

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 4G 10-20 倍）、低时延（≤ 10ms，为 4G 1/5）、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 $\geq 180\text{l m/W}$ 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”（HKYZXYB-2024-11）。