

地铁照明系统的智能调光控制策略与实践

褚海锋 顾嘉伦

宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i6.8153

[摘要] 地铁照明系统是城市轨道交通不可缺少的组成部分,其能效管理和智能化水平直接关系运营安全以及能源成本控制。本文主要针对地铁照明系统的构成与运行特点加以分析,系统梳理了基于时间、人流量、自然光及多因素融合的智能调光控制策略,阐述了该系统在节能降耗、提升照明质量、延长灯具寿命、优化管理效率等方面的实践成效,希望可以为智能化升级轨道交通照明系统提供可行路径。

[关键词] 地铁照明系统;智能调光;控制策略

Intelligent dimming control strategy and practice of subway lighting system

Chu Haifeng Gu Jialun

Ningbo Rail Transit Group Co., LTD. Operation branch

[Abstract] The subway lighting system is an indispensable part of urban rail transit. Its energy efficiency management and intelligence level directly affect operational safety and energy cost control. This paper mainly analyzes the composition and operating characteristics of the subway lighting system, systematically reviews intelligent dimming control strategies based on time, pedestrian flow, natural light, and multi-factor integration. It elaborates on the practical achievements of this system in energy conservation, improving lighting quality, extending lamp life, and optimizing management efficiency, aiming to provide a feasible path for the intelligent upgrade of rail transit lighting systems.

[Key words] subway lighting system; intelligent dimming; control strategy

城市轨道交通中的地铁照明系统面临运行时间长、能耗高、管理复杂等问题,迫切需要凭借智能化手段提升运行效率。智能调光技术不仅可以有效降低能源消耗,还可以提升系统运维水平。以下就是本文针对地铁照明系统功能分区、技术特点以及智能调光策略的深入分析。

一、地铁照明系统的构成与特点

(一) 系统构成

地铁照明系统按功能可划分为五大板块。公共区照明覆盖站厅、站台等乘客活动区域,通常采用LED面板灯,需保证GB50157-2013规范要求,并满足人员通行与票务操作需求。设备区照明服务于配电室、机房等区域,多采用防爆型工矿灯与局部投光灯组合,在保障检修人员清晰视野的同时,通过IP65防护等级应对潮湿、粉尘环境。区间照明沿隧道壁间隔10-15米布设,采用抗震LED灯带。应急照明由双电源切换装置控制,配合智能疏散指示系统,断电瞬间导向标识自动切

换至800mcd高亮模式。导向照明则通过LED地埋灯、墙面指示灯构成立体引导网络,配合动态箭头指示,辅助乘客快速定位出入口与换乘通道。

(二) 照明特点

地铁照明系统呈现显著的运行特性。从时间维度看,日均18-20小时连续运行,年累计点亮时长超6500小时,对灯具耐久性提出极高要求。空间层面,站厅、站台需维持高亮度均匀照明,而设备走廊、隧道区间仅需基础照度,形成0.3-1.0cd/m²的梯度化需求。可靠性方面分析,供电系统普遍采用双回路冗余设计,故障切换时间控制在0.3秒内,确保照明无间断。节能需求推动技术升级,调光系统通过0-10V/PWM接口实现灯具亮度2%-100%动态调节,结合传感器联动,可降低30%-50%能耗。同时,系统必须符合《城市轨道交通照明设计标准》,限制眩光值 $UGR \leq 22$,频闪比 $< 3.3\%$,保障乘客视觉舒适度与安全性^[1]。

二、地铁照明系统智能调光控制的优势

(一) 节能效果显著

智能调光系统通过精准调控亮度实现能耗降低。依据时段、环境光及人流量动态调节，如深夜降低公共区亮度，白天利用自然光减少人工照明。调光模块支持 2%-100% 亮度调节，配合 0-10V/PWM 接口，可使照明系统能耗下降 30%-50%，契合地铁节能增效需求。

(二) 提升照明质量

基于传感器反馈数据，系统自动优化照明参数。清晨傍晚调节色温模拟自然光，出入口处根据室外亮度平滑过渡照明，避免视觉不适。严格控制眩光值 $UGR \leq 22$ 、频闪比 $< 3.3\%$ ，满足 GB 50034-2013 标准，为乘客营造舒适、稳定的光环境。

(三) 延长灯具寿命

减少灯具频繁开关与高负荷运行是关键。智能系统通过亮度渐变替代直接启停，降低电流冲击；根据需求动态调节功率，避免长时间满负荷工作。数据显示，采用智能调光后，灯具更换周期可延长 2-3 倍，有效降低运维成本。

(四) 提高管理效率

远程集中监控与自动化控制重塑管理模式。管理人员通过中央控制系统实时查看灯具状态，故障时自动报警并定位。预设时间表结合传感器数据实现自动调光，无需人工巡检，减少人力投入，提升照明系统管理的及时性与精准度。

三、地铁照明系统的智能调光控制策略

(一) 基于时间的调光策略

基于时间的调光策略以地铁运营时刻表为基础，通过划分不同时段设定差异化照明亮度。具体实施时，首先需将全天运营时间划分为高峰时段（如早 6:30-9:00、晚 17:00-19:30）、平峰时段（高峰时段外的运营时间）及停运时段（夜间闭站后）。高峰时段，为保障乘客安全与通行效率，站厅、站台公共区照明需维持 100% 亮度；平峰时段人流量减少，可将亮度调至 70%，既能满足基本照明需求，又能降低能耗。

地铁停运时段，公共区只需保留必要的应急照明和疏散指示，如需设备检修则还需要保留部分基础照明，亮度控制在 10%-20%。系统依靠内部所设置的时钟模块可以保证精准触发时间。实际操作中，中央控制系统还可以制定时间-亮度对应表。比如，系统根据北方冬季昼短夜长的特点，可将低亮度时段适当延长，夏季则缩短低亮时段。一般情况下，上述策略需要配合区间照明，列车停运后隧道照明切换为最低亮度模式，以减少电力资源的消耗，同时缩短灯具工作时长，延长灯具使用寿命^[2]。

(二) 基于人流量的调光策略

基于人流量的调光策略离不开传感器所具备的实时采集

数据的功能。基于此，系统根据传感器采集的数据可以动态调整地铁照明灯具的亮度。工作人员需要将红外或微波传感器安装在地铁车站出入口、楼梯、站台边缘等人流密集的区域。这些传感器会检测人体移动产生的信号，统计单位时间内通过的人数，并将统计数据向区域控制器传输。一旦传感器检测到每分钟人流量超过设定阈值，此时系统则判定地铁站为高流量状态，区域控制器立即需要提高区域照明亮度，使其提升至 90%，以满足乘客对充足照明的需求，避免光线不足而引发的安全事故。

如果人流量低于 10 人/分钟该阈值，系统则会自动将亮度调至 50%。系统还可以设置 3-5 分钟的延迟时间，以避免短暂人流量波动频繁调节亮度，确保数据稳定后再执行接下来的调光操作。针对大型换乘站则可以采用分区控制方式，将站厅、站台划分为多个区域，每个区域均具备独立监测人流量并调光的功能，比如，非换乘通道区域人流量相对不高时，系统会维持该区域较低的亮度，而在换乘通道则会保持较高的亮度，以此平衡精准节能与按需照明的关系^[3]。

(三) 基于自然光的调光策略

基于自然光的调光策略需要工作人员合理利用外界光照条件，减少人工照明所产生的能耗。工作人员需要将高精度传感器安装在地铁车站出入口、靠近地面的站厅及通风口等区域。所安装的传感器可以实现对环境光照强度的实时检测，一旦检测到外界自然光强度达到设定阈值说明光线充足，系统便会自动降低人工照明亮度，将亮度调为 30%，只提供辅助照明服务。一旦自然光强度低于 1000lux，系统会判定该区域存在光照不足的情况，随后逐步提升人工照明亮度至 80%，以确保该区域照度满足规范要求。

地下车站可以通过天窗、光导纤维等装置将自然光引入，并结合照度传感器反馈调节光亮。工作人员在设置系统时需要根据不同季节、天气情况调整调光阈值。夏季晴天自然光较强，可以适当提高系统所设阈值；冬季阴天光线弱，则可以适当降低系统阈值。同时，工作人员也可以设置 $\pm 500\text{lux}$ 的缓冲区间，起到避免自然光波动频繁调节照明的作用。当光照强度在缓冲范围内时，当前照明亮度可以保持不变，确保照明稳定性。此项策略在有效降低能耗的同时，还可以减少因人工照明所排放的热量，降低车站内空调系统压力。

(四) 综合调光策略

综合调光策略整合时间、人流量、自然光三种单一策略的优势，实现更精准高效的照明控制。实施时，中央控制系统需同时接收时间、人流量传感器、照度传感器的多源数据，并通过预设算法进行分析处理。例如，在白天平峰时段，若自然光充足且人流量较少，系统优先根据自然光强度降低照明亮度，

同时结合人流量数据，仅在有人活动区域保持适度照明，无人区域维持最低亮度；若此时人流量突然增加，则立即提高照明亮度，保障乘客安全。

在夜间停运时段，即便检测到少量人员（如设备维护人员），系统也仅在人员活动轨迹范围内，依据人流量数据动态调光，其余区域保持低亮度。对于地下站、高架站、换乘站等不同类型车站，可通过设置差异化参数，优化综合策略。如高架站自然光充足，自然光策略权重可提高；换乘站人流量复杂，人流量策略占比相应增加。此外，系统还可结合节假日、特殊活动等情况，临时调整调光参数，如节假日延长高峰时段照明亮度维持时间，确保乘客获得良好的出行体验，同时实现能耗与照明需求的最佳平衡^[4]。

四、地铁照明系统的智能调光系统的设计实施

（一）系统架构设计

智能调光系统的构建要以系统架构设计作为基础。整体采用涵盖中央控制单元、区域控制器、调光模块和传感器等部分的分层分布式架构。其中，中央控制单元要部署在地铁控制中心，该核心部件具备强大的数据处理和决策能力，可以通过通信网络收集各区域传感器数据，并依据预设调光策略生成控制指令。分布在各车站或隧道区间的区域控制器，负责接收中央控制单元指令，并将所接受的指令转化为具体的调光信号向调光模块进行传输。同时，区域控制器还可以实时监测并反馈本区域内设备运行情况。

调光模块直接与照明灯具相连，可根据接收到的信号精确调节灯具亮度。其应具备多种调光方式，如 PWM 调光、0-10V 调光等，以适应不同类型的灯具。传感器则包括时间传感器、人流量传感器和照度传感器等，分布在地铁各关键区域，实时采集环境数据。通信网络采用有线和无线相结合的方式，有线部分如 RS485、CAN 总线确保数据传输的稳定性和可靠性，无线部分如 ZigBee、Wi-Fi 用于灵活部署和补充覆盖。在设计时，要充分考虑系统的可扩展性和兼容性，为后续的功能升级和设备接入预留接口。

（二）硬件选型与安装

硬件选型与安装需综合考虑性能、可靠性和成本等因素。调光模块要根据灯具类型和功率进行选择，对于 LED 灯具，优先选用 PWM 调光模块，因其调光精度高、无频闪。要确保调光模块的负载能力与灯具匹配，避免过载损坏。人流量传感器可选用红外或微波传感器，安装在车站出入口、楼梯口等人员流动频繁的区域，安装高度和角度要保证能准确检测人员活动。照度传感器应安装在能充分接收自然光的位置，如车站出入口、靠近窗户的站厅区域，安装时要注意避免遮挡，确保测量

数据准确。

通信设备要根据通信网络架构选择，如采用 RS485 通信时，要选用质量可靠的转换器和线缆，并做好接地处理，防止信号干扰。安装过程中，要严格按照施工规范进行布线和设备固定，确保硬件设备的稳定运行。同时，要对硬件设备进行标识和编号，便于后续的维护和管理。

（三）软件系统开发调试

软件系统开发调试是实现智能调光功能的关键环节。开发前，要明确系统功能需求，包括调光策略设置、实时数据监测、远程控制、故障诊断与报警等。采用模块化设计理念，将不同功能封装成独立的模块，便于开发和维护。在开发过程中，要遵循相关的编程规范和标准，确保代码的可读性和可维护性。

对于调光策略设置模块，要支持多种调光策略的组合和灵活配置，用户可以根据实际需求进行调整。实时数据监测模块要能够准确显示传感器采集的数据和照明设备的运行状态。远程控制模块要具备良好的用户界面，方便管理人员进行操作。故障诊断与报警模块要能够及时发现系统故障，并通过声光、短信等方式通知相关人员。

开发完成后，要进行全面的调试工作。首先进行单元测试，对每个模块的功能进行验证，确保其正常运行。然后进行集成测试，检查模块之间的接口和数据交互是否正常。最后进行系统测试，在实际环境中模拟各种工况，对系统的整体性能进行评估。在调试过程中，要及时记录和解决出现的问题，确保软件系统的稳定性和可靠性^[5]。

五、结语

综上所述，地铁照明系统的智能调光控制，在顺应节能环保时代趋势的同时，显著提升了照明系统的运行效率。地铁车站全面落实基于时间、人流量、自然光等多维数据驱动的调光策略，可将精准照明与能源优化有机结合起来，为城市轨道交通的可持续发展提供了强有力的技术支撑。

【参考文献】

- [1]李家旭, 李小亚, 刘海浪, 等. 地铁直流智能照明系统的调光应用分析[J]. 照明工程学报, 2022, 33(2): 76-83.
- [2]孙二杰. 智能照明系统在济南地铁 1 号线的应用[J]. 光源与照明, 2022(3): 49-51.
- [3]王道蕴. 智能照明系统在国内地铁项目中的应用研究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(1): 118-120.
- [4]帅品格. 地铁车站照明系统节能研究与应用[D]. 江西: 南昌大学, 2022.
- [5]包仕瑾. 地铁动力照明智能化设计关键技术研究[J]. 中国照明电器, 2024(7): 63-65.