

可变视场角 LED 照明光学系统设计

辛迪^{1,2} 刘华^{1*} 卢振武¹ 吴宏圣¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了满足在某些照明场合下随时改变光束视场角以及能量密度分布的实际需要, 提出一种可变视场角 LED 照明光学系统的设计方法。针对传统可变视角照明光学系统的不足, 在全反射式透镜结构的基础上, 依据出射光束准直设计透射面, 依据远场目标面照度均匀的特定光强分布形式设计全反射面。当 LED 的位置在规定范围内连续变化时, 出射光束的视场角以及能量密度分布亦随之变化。设计了一种视场角变化范围为 $8^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的新型全反射式透镜, 模拟结果表明, 相比于传统结构, 系统的平均光能利用率提高约 13%, 目标面辐照度平均均匀度提高约 17%, 体积约减小为传统结构的 1/5。

关键词 光学设计; 全反射式透镜; 非成像光学; 发光二极管; 照明设计

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0522003

Optical Design of the LED Illumination System with Adjustable View Angle

Xin Di^{1,2} Liu Hua¹ Lu Zhenwu¹ Wu Hongsheng¹

(¹ Opto-Electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to satisfy the practical requirements that the view angle and the energy density distribution of the light beam should be adjustable in some specific lighting applications, an effective method to design LED illumination system with adjustable view angle is proposed. Considering the shortage of the traditional structure, a novel total internal reflection (TIR) lens is designed. The refractive surface is designed according to that the output light rays are parallel to the light axis. The TIR surface is designed according to that the total output light rays can realize the uniform illuminance on the remote target plane. A polycarb (PC) TIR lens with the view angle from 8° to 20° is designed as an example with this method. The simulation results show that, compared with the traditional structure, the average optical efficiency is increased by 13% and the average irradiance uniformity is increased by 17%. The volume of the novel TIR lens is decreased to about 1/5 of that of the traditional structure.

Key words optical design; total internal reflection lens; non-imaging optics; LED; illumination design

OCIS codes 220.4298; 230.3670; 220.2945

1 引言

如今, LED 由于其寿命长、能耗低等优势在各个领域得到了广泛的应用, 如道路照明、投影机以及室内照明等^[1-4]。在许多应用场合中, 被照明的目

标面与光源的距离以及光束的视场角都不是固定不变的, 如应用于夜间监控系统的红外照明设备, 要求能够根据红外摄像机的变焦范围改变自身的视场角以及能量密度分布, 使其照射范围覆盖整个监控区

收稿日期: 2012-08-03; 收到修改稿日期: 2012-10-17

基金项目: 中国科学院创新项目(Y10132N110)资助课题。

作者简介: 辛迪(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事非成像光学设计方面的研究。E-mail: cindy2178@163.com

导师简介: 卢振武(1955—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事衍射光学、光学系统设计、非成像光学和光学检测等方面的研究。

E-mail: luzhenwu55@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: liuhua_rain@yahoo.com.cn

域。若红外灯的视场角过大,会造成光能浪费,反之则会产生手电筒效应,影响照明效果。针对这种应用要求,需要设计可变视场角的 LED 照明光学系统。

传统的可变视场角的照明光学系统多采用两片或三片透镜的形式进行配光^[5,6],这种形式存在以下几点问题。大多数的红外线发射二极管其半视场角都在 $\pm 60^\circ$ 左右,类似朗伯分布。采用多透镜形式不可避免地使大角度光束无法收集利用,造成了光能的浪费。由于透镜个数往往多于 1 个,导致系统体积较大。传统透镜结构的设计自由度较低,针对某一种或者两种模式设计得到的结构仅在该模式下效果较好,偏离后其光束均匀性则明显下降。

针对这些问题,本文采用一种新型的全反射式(TIR)透镜结构取代传统结构实现视场角可变,依据光束准直模式与视场角最大模式对光强分布的不同要求,基于分离变量的非成像光学系统设计理论^[7,8]分别设计其透射面与全反射面。由于新型全反射式透镜的透射面与全反射面都采用自由曲面的形式,具有很高的设计自由度,因此能够更好地兼顾各个视场,使整个视场角变化过程都保持较高的光能利用率和光束均匀性,且整体结构紧凑,便于装调。

2 设计方法

图 1 为新型全反射式透镜的 2D 结构。黑色矩形表示 LED。AB、BC、CD 以及 EF 为直线,DE 和 FG 为自由曲线。CD 为透镜底座,长度记为 t 。P₁P₂

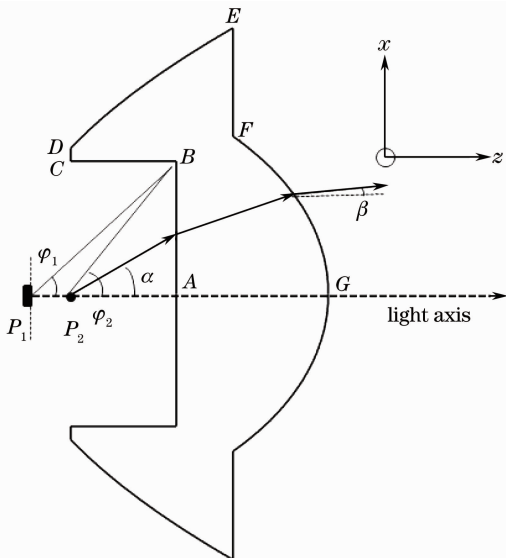


图 1 全反射式透镜 2D 结构

Fig. 1 2D structure of the TIR lens

表示视场角变化过程中 LED 的移动范围,长度记为 l 。当 LED 位于 P₁ 时,光学系统处于准直模式,当 LED 位于 P₂ 时,光学系统处于视场角最大模式。 α 表示 LED 出射光线与光轴的夹角。 φ_1 表示 P₁B 与光轴的夹角,即准直模式下透射面与全反射面所分配光束角度的临界值。 φ_2 表示 P₂B 与光轴的夹角,即视场角最大模式下透射面与全反射面所分配光束角度的临界值。依据 LED 位于位置 P₁ 时光束准直出射设计透射面,依据 LED 位于位置 P₂ 时总出射光束实现远场目标面照度均匀设计全反射面。在设计过程中,将 LED 视为理想点光源。

2.1 透射面设计

无论是透射面的设计还是全反射面的设计,其核心步骤都要依据特定的光强分布要求,建立相应的人射光线与出射光线的能量映射关系。对于透射面而言,要求当 LED 位于位置 P₁ 时, $0 \leq \alpha \leq \varphi_1$ 的光线经 AB、FG 面透射后平行于光轴射出,由此可依据文献^[9,10]中所阐述的面形生成原理与计算方法计算出透射面的面形结构。

2.2 全反射面设计

LED 设为理想朗伯体,其归一化光强分布与相应的累积光通量分布为

$$I(\alpha) = \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\phi_s(\alpha) = \int I(\alpha) d\Omega = \pi \sin^2 \alpha. \quad (2)$$

入射累积光通量由两部分组成:经透射面出射的能量分布 $\phi_{\text{refract}}(\alpha_r)$ 与经全反射面出射的能量分布 $\phi_{\text{TIR}}(\alpha_{\text{TIR}})$,其中 $0 \leq \alpha_r \leq \varphi_2$, $\varphi_2 < \alpha_{\text{TIR}} \leq \pi/2$ 。如图 1 所示,P₁A 的长度记为 h ,AB 的长度记为 d ,则当 LED 位于位置 P₂ 时,透射面与全反射面所分配角度的临界值 φ_2 为

$$\varphi_2 = \arctan[d/(h-l)]. \quad (3)$$

则两部分能量分布可分别表示为

$$\phi_{\text{refract}}(\alpha_r) = \pi \sin^2 \alpha_r, \quad \alpha_r \in [0, \varphi_2] \quad (4)$$

$$\phi_{\text{TIR}}(\alpha_{\text{TIR}}) = \pi(\sin^2 \alpha_{\text{TIR}} - \sin^2 \varphi_2), \quad \alpha_{\text{TIR}} \in (\varphi_2, \pi/2] \quad (5)$$

由于此时透射面的面形结构已经得出,因而对于取值范围内的任意一个 α_r 值都可以依据斯涅耳定律求得相应的出射光线。出射光线与光轴的夹角用 β 表示。

能够实现远场目标面照度均匀的光强分布形式为^[11]

$$I(\beta) = I_0 / \cos^3 \beta. \quad (6)$$

由(6)式积分可得到理想的出射累积光通量分布为

$$\phi_i(\beta) = I_0 \pi (1/\cos^2 \beta - 1), \quad \beta \in [0, \beta_{\max}] \quad (7)$$

归一化后, $I_0 = 1/(1/\cos^2 \beta_{\max} - 1)$, β_{\max} 表示 β 的最大值。透射部分能量与全反射部分能量相互配合, 共同实现如(7)式所示的理想的出射能量分布形式, 即

$$\phi_t(\beta) = \phi_{\text{refract}}(\alpha_r) + \phi_{\text{TIR}}(\alpha_{\text{TIR}}). \quad (8)$$

将(4)、(5)、(7)式分别代入(8)式, 可得

$$\alpha_{\text{TIR}} = \arcsin[\sqrt{I_0(1/\cos^2 \beta - 1) - (\sin^2 \alpha_r - \sin^2 \varphi_2)}], \quad (9)$$

(9)式表示 α_{TIR} 与 β 的一一对应关系。利用(9)式, 结合文献[9,10]的面形构造方法, 即可计算出全反射面面形。

至此完成了初始结构的建立, 由于在设计过程中将LED视为理想点光源, 而实际的LED是具有有一定大小的扩展光源, 因而在光学仿真软件中进行模拟时必然导致模拟结果与理想结果的偏离。因此, 需要引入反馈过程对初始结构进行优化。由扩展光源导致的透射部分的光型偏离并不严重, 在可以接受的范围之内, 简单起见, 只对全反射面进行优化。记第 i 次反馈优化后的光强分布为 $I_i(\beta)$, 积分后得到相应的累积光通量分布为 $\phi_i(\beta)$ 。目标光强分布为 $I_t(\beta)$, 相应的累积光通量分布为 $\phi_t(\beta)$ 。修正因子 ε_i 表示为累积光通量的目标分布与实际分布之比:

$$\varepsilon_i = \phi_t(\beta) / \phi_i(\beta). \quad (10)$$

利用修正因子对目标累积光通量进行修正后, 得到入射光线与出射光线的第 $i+1$ 组对应关系, 表示为

$$\alpha_{\text{TIR}, i+1} = \arcsin[\sqrt{\varepsilon_i I_0 (1/\cos^2 \beta - 1) - (\sin^2 \alpha_r - \sin^2 \varphi_2)}], \quad (11)$$

由此计算得到新的透镜结构, 再用仿真软件进行模拟, 重复上述过程, 直到模拟结果符合要求为止。

3 系统模拟仿真

依据上述方法设计一种视场角变化范围为 $8^\circ \sim 20^\circ$ 的新型全反射式透镜, 主要技术参量如表1所示。

表1 光学设计参量

Table 1 Parameters of optical design

Parameter	Value
Lens material	Polycarb
LED type	OSRAM SFH 4235
Angle φ_1 (see Fig. 1) / ($^\circ$)	40
Required maximum output ray angle β_{\max} / ($^\circ$)	20
$P_1 G$ (see Fig. 1) / mm	13.5
$P_1 A$ (see Fig. 1) / mm	5.5
l (see Fig. 1) / mm	1.5
t (see Fig. 1) / mm	2

设计完成后利用UG软件进行3D结构建模, 如图2所示。将透镜导入照明设计软件Tracepro中进行光学模拟, 考虑菲涅耳损失以及材料吸收。图3表示准直和视场角最大两种模式下的光线追迹图。图4为LED位于4个不同位置时的光强分布曲线, 其中, 实线表示LED位于准直位置 P_1 时的光强分布曲线, 其视场角为 8° ; 虚线、点划线和十字分别表示LED从位置 P_1 处前移 0.5、1、1.5 mm 时的光强分布曲线, 其视场角分别为 9° 、 16° 和 20° 。

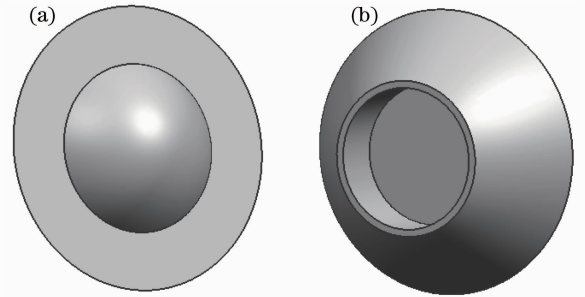


图2 全反射式透镜3D图

Fig. 2 3D structure of the TIR lens

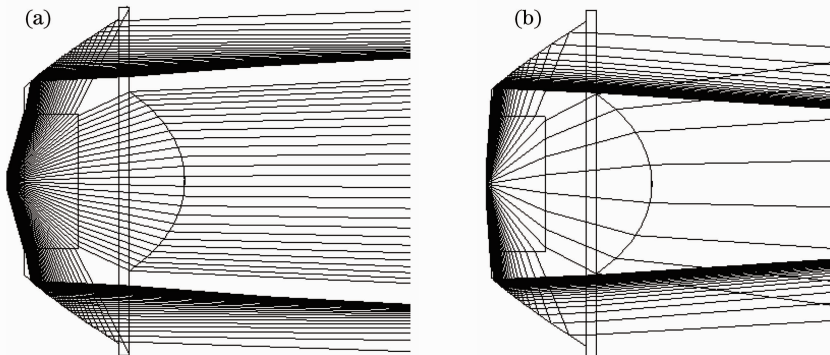


图3 (a)准直和(b)视场角最大模式下的光线追迹图

Fig. 3 Diagram of ray tracing (a) in the collimating mode and (b) the mode with maximum angle of view

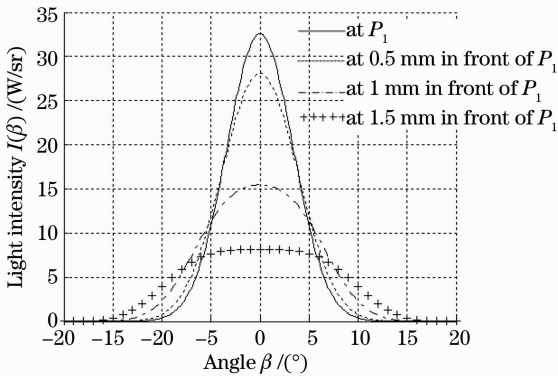


图 4 LED 位于不同位置时的光强分布曲线
Fig. 4 Light-intensity distribution when LED is at different positions

考查视场角分别为 20°, 14° 以及 8° 三种模式下, 10 m 处目标面上的辐照度分布情况, 如图 5~7 所示。三种模式下系统的光能利用率分别为 85.8%, 85.2% 和

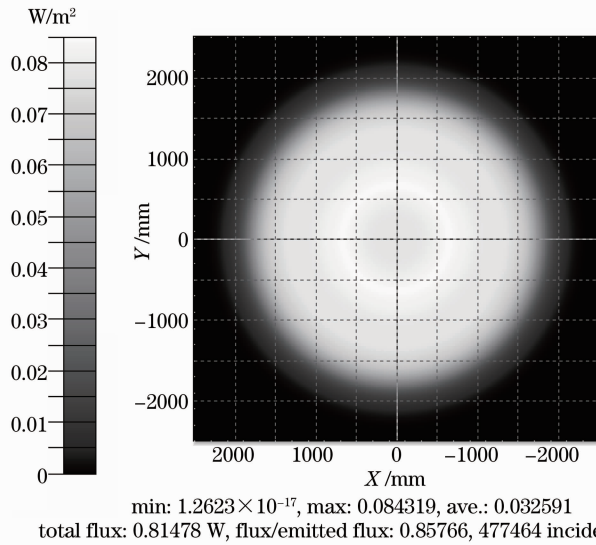


图 5 视场角为 20° 时目标面上的辐照度分布
Fig. 5 Irradiance distribution on the target panel when the angle of view is 20°

表 2 性能对比结果

Table 2 Comparison of the optical performance

	Total length /mm	Maximum diameter /mm	Optical efficiency /%			Uniformity /%		
			8°	14°	20°	8°	14°	20°
Traditional structure	40	44	68.9	70.6	71.1	90	52.9	57.8
Novel structure	13.5	26	80	85.2	85.8	77.3	85.7	89.3

实现同样的 8°~20° 的视场角变化范围, 传统结构系统总长 40 mm, 口径 44 mm, 采用新型全反射式透镜的系统结构总长 13.5 mm, 口径 26 mm, 总体积约减小为传统结构的 1/5。传统结构在三个视场的平均光能利用率为 70.2%, 而新型结构的平均

80%, 辐照度均匀度分别为 89.3%, 85.7% 和 77.3%。辐照度均匀度定义为目标面上有效照明区域内最小辐照度值与最大辐照度值之比。

在 LED 移动的过程中, 系统的光能利用率介于 80% 和 85.8% 之间, 辐照度均匀度介于 77.3% 和 89.3% 之间。取三种模式下的平均值来衡量系统整个变焦过程的光学性能, 平均光能利用率为 83.7%, 平均辐照度均匀度为 84.1%。以一种同样实现 8°~20° 的视场角变化范围的传统透镜结构作为对比。传统光学系统采用双透镜结构, 其中前一片为标准球面透镜, 为增加设计自由度, 将后一片透镜的后表面设计为偶次非球面。其光线追迹图如图 8 所示。

模拟其光束角分别为 20°, 14° 和 8° 时 10 m 处目标面上的辐照度分布情况。与本文提出的新型全反射式结构进行对比, 结果如表 2 所示。

光能利用率为 83.7%, 比传统结构高约 13%。从表 2 中可以看出, 传统结构在视场角较小时辐照度均匀度很高, 但视场角变大后均匀度迅速下降, 三个视场的平均辐照度均匀度为 66.9%。而新型结构在小视场角时虽然均匀度不及传统结构, 但在整个

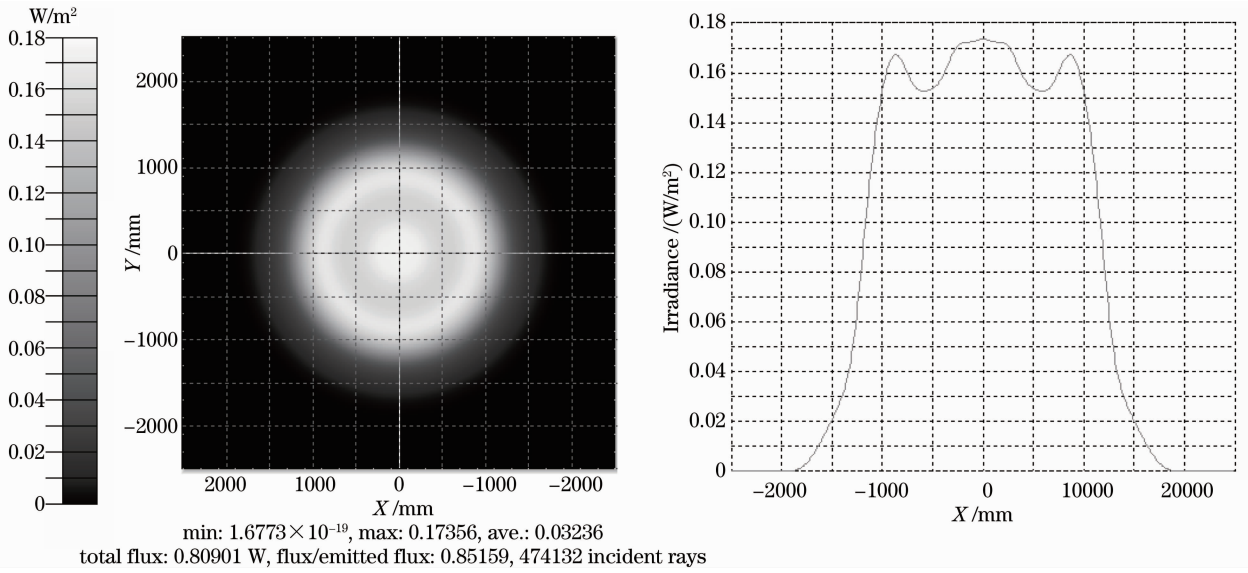


图6 视场角为 14° 时目标面上的辐照度分布

Fig. 6 Irradiance distribution on the target panel when the angle of view is 14°

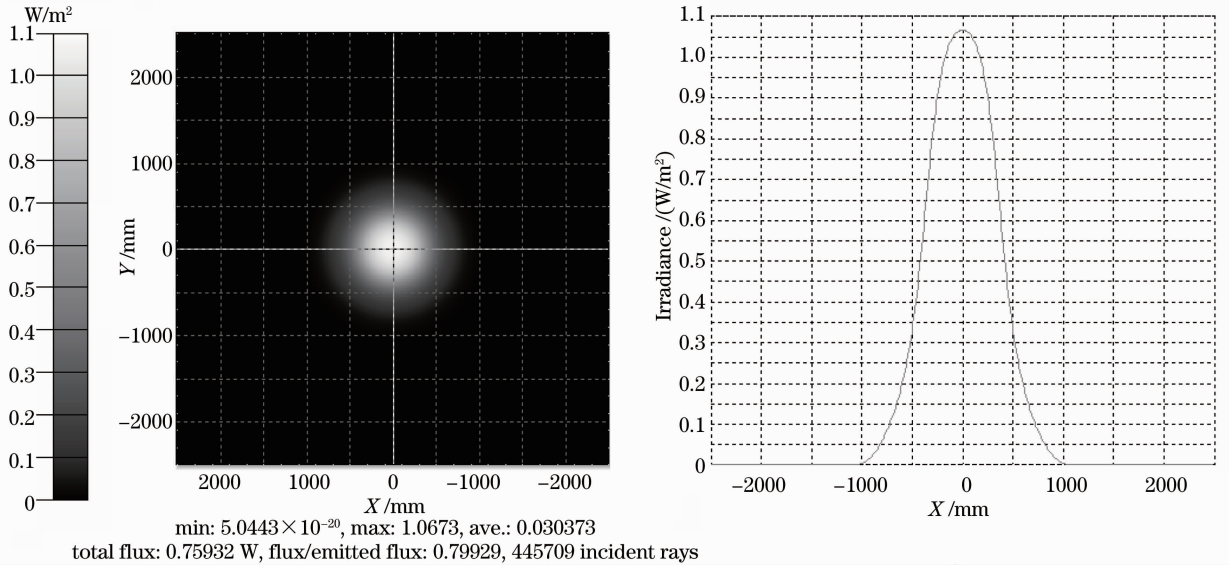


图7 视场角为 8° 时目标面上的辐照度分布

Fig. 7 Irradiance distribution on the target panel when the angle of view is 8°

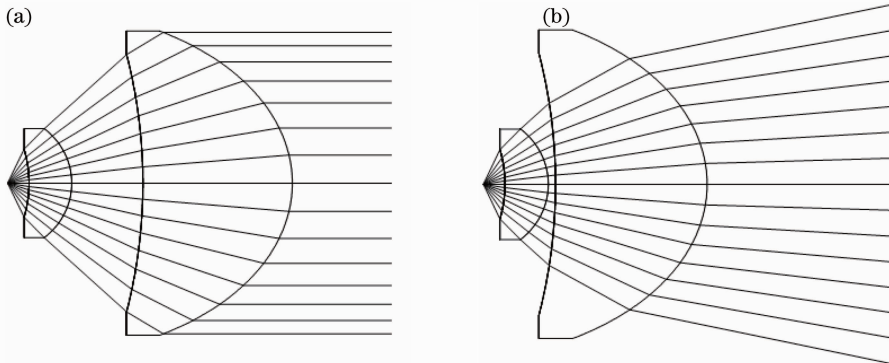


图8 (a)准直和(b)视场角最大模式下的光线追迹图

Fig. 8 Diagram of ray tracing (a) in the collimating mode and (b) the mode with maximum angle of view

变焦过程中均匀度都保持在 75% 以上,其平均均匀度比传统结构提高了 17% 左右。综合考虑整个视场角变化过程,采用新型全反射式透镜结构的系统其光能利用率与辐照度均匀度始终保持较高值,且结构紧凑,便于装调,因此其总体效果优于传统透镜结构。

4 结 论

本文提出一种实现可变视场角的 LED 照明光学系统的设计方法。采用全反射式透镜结构,根据光学系统对准直模式以及视场角最大模式下光强分布的不同要求,分别设计其透射面与全反射面,并依据模拟结果对全反射面进行反馈优化。最后与传统透镜结构在同样的条件下进行对比分析,模拟结果表明,该结构在光能利用率以及辐照度均匀度上均优于传统结构。且光学系统仅含一片透镜,体积更加紧凑,且便于装调。

参 考 文 献

- Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22020~22031
- Xing Zhao, Zhiliang Fang, Jicheng Cui *et al.*. Illumination system using LED sources for pocket-size projectors[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(4): 522~526
- Fei Chen, Sheng Liu, Kai Wang *et al.*. Free-form lenses for high illumination quality light-emitting diode MR16 lamps[J]. *Opt. Eng.*, 2009, **48**(12): 123002
- 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
- Chen Jinfa, Zheng Zhiming, Chen Junjie. An Efficient and Smart Infrared Lighting System[P]. China Patent, CN 101950117A
陈金发, 郑志明, 陈俊杰. 一种高效智能的红外照明系统[P]. 中国专利, CN 101950117A
- Chen Jinfa, Zheng Zhiming, Chen Junjie. A Smart High Speed Ball with Built-in Angle Adjustable Infrared Lighting System[P]. China Patent, CN 101800851A
陈金发, 郑志明, 陈俊杰. 一种内置可变角度红外照明系统的智能型高速球[P]. 中国专利, CN 101800851A
- Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun *et al.*. Optics in solid state lighting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **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*, 2012, **31**(9): 0900117
- Wang Ziyi, Zhang Rongjun, Xu Wei *et al.*. A light emitting diode-lighting fiber coupler based on total reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0922007
王子仪, 张荣君, 徐 蔚 等. 基于全反射的发光二极管-照明光纤耦合器的设计与研制[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0922007
- Jin-Jia Chen, Chin-Tang Lin. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens[J]. *Opt. Eng.*, 2010, **49**(9): 093001
- Kuang-Lung Huang, Jin-Jia Chen, Te-Yuan Wang *et al.*. Free-form lens design for LED indoor illumination[C]. *SPIE*, 2010, **7852**: 78521D
- Feng Zhao. Practical reflector design and calculation for general illumination[C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 59420J

栏目编辑: 韩 峰