

文章编号:1009-6582(2022)05-0188-07

DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.05.023

引文格式:戴开来,王峰,朱磊,等.公路隧道内汽车移动光源动态照明效果研究[J].现代隧道技术,2022,59(5):188-194.

DAI Kailai, WANG Feng, ZHU Lei, et al. Study on Dynamic Lighting Effect of Vehicle Lights in Road Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 188-194.

公路隧道内汽车移动光源动态照明效果研究

戴开来^{1,2} 王峰^{1,2} 朱磊^{1,2} 曾艳华^{1,2}

(1.西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,成都610031;2.西南交通大学土木工程学院,成都610031)

摘要:对汽车移动光源进行照明试验,并采用三维仿真模拟方法对汽车移动光源照明、隧道灯具照明及汽车移动光源与隧道灯具动态叠加照明工况下的隧道照明效果进行研究。结果表明:汽车移动光源较远区域的路面亮度衰减明显,汽车移动光源纵向有效照明范围为20 m,横向有效照明范围为3.75 m;在设置的照明条件下,灯具照明的右行车道中线最大亮度为 $1.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,汽车移动光源照明的右行车道中线最大亮度为 $5.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,汽车移动光源与灯具叠加照明的右行车道中线最大亮度为 $7.1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;叠加照明的行车道中线最大亮度相较汽车移动光源照明增加27%,相较灯具照明增加超过300%。

关键词:隧道照明;照明试验;汽车移动光源;动态照明

中图分类号:U453.7

文献标识码:A

1 引言

为保障高速公路隧道内车辆行驶的安全性,进一步预防和减少隧道内的交通事故,《中华人民共和国道路交通安全法》规定:进入隧道前必须打开近光灯。车辆在隧道内行驶时,驾驶员感受到的光环境是汽车移动光源与隧道照明灯具共同产生的,汽车光源随车辆位置而不断动态变化。因此,隧道照明设计需要考虑汽车光源与隧道灯具动态叠加效应对隧道照明的影响。

针对汽车移动光源对隧道照明的影响,国内外开展了部分研究。Janoff等^[1]根据夜间驾驶员的视觉表现对路面能见度进行研究,发现汽车光源会减小路面小目标的可见度。Ekrias等^[2]研究了车辆位置、前照灯类型等因素对道路上不同目标亮度对比度的影响,发现与卤素车灯相比,氙气车灯的影响更为显著。Hirakawa等^[3]研究发现,在对称照明中,汽车光源作用下小目标垂直面中点的照度会降低,同时附近区域的照度会升高,导致目标可见度发生变

化,但在顺光照明中,汽车光源对目标可见度几乎没有作用。翁季等^[4]发现汽车近光灯对公路隧道照明中小目标可见度的对比显示系数会产生影响。梁波等^[5]采用室内模型实验和DIALux仿真相结合的方法,针对不同光通量的汽车光源对小目标可见度的影响进行研究,发现汽车光源光通量越大,小目标可见度的削弱越明显。

针对照明灯具对隧道照明的影响,国内外已开展了大量研究。傅翼等^[6]通过仿真模拟与定量分析,研究了不同灯具布置形式下产生照明眩光的影响范围。季佳俊等^[7]采用数值模拟与试验相结合的方法,分析了灯具不同间距、不同高度和不同布灯形式对灯具利用系数、路面照度和总均匀度的影响规律。韩直等^[8]探究了曲线隧道不同灯具布置形式下的允许最大布灯间距与最大盲区面积,发现足够大的布灯间距才存在盲区面积。张理智^[9]从照明灯具寿命、光效、能耗和成本等方面进行分析比选,发现按5 a运营计算时,每公里LED灯具的总费用可比高压钠灯具节省40.73万元。刘强等^[10]研究了混合

收稿日期:2022-07-20

修回日期:2022-09-10

基金项目:四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12)。

作者简介:戴开来(1998-),男,硕士研究生,主要从事隧道及地下工程领域的相关研究工作,E-mail:7348445325@qq.com.

灯具组合下对隧道照明效果的影响。Liu等^[11]通过研究LED光谱下的驾驶员的反应时间和瞳孔收缩等视觉表现,得出了LED照明灯具更有利于隧道行车安全的结论。

根据以上分析可知,目前对于照明灯具的研究较为充分,对于汽车移动光源尤其是汽车移动光源与隧道灯具动态叠加效应对隧道照明效果的研究还极其缺乏。本文针对汽车移动光源照明效果及影响范围开展照明试验研究,并采用三维仿真模拟软件对隧道内移动光源照明、灯具照明及移动光源与灯具动态叠加照明工况下的隧道照明效果进行准静态分析,期望对高速公路隧道照明系统设计提供参考。

2 汽车移动光源静态照明试验

2.1 试验方案

由于隧道结构半封闭的特殊性,隧道内部基本处于完全的暗环境,尤其是特长公路隧道,其行驶环境与夜晚的道路行驶环境相似,因此本文选取无外界光源影响的空旷道路作为试验场地,路面为水泥混凝土路面。试验场地宽度与双车道公路隧道一致,为 $3.75\text{ m}\times 2$,长度大于 50 m ,如图1所示。货车近光灯是照明效果较弱的汽车前照灯,为充分保证行车安全,选取货车进行静态照明试验。如图2所示,汽车车灯光源高度为 1.5 m ,近光灯种类为卤素灯,型号为H1。



图1 汽车静态照明试验场地
Fig.1 Static vehicle lighting test site



图2 汽车静态照明试验车辆
Fig.2 Vehicle used in static lighting test

根据《照明测量方法》(GB/T 5700—2008)^[12]的相关要求,道路照度测量时应将测量路段划分为若干大小相等的矩形网格,其纵向间距应小于或等于 5 m ,横向间距宜为车道宽度的 $1/3$ 。双车道公路隧道标准车道宽度为 3.75 m ,本试验选取照明测点横向间距为 1.25 m ,纵向间距为 5 m 。由于汽车移动光源照明的对称性,测试区域宽度可减半,汽车移动光源照明试验测点分布如图3所示。为确保测试不受外界光源影响,汽车车灯打开前,使用照度计对前方路面随机测量数次,以保证路面亮度为0。

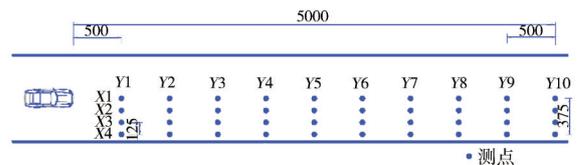


图3 汽车静态照明试验测点布置(单位:cm)

Fig.3 Layout of measurement points in static vehicle lighting test(Unit:cm)

2.2 试验结果与分析

驾驶员在行驶过程中感受到的是路面反射出来的光,即路面照明亮度。根据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014)^[13]要求,水泥混凝土路面照度的转换系数取 $10\text{ lx}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

图4给出了汽车移动光源照明的路面亮度随纵向距离的变化结果。从图中可以看出,随着纵向距离的增加,路面亮度均呈现不断衰减的趋势。路面中线处亮度达到最大值,纵向距离为 5 m 时,路面中线亮度为 $8.0\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;纵向距离为 20 m 时,路面中线亮度为 $1.2\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;当纵向距离进一步增大到 25 m 时,路面中线亮度仅有 $0.7\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,以规范中要求的隧道中间段最低平均亮度 $1\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 作为评价指标,此时汽车光源照明效果已不明显。由此可知,汽车移动光源纵向有效照明范围为 20 m 。远离路面中线时,路面亮度变化逐渐平缓。图5进一步给出了汽车移动光源照明时,纵向距离 20 m 内路面亮度随横向距离的变化规律。从图中可以看到,随着距车辆横向距离的增加,路面亮度逐渐降低;距离测试车辆 2.5 m 时,路面最大亮度为 $1.1\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,当距离测试车辆 3.75 m 时,路面最大亮度降至 $0.3\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可知,横向距离 2.5 m 内汽车光源照明效果较明显。

3 仿真模拟方法

3.1 模型及参数

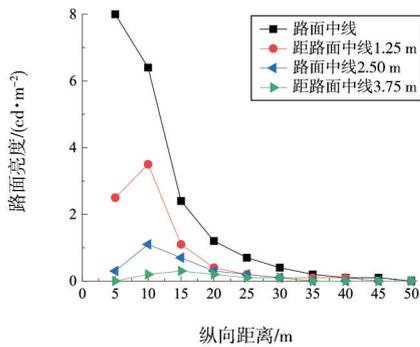


图4 汽车照明试验路面亮度纵向分布

Fig.4 Longitudinal distribution of pavement luminance of static vehicle lighting test

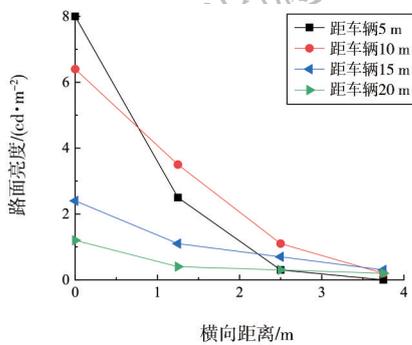


图5 汽车照明试验路面亮度横向分布

Fig.5 Transverse distribution of pavement luminance in static vehicle lighting test

本文采用 Dialux 软件对隧道照明效果进行模拟,隧道模型选取典型双车道公路隧道断面,隧道长度为 300 m,高度为 7.2 m,路面宽度为 7.5 m,汽车车辆位于隧道右侧行车道中线,如图 6 所示。

隧道照明灯具采用雷士照明 LED 灯系列,灯具编号为 NHLED102,该类型灯具发光效率为 100 lm/W,发光角度为 120°,光线输出率为 1,功率为 40 W。汽



图6 隧道照明模型示意

Fig.6 Configuration of tunnel lighting model

车移动光源采用 PHILIPS BBP623 GC 34xLED-HB/GN NB,发光效率为 68.5 lm/W,功率为 60 W。隧道边墙反射系数取 58%(瓷砖),穹顶反射系数取 10%,路面设置为沥青路面。

3.2 模型的验证

为验证仿真模拟的适用性和准确性,本文建立了外界路面汽车移动光源静态照明仿真模型,并将仿真结果与试验结果进行对比分析。仿真软件中路面的材质和照明试验路面材质不同,故采用照度进行分析评价。图 7、图 8 分别给出了外界路面汽车移动光源照明时,路面中线照度纵向分布和车辆前方 15 m 处路面照度横向分布仿真模拟与试验结果的对比。

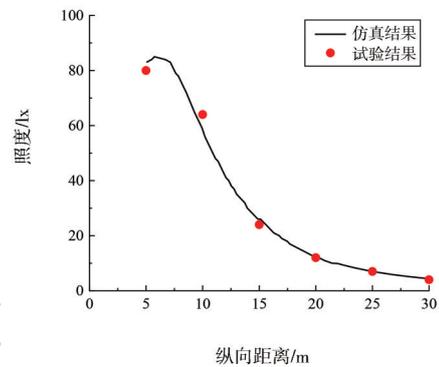


图7 路面中线照度纵向分布

Fig.7 Longitudinal distribution of median-road illumination

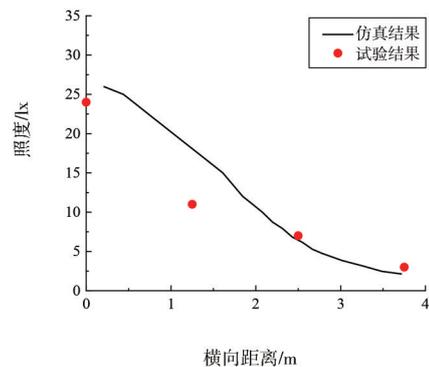


图8 车辆前方 15 m 路面照度横向分布

Fig.8 Transverse distribution of road illumination 15 m front of vehicle

从图 7、图 8 中可以看出,路面中线照度纵向分布规律与试验结果吻合较好。车辆前方 15 m 处,路面中线附近区域的仿真模拟结果略高于试验结果,在远离路面中线区域的仿真结果与试验结果吻合较好。说明本文所采用的汽车光源照明仿真模型是基

本合理的。

4 仿真结果与分析

4.1 公路隧道灯具照明效果分析

公路隧道照明质量对隧道运营安全至关重要,长度大于200 m的高速公路隧道均应设置隧道照明灯具。隧道照明主要有中线布置、中线偏移布置、两侧交错布置和两侧对称布置4种布置形式。目前中线偏移由于照明效果好、后期维护便利等优势被广泛应用。本文基于隧道中间段灯具中线偏移布置形式,对隧道内照明效果开展分析。隧道灯具采取NVC NHLED102,偏移距离设置为1 m,灯具高度为7 m,照射角度为 10° ,灯具间距为12 m。

选取评估区域1(50 m \times 7.5 m)用以计算路面平均亮度及路面亮度总均匀度,同时选取路面中线评估区域2(50 m \times 0.25 m)用以计算路面亮度纵向均匀度,隧道路面亮度评估区域如图9所示。

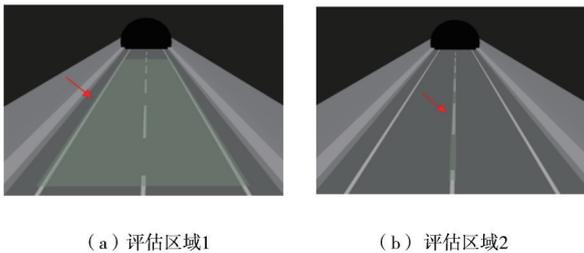


图9 隧道路面亮度评估区域

Fig.9 Evaluation area of tunnel pavement brightness

根据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)^[12],隧道中间段平均亮度不低于 $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,路面亮度均匀度不低于0.3,纵向均匀度不低于0.5。利用仿真模拟软件计算得到隧道灯具照明的路面平均亮度、路面亮度总均匀度及路面纵向均匀度,计算结果如表1所示,照明效果云图如图10所示。可以看出,本文采取的隧道灯具布置形式下的路面照明效果满足规范要求。

汽车车辆在隧道内行驶时,位于隧道行车道一侧。隧道行车道中线为驾驶员主要视线区域,对隧道内行车安全十分关键。图11给出了隧道灯具照

表1 隧道灯具照明仿真计算结果

Table 1 Simulation results of tunnel lighting

平均亮度/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	总均匀度	纵向均匀度
1.24	0.585	0.552

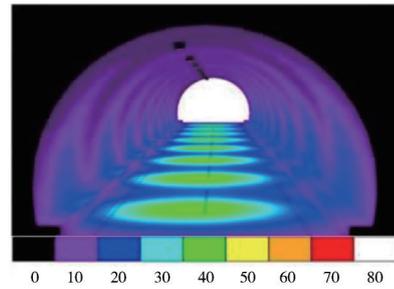


图10 隧道灯具照明效果

Fig.10 Lighting effect of luminaries

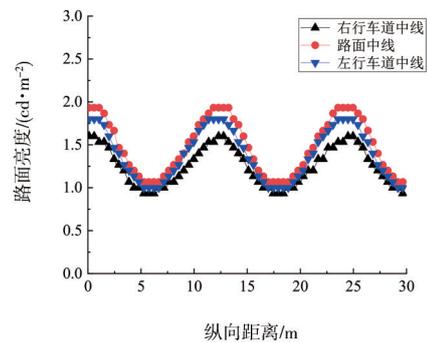


图11 隧道灯具照明的路面亮度纵向分布

Fig.11 Longitudinal distribution of luminance under luminaries

明时,路面中线、右侧行车道中线及左侧行车道中线路面亮度随纵向距离的变化过程。

从图11中可以看出,隧道灯具照明的路面亮度随纵向距离呈正弦性周期变化,路面中线亮度大于左(右)行车道路面亮度。路面中线亮度最大值为 $1.93 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值为 $1.06 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;右行车道中线亮度最大值为 $1.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值为 $0.93 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。图12进一步给出了距隧道进口150 m处路面亮度随横向距离的变化曲线。从图中可以看到,隧道灯具中线

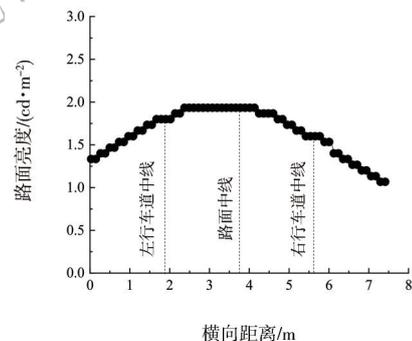


图12 隧道灯具照明的路面亮度横向分布

Fig.12 Transverse distribution of luminance under luminaries

偏移布置时,路面亮度横向分布不均匀,左侧行车道路面亮度较大,右侧行车道路面亮度较小。

4.2 公路隧道移动光源照明效果分析

隧道内行车必须打开近光灯,汽车移动光源将直接影响驾驶员对障碍物的辨认能力及驾驶舒适度。本文以汽车车辆位于右侧行车道中线为例,探究公路隧道内汽车移动光源的动态照明效果。图13给出了汽车光源照明的路面亮度随纵向距离的变化曲线。

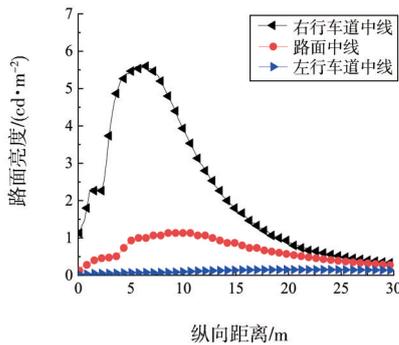


图13 汽车光源照明的路面亮度纵向分布

Fig.13 Longitudinal distribution of pavement luminance under vehicle lights

从图13中可以发现,汽车光源照明时,右侧行车道、路面中线处亮度随纵向距离的变化呈现出先增长后衰减的规律。在汽车光源附近的路面区域,右侧行车道路面亮度迅速上升,当距汽车光源距离为6 m左右时,右侧行车道亮度达到最大值,为 $5.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;随着纵向距离的进一步增加,右侧行车道亮度逐渐衰减,当纵向距离增大到19.6 m时,右侧行车道亮度衰减至 $0.93 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,低于规范要求的最低平均亮度 $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可知,汽车移动光源的纵向有效照明范围为20 m,这与汽车移动光源静态照明试验得到的结论一致。

从图13中还可以看到,汽车车辆位于右侧行车道时,汽车光源对左侧行道路面几乎没有照明效果。图14进一步给出了汽车车辆前方20 m范围内不同横向路面位置汽车光源照明的路面亮度变化。可以看到,距车辆横向距离为5 m时,路面亮度出现了一个双驼峰型分布;远离车辆的路面亮度分布变为单驼峰型分布。在隧道路面中线处,最大亮度仅为 $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,此时汽车光源的照明效果已经不明显。由此可知,汽车移动光源的横向有效照明范围为3.75 m。图15所示为汽车光源的照明效果云图。综

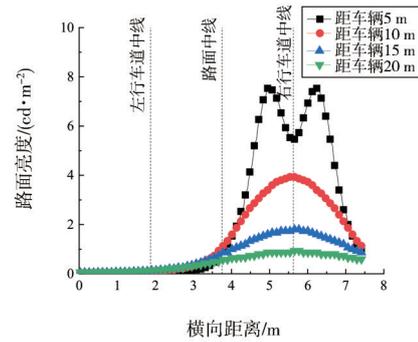


图14 汽车光源照明的路面亮度横向分布

Fig.14 Transverse distribution of pavement luminance under vehicle lights

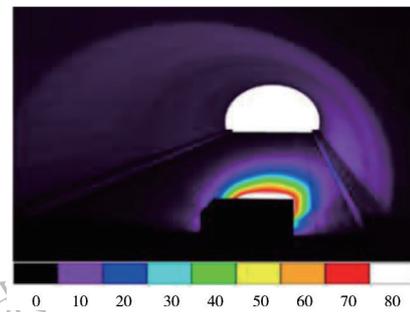


图15 汽车光源照明效果

Fig.15 Lighting effect of vehicle lights

上可知,汽车移动光源较远区域的路面亮度衰减明显,有效照明范围为 $20 \text{ m}\times 3.75 \text{ m}$ 。

4.3 公路隧道移动光源与灯具动态照明效果分析

公路隧道照明灯具通常按照一定间距均匀布置,车辆行驶过程中,汽车光源与隧道灯具的叠加区域将周期性变化,即车辆从隧道灯具下方行驶至下一个灯具下方为一个周期。本文以一个变化周期为例,对公路隧道内汽车动态行驶过程进行准静态模拟,研究不同车辆位置下汽车光源与隧道灯具叠加的照明效果。照明灯具间距设置为12 m,每间隔3 m选取1个车辆位置,如图16所示。

图17给出了不同车辆位置下车辆前方48 m范围(4倍灯具间距),汽车移动光源与隧道灯具叠加照明的右侧行车道中线亮度纵向分布。

从图17中可以看出,汽车光源与隧道灯具叠加照明的右侧行车道中线亮度变化经历了先增长后衰减的叠加影响阶段,最后进入与仅隧道灯具照明相似的正弦性周期变化阶段的过程;还可以发现,不同车辆位置的右行车道中线最大亮度有较大区别,图18进一步给出了右行车道中线最大亮度随纵向距

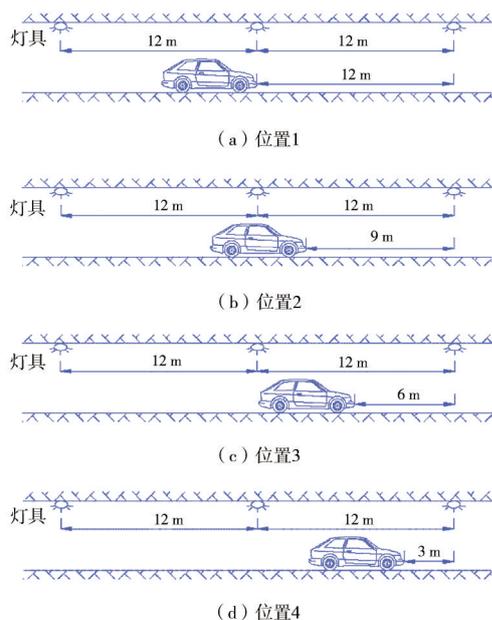


图16 车辆位置示意

Fig.16 Schematic of vehicle positions

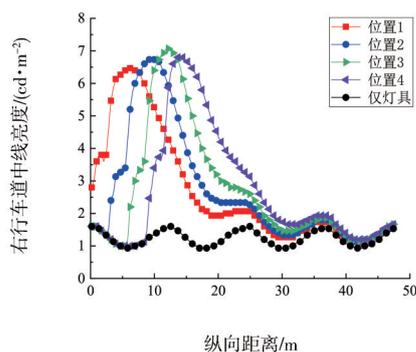


图17 汽车光源与隧道灯具叠加的右行车道中线亮度

Fig.17 Luminance at centerline of right lane under the coupling effect of vehicle lights and luminaries

离的变化。可以看到,随着测试车辆与隧道灯具距离的增加,右行车道中线最大亮度呈现先增长后衰减的变化规律。当测试车辆位于车辆位置3时,右行车道中线最大亮度达到最大值,为 $7.1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,车辆位置1的右行车道中线最大亮度最小,为 $6.5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$,相比最大值减小约10%。分析可知,测试车辆位于车辆位置1时,汽车移动光源的最大光通量的位置处

参考文献

References

- [1] JANOFF M S. The Effect of Headlights on Small Target Visibility[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1992, 21(2): 46-53.
- [2] EKRIAS A, ELOHOLMA M, HALONEN L. Effects of Vehicle Headlights on Target Contrast in Road Lighting Environments[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2008, 32(3): 302-314.
- [3] HIRAKAWA S, KARASAWA Y, YOSHIDA Y. Visibility Evaluation of Obstacles on Road Surface in Consideration of Vehicle

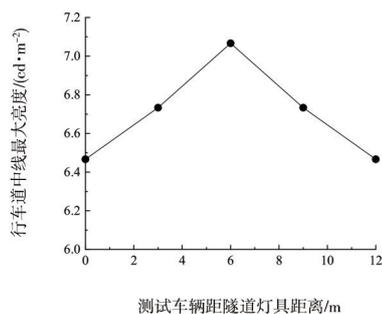


图18 汽车光源与隧道灯具叠加的右行车道中线最大亮度

Fig.18 Maximum luminance at centerline of lane under the coupling effect of vehicle lights and luminaries

于隧道灯具光通量最小处,导致右行车道中线最大亮度较小;而测试车辆位于车辆位置3时,汽车移动光源的最大光通量和灯具光源的最大光通量叠加,此时右行车道中线最大亮度达到极大值。

5 结论

本文通过汽车移动光源照明效果及范围的研究,并探究了汽车车辆位于右侧行车道时,汽车移动光源与隧道灯具动态叠加效应对隧道照明效果的影响。采用本文设置的照明条件时,得到以下结论:

(1) 汽车移动光源较远区域的路面亮度衰减明显;汽车移动光源纵向有效照明范围为20 m,横向有效照明范围为3.75 m,有效照明区域为 $20 \text{ m}\times 3.75 \text{ m}$ 。

(2) 隧道灯具照明的右行车道中线亮度呈现正弦性周期变化,采用本文设置的隧道灯具照明时,右行车道中线最大亮度为 $1.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(3) 汽车移动光源照明的右行车道中线亮度表现出先增长后衰减的趋势,距离汽车光源为6 m左右时,右行车道中线亮度达到最大值,为 $5.6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(4) 汽车移动光源与灯具耦合照明的右行车道中线亮度经历了先增长后衰减的叠加影响段,最后进入正弦性周期变化阶段的过程。当汽车移动光源位于相邻隧道灯具中间位置时,汽车移动光源与灯具叠加照明的右行车道中线最大亮度达到极大值 $7.1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$;叠加照明的右行车道中线最大亮度相较灯具照明增加超过300%,相较汽车移动光源照明增加27%。

- Headlamps and Tunnel Lighting Based on Total Revealing Power[J]. Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan,2014, 98(8A): 352-361.
- [4] 翁季,蔡贤云,杜峰,等.公路隧道照明中基于小目标可见度的对比显示系数研究[J].照明工程学报,2015,26(6):87-90.
WENG Ji,CAI Xianyun,DU Feng,et al. The Research of Contrast Revealing Coefficient Based on Small Target Visibility in Highway Tunnel Lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal,2015,26(6):87-90.
- [5] 梁波,凌超,李翔,等.汽车前照灯对隧道路面照明质量影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(3):14-21.
LIANG Bo,LING Chao,LI Xiang, et al. Influence of Vehicle Headlights on the Quality of Tunnel Pavement Lighting[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2018,37(3):14-21.
- [6] 韩直,王晶晶,关雨嫣.LED灯曲线隧道照明间距[J/OL].西南交通大学学报:1-6[2021-10-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210401.0956.004.html.
HAN Zhi,WANG Jingjing,GUAN Yuyan, Lighting Spacing in Curved Tunnel Using LED Lights[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University:1-6[2021-10-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20210401.0956.004.html.
- [7] 傅翼,杨波,陈云庆.公路隧道照明眩光影响仿真与分析[J].现代隧道技术,2014,51(5):150-154.
FU Yi,YANG Bo,CHEN Yunqing.Simulation and Analysis of the Glare Effects of Highway Tunnel Lighting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014,51(5):150-154.
- [8] 张理智.隧道高压钠灯与LED灯照明节能分析、比选[J].隧道建设,2012,32(增2):18-23.
ZHANG Lizhi. Analysis on and Comparison and Contrast between High-pressure Sodium Lamps and LED Lights [J].Tunnel Construction, 2012,32(S2):18-23.
- [9] 季佳俊,王晓雯,陈建忠.公路隧道照明灯具配光的实验对比[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(6):1314-1317.
JI Jiajun,WANG Xiaowen,CHEN Jianzhong. Comparative Experiment Analysis for Light Distribution of Highway Tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2011,30(6):1314-1317.
- [10] 刘强,王希良.混合灯具组合的隧道中间段照明改善方法研究[J].公路,2019,64(12):308-312.
LIU Qiang, WANG Xiliang. Study on Lighting Improvement Method of Middle Section of Tunnel with Mixed Lighting Combination [J]. Highway,2019,64(12):308-312.
- [11] LIU Y Y, LI P, LIN L Y, et al. The Impact of LED Spectrum and Correlated Color Temperature on Driving[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021:103867.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局.照明测量方法:GB/T 5700—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China.Measurement Methods for Lighting: GB/T 5700—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [13] 中华人民共和国交通部.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.
Ministry of Communications of the People's Republic of China.Guidelines for Design of Lighting of Highway Tunnels:JTG/T D70 /2—01—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

Study on Dynamic Lighting Effect of Vehicle Lights in Road Tunnels

DAI Kailai^{1,2} WANG Feng^{1,2} ZHU Lei^{1,2} ZENG Yanhua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Vehicle lighting test was carried out and three-dimensional simulation was used to study and analyze the lighting effect in the tunnel under the three different conditions of vehicle lights, tunnel luminaries, as well as the combination of vehicle lights and luminaries. The results show that the luminance decreases significantly in the distance from vehicle lights, the longitudinal effective illumination range of vehicle lights is 20 m and the transverse effective illumination range is 3.75 m. When the vehicle is located in the right lane, the maximum luminance at centerline of right lane under luminaries used in this paper is $1.6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, while the maximum luminance under vehicle lights is $5.6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. The luminance at centerline of right lane under the combined effect of vehicle lights and luminaries reaches to the maximum value of $7.1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. The maximum luminance at centerline of right lane under the combined effect of vehicle lights and luminaries increase by more than 300% compared to luminaries lighting, and 27% compared to vehicle lighting.

Keywords: Tunnel lighting; Lighting test; Vehicle lights; Dynamic lighting