

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.018

隧道照明光源光色对驾驶员视觉功效的影响

邓 敏, 代言明

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430000)

摘 要:目前,各国以及 CIE 的隧道照明设计规范和标准在隧道照明研究中都只考虑隧道路面的亮度或者照度水平,对于色温、显色性和光谱分布等因素对视觉效果的影响考虑不足,导致对隧道照明质量的评价不够科学。笔者从隧道照明光源光色对于驾驶员视觉功效的影响出发,选择两个隧道进行了小目标识别现场实验和不同色温反应时间测试实验,分析了驾驶员视觉功效受隧道照明光源的显色性和色温的影响情况。结果表明:隧道照明光源显色指数越高,驾驶员的视觉功效越好;对于光谱能量分布相似的光源,背景亮度相同时,含有短波成分多的光源照明效果更好,驾驶员的视觉功效也更好。

关键词:隧道照明;光源色温;显色指数;驾驶员;视觉功效

中图分类号:J914

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)02-140-06

The effect of tunnel light source and tunnel light color to drivers' visual performance

DENG Min, DAI Yanming

(CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd. Wuhan 430000, P.R.China)

Abstract: Brightness and illuminance level are the only factors to be considered in the present tunnel lighting specifications and standards of CIE and countries all over the world, but color temperature, color rendering index and light spectrum distribution can also influence visual effect. We selected two tunnels to carry out a small target identification experiment and a color temperature reaction time test, and then analyzed the effect of tunnel lighting CRI (color rendering index) and CT (color temperature) on the driver's visual performance. The outcome shows that the bigger the CRI, the better the driver's visual performance is. For light sources with the similar spectral energy distribution, when the background brightness is the same, the more short waves in the light sources, the better the visual performance is.

Keywords: tunnel lighting; light sources color temperature; color rendering index; driver; visual performance

收稿日期:2015-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278507);广东省交通运输厅科技项目(科技-2012-04-11)。

Supported by National Science Foundation of China (51278507); Science and Technology Projects of Transportation of Guangdong Communications Department(2012-04-11).

作者简介:邓敏(1981-),男,工程师,主要从事交通安全与节能减排研究,(E-mail)deng_min2008@126.com。

光源的光色包含显色性和色温。视觉功效是人借助视觉器官完成一定视觉作业的能力,通常用完成作业的速度和精度来评定视觉功效,除了人的因素外,还与照明密切相关,在一定范围内,随着照明的改善,视觉功效会有显著的提高。

目前,欧盟^[1]以及 CIE^[2-3]的隧道照明设计规范和标准都只考虑隧道路面的亮度或者照度水平,对于色温、显色性和光谱分布等因素对视觉效果的影响考虑不足,导致对隧道照明质量的评价不够科学,造成交通安全和能源浪费的问题。随着仪器设备功能的改进和研究方法的发展,越来越多的研究者开始关注光源光色对驾驶员视觉功效的影响^[4]。刘英婴等^[5]通过反应时间和瞳孔实验,将不同色温的多种光源引入到隧道照明各段并对之进行了相应的研究,得出了光源色温与反应时间和人眼瞳孔大小的变化关系,找到适合隧道过渡段照明的光源。张青文等^[6]采用视觉功效法,利用“反应时间测量系统”,测取了人眼在不同色温 LED 光源下的视觉功效,获得了适用于道路照明的 LED 光源色温值并且应用于实践。陈仲林等^[7]基于司辰视觉理论和中间视觉理论,研究了高压钠灯和金属卤化物灯在不同亮度条件下的发光效率,进行了反应时间实验,得出了金卤灯的司辰视觉在道路照明下发光效率高于高压钠灯的结论,该研究方法值得隧道照明借鉴。洪伟鹏等^[8]在明视觉和中间视觉条件下,选取了 5 个背景亮度对 10 名视觉正常的测试者进行了反应时间测试试验,研究了高压钠灯、金属卤化物灯、紧凑型荧光灯和 LED 4 种光源的光效。利用反应时间的试验结果,确定了不同光源在隧道照明环境中的适宜性和节能性。崔璐璐等^[9]研究了隧道照明光源的光色与小目标可见度之间的关系,提出了小目标显色性的视觉实验方法,为研究隧道照明的小目标可见度打开了新思路。Barbur 等^[10]提出了明视觉、暗视觉和中间视觉在视觉功效中的变化理论,该理论为隧道照明的研究提供了研究方法和一定的理论基础。Miomir Kostic 等^[11]利用中间视觉理论,对照了在隧道中应用 HPS 光源和 MH 光源的不同情况,指出虽然 HPS 的显色更高,颜色的表现也更好,但是 MH 光源更加实用和节能,应当提倡在隧道照明中使用。

笔者通过实验研究隧道照明光源的光色对驾驶员视觉功效的影响,以得到显色性和视觉功效的关系以及光源色温、观察目标颜色与视觉功效的关系。

1 显色指数对驾驶员视觉功效的影响

1.1 显色指数对驾驶员视觉的影响实验

通过现场试验研究隧道照明光源显色指数对驾驶员视觉功效的影响。选择 2 座隧道进行小目标识别实验,2 座隧道分别标为 1 号隧道和 2 号隧道,其中 1 号隧道所用光源为高压钠灯(HPS)、2 号隧道安装了 HPS 和 LED 两种光源,实验过程中根据需要开启其中一种光源。2 座隧道照明光源的基本参数见表 1。

表 1 实验隧道照明的基本参数

Table 1 Light parameters of experimental tunnels

| 隧道编号 | 光源 | 一般显色指数 R_a | 路面亮度/($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|------|-----|--------------|--|
| 1 | HPS | 23 | 3.2 |
| 2 | LED | 80 | 1.93 |
| 2 | HPS | 60 | 5.39 |

实验选用 3 种中性色(白色、灰色、黑色)和 4 种彩色(红色、黄色、蓝色和绿色)的立方体(尺寸为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)作为识别目标,将识别目标放置于隧道内的道路上,让 10 名测试者分别从距离识别目标 40、50、60、80、110 m 的观察点识别目标,并回答以下问题:1)是否存在目标物;2)如果存在目标物,目标物是什么颜色。图 1 为实验布置示意图。

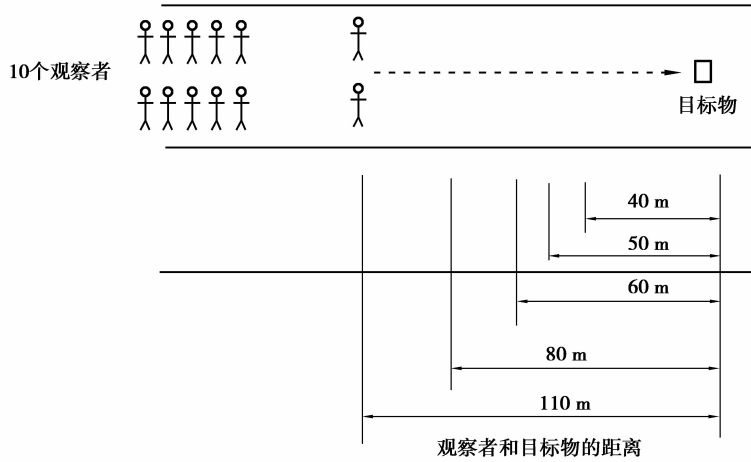


图 1 实验布置示意图

Fig.1 Sketch of experiment

1.2 显色指数对驾驶员视觉功效影响的实验结果分析

实验结果表明,在观察距离为 110 m 的观察点,1 号隧道内小目标(在此指对目标物的识别)的正确识别率为 69%,2 号隧道用 LED 照明时的正确识别率为 86%,2 号隧道用 HPS 照明时的正确识别率为 77%;在观察距离为 80 m 的观察点,1 号隧道内小目标的正确识别率为 77%,2 号隧道用 LED 照明时正确识别率为 90%,2 号隧道用 HPS 照明时为 80%。实验结果见图 2。

由图 1 可以看出,在其他条件相同的情况下,隧道照明光源的显色指数越高,越有利于驾驶员对障碍物的识别,有利于行车安全和照明节能。但目前尚没有有关对小目标的正确识别率相同时不同显色指数的光源需提供照度之间关系的研究成果。隧道照明设计应对光源显色性提出要求,可以参考《工业企业照明设计标准》(GB 50034—1992)的相关规定执行。按照该标准第 6.2.3 条的规定,对颜色识别有要求的工作场所,当使用照度在 500 lx 及以下,采用光源的显色指数较低时,宜提高其照度标准值,其提高值为其照度标准值乘以表 2 中相对照度系数值。

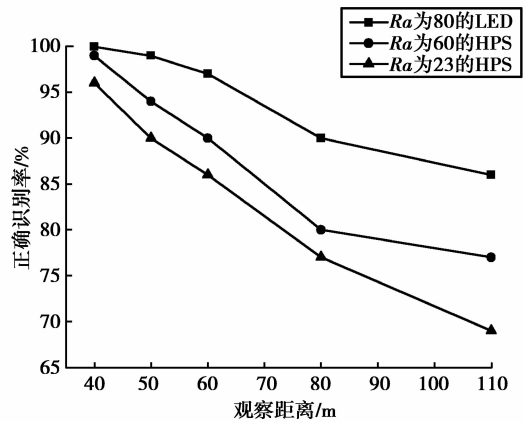


图 2 色温反应时间测量装置

Fig.2 Reaction time system

表 2 相对照度系数值

Table 2 Relative coefficients of illuminance

| 一般显色指数 R_a | 照度 E/lx | |
|--------------------|-----------------------|-----------|
| | $300 \leq E \leq 500$ | $E < 300$ |
| $80 > R_a \geq 60$ | 1.20 | 1.25 |
| $60 > R_a \geq 40$ | 1.30 | 1.40 |

2 色温对驾驶员视觉功效的影响

2.1 隧道照明光源色温对驾驶员视觉影响实验

为了研究驾驶员的视觉功效受隧道照明光源色温影响的情况,在实验室采用“隧道照明反应时间测量装置”模拟隧道照明的状况,测试模拟驾驶员在不同色温光源提供的各背景亮度水平下的反应时间。“隧道照

明反应时间测量装置”由观测箱、光学系统、灯箱、电子计时仪 4 个部分组成。实验装置如图 3 所示。

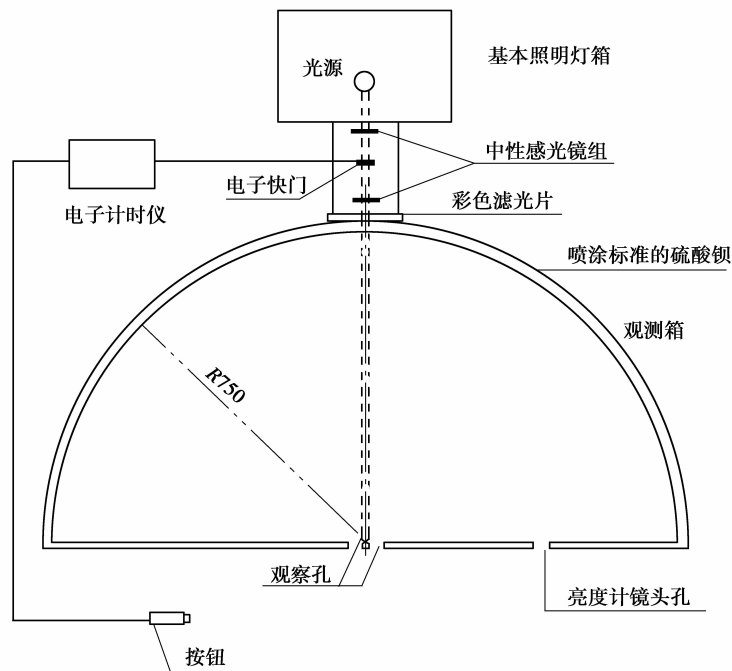


图 3 不同光源下小目标的正确识别率

Fig.3 Recognition rate of small target with different light sources

为了研究光源色温对视觉的影响,选择色温为 2 700 K 和 6 400 K 的两种紧凑型荧光灯进行反应时间对比实验。实验中分别采用两种荧光灯提供 1.0~4.0 cd/m² 的背景亮度,用随机出现的光斑模拟可能在隧道内出现的障碍物,光斑直径为 26 mm,相对受测者的眼睛为 2°视场左右,视标亮度可以根据需要调节,以与背景形成不同的亮度对比,通过加滤光片的方法改变光斑的颜色,使其颜色分别为红、黄、蓝、绿。测试者在特定的视觉条件下,对视标的出现作出最快的反应,并通过按钮由电子计时仪记录其反应时间。

2.2 色温对驾驶员视觉功效影响的实验结果分析

在两种光源提供的不同背景亮度下,测试者对不同颜色光斑的反应时间平均值见图 4。由图 4 可以看出,在隧道照明条件下,当紧凑型荧光灯的色温为 6 400 K 时,测试者的反应时间相对较短;当紧凑型荧光灯的色温为 2 700 K 时,测试者的反应时间相对较长。

当目标光斑颜色不同时,测试者的反应时间与背景亮度之间的关系总体来看基本相似,测试者的反应时间都是随着背景亮度的增大而变短,且背景亮度相同时,测试者都是在高色温的紧凑型荧光灯下的反应时间比在低色温的紧凑型荧光灯下的反应时间短,见图 5。但对于红、黄、蓝、绿 4 种不同颜色的目标光斑而言,当背景亮度相同时,测试者在 2 种色温光源下的反应时间之差有明显差别。由图 5 可以看出,对于蓝色目标光斑,当背景亮度相同时,测试者在色温为 6 400 K 的紧凑型荧光灯下的反应时间与色温为 2 700 K 的紧凑型荧光灯下的反应时间之差较大,而对于黄色和绿色的目标光斑,该反应时间之差较小。这说明,对于实际的彩色隧道照明应用,如果以反应时间作为评价指标,高色温的紧凑型荧光灯比低色温的紧凑型荧光灯照明效果好。如果再考虑道路上可能出现的障碍物的颜色,当障碍物的颜色富含可见光中的短波成份时,高色温照明光源的照明效果优势更加明显。

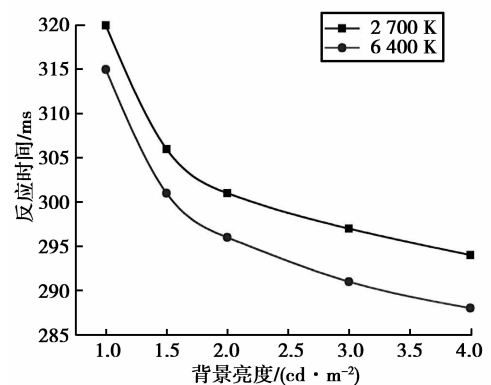


图 4 对光斑的反应时间平均值与背景亮度的关系

Fig.4 Relationship between the average reaction time and background luminance

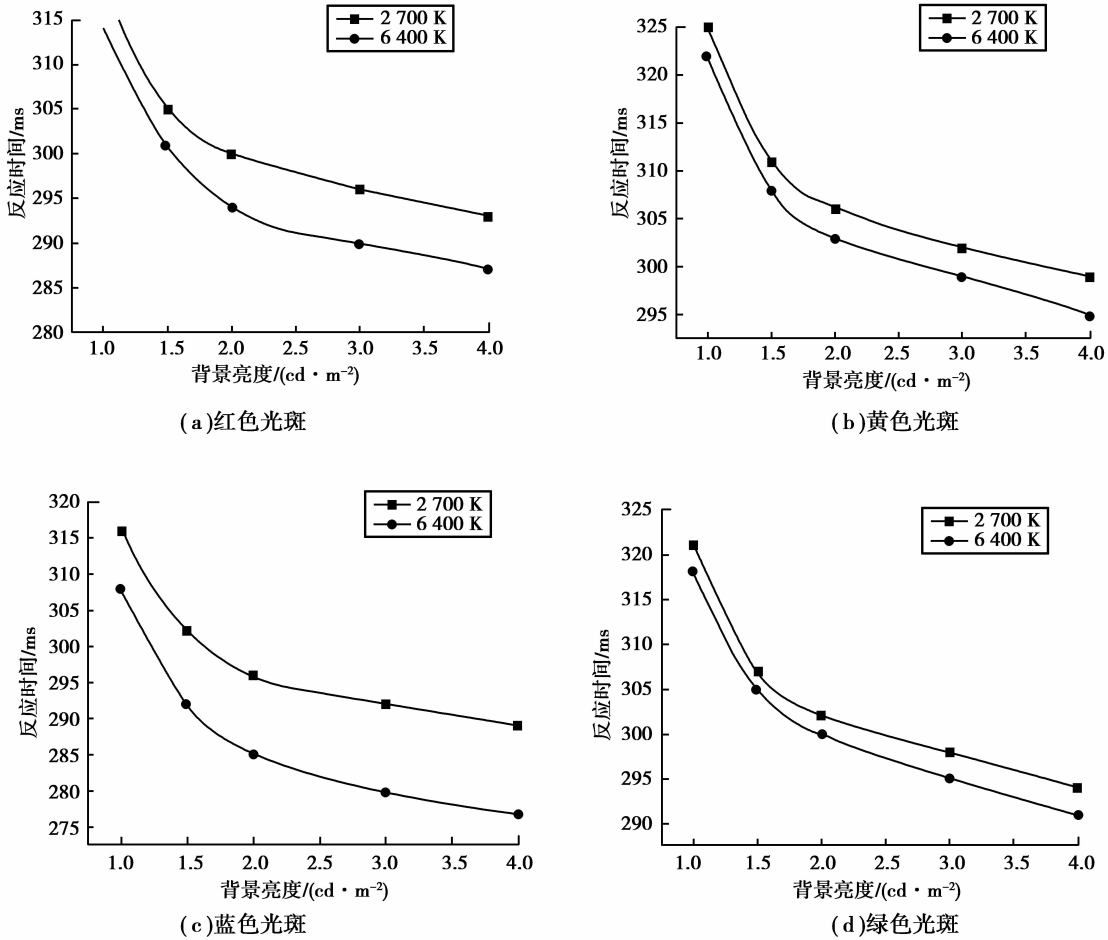


图 5 测试者对不同颜色目标光斑的反应时间与背景亮度的关系

Fig.5 Relationship between the reaction time and background luminance of different color target

反应时间实验结果表明,在不同的照明环境实验条件(背景亮度、视标偏心角、视标对比度)下,驾驶员在色温 6 400 K 的紧凑型荧光灯下对红、黄、蓝、绿 4 种颜色目标光斑的反应时间都比在色温为 2 700 K 的紧凑型荧光灯下短。分析这 2 种不同色温紧凑型荧光灯的光谱组成可以发现,这 2 种紧凑型荧光灯的光谱能量分布曲线形状基本相似,只是色温为 6 400 K 的紧凑型荧光灯比色温为 2 700 K 的紧凑型荧光灯光谱中的短波成分多些。测试者在两种色温紧凑型荧光灯下对各种颜色目标光斑的反应时间之差的差别明显,驾驶员在高色温照明环境中更容易发现富含短波成份的障碍物,而对于黄色、绿色障碍物而言,驾驶员在不同色温照明环境中的反应时间差别不如对蓝色障碍物明显。

虽然实验结果表明高色温光源对于隧道照明效果更好,但隧道照明不能仅仅考虑驾驶员的反应时间,还应考虑隧道空气状况等对照明效果的影响。实验室获得的驾驶员在不同光环境中的反应时间只能作为隧道照明光源选择的因素之一,隧道照明光源的选择还要综合考虑隧道照明环境的各种影响因素。

3 结 论

1) 在其他条件相同的情况下,隧道照明光源的显色指数越高,越有利于驾驶员对障碍物的识别,二者之间存在着正相关的关系,有利于行车安全和照明节能。在隧道照明设计中,以满足照明的安全和舒适为主,兼顾节能,应尽可能选择高显色指数的光源。

2) 在真实考虑色彩的隧道照明环境中,背景亮度越大,驾驶员的反应时间越短,相应的视觉功效更好。背景亮度固定时,对于光谱能量分布曲线相似的隧道照明光源,驾驶员在富含短波段成分的照明环境中的视觉功效更好,照明效果更好。目标物颜色富含短波成份时,在高色温照明环境下更容易被发现。

参考文献:

- [1] CEN. CR 14380—2003 Lighting Applications—Tunnel Lighting[R]. European Committee for Standardization, 2003.
- [2] CIE. CIE 88—2004 Guide for the lighting of road tunnels and underpasses[R]. CIE Central Bureau CIE Central Bureau, 2004.
- [3] CIE. CIE 61—1984 Tunnel Entrance Lighting; A Survey of Fundamentals for Determining the Luminance in the Threshold Zone[R]. CIE Central Bureau, 1984.
- [4] 刘英婴,翁季,张青文,等.LED光源色温对隧道照明过渡段的影响[J].灯与照明,2013,37(2):34-37.
LIU Yingying, WENG Ji, ZHANG Qingwen, et al. Effects of LED Light Source Color Temperature on Tunnel Lighting in the Transition Zone[J]. Light and lighting, 2013, 37(2): 34-37.(in Chinese)
- [5] 刘英婴,翁季,陈建忠,等.光源光色对隧道照明效果的影响[J].土木建筑与环境工程,2013,35(3):162-166.
LIU Yingying, WENG Ji, CHEN Jianzhong, et al. Influence of Light Sources Color on Tunnel Lighting[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2013, 35(3): 162-166.(in Chinese)
- [6] 张青文,李毅,翁季,等.不同色温LED光源在道路照明中的适用性研究[J].照明工程学报,2013,24(5):70-77.
ZHANG Qingwen, LI Yi, WENG Ji, et al. The Applicability of Different Color Temperature LED Light Sources in Road Lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(5): 70-77.(in Chinese)
- [7] 陈仲林,李毅,胡英奎.视觉功效法及其在道路照明安全研究中的应用[J].重庆大学学报,2008,31(3):332-335.
CHEN Zhonglin, LI Yi, HU Kuiying. Visual function method and its application in road lighting safety research[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(3): 332-335.(in Chinese)
- [8] 洪伟鹏,易富君.公路隧道照明采用不同光色光源的光效研究[J].公路交通技术,2012(5):112-118.
HONG Weipeng, YI Fujun. Research on lighting effect of light sources with different colors for lighting of highway tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2012(5): 112-118.(in Chinese)
- [9] 崔璐璐,陈仲林,殷颖.隧道照明光源的光色及可见度研究[J].灯与照明,2008,32(2):8-12.
CUI Lulu, CHEN Zhonglin, YIN Ying. Study on the Colour and visibility of Tunnel Light Source[J]. Light and lighting, 2008, 32(2): 8-12.(in Chinese)
- [10] Barbur J L, Stockman A. Photopic, mesopic and scotopic vision and changes in visual performance[J]. Encyclopedia of the Eye, 2010: 323-331.
- [11] Kostic M, Djokic L, Pojatar D, et al. Technical and economic analysis of road lighting solutions based on mesopic vision[J]. Building and Environment, 2009, 44(1): 66-75.

(编辑 王维朗)