

文章编号 1004-924X(2012)07-1463-06

发光二极管道路照明的配光优化设计

王尧^{1*}, 刘华¹, 荆雷^{1,2}, 卢振武¹, 党博石¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研究中心, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 130039)

摘要:从道路照明评价指标出发,对发光二极管(LED)道路照明的配光进行优化设计。综合考虑照度分布与道路照明评价指标之间的函数关系,建立了LED路灯照度分布的数学模型。以照明评价指标为优化条件,亮度-照度比Q为优化目标,求解有约束的最优化问题,得到配光曲线。以沥青路面主干路为例,把得到的配光曲线导入照明模拟软件中进行仿真模拟。配光优化结果表明:其横向配光呈非对称分布,且最大光强偏向机动车道方向,比传统的对称式配光曲线节能30.3%;Q为0.0727,高于一般沥青路面的比值;同时各项照明评价指标均符合CJJ 45-2006的要求,配光性能良好。

关键词:非成像光学;发光二极管路灯;配光优化;道路照明评价

中图分类号:TU113.666;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1463

Light distribution optimization of LED luminaries for road lighting

WANG Yao^{1*}, LIU Hua¹, JING Lei^{1,2}, LU Zhen-wu¹, DANG Bo-shi¹

(1. *Opto-electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: minwooyoyo@yahoo.cn*

Abstract: According to the evaluation indexes of road lighting, the light distribution of Light Emitting Diode(LED) luminaries was optimized. A mathematical model of the illumination distribution for LED luminaries was established based on the relationship between the evaluation of road lighting and the illumination distribution. By taking the evaluation indexes of road lighting as the optimization conditions and the ratio(Q) of average luminance to average illuminance of road surface as an optimization target, the light distribution was obtained by solving a constrained optimization problem. Finally, the optimized light distribution was induced into lighting simulation software to simulate the LED luminaries for an asphalt trunk road. The result shows that the light distribution is asymmetric in the lateral direction, and the maximum intensity direction leans to the traffic lane. The light distribution saves 30.3% in energy consumption compared to traditional symmetrical light distribution. Moreover,

收稿日期:2011-12-13;修订日期:2012-02-15.

基金项目:国家973重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB227101);中科院三期创新工程资助项目;吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115123)

the Q value is 0.072 7, which is higher than that of the normal asphalt trunk road. The evaluation of the road lighting meets the standard of CJJ 45-2006, and demonstrates that the lighting parameters are optimized well.

Key words: non-imaging optics; Light Emitting Diode (LED) luminary; light distribution optimization; evaluation of road lighting

1 引言

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有高效、节能、寿命长、显色指数高、环保等优点,用 LED 代替传统的高压钠灯作为道路照明的光源,是城市道路照明建设发展的必然趋势^[1-3]。然而,目前 LED 路灯的实用效果并不理想,主要原因是 LED 路灯配光设计不合理:一方面,亮度均匀性不足,产生“斑马效应”,严重威胁道路安全;另一方面,眩光控制和横向配光分布不合理,导致光入侵和光污染,造成能量的严重浪费^[4]。近年来,一些研究者对 LED 道路照明灯具的配光设计进行了相关研究。2008 年,2010 年 Pachamanov^[5]、Feng^[6]等人先后根据国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)提出的亮度和眩光的相关标准,进行了灯具的配光设计,其配光结果能很好地满足道路照明中纵向配光的要求。然而,由于在配光设计过程中没有考虑机动车道和非机动车道的照明需求不同以及环境比的影响,其横向配光没有得到很好的优化,仍采用对称形式,致使灯具能量利用率较低。

根据 CIE 和《城市道路照明设计标准》(CJJ 45-2006)的相关规定,道路照明需要同时满足 7 种道路照明评价指标的要求^[7-8]。本文在 LED 道路照明配光设计过程中,综合考虑所有道路照明评价指标对道路照明的影响,建立了 LED 路灯照度分布的数学模型,并根据照度分布与各个评价指标之间的函数关系,通过求解有约束的最优化问题完成配光优化。以沥青路面主干路为例,进行了配光优化的实例设计,并在照明模拟软件中进行了具体的道路照明模拟分析,其各项道路照明评价指标均满足 CJJ45-2006 的要求。

2 设计原理

2.1 路面亮度系数

道路使用者在道路上行驶时感受到的是路面的亮度而非照度,但是目前的道路照明设计中,往往注重照度指标而忽略亮度指标,甚至有很多人认为亮度与照度成正比,亮度均匀性等同于照度均匀性。然而实际上,亮度与照度的关系十分复杂,这不仅与灯具本身的光度特性有关,还与道路使用者与路面观察点之间的相

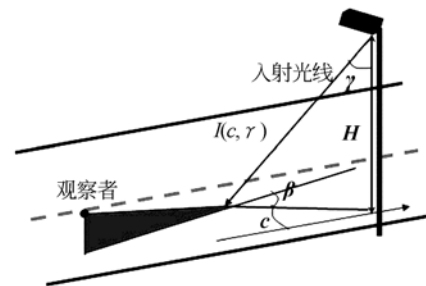


图 1 亮度与照度计算关系示意图

Fig. 1 Calculation relationship between luminance and illumination

对位置以及路面材料的反射特性有关。CIE 规定了道路使用者的标准观察位置^[8]。设 β 为光线入射平面和观察平面之间的角度, γ 为入射光线的垂直角, c 为光线入射平面与道路行驶方向之间的角度, H 为路灯到路面的距离,如图 1 所示。路面的亮度为:

$$L(\beta, \gamma) = \frac{r(\beta, \gamma)}{10^4 \cos^3 \gamma} \cdot E(c, \gamma). \quad (1)$$

式中: $r(\beta, \gamma)$ 称为简化亮度系数, CJJ45-2006 中规定了不同路面材质对 $r(\beta, \gamma)$ 的要求^[7-9]。 $E(c, \gamma)$ 表示路面照度, 其与灯具发光强度 $I(c, \gamma)$ 的关系为:

$$E(c, \gamma) = \frac{I(c, \gamma) \cos \gamma}{(H/\cos \gamma)^2} = \frac{I(c, \gamma) \cos^3 \gamma}{H^2}. \quad (2)$$

2.2 配光优化

以一段道路上相邻两根灯杆之间的路面为目标面进行配光优化,如图 2 中灯杆 A=2 和灯杆 A=3 之间的路面。假设 LED 路灯到路面的距离为 H,路灯间距为 L,机动车道宽度为 W₁,非机动车道宽度为 W₂。以 A=2 灯杆的位置为原点,垂直于道路长度的方向为 x 轴,沿道路长度的方向为 y 轴,建立直角坐标系(x, y),按照 CIE 规定的方法^[8],将目标面分为 M×N 个矩形区域,坐标值为(x_i, y_j), i=1, 2, …, M, j=1, 2, …, N。

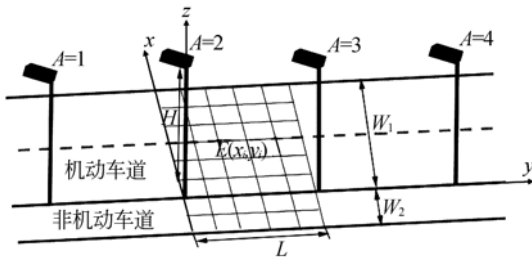


图 2 配光优化目标面计算示意图

Fig. 2 Target region of light distribution optimization

β, γ, c 以及简化亮度系数 r 均可以写为 x 和 y 的函数。 (x_i, y_j) 处的照度值和亮度值均为所有路灯在该处叠加的结果,分别记为 $E_{total}(x_i, y_j)$ 和 $L_{total}(x_i, y_j)$:

$$E_{total}(x_i, y_j) = \sum_{A=1}^a E_A(x_i, y_j), \quad (3)$$

$$L_{total}(x_i, y_j) = \sum_{A=1}^a \frac{\gamma_A(x_i, y_j)}{10^4 \cos^3 \gamma_A(x_i, y_j)} \cdot E_A(x_i, y_j), \quad (4)$$

其中: $E_A(x_i, y_j)$ 表示第 A 个灯在 (x_i, y_j) 处的照度, $A=1, 2, 3, \dots, a$ 。

道路照明的 7 种评价指标包括:路面平均亮度 L_{av} 、路面亮度总均匀度 U_0 、路面亮度纵向均匀度 U_L 、路面平均照度 E_{av} 、路面照度均匀度 U_E 、眩光限制阈值增量 TI 和环境比 SR,这 7 种评价指标均与 $E_{total}(x_i, y_j)$ 和 $L_{total}(x_i, y_j)$ 有关^[7-10]。即对于路面材质已知的道路,道路照明的 7 种评价

指标可以根据灯具的照度分布 $E(x, y)$ 计算得到。其中环境比 SR 表示为:

$$SR = \frac{E_{av2}}{E_{av1}}. \quad (5)$$

其中: E_{av1} 表示机动车道平均照度, E_{av2} 表示非机动车道的平均照度。这是道路照明中十分重要的一个评价指标,直接影响着横向配光的质量。路灯一般安置在路边,以往的灯具均简单地将横向配光设计为对称形式,使得机动车道和非机动车道的照度分布相同,产生了严重的资源浪费。

本文采用分离变量法将 $E(x, y)$ 写为:

$$E(x, y) = E_x(x) \cdot E_y(y), \quad (6)$$

式中, $E_x(x)$ 和 $E_y(y)$ 均为余弦函数多项式:

$$E(x, y) = E_x(x) \cdot E_y(y) = \left[\sum_{i=1}^J a_i \cos^{m_i} \frac{\pi(x - \theta_x)}{2 \left(\frac{W_1}{2} + W_2 \right)} \right] \left[\sum_{i=1}^K b_i \cos^{n_i} \frac{\pi(y - \theta_y)}{2L} \right], \quad (7)$$

其中: J 表示多项式 $E_x(x)$ 的项数, a_1, a_2, \dots, a_j 表示多项式 $E_x(x)$ 各项系数, m_1, m_2, \dots, m_j 表示多项式 $E_x(x)$ 各项次数, θ_x 表示多项式 $E_x(x)$ 的相移量, K 表示多项式 $E_y(y)$ 的项数, b_1, b_2, \dots, b_k 表示多项式 $E_y(y)$ 各项系数, n_1, n_2, \dots, n_k 表示多项式 $E_y(y)$ 各项次数, θ_y 为多项式 $E_y(y)$ 的相移量。

将 $E(x, y)$ 表达为式(7)的原因有三点:第一,采用分离变量法将照度分布分为纵向配光 $E_y(y)$ 和横向配光 $E_x(x)$ 两部分,可以同时兼顾 7 项照明指标的要求,也简化了配光优化的计算过程;第二, $E_y(y)$ 和 $E_x(x)$ 均采用余弦函数形式,符合 LED 的光辐射模式^[11],更适合 LED 路灯的配光优化设计;第三,表达式中引入了相移量,更有利于 SR 的优化。

定义亮度-照度比 $Q = L_{av} / E_{av}$,配光优化的过程实际上就是满足道路照明相关标准的同时求 Q 的最大值,即用更少的光通量达到道路照明标准中各项技术参数的标准值。

$$\max(Q(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y)) = \max \left\{ \frac{L_{av}(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y)}{E_{av}(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y)} \right\}, \quad (8)$$

$$L_{av}(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y) \geq L_{avT}, \quad (9)$$

$$E_{av}(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y) \geq E_{avT}, \quad (10)$$

$$U_0(a_1, a_2, \dots, a_j, m_1, m_2, \dots, m_j, b_1, b_2, \dots, b_k, n_1, n_2, \dots, n_k, \theta_x, \theta_y) \geq U_{0T}, \quad (11)$$

$$U_E(a_1, a_2, \dots, a_J, m_1, m_2, \dots, m_J, b_1, b_2, \dots, b_K, n_1, n_2, \dots, n_K, \theta_x, \theta_y) \geq U_{ET}, \quad (12)$$

$$U_L(a_1, a_2, \dots, a_J, m_1, m_2, \dots, m_J, b_1, b_2, \dots, b_K, n_1, n_2, \dots, n_K, \theta_x, \theta_y) \geq U_{LT}, \quad (13)$$

$$TI(a_1, a_2, \dots, a_J, m_1, m_2, \dots, m_J, b_1, b_2, \dots, b_K, n_1, n_2, \dots, n_K, \theta_x, \theta_y) \leq TI_T, \quad (14)$$

$$SR(a_1, a_2, \dots, a_J, m_1, m_2, \dots, m_J, b_1, b_2, \dots, b_K, n_1, n_2, \dots, n_K, \theta_x, \theta_y) \geq SR_T. \quad (15)$$

其中, $L_{avT}, E_{avT}, U_{0T}, U_{ET}, U_{LT}, TI_T$ 和 SR_T 分别为 CJJ 45-2006 中规定的 $L_{av}, E_{av}, U_0, U_L, TI$ 和 SR 的标准值。灯具的照度分布 $E(x, y)$ 要根据方程组(8)~(15)解出 $a_1, a_2, \dots, a_J, m_1, m_2, \dots, m_J, b_1, b_2, \dots, b_K, n_1, n_2, \dots, n_K, \theta_x, \theta_y$ 的值, 这是一个有约束的最优化求解问题, 其中式(8)为优化目标, 即求得 Q 最大值; 式(9)~(15)为优化条件, 即满足道路照明相关标准。这个求解过程十分繁复, 需要借助计算机程序语言求解。最后根据式(2)就可获得灯具的光强分布 $I(c, \gamma)$, 进而得出灯具配光曲线。

3 设计实例

3.1 配光优化

根据道路使用功能和道路等级的不同, 道路照明评价指标的标准值也不同。以沥青路面主干路为例进行配光优化。根据 CJJ45-2006, $L_{av} \geq 1.5 \text{ cd/m}^2, U_0 \geq 0.4, U_L \geq 0.7, E_{av} \geq 20 \text{ lx}, U_E \geq 0.4, TI \leq 10\%$, 环境比 $SR \geq 0.5^{[7]}$ 。LED 路灯到路面的距离 $H=10 \text{ m}$, 路灯间距 $L=30 \text{ m}$, 机动车道宽度 $W_1=15 \text{ m}$ (4 车道, 每个车道宽度为 3.75 m), 非机动车道宽度 $W_2=5 \text{ m}$ 。沥青路面亮度-照度比 Q 值一般为 $0.0455 \sim 0.0667^{[12]}$, 通过合理的配光优化完全可以使 Q 高于这个范围。将目标面划分为 9×10 个矩形区域, 取 $J=2, K=3$, 则式(7)可改写为:

$$E(x, y) = \left[\sum_{i=1}^2 a_i \cos^{m_i} \frac{\pi(x - \theta_x)}{2 \left(\frac{W_1}{2} + W_2 \right)} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^3 b_i \cos^{n_i} \frac{\pi(y - \theta_y)}{2L} \right]. \quad (16)$$

根据公式(8)~(15), 求解 $a_1, a_2, m_1, m_2, b_1, b_2, m_1, n_2, \theta_x, \theta_y$ 的值。由式(2)可以得到其配光曲线, 如图 3 所示, 其纵向配光 ($C=0^\circ$ 平面和 $C=180^\circ$ 平面的配光曲线) 呈对称分布, 横向配光 ($C=90^\circ$ 平面和 $C=270^\circ$ 平面的配光曲线) 呈非对称分布, 且最大光强偏向机动车道方向。

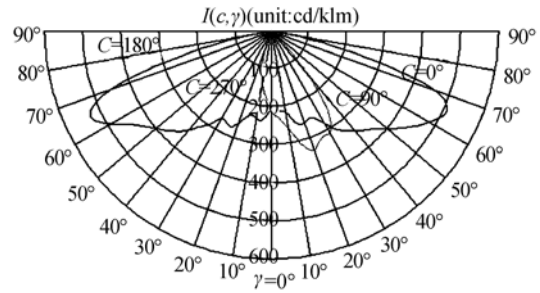


图 3 配光优化后的配光曲线图

Fig. 3 Light distribution curve after light distribution optimization

3.2 照明模拟分析

将获得的配光曲线输入到照明模拟软件 DI-ALux 中进行道路照明模拟。图 4 为道路 3D 模拟视图, 路灯采用双侧对称式布置, 路面材质为沥青路面, 机动车道采用 4 车道, 每车道宽度为 3.75 m , 非机动车道宽度为 5 m 。图 5 为机动车道点照度图, 路面照度最大值为 31 lx , 最小值为 18 lx , 照度平均值为 22 lx , 照度均匀度 U_E 达到 0.807 。

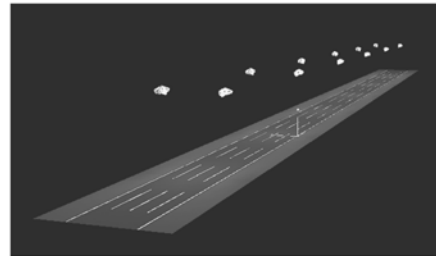


图 4 道路 3D 模拟视图

Fig. 4 Three dimensional simulation view of road

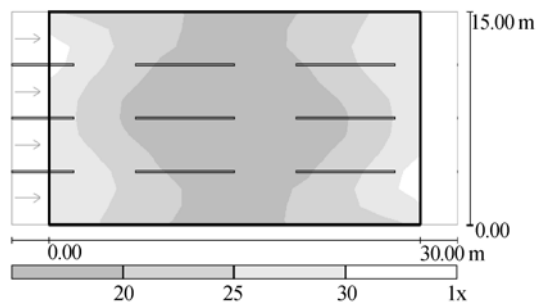


图 5 机动车道路面点照度图

Fig. 5 Point illuminance of vehicle road

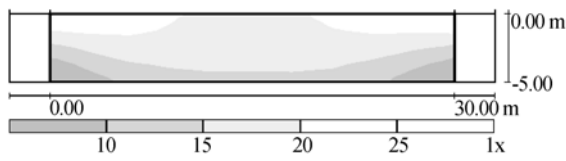


图 6 非机动车道路面点照度图

Fig. 6 Point illuminance of non-motor road

图 6 为非机动车道点照度图,路面平均照度为 13 lx,因此环境比 SR 为 0.6。表 1 为 4 个标准观察位置的机动车道路面点亮度值,平均亮度为 1.6 cd/m²,平均亮度均匀度为 0.7,纵向亮度均匀度不小于 0.8,眩光限制阈值增量不大于 9%。

表 1 机动车道路面模拟亮度值

Tab. 1 Simulation values of luminance of vehicle road

标准观察位置	$L_{av}/(cd \cdot m^{-2})$	U_0	U_L	TI/(%)
1	1.6	0.7	0.8	7
2	1.6	0.7	0.9	8
3	1.6	0.7	0.9	8
4	1.6	0.7	0.8	9

综合以上模拟分析结果,以沥青路面主干路为例进行配光优化,得到的配光优化曲线光学性能如表 2 所示,7 项照明指标均符合 CJJ 45-2006 中的规定。Q 值为 0.072 7,高于一般沥青路面的亮度-照度比,用更少的光通量实现了道路照明的配光要求。配光优化后得到的配光曲线性能优良。

表 2 配光优化后照明指标值

Tab. 2 Evaluation values of road lighting after light distribution optimization

$L_{av}/(cd \cdot m^{-2})$	U_0	U_L	TI/(%)	E_{av}/lx	U_E	SR	Q
1.6	0.7	0.8	9	22	0.807	0.6	0.072 7

3.3 横向配光分析

路灯一般安装在路边,为机动车道和非机动车道提供照明,且机动车道需要的光能大于非机动车道。传统的配光曲线横向配光呈对称式分布,使得投射到非机动车道的光能和机动车道一

样多,显然造成了能量的浪费。图 7 为传统的对称式配光曲线,与图 3 本文优化后的配光曲线相比较,两者机动车道方向的配光相同。表 3 给出了非对称式与对称式配光的部分光学性能对比。在机动车道的亮度和照度相同的条件下,非对称式的横向配光比对称式的横向配光节省光通量 3 000 lm,节能 30.3%。本文设计的非对称式横向配光分布有效提高了能量利用率,具有这样配光分布的路灯适合安装在路边。

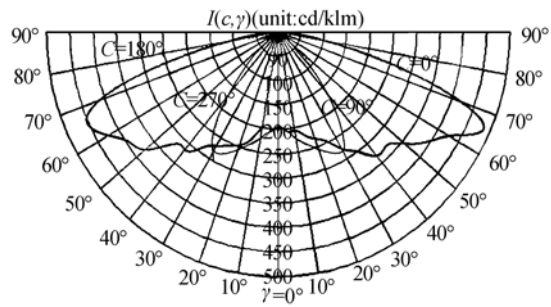


图 7 传统对称式配光曲线图

Fig. 7 Symmetrical light distribution curve

表 3 非对称式与对称式配光部分光学性能对比

Tab. 3 Comparison of optical performances between a-symmetrical light distribution and symmetrical light distribution

横向配光形式	$L_{av}/(cd \cdot m^{-2})$	机动车道 E_{av}/lx	非机动车道 E_{av}/lx	光通量 /lm
非对称	1.6	22	13	6 900
对称	1.6	22	22	9 900

4 结 论

本文进行了 LED 道路照明的配光优化设计,建立了 LED 路灯照度分布的数学模型。以提高亮度-照度比 Q 为优化目标,根据道路照明评价指标标准值完成配光优化。以沥青路面主干路为例,配光优化后,横向配光非对称分布,比传统对称式横向配光节能 30.3%。7 种道路照明评价指标均符合 CJJ45-2006 中规定的标准,亮度-照度比 Q 等于 0.072 7,配光性能良好,有利于进一步设计性能更优越的 LED 路灯配光元件。

参考文献:

- [1] PELKA D G, PATEL K. An overview of LED applications for general illumination[J]. *SPIE*, 2003, 3781:15-26.
- [2] 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)
- [3] STERANKA F M, BHAT J, COLLINS, *et al.*. High power LEDs technology status and market applications[J]. *Physical Status Solid (A) Applied Research*, 2002, 194(2):380-388.
- [4] 王晔, 陈超中, 施晓红. LED 道路照明灯具光度数据的现状分析[J]. *照明工程学报*, 2009, 20(9):54-63.
WANG Y, CHEN CH ZH, SHI X H. Analyses of photometry data status of road lighting luminaires with LED [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2009, 20(9):54-63. (in Chinese)
- [5] PACHAMANOV A, PACHAMANOVA D. Optimization of the light distribution of luminaires for tunnel and street lighting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 40(1):47-65.
- [6] ZEXIN F, YI L, YAN J H. Design of LED free-form optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(21):22020-22031.
- [7] CJJ 45-2006, 城市道路照明设计标准[S].
CJJ 45-2006, *Standard for Lighting Design of Urban Road*[S]. (in Chinese)
- [8] CIE publication 140, *Road Lighting Calculations* [S].
- [9] CIE publication 30.2, *Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting*[S].
- [10] CIE publication 31, *Glare and Uniformity in Road Lighting Installations*[S].
- [11] MORENO I, SUN CH CH. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(3):1809-1819.
- [12] JTJ 026.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范[S].
JTJ 026.1-1999, *Specification for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel*[S]. (in Chinese)

作者简介:



王尧(1984—),女,河北邯郸人,研究实习员,2007年于天津大学获得学士学位,2010年于南开大学获得硕士学位,主要从事非成像光学、LED照明方面的研究。E-mail: minwooyoyo@yahoo.cn



刘华(1976—),女,辽宁抚顺人,博士,副研究员,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学检测、光学设计、非成像光学方面的研究。E-mail: liuhua_rain@yahoo.com.cn



荆雷(1983—),男,天津静海人,博士研究生,2006年于山东大学获学士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事非成像太阳能聚光、LED照明等领域的研究。E-mail: 100jinglei100@163.com



卢振武(1955—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn



党博石(1985—),女,吉林松原人,硕士,研究实习员,2009年,2011年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士学位,主要研究方向为衍射系统光学设计。E-mail: dangboshi@163.com