

文章编号 1004-924X(2012)02-0220-06

中间视觉条件下的道路交通安全照明

赵建东^{1*}, 杨 勇², 李兆轩¹

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 交通运输部 公路科学研究院, 北京 100088)

摘要:研制了反应时间测定仪,用于有效评价中间视觉条件下的道路交通安全照明。通过采集发光二极管(LED)、高压钠灯(HPS)、金卤灯(MH)3种不同光源背景下人眼观测目标的反应时间,研究在中间视觉条件下各种光源的视觉功效。首先,测试了在不同背景亮度、视标对比度、视标偏心角下,人眼在不同光源下辨认视标的反应时间。然后,利用相关系数法对数据进行回归分析,得出反应时间与不同背景亮度、视标对比度和视标偏心角的关系。最后,基于视觉功效法分析研究了3种光源在中间视觉条件下的反应时间趋势和道路交通安全照明光源光效。结果显示,当背景亮度 ≤ 1.5 cd/m²,高压钠灯与金卤灯、LED灯产生相同视觉功效时,高压钠灯所需的背景亮度最大,金卤灯次之,LED灯最小。在中间视觉条件下,LED作道路照明光源的视觉功效优于其他两种光源。

关键词:中间视觉;道路照明;视觉功效;曲线拟合;反应时间测定

中图分类号:TH714;TU113.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0220

Road traffic lighting safety in mesopic vision

ZHAO Jian-dong^{1*}, YANG Yong², LI Zhao-xuan¹

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaojd@bjtu.edu.cn

Abstract: A time tester was developed to evaluate the quality of a traffic safety lighting in mesopic vision conditions. Firstly, test parameters including background brightness, visual target contrast and visual target eccentric angle were set by collecting the reaction time of human eyes to observing objects in three kinds of light sources (Light Emitting Diode/High-pressure Sodium Lamp/Metal Halide Lamp, LED/HPS/MH), and the vision efficiencies of different sources were researched. Then, utilizing the regression analysis of correlation coefficient method, the relationship between reaction time and three test parameters was obtained, respectively. Finally, based on visual performance method, the reaction time tendencies and road traffic lighting performance of the three light sources were analyzed in the mesopic vision. The experimental results show that under the same visual performance conditions, when the background brightness is less than or equal to 1.5 cd/m², the background brightness of HPS is the maximum, MH lamps take the second place and the LEDs are the minimum. The conclusion is that the visual performance of the LEDs is better than those of other two light

收稿日期:2011-08-24;修订日期:2011-10-28.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2011JBM094)

sources in the mesopic vision, therefore they are more suitable for road traffic safety needs.

Key words: mesopic vision; road lighting; visual performance; curve fitting; reaction time measurement

1 引言

随着我国道路建设和交通运输业的迅速发展,交通事故日渐成为生活中的潜在危险。2010年全国共发生道路交通事故238 351起,造成67 759人死亡。分析造成事故的各项原因发现,道路照明质量是引起事故的重要条件^[1];来自国际电工委员会的数据表明,白天道路事故发生率仅为夜间的三分之一^[2]。由此可见,夜间道路照明的质量已成为关系公众生命财产安全的热点问题,而夜间道路照明环境亮度水平一般在 1.5 cd/m^2 ,处于中间视觉范畴。通常认为,照明强度大于 10 cd/m^2 为明视觉范围,小于 0.001 cd/m^2 为暗视觉范围,处在两者之间的状态为中间视觉。现行道路交通照明规定的亮度和照度均是在明视觉条件下确定的,已不能满足实际道路交通安全照明发展的需要^[3-4],但现在还没有正式的中间视觉光谱光视函数推荐值。

国内外很多研究机构已开展了中间视觉的研究工作,主要方法有异色视亮度匹配法、闪烁光度测量法及视觉功效法等。目前,基于反应时间的视觉功效法是研究中间视觉的理想方法^[5]。视觉功效是人借助视觉器官完成给定视觉作业的能力,常用完成的速度和精度来评价;它不仅取决于作业的外形、方位、作业与背景光反射比,还取决于照明亮度、对比度等条件^[6]。研究表明:随着照明改善,视觉功效会有提高;视觉功效与照明间的定量关系可为制定道路交通照明标准提供视觉方面的依据^[1-2]。

国内外基于视觉功效的研究主要包括:在封闭环境内建立中间视觉环境,利用光学原理投出视标作为对观测者的刺激物,并应用电子计时器等电子元件记录反应时间及其所处环境的各项数据^[7-8]。由于各个研究机构的实验设备和条件不同,模拟夜间道路照明环境和采集反应时间数据采用的方法也不相同;同时,不同年龄受试者实验时所得到的反应时间数据也差异颇大。因此,本实验采用较为贴近实际道路照明环境,直接利用

投影与背景光源作为测试环境的光源来模拟道路障碍物(视标)和道路照明光源;通过由按键和光敏传感器所构成的电子计时器对反应时间数据进行采集储存;并且严格挑选年龄和视力较为一致的受试者,以便得到可靠性较高的数据。通过对反应时间数据与背景亮度等的拟合,比较了高压钠灯(High Pressure Sodium, HPS)、金卤灯(Metal Halide, MH)、LED作为道路交通照明光源在中间视觉条件下的视觉功效。

2 测试系统构成及工作原理

2.1 测试系统硬件构成

基于视觉功效法开发研制的反应时间测试系统主要由上位机、电子计时器、投影仪、感光元件、光源、屏幕、暗箱等^[3-4]组成,如图1所示。

上位机PC:安装有视标测试方案设置软件,由用户设置视标测试方案,并与投影仪相连,将设置好的背景与视标投射到屏幕上,以模拟夜间行车道路上突然出现的障碍物。上位机与电子计时器通讯,接收并存储测试的时间数据。

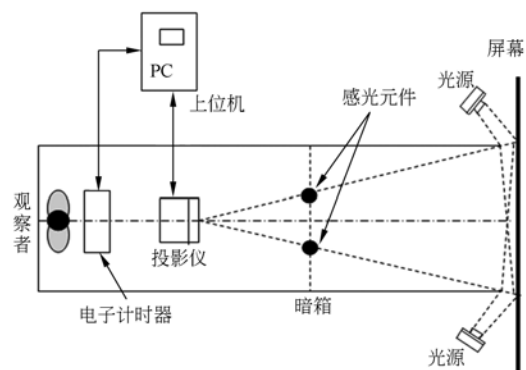


图1 反应时间测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of reaction time measuring system

电子计时器:如图2所示,其核心元件是单片机,通过接收感光传感器信号,开启单片机内部计时器;通过检测手动按钮信号,形成反应时间并记录,之后与上位机通讯,将反应时间数据上传。电子计时器具备显示所采集反应时间的功能。

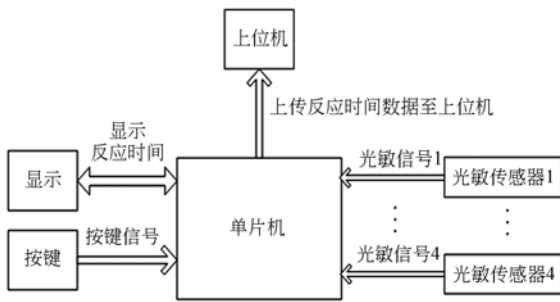


图 2 电子计时器构成原理图

Fig. 2 Schematic diagram of electronic timer

投影仪:将上位机设置好的测试方案(包括背景与视标)投射到屏幕上,与光源产生的背景相叠加,此方法为增量阈值法^[9-11],即人眼看到视标的实际亮度是背景亮度与视标亮度的叠加。

感光元件:在投影光线范围内上下左右对称共布置 4 个感光元件,它们用来接收投影仪投射出来的光信号,光信号经检测电路传给电子计时器以启动计时。

光源:左右两侧对称布置 2 个光源,为暗箱提供照明,模拟夜晚道路两旁路灯照明,同时使屏幕上光照均匀,不会形成明显光斑。本实验选择高压钠灯、金卤灯、LED 3 种光源,功率都为 250 W。

2.2 测试系统工作原理

该系统工作原理为:在光源投出后,实验操作者按照图 3 所示的上位机软件设置好测试方案,包括视标图案、大小、开口方向、颜色、停留时间、位置坐标,以及背景颜色、亮度等。然后,通过投影仪将测试视标和背景投射到屏幕,并用亮度计检测屏幕上打光是否均匀,以及亮度是否符合要求。



图 3 测试方案设置界面

Fig. 3 Set interface of test scheme

实验时,投影视标(即兰道尔环)如图 3 左下

角所示,4 个感光元件均检测到投射出的光线时,判定为目标稳定出现,电子计时器记录下此时刻为 t_1 ;当观测者辨认出兰道尔环的开口方向时,按下接触开关,电子计时器记录此时刻为 t_2 ;则此次实验反应时间 $t = t_2 - t_1$ 。在做完一组实验后,将此次实验数据上传上位机,进行后续处理;然后,另一名受试者参与实验,依次进行测试。图 4 为系统测试现场与实物图。



(a)现场系统测试图

(a)Figure of system test



(b)单片机控制板

(b)Control panel



(c)电子计时器

(c)Electronic timer

图 4 测试现场与实物图

Fig. 4 Photos of test field and equipment

3 实验数据处理与结果分析

本实验挑选了 10 名年龄在 20~28 岁,且具有正常色觉与视力的学生。在实验开始前,要求每名学生在中间视觉环境下,通过观测口双眼前视,当兰道尔环出现时以及在确认兰道尔环开口方位时分别按下按钮。经过多次反复训练,以熟悉测试系统操作步骤,确保实验数据真实可靠。本文实验分别进行了 3 种光源的不同背景亮度实验,视标对比度实验和视标偏心角实验。

3.1 反应时间与背景亮度的关系

在不同背景亮度下共测得 HPS、MH 与 LED 灯的 1 800 个有效数据,各自反应时间平均值如表 1 所示。当背景亮度由 0.5 cd/m² 上升至 3.0 cd/m² 的过程中,HPS 的反应时间由 525 ms 下降至 270 ms;MH 由 461 ms 下降至 260 ms;LED 由 410 ms 下降至 248 ms;3 者均为下降趋势,并且当背景亮度为一定值时,LED 的反应时间比 HPS 至少低 10%。

表 1 3 种光源在不同背景亮度下的反应时间

Tab.1 Reaction time of three light sources in different background brightnesses

背景亮度	反应时间/ms			时间比	
	HPS	MH	LED	HPS/MH	HPS/LED
0.5	525	461	410	1.14	1.28
1.0	422	402	326	1.05	1.29
1.5	333	335	285	0.99	1.17
2.0	301	315	275	0.96	1.09
2.5	297	283	252	1.05	1.18
3.0	270	260	248	1.04	1.09

图 5 为 3 种光源反应时间随背景亮度变化的曲线。当背景亮度 < 1.5 cd/m² 时,HPS 的反应时间最大;当背景亮度 = 1.5 cd/m² 时,HPS 与 MH 的反应时间相近,LED 的反应时间为二者的 85% 左右;当背景亮度 ≥ 2.5 cd/m² 时,HPS 的反应时间大于 MH。

利用相关系数法回归分析时间数据,可得出 3 种光源的背景亮度与反应时间的拟合函数,如表 2 所示,函数包括常数、倍数、负指数和相关系数,其中相关系数均接近 0.96,表明拟合结果较好。

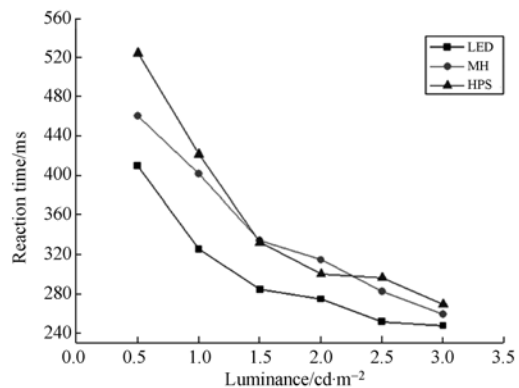


图 5 反应时间随背景亮度变化曲线

Fig. 5 Curves between reaction time and background brightness

表 2 3 种光源的背景亮度与反应时间的拟合函数

Tab.2 Fitting function of background brightness with reaction time

光源	拟合曲线函数	相关系数 R ²
HPS	$Y=257.207+237.814e^{-x/0.885}+237.814e^{-x/0.885}$	0.953
MH	$Y=205.677+174.069e^{-x/1.646}+174.069e^{-x/1.646}$	0.964
LED	$Y=-46.076+336.045e^{-x/0.434}+362.842e^{-x/13.826}$	0.965

3.2 视标对比度对反应时间的影响

视标对比度 C 是背景亮度与视标亮度的比值。取视标偏心角为 0°、背景亮度为 1.5 cd/m² 和 5 种视标对比度,HPS、MH、LED 共测得 1 500 个有效数据,反应时间如表 3 所示。当视标对比度相同时,HPS 反应时间比 MH 长约 80 ms,比 LED 长约 120 ms。其中,HPS/MH 和 HPS/LED 在 C=0.5 时最大,在 C=0.3 时最小。

表 3 3 种光源在不同视标对比度下的反应时间

Tab.3 Reaction time under different visual target contrasts

C	反应时间/ms			时间比	
	HPS	MH	LED	HPS/MH	HPS/LED
0.3	504	416	381	1.21	1.32
0.4	476	386	335	1.23	1.42
0.5	460	371	316	1.24	1.46
0.6	442	363	311	1.22	1.42
0.8	438	360	308	1.22	1.42

图 6 为视标偏心角为 0°时,HPS、MH 和 LED 3 种光源反应时间随视标对比度的变化趋势。

图 6 中对比度在 0.3~0.5,LED 反应时间下

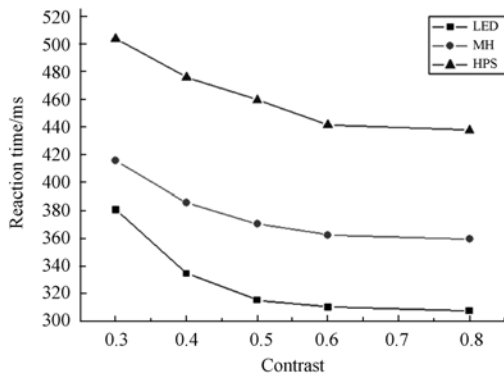


图 6 反应时间随视标对比度变化曲线

Fig. 6 Curves between reaction time and visual target contrast

降最为明显,为 65 ms;在 0.5~0.8, HPS 反应时间下降最明显,为 22 ms;对比度由 0.3 增加到 0.8,3 种光源反应时间均呈下降趋势,视觉功效均上升,LED 视觉功效最好。

3.3 视标偏心角对反应时间的影响

实验取背景亮度为 1.5 cd/m^2 、视标对比度为 0.5、5 种视标偏心角,3 种光源共测得 1 500 个有效数据,反应时间见表 4。视标偏心角在 $0 \sim 30^\circ$,3 种光源反应时间均增加;MH 增加幅度约为 80 ms;HPS 增加幅度约为 30 ms;LED 增加幅度约为 40 ms;视标偏心角相同时,LED 反应时间要小于其他 2 种光源。

表 4 3 种光源在不同视标偏心角下的反应时间

Tab. 4 Reaction time under different visual target eccentric angles

视标偏心角/ $^\circ$	反应时间/ms			时间比	
	HPS	MH	LED	HPS/MH	HPS/LED
0	460	371	316	1.24	1.45
10	471	388	320	1.21	1.47
15	488	412	335	1.18	1.46
20	491	433	349	1.13	1.41
30	493	452	360	1.09	1.40

图 7 为 HPS、MH 和 LED 3 种光源反应时间随视标偏心角的变化趋势。随着视标偏心角增

参考文献:

[1] VARADY G, FREIDING A, ELOHOMA M, *et al.*. Mesopic visual efficiency III: discrimination threshold experiments[J]. *Lighting Research and Technology*, 2007, 39 (1): 355-364.

加, MH 反应时间曲线呈线性。偏心角在 $15 \sim 30^\circ$ 时, HPS 反应时间的增加较小,仅为 5 ms;而 MH 的增加最大,为 40 ms。以上数据表明, HPS 所受视标偏心角变化的影响最小, LED 居中, MH 最大。

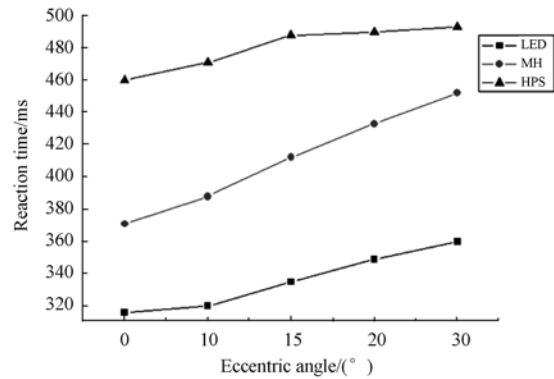


图 7 反应时间随视标偏心角变化曲线

Fig. 7 Curves between reaction time and visual target eccentric angle

4 结 论

本文基于视觉功效法,研制了道路交通照明模拟环境下的中间视觉反应时间测试系统;分别将 HPS、MH、LED 作为背景光源,在不同背景亮度、视标对比度、视标偏心角的条件下进行反应时间测试实验。数据处理分析表明:当背景亮度 $\leq 1.5 \text{ cd/m}^2$ 时,若要 HPS、MH 及 LED 的视觉功效相同, HPS 所需背景亮度最大, LED 所需背景亮度最小;当背景亮度 $> 1.5 \text{ cd/m}^2$ 时,若要 3 者的视觉功效相同, HPS 与 MH 功耗基本持平, LED 明显低于两者;相同功率的 3 种光源的视觉功效相同时, LED 的功耗明显低于 MH 和 HPS;相同视标对比度条件下, LED 较 HPS 与 MH 的视觉功效高;相同视标偏心角条件下, LED 较 HPS 与 MH 的视觉功效高。上述结果表明,当道路照明处于中间视觉条件下, LED 相对于 HPS 和 MH 其光效更高、功耗最小,更满足道路交通安全的需要。

[2] CIE115-2010, Technical report recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic [S]. *International Commission on Illumination*, 2010.

[3] ZHAO J D, LI Z X, YANG Y. Research on mecha-

- tronic system of comprehension reaction time in mesopic vision[J]. *Advanced Materials Research: Machinery Materials Science and Engineering Application Part2*, 2011,228-229:957-962.
- [4] SHEN T, ZHAO J D, LI H R. The development and application of a testing system of reaction time based on mesopic [C]. 2011 *International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, P. R. China*; MEC, 2011: 418-420.
- [5] 刘英婴. 用反应时间研究道路照明光源的相对光效[D]. 重庆:重庆大学,2006.
LIU Y Y. *Study on relative efficacy of light source on road lighting using reaction times* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [6] 金鹏,喻春雨,周奇峰,等. LED在道路照明中的光效优势[J]. *光学精密工程*, 2011,19(1):51-55.
JIN P, YU CH Y, ZHOU Q F, *et al.*. Superior application of LED to street lighting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(1):51-55. (in Chinese)
- [7] 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 CH Y, CHEN ZH 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. (in Chinese)
- [8] 陈凤,袁银麟,郑小兵,等. LED的光谱分布可调光源的设计[J]. *光学精密工程*, 2008,16(11):2060-2064.
CHEN F, YUAN Y L, ZHENG X B, *et al.*. Design of spectral tunable LED light source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2060-2064. (in Chinese)
- [9] ANTONY H, IAN M, PATRICK W, *et al.*. A model for visual performance at mesopic light levels[J]. *Scientific Generics Limited*, 2008,12(6):21-23.
- [10] 张培茗,陈家壁,杨雪,等. 用于人眼波前像差测量的照明系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009,17(9):2084-2090.
ZHANG P M, CHEN J B, YANG X, *et al.*. Illumination system design for ocular wavefront aberration measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2084-2090. (in Chinese)
- [11] VAN BOMMEL W, 周太明,林燕丹. 光源的光谱与低照明水平——中间视觉的基础[J]. *照明工程学报*, 2009,20(4):1-4.
VAN BOMMEL W, ZHOU T M, LIN Y D. The spectrum of light sources and low lighting levels: the basics of mesopic vision[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2009, 20(4): 1-4. (in Chinese)

作者简介:



赵建东(1975—),男,山西忻州人,博士,副教授,1997年,2000年于西安交通大学分别获得工学学士及工学硕士学位,2004年于清华大学获得工学博士学位,主要从事交通安全与控制技术方面的研究。E-mail: zhaojd@bjtu.edu.cn.



李兆轩(1987—),男,北京人,硕士研究生,2009年于北京印刷学院获得工学学士学位,主要从事交通安全与交通控制的研究。E-mail: lizhaoxuan726@yahoo.com.cn



杨勇(1981—),男,河北保定人,工程师,2003年,2006年于河北大学分别获得工学学士及工学硕士学位,主要从事照明节能、中间视觉等方面的研究。E-mail: yong.yang@rioh.cn