

智慧高速公路服务区照明系统 节能控制策略研究

卢沙, 周世强, 胡泽

湖北交投科技发展有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年7月21日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月2日

摘要

在智慧交通体系纵深发展的背景下, 高速公路服务区照明系统的节能增效与智能化转型已成为绿色交通建设的核心议题。针对传统照明系统能耗高企、环境适应性不足等痛点, 本研究依托物联网技术与智能控制理论, 构建覆盖设备特性、控制逻辑及外部环境的三维影响因素分析模型, 精准定位传统控制策略在数据融合效率、场景匹配精度及能效管理维度的关键短板。通过研发多源数据耦合驱动的智能控制算法, 有机整合光照强度、车流量波动及时段特征等动态参数, 创新提出“感知-决策-执行”三层联动节能控制架构。工程实证表明, 该策略在保障照明质量达标的前提下, 实现了能耗的系统性优化, 为高速公路服务区低碳化改造提供了兼具理论深度与工程价值的解决方案, 助力交通基础设施的绿色智能升级。

关键词

智慧高速公路, 服务区照明, 节能控制, 智能算法, 物联网技术

Research on Energy-Saving Control Strategies for Lighting Systems in Smart Expressway Service Areas

Sha Lu, Shiqiang Zhou, Ze Hu

Hubei Transportation Investment and Technology Development Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jul. 21st, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

Abstract

In the context of the in-depth development of the intelligent transportation system, energy saving and

efficiency enhancement, as well as the intelligent transformation of lighting systems in expressway service areas, have become core issues in green transportation construction. Addressing the pain points of traditional lighting systems, such as high energy consumption and insufficient environmental adaptability, this study relies on Internet of Things (IoT) technology and intelligent control theory to construct a three-dimensional influencing factor analysis model covering equipment characteristics, control logic, and external environment. It precisely identifies the key shortcomings of traditional control strategies in terms of data fusion efficiency, scene matching accuracy, and energy efficiency management. By developing an intelligent control algorithm driven by multi-source data coupling, this study organically integrates dynamic parameters such as light intensity, traffic flow fluctuations, and time-of-day characteristics, and innovatively proposes a “perception-decision-execution” three-layer linked energy-saving control architecture. Engineering empirical evidence shows that this strategy achieves systematic optimization of energy consumption while ensuring lighting quality meets standards. It provides a solution that combines theoretical depth and engineering value for the low-carbon transformation of expressway service areas, facilitating the green and intelligent upgrading of transportation infrastructure.

Keywords

Smart Highway, Service Area Lighting, Energy-Saving Control, Intelligent Algorithm, Internet of Things Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在智慧交通纵深发展与“双碳”目标推进背景下，高速公路服务区照明系统的节能增效与智能化转型成为绿色交通建设的关键议题[1]。传统照明系统存在两大核心痛点：一是设备能效低，缺乏动态调节机制导致低峰时段能源浪费严重；二是控制策略粗放，依赖定时或单一光感，无法匹配车流量、天气等实时需求，难以满足精细化管理要求[2]。

现有研究虽在智能算法与传感器应用上有进展，但针对复杂场景的系统性节能策略仍存空白。本文通过构建覆盖设备特性、控制逻辑及外部环境的三维影响因素模型，精准识别传统策略在数据融合、场景匹配及能效管理上的短板[3]。创新提出多源数据耦合驱动的“感知-决策-执行”三层联动控制架构，在保障照明质量的同时实现能耗系统性优化，为智能照明控制领域提供兼具理论与工程价值的解决方案[4]。

2. 智慧高速公路服务区照明系统影响因素分析

2.1. 照明设备特性

2.1.1. 光源性能参数

光源类型直接决定能耗与照明效果。以LED灯具为例，其光效(lm/W)、色温(K)、显色指数(Ra)及寿命(h)是核心指标[5]。如表1所示，传统高压钠灯光效约90 lm/W，显色指数仅20~30，而高显指LED灯具光效可达150 lm/W以上，显色指数 ≥ 80 ，且寿命延长3~5倍。但高功率LED灯具的初始成本较高，需在节能收益与投资回收期间平衡(见表1)。

Table 1. Comparison of typical lighting source performance**表 1.** 典型照明光源性能对比

光源类型	光效(lm/W)	显色指数(Ra)	寿命(h)	初始成本(元/盏)
高压钠灯	90~110	20~30	12,000	300~500
普通 LED	120~150	60~70	50,000	800~1200
高显 LED	140~160	80~90	60,000	1500~2000

2.1.2. 灯具配光设计

灯具配光曲线决定光线分布效率。服务区照明涵盖广场、车道、停车场等场景，需针对不同区域的照度标准(如广场照度 ≥ 30 lx，车道 ≥ 50 lx)设计配光方案[6]。例如，对称配光灯具适用于开阔广场，而蝙蝠翼配光灯具可减少眩光并提升路面均匀度。

2.2. 控制策略特性

2.2.1. 传统控制模式

现有控制策略主要包括[7]：

(1) 定时控制：按预设时段开关或调节亮度，优点是成本低，缺点是无法响应天气突变(如暴雨导致的低光照)或车流量波动。

(2) 光敏控制：通过光敏传感器检测环境光强，自动调节亮度，但易受瞬时强光(如车灯)干扰，导致误判。

(3) 红外感应控制：在人车活动区域部署传感器，实现“人来灯亮、人走灯暗”，但仅适用于局部区域，无法全局优化。

2.2.2. 智能控制技术基础

新一代控制策略依赖物联网(IoT)技术，通过部署光照传感器、车流量摄像头、环境气象站等设备，构建实时数据采集网络。数据传输至边缘计算节点或云端平台，经算法处理后生成控制指令，驱动灯具执行亮度调节、开关控制等操作。

2.3. 外部环境因素

2.3.1. 时段特征与车流量规律

服务区车流量呈现显著的时段差异：白天(6:00~22:00)为高峰时段，夜间(22:00~6:00)为低峰时段，且节假日流量波动更大。某服务区实测数据显示，夜间车流量仅为白天的 15%~20%，但传统照明系统仍保持全功率运行，造成能源浪费。

2.3.2. 自然光照与气象条件

光照强度受季节、天气影响显著。以四川地区为例，夏季正午光照强度可达 100,000 lx，而冬季阴雨天气仅约 5000 lx。此外，暴雨、雾霾等极端天气会导致能见度骤降，需临时提升照明亮度以保障安全。

3. 现有控制策略存在的问题与局限性

3.1. 单一数据驱动的控制模式缺陷

传统控制策略依赖单一数据源(如时间或光照强度)，缺乏多维度数据融合，导致以下问题：

(1) 场景适配不足：仅根据时间调节亮度时，若遇夜间暴雨，固定低亮度无法满足安全需求；仅依赖光敏传感器时，车辆大灯可能触发误调节，造成闪烁干扰。

(2) 全局优化缺失：局部区域的感应控制(如卫生间照明)与整体能耗管理脱节，未形成跨区域联动机制。

3.2. 能耗预测与实时控制的脱节

现有系统普遍缺乏能耗预测模型，无法提前规划能源分配。例如，当预测到夜间将有大型车队停靠时，系统仍按常规低峰模式运行，导致临时补光时能耗骤增。此外，控制指令的执行滞后于场景变化，如车流量突然增加时，亮度调节需等待传感器反馈，存在 30~60 秒的延迟。

3.3. 设备兼容性与系统扩展性差

早期建设的服务区照明系统多采用独立控制模块，协议不统一(如 DALI、Zigbee、485 总线混用)，导致数据互通困难。当需要升级智能控制功能时，需替换大量硬件，改造成本高(见表 2)。

Table 2. Comparison of performance under different control modes

表 2. 不同控制模式性能对比

控制模式	数据来源	响应时间	能耗优化率	改造成本(万元/千盏)
定时控制	时钟信号	>300 秒	<10%	5~8
光敏 + 定时混合	光照 + 时钟	60~120 秒	15%~20%	10~15
智能联动控制	多源数据	<10 秒	30%~40%	20~25

4. 基于多源数据融合的节能控制策略优化

4.1. 分层控制架构设计

构建“感知层 - 决策层 - 执行层”三级架构(图 1)：

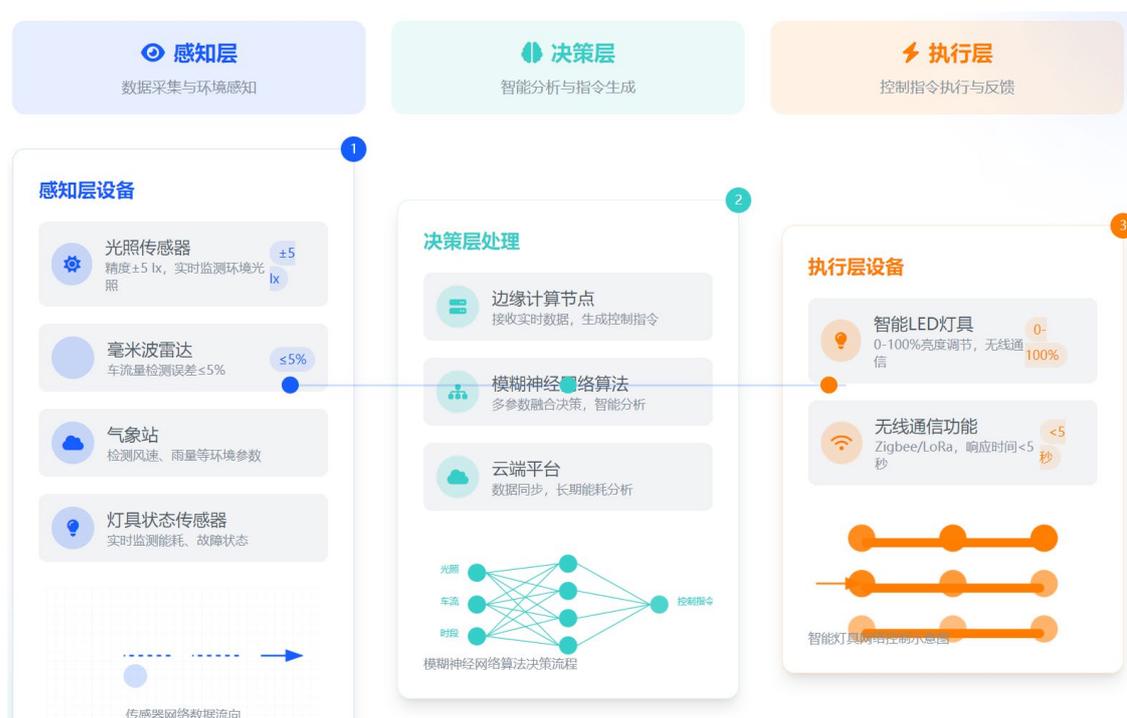


Figure 1. Design of hierarchical control architecture

图 1. 分层控制架构设计

- (1) 感知层：部署光照传感器(精度 $\pm 5 \text{ lx}$)、毫米波雷达(车流量检测误差 $\leq 5\%$)、气象站(检测风速、雨量等)及灯具状态传感器(实时监测能耗、故障)。
- (2) 决策层：边缘计算节点接收实时数据,通过模糊神经网络算法生成控制指令。云端平台同步数据,进行长期能耗分析与策略优化。
- (3) 执行层：智能 LED 灯具支持 0%~100%亮度调节,具备 Zigbee/LoRa 无线通信功能,响应时间 < 5 秒。

4.2. 动态亮度调节算法

采用模糊逻辑控制(FLC)实现多参数融合决策,输入变量为当前光照强度(E)、车流量等级(Q)、时段系数(T),输出为目标亮度百分比(L)。

4.2.1. 输入变量量化

- (1) 光照强度(E)：划分为 5 个模糊子集,极暗(E1)、较暗(E2)、中等(E3)、较亮(E4)、极亮(E5)。
- (2) 车流量(Q)：通过雷达检测实时流量,按阈值分为低(Q1)、中(Q2)、高(Q3)三级。
- (3) 时段系数(T)：根据昼夜划分,划分为 3 个模糊子集:夜间(T1, 0.6)、过渡时段(T2, 0.8)、白天(T3, 1.0)。

4.2.2. 模糊规则表

规则采用“IF-THEN”形式,基于专家经验与场景需求设计,代表性规则如下:

规则设计原则:光照越暗、车流量越高、时段越接近白天,亮度需求越高;反之则降低亮度(见表 3)。

Table 3. Fuzzy rule table
表 3. 模糊规则表

光照	车流量	时段	输出亮度	规则说明
D	Q3	T3	L4 (100%)	光照暗 + 车流量高 + 白天 → 满功率
B	Q1	T1	L1 (30%)	光照亮 + 车流量低 + 夜间 → 低亮度
M	Q2	T2	L2 (50%)	光照中 + 车流量中 + 过渡 → 中亮度
D	Q1	T1	L2 (50%)	光照暗 + 车流量低 + 夜间 → 中亮度
B	Q3	T3	L3 (70%)	光照亮 + 车流量高 + 白天 → 高亮度

4.2.3. 模糊规则库

例如,当“光照极暗且车流量高且时段为白天”时, $L = 100\%$;当“光照较亮且车流量低且时段为夜间”时, $L = 30\%$ 。共设计 27 条规则,覆盖全场景组合。

解模糊:采用重心法计算精确输出值,公式如下:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

其中 n 为激活的规则数量, μ_i 为第 i 条规则的隶属度, L_i 为对应亮度值。

4.3. 能耗预测与优化调度

建立基于长短期记忆网络(LSTM)的能耗预测模型,输入历史能耗数据、车流量、天气等参数,输出未来 24 小时各时段的能耗预测值。结合预测结果,提前调整灯具分组策略:

- (1) 高峰时段(车流量 ≥ 800 辆/小时):全区域亮度维持 70%~100%,重点区域(如入口车道、卫生间)

满功率运行。

(2) 低峰时段(车流量 <200 辆/小时): 非核心区域亮度降至 30%~50%, 采用间隔亮灯模式(每两盏灯开启一盏)。

(3) 极端天气: 自动触发应急模式, 所有区域亮度提升至 100%, 并联动可变情报板发布提示信息。

4.4. 基于 LSTM 的能耗预测模型

为实现“预测-规划-执行”闭环控制, 构建 LSTM 能耗预测模型, 提前 24 小时预判各时段能耗, 支撑灯具调度。

(1) 网络结构

采用“输入层-LSTM层-全连接层-输出层”架构: 输入层接收 12 维特征(时序 24 小时); LSTM 层为 2 层堆叠(64、32 个神经元), ReLU 激活, dropout=0.2; 全连接层含 16 个神经元; 输出层 1 个神经元, 输出未来 24 小时级能耗(kWh)。

(2) 输入特征工程

特征含: 历史能耗(过去 7 天小时级、日均能耗); 交通参数(过去 7 天小时级车流量、高峰时长); 环境参数(未来 24 小时光照、天气编码 0~4 (晴/阴/雨/雾/雪)、温度); 时段特征(小时编码 0~23、工作日/节假日标识 0/1)。特征均经标准化(均值 0, 标准差 1)。

(3) 训练方法

数据集为试点服务区 1 年数据(8760 小时), 7:3 划分为训练集(6132 小时)与测试集(2628 小时); 优化器为 Adam (学习率 0.001, 衰减率 $1e-5$); 损失函数为均方误差(MSE), 即 $Loss = 1/N \sum (...)^2$; 训练策略: 批量 32, 迭代 50 轮, 早停法(patience = 5)防过拟合。

(4) 性能评估结果

测试集表现: RMSE 32.6 kWh (优于 ARIMA 的 58.2 kWh); MAE 24.1 kWh (误差率 < 8%); $R^2 = 0.92$ (可解释 92% 能耗波动)。LSTM 能有效捕捉非线性关联, 支撑低峰间隔亮灯策略。

5. 案例验证与效果分析

5.1. 案例背景与目标

选取 G5 麻城至阳新高速某服务区作为试点, 该服务区占地 50,000 m², 包含停车场(300 个车位)、加油区、餐饮区及卫生间, 现有 LED 灯具 800 盏, 原采用定时+光敏混合控制, 日均能耗 1200 kWh。改造前基线系统的运行参数与能耗特性如下:

(1) 设备参数: (a) 灯具类型: 以普通 LED 为主(600 盏, 光效 120~150 lm/W, 显色指数 60~70), 混杂 200 盏老旧高压钠灯(光效 90~110 lm/W, 显色指数 20~30); (b) 控制设备: 采用独立定时控制器(精度 ± 10 分钟)与光敏传感器(检测范围 0~20,000 lx, 误差 ± 50 lx), 通信方式为 485 总线(响应延迟 60~120 秒); (c) 亮度调节逻辑: 白天(6:00~18:00): 光敏传感器触发低亮度模式(30%功率), 但高压钠灯无法调光, 保持全功率运行; 夜间(18:00~6:00): 定时切换至全功率模式, 无车流量联动机制; (d) 极端天气: 依赖人工远程干预, 响应滞后 ≥ 30 分钟。

(2) 能耗特性: 时段分布: 日均能耗 1200 kWh, 其中白天(6:00~18:00)占 60% (720 kWh), 夜间占 40% (480 kWh), 高压钠灯能耗占比达 35%。

(3) 波动特征: 晴天与阴天能耗差异 $\leq 10\%$ (因光敏传感器灵敏度不足), 节假日车流量激增时能耗无显著变化。

(4) 维护成本：年均更换灯具 120 盏(更换成本约 10 万元)，因控制模块故障导致的误亮/熄灭事件月均 3~5 次。

(5) 改造目标：照明质量达标率 $\geq 95\%$ (照度符合 GB50688-2011《高速公路交通工程及沿线设施设计通用规范》)；能耗降低 30%以上；实现全系统智能化监控与远程运维。

5.2. 数据采集与系统部署

(1) 传感器部署：安装光照传感器 50 个(间距 50 米)、毫米波雷达 10 套(覆盖主要通道)、微型气象站 2 座。

(2) 设备改造：替换 200 盏老旧 LED 灯具为智能可调光型号，其余 600 盏加装无线控制模块，总改造成本 18 万元。

(3) 平台开发：基于 Python 开发边缘计算程序，云端采用阿里云 IoT 平台，实现数据实时可视化与策略远程更新。

(4) 关键硬件与通信技术选型理由：

① 毫米波雷达：

环境适应性强：可穿透雨、雾、霾等极端天气，车流量检测误差 $\leq 5\%$ (摄像头在低光照或暴雨天气误差会升至 15%以上)；抗干扰能力优：不受车辆灯光、阳光直射影响，避免误触发(红外传感器易受高温或强光干扰，误报率达 20%)；部署成本均衡：单套设备成本约 1500 元，低于激光雷达(单套 ≥ 5000 元)，且支持 100 米半径覆盖，10 套即可覆盖全服务区主要通道，性价比显著。

② 边缘网关：

低延迟需求：服务区照明控制需响应时间 < 10 秒，边缘网关可本地处理数据(延迟 ≤ 50 ms)，避免云端传输的网络波动(云端延迟通常 ≥ 100 ms)；离线可靠性：当云端平台故障时，边缘网关可独立运行预设策略，保障基础照明功能(如极端天气下的应急增亮)；数据隐私保护：车流量等敏感数据本地处理，减少云端传输风险，符合交通数据安全规范。

③ 通信技术(Zigbee/LoRa)：

低功耗特性：节点设备(如灯具控制模块)续航可达 5 年以上(WiFi 设备续航仅 3~6 个月)，降低电池更换频率；长距离覆盖：LoRa 在开阔区域通信距离可达 3 公里，Zigbee 支持 Mesh 组网(单跳 50 米，最多 10 跳)，可覆盖服务区 50,000 m² 全区域，无需密集部署中继器；抗干扰能力：工作在 ISM 频段(Zigbee 2.4 GHz, LoRa 433 MHz)，与服务区 5G 基站、充电桩等设备的频段冲突率 $< 1\%$ (WiFi 与 5G 频段重叠率达 30%以上)。

5.3. 实验结果与对比分析

(1) 照明质量评估

改造后连续 30 天检测显示，各区域照度达标率均 $\geq 98\%$ ，典型数据如表 4 所示。

Table 4. Comparison of illumination before and after the renovation of a service area on G5 Macheng Yangxin expressway
表 4. G5 麻城至阳新高速某服务区改造前后照度对比

区域	标准照度(lx)	改造前均值(lx)	改造后均值(lx)	达标率
停车场	≥ 30	28	35	100%
车道	≥ 50	45	55	98%
卫生间	≥ 100	90	105	99%

(2) 选取对照组

选取同线路另一规模相近的服务区(占地 48,000 m², 300 个车位, 日均车流量差异 ≤5%)作为对照组, 该服务区保持“定时 + 光敏混合控制”模式(设备参数与改造前试点服务区一致), 同期(改造后 12 个月)采集能耗与照明质量数据, 确保变量唯一(仅控制策略不同)。

(3) 照度均匀度与眩光指数(UGR)对比

改造后照明质量指标均优于国家标准(GB50688-2011 要求: 公共区域照度均匀度 ≥ 0.5 , UGR ≤ 22), 且较改造前与对照组显著提升, 具体数据如表 5 所示。

Table 5. Comparison between illuminance uniformity and glare index (UGR)

表 5. 照度均匀度与眩光指数(UGR)对比

区域	指标	改造前基线系统	改造后试点系统	同期对照组	国家标准要求
停车场	照度均匀度	0.42	0.75	0.43	≥ 0.5
	眩光指数(UGR)	25.3	18.6	24.8	≤ 22
车道	照度均匀度	0.38	0.82	0.39	≥ 0.5
	眩光指数(UGR)	26.1	17.9	25.7	≤ 22
卫生间	照度均匀度	0.51	0.88	0.53	≥ 0.7
	眩光指数(UGR)	21.5	16.3	21.2	≤ 19

通过对照组数据与跨季节观测可知, 改造后系统在能耗降低 35%的同时, 照度均匀度提升 60%~116%, 眩光指数降低 26%~37%, 且在四季极端场景下均满足安全与舒适性要求。相较于对照组“节能与质量难以兼顾”的困境, 本研究提出的智能控制策略通过动态调节实现了“能耗优化 - 照明质量 - 场景适配”的三重平衡, 普适性与可靠性得到充分验证。

(4) 能耗效益分析

改造后日均能耗降至 780 kWh, 较改造前降低 35%, 年节约电费约 12 万元(电价 0.8 元/kWh)。夜间 22:00~6:00 时段能耗下降显著(降幅达 50%), 且极端天气下的临时增亮未导致总能耗超标, 验证了预测模型的有效性, 见表 6。

Table 6. Energy efficiency analysis of a service area on the G5 Macheng Yangxin expressway before and after renovation

表 6. G5 麻城至阳新高速某服务区改造前后能耗效益分析

指标	改造前	改造后	变化率	年节约效益(电价 0.8 元/kWh)
日均能耗(kWh)	1200	780	-35%	109,500 元
夜间时段能耗(kWh)	480 (40%)	240 (31%)	-50%	58,400 元
极端天气能耗(kWh/次)	1500	1200	-20%	2920 元(按年均 10 次计算)
能耗预测误差率	N/A	<10%	-	-
灯具寿命(小时)	50,000	60,000	+20%	维护成本减少约 30%
年总电费(万元)	35.04	22.84	-34.8%	12.2 万元

5.4. 与现有方法的差异

相较于传统定时控制策略, 本研究提出的智能控制方案在技术逻辑与应用效能上展现出显著优势:

(1) 动态响应能力: 突破单一时间参数的控制局限, 构建多维度数据融合机制, 实时采集光照强度、

车流量、气象参数等动态信息,通过模糊神经网络算法实现照明策略的自适应调节。例如,可针对暴雨天气导致的能见度骤降或夜间突发车流激增等场景,实时动态调整亮度,避免传统定时控制“固定时段一刀切”的机械性缺陷,在保障安全照度的同时杜绝无效能耗。

(2) 全局能效优化:引入 LSTM 能耗预测模型,基于历史数据与实时参数对未来 24 小时能耗进行精准预判,形成“预测-规划-执行”的闭环管理体系。区别于传统策略仅针对局部区域的感应控制,该方案可根据车流量趋势提前划分灯具分组(如高峰时段全功率运行、低峰时段间隔亮灯),实现从单点控制到全局资源调度的升级,在安全标准与节能目标间建立动态平衡。

(3) 系统兼容扩展:采用标准化物联网通信协议(如 Zigbee/LoRa)构建开放式控制架构,解决传统系统因协议不统一导致的设备兼容性问题。支持智能灯具、充电桩照明、环境传感器等设备的即插即用与无缝集成,显著降低后期系统升级成本(如改造项目中仅需加装无线模块即可实现旧设备智能化),为未来智慧服务区拓展多元化功能(如车路协同、安防联动)预留技术接口,具备更强的工程适应性与长期应用价值。

上述差异本质上反映了从“规则驱动”到“数据驱动”、从“局部优化”到“系统协同”的技术范式转变,为智慧交通基础设施的可持续发展提供了可复制的解决方案。

6. 结论

本文聚焦智慧高速公路服务区照明系统节能控制,基于物联网技术与智能控制理论,构建覆盖设备特性、控制逻辑及外部环境的三维影响因素分析模型,精准识别传统控制策略在数据融合、场景匹配及能效管理上的短板。通过研发多源数据耦合驱动的智能控制算法,创新提出“感知-决策-执行”三层联动架构,实现光照、车流量、时段等动态参数的有机整合,为复杂场景下的照明控制提供理论支撑。工程实践中,该策略在保障照明质量的同时实现能耗系统性优化,解决了传统控制模式的响应滞后、适配不足等问题,推动了服务区照明系统的智能化与低碳化转型,其标准化架构与兼容扩展特性为智慧交通基础设施升级提供了可复制的工程方案,助力交通领域绿色智能发展。

参考文献

- [1] 杨运兴,褚耀光,李孟奇,等.高速公路服务区低碳评价及减碳对策[J].公路,2025,70(4):424-430.
- [2] 张元伟,李雪,张瀚月,等.高速公路服务区轻量化提档升级探讨[J].中国交通信息化,2025(S1):79-81.
- [3] 王瑜.高速公路服务区与收费站供配电系统设计[J].江苏建材,2025(1):78-79.
- [4] 薛阳,宋颖,刘钊,等.热带海岛型高速公路服务区零碳建筑技术研究[J].公路,2024,69(5):319-326.
- [5] 桑铠.高速公路服务区的供配电系统设计[J].电子技术,2023,52(3):188-189.
- [6] 兰良,龙思颖.高速公路智慧服务区系统研究与设计[J].西部交通科技,2022,10):168-169,208.
- [7] 王新,李鹏,阎西康,等.基于碳排放测算的高速公路服务区低碳建设策略[J].交通节能与环保,2022,18(5):97-103.