

用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计

丁纾姝 余桂英 郝雯雯

(中国计量学院测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 以非成像光学为基础,设计了一种在大发散角范围内均匀配光的大功率 LED 室内照明二次配光透镜方案。采用划分网格法建立光源 LED 和接收面的映射关系,推导透镜自由曲面面形的一般方程,采用差分法求解透镜面形方程获得面形轮廓数据,再用三维软件建立透镜模型,通过光学仿真软件对所建模型进行光线追迹。结果表明:此方案适用于 $40^\circ \sim 140^\circ$ 配光角度要求的均匀配光;仿真配光角度 120° 的照明系统,当透镜的口径与 LED 发光面直径之比大于等于 10 时,照明系统的均匀性优于 0.9,能量利用率大于 92%,且照明效果不受接收面高度的影响。该设计方法为实现大功率 LED 室内均匀照明系统的小型化和简单化提供了一种有效的途径。

关键词 光学设计;均匀照明;自由曲面;划分网格法

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.042201

A Freeform Surface Lens for Indoor Uniform Illumination

Ding Shushu Yu Guiying Hao Wenwen

(College of Metrology and Measurement, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Based on non-imaging optics, a secondary optical lens is designed for indoor illumination of high-power LED which could illuminate uniformly in a large divergence angle. The mapping of LED onto the target plane is constructed by grid partition method, based on which the general equations of freeform surfaces are derived. The surface profiles are obtained by solving the equations using difference method. Using the profile data, the lens model is established with three-dimensional (3D) software. The optical system is simulated with ray-tracing software. This lens is fit for uniform illumination with the target divergence angle between 40° and 140° . A lens with 120° divergence angle lens is designed and simulated. The results show that it can keep the uniformity above 0.9 and the efficiency above 92% when the ratio of the lens aperture to the diameter of LED emitting surface is not less than 10, and the uniformity is not effected by the distance between the LED and the target plane. This design provides an effective way for the miniaturization and simplification of the indoor illumination system of high-power LED.

Key words optical design; uniform illumination; freeform surface; grid partition method

OCIS codes 220.2945; 220.3630; 230.3670

1 引言

LED 作为第四代新型光源,在节能、环保和使用寿命等很多方面都有卓越的表现。随着 LED 光效的大幅度提升,LED 在照明方面的应用也日趋广泛,在室内和公共照明上更是有巨大的发展潜力^[1,2]。室内照明光源要求柔和、均匀、没有突出的亮点和有相当的发散角^[3]。对于目前的 LED 室内照明,均匀和大发散角是技术的关键。因此需要通过光学设计对光源光线重新分配,在能量损耗尽量小的情况下,将光均匀发散到照明面上。以往的一些设计中通过光源阵列^[4]来达到均匀照明的效果,这种方法虽然均匀度高,但是由于叠加的配光形式,在一个光源受到遮挡的情况下对均匀性的影响很大,不适于通用照明;而利用二次配光设计达成均匀照明的系统则多数以小功率的 LED 为设计对象,光源尺寸较小,且配光角度较小^[5,6],对大功率、大尺

收稿日期: 2011-11-08; **收到修改稿日期**: 2011-11-23; **网络出版日期**: 2012-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(60908039)和浙江省重大科技专项(2011C12025)资助课题。

作者简介: 丁纾姝(1987—),女,硕士,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: shuziqux@163.com

导师简介: 余桂英(1965—),女,硕士,教授,主要从事照明和测量等方面的研究。

E-mail: yuguiying11@163.com(通信联系人)

寸 LED 的配光设计相对比较欠缺。

利用非成像光学理论构建自由曲面透镜,重新分配光源能量,能有效实现均匀照明。目前常用的自由曲面设计方法主要有多参数优化法、微分方程法、划分网格法以及多表面同步设计法(SMS)。多参数优化法^[7]在已有的光学面形下,通过反复优化得到光学面形,设计周期长,效率较低。SMS 法针对扩展光源设计,可同时设计透镜的多个表面,从而控制光源发出的两个波面,变换成给定的两个输出波面^[8,9],但是这种方法模型复杂,且在得到面形数据后对数据的曲线拟合也有一定的难度。微分方程法^[10~12]通过数值求解偏微分方程的方法构造自由曲面的面形,根据光源的光辐射特性及目标面上所需的照度分布推导出关于面形的偏微分方程组,通过数值解析得到面形数据,这种方法目的性强,计算速度快,但是偏微分方程的可解性很低,限制了这种方法的应用,且不适用于扩展光源。划分网格法^[2,13]根据能量守恒原理定义光源到所需光分布的映射,利用定义的映射进行光学系统设计,这种方法可以解决复杂的照度分布问题,并通过细化网格来提高结果的精确度,而且不用进行误差校验,是一种可行的二次光学设计方法。

本文以非成像光学为基础,用划分网格的方法构造自由曲面,设计了一种适用于大功率 LED 均匀照明的二次配光透镜理论模型。根据此模型设计的透镜,其配光角度和口径大小都可以根据配光需要自由设定,配光角可调范围大,且在 LED 尺寸较大的情况下仍能保持较高的均匀性和能量利用率。在此光学系统中光线无交叉,因而系统的均匀性不受照明高度的影响,特别适用于室内环境的照明。

2 设计原理及数学模型建立

采用划分网格的方法设计自由曲面透镜,设计思路如下:首先划分网格,定义光源与接收面的一一映射关系,然后依据映射关系建立透镜的数学模型,利用差分法求解模型,得到面形的离散值及对应的法向量信息,最后导入三维(3D)软件建立透镜模型。

2.1 划分网格

根据非成像理论定义光源与接收面的映射关系,网格的划分如图 1 所示,将 LED 的出射光和接收面都划分成 N 个区域,LED 与几何中心垂轴的角为 ϕ_i 的光线对应接受面上照明半径 r_i 的圆。此映射同时也实现能量的传输, N 的大小决定了结果的精确程度。

在不考虑吸收、散射等损耗的理想情况下,能量经过光学系统其总量不发生变化^[8],因此光线自透镜出射的所有光通量 Φ_2 与光源光通量 Φ_1 恒相等(图 1):

$$\Phi_1 = \Phi_2, \quad (1)$$

假设 LED 光源呈朗伯体分布,则 Φ_1 可以表示为

$$\Phi_1 = \int I d\Omega = \pi I_0 \sin^2 \phi \Big|_0^{\phi_0} = \pi I_0 \sin^2 \phi, \quad (2)$$

式中 I_0 表示光源的最大光强。

系统要求光强均匀分布至照明区域上,因此 Φ_2 可表示为

$$\Phi_2 = \int E dA = E_0 \pi r^2, \quad (3)$$

式中 E_0 表示照明面上的平均照度。

由(1)~(3)式,得到关于光线出光角 ϕ 与照明半径 r 之间的关系

$$r(\phi) = \sqrt{(I_0/E_0)} \sin \phi. \quad (4)$$

当 LED 的出光角最大时,出射光照射至与光源中心轴夹角 δ_{\max} 的位置,因此,

$$\sqrt{I_0/E_0} = h \tan \delta_{\max}. \quad (5)$$

由(4),(5)式,得到 r 和 ϕ 的一一对应关系

$$r(\phi) = (h \tan \delta_{\max}) \sin \phi. \quad (6)$$

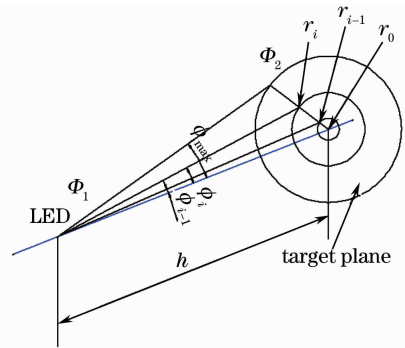


图 1 光源与接收面拓扑关系示意图

Fig. 1 Topological relation between LED and the target plane

2.2 建立面形曲线方程

透镜配光原理如图 2 所示,光源 LED 位于坐标原点 O 处,LED 出射光经透镜后发散至照明面上。与几何中心垂轴的夹角 $\phi(\phi \in [0, \phi_E])$ 的光线 I_1 进入透镜后,在自由曲面折射面的 $P(x, y)$ 点处发生折射,并沿着与垂轴夹角 δ 的 O_1 方向出射,分布至接收面上点 $S(r, h)$ 处。其中 P 点处的法矢与垂轴相交呈 η_1 角, r 是光线在接收面上的照明半径, h 是接收面至 LED 的距离。当 $\phi > \phi_E$ 时,系统通过全反射面完成配光,光线 I_2 传输至全反射面上点 $T(u, v)$ 处发生全反射,沿 O_2 出射至折射面点 $P'(x', y')$ 处,折射后沿 O_2' 方向出射,分布至接收面上 $S'(r', h)$ 处。 β 和 δ' 是 O_2 、 O_2' 与垂轴的夹角, η_2 和 η_3 是 T 和 P' 处的法矢与垂轴的夹角,由折射面形曲线的端点和全反射面边缘点决定。

2.2.1 折射曲面的计算

根据斯涅尔定律的矢量形式,在 P 点有

$$[n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 (\mathbf{O}_1 \cdot \mathbf{I}_1)]^{1/2} \mathbf{N}_1 = n_2 \mathbf{O}_1 - n_1 \mathbf{I}_1, \quad (7)$$

n_1 和 n_2 分别是 \mathbf{I}_1 和 \mathbf{O}_1 的环境介质。对于曲线,有一般方程

$$F(x, y) = 0. \quad (8)$$

根据(7),(8)式的微分形式,得到曲面上各点存在的微分关系

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{N_x}{N_y} = -\frac{n_2 O_x - n_1 I_x}{n_2 O_y - n_1 I_y}, \quad (9)$$

式中 I_x, I_y 和 O_x, O_y 分别为单位向量 \mathbf{I}_1 和 \mathbf{O}_1 在 x 轴和 y 轴的分量。透镜的内表面为球面,光线进入透镜时不发生折射,因此在 P 点有几何关系

$$\tan \phi = x/y, \phi \in [0, \pi/2). \quad (10)$$

在(9)式中, n_1 为透镜材料的介质 $n, n_2 = 1$ 。所以通过(9),(10)式可知折射面上点的微分关系为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{n \sin \phi - \sin \phi \tan[\phi - \arctan(x/y)]}{\cos \phi \tan[\phi - \arctan(x/y)] - n \cos \phi}. \quad (11)$$

2.2.2 TIR 曲面的计算

T 点处同样适用(9)式,其中 $n_1 = n_2 = n$,可得到 T 点的微分关系为

$$\frac{dv}{du} = \frac{\sin \phi - \sin \beta}{\cos \beta - \cos \phi}. \quad (12)$$

根据(6)式得到

$$\delta'(\phi) = \arctan(\sin \phi / \cos \phi_{\max}). \quad (13)$$

在 P' 点根据斯涅尔折射定律有

$$n \sin(\beta - \eta_3) = \sin(\delta' - \eta_3). \quad (14)$$

由(12),(13)式推导,(12)式中的 β 可由 ϕ 表示为

$$\beta(\phi) = \arcsin \left\{ \frac{\sin[\arctan(\sin \phi / \cos \phi_{\max}) - \eta_3]}{n} \right\} + \eta_3. \quad (15)$$

以 ϕ 为自变量,用差分法求解(6),(11)式和(12),(15)式,可分别得到点 P 和 T 的信息。

3 仿真结果及分析

用 Matlab 软件编程实现方程的求解,得到面形曲线的离散值和各点法向量值,用机械软件(犀牛)拟合出面形曲线并建立透镜模型。图 3 和图 4 为设计出的一个配光角度为 120° 的透镜的面形曲线图和模型图,此透镜的口径为 30 mm,高 6 mm。用光学追迹软件 Trace-Pro 进行光学系统的模拟仿真。

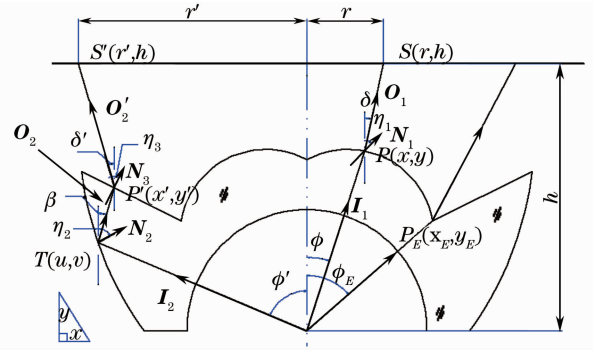


图 2 透镜配光原理图

Fig. 2 Design principles of the lens

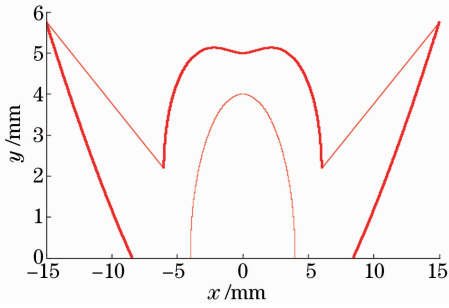


图3 透镜面形曲线图(Matlab)

Fig. 3 Curve of the lens surface (Matlab)

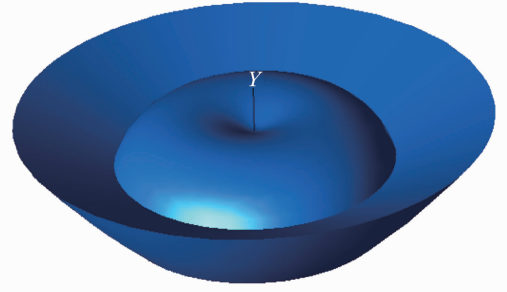


图4 透镜三维模型图

Fig. 4 3D model of the lens

3.1 照明距离影响分析

仿真配光光学系统,将光源设为点光源,仿真结果显示配光后光强曲线呈蝠翼形,均匀配光范围约 123° ,如图5所示。在距离光源1 m处设置接收面,其照度分布均匀,如图6所示。系统的均匀性 $U \approx 0.98$,能量利用率 $E \approx 92.5\%$,其余能量因透镜内部反射、吸收等原因而损耗。在距离光源不同的高度 h 处设置接收面, h 变化时接收面上的能量利用率基本不受影响,均匀性在 $0.986 \sim 0.960$ 间有细微波动,可见系统的效率基本不受接收面高度 h 的影响。

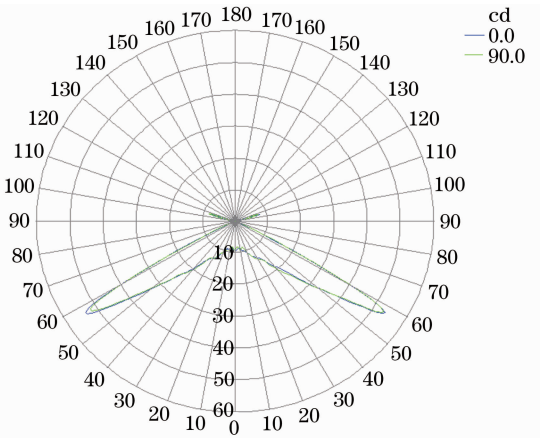


图5 点光源光学系统光强曲线

Fig. 5 Intensity far-field distribution of point-source optical system

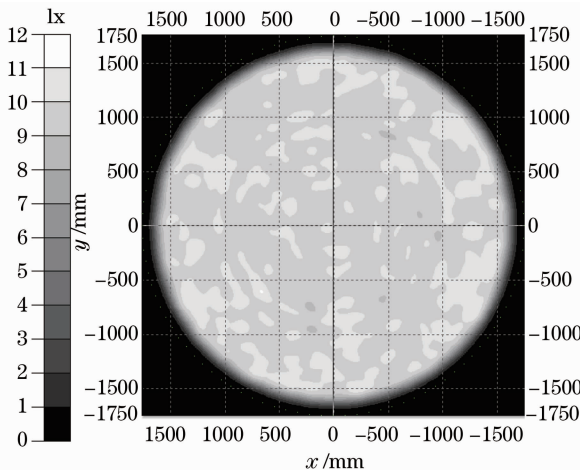


图6 距离光源1 m处照度分布

Fig. 6 Illuminance distribution diagram at 1 m distance from the light source

3.2 光源尺寸对照明效果的影响分析

根据LED的实际大小模拟不同光源尺寸的LED光学系统,分析透镜对LED的配光效果及LED尺寸对系统效果的影响。表1为LED发光面尺寸变化时,系统的效率变化:发光面增大时,光强分布和能量利用率基本不受影响,但系统均匀照明的范围缩小,在照明面上的照明均匀性下降。在此透镜的配光下,LED发光面直径小于8 mm时,都能满足室内照明均匀性0.5的要求。

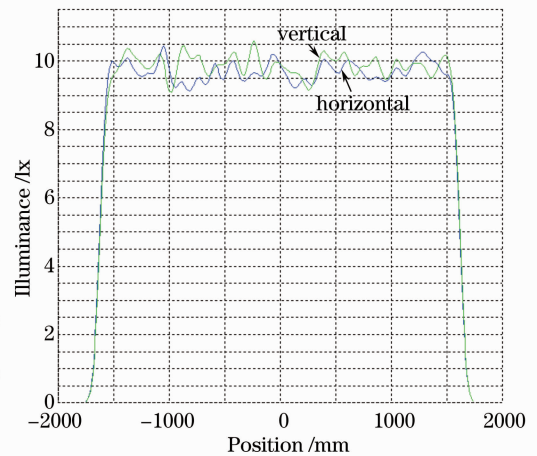


表1 光源尺寸对系统的影响
Table 1 Influence of LED size on the system

Diameter of LED d /mm	Efficiency E /%	Uniformity U	$U=0.9$ angle /($^{\circ}$)	$U=0.8$ angle /($^{\circ}$)	$U=0.7$ angle /($^{\circ}$)	$U=0.5$ angle /($^{\circ}$)
0.2	92.5	0.96	120	120	120	120
2	92.5	0.90	120	120	120	120
3	92.4	0.83	114	120	120	120
4	92.4	0.76	110	115	120	120
5	92.3	0.68	105	111	120	120
6	92.2	0.61	100	110	114	120
7	92.3	0.58	97	100	104	120
8	92.1	0.52	90	94	101	120

图7为不同光源尺寸时, $U=0.9$ 的照明范围变化曲线图,由图可见 $U=0.9$ 的发散角度范围与光源尺寸呈线性变化。图8为用照明软件DIALux仿真的一个 $5\text{ m}\times 4\text{ m}\times 2.8\text{ m}$ 办公环境的照明情况,以吸顶的方式在房间的中心线上以 0.8 m 的间隔直线排列4组光源,每组环形排列4颗光通量 1000 lm 、发光面 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的LED作为光源,通过口径 32 mm 的 120° 发散角全反射透镜配光,配光结果显示工作面的平均照度 339 lm ,照明均匀性大于 0.82 ,书桌桌面的平均照度 359 lm ,照明均匀性大于 0.95 ,完全满足国家建筑标准中的光度要求。

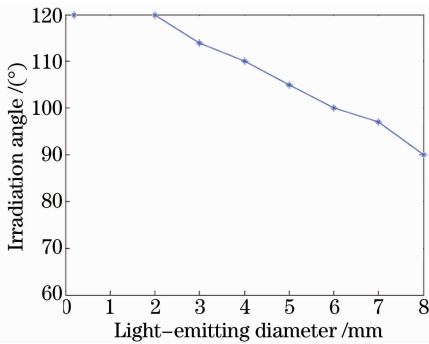


图7 系统 $U=0.9$ 的发散角与发光面大小的关系

Fig. 7 Relation between light-emitting diameter of LED and the divergence angle with $U=0.9$



图8 室内照明效果图

Fig. 8 Simulation of indoor illumination

3.3 透镜的口径对系统效果的影响

根据此方案设计不同口径的 120° 配光透镜,仿真各透镜在不同LED尺寸下的照明情况,结果如表2所示,透镜的配光均匀性 U 受到发光面直径 d 与透镜口径 D 尺寸比的影响: $d/D\leq 22.2\%$,即 $D\geq 4.5d$ 时, $U\geq 0.5$, $d/D\leq 10\%$ 时, $U\geq 0.9$ 。可见此透镜方案可以通过调整透镜的尺寸来保证系统的均匀性,对于大功率的集成LED也可以通过一个较大口径的透镜来完成配光。

表2 透镜口径与均匀配光范围的关系

Table 2 Relation between the aperture of lens and uniform illumination

Aperture of lens D /mm	Maximum d in $U=0.5$ /mm	d/D in $U=0.5$ /%	Maximum d in $U=0.9$ /mm	d/D in $U=0.9$ /%	Efficiency E /%
32	8	25.0	3.2	10.0	91.8
45	10	22.2	4.6	10.2	92.3
60	14	23.3	6.4	10.7	92.2
80	19	23.8	8	10.0	92.3

3.4 透镜的配光范围

根据本文理论设计不同配光角度的全反射透镜,分别仿真光学系统并分析,仿真结果见表3。由表可见,当透镜的配光角度在 $40^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 之间变化时,仍能保持较高的能量利用率和照明均匀性。当配光角度较

小时,由于折射配光和全反射配光的叠加不够均匀,造成接收面边缘部分的光强过强,出现明显光圈,影响了系统效率。

表3 不同配光角透镜的系统效果分析

Table 3 Results of optical systems for lenses with different divergence angles

Divergence angle /($^{\circ}$)	Efficiency on target surface /%	Efficiency /%	Uniformity
30	71.5	87.4	0.778
40	84.1	93.5	0.914
100	87.1	92.5	0.941
140	79.0	93.8	0.920
150	72.5	92.3	0.741

4 结 论

用划分网格的方法设计了一种自由曲面的均匀配光透镜方案,光源经过透镜配光后以较大的角度均匀发散,其中透镜的配光角度和透镜尺寸都可以根据需求自由设定,当配光角度在 $40^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 之间时均可达到高效的均匀照明。通过模拟仿真 120° 配光的透镜及其配光光学系统,证实这种方案可以对LED完成大发散角度的均匀配光,发散角度符合理论模型设定,且均匀性 $U>0.96$,能量利用率 $E>92\%$ 。对于尺寸较大的大功率LED,设置透镜的尺寸,使配光透镜的口径与LED发光面直径之比大于等于4.5,则光学系统均匀性 $U>0.5$;该比值大于等于10时,系统均匀性 $U>0.9$ 。

参 考 文 献

- 1 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
余桂英, 金 骥, 倪晓武 等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 2 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 963~971
罗 毅, 张贤鹏, 王 霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 963~971
- 3 L. Wang, K. Y. Luo. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(18): 3716~3723
- 4 Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3039~3043
黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的LED二次曲线阵列的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3039~3043
- 5 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 680~684
金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的LED高收光率的抛物反射器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 680~684
- 6 Zhuo Jinzhai, Wang Min, Zhuang Zhenfeng. Design of efficient matched mirrors and arrays for small angle LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 112202
卓金寨, 王 敏, 庄振锋. 小角度LED高效配光镜组及阵列设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 112202
- 7 B. A. Jacobson, R. D. Gengelbach. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source[C]. *SPIE*, 2001, **4446**: 121~128
- 8 F. Munoz, P. Benitez, O. Dross *et al.*. Simultaneous multiple surface design of compact air-gap collimators for light-emitting diodes[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(7): 1522~1530
- 9 O. Dross, R. Mohedano, P. Benitez *et al.*. Review of SMS design methods and real world applications[C]. *SPIE*, 2004, **5529**: 35~47
- 10 Wang Wei. Study on the Design Method of Uniform Illumination Based on Transmitted Free-form Surface Theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006
汪 巍. 基于透射型自由曲面理论的均匀照明设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- 11 H. Ries, J. Muschaweck. Tailored freeform optical surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(3): 590~595
- 12 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
丁 毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 540~544
- 13 B. Parkyn, D. Pelka. Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm[C]. *SPIE*, 2006, **6338**: 633808