

文章编号 1004-924X(2011)01-0051-05

# LED 在道路照明中的光效优势

金 鹏,喻春雨,周奇峰,王一峰,吴 娜

(北京大学 深圳研究生院 集成微系统科学与工程与应用重点实验室,广东 深圳 518055)

**摘要:**选择路灯时,需基于恰当的光度测量模型对不同类型路灯的发光效率进行比较。以两种常用路灯光源和两种LED路灯光源为研究对象,对道路照明环境中人眼处于的视觉状态进行了分析,进而通过 MOVE 模型求得这4种路灯在中间视觉状态下的发光效率。与明视觉状态下的发光效率比较,LED路灯和金属卤素路灯在中间视觉状态下的发光效率大大提高,而高压钠灯有所降低。中间视觉状态下,当环境照明亮度从  $0.03 \text{ cd/m}^2$  变化到  $0.1 \text{ cd/m}^2$  再变化到  $0.3 \text{ cd/m}^2$  时,标准LED路灯的发光效率首先从  $131.2 \text{ lm/W}$  降到  $122.7 \text{ lm/W}$ ,然后又上升到  $140.5 \text{ lm/W}$ 。结果表明,由于人眼视觉响应是随环境照明变化的,在中间视觉状态下LED路灯比常用路灯的发光效率高,通过光谱加强等优化方法可以得到发光效果令人满意的LED光源。

**关键词:**中间视觉;暗视觉;明视觉;发光二极管;发光效率

**中图分类号:**TU113.83;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0051

## Superior application of LED to street lighting

JIN Peng, YU Chun-yu, ZHOU Qi-feng, WANG Yi-feng, WU Na

(Key Laboratory of Integrated Microsystem,  
Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** To compare the luminous efficiencies of different street lightings, it is necessary to establish an appropriate photometric measuring model. In this paper, two kinds of traditional street lights and two kinds of Lighting Emitting Diode(LED) sources were selected for comparing their luminous efficiencies in the mesopic state and photopic state, then the MOVE model was used to derive the luminous efficiencies of the four kinds of lightings. Compared with the luminous efficiencies in photopic state, the luminous efficiency of the LED street lights and the Metal Halide(MH) lamps have improved significantly in the mesopic vision. However, the efficiency of the High Pressure Sodium(HPS) has decreased under the mesopic vision. Furthermore, when background luminance varies from  $0.03 \text{ cd/m}^2$  to  $0.1 \text{ cd/m}^2$ , and then to  $0.3 \text{ cd/m}^2$ , the luminous efficiency of the LED street lighting in the mesopic visual state will decrease from  $131.2 \text{ lm/W}$  to  $122.7 \text{ lm/W}$  firstly but then increase to  $140.5 \text{ lm/W}$ . It is concluded that the sensitivity of human eye changes in the different brightnesses of backgrounds. Among HPS, MH, standard LED light and modified LED light based on mesopic vision theory, the LED can offer the best solution in energy saving. Moreover, the LED lightings with more high efficiency can be obtained further by optimizing their spectra.

**Key words:** mesopic vision; scotopic vision; photopic vision; Light Emitting Diode(LED); luminous efficiency

收稿日期:2010-01-26;修订日期:2010-07-21.

基金项目:深圳市科技计划资助项目(No. JC200903160350A)

## 1 引言

低碳环保是当今能源发展的主题,绿色照明倡导在道路照明方面使用更加节能、更高光效的路灯。目前,在道路照明中比较常用的是高压钠灯和卤素灯,而作为新材料光源的 LED(Light Emitting Diode)灯具有寿命长、节能高效等众多优势,是非常理想的道路照明新光源<sup>[1-3]</sup>。具有高的发光效率对于光源来说是非常重要的,所以选择路灯常常通过光度测量方法对候选光源的发光效率进行比较。光源发光效率分析模型常常是基于明视觉状态函数的<sup>[4-5]</sup>,然而人眼视觉响应是随环境照明强度变化的,所以不同视觉状态下的光源光度测量应该根据相应的视觉响应模型进行。比如测量高压钠灯的发光效率,灯的发光效率峰值在 580~590 nm 波段,此时所处的黄色波段与明视觉状态下人眼光效峰值相匹配。因此,高压钠灯在明视觉状态下有相对高的光效测量值。然而,当环境照明低于 3 cd/m<sup>2</sup> 时,发光测量仪就不能正确表示人眼感应到的光效了<sup>[4-5]</sup>。

通常,照明强度高于 3 cd/m<sup>2</sup> 为明视觉,低于 0.001 cd/m<sup>2</sup> 为暗视觉,处于明视觉和暗视觉中间的状态被定义为中间视觉。事实上,在道路照明的环境背景亮度中人眼是处于中间视觉状态的,而人们常常根据明视觉状态下的视觉函数对路灯发光效率进行标定显然是不适合的,应该采取中间视觉状态下的标定方法<sup>[6-7]</sup>。

光度测量是一个非常复杂的问题,因为它不仅依赖人眼的物理特性,而且和人眼视觉感知心理密切相关<sup>[7]</sup>。由于在中间视觉状态下,光源发光效率是随着人眼锥状细胞和杆状细胞的数量之比变化的,因此,建立中间视觉状态下的光度测量模型是非常复杂的工作。人眼视觉响应特性可以通过多种方法得到,比如:逐步亮度匹配法、直接多色亮度匹配法和闪动光度测量法等。但是,逐步亮度匹配法可以预测单色光却不满足叠加法则;直接多色亮度匹配法实现比较复杂;闪动光度测量法遵守叠加法则,但却只能分别测量锥状细胞或杆状细胞的视觉响应。此外,闪动光度测量法还依赖亮度等级和物体在视网膜上成像的位置,因此,闪动光度测量法有很多局限<sup>[8]</sup>。

本文采用 MOVE 模型对常用的两种传统路

灯(高压钠灯、卤素灯)和两种 LED 路灯(标准 LED 路灯、光谱优化 LED 路灯)在道路照明亮度环境中的发光效率进行了分析,并与明视觉状态下的光度分析结果进行了比较。结果表明,LED 路灯比传统路灯在道路照明方面不仅照明效率更高,并且通过光谱优化可以更加节能<sup>[9-10]</sup>。

## 2 中间视觉光度测量 MOVE 模型

1989 年,国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)在已有的中间视觉状态研究成果基础上归纳出 5 种光度测量模型。但是,这 5 种模型均基于亮度匹配方法,不满足叠加法则。2002 年,赫尔辛基理工大学照明实验室 MOVE 项目组在道路照明条件下建立了基于视觉函数的中间视觉光度测量模型,称作 MOVE 模型,该模型包含了视觉反应时间、视觉分辨阈值以及心理和生理的反应参数<sup>[11]</sup>,模型如下:

$$M(X) \cdot V_{\text{mes}}(\lambda, X) = X \cdot V(\lambda) + (1 - X) \cdot V'(\lambda), \quad (1)$$

式中,  $V_{\text{mes}}(\lambda, X)$  是中间视觉状态下的发光效率函数;  $V(\lambda)$  和  $V'(\lambda)$  分别是明视觉和暗视觉状态下的发光效率;  $M(X)$  是归一化函数;  $0 \leq X \leq 1$ 。它们之间的函数关系可以用图 1 来表示。  $V_{\text{mes}}(\lambda, X)$  是参数  $X$  的函数,当  $X=0$  时,  $V_{\text{mes}}(\lambda, 0)$  表示暗视觉状态下发光效率,峰值响应波长为 507 nm,最大光视效能为 1 700 lm/W;当  $X=1$  时,  $V_{\text{mes}}(\lambda, 1)$  表示明视觉状态下发光效率,峰值响应波长为 555 nm,最大光视效能为 683 lm/W;当  $0 < X < 1$  时,响应曲线表示中间视觉状态下发

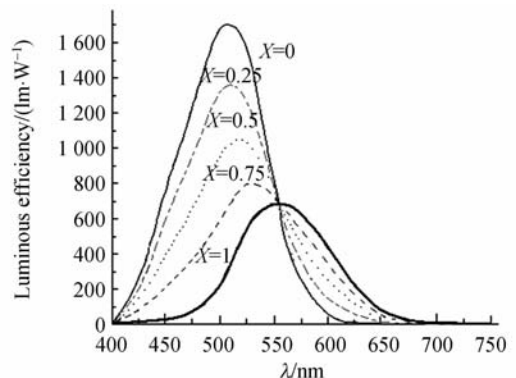


图 1 不同视觉状态下 ( $0 \leq X \leq 1$ ) 的发光效率  
Fig. 1 Luminous efficiency characterized by  $X$

光效率,峰值响应波长在 507~555 nm,最大光视效能能在 683 lm/W 和 1 700 lm/W 之间。显然,这个模型不仅满足叠加法则,而且将环境照明以及锥状细胞、杆状细胞和神经元等对环境照明的响应均考虑在内,是理想的中间视觉光度测量模型。

### 3 路灯在中间视觉状态下的光效分析

本文的路灯光效实验选定了两种常用路灯光源和两种 LED 光源。一种 LED 光源是选自德士达照明电子技术公司的 DST 110 W,被作为本文的标准 LED 光源(LED<sub>s</sub>);另一种 LED 光源是选自 Lemnis 公司的 20 W 样本,它是经过光谱优化处理的,作为本文的优化 LED 光源(LED<sub>o</sub>)。两种常用路灯均选自飞利浦公司,分别是高压钠灯(High Pressure Sodium, HPS) SON-T Pro 250 W 和金属卤素灯(Metal Halide, MH) MASTER CDM-T 250 W/830,图 2 给出这 4 种光源

的光谱特性曲线。

公式(1)中,与 X 参数相关的是明视觉、暗视觉两种视觉状态下光亮度接收比率(S/P)以及环境照明(L<sub>b</sub>),这种函数关系如图 3 所示。在本文中,S/P 表示杆状细胞和锥状细胞的对环境光的视觉响应之比。

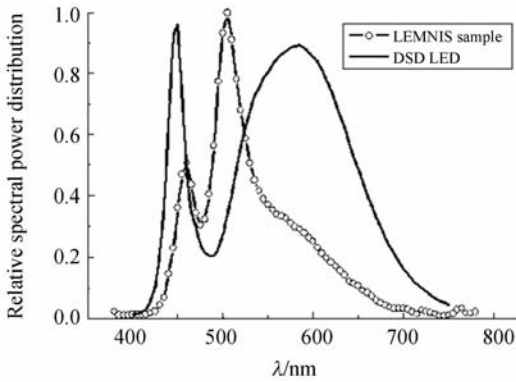
表 1 给出在实验中测得的 4 种路灯的暗视觉、明视觉状态下光亮度之比 S/P。

表 1 4 种路灯的 S/P 值

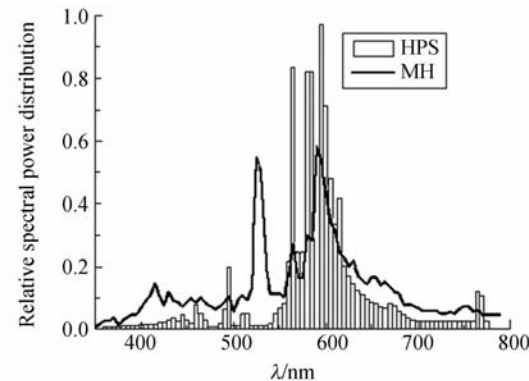
Tab. 1 S/P values of four street lights

	暗视觉下发光 /lm	明视觉下发光 /lm	S/P
LED <sub>s</sub>	15 415	10 142	1.520
LED <sub>o</sub>	6 796	2 273	2.989
HPS	17 500	28 000	0.625
MH	32 500	23 000	1.413

已知 S/P 值和环境照明条件,由图 3 可以得到 4 种路灯在不同环境照明条件下的 X 值。当 X 确定以后,将其代入公式(1)可以求得中间视觉状态下的人眼视觉响应函数 V(λ)。



(a) 标准 LED 路灯和优化 LED 路灯  
(a) Standard and modified LED lights



(b) HPS 路灯和 MH 路灯  
(b) HPS and MH lamps

图 2 4 种路灯的光谱特性

Fig. 2 Spectral distributions of selected light sources

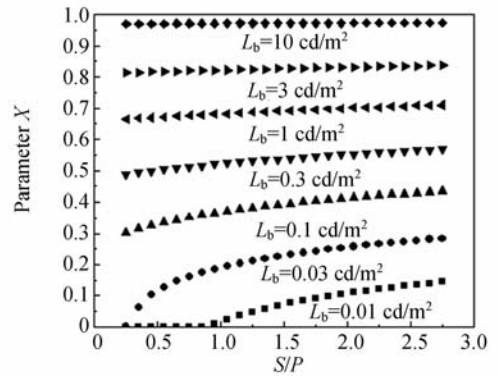


图 3 参数 X 和 L<sub>b</sub> 以及 S/P 之间的函数关系  
Fig. 3 X parameter dependence on L<sub>b</sub> and S/P

因此,路灯的发光效率 η 可以由式(2)求得。

$$\eta = \frac{\phi_v}{P} = \frac{L_{mes}(x)}{IV} = \frac{k_{mes}(x) \int S(\lambda \phi_{mes}(\lambda, x)) d\lambda}{IV} \quad (2)$$

式中,L<sub>mes</sub>(X)表示路灯在中间视觉条件下的发光强度,k<sub>mes</sub>(X)是中间视觉状态下人眼视觉响应函数的最大值,S(λ)是光谱响应函数。

为了与以往基于明视觉的光度测量法对比,表 2 给出 4 种路灯在明视觉状态下和中间视觉状

态下求得的发光效率数据。

表 2 两种视觉状态路灯的发光效率

Tab. 2 Luminous efficiencies of four street lights

路灯	环境照明 /( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	X	中间视觉 发光效率 /( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ )	明视觉 发光效率 /( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ )
LED <sub>s</sub>	0.03	0.230	131.2	92.2
LED <sub>o</sub>		0.292	273.8	113.7
HPS		0.141	75.9	112.0
MH		0.224	121.5	92.0
LED <sub>s</sub>	0.1	0.398	122.7	92.2
LED <sub>o</sub>		0.440	240.3	113.7
HPS		0.348	84.6	112.0
MH		0.394	115.0	92.0
LED <sub>s</sub>	0.3	0.540	140.5	92.2
LED <sub>o</sub>		0.569	211.1	113.7
HPS		0.505	91.2	112.0
MH		0.534	109.7	92.0

由表 2 数据可知:光源的发光效率随环境照明强度变化;在相同环境照明条件下,与明视觉状态下测量的发光效率相比,LED 路灯和金属卤素路灯在中间视觉状态下的发光效率均有显著的增加,然而高压钠灯的发光效率却大大降低,并且 LED 光源增加的幅度最大,是比较理想的路灯光

源;在中间视觉状态下,当环境照明亮度从  $0.03 \text{ cd/m}^2$  变化到  $0.1 \text{ cd/m}^2$  再变化到  $0.3 \text{ cd/m}^2$  时,标准 LED 路灯的发光效率首先从  $131.2 \text{ lm/W}$  降到  $122.7 \text{ lm/W}$ ,然后又上升到  $140.5 \text{ lm/W}$ 。这是由于人眼视觉响应是随环境照明变化的,因此,通过光谱优化可以得到发光效果令人满意的 LED 光源。

## 4 结 论

人眼的视觉响应是随背景亮度的变化而变化的,所以对不同场景中的候选光源进行光度测量应该以不同视觉响应模型为理论依据。因为人眼在道路照明的背景亮度中处于中间视觉状态,由此本文介绍了适用于道路照明的中间视觉模型,并以此为理论依据对常用路灯光源和新材料光源 LED 灯进行了光效分析。分析结果表明,LED 光源在道路照明中光效优势明显,并且可以通过光谱优化进一步提高光效,所以在道路照明以及其他室外照明方面具有非常广阔的发展前景<sup>[5]</sup>。文章最后给出了以往基于明视觉模型的光效分析和基于中间视觉模型的光效分析结果的对比,对比结果表明两种视觉模型下光效分析有很大差异,所以按照传统基于明视觉模型的光度测量方法来标定路灯的发光效率是不准确的。

## 参考文献:

- [1] 屠大维,吴仍茂,杨恒亮,等. LED 封装光学结构对光强分布的影响[J]. 光学精密工程,2008,16(5):832-838.  
TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.*. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):832-838. (in Chinese)
- [2] 陈风,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)
- [3] SCHUBERT E F. *Light-emitting Diode* [M].

Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

- [4] ELOHOLMA M, VIHKARI M, HALONEN L, *et al.*. Mesopic models-from brightness matching to visual performance in night-time driving: a review [J]. *Lighting Research and Technology*, 2005,37(2):155-173.
- [5] 瞿佳. 视光学理论和方法[M]. 北京:人民卫生出版社,2004:79-81.  
QU J. *Optometry Theory & Method* [M]. Beijing: People Sanitation Press, 2004:79-81. (in Chinese)
- [6] 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 (Nature Science)*, 2009,37(6):781-785. (in Chinese)

- [7] 金伟其,胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.  
JIN W Q, HU W J. *Radiometric, Brightness, Color and Their Measurement*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [9] FOTIOS, SA, CHEAL C. Road lighting for pedestrians in residential areas; choosing the optimum lamp colour characteristics[R]. *CIE Midterm meeting, Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting*, Budapest, 2009.
- [10] JIN P, WANG Y F, ZHOU Q F, *et al.*. The luminous efficacy of white LED in the mesopic state [J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, 5(4): 265-267, 272.
- [11] Helsinki University of Technology Lighting Laboratory. Mesopic Optimisation of Visual Efficiency, Performance based model for mesopic photometry [R]. MOVE Report, 2005.

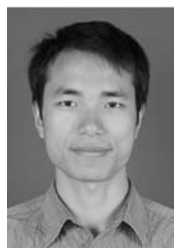
## 作者简介:



金鹏(1970—),男,天津人,博士,副教授,2000年于美国休士顿大学获得物理学博士学位,主要从事照明工程与封装技术的研究。E-mail: jinpeng@szpku.edu.cn



喻春雨(1976—),女,辽宁沈阳人,博士,讲师,2006年于南京理工大学获得光学工程博士学位,主要从事光电检测、成像等方面的研究。E-mail: yucy@szpku.edu.cn



周奇峰(1983—),男,湖北安陆人,硕士,主要从事光信息学、LED照明、中间视觉、光色优化、视觉响应、光电封装等方面的研究。E-mail: zhouqf888@yahoo.cn



王一峰(1984—),男,河南新野人,硕士,主要从事光电系统机械结构设计、LED光学特性及应用方面研究。E-mail: wangyf06184@szcie.pku.edu.cn



吴娜(1985—),女,陕西渭南人,硕士,主要从事光信息学、LED照明、中间视觉、光色优化、视觉响应、光电封装等方面的研究。E-mail: wuna851229@163.com