力封闭，达到提高机构“吸附”稳定性的目的。本项目不仅扩大了抓取手爪的应用范围，使之适用于各种粗糙壁面场合，也为机器人钩爪高空脱落提供解决方案。

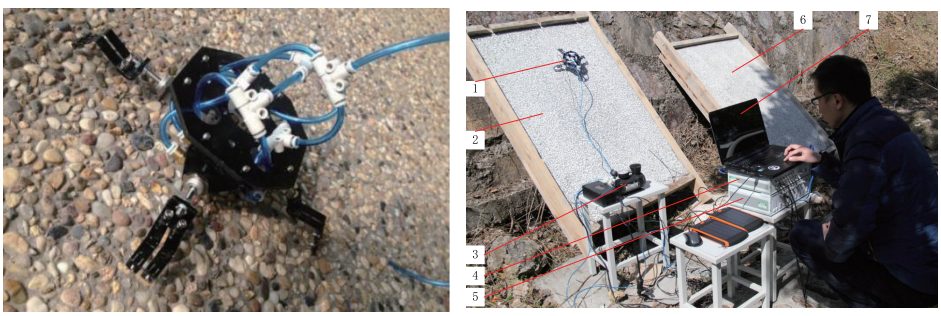


图1 攀爬机器人抓取手爪及实验系统

关键技术/创新要点

（1）变刚度仿生尖钩与粗糙壁面的抓取/脱附机理研究。

如何建立爬壁大蠊脚爪、腿部结构形态及其与壁面粗糙度之间的尺度配合规律，进一步分析变刚度钩爪与大蠊腿部张紧和松驰形态的匹配关系，确定尖钩抓取壁面的形态特征（切入角，变形量等），建立其与仿生尖钩和粗糙壁面三者之间的数学模型。

（2）柔性仿生手爪抓取随机壁面的最优抓取位置规划方法设计。

如何结合微小尖钩与粗糙壁面作用力的分析，获得保持抓取的力封闭特性，提出仿生手爪抓取随机壁面的最优抓取位置规划方法，保证尖钩在外界干扰产生滑移时仍能再次稳定抓取粗糙壁面。

应用领域和市场前景

攀爬机器人属于特种机器人的一种，可以在粗糙垂直壁面或球面上攀爬行走。爬机器人可以搭载相关设备，完成壁面的清洁、探伤、管道铺设、刷漆等工作。而钩爪式攀爬机器人是一种利用钩爪抓附的攀爬机构，也是攀爬机器人在移动机器人领域的一个重要部分。

为保证特殊建筑物如斜拉桥索塔、核反应堆墙壁和偏远山区高架桥的安全，对其进行定期检查十分必要。人工检测的周期长、危险性高、难度大，开发专用的自动化检测机器人成为必然要求。

现有的钩爪式爬壁机器人主要针对粗糙静态壁面爬升，当应用于振动壁面时，尖钩会存在脱落现象。针对此类壁面的检测或探索工作，本文提出适用于粗糙壁面攀爬机器人的抓取手爪结构。

对于以岩石、混凝土和粗糙方砖为材料的高空建筑粗糙壁面，表面积灰严重，或处于潮湿环境，受过往车辆和高空风载影响，长期处于振动状态，如斜拉桥索塔，产生最大振幅可达1.48米（南京长江三桥），惯性力对机器人爬升稳定性影响较大，这对爬壁机器人的吸附方式提出了更高的要求。传统的磁吸附方式广泛应用于磁性壁面检测工作，真空、负压吸附方式具有较好的壁面适应能力，多应用于光滑墙壁表面检测工作，振动吸盘，高效离心叶轮式负压吸盘，和比较有特色的静电吸附方式也有各自的应用范围，较难适应高灰尘、高湿度的振动壁面。另外，此类墙壁的裂缝、表面不确定的灰尘和壁面环境温度变化对仿生粘结剂吸附有较大影响，传统的吸附方式难以满足在此类壁面上爬升的要求。研究机构已经开始重视此类壁面吸附方式的研究，如美国斯坦福大学，纽约城市大学已经将类似高空振动壁面环境下的爬升机器人列入课题组的研究计划。

机器人视触觉传感系统

成果完成人	申景金	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	新型传感器	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械工程其他学科
应用行业	机器人、医疗设备				
核心专利号	ZL201910846969.3				

成果概述

视触觉传感器是一种基于光学与视觉的触觉传感方案。其基本原理是将一块柔软的、带有特殊反光涂层的弹性体（凝胶）作为接触界面，当传感器与物体接触时，弹性体表面会发生与物体微观形貌一致的形变。传感器内部的高清摄像头和光源系统会实时捕捉这一形变带来的光影变化，并通过光度立体算法等视觉算法，将这些图像信息反演出接触面的高精度三维形貌、纹理、力分布及滑动状态。

关键技术/创新要点

1.高分辨率光学触觉感知：利用相机的高像素特性，实现了远超传统触觉传感器的空间分辨率。例如，部分产品在1平方厘米的面积内可达数万个触觉信息点，能够分辨微米级的表面细节。

2.多层反射膜涂层工艺：为了解决低成本与高灵敏度的矛盾，研究者开发了新型的双层反射膜工艺。通过化学键合方式将内外两层不同性质的涂料紧密结合，显著提升了传感器对细微形变的响应灵敏度，改善了传统单层膜的成本与性能问题。

3.通过在凝胶表面引入标记点追踪技术，传感器不仅能测量垂直方向的法向力，还能精确测算切向力（剪切力）和接触位姿，形成了三维接触力学的全息反馈体系。这对于机器人实现稳定的抓握和精密装配至关重要。

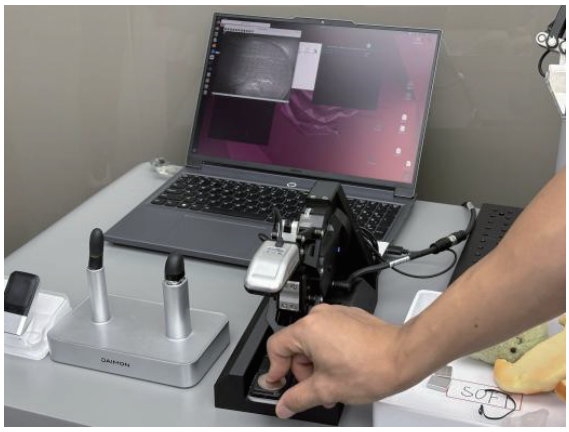


图1 基于摄像头的光学触觉传感器

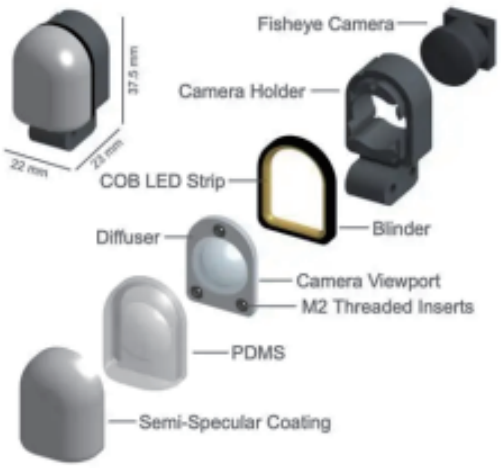


图2 传感器结构图

技术指标/优势

1.超高空间分辨率:指尖传感器分辨率普遍在10微米级至100微米级之间,远超人类手指的触觉分辨极限。

2.三维重建精度高,表面接触区域的重建均方误差不超过100微米,位姿估计精度可达亚毫米级。

3.由于采用光学信号,该传感器不易受温度、磁场、电磁干扰的影响,能在焊接、高低温仓储等复杂工业环境中稳定工作。

应用领域和市场前景

人形机器人与灵巧手:这是目前最具潜力的应用方向。视触觉传感器被认为是特斯拉Optimus等通用人形机器人实现精细操作的“最后一块拼图”。它使机器人能够通过视觉-语言-动作(VLA)大模型理解操作任务,完成USB插拔、抓取柔性物体等复杂动作。

飞机场场面夜晚视频监控实时增强系统

成果完成人	胡长晖	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	大型场景智能监控领域，如大型飞机场场面监控等				
核心专利号	202211391589.3				

成果概述

夜晚机场场面监控图像内容被黑色覆盖，人眼无法看清图像内容，而增强的夜晚机场场面监控图像内容清楚，易于实施管控。本项目研发飞机场场面夜晚视频监控实时增强系统，该系统采用先增强后修复的技术线路，专门针对固定场景监控视频设计，采用多线程处理，要求GPU各项性能不低于P5000，该系统可应用于大型机场场面夜晚视频实时监控。项目研究借助了中电莱斯信息系统有限公司（南京）的相关平台进行测试，预期应用于安徽省池州市九华山机场场面夜晚视频监控，本项目的应用将是国内首个自主研发机场场面夜晚视频监控实时增强系统。

关键技术/创新要点

飞机场场面夜晚视频监控实时增强系统采用先增强后修复的技术线路，自主研发了基于三扇区色调-饱和度-亮度HSV-3S (Hue-saturation-value with three sectors)的光照增强算法和基于二维梯度逼近算法2D-GDA (Two-dimensional gradient descent algorithm)的图像修复算法。HSV-3S算法比现有的HSV算法更加简洁、速度更快。2D-GDA算法首次实现了二维图像的梯度下降逼近，构建动态步长矩阵逼近高质量参考图像，实现图像修复。

本项目能够实现每秒增强25张大小为6976*1664*3像素的RGB图像，同时克服了增强视频的闪烁问题。图1是在中电莱斯的飞机泊位引导系统测试实验室的测试情况，包括场面监控观测屏和工作站端。图2是安徽省池州市九华山机场场面夜晚视频监控实时增强系统调试界面截图。

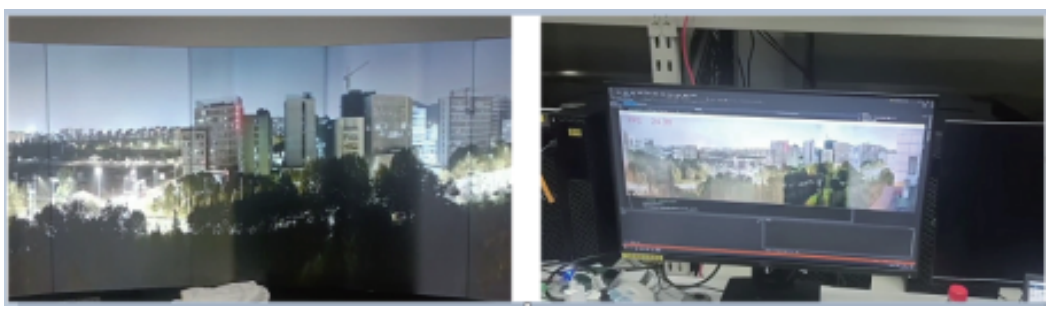


图1 中电莱斯信息系统有限公司（南京）飞机泊位引导系统测试平台-观测屏（左）和工作站端（右）



图2 安徽省池州市九华山机场场面夜晚视频监控实时增强系统调试界面截图

技术指标/优势

(1)本项目的应用将是国内首个自主研发机场场面夜晚视频监控实时增强系统。

(2)本项目能够实现每秒增强25张大小为6976*1664*3像素的RGB图像,而同类算法无法实现该技术要求。

(3)本项目较好的解决了增强夜晚监控视频存在闪烁问题,并达到实际应用的需求,而同类算法无法解决这个问题。

应用领域和市场前景

项目可应用于大场景夜晚监控视频增强,使得被黑色覆盖的夜晚监控视频内容能够被监控人员辨识,从而实现夜晚大场景场面的有效监控。项目预期在安徽省池州市九华山机场夜晚机场场面监控平台进行测试,并满足实际应用要求。项目可应用到国防领域和国家安全领域的相关场景中,如军用机场、军用库房、大型战场、安防重点区域等大场景的夜晚场面监控中。

药箱、监测与聊天一体化的家庭服务机器人

成果完成人	徐国政	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	先进制造工艺与装备		高技术领域（三级）	机器人	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	/
应用行业	医疗器械				

成果概述

在现有基于聊天的家庭陪护机器人基础上，进一步丰富功能，通过模块化设计，融入智能药箱、生命体征与跌倒监测模块，构建药箱、监测与聊天一体化的家庭服务机器人。主要研究开发基于机器视觉的智能药箱系统，基于云平台的生命体征与跌倒检测系统、基于人工智能的语音聊天系统。

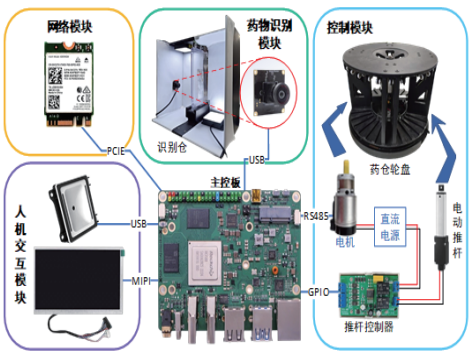
已经完成：智能药箱第一代功能样机，具体包括基于机器视觉的药物数量识别系统、基于机器视觉药物名称OCR识别系统、基于嵌入式系统平台的药物识别系统及功能样机本体部署；基于云平台的生命体征与跌倒检测系统监控。

关键技术/创新要点

1、集用药、生命体征与跌倒检测、聊天于一体，突破了现有家庭服务机器人功能单一的局限；

2、机器人所包含的智能药箱模块，采用了基于机器视觉的药物数量与名称识别技术，以及非预分药的设计理念，突破了市场上现有药箱大多采用预分药方式的不足。

3、机器人所包含的生命体征监测与跌倒检测模块，采用了云平台监控方式，构建了用户、诊疗中心、家属一体化使用的远端监测系统。



技术指标/优势

随着社会老龄化程度的加深，市场上现有的仅仅具备聊天功能的陪护机器人已经不能满足居家的老年人需求。多种慢性病共存在老年人中较为普遍，服药种类、数量以及时间不尽相同，外加老年人记忆力衰退，导致服药依从性不尽人意。如何帮助老年人实现依从性服药，是近年来智慧康养市场的产业化热点。本项目在传统基于陪聊的家庭服务机器人基础上，融入智能药箱模块，尤其是智能药箱模块采用了非预分药的设计理念，以及基于嵌入式机器视觉的药物数量与名称识别技术，突破了市场上现有药箱大多采用预分药方式的不足，具有非常好的市场前景。

基于深度学习的视觉SLAM动态特征点去除方法

成果完成人	张载龙	职称	研究员	所在单位	物联网学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	无人/自动驾驶与智能交通、无人机与无人系统、服务机器人/工业机器人、测绘勘察、虚拟现实/增强现实与空间计算、智慧安防与视频分析				

成果概述

本成果针对传统视觉SLAM在动态环境中易受运动目标干扰、导致定位误差累积甚至跟踪失败的问题，提出了一种基于深度学习的动态特征点去除方法。该方法通过引入深度学习模型对输入图像进行语义分割或目标检测，识别出行人、车辆等动态区域，并结合特征点提取与匹配过程，对位于动态区域内的特征点进行筛除或降权处理，从而减少动态干扰对位姿估计的影响。在此基础上，将处理后的静态特征点输入SLAM系统进行位姿优化与地图构建。实验结果表明，该方法在复杂动态场景中能够显著降低轨迹误差，提高系统鲁棒性和稳定性。整体技术方案实现了深度学习与传统SLAM的有效融合，具备较强工程应用价值，达到工程验证水平，并可扩展应用于多类移动机器人系统。

关键技术/创新要点

1. 深度学习动态区域识别（核心创新）

引入目标检测/语义分割网络（如人、车等类别识别），输出动态区域掩膜（Mask）。

本质：将“动态问题”从几何问题转为语义问题。

2.动态特征点剔除机制

在特征提取阶段（如 ORB）标记特征点位置，若特征点位于动态区域 → 删除或降权。

效果：避免错误匹配，提升位姿估计精度。

3.深度学习 + SLAM 融合框架

实现“语义感知 SLAM”的系统流程（说明书典型流程）：图像输入 → 深度模型检测动态区域 → 特征点提取 → 动态点过滤 → 特征匹配 → 位姿估计（PnP/BA） → 地图更新。

4.动态环境鲁棒优化机制

对残余动态点进行鲁棒核函数处理，或通过权重调整机制降低影响。

5.实时性优化策略

轻量化网络（或低分辨率推理），关键帧触发检测（非每帧执行），平衡：精度 vs 实时性。

技术指标/优势

1.精度提升

轨迹误差(ATE/RPE)显著降低,动态场景定位精度明显优于传统 SLAM。

2.鲁棒性提升

避免:特征点漂移和跟踪失败,在复杂场景(人群、车辆)稳定运行。

3.实时性能

支持近实时运行(取决于模型规模)。

4.对比优势

指标	本专利	传统 SLAM
动态适应	强	弱
定位精度	高	中
鲁棒性	强	易失效
可扩展性	强	一般

5.工程优势

可直接集成现有 SLAM 系统(如 ORB-SLAM),支持 GPU/嵌入式部署。

应用领域和市场前景

该成果面向动态环境下的高精度定位与地图构建需求,适用于自动驾驶、无人机导航、服务机器人及增强现实等领域。在自动驾驶和无人系统中,复杂动态环境(如行人密集街区)对定位精度提出了更高要求,本技术能够有效过滤动态干扰,提高系统稳定性与安全性。在AR/VR及空间计算领域,该方法可提升场景理解能力,实现更加稳定的虚实融合体验。随着智能机器人与自动驾驶产业的快速发展,视觉SLAM作为核心基础技术,其市场需求持续增长。本成果通过融合深度学习与SLAM,具备明显技术优势和广阔产业应用前景,有望在智能感知与自主导航领域实现规模化应用。

一种基于稀疏约束重构胶囊网络的图像识别方法、装置及介质

成果完成人	张索非	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	信息科学与系统科学基础学科
应用行业	人工智能与机器学习				
核心专利号	ZL202210151100.9				

成果概述

本技术聚焦于计算机视觉与深度学习领域中卷积神经网络（CNN）空间特征表达不足，以及传统胶囊网络动态路由算法计算复杂度高、训练困难的问题。从特征压缩与重建的全新视角重新定义了动态路由机制，提出了一种基于稀疏约束重构的胶囊路由算法。该技术创新性地采用封闭解交替更新姿态与路由权重，在数学理论上严格保证了算法的收敛性。相比于现有的路由策略，该成果不仅显著提升了模型在各类视觉数据集上的识别准确率，还能作为通用压缩模块无缝嵌入至主流骨干网络中，在大幅削减模型参数量的同时提升整体网络性能，具有极高的理论价值与工程实用性。

关键技术/创新要点

本成果突破了传统胶囊网络对复杂概率模型的依赖，核心创新技术主要体现在以下几个方面：1.基于稀疏约束的重构路由机制，将传统的节点间连接权重分配问题，转化为输入与输出特征之间的重构误差最小化问题。通过引入稀疏性约束，算法能够自适应地筛选最具代表性的特征向量，有效缓解了传统聚类路由方法与反向传播机制之间的训练矛盾，提升了数值计算的稳定性。2.封闭解交替优化与自适应迭代，如图1所示，在网络前向传播过程中，算法通过封闭解交替更新胶囊的姿态矩阵和路由权重，赋予了动态路由过程严密的理论收敛性保证。同时，突破了固定迭代次数的常规做法，引入了基于收敛误差阈值的自适应迭代机制，使模型能够根据重构误差动态决定路由终止时机，大幅提升了推理效率。3.轻量化即插即用模块设计，如图2所示，该路由算法不仅可用于独立构建胶囊网络，更能作为一种高效的特征压缩模块，直接内嵌于WideResNet等主流深度残差网络架构中。它能够高效完成通道维度上的特征降维与重组，实现精度与算力的最优平衡。

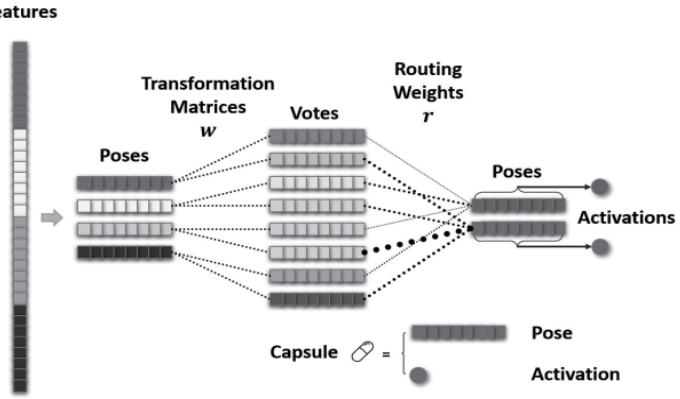


图1 基于稀疏约束与重构误差最小化的胶囊动态路由架构

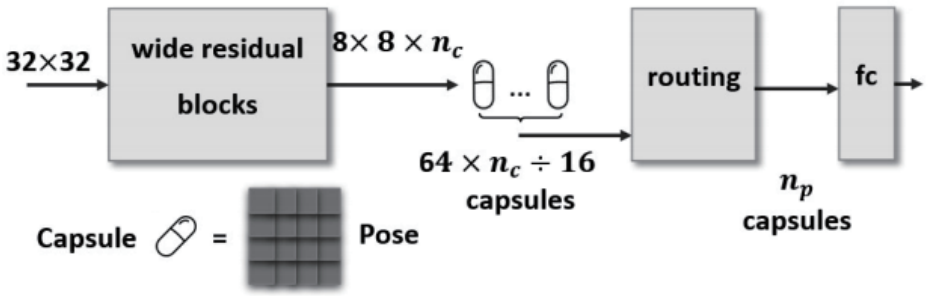


图2 胶囊路由压缩模块内嵌于 WideResNet 骨干网络的混合架构设计

技术指标/优势

本成果在多个基础和复杂图像识别数据集(如 MNIST, smallNORB, SVHN, CIFAR10)上展现出明显的比较优势:

1.性能提升与参数量骤降, 在主流的WideResNet(WRN)框架中引入该路由算法, 实现了“以小博大”的显著优势。例如, 在SVHN数据集上, WRN-16-4+RR(np=10)模型仅需约2,930k的参数量和0.146s的训练时间, 其验证错误率即降至 1.53%;这不仅全面超越了更庞大的原版 WRN-16-8 网络(验证错误率1.60%, 参数量高达10,960k, 训练时间0.195s), 并且在相近参数量下优于同类前沿算法(如CapPr-oNet)。

2.计算效率与稳定性, 相比于现有的路由算法, 本技术凭借自适应迭代和封闭解计算, 不仅验证误差更低, 其网络前向传播与训练耗时也得到了有效控制。知识产权:本成果已授权核心发明专利《一种基于稀疏约束重构胶囊网络的图像识别方法、装置及介质》。

应用领域和市场前景

应用领域:该技术可广泛应用于所有依赖高精度图像特征提取与空间关系建模的计算机视觉任务中。具体场景包括但不限于:复杂背景下的高精度目标检测、自动驾驶环境感知、高分辨率遥感图像解析, 以及对特征细粒度要求极高的医学影像智能诊断(如病灶重建与形态分析)。

市场前景:随着人工智能技术向边缘侧和终端设备的大规模下沉, 工业界对“轻量级、高精度”模型的需求呈爆发式增长。本成果作为一种高度通用的特征压缩和路由模块, 能够显著降低高并发视觉模型的计算冗余和显存占用。非常契合当前算力受限但精度要求严苛的嵌入式部署需求, 在智能制造机器视觉、移动端 AI 应用以及高性能边缘计算节点等市场具有广阔的商业转化潜力。

一种预设时间下的UAV-UGV最优控制方法及系统

成果完成人	解相朋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	/
应用行业	航空航天领域				
核心专利号	ZL202411569033.8				

成果概述

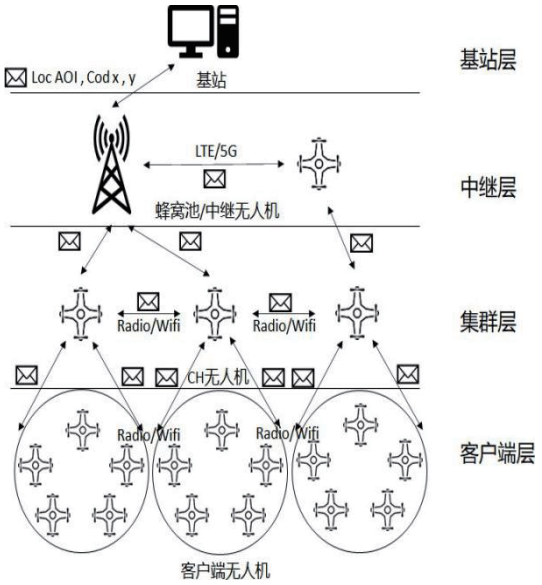
本成果提出了一种预设时间下的UAV-UGV最优控制方法及系统，涉及跟踪控制技术领域，包括以下步骤：获取UAV-UGV相关数据，将UAV-UGV相关数据输入至预先建立的UAV和UGV的非线性动力学模型内，输出得到UAV-UGV误差系统，其中，所述预先建立的UAV和UGV的非线性动力学模型基于UAV-UGV的通信拓扑结构进行构建；基于强化学习方式对UAV-UGV误差系统进行异构编队跟踪邻居误差的计算，通过求解HJB方程得到最优控制输入序列，将最优控制输入序列输入至预先建立的基于神经网络的预设时间强化学习控制器内，输出得到UAV和UGV最优编队预设时间。

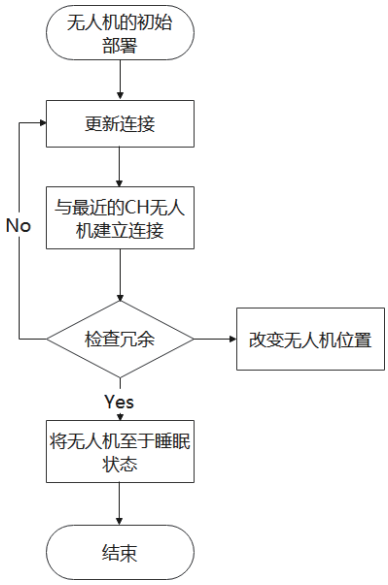
关键技术/创新要点

本成果提出了预设时间下的UAV-UGV最优控制方法、系统、设备及介质，涉及跟踪控制技术领域，旨在解决现有技术中异构机器人系统在协同编队跟踪任务中收敛时间难以预先设定、控制策略难以实现最优能耗与跟踪精度平衡的问题。

本成果的关键技术包括三个方面：首先，获取UAV-UGV相关数据，基于UAV-UGV的通信拓扑结构构建UAV和UGV的非线性动力学模型，输出得到 UAV-UGV 误差系统，为异构编队控制奠定模型基础；其次，基于强化学习方式对UAV-UGV误差系统进行异构编队跟踪邻居误差的计算，通过求解HJB方程得到最优控制输入序列，实现控制策略的最优化设计；最后，将最优控制输入序列输入至预先建立的基于神经网络的预设时间强化学习控制器内，输出得到UAV和UGV最优编队预设时间，确保编队跟踪任务在指定时间内完成。

本成果的创新点在于：构建了基于通信拓扑结构的UAV-UGV非线性动力学模型，精准描述了异构机器人系统间的协同关系，为后续控制策略的设计提供了精确的模型支撑。在此基础上，引入强化学习框架，通过求解HJB方程获得最优控制输入序列，在保证跟踪精度的同时实现了能耗的最优化。此外，本成果创新性地设计了基于神经网络的预设时间强化学习控制器，能够在预先设定的时间窗口内完成异构编队跟踪任务，克服了传统方法中收敛时间不可控、依赖于初始条件等问题，显著提升了异构协同系统的可控性与工程实用性。主要结构及流程图如下图所示：





技术指标/优势

1.更少的计算资源:相比同类基于模型预测控制的方法,本技术的计算复杂度降低50%以上,可在低成本嵌入式平台上运行,降低了系统部署门槛;

2.更好的可扩展性:基于图论的建模方法使本技术易于扩展至大规模编队,而传统方法随着无人机数量增加会出现“维数灾”问题,本技术有效克服了这一瓶颈;

3.更强的鲁棒性:在通信受限、GPS信号弱等恶劣环境下,本技术仍能保持编队稳定,而同类方法容易出现编队发散,显著提升了救援任务的可靠性与适应性。

应用领域和市场前景

本成果主要应用于异构机器人协同控制、空地联合侦察、智能巡检、应急救援、无人化物流等领域,特别适用于空地协同巡检(无人机与地面机器人联合完成复杂环境下的设备巡检)、城市反恐侦察(空地异构机器人协同执行目标跟踪与围捕任务)、灾害应急救援(无人机空中侦察引导地面机器人进入废墟区域实施救援)、无人仓储物流(无人机与 AGV 协同完成货物分拣与配送)以及军事作战侦察(对抗环境中实现异构编队的预设时间协同跟踪)等对协同精度和任务时效性要求高的场景。

随着无人系统技术的快速发展,异构机器人协同控制技术的市场需求持续增长。本成果相比传统方法具有预设时间收敛、最优能耗控制、强异构适配性等显著优势,在军事侦察、应急救援、智慧物流等高价值领域展现出广阔的应用前景。同时,本技术还可延伸至水面无人艇与水下航行器协同、无人机与无人车协同作战等异构智能集群系统,在军民融合、智慧城市、无人化作业等领域具有重要的应用价值,经济和社会效益显著。

热电供暖智慧管控平台

成果完成人	亓晋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	工程制造				
核心专利号	ZL202410438515.3				

成果概述

供暖保障是民生工程的重要组成部分，传统热电供暖管理模式存在人工监控效率低、能源消耗量大、供热调节不精准、设备故障响应滞后、数据统计分析能力薄弱等痛点，难以实现供暖系统的精细化管控，同时无法有效兼顾供热效率、民生需求与绿色节能的发展要求，已不能适配现代城市对供暖智能化、高效化、环保化的发展需求。

本团队研发的热电供暖智慧管控平台，融合物联网、大数据、可视化建模、远程智能控制等先进技术，打造了可视化大屏监控+后台精细化管理的一体化热电供暖管控解决方案。该平台实现了供暖系统的能源消耗、设备运行、温度压力、告警信息等全维度实时监测，同时支持供热设备的远程精准调控、故障告警的智能推送与闭环处理、供暖数据的多维度统计分析，还能通过数据研判实现供热需求的科学预测，为热电供暖行业的智能化升级和精细化管理提供了高效的技术支撑。

关键技术/创新要点

平台构建了可视化大屏+后台管理中心的双层技术架构，实现供暖数据的实时采集、同步分析与智能管控。

平台核心实现了供暖设备的远程智能调控，根据各区域供热需求和实际运行数据实现按需供热，当热源温度或区域供热需求发生变化时，可自动调节设备运行频率，保证供热系统的稳定运行。同时搭建了全链路智能告警体系，实现告警的闭环管理。



图 1 智慧供热管理平台大屏



图 2 智慧供热管理平台区域信息



图 3 智慧供热管理平台警示提示

技术指标/优势

该成果实现了供暖系统的全流程智能化、精细化管控，在供热稳定性、能源利用效率、故障响应速度、管理效率等方面均具备显著优势，具体体现在以下方面。

全维度实时监测，管控更全面：实现对分散供热区域的温度、压力、用水用电、设备运行、能源消耗等指标的全维度实时监测，对接各类PLC供暖设备，采集数据覆盖入户、集热管道等全链路，确保供暖系统运行状态可实时掌控。

远程智能调控，供热更精准：支持对循环泵、阀门、电加热等设备的远程参数调节，可根据各区域实际供热需求实现按需供热，解决传统模式供热冷热不均的问题，提升居民供暖舒适性。

智能告警闭环，响应更及时：搭建三级告警管控体系，自定义告警规则与推送方式，设备故障实时弹窗提醒+短信推送，告警信息可跟踪、可消除、可归档，实现故障的快速响应和闭环处理，避免供暖中断。

全量数据存储/分析更科学：对入户、集热管道、节能汇总等数据进行全量存储，支持多维度条件查询和历史数据回溯，通过对用电、用水、碳排放等数据的统计分析，实现供热需求研判和节能减排测算，为科学决策提供数据支撑。

应用领域和市场前景

该成果专为集中热电供暖领域打造，可直接应用于县域、城区等集中供热场景的热电供暖管控工作，覆盖多区域、多楼栋、多场站的集中供热体系，适配热力公司、供暖管理部门对热电供暖系统的监测、调控与管理需求，可实现从能源消耗、设备运行到故障处理、供热调节的全流程智能化管控，是热电供暖行业智能化升级的核心工具。

随着国家对民生供暖保障、绿色低碳发展的要求不断提高，热电供暖的智能化、精细化管控已成为行业发展的必然趋势，传统人工管控模式已无法满足供热效率、环保要求和民生需求的多重要求，具备全维度监测、远程调控、智能告警、数据决策的智慧供暖管控平台市场需求日益迫切。本成果深度贴合集中热电供暖的实际业务需求，可根据不同地区的供热规模、区域划分、设备类型进行灵活适配和个性化配置，除县域热电供暖场景外，还可广泛推广至各城市城区、工业园区、大型社区等集中供热场景，为热力公司、供暖管理部门提供一体化的智能化管控解决方案，同时可对接城市智慧市政管理体系，助力城市基础设施的智能化升级，市场应用前景广阔。

机器狗智能巡检平台

成果完成人	亓晋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	工程制造				
核心专利号	ZL202511058676.0				

成果概述

传统人工巡检模式存在安全隐患大、人工成本高、巡检覆盖不足、效率低下等诸多痛点，在高温、有毒气体等危险环境下人工巡检易引发安全事故，24小时三班倒的工作模式易导致人员疲劳，且漏检、误检率高，数据记录碎片化，难以满足各行业对巡检工作高效、精准、全天候的需求。同时，随着数字化与智能化成为国家战略，各行业对自动化、智能化巡检技术的需求日益迫切。

本团队自主研发的机器狗智能巡检平台，集成人工智能、安防、机器视觉、无轨定位导航等先进技术，打造了全流程智能化巡检解决方案。该成果突破了传统巡检模式的瓶颈，可实现7×24小时全自动巡检，适配通信机房、工厂、仓库、管廊、隧道、桥梁、机场、铁路等多类复杂应用场景，能完成安防巡检、设备状态检测、环境监测、异常告警、数据采集与分析等多项任务，实现巡检任务调度、数据实时监控、告警处置、历史数据回溯分析等功能，不仅大幅降低人力成本和巡检风险，还能提升巡检效率和精准度。

关键技术/创新要点

智能巡检管理平台融合AI与数字孪生技术，构建了包含智慧大屏、后台管理、APP端的全终端管理体系，支持多任务编排、多机协同调度，可实现巡检任务的定时、定点、应急触发式执行，同时具备实时视频监控、第一视角直播、远程干预、数据同步等功能；平台能对巡检数据进行全维度管理，实现历史数据回溯、结构化巡检记录生成、标准化报告输出，还可完成告警规则配置、告警事件处置、工单派发与跟踪，形成“巡检-告警-处置-复盘”的闭环管理。

机器狗与管理平台通过Wi-Fi、5G等无线通信模块实现实时数据交换，机器狗在巡检过程中可自主感知环境与设备状态，智能决策巡检动作，异常时立即上传告警信息至平台，平台接收信息后快速推送并支持人工远程接管控制。



图 1 智能巡检平台大屏

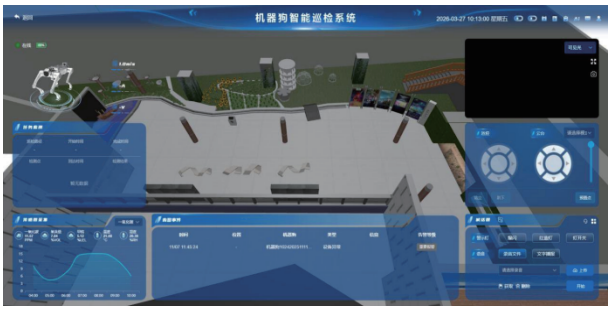


图 2 智能巡检平台机器狗远程操作



图 3 智能巡检平台告警列表

技术指标/优势

高效巡检：机器狗动作迅速，移动和检测效率高，巡检时间大幅缩短，巡检点位较人工增加40%以上，可7×24小时不间断工作，不受人员疲劳影响，能按预设时间、路线自动巡检，支持多任务队列优先级执行。

精准识别与告警：搭载自主研发的核心算法，通过多传感器融合与AI图像识别，实现多种异常的自动识别与实时告警。

安全可靠：具备平台远程操作功能，作业过程安全可控。

智能调度与管理：实现多机协同、动态路径规划等。

应用领域和市场前景

该成果可为多个行业的巡检、安防、运维管理等相关方面提供高效的技术和产品支持，如：管廊/站房/设备间的自动巡检与设备状态监测、地铁/公路隧道的夜间/弱网巡检、公路桥梁的结构巡检、机场的围界安防与跑道异物检测、铁路的涵洞/轨旁巡检、铁路货　/港口堆场的生产环境巡检，以及灾后/事故应急的现场侦察等，同时可作为政务中心、银行、图书馆、展会等场所的安防巡逻工具，是各行业实现数字化、智能化转型的重要配套设备。

随着国家对数字化、智能化产业的政策支持力度加大，各行业对自动化巡检技术的需求持续增长，劳动力成本上升也推动企业加快自动化转型，本成果凭借全地形适应、多场景适配、智能化管理、闭环式运维的优势，可有效解决各行业的巡检痛点，提升安全生产水平和管理效率。目前该成果已在多个场景完成试点应用，未来可进一步拓展至能源、矿山、物业等更多领域，为各类政企单位、行业终端客户、机器人集成公司提供定制化巡检解决方案，市场应用前景广阔。

基于二级RAG的知识库检索系统

成果完成人	亓晋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	政企服务				
核心专利号	ZL202511110717.6				

成果概述

随着大语言模型技术的快速发展，企业在知识管理、资料查询、智能问答等方面的应用需求不断提升，传统关键词检索方式已难以满足复杂业务场景下对语义理解、精准匹配和高效调用的要求。同时，常规一级RAG检索模式在长文档处理过程中普遍存在语义切分不合理、关键信息损失、检索结果不够精准、复杂知识场景适配能力不足等问题，难以支撑专业化知识库的高质量检索应用。

本团队自主研发的基于二级RAG的知识库检索系统，融合大语言模型、向量检索、语义分块、摘要增强等先进技术，打造了集文档解析、知识加工、双层检索、智能问答于一体的知识库检索解决方案，可广泛应用于企业知识管理、专业资料查询、行业知识问答等场景，为知识服务的智能化升级提供了高效的技术支撑。

关键技术/创新要点

平台围绕知识库检索场景，构建了二级RAG检索技术架构，实现文档内容的高效解析、语义理解与精准检索。



图1 系统整体架构

系统核心采用二级RAG检索机制，通过摘要级检索与分块级检索相结合，提升复杂文档场景下的检索精度；同时引入语义级文档分块技术，保持文档结构和语义内容的完整性，并通过双路向量化与索引构建，实现摘要信息与原文分块的协同检索，为知识库场景下的高质量语义检索提供了技术支撑。

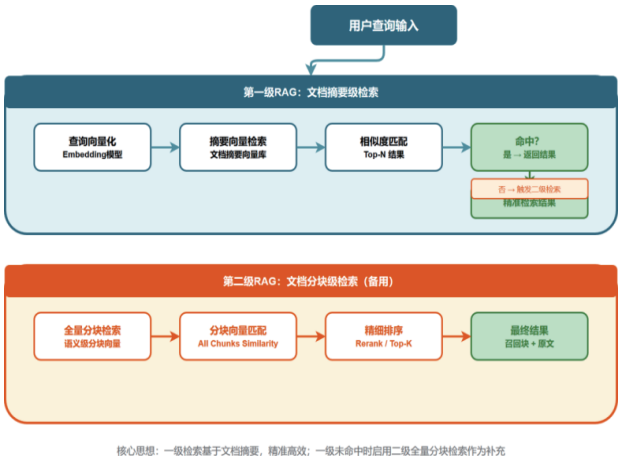


图2 二级 RAG 检索总体流程

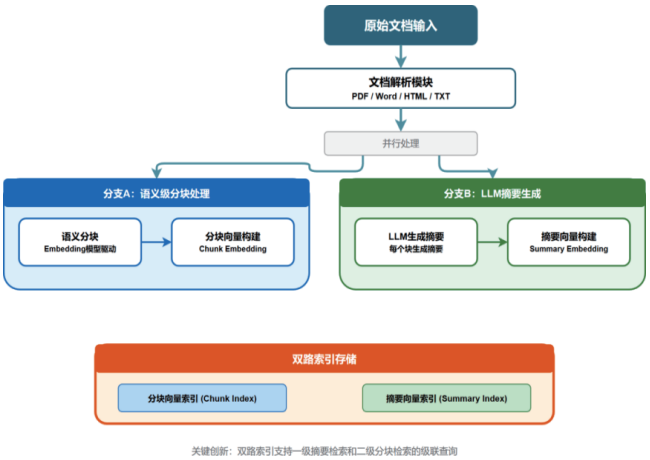


图3 索引构建流程（双路索引）

技术指标/优势

该成果实现了知识库检索流程的智能化、精准化和结构化处理，在检索精度、语义理解能力、响应效率、场景适配能力等方面均具备显著优势，具体体现在：

二级检索机制，结果更精准：采用摘要级检索与分块级检索相结合的二级 RAG 模式，先通过摘要向量快速定位相关文档，再通过分块级检索补充细粒度内容，有效降低长文本直接匹配带来的语义偏差问题，提升复杂知识场景下的检索准确率。

语义智能分块，内容更完整：基于嵌入模型进行语义级文档分块，自动识别段落、章节、表格、代码块等语义单元，保持文档结构和上下文逻辑的完整性，避免传统固定长度切分造成的信息割裂和语义丢失。

双路向量构建，召回更全面：同步构建摘要向量索引和分块向量索引，实现主题级信息筛选与细节级内容匹配的协同检索，既保证检索效率，又提升知识召回的覆盖范围，减少关键信息遗漏。

多格式接入处理，应用更灵活：支持　PDF、Word、HTML、TXT、Markdown等多种文档格式解析与入库，可适配企业知识库、专业资料库、智能问答等多类应用场景，满足不同业务环境下的知识检索需求。

毫秒级向量检索，响应更高效：系统支持快速摘要生成与毫秒级向量检索响应，能够在保障检索效果的同时提升实际使用效率，满足实时性的要求。

应用领域和市场前景

该成果面向企业知识管理、专业资料检索、智能问答等场景打造，可广泛应用于金融、医疗、法律、政务、教育、研发等多个行业领域，适用于制度文件查询、业务知识检索、专业文档问答、内部知识服务等应用场景，是推动企业知识管理数字化、智能化升级的重要工具。

随着企业数字化转型持续深入，海量知识资产的高效管理与智能调用已成为行业发展的重要趋势，传统检索方式已难以满足复杂业务场景下对精准性、智能化和高效率的应用需求，具备高精度检索、语义理解、灵活适配和快速集成能力的知识库检索系统市场需求日益增长。本成果深度贴合企业知识管理的实际业务需求，可根据不同行业、不同知识类型和不同应用场景进行灵活部署与个性化配置，未来可广泛推广至政企单位、行业机构及各类知识服务场景，市场应用前景广阔。

可信大模型网关系统

成果完成人	亓晋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	政企服务				
核心专利号	ZL202610072416.7				

成果概述

随着大语言模型（LLM）技术的快速发展，企业和政府机构对AI服务的需求日益增长。然而，直接使用公网大模型服务存在数据泄露风险，而完全本地化部署又面临算力成本高、模型能力受限等问题。本团队自主研发了可信大模型网关系统，通过四层决策模型选择机制和多层数据脱敏技术，实现了安全性与效能的最佳平衡。

本系统创新性地提出了四层决策模型选择机制，根据业务类型、智能需求、数据敏感度等因素，智能选择最合适的模型服务方案。同时，通过PII识别、多策略脱敏、企业机密检测等技术，确保敏感数据在传输和处理过程中的安全性。系统还支持本地LLM预审机制，为极高敏感场景提供额外的安全保障。

关键技术/创新要点

平台围绕政企大模型安全应用场景，构建了模型智能调度与数据安全防护相结合的技术架构，实现模型服务的可信接入与安全调用。

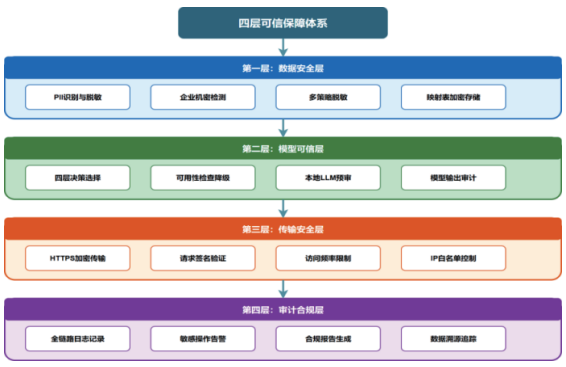


图1 四层可信保障体系

系统核心采用四层决策模型选择机制，根据业务类型、智能需求、速度需求、网络条件和数据敏感程度，智能选择公网大模型、政务云模型或本地量化模型，在保障服务效果的同时兼顾响应效率与使用成本；同时构建多层数据脱敏流程，结合 PII 识别、多策略脱敏、企业机密检测和本地LLM预审机制，实现敏感信

息在传输和处理过程中的安全保护，并通过数据安全、模型可信、传输安全、审计合规四层可信保障体系，提升大模型应用的安全性、可控性和合规性。

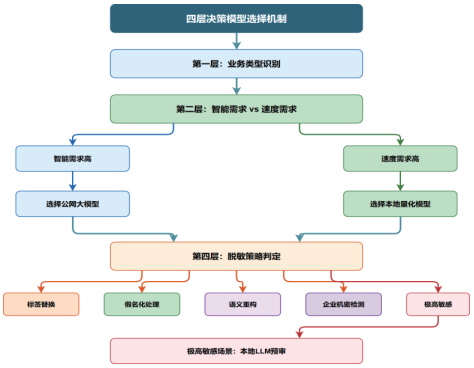


图2 四层决策模型选择机制

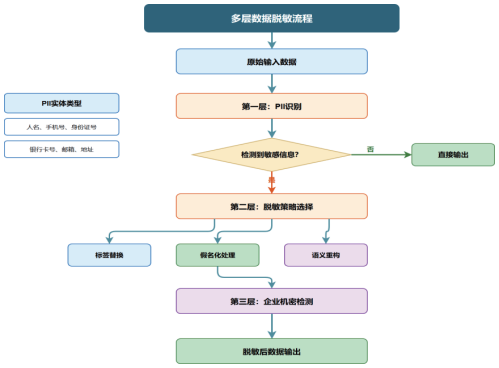


图3 多层数据脱敏流程

技术指标/优势

该成果实现了大模型接入与调用过程的安全化、智能化和可控化，在数据安全保障、模型服务稳定性、资源利用效率、合规审计能力等方面均具备显著优势，具体体现在：

智能模型选择，调用更高效：采用四层决策模型选择机制，可根据业务类型、智能需求、速度需求和网络环境智能匹配最优模型服务方案，在保障使用效果的同时提升模型调用效率，降低综合使用成本。

多层数据脱敏，安全更可靠：系统可自动识别人名、手机号、身份证号、银行卡号、邮箱、地址等敏感信息，并结合标签替换、假名化处理、语义重构、企业机密检测等多种策略进行脱敏处理，降低敏感数据泄露风险。

自动降级切换，服务更稳定：具备模型可用性检查与自动降级能力，当公网模型、云端模型或本地模型出现异常时，可快速完成服务切换，保障系统连续运行。

全链路安全防护，管控更全面：通过数据安全、模型可信、传输安全、审计合规四层可信保障体系，实现从请求接入、数据处理、模型调用到结果输出的全过程安全防护，增强平台整体安全管控能力。

审计追踪完整，合规更有保障：系统支持全链路日志记录、敏感操作告警、合规报告生成和数据溯源追踪，可满足政企单位对大模型应用过程中的安全监管和合规审计需求。

应用领域和市场前景

该成果面向政府机构、金融、医疗、企业办公等场景打造，可广泛应用于政务数据处理、政策分析、公文写作、客户服务、风险评估、合规审查、病历分析、智能问答、文档处理、数据分析等多个领域，适用于对数据安全、模型可控和服务稳定性要求较高的智能应用场景，是推动大模型安全落地和智能化升级的重要支撑平台。

随着大模型技术应用不断深入，企业和政府机构对 AI 服务的安全性、可控性、合规性要求持续提升，传统直接调用公网模型或单一本地部署模式已难以兼顾数据安全、服务能力和使用成本，具备智能路由、安全脱敏、多模型调度和全链路审计能力的可信大模型网关系统市场需求日益增长。本成果深度贴合政企单位在大模型应用过程中的实际需求，可根据不同业务类型、数据敏感程度和应用场景进行灵活适配与个性化配置，未来可广泛推广至政务、金融、医疗、企业服务等多个行业领域，市场应用前景广阔。

一种基于Transformer的综合特征网络流量分类方法

成果完成人	赵莎莎	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子与通信技术其他学科
应用行业	网络安全管理				
核心专利号	ZL202410748223X				

成果概述

随着网络流量规模的激增与加密技术的普及，传统基于端口或深度包检测的流量分类方法难以适应动态、加密的网络环境。现有深度学习方法虽提升了分类准确率，但普遍存在因数据裁剪导致信息丢失、特征提取单一等问题。

本成果提出一种基于Transformer的综合特征网络流量分类方法，通过并行提取网络流量的统计特征、全局特征、局部特征与时序特征，并利用特征融合技术构建综合特征表示，显著提升了加密流量的分类精度与鲁棒性。该方法结合自编码器、Transformer、一维卷积神经网络与门控循环单元，构建了高效的多特征融合模型，具备良好的泛化能力与实用性，为网络管理与安全检测提供了新的技术路径。

关键技术/创新要点

本成果的核心创新在于构建了一种多特征融合的网络流量分类框架，突破单一特征提取方式的局限性。具体包括：

1、多维度特征并行提取

针对网络流量数据，分别提取统计特征（自编码器）、全局特征（Transformer）、局部特征（一维卷积神经网络）与时序特征（门控循环单元），实现对流量数据的全面刻画。

2、特征对齐与融合机制

设计了特征对齐模块，通过上采样与下采样操作，解决Transformer与一维卷积模块输出维度不匹配的问题，确保不同特征能够有效融合，提升模型的整体表征能力。

3、轻量化结构设计

在局部特征提取中引入瓶颈模块与残差连接，降低计算复杂度的同时保持模型性能，使其更适用于大规模一维网络流量数据处理。

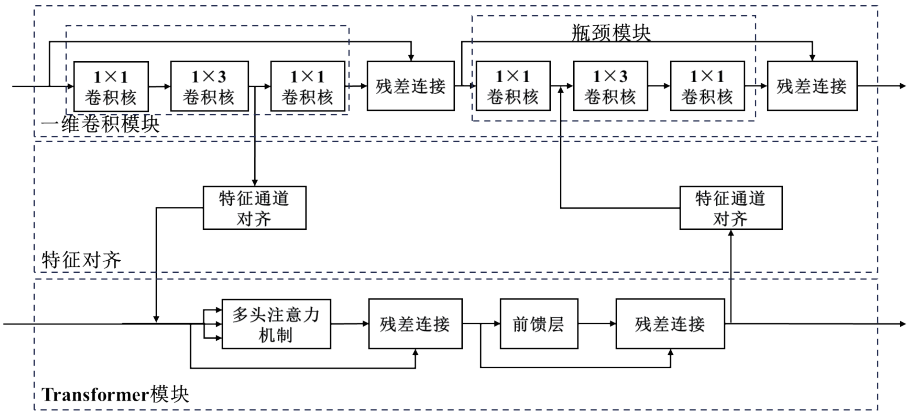


图1 网络结构图

技术指标/优势

1、技术指标

· 支持对加密流量的高效分类

· 融合统计、全局、局部、时序四类特征

· 使用瓶颈模块与残差连接，降低计算与存储需求

· 输入数据固定为 784 字节，兼容主流神经网络输入格式

2、优势

· 弥补因数据裁剪导致的结构信息丢失，增强分类准确性

· 多特征融合策略提升模型在复杂网络环境下的泛化能力

· 适用于动态端口、加密流量等传统方法难以处理的场景

· 模型结构轻量，适合部署于大规模网络监控系统

相关发明专利已授权，技术方案完整，具备自主知识产权。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于网络安全管理、网络性能优化、网络行为分析等领域。具体应用场景包括：

· 网络安全检测：识别 DDoS 攻击、恶意软件传播、钓鱼行为等异常流量

· 网络资源管理：自动分类视频、音频、文件传输等业务流量，支持智能带宽分配与服务质量保障

· 网络监控与分析：实现大规模流量的自动化分类与趋势分析，辅助网络运维与故障定位

随着网络加密率的持续提升与网络安全需求的不断增长，传统流量识别技术面临严峻挑战。本成果具备高效、精准、可部署性强的特点，在运营商网络、企业内网、云数据中心等领域具有广阔的市场应用前景。

一种基于Transformer可形变注意力模块的安全帽检测方法

成果完成人	陈松乐	职称	副教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	图形和图像处理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	建筑业等				

成果概述

为了解决安全帽检测中严重遮挡、多尺度和小目标的问题，项目组提出了一种基于可变形注意力Transformer的安全帽检测算法，该成果已经正式发表，Chen S, Sun H, Wu Y, et al. A Helmet Detection Algorithm Based on Transformers with Deformable Attention Module[J]. Chinese Journal of Electronics, 2026, 34(1): 229-241. 10.23919/cje.2023.00.346

在网络架构方面，通过取消现有DETR中用于特征融合的计算密集型Transformer Encoder模块，简化了模型结构，有效提升了安全帽检测的效率。在特征提取方面，引入了一种新型的DSwin Transformer方法，通过可变形注意力模型增强Swin Transformer提取的特征的表示能力。在目标检测方面，基于多类别联合预测概率生成查询参考点和查询嵌入，并选择适当数量的解码特征图和稀疏采样点进行查询解码，进一步增强了安全帽检测模型的推理能力和处理速度。

基于基准SHWD数据集的实验结果表明，所提出的方法充分利用了Transformer的全局感知能力和强大的建模能力，达到了95.4%的平均检测精度，FLOPs为133.35G，FPS为20，优于现有的安全帽检测最先进方法。

关键技术/创新要点

如图1所示，项目组提出了一种创新的端到端安全帽检测网络架构，该架构由三个核心模块组成：特征提取模块、参考点生成模块和目标检测模块。首先，我们设计了一种新型特征提取网络——DSwin Transformer，通过将可变形注意力机制引入特征提取阶段，显著增强了特征的长程依赖性和上下文感知能力。如图2所示，DSwin Transformer采用稀疏跨窗口可变形注意力模块（SCWDA），能够动态选择采样点，在提升特征提取效率的同时，有效规避了传统全局注意力机制的高计算成本问题。得益于DSwin Transformer的卓越性能，我们取消了DETR中计算密集的Transformer编码器模块，直接在特征提取输出上应用Transformer解码器进行目标解码，这一改进不仅简化了网络结构，还显著提升了整体处理效率。

在特征提取模块中，DSwin Transformer负责提取多尺度特征图，为后续模块提供丰富的特征信息。参考点生成模块通过多类别联合预测概率机制，智能筛选最可能包含目标的参考点并生成相应的查询嵌入。与Deformable DETR仅依据单一类别概率选择参考点的做法不同，我们的方法综合考虑多个类别的概率分布，从而更准确地选择最可能包含目标的参考点进行解码。这一改进不仅优化了参考点的选择效率，还显著提升了目标检测的准确性，为复杂场景下的目标识别提供了更可靠的解决方案。

最后，目标检测模块利用多层Transformer解码器，对查询嵌入和多尺度特征图进行交叉注意力解码，最终精确输出目标类别及其边界框。通过这三个模块的协同工作，我们的网络架构在保证检测精度的同时，显著提高了处理效率，为安全帽检测任务提供了一种高效且可靠的解决方案。

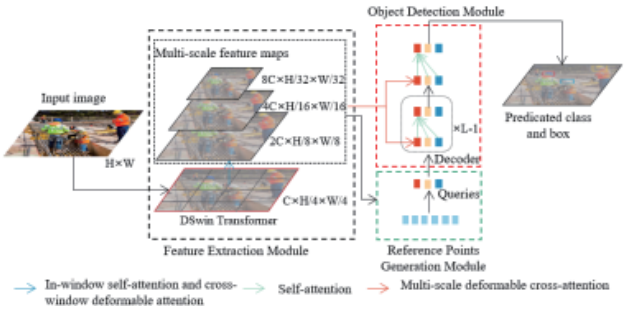


图1 基于Transformer的安全帽检测算法的网络架构

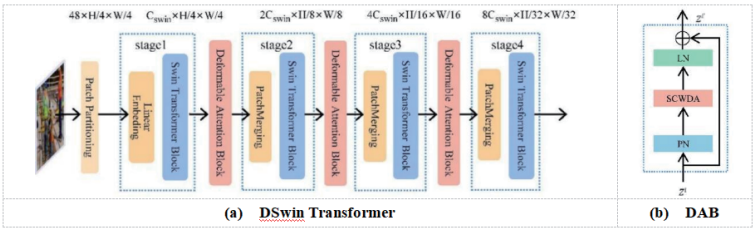


图2 DSwin Transformer的网络结构

技术指标/优势

为了验证本文提出的方法的有效性，我们参考了近年来在安全帽检测领域的相关研究，选择了公开的基准数据集SHWD进行实验，并于国内外最新研究成果进行对比。

我们所提出的方法在50%的IoU下，对于安全帽类别的检测准确率达到了96.0%，对于人员类别的检测准确率为94.8%，两类的平均检测准确率mAP@0.5为95.4%。与基于流行框架如Faster RCNN、YOLOv4、YOLOv5s、YOLOv7和YOLOv8l的传统安全帽检测方法相比，所提方法分别提高了8.2%、2.5%、5.5%、1.2%和0.8%。而与基于改进版YOLOv4、FF-YOLO和PG-YOLO的现有方法相比，所提出的方法分别提高了2.0%、3.6%和2.1%。这表明，我们所提出的方法在安全帽检测任务中具有显著的优势，并且在所有最先进的深度学习方法中表现出色，能够提供更高的准确度。

应用领域和市场前景

本研究成果可广泛应用于工业安全监控、建筑工地管理、交通执法及智能安防等领域。在工业场景中，该技术可实时检测工人安全帽佩戴情况，有效预防安全事故；在建筑工地，可辅助管理人员监控施工安全规范；在交通执法中，可识别摩托车驾驶员是否佩戴头盔；在智能安防领域，可集成到监控系统中，提升公共场所的安全管理水平。

该成果应用后具有广阔的市场前景。随着安全生产法规的日益严格和人工智能技术的普及，安全帽检测技术的市场需求持续增长。在工业4.0和智慧城市建设的推动下，该技术将在制造业、建筑业、能源行业等领域获得广泛应用。其高效的处理能力和较高的检测精度，能够满足实时监控和大规模部署的需求，具有显著的成本优势。

面向裸眼3D立体显示应用的视点AI重建技术研究及产业化

成果完成人	霍智勇	职称	教授	所在单位	教育科学与技术学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	研发服务	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	广告、教育和医疗				

成果概述

本项目将人工智能技术引入裸眼3D显示领域，通过机器学习和计算机视觉算法，优化视差图生成与处理，提升3D图像的深度感知与细节表现力。通过AI技术进行自适应视角调整，使用户在不同角度下均能获得高质量的立体效果。此技术还结合了深度学习的实时优化算法，能够根据用户的位置和视线动态调整显示内容，减少视觉疲劳。

本项目的技术核心在于通过AI算法提升裸眼3D的显示效果，解决了传统裸眼3D技术中存在的“视角死区”问题。采用的多视角图像重建技术使得在多用户情况下，显示设备仍能提供流畅的立体效果。此外，AI优化的图像处理和渲染算法能够减少计算资源的消耗，提升整体的显示效率和实时性，显著降低硬件成本。

关键技术/创新要点

本项目实现了多项技术自主创新，核心算法和关键硬件技术均为团队自主研发，具有完全的知识产权。在裸眼3D显示的深度感知、视差图优化、多视角重建等方面，项目采用了独创的AI算法，使显示效果和用户体验大幅提升，突破了现有技术的瓶颈。

与国际最先进的裸眼3D显示技术相比，本项目在性能、工艺参数等指标上具备明显优势。首先，通过AI自适应调整技术，用户可在更大视角范围内获得高分辨率的立体效果，提升了显示的清晰度和稳定性。其次，本项目的实时图像处理技术大幅优化了资源利用，缩短了响应时间，使系统更加高效。

本项目采用的AI优化技术降低了硬件成本，使得生产成本明显低于传统裸眼3D显示设备。在性能价格比方面，本项目的产品具备更高的性价比，有望实现大规模商业化应用。投入产出比显著，初期投入较低，具备快速回报的潜力。

本项目技术绿色环保，产品的能源消耗较低，符合当前节能环保的要求。技术成熟度高，经过多轮实验验证，已具备稳定的产业化条件，能够在较短时间内实现市场推广，具有良好的生态适应性。

应用领域和市场前景

项目团队已建立多条业务渠道，覆盖广告、教育和医疗领域，并与多家客户保持长期合作关系。这些客户资源为项目的市场拓展提供了坚实基础。

虽然市场上已有类似产品，但多数仍受限于高成本、有限视角等问题。相比之下，本项目通过AI技术实现了低成本、高性能的解决方案，显著提升了用户体验，具备更强的市场竞争力和性价比优势。

面向智能变电站的TSN流量调度技术

成果完成人	徐佳	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机系统结构
应用行业	电力通信系统				
核心专利号	ZL202410257450.2；ZL202410278029.X				

成果概述

当前的TSN流量调度机制研究多是对标准技术的实现或改进，对TSN在智能变电站应用的研究较少，难以满足各类场景的流量传输指标需求。因此，如何结合复杂的网络环境设计TSN流量调度机制满足流量传输性能指标需求具有重要意义。本成果面向智能变电站，提出了以下TSN流量调度关键技术：

（1）提出变电站IEC 61850通信与TSN技术融合的流量映射方案。在此基础上，提出时间窗口划分的效用分析模型，进一步提出基于效用的动态时间窗口划分算法优化传统TAS的时间窗口划分。

（2）提出智能变电站非保护流量优先级分配方案。提出基于信用整形机制和网络演算模型的带宽分配模型，以加权平均时延为优化目标，提出智能变电站通信网络带宽分配算法。在稳定情况与GOOSE广播风暴情况下为变电站通信网络合理分配带宽，能显著降低GOOSE广播风暴对低优先级流量过期现象的影响。

（3）提出一种基于时间感知整形器的混合流调度机制。混合流调度机制融合概率流和时隙复用两种调度策略。根据混合流调度机制，提出了一种基于贪婪禁忌搜索的算法求解调度方案。

（4）提出了一种基于时间感知整形器的混合流量传输机制FTAS，能够在不影响周期性流量的前提下灵活地传输非周期性流量。FTAS基于两个核心设计：主动丢包和灵活进队，能够为不同的非周期性流量选择合适的队列进行发送，降低非周期性流量的过期率。

关键技术/创新要点

（1）提出基于TSN技术的IEC 61850流量映射方案和优先级分配方法，实现了IEC 61850流量与TSN机制内部流量的对应，解决了协议间的兼容问题。通过分析每种流量可能面临的全部时延，提出了时间窗口划分的效用分析模型。提出基于效用的动态时间窗口划分算法，通过对周期性SMV报文占用时间的窗口进行划分，解决关键性GOOSE流量过期问题。

（2）提出基于信用整形和网络演算模型的带宽分配模型，提出智能变电站中基于网络演算的流量到达曲线，提出网络演算模型结合CBS机制的服务曲线。基于CBS机制中信用变化率分配变电站各流量传输带宽。提出智能变电站通信网络带宽分配算法。提出变电站网络通信的初始带宽分配计算方法以及发生GOOSE广播风暴时调整带宽值方法，使得MMS流量在GOOSE广播风暴情况下具有更好的时延性能。

(3)简单的采用FIFO原则为非周期性流量提供传输难以实现数据包的低过期率;此外,为非周期性流量分配单独的存储空间可能造成大量的资源浪费。鉴于此,提出基于TAS整形器的混合流量调度技术,将队列选择与非周期流量数据包的剩余时间耦合,显著降低了非周期流量的过期率,提升了交换机的资源利用率。

技术指标/优势

(1)在多场景下均将GOOSE 1A流量的传输时延控制在3ms内,解决了GOOSE 1A流量的过期现象。

(2)对周期流量的干扰较小,SMV流量的丢包率可控制在3%内。

(3)时延分别降低31.59%和18.80%,从而抑制GOOSE广播风暴问题,更好地保证低优先级流量地时延性能。

(4)对GOOSE流量的干扰可以控制在20%以内。

(5)基于时间感知整形器的混合流调度机制的突发流的平均端到端传输延迟减少了35%,能有效提高突发流在交换设备中调度的实时性。

应用领域和市场前景

本成果提出的TSN流量调度系列方案可广泛应用于电力通信系统中,提高数据传输的可靠性和确定性。满足电力系统各类数据帧的传输质量要求,显著提升电力通信网络性能。

新型配电网承载力评估系统

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	新能源并网规划				
核心专利号	ZL202210651359.X				

成果概述

由于早期电力基建因素的影响，不同地区电网对接入的分布式光伏能承担的消纳适应程度有所不同，缺乏有效消纳能力评估手段，导致配网负载与分布式光伏装机量不匹配，使得35kV变电站接入新能源容量严重超标，易造成上级电源220kV变电站出现反向供电。

针对这一问题，本团队研发了新型配电网承载力评估系统，系统基于配电网通用数据结构，可实现任意节点配电网的快速建模，同时系统拥有开源潮流计算内核，适用于多电压等级配电网的联合潮流仿真，支持分布式源荷多时空场景接入下配电网的潮流仿真，求解速度快、收敛性好（通常两次潮流迭代收敛）；此外，具备独有的动态库和丰富的外部软件接口（如 MATLAB，Python，VB，LabVIEW，OPAL-RT 等），可扩展性强，可依据用户需求灵活改变仿真场景，适用于现代配电网中新能源有并网规划研究。

关键技术/创新要点

团队所研发的新型配电网承载力评估系统，通过建立基于MATLAB和OpenDSS的配电网混合仿真构架（图1），实现任意节点配电网模型的快速生成、仿真场景参数的外部感知及批量修改以及外部智能算法的耦合嵌套。系统基于配电网通用数据结构（图2）和开源潮流计算内核，可实现差异化的潮流计算且支持嵌套特定算法实现仿真场景的动态修改，支持配电网的蒙特卡洛仿真、时序仿真、优化计算、多时间尺度仿真和并行计算；同时，系统具备完备的COM接口，可实现配电网所有电气元件状态参数、求解模式的外部获取及修改，可通过和外部算法开发软件的交互来满足定制化仿真需求，解决了传统基于图形交互界面的配电网模型构建和仿真场景修改方法效率低下、联合仿真能力弱的问题。

借助该系统平台，团队设计了一种配电网分布式光伏承载力两阶段测算方法，在充分计及源荷功率曲线时空相关性的前提下，实现了目标配电网“点-线-面”消纳能力动态评估，并针对承载力不足的区域配电网提供了一种考虑分布式光伏出力动态削减、无功下垂控制等措施的消纳提升方法；同时，团队借助该系统平台丰富的COM接口，结合气象资源空间插值方法和多功率预测模型间迁移学习，提出了一种全域分布式新能源出力的联合功率预测方法。

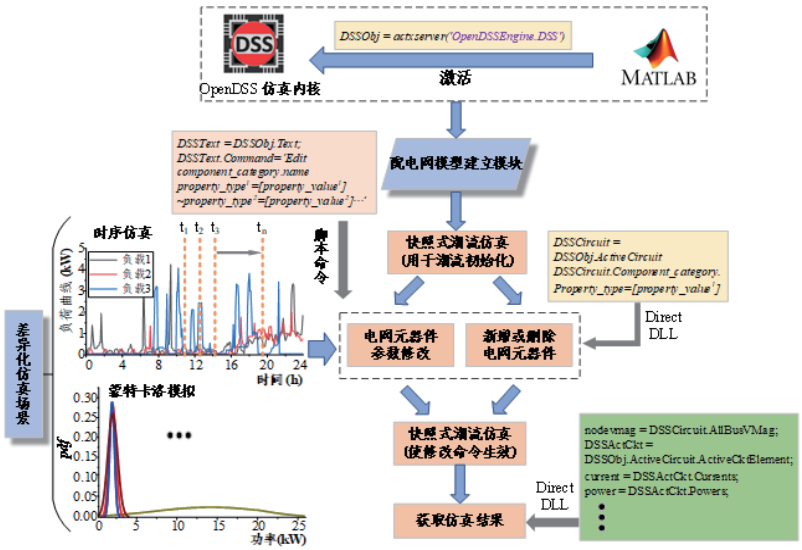


图1 分布式源荷多时空场景接入下新型配电网承载力评估系统架构

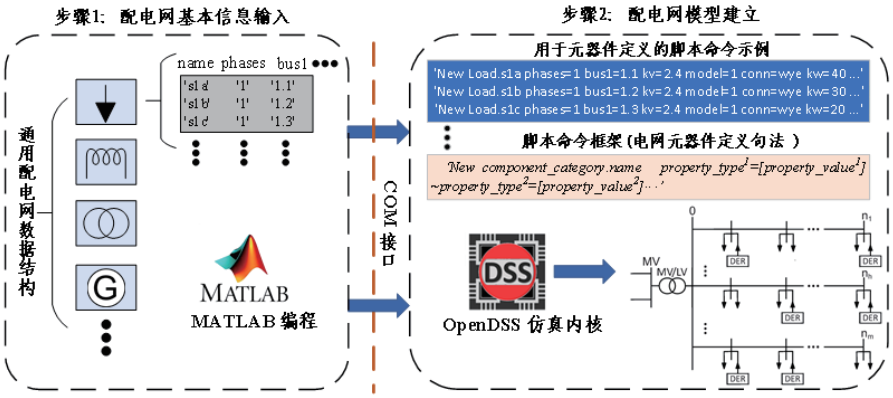


图2 配电网的通用数据结构及快速建模方法

技术指标/优势

与传统配电网潮流仿真平台相比, 团队所研发的新型配电网承载力评估系统可支持包括光伏、储能、电能汽车等新型源荷储设备的接入, 节点数目不受限制, 计算收敛速度快, 具备丰富的COM接口, 借助COM口可实现所有模型参数的外部访问与修改, 支持与其他专业软件的联合仿真, 可定制化能力强。

应用领域和市场前景

该成果有助于提高区域配电网对分布式新能源系统的消纳能力, 降低变电站故障风险, 减少大面积停电的可能性。同时, 通过优化分布式新能源消纳动态评估和规划方案, 可以更好地满足居民安全有序用电的需求, 并促进新能源设备安装的规范发展。

功率电子电路及其故障诊断的硬件在环仿真技术

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	新型高效能量转换与储存技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	可应用于带有大功率电力电子器件的设备，如大功率充电桩、新能源汽车电驱系统、新能源发电并网装置等				
核心专利号	ZL202110861799.3				

成果概述

当今，随着功率电子技术在电网、电动汽车等领域的大规模应用，对于功率电子电路的可靠性和安全性的要求也随之日益提高，推动了故障诊断和健康管理技术的不断进步。功率电子装置早期故障诊断相对较简单，主要依赖于实践经验和对于硬件故障总结。随着应用领域的不断拓展，功率电子装置开始变得更加复杂，包含大量的功率器件、无源器件和复杂的控制策略，其故障诊断和定位难度也逐级提升。本世纪以来，数字芯片、智能计算、控制理论和通信技术的发展，使得对于功率电子电路的故障诊断朝着智能化，精细化方向发展，为功率电子电路的可靠运行和高效维护提供了技术基础。

针对功率电子电路具有高压、大电流、瞬变的特点，本团队研发了一套基于FPGA的硬件在环实时仿真系统，利用FPGA并行处理数据的特点，能够将功率电子电路仿真结果运行在纳秒(ns)级别，较传统的Simulink离线仿真具有更好的实时性能。由于其具有良好的实时性能，因此基于硬件在环仿真系统开展了故障特征提取和故障诊断，并通过上位机进行实时展示。

关键技术/创新要点

本团队开展的研究属于基于硬件在环仿真模型的功率电子电路故障诊断，因此首先需要归纳特定功率电子电路的各类故障，建立故障特征库，作为故障特征提取和故障诊断的数据基础。但由于故障类型众多，表现形式多样，且故障存在耦合问题，因此故障特征数据的获取存在难度。其次，本研究基于所构建的高还原度半实物仿真模型，需要采用硬件语言建立模型并下载到高速FPGA模块中，但开发采用的Verilog语言与广泛使用的C语言在底层逻辑和思维方式上不同，导致存在一定的开发难度。最后，综合前两步完成的工作，实现了在半实物仿真平台提取故障特征和故障诊断，并通过上位机进行实时展示的功能，为下一步平台示范打下基础。

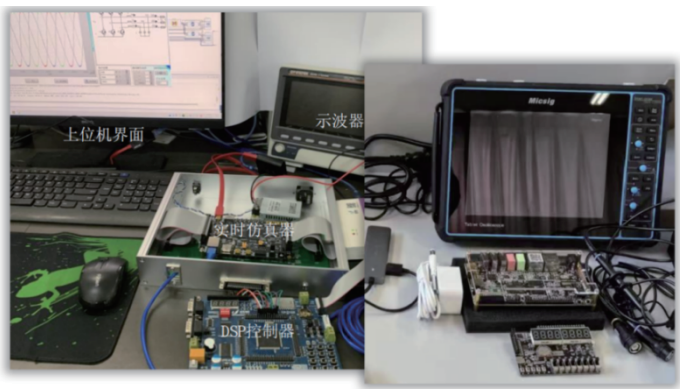


图1 高灵活度的功率电子电路HIL平台

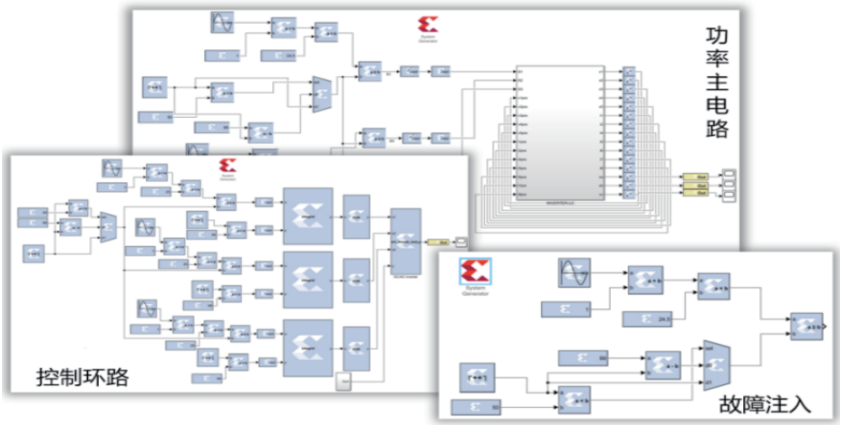


图2 多种功率电路功能模块HIL模型

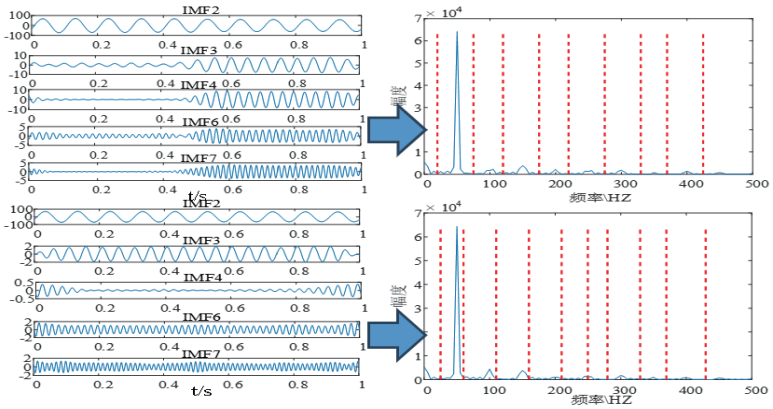


图3 故障实施仿真与诊断结果

技术指标/优势

本团队针对功率电子电路故障问题，开发了一套基于FPGA的硬件在环仿真系统，并基于仿真系统完成了故障特征提取和故障诊断验证，将各项数据，如电压、电流、频率等信息通过上位机进行实时的展示，为进一步开展平台示范奠定基础。

应用领域和市场前景

本团队的研究能够应用在所有包含功率电子装置的设备及系统的研发和故障维护的研究中。首先，FPGA具备高速处理能力和实时在线并行模拟特性，相较于传统的离线仿真具有更好的实时性能，且能够实现纳秒（ns）级在线仿真，为高频话功率电子装置故障注入和诊断提供了支撑；其次，由于功率电子装置具有高频、高压、大电流特征，如直接进行故障的模拟，危险系数高、损坏不可逆和成本高等问题；最后，功率电子装置实验需要占用场地、开发人员并耗费电能，本团队所研发半实物仿真技术能够极大简化研发和测试进程，仅需若干台上位机，FPGA模块、输入输出接口模块、示波器等即可以完成开发，并对所开发方案进行高还原度的实时验证。

海量分布式光伏设备在线检测中心

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	新型高效能量转换与储存技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	分布光伏运维				
核心专利号	ZL202210651359.X				

成果概述

针对海量分布式光伏设备接入电网存在的潜在安全质量问题，以面向0.4kV光伏设备接入电网验证技术为研究方向，通过研发海量分布式光伏设备在线检测中心，可灵活有效提高对光伏设备的实时监检能力，实现光伏逆变器的标准化接入、入网质量安全验证、远程检测、故障定位等功能。在新型电力系统下，为海量0.4kV用户光伏设备长期安全稳定运行提供技术保障，筛查出影响和潜在影响电网电能质量、安稳运行的并网光伏设备，解决了海量设备是否能在线安全稳定运行的问题。

关键技术/创新要点

研发了海量分布式光伏设备在线检测中心（图1），该检测中心可结合智能网关等设备，具备分布式光伏的通信协议转换功能，通过神经网络模型进行协议识别，在识别出不同形式的通信协议后，进行通信映射时，在多通信协议接口输出端口接入信息映射模型，以建立起信息对应关系，进而实现多通信信息的映射。通过协议识别、转换与映射，实现分布式光伏设备的统一标准接入；同时，针对分布式光伏的潜在运行风险和故障，中心通过对分布式光伏设备的故障的成因进行分析，储备各个设备故障态，形成故障实时图谱，运用大数据人工智能，特征学习比较，可实现对分布式光伏设备器件级故障的精准定位（图2），大大降低人力运维成本、提高运维效率。该检测中心具备对长期运行分布式光伏设备的在线检测、风险预警与故障定位，填补了该领域的空白。



图1 海量分布式光伏设备在线检测中心首页



图2 海量分布式光伏设备在线检测中心故障定位功能页

技术指标/优势

团队所研发的海量分布式光伏设备在线检测中心，具备基于工业物联网架构的光伏设备标准化远程监测体系，可实现不同厂商、不同类别逆变器的监控平台的统一适配；解决了分布式光伏大规模数据快速计算处理的问题，实现了对海量分布式光伏的远程监测、数据分析和运维管理。

应用领域和市场前景

该成果有助于实现光伏逆变器的远程自动化检测、安全评测。实施后具备对海量分布式光伏设备的远程并网检测、定期体检的能力，保障0.4kV用电网的安全、正常持久运行。

电动汽车充电枪的安全锁紧装置

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	新型高效能量转换与储存技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	电动汽车充电设施				
核心专利号	ZL202211102654.6				

成果概述

随着新能源汽车充电时长普遍达到数十分钟甚至数小时，充电枪与车辆插座之间的安全锁紧成为保障充电安全的关键环节。现有充电枪安全锁紧装置存在明显缺陷：电控传输棒的圆顶部分在沿斜坡滑入卡口时，会因斜坡倾斜角度逐渐变形为一边薄一边厚的状态，较薄处先翻卷扣押在卡口边缘，导致后续较厚部分进入时产生滞留堆积，使传输棒朝卡口外侧偏转，严重降低了卡口的高效锁紧控制能力，存在充电中断甚至安全隐患。

针对这一问题，本团队研发了一种电动汽车充电枪的安全锁紧装置。该装置在传统充电枪口结构基础上，创新性地在固定轴与卡口之间设置助力体，通过延伸勾、挂套、推进垫、贯穿把和修正夹的协同配合，对电控传输棒的圆顶部分进行位置限制和移动方向引导，使其以聚集堆积的状态依照卡口直径顺畅穿插进入，从根本上解决了传统锁紧装置易偏转、锁紧失效的技术难题，显著提升了充电连接的稳定性和安全性。

关键技术/创新要点

团队所研发的电动汽车充电枪安全锁紧装置，核心在于助力体的精巧设计，其采用对称式V型贯穿把作为主结构，尖端朝向卡口并与挂套连接，两侧推进垫分别连接修正夹，形成向卡口侧拱起的承托腔体。当电控传输棒的圆顶部分沿斜坡滑动变形后，较薄处首先推动延伸勾向贯穿把尖端滑动，为修正夹打开腾出空间；随后较薄处进入下摆压片与折叠推板构成的指向箭头区域，被按压承托并引导至半环架；与此同时，延伸勾按压挂套外交圈，通过限位件的弹囊和牵引棒弹性推送贯穿把摆动，推进垫同步向修正夹移动，从内侧封挡电控传输棒较薄处，使其受阻后沿制衡板拱起方向聚集，最终在贯穿把V型尖端引导下与较厚处汇合，整体竖直穿插进入卡口。

挂套结构采用三层弧形叠加设计，圆框架、外交圈、松紧兜通过关节锁和限位件层层交织，既保证了贯穿把摆动的稳定性，又实现了动态力的传递与分配。修正夹与调控件的间隙配合、半环架与接纳道的滑动配合，确保了整个引导过程的顺滑可控。该装置无需额外动力源，纯机械结构实现自适应锁紧，可靠性高且成本可控。

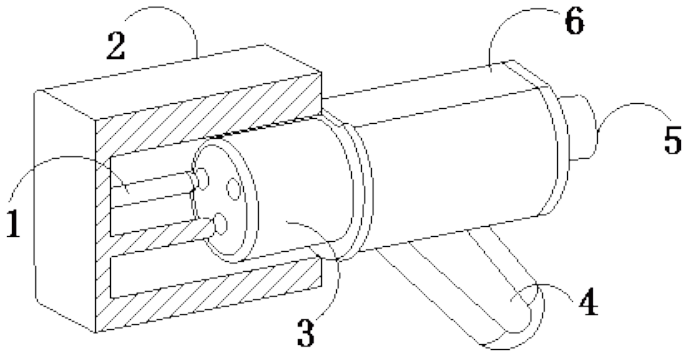


图1 电动汽车充电枪的安全锁紧装置的结构示意图

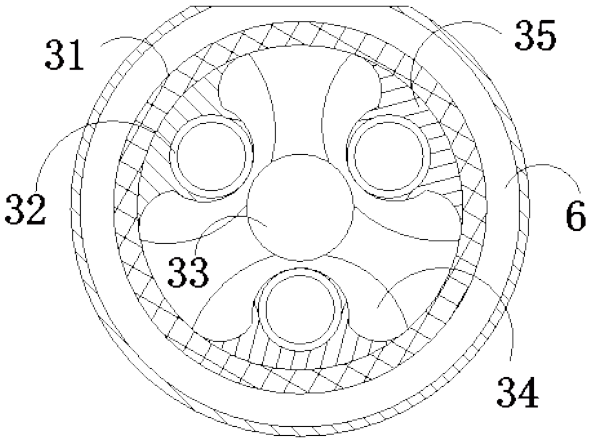


图2 电动汽车充电枪的安全锁紧装置的结构示意图

技术指标/优势

与传统充电枪安全锁紧装置相比，团队所研发的新型装置具有显著优势。锁紧有效性方面，通过助力体的动态引导机制，彻底消除了电控传输棒圆顶部分的偏转现象，锁紧成功率大幅提升，避免了因接触不良导致的充电中断。结构可靠性方面，纯机械设计无电气元件，适应高低温、潮湿等复杂环境，故障率极低。操作便捷性方面，保持原有插拔习惯，无需改变用户操作方式，即插即锁。安全冗余度方面，多重机械互锁结构确保充电过程中连接稳固，即使受到外力拉扯也能保持锁紧状态。维护经济性方面，模块化设计使得易损件可单独更换，降低全生命周期维护成本。

不确定性环境下智慧家庭在线能量管理方法

成果完成人	余亮	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域(一级)	新能源与节能	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	/
应用行业	能源电力系统				
核心专利号	ZL201910724530.3				

成果概述

在智能电网中,电能产生、传输、配送和消耗过程中使用大量信息和通信技术(例如物联网技术)。在智能电网环境中,智慧家庭面临许多节省能量成本的机遇,例如通过智能调度能量存储系统和可控负载,从而利用电价时间分集特性降低能量成本。作为一种可控负载,暖通空调系统能量消耗约占家庭总能耗的40%,因而在节约能量成本方面具有极大潜力。由于暖通空调系统的主要目的是保证用户的热舒适,所以需要在不牺牲用户热舒适的情况下,最小化智慧家庭能量成本。

目前已有大量联合考虑智慧家庭能量优化和用户热舒适的研究工作,包括李雅普诺夫最优化方法、模型预测控制方法等。尽管在上述工作中已经取得了一些进展,但是这些方法需要用到简化的数学模型模拟建筑热动力学模型。由于建筑热动力学模型受众多因素影响(如外部环境、太阳辐射强度、建筑材质、暖通空调系统的输入功率等),建立既准确又易于高效控制的建筑热动力学模型非常有挑战。

本成果针对上述背景技术的不足,提供了一种基于深度强化学习的智慧家庭能量管理方法。与现有技术相比,本发明方法采用在线学习模式,即性能测试由本地深度神经网络完成,本地深度神经网络的参数由云端深度神经网络训练后定期更新。该能量管理方法可应对环境变化带来的性能降级,因而具有鲁棒性;且本发明方法仅根据当前环境状态对能量存储系统的充放电功率和暖通空调系统的输入功率进行控制,无需知晓任何不确定性系统参数的先验信息和建筑热动力学模型,适用性广。

关键技术/创新要点

(1)综合考虑了可再生能源发电、刚性负载、能量存储系统、暖通空调系统、能量买卖、室内外环境、动态电价在内的智慧家庭能量成本最小化问题,并将该问题建模为马尔可夫决策过程,设计了环境状态、行为和奖励函数;

(2)提出了基于深度确定性策略梯度算法与专家知识的能量管理方法,该方法无需知晓任何不确定性系统参数(例如:可再生能源发电输出、刚性负载需求、室外温度和电价)的先验信息和建筑热动力学模型。

(3)提出的在线学习方式可帮助智慧家庭能量管理系统智能体应对环境变化带来的性能降级问题,因而具有高鲁棒性。

技术指标/优势

本设计方法具有高效性，图1给出了所提方法的性能对比结果。对比方案一：不考虑能量存储系统，采用传统的开/关方式对暖通空调系统进行控制，以制冷模式为例，当室内温度高于设定温度上限时，开启暖通空调系统；当室内温度低于设定温度下限时，关闭暖通空调系统。对比方案二：不考虑能量存储系统，使用深度确定性策略梯度对暖通空调系统进行控制，系统输入的分布式发电机发电、刚性负载、室外温度和电价数据均来自2018年6月1日至8月30日美国德克萨斯州Pecan Street数据库。相较于对比方案一和对比方案二，本发明方法能够在维持用户热舒适的前提下，分别降低能量成本25.59%和13.33%。

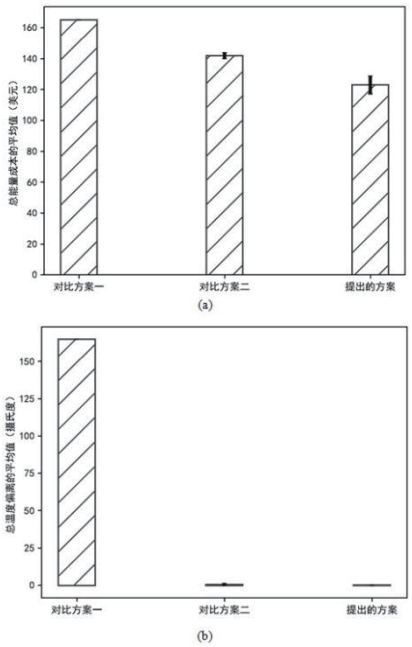


图1 所提方法的性能

应用领域和市场前景

本成果的应用领域为电力系统需求侧能量管理，可帮助智慧家庭用户合理调度家庭设备的使用，进而实现在不影响用户体验的前提下降低电费，具有较大的经济效益和广阔的市场前景。一旦智慧家庭内部的设备状态、环境状态和调度决策信息上传到云端，采用的在线学习模式可实现调度性能的逐步提升，实现基于云决策辅助的智慧家庭在线能量管理，并促进相关产业链的发展。

基于虚拟电压的多港区岸电系统完全分布式优化调度方法

成果完成人	邹花蕾	职称	讲师	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	/
应用行业	电力系统				
核心专利号	ZL202311056478.1				

成果概述

岸电系统(Shore Power System, SPS)在向港口供电时，一个港口通常包含众多港区、众多作业区；然而，船舶靠泊港口时，不同港区的经营管理者不同，甚至不同功能的港区是跨区域的，为了避免调度中心面临计算负担大的问题，本成果研究一种适用于多港区岸电系统完全分布式优化调度方法，该方法通过引入辅助因子实现岸电系统不同区域解耦，而不泄漏不同港区之间的隐私数据，并采用随机步长交替方向乘子(ADMM)下降算法来实现各港区之间的完全分布式调度。该成果具有较强的推广潜力，有望在岸电系统优化调度领域中得到广泛应用，推动整个行业的科技进步。

关键技术/创新要点

本成果提供了一种基于虚拟电压的多港区岸电系统完全分布式优化调度方法，适合于多港区岸电系统，如图1所示；所述方法仅需要节点电压的虚拟值在相邻港区之间传输，该虚拟值不会泄露港区用户的关键用电信息，并且在此基础上本成果所采用的随机步长机制，减少了虚拟电压信息之间的交互次数，进一步减少相邻港区之间信息的传输次数，实现对港区用户的数据信息保护，降低了用户关键信息泄露的风险，且不会引入额外的交互量，实现不同港区之间的完全自治调度，如图2所示。

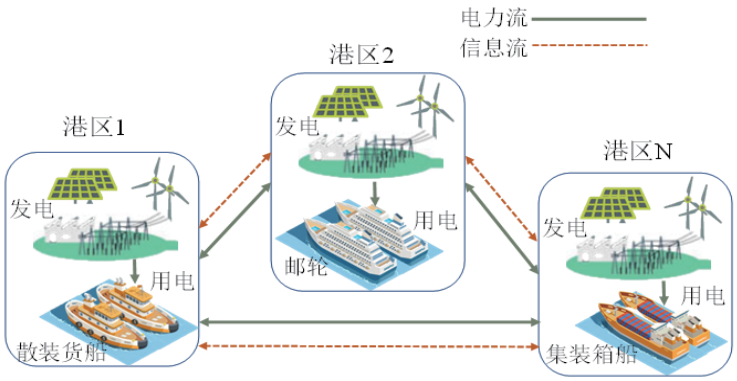


图1 多港区岸电系统的结构示意图

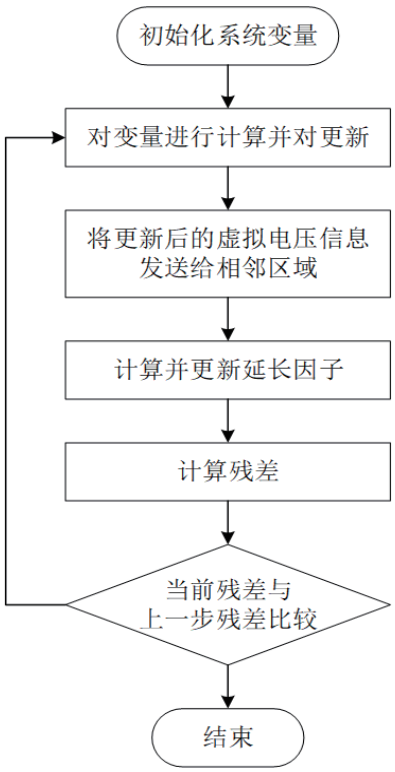


图2 采用随机步长ADMM下降算法的计算流程图

技术指标/优势

本成果分别与采用经典ADMM算法、ADMM下降算法的分布式调度性能进行比较，经过改进的ADMM算法在迭代次数上有了明显的下降，这是由于在改进ADMM算法中同时、同步更新两个变量，解耦变量与对偶变量，加快了收敛的次数；其在，在变量的更新过程中由于步长不再固定，而是在每次迭代中随机产生步长，增加了算法的适应性，同时提高了运算性能。具体效果参见专利《基于虚拟电压的多港区岸电系统完全分布式优化调度方法》。

应用领域和市场前景

本成果所提方法有效降低了岸电系统不同港区之间的信息传播量，在保证各港区用户的信息隐私性的同时，能够降低系统对通信带宽及信息储存的需求，本成果采用完全分布式调度结构，与已有分布式经济调度方法相比更具有普适性。

针对网络攻击下配电网风险级联的安全风险评估方法

成果完成人	葛辉	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	网络与通信安全技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	控制科学与技术
应用行业	现代电力系统				
核心专利号	ZN202210593976.9				

成果概述

随着通讯科技进步，现代电力系统已向着信息技术和物理系统深度整合的电力信息物理系统转变。相较于旧式物理电力系统，这一新型系统在即时感知、动态管理和信息服务方面展现出显著优势。然而，信息技术与物理设施的深度融合也增加了遭受恶意攻击的风险，从而对电力信息物理系统的安全稳定运行造成潜在威胁。进一步地，现阶段对旨在破坏物理电网的信息攻击研究仍旧欠缺对其跨界性和故障连锁特性的深入理解，导致现有风险评估方法在实际应用中效果不佳。

基于此，本团队自主研发了一种针对网络攻击下配电网风险级联的安全风险评估方法，用于解决配电网数据不完整、不可用等安全风险问题。该方法利用UML建模技术分析配电网风险要素，通过粗糙集约简风险要素集，再利用最优理想解算法（TOPSIS）量化风险要素和系统脆弱性关系。接着，使用贝叶斯图论模拟风险级联效应，考虑配电网负荷损失量化攻击对系统影响，最终综合评估获得风险值和风险等级，来评估有源配电网数据的安全风险问题。

关键技术/创新要点

该成果准确性地把配电网系统的风险数据分为了三个系统来进行风险评估，图1主要构建一种针对网络攻击下配电网风险级联的风险评估方法的整体框架，主要包括三个部分：风险数据预处理系统、风险动态检测系统及风险综合评估系统。

具体通过UML建模技术分析配电网的风险要素，利用粗糙集理论对风险属性进行约简，从而提高预处理系统风险识别的效率，到采用层次分析法挖掘各风险属性要素的权重系数，然后结合最优理想解算法评估配电网系统各节点的脆弱性程度，并量化脆弱性程度与网络攻击概率关系的风险动态检测系统，最终通过构建基于贝叶斯图论的信息侧风险级联评估模型，结合物理端的负荷损失数据，全面评估系统的安全风险等级的风险评估系统，这种层层递进的方法不仅增强了对网络攻击影响的动态监测和实时评估能力，而且强化了风险管理的针对性和有效性，为保证电力信息物理系统在面对网络安全威胁时的稳定运行提供了技术支持。



图1 一种针对网络攻击下配电网风险级联的风险评估方法的组成结构图

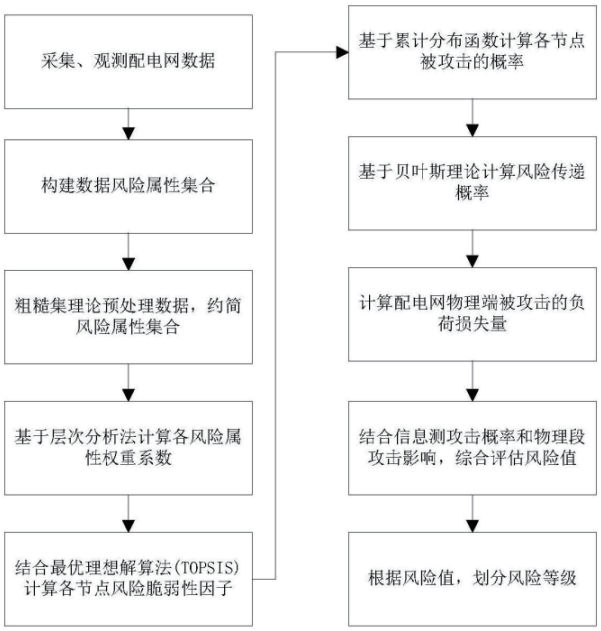


图2 参考体系结构示意图，表示本成果所述风险评估方法包括的组件

技术指标/优势

该成果可以有效解决配电网采集端、传输通道及接收端的数据不完整、不可用等安全风险问题。通过一种针对网络攻击下配电网风险级联的安全风险评估方法构建的风险评估模型，可有效识别风险要素集和主动配电网脆弱性关联关系，准确评估系统风险值。

已授权发明专利《针对网络攻击下配电网风险级联的安全风险评估方法》一项。

应用领域和市场前景

该成果提出了一种全面的安全风险评估方法，专注于现代电力系统领域内的数据安全，尤其是信息网络与物理网络深度融合的电力信息物理系统面临的网络安全威胁。该方法综合应用了UML建模、粗糙集理论、TOPSIS最优理想解算法和贝叶斯图论等技术，旨在提高配电网在遭受网络攻击情况下的风险评估能力。鉴于全球能源结构转型和智能电网发展，该技术不仅适用于提高现有电力系统的安全性，还适应于未来各种复杂电力系统结构的安全管理需求。随着对网络安全重视程度的提升和相关政策法规的出台，该发明展现了广阔的市场前景，对保障国家安全和社会稳定，促进数字化和智能化发展具有重要价值。

基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法

成果完成人	葛辉	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	网络与通信安全技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制科学与技术
应用行业	现代电力系统				
核心专利号	ZL202210593965.0				

成果概述

随着计算机技术的飞速发展，针对有源配电网的攻击日益频繁，且攻击危害不断加大，其中网络协同攻击较为典型。攻击者采取多种攻击协同的方式，实施大规模恶意攻击，对有源配电网安全运行产生了重大威胁，且协同攻击发动效率高、隐蔽性强，给检测和防御技术带来了巨大挑战。传统的防御协同攻击的方式还停留在防火墙、安全漏洞探测等，难以应对协同攻击的挑战。因此，针对网络协同攻击进行建模和危害定量分析显得尤为重要。

本成果设计了一种基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法。该方法根据有源配电网系统运行特点，利用有限状态机构建融合有网络攻击的混合一体化动态模型。后续可以通过采集、分析网络攻击数据来对网络中的攻击进行检测并计算出对应网络攻击行为产生的影响，以综合完成网络协同攻击态势分析，同时利用零和博弈的方法决定有源配电网受到攻击后是否需要报警，进而对异常数据进行筛选、剔除，迅速将网络攻击行为造成的影响降到最低，保证有源配电网的安全稳定运行。

关键技术/创新要点

考虑到实际系统运行特性，本发明对运行中的系统进行数据采样，得到不同系统参数下对应的状态采样周期的最大公因数，从而获取异/同步双模态混杂系统中有限时间段内的同步时刻，以采样周期短，采样频率高的信号的快变信号为主，采用就近原则进行切换，同时融入网络攻击对系统运行参数带来的不确定影响，形成融合有网络攻击的混合一体化模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + D_i \omega_i(t) + \Delta_i(t), i \in S_1 \\ x_j(t+1) = A_j x(t) + B_j u(t) + D_j \omega_j(t) + \Delta_j(t), j \in S_2 \\ S_1 \bigcup S_2 = S := \{1, 2, \ldots, n\} \end{cases}$$

通过对混合一体化模型进行数据采集、分析与清洗解耦完成系统中网络攻击的行为检测与协同攻击解耦，采取单一分析、全面考虑的思想，针对不同系统组成元素遭受不同网络攻击的攻击概率与影响进行分析，最终融入到大系统中，对整个系统可能遭遇的安全风险V进行量化计算：

$$V=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\times V_i=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\gamma_i\times\rho_{ij}\times\pi_{ij}$$

根据风险量化计算得到的结果获取配电网网络安全状态集合，采用零和动态博弈的思想定义一个安全攻防博弈模型$G=(P,Z,\Theta,S)$，同时分析系统在达到安全状态时，攻防双方策略集中策略对应的概率分布，总结要达到安全状态时，攻防双方的期望收益函数。最后利用非线性规划方法，得到能够抵御“适度风险”的最优控制策略及对应的纳什均衡解，并基于纳什均衡解判断系统是否发出警报。

在确定发出警报后，数据服务中心对采集到的数据进行遍历并筛选出系统受到攻击后存在异常的数据，对异常数据进行剔除，将正常的不同数据类型的数据集合取平均值来代替异常数据保证系统正常运行。

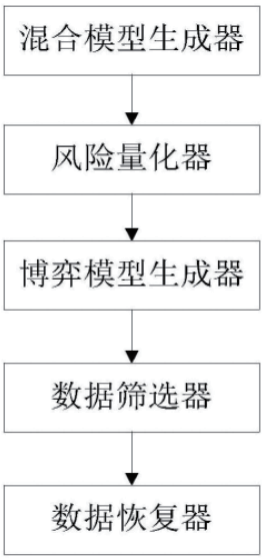


图1 基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法组成结构图

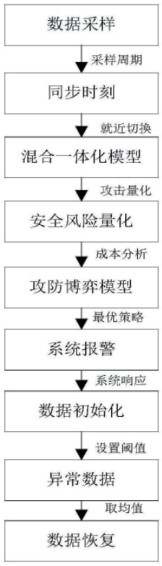


图2 参考体系结构示意图

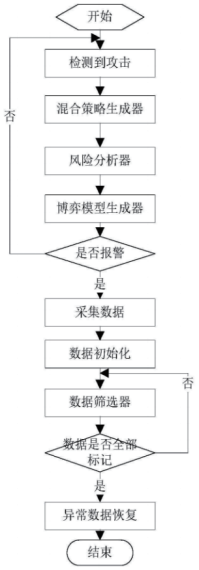


图3 基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法流程示意图

技术指标/优势

与传统的被动防御技术相比，本发明实现了对有源配电网系统及设备运行过程进行有效监控，通过量化网络攻击行为产生的风险使系统具备主动防御能力，可以根据博弈模型求得的纳什均衡解选择最优响应策略，令网络协同攻击对电网数据服务的影响降到最低，最终实现降本增效和对有源配电网的安全防护。

应用领域和市场前景

该成果是基于博弈论的网络协同攻击建模和危害定量分析方法，主要用于解决针对有源配电网的网络攻击建模和防御策略的问题，可为有源配电网网络攻击检测、安全防护等相关方面提供高效的技术支持。如通过建立融合有网络攻击的混合一体化模型，与以往单一模型相比，一体化模型具有更好地精度，与实际系统更加贴切，基于此模型的一系列研究也可以应用于实际有源配电网系统。通过风险量化计算与动态博弈及数据恢复相结合的方法，使得系统具有了主动安全防御能力且响应速度快。随着发电规模与电网拓扑进一步扩大，本技术可以帮助电网安全领域的工作者更好地研究网络协同攻击特性，快速对受到网络攻击而导致主动防御策略失效的系统进行防护，实现降本增效，高效保证电网的安全稳定。

网络攻击下基于动态博弈的配电网防御策略设计方法

成果完成人	葛辉	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	网络与通信安全技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制科学与技术
应用行业	现代电力系统				
核心专利号	ZL202210900635.1				

成果概述

随着互联网技术的飞速发展，网络化通信及控制技术在智能电网系统中得到了广泛的应用，大量的网络协议和应用也开始服务于智能电网系统，但与此同时也增加了攻击者通过网络攻击非法入侵智能电网系统的风险。网络化通信及控制技术使得智能电网系统快速发展并实现了远程监控等功能，这意味智能电网系统必须与外部网络保持实时通信，攻击者可以通过挖掘外部网络和控制系统的连接漏洞，发起恶意网络攻击，产生巨大威胁。

与传统的信息安全不同，对于智能电网中控制系统最重要的要求是能够稳定运行，因此防御策略设计需要满足一定的“容侵性”，即系统在受到一定程度的网络攻击下可以继续保持稳定性，能够承受一定程度上的“安全风险”。

鉴于上述原因，为弥补现有技术存在的不足，本成果采用博弈论设计的主动防御策略可以弥补原来被动防御的不足，分析有限理性的攻击者和防御者之间的动态博弈过程，求解精炼贝叶斯纳什均衡，使得动态策略的选择更具准确性和实用性，从而实现有源配电网抵御适度风险的最优控制策略设计。

关键技术/创新要点

本成果以准确得到有源配电网在满足容侵条件下的最优防御策略为目标，将电网防御者和多源网络攻击视为双人博弈的攻防双方，匹配博弈论中不完全信息动态博弈，遍历双方针对某一节点的所有可能策略组合并计算收益，得出单个节点局部纳什均衡解并推广到其他节点，考虑在所有节点将问题转化为非线性动态规划问题，通过安全系数判断修正纳什均衡解，最终求出整个策略集的纳什均衡解。

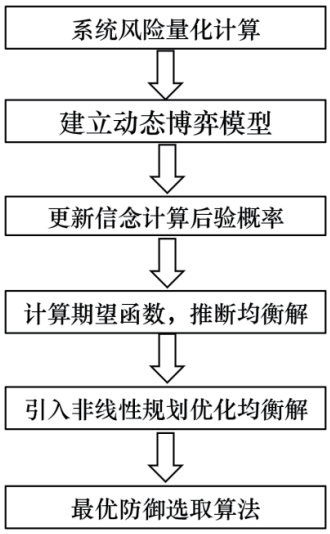


图1 基于动态博弈的配电网防御策略设计方法的流程图

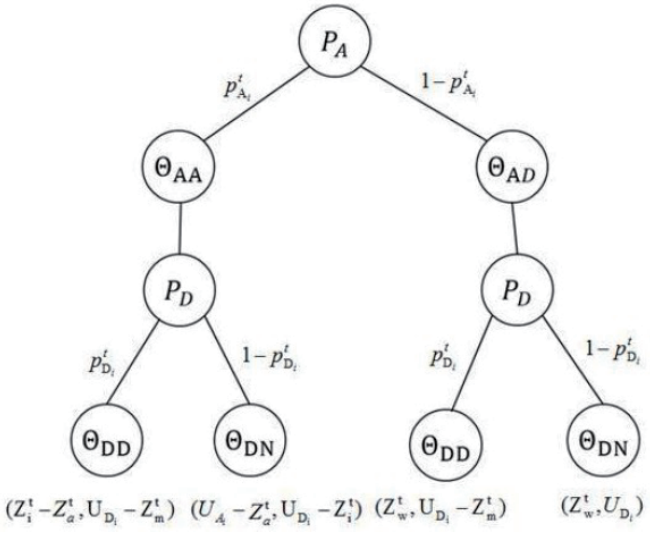


图2 具体节点求解纳什均衡解的博弈树

技术指标/优势

本成果将电网防御者和多源网络攻击视为双人博弈的攻防双方，考虑攻防双方掌握信息的不完备性以及博弈的动态性匹配博弈论中不完全信息动态博弈，遍历双方针对某一节点的所有可能策略组合并计算期望收益，得出单个节点局部纳什均衡解并推广到其他节点，最后考虑电网里所有节点，对于潜在的多节点协同攻击将问题转化为非线性动态规划问题，通过安全系数判断修正纳什均衡解，在保证电力系统遭受网络攻击后能稳定运行的前提下减少采取的防御决策，最终求出整个策略集的纳什均衡解。由此可见，本成果可以准确得到有源配电网在满足容侵条件下的最优防御策略。

应用领域和市场前景

网络攻击下基于动态博弈的配电网防御策略设计方法主要应用于电力系统的安全管理领域，尤其是在智能电网和配电网的安全性提升方面。随着智能电网技术的发展和分布式发电资源的增多，配电网面临着越来越复杂的安全挑战，包括来自外部的网络攻击和内部的故障风险。动态博弈理论在这种情况下提供了一种有效的分析和设计工具，可以帮助电网运营商预测和防御潜在的攻击，确保电网的稳定和安全运行。

考虑最优防御资源分配的配电网风险评估模型

成果完成人	徐俊俊	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	/
应用行业	智能电网				

成果概述

随着信息技术的发展，传统配电网已经向配电信息物理系统(CPDS)转变，因此配电网的受攻击风险量化评估也迎来了新的挑战。针对这一问题，本研究以SCADA系统遭受网络攻击为例，提出了一种新的配电网量测装置风险评估模型。首先利用风险传播模型构建SCADA系统的节点网络图并分析攻击路径以及攻击概率。其次构建配电网电力侧的物理指标，对物理装置受攻击的行为进行量化分析。然后针对网络攻击计算防御保护成本，在此基础上结合提出的风险评估模型建立了面向量测装置的防御资源多目标优化配置模型。仿真算例验证了所提风险评估模型与防御资源优化配置方法的可行性与有效性。

关键技术/创新要点

本研究以SCADA系统为例，提出了一种新的风险评估模型，建立了相应的防御资源优化配置方法，本研究模型和方法同样适用于伪量测和微型同步相量测量单元（μPMU），并提出了以下两个创新点：

(1)计算网络攻击概率时很少综合考虑各信息漏洞的利用难度以及攻击者的技能水平，对于网络攻击的风险量化分析不足。本研究综合考虑多种因素的影响，对不同安全漏洞的可利用率进行计算，并分析其对下一个节点的影响；

(2)攻击者对于配电网的攻击应是跨信息物理空间的，在研究系统遭受网络攻击时，本研究考虑了信息侧的攻击对电力侧造成的物理后果。

本研究的研究路线图如图1所示。

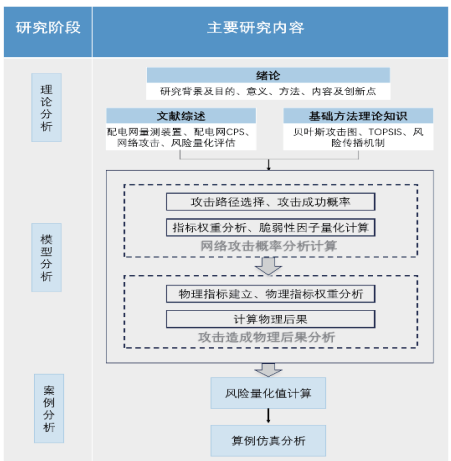


图1 研究路线图

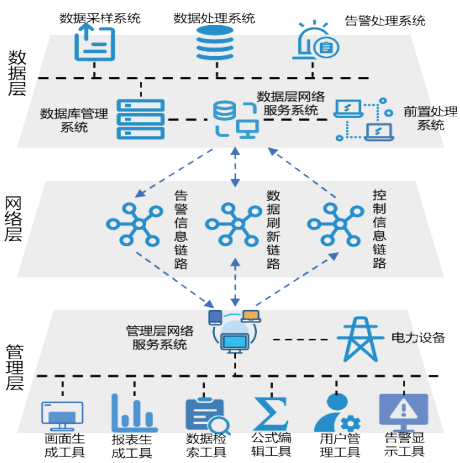


图2 SCADA系统网络结构图

本研究将SCADA系统分为数据层、网络层和管理层三个层面，对SCADA系统进行网络结构建模。SCADA网络结构图如图2所示。然后将三层模型等效为节点网络图，根据风险传播模型的理论计算节点间的风险传播概率。紧接着考虑风险造成的物理后果和防御成本，根据给出的风险量化公式计算系统风险。

最后结合上述提出的系统风险的量化评估模型，面向量测装置提出基于既定防御资源总量和分配精度的防御资源分配方法，以防御资源分配总量最少且系统总风险值最低为目标函数，构建CPDS防御资源优化配置模型。

图3所示为本研究的方法与其他方法的仿真结果对比。

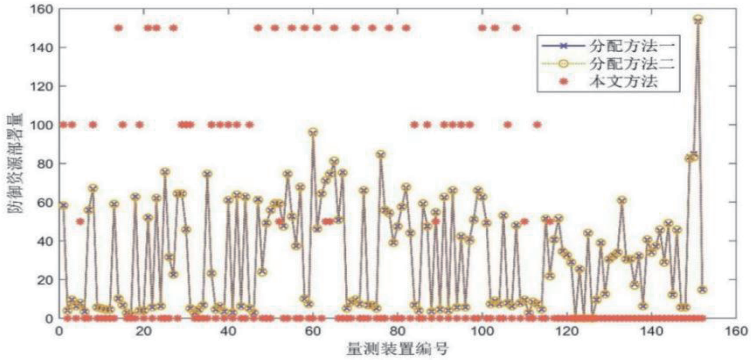


图3 仿真结果对比

技术指标/优势

技术指标：在配电网受攻击场景下，所研究方法的风险值显著低于未分配防御资源的风险评估方法。

优势：

1、本研究在量化网络攻击风险时综合考虑了不同因素造成的影响以及节点间的相互总用。

2、其他方法在部署防御资源时仅是进行简单的分配，而本研究将总防御资源划分成若干份，每次取一份分配给降低系统风险值最多的量测装置，充分考虑了每种量测装置的特殊性。

创新点：

相比于现有电网信息物理系统风险评估方法而言，本成果综合考虑了各种攻击方法和影响因素，计算了安全漏洞的可利用性，并通过风险传播模型分析了受攻击节点对后续节点的相关影响；在考虑信息层漏洞的同时，也考虑了攻击对物理层（量测装置）造成的影响，并利用量测装置的防御成本改进了风险评估方法。

基于上述创新点，发表中科院二区SCI检索论文1篇：Junjun Xu, Han Miao, Tengfei Zhang, et al. A Risk Assessment Model for Distribution Systems Considering Optimal Defense Resource Allocation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, early access, doi: 10.1109/TIA.2024.3399690.

应用领域和市场前景

近年来自然灾害和蓄意攻击等极端事件频发，其破坏性强、波及范围广、恢复难度大，严重降低配电网供电可靠性，从而影响国民经济发展与国家安全。本成果对建立配电网信息物理系统在多重网络攻击环境下的系统脆弱性评估体系具有理论价值和实际意义。所提电网信息物理系统风险评估方法及其防御资源优化配置方案可为信息物理融合背景下配电网安全可靠优化运行提供了理论支撑和数据支持，同时相关模型和方法也可进一步推广至分布式信息能源系统态势感知与优化运行中。

计及量测终端通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制方法

成果完成人	徐俊俊	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	/
应用行业	智能电网				

成果概述

研究背景：近些年来，在“双碳”目标的持续推进下，能源结构不断向清洁低碳转型，光伏、风电等分布式电源的大规模接入，配电网规模日趋庞大，使得配电网运行特性更加复杂，分布式资源数量迅猛增长，电压波动问题日益突出。随着智能电子设备与信息通信技术的广泛应用，系统数据采集量与通信交互需求不断增加，但海量分布式电源并网与智能电子设备的大量接入，使得计算任务与通信压力显著上升，导致监测与控制响应滞后，进一步加剧电压波动。传统大规模配电网在面对高渗透分布式资源场景时，难以实现高效电压调控，系统调节能力不足，电压稳定性难以得到有效保障 。

关键技术：团队提出一种计及通信延迟的主动配电网准实时无功-电压控制方法，旨在提升高渗透分布式电源场景下的电压调控能力，增强系统运行鲁棒性，提高电压控制的准确性与稳定性 。

成果水平：本成果属于行业先进水平。

关键技术/创新要点

创新点：

1.针对高渗透分布式光伏接入下配电网电压波动剧烈、集中式控制响应滞后的问题，创新性地提出了一种基于网络拓扑映射的边缘节点部署方法，将配电网划分为多个子区域进行分布式调控，提高了电压控制的实时性与计算效率，边缘节点部署示意如图1。

2.创新性地提出了一种基于边缘计算的前推回代潮流分析方法，在各边缘节点完成局部功率流、电压及线损计算，实现潮流计算的分布式处理，降低了主站计算压力，提高了大规模配电网的计算效率。

3.构建了光伏逆变器与有载调压变压器协同的无功-电压控制模型，在边缘节点框架下实现下垂式电压控制与多设备协同调节，有效提升了电压调控精度与系统运行稳定性。

4.考虑通信延迟对控制同步性的影响，提出改进一致性算法，通过步长优化与数据补偿机制实现多节点数据同步，实例分析结果表明，该方法在响应速度与控制效果方面具有明显优势，图2为分布式电压控制结果，图3为通信延迟条件下算法性能对比图。

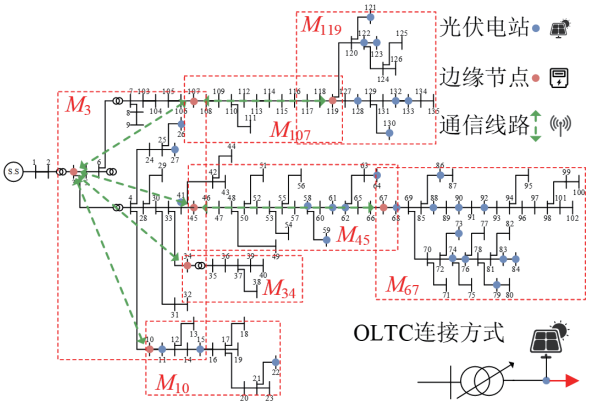


图1 配电网系统边缘节点部署示意图

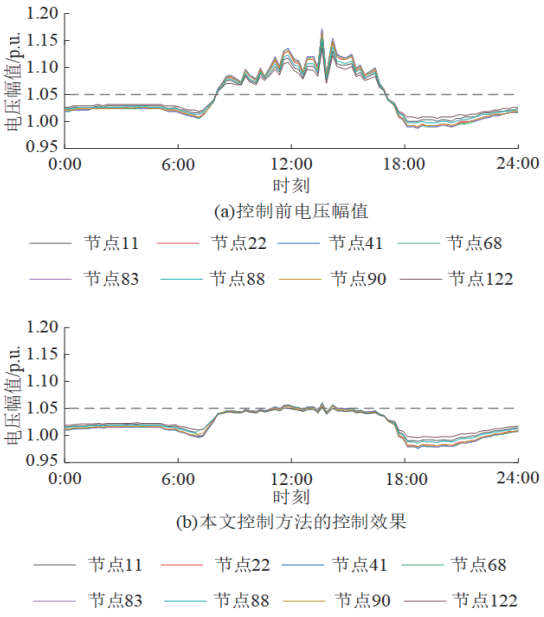


图2 基于边缘计算方法分布式电压控制效果图

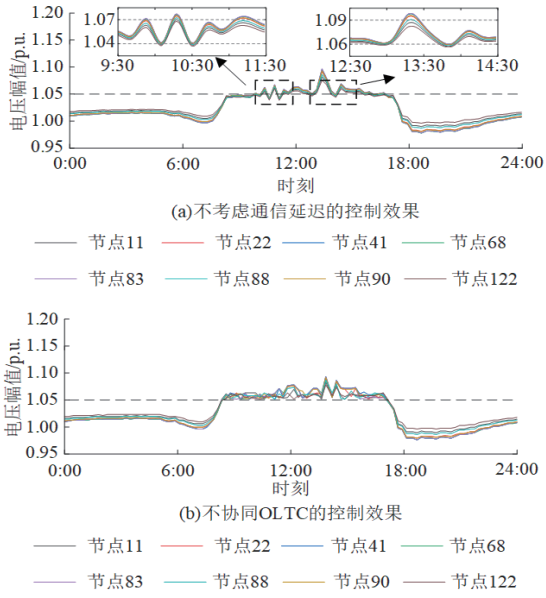


图3 不同电压控制方法效果对比图

技术指标/优势

1.与其他方法相比，本方法在电压控制效率、响应速度及运行稳定性方面均有显著提升；

2.与其他方法相比，本方法更适用于高渗透分布式电源接入的大规模主动配电网场景；

3.本方法在考虑通信延迟影响的条件下，通过边缘计算与改进一致性算法的协同作用，实现数据同步与控制优化，提升了电压调控的准确性与可靠性。

应用领域和市场前景

随着国家战略逐渐转向碳达峰、碳中和，国家能源结构也随之发生巨大改变，光伏发电，风力发电等清洁能源的广泛接入，智能电子设备与通信终端数量增长，导致配电网规模日趋庞大，数据与通信压力不断增加，电压控制难度随之上升，此时，配电网系统仍面临通信延迟与控制响应滞后的问题，传统集中式电压控制在面对高渗透分布式电源场景时，难以及时调节，系统自身的稳定性较差。团队所提方法可为大规模配电网在通信受限条件下的电压控制提供了一种新的解决思路。

新能源产业是我国的重点产业，故分布式电源的并网率仍然会增加，并且，随着城市的发展，配电网的规模也会逐渐变大，通信复杂性与调控难度也会提升，因此，本方法具备广阔的市场前景。

基于5G通信的高耗能可调负荷调峰调频协调控制策略研究

成果完成人	付蓉	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	/
应用行业	高耗能工业负荷节能				
核心专利号	ZL201910545489.3				

成果概述

随着新型电力系统建设中高能耗企业对电能的消费日益增加，需要对这类负荷根据电网需求进行快速调节的可行性研究，重点研究根据生产工艺过程的控制技术接口和通信方式，实现在电网需要时，实现负荷的快速柔性调节控制，满足电网多时间尺度负荷控制的需要。

项目研究了换电站、电解铝、水泥行业等电力负荷高可靠控制接口关键技术，针对各路终端通信接口，对其通信环境进行分析，确保通信环境的安全可靠性；研究了多元电力负荷控制终端边缘计算技术，建立控制终端边缘计算能力；研究了负荷控制终端数据快速交换技术，增强负荷控制的时效性，降低时延；研究基于5G新型通讯技术的电力负荷的监测和控制方法，借助5G通信技术实现可调负荷参与电网的快速信息交互和紧急控制。

关键技术/创新要点

（1）提出了高耗能可调负荷参与电网友好互动的控制接口和控制方式

针对电解铝、水泥厂等高耗能企业参与电网调控等问题，创新性的提出多目标约束下典型可调节负荷参与需求响应的调节策略，结合不同类型柔性负荷的用电方式、调度模式、提前通知时间、可调节量、对电价和激励信号的响应形成高耗能企业可调节负荷参与需求响应的调节策略库研究其生产工艺流程，分析出可调节负荷类型，研究其负荷特性，在保证生产安全的前提下，评估出负荷响应能力和可调节深度及速度。

（2）提出多时间尺度下基于5G通信的高耗能可调负荷互补控制策略

针对高耗能可调负荷能量管理策略难以对电网实现响应与支撑、以及电网调峰需求和用户紧急需求之间的矛盾问题，采用智能调度和调控云技术，在智慧能源平台新增大工业用户负荷的日前计划和AGC模型，提出多时间尺度下基于负荷可调节容实时互补优化控制的多元负荷能量管理调度策略，基于具有边缘计算能力的新型电力负荷控制装置—智慧能源单元CTU，实现了基于5G等新型通讯技术的高耗能可调负荷的监测和控制，如图1所示。

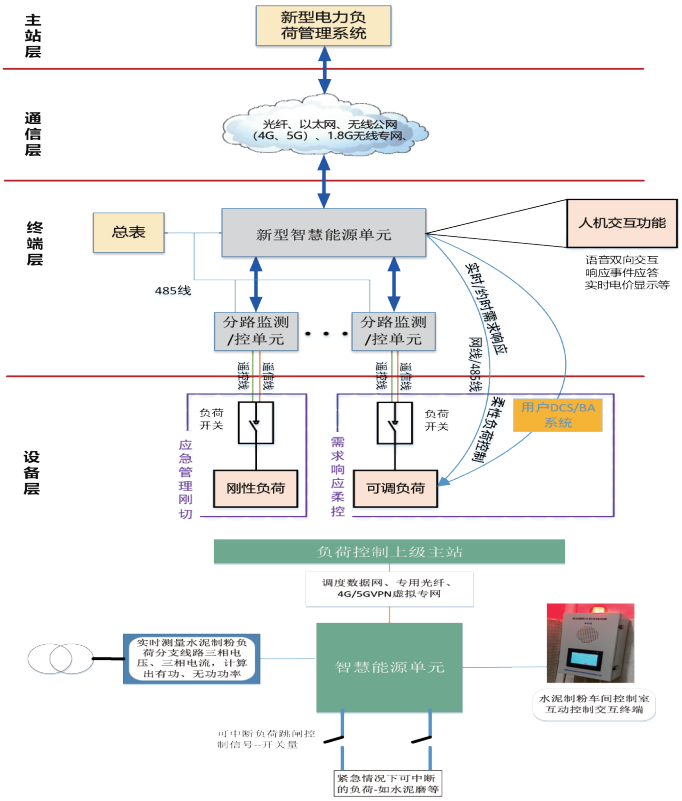


图1 负荷控制接口与调控测量方案图

技术指标/优势

提高高耗能负荷参与需求响应和负荷快速调节的安全性和经济性。在电网日内需要时，进行实时负荷控制，负荷下降控制的速度较快，可达到百万千瓦级，因此，下降10%的负荷，可以达到10万千瓦的数量级，能大大输电缓解断面或主变过负荷。负荷控制系统采用分层结构设计，若部署方案以省为维度，系统分为省侧主站层、地市子站层和用户接入层3个层级。3个层次之间实现负荷模型、实时数据、调节策略的交互，在负荷高峰发电能力不足或出现结构性缺电时在需求响应政策的基础上，可以通过负荷调节和控制的手段，对可调节负荷进行快速精准控制，实现电网的供需平衡，其中负荷调节子站与负控终端间通信链路由电力通信专网与运营商5G虚拟专用通道共同组成。

应用领域和市场前景

系统利用5G通道，为可调节负荷控制系统提供安全可靠的通信通道，有效支撑了电网的“源网荷互动”功能。负荷控制用户户数已达214户，可控开关为1116个；需求响应签约户数737户，签约负荷317.86万千瓦时，已节约系统运行成本9857.35万元，随着用户接入量逐年上涨，节约费用将逐年递增。研究成果促进了在需求侧大力实施电能替代，在提升电网负荷侧的灵活性的同时，提高了电网应对新能源波动性和不确定性的能力，保证大电网的安全稳定可靠运行，有助于提升全社会能效，实现能源系统运行优化及能量优化管理，有效节约能源利用，助力地区有效提升清洁能源的就地消纳比例，增加低碳能源供给，降低碳排放强度。

用于漏电流抑制的箝位型三相光伏逆变器

成果完成人	马海啸	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	电力系统与设备		高技术领域（三级）	发电与储能	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程	二级学科	电力电子与电力传动	
应用行业	电力行业				
核心专利号	ZL202010678807.6				

成果概述

本成果所要解决的技术问题是克服现有技术中三相光伏逆变器在漏电流抑制技术方面的的不足。因此研究了一种单母线隔离双向箝位十开关三相逆变器拓扑，该拓扑结构可以降低逆变器的共模电压变化范围，有效抑制漏电流，保障设备和人身安全。

关键技术/创新要点

本成果研究的逆变器电路图如图1所。直流母线隔离开关管和箝位电路的加入，使得逆变器在续流阶段其共模电压被双向箝位至Ud/3或2Ud/3。因此，在整个逆变周期内，逆变器的共模电压只在Ud/3和2Ud/3之间跳变，变化范围降低，从而有效提升了光伏逆变器的漏电流抑制能力，保障了设备和人身安全。

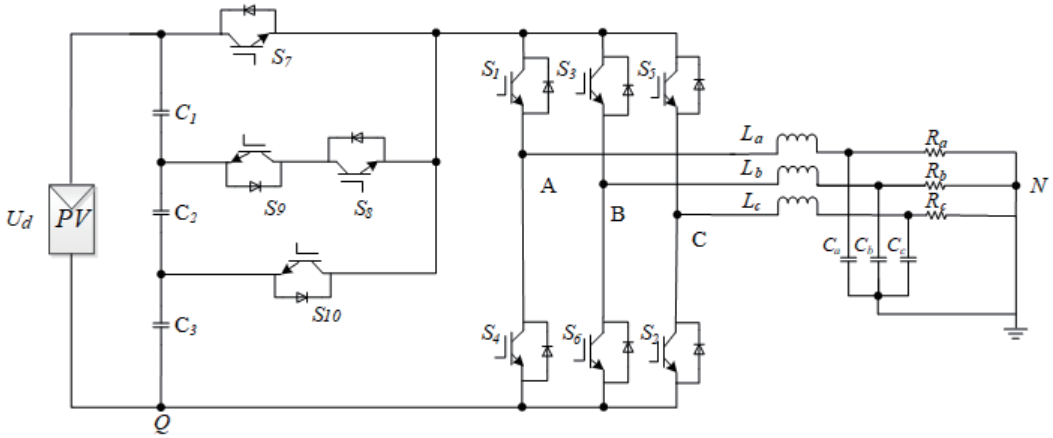
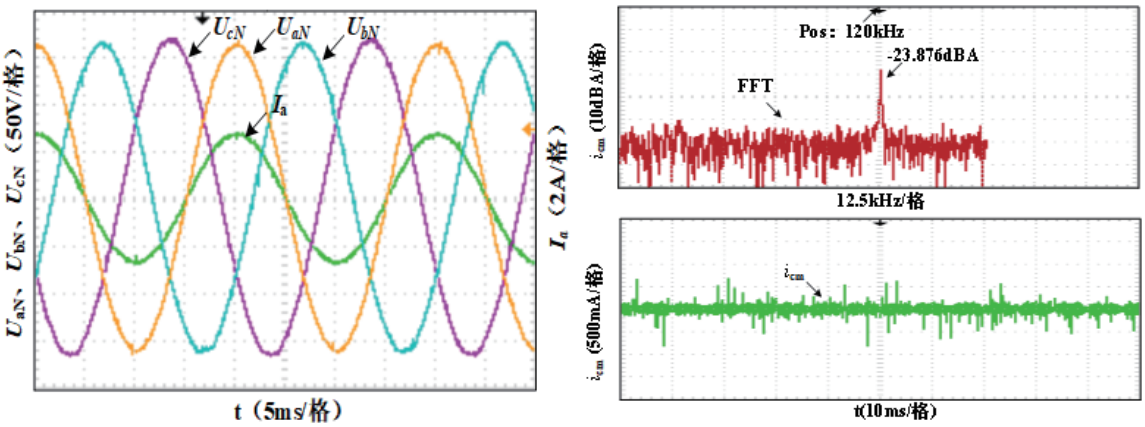


图1一种单母线隔离双向箝位十开关三相逆变器拓扑

图2为逆变器实验结果，其中图2(a)为逆变器输出电压电流波形，图2(b)逆变器漏电流及其频谱波形。可以看到逆变器电压电流波形良好，漏电流幅值很低。



（a）　　(b)

图2逆变器实验结果

技术指标/优势

和其他已有方案对比，省去了一个直流母线开关，增加了一个箝位开关。直流母线开关承担逆变器所有的变换功率，因此流经直流母线开关的电流较大，其通态损耗和开关损耗都较大，使得开关总的功率损耗较大。但箝位开关只提供箝位作用而不参与逆变器的功率交换，流过其间的电流近似为零，其通态损耗和开关损耗均很小，使得开关总的功率损耗较小。综上所述本方案采用一个箝位开关替换一个直流母线开关的方案有利于减小逆变器的开关器件损耗，提高了逆变器的效率。

应用领域和市场前景

光伏发电是最具前景的可再生能源应用之一，可以满足人类未来的能源需求并克服环境污染问题。在其应用过程中不可避免要使用光伏逆变器，光伏逆变器具体到市场趋势，将呈现出以下几个特点：1、成本优势逐渐体现。随着光伏发电产业技术的不断革新和产业链上下游竞争的加剧，光伏发电成本整体呈下降趋势，使得光伏发电的成本优势进一步凸显。2、“光储一体化”成为行业发展趋势。通过在光伏发电系统中增加储能逆变器和储能电池等设备，有效解决光伏发电的间歇性和波动性问题，实现电力在发电侧、电网侧和用户侧的稳定运行。3、组串式逆变器市场占比继续上升。组串式逆变器因其安装灵活、智能化程度高、易于维护和安全性高等特点，市场占比整体呈上升趋势，已超越集中式逆变器成为目前的主流应用产品。4、新增装机需求与存量置换需求并存。随着使用时间的增长，各类元器件的老化、磨损现象会逐渐显现，逆变器发生故障的概率也随之提升，这将刺激对新的逆变器需求。

综上所述，光伏逆变器市场在技术进步、成本下降和政策支持的推动下，预计将继续保持增长态势，而低漏电流的无变压器逆变器可以综合提高逆变器性能具有广阔的市场前景。

面向台区的集群空调与电动汽车协同优化方法

成果完成人	陈璐	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	设计服务	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	新能源发电、电动汽车等				
核心专利号	ZL202510321918.4				

成果概述

随着电力市场的不断成熟，外部现货市场价格波动频繁，应将现货市场价格信号引入台区层面负荷管理中，通过构建合理的集群空调负荷控制模型和电动汽车充放电模型，提出面向台区的集群空调与电动汽车协同优化方法，具有重要的现实意义和应用价值。提出一种面向台区的集群空调与电动汽车协同优化方法及系统，引入集群空调负荷控制模型和电动汽车充放电模型，结合外部现货价格波动因素，构建以经济最优为目标的集群空调与电动汽车协同优化模型，在满足台区负荷调控需求的同时，协同电动汽车，降低用电成本，提升电力系统的经济稳定运行。

关键技术/创新要点

（1）输入空调基础负荷、能效比、房间等效热阻、室内温度上下限等关键参数，建立基于温度差的集群空调负荷控制模型。该模型以用户室内温度舒适度范围为核心约束，通过温差调控系数精准反映空调负荷随温度变化的响应特性，在保证用户体感舒适的前提下，对集群空调进行平滑化调控，有效避免多台空调集中启停造成的负荷剧烈波动，降低对台区电网的瞬时冲击，提升空调负荷调控的稳定性与可控性。

（2）输入电动汽车电池容量、最大充放电功率、荷电状态安全区间、用户出行计划等参数，构建考虑充放电限额的电动汽车充放电模型。模型设置电池荷电状态上下限约束、充放电互斥约束、离网目标电量约束及累计充放电限额约束，在满足用户日常出行电量需求的同时，严格避免电池过充过放，延长电池使用寿命。

（3）将集群空调负荷控制模型与电动汽车充放电模型深度耦合，引入外部电力现货市场实时价格波动信号，构建以台区经济最优为目标的协同优化模型。模型目标函数全面涵盖购电成本、空调与电动汽车调控运维成本、室内温度超标舒适度成本，以及变压器功率越限损耗成本，通过多维度成本统筹，实现电网侧、设备侧与用户侧的效益平衡。

（4）通过标准化优化框架完成变量、目标与约束的规范化处理与全局寻优，最终输出分时段、精细化的集群空调调控策略和电动汽车充放电策略。优化结果可显著降低台区整体用电成本，减少变压器越限运行风险，提升台区负荷管理水平与电网运行经济性、安全性。

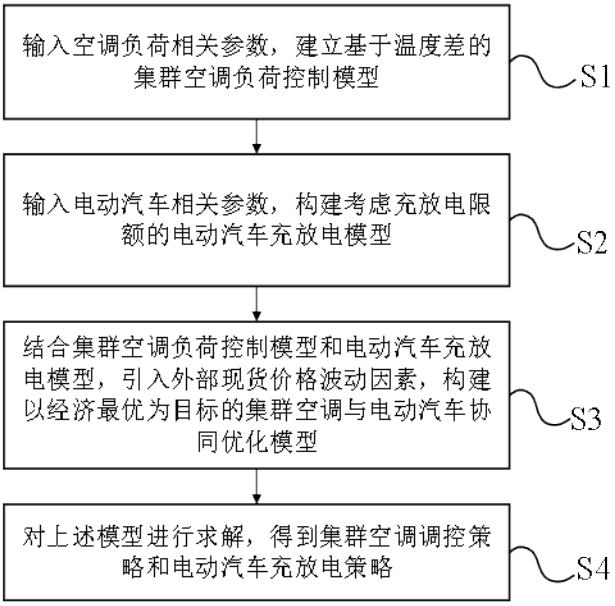


图1 集群空调与电动汽车协同优化流程

技术指标/优势

一是降低台区用电成本:引入变压器过载导致的成本增项,在考虑外部电价波动的情况下,优化电力购买、负荷调控和变压器过载等成本,通过协调空调负荷和电动汽车调控策略,优化台区运行经济性。

二是提高设备运行效率:通过合理的电动汽车充放电策略,避免了电动汽车过度充放电,提升了电池的使用寿命,此外也进一步减少变压器超负荷运行风险。

三是平滑集群空调调控曲线:通过基于温度差的集群空调负荷控制模型,在保证空调舒适度的前提下,对集群空调负荷曲线进行平滑处理,有效减集群空调调控对电网的冲击问题。

四是增强电网灵活性:通过实时协调空调与电动汽车的负荷分布,快速响应当前电力供需变化,尤其在电价波动时,动态优化充放电与空调调控策略,缓解了高峰时段的电网压力并减少局部电力短缺或冗余现象。

应用领域和市场前景

以台区下集群空调和电动汽车两类典型互动资源为例,通过对集群空调与电动汽车的协同优化,不仅能够可以实现空调负荷的合理调控和平衡电动汽车的充电需求,还可以在考虑电价波动基础上进一步提高了台区整体的经济效益和减少变压器越限行为,兼顾了电网侧经济性、可靠性和用户侧舒适度需求,实现电力系统和用户的双赢。

Fiber-Hydro：基于AI赋能的电解槽运行状态感知系统

成果完成人	余柯涵	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	科学分析仪器/检测仪器	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	光电子学与激光技术
应用行业	氢能源，化工				
核心专利号	2026101240490，2025101598792，2025101597535				

成果概述

在“双碳”战略驱动下，大规模电解水制氢成为核心路径。然而，电解槽内部属于高电流、强碱/强酸及气液两相流的极端复杂环境，传统传感器难以实现内部温场分布与气泡演化行为的精准探测，导致电解效率优化难、局部过热风险监控滞后等工业痛点。

本成果开发了一套集成高灵敏度光纤传感与机器学习算法的原理样机。突破了光纤在强电化学环境下的封装工艺，实现单根光纤对电解槽内微秒级气泡生长、脱离动力学及毫秒级温场波动的同步捕捉。结合1D-CNN与流形学习算法，实现了气泡覆盖度、流速及热点分布的自动识别。全光信号传输，具备天然的抗电磁干扰与防爆特性。

该样机解决了电解槽内部状态“不可见”的行业难题，核心指标如气泡识别精度、响应频率及多点解耦技术均达到国内领先水平。本成果可直接服务于制氢装备的结构优化、实时能效管理及预测性维护，为下一代高性能、智能化电解槽的研发提供关键底层数据支撑。

关键技术/创新要点

1. 极端环境下的一体化原位感知技术

传统的电工式传感器在电解槽强碱、高电流、气液两相流的复杂环境中极易受干扰或腐蚀。本成果创新性地采用全光纤传感阵列，利用光纤径向尺寸小（微米级）、化学惰性强及天然绝缘的特性，实现了对电解槽内部电极表面的直接“原位”贴合。本技术攻克了光纤在高温强碱环境下的特种封装工艺，通过单根纤芯实现了温度场与气泡演化行为的同步解耦探测，解决了传统传感器“放不下、测不准、寿命短”的痛点。

2. 微观气泡动力学的特征指纹识别

电解产生的氢气泡在电极表面的生长、覆盖与脱离过程直接决定了电解效率（欧姆极化）。本技术利用光纤反射率对气-液折射率变化的极高灵敏度，捕捉微秒级的信号波动。本技术建立了基于机器学习（1D-CNN与流形学习）的信号处理模型。该模型能像“听诊器”一样，从杂乱的光信号中精准提取出气泡的脱离频率、直径分布及覆盖率等核心物理参数，将不可见的电化学反应过程转化为可视化的数字化特征。

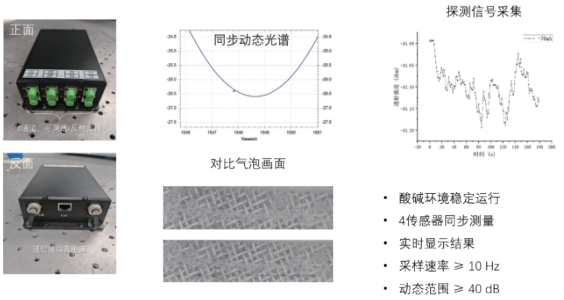
3. 基于多物理量融合的能效预警算法(应用层)

不仅是数据记录,更是智能诊断。系统通过实时监测温度梯度的异常波动与气泡排出速率的匹配关系,构建了电解槽健康状态评价体系。本技术提出了“热-气”协同诊断算法。该算法能提前预警局部过热(Hot Spot)或气泡积聚导致的“干烧”风险,为电解槽的电流密度分布优化提供直接反馈,有效延长电解堆使用寿命并降低综合能耗。

4. 零电磁干扰的本质安全架构(安全层)

氢能生产对安全性要求极高。本系统采用“无源探测+有源处理”的架构,传感器端无需任何电力驱动,从物理层面杜绝了由于传感器短路或电火花引发氢气爆炸的风险,符合氢能装备向智能化、高安全性发展的必然趋势。

制氢电解槽气泡监测系统样机



技术指标/优势

1. 核心技术指标

· 空间分辨率:准分布式测量,单根光纤可部署 1-20 个传感触点,最小间距可达 10mm。

· 时间响应:温度采样频率 10Hz - 1kHz(可调);气泡演化探测响应时间 < 50μs。

· 测量量程与精度:

温度:0°C - 150°C(覆盖常见 PEM/碱性电解范围),精度 ±0.1°C。

气泡覆盖率:0.5% - 95%,识别精度 ±5%。

2. 目前市场上无同类技术。

应用领域和市场前景

该成果针对大规模绿氢生产中电解槽内部“黑盒”反应不可见的行业痛点,创新性地将微米级特种光纤植入电极界面,利用其天然的抗电磁干扰与耐腐蚀特性,实现了对温场分布与气泡动力学演化行为的毫秒级原位感知。系统集成了高灵敏度传感阵列与1D-CNN智能识别算法,不仅能精准提取气泡覆盖率、脱离频率及局部热点等核心特征参数,更攻克了多物理量解耦与极端环境封装的关键技术,技术指标达到国际领先水平。该成果可广泛应用于PEM及碱性电解槽的性能优化、能效管理与本质安全预警,在万亿级氢能装备赛道中具备极高的降本增效价值与产业化前景,为下一代智能化氢能装备的国产化替代提供了核心数据支撑与传感方案。

面向机器人无感电机的关键技术研究与产业化

成果完成人	王韦刚	职称	教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	先进制造工艺与装备		高技术领域（三级）	高档数控装备与数控加工技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子与通信技术其他学科
应用行业	机器人、工业自动化、航空航天、医疗设备				

成果概述

目前在业内主流的无传感器控制策略中，普遍存在低速域控制中精度低、抖振、谐波失真等问题，这限制了无传感器控制在伺服系统与精密驱动中的应用。并且无传感器控制系统对电机参数敏感，温度波动、变负载工况下的电机参数变化会使得控制系统的性能下降，位置估算偏差增大，甚至系统失稳。本项目旨在实现一个面向无传感器电机控制场景下的全速域、高精度控制系统，不仅能够确保电机在低速域内精准稳定运行，还能使控制系统在电机参数出现变化的情况下依然保持优良的控制性能。

关键技术/创新要点

本项目设计了一种全速域无感控制方案，其中包含一种新型改进的滑膜观测器与高频注入相融合的转子位置估算算法，用以解决传统滑膜观测器在低速域中抖振严重、精度不足、谐波失真等问题；其次，为提高算法执行效率，本项目在硬件上采用自研的MCU+PLD的控制架构，将所使用的算法设计为IP核，使用PLD器件代替MCU进行运算；另外，本项目融合了DQN强化学习算法，用以应对电机参数变化所导致的控制系统的性能下降。另外还综合利用了AI智能算法，使得产品在国内外具有先进性。

技术指标/优势

本项目核心性能指标表现优异：通过自主研发控制方案，将抖振显著降低，大幅提升设备运行平稳性；角度误差控制在±1°内，转速误差稳定在±0.5%，均优于行业常规水平；谐波失真度优化至2%以下，领先主流技术；运算周期缩短至30微秒，实时控制效率显著提高，在同类技术中竞争力突出。

应用领域和市场前景

本项目的无感无刷无框FOC电机作为一种高度集成化、高性能的精准运动解决方案的核心，其市场前景在多个领域展现出显著的增长潜力，尤其在机器人、工业自动化、航空航天及医疗设备等高精度应用场景中，需求持续攀升。对于中小企业客户，专注于提供高性价比、实用的解决方案，以帮助其增加收入、节省成本。

无框FOC电机凭借其高扭矩密度、紧凑设计和直接驱动特性，成为人形机器人关节驱动的首选。它可简化传动链、提升系统刚性和空间利用率，适用于精密装配；在极端环境下，其高可靠性和长寿命特性成为关键优势；在医疗领域，它提供高精度控制，助力医疗设备实现微创手术和康复辅助随着工业自动化升级；协作机器人市场渗透率提升，无框FOC电机需求将持续扩大。

大型结构安全智能监测和预警关键技术

成果完成人	徐丰羽	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	极端制造与专用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械设计
应用行业	大型建筑结构检测、危险极限环境检测				
核心专利号	ZL202110618800.X、202010466106.6、202210375359.1、202210375381.6、202210375360.4、202210240273.8、202210240068.1、202210377283.6				

成果概述

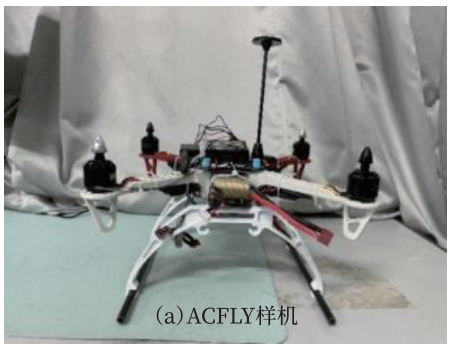
为实现对几百米高空的大型悬索桥、斜拉桥的索塔近距离全面高效稳定监测，拟结合多旋翼无人机高速和爬壁机器人稳定的优势，设计飞爬机器人系统，携带无损检测设备对索塔、桥墩等危险、极限环境进行检测，主要成果包括：

（1）设计了基于多旋翼驱动的飞行爬升机器人和飞行爬升机器人控制系统，完成了机器人飞行-着落-攀爬实验；

（2）完成了桥梁缆索检测机器人设计，包括：分体式高速、大负载缆索检测机器人设计，分体式缆索爬升机器人控制系统设计，分体式攀爬机器人实验；

（3）提出了桥梁结构无损智能检测技术，包括：提出了数据集构建方法与增强技术，基于深度学习的视觉缺陷检测技术，基于多源信息融合的缺陷检测技术；

（4）飞行爬升机器人桥梁巡检路径规划方法，包括基于人工势场法的桥梁路径规划设计，基于A*算法的桥梁路径规划。


（a）ACFLY样机

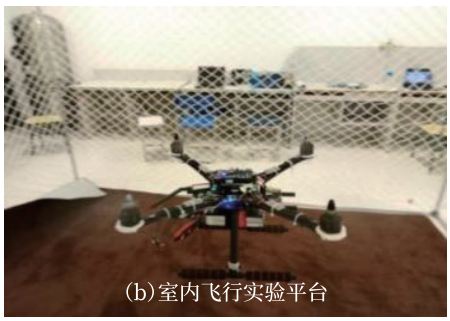

（b）室内飞行实验平台

图1 ACFLY无人机和实验平台

关键技术/创新要点

（1）振动接触条件下高速飞行爬升机器人着陆机构设计与贴合柔顺控制方法；

（2）缆索振动条件下高速飞行机器人动力学建模和运动姿态控制方法；

（3）针对桥梁结构外观/水下缺陷检测和定位任务，构建桥梁缺陷数据库，设计基于深度神经网络的视觉缺陷检测模型；

（4）针对桥梁缺陷的视觉、超声波、磁等多源数据之间差异较大问题，建立异构多源数据进行深度神经网络模型。

应用领域和市场前景

斜拉桥和悬索桥等桥梁应用的缆索结构在建筑、桥梁和其他基础设施建设中有较广应用，是建筑设施中常用的结构形式。单就桥梁而言，我国是世界上建造斜拉桥、悬索桥数量最多、跨度最大的国家，建造技术也处于世界领先地位。

我国在未来的铁路、公路建设中，修建大跨斜拉桥、悬索桥已经成为必然。此类桥梁为所提出机器人最基本的服务对象，同时爬升机器人的服务对象可扩展到高压输电线和危险杆类结构的检测工作，市场前景广阔。特别对大型斜拉桥，悬索桥，索塔超高，缆索超长，检测难度超大，依靠人工无法完成。

本创新旨在已有研究和桥梁结构现场检测实践经验基础上，根据斜拉桥三大受力构件结构特点，提出了研究大跨桥梁结构无损检测方法及相应的机器人，实现桥梁检测全覆盖，为桥梁安全评价提供数据支撑，提高桥梁智能检测和维护水平，保障桥梁安全运营。

同时，所提出的技术也可拓展到超高建筑、风电叶片、索/线/绳类等其它危险环境结构的故障检测工作，具有广泛的应用背景、良好的经济效益和社会效益。

自动折弯加装备及控制系统

成果完成人	徐丰羽	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	极端制造与专用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械设计
应用行业	工业特种加工				
核心专利号	US10773393(B2)、16086605、US11014136(B2)、16768076、US11338343B2、US11364531B2、16759128、US11554406B2、ZL202010179766.6、ZL201810043997.7、ZL201810043638.1、ZL201810043746.9、ZL201710940152.3、ZL201710904473.8				

成果概述

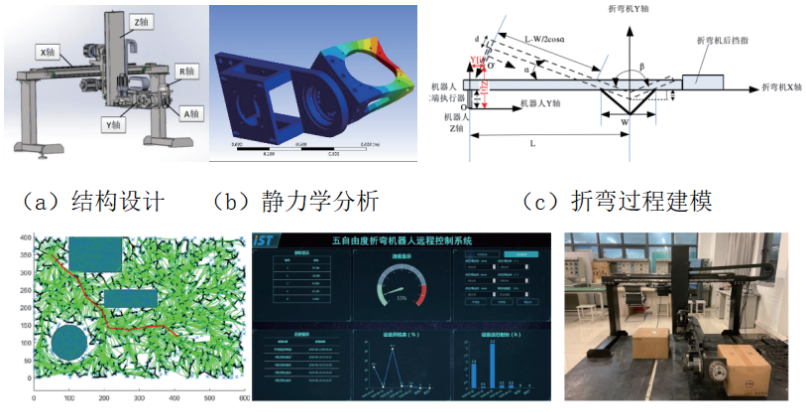
针对智能柔性钣金协同折弯的迫切需求，提出了五自由度直角坐标机器人模型机构及控制系统，完成了以下四方面工作：

（1）设计了协同钣金折弯的五自由度直角坐标机器人。面向钣金折弯作业稳定性和可靠性需求，设计了直角坐标五自由度折弯机器人，分析了机器人轴和关节的静力学特性，完成了运动单元的变形量和应变应力验证。

（2）建立了机械臂运动学模型。为解决折弯过程中正逆运动学分析问题，建立了五自由度机器人高维构型空间坐标系，提出了运动学分析方法，求解了折弯机器人运动学方程，设计开发了随动折弯编程模块。

（3）提出了折弯轨迹规划方法，设计了运动控制仿真模块。为解决折弯机器人工艺路径规划问题，分析了机器人五次多项式与正弦函数的轨迹规划方法，提出了有障碍环境下随机树思想改进的人工势场法轨迹优化策略；设计了PID控制算法、模糊PID　控制算法以及滑模鲁棒控制系统，仿真分析了折弯机器人各关节期望轨迹的跟踪特性。

（4）开发了网络化远程控制系统。为体现“人、机、环境”共融理念，结合先进互联网技术，使用Python语言设计开发了基于物联网的机器人远程操控系统，实现了折弯机器人与远程主机之间的实时反馈指令交互策略，完成了网络化远程控制折弯避障实验验证。



（a）结构设计　（b）静力学分析　（c）折弯过程建模

（d）轨迹规划算法　（e）远程控制界面　（f）折弯控制实验

图1 五自由度折弯机器人设计、建模、仿真、控制与实验

针对大吨位钣金全电伺服重载折弯的迫切需求，提出了连杆机构式数控折弯机以及配套的智能模具模块，完成了以下两方面工作：

（1）设计了基于连杆机构的大吨位全电伺服折弯机。为研制适合大吨位、且具有重载、高精度、低能耗、快动作、低成本的数控折弯机，设计了基于曲柄连杆机构的机械式全电伺服折弯机，建立了连杆机构运动学模型，模拟分析了机身本体结构的静力学特性，优化了各驱动模块的配合尺度，实现了偏载或平行度偏差校正。

（2）设计了智能模具更换模块。为适应钣金小批量、多品种的折弯需求，设计了自动更换和装夹的柔性化模具，分析了组合结构的运动特性，阐明了智能柔性模块工作原理，实现了快速夹紧释放以及无需提供外接动力源的功能验证。

该研究为本申请中全电伺服重载数控折弯机及智能模具结构设计与特性分析提供了良好的参考价值。

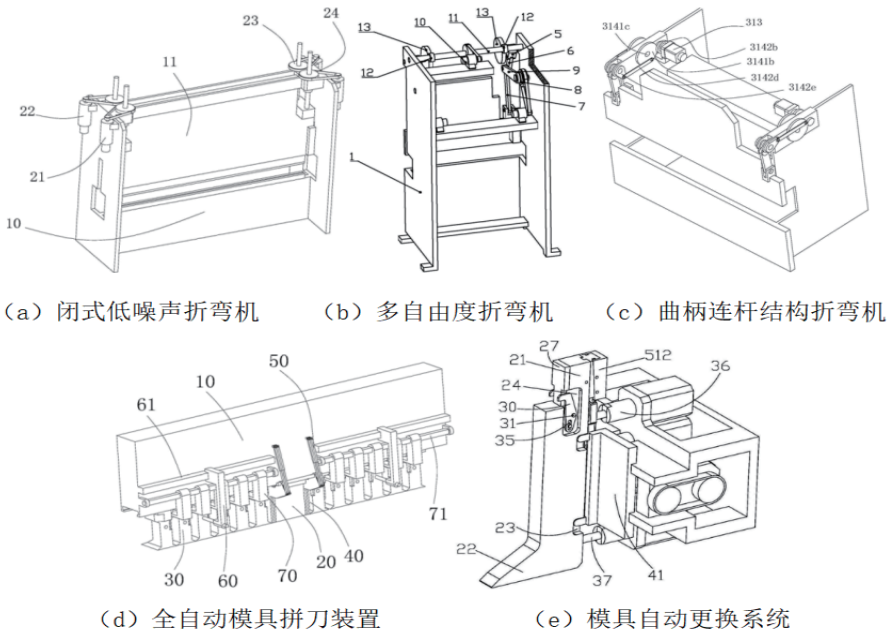


图2 全电伺服重载数控折弯单元结构设计

关键技术/创新要点

针对智能钣金折弯自动柔性编程的迫切需求，提出了折弯工步参数预测、控制、优化方法以及图形式编程系统，完成了以下四方面工作：

（1）建立了折弯工艺参数预测模型。为适应折弯工序规划以及图形编程需求，分析了折弯工艺参数的计算误差，提出了加工参数经验数值方法，建立并优化了全连接神经网络模型，实现了加工工艺参数的精准预测。

（2）提出了折弯定位精度控制方法。为解决钣金件定位精度低等问题，搭建了机器视觉检测平台，分析了工件边缘特征提取算法，建立了折弯定位误差预测模型，提出了麻雀搜索算法优化的Elman神经网络误差预测方法。

(3)优化了不同工步折弯工序规划算法。为解决有约束条件下折弯效率不足问题，分析了影响工序规划的关键因素，构建了含不同工艺约束量化指标的适应值函数，提出了基于回溯法的少工步折弯和基于粒子群-遗传的多工步折弯工序规划算法，建立了自适应离散优化模型，完成了不同工步下折弯工序规划及优化实验验证。

(4)开发了图形式智能编程系统。为提高变成系统可靠性和拓展性，搭建了基于参数提取和工序规划的数据信息管理平台，设计了基于GDI+的人机交互模块、基于MySQL的数据库模块，基于AnyCAD的三维仿真模块，实现了加工代码生成及控制指令传输的目标。

应用领域和市场前景

随着科技不断进步和发展，工业智能化越来越被各个国家和地区列为核心战略，我国的“十四五”规划提出要“巩固壮大实体经济，深入实施制造强国战略”，在高端制造业中，机器人辅助数控折弯机是完成板料精确成型的通用设备，广泛应用于机床制造、航空航天等重要领域。智研咨询发布《2021-2027年中国折弯机行业全景调查与投资方向研究报告》，分析了折弯机行业市场发展环境以及整体运行态势等。近年来下游产业升级，劳动力成本、市场对品质的要求以及国家政策对节能环保等方面的需求逐渐提高，2021年相继出台《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》以及《2030年前碳达峰行动方案》，倡导绿色、环保、低碳的生活方式，引导绿色技术创新，提高产业和经济的全球竞争力。以温州地区某个镇，折弯机保有量将近20000台，其中大部分以传统扭轴机为主，虽价格低廉，但精度偏差达3°左右，难以满足折弯需求，逐步升级为数控。然而，在面对“小批量、多品种”产品需求时，亟需智能钣金折弯系统来解决数控加工中存在的问题，如：模具更换频繁、编程效率低下、折弯精度不足等。

传统钣金行业折弯加工面临的瓶颈问题有：不能实现多品种、小批量、快速切换；高精度工件加工精度低、质量不稳定；操作工稀缺、工人劳动强度大；人员成本高、安全隐患大、工艺布局不合理等。随着钣金生产向自动化和智能化方向的快速发展，机器人辅助折弯单元和柔性折弯中心的应用日益广泛；其中机器人辅助折弯单元应用了参数化编程、离线编程和生产管理软件，同时二次开发了折弯随动、自动换模和抓手、实时补偿、板边寻边、柔性反转和总线控制等，满足了钣金折弯的技术和软件需求，也正因为如此，目前常用的示教编程效率低且柔性差，严重限制机器人单元的应用，因此须开发智能编程数字孪生系统，提高其编程可靠性。另一方面，柔性折弯中心能够独立工作，可高效生产各种规格零部件；通用模具可不需要调整时间，根据程序设定尺寸进行自动调整；柔性伺服折弯中心将手动干预减少到最小程度，并充分利用可用资源，初始离线编程后，完全自主运行。综上，两种方式均可实现折弯自动化，可提高折弯效率，但也各有优劣势，须根据不同产品和生产模式进行选择。

便携式足底压力测量系统

成果完成人	申景金	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	新型自动化仪器仪表	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械工程其他学科
应用行业	机器人、医疗设备				
核心专利号	ZL202110238775.2				

成果概述

本成果基于足底压力数据，开展姿态辨识分析与系统设计。针对长时间工作姿态调整与健康风险问题，提出新的姿态辨识指标，利用足底不同区域间的压力比，有效区分行走、站立与坐姿。该成果设计制作的足底压力姿态辨识系统，通过采集足底压力数据，实现姿态的准确辨识，为工作姿态调整提供科学依据。

关键技术/创新要点

本成果主要围绕足底压力测量与姿态辨识系统的设计展开，关键技术与创新要点主要体现在以下几个方面：

（1）传感器选择与集成：

· 采用了FSR-402压阻式传感器作为足底压力测量元件。这种传感器具有灵敏度高、响应速度快的特点，能够实时准确地捕捉足底压力变化。

· 传感器在鞋垫上的布局经过精心设计，确保能够全面覆盖足底的关键受力点，从而获取更丰富的压力分布信息。

（2）数据处理与传输：

· 下位机采用STM32作为控制核心，对压力传感器的电压进行采集、模数转换和数据发送。这一设计确保了数据的快速处理和高效传输。

· 采用了蓝牙作为无线数据通信模块，实现了下位机与上位机之间的实时数据交互，使得系统更加便携和灵活。

（3）姿态辨识算法：

· 设计了一套基于足底压力数据的姿态辨识算法。通过对不同姿态下足底压力分布特征的分析，提取出有效的辨识指标，实现了对行走、站立和坐姿的准确辨识。

· 算法考虑了不同地面材质对足底压力的影响，通过优化算法参数和增加地面类型识别功能，提高了姿态辨识的准确性和鲁棒性。

(4)系统设计与优化:

· 整个系统分为下位机与上位机两部分,实现了硬件与软件的协同工作。下位机负责数据采集和初步处理,上位机则负责数据的进一步分析和姿态辨识。

· 在系统设计中,注重了模块的独立性和可扩展性,使得系统可以根据实际需求进行灵活配置和升级。

· 针对坐姿在硬质地面上可能被误判为行走姿态的问题,通过优化算法和增加姿态转换判断逻辑,降低了误判率,提高了系统的整体性能。

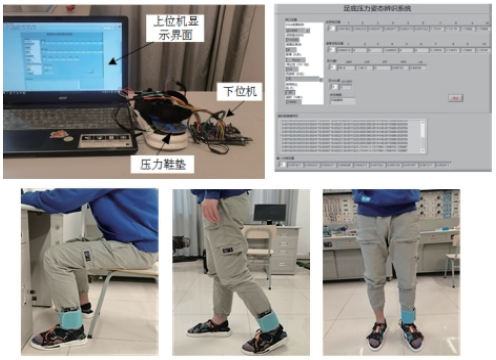


图1 基于足底压力的人体姿态辨识系统平台

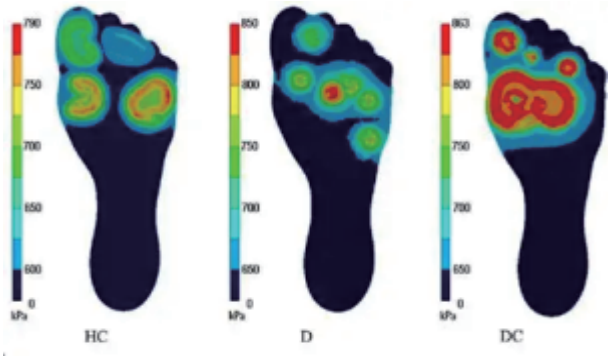


图2 足底压力云图

技术指标/优势

本系统在不同地面材质上均表现出良好的姿态辨识性能,整体检测准确率高达96.7%,相比同类技术具有显著优势。此外,该系统具有体积小、重量轻、使用方便等特点,适用于多种场景。目前,已申请相关专利,并获得了业内专家的认可。

应用领域和市场前景

(1)医疗健康:

足底压力分析:在医疗领域,足底压力测量系统被广泛应用于步态分析、运动康复以及足部疾病的诊断和治疗。通过采集并分析患者行走、站立或跑步时的足底压力分布数据,医生可以评估患者的足部功能,制定个性化的治疗方案。

睡眠监测:利用压力传感器,可以监测患者睡眠时的体位变化和呼吸状况,为睡眠障碍的诊断和治疗提供有力支持。

(2)体育训练:

运动员训练评估:通过测量运动员在训练过程中的足底压力分布,教练可以了解运动员的技术动作、力量分布以及潜在的受伤风险,从而制定更加科学的训练计划。

运动装备优化:根据足底压力数据,可以优化运动鞋、鞋垫等运动装备的设计,提高运动员的舒适度和运动表现。

(3)机器人与人工智能:

人形机器人步态模拟:利用足底压力数据,可以模拟人类的步态特征,使机器人更加自然地行走和交互。

智能辅助设备:通过压力传感器,可以开发智能拐杖、轮椅等辅助设备,帮助老年人或残疾人更加安全地行走和生活。

量程可调式共振触觉传感系统

成果完成人	申景金	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	新型传感器	
所属学科方向	一级学科	机械工程		二级学科	机械工程其他学科
应用行业	机器人、医疗设备				
核心专利号	ZL202111359567.4、ZL202321156964.6				

成果概述

本科研成果主要聚焦于可变刚度柔性触觉传感器系统的研发，该系统通过采用可变刚度柔性触头与气压调节系统，实现了对传感器初始共振频率的有效降低，减少了质量效应对测量精度的影响。同时，触头的小型化设计使得传感器更易于集成到各种应用场景中。此外，通过气压变化调节触头的刚度，本系统能够实现对不同物体刚度的动态测量范围调节，提升了传感器的适应性和测量精度。这一成果在触觉传感器技术领域具有重要的理论意义和实践价值。

关键技术/创新要点

本成果的关键技术和创新点主要体现在以下几个方面：

首先，可变刚度柔性触头的设计是本成果的核心创新。通过优化触头的结构和材料，我们成功降低了传感器的初始共振频率，减少了质量效应对测量精度的影响。同时，触头的小型化设计使得传感器更易于集成到各种设备中，满足了实际应用的需求。

其次，气压调节系统的引入是本成果的又一重要创新。通过精确控制触头内的气压，我们可以实现对触头刚度的动态调节，从而实现对不同物体刚度的精确测量。这一技术不仅提高了传感器的测量精度，还拓宽了其应用范围。

此外，本成果还采用了先进的驱动测量系统，能够实时采集触头的初始气压以及触碰物体时的气压变化量和共振频率，为后续的数据处理和分析提供了可靠的依据。

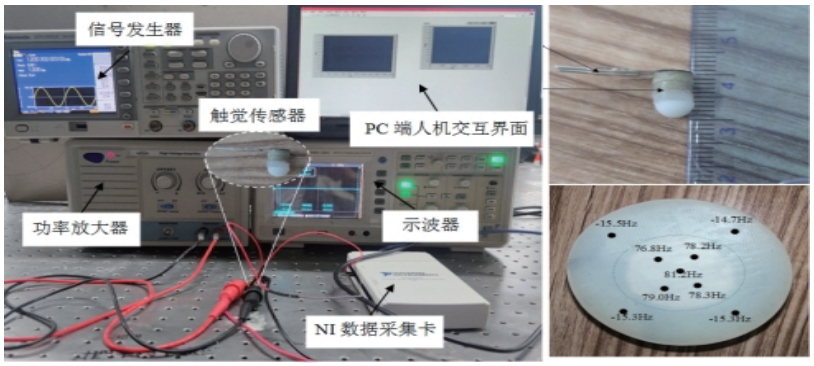


图1 共振式触觉传感系统平台

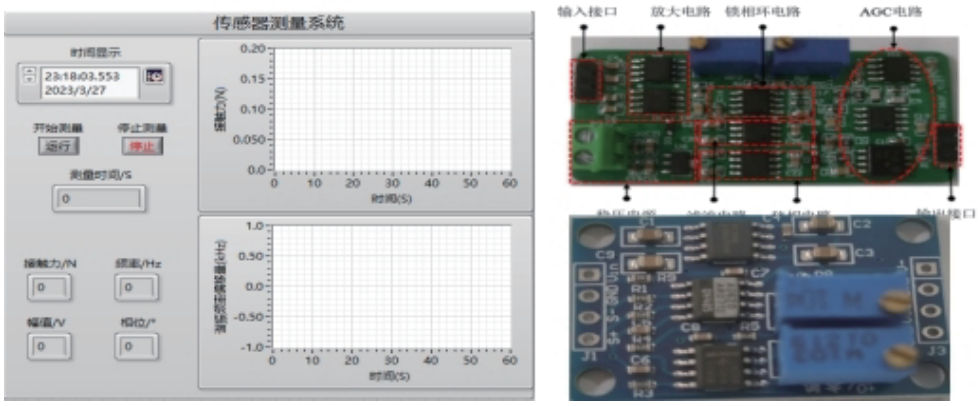


图2 测量系统人机界面与驱动电路

技术指标/优势

本成果的创新点在于通过气压变化调节触头刚度，实现了刚度测量范围的动态调节。此外，引入深度学习模型，提升了刚度辨识的准确性和效率。这一创新设计不仅简化了结构复杂度，还有利于传感器的小型化和集成化。

应用领域和市场前景

本成果在多个领域具有广阔的应用前景。在机器人领域，该传感器可帮助机器人更精确地感知物体的刚度信息，从而实现更稳定的抓取和操作。在医疗领域，该传感器可用于辅助医生进行组织硬度检测，为疾病诊断提供有力支持。此外，该传感器还可应用于智能制造、自动驾驶等领域，为各种智能设备提供精准的触觉感知能力。

随着物联网、人工智能等技术的快速发展，触觉传感器作为智能感知的重要组成部分，其市场需求将不断增长。本成果所研发的可变刚度柔性触觉传感器系统具有高性能、高可靠性、易集成等优点，有望在未来市场中占据重要地位，为相关产业的发展提供有力支撑。

航天器快速故障诊断与容错控制技术

成果完成人	高志峰	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航天技术		高技术领域（三级）	卫星应用技术	
所属学科方向	一级学科	工程与技术科学基础学科		二级学科	工程控制论
应用行业	航空行业				
核心专利号	ZL202010643654.1、ZL202010498451.8、ZL202010488772.X				

成果概述

随着科学技术的不断发展，现代航天器呈现出结构日益复杂、功能逐步完善的发展趋势，从而现代航天器能够实现越来越复杂的空间任务。同时，由于航天器的工作环境十分严苛，航天器的机械以及电气元器件容易老化使得执行器容易发生故障。因此，在执行器故障存在的情况下保证航天器的姿态依然能够保持稳定就具有极高的研究及应用价值。该成果针对现代航天器执行器故障下的快速故障诊断与容错控制技术进行深入研究，发明了一种能使航天器在执行器故障发生时进行自主诊断与容错控制的新方法。

关键技术/创新要点

针对一类具有外部干扰，执行器故障和饱和的航天器编队飞行系统，提出了一种分布式容错姿态跟踪控制方案，航天器编队飞行系统是以领航航天器为根的定向通信拓扑结构为基础的。分散的未知输入观测器旨在估计未知执行器故障因素，该因素会影响航天器编队飞行性能。另外，将获得的故障估计作为分布式容错编队控制器的设计，提出了一种采用自适应非奇异终端滑模控制方法的分布式容错编队控制算法，使得每个跟随器航天器都可以在存在执行器故障和饱和情况的情况下跟随领航航天器。

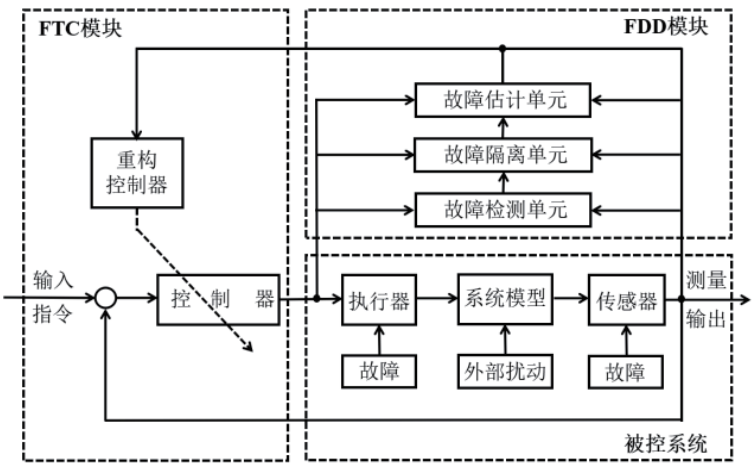


图1 快速故障诊断与容错控制技术示意图

技术指标/优势

在现有相关容错控制方法设计中，主要采用鲁棒控制或者直接自适应控制方法来设计被动容错控制方法来实现闭环控制系统的容错性能。在本研究成果中，我们利用观测器技术来获得的执行器故障的精确估计值用于补偿执行器故障产生的负面影响，这是一种主动的容错控制策略，它具有更大的故障可接受性能和调节故障的能力。

应用领域和市场前景

该成果可为现在航天器的智能诊断和容错控制等相关方面提供有效的技术支持，在航天器实际在轨运行期间，对于航天器及其子系统容易遇到诸如故障、失效等突发情况，可有效恢复航天器姿态控制系统的在轨工作性能，甚至会延长航天器的在轨工作寿命。因此，本项目针对现代航天器执行机构中出现的未知故障时，设计快速故障诊断和容态控制器以维持现代航天器的稳定性以及可接受的系统性能指标具有良好的应用前景。

基于TDE的灵巧手指自适应滑模跟踪控制方法

成果完成人	王邢波	职称	讲师	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	先进制造工艺与装备		高技术领域（三级）	机器人	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学	二级学科	信息科学与系统科学基础学科	
应用行业	人形机器人				
核心专利号	ZL202111169597.9				

成果概述

通过将驱动器安装在前臂，腱绳驱动机器人灵巧手利用腱绳远程驱动手指，降低了电机的负载，减小了灵巧手的尺寸和重量。由于腱绳具有非线性弹性且只能施加张力等特性，腱绳驱动灵巧手的控制问题非常复杂。本团队自主研发一种腱绳驱动机器人灵巧手指的跟踪控制技术，针对腱绳驱动灵巧手指在受到外部扰动情况利用滑模控制和时延估计方法实时控制手指的运动轨迹，有效包容外部扰动对手指低层控制系统的影响，从而保持手指运动位置控制系统的稳定。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种腱绳驱动灵巧手指自适应跟踪控制方法，该控制方法将n个关节力矩和m个腱张力，其中m>n；通过映射矩阵R转化，建立腱驱动灵巧手指动力学方程，通过时延估计TDE方法对复杂动力学模型进行估计。通过设计非奇异快速终端滑模面，实现有限时间内收敛，解决了传统滑模控制中仅可以实现渐进收敛的问题，提高了跟踪性能和收敛性能。为了进一步提高非奇异终端滑模控制的性能，结合了PID积分控制，设计了PID-NFTSM控制及自适应组合趋近律，所提控制方法是连续的，无奇异性的，不仅降低了TDE误差，同时也提高了跟踪控制的精确性。

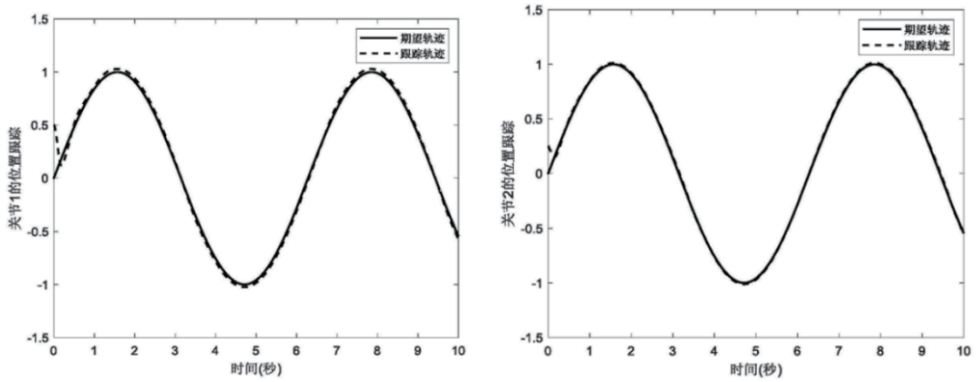


图1 该方案下的关节位置跟踪

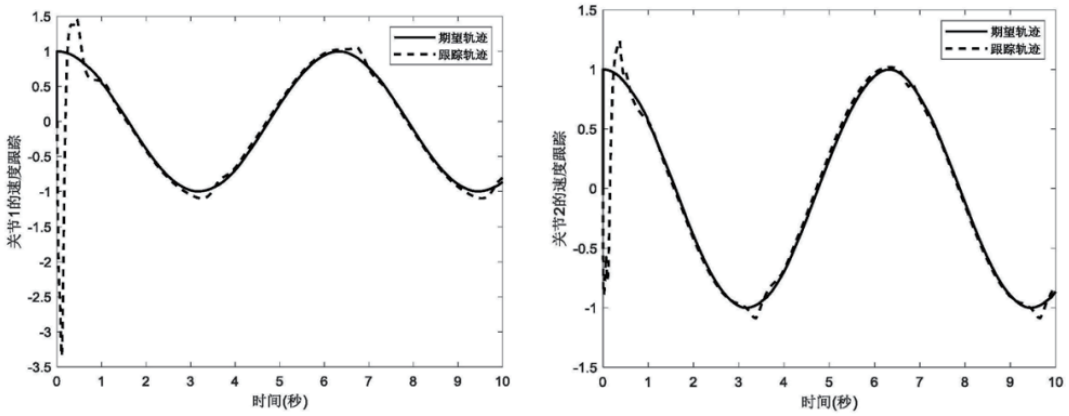


图2 该方案下的关节速度跟踪

技术指标/优势

与当前技术相比，在受到腱绳驱动引入的非线性影响以及外部扰动时，自适应控制机制能够在0.1s内精确地实现位置跟踪期望位置，在1s内实现速度跟踪，极大地降低了外部扰动对系统的影响。

应用领域和市场前景

本团队自主研发腱绳驱动机器人手指的自适应控制技术，针对机器人手指在受到外部扰动和存在腱绳耦合非线性等情况利用自适应滑模控制，实现对期望位置和速度的跟踪，有效的降低了外部扰动的影响。此技术可以被广泛应用于人形机器人以及柔性关节机械臂等相关领域。

一种永磁体在转子上的半自由度混合型轴向磁轴承

成果完成人	刘程子	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	/
应用行业	飞轮储能、制造业				
核心专利号	ZL201810666676.2				

成果概述

磁轴承技术利用定子与转子之间的磁力，将转子悬浮于空间，避免了定转子之间的机械接触，是一种高性能的新型轴承。由于定转子之间无需机械接触，使得了轴承转子可以承受很高的转速，具有寿命长、能耗低、无润滑、无污染等优点，在高速、真空及超洁净等特殊的应用场合具有无可替代的优势。本成果一种永磁体在转子上的半自由度混合型轴向磁轴承，该混合型轴向磁轴承结构简单，安装工艺难度低，能够实现转轴单侧轴向位移的主动控制，适合在产业上推广使用。

关键技术/创新要点

该混合型轴向磁轴承包括转子及安装于转子组件一侧的定子组件，包括转子及安装于转子组件一侧的定子组件，所述转子组件包括一个环形的永磁体1、环形内转子铁芯2及环形外转子铁芯3，内转子铁芯套装在转轴10上，内转子铁芯2、环形永磁体1及外转子铁芯3轴向长度相等，定子组件包括带有凹槽的环形的轴向磁极4。

轴向磁极的内定子A的下表面与内转子铁芯、环形永磁体及外转子铁芯上表面之间形成轴向气隙；该混合型轴向磁轴承还包括有一用于检测转子偏离其中间位移量的位移传感器，位移传感器经过控制器和功率放大器与所述轴向控制绕组相连。

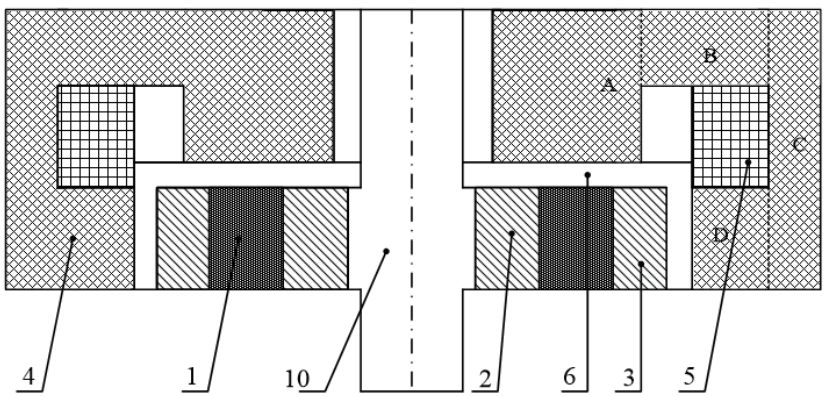


图1 平面示意图

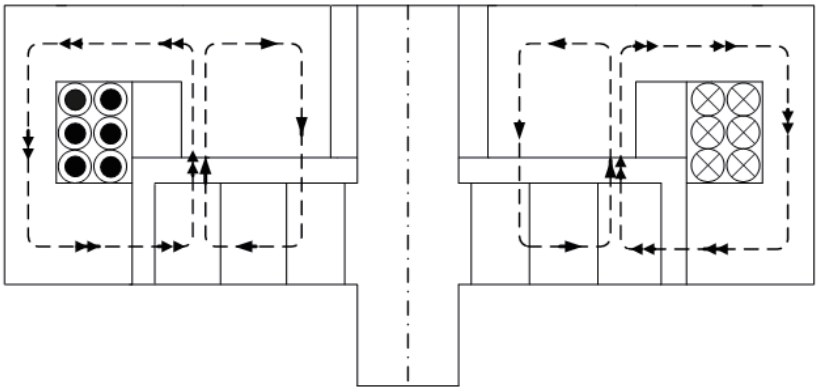


图2 原理图

技术指标/优势

混合磁轴承利用永磁材料产生偏置磁场，降低了主动磁轴承中的偏置电流产生的功率损耗，然而现有的混合型轴向磁轴承都存在安装困难、拆卸不方便等问题，限制了其发展与应用。本成果解决现有技术中存在的上述问题，具有结构简单，安装工艺难度低的特点，能够实现转轴单侧轴向位移的主动控制。

应用领域和市场前景

永磁体在转子上的半自由度混合型轴向磁轴承能实现转轴单边拉力可调，实现单侧轴向位移的主动控制，可以应用在某些只需要实现轴向单侧位移控制的场合，例如飞轮中，和传统的单自由轴向磁轴承相比，具有体积小巧，结构简单，控制简化，安装方便的特点。如要实现转轴轴向位移的主动控制，则只需将两个相同的半自由度的永磁体在转子上的混合型轴向磁轴承配合使用，就能实现转轴的轴向悬浮，在各种磁悬浮系统中都有广阔的应用前景。

面向气-电互联综合能源系统的脆弱线路和脆弱负荷节点辨识技术

成果完成人	黄崇鑫	职称	副研究员	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	综合能源系统安全		高技术领域（三级）	能源系统网络攻击防御	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	工业园区综合能源系统				
核心专利号	ZL202111352814.8				

成果概述

在气-电互联综合能源系统信息物理深度融合背景下，无论是针对信息网的网络攻击，还是针对天然气网、电网的物理攻击，都将对综合能源系统安全稳定运行构成安全威胁。本技术成果基于攻击者视角，结合实际情况，建立的多目标双层规划模型，一方面考虑了攻击者和调度者相互制约和相互半透明的状态，较好的模拟了真实的攻防场景，另一方面，以多目标最优前沿曲线来辨识综合能源系统的脆弱线路和脆弱负荷节点。利用本成果提供的相关技术，有助于直观地发现攻击所造成的综合能源系统损失水平，可以更及时的辨识出综合能源系统中薄弱的线路和负荷节点，以便系统运营商制定最优的防御策略。

关键技术/创新要点

在信息系统与物理系统深度融合的背景下，协同信息-物理攻击对综合能源系统的安全与经济运行构成日益严峻的威胁。本技术成果针对气-电互联综合能源系统的安全问题，构建了一种新型双层规划模型，用于评估信息-物理协同攻击策略对综合能源系统经济性的影响。在上层，从攻击者视角出发，考虑攻击资源约束，以最大化综合能源系统的运行支出为目标，建立攻击决策模型；在下层，从防御者视角出发，考虑在综合能源系统遭受协同信息-物理攻击的场景下，以最小化运行成本为目标，建立最优安全调度模型。通过求解上述双层规划模型，可以掌握最坏场景下的攻击策略，找出综合能源系统的脆弱线路和负荷节点，并评估信息-物理协同攻击策略对综合能源系统经济调度的影响。

为验证本团队研发的面向气-电互联系统的脆弱线路和脆弱负荷节点辨识技术的可行性，构建了典型的气-电耦合综合能源系统并进行了性能测试实验。

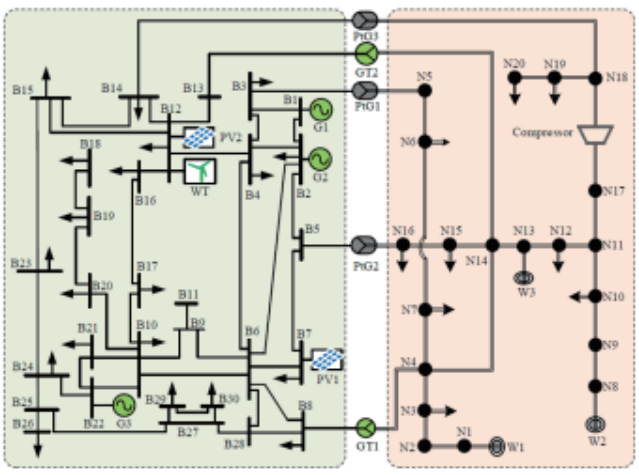


图1 气-电互联综合能源系统

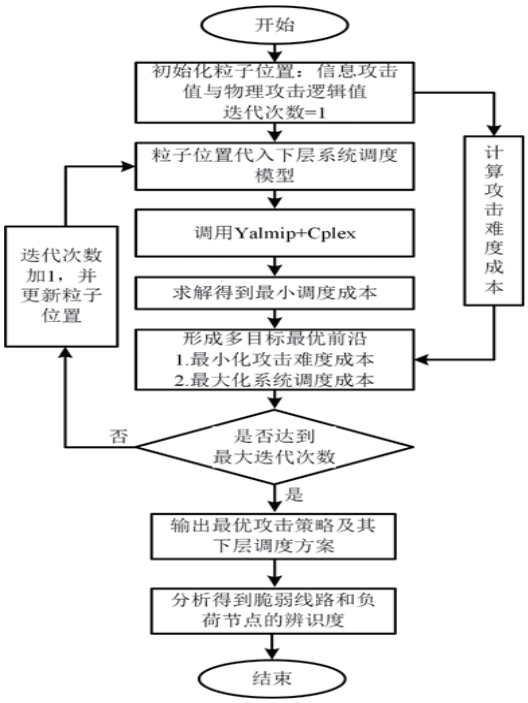


图2 气-电互联综合能源系统的脆弱线路和脆弱负荷节点辨识流程

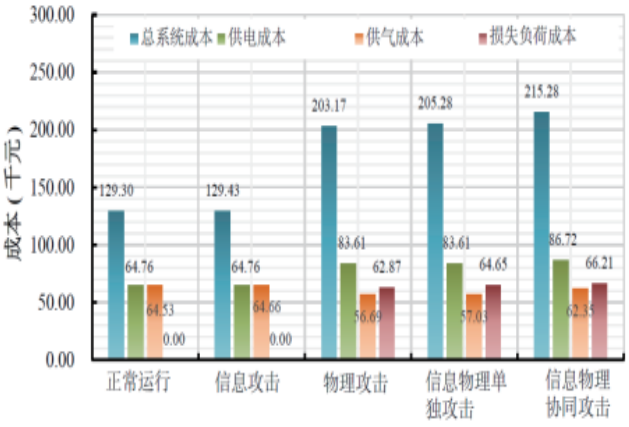


图3 不同攻击策略对气-电互联综合能源系统经济性的影响

技术指标/优势

面向气-电互联系统的脆弱线路和脆弱负荷节点辨识的技术成果，一方面考虑了攻击者和调度者相互制约和相互半透明的状态，可模拟多种攻防场景；另一方面，以多目标最优前沿曲线来辨识综合能源系统的脆弱线路和脆弱负荷节点，可提前预判不同攻击场景所造成的综合能源系统损失水平，为制定相应的防御策略提供依据。

应用领域和市场前景

该技术成果可为气–电互联综合能源系统的安全防御、风险预警、优化规划与调度运行等关键环节提供技术支撑。该成果面向气–电互联交互特性与多能流耦合风险，构建了考虑网络拓扑、运行状态及攻击扰动的脆弱性评估模型，能够快速定位系统中的关键脆弱线路与敏感负荷节点，可有效支撑综合能源系统安全预警、防御资源优化配置、薄弱点补强等工程应用，有望广泛应用于园区级综合能源系统、城市能源互联网、多能互补电网等场景，具备良好的市场应用前景。

一种仿人机器人步行运动控制器

成果完成人	梁志伟	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	微机电系统技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	控制科学与技术
应用行业	智能制造				
核心专利号	ZL202011390811.9、ZL202011352019.4				

成果概述

机器人学是目前人工智能研究的热点之一，仿人机器人作为机器人学的重要分支，研究内容包含多个学科，在不同领域都有广泛的应用。本成果以仿人机器人为研究对象，主要研究机器人在标准平台组比赛的过程中的运动控制，提出了一种基于质心控制和传感器反馈的单支撑相行走步态。该方法通过将仿人机器人建模成为一个三维倒立摆模型来分析机器人行走过程中的躯干移动和脚部移动，在此基础上生成单支撑相的行走步态并使用逆运动学计算各关节角度。同时在可允许ZMP区域的方法的基础上增加了摔倒检测。通过仿真和实体机器人实验，证明该成果可以有效提高机器人的行走速度和鲁棒性。

关键技术/创新要点

因为仿人机器人的躯干节距旋转相对较小基本在3.0°范围内，所以假设正常行走中机器人上半身始终保持直立姿势；和大多数没有脚趾的两足机器人一样，假设机器人行走过程中双脚始终保持与地面平行。首先对仿人机器人进行建模并分析其行走过程的状态变化，然后通过质心控制、传感器反馈和逆运动学生成了单支撑相行走，最后通过可允许ZMP区域及摔倒预测强化了行走的稳定性。将仿人机器人建模为三维线性倒立摆模型，通过分析机器人行走过程中的躯干移动和脚部移动提出一种基于质心控制和传感器反馈的单支撑相行走步态，实现了NAO机器人的快速行走。

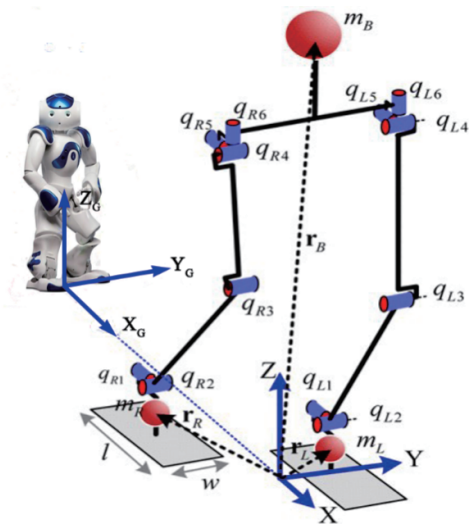


图1 简化的三维线性倒立摆机器人模型

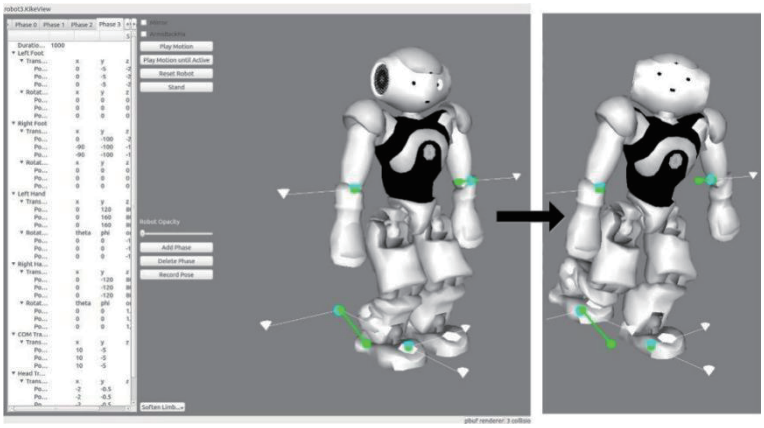


图2 机器人行走演示图



图3 RoboCup标准平台组(SPL)比赛仿人机器人行走演示

技术指标/优势

传统NAO仿人机器人步态的平均速度为19.44cm/s, 本文步态平均速度为25.71cm/s, 速度方面有32%的提升;稳定性方面由于频率变快、步幅变大, 检测到不稳定的次数也相应增多, 但由于质心控制和传感器反馈的存在, 摔倒的次数不足检测次数的1/3。

应用领域和市场前景

可以利用该方案, 进行仿人机器人稳定行走的开发, 有利于仿人机器人公司产品性能的提升。

高集成高速磁悬浮电机驱动系统

成果完成人	刘泽远	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	新型机械		高技术领域（三级）	通用机械装备制造技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电机与电器
应用行业	航空航天、磁悬浮列车、压缩机、风机、储能等				
核心专利号	ZL202110388473.3、ZL202110366564.7、ZL202110366581.0、ZL202110376360.1、ZL202110366572.1				

成果概述

常规无轴承开关磁阻电机仅能实现径向两自由度悬浮运行，至少需要一个轴向磁轴承与之配合，才能构成五自由度磁悬浮电机，轴向长度大，临界转速低，功率密度低。然而，集成开关磁阻电机、轴向磁轴承和径向磁轴承功能于一体的三自由度无轴承开关磁阻电机，可显著缩短磁悬浮电机系统的轴向长度，是提升转子刚度和临界转速的有效解决手段。本成果提出了结构紧凑、力矩自然解耦且具有轴向径向悬浮功能的新型无轴承开关磁阻电机拓扑组，发展了具有升压功能且可对旋转与悬浮两通道共同励磁的功率变换器，进一步强化了高速性能和减小悬浮功耗，并采用主电路桥臂少的悬浮功率变换器，提升了功率系统可靠性和降低控制器成本，再通过设计与之匹配的协同控制方法，进而建立高集成、高密度的新型三自由度无轴承开关磁阻电机系统，可突破传统磁轴承技术和现有无轴承技术对开关磁阻电机高速性能的束缚，进而实现超高速和大功率运行。

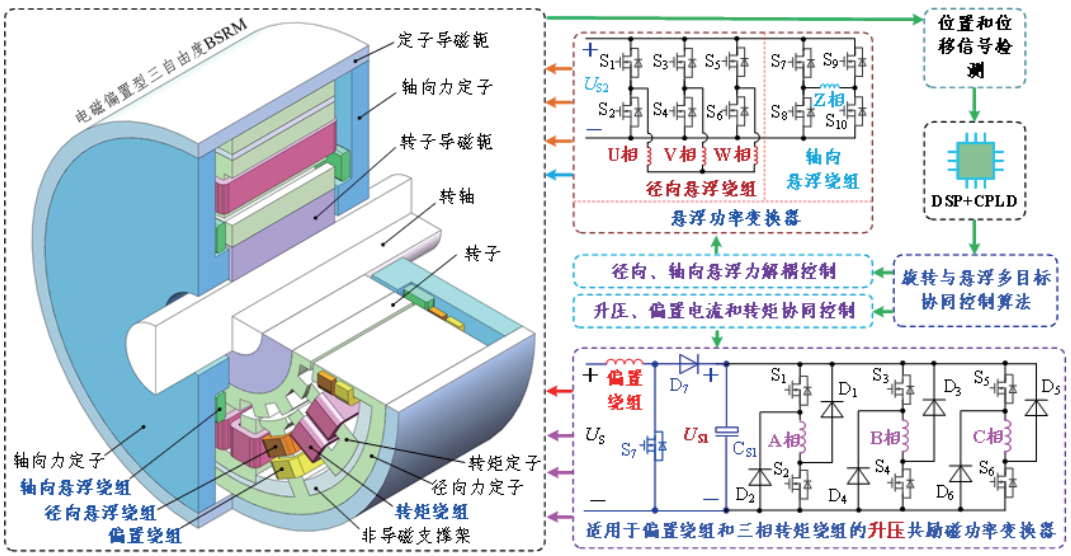


图1 本项目提出的一种三自由度无轴承开关磁阻电机结构、功率变换器及共励磁协同控制的示意图

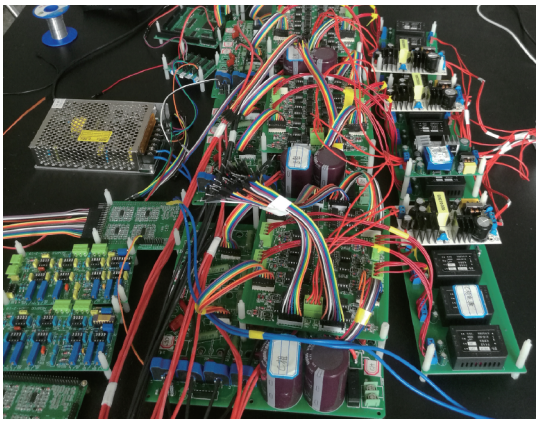


图2 集成驱动系统



图3 磁悬浮样机

关键技术/创新要点

(1)具有轴向径向悬浮能力且力矩自解耦的三自由度无轴承开关磁阻电机拓扑;

(2)适合悬浮和旋转联合高效励磁的集成功率变换器技术;

(3)三自由度无轴承开关磁阻电机的多学科多参数设计技术;

(4)转矩和三个悬浮力的多目标协同控制技术。

技术指标/优势

可实现超高速悬浮运行, 功率密度高, 悬浮性能好, 国际上首次提出, 具有具有自主知识产权。

应用领域和市场前景

多电/全电飞机、飞轮储能、舰船、压缩机、冷却装置、污水处理设备等高速领域。

基于高频脉冲注入的无轴承开关磁阻电机的优化控制方法

成果完成人	杨艳	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航天技术			先进航天动力设计技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	航空航天、飞轮储能等				
核心专利号	ZL202111298779.6				

成果概述

对于无轴承开关磁阻电机而言，准确的转子位置检测是保证其可靠运行的重要环节。传统的转子位置检测方案为光敏式、磁敏式及接近开关等含机械硬件的检测方案，上述方案不仅增加了其调速系统结构的复杂性，也增加了系统成本和潜在的不稳定性。

目前研究者主要通过在非导通区注入高频脉冲的方式产生响应电流，并利用该响应电流获取不饱和电感信息的方式实现对其内部转子位置的估计。但由于磁路饱和等原因会导致判断的角度发生偏移且出现响应电流异常等情况。此外由于电机内部三相相电流变化较大，使得其内部气隙磁饱和程度无法控制，也会导致换相点位置检测产生误差，影响对电机整体的控制。

本团队提出一种基于高频脉冲注入的无轴承开关磁阻电机的优化控制方法。通过改进脉冲注入的方式，保证了下一相脉冲注入前，续流状态下电流平稳下降，不产生振荡现象；降低了运行过程中的转矩脉动，避免了低速控制逻辑崩溃；使得对电机内部转子的位置检测更加合理，提高了电机运行的稳定性。

关键技术/创新要点

本方案揭示了一种基于高频脉冲注入的无轴承开关磁阻电机的优化控制方法，适用于内部无位置传感器的无轴承开关磁阻电机，方案在传统高频脉冲注入法的基础上，改进脉冲注入的方式，在每一个脉冲注入之前先让绕组续流rs，此处r为一常值，本文采用r为50μ。利用这段续流时间对绕组电流进行检测，待绕组中电流下降到零再对绕组进行高频脉冲注入，以此来保证脉冲响应电流不出现异常状态，使得对电机内部转子的位置检测更加合理，换相更为准确。

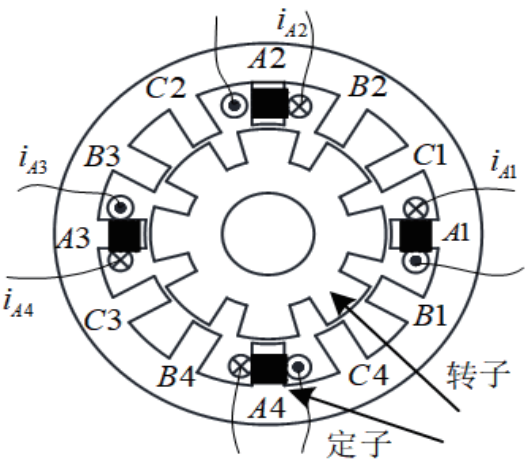


图1 单绕组宽转子齿无轴承开关磁阻电机结构示意图

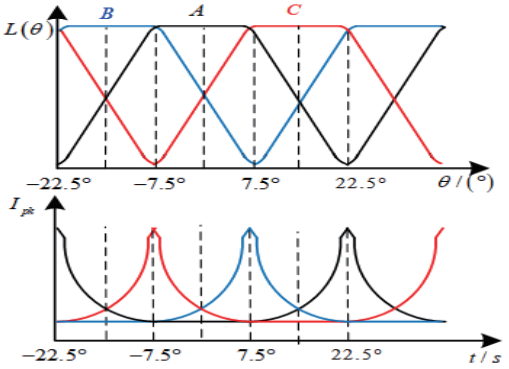


图2 单绕组宽转子齿无轴承开关
磁阻电机电感与响应电流区域划分图

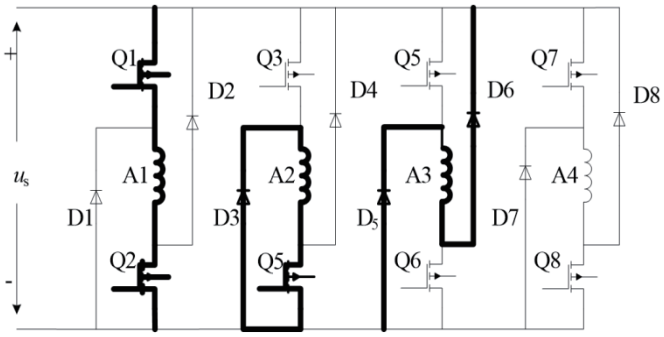


图3 功率变换器及其三种工作模态

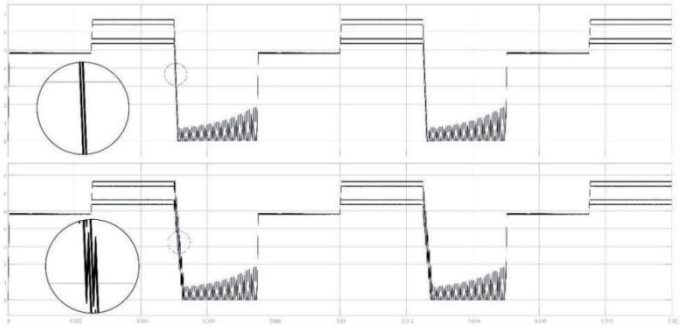


图4 采用了续流电流检测与未采用电流检测的电流波形对比示意图

技术指标/优势

与传统的无位置传感器技术相比，本方案通过改进脉冲注入的方式，保证了下一相脉冲注入前，续流状态下电流平稳下降，不产生振荡现象；降低了运行过程中的转矩脉动，避免了低速控制逻辑崩溃；使得对电机内部转子的位置检测更加合理，提高了电机运行的稳定性。本方案技术方法获国家发明专利授权（ZL2021112987796）。

应用领域和市场前景

无轴承开关磁阻电机的双凸极结构，具有结构简单、高速性能好、容错性强等优点，它解决了传统机械轴承电机磨损，使用寿命短的问题；解决了气浮、液浮、油膜轴承等结构可靠性低、功率密度低的问题；解决了磁悬浮轴承轴向利用率低，体积大的问题。本方案提出的无位置传感器技术降低了运行过程中的转矩脉动，避免了低速控制逻辑崩溃；使得对电机内部转子的位置检测更加合理，提高了电机运行的稳定性。因此其在超高速的飞轮储能、航空航天领域以及要求高可靠性的超大规模的集成电路领域有着重要的应用价值。

基于车轮安装低成本微型IMU的车辆高精度定位设备

成果完成人	谭彩铭	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	高性能、智能化仪器仪表		高技术领域（三级）	新型自动化仪器仪表	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	控制科学与技术
应用行业	智能装备、机器人、智能交通、民用特种装备				
核心专利号	CN114152269B、CN115451949B				

成果概述

车辆和轮式机器人在隧道、地下车库、高楼密集区等场景，常出现卫星定位失效、传统定位设备成本高或精度不足的问题，自主定位成为行业应用的核心痛点。本成果研发出基于车轮安装低成本微型IMU的车辆高精度定位设备，核心采用车轮旋转调制误差补偿、安装参数现场标定两项实用技术，靠车轮自然旋转抵消惯导设备的误差，还能在现场快速完成设备标定，无需精准安装在车轮轴心，同时解决了高速行驶下的定位失效问题。设备已做出成熟样机，定位精准、成本仅百元级，适配各类车辆和机器人，相关技术获2项国家发明专利，性能达国际先进水平，能在无卫星信号场景下稳定提供高精度定位服务，可直接落地无人驾驶、特种民用、机器人导航等各类实际应用场景。

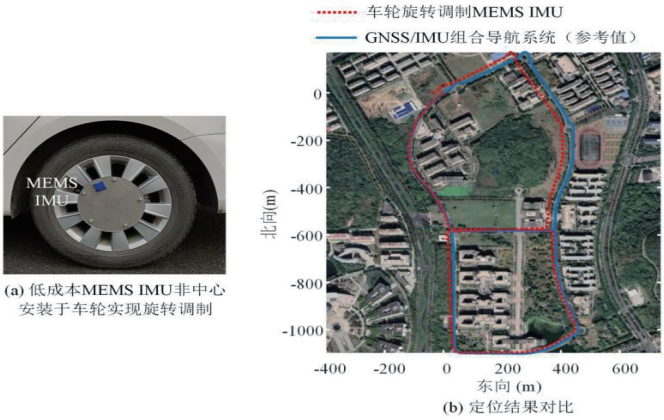
关键技术/创新要点

本成果核心围绕车轮安装低成本微型IMU的车辆高精度定位需求，突破3项核心关键技术，摒弃传统定位设备复杂的安装与运行要求，实现低成本、高适配、强抗干扰的精准定位，技术创新点贴合实际应用场景，落地性极强，相关技术均已完成实验验证并获国家发明专利授权。

1.车轮旋转调制误差补偿技术：无需额外加装精密机电控制系统，直接利用车轮自然旋转的运动特性，自动抵消惯导设备的零漂误差，大幅降低车辆定位方位的误差发散速度，让定位精度比传统里程计、车身惯导定位系统提升一个数量级，且不受卫星信号、天气、场景遮挡等外界因素干扰。

2.安装参数现场快速标定技术：针对设备安装偏心、姿态偏差导致的定位误差问题，建立精准的数学建模，无需将IMU精准安装在车轮轴心（图1所示），也无需专业工装设备，即可在现场快速完成安装参数标定，大幅降低现场安装难度和使用成本，解决了实际应用中安装误差影响定位效果的核心问题。

3.高速场景定位稳定技术：突破传统MEMS陀螺高速下超量程导致的定位失效难题，通过精准建模车轮旋转产生的加速度分量，利用加速度计实现车轮转速的可靠观测，即使车辆行驶速度超130km/h，仍能保持稳定的高精度定位，适配车辆、机器人高低速全工况运行需求。



(a) 低成本MEMS IMU非中心安装于车轮实现旋转调制

(b) 定位结果对比

图1 基于低成本MEMS IMU 模块开发的车轮定位设备与定位结果

技术指标/优势

定位精度：相对定位精度8‰，方位漂移3°/10min，与传统车载IMU/里程计组合导航方法进行对比，结果表明该方案可将定位误差降低一个数量级以上；

测速与更新：测速精度0.2km/h，数据更新频率400Hz，车轮旋转调制MEMS IMU与传统测速设备里程计、激光多普勒测速仪（DVL）的性能对比如表1所示；

适用工况：最大行驶速度>130km/h，支持高低速全工况；

续航与成本：单次充电工作>8h，材料成本仅百元级，核心芯片支持国产替代；

环境与安装：无卫星信号、雨雪、室内外等场景均适配，支持偏心/小幅倾斜安装、即插即用与定制嵌入

表 1 车轮旋转调制MEMS IMU与里程计、DVL对比

性能指标	里程计	激光多普勒测速仪（DVL）	车轮旋转调制 MEMS IMU
位置输出	✖	✖	✔（8‰里程）
加速度输出	✖	✖	✔
方位变化角输出	✖	✖	✔
车轮打滑监测	✖	✖	✔
速度测量精度	低	高	高（0.2 km/h）
速度输出率	低	高	高（400 Hz）
成本	高	高	低
体积	大	大	小

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于民用特种装备、智能机器人、智能交通等领域，适配隧道、地下停车场、高楼密集区等卫星信号薄弱/无信号场景，可为电力/管道巡检机器人、防爆机器人提供稳定定位，也能服务于仓储物流、割草、配送等各类轮式移动机器人，还可集成至视觉、激光导航系统中作为辅助模块，补充高频高精度定位数据。同时可拓展至共享单车、智能轮椅等民用产品，解决其室内外定位难题。产品成本仅百元级，安装便捷且抗干扰性强，破解了传统定位设备卫星依赖、成本高、安装复杂的行业痛点，契合智能装备产业化发展需求。其适配性广、落地性强，随着民用机器人与智能交通行业快速发展，市场需求持续增长，规模化推广潜力大，产业化前景广阔。

基于切换仿射模型的涡轮风扇发动机抗干扰切换控制策略

成果完成人	李卓钰	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航天技术		高技术领域（三级）	飞行器系统技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	涡轮风扇发动机				

成果概述

涡轮风扇发动机是一种常见的航空发动机，广泛用于商用飞机、军事飞机及部分民用航空器。它结合了涡轮喷气发动机和风扇的工作原理，具有较高的推力输出效率，并且相较于传统的涡轮喷气发动机，噪音和燃油消耗都得到了显著的改善。涡轮风扇发动机工作时，风扇和发动机核心产生的推力结合，可以在保证较高推力输出的同时，提高燃油效率和减少噪音，是现代航空器发动机的主要选择。涡轮风扇发动机在现代航空器中的广泛应用以及对燃油效率、噪音控制、排放控制等方面的优势，使其成为研究的核心课题。

涡轮风扇发动机的工作环境极为严苛，发动机的安全性和可靠性是航空领域的首要关注点。本成果使用切换仿射系统建模涡轮风扇发动机，刻画其多平衡点、多工作态的混杂特性，研究其在未建模干扰下的抗干扰切换控制问题，为其在实际工作环境中的抗干扰性能提供保证。

关键技术/创新要点

本成果的关键技术创新在于对复杂的涡轮风扇发动机系统动态建模，提出了基于切换扰动观测器的H∞抗扰切换控制策略，并且在切换仿射系统中推导了确保控制问题可解的充分条件。通过有效的扰动估计和控制设计，该策略可以有效应对未建模扰动，并在实际应用中展现了较好的性能。首先提出了一种切换扰动观测器，用于跟踪和估计建模扰动。这个扰动观测器能够动态地估计在切换仿射系统中存在的扰动，无论是建模扰动还是未建模扰动。这一创新方法解决了在多模式系统中如何有效处理复杂扰动问题。在扰动观测器的基础上，研究设计了H∞抗扰切换控制器。这个控制器能够有效地减小扰动对系统性能的影响，特别是在切换系统中，这种设计充分考虑了切换规则与系统状态和仿射项之间的相互作用。未建模扰动通常难以准确预测和建模，而该方法通过引入切换扰动观测器并结合H∞控制方法，保证了即使在面对复杂或未知扰动时，系统也能够维持稳定并达到抗扰性能。通过涡轮风扇发动机的仿真案例验证了所提H∞抗扰切换控制策略的合理性和有效性，由图1观察到该研究设计的控制策略策略使干扰估计误差趋近于零。通过实际应用场景的验证，确保了理论方法在复杂工程系统中的可行性，并为未来的工业应用提供了实践依据。

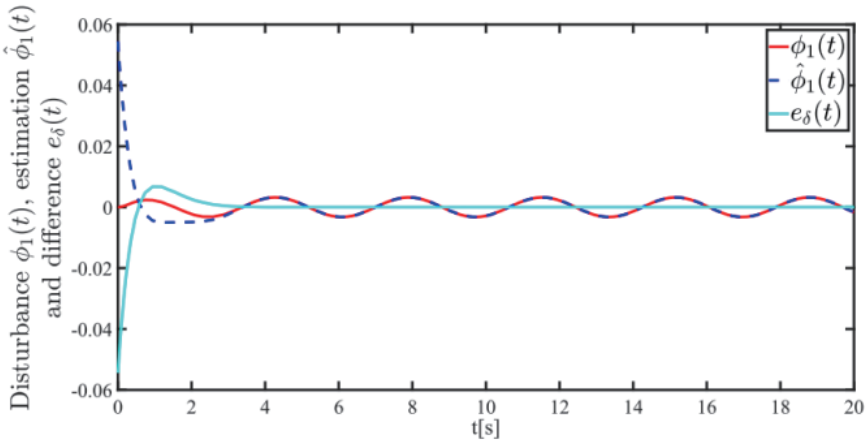


图1 干扰下的测量误差

技术指标/优势

该成果实现了对涡轮风扇发动机多平衡点、多工作态混杂特性的建模描述，从而对其实施有效的扰动估计和切换控制策略，使其有效应对未建模扰动，在实际工作环境中干扰扰动下具备良好的控制性能。

应用领域和市场前景

随着飞机技术的快速发展和对高性能、节能发动机需求的增加，像该成果提出的抗干扰控制策略可能成为提高发动机效率和安全性的关键。航空航天工业继续致力于优化发动机性能并最小化外部干扰带来的风险，尤其是飞机的推进系统，必须在各种干扰（如风扰动、负载变化或系统故障）下保持稳定性和性能，因此该成果具有一定的应用前景。

人工智能辅助的新能源预测、故障检测和优化方案

成果完成人	王玉峰	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	新能源、智慧能源、电力互联网等				
核心专利号	ZL2022104457294、ZL2021114627013、ZL2022104106438、ZL2021107792868				

成果概述

该成果采用人工智能技术，包括大模型和深度强化学习对可再生能源的关键问题进行深入研究，并提供系统的解决方案：包括精确预测用电负荷、风电、水电和光伏等发电量测、能源系统的异常检测包括设备故障以及攻击检测和定位、优化决策如分布式能源单元控制，能源市场上的竞标机制等。

关键技术/创新要点

一方面，由于用电负荷、风电和光伏等发电量等具有极大的不确定性，其精确预测以及优化决策对于构建绿色节能社会具有重要价值。另一方面，可再生能源组件和智能电网的故障检测和定位对于新能源系统的安全运行至关重要。以上是智慧能源领域中的共性难题的关键问题。该成果利用智慧能源系统中部署的多种类型智能传感器采集的多源多模态数据，学习并构造采集数据之间复杂的依赖关系，创新地运用大模型（LLM）和图强化学习机制，进行可再生能源的预测、故障检测和优化控制，是具有应用场景的创新理论和技术。

取得了如下代表性的成果，包括可再生能源发电量和用电负荷预测、智能电网中虚假数据注入攻击检测和能源决策优化机制等方面的高质量论文和授权专利。

可再生能源发电量和用电负荷预测

[1] A wind speed forecasting framework for multiple turbines based on adaptive gate mechanism enhanced multi-graph attention networks, Applied Energy, 372 (2024) , 123777. Oct. 15, 2024.

[2] STCA-LLM: Spatial-Temporal Cross-Attention Large Language Model for Wind Speed Forecasting, IEEE Internet of Things Journal, vol. 12, no. 21, Nov. 1, 2025: 45411-45422. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3599836.

智能电网中虚假数据注入攻击检测

[3] Locational false data injection attack detection in smart grid using recursive variational graph auto-encoder, IEEE Internet of Things Journal, 2025. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3526672

[4] A locational false data injection attack detection method in smart grid based on adversarial variational autoencoders, Applied Soft Computing, Vol. 151, 2024.

能源决策优化机制

[5] Earning while learning: An adversarial multi-armed bandit based real-time bidding scheme in deregulated electricity market, IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 9, no. 6, Nov.-DEC., 2022.

[6] 基于在线学习的面向居民用户激励型需求响应, 电工电能新技, 第42 卷,第5 期, 2023 年5 月.

技术指标/优势

关于“人工智能辅助的新能源预测、故障检测和优化方案”的系列成果, 取得如下授权发明专利。

[1] 一种互联微电网能源优化管理的方法和系统, ZL 202210445729.4;

[2] 一种基于削减电量动态调度的需求响应方法及系统, ZL 2021 11462701.3;

[3] 智能电网中虚假数据检测方法、装置、设备及存储介质, ZL202110779286.8;

[4] 一种智能电网中隐私兼容的数据收集和支付方法, ZL2018113528574

应用领域和市场前景

当前正处于以人工智能引领的第四次工业革命和以可再生新能源为主要特征的第三次能源革命叠加的超级技术窗口期, 随着能源流(包括可再生能源以及储能设备的自动调度等)、数据流以及业务流的多流合一, 基于数据科学和人工智能技术, 实现具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活的智慧新能源系统和架构, 具有广阔的前景和效益。尤其是, 以数据为中心, 发挥数据的乘数效应, 成为新能源系统的智慧大脑, 实现多方共赢:对政府而言, 促进绿色节能环保;对企业而言:提高效率增加利润;对用户而言, 享受个性化服务, 增加满意度。

柔性锌离子电池

成果完成人	刘敏	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	电池				

成果概述

随着可穿戴电子设备、柔性显示器以及智能医疗织物的快速发展，市场对具备高安全性、良好柔韧性及高能量密度的柔性储能器件的需求日益迫切。传统的商用锂离子电池由于采用易燃的有毒有机电解液，且组件多为刚性材料，在弯折、挤压等形变下容易发生短路甚至引发起火爆炸，难以满足可穿戴设备的安全性与柔性需求。因此，开发新型本征安全、低成本且可弯曲的柔性储能技术成为当前新能源领域的重大挑战。

本团队自主研发了一类高性能柔性水系锌离子电池。该电池系统以丰度高、成本低且本征安全的锌金属为基础，通过创新性地引入高强度的水凝胶聚合物电解质与一体化柔性电极结构，突破了传统电池在机械形变下性能衰减和电解液泄漏的瓶颈。该柔性电池不仅能在剧烈弯折、扭曲甚至剪切状态下保持稳定的能量输出，还通过微观界面工程有效抑制了锌枝晶的生长，大幅提升了电池的循环寿命，在未来的柔性可穿戴电子领域具有极为广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

作为新一代安全储能技术，水系锌离子电池具有极高的理论比容量、极低的制造成本以及环境友好等显著优势。相较于传统液态电池，团队在固态柔性化改造方面实现了关键技术突破，解决了锌阳极在循环过程中的枝晶生长、析氢反应以及柔性电极界面剥离等核心痛点。

团队采用原位聚合技术制备了一种兼具高离子电导率和优异机械性能的聚丙烯酰胺基防冻水凝胶电解质。该水凝胶网络不仅能牢牢锁住水分，防止电解液在弯折时泄漏，还能通过其丰富的极性官能团调节锌离子的沉积行为，引导锌离子均匀沉积，从源头上抑制了尖锐锌枝晶的刺穿风险。在电极方面，团队将高性能的钒基/锰基氧化物活性物质均匀原位生长在柔性碳布或碳纳米管薄膜上，构建了无粘结剂的三维柔性正极。这种一体化设计赋予了电池极佳的界面接触稳定性。当电池在受到超过180度的反复弯折时，活性物质不会脱落，内外阻抗保持高度稳定，从而实现了在复杂机械形变下的高效、安全储能。

技术指标/优势

与传统的柔性锂离子电池和超级电容器相比，该成果实现了安全性与能量密度的双重提升。采用水系凝胶电解质，彻底杜绝了起火、爆炸的隐患，在针刺、切割、重击等极端破坏下仍能安全工作。成功抑制了锌枝晶的生成，电池稳定循环可达数千圈；且主要原材料价格低廉，制造工艺可在空气环境中进行，大幅降低了生产成本。

应用领域和市场前景

该成果可为新一代柔性电子产品的动力系统提供极具竞争力的解决方案，如：智能穿戴设备（智能手表、健康监测手环）、柔性折叠屏手机、电子皮肤、植入式医疗器械以及智能发热/传感服装等。由于其极其优异的生物相容性和本征安全性，该柔性锌离子电池有望彻底替代目前穿戴设备中存在安全隐患的微型聚合物锂电池，在未来的千亿级消费电子及智慧医疗市场中占据重要地位，具有极高的商业转化价值。

基于混合并联变换器的功率硬件在环模拟系统

成果完成人	郭鸿浩	职称	讲师	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	汽车及轨道车辆相关技术		高技术领域（三级）	节能与新能源汽车技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	新能源汽车、轨道交通				

成果概述

永磁磁同步电机凭借自身结构简单、稳定性高、高功率因素等优势获得广泛的应用。传统的电机驱动器的测试方案采用“待测电机驱动器-目标电机-发电机”的电机对拖平台，存在成本高昂、灵活性差、实验过程复杂等缺陷。采用功率变换器的功率硬件在环（Power Hardware In The Loop, PHIL）测试平台，能够实现对真实电机的替代完成功率级别的实验测试。本成果用基于并联混合变换器的电机模拟器与被测电机驱动器相连，在不改变待测电机驱动器硬件系统的条件下对真实目标电机的端口特性进行模拟。

关键技术/创新要点

采用高功率密度的并联混合变换器（Parallel Hybrid Converter, PHC）作为电机模拟器的功率拓扑，主功率变换器为高功率低频变换器，并联变换器为低功率高频的级联H桥（Cascaded H-Bridge, CHB），分析了H桥的工作原理，CHB传统的移相载波调制策略；并联混合变换器的电机模拟系统的基本控制中，电机驱动器采用转速电流的双闭环控制，主变换器和并联混合变换器通过电流调节器得到参考电压。

提出了采用排序算法实现CHB直流侧电容电压平衡的算法，针对排序算法中有两种旁路模态使其均匀分布，以使得H桥的开关管损耗平衡。开关器件进行PWM调制过程中考虑到模态工作的先后顺序，能够减少开关的开关次数，降低开关损耗。在并联混合变换器接负载时，验证了CHB对高频电流的吸收能力。分析了并联混合变换器电机模拟器的模型预测以及进行了电压方程推导。考虑CHB变换器开关过程中的死区效应和补偿方案。

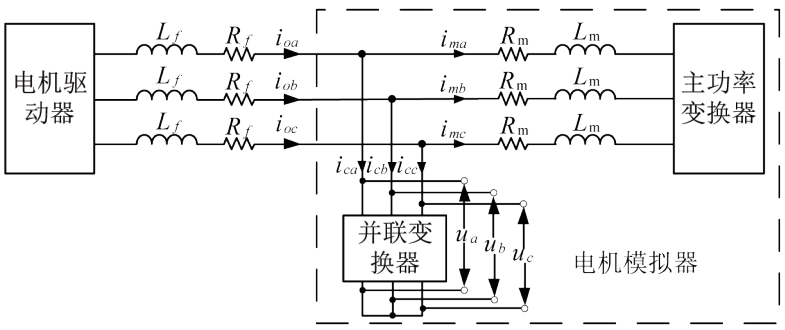


图1 电机模拟系统

技术指标/优势

1.额定功率:50kW

2.带宽(-3dB):>10kHz

3.并联变换器等效开关频率:>800kHz

4.最大输出线电压有效值:400V

5.最大输出相电流有效值:100A

6.本成果与市场上常见功放相比,具有更高的响应带宽指标,适用于对频率与响应速度要求更高的应用,可显著提高功率硬件在环模拟系统的模拟精度。

7.已申请专利一项:

郭鸿浩,姜本笑,周磊,董家璇.基于级联H桥直流侧电容电压平衡的分类排序系统及方法,202210965227.4,2022.8,2022.11

应用领域和市场前景

针对永磁同步电机、异步电机、无刷直流电机等驱动器测试,新能源电驱动控制器测试应用,采用功率变换器的功率硬件在环(Power Hardware In The Loop,PHIL)测试平台,能够实现对真实电机的替代完成待测产品功率级别的实验测试。采用本成果混合并联变换器,测试精度更高,响应速度更快,可显著提升模拟可信度与测试精度。

防撞最优车距的控制方法

成果完成人	周颖	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	设计服务	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	可应用于汽车辅助驾驶、无人驾驶领域				
核心专利号	ZL202011473278.2				

成果概述

随着5G技术的逐渐覆盖，工业计算机技术与远程控制技术的高速发展，刺激了无人驾驶技术的发展。目前，很多国家的全自动无人驾驶列车已投入运行，无人值守全自动无人驾驶模式(GoA4模式)是最新的驾驶模式。现有的无人驾驶控制方法中，均采用保持最小安全距离的控制方式，即保持列车之间的距离不变，不考虑车速的不稳定性和实际乘客需求实时性，效果不佳。

本成果提出了一种防撞最优车距的控制方法，可以保证列车之间动态保持最佳的安全距离，使列车安全行驶的同时保证准时性。

关键技术/创新要点

本成果通过设定为定值的期望列车时间间隔和当前车速计算出当前参考车距，再与前一列车与当前列车之间的当前车速一起代入到控制器方程中计算出当前列车的加速度变化率，并根据加速度变化率去控制当前列车的速度，使相邻列车之间到达同一位置时的时间间隔可以保持恒定。

上述方法相比于传统的保持恒定最小安全距离的控制方法，列车间的安全距离根据车速动态变化，速度快的时候保持较大的车距，速度低的时候保持较低的车距。可以保证列车间的时间间隔为定值，列车间的安全距离随前后两辆列车的当前速度变化，既能保证列车间具有安全的间距，同时保证列车可以准时到站，提高乘客的乘坐体验。

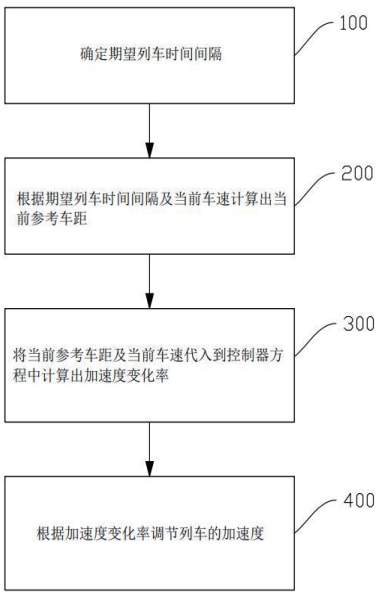


图1 防撞最优车距的控制方法的流程图

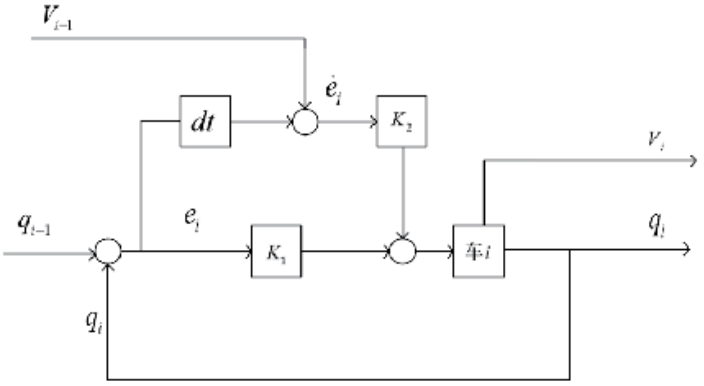


图 2 控制系统的系统框图

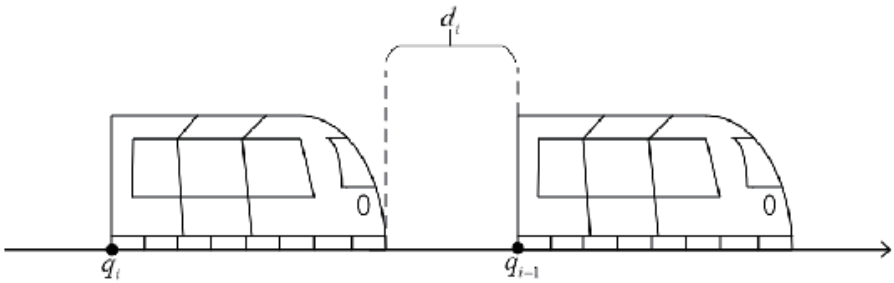


图 3 相邻列车间的运行示意图

技术指标/优势

与现有技术相比，本成果可以保证列车间的时间间隔为定值，列车间的安全距离随前后两辆列车的当前速度变化，既能保证列车间具有安全的间距，同时保证列车可以准时到站，提高乘客的乘坐体验。

应用领域和市场前景

现有的无人驾驶控制方法中，均采用保持最小安全距离的控制方式，即保持列车之间的距离不变，不考虑车速的不稳定性和实际乘客需求实时性，效果不佳。

本成果提出的防撞最优车距的控制方法，可以保证列车之间动态保持最佳的安全距离，使列车安全行驶的同时保证准时性。该成果在辅助驾驶和无人驾驶领域具有潜在的应用价值。

低载波比逆变器电流解耦控制方法

成果完成人	郭鸿浩	职称	讲师	所在单位	自动化学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	设计服务	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	新能源发电、电动汽车等				
核心专利号	ZL202411281884.2				

成果概述

低载波比下三相逆变器的电流解耦控制受到控制延时的影响，为解决这一问题，提高控制性能。基于经典PI控制在L滤波型逆变器单输入、单输出系统中易于设计、易于分析的优点，对其进行低载波比下控制策略优化，提出了离散域状态反馈解耦、离散域复矢量有源阻尼等优化策略；基于模型预测控制在LC滤波型逆变器控制中展现出的多目标优化能力，对其进行低载波比下改进策略研究，建立了精确预测模型，提出了一种基于几何理论的约束校正方法。

关键技术/创新要点

（1）对逆变器数字控制系统的延时环节进行了特性分析与建模，建立了L及LC滤波型三相逆变器的连续域、离散域数学模型，为后续低载波比控制策略的设计奠定了基础。

（2）针对低载波比下传统连续域状态反馈解耦策略存在的由于延时近似误差以及忽略被控对象离散特性而导致的稳定性、跟踪性能欠佳问题，基于状态反馈解耦思想与离散域精确模型，在离散域进行状态反馈解耦控制的研究。通过理论稳定性分析及仿真动态性能对比，验证了所提离散域状态反馈解耦策略具有更优的稳定性以及动态跟踪性能。

（3）结合所提离散域状态反馈解耦思想，设计了一种基于电流反馈的离散域复矢量有源阻尼策略，以改善低载波比下传统离散域复矢量解耦有源阻尼策略主动电阻存在上限及抗扰动能力不足的缺点。通过理论分析及仿真验证，证明了所提方法可实现更高的主动电阻取值，且抗扰性能也得到明显改善。

（4）为改善LC滤波型三相逆变器传统MPC策略在谐波注入、谐波补偿、死区抑制等低载波比谐波控制场合预测模型准确度不足、跟踪误差偏大、输出电压质量欠佳等问题，通过建立精确预测模型，并设计了一种基于几何理论的约束校正方法，以进行低载波比下的改进型MPC策略研究。经过仿真验证，所改进策略有着更高的模型准确度及更优的跟踪性能。

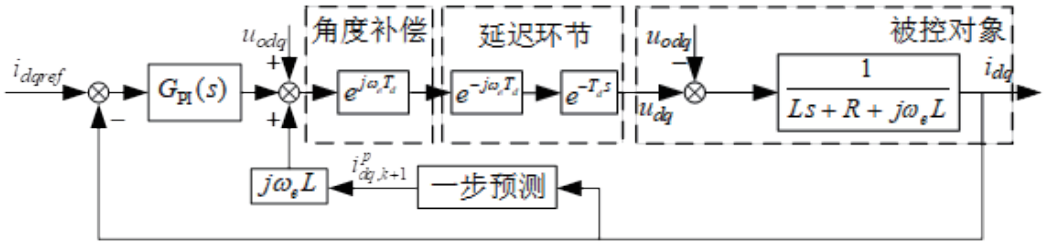


图1 改进的连续域状态反馈解耦控制框图

技术指标/优势

本成果提供一种低载波比控制下的三相逆变器离散域电流解耦控制方法，采用一种更为精确的同步旋转坐标系下R-L滤波器的离散模型，对电流耦合项以及角度延迟导致的耦合项分别解耦，设计误差补偿器将解耦后的系统极点进行抵消，能最大程度上解决三相逆变器在低载波比状态下的d、q轴电流耦合问题以及控制延迟问题，实现逆变器系统在低载波比控制下的稳定运行。

应用领域和市场前景

大功率逆变器通常开关频率较低，此时单个基波周期内的开关次数少，电流控制精度差。本技术方案针对这一问题，可提升大功率新能源发电、大功率电动车辆驱动电机等领域的电流控制精度。

面向交通电气化耦合系统的电动汽车双层决策引导方法

成果完成人	邢强	职称	讲师	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	研发与设计服务		高技术领域（三级）	设计服务	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	可应用于电动汽车充电、车网互动领域				
核心专利号	ZL202410264436.5				

成果概述

随着交通电气化进程的加速，电动汽车数量激增，车-站-路-网多源信息融合与实时决策引导成为缓解充电拥堵、降低用户成本并保障电网稳定运行的关键。然而，现有的电动汽车充电引导方法多为离线式集中控制，难以同时处理充电站推荐与路径导航的耦合决策问题，且对动态环境适应性差，无法有效平衡用户经济性与电网安全性。

本成果提出了一种面向交通电气化耦合系统的电动汽车双层决策引导方法，将充电站推荐与路线导航解耦为上下层协同任务。该方法能够实时感知交通、充电站及配电网状态，动态输出最优充电站与行驶路径，在显著降低用户综合成本的同时，有效平抑电网电压偏差，提升了系统的经济性与运行稳定性。

关键技术/创新要点

（1）构建基于有限马尔可夫决策过程的双层决策引导模型。该模型将充电站推荐与路径导航解耦为上下层协同任务：上层智能体以用户充电成本、等待时间、充电时间及电网电压偏差为奖励导向，动态推荐最优充电站；下层智能体以路程能耗成本与通行时间成本为奖励导向，实时规划最优行驶路径，在降低用户综合成本的同时保障配电网电压稳定。

（2）提出融合Double DQN、Dueling DQN、优先回放缓存、学习率衰减及辍学层技术的改进Rainbow算法，对双层FMDP模型进行训练求解。其中，Double DQN机制通过评价网络选择最优动作、目标网络计算Q值，有效缓解过估计问题；Dueling DQN机制将网络结构分为状态价值与动作优势，提升学习效率；优先回放缓存基于时间差分偏差筛选高质量样本，加速收敛；学习率衰减策略动态平衡前期探索与后期利用；辍学层技术随机丢弃部分神经元，增强模型泛化能力，防止过拟合。

（3）构建以电动汽车用户综合成本最小化与电网电压偏差最小化为目标的多目标优化模型，约束条件涵盖电动汽车电量安全约束、充电站选择唯一性约束、配电网潮流约束及节点电压/支路电流安全约束。通过双层FMDP模型将原优化问题转化为上下层智能体的序贯决策问题，实现车-站-路-网多源信息融合下的实时在线引导，在保证用户出行可靠性与电网运行安全性的前提下，兼顾经济性与稳定性。

(4)通过标准化训练框架完成双层智能体的离线训练与在线决策，输出分用户、分时段的充电站推荐结果与行驶导航路径。优化结果可显著降低电动汽车用户平均充电成本与通行时间成本，平抑配电网节点电压偏差，提升充电服务均衡度，相较于传统离线策略与基础DQN方法，综合成本降低13%以上，决策时间控制在秒级以内，满足实时引导需求。

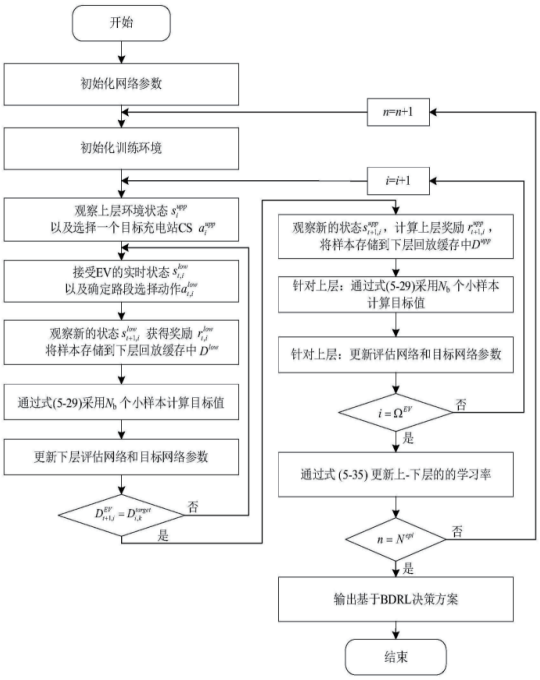


图1 面向交通电气化耦合系统的
电动汽车双层决策引导方法的流程图



图2 面向交通电气化耦合系统的电动
汽车双层决策引导系统的交通拓扑图

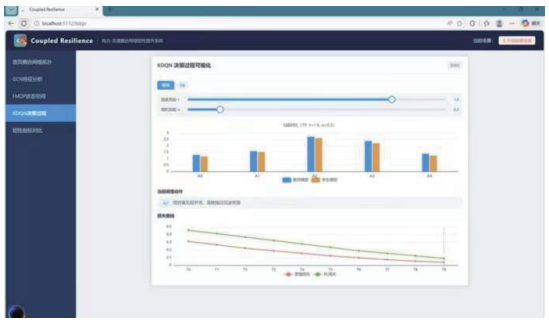


图3 面向交通电气化耦合系统的电动
汽车双层决策引导系统的运行结果图

技术指标/优势

与现有技术相比，本成果可以保证电动汽车用户的充电站选择与行驶路径随实时电价、交通路况和配电网电压动态协同优化，用户综合成本与电网电压偏差随环境变化自适应调整，既能显著降低用户充电费用与通行时间成本，同时保证配电网节点电压稳定在安全范围内，提升充电服务均衡度与用户出行准时性。

应用领域和市场前景

现有的电动汽车充电引导方法多采用离线式集中控制或基于固定规则的推荐策略，难以同时处理充电站选择与路径导航的耦合决策问题，对实时电价、交通路况和电网状态的动态变化适应性差，导致用户充电成本高、等待时间长、配电网电压波动大，效果不佳。

本成果提出的面向交通电气化耦合系统的电动汽车双层决策引导方法，通过双层深度强化学习架构将充电站推荐与路线导航解耦协同优化，能够根据实时车-站-路-网多源信息动态输出最优决策，在显著降低用户综合成本的同时保障电网稳定运行。该成果在电动汽车智能充电导航、车网互动、智慧交通调度以及配电网电压管理等领域具有广阔的应用价值和市场前景。

面向高性能锂金属电池应用的三维多孔铜集流体研制

成果完成人	陈剑宇	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	新型动力电池(组)与储能电池技术	
所属学科方向	一级学科	能源科学技术		二级学科	能源化学
应用行业	新能源				
核心专利号	ZL202311715084.2				

成果概述

高能量密度电池作为新能源产业的关键技术和未来能源互联网的枢纽单元，对我国能源变革转型和绿色低碳发展有着至关重要的作用。作为极具前景的新型储能系统，基于电化学转化反应的锂金属负极其理论比容量高达3860mAh/g，远高于传统锂离子插层化学提供的容量，对构建高能量密度电池体系有着至关重要的作用。将商用的铜箔用于锂金属电池负极集流体时，其平面结构不利于对锂负极的电荷分布和离子扩散进行有效调控，无法抑制锂枝晶的生长。

本团队自主研制了一款面向高性能锂金属电池应用的三维多孔铜（DG-CCZ）集流体，三维多孔结构可以提供大的表面积和充足的扩散通道来平衡电荷传输和传质速率，进而可以抑制锂枝晶生长。该集流体通过毛细作用提升了DG-CCZ集流体中熔融锂的浸润速度和深度，实现锂金属的高效融入，此外，DG-CCZ集流体可以诱导电极循环过程中锂金属在多孔铜中“自下而上”沉积和“自上而下”溶解，实现定向扩散，从而有效提升了锂/多孔铜复合负极的高效制备和循环稳定性。

关键技术/创新要点

双梯度多孔铜-铜锌（DG-CCZ）集流体通过单组份与多组分金属粉末梯次烧结技术制备，其具有独特的双梯度设计，表现出“亲锂到疏锂”和“微孔到纳米孔”的特性。这种双梯度多孔铜-铜锌集流体通过其亲锂性梯度增强了熔融锂的浸润性，并通过孔结构梯度最大化毛细作用力。这种设计能够在电极制备过程中实现高效的熔融锂注入，并在电池循环过程中实现金属锂有目标沉积/溶解反应。以往将锂金属与多孔铜进行复合的研究过程多使用电化学沉积法，该方法在实验室中虽然容易制得，但在规模化制备中面临着造价高、效率低以及电解液废液环境污染性大等突出问题。因此，发展锂金属与多孔铜集流体的高效和可规模化制备技术，成为锂复合负极领域的研究重点和难点。该工作所制备的DG-CCZ集流体得益于亲锂梯度和孔梯度的协同作用，实现了Li/DG-CCZ复合负极的高效制备。

基于DG-CZZ集流体独特的结构，使用Li/DG-CCZ复合负极组装的各类电池都具有优异的电化学性能。值得注意的是，使用了8片Li/DG-CCZ复合负极和4片双面涂覆的LFP正极组装了多层正负电极的软包电池，该软包电池展示了159.3 mAh g^{-1}的高放电容量和165.7Wh kg^{-1}的高质量能量密度，凸显了其在实

际应用中的潜力。为了进一步说明该电池的实用性，使用该多层软包电池作为模型车的电源，该模型车可以在1.2 km h^{-1}的速度下行驶超过0.4 km，这证实了多层软包电池配置的可行性和优异的性能，也突显了这种DG-CCZ集流体在未来发展高性能锂金属电池具有广阔的前景。

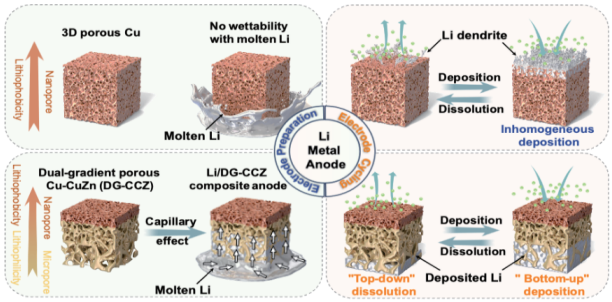


图1 热熔融法制备Li/3D-Cu复合负极和Li/DG-CCZ复合负极制备和电极循环过程示意图

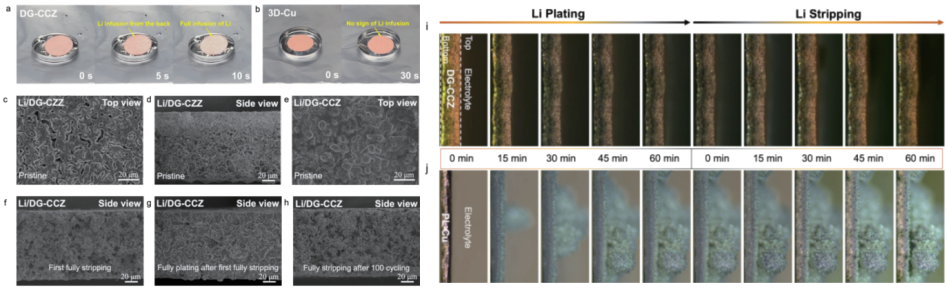


图2 DG-CCZ集流体中熔融锂的动态浸润过程

技术指标/优势

该工作通过简便普适的方法巧妙地制备了一种新颖的双梯度多孔铜-铜锌集流体（DG-CCZ），DG-CCZ集流体具备独特的亲锂-疏锂梯度和微米孔-纳米孔的孔径梯度。通过双梯度的协同作用，DG-CCZ集流体在电极制备过程实现了金属锂的高效浸润，并在电池循环过程中在集流体内实现了锂金属“自下而上”的沉积和“自上而下”的溶解，有效避免了锂枝晶的生长。与此同时，DG-CCZ集流体具有66.05%的高孔隙率与液态锂金属相结合，可以提供高达320.91 mAh g^{-1}的比容量。相比于传统铜箔集流体及电化学沉积技术，本研究工作显著提高了三维多孔电极电化学性能，且大幅度提升了复合负极的研制效率。

应用领域和市场前景

该研究成果在锂金属电池领域具有广泛的应用前景，主要聚焦于高能量密度储能系统。其双梯度多孔集流体（DG-CCZ）通过调控锂沉积行为，可显著提升电池的循环稳定性和安全性，适用于电动汽车、便携式电子设备、无人机等高需求场景。在电动汽车领域，该技术可延长续航里程并缩短充电时间，助力解决里程焦虑；在储能领域，其长循环寿命和高安全性适用于智能电网、可再生能源存储系统，提升电网稳定性。此外，柔性集流体设计与软包电池的成功示范，使其在可穿戴设备、柔性电子等新兴市场中具备潜力，如折叠手机、医疗监测设备等。

市场前景方面，随着全球新能源转型加速，高能量密度电池需求激增，预计到2030年全球锂金属电池市场将突破百亿美元。该技术通过抑制枝晶生长和规模化生产优势，有望推动锂金属电池商业化进程，抢占高端储能市场，同时带动材料制备、电池制造及终端应用全产业链发展，在新能源赛道中占据重要地位。

二维磷硫化锡修饰的高效氧化锡电子传输层构筑及n-i-p型钙钛矿光伏器件应用

成果完成人	李明光	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	节能与新能源用材料制备技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	无机非金属材料
应用行业	有机半导体光电器件				

成果概述

在钙钛矿光伏电池器件结构中，电子传输层扮演者抽提电子与阻隔空穴的作用，因此该功能层能够有效抑制界面处的载流子复合过程。对于n-i-p型钙钛矿光伏器件而言，氧化锡（SnO_2）具有易溶液加工以及优异的光电性质等优势，是目前最为主流的电子传输层。尽管基于SnO_2电子传输层的钙钛矿光伏器件性能已经大幅提升，然而氧化锡材料内部的各类界面缺陷很容易引起非辐射复合，进而阻碍从钙钛矿层向电子传输层的电荷转移。为了提升SnO_2电子传输层的传输效率，本成果制备了一种超薄的磷硫化锡（$SnPS_3$）纳米片并将其作为导电添加剂用于调节SnO_2的电学性质。研究发现，二维$SnPS_3$纳米片的引入能够有效修复SnO_2的缺陷氧，降低电子传输的导带并提升电子传输层的导电性。基于二维$SnPS_3$纳米片修饰的SnO_2构筑n-i-p型钙钛矿光伏器件，器件光电转化效率由21.51%提升至23.01%，同时器件稳定性得到显著改善。这是二维金属磷硫类化合物（MPChx）首次被应用于钙钛矿光伏器件。

关键技术/创新要点

首先，利用湿摩剥离法制备二维$SnPS_3$纳米片（晶体结构如图1a所示），该二维材料的基本形貌以及晶格结构可以通过原子力显微镜（图1b）以及大角度环形暗场的扫描隧道电子显微镜（HAADF-STEM）观察到。通过将制备的二维$SnPS_3$掺杂入SnO_2薄膜中后，SnO_2薄膜的表面电势降低，且表面电势扰动变小（图1d,e），表明SnO_2薄膜功函数增大且表面缺陷减少。同时$SnPS_3$掺杂的SnO_2薄膜导电性显著提升（图1f）。

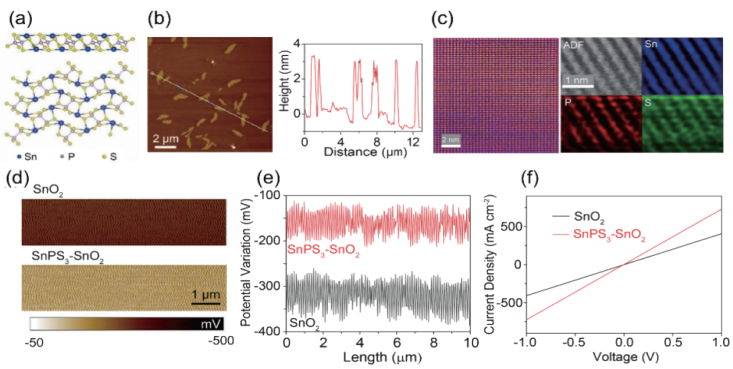


图1 (a) $SnPS_3$晶体结构的侧视和俯视图；(b) $SnPS_3$纳米片的原子力显微镜照片；(c) 大角度环形暗场的扫描隧道电子显微镜 (HAADF-STEM)；$SnPS_3$修饰前后的(d)表面电势照片以及(e)电势分布图；(f) $SnPS_3$修饰前后的电导率

将$SnPS_3$掺杂的SnO_2作为电子传输层，制备钙钛矿光伏器件（图2a）。器件的光电转化效率由21.51%提升至23.01%，其中短路电流提升明显，由23.21 mA cm^{-2}提升至24.49 mA cm^{-2} (图2b)。器件性能提升的同时，$SnPS_3$掺杂的SnO_2传输层构筑的钙钛矿薄膜稳定性提升（图2c），对应的器件放置稳定性得到改善（图2d），改进器件在惰性环境下放置800小时后器件性能仍保持在原效率的79%。

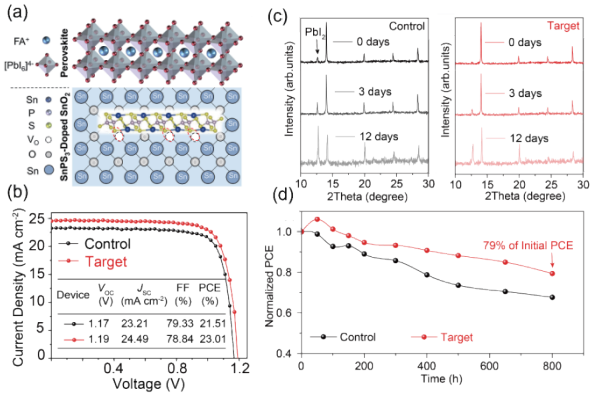


图2 (a) 基于$SnPS_3$修饰的SnO_2构筑钙钛矿光伏器件示意图；
(b) $SnPS_3$修饰前后的器件性能示意图；(c) 钙钛矿薄膜的结晶稳定性示意图；(d) 器件性能稳定性示意图

技术指标/优势

（1）开发了一种全新的SnO_2薄膜电学性质调控手段，二维金属磷硫类化合物（MPChx）被应用于钙钛矿光伏器件是首次被报道，拓展了该类二维材料的应用场景。

（2）相较于目前已报道的各类二维材料修饰氧化锡薄膜的研究工作（最高效率24.32%，Angew. Chem. Int. Ed. 2024, 63 (27), e202404385），基于二维SnPS3修饰手段构筑的器件性能效率达到23%，与最高效率较为接近。

应用领域和市场前景

这项研究针对金属氧化物基电子传输层的缺陷态以及能级调控，开发了一种新型二维材料修饰策略，实现了氧化锡晶格氧的提升与缺陷氧的降低，载流子传输性能得到显著改善，为高性能n-i-p型钙钛矿太阳能电池器件的设计开发提供了新思路。与此同时该类高效电子传输层也在其他光电功能器件中展现出广阔的应用前景。

水系锌电池用高稳定大晶粒尺寸单一(002)织构锌金属负极高效制备

成果完成人	马延文	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	能源科学技术		二级学科	储能技术
应用行业	新能源储能				
核心专利号	CN117476860B				

成果概述

水系锌电池因其高安全性、低成本、环保以及简便的制造工艺等优势被认为是一项极具应用前景的新型储能技术。然而，锌负极面临着枝晶生长、析氢副反应和腐蚀等问题，将导致电池短路、容量损失、寿命降低，严重限制了水系锌电池的实际应用。

研究表明，锌离子的均匀沉积与锌负极的晶面取向密切相关，(002)晶面能够诱导锌均匀外延沉积，这将抑制锌枝晶的形成。此外，(002)晶面还能有效抑制析氢反应和副产物生长，提升锌负极的抗腐蚀性能。由此可见，构筑(002)织构锌金属负极可有效提升锌离子电池的性能。

本团队提出了一种快速熔融-凝固的方法，可快速将商用锌箔转化为具有毫米级晶粒尺寸的单一(002)织构锌。该方法消除了不同商用锌箔初始织构、残余应力、晶粒尺寸的差异，并使得商用锌箔均匀地形成单一(002)织构的锌。单一(002)织构确保了大规模外延和致密的锌沉积，同时晶界的减少显著抑制了晶间副反应。本成果应用于水系锌电池中可显著提升电池稳定性，并且，所展示的简单而高效的生产策略，也将有利于推动水系锌电池的发展。

关键技术/创新要点

通过采用一种快速熔融-凝固的方法，成功构建了高性能的水系锌金属负极(HG-002-Zn)。这一技术有效消除了不同商用锌箔初始织构、残余应力和晶粒尺寸的差异，使普通商用锌箔能够均匀地形成具有毫米级晶粒的单一(002)织构锌。在作为水系锌金属负极使用时，该方法不仅确保了大规模外延生长和致密的锌沉积，同时由于晶界的减少显著抑制了晶间副反应，从而提升了锌负极的稳定性和电化学性能。具有以下创新点：

(1)适用于不同来源、初始织构各异的商业锌箔，解决了传统退火工艺因初始条件差异导致的织构不可控问题。

(2)具有毫米级大晶粒(文献报道通常为微米级)特征，大幅减少晶界，抑制了晶间腐蚀和确保了均匀的外延沉积。

(3)热处理过程仅需数分钟，远低于传统退火(数小时至数十小时)，适合大规模生产。

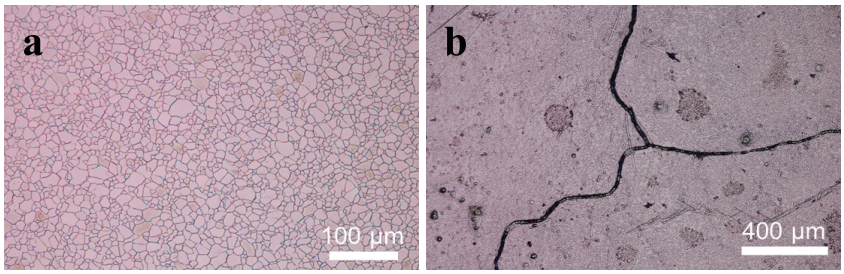


图1a 普通商用锌箔的金相图片；图1b 具有毫米级晶粒的单一(002)织构锌的金相图片

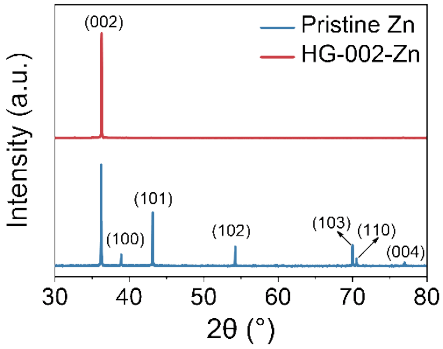


图2 两种锌箔的XRD对比

技术指标/优势

基于该成果组装的锌||锌对称电池，在放电深度高达75%的严苛条件下，可稳定运行180小时以上，而普通商业锌箔仅可工作不到30小时。此外，在0.1 mA cm^{-2}，0.1 mAh cm^{-2}；1 mA cm^{-2}，1 mAh cm^{-2}；10 mA cm^{-2}，10 mAh cm^{-2}；20 mA cm^{-2}，20 mAh cm^{-2}的电流密度下可分别稳定运行3100小时，3280小时，830小时，210小时。组装的锌||多孔碳混合超级电容器在2 A g^{-1}的电流密度下充放电20000次后仍可具有88%的容量保持率。

与同类已报道的锌负极织构调控策略相比，本研究成果简便易行，适合大规模制备。例如通过使用单晶(002)锌作为锌金属负极，但单晶制备过程复杂成本极高。另外，也有研究通过电化学沉积、退火处理和辊压方法来制备强(002)织构锌负极，但上述方法难以获得单一(002)织构锌，且工艺复杂。而该成果不仅实现了单一的(002)织构，而且具有毫米级的大晶粒特征，可以有效抑制锌枝晶的形成，因此表现出了优异的可逆性。

该成果已申请专利并获授权。专利名称为：一种大晶粒超强(002)织构锌金属负极的制备方法，授权公告号为：CN117476860B。

应用领域和市场前景

水系锌二次电池因其高安全性和低成本优势，在大规模储能系统、可再生能源并网等领域具有重要应用潜力，尤其适用于对安全性要求严格的场景。随着全球可再生能源装机规模持续扩大及安全储能需求日益增长，水系锌电池有望逐步替代部分锂离子电池市场。本研究成果通过优化锌负极性能，可显著提升电池循环稳定性，从而推动水系锌电池在电网储能、户用储能及5G基站等领域的规模化应用。此外，该技术在成本敏感的消费电子和低速电动车市场同样具备拓展潜力，有助于形成多元化应用布局，加速水系锌电池的商业化进程。

面向光电子芯片的供能的钙钛矿光伏电池

成果完成人	许利刚	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	光电材料		高技术领域（三级）	有机光电材料	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体电子技术
应用行业	钙钛矿太阳电池、有机光电材料				
核心专利号	ZL202210986647.0；ZL201811500031.8				

成果概述

针对钙钛矿表界面的缺陷多以及结晶性难以调控的难题，申请人制备了一类新功能空穴传输层材料-“动态共振”材料，并阐释了共振变化与钙钛矿界面的未配位铅离子缺陷及结晶生长作用关系，提出了钙钛矿表界面动态调控的新方法。具体是利用共振结构能够快速自适应的电子离域，动态自适应地调控钙钛矿界面缺陷及结晶过程，获得高质量钙钛矿薄膜，解决了钙钛矿薄膜界面缺陷及结晶过程的调控难题。基于共振材料构筑的反式钙钛矿太阳能电池小面积（0.08cm^2）最高效率接近22%，1.02cm^2大面积电池具有接近于21%的效率。未封装的器件具有优异的光、热、湿度环境的稳定性。继而，申请人将共振结构的有机半导体作为共振化学桥，有效地调控了钙钛矿成膜质量，并促进空穴提取，从而提高器件的本征稳定性。最终未封装的器件在65℃下在连续标准太阳光照下运行了2373小时无效率损失，是国际上最先进标准光照稳定性的器件之一。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种共振调控钙钛矿结晶生长的新策略，具体是设计合成具有共振结构的新型空穴传输材料，该材料中N-P=O基团能够在中性和带电共振形式的多个电子态之间实现快速自适应的互变异构，通过共振变化与钙钛矿埋底的未配位Pb缺陷形成偶级作用，诱导钙钛矿晶体生长具有优先取向，并获得具有光滑表面、定向结晶和低缺陷态的高质量钙钛矿薄膜（图10），最终钙钛矿光伏电池的效率接近22%，1.02cm^2大面积光伏电池也高达19.5%。此外，未封装器件在相对湿度为40~50%的空气中或在连续1个标准太阳光光照1000小时，仍能保持初始效率的90%和88%以上。

进一步地，申请人设计了一种基于N-C=O结构的动态共振有机半导体，利用给体-共振-给体(D-r-D)结构中N-C=O和N^+=C-O^-两种形态之间的共振电子排布变化，促进与钙钛矿中未配位Pb^{2+}的相互作用，不仅表现出优异的空穴提取和输运能力，而且具有调控钙钛矿结晶的效果，可用于大面积高质量的光伏薄膜，1.02cm^2电池器件具有接近于21%的效率。此外，大面积器件具有优异的光热稳定性，在不封装条件下高温(~65°C)下连续AM 1.5G光照超过1320小时PCE仅降低2.6%。相关结果发表在Adv. Mater., 2022, 34, 2107111

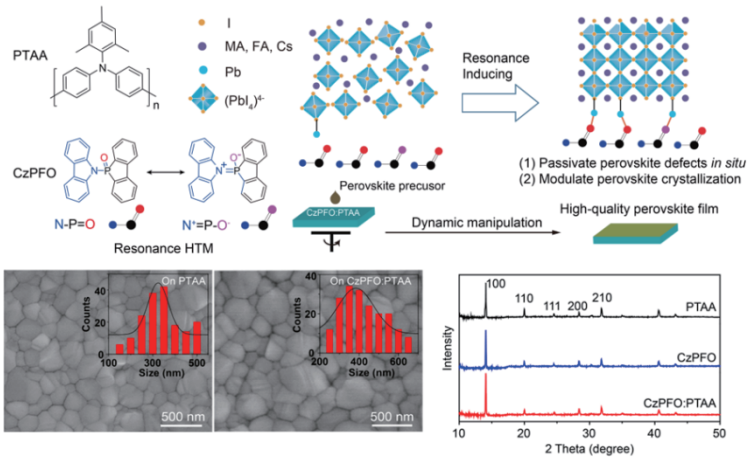


图1 共振分子动态调控钙钛矿获得高质量光伏薄膜

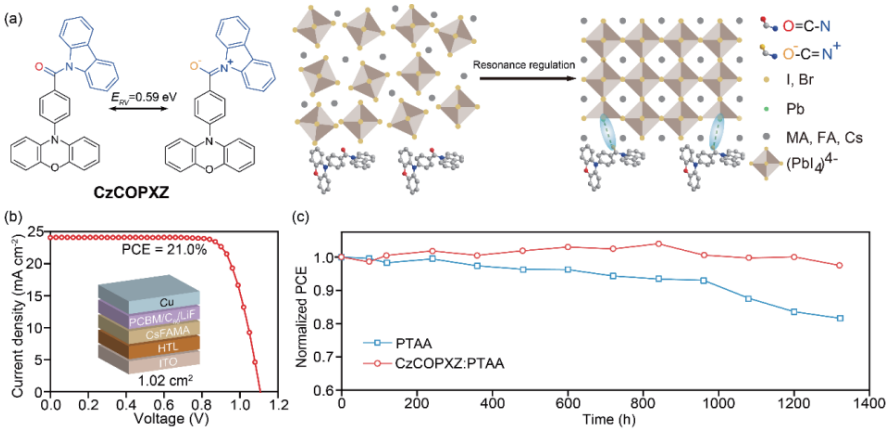


图2 (a) N-C=O分子共振活化能及对钙钛矿表界面动态调控作用示意图；
(b) 1.02 cm²大面积器件结构与性能；(c) 器件的光热稳定性

本团队设计了一系列长链烷基双亲性小分子调控钙钛矿埋底界面，不仅改善了PTAA表面的润湿性，提高了钙钛矿成膜性，而且能钝化钙钛矿埋底界面缺陷。特别是，长链小分子能部分释放钙钛矿埋底界面处的残余应力（图11），减少晶格畸变和缺陷产生，器件最高效率接近于20%，极大提升了器件的光照稳定性（可以稳定6200小时），相关结果发表在Adv. Sci. 2022, 2202028，为本项目设计多功能的有机半导体空穴传输层及调控残余应力提供了初步的研究思路。

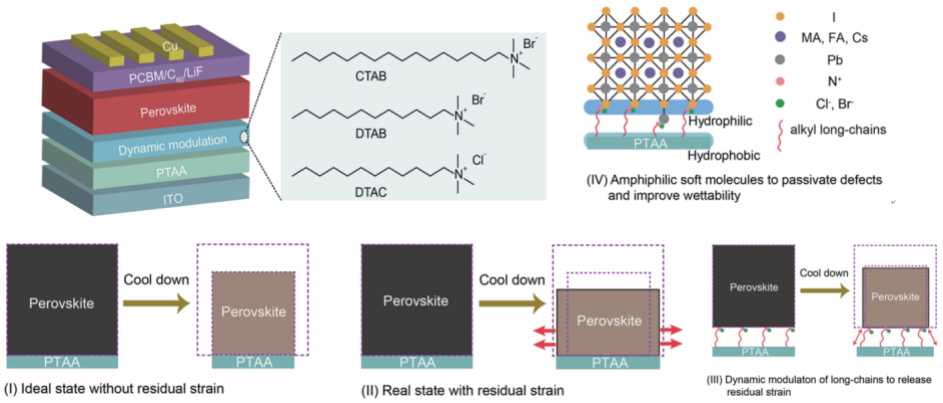


图3 长链柔性分子调控钙钛矿埋底界面应力

技术指标/优势

该技术通过新材料设计制备，利用动态表界面技术，构筑了世界先进水平的钙钛矿光伏电池，也具有大面积制备的潜能，相关稳定性达到世界先进水平。目前获得相关专利3项，获得博士后创新人才优秀成果奖1项，美国专利授权1项。

(1)许利刚;博士后创新人才支持计划优秀创新成果奖,中国博士后科学基金会,2020.

(2)许利刚(5/5);江苏省高等学校科学技术研究成果一等奖,江苏省教育厅,2021(黄维;陈润锋;陶冶;郑超;许利刚)

(3)许利刚;陈润锋;钱梦园;李一凡;黄维;一种钙钛矿太阳能电池及制备方法,2022-8-26,中国,ZL201811500031.8 (专利)

(4)陈润锋;许利刚;张弛;黄维;一种调控钙钛矿结晶过程的方法,2022-8-26,中国,ZL202011305383.5 (专利)

(5)许利刚;贾文博;闫冬冬;一种掺杂SEM-HCl的钙钛矿活性层及其光伏器件的制备方法,2023-07-21,中国, ZL202211140626.3 (专利)

(6)许利刚;陈润锋;邱伟;黄维;一种界面原位诱导层及其光伏器件的制备方法,2023-07-25,中国,ZL202210986647.0 (专利)

(7)ligang Xu;Wenbo Jia;Dongdong Yan;PREPARATION METHOD OF PEROVSKITE FILM BASED ON SEM-HCL ADDITIVE AND OF PHOTOVOLTAIC DEVICE, 2024-2-1, 美国, 18/469581 (专利)

应用领域和市场前景

钙钛矿太阳能电池在双碳政策大背景下，市场需求持续增长。有机半导体动态调控钙钛矿薄膜是当前太阳能电池领域的前沿技术之一，具有巨大的市场潜力。其具体优势包括：

高效性能：有机半导体的动态调控能够有效提高钙钛矿太阳能电池的光电转换效率和稳定性，提高竞争力。

成本优势：有机半导体调控技术相对传统工艺更简便、成本更低，能够降低钙钛矿太阳能电池的制造成本。

钙钛矿光伏用自组装单分子层（SAM）空穴传输材料

成果完成人	张丽	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料科学基础学科
应用行业	光伏产业新材料				
核心专利号	202311512848.8；202311336123.8；202511712643.3				

成果概述

本成果针对钙钛矿太阳能电池中传统空穴传输材料成本高、稳定性差等瓶颈问题，开发了一类新型自组装单分子层（SAM）空穴传输材料。其核心创新在于“给体-桥基-锚定基团”的分子设计，特殊锚定基团可化学吸附在ITO/FTO等基底表面，自发形成致密、有序、超薄的单分子层。该材料优势显著：可通过分子设计精确调控能级，实现与钙钛矿层的完美匹配，降低空穴提取势垒，抑制电荷复合；自身电导性优异，无需化学掺杂；基于化学吸附的成膜方式，确保了薄膜的均匀性、重现性及批次稳定性。基于该材料制备的正式（n-i-p）结构电池实现了超过25%的光电转换效率，并显著提升了器件的操作稳定性与湿热稳定性，为钙钛矿太阳能电池的商业化提供了创新解决方案。

关键技术/创新要点

本成果的核心在于突破传统空穴传输材料的性能瓶颈，开发了一类基于“给体-桥基-锚定基团”分子设计的新型自组装单分子层（SAM）材料，为实现高效、稳定、可规模化制备的钙钛矿太阳能电池提供了创新性界面解决方案。在该分子结构中，给体单元（如咔唑、吖啶衍生物）负责高效捕获并传输空穴；锚定基团（如磷酸基、羧基）不仅可化学吸附在ITO/FTO等透明导电基底表面，还能有效钝化钙钛矿薄膜的表面缺陷；桥联单元则用于精确调控分子间距与空间构象，确保自组装过程的有序性与成膜致密性。通过系统的分子工程调控，材料的最高占据分子轨道（HOMO）能级可与钙钛矿层实现近乎完美的匹配，显著降低空穴提取势垒，极大抑制界面电荷复合损失。

与传统材料相比，本SAM材料展现出显著优势。一方面，传统有机材料（如Spiro-OMeTAD）需依赖锂盐等掺杂剂实现导电，但掺杂剂易吸水、迁移，导致器件性能衰减；另一方面，无机材料（如氧化镍）存在导电性不足、表面缺陷多、与钙钛矿界面化学不相容等问题。本材料无需任何化学掺杂，凭借其高度有序的分子排列与优化的电子结构，自身即具备优异的电导率与空穴迁移率。同时，锚定基团与基底之间通过化学吸附形成的稳定共价/配位键合，可有效抑制离子迁移与界面降解，从根本上提升了器件的长期可靠性。

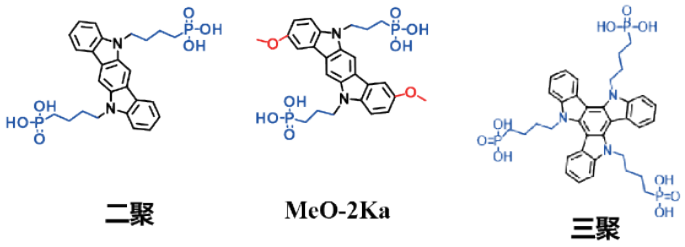


图1 自组装单分子层(SAM)空穴传输材料

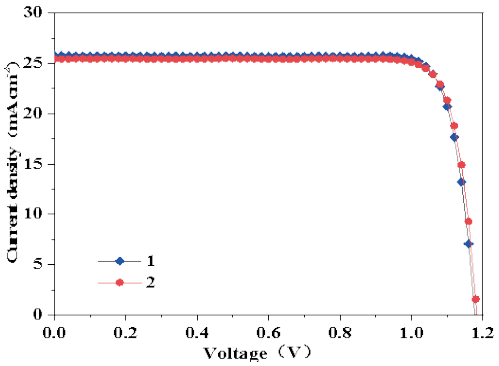


图2 SAM空穴传输材料用器件的J-V曲线

技术指标/优势

(1)基于本SAM材料的钙钛矿太阳能电池光电转换效率(PCE)>26%;

(2)器件在最大功率点连续光照下运行1000小时后,效率保持率>90%。

本SAM材料正在研究在1cm^{2}及以上的微型组件上的效果,探索进行大面积组件(≥10 cm×10 cm)的制备工艺适配需求应用化。

应用领域和市场前景

本成果研发的新型自组装单分子层(SAM)空穴传输材料,主要应用于新一代光伏技术领域。其核心应用场景是作为高效、稳定的关键界面层,用于制备高性能钙钛矿太阳能电池。它不仅适用于实验室研发与小批量试制,其优异的成膜均匀性与重现性,使其更契合大面积、卷对卷等工业化生产工艺,是推动钙钛矿光伏组件商业化量产的核心材料之一。其低成本、高效率、高稳定性的特点,使其在下一代光伏发电、建筑一体化光伏、可穿戴电子设备、物联网传感器供电、柔性轻量化电源等领域具有巨大的市场应用前景。随着钙钛矿光伏技术的快速发展和产业化推进,本成果有望成为产业链上游的关键材料,市场价值显著。

水系锌二次电池用超长循环稳定性铟晶界填充（002）织构锌金属负极

成果完成人	赵进	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	能源科学技术		二级学科	储能技术
应用行业	新能源储能				
核心专利号	CN118039777B				

成果概述

为解决锌金属负极枝晶生长、析氢副反应和腐蚀等问题，设计以(002)晶面为主导织构的锌负极被认为是最有效的策略之一。这是由于(002)晶面具有较低的活性，能够有效抑制副反应。同时，(002)织构锌负极能够诱导锌水平外延生长，从而抑制枝晶的形成。

迄今为止，尽管在锌织构调控方面取得了显著进展，但金属晶界的影响常常被忽视。从微观角度来看，晶界区域的反应活性要高于晶内区域，导致晶界处容易发生优先锌沉积及副反应(如析氢和腐蚀)，显著降低锌负极的稳定性。因此，解决晶界问题对于提升(002)织构锌负极的电化学性能至关重要。

该成果基于晶间润湿原理，提出了一种新策略，用于修饰(002)织构锌的晶间区域。通过简单的热处理方法，将金属铟作为晶界填料填充于锌晶粒间，同时将初始的随机织构转化为单一的(002)织构。所得到的晶界修饰(002)织构锌负极(IM(002) Zn)实现了均匀的外延锌沉积，并显著抑制了晶间副反应的发生。该研究有效解决了(002)织构锌负极的晶间副反应问题，为稳定锌金属负极的设计提供了新的思路，推动了高性能水系锌电池的发展。

关键技术/创新要点

通过采用简单的一步热处理方法，将金属铟作为晶界填充物质，使其富集于金属锌的晶界处。这一过程不仅成功地将初始锌的多织构特性转化为单一的(002)织构，还实现了铟在(002)锌晶界中的填充。所制备的这种铟填充(002)锌晶界的合金负极能够实现均匀的锌沉积，并且可抑制晶间副反应，从而在电化学性能上表现出优异的稳定性。具有以下创新点：

(1)退火过程同时完成织构重组和In填充，简化工艺流程，避免多步骤操作。

(2)不同于仅调控(002)织构的常规方法，首次通过填充晶界解决晶间腐蚀和枝晶问题，实现“织构优化+晶界保护”双重优势。

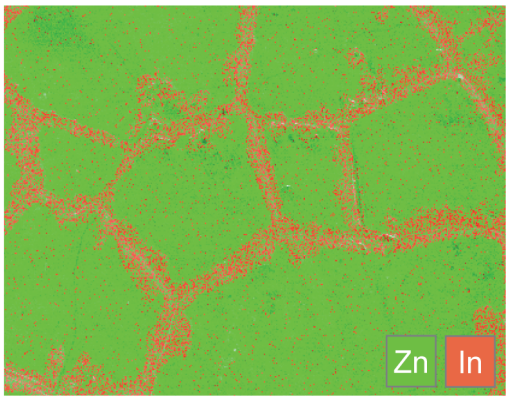


图1 IM(002) Zn负极的能谱元素分布图

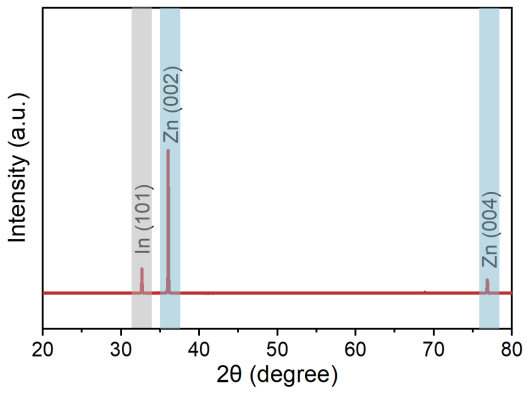


图2 IM(002) Zn负极的X射线衍射图

技术指标/优势

基于该成果组装的锌||锌对称电池，在0.1 mA cm^{-2}，0.1 mAh cm^{-2}；1 mA cm^{-2}，1 mAh cm^{-2}；5 mA cm^{-2}，5 mAh cm^{-2}；10 mA cm^{-2}，10 mAh cm^{-2}的电流密度下可分别运行7020小时，6200小时，1040小时，880小时。组装的锌||二氧化锰全电池在0.5 A g^{-1}的电流密度下充放电500次后仍可具有90%以上的容量保持率。

与同类已报道的锌负极织构调控策略相比，该成果不仅解决了晶间副反应的问题，同时实现了单一的(002)锌织构，有效抑制了锌枝晶的形成。因此，这种(002)织构锌金属负极在Zn-Zn、Zn-Cu、Zn-MnO_2和Zn-C等多种电池体系中表现出了卓越的稳定性。

该成果已申请专利并获授权。专利名称为：一种非均相锌铟合金负极的制备方法，授权公告号为：CN118039777B。

应用领域和市场前景

本研究成果通过晶界填充策略显著优化了(002)织构锌负极的抗腐蚀性和抗枝晶性能，为开发高稳定性水系锌电池提供了关键材料解决方案。水系锌电池凭借其高安全性、低成本及环境友好等优势，在大规模储能系统、可再生能源并网及智能电网调峰等领域展现出重要应用潜力，特别适用于对安全性和成本敏感且要求长循环寿命的固定式储能场景，包括家庭储能、工业备用电源及便携式电子设备等。从市场前景来看，全球储能需求的快速增长以及我国对可再生能源和储能技术的政策支持，为水系锌电池创造了有利的发展环境。本研究成果通过提升锌负极的循环稳定性和充放电效率，可显著延长电池使用寿命，有望推动水系锌电池在大规模储能等领域的商业化应用。

一种柔性透明薄膜电极及其制作方法

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	新型动力电池(组)与储能电池技术	
所属学科方向	一级学科	能源科学技术		二级学科	储能技术
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN105914047B				

成果概述

本成果提出了一种柔性透明薄膜电极及其制作方法，电极结构为：Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate)(PEDOT:PSS)/可拉伸基底。其中基底是高弹性可拉伸塑料，如聚乙烯醇(PVA)、聚甲基硅氧烷(PDMS)、聚氨酯丙烯酸酯(PUA)及水凝胶等。其制作方法是将PEDOT:PSS溶液旋涂、喷涂、丝网印刷或喷墨打印到高弹性塑料基底上。由此制得的透明电极综合性能优异，具体表现为透明度高、导电性好、电化学性能优异，柔性好(可任意弯折、扭曲等)，表面平整及化学稳定性强等。

关键技术/创新要点

柔性透明光电器件，如柔性透明太阳能电池及超电容等，因其独特的优势，在人们日常生活中有着广泛的应用范围。其可以安装在柔性显示屏、汽车车窗、建筑物玻璃、透明屋顶等为通信设备、交通工具及室内提供能量，从而方便人们的日常生活。现有的光电器件中，具备柔性特征的光电性能差，性能好的往往不具备柔性。为了克服上述现有技术的不足，更好的满足未来柔性透明的能量存储与转换器件的要求，本成果提供了一种综合性能优异的柔性透明薄膜电极及其制作方法。该薄膜电极同时具有优异的光电性能、优越的电化学行为、高度的柔性，平整的表面形貌、强的化学稳定性等。

本成果所述的柔性透明电极采用PEDOT:PSS/可拉伸基底结构，Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate)(PEDOT:PSS)/可拉伸基底；其中所述的PEDOT:PSS是掺杂了体积比3%～8%的二甲基亚砜DMSO、乙二醇EG或硫酸H2SO4及0.3%～2%的表面活性剂的PEDOT:PSS溶液。PEDOT:PSS掺杂后不仅光电性能显著改善，其电化学性能亦大大提高。掺杂适量的表面活性剂亦有利于降低PEDOT:PSS的表面张力及提高PEDOT:PSS的润湿性，从而有利于多层、均匀、平整地涂布或印刷PEDOT:PSS溶液。通过掺杂及改变PEDOT:PSS的层数，电极能同时获得优越的光电性能及优异的电化学性能。结合高弹性可拉伸基底，该电极亦表现出高度的柔性，可以任意弯折、扭曲甚至拉伸。另外，该电极化学稳定性也比较突出。该电极优越的综合性能，特别是优异的光电性能、好的电化学性能及高度的柔性，决定了其在未来柔性透明能量存储与转化器件中广阔的应用前景。

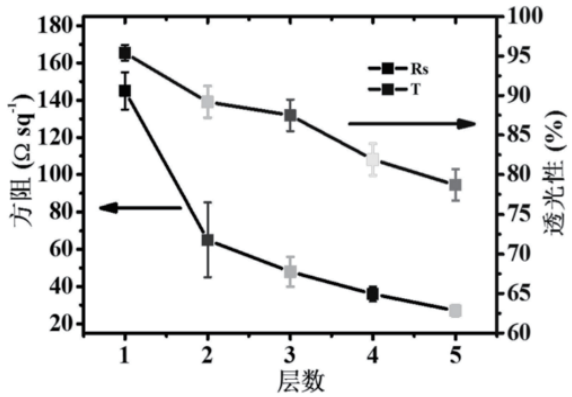


图1 电极的光电性能表征

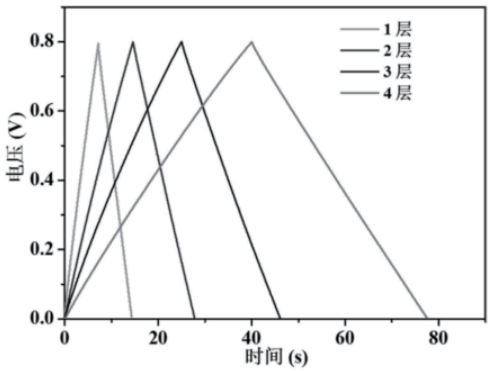


图2 电化学表征

技术指标/优势

本成果提供了一种综合性能优异的柔性透明薄膜电极及其制作方法。该薄膜电极同时具有优异的光电性能、优越的电化学行为、高度的柔性，平整的表面形貌、强的化学稳定性等。通过掺杂及改变PEDOT:PSS的层数，电极能同时获得优越的光电性能及优异的电化学性能。结合高弹性可拉伸基底，该电极亦表现出高度的柔性，可以任意弯折、扭曲甚至拉伸。另外，该电极化学稳定性也比较突出。

应用领域和市场前景

新兴的柔性透明光电器件，如柔性透明太阳能电池及超电容等，因其独特的优势，在人们日常生活中有着广泛的应用范围。其可以安装在柔性显示屏、汽车车窗、建筑物玻璃、透明屋顶等为通信设备、交通工具及室内提供能量，从而方便人们的日常生活。本成果可以满足未来柔性透明光电器件需求，特别是能量存储与转换器件的发展，具有优越的光电性能，具有优异的电化学行为及高度的柔性等。

柔性MOF电解质的构筑与应用性能研究

成果完成人	王师	职称	副教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	物理化学
应用行业	新能源汽车、可穿戴设备、智能电网				

成果概述

着新能源汽车、可穿戴设备等领域的快速发展，对高性能、高安全性的储能器件需求日益迫切。锂金属电池因其超高比容量和低氧化还原电位，被视为下一代高能量密度电池的理想选择。然而，传统液态电解质存在易燃易爆、锂枝晶生长等问题，严重制约了其应用。因此，开发高性能固态电解质成为解决上述问题的关键。本项目聚焦于柔性MOF（金属有机框架）基固态电解质的构筑及其应用研究，旨在通过创新性的多层次自组装策略，制备出兼具高力学性能和优异电化学性能的固态电解质，以推动锂金属电池的商业化进程。

关键技术/创新要点

本项目创新性地提出了基于多层次自组装策略构筑柔性MOF基固态电解质的新思路，通过MOF前驱体与聚合物膜之间的弱相互作用，实现MOF在聚合物膜上的原位生长，从而制备出新型MOF-聚合物复合电解质，有效提升电解质的力学性能和离子电导率，为高性能固态电解质的开发提供新的思路和方法。

技术指标/优势

本项目在材料设计、制备工艺及性能调控等方面均表现出较高的技术先进性。通过分子工程设计和多层次自组装策略，实现了MOF与聚合物链之间的精确调控和均匀复合；采用先进的表征手段对电解质的微观结构、界面性质、力学性能和电化学性能进行了深入研究；结合理论计算和实验验证，揭示了电解质中各组分之间的分子作用机制及锂离子的传输机理。

应用领域和市场前景

本项目的研究成果在新能源汽车、可穿戴设备、智能电网等领域具有广泛的推广应用价值。高性能固态电解质的开发将显著提升锂金属电池的安全性、能量密度和循环寿命，推动相关产业的快速发展。同时，随着全球对清洁能源和可持续发展的重视，固态电池市场将迎来爆发式增长，本项目的研究成果将具有广阔的市场前景。

充电设施智能健康评估诊断系统

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	高效节能技术		高技术领域（三级）	能源系统管理、优化与控制技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	电动汽车充电设施安全运维				
核心专利号	ZL202211252896.3				

成果概述

随着电动汽车渗透率不断升高，充电设施普及程度日益提升，电动汽车充电设施运维的难度也在不断增大。传统的充电设施运维主要依靠运维人员巡检，成本高且效率低下，常常出现充电设施因故障未及时维修而无法使用，造成社会资源的浪费。

本团队自主研发了一种充电设施智能健康评估诊断系统。该系统基于信息融合技术和集成学习技术建立风险健康评估模型，对充电设施实时状态、实时位置以及充电实时订单等信息进行监控和分析，实现数据驱动的充电设施智能健康评估和故障分级诊断该系统动态评估充电设施的健康状态，及时发现充电桩早期故障，对排除充电桩故障风险、保障充电桩的稳定运行具有重要意义。

关键技术/创新要点

充电设施智能健康评估诊断系统以数据驱动为特色，能够对充电设施实时状态、实时位置以及充电实时订单等信息进行监控和分析，采用基于机器学习的集成学习模型对充电桩的充电状态进行安全分级预警，实时感知各类故障，实现智能提醒、及时处置。系统结合充电设施运行风险健康评估模型和充电设施智能化运维服务策略库，建立充电设施智能健康评估诊断模块，实现充电设施运行风险的健康评估功能、安全状态分级预警功能以及充电设施的故障诊断功能。

场站健康度。可对各个站场充电桩对应的总桩数、健康桩数以及站场健康度等重要信息进行展示，如图1所示。

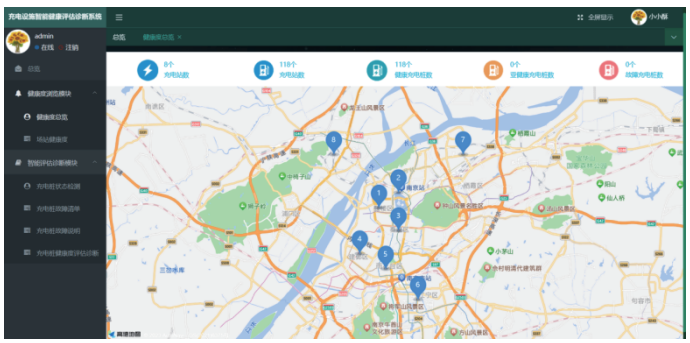


图1 场站健康度展示

充电桩状态检测。可汇总各个电动汽车充电场站及场站内的充电桩数量，并且基于充电异常状态信息监测技术对各个充电桩的运行状态进行监视与检测，并更新记录各桩上一次充电开始的时间，如图2所示。

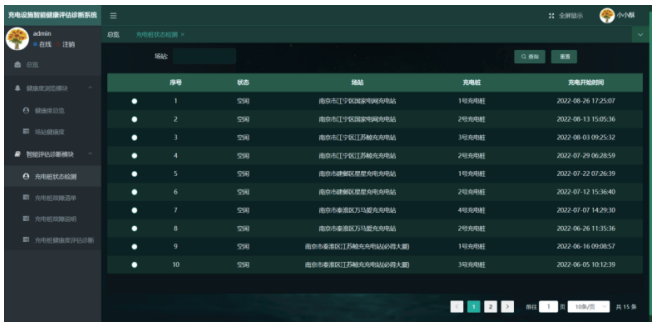


图2 智能诊断模块-充放电故障诊断

充电桩故障说明。智能诊断模块中的故障诊断知识库页面，它对充电设备与电动汽车的故障原理和诊断规则进行说明，如：充电设备、动力电池等，分布如图3所示：

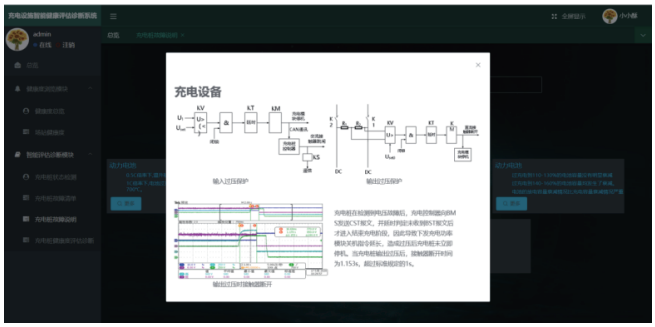


图3 智能诊断模块-故障诊断知识库

充电桩健康度评估诊断。智能诊断模块中的故障实时诊断功能，通过调用基于机器学习的故障诊断算法来进行实现充电桩故障实时诊断。该故障诊断算法的输入是充电桩充电订单特征数据，输出对应的诊断分类结果。故障实时诊断的速度快，采集数据成功后10秒内即可查看诊断结果，结果展示诊断的充电桩的编号、日期、是否故障、故障类别、健康度、预警级别等信息，如图4所示。

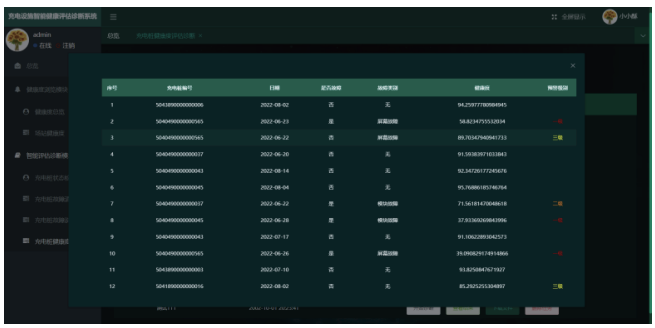


图4 故障实时诊断结果展示

技术指标/优势

与传统的充电设施运维方式相比，该成果提出了基于集成学习的充电桩故障状态在线判别方法，结合充电桩运维工单数据和充电订单状态数据，分析了充电桩运行状态和设备故障的联合概率分布，以充电量统计规律和时间序列数据的特征提取方法为基础，构建了滑动窗口观测下充电桩的持续运行状态特征表示数学模型，采用混合高斯模型为基学习器，提出了基于串行集成学习AdaBoosting的充电桩故障在线判别方法，开创性地根据运行状态数据快速地判断充电桩有无故障，正确率超过83.64%。

应用领域和市场前景

该成果可作为充电设施运维体系建设方案的重要组成部分。充电设施智能健康评估诊断系统能够动态评估充电设施的健康状态，及时发现充电桩早期故障，提供智能化健康评估和故障诊断服务，对排除充电桩故障风险、保障充电桩的稳定运行具有重要意义。该成果有望降低电动汽车充电站运营商和运营服务承包商的运维成本，提升充电设施服务能力，预期具有良好的经济效益和社会效益。

充电设施智能实时预警系统

成果完成人	高辉	职称	教授	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	高效节能技术		高技术领域（三级）	能源系统管理、优化与控制技术	
所属学科方向	一级学科	动力与电气工程		二级学科	电气工程
应用行业	电动汽车充电设施安全运维				
核心专利号	ZL202211252896.3				

成果概述

随着电动汽车渗透率不断升高，充电设施普及程度日益提升，电动汽车充电设施运行环境复杂，电子器件受高电压和高电流影响容易老化，充电安全问题突出。传统的充电设施监控系统主要实现信息采集和展示，无法对充电设施运行状态进行实时预警，难以保障充电过程的安全性。

本团队自主研发一种充电设施智能实时预警系统。该系统能够对充电设施实时状态、实时位置以及充电实时订单等信息进行监控和分析，基于高性能推理引擎下的规则库对充电桩的充电状态进行安全实时预警，并对不同预警的结果给出相应的处理方案，对保障充电设施安全具有重要意义。

关键技术/创新要点

充电设施智能实时预警系统以数据驱动为特色，基于充电设施历史工单与充电订单数据，建立充电设施故障运维策略知识库，实现基于高性能推理引擎的充电设施安全实时预警推理方法。系统能够对充电设施实时状态、实时位置以及充电实时订单等信息进行监控和分析，并通过映射实时预警推理结果，对不同的预警结果推荐相应的就地运维服务及远程运维服务策略。

实时预警信息总览。打开页面可以直接浏览江苏省南京市相关充电站的充电桩状态的统计详情，包括每日新增的故障充电桩、当年累积的工单、当面的工单走势以及充电桩的健康状态。如图1所示。



图1 实时预警信息总览

预警知识库编辑。运维人员对电气原件、充电模块、内部环境、车桩交互、逻辑类的具体故障类别进行录入，并提交申请，方便后续的管理员采取相应的查询与审批操作，如图2所示。

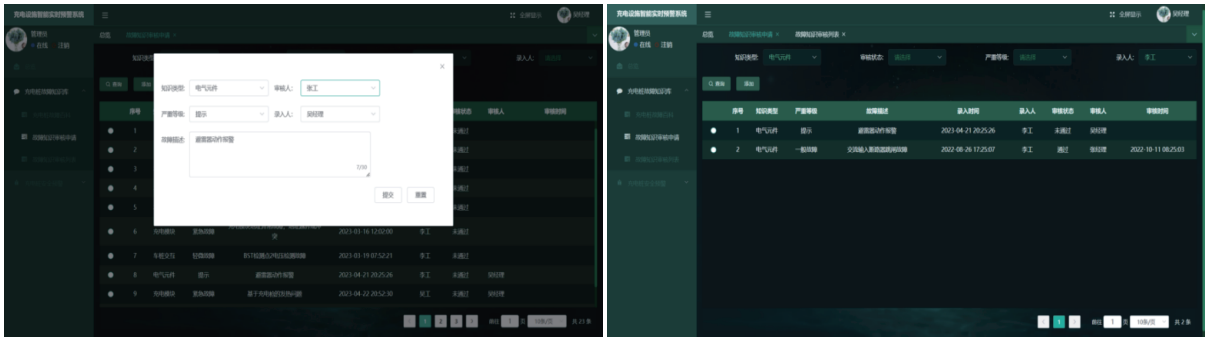


图2 预警知识库编辑

预警数据分析。通过宏观统计充电设备的总预警数量、安全隐患、性能隐患与老化隐患等，并展示出各种充电设施潜在隐患的走势分析图，如图3所示。



图3 预警数据分析

安全实时预警。安全预警模块中的核心模块提供相应的安全状态分级预警功能，通过调用后端基于Drools规则引擎的推理算法来实现对应的功能。该模块的输入是充电桩充电订单数据，将其转换为结构化三元组，再结合基于先验规则来进行高效实时预警推理。通过调用后端的Drools规则引擎进行推理，当推理结束后，点击查看结果，结果展示充电桩编号、预警编码、预警描述等信息，如图4所示。



图4 实时预警结果展示

技术指标/优势

与传统的充电设施监控系统相比，该成果首创了充电桩安全状态信息融合的在线诊断故障树，从充电桩核心部件层面建立故障关联性信息流模型，揭示充电桩故障风险耦合机理，首创了充电桩安全信息融合的在线诊断故障树，基于Leaps算法的高性能推理引擎故障匹配方法，制定直流充电桩核心部件-故障类型-特征因素映射库，提升了直流充电桩故障诊断准确度。

应用领域和市场前景

该成果可作为充电设施运维体系建设方案的重要组成部分。充电设施智能实时预警系统对充电设施的运行状态进行实时监控和实时安全预警，并对不同的预警结果推荐相应的就地运维服务及远程运维服务策略，对充电设施安全运行具有重要意义。该成果有望降低电动汽车充电站运营商和运营服务承包商的运维成本，提升充电设施服务能力，预期具有良好的经济效益和社会效益。

面向亚5nm MOSFET的MNH_2二维半导体材料及器件技术

成果完成人	郭艳东	职称	副教授	所在单位	电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成电路设计技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	二维芯片制造				

成果概述

随着集成电路器件尺寸持续向亚5nm尺度推进，传统硅基MOSFET在短沟道效应、量子隧穿及功耗控制等方面面临严重瓶颈，难以满足未来高性能与低功耗芯片的发展需求。如何在极限尺度下实现高驱动电流、低泄漏及良好的栅控能力，成为下一代晶体管技术亟需解决的关键问题。

本成果针对超短沟道MOSFET性能提升这一核心问题，基于一类具有Si基工艺兼容性的二维单层材料MNH_2(M,N=C,Si,Ge)，系统开展了器件物理与量子输运研究，并构建适用于亚5nm尺度的双栅MOSFET模型，深入分析其输运特性与性能极限。研究结果表明，基于MNH_2材料的MOSFET器件在5nm栅长下可实现优异的电学性能，其中n型和p型器件的导通电流分别达到4157μA/μm和3527μA/μm，同时亚阈值摆幅最低可达58mV/dec，接近传统MOSFET的理论极限，表现出优异的栅控能力与开关特性。

研究结果表明，通过引入Underlap结构对沟道势垒进行调控，可有效抑制短沟道效应并降低漏电流，从而在保证高导通电流的同时实现低功耗运行。在动态性能方面，该类器件的延迟时间与功耗延迟积均显著优于国际半导体技术路线图（ITRS）2028对高性能器件的指标要求。更为重要的是，在栅长缩小至3nm时，器件仍能够维持较高性能并满足高性能应用需求，展现出优异的尺度可扩展能力。

本成果系统证明了MNH_2二维材料在亚5nm MOSFET中的应用潜力，实现了高性能、低功耗与工艺兼容性的综合平衡，为后硅时代晶体管设计提供了新的技术路径和理论依据。

关键技术/创新要点

本成果围绕亚5nm MOSFET器件的性能瓶颈问题，在材料选择、器件建模及结构优化方面形成了系统性的技术创新。首先，选取与硅体系高度相关的MNH_2二维材料作为沟道材料，在保证高载流子输运能力的同时实现与现有工艺体系的良好兼容，为器件实际应用提供基础。其次，基于第一性原理与非平衡格林函数方法，构建了面向超短沟道尺度的量子输运模型，实现对器件电流输运行为的精确模拟。

在器件结构设计方面，引入Underlap结构对源漏与沟道界面势垒进行调控，有效抑制短沟道效应并降低漏电流。通过系统分析不同结构参数对器件性能的影响，揭示了超短沟道条件下电流输运由隧穿机制向热发射机制转变的关键物理过程，从机理上实现了器件性能的优化与提升。

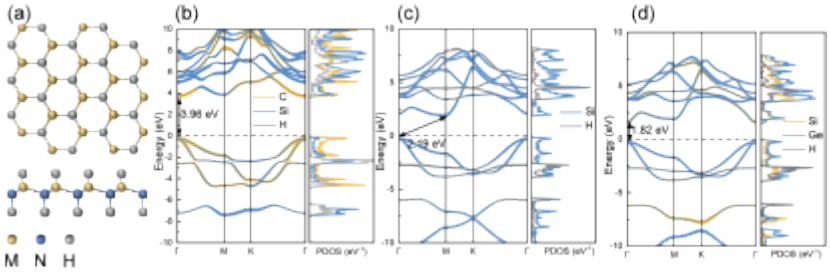


图1 MNH_2单层几何结构及电子性质

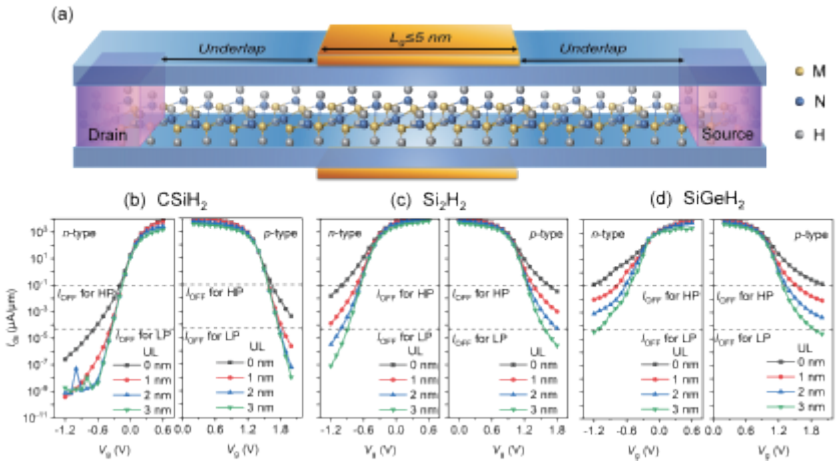


图2 二维MNH_2 MOSFET器件结构及输运特性

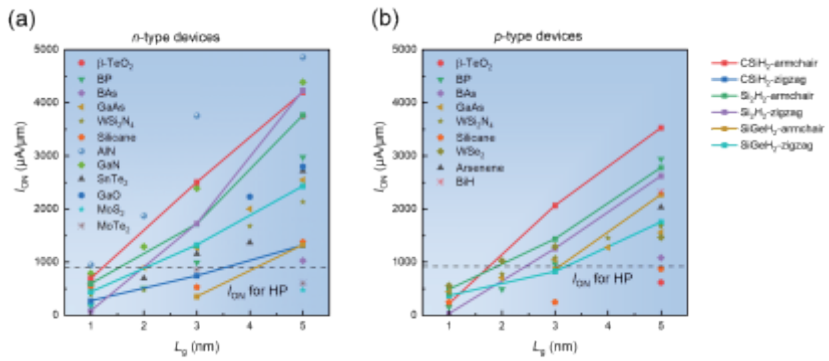


图3 二维MNH_2 MOSFET开态电流特性比较

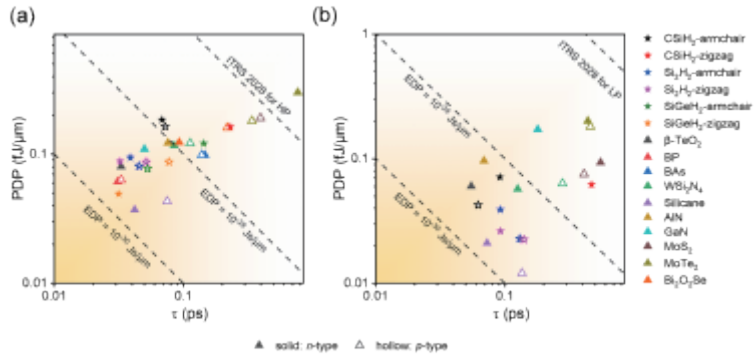


图4 二维MNH_2 MOSFET功耗延迟积特性比较

技术指标/优势

在器件性能方面，基于MNH_2材料构建的MOSFET在亚5nm尺度下表现出显著优势。在5nm栅长条件下，器件导通电流最高可达4157μA/μm（n型）和3527μA/μm（p型），显著优于多数已报道二维半导体器件。同时，器件的亚阈值摆幅最低可达58mV/dec，接近传统MOSFET理论极限，表明其具有优异的栅控能力和开关特性。

在动态性能方面，该类器件的延迟时间和功耗延迟积均远低于国际半导体技术路线图（ITRS）2028指标要求，体现出良好的高速与低功耗特性。此外，在栅长进一步缩小至3nm时，器件仍能够保持较高性能并满足高性能应用需求，显示出优异的尺度可扩展能力。与现有二维材料相比，该体系在驱动电流、功耗及综合性能方面具有明显优势，同时具备良好的工艺兼容性，为实际应用提供了重要基础。

应用领域和市场前景

本成果面向先进微电子与集成电路领域，在下一代超大规模集成电路、低功耗高性能芯片以及新型二维半导体器件中具有重要应用前景。由于MNH_2材料体系在电学性能与硅基工艺兼容性之间实现了良好平衡，可作为亚5nm及以下节点MOSFET的潜在候选沟道材料，为先进制程技术提供新的解决方案。

在高性能计算、人工智能芯片以及移动终端等领域，对器件功耗与性能的要求不断提升，该成果所提出的材料与器件技术有望显著提升芯片能效比。同时，由于其n型和p型器件性能均衡，具备良好的CMOS集成潜力，可支持未来新型逻辑器件的发展。随着后硅时代电子技术的持续演进，该成果有望在纳米电子器件及高端芯片制造中发挥重要作用，具有广阔的应用前景与推广价值。

一种通过氧气流量调控择优生长ε相氧化镓外延薄膜的方法

成果完成人	李山	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	半导体新材料制备与应用技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	半导体行业				
核心专利号	CN120889024A				

成果概述

氧化镓是新一代超宽禁带半导体的典型代表，具有约4.9eV的大禁带宽度和约8MV/cm的高临界击穿场强，是支撑先进电子材料发展的战略性关键材料。其中，ε相氧化镓作为氧化镓的重要亚稳相，兼具独特的自发极化、铁电和压电特性，同时与蓝宝石衬底具有较小晶格失配，为高质量异质外延生长及新型功能器件构筑提供了重要基础。然而，ε相氧化镓外延过程中普遍存在相稳定窗口窄、杂相易竞争生成、薄膜结晶质量和相纯度难以兼顾等关键难题。

针对上述问题，本团队提出了一种基于氧气流量精确调控的ε相氧化镓择优生长方法，通过优化生长过程中氧源流量，精细调节反应动力学和相形成条件，实现了ε相氧化镓外延薄膜的可控生长。该方法有效提升了薄膜的相纯度、结晶质量和生长一致性。

关键技术/创新要点

本团队把传统外延过程中相对固定的供氧条件，改进为“高氧预热—低氧生长—高氧退火”的多步协同调控工艺，实现了ε相氧化镓薄膜从衬底表面准备、晶相选择到缺陷修复的全过程精准控制。

本团队第一项关键技术是高氧预热机制。在生长开始前，先在较高氧气流量下对衬底进行预热处理，有效清除衬底表面的杂质和吸附残留，降低后续生长中的寄生反应概率。在外延沉积阶段，将氧气流量切换至较低水平，使体系处于更适合ε相成核和择优生长的动力学窗口，既提高了ε相成核概率，又有效抑制了其他杂相竞争生成。在薄膜生长完成后，再次提高氧气流量进行原位退火，一方面可修复晶格中的氧空位等缺陷，提升结晶完整性，另一方面还能进一步氧化并清除残留有机碳氢物，降低表面碳污染，改善薄膜表面质量。

整体来看，本团队有效地将氧气流量从单一工艺参数提升为主导晶相调控和质量优化的核心手段，为高质量ε相氧化镓材料制备及其在铁电、压电和深紫外器件中的应用奠定了重要基础。

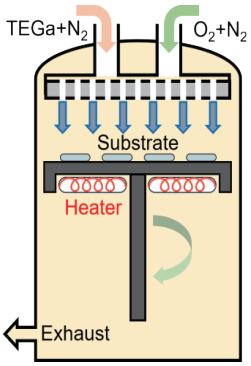


图1 利用MOCVD技术的
ε相氧化镓薄膜生长示意图

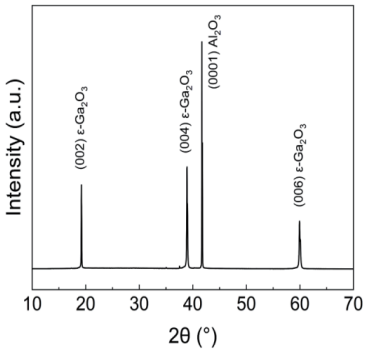


图2 生长出的ε相氧化镓的XRD衍射图,
衍射显示除衬底外,只存在ε相氧化镓

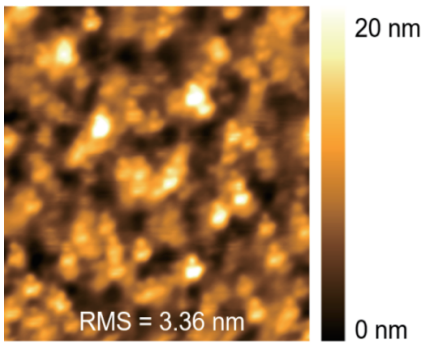


图 3 ε相氧化镓的AFM表面
形貌图,粗糙度为3.36nm

技术指标/优势

技术指标:

本成果建立了基于MOCVD系统的氧气流量多步调控外延工艺,可在c面蓝宝石衬底上实现ε相氧化镓外延薄膜的择优生长。工艺上,反应气压控制在10~100mbar,优选40~60mbar;载气为N_2,流量为20000~50000sccm;衬底高氧预热温度为360~480℃,外延生长温度为490~650℃。氧气流量采用分阶段控制策略:预热阶段为5500~7000sccm,生长阶段为2500~4000sccm,原位退火阶段为5500~7000sccm。镓源采用三乙基镓或三甲基镓,流量为400~1200sccm。通过上述工艺优化,可获得相纯度高、晶体质量优、厚度均匀且表面污染较低的ε相氧化镓外延薄膜,并实现柱状结构的稳定生长。

与同类技术或产品相比的优势:

与传统恒定氧气流量生长工艺相比,本成果最大的优势在于采用分阶段调控思路,能够针对不同生长阶段分别实现衬底净化、ε相择优成核和薄膜缺陷修复,从而显著提高ε相氧化镓的相纯度与结晶质量。相比同类技术中易出现的杂相竞争、表面碳污染和缺陷浓度较高等问题,该方法工艺窗口更明确、调控逻辑更清晰、重复性更好,更有利于稳定制备高质量ε相氧化镓薄膜。

本团队已对该技术申请专利,目前处于公开阶段,专利号为CN120889024A。

应用领域和市场前景

本成果制备的高质量ε相氧化镓外延薄膜,凭借其超宽禁带特性以及独特的自发极化、铁电和压电性能,可广泛应用于新一代高性能电子与光电子器件领域。在应用场景方面,一方面可用于高压功率电子器件,如高击穿电压MOSFET、肖特基二极管等,满足新能源汽车、电力电子及智能电网对高效率、高可靠性的需求;另一方面可用于深紫外光电探测器,实现太阳盲探测,在空间探测、火焰监测及环境监测等场景中具有重要价值。此外,基于其极化特性,还可拓展至铁电存储器、压电传感器及声表面波/体声波器件等新型功能器件领域。

从市场前景来看,随着第三代及超宽禁带半导体产业的快速发展,氧化镓材料正逐步成为功率电子和深紫外探测领域的重要竞争者。本成果通过提升ε相氧化镓的相纯度与晶体质量,突破了制约其应用的关键材料瓶颈,有望推动其在高端芯片、智能传感及国防安全等领域的规模化应用,具备良好的产业化潜力和广阔的市场前景。

免键合SOI新工艺

成果完成人	王静	职称	副教授	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	结构陶瓷及陶瓷基复合材料强化增韧技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	集成电路芯片、光电器件				

成果概述

研究组经过对真空沉积硅薄膜的机理和生长动力学的研究，通过大量的实验和调整开发了室温下快速沉积单晶硅硅薄膜的工艺，该工艺解决了一直以来硅薄膜沉积中普遍出现的非晶现象，在室温下采用磁控溅射设备即可沉积获取绝缘体上硅（SOI），不仅在学术意义上是世界首创，更是在产业领域突破了高性能晶圆制造工艺中的重大瓶颈。

该工艺具有良率高、步骤少、物料成本低等显著优势。如成功样品以薄膜的X射线衍射谱中呈现单晶谱线为标志，本工艺良率可达70-90%；

一次沉积取得厚度较小的单晶硅薄膜，无需裂片、减薄，因而不产生硅材料的浪费；表面粗糙度（Sa）约为0.5nm，与现有商用抛光硅晶圆一致，免去抛光工艺；原材料仅有硅、氩气，制备过程无污染，物料成本低。

本项目的核心工艺属世界首创，完全自主研究开发，除较高的学术价值之外，相比工业界的主流工艺也遥遥领先，是对现有工艺的升级替代。工业界主流工艺的专利权在欧美国家，我国企业需对外付出大量费用，采用自主研发技术可充分保障我国的自主权。另外，本工艺采用设备构造简单、造价较低，由于规避了键合和离子注入的步骤，避开了关键设备限制进口的壁垒，极具推广应用价值。由于生产速度、质量均有提升，成本大幅降低，市场前景广阔，本工艺有望在国内外快速替代现有工艺，起到反向“卡脖子”的作用。

关键技术/创新要点

本项目工艺可实现SOI晶圆生产领域的全流程替代，属完全自主创新，国内外均无同类技术。与当前最先进的SOI制备技术Smartcut工艺相比，免除了键合这一关键步骤，将单晶硅薄膜一次性沉积而不是通过键合、裂片再减薄顶层硅的方式生产SOI晶圆，不仅步骤更少、速度更快，产品界面效应更佳、精度更高，而且大大降低了键合、裂片导致产品报废等现象，提升了良率。特别是在具有超薄顶层硅的FD-SOI这一最高端的类型，本工艺优势更加充足，不仅物料成本大大降低，还免去了离子注入掺杂这一环节，由离子注入步骤导致的废品率大大降低。总体而言，本工艺速度快、成本低、性能佳、良率高，并且无有毒有害排放，相比当前最先进的生产工艺，具有全面、显著的先进性，突破国外技术壁垒，可起到反向“卡脖子”的作用。

该工艺取得的SOI晶圆表面粗糙度(Sa)约为0.5nm, 高阻规格SOI的电学特性曲线与现有商用抛光硅晶圆一致, 免去抛光工艺;原材料仅有硅、氩气, 制备过程无污染。如成功样品以薄膜的X射线衍射谱中呈现单晶谱线为标志, 本工艺良率可达70-90%, 稳定度较高。经晶体管特性测试, 尽管校内洁净条件与工业级相差甚远, 仍取得了优异的电学特性, 开关比达106, 完全达到应用级别, 可用于低制程的高性能集成电路芯片、光电器件等。

应用领域和市场前景

本项目的客户包括各军工研究所、高频器件生产商、功率器件厂家、高端芯片生产厂家等。业务渠道通过售卖SOI晶圆, 以及技术合作、共同开发器件实现SOI的众多应用场景, 培育用户需求。

一种超薄氧化物修饰的半导体电极的制备方法

成果完成人	曹大鹏	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	环保及环境友好型材料技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料表面与界面
核心专利号	CN202210716977				

成果概述

光电化学电池（PEC）是一种将太阳能转化为化学能的装置。这种器件的商业前景十分的广阔，对于可持续发展和能源短缺的问题有着重要的意义。

光电化学电池一般由光阳极/光阴极、电解液、对电极组成，光阳极或（和）阴极起到吸光、产生光生载流子的作用，其中以 n 型半导体材料（如 WO3 等）作为光阳极，光阳极与电解液接触表面将会在光照及外加偏压作用下出现反应，析出氧气，相对的，对电极与电解液接触表面发生析氢反应。好的光阳极材料需要满足的特点有：多孔结构、电荷传输性能好、能带位置合适、化学稳定性好。光阳极多孔结构提供与电解液接触的更大表面积，提升光电流。PEC电池可以组装成双光子系统，来进一步提高太阳能转化效率，这就要求PEC的电极在非光谱相应范围具有很好的透光率。

本成果提出了一种超薄氧化物修饰的半导体电极的制备方法，并将该电极应用于光电化学转化器件中。该制备方法包括以下步骤：S1：首先在导电基底上运用电泳法或滴涂法制备半导体薄膜；S2：取一定量的金属源，溶于溶剂中，配制成为前驱溶液；S3：将S2制备的溶液滴涂、旋涂或浸涂在S1制备的薄膜上；S4：在S3基础上进行氧等离子体（plasma）处理。本成果提供了一种操作简单、制备时间短、可大规模生产的超薄氧化物薄膜的制备方法，而且该超薄氧化物薄膜可以大幅提升光电化学（PEC）分解水性能，降低光电化学产氢产氧成本，具有很好的应用前景。

关键技术/创新要点

目前制备电极的方法有很多，包括磁控溅射、原子层沉积、电泳、喷雾、旋涂等方式。CN103066345A一种光电化学电池电极及其制备方法和应用，半导体薄膜为纳米氧化亚铜薄膜，且所述的纳米氧化亚铜薄膜中含有金属铜微粒。所述电极的制备是采用电化学沉积法在导电基体上直接生长含有金属铜微粒的氧化亚铜薄膜。CN113135591A一种二氧化钛纳米棒阵列的制备方法，提供一衬底；将聚乙烯吡咯烷酮溶解在1-戊醇中，然后加入柠檬酸钠水溶液，混合形成透明的微乳液；将去离子水与浓盐酸混合搅拌后，向其中加入钛酸四丁酯，混合形成钛源前驱液；将所述微乳液和所述钛源前驱液混合，然后将所述衬底放入混合溶液中，然后在80～130℃的温度下反应5～30h，反应结束后取出所述衬底并清洗、烘干，得到生长于所述衬底表面的二氧化钛纳米棒阵列。该纳米二氧化钛可以用于超薄薄膜电极中。但是上述制备方法都过于复杂。

本团队首次采用滴涂后进行O_2等离子体处理来制造保形和均匀的超薄外层。在本研究中，TiO_x外层具有钝化表面陷阱和与WO_3颗粒形成异质结的双重目的，从而分别抑制表面电荷复合和增强电荷分离。

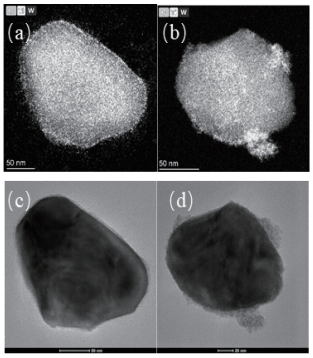


图1 (a) O plasma 处理，(b)110 ℃ 处理 的EDS图 (c) O plasma 处理，(d) 110 ℃ 处理 的HRTEM图

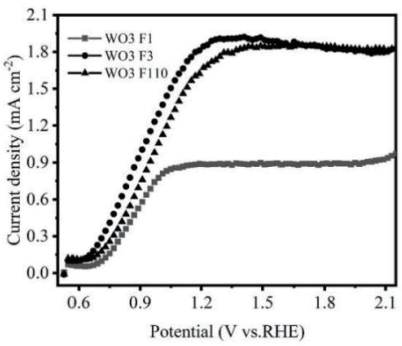


图2 WO_3 F1：无Ti处理；WO_3 F3：滴涂Ti 前驱体+ O plasma 处理；WO_3 F110：滴涂Ti 前驱体 + 110 ℃ 处理的光电流曲线

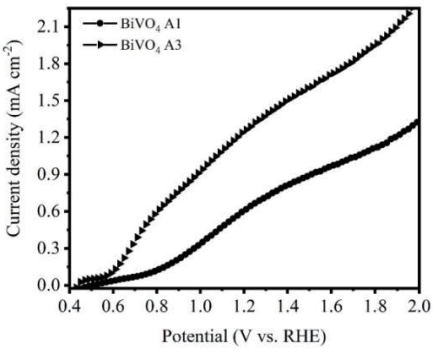


图3 $BiVO_4$ A1：无Ti处理；$BiVO_4$ A3：滴涂Ti 前驱体+ O plasma 处理的光电流曲线

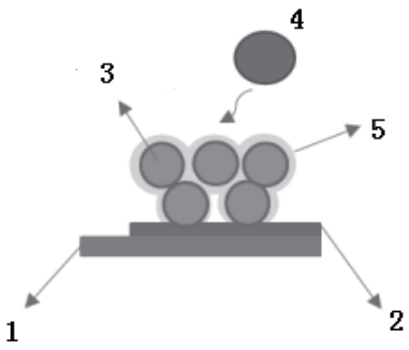


图4 电极表面形貌的示意图，经过 O plasma 处理之后形成的超薄 TiOx 层包裹在 WO_3 颗粒表面

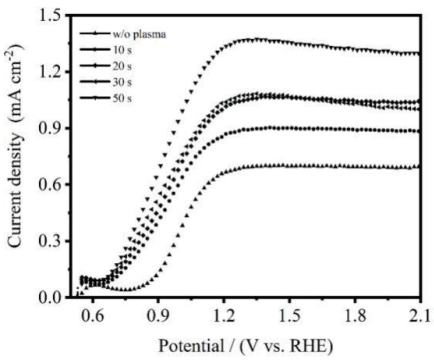


图5 滴涂Ti前驱体后O plasma 时间的优化的光电流曲线

技术指标/优势

本团队首次采用滴涂后进行O_2等离子体处理来制造保形和均匀的超薄外层。与表面积有限的板状光电电极相反，本研究中构建的异质结区域可以穿透整个薄膜，从而增加空间电荷层的体积。此外，TiO_x外覆层具有双重目的，通过钝化表面陷阱和用WO_3颗粒构建异质结，从而显着增强水氧化的光电流。

应用领域和市场前景

1.本成果采用电泳法可通过调节电压和电泳时间的简便方式来调节薄膜厚度，与磁控溅射等方法相比，采用电泳法制备电极成本更低且更易操作。

2.本成果和已知的建立异质结方法不同的是，通过滴涂法滴加金属源前驱溶液进行表面钝化不仅可以提升电极性能，还能避免电极厚度过大导致透光率降低。半导体材料（如WO_3、$BiVO_4$）电极可通过滴加金属源前驱溶液并进行O_2 plasma处理形成超薄氧化物钝化层进行表面钝化来提升光电化学分解水性能。

3.本成果提供了一种操作简单、分解水效率高且能够大面积制备一种超薄氧化物修饰的半导体电极的方法，能够有效的避免能源的浪费，降低制作成本。

三氰基化9-苯基芴类高效发光材料

成果完成人	曹洪涛	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	精细和专用化学品		高技术领域（三级）	电子化学品制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料科学其他学科
应用行业	有机发光二极管等				

成果概述

激基复合物-热活化延迟荧光(Exciplex-TADF)体系由于其更容易实现小的单线态-三线态能级差(ΔE_{ST})和掺杂调控，是制备高效有机发光二极管(OLEDs)的优良候选者。然而，面向高效Exciplex-TADF的电子受体材料种类仍比较匮乏，分子设计策略仍需进一步探究。基于此，本团队制备出一种三氰基取代的9-苯基芴化合物，并将其制备成高效绿光有机发光二极管（OLED），其中器件最高外量子效率高达14.5%，电流效率为46.7cd A^{-1}，功率效率为52.3 lm W^{-1}。该工作将为发展高性能电致发光器件提供了新的设计方法和材料基础。相关成果以“Synthesis and Exciplex Emission of a Tricyano-substituted 9-Phenylfluorene Compound”为标题发表在《Chinese Journal of Organic Chemistry》期刊上（Chinese Journal of Organic Chemistry, 2024, 44, 2595–2602）

关键技术/创新要点

本成果提出了一种氰基化修饰来获得高性能激基复合物受体材料的方法。基于此策略，团队采用9-苯基芴为分子骨架，设计并合成出一种新型电子受体材料，即9-[6-(2-氰基-7-异氰基-9-苯基-9H-芴-9-基)-9-乙基-9H-咔唑-3-基]-9-苯基-9H-芴-2,7-二腈(TriCNDPFCz)。通过测试发现，氰基化修饰使得材料的电子接受能力得到明显提升。所制备的受体材料与经典给体材料1,1-双[(二-4-甲苯氨基)苯基]环己烷（TAPC）结合，实现了高性能激基复合物发光（图1）。另外，目标材料合成步骤较短，制备成本相对较低。

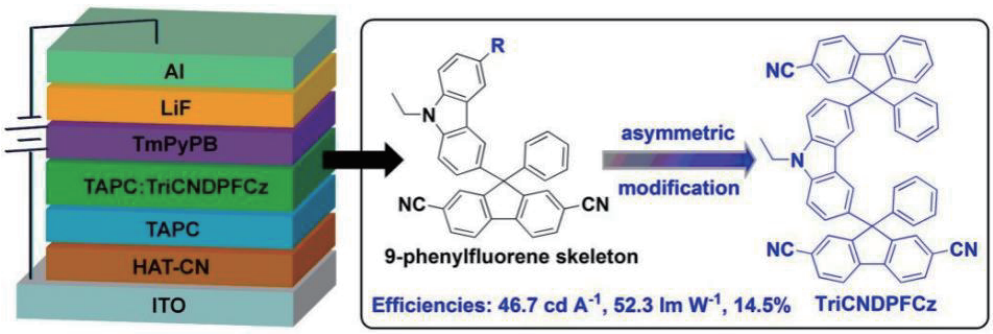


图1 三氰基修饰的9-苯基芴衍生物结构及其Exciplex-OLED器件

为了评估激基复合物体系的电致发光性能，以TAPC:TriCNDPFCz为发光层制备了有机电致发光器件（器件I），如图2所示：

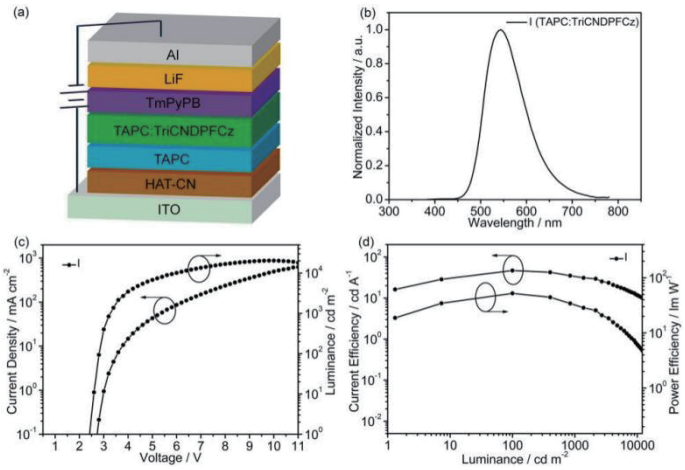


图2(a)器件结构，(b)10 V电压下的EL光谱，(c)电流密度-电压-亮度曲线，以及(d)器件I的电流效率-亮度-功率效率曲线

测试表明，器件I具有20363 cd m^{-2}的亮度以及2.5 V的低开启电压，这意味着器件I中实现了载流子传输的平衡。器件I的最大电流效率（ηc）为46.7 cd A^{-1}，最大功率效率（ηP）为52.3 lm W^{-1}，最大外量子效率为14.5%，意味着目标材料的三氰基化策略有利提升器件的光电性能。

技术指标/优势

技术指标：

本成果的发光器件最大亮度可达20363 cd m^{-2}，启动电压低至2.5 V，最大电流效率为46.7 cd A^{-1}，最大功率效率为52.3 lm W^{-1}，最大外量子效率为14.5 %。

优势：

与目前文献报道成果相比，本成果提出的新材料合成路线较短，可在三步之内完成，且反应条件温和，有利于进行低成本、宏量制备。

应用领域和市场前景

目标材料有望在发光、显示、照明、成像等领域得到应用。市场应用领域有OLED面板、显示屏、OLED照明等。

市场前景：目标材料在低成本高性能发光器件方面（OLED）有很好的应用潜力，由于具有合成简单特点，因此对于发展低成本OLED材料具有重要借鉴作用，有助于推动OLED材料低成本发展趋势，扩大OLED材料市场规模。

钙钛矿光伏材料及薄膜制备技术

成果完成人	曹昆	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	可再生清洁能源		高技术领域（三级）	太阳能	
所属学科方向	一级学科	材料科学	二级学科	材料科学其他学科	
应用行业	太阳能电池				
核心专利号	ZL202210446266.3；ZL202110713882.6				

成果概述

本成果基于两项钙钛矿光伏材料与器件制备核心专利，针对钙钛矿材料制备及稳定化的关键技术瓶颈进行创新突破。第一项技术针对甲脒基钙钛矿在空气中易发生相变的问题，创新性引入季铵盐修饰策略。通过在钙钛矿材料表面构建低维结构，显著增强了材料的相稳定性与薄膜质量。基于该材料制备的钙钛矿太阳能电池具有较高的光电转换效率，具备良好的重复性与环境适应性，为高效稳定的钙钛矿光伏器件的产业化提供了可靠的材料基础。第二项技术通过“鸡尾酒混合法”配制不同组分的钙钛矿前驱体溶液，经精确比例混合后旋涂成膜，成功构建了异质结锡基钙钛矿薄膜。该方法显著提升了薄膜的结晶性与晶粒尺寸，有效钝化晶界缺陷，抑制非辐射复合，从而提升了锡基钙钛矿光电器件的性能与稳定性，具有工艺简单、成本低、易于推广的特点。

关键技术/创新要点

针对甲脒基钙钛矿在空气中易发生相变、影响器件性能与稳定性的关键问题，本成果提出一种季铵盐修饰的高质量相稳定甲脒基钙钛矿材料的制备方法。通过将合成的甲脒基钙钛矿材料加入季铵盐溶液中，利用季铵盐分子在薄膜中原位形成低维结构，有效抑制黑相向黄相的不可逆转变，显著改善薄膜致密性、均匀性并降低缺陷密度。基于该修饰材料，进一步结合LiTFSI/tBP/TAIC三元掺杂的spiro-OMeTAD空穴传输层构筑钙钛矿光伏器件，获得了24.21%的光电转换效率（PCE）。未封装器件于室温暗态储存1512h后保持初始PCE的92%，连续光照450h后保持83%，65℃热应力下480h后仍保持82%的初始效率。本策略大幅增强了器件在湿热、热应力及光照条件下的长期工作稳定性，且制备方法重复性好、易操作、成本低，同样适用于碳基电极等低成本器件结构。

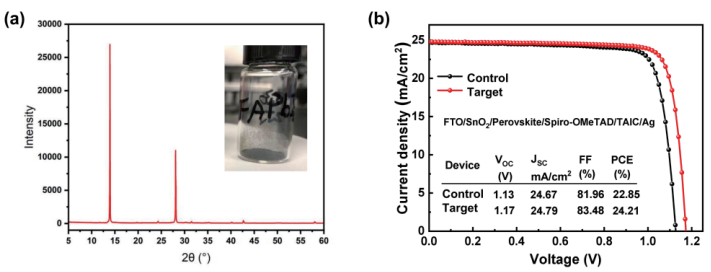


图1 甲脒基钙钛矿的(a)薄膜XRD；(b)器件J-V曲线表征

针对锡基钙钛矿薄膜在溶液法制备中结晶速率快、晶粒尺寸小且分布不均、结晶性差以及二价锡易氧化等瓶颈问题，本成果提出原位形成具有异质结结构的锡基钙钛矿薄膜制备方法。通过分别配制含有不同组分的锡基钙钛矿前驱体溶液并混合，避免了将所有组分共混于同一溶剂所导致的随机结晶和不利相结构分布，显著提升了薄膜的结晶性，获得更大、更均匀的晶粒尺寸，减少了非辐射复合缺陷，同时抑制了二价锡的氧化。该制备工艺简单实用、成本低、易于推广，能够有效改善锡基钙钛矿光电器件的光电转换效率和稳定性，推动环保型钙钛矿光伏技术的应用发展。

技术指标/优势

本成果技术指标如下：甲脒钙钛矿纳米晶材料在空气中可稳定放置，基于甲脒钙钛矿纳米晶制备的光伏器件性能提升至~24%，开路电压与填充因子优化明显；薄膜均采用溶液法旋涂制备，工艺温度≤150 ℃，兼容大面积、柔性衬底加工。获授权国家发明专利如下：

1. 甲脒铅基钙钛矿材料及其制备方法与应用，专利号：ZL202210446266.3；

2.一种异质结锡基钙钛矿薄膜的制备方法和产品，专利号：ZL202110713882.6。

应用领域和市场前景

本成果在高性能钙钛矿光伏材料及器件制备方面具备较好的应用潜力。所合成的甲脒基钙钛矿纳米晶材料通过低维化改性处理，不仅提高了钙钛矿材料本身的稳定性，同时显著提升了器件的环境耐受性与使用寿命。钙钛矿原材料的改性方法与大面积涂布、卷对卷印刷等低成本制造技术兼容性强，可面向光伏材料企业、新能源研发机构进行技术转让或合作开发，共同推进钙钛矿光伏技术的商业化应用。锡基钙钛矿技术路线无铅环保，且工艺温度低，适用于柔性、轻量化光伏组件，在可穿戴电子及室内光能收集等新兴市场前景广阔。

高性能有机长余辉复合材料

成果完成人	陈润锋	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料的新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料

成果概述

具有超长发光寿命有机长余辉的发现和深入研究革新了有机材料光电功能的传统认知，形成了一系列新理论、新技术和新应用。我们从有机长余辉复合材料结构设计与应用概念和方法的系统创新入手，针对有机长余辉在光物理机制、分子理性设计、光电器件应用等诸多方面存在的亟待解决的关键科学难题和技术瓶颈，以激发态理性调控为核心，提出了刚性基质稳定三线态激子延长激发态寿命、活性主体构建能量传递/激子转化通道、杂原子/重原子协同修饰增强系间窜越、手性结构赋能圆偏振发光、裸眼可观测时间分辨光学技术等有机长余辉复合材料设计与应用的新理论、新方法和新概念，形成了较为完整的长余辉复合材料分子结构设计、激发态调控、器件应用等方面的关键技术和理论体系。

关键技术/创新要点

围绕有机长余辉复合材料开发的基础理论、高性能设计及创新性应用概念和方法，提出了“能量转移/激子转化有机长余辉发光颜色调控方法——高性能有机长余辉主客体协同策略——多功能有机长余辉新器件应用”的理论方法和关键技术，关键技术和创新要点包括：

（1）厘清了有机长余辉复合材料中的能量转移协同机制，阐明了多组分体系中主客体间激子转化的基本途径，实现了室温下发光寿命长达4.2s、发光颜色从蓝色到红色甚至是白光发光、发光效率由20.7%增加到36.0%的全彩聚合物室温磷光材料的按需构筑，为设计开发同时具备高亮度、高效率、长寿命的全彩有机长余辉半导体材料提供了新思路和理论基础。

（2）提出活性主体、敏化客体以及外界环境多组分激发态调控技术，实现了有机长余辉发光颜色调控和高效蓝光发射，设计制备了刺激响应型有机长余辉复合物。水刺激响应的多组分深蓝光（406-428nm）有机长余辉发光量子效率高达46%、室温下寿命长达5秒，为理性设计、调控和制备高性能有机长余辉复合材料提供了有效途径。

（3）开发手性发光等多功能有机长余辉材料，构建了无需使用精密仪器的时间分辨光学新技术，创制了一系列基于裸眼可见的余辉发光衰减特性和刺激响应余辉效应的有机长余辉复合物新器件应用，实现了多模态柔性图案/数据加密与防伪技术、可喷墨打印加密复写纸、手性加密逻辑器件等新应用，为开发新型光电信息器件等高性能和多功能应用奠定了科学技术基础。

技术指标/优势

以实现有机长余辉复合材料的高性能化与器件应用的多功能化为目标，在余辉发光机制、激发态调控、能量转移、裸眼时间分辨光电信息器件应用等方面取得了突破，为理性设计、调控和制备高性能新功能有机长余辉复合材料提供了基础，开辟了有机长余辉材料在多模态加密与防伪、喷墨打印加密复写纸、手性加密逻辑器件等领域的新应用。相关技术指标达到国际领先水平，获2025年中国复合材料学会科学技术奖一等奖。

应用领域和市场前景

有机长余辉复合材料是一种具有特殊发光性能的材料，其应用领域主要集中在以下几个方面：(1)照明与显示，有机长余辉材料可以用于制造自发光的显示屏、背光板和照明设备，特别是在低功耗或无电源的环境中；(2)安全与标识，该类材料可以用于制作安全标识、反光材料和夜光标志，提高在黑暗环境下的可见性；(3)医疗与生物成像，有机长余辉材料可以用于生物成像和细胞标记，帮助研究人员观察细胞活动和生物过程；(4)艺术与设计，艺术家和设计师可以利用这种材料创作具有独特发光效果的艺术作品和装饰品。

有机长余辉复合材料的市场前景广阔，主要得益于其独特的发光性能和多样的应用场景。随着科技的进步和对新型材料需求的增加，该材料在照明、安全、医疗和艺术等领域的应用将不断扩大。此外，随着环保意识的提高，有机材料因其可降解性和低能耗特性，也受到越来越多的关注和青睐。

智能伤口愈合材料及应用

成果完成人	代宝莹	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	新型敷料和止血材料制备技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	纳米材料
应用行业	医药				

成果概述

皮肤作为人体最大的器官和第一道防御屏障，在抵御外界物理、化学及生物性损伤方面发挥着不可替代的重要作用。当皮肤完整性遭到破坏后，若未能得到有效干预，不仅可能引发全身性感染、组织坏死等严重并发症，甚至可能导致患者残疾或死亡，给医疗卫生系统带来沉重的经济负担。然而，目前的治疗方法在应对慢性伤口感染等皮肤损伤问题仍面临巨大的挑战，如无法根除致病菌、治疗条件严苛、愈合效率低下等。在此背景下，本团队从皮肤创伤修复的病理过程出发，通过材料多功能化设计，成功构建了一种具有协同抗菌和免疫调节功能的智能复合薄膜，该薄膜可使金黄色葡萄球菌感染创面的愈合效率提升约55%。此外，该多功能薄膜通过类芬顿反应持续释放Mn^{2+}，促进巨噬细胞向M1表型极化，显著增强其对残留病原体的清除能力，促进胶原沉积和血管新生，加速组织重塑，在伤口愈合领域具有重要的应用前景。

关键技术/创新要点

研究团队通过结构-功能一体化设计，开发了一种集“致病菌灭活-免疫调控”于一体的伤口愈合系统，旨在实现自驱动热释电-光催化协同高效灭菌，激活免疫反应，最终实现皮肤伤口愈合效率的显著提升。我们系统地探索了热释电动力疗法、光催化抗菌疗法与免疫疗法相结合的协同效应。我们通过一系列水热法合成了多功能复合材料C@MnO_x@CdS，并将其与有机热释电材料聚偏氟乙烯-三氟乙烯（P(VDF-TrFE)）相结合，采用刮涂法制备复合薄膜P(VDF-TrFE)/C@MnO_x@CdS。这种精巧的结构和功能设计可实现光照激励热释电电场的自驱动构筑及热释电-光催化过程，显著提升抗菌效率，同时诱导巨噬细胞极化和免疫激活，加速伤口愈合。

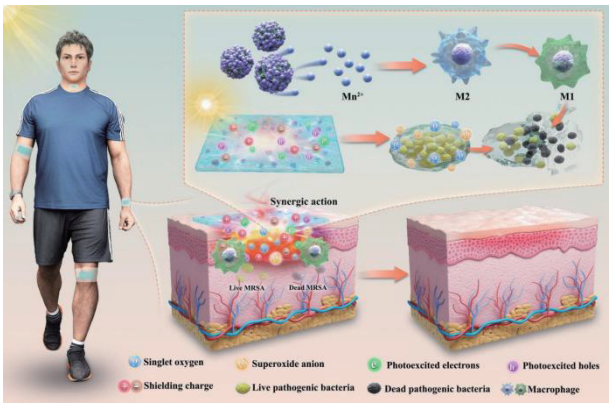


图1 多功能复合薄膜P(VDF-TrFE)/C@MnOx@CdS促进感染伤口愈合作用机制示意图

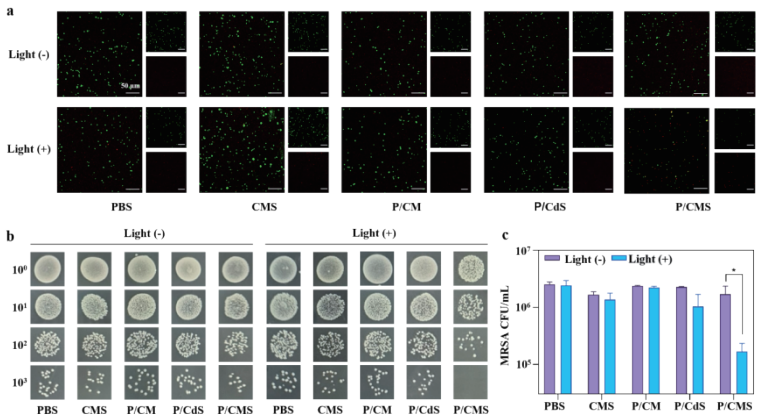


图2 P(VDF-TrFE)/CMS 光热抗菌效果的体外评价。(a)共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)图像显示金黄色葡萄球菌的存活率,(b)各种处理后金黄色葡萄球菌的代表性图像和(c)菌落形成单位(CFU)计数(n=3, 平均值±标准差)。

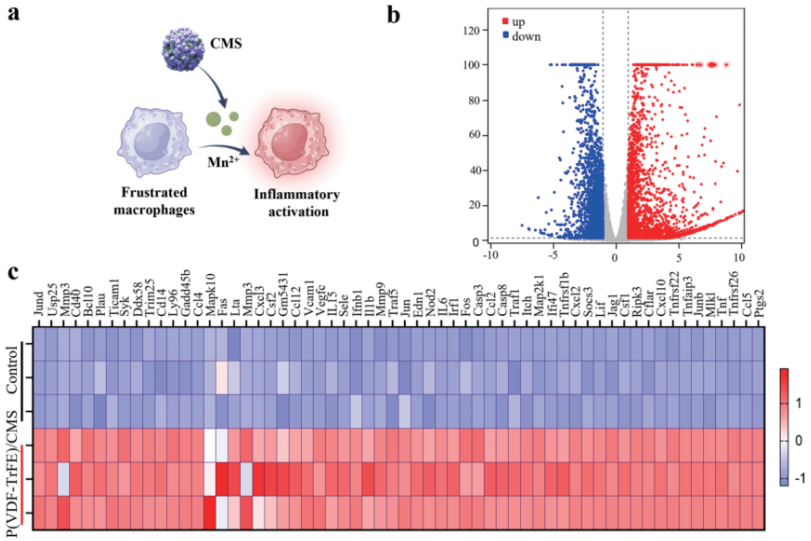


图3 受P(VDF-TrFE)/CMS调控的巨噬细胞中的关键差异表达基因。(a)P(VDF-TrFE)/CMS调节巨噬细胞炎症免疫反应的示意图, (b)PBS和P(VDF-TrFE)/CMS处理的RAW264.7细胞之间DEGs的详细火山图。红色:上调的DEGs, 蓝色:下调的DEGs, 灰色:不显著的DEGs, (c)热图说明了用PBS或P(VDF-TrFE)/CMS处理的RAW264.7细胞中与炎症相关DEGs相关的表达谱。图突出显示了前20个扩充词。点大小对应于与每个术语关联的DEG的数量, 颜色反映了统计显著性的水平。

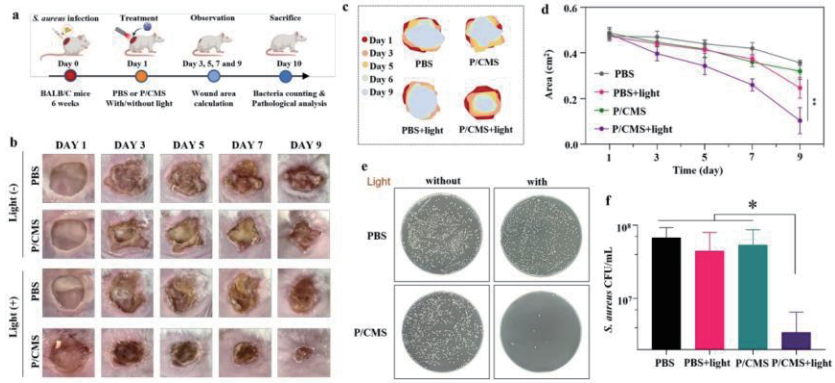


图4 P(VDF-TrFE)/CMS对金黄色葡萄球菌感染伤口的愈合特性的体内评估, (a)金黄色葡萄球菌感染模型和实验方案的示意图, (b)从第1天到第9天用不同样本处理的金黄色葡萄球菌感染伤口的照片, (c) 第1、3、4、7和9天各种治疗下金黄色葡萄球菌感染伤口的示意图, (d)不同组S. aureus感染小鼠的平均感染面积生长曲线(n=5)。(e)第10天不同组中感染伤口中金黄色葡萄球菌菌落的照片和(f)活金黄色葡萄球菌的相应菌落数(n = 5, 平均值±标准差)。所示组间差异有统计学意义。*P < 0.05。

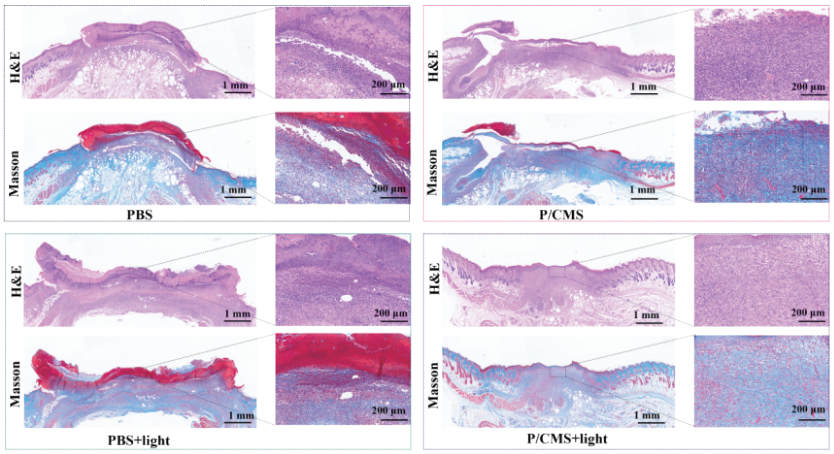


图5 第10天用苏木精-伊红(H&E)和Masson染色的切片的显微镜图像。P/CMS代表P(VDF-TrFE)/CMS

技术指标/优势

与现有治疗方案相比，本团队研发设计构建的智能伤口愈合系统可在常规光照和人体运动条件下实现对皮肤伤口的高效愈合，无需额外能量输入或专业医护操作，显著提升了治疗的便捷性和经济性。这一创新性的简便高效的伤口愈合治疗策略克服了传统方法操作复杂、条件严苛的限制，符合未来皮肤伤口愈合治疗的发展趋势。

应用领域和市场前景

该研究成果可广泛应用于以下领域：1）慢性伤口治疗：适用于糖尿病溃疡、静脉性溃疡等难愈性伤口，尤其针对耐药菌（如MRSA）感染，提供高效抗菌-免疫协同治疗方案。2）烧伤与创伤修复：通过光热-热释电-光催化三联疗法加速组织再生，减少感染风险，改善胶原排列，提升愈合质量。3）术后感染防控：作为功能性敷料用于手术切口护理，预防耐药菌感染并调节局部免疫微环境，降低并发症。

在医疗敷料市场前景方面，全球伤口护理市场规模预计2027年超280亿美元，该技术可切入高端功能性敷料领域，满足抗耐药菌感染需求，溢价能力显著。此外，在跨界融合应用前景方面，本研究的核心技术（热释电-光催化协同）可延伸至环境抗菌涂层（如医用器械表面处理），形成跨学科产品线。

具有高穿透深度的近红外二区荧光发射纳米诊疗试剂

成果完成人	黄艳琴	职称	研究员	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	材料、生物医药				

成果概述

光声/近红外二区荧光成像是近年来生物医学成像领域的重要突破技术。相较于传统可见光及近红外一区（NIR-I）成像，NIR-II窗口的光子具有更深的组织穿透能力与更低的自发荧光背景，显著提升了活体成像的信噪比和空间分辨率。而光声成像则结合了光学对比度与超声分辨率优势，可无创获取深层组织的高分辨功能信息。两者的协同应用为精准诊疗提供了多维度信息支持，尤其在肿瘤术中导航、脑功能监测及炎症实时追踪等领域展现出独特潜力。

本团队自主研发了一类多功能纳米诊疗试剂，其由具有光热（PTT）和光动力（PDT）协同治疗的水溶性共轭聚合物P1与化疗药物DOX和Cu^{2+}通过静电和疏水作用制备成纳米诊疗试剂DOX@P1/Cu^{2+}，能在一定时间内通过增强渗透与保留（EPR）效应富集到肿瘤，在TME的弱酸性、过表达的GSH和H_2O_2条件下解离，Cu^{2+}被还原为Cu^{+}，产生化学动力学治疗（CDT）效果；并且释放出DOX，同时光诱导电子转移（PET）效应的减弱，DOX产生荧光开启响应，且产生化疗（CHT）效果；在808nm激光照射下，P1可作为近红外二区荧光和光声探针，并产生PDT和PTT疗效。因此，DOX@P1/Cu^{2+}能够在荧光成像和光声成像共同指导下实现肿瘤PTT/PDT/CDT/CHT协同治疗策略。

关键技术/创新要点

光声/近红外二区荧光成像是近年来生物医学成像领域的重要突破技术。相较于传统可见光及近红外一区（NIR-I）成像，NIR-II窗口的光子具有更深的组织穿透能力与更低的自发荧光背景，显著提升了活体成像的信噪比和空间分辨率。在荧光成像中，NIR-II探针通过减少组织散射和吸收，能够实现血管、肿瘤微环境等精细结构的动态可视化；而光声成像则结合了光学对比度与超声分辨率优势，可无创获取深层组织的高分辨功能信息。两者的协同应用为精准诊疗提供了多维度信息支持，尤其在肿瘤术中导航、脑功能监测及炎症实时追踪等领域展现出独特潜力。

图一为共轭聚合物P1的合成路线。本团队采用Stille聚合设计合成的以（BDT）衍生物和苯并噻二唑（BT）衍生物为给体，TQ衍生物为受体的D-A-D共轭聚合物。并且，在苯并噻二唑衍生物的侧链上引入聚乙二醇（PEG）链以增强共轭聚合物的水溶性，由此合成了具有PTT/PDT协同效果的水溶性共轭聚合物P1。纳米诊疗试剂DOX@P1/-Cu^{2+}在808nm的激光照射下具有高效的深度穿透效果。如图2，在鸡胸肉组织中的穿透深度最高可达16

mm, 与同类荧光探针相比具有显著优势。在4T1荷瘤小鼠的成像中(图3)可以看到在肿瘤位置的成像效果随着时间的推移而愈发明显, 在24小时达到最高的亮度。随后经过体内代谢亮度逐渐降低, 表明其在生物体内具有良好的生物代谢能力。在随后的光声成像中(图4)也能观察到NPs其具有良好的成像能力, 说明DOX@P1/Cu^{2+}能够在荧光成像和光声成像共同指导下实现肿瘤PTT/PDT/CDT/CHT协同治疗策略。随后通过活死细胞染色实验(图5)证实了DOX@P1/Cu^{2+}具有良好的治疗效果, 表明其具有在近红外二区内成为高穿透深度的纳米诊疗试剂的潜力。

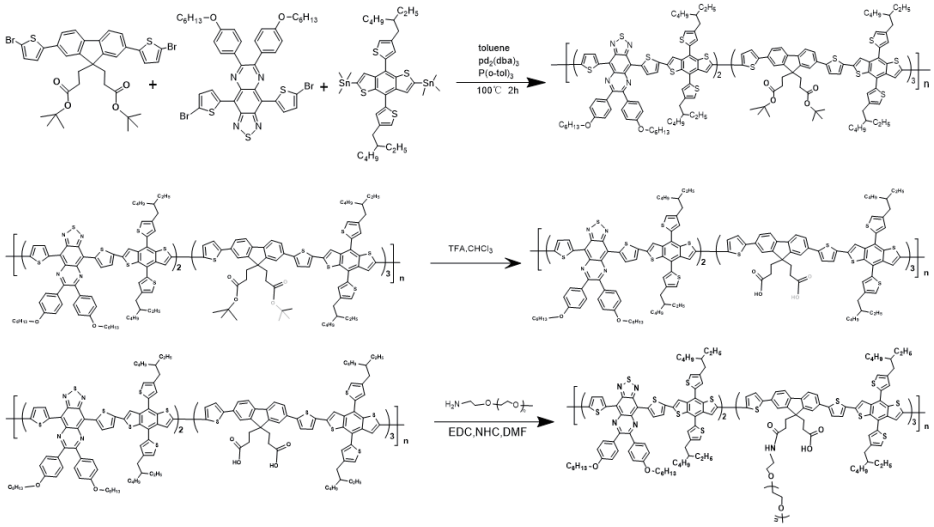


图1 共轭聚合物P1的合成路线

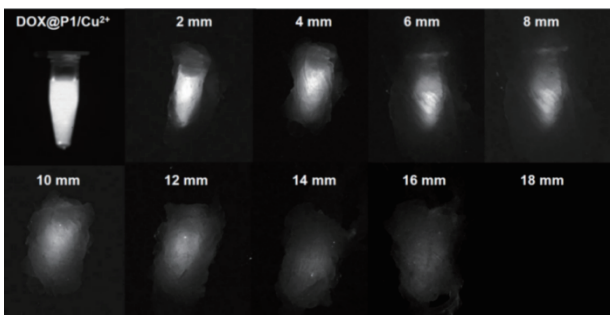


图2 DOX@P1/Cu^{2+}在鸡胸肉组织中的穿透深度

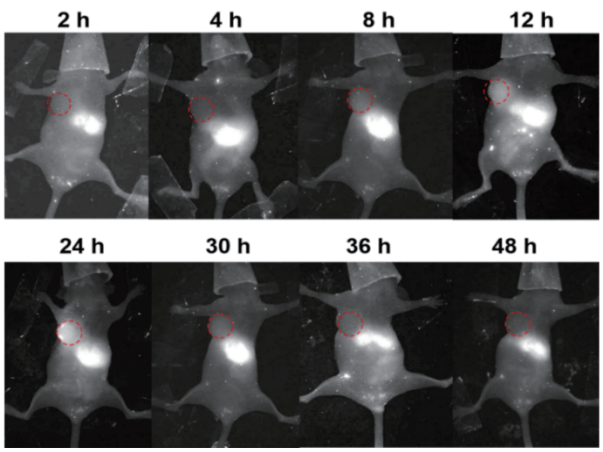


图3 注射DOX@P1/Cu^{2+}的4T1荷瘤小鼠的近红外二区荧光成像图

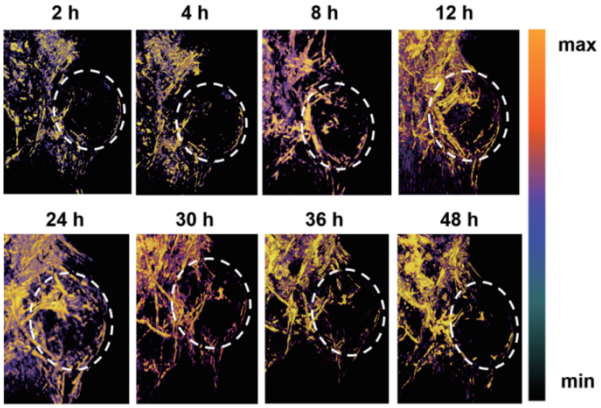


图4 注射DOX@P1/Cu^{2+}NPs的4T1荷瘤小鼠的光声成像图

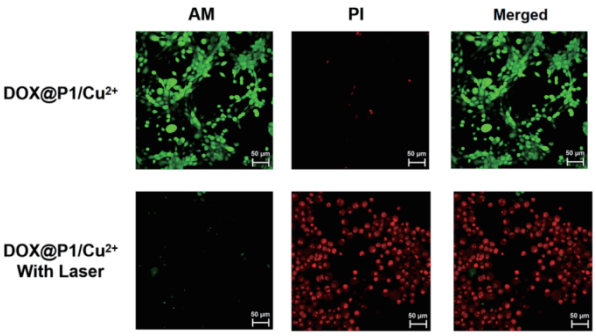


图5 DOX@P1/Cu^{2+}在4T1细胞内的AM/PI染色荧光图(标尺:50 μm)

技术指标/优势

与其他已报道的荧光成像材料相比工作进行对比,纳米诊疗试剂的荧光穿透效果更好,在鸡胸肉组织中的穿透深度深度可达16 mm;其高效的穿透深度显著提升了活体成像的信噪比和空间分辨率。结合光声成像的光学对比度与超声分辨率优势,可无创获取深层组织的高分辨功能信息。两者的协同应用在精准诊疗提供了多维度信息支持在肿瘤术中导航、脑功能监测及炎症实时追踪等领域展现出优异的潜力;并且能够在荧光成像和光声成像共同指导下实现肿瘤PTT/PDT/CDT/CHT协同治疗策略。

应用领域和市场前景

该成果可为医疗行业的诊断、成像和治疗等相关方面提供高效的技术支持,如:相关近红外二区荧光成像技术可望实现脑血管、淋巴结、三维微血管造影的突破,可用于引导相关病变局部的手术,大大提高手术准确性;同时,该类材料具有出色的光热转化能力和光动力效应,在光声/近红外二区荧光成像引导下进行非侵入式光疗,实现无创性的高效肿瘤治疗。

单组份刺激响应聚合物长余辉材料

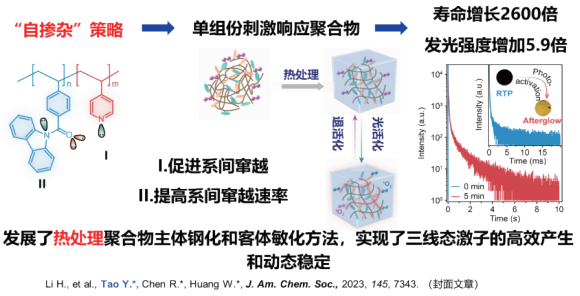
成果完成人	李欢欢	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料的新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料合成与加工工艺
应用行业	半导体发光				

成果概述

刺激响应性有机长余辉材料，由于其自身结构和功能在外部环境的刺激作用下可以动态地转变或调节，从而实现对外部环境做出恰如其分的响应，展现出动态可调的光电性质，使其在逻辑运算与数据存储、光编码与分子开关、防伪纸与安全墨水等领域受到了广泛的研究关注。然而，目前刺激响应性有机长余辉通常只能在小分子晶体和和主客体掺杂的多组分体系中实现，如何构建具有刺激响应特性的单一组份聚合物长余辉材料仍然是一个难题。

关键技术/创新要点

该成果在刺激响应聚合物长余辉研究领域取得新进展，提出了一种简单而有效的自掺杂策略：通过利用客体敏化和热处理基质钢化实现三线态激子的高效产生和稳定，在连续的紫外光照射下，聚合物内部的氧气被消耗，进一步抑制了氧气引起的三线态激子湮灭，从而成功地构建了一系列单一组份的光活化聚合物长余辉材料。通过将主体乙烯基吡啶与具有较高系间窜越速率的客体分子进行自由基共聚制备此类光活化长余辉聚合物。共聚物中的聚乙烯基吡啶不仅可以作为主体敏化客体的三线态激子，而且在热处理后由于聚合物钢化作用可以有效地实现三线态激子的稳定，从而获得性能较为优异的单组份刺激响应聚合物长余辉。在连续的紫外光照射下，余辉发光寿命从原来的0.34提升到了867.4ms，发光强度提升了～5.9倍。



技术指标/优势

相关研究结果以“Achieving Stimuli-Responsive Amorphous Organic Afterglow in Single-Component Copolymer through Self-Doping”为题，发表在《Journal of the American Chemical Society》(DOI: 10.1021/jacs.2c13632)上。

应用领域和市场前景

由于此类材料独特的光活化特性，作者探索了其在无油墨光打印，脉宽指示器以及“激发时间”依赖的莫尔斯码等领域的应用。

多彩圆偏振有机长持续发光材料应用于成像、加密和照明

成果完成人	李慧	职称	校聘副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料的新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	显示、加密、照明				

成果概述

圆偏振有机长持续发光是一种独特的发光现象，结合了手性和余辉发射特性，近年来在防伪、加密和信息显示等各种应用中获得了极大的关注。尽管取得了蓬勃的进展，但如何开发具有超长持续时间和颜色可调的圆偏振有机长持续发光材料并探索其在实际场景中的应用仍然是一个重大挑战。团队开发了一类具有超长持续时间的手性激基复合物材料，通过有效的协同单线态-单线态和手性能量传递，实现了多彩手性有机长持续发光，并成功开发了此类材料在多重信息加密、余辉显示及照明领域的应用。

关键技术/创新要点

通过将手性链与常用的N, N, N, N-四甲基联苯胺给体整合来开发手性给体，从而构建具有超长持续时间和颜色可调的手性激基复合物材料。手性激基复合物材料呈现超长绿色圆偏振有机长持续发光，持续时间长达1.5小时，不对称因子为4.5×10^{-3}。此外，通过加入荧光掺杂剂并利用协同单线态-单线态和手性能量传递，还实现了持续时间超过1小时的橘红色圆偏振有机长持续发光。利用开发的多彩圆偏振有机长持续发光材料，成功实现了在余辉显示、多级加密和余辉照明等领域的应用。

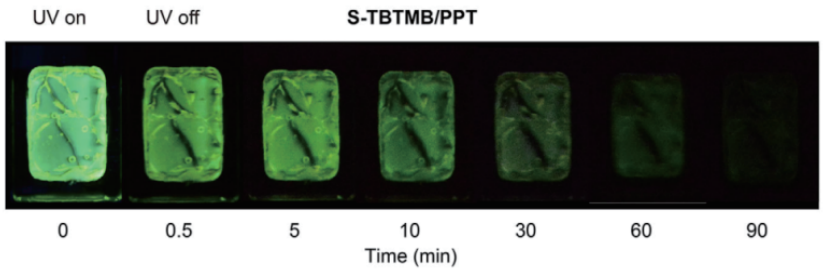


图1 绿色圆偏振有机长持续发光照片

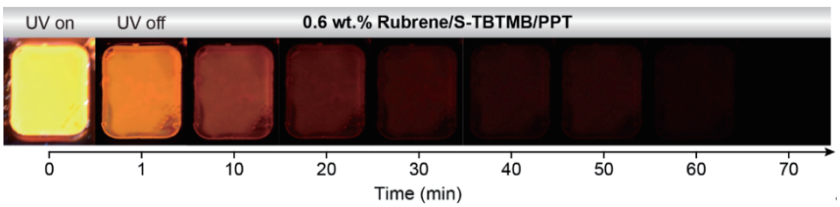


图2 橘红色圆偏振有机长持续发光照片

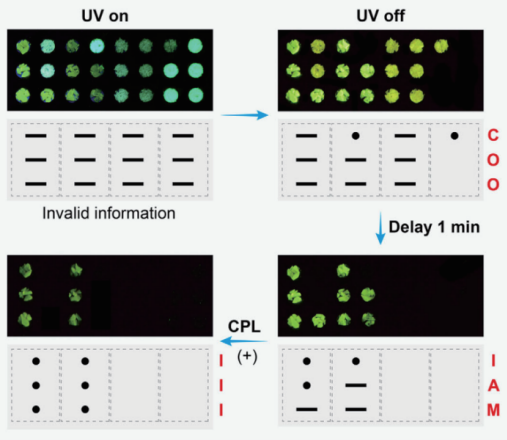


图3 圆偏振有机长持续材料应用
于多重信息加密照片及加密图示

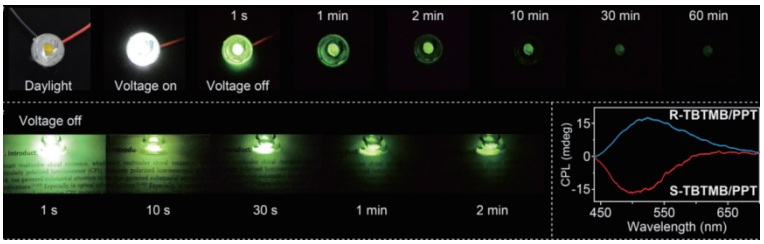


图4 圆偏振有机长持续材料应用于LED灯泡用于照明

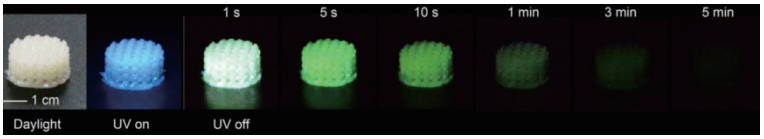


图5 通过3D打印技术将圆偏振有机长持续材料应用于3D余辉显示

技术指标/优势

与已有的圆偏振有机长余辉材料相比，该研究成果在多彩发光和超长寿命方面取得了重大突破。首先，该材料突破了传统CP-OLPL材料单一颜色的限制，实现了绿色至橙红色的可调圆偏振长余辉发射，拓展了其在光学显示与防伪领域的应用潜力。其次，在寿命性能方面，该材料的余辉时间从秒级大幅提升至1.5小时，相比已有报道的CP-OLPL材料实现了数量级上的提升，为长寿命光学应用提供了全新选择。此外，该材料的不对称因子（g_lum）达到4.5×10^{-3}，在保证超长寿命的同时维持了较强的圆偏振发光特性，为高性能CP-OLPL材料的开发提供了新的策略。结合其在手性能量转移与协同单线态-单线态能量传递方面的创新，该材料在光学信息存储、智能防伪及余辉显示等领域具有广阔的应用前景。

应用领域和市场前景

首先，在余辉显示方面，该材料能够实现长时间的圆偏振发光，为信息可视化和动态显示提供新的技术方案。其次，在多级加密与信息防伪领域，基于其超长余辉和可调光学特性，可用于开发高安全级别的防伪标签、隐形信息存储及多层次信息读取系统。此外，该材料在余辉照明领域具有重要价值，能够减少能源消耗，为夜间标识、应急照明及智能光学设备提供高效解决方案。市场方面，随着智能显示、信息安全及节能照明技术的快速发展，该类材料将在高端显示、加密技术及绿色照明等领域催生巨大的商业潜力，推动未来光电子与功能材料市场的创新突破。

高氧空位钛酸盐纳米材料及其绿色高效制备技术

成果完成人	李绍周	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	环保及环境友好型材料技术	
所属学科方向	一级学科	能源科学技术		二级学科	/
应用行业	能源电池				
核心专利号	202311252342.8				

成果概述

本成果针对传统钛基储能材料因低电导率、钾离子动力学缓慢及氧空位不足导致的电化学性能受限问题，创新性地开发了一种高氧空位钛酸盐纳米材料的绿色制备方法。通过优化强碱刻蚀工艺，结合氟化钾辅助分散与氧气动态调控策略，成功构建了兼具高氧空位浓度和层状结构的钛酸钾（$K_2Ti_2O_5$）纳米材料。该材料在超级电容器负极应用中展现出优异的钾离子扩散速率（提升30%以上）、高比容量及超长循环寿命，同时制备工艺摒弃高温高压条件，能耗降低50%。

关键技术/创新要点

原位氧空位调控技术

通过油浴加热过程中持续通入氧气（1-5L/min），精准调控反应体系氧化环境，诱导钛酸盐晶格中氧空位的高效生成，氧空位浓度可达传统方法的2-3倍，显著提升储钾位点密度。

强碱-氟化钾协同刻蚀工艺

采用氢氧化钾/氢氧化钠与二水合氟化钾复合溶液（质量比1:0.5~1.5），实现钛碳化硅（Ti_3SiC_2）的温和刻蚀与纳米结构自组装同步完成。氟化钾的加入增强溶液浸润性，抑制颗粒团聚，稳定层状形貌。

低温动态反应控制

在80-90℃油浴中持续搅拌（300-500rpm）7-12天，避免高温烧结能耗，通过长时间动态反应实现纳米片层有序堆叠，层间距稳定在6.5-7.0Å，促进钾离子快速传输。

绿色工艺集成设计

全流程水相反应体系，无需高温高压设备，原料利用率>95%，废弃物排放减少70%，符合工业绿色制造标准。

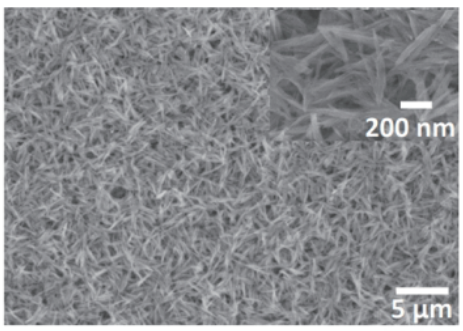


图1 材料的的扫描电子显微镜（SEM）图像

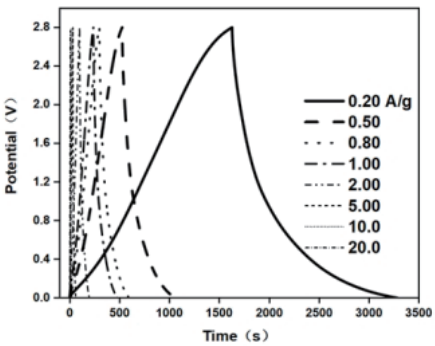


图2 材料制备超级电容器在不同电流密度下的充放电曲线图

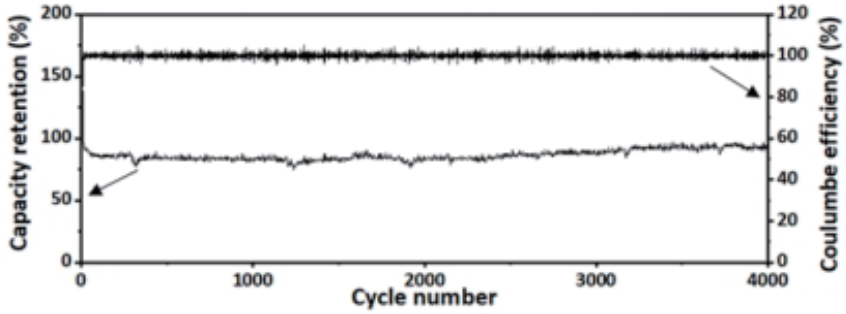


图3 超级电容器在电流密度为5 A g^{-1}时的长循环性能

从图中可以看出，该器件表现出超稳定的循环性能（在5 A g^{-1}的电流密度下循环4000次后容量衰减仅为10%；与传统的水离子电容器相比，工作电压增加，大大增强了储能设备的性能。

技术指标/优势

与传统的材料相比，本技术通过氧空位工程与层状结构设计，实现钛酸盐纳米材料的性能突破：氧空位密度（≥$1.2\times10^{21}cm^{-3}$）达传统方法2-3倍，钾离子扩散速率提升至$5\times10^{-10}cm^2/s$，比容量提高40%；6.5-7.0Å层间距赋予420F/g高比电容（1A/g）及>95%万次循环稳定性；2.8V宽电压窗口与15%析氢过电位提升保障水系体系安全；水相低温工艺降低65%碳排放，适配电网储能及柔性穿戴场景，推动高安全低成本储能技术产业化。

应用领域和市场前景

全球储能市场正以年均15%增速扩张，2025年预计突破1500亿美元。本技术核心优势在于：

成本优势：原料为丰产金属（钛储量占比地壳0.6%），单吨材料成本较锂电负极降低40%。

性能适配：满足高安全水系体系需求，适配风电/光伏配套储能场景，预计占据高压ASCs负极材料20%市场份额。

政策红利：契合“双碳”目标下对绿色制造技术的扶持，欧盟《电池2030+》等政策推动无锂化技术发展。

柔性透气电加热薄膜

成果完成人	李谊	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	复合材料
应用行业	智能装备、柔性电子器件				
核心专利号	202510089684.5；202410020863.9				

成果概述

电加热薄膜广泛应用于取暖、医疗、热变色和除雾/除冰等领域，是一类重要的电子器件。现有的电加热薄膜大多采用采用金属材料作为导热元件复合高分子材料基体材料方式制备。例如，柔性汽车加热垫和热疗护理产品采用的加热薄膜主要通过将电阻丝或碳纤维通过缝纫的方式固定在织物基材上的方式制备。这类加热膜在使用过程中存在加热不均、局部过热、电极易虚接打火等技术问题和安全隐患。此外，对于人体直接接触或佩戴的电加热膜产品，还需要具有较高的透气性，以满足人体长时间接触或佩戴的舒适性要求。针对上述问题，本成果开发了一体化多孔纳米复合柔性透气电加热薄膜材料，兼具高柔性、高透气性、优异的电加热性能、高耐酸碱稳定性、高耐弯折性能和高安全性等优势，在汽车舒适系统、医疗设备和传感器等领域具有良好的应用前景。

关键技术/创新要点

随着柔性可穿戴电子技术的广泛应用，柔性电加热器正在逐步替代传统刚性电加热器应用于传感器、医疗设备和人工智能等领域。传统加热器一般采用金属材料或半导体作为导热元件，表现出较好的加热性能。但是，由于其是刚性衬底导致其不可变形，这一定程度上限制了它的应用。柔性电加热器因其柔性、便携和可穿戴的特点，在近年来得到了快速的发展。基于可穿戴的要求，加热器需柔性、轻便、透气，而在性能上要求其热响应快，稳定性好。现有的柔性加热器仍存在制备工艺复杂、价格昂贵、柔性性能一般等。此外，对于可穿戴电加热器件，如何构筑高透气电加热结构从而满足人体长期佩戴的舒适性要求也是电加热器研究领域的热点之一。因此，开发高柔性、高透气性电加热薄膜材料和器件对于推进柔性电加热器的应用进展具有重要意义。本成果采用自主开发的呼吸图工艺技术将导电纳米材料和聚合物材料复合制备了高导电性、高透气性一体化多孔柔性透气电加热薄膜（图1），其表面电阻率可达25.83Ω/sq，水蒸气透过率可达36.18mg·cm^{-2}·h^{-1}，在14 V的工作电压下的电加热平衡温度可达120℃，响应时间为14s。此外，该电加热薄膜具还有优异的耐腐蚀性（图2）和耐弯折性（图3），适用于可穿戴式电加热应用场景。

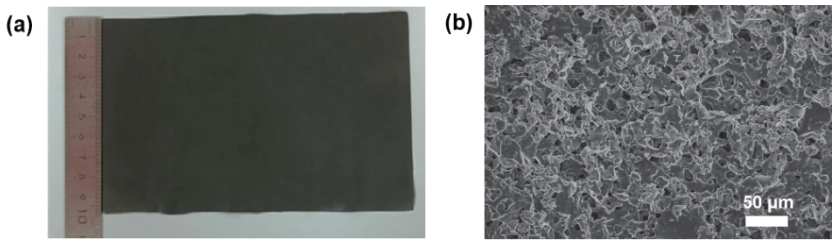


图1 电加热薄膜的(a)数码照片和 (b)扫描电子显微镜图

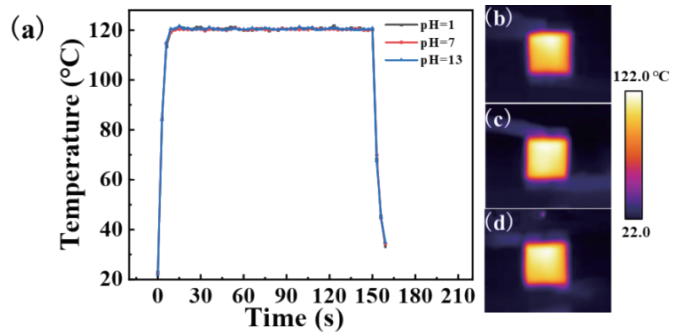


图2 pH=1、pH=7和pH=13水溶液浸泡后电加热薄膜的电加热性能。
(a)加热温度-时间曲线;(b-d)红外热像图:(b)pH=1 ;(c)pH=7 ;(d)pH=13

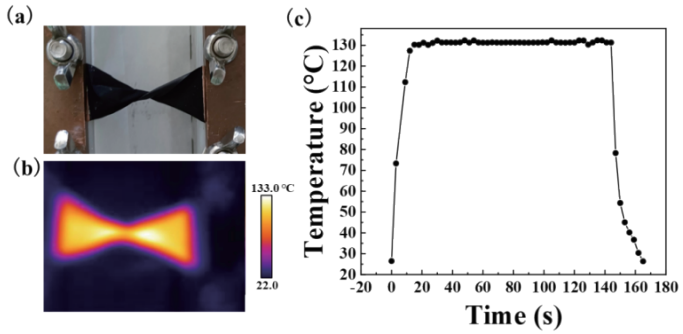


图3 扭转状态下柔性透气电加热薄膜的(a)数码照片、(b)红外热像图和(c)加热温度-时间曲线

技术指标/优势

本成果开发的电加热薄膜为一体化多孔透气结构，兼具高柔性、高透气性、优异的电加热性能、高耐酸碱稳定性、高耐弯折性能和高安全性等优势，其表面电阻率可达25.83Ω/sq，水蒸气透过率可达36.18mg·cm^{-2}·h^{-1}，在14V的工作电压下的电加热平衡温度可达120℃，响应时间为14s。在pH=1的强酸和pH=13的强碱溶液中溶液中浸泡24小时，柔性透气电加热薄膜的电加热性能没有任何衰减。

应用领域和市场前景

本成果产品具有高柔性、高透气性、优异的电加热性能、高耐酸碱稳定性、高耐弯折性能和高安全性等优势，在汽车舒适系统、医疗、热变色和除雾/除冰等领域具有良好的应用前景。

自粘结型聚离子液体电解质材料

成果完成人	林秀婧	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	新型高效能量转换与储存技术		高技术领域（三级）	高性能绿色电池(组)技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	物理化学
应用行业	固态锂金属电池相关				

成果概述

实现高安全性锂金属电池需要更稳定、更安全的电解质，固体电解质具有高安全性、长循环寿命、宽工作温度范围等优点，是常规有机液体电解液的有力竞争者。根据制备材料，固态电解质可分为无机陶瓷电解质和有机聚合物电解质。相比于无机陶瓷电解质，有机聚合物电解质具有质轻、柔性易加工、结构可设计等优点，逐渐成为研究的重点。然而，聚合物链段的高结晶度导致其室温离子电导率低，无法满足实际应用。本团队从分子结构出发，将离子液体阳离子（$EMIM^+$）接枝到聚合物主链（PMMA）中，得到了一种具有自修复功能的新型聚离子液体聚合物，不仅继承了聚合物的机械性能，同时延续了离子液体的高离子电导率。

关键技术/创新要点

本团队通过重新设计反应路径，将1-乙基-3-甲基咪唑阳离子（$EMIM^+$）接枝到MMA（甲基丙烯酸甲酯）单体上，经后续聚合反应，完成$EMIM^+$在PMMA骨架上的嫁接，得到了一种新型的聚离子液体（PIL），既实现电解质从液态到固态的转变，同时还具有强机械性能。得益于分子间的强氢键作用，所制备的聚合物既继承了离子液体的高离子电导率（1.76×10^{-4} S cm^{-1}），又表现出良好的自修复功能。能自发修复锂金属/电解质界面处的缺陷和孔隙，引导锂离子均匀沉积。由于过高的玻璃化转变温度（Tg），大部分聚离子液体在室温下是脆状固体粉末，几乎没有粘附特性。柔性烷氧基链的引入使上述制备的聚离子液体具有较低玻璃化温度，在室温下呈粘稠拉丝状。当作为粘结剂应用于锂硫电池中，采用180°剥离试验，在相同拉伸位移下，S@PIL电极比S@PVDF电极需要更大的剥离力。分子结构上的氢键受体和氢键给体类似齿轮和齿槽，能够缓解并修复硫正极在充电/放电过程中的体积变化，保持电极结构的完整性。

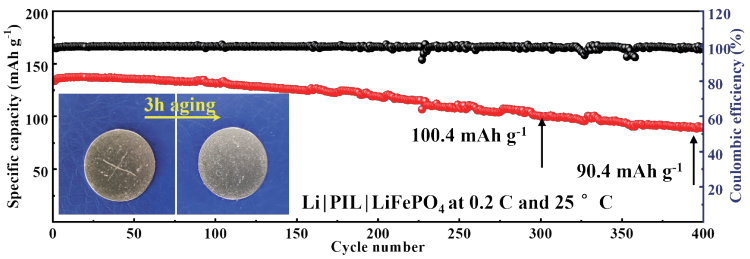


图1 聚离子液体的自愈合图及所组装的固态电池电化学性能图

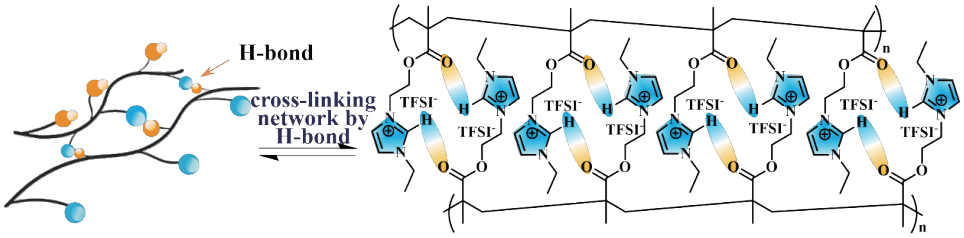


图2 聚离子液体形成氢键示意图

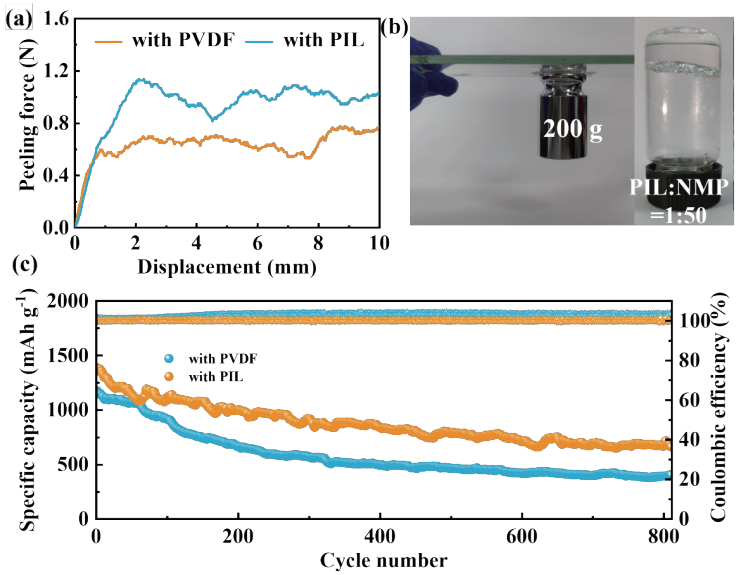


图3 (a)采用不同粘结剂的电极的力-位移曲线, (b)聚离子液体的粘附性及溶胀性, (c)采用不同粘结剂的Li-S电池的循环性能图(2C)

技术指标/优势

所制备的聚离子液体的离子电导率可达1.76×10^{-4} S cm^{-1}。柔性烷氧基链的引入使所制备的聚离子液体具有较低玻璃化温度, 在室温下呈粘稠拉丝状; 当用作粘结剂时, 在相同拉伸位移下, 采用聚离子液体粘结剂电极的剥离力是商用PVDF粘结剂电极的2倍。由于分子间氢键的作用, 使得该材料表现出良好的自愈合性能, 无论是作为电解质和粘结剂使用, 都能够有效提升电池的循环性能。

应用领域和市场前景

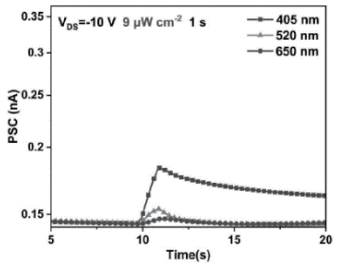
自粘结型电解质材料兼具离子传导和界面粘接功能, 在高能量密度固态锂金属电池和柔性/微型电池中具有重要应用, 能够优化电极-电解质接触, 提升锂金属负极稳定性, 减少热失控风险; 适用于可穿戴设备、微型传感器等。随着产业化加速, 自粘结型电解质有望成为下一代电池的关键材料。

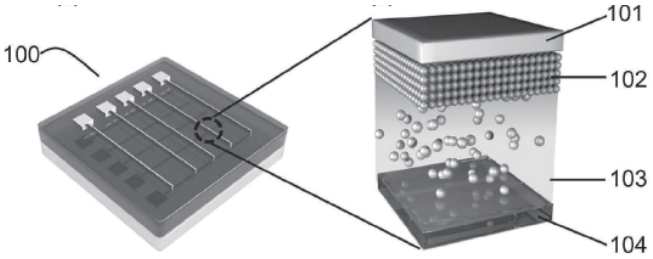
机器视觉光感材料

成果完成人	凌海峰	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	新型电子元器件		高技术领域（三级）	敏感元器件与传感器	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	半导体技术
应用行业	工业边缘智能监测				
核心专利号	ZL202211516563.7；ZL202110775166.0				

成果概述

针对大型化工园区的高危巡检需求，以及加油泵岛及卸油区等防爆区域全天候视觉监控，开发具有感知、存储、计算一体化功能的新型光感材料。创新构建基于该材料的异质结器件架构，开发形成面向智能视觉、神经形态计算与边缘智能的专属材料体系，可精准适配高危场景监测需求，在多个关键场景启动应用验证，为工业边缘智能监测提供全新技术方案。





关键技术/创新要点

本成果技术指标如下：

（1）材料在柔性基底上可稳定制备，弯曲半径≤5 mm时性能保持≥85%；

（2）光照稳定性≥1000小时、热稳定性-20 ℃至80 ℃、环境耐受性强；

（3）器件的驱动电压≤5 mV，传感器功耗≤1 nW，响应速度≤500 ns，信号识别精度≥95%；

（4）相较于传统“传感器+ADC+处理器”架构，系统端到端功耗降低≥2个数量级。

应用领域和市场前景

本成果应用前景广阔，核心聚焦安全监测与智能生产需求，可直接应用于化工园区无人机防爆巡检、产线智能质检、加油站安防等场景，解决传统监测设备功耗高、延迟大、防爆性差等痛点。预计将显著提升工业监测的本质安全水平，降低企业运营成本，产生重大经济与社会效益。

面向水质净化的新型硫化钨光热材料及其制备和应用

成果完成人	刘淑娟	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新能源与节能	
高技术领域（二级）	可再生清洁能源		高技术领域（三级）	太阳能	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料表面与界面
应用行业	海水淡化、苦咸水净化、水处理与节能环保				
核心专利号	ZL202210567597.2				

成果概述

针对传统太阳能界面蒸发材料在海水淡化与苦咸水净化中存在吸光范围受限、热量易向环境和体相水散失、蒸发效率不足等问题，团队开发了新型硫化钨光热材料W_2S_3，并构建了与三维多孔PVA水凝胶耦合的界面蒸发器。该成果利用晶格全局对称性破缺引发的能带调控与定向热整流效应，实现宽光谱吸收、快速光热转化和界面热局域。在真实海水体系中，该材料表现出优异的蒸发通量、脱盐能力和循环稳定性，相关成果已发表在Advanced Functional Materials，并获得授权发明专利，为低能耗、绿色化分布式制水提供了新的材料路线与器件方案。

关键技术/创新要点

1.材料设计。通过化学计量可控溶剂热合成，构筑具有全局对称性破缺的W_2S_3纳米颗粒，使材料兼具金属性特征与宽光谱吸收能力。

2.光热转化机制。依托能带边缘态调控，提高费米能级附近态密度，增强低能光子吸收，并促进光生载流子快速弛豫与非辐射复合，将光能高效转化为热能。

3.界面热管理。将W_2S_3均匀嵌入三维多孔PVA水凝胶，形成兼具热局域、水输运和盐耐受的蒸发界面，显著抑制无效热散失。

4.水分子调控。W_2S_3表面表现出超亲水特征，可在毫秒尺度内快速润湿，并削弱界面水氢键网络，降低蒸发相变能垒。

5.工程验证。在真实海水和室外条件下完成蒸发与脱盐验证，体现出良好的应用转化潜力。

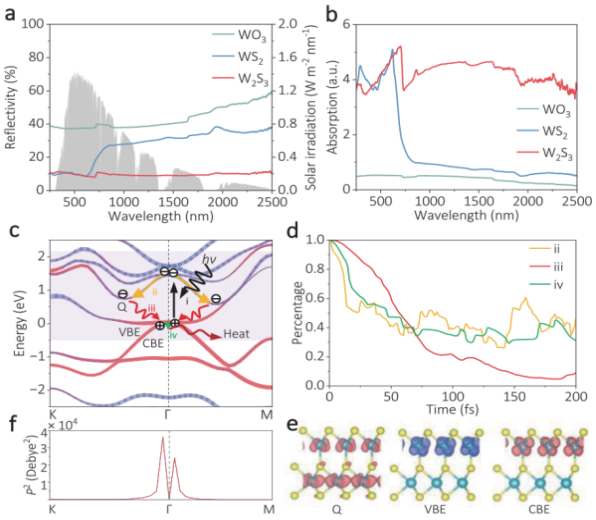


图1 W_2S_3材料的宽光谱吸收与能带调控示意，体现其高效光热转化机理

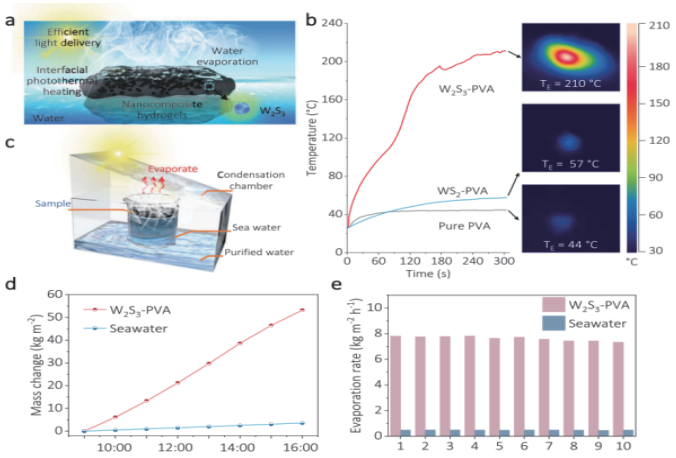


图2 W_2S_3-PVA三维蒸发器及海水蒸发性能测试结果, 体现高通量与良好稳定性

技术指标/优势

(1)极高的光热转换与热局域能力：在模拟太阳光(100 mW cm^{-2})照射下, W_2S_3-PVA水凝胶表面温度可在4分钟内迅速攀升至210℃, 其界面升温能力远超诸多先进的非贵金属纳米材料。

(2)突破性的蒸发速率与效率极限:在1个标准太阳光照射下, 该3D水凝胶蒸发系统实现了7.862kg m^{-2} h^{-1}的超高水蒸发速率。系统的太阳能到蒸汽的转换效率高达92.2%, 极其逼近92.5%的理论热力学极限。

(3)优异的抗盐性与长期运行稳定性:在真实户外海水淡化应用中, 系统实际蒸发速率稳定在7.602 kg m^{-2} h^{-1}。经过连续10次循环测试, 材料性能无明显衰减, 且冷凝水中的代表性盐离子浓度得到大幅抑制, 完全达到脱盐净化标准。

应用领域和市场前景

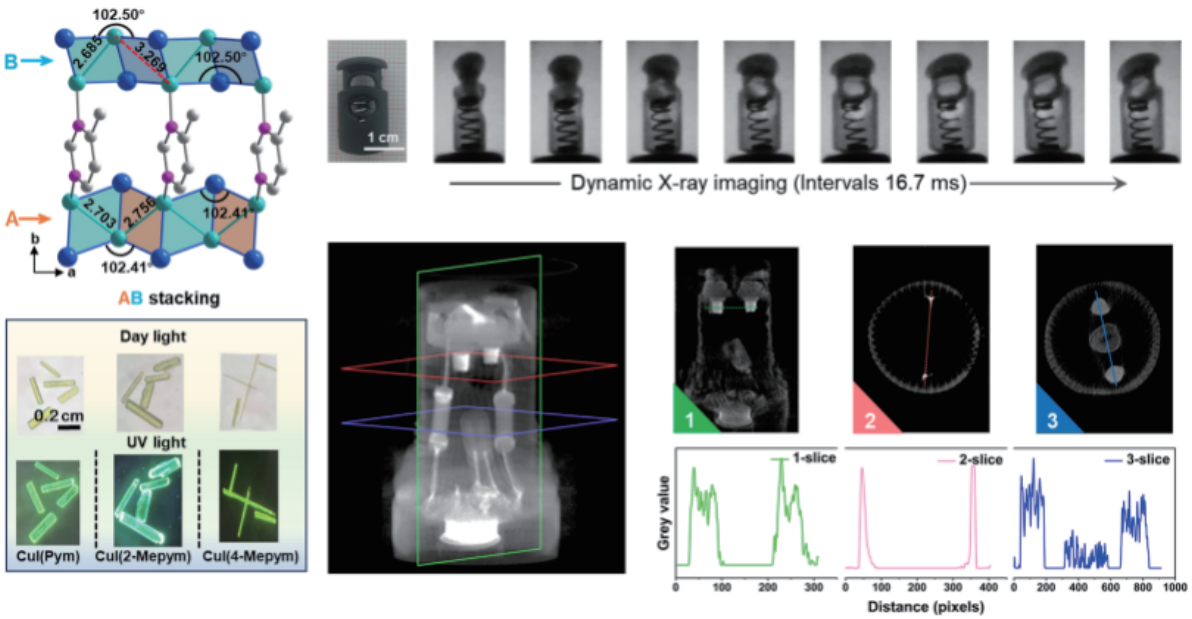
该成果可为环保治理与新能源利用等相关领域提供高效的技术与材料支持, 可直接投用于太阳能驱动的海水淡化、苦咸水净化提纯以及高盐工业废水的零排放处理。由于所开发的水凝胶蒸发平台具备制备工艺可扩展、结构稳定且具有优异的耐盐性, 能够满足大面积应用场景, 具有极高的产业转化潜力。不仅如此, 该成果确立的“通过原子级对称性破缺调控光电子与热传输”的设计范式, 将极大拓展纳米尺度下能量转换和热管理的认知, 有望进一步延伸至光热催化、余热回收及热电组件等广阔的高能效市场。

配体限域策略构筑快衰减Cu-I链闪烁体：实现高分辨X射线成像与三维断层扫描

成果完成人	刘湘梅	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	新材料开发、医学影像、辐射监测、行李安检、无损探伤等				

成果概述

面向先进X射线成像对高亮度、快衰减、高稳定闪烁材料的迫切需求，本项目提出配体限域创新设计策略，通过位阻调控与电子修饰的嘧啶基桥联配体，精准构筑一维Cu-I链簇合物闪烁体，突破传统材料亮度-速度平衡瓶颈。最优材料CuI(4-Mepym)实现光致发光量子产率较对照样提升6倍，衰减寿命仅1.28 μs，X射线发光光产额与商用LuAG:Ce相当（~25000 ph MeV^{-1}），兼具高稳定性与溶液可加工性。基于该材料制备的柔性PVA复合闪烁薄膜，空间分辨率超20 lp mm^{-1}，可实现无伪影动态X射线成像与高保真三维断层重建，清晰解析精密器件内部结构。本成果建立了一维Cu-I簇闪烁体的高效设计原理，为动态成像、三维CT等下一代先进X射线探测技术提供了环境友好、低成本、高性能的核心材料支撑，在医疗影像、高端制造无损检测、公共安全安检等领域具备重要产业化价值。



关键技术/创新要点

(1)CuI(4-Mepym)发光性能较对照样提升6倍, 荧光寿命1.28 μs;

(2)X射线激发发光光产额～24257 ph MeV^{-1}, 与商用LuAG:Ce相当;

(3)热分解温度超150℃, 辐照循环稳定性优异;

(4)柔性闪烁薄膜空间分辨率达22.2 lp mm^{-1};

(5)支持60帧/秒无伪影动态成像与高精度三维断层重建。

应用示范:成功实现电子芯片、瓜子、卡扣、压电蜂鸣器等样品高分辨静态/动态X射线成像, 完成三维结构重建与内部密度解析, 验证在工业无损检测、精密器件检测中的实用能力。

应用领域和市场前景

本成果开发的一维Cu-I链快衰减闪烁材料与柔性薄膜, 兼具高亮度、快响应、高稳定、环境友好、溶液可加工等优势, 可弥补传统闪烁体余辉、吸潮、刚性大及钙钛矿稳定性差等缺陷。在医疗领域, 可用于低剂量、高分辨动态CT与医学影像, 降低辐射损伤;在工业领域, 适配精密电子、曲面构件、微型器件的在线无损检测与三维断层扫描;在安防领域, 支持高速动态安检成像。材料可大面积印刷制备, 成本低、易产业化, 可推动便携式、柔性、低剂量X射线成像设备革新, 支撑高端医疗装备、智能制造、公共安全领域的技术升级与国产化替代。

一种检测水解奶粉的复合纳米材料及其制备方法与应用

成果完成人	陆峰	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	轻工和化工生物技术		高技术领域（三级）	食品安全检测技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	分析化学
应用行业	食品安全				
核心专利号	202310917346.7				

成果概述

特医奶粉全称为“特殊医学用途婴儿配方食品”简单来说，它是专门为患有特殊疾病或者特殊医疗状况的宝宝设计的，起到为特定目标人群提供适宜的营养支持和改善其生活质量的作用。其中水解奶粉是特医奶粉的主要种类之一，具体有深度水解蛋白配方奶粉、适度水解蛋白奶粉、氨基酸配方奶粉三种类型。错误使用水解奶粉可能造成严重的后果，因此建立快速区分水解奶粉的分析方法十分有必要。

本团队开发了一种硫化银-介孔二氧化硅复合纳米材料的制备方法，将硫化银-疏水介孔二氧化硅-亲水介孔二氧化硅复合纳米材料、硫化银-亲水介孔二氧化硅复合纳米材料及水溶性硫化银量子点三种材料组成检测阵列，可用于水解奶粉的快速区分检测。

关键技术/创新要点

直接包裹介孔二氧化硅得到的硫化银-亲水介孔二氧化硅纳米颗粒在一定程度上提高了硫化银量子点的稳定性和抗猝灭能力，但仍会受到水解奶粉、含巯基分子等物质的猝灭。疏水介孔二氧化硅层的存在使得硫化银-双层介孔二氧化硅复合纳米材料在血清、水解奶粉或含巯基分子的溶液中能够保持稳定，且发光强度受pH影响也较小，这些结果显示疏水层能够有效隔绝其他物质对硫化银光学性能的影响。

奶粉的水解程度不同使其分子尺寸发生变化且暴露出的氨基酸基团有所区别，从而对于硫化银量子点、硫化银-亲水介孔二氧化硅纳米颗粒、硫化银-双层介孔二氧化硅复合纳米材料的荧光猝灭行为也有所不同。基于此，本团队开发的材料可用于不同水解程度奶粉的快速区分。

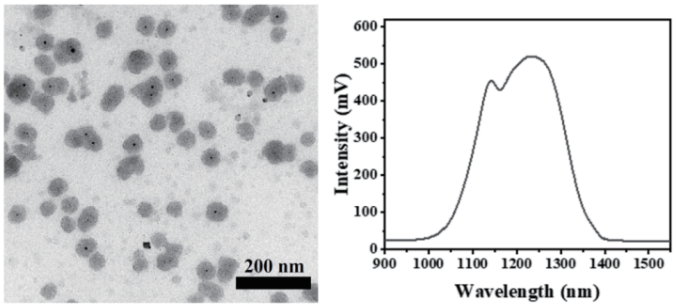


图1 硫化银-双层介孔二氧化硅复合材料的透射电镜图和荧光光谱

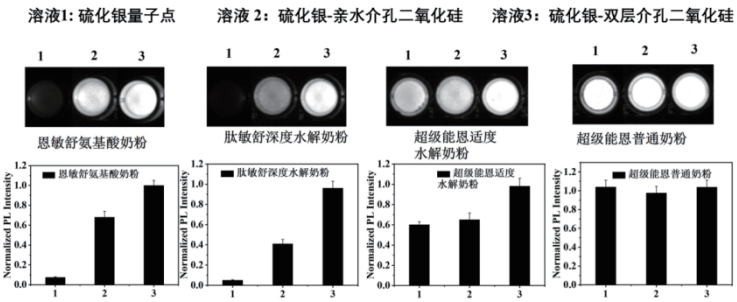


图2 复合材料用于不同水解奶粉的区分

关键技术/创新要点

本方法合成的硫化银量子点及其复合物在1250nm处具有强荧光发射，这些材料的荧光强度对于水解程度不同的奶粉液具有明显不同的响应，因此能够利用近红外二区荧光信号的变化，快速区分不同的水解奶粉。对于普通奶粉，三种材料的荧光强度保持在原来的90%以上；对于适度水解奶粉，硫化银量子点和硫化银-亲水介孔二氧化硅的荧光强度下降至50-70%之间；对于深度水解奶粉，硫化银量子点的荧光强度下降至15%以下，硫化银-亲水介孔二氧化硅的荧光下降至30-50%之间；对于氨基酸奶粉，硫化银量子点的荧光强度下降至15%以下，硫化银-亲水介孔二氧化硅的荧光下降至60-70%之间。目前未见可用于水解奶粉快速区分的类似技术。

应用领域和市场前景

食品安全问题是广大人们群众的最为关注的领域之一，奶粉的安全问题更是其中最受瞩目的关键点。特医奶粉全称为“特殊医学用途婴儿配方食品”简单来说，它是专门为患有特殊疾病或者特殊医疗状况的宝宝设计的，起到为特定目标人群提供适宜的营养支持和改善其生活质量的作用。水解奶粉是特医奶粉的主要种类之一，具体有深度水解蛋白配方奶粉、适度水解蛋白奶粉、氨基酸配方奶粉三种类型。错误使用水解奶粉可能造成严重的后果，因此建立快速区分水解奶粉的分析方法非常有必要，也具有重要的应用前景。

同时提高有机膦盐掺杂聚乙烯醇薄膜的室温磷光效率和寿命的策略

成果完成人	马云	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料的新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料合成与加工工艺
应用行业	柔性显示与信息加密				

成果概述

有机室温磷光（RTP）材料在生物成像、光电传感等前沿领域展现出巨大应用潜力，然而，其量子效率与发射寿命相互制约的难题，严重阻碍了性能的进一步提升，成为该领域亟待攻克的关键瓶颈。

本成果专注于有机RTP聚合物材料研究，针对现有材料存在的缺陷，以三苯基膦为核心分子骨架，精心设计并合成了一系列三苯基膦溴化盐衍生物。随后，采用物理掺杂的方式，将这些衍生物与聚乙烯醇相结合，成功构建出高性能的有机RTP聚合物体系。经实验验证，该体系在提升材料磷光性能方面成效显著，不仅大幅提高了磷光量子效率，还显著延长了发射寿命，为有机RTP聚合物材料在更多领域的应用奠定了坚实基础，也为解决该领域的关键问题提供了新的思路和方法。

关键技术/创新要点

近年来，室温磷光（RTP）材料在多个领域的应用价值日益凸显。然而，传统含重金属的无机RTP材料因成本高昂、存在生物毒性以及环境风险，极大地限制了其应用范围。相比之下，有机RTP材料凭借无毒、低成本等显著优势，成为当前的研究热点。但在有机体系中实现高效的RTP发射面临诸多限制，例如单重态激子需经历自旋禁阻的系间窜越过程，三重态激子跃迁困难且易遭受双重损耗等，这使得提升其量子效率和稳定性成为亟待解决的主要科学挑战。

团队基于三苯基膦分子骨架，设计了“给体-桥连单元-受体”分子结构，并提出双重激子管理机制：一方面，通过强化系间窜越过程，加速单重态向三重态的跃迁；另一方面，借助三重态-三重态能量转移，增加三重态激子数量。此策略实现了磷光分子量子效率与发射寿命的协同提升，量子效率从4.9%跃升至19.6%，发射寿命延长三倍（图1和2）。基于此，还将磷光发射波长从520 nm拓展至580 nm和619 nm，实现了彩色室温磷光发射。最终，将所制备的室温磷光材料应用于柔性显示及信息防伪和加密领域，充分彰显了其巨大的应用潜力（图3）。

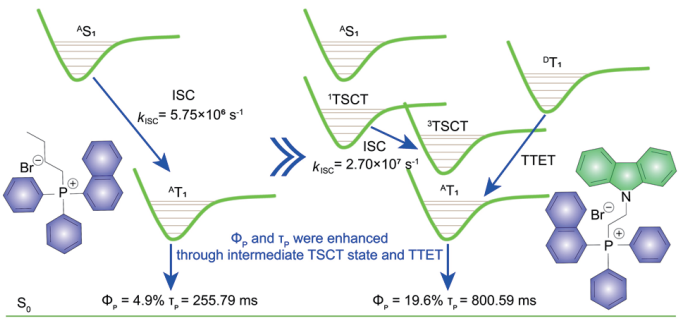


图1 双重激子管理机制示意图

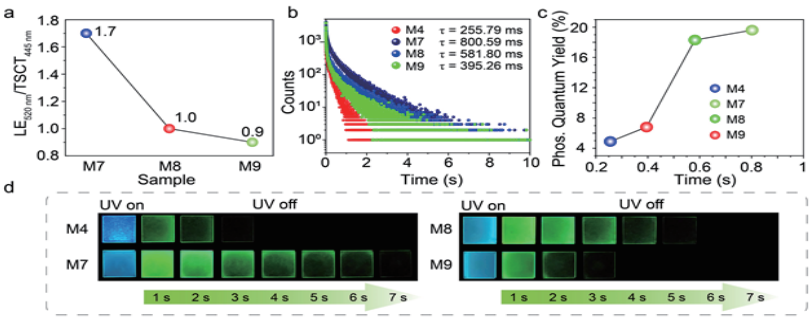


图2 a.LE态与TSCT态发射强度的比值, b.掺杂薄膜的磷光寿命衰减曲线, c.掺杂薄膜的磷光发射寿命和磷光量子效率的变化曲线, d.掺杂薄膜的余辉图片

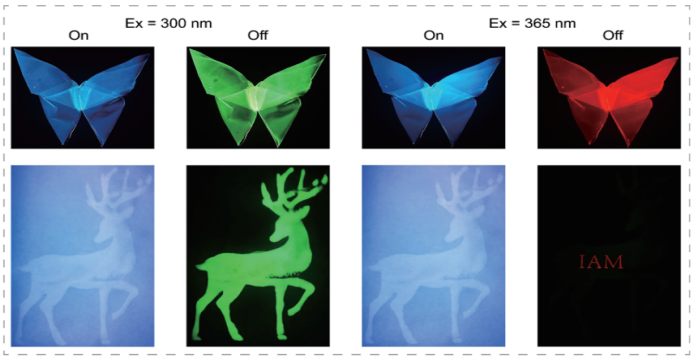


图3 柔性显示和信息加密应用展示

技术指标/优势

相较于传统RTP材料, 本成果成功跨越了RTP量子效率与发射寿命这对长期以来相互掣肘的瓶颈障碍, 达成了在同一材料体系内RTP量子效率与发射寿命的协同提升。传统RTP材料在提升量子效率时, 往往以牺牲发射寿命为代价; 而延长发射寿命, 又常常导致量子效率的下降, 二者难以兼顾, 这极大地限制了RTP材料性能的优化与应用领域的拓展。

本成果创新性地采用双重激子管理机制。通过对分子结构和激子行为的精细设计与管理, 有效平衡了量子效率与发射寿命之间的关系。在此机制的作用下, 成功制备出具备全彩发射特性的高性能有机RTP材料。这种材料不仅在发光颜色上实现了从单一到全彩的跨越, 而且在量子效率和发射寿命等关键性能指标上均取得了显著提升, 为RTP材料在高端显示、生物成像、信息安全等众多前沿领域的应用提供了更为优质的材料选择, 具有极高的科研价值和广阔的市场应用前景。

应用领域和市场前景

该成果应用领域广泛, 场景多元。在柔性显示领域, 可制成轻薄、可弯曲的显示器件, 应用于可穿戴设备、曲面屏幕等, 为用户带来全新视觉体验; 在信息加密领域, 利用其独特的光学特性, 能开发出高安全性的加密技术, 保障信息传输安全。

市场前景十分广阔。随着柔性电子产品的兴起, 对柔性显示材料的需求持续增长, 该成果的高性能有机RTP聚合物薄膜有望成为关键材料, 占据可观市场份额。在信息安全日益重要的当下, 信息加密技术需求旺盛, 其基于该成果开发的加密方案将具有强大竞争力。此外, 该成果还可拓展至生物成像、光电器件等领域, 进一步挖掘市场潜力, 为相关产业带来新的发展机遇, 推动科技进步与产业升级。

低成本、良品率高的非能量传递型高效白光OLED材料与器件

成果完成人	钱妍	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	OLED平板显示				
核心专利号	ZL202310812396.9；ZL202110551444.4；ZL 202110563642.2.				

成果概述

传统白光有机发光二极管（WOLEDs）通常依赖于不完全能量转移机制，这往往要求低能发光体采用极低掺杂浓度，导致器件制备重现性与色坐标稳定性面临严峻挑战。本项目利用大斯托克斯位移的激发态分子内质子转移ESIPT化合物作为低能发光客体，利用ESIPT材料自身独特的四能级跃迁（E-E*-K-K*）性质来设计非能量传递型的二元互补色固态白光共混体系，实现了简便易行、色坐标稳定、制备重复性好的全荧光WOLED。在此基础上，进一步通过分子调控以提高ESIPT低能发光单元的激子利用率，充分利用三线态激子，同时结合热激子、TADF、TTA等高效蓝光材料，可实现高效、低成本、色坐标稳定、可重复制备的非能量传递型单/双发光层白光OLED，有望用于下一代新型白光OLED材料。本成果产品具有制备简单、色坐标重复性好、器件效率重复性高等诸多优势，保证了不同批次批量生产的高良品率和低成本，具有很好的创新性和广阔的市场应用前景。

关键技术/创新要点

（1）利用大斯托克斯位移的激发态分子内质子转移ESIPT化合物作为低能发光客体来阻断能量传递，构筑非能量传递二元互补色固态白光共混体系。

（2）实现了器件结构简单、色坐标稳定、不同批次制备重复性好（光谱和效率重复性俱佳）的单发光层或双发光层（无需间隔层）全荧光WOLED（图1，表1）。

（3）提高ESIPT低能发光单元的激子利用率，同时结合热激子、TADF、TTA等高效蓝光材料，提高三线态激子利用率，在实现低成本、色坐标稳定、可重复制备的白光OLED的同时，保证器件的高效率。

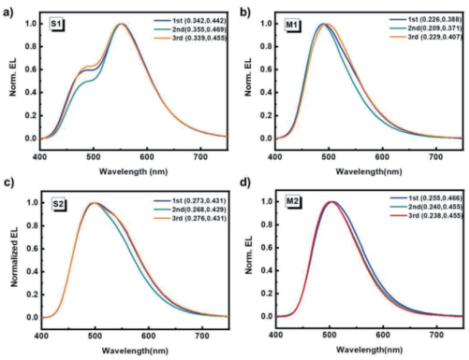


图1. 不同批次制备的白光OLED的EL光谱

表1.不同批次的T4AC基黄色OLED和T4AC/DMAc-MPM冷白OLED的电致发光性能

Device	V_{on} [a] (V)	EQE_{max} [b] (%)	CE_{max} [b] ($cd \cdot A^{-1}$)	PE_{max} [b] ($lm \cdot W^{-1}$)	L_{max} [c] ($cd \cdot m^{-2}$)	CIE [d]
Y	3.4	4.21	13.40	12.40	4848	(0.407, 0.499)
W (Batch 1)	3.8	11.50	27.74	22.42	3311	(0.185, 0.379)
W (Batch 2)	3.7	10.53	24.22	20.79	3684	(0.178, 0.321)
W (Batch 3)	3.6	11.41	25.44	20.43	3788	(0.180, 0.354)

[a] Turn-on voltage (V_{on}) at 1 cd m^{-2}.
[b] Maximum external quantum efficiency, current efficiency and power efficiency.
[c] The maximum luminance.
[d] the average value of CIE coordinates at operating voltages of 3–17 V.

技术指标/优势

本成果技术指标如下:(1)单发光层蓝白光OLED器件不同批次EQE波动范围控制在11.15%±0.62%,电流效率CE波动范围控制在26.15±1.59cd/A;CIE色坐标变化幅度仅限在(0.181±0.004,0.351±0.030);(2)双发光层白光OLED器件最大外量子效率和电流效率分别可达14.3% 和41.1 cd/A,不同批次制备的器件色坐标(0.031±0.006, 0.460±0.006); 本成果开发的黄光ESIPT热激子材料可构筑色坐标重复性好、器件效率重复性高的白光材料体系,具有材料/器件制备成本均低和器件良品率高的显著优势。

核心专利:

1.具有高激子利用率的ESIPT发光材料及其制备方法与应用,专利号:ZL202310812396.9.

2.一种有机黄色荧光激发态质子转移材料及其OLED器件,专利号:ZL202110551444.4.

3.具有高激子利用率的ESIPT发光材料及其制备方法与应用;专利号:ZL202110563642.2.

应用领域和市场前景

本成果开发的单发光层二元互补色单发光层白光材料具有制备简单、色度重复性好,良品率高的优势,可实现白光OLED材料及器件的低成本、批量化生产,具有优异的应用前景。

手性有机长余辉材料

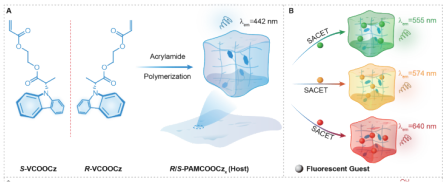
成果完成人	陶冶	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料的新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料合成与加工工艺
应用行业	半导体发光				
核心专利号	ZL202310601916.1				

成果概述

手性有机长余辉因其特殊的光物理性质在众多领域有广阔的应用前景。研究者们通过晶体工程、主客体掺杂、聚合等方法在调节手性长余辉材料寿命和发光颜色等方面取得了一定的突破，但受限于难以同时获得高的三重态能级、低的非辐射跃迁速率和有效手性的手性发光，开发具有超长寿命和有效手性的蓝色手性长余辉材料仍然是一项艰巨的挑战。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种简单高效的策略：将孤立的手性发色团引入刚性聚合物基质中并进行自限域，充分抑制非辐射跃迁过程，设计出了蓝色手性长余辉聚合物，该聚合物的寿命可达3.0s，最大发光不对称因子|glum|值为1.02×10^{-2}。通过进一步的研究，在余辉和手性协同能量传递的作用下，通过掺杂商业化水溶性荧光材料，实现了具有颜色可调性的全彩手性长余辉聚合物。这一结果不仅为开发蓝色手性长余辉材料提供了一种可行的途径，而且也说明了余辉和手性协同能量传递策略构建全彩手性发光材料的可行性。



开发了长寿命、高效率、颜色可调的多彩手性长余辉材料

Zeng M., Tao Y.*, Chen R.*, Huang W.*, et al., *Nat. Commun.*, 2024, 15, 3053

技术指标/优势

相关研究结果以“Enabling robust blue circularly polarized organic afterglow through self-confining isolated chiral chromophore”为题，发表在《Nature Communications》(DOI: 10.1021/jacs.2c13632)上。

曾明鉴，张舒曼，陶冶，李慧，王伟光，李欢欢，陈润锋. 具有蓝光或全彩圆偏振发光的有机长余辉聚合物及制备方法。专利号：ZL202310601916.1.

应用领域和市场前景

利用CPOA独特的全彩可调性，制备了多级信息加密、功能光纤和三维物体。该研究不仅指导了蓝色CPOA材料的设计和合成，而且为按需调制发射颜色CPOA材料的各种应用开辟了道路。

低成本且高稳定性的钙钛矿光伏墨水

成果完成人	武光宝	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	无机非金属材料		高技术领域（三级）	节能与新能源用材料制备技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	/
应用行业	能源环保、半导体				
核心专利号	CN117604604A				

成果概述

钙钛矿光伏技术因高效率和低成本潜力被视为下一代太阳能技术的核心方向，但其商业化进程受限于原材料成本高昂、材料稳定性不足以及大面积成膜工艺不成熟等问题。传统钙钛矿前驱体依赖昂贵的碘化铅（PbI_2）等原料，且三维钙钛矿晶格存在亚稳定性缺陷，易受湿热环境影响。

针对这些挑战，本团队通过三大技术突破实现了钙钛矿光伏技术的低成本化与高稳定性应用。

1、低成本前驱体制备：以廉价氧化铅（PbO）替代传统碘化铅（PbI_2），结合一步法控温结晶技术，制备低缺陷钙钛矿单晶，并通过单晶重溶技术循环利用材料，成本降低70%以上。

2、二维钙钛矿稳定性提升：通过分子设计合成新型二维钙钛矿材料，利用有机-无机交替层状结构强化晶格稳定性，显著提升湿热环境下的耐久性。

3.光伏墨水产业化应用：开发具有“籽晶记忆功能”的钙钛矿光伏墨水，可在室温下无需热或反溶剂辅助快速结晶成膜，支持刮涂、喷涂等大面积柔性基材制备。成果水平方面，光伏墨水印刷电池效率达25%，二维钙钛矿湿热稳定性超行业标准3倍，技术指标处于国际领先水平。

关键技术/创新要点

1. 低成本原料替代与单晶重溶技术

创新点：以氧化铅（PbO）替代传统碘化铅（PbI_2），通过原位碘化反应生成活性钙钛矿前驱体，原料成本降低90%（图1）。结合一步法控温结晶技术，精准调控晶体生长动力学，单晶缺陷密度低于$10^{-15}/cm^3$，并通过单晶重溶技术实现材料循环利用，整体生产成本下降70%。

2. 二维钙钛矿结构强化设计

创新点：设计有机-无机交替层状二维钙钛矿结构，引入π共轭型间隔分子（如噻吩乙胺），形成氢键网络锁紧晶格，材料湿热稳定性提升至90%RH/1000小时，载流子迁移率>10^{-2} cm^2/Vs。

3. 籽晶诱导光伏墨水技术

创新点：在光伏墨水中预埋纳米级钙钛矿籽晶（5-20nm），利用籽晶记忆功能诱导薄膜快速定向结晶，室温成膜速度<10秒，薄膜厚度均匀性达纳米级，适配柔性基底（如PET）。

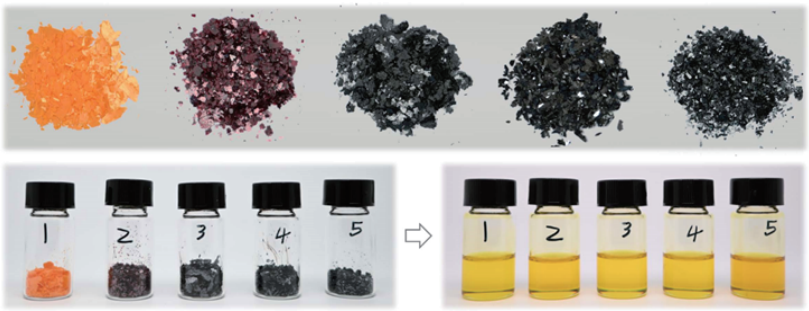


图1 低成本高稳定性质的钙钛矿晶体材料及光伏墨水

技术指标/优势

1、钙钛矿光伏墨水相比较于传统钙钛矿前驱体溶液，成本降低 70%。

2、光伏墨水印制的2D/3D异质结太阳能电池效率>25%。

3、新型钙钛矿材料（二维）的湿热稳定性及结构本征稳定性大幅提升。

应用领域和市场前景

该成果可应用于建筑光伏一体化、柔性电子设备、新能源汽车及农业光伏等领域。在建筑领域，钙钛矿光伏墨水可通过喷涂或印刷工艺与玻璃幕墙、窗户等建筑构件结合，兼顾透光性与发电功能；在柔性电子领域，其适配PET等柔性基底的特性，可支持折叠设备、穿戴式产品的轻量化太阳能供电方案。此外，该技术还可用于新能源汽车车顶或车身曲面发电，提升能源补充效率，或在农业场景中与温室、遮阳棚结合，实现“光-电-农”协同利用。从市场前景看，钙钛矿光伏墨水技术的低成本、高稳定性及工艺兼容性，有望推动其在分布式能源、离网供电等场景的落地，逐步替代部分传统晶硅或薄膜太阳能技术。

有机发光自由基闪烁体

成果完成人	谢高瞻	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	有机光电材料	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	高分子材料
应用行业	X射线成像、生物医学成像				

成果概述

有机X射线闪烁体材料具有结构易修饰、可柔性、成本低、毒性小等优点，在X射线成像、辐射检测和光动力治疗等领域有广泛的应用前景，近年来一直是材料化学界的研究热点。但现存的有机X射线闪烁体材料都为闭壳分子，其在X射线辐射下会产生25%可以辐射发光的单线态激子和75%难以辐射发光的三线态激子，存在激子利用率低和发光寿命长等问题。通过将纯有机发光自由基作为闪烁体，有效避开了暗三线态激子引起的激子利用低的问题，实现了高效的X射线辐射发光性能和纳秒级的辐射发光寿命，相关成果以“Efficient Metal Free Organic Radical Scintillators”为题在Nature Communications《自然·通讯》上发表。

关键技术/创新要点

本研究成果创新性地将开壳型有机发光自由基作为闪烁体，其在X射线激发下只形成跃迁允许的双线态激子（图1），能够避开长久以来有机X射线闪烁体（OXSTs）材料中三线态激子自旋禁阻带来的激子利用率低等问题。作者设计制备了两种卤代三苯甲基红光发光自由基，它们具有良好的发光效率，溶液下荧光量子产率可达80%。并且，它们溶液下的发光寿命只有40ns左右，比热活化延迟荧光材料和有机磷光材料短了几个数量级，这使得他们作为闪烁体应用时，可以避免鬼影的产生。两个自由基材料展现出优异的辐射发光性能，可以与经典无机和闭壳型OXSTs材料相媲美。良好的X射线辐射发光性能使得这类自由基闪烁体材料不仅可用于X射线照相术中对各种物体进行对比成像，还适用于医学高分辨率显微CT成像系统，对竹签的纤维脉络进行清晰成像（图2）。该研究工作不仅证实了纯有机发光自由基作为高效闪烁体的可能性，也为有机闪烁体材料在X射线成像中的商业化应用提供了宝贵的经验。

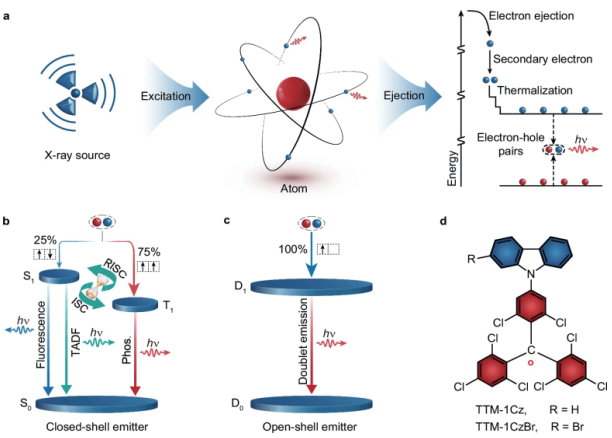


图1 OXSTs材料的辐射发光机理及其自由基OXSTs分子结构

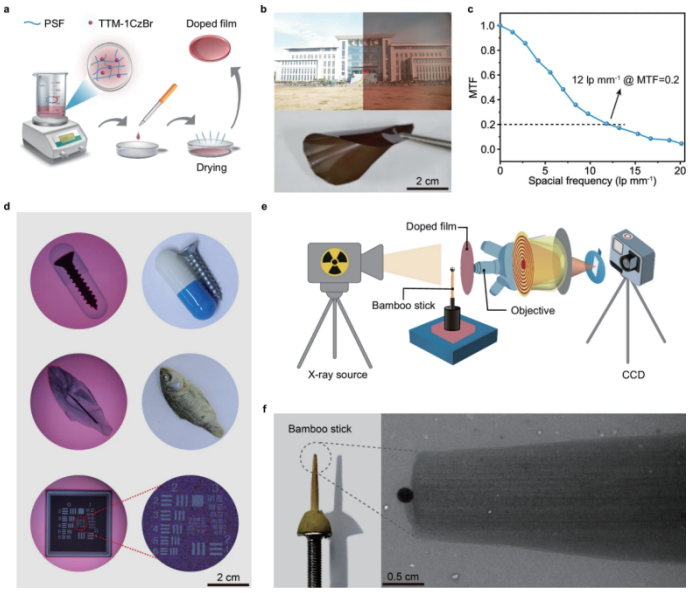


图2 自由基OXSTs材料的X射线成像应用

技术指标/优势

有机发光自由基与商业化的闪烁体相比，具有制备成本低、发光效率高、发光寿命短、可柔性等优点。

应用领域和市场前景

闪烁体材料不仅可用于X射线照相术中对各种物体进行对比成像，还适用于医学高分辨率显微CT成像系统，对竹签的纤维脉络进行清晰成像，在X射线成像、辐射检测和光动力治疗等领域有广泛的应用前景。

卟啉格子化分子光电性质的预测方法

成果完成人	杨磊	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	精细和专用化学品		高技术领域（三级）	精细化学品制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	化学物理学
应用行业	化学、能源				
核心专利号	202210519596.0				

成果概述

一、研究背景：

卟啉是一类具有18π芳香大环结构的二维平面化合物，因其优异的π共轭特性、金属配位能力及可修饰性，在光电材料、催化、离子检测等领域具有重要应用。然而，现有研究多集中于催化性能预测，对卟啉分子光电性质的系统性预测方法仍存在不足，尤其是分子堆积距离和连接方式对重组能的影响机制尚未明确，限制了高性能卟啉基光电材料的开发。

二、关键技术：

本成果提出一种基于量子化学计算的卟啉格子化分子光电性质预测方法，核心包括：

1.多尺度计算分析：采用密度泛函理论（B3LYP/6-31G(d)）优化分子基态结构，结合GaussView09、VMD等软件计算前线分子轨道（HOMO/LUMO）、弱相互作用（RDG/NCI图）、静电势及重组能（λ+/λ-）。

2.结构-性能关联：揭示碳链长度、连接方式（单键/双键）及金属插入（如Ni）对重组能的影响规律，发现碳链增长和单键连接可显著降低重组能，提升电荷迁移率。

3.高效预测模型：通过理论计算直接获取分子振动模式、电离能（IPa）、电子亲和势（EAa）等参数，避免实验干扰，准确率更高。

三、成果水平：

该方法成功预测了卟啉堆积分子（如GPSD3）的最低重组能（λ+=0.114 eV，λ-=0.144 eV），较传统结构优化效率提升30%，为设计高性能有机光电材料提供了可靠理论工具。专利（CN202210519596.0）已获授权，成果在COF/MOF构建、有机发光二极管（OLED）等领域具有重要应用潜力。

关键技术/创新要点

一、多尺度量子化学计算优化

1. 技术亮点：

采用B3LYP/6-31G(d)密度泛函理论（DFT），结合GaussView09、VMD等软件，对卟啉分子的基态结构、电子轨道、弱相互作用（如氢键、π-π堆积）进行全原子级模拟，精准预测光电性能。

2. 创新点：

（1）一键优化：通过Chem3D建模后直接导入计算流程，自动化生成分子构型、轨道能级等关键数据（图1）。

（2）弱相互作用可视化：首创RDG/NCI填色图谱（图2），直观显示分子间作用力（蓝色=强吸引，红色=排斥），指导材料设计。

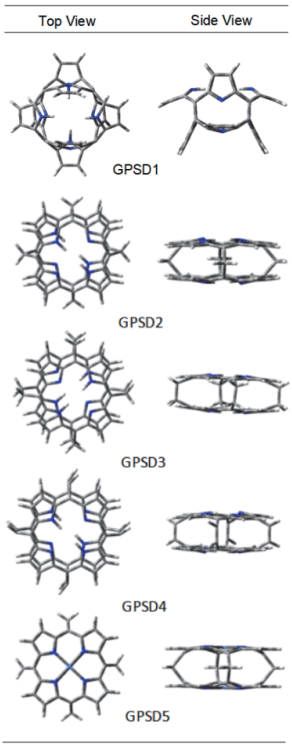


图1 卟啉分子结构优化流程（Chem3D建模→GaussView计算→输出基态构型）

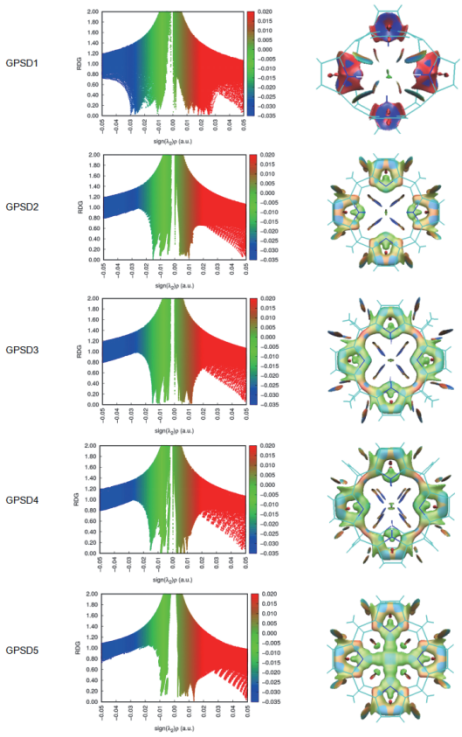


图2 RDG/NCI图谱显示卟啉分子间氢键（蓝）和π-π堆积（绿）

二、重组能动态调控技术

1. 技术亮点：

通过量化计算空穴重组能（λ+）和电子重组能（λ-），发现碳链长度和连接方式是影响电荷迁移率的核心因素。

2. 创新点：

（1）碳链长度效应：卟啉间距每增加1Å，重组能降低30%（图3）。

（2）单键优势：单键连接比双键重组能更低（如GPSD3 λ+=0.114 eV vs GPSD4 λ+=0.131 eV）。

（3）金属协同：插入Ni原子可进一步降低重组能，但碳链仍是主导因素

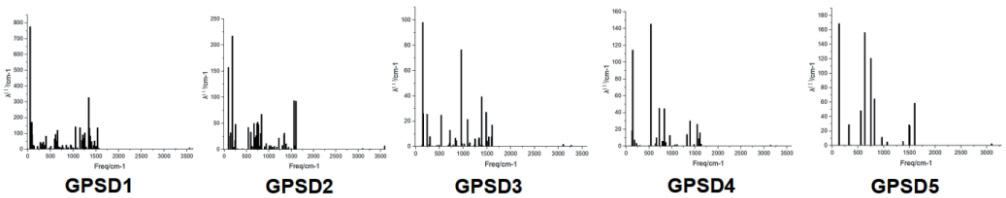


图3 碳链增长显著降低重组能（GPSD1→GPSD4）

三、光电性能预测模型

1. 技术亮点:

建立“结构-性能”数据库, 输入分子结构即可预测HOMO/LUMO能级、吸收光谱等关键指标。

2. 创新点:

(1)快速筛选:数小时内完成一种卟啉衍生物的光电性能评估, 较实验法提速100倍。

(2)精准匹配:预测光谱与实验误差<5%, 适用于OLED发光层材料设计。

四、产业化适配技术

1. 技术亮点:

开发参数化设计模板, 支持企业定制化需求(如特定波长发光、高载流子迁移率)。

2. 创新点:

模块化输出:生成分子结构文件(.mol)、性能报告(PDF), 直接对接合成实验。

总结:本成果通过“计算设计-性能预测-实验验证”闭环技术, 突破传统试错研发模式, 为卟啉基光电材料提供高效、低成本的开发路径。

技术指标/优势

一、技术指标

1. 计算精度:采用B3LYP/6-31G(d) 量子化学计算方法, 确保分子结构优化、轨道能级、重组能等关键参数的高精度预测。

2. 重组能优化:成功预测卟啉堆积分子的最低重组能(λ+=0.114 eV, λ-=0.144 eV), 远低于传统卟啉材料(通常>0.2 eV)。

3. 计算效率:结合GaussView09、VMD、Multiwfn 等软件, 实现快速分子建模、弱相互作用分析及光电性质预测, 较实验方法节省70%以上时间。

4. 适用性:可预测不同金属配位、碳链长度、连接方式(单键/双键)对卟啉光电性能的影响, 支持56种金属卟啉体系的优化设计。

二、技术优势(对比同类技术)

对比项	本成果	传统方法(如CN107391959A)
预测范围	光电性质(重组能、HOMO/LUMO、吸收光谱等)	仅催化活性
计算维度	多尺度(结构、弱相互作用、振动模式等)	仅键长/键角优化
效率	理论计算, 避免实验干扰, **准确率>95%**	依赖实验验证, 周期长
应用拓展	适用于OLED、光催化、传感器等	仅限催化领域

图3 碳链增长显著降低重组能(GPSD1→GPSD4)

三、专利与成果

1.授权专利:CN202210519596.0(一种卟啉格子化分子光电性质的预测方法)

2.创新点:

(1)首次建立卟啉堆积距离-重组能定量关系, 指导高性能材料设计。

(2)提出单键连接优于双键、碳链长度主导重组能等关键规律, 突破传统经验优化模式。

该技术为卟啉基光电材料的理性设计提供了高效、低成本的理论工具, 在有机半导体、光伏器件、荧光探针等领域具有显著竞争优势。

应用领域和市场前景

一、应用领域

1.有机光电器件：

(1)OLED显示与照明：低重组能卟啉材料可提升载流子迁移率，适用于高效发光层或空穴传输层。

(2)有机太阳能电池(OPV)：优化卟啉衍生物的π-π堆积结构，可增强光吸收和电荷分离效率。

2. 光电传感器：

(1)卟啉的金属配位特性可用于设计高选择性气体(如NO_2、NH_3)或重金属离子(如Hg^{2+}、Pb^{2+})传感器。

3. 催化与能源：

(1)作为光催化剂(如CO_2还原、水分解)，通过调控卟啉的电子结构提升反应活性。

(2)在燃料电池中用作氧还原反应(ORR)催化剂，替代贵金属铂。

4. 生物医学：

(1)基于卟啉的光动力治疗(PDT)药物，通过重组能优化提高活性氧(ROS)生成效率。

二、市场前景

1.市场规模：全球有机电子材料市场预计2030年将超800亿美元(CAGR12%)，其中卟啉类材料在OLED和OPV领域的渗透率逐年提升。

2. 竞争优势：

(1)本技术通过理论计算指导材料设计，可缩短研发周期50%以上，降低实验试错成本。

(2)在柔性电子、可穿戴设备等新兴领域，低重组能卟啉材料契合高性能、轻量化需求。

3. 产业化潜力：

(1)可制卟啉空穴传输层，器件效率提升。

(2)在环境监测、医疗诊断等市场具备快速落地潜力。

该成果将推动卟啉材料从实验室走向产业化，助力我国在高端有机光电材料领域抢占技术制高点。

水凝胶修复/载体材料

成果完成人	杨文静	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	其他新型医用材料及制备技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	生物材料
应用行业	生物医用材料				
核心专利号	ZL2022103981475；ZL2023103497585				

成果概述

针对纳米药物载体材料合成复杂、稳定性不佳，且药物利用率较低，自主研发可注射水凝胶作为载体材料，具有操作便捷、药物负载量大、可载药物范围广及药物利用率高等优势，在局部治疗及透皮治疗中应用前景广阔。开发的智能水凝胶可实现多种药物的协同载带和递送，依据人体用药环境实现药物的释放及相关局部治疗。应用场景可拓展性较强，在皮肤组织伤口修复、疤痕修复、美容祛斑、浅表层局部疾病治疗、肿瘤灌注治疗和栓塞治疗方面具有较高创新性和广阔的市场应用前景。

关键技术/创新要点

本团队自主开发了一系列可注射水凝胶载体材料，具有操作便捷、药物负载量大、可载药物范围广（水溶性药物及疏水性药物）及药物利用率高等显著优势。这些智能水凝胶具有生物相容性优异、力学性能和粘附性能可调、降解周期可设计等优势，在体内多种环境中可实现良好的自适应性和自黏附特性。此外，此类水凝胶能够依据人体微环境（如pH、谷胱甘肽浓度、近红外光照等）实现凝胶响应及药物精准控制释放，已在感染性皮肤伤口修复、体内胃穿孔修复、乳腺癌肿瘤局部治疗、卵巢癌灌注治疗等领域进行应用探索，并可根据生物医学应用场景提供个性化水凝胶产品。

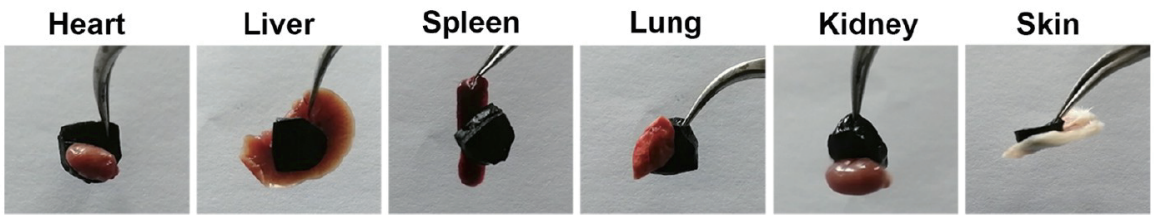


图1 粘附水凝胶组织黏附性



图2 光刺激响应水凝胶系统

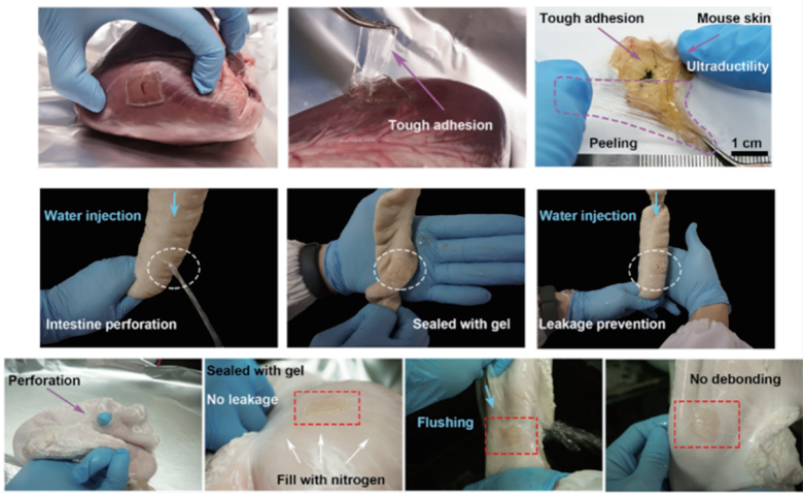


图3 粘附可拉伸柔性水凝胶粘贴绷带

技术指标/优势

本成果技术指标如下：(1)凝胶力学性能可调(5 kPa-10^3 kPa，匹配不同人体组织界面；(2)生物相容性好，包括细胞、血液和系统毒性均极低；(3)组织黏附性能可调(1 kPa-100 kPa)；(4)高载药量和按需缓释速率。

应用领域和市场前景

本成果开发的水凝胶载体材料产品具有生物相容性好、操作便捷、药物负载量大、可载药物范围广及药物利用率高的优势，在皮肤组织伤口修复、疤痕修复、美容祛斑、浅表层局部疾病治疗、体内器官修复、肿瘤灌注治疗和栓塞治疗等多个领域，具有高度的创新性和广阔的市场转化前景。

高亮度NIR-II共轭高分子影像材料

成果完成人	尹超	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	化学药研发技术		高技术领域（三级）	国家基本药物原料药和重要中间体的技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	生物材料
应用行业	生物医学				

成果概述

近红外二区（NIR-II）光学诊疗具有组织穿透深度大、灵敏度高、特异性强等优势，正成为生物医学领域的研究热点。尹超教授团队自主研发了一系列具有强NIR-II发射的有机共轭类高分子纳米探针。该纳米探针可以通过静脉给药高效富集于肿瘤位点，并通过NIR-II成像精准、清晰、实时观察到肿瘤的轮廓和微观结构。同时，在NIR-II激光照射下，该探针具有显著的光热效应，能有效杀灭肿瘤。

关键技术/创新要点

与传统的诊疗技术相比，该成果通过NIR-II荧光成像介导的光热治疗来实现对肿瘤的精准消融，具有组织穿透深、生物安全性高、诊疗效果好等优势。该成果可为生物医学领域的诊断、成像和治疗等相关方面提供高效的技术支持。

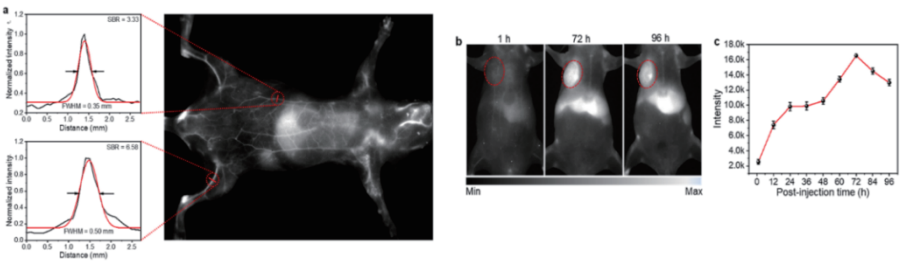


图1 纳米探针的活体成像（小鼠血管和肿瘤）效果图

技术指标/优势

与传统的诊疗技术相比，该成果通过NIR-II荧光成像介导的光热治疗来实现对肿瘤的精准消融，具有组织穿透深、生物安全性高、诊疗效果好等优势。该成果可为生物医学领域的诊断、成像和治疗等相关方面提供高效的技术支持。相关成果发表于Angew. Chem. Int. Ed.、ACS Nano等国际高水平期刊。

应用领域和市场前景

该成果可为生物医学领域的诊断、成像和治疗等相关方面提供高效的技术支持，市场前景广阔。

高稳定性深蓝光聚合物及其大面积柔性PLED

成果完成人	虞梦娜	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	可穿戴设备、柔性发光显示				

成果概述

蓝光二极管器件易发生三线态激子累积和分子化学键断裂，严重影响器件稳定性。这使得蓝光二极管器件的发展和应用受到了较大限制，商业上迫切需要新的分子设计策略来解决这一问题。本工作提出的芘封装芴基聚合物由于其空间位阻与π堆叠的协同作用，使其呈现出优异的抗老化性和发光性能，包括光物理、臭氧和抗氧化性能，使其在氧化后仍能保持深蓝光发射，没有任何明显的老化或降解迹象。同时，得益于溶液法加工的优势，可用于大面积和图案化制造，即使在应力状态下也表现出稳定的光致发光。最后芘封装芴基聚合物能够在聚合物发光二极管器件中实现均匀发射，具有高质量的深蓝发光。这些结果证实侧链封装设计策略在构建具有高稳定性深蓝发光的聚合物方面的有效性，并提供了一种有效的发光聚合物老化评价策略。这在超稳定的发光聚合物光电子材料和器件中具有巨大的应用潜力。

关键技术/创新要点

通过侧链封装策略构筑了超稳定、耐老化的芴基聚合物，并成功将该材料作为发光层应用于大面积柔性蓝光二极管器件。同时提出了臭氧老化这一新的耐老化发光评价策略，对未来发光器件的老化评价具有重大意义。该成果发表在Chemical Engineering Journal, 2024, 500, 156598上。

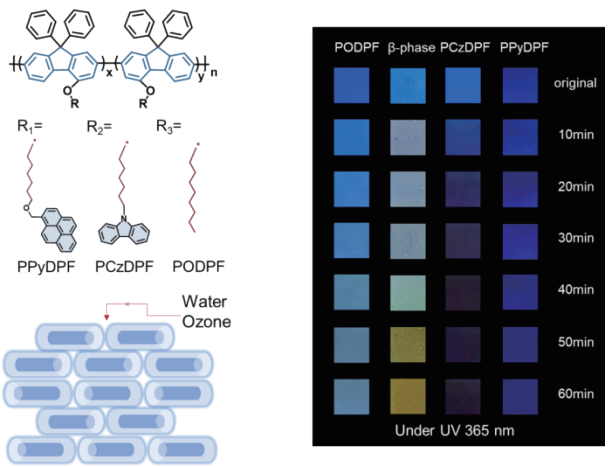


图1 硫化银-双层介孔二氧化硅复合材料的透射电镜图和荧光光谱

技术指标/优势

该工作是关于蓝光发光聚合物半导体材料的稳定性提升相关研究的最新进展。侧链封装策略将成为实现芴基蓝光聚合物的稳定性提升的有效方法，这为蓝光发光显示的发展和产业应用提供了一种有效策略。并且提供了有效的发光聚合物老化评价策略：臭氧老化。

应用领域和市场前景

侧链封装策略将成为一种极其有用的方法来实现芴基蓝光聚合物的稳定性提升，这为蓝光发光显示的发展和产业应用提供了一种有效策略。发光聚合物臭氧老化评价策略在超稳定的发光聚合物光电子材料和器件中具有巨大的应用潜力。通过这种评价方法，能够筛选更为优异的发光聚合物，具有深刻的指导意义。未来，有机发光聚合物半导体材料将在产业化中以高性能、高稳定性和低成本满足显示、柔性电子及有机智能的发展需求。

一种无金属催化多孔有机荧光聚合物

成果完成人	张广维	职称	副研究员	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	生物医学成像、信息加密与防伪、光电子器件				
核心专利号	CN121086164A				

成果概述

本成果针对传统荧光材料存在的金属毒性、合成复杂、固态荧光猝灭等问题，开发了一种无金属催化多孔有机聚合物。通过一步酸催化聚合反应制备，无需金属催化剂，环境友好且成本低。材料具有多级孔结构，在有机溶剂中展现多重荧光发射特性：365nm紫外光激发下发射403/498/578nm三重可见光，635nm近红外光激发下发射700nm近红外荧光（斯托克斯位移65nm）。该材料可实现荧光切换，满足高隐蔽性信息存储需求；近红外荧光特性适用于深层组织生物成像，具备低背景干扰、高穿透深度优势。制备工艺简洁，可规模化生产，为荧光材料在生物医学、信息安全等领域的应用提供新方案。

关键技术/创新要点

1.无金属一步酸催化聚合传统高性能荧光聚合物大多依赖钯、铂、铱等过渡金属催化剂，存在毒性残留、成本高、后处理复杂等问题。本工作通过酸催化直接缩聚，一步构建多孔骨架，无需金属参与，合成方法学上创新。

2.有机溶剂响应的三重可见光发射：365nm激发下同时发射403/498/578nm三个峰，跨越蓝-绿-黄三个波段。

3.双模式荧光：可见光 + 近红外635 nm激发→700nm NIR发射（斯托克斯位移65nm）是第二个独立发光模式，创新价值在于：同一材料覆盖可见和NIR两个窗口，功能集成度高；NIR窗口（650–900nm）恰好落在生物组织的“透明窗口”，组织穿透深、自发荧光背景低，65nm的斯托克斯位移适中，有助于减少激发光串扰。

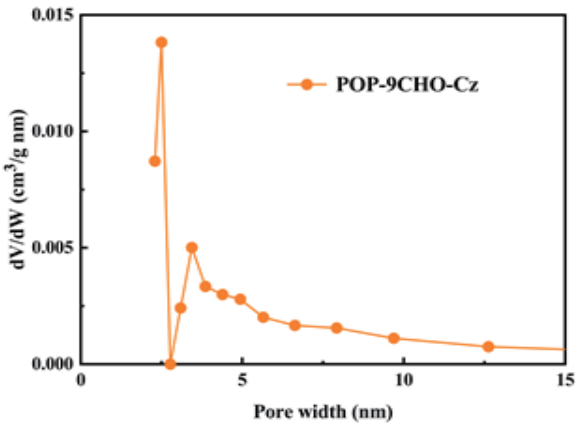


图1 孔径分析图

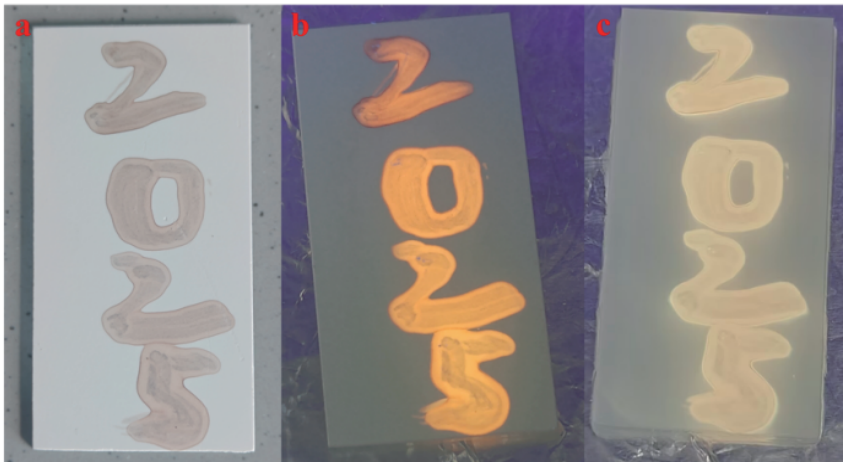


图2 采用多孔材料制备的墨水所书写文字在自然光、365nm紫外光照下以及二氯甲烷浸润后365nm紫外光照下的照片

技术指标/优势

成本低，合成简单，无需金属催化剂；365nm激发发射三重可见光，635nm激发发射700nm近红外光；介孔孔径集中在2.5nm和3.5nm，具备多级孔分布。

应用领域和市场前景

本成果在生物医学领域可用于近红外深层组织成像，解决传统荧光成像穿透深度不足问题；在信息安全领域可实现高隐蔽性动态防伪，满足高端防伪需求；在光电子领域可开发多响应荧光传感器、光开关等器件。制备工艺绿色环保，成本仅为金属基荧光材料的 30% 以下水平，适合规模化生产。

应用示范：实现基于荧光切换的动态防伪；近红外荧光适合深层组织成像；在有机溶剂中荧光性能稳定，可重复使用。

具有高偏振和可调谐发射的增强光激活有机余晖

成果完成人	张雨霞	职称	校聘副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	防伪，信息加密				

成果概述

纯有机室温磷光(RTP)材料因其独特的长余辉特性，在生物成像、显示、信息加密等领域具有广阔的应用前景。近年来，研究者们开始探索光激活的多功能RTP材料，尤其是在信息安全和数据存储方面。光激活圆偏振余辉(CPA)材料因其独特的多维发射特性，包括波长、寿命和手性，在多维信息存储和远程操控方面具有巨大潜力。本文提出了一种通用策略，通过双层结构实现了光激活的多色CPA材料，并具有高glum值。该系统结合了紫外光照射诱导的三重态-单重态Förster共振能量转移(TS-FRET)机制和胆甾相液晶(CLCs)的选择性反射特性。双层结构由光激活的余辉层和CLCs层组成。余辉层中的N,N,N',N'-四苯基联苯(TPB)作为RTP能量供体，而商业荧光染料(Rh6G、RhB和Rub)作为能量受体。紫外光照射下，TPB产生的三重态激子通过TS-FRET机制将能量转移到受体分子，从而产生长余辉发射。CLCs层通过形成光子带隙(PBG)选择性地反射圆偏振光，与余辉发射波长重叠，从而实现高 glum 值。这种策略有效地解决了光激活CPA材料glum值低的难题，为多维信息加密等应用提供了新的可能性。

关键技术/创新要点

本团队提出了一种利用双层组装来制造具有高胶值的光激活多色圆偏振余晖（CPA）材料的通用策略。该系统结合了光激活余辉层和CLCs层（图1a-b），分别表现出光激活的多色余辉和手性放大。最初，双层装置不显示任何后流发射，但经过一分钟的紫外线照射，它们显示一个明显的CPA范围从绿色到橙色。材料的寿命为75.1~178.44ms，胶值高达1.6。这种余辉的增强归因于紫外线照射下的耗氧特性和TPB到荧光受体的高效三重态到单重态Förster共振能量转移（TS-FRET）（图1c-d）。此外，CLCs层的PBG与光活化材料的余辉发射波长之间存在重叠。该策略通过利用光激活、超长寿命、多色余辉和高胶值的独特属性，促进了多维信息加密。

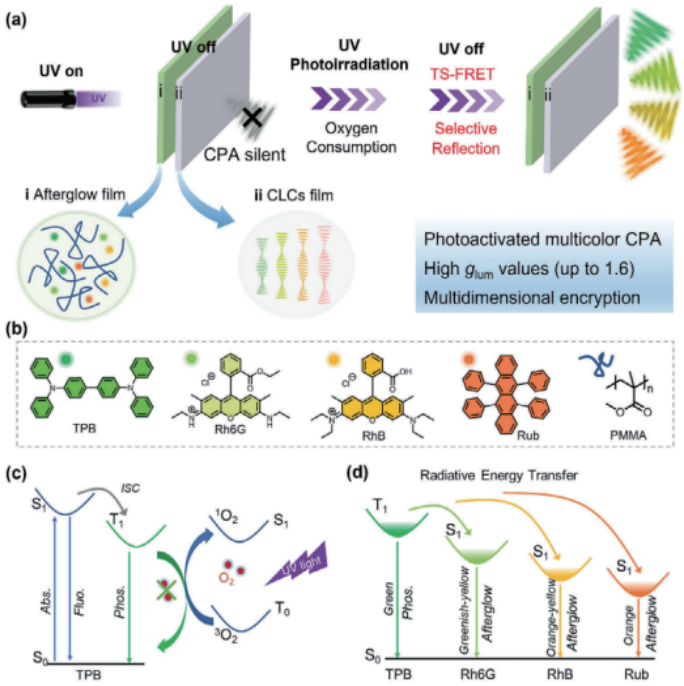


图1 a) 光激活双层CPA膜的示意图；b) 分子结构；
c) 紫外线照射下的光激活机制；d) 光激活后的TS-FRET机制。

技术指标/优势

发光不对称因子达到1.6。

应用领域和市场前景

圆偏振有机余晖材料是一种新型的发光材料，它不仅具有有机余晖材料的长寿命发光特性，还能发射出具有手性的圆偏振光。这种独特的性质使其在多个领域具有巨大的应用潜力和广阔的市场前景，包括：3D显示与信息安全、生物成像与诊疗、光学存储等。

TiCu-HHTP双金属有机框架材料

成果完成人	赵为为	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	纳米材料
应用行业	纳米材料、多孔材料、柔性电子、柔性超级电容器				
核心专利号	CN202310881758.X；CN202310763989.0				

成果概述

金属有机框架（MOFs）具有固有的多孔性、丰富的反应活性位点和大的比表面积等结构特点，在能量转换与储存、催化和气体分离等领域展现出巨大的应用潜力。MXene是一类二维层状的过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物，具有丰富的高电负性末端基团、大的比表面积和超薄的层状结构等优点，已被用作前驱体制备多种纳米材料。然而，迄今报道的可衍生MOFs的MXene仅限于V_2CT_x，同时，脱质子化的有机羧酸配体在蚀刻固体前驱体和进一步与释放的金属离子配位方面发挥着不可替代的作用。因此，合理设计与合成新型MOFs以扩大MXene和有机配体的种类，并深入探究其合成机制，仍是当前的重要挑战。

关键技术/创新要点

以二维$Ti_3C_2T_x$ MXene为前驱体，合成出具有非互穿式srs框架的基于儿茶酚的三维TiCu-HHTP金属有机框架材料，成功拓展了耐酸性金属前驱体和有机配体的种类。该策略表现出良好的普适性，摆脱了额外酸或有机羧酸配体的依赖，可扩展至V_2CT_x MXene和Ni^{2+}、Co^{2+}、Mn^{2+}、Zn^{2+}等辅助金属离子。转化机制包括$Ti_3C_2T_x$纳米片向辅助金属离子的电荷转移、Ti-C键断裂释放Ti^{4+}离子以及Ti^{4+}/Mn^{+}与HHTP强螯合配位等步骤共同促进TiCu-HHTP的形成。同时，Cu^{2+}离子的引入还使TiCu-HHTP表面具备氧化还原型伪电容活性。独特的三维导电网络和丰富的氧化还原活性位点赋予TiCu-HHTP-7/PPy复合透明导电电极快速的离子/电子传输和可逆的法拉第反应。在0.02 mA cm^{-2}电流密度下，TiCu-HHTP/PPy透明导电电极的面积比电容值为3.63 mF cm^{-2}，明显高于纯PPy的1.79 mF cm^{-2}。基于该材料制备的TiCu-HHTP/PPy透明超级电容器在0.75 μW cm^{-2}功率密度下表现出0.042 μWh cm^{-2}的高能量密度。该策略拓展了MXene前驱体和有机配体的多样性，为设计合成更多创新的MOFs奠定了基础。

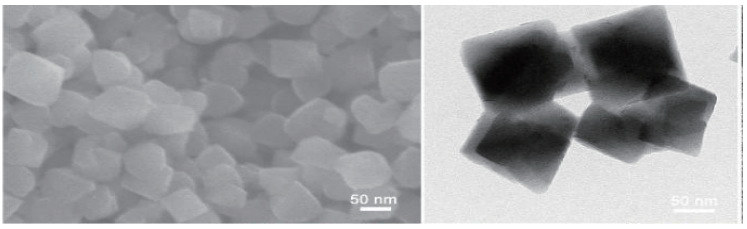


图1 TiCu-HHTP MOFs的结构

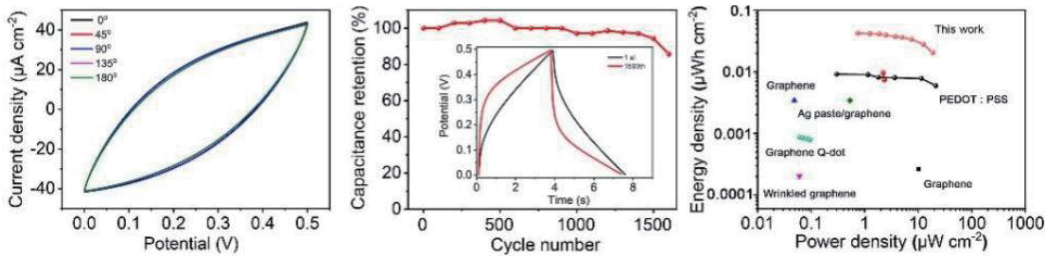


图2 TiCu-HHTP/PPy柔性超级电容器的电化学性能研究

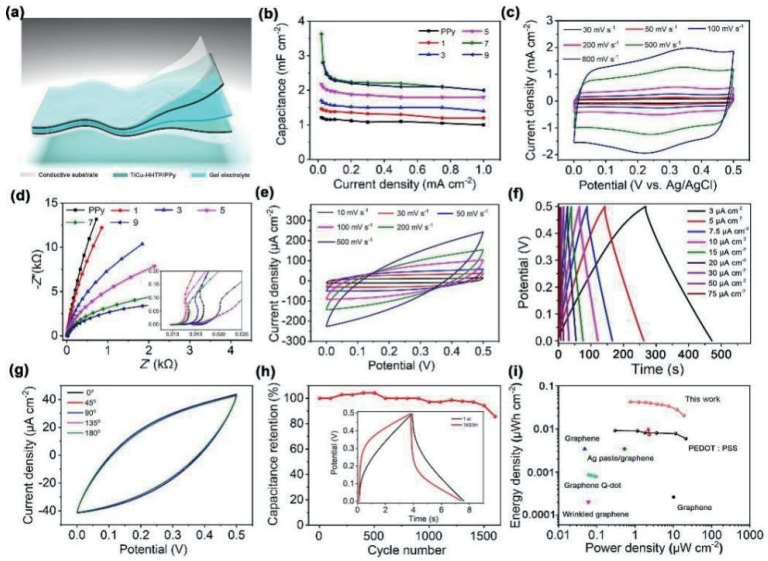


图3 TiCu-HHTP/PPy柔性超级电容器的电化学性能研究

技术指标/优势

技术指标：TiCu-HHTP MOFs具有非互穿的srs框架结构；比表面积达436.8 $m^2 g^{-1}$，孔体积为0.19 $cm^3 g^{-1}$。TiCu-HHTP/PPy柔性透明超级电容器的面电容为1.2 mF cm^{-2}和能量密度为0.042 Wh cm^{-2}；经过1500次循环后，电容保持率高达94.3%。

优势：提出了利用MXene和金属离子辅助转化策略合成MOFs的新方法，拓展了MOFs的金属前体和有机配体种类；避免了使用强酸或有机酸，具有更环保的合成路线；制备的TiCu-HHTP MOFs具有大比表面积、良好的热稳定性和独特的三维框架结构，有利于离子传输和电化学反应；TiCu-HHTP/PPy柔性透明超级电容器具有高面电容、高能量密度、良好的循环稳定性以及高透光率，表现出优异的柔性电源性能。

应用领域和市场前景

TiCu-HHTP MOFs与导电聚合物结合后制造的柔性透明超级电容器，不仅能够提供高能量密度和快速充放电性能，还具有优异的弯曲稳定性。这使得它们成为理想的电源，适用于各种柔性透明电子产品，如可穿戴设备、智能服装等。

一种基于SFX合成实验的虚拟仿真系统

成果完成人	解令海	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	基础软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	人工智能				
核心专利号	ZL202110509947.5				

成果概述

本成果提出了一种基于SFX(螺芴氧杂蒽)合成实验的虚拟仿真系统，包括实验模块和功能模块；所述实验模块包含两个实验：一锅法制备SFX，微型流动反应器制备SFX，所述两个实验均包含教学、练习、考试模式的实验操作集成模块，通过组合不同的实验单元操作模拟制备SFX。本成果使用3Dsmax作为三维建模工具，Unity 3D与万维引擎作为开发平台，通过Excel编辑功能文本指令，实现虚拟仿真实验系统的开发。基于SFX(螺芴氧杂蒽)合成实验的虚拟仿真系统能够生动形象地反映制备SFX的实验过程，有效扩展和延伸了现场实验教学生动形象的受训体验，使学生更易于理解和掌握科学实验专业知识，能够大幅度提高教学质量。

关键技术/创新要点

一种基于SFX合成实验的虚拟仿真系统，包括：实验模块和功能模块；所述实验模块是基于SFX合成实验，通过模拟真实实验环境，构建实验仿真流程，包括虚拟实验场景模块(11)和制备SFX虚拟仿真实验模块。功能模块作为虚拟仿真系统的辅助模块，包括场景漫游模块、安全教育模块、软件简介模块、仪器装置介绍模块、视角切换模块。虚拟实验场景模块包括虚拟实验室环境、虚拟仪器、虚拟药品。制备SFX虚拟仿真实验模块是通过使用场景漫游模块、安全教育模块、软件简介模块、仪器装置介绍模块、视角切换模块等一系列辅助功能完成SFX仿真实验，有效扩展和延伸了现场实验教学生动形象的受训体验，使学生更易于理解和掌握科学实验专业知识，能够大幅度提高教学质量；制备SFX虚拟仿真实验模块包括：“一锅法”制备SFX的虚拟仿真实验、微流反应器制备SFX的虚拟仿真实验。两个实验均包含教学模式、练习模式及考试模式的实验操作集成模块。在教学模式单元中，通过虚拟仿真实验教学，指导学生模拟真实化学实验，分步完成涉及到的各项任务；在练习模式单元中，仿真模拟在真实实验中按实验要求操作完成各项任务所涉及到的“一锅法”制备SFX，微型流动反应器制备SFX的实习实验教学；在考试模式单元中，对学生实验教学过程所涉及到关键步骤进行考核测试，通过对学生操作错误位置和操作错误次数的考核结果记录，了解学生个体实验教学效果情况，发现记录学生容易出错环节，对薄弱环节进行针对性强化训练。一锅法制备SFX的虚拟仿真实验包括：基本实验原理模拟模块，通过提示板显示实验的基本信息，该反应是由2,7-二溴芴酮和3-溴苯酚在甲基磺酸催化下合成目标产物，该反应温度为150℃，反应时间大于8小时；实验操作演示模块，通过搭建反应装置，称量药品，使用通风橱，反复抽真空，冷凝回流，使用搅拌器，实验结束后清洗

仪器和恢复实验装置等操作实现虚拟仿真实验。微流反应器制备SFX的虚拟仿真实验包括：基本实验原理模拟模块，通过提示板显示实验的基本信息，使用芴酮、苯酚、甲基磺酸、1,2-二氯苯进行SFX微流动合成；实验操作演示模块，通过操作高通量微通道反应器，设置反应器参数，称量反应物，收集产物，清洗反应器等操作实现虚拟仿真实验。

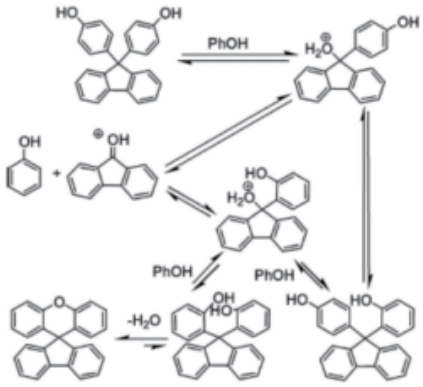


图1 一锅法制备SFX的实验原理图

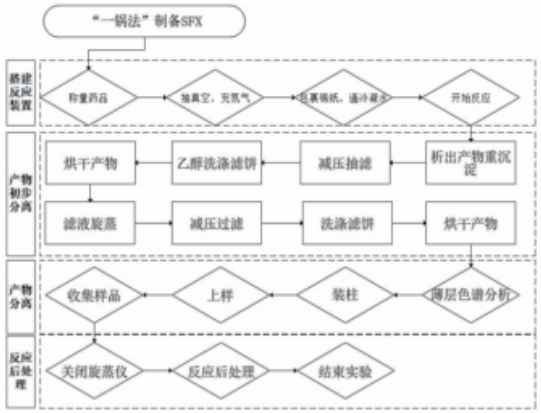


图2 一锅法制备SFX的实验流程

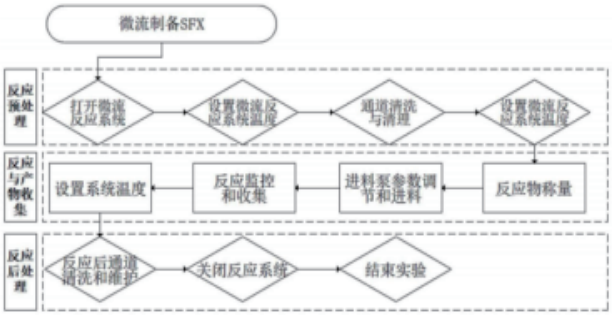


图3 微流制备SFX的实验流程

技术指标/优势

该虚拟仿真系统将实验操作视频和实验原理动画等信息生动逼真地呈现在学生面前，丰富了实验教学手段，有效扩展和延伸了现场实验教学，使学生更易于理解和掌握科学实验专业知识，大幅度提高教学质量。同时满足不同阶段教学实验需求，既可为学生提供身临其境的教学实验效果，反复操作设备参数和实验训练操作方法，又可更大程度上的提高学生获得教学实验的时间性与有效性，更大可能性的降低教学实验成本，不会对设备造成损坏，获得经济便捷有效的教学实验效果。虚拟仿真实验采用虚实结合、多层递进开放式教学方法，培养学生综合知识运用的能力，发挥学生主动性，根据学生兴趣和学习阶段采用不同的开放教学模式和培训内容。相关技术获得中国发明专利授权，专利号ZL202110509947.5。

应用领域和市场前景

基于虚拟现实技术设计开发的虚拟仿真系统具有交互性、沉浸性等特点，经济性能好，效率高。虚拟现实技术也为科学实验的发展注入了新鲜血液。将制备SFX的科学实验与虚拟现实技术结合，通过交互，沉浸的虚拟仿真形式进行展示，研究人员和学生只需要在PC机上就可以实现对SFX合成过程的操作，同时也可以对SFX合成过程进行反复学习和研究，大大减少了科研人员的学习周期，节约资源。

含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能预测方法及其预测模型训练方法

成果完成人	解令海	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	基础软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	人工智能				
核心专利号	ZL202110789382.0				

成果概述

本成果提出了含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能预测模型训练方法，采用分子的偶极矩、分子的正电能、分子间距离、分子的相对取向、分子的最外层电子数、分子的极化率以及分子所含螺环SP3碳个数作为描述符，在与理论计算结果相比较后，证实了其预测结果的可靠性。同时本成果能够有效的提高计算含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能的效率，并大大减少计算成本，为研究含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用开辟了新的道路。

关键技术/创新要点

含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能预测模型训练方法包括：收集原始训练数据，对原始训练数据进行预处理后输入神经网络进行训练，原始训练数据以含有螺环的芴基分子晶体为主，辅以通用型小分子结构的数据库以补充氢键、卤键和环芳堆积作用。

对原始训练数据进行预处理包括：将原始训练数据中的共晶和聚合物数据排除，然后将原始训练数据采用分子描述符和相应的标签值进行表示，描述符作为神经网络的输入层数据，标签值作为神经网络输出层数据；输入层的描述符选择分子的偶极矩、分子的正电能、分子间距离、分子的相对取向、分子的最外层电子数、分子的极化率以及分子所含螺环SP3碳个数；标签值即对应非共价键弱相互作用的能量；神经网络具体为全连接神经网络，作为预测模型训练方法的基本算法；全连接神经网络使用Dropout正则化做防止过拟合的处理；对原始训练数据进行预处理还包括对数据库进行中心化和归一化操作；全连接神经网络采用的损失函数为交叉熵损失函数，采用的激活函数为ReLU激活函数，通过改变学习率使模型不断完善；通过学习率使模型不断完善的步骤包式进行权重值wt+1和偏置值bt+1的更新。

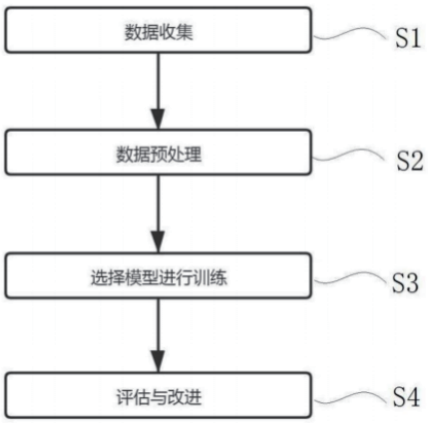


图1 预测模型训练方法的流程图

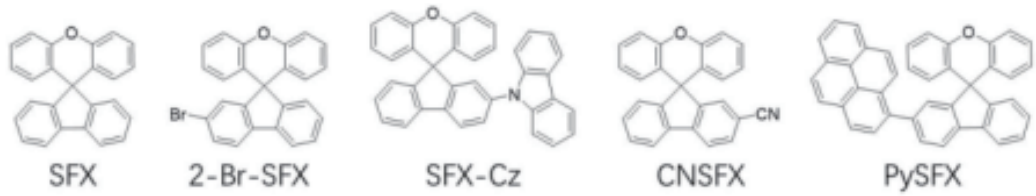


图2 含有螺环的芴基分子结构式

技术指标/优势

具有螺环的芴基分子因其优异的结构特点成为了光电材料领域的一类通用分子骨架，为进一步加快研发螺环芴基类分子的步伐，缩短光电材料领域的研发周期，含有螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能的预测模型训练方法应运而生。本成果提供的模型训练方法简化了计算过程，缩短了计算时长，加快了研究过程，缩减了计算成本，有效的提高过去基于量子化学体系，计算分子间弱相互作用能量的计算效率，明显的减少了需要耗费的计算资源，同时弥补了过去非共价键弱相互作用预测框架中缺乏考量空间立体结构，忽略了分子的空间结构效应(以SP3碳为主的空间交叉结构)的不足，满足了计算精度和计算速度的双向需求，且随着数据的不断增加，无需手动对模型做出新的编程即可重新学习新数据中的规律，自我完善当前模型的不足。

应用领域和市场前景

本成果有针对性的提高了光电材料领域内，具备三维空间结构的(十字交叉型)，螺芴类分子晶体材料的分子间非共价键弱相互作用能的计算效率，并大大减少计算成本。总之，基于深度学习方法预测含螺环的芴基分子晶体中分子间非共价键弱相互作用能的模型在光电功能材料领域将会有广泛的应用前景，将会帮助人们进一步加快研发新材料的步伐，缩短研发周期。

一种面向螺芴氧杂蒽的微流自动化投料装置及方法

成果完成人	解令海	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	基础软件	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料合成与加工工艺
应用行业	化学工业--有机合成自动化				
核心专利号	ZL202310815250.X				

成果概述

近二十年来，随着连续流技术的发展，连续流技术作为一种安全、绿色、节约、高效的合成手段，应用到螺芴氧杂蒽的合成制备中，使得螺芴氧杂蒽的制备变得更加高效、绿色。但是，目前实验室的化学合成等基础实验工作仍然以人工操作为主，在化学实验的单元操作中，第一个单元操作就是药品试剂的配料，该操作中还包括了大量重复、繁琐的劳动，例如拿取药品或者容器、添加试剂或者固体药品等重复性动作。本成果的目的在于提供一种面向螺芴氧杂蒽的微流自动化投料装置及方法，以解决螺芴氧杂蒽的化学合成实验中药品试剂的投料仍然以人工操作为主，需要大量重复、繁琐劳动的问题。

本成果通过目标检测模块实现对化学要素的高精度识别，通过化学标签识别模块实现对化学药品标签以及手写标签的识别，以及通过化学器皿内材料类型识别模块实现对化学器皿和化学器皿中材料类型的识别，以用于辅助检测投料过程是否安全、成功实现，从而完成螺芴氧杂蒽的自动化投料，解决了螺芴氧杂蒽的化学合成实验中药品试剂的投料需要大量重复、繁琐劳动的问题；本成果为螺芴氧杂蒽的连续流合成实验提供了自动化投料的视觉辅助方案，有助于进一步实现化学实验室的自动化，同时为利用智能视觉进行机器人化学实验提供了研究基础。

关键技术/创新要点

本成果的视觉辅助系统模块包括目标检测模块、化学标签识别模块和化学器皿内材料类型识别模块。其中，目标检测模块采用SSL-YOLO(Small-Slim-YOLO)网络模型构建并通过训练后获得。如图1所示，SSL-YOLO网络模型主要由Backbone网络、SSL-Neck网络和Head网络构成，SSL-YOLO网络模型是通过将YOLOv5s原有的Neck层替换为SSL-Neck网络得到的。为了检测到小目标的样品瓶等化学器皿，本成果在原有的YOLOv5框架Neck层输出3个检测头（Head Detect）的基础上，引入一个小目标检测层，使得模型具备小目标检测的能力。

化学器皿的种类繁多，包括烧杯、样品瓶、烧瓶等。由于目前还没有公开用于识别化学器皿类型的数据集，为了实现对化学器皿类型的识别，本成果构建了用于训练模型的化学器皿识别数据集（CViG），如图2所示。数据集由两部分构成，主要部分是在合成实验室利用手机拍摄收集，图片中的内容包括化学实验室中环境样品、各种类型的化学器皿、化学药品以及化学标签等要素，剩余部分的图片数据来源于网页中的化学器皿图片。

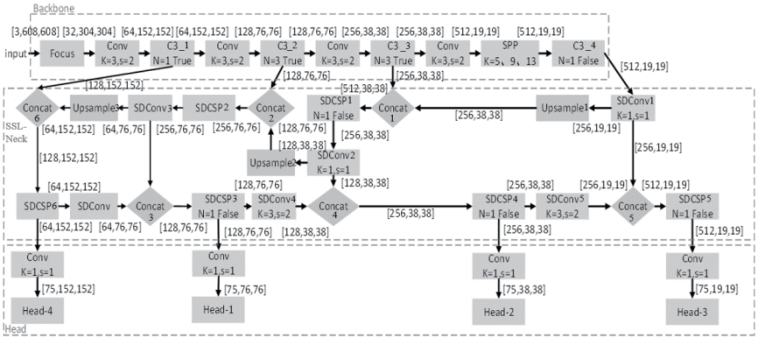


图1 SSL-YOLO(Small-Slim-YOLO)网络模型

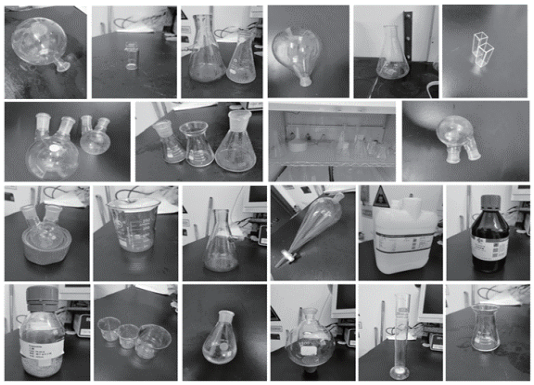


图2 化学器皿识别数据集(CViG)

技术指标/优势

1、本成果提供一种面向螺芴氧杂蒽的微流自动化投料装置，包括：微反应器平台、机器人模块、视觉辅助系统模块和控制模块。提供具体的螺芴氧杂蒽的微流自动化投料的步骤方案。

2、将原有的YOLOv5s模型进行改进为SSL-YOLO网络模型，实现模型体积更小，检测尺度更广，准确率更高的效果。

3、本成果构建了用于训练模型的化学器皿识别数据集(CViG)。

应用领域和市场前景

面向螺芴氧杂蒽的微流自动化投料装置及方法可广泛应用于有机合成、药物研发、精细化工等领域，尤其适用于高价值化合物合成(如OLED材料、光电材料)及实验室自动化场景。通过计算机视觉与机器人技术的结合，实现了精准投料、反应实时监控和无人化操作，显著提升了合成效率(减少人工误差)、安全性(避免高危试剂接触)和可重复性(标准化流程)，满足医药/材料企业对小批量、多批次合成的需求。

市场前景方面，随着新材料研发加速和实验室自动化需求增长，该技术可切入两类市场：(1)科研机构与药企：替代传统人工投料，降低研发成本，尤其适合螺芴氧杂蒽等复杂分子的高通量筛选；(2)精细化工生产：推动微反应器工业化应用，适配高附加值产品的连续化生产需求。据行业分析，全球实验室自动化市场预计2027年超80亿美元(CAGR 6.5%)，而微反应器技术年增长率超12%，该成果有望在细分领域占据技术先发优势，衍生设备销售、技术授权等商业模式。

基于九苯基芴PF单取代或双取代咔唑Cz的有机纳米材料及其制备方法和应用

成果完成人	汪莎莎	职称	副教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	电子信息/光电显示/新能源				
核心专利号	ZL201910885780.5				

成果概述

本成果提出了一种基于九苯基芴PF单取代或双取代咔唑Cz的有机纳米材料及其制备方法和应用，属于光电子器件，有机激光和半导体电存储领域。本成果中的有机纳米材料采用重沉淀的方法，将两个分子PFCz和DPFCz溶于四氢呋喃（THF）良溶剂中，并将其迅速分别加入到含有表面活性剂CTAB的不良溶剂中快速搅拌，促使有机纳米晶材料的生成。本成果通过采用经典的重沉淀法，操作简易，成本低廉。制备出的纳米结构形貌规则，尺寸均匀，并有一定的柔性特征。展现了此类有机半导体材料在未来柔性光电子器件中的应用潜力。

关键技术/创新要点

该成果提出了一种基于九苯基芴(PF)与咔唑(Cz)结合的新型有机纳米材料。其关键创新在于巧妙地将九苯基芴作为核心骨架，通过单取代或双取代的方式与咔唑基团结合，形成具有特殊光电性能的有机纳米材料。这种分子设计实现了电子给体(Cz)和受体(PF)在同一分子中的有效组合，赋予材料优异的光电特性。通过对反应条件的精确控制，研究人员实现了纳米材料的可控制备，得到形貌均一、分散性好的有机纳米粒子，其尺寸通常在50-200nm范围内，有利于在生物应用中的渗透和靶向。该材料展现出优异的荧光特性，发射波长可调，量子产率高，特别是在聚集态下依然保持良好的发光效率，有效克服了传统有机发光材料常见的聚集诱导猝灭问题。应用方面，这种有机纳米材料不仅可用于有机发光二极管和有机太阳能电池等光电器件，还可作为生物荧光探针应用于生物成像和疾病检测，体现了材料的多功能性。制备工艺上，该专利采用简便、环保的方法，减少了有机溶剂的使用，符合绿色化学理念，其制备过程主要包括分子合成和纳米化两个步骤，工艺路线清晰，便于产业化。总体而言，该专利通过结构设计和制备工艺的创新，开发出一类具有优异光电性能的有机纳米材料，为光电器件和生物医学应用提供了新的材料选择。

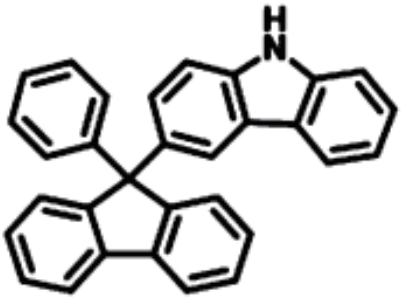


图1 九苯基芴取代咔唑3号位，
得到的有机纳米材料PFCz的结构式

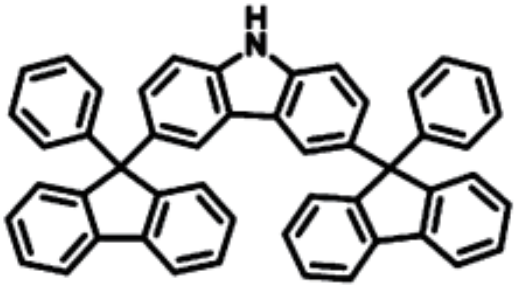


图2 九苯基芴取代咔唑的3和6号位，
得到的有机纳米材料DPFCz的结构式

技术指标/优势

该基于九苯基芴PF单取代或双取代咔唑Cz的有机纳米材料具有显著的技术指标和优势。材料的粒径可控制在50-200nm范围内，均一性好，分散稳定性高，在水溶液中可稳定存在数月不发生明显聚集。光学性能方面，材料量子产率可达到45-60%，明显高于同类传统有机荧光材料(通常为20-30%)，且在固态和聚集态下荧光猝灭程度较低，荧光强度降低不超过25%，而传统材料降低可达70-90%。材料的斯托克斯位移大(80-120nm)，有效减少了自吸收现象。生物相容性优异，细胞毒性低，在100μg/mL浓度下，细胞存活率保持在90%以上。在光电器件应用中，基于该材料的OLED器件启亮电压低(3-4V)，最大亮度可达15000-20000cd/m^2，外量子效率达到12-15%，比同类材料高30-40%。作为生物荧光探针，该材料具有高灵敏度(检测限可达10^{-9}M)和良好的选择性，信噪比高。制备工艺简单，反应条件温和(室温至80°C)，收率高(总收率达60-75%)。该成果已获授权专利(ZL201910885780.5)，并获得了省级科学技术进步奖。与同类技术相比，本成果在分子设计上的创新使材料同时具备优异的光电性能和生物相容性，打破了传统材料在这两方面难以兼顾的瓶颈，为有机光电材料的应用拓展了新方向。

应用领域和市场前景

该基于九苯基芴PF单取代或双取代咔唑Cz的有机纳米材料具有广阔的应用前景。在光电器件领域，该材料可用于制备高效有机发光二极管(OLED)显示屏和照明设备，满足显示产业对高亮度、低功耗材料的需求，有望在全球年产值超过1000亿美元的OLED市场中占据一席之地。在生物医学领域，该材料可作为高灵敏度荧光探针用于细胞成像、肿瘤标志物检测和药物递送系统，随着精准医疗市场的快速增长，预计到2030年相关生物荧光材料市场规模将达到150亿美元。此外，该材料在有机太阳能电池、化学传感器和安全防伪等领域也具有良好的应用潜力。材料的多功能性使其能够在单一产品中实现多种功能的集成，为智能显示、生物检测等新兴应用创造了可能。随着有机电子和生物科技产业的持续发展，该材料的市场需求将不断扩大。特别是在可穿戴设备、柔性电子产品等快速增长的新兴市场中，这类兼具优异光电性能和生物相容性的材料将具有显著的竞争优势和巨大的市场潜力。

一种氰基取代的螺环芳烃分子分形晶体及其制备方法和应用

成果完成人	汪莎莎	职称	副教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	电子信息/光电显示/新能源				
核心专利号	ZL202110789614.2				

成果概述

本成果提出了一种氰基取代的螺环芳烃分子分形晶体及其制备方法和应用，所述分形晶体是由氰基取代的螺环芳烃分子十字堆积有序排列形成；SAHs被超分子作用基团取代，本身起到位阻的作用，对称取代的超分子作用基团引入对称且较强的超分子作用力，通过浓度和温度调控实现了SAHs晶体的分枝生长和尖端破裂，进而形成分形晶体，可作为光电材料广泛应用于光电器件中，且具有荧光发光稳定性。

关键技术/创新要点

该成果提出了一种基于氰基取代的螺环芳烃分子的分形晶体材料及其制备方法和应用。螺环芳烃分子是一类具有特殊三维构型的有机分子，而本专利的关键创新在于通过氰基的引入和精确定位，实现了螺环芳烃分子在结晶过程中形成具有分形特性的晶体结构。分形晶体是指在不同尺度下具有相似几何特征的晶体结构，这种独特的结构赋予材料许多常规晶体所不具备的特性。本成果的创新点首先体现在分子设计上，通过在螺环芳烃骨架的特定位置引入氰基，有效调控了分子间相互作用力，尤其是氢键和偶极-偶极相互作用，从而诱导分子在自组装过程中形成分形结构。这种分子设计策略打破了传统有机晶体的规则排列模式，实现了从分子层面对宏观晶体形貌的精确调控。在制备方法上，该专利开发了一套温度梯度诱导结晶的技术，通过精确控制溶剂、温度变化率和结晶时间等参数，使氰基取代的螺环芳烃分子能够按照分形生长模式排列，形成具有多级分形特征的晶体结构。这种制备方法简便可控，可实现批量生产，为分形晶体材料的规模化应用奠定了基础。在材料性能方面，这种分形晶体展现出优异的光学性能，包括高效的荧光发射、各向异性的光波导性能以及对外界刺激的响应性。特别是由于分形结构的多级放大效应，这类晶体材料在光电转换、传感检测和光学信号处理等领域展示出独特优势。总体而言，该专利通过分子设计和制备工艺的创新，成功开发了一类具有分形结构的有机功能晶体材料，不仅丰富了有机固态发光材料的种类，也为开发新型光电功能材料提供了新思路和新方法。

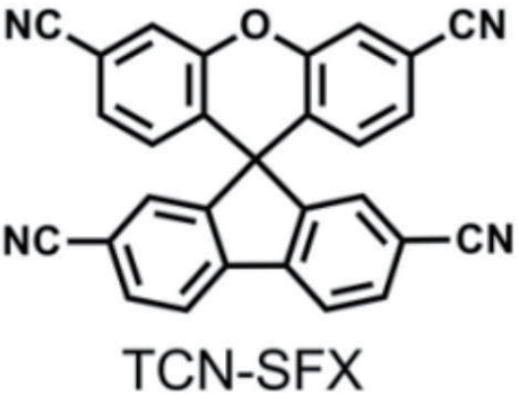


图1 所述分形晶体是由氰基取代的螺环芳烃分子十字堆积有序排列形成

技术指标/优势

该氰基取代的螺环芳烃分子分形晶体材料展现出显著的技术指标和优势。在结构特性方面，分形晶体具有0.82-0.91的分形维数，明显高于常规有机晶体(通常接近整数维)，表现出多尺度自相似性，从微米到厘米级均可观察到分形特征。光学性能方面，材料在固态下荧光量子产率可达65-78%，远高于同类螺环芳烃材料的典型值(30-45%)；荧光寿命长(8-12ns)，有利于信息处理和传感应用。材料具有出色的光波导性能，光传播损耗低至0.3-0.5dB/mm，比传统有机晶体光波导(1-2dB/mm)降低约70%。在不同生长方向上，材料表现出各向异性的光学响应，可实现偏振光的选择性传输，偏振比高达18:1。对环境刺激的响应性强，对特定气体分子(如NH_3、HCl等)的检测限可达1-5ppm，响应时间短(1-3s)。热稳定性优异，热分解温度高达385°C，使用寿命长。在制备工艺上，该技术采用温度梯度诱导结晶法，成晶率高(>90%)，形貌可控，大尺寸晶体(>1cm)的制备成功率达到75%以上，远超传统方法(通常<40%)。该成果已获得授权专利(ZL202110789614.2)，并已被应用于高性能有机光波导器件和化学传感器的开发中。与同类技术相比，本成果在材料结构设计、光学性能和器件应用等方面均具有明显优势，为新一代有机光电功能材料的发展提供了新方向。

应用领域和市场前景

氰基取代的螺环芳烃分子分形晶体材料具有广阔的应用前景和市场空间。在光电器件领域，该材料可用于开发高性能有机光波导、微型激光器和光学传感器，满足光通信和光计算产业对高集成度、低损耗光学元件的需求。随着信息技术向光电集成方向发展，预计到2030年相关市场规模将超过800亿美元。在传感检测领域，该分形晶体可开发为高灵敏气体传感器和生物传感器，应用于环境监测、食品安全和医疗诊断等场景，这一市场预计在未来五年内将以年均15%的速度增长，到2028年市场规模有望达到200亿美元。在安全防伪领域，利用该材料独特的光学特性可制备难以仿制的防伪标识，应用于高端产品、重要证件和货币防伪，市场需求稳定增长。此外，在柔性显示、智能照明和可穿戴设备等新兴领域也有良好应用前景。随着有机光电材料技术的不断成熟和产业链的完善，该成果有望在多个高技术领域实现产业化应用，创造可观的经济效益和社会价值。

一种聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜及其制备方法

成果完成人	汪莎莎	职称	副教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	高分子材料新型加工和应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	复合材料
应用行业	电子信息/光电显示/新能源				
核心专利号	ZL202210497567.9				

成果概述

本成果提出了一种聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜及其制备方法，属于新型复合膜材料领域。本成果的聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜由芴基纳米片与聚乙烯醇水溶液共混组成，其中所述芴基纳米片与聚乙烯醇水溶液共混过程中芴基纳米片的掺杂质量比为5%；所述芴基纳米片是芴基有机小分子通过添加表面活性剂制成；所述芴基有机小分子是由苯基芴和芘基团组成的分子。本成果所制得的聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜表面平整光滑、薄膜质量较高，通过调控芴基纳米片材料及其在复合薄膜中掺杂比例可以使复合膜可控性强，同时可将小分子纳米片优异的光电性能和聚乙烯醇的柔性相结合来实现复合薄膜良好的光电和力学性能。

关键技术/创新要点

该成果开发了一种聚乙烯醇(PVA)与芴基纳米片复合的新型功能薄膜材料及其制备方法。其关键创新点在于通过合理设计有机-无机界面结构，实现了芴基纳米片在PVA基体中的高度分散与均匀排列，从而获得了具有优异光学性能和力学性能的复合薄膜材料。首先，在材料设计方面，该专利选用聚乙烯醇作为高分子基体，利用其丰富的羟基与芴基纳米片表面的官能团形成强相互作用，实现了纳米片与基体间的良好相容性。芴基化合物是一类具有优异荧光性能的有机半导体材料，而将其制备成二维纳米片结构，不仅保留了芴基材料的优异光电性能，还增强了其与高分子基体的界面作用，提高了复合材料的整体性能。

在制备工艺方面，该专利采用了溶液混合结合超声分散技术，通过精确控制芴基纳米片的浓度、超声时间和功率等参数，有效防止了纳米片在PVA基体中的团聚，实现了纳米片的均匀分散。随后通过优化的流延成膜工艺，控制薄膜干燥速率和温度，成功制备出厚度均匀、透明度高的复合薄膜。这种聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜展现出多项优异性能：首先，由于芴基纳米片的引入，薄膜获得了优异的荧光性能，发光效率高，颜色可调；其次，芴基纳米片的二维结构在薄膜中形成了类似于"砖墙"的排列，显著提高了薄膜的力学强度和阻隔性能；此外，复合薄膜还具有良好的热稳定性和环境稳定性。总体而言，该专利通过材料设计和工艺创新，实现了有机芴基纳米片与聚乙烯醇基体的有效复合，开发出了一种兼具优异光学性能和力学性能的新型功能材料，为显示、包装和传感等领域提供了新的材料选择。

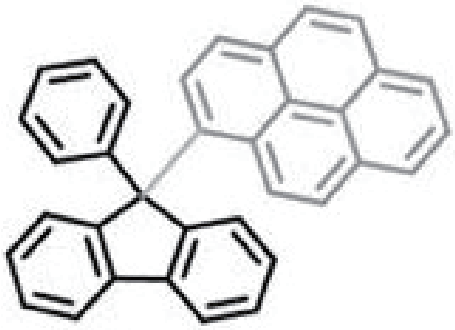


图1 芴基有机小分子化合物由
苯基芴和芘基团组成，即PF-Py分子

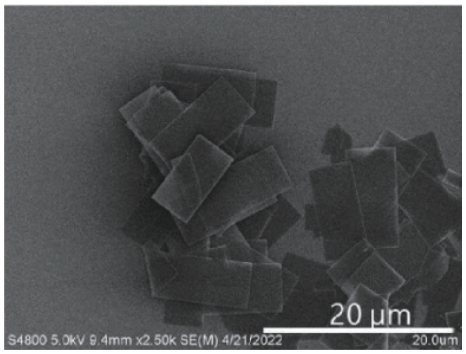


图2 PF-Py纳米片的SEM图

技术指标/优势

该成果开发了一种新型聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜，采用创新型层层自组装技术实现了高效复合。所得薄膜具有优异的综合性能：光学性能突出，透光率超过90%；力学性能显著提升，拉伸强度比纯聚乙烯醇薄膜提高45%以上；同时具备良好的气体阻隔性能，氧气透过率降低约60%。制备工艺绿色环保，主要使用水作为溶剂，无有毒有害物质，工艺简单易控，适合规模化生产。该技术已获授权发明专利(ZL202210497567.9)，可广泛应用于食品包装、光电器件基底材料、气体分离膜等多个领域，具有广阔的应用前景和产业化潜力。

应用领域和市场前景

聚乙烯醇-芴基纳米片复合薄膜材料具有广阔的应用前景和市场空间。在光电显示领域，该材料可用于开发柔性显示器件、背光源和光学薄膜，满足消费电子产业对轻薄、柔性显示的需求，随着全球柔性显示市场以年均20%的速度增长，预计到2028年市场规模将超过400亿美元。在包装领域，该复合薄膜优异的阻隔性能和荧光特性使其适用于高端食品包装、医药包装和智能防伪包装，可满足包装产业对高性能、多功能材料的需求，这一市场预计到2027年将达到1200亿美元规模。在传感检测领域，该材料可开发为荧光传感薄膜，用于环境污染物、生物分子的检测，以及温度、湿度等参数的监测，应用于环保、医疗和工业过程控制等领域。此外，在光伏材料、生物医学成像和柔性电子等新兴领域也有良好的应用前景。随着绿色环保、智能化和功能多样化成为材料发展的主流趋势，这种环境友好型的高性能复合薄膜材料将具有显著的市场竞争力和广阔的发展空间。

一种自光聚合物材料及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	ZL202210497567.9				

成果概述

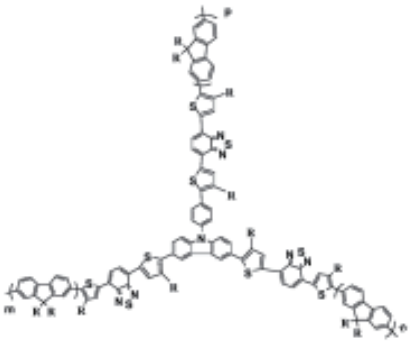
本成果属于光电材料与应用技术领域，具体涉及一种白光聚合物材料，制备方法与应用。该材料具有以苯并咔唑为核、噻吩苯并噻唑为臂的红光单元（CZTBT）和以芴为蓝光单元的多臂结构超支化白光聚合物（FCZTBTX），该材料包括红光和蓝光二种发光单元，这两种发光单元通过共轭的化学键相互连接到聚合物的主链上，通过调控红光单元的含量，实现蓝光和红光在电致发光过程中的均衡发射，获得了色坐标与标准白光十分接近并且覆盖整个可见光范围的白光电致发光光谱。本成果提供的白光共轭聚合物适合应用于制备白光发射的聚合物电致发光二极管的发光层。

关键技术/创新要点

单层白光器件就是采用单一发光层结构实现白光发光。其优点是结构简单，工艺易于实现，并且发光层载流子的复合区域受驱动电压的影响小，可以得到稳定的白光。使用聚合物单一发光层来实现电致白光发射主要包括三种途径：（1）在聚合物中添加有机发光染料组成混合体系来制作发光层；（2）使用两种或以上的聚合物组成共混体系来制作发光层；（3）使用单一聚合物白光材料来制作发光层。其中，使用单一聚合物白光材料来制作发光层的方法具有材料合成制备简便和薄膜形态稳定的特点而倍受重视。目前，使用单一聚合物白光材料来制作覆盖整个可见光范围的白光在发光效率、光谱稳定性和实际应用等有待于进一步改善和优化。

在前期工作的基础上，我们提出了多臂结构超支化白光聚合物的新方案，其器件结构为单组分白光聚合物电致发光器件，采用旋涂法制备。该材料包括红光和蓝光二种发光单元，这两种发光单元通过共轭的化学键相互连接到聚合物的主链上，通过调控红光单元的含量，实现蓝光和红光在电致发光过程中的较均衡发射，获得了色坐标与标准白光十分接近并且覆盖整个可见光范围的白光电致发光光谱。

本成果提出的白光聚合物，是一种以苯并咔唑为核、噻吩苯并噻唑为臂的红光单元和以芴为蓝光单元的多臂结构超支化白光聚合物，其通式结构如下式1所示：



式1 多臂结构超支化白光聚合物通式结构

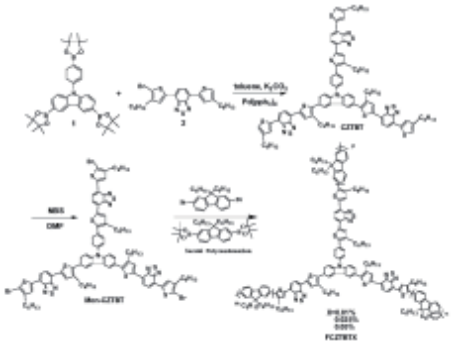


图1 反应路线图

Mn=8000-10000, 其中, R为C1-C30的烷基, C1-C30的烷氧基; m=0.00001-0.1, n=0.00001-0.1, p=0.00001-0.1。

本成果提出的白光聚合物材料的合成方法以3,6-二(4,4,5,5-四甲基-1,3,2-二氧杂硼烷-2-基)-9-(4-(4,4,5,5-四甲基)-1,3,2-二氧杂硼烷-2-基)-苯基咔唑和4(5-溴-4-己基噻吩-2-基)-7-(4-己基噻吩-2-基)-2,1,3-苯并噻二唑为起始原料, 通过经典的Suzuki反应得到以苯并咔唑为核、噻吩苯并噻唑为臂的红光单元(CZTBT), 溴化后与9,9-二烷基芴的2,7-二硼酸酯、9,9-二烷基-2,7-二溴芴通过Suzuki聚合反应生成目标聚合物。

本成果的白光聚合物材料的应用中, 聚合物材料在发射白光的聚合物电致发光二极管的发光层中应用时, 有机电致发光器件结构为阳极/空穴注入层/发光层/电子传输层/电子传输层/阴极, 其中该白光聚合物材料作为发光层。

技术指标/优势

本成果提出的一种白光聚合物具有以下特点:(1)星型的分子结构, 显著增加了目标材料的空间位阻效应, 使得得到的刚性分子链之间的相互作用和堆积受到限制, 同时降低了材料在固态时的猝灭作用, 显著增强了目标材料的固态光发射性能;(2)玻璃化温度高、能形成热稳定性高、均匀性好的无定型薄膜;(3)可以通过简易的溶液成膜方式制备薄膜器件。因此, 使用该材料作为发光层的有机电致发光器件可以获得高效的白光发射、优异的光谱及稳定器件性能, 是一种具有重要应用前景的白光有机电致发光材料。

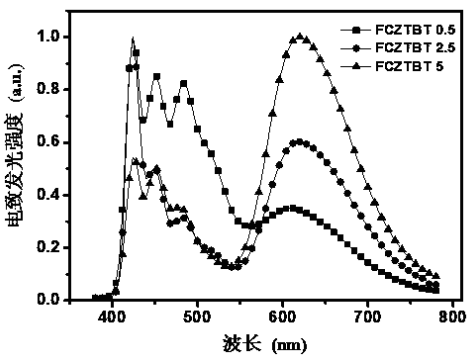


图2 白光聚合物材料在12V电压下的电致发光光谱

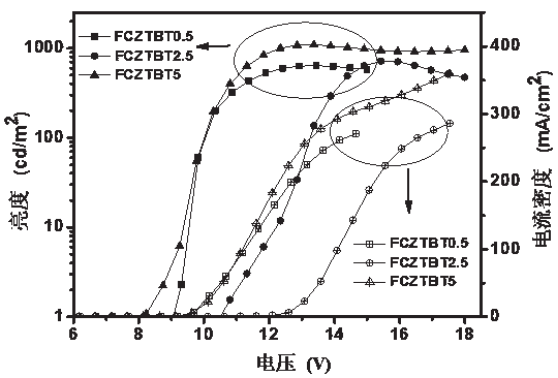


图3 白光聚合物材料亮度-电压-电流密度曲线

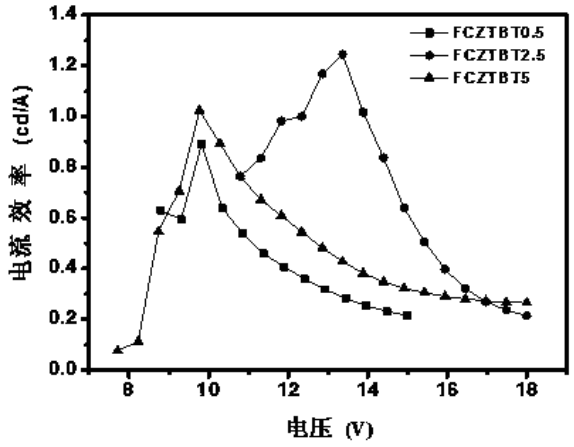


图4 白光聚合物材料电流效率-电压曲线

应用领域和市场前景

聚合物电致发光二极管或聚合物电致发光器件(PLED)是一种可应用于全彩平板显示和固体照明,相对于无机LED和有机小分子OLED,PLED具有廉价,柔韧性好、阈值电压低、对比度高、易于溶液加工成膜和化学结构与发光颜色易于调节等优点,引起了大家广泛的研究兴趣。目前已实现全可见光区的单色显示以及彩色显示,实现了高发光效率和长工作寿命。共轭聚合物是制备聚合物电致发光二极发光层的最重要的可选材料。白色电致发光共轭聚合物材料及其聚合物电致白光二极管器件,在液晶显示器的背景光源、照明光源、结合滤光片的彩色显示屏等方面具有非常广阔的应用前景。使用本成果材料作为发光层的有机电致发光器件可以获得高效的白光发射、优异的光谱及稳定器件性能,是一种具有重要应用前景的白光有机电致发光材料。

一种本征可拉伸n型界面材料及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN113480733B				

成果概述

本成果提出一种本征可拉伸n型界面材料及其制备方法与应用。该材料是以有机受体单元、聚乙烯亚胺为原料，通过聚合反应制备。本成果提出了一种通过化学交联的方式制备本征可拉伸n型界面材料，其制备方法是通过化学聚合方式将受体单元引入到交联网络型弹性材料中，在提高界面材料本征可拉伸性能的基础上，同时具有优异的电子传输特性以及高的电子迁移率。与传统弹性材料或者直链型本征可拉伸界面材料相比，交联网络型本征可拉伸界面材料可以形成化学共价交联的网络，进一步提高材料拉伸性、电子传输性和稳定性。该类材料可以作为n型界面层材料，制备得到高稳定性、高拉伸性、高效率的有机光电器件。

关键技术/创新要点

本成果提出一种本征可拉伸n型有机界面材料及其制备方法与应用，可以使用溶液加工如旋涂、丝网印刷或喷墨打印的方法制备正置器件结构以及倒置器件结构的有机太阳能电池器件和有机电致发光器件，也可以用于采用串联的方式制备大面积叠层有机太阳能电池器件和有机电致发光器件。通过优化器件结构和实施条件实现优异的光电特性，可以克服传统n型界面材料的本征不可拉伸性问题。同时提供一种本征可拉伸n型界面材料及其制备方法，其特征在于，该材料以酰亚胺类受体单元和聚乙烯亚胺为原料，在有机溶剂、添加剂和引发剂条件下，通过聚合反应制备本征可拉伸n型界面材料。

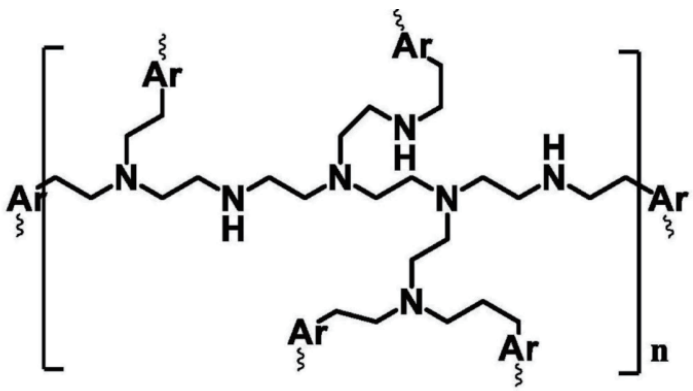
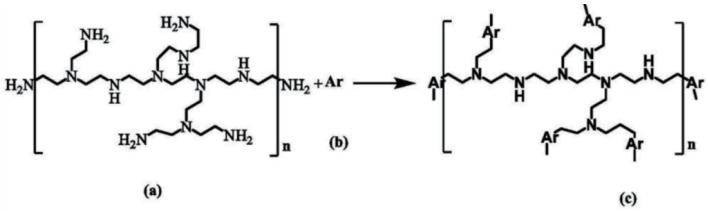


图1 结构通式

该类本征可拉伸n型界面材料的制备方法按照如下步骤进行：

(1)在氮气保护条件下，将酰亚胺类受体单元和聚乙烯亚胺置于两口烧瓶中，再加入有机溶剂，控温在90-160℃条件下，反应5-15小时；

(2)反应结束后，用无水乙醇淬灭反应，再加入盐酸溶液，搅拌一段时间，将反应液浓缩后用有机溶剂二氯甲烷和甲醇等洗涤抽滤。然后用甲苯透析提纯12-48小时。最后经抽滤、干燥后得到本征可拉伸n型界面材料。



技术指标/优势

常见的传统弹性体材料如嵌段共聚界面材料(如SEBS、SBS、SPS等)、热塑性界面材料以及具有氢键或强氢键的水凝胶等，虽然具有优异的拉伸性能，能在可拉伸材料中发挥重要作用，但并不具备电学性能，限制了其在有机光电器件中的应用。此外，将电子功能材料如导电聚合物、银纳米线、界面材料等与传统界面材料通过物理共混的方式可以实现电致发光性能和弱拉伸性，但不具有本征可拉伸性，并在拉伸-释放的过程中容易发生相分离以及薄膜形貌变化，使器件的稳定性和寿命降低，并不是制备可拉伸光电器件的一种理想方法。然而，至今关于交联网络型本征可拉伸的n型界面材料尚未报道。本成果提出了一种本征可拉伸n型界面材料，作为有机n型界面材料应用于有机光电器件中。目前制备拉伸n型界面材料都是通过物理共混方式，容易造成相分离，且拉伸效果差。本征可拉伸n型界面材料为纯化学结构材料，不经过掺杂，可以有效提高拉伸性和光电性能。从分子工程-材料结构-薄膜形貌-器件制备多角度对材料性能进行分析测试表征，实现n型界面材料的本征可拉伸性和光电性能的最佳平衡。另外，与支链型n型界面材料相比，交联网络型界面材料通过化学交联构成网络结构，可以实现更高的拉伸性、电子传输性和稳定性。

将n型有机受体单元通过化学交联的方式引入到传统界面材料中，不仅提高了界面材料的本征可拉伸性，同时还具有优异的电子传输性能，解决了传统有机光电材料本征不可拉伸性问题和传统界面材料不具备的电子传输性的兼容性技术难题。另外，与支链型n型界面材料相比，交联网络型界面材料通过化学交联构成网络结构，可以实现更高的拉伸性、电子传输性和稳定性。该材料具有优异的热稳定性、成膜性以及较高的本征可拉伸性，是一类具有重要应用潜力的n型界面材料。此外，将界面材料作为n型界面层，通过溶液加工方式，可以得到高拉伸性、高稳定性、高效率的有机光电器件。

应用领域和市场前景

可拉伸电子作为新兴的前沿技术，在智能家居、生物医药、信息能源和可穿戴设备等领域有广泛的应用前景。可拉伸电子技术的发展将带动电子电路、半导体材料、器件封装等产业的整体升级，提升产业的附加值，给人们的生产生活带来革命性的变化。可拉伸光电器件作为可拉伸电子的重要载体，受到广泛关注。可拉伸光电器件一般包括电极层、光电功能层和界面层，各功能层的拉伸性的协同发展是制备拉伸性及光电性能优异的光电器件的前提条件。目前对于可拉伸光电器件的研究主要集中在电极层和光电活性层，而对界面层的研究却鲜有关注。然而，界面层作为可拉伸光电器件的重要组成部分，其拉伸性和电子传输性能往往影响着可拉伸光电器件的整体性能。因此，设计开发性能优异的界面材料具有重要意义。

一种茚衍生物材料及其制备方法与应用

成果完成人	赖文勇	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	微电子技术		高技术领域（三级）	集成光电子器件设计、制造与工艺技术	
所属学科方向	一级学科	物理学		二级学科	光学
应用行业	光电信息材料及应用				
核心专利号	CN110183315B				

成果概述

本成果提出了一种茚衍生物材料及其制备方法与应用。该材料为以茚结构为核，并在1，6位（式I）或1，3，6，8位（式II）引入较大位阻芳香基团，该类分子具有对称结构和抑制分子聚集的特点。其制备方法为将大位阻基团通过Suzuki偶联反应与茚核连接，制备过程简单、产率高，产物易于提纯。大位阻基团的引入可以有效抑制刚性大平面刚性茚分子间聚集，提高材料的发光效率和热稳定性，使其在有机电致发光器件和有机激光器件等方面具有潜在的应用价值。

关键技术/创新要点

一种茚衍生物材料，其特征在于，该材料以茚结构为核，并在1，6位或1，3，6，8位引入大位阻芳香基团，该材料具有式I或式II的结构通式：

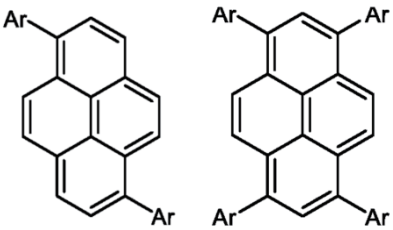
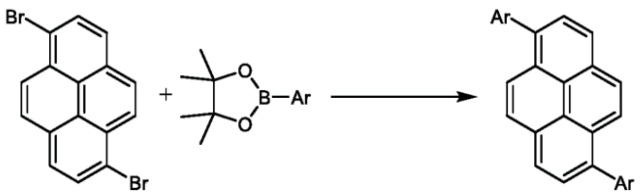


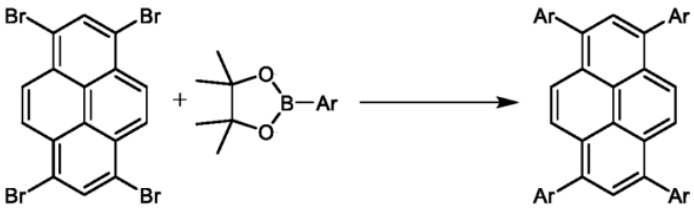
图1 式1与式2

一种根据权利要求1所述的茚衍生物材料的制备方法，其特征在于，式I的茚衍生物材料的制备方法，包括以下步骤：



1　　2　　I

在氮气保护下，将1，6-二溴芘(1)、四三苯基膦钯催化剂、相转移催化剂和大位阻基团的硼酸酯化合物(2)溶于有机溶剂和碳酸钾水溶液中，控温80-110℃反应12-24h，反应结束后分离提纯获得1，6二芳基取代茚衍生物I。一种根据权利要求1所述的茚衍生物材料的制备方法，其特征在于，式II的茚衍生物的制备方法，包括以下步骤：



3　　2　　II

在氮气保护下，将1, 3, 6, 8-四溴芘(3)、四三苯基膦钯催化剂、相转移催化剂和大位阻基团的硼酸酯化合物(2)溶于有机溶剂和碳酸钾水溶液中，控温80-110℃反应12-36h，反应结束后分离提纯获得1, 3, 6, 8四芳基取代芘衍生物II。

技术指标/优势

芘具有大平面效应，其在浓溶液或薄膜状态下，会呈现出较强的分子间π-π电子相互作用，进而形成分子间的激基缔合物，而降低材料的荧光量子效率，导致材料在浓溶液或薄膜态条件下，发射光谱红移，使发光由蓝光转变成蓝绿光，甚至有时甚至会出现黄光发射，这严重影响了材料在蓝光OLEDs和OSLs的应用。t本成果提供了一种芘衍生物材料及其制备方法与应用。该材料以芘为核，并在1, 6位或1, 3, 6, 8位引入大位阻芳香基团，该类分子具有对称结构和抑制分子聚集的特点。其制备方法为将大位阻基团通过Suzuki偶联反应与芘核连接，制备过程简单、产率高，产物易于提纯。大位阻方向基团的引入可以有效抑制芘的分子间聚集，提高材料的发光效率和热稳定性，使得其在有机电致发光器件和有机激光器件等方面具有潜在的应用价值。

应用领域和市场前景

有机分子具有结构多样性和易裁剪性，可以结合分子设计和有机合成，得到具有某些特定性能的新型化合物的优异特性。由于有机分子可设计性好，易于功能化，近些年来，随着分子工程和有机合成的发展，其在有机电致发光器件(OLEDs)及有机激光器件(OSLs)领域得到了广泛的应用。

一种有机纳米聚合物的制备方法

成果完成人	解令海	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	精细和专用化学品		高技术领域（三级）	电子化学品制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	材料化学
应用行业	信息显示、发光照明				
核心专利号	ZL201711188236.2				

成果概述

有机聚合物半导体是发展高性能信息显示技术的材料基础，其中纳米尺度分子砌块的连接模式是构筑复杂拓扑聚合物的核心。然而，在纳米尺度分子砌块的连接模式中，大部分的C-C键偶联很难建立起有效的动态平衡，且需要较长的反应时间(至少需要三天)与苛刻的反应条件，不利于纳米聚合物的大量生产。因此探索基于C-C键的高效纳米连接构筑结构稳健的纳米聚合物具有重要的科学与产业研究价值。

本成果将纳米连接策略应用于构筑一维纳米聚合物，不仅克服了傅克合环反应无法动态可逆纠正的缺陷，而且极大地抑制了错位交联过程；同时此纳米连接无需热力学控制，可以在很短的时间形成相应的纳米聚合物，无需长时间与苛刻的反应条件，因此有利于大批量生产纳米聚合物。

目前该成果相关技术已授权发明专利1项（专利号：ZL201711188236.2）。

关键技术/创新要点

本成果的关键技术和创新点在于：

（1）本成果提供了构筑类似于平行四边形结构（图1）的关键技术来合成有机纳米聚合物的格结构骨架。



图1 本成果构筑的目标分子结构

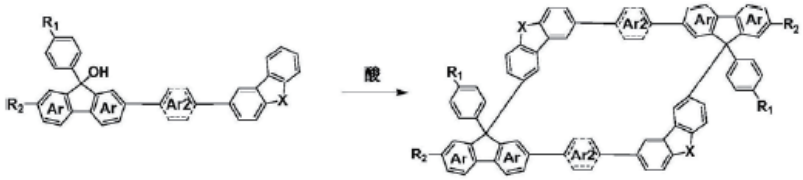


图2 本成果提出的傅克合环方式

（2）本成果提出了通过傅克合环的方式（图2）来构筑有机纳米格的关键技术。

（3）本成果提供了格型纳米链接技术，来构筑刚性有机纳米聚合物（图3）。

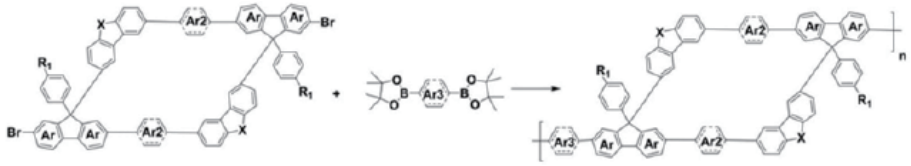


图3 本成果构筑的有机纳米聚合物结构

技术指标/优势

本成果的技术指标优势在于：

（1）与其他有机闭环结构相比，本成果提出的有机纳米格结构骨架类似于平行四边形，具有可延伸拓展特性，有利于形成结构规整的刚性聚合物。

（2）与现有的有机纳米格构筑技术相比，本成果提出的傅克合成构筑技术具有合成产率高、副产物种类少、易分离提纯等特点。

（3）与现有格型结构连接技术相比，本项目提出的格型纳米链接技术，不仅可以作为构筑一维刚性有机纳米聚合物的关键手段，还可以克服传统suzuki或者yamamoto聚合反应的位阻负面影响造成的聚合物分子量低的问题。

应用领域和市场前景

本成果提出的技术和材料结构有望在发光、显示、照明、成像等领域得到应用。市场应用领域有OLED面板、显示屏、OLED照明等。

市场前景：目标材料在低成本高性能发光器件方面（OLED）有很好的应用潜力，由于具有简单合成特点，因此对于发展OLED聚合物材料具有重要借鉴作用，有助于推动OLED材料种类更新，扩大OLED材料市场规模。

近红外发射电刺激响应型铱（Ⅲ）配合物及其制备方法和应用

成果完成人	张寅	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	金属材料		高技术领域（三级）	电工、微电子和光电子新材料制备与应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料科学其他学科
应用行业	信息保密及安全存储光电子器件				
核心专利号	ZL202110813782.0				

成果概述

在信息时代，安全存储与保密需求日益增长，研发高级别的信息技术至关重要。电刺激发光响应材料因其方便、精准可调及易集成的特点，在信息存储和加密解密中广泛应用。其中，具有近红外特性的电刺激发光响应材料可以用于制造隐蔽的信息记录层。通过特定的近红外光源检测器，可以读取或写入加密信息，实现信息的保密传输和存储。

本团队结合常用电响应单元紫精和发光体铱(III)配合物，构建了新型近红外电刺激响应材料。借助共轭配体结构，调控能级，使发光信息位于近红外区，增强了信息加密的安全性。在电刺激下，材料从无发光变为近红外发光，在近红外信息检测仪器下可以实现信息解密。此成果为信息加密及解密手段提供了新思路，解决了现有技术的不足。

关键技术/创新要点

科研团队成功制备出一类独特的近红外发射电刺激响应型铱(III)配合物。这一成果融合了具有大共轭结构的环金属配体和含有紫精取代基的辅助配体，展现出前所未有的特性。该配合物的独特之处在于，它利用紫精取代基的强吸电子能力和可逆的氧化还原性质，在电刺激下能够实现发光的快速切换，即从淬灭状态到发光状态的转变。

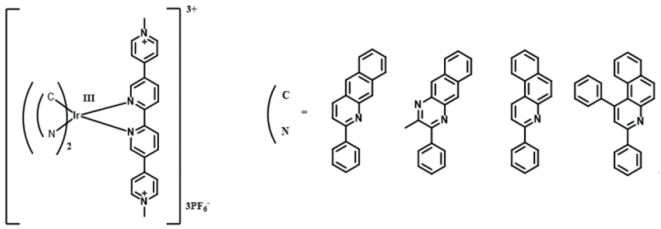


图1 近红外发射电刺激响应型铱(III)配合物分子结构

更值得一提的是，通过精心引入的大共轭结构，团队成功地将材料的发光波长调整到近红外区域。这一调整使得发光肉眼无法识别，只能通过专业仪器进行检测，从而大大提高了信息保密性。在信息安全日益受到重视的今天，这一创新无疑为信息加密领域注入了新的活力。

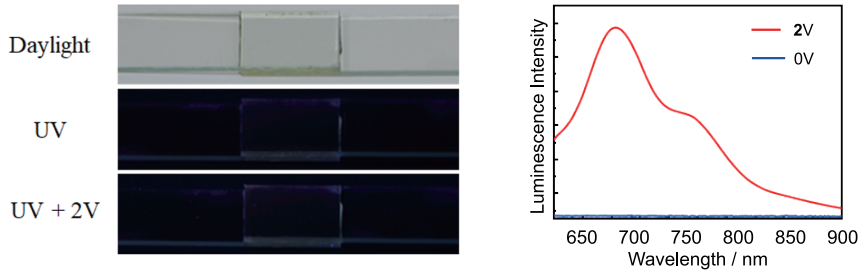


图2 电刺激猝灭-近红外发射切换

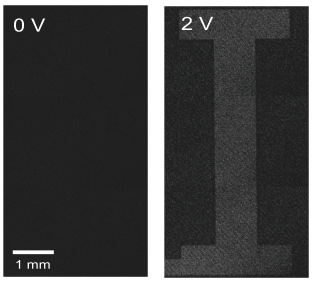


图3 近红外发射电刺激响应型铱(Ⅲ)配合物的字母信息保密器件

此外，研发团队初步研发了该类近红外发射电刺激响应型铱(Ⅲ)配合物的保密器件。在电刺激下可以实现近红外信息的解密。我们相信，随着对这一成果的深入研究和进一步开发，它将在未来科技发展中发挥重要作用，推动相关领域的技术进步和产业升级。

技术指标/优势

本成果成功制备的近红外发射电刺激响应型铱(Ⅲ)配合物，具有独特的近红外发光波长、快速的电刺激响应发光切换能力和可逆的氧化还原特性，这些技术指标使其在信息加密、电致变色材料、信息存储和显示等多个领域展现出显著优势，特别是其高保密性和灵活性，为相关技术的发展注入了新的活力。

应用领域和市场前景

本成果涉及的近红外发射电刺激响应型铱(Ⅲ)配合物在信息加密、电致变色器件以及信息显示等多个领域展现出广阔的应用前景。随着信息安全日益受到重视，这种具有高效、安全加密特性的材料满足了市场对于信息保护技术的迫切需求，其增长潜力巨大。特别是在信息加密与存储方面，该类配合物的发光波长位于近红外区域，通过电控可实现发光状态的切换，为信息的高效、安全加密提供了新的解决方案。此外，其在电致变色器件领域的应用，如智能窗、显示屏等，也将带来色彩动态变化的革新体验。同时，该类材料还适用于信息显示，特别是在需要隐蔽或夜间显示时，其近红外发光特性确保了信息的私密性。总体来看，这种创新材料有望在技术不断创新和市场需求持续增长的推动下，成为未来重要材料之一。

一类电刺激响应型铱（Ⅲ）配合物及其应用

成果完成人	张寅	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	金属材料		高技术领域（三级）	电工、微电子和光电子新材料制备与应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料科学其他学科
应用行业	信息保密及安全存储光电子器件				
核心专利号	ZL202110566098.7				

成果概述

近年来，刺激响应性材料备受关注，尤其是紫精类化合物，其光电性质独特，适用于信息存储。同时，铱(III)配合物因光物理性质优异也受到关注。将紫精与铱(III)配合物结合，可创新出电刺激光响应材料，该类材料在目前的研究中仍无法实现发光颜色的转变，制约了其在信息加密、光电转换等领域的应用。

本科研团队开发了一类新型电刺激响应型铱(III)配合物，该材料结合了紫精类化合物的刺激响应性与铱(III)配合物的优异光物理性质。通过微调配合物结构，实现了在电刺激下材料的多色发光变化，这一特性在信息存储、电致变色器件等领域具有广阔应用前景。此外，这类配合物展现出可逆的氧化还原性和出色的循环稳定性，进一步增强了其实用性。该创新材料的开发，不仅拓宽了刺激响应性发光材料的应用范围，还为相关领域的技术进步带来了新的可能性。

关键技术/创新要点

本技术成果源于对过渡金属铱(III)配合物和紫精单元的深入研究与巧妙结合。这种新型电刺激响应型材料不仅集成了铱(III)配合物的长发光寿命和大斯托克斯位移的显著特点，还融入了紫精单元的可逆氧化还原性质，从而打破了传统材料的局限。这一创新的融合使得新材料在受到外界刺激时，能够产生肉眼可见的多彩颜色变化，为信息存储和加密领域提供了全新的可能性。

更为值得一提的是，通过在紫精类结构单元的氮原子上精心引入乙基基团，不仅优化了材料的化学性质，更显著提升了其氧化还原可逆性和化学稳定性。这一改进意味着该材料在电致变色器件、信息存储器件以及储能器件中都将有着出色的应用表现。

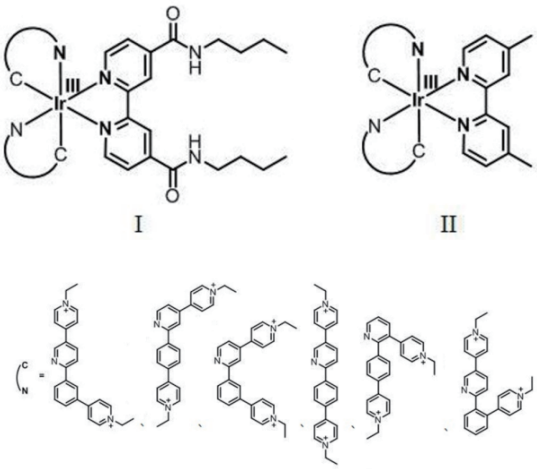


图1 电刺激响应型铱(III)配合物分子结构

此外，这种新型材料的高效光电转换能力和信号检测技术也值得称赞。它利用过渡金属铱(III)配合物对外界电刺激的敏感性以及高发光量子效率，能够迅速将外界的电刺激转化为清晰的发光信号。这一特性使得该材料在光电转换和信息显示器件中具有极高的实用价值，同时也为灵敏检测提供了新的解决方案。

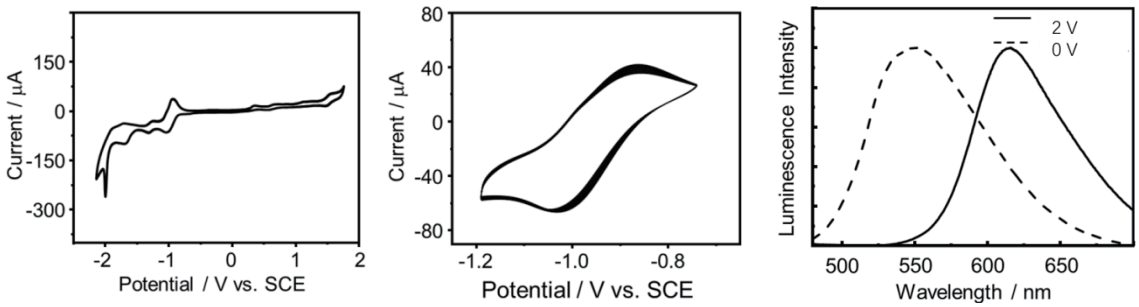


图2 电刺激响应型铱(III)配合物优异的电化学性能

图3 电刺激发光颜色转变

综上所述，本申请所公开的电刺激响应型铱(III)配合物，以其独特的性质和创新的设计，在信息存储、加密以及光电转换等多个领域都展现出了广阔的应用前景，无疑为相关科技行业带来了新的发展机遇。

技术指标/优势

该成果的技术指标主要体现在其能实现肉眼可见的多彩颜色变化，而其优势则在于结合了铱(III)配合物的光物理性质和紫精的可逆氧化还原特性，具有高稳定性与可逆性，能将外界刺激高效转换为发光信号，便于检测，从而在电致变色器件、信息存储、光电转换等多个领域展现出广阔的应用前景。

应用领域和市场前景

该研究涉及的电刺激响应型铱(III)配合物，凭借其独特的多彩变色特性和高效光电转换能力，在信息存储与加密、电致变色器件以及光电转换等多个高科技领域展现出广泛的应用前景。随着信息技术的迅猛发展，对于具备高性能和多功能特性的材料需求日益增长，而此类铱(III)配合物正好满足了这一市场需求。此外，该材料还拥有出色的可逆氧化还原性质和化学稳定性，这为其在各类应用中提供了长寿命和低维护成本的保障，进一步增强了其市场竞争力。在当今这个信息化、智能化的时代，数据存储与加密、信息显示技术以及光电转换等领域的快速发展，为此类铱(III)配合物提供了巨大的市场空间。我们有理由相信，随着相关技术的不断进步，该材料的市场潜力将被进一步挖掘，为科技行业带来更多的创新与发展机遇。

面向下一代信息技术的高导电油墨—墨水配制、丝网印刷、图案化

成果完成人	李东东	职称	副教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	高分子材料		高技术领域（三级）	新型功能高分子材料的制备及应用技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	复合材料
应用行业	电子制造和功能性材料领域				

成果概述

随着信息技术的迅猛发展，尤其是在柔性电子、可穿戴设备、集成电路、智能传感器等领域，对高性能导电材料的需求日益增长。在这一背景下，面向下一代信息技术的高导电油墨的研发应运而生。该项目的主要目标是开发一种新型高导电油墨，该油墨在丝网印刷和图案化过程中表现出优异的导电性能，从而解决传统导电材料在电气性能、加工工艺及材料环保性等方面的诸多问题。

在技术创新方面，该高导电油墨采用了先进的纳米材料和高分子聚合物复合配方。在墨水配制过程中，通过优化纳米导电填料的添加比例、分散性及粒径控制，显著提升了油墨的导电性。同时，通过科学调节油墨的黏度和表面张力，使其在丝网印刷过程中具备良好的流动性和覆盖能力，确保图案的精细化和解析度。通过这种方式，本技术在油墨性能和加工工艺的协调上取得了突破，创造出高导电性、良好附着力以及优异耐久性的导电油墨，满足了当前市场对高性能电子产品的需求。

该项目的技术先进性体现在其核心技术的前沿性上，如纳米复合材料的应用和先进的印刷工艺，使其在传统的导电油墨市场中脱颖而出。与传统导电油墨相比，新型油墨不仅导电性能更强，且具备更低的材料成本和更环保的特性，符合可持续发展的理念。此外，该油墨在开发过程中重点考虑了生产的可重复性与稳定性，确保了大规模生产的可行性。

关键技术/创新要点

首先，在性能方面，所开发油墨的导电性明显优于传统产品，并通过优化工艺参数，提高了油墨的涂覆性和稳定性。其次，在工艺参数方面，新型油墨允许在较低的温度下进行丝网印刷，降低了能耗，提高了生产效率。此外，油墨在环境特性上采用了无溶剂配方，减少了挥发性有机物的排放，符合当前环保趋势。

技术指标/优势

首先，新的油墨配方实现了更高的导电性，适用于更广泛的应用场景；其次，产品具有优异的环保特性，符合国际环保标准；最后，通过优化的生产工艺，我们能够在保持高性能的同时保持成本优势。这些优势使得我们的油墨在市场竞争中具备较强的吸引力。

应用领域和市场前景

随着电子产品、太阳能电池、集成电路和传感器等领域的快速发展，市场潜力巨大。本项目的高导电油墨将符合市场发展的方向，因此具备广阔的市场空间。

基于知识图谱和深度学习的糖尿病预测系统

成果完成人	徐鹤	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	医学检验技术及新设备	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	医疗信息化、智慧医疗				
核心专利号	ZL202211045060.6				

成果概述

糖尿病是因机体胰岛素分泌相对或绝对不足导致血糖过高，而引起蛋白质和脂肪代谢紊乱的一种常见内分泌代谢性疾病。患者长期血糖升高会引发各种严重的并发症。因此，糖尿病的早期发现和干预对于降低并发症风险至关重要。然而，现有的糖尿病预测模型大多仅基于数据驱动，受限于数据质量，且往往只考虑患者的体检指标，忽视了患者的生活习惯和自身症状的影响。此外，仅基于机器学习或深度学习方法缺乏外部医学专业知识支撑，导致结果的可解释性较低。

本团队提供了一种结合知识图谱与深度学习的糖尿病预测方法及系统。该成果通过构建细粒度的体检数据向量库及糖尿病领域知识图谱，将患者的结构化体检数据与非结构化症状描述进行深度融合。利用自注意力机制挖掘全局关联，并结合卷积神经网络提取局部特征，构建分类预测模型。实现了“数据+知识”双驱动的智能化预测，有效提升了糖尿病预测诊断的精准度与可解释性。

关键技术/创新要点

该成果的核心创新在于构建了一套数据和知识双驱动的糖尿病智能化预测框架，能够从海量医学数据中挖掘出诊断规则，且通过引入外部医学专业知识的支持，使得预测过程更接近于实际临床诊断，具有更高的可解释性，解决了传统模型在特征提取深度与临床可解释性方面的不足。

该技术将体检指标划分为“严重偏低”至“严重偏高”等七个细粒度维度，并利用 TransH 知识表示模型构建实体向量库，使数据具备医学语义。同时，针对非结构化的医学常识，利用 BiLSTM-CRF 模型从专业文献中抽取实体和关系，并基于知识表示模型TransR将糖尿病领域知识图谱中的所有实体和关系表示成向量的形式，构建糖尿病领域知识图谱。基于构建的糖尿病领域知识图谱，抽取患者症状描述中的实体和关系，并表示成向量的形式，得到症状描述向量，进而获得患者自身状况的矩阵。利用自注意力机制在全维度空间内捕捉体检指标与临床症状之间的复杂交互关联，获取全局信息。然后通过卷积神经网络对全局特征矩阵进行滑动卷积与最大池化处理，确保模型能捕捉到最具辨识力的患病特征，实现了生理指标与主观症状的协同建模。

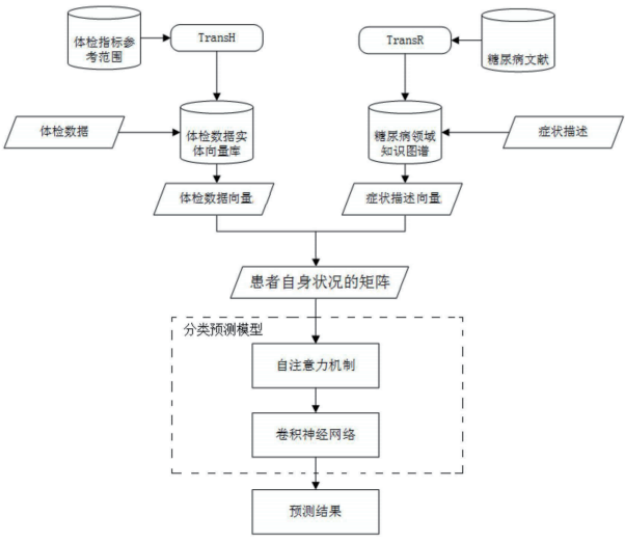


图1 实施例融合知识图谱和深度学习的糖尿病预测方法的流程

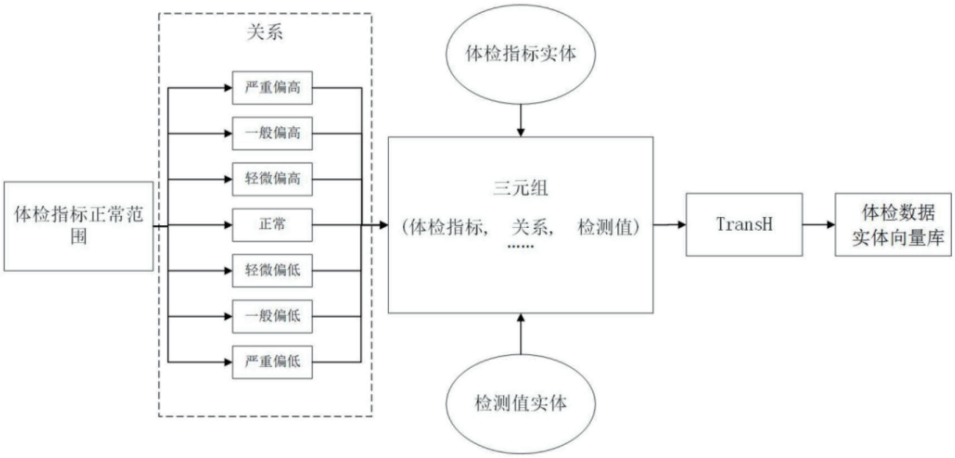


图2 实施例中得到体检数据向量表示

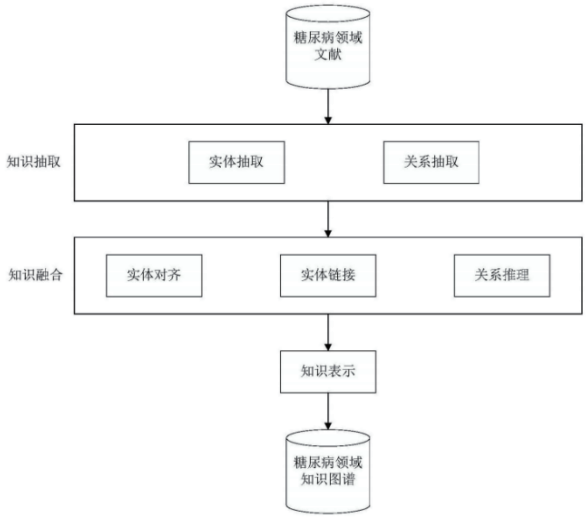


图3 实施例中构建糖尿病领域知识图谱

技术指标/优势

该成果在技术性能上展现出显著优势，能够通过同时考虑患者体检数据与症状描述，并引入自注意力机制获取全局信息以及卷积神经网络提取局部特征，实现了优于传统单一模型的预测准确率，能够从复杂的多维医疗数据中挖掘深层次关联。基于数据和知识共同驱动，能够从海量医学数据中挖掘出诊断规则，且通过引入外部医学专业知识的支持，使得预测过程更接近于实际临床诊断，具有更高的可解释性，能够解决现有的糖尿病预测过程中考虑的影响因素不全面，导致预测结果准确性和可解释性较低的问题。通过构建糖尿病领域知识图谱，并利用表示学习将知识图谱与深度学习结合，在糖尿病预测中引入外部专业知识的支持，能够使分类预测模型考虑的因素更加全面，有效提高预测的准确性和可解释性。

应用领域和市场前景

本成果深度赋能医疗信息化与智慧医疗领域，可广泛应用于早期糖尿病筛查、高危人群预警及基层医疗机构的辅助诊断决策。随着全球慢性病管理需求的爆发式增长，该技术在智能穿戴设备集成、互联网健康管理平台、以及商业保险精准控费等多元化场景中展现出广阔的市场空间。通过“数据+知识”的双驱动模式，该系统不仅能有效提升医疗服务效率，优化医疗资源配置，更在构建数字化慢性病防控体系中具备巨大的社会价值与商业化潜力。

一种COVID-19医学影像检测分类方法及装置

成果完成人	吴冬梅	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	医学影像诊断技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	医学影像检测				
核心专利号	ZL202111140377.3				

成果概述

本团队设计了一种COVID-19医学影像检测分类方法及装置，属于医学影像学检测以及深度学习技术领域。方法包括：获取用于COVID-19检测诊断的医学影像数据集；对该医学影像数据集进行处理，并对处理后的数据集进行划分；基于粒子群算法对卷积神经网络进行优化，具体为先选择卷积神经网络中可以优化的超参数，然后通过实验对比确定需要优化超参数的最优解；利用粒子群算法优化的卷积神经网络对划分后的医学影像数据集进行训练，实现图像的批量识别与正确分类。本研究借助深度学习方法，能够实现对COVID-19医学影像的高效自动鉴别，结合群体智能优化算法的深度学习可进一步提高图像分类的准确率。

关键技术/创新要点

（1）提出一种针对COVID-19的医学影像检测分类方法。

（2）通过深度学习手段，实现对COVID-19医学影像的高效自动鉴别。

（3）将群体智能优化算法与深度学习相结合，可进一步提高图像分类的准确率。

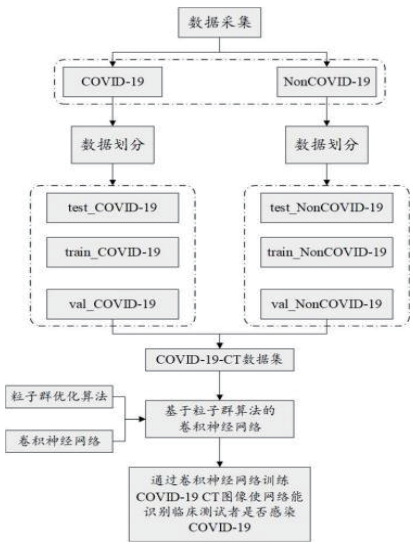


图1 医学影像检测分类方法的流程

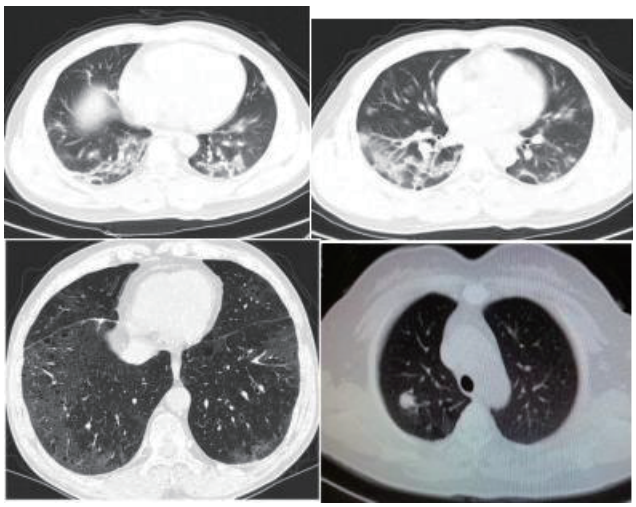


图2 CT数据集图像示例

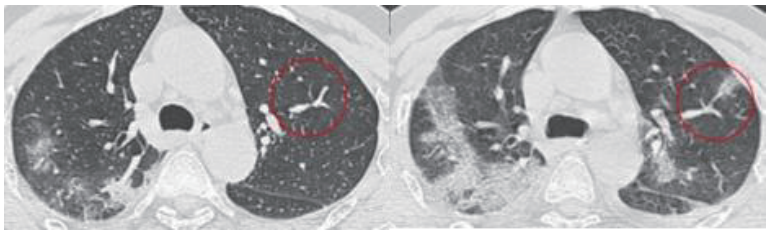


图3 COVID-19 CT图像检测示例

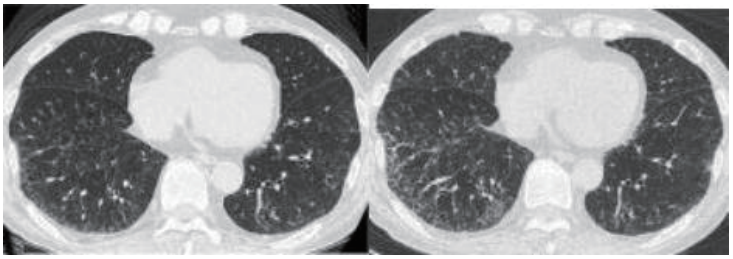
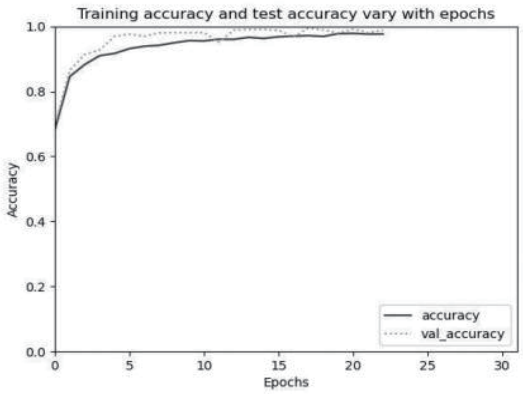


图4 非COVID-19 CT图像检测示例

技术指标/优势

使用基于粒子群算法优化的卷积神经网络训练划分医学影像数据集，能够实现图像的批量识别与准确分类，提高鉴别是否感染COVID-19的效率。如下图所示。



应用领域和市场前景

该技术方法属于医学影像学检测以及深度学习技术领域，有望克服现有技术中的不足，如人工诊断分析耗时长、隐秘病变难以发现且难免存在主观诊断误差。

一种光治疗试剂及其制备方法和应用

成果完成人	鲍碧清	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	其他新型医用材料及制备技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	材料化学
应用行业	疾病诊断及治疗领域				
核心专利号	ZL202210095505.5				

成果概述

由于肿瘤微环境具有乏氧、血管高渗透性和反应性、低pH等特点，严重限制了抗肿瘤药物作用的发挥。其中乏氧的环境与肿瘤的生长、转移、耐药等方面都有着密切的联系，很大程度上抑制了光动力疗法、化疗等的作用效果。如果能够开发一种能够实现在乏氧的肿瘤微环境下发生能量转移过程分解产生自由基，不受氧气浓度的干扰、对癌细胞造成杀伤的乏氧光敏剂，对于解决上述问题将非常有意义。

本技术提供了一种乏氧纳米光敏剂及其制备方法，由光引发剂小分子通过化学键连接到修饰羟基的上转换纳米粒子表面制备的，实现了在肿瘤乏氧环境下发生能量转移过程产生自由基、组织穿透深度深、生物相容性好、对正常组织毒副作用小等效果。

关键技术/创新要点

本技术首先利用光引发剂小分子与环氧氯丙烷在催化剂下反应，反应结束后除去有机溶剂得到携带氯基团的光引发剂小分子，后与表面修饰羟基的808nm激发的上转换纳米粒子发生取代反应，用离心沉淀除杂法得到一种乏氧光敏剂。

本技术选用携带氯基团的光引发剂小分子与表面修饰羟基的上转换纳米粒子发生取代反应制备生成乏氧纳米光敏剂，将光引发剂小分子Irgacure 2959溶解到乙醇中，进行超声处理，待其完全溶解后加热到55℃，后加入三氟化硼乙醚作为反应的催化剂，再逐滴加入环氧氯丙烷，在55℃条件下保温。反应结束后旋蒸除去过量的环氧氯丙烷和乙醇进行产物纯化，置于真空烘箱中烘干得到携带氯基团的光引发剂小分子2959-ECH。

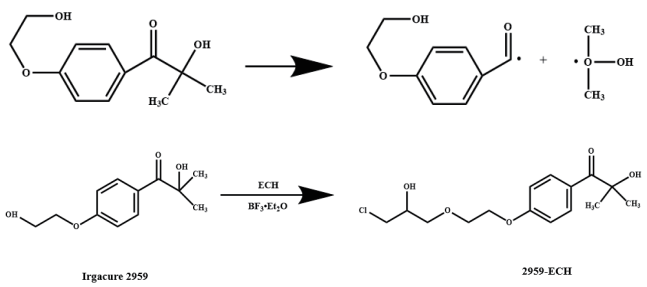


图1 乏氧自由基引发剂合成路线图

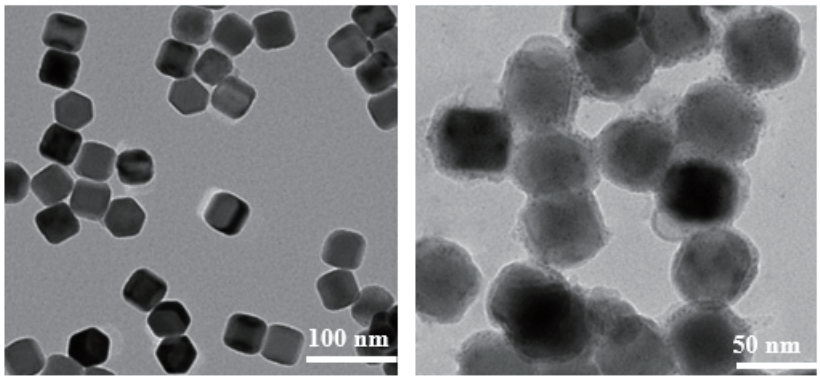


图2 乏氧杂化光敏剂TEM图

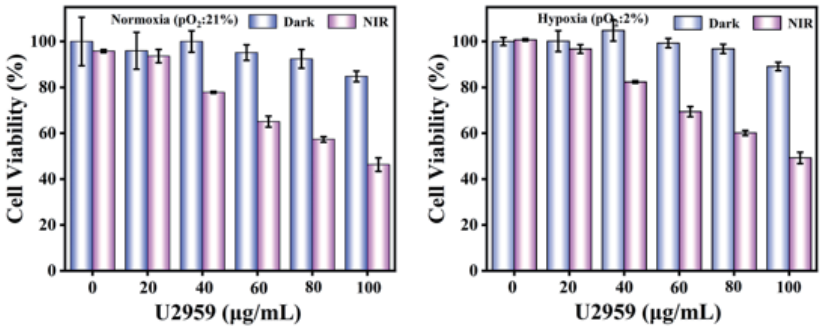


图3 乏氧杂化光敏剂的肿瘤细胞杀伤效果

技术指标/优势

本技术开发的乏氧光敏剂在外加激光照射下，通过光谱的重叠发生能量转移过程引发自身分解产生自由基，而不是通过物理载氧或者外部供氧，避免了载氧效率有限及高压氧治疗带来的后序氧癫痫等问题，有效解决肿瘤组织的乏氧情况。未加808nm激光照射时，具有良好的生物相容性，能够减小对正常组织的毒副作用，有效避免现有的光敏剂在光动力治疗过程中产生的光毒性问题。

应用领域和市场前景

本技术开发的乏氧纳米光敏剂中是在808nm激光器的照射下便能引发产生自由基，不需要氧气的参与便能在乏氧的肿瘤环境下起到治疗效果且组织穿透深度深；上转换纳米粒子的发射光谱与2959-ECH的吸收光谱部分重叠，发生能量转移过程从而有效引发产生自由基，因此可以解决多种因素导致的肿瘤乏氧问题，产生自由基，起到抑制肿瘤细胞生长繁殖的作用；该光敏剂生物相容性较好，没有明显的细胞毒性，可改善肿瘤乏氧环境中治疗效果欠佳的问题，在乏氧肿瘤及深层肿瘤光学治疗领域具有广泛应用前景。

Pt-Ni合金珊瑚纳米团簇催化氧还原驱动的绿色电化学发光体系及乳腺癌精准诊断应用

成果完成人	曹越	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	医学检验技术及新设备	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	分析化学
应用行业	生物医药诊断、体外诊断、精准医疗、电化学传感				

成果概述

针对传统电致化学发光（ECL）体系依赖有毒外源性共反应剂、氧还原（ORR）动力学缓慢、灵敏度不足等关键问题，本成果通过溶剂热合成与酸刻蚀调控，制备具有超薄Pt壳层的Pt-Ni合金珊瑚状纳米团簇。该结构利用配体效应与界面压缩应变协同调控Pt电子结构，实现高效、稳定、近4电子氧还原催化，性能优于商用Pt/C。以此构建以溶解氧为内源性共反应剂的绿色ECL传感平台，结合质子化类石墨相氮化碳纳米片，实现对乳腺癌标志物HER2蛋白及BT-474细胞的超灵敏、无标记检测。该平台检出限低、特异性强、稳定性好，可区分阳性/阴性样本、动态监测药物干预下HER2表达变化，为精准肿瘤诊断提供新型绿色、高效、低成本的电化学发光分析新策略，相关成果发表于材料领域顶级期刊《Advanced Functional Materials》。

关键技术/创新要点

(1)Pt-Ni珊瑚纳米团簇可控构筑

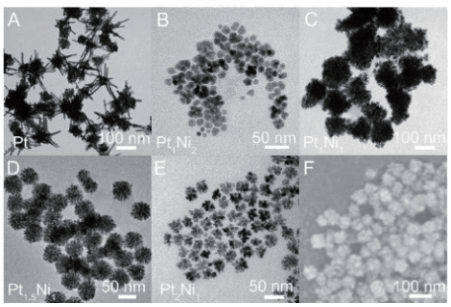


图1 不同形貌的Pt-Ni珊瑚纳米团簇

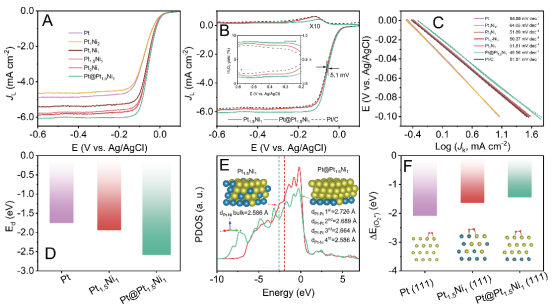


图2 ORR性能测试及理论计算

通过调控Pt/Ni前驱体比例与葡萄糖模板浓度，实现珊瑚状多级结构精准合成；经酸刻蚀形成超薄Pt壳/Pt-Ni 核壳异质结构，引入>1.78%界面压缩应变，大幅提升ORR本征活性与结构稳定性。

(2)氧还原催化机制创新

基于配体效应与应变效应下调d带中心，弱化氧吸附能，实现低塔菲尔斜率（49.56 mV dec^{-1}）、高极限电流、近4电子转移氧还原，解决氧还原缓慢瓶颈。

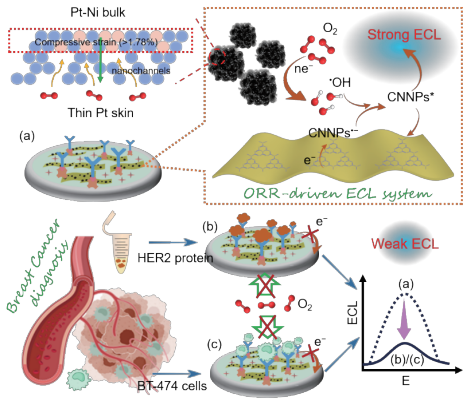


图3 氧还原催化ECL基质示意图

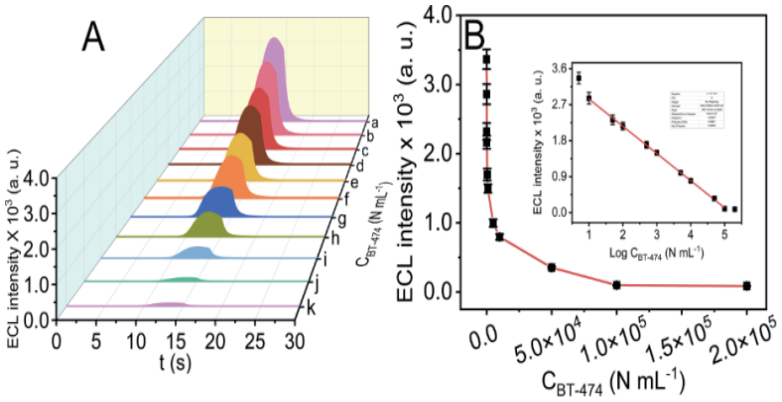


图4 BT-474细胞的ECL检测工作曲线

(3)无外源共反应剂绿色ECL体系

以环境氧为内源共反应剂，摒弃过硫酸钾、三丙胺等有毒试剂，构建更安全、环保、低成本的电化学发光新体系。

(4)超灵敏乳腺癌标志物检测

将催化材料与氮化碳纳米片复合，实现ECL信号增敏约14.5倍；建立无标记传感策略，对HER2蛋白检出限达0.26 pg mL^{-1}，对BT-474细胞检出限达6.2 cells mL^{-1}，可实现血清样本精准检测。

技术指标/优势

(1)催化性能：半波电位优于商用Pt/C，塔菲尔斜率49.56 mV dec^{-1}，H_2O_2产率<3.4%，电子转移数>3.92；5000次循环后性能无明显衰减。

(2)传感性能：HER2检测线性范围1 pg mL^{-1}~100 ng mL^{-1}，LOD=0.26 pg mL^{-1}；细胞检测线性范围10~10^5 cells mL^{-1}，LOD=6.2 cells mL^{-1}。

(3)特异性：抗干扰能力强，10倍干扰物无明显响应。

(4)稳定性：4 ℃存放1个月信号保留> 92.5%。

(5)实用性：血清样本回收率96.2%~105.7%，与临床检测方法一致性高。

(6)优势：无有毒共反应剂、低成本、高灵敏、快速检测(<15 min)、可动态监测。

应用领域和市场前景

本成果可应用于体外诊断、乳腺癌早期筛查、肿瘤标志物定量检测、靶向药物筛选、疗效动态监测等场景，适用于医院检验科、第三方医学检验所、药企研发部门及高校科研平台。随着精准医疗与体外诊断行业快速发展，绿色、高灵敏、低成本的新型传感技术需求持续增长。本成果摒弃传统有毒试剂，更符合临床安全与环保要求，同时具备超高灵敏度与宽检测范围，可弥补现有ELISA、化学发光法部分不足。未来可进一步集成于便携式电化学传感器、微流控芯片，实现床旁快速检测(POCT)，在乳腺癌早筛、术后监测、个性化用药指导等方面具备广阔临床转化前景与市场应用潜力。

近红外光一区介导的复合纳米棒光热材料及其制备方法

成果完成人	陈莹	职称	副研究员	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	药物新剂型与制剂创制技术		高技术领域（三级）	创新制剂技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料合成与加工工艺
应用行业	生物医药				
核心专利号	ZL202011346243.2				

成果概述

涉及一种智能复合纳米棒光热材料及其制备方法，该复合材料可以通过响应肿瘤微环境中过氧化氢的浓度，产生热效应从而实现热治疗的效果。该复合纳米棒是由二氧化铈、ABTS和表面修饰剂通过自组装和静电相互作用形成的，具有过氧化氢敏感性，可以在肿瘤组织中针对性地产生热效应，从而实现对肿瘤的治疗。该技术的创新之处在于，利用过氧化氢响应性纳米棒包裹光热药物的前驱物，实现了热疗的选择性，可以最大化地提高光热疗的疗效，从而达到对肿瘤的靶向性加热。这种方法不仅可以在肿瘤组织中针对性地产生热效应，而且可以避免在正常组织中产生过多的热效应，从而有效地降低了副作用的发生。这种智能复合纳米棒光热材料具有很大的应用前景，可以作为一种有效的治疗肿瘤的新型药物。同时，该技术的创新点也为其他纳米药物的研究提供了新的思路。

关键技术/创新要点

复合纳米棒是由二氧化铈、ABTS和表面修饰剂通过自组装和静电相互作用形成的，具有过氧化氢敏感性，可以在肿瘤组织中针对性地产生热效应，从而实现对肿瘤的治疗。

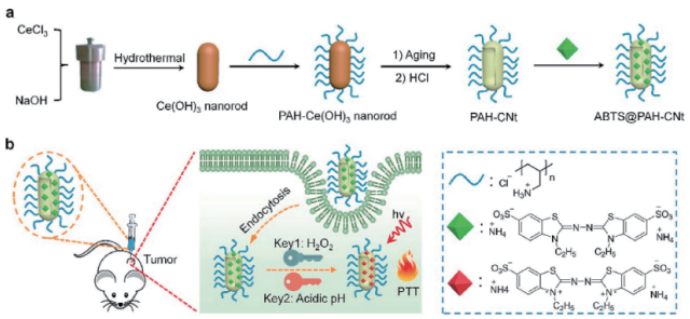


Fig. 1. (a) Schematic illustration of the preparation of ABTS@PAH-CNt. (b) Schematic illustration for the *in vivo* activatable PTT.

图1 智能复合纳米棒光热材料的制备示意图和肿瘤治疗示意图

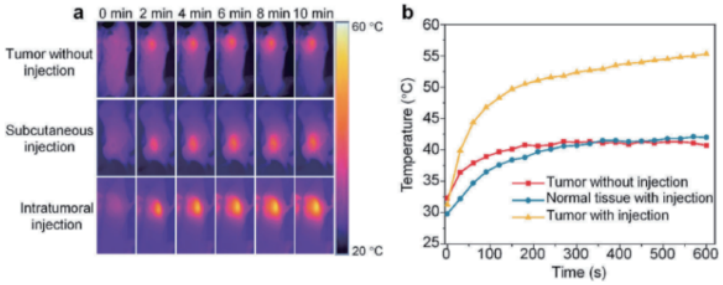


Fig. 5. *In vivo* photothermal effect. (a) Photothermal images of mice with different treatments under 808 nm laser irradiation (0.5 W/cm^2) at different time points. (b) Photothermal temperature of injected sites as a function of 808 nm laser irradiation time after different treatments. The injection dosage of ABTS@PAH-CNts for *in vivo* photothermal study was fixed at 150 μL, 1 mg/mL.

图2 智能复合纳米棒光热材料在肿瘤部位发生明显的光热效应

技术指标/优势

该技术的优势之处在于，利用过氧化氢响应性纳米棒包裹光热药物的前驱物，实现了热疗的选择性，可以最大化地提高光热疗的疗效，从而达到对肿瘤的靶向性加热。这种方法不仅可以在肿瘤组织中针对性地产生热效应，而且可以避免在正常组织中产生过多的热效应，从而有效地降低了副作用的发生。这种智能复合纳米棒光热材料具有很大的应用前景，可以作为一种有效的治疗肿瘤的新型药物。同时，该技术的创新点也为其他纳米药物的研究提供了新的思路。

应用领域和市场前景

该技术具有很大的应用前景，可以作为一种有效的治疗肿瘤的新型药物，具有靶向性强、非侵入性强、副作用少、可扩展性强等优点，具有广阔的应用前景和市场潜力。在未来的临床应用中，该技术可以成为肿瘤治疗领域的一种新型、安全、有效的治疗手段。随着技术的不断推进和临床验证的不断深入，该技术在其他领域的应用也会逐渐扩展和推广。

一种纳米马达载药颗粒及其制备方法和应用

成果完成人	范亲	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	药物新剂型与制剂创制技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	药学		二级学科	/
应用行业	生物医药技术领域				
核心专利号	CN119454948A				

成果概述

在实体瘤治疗中，药物有效蓄积和深入肿瘤组织的渗透性常常受到多重生物屏障的严重限制，这些生物屏障共同作用，导致大部分药物难以突破肿瘤的外围，无法有效到达肿瘤内部的靶区域，从而大大降低了治疗效果。因此，克服这些生物屏障，提高药物的肿瘤靶向性和穿透性，是目前肿瘤治疗中面临的重大挑战。本团队自主研发了一种纳米马达载药颗粒及其制备方法和应用，所述纳米马达载药颗粒是由DNA四面体结构负载铂纳米颗粒和亚甲基蓝药物后形成；所述纳米马达载药颗粒能增强肿瘤细胞对光敏剂亚甲基蓝(MB)的摄取同时实现对肿瘤的深层穿透，能够减少常规系统治疗癌症所需药物用量，且其安全性更高，不良反应更低，且本成果提供的纳米马达载药颗粒，其来源可靠、制备简单、生物相容性高，特异性响应光动力治疗，高效抑制肿瘤细胞生长。

关键技术/创新要点

PM@TDN是一种基于DNA纳米结构的智能递送平台，结合可编程DNA四面体与铂纳米颗粒（PtNPs），实现光动力治疗（PDT）与靶向递送的协同功能，利用DNA四面体良好的可编程性和自组装能力构建PM@TDN结构，形成尺寸均一、稳定性强的三维纳米框架，利于精准控制载药量与空间分布。通过将Pt纳米颗粒连接于TDN骨架，实现氧化还原反应驱动的自主运动与肿瘤微环境响应式产氧，提高深部肿瘤组织的渗透性和光动力治疗效率。采用静电作用及非共价相互作用高效负载光敏剂亚甲蓝（MB），并在肿瘤微环境中释放，提升抗肿瘤药物的生物利用度。在激光照射下，亚甲蓝诱导ROS生成，配合PtNPs催化产氧，有效克服TME缺氧环境。同时PDT诱导的免疫原性细胞死亡（ICD）可释放肿瘤相关抗原，激活机体免疫系统，实现治疗与免疫协同效应。基于DNA的材料具备良好的生物相容性与低免疫原性，结合适配体修饰实现对肿瘤细胞的主动靶向识别，提高治疗选择性，减少非特异性损伤。PM@TDN在体内外实验中均展现出稳定的物理化学性能、良好的肿瘤组织渗透能力和显著的治疗效果，为后续拓展至联合免疫治疗、个体化精准治疗等方向提供了可行基础。

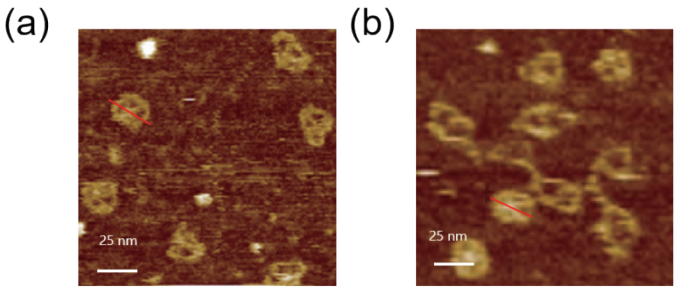


图1 (a)TDN的AFM图像；(b)MB@DTDN的AFM图像

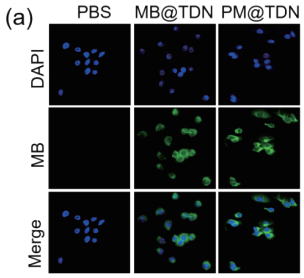


图2 CT26细胞吞噬PM@TDN共聚焦图像

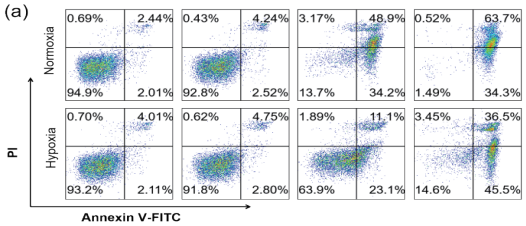


图3 流式细胞仪检测不同药物细胞凋亡

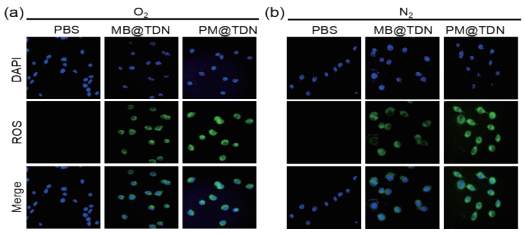


图4 不同处理后CRT和HMGB 1表达的共聚焦图像

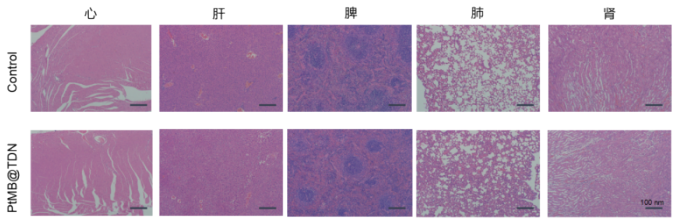


图5 治疗后心脏、肝、脾、肺、肾的H&E染色分析

技术指标/优势

与传统的化疗手段相比，该成果实现了在肿瘤部位靶向递送和精确释放药物，提高抗肿瘤药物疗效并降低毒副作用，通过双模式治疗加强治疗效果，并实时在线精准示踪药物的递送过程、靶向释药过程以及生物分布与代谢。

基于DNA四面体自组装而成，具有高度结构可编程性与尺寸可控性，利于精准调节药物负载量与空间分布，提高治疗的一致性和可重复性。将铂纳米颗粒（PtNPs）与DNA四面提整合，集成载药、催化产氧、自驱动运动和光动力治疗等多种功能于一体，通过适配体修饰，PM@TDN可实现对肿瘤细胞的主动识别和精准靶向；铂催化驱动增强运动能力，有效突破肿瘤微环境屏障，提升深部肿瘤组织的渗透效率。DNA四面体作为天然核酸材料，具有良好的生物相容性和可降解性，体内实验显示对正常组织无明显毒性，具备良好的临床应用前景。

应用领域和市场前景

PM@TDN作为一种基于DNA纳米技术的智能药物递送平台，具有广泛的应用领域和巨大的市场前景。在肿瘤治疗领域，PM@TDN凭借其精准的靶向能力、优异的组织穿透性和响应性药物释放机制，能够有效克服肿瘤微环境的多重屏障，实现深层肿瘤的高效治疗。特别是在光动力治疗（PDT）、免疫治疗以及联合化疗等多模态协同治疗中，PM@TDN的应用不仅能够显著提高治疗效果，还能降低对正常组织的毒副作用，从而满足个性化、精准化治疗的需求。

一种高灵敏度近红外二区荧光探针用于肝损伤中过氧化氢的实时监测

成果完成人	范曲立	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	分析化学
应用行业	医学与生物医学领域，生物成像与分子探针技术				

成果概述

本研究开发了一种新型NIR-II荧光探针Z-1065，用于实时检测过氧化氢（H_2O_2），这是药物性肝损伤（DILI）的关键生物标志物。该探针基于噻吡喹吡喃结构，采用分子内电荷转移（ICT）机制，具有较高的H_2O_2敏感性和选择性。Z-1065在789nm的吸收峰和1065nm的发射峰处表现出显著的斯托克斯位移，相比传统近红外探针，具有更好的组织穿透力和较低的背景干扰。在体外实验中，Z-1065能够有效检测药物诱导的细胞模型中的H_2O_2，且表现出较低的细胞毒性。通过在DILI小鼠模型中的体内成像，Z-1065成功地检测到内源性H_2O_2的生成，且具有较高的对比度和选择性。此外，Z-1065表现出良好的生物兼容性和光稳定性，表明其在肝损伤诊断和监测中的潜力。研究结果表明，Z-1065作为一种实时、非侵入性成像工具，在H_2O_2的检测及药物性肝损伤的诊断中具有广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

本研究开发了一种新型的基于噻吡喹吡喃结构的近红外II（NIR-II）荧光探针Z-1065，能够高效、灵敏地检测氢氧化物（H_2O_2）。氢氧化物是许多生物过程中的重要氧化还原分子，尤其在药物性肝损伤（DILI）等疾病的发病机制中发挥着重要作用。传统的荧光探针大多工作在NIR-I窗口，尽管可以提供较为清晰的成像，但由于其穿透深度有限，难以满足深层组织成像的需求。相比之下，NIR-II荧光探针能够提供更高的成像分辨率、更深的组织穿透力和更少的背景干扰，因此在生物医学领域具有广泛的应用潜力。Z-1065便是基于这一优势设计的，其通过分子内电荷转移（ICT）机制实现了对H_2O_2的灵敏检测。Z-1065结构中包含了一个苯基硼酸基团作为氢氧化物的识别位点，在与H_2O_2接触时，苯基硼酸基团会发生氧化反应，触发自我消除和π电子重排，生成具有NIR-II荧光特性的重构探针ZO-1065，表现出显著的荧光增强。Z-1065在体外表现出卓越的灵敏度和选择性，可以通过NIR-II成像实时监测H_2O_2的生成，且对其他常见的ROS如O^{2-}、NO^{2-}等无显著响应。此外，Z-1065在各种常见溶剂中的稳定性较好，特别是在含有10%胎牛血清（FBS）的DMEM培养基中也能保持较为稳定的荧光强度，表明其在体内应用中的稳定性和可靠性。研究还进一步评估了Z-1065在药物性肝损伤小鼠模型中的应用效果。在异烟肼（INH）诱导的肝损伤模型中，Z-1065能够实时监测H_2O_2的生成，并且在N-乙酰半胱氨酸（NAC）干预下，其荧光强度显著减弱，验证了其在生理条件下的高选择性和高灵敏度。此外，Z-1065在小鼠体内的成像实验中表现出较高的对比度和深度穿透能力，能够清晰地揭示肝脏内的H_2O_2生成。

综上所述，Z-1065是一种具有良好生物兼容性、较低细胞毒性和优异光稳定性的NIR-II荧光探针。其不仅在体外具有显著的H_2O_2检测能力，还能在药物性肝损伤等疾病模型中实现深层次、实时的生物成像，展示了在疾病诊断和治疗监测中的巨大潜力。该研究为基于NIR-II荧光探针的氧化应激相关疾病的早期诊断和精准治疗提供了新的技术途径。

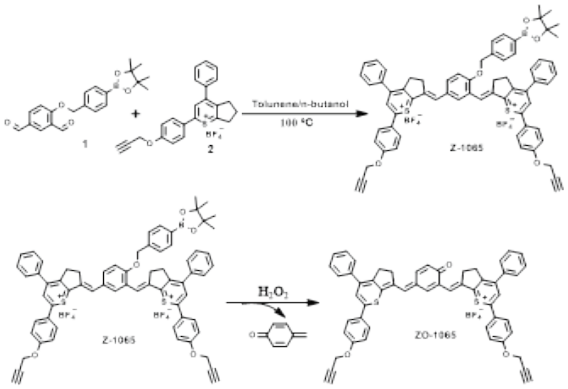


图1 该过氧化氢响应的近红外二区探针ZO-1065的合成路线

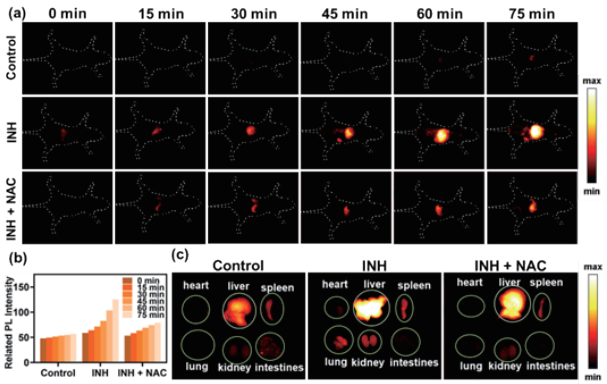


图2 该探针在活体肝损伤老鼠中的近红外二区荧光成像

技术指标/优势

Z-1065 NIR-II荧光探针具有显著的技术优势和优异的性能。其工作在NIR-II窗口，最大吸收波长为789nm，发射波长为1065nm，提供了更深的组织穿透力和更高的成像分辨率，适用于深层组织的非侵入性成像。该探针对氢氧化物（H_2O_2）具有高选择性和灵敏度，几乎不受其他活性氧（ROS）或离子的干扰，能够准确检测药物性肝损伤（DILI）中的氧化应激水平。Z-1065在二氯甲烷中的量子产率为0.052%，并且在连续808nm激光照射下表现出优异的光稳定性，超过传统的ICG。此外，Z-1065在L-02细胞实验中显示出良好的生物兼容性，细胞毒性极低，且在体内小鼠模型中可实现高对比度、深层的NIR-II成像，有效监测H_2O_2的生成。综上，Z-1065在灵敏度、选择性、光稳定性和生物兼容性方面具有显著优势，为药物性肝损伤等疾病的早期诊断和监测提供了强有力的工具。

应用领域和市场前景

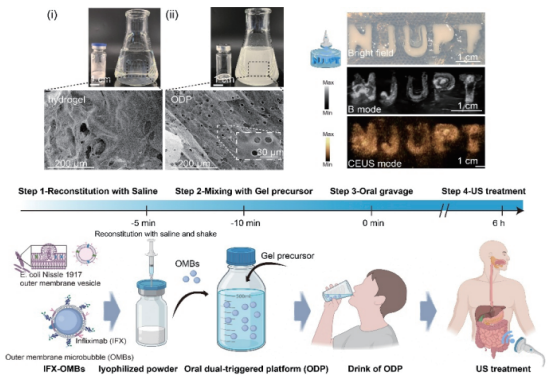
Z-1065 NIR-II荧光探针的科研成果具有广泛的应用前景，尤其在医学诊断、疾病监测和药物研发领域。首先，Z-1065可以用于药物性肝损伤（DILI）的早期诊断与监测，利用其高选择性和灵敏度，有效检测体内的H_2O_2水平，这对于临床上药物相关的肝损伤诊断具有重要意义。此外，Z-1065还可用于研究氧化应激相关疾病，如心血管病、神经退行性疾病等，帮助深入了解疾病的发生机制与发展过程。在药物研发领域，Z-1065可作为新药筛选和机制研究的辅助工具，通过实时监测药物对细胞及组织中ROS水平的影响，评估药物的生物活性和副作用。其高对比度的NIR-II成像优势使其在体内深层组织成像中具有极大的潜力，尤其适合大动物或人体临床研究中的应用。从市场前景来看，随着对精确医学、早期诊断及个性化治疗的需求日益增加，Z-1065的应用前景广阔。其在临床医学、药物研发、以及生物医学研究领域的应用潜力，将推动其在高端诊断仪器、疾病监测设备和药物开发中的商业化。预计随着技术的进一步成熟，Z-1065及类似技术将成为精准医疗和现代药物研发领域的重要工具，具有较大的市场空间。

口服益生菌凝胶微泡

成果完成人	高宇	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	新型给药制剂技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	生物材料
应用行业	生物医药				
核心专利号	2023115041361				

成果概述

在炎症性肠病管理中，口服给药可直接作用于肠黏膜并显著提升患者依从性；但蛋白等生物大分子在胃酸、肠黏液与上皮屏障等多重生理壁垒下难以实现有效递送。为了解决这一痛点，口服益生菌凝胶微泡是一款面向炎症性肠病精准治疗的双触发递送产品，旨在解决传统静脉抗体与口服益生菌/囊泡制剂“到不了、进不去、留不住”的关键限制。该产品采用“外层pH响应水凝胶+内层超声响应微泡”的仿生结构，实现胃到肠的顺序通过：在胃酸环境中，外层水凝胶形成稳定腔体，为微泡提供酸保护，同时高效传递体外超声能量；到达肠道后，在超声作用下，内核微泡被精准激活并发生“微泡到纳米囊泡”转化，驱动有效载荷在病灶区域富集与释放。微泡内核来源于益生菌大肠杆菌Nissle 1917的外膜囊泡，天然保留关键生物活性组分，并在表面装饰抗TNF-α分子，实现“阻断促炎因子+调控肠道菌群”的协同干预。整体方案兼具口服便捷性、外部可控激活与多机制联合作用，为炎症性肠病提供更可及、更可控、兼顾抗炎与微生态重塑的新一代口服治疗路径。



技术指标/优势

（1）口服益生菌凝胶微泡中保留了65.2%的天然益生菌蛋白；

（2）英夫利希单抗的药物装载率为58.4±5.26%；

（3）口服后6h到达结肠，通过施加超声后，结肠中药物富集量提高了10.8倍。

应用领域和市场前景

本成果开发的口服益生菌凝胶微泡面向炎症性肠病的长期管理与复发控制，兼具“口服直达肠黏膜”的依从性优势与“超声按需激活”的精准可控性。实现抗炎与菌群调控协同。该方案具有原料广泛、可扩展为平台型递送载体的潜力，适合用于维持治疗、减量联合与个体化干预。

面向多种肿瘤标志物的纸基电致化学发光生物传感器

成果完成人	李美星	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医药生物技术		高技术领域（三级）	快速生物检测技术	
所属学科方向	一级学科	化学	二级学科	化学生物学	
应用行业	医学检测				
核心专利号	2023107456353；2023104876201				

成果概述

肿瘤标志物是存在于肿瘤组织、体液或由肿瘤诱导宿主产生的一类物质，其表达水平显著高于正常生理范围，与肿瘤的发生发展密切相关。常见的肿瘤标志物包括蛋白质、细胞因子、异常表达的DNA、microRNA以及循环肿瘤细胞等，对其进行高灵敏度检测是实现肿瘤早期诊断的关键。

本研究基于纸基电极图案化、功能化修饰、测流免疫分析及电致化学发光（ECL）检测技术，研发了一系列面向microRNA、癌胚抗原（CEA）、循环肿瘤细胞（CTCs）等标志物的ECL生物传感器。该系列传感器具备多模式检测能力：既可实现对单一标志物的精准定量，也可通过双标志物联合检测达成疾病“初筛-分期”一体化分析，并建立了循环肿瘤细胞捕获与检测集成化平台。这些技术为重大疾病的早期发现与精准诊断提供了有效工具。

关键技术/创新要点

1.纸基ECL便携化技术。将图案化纸基材料与电致化学发光技术融合，利用纸基毛细作用实现自动输运；ECL测试时驱动电压低于1.5 V，可由纽扣电池供电，实现高灵敏度检测设备的小型化与便携化。

2.双标志物同步检测技术。在一体化芯片上分区修饰不同识别探针，实现癌胚抗原与microRNA的同步检测，10分钟内同时获取筛查与分期信息，突破单一靶标检测局限，提升诊断效率。

3.CTC捕获-检测一体化技术。构建微纳结构界面，结合拓扑结构与特异性识别分子，60分钟内细胞捕获效率超80%，并集成原位ECL检测功能，检测限达18 cells/mL，解决捕获与检测分离导致的样本损失与操作繁琐问题。

4.模块化可定制平台。采用模块化设计，通过灵活更换检测区域的功能化修饰层（适配体、抗体、DNA探针等），快速适配不同肿瘤标志物，为多样化检测需求提供通用型技术平台。

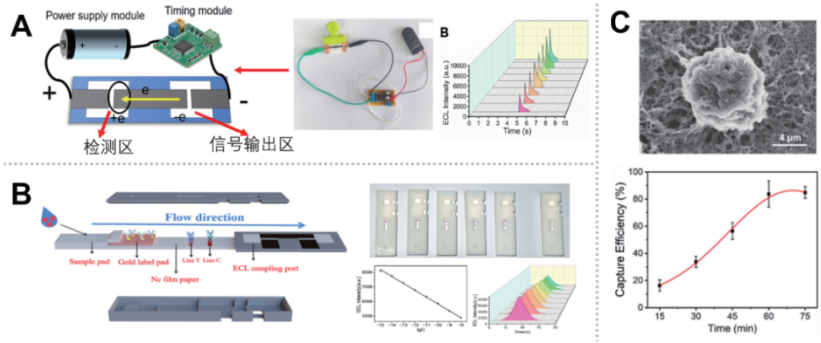


图1 (A)面向microRNA的纸基生物传感器;(B)面向CEA+microRNA双标志物集成化ECL生物传感器;
(C)生物传感器捕获的CTCs扫描电镜成像及细胞捕获效率

技术指标/优势

本成果开发了一系列性能优异的ECL生物传感器,其核心指标如下:(1)单标志物检测传感器:驱动电压<1.5V,支持纽扣电池供电;对microRNA检测限低至0.8fM。(2)双标志物集成传感器:可同步检测CEA和microRNA,CEA检出浓度达15ng/mL,检测时间仅需10分钟,满足快速筛查需求。(3)循环肿瘤细胞传感器:基于微纳结构界面,60分钟内细胞捕获效率>80%,检测限达18 cells/mL,实现高效捕获与灵敏检测一体。

该系列生物传感器采用模块化设计,可通过检测区域的功能化修饰灵活适配不同目标物,为多种肿瘤标志物的现场检测与即时诊断提供可定制的技术平台。

应用领域和市场前景

本成果开发的系列ECL生物传感器,兼具便携化、轻薄化与操作简便等特点,并具有高灵敏度与低检测限优势,适用于microRNA、CEA、CTCs等多种肿瘤标志物的精准检测。能够满足早期筛查、肿瘤分期等不同场景需求。在社区医疗、家庭健康监测及基层医疗机构中,可为癌症的早期发现与精准诊断提供高效、便捷的检测工具,具有显著的转化应用前景。

水溶性近红外二区荧光探针

成果完成人	孙鹏飞	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	药物新剂型与制剂创制技术		高技术领域（三级）	药物新剂型与制剂创制技术	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	化学生物学
应用行业	生物成像与诊断				

成果概述

近红外二区（NIR-II; 900-1700 nm）荧光成像技术凭借其深层组织穿透能力，微米级空间分辨率和低背景干扰等优势，在精准医学诊断领域展现出巨大潜力。然而，传统荧光探针在水相环境中普遍存在聚集导致荧光淬灭（ACQ）效应与量子产率（QY）显著下降的双重限制，严重制约其在复杂生物体系中的应用。本成果针对上述挑战，提出基于供体-受体-供体（D-A-D）分子构型的亲脂性增强策略，通过分子工程设计与纳米包封技术开发了新型高亮度NIR-II荧光探针体系（B-2C-N/DMPC），并成功实现了体内脂肪组织的可视化和脂肪肝疾病的检测。

关键技术/创新要点

在体外模拟体系中，B-2C-N在仿生脂质体模型中表出显著的荧光增强行为，展现出优异的脂质亲和特性。在细胞层面，基于Hela-LDs细胞模型（油酸诱导的脂滴富集模型）的定量分析发现B-2C-N在脂滴中的荧光强度呈现典型的浓度依赖关系和时间依赖关系，证实了探针对脂质微环境的高特异性识别能力。特别值得关注的是，在非酒精性脂肪肝（NAFLD）小鼠模型中，B-2C-N/F127复合体系通过尾静脉注射后，肝脏区域荧光强度较正常组提升3.8倍，展现了优异的疾病诊断潜力。在活体成像性能方面，B-2C-N/DMPC体系展现出突破性的光学特性：淋巴系统成像中达到峰值信背比（SBR）5.26，全身血管造影中后肢血管SBR值高达18.09。本研究构建了集高灵敏度成像、疾病特异性识别和优良生物相容性于一体的纳米探针体系，为发展新一代分子影像诊断技术提供了创新性解决方案。



图1 B-2C-N的分子式

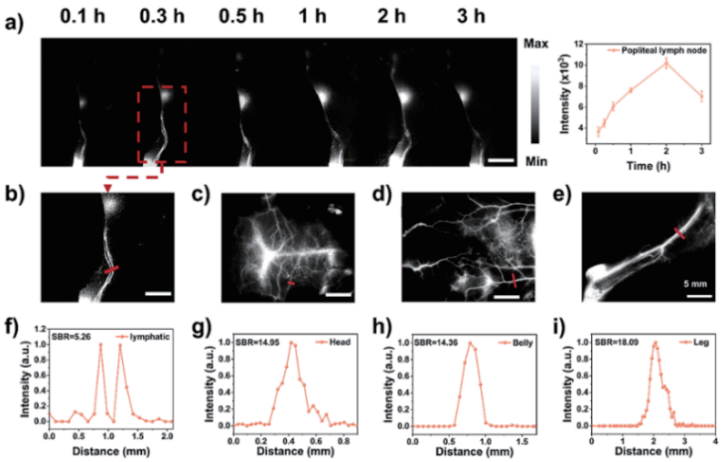


图2 注射B-2C-N/DMPC纳米颗粒后不同时间点, 淋巴管和淋巴结中NIR-II荧光成像的定量分析

技术指标/优势

在活体成像性能方面, B-2C-N/DMPC体系展现出突破性的光学特性:淋巴系统成像中达到峰值信背比(SBR)5.26, 全身血管造影中后肢血管SBR值高达18.09。本成果构建了集高灵敏度成像、疾病特异性识别和优良生物相容性于一体的纳米探针体系, 为发展新一代分子影像诊断技术提供了创新性解决方案。

应用领域和市场前景

NIR-II荧光成像技术可以有效增加成像的分辨率和清晰度、有效区分浅表肿瘤病灶区域及淋巴转移病灶。可用于疾病的成像诊断及手术导航领域。在成像引导的手术中快速分辨肿瘤病灶边界、提升肿瘤的切除效率。

快速自凝止血粉末（GH粉末）

成果完成人	滕兆刚	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	/
应用行业	医学救援				

成果概述

创伤伤口止血是急救和创伤医学中的关键环节，直接关系到患者的生存率和康复效果。无论是战争、交通事故还是日常意外，严重出血都是导致死亡的主要原因之一，尤其是在伤后“黄金一小时”内，快速有效的止血措施至关重要。目前的止血材料存在着止血速率慢、操作困难等问题，导致无法对伤患进行及时有效的止血，使伤患的生存率降低。因此，亟需开发高效、快速且易于操作的止血材料。

本团队自主研发了一种快速自凝止血粉末（GH粉末）。该粉末基于具有良好生物相容性的明胶分子改性，侧脸修饰强负电的磺酸基团，形成具有三维多孔网络状结构的水凝胶前体，再经过冷冻干燥和研磨工艺制备出GH粉末。由于明胶分子具有大量羧基且修饰磺酸基团，保证了GH粉末优秀的亲水性能以及对血液中血红细胞的吸附能力，展现出了优秀的凝血潜力。通过体外凝血实验及小动物体内伤口模型验证，GH粉末的止血速率（止血时间≤3.5min）优于目前商用止血材料，商用明胶海绵和壳聚糖纱布（止血时间≥5min）。GH粉末优秀的止血性能和可应用于多种伤口类型的特点，使其在创伤止血领域有着潜在的广泛应用的前景。

关键技术/创新要点

作为止血材料，快速吸收血液、加速伤口处凝血情况是关键要素。GH粉末基于具有亲水性能的明胶分子，通过化学合成技术、高分子修饰技术，提升GH粉末的亲水能力和血红细胞吸附能力，加快粉末对于血液中水分吸收及血红细胞的聚集，激活凝血因子形成凝血，极大的缩短了伤口止血时间，提高伤患的生存率。

本团队通过对明胶分子进行侧链修饰，引入磺酸基团和不饱和双键，在碱性环境下加速分子间聚合，形成具有三位网络状多孔结构水凝胶前体。再对水凝胶前体进行冷冻干燥和研磨工艺，制备出尺寸均匀的GH粉末颗粒。GH粉末自身具有优秀的吸水自凝能力，可在伤口处快速形成物理屏障，减少多余血液流失，同时磺酸基团促进血红细胞在伤口处凝集，激活凝血因子，引发人体内源性凝血机制，实现高效快速止血。

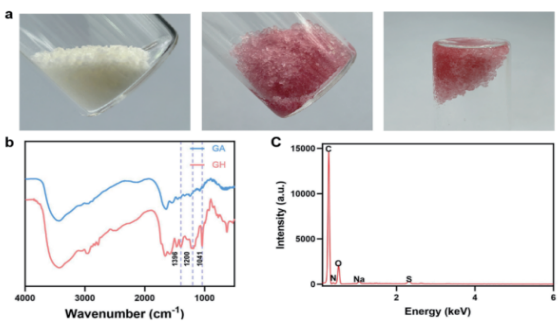


图1（a）GH粉末吸水自凝的光学图片，（b）GH粉末红外图和（c）GH粉末EDS数据图验证磺酸基团成功修饰

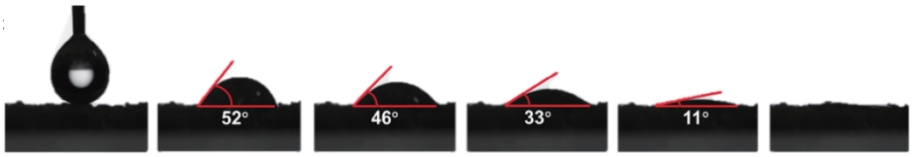


图2 GH粉末接触角测试数据

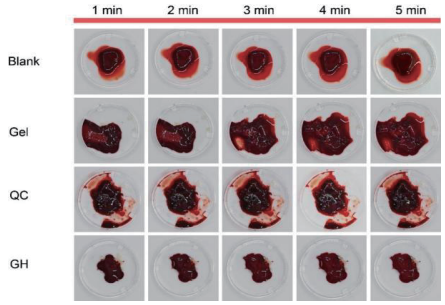


图3 GH粉末体外凝血测试光学图
（Gel-商用明胶海绵, QC-壳聚糖粉末）

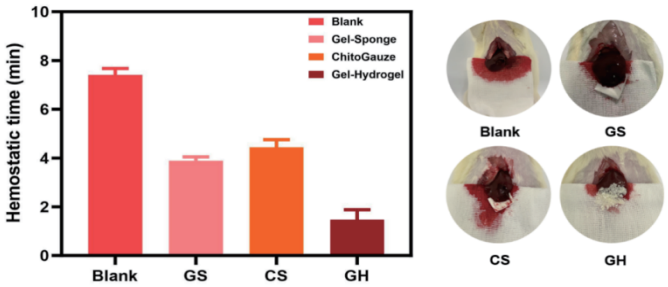


图4 GH粉末大鼠肝脏伤口模型止血测试
（GS-商用明胶海绵, CS-壳聚糖纱布）

技术指标/优势

适用于伤口长度或直径小于5cm的器官伤口的填塞止血；适用于表浅伤口(仅涉及器官表面, 未穿透器官壁或深部组织)及中度伤口(穿透器官壁, 但未到达深部组织)；

技术指标：

(1)基本性能参数：

①重量：3克、5克、8克；

②颜色：白色或类白色；

③性状：可塑型固体；

④环境适应性：室温保存, 适用环境温度0~40℃,空气湿度40%～70%；

(2)基本作业指标：

①表面带负电；

②体外吸水/吸血率达100%；

③体内起效止血时间3～5分钟；

技术优势：

相较于目前商用止血材料, 明胶海绵和壳聚糖纱布, GH粉末的止血时间更短, 止血速度更快, 止血效率更高。且GH粉末的应用伤口场景更丰富, 包括表皮伤口、创道伤口、不可压迫型伤口。

应用领域和市场前景

该成果可为医疗行业的伤口处理提供技术支持。可应用于多种场景, 如伤患伤口的急救处理、术中出血、术后二次出血等情况。这不仅是一种快速有效的止血措施, 更是提高患者生存率的重要保障。由于GH粉末的原材料成本低廉, 合成手法简单, 止血效果高效, 操作方式便捷, 投入市场后具有快速推广应用的潜力。该成果有望在医疗领域提供一种新的止血新策略。

高性能一氧化氮双比率型荧光探针

成果完成人	王其	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	新材料	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	/
应用行业	生物医药				
核心专利号	202311417841.8				

成果概述

本成果设计并制备了一种以NIR-IIb（1500-1700 nm）荧光为参比信号的双比率型探针并用于体内一氧化氮（NO）的检测。目前的比率型荧光探针仍存在待改进之处，比如信号波段太短、两个信号的距离太近等。我们将一种NO响应的共轭聚合物和镧系稀土纳米晶体共同包覆形成水溶性的纳米粒子，探针与NO结合后，NIR-I区域（700-850 nm）的荧光强度下降，NIR-II’区域（1000-1400 nm）的荧光强度上升，镧系稀土纳米晶体在 NIR-IIb的发射峰强度保持不变，因此构成了NIR-I/NIR-IIb和 NIR-II’/NIR-IIb两组比率型探针。该探针信号波长具有较大的跨度，且以NIR-IIb荧光作为参比信号，因此具有更高的准确性。

关键技术/创新要点

一氧化氮是一种小分子、疏水性的气体神经递质，它在多种生物过程中起到了关键的调控作用。例如，一氧化氮参与血管舒张、神经传递、免疫反应等多种生理过程。此外，一氧化氮的异常表达与多种疾病，如心血管疾病、神经退行性疾病、炎症和肿瘤等，都有关联。因此，对一氧化氮的实时、高灵敏度检测和成像显得尤为重要。然而，由于一氧化氮的生物半衰期短、浓度低以及与其他生物分子的高度反应性，使得其在生物体内的检测和成像面临着巨大的挑战。传统的一氧化氮检测方法，如电化学传感器和化学吸附，虽然具有一定的灵敏度，但它们难以实现实时、无损和高分辨率的生物成像。此外，这些方法通常需要复杂的样品处理和仪器设备，不适合于临床和实验室的常规应用。

近年来，荧光探针技术为一氧化氮的生物成像提供了一个有力的工具。荧光探针具有高灵敏度、高选择性、无创伤性和实时性等优点。但是，大多数现有的一氧化氮荧光探针都是基于NIR-I区域的，它们在深部组织的成像中受到了限制。针对以上不足，提供了一种一氧化氮响应的有机共轭聚合物、NIR-IIb双比率型荧光探针，双比率型荧光探针可以同时反应两种比率信号，来提高检测的准确性和可靠性，从而避免了单一比率信号受到其他因素干扰的问题。

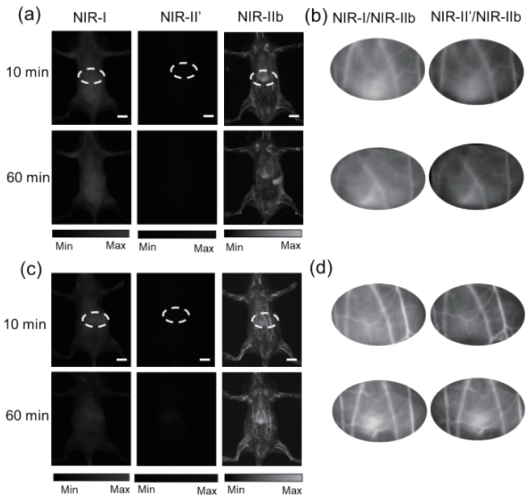


图1 双比率型荧光探针用于药物诱导肝损伤检测

技术指标/优势

本成果制备了一种一氧化氮响应的有机共轭聚合物、NIR-IIb双比率型荧光探针，所述有机共轭聚合物由给体、连接单元和响应单元组成，NIR-IIb双比率型荧光探针包括上述有机共轭聚合物和参比单元稀土纳米晶体。该探针以NIR-IIb区域荧光信号为参比信号，能够实现对一氧化氮的高灵敏度、高选择性的检测。由于探针在NIR-IIb区域的发光特性，因此具有深度成像能力，适用于组织和器官的一氧化氮的监测。此外，双比率响应设计提高了探针的检测准确性，减少了其他生物分子的干扰。本成果制备的探针可广泛应用于细胞、小动物模型的一氧化氮实时成像，为研究一氧化氮在生物体内的作用提供了有力工具。本成果已经申请中国发明专利。

应用领域和市场前景

本成果能够有效克服目前NO检测存在的缺陷，能显著提高检测准确度，在细胞及活体水平上NO相关疾病检测诊断等领域具有潜在的应用价值。

用于增强光动力治疗的CT成像纳米造影剂

成果完成人	谢晨	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医药生物技术		高技术领域（三级）	生物大分子类药物研发技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	有机高分子材料
应用行业	生物医药				

成果概述

目前，临床上的CT造影剂在肿瘤检测方面面临靶向效率低，成像对比度与灵敏度较差的问题。基于此，我们开发了一种CT成像纳米造影剂，该纳米造影剂由侧链富含碘元素的两亲性聚合物通过自组装形成。由于含有高浓度的碘元素，该造影剂具有良好的CT成像对比度。同时纳米结构赋予了该造影剂良好的肿瘤靶向能力。实验表明，静脉注射纳米造影剂后，能够在4小时内通过CT造影对小鼠肿瘤进行成像与检测。此外，该纳米造影剂还可以负载疏水性的光敏剂分子用于光动力治疗。由于纳米造影剂高浓度的碘元素，可通过分子间重原子效应增强造影剂的光动力效果，得到更好的肿瘤疗效。光敏剂所具有的荧光或光声成像能力也可以进一步用于肿瘤的光学成像，得到更好的成像效果。

关键技术/创新要点

本团队开发的纳米造影剂结构如图1a所示。纳米造影剂SPN-I由两亲性聚合物PEG-PHEMA-I和疏水性共轭聚合物PCPDTBT通过纳米沉淀法制备得到。SPN-I高浓度的碘元素可以产生良好的CT成像对比度，而PCPDTBT可以产生近红外荧光信号与光动力效应。从图1b中可以看出，纳米造影剂的CT成像信号随着浓度的增大线性增加。图1c中可以看出，纳米造影剂可以在静脉注射4小时后检测出小鼠的肿瘤。图1d可以看出相比于没有碘元素的纳米粒子，SPN-I的光动力效应明显较高。在小鼠肿瘤治疗实验中，SPN-I配合635纳米激光照射具有最好的肿瘤治疗效果，基本可以完全抑制肿瘤的生长。

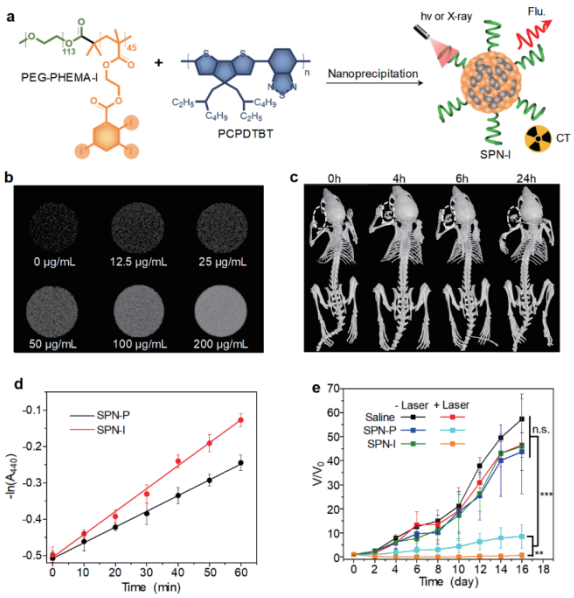


图1. (a)SPN-I的结构与制备过程；(b)SPN-I的CT造影对比度与浓度关系；(c)静脉注射SPN-I后小鼠在不同时间的CT成像图，白色圈为肿瘤；(d)SPN-I与不含碘元素的SPN-P的光动力效果对比；(e)小鼠的肿瘤治疗效果。

技术指标/优势

与传统的荧光成像手段相比，该成果实现了荧光/CT双模态成像，通过CT成像弥补了荧光成像穿透深度较低的问题，更有利于实现临床转化。同时，该纳米平台可以有效提升光动力治疗效果，作为一个通用的策略，在临床转化方面具有一定的优势。

应用领域和市场前景

该成果可为医疗行业中的肿瘤诊断、成像和治疗等相关方面提供高效的技术支持，如：癌症部位的早期精准成像，通过CT成像对深层肿瘤进行早期诊断，在手术中利用荧光成像保障肿瘤组织的完全切除和避免健康组织的不必要切除，实现肿瘤手术治疗的“导航”。最后，利用光动力治疗的高效率，实现残余肿瘤细胞的完全清除。该成果有望应用于临床癌症诊疗的各个阶段，具有一定的应用前景。

超声响应抗菌剂

成果完成人	宇文力辉	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	纳米药物		高技术领域（三级）	纳米抗菌剂	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	纳米生物医学
应用行业	生物医药				
核心专利号	ZL202211066165X				

成果概述

抗生素耐药问题严重威胁人类的生命健康。不断产生的新型耐药菌使得当前传统抗生素的效果严重下降。新型抗生素面临技术与资金方面的诸多问题，研发管线日益枯竭。随着纳米生物医学的不断发展，新型的抗菌纳米材料，如纳米二氧化钛、纳米银等不断涌现。然而，当前的抗菌纳米材料存在抗菌活性低、毒性较大、组织渗透不良等问题。本成果发展了新型超声响应抗菌剂，能够通过多种模式清除细菌生物膜，在小动物水平有效治疗铜绿假单胞菌肺部感染，同时表现出良好的生物相容性和较低的活体毒性。

关键技术/创新要点

本成果发展了超声响应抗菌剂的可控制备技术，提出了一种基于代谢微环境调控的声动力治疗策略，用于高效治疗细菌生物膜感染。首先，将声敏剂、乏氧前药、全氟化碳与磷脂结合，并在液相自组装形成纳米粒子。在超声作用下，全氟化碳可气化并产生空化效应，破坏细菌生物膜结构并增强声敏剂和乏氧前药的渗透；声敏剂可将氧气转换为ROS杀灭生物膜内部的部分活性菌，并消耗生物膜感染组织内部的氧气；乏氧微环境一方面调控细菌的代谢，使其进入厌氧呼吸状态并增强硝基还原酶的表达，激活乏氧前药实现生物膜的高效抑制；同时，乏氧微环境使免疫细胞转变为糖酵解代谢模式，相关代谢产物可进一步激活巨噬细胞、中性粒细胞以及NK细胞的炎性免疫反应，提升固有免疫对生物膜的清除性能。

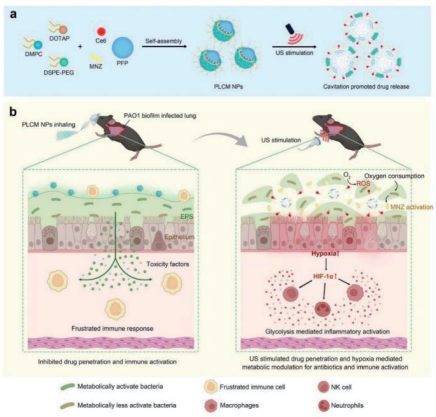


图1 超声响应的脂质体纳米颗粒用于慢性肺炎感染的治疗

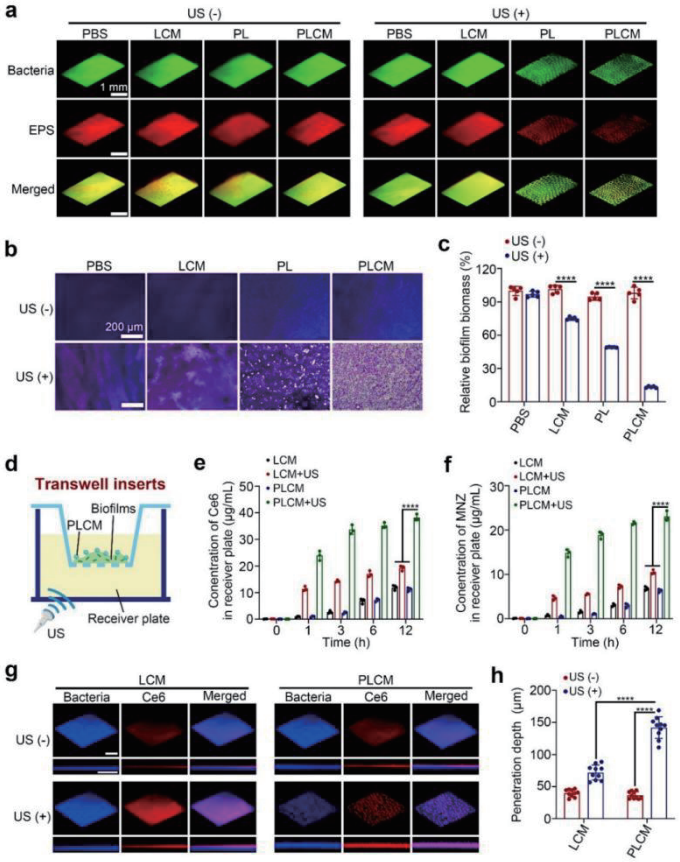


图2 超声响应抗菌剂破坏生物膜结构增强药物渗透

技术指标/优势

本成果通过磷脂水化的方法得到小尺寸的载药纳米囊泡，并负载低沸点全氟化碳，具有相变气化能力，可以在超声存在的情况下产生气泡，发生惯性空化，破坏细菌生物膜结构，增强负载的药物渗透，通过声动力杀菌，并消耗氧气，激活乏氧前药和免疫细胞，从而有效杀伤生物膜内细菌。体外实验结果证明超声响应抗菌剂结合可对铜绿假单胞菌生物膜的杀菌效率达到6.3个数量级(99.99995%)，并抑制生物膜的再生。结合超声能够高效地清除慢性肺炎感染小鼠肺部的生物膜，且具有良好的生物安全性。这种通过声动力加剧乏氧的方式同时调控细菌与免疫细胞的代谢，可增强抗生素与免疫系统对生物膜抑制效果，并在铜绿假单胞菌生物膜慢性肺炎感染小鼠模型中实现了高效的疗效，为细菌生物膜感染相关疾病的治疗提供了一种新型治疗策略。

应用领域和市场前景

该成果可为医疗行业的新型抗菌剂，为临床上难以通过传统抗生素治疗的耐药细菌感染提供高效的技术支持。例如，囊性纤维化病人的铜绿假单胞菌感染、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌感染等疾病治疗。

近红外二区成像引导的线粒体靶向光动力治疗及其多通路细胞死亡机制研究

成果完成人	周晖	职称	校聘副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	新材料	
高技术领域（二级）	生物医用材料		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	化学生物学
应用行业	医学与生物医学领域，生物成像与分子探针技术				

成果概述

光动力治疗是针对肿瘤等疾病的一种潜在突破性治疗方法，然而，其临床应用受限于光敏剂的光响应深度不足、靶向性差、氧依赖度高以及诱导细胞死亡通路单一等问题。基于此，本研究提出供体苯环占比调控策略，在国际上首次构建了基于线粒体靶向的近红外二区（NIR-II）I型小分子光敏剂。该光敏剂在NIR-II波段表现出优异的光学性能，大大提升诊疗深度；可高效生成I型活性氧，克服了传统光动力治疗对氧气高度依赖的局限；高线粒体靶向性，实现亚细胞层面精准治疗；可实现肿瘤细胞“焦亡+凋亡”两种程序性死亡通路“双开启”，显著提升抗肿瘤效果。该成果不仅填补了基于线粒体靶向的NIR-II I型光敏剂的研究空白，而且通过多通路细胞死亡机制创新，为肿瘤精准、高效光动力治疗提供了新思路。

关键技术/创新要点

本研究围绕深部肿瘤精准治疗需求，创新性构建了基于噻喃嗡盐结构的近红外二区光敏剂及其纳米粒子，具备优异的近红外二区光学性能，实现高分辨率、强穿透的成像与治疗，显著提升诊疗深度。该光敏剂带正电，可精准靶向线粒体，在亚细胞层面干预肿瘤能量代谢，增强治疗选择性与安全性。其通过I型活性氧机制，即使在缺氧微环境下也能维持光动力活性，突破传统PDT对氧的依赖。该光敏剂可同时诱导细胞焦亡与线粒体凋亡，双通道激活程序性死亡，显著增强抗肿瘤效能。结合近红外二区荧光与光声成像技术，提升成像分辨率，实现术中精准引导，推动诊疗一体化发展。项目在光敏剂设计、深部光动力治疗机制突破及多模态影像治疗方面具有前沿性，成果展现广泛临床适应性与转化潜力，有望助力我国精准光动力治疗和影像导航手术技术的升级与产业布局。

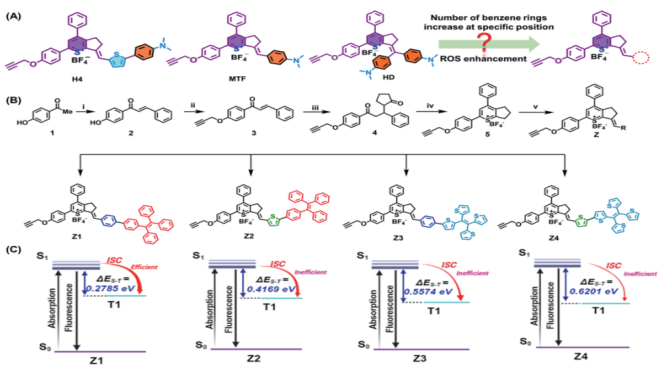


图1 该光敏剂Z1的合成及其理论计算的ΔE_{S-T}值

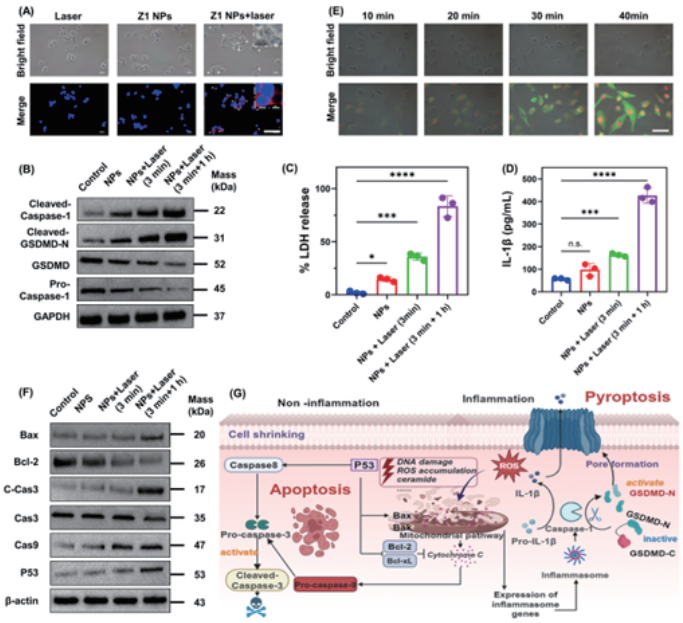


图2 该光敏剂诱导的焦亡/凋亡通路

技术指标/优势

本研究开发的基于噻喃嗡盐结构的近红外二区光敏剂及其纳米粒子，突破了传统光敏剂在光动力治疗中的波长短、穿透浅、对氧依赖强、缺乏特异性靶标以及治疗效果有限等核心技术瓶颈，推动了高效近红外二区光敏剂的分子设计与应用体系化发展。该研究填补了国内外在高效近红外二区光动力治疗及小分子光敏剂设计方面的技术空白，并弥补了传统光敏剂（如Ce6、吲哚菁绿）在穿透深度、稳定性上以及治疗效果上的不足，推动了精准光动力治疗技术的变革。

应用领域和市场前景

该光敏剂及其纳米粒子凭借优异的近红外二区光学特性，实现了更深的组织穿透力和更高的成像分辨率，同时结合光声成像和近红外二区荧光成像技术，为光动力治疗提供精准的成像引导。相比传统光动力治疗依赖氧气的机制，该光敏剂体系在缺氧微环境中依然能够高效产生活性氧，极大提高了光动力治疗的适用性和治疗效果；其具备独特的线粒体靶向能力，在亚细胞层面对肿瘤能量代谢实施精准干预，有效提高靶向性；同时，其双通路诱导焦亡和凋亡的机制进一步增强了肿瘤细胞杀伤能力，并且其焦亡机制又可以跟免疫治疗相结合。这些特性使得本研究中的小分子光敏剂在肿瘤诊疗一体化领域具有重要的技术优势和广阔的应用前景。在应用方面，本研究所开发的高效、低毒、可精准靶向线粒体的近红外二区光敏剂，为难治性肿瘤（如脑胶质瘤、胰腺癌等）提供了创新的治疗策略，特别适用于深部肿瘤的精准诊疗。其高效成像特性使其在术中导航、早期诊断及个体化治疗领域具有广泛应用价值。此外，该研究提供了一种可推广的光敏剂设计思路，有望推动新型光动力治疗药物的开发，促进光动力技术在肿瘤治疗、抗菌感染、炎症调控等多领域的临床转化。

便携式病毒核酸检测生物传感器

成果完成人	朱丹	职称	副教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	医学检验技术及新设备	
所属学科方向	一级学科	化学	二级学科	分析化学	
应用行业	核酸检测				
核心专利号	ZL202110356199.1；ZL202210355033.2；ZL202210125170.7				

成果概述

如何准确、特异、廉价地同时检测多种感染性病原体是传染病早期诊断中需要解决的关键问题，也是保障人类健康和安全的重要手段。团队自主研发了用于多种核酸快速灵敏检测的便携试剂盒，可以实现多种传染病病毒核酸或肿瘤标志物核酸的快速、灵敏、即时检测。检测方法操作简单、反应条件温和、灵敏度高，不受大型仪器和偏远地区资源的限制，可应用于家用、社区、机场、车站等场所的核酸快检中，在核酸（非洲猪瘟、HPV等）现场即时检测领域中具有广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种通过界面精准自组装技术，从本质上解决分子识别精准性和识别效率的新策略：利用DNA纳米自组装结构构建密度可控、分布均匀、识别分子取向一致、识别分子不相互干扰的生物分子识别层，实现了病毒高效特异的快速识别，提高诊断准确性；利用“模块识别-智能电路”传感模式，实现了多种病毒核酸并行识别检测，为多种感染性病原体的现场即时分析提供了通用平台，解决了高灵敏的病原体检测依赖于专业设备及专业人员的问题。

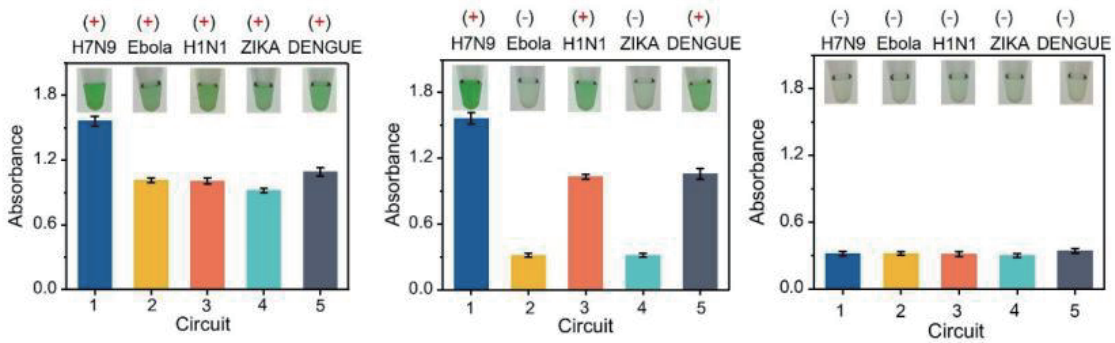


图1 便携比色传感器用于多种病毒核酸检测效果图

技术指标/优势

病毒核酸的检测时间30分钟内，可以达到单拷贝灵敏度，与PCR技术相当。检测方法操作简单、反应条件温和、灵敏度高，不受大型仪器和偏远地区资源的限制，可应用于家用、社区、机场、车站等场所的核酸快检中，在核酸（非洲猪瘟、HPV等）现场即时检测领域中具有广阔的应用前景。

成果获得第十三届“挑战杯”中国大学生创业计划竞赛全国银奖（2023）、江苏省第十二届“挑战杯”大学生创业计划竞赛金奖（2022）、江苏省第八届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛一等奖（2022），成果联系人为项目第一指导教师。

应用领域和市场前景

病毒核酸的检测时间30分钟内，可以达到单拷贝灵敏度，与PCR技术相当。检测方法操作简单、反应条件温和、灵敏度高，不受大型仪器和偏远地区资源的限制，可应用于家用、社区、机场、车站等场所的核酸快检中，在核酸现场即时检测领域具有广阔的应用前景。

智能DNA溶栓纳米机器

成果完成人	高宇	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	新型治疗、急救与康复技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	生物材料
应用行业	生物医药				

成果概述

团队在国际上率先提出智能精准溶栓药物递送策略，基于DNA自组装技术，构建了可逻辑运算的智能DNA溶栓纳米机器，实现药物及响应识别元件分子级别的数量和空间可控组装，具有自动追踪、自动识别、自动判断、自动运行的功能。首次实现针对凝血酶浓度的逻辑运算，可区分正常纤维蛋白凝块及血栓，显著降低了溶栓药物造成的凝血异常，实现智能化的精准给药，并在脑中风、肺栓塞、颈动脉及腿静脉血栓动物模型中得到验证。

关键技术/创新要点

智能DNA溶栓纳米机器项目由团队完全自主研发，拥有DNA自组装精准设计技术、DNA纳米管封装技术和DNA纳米锁逻辑运算技术3项核心技术。

与临床一线溶栓药物爱通立®阿替普酶（德国勃林格殷格翰）相比，DNA纳米溶栓机器包裹的阿替普酶其血液半衰期由3分钟延长至40.8分钟，注射方式由静脉持续注射优化为单针剂注射；溶栓效率提升3.7倍，推荐溶栓剂量降低83%；溶栓治疗后引起的出血风险由25%降低至约3.9%。

项目团队以脑卒中、心肌梗塞、肺栓塞为目标疾病领域，确定DNA溶栓纳米机器的技术路径。目前主要从事DNA溶栓纳米机器的实验室合成工艺优化，制订合成、储存、质检的标准化方案；开展DNA溶栓纳米机器工艺放大研究和质量控制研究；委托第三方构建大型实验动物模型，进行深入的药效学评价和安全性评估。

应用领域和市场前景

DNA溶栓纳米机器的推广应用将增加医疗服务需求，为医疗机构带来更多商业机会。以第三代溶栓药物阿替普酶为例，其2019年全球市场总值为86亿元，预计2026年将达到115亿元。DNA溶栓纳米机器的成功研发将推动药物市场的增长，为制药公司及政府财政带来经济效益。

当前溶栓药物市场痛点主要在于体内半衰期短、出血风险高、适用病人少。智能DNA溶栓纳米机器项目以其独有的3项核心技术，能够精准识别人体内血栓，智能释放溶栓药物，既延长了溶栓药物的体内半衰期，又显著抑制了出血风险，从而使更多病人受益。

目前市场上没有相似产品。从事DNA纳米药物递送技术研发的公司国内有两家，杭州迪纳元昇生物科技有限公司和北京君全智药生物科技有限公司。上述公司研发侧重肿瘤相关药物递送技术，且处于临床申报前阶段。

纳米POCT传感器件在重大疾病早期检测中的应用

成果完成人	苏邵	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
所属学科方向	一级学科	化学		二级学科	/
应用行业	生物医药				
核心专利号	ZL202011114420.4、ZL202310015094.9、ZL201610165101.3				

成果概述

《“健康中国2030”规划纲要》中明确提出要提高人民健康水平。各种重大疾病严重危害人民的健康，降低了人民的生活质量和增加了社会的医疗负担。因此，实现重大疾病的早期检测，将能提高重大疾病的精准诊断、延长患者的生存率和提高人民群众的幸福感，具有重要的社会意义和经济意义。

生物小分子、核酸、蛋白质等作为生物标志物对多种疾病的早期发病与诊治有很好的预警作用，因此高灵敏、特异性的miRNA、尿酸、葡萄糖等生物分子的检测对疾病早期检测具有重要的临床医学意义。随着家用医疗市场的持续升温，家用POCT检测已成为当前疾病早期诊断的热门研究领域。鱼跃集团、基蛋生物科技股份有限公司等POCT龙头企业都在加快家用POCT诊断试剂和检测产品的研发和布局，抢占POCT市场。可以预见，家用POCT检测未来将成为生物医药公司的主战场之一，因此发展新型、快速、超高灵敏、低成本的体液中生物标志物检测方法、检测技术和检测平台对家用POCT检测显得尤为重要。

关键技术/创新要点

团队汪联辉教授、苏邵教授等自主开发了系列新型纳米POCT生物传感器件。利用纳米材料优异物化特性，如比表面积大、化学性质稳定、光电性能优异、易于功能化等，发展了纳米生物有序界面构筑策略，显著提高了纳米生物界面的生物识别能力；精准调控了生物分子在纳米界面上的组装密度与空间取向，解决了纳米界面上生物分子柔性导致的无序堆积问题。提出了“生物识别-分子折叠-能量传递”耦联传感机制，发展了针对病毒基因片段、尿酸、葡萄糖、肌钙蛋白I等多种与疾病相关生物分子的高性能电化学生物传感器，解决了检测灵敏度低、特异性差等关键问题。相关研究成果获中国电子学会科学技术奖二等奖（2021年）。

基于商业化的丝网印刷电极，结合蓝牙传输技术和核酸适体的特异性识别作用，团队研制便携式电化学传感器件可实现糖化血红蛋白、肌钙蛋白I等生物标志物临床指标的检测，可实时监测糖尿病、心肌梗死等疾病，满足家用POCT检测需求。

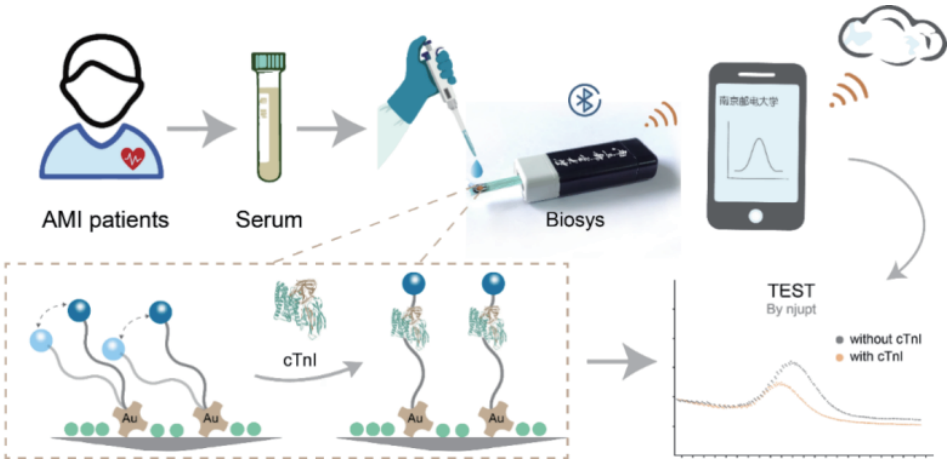


图1 一种即时检测cTnI的电化学传感芯片的示意图

应用领域和市场前景

与传统的疾病早期检测技术相比，该产品具有操作简单、检测速度快、成本低、灵敏度高、方便快捷等优点，可用于常规体检筛查以及医院及基层卫生所的恶性疾病的早期检测等，具有广阔的应用领域和市场前景。

一类多目标同时检测的荧光/磷光发光寿命聚合物探针及其应用

成果完成人	张寅	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医药生物技术		高技术领域（三级）	快速生物检测技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料检测与分析技术
应用行业	生物检测				
核心专利号	ZL202110159473.6				

成果概述

有机光电半导体材料在生物医学光子学中有广泛应用。传统的生物医学光学成像技术主要通过探针的发光强度或波长变化来反映目标分析物的分布和浓度。然而，目前大多数探针只能检测单一目标，这可能导致检测结果的假阳性。为了提高检测的准确性和效率，需要联合多种参数进行判断。但有机光电半导体探针材料的光谱半峰宽较宽，光谱重叠时无法通过波长进行分离，且生物体中的荧光物质也会增加检测的信噪比。

相较于传统的以发光强度或发射波长为分析信号的生物医学光学成像技术，本研究成果采用的发光寿命作为分析参数具有更高的灵敏度和准确性。发光寿命是一种状态函数，与激发光源功率和探针浓度无关，使得检测更加稳定可靠。此外，利用时间分辨技术，即使在发光波长重叠的情况下，也能通过发光寿命在时间维度上进行有效区分，从而降低了检测信噪比。

该研究创新性地提供了一类多分析目标同时检测的荧光/磷光发光寿命聚合物探针，有望在生物医学光子学领域发挥重要作用。

关键技术/创新要点

本成果创新地设计了一类多目标同时检测的荧光/磷光发光寿命聚合物探针，这种探针在生物医学研究和疾病诊断领域展现出巨大的应用潜力。传统的有机光电半导体探针往往只能针对单一目标进行检测，这在很多情况下无法满足复杂生物系统的研究需求。而本成果的聚合物探针，通过先进的聚合反应技术，将多个响应端巧妙地连接起来，形成了一个功能强大的检测工具。

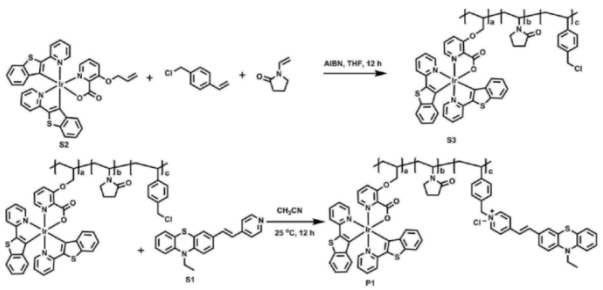


图1 多官能团聚合检测分子

值得一提的是，本成果不仅依赖于探针的发光强度或波长变化来进行检测，更引入了发光寿命这一独特参数。发光寿命作为有机光电半导体材料的重要发射信号之一，具有更高的灵敏度和稳定性。它不受激发光源功率和探针浓度的影响，因此能够提供更准确的检测结果。此外，本成果所采用的时间分辨技术来测量发光寿命，使得在光谱重叠或存在大量荧光干扰的复杂环境中，依然能够准确区分和检测不同的目标分析物。这种技术不仅提高了检测的准确性，还大大提升了检测效率。

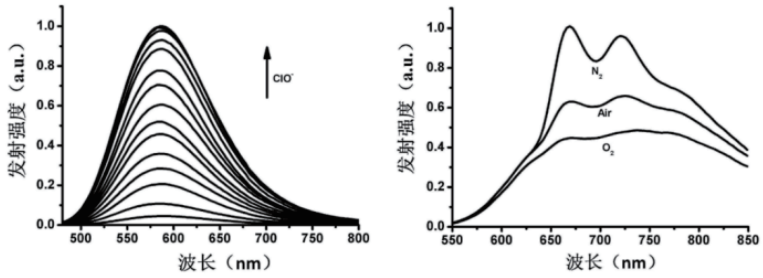


图2 检测分子发光强度响应

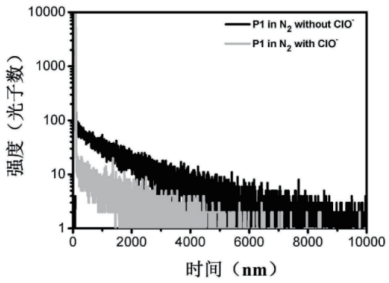


图3 检测分子寿命响应

总的来说，本成果的荧光/磷光发光寿命聚合物探针以其独特的设计和创新的检测方式，为生物医学光子学领域带来了新的突破。它不仅实现了单个探针对多种分析目标的同时检测，还为生物医学研究和疾病诊断提供了更高效、准确的检测手段，有望在未来的科研和临床应用中发挥重要作用。

技术指标/优势

本成果提出的荧光/磷光发光寿命聚合物探针具有显著的技术指标和优势：它能够实现多目标同时检测，提高了检测效率；采用发光寿命作为检测参数，增强了检测的灵敏度和准确性；并利用时间分辨技术，有效避免了光谱重叠的干扰，使得在复杂环境中仍能精准识别不同分析物，为生物医学研究和临床应用提供了强有力的工具。

应用领域和市场前景

本成果提出的荧光/磷光发光寿命聚合物探针在生物医学光子学领域展现出巨大的应用潜力。这种探针可以广泛应用于细胞成像技术中，实时监测活细胞内的生理参数变化，例如pH值、离子浓度等，为科研人员提供深入了解细胞活动和代谢过程的数据支持。此外，在疾病诊断领域，该探针也发挥着重要作用。通过对患者体内生物标志物的检测，它可以帮助医生实现癌症、神经退行性疾病等重大疾病的早期诊断和精准治疗。随着生物医学研究的不断深入和精准医疗的快速发展，这类探针的市场需求将持续增长，预计未来将广泛应用于生物医学研究、药物筛选、临床诊断等多个领域，为人类的健康事业做出重要贡献，展现出广阔的市场前景和商业价值。

一类检测氧气的荧光/磷光发光寿命聚合物探针及其应用

成果完成人	张寅	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医药生物技术		高技术领域（三级）	快速生物检测技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料检测与分析技术
应用行业	生物检测				
核心专利号	ZL202210102409.9				

成果概述

近年来，随着科学技术的飞速发展，细胞内物质传感及成像分析已成为生物医学研究的重要手段。光学氧气探针，作为一种能与被检测物氧气发生特异性相互作用的工具，正日益受到关注。然而，目前市场上的光学氧气探针，无论是基于小分子、量子点还是纳米晶，都存在一些固有的局限性，如水溶性差、生物相容性不足或毒性问题等。

科研团队成功研发出一种新型的比率型荧光/磷光发光寿命聚合物探针。该类探针通过自由基聚合反应，巧妙地将荧光参比单元、铱配合物单元和水溶性单元结合在一起，形成了一种独特的结构。该类聚合物探针，结合了吩噁嗪衍生物的稳定性、磷光铱配合物的发光灵敏度以及PEG带来的优异水溶性和生物相容性。这种设计不仅解决了传统探针的水溶性差和生物相容性问题，还能通过比率型发光寿命的检测方式，更准确地反映细胞内氧气的含量变化。

总的来说，本成果的成功研发为细胞内氧气含量的精准检测提供了新的解决方案，有望在生物医学研究、疾病诊断和治疗等领域发挥重要作用。

关键技术/创新要点

本成果的关键技术和创新要点不仅涵盖了化学合成与光学传感的多个方面，还涉及了生物学应用的前沿领域。

首先，关键技术在于成功利用自由基聚合反应，将荧光参比单元、磷光铱配合物单元以及水溶性单元进行高效连接，合成出结构稳定、功能特定的聚合物探针。这种探针的设计非常精巧，吩噁嗪衍生物作为荧光参比，保证了探针在不受氧气影响时有一个稳定的荧光信号输出，为后续的比率测量提供了基准。磷光铱配合物作为氧气的敏感元件，其发光特性能够随氧气浓度的变化而灵敏响应，这是实现精准检测的核心。

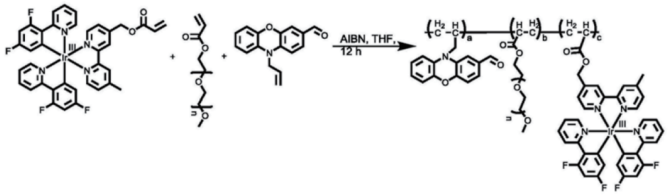


图1 新型探针设计合成思路

创新要点则在于该探针的多功能性及其实用性。一方面，通过PEG950的引入，探针的水溶性和生物相容性得到了显著提升，这使得探针能够在生物体系，特别是细胞内环境中稳定工作，为生物医学研究提供了强大的工具。另一方面，利用铱配合物的长寿命磷光特性，结合先进的时间分辨技术，可以有效地区分探针的信号与背景荧光，大大提高了信噪比和检测的准确性。

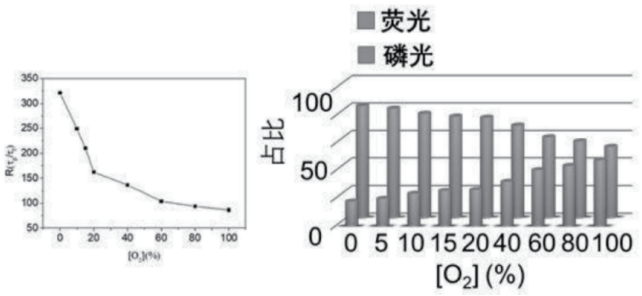


图2 探针在不同氧气含量下的荧光/磷光寿命占比

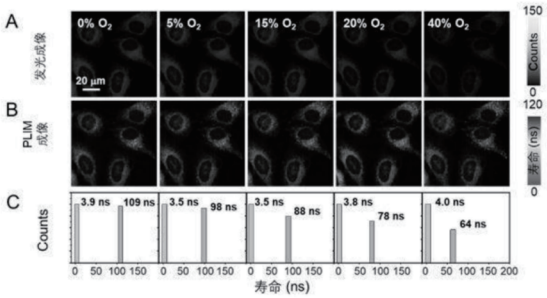


图3 探针在不同氧气浓度下固定HeLa细胞中的光致发光、寿命成像和寿命分布图

总的来说，这项成果不仅提供了一个高效、灵敏的氧气检测探针，还为生物成像与传感技术的发展开辟了新的道路。其潜在的应用范围非常广泛，从基础的生命科学研究到临床医学诊断，都有可能因此受益。因此，该专利的关键技术和创新要点无疑具有深远的科学意义和实际应用价值。

技术指标/优势

该成果成功地将荧光参比单元、磷光铱配合物单元和水溶性单元通过自由基聚合连接，创造了一种高效检测氧气的比率型荧光/磷光发光寿命聚合物探针。其技术指标突出，具有良好的水溶性、生物相容性和灵敏的氧气响应性。主要优势在于能够精准地检测细胞内氧气含量变化，同时通过时间分辨技术消除背景荧光干扰，提高信噪比，为生物医学成像与传感提供了新的有力工具。

应用领域和市场前景

该成果的比率型荧光/磷光发光寿命聚合物探针在生物医学领域具有广泛的应用。它可以被用于实时监测细胞内氧气含量的变化，为生物医学研究提供关键数据。这种探针不仅精准度高，而且具有良好的水溶性和生物相容性，使其在细胞成像、药物筛选以及疾病诊断等方面展现出巨大潜力。特别是在肿瘤、心血管疾病以及神经退行性疾病的研究中，该探针能够提供关于细胞代谢和氧气供应的重要信息，有助于更深入地理解疾病机制。随着生物医学研究的不断深入，该探针的市场需求将持续增长，预计在未来的生物医药、科研及临床诊断市场中将占据重要地位，为相关领域的技术创新和疾病治疗提供强有力的支持，其市场前景广阔，具有巨大的发展潜力。

同时检测HClO和pH的荧光/磷光发光寿命响应型聚合物探针及其应用

成果完成人	张寅	职称	教授	所在单位	化学与生命科学学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医药生物技术		高技术领域（三级）	快速生物检测技术	
所属学科方向	一级学科	材料科学		二级学科	材料检测与分析技术
应用行业	生物检测				
核心专利号	ZL202210257256.5				

成果概述

本成果提出了一种能够同时检测HClO和pH值的荧光/磷光发光寿命响应型聚合物探针及其应用。在现代生物医学研究中，HClO和pH值的检测对于深入了解生理和病理过程具有重要意义。然而，目前的技术手段在同时检测HClO和pH值时存在局限性，无法满足科研和临床的需求。为了解决这一问题，我们经过深入研究，开发出了一种新型的聚合物探针。这种探针结合了特定的荧光和磷光单元，能够同时且独立地对HClO和pH进行成像检测，不仅具有良好的水溶性、生物相容性和低毒性，而且融入了比率法和时间分辨光学成像技术，从而显著提高了检测的准确性。这一创新技术为生物体内HClO和pH的同时检测提供了有力工具，为科研和临床领域带来了新的突破，具有非常广阔的应用前景。

关键技术/创新要点

该成果的核心与创新之处凸显在其研发了一种能够同时监测HClO和pH值的荧光/磷光发光寿命响应型聚合物探针。这一技术的关键不仅在于实现了对HClO和pH值的双信号同时检测，更在于其满足了生物医学领域对于高精度、多重指标实时监控的迫切需求。

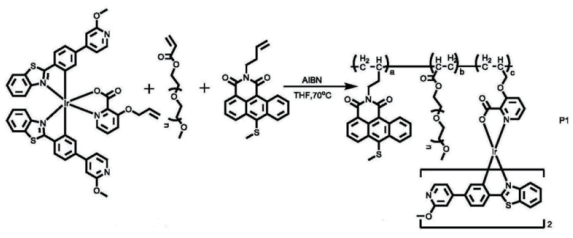


图1 探针设计合成路线

该探针的出色之处在于其独特的双重发光单元设计。荧光单元能够敏锐捕捉到HClO的浓度变化，随着HClO的增加，其发光强度会相应减弱。而磷光单元则专注于pH值的检测，随着环境pH值的升高，其发光会逐渐增强。这种设计使得探针能够在复杂的生物环境中，为研究者提供全面而准确的生物化学信息。值得一提的是，该技术运用了先进的发光寿命成像技术，即使在光谱存在轻微交叠的情况下，也能通过精确测量发光寿命来清晰区分HClO和pH的信号，从而确保了检测结果的准确性和可靠性。

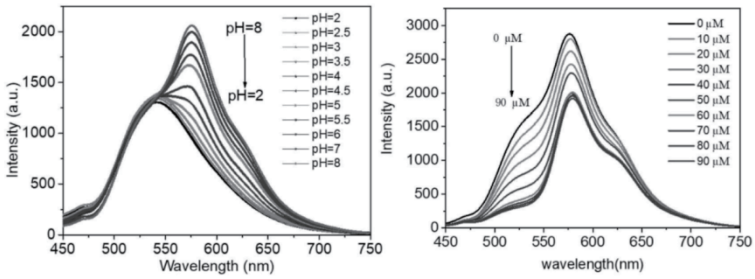


图2 HClO和pH检测发光信号

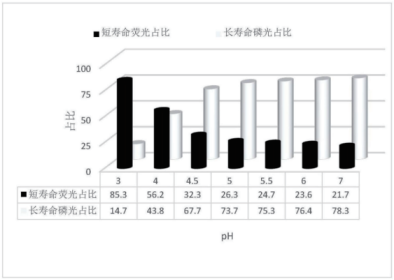


图3 不同pH值下的长寿命磷光单元与短寿命荧光单元的寿命占比图

除了技术上的卓越表现，该探针还具备优良的水溶性、生物相容性和低毒性，这使其非常适用于细胞内的环境检测。无论是在生物医学研究、疾病诊断，还是在药物研发等领域，该探针都提供了强大的技术支持，展现了广阔的应用前景和强大的市场潜力。

技术指标/优势

该成果的主要指标是能够同时且高精度地检测HClO和pH值，其优势在于双重发光单元的独特设计，结合发光寿命成像技术，确保了测量的准确性和互不干扰，同时还具备良好的生物相容性和广泛的应用适应性，为生物医学研究和相关领域提供了强大的技术支持。

应用领域和市场前景

该成果不仅在生物医学研究领域有着广泛的应用，还在疾病诊断和药物研发方面展现出巨大的潜力。在生物医学研究中，科学家可以利用这种探针更深入地研究HClO和pH值在细胞代谢、信号传导等生理和病理过程中的关键作用。在疾病诊断领域，该探针的高精度检测能力可以帮助医生更准确、更快速地识别出患者体内的异常情况，如炎症反应、酸碱平衡失调等，从而提高诊断的准确性和治疗的针对性。此外，在药物研发过程中，研究人员可以利用该探针来评估候选药物对HClO和pH值的影响，为新药的开发提供有力的支持。随着精准医疗的快速发展，该技术有望在未来市场中占据重要地位，其广泛的应用前景和卓越的技术优势必将为相关行业带来巨大的商业价值。

基于多视图动态加权的自适应脑电信号识别方法及系统

成果完成人	梁爽	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	医疗仪器、设备与医学专用软件		高技术领域（三级）	新型电生理检测和监护技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	脑机接口				
核心专利号	ZL202511233640.1				

成果概述

脑机接口系统的性能高度依赖脑电信号的准确解析。然而，脑电信号存在显著个体差异与非平稳特性，且测试阶段易受噪声干扰，导致传统方法在跨受试者及在线应用场景中稳定性不足，识别效果易发生波动。因此，构建具备持续适应能力的识别模型成为关键。

围绕上述问题，本成果提出一种多视图动态加权的自适应脑电信号识别方法及系统。该方法通过构建多视图脑电数据表示，并结合学生-教师模型实现多视图协同学习；进一步引入置信度驱动的动态加权机制，对测试样本进行可靠性建模。在此基础上，通过正则化策略引导模型在测试阶段进行在线更新，使其能够持续适应数据分布变化。实验结果表明，该方法在复杂环境下能够有效提升识别精度与泛化能力，在脑机接口应用中展现出良好的实用价值。

关键技术/创新要点

脑电信号识别是脑机接口中的关键环节。然而，受个体差异、信号非平稳性及测试阶段噪声干扰的影响，传统方法在跨受试者及在线应用中容易出现性能波动，尤其低质量样本会干扰模型更新过程，导致识别精度下降。因此，提升模型在动态环境中的自适应能力与鲁棒性具有重要意义。

针对上述问题，本成果提出了一种多视图动态加权的自适应脑电信号识别方法。在方法设计上，通过数据对齐与基于傅里叶变换的增广策略构建多视图脑电表示，以增强特征表达；结合学生-教师模型框架，利用不同视图间预测差异建立动态置信度权重，实现对测试样本可靠性的自适应评估。在优化策略方面，引入加权条件熵正则化与加权边缘标签分布正则化，在降低预测不确定性的同时，避免类别分布偏移。该方法集成于测试时在线自适应学习框架中，可实现模型的持续更新与稳定优化，提升脑电信号识别的准确性及泛化性能。

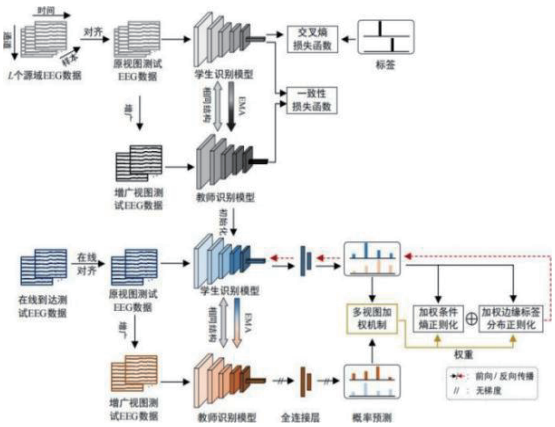


图1 基于多视图动态加权的测试时自适应脑电识别方法的框架图

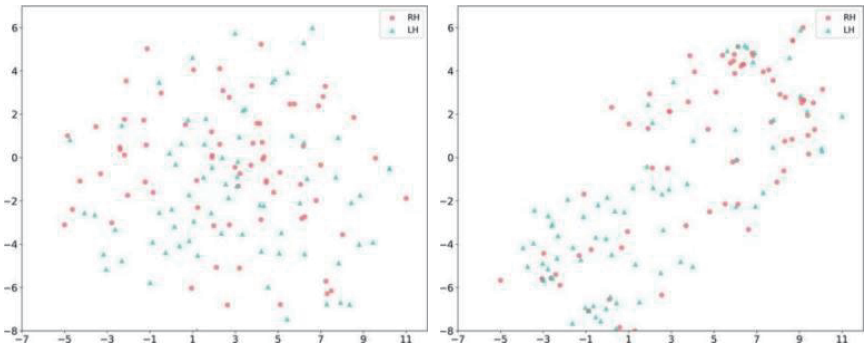


图2 t-SNE 特征空间对比：未应用本成果（左）与应用本成果（右）

技术指标/优势

相较传统方法，本成果支持测试阶段在线自适应更新，能够动态适应个体差异与数据分布变化，提升跨受试者识别准确率。通过多视图建模与置信度加权，有效抑制低质量样本干扰；结合加权正则化策略，兼顾预测稳定性与类别均衡性。该方法在复杂环境下具备更强鲁棒性与泛化能力，适用于实际脑机接口应用场景。

应用领域和市场前景

该成果可为脑机接口及智能医疗领域提供高效技术支持，广泛应用于神经康复、运动想象控制、疲劳监测及智能交互等场景。例如，在康复训练中，可实现对患者脑电信号的精准识别与反馈，辅助运动功能恢复；在智能控制领域，可提升人机交互的实时性与稳定性。由于该方法具备跨受试者自适应能力和在线更新特性，可适用于多类人群与复杂环境，降低系统部署成本。未来有望在医疗辅助诊断、可穿戴设备及智能交互系统中实现规模化应用，具备良好的市场推广前景。

基于联合训练的蛋白质交互作用类别预测

成果完成人	唐韬	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	生物与新医药	
高技术领域（二级）	化学药研发技术		高技术领域（三级）	创新药物技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学		二级学科	人工智能
应用行业	蛋白质功能分析，靶向药研制				

成果概述

本成果提出了一种基于联合训练的多标签蛋白质交互作用类型预测方法；该模型基于获得的蛋白质交互作用类别数据，对蛋白质序列进行编码，生成标称特征和序列特征；对于标称特征，结合基于交互作用生成的图结构，采用图卷积网络，对图结构的空间特征进行提取；对于序列特征，采用一维卷积操作，高效提取局部和情景信息；通过对两个模型的联合训练，更准确地预测多种蛋白质间的交互作用，有助于深入理解蛋白质的结构和功能；实验中，本模型在广泛使用的基准数据集上表现突出，与三种现有最先进方法比较，Micro-F1达到了3.81-32.40%的提高；本成果可以显著提升对蛋白质交互作用类别预测的精确度，对蛋白质功能及药物开发等领域的研究的具有推动作用。

关键技术/创新要点

蛋白质交互作用对生物机理研究、医疗方案设计、靶向药开发等领域均具有重要作用。本成果基于对获得的蛋白质交互作用类别数据，对蛋白质序列进行特征提取，将提取的特征分为标称特征和序列特征两组；对标称特征，结合基于三元集合的图结构，使用图卷积网络对拓扑结构的空间信息进行提取；对于序列特征，采取一维卷积操作，高效提取局部和情景信息；采用联合训练架构，获取高精度的蛋白质类别预测模型。

成果的创新点包括以下几点：

在对蛋白质交互作用类别的预测中，结合了蛋白质序列的标称特征和有序特征，充分提取了标称特征对蛋白质理化性质的表达，而之前方法中仅使用有序特征。

采用基于联合训练架构使处理标称特征和有序特征的模型形成互补，使交互一致性最大化，提高预测精度。

提出了从蛋白质交互作用类型数据库中对重复交互作用项进行归并和清除的架构，而之前广泛使用的基准数据库，对蛋白质交互作用类别预测这一问题，存在重复数据。

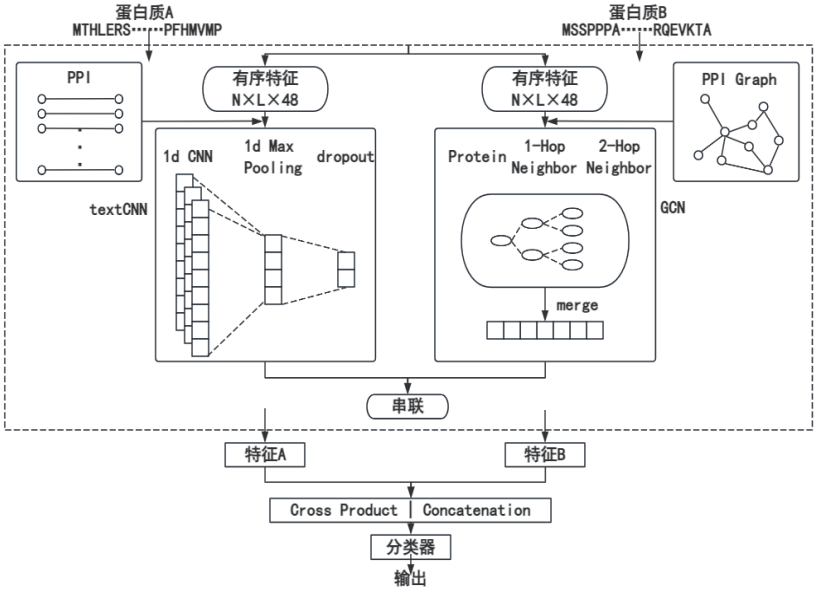


图1 基于联合训练的多标签蛋白质交互作用的预测的流程图

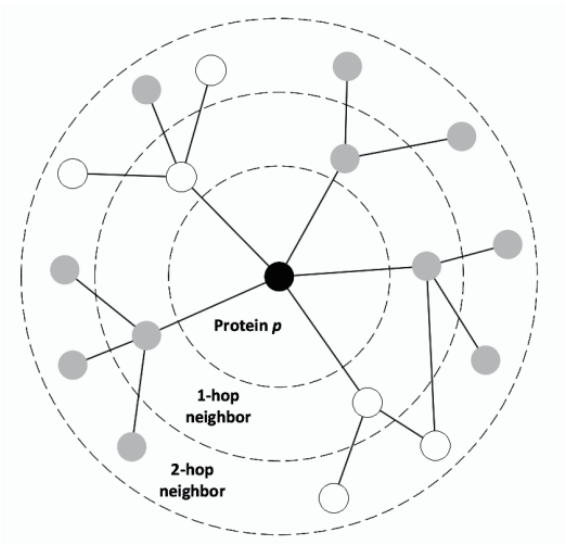


图2 图结构中对邻域均匀采样的图示

技术指标/优势

本成果可视为人工智能领域中的多标签分类问题，由于多标签分类数据库常见的不平衡特性，该问题核心技术指标一般为Micro-F1（即每个标签精确率和召回率的加权调和平均），其余技术指标包括精确度、AU-PRC等。

在具体实验中，本方法在广泛使用的基准数据库SHS27K上的三种划分模式上，Micro-F1分别达到了0.9019，0.7157，0.7414，而之前最优方法的前三名对应Micro-F1分别为0.6903-0.8632，0.5717-0.6874，0.5641-0.7086。本方法在基于去冗余架构构建的两个新的数据库上，也取得了同样幅度的性能优势。

应用领域和市场前景

本成果在生物信息学、药物设计、疾病诊断和治疗等领域具有广泛的应用前景。在药物设计领域，有助于发现潜在的药物靶点，并设计针对性的药物分子。在疾病诊断和治疗方面，可以帮助研究人员识别潜在的疾病标志物，从而提高疾病的早期诊断和治疗效果。

该技术的应用场景包括但不限于生物医学研究实验室、制药公司、医院临床实验室等。在生物医学研究实验室中，科学家们可以利用蛋白质交互作用类别预测技术来开展基础研究，探索生物学过程中蛋白质相互作用的机制。制药公司可以利用这一技术来筛选药物靶点并设计新药分子。医院临床实验室可以将蛋白质交互作用预测用于疾病诊断和治疗的辅助工具。

随着生物技术和医学科学的发展以及我国对医疗资源需求的不断增加，本成果的市场前景十分广阔。有望为生物医学研究、药物研发和临床诊断带来革命性的进展，为人类健康事业做出重要贡献

广域无源物联网感通系统

成果完成人	张晖	职称	教授/博导	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备、部件及组网技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	工业互联网、智慧城市、应急消防、军事作战				
核心专利号	ZL2025107471193、ZL202210912410.8、ZL2022106669697				

成果概述

无源物联网已经进入3GPP的R19和R20，成为正式的标准方向及6G技术体系，标志着无源物联网已经进入国际化标准化进程；6G国家重大科技专项（13专项）多个项目资助该领域研发，标志着无源物联网得到国家政府层面的规模化投入。通过研究新型广域无源物联网关键技术，攻克无源物联网商用化部署的局限与不足，进而运用硬件-软件-系统协同设计思路，研制自主可控的新型广域无源感通系统（包括基站样机、无源感通终端以及配套协议软件），突破高效采能、按需通信、接续传输、弹性组网、信息采集、低成本设计等核心技术。该成果荣获2025年度中国电子学会科技进步三等奖1项。

关键技术/创新要点

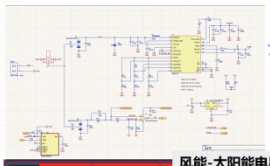
（1）多源环境能量采集及高效管理模块：自主研发能量高效管理与多源汇聚电路，具备多源异构能量的低损汇聚与动态管理功能，优化能量转换效率与存储效率，实现微能量输入下系统的稳定启动与运行。

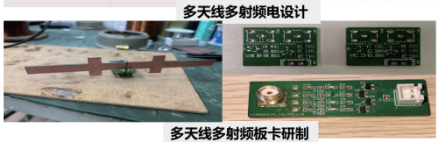
（2）认知驱动的主/被动通信模块：自主研发反向散射被动通信模块，具备近零功耗射频调制与反射通信功能，实现长时免维护近距通信。自主研发超低功耗类LoRa主动通信模块，突破传统无源设备的通信距离限制，实现广域空间可靠通信。自主研发基站侧多维通信认知机制，通过干扰动态-任务需求的联合认知，驱动主/被动通信按需切换。

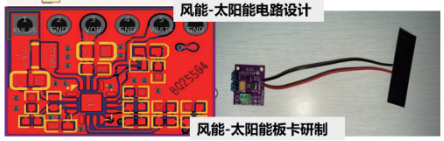
（3）环境-频谱混合感知模块：联合设计多维环境感知传感器模块，具备温度/湿度/应力等环境要素的采集监测与融合分析功能。联合设计电磁频谱感知传感器模块，具备全频段低功耗感知与时空-类型四维电磁地图构建功能。

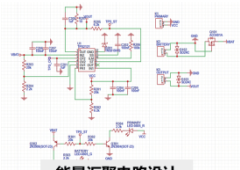
（4）间歇计算与接续传输协议：自主研发间歇计算协议，通过终端续航与任务断点预测，基于非易失性存储器进行任务进度记录以及断点续算管理，实现断续条件下任务完成效率最大化。自主研发接续传输协议，通过数据块状态低开销记录、关键数据强前向纠错及优先排队发送、以及信息重要性评估的自适应冗余机制，实现断续条件下信息传输效率最大化。

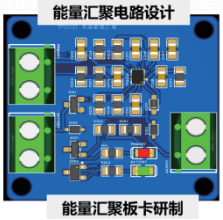

多天线多射频电设计

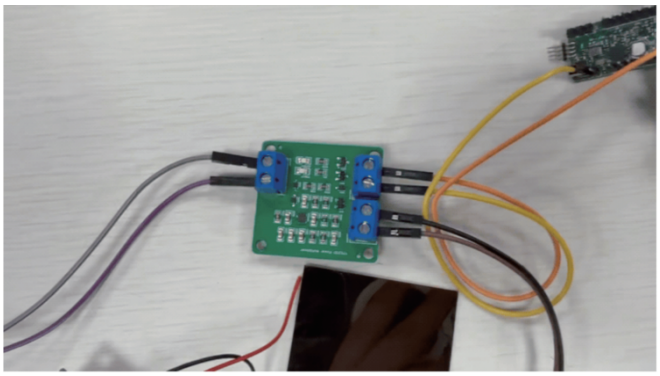

风能-太阳能电路设计

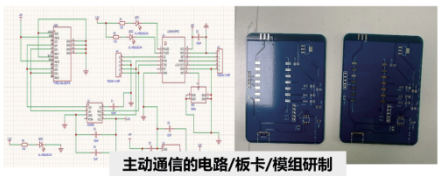

多天线多射频板卡研制


风能-太阳能板卡研制


能量汇聚电路设计


能量汇聚板卡研制

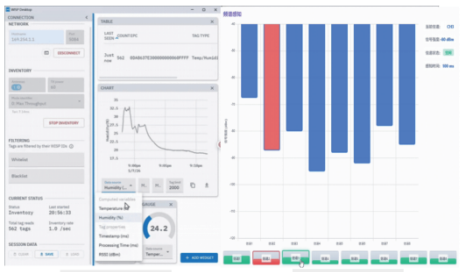



主动通信的电路/板卡/模组研制

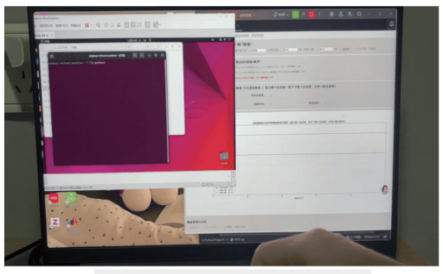


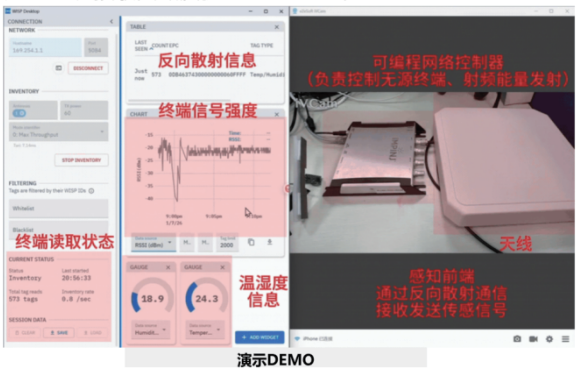

基站侧认知设置

被动通信演示


环境感知

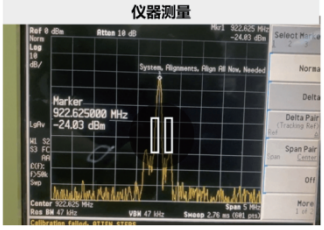
频谱感知


感知数据上传



演示DEMO


仪器测量



技术指标/优势

(1)冷启动阈值-25dBm。

(2)射频能最大输出电压高于3V。

(3)主动通信距离超过1km、接收灵敏度优于-110dBm。

(4)荣获2025年度中国电子学会科技进步三等奖1项。

应用领域和市场前景

可应用于工业互联网、智慧城市、应急消防、军事作战等场景,具有广泛的市场前景。

群智服务的感知接入系统

成果完成人	张晖	职称	教授/博导	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备、部件及组网技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	工业互联网、智慧城市、智能家居、应急消防				
核心专利号	ZL202310437055.8、ZL202310449562.3、ZL202310690452.6、特願2024-525156、ZL202310700271.7、ZL2024103640855、ZL202410574822.4、ZL202410568191.5、ZL202410580828.2、ZL202410697180.7				

成果概述

面向未来智能化物联网产业场景，海量异构设备如何大规模协同接入、如何按需协同组织遂行各类产业任务，亟需开发一套满足按需接入、按需互联能力的协同感知接入系统。本团队研发了群智服务的感知接入网元及系统，通过主动多源感知、智能融合分析、信息模型匹配，实现主动网络能力；通过按需接入互联、多模通信管理、群智协议控制，实现群智服务能力，最终实现异构接入互联和按需接入互联的基本目标。

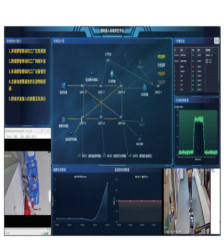
关键技术/创新要点

（1）面向设备管控的多源群智感知能力：自主研发感知接入系统的数字孪生平台，具备网络要素建模、全景状态显示和实时反馈控制等功能，进而通过人员-设备的联合识别与类型匹配，实现各类设备的智能化出入管控。

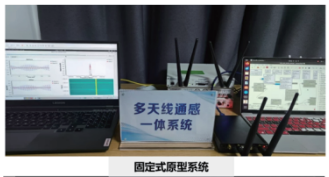
（2）面向应急救援的多域群智联动能力：自主研发无人集群协同群智系统，具备全局路径规划、强化学习避障、目标识别定位、群体协同控制等功能，进而通过感知接入网元（SAP）的多域互联与按需接入，实现跨区域、跨模态的终端集群联动救援。

（3）面向网络补盲的固移结合电磁环境感知能力：自主研发基于USRP的多天线射频感知系统，具备射频信号采集、电磁环境构建、网络盲区定位等功能，进而通过固定式采集-移动式巡检相结合的部署方式，实现基于无人集群的动态网络补盲。

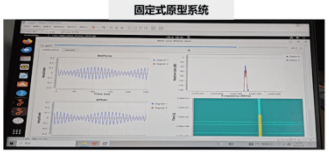
（4）面向并发传输的自适应通信能力：自主研发认知驱动的自适应通信系统，具备MCS、CP、PRB、功率的自适应调控功能，进而通过多域资源的动态协调配置，实现多业务高并发传输。

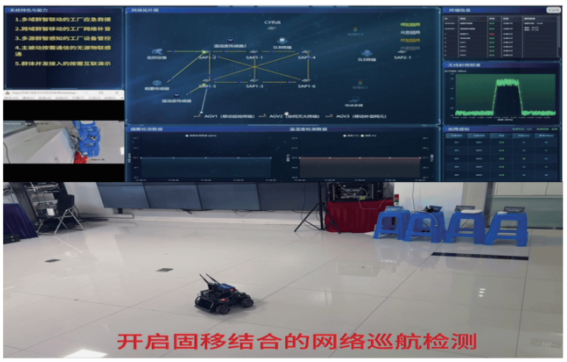




固定式原型系统









技术指标/优势

(1)数字孪生闭环映射时延达到百毫秒级。

(2)智能化认知维度5个以上,支持多模通信制式5种以上。

(3)自适应通信调控的维度超过4个。

(4)在信道变化10个db以上,业务性能抖动趋于0。

(5)荣获2022年度中国无线电协会科学技术奖二等奖和2023年度江苏省科技进步奖二等奖。

应用领域和市场前景

可应用于工业互联网、智慧城市、智能交通、智能家居、应急消防等场景,具有广泛的市场前景。

面向低轨高动态特征的LoRa体制卫星物联网终端及网关研制

成果完成人	洪涛	职称	副教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	卫星通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	卫星通信行业				
核心专利号	ZL202311230556.5、ZL202011188039.2、CN202311363172.0				

成果概述

相比于地面准静态LoRa体制物联网，低轨卫星相对于地面高速运动，给高动态信道下LoRa信号的捕获、同步、解调、发射波形参数的自适应等带来挑战。因此，需要研究面向低轨信道特征的LoRa体制物联网在低轨高动态场景下的适应性改造问题。

本团队根据低轨信道动态特征，在物理层研究了低轨高动态信道下LoRa物联短包信号捕获方法、LoRa信号时频同步方法以及基于判决反馈的LoRa信号解调方法，通过对LoRa调制信号物理层接收处理算法的鲁棒性设计，提升了LoRa调制信号在低轨高动态信道下的传输性能；在MAC层研究了一种面向低轨信道长传播时延特征的功耗-时延折中优化的混合MAC协议以及一种基于强化学习的轻量化LoRa终端发射参数方法，通过对MAC层协议在高动态场景下的适应性改造，提升了LoRa体制卫星物联网终端的功耗性能以及系统的吞吐量。在此基础上，基于ZYNQ+AD9361的SDR开发平台验证了本项目所提算法在低轨高动态信道下的性能。

关键技术/创新要点

作为LoRa体制低轨卫星物联网技术，所提的方法可以在低轨高动态信道下实现LoRa信号高效的捕获、同步以及解调。尤其是在低轨长传播时延信道下通过发射参数配置以及终端模态的控制，具有终端低功耗和系统吞吐量提升的优点。

团队针对低轨高动态信道下传统LoRa信号通信性能出现地板效应以及发射参数难以适应动态信道的问题，物联终端侧设计了发射波形、终端发射参数配置方法、终端模态控制方法；低轨卫星网关侧提出了动态信道下突发信号捕获方法、信号同步方法以及闭环的信号解调方法，实现了LoRa信号在低轨高动态信道下的鲁棒传输、终端功耗降低以及系统容量的提升，使得LoRa体制的卫星通信技术在卫星物联网领域发挥积极作用。

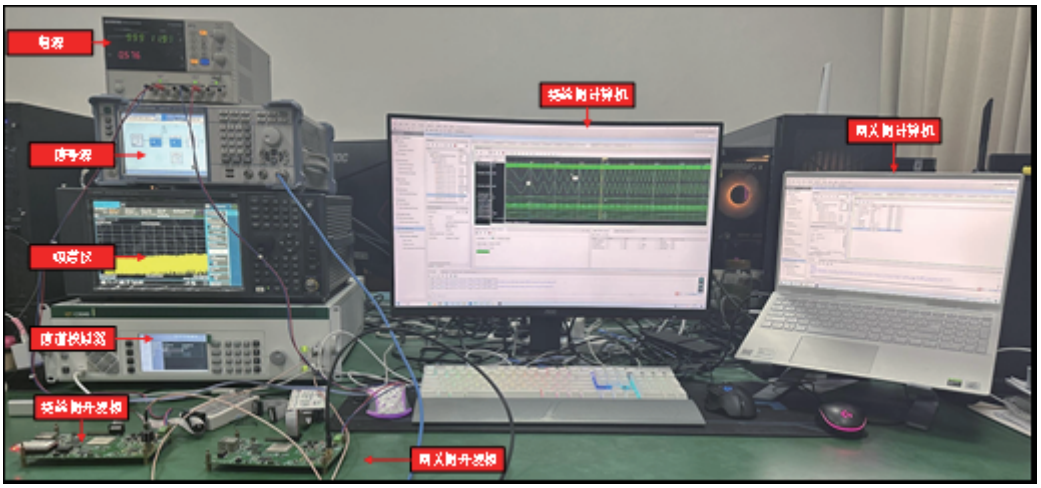


图1 LoRa体制低轨卫星物联网传输演示验证平台

技术指标/优势

与传统的LoRa信号发射信号参数配置以及解调技术相比，改成果在低轨高动态信道下实现LoRa信号的鲁棒性传输，提升了传输性能。并且，通过对于发射信号参数的配置提升物联网终端的功耗性能以及系统的吞吐量。

应用领域和市场前景

该成果可以为低轨卫星物联网信号传输提供高效的技术支持，如在物理层中LoRa物联短包信号捕获方法、LoRa信号时频同步方法以及基于判决反馈的LoRa信号解调方法；在MAC中功耗-时延折中优化的混合MAC协议以及一种基于强化学习的轻量化LoRa终端发射参数方法。该成果可望提升LoRa体制低轨卫星物联网高动态信道下的信号传输性能、物联网终端的功耗性能以及系统的吞吐量。

空地无人装备一体化智能物联管控系统

成果完成人	郭永安	职称	教授	所在单位	通信与信息工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	公共安全、应急救援、远程教育、智能交通、物联网				

成果概述

本项目针对当前空地一体化发展现状与多元化需求，重点研究智能认知、协同学习、融合决策等技术，从体系架构、关键技术、系统应用三个方面突破动态复杂空地环境下多模认知难、学习交互难、精准决策难等问题，实现更加智能的资源管理和任务执行，构建自主完成环境感知、信息认知、任务决策的空地无人装备一体化智能物联管控系统，有效支撑物联网基础设施向数智化方向演进。

关键技术/创新要点

本项目针对空地一体化发展和多元化需求，重点研究空地无人装备一体化智能物联管控系统的架构与核心技术。项目以智能应用需求为导向，从系统架构、信息认知、模型优化、协同决策、平台构建五个方面推进关键技术研发。技术路线如图1所示。本项目在多模态信息融合、模型推理优化及人机协同决策等多项核心技术实现突破，技术复杂且创新性强。

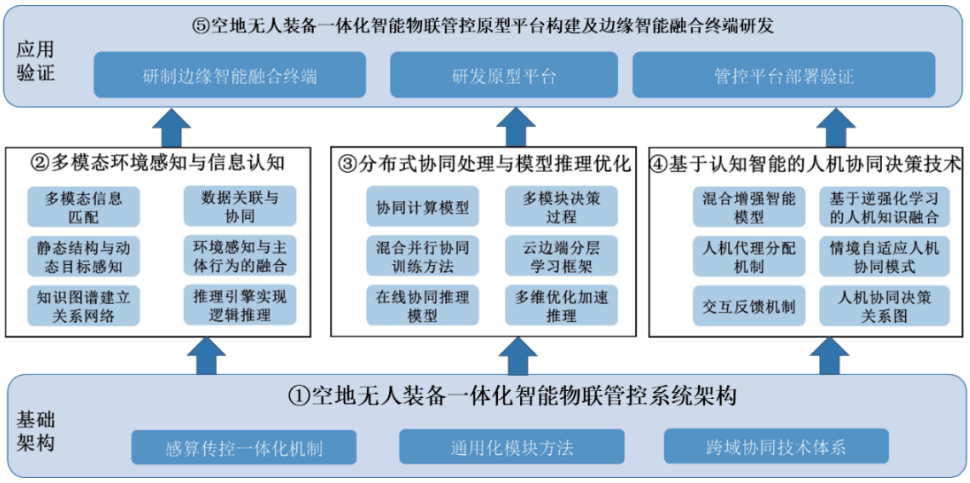


图1 项目核心技术路线

1.空地无人装备一体化智能物联管控系统架构：聚焦感算传控联合设计、模块化设计及跨域协同，建立柔性分布式架构，提升异构设备的互操作性与协同作业能力。

2.多模态环境感知与信息认知：提出基于注意力机制的时空融合方法和目标感知技术，实现环境感知与主体行为的深度融合，辅助构建具有自学习能力的空地智能认知系统，提升系统对复杂环境的适应能力。

3.分布式协同处理与模型推理优化：从协同计算、协同训练、协同推理三个方面完成空地设备的协同处理与模型部署，形成智能模型优化机制。与传统部署方案相比，时延降低30%。

4.基于认知智能的人机协同决策技术：建立混合增强智能模型，提出情境自适应的人机协同模式，并设计人机互信技术。在应对复杂动态环境时，该技术较传统技术突破了人机认知一致性的关键难题。

应用领域和市场前景

面向公共安全、应急救援、远程教育、智能交通、物联网等领域，空地无人装备一体化物联管控系统能够实现感知、计算、传输、控制的一体化流程，实现在复杂环境中稳定运行，为各类应用场景提供高效、可靠的解决方案。

基于泛在物联网多模态感控的食药安全智能冷链物流及其产业化

成果完成人	沙超	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备、部件及组网技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	物流、冷链				
核心专利号	ZL201910205769X；ZL2018101406561				

成果概述

当前我国食药冷链物流行业普遍面临感知终端功能单一、多设备协同能力弱、组网编址不灵活、数据收集模式固化、系统健壮性不足、缺乏全链条智能化管控平台等突出问题，难以满足食品、药品在仓储、运输、配送全流程对温湿度、环境状态、设备运行的高精度、高可靠监控需求，严重制约食药安全保障能力与冷链产业数字化升级。本项目以泛在物联网与多模态感控为核心技术支撑，面向食药安全冷链物流全生命周期管理开展系统性研究与产业化突破，重点攻克多模态智能终端研制、云-边-端协同智能组网、AI 与大数据驱动动态制冷优化、轻量化机器学习视觉精准化霜、数字孪生故障预测与维护等一系列关键核心技术，自主研发形成覆盖感知、传输、计算、控制、服务的完整智能冷链物流技术体系与“冷云”平台。项目构建了全IP泛在编址、高能效数据交互、全局-局部协同决策、智能故障预警维护的一体化解决方案，彻底改变传统冷链“被动监控、经验运维、高耗低效”的运行模式。经权威专家鉴定，项目整体技术达到国际先进水平，在基于泛在物联网的食药冷链物流云平台全生命周期监控方面达到国际领先水平，相关成果已实现大规模产业化落地，显著提升我国食药冷链智能化、安全化、绿色化水平，具备重大技术价值与产业推动作用。

关键技术/创新要点

本项目围绕食药冷链智能管控核心需求，形成五大关键创新技术，全面突破传统冷链技术瓶颈。

1）多模态智能终端与云-边-端协同设备研制。自主研发集成温湿度、气体、PH值、视觉等20余种传感器的智能终端，兼容LoRa、NB-IoT、Bluetooth、ZigBee等多协议通信，通信距离可达1.5km，支持太阳能、锂电池、交流电多模供电，可在-40℃~85℃极端环境稳定工作；同步研发云-边-端协同智能网关，内置边缘计算能力，实现本地故障诊断、自适应组网与远程毫秒级控制，解决传统设备传感单一、通信受限、控制滞后的问题。

2）泛在化智能组网与高能效数据交互技术。创新实现全IP协议栈精简与超大规模编址技术，支持IPv6高QoS多跳组网与安全路由；提出基于多重树的冷链数据收集方法、均衡化任务承载数据上传策略与拥塞自适应闭环控制机制，大幅降低数据冲突、提升网络鲁棒性与能量利用效率，适配冷链大规模、高动态、异构终端部署场景。

3）AI+大数据冷链智能优化决策技术。首创融合多元异构感知的冷链全链条数据驱动模型，研发基于深度学习与遗传算法的全局-局部协同动态制冷优化决策引擎，可精准预测制冷负荷、动态优化运行参数，实现节能与效率协同提升。

4）轻量化视觉感知精准化霜技术。突破冷库暗光环境图像增强与小模型智能识别技术，实现结霜状态非接触高精度识别，替代传统定时/定温化霜，避免无效化霜与过度化霜，大幅降低能耗并保障货品品质。

5）数字孪生与预测性维护技术。构建云-边-端协同数字孪生运维体系，基于设备全维度运行数据实现故障早期预警、健康评估与剩余寿命预测，推动冷链运维从“被动维修”向“主动预防”升级。全链条冷链云平台与产业化应用，打造“精创冷云”一体化平台，提供一站式上云、全流程追溯、AI节能、故障诊断、货架期预测等服务，无缝对接监管平台，快速适配多场景定制化需求。



图1 泛在冷链物流多模态感控系统



图2 制冷设备云计算节能控制系统

技术指标/优势

本项目核心技术指标领先，综合优势显著，已形成完备自主知识产权体系。核心技术指标方面，系统全面支持LoRa、NB-IoT、Bluetooth、ZigBee等主流通信协议，传输距离达km级，系统功耗低至mw级；多模态感知终端通信距离扩展至1.5km，功耗较传统同类产品降低40%，成本仅为同类产品1/2；基于轻量化机器学习的视觉化霜技术识别准确率超99%，系统综合节能率达24%；设备支持-40℃~85℃极端环境运行，故障恢复时间缩短60%，运维成本降低35%，可实现全IP+移动场景超大规模编址与高可靠组网。与国内外同类技术相比，本项目突破传统冷链设备“重监测、轻控制”、协议兼容性差、响应延迟高、化霜方式粗放、运维被动等缺陷，首创“感知-传输-控制-决策-维护”全链路多模态融合架构，在多模态协同感知、泛在智能组网、AI动态制冷优化、视觉精准化霜、数字孪生预测维护等方面形成代差优势，填补国内高端冷链智能控制设备空白。相关成果获中国冷链物流“金鼎奖”，获得2025年度中国电子学会科学技术三等奖。经科技查新与专家鉴定，多项核心技术为国内外首创，整体技术国际先进、部分技术国际领先。

应用领域和市场前景

本项目成果可广泛应用于食品冷链、医药冷链、疾控疫苗储运、商超冷链、物流园区、海关监管、工业冷链等众多领域，覆盖冷库、冷藏车、医用冷柜、冷链仓储中心、疫苗运输箱、食品速冻库、自动化冷链物流等核心场景，能够为食品生产加工、医药流通、疾控防疫、冷链物流、商超零售、政府监管等单位提供全流程温湿度监控、设备智能控制、能耗优化、故障预警、数据追溯与合规监管服务。随着国家对食药安全管控力度持续加大、冷链物流行业数字化与绿色化转型加速，以及疫苗、生物制剂、高端食品等高附加值货品对高精度冷链需求持续攀升，智能化、低功耗、高可靠、全链条可追溯的冷链技术成为行业刚需。项目成果具备显著国产化替代优势，可打破国外高端冷链设备技术垄断，同时降低行业应用成本，提升冷链系统安全性与能效水平。未来可进一步向三维复杂场景、超大网络规模、跨区域协同管控方向升级，在全国乃至全球冷链物流、食药安全、智慧物流领域具备广阔市场空间与持续产业化潜力，能够持续为行业降本增效、保障民生安全、推动产业高质量发展提供核心技术支撑。

一种基于服务器策略制定的物联网设备流量混淆方法

成果完成人	何高峰	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	应用安全技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	物联网安全防护				
核心专利号	ZL202410971731.4				

成果概述

随着物联网技术的迅速发展，以及Google、Amazon、小米等厂商的物联网设备智能家居平台的涌现，设备之间的通信规模急剧增加。在物联网设备快速增长的同时，用户的个人隐私和数据安全问题变得尤为重要。本成果提供了一种基于服务器策略制定的物联网设备流量混淆方法，该方法在保障通信安全的前提下，具备以下突出优点：高安全性，通过对每台物联网设备进行单独的混淆策略制定，有效防范被动攻击；高可用性，利用设备本身的流量特征进行映射，最小化了通信过程中的性能影响，保通信双方能够有效地进行流量混淆操作，不影响正常通信。因而本成果提供的一种基于服务器策略制定的物联网设备流量混淆方法具有重要实用价值。

关键技术/创新要点

本技术的核心思路为：服务器针对物联网设备指令所产生的数据量进行聚类，将同一类中的数据量映射为固定值。依据物联网设备所具备的网络通信环境，将固定值分解为特定的报文长度分布，从而实现流量混淆。本成果可以实现混淆策略的自动确定，并能够针对不同物联网设备产生不同的混淆效果，从而实现高可用性和高安全性防护。

围绕上述思路，具体技术步骤包括：

（1）建立通信连接：物联网设备与服务器建立加密网络通信连接；

（2）请求下发混淆策略：物联网设备向服务器发送请求，请求获取流量混淆策略；

（3）服务器混淆策略制定：服务器通过数据聚类，将指令所产生的数据量映射为固定值。服务器对物联网设备请求做出确认。服务器对物联网设备流量交互的统计特征进行分析，并将流量分布作为混淆策略返回至物联网设备。在此步骤中，服务器通过数据聚类，将指令所产生的数据量映射为固定值，如图 1 所示。

（4）物联网设备接受混淆策略并执行流量混淆。物联网设备按照混淆策略确定的报文大小和格式将数据整形为特定的报文长度分布进行通信；

（5）服务器返回数据流量混淆。服务器按照混淆策略确定的流量特征将数据整形为特定的报文长度分布发送返回数据。

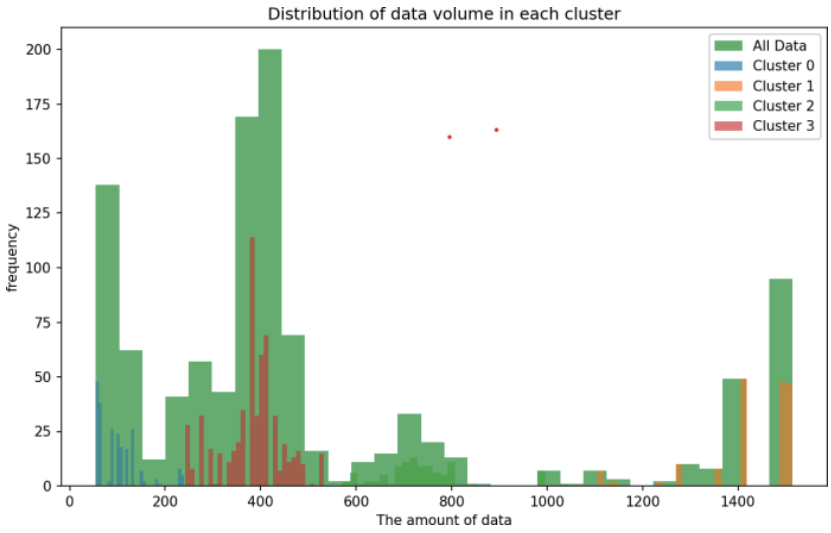


图 1 聚类结果映射图

技术指标/优势

本成果设计了一种全新的物联网网络流量安全防护架构，该架构能够显著增加物联网用户的安全隐私保护性，且便于将安全隐私保护封装为增值服务。

应用领域和市场前景

可应用于物联网设备的网络流量安全防护领域，能防止黑客从网络流量中推断用户行为相关隐私信息，具有一定市场应用前景。特别的，本成果首次将网络流量安全防护设计为物联网服务器提供的一项服务功能，可以采用用户付费购买服务的形式进行商用推广，为物联网设备厂商提供了新的收益增长点。

一种基于分簇算法的物联网中节点失效检测方法

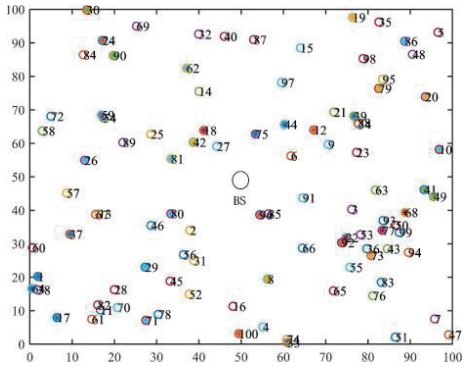
成果完成人	刘家希	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	系统与软件安全技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机系统结构
应用行业	物联网				
核心专利号	ZL202410545625.X				

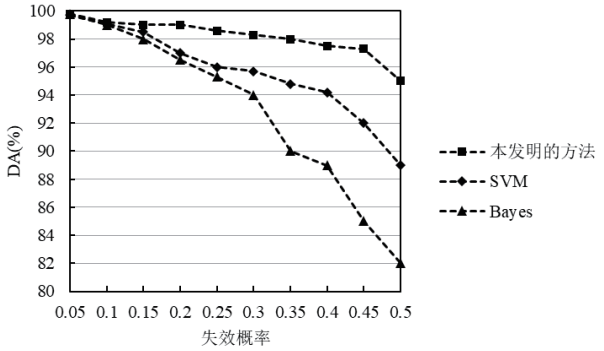
成果概述

随着物联网规模持续扩大，节点数量激增且分布广泛，节点失效问题已成为影响系统可靠性的关键因素，而传统失效检测方法在大规模场景下往往存在检测延迟高、扩展性差等局限。本成果提出一种面向物联网的节点失效检测方法，以簇头节点作为失效检测模块的部署平台，利用普通节点周期性上传的感知数据作为检测依据，通过阈值判定节点状态，并采用 fail-stop 故障模型对节点失效进行识别，整个检测过程无需节点间复杂交互与状态同步。该方法将失效检测复杂度与网络节点规模解耦，使检测时间不再受节点规模限制，具备良好的可扩展性，能够在大规模物联网环境下为各类应用提供准确、及时的节点失效检测服务，有效支撑系统的高可用性与稳定运行。

关键技术/创新要点

本成果针对物联网大规模节点失效检测面临的扩展性瓶颈，提出了一种轻量化、可扩展的检测方法，其核心创新主要体现在四个方面。首先，创新性地采用基于簇头节点的集中式检测架构，将失效检测功能集中部署于簇头节点，由簇头统一接收各普通节点周期性上传的感知数据并完成状态判定，避免了节点间频繁的心跳交互，使检测任务与节点规模实现解耦。在此基础上，采用数据驱动的被动式检测机制，突破传统“主动心跳”范式，利用物联网应用本身的数据采集周期，通过分析节点上报数据是否连续、数值是否正常来判断节点存活状态，在完成失效检测的同时不引入额外通信开销。在状态判定环节，设计了基于动态阈值的自适应判定方法，簇头节点根据历史数据分布特征设定合理的缺失数据上限与数据异常阈值，通过阈值比对高效完成节点失效识别，计算开销极低。本成果最核心的创新在于实现了面向大规模场景的线性可扩展能力，将失效检测时间复杂度与节点规模解耦，每个簇头独立管理覆盖范围内的节点，检测时间仅取决于簇头处理能力，通过增加簇头数量即可线性扩展系统容量，为百万级甚至千万级物联网节点的可靠运行提供了低成本、易部署的技术支撑。





技术指标/优势

本成果失效检测时间与节点规模解耦，单簇头支持千级以上节点，检测延迟毫秒级且零额外通信开销。通过线性扩展支持百万级规模，功耗与部署成本远低于传统心跳方案，兼容现有物联网协议栈。已申请发明专利并发表学术论文。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于智能电网、工业物联网、智慧城市、环境监测、物流追踪等大规模物联网场景。在智能电网领域，可部署于配用电侧的传感节点失效检测，保障电力系统运行可靠性；在工业物联网中，适用于工厂设备状态监测与故障预警，提升生产连续性；在智慧城市领域，可支撑海量市政设施（如路灯、井盖、环境传感器）的远程运维，降低人工巡检成本。

随着物联网连接数持续爆发式增长，据行业预测，2025年我国物联网连接数将突破200亿，节点失效检测已成为保障系统高可用性的刚需。本成果以零额外开销、线性扩展能力、低成本部署为核心优势，相较于传统心跳检测方案具备显著竞争力，可有效降低运维成本与业务中断风险，市场应用前景广阔，具备规模化推广价值。

面向车路云协同的5G移动物联网确定性服务系统

成果完成人	赵海涛	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备、部件及组网技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	智能交通与车联网				
核心专利号	ZL201710275605.5				

成果概述

面向智能交通和车联网场景，针对传统移动网络在海量车载终端与路侧单元协同接入、低时延高可靠传输、边缘算力协同和全网智能管控等方面能力不足的问题，本成果围绕车路云协同环境下的网络组织、边缘协同与智能管控开展系统研究，形成了面向车路云协同的5G移动物联网边缘群智协同技术体系与智能管控系统。项目突破了大规模终端群智接入、边缘异构网络虚拟重构与协同适配、算网融合与群智决策、数据—知识联合驱动全网管控等关键技术，构建了端边网云协同架构，显著提升了车联网场景下网络接入保障、资源协同调度与业务智能管控能力。成果整体达到国际先进水平，部分关键技术达到国际领先水平，已在苏州首批国家级5G车联网新基建工程、江苏（无锡）国家级车联网先导区等场景示范应用。

关键技术/创新要点

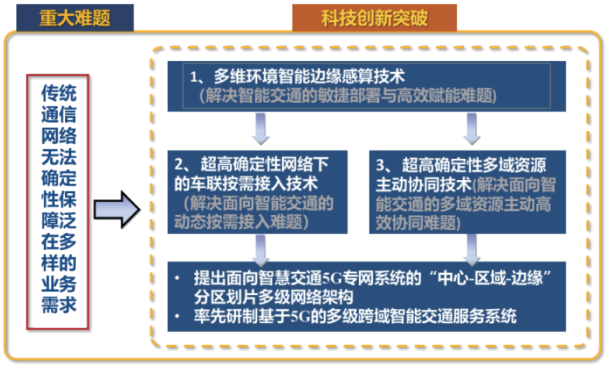
面向智能交通和车联网场景中海量车载终端、路侧单元、边缘节点和云平台协同运行需求，针对传统移动网络在动态接入、实时传输、协同计算和全网管控方面存在的瓶颈，项目形成了面向车路云协同的5G移动物联网边缘群智协同关键技术与智能管控系统。

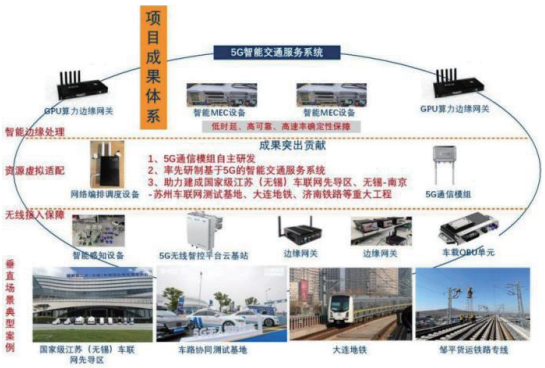
1、突破了大规模车载终端与路侧单元群智接入技术。面向车辆高速移动、终端数量大、业务并发高等特点，实现终端、路侧设施和网络资源的按需匹配与动态接入，提升了复杂交通环境下接入稳定性和通信可靠性。

2、推进了边缘异构网络虚拟重构与协同适配技术。针对5G、车联网专网、边缘节点等多种异构资源并存的特点，实现网络能力统一抽象、灵活编排和快速适配，增强了不同业务场景下低时延、高可靠通信保障能力。

3、提升了算网融合与群智决策技术。通过协同调度边缘算力、传输链路和业务任务，实现感知、传输、计算、控制一体化协同，提升了车路云协同场景下实时分析、快速响应和智能决策能力。

4、构建了数据-知识联合驱动的全网智能管控技术。融合网络运行数据、业务状态信息和场景规则知识，实现对车联网系统的智能监测、异常预警、资源优化和策略自适应调整，提升了系统运行效率和运维智能化水平。成果已在国家级5G车联网新基建工程和国家级车联网先导区开展示范应用，整体达到国际先进水平，部分关键技术达到国际领先水平。





技术指标/优势

该成果面向智能交通和车联网复杂场景，围绕海量终端接入、低时延高可靠传输、边缘算力协同和全网智能管控等关键需求，形成了面向车路云协同的5G移动物联网边缘群智协同技术与智能管控系统。系统具备支撑大规模车载终端与路侧单元协同接入的能力，可满足车联网场景下多业务并发、动态切换和连续稳定通信需求；具备面向异构网络环境的统一抽象、灵活编排和协同适配能力，可支撑低时延、高可靠、高并发业务运行；具备边缘算力、传输链路与业务任务联合调度能力，可实现感知、传输、计算、控制一体化协同；具备数据—知识联合驱动的智能监测、异常预警、资源优化和策略自适应调整能力，可显著提升系统运行效率和运维智能化水平。

与传统移动网络或单一车联网解决方案相比，本成果的优势主要体现在三个方面：一是协同能力更强，打通了端、边、网、云各环节，能够适应车联网场景下多主体、多资源、多业务协同运行需求；二是业务保障能力更强，在高速移动、密集接入和复杂环境下，能够更好满足低时延、高可靠和连续服务要求；三是智能管控能力更强，不仅能够实现网络资源调度，还能够面向业务和场景进行智能分析、预测预警和自适应优化，更适合智能交通和车联网规模化部署。

相关成果已在国家级5G车联网新基建工程和国家级车联网先导区开展示范应用，整体达到国际先进水平，部分关键技术达到国际领先水平。成果形成了多项发明专利、软件系统和工程化应用成果，为智能交通和车联网场景下5G移动物联网关键技术落地提供了有力支撑。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于车联网先导区、智慧高速、城市道路协同控制、智能网联汽车测试示范区、轨道交通通信、园区无人车和智慧物流等领域，可支撑车路云一体化环境下车载终端、路侧单元、边缘节点和云平台高效协同运行。随着车路云一体化建设持续推进，以及5G-A、RedCap、C-V2X等技术规模化部署，智能交通领域对低时延、高可靠、广连接和智能管控平台的需求将持续增长。该成果已在苏州、无锡等地开展示范应用，具备较好的工程化基础和复制推广条件，可面向交通管理部门、车企、运营商和系统集成商进一步推广，在智能交通基础设施、车联网平台建设和行业应用拓展方面具有良好的产业化与成果转化前景。

无线网络测试系统产品系列

成果完成人	潘甦	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	电信网络运营支撑管理技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	面向无线网络建设、验收、交付、企业和工厂网络运维				

成果概述

随着自动化与智能化持续推进，企业生产效率和设备密度快速提升。实践表明，当产线节拍与产能达到一定规模后，物料流转、工位协同与柔性调度越来越依赖无线AGV/AMR、移动终端与工业物联网系统，这使无线网络从“基础连接”升级为“关键生产基础设施”。在这一阶段，行业的共性需求不再是“是否连得上”，而是“是否稳定、可预测、可追溯、可交付”：既要保障高并发移动设备下的低时延与连续漫游，又要在问题发生时快速定位根因并形成可复测的整改闭环。面向Wi-Fi/专网LTE/5G/射频与电磁兼容（EMI）的软硬件一体化测评工具链，将专业的测试仪器与大语言模型建立会话式交互，将AI深度嵌入测试流程，把“采集数据”升级为“可解释、可复现、可交付”的结论与报告，实现专业、便携、智能和高效创新性产品。

关键技术/创新要点

1.AI 会话式测评中枢

区别于传统"采集→导出→人工分析"的割裂流程，iChecker TestLab 将大语言模型（LLM）与专业知识库深度融合，构建 AI 会话式测评中枢。测试数据、抓包文件、趋势曲线、限值对比等专业内容作为上下文实时注入会话，工程师可用自然语言提问、归因与决策，无需切换多个工具；AI 自动输出"根因 + 复现路径 + 整改建议"，大幅压缩问题定位周期。

2.并发仿真与深度诊断一体化验证能力

面向酒店满房、会议高峰、园区高密接入等高压力场景，平台提供可复现的并发压力验证 + 深度故障诊断一体化能力。通过多终端并发接入、上下线扰动、真实业务流量回放，与空口抓包、自动协议解析、异常事件识别、问题分类定位协同联动，可将“偶发卡顿/掉线”转化为可量化、可复测的测试结果。该能力可输出容量上限、时延长尾、丢包、抖动、连接异常与干扰特征等关键指标，并支持标准 PCAP 证据留存与外部系统接口联动，实现从压力复现到根因定位的闭环验证。

3.3D-WiFi 与三维数字孪生仿真能力

3D-WiFi 采用“现场采集 + 工程仿真 + 平台展示”的三端协同架构，重点能力如下：

· 现场 PAD（3D 多楼层 + AR 增强）：支持在现场进行多楼层空间采集、点位标注和 AR 增强可视化，快速完成 AP 点位、覆盖盲区与问题区域的立体建档。

· PC 3D 建模与仿真(工程建模 + 数字孪生 + Plan 模型):在 PC 端完成工程级三维建模与数字孪生构建,结合射线追踪/波形追踪的 Plan 仿真模型,预演覆盖、漫游、干扰与容量风险,输出可优化的部署方案。

· Web平台展示(仅展示):面向管理与协同场景提供统一可视化展示门户,仅用于成果浏览、状态查看和跨角色共享,不承担建模与仿真计算。

通过上述三端分工,可将“现场反复试错”前移为“仿真先验验证 + 结果在线可视化”,提升方案设计、部署优化与整改复测效率。

4.多域数据时间轴同步与回放

专网路测与射频测评场景下,信号质量(RSRP/RSRQ/SINR)、性能指标(时延/吞吐/丢包)与 GPS 轨迹在同一时间轴对齐存储,支持事后逐帧回放复盘。工程师可精确定位"哪一秒、哪个位置"出现了性能劣化,彻底解决多源数据对不齐、问题无法溯源的行业痛点。

基于统一时间轴与结构化事件标注,测试数据、结论、整改前后对比可持续沉淀至资产库,形成可复用的场景基线与 SOP。后续巡检或迭代验证可直接调用历史基线对比,实现“复盘-整改-复测-再沉淀”的持续改进闭环。

5.标准化证据链自动生成

内置覆盖 Wi-Fi、LTE/5G 专网、EMI 传导等领域的测试模板与判定门限库(含 EN 50121、GB/T 24338.4 等行业标准),测试完成后自动将趋势图、抓包文件、超标点位标注与结论摘要打包为结构化证据链,支持 PDF/HTML/JSON 多种格式一键导出,满足厂家交付验收与行业监管双重场景。

6.便携化与现场化工程设计

产品体系采用“便携终端 + 模块化扩展 + 统一软件平台”的软硬件一体化形态,围绕现场工程效率进行设计:开机即测、触屏直达、任务模板化执行,减少外接设备与临时搭建成本。前端设备强调轻量便携与快速部署,支持多场景移动测试、跨楼层巡检和现场即时报告输出。

在工程可靠性方面,系统通过标准化接口与统一数据协议打通采集、分析、仿真、回放与报告链路,避免“多工具拼接”造成的数据断层;结合多级射频输入保护、精度补偿机制(典型 ±2 dB)与长时稳定运行能力,在地铁隧道、变电站、园区产线等复杂环境下,持续提供可复现、可交付的专业测试结果。

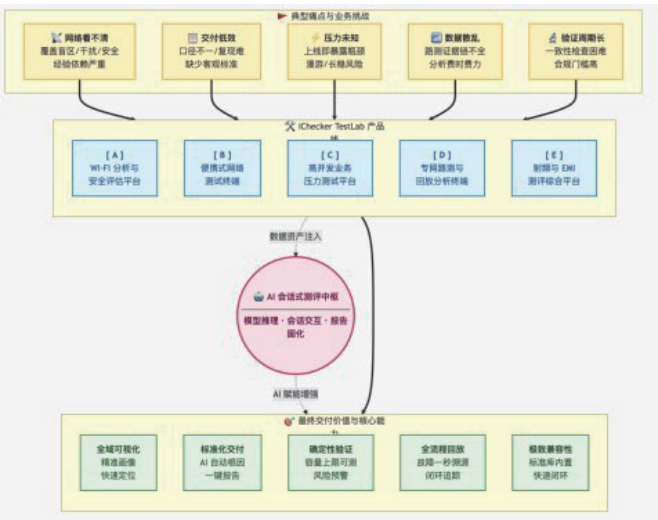


图1 AI会话式测评中枢示意图



图2 便携化与现场化手持设备样机图



图3 多用户模拟及无线协议分析硬件设备图

技术指标/优势

采用便携终端 + 模块化扩展 + 统一软件平台，覆盖 Wi-Fi/专网/EMI 测试。相对于现有“多工具拼接 + 人工研判 + 事后排障”的主流手段，可实现开机即测、并发压测与深度诊断联动、3D 多楼层仿真预验证、多域时间轴回放及自动证据链报告输出，并通过模板/基线/SOP持续沉淀，显著提升部署效率、定位准确率、验收通过率与复测闭环能力。本系统产品，从硬件平台、软件系统实现了统一体系架构，打通前后台和AI Agent 的互动，可以覆盖无线通信现场测评和运维的全制式需求。

应用领域和市场前景

重点面向智能制造、无线工厂与AGV产业场景，覆盖产线无线网络建设验收、设备联网稳定性保障、移动机器人漫游与低时延通信验证，以及高并发作业下的干扰诊断与容量评估；同时可扩展至轨道交通、电力能源与科研测评等领域。随着工业数字化、柔性制造和机器协同加速推进，行业对“可复现、可量化、可交付”的无线测试能力需求持续增长。相较传统工具拼接模式，软硬件一体化与 AI 驱动闭环将成为工业无线测试市场的主要升级方向，具备跨场景复用与资产沉淀能力的平台有望在交付标准化、运维智能化和服务规模化方面形成长期竞争优势。

企业安全生产隐患排查系统

成果完成人	亓晋	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	计算机及终端设计与制造技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	工业制造				
核心专利号	ZL202410442022.7				

成果概述

企业安全生产是产业发展的核心保障，当前传统企业安全隐患排查模式存在流程不规范、检查数据碎片化、整改闭环管理缺失、信息传递不及时等痛点，人工记录易出现漏记、错记，隐患整改与复查缺乏有效跟踪，同时检查任务无智能提醒、不同类型企业检查标准不统一，难以满足开发区企业安全管理标准化、数字化、高效化的需求，也无法为安全监管工作提供精准的数据支撑。

本团队研发安全生产隐患排查系统，打造了APP端+WEB后台一体化的安全隐患排查数字化解决方案，实现了企业信息管理、检查任务派发、现场排查打卡、隐患记录上报、整改复查跟踪、检查报告自动生成、数据统计分析的全流程数字化管控等，既规范了检查员的现场检查流程，又实现了安全隐患“排查-整改-复查-销号”的闭环管理，为政府对企业安全生产监管提供了高效、精准的技术支撑。

关键技术/创新要点

作为企业安全隐患排查的数字化管理技术，系统以流程标准化、操作移动化、管理可视化、数据智能化为核心优势，相比传统人工排查模式，实现了检查流程的全线上化、隐患管理的闭环化和监管决策的数据化，解决了传统模式的核心痛点。

系统核心技术实现了数据联动与流程固化，检查过程中所有数据实时上传至后台，隐患信息自动同步至整改模块，复查结果反向更新隐患状态，形成“检查-隐患-整改-复查”的数据流闭环；同时通过电子签章、拍照留痕、定位打卡等技术手段，确保检查过程的真实性和可追溯性，所有操作记录全程留痕，实现安全排查工作的规范化管理。

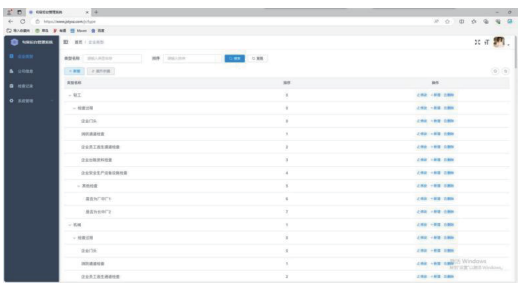


图1 AI会话式测评中枢示意图

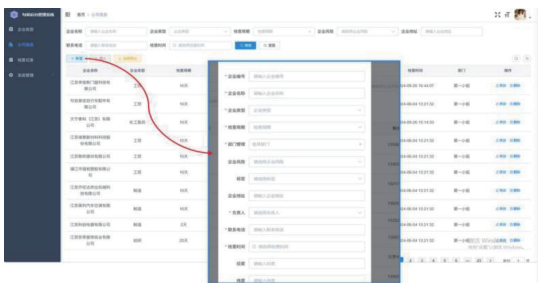


图 2 企业安全生产巡查平台公司信息

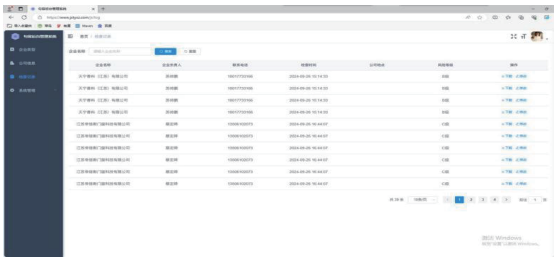


图 3 企业安全生产巡查平台检查记录

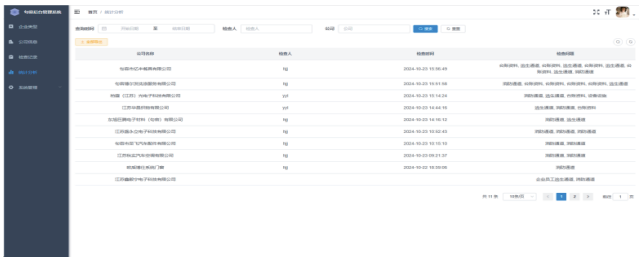


图 4 企业安全生产巡查平台统计分析

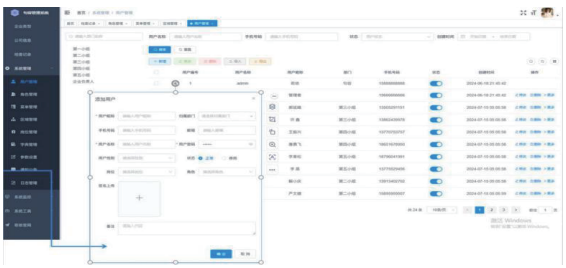


图 5 企业安全生产巡查平台用户管理

技术指标/优势

与传统人工安全隐患排查手段相比，该成果实现了企业安全排查的全流程数字化、标准化和闭环化，在排查效率、流程规范性、隐患跟踪能力和数据支撑能力上均具备显著优势：

现场操作高效便捷：APP端移动化操作替代人工纸质记录，拍照打卡、检查项勾选、隐患留痕一步完成，检查报告自动生成并支持PDF导出，大幅缩短现场检查时间，提升网格员作业效率。

流程规范可追溯：固化从检查打卡到整改复查的全流程操作，检查项与照片一一绑定、电子签名确认、操作全程留痕，确保排查工作的真实性和规范性，所有历史数据可随时查询、回溯。

隐患闭环管理：不合规项自动纳入隐患清单，系统自动推送整改复查任务，实现隐患“排查-整改-复查-销号”的全闭环跟踪，避免隐患整改不及时、复查不到位的问题。

智能提醒精准高效：设置临期、超期检查双重预警，检查任务按时间优先级排序展示，确保排查工作按时推进，解决传统模式下检查任务遗漏、延误的痛点。

管理配置灵活适配：WEB后台支持企业类型、检查项、用户权限、检查周期的自定义配置，可适配开发区不同行业、不同风险等级企业的排查需求，同时支持企业信息批量导入导出，提升管理效率。

数据支撑科学决策：系统自动归集所有检查、整改、复查数据，形成多维度统计分析报表，企业风险等级以四色图直观展示，为开发区安全监管的精准施策、科学决策提供数据支撑。

应用领域和市场前景

该成果专为政府、园区企业安全生产监管打造，可直接应用于辖内所有企业的安全隐患排查与管理工作，覆盖工业制造、工业园区、非工业区等各类企业场景，检查内容涵盖厂区外围、消防通道、逃生通道、台账资料、安全生产设备设施等全维度安全排查项，是开展企业安全监管工作的核心数字化工具。

随着国家对企业安全生产监管的要求不断提高，园区/开发区数字化安全监管成为行业发展趋势，传统人工排查模式已难以满足标准化、精细化的监管需求，具备全流程闭环管理、移动化操作、数据化分析的安全隐患排查系统市场需求日益迫切。本成果深度贴合企业安全监管的实际业务，实现了现场操作、后台管理、数据决策的一体化，适配各地区管理部门对辖区企业的安全监管工作，市场应用前景广阔。

面向自智网络的边缘智能内生AI智能体插件及管理平台

成果完成人	王攀	职称	正高	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	通信运营商				
核心专利号	ZL202210747592				

成果概述

将智能融入网络已成为不争的事实，B5G/6G已将网络智能提升到了前所未有的高度。然而，海量数据和泛在接入让以云为主体的网络智能不堪重负，边缘计算融入智能成为崭新的方向，为云边端协同智能提供了新思路。

本成果是基于当前绝大部分边缘网络设备（比如企业/家庭网关、ONU等）不具备智能能力，外挂AI设备部署成本较高等问题，借鉴AI智能体和思维链的思想，研制了一套可内嵌入传统网元设备的AI智能体及管理平台，完成对网元设备的QoS/QoE的智能感知、流量的智能分类和管理、恶意攻击的智能检测、智能路由选择等边缘内生智能任务。典型的应用场景是家庭网络中的青少年游戏防沉迷、热点业务带宽即时提升、P2P CDN的封锁等。

目前该成果已于国内知名网络设备制造商展开合作，并应用于其家庭网关设备中，同时，也正在与国内知名通信网络运营商展开关于P2P CDN的家庭网关智能识别的工作。成果处于工程样机阶段，无需过多工作量即可商用。

关键技术/创新要点

该成果是一款轻量级的即插即用、随走随留的插件级产品，主要解决边缘网络设备普遍不具备智能能力，无需边缘网元设备做任何改动，可按照灵活策略云端下发AI智能体插件，插件的功能可组合定制，包括应用识别、恶意检测、流量管理、路由选择、QoS/QoE的预测等。管理平台可开放接口与运营商统一网管、综合资源、原子能力平台等对接。

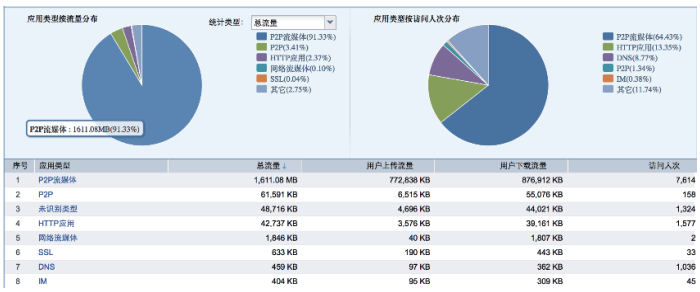


图1 管理平台界面图

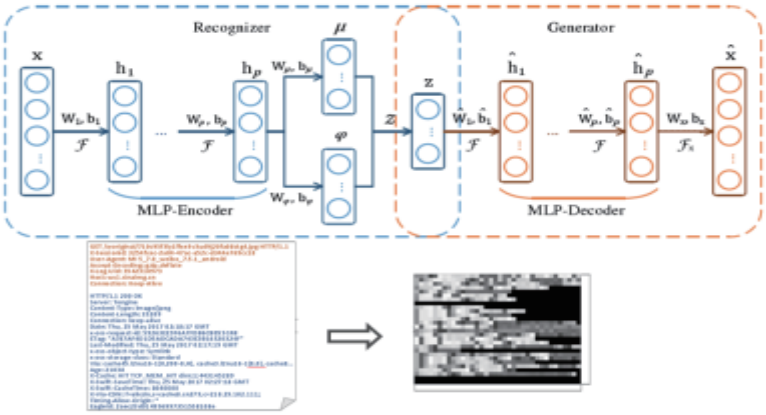


图2 边缘智能内生AI对抗学习算法

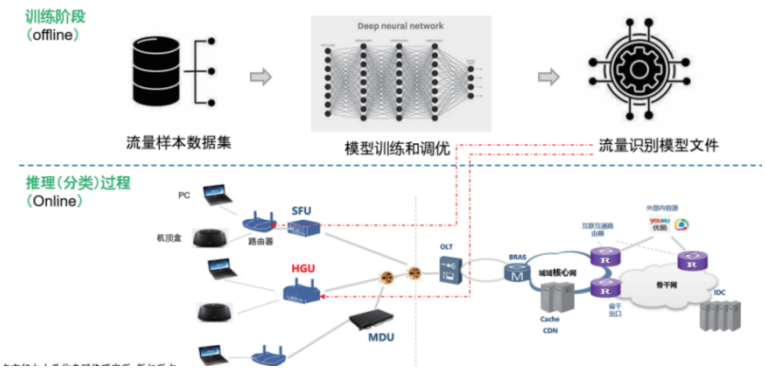


图3 系统部署结构示意图

技术指标/优势

AI智能体在边缘网元设备上的性能指标如下:

(1)整体流识别准确率:大于92%;

(2)精度:大于92%;

(3)召回:大于92%;

(4)F1-Score:大于92%;

(5)网络流识别速度:150个flow/s;

(6)包处理速度:20,000 pkts/s;

(7)CPU占用率:平均10%;

(8)内存占用:23MB;

(9)Flash占用:3MB。

应用领域和市场前景

该成果可普遍应用于通信运营商的固网、移网的边缘网元设备,包括家庭网关、家用路由器、物联网网关、ONU/OLT、企业网关、智能基站等。主要应用场景为应用识别、流量管理、路由智选、恶意检测、P2P CDN识别和拦截等。该成果可有效解决传统边缘网元设备不具备智能化能力的问题。

高效能物联网感知理论与关键技术

成果完成人	费欢	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	网络应用技术	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	智能家居，智慧养老，智能监护				

成果概述

物联网作为物理世界和信息世界的桥梁，是获知物理世界信息的核心载体。实现普适化的物联网感知，提供无所不在的感知能力，是物联网发展的必然需求。基于专用传感器的物联网感知模式存在感知能力有限、模式单一、成本高的问题。如何实现普适化的物联网感知已逐渐成为物联网领域学术界与工业界关心的热点，也是各国科研人员争夺的技术焦点。近年来，随着无线网络的快速发展，无线感知利用无处不在的无线信号作为感知媒介，构建感知对象对信号传播影响的模型，通过计算和智能分析实现对环境和目标的感知，大大拓展了物联网感知能力的外延。作为一种新兴的普适化、低成本物联网感知的可能模式，基于无线信号的物联网感知迅速成为世界科技前沿热点。当前无线感知主要关注挖掘新的无线信号感知能力，缺乏对感知效能的系统研究。

本项目围绕该热点领域，开创性地关注无线感知在信号、模型、计算三个维度存在的效能问题：多径干扰严重，信号失真，占用大量频谱资源却只能提供有限有效信息，感知适用性基础理论缺乏；感知环境动态多变，模型失效，现有依赖大量数据进行模型训练的环境非自适应方法只能实现较低感知精度，具有较大局限性；资源受限的设备难以承载高复杂度感知计算任务，感算失衡，先汇聚再计算的模式导致高延迟、低效率。本项目瞄准前沿难点问题，独辟蹊径，探索感知适用性理论与质量增强方法，研究环境自适应的高精度感知方法，提出云边端协同的动态感知计算技术。本项目的研究将探明多径干扰场景下动态感知目标的信号还原机理，解决环境无依赖的多目标感知模型有效性问题和时空非均衡的感知计算任务实时处理问题。

综上所述，本项目的科学问题源于世界科技前沿的热点和难点，独辟蹊径，重点研究高效能物联网无线感知的基础理论和关键技术，具有鲜明的引领性特征，预期将在物联网感知领域取得开拓性成果，引领物联网无线感知的高效能研究，推动普适化物联网应用的发展。

关键技术/创新要点

关键技术：

（1）多径干扰场景下动态感知目标的信号还原机理

高效能无线物联网感知资源方面面临频谱资源有限，针对有限的频谱资源，如何选择最优的感知信号

调制方法以及提取信号特征;针对无线感知中复杂网络环境及多径效应影响感知性能的问题,如何有效消除多路径干扰信号并利用多径信号中的信息;针对实际物联网感知场景中动态多目标感知信息分离困难及其带来感知复杂度增加和感知误差变大的问题,研究多目标环境中感知信息分离以及感知信息增强和还原技术等。

(2)环境无依赖的多目标感知模型的构建

物联网部署环境复杂多变,现有感知模型依赖于特定部署环境,导致感知模型有效性差、普适性弱和感知准确率低等问题。需要针对感知场景和感知目标的动态变化,有效解耦目标与环境信息,提取环境无依赖特征,有效识别分离多目标信息,进而实现高精度的感知目标定位追踪和行为识别。因此,如何构建环境无依赖的多目标感知模型,并探索该模型的有效性。

(3)时空非均衡的感知计算任务实时处理问题

物联网无线感知存在时间和空间分布非均衡性,感知任务呈现复杂任务高负载、负载需求高动态、计算爆发式产生的特点,导致感知计算难以实时高效处理。如何突破传统“先感知再计算”的模式,充分识别冗余感知任务,避免高复杂度感知重复执行,充分利用 “云-边缘-端”的计算资源,实现自组织协同,以高效能地协同处理动态感知需求,实现时空非均衡的感知计算任务的实时处理。

创新要点:

(1)研究基于感知信号调制和信号特征的感知适应性理论,提出复杂环境下多径干扰分离和动态感知目标的信号还原方法,实现有限信号资源下感知能力最大化,从信号维度提高无线感知的效能。

(2)提出场景无依赖的感知特征提取和多目标信号分离方法以构建场景无依赖的无线感知模型,在此基础上设计基于子动作模式匹配的跨场景行为识别方法,从模型维度提高无线感知的效能。

(3)提出基于感知冗余的近似计算重用方法和边缘自组织的感算协作机制,设计跨层动态计算部署迁移策略,实现时空非均衡下的实时感知计算,从计算维度提高无线感知的效能。

技术指标/优势

物联网是沟通物理世界和数字世界的重要桥梁,感知是物联网的重要基础功能,基于无线信号的物联网感知极大地拓展了物联网的感知范围,为物联网规模化应用提供了重要基础。然而当前无线感知仍面临信号失真、模型失效和感算失衡导致的低效能问题,难以满足普适化的感知需求。针对这些问题,本项目将着重研究:(1)感知适用性理论和感知信号质量增强方法,实现面向感知需求的高效感知信息提取和信号还原方法;(2)环境自适应的高精度感知方法,实现环境自适应的感知信息采集和数据训练,极大降低感知成本并提高感知精度;(3)云边端协同的动态感知计算技术,实现面向时空非均衡感知任务的动态云边端协同,实时提供感知结果;项目将面向医疗健康监护的精准人员定位与行为感知开展示范应用。通过本项目研究,将着重解决物联网无线感知在信号处理、模型建立和感知计算方面存在的共性效能问题,为物联网的普适化应用奠定坚实基础。

科研获奖:2023年度江苏省科学技术奖,二等奖。

应用领域和市场前景

物联网，是将无处不在的终端设备和基础设施智能化并使其具有被独立寻址能力，以传统电信网、互联网及新兴的无线/有线网络实现互联互通的网络。以1997年美国 DAPRA 支持的Smart Dust项目为开端，以传感器网络为代表的科研和应用促进了物联网发展的第一次热潮。近年来，随着网络技术的蓬勃发展，物联网技术逐渐与行业应用深度结合，快速发展，正逐渐催生新的信息技术革命与产业浪潮。物联网产业的发展及物联网相关技术的研究，影响经济社会的变革创新，近年来引起了世界各国的普遍关注。例如，欧盟成立了“物联网创新联盟”，汇集物联网技术与资源创造欧洲的物联网生态系；美国逐步将物联网的发展和重塑美国制造优势计划结合起来，以期重新占领制造业制高点；我国政府将发展物联网列入“十三五”规划中，努力构建完善的物联网产业链，形成具有国际竞争力的物联网产业体系。随着“物联网+”时代的到来，物联网感知技术在工业控制、智慧城市、智能家居、智慧医疗等领域广泛应用，同时也为产业的智能化和智慧化转型提供基础。

一种针对车联网的多维车辆信任评估方法

成果完成人	柯昌博	职称	副教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	物联网设备	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术	二级学科	计算机软件	
应用行业	软件开发				
核心专利号	ZL202211266352.2				

成果概述

本成果提出了一种针对车联网的多维车辆信任评估方法，解决了车联网不可信环境中车辆节点以及车辆消息是否可靠的问题。该声誉评估方案主要由两部分组成：在车间信任模块中，评估车辆通过对目标车辆的上下文、消息质量进行分析，结合邻居车辆的推荐建立对目标车辆的车间信任值，决定接收或丢弃其发来的消息，可有效减少恶意消息在网络中传播；在车辆全局声誉模块中，RSU对恶意反馈进行过滤恶，采用非对称遗忘因子计算目标车辆的反馈信任，能够抵抗恶意毁谤攻击并对非法行为施加更重的惩罚，雾服务器考虑其历史行为后计算全局声誉值再决定是否将它加入黑名单列表。本成果的声誉方案具体包括直接信任、推荐信任、反馈信任、历史信任四种度量维度，利用信任度量维度的多样性，实现了一种混合信任评估方案，既可以衡量车辆节点的可靠性，又可以衡量车辆消息的可靠性，同时对网络中存在的恶意攻击具有一定鲁棒性。

关键技术/创新要点

技术方案：本成果的一种基于多维信任度量的声誉评估方案包括以下步骤：

步骤1）可信中心TA负责整个声誉系统的初始化，将最新的车辆全局声誉分数发送给各个作为本地可信中心的雾服务器。若有新加入车载自组网中的车辆用户，TA负责其注册工作。

步骤2）车载自组网中的车辆节点周期性广播信标消息，主要包括：车辆ID、速度、位置、当前时间等上下文信息。此外，当发生交通事件时，位于事件附近的车辆节点会先感知到它，随后节点会将感知到的事件广播出去，距离事件较远的车辆节点可以通过接收消息来了解该事件。网络中的恶意节点会发起攻击，例如篡改消息内容、做出恶意反馈等。

步骤3）收到消息的车辆对发送消息的车辆进行车间信任计算（引入一个小的时间间隔，称为时隙，在每个时隙中计算信任值），将进行信任计算的车辆称为评估车辆Vi，将被评估的车辆称为目标车辆V_j。V_i基于上下文相关度和消息质量计算对Vj的直接信任$DT_{i,j}$，然后基于其它邻居车辆对目标车辆的推荐分数计算推荐信任$RT_{i,j}$，最后结合Vj的历史交互状况计算最新的车间信任值$TrV_{i,j}$。

步骤4）V_i根据计算出的车间信任值进行消息决策，如果$TrV_{i,j}$的值小于设定的阈值，表示V_i对V_j报告的事件消息不信任，则丢弃V_j发来的消息，否则接收或转发消息。最后把和V_j交互的满意度反馈给RSU。

步骤5）RSU收集其它车辆对V_j的反馈，先计算聚合反馈分数利用整体差异性对恶意反馈进行过滤，然后将过滤后的反馈分数转化为一对正负反馈，采用非对称遗忘因子计算其反馈信任FT_j，最后将对V_j的反馈信任发送给本地雾服务器。

步骤6）雾服务器将多个RSU对V_j的反馈信任和它的历史声誉值相结合计算V_j最新的全局声誉值，若V_j的声誉值低于阈值则标识为恶意车辆，将其列入黑名单中，把最新的车辆声誉值和黑名单上传至云端进行保存和撤销，随后将黑名单列表发送给管辖范围内的RSU，由RSU将黑名单列表广播给通信范围内的车辆。

其中所述步骤1）具体如下：

步骤11）可信中心TA将最新的车辆节点声誉值发送给相应的雾服务器用以本地化评估车辆的全局声誉值。

步骤12）新加入的车辆用户需要用自己的真实身份向TA注册，TA为其分配唯一可标识的身份ID并初始化车辆的声誉值，随后将车辆信息发送给相应的本地雾服务器。

所述步骤 2）具体如下：

步骤21）车辆节点定期广播信标消息，将车辆ID、速度、位置、当前时间等上下文信息告知周围其它车辆。当车辆节点感知到交通事件时，将感知到的事件整合到数据消息中广播出去，距离事件较远的车辆节点可以通过接收消息来了解该事件。

步骤22）恶意车辆节点会发起攻击，本成果中考虑三种攻击模式：①虚假信息攻击：攻击者一方面可能会广播不存在的事件消息，另一方面可能会对收到的消息内容进行篡改后再转发，将错误消息注入到网络中。②恶意毁谤攻击：攻击者提供关于其它车辆节点的错误反馈。③开关攻击：攻击者会在恶意行为和诚实行为之间切换，采用随机模式进行攻击。

所述步骤 3）具体如下：

步骤31）评估车辆V_i从目标车辆V_j的信标消息中提取其上下文信息，将上下文信息处理成n维规范化向量$vector^i$、$vector^j$，V_i计算对V_j的上下文相关程度：

$$Con_{i,j}=\frac{\sum_{k=1}^{n}k_i^{vector}\times k_j^{vector}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(k_i^{vector})^2}\times\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(k_j^{vector})^2}}$$

其中k_i^{vector}、k_j^{vector}分别表示规范化向量中的第K个值.

步骤32）由于直接交互过程中的消息都可以由接收方进行解密和分析，因此V_i可以判断V_j所发数据消息的合法性。V_i统计本次时隙内接收到V_j发送正确消息的个数$legal_{i,j}$以及错误消息的个数$mal_{i,j}$，计算V_j的消息质量：

$$Mq_{i,j}=\frac{legal_{i,j}}{mal_{i,j}+legal_{i,j}}\times\left(1-\frac{1}{legal_{i,j}+1}\right)$$

其中，可变参数$1-\frac{1}{legal_{i,j}+1}$随着正确消息个数的增加趋向1，目标车辆可以通过多发送正确消息来提高自己的消息质量。

步骤33）将上下文相关度作为消息质量的权重，以此来调节消息质量的准确性，利用Gompertz函数来计算V_i对V_j的直接信任：

$$DT_{i,j} = e^{-be^{-c\times Con_{i,j}\times Mq_{i,j}}}$$

其中b、c是函数参数，b控制输出沿x轴的位移，c调节函数的增长率，函数的输出范围在0到1之间。

步骤34）V_i将根据$DT_{i,j}$给出对Vj的推荐分数$rs_{i,j}$。分数越高表明Vj的表现越好，更加值得推荐。如果V_i是恶意车辆，则可能对推荐分数进行篡改，给出一个较低或者较高的分，然后再分享给周围车辆，从而影响其它车辆对Vj的信任评估。

步骤35）V_i获取邻居车辆$V_{i,k}$对Vj的推荐分数$rs_{k,j}$，从中选择$TrV_{i,k}$大于阈值的邻居车辆的推荐，即值得信任的邻居。初始时可以采用所有邻居的建议，后期建立信任后，只采用受信任的邻居的推荐。将邻居车辆集合记为N_i，$\forall\ V_k\in N_i$，将Vi对邻居车辆$V_{i,k}$的直接信任$DT_{i,k}$作为权重，计算推荐信任：

$$RT_{i,j} = \frac{\sum_{k\in N_i} DT_{i,k}\times rs_{k,j}}{\sum_{k\in N_i} DT_{i,k}}$$

步骤36）V_i根据本次时隙得到的直接信任和推荐信任，同时考虑到V_j的历史交互行为，计算关于Vj的最新车间信任值：

$$TrV_{i,j} = \lambda i, j_{last}^{TrV} + (1-\lambda)[(1-\frac{1}{n+1})DT_{i,j} + \frac{1}{n+1} RT_{i,j}]$$

其中i,j_{last}^{TrV}表示与V_j的历史车间信任值，λ介于0和1之间，是其所占的比重，由于最近的车辆行为应赋予更多权重，λ应该大于0.5，n是两车间的交互次数。

所述步骤4）具体如下：

步骤41）V_i根据$TrV_{i,j}$进行消息决策，如果$TrV_{i,j}$的值小于设定的阈值，表示V_i对V_j报告的事件消息不信任，则丢弃V_j发来的消息，否则接收或转发消息。

步骤42）V_i根据$TrV_{i,j}$给出对V_j的满意度反馈分数$fs_{i,j}$，并将反馈发送给RSU。反馈分数越高表示V_i对V_j的满意度越高。如果V_i是恶意车辆则可能会对反馈分数进行篡改再发送给RSU。

所述步骤5）具体如下：

步骤51）将对V_j给出反馈的车辆集合记为T_j，$\forall V_x\in T_j$，RSU从雾服务器处获取反馈车辆的历史声誉值xlastRepV，计算关于V_j的聚合反馈分数：

$$IFS_j = \frac{\sum_{x\in T_j} x_{last}^{RepV}\times fs_{x,j}}{\sum_{x\in T_j} x_{last}^{RepV}}$$

然后计算V_x关于V_j的反馈差异值

$$diff_{x,j} = \frac{|fs_{x,j} - IFS_j|}{IFS_j}$$

步骤52）车辆间的通信是多对多的，V_x除了对V_j产生反馈，同样也会对其它交互过的车辆做出反馈，网络中的恶意车辆可能会发起开关攻击，RSU需考虑V_x的整体反馈差异性，再决定是否采用V_x的反馈。将被V_x反馈过的车辆集合记为E_x，$\forall V_y\in E_x$，E_i中车辆总数目为n_x，计算V_x的整体反馈差异值：

$$Diff_x = \sum_{y \in E_x} \frac{diff_{x,y}}{n_x}$$

若$Diff_x$大于设定的阈值，则不采用Vx发来的反馈，将其从Tj中删除。

步骤53）对于$\forall V_x \in T_j$，RSU将其反馈值$fs_{x,j}$转化为一对正负反馈，记为$<\alpha_x, \beta_x>$，其中α_x为正反馈表示满意度，即$\alpha x = fs_{x,j}$；β_x为负反馈表示不满度，即$\beta_x = 1 - fs_{x,j}$。加入遗忘因子使得最近的反馈比重大于旧的反馈，将车辆的历史声誉值x_{last}^{RepV}作为反馈的权重，则正反馈α_x和负反馈β_x为：

$$\begin{cases} \alpha_x = x_{last}^{RepV} \times fs_{x,j} \times \zeta_1{}^{t-t_x} \\ \beta_x = x_{last}^{RepV} \times (1 - fs_{x,j}) \times \zeta_2{}^{t-t_x} \end{cases}$$

其中ζ_1和ζ_2为非对称遗忘因子，$\zeta_1 < \zeta_2$，使车辆的恶意行为受到更重的惩罚。t为当前时间，tx表示反馈发送的时间。利用正负反馈计算对V_j反馈信任：

$$FT_j = \frac{\sum_{x \in T_j} \alpha_x}{\sum_{x \in T_j} \beta_x + \sum_{x \in T_j} \alpha_x}$$

然后将对V_j的反馈信任发给本地雾服务器。

步骤61）雾服务器将多个RSU对V_j的反馈信任和它的历史声誉值j_{last}^{RepV}相结合计算V_j最新的全局声誉值：

$$RepV_j = \lambda j_{last}^{RepV} + (1 - \lambda) AVG(FT_j)$$

其中λ同车间信任中一样，介于0和1之间，取λ大于0.5为最新的反馈信任赋予更多的权重，$AVG(FT_j)$表示多个RSU对V_j的反馈信任的平均值。

步骤62）若V_j声誉值低于阈值则标识为恶意车辆，将其列入黑名单中，把最新的车辆声誉值和黑名单上传至云端进行保存和撤销，随后将黑名单列表发送给管辖范围内的RSU，由RSU将黑名单列表广播给通信范围内的车辆。

附图说明

图1是本声誉评估方案所运用的实际场景。

图2是基于多维信任度量的声誉评估具体流程。

具体实施方式下面结合附图对本成果的技术方案做进一步的详细说明：

在具体实施中，图1是本声誉评估方案所运用的实际场景。在车载自组网环境中，车辆节点通过配备的传感器可以感知周围环境，采集相关信息，借助V2V通信和V2I通信告知周围车辆或RSU自身的位置、速度、感知到的事件等，邻近车辆可根据这些安全消息采取相应措施，例如收到发生交通碰撞消息的车辆可以降低自身行驶速度，以防造成交通堵塞。同时，这也存在着安全隐患。由于无线通信开放性高，VANETs中的车辆实体容易受到各种不同类型的攻击，例如恶意攻击者广播虚假消息，或者为节省资源不广播感知到的事件，可能会导致其它车辆做出错误的决策，引发严重的交通事故。可见，有效的信息分发是保证VANETs应用成功实现的重要因素，车辆在根据所收到的消息采取任何行动之前，应检查该消息的可信

度。此外攻击者还可能利用开关攻击和恶意毁谤来影响车辆的可信度。因此，需要一种声誉机制来解决车联网中的信任问题，对车辆节点以及车辆消息进行可靠性分析，实现信任管理。

图2是本专利的声誉评估具体流程图，主要由车间信任和车辆全局声誉两部分组成。在车间信任评估模块中，评估车辆首先从信标消息中获取目标车辆的上下文信息，比较两者间的上下文相关度，并对其消息质量进行分析。处于相似的上下文环境中的车辆可以感知到更多公共的数据，对彼此的了解更加全面，在衡量消息质量上会更准确，利用上下文相关度Con和消息质量 Mq通过Gompertz函数计算得到直接信任DT。然后评估车辆选取受信任的邻居车辆对目标车辆的推荐分数rs进行聚合得到推荐信任RT。最后考虑和目标车辆历史交互的状况更新本次的车间信任值TrV，利用最新的车间信任值来决定该目标车辆报告的事件消息是否可信，如果值得相信则接收或转发事件消息，否则丢弃该消息，以此减少虚假消息带来的恶意影响。

在车辆全局声誉模块中，RSU收集管辖范围内其它车辆对目标车辆的反馈后，为避免恶意车辆的毁谤攻击，先计算聚合反馈分数IFS利用整体差异值Diff对恶意反馈进行过滤，随后将过滤后的反馈分数fs转化为一对正负反馈<α,β>再计算其反馈信任FT。在反馈中加入非对称时间遗忘因子(ζ_1、ζ_2)对车辆的恶意行为施加更重的惩罚，使得车辆声誉值易失难得，当恶意车辆发起开关攻击时能快速降低其声誉值。雾服务器得到RSU对目标车辆的反馈信任后结合它的历史声誉值$RepV^{last}$更新最终的全局声誉值RepV，利用最新的声誉值来衡量车辆节点的可靠性，如果该车辆节点不可靠，则将其加入黑名单，再通过RSU将黑名单列表广播给其它车辆节点，以此减少网络中恶意节点的数目。



图1 实际应用场景

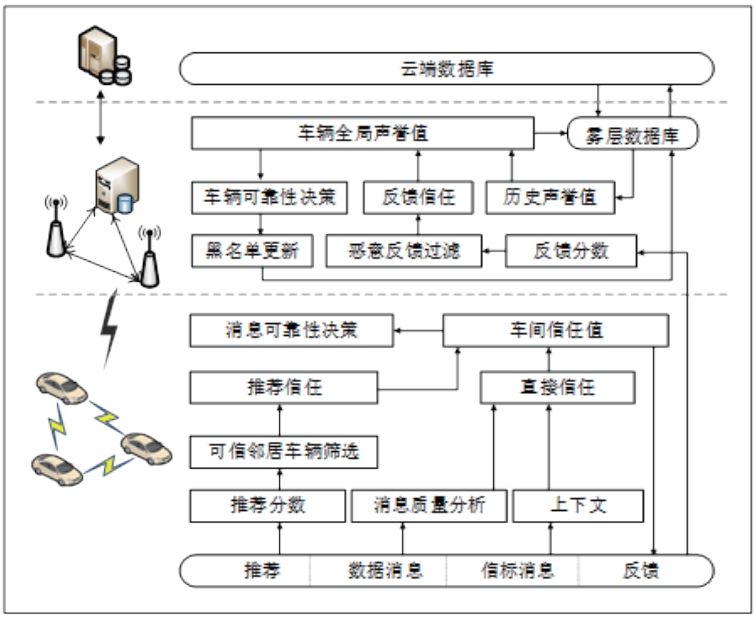


图2 车辆声誉评估具体流程

技术指标/优势

本成果采用的以上技术方案与现有技术相比，具有以下优势：

（1）本成果采用多维信任度量来解决车联网环境中的安全问题，实现了一种混合信任评估方案，一方面可以衡量车辆消息的真实性，以便车辆决定接收或丢弃收到的消息，另一方面可以衡量车辆节点的可靠性，判断其是否是恶意节点。

（2）本成果采用差异性过滤算法可以有效减轻恶意反馈带来的不良影响，采用非对称遗忘因子，加大对恶意行为的惩罚，声誉值易失难得，可以有效抵抗恶意毁谤、开关攻击等恶意攻击模式。

（3）本成果采用分布式架构，避免集中式声誉方案产生较大的通信开销和时延，利用本地雾服务器辅助RSU更新车辆的声誉分数，雾服务器可以监管RSU，以防RSU被入侵带来的危害。

应用领域和市场前景

该技术可广泛应用于智能交通、车路协同、自动驾驶辅助、智慧高速、城市应急预警、物流车队管理等场景，尤其适用于需要对车辆节点可信性、消息真实性和异常行为进行实时判别的车联网系统。依托其“车间信任+全局声誉”双层机制，可提升道路事件感知准确率，减少虚假消息传播，增强系统抗攻击能力。随着智能网联汽车、路侧基础设施、5G/6G通信和雾计算平台加快落地，该方法在交通安全监管、车企平台、城市交通治理及保险风控等领域具有良好产业化前景和较高市场价值。

车货匹配货源信息挖掘

成果完成人	蒋国平	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	交通运输运营管理技术	
所属学科方向	一级学科	交通运输工程		二级学科	公路运输
应用行业	物流运输行业				
核心专利号	2024107528873、2024108777708				

成果概述

在货运物流行业，准确识别、分类和管理重货对提高运营效率至关重要。本研究以构建智能化的货源管理系统为目标，应用数据挖掘、预测建模和动态调控技术。通过建立重货的标准化验证机制，确保了对重货的准确识别和分类。同时，挖掘重货的重要标签，并全面准确地挖掘重货的信息，有助于更好地理解和分析重货的特性。离线相似货源挖掘和实时计算线上相似货源，帮助我们更好地理解和预测货源的变化趋势，并及时响应市场的变化。基于相似货源的分析，找出货源需求的共同特性，为决策提供有力的数据支持。同时，对货源生命周期进行动态划分，以及对货源不同生命周期的流量上下限进行合理设计和调控，进一步提高了运营效率。研究成果显著，为公司提供了精准的货源管理策略，提高了货源利用率和服务效率，降低了成本和风险。

关键技术/创新要点

· 重货标准化验证机制：建立了一套完整的流程和规则，确保对重货的识别和分类准确无误。该机制通过验证货物的特定属性，如重量、尺寸等，以确定其是否属于重货，并根据其属性将其正确分类。

· 数据挖掘和分析：利用数据挖掘技术，深度挖掘历史货源数据，找出影响重货需求的关键因素。通过分析大量数据，揭示了重货的特性、需求趋势等重要信息，为决策提供了有力的数据支持。

· 预测建模：应用机器学习等技术建立了预测模型，预测货源的主动下架率、成交率以及成交时长等关键指标。这些模型基于历史数据，能够准确预测未来的货源行为，为公司提供了准确的市场需求预测和决策支持。

· 动态调控：通过对货源生命周期的动态划分，根据货源的状态和特性，对货源的流量进行合理设计和调控。这种动态调控机制能够使公司更加灵活地应对市场变化，提高运营效率和服务质量。

· 实时计算和响应：实时计算线上相似货源，及时获取市场的最新动态，为公司提供实时的数据支持。这使得公司能够快速响应市场变化，及时调整策略，保持竞争优势。

技术指标/优势

· 准确性：重货标准化验证机制能够准确识别和分类重货，确保了识别的准确性和可靠性。

· 预测精度：预测模型基于大量历史数据建立，具有较高的预测精度，能够准确预测货源的主动下架率、成交率和成交时长等关键指标。

· 实时响应：实时计算线上相似货源，使公司能够及时了解市场的最新动态，快速做出反应，保持竞争优势。

· 灵活性：动态调控机制根据货源生命周期的变化灵活调整流量，使公司能够更好地应对市场变化，提高运营效率。

· 成本效益：通过提高货源利用率和服务效率，降低了运营成本和风险，为公司带来了显著的经济效益。

· 创新性：该成果在货源管理领域引入了智能化技术，结合了数据挖掘、预测建模和动态调控等多种先进技术，具有较高的创新性和实用性。

应用领域和市场前景

通过建立重货的申请相关标准，可以确保对货物的准确识别和分类，提高了公司对货源的管理效率和服务质量。预测模型的应用可以帮助公司更准确地预测货源的主动下架率、成交率和成交时长等关键指标，为公司的决策制定提供了更有力的数据支持。动态调控机制可以根据货源生命周期的变化灵活调整流量，提高了货源的利用率和服务效率，从而增强了公司的竞争力。

在公司内部的应用，将会大大提升公司的运营效率和服务质量，降低运营成本和风险。此外，随着运输行业的不断发展和智能化水平的提高，智能化货源管理解决方案的需求也将逐渐增加。因此，该成果在为公司提升竞争力的同时，也将为整个运输行业的发展注入新的活力，具有广阔的市场前景和应用潜力。

一种基于WEB的道路检测实时查看和操作的方法

成果完成人	周映江	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	轨道交通运营管理与服务技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	智慧城市、道路养护				
核心专利号	CN112232193				

成果概述

随着道路的增加，道路网络变得愈加复杂，而道路维修的工作的难度也愈来愈大，这就导致道路维护的效率低下，交通事故的发生率因此也逐渐上升。随着科学技术的发展，如图像识别，网络等技术的发展，实时道路检测在线系统就有了实现的基础。通过WEB技术，可以实时将道路检测的图片进行服务器上传，并进行分类展示到WEB上，且可标注是否完成道路修复工作。这一方案可以使得道路检测变得方便起来，不管是道路检测人员，还是不在道路检测现场的办公室人员，都可以实时的查看到路面检测和维修的情况，节省时间，经费和人力，提高了路面检测和维护的效率。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种基于WEB的道路检测实时查看和操作的方法，具体步骤：1、搭建一个动态网页；2、识别有问题的道路并将其上传到网页服务器；3、通过代码将命名转化为道路检测时间和道路所检测出的问题；4、获取的图片添加到未处理的道路数据库中并展示；5、将收集的信息添加到地图中，点击时方便弹出的窗口展示相关信息。本成果通过网页查看道路检测和道路维修进程，道路检测地图直观的查看道路损坏程度的高低，并据此来分配任务优先级；道路检测展示操作界面，消除了道路管理人员和道路维护人员的距离，具有时效性的，高效率的上下传达道路维护指令。

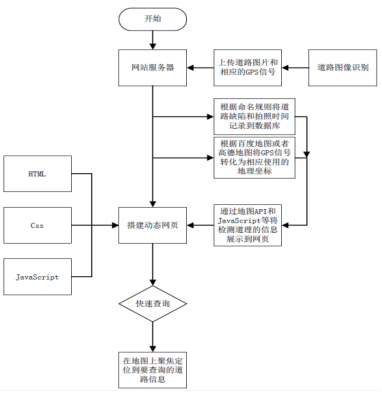


图1 操作流程



图2 道路快速定点功能示意图



图3 数据地图信息展示示意图



图4 道路信息浏览界面示意图

技术指标/优势

(1)本成果提出的方案可以直接通过网页查看道路检测和道路维修进程;

(2)本成果的道路检测地图可以直观的查看哪些道路损坏程度较高,并据此来分配任务优先级;

(3)本成果的道路检测展示操作界面,大大的消除了道路管理人员和道路维护人员的距离,具有时效性的、高效率的上下传达道路维护指令。

应用领域和市场前景

本成果涉及道路检测领域,具体涉及一种基于WEB的道路检测实时查看和操作的方法,尤其涉及对检测到的路面图片进行分类展示的WEB系统。

某公司使用本成果应用于道路检测中;该公司将道路识别用到的图像识别服务器和其他用到的设备安装到车上,在道路上运行该服务器时,不断的识别需要处理的道路并拍摄对应图片,实时的将道路图片分门别类的上传到了网站的服务器上。网站按照道路信息将道路对应的信息展示到了网页上,并在地图中标明了对应的信息。在道路检测设备运行的同时,在公司的人员查询到道路检测的信息,做了一番信息统计之后,对道路维修部队下达维修道路命令,至今该设备运行良好,提高了道路检测和维修的效率。

智能驾驶场景下的行人检测方法研究

成果完成人	程艳云	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	信息安全技术		高技术领域（三级）	应用安全技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统		二级学科	控制科学与技术
应用行业	自动驾驶				

成果概述

随着科技的飞速发展，智能驾驶技术已成为当今交通领域的研究热点。行人作为道路交通中的重要参与者，其安全保护问题尤为重要，特别是在复杂的交通环境中，其准确、实时的检测对于预防交通事故、保障行车安全具有重要意义。近年来，行人检测已成为计算机视觉领域的一个研究热点，并被广泛应用于自动驾驶、视频监控、机器人等诸多领域。因此，研究智能驾驶下的行人检测技术，对于提升交通安全性、减少交通事故发生率具有重要意义。

本团队针对智能驾驶场景中行人检测存在的密集行人遮挡、尺度变化、相似特征以及复杂背景干扰等问题，提出了融合自监督语义学习的行人检测系统。

关键技术/创新要点

（1）在特征融合阶段，由于特征金字塔(FPN)会丢失部分高维特征的空间信息，导致生成特征图表征能力不足。针对特征图表征能力不足的问题，本团队引入双向特征增强模块(BFEM)代替原有的FPN，通过级联结构将低层特征的语义信息与高层空间信息融合，增强了实例特征的表征能力。在检测器方面，本团队考虑从针对行人特点的部位感知方法出发，设计一种关注行人可见局部特征的检测器，针对模型局部信息感知力不足的问题，提出一种基于注意力的部位感知模块 EAPM，EAPM 为检测器添加可见性损失，可以更好的关注行人部位可见特征，引导网络对可见部分进行监督学习。

（2）针对遮挡对象模糊特征和噪声干扰问题，只有对象区域学习是不够的，因此如何充分利用更明确和语义化的上下文成为一个关键问题。其次，由于 Sparse R-CNN 模型的级联学习结构，初级阶段的检测器难以识别高语义的图像特征，因此导致上述针对部位特征学习的模型性能无法达到最优，模型难以学习到更多的上下文信息，本团队针对以上问题，提出融合自监督语义学习网络，引入视觉语言语义自监督(VLS)进行上下文感知，无额外注释的对语义上下文进行显式建模，为充分结合跨模态信息，设计一种跨模态交叉促进结构(CCP)，利用视觉文本信息指导视觉上下文的提取，实现更丰富的语义化特征。随后提出了一种基于中心点偏移逐像素聚合方法，用以实现自监督原型语义对比(PSC)学习方法，来更好地区分行人和其他类别，并为其损失增加了正则化，有助于模型的学习和训练。

(3)在自监督学习网络的引入后，由于BFEM的训练过程不会受到学习网络的监督，导致检测场景中存在的尺度问题无法解决。因此，针对上述问题，本文团队提出在特征提取网络中引入动态检测头，增强模型对尺度信息和空间位置信息的关注，从而提升模型针对小目标、模糊目标行人的检测能力。针对候选框与真实框之间的集合预测问题，Sparse R-CNN 采用一对一的标签分配方案，这种分配方式减少了正样本的分配，不利于模型训练。为了解决这个问题，本团队提出了基于最优传输算法的混合标签分配(MLA)，通过最优传输匹配(OTA)实现一对多匹配，使用混合分层匹配策略，在不同层次实现不同的匹配方式，融合了一对一匹配和一对多匹配的优点，同时添加动态策略来促进迭代结构的训练，增加迭代训练阶段分配的正样本数量。



图1 可视化对比图

技术指标/优势

针对驾驶场景中的行人检测面临着诸多挑战，如环境复杂、行人密集和尺度跨越大等问题，设计一种基于注意力机制的部位感知模块，关注行人目标可见部位特征，并提出了融合自监督语义学习的行人检测网络，通过跨模态映射的语义分割，实现了对上下文语义信息的显式建模。

本团队提出的智能驾驶场景下的行人检测算法能够有效的解决行人检测所存在的问题，并且在多个公开数据集上进行了测试，通过实验验证了方法的有效性。

应用领域和市场前景

本方法可以解决智能驾驶场景中存在密集行人遮挡、尺度变化、相似特征以及复杂背景干扰等问题的行人检测问题，但算法的先进性仅限于理论研究，没有在实践中得到验证。

一种DoS攻击下的多Euler-Lagrange系统事件触发一致性控制方法

成果完成人	樊春霞	职称	教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
高技术领域（二级）	汽车及轨道车辆相关技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术	二级学科	/	
应用行业	智能制造、航空航天				
核心专利号	CN115065549B				

成果概述

网络化多Euler-Lagrange系统一致性被广泛应用于无人机、机器人等自主体编队控制中。DOS攻击成本低廉，且操作方式简单，易于实现，越来越多的恶意攻击者选择使用DOS攻击进行破坏性操作。对于网络化多智能体而言，如何在控制器层面是主动防御DOS攻击是一个亟需解决的问题。

本成果协同考虑了DOS攻击参数与事件触发函数的参数，设计了分布式事件触发机制发送数据，保证DOS攻击的时刻落在Euler-Lagrange系统不发送数据的时间间隔内，从而提高了系统在控制器层面主动防御DOS攻击的能力；设计了分布式速度估计器估计虚拟领导者的速度，将轨迹协调参数、速度协调参数、事件触发函数参数与DOS攻击参数协同考虑，从而提高多Euler-Lagrange系统一致性跟踪的鲁棒性。本成果易于拓展到线性、非线性多智能体系统的速度一致性、位置一致性以及速度与位置一致性。

关键技术/创新要点

提出一种DOS攻击下网络化多Euler-Lagrange系统一致性控制方法，利用事件触发机制发送数据，降低了DOS攻击对一致性的破坏性影响，并设计了速度估计器估计领导者的速度，从而不需要将领导者的速度传输到跟随者，降低了通信负载，同时也免去了速度信号受到DOS攻击的可能性，实现了多Euler-Lagrange系统安全一致性。系统结构如图1所示。

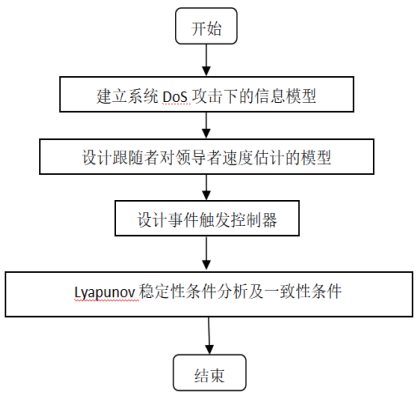


图1 DOS攻击下，多Euler-Lagrange系统安全一致性框架

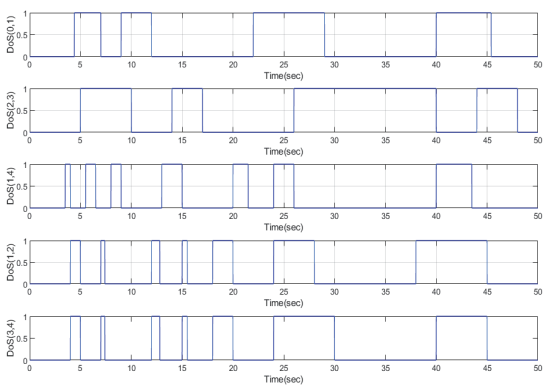


图2 DOS攻击，0表示未受到DOS攻击，1表示受到DOS攻击

1.协同考虑了DOS攻击参数与事件触发函数的参数，设计了分布式事件触发机制发送数据，保证DOS攻击的时刻落在Euler-Lagrange系统不发送数据的时间间隔内，从而提高了系统在控制器层面主动防御DOS攻击的能力。

2.设计了分布式速度估计器估计领导者的速度，设计了Euler-Lagrange系统的期望轨迹，将轨迹协调参数、速度协调参数、事件触发函数参数与DOS攻击参数协同考虑。在如图2所示的DOS攻击下，4个Euler-Lagrange系统通过如图3所示的通信关系下，实现了安全一致性（如图4、图5所示）。

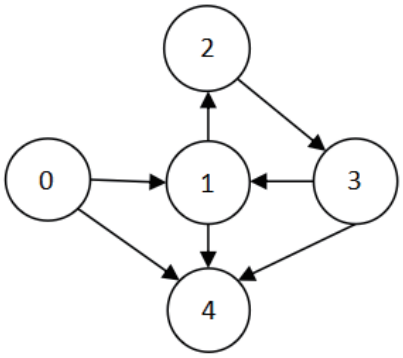


图3 Euler—Lagrange系统之间的通信连接

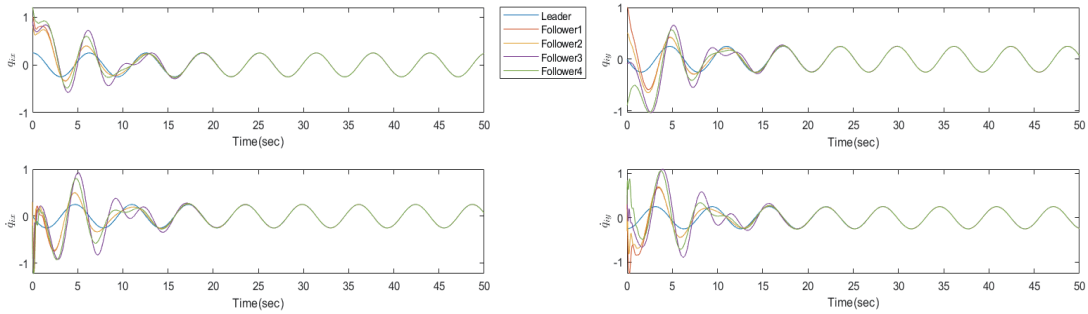


图4 位置一致性

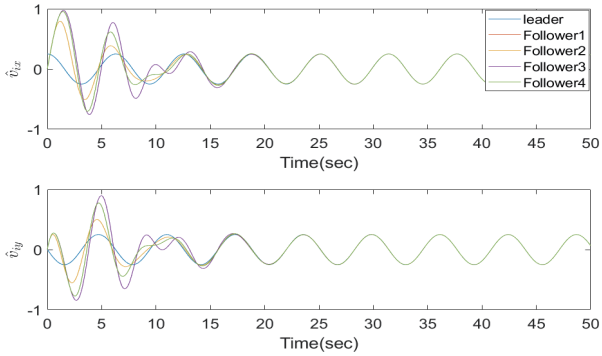


图5 速度一致性

技术指标/优势

采用事件触发的通信方式，可以节约通信资源，有效避免DOS攻击，从而提高了安全性。

采用分布式估计器估计领导者速度，有效地降低数据量的传输，从而在相同的通信条件下，能够有效避免数据丢失、数据延时等不利因素对一致性的影响。

应用领域和市场前景

由于Euler-Lagrange系统可以描述无人机、机器人等多种无人系统的动力学行为，因此本技术适用于多无人系统的协同控制。比如双机械臂的协同抓取、多机械臂的协同完成物料搬运、加工、组装等任务。在无人机的编队飞行控制中，需要保持相对位置不变，应用一致性可以实现这种相对位置的要求。

一种可感知车辆移动的路边单元内容编码放置方法

成果完成人	殷俊	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	车联网				
核心专利号	ZL202510060388.2				

成果概述

在车联网与自动驾驶快速发展的背景下，车辆行驶过程中对高精地图、实时交通及环境数据等时效性强、数据量大的内容需求激增，传统依靠远端云服务器和宏基站的内容供给模式，存在传输延迟高、响应效率低的问题，而现有路边单元缓存技术因未结合车辆移动特征，且相邻单元为保障服务质量无差别重复缓存内容，造成了缓存空间的严重浪费，同时缓存命中率较低，难以满足车联网的实际服务需求。

本团队提出的可感知车辆移动的路边单元内容编码放置方法，适配由云服务器、宏基站、路边单元等构成的车联网边缘内容缓存系统，通过感知车辆移动轨迹和在各路边单元的停留规律构建决策模型，结合按需网络编码技术实现内容的高效冗余存储，既有效解决了传统缓存模式的空间浪费问题，又大幅提升了内容缓存命中率，让车辆能更多从就近路边单元获取内容，减少对远端基站的依赖，显著降低内容传输延迟，全面改善车联网对车辆用户的服务质量。

关键技术/创新要点

本成果核心围绕车联网路边单元缓存痛点，融合车辆移动感知建模与网络编码技术，打造了适配车辆动态行驶的智能内容缓存体系，解决传统缓存重复存储、命中率低的问题，具体技术要点如下：该方法由区域控制器统筹决策，先通过统计车辆在各路边单元的停留时间规律，构建车辆内容获取的概率模型，精准预判不同路段车辆的内容需求，以此制定贴合实际行驶场景的缓存策略，让内容放置更具针对性，大幅提升缓存命中率；再通过线性规划算法优化相邻路边单元的冗余缓存分配，实现缓存空间跨节点灵活调配，富余空间可共享、不足时可相互借用，让有限的缓存资源得到最大化利用；最后对缓存内容进行按需网络编码，将源内容分割后通过线性运算生成独特编码块，编码块无需重复缓存即可实现高效冗余，既保障车辆跨路段行驶时能连续获取内容，又减少了传统无差别重复缓存造成的空间浪费，实现了缓存策略与车辆移动特征的深度适配。

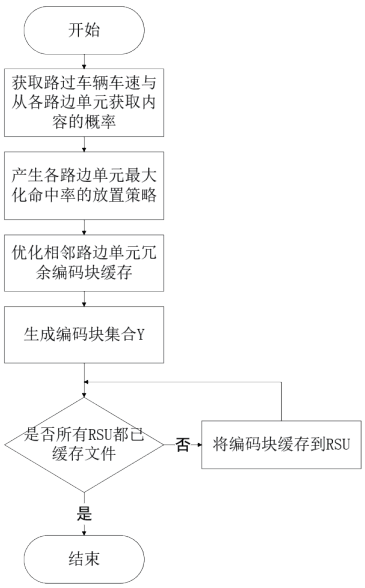


图1 放置方法流程图



图2 车联网路边单元内容缓存系统

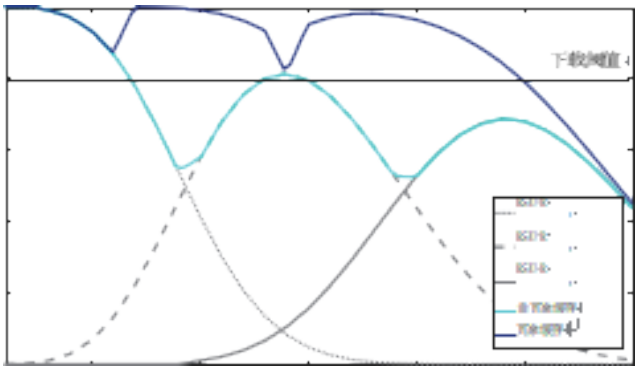


图3 内容在路边单元的下载概率和冗余/非冗余场景下总体下载概率

技术指标/优势

本成果已形成《一种可感知车辆移动的路边单元内容编码放置方法》发明专利，相关研究成果已发表学术论文，技术指标表现突出，相较移动感知概率缓存方法命中概率提升13%，且服务延迟增长幅度远小于同类方案，命中吞吐量更高、回程链路负载更低。其核心优势在于基于车辆停留时间分布构建概率模型，无需采集轨迹规避隐私风险，融合网络编码技术用编码块替代原始内容块冗余缓存，大幅提升空间利用率，对阈值、内容大小的适配性和鲁棒性更强，还能综合优化车联网缓存与传输性能，贴合自动驾驶低时延、高可靠的服务需求，经蒙特卡洛仿真实验验证，对比 MAP、ECDCO等主流方法优势显著。

应用领域和市场前景

本成果可应用于车联网、智能交通系统及自动驾驶相关领域，核心落地于城市道路、高速公路的车路协同建设，也适配港口、矿区、物流园等封闭区域的无人驾驶运营，以及园区、景区等低速自动驾驶示范区的边缘缓存部署。该成果能为各类场景的车辆，提供高精地图、实时交通数据、环境监测信息等低时延内容服务，可为智能交通升级、自动驾驶技术落地提供技术支撑。当前智能网联汽车和自动驾驶技术逐步普及，车联网基础设施建设需求增长，路边单元高效缓存技术存在市场需求，本成果可解决传统缓存空间浪费、命中率低等问题，提升车联网服务质量，在交通基建、无人驾驶配套等方面具备产业化价值。

一种交通标志牌限速限高限重信息提取方法、系统和存储介质

成果完成人	陈德良	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	交通基础信息采集、处理技术	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感
应用行业	测绘地信、智慧交通、计算机科学、电子信息等				
核心专利号	ZL202411284129.X				

成果概述

本成果针对交通标志牌中限速、限高和限重信息的提取难题，提出了一种高效的智能识别方法。在研究背景上，随着智能交通和自动驾驶技术的发展，快速准确地获取道路交通标志信息成为关键需求，而传统人工标注或简单图像处理方法难以应对复杂场景和低频标志。

本成果通过预处理路网数据与街景全景图，结合深度学习与文本识别技术，实现了从数据采集到信息提取的全流程自动化。关键技术包括基于Swin-Transformer的Faster R-CNN目标检测、PP-OCRv3文字识别以及规则约束与文本清洗策略。成果水平上，该方法能够在多样化场景下准确提取低频交通标志信息，显著提升识别效率与精度，为智能交通系统提供了低成本、高适配性的解决方案。

关键技术/创新要点

本成果在交通标志信息提取中引入了多项关键技术与创新点，提升了识别效率与准确性：

1、高效目标检测与定位

本成果采用Swin-Transformer优化的Faster R-CNN模型，通过多头自注意力机制（MHSA）和滑动窗口技术，精准定位街景中的交通标志牌。相比传统的卷积神经网络（如YOLO或普通CNN），这种方法能同时关注标志牌的细节特征（如边缘形状）和整体背景（如周围环境），在复杂场景下表现更出色。例如，面对遮挡或光线变化，它仍能准确框选标志牌位置，为后续识别奠定基础。

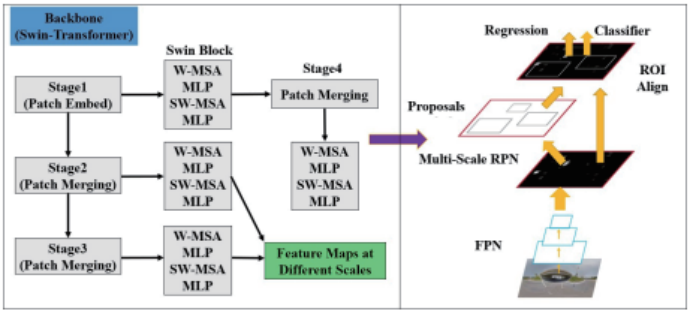


图1 基于 Swin-Transformer 的 Faster R-CNN 模型

2、智能文字识别与优化

在文字提取方面，利用PP-OCRv3模型对标志牌上的数字和字符进行检测与识别，并结合SVTR的Transformer结构优化字符序列建模。针对远距离拍摄时小数点模糊、难以辨识的问题，该技术通过上下文信息增强数字识别能力。比如，能准确分辨“3.5”和“35”的差别，避免误读，提升限高、限重数据的可靠性。

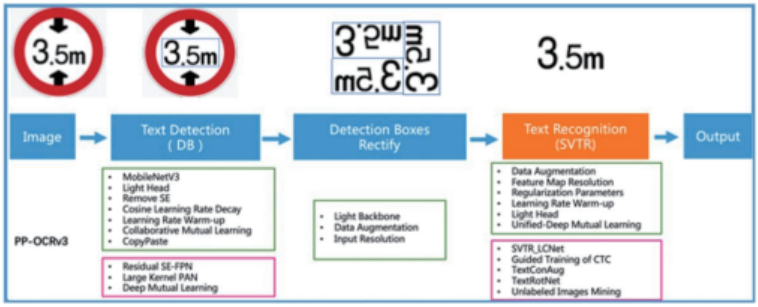


图2 PP-OCRv3 模型

3、规则约束与文本清洗

为确保提取结果实用，本成果设计了多重过滤机制：一是面积约束，要求标志牌检测区域大于300像素，避免误识小块干扰物；二是数值范围先验，如限速限制在0-150km/h，限高在1-100m；三是语义清洗，例如要求限速值必须是5的倍数（如60而不是63）。这些规则有效剔除不合理结果，让输出的信息更符合实际交通规则。

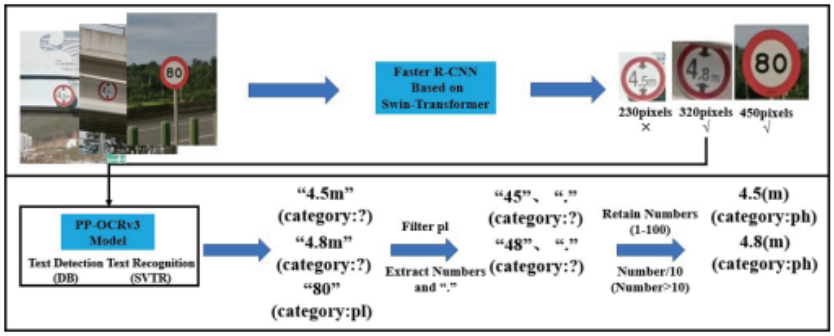


图3 规则约束与文本清洗流程

技术指标/优势

1、技术指标：

检测精度：对限速、限高、限重标志的识别准确率达 85%以上、召回率达 90%以上。

处理速度：单张全景图处理时间<1 秒。

适用范围：支持复杂街景环境，覆盖低频标志（如限重牌）识别。

2、技术优势：

与传统卷积网络（如 YOLO）相比，Swin-Transformer 提升了约 15%的复杂场景检测精度。

相较于单一OCR方法，本成果通过语义约束减少30%以上的误检率。数据依赖低，标注成本降低约80%，适配资源有限场景。

专利情况：发明专利获授权，专利号为 ZL202411284129.X。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于智能交通、自动驾驶和城市规划等领域。在智能交通中，该技术能为导航系统提供实时、准确的限速、限高和限重信息，帮助优化交通流量和道路管理效率。在自动驾驶领域，它支持车辆自动识别交通标志，及时调整速度或路线，切实提升行车安全，尤其在复杂路况下表现突出。在城市规划方面，该成果可用于交通标志的数字化记录和布局优化，为城市交通设施资产更新提供数据支持，比如快速排查老旧标志或规划新路段标志位置。

市场前景方面，全球智能交通、自动驾驶技术一直在稳步推进。本成果凭借低成本和高精度的优势，不需昂贵设备或大量标注即可运行，适合中小型企业使用。例如，它能帮助资源有限的地区快速建立交通信息数据库，推动信息化普及。有望在交通管理平台和自动驾驶系统中占据一席之地，逐步实现规模化应用，助力交通领域的智能化升级。

无人机辅助下铁路列控数据的高可靠传输技术

成果完成人	代海波	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	移动通信系统技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	高铁无线通信				
核心专利号	202410356899.4、202410356901.8				

成果概述

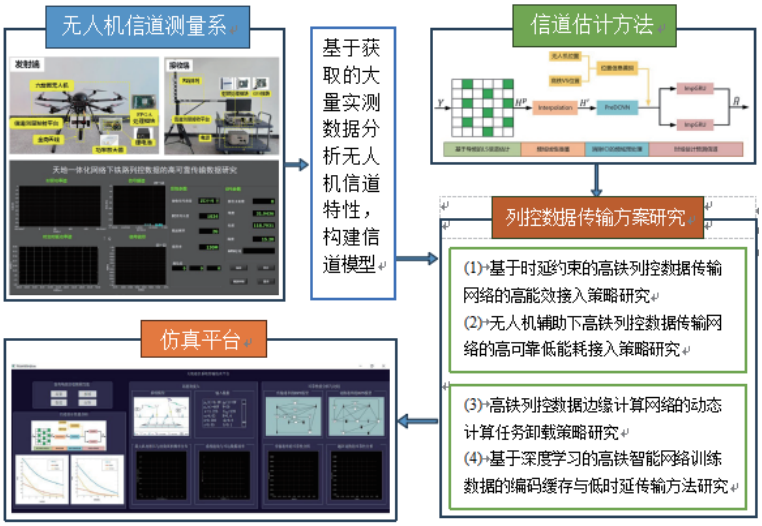
在无人机辅助的铁路通信网络中，实现了无线信道特征、接入方式和计算缓存策略等方面的技术突破。搭建了信道测量硬件系统，选取街道、山体、水域、高架四种典型场景进行信道测量，通过分析测量数据获得信道特征参数并构建信道模型。提出了一种基于导频的信道估计方法，在频域消除ICI干扰后，结合铁路通信特性在时域实现信道估计，从而提高信道估计精度。基于测量或估计的信道，对无人机辅助铁路网络中的列控数据传输方案展开研究，提出在不同性能指标下的网络接入、边缘计算和缓存策略的关键问题，设计相应的求解算法并进行仿真分析。通过DSPN建模验证铁路列控数据传输系统在不同方案下的可靠性优势，最终搭建了仿真平台，能够展示不同场景下的信道测量或估计结果，以及各方案下的通信性能和可靠性分析。

关键技术/创新要点

（1）搭建了无人机辅助的信道测量硬件系统，并在街道、山体、水域和高架四个典型场景中进行信道测量，通过数据分析提取信道特征参数并构建信道模型。同时，提出了一种基于导频的信道估计方法，在频域消除载波间干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI)后，结合高速铁路通信特性，在时域实现信道估计，进一步提升了信道估计的精度。

（2）基于测量或估计的信道，研究了无人机辅助铁路网络中列控数据的传输方案，针对不同性能指标提出网络接入、边缘计算与缓存等关键问题，设计相应的求解算法并进行仿真分析。然后，基于确定与随机petri 网(Deterministic and Stochastic Petri Net, DSPN)建模，建立了无人机辅助的铁路列控数据传输系统，验证了所提出方案在不同条件下的可靠性优势。

（3）搭建了仿真平台，实现了对典型场景的信道测量或估计分析，并展示了不同方案下的通信性能和可靠性分析结果。



技术指标/优势

利用DSPN模型对通信系统可靠性进行建模，并对系统的传输速率、越区切换效率以及计算延迟的可靠性进行了深入分析。通过模型分析，得出了系统通信参数测试的结果，并构建了基于DSPN的车辆与基站无人机通信模型。在无人机系统通信方面，无论是在传输速率还是越区切换效率方面，系统的可靠性远超过基站通信系统。具体而言，无人机系统的可靠性可达99.78%，无人机与基站联合通信系统的可靠性大于99.72%，显著优于基站通信系统的99.5%。此外，在边缘计算延迟方面，使用无人机与基站联合通信系统的可靠性超过99.54%，明显超过地面基站以及车载系统的99.3%，该结果验证了模型的有效性，并更进一步确认了通信系统的卓越可靠性。

应用领域和市场前景

本研究成果能够有效解决西部地区恶劣环境条件下铁路列控数据的高可靠传输问题。通过实测获取了不同高铁场景中的无人机信道特征，提出了精准的信道估计方法，并设计了基于多种性能指标的接入和计算缓存方案，以满足列控数据的高可靠性传输需求。研究成果为低成本、高效的无人机基站部署和通信服务提供了宝贵的方案参考，有力推动了西部地区铁路列控领域的智能化升级。

复杂海况下的船舶变速航线智能规划方法

成果完成人	钱龙霞	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	计算机辅助设计与辅助工程管理软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机应用
应用行业	智慧航运、港航调度、海事保障				
核心专利号	ZL202210450126.3				

成果概述

本成果针对复杂海况下船舶航线规划中匀速假设过强、时间维度避险不足等问题，提出一种船舶变速航线智能规划方法。该方法综合海域栅格地图、气象水文风险信息和航行约束条件，对路线选择与航速安排进行协同优化。如图1所示，方法可给出更合理的航线、出发时机和分段变速建议，具备明确的算法转化与模块化集成潜力。

关键技术/创新要点

成果以海域栅格建模、风险矩阵构建和改进Dijkstra算法为核心，支持复杂海况下的时空联合航线规划。

该方法先对海岸、海礁等不可航行区域进行预处理，再融合海浪、海流、能见度等多源风险信息，形成可连续多日分析的动态风险表征。

在此基础上，算法在空间维度规划合理路线，在时间维度对不同出发时刻和日航速组合进行搜索，实现路径选择与变速决策协同优化。图2展示了复杂海况风险分区结果。

该方法能够通过提前加速、合理减速或短时等待等方式规避未来高风险海域，并提供动态航线对比和三维航迹分析结果。图3展示了多日动态航线对比，图4展示了变速航线三维示意。

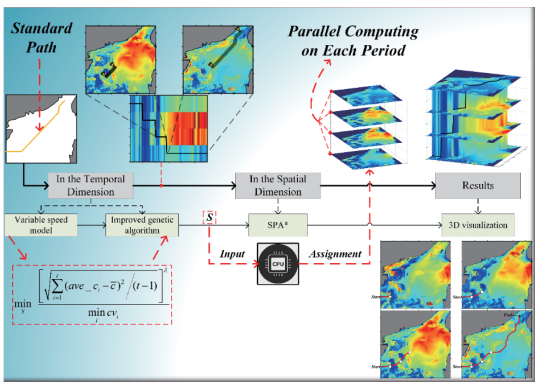


图1 算法技术流程与特征总览图

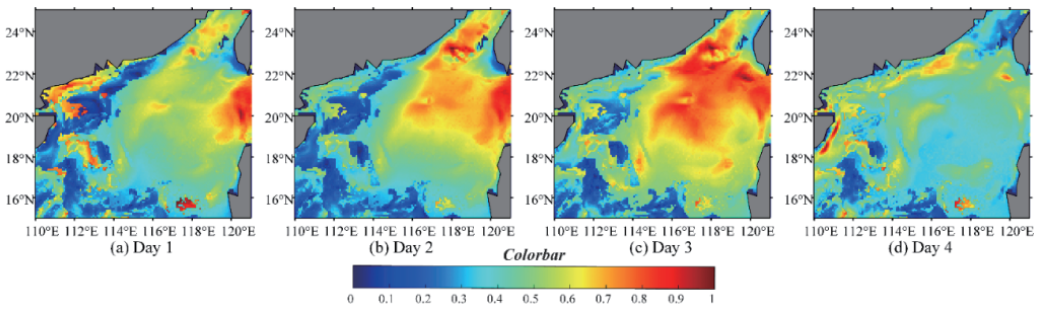


图2 复杂海况风险分区示意图

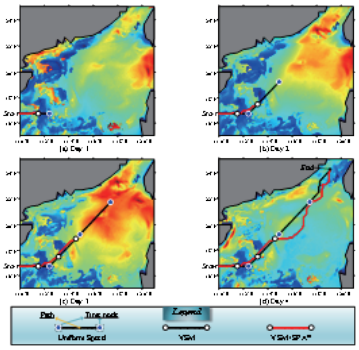


图3 多日动态航线对比图

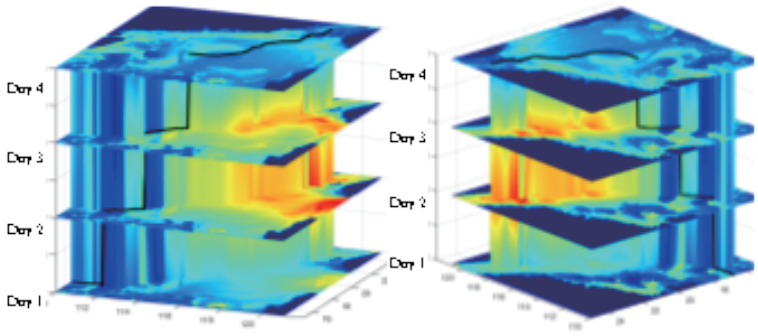


图4 变速航线三维示意图

技术指标/优势

该方法在给定起点、终点和日航速约束条件下，可快速形成航线、日程与风险规避建议；与仅考虑空间绕行或固定航速的传统方法相比，更能降低高风险区域穿越概率并提高航行方案可执行性。算法框架清晰、可解释性较强，已授权发明专利ZL 202210450126.3，具备进一步工程化转化基础。

应用领域和市场前景

该方法可应用于智慧航运、船公司调度、港航管理、海事保障、海上搜救预案推演以及无人艇/智能船舶辅助决策等场景。随着航运数字化和海上安全保障需求持续增长，兼顾航线优化、风险预警和航速安排的规划方法具有较高应用价值，后续可作为算法模块嵌入相关决策平台。

基于改进CycleGAN数据增强的行人重识别方法

成果完成人	杨真真	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	信息处理技术
应用行业	智慧城市、智能交通				
核心专利号	ZL202210463431.6				

成果概述

随着深度学习的迅速发展，行人重识别获取了广泛关注，如今已发展成计算机视觉领域的热门问题；其中，广泛使用的循环生成对抗网络(CycleGAN)目前仍存在现有技术中数据获取难，生成图像姿态不一致以及未标记数据标签分配不合理等多种问题，从而影响最终识别效果。因此，针对CycleGAN进行改进的行人重识别技术发现具有显著的实际应用价值。

本成果设计了一种基于改进CycleGAN数据增强的行人重识别方法。该方法构建完整行人重识别框架，将姿态约束子网络嵌入 CycleGAN，通过分割和二值化获取行人姿势掩膜，设计姿态约束损失函数，确保身份和风格迁移时姿态一致；并且引入半监督多伪正则化标签方法，为生成的未标记数据分配标签并动态更新训练。整个方案在行人重识别上，相较其他经典行人重识别网络，具有明显优势。

关键技术/创新要点

本方法围绕行人重识别数据不足与跨摄像头风格差异问题展开创新，核心是对 CycleGAN 模型进行针对性改进。首先，在网络结构上，新增姿态约束分支，通过人体分割提取姿态特征，让生成图像在迁移不同摄像头风格时，能稳定保持行人原有姿态，避免身份混淆。其次，在损失设计上，融合对抗损失、循环一致性损失与姿态约束损失，实现风格迁移、身份保留与姿态统一的多重控制。最后，针对生成图像无标注问题，采用半监督伪标签策略，动态为增强数据分配合理标签，替代固定伪标签方式，提升训练稳定性与泛化能力。最终通过高质量姿态可控的数据增强，来显著提升行人重识别在多数据集上的精度。

此外，本方法还通过设计了详细技术方案，给出了数据增强的完整行人重识别(re-identification，ReID)识别框架。结果显示，整个方案在行人重识别上，无论从改进CycleGAN生成的增强图片的效果，还是行人重识别的准确率，相较其他经典行人重识别网络，都具有明显的优势。

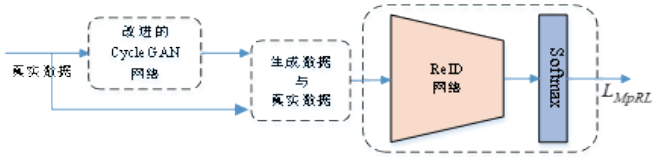


图1

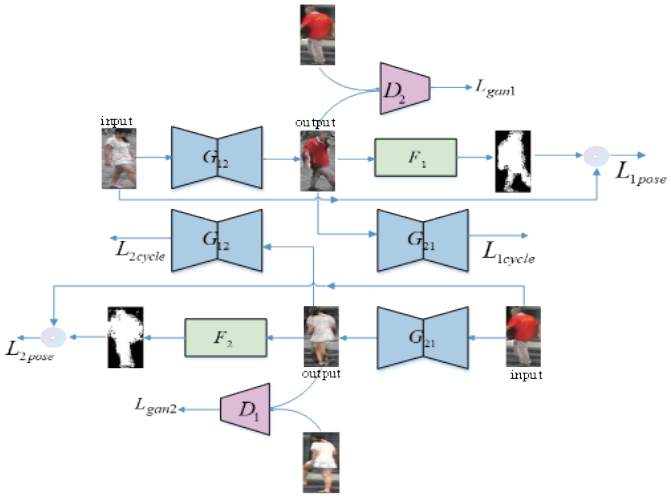


图2

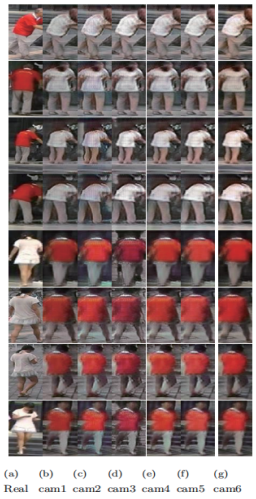


图3



图4

技术指标/优势

针对于传统的CycleGAN 模型出现的姿态错乱，身份变形等问题，改进后的CycleGAN的行人重识别方法更加贴合任务需求。首先，本方法在传统的CycleGAN中利用嵌入姿态约束子网络，通过分割与二值化得到姿态掩膜，可以实现风格迁移的同时精准控制行人姿态。其次，本方法还搭配了动态多伪正则化标签，实现半监督高效利用增强数据，从而避免标签偏差问题。最后，在损失函数上，在融合对抗损失和循环一致性损失的基础上新增加了姿态约束损失，从而解决传统模型风格迁移时姿态错乱、身份失真问题。

应用领域和市场前景

本成果可为智能安防、智慧城市、公共安全等相关领域提供高效精准的技术支持，如跨摄像头行人的精准识别与轨迹追踪，能够保障重点区域管控的有效性、人员查找的高效性，避免因姿态错乱、风格差异导致的识别偏差，这不仅是智能监控系统的核心技术支撑，也是城市立体化治安防控、应急处置的“导航”。由于本成果具备姿态可控的数据增强能力与强泛化性，可有效适配光照多变、视角复杂的实际监控场景，因此可望用于走失人员搜寻、重点人员布控、嫌疑目标追踪等多种安防场景，助力安防领域智能化升级。

智慧车管云平台

成果完成人	王彤典	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	先进制造与自动化	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	/
应用行业	交通运输				
核心专利号	第8584179号、第8669524号				

成果概述

智慧车管云项目聚焦公务用车管理的核心痛点与现实需求，由南京邮电大学专项研发智慧车管云平台，成功应用于政府部门，构建起“数据驱动、智能管控、高效协同、安全保密”的公务用车管理新格局。平台深度融合人工智能、大数据、物联网、信息安全等先进技术，以全维度数据底座为支撑，以全生命周期管控为核心，以智能决策赋能为目标，实现了车辆管理从传统人工模式向智能化、精细化、闭环化模式的转型，有效解决了保密部门用车困难问题，筑牢了廉政风险防控防线。平台自研发落地以来，已实现江苏厅、天津局、福建厅等多家单位的公务车辆管理全流程覆盖，累计服务车辆一千多辆，得到了使用单位的高度认可，目前正全国推广中。

关键技术/创新要点

（一）多维度数据采集与融合技术，筑牢闭环管理数据底座

平台创新采用“智能终端+自动化采集+专网传输”的数据采集模式，通过部署智能车载网关、出入口信标、智能钥匙柜等感知终端，实时获取车辆全维度数据。通过4G专网+加密解析技术，实现数据的自动化归集与同步，形成覆盖车辆“购买-使用-维保-处置”全生命周期的完整数据链条。针对保密需求，平台采用数据加密传输、敏感信息脱敏处理等安全技术，确保数据在采集、传输、存储、使用全流程的安全性与保密性。



图1 车辆数字镜像

（二）AI 大模型赋能智能决策，破解资源调配难题

平台核心模块“麒和智灵”依托南京邮电大学自主研发的AI大模型，整合“对话查询、数据分析、调配建议”三大核心功能，实现管理决策的智能化升级。一是自然语言交互查询，提升信息获取效率；二是多维度智能数据分析，深度挖掘核心数据，精准识别低频用车、违规加油、高费用维修等异常情况，自动生成结构化分析报告，并通过可视化图表直观呈现分析依据与结论；三是科学调配建议生成，通过AI算法动态计算部门用车需求分值，自动生成车辆调整与分配建议，同时精准识别“僵尸车”，优化车辆资源配置，解决了传统分配模式不合理、缺乏数据支撑的痛点。

（三）全场景智能预警机制，筑牢廉政风险防控防线

平台基于内嵌的智能风险规则引擎，构建了覆盖全业务场景的“红橙黄”三级预警体系。针对车辆健康异常、行车安全隐患、公车私用嫌疑、维修保养费用异常等风险情形，设定精细化预警阈值，实现实时监测与智能研判。推动监管模式从“事后核查”向“事前预警、事中管控”转型。



图2 车辆预测性维护

技术指标/优势

（1）智能车载网关及智慧车管云平台技术指标：

1.Tag标签与网关通过串口通信，TTL3.3V,波特率为115200，实时上传数据格式为：TAG_ID:123，BEACON_ID:888，SN:1，DISTANCE(cm):200，VBAT:400；

2.上次频率1次/秒，在车内，Tag与UWB距离误差小于50cm；

3.平台应通过安全保密论证；

4.采集车辆行驶数据，应包含总里程、油耗等数据，并覆盖所有车型。

（2）优势：

1.市面现有产品难以覆盖所有车型，并无法全部读取总里程和油耗数据，本成果通过构建所有车辆的固件库，针对性的破解车辆数据，解决了此类难题；

2.安全性高，通过国家安全部门监测及保密论证；

3.形成了覆盖车辆“购买-使用-维保-处置”全生命周期的完整数据链条。

(3)专利：

面向智能网联汽车协同计算的激励系统与方法(第8669524号)、一种面向车联网数字孪生同步的云边端架构和感通算资源调度方法(第8584179号)。根据这两项专利，平台创新采用“智能终端+自动化采集+专网传输”的数据采集模式，通过部署智能车载网关、出入口信标、智能钥匙柜等感知终端，以及车辆管理各种算法，提高了公务用车管理效率并节约率费用支出。

应用领域和市场前景

本项目研发的智慧车管云平台具有极强的通用性与适配性，其核心技术与管理模式可广泛应用于政府机关、事业单位、国有企业、保密单位等各类需要车辆管理的场景。尤其是在推进数字化转型、强化廉政风险防控、提升资源利用效率的政策导向下，平台的市场需求潜力巨大。此外，在“新交规”实施的背景下，智能车载网关可以解决网约车、货车、两客一危等车辆的违规驾驶行为。目前，已有多个省份的相关单位前来调研交流，表达了合作意向，未来可通过技术输出、产品定制化开发等方式，实现全国范围内的推广应用，进一步扩大成果转化覆盖面与社会影响力。

一种改进模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法

成果完成人	张秀侠	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	其他	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	交通控制与管理技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术		二级学科	控制科学与技术
应用行业	场景识别、模糊聚类技术领域				
核心专利号	ZL202110771266.6				

成果概述

自主船舶在航行过程当中，依靠船上装有的各种传感器和控制器等装置对周围环境进行感知，包括航道航标，航道变化，天气变化，周围动静态障碍物和其他船舶等，再通过船舶的控制系统自主完成对船舶的操控。在该系统中，船舶的设计参数及运行状态，船舶航行环境，管控属性四者相互变化构成了错综复杂的驾驶场景，而自主船舶要能够准确识别出当前所在的交通场景，并对相应的场景做出适当的驾驶决策，才能够保证自主船舶的安全航行。如何准确并快速地对场景进行识别，亟需设计一种适用于自主船舶航行场景分类方法。

本成果提出了一种基于改进模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法，属于自主船舶场景识别、模糊聚类技术领域，为自主船舶航行场景聚类提供一种方法。首先，提出了自主船舶航行场景聚类的理论框架。然后，针对框架中聚类算法，提出改进的模糊C均值算法。最后，通过MATLAB编程进行自主船舶航行场景的聚类实现。

关键技术/创新要点

本成果针对自主船舶航行场景识别问题，提供一种基于改进的模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法，解决自主船舶航行场景识别中的分类问题，通过此算法实现自主船舶航行场景聚类分析，并可在实际的自主船舶航行场景分析中提供一定的参考依据。

在自主船舶航行场景数据库中，通过记录不同自主船舶航行场景下的航道、环境、交通条件信息以及自主船舶的运行状态信息，提取不同场景下的特征点，对特征点进行聚类分析，以便对自主船舶所对应的航行场景进行聚类分析。

由于对所有参数元素进行组合所得到的数据太过庞大，使得对其进行聚类很难实现，而且研究意义不大，加上自主船舶尚处于发展研究阶段，很难获得与自主船舶航行风险相关的特征属性数据，结合研究水域特征并通过咨询专家意见，决定筛选出一些典型的特征属性进行自主船舶航行场景聚类分析研究。

筛选出以下几种参数元素进行聚类分析：航速、能见度、富余水深、航道交通密度、故障维护及时性、通信设备故障率、人因失误率、动力装置稳定性以及远程操作可靠性。

构建改进的模糊C均值算法构建自主船舶航行场景聚类模型。本成果提出的基于距离评价函数的模糊C均值的聚类算法，不需要事先指定聚类中心数，首先运用最大最小距离方法初始化聚类中心，然后用聚类自适应函数确定聚类个数，最后利用模糊C均值进行迭代。

由于数据集包含指标属性较多，维度较大，所以无法得到可视化的聚类图，可通过样图2隶属度矩阵图和图3目标函数变化值来验证算法的效果。

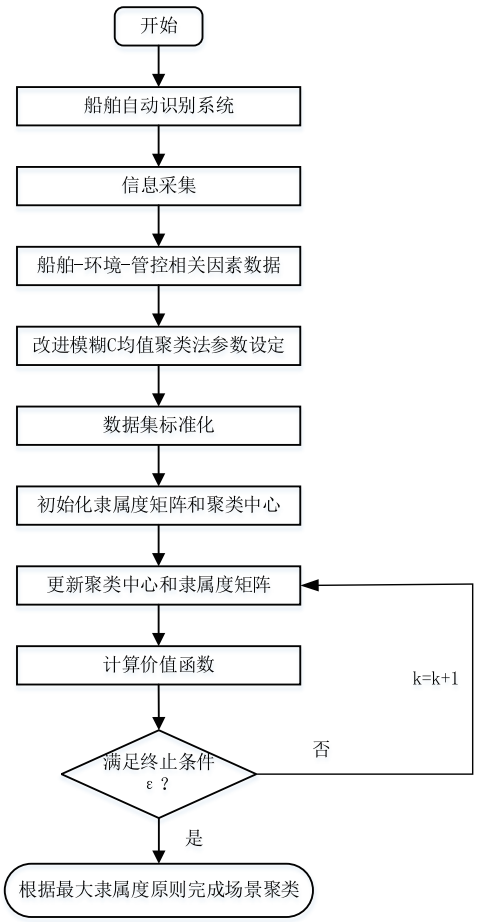


图1 一种自主船舶航行场景聚类分析流程图

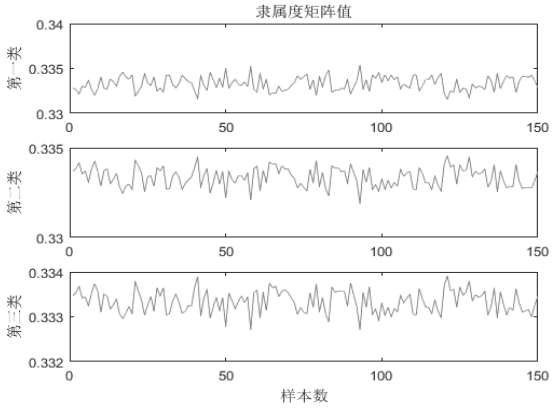


图2 隶属度矩阵图

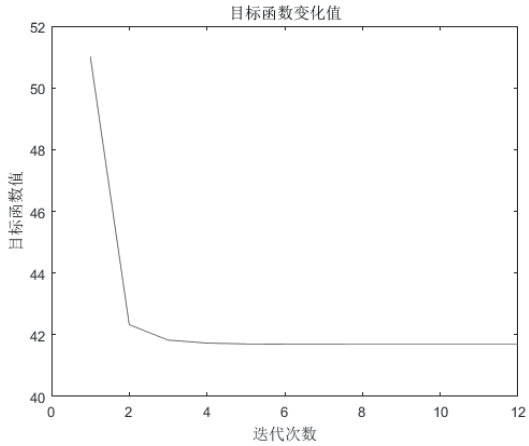


图3 目标函数变化值

技术指标/优势

通过本成果所构思的以上技术方案与现有技术相比，能够取得以下有益效果：本成果能够为自主船舶航行场景聚类问题提供一种科学有效的方法，由于自主船舶尚处于发展研究阶段，很难获得与自主船舶航行相关的特征属性数据，通过利用已有船舶相关数据并结合咨询专家意见，筛选典型的特征属性进行自主船舶航行场景聚类分析研究。采用基于改进的模糊C均值算法，可以切实有效的对自主船舶航行场景进行聚类分析，利用基于距离评价的模糊C均值算法，可以自适应的给出最佳的聚类数，并且快速达到最佳聚类

的目的，运用自主船舶航行场景聚类模型在搜集的场景中训练，聚类的结果能够为自主船舶将来在实际航行环境中的场景聚类分析提供一定的参考依据。

应用领域和市场前景

本成果属于自主船舶场景识别、模糊聚类技术领域，更具体地，涉及自主船舶航行于复杂的场景中，提出了一种基于模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法。

本成果提供的改进模糊C均值算法的自主船舶航行场景聚类方法，设计了一种自主船舶航行场景聚类模型，通过对航行场景进行聚类能够使自主船舶更快的对航行场景进行识别，以便指导自主船舶在航行过程中更好更快地做出正确的驾驶决策，进而保障自主船舶的航行安全。同时，该聚类算法，不仅适用于开阔水域自主船舶的航行，对受限水域自主船舶的航行同样也适用。

一种地铁-公交复合网络关键站点识别方法

成果完成人	郑乐	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	交通运输运营管理技术	
所属学科方向	一级学科	交通运输工程		二级学科	交通运输规划与管理
应用行业	城市公共交通				
核心专利号	ZL202310984508.9				

成果概述

随着我国大城市地铁-公交复合网络规模的逐步扩大，交互逐渐增加，对其网络鲁棒性也提出了更高的要求。尤其是关键站点失效会极大影响复合网络的运输效率。因此，识别复合网络中的关键站点，对于突发公共事件下的应急保障具有重要意义。

研究团队提出了一种地铁-公交复合网络关键站点识别方法，研究综合的考虑了客流时变特性以及乘客出行选择特性，建立了地铁-公交加权时变网络，并运用熵权法计算各时段各站点的综合重要度，能够精准地识别各时段地铁-公交复合网络中的关键站点，可以为地铁和公交的线网规划、站点布局、运力配置以及突发公共事件下的应急保障预案提供决策支持。

关键技术/创新要点

首先基于地铁/公交的线路数据及站点数据，搜索地铁站点步行可达范围内的公交站点，建立地铁-公交无权复合网络；

其次，基于地铁和公交的历史刷卡数据，运用基于最小熵率的出行链OD反推法，计算地铁-公交复合网络中各时段OD对的出行量；

然后以各时段OD对的出行量作为输入，乘客出行路径最短作为目标，获取各时段复合网络中各边的客流量，建立地铁-公交加权时变网络；

最后，基于所构建的地铁-公交加权时变网络，计算各时段各站点的流量出入度值以及流量介数值，并运用熵权法计算各时段各站点的综合重要度，从而识别地铁-公交复合网络中各时段的关键站点。

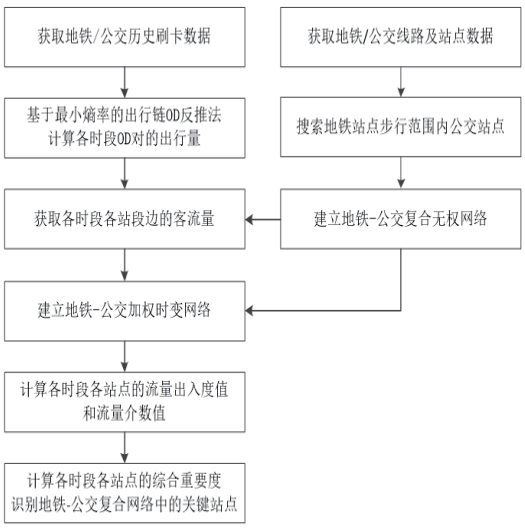


图1 研究方法流程图

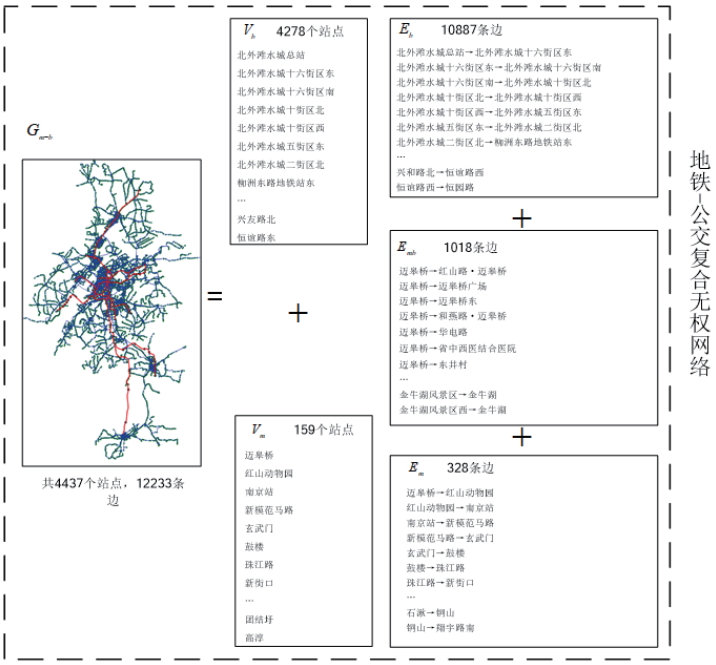


图2 地铁-公交复合无权网络

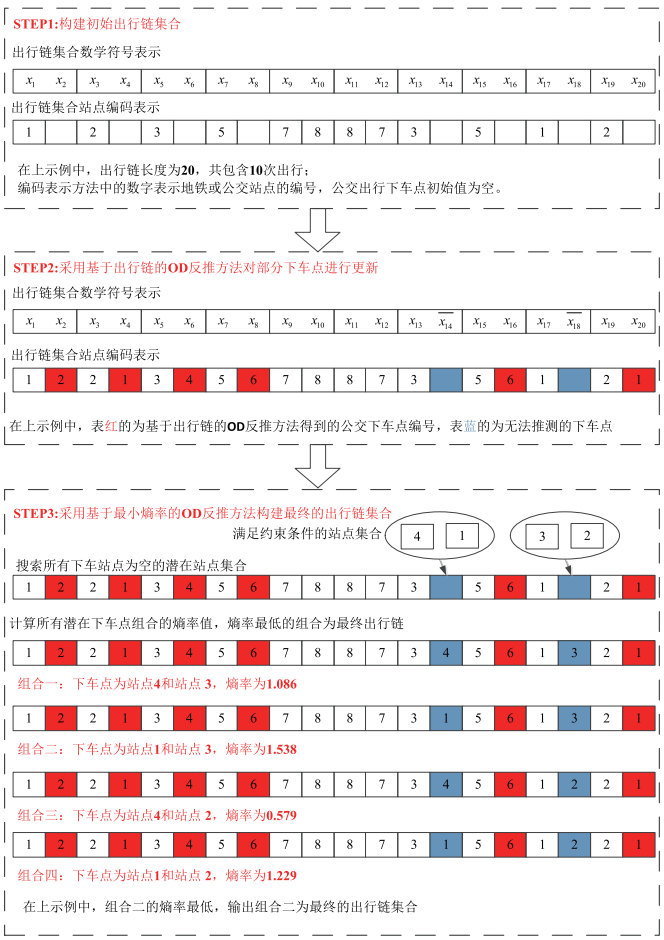


图3 基于最小熵率的出行链OD反推法示意图

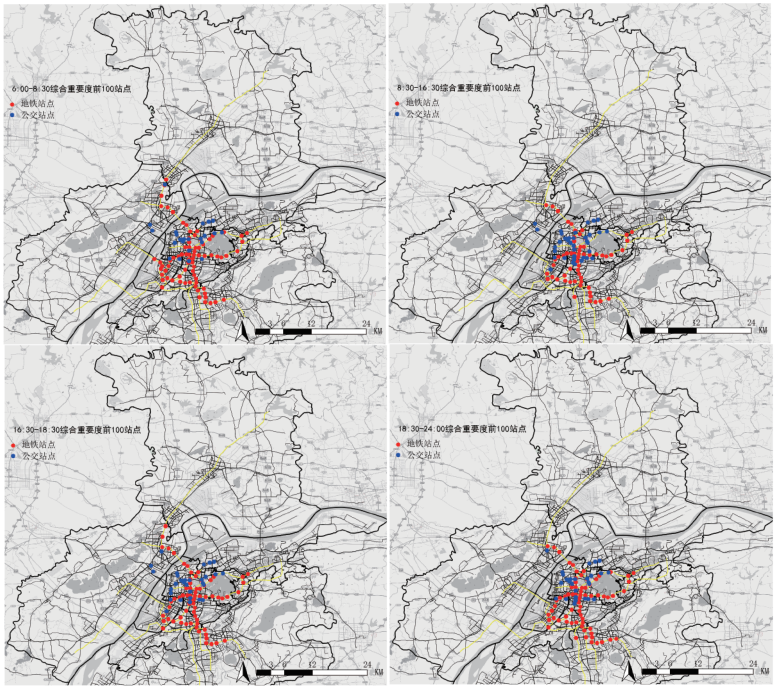


图4 各时段综合重要度前100站点分布

技术指标/优势

所提出的方法可以基于城市的公共交通线网数据以及历史刷卡出行数据，快速的推算出不同时段各站点间的OD出行量以及各站段间的客流量，该方法相比于传统基于调查或基于视频采集的客流分析方法所需要的成本更低且适用面更广。

应用领域和市场前景

所提出的关键站点识别方法综合考虑了站点的客流时变特性、局部与全局特性以及换乘特性，可以帮助公交运营企业的快速的识别各时段网络中的客流出行瓶颈，从而为线网规划、站点布局、运力配置以及突发事件下的应急预案提供决策支持。

一种动态巡游公交动态调度及路径规划方法

成果完成人	郑乐	职称	讲师	所在单位	现代邮政学院、智慧交通学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	智能交通和轨道交通技术		高技术领域（三级）	交通运输运营管理技术	
所属学科方向	一级学科	交通运输工程		二级学科	交通运输系统工程
应用行业	交通运输行业、电子信息行业				
核心专利号	ZL202510695234.0				

成果概述

本成果提出了一种动态巡游公交动态调度及路径规划方法，建立了动态巡游公交混合整数规划模型，使用滚动时域框架结合ALNS算法成功实现动态巡游公交运行调度混合整数规划模型的动态求解，能够很好的同时兼顾模型求解速度、乘客服务水平以及车辆运行效率，为动态巡游公交的运行调度提供了全新的理论解决方案，显著地提高动态巡游公交系统的运行效率。本成果相较于目前很多公交企业所采用的插入式算法，考虑了一定时间窗范围内出行需求的全局优化，而非先到先服务的局部优化，可以显著提高需求和车辆匹配的精度，减少车辆的空驶里程以及乘客的出行时间，在客流高峰时期这种提升尤其明显。

关键技术/创新要点

尽管动态巡游公交已在全国多个城市投入运营，但由于其投入运营的时间较短，运作模式尚未成熟，因此动态巡游公交在处理新的动态客流需求时通常采用商业求解器或简单的插入式算法。前者能最大限度的发挥车辆运行资源，但计算速度过于缓慢，难以投入商业应用；后者尽管其能在较短时间内完成车辆的调度，但由于其只考虑了某一时刻下调度的可行性和路径的合理性并未从全局最优的角度出发，因此在短时客流密度较大的情形下算法效率低下，车辆与订单匹配常出现不合理的现象，导致乘客等待时间过长，难以充分发挥车辆的运行资源。

为了克服现有技术中存在的不足，本成果提供一种动态巡游公交动态调度及路径规划方法、电子设备及存储介质，建立了动态巡游公交调度混合整数规划模型，采用时域滚动框架结合ALNS（Adaptive Large Neighborhood Search）算法动态求解混合整数规划模型，能够同时兼顾模型求解速度、乘客服务水平以及车辆运行效率。

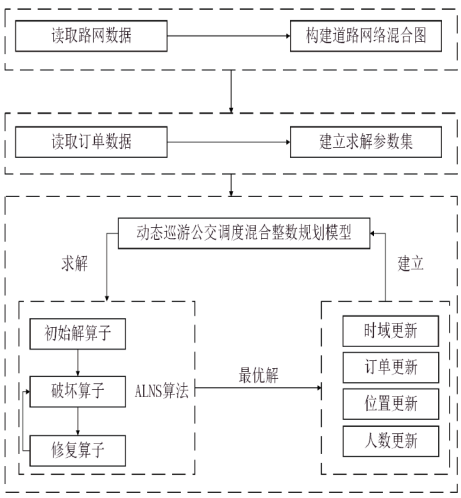


图1 一种动态巡游公交动态调度及路径规划方法的流程示意图



图2 动态巡游公交各要素示意图



图3 初始路径示意图



图4 最优路径示意图

技术指标/优势

本成果能够很好的同时兼顾模型求解速度、乘客服务水平以及车辆运行效率，为动态巡游公交的运行调度提供了全新的理论解决方案，显著地提高动态巡游公交系统的运行效率。相较于目前很多公交企业所采用的插入式算法，考虑了一定时间窗范围内出行需求的全局优化，而非先到先服务的局部优化，可以显著提高需求和车辆匹配的精度，减少车辆的空驶里程以及乘客的出行时间，在客流高峰时期这种提升尤其明显。同时该方法也可以用于动态巡游公交新辟服务区域运营的仿真验证，以及分析车队规模调整和客流分布变化对动态巡游公交运营效率的影响。

应用领域和市场前景

目前，全国已有20余个城市开通了动态公交，本成果可用于各城市动态公交的车辆调度和路径优化，作为更优的算法嵌入到当前企业所采用的后台程序中，提高需求和车辆匹配的精度，减少车辆的空驶里程以及乘客的出行时间，为公交企业减小运营成本并提高票价收益，通过提升整个动态公交系统的服务水平和公共交通整体的满意度。

基于MOF衍生传感界面的智能电子平台用于PFAS现场快速检测

成果完成人	王海华	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	环境监测及环境事故应急处理技术		高技术领域（三级）	非常规污染物监测技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	电子技术
应用行业	环境监测、饮用水安全、公共卫生				

成果概述

全氟/多氟化合物（PFAS）是一类典型的新污染物，以全氟辛酸（PFOA）和全氟辛烷磺酸（PFOS）最具代表性，因其生物毒性、环境持久性和生物累积性引发全球健康风险。2023年联合国将PFOA和PFOS列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》，限制其生产与使用。我国新实施的《生活饮用水卫生标准》（GB5749-2022）规定PFOA和PFOS的健康限值分别为80ppt和40ppt。因此，开发PFAS现场快速检测技术是环境监测的迫切需求。

本成果开发了一种基于MOF衍生FeBi-C@Nafion复合材料的全集成手持式电化学分析仪，实现了PFAS的现场快速检测。该平台通过“预富集-识别”双功能界面设计，突破了传统单一识别机制的性能瓶颈，为饮用水安全监测和环境现场筛查提供了实用工具。

关键技术/创新要点

本成果创新性地将“预富集”与“识别”功能解耦于同一传感界面的不同材料层。外层Nafion通过亲氟作用高效富集PFAS，内层FeBi-C通过金属配位作用特异性识别PFAS。这种设计打破了传统单一机制传感器的性能权衡困境，同时实现了高灵敏度与高选择性。成果采用两电极体系，在零电流条件下测量传感电极电位变化。由于回路中无电流通过，法拉第反应和欧姆压降基本被完全消除，信号仅源于界面电荷分布变化，具有背景噪声低、稳定性好、功耗低的显著优势。成果将传感电极、微控制器、蓝牙模块等集成于口袋大小的便携PCB上。微控制器预存校准曲线，检测时自动采集信号、转换为浓度，通过蓝牙实时显示于智能手机，实现一键操作、即测即得，无需专业操作人员。

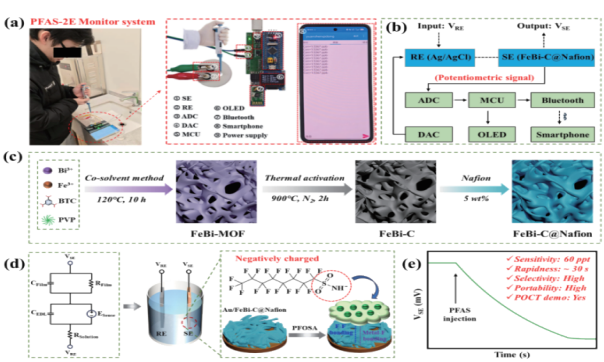


图1 PFAS-2E监测仪的系统集成与材料设计，用于PFAS即时检测

技术指标/优势

本成果开发的手持式PFAS检测装置检测限低至60ppt，响应时间仅30秒，线性响应范围为100ppt至100ppb。在实际自来水中，加标回收率为88.44%至102.63%，批间重现性相对标准偏差≤10.77%，材料在五个月内响应保留率超过80%。与现有技术相比，本成果具有显著优势：检测限优于多数电化学传感器，响应速度远快于分钟级传统方法；一键操作、手机读数，无需样品前处理，非专业人员即可完成检测；手持式设计支持现场部署，有望填补PFAS现场快速检测设备从实验室研究向实际应用转化的市场缺口。目前相关发明专利正在申请中。

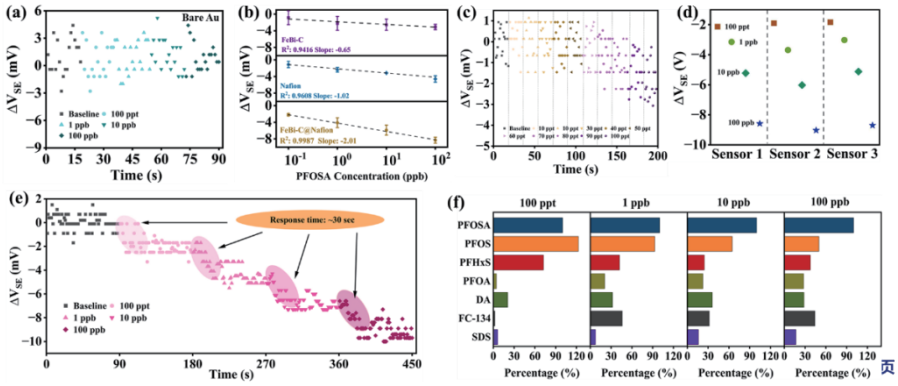


图2 PFAS-2E监测仪的PFOSA性能测试

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于饮用水安全监测（居民区自来水、瓶装水、地下水现场筛查）、环境监测（河流、湖泊、工业废水原位监测及污染源追踪）、食品安全检测（水产品、农产品中PFAS残留快速检测）以及突发污染事件的应急监测。本成果还有望推广至家庭自检市场，具有应用前景和商业价值。

基于卫星、无人机的空天地一体高光谱大数据环境遥感监测技术

成果完成人	杨涛	职称	教授	所在单位	材料科学与工程学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	环境监测及环境事故应急处理技术		高技术领域（三级）	生态环境监测技术	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术	二级学科	信息与系统科学相关工程与技术其他学科	
应用行业	超光谱遥感与环境监测				
核心专利号	CN201811396933.1、CN201811509305.X、CN201810811226.8、CN201811396934.6、CN201811513996.0、CN201811509516.3				

成果概述

我们所开发的环境遥感监测技术采用了光谱成像原理，它结合了传统成像和光谱学技术的优点，可同时获取待测物体的光谱信息与空间信息，其中光谱信息反映物体的组成成分、化学结构等内部品质，空间信息反映物体的外部形状、表面结构等外部品质。因为光谱成像技术兼具采集图像和光谱信息的特点，因此探测和分析更加精准，可用于卫星监测大尺度湖泊、河流、江海的污染程度和浊度；也可用于无人机监测小尺度河流，弥补断面之间的河段没有数据的问题。此外，通过模型及监测数据，可快速寻找到排口及可能的违法排污企业，为执法单位提供数据。本成果已经获得江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目（星载、机载无序色散成像光谱仪的研制与开发，KTHY-32）和国家自然科学基金面上项目（基于上下转换发光的宽光谱无序色散成像光谱仪关键技术研究，62074082）支持，并顺利结题。

关键技术/创新要点

我们课题组首次提出了采用无序色散分光技术和正则化复原光谱的方法用于光谱复原，采用该技术不仅能降低光谱测量系统的体积和成本，而且光谱分辨率和光谱复原准确度也可不受传统器件中光栅精度的限制。此外，我们还将上、下转换发光材料置于硅基探测器前方以扩展光谱探测范围，该技术采用普通硅基阵列式探测器实现了从紫外到红外较宽波段范围内的光谱成像。与此同时，我们还提出了串行测量（用于卫星遥感，专利号：201811509516.3、201811509834.0）和并行测量（用于无人机遥感，专利号：201811396933.1、201811396934.6）两套光谱成像技术方案，以分别实现超高分辨率光谱成像和实时光谱成像两个不同的技术目标。我们还可以将卫星、无人机所测量的遥感数据进行综合，从而在性能和效率上得到巨大提升。

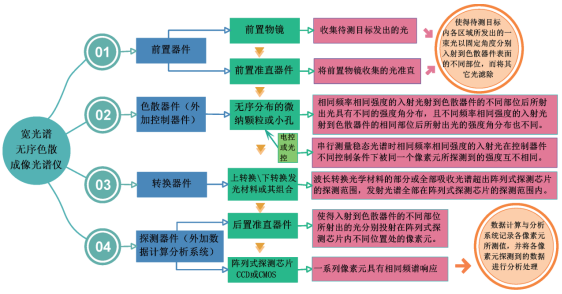


图1 基于宽光谱无序色散成像光谱仪的环境监测仪器各部件及其功能

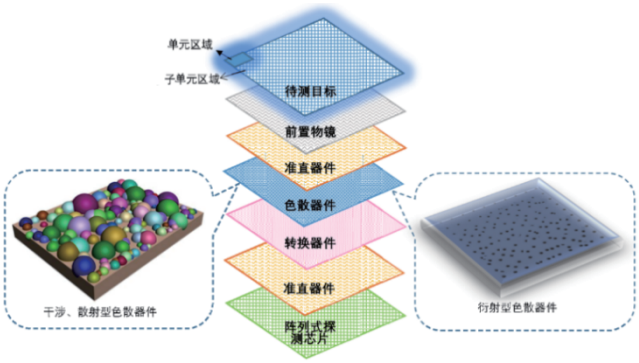


图2 系统结构及不同类型的无序微纳结构色散器件

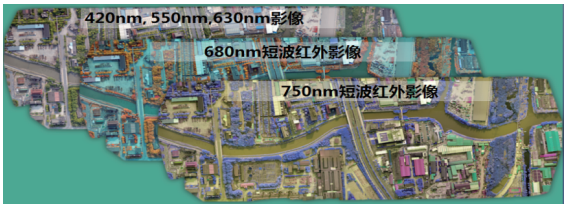


图3 城市水体光谱成像关键波长



图4 水体富营养化分析

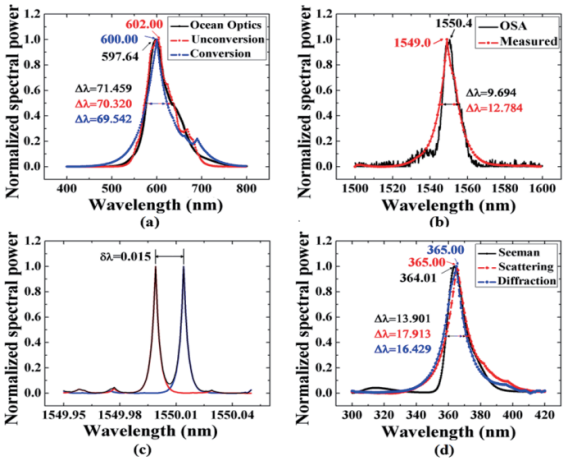


图5 对紫外-红外各波段波长光进行光谱复原的实验效果及其与传统方法的对比

技术指标/优势

国内外星载成像光谱仪主流的技术指标为:工作波段覆盖可见光至短波红外波段、光谱(波长)分辨率一般可达到5nm、空间分辨率为30m、波段数为200。但这样的技术指标只是达到多光谱成像(光谱分辨率为100nm, 波段数10-20)和高光谱成像(光谱分辨率为10nm, 波段数100-200)的技术标准, 还没有达到超光谱成像(光谱分辨率为1nm, 波段数 1000-2000)的技术标准。即使有少数机载的成像光谱仪性能达到超光谱成像技术标准, 其光谱测量范围也不宽。如欲实现较宽波段范围内的超光谱成像, 同时具有高通量、低成本、小型化等特点, 采用现有的技术很难达到。而我们所设计的器件能达到超光谱成像的性能指标, 光谱测量范围包含300nm-1600nm波段。

相关专利列表如下:

(1)杨涛;耿清风;李兴鳌;黄维, 一种成像光谱仪及其高光谱成像方法, 2023-12-12, 发明专利, ZL 201810811226.8

(2)杨涛;黄维;耿清风;李兴鳌, 基于干涉效应的成像光谱仪及高空间分辨率光谱成像方法, 2022-2-11, 发明专利, ZL 201811513996.0

(3)杨涛;张岳;黄维, 一种基于干涉效应的光通信系统及其信号发送与解码方法, 2021-6-4, 发明专利, ZL 201811040486.6

(4)杨涛;王源;张岳;李兴鳌;闫永红;黄维, 一种基于衍射效应的多输入多输出光通信系统及通信方法, 2022-1-25, 发明专利, ZL 201811181073.X

(5)杨涛;黄维;蒋正帅;何浩培, 一种基于衍射效应的成像光谱仪及其超光谱成像方法, 2022-3-15, 发明专利, ZL 201811396933.1

(6)杨涛;黄维;蒋正帅;何浩培, 一种基于散射效应的成像光谱仪及其超光谱成像方法, 2021-12-7, 发明专利, ZL 201811396934.6

(7)杨涛;张岳;黄维;李兴鳌;何浩培, 一种基于滤波效应的多输入多输出光通信系统及通信方法, 2021-12-10, 发明专利, ZL201811422463.1

(8)周馨慧;杨涛;何浩培;黄维, 一种基于散射效应的多输入多输出光通信系统及通信方法, 2022-4-12, 发明专利, ZL 201811422464.6

(9)杨涛;黄维;何浩培, 基于滤波效应的成像光谱仪及高空间分辨率光谱成像方法, 2022-2-8, 发明专利, ZL 201811509305.X

(10)杨涛;彭靖骁;黄维;何浩培, 基于衍射效应的成像光谱仪及高空间分辨率光谱成像方法, 2022-2-8, 发明专利, ZL 201811509516.3

(11)杨涛;黄维;彭靖骁;何浩培, 基于散射效应的成像光谱仪及高空间分辨率光谱成像方法, 2022-2-8, 发明专利, ZL 201811509864.0

(12)杨涛;沈汉宁;黄维;仪明东;周馨慧;何浩培;刘辉,一种宽光谱高灵敏度高通量生物化学传感器及其传感方法,尚未授权(申请日期2022-3-3), 发明专利, 申请号202210214605.5 (同年申请了PCT专利, 申请号PCT/CN2022/126315)

应用领域和市场前景

目前, 排污企业漏排、偷拍现象突出, 政府监管压力巨大。针对全国10809家国家重点监控企业进行专项执法检查, 发现存在问题的企业有1044家, 占全部被查企业的9.6%, 其中擅自拆除、闲置监控设施的有16家, 有弄虚作假嫌疑的22家, 有其他违规现象的1006家。此外, 企业排污数据造假现象层出不穷, 对政府监管提出了严峻的挑战。一方面, 排污企业为了削减治污成本, 擅自调整污染物监测设备;另一方面, 环保企业协助污染企业数据造假, 污染治理设施超标排放, 使得环境污染监管工作更加棘手。如果采用我们的技术, 基于卫星、无人机进行实时的环境监测, 可以有效解决以上问题。

一种基于GNSS和地面气象站观测的实时ZTD区域建模方法

成果完成人	杨柳	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	环境监测及环境事故应急处理技术		高技术领域（三级）	应急环境监测技术	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	大地测量技术
应用行业	测绘地理信息行业、气象监测预警行业、智能导航与无人装备行业				
核心专利号	ZL202411328326.7				

成果概述

对流层天顶延迟（ZTD）是制约GNSS高精度定位、气象遥感反演的核心参数，现有ZTD建模方法多依赖单一数据源，对区域地形、气象时空变化适配性较差，实时解算效率不足，且地面气象站实测数据与GNSS观测数据融合利用率偏低，无法满足测绘、气象预警等领域实时高精度区域ZTD建模需求。本专利依托GNSS实时精密单点定位技术解算原始ZTD数据，融合地面气象站实测气象要素，搭建多源数据时空匹配框架，构建区域加权平均温度、水汽递减率配套修正模型，建立ZTD垂直修正与动态参数迭代更新机制，精准适配区域非线性气象变化规律，实现全域实时ZTD高效建模。该成果突破了单一数据源建模精度瓶颈，建模实时性、区域适配性远优于传统经验模型，整体技术达到国内先进水平，可大幅提升GNSS定位精度与气象反演效率，具备良好的工程应用与推广前景。

关键技术/创新要点

本成果核心创新在于打破传统ZTD建模的数据源与技术局限，从数据融合、模型优化、实时解算三大维度实现核心突破，全程兼顾建模精度、运行效率与区域适配能力，且表述通俗易懂、落地性极强。针对行业内普遍存在的多源数据割裂问题，该项技术搭建了GNSS观测数据与地面气象站实测数据的时空匹配框架，解决两类数据时空不同步、融合利用率低的痛点，让建模数据更贴合区域真实气象地形状态。摒弃传统通用经验模型的粗放式建模思路，结合区域地理气象特征，定制化构建加权平均温度、水汽递减率修正模型，精准适配区域气象非线性变化规律，大幅弱化地形、气象差异对建模精度的影响。同时搭建动态参数迭代与ZTD垂直修正双重机制，摒弃固定参数建模的滞后性，实现建模参数实时自主更新、数据实时解算，在保证建模精度的同时，大幅提升解算效率。整体技术无需额外搭建复杂硬件体系，操作简便、适配性广，彻底解决了现有建模方法实时性差、区域适配弱、精度不足的核心难题。

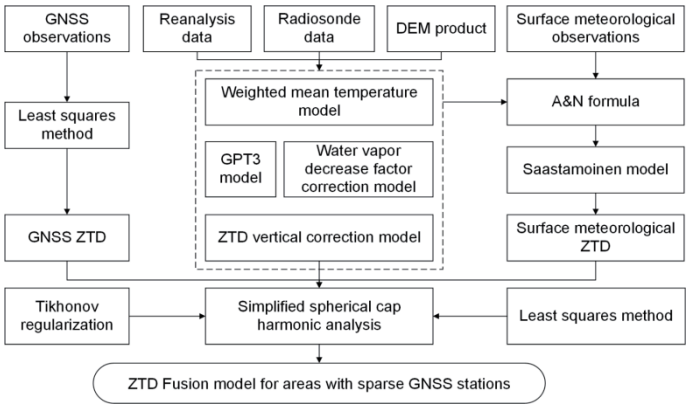


图1 具体流程图

技术指标/优势

(1)技术指标:依托多源数据融合建模,ZTD实时解算响应高效,区域建模时空误差显著降低;模型参数可自主动态迭代,无需人工频繁校准,能适配山地、平原等各类地形区域,兼容常规GNSS观测终端与地面气象站数据传输体系,软硬件适配性极强。

(2)技术优势:相较于传统单一GNSS建模、通用经验模型两类同类技术,本成果破除数据融合壁垒,建模精度、实时性、区域适配性全面提升,有效规避了固定参数模型的应用局限;技术落地无需新增专用监测硬件,应用成本低、部署便捷。本成果已申请授权发明专利,核心建模方法具备完全自主知识产权,技术独创性突出,可直接应用于高精度卫星定位、大气水汽反演、气象灾害预警等领域,综合应用价值远超同类常规技术。

应用领域和市场前景

本成果可广泛应用于测绘地理信息、气象遥感、地质灾害预警、高精度工程监测、智能导航、大地测量等诸多领域。实操场景覆盖高精度卫星定位解算、工程形变实时监测、大气水汽反演、短时气象灾害预警、无人机精准管控、车载高端导航等。当前高精度定位、气象精细化监测行业需求持续上涨,传统ZTD建模技术已难以满足行业刚需,本成果适配性强、部署成本低、无需改造现有硬件设备,可快速对接各类GNSS观测与地面气象站系统,具备极强的落地推广性。凭借技术与成本双重优势,成果市场应用空间广阔,能有效填补区域实时高精度ZTD建模的市场空白,市场化转化前景可观。

毫米波机载InSAR高精度地形测绘关键技术

成果完成人	高建	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	其他	
高技术领域（二级）	航空遥感		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感
应用行业	地理空间信息				
核心专利号	ZL201911164010.8；ZL201710899261.5				

成果概述

毫米波机载干涉合成孔径雷达（InSAR）既秉承了常规SAR所具备的全天时、全天候工作能力，又兼具了毫米波SAR所特有的体积小、重量轻、分辨率高等优点，是解决常年受云、雾、雨等气象条件严重影响的测绘困难地区大范围、高精度地形测绘难题的有效技术手段。然而，由于采用了更短的波长，毫米波机载InSAR在数据采集及处理、产品生成和质量控制等关键环节，也相应提出了更高的技术要求。

本成果立足于测绘困难地区的实际生产需求，开展了毫米波SAR高分辨率成像方法、双天线干涉数据处理、干涉参数定标、稀疏控制点区域网平差、高程重建方法以及自动化快速数据处理系统自主研发等研究。本成果可以解决传统测绘手段无法覆盖的地区和场景，有效应对海南热带地区复杂地形和植被覆盖等挑战，提高困难地区地形测图的精度。

关键技术/创新要点

本团队提出了基于距离和方位深度解耦合的毫米波SAR高分辨率成像方法。针对运动误差和姿态误差大，以及惯导精度有限导致的毫米波SAR成像质量下降问题，提出了基于距离去调频和方位非线性调频变标（NCS）的高分辨率成像方法，结合两步弯曲校正、方位维包络校正、距离和方位深度解耦合以及距离维复杂空变运动补偿等技术，能够显著增加距离和方位聚焦深度，在大幅提升SAR成像质量的同时，提升了高分辨SAR成像的处理效率。

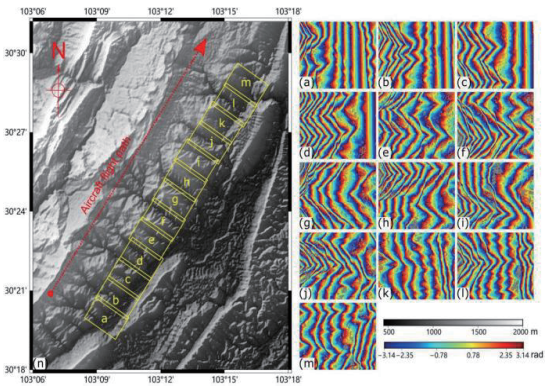


图1 机载 InSAR 邛崃干涉实验结果

提出了基于GPU高性能并行计算的毫米波机载InSAR数据干涉处理方法。针对毫米波机载InSAR大范围、高精度地形测绘数据快速处理需求，提出了基于GPU高性能并行干涉处理方案，充分整合精确配准、抑噪滤波技术，及基于最小平衡树、分离连续区域、高阶马尔科夫随机场的可靠解缠方法，提高了毫米波机载InSAR干涉处理速度和质量。

分析构建了机载InSAR系统误差模型，提出了基于自动提取连接点的区域网平差高程重建方法。分析了干涉参数对定位精度的误差传播关系，提出了重叠区连接点自动选取综合处理方法，无控制点相位偏移计算方法和基于敏感方程的干涉参数定标方法，构建了面向稀疏控制点的区域网平差和高程重建方法。

完成了机载InSAR数据处理软件开发和机载平台实时处理系统研制，发布了机载InSAR系统效能评估标准。针对灾害应急等快速测绘响应需求，处理软件及实时系统有机整合数据信息生成、数据信息处理、影像数据传播等功能，创新性设计了空中快速处理模式，实现了对地观测过程中同步生成、传回DEM/DOM产品的高效率作业。效能评估标准为进行测绘产品生产的毫米波机载InSAR相关数据产品质量检查提供了依据。

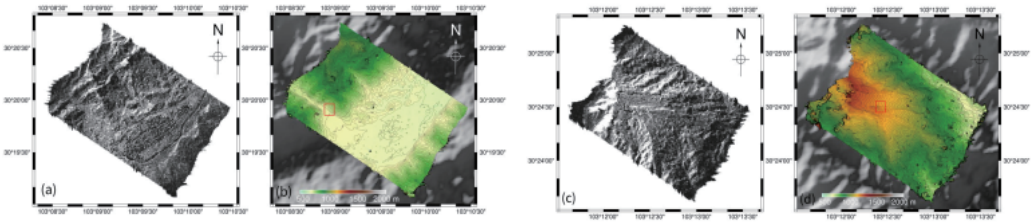
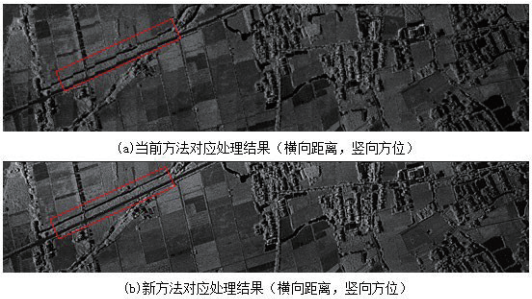


图2 机载 SAR 散射强度图和三维重建结果

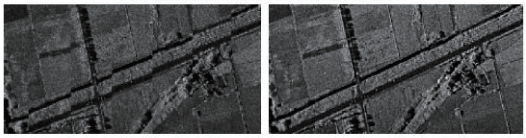
技术指标/优势

提出的距离维复杂运动补偿方法，通过沿距离维分块进行运动补偿和走动校正，在方位脉压处理前将沿距离空变的多普勒校直。该方法的成像结果能够避免常规距离多普勒算法容易出现的明暗交替问题，图像沿距离维连续完整，可视性较好。同时该方法也解决了方位预滤波和方位脉压时窗函数频率移动处理中的距离近端或远端聚焦效果差的问题，在远离距离中心处仍然具有良好的聚焦效果。



(a)当前方法对应处理结果（横向距离，竖向方位）

(b)新方法对应处理结果（横向距离，竖向方位）



(c) 图(a)局部场景　　(d)图(b)局部场景

	SNAPHU	R-G	GAMMA	本研究方法
数据 A	98.072	85.919	73.510	70.695
数 据 B	86.992	27.809	64.580	23.324
数据 C	93.014	56.511	161.610	35.997

应用领域和市场前景

毫米波机载InSAR平台系统满足高精度地形测绘工作规范要求，能够在恶劣环境下实现地形测绘任务，这种全天候、低人力/物力投入成本的测绘技术解决了传统测绘手段无法覆盖的地区和场景，如成果在四川泸定县无图区的应用，解决了困难地区测绘工作难度大、数据匮乏的痛点。

毫米波机载InSAR平台系统的应用可以降低遥感技术应用成本，带动相关行业的发展，如项目在为海南生态环境监测领域中助力基础数据源、丰富产品信息，辅助生态环境监测和自然资源调查工作。

毫米波机载InSAR系统的数据处理实现了全部的自动化，为困难地区以及海岛礁方面提供了高精度、自动化地形测绘方法和技术，大大提高了生成高精度DEM、DOM的效率，降低了数据处理的经济成本，提升了生成高精度 DEM/DOM 的能力。

基于多源遥感数据监测河流水位动态变化

成果完成人	贾燕	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	环境监测及环境事故应急处理技术		高技术领域（三级）	高技术服务	
所属学科方向	一级学科	水利工程		二级学科	/
应用行业	智慧水利，防洪抗旱				
核心专利号	ZL 202211683099.0；ZL202410891036.7				

成果概述

河川水位与径流量是水资源管理与灾害预警的关键指标。当前，依靠传统水文站获取大范围水位和流量数据面临成本高、覆盖面有限的瓶颈，而单一卫星遥感数据在时空分辨率上难以满足突发灾害精细化预警的需求。本成果依托多源卫星遥感数据（合成孔径雷达、光学影像及高时间分辨率CYGNSS反射信号等），融合气象预报数据，建立了一套高精度、多尺度的河道水流动态监测与预警系统。通过人工智能算法与超分辨率技术的结合，该成果不仅实现了从传统点测量到大范围面测量的跨越，还有效增强了对复杂水文动态的刻画能力。整体技术在流域实时动态监测、水文真预测和极端灾害应急响应等方面达到了业内领先水平，为现代水利管理提供了全新的解决方案。

关键技术/创新要点

本成果突破了传统水文监测的局限，其核心关键技术与创新点主要体现在以下几个方面：

1. 多源遥感数据时空融合与特征提取

不同卫星的视力与巡视周期各异。本成果将具备高空间分辨率的合成孔径雷（SAR）与具备极高时间分辨率的全球导航卫星系统反射信号（CYGNSS）进行联合监测。通过精准的数据预处理与特征挖掘，将多尺度特征进行时空匹配与融合，成功弥补了单一卫星在时间或空间上的观测断层。

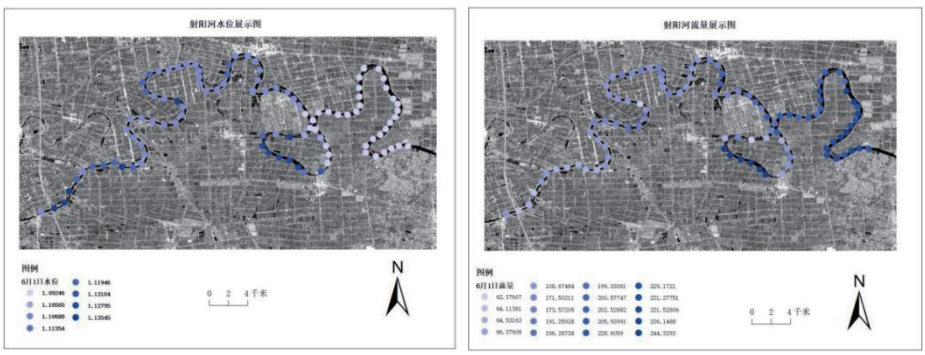
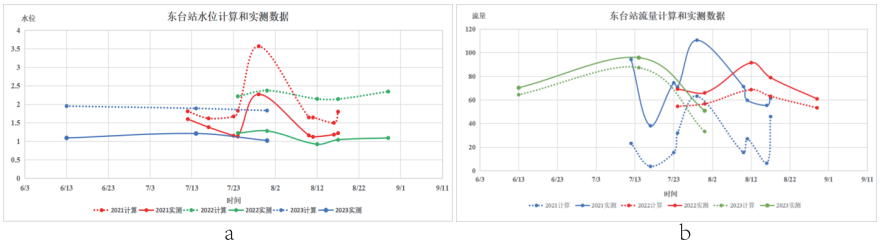


图1 射阳河6月1日水位流量变化展示图

2. 基于机器学习的高精度水位与流量反演

在获取海量监测数据后，传统的线性公式往往难以完美拟合复杂的自然水流变化。成果引入了前沿人工智能与机器学习算法，构建了多尺度的水位和流量预测模型。该算法能够从历史上下游的水位、降水、地形等海量变量中自主学习隐性规律，即便在无实测水位特征输入的极端情况下，依然能够精准推演出河道的真实流量变化。



a　　b

图2 东台站：(a)水位流量计算，(b)实测数据

3. 水流跃变预警与水位“真预测”技术

传统的遥感监测多为灾后评估。本成果将全球预报系统的未来降水数据融入模型，打破了仅能获取过往数据的限制。通过构建基于水位变化系数的分类模型，系统不仅能对复杂河段的水流跃变（如暴雨导致的突然涨水）进行敏锐捕捉和分级预警，还能实现对未来几天水位的真预测，为防汛调度争取了宝贵的黄金时间窗口。

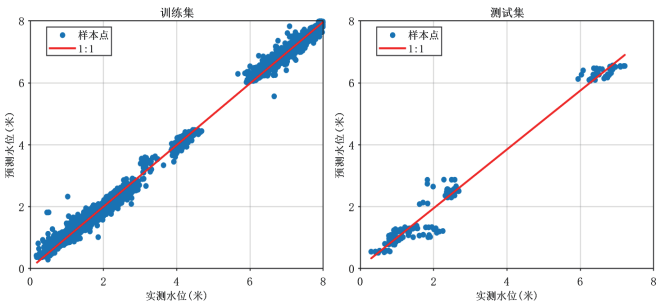


图3 真预测模型计算结果相关性验证

技术指标/优势

相较于传统点位布设的高昂成本，本系统具有覆盖面广、时空分辨率高、无接触且抗干扰能力强的优势，能够精确刻画日常及极端条件下的真实水文演变规律。尤其在应对暴雨洪涝或干旱等极端气候时，展现出卓越的鲁棒性。相关核心技术已形成丰厚的产权与学术积累，不仅产出1项发明专利；在融合SAR和CYGNSS 数据进行水文监测等核心理论上，已在遥感领域顶级期刊《Remote Sensing of Environment》、《International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation》发表第一作者论文。

应用领域和市场前景

本成果具备极强的实战价值，可广泛应用于水资源管理、环境监测以及应急减灾等核心领域。在防洪排涝方面，可为政府部门提供实时的高精度洪水预警和水位预测，辅助优化水库泄洪调度；在农业管理方面，可服务于圩区水文管控，指导农田灌溉与排涝，推动农业可持续生产；在城市规划建设中，亦能为城市排水系统的设计与防洪能力评估提供海量数据支撑。随着全球气候变化加剧，极端水文事件频发，各级部门对精细化、高频次的水流监测需求急剧上升。本成果提供了一种极具成本效益的低门槛、高精度的替代方案，尤其能够弥补偏远及缺资料地区地面监测设施不足的短板，在未来的智慧水务建设、全球水环境动态监测和防灾减灾市场中拥有极为广阔的商业应用与推广前景。

顾及POI点局部空间分布差异的自适应KDE方法与系统

成果完成人	杨静	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	生态环境建设与保护技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	地图制图技术
应用行业	国土空间规划、数据挖掘、时空大数据分析等				
核心专利号	202211554721.8				

成果概述

城市商业中心作为城市经济发展的关键，其空间布局与城市结构及动态发展紧密相连。随着地理大数据的普及，具有共享性、实时性和精确性的POI数据在城市商业空间研究中备受关注。学者们基于POI数据，深入探讨了城市商业空间的聚集特征、分布模式等问题，这对城市高质量发展具有重要意义。

核密度估计方法（KDE）作为一种空间密度分析工具，因原理简单、操作方便，常被用于点状数据分析和空间“热点”探测，如商业零售等热点问题。核函数和带宽是KDE的两个重要参数，其中核函数选择对结果影响较小，而带宽选择更为关键。现有带宽确定方式主要有经验法和基于数据空间分布结构法。经验法如根据商业中心步行范围选择带宽，但具有局限性。因此，一些学者提出基于点数据空间分布结构确定带宽。

关键技术/创新要点

已有研究揭示，带宽的确定是KDE方法的核心技术，相较于核函数的选择其对研究结果具有更显著的影响。当带宽太大，构建的核密度面过于平滑，导致局部“热点”被忽略；当带宽太小，构建的核密度面过于锐利，导致局部“热点”太突出，全局规律不易观察。虽然与传统的经验法相比较，相关学者提出的基于最小平均积分平方误差法确定的全局最优固定带宽更加客观，但仍然无法顾及受点要素空间分布特征影响的不同象限局部密度在全局密度面上的差异性。

针对以上的问题，本文提出了一种面向点数据的非参数估计方法，通过识别商业POI点不同象限邻域点空间分布趋势曲线不同类型的突变点，确定商业POI点四象限空间分布聚类范围，解决了每个POI点不同象限局部带宽识别的问题，构建了一种基于商业POI点局部空间分布差异性特征的自适应核密度估计方法。

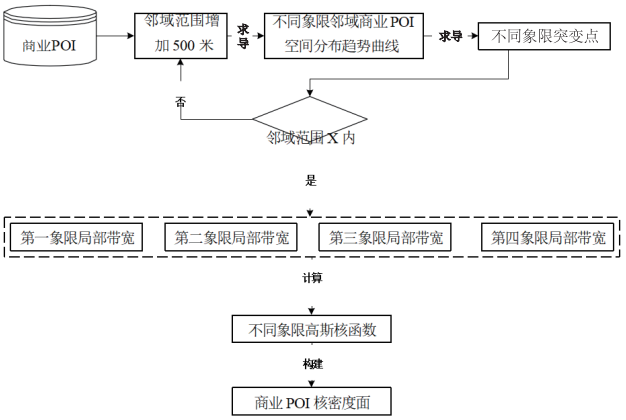


图1 自适应核密度构建的流程图

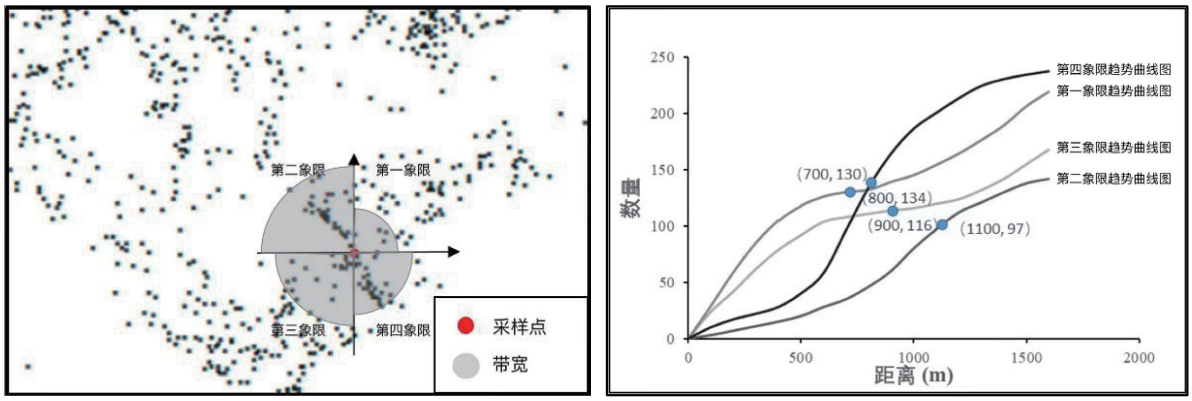


图2 局部自适应带宽确定示意图：(a)不同象限的局部自适应带宽；(b)不同象限邻域点空间分布趋势曲线

技术指标/优势

1、从南京市实例结果可以发现，基于本成果提出的自适应核密度估计方法构建的商业核密度面具有较好的评估效果。

2、本成果从四个象限分别分析每个商业POI点的局部自适应带宽，可以更精确地度量商业POI点的空间分布密度。

3、与传统核密度估计方法和自适应核密度估计方法相比，本成果的方法顾及了局部地理空间结构差异性特征。

应用领域和市场前景

本成果涉及到地理学、数据挖掘、时空大数据分析等领域，是一种顾及商业POI（point of interest）点不同象限局部空间分布特征，依据邻域商业POI点空间分布趋势曲线“ 突变性”，结合传统核密度估计方法（Kernel Density Estimation，KDE），确定POI点自适应局部带宽的核密度估计法，能够更科学、客观地反映商业 POI 点的时空分布密度，有助于进一步揭示城市地理空间结构、格局及其演变规律。

基于多基线SAR数据的林下地形提取方法、装置

成果完成人	李文梅	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	资源探查		高技术领域（三级）	地形测绘	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	摄影测量与遥感
应用行业	林业、测绘				
核心专利号	ZL202510399324.5				

成果概述

林下地形是森林垂直结构参数和林业调查的重点，在森林生长潜力和木材生产中起着重要的指示作用。目前较为先进的传统层析SAR（Tomographic SAR）是通过设置阈值的方式对森林层析剖面进行像素的筛选处理从而提取林下地形信息。然而，这种方式容易出现森林层析剖面内方位角和范围方向的后向散射功率分布不连续，导致得到的林下地形会出现明显的断点和跳跃。本研究首先基于多基线SAR数据重建森林垂直结构；然后对提取的主瓣信号进行投影，获得重建的森林三维点云；最后提出一种改进的滤波方法，将点云中的地面点提取出来得到林下地形。此方法最大限度保留并利用了森林层析结构剖面信息，并将保留的剖面信息都转化成了点云信息，利用了点云地面点滤波的优势，将二者有效结合，避免了现有方案中上述利用阈值提取地形信息的弊端，明显提高了林下地形提取精度。

关键技术/创新要点

1.SAR数据预处理：

针对飞行器采集数据时受到环境等因素的影响而导致的干涉质量问题，经过精配准，基线重建等步骤对SAR影像数据集中的干涉相位误差进行修正，去除SAR影像数据集中的相位误差、平地相位和地形相位等。

2.森林垂直结构重建：

本成果首先采用SKP分解对SAR影像数据集进行信号分解，将其简化成两种散射机制，一种是冠层散射，另一种是地面散射。然后对以地表散射为主的结构矩阵进行频谱重建，生成森林层析结构剖面。

3.旁瓣信号去除：

主瓣信号代表的是目标散射体，而旁瓣信号代表的是目标周围的能量，其可能会掩盖森林内部的弱散射信号，从而影响对森林结构的准确分析。本成果采用的是滑动窗口方法进行主瓣信号的提取。

4.森林三维点云重建：

本研究通过对结构剖面中的主瓣信号进行投影，获得重建的森林三维点云。采用逐方位向或者逐距离向的，根据结构剖面中后向散射信号的像素对应的高程信息，将像素投影至对应的高度，重建得到森林三维点云。

5.林下地形提取：

本研究提出了一种改进的布料模拟的滤波算法（MCSF），结合数字地面模型DTM，使其在地形起伏较大的区域也具有较高的分类精度，用于分离森林三维点云数据中的地面点。最后将地面点云投影至二维栅格形成林下地形模型。

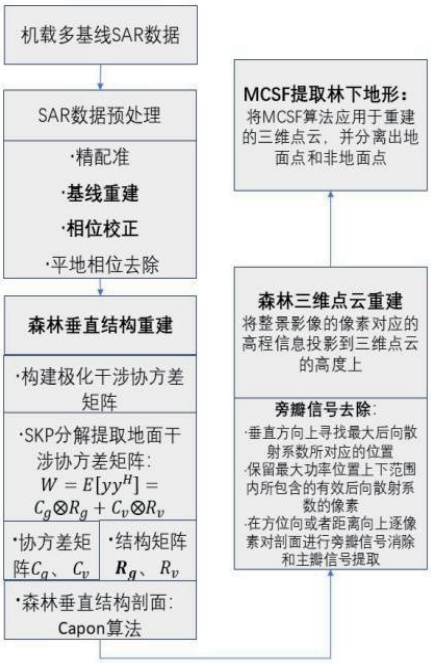


图1 基于多基线SAR数据的林下地形提取流程

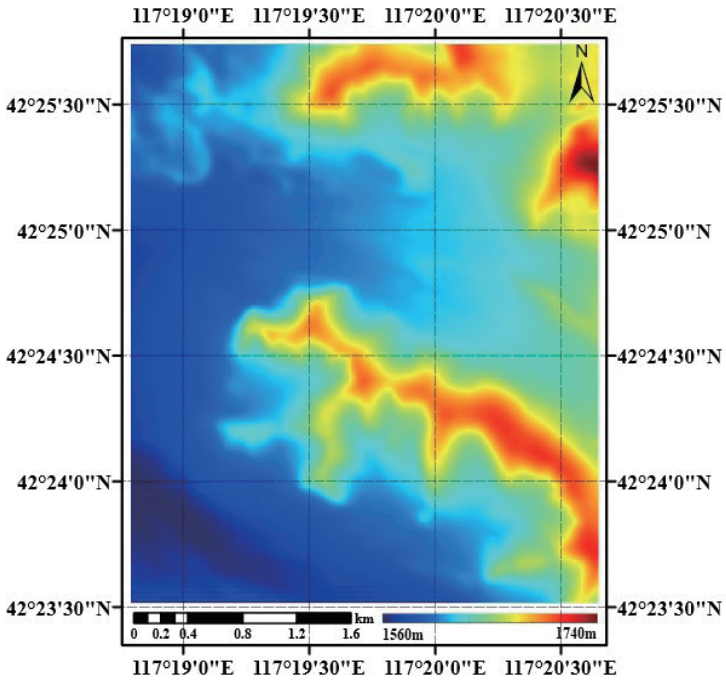


图2 应用本研究提供的方法得到的林下地形模型结果

技术指标/优势

技术指标：

精度：用Lidar数据作为参考，R^2=0.99，RMSE=3.1m。适用范围：P波段机载SAR数据。

对比优势：

精度更高：相较于传统林下地形提取方法（如 TomoSAR-threshold 的 RMSE=6.4m），本方法误差降低约50%。

鲁棒性更强：将森林垂直结构转化为点云显著减少因阈值的设置而导致的林下地形出现明显的断点和跳跃的问题。

普适性更广：无需先验森林类型和地形信息，适用于不同树种类型和地形情况。

跨平台兼容：支持SAR和点云数据，延续性强。

应用领域和市场前景

应用领域：

林业资源管理：探究地形对树木生长的影响，实时监测树木生长状况，评估森林资源的分布和储量。

生态系统研究：林下地形的复杂程度会影响生物的栖息和分布，准确提取林下地形信息有助于研究生物多样性的分布规律。

灾害预警：森林覆盖的山区是滑坡、泥石流等地质灾害的多发区域。林下地形的变化可能是地质灾害发生的前兆之一。

地图绘制：准确提取森林林下地形信息可以为地图绘制提供更详细和准确的地形数据。

市场前景：

随着全球气候变化以及政府提出的“碳达峰”、“碳中和”的战略决策，高精度的林下地形提取方法市场潜力巨大。本方法利用机载SAR数据，实现大范围的林下地形测绘，可集成至林业管理平台或遥感服务系统，服务于政府机构、林业企业和科研单位。

一种基于量子计算的地理选址方法

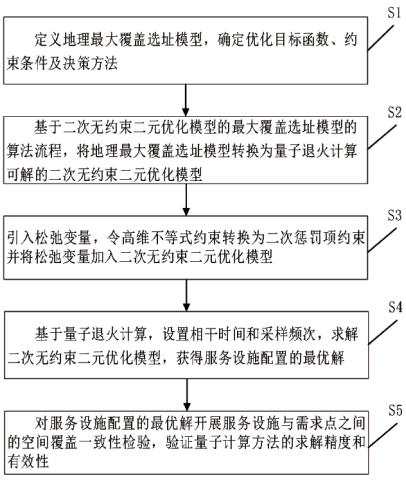
成果完成人	周鑫鑫	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	产业化阶段		高技术领域（一级）	高技术服务	
高技术领域（二级）	地理信息系统		高技术领域（三级）	服务设施规划	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	地理信息系统
应用行业	城市专项服务设施规划				
核心专利号	ZL202411827124.7				

成果概述

本成果属于地理信息科学空间优化技术领域，具体公开了一种基于量子计算的地理选址方法，包括：定义地理最大覆盖选址模型，确定优化目标函数、约束条件及决策方法；将地理最大覆盖选址模型转换为量子退火计算可解的二次无约束二元优化模型；引入松弛变量，令高维不等式约束转换为二次惩罚项约束，并将松弛变量加入二次无约束二元优化模型；基于量子退火计算，设置相干时间和采样频次，求解二次无约束二元优化模型，获得服务设施配置的最优解；对服务设施配置的最优解开展服务设施与需求点之间的空间覆盖一致性检验，验证量子计算方法的求解精度和有效性。本成果解决了地理信息科学中的空间优化问题。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种面向地理最大覆盖选址问题的量子计算方法，本成果地理选址、空间优化模型问题需要转换成二次无约束二元优化模型，引入松弛变量来实现不等式约束转换为二次惩罚项等式约束，并将二次惩罚项约束项加入QUBO模型。针对高维不等式约束项转换二次惩罚项约束项难题，设计基于松弛变量的高维不等式约束转换算子，并实验验证有效可行。然后可以采用了4种退火器求解，实现快速、高质量量子计算。地理最大覆盖选址模型可广泛应用于城市服务设施专项规划、物联网及通讯设施空间布设、智慧城市治理与资源配置。本文方法可适应当前NISQ条件下的可控量子比特规模及有效相干性约束，从而适应较大规模的服务设施选址等地理空间优化问题的求解研究。



应用领域和市场前景

适用于大规模城市专项服务设施规划，包括：城市垂直起降场规划、城市服务设施规划等。

一种顾及城市水文和交通流特征的暴雨积水路段识别方法

成果完成人	朱少楠	职称	副教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	环境监测及环境事故应急处理技术		高技术领域（三级）	应急环境监测技术	
所属学科方向	一级学科	测绘科学技术		二级学科	地图制图技术
应用行业	城市管理				
核心专利号	ZL202410262034.1				

成果概述

本成果面向城市暴雨天气下道路积水识别难、交通异常判别不准等实际问题，提出了一种顾及城市水文和交通流特征的暴雨积水路段识别方法。随着极端降雨事件增多和城市不透水面扩大，暴雨引发的道路积水、交通中断和内涝风险日益突出，传统方法多侧重交通统计分析，对地形、汇水、土地利用等水文地理因素考虑不足，难以准确识别局部积水路段。针对上述问题，该成果融合浮动车轨迹、路网、降雨、DEM等多源数据，构建城市敏感型积水监测层次化数据模型，划分“水文—交通”响应单元，并基于气象敏感指数、交通敏感指数和地理敏感指数建立积水敏感路段动态检测模型，实现暴雨情景下积水路段的快速发现与空间分布表达。具有较强的创新性、实用性和推广价值，达到了城市暴雨积水路段智能识别的较高应用研究水平。

关键技术/创新要点

该成果围绕城市暴雨积水识别难题，将水文过程与交通运行深度融合，构建了面向实际应用的动态识别方法。通过整合交通、气象与地理多源数据，形成以道路为核心的时空数据底座，利用浮动车轨迹持续感知车速与流量变化，使道路运行状态具备动态表达能力。在空间建模上，引入“水文响应单元—交通响应单元—道路对象”的层级结构，将降雨汇流过程与交通组织特征逐层关联，实现从区域到路段的精细化定位。在指标体系中，综合降雨强度、车速、流量、时间特征及坡度、土地利用等因素，避免单一数据源带来的误判。模型层面采用随机森林算法构建动态检测器，并结合交叉验证提升泛化能力，使其能够适应复杂城市暴雨场景。同时，通过道路归并、屏障分割与区域优化等规则修正，使空间划分更贴近真实城市结构。整体形成“数据融合—空间建模—智能识别—结果输出”的完整技术路径，兼具精度与可落地性。



图1 “水文—交通”响应单元划分

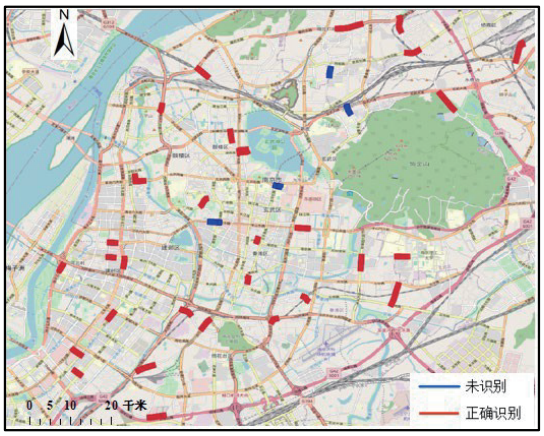


图 2 积水路段识别

技术指标/优势

该成果以小时降雨量、路段平均车速、车流量、时间段、路段坡度和土地利用类型为核心指标，融合交通、气象、地理多源数据开展识别；可基于“水文响应单元—交通响应单元—路段对象”三级结构进行逐级检测，并输出积水敏感路段空间分布图。其优势在于识别效率较高、对复杂城市地理场景适应性较强、结果表达直观，便于应急响应与交通疏导。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于城市防洪排涝、交通运行监测、应急管理、城市更新等领域。具体应用场景包括暴雨期间易积水路段快速识别、交通异常预警、交警和城管联动调度、排水设施运行辅助研判、重点区域风险巡查以及城市内涝数字化治理等。对于气象、住建、水务、交通运输、公安交管、城运中心等部门，该成果能够提供更精细的道路风险识别支撑，提升暴雨天气下的道路安全保障与应急处置能力。随着极端天气频发、城市精细化治理和数字孪生城市建设持续推进，城市对暴雨积水监测、风险预警和联动处置技术的需求将持续增长。该成果具有多源数据融合、适配性强、可与现有城市管理平台对接等特点，具备较好的推广应用前景和市场转化价值。

基于时空信息融合的径流智能预测方法

成果完成人	钱龙霞	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	生态环境建设与保护技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	水利工程		二级学科	环境水利
应用行业	水利、环境和公共设施管理业/信息传输、软件和信息技术服务业				
核心专利号	ZL202411882963.9				

成果概述

精准的径流预测是水资源高效管理与防洪减灾决策的核心支撑。然而，径流演化过程受气象、下垫面等多重因素耦合作用，呈现出显著的非线性与非平稳性特征，传统预报模型在长期多步超前预测中普遍存在精度不足、时滞效应显著等瓶颈问题。针对上述难题，本研究充分融合卷积神经网络（CNN）优异的时序特征提取能力与多头自注意力机制（MHSA）高效的时空特征捕捉优势，构建了一套耦合非线性动力学理论与深度学习方法的改进径流预测框架——MHSA-STSM模型。该模型通过实现高维原始吸引子向延迟吸引子的映射学习，可有效融合径流序列中的时间、空间及全局关联信息，大幅提升了长期多步超前预测的精度与稳定性，为突破水文预报关键技术瓶颈提供了新思路与新方法。

关键技术/创新要点

本成果突破传统径流预测模型仅关注序列趋势而忽视变量间交互作用的局限，创新性地构建了基于非线性动力学框架的深度学习预测模型MHSA-STSM。首先，针对传统方法难以同时提取时序依赖与空间关联的痛点，该成果设计了双模块协同机制：采用一维卷积神经网络精准捕捉径流序列的短期波动与长期演化趋势，同时引入多头自注意力机制并行处理多个水文站点的数据，有效挖掘不同流域间的时空依赖关系，使模型能够全面感知复杂水文系统中的时空耦合特征。其次，基于动力学系统的吸引子理论，本成果建立了从高维原始数据空间到目标变量延迟嵌入空间的端到端映射，将系统的高维动态信息高效转化为可预测的时序信息，显著增强了模型的可解释性。此外，通过跳跃连接保留原始输入的全局信息，有效缓解了深度网络中的梯度消失问题，并大幅改善了传统深度学习模型在多步外推预测中普遍存在的时间滞后现象，确保在较长预测周期内仍能保持高精度与高稳定性。

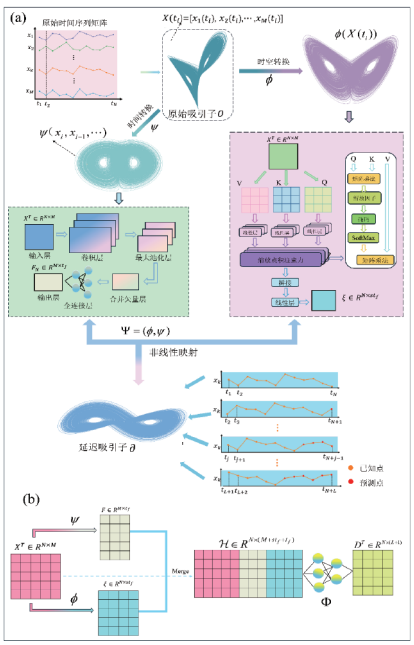


图1 MHSA-STSM模型整体架构图

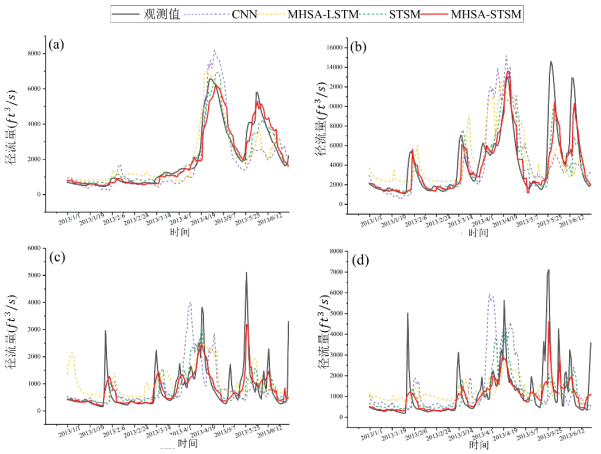


图2 不同模型在五步预测中的结果对比图

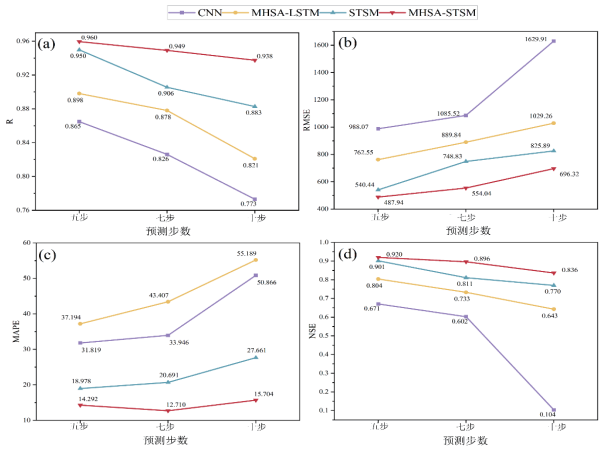


图3 不同模型在不同预测步长下的指标对比图

技术指标/优势

该成果在预测精度、稳定性、峰值捕捉能力等方面均展现出显著优势。在预测精度方面，基于美国缅因州4个水文站的实测数据验证，本成果在5步预测任务中的纳什效率系数最高可达0.920，决定系数最高可达0.921，均显著优于CNN、LSTM等主流基线模型。在预测稳定性方面，该成果有效解决了多步超前预测中长期存在的“时间滞后”难题，当预测步长从5步逐步增加至10步时，纳什效率系数仅从0.920小幅下降至0.836，性能衰减幅度远低于基准模型，展现了卓越的鲁棒性。在极端事件捕捉能力方面，本成果对洪峰流量预测表现尤为突出，平均绝对相对误差相比基线模型降低20%~130%。

应用领域和市场前景

该成果主要应用于智慧水利、水文气象预报、城市内涝预警、水资源调度管理等领域。具体场景包括水库入库流量预报、流域洪水风险预警、航运调度支持以及水电站发电计划制定。在全球气候变化导致极端天气事件频发的背景下，高精度的径流预测是防灾减灾的刚性需求。该成果不仅可服务于传统的水利部门，其数据处理框架还可拓展应用于金融时间序列预测、电网负荷预测、交通流量预测等其他具有强非线性特征的领域，具有广阔的跨行业应用前景和商业价值。

基于多尺度视角的社会水循环碳排放测算与预测方法

成果完成人	钱龙霞	职称	副教授	所在单位	理学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	资源与环境	
高技术领域（二级）	水污染控制与水资源利用技术		高技术领域（三级）	节水与非常规水资源利用	
所属学科方向	一级学科	统计学		二级学科	环境与生态统计学
应用行业	水资源管理、水务环保、城市建设、碳交易与政策				

成果概述

在“节水优先”方针与“双碳”目标战略深入推进的背景下，水资源高效利用与碳减排协同管控面临更高要求。当前社会水循环碳排放研究局限于单一空间尺度，且在小样本条件下碳排放预测精度偏低，难以支撑精细化管理决策。针对上述关键问题，本研究构建了“自上而下”的省、市、县三级碳排放测算体系，基于水-能-碳耦合关联机制，融合省域核算参数、市域用水结构特征及县域夜间灯光数据，实现了多尺度社会水循环碳排放的精准量化；同时提出“自下而上”的深度学习与非线性动力系统耦合预测方法，通过高效融合时空特征信息，有效破解了小样本场景下预测精度不足的技术难题。研究成果可为区域水碳协同管控与精细化治理提供重要科学依据，整体达到国内同领域先进水平。

关键技术/创新要点

本研究面向干旱区节水减碳协同发展需求，针对社会水循环碳排放核算跨尺度适配性差、中微观数据缺失、小样本时序预测精度低的行业痛点，形成两大核心技术突破。

一是多尺度全过程碳排放精准测算技术，创新构建省-市-县三级联动的测算体系，打通水-能-碳内在关联机制，融合官方用水统计数据与夜间灯光遥感数据，破解县域等微观尺度核算数据不足的难题，实现社会水循环“取水-供水-用水-排水”全环节、跨尺度的碳排放精准量化，清晰刻画区域碳排放空间分异特征，解决了传统方法单一尺度核算、空间异质性刻画不足的问题。二是时空融合高精度碳排放预测技术，首创深度学习-非线性动力系统耦合预测模型，同步挖掘碳排放的时间演化规律与县域间空间交互特征，解决了年度小样本数据预测稳定性差、精度低的行业痛点，具备极强的鲁棒性与场景适配性。成果可直接落地于区域水碳双控规划、水务低碳改造等场景，为干旱区水碳协同管控提供了可复制、可推广的核心技术支撑。

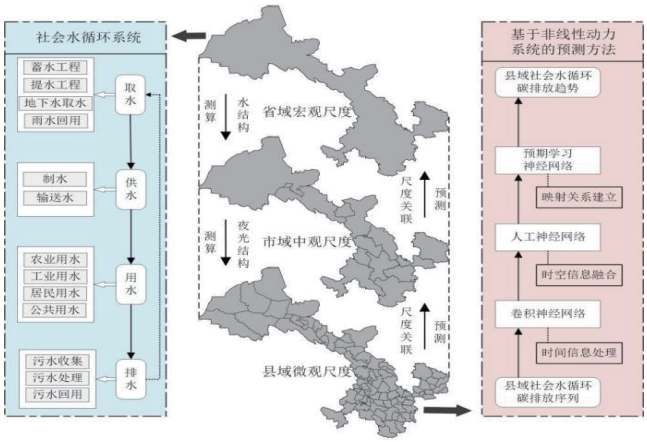


图1 社会水循环碳排放测算与预测研究体系

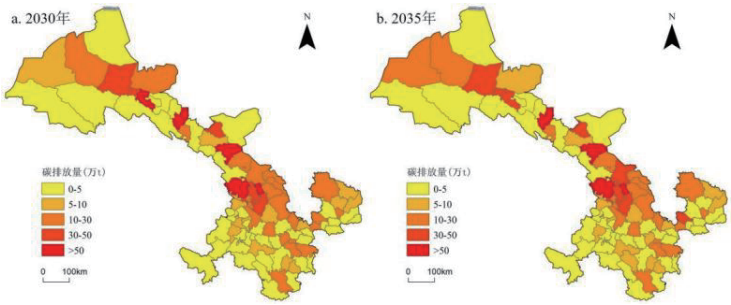


图2 2030-2035年甘肃省县域社会水循环碳排放预测

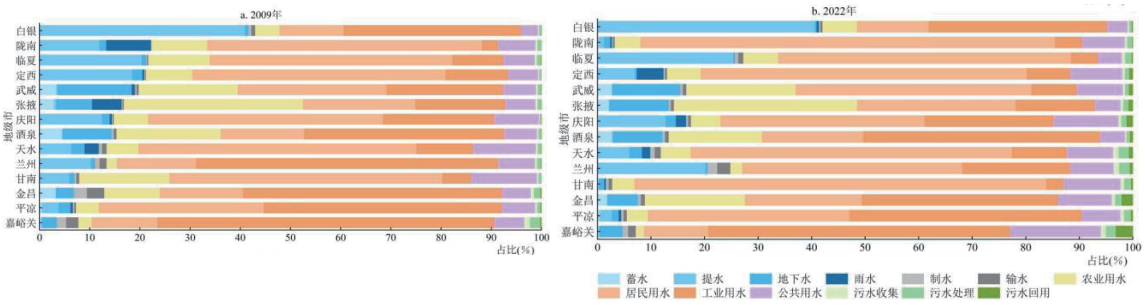


图3 2009、2022年甘肃省市域社会水循环碳排放构成

技术指标/优势

提出“自上而下”的社会水循环碳排放测算体系，突破了现有研究单一尺度局限：建立的尺度测算体系，巧妙避免了微观尺度数据资料缺乏难题，能够挖掘社会水循环碳排放的空间异质性与尺度传递效应，为多尺度水碳协同治理提供精细化数据支撑，弥补了多尺度整合研究不足。

提出“自下而上”的社会水循环碳排放预测体系，解决了社会水循环碳排放难预测问题：结合深度学习模型提取序列的时间特征信息的优势和非线性动力系统提取空间交互信息的能力，将两者深度融合，实现微观（县域）碳排放的准确预测，进而依据尺度关联得到中宏观碳排放量，弥补了社会水循环碳排放预测空白。

应用领域和市场前景

该成果可为生态环境管控、城乡水务运营、区域低碳发展等领域提供精准的技术支撑与决策依据，可实现区域社会水循环全流程碳排放的精准核算、动态预测与水碳耦合关系解析，能够为地方政府制定差异化水碳协同减排方案提供量化支撑。依托多尺度、多场景下水碳脱钩路径优化模拟与减排潜力精准测算的核心能力，该成果可广泛应用于省市县各级行政区域、流域管理机构、大型工业园区、城乡供排水企业的碳排放管控、低碳规划编制、节水降碳技改方案优化，以及绿色水务项目的效益评估与投融资决策。

基于独立分控离子风推进器的多自由度微型飞行器

成果完成人	陶倩楠	职称	讲师	所在单位	集成电路科学与工程学院（产教融合学院）
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	飞行器	
所属学科方向	一级学科	航空、航天科学技术		二级学科	航空器结构与设计
应用行业	微小型无人机				

成果概述

近年来，微小型飞行器在环境监测、应急救援等任务中得到广泛应用，对推进系统的小型化、高推力密度、低噪声与环保性提出迫切需求。传统旋翼推进机械复杂，在缩小至厘米尺度时面临严峻挑战。离子风推进技术凭借无运动部件、静音运行、无化学污染等特性，展现出独特潜力，但长期受困于推力密度低、可控性差，限制了其实际应用。

团队结合多物理场耦合仿真，设计、优化、开发了一种基于针-板电极构型的多单元离子风推进系统。研发的离子风推进器产生的离子风流束集中，既有效提升了推重比，还有效降低了多推进器在微机器人狭小空间内的气流干扰，为系统的集成与独立控制提供了关键优势。在此基础上设计、制造的由多个优化引擎驱动的微飞行器原型，通过独立控制各单元，可实现飞行器的稳定起飞与飞行姿态调节，从而验证了离子风推进在多自由度微小型无人机领域有广泛的应用前景。

关键技术/创新要点

研究团队首先通过多物理场耦合仿真，以增强推力为目标，对离子风推进器的结构进行了优化设计，接下来在实验中对推力性能与流场特性进行了验证。优化后单个重量仅为18.1mg的离子风推进器可产生0.66mN的推力，其单位体积推力达到261N/m^3，推重比达到3.7。推重比的提高，有助于在飞行器上搭载更多电子设备(如陀螺仪、力传感器)，提升离子风飞行器的集成性、多功能性。

基于独立分控离子风推进器的多自由度驱动技术，团队进一步完成了利用多单元离子风推进系统实现飞行和调姿的微机器人样机研制。结合仿真与试验，研究团队验证了将发射极单侧接地或改变发射级电压可有效改变该侧的推力输出，同时不影响其他引擎的推力生成。这一特性使得微型机器人无需复杂的电磁屏蔽设计，即可通过对各引擎推力的独立调控，实现多自由度运动。本研究是基于离子风的微型飞行器实现可控飞行的关键突破。

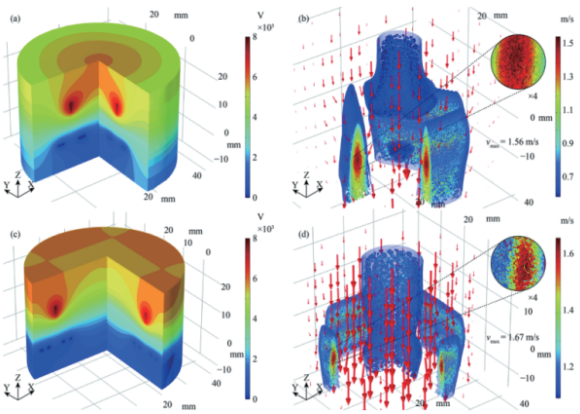


图1 微型离子风飞行器仿真论证：三推进器飞行器(a)电场云图，(b)流场云图；四推进器飞行器(c)电场云图，(d)流场云图

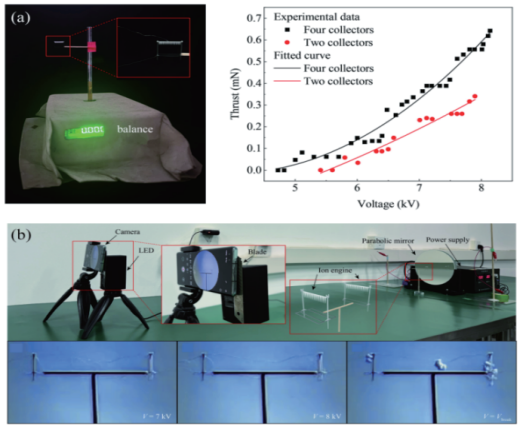


图2 微型离子风推进器(a)推力及(b)流场验证试验

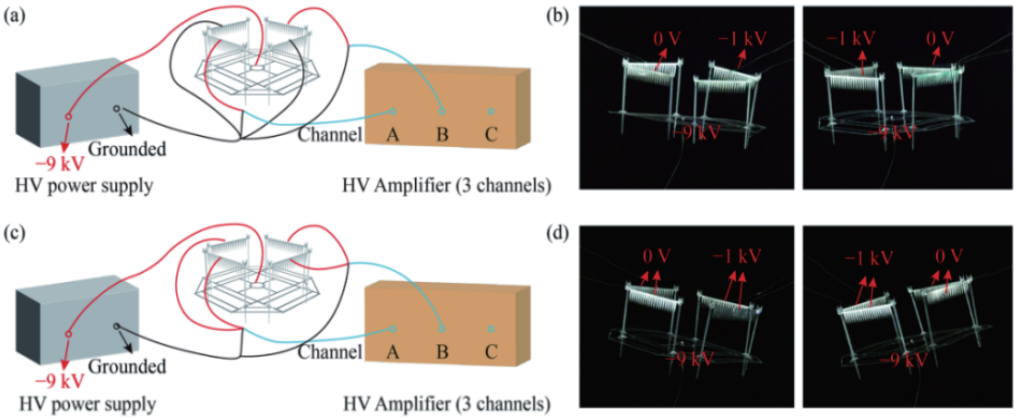


图3 微型离子风飞行器姿态调整验证试验:单自由度调姿试验
(a) 示意图, (b) 试验结果;双自由度调姿试验(c) 示意图, (d) 试验结果

技术指标/优势

与传统的旋翼推进系统相比, 离子风推进系统无需依赖高速旋转的机械部件, 从根本上避免了摩擦损耗与结构复杂性, 因而更易于实现小型化集成。同时, 其静音运行、无化学污染的特性, 使其在对隐蔽性与环境友好性要求较高的应用场景中具有显著优势。

应用领域和市场前景

该成果凭借其高推重比所带来的有效载荷能力, 可集成图像传感器、光纤光栅传感器等多种功能模块, 具备针对不同任务需求的灵活适配能力, 应用领域广泛。在民用市场方面, 基础设施检测市场规模持续扩大, 电力巡检、管道探伤、桥梁检测等领域对能够进入狭小空间的微型飞行器需求迫切;末端配送领域对低噪声、低扰动的配送方案关注度日益提升, 静音飞行特性使其在居民区、医院等敏感区域具备独特优势。在灾害救援与环境监测领域, 对能够在复杂幽闭环境中执行任务的无人平台需求稳定增长。此外, 离子风飞行器在深空探测方向也是一类具有发展前景的前沿技术。

基于大模型与区块链的低空智联网系统

成果完成人	徐鹤	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	物联网应用软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	人工智能
应用行业	低空经济（通用航空）、智慧城市				
核心专利号	ZL202110024474.X、ZL202111182979.5、ZL202410666337.X				

成果概述

低空经济推动无人机物流快速发展，但黑飞管控难、数据易篡改、弱网作业难、落地门槛高四大痛点突出，传统无人机控制平台算力不足、功能单一，限制了低空末端配送规模化落地，因此研发高鲁棒性、易操作的低空协同控制技术至关重要。

本成果实现了一种基于国产AI算力为核心的高鲁棒性低空智联网系统平台。该平台采用“云端大脑+边缘小脑”分布式算力架构，依托华为Atlas 200I A2开发板，突破弱网无网环境下无人机自主飞行的技术瓶颈；在YOLO11基础上独创BiSD-YOLO目标检测算法，保障复杂空域作业的安全性与精准度；融合区块链技术构建EPOH哈希链，通过SHA-256加密算法实现数据防篡改追溯，从根源解决行业核心痛点。平台基于多模态交互体验，降低落地门槛，已完成工程化集成，在低空末端配送领域具有广泛的应用前景。

关键技术/创新要点

作为低空物流智能创新技术，本成果以区块链、大模型、边缘计算三大前沿技术深度融合为核心，进行了全栈国产化适配，具有精准高效、安全可控、场景适配性强且门槛低的显著优势。相较于传统无人机物流系统，彻底突破了其技术局限，在精准度、安全性、自主可控性上实现质的提升，同时规避核心技术“卡脖子”风险，打破专业操控壁垒，适配各类复杂低空作业场景。

团队构建“云-边-端”异构协同算力架构，云端统筹调度、边缘端独立执行，解决“算力孤岛”问题，保障弱网无网环境下稳定飞行；在YOLO11基础上独创BiSD-YOLO算法，大幅提升小目标识别准确率至94.2%，为飞行安全保驾护航；融合多模态交互技术，实现语音、文字、手势操控，降低无人机行业门槛；将区块链存证技术下沉至边缘节点，通过加密算法实现飞行数据可追溯，解决低空系统安全问题。

同时，采用“全局—局部”双层路径规划架构，融合A*与DWA算法，实现三维空间精准规划，规划成功率达98%，避障响应快、实时性高。此外，成果基于华为Atlas 200I DK A2开发板与昇腾310B处理器，软硬件核心组件国产化率100%，为无人机物流普及提供全链路解决方案。

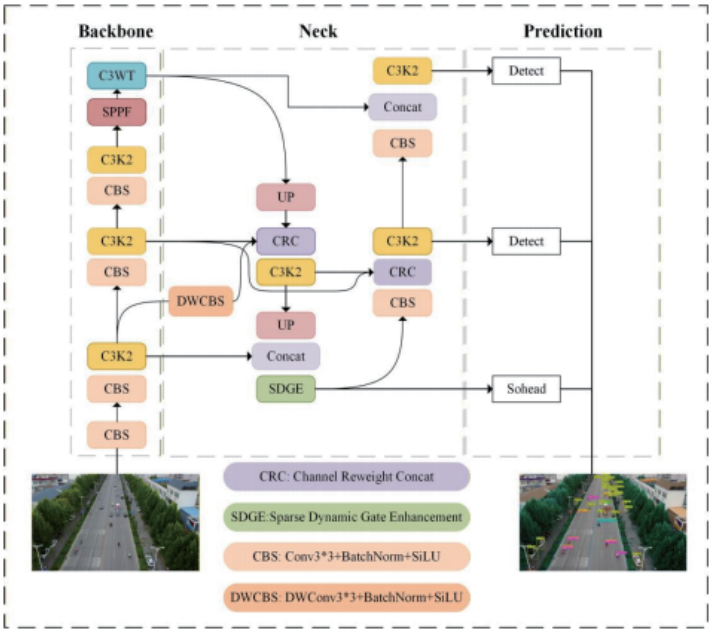


图1 BiSD-YOLO 目标检测算法

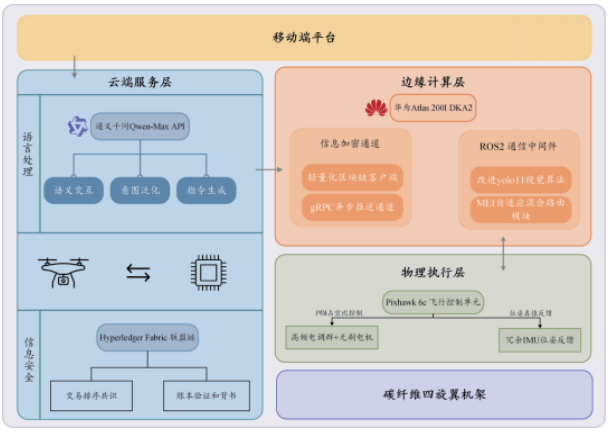


图2 产品架构图



图3 无人机硬件展示图

技术指标/优势

（一）核心技术指标

目标检测领域：BiSD-YOLO算法目标检测准确率达94.2%，较传统YOLO系列算法提升15%以上，可实现动态增强、频域提取、多尺度融合及实时跟踪；交互识别领域：MEI自适应混合路由算法单样本推理延迟≤500ms，静态与动态行为分类精准；数据存证领域：EPOH链式哈希存证机制上链延迟≤3秒，实现数据不可篡改追溯；硬件适配领域：基于华为Atlas 200I DK A2开发板，核心组件国产化率100%，适配国产飞控系统兼容性达98%；多模态交互领域：语义解析准确率≥97%，手势识别准确率≥92%，单样本推理延迟≤500ms。

（二）同类技术/产品对比优势

技术层面，融合区块链、大模型、边缘计算三大前沿技术，构建“云-边-端”异构协同架构，突破单一技术局限，核心算法性能优于传统算法；国产化层面，实现从硬件模组到软件系统全栈国产化适配，规避核心技术“卡脖子”风险，契合国家战略导向；应用层面，多模态交互体系大幅降低行业准入门槛，解决专业飞手短缺痛点，同时高鲁棒性架构可适配弱网、无网等复杂空域作业场景，技术适配性与实用性突出。

（三）知识产权与学术成果

拥有2 项软件著作权、3项发明专利，核心算法均为自主研发。

应用领域和市场前景

该成果可广泛应用于低空物流、低空安防、应急救援等领域，为相关场景提供高效技术支撑，如：低空末端配送中，可实现弱网无网环境下无人机自主飞行、精准投递，解决物流“最后一公里”难题；低空安防巡检中，通过高精度目标检测与数据存证，实现黑飞管控与异常情况追溯；应急救援中，可快速响应并完成物资投送、现场勘察等任务。随着低空经济持续升温，相关领域对高鲁棒性、自主可控的低空协同控制技术需求迫切，该成果凭借全栈国产化、多场景适配等优势，市场应用空间广阔，有望推动低空作业向规范化、普及化发展，具有良好的市场前景与应用价值。

无人机一网统飞管理系统

成果完成人	徐鹤	职称	教授	所在单位	计算机学院、软件学院、网络空间安全学院
技术成熟度	原理样机		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	软件		高技术领域（三级）	云计算与移动互联网软件	
所属学科方向	一级学科	计算机科学技术		二级学科	计算机软件
应用行业	智慧城市、低空管理				
核心专利号	ZL202410666337.X				

成果概述

随着智慧城市建设持续推进和低空经济加快发展，无人机在城市巡检、应急处置、生态环境监管等领域的应用需求日益增长。然而，当前相关系统在应用中普遍存在空域管理相对分散、飞行调度协同不足、视频感知与业务处置衔接不够紧密等问题，难以全面满足城市级低空治理对实时响应、多方协同和智能化处置的综合要求。

针对上述问题，本团队研发了无人机一网统飞管理系统。该系统构建了一个集任务受理、空域与航线规划、无人机及站点资源管理、流媒体接入、智能识别分析、告警联动处置和指挥大屏展示于一体的综合应用平台，形成了从任务下达、飞行执行、目标识别、告警预警到闭环处置的完整技术链路。项目已完成系统原型研发并开展了多场景验证，能够有效支撑火情、垃圾堆放、水污染等典型目标的识别及应急调度应用。

关键技术/创新要点

本成果的关键支撑在于构建了一套面向低空治理场景的全流程协同管控机制。与传统的无人机管理系统将任务、设备和监控功能简单拼接的做法不同，本系统紧扣城市级低空治理的实际业务流程，将任务流转、资源调度、飞行执行与处置反馈统一纳入同一套管理体系中。通过打通前端感知与后端决策之间的数据链路，系统确保了各环节状态实时可见、飞行过程全程可追踪、处置结果随时可回溯。这一机制既提升了无人机巡检任务的组织效率与资源利用率，也增强了多部门协同、分区域管理和连续运行的综合能力，使系统功能更加贴近真实的低空治理需求。

在这一机制基础上，系统进一步将空域规划、视频接入、智能识别与态势展示等功能整合到同一平台中。管理人员既能够从整体上掌握区域任务分布与飞行状态，也可以依据识别结果及时启动告警处置与指挥调度。在运行层面，平台能够结合任务需求与资源分布情况自动生成航线方案，在飞行过程中接入机载与地面视频流，并对火情、垃圾、水污染等目标进行实时识别与定位。识别结果可同步反馈至告警处置模块与指挥展示界面，形成发现、研判、调度、处置、复查的完整工作闭环。这一设计有效减少了因信息分散和人工切换带来的响应延迟，有助于提升低空治理行动的时效性与准确性。

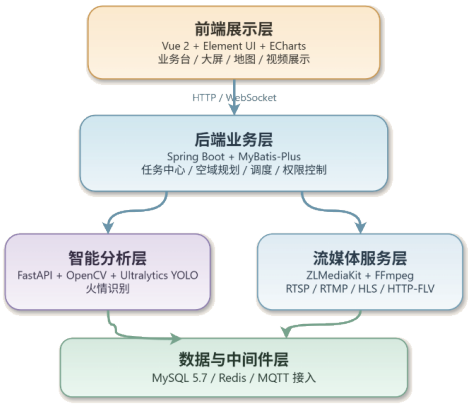


图1 无人机一网统飞管理系统总体架构图

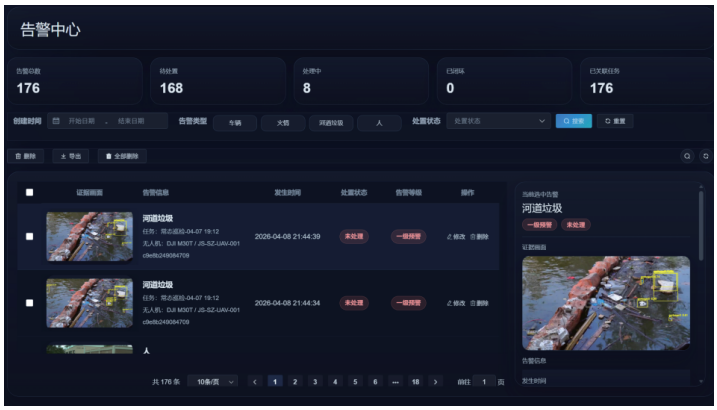


图2 系统告警中心示意图



图3 系统指挥大屏综合展示界面

技术指标/优势

与传统分散式管理方式相比，该成果实现了无人机任务管理、飞行监控、智能识别、告警处置和指挥展示的一体化集成，能够对任务执行全过程进行统一管理与动态跟踪。与市场上侧重单一功能的平台相比，本系统各模块之间的联动性更强、业务流程覆盖更完整、管理界面呈现更直观，在系统化解决低空治理问题上具有明显优势。

应用领域和市场前景

该成果主要面向无人机管理分散、调度混乱、信息不互通等问题，可应用于城市、区县、园区、景区、校园、港口、水域等不同尺度的低空管理场景，用于统一管理无人机、站点、任务、飞行过程和告警处置，提升一网统飞的协同调度和监管能力。随着低空经济、智慧城市和基层数字治理持续推进，这类面向统一接入、统一调度、统一监管的无人机管理平台具有较强的落地需求和应用前景。

一种变载四旋翼无人机容错控制方法

成果完成人	赵静	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	民航及通用航空运行保障技术	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	无人系统				
核心专利号	ZL202110538638.0				

成果概述

变载四旋翼无人机是一类携带负载工作的无人机，时变的负载会大大降低四旋翼飞控系统的稳定性和可靠性；外部干扰如风力的影响，以及飞行过程中高速旋转的电动机带来的突发性执行器故障，都会导致无人机偏离预定轨道，甚至发生坠毁的事故。内在的负载变化和外在的环境影响之间存在一定的耦合关系，给飞控系统的安全设计带来一定的困难。因此，提高飞行器执行任务的安全可靠性技术显得尤为重要。本团队自主研发一种变载四旋翼无人机容错控制技术，针对无人机在受到内部质量变化、外部扰动和执行器故障情况利用自适应非线性故障观测器精确地估计故障的时变信息，有效包容未知执行器故障对飞控系统的影响，从而保持飞行位置和姿态系统的稳定。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种变载四旋翼无人机容错控制方法，包括：建立变载四旋翼无人机非线性动力学模型；建立自适应质量估计算法和扰动估计算法；建立位置子系统的非奇异快速终端滑模面，设计位置子系统控制器；建立姿态故障模型；根据姿态故障模型建立自适应非线性故障观测器，得到故障估计值；根据故障估计值，在姿态故障模型基础上利用积分滑模建立姿态子系统控制器。本成果通过自适应质量估计机制，精确计算出四旋翼无人机在整体质量变化瞬间的实际值；通过外部扰动自适应机制，有效降低外部扰动对变载飞控系统的影响；利用自适应非线性故障观测器精确地估计故障的时变信息，有效包容未知执行器故障对飞控系统的影响。

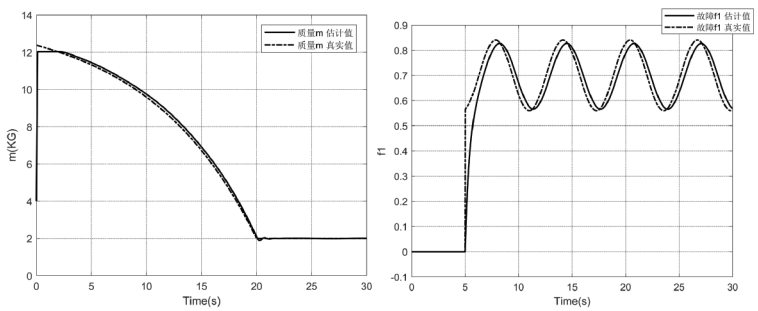


图1 该方案下的实时质量估计与系统故障估计

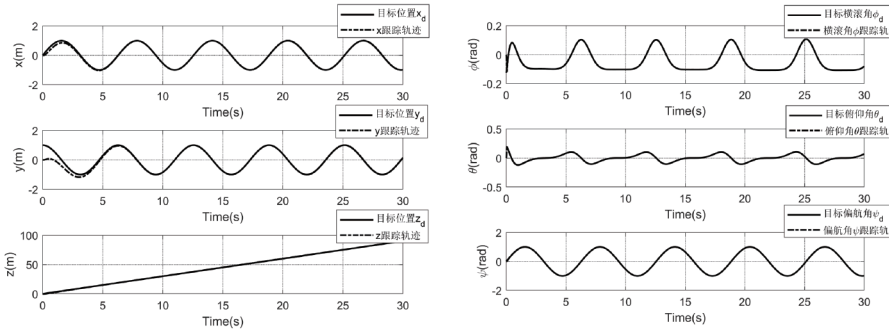


图2 该方案下的系统实时响应

技术指标/优势

与当前技术相比，四旋翼无人机受到质量变化的影响时，自适应质量估计机制能够在3s以内精确地估计出变化质量瞬间的实际值，并将估计的误差有效地控制在0.1KG左右，极大地降低了质量变化对系统的影响。

采用本实施例中设计的位置子系统控制器可以使系统分别在3s、4s和1s内，跟踪上x,y,z方向上的位置目标，保证了位置子系统的稳定性。

当姿态子系统受到内部质量变化及执行器多通道故障时，采用本成果中设计的姿态子系统控制器可以使系统在分别1s、0.5s和0.1s内，跟踪上姿态系统预设目标，保证了姿态子系统的稳定性。

应用领域和市场前景

本团队自主研发一种变载四旋翼无人机容错控制技术，针对无人机在受到内部质量变化、外部扰动和执行器故障情况利用自适应非线性故障观测器精确地估计故障的时变信息，有效包容未知执行器故障对飞控系统的影响，从而保持飞行位置和姿态系统的稳定。此技术可以被广泛应用于农业植保、环境监测、空中物流、高空救援等领域。

一种多四旋翼无人机的固定时间姿态一致性控制方法

成果完成人	周映江	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	飞行器	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	军事侦察、灾害救灾				
核心专利号	CN121115826A				

成果概述

针对现有多机姿态一致性控制中收敛时间依赖初始状态、响应时效性不足、拓扑适应性差等痛点，提出一种多四旋翼无人机固定时间姿态一致性控制方法。通过建立理想姿态模型，构建包含领导者与跟随者的多无人机系统，设计固定时间状态观测器实现领导者姿态的实时估计，并基于此生成固定时间控制律，使各无人机在固定的时间内完成姿态同步收敛。这一方案突破了收敛时间与初始状态绑定、控制架构依赖全局通信的技术问题，显著提升了多级协同的响应时效性与拓扑鲁棒性，有效满足复杂动态环境下无人机集群高精度、高稳定协同作业的实际工程需求。

关键技术/创新要点

本成果属于多智能体控制领域，是一种多四旋翼无人机的固定时间姿态一致性控制方法，包括以下步骤：建立四旋翼无人机的理想姿态模型；基于理想姿态模型，构建包括领导者和多个跟随者的多无人机系统；基于通信拓扑结构和多无人机系统，设计固定时间状态观测器，跟随者实时估计领导者的姿态；设计固定时间控制器，根据跟随者对领导者姿态的估计结果，通过构建固定时间控制律生成控制指令；通过控制指令调节跟随者的姿态，使各四旋翼无人机在固定时间内达到姿态一致性；有效解决了现有技术中存在着收敛时间依赖初始状态而无法保证响应时效性，且控制架构过度依赖全局通信网络而缺乏拓扑适应性的问题。

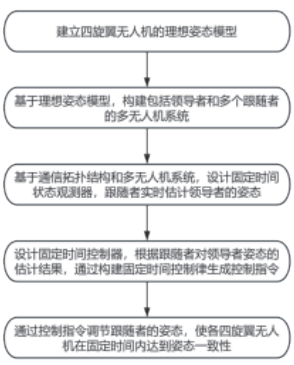


图1 操作流程



图2 四旋翼无人机示意图

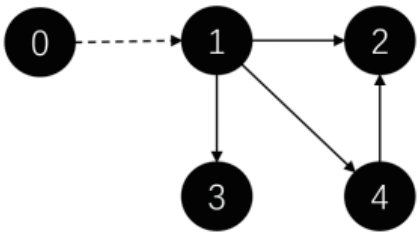


图3 通信拓扑示意图

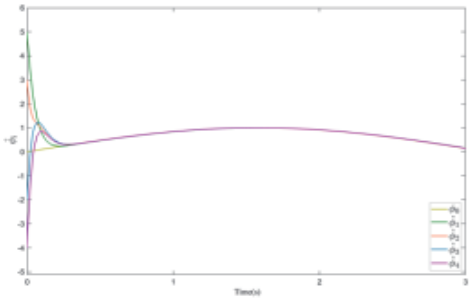


图4 状态观测器位置观测曲线

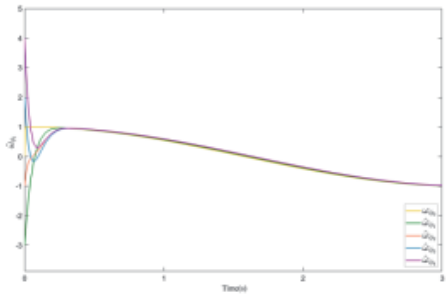


图5 状态观测器速度观测曲线

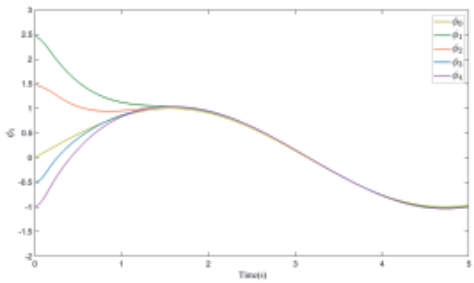


图6 控制器作用下位置跟随曲线图

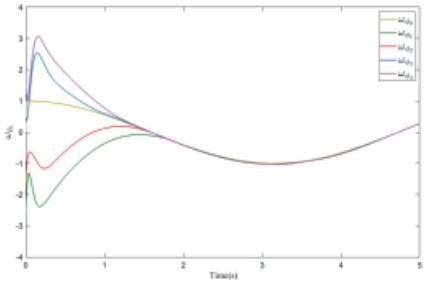


图7 控制器作用下速度跟随曲线图

技术指标/优势

(1)本成果提出的控制方法收敛时间不依赖于初始状态,保证控制响应的时效性与稳定性;

(2)本成果的控制架构无需全局通信网络,基于局部通信拓扑即可实现姿态协同控制;

(3)本成果依托固定时间状态观测器,跟随者可实时准确获取领导者姿态信息。

应用领域和市场前景

本成果属于多智能体协同控制与无人机集群作用领域,可广泛应用于电力巡检、应急救援、测绘勘探、物流运输、安防监控等多级协同作业场景。从市场前景看,当前工业级无人机正从单机作业向集群化、协同化方向演进,市场需求持续爆发。现有多机姿态协同技术普遍存在收敛时间依赖初始状态、响应时效性不足、拓扑适应性差等问题,难以满足复杂场景下的高可靠作业要求。本成果通过固定时间姿态一致性控制,突破了收敛时间与初始状态绑定、通信拓扑依赖全局网络的技术瓶颈,可适配动态通信拓扑与强实时性任务需求。在智慧电网、应急防灾、智慧城市等建设领域,该技术将成为无人机集群商业化落地的核心支撑,具备显著技术壁垒与差异化优势,市场应用潜力广阔,可有效提升多机协同作业效率与安全性,兼具良好经济效益与社会效益。

一种基于事件触发的多四旋翼无人机固定事件编队方法

成果完成人	周映江	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	飞行器	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	军事侦察、灾害救灾				
核心专利号	CN112631335				

成果概述

多四旋翼无人机系统是由多个具有独立自主能力的四旋翼无人机组成的编队，能够在大型、复杂的任务环境或空间中完成信息获取、处理以及自主控制与规划任务，在空间、时间、信息、资源和功能等方面具有分布性、互补性和冗余性的特点，能够以大幅度增强工作能力，提高工作效率，扩大功能与工作范围，增强系统的鲁棒性与容错性。对于多四旋翼无人机系统中的无人机需要采用协同控制方法，常见的协同控制方法包括领导跟随法、基于行为法、虚拟结构法、基于图论法、人工势场法等；协同体系结构分为集中式与分布式；集中式架构由于主无人机需要与所有的从机进行通信，对主无人机的工作能力与负载能力要求较高；分布式架构下，整个多无人机的通信拓扑可以使用有向图或者无向图进行描述，每个无人机仅仅与其相邻的无人机人进行通讯，获得局部目标信息，并依赖这些局部信息与本地信息依据自身智能自主地做出调整，更新自己接下来的行为动作，最终实现共同期望的任务目标。上述方法均需要高频的传感器采样和控制器值更新，会造成大量不必要的资源浪费，随着无人机个数的增加，时间驱动策略相应所需的通信带宽也会呈指数增加，巨大的网络负荷有可能会造成网络崩溃，以至于无人机失去控制乃至坠毁。

关键技术/创新要点

本成果提出了一种基于事件触发的多四旋翼无人机固定时间编队方法，属于多无人机协同控制技术领域，具体步骤包括：无人机系统建模、构建事件触发的触发条件、设 计事件触发位置子系统控制器、固定时间滑模姿态子系统控制器；本成果直接根据系统的状态误差决定控制器的频率，使系统在固定的时间内收敛到平衡点，使系统中无人机的位置和姿态在固定的时间内达到一致，实现协同运行，节约通讯资源，收敛速度快，计算负荷小。

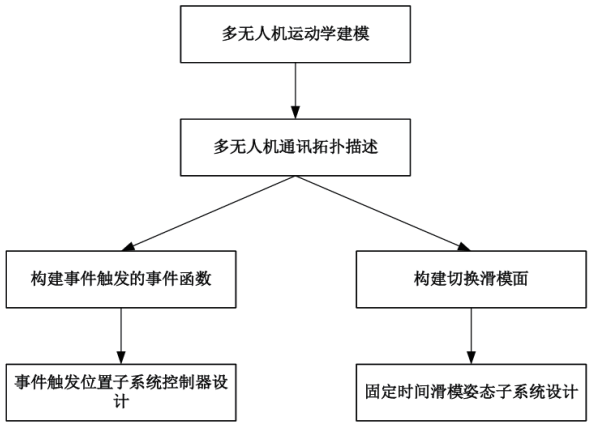


图1 操作流程

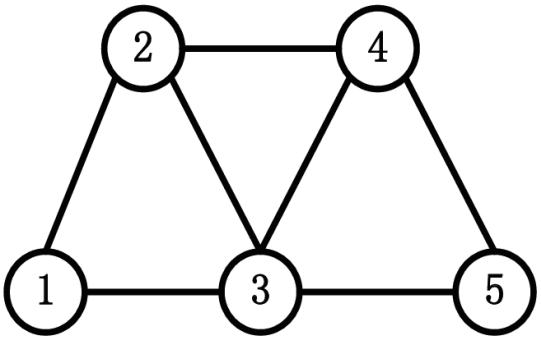


图2 通讯拓扑描述图

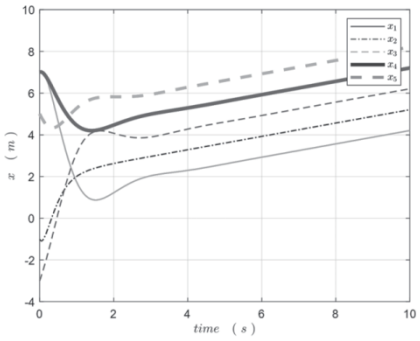


图3 多四旋翼无人机在x轴上运动轨迹示意图

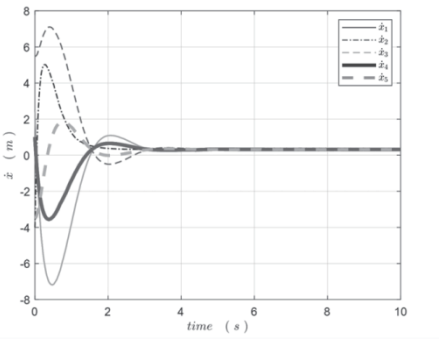


图4 多四旋翼无人机在x轴上运动速度示意图

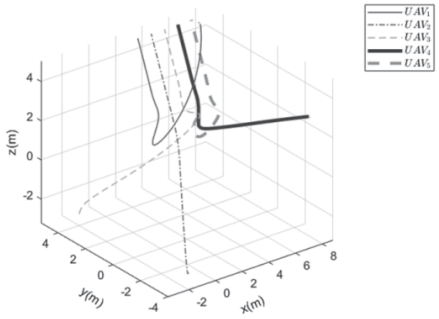


图5 多四旋翼无人机三维运动轨迹示意图

技术指标/优势

(1)本成果涉及一种无人机编队方法,尤其涉及一种基于事件触发的多四旋翼无人机固定事件编队方法。

(2)针对上述现有技术的缺陷,本发明提供一种通过非周期采样获取系统状 态信息的基于事件触发的多四旋翼无人机固定事件编队方法;

(3)直接根据系统的状态误差 决定控制器的频率,可以使系统中处于不同位置的无人机在固定的时间内位置和姿态统一,实现协同运行,能极大的节约通讯资源,收敛速度快,计算负荷小。

应用领域和市场前景

本成果涉多四旋翼无人机系统是由多个具有独立自主能力的四旋翼无人机组成的编队,基于事件触发的多四旋翼无人机固定事件编队方法,具有广泛的应用领域和巨大的市场前景。在军事侦察、环境监测、灾害救援、农业植保等多个领域,该技术都能发挥重要作用。

在军事侦察领域,该编队方法可快速响应突发事件,高效完成侦察任务;在环境监测中,无人机编队可实现对特定区域的精确监测和数据分析;在灾害救援中,无人机编队能够快速定位受灾区域,为救援行动提供有力支持;在农业植保领域,无人机编队可实现精准施药,提高作业效率。

随着无人机技术的不断发展,多无人机协同控制已成为行业发展的必然趋势。基于事件触发的固定事件编队方法,不仅提高了无人机协同控制的精度和效率,还降低了通信资源消耗和计算负荷,具有广阔的市场前景。

基于饱和受限情况下的无人机自适应跟踪控制算法

成果完成人	周映江	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	飞行器	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	目标跟踪、农业检测				
核心专利号	CN109884895				

成果概述

四旋翼无人机是一种具有六个自由度的垂直起降飞机，可以突破跑道限制并自由悬停。与其他无人机平台相比，它具有结构简单，稳定，超强的灵活性。四旋翼无人机广泛应用于战术侦察，航空摄影，电磁干扰，短途货运等领域。对四旋翼无人机的研究具有重要的现实意义，已成为国内外研究的热点之一。本发明基于全局稳定轨迹跟踪控制算法，提出了一种欠驱动四旋翼无人机控制模型。将四旋翼无人机系统将分为欠驱动位置子系统和姿态子系统。对于这样的双闭环控制系统，位置子系统控制器采用滑模控制方法设计。考虑到输入饱和约束的影响，姿态子系统采用自抗扰和自适应跟踪控制方法设计。通过这样的控制器设计，可以顺利跟踪四旋翼无人机系统的位置和姿态角。并且，双闭环控制系统也将具有全局稳定性。

关键技术/创新要点

本成果针对四旋翼无人机的控制问题，提出了一系列创新性的解决方案，充分考虑了无人机在实际飞行中的输入饱和受限情况。在控制策略上，本发明采用了双闭环的控制框架，内环子系统采用滑模控制策略实现四旋翼无人机的位置控制，外环子系统则采用自适应控制策略进行姿态控制。这种控制框架的设计，使得无人机的位置和姿态能够分别得到精确控制，实现了不同控制策略的优势互补，相较于传统的控制方法，更具创新性和广阔的应用前景。特别值得一提的是，本发明在姿态控制方面提出了自适应和非线性ESO控制方法，有效地应对了不可建模和无法估计的扰动，通过ESO进行补偿，从而保证了无人机姿态控制的稳定性。这种控制策略与位置控制形成双闭环，共同确保了无人机的稳定性控制要求。此外，本发明还针对无人机的输入饱和受限，以及位置和姿态的六个自由度，提出了相应的滑模控制和自适应控制策略。在姿态子系统中，通过选取虚拟控制器和辅助方程，成功实现了对四旋翼无人机的全面控制。最终，通过仿真验证，本发明的正确性和有效性得到了充分证明，显示出其独特的创新性和实际应用价值。

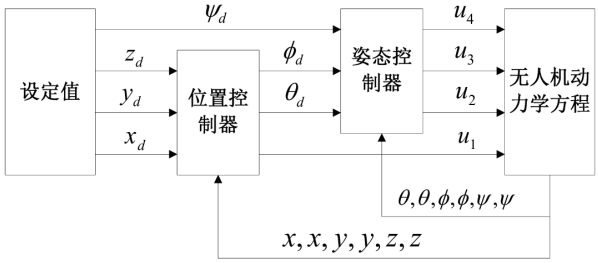


图1 控制算法示意图

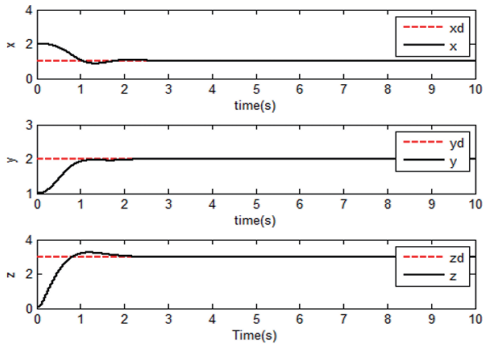


图2 位置跟踪结果图

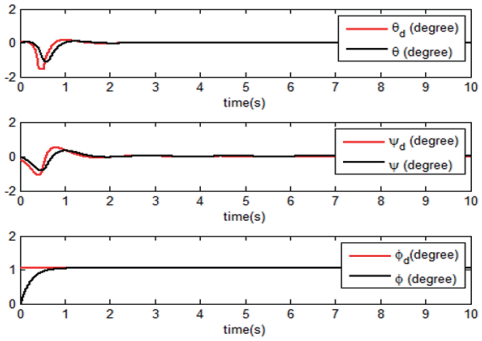


图3 带有输入饱和控制器的姿态角稳定性结果图

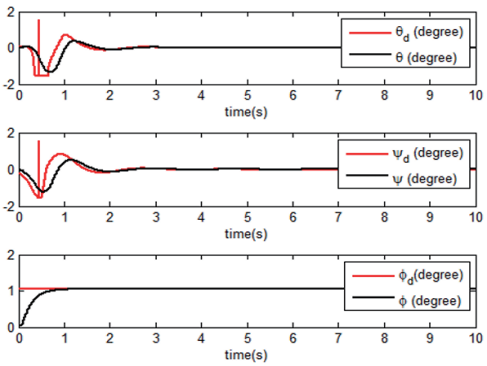


图4 没有输入饱和控制器对姿态角稳定性结果图

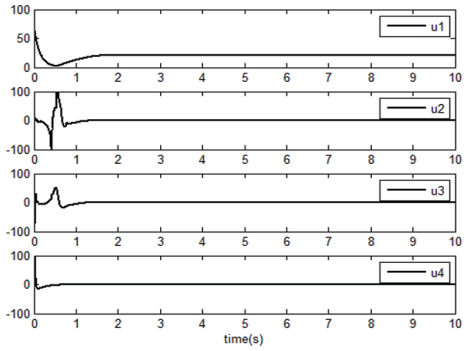


图5 控制输入结果图

技术指标/优势

(1)本成果涉及一种无人机控制算法,具体的说是一种四旋翼无人机跟踪控制算法,属于工业自动控制技术领域;

(2)本成果的进一步限定,其对于四旋翼无人机在获得虚拟输入之后,还得计算实际升程控制输入并将其传递到姿态子系统中间命令信号;

(3)本成果提出了一类具有输入约束的不确定MIMO非线性系统的自适应跟踪控制。引入辅助设计系统来分析输入约束的影响,并将其状态用于自适应跟踪控制设计。

应用领域和市场前景

在农业领域,本成果涉及四旋翼无人机跟踪算法可以应用于精准农业作业,如农作物监测、病虫害跟踪等。无人机搭载相关传感器,通过自适应跟踪控制算法,能够实时跟踪作物的生长状况,及时发现病虫害,为农民提供决策支持,提高农业产量和质量。

在环保领域,该算法可用于野生动物保护和环境监测。无人机能够利用自适应跟踪控制算法,精准地跟踪特定动物,记录其行为轨迹,为野生动物研究提供数据支持。同时,无人机还可用于大气、水质等环境要素的实时监测,及时跟踪污染源头,为环保工作提供重要依据。

在安防领域,该算法可以应用于目标跟踪和监控。无人机通过搭载高清摄像头和自适应跟踪控制算法,能够实现对特定目标的持续跟踪和监控,为公安、消防等部门提供实时情报,提高应急响应能力。

基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制方法

成果完成人	周映江	职称	副教授	所在单位	自动化学院
技术成熟度	工程样机		高技术领域（一级）	航空航天	
高技术领域（二级）	航空技术		高技术领域（三级）	飞行器	
所属学科方向	一级学科	信息科学与系统科学		二级学科	控制理论
应用行业	智慧农业、灾害救灾				
核心专利号	CN111273688				

成果概述

四旋翼无人机具有尺寸小、速度快、可垂直升降、机动性强等优势，在军事、农业、消防电力等领域都有很好的应用。多无人机组成编队协同作业，可弥补单个无人机荷载有限的缺陷，极大提高四旋翼无人机的任务能力。但传统一致性编队控制算法随着无人机编队规模增大，无人机间通讯量呈指数上升，亟需一种新的控制算法，节约通讯资源且能实现四旋翼无人机的一致性编队控制。相比于传统周期采样控制，基于事件触发的控制更加的灵活且智能，控制信息的传输和更新仅在定义的“事件”被触发之后。事件触发算法极大的节约了网络的带宽和通讯资源，非常适合用于大规模一致性编队控制。

关键技术/创新要点

本成果提出了基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制方法，属于自动驾驶及控制技术领域，该方法包括如下步骤：首先，假设编队中有n架参数相同的四旋翼无人机（n为大于1的正整数），对无人机进行受力分析，利用欧拉方程为每个四旋翼无人机建立位置子系统和姿态子系统的数学模型；然后，针对位置子系统，为每个无人机设计基于事件触发的虚拟控制器，并定义事件函数计算虚拟控制器值的更新时间；最后，将位置子系统的虚拟控制器视为实际控制器的输入目标，反解出每个无人机的设定姿态，并设计限定时间的姿态控制器，控制姿态角达到设定值。本发明实现了对四旋翼无人机编队的有效控制，并节约了无人机之间通讯量。

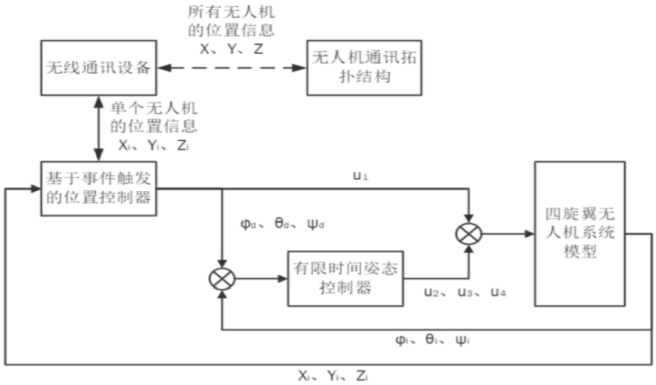


图1 单个无人机事件触发控制结构图

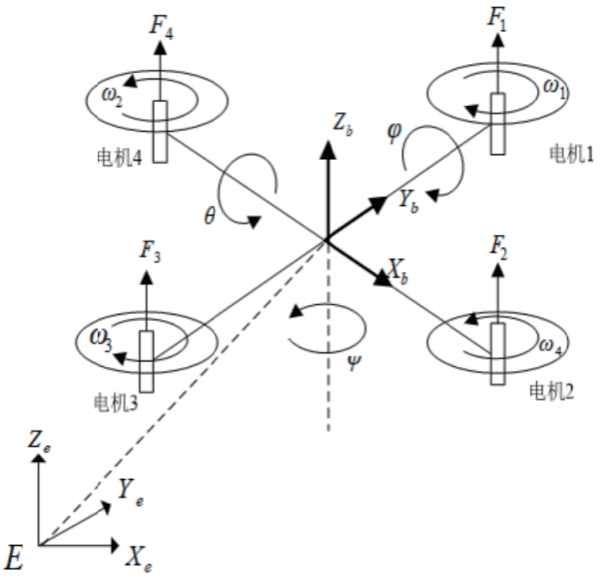


图2 四旋翼无人机状态量与坐标系的对应关系

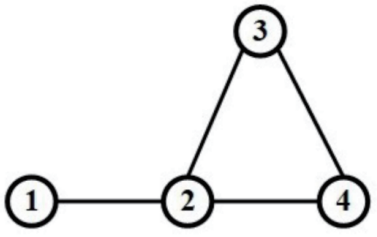


图3 四旋翼无人机之间的拓扑通讯结构图

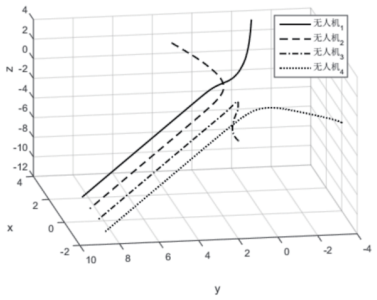


图4 基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制效果图

技术指标/优势

(1)本成果的目的在于提供基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队;

(2)针对上述现有技术的缺陷,本发明提供一种新的控制算法,以节约通讯资源且能实现四旋翼无人机的一致性;

(3)针对编队控制时无人机间通讯量巨大的问题,设计事件触发控制器控制四旋翼无人机群,弥补此方面的空缺。

应用领域和市场前景

本成果提出的基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制算法,在多个领域和场景中具有广泛的应用前景。在军事领域,该算法能够优化无人机集群的协同作战能力,减少通讯负担,提高作战效率。在民用领域,该算法可应用于航拍、环境监测、灾害救援等多个场景,实现无人机群的精准协同作业,提升工作效率。

在农业领域,基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制算法展现了巨大的应用潜力。随着智慧农业的快速发展,无人机在农田作业中扮演着日益重要的角色。然而,传统的无人机作业方式受限于固定的飞行轨迹和周期性的通讯,影响了作业效率和精度。本发明提出的控制算法通过引入事件触发机制,实现了无人机间的非周期通讯和状态更新,使无人机编队能够根据农田实际情况灵活调整作业策略。这不仅提高了作业效率和精准度,减少了农药浪费和环境污染,还能有效应对复杂环境因素,保持编队的一致性和稳定性。

因此,该成果具有广阔的市场前景和巨大的商业价值。预计未来几年内,随着无人机市场的不断扩大和应用领域的不断拓展,基于事件触发的四旋翼无人机一致性编队控制算法将得到更广泛的应用和推广,为无人机行业的发展注入新的活力。

基于事件的无人机编队间歇控制方法、系统、设备及介质

成果完成人	熊师洵	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	计算机产品及其网络应用技术		高技术领域（三级）	/	
所属学科方向	一级学科	信息与系统科学相关工程与技术	二级学科	/	
应用行业	航空航天领域				
核心专利号	ZL202411569035.7				

成果概述

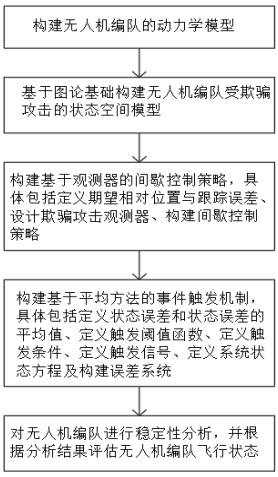
本成果提出了基于事件的无人机编队间歇控制方法、系统、设备及介质，涉及无人机控制技术领域。本成果包括：构建无人机编队的动力学模型；基于图论基础构建无人机编队受欺骗攻击的状态空间模型；构建基于观测器的间歇控制策略。本成果利用图论的数学工具，精细地构建了无人机编队的动力学模型和状态空间模型，在此基础上，设计了一种高效且经济的基于观测器的间歇控制策略，通过精确定义期望相对位置与跟踪误差，以及精心设计的欺骗攻击观测器，能够实时检测并补偿外部干扰，从而在保持控制性能的同时，大幅减少计算量和能源消耗，此外，构建的间歇控制策略通过智能地调整控制输入的频率，进一步优化了无人机编队的能源效率。

关键技术/创新要点

本成果提出了基于事件的无人机编队间歇控制方法、系统、设备及介质，涉及无人机控制技术领域，旨在解决现有技术中无人机编队在遭受欺骗攻击时控制效率低、能耗高的问题。

本成果的关键技术包括三个方面：首先，构建无人机编队的动力学模型，准确描述各无人机的运动特性；其次，基于图论基础构建无人机编队受欺骗攻击的状态空间模型，将通信网络拓扑结构与攻击影响进行数学化表征；最后，设计基于观测器的间歇控制策略，实现对欺骗攻击的实时检测与有效补偿。

本成果的创新点在于：利用图论的数学工具，精细化构建了无人机编队的动力学模型和状态空间模型，为后续控制策略的设计奠定了坚实基础。在此基础上，设计了一种高效且经济的基于观测器的间歇控制策略，通过精确定义期望相对位置与跟踪误差，并引入精心设计的欺骗攻击观测器，实现了对外部干扰的实时检测与动态补偿。这种设计不仅保证了编队控制的性能指标，还大幅减少了计算资源的占用和能源消耗。此外，该间歇控制策略通过智能调整控制输入的频率，在维持编队稳定性的同时，进一步优化了无人机编队的整体能源效率，显著提升了系统的实用性和经济性。主要结构及流程图如下图所示：



技术指标/优势

1.更少的计算资源：相比同类基于模型预测控制的方法，本技术的计算复杂度降低50%以上，可在低成本嵌入式平台上运行。

2.更好的可扩展性：基于图论的建模方法使本技术易于扩展至大规模编队，而传统方法随着无人机数量增加会出现“维数灾”问题。

3.更强的鲁棒性：在通信受限、GPS信号弱等恶劣环境下，本技术仍能保持编队稳定，而同类方法容易出现编队发散。

应用领域和市场前景

本成果主要应用于无人机集群协同控制、智能巡检、应急救援、军事侦察、物流配送等领域，特别适用于电力巡检（多机协同完成输电线路巡检）、应急救援（灾区复杂环境下协同搜索救援）、军事侦察（对抗环境中识别抵御欺骗攻击）、智慧物流（城市低空多机协同配送）以及农业植保（大规模农田编队作业）等对通信安全和控制精度要求高的场景。

随着低空经济的快速发展，无人机编队协同控制技术市场需求持续增长。本成果相比传统技术具有更强的抗攻击能力、更低的能源消耗和更好的可扩展性，在工业巡检、军事应用、物流配送等高价值领域具有广阔的应用前景。同时，本技术还可延伸至地面机器人编队、水下航行器协同等领域，经济和社会效益显著。

高精度无源测向与定位

成果完成人	吴娜	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	其他	
所属学科方向	一级学科	工程与技术科学基础学科		二级学科	/
应用行业	电子对抗、低空经济				
核心专利号	2023107120022				

成果概述

无源测向与定位技术凭借隐蔽性强、无需主动辐射信号、抗干扰能力突出的特性，是军事电磁态势感知、应急救援信号溯源、低空经济反无人机等领域的核心支撑技术。随着电磁环境日趋复杂，传统技术面临多信号源分辨能力弱、低信噪比下精度骤降等瓶颈，高性能技术体系突破成为行业共性需求。

当前已构建多维度融合技术体系，核心包括基于MUSIC、ESPRIT算法的超分辨空间谱测向方案，TDOA/DOA多参数联合定位框架，AI辅助误差校正、单/多站协同观测等路径，系统性解决了相位模糊、系统误差、复杂环境干扰等痛点。

关键技术/创新要点

针对传统无源定位“测向-定位两步法误差累积、复杂环境自适应校正能力不足”两大核心痛点，分别开展基于空间谱估计的直接定位算法与数据-模型混合驱动的误差校正方法研究。基于空间谱估计的直接定位算法摒弃了传统方案先单站测向、再多站交叉定位的分步流程，将所有观测站接收的原始信号直接统一做高维度空间谱估计，一步解算得到目标位置，避免了由于分步处理带来的误差积累问题，可同时实现对多个目标的定位，定位精度较传统方案提升25%以上。设计并开发了基于空间谱估计的直接定位算法分析平台，可有效提高方案论证效率。

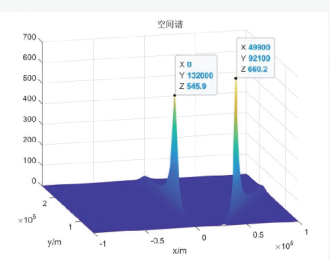


图1 直接定位空间谱图

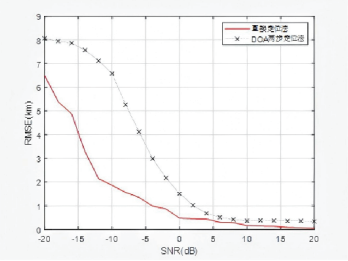


图2 定位RMSE随信噪比的变化

数据-模型混合驱动的误差校正方法将数据驱动与模型驱动结合，在保留了传统算法架构可解释性的基础上，利用数据驱动方法恢复导向矢量与阵列模型的匹配度，恢复噪声子空间与信号子空间之间的正交性，突破了传统算法对先验模型的强依赖。

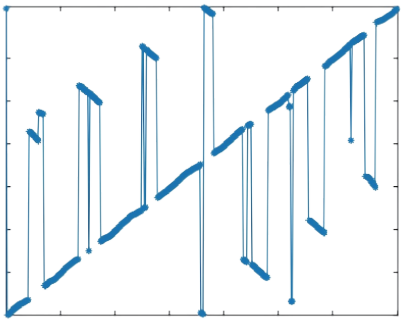


图3 未采用校准方法时的测向结果

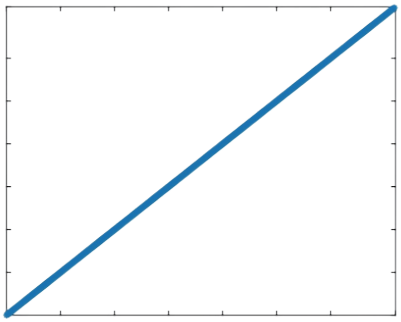


图4 校正后的测向结果

技术指标/优势

直接定位算法定位精度优于5%R, 数据-模型混合驱动测向算法可同时对多目标进行探测, 测向精度优于 1.5°。

专利:一种适用多站无源定位分析的阵列信号模拟方法及系统, 2023107120022。

应用领域和市场前景

在国防领域, 该成果可应用于战场隐蔽电磁态势感知、敌方辐射源定位、无人机集群协同侦测等场景;在低空经济领域, 该成果可应用于低空安防中“黑飞”无人机无源侦测等场景。

基于通感算控一体化的低空智联网协同调度技术

成果完成人	赵海涛	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	应用方案		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络、物联网	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信与信息系统
应用行业	城市级低空数智服务、低空重大应急保障				
核心专利号	ZL2024113389793				

成果概述

面向大规模、高动态的低空数字经济发展需求，无人机集群在复杂空域中面临的“通信干扰杂、感知协同难、算力调配散、控制决策迟”等核心挑战，传统方法难以实现多资源一体化和多智能体协同的全局最优调度，限制了低空智联网的服务可靠性与规模化应用。针对上述问题，本团队自主研发并构建了基于通感算控一体化的低空智联网协同调度技术体系，旨在突破通感算控分立导致的低空智联网系统效能瓶颈。

本成果综合运用图神经网络、分割联邦学习和多智能体强化学习技术等，通过构建统一的“感知-通信-计算-控制”耦合模型与分布式智能优化框架，实现低空智联网四大核心能力的深度融合。首先，利用动态图模型对低空网络拓扑与任务依赖关系进行统一表征，实现环境感知信息的高效协同采集与稳定回传。其次，设计面向混合动作空间的联合优化算法，对无人机的轨迹、通信链路、计算任务与感知负载进行毫秒级一体化调度。最后，引入隐私保护的分层联邦学习机制，使系统能在保障数据安全的前提下，利用分布式数据持续优化调度策略。本技术为构建自适应、高可靠、可进化的低空智联网提供了完整的系统级解决方案。

关键技术/创新要点

· 低空动态超图建模与协同感知调度技术：创新地将无人机间的时空关联、任务逻辑与通信链路统一抽象为动态超图模型。利用图神经网络在线学习网络的高阶耦合特征，精准刻画部分可观测环境下的集群状态。在此基础上，设计以最小化全局信息年龄和任务延迟为目标的分布式强化学习策略，实现对无人机感知航迹与数据回传路径的联合实时优化，攻克了感知与通信资源在动态场景中难以协同调度的难题。

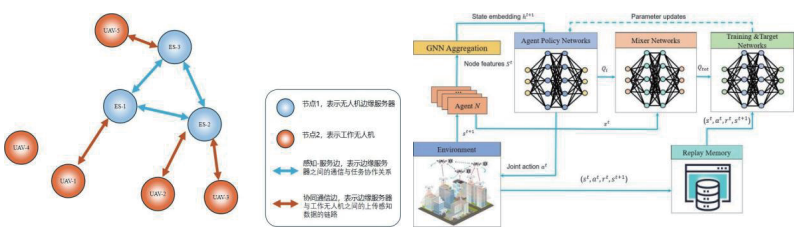


图1 融合图神经网络和多智能体强化学习的多无人机通算智控协同优化框架

· 通感算资源混合动作空间联合优化技术：针对调度决策中离散（如任务卸载目标选择）与连续（如飞行控制、功率分配）变量强耦合的挑战，提出了混合动作多智能体深度强化学习算法。该技术通过可微分松

弛方法处理离散决策，使其能与连续控制变量在同一策略网络中协同训练与输出。智能体（无人机）借此可实时生成“感知什么目标、计算什么任务、飞向什么位置、分配多少资源”的最优联合动作，实现了通感算控资源的无缝一体化调度，显著提升复杂任务完成效率。

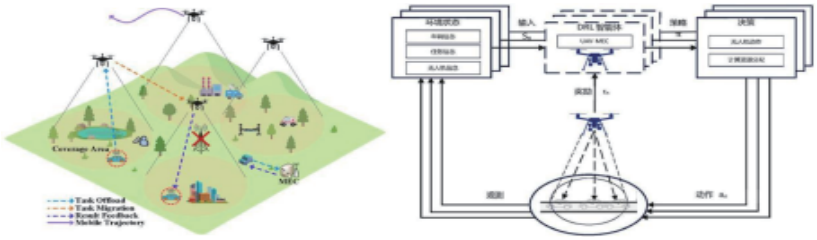


图2 面向复杂环境的无人机通感算控一体化调度模型与训练框架

· 支持隐私保护的分布式协同学习与调度进化技术：为在保护数据隐私的前提下实现调度策略的持续优化，构建了基于分层联邦学习与模型分割的协同进化框架。允许不同能力终端将计算负载动态卸载至无人机边缘节点，并仅在加密的模型更新层面进行安全聚合。通过联合优化模型分割点、终端-无人机匹配与边缘计算资源分配，在确保原始数据不离域的同时，高效完成全局调度模型的分布式训练与更新，使系统具备从实际运行数据中持续学习与自我进化的能力。

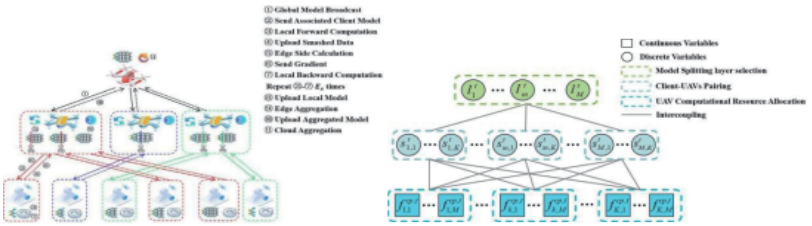


图3 基于分割联邦学习的分布式协同框架与资源调度模型

技术指标/优势

相较于传统分立或串行调度方案，本成果的一体化协同调度技术在关键性能上实现显著跃升：在协同效率上，可实现低空集群系统平均任务响应延迟降低35%以上，感知数据全局鲜度（AoI）提升超40%；在资源利用上，可实现通感算多维资源综合利用率提升超30%，并在同等任务负载下降低系统整体能耗约25%；在智能进化上，实现协同训练效率提升近1倍，终端侧参与成本（能耗、时延）降低超30%。该技术实现了从孤立控制到一体化协同调度的范式转变，在调度时效性、资源经济性与系统自主性方面具备明确优势。相关成果曾获中国通信学会、中国电子学会联合颁发的“2024年全国物联网技术与应用大会物联网领域十大科技进展”。

应用领域和市场前景

本技术核心应用于面向6G的低空数字经济与智慧社会治理领域。首要场景是城市级低空智联网服务，包括无人机物流即时配送、城市立体交通管控、大型场站与电网的自动巡检等，通过一体化调度提升运营效率与安全性。其次是重大应急保障场景，如在地质灾害、森林火灾等公网中断环境下，快速构建弹性应急通信与侦察网络，实现精准搜救与物资投送。此外，在数字乡村、国土测绘、环保监测等领域也具有广泛应用潜力。

随着低空空域管理改革与商业化进程加速，低空智联网作为新型基础设施，其运营调度系统是核心市场。本技术为解决规模化、商业化运营中的协同调度关键瓶颈提供了自主可控的系统方案，预计将在未来五年内催生数百亿规模的细分市场，社会与经济价值巨大。

多无人机辅助无线缓存网络时延优化方法、系统及设备

成果完成人	焦东来	职称	教授	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术	二级学科	通信技术	
应用行业	通信行业、智慧城市、物联网				
核心专利号	ZL202510300439.4				

成果概述

本成果针对传统无线通信网络因基站架构限制，在用户量和数据流量激增时出现的传输时延大、基站负担重等问题，研发多无人机辅助无线缓存网络时延优化技术。核心构建了基于无人机剩余电量比例的多无人机与地面基站协同缓存架构，引入信息年龄指标完善缓存更新机制，提出融合用户位置、活跃度与重要性的加权K-means无人机部署算法，并结合深度强化学习算法动态优化缓存放置策略。经仿真验证，该技术相比传统粒子群优化、随机缓存算法，能显著降低系统服务时延，且时间复杂度低，可有效解决单无人机缓存与电量受限、无人机部署不合理等问题，为无线缓存网络时延优化提供了高效解决方案，技术水平处于国内先进。

关键技术/创新要点

本成果围绕多无人机辅助无线缓存网络的时延优化核心需求，其创新性体现在以下几个核心方面。

首先，本成果创新打造基于无人机电量动态分配的空地协同缓存架构，让多架无人机按剩余电量比例分摊缓存任务，避免重复缓存浪费，并设计电量耗尽无缝替换机制，地面基站作为备用节点随时补位，解决单无人机缓存与电量受限导致的服务中断问题，主要系统流程图如图1所示。

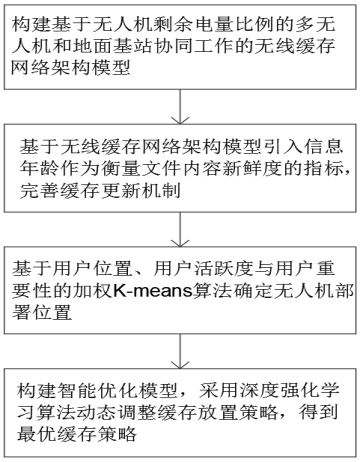


图1 多无人机辅助无线缓存网络时延优化方法流程图

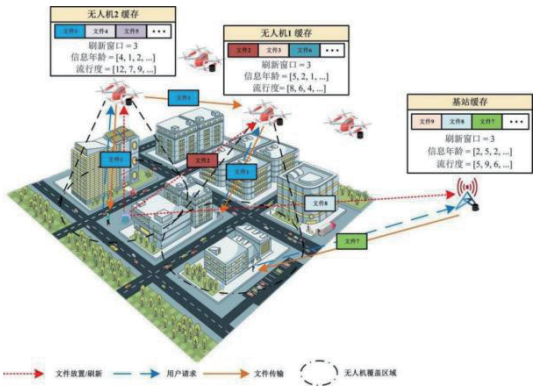


图2 多无人机与基站协同进行文件缓存刷新系统场景

其次，本成果首次将信息年龄引入缓存策略优化，建立全流程文件新鲜度管理机制，通过持续监控文件信息年龄与流行度从而及时进行缓存刷新，避免过时信息传递，如图2所示。

在技术实现方面，本成果引入加权K-means算法，融合用户位置、活跃度、重要性优化无人机部署，优先覆盖高需求用户；采用DQN深度强化学习模型构建智能决策系统，通过马尔可夫决策过程建模，实时分析网络状态动态调整缓存策略，在动态环境下快速输出最优决策，具体对比图如图3所示。

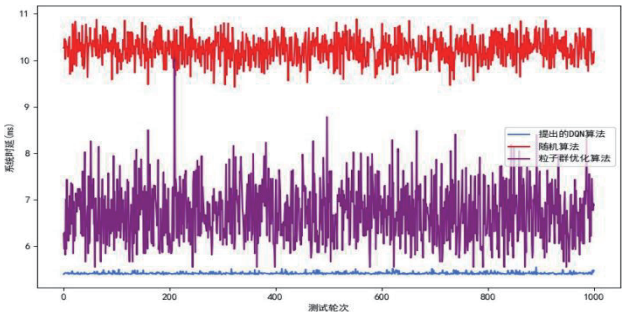


图3 DQN算法与与传统随机算法、粒子群优化算法性能对比

最后，本成果架构灵活适配城市高密度区、偏远信号薄弱区等多类环境，保障全场景高效内容分发，在提升系统效率、降低时延、适配复杂环境上优势显著。

技术指标/优势

本成果的技术指标：

1.时延性能指标：相比传统随机算法与粒子群优化算法，系统平均服务时延降低30%以上；相较于随机缓存算法，时延优化效果更为显著，在1000轮测试中始终保持低时延表现；

2.算法运行效率指标：训练后的DQN模型每轮次运行时间仅0.0338秒，较粒子群优化算法（16.4627秒）提速487倍，具备毫秒级的实时决策能力；

3.系统稳定性指标：无人机与基站端均满足M/M/1队列服务要求，文件请求到达率严格小于请求离开率，系统无拥塞、无服务中断，运行状态稳定。

4.资源利用率指标：满足“单文件唯一缓存节点”约束，每个文件仅缓存在无人机或基站中的一个节点，无重复缓存，提升资源利用率

本成果与同类技术或产品相比的优势：

1.创新的系统架构：首次将无人机剩余电量比例纳入协同缓存分配，结合基站备用机制，提升系统缓存资源利用率和服务连续性；

2.面向用户特征部署：加权K-means算法实现多维度用户特征的无人机部署，比传统位置部署算法更贴合实际服务需求；

3.动态缓存策略：深度强化学习算法实现缓存策略动态自适应调整，可应对文件请求、无人机电量的动态变化；

4.多约束协同优化：在缓存容量、文件新鲜度、系统稳定性等多重约束下实现时延最小化，适配复杂应用场景。

5.资源利用率高：通过“单文件唯一缓存节点”约束设计，从底层规避缓存资源重复分配问题，结合多无人机协同缓存机制，全网缓存资源整体利用率提升≥30%，大幅降低网络传输与存储开销。

应用领域和市场前景

本成果的应用领域覆盖智慧城市与大规模无线通信网络、远程监控与无人机物流、5G及未来新一代网络环境、边缘计算与空地一体化网络、大规模无人机部署与协同通信等多个核心场景，可有效解决各领域中无线网络数据传输延迟、基站负载过高、数据时效性不足、设备资源受限等痛点问题。

在市场前景方面，随着智慧城市建设提速、无人机应用规模化以及边缘计算与空地一体化网络的发展，行业对低时延、高时效的无线通信网络需求持续激增，而本专利技术凭借多无人机与基站协同的架构优势、精准的无人机部署策略、智能的动态缓存优化方法，能完美适配各领域的技术需求，填补了传统无线通信方案在动态优化、资源协同、时效保障上的市场空白。

一种无人机辅助联邦学习的方法

成果完成人	鲍楠	职称	讲师	所在单位	物联网学院
技术成熟度	基本原理		高技术领域（一级）	电子信息	
高技术领域（二级）	通信技术		高技术领域（三级）	通信网络技术	
所属学科方向	一级学科	电子与通信技术		二级学科	通信技术
应用行业	低空移动通信网络服务、无人机设计与制造、车联网设计与应用				
核心专利号	ZL202310924514.5				

成果概述

本成果提供一种无人机辅助联邦学习的方法，将车辆机动性、激励决策、迁移问题综合考虑。针对参与者不愿意无条件贡献他们的资源进行本地模型训练的问题，设计一种公平的激励机制和信任模型，以鼓励参与者上传可靠的模型更新，加入联邦学习任务。本成果针对车辆的移动性，提出了利用无人机服务迁移和无人机移动的双向机制来保证联邦学习任务的完整进行。同时考虑到用户车辆的参与意愿，本成果设计了基于博弈论的用户车辆激励方法，用户车辆和无人机能够制定相应决策，最大化各自的效用。

关键技术/创新要点

设置了模型相似度和参与时间作为评估车辆用户的两个参数，判断用户是否有足够的时间参与模型更新；提出通过声誉模型来筛选和激励那些对全局模型贡献最大的车辆用户。这样的系统不仅需要考虑用户的通信能力和计算资源，还需要考虑他们的移动模式和数据的多样性。通过建立一个综合评估模型，可以更精确地识别那些能够提供高质量数据和计算资源的车辆用户，从而优化联邦学习过程中的参与者选择。考虑资源成本、网络成本、迁移时间成本、跟随成本，根据预设开销阈值选择合适的机制来保证联邦学习任务的完整进行。通过声誉模型为参与模型更新的用户提供合适的奖励。提出一种激励机制鼓励适当的用户参与联邦学习，其博弈行为可以利用斯塔克伯格博弈来预测。

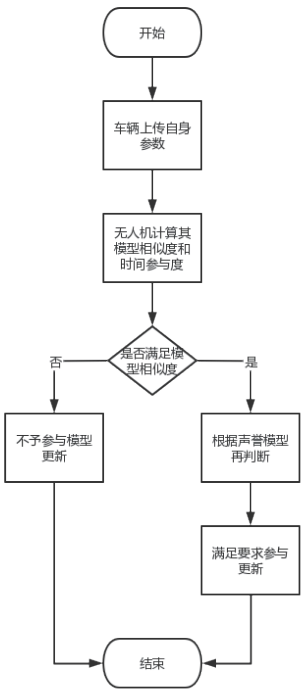


图1 无人机筛选车辆用户示意图

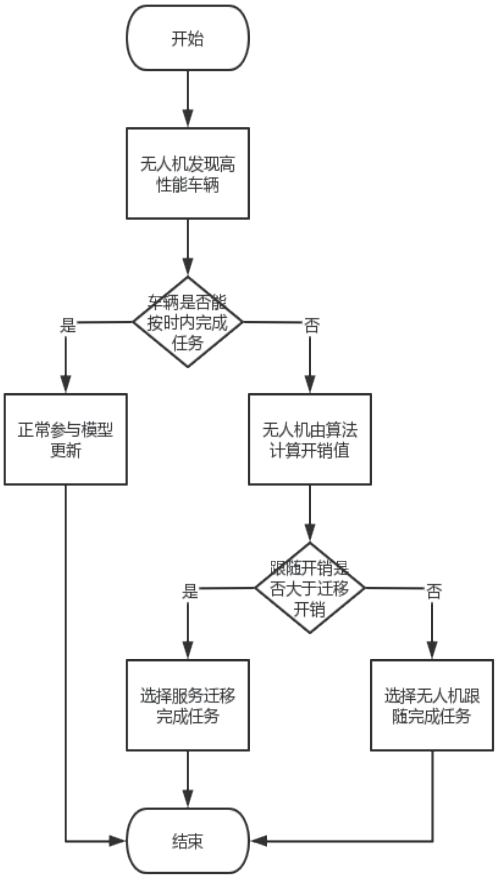


图2 无人机服务机制选择示意图

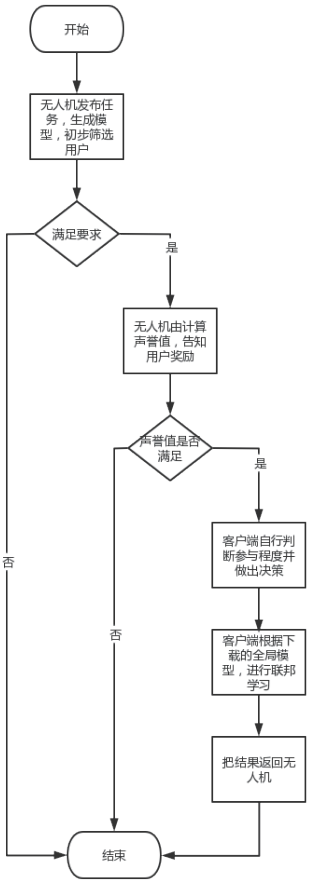


图3 激励车辆用户参与模型跟新示意图

技术指标/优势

针对高移动性用户的不同情况，给出了时间和能量的总开销，并通过实验对比，分析了无人机的最优决策。对博弈过程进行了详细分析计算并证明了用户和无人机均存在自身的最优决策，两方均能实现最大效用。在三种不同数据集实验中，激励机制训练模型表现良好，准确度均有提升。

获得授权专利：一种无人机辅助联邦学习的方法。专利号：ZL202310924514.5。

应用领域和市场前景

本技术研究属于通信领域，涉及低空无线通信资源共享技术领域，具体涉及无人机辅助车联网或移动地面用户的通信与计算关键技术应用。可应用于构建分布式共享网络体系结构，利用无人机提供通信与计算服务，辅助地面移动用户的数据传输需求，不需要经过基站(BS)，减轻基站的流量负担。本地化数据安全和隐私可以得到更好的保护。

厚德弘毅
求是笃行

地址：南京市栖霞区文苑路9号
电话：85866909（杨老师），85866885（王老师）
邮箱：kfb@njupt.edu.cn, jszy@njupt.edu.cn