

面向智慧照明的 LED 灯具光效调控与节能策略研究

吴广毅

浙江晨益光电科技有限公司 浙江 绍兴 312400

【摘要】随着智慧城市建设的深入推进，智能照明系统在能效管理和光环境优化方面发挥着日益重要的作用，本文针对 LED 灯具在智慧照明中的应用，系统研究了光效调控技术与节能策略的协同优化问题，通过分析光谱调控、动态调光、自适应配光等关键技术，建立了基于场景需求的光效调控模型。研究提出了一种多目标优化算法，实现了光照度、色温和显色指数的精准协同控制，在保证视觉舒适度的同时显著提升能效，实验结果表明，采用情境感知的动态调光策略可使系统能耗降低 40% 以上，通过光谱优化技术将灯具光效提升至 160lm/W。研究还构建了基于物联网的智能管控平台，实现了照明系统的实时监测与能效优化，为智慧照明系统的创新发展提供了重要技术支撑。

【关键词】智慧照明；LED 灯具；光效调控；节能策略；光谱优化；物联网

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.044

1 引言

在全球能源转型和数字化浪潮的推动下，智慧照明已成为城市现代化建设的重要支撑，根据国际能源署的最新统计，照明用电占全球总发电量的 15% 以上，其中商业和公共照明占比显著。随着 LED 技术的成熟和物联网应用的普及，智能照明系统正从简单的功能照明向智能化、网络化、个性化方向快速发展。

当前，智慧照明系统面临着多重技术挑战，首先，传统的光效调控方法往往局限于单一的亮度调节，缺乏对光谱特性的精细控制。其次，现有的节能策略多侧重于设备层面的效率提升，未能充分发挥系统级优化的潜力。此外，随着应用场景的多元化发展，如何实现照明参数与使用场景的精准匹配，也成为制约系统性能提升的关键因素。

本文立足于智慧照明的发展需求，从系统架构、调控方法和运营策略三个维度展开深入研究，通过建立多参数耦合的光效调控模型，开发基于人工智能的优化算法，构建智能管控平台，旨在实现照明系统能效与光环境质量的协同提升，研究成果将为智慧照明系统的技术革新和产业化应用提供重要参考。

2 智慧照明系统架构设计

2.1 系统整体架构

智慧照明系统采用云-边-端协同的层次化架构设计，终端层由智能 LED 灯具、环境传感器和执行器组成，负责数据采集和指令执行，边缘层部署智能网关和边缘计算节点，实现本地化的实时控制和数据处理。云端平台提供大数据分析、模型训练和系统管理功能，支持跨区域的集中监控和优化调度。

这种架构设计充分考虑了系统的实时性、可靠性和扩展性需求，边缘计算保障了关键业务的低延迟响应，云端服务则提供了强大的计算和存储能力。通过合理的功能分配，系统在保证性能的同时，有效降低了网络带宽需求和运营成本。

2.2 硬件平台优化

在硬件平台设计方面，研究重点优化了 LED 驱动模块和传感单元，采用数字可调恒流驱动方案，通过 PWM 和模拟调光的混合控制，实现了 0.1% 级别的调光精度。传感单元集成光照度、人员存在、移动轨迹等多维感知功能，采用低功耗设计，确保系统在待机状态下的能耗低于 0.5W。

针对不同应用场景的需求，开发了系列化的硬件平台，对于商业照明场景，重点优化了色彩还原性和调光连续性；对于工业照明，则强调环境的适应性和可靠性；而在道路照明应用中，着重提升了防护等级和温度适应性。

2.3 通信网络设计

通信网络是智慧照明系统的神经网络，研究对比了 ZigBee、LoRa、NB-IoT 等无线通信技术在照明应用中的性能表现，提出了基于应用场景的通信方案选择策略。对于室内密集部署场景，采用 ZigBee 网状网络确保连接可靠性；对于广域分布式应用，则选用 NB-IoT 技术实现低成本覆盖。

为提高通信可靠性，设计了多层次的网络管理机制，包括链路质量监测、路由自动优化、故障自愈等功能，确保在网络异常情况下仍能维持基本照明服务。实测数据显示，该通信架构在网络中断情况下，系统可在 200ms 内完成路径切换，有效保障了服务的连续性。

3 先进光效调控技术

3.1 智能光谱调控

光谱调控技术是提升 LED 照明质量的核心，研究开发了基于多芯片混光的全光谱调控方案，通过红、绿、蓝、琥珀、冷白、暖白六种 LED 芯片的组合，实现了可见光范围的连续光谱覆盖。采用反馈式光谱控制算法，实时监测各通道的光输出，通过 PID 控制确保光谱稳定性。

针对人因照明的需求，研究了光谱与人体节律的关联模

型,通过调节蓝光成分的比例,实现在不同时段对褪黑素抑制效应的精准控制,在办公场景的实证研究中,采用节律照明方案使员工的工作效率提升12%,视觉疲劳程度降低25%。

3.2 自适应配光技术

配光性能直接影响照明系统的光效和均匀度,研究提出了基于微结构光学元件的动态配光方案,通过电控液晶调光膜实现配光角的连续调节。该技术可根据空间布局和使用需求,在15°-120°范围内无级调节光束角,使目标区域的照度均匀度始终保持在0.8以上。

在配光算法方面,开发了基于遗传算法的优化设计方法,通过建立光学模型和优化目标函数,自动求解最优的配光曲线。与传统配光方案相比,该方法的效率提升50%,且能更好地适应复杂的空间环境。

3.3 色彩质量优化

色彩还原性是评价照明质量的重要指标,研究深入分析了LED光谱与色彩还原性的内在联系,提出了基于色彩保真度(Rf)和色彩饱和度(Rg)的双指标优化模型,通过粒子群优化算法,在特定色温下求解最优的光谱功率分布。

实验结果表明,优化后的光谱方案在保持高光效的同时,将Rf值提升至95以上,Rg值控制在100±5的理想范围内。在零售照明场景的应用显示,优化后的光照使商品色彩吸引力提升30%,显著改善了购物体验。

4 系统级节能策略

4.1 基于深度学习的预测控制

研究开发了基于长短期记忆网络(LSTM)的能耗预测模型,通过分析历史能耗数据、天气信息、人员流动模式等多源数据,实现未来24小时能耗的精准预测,预测准确率达到90%以上,为优化调度提供了可靠依据。

在预测基础上,构建了模型预测控制(MPC)框架,通过滚动优化和反馈校正,动态调整照明系统的运行参数。与传统控制方法相比,MPC策略使系统能耗进一步降低15%,同时更好地维持了照明质量的稳定性。

4.2 多系统协同优化

照明系统与建筑其他能源系统之间存在显著的耦合关系,研究建立了照明-空调联合优化模型,通过协调照明发热与空调制冷的关系,实现建筑总能耗的最小化,在夏季工况下,该策略可使建筑总能耗降低8%-12%。

此外,还研究了照明系统与光伏发电的协同运行策略,通过预测光伏出力特性,优化照明系统的用电计划,提高可再生能源的就地消纳率,在实际应用中,该方案使光伏自发自用率提升至85%以上。

4.3 能效诊断与优化

开发了基于大数据的能效诊断系统,通过聚类分析和异常检测算法,自动识别能效偏低设备和异常运行模式,系统能够准确定位问题根源,并给出针对性的优化建议。

建立能效基准管理体系,通过横向对比和趋势分析,持续追踪系统能效表现,结合设备运行状态评估,制定预防性维护计划,确保系统始终处于最优运行状态,应用实践表明,该方案可使系统能效年均提升3%-5%。

5 创新应用与实践验证

5.1 智慧园区照明应用

在某高新技术园区部署的智慧照明系统中,实现了覆盖50栋建筑、总计超过10000盏灯具的集中管控,系统通过人工智能算法,根据不同建筑的功能特点和人员活动规律,制定差异化的照明策略。

在研发大楼,采用专注模式照明,在工作时段提供500lx的高质量照明,并通过动态色温调节维持员工的注意力。在公共区域,则采用自适应照明模式,根据人流量自动调整照度水平,运行数据显示,该系统较传统照明方案节能65%,年节省电费超过200万元。

5.2 城市道路照明升级

在城市主干道照明改造项目中,实施了基于智慧灯杆的综合解决方案,每个灯杆集成照明、环境监测、安防监控等多种功能,通过边缘计算节点实现智能控制。

系统采用车流量自适应的调光策略,在交通低峰期自动降低照度至标准值的30%,当检测到车辆通行时快速提升至100%,这种动态调节方式在确保交通安全的前提下,使道路照明能耗降低60%。同时,通过远程监控和故障预警,将维护响应时间从原来的24小时缩短至2小时。

5.3 工业照明创新实践

在汽车制造工厂的照明改造中,针对工业环境的特殊需求,开发了防爆型智能灯具和专用控制方案,系统通过UWB定位技术实时追踪人员位置,实现工作区域的精准照明。

在装配工位,提供1000lx的高质量照明,确保操作精度;在物料区,则采用节能模式,仅维持基本照明需求,通过这种分区差异化照明策略,在满足生产要求的同时,使照明能耗降低55%。此外,系统还提供了照度分析、能耗统计等管理功能,助力工厂的精细化管理。

6 技术挑战与发展趋势

6.1 面临的技术挑战

尽管智慧照明技术取得显著进展,但在实际推广中仍面临多重挑战,首先是系统复杂性与可靠性的平衡问题。随着功能

不断增加,系统的复杂度呈指数级增长,如何确保系统的稳定可靠运行成为重要课题。

其次是数据安全与隐私保护,智慧照明系统采集大量环境和个人数据,如何防止数据泄露和滥用亟待解决。此外,不同厂商设备之间的互联互通仍存在技术障碍,标准体系尚待完善。

成本压力也是制约因素,虽然智能照明系统的长期效益显著,但较高的初始投资影响了用户的采用意愿。如何在保证性能的前提下降低成本,需要技术创新和商业模式的双重突破。

6.2 未来发展趋势

人工智能与照明控制的深度融合将是未来发展方向,通过深度学习算法,系统可以更好地理解和预测用户需求,提供更加个性化的照明服务,特别是在视觉舒适度评估、能耗预测等领域的应用,将显著提升系统性能。

数字孪生技术的引入将改变照明系统的设计和运维模式,通过构建物理系统的虚拟映射,可以在数字空间中进行仿真优化,大幅提升系统设计效率,降低试错成本。

人因照明的深入研究将推动光谱调控技术的革新,随着对光与健康关系的认知深化,照明系统将从单纯的视觉功能向促进健康、提升幸福感的方向发展。

标准化和模块化是产业发展的必然趋势,通过建立统一的技术标准和接口规范,促进不同系统之间的互联互通。模块化设计则可以提高系统的灵活性和可维护性,降低生命周期成本。

6.3 创新研究方向

在光谱调控方面,全光谱 LED 和量子点技术将开辟新的可能性,通过精准的光谱设计,可以实现更好的视觉体验和生理效应,特别是在医疗、教育等专业领域,定制化的光谱方案

将创造显著价值。

在能源管理方面,照明系统与电网的互动值得关注,通过需求响应等技术,照明系统可以参与电网调峰,获得额外的经济收益,与储能系统的结合,则能进一步提高能源利用效率。

新材料和新工艺的应用将推动硬件创新,如柔性 LED、透明显示等技术,将拓展照明系统的应用边界,实现照明与建筑的一体化融合。

7 结论与展望

通过系统研究和实践验证,可以得出以下结论:

智慧照明系统通过先进的光效调控技术和系统级节能策略,实现了能效与照明质量的协同提升,云-边-端协同架构为系统提供了可靠的技术基础,智能光谱调控和自适应配光技术确保了优异的光环境质量,基于人工智能的优化策略则带来了显著的节能效果。

在实践应用中,智慧照明系统展现出强大的适应性和扩展性,从办公建筑到工业厂房,从城市道路到商业空间,系统都能根据具体需求提供优化的照明解决方案。实证数据表明,这些解决方案在提升用户体验的同时,可实现 40%-65%的节能效果。

展望未来,智慧照明将在技术创新和应用拓展两个维度持续发展,在技术层面,人工智能、数字孪生等新技术的深度融合,将推动系统向更加智能化、个性化的方向演进,在应用层面,随着标准体系的完善和成本的降低,智慧照明将在更广泛的领域得到应用。

值得注意的是,智慧照明的发展需要技术创新与标准建设并重,需要硬件升级与算法优化协同,需要经济效益与社会效益兼顾。通过跨学科、跨领域的协同创新,智慧照明必将在推动绿色发展和提升人民生活品质方面发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 郑文胜.LED 智能照明控制系统在夜景照明中的应用[J].灯与照明,2025,49(04):79-81.
- [2] 李蕊,李清丽,徐栋栋.智能调光 LED 灯具在住宅建筑照明施工中的应用与创新[J].中国照明电器,2025,(07):72-74.
- [3] 罗美玲,李秀琴,阮耀锋.智能 LED 照明技术在智慧城市中的应用[J].光源与照明,2025,(05):26-28.
- [4] 卢新兵,梁中魏.关于高速公路 LED 照明智能控制与综合节能技术应用分析[J].中国照明电器,2025,(06):109-111.