

同时实现路面照度与亮度均匀性的LED光源光学系统研究

钱可元 胡晓佳

清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055

摘要 对于道路照明,人眼观察到的是路面的亮度而非路面照度。理想的路面照明应能达到照度和亮度的双重均匀性。从发光二极管(LED)道路照明中路面的亮度与照度的关系出发,提出了一种基于路面反射特性同时实现路面照度与亮度均匀性的设计方法。首先根据国际照明委员会(CIE)标准给出的简化亮度系数表计算路面上所有点的亮度系数;然后利用最小二乘法对路面照度和亮度同时进行分析,得到路面最优照度分布;最后采用分离变量与最小能量块迭代结合的方法对光源以及接收面进行网格划分,根据目标照度分布进行三维自由曲面光学系统设计,得到实现路面照度均匀与亮度均匀的光学透镜。将此设计应用于双车道的C1路面,实现了路面93.47%的照度均匀度,各车道观察到的路面总亮度均匀度为86.94%和89.26%。

关键词 几何光学;亮度均匀性;照度均匀性;路面反射特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0208001

Study of the Optical Systems with Illuminance and Luminance Uniformity Simultaneously for LED Lighting

Qian Keyuan Hu Xiaojia

Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract For road lighting, the human eyes observe surface luminance rather than the illuminance. An ideal road lighting system should be able to achieve both the uniformity of illumination and luminance. A design method is presented to realize the illumination and luminance uniformity of road surface. According to the Commission Internationale Ed I'eclairage (CIE) standard simplified luminance coefficient table, the luminance coefficient of all road surface points can be obtained. Then these parameters are analyzed by using the least square method, so as to obtain the optimal illumination distribution. According to the minimum energy block iterative methodology, we mesh both the light source and the receiving surface. With the three-dimensional free-form surface design method, the optical lens are obtained which can get the illumination uniformity of 93.47% and the luminance uniformity of 86.94% and 89.26% for a C1 double lane road surface.

Key words geometric optics ; luminance uniformity; illuminance uniformity; reflection characteristics of road surface

OCIS codes 080.2740; 080.3620; 080.3630

1 引言

道路照明的目的是为了夜间的行车安全,一方面是让驾驶员看清路面以避免交通事故,另一方面是让驾驶员观察舒适以缓解驾驶疲劳。发光二极管(LED)作为一种新型的固体光源,用作路灯时与传统路灯相比具有很多潜在的优势,在光学设计方面,由于LED的体积很小,给灯具的光学设计带来了很大的实现空间,通过透镜可以有效控制光线从而得到需要的照度分布,常用的花生米形透镜可以让LED路灯设计获得照度较为均匀的矩形光斑^[1-4],实现整个路面的照度均匀,从而使得LED路灯获得了广泛的应用。本文提出了一

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-09-10

作者简介: 钱可元(1957—),男,硕士,研究员,主要从事光电器件及LED照明方面的研究。

E-mail: qianky@sz.tsinghua.edu.cn

种基于路面反射特性,同时实现路面照度和亮度均匀性的设计方法,适用于类似道路照明双方向都有非均匀照度分布的场合。

2 道路照明系统模型

然而在道路照明中,人眼感知的是路面反射进入人眼的光线,如图1所示为照度与亮度的区别示意图。从图1(a)可以看出,只要入射到平面上的光通量是一定的,不管入射方向如何,平面上的平均照度是不变的。从图1(b)可以看出,改变入射光线方向、观察者位置,人眼观察到的路面亮度都会产生变化。

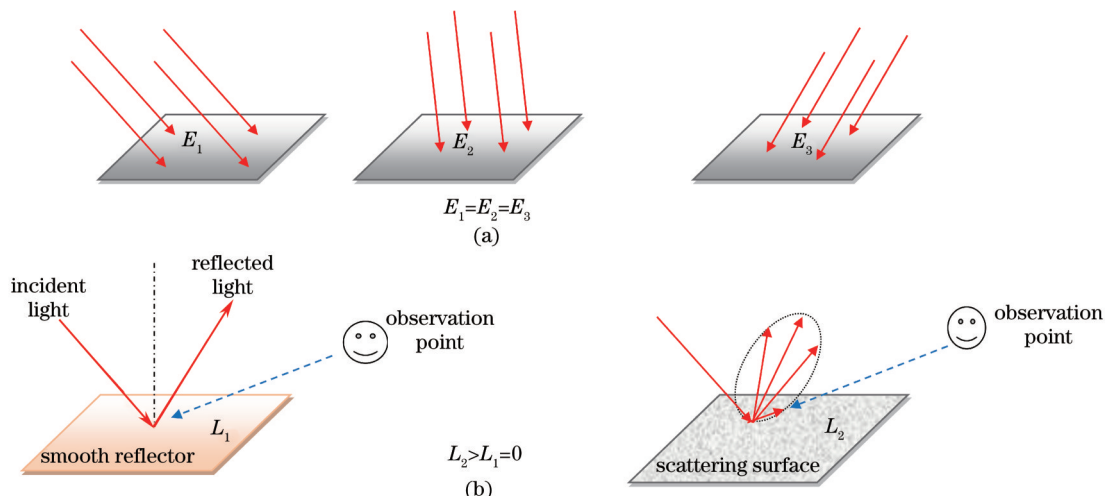


图1 照度与亮度的区别示意图。(a)照度与光线的入射方向、路面的反射性能、观察者位置无关;(b)亮度与光线的入射方向、路面的反射性能、观察者位置有关

Fig.1 Difference between illumination and luminance. (a) Illuminance is independent of the direction of the incident light, the surface reflection properties and observer position; (b) luminance depends on the incident direction, surface performance and observer position

因此对于驾驶员来说,观察到的是路面的亮度而非路面照度。如图2所示,其中照度是指入射到路面单位面积的光通量,与光线入射角度、路面情况等无关,亮度则是人眼感觉到的照明光经路面或目标漫反射后进入眼睛的那部分光线,与入射光线方向、强度、路面情况以及观察角度等都有关系。只有当路面的反射特性接近均匀漫反射(即朗伯型反射体)时,等照度路面才会给人等亮度的感觉。由此可以看出,在进行道路照明分析中,一定要综合分析路面的照度与亮度两个因素。

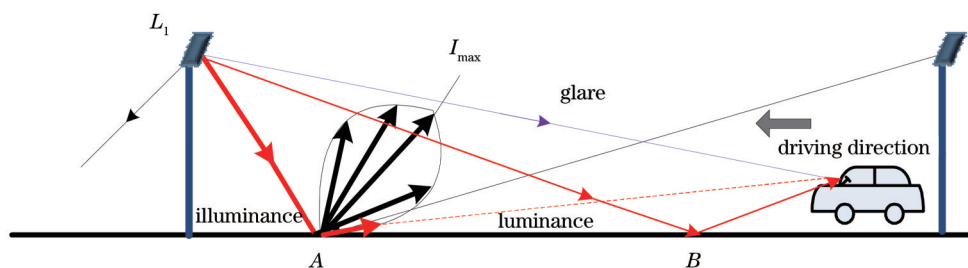


图2 道路照明光线的分析

Fig.2 Analysis of road lighting

而实际的路面反射特性一般是镜面反射与漫反射的结合体,与路面的材质以及路面情况有关。一般如图2所示的反射光强分布,在镜面反射方向有散射光的最大值 I_{max} 。如果照度完全均匀, L_1 光源在路面A点散射进入观察者的光通量将小于B点散射进入观察者的光通量,造成道路上的亮度均匀性的差距,也就是常见图3所示的“斑马线”效应,这对于道路行驶是非常不利的。

若要解决上述问题,就需要综合考虑汽车行驶过程中影响人眼辨识能力的所有因素,主要包括道路的平均亮度、亮度的均匀度、眩光控制水平以及显色指数^[5-6]。采用一定的方法求得合适的路面光分布,然后利用光学系统手段将LED的光能进行重新分配,得到目标光分布。

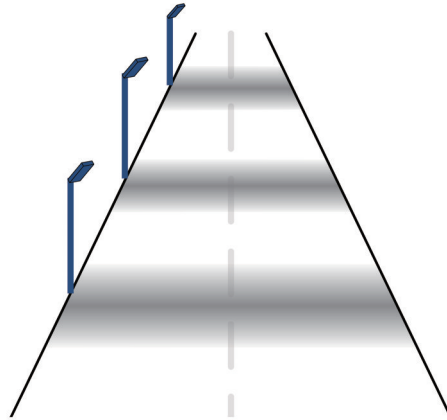


图3 “斑马线”效应示意图

Fig.3 Sketch of the "zebra crossing" effect

对于路面上任意一点 P 来说,它的亮度计算公式为^[7-8]

$$L_p = \sum_{i=1}^n q(\beta_i, \gamma_i) E(c_i, \gamma_i), \quad (1)$$

式中 c_i, γ_i 表示点 P 相对于第 i 个灯具的坐标,其中 $i=1,2,3, \dots, n, E(c_i, \gamma_i)$ 表示第 i 个灯具在 P 点产生的照度值, h 表示灯具的高度, $q(c_i, \gamma_i)$ 表示路面的亮度系数。

P 点的亮度系数定义为该点亮度与照度的比值,即

$$L(\beta, \gamma) = Eq(\beta, \gamma). \quad (2)$$

如图4所示,亮度系数取决于该点与观察者 AB 以及光源 O 的相对位置。其中 β 为光线入射平面 POF 与观察者视线平面 PAB 的夹角, γ 为光线入射角度。

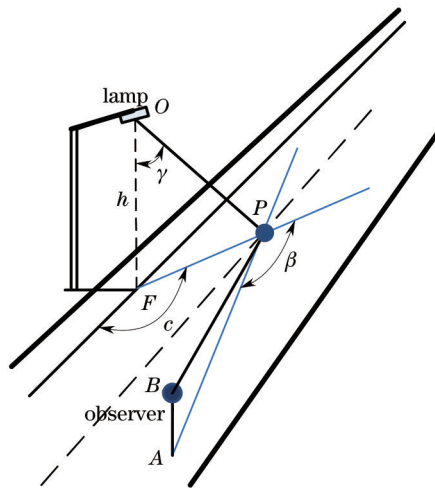


图4 观察者、观察点及光源之间的角度关系

Fig.4 Angle relationship between the observer, surface point and the light source

国际照明委员会(CIE)规定观察位置应该位于距离照明测试区域最近端 60 m 处的车行道中线上,观察高度根据车内人眼的高度规定为 1.5 m^[9]。

根据亮度系数依赖的角度关系,可以将路面上每一点的反射特性用一个二维的亮度系数表来表示。为了方便亮度计算,这些表一般以简化亮度系数 r 来表示,这时有

$$r(\beta, \gamma) = q(\beta, \gamma) \cos^3 \gamma. \quad (3)$$

根据 CIE 标准的规定,计算路灯 L_2 对点 P 产生的亮度时,定义观察者 1 位于 $(S+60m, W/4)$, 观察者 2 位于

($S+60m, 3W/4$)。分别计算 L_2 照射范围内 (即 $-2S \leq x \leq 2S, 0 \leq y \leq W$) 路面上每一点相对于两个观察者位置的 β 和 γ 值, 通过在简化亮度系数表中进行插值可以得到每一点的简化亮度系数 r 。根据 (3) 式和每一点的 γ 值可以得到每盏灯照射范围内路面上每一点的亮度系数 $q(x, y)$ 。

3 路面最优光分布计算方法

基于路面的散射特性, 如图 5 所示, 其中 S 表示路灯间距, W 为路面宽度, h 表示路灯的高, d 表示灯具到路边的水平距离, $L_1 \sim L_4$ 表示路灯, P 为路面上某一点。为了更清晰的表示路灯、路面点以及观察者的位置, 引入了一个笛卡尔坐标系 (x, y, z) , 其中 x 和 y 分别表示平行和垂直于道路的中心线方向, z 为垂直于路面的方向。并且, 在计算亮度时, 由于观察者位置的不同, 路面的亮度系数也会不同, 在如图 5 所示的道路系统中, 驾驶员更关心的是自己所在车道的照度与亮度, 因此在下面的分析中应该分车道讨论。

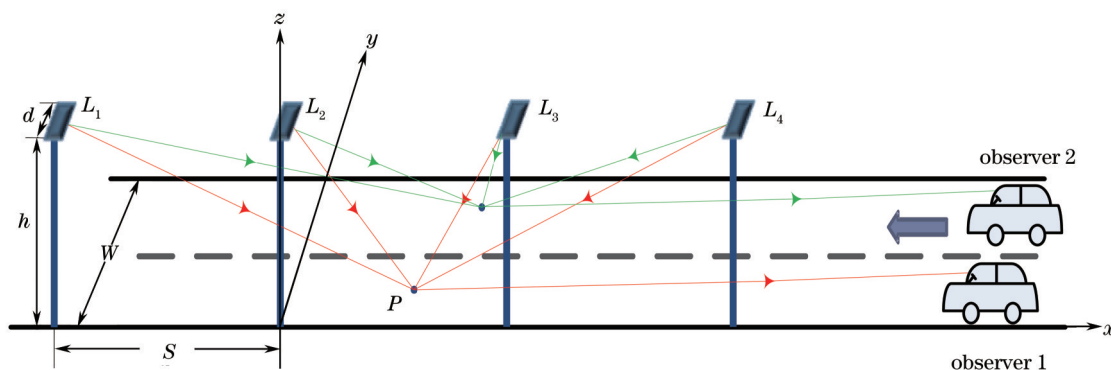


图 5 路面亮度计算模型

Fig.5 Calculation model of road surface luminance

由于每盏灯的照度分布在道路长度方向上是对称的, 以灯柱所在平面为对称平面。所以假设一盏灯位于坐标原点处 (如图 5 中路灯 L_2), 其照度 E 分布是一个偶函数, 满足

$$f(x, y) = p_0 + p_1 x^2 + p_2 x^4 + \dots + p_n x^{2n}, \quad (-2S \leq x \leq 2S), \quad (4)$$

式中 $f(x, y)$ 表示路面上坐标 (x, y) 处点的照度, n 表示此偶函数的阶数, $p_0 \sim p_n$ 为未知系数, 对应不同的 y 有着不同的系数。通过改变多项式阶数 n , 可以调节照度分布。

如图 5 所示, 路灯 L_2 与 L_3 之间路面上某点 P 受到 4 盏灯的共同照射, 那么该点的照度和亮度也是这 4 盏灯分别对 P 点产生的照度和亮度之和。假设 P 点横坐标为 x , 则路灯 L_1 在 P 点形成的照度为 $f(x+S, y)$, 路灯 L_3 在 P 点形成的照度为 $f(S-x, y)$, 路灯 L_4 在 P 点形成的照度为 $f(2S-x, y)$ 。因此, 点 P 的照度 $g(x, y)$ 可以表示为

$$g(x, y) = f(x, y) + f(x+S, y) + f(S-x, y) + f(2S-x, y), \quad (0 \leq x \leq S, 0 \leq y \leq W). \quad (5)$$

而 P 点的亮度 $L(x, y)$ 可以表示为

$$L(x, y) = f(x, y)q(x, y) + f(x+S, y)q(x+S, y) + f(S-x, y)q(S-x, y) + f(2S-x, y)q(2S-x, y). \quad (6)$$

为了使路面的照度和亮度同时均匀, 需要照度 $g(x, y)$ 和亮度 $h(x, y)$ 的方差之和最小, 设路面的平均照度为 E_{av} , 平均亮度为 L_{av} , 针对每一个 y 值可以得到一个总的方差值:

$$M(y) = \int_0^S \left[(g(x, y) - E_{av})^2 + k(h(x, y) - L_{av})^2 \right] dx, \quad (7)$$

其中 k 为可变权重系数, 它决定照度与亮度均匀度在求解方程中的权重, 由于对一般路面而言, 路面的照度与亮度是高度相关的, 因此 k 系数的取值在 $10^{-3} \sim 10^2$ 范围内变化时, 基本都能获得相似的结果, 满足照度与亮度均衡性的要求。

此方程有 $p_1 \sim p_n$ 共 n 个未知数, 为了使 $M(y)$ 的值最小, 对 $p_1 \sim p_n$ 分别求偏导, 令偏导值为 0, 得

$$\frac{\partial M(y)}{\partial p_i} = \int_0^S \left\{ \frac{\partial [g(x, y) - A]^2}{\partial p_i} + k \frac{\partial [h(x, y) - B]^2}{\partial p_i} \right\} dx = 0, \quad (i = 1 \sim n). \quad (8)$$

经过计算可以得到一个以 $p_1 \sim p_n$ 为未知数的方程组

$$\begin{cases} a_{1,1}p_1 + a_{1,2}p_2 + \dots + a_{1,n-1}p_{n-1} + a_{1,n}p_n = b_1 \\ a_{2,1}p_1 + a_{2,2}p_2 + \dots + a_{2,n-1}p_{n-1} + a_{2,n}p_n = b_2 \\ \dots \\ a_{n-1,1}p_1 + a_{n-1,2}p_2 + \dots + a_{n-1,n-1}p_{n-1} + a_{n-1,n}p_n = b_{n-1} \\ a_{n,1}p_1 + a_{n,2}p_2 + \dots + a_{n,n-1}p_{n-1} + a_{n,n}p_n = b_n \end{cases}, \quad (9)$$

其中 a_{ij} 和 b_i 是利用(8)式计算出来的具体数值,所有 a_{ij} 可以用一个系数矩阵 A 表示, b_i 可表示为一个向量 b , 那么方程组(9)可简化为

$$A \cdot p = b. \quad (10)$$

对方程组(9)进行矩阵运算可以得到对应不同 y 的 $p_1 \sim p_n$, 根据(4)式可以得到单盏路灯在道路上的照度分布, 从而可以得到不同观察者位置观察到的路面亮度。在实际计算中, 取多项式的项数 $n=6$, 权重系数 $k=10^{-2}$, 根据照度分布, 对多盏路灯进行分析, 根据(5)式和(6)式即可计算得到理论的路面照度与亮度情况。

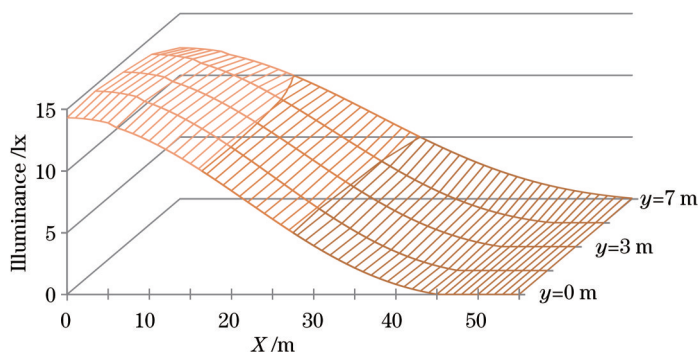


图6 单盏路灯在路面不同宽度处的照度分布曲线

Fig.6 Illuminance distribution curves for a single street lamp at different road widths

通过以上方法, 得到了一盏路灯在 $120 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 的 C2 类双车道路面以及道路两边各 5 m 宽带状区域的照度分布, 如图 6 所示, 整体呈现近视余弦分布的变化, 但在路面的不同宽度处, 其分布与大小也不同, 当多盏路灯叠加后, 可实现路面总照度均匀度为 0.98, 对应不同观察者位置的路面总亮度均匀度为 0.91, 环境比为 0.5。

4 自由曲面透镜的设计

传统的分离变量法在应用于均匀照度 LED 路灯透镜设计中, 可以得到较好的结果^[1, 10-11]。此类光学设计问题属于非成像光学的研究范畴^[12-15]。然而对于路面照度分布在道路横向和纵向都不均匀的路灯透镜设计中, 单纯采用分离变量法的结果并不理想, 这与透镜设计软件的局限性有一定的关系。通过结合最小能量块迭代法的使用, 可以有效解决这个问题。

对 LED 光源采用分离变量法进行划分。如图 7(a)所示, 沿着 θ 方向将光源的能量分成许多个能量条, 每个能量条的光通量可由下式求得

$$\Phi = \frac{\pi I_0}{2} [\sin(\theta + d\theta) - \sin \theta]. \quad (11)$$

接着采用最小能量块迭代法对接收面的长度方向进行能量划分。在长度方向上以足够小的间隙 d_{min} 将接收面分成许多个细长条, 由于接收面上的照度分布已知, 那么每个细长条接收的光通量即为已知, 将光通量依次叠加, 总光通量值达到光源对应的能量条的光通量时即停止叠加, 此次叠加的起始和终止长条即为光源对应的能量条的边界。多次迭代之后, 即可将接收面在长度方向上分成多个能量条, 与光源的能量条一一对应。图 7(b)为接收面长度方向上划分的能量条示意图, 其每个能量条的宽度与路面的照度分布有关。

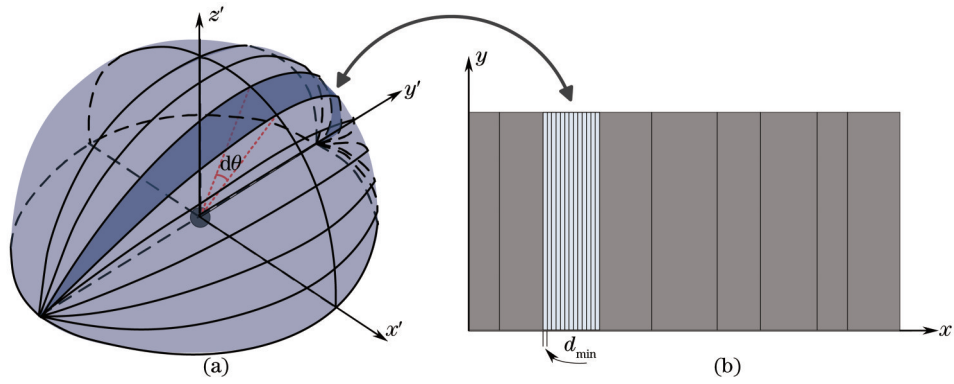


图7 网格划分示意图。(a)对LED光源能量的纵向划分;(b)接收面的纵向划分

Fig.7 Schematic diagram of grid division. (a) Vertical division of the LED light source energy; (b) longitudinal division for receiving surface

继续对LED光源的能量条进行划分,如图7所示,沿着 α 方向将每个能量条划分成许多个能量块。每个能量块的光通量为

$$\Phi = \frac{I_0}{2} [\sin(\theta + d\theta) - \sin \theta] \cdot \left[d\alpha + \frac{\sin 2(\alpha + d\alpha) - \sin 2\alpha}{2} \right]. \quad (12)$$

然后采用最小能量块迭代法对接收面的宽度方向进行能量划分。由于道路照度分布的不均匀性,不同能量条在宽度方向上的划分可能会有差异,如图8(b)所示。最后会在光源与接收面之间形成能量块的一一对应。

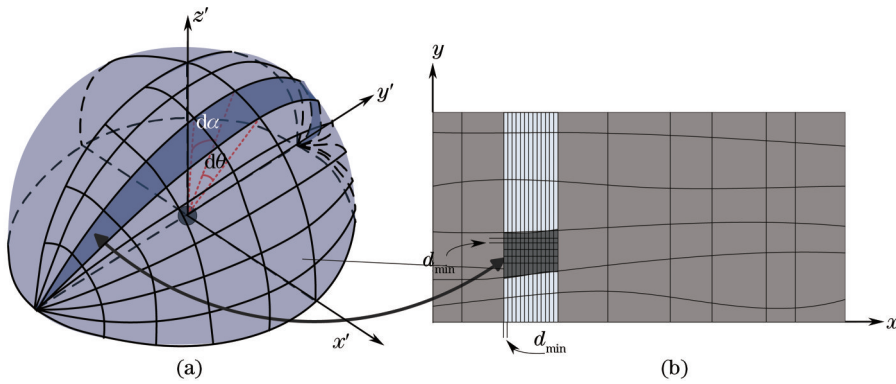


图8 网格划分示意图。(a)对LED光源能量的横向划分;(b)接收面的横向划分

Fig.8 Schematic diagram of grid division. (a) Horizontal partition of LED light source energy; (b) transverse division for receiving surface

透镜形状如图9所示,在宽度方向上透镜不对称,透镜表面的褶皱是为了有效解决3D自由曲面合成的法矢漂移问题^[1]。

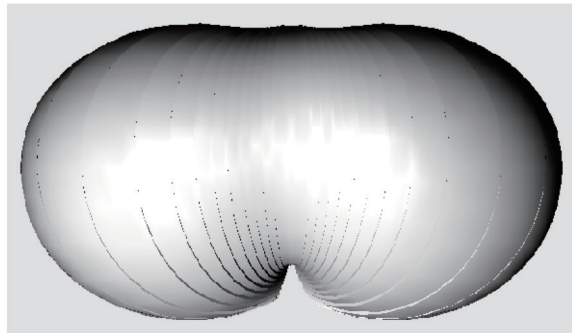


图9 实现非对称光型照度亮度同时均匀的路灯透镜

Fig.9 Street lamp lens to realize asymmetric light with luminance and illuminance uniformity

对单盏路灯进行仿真,可以得到路面的照度分布如图 10(a)所示,其空间光强的分布如图 10(b)所示。多盏灯叠加后的道路照度均匀度优于 0.93,并且在车行道两边各有 5m 的照度逐渐减弱的区域,实现道路照明标准中要求的环境比为 0.55。

将路灯置入 C1 道路系统中进行仿真,两个观察者位置观察到的路面亮度情况如图 11 所示。

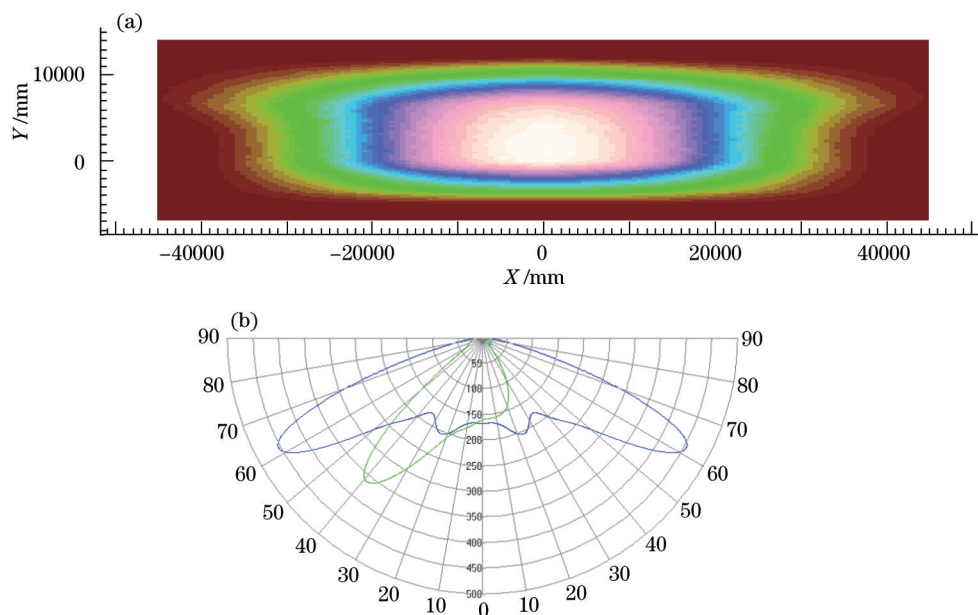


图 10 路灯透镜系统照度的仿真结果。(a)单盏路灯在路面的照度分布;(b)单盏路灯的极坐标光强分布图

Fig.10 Simulation results of street lamp lens system illumination. (a) Illumination distribution of single lamp; (b) polar candela distribution plot of single lamp

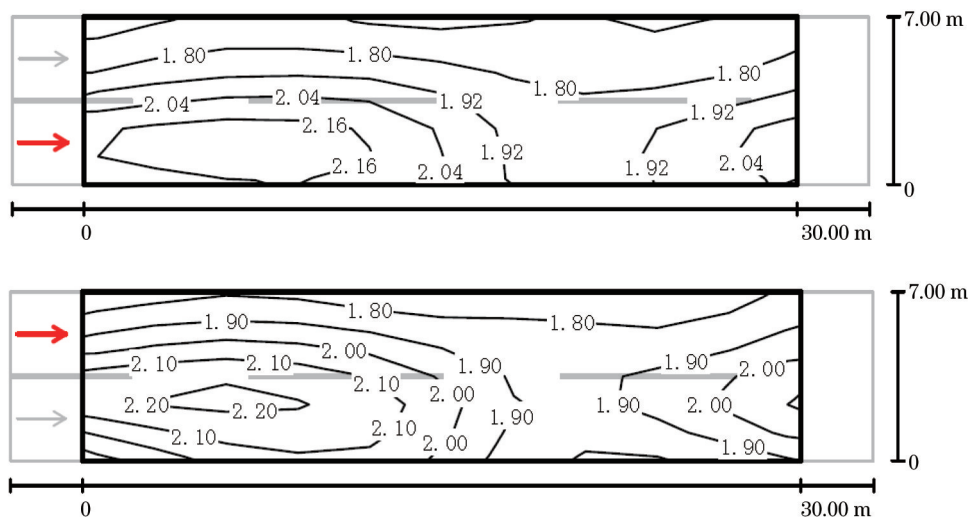


图 11 路灯透镜系统亮度的仿真结果

Fig.11 Simulation results of street lamp lens system luminance

根据仿真结果,对于道路的不同观察点都可以得到道路照明的实际参数,各车道观察到的路面总亮度均匀度为 86.94%和 89.26%,纵向亮度均匀度为 88%和 89.27%。

5 结 论

道路照明的最理想情况是路面总照度和亮度的均匀性同时满足、并且同时满足环境比的要求,眩光的控制复合规定,功能得到最充分的利用。要实现这些目标在光学设计中就必须考虑路面的实际散射特性,

必须考虑多灯叠加的性能差异。通过对 C1 路面亮度系数的分析,计算得知要满足上述条件,单盏路灯在路面长度和宽度方向的照度都应该呈现特定的分布。用最小二乘法求出了最佳照度的多项式分布函数,并提出了采用最小能量块迭代法对接收面的宽度方向进行能量划分的自由光学曲面设计方法,可以有效实现路面任意照度分布的透镜设计。最后对于路侧布等的非对称光型路灯透镜设计,应用于双车道的 C1 路面,实现了路面 93.47% 的照度均匀度和优于 86.94% 的路面总亮度均匀度。本方法可以有效实现任意照度分布的 LED 光学系统设计,适用于类似道路照明双方向都有非均匀照度分布的场合。

参 考 文 献

- 1 Wang Lin, Qian Keyuan, Luo Yi. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(18): 3716-3723.
- 2 Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, *et al.*. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source [J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9055-9063.
- 3 Feng Zexin, Luo Yi, Han Yanjun. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio [J]. *Opt Express*, 2010, 18(21): 22020-22031.
- 4 Wang Jianping, Deng Yuntang, Qian Gongquan. *The Road Lighting* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2005.
汪建平, 邓云塘, 钱公权. *道路照明* [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005.
- 5 D A Schreuder. *Road Lighting for Safety* [M]. London: Thomas Telford Publishing, 1998.
- 6 The Ministry of construction of the people's Republic of China. CJJ45-2006 *The City Road Lighting Design Standard* [S]. China: Chinese Architecture Industry Press, 2006.
中华人民共和国建设部. CJJ45-2006 *城市道路照明设计标准* [S]. 中国: 中国建筑工业出版社, 2006.
- 7 A Pachamanov, D Pachamanova. Optimization of the light distribution of luminaires for tunnel and street lighting [J]. *Eng Optim*, 2008, 40(1): 47-65.
- 8 F Burghout. On the relationship between reflection properties, composition and texture of road surfaces [C]. CIE, Proceedings 19th session, Kyoto, Japan, 1979.
- 9 International Commission on Illumination (CIE). Road lighting for wet conditions. CIE Publ [S]. 47 (TC-4.6), 1979.
- 10 International Commission on Illumination (CIE). CIE Collection on GLARE [S]. CIE Publ, 2002.
- 11 Ding Yi, Liu Xu, Zheng Zhenrong, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 12958-12966.
- 12 Xiaojia Hu, Keyuan Qian. Optimal design of optical system for LED road lighting with high illuminance and luminance uniformity [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(24): 5888-5893.
- 13 W T Welford, R Winston. *The Optics of Nonimaging Concentrators* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- 14 P T Ong, Gordon J M, Rabl A, *et al.*. Tailored edge-ray designs for uniform illumination of distant targets [J]. *Opt Eng*, 1995, 34(6): 1726-1737.
- 15 D G Pelka, K Patel. An overview of LED applications for general illumination [C]. SPIE, 2003, 5186: 15-26.

栏目编辑: 韩 峰