

激光与光电子学进展

基于扩展光源的双自由曲面均匀照明设计方法

曾茂庭, 楼俊*, 岑松原, 高同瑞

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 提出一种基于双自由曲面的均匀照明设计方法, 根据几何光学理论和能量映射关系, 设计了距高比为 1 的双自由曲面透镜。通过将扩展光源和透镜表面离散化, 对扩展光源进行反向追迹构建新的双自由曲面。借助光学仿真软件模拟了光学性能, 结果表明: 在距离光源 1000 mm 处的目标面实现了半径为 1000 mm 的均匀圆形照度分布, 照度均匀度达 92.3%, 该方法有效提升了基于扩展光源的目标面的照度均匀性, 设计过程无需对自由曲面反馈优化, 大大缩短设计时间, 过程简易方便。

关键词 光学设计; 扩展光源; 自由曲面; 均匀照明

中图分类号 O439 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP221600

Design Method for Double Free-Form Surface with Uniform Illumination Based on an Extended Light Source

Zeng Maoting, Lou Jun*, Cen Songyuan, Gao Tongrui

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract A uniform lighting design method based on a double free-curved surface is proposed herein. According to the theory of geometrical optics and energy mapping relationship, a double free-form surface lens is designed with a distance-to-height ratio of one. By discretizing the extended light source and lens surface, a new double free-form surface lens profile is constructed by inverse tracing the extended light source. The optical properties are simulated by using optical simulation software. The results have shown that uniform circular illumination distribution with a radius of 1000 mm is achieved on the target surface 1000 mm away from the extended light source, and the illumination uniformity is 92.3%. This method can effectively improve the illumination uniformity of the target surface based on an extended light source, and the design process of the free-form surface does not depend on feedback optimization. Accordingly, the design time is reduced and the process becomes simple and convenient.

Key words optical design; extended light source; free-form surface; uniform illumination

1 引言

发光二极管(LED)作为当今世界最流行的照明光源,因其体积小、功耗低、寿命长、绿色环保等优势被广泛应用于投影显示、道路照明、机器视觉照明等领域^[1-5]。然而LED类似朗伯体的发光特性,在许多特定照明场景受到限制,必须对其进行二次光学设计来调控光线走势,以达到目标面均匀辐照度分布。

之前的研究大多将LED看作理想点光源进行二次光学设计,而当LED芯片口径与透镜口径之比大于1:5时,基于点光源的自由曲面透镜设计方法将难以

满足要求,将LED作为扩展光源进行设计已成为当下的研究热点和难点^[6-12]。Mao等^[6]提出一种反馈优化算法,将目标面形状缩放与迭代反馈修正算法结合,生成目标面分布为边界可控的自由曲面光学系统,再将一组系统半径作为优化变量,最终实现了均匀矩形照明,但算法需两步优化相结合,优化设计时间冗长,且计算编程困难;李潇等^[13]将序列光线追迹原理引入照明设计,利用菲涅耳公式与照度补偿理论相结合,提高了照度拟合速度且实现了均匀圆形照明,但近距离照明均匀度不高,且需要对Matlab软件有较高熟练度;黄丹等^[11]通过计算扩展光源发出的人射区域能量、曲

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-05-23; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(62175224)

通信作者: *loujun@cjl.u.edu.cn

面的出射区域能量和目标面区域能量的对应关系,得到曲面采样点分布,再对目标面单元重新划分,重新计算自由曲面,实现了均匀圆形照度分布,但不适用于双曲面设计,需借助光学仿真软件进行布尔运算才能构建透镜内曲面来控制 LED 光线方向,降低了设计灵活性和自由度。

对绕中心轴旋转对称的光学系统而言,本文根据能量守恒定律和 Snell^[14-15]定律设计了基于扩展光源的双自由曲面透镜,使结构更加紧凑,无需反馈优化,极大节省了设计优化时间、简易方便,设计难度低,能有效提高扩展光源下目标面的照度均匀性。

2 设计原理

设计方法如图 1 所示,预先将光源以点光源设计出双自由曲面透镜初始面型,再将双自由曲面的采样点反向追迹到实际扩展光源,调整曲面切向量,重新生成自由曲面新面型。若将扩展光源离散化为无穷多个子光源,扩展光源可看为这些子光源的集合,同理,透镜表面也可离散化为无穷多个子光源,来自扩展光源的子光源发出的具有一定角度的光锥全部传递给透镜表面的子光源,接着透镜表面的子光源继续传递给后面的光学系统,由此,每个光学系统的子光源都有两条入射光线和两条出射光线,通过控制出射光线的出射光锥大小相等使得目标面照度均匀。

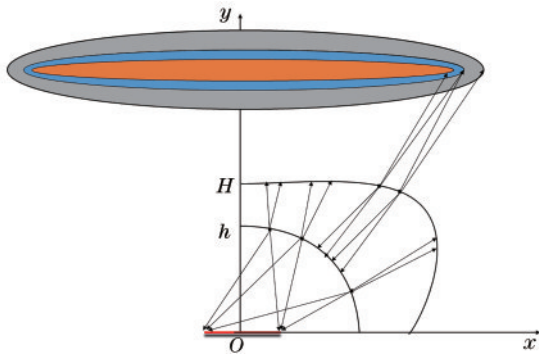


图 1 双自由曲面透镜设计示意图

Fig. 1 Schematic design of double free-form surface lens

2.1 等分光通量与目标面

以点光源进行设计^[16]时,根据能量守恒定律,在 LED 光源与目标面之间建立一一对应的能量映射关系,LED 光源能量在空间中划分为 N 份等光通量的同心圆环,如图 2 所示,则每个同心圆环接收到的光通量为

$$\Phi_0 = \int I(\theta) d\Omega = 2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

式中: Φ_0 为该圆环区域内的光通量总和; θ_i 、 θ_{i+1} 分别为同心圆环内外环与 Z 轴所构成的出射角; $d\theta$ 为光通量被划分 N 份后的每份出射角度,LED 光源呈朗伯体分布,发光强度分布 $I(\theta)$ 为

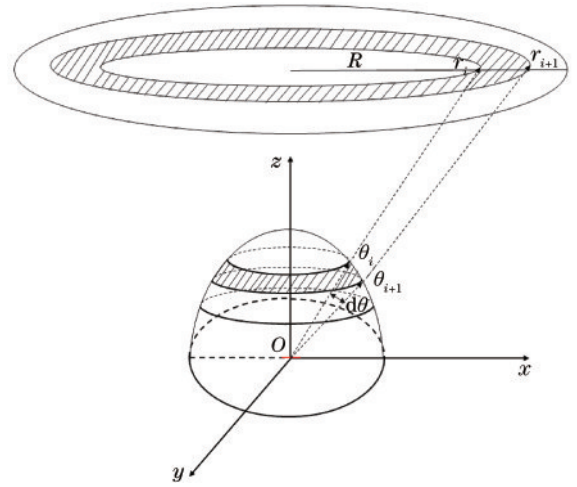


图 2 按等光通量划分角度示意图

Fig. 2 Schematic design of double free-form surface lens

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (2)$$

式中: I_0 为光源在法线方向的发光强度。LED 光源总光通量为

$$\Phi_t = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

式中: Φ_t 为 LED 的光通量总和,则联立关系式:

$$2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{\Phi_t}{N} = \frac{2\pi}{N} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

计算得 θ_{i+1} 的迭代关系式:

$$\theta_{i+1} = \arcsin \sqrt{\sin^2 \theta_i + \frac{1}{N}}. \quad (5)$$

即可求得 LED 出射光线按等光通量划分后的采样点角度。光源按等光通量划分,将目标面划分为 N 个等面积的同心圆环,假设目标面半径为 R ,每个圆环半径为 r_i ($i=0, 1, \dots, N-1$),则每个等面积的圆环面积为

$$S_i = (\pi R^2) / N = \pi r_{i+1}^2 - \pi r_i^2, \quad (6)$$

迭代计算可得 r_i 的表达式为

$$r_i = R \sqrt{i/N}, \quad (7)$$

通过控制每条出射光线入射到目标面上所对应的采样点,控制 LED 光源等光通量入射到目标面等面积上,从而实现目标面均匀照度分布。

2.2 构建内、外自由曲面的设计过程

设计的均匀照明系统为关于中心轴旋转对称的系统,只需设计二维平面右侧一半的部分,再绕中心轴旋转一周即可得到整个光学系统模型。其中内自由曲面作用为收缩 LED 光源朗伯体发光分布的光束角,出射光再经外自由曲面使目标面光通量相等,使光能量均匀化。如图 3 所示,透镜由内、外自由曲面构成,通过建立曲面采样点的迭代关系来设计双自由曲面,在设计内曲面中,根据矢量形式的折射定律^[17]可得:

$$n' \mathbf{O} - n \mathbf{I} = p \mathbf{N}, \quad (8)$$

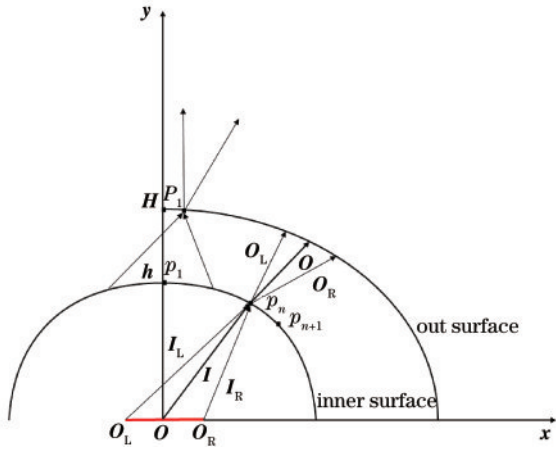


图 3 双自由曲面透镜设计原理图

Fig. 3 Schematic diagram of double free-form surface lens

式中:一般地, $\rho = [n^2 + n'^2 - 2nn'(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{\frac{1}{2}}$; n, n' 分别为入射光线和出射光线的所处介质折射率; \mathbf{I}, \mathbf{O} 和 \mathbf{N} 分别为入射光线矢量、出射光线矢量和法向量矢量, 通过折射定律求得内曲面采样点的法向量 \mathbf{N} 后, 从而可以获得过采样点的切线矢量 \mathbf{T} 。

如图 3 所示, 光线从扩展光源 $O_L O_R$ 发出, 根据以点光源设计方法计算的角度 $\theta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 划分 N 条采样光线, 透镜高度已知, 内曲面的中心点 p_1 为 $(0, h)$, 外曲面的中心点 P_1 为 $(0, H)$, 当采样点足够多、 $p_n(x_n, y_n)$ 与 $p_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 两点之间的距离非常小时, 过点 p_n 的切线近似与第 $n+1$ 条采样光线相交于点 p_{n+1} , 即过 $p_n(x_n, y_n)$ 的切线斜率 k_n 和出射角 θ_n 可表示为

$$k_n = (y_{n+1} - y_n) / (x_{n+1} - x_n), \quad (9)$$

$$\tan \theta_n = x_n / y_n, \quad (10)$$

联立式(9)、式(10), 可得 $p_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$:

$$x_{n+1} = y_{n+1} \tan \theta_{n+1}, \quad (11)$$

$$y_{n+1} = (y_n - k_n x_n) / (1 - k_n \tan \theta_{n+1}). \quad (12)$$

2.3 调整界面切向量

根据相邻两点的迭代关系式, 即可求得曲面所有采样点的坐标, 构建出内曲面的初始母线, 接着根据实际扩展光源所发出的边缘光线^[18]来确定左入射光线矢量 \mathbf{I}_L 和右入射光线矢量 \mathbf{I}_R , 再由式(8)中入射矢量与出射矢量的关系, 得到左出射光线矢量 \mathbf{O}_L 和右出射光线矢量 \mathbf{O}_R , 如图 4 所示, 此时 \mathbf{O}_L 与 \mathbf{O} 的夹角为出射左光锥角 α_1 , \mathbf{O}_R 与 \mathbf{O} 的夹角为出射右光锥角 α_2 , 通过反向追迹扩展光源判断每个出射光矢量 \mathbf{O} 的左右出射光锥角是否大小相等, 若不相等则调整 α_1, α_2 的大小使之相等, 调整后的左出射光线矢量为 \mathbf{O}'_L , 右出射光线矢量为 \mathbf{O}'_R , 出射左光锥角为 α'_1 , 出射右光锥角为 α'_2 , 其中左右出射光锥角满足以下关系:

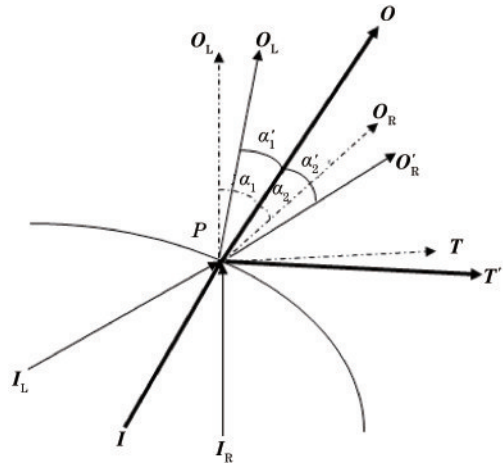


图 4 调整界面切向量图

Fig. 4 Schematic diagram of adjusting the target vector of interface

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 = \alpha'_1 + \alpha'_2 \\ |\alpha_1| \neq |\alpha_2| \\ |\alpha'_1| = |\alpha'_2| \end{cases} \quad (13)$$

通过生成新的左右出射光线矢量来调整界面切向量 \mathbf{T} , 调整后的切向量为 \mathbf{T}' 。直至光学系统的各个子光源都满足左右出射光锥角相等, 最终便得出内曲面母线。外曲面的入射光线为来自内曲面的出射光线, 因此需将内曲面的二维平面展开进行设计, 再重复上述设计方法得到外曲面母线, 最终得到双自由曲面母线。

3 设计仿真和结果分析

为验证该设计方法对提升扩展光源照度均匀性的可行性, 选择 LED 芯片尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 透镜内、外曲面高度分别为 $3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}$, 透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 基于点光源设计方法与扩展光源设计方法分别在 Matlab 软件中迭代 8000 个采样点所得的双自由曲面轮廓曲线, 如图 5 所示。由图 6

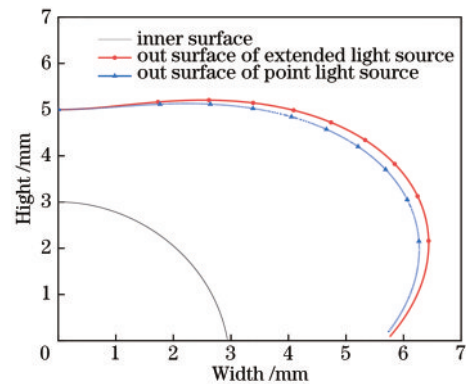


图 5 双自由曲面透镜轮廓图

Fig. 5 Profiles of double free-form surface lens

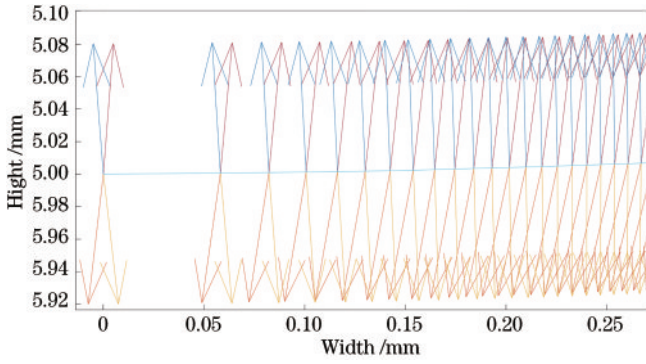


图 6 外曲面的光锥示意图

Fig. 6 Light cone diagram of outer surface

可知,外曲面的光锥大小基本一致,能达到目标面照度均匀的效果,经 Solidworks 建模软件将曲线绕中心轴旋转一周即可得到双自由曲面透镜模型,如图 7 所示。

为了验证设计方法对提升扩展光源照度均匀性的可行性,将上述透镜模型与基于点光源设计的透镜模型分别导入到光学仿真软件 Light Tools 进行光学仿真与对比分析,设置光源属性、透镜材料与目标面参数,目标面半径为 1000 mm,目标面与光源距离为 1000 mm,即距高比(DHR)为 1,以便能量利用率损耗

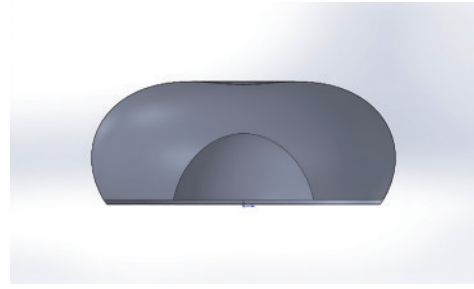


图 7 双自由曲面透镜模型

Fig. 7 Model of double free-form surface lens

微弱,采用蒙特卡洛光线追迹 2500000 根光线,得到照度分布如图 8 所示。由图 8 可知,由于实际光源尺寸的影响,目标面中心处曲线都有所下凹,但与基于点光源设计方法相比,本设计方法的中心半径为 200 mm 处照度均匀性比后者提升了 9.5%,有效降低了远场照明中心的照度非均匀性,在半径为 1000 mm 处,本设计方法的照度均匀度为 92.3%,而传统方法的照度均匀度为 85.1%,比较二者目标面的照度剖切图在 x 与 y 方向的照度分布亦可观察得:应用本设计方法在目标面中心照度处曲线趋势平坦,传统方法曲线下凹明显,说明与传统点光源设计方法相比,本设计方法在实际照明应用中提升了照度均匀性。

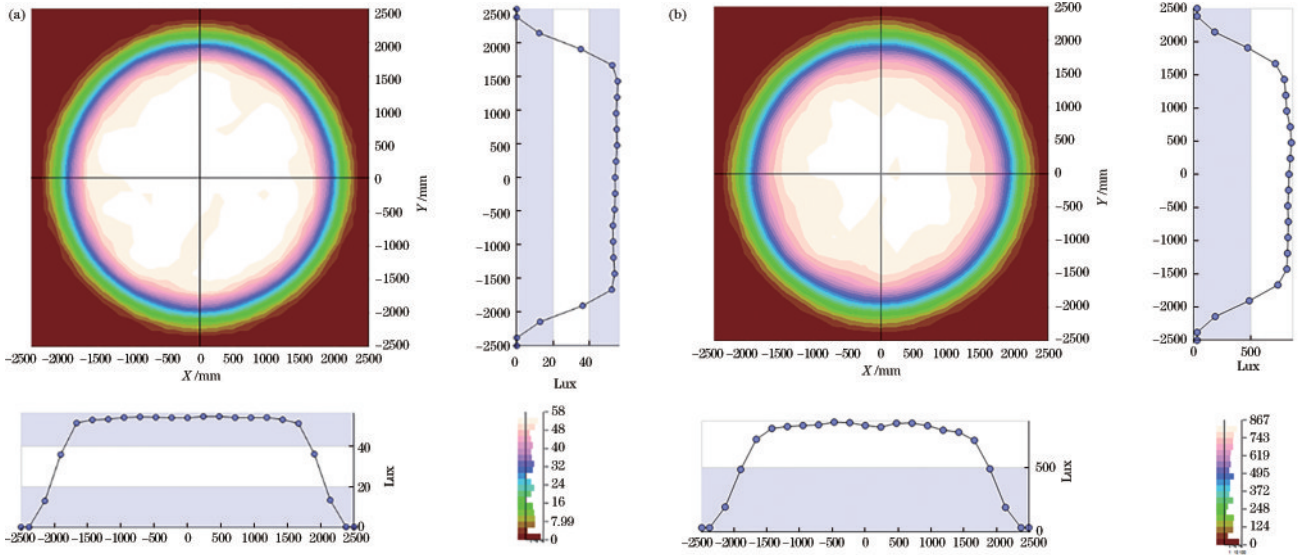


图 8 2 种设计方法的照度分布对比图。(a)基于扩展光源的设计方法;(b)基于点光源的设计方法

Fig. 8 Illumination comparison chart of two design methods. (a) Design method based on extended source; (b) design method based on point source

4 结 论

针对实际均匀照明应用中,基于几何光学理论和能量守恒定律,提出了一种基于扩展光源的双自由曲面设计方法,仿真结果表明,与传统设计方法相比,目标面的照度均匀性明显提高,设计过程无需对自由曲面进行优化,极大缩短了设计时间,设计过程简易方便,但其近场照明的照度均匀性不高,有待进一步提

升,将反馈优化与此方法结合能否更有效地提升照度均匀性,亦是后续工作的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 邢莎莎, 吴仍茂, 李海峰, 等. 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0322002. Xing S S, Wu R M, Li H F, et al. Freeform-surface design of off-axis illumination in projection lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3):0322002.

- [2] 刘明伟, 钱可元. 基于照度分割反馈法的扩展光源背光源设计[J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 30-35, 39.
Liu M W, Qian K Y. Direct-type backlight design for extended source based on irradiance-segmentation-feedback [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 30-35, 39.
- [3] Wang K, Chen F, Liu Z Y, et al. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 413-425.
- [4] 贺志华, 董前民, 王少雷, 等. 用于道路均匀照明的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 照明工程学报, 2014, 25(4): 85-89.
He Z H, Dong Q M, Wang S L, et al. LED freeform lens design for street uniform illumination[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2014, 25(4): 85-89.
- [5] 陈瑞, 岑松原, 金尚忠. 基于同步多曲面法的发光二极管机器视觉照明设计[J]. 光子学报, 2013, 42(8): 956-961.
Chen R, Cen S Y, Jin S Z. A machine vision illumination system based on simultaneous multiple surfaces design[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(8): 956-961.
- [6] Mao X L, Li H T, Han Y J, et al. A two-step design method for high compact rotationally symmetric optical system for LED surface light source[J]. Optics Express, 2014, 22(5): A233-A247.
- [7] Wang T Y, Chen J J, Huang K L, et al. Freeform lens design using a complementary optimization method for uniform illumination with extended LED light sources[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9272: 927214.
- [8] Chen J J, Huang Z Y, Liu T S, et al. Freeform lens design for light-emitting diode uniform illumination by using a method of source-target luminous intensity mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): E146-E152.
- [9] Ma D L, Feng Z X, Liang R G. Freeform illumination lens design using composite ray mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 498-503.
- [10] 赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.
Zhao H, Li C G, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.
- [11] 黄丹, 冯奇斌, 唐天, 等. 基于扩展光源的曲面能量映射优化设计方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222003.
Huang D, Feng Q B, Tang T, et al. Design method for surface energy mapping optimization based on extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222003.
- [12] 曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2422001.
Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2422001.
- [13] 李潇, 高培丽, 黄逸峰, 等. 基于序列光线追迹原理的快速优化照明设计[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 873-879.
Li X, Gao P L, Huang Y F, et al. Rapid optimization design for lighting system based on principles of sequential ray tracing[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(6): 873-879.
- [14] 朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422002.
Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.
- [15] 胡甜甜, 曾春梅, 芮丛珊, 等. 用于 LED 均匀照明的自由曲面菲涅耳 TIR 透镜光学设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 20200183.
Hu T T, Zeng C M, Rui C S, et al. Optical design of freeform Fresnel TIR lens for LED uniform illumination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(2): 20200183.
- [16] 苏宙平. 非成像光学系统设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
Su Z P. Design methods for non-imaging optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [17] 苏宙平, 阙立志, 朱焯炜, 等. 用于 LED 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.
Su Z P, Que L Z, Zhu Z W, et al. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022203.
- [18] 陈俄振, 郭震宁, 智佳军. LED 扩展光源均匀照明的透镜设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 632-635.
Chen E Z, Guo Z N, Zhi J J. Lens design with uniform illumination of the LED extended sources[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(6): 632-635.