

基于物联网的高速公路隧道照明节能控制技术研究

郑军, 刘海燕, 颜家远

贵州建设职业技术学院, 贵州 贵阳 551400

DOI: 10.61369/SSSD.2026040036

摘 要 : 基于隧道的安全照明与节能需求, 提出了车速与车流量变化的隧道照明补偿模型, 研究得到智能调光控制算法模型, 并基于物联网研发了隧道照明智能控制系统, 系统设置主控雷达、分段雷达、分段调光控制箱等末端设施, 在常规调光基础上增加了伴随式分段自动调光控制, 实现了“车来灯亮、车走灯暗、灯随车走的”安全节能照明效果。通过在长度为2060米的高速公路双向隧道进行测试分析, 结果表明, 系统具有较高的可靠性, 节能率较正常调光控制系统提高50%以上。

关 键 词 : 物联网; 安全; 高速公路; 隧道照明; 节能控制

Research on Energy-Saving Control Technology for Expressway Tunnel Lighting Based on the Internet of Things

Zheng Jun, Liu Haiyan, Yan Jiayuan

GuiZhou Polytechnic Of Construction, Guiyang, Guizhou 551400

Abstract : In response to the requirements for safe lighting and energy conservation in tunnels, this paper proposes a tunnel lighting compensation model that responds to changes in vehicle speed and traffic flow, and develops an intelligent dimming control algorithm model accordingly. An intelligent tunnel lighting control system is researched and developed based on the Internet of Things (IoT). The system is equipped with terminal devices including a main control radar, section radars, and section dimming control boxes. On the basis of conventional dimming, it adds an accompanying section automatic dimming control function, achieving a safe and energy-saving lighting effect characterized by "lights turn bright when vehicles approach, dim when vehicles pass, and adjust dynamically following vehicle movement". Through testing and analysis conducted in a 2,060-meter-long bidirectional expressway tunnel, the results show that the system has high reliability, and its energy-saving rate is increased by more than 50% compared with conventional dimming control systems.

Keywords : internet of things; safety; expressway; tunnel lighting; energy-saving control

引言

随着我国高速公路的快速发展, 隧道里程不断增加, 其能耗呈现快速增加态势, 截止2024年底, 我国公路隧道总里程达32596.6 km^[1]。隧道照明作为高速公路隧道通行的关键组成部分, 其能耗占据运营用电的大部分份额^[2], 特别是对于部分偏远的山区高速公路, 其隧道比例高, 运营费用高, 但交通量较低, 照明开支已成为高速公路隧道运营管理部门沉重的负担^[3], 因此, 采用高效安全的照明节能控制技术应用, 对降低公路隧道运营费用, 保障隧道安全运营, 减轻运营管理部门运营费用至关重要。

针对隧道照明技能技术, 广大学者开展了深入的研究。史玲娜^[3-4]针对低交通量下公路隧道“无车照明”的能耗浪费现象, 采用微波车检测探测交通流, 提出了低交通量下“车来灯亮、车走灯暗”的“与车随行”智能控制技术; 通过在隧道涂装高性能的新型发光反光涂料, 提高了行车舒适性与安全性, 可降低隧道照明年运营能耗在20%以上。江孔顺^[5]以甬莞高速白石格隧道为示范, 采用了“车随灯亮”的动态智能调光技术, 提升了隧道运营的安全性, 并降低了能效。包谋多^[6]提出了“太阳光反射照明+太阳光光纤照明”的新型照明应用方案, 通过验证, 隧道入口段照明效果提高了65.4%以上, 节约运营费节约33%。张伟刚^[7]研究了解决隧道过度照明的方法, 并设计了一套基于物联网的高速公路隧道智慧照明节能系统, 经测试与能耗分析, 效果较好。周华妹^[8]基于LoRa无线技术研究了一种兼具智能化与节能的照明控制系统, 并应用到了14座隧道中, 节能率可达35%。张笑歌^[9]通过对照明设计进行优化, 建立按需照明亮度模型, 并采用GA-PID控制算法动态调节隧道内的实际亮度。杜泽宇^[10]基于隧道照明的基本理论, 提出“与车相随、按需照明”的照明控制策略, 系统测试表明具有较好的节能率。

项目信息: 2025年度贵州建设职业技术学院院级科研项目专项资金资助(2025YJZK005)。

作者简介: 郑军(1989—), 男, 贵州遵义人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机电控制与安全方面教学与研究工作。Email:444632066@qq.com

综述文献,目前隧道的照明节能技术集中在控制算法、新型发光材料与绿色能源方面,但未将动态调光的控制算法与按需照明结合起来。因此,基于《公路隧道照明设计细则》在保证的安全照明的情况下,将动态调光的控制算法与“与车随性,按需照明”结合起来,进一步提高节能效率。

一、隧道照明智能控制算法

(一) 车速变化引起的隧道照明补偿模型,在隧道照明中,当设计为双车道单向交通 $N \geq 1200 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$,设计车速为 $v=100 \text{ km/h}$ 时,中间段亮度为 $6.5 \text{ cd}/\text{m}^2$;当设计车速为 $v=80 \text{ km/h}$ 时,中间段亮度为 $3.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。如果车速恰好为这两个值时,可精确调节隧道内照明亮度,但是当车速在 $80\sim 100 \text{ km/h}$ 之间时,应该在 $3.5\sim 6.5$ 之间取值。此处提出车速变化引起的中间段照明补偿值如下:

$$L_{vc} = \left(\frac{V - V_d}{V_u - V_d} \right) \times (L_u - L_d) \quad (2-1)$$

式中: V —实际车速;

V_d — V 所在的相邻两设计车速之间的较小量;

V_u — V 所在的相邻两设计车速之间的较大量;

L_u — V_u 对应的中间段亮度值;

L_d — V_d 对应的中间段亮度值。

(二) 车流量变化引起的隧道照明补偿模型,同理,需要对车流量变化对照明的影响进行亮度补偿。入口段折减系数 k 表征了车流量变化对隧道照明的影响,此处以 k 表征车流量变化对隧道内照明亮度的补偿。表达式如下:

$$k = k_d + \left(\frac{N - N_d}{N_u - N_d} \right) \times (k_u - k_d) \quad (2-2)$$

式中: N —实际车流量;

N_d — N 所在相邻两设计车流量之间的较小量;

N_u — N 所在相邻两设计车流量之间的较大量;

k_u — N_u 对应的入口段折减系数值;

k_d — N_d 对应的入口段折减系数值;

(三) 智能调光控制算法模型,由式(2-2)知由车流量变化补偿后的入口段1照明亮度为:

$$L_{th1} = \left[\left(\frac{N - N_d}{N_u - N_d} \right) \times (k_u - k_d) + k_d \right] \times L_{20}(S) \quad (2-3)$$

中间段照明经车速变化补偿后的亮度为:

$$L_{in} = L_d + L_{vc} = L_d + \left(\frac{V - V_d}{V_u - V_d} \right) \times (L_u - L_d) \quad (2-4)$$

依据《公路隧道照明设计细则》的要求,入口段2、过渡段1、过渡段2与过渡段3的亮度分别是入口段1亮度的50%、15%、5%与2%;出口段1与出口段2的亮度分别为中间段亮度的300%与500%。

二、基于物联网的隧道照明智能控制系统

基于物联网的隧道照明智能控制系统由分段调光控制箱、主

控雷达车检(洞外)、分段雷达(洞内)、分段调光控制箱、亮度检测器、通信箱、变电所照明主控柜及系统控制软件等构成。系统主要由四层架构组成,包含平台管理层、本地管理层、通信传输层与设备终端层,系统具备自动无极调光控制、手动控制功能。整个系统架构如图1所示:

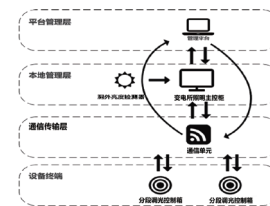


图1 隧道照明智能控制系统架构图

平台管理层主整个系统的主控平台,对隧道的照明进行调光远程控制,同时对设备进行管理 with 参数设置;本地管理层主要是变电所照明主控柜,对整个隧道的照明进行调光控制,同时对设备进行管理 with 参数设置。通信传输层为隧道内通信环网,对本地管理层与设备终端层的数据传输提供通道;设备终端层:主要是前端布置的各类检测设备,亮度检测器、雷达车检器、分段调光控制箱。下面重点对设备总断层的设备布置进行介绍:

(一) 交通流数据监测,与传统交通流数据监测技术不同,该技术^②的实现需要结合隧道口设置的卡口车辆检测器实时监测隧道的内通行车辆的车速、车流、车型等状态,并在隧道内外设置雷达调光控制器实时监测区域段落内车辆通行状态,为隧道交通管理提供基础参考数据。如图1为隧道内外物联网相关设备布设示意图。主控雷达车检:设置于行车方向入口隧道外不小于250m处,设置两套雷达,以保证洞外车辆不漏检,实现提前亮灯。分段雷达:洞内第1处分段雷达设置于入口加强照明的中部,后续按照每300~400m布设,弯道处加密布设,保证雷达不漏检车辆;在行车方向出口处安装1处分段雷达,以保证车辆驶出隧道后的调光控制。

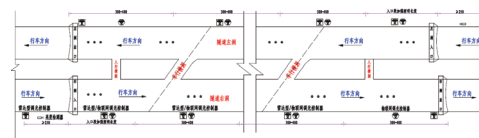


图1 隧道内外物联网相关设备布设示意图

(二) 亮度采集,亮度检测器通过检测的洞内外亮度来确定洞内调光设备的调光等级。通过采集到的亮度数据传至智能调光控制主机,经计算后下发指令控制隧道灯具亮度,系统应具有自动调节加强照明灯光亮度的功能,系统根据洞内外亮度自动跟踪控制加强照明亮度。

洞外亮度检测器宜设置在离洞口一个停车视距位置处,检测器探头方向应指向洞口中心。洞内亮度检测器宜设置在洞内离洞口一倍隧道净高的侧壁上,检测器探头方向应指向行车前进方向且离检测器一个停车视距位置路面中心处。

(三) 调光控制器。调光控制器主要为变电所照明主控柜与现场分段调光控制。变电所照明主控柜作为监控平台软件与终端设备之间连接的媒介。对采集到的现场洞内外照度数据和交通数据进行分析、处理,并将指令通过通信传输层发至洞内各设备控制现场的工作状态,同时对调光系统的工作状态、亮度数据通过网络传输到监控中心软件控制平台。分段调光控制箱作为隧道末端照明灯具控制设备,根据现场雷达探测的数据对所连接的 LED 灯具进行灯光控制。洞内第 1 处分段调光控制箱设置于入口加强照明的中部,后续按照每 300~400m 布置,弯道处加密布置,以保证隧道内的调光控制。系统能通过对隧道内车辆的实时检测与跟踪,实现 LED 隧道灯开关和亮度的实时控制,达到“车来灯亮、车走灯暗、灯随车走的”节能照明效果。

(四) 通信网络,分段调光控制器与变电所照明主控柜通过采用组环网进行传输,控制网络采用单模光缆,每个本地控制器通过以太网交换机的光纤接口连接构成以太网单模光纤冗余环结构,即环网上任何一点被截断,通信传输依然可以保持,保证了现场总线避免外界干扰,传输畅通,并提高了数据传输的可靠性。

(五) 伴随式分段自动调光控制,伴随式照明节能控制作为智能无极调光控制的补充系统,主要实现车流量小的路段的照明节能目的,系统能通过对隧道内车辆的实时检测与跟踪,实现 LED 隧道灯开关和亮度的实时控制,达到“车来灯亮、车走灯暗、灯随车走的”安全节能照明效果,并结合隧道内实时亮度和车辆通行情况,依据智能调光控制算法模型按需自动调节隧道内的安全照明亮度,在满足规范安全情况下节约电能。当隧道入口附近的雷达探测到有车辆准备驶进隧道时,触发控制服务主机启动自动调节控制算法,依据实时获取的车辆感知和亮度信息,生成亮度控制及调节参数,从隧道入口段开始,依次传递到过渡段、基本段和出口段,在车前及车后一段距离内的进行照明控制,使隧道内犹如有一条光亮伴随车辆前行,避免隧道灯处于长期、大面积全开状态,从而实现照明能耗的有效节约。

三、系统验证与分析

为验证系统的安全性、可靠性与有效性,在长度为 2060 米的高速公路双向隧道进行测试,左洞为试验隧道,右洞为对比隧道。为保证对比的有效性,测试中各照明段隧道均采用相同的交通量与车速进行调光,试验隧道再实施基于物联网的隧道照明智能控制系统进行控制,试验隧道有车进入时调光各参数(洞外亮度与车流量)与对比隧道的保持一致,测试结果如表 1:

表 1 试验隧道与对比隧道的亮度对比 cd/m²

照明段	试验隧道亮度		对比隧道亮度	设计亮度
	有车时	无车时		
入口段 1	99.3	20.3	98.6	90
入口段 2	49.8	9.4	49.5	45
过渡段 1	15.1	3.3	15.2	13.5
过渡段 2	5.0	1.2	5.1	4.5

中间段	2.9	1	2.9	2.5
出口段 1	8.7	1.8	8.5	7.5
出口段	14.6	2.9	14	12.5

通过上表可知,采用基于物联网的隧道照明智能控制系统进行调光的隧道,有车时实验隧道与对比隧道亮度相近,无车时试验隧道按照最大设计亮度的 20% 输出待机。试验结果表明,当隧道外雷达监测到车来时,提前开启隧道内入口段照明灯具,当隧道内分段雷达监测到车来时,开启后续照明段的灯具,达到满足车速与交通量的安全亮度;当车驶离隧道一段时间且无来车时,试验隧道各照明段通过调光降低隧道亮度,在降低能耗的同时延长灯具寿命。

系统通过半年多的运行,设备、系统运行稳定,均无故障。通过统计试验隧道与对比隧道 6 个月的用电量(见表 2),试验隧道耗电量 6 个月平均耗能较对比隧道降低 50% 以上,节能降碳效果显著。

表 2 隧道用电量对比 kwh

照明段	2025-6	2025-7	2025-8	2025-9	2025-10	2025-11	平均值
试验隧道	7225	7780	7662	7486	8059	7206	7570
对比隧道	15068	16002	15849	15607	16455	14972	15659

四、结论

通过分析隧道照明的需求,提出了隧道照明智能控制算法,研发了基于物联网的隧道照明智能控制系统,控制系统采用了伴随式分段自动调光控制,达到“车来灯亮、车走灯暗、灯随车走的”安全节能照明效果。整套系统在实际隧道中进行了应用对比,经过半年多的稳定运行,结果表明,系统具有较高的可靠性,节能率较正常调光控制系统提高 50% 以上。

参考文献

[1]2024 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2025-06-12). https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html

[2] 廖文骏, 刘梁鸿, 袁飞云. 公路隧道照明节能技术发展现状与方向 [J]. 上海公路, 2025 (02): 51-55.

[3] 尹力, 史玲娜, 刘贞毅, 张龙. 低交通量下“车随灯行”隧道照明节能控制技术应用研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 39 (8): 1270-1276.

[4] 尹力, 史玲娜, 刘贞毅, 张龙. 基于发光反光高性能涂料的隧道照明安全与节能技术应用研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 39 (8): 327-333.

[5] 江孔顺. 基于智慧调光的高速公路隧道能效分析与节能策略 [J]. 中国交通信息化, 2025 (08): 137-139.

[6] 包谋多. 基于安全与节能的公路隧道太阳光直接照明技术应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[7] 张伟刚. 基于物联网的高速公路隧道智慧照明节能系统设计 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.

[8] 周华妹. 基于 LoRa 无线技术的隧道照明智慧控制系统研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

[9] 张笑歌. 隧道照明节能控制技术与评价体系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.

[10] 杜泽宇. 基于物联网的隧道智慧照明系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2024.