

单光源可调色温 LED 在城市隧道照明的应用研究

阮程¹, 赵京², 刘伟³, 徐天宇¹, 吕志刚¹, 黄耀伟¹, 汪洋^{1,4}

(1. 长春希达电子有限公司, 吉林 长春 130103; 2. 吉林中铁高速公路有限公司, 吉林 长春 130000;
3. 吉林省交通规划设计院, 吉林 长春 130103; 4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130103)

摘要: 随着国家碳中和、碳达峰战略和政策的实施, 本文探讨城市道路隧道节能和安全照明的应用研究。通过一体化热传输技术, 多自由曲面逐点精准配光设计和全自动过盈配合快速精准装配技术, 实现单光源可调色温 LED 产品设计及产业化示范应用, 提升城市隧道照明整体技术水平和节能功效, 开发多色温 LED 智能调光系统, 提升隧道照明舒适度, 降低驾驶疲劳感, 提高行车安全性和道路通行率, 满足智慧交通和数字城市的建设需要。

关键词: 隧道照明; 光热一体化设计; 单光源 LED; 智能调光系统; 照明舒适度

中图分类号: TN209

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2023.09.007

Research on the Application of Single Light Source Adjustable Color Temperature LED in Urban Tunnel Lighting

RUAN Cheng¹, ZHAO Jing², LIU Wei³, XU Tianyu¹, LÜ Zhigang¹, HUANG Yaowei¹, WANG Yang^{1,4}

(1. Changchun Cedar Electronics Technology Co., Ltd., Changchun 130103, China;
2. Jilin China Railway Expressway Co., Ltd., Changchun 130000, China;
3. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130103, China;
4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130103, China)

Abstract: With the implementation of national carbon neutrality and carbon compliance strategies and policies, this paper discusses the application of energy conservation and safety lighting in urban road tunnels. Through integrated heat transfer technology, accurate light distribution design of multiple freeform surfaces point by point, and fully automatic interference fit fast and precise assembly technology, the COB LED products with adjustable color temperature are designed and they achieve industrial demonstration application. The overall technical level and energy-saving efficiency of urban tunnel lighting are improved. A multi color temperature LED intelligent dimming system is developed to improve tunnel lighting comfort, reduce driving fatigue, improve driving safety and road traffic rate, and meet the needs of smart transportation and digital city construction.

Key words: tunnel lighting; integrated light and heat design; single light source LED; intelligent photosystem; lighting comfort

0 引言

我国经济的不断发展, 有力地推动了我国高速公路建设的迅猛发展。城市道路隧道作为城市道路建

设的一个重要组成部分, 其数量和规模也在近几年呈现逐渐增长趋势。城市隧道照明不同于高速隧道, 城市交通隧道位于城市内及周边, 车流、人流量和地势差异化比较大, 遇雨雾雪等恶劣天气容易发生安全隐

基金项目: 吉林省交通运输重点科技项目“隧道照明节能关键技术及应用研究”(2023ZDGC-1-5)

作者简介: 阮程, 硕士, 高级工程师, 主要从事 LED 产品研发及产业化研究。

患,因此,城市隧道照明系统要求更高^[1-2]。隧道照明系统的电能消耗一般占隧道总电能消耗的70%以上,巨大的电费支出往往成为运营单位的主要负担^[3-4]。通过智能化光色调节系统能够实现亮度提升和节能减排,避免过度照明造成的无效电能消耗,提升驾驶安全性和舒适度。由于隧道交通埋置于地层内,隧道照明灯具必须7×24小时工作,因此对隧道照明灯具防眩光学设计,平均路面照度及均匀度提出了严格要求,国内一些尘、沙或盐雾等恶劣自然环境地区城市隧道对灯具本身的损耗和清洁维护的需求标准更高^[5-7]。

本文基于上述城市隧道照明需求,首次采用相变散热技术与压铸工艺结合设计,自主研发的“芯”散热和对流通道技术路线,突破高功率密度COB光源的导、散热难题。采用高导热“芯”和低密度散热壁组合工艺一体化设计,实现产品快速散热、小体积、轻量化,低成本。采用具有耐高温、抗冲击、抗腐蚀和高透光率的光学玻璃透镜,产品防护等级IP66,满足全户外环境使用要求,易维护,高可靠。通过多色温智

能调光系统,实现1800~6500K色温调节,可根据使用场所和用户需要自由选配智能组件,满足城市安全、绿色、健康和智慧的交通建设需要。

1 隧道照明标准分析

隧道照明设计标准参考中华人民共和国交通运输部于2014年施行的JTG/T D70/2-01-2014《公路隧道照明设计细则》执行,隧道分为接近段、入口段、过渡段、中间段以及出口段^[8],不同区域对应不同的设计要求,标准6.1条规定了中间段照明亮度,如表1所示,6.2条对中间段的照明亮度总均匀度与亮度纵向均匀度要求如表2所示。其中,过渡段给驾驶者创造充足时间适应入口段和中间段的亮度变化^[9]。根据隧道照明亮度模型和驾驶员心理分析模型,在入口段和出口段会出现黑白洞的视觉反馈,影响驾驶员正常观察行车环境,造成心理负荷增大^[10]。因此在入口段、中间段和出口段进行合理的照明设计和规范的安装,对提升驾驶安全性和舒适度意义重大。

表1 中间段亮度表

Table 1 Middle section brightness

设计速度 v_1 /(km/h)	亮度 L_m /(cd/m ²)		
	单向交通		
	$N \geq 1200$ veh/(h·ln)	350 veh/(h·ln) $< N < 1200$ veh/(h·ln)	$N \leq 350$ veh/(h·ln)
	双向交通		
	$N \geq 650$ veh/(h·ln)	180 veh/(h·ln) $< N < 650$ veh/(h·ln)	$N \leq 180$ veh/(h·ln)
120	10.0	6.0	4.5
100	6.5	4.5	3.0
80	3.5	2.5	1.5
60	2.0	1.5	1.0
20~40	1.0	1.0	1.0

表2 中间段照明亮度总均匀度与亮度纵向均匀度要求

Table 2 Requirements for overall brightness uniformity and longitudinal brightness uniformity of the middle section lighting

路面亮度总均匀度		
设计小时交通量 N /(veh/(h·ln))		U_1
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.4
≤ 350	≤ 180	0.5
路面中线亮度纵向均匀度 U_1		
设计小时交通量 N /(veh/(h·ln))		U_1
单向交通	双向交通	
≥ 1200	≥ 650	0.6
≤ 350	≤ 180	0.5

注:交通量在中间值时,按线性内插取值。

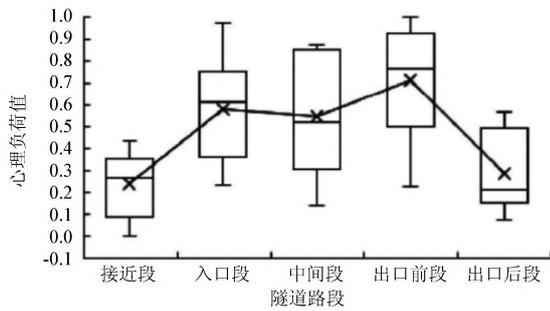


图1 隧道不同路段心理负荷变化箱线图^[1]

Fig.1 Box diagram of psychological load changes in different sections of the tunnel

2 隧道照明设计及案例分析

2.1 隧道照明单光源可调色温LED产品

通过采用一体化热传输技术,多自由曲面逐点精准配光设计和全自动过盈配合快速精准装配技术,实现一体化可拼接单光源可以调光色隧道照明产品,

满足全类型城市道路隧道照明环境需求,关键技术如下:

(1) 一体化热传输技术

产品采用压铸散热一体化设计,有效减小风阻、促进空气对流及增加灯体散热面积。优良的涂装材料,耐腐蚀、耐高温。相变散热技术和散热结构组合工艺,解决大功率COB光源的导、散热难题,实现产品快速散热,保证产品的稳定性和可靠性。

(2) 多自由曲面逐点精准配光设计

基于隧道实际环境,产品采用多自由曲面逐点精准配光设计(见图2)。小角度配光设计有效防眩,矩形光斑设计提高路面均匀度,改善墙壁锯齿斑现象,军工级光学玻璃透镜,耐高温、抗冲击、抗腐蚀、高透光率。产品色温覆盖范围从2200K到5700K,2200K色温以下产品具有极佳的穿透力,在雾霾雨夜天气下能保持较好的路面照度。

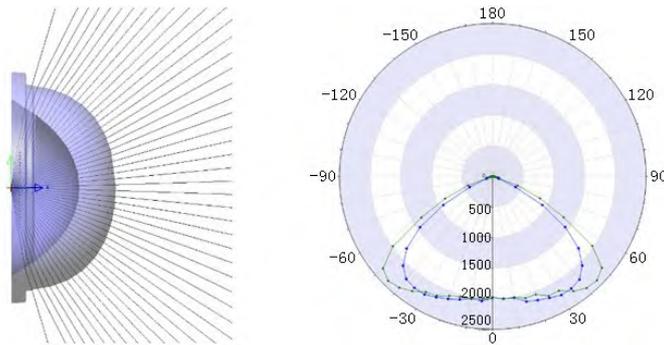


图2 多自由曲面透镜追迹光线图和配光曲线图

Fig.2 Ray tracing and light distribution curves of multi freeform surface lenses

(3) 单光源、无虚影

相比多光源LED隧道灯,单光源灯具照射物体不会产生任何虚影,保障行车安全。如图3所示。

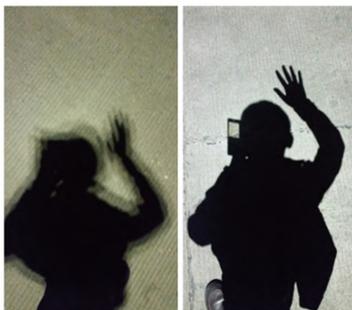


图3 多光源(左)和单光源(右)投影图片

Fig.3 Multiple light source (left) and single light source (right) projection images

(4) 可靠的结构设计

采用角度调节配件与挂臂连接,可根据需求灵活调节安装角度,并且根据不同的安装场合搭配不同的挂臂,实现一灯多用,以降低成本,方便维护管理,满足大多数隧道要求。此灯具还可以拼接使用,组成更大功率的灯具。如图4所示。



图4 灯具3种安装方式

Fig.4 Three installation methods for lighting fixtures

(5) 灵活的智能控制

灯具可预留调光接口(1~5 W、1~10 V、PWM), 搭配智能控制系统, 实现隧道内按需照明, 满足隧道内各段的亮度要求, 最大限度地节约电能的同时, 提高驾驶员视觉舒适度, 营造良好的行车光环境。

2.2 隧道照明设计

本文以山东省某隧道项目照明改造为例, 在入口段、过渡段和出口段进行照明设计, 旨在为城市道路隧道照明提供设计参考。隧道为沥青路面, 维护系数采用 0.7, 入口段采用 150 W 单光源 LED 隧道灯, 按照 2 m 对称布灯, 模拟平均亮度为 71 cd/m², 平均照度为 1120 lx, 均匀度为 0.839; 过渡段采用 50 W LED 单光源 LED 隧道灯, 按照 6 m 对称布灯, 模拟平均亮度为 8.88 cd/m², 平均照度为 139 lx, 均匀度为 0.821; 出口段采用 90 W LED 单光源 LED 隧道灯, 按照

6 m 对称布灯, 模拟平均亮度为 14 cd/m², 平均照度为 224 lx, 均匀度为 0.821。隧道照明模拟要求及数据见表 3, 入口段、过渡段及出口段照明采用多自由曲面逐点精准配光设计, 提高亮度均匀度, 降低眩光危害, 灯具配光及照明设计伪色图对应表, 如表 4 所示。

表 3 隧道照明要求及模拟数据表

Table 3 Tunnel lighting requirements and simulation data table

序号	路段名称	使用灯具功率/W	亮度设计需求/(cd/m ²)	模拟平均亮度/(cd/m ²)	模拟平均照度/lx	模拟均匀度
1	入口段	150	52.5	71	1120	0.839
2	过渡段	50	5.25	8.88	139	0.821
3	出口段	90	11.25	14	224	0.821

表 4 灯具配光及照明设计伪色图对应表

Table 4 Corresponding table of false color map for luminaire distribution and lighting design

序号	路段名称	配光曲线	伪色图
1	入口段	<p>光强: cd C0/180, 121.2° C90/270, 114.2° 平均光束角 (50%): 117.7°</p>	
2	过渡段		
3	出口段		

2.3 隧道照明智能控制系统设计

隧道照明智能控制系统主要由洞外亮度检测仪、洞内亮度检测仪、隧道智能照明控制柜、车流量检测器、亮度可控型公路隧道 LED 照明灯具、通信系统和智能照明管理平台等组成, 如图 5 所示。系统的洞外亮度检测仪将检测到的隧道洞外亮度值上传至智能照明控制柜, 系统的洞内亮度检测仪将检测到的隧道洞内入口段和中间段亮度值传送至智能照明控制柜。系统根据实时测取的车流量、洞外亮度、洞内亮度及设计冗余数据结合现行照明设计细则, 分别计算出入

口各段加强照明和基本照明相应的需要亮度, 并控制加强照明灯具和基本照明灯具的输出功率, 而灯具输出功率的变化, 又会引起灯具输出光通量发生变化, 从而达到控制被照场所亮度的目的。设于监控分中心的照明控制计算机通过工业以太网交换机与现场的隧道智能照明控制柜实现通信。照明控制计算机利用智能照明控制平台, 实现相关参数的设定、指令下达、实时信号读取和储存。当照明控制计算机与现场的隧道智能照明系统通信中断时, 现场的隧道智能照明系统自行根据洞外亮度、实时交通量等参数进行调光。

通过隧道照明整体运营管理与智能控制系统的应用研究,可降低LED灯具的工作温度,大幅延长LED光源及灯具电源的寿命;消除洞外亮度变化和

车流量不足所形成的过渡照明,实现按需照明;下半夜功率可同步减半,避免单侧关灯所产生的危及行车安全的斑马效应。

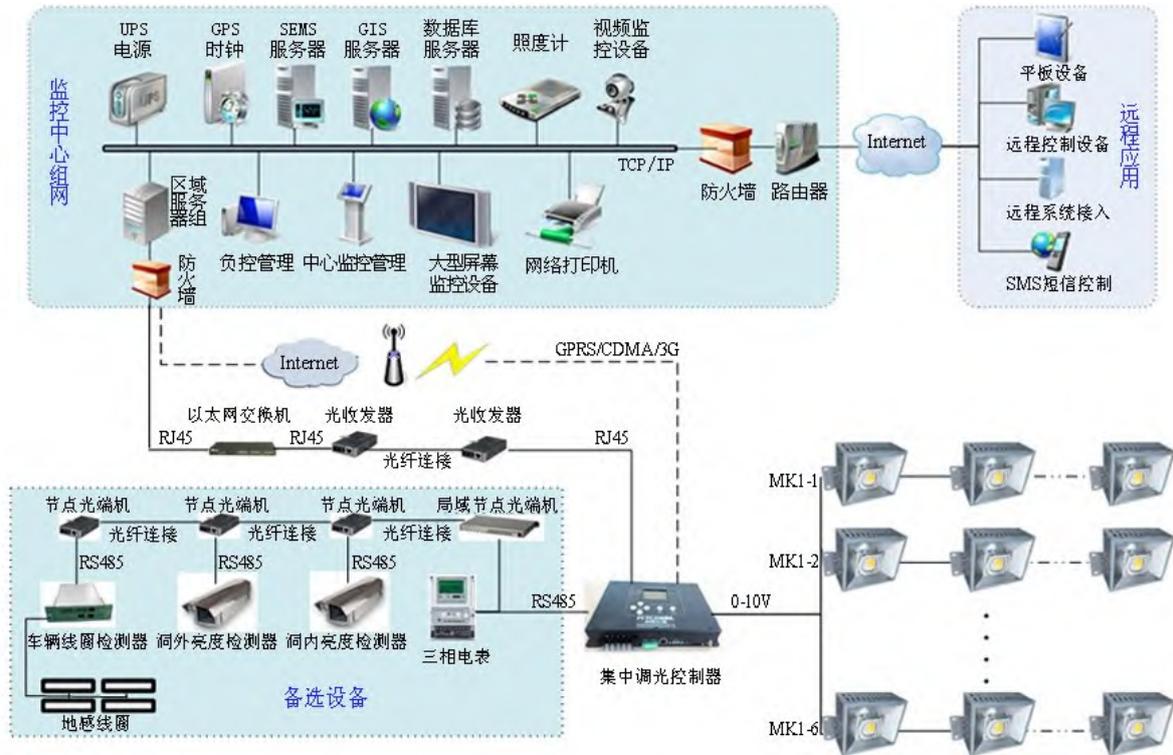


图5 隧道照明智能控制系统结构图

Fig.5 Structure diagram of intelligent control system for tunnel lighting

2.4 项目实施

本项目选取山东省某隧道入口段为实际照明改造试点项目,采用150W单光源LED产品,按照2m

对称布灯设计,测试100%照度值时,路面平均照度为1021.73 lx,照度均匀度为0.83;测试70%照度值时,路面平均照度为760 lx,照度均匀度为0.81。



图6 现场灯具安装效果及照明效果

Fig.6 Installation effect and lighting effect of on-site lighting fixtures

本项目灯具结合智能控制系统,灯具色温可根据洞外色温自适应调节,保证洞内外色温相近,同时结合洞外亮度,调节洞内亮度,避免出现“白洞效应”和

“黑洞效应”,提高隧道照明舒适度、分辨率和安全性。在运营管理方面,灯具智能控制可结合时间、洞内外光照度、车流量及车速等信息进行调试和控制,

二次节能高达30%,采用灯具故障主动上报功能,可分析灯具故障原因,提供灯具在隧道内的具体地址等多种信息,可分析每个配电箱的不同时段、用户电表用电量及单位时间能耗等各种节能数据,提高后期项目维护和分析效率。

3 总结

城市道路隧道是城市交通重要组成部分,提升隧道照明光环境 and 安全性意义重大,本文提出一种自适应智慧隧道照明控制系统,采用单光源可调色温LED隧道照明产品,通过总线控制系统,实现隧道入口到出口不同需求段的照明标准要求,同时基于隧道不同路段驾驶员心理舒适度评价模型,智能调节照度和色温,提高舒适度和车流通行率,降低事故发生风险。

参 考 文 献

- [1] 刘燕娟,杨和良,刘优明.城市隧道照明系统的研究[J].中国新技术新产品,2021(19):103-105.
[2] 刘畅,仵磊,柳雁玲,等.公路隧道视觉传达艺术照明设计

- 计探讨[J].现代隧道技术,2020,57(6):127-132.
[3] 谢居应,胡磊,杜晟,等.基于“按需照明”的隧道照明能效分析研究[J].交通节能与环保,2021,17(3):111-114,128.
[4] 刘磊实,林卫,王鹏展.LED光源在城市隧道照明中的应用与分析[J].照明工程学报,2010,21(3):50-55.
[5] CHEN F, WANG K, QIN Z, et al. Design method of high-efficient LED headlamp lenses [J]. Optics Express, 2010, 18(20): 20926-20938.
[6] 史永胜,买迪,宁磊.实现道路均匀照明的LED自由曲面透镜设计方法综述[J].照明工程学报,2010,21(5):73-77.
[7] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
[8] 吕红.关于隧道道路的照明设计[J].自动化与仪器仪表,2021(9):156-160.
[9] 李顶.新规范下公路隧道照明设计方法研究[D].北京:北京工业大学,2017.
[10] 祁绍益.浅谈公路隧道照明系统设计[J].城市道桥与防洪,2021(2):224-227.

(上接第34页)

可感知属性,为订单式修灯、智慧调光^[4]提供基础条件;并将智慧杆“可感知”纳入验收移交必要条件。

4.4 主动预警体系建设

将“事前预警”作为设施运营“数智化”阶段最重要的攻关方向。“数字化”底座带来了全时段的、全过程的、清晰的设施运行状态信息,具备了以数据沉淀的方式不断优化更新设施管理“算法”的条件。以城市照明线路集中监控系统为例,我们将有效区分设施变更、基站加载、环境天气、外力破坏引起的数据扰动,最终呈现出系统对线路自身运行特点的主动学习、智能化分析和故障预判,并触发线路设施的主动更换机制,进而形成智慧城市能源网的“事前预警”管理,为智慧市场场景应用提供稳定的能源供给。

5 结束语

综上,智慧杆设施的控制感知运营平台的探索,通过现状调查、需求分析和路径设置,正加速为城市

智慧杆体系及智慧市场场景的加载运行,提供必要的软件支撑条件。而在硬件体系方面,“源网荷储”“虚拟电厂”“双碳节能”等方面的实践,正在加速城市路侧能源结构的数字化转型。因此,城市感知+数字能源的组合,将形成新的技术汇集,成为未来智慧城市领域主要的发展方向之一。

参 考 文 献

- [1] 臧锋,顾磊明,王鹏展,等.基于城市照明迭代升级下智慧城市产业生态体系的构建[J].照明工程学报,2020,31(3):14-17,184.
[2] 臧锋,王金勇,朱亚著,等.智慧城市背景下城市路灯专网的构建与应用探究[J].照明工程学报,2022,33(1):90-94.
[3] 臧锋,王鹏展,陈俊羽,等.数字化城市照明驱动的新型城市生命线体系发展路径研究[J].照明工程学报,2022,33(4):214-222.
[4] 陈荃,臧锋.浅议基于人因工程学的城市道路照明评价体系研究[J].照明工程学报,2023,34(4):99-102.