

基于单灯控制器的城市路灯智能调光节能效果实证

刘卫军

铜陵市市政工程管理处，安徽 铜陵 244000

DOI:10.61369/UAID.2026020008

摘 要： 为应对单灯控制器在城市路灯调光过程中所面临策略固化、感知不准、协作不足、评价不清以及维护滞后等问题，提出一种基于实际监测信息反馈循环优化的方法。该方法利用多种外部环境和交通信息构建五个等级分层调光方案；根据道路网络结构划分为三个层次合作区域，保证路面亮度连续变化并且能够迅速改变模式；同时加入八个方面的光学和电气效率参数还有四个级别的维护响应级别，使得从调控到检测形成一个完整的循环。实验结果表明，在保证良好照明的前提下，该方法可以大幅度节约能源消耗并且提高可靠性。

关 键 词： 单灯控制器；智能调光；能效评估；区域协同；运维闭环

Empirical Study on Energy-Saving Effect of Urban Street Light Intelligent Dimming Based on Single Lamp Controller

Liu Weijun

Tongling Municipal Engineering Management Office, Tongling, Anhui 244000

Abstract： To address the problems of fixed strategy, inaccurate perception, insufficient collaboration, ambiguous evaluation and delayed maintenance faced by single lamp controllers in the dimming process of urban street lights, this paper proposes a feedback cycle optimization method based on actual monitored information. This method constructs a five-level hierarchical dimming scheme by integrating various external environmental and traffic information. The road network structure is divided into three levels of cooperative areas to ensure the continuous change of road surface brightness and rapid mode switching. Meanwhile, eight optical and electrical efficiency parameters and four levels of maintenance response are introduced, forming a complete closed loop from regulation and control to detection. The experimental results show that the proposed method can significantly reduce energy consumption and improve operational reliability on the premise of guaranteeing favorable lighting quality..

Keywords： single lamp controller; intelligent dimming; energy efficiency evaluation; regional collaboration; operation and maintenance closed loop

引言

目前大多数城市照明智能化改造以单灯控制器为基本单位进行实施，但是其能效提升尚有较大空间。很多工程仍然采取定时或者单阈值开关灯方式进行操作，在考虑道路功能、车流情况以及天气变化方面均存在不足。而且传感器质量不高、灯具之间无法协同工作、节电效果难以衡量以及维护需要人工等，使该类项目在长时间后会逐渐失效。因此需要一种集感知、决策、控制和评价于一体的实证方法来推动路灯由“可调”到“智调”的转变。

一、单灯控制器部署下城市路灯调光面临的核心问题

在推动城市照明系统智能化进程中，虽然单灯控制器是进行精细化调光的前提条件，但是其应用及使用中也存在诸多问题和技术、管理上的限制，包括调光策略不适合、感知信息融合度不高、系统间联动差、缺乏有效能耗评价方法及维护不便等。

（一）调光策略与道路照明需求匹配度不足

目前大多数城市在应用单灯控制器之后，调光方式多采用预

先设定的时间段或者简单的光照强度进行控制，而忽视道路等级、交通流量的变化情况、气象条件以及人车混行的比例等因素的影响，在一定程度上使得调光方式过于简单或者半自动化的方式不能很好地满足实际需要。在低交通量的情况下会出现过度照明现象，在突发性大交通量或者极端天气情况下会出现照明不足的情况，从而影响人们的视线安全^[1]。由于各个地区的对光环境的要求也有所不同，如果采取统一的调光方案，则可能导致部分地区光环境的质量降低，进而降低智能调光的效果。

作者简介：刘卫军（1978.10-），男，汉族，安徽怀宁人，高级工程师，本科，研究方向：建筑电气、城市路灯智能化节能化改造。

（二）环境与交通感知数据采集精度受限

单灯控制器智能调光效果很大程度上取决于准确可靠的数据输入，例如环境照度、车流量、人流量等。但是目前安装在道路上的各类传感器普遍存在精度不高、标定时间较长、易受到外界影响等因素，在下雨、起雾或者反光路面上容易造成数据偏差较大问题；而且有些设备没有连接到城市交通管理系统，只通过自身检测不能形成整体道路照明视图来做出合理和及时的调光。

（三）多灯协同与区域联动控制能力薄弱

单灯控制器虽然可以单独进行控制，但是在实际道路网络中，如果缺少上位机统一指挥，则容易出现每盏灯都是独立工作的现象，造成前后路段之间亮度变化大，明暗闪烁等情况发生，影响整条道路上视觉平滑度。而现有的大部分系统还未设计出合理区域间联系规则，在主干道一支路一交叉口这种层级结构上无法做到按需改变调光程度，以及在突发状况下或者节假日期间不能及时做出反应并相互配合完成相应工作。

（四）节能效果缺乏统一量化与验证标准

虽然单灯控制器被大力推广其能带来巨大的节能效果，但是由于缺少统一的检测标准以及评价准则而导致不同项目的节能效果无法进行对比分析。一些工程仅仅是以“同比减少的电量消耗”作为唯一的衡量标准，而不考虑照度保持率、功率因数、灯具寿命衰减等因素，使得节能的效果值得怀疑^[2]。调光对于灯具光效、色温稳定性和驱动电源效率的影响也没有得到系统的分析研究工作，不利于进一步的研发改进方向。

（五）运维体系与智能化水平不匹配

单灯控制器的大规模应用给运维带来新的挑战，如远程故障检测、固件在线更新、能耗异常报警等。但是目前大多数城市的智慧照明系统还停留在人工定期巡检阶段，缺少对控制器工作情况及时了解以及分析的能力。设备断电、通讯故障、策略无效等情况不能被及时发现并解决，这不仅会影响到调光的稳定性，也会降低节能减排的效果。

二、基于实测数据的智能调光策略与节能效果验证

针对单灯控制器部署过程中暴露的调光策略适配性不足、感知数据精度受限、协同控制能力薄弱、能效评估标准缺失以及运维机制滞后等问题，需构建以实测数据驱动的闭环调光优化体系。该体系涵盖多源感知融合与分级动态调光策略、区域协同与场景自适应联动控制、标准化能效评估与运维闭环验证三个维度，分别对应解决调光策略精准性问题、协同控制一致性问题以及节能成效与运维可持续性问题，通过实测数据形成策略—执行—评估—优化的完整闭环。

（一）多源感知融合与分级动态调光策略

针对调光策略与道路照明需求匹配度不足以及环境与交通感知数据采集精度受限的问题，建立多源感知数据融合机制与分级动态调光模型。在感知层面，将单灯控制器集成的环境照度传感器、毫米波雷达车检器与城市交通管理平台的卡口流量数据、气象局实时天气数据进行时空对齐与交叉验证，采用卡尔曼滤波算

法对传感器原始数据进行降噪处理，当本地传感器数据与平台数据偏差超过15%时自动触发校准指令^[3]。在调光策略层面，摒弃静态时间表与单一光照阈值模式，构建基于道路等级、交通流量、天气状况与时段特征的四维调光矩阵，将调光指令划分为五个功率档位：休眠档（额定功率的10%）、低流量档（30%）、常规档（50%）、高峰档（80%）、应急档（100%）。针对不同道路等级设定差异化响应阈值，主干道在车流密度低于5辆/分钟时切换至低流量档，次干道对应阈值为3辆/分钟，支路为1辆/分钟。恶劣天气条件下，系统依据降雨强度或能见度数据自动提升1至2个功率档位，确保照明连续性。调光指令通过NB-IoT通信链路下发，执行状态实时回传至平台，对未成功执行的指令进行自动重发机制，重发间隔设定为30秒，连续失败3次后生成运维工单。

（二）区域协同与场景自适应联动控制

针对多灯协同与区域联动控制能力薄弱的问题，构建基于路网拓扑关系的区域协同控制架构。将城市照明系统划分为主干道一次干道一支路三级协同域，每个协同域内设置主控节点，主控节点通过边缘计算网关汇聚所辖灯具的运行状态与感知数据，采用一致性算法计算协同域内各灯具的调光系数，确保相邻路段照度平滑过渡，消除因单灯独立调控导致的光影跳跃现象。针对交叉口、人行横道、公交站点等关键节点，建立独立增强区，增强区内灯具在检测到行人或车辆活动时同步提升至高峰档，增强区边界照度与相邻路段照度梯度变化率控制在每10米不超过10%。针对应急照明、重大活动、节假日等特殊场景，平台预设场景策略库，策略库包含调光曲线、增强区范围、切换时间窗口等参数，运维人员通过数字孪生系统进行策略仿真后一键下发，可实现全区域灯具在60秒内完成场景模式同步切换。建立通信中断应急机制，当协同域内主控节点与平台通信中断时，主控节点依据本地存储的历史同期调光策略自动运行，从属节点与主控节点之间通过LoRa通信保持区域协同，确保系统在平台离线状态下仍能维持72小时稳定运行。

（三）标准化能效评估与运维闭环验证

为了应对节能效果缺少定量检测方法以及运维管理和智能化程度低下问题，在此基础上构建包含能效指标及运维指标规范化评价标准^[4]。在能效评价中参考GB/T 37478-2024《道路和隧道照明用LED灯具能效限定值及能效等级》征求意见稿的规定，在恒温25℃±2℃、湿度50%±10%条件下进行试验，在2m积分球加光谱辐射计组成的装置上测定灯具发光效率，在高精度功率分析仪上获取电压、电流、功率因数、畸变率等相关信息。能效评价指标涉及单灯每年耗电量、整体节电量、道路平均亮度、亮度均匀性、发光效率衰减比率、整体功率因数、色温变化率以及眩光增加量等八个主要指标，每个指标均以连续七天的实际测量结果取平均值得出结论。而在运维评价中设立设备在线率、通讯成功率、命令响应成功率、平均故障恢复时间四个运维指标并通过平台后台自动记录形成运维报告。对于设备离线、通信中断、策略失效等情况，设置不同级别告警，三级告警是单灯离线超过24小时，系统自动生成巡检工单推送到运维人员手机上；二级告警

为协同区域内超过5%灯具离线或者通信成功率为90%以下，下发该区域运维任务；一级告警为主干道路上连续三盏及以上灯具离线并且照度未达到标准要求30%，系统自动进入应急状态并且及时向运维管理人员发送信息。

三、路灯系统节能效能的量化评估与运行优化路径

基于实测数据分析形成的闭环调光优化系统的基础上，还需要更深入研究其节电效果并进行优化。在此基础上建立多种评价指标体系、优化动态调光参数调整方法、加强区域间协调控制逻辑、提高运维人员工作效率及促进相关标准制定等，从而达到由“策略实施”到“效果可测、过程可控、结果可靠”的良好运行状态。

（一）多维能效指标体系的精细化构建

节能效果需要从光学性能、电气特性和环境适应性几个方面进行评价。除了单灯每年所消耗电能以及总节电量之外，还需要观察道路平均亮度、亮度均匀性和眩光增加量等与视觉安全相关的指标，在调光的同时保证照明品质不会因为功率下降而下降。光通量衰减率表示灯具在长时间使用后出现光衰情况，色温变化是由于调光造成光色不稳定现象，防止由于不断改变功率而导致人眼产生不适感^[5]。总的功率因数以及谐波含量是电能质量的重要因素，决定着供电系统的负担以及整个供电系统的效率，要对其进行定期检测。

（二）动态调光参数的自适应校准机制

为了克服传感器漂移、环境突变以及交通流非稳态问题，调光参数应具有在线自校准功能。系统周期性地比较本地检测结果与城市级平台提供的信息，一旦两者差异长期大于一定范围（比如15%），即刻进行传感器重新标定或者使用备用数据源。调光档位也不是一成不变，它根据过往交通流量情况和季节变化定期更新。在节假日或者大型活动时，支路车流量门槛可以适当提高，防止由于误判小交通量而导致亮度过大；在雨水来临之前，系统预先设置潮湿状态下增加光照强度的比例，保证雨天照明正常工作。这些都是在边缘计算节点上自主进行，无需过多联系中央服务器，加快响应速度并且增强鲁棒性。

（三）区域协同控制逻辑的拓扑优化

协同控制效果由路网布局以及调光指令空间相关性决定。主

干道-次干道-支路三级协同域划分需考虑实际情况中实际交通流量以及照明需求进行划分，使调光梯度随着行车方向逐渐降低。交叉口增强区范围大小以人行横道宽度以及车辆刹车距离为基础，可实时变化其半径大小来避免由于光照变化造成的视野不足现象。当网络良好时，主节点每隔5分钟向所有从属节点广播新的协同调光因子；而当网络不好时，则利用LoRa近场通信保留在区域内所有灯一致亮度并在本地缓存中存储数据，保证至少72小时内的基本协同工作能力。

（四）运维响应速度智能化提高

运维闭环的核心在于故障识别的及时性与处置流程的自动化。设备在线率与通信成功率作为基础健康指标，由平台实时采集并生成热力图，直观呈现异常区域分布。指令执行失败不仅触发重发机制，还关联历史执行记录分析失败原因，如电源异常、固件版本不兼容等，辅助精准定位。告警分级策略与工单自动派发机制相结合，使三级告警对应常规巡检，一级告警直连应急响应通道，大幅缩短故障修复周期。修复完成后，系统自动复测相关能效与照明指标，验证恢复效果，杜绝“假修复”现象。

（五）标准规范与评估方法的体系化推进

节能成效的横向可比性依赖于统一测试条件与评估流程。参照GB/T 37478-2024征求意见稿，明确实验室与现场测试的环境边界条件，规定积分球测量光效时的稳定时间、采样频率及数据处理方法。现场评估需同步记录气象、交通与电网参数，剥离外部干扰因素对能耗数据的影响。此外，推动将调光策略有效性、协同控制稳定性、运维响应时效等纳入地方智慧照明验收标准，促使项目从“装得上”向“用得好、省得实、管得住”转变，为行业提供可复制、可验证的技术范式。

四、结语

路灯智能调光系统的高质量发展需突破单一设备控制局限，转向数据融合、拓扑协同与标准统一的系统级优化。未来应深化边缘智能在本地决策中的作用，拓展数字孪生在策略预演中的应用，并将照明能耗纳入城市碳排监测体系。通过构建“感知—调控—验证—进化”的自适应架构，城市照明将逐步实现安全、节能与韧性并重的运行目标。

参考文献

- [1] 宋鹏. 智慧城市照明中的单灯智能控制系统分析 [J]. 中国照明电器, 2025, (05): 154-156.
- [2] 余亚军. 单灯智能控制系统在城市智慧照明中的应用研究 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 87-89.
- [3] 杨尚军. 基于NB-IoT技术的城市照明智能单灯控制系统设计与应用 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 90-92.
- [4] 陈庆祝. 智慧城市照明中的单灯智能控制系统分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (12): 70-72.
- [5] 陆文玲. 基于电力线载波的智能照明单灯控制系统设计 [J]. 光源与照明, 2023, (06): 96-98.