【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

低灯位多维道路照明技术

张 兵¹, 赖冠华², 杜媛媛¹, 李田茵¹, 赵海天¹

1) 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳高维照明技术有限公司, 广东深圳 518058

摘 要: 低位照明中眩光强烈程度与灯具出光效率呈正相关, 消除眩光的截光板会降低灯具出光效率. 从照明方式与灯具结构两个方面展开研究, 通过分析路面反射模型, 论证路灯出光角度与照明效率的关系. 利用软件模拟灯具结构, 探讨透镜出光面光线分布、结构中垂直角、出光面高度与灯具长度等因素对灯具出光效率的影响. 结果表明, 粗糙路面采用正向照明, 光滑路面采用逆向照明, 可以提高路面反射效率; 提升灯具出光效率的关键在于降低透镜出光面高度, 当透镜出光面高度为 7 mm 时, 灯具出光效率达到极限值的 67%, 灯具能耗比国家标准 1 W/m² 降低了 88%.

关键词: 公路运输; 道路照明; 分布式; 低灯位; 节能; 出光效率

中图分类号: U491.5⁺3

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.06658

Multi-dimentional road lighting technology with fixed low-mounting height luminaires

ZHANG Bing¹, LAI Guanhua², DU Yuanyuan¹,
LI Tianyin¹, and ZHAO Haitian¹

1) School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Shenzhen Gaowei Lighting Technology Limited Company, Shenzhen 518058, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: The intensity of glare in low-level lighting is positively correlated with the light output efficiency of lamps. The light intercepting plate to eliminate glare will decrease the light output efficiency of lamps. In this paper, we investigate the road lighting efficiency from the lighting mode and the lamp structure. Through the analysis of the road reflection model, we demonstrate the relationship between the different light-emitting angles of street lamps and the lighting efficiency. Using software to simulate the structure of the lamp, we discuss the influence of the light distribution of the light-emitting surface of the lens, the vertical angle in the structure, the optical surface height of lens and the length of the lamp on the light-emitting efficiency of the lamp. We find that the use of forward lighting on rough roads and the use of reverse lighting on smooth roads can greatly improve the reflection efficiency of the road. The key to improve the light output efficiency of lamps is to reduce the optical surface height of lens. When the optical surface height of lens is 7 mm, the light output efficiency of lamps reaches the limit value of 67%, and the energy consumption of lamps is 88% lower than the national standard of 1 W/m².

Received: 2020-06-23; **Accepted:** 2020-12-20; **Online (CNKI):** 2021-09-01

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51778367); Shenzhen Science and Technology Plan (JCJY20170818 141507055, JSGG20170411140639558)

Corresponding author: Professor ZHAO Haitian. E-mail: arphlb@szu.edu.cn

Citation: ZHANG Bing, LAI Guanhua, DU Yuanyuan, et al. Multi-dimentional road lighting technology with fixed low-mounting height luminaires [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(6): 658-663. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

Key words: road transport; road lighting; distribution; low-mounting height; lighting energy saving; light output efficiency

行车道路照明包括全封闭的高速公路、快速市政道路及公路隧道的照明,这些道路照明系统基本按CJJ 45—2015标准设计。高速公路及市政道路路灯一般采用高压气体放电(high intensity discharge, HID)灯或发光二极管(light-emitting diode, LED),安装高度为10~14 m,间距为30~40 m,单灯功率为120~400 W,按蝙蝠型配光,特点是单灯功率大、灯位高和灯距远^[1-2]。LED照明体系经过了上百年的发展,技术已趋于成熟。目前实际应用中最为完善的技术是使用非成像光学对LED进行二次配光^[3],特点是可以将光辐射按需分配,但仍存在眩光强烈、能耗高和照明质量差等问题。高眩光、高能耗和低均匀性的根本原因在于传统路灯采用高灯位、大间距和自上而下照射的照明方式^[4]。对于驾驶员而言,只有经路面或者障碍物反射后进入人眼的光线为有效光线。在高位照明中,路灯自上往下照射,路面可以认为是平坦光滑的,大部分地面反射光射向天空,实际光通量的有效占比很低。从空间上看,驾驶员视线位于路灯发光面与路面之间,所以无论采取什么措施都无法消除高位路灯眩光,只能做到消减^[5]。

近年来,低灯位道路照明开始出现,大多应用在桥梁^[6]、匝道与高架桥等方面。目前,低位照明体系还处于起步阶段,大多数低位路灯仅仅是将高位路灯高度降低、功率变小、间距变小,然后将其改为横向照明。陈神飞等^[7-9]研究发现现有低位照明均存在眩光强烈及频闪严重等问题,会降低驾驶员主观视觉亮度,降低驾驶员的分辨能力,甚至引发癫痫等疾病。

本研究针对驾驶员的视觉需求建立道路照明模型,得到了路灯有效辐射效率与照射角度的关系,然后根据不同路面的粗糙程度将传统高位路灯分解为多个方向的低位路灯,解决了现行道路照明体系下高眩光和高能耗等问题,在完全满足道路照明的各项需求的条件下,提高照明效率和可见度水平,为道路照明技术的改造提供了依据。

1 道路照明的基本需求

行车道路的路面是驾驶员观察前方障碍物的主要背景^[10]。要提升行驶的安全性与舒适性,除了

需满足路面的均匀度外,还需要关注空间亮度的分布^[11]。本研究综合CJJ 45—2015标准规定及道路照明实践,总结出高速公路照明的多重需求,主要包括:①路面照明质量,判断指标包括路面亮度与均匀度。一级道路要求路面的总均匀度达到0.4以上,纵向均匀度达到0.7以上,亮度不低于1.5 cd/m²^[12];②空间照明,目的是为路面上的障碍物提供足够的对比度,以提升驾驶员的辨别能力;③限制眩光,判断指标为阈值增量,要保证驾驶员在各个方向上直射眩光与反射眩光的阈值增量均在10%以下。

多维照明系统是指将传统道路照明体系里单个光源负责所有照明功能,改为多个光源负责不同照明功能。多维度是指多个光源在多个方向上进行照射,对路灯的出光进行精细化管理。多维照明系统的设计思路是:根据驾驶员在道路照明中的视觉需求,将传统的集中式照明改为分布式照明,设置多个维度照明的光源,高灯位安装改为低灯位安装,大功率光源改为小功率光源,使不同用途光源与灯具以达到能效最大化,从而使总体照明达到综合最优。

2 道路照明模型分析

道路照明模型是建立在视轴方向 φ 角(观察角)不变的情况下,光源照射方向与视网膜照度的关系。图1给出了有效照明和无效照明的分量分析图。其中, E_r 为光源在路面上的反射照度值; E_{re} 为路面反射照度在驾驶员视轴方向的分量; E_{ri} 为路面反射照度在道路对面方向的无效分量; E_{rv} 为路面反射照度在竖直方向的无效分量; α 为光源的入射角,即路面法线与光源投光方向之间的夹角; φ 为机动车驾驶员视线方向与路面之间的夹角; θ 为光源投光方向所在平面与驾驶员视线方向所在平面的夹角。

通常,机动车驾驶员的观察高度距离路面(工作面)1.2 m(小车)~1.6 m(大车),观察距离为60~160 m, φ 取值为1.5°~0.5°^[13],本研究取 $\varphi=1^\circ$ 。在道路照明中,以 E_{re} 作为路灯有效辐射效率的衡量标准。

当路灯灯具处于路边,路面规则反射且不计光线在空气传输中的能量损失时,竖向反射分量为

图 1 有效照明与无效照明的分量分析

Fig. 1 Analysis diagram of effective lighting and ineffective lighting components

$$E_{rv} = E_r \cos \alpha \quad (1)$$

横向反射分量为

$$E_{rt} = E_r \sin(\alpha + \varphi) \sin \theta \quad (2)$$

光源在驾驶员视轴方向的照度分量为视网膜分量, 可表达为

$$E_{re} = E_r \sin(\alpha + \varphi) \cos \theta \quad (3)$$

可见, 减小 θ 会降低射向道路对侧的光损失; 增大 α 会降低射向天空的光损失. 因此, 在较光滑的道路照明中, 可以采用低位安装的窄光束光源模块逆向照射路面, 照射角度趋近于驾驶员的观察角度, 此时在驾驶员视网膜上形成的 E_{re} 可取得最大值, 无效辐射分量降至最低. 在粗糙道路上则照明方向与驾驶员视线方向相同, 近似于车灯的照射角度, 则采用正向照明.

3 多维度低位路灯照明方式

驾驶员感觉到路灯产生的亮度由路灯发出的总光通量、路灯照射角度和路面反射特性 3 个因素决定^[14]. 路面反射特性不同, 反射光的方向和分布将不同, 导致亮度不同. 因此, 路面的反射特性对于提高道路照明效率起着重要作用, 路面反射特性也决定着照明方向的选择^[15]. 路面的粗糙程度决定路面反射率, 且需要现场测定.

3.1 低灯位逆向照明子系统

根据道路照明模型计算分析, 在宏观光滑路面条件下(图 2), 低灯位逆向照明方式可以使灯具的有效光通量最大, 即路面照明效率最高.

图 2 光滑路面反射特性示意

Fig. 2 Schematic diagram of smooth road reflection characteristics

当光源低于轿车驾驶员视点 1.2 m、投光角度接近平行于路面、照射方向与车行方向相反(逆向照明)时(图 3), 在驾驶员视线方向上可获得最高的路面反射亮度. 原因在于此时逆向射向路面的光线大部分按照反射定律射向前方, 这是多维照明系统中设置低灯位逆向照明子系统的基本依据.

图 3 低灯位逆向照明子系统平面示意

Fig. 3 Plan schematic of low-mounting height reverse lighting subsystem

3.2 低灯位正向照明子系统

在宏观粗糙路面条件下, 低灯位正向照明方式的路面照明效率最高(图 4). 所以光源低于驾驶员视点 1.2 m、投光角度接近平行于路面、照射方向与车行方向相同(正向照明)时(图 5), 在驾驶员视线方向上可获得最高的路面反射亮度. 原因在于此时正向射向路面的光线大部分按照反射定律被反射进入驾驶员视野. 这是在多维照明系统中设置低灯位正向照明子系统的基本依据.

图 4 粗糙路面反射特性示意

Fig. 4 Schematic diagram of reflection characteristics of rough road

图5 低灯位逆向照明子系统平面示意

Fig. 5 Plan schematic of low-mounting height reverse lighting subsystem

4 灯具结构分析及优化

光展既可以表示光源的发光能力, 衡量光学器件的传输能力, 也可以体现接收器的接收能力(图6). 对于理想光学系统来说光展是一个守恒量, 而对于非理想光学系统的光展只增不减, 光展守恒为非成像光学设计带来了极大的方便.

图6 光展

Fig. 6 Etendue

全内反射(total internal reflection, TIR)透镜可通过透镜折射率、透镜出光面面积和光束立体角的乘积表示光展, 光展微元 dU 定义为

$$dU = n^2 dA \cos \theta d\Omega \quad (4)$$

其中, n 为透镜折射率; A 为透镜出光面面积; θ 是面积微元法矢量与中心光线的夹角; $d\Omega$ 是光束的立体角元^[16].

TIR 透镜的光展守恒见图7. 此时光展为

$$U = \int n^2 S \cos \theta d\Omega \quad (5)$$

其中, S 为光源面积. TIR 透镜出光面的光展 U_A 为

$$U_A = \int n^2 A \cos \theta d\Omega \quad (6)$$

假设透镜出光面的出光为完全准直, 则式(6)

图7 TIR 透镜的光展守恒

Fig. 7 Etendue conservation of total internal reflection lens

中 $d\Omega = 0$, 出光面的光展 $U_A = 0$, 根据光展守恒原理, LED 芯片出光也为 0. 但只有当芯片面积为 0 时才会使得光展为 0, 而实际上芯片是有一定面积的, 所以无论经过什么样的准直配光都无法在保持光线无损失的情况下做到完全准直出光, 这就意味着透镜出光面每个微元都存在非光轴方向的溢散光. 由此, 正逆向照明出光面的每一个微元都会产生眩光, 眩光消除的关键技术在于出光面的隐藏.

已知驾驶员视线与路面的夹角 $\varphi \approx 1^\circ$, 所以设定正逆向照明的垂直角度 θ 也为 1° , 准直出光透镜的直径为 d ; 配光角为 α ; 透镜出光面距离截光板为 l (图8). 由于 $\theta = 1^\circ$, 可以认为出光面高度 h 与透镜直径尺寸 d 相同.

图8 无眩光灯具简化结构

Fig. 8 Simplified structure of glare-free lamps

透镜出光面直径 d 、透镜垂直角 θ 与出光面和截光板距离 l 之间的关系为

$$\sin \theta = d/l \quad (7)$$

实际应用中 $\theta \approx 1^\circ$, 为了达到较高的准直性(透镜配光角约为 4.5°), 设 $d = 70 \text{ mm}$, 即出光面高度为 70 mm , 根据式(4), 截光板与透镜出光面的

距离需要达到约 4 m 才能达到较高的出光效率,但这个尺寸从成本、加工、运输和安装等方面考虑都不现实,所以成品将 l 限制在 400 mm,此限制值下透镜出光面高度为 7 mm 时光线可以基本从灯具射出,可见优化的关键在于降低透镜出光面高度.本研究根据实际的道路应用要求将 θ 调整为 1.2° ,降低了照射距离,增加了出光效率.

5 武汉长江大桥测试结果

调整后的灯具经过光学软件 Tracepro 进行仿真模拟,并使用分布式光度计进行测试后得到灯具出

光效率约为 20%,比原灯具结构的 16.8% 出光效率提升了约 24%.表 1 为实测数据与城市道路照明设计标准对比.由表 1 可见,本研究测试的亮度、均匀度、能耗和眩光都远优于 GBT 24969—2010 设计标准.但实验路面为水泥路面,亮度较柏油路面偏高,实际柏油路面的应用中亮度应为 $2 \sim 3 \text{ cd/m}^2$.从视觉效果上看整个照明空间的亮度从下往上逐渐降低,灯具出射光线完全投射在地面上,空间照明由路面反射光线提供,由路边参照物可知照明空间高度在 5 m 以上,完全满足空间照明的要求.所以,从测量参数与视觉效果上看,多维度照明体系均优于高位路灯.

表 1 武汉长江大桥试灯测试数据
Table 1 Light test data on Wuhan Yangtze River Bridge

实测与标准	平均亮度/ $(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	亮度均匀度	纵向均匀度	功率密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	眩光阈值/%
本研究测试数据	5.95	0.67	0.89	0.4	0.7
GBT 24969—2010 设计标准	1.50 ~ 2.00	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 1.0	< 10.0

6 结 论

1) 低灯位、分布式和正逆向的照明方式在照明路面的亮度值、亮度均匀度、阈值增量和能耗都优于国家标准,在生理的视觉效果上也优于传统道路照明效果.这证明了此照明系统可行,可为道路照明提出了新的理论依据与设计思路,使路灯走向精细化、节能化和智能化,为道路照明设计体系开辟了新的发展道路.

2) 虽然此照明方式解决了高位照明与低位照明所存在的诸多问题,但由于结构因素导致出光效率仍比较低.在目前的实验研究中,功率密度为国家标准的 40%,理论上当透镜配光角约为 4.5° ,垂直角约为 1° 时灯具极限照明效率可达 67%,此时能耗可以降为国家标准的 12%.再结合眩光影响人眼视觉的理论,亮度标准还可以进一步降低,最终此照明方式可以在提升照明环境的条件下为我国道路照明降低约 90% 的电力消耗.

参考文献 / References:

- [1] CJJ 45—2015 城市道路照明设计标准[S].
CJJ 45—2015 Urban road lighting design standard [S]. (in Chinese)
- [2] ANSI/IESNA RP-8-2000 American national standard practice for roadway lighting [S].
- [3] 王启汶. LED 路灯和车灯的二次光学设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
WANG Qiwen. Secondary optical design of LED streetlights and car lights [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [4] 赵海天, 姚 其, 邝志斌, 等. 基于视网膜照度的路面照明效率分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2013, 30(2): 186-189.
ZHAO Haitian, YAO Qi, KUANG Zhibin, et al. Road lighting efficiency analysis based on retinal illuminance [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2013, 30(2): 186-189. (in Chinese)
- [5] 张 兵, 赖冠华, 李田茵, 等. 高位路灯眩光本质分析与眩光消除技术[C]// 半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集. [S. l.]: 中国照明学会, 2020: 57-66.
ZHANG Bing, LAI Guanhua, LI Tianyin, et al. High-mounted street lamp glare analysis and glare elimination technology [C]// Proceedings in Semiconductor Lighting

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778367); 深圳市科技计划资助项目(JCJY20170818141507055, JSGG20170411140639558)

作者简介: 张 兵(1995—), 深圳大学硕士研究生. 研究方向: 道路照明. E-mail: 727499623@qq.com

引 文: 张 兵, 赖冠华, 杜媛媛, 等. 低灯位多维度道路照明技术[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(6): 658-663.

- Innovation Application and Smart Lighting Development Forum, [S. l.]: China Illuminating Society, 2020: 57-66. (in Chinese)
- [6] 王振祥, 漆志军, 于群松, 等. 低位照明技术在山区峡谷悬索桥上的应用[J]. 公路, 2020, 65(12): 204-207.
- WANG Zhenxiang, QI Zhijun, YU Qunsong, et al. Application of Low position illumination technology on suspension bridge in mountain canyon [J]. Highway, 2020, 65(12): 204-207. (in Chinese)
- [7] CHEN Shenfei, LI Weisheng, YANG Songbai, et al. Evaluation method and reduction measures for the flicker effect in road lighting using fixed low mounting height luminaires [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 93.
- [8] 王晓喜. 护栏照明失能眩光及闪烁频率问题的研究[J]. 建筑电气, 2018, 37(7): 59-63.
- WANG Xiaoxi. Research on disability glare and flicker frequency of guardrail lighting [J]. Electrical Building, 2018, 37(7): 59-63. (in Chinese)
- [9] 杨松柏, 李玮晟, 陈神飞, 等. 基于瞳孔相关实验的等主观亮度下消减路灯眩光的节能效应[J]. 照明工程学报, 2019, 30(4): 65-69, 136.
- YANG Songbai, LI Weisheng, CHEN Shenfei, et al. Energy-saving effect of reducing street lamp glare under equal subjective brightness based on pupil correlation experiment [J]. Journal of Illuminating Engineering, 2019, 30(4): 65-69, 136. (in Chinese)
- [10] Science-Applied Sciences. Investigators from university of pisa have reported new data on applied sciences (space syntax analysis applied to urban street lighting: relations between spatial properties and lighting levels) [J]. Science Letter, 2019, 9(16): 3331.
- [11] JOANNE M W. Nighttime driving: visual, lighting and visibility challenges [J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 2020, 40(2): 187-201.
- [12] PAUL M. Do brighter, whiter street lights improve road safety [J]. Significance, 2019, 16(5): 8-9.
- [13] 贺岩松, 陈 奎, 潘 罗, 等. 驾驶舱眩光仿真分析与实车评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 183-190.
- HE Yansong, CHEN Kui, PAN Luo, et al. Glare analysis and evaluation of a cockpit based on visual simulation [J]. Journal of China Highway Engineering, 2019, 32(8): 183-190. (in Chinese)
- [14] 关烨锋, 陈泳竹. 路面反射系数对LED道路配光的影响及其优化研究[J]. 广东技术师范学院学报, 2016, 37(2): 33-36.
- GUAN Yefeng, CHEN Yongzhu. Influence of road reflection coefficient on LED road light distribution and its optimization [J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University, 2016, 37(2): 33-36. (in Chinese)
- [15] 潘怡蕾, 刘超博, 王洪波, 等. LED道路照明“灯下黑”问题的分析[J]. 照明工程学报, 2018, 29(1): 67-71, 81.
- PAN Yilei, LIU Chaobo, WANG Hongbo. Analysis of LED road lighting “black under the lamp” problem [J]. Journal of Illuminating Engineering, 2018, 29(1): 67-71, 81. (in Chinese)
- [16] 张 航, 严金华. 非成像光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 26-27.
- ZHANG Hang, YAN Jinhua. Design with non-imaging optical [M]. Beijing: Science Press, 2016: 26-27. (in Chinese)
- [17] 周彦辰, 郭 亮, 陈志涛, 等. 基于全内反射结构的多自由曲面准直透镜设计[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 186-194.
- ZHOU Yanchen, GUO Liang, CHEN Zhitao, et al. Design of multi-free-form collimating lens based on total internal reflection structure [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 186-194. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 隼】