

隧道入口段复合照明节能试验研究^{*}

吴桂林¹, 肖尧^{2a}, 梁波^{2b}, 潘国兵^{2b}, 赵宾¹

(1. 云南省公路开发投资有限公司, 昆明 650200; 2. 重庆交通大学 a. 土木建筑学院;
b. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验培育基地, 重庆 400074)

摘要:在隧道照明领域, 自然光是一把双刃剑, 一方面可以提高隧道内亮度, 另一方面也可引起“白洞”效应, 威胁车辆行驶安全。充分利用自然光对隧道照明的增效作用, 降低人工照明的能耗, 是实现隧道入口段照明节能的有效途径之一。结合云南保腾高速公路鹿山隧道内自然光、以及自然光与 LED 灯复合照明下隧道不同纵深路面照度的实测数据, 通过与规范规定值的对比分析研究, 得到了隧道入口段各区段自然光、LED 灯复合照明下隧道照度分布规律, 并对节能效果进行了评价。为今后进一步合理利用自然光、人工光源进行隧道复合照明节能研究提供参考。

关键词: 复合照明; 隧道入口段; 隧道节能照明; 路面照度

中图分类号: U453

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)03-0846-05

Experimental Study on Energy Saving of Composite Lighting in Tunnel Entrance Section

Wu Guilin¹, Xiao Yao^{2a}, Liang Bo^{2b}, Pan Guobing^{2b}, Zhao Bin¹

(1. Yunnan Highway Development & Investment Co.Ltd., Kunming 650200, P.R.China; 2a. School of Civil Engineering and Architecture, 2b. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China)

Abstract: In the tunnel lighting field, natural light is a double-edged sword, on one hand, it can improve the luminance in tunnel, on the other hand, it will cause “white hole” effect, which threaten vehicle safety. Making full use of the synergism of natural light effect on tunnel lighting to reduce energy consumption of artificial lighting is one of the most effective ways to realize tunnel lighting energy saving in entrance section. Based on different depths road illumination measured in Lushan tunnel under the condition of natural light and LED lamps composite lighting, measured data were contrasted with the standard values, the distribution law of tunnel illumination of composite lighting was got to evaluate its energy saving effect. The paper can provide the reference for tunnel lighting energy-saving in reasonable use natural light and artificial light composite lighting.

Keywords: composite lighting; tunnel entrance section; tunnel energy saving lighting; road illumination

^{*} 收稿日期: 2016-04-30(修改稿)

作者简介: 吴桂林(1957-), 男, 云南人, 高级工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作。

E-mail: guilinwucd@126.com

通讯作者: 肖尧(1990-), 男, 重庆梁平人, 硕士生, 主要从事隧道照明节能研究。E-mail: 894531591@qq.com

基金项目: 云南省交通厅科技项目(云交科 2010(B) 16-B); 教育部博士点专项基金(2011552211003); 交通运输部应用基础研究项目(2013319814030); 交通运输部应用基础研究项目(2014319814260); 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地开放基金(CQSLBF-Y14-8)

0 引言

隧道洞内外亮度的巨大差异,使得司乘人员进入隧道将出现“黑洞”现象,影响行车安全^[1-3]。为了减弱该现象对行车安全的影响程度,隧道入口段不得不加大布灯密度或增大大具功率,提高隧道入口段亮度,从而缩小洞内外亮度的差异^[4-5]。增大人工照明,一方面避免了“黑洞”现象,保证了行车安全,另一方面却给隧道运营造成了极大的经济负担,阻碍了隧道建设的可持续发展^[6-7]。

太阳是一种取之不尽、用之不竭的绿色能源,通过一定的技术方法实现隧道入口段的复合照明,使自然光替代隧道内部分人工照明光源,从而降低隧道入口段的照明能耗^[8-9],可实现隧道运营的节能减排。本文依托云南保腾高速公路鹿山隧道,通过对隧道路面照度的测量,并将测量结果与规范规定值进行对比,以期得出自然光与人工光源复合照

明下的节能效果,为日后合理利用自然光、人工光源进行隧道复合照明节能研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试验时间和地点

本次试验时间为2013年1月20日9:53—10:45,试验地点为云南保腾高速公路鹿山隧道腾冲至保山方向进洞口区域。该隧道位于北纬24.9°、东经98.6°,全长221 m,路面宽8.75 m,高7.05 m,左右检修道各1.075 m,设计时速为80 km/h。隧道地属热带季风气候,平均气温14.8℃,冬季干燥,日照时间长,夏季多雨潮湿。

1.2 试验天气

依据ISO 15469:2004/CIE 011:2003指导文件中15种标准天空模型(如表1)并结合现场天气状况得出:本次试验时段天气为CIE天空模型类型12,即标准晴天空,清澄大气^[10]。

表1 标准天空模型
Table 1 Standard sky model

类型	天空亮度分布	类型	天空亮度分布
Type-1	CIE 标准全云(近似值),朝向天顶亮度发生急剧渐变,但各方位相同	Type-2	全云天空的亮度发生急剧的渐变,朝向太阳的一侧稍亮
Type-3	全云天空的亮度发生急剧的渐变,但各方位相同	Type-4	全云天空的亮度发生急剧的渐变,朝向太阳的一侧稍亮
Type-5	均匀天空	Type-6	部分存在云的天空,朝向天顶无渐变
Type-7	部分存在云的天空,太阳的周边较亮	Type-8	部分存在天空,朝向渐变,但有明显的光环
Type-9	部分存在云的天空,看不见太阳	Type-10	部分存在云的天空,太阳的周边亮
Type-11	白色晴天空,有明显的光环	Type-12	CIE 标准晴天空,清澄大气
Type-13	CIE 标准晴天空,浑浊大气	Type-14	无云浑浊天空,大范围光环
Type-15	白色浑浊晴天空大范围光环		

1.3 试验方法

试验采用双车道三点测试法,即隧道断面上左右车道中心各一个测点和道路中心一个测点,共计

3个测点。按照该测试法用TES-1336A数字式照度计每隔1 m间距测量一个断面,测量示意图如图1。

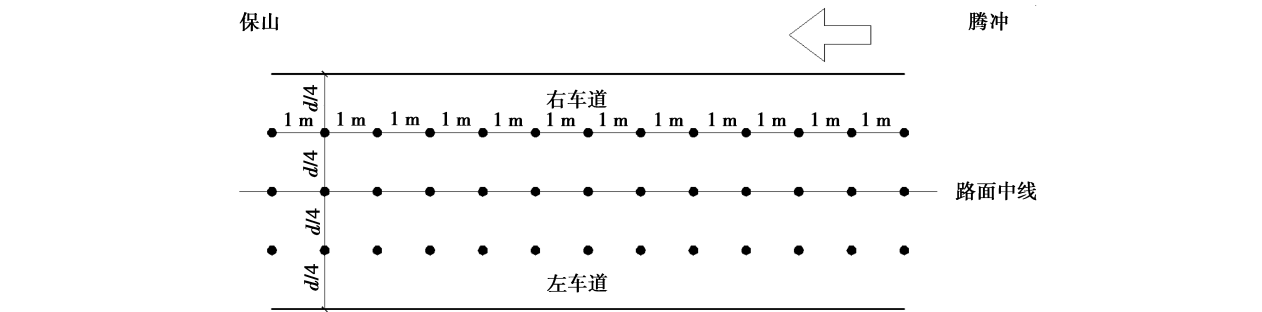


图1 隧道路面照度测量布点示意图

Fig.1 Layout diagram of tunnel pavement illuminance measurement

1.4 试验区段

依据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)“ $D_{th}=1.154D_s-(h-1.5)/\tan 10^\circ$ ”(D_{th} 为入口段长度; D_s 为照明停车视距; h 为洞口内净空高度), 计算可得鹿山隧道入口段长度为 71 m, 因此, 本次试验测试区段为隧道洞口处至隧道洞身 71 m 之间区段^[11-12]。

1.5 试验工况

本次试验工况如表 2 所示。

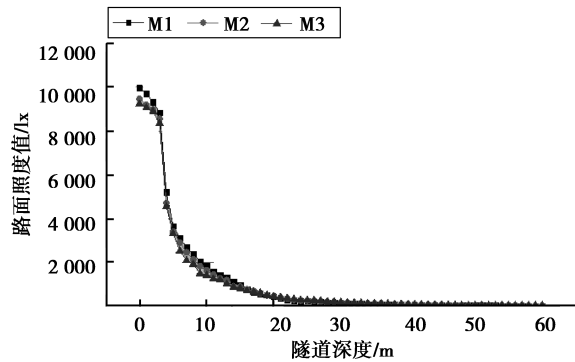
表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	光源
工况一	自然光
工况二	自然光+LED 灯复合照明

2 试验数据整理

采用上述试验方法可得自然光照明以及自然光与 LED 灯复合照明下试验区段各测试点照度值, 见图 2、图 3。



M1—隧道左车道中线照度值; M2—隧道中线照度值; M3—隧道右车道中线照度值

图 2 自然光照明下隧道路面各测试点照度值

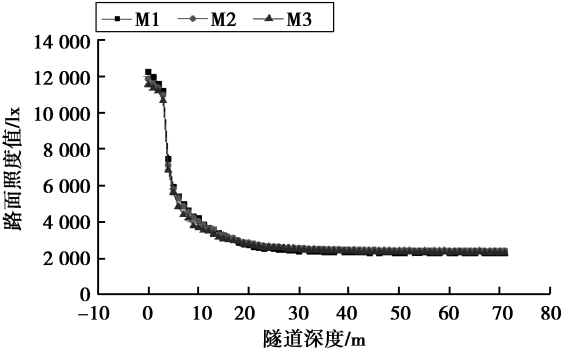
Fig.2 Tunnel pavement illuminance values of each test point in natural light condition

通过对数据的整理, 利用有关照明理论公式计算分别可得自然光照明下、自然光与 LED 灯复合照明下隧道入口段路面平均照度、路面照度总体均匀度和路面照度纵向均匀度, 如表 3。

表 3 隧道照明质量指标

Table 3 Quality index of tunnel lighting

光源	平均照度/lx	总体均匀度	纵向均匀度
自然光	1 002.0	0.004	0.000 7
自然光+LED	3 274.2	0.690	0.200 0



M1—隧道左车道中线照度值; M2—隧道中线照度值; M3—隧道右车道中线照度值

图 3 自然光与 LED 灯复合照明下隧道路面各测试点照度值

Fig.3 Tunnel pavement illuminance values of each test point in natural light and LED condition

3 节能分析

依据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)有关规范标准, 结合鹿山隧道实际情况, 隧道入口段亮度折减系数 k 取值 0.025, 洞外亮度 $L_{20}(S)$ 取值为 3000 cd/m^2 , 亮度与照度间的换算系数取 $15\text{ lx}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$, 故鹿山隧道入口段所需满足规范亮度 $L_{th}=k\times L_{20}(S)=0.025\times3\ 000=75\text{ cd/m}^2$, 乘以照度与亮度换算系数 $15\text{ lx}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$, 照度为 1125 lx ^[11-12]。将所求得的规范值分别与自然光照明、自然光与 LED 灯复合照明照射下隧道路路面照度值相对比, 对比结果如图 4、图 5 所示。

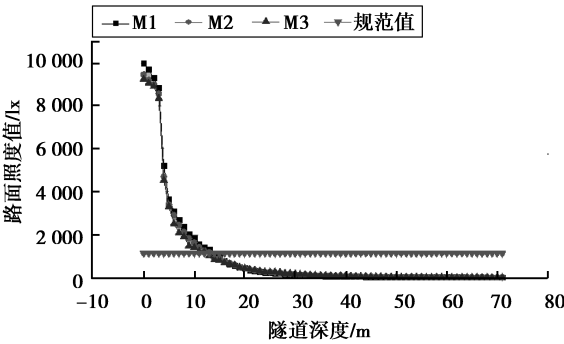


图 4 自然光照射下隧道路路面照度值与规范照度值对比

Fig.4 Illuminance value comparison between tunnel pavement and standard values in natural light condition

由图 4、图 5 可以看出:

(1) 隧道纵深 $<2H$ (隧道高度, 下同) 时, 自然光和复合照明照射下隧道路路面照度值均大于经由规范求得路面照度值。由此可见, 阳光明媚天气

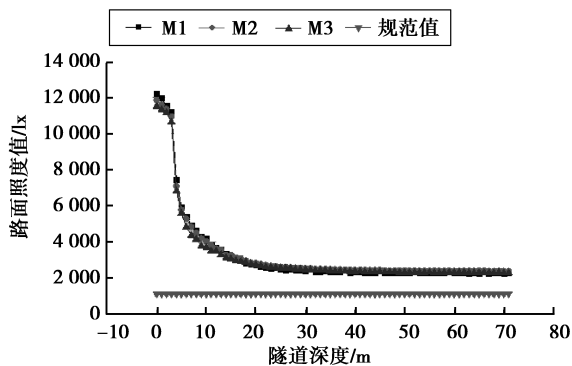


图 5 复合照明照射下隧道路面照度值与规范照度值对比

Fig.5 Illuminance value comparison between tunnel pavement and standard values in composite light condition

下,该试验隧道进洞口至隧道纵深 $2H$ 区段在白天无需LED灯照明。白天关闭该区段多余照明,有利于在不损害隧道照明质量的前提下实现隧道照明的节能减排。

(2)当 $2H \leq \text{隧道纵深} < 5.4H$ 时,单纯依靠自然光照明已无法满足经由规范求得的路面照度 ($1\,125\text{ lx}$),但自然光与 LED 灯复合照明下隧道路面照度又远大于经由规范求得的路面照度。由此可见,该区段有较大的节能空间。以隧道纵深 18 m 路面中线处为例,自然光照射下该点照度值为 576 lx ,满足规范要求值 51.2% ,剩下 48.8% (549 lx)需由人工照明提供。然而试验隧道该点 LED 提供照度为 $2\,390\text{ lx}$,超过该点所需人工照明 335% ,造成过度照明,增大了隧道照明耗能。

(3)隧道纵深 $\geq 5.4H$ 时,自然光强度随着隧道纵深的增加而逐渐减弱,对隧道路面照度增效作用随之减弱,尤其是当隧道纵深 $> 8.6H$ 时,自然光照射下隧道路面照度不足 10 lx ,由此可见该区段采用自然光与 LED 灯复合照明意义不大。

因此,鹿山隧道洞口至洞内 $5.4H$ 区段有条件实施自然光与隧道灯具的复合照明,从而实现隧道的绿色照明。其中,洞口至洞内 $2H$ 区段白天可仅依靠自然光对隧道内的照明作用,从而实现节能 100% ;洞内 $2H$ 至洞内 $5.4H$ 区段应充分利用自然光对隧道内照明的增效作用,从而降低人工照明能耗,进而实现节能 $78\% \sim 9.4\%$ 。值得一提的是,自然光与隧道灯具复合照明的具体节能值与隧道高度、所处经纬度、周边地势地貌等因素有关。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)阳光明媚天气下,隧道洞口至隧道洞内 $2H$ 区段白天无需人工照明即可满足隧道照明规范规定值;

(2)在 $2H \leq \text{隧道纵深} < 5.4H$ 区段,应充分利用自然光辅助人工照明,避免过度照明带来的能源损耗;

(3)隧道入口段纵深 $\geq 5.4H$ 区段,自然光对隧道路面照度影响微弱,采用自然光与 LED 灯复合照明意义不大。

4.2 展望

自然光由洞外直接照射进洞内一定距离,再经隧道内壁的多次反射增大对隧道内部照明的影响范围,充分利用自然光对隧道照明的增效作用能够实现隧道的节能减排。但自然光的每一次反射都不可避免造成自然光光强的衰减,该衰减不利于隧道路面照度总均匀度和纵向均匀度(文中表 3 也已表明)。由此可见,直接利用洞外进入的自然光再加人工照明实现的复合照明不够妥善。目前有关科研人员致力于光导管的研究,通过介质将自然光引入隧道洞内,再经漫射器均匀的照射隧道内部。该技术既利用了自然光这一免费绿色能源,又避免了对隧道路面照度均匀度的不利影响。因此,光导管在隧道入口段复合照明节能方面有着良好的应用前景。

参考文献(References)

[1] 李靖,宋燕铭,刘雄.隧道出入口延伸照明段落节能方法研究[J].公路工程,2012,37(2):57-59. (Li Jing, Song Yanming, Liu Xiong. Study on method of energy-saving about extended lighting sections in entrance and exportation of tunnel lighting[J]. Highway Engineering, 2012, 37(2):57-59. (in Chinese))

[2] 王少飞,涂耘,邓欣,等.公路隧道照明节能的形势和对策[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1539-1544,1604. (Wang Shaofei, Tu Yun, Deng Xin, et, al. Situation and countermeasures of energy-saving in road tunnels lighting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp.1): 1539-1544,

1604. (in Chinese))

[3] 杨超, 王志伟. 公路隧道照明节能技术[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(2): 102-108. (Yang Chao, Wang Zhiwei. Energy-saving technology for highway tunnel lighting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(2): 102-108. (in Chinese))

[4] Liang B, Pan G B, Pi Y H. Energy-saving experimental study on reflective material auxiliary tunnel lighting based on visual effect[J]. Advanced Material Research, 2012, 594-597: 1193-1196

[5] 涂耘, 王少飞, 陈建忠, 等. 承德市干线公路隧道节能照明设计方案[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增 1): 1501-1505. (Tu Yun, Wang Shaofei, Chen Jianzhong, et al. Energy-saving tunnel lighting design of trunk highway in Chengde city[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp.1): 1501-1505. (in Chinese))

[6] 季佳俊. 三车道大断面公路隧道照明节能参数优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012. (Ji Jiajun. The research on parameter optimization of energy-saving illumination in three-lane highway tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[7] 梁波, 潘国兵, 皮宇航, 等. 反光材料辅助隧道节能照明的视觉功效试验研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(增): 243-245. (Liang Bo, Pan Guobing, Pi Yuhang, et, al. Experimental study on visual effect of reflective material auxiliary tunnels energy-saving lighting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(Supp.): 243-245. (in Chinese))

[8] 王亚琼, 谢永利, 赖金星. 隧道钠灯与 LED 灯组合照明试验研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 505-509, 524. (Wang Yaqiong, Xie Yongli, Lai Jinxing. Experimental research and application of high voltage sodium lamp and low emitting diode combined lighting in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 505-509, 524. (in Chinese))

[9] 王宝林, 叶颖, 刘灿, 等. 自然光在隧道照明工程的应用及试验评价[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 35-42. (Wang Baolin, Ye Xin, Liu Can, et al. Application and experimental evaluation of natural light for tunnel illumination [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 35-42. (in Chinese))

[10] Spatial Distribution of Daylight. CIE standard general sky (CIE S 011/E-2003) [S]. Vienna: CIE Publication, 2003.

[11] 公路隧道照明设计细则(JTG/T D70/2-01-2014)[S]. 北京:人民交通出版社, 2014. (Guidelines for Design of Lighting of Highway Tunnels (JTG/T D70/2-01-2014)[S]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese))

[12] 公路隧道设计规范(JTG D70-2004)[S]. 北京:人民交通出版社, 2004. (Code for design of road tunnel (JTG D70-2004)[S]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese))

(上接第 787 页)

[10] 鲁得文, 梁庆国, 欧尔峰, 等. 高速公路泥岩隧道围岩压力试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1178-1184. (Lu Dewen, Liang Qinguo, Ou Erfeng, et al. Test study on ground pressure of mudstone highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1178-1184. (in Chinese))

[11] 沈才华, 童立元. 钢拱架柔性支撑稳定性预测判别方法探讨[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 88-91. (Shen Caihua, Tong Liyuan. Discussions on predicting the stability of flexible shotcrete and steel arch frame support for tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 88-91. (in Chinese))

[12] 路军富, 王明年, 贾媛媛, 等. 高速铁路大断面黄土隧道二次衬砌施作时机研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 843-848. (Lu Junfu, Wang Mingnian, Jia Yuanyuan, et al. Research on construction time of secondary lining of large section loess tunnel for high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 843-848. (in Chinese))