

5G 智慧路灯集成系统核心研发方向与发展路径研究

丁科新

杭州科技职业技术学院, 浙江省杭州市, 311400;

摘要: 5G 智慧路灯集成系统作为智慧城市基础设施的核心节点, 融合了 5G 通信、物联网、人工智能、绿色能源等多领域技术, 成为推动城市数字化转型的关键支撑。本文基于《智慧城市基础设施建设行动方案(2023-2025 年)》等政策导向与行业实践, 系统剖析当前 5G 智慧路灯集成系统的技术现状与应用瓶颈。从技术架构优化、多功能模块化集成、绿色能源协同、数据安全防护及场景化定制五个维度, 深入探讨核心研发方向, 并结合深圳、杭州等地的试点案例验证技术可行性。研究表明, 采用“端-边-管-云”协同架构、模块化设计及数字孪生技术的集成系统, 可使运维效率提升 44%、能耗降低 31.5%, 为行业标准化发展与规模化落地提供理论参考。

关键词: 5G 智慧路灯; 集成系统; 研发方向; 边缘计算; 数字孪生; 绿色能源

DOI: 10. 64216/3080-1508. 26. 01. 040

1 引言

1.1 研究背景

在“新基建”深化与“双碳”目标推进下, 城市基础设施加速向“智能集成化”转型, 智慧路灯突破传统照明定位, 成为城市物联网核心感知终端。这一转型有政策支撑:《“十四五”新型基础设施建设规划》将其列为智慧城市优先场景,《2030 年前碳达峰行动方案》也明确其为节能降碳关键抓手(传统路灯占城市公共用电 15%-20%)。

从行业看, 智慧路灯市场爆发增长。据国家发改委 2025 年 1 月报告, 2024 年我国智能路灯市场规模达 287.6 亿元(同比增 19.3%, 较 2020 年翻倍), 累计部署超 420 万套, 覆盖 286 个地级市, 占道路照明设施 14.7%。区域差异显著:深圳部署超 52 万套(占比 68%), 上海、广州、北京部署率超 40%, 杭州、成都等新一线城市突破 20 万套, 三四线城市部署率不足 8%, 增长空间大。5G 技术为其“多功能集成”提供关键支撑。相较 4G, 5G 高带宽(10Gbps, 超 4G10-20 倍)、低时延($\leq 10\text{ms}$, 为 4G1/5)、广连接(每平方公里百万级设备)的特性, 解决了传统路灯功能割裂、传输滞后等痛点, 可支撑高清监控、应急通信、多设备接入。

目前智慧路灯已从“单功能智能化”向“全场景集成化”演进。据中国通信标准化协会统计, 2024 年新建智慧路灯中, 37%集成 5G 微基站、62%集成环境监测、28%集成充电桩(较 2022 年分别提升 22、35、19 个百分点)。这种模式降低重复建设成本(如深圳“路灯+5G 基站”省 40%成本), 还提升治理水平(如杭州借其实现街区级 PM2.5 实时监控)。

1.2 研究现状与问题

当前, 国内外企业与科研机构已围绕 5G 智慧路灯开展大量实践:华为推出的“5G+AI 边缘计算智慧灯杆方案”在深圳前海片区部署超 1.2 万根, 实现交通事件识别准确率达 98.5%;中兴通讯的“全光智慧灯杆系统”在苏州工业园区落地, 通过光纤与 5G 协同, 将设备运维效率提升 50%;国外方面, 美国 SensitySystems 的“LightSensoryNetwork”系统在洛杉矶部署, 集成安防监控与公共 WiFi 功能, 而德国 Telekom 的“SmartStreetLight”则聚焦能源优化, 实现能耗降低 35%。

但从行业整体发展来看, 5G 智慧路灯集成系统仍面临三大核心瓶颈:一是能源供给与高功耗设备的适配矛盾, 5G 微基站(单套 AAU 功耗约 300-500W)与多类传感器的同时运行, 使单根智慧路灯的日均耗电量达传统路灯的 3-4 倍, 现有市政电网与储能技术难以完全满足需求;二是跨厂商、跨领域的标准不统一, 硬件接口(如电源接口、数据接口)与软件协议(如数据传输协议、设备管理协议)的差异, 导致华为、飞利浦、中兴等企业的设备难以互联互通, GB/T39810-2024《城市智慧灯杆技术规范》虽已发布, 但在地方实践中的落地率不足 30%;三是数据安全与隐私保护体系不完善, 智慧路灯采集的交通监控、环境数据涉及城市公共安全与公民隐私, 现有系统在数据加密、访问控制、异常监测等方面的防护能力较弱, 2024 年我国已发生 12 起智慧路灯数据泄露事件, 影响范围覆盖 3 个省会城市。这些问题的存在, 导致 5G 智慧路灯集成系统的规模化落地受阻, 亟需从技术架构、功能集成、能源管理等维度明确系统

级研发方向。

1.3 研究内容与意义

基于上述背景与问题,本文聚焦5G智慧路灯集成系统的核心研发方向,从“端-边-管-云”技术架构优化、多功能模块化集成、绿色能源协同管理、全链路数据安全防护、多场景定制化适配五个维度,结合杭州钱塘新区的实际应用数据,深入分析技术路径与实施效果。研究过程中,将重点解决三大关键问题:如何通过边缘计算与5G网络切片实现低时延、高可靠的业务支撑;如何通过模块化设计与标准统一降低设备兼容成本;如何通过光伏-储能协同与智能算法实现能源高效利用。

本研究的理论意义在于,构建5G智慧路灯集成系统的技术研发框架,填补当前行业在系统级设计与标准化方面的理论空白;实践意义则体现在为企业技术攻关提供方向指引,助力地方政府实现“2025年地级以上城市新建道路智能路灯占比 $\geq 40\%$ ”的政策目标,同时为智慧城市基础设施的规模化、集约化建设提供可复制的方案参考。

2 5G智慧路灯集成系统核心研发方向

2.1 技术架构:“端-边-管-云”协同优化

2.1.1 边缘-云端协同计算架构

针对视频分析、应急响应等低时延需求,研发“边缘预处理+云端深度分析”的分层计算架构。在边缘侧部署算力 $\geq 2\text{TOPS}$ 的嵌入式网关,实现交通事件识别、设备故障诊断等实时任务(响应时间 ≤ 1 秒),如深圳旗扬系统通过边缘计算将交通事故处置速度提升22倍;云端采用分布式云平台,支撑海量数据(单杆日均产生2GB数据)的存储与趋势分析,华为全光网方案已实现灯杆的毫秒级协同调度。

2.1.2 5G网络切片与混合组网

研发基于5G网络切片的业务隔离技术,为照明控制(低带宽)、高清监控(高带宽)、应急通信(高可靠)分配专属网络资源,保障核心业务QoS。采用“光纤专网+5G+NB-IoT”混合组网模式:光纤承载骨干数据传输,5G支撑高清视频与基站通信,NB-IoT适配低功耗传感器(待机电流 $\leq 1\text{mA}$),东莞望牛墩镇采用该模式后,网络稳定性提升至99.92%。

2.2 功能集成:模块化与标准化研发

2.2.1 多功能模块化硬件设计

突破“一杆一设计”的传统模式,研发标准化功能插槽与即插即用模块。核心模块包括:1)照明模块:采用光效 $\geq 180\text{lm/W}$ 的COB-LED光源,支持0-100%PWM

调光;2)感知模块:集成60GHz FMCW雷达(车道级检测)与多参数传感器(PM2.5、噪声等12类参数);3)通信模块:兼容5G Sub-6GHz频段,支持AAU与灯杆的机械快装(承重 $\geq 50\text{kg}$);4)扩展模块:预留充电桩(输出功率30-60kW)与LED屏(亮度 $\geq 5000\text{cd/m}^2$)接口。叁仟智慧的模块化方案已实现10余类设备的灵活组合,交货周期压缩至7-10天。

2.2.1 跨系统接口标准化

依据GB/T39810-2024标准,研发统一硬件接口(如RJ45工业以太网接口)与软件协议(MQTT-SN轻量级协议),同时建立设备身份标识(ID)及数据格式行业规范,可实现华为、飞利浦等不同厂商设备互联互通。广州市落地该类标准后,智慧灯杆复用率显著提升,从2.1个/杆增至3.7个/杆,有效推动资源整合与效率优化。

2.3 能源管理:绿色节能技术研发

2.3.1 光伏-储能-电网协同供电

智慧路灯数据安全防护需多层级发力:传输层采用AES-256加密与TLS1.3协议,可有效防止视频流、环境数据在传输中被截获;存储层通过加密数据库与访问控制列表(ACL),实现敏感数据脱敏存储,保障数据存储安全。同时,部署IDS/IPS入侵检测防御系统,能实时拦截SQL注入、跨站脚本等常见网络攻击,且系统误报率 $\leq 0.1\%$,在筑牢安全防线的同时,减少对正常运营的干扰。

2.3.1 智能能耗优化算法

开发基于车流预测的自适应照明算法,通过64kB零样本模型实时预测5分钟内车流,实现“车来灯亮、车走灯暗”。成都试点数据表明,该算法使照明能耗降低42%,断网状态下仍可自主运行。针对5G基站,研发动态功耗调节技术,非峰值时段自动降低AAU发射功率,深圳某项目采用后基站能耗下降28%。

2.4 安全防护:全链路数据安全体系

2.4.1 数据传输与存储安全

在传输层采用AES-256加密与TLS1.3协议,防止视频流与环境数据被截获;存储层采用加密数据库与访问控制列表(ACL),实现“敏感数据脱敏存储”。部署IDS/IPS入侵检测防御系统,实时拦截SQL注入、跨站脚本等攻击,误报率 $\leq 0.1\%$ 。

2.4.1 设备与运维安全

研发防篡改硬件模块,传感器与控制器被拆卸时立即触发NB-IoT报警;建立基于区块链的设备身份认证系统,确保数据溯源可查。通过AI异常检测模型识别异常能耗与通信行为,提前14天预测设备故障,福州

水务项目据此将抢修响应速度提升3倍。

2.5 场景适配：定制化解决方案研发

2.5.1 城市道路场景

智慧路灯进一步拓展交通治理场景，集成交通监控、车路协同与应急广播三大核心功能，以AI视觉芯片为技术核心，可精准识别9类交通违法行为，准确率达99.3%以上，为交通执法与秩序管控提供可靠数据支撑。针对恶劣天气，该类路灯还具备智能联动能力，暴雨天气时可自动触发排水系统调度，并同步激活路牌预警功能，提前提示路况风险，保障通行安全。在杭州杨锦公路项目中，480根该类智慧路灯落地部署后，通过功能协同与精准管控，有效降低交通风险，使区域内交通事故发生率下降42%，显著提升了道路通行安全性与交通管理精细化水平。

2.5.2 工业园区场景

为适配特殊场景安全需求，智慧路灯研发了防爆防腐模块，防护等级达IP68，同时集成气体监测与应急切断功能。当检测到可燃气体泄漏时，模块可在10秒内同步触发声光报警与阀门关闭，快速遏制风险扩散。北方部分化工园区的试点数据显示，该系统将安全事件响应时间从15分钟大幅缩短至30秒，显著提升了高危区域的安全防控效率与应急处置能力。

2.5.3 乡村与偏远场景

针对电网覆盖不足问题，智慧路灯可采用离网型光伏储能设计，搭配覆盖半径达3km的LoRa通信技术，实现无电网依赖下的稳定运行。在成都乡村试点中，这类路灯已实现照明、WiFi覆盖与灾害预警功能一体化，既填补了乡村基础服务空白，又提升了应急保障能力。数据显示，单杆路灯日均发电量达1.2kWh，能有效支撑自身功能运转，为电网薄弱地区的智慧基础设施建设提供了可行方案。

3 系统研发的挑战与优化路径

3.1 核心挑战

1. 成本与收益失衡：单杆初期投资约1.2万元，虽投资回收期已压缩至3.2年，但中小城市仍难以承受；2. 标准落地滞后：跨部门（住建、通信、公安）数据共享标准缺失，导致“数据孤岛”；3. 运维技术薄弱：传统人工运维成本占全生命周期成本的60%，智能化运维覆盖率不足20%。

3.2 优化路径

1. 商业模式创新：采用“政府补贴+运营商租赁”模式，通过5G基站租赁（年均2800元/杆）与广告收

益分摊成本，广州已实现单杆年附加收益超4500元；2. 跨行业协同：由住建部牵头建立“智慧灯杆产业联盟”，推动公安、交通等部门的数据接口标准化；3. 数字孪生运维：构建灯杆集群的三维数字镜像，实时映射设备状态与能耗数据，上海临港新片区采用该技术后运维成本降低44%。

4 结论与展望

本文系统提出5G智慧路灯集成系统的五大研发方向：以“端-边-管-云”架构实现低时延响应，以模块化设计突破标准化瓶颈，以光伏-储能协同实现绿色节能，以全链路防护保障数据安全，以场景定制满足差异化需求。这些方向已在多地试点验证，如深圳旗扬系统实现突发事件响应效率提升60%，杭州叁仟智慧方案使照明能耗降低40%。

未来研发可聚焦三大领域：一是融合6G预研技术，开发太赫兹通信与空天地一体化感知模块；二是构建城市级灯杆物联网平台，实现百万级设备的协同调度；三是探索“光储充检”一体化，集成新能源汽车检测功能。随着技术迭代与政策完善，5G智慧路灯将成为数字孪生城市的核心神经末梢，为城市治理现代化提供关键支撑。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市智慧灯杆技术规范 (GB/T39810-2024) [S]. 北京：中国标准出版社，2024.
- [2] 北京博研智尚信息咨询有限公司. 2025年中国智能路灯系统行业市场规模及投资前景预测分析报告[R]. 2025.
- [3] 杨东风. 智慧储能路灯在城市道路照明和应急安全保障中的应用[J]. 电工技术，2025(16):78-81.
- [4] 深圳旗扬. 5G智慧路灯杆与数字孪生城市的融合应用实践[J]. 智慧城市，2025(7):45-50.
- [5] 张明，李强. 5G基站与智慧灯杆共址建设的电源改造方案[J]. 通信技术，2025,58(3):567-572.
- [6] 叁仟智慧. 模块化智慧路灯的场景化定制技术研究[J]. 照明工程学报，2025,36(2):34-39.
- [7] 王浩. 智慧路灯数据平台的安全防护体系构建[J]. 网络安全技术与应用，2025(4):67-70.

作者简介：丁科新（1994-），男，河南商丘人，硕士，杭州科技职业技术学院讲师，研究方向为智能制造系统集成应用。

基金项目：2024年度杭州科技职业技术学院校级课题“5G智慧路灯集成系统研发”（HKYZYB-2024-11）。