

# 实现角度偏转的 LED 二次光学透镜设计

曾赤良<sup>1</sup>, 廖文哲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖北省机电研究设计院股份公司, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>武汉虹识技术有限公司, 湖北 武汉 430075

**摘要** 通过光学建模软件 Light Tools 设计了一款适用于机器视觉的自带角度偏折的发光二极管(LED)聚光透镜,材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。首先根据所需工作距离和照明尺寸建立 LED 模型,然后建立投射曲面加全反射曲面的组合透镜模型,建立照度网格优化函数得到目标区域范围内的均匀照明;最后根据折射定律,对透镜进行倾斜角度的切割,以满足其对角度的要求。整个透镜结构简洁,均匀性好,易实现加工要求,满足机器视觉领域中对角度偏折的要求。

**关键词** 光学设计; 发光二极管; 聚光透镜; 偏折角度

**中图分类号** O439; TN312.8 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.022204

## Secondary Optical Lens Design for LED to Achieve Angular Deflection

Zeng Chiliang<sup>1</sup>, Liao Wenzhe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hubei Mechanical and Electrical Research and Design Institute Co.Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup>Wuhan Hongshi Technologies Co.Ltd., Wuhan, Hubei 430075, China

**Abstract** Light emitting diode (LED) focusing lens with angle deflection for machine vision is designed by optical modeling software Light Tools. The lens is made of polymethyl methacrylate (PMMA). Firstly, the LED model is built according to the working distance and the illumination size. Secondly, a total reflection lens model is established with a lens model inside, and the illumination gridding optimization function is made to obtain the uniform illumination in the target area. Lastly, the lens is cut with tilted angle to meet the requirements of the angle based on the refractive law. The lens has simple structure, good uniformity, and it is easy to achieve the processing requirements. The lens meets the requirements of the angle deflection in the machine vision field.

**Key words** optical design; light emitting diode; focusing lens; deflection angle

**OCIS codes** 220.2945; 230.3670; 220.4298

## 1 引言

近年来,随着电子工业的不断发展,发光二极管(LED)产品越来越广泛地应用于工业领域和民用领域。尤其是在机器视觉领域,LED 因具有体积小、响应快、节能、环保等优点而被广泛应用。然而,在机器视觉领域,由于所有的照明系统都需要跟成像系统搭配使用,除非使用类似同轴照明的方式,可以将照明光路和成像光路集成在一起。但是这种照明需要和成像物镜集成设计,在适用领域里存在很大的局限性。目前,常用的机器视觉领域里的成像光路和照明光路是分开的,为了提高照明的利用效率,需要将照明光源偏折一定角度。另一方面,由于 LED 光源本身发出的光束近似朗伯型,即光强呈余弦分布,并不能直接照明。为了提高 LED 的性能同时满足机器视觉中对光源角度偏折的需求,本文提出了一种 LED 透镜,首先使用自由曲面的方式将 LED 光束进行汇聚,接着再根据折射原理将汇聚的光束进行偏折,不需要倾斜固定光源即可实现照明光束的偏转<sup>[1-2]</sup>。

**收稿日期:** 2016-09-02; **收到修改稿日期:** 2016-10-12

**作者简介:** 曾赤良(1985—),男,硕士,工程师,主要从事光机电一体化方面的研究。E-mail: zengcl1113@126.com

## 2 设计过程

### 2.1 设计需求

结合项目的需求进行设计,具体的需求如表 1 所示。

表 1 设计要求

Table 1 Design requirement

Light source parameter	Value
Working distance	300 mm
Illumination diameter	120 mm
Distance between the optical axis of light source and the optical axis of objective lens	53 mm

按照项目的需求,可以将设计思路分为两个阶段:第一阶段,对朗伯型 LED 光源进行聚光设计,以满足设计需求的工作距离和照明光斑大小的要求;第二阶段,满足照明光轴偏折的设计。

### 2.2 LED 聚光设计

#### 2.2.1 LED 设计原理

LED 芯片是一种尺寸很小的固体,其尺寸有 14,18,28 mil(1 mil=25.357  $\mu\text{m}$ )等规格。由于 LED 内部的两个电极需要保护,而且需要选择合适的封装形状结构和材料来提升光传递效率,所以有必要对 LED 进行封装设计,也称之为一次配光设计<sup>[3]</sup>。

LED 在生产过程中就已经做好了封装设计,市面上流通的 LED 芯片是已经封装好的产品,即已经完成了 LED 的一次光学设计。而且,从封装好的 LED 产品的规格说明书中可以看到其光束的分布情况。市面上流通最广泛的 LED 光源产品的光束分布为朗伯分布。然而,封装好的 LED 产品并不能直接应用在机器视觉领域,而是需要在 LED 封装之外再进行设计,所以各种角度和尺寸的 LED 二次光学设计产品在市面上均有其存在的价值。因此,本设计案例以朗伯分布作为设计光源的依据,进行 LED 光源的二次光学设计。

#### 2.2.2 聚光透镜原理

应用全反射表面和折射表面的结合设计一款聚光透镜,透镜的截面图如图 1 所示,可以看到聚光透镜为旋转对称结构,LED 芯片发出的各个角度的光束通过该旋转对称结构之后按照折射定律进行光的折射和反射<sup>[4]</sup>,其中小角度的光线通过表面 1 和表面 3 完成了对应角度的偏转,而大角度的光束在表面 2 发生全反射,再经过表面 3 完成相应角度的偏转。

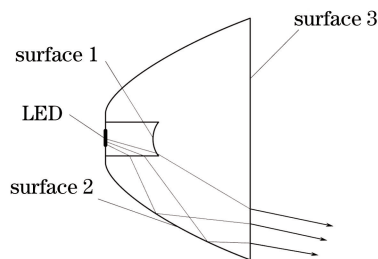


图 1 聚光透镜原理

Fig. 1 Principle of focusing lens

图 1 中表面 1 和表面 2 使用的曲面为偶次非球面,其非球面方程如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10}, \quad (1)$$

式中  $z_0 = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$  为基准面的二次曲面方程, $c$  为球面顶点的曲率, $r$  为径向坐标(非球面任意点到光轴的距离), $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  为多项式系数<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.3 Light Tools 软件建模

LED 发出的光束在出射时,其光束的位置方向都是未知的,这些未知的随机出现的光束都需要用蒙特

卡罗方法来模拟。所以使用 Light Tools 软件中的蒙特卡罗光束追迹方法进行设计。首先,建立 LED 光源模型。使用 Light Tools 程序,建立直径为 2.6 mm 的 LED 芯片,定义其发光面为朗伯型光源<sup>[6]</sup>,选择模拟光束数量为 700000 条,点击“光线追迹”,选择“强度显示”查看其光束分布情况。

LED 的发光角度为朗伯型光源,配光曲线如图 2(b)所示。按照聚光透镜的样式,使用布尔运算定义聚光透镜体,输入初始参数材料选择聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),得到的效果如图 3(a)所示。

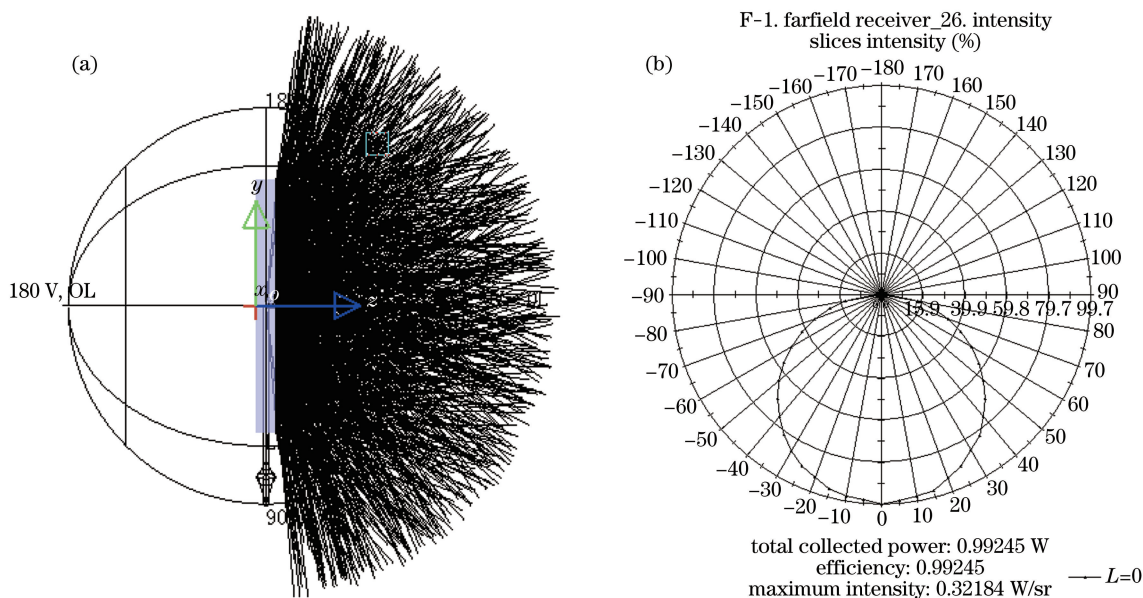


图 2 (a) LED 建模; (b) 光强分布

Fig. 2 (a) LED modeling; (b) light intensity distribution

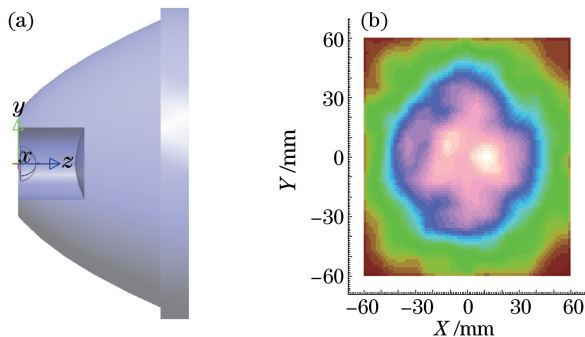


图 3 (a) 初步建模效果; (b) 光斑图

Fig. 3 (a) Result of preliminary modeling; (b) spot diagram

将透镜体输入到 Light Tools 程序,在 300 mm 处建立半径 60 mm 的接收器,接收器表面光斑情况如图 3(b)所示,可以看到此时的光斑情况不理想,光束分布不均匀。

因此,在目标面设定网格优化函数<sup>[7-8]</sup>,进行优化设计,具体过程如下:

- 1) 使用网格函数将目标面分割成若干个网格的形状,其中网格的个数以及网格的孔径类型均可以进行修改,此次设计过程中将目标检测面(工作距离 300 mm 下的平面)分割成  $21 \times 21$  个标准正方形网格进行分析;
- 2) 将所有网格中所检测到的辐照度进行归一化计算;
- 3) 将每个网格的目标值设定为 1,从而完成被照明面均匀照明优化目标的定义;
- 4) 根据偶次曲面公式,将对应的曲面参数和透镜的厚度等参数设置为变量,每进行一次对应的参数值修改,便分析一次对应的光照度分布,经过多次反复修改后,得到的优化结果如图 4(a)所示。

此时通过聚光透镜的效果较好,在目标面上光斑[图 4(b)]均匀分布,辐照度值最小为  $0.000075531 \text{ W/mm}^2$ ,辐照度平均值为  $0.000086026 \text{ W/mm}^2$ ,照度均匀性为 87.8%。根据目标接收面与 LED

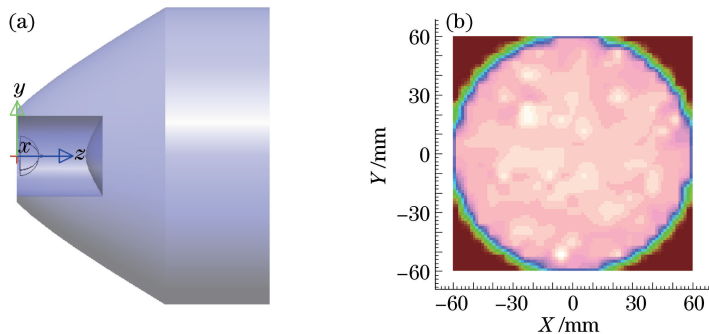


图 4 (a) 优化设计结果; (b) 优化后的光斑图

Fig. 4 (a) Result of optimization design; (b) spot diagram after optimization

芯片的距离 300 mm 以及目标面的尺寸为半径 60 mm 的光斑尺寸,可以得到对应聚光透镜的角度  $\theta$ ,即:

$$\theta = 2\arctan \frac{60}{300} = 2 \times 11.3^\circ = 22.6^\circ. \tag{2}$$

优化后的光强分布曲线如图 5 所示,从图 5 可以看出其半发光角度为  $\pm 11.3^\circ$ ,与设计相符。

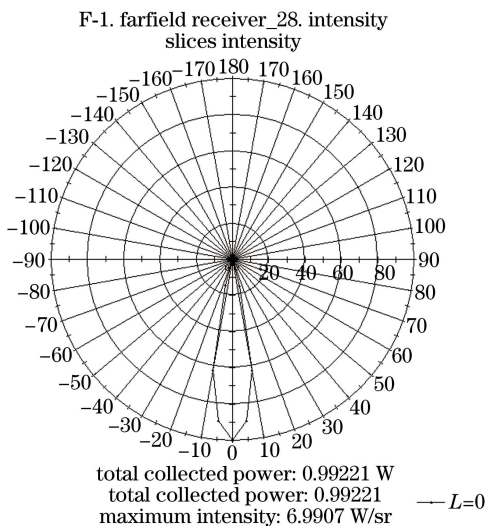


图 5 优化后的光强分布图

Fig. 5 Light intensity distribution after optimization

此时,已经完成了聚光的设计,聚光透镜已经满足 2.6 mm 朗伯型 LED 芯片在 300 mm 的工作距离下得到半径 60 mm 光斑的效果,且光斑图案均匀分布,聚光效果较为理想。当然,为了得到效果更佳的聚光效果,可以在聚光透镜表面设计三维鳞甲方案或者进行磨砂处理等,这里不再赘述。

### 2.3 光束偏折设计

#### 2.3.1 设计目标

对于目前常用的机器视觉照明结构,整个系统的照明是通过照明光源与机器视觉物镜平行放置或者是照明光源与机器视觉物镜倾斜一定角度放置,如图 6 所示。

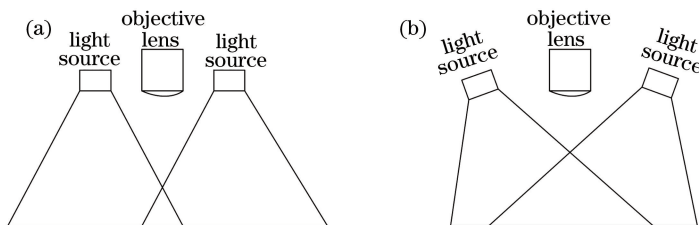


图 6 机器视觉中常用照明结构。(a) 平行; (b) 倾斜

Fig. 6 Common illumination structure of machine vision. (a) Parallel; (b) tilt

图 6(a)的情况比较常见,其结构简单,安装方便,但是光源利用上存在一定程度的浪费。另外一种照明与物镜的安装方式如图 6(b)所示,在光源利用上会优于前一种方案,但是在结构上会复杂一些。

为了达到简单而又保证光效的效果,有必要对已经设计好的聚光透镜进行第二次设计,得到如图 7 所示的设计结果。

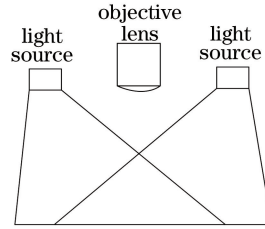


图 7 结构紧凑的机器视觉照明方案

Fig. 7 Machine vision illumination solution with compact structure

### 2.3.2 实现方法

为了实现上述的照明效果,利用折射定律原理进行设计。设计好的透镜体样式(图 2)中表面 3 为平面,此时将表面 3 改为斜面,其中主光线的偏折角度如图 8 所示,根据折射定律<sup>[5]</sup>,有:

$$n \cdot \sin I = n' \cdot \sin I', \quad (3)$$

式中  $n$  和  $n'$  分别是两个介质的折射率,  $I$  和  $I'$  分别是入射光和折射光与界面法线的夹角,称为入射角和折射角。根据透镜体的材料为 PMMA 可知,  $n = 1.49$ ,  $n' = 1$ 。

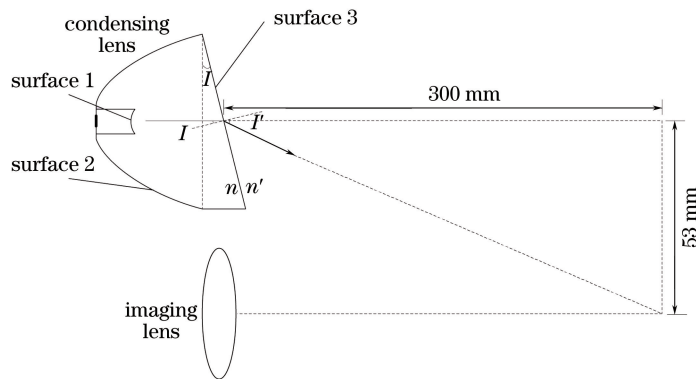


图 8 光束偏折原理

Fig. 8 Deflection principle of light beams

根据设计要求,照明光轴与成像物镜光轴距离为 53 mm,工作距离 300 mm 处,可以得到:

$$I' = I + \arctan \frac{53}{300} = I + 10^\circ, \quad (4)$$

由三角函数公式:

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B, \quad (5)$$

$$\sin^2 A + \cos^2 A = 1, \quad (6)$$

可以算出:  $I = 18.965^\circ$ 。

### 2.3.3 Light Tools 软件建模

建立直径等于聚光透镜口径的圆柱体,再旋转  $18.965^\circ$  使用布尔运算,与原聚光透镜体进行布尔运算中的求差处理,得到最终的透镜体如图 9 所示,图 9(a)为透镜的设计样式,图 9(b)为最终的光斑效果。从图中可以看到该透镜简单紧凑,实用性强,光斑均匀,辐照度值最小为  $0.000073464 \text{ W/mm}^2$ ,辐照度平均值为  $0.000086026 \text{ W/mm}^2$ ,照度均匀性为 85.4%,照明效果较好。

图 10 为光束偏折的效果图,从图 10 可以看出设计结果完全符合设计要求。

图 11 为设计结果的光强分布曲线,从图 11 可知该透镜的半光强角度为  $22.6^\circ$ ,偏转角为  $10^\circ$ ,符合 300 mm 处偏折 53 mm 的设计要求。

## 2.4 实验结果

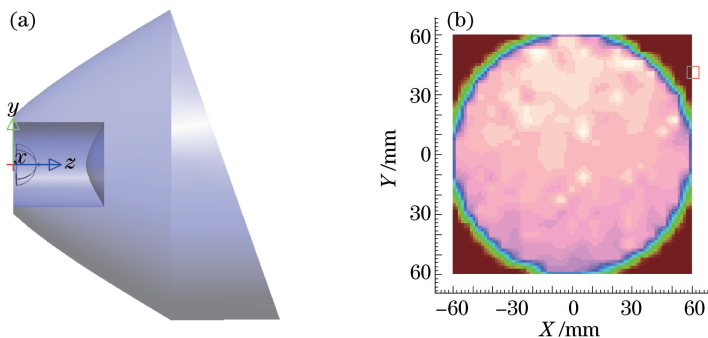


图9 (a) 设计结果; (b) 光斑图

Fig. 9 (a) Result of design; (b) spot diagram

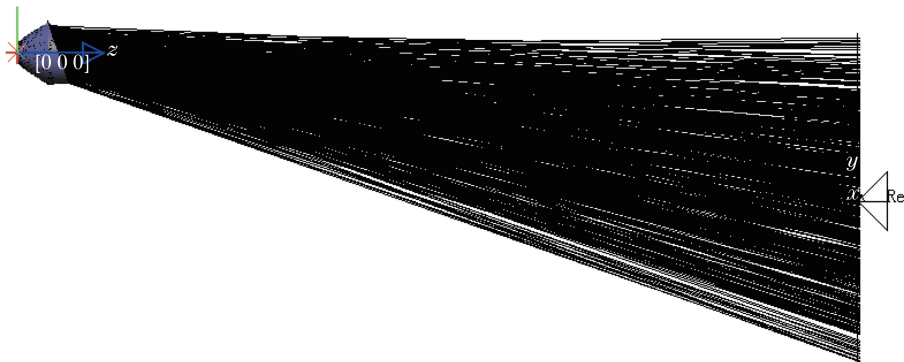


图10 光束偏折效果

Fig. 10 Deflection effect of light beams

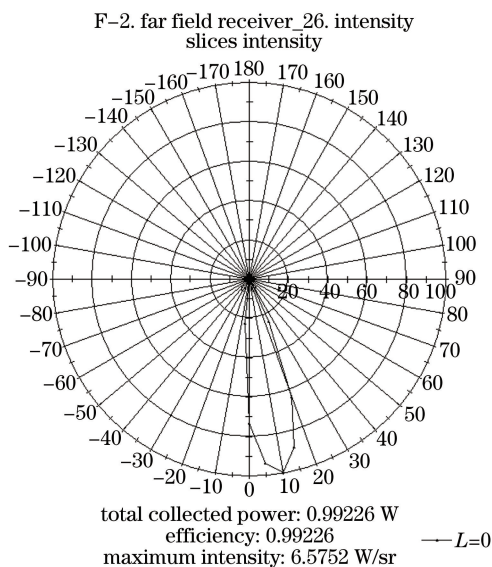


图11 设计结果的光强分布图

Fig. 11 Light intensity distribution chart of design result

根据设计结果制作了透镜,当使用白光 LED 作为光源,工作距离为 300 mm 的情况下可以得到直径约为 120 mm 的光斑,透镜实物图和光斑效果分别如图 12、13 所示。

### 3 结 论

介绍了一种结构简单、实用性强的带角度偏折的聚光透镜设计过程,结合设计需求,设计了一款口径为 22 mm,聚光角度为  $22.6^\circ$ ,光束偏折为  $10^\circ$ ,能满足发光面积为  $2.6 \text{ mm}^2$ 、封装尺寸小于 6 mm 的朗伯型 LED 芯片的聚光透镜。该方法可以广泛应用于机器视觉领域,能够有效减小机器视觉中照明模块的尺寸。



图 12 透镜实物图

Fig. 12 Practicality diagram of lens

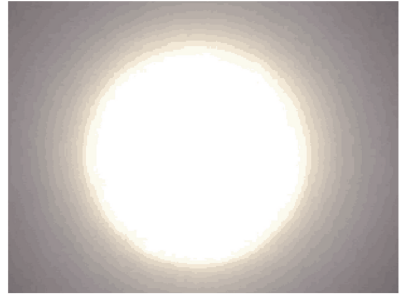


图 13 光斑效果图

Fig. 13 Effect of spot

## 参 考 文 献

- [1] Tu Hao, Chen Jiabi, Qin Han, *et al.* An optical design based on improving LED array far field illumination intensity [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, 24(1): 74-80.  
涂 浩, 陈家璧, 秦 汉, 等. 基于提高 LED 阵列远场照度的设计 [J]. *照明工程学报*, 2013, 24(1): 74-80.
- [2] Yan Qiang, Gao Chunming, Sheng Yanmei, *et al.* Optimization design of LED collimation lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 112203.  
严 强, 高椿明, 生艳梅, 等. LED 照明准直透镜结构结果优化设计 [J]. *激光与光电子学进展*. 2013, 50(11): 112203.
- [3] Zhang Feibi, Chen Hongqing. Display technology of LED large video screen [J]. *Entertainment Technology*, 2007, 23(4): 36-39.  
张飞碧, 陈宏庆. LED 大屏幕显示技术 [J]. *演艺设备与科技*, 2007, 23(4): 36-39.
- [4] Zhou Shikang, Chen Chungun, Xu Li, *et al.* Optical design of LED lens using light flux ray method [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(1): 101-111.  
周士康, 陈春根, 许 礼, 等. 光通量线方法用于 LED 二次光学设计 [J]. *照明工程学报*, 2016, 27(1): 101-111.
- [5] Xiao Zexin. *Engineering optical design* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 154-166.  
萧泽新. *工程光学设计* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 154-166.
- [6] Pan Hao, Chen Guoqing, Du Bojun. Design of double freeform surface lens for LED uniform illumination based on cubic splines [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 032201.  
潘 浩, 陈国庆, 杜伯钧. 基于三次样条的双自由曲面 LED 匀光透镜设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 032201.
- [7] Hao Jian, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.* Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 032302.  
郝 剑, 刘 华, 孙 强, 等. LED 自由曲面准直透镜的优化设计方法 [J]. *激光与光电子学进展*. 2014, 51(3): 032302.
- [8] Feng Qibin, Li Yani, Li Qigong, *et al.* Lens array with double freeform surface for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123003.  
冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 用于头显液晶像源 LED 背光的双自由曲面透镜阵列设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123003.