

文章编号:1001-5078(2024)07-1130-06

· 光学技术 ·

可实现非对称照明的自由曲面光学系统设计

吕佳博¹, 张健², 杨东澎², 杨俊杰², 赵斌², 孙景睿³, 任太阳², 张宇², 莫晓旭², 侯天野⁴

(1. 吉林省计量测试仪器与技术重点实验室, 吉林省计量科学研究院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学人工智能学院, 吉林 长春 130022; 4. 吉林市公安局交通巡逻警察支队, 吉林 长春 132001)

摘要:基于最优传输理论的光线映射方法, 针对非对称的照明的光学系统设计需求, 以光源到辐照面距离为 20 mm, 在范围 50 mm × 50 mm 范围内实现字母“JL”为目标, 计算了面向零扩展度光源自由曲面光学系统初始参数, 在此基础上利用 LightTools 软件优化设计并仿真分析了面向零扩展度光源和扩展光源的自由曲面光学系统, 结果表明: 面向零扩展度光源时, 自由曲面直径为 86.52 mm, 光源与自由曲面距离为 34 mm, 在辐照面上可以实现字母“JL”的照度分布调控; 面向直径为 10 mm 的扩展光源时, 自由曲面直径为 435.16 mm, 光源与自由曲面距离为 242 mm 时, 在辐照面上可以实现字母“JL”的照度分布调控, 说明所设计系统可以实现非对称照明分布调控, 有效的提高了自由曲面光学系统的设计效率。

关键词:自由曲面; 非对称照明; 扩展光源; 照度分布; 光学设计

中图分类号: O435; TH74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.020

Free-form optical system design for asymmetric illumination

LV Jia-bo¹, ZHANG Jian², YANG Dong-peng², YANG Jun-jie², ZHAO Bin²,
SUN Jing-rui³, REN Tai-yang², ZHANG Yu², MO Xiao-xu², HOU Tian-ye⁴

(1. Jilin Province Key Laboratory of Measuring Instrument and Technology, Jilin Institute of Metrology, Changchun 130022, China;
2. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. School of Artificial Intelligence, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
4. Jilin Public Security Bureau Traffic Patrol Police Detachment, Changchun 132001, China)

Abstract: Based on the light mapping method of optimal transmission theory, the initial parameters of the free-form optical system for zero extension light source are calculated for the design of the optical system for asymmetric illumination, with the distance from the light source to the irradiated surface of 20 mm, and the realization of the letter “JL” within the range of 50 mm × 50 mm as the target. The initial parameters of the free-form optical system for zero extension light source are calculated, and based on this, the free-form optical system for zero extension light source and extended light source is optimally designed and simulated using LightTools software. The results show that for zero extension light source, the free-form surface diameter is 86.52 mm, the distance between the light source and the free-form surface is 34 mm, and the illumination distribution control of the letter “JL” can be realized on the irradiated surface; when facing the extended light source with a diameter of 10 mm, the diameter of the free surface is 435.16 mm, the distance between the light source and the free surface is 242 mm, and the illumination distribution control of the letter

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20230201053GX) 资助。

作者简介: 吕佳博 (1989 -) 女, 硕士, 助理工程师, 从事汽车碰撞性能检测技术研究、机动车检测校准, 计量标准建立、量值溯源传递等研究。E-mail: 992493483@qq.com

通讯作者: 张健 (1989 -) 男, 博士, 助理研究员, 从事光电仪器及其校准、量值溯源等研究。E-mail: zhangjian_nr@126.com

收稿日期: 2023-11-08; **修订日期:** 2024-01-15

“JL” can be achieved on the irradiated surface, indicating that the designed system can realize the asymmetric illumination distribution control and effectively improve the efficiency of the design of the free-form optical system.

Keywords: free-form surface; asymmetric lighting; extended light source; illumination distribution; optical design

1 引言

自由曲面光学系统与传统的球面光学系统相比,可以有效地减小整个光学系统的长度和体积^[1-2],可以为光学系统提供更精细的光束控制能力,实现复杂的照明分布^[3-5],随着自由曲面加工技术的不断进步,采用自由曲面分布光学元件的照明系统有望逐步取代传统的照明光学系统,从而可以更节能、小型、高效、低成本的现代照明应用。

2002年,Zhang^[6]率先将零扩展度光源的照明问题转化为 Monge-Ampère 类型的二阶偏微分方程问题,得到了一个带有字母“oec”的复杂光照分布,由于在建立 Monge-Ampère 方程的过程中自动满足了可积性条件,由此得到的自由曲面类型可以实现对光束的精确控制,但是 Ries 等人当时没有公布 Monge-Ampère 方程的具体求解过程。2007年,L. Wang^[7]根据光源空间的立体角与照明目标的观测坐标之间的映射关系,采用了一种基于变量可分离的光线映射方法,设计了在目标表面产生字母 E 图案的自由曲面透镜。2008年,Y. Ding^[8], Y. Luo^[9]对光源空间和照明目标空间的能量分布进行网格划分,根据能量守恒定理和边界条件,构造了一阶偏微分方程,用数值方法求解了偏微分方程。然而,这种光线映射机制的建立过程仍然是以人工方式进行的相对简单的能量网格划分,得到的映射关系也难以满足可积条件。2013年,R. Wu^[10]首次给出了 Monge-Ampère 方程的详细数值求解过程,随后 Z. Feng^[11]和 DMITRY A. BYKOV^[12]分别采用不同的方法求解 Monge-Ampère 方程,均获得了较好的设计结果。此后,Oliker V 和 Kravchenko S V 等采用支撑二次曲面法^[13-15]将照明目标离散化,利用二次曲面的光学特性,将光源空间不同子区域发出的光束聚焦到照明目标表面的特定位置,实现对能量的精确控制,该方法理论上可以实现任意复杂的照明分布,但是通常需要数量很大的二次曲面来构造接近光滑的准连续自由曲面面型,这使得该方法的光学设计效率不高。

自由曲面光学系统设计的理论已越来越完善,然而目前自由曲面光学系统设计仍主要集中在对称

式的均匀照明领域,如曾茂庭通过将扩展光源和透镜表面离散化,反向追迹构建一种基于双自由曲面的均匀照明系统,有效提升了基于扩展光源的目标面的照度均匀性^[16]。段文举利用扩展光源边缘光线经过透镜折射后形成的角度差值来控制目标面的照度分布,对含有扩展光源的照明系统设计具有指导意义^[17]。Shili W 通过将照明计算与空间变异卷积数学模型相结合,开发出一种无需近似值即可直接计算的紧凑、高效照明光学系统设计方法^[18]。近几年国内逐渐开始了针对非对称照明需求的光学系统设计研究,如2023年 Wei S 等基于能量守恒关系和边界条件,将问题同样转化为 Monge-Ampère 方程,并构建能量传输代价函数,映射关系最优解满足 Monge-Ampère 方程并使代价函数最小^[19]。此后2024年陆建东采用基于梯度和形状因子的网格优化方法,设计了一种用于非均匀照明的自由曲面透镜,简化了平滑映射关系的求解,一定程度上提高了设计效率^[20],但是非对称照明的自由曲面光学系统设计仍然需要大量繁杂的理论计算,存在模型复杂、工作量大、耗时长等问题。

为此,本文在前人研究基础上,基于最优传输理论的光线映射方法,结合 LightTools 光学软件,减少了复杂的计算工作,优化设计了一种可实现非对称照明的自由曲面光学系统,实现了工作距离 20 mm, 50 mm × 50 mm 范围内的字母“JL”分布的照面光斑,为提高非对称照明的自由曲面光学系统的设计效率提供了一种设计思路。

2 基于最优传输理论的光线映射方法

自由曲面照明光学设计旨在将光源空间的能量重新分配至目标空间,并且遵循能量守恒定律和边界条件^[21],属于数学领域的最优传输理论。

首先用 $E_s(x_s, y_s)$ 表示光源所在空间 S 的能量分布,用 $E_t(x_t, y_t)$ 表示照明目标所在空间 T 的能量分布,光源与目标之间的映射关系为 $m: S \rightarrow T$ 则根据能量守恒定律可以得到:

$$\iint_T h(x_t, y_t) E_t(x_t, y_t) dx_t dy_t = \iint_S h(m(x_s, y_s)) E_t(x_s, y_s) dx_s dy_s \quad (1)$$

其中 h 为任意连续函数。将 $(x_i, y_i) = m(x_s, y_s)$ 代入公式(1)整理后可以得到:

$$\iint_s h(m(x_s, y_s)) [E_s(x_s, y_s)] - E_t(m(x_s, y_s)) \det(\nabla m(x_s, y_s)) dx_s dy_s = 0 \quad (2)$$

由于 h 为连续任意函数, 所以有:

$$\det(\nabla m(x_s, y_s)) = \det(D^2u) \quad (3)$$

Brenier^[22] 等人证明了最优映射其实是一个凸函数的唯一梯度, 在本处用 u 代表这一凸函数, 也就是 $m = \nabla u$, 代入公式(3)中得到:

$$\det(D^2u) = \frac{E_s(x_s, y_s)}{E_t(\nabla u(x_s, y_s))}, (x_s, y_s) \in S \quad (4)$$

至此, 照明中的最优传输理论问题已经被转化为公式(4)所示的 Monge-Ampère 方程, 并满足公式(5)所表示的边界条件。

其中 D^2u 为凸函数 u 的 Hessian 矩阵。在映射过程中还要满足边界条件, 从而保证光源边界 ∂S 处的能量映射至目标的边界 ∂T , 即:

$$\nabla u(\partial S) = \partial T \quad (5)$$

Prins 等人所用的最小二乘原理^[23], 求出来满足最小代价函数如式(6)所示的 Monge-Ampère 方程的解即光源和照明目标之间的光线映射。

$$c(m) = \iint_s |(x_s, y_s) - m(x_s, y_s)|^2 E(x_s, y_s) \cdot dx_s dy_s \quad (6)$$

基于最优传输理论的光线映射方法的光线映射机制在近轴照明情况下表现出较强的光线控制能力, 但是由于建模过程中没有考虑可积性条件, 随着照明角度的增加, 设计出的自由曲面控光能力会逐渐下降^[24], 因此利用基于最优传输理论的光线映射方法获得自由曲面面型后可以 LightTools 光学软件进一步优化以达到更好的设计效果。

3 面向零扩展度光源的自由曲面光学系统设计

本文以在光源到辐照面距离 20 mm, 50 mm × 50 mm 范围内实现“JL”两个字母的照度分布作为设计目标, 目标照度分布如图 1 所示。

零扩展度光源作为理想光源, 其光束扩展量为零, 考虑到压缩光学系统的体积, 本文以零扩展度光源、光源到自由曲面反射镜距离为 1 mm 作为初始条件。根据基于最优传输理论的光线映射方法, 计算得到面向零扩展度光源的自由曲面光学系统初始参数如表 1

所示, 系统结构和辐照面上照度分布如图 2 所示。

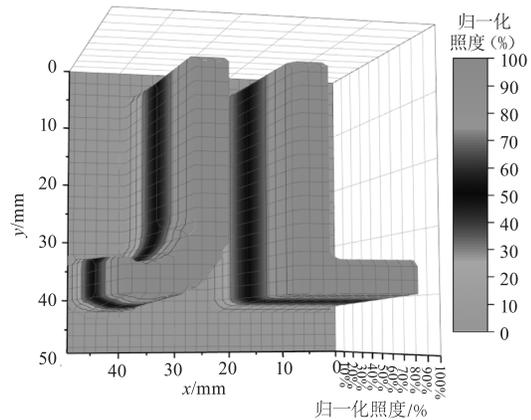


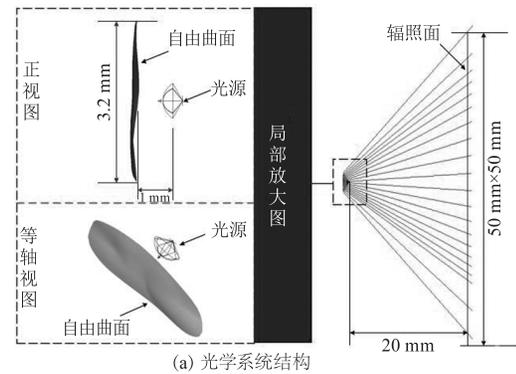
图 1 目标照度分布

Fig. 1 Target illuminance distribution

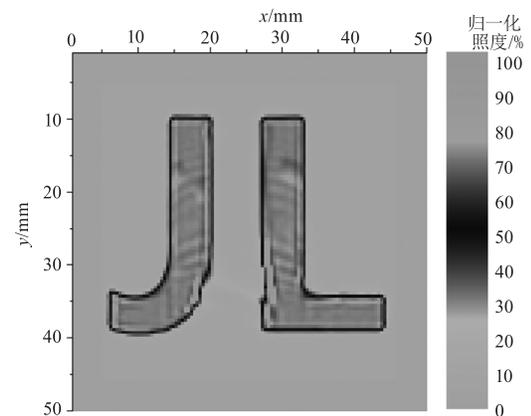
表 1 面向零扩展度光源的自由曲面光学系统初始参数

Tab. 1 Initial parameters of the free-form optical system for a zero-extension light source

名称	参数
自由曲面直径/mm	3.2
光源与自由曲面距离/mm	1



(a) 光学系统结构



(b) 辐照面照度分布

图 2 零扩展度光源的自由曲面反射光学系统初始结果

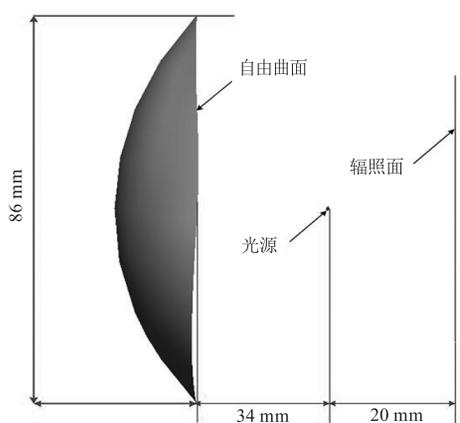
Fig. 2 Initial results of a free-form reflective optical system with a zero-expansion light source

根据图 2(b)可知,字母“J”和“L”之间存在无法分辨的区域,因此,利用 LightTools 软件以自由曲面直径、光源到自由曲面反射镜距离以及自由面型参量为优化变量,以字母“J”和“L”清晰分辨为优化目标,优化基于零扩展度的自由曲面光学系统,优化后的参数如表 2 所示,此时系统结构和辐照面上照度分布如图 3 所示。

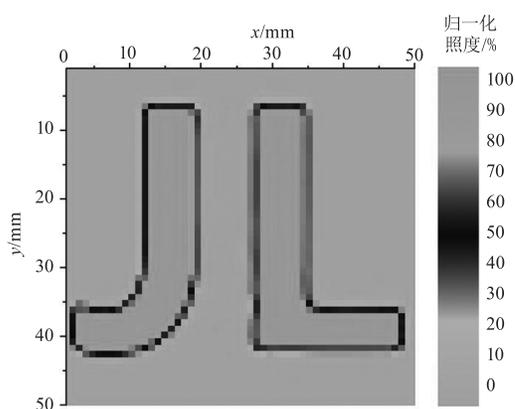
表 2 面向零扩展度光源的自由曲面光学系统优化结果

Tab. 2 Optimization results of free-form optical system for zero-extension light source

名称	参数
自由曲面直径/mm	86.52
光源与自由曲面距离/mm	34



(a) 光学系统结构



(b) 辐照面照度分布

图 3 面向零扩展度光源的自由曲面光学系统优化结果

Fig. 3 Optimization results of a free-form optical system for a zero-extension light source

根据图 3(b)可知,此时在零扩展度光源情况下,此时在辐照面距离 20 mm,50 mm × 50 mm 范围内实现“JL”两个字母的照度分布调控。

4 面向扩展光源的自由曲面光学系统设计

由于实际上零扩展度光源并不存在,同时当自由曲面光学元件的尺寸大于 LED 光源发光面尺寸 5 倍时,此时 LED 光源的尺寸在照明设计中可以忽略不计^[7],可以当做零扩展度光源,因此,在面向零扩展度光源的自由曲面光学系统设计结果基础上,以光源直径为 10 mm 验证扩展光源情况下,自由曲面反射系统能否满足扩展光源的使用需求,此时辐照面照度分布情况如图 4 所示。

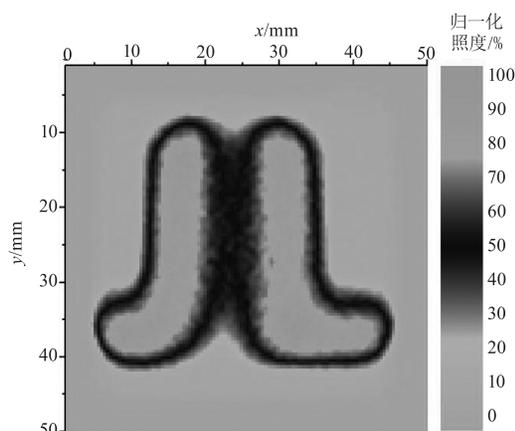


图 4 光源半径 5 mm 时辐照面分布情况

Fig. 4 Irradiation surface distribution at 5 mm radius of light source

根据图 4 可知,此时字母“J”和“L”中间出现了无法分辨的情况,因此应当以面向零扩展度光源的自由曲面光学系统为初始结构,对面向扩展光源的自由曲面光学系统面型以及 J 和 L 进一步优化。优化后的参数如表 3 所示。

表 3 面向扩展光源的自由曲面光学系统优化结果

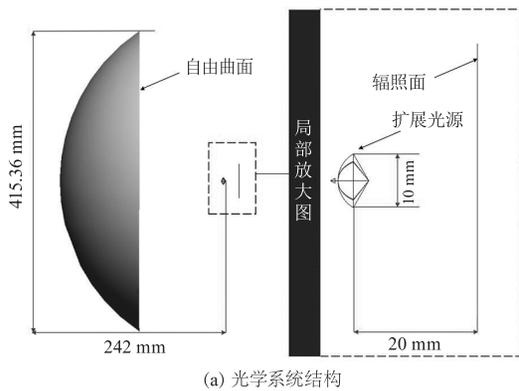
Tab. 3 Optimization results of free-form optical system for extended light sources

名称	参数
自由曲面直径/mm	435.16
光源与自由曲面距离/mm	242

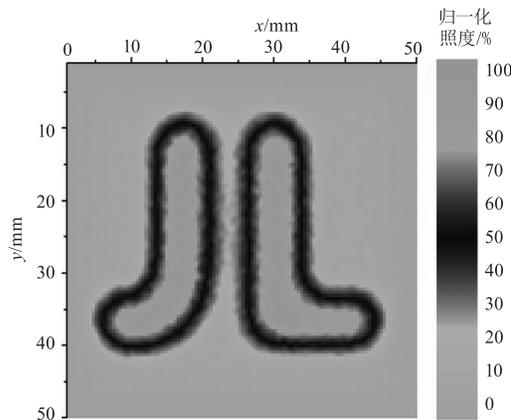
此时系统结构和辐照面上照度分布如图 5 所示。

根据图 5 可以看出在光源半径 5 mm 情况下,字母“J”和“L”可以清晰分辨。在此基础上,在零扩展度光源和直径 12 mm 和 14 mm 三种光源情况下,仿真此时的辐照面照度情况,如图 6 所示。

根据比较图6(a)和图3(b)可知,在零扩展度光源情况下,面向扩展光源的自由曲面光学系统相比于面向零扩展度的自由曲面光学系统的照度分布边缘更加的锐利清晰;根据图6(b)可知,在扩展光源直径为12 mm时,字母“J”和“L”中间的边缘出现了少量叠加现象,字母“JL”的主体较为清晰,可以辨别;根据图6(c)可知,在扩展光源直径为14 mm时,字母“J”和“L”中间的边缘出现大量叠加现象,两个字母融为一体。



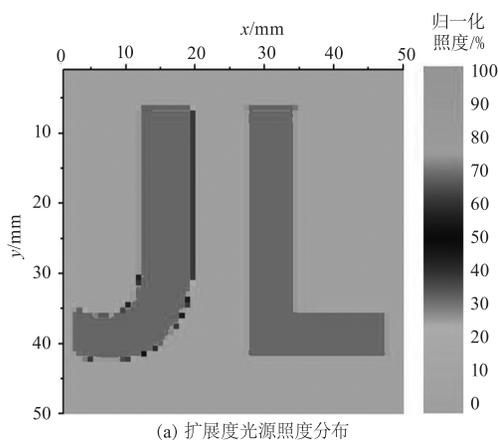
(a) 光学系统结构



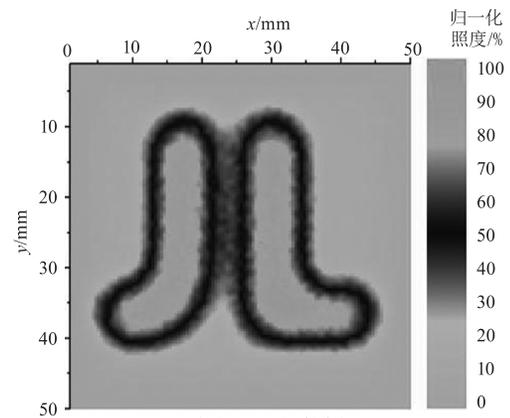
(b) 辐照面照度分布

图5 面向扩展光源的自由曲面光学系统优化结果

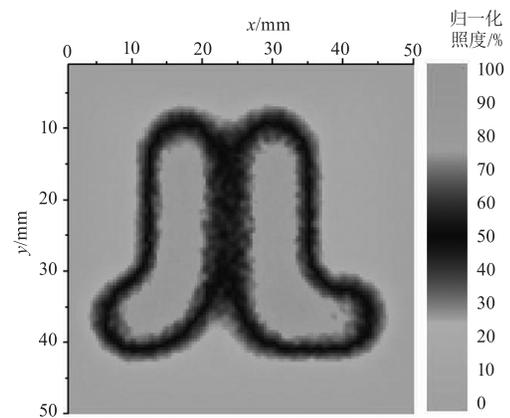
Fig. 5 Optimization results of free-form optical system for extended light sources



(a) 扩展光源照度分布



(b) 直径12 mm照度分布



(c) 直径14 mm照度分布

图6 三种光源情况下照度分布

Fig. 6 Illuminance distribution in the case of three light sources

5 结论

本文基于最优传输理论的光线映射方法,以光源到辐照面距离为20 mm,在50 mm × 50 mm 范围内实现字母“JL”为目标,分别针对零扩展度光源和扩展光源,利用 Lighttools 光学软件优化设计了两种自由曲面光学系统,分别对两种光学系统进行了仿真分析,仿真结果表明:当自由曲面反射镜直径为86.52 mm,光源与自由曲面距离为34 mm时,面向零扩展度光源能够实现字母“JL”的照度分布调控;当自由曲面直径为435.16 mm,光源与自由曲面距离为242 mm时,面向直径为10 mm的扩展光源能够实现字母“JL”的照度分布调控,并在此情况下仿真了零扩展度光源、直径为12 mm和14 mm的扩展光源的照度分布调控情况,此时零扩展度光源的照度分布相较于针对零扩展光源设计时的照度分布边缘更锐利清晰,直径为12 mm扩展光源的照度分布字母“JL”之间出现了少量边缘的叠加现象,直径为14 mm扩展光源的照度分布字母“JL”之间出现了边缘重叠现象,两个字母中间难以区分,可知在对分

布调节要求不高的情况下可以近似使用,为简化非对称照明的自由曲面光学系统的设计流程,提高设计效率提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] Luo Yue, Li Libo, Feng Yutao, et al. An initial structure design method for free-form optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2422002. (in Chinese)
罗越, 李立波, 冯玉涛, 等. 一种自由曲面光学系统初始结构设计方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2422002.
- [2] Sun Yanjie, Liu Hua, Li Jinhuan, et al. Free-form optical lenses for smoothing DMD scanning photolithography pattern edges [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2019, 48(4): 0411002. (in Chinese)
孙彦杰, 刘华, 李金环, 等. 自由曲面光学透镜平滑 DMD 扫描光刻图形边缘 [J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0411002.
- [3] Wu R, Yang L, Ding Z, et al. Precise light control in highly tilted geometry by freeform illumination optics[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2887 – 2890.
- [4] Feng Z, Cheng D, Wang Y. Iterative freeform lens design for prescribed irradiance on curved target[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(7): 200010.
- [5] Zhu Z, Wei S, Li W, et al. Freeform illumination optics for 3D targets through a virtual irradiance transport[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15382 – 15392.
- [6] Ma Yufei, Zhang Hang, Su Zeyu, et al. Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4503.
- [7] Desnijder Karel, Hanselaer Peter, Meuret Youri. Flexible design method for freeform lenses with an arbitrary lens contour[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5238.
- [8] Karel Desnijder, Peter Hanselaer, Youri Meuret. Flexible design method for freeform lenses with an arbitrary lens contour[J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42, 5238 – 5241.
- [9] Luo Y, Feng Z, Han Y, et al. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9055 – 9063.
- [10] Wu R, Liu P, Zhang Y, et al. A mathematical model of the single freeform surface design for collimated beam shaping [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20974 – 20989.
- [11] Feng Z, Cheng D, Wang Y. Iterative wavefront tailoring to simplify freeform optical design for prescribed irradiance [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2274 – 2277.
- [12] Bykov D A, Doskolovich L L, Mingazov A A, et al. Linear assignment problem in the design of freeform refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27812 – 27825.
- [13] Oliker V, Rubinstein J, Wolansky G. Supporting quadric method in optical design of freeform lenses for illumination control of a collimated light[J]. *Advances in Applied Mathematics*, 2015, 62: 160 – 183.
- [14] Kravchenko S V, Byzov E V, Moiseev M A, et al. Development of multiple-surface optical elements for road lighting [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A23 – A35.
- [15] Oliker V. Controlling light with freeform multifocal lens designed with supporting quadric method(SQM) [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A58 – A72.
- [16] Zeng Maoting, Lou Jun, Cen Songyuan, et al. Design method for double free-form surface with uniform illumination based on an extended light source[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2023, 60(19): 172 – 176. (in Chinese)
曾茂庭, 楼俊, 岑松原, 等. 基于扩展光源的双自由曲面均匀照明设计方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 172 – 176.
- [17] Duan Wenju, Piao Mingxu, Quan Xiangqian, et al. Design of compact double freeform surface lens with uniform illumination for extended light source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(15): 161 – 169. (in Chinese)
段文举, 朴明旭, 全向前, 等. 适于扩展光源的紧凑型双自由曲面匀光透镜设计 [J]. *光学学报*, 2022, 42(15): 161 – 169.
- [18] Shili W, Zhengbo Z, Wenyi L, et al. Compact freeform illumination optics design by deblurring the response of extended sources[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2770 – 2773.
- [19] Wei S, Zhu Z, Ma D. Efficient and compact freeform optics design for customized LED lighting[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109775.
- [20] Lu Jiandong, Chen Jiawen, Liu Rui, et al. Design of freeform lens based on gradient and shape factor of grids[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(2): 0422005 – 1 – 0422005 – 7. (in Chinese)
陆建东, 陈嘉文, 刘锐, 等. 基于网格梯度和形状因子的自由曲面透镜设计 [J]. *光学学报*, 2024, 44(2): 0422005 – 1 – 0422005 – 7.
- [21] Desnijder K, Hanselaer P, Meuret Y. Ray mapping method for off-axis and non-paraxial freeform illumination lens design[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 771 – 774.
- [22] Villani C. Topics in optimal transportation [M]. *American Mathematical Society*, 2003. 125 – 126.
- [23] Prins C R, Beltman R, Ten Thije Boonkamp J H M, et al. A least-squares method for optimal transport using the monge-ampre equation [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2015, 37(6): B937 – B961.
- [24] Zhengbo Zhu. Research on the optics design method of freeform illumination[D]. *Wuhan: Huazhong University of Science and Technology*, 2021. (in Chinese)
朱正波. 基于自由曲面的照明光学设计方法研究 [D]. *武汉: 华中科技大学*, 2021.