

用于 LED 平板灯面板均匀照明的自由曲面透镜设计与实现

赖丽萍, 庄其仁, 刘士伟, 胡奕彬

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计了一种 PMMA 自由曲面透镜, 用于无导光板结构的 LED 平板灯。该透镜基于自由曲面透镜的折射和全反射原理实现出射光的重新分布, 可用于均匀照明 LED 平板灯的出光面板。采用数字仿真和实验制作进行设计。仿真结果表明, 当自由曲面透镜与出光面板的距离为 5 mm、自由曲面透镜旋转为 0° 、LED 与自由曲面透镜的距离为 7 mm 时, LED 平板灯出光效率较高且整灯均匀性达 96.6%。实验结果表明, 所设计的自由曲面透镜可使无导光板结构的 LED 平板灯的面板均匀性达 95.74%, 与数字仿真近似相等。

关键词: 自由曲面透镜; LED 平板灯; 均匀照明; 数字仿真; 实验

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0561-06

Design of freeform lens for uniform illumination on panel of LED flat light

Lai Liping, Zhuang Qiren, Liu Shiwei, Hu Yibin

(College of Information Science and Engineering, Hua Qiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A design of the freeform lens made by PMMA for the LED flat light applications was presented. This lens can be used to achieve the uniform illumination of the flat target of the LED flat light, which is based on the principle of freeform surface of the refraction and total reflection principle which realize redistributing the out light. A numerical method and experimental method were used in the design. The simulation results show that when the distance between the freeform lens and the flat target is 5 mm, rotation angle is 0° , the distance of the freeform lens and the LED is 7 mm, the uniformity of the whole lamp is up to 96.6% with the high luminous efficiency. The experimental results show that under the action of freeform lens, the uniformity of the flat target of the LED flat light without the guide plate is 95.74%, which is similarly equal to the digital simulation.

Key words: freeform lens; LED flat light; uniform illumination; numerical method; practical experiment

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-12

基金项目: 福建省科技计划(2012H0029)

作者简介: 赖丽萍(1988-), 女, 硕士生, 主要从事 LED 照明方面的研究。Email: lplai78@163.com

导师简介: 庄其仁(1960-), 男, 教授, 主要从事光电传感与检测技术和半导体照明技术方面的研究。Email: qrzhuang@hqu.edu.cn

0 引言

随着半导体照明产业的兴起,LED 照明被广泛应用于生活中的各个方面,例如道路照明,室内外照明,LCD 背光源,汽车前照灯等^[1-2]。LED 平板灯以其清新、自然的灯光效果赢得广大消费者及经销商的青睐。侧入式超薄型 LED 平板灯利用导光板将光均匀分布在出光面板上,但导光板普遍存在耦合效率低,反射、吸收损耗大等问题,尤其是出光面积大的侧入式 LED 平板灯整灯出光效率较低,难以体现 LED 节能、低功耗的优势。侧入式 LED 平板灯若采用无导光板结构,则可以提高整灯出光效率,但这种结构需要解决出光面板的均匀照明问题,也就是需要设计一组侧面均匀照明的自由曲面透镜。

目前关于侧面均匀照明的自由曲面透镜的研究很少,有关研究一般基于正面均匀照明的目的,如荆雷等设计的紧凑型准直自由曲面透镜在距离准直镜 1 m 的接收屏上实现了照度均匀性 92%,光斑直径为 60 mm^[3]。刘正权等基于微分几何研究的一种自由曲面反射器,其矩形被照面横向照度均匀度达到了 90%^[4]。余桂英等设计的用于体视显微镜的自由曲面透镜在直径 90 mm 范围内实现了 90.6% 的照度均匀性^[5]。这些自由曲面透镜的研究均实现了正面高度均匀照明,但不能直接用于无导光板 LED 平板灯的侧面均匀照明。

文中研究一种可实现侧面均匀照明的自由曲面透镜,用于面板尺寸为 120 mm×240 mm 的无导光板 LED 平板灯中,实现 LED 平板灯面板均匀性 80% 以上从而达到实际平板灯的应用需求。基于 Snell 定律和能量守恒定律,将光源的光强分布与照明目标面的照度分布加以匹配,对自由曲面透镜的折射面和全反射面进行设计,并将其应用于无导光板 LED 平板灯中,最后对所设计的模型进行模拟仿真和实验验证。文中设计的自由曲面透镜拓展了 LED 均匀照明的应用领域^[6-8]。

1 设计方法

自由曲面透镜应用于 LED 平板灯的原理如图 1 所示。根据目标平面照明区域(平板灯出光面)的光照分布,让近轴光线通过折射面(图中曲线 1)时,产

生近乎平行平板灯出光面的光线以照射远离自由曲面透镜的区域,而全反射面(图中曲线 2)出射的离轴光线则均匀分布在近邻自由曲面透镜的平板灯出光面上,保证在一定的距离范围内平板灯远近出光面亮度均匀。利用 MATLAB 编程求得曲线 1、曲线 2 上一系列的点,然后对这些点进行曲线拟合,并导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合并旋转得到自由曲面透镜实体。

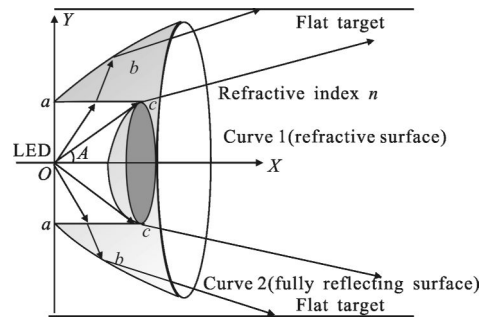


图 1 自由曲面透镜应用于 LED 平板灯的原理图

Fig.1 Schematic diagram of LED flat light with freeform lens

根据边缘光线原理^[9-12],目标平面上任意一点的能量由边缘光线决定,所以曲线 1 和曲线 2 的形状由光线的分布情况决定。

将 LED 光源看作朗伯光型,设其光强分布由发光角度的余弦方程 $I(\alpha)=I_0\cos\alpha$ 决定^[13-16]。对 LED 出射光线按照极角 A_i 的度数做一定数目的区域分割(如图 2),将目标面对应分成相同数目的区域,这些区域的面积大小、比例取决于各区域光线的光通量 ϕ_i 之比。 ϕ_i 如公式(1)所示:

$$\phi_i = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{A_i}^{A_{i+1}} I(\alpha)\sin\alpha da \quad (1)$$

由此所有光线能量(即光通量)和目标面的几何区域建立一一对应关系,目标面上的照度大小等于投射到该区域的光通量除以该区域的面积,设为常数,从而保证光线均匀分布在目标面^[17-18]。将目标面在 x 方向均分为 M 等份,每一份宽为 W_i :

$$W_i = W = \frac{a}{M} (i=0, 1, \dots, M) \quad (2)$$

这样每一个 W_i 分别对应极角 A_i ,同时对应曲线 1 和曲线 2 上的一点 P_i ,如图 2 所示。

用 MATLAB 编程求解得到各个极角 A_i ,各个极角 A_i 和目标点 T_i 确定后,容易根据折射定律和

全反射定律求出曲线 1 和曲线 2 上的每一点,将全部 P_i 点连起来就能得到自由曲面透镜横截面上的曲线 1 和曲线 2。

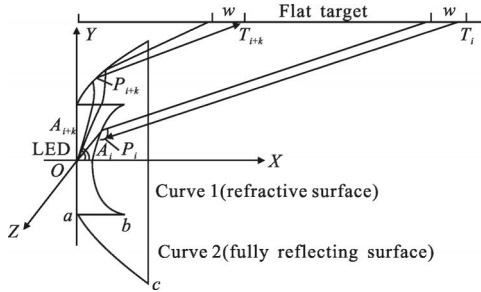


图 2 自由曲面透镜设计原理示意图

Fig.2 Diagram of design principle of freeform lens

2 自由曲面透镜结构设计与分析

根据上述设计方法,采用最大发散半角为 90° 的 LED 朗伯光源,得到了曲线 1 和曲线 2,建立自由曲面透镜仿真模型如图 3 所示。光源射出的光线根据发散半角 φ 被分为两部分: $0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ 和 $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ 。在 $0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$,光源射出的光线通过 C1.1 的折射产生近乎平行平板灯出光面的光线。在 $45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$,光线首先经过 C2.1 折射后再由 C2.2 产生全内反射,让光照射到靠近自由曲面透镜区域的 LED 平板灯的上下两个面板。

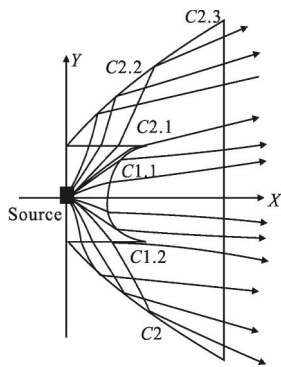
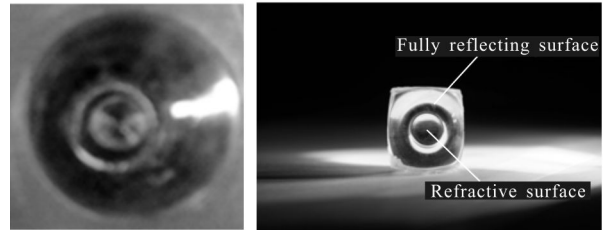


图 3 自由曲面透镜仿真模型

Fig.3 Simulation model of freeform lens

光线 0° 入射时,中心部分光线可能出现平行 x 轴射出,这样光线就无法到达 LED 上下两个出光面板,导致 LED 光利用率有一定损耗,因此需要对曲线 C1.1 进行优化。通过软件模拟微调 C1.1 的倾斜角度,使在 $0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ 范围的全部光线都落在 LED 平板灯的出光面板上,并使远离自由曲面透镜区域

的面板照度尽量均匀。将优化后的自由曲面透镜结构三维模型制作成模具,如图 4(a)所示,采用热压成型后的亚克力(PMMA)自由曲面透镜如图 4(b)所示。



(a) 模具模型

(b) 热压成型后实物

(a) Mold model

(b) Hot press-molding material

图 4 自由曲面透镜实物图

Fig.4 Appearance of freeform lens

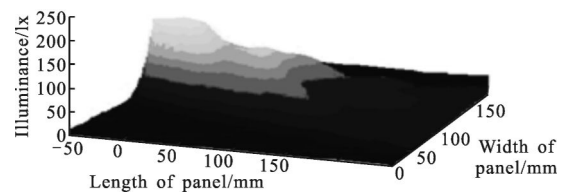
自由曲面透镜理论设计参数值与实物实际测量值对比如表 1 所示。

表 1 自由曲面透镜理论参数设计值与实际参数测量值对比表

Tab.1 Design theoretical parameters of freeform lens comparing with practical one

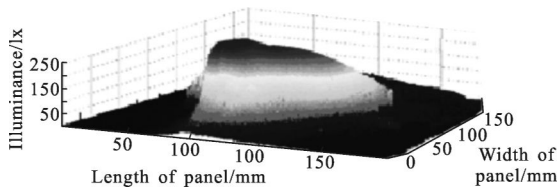
Freeform-lens	Maximum radius of refraction-surface /mm	Radius of outlet/mm	Thickness of projector /mm	Concave depth of refraction-surface /mm
Theoretical parameters	4	10	6	3.6
Practical parameters	3.95	9.9	6.2	3.5

采用光线追迹软件模拟仿真单颗自由曲面透镜,采用光通量为 1.4 lm 的 LED 贴片灯,得到侧面照明能量分布图如图 5(a)所示,与制作好的 PMMA 自由曲面透镜的侧面照度分布图(图 5(b))进行对比,可以看到在 x 方向 150 mm 范围内光能量分布比较平坦,并且模拟结果与实际测量结果吻合较好。



(a) 理论仿真

(a) Theoretical simulation



(b) 实际测试结果

(b) Result of practice test

图 5 单个自由曲面透镜实验

Fig.5 Test result of one freeform lens

3 自由曲面透镜应用于平板灯仿真与实验

3.1 自由曲面透镜安装位置的影响

设计选取 120 mm×240 mm 大小窗格的平板灯进行均匀照明仿真,16 颗 1 mm×1 mm 的 LED 芯片分居两侧作为平板灯光源,光强呈余弦分布,每两颗 LED 间距 20 mm,每颗 LED 灯珠光通量取 1.4 lm。自由曲面透镜材料采用便于注塑成型的树脂材料 PMMA,折射率 $n=1.49(\lambda=0.546\ 1\ \mu\text{m})$ 。在每颗 LED 前均放置设计好的自由曲面透镜,LED 平板灯的仿真建模如图 6 所示。在 TracePro 软件中对其进行光线追迹。

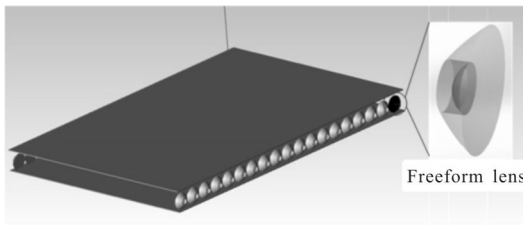


图 6 LED 平板灯仿真建模

Fig.6 Simulating model of LED flat light

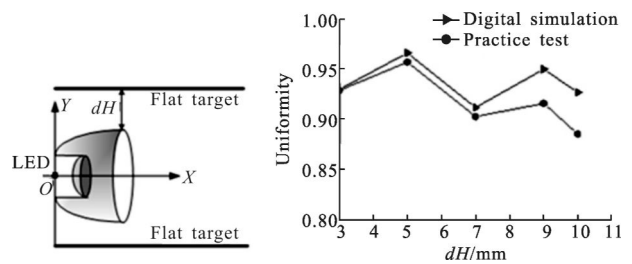
由图 7 所示的理论仿真结果图可知,出光面与自由曲面透镜距离 dH ,自由曲面旋转角度 θ ,LED 灯条与自由曲面透镜距离 dL 参数变化对无导光板 LED 平板灯的均匀性会产生影响。下面对自由曲面透镜位置参数进行数字仿真和实验测试。以 LED 平板灯左侧的灯条置于 z 轴上(过原点)。

由图 7(a)可知,在数字仿真中,出光面和自由曲面透镜距离变化时,LED 平板灯的均匀性均在 91% 以上,且实际测量结果与模拟仿真结果均表明出光面和自由曲面透镜最佳距离为 5 mm,此时平板灯均匀性达 96.6%。由于实验过程中存在的误差,导致实

际测试结果与模拟仿真结果有一定差别,但在允许误差范围内,出光面与自由曲面透镜的最佳距离为 5 mm 得到验证。

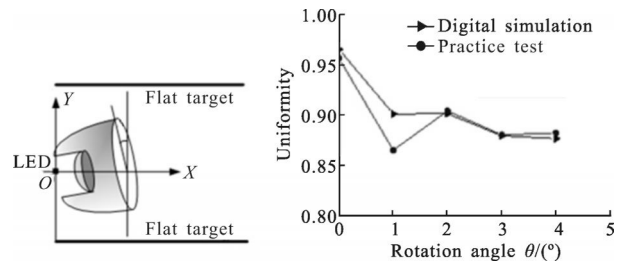
图 7(b)自由曲面透镜单侧旋转角度增加,LED 平板灯均匀性随之变小,但不管旋转任何角度,实际测试结果与模拟仿真结果都表明:旋转角度为 0° 时,LED 平板灯的均匀性比其旋转一定角度所对应的均匀性都高,因此将自由曲面透镜竖直放于 LED 灯条前面。

图 7(c)数字仿真结果表明,LED 灯条与自由曲面透镜的距离设为 7 mm 时均匀性最佳,实际测试出



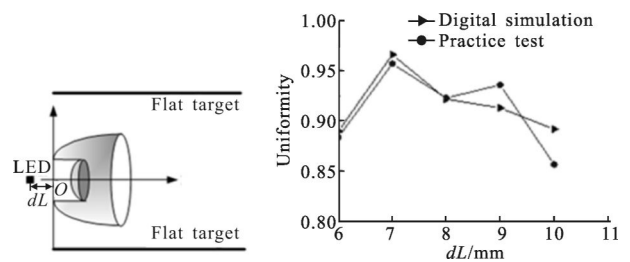
(a) dH 仿真

(a) dH simulation



(b) θ 仿真

(b) θ simulation



(c) dL 仿真

(c) dL simulation

图 7 自由曲面透镜位置参数数字仿真与实际测试结果

Fig.7 Digital simulation and practice test result of the location of freeform lens

来的结果与模拟仿真结果基本吻合。9 mm 所对应的实际测量均匀性为 93.6%,高于模拟仿真的结果 91.3%,10 mm 所对应的实际测量均匀性为 85.7%,

较模拟仿真结果 89.2% 低了些, 实验过程中存在的误差是不可避免的, 但总体实验结果表明: LED 灯条与自由曲面透镜的最佳距离为 7 mm 时均匀性最好。

因此将出光面和自由曲面透镜之间的距离设为 5 mm, 自由曲面透镜单侧旋转角度设为 0°, LED 灯条与透镜距离设为 7 mm。

3.2 LED 平板灯照度均匀性实验

目标面照明区域的实际照度均匀度, 采用九宫格测量法对其照度值进行测量与计算, 将整个接收面平均分成九个区域, 再分别取九个区域中的几何中心点的数值。均匀度为^[9]:

$$\eta = \left(\frac{E_{\min}}{E_{\text{average}}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_{\min} 为九个数值中的最小值; E_{average} 为九个数值的平均值。

无导光板 LED 平板灯在不放自由曲面透镜的情况下, 根据九宫格法测量九点的结果如图 8 所示, 最大照度值(位于出光面板两端距离灯条近的区域) 930 lx 与最小照度值(出光面板中间区域) 310 lx 之间的差值达 620 lx, 整灯的均匀性 $\eta = \frac{310}{655.56} = 47.33\%$, 出光面板呈现两端极亮、中间暗的趋势。现将自由曲面透镜应用到 LED 平板灯中, 根据上述仿真结果对相应参数进行设置。在自由曲面透镜的作用下, 九宫格法测量九点的最大照度值与最小照度值的差值为 50 lx, 平均照度值为 471 lx, 整灯的均匀性 $\eta = \frac{450}{471} = 95.74\%$ 。

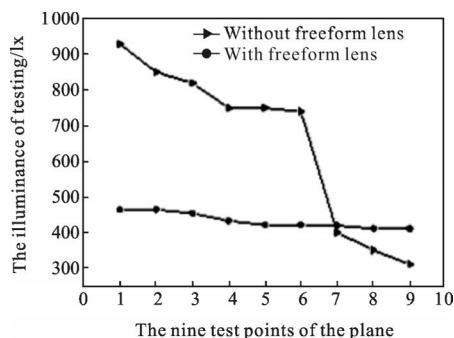
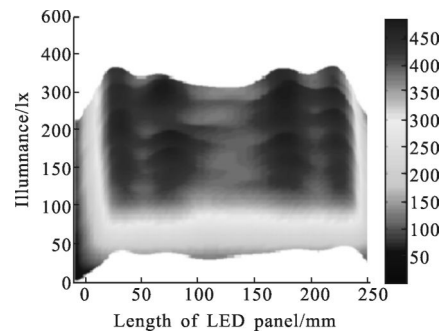


图 8 LED 平板灯有无自由曲面透镜作用结果测试
Fig.8 Practice test result of the location of freeform lens

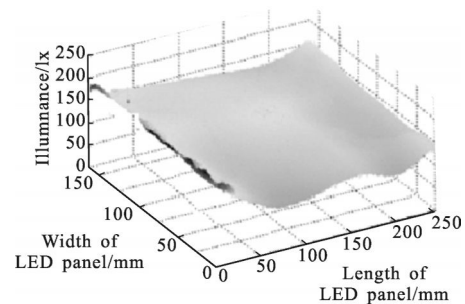
理论仿真结果: 在窗格大小为 120 mm×240 mm 的 LED 平板灯照明区域内理论上均匀性为 96.6%, 实际测得的无导光板 LED 平板灯在自由曲面透镜

的作用下均匀性为 95.74%。实际测试的结果与仿真结果整体上分布趋势一致。如下图 9 所示, 距离灯条较近的两端较亮的光被导到了出光面板中间暗区部分, LED 灯条出射光在整个出光面板上呈均匀分布。而实际测量与数字仿真存在的均匀性差异由以下几个方面造成: 透镜所放置的位置与理论上设定的位置存在一定偏差, 自由曲面透镜对光存在损耗, 出光面板存在光损, 照度计存在仪器精度差和实际读取数据误差。综合这些因素, 实际测出的均匀性与数字仿真计算所得的均匀性存在的误差仅为 0.86%, 不到 1%, 在允许误差范围内, 因此可以认为, 所设计的自由曲面透镜能实现对无导光板 LED 平板灯高均匀性照明, 且照明效果较佳。



(a) 理论仿真

(a) Theoretical simulation



(b) 实际测试结果

(b) Result of practice test

图 9 自由曲面透镜应用于 LED 平板灯中实验

Fig.9 Test result of LED flat light with freeform lens

4 结 论

基于 Snell 定律和能量守恒定律, 通过对自由曲面透镜的折射面和全反射面的光线分析, 对其自由曲面进行设计, 运用 MATLAB 工具编程求出自由曲面透镜表面上的离散点, 再导入到 SolidWorks 软件

中对其进行曲线拟合并旋转得到 3D 模型,最后通过 TracePro 软件对设计模型进行光线追迹模拟。实验结果与数字仿真均表明:当自由曲面透镜与出光面板的距离为 5 mm、自由曲面透镜旋转为 0°、LED 与自由曲面透镜的距离为 7 mm 时,LED 平板灯整灯均匀性达到最佳。数字仿真结果表明,在自由曲面透镜的作用下,无导光板结构的 LED 平板灯在面积 120 mm×240 mm 的面板均匀性达 96.6%,实际测试结果为 95.74%,实验测量结果与模拟结果基本吻合,说明该自由曲面透镜的设计可以实现预期要求,且其制作简单,易于加工,对于路灯照明或 LED 平板灯和 LED 灯箱等具有普遍应用价值。

参考文献:

- [1] Luo Jianzhong, Chen Zhe, Zhang Yonglin, et al. Design and simulation analysis of scattering netted dots on edge-lighting flat light guide plate [J]. *Chinese J Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(3): 206–213. (in Chinese)
- [2] Lu Jianing, Yu Jie, Tong Yuozhen, et al. Secondary optical design for light emitting diodes lens with wide range and high uniformity illumination [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(3): 334–337. (in Chinese)
- [3] Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, et al. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222001. (in Chinese)
- [4] Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022006. (in Chinese)
- [5] Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on tendue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2297–2301. (in Chinese)
- [6] Zheng Z R, Hao X, Liu X. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(35): 6627–6634.
- [7] Domjan L, Kocsanyi L, Richter P, et al. Stripe illuminator based on LED array and parabolic mirror for active triangulation sensors used on mobile robots [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(11): 2867–2875.
- [8] Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30 (10): 3039–3043. (in Chinese)
- [9] Moreno I, Avendano-Alejo M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10): 2265–2272.
- [10] Wu R, Li H, Zheng Z, et al. Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(5): 725–732.
- [11] Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua, et al. Illuminative uniformity design of a LED illumination system [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 74–76. (in Chinese)
- [12] Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 718–723. (in Chinese)
- [13] Li Cheng, Li Nong. The research of nonimaging optics in LED lighting design [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, 22(5): 90–94. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] Arecchi A V, Messadi T, Koshel R J. Field Guide to Illumination [M]. US: SPIE Press, 2007.
- [17] Yan Jie, Ye Bing. The method of lens design for LED uniform illumination [J]. *Advanced Display*, 2012, 23 (2): 38–42. (in Chinese)
- [18] Ries H, Rabl A. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *Opt Soc Am A: Optics Image Science and Vision*, 1994, 11 (10): 2627–2632.
- [19] Wang Yao, Liu Hua, Jing Lei, et al. Light distribution optimization of LED luminaries for road lighting [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1463–1468. (in Chinese)