

一种基于LED扩展光源的均匀照明设计新方法

徐超 高淑梅 苏宙平 钱维莹 刘诚

江南大学理学院, 江苏 无锡 214000

摘要 为满足LED均匀照明要求,提出了一种实现面光源下自动优化的设计方法。根据点光源近似理论建立可实现均匀照明的反射器初始结构,用COB(Chips on board)型LED面型光源替代点光源,基于TracePro中Scheme语言编写了自定义均匀照明优化函数,实现了目标面上均匀照明的自动优化设计。模拟结果表明:在光源为直径20 mm的朗伯体发光LED时,能够在300 mm处实现均匀照明,照明均匀度(平均照度与最大照度的比值)达到85%以上,光学效率在96%以上。本设计方法简单易用,具有广泛的应用价值。

关键词 光学设计; COB型LED; 自动优化; 均匀照明; 反射器

中图分类号 O432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.022203

A New Optical Design Method of Uniform Illumination Based on Extended LED Source

Xu Chao Gao Shumei Su Zhouping Qian Weiyong Liu Cheng

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China

Abstract To meet the requirement of uniform illumination, a new automatic optimization design method for LED extended source is proposed. According to point source approximation theory, a reflector for uniform illumination is established. With chips-on-board (COB) type LED source replacing point source, our approach is used to achieve uniform illumination on the target plane with optimized illumination function defined by the "scheme" language in TracePro. A Lambert emission of LED with diameter of 20 mm is used as simulation source. The result shows that our optimization method works well with uniformity (the ratio of average illumination to the maximum illumination) of 85% or more and optical coupling efficiency of 96% or more at the target plane 300 mm away from the source. This design method is easy and useful, with a wide range of applications.

Key words optical design; chips-on-board type LED; automatic optimization; uniform illumination; reflector

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 220.3620; 220.4830

1 引言

LED具有寿命长、功耗低、无污染等特点,正逐步取代传统光源,成为下一代绿色照明光源^[1-2]。尤其是COB(Chips on board)型LED,因其光色均匀、高功率等优势,越来越多地应用于道路照明、室内照明、景观照明等领域^[3-4]。LED为光强呈余弦分布的近朗伯光源,可根据不同的照明要求(均匀照明等),进行适当的光学系统设计来达到光能的合理分布,同时提高光效。目前针对点光源的光学系统设计研究比较多,相对成熟,因此市场上许多灯具厂家的配光器件,主要为基于点光源设计的光学系统,用COB型LED面光源替换点光源,稍作调整即投入使用,结果会产生照明中心出现暗斑且光效降低的问题^[5]。所以,找到一种能实现面型LED光源下均匀照明的设计方法已经成为新的研究热点。目前针对扩展光源的配光研究相对较少,主要有三大类:同步多曲面(SMS)方法^[6-7]、广义函数法^[8-9]和反馈优化算法^[4,10-11]。SMS方法能控制扩展光源的边缘光线,但对中间光线无法进行有效控制,且计算过程极为繁琐;广义函数法将扩展光源离散成多个点光源设计,但造成光学系统(多透镜组)复杂化,且光效降低;反馈优化算法多为比较目标面上的预期照度与

收稿日期: 2013-10-09; 收到修改稿日期: 2013-10-31; 网络出版日期: 2014-01-20

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012548)

作者简介: 徐超(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xuchao198910@163.com

导师简介: 高淑梅(1961—),女,博士,教授,主要从事光学成像与光谱技术方面的研究。Email: gaosm@jiangnan.edu.cn

实际照度,引入相应的反馈修正来实现设计目标,但现有的优化算法均较为复杂繁琐,不利于编程的实现。上述研究方法总体来说操作复杂,有些方法得到的结果也有待提高。

商用软件 TracePro 7.0 有自带的优化器,但需要设计者凭借较丰富的经验来使用,否则容易陷入局部最优解。而软件的二次开发环境为我们提供了良好的创新空间,可以自定义优化算法。本文结合自由曲面设计中最常用的数值解法^[12-15]和试错法^[16-18],用数值解法求出照明器件初始结构离散数据,基于 TracePro 软件的二次开发平台,用 Scheme 语言直接在 TracePro 中生成反射器实体,相比于传统的用计算机辅助设计(CAD)软件(如 Solidworks)构造实体再导入到 TracePro 的方法,过程简单准确,提高了操作效率。以均匀照明为目标自定义优化函数,结合试错法实现面光源下的自动优化设计。该方法不仅操作简单,而且优化设计的自由曲面反射器能很好地达到预期的设计目标,照明均匀度和出光效率均较高。

2 设计原理

本文的设计方法主要由三部分组成:初始结构的设计,自由曲面点的参数化和优化函数的创建。整个优化设计的流程如图 1 所示。为避免陷入局部最优解,不同于 TracePro 自带优化器选取与设定目标临近的值作为最优解,本文优化过程中,全局比较多种情况下的优化结果,从而确定最佳优化结果,使得结果更加准确可靠。为验证该优化设计方法的一般性,将给出自由曲面反射器的自动优化设计。

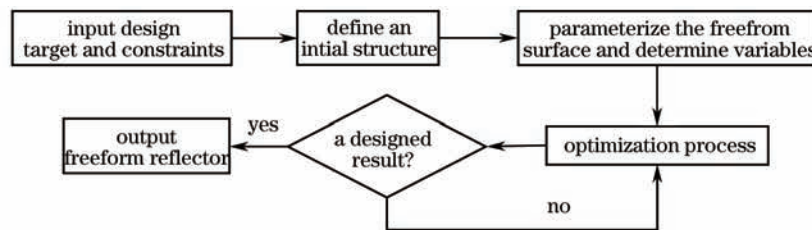


图 1 设计方法流程图

Fig.1 Flow chart of the design method

2.1 基于点光源的反射器初始结构设计

根据点光源近似理论^[11,19-20],建立反射器初始结构,如图 2 所示。图中 LED 光源位于原点 O 处,目标面与原点距离为 H 。LED 发出的光经反射器分为两部分:直接出射光和反射器反射光。直接出射光线在目标面上形成的照度随着 θ_R 的增大而减小,故将反射光中光强较大的光线补偿到靠近照明面边缘的区域,恰好弥补了直接出射光的非均匀分布,目标面上得到均匀照明^[21-22]。

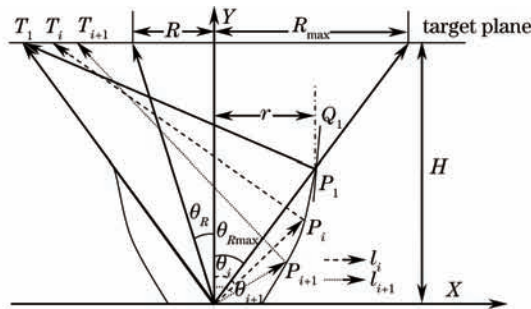


图 2 反射器初始结构光路示意图

Fig.2 Optical schematic of initial reflector

设目标面的照度为常数 E_0 ,光源在单位立体角发出的光通量等于目标屏上对应半径 R 的圆环内所接收的光通量,根据能量守恒原则有

$$\int_0^R E_0 \cdot 2\pi R dR = \int_0^{\theta_R} 2\pi I_0 \sin \theta \cos \theta d\theta + \int_0^{\pi/2} 2\pi I_0 \sin \theta \cos \theta d\theta, \quad (1)$$

式中 I_0 为 LED 的中心光强。

图 2 中目标照明面 R_{\max} 划分为 $k-1$ 等分,令光线 $l_i (i=1 \sim k)$ 经反射面上点 P_i 反射后到达目标面上点 T_i ,则

$$\theta_i = \arcsin \sqrt{1 - E_0 R_i^2 / I_0 + R_i^2 / (R_i^2 + H^2)}. \quad (2)$$

根据反射定律矢量公式^[13],可知 $P_i(X_i, Y_i, 0)$ 处法向量

$$N_i = \frac{N_{out-i} - N_{in-i}}{\sqrt{2 - 2(N_{out-i} \cdot N_{in-i})}}, \quad (3)$$

其中

$$N_{out-i} = [T_i(R_i, H, 0) - P_i(X_i, Y_i, 0)] / |[T_i(R_i, H, 0) - P_i(X_i, Y_i, 0)]|$$

$$N_{in-i} = [P_i(X_i, Y_i, 0) - O(0, 0, 0)] / |[P_i(X_i, Y_i, 0) - O(0, 0, 0)]|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k.$$

由此可得点 P_i 处切平面 Q_i ,则 $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, 0)$ 为光线 l_{i+1} 经过传播与切平面 Q_i 的交点,以此迭代出 $P_1(X_1, Y_1, 0) \sim P_k(X_k, Y_k, 0)$ 。

2.2 自由曲面点的参数化和面光源均匀照明优化函数的创建

基于所获得的 $P_1 \sim P_k$ 数据,运用TracePro软件的宏编辑器(SchemeEdit),用spline命令对反射器的初始结构进行拟合,从 $P_1 \sim P_k$ 中选取 m 个离散点 $P_1, S_1 \sim S_{m-2}$ 和 P_k, P_1 恒定不变,将 $S_1 \sim S_{m-2}$ 和 P_k 设置为动态点,设定一定的动态范围 δ 。定义图2中目标面为一个半径为 R_{max} 的圆形接受面,接收面与LED光源距离为 H 。为明确照度分布,在TracePro中编写宏语言程序,运用analysis命令读取目标面上的照度最大值 E_{max} 和照度平均值 E_{aver} 。

设定目标面均匀照明优化函数 U_{best} :

$$U_{best} = \max\left(\frac{E_{aver1}}{E_{max1}}, \frac{E_{aver2}}{E_{max2}}, \dots, \frac{E_{averN}}{E_{maxN}}\right), \quad 0 \leq U_{best} \leq 1, \quad (4)$$

式中 $N=G(m, \delta)$,即 N 由 m 和 δ 的大小决定。

在保证均匀度的同时,兼顾光效,针对点光源替换成面光源后光效降低的问题,定义光效优化函数 E_{best} :

$$E_{best} = \max\left(\frac{\Phi_{g1}}{\Phi_{s1}}, \frac{\Phi_{g2}}{\Phi_{s2}}, \dots, \frac{\Phi_{gN}}{\Phi_{sN}}\right), \quad 0 \leq E_{best} \leq 1, \quad (5)$$

式中 Φ_g 表示指定区域内的光通量, Φ_s 表示光源发出的光通量。

最终,建立综合优化评价函数 $F(U, E)_{best}$:

$$F(U, E)_{best} = \max(U_i + E_i), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

3 实例设计与模拟分析

设反射器的出口半径为 $r=50$ mm,目标面的半径为 $R_{max}=150$ mm, $H=300$ mm,光源均为朗伯体发光,反射器的表面反射率设为100%。优化时,均采用20万光线追迹模拟。

3.1 基于点光源的反射器模拟分析

当光源为点光源时,根据(1)~(3)式,用Matlab软件编程求解得到反射器面型曲线的离散数据点,在TracePro二次开发环境下拟合得到反射器初始结构,如图3所示。图4为点光源下20万光线追迹照度图,实现了均匀照明的目标。

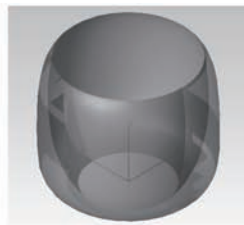


图3 反射器初始结构

Fig.3 Initial structure of the reflector

当将点光源直接换为直径为20 mm的COB型LED面光源时,得到目标面上的照度分布如图5所示。显然,照明中心出现了暗斑,中心照度不均匀,照明边界模糊。整体照明均匀性理论上不足60%,光学效率理论上仅为89%。

在面光源替代点光源的过程中,发现随着面光源尺寸的扩大,点光源系统直接运用面光源时照明效果恶化越来越明显。图6给出了照明均匀度和光效随面光源尺寸变化的趋势。

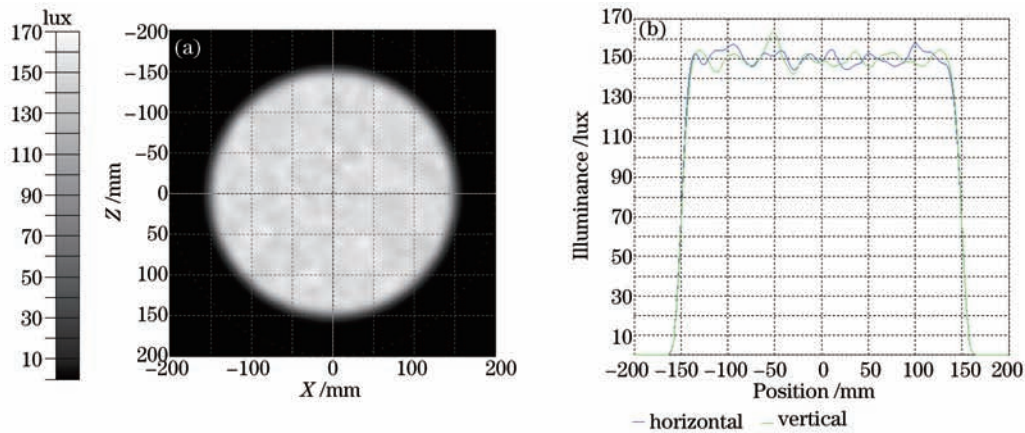


图4 点光源下的照度图

Fig.4 Illuminance with point source

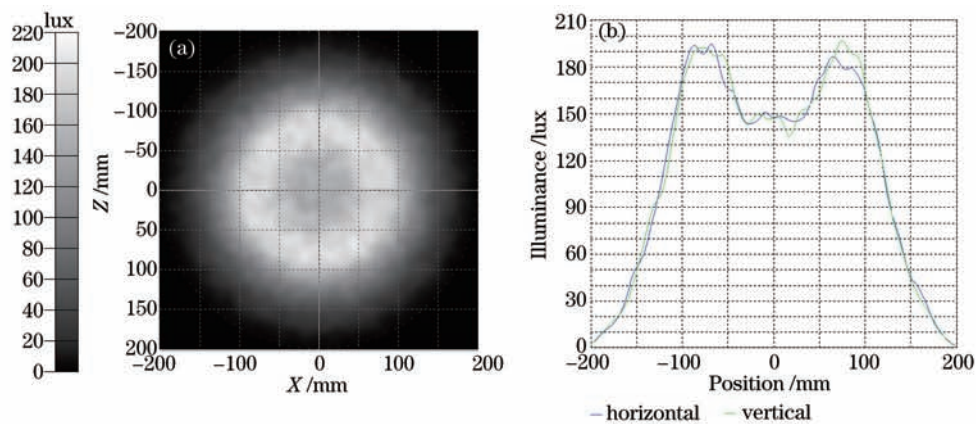


图5 面光源替代点光源优化前照度图

Fig.5 Illuminance distribution with extended source before optimization

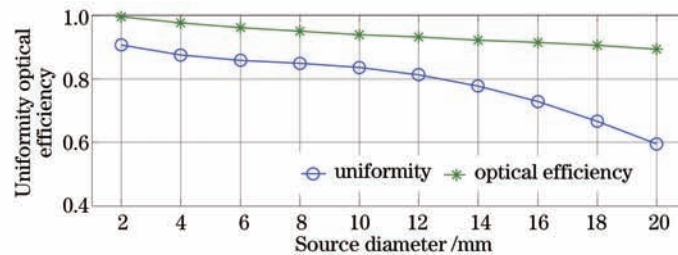


图6 光源直径对照明效果的影响

Fig.6 Influence of the source's diameter on illumination

3.2 采用自建的优化函数的模拟分析

根据(4)~(6)式,设定照明优化函数,编写相应的Scheme程序,在直径20 mm面光源条件下进行优化,结果如图7所示,可见照明中心暗斑消失且照度均匀,照明边界清晰,整体照明均匀性得到明显改善,优于85%,光学效率达到96%。对比图5和图7可知,照度均匀性和光效均有显著提升。优化后的反射器结构如图8所示。

在优化过程中,发现动态点个数 m 和动态范围 δ 的大小对结果有所影响,因此,需要选取合理的 m 和 δ 。取的动态点个数 m 越大,优化效果越好,但优化时间也相应增加。当 m 大于一定数值时,优化结果将趋于平稳,研究发现当 $m > 20$ 时,优化结果(照明均匀度和光效)基本不变。图9为光源直径20 mm,相同 δ 下,照明均匀度和光效随 m 大小的变化趋势。对于动态范围 δ ,过小时可能导致优化结果不理想;过大时使得优化时间变长。文中所用 δ 范围为1~3 mm,可根据实际设计要求对 δ 的范围进行适当调整;此外,进行多次优化时,可在优化后期适当减小 δ 。同时,为提高优化速度,优化过程中可减少每次追迹光线的数量。

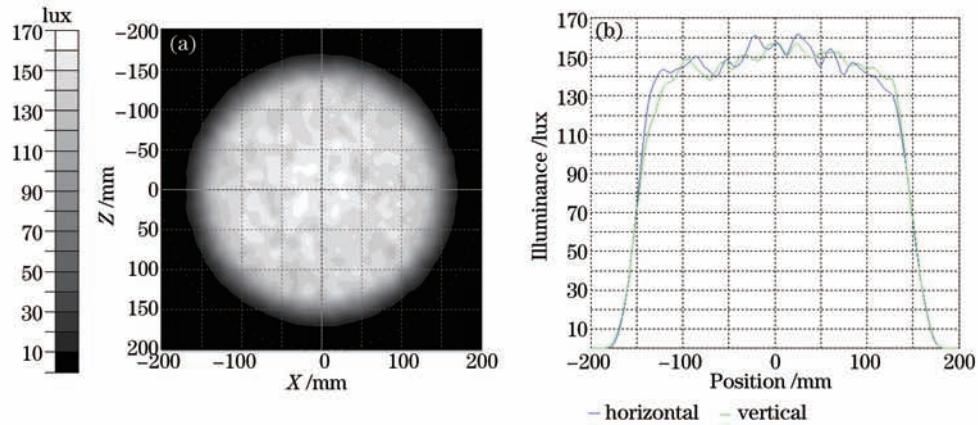


图7 面光源条件下优化设计后照度图

Fig.7 Illuminance distribution with extended source after optimization

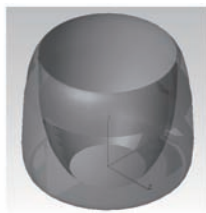
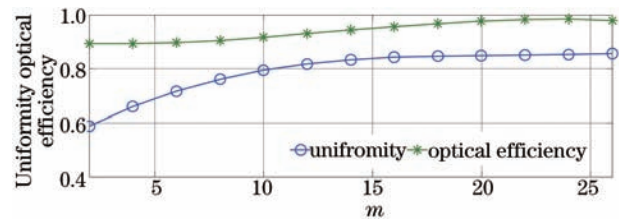


图8 优化后的反射器

Fig.8 Reflector after optimization

图9 相同 δ 下 m 对照明效果的影响Fig.9 Influence of m on illumination with the same δ

4 结 论

基于点光源近似理论设计得到的均匀照明反射器,直接运用面光源时,照明效果将会恶化,随着光源直径的增大,恶化效果越来越明显。在 TracePro 二次开发环境下,可以运用 Scheme 语言编写自定义均匀照明评价函数,实现面光源下反射器结构的自动优化。采用自建的优化函数进行了面型 LED 照明光学系统设计,照度均匀性和光效均有显著提升,照明均匀性得到明显改善,优于 85%,光学效率达到 96%。本研究结果对扩展光源下透镜的优化也有一定的参考价值。该方法应用在以 COB 型大功率 LED 为光源的灯具及室内照明等光学系统中,可以实现较高的光学效率和良好的照度均匀度,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Luo Yi, Zhang Xianpen, 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.
- 2 Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, *et al.*. Optics in solid state lighting[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900117.
罗毅, 冯泽心, 韩彦军, 等. 面向半导体照明的光学[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900117.
- 3 Kai Wang, Fei Chen, Zongyuan Liu, *et al.*. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 413-425.
- 4 Lai Wei, Chen Weimin, Liu Xianming, *et al.*. Nonlinear optimization of light intensity spatial distribution for LED road luminaires[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0122003.
赖伟, 陈伟民, 刘显明, 等. 发光二极管路灯光强空间分布的非线性优化设计[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0122003.
- 5 Wang Hong, Zhang Xiaofan, Du Naifeng, *et al.*. Reflector design method of integrated high-power LED light source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1282-1286.
王洪, 张小凡, 杜乃锋, 等. 面向大功率 LED 集成光源的反射器设计方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1282-1286.
- 6 P Benitez, J C Minano, J Blen, *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. Opt Eng, 2004, 43(7): 1489-1502.
- 7 Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. Compound parabolic-simultaneous multiple surfaces design methods for

- LED collimators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922004.
- 张 航, 梁 雪, 严金华, 等. LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922004.
- 8 J Bortz, N Shatz. Generalized functional method of nonimaging optical design[C]. SPIE, 2006, 6338: 633805.
- 9 J Bortz, N Shatz. Iterative generalized functional method of nonimaging optical design[C]. SPIE, 2007, 6670: 66700A.
- 10 F R Fournier, W J Cassarly, J P Rolland. Optimization of single reflectors for extended sources[C]. SPIE, 2008, 7103: 710301.
- 11 Yi Luo, Zexin Feng, Yanjun Han, *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.
- 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 Ding Yi. Freeform Optics Design and Its Application in the Lighting System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 15-16.
- 丁 毅. 自由曲面光学器件的设计及其在照明系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学信息学院, 2009. 15-16.
- 14 J S Schruben. Analysis of rotationally symmetric reflectors for illuminating systems[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, 64(1): 55-58.
- 15 Yang Yi, Qian Keyuan, Luo Yi, *et al.*. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics[J]. *Optical Technology*, 2007, 33(1): 110-112, 115.
- 杨 毅, 钱可元, 罗 毅, 等. 一种新型的基于非成像光学 LED 均匀照明系统[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 110-112, 115.
- 16 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.
- 17 Yi Ding, Xu Liu, Zhenrong Zheng, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 12958-12966.
- 18 John Bortz. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with all LED source and a rectangular target[C]. SPIE, 2000, 4092: 130-138.
- 19 Kudaev S, Schreiber P. Automated optimization of non-imaging optics for luminaires[C]. SPIE, 2005, 5962: 59620B.
- 20 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022203.
- 苏宙平, 阙立志, 朱焯炜, 等. 用于光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022203.
- 21 Zhang Qihui. Study on Optical Design Method of High-Power LED Lighting System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. 39-40.
- 张奇辉. 大功率 LED 照明系统光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. 39-40.
- 22 Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi, *et al.*. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 718-723.
- 闫兴涛, 杨建峰, 张国琦, 等. 基于补偿法的均匀照明自由曲面 LED 反光杯设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 718-723.