

智慧路灯控制系统在城市道路照明中的节能应用研究

马 欢

中节能晶和照明（江西）有限公司 江西 南昌 330096

摘 要：城市道路照明是城市基础设施能耗的重要组成部分，传统控制模式下的“定时开关、全夜常亮”方式导致了大量的能源浪费。智慧路灯控制系统以物联网、传感器、通信技术和智能控制算法为核心，通过对道路照明需求的实时感知和按需调节，实现了照明供给与交通流量的动态匹配。本文从城市道路照明的能耗特征与实际需求出发，系统分析智慧路灯控制系统的架构组成与核心功能，深入剖析其节能运行的机理——包括单灯调光、分时分段控制、环境自适应调节及人/车感应控制等策略，并探讨系统在可靠性、数据安全和运维管理等方面面临的现实挑战，提出推进智慧路灯控制系统的实施路径。研究表明，智慧路灯控制系统是实现城市道路照明节能降耗的有效技术手段，其节能效益在中等交通流量的城市道路上最为显著。

关键词：智慧路灯；道路照明；节能控制；物联网；单灯调光；按需照明

引言

城市道路照明能耗巨大，在“双碳”目标约束下，其节能改造至关重要。传统“定时开关、全夜常亮”的粗放模式忽视夜间交通流量的不均匀分布，导致能源浪费。智慧路灯控制系统应运而生，通过集成传感器、通信模块及智能终端，实现路灯感知、通信与调节一体化。该系统依据实时交通流量、环境照度及天气状况，对单盏路灯进行独立动态调光，落实“有人有车高亮、无人无车低亮”的按需照明策略，在保障交通安全的前提下最大化降低能耗。本文将系统分析该系统的架构、节能机理、应用效益及推进策略，探讨其在城市道路照明中的节能应用价值。

1 城市道路照明的能耗特征与节能潜力

1.1 道路照明的能耗构成与运营特征

城市道路照明系统的能耗主要由光源功耗和配电线路损耗两部分构成，其中光源功耗占比通常在90%以上。目前城市道路照明的主流光源为高压钠灯和LED灯，LED灯具因具有更高的光效和更长的使用寿命，正在逐步取代传统高压钠灯，成为新建和改造道路的首选方案。道路照明在时间维度上呈现明显的规律性，通常以日落和日出为启闭节点，夜间全程保持恒定照度输出。无论采用何种灯具，大部分城市道路照明设施每晚的运行时间长达10~12小时，全年累计达4000小时以上。在深夜时段（通常指23:00至次日5:00），城市道路的交通流量普遍降至峰值的10%~30%，照明需求量大幅下降，但灯具仍然维持满功率运行，构成了主要的无效能耗区间。

1.2 传统控制模式的能耗浪费分析

传统控制模式的能耗浪费主要源自三个方面。全夜

常亮的固定功率输出——城市道路的照明需求随时间和交通状态变化，而常亮模式无法响应这种变化，在低交通流时段造成了持续的电力空耗。缺乏对天气和环境变化的动态响应——在雨雾天气、路面湿滑等条件下需要适当提高照度以保障安全，而在晴朗且月光充足的良好天气下可以适度降低照度，传统定时控制无法对此做出区分，始终以统一亮度运行^[1]。照度冗余设计导致的常年超需运行——道路照明设计通常按最不利条件确定灯具功率和布设间距，这使得在绝大多数正常天气条件下，路面的实际照度超出了最低安全需求，形成长期性的“超量照明”。

1.3 节能控制的潜力与空间

节能潜力来源于“照明需求的时间不均”和“照明供给的恒定模式”之间的结构性错配。通过对深夜低交通流时段的照度进行合理降低，以及对良好天气条件下的适度调光，在保证交通安全的前提下，可实现节电。智慧路灯控制系统正是将这种“理论上的节能空间”转化为“实际可实现的节能效果”的技术桥梁。

2 智慧路灯控制系统的架构与核心功能

2.1 系统总体架构

智慧路灯控制系统采用“端—网—云”三层架构。终端感知层部署在每一盏路灯杆上，由LED光源、单灯控制器、调光电源、环境照度传感器、微波雷达或红外探测器等组成，负责灯具的本地控制和数据采集。网络通信层通过电力线载波、ZigBee、LoRa或NB-IoT等通信技术，将各路路灯终端连接成局域网络，再通过网关接入公网，将数据传输至云端管理平台。云端管理平台提供数据存储、设备管理、策略下发、状态监测和故障报警

等功能，是系统的决策核心和用户操作界面。

2.2 核心功能模块

智慧路灯控制系统由五大核心功能模块构成，共同支撑其节能高效运行。一是远程监控与管理，依托云端平台实时监测每盏路灯的电压、电流、功率及亮度等参数，支持管理人员通过多终端随时随地掌握设备状态。二是单灯独立调光，支持0%~100%无级调节，确保照明输出与需求精准匹配。三是策略化场景管理，根据道路等级、时段及天气预设全亮、节能等多模式，实现一键切换或自动触发。四是故障自动报警与工单派发，系统自动识别不亮、闪烁等故障并生成报警，同步推送至维护人员手机端以快速响应。五是数据采集与统计分析，持续记录运行能耗数据，自动生成日报、周报及月报，统计节电率、亮灯率等关键指标，为运维决策和节能评估提供坚实的数据支撑。

3 智慧路灯控制系统的节能控制策略

3.1 单灯智能调光策略

单灯智能调光是最基础的节能手段，也是其他节能策略的执行基础。调光策略的核心逻辑是：在交通流量低或环境照度较好的时段和路段，将路灯功率从100%降低至50%~70%；在深夜时段进一步降低至30%~50%；在黎明前再逐步恢复至全功率，以衔接日出的自然过渡。这种阶梯式的功率调节可以理解为将深夜时段的“常亮满功率”转化为“可变低功率”，从而避免了大量无效能耗^[2]。在技术实现上，单灯控制器根据云端平台下发的调光时间表或实时调光指令，调整LED驱动电源的输出电流，实现光源亮度的精准调节。调光过程应平滑渐变，避免因功率突变造成的视觉冲击和光源寿命损伤。

3.2 分时分段控制策略

不同等级的城市道路在不同时段的照明需求存在显著差异。分时分段控制策略正是基于这一差异实施的：在每天固定的时间节点（如22:00、23:00、0:00、5:00等），系统自动切换至对应的照明功率模式，逐级降低或恢复照明亮度，形成“夜间阶梯式调光”的运行曲线。在周末、节假日或特定大型活动期间，系统切换至相应的特殊时段模式，在保障活动安全的前提下避免不必要的能源浪费。在深夜至凌晨的极低交通流量时段，系统将路灯功率降至安全允许的最低值，仅维持基础照明（通常为额定功率的30%~40%）。

3.3 环境自适应控制策略

环境自适应控制是通过传感器实时感知环境光亮度，自动调节路灯输出亮度的闭环控制方式。当环境照度传感器检测到黄昏来临、自然光亮度降至设定阈值

时，系统自动开启路灯；黎明时分自然光亮度回升至设定阈值时，系统自动关闭路灯，无需依赖固定的日出日落时间表，能够适应阴雨天等特殊天气条件^[3]。在雨雾天气下，环境能见度降低，系统适当提高路灯功率以补偿散射损失，保障路面照度维持在安全水平，从而在不利天气条件下自动提高照明输出。在晴朗且月光充足的夜晚，路面已有一定的自然光补偿，系统适度降低路灯亮度而不影响路面总体照度。

3.4 人/车感应联动控制策略

人/车感应联动是智慧路灯系统中节能潜力最大但技术要求也最高的策略。其原理是在路灯杆上安装微波雷达、红外探测器或毫米波雷达，实时探测路灯周边道路上的行人和车辆移动情况。当探测范围内无人无车时，路灯自动降低至基础待机亮度（如额定功率的20%~30%）；当探测到行人或车辆进入该路段时，路灯在极短时间内（毫秒级）切换至全功率照明，并在行人或车辆离开后一定延时（通常30~60秒）后恢复待机亮度。这种策略在有非机动车和行人通行的次干道和支路上节能效果十分可观，但在车速较高的快速路和主干道上，需要兼顾驾驶安全视距，感应距离和响应速度的要求更高，通常采用车队联动方式——车辆进入某一路段时，前方多盏路灯同步提前亮起，保证安全视距范围内始终有充足的照明。

4 智慧路灯控制系统应用中的关键问题

4.1 系统的可靠性与稳定性

智慧路灯控制系统将传统路灯的“电源+光源”简单结构升级为“感知+通信+控制+光源”的复杂电子系统，系统复杂度显著提升。在户外环境下，电源波动、雷电感应、高温高湿等因素对电子设备的可靠性构成持续挑战。通信中断时控制指令无法下达、传感器失效时调光策略失去输入依据、单灯控制器故障导致整灯不可控等任一环节出现问题都可能影响道路照明的正常功能。应对策略包括：在系统架构上保留本地控制模式的冗余设计，通信中断时终端可按预设策略自主运行；关键设备采用工业级元器件，提高环境适应性；建立系统自诊断功能，实时监测各节点的健康状态，在故障发生前提前预警。

4.2 数据安全与隐私保护

智慧路灯系统在运行过程中采集和传输路灯的地理位置、运行状态和能耗数据，以及人/车感应检测到的交通流量信息。这些数据如果被恶意篡改或盗用，不仅可能影响照明控制的准确性，还可能引发对交通流量分布、特定区域行人活动规律等信息的间接推断，涉及公

共安全和隐私保护问题^[4]。需要从数据加密传输、分级授权访问、核心数据脱敏存储等层面构建安全防护体系,确保数据在采集、传输、存储和使用全链条的安全性。

4.3 初始投资与经济效益的平衡

智慧路灯控制系统的初始投资显著高于传统路灯——每盏灯需增加控制器、传感器和通信模块,加上系统平台建设和运维成本,整体造价约为传统路灯的1.5~2.5倍。对于财政紧张的城市而言,这笔初始投入是需要认真权衡的决策变量。成本回收主要通过节能电费和运维节约实现,其经济效益与道路的交通流量特征、电价水平和运行时长直接相关,通常在中等交通流量的次干道和支路上投资回收期最短(约3~5年),而在交通繁忙的主干道上由于节能空间有限,回收期相对较长(约6~8年)。

5 推进智慧路灯节能应用的实施路径

5.1 分区域分阶段推进的实施策略

智慧路灯系统的大规模部署应采取“试点先行、分步推广”的稳妥推进策略。试点阶段优先选择交通流量适中、节能潜力较大的次干道和城市支路作为智慧路灯的部署对象,验证系统在不同路况和气候条件下的运行效果,积累节能数据和运维经验。推广阶段由点及面,逐步向城市主干道和快速路延伸,将智慧路灯纳入新建道路的标配设计和既有道路的节能改造工程。分区实施有助于控制初始投资规模,在验证成效后再扩大范围,降低决策风险。

5.2 标准化与平台兼容性建设

智慧路灯控制系统的技术架构、通信协议和数据接口应在城市层面实现统一。统一技术标准确保不同厂商的设备能够互通互操作,避免因系统不兼容导致的重复建设和运维困难。统一数据接口便于系统接入城市级智慧管理平台,实现照明系统与交通、安防、环境监测等系统的信息共享与联动协同。在设备选型时,优先选择采用标准通信协议的成熟产品,减少定制开发和后续维护成本。

5.3 运维管理体系的配套转型

智慧路灯系统引入后,运维管理模式也需要相应转型。运维人员需要从传统路灯的“故障后抢修”模式升级为“数据驱动的预防性维护”——通过系统平台实时监测路灯的工作状态和参数,在故障发生前识别异常趋势并提前介入维护,减少突发故障和夜间巡查的人力投入。运维队伍的技能结构也需要同步升级,增加对控制系统、通信网络和数据分析的基本掌握能力,使技术与人员共同支撑智慧路灯系统的长期稳定运行。

结束语

智慧路灯控制系统通过将物联网、智能传感和通信技术引入城市道路照明管理,实现了照明供给与实时需求的动态匹配,从根本上改变了传统“定时开关、全夜常亮”的粗放能耗模式。本文系统分析了智慧路灯控制系统的技术架构与核心功能,深入阐述了单灯调光、分时分段控制、环境自适应和感应联动等节能策略的运行机理与适用条件,论证了其在城市道路照明中的节能价值。研究表明,智慧路灯控制系统在中等交通流量的道路上节能效益最为显著。然而,系统的大规模推广仍需统筹考虑初始投资、运行可靠性和运维管理转型等因素。智慧路灯控制系统的节能应用,不仅是道路照明技术升级的体现,更是城市公共基础设施从“功能保障型”向“低碳智能型”转型的缩影。

参考文献

- [1]赵跃宇,王磊,李明.基于物联网的智慧路灯控制系统架构与关键技术研究[J].照明工程学报,2022,33(4):56-63.
- [2]陈思,张华,杨帆.LED道路照明智能调光控制策略及节能效果分析[J].中国照明电器,2023(6):34-41.
- [3]刘洋,孙涛,周明.基于交通流感知的城市道路照明按需控制方法[J].交通运输系统工程与信息,2024,24(2):156-164.
- [4]王芳,赵岩,李磊.智慧城市背景下路灯系统多源数据融合与智能管控平台设计[J].物联网技术,2023,13(10):78-84.