

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.026

光源光色对隧道照明效果的影响

刘英婴¹, 翁季¹, 陈建忠², 陈仲林¹

(1. 重庆大学建筑城规学院; 教育部山地城镇建设与新技术重点实验室, 重庆 400045;

2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:为了研究隧道照明中光源的光色,在 3 种照明水平和负对比条件下,比较了 5 种色温的 LED 光源与传统照明光源高压钠灯(HPS)、金卤灯(MH)对隧道照明效果的影响。通过反应时间实验方法,分析了光源光色分别与反应时间和人眼瞳孔大小之间的变化关系。实验结果显示,在高照明水平下,高色温 LED 光源的视觉功效最高,光生物效应最显著;而在中间视觉照明水平下,中间色温的 LED 光源的视觉功效和光生物效应最显著。合理选择适用隧道照明各区段的光源应考虑光源光色对视觉功效和光生物效应的综合影响,并值得进一步研究。

关键词:光源;隧道照明;反应时间;瞳孔大小

中图分类号:TU113.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0162-04

Influence of Light Sources Color on Tunnel Lighting

Liu Yingying¹, Weng Ji¹, Chen Jianzhong², Chen Zhonglin¹

(1. College of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract: Five color temperature LEDs were compared to traditional light sources (HPS and MH) under three lighting levels and negative contrasts to study the effect of light sources color on tunnel lighting. Through the experiment of reaction times, the relation between light sources color and reaction times, and the relation between light sources color and pupil size were studied, respectively. The experiment result shows that visual performance and circadian rhythm with high color temperature LED are the most significant under high lighting level. The visual performance and circadian rhythm with middle color temperature LED are the most significant under mesopic lighting level. It is shown that comprehensive influence of light sources color on visual performance and circadian rhythm must be considered for choosing appropriate light sources in different sections of tunnel lighting.

Key words: light source; tunnel lighting; reaction times; pupil size

在照明对视觉功效影响的研究中,20 世纪几乎都集中在照明的数量,也就是照度(亮度)水平对于视觉敏锐度或对比敏感度的影响,而研究光源的光谱(光色)对于视觉功效的影响者却是凤毛麟角^[1]。较早涉及这个问题的 Smith 等^[2]系统地研究了照明水平和光谱这两者的作用,使用了冷白色荧光灯,金卤灯和高压钠灯 3 种光源进行比较,实验结果表明,

光源光谱对于作业效能或难度的评价并无统计上显著的影响。Berman^[3]发现视网膜上的杆体细胞对于瞳孔大小以及在一般室内照明条件下感知的亮度,具有显著的影响,并且也是感知白色光的视亮度的主要决定因素。他们为此进行了一系列研究以证实光的光谱对于非彩色的视觉效能具有显著的作用。上世纪末,迪伦·姜^[4]总结了各国独立进行的

收稿日期:2012-10-15

基金项目:国家自然科学基金(51278507,50908240);重庆市江北区科技计划项目(20100305)

作者简介:刘英婴(1974-),女,博士生,主要从事建筑光学与技术研究,(E-mail)cq66769970@126.com。

研究实验证实了光色极大地影响着人类视觉的适应能力。研究表明在低照明水平下蓝/绿色光源的有效光输出会增加,而与此对应的黄色光源的有效光输出会下降。2002年,美国布朗(Brown)大学的学者 David Berson 在人眼视网膜上发现了第3种感光细胞——神经结细胞,确认了人眼的非视觉效应,并称为 Cirtopic^[5-6]。Cirtopic 具有与明视觉、中间视觉和暗视觉不同的光谱响应特性,其中瞳孔大小随光照变化是一种重要的光生物效应,而瞳孔大小变化与视觉功效密切相关^[7-8]。此后,张青文等^[9]进行了光源色温对隧道及道路照明视觉功效影响的研究,研究成果表明用高色温的紧凑型荧光灯照明能缩短反应时间,而低色温的紧凑型荧光灯则会延长反应时间。进入21世纪以来,LED光源及其光色研究已逐渐成为照明研究的新“热点”^[10],新型光源在隧道照明中的应用也成为照明研究的发展方向。但是,目前现行有关的公路隧道照明设计规范和标准^[11-12]均是参照国际照明委员会(CIE)上个世纪明视觉光度学和色度学系统制订的,只考虑了隧道照明的亮度水平,没有考虑光源的光色对照明水平的影响,更没有考虑光生物效应对实际视觉效果的影响,特别是对于新型光源LED的光色研究还很不深入。本文正是针对以上问题,采用视觉功效的实验方法,将不同色温的LED光源与传统隧道照明光源高压钠灯、金卤灯相比较,结合光生物效应的研究成果,深入探讨光源光色对隧道照明的影响。通过研究以提出适用于隧道照明特点的光源,进而为制定更加科学合理的隧道照明设计规范标准提供理论依据,最终利于实现隧道照明的安全与节能。

1 光源光色与反应时间实验

反应时间是衡量驾驶员视觉功效的一个重要指标。反应时间实验旨在模拟隧道照明的驾驶环境,测量人眼在隧道照明条件下观测视标的反应时间以及瞳孔的大小,来获得光源色温与反应时间和瞳孔大小之间的变化关系。

1.1 实验方案及步骤

实验中用随机出现的圆斑作为目标,以模拟隧道照明中可能出现的障碍物。圆斑直径为26 mm,相对受测者的眼睛为2°视场左右。实验采用7种光源:150 W 高压钠灯(HPS)、150 W 金卤灯(MH)、5种色温的LED灯提供背景亮度和目标亮度。因为由同一种光源提供光亮度,所以目标亮度和背景亮度具有相同的光谱分布,不存在颜色对比。为了与实际的隧道照明视看环境相符,实验通过调整目标的不同灰度(反射比),来达到不同的负对比值。为

了保证既有中央视觉又有周边视觉,目标可以在轴线或非轴线上出现。实验时受测者一旦发现目标,立即以最快的反应按下按钮,由电子计时仪记录其反应时间。与此同时,受测者戴上 iView X 眼动仪,记录下每次反应时间段对应的瞳孔变化值。

参与实验的一共有5名受测者(年龄20~24岁,3男2女),所有的受测者都拥有正常的色觉和矫正视力。在开始每组实验前,受测者首先戴上 iView X 眼动仪进行瞳孔校正。因为人眼对亮适应的时间要短一些,所以实验时背景亮度是从暗到亮进行的。受测者用30 min来适应较暗的实验环境。实验中出现3种不同的视标对比度,每一种对比度下测试3个背景亮度的反应时间。每一种背景亮度下测试15次反应时间,即在3个视标偏心角0°(轴线)、10°(从0°水平顺时针旋转)、-10°(从0°水平逆时针旋转)位置上随机各测试5次。在每一次实验中,目标物出现后如果受测者无反应,目标物在持续出现2 s后消失。在每种亮度条件开始前受测者有1 min的适应时间。

1.2 实验参数确定

实验中提出了在隧道照明条件下4个影响视觉功效的变量(L_b 、 C 、 θ 、 T_{CP})作为实验参数,见表1。

表1 实验参数的设置

背景亮度 L_b / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	视标对比度 C	视标偏心角 $\theta/(\text{°})$	光源色温 T_{CP}	
85	-0.5	0	HPS	1 919 K
45	-0.4	10	MH	2 789 K
4.5	-0.3	-10	LED1	4 446 K
			LED2	2 432 K
			LED3	3 686 K
			LED4	5 128 K
			LED5	4 806 K

背景亮度 L_b : 依据隧道照明的特点,不同照明区段的最低亮度值不同,确定了3个背景亮度值,分别代表是:入口段 $80 \text{ cd}/\text{m}^2$, 过渡段 $45 \text{ cd}/\text{m}^2$, 中间段 $4.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。

视标对比度 C : 由于在隧道照明中最常出现亮背景下观察暗目标,因此亮度对比值应采取负数,即目标亮度小于背景亮度。而目前的隧道照明研究均采用的是正对比,所以需要对其进行修正。根据一般隧道照明标准的亮度对比设置3种对比度,其对应的目标亮度见表2示。

目标随机出现的位置造成不同的视标偏心角,分为视轴和非视轴2种,对应于中央视觉和周边视觉。

表 2 不同对比度对应的目标亮度 L_t cd/m^2

C	$L_b / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$		
	80	45	4.5
-0.5	40	22.5	2.25
-0.4	48	27	2.7
-0.3	56	31.5	3.15

2 实验结果与分析

2.1 光源光色与反应时间关系

反应时间是指对于每种测试条件下,从视标出现(电子快门打开)到受测者按下按钮的时间之差。对所有受测者在不同照明条件下的反应时间取平均值,计算结果见表 3。

表 3 7 种光源色温条件下的反应时间

背景亮度 $L_b / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	MH	HPS	LED1	LED2	LED3	LED4	LED5
	2 739 K	1 919 K	4 446 K	2 432 K	3 686 K	5 128 K	4 906 K
80	210.112 9	165.949 8	159.949 6	168.585 1	169.037 4	150.943 6	160.968 9
45	205.341 8	163.808 0	161.596 9	165.216 8	169.297 1	146.023 6	164.012 9
4.5	178.029 0	204.304 7	170.875 4	177.765 0	158.662 8	160.289 3	164.892 6

7 种光源对于 3 种对比度,在背景亮度为 $L_b = 80, 45, 4.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 的反应时间如图 1、图 2、图 3 所示。

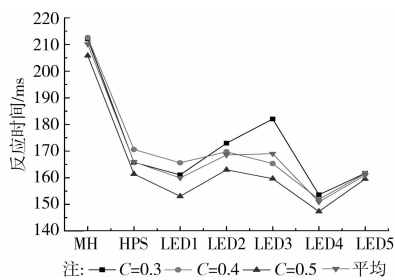


图 1 $L_b = 80 \text{ cd}/\text{m}^2$ 反应时间

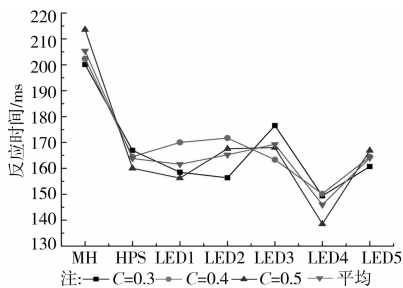


图 2 $L_b = 45 \text{ cd}/\text{m}^2$ 反应时间

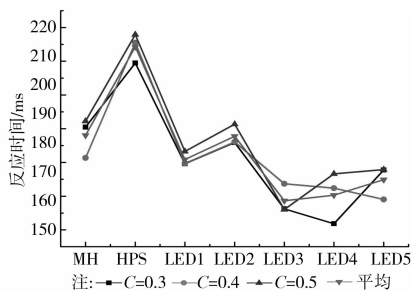


图 3 $L_b = 4.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 反应时间

分析上述 3 图可以看出,在较高的背景亮度 $L_b = 80, 45 \text{ cd}/\text{m}^2$ 时,反应时间最短的是 LED4。LED4 的色温为 5 128 K,是 7 种光源中色温最高的。其对应的反应时间比最长的金卤灯缩短了

28% 以上,说明高色温的 LED 光源在较高的照明水平条件下视觉功效最高。金卤灯的色温为 2 739 K,在 7 种光源中色温并不是最低的。色温为 2 432 K 的 LED2,虽然色温值与金卤灯相近,但是在较高照明水平下的反应时间却比金卤灯平均缩短了 18%,而在中间视觉照明水平时两者却很接近。这说明视觉功效不仅与光源的色温和照明水平有关,而且与光源的光谱能量分布 SPD 密切相关,见图 4 所示。比较图 4(a)、(b),可以看出 LED2 的相对光谱能量分布 SPD 的连续性明显要好于金卤灯,而且在短波 450 nm 左右有一个明显的突起。这个比较说明了即使色温接近的光源由于光谱分布不同,对于人眼视觉功效的影响也显著不同。选择 SPD 连续性较好且富含短波较多的光源,在较高的照明水平下可以提高视觉功效。在背景亮度 $L_b = 4.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 时,反应时间最短的是 LED3。LED3 色温为 3 683 K,属于中间色温,其对应的反应时间比最长的高压钠

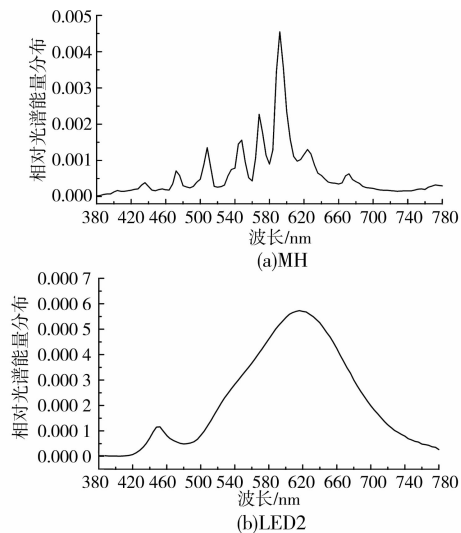


图 4 MH 与 LED2 相对光谱能量分布比较

灯缩短了 20% 以上,说明中间色温的 LED 光源在中间视觉的照明水平下视觉功效最高。

2.2 光源光色与瞳孔变化关系

瞳孔变化值是每次反应时间段相对应的。iView X 眼动仪会自动记录下受测者在每种测试条

件下每隔 20 ms 的瞳孔面积。将受测者按下按钮时的瞳孔面积 A_2 减去视标出现(电子快门打开)时的瞳孔面积 A_1 的差值,即为瞳孔变化值。

对所有受测者在不同照明条件下的瞳孔变化值取平均值,计算结果见表 4。

表 4 7 种光源色温条件下的瞳孔变化值

背景亮度 L_b / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	光源色温 / K							mm ²
	MH 2 739 K	HPS 1 919 K	LED1 4 446 K	LED2 2 432 K	LED3 3 686 K	LED4 5 128 K	LED5 4 906 K	
80	0.313 210	0.174 372	0.213 350	0.183 039	0.183 039	-0.145 940	0.177 275	
45	0.301 541	0.148 527	0.155 515	0.092 380	0.167 953	-0.030 930	0.142 530	
4.5	0.090 577	0.101 975	-0.010 420	-0.003 130	-0.172 610	-0.016 690	-0.105 010	

从表 4 可以看出,除了 LED4,其它光源的瞳孔变化值随着背景亮度的减小而减小,说明瞳孔在视看目标时随着背景亮度的减小收缩得越明显。但是 LED4 却相反,在背景亮度最大时瞳孔变化值最小(负值),即在高亮度水平下瞳孔收缩得越突出。前面提到瞳孔大小随光照变化是一种重要的光生物效应,这个实验结果表明高色温的光源在高亮度水平下光生物效应越明显。

在背景亮度 $L_b=80,45 \text{ cd/m}^2$ 时,除了 LED4 以外,其它光源的瞳孔变化值都为正值。说明在较高的照明水平下,由于入射光很强,为了控制进入视网膜光线的强度,人眼的瞳孔先是收缩的。当视标出现时,人眼为了调节进光量瞳孔会自动放大。但是在 LED4 的照明条件下,瞳孔变化值却为负值,说明 LED4 在较高的照明条件下仍会使人眼的瞳孔收缩,这充分说明高色温的光源在较高的照明水平下具有更明显的光生物效应。前面提到瞳孔收缩有利于提高视觉功效,这与图 1、图 2 中对应的 LED4 反应时间最短是相吻合的。而金卤灯在较高照明水平下对应的瞳孔变化值都是最大(正值),说明金卤灯使人眼的瞳孔在较高照明水平下放大得最大,这样不利于提高视觉功效,这与图 1、图 2 中对应的 MH 反应时间最长也相吻合。

在背景亮度 $L_b=4.5 \text{ cd/m}^2$ 时,除了 MH 和 HPS 对应的瞳孔变化值为正值,所有的 LED 灯对应的瞳孔变化值都为负值。说明在中间视觉的照明水平下,LED 灯会使人眼瞳孔收缩,而金卤灯和高压钠灯却会使瞳孔放大,其光生物效应明显比 LED 灯弱,对应的反应时间也比 LED 灯长,如图 3 所示。在所有 LED 灯中,色温为 3 686 K 的 LED3 的瞳孔变化值最小(负值),表明在中间视觉的照明水平下,LED3 使人眼的瞳孔收缩得最显著,光生物效应最强,这与图 3 中显示的 LED3 的反应时间最短相吻合。

3 光源光色对隧道照明效果的影响

通过实验结果分析,光源的色温和光谱分布与

反应时间和瞳孔大小是密切相关的,并且与照明水平也是有关系的。3 种照明水平由高到低分别对应的是隧道照明的入口段、过渡段、中间段。在入口段和过渡段照明水平较高时,高色温 5 128 K 的 LED4 的反应时间最短,表明视觉功效最高;与此对应的瞳孔变化值也最小(负值),说明瞳孔收缩有利于提高视觉功效,光生物效应最显著。而中间段属于中间视觉水平,中间色温 3 686 K 的 LED3 的反应时间最短,视觉功效最高;与此对应的瞳孔变化值也最小(负值),说明中间色温在中间段的光生物效应最显著。

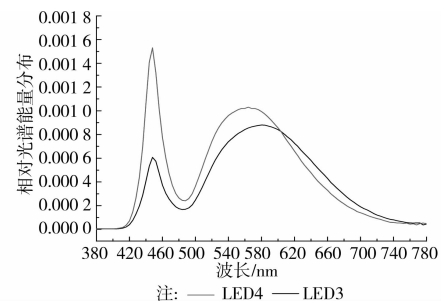


图 5 LED4 与 LED3 光谱能量分布比较

分析比较 LED4 和 LED3 的光谱能量分布图可以发现,如图 5 所示,LED4 和 LED3 的光谱分布宽度及连续性都较好,明显优于金卤灯(见图 4)。LED4 的最高峰值在 460 nm 附近,正好处于光生物效应 Cirtopic 的峰值敏感度区域^[7],且辐射量数值达到 1.5×10^{-3} ,明显偏向短波方向。另一个突起位于 560 nm 附近,但是辐射量数值只有 1×10^{-3} 。LED4 的光谱分布明显向蓝绿光方向积聚,这充分证实了 Berman 关于 Cirtopic 的最大光谱灵敏度处于蓝色光区域内,并且在高照明水平时很活跃^[8],即光源中蓝绿光成份含量越多高照明水平时光生物效应越显著。而 LED3 的最高峰值在 580 nm 附近,向长波方向偏移,虽然在 460 nm 附近也有一个突起,但辐射量数值只达到了 6×10^{-4} ,不到 LED4 的一半。LED3 的光谱分布明显向黄绿光方向积聚,在中间视觉的照明水平时具有较明显的光生物效应。

LED4 和 LED3 的光谱能量分布的不同不仅决定了两者色温的不同,而且对不同照明水平时的反应时间与瞳孔大小的影响也显著不同。反应时间是视觉功效的重要指标,而瞳孔大小是光生物效应的本质表现。研究光源光色对隧道照明的影响正是基于光源的色温和光谱分布对视觉功效和光生物效应的综合影响。

4 结 语

综合以上的分析和研究,色温在 5 000 K 左右,光谱分布偏向蓝绿光的 LED4 最适宜隧道照明的入口段和过渡段;而色温在 3 500 K 左右,光谱分布偏向黄绿光的 LED3 最适宜隧道照明的中间段。

在隧道照明研究中,光源的光色是一个不可忽略的重要因素。在隧道照明设计规范和标准的制定中如果只考虑隧道路面的亮度或者照度水平,而不考虑光源的色温和光谱分布对视觉功效和光生物效应的影响,其结果必然是不能科学地评价隧道照明水平和隧道照明光源,造成能源的浪费和交通安全问题。相信随着这方面研究的不断深入,在未来的隧道照明设计和实施中,可以更合理地选择适用隧道照明各区段的光源。在今后制定隧道照明设计规范和标准时能更加科学地确定隧道照明水平,在保证安全的同时促进隧道照明节能,从而解决隧道照明中节能与安全的矛盾。

参考文献:

- [1] 杨公侠. 光谱对视觉效能的影响[C]//照明科技论坛(上海)论文集,2002:128-131.
- [2] Smith S W, Rea M S. Relationship between office task performance and ratings of feelings and task evaluations under different light sources and levels [C]// Proceedings of the CIE, 19th Session, Kyoto, Japan, 1979:207-210.
- [3] Berman S M. Luminance-controlled pupil size affects Landolt C task performance [J]. JIES,1993,22:150-165.
- [4] 迪伦·姜. 光源的光谱对道路照明的影响[J]. 吴锦雷译. 光源与照明,2000(4):29-33.
John D. Light sources spectrum affects on road lighting [J]. Lamps and Lighting,2000(4):29-33.
- [5] Berman S M, Clear O D. Past vision studies can support a novel human photoreceptor [C]//International Lighting Conference "Lighting in the 21 Century" Proceedings, Leon Spain, 2005.
- [6] 章海骢. 照明科学新进展—眼睛的非视觉效应[J]. 照明工程学报,2006,17(3):1-3
Zhang H C. New progress among the lighting science—the non-visual effect of eye [J]. China Illuminating Engineering Journal,2006,17(3):1-3.
- [7] 杨公侠,杨旭东. 人类的第三种光感受器(上)[J]. 光源与照明,2006(2):30-31.
Yang G X, Yang X D. The third photoreceptor in the human eye [J]. Lamps and Lighting,2006(2):30-31.
- [8] 杨公侠,杨旭东. 人类的第三种光感受器(下)[J]. 光源与照明,2006(3):28-30.
Yang G X, Yang X D. The third photoreceptor in the human eye [J]. Lamps and Lighting,2006(3):28-30.
- [9] 张青文,陈仲林,胡英奎,等. 光源色温对隧道及道路照明视觉功效影响的研究[J]. 照明工程学报,2008,19(2):24-29.
Zhang Q W, Chen Z L, Hu Y K, et al. Study on the influence of lighting source color temperature on visual performance in tunnel and road lighting [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008,19(2):24-29.
- [10] van Bommel W. 照明的明天:什么是热点[J]. 徐红妹译. 照明工程学报,2011,22(3):2-3.
van Bommel W. Lighting tomorrow: what is hot [J]. China Illuminating Engineering Journal,2011,22(3):2-3.
- [11] CIE. Guide for the lighting of road tunnels and underpasses [R]. (TC-4.6), draft(2004b)
- [12] JTJ 026.1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [13] 居家奇,陈大华,林燕丹. 照明的非视觉生物效应及其实践意义[J]. 照明工程学报,2009,3(1):25-28.
Ju J Q, Chen D H, Lin Y D. The non-visual biological effect of lighting and its practical meaning [J]. China Illuminating Engineering Journal,2009,3(1):25-28.
- [14] West K E, Jablonski M R, Warfield B, et al. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans [J]. Journal of Applied Physiology,2011,110(3):619-626.
- [15] 张青文,杨春宇,陈仲林,等. 用视觉功效法探究适用于道路照明的新型光源[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(6):781-785.
Zhang Q W, Yang C Y, Chen Z L, et al. A Research of new light source for road lighting based on vision function method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2009,37(6):781-785.
- [16] Onaygil S. Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey [J]. Tunnelling & Underground Space Technology,2003,18(1):85-91.
- [17] Yasukouchi A, Ishibashi K. Non visual effects of the colour temperature of fluorescent lamp on physiological A spectra in humans [J]. Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science, 2005, 24(1):41-43
- [18] 石路. 照明光源色温对人体中枢神经生理功能的影响[J]. 人类功效学,2006,6(2):59-61,71.
Shi L. Influence of colour temperature on physiological function of central nervous system [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2006,6(2):59-61,71.