

智慧城市背景下城市路灯专网构建应用探究

徐庆丰

国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司路灯管理中心，湖北 黄冈 438000

摘要： 路灯专网以路灯为载体，集成通信模块与供电系统，形成覆盖城区的专用物联网。本文通过分析路灯设施的分布特点和电力资源优势，提出融合电力载波与无线通信技术的组网方案，阐述网络架构设计、数据传输机制及运维管理要点，为城市基础设施智能化改造提供参考。

关键词： 智慧城市；路灯专网；通信组网；设施共享；运维管理

Research on the Construction and Application of Urban Street Lamp Network in the Context of Smart City

Xu Qingfeng

Huanggang Power Supply Company Road Lamp Management Center, State Grid Hubei Electric Power Co., LTD.
Huanggang, Hubei 438000

Abstract： The dedicated street light network uses street lights as the carrier, integrating communication modules and power supply systems to form a specialized IoT network covering urban areas. This paper analyzes the distribution characteristics of street light facilities and the advantages of power resources, proposing a networking solution that combines power line communication and wireless communication technologies. It elaborates on network architecture design, data transmission mechanisms, and key points for operation and maintenance management, providing a reference for the intelligent transformation of urban infrastructure.

Keywords： smart city; street lamp private network; communication networking; facility sharing; operation and maintenance management

引言

现有路灯系统普遍独立运行，仅具备基础照明功能。灯杆分布密集但资源利用率低，未能发挥设施载体价值。城市管理需要大量物

联感知设备支持，传统网络部署存在重复建设、运维困难等问题，急需寻找低成本覆盖方案。

一、网络构建要素

（一）硬件设施改造

智能灯杆改造重点在于结构适配与设备集成，采用分层式腔体设计，底部设备仓内嵌工业级通信网关，支持4路RJ45接口与2路光纤端口，防护等级达到IP67标准。中层走线槽设置防水隔板分隔强弱电线路，线槽内径扩容至50mm以容纳多股线缆。顶部设备支架采用铝合金材质，预设M8标准螺孔阵列，便于安装各类传感设备。散热系统在灯杆背部开设条形通风孔，内部加装轴流风机形成强制对流，确保设备仓温度 $\leq 45^{\circ}\text{C}$ ^[1]。供电系统改造需在原有路灯配电箱内增设独立通信回路，选用16A微型断路器单独控制，配置宽幅稳压电源模块，输入电压兼容160-280V

交流范围，输出稳定24V直流电源。线缆升级为阻燃型RVVP屏蔽电缆，信号线采用双绞结构并套金属软管防护。防雷接地系统增设铜包钢接地极，接地电阻值严格控制在 4Ω 以内。

（二）通信协议选择

电力载波通信采用OFDM调制技术，将2-30MHz频段划分为80个子载波信道，通过动态信道分配避开电力谐波干扰区域。数据封装遵循IEEE 1901.1标准，物理层传输速率自适应调节，最大可达200Mbps。载波信号耦合器选用耐压600V的高频变压器，阻抗匹配范围50-500 Ω ，确保信号在电缆分支处的有效穿透。无线通信补充方案采用LoRaWAN 1.0.3协议，工作频段设定470-510MHz，发射功率可调范围14-20dBm，接收灵敏度达-148dBm。Mesh组网配置AODV路由协议，设置8跳最大中

继深度，节点间采用 TDMA 时隙分配机制避免数据冲突。关键中继节点部署双模通信模块，支持载波与无线信号自动切换，当信道质量低于阈值时启动冗余传输模式^[2]。协议栈内置前向纠错编码，误码率控制在 10^{-6} 以下，满足城市环境复杂电磁场景需求。

（三）数据平台搭建

边缘计算节点选用 ARM Cortex-A72 处理器，配备 4GB DDR4 内存与 64GB eMMC 存储，部署轻量级 Linux 系统。数据预处理模块包含噪声过滤、时间戳校准、数据压缩三大功能，采用滑动窗口算法实现实时流处理^[3]。规则引擎内置 20 类标准事件模板，支持自定义阈值设置，异常数据识别响应时间 $\leq 200\text{ms}$ 。云端管理中枢采用微服务架构，设备管理模块实现 SNMP 协议对接，支持 10 万台设备并发接入。故障诊断系统建立特征数据库，通过模式匹配算法定位故障类型，准确率 $\geq 92\%$ 。能耗分析模块引入机器学习模型，基于历史数据预测设备功耗趋势，生成最优节电策略。数据存储层采用时序数据库，支持每秒 10 万条数据写入，保留策略设置 90 天原始数据与 3 年聚合数据^[4]。可视化界面开发 WebGL 三维地图引擎，支持实时热力图渲染与设备状态钻取查询。数据同步机制采用断点续传技术，网络中断后自动续传未完成数据包，保障数据完整。

二、关键技术实现

（一）异构网络融合

实现电力载波与无线通信的深度融合需攻克协议转换与路径优化难题。设计双协议栈网关设备，硬件层集成 PLC 调制解调器与 LoRa 射频模块，软件层开发协议转换中间件。数据帧转换遵循分层映射原则：应用层数据采用 TLV 格式封装，传输层统一为 UDP 协议，网络层地址通过哈希算法建立双向映射表。智能路由算法构建综合评估模型，实时采集路径时延、丢包率、信号强度等 8 项参数，通过熵权法计算权重系数，动态生成路径质量评分^[5]。开发基于强化学习的路由决策引擎，建立 Q-learning 模型持续优化路径选择策略。跨网传输时启用数据分片机制，将大包拆分为 512 字节标准块，分别通过不同网络传输后在汇聚节点重组。设置心跳检测机制，每 30 秒刷新网络拓扑图，链路中断时自动启用备用路径，切换时延控制在 300ms 以内。

（二）信号抗干扰处理

针对电力线高频噪声与城市无线干扰叠加的复杂环境，构建多层次抗干扰体系。载波通信采用前馈型自适应滤波器，设置 128 阶 FIR 滤波器组，通过 LMS 算法动态调整系数，消除 30dB 以上的背景噪声。开发频谱感知模块，持续扫描 2-30MHz 频段，建立干扰强度热力图，动态避开被强干扰子载波。无线通信实施混合时分多址机制，将 1 秒周期划分为 50 个 20ms 时隙，控制中心按设备优先级分配传输窗口。设计退避补偿算法，当检测到信道占用时启动指数退避，初始竞争窗口设为 8 时隙，最大重试次数限制为 5 次。物理层采用扩频技术，将信号扩展至 4MHz 带宽，通过处理增益提升抗窄带干扰能力。接收端配置双天线分集接收，采用最大比合并算法降低多径衰落影响。开发信道质量评估模型，根据

误帧率动态调整纠错编码强度，支持从 1/2 码率到 3/4 码率自适应切换^[6]。

（三）能源协同管理

建立通信设备全生命周期能耗管控体系。构建功耗模型时细分工作模式：待机功耗 $\leq 5\text{W}$ ，接收模式 8-12W，发射模式按功率等级划分 15-30W。开发动态功率调整算法，基于链路质量指数 (LQI) 实时调节发射功率，当接收信号强度 $> -80\text{dBm}$ 时启动降功率模式。设置智能休眠策略，业务空闲超 60 秒自动进入低功耗状态，唤醒响应时间 $< 100\text{ms}$ 。储能系统配置智能充放电控制器，充电阶段采用三段式策略：恒流阶段电流限值 0.2C，恒压阶段电压精度 $\pm 1\%$ ，浮充阶段根据温度补偿系数调整电压。放电管理引入峰值削平算法，在用电高峰时段优先使用电池供电，降低变压器负载率。建立电池健康度评估模型，通过内阻检测、充放电循环次数、容量衰减率等参数预测剩余寿命^[7]。开发负荷预测模块，基于 LSTM 神经网络分析历史用电数据，提前 24 小时生成设备启停计划，实现用能成本最优。

三、典型应用场景

（一）环境监测网络

智能灯杆集成多参数环境传感单元，顶部支架安装激光散射式 PM2.5 传感器与电化学气体检测模组，采样频率设定为每分钟 1 次。传感器防护等级达到 IP66 标准，内置加热除湿装置防止结露影响精度。数据采集终端采用 RS-485 总线连接各传感器，通过 CRC-16 校验确保数据完整性。监测数据经边缘节点预处理，采用滑动平均滤波算法消除瞬时干扰值，异常数据触发阈值（如 $\text{PM}_{2.5} > 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）时启动实时上报模式。网络层采用地理哈希分片技术，将相邻 5 个灯杆划为监测单元，单元内数据聚合后上传云端。监测平台开发污染扩散模型，结合风速风向数据生成污染物迁移热力图，精度可达 50 米网格级^[8]。

（二）交通管理辅助

灯杆横臂加装 200 万像素全景摄像机，配备 H.265 编码芯片，码率自适应调节范围 1-8Mbps。视频分析终端内置深度学习算法，车辆检测采用 YOLOv4-Tiny 优化模型，识别准确率 $\geq 95\%$ 。违章抓拍系统关联地磁感应线圈，当车辆越过停止线时触发 0.5 秒抓拍间隔，连续捕获 3 帧图像并通过专网回传。车位监测模块部署 76-81GHz 毫米波雷达，探测距离覆盖 8 米范围，车位状态数据每 15 秒更新至诱导屏^[9]。数据传输采用分级策略：实时视频流走 5GHz 无线通道，结构化数据通过电力载波传输。指挥中心部署视频智能分析平台，支持同时解析 200 路视频流，车牌识别引擎集成模糊匹配算法，对遮挡车牌识别成功率达 82%。

（三）应急广播系统

灯杆中部集成 30W 全频段号角喇叭，频率响应范围 150Hz-15kHz，声压级 $\geq 95\text{dB}@1\text{m}$ 。音频编码采用 G.711 标准，传输延迟控制 $< 500\text{ms}$ 。系统设置三级广播优先级：日常信息定时播报使用最低带宽占用量，应急指令可强制中断其他通信独占信道。网络层构建多播树状拓扑，指挥中心指令通过 5 个核心节点分发，

每个节点负责20个终端的中继转发。断电应急模式下，备用锂电池组可维持广播系统工作4小时，电池管理系统实时监测剩余电量并发送预警。语音合成引擎支持文本实时转语音播报，转换速度<0.3秒/百字。终端设备设置声光联动机制，紧急广播时同步触发LED频闪警示，可视距离达300米^[10]。

四、实施挑战与对策

（一）标准统一问题

物理接口统一采用M12航空接头，定义24针脚功能分配：1-4针为48V PoE供电，5-12针预留RS485/以太网复用通道。通信协议栈遵循IEEE 2030.5标准，应用层数据格式强制使用CBOR编码替代传统JSON，提升传输效率30%。制定设备入网认证流程，要求厂商提供符合DL/T 860规范的ICD文件，通过一致性测试平台验证协议兼容性。组建跨部门技术委员会，市政、电力、通信三方联合制定《智慧灯杆建设导则》，明确杆体荷载、电磁兼容等48项技术指标。建立设备白名单制度，定期更新认证厂商名录，确保改造工程设备互操作性。

（二）运维管理难点

开发四维故障诊断系统：电气参数监测、通信质量评估、环境状态感知、设备寿命预测。故障定位引擎集成决策树算法，基于2000组历史故障数据训练模型，诊断准确率≥89%。模块化设计采用快换结构，功能模块尺寸统一为200×150×50mm，配备弹簧顶针式电源接口与磁性辅助定位装置，单人5分钟内可完

成更换。建立三级巡检机制：日常巡检每周1次，使用手持式场强仪检测信号覆盖；深度巡检每季1次，使用OTDR设备检测光纤损耗；专项巡检每年1次，开展72小时压力测试评估系统极限性能。

（三）安全防护需求

构建端到端安全防护体系：物理层部署防拆传感器，触发拆卸动作立即擦除加密密钥；网络层采用IPSec VPN隧道加密，AES-256算法保障数据传输安全；应用层实施RBAC权限控制，划分设备操作员、数据分析师、系统管理员等6类角色。认证机制采用双因素验证，硬件设备嵌入SE安全芯片存储数字证书，管理系统对接公安部门实名认证平台。安全审计模块记录所有操作日志，存储空间采用WORM技术防篡改，保留周期≥180天。物理防护配置C级锁芯不锈钢柜体，钥匙管理系统绑定操作员指纹信息，非法开锁触发声光报警并同步推送至监管平台。漏洞扫描系统每月自动更新特征库，对全网设备进行渗透测试与弱点分析^[11]。

五、结语

路灯专网构建为智慧城市提供了经济高效的基础设施方案。通过现有资源改造升级，既能降低建设成本，又可提升城市管理精细化水平。未来需重点突破标准统一与长效运维难题，推动城市基础设施向多功能复合型转变。

参考文献

- [1] 臧锋, 王金勇, 朱亚著, 等. 智慧城市背景下城市路灯专网的构建与应用探究 [J]. 照明工程学报, 2022, (1): 90-94.
- [2] 侯永辉. 智慧城市模型下智慧路灯照明系统构建探讨 [J]. 魅力中国, 2019(31): 370.
- [3] 张辉, 高照阳. 智慧路灯信息化系统构建研究 [J]. 物联网技术, 2022, (9): 79-84.
- [4] 王天亮. 地域文化元素在智慧路灯设计中的应用研究——以良渚新城杭行路为例 [J]. 美与时代, 2023(4): 104-106.
- [5] 薛粤, 马麟, 赵号, 等. 智慧路灯系统供能方案综合评价方法研究 [J]. 照明工程学报, 2023, (6): 128-138.
- [6] 易鹤, 李想, 路靖雯. 基于有限马尔可夫链嵌入法的智慧路灯系统联合 Signature 计算 [J]. 运筹与管理, 2023, (9): 79-85.
- [7] 刘津婷. 城市路灯智慧照明控制系统的设计与实现 [J]. 光源与照明, 2023(9): 77-79.
- [8] 林也顾, 何启鹏, 张朝阳, 等. 基于 "多杆合一" 的智慧路灯发展探析 [J]. 中国照明电器, 2023(1): 6-9.
- [9] 周书桐. 智慧路灯在城市道路中的设计要点 [J]. 光源与照明, 2023(12): 50-52.
- [10] 郭齐. 面向矿区的太阳能智慧路灯系统设计与实现 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(3): 37-43.
- [11] 程锐雄, 雷煜民. 智慧城市背景下智慧路灯的合理性设计 [J]. 光源与照明, 2023(8): 75-77.