

用于环形交叉路口照明的 LED 自由曲面透镜设计

曾丹 彭冬生 蒋月

深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 为了解决环形交叉路口的照明问题,基于非成像光学的光学扩展量守恒理论,提出了一种产生环形光斑透镜的方案。该方案对单个透镜和透镜阵列进行设计,并利用 TracePro 软件对其进行模拟,结果均能得到环形光斑。对于单个透镜,随着光源尺寸的增大,目标照明面的照度均匀性降低,光能利用率基本保持不变,当发光二极管(LED)光源尺寸为 5 mm×5 mm 时,目标照明面的照度均匀性为 86.5%,光能利用率为 90.3%。对于 3 种透镜阵列,通过设置合适的初始参数,得到目标照明面的照度均匀性在 91% 以上,光能利用率均在 90% 以上,符合道路照明设计标准。

关键词 光学设计; 光学扩展量; 透镜; 照度均匀性

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.072202

LED Freeform Lens Design for Roundabout Crossing Illumination

Zeng Dan Peng Dongsheng Jiang Yue

*Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*

Abstract In order to solve the problem of the roundabout crossing illumination, a design method of lens with circular spots is proposed based on the theory of etendue conservation in non-imaging optics. Through the designed single lens and lens arrays, the circular spot can be obtained by simulation of TracePro software. The simulation of single lens shows that the illumination uniformity of the target surface is reduced with light source size increasing, but the efficiency keeps unchanged. The illumination uniformity of the target surface is about 86.5% and the efficiency is about 90.3% when the size of light emitting diode(LED) source is 5 mm×5 mm. For the three kinds of lens arrays, the illumination uniformities are more than 91% and efficiencies are more than 90% by setting the appropriate initial parameters. This design is in conformity with the design standards of road illumination.

Key words optical design; etendue; lens; illumination uniformity

OCIS codes 220.2945; 080.4298; 220.3620; 220.4298

1 引言

发光二极管(LED)光源在路灯照明应用中得到飞速发展,LED 路灯具有维护成本低、低碳环保、能源消耗低、启动时间较快、显色性好等优势^[1-2]。LED 光源的光强近似朗伯分布,这种光源在路面上形成的是不均匀的圆形光斑,其中心光强最大,到边缘呈递减趋势,不适合直接将其应用到路灯照明。道路照明系统需要在其被照区域形成均匀的光斑照明,在满足均匀性照明的同时,也能获得较高光能利用率。因此,这就需要进行二次光学设计,将 LED 发出的光分配到指定的照明区域,获得符合道路照明的光场分布。

目前市场上的 LED 路灯,主要为产生矩形光斑的透镜和反射器,这种光学器件主要用于直行道路上。对于产生矩形光斑的光学器件设计方法,主要有经验法^[3]、偏微分方程法^[4],划分网格法^[5-6]等。经验法是根据

收稿日期: 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-14; **网络出版日期:** 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60806017,61136001)、深圳市科技计划(JCYJ20140418095735627)

作者简介: 曾丹(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 471478711@qq.com

导师简介: 彭冬生(1978—),男,博士,副教授,主要从事光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: pengdongsheng@163.com(通信联系人)

据设计经验选择结构的初始参数设计,再利用软件的优化功能改变初始参数,以达到预期的设计要求。偏微分方程是通过理论知识推导出偏微分方程,编程、计算出自由曲面坐标点,此方法需要具有一定的数学逻辑推导能力和深厚的编程功底,且方程不一定会有解,从而局限了此方法的应用。划分网格法是根据非成像光学中的能量守恒定律,建立光源与目标照明面之间的映射,从而设计出光学器件,并且可以通过细分网格来提高精度,此方法在二次光学设计中应用较广泛。

实现矩形光斑照明的光学器件也有很多,如刘正权等^[7-9]基于折反射定律和光通量守恒定律,求得了产生矩形光斑的透镜和反射器,虽然能够得到较好的照度均匀性,但是理论推导较复杂,自由曲面离散点求解较难。对于环形交叉路口处,如果选用产生矩形光斑的光学器件,虽然满足了路面的均匀性,但不在指定路面的光可能会产生反射,从而形成炫光,对行人和车辆会造成严重的影响。对于一个交通流量非常大的环形路口,显然用这种器件不是最优选择。

本文针对 LED 光源的光强分布特性,基于非成像光学中的光学扩展量守恒定律,建立光源与目标照明面之间的映射关系,设计了自由曲面透镜,实现了均匀照明的环形光斑。

2 设计原理及模型的建立

光学扩展量是非成像光学理论中的核心内容,用于描述光学系统传输能量的能力。对于一个光学系统,为了使光能传输的损耗降低,必然要求入射光能最大限度地传输到输出端。理想情况下,入射光束的光学扩展量与出射光束的光学扩展量相等,即为光学扩展量守恒,它等于光束通过的面积和所占立体角的积分^[10],即

$$U = n^2 \iint \cos\theta dA d\Omega, \quad (1)$$

式中 n 为入射介质折射率, θ 为面积 dA 与立体角 $d\Omega$ 的中心轴之间的夹角。

图 1 为形成环形光斑透镜的原理图,LED 位于坐标原点, h 为 LED 光源到目标照明面的距离,照明面上的照明范围为 R_1 半径与 R_2 半径之间的面积, r 为 R_1 与 R_2 之间的任意照明半径。对从 LED 光源任意角度 θ 内发出的光,可得到

$$U_m = n^2 A_m \int_0^{2\pi} d\Phi \int_0^\theta \cos\theta \sin\theta d\theta = n^2 \pi A_m \sin^2\theta, \quad (2)$$

式中 U_m 为 LED 光源 θ 角内的光学扩展量, A_m 为 LED 光源的发光面积, θ 角内光源到达目标照明面上的照度为 $E_r = LU_r/A_r$, L 为照明面亮度, A_r 为目标照明面上的照明面积, U_r 为目标照明面上的光学扩展量。再根据边界点可得到 $E_0 = LU_0/A_0$, U_0 为 θ_{\max} 所对应的的光学扩展量,根据光学扩展量守恒和均匀照明的照度值相等,可以得到

$$r = \sqrt{\frac{\sin^2\theta(R_2^2 - R_1^2)}{\sin^2\theta_{\max}} + R_1^2}. \quad (3)$$

在这里,设置 $\theta_{\max} = \pi/2$,根据(3)式,可知 r 与 θ 是一一对应关系。根据图 1,设置透镜的初始高度 $z_0 =$

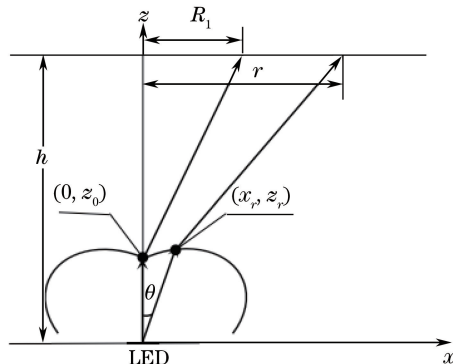


图 1 透镜的原理图

Fig. 1 Principle of the lens

15 mm, $h = 10$ m, 可得到初始的入射光线与出射光线。根据 Snell 定律可求出初始点的法向量^[11], 即

$$[n_1^2 + n_2^2 - 2n_1n_2(\mathbf{P}_{in} \cdot \mathbf{P}_{out})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = n_2\mathbf{P}_{out} - n_1\mathbf{P}_{in}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{N} 为单位法向量, \mathbf{P}_{in} 为入射光线的单位向量, \mathbf{P}_{out} 为出射光线的单位向量, n_1 、 n_2 分别为入射光线和出射光线所在空间介质折射率, 这里令 $n_2 = 1$, 可以得到初始点的切面, 该切面与下一条入射光线相交, 即得到自由曲面(透镜外表面)的第二点坐标, 根据迭代算法, 用 Matlab 软件求出自由曲面上的一系列坐标, 如图 2(a) 所示。将坐标点导入到 Solidworks 软件中, 旋转得到实体模型, 如图 2(b) 所示。

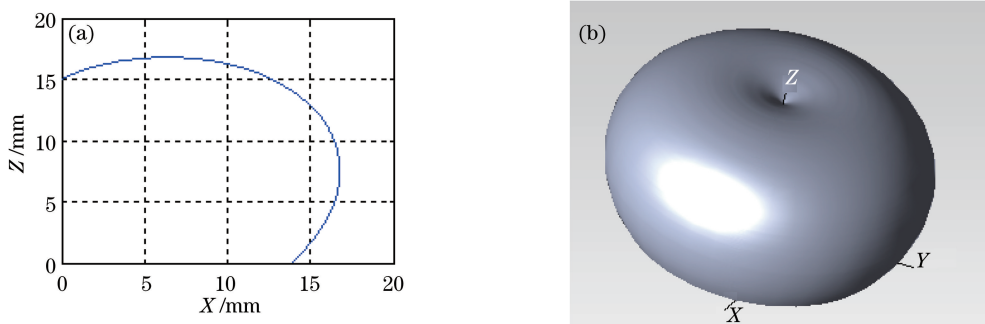


图 2 (a) 离散点坐标; (b) 透镜的实体模型

Fig. 2 (a) Discrete point coordinate; (b) entity model of the lens

3 模拟与分析

将图 2(b) 实体模型导入到 TracePro 软件中, 设置透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 光源大小为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 光通量为 100 lm, 进行光线追迹, 光线数目为 1×10^6 条, 模拟的照度分布图如图 3 所示。

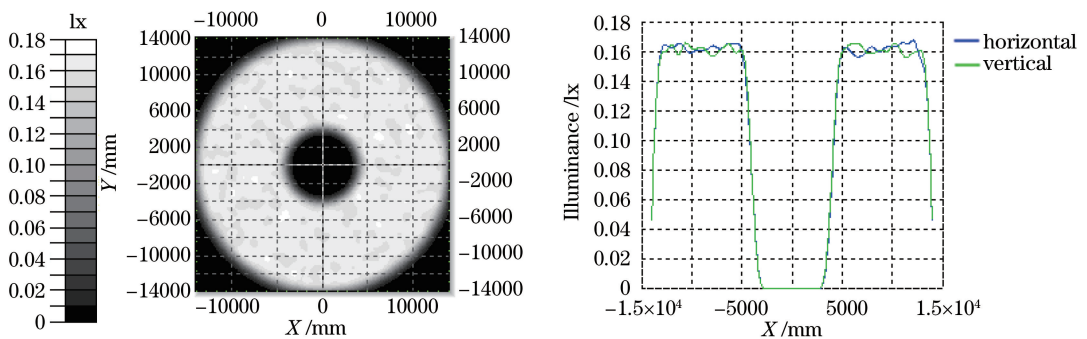


图 3 光源为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的照度图

Fig. 3 Illuminance map of $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ source

在照度曲线分布图中, 曲线中有很多不平滑的地方, 为了能够准确的了解照度均匀性, 可以用照度均匀度来描述, 这里的均匀度定义为照度最小值与平均值之比(平均值与最小值是针对目标照明环形内的值)。通过观察与计算, 得到图 3 中的照明面上的照度均匀性为 93.7%, 光能利用率为 91.1%。通过对透镜厚度和 LED 光源到照明面距离的分析可知, 它们的变化对照度均匀性和光能利用率的影响很小。下面就光源大小的变化对光照均匀性的影响进行仿真分析。

3.1 光源大小对照度均匀性的影响

假设其他参数不变, 仅仅改变光源的大小, 分析 LED 光源大小对目标照明面照度的影响, 下面是光源大小分别为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的照度分布图, 如图 4 所示。通过模拟、计算、总结, 得到如表 1 所示的照度均匀度和光能利用率。

从变化的照度图可观察到, 随着光源尺寸的增大, 光斑中间的黑圆圈面积在逐渐减小, 可见, 目标照明区域内的照度均匀性发生了变化。为了能够准确直观地观察均匀性变化, 选择一个方向, 得到的结果如表 1 所

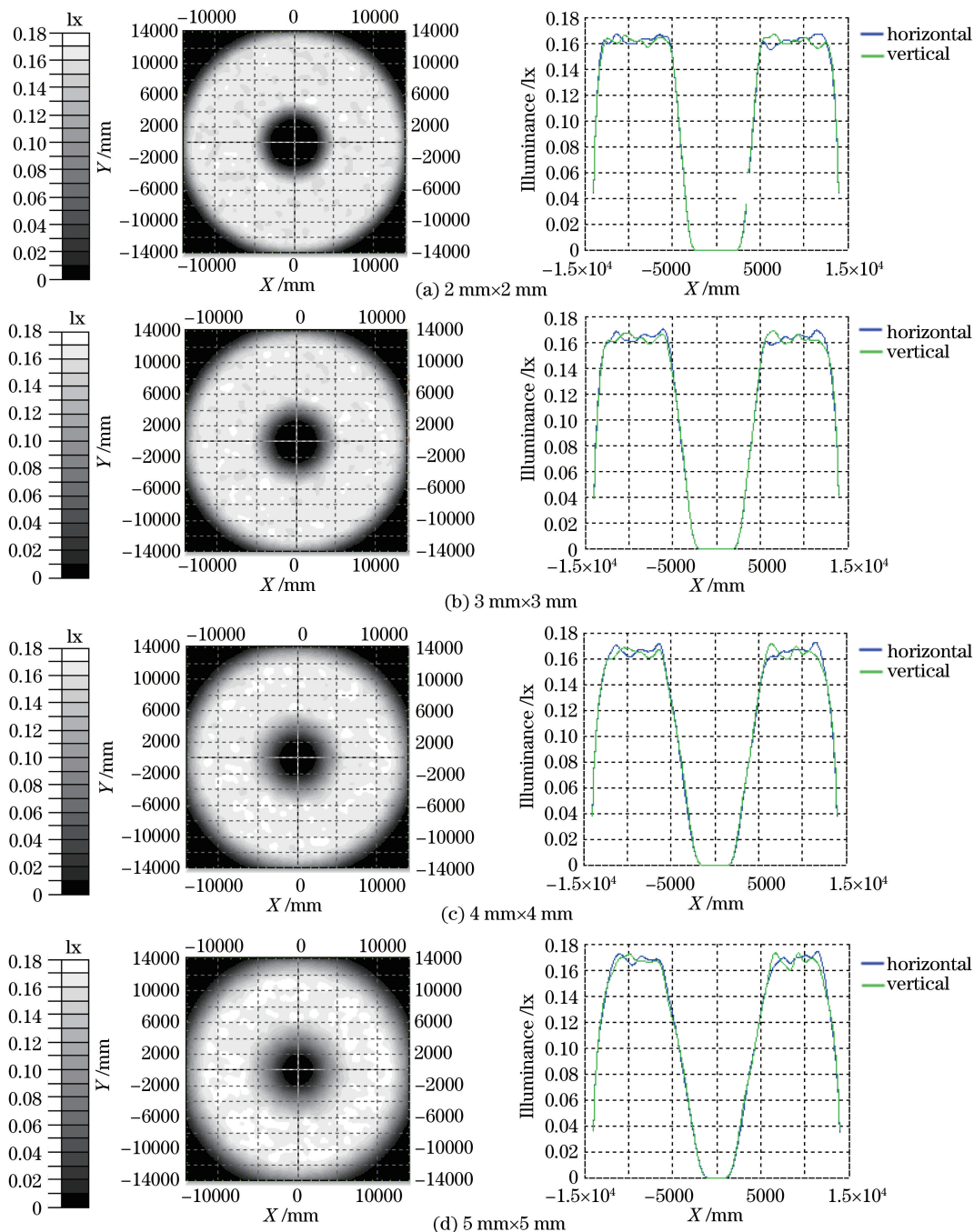


图4 透镜在不同光源尺寸下的照度分布

Fig. 4 Illuminance map of lens at different light source sizes

表1 光源尺寸对照明的影响

Table 1 Influence of size of light source on the illuminance

Size	Illumination uniformity / %	Efficiency / %
1 mm×1 mm	93.7	91.1
2 mm×2 mm	92.1	91.0
3 mm×3 mm	90.2	90.8
4 mm×1 mm	88.1	90.6
5 mm×5 mm	86.5	90.3

示。从表中的数据可以看到:当光源尺寸增大时,指定目标照明面的光能利用率变化微弱,而照度均匀性在逐渐减小,但照度均匀性仍都很高。这些光源尺寸与透镜高度尺寸比例是在1:3以内,这些光源可以看作是

小功率 LED 光源的集成,因此,设计的这种透镜对一定范围尺寸光源适用。想要得到更高的功率型透镜,可以通过增大透镜的尺寸或者透镜阵列实现,下面就透镜阵列进行简单分析。

3.2 透镜阵列分析

由于透镜阵列排列需要考虑的因素之多,因此,仅分析 3 种不同透镜阵列模式,且一些参数设置一致。设计阵列透镜时,阵列之间的间距选择尤为重要,首先,要保证单个透镜中的所有光线在穿过透镜时,只穿过一次透镜就到达照明面,即每一个透镜对应一个光源,该光源在透镜外表面发生折射之后,不照射到其他透镜。其次,还要保证透镜阵列的照明效果达到照明设计的要求。通过计算,以下 3 种阵列模式的间距 d 均设置为 36 mm,单个透镜中的光源大小设置为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,光通量为 100 lm,阵列模式为 5×7 、 6×6 矩形阵列和一个圆形阵列,图 5 为这几种阵列的模型图。通过模拟计算,结果如表 2 所示,从表中的数据可看到,3 种阵列的照明效果基本一致,目标照明面的照度均匀性和光能利用率均在 90% 以上,可见,透镜阵列所得的效果是非常好的,可以把这些阵列方案运用路灯照明中的圆环形交叉路口处。

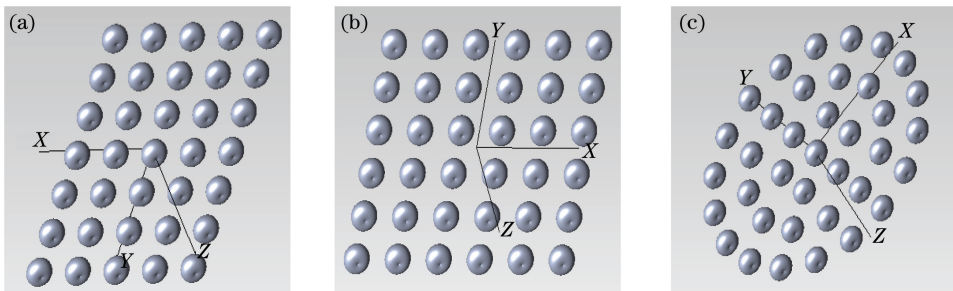


图 5 透镜模型 (a) 5×7 阵列; (b) 6×6 阵列; (c) 圆形阵列

Fig. 5 Lens model. (a) Array of 5×7 ; (b) array of 6×6 ; (c) array of circle

表 2 不同阵列对照明的影响

Table 2 Influence of different arrays on the illuminance

Lens arrays	Lens spacing d / mm	Illumination uniformity / %	Efficiency / %
Array of 5×7	36	91.5	90.8
Array of 6×6	36	91.3	90.9
Array of circle	36	91.4	90.7

4 结 论

根据非成像光学中的光学扩展量守恒理论,计算得到 LED 光源与目标照明之间的映射关系,创建初始条件,运用 Matlab 软件编程计算, Solidworks 软件建模,设计了形成环形光斑的透镜。将模型导入到 TracePro 软件进行光线追迹,模拟结果表明:对于单个透镜,随着光源尺寸的增大,目标照明面的照度均匀性在逐渐下降,光能利用率基本保持不变;当光源尺寸与透镜高度尺寸比例在 1:3 以内时,照明面的照度均匀性在 86% 以上,光能利用率在 90% 以上;对于 3 种透镜阵列的照明效果基本一致,光照均匀性和光能利用率均在 90% 以上。所设计的透镜是在 LED 光源尺寸与透镜尺寸相对范围内进行模拟,对于更高功率光源,可以通过更改透镜尺寸或者所模拟的透镜阵列去实现。所设计的透镜,均符合照明设计要求,且对于高功率 LED 光源适用,适用于道路照明中的环形交叉路口处。

参 考 文 献

- Jin Peng, Yu Chunyu, Zhou Qifeng, *et al.*. Superior application of LED to street lighting [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 51-55.
金 鹏, 喻春雨, 周奇峰, 等. LED 在道路照明中光效优势 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 51-55.
- Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong, *et al.*. Design for optical freeform reflector of LED [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 727-731.
王 洪, 张小凡, 王海宏, 等. 自由曲面 LED 路灯反射器设计 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 727-731.

- 3 Wang K, Chen F, Liu Z Y, *et al.*. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging [J]. Opt Express, 2010, 18(2): 413-425.
- 4 He Zhihua, Dong Qianmin, Wang Shaolei, *et al.*. LED freeform lens design for street uniform illumination [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2014, 25(4): 85-89.
贺志华, 董前民, 王少雷, 等. 用于道路均匀照明的 LED 自由曲面透镜设计 [J]. 照明工程学报, 2014, 25(4): 85-89.
- 5 Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. Opt Express, 2010, 18(5): 5295-5304.
- 6 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
李 林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222002.
- 7 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Danyan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022006.
刘正权, 孙耀杰, 林丹燕. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022006.
- 8 Wang K, Liu S, Chen F, *et al.*. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 105501.
- 9 Zhang Kang, Su Chengyue, Wang Weijiang. LED freeform surface lens design for uniform illumination with square spot [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2014, 25(1): 82-88.
张 康, 苏成悦, 王维江. 均匀照明方形光斑的 LED 自由自由曲面透镜设计 [J]. 照明工程学报, 2014, 25(1): 82-88.
- 10 Shan Qiusha, Zhang Guoyu, Lu Shi, *et al.*. Lagrange invariant energy transfer of solar simulator [J]. Chinese Optics, 2012, 5(6): 639-644.
单秋莎, 张国玉, 刘 石, 等. 太阳模拟器的拉赫不变量传递 [J]. 中国光学, 2012, 5(6): 639-644.
- 11 Ding Shushu, Yu Guiying, Hao Wenwen. A freeform surface lens for indoor uniform illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 042201.
丁纾姝, 余桂英, 郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 042201.