

智慧路灯在城市道路照明中的应用研究

贾海港 王文浩

山东金宇信息科技集团有限公司, 中国·山东 济南 250101

摘要: 随着智慧城市建设发展, 城市道路照明系统正从传统的单一照明功能, 向信息化、智能化、系统化方向演进。智慧路灯是智慧城市的重要基础设施, 不仅承担照明功能, 更成为城市信息采集、环境监测、公共通信及应急服务的重要节点。基于此, 本文从智慧路灯的系统结构、应用类型、功能模块及与传统路灯的对比等方面展开探讨, 为我国城市道路智慧照明体系建设提供参考。

关键词: 智慧路灯; 城市道路; 照明; 功能模块; 经济效益

Research on the Application of Smart Street Lights in Urban Road Lighting

Jia Haigang, Wang Wenhao

Shandong Jinyu Information Technology Group Co., Ltd., China Shandong Jinan 250101

Abstract: With the development of smart city construction, urban road lighting systems are evolving from traditional single lighting functions towards informatization, intelligence, and systematization. Smart street lamps are important infrastructure in smart cities, not only fulfilling lighting functions but also serving as crucial nodes for urban information collection, environmental monitoring, public communication, and emergency services. Based on this, this paper explores the system structure, application types, functional modules of smart street lamps, and their comparison with traditional street lamps, aiming to provide references for the construction of smart urban road lighting systems in China.

Keywords: Smart street lamps; Urban roads; Lighting; Functional modules; Economic benefits

0 引言

随着物联网、大数据和云计算等技术发展, 智慧路灯应运而生, 推动城市照明系统由传统方式, 向智能化、高效化与绿色化方向转变。智慧路灯集成了多种传感器、摄像设备及无线通信模块, 实时感知和分析周围环境数据, 并通过智能处理实现远程控制与管理。在确保照明质量的同时, 有效降低能耗。此外, 智慧路灯还可为交通管理、城市安防与信息服务等领域提供数据支撑, 从而提升城市治理水平与居民生活品质。

1 各类智慧路灯在城市道路照明中的应用

1.1 调整灯位便捷型智慧路灯

在城市道路照明体系中, 道路类型、交通密度及空间尺度差异较大, 对光照高度与照射范围的要求各不相同。如果灯位固定且难以调节, 常导致局部照度不均, 既影响行车安全, 也降低能源利用效率。为解决这一问题, 近年来出现的调整灯位便捷型智慧路灯, 内部设有滑块、旋转轴、连杆及定位装置等多重结构元件, 依靠机械传动实现灯体位置的灵活变换。调节过程中, 安装板以转轴为支点产生角度变化, 滑块与连接杆在受力作用下实现垂直与水

平的协调位移, 从而精确控制灯头的空间位置。防滑装置中的弹簧与限位套筒协同作用, 在保持结构稳定的同时有效防止位移偏差, 保证灯具在风力或震动环境下的稳固性。

1.2 调节角度便捷型智慧路灯

调节角度便捷型智慧路灯, 结构多采用电机驱动与齿轮联动的机械系统, 依靠转盘、支撑块及齿轮组之间的配合, 实现灯体角度灵活调节。光束方向在立柱旋转时随之改变, 照射范围更为广泛, 在不同路段、车流密度及天气条件下保持最佳照明效果。此外, 电机底部与固定板稳固衔接, 转盘表面设置的齿块与第二齿轮形成严密啮合, 使角度调节过程平稳顺畅。立柱底部配备四个等距滑轮及稳定机构, 保证整灯在调节过程中的平衡与安全。夜间高峰时段, 可根据交通状况调整灯具朝向, 使光照集中于主干道; 深夜时段则转向人行区域或绿化带, 既避免能源浪费, 又减少无效照明对居民生活的干扰。

1.3 安全防护型智慧路灯的应用

安全防护型智慧路灯在照明模块之外, 还配置环境监测、视频监控、一键报警、应急呼叫及公共广播等多项功能, 实现照明与城市安全的有机融合, 让路灯成为“城市

守望者”，在保障夜间出行安全的同时，为城市治安防控和应急管理提供支撑。在结构设计上，设有安全舱体，舱内配备摄像头、语音终端、警示灯及呼叫装置。当地面出现异常情况或突发事件时，设备可立即触发警报信号，监控系统同步定位事件区域，并将信息传送至城市管理平台。部分型号还引入光伏供能与蓄电储能装置，以保证在停电或灾害条件下，维持基本照明与通信功能，从而提升城市公共设施可靠性。

2 智慧路灯在城市道路照明中的应用前景

2.1 智能化

智慧路灯在设计理念上，已不再局限于照明设备本身，而是逐步演变为集感知、计算与决策为一体的综合性信息节点。依托物联网、云计算和人工智能等新一代信息技术，路灯实现了状态自识别、亮度自调节与数据自反馈等功能，使照明设施由被动响应转向主动感知，运行机制以数据驱动为核心，实时采集环境光照、交通流量与气象信息，形成动态照明策略，实现照度的精准调控与能源的高效分配。在系统层面，智能路灯已具备远程集中监测、故障预警、能耗统计与调度优化等能力，使管理模式更加精细化与智能化。

2.2 节能环保

随着“双碳”战略深入实施，城市照明系统能效水平，已成为衡量城市管理智慧化程度的重要指标。智慧路灯在设计理念上突出绿色节能，以高效 LED 光源替代传统高压钠灯，能量转化效率显著提升，光衰速率大幅下降，从而有效延长灯具使用寿命。根据现有工程数据，智慧路灯的综合节能率普遍在 50%~70% 之间，部分系统在采用智能调光与能耗分析算法后，节能效果甚至超过常规水平。

在照明控制方面，系统根据道路交通流量、气象条件及人流密度实时调节亮度，合理分配照明资源，减少电能浪费与光污染。同时，智慧路灯配套建设太阳能光伏板与储能单元，白天储存能量，夜间供电照明，实现能源的循环利用与分布式供能，显著降低对传统电网的依赖。

2.3 标准化

智慧路灯系统快速发展，使设备类型日趋多样，但不同厂商间的接口设计、通信协议及数据格式差异较大，已成为制约行业整体水平提升的重要因素。城市照明系统作为公共基础设施，兼容性和互联性直接影响建设成本与运维效率，如果各类设备在技术规范上缺少统一标准，势必导致系统整合困难、资源浪费和重复建设等问题。因而，在未来发展进程中，推动智慧路灯的标准化已成行业共识。

3 智慧路灯系统功能模块

3.1 LED 照明模块

LED 照明模块在整体结构中，承担基础照明与能耗调控的双重任务，该模块采用高效发光二极管光源，配合集成式恒流驱动电路与自适应调光芯片，实现对光输出强度的精准管理。根据《城市智慧照明工程技术规范（2024）》测算，同功率条件下，LED 路灯的光效普遍超过 130 lm/W，较传统高压钠灯提升约 55%~70%。在热管理设计方面，灯具外壳多选用高导热系数铝合金材料，并采用静电喷涂工艺与蜂窝散热鳍片结构，以强化热传导效率并延长整灯寿命，平均寿命一般超过 5 万小时，维护周期显著缩短。照明控制终端采用 NB-IoT 与 ZigBee 混合通信架构，具备分布式节点协同机制，可实现单灯级精细化控制与群组级能效优化。此外，灯具在防护性能方面普遍达到 IP66 标准，具备抗风压、抗盐雾与高湿耐腐蚀特性，适用于多气候条件下的长期运行。

3.2 信息采集模块

信息采集模块依托多源传感器阵列，实时监测环境亮度、气温、湿度、噪声、车流密度以及空气质量等指标，并将信号经模数转换后输入控制中心进行数据融合与分析。在信号传输层面，信息采集模块采用 LoRa 与 NB-IoT 混合通信架构，以窄带低功耗方式实现远距数据交互，单节点覆盖半径可达 5~10 公里，数据丢包率低于 0.2%，显著提升系统通信稳定性。在数据处理环节，模块内部嵌入 ARM Cortex-M 系列微控制单元（MCU），构建以时序预测为核心的动态数据滤波模型，该模型对光照变化趋势进行自适应拟合，其计算公式为：

$$L_t = \alpha \times L_{t-1} + (1 - \alpha) \times S_t$$

式中， L_t 表示当前时刻预测亮度值， S_t 为实时采样值， α 为平滑系数（取值范围 0.6—0.8）。

该算法在降低噪声干扰的同时，强化了亮度响应的稳定性，使数据波动范围控制在 $\pm 2\%$ 以内。经实测，信息采集模块的数据响应时延平均为 0.35 s，满足城市道路照明对高实时性的要求。在系统集成层面，LED 灯杆内嵌全彩显示屏及边缘计算终端，既承担信息采集任务，又实现数据发布与交互。信息发布端根据通信控制协议（MQTT 或 CoAP）执行数据上传与任务调度，支持广告图文、政务公告、气象预警等多类型信息的即时推送。

3.3 电能补给模块

电能补给模块由光伏发电单元、储能装置、功率变换器及控制管理系统组成，形成自给、自储、自控的一体化

能源闭环。白昼时段, 光伏电池阵列接收太阳辐射能量, 依据下述公式计算光电输出功率:

$$P = \eta \cdot G \cdot A$$

其中, P 表示输出功率 (W), η 为光电转换效率 (约为 18%~22%), G 为太阳辐照度 (W/m²), A 为电池板有效受光面积 (m²)。在日照强度 800 W/m²、受光面积 1.5 m² 条件下, 单套光伏装置的瞬时功率约为 264 W, 可满足 LED 照明及部分储能需求。系统中储能单元通常采用磷酸铁锂电池组, 具备高比能量 (约 120 Wh/kg) 及 3000 次以上循环寿命, 电能补给模块通过双向 DC/DC 变换器实现光伏侧与负载侧之间的能量平衡。控制器依据实时电压、电流采样信号执行能量调度, 其目标函数为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n (P_{Li} - P_{Gi} - P_{Bi})^2$$

其中, P_{Li} 为负载功率, P_{Gi} 为光伏输出功率, P_{Bi} 为电池充放电功率。最优解对应系统能量平衡状态, 使照明端负荷稳定、能量分配效率最高。

3.4 应急通信模块

应急通信模块内部, 集成语音通信、视频传输及定位等多类功能, 依托 GPRS、NB-IoT 等低功耗广域网络协议, 实现数据交互, 形成覆盖全域的应急通信网络。设备前端设有一键报警装置, 当发生交通事故、突发灾害或治安事件时, 市民触发按钮后信号立即上传至城市照明控制中心, 系统自动调取视频监控与地理信息数据, 实现事件快速定位与指挥联动。在通信保障方面, 模块采用多通道冗余机制与自适应切换策略, 确保信号在高干扰环境下依然保持稳定传输。主控芯片配置 AES 加密算法, 数据传输误码率控制在 0.01% 以内, 语音延迟不超过 150 ms, 通信可靠性达到 99.9%。系统还配备户外广播设备, 可在突发事件、极端天气或交通管制时实现分区级信息发布, 使应急处置环节形成发现、上报、响应、处置一体化闭环。

3.5 智能监控模块

智能监控模块集成高清摄像头、红外传感器、图像识别处理芯片及边缘计算终端, 形成分布式视频监控网络。系统在实际运行中基于 AI 视觉算法与视频结构化分析技术, 对行人、车辆及异常事件精准识别和动态追踪。相关统计数据, 采用嵌入式视频监测单元后, 道路交通事件响应时间平均缩短了 37%, 违法停车识别准确率超过 92%, 夜间照明区域的安全警示率提升约 45%。智能监控模块的核心算法架构, 以卷积神经网络 (CNN) 为基础, 结合轻量化的模型剪枝与边缘推理机制, 实现视频流的低时延

识别与实时反馈。摄像终端所采集的数据经加密传输至智慧照明控制中心, 再由云端平台完成多维度融合分析, 用于交通拥堵评估、环境质量监测及公共安全预警。监控模块的数据接口遵循国家 GB/T 28181-2016 视频监控联网标准, 保障不同厂商设备间的互联互通。

3.6 储能模块

储能模块主要由储能装置、电能转换器及能量管理系统三部分构成, 采用锂离子电池或超级电容, 以高能量密度和快速充放电特性, 满足道路照明的动态功率需求。系统在设计时依据能量平衡原理, 建立能量管理方程:

$$P_{in}(t) - P_{out}(t) = \frac{dE(t)}{dt}$$

式中, $P_{in}(t)$ 表示储能单元的输入功率, $P_{out}(t)$ 表示输出功率, $E(t)$ 为储能系统在时间的总能量状态。能量管理系统依据该方程对储能装置进行实时调节, 维持输出电压稳定在 220 ± 5% V 区间, 保障 LED 照明模块、电动汽车充电单元及通信模块的能耗分配均衡。

储能单元一般采用分层控制结构。底层由电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 负责电芯的均衡控制与温度监测; 中层配置能量调度控制器 (Energy Management Controller, EMC), 根据光照强度、负载功率及市电波动状态设定充放电策略; 上层控制平台则利用模糊自适应算法对能量流向进行最优分配, 以实现峰谷功率削减与能效最大化。系统功率平衡条件为:

$$\eta_c P_{grid} + P_{pv} = P_{load} + P_{loss} + \eta_d P_{bat}$$

其中, η_c 与 η_d 分别为充、放电效率, P_{grid} 为市电输入功率, P_{pv} 为光伏输入功率, P_{load} 为照明与附属设备负载功率, P_{loss} 为系统损耗。实测数据显示, 在典型城市路段应用场景下, 配置储能容量为 2.5 kWh 的智慧路灯系统, 夜间照明稳定时长可提升 42%, 综合节能率提高至 73.6%。

4 智慧路灯与传统路灯对比分析

4.1 能耗方面

以我国为例, 道路照明约占城市电力总消耗的 9% 左右。传统高压钠灯照明效率偏低, 光能转化率不足 30%, 且显色性差、散热性能不佳, 导致大量电能损耗在无效光辐射与热能释放上。相比之下, 智慧路灯普遍采用高光效 LED 光源与智能调光系统, 光电转化效率提升至 85% 以上, 平均节能率在 55% 至 70% 之间。监测数据显示, 在交通流量较低的夜间时段, 照度需求可下降至标准值的 30%, 对应能耗削减幅度约为 65%。此外, 智慧路灯集成的分布式储能单元和光伏组件, 在白昼阶段完成能量积蓄, 于夜

间释放电能,实现照明系统与可再生能源的动态平衡,显著降低市政电网负荷。

4.2 控制技术方面

智慧路灯的控制体系以分布式智能节点为基础,采用多协议融合通信架构,实现照明设备的远程监测、精细化调度与数据闭环管理。系统核心依托 GPRS 与 ZigBee 短距组网技术构建多层通信网络,上层完成跨区域信息传输,下层承担终端节点组网与数据交互任务。GPRS 模块负责中心控制平台与分控终端之间的指令交换,典型通信速率保持在 114 kbps 左右,覆盖范围广、信号稳定; ZigBee 模块基于 IEEE 802.15.4 标准,具备自组网与低功耗特性,节点间通信距离约为 50 至 100 米,适用于路灯密集分布区域的组网部署。

5 结语

综上所述,智慧路灯是城市照明现代化和智慧城市建设的重要支撑,以高效节能、信息互联、安全防控为核心特征,不仅提升了照明系统的运行效率与服务水平,也为构建低碳、安全、宜居的现代城市提供了关键支撑。随着

人工智能与物联网技术进一步融合,智慧路灯将成为城市信息化基础设施的重要节点,实现从“照明工具”向“智慧终端”的转变。

参考文献:

- [1] 董淑艳. 智慧城市建设中的市政工程管理创新研究[J]. 陶瓷, 2025,(09):188-190.
- [2] 程盛杰. 路灯工程技术与管理方式创新解析[J]. 中国住宅设施, 2025,(08):7-9.
- [3] 努尔尼沙·阿不力米提. 智慧路灯在城市道路照明中的应用[J]. 灯与照明, 2025,49(04):70-72.
- [4] 杨东风, 樊岳波. 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]. 光源与照明, 2024,(11):29-32.
- [5] 李立. 智能技术在城市道路照明配电设计中的应用[J]. 智慧中国, 2024,(04):92-94.

作者简介: 贾海港(1982.02-), 男, 汉族, 山东邹平人, 本科, 高级工程师, 山东金宇信息科技集团有限公司。