

适于扩展光源的紧凑型双自由曲面匀光透镜设计

段文举¹, 朴明旭^{1,2*}, 全向前², 曾翌¹¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000

摘要 为了解决现有含有扩展光源的照明系统能量利用率低、透镜体积大、照度不均匀等问题,根据非成像光学边缘光线理论,提出了一种适用于扩展光源的双自由曲面设计方法。利用扩展光源的左右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,根据设计目标参数,计算内外自由曲面离散点,拟合内外自由曲面的轮廓曲线,得到旋转对称的双自由曲面透镜。在透镜高度与光源直径之比仅为 2 的情况下,利用此方法,经过数值计算以及光学仿真,设计了高能量利用率、高均匀性的双自由曲面透镜。近场双自由曲面光学系统的能量利用率为 99.52%,照度均匀度为 95.81%;远场双自由曲面光学系统的能量利用率为 99.12%,照度均匀度为 93.45%。研究表明,所提设计方法将对含有扩展光源的照明系统设计具有指导意义。

关键词 光学设计; 扩展光源; 非成像光学; 双自由曲面透镜; 均匀照明

中图分类号 TN312

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1522001

Design of Compact Double Freeform Surface Lens with Uniform Illumination for Extended Light Source

Duan Wenju¹, Piao Mingxu^{1,2*}, Quan Xiangqian², Zeng Yi¹¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, Hainan, China

Abstract In order to solve the problems of low energy utilization, large lens size, and non-uniform illumination of existing lighting systems with the extended light source, according to the non-imaging optical marginal ray principle, this paper proposes a double freeform surface design method suitable for the extended light source and utilizes the angle difference formed by the refraction of the left and right marginal rays of the extended light source through the lens to control the illuminance distribution in the target plane. According to the design parameters, this paper calculates discrete points in the internal and external freeform surfaces, fits the contour curves of the internal and external freeform surfaces, and obtains a rotationally symmetric double freeform surface lens. In the case that the ratio of lens height to light source diameter is only 2, the paper adopts this method to design a double freeform surface lens with high energy utilization and high uniformity after numerical calculation and optical simulation. The energy utilization of the near-field double freeform optical system is 99.52%, and the illuminance uniformity is 95.81%; the energy utilization of the far-field double freeform optical system is 99.12%, and the illuminance uniformity is 93.45%. The research results show that the proposed method will guide the design of lighting systems with extended light sources.

Key words optical design; extended source; non-imaging optics; double freeform surface lens; uniform illumination

1 引言

随着新能源照明技术的发展,LED作为新一代绿色照明器件,具有体积小、发光效率高、成本低等优点,

已经广泛用于照明领域^[1-3]。自由曲面光学系统设计相比于传统的球面光学系统,有体积小、能量利用率高等优点,可有效减小整个光学系统的长度与体积^[4-5],现代光学加工技术的进步,如注塑技术,推动了光学自

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(62105041)

通信作者: *piaomingxu123@126.com

由曲面在光学系统中的应用。

如今,多芯片和大型LED主导着发达国家的照明市场。迄今为止,并没有一种通用的适用于扩展光源的光学设计方法可实现预期的照度分布,而针对LED二次配光的自由曲面技术日趋成熟。自由曲面设计方法主要有同步多表面(SMS)法、波前裁剪法、光线映射法、偏微分方程(PDE)法等^[6-9]。其中:SMS法虽然可以直接用于扩展光源照明系统设计,可以很好地控制边缘光线,但是所设计系统的能量利用率为54%^[10];PDE法虽然可以通过迭代优化去满足可积条件,但是只适用于点光源^[11-12]。

适用于扩展光源的设计方法主要有点光源设计法^[13]和SMS法^[14]。点光源设计法首先基于能量守恒定理和折射定理,建立光线与目标面之间一一对应的关系,得到初始结构,然后进行优化设计^[15]。黄丹等^[16]通过改变自由曲面面型上的采样点进行迭代优化,设计的基于扩展光源的单自由曲面透镜的能量利用率为94.50%,目标面均匀度为89.00%;吴涛等^[17]提出了基于加权叠加法的单自由曲面透镜设计,经优化后,目标面上的均匀度从初始结构的78.93%提高到90.67%,同时光能利用率大于92.00%,但是透镜高度 h 与光源直径 D 之比(h/D)为5;李登高等^[18]基于遗传算法优化自由曲面,对直径为3 cm的扩展光源进行4.8 h优化后,其目标面上照度均匀度提高到93.50%,但是反射镜的口径较大,为300 mm;李潇等^[19]结合自然选择粒子群(SelPSO)算法进行2.2 h优化,得到 $h/D=2.5$ 的适用于扩展光源的紧凑型单自由曲面匀光透镜,目标面照明均匀度达到89.00%;Wang等^[20]基于扩展光源提出了反馈优化算法,但是当 $h/D < 3$ 时,此方法会失效。

Mao等^[21-23]提出了一种光强设计方法,且设计的双自由曲面透镜结构紧凑, $h/D=3$,能量利用率为98.7%,可在目标面上实现预定的光强分布;Hu等^[24]利用基因遗传算法,设计了双自由曲面匀光透镜。但是这些方法都只适用于远场照明。

反馈迭代法用于设计扩展光源透镜时,步骤繁琐,且设计出的透镜体积大、能量利用率低;光强设计法只适用于设计远场照明透镜。为解决现有设计方法的局限性,本文在前人的研究^[25]基础上,提出了一种双自由曲面透镜设计方法,利用LED扩展光源的发光特性以及边缘光线原理,根据边缘光线在目标面投射角度的差值,利用折射定律只需经过数值计算,即可在目标面实现均匀的照度分布。最后设计了远场、近场都适用的高能量利用率、体积紧凑、高均匀度的双自由曲面匀光透镜。

2 设计原理以及方法

2.1 二维平面光照度推导

如图1所示,长度为 S_1S_2 的LED扩展光源的发射角为 θ ,则光源发出的总光通量为

$$\Phi_S = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} I_0 \cos \theta d\theta, \quad (1)$$

式中: I_0 为光源在法线方向上的发光强度; $\theta_{\min} = -\theta_{\max} = -90^\circ$ 。

根据设计目标,目标面光照度处处相等,光源在半径为 R 的目标面上产生的光通量为

$$\Phi_T = \int_{\theta_{\text{left}}}^{\theta_{\text{right}}} L \pi R^2 d\theta, \quad (2)$$

式中: L 为光源的光亮度; θ_{left} 、 θ_{right} 为光线经过透镜折射到达目标面某个位置后与从该点作关于 X 轴的垂线所成的夹角,规定:从光源所在点 S_1 、 S_2 发出的光线经过透镜折射后到达目标面上某点与 Z 轴所形成的夹角与 θ_{left} 一致时为正,与 θ_{right} 一致时为负。

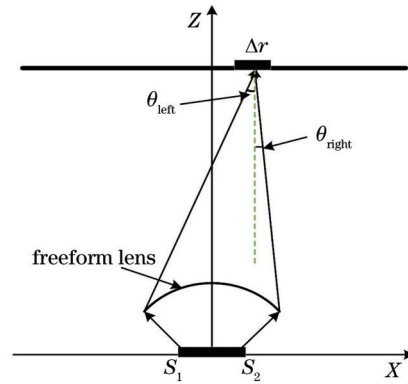


图1 二维平面光通量积分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional planar luminous flux

根据能量守恒定律,光源发出的光通量 Φ_S 与目标面接收到的能量 Φ_T 相等,即

$$\Phi_S = \Phi_T. \quad (3)$$

设一束光的光亮度为 L ,出射方向为 θ ,光线角度宽为 $d\theta$,光入射到平面上一个微分区域 Δr ,则此区域内的光通量为

$$\Delta\Phi = L \Delta r \cos \theta d\theta. \quad (4)$$

由LED的发光特性可知,LED光亮度处处相等^[21]。如图1所示,在二维情况下,有一定长度的LED光源,其边缘光线经过自由曲面透镜后,在目标平面上的微分区域 Δr 处的微分照度为 ΔE ,则此区域内的光通量为

$$\Delta\Phi = \Delta E \Delta r. \quad (5)$$

因为目标平面的照度微元 $\Delta E(r)$ 等于光线与目标平面的夹角与光亮度乘积:

$$\Delta E(r) = L \cos \theta d\theta, \quad (6)$$

在二维平面上,照度为

$$E_{2D} = L \int \cos \theta d\theta, \quad (7)$$

通过积分得到

$$E_{2D} = L \int_{\theta_{\text{right}}}^{\theta_{\text{left}}} \cos \theta d\theta = L (\sin \theta_{\text{left}} - \sin \theta_{\text{right}}) = L \Omega_{2D}, \quad (8)$$

式中: Ω_{2D} 为投射平面角,在三维空间中为投射立体角。

投射平面角的积分上下限分别由光源的两条边缘光线到达目标面与竖直方向所成的夹角决定。当设计自由曲面匀光透镜时,通过式(8)可以推出,当目标面照度处处相等时,只需控制光线经过透镜后形成的 Ω_{2D} 相等即可。

2.2 设计方法与步骤

2.2.1 设计初始曲线

设计自由曲面透镜时,首先需要将抛物曲线作为初始曲线,然后在抛物曲线的基础之上,通过迭代计算自由曲面透镜余下的部分。如图 2 所示, I_1I_2 和 O_1O_2 为初始曲线,且 I_1 与 I_2 、 O_1 与 O_2 点关于 Z 轴对称。两条边缘光线 S_1I_1 和 S_2I_2 经过第一个自由曲面折射后分别到达 O_1 点与 O_2 点,出射光线 1 和 2 到达照明面的中心点 R_0 点。此时光线 1、2 与 Z 轴形成的夹角为 $\theta_{l(0)}$ 、 $\theta_{r(0)}$,且 $\theta_{r(0)} = -\theta_{l(0)}$ 。在计算了曲线 I_1I_2 和 O_1O_2 在 I_1 点和 O_1 点的一阶导数后,使用两个抛物线拟合内外自由曲面初始轮廓。一个抛物线作为入口轮廓,另一个抛物线表示出口轮廓的初始曲线。为确保所有光线都可以射入透镜内, I_1 点的坐标应确保曲线 I_1I_2 开口向下,即确保在 I_1 点的一阶导数为负。 O_1 的坐标取决于 $\Omega_{2D}(0)$,决定了在 R_0 点的照度,同时 O_1 的 Z 坐标应该满足预先设定的透镜口径尺寸要求。

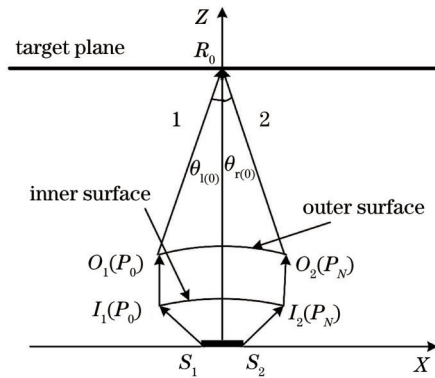


图 2 双自由曲面透镜的初始曲线构造示意图

Fig. 2 Schematic of initial curve construction of double freeform surface lens

取初始点坐标 O_1 、 I_1 ,其中 I_1I_2 和 O_1O_2 是预设的初始二次多项式曲线:

$$z = a_i x^2 + b_i, \quad (9)$$

式中: $i=1,2$ 代表内、外两个透镜轮廓; a_i 为多项式系数; b_i 为常数项。

光线从光源左侧边缘的点 S_1 发出,在两个表面轮廓处的点 I_1 和 O_1 折射。在 XOZ 平面上的第二象限任意选择 O_1 点坐标, R_0 已知,在透镜界面上,自由曲面离散点的法向量可通过折射定律的矢量形式求解^[24]:

$$N = N_x \hat{x} + N_z \hat{z} = \frac{n_o e_{out} - n_i e_{in}}{\sqrt{n_o^2 + n_i^2 - 2n_o n_i e_{out} \cdot e_{in}}}, \quad (10)$$

式中: e_{in} 、 e_{out} 分别为入射光线和出射光线的单位法向量; n_i 和 n_o 分别为入射和折射介质的折射率; N_x 为 N 在 X 方向的分量; N_z 为 N 在 Z 方向的分量; \hat{x} 和 \hat{z} 都为

单位基。二次曲线端点 I_1 的斜率由它的法向量求得: $k_{I_1} = -N_x/N_z$,求式(9)关于 x 的一阶偏导数,并将 I_1 点坐标代入,则二次多项式曲线 I_1I_2 的参数 a_1 和 b_1 可以导出为

$$a_1 = k_{I_1}/(2x_{I_1}), b_1 = z_{I_1} - a_1 x_{I_1}^2, \quad (11)$$

式中: x_{I_1} 为 I_1 点的 X 坐标; z_{I_1} 为 I_1 点的 Z 坐标。为了求出初始曲线的参数、达到控制光线走向的目的,如图 2 所示,从 S_1 点发出的光线经过 I_1 、 O_1 点后需到达目标面上 R_0 点,因此逆向追迹光线 1,则在点 O_1 折射后的光线将会通过 I_1 点传播至 S_1 点。曲线 O_1O_2 的参数 a_2 、 b_2 也可以根据上述过程类似地导出。计算出的二次抛物线将用于求解内、外自由曲面的剩余部分。

2.2.2 计算自由曲面剩余部分

沿 X 轴均分初始曲线 O_1O_2 ,得到一系列数据点 $P_i(i=1,2,\dots,N)$,光线 S_1Q_i 经过 Q_i 进入透镜之后到达 P_i 点,且内自由曲面的抛物线表达式已知,故 Q_i 点坐标可以通过费马原理计算出来。从 S_1 、 S_2 点发出的光线经过光学系统折射后在目标面 R_i 点与 Z 轴形成的角分别为 $\theta_{l(i)}$ 、 $\theta_{r(i)}$ 。如图 3 所示,对于边缘光线 S_1Q_1 来说,它的出射光线 3 最终到达目标平面上的 R_1 点,根据点 P_1 和 R_1 的坐标可以求得 $\theta_{l(1)}$ 的值,将 $\theta_{l(1)}$ 代入式(8)可求出 $\theta_{r(1)}$ 。逆向追迹从 R_1 发射的光线 4,且光线 4 与 Z 轴形成的夹角为 $\theta_{r(1)}$,代入 R_1 点的坐标,可求得光线 4 的直线表达式。点 P_{N+1} 为光线 4 与前一点 P_N 处的切线的交点,即切向矢量 T_{P_N} 与光线 4 的交点为 P_{N+1} ,此时 P_{N+1} 点的坐标即可求出。

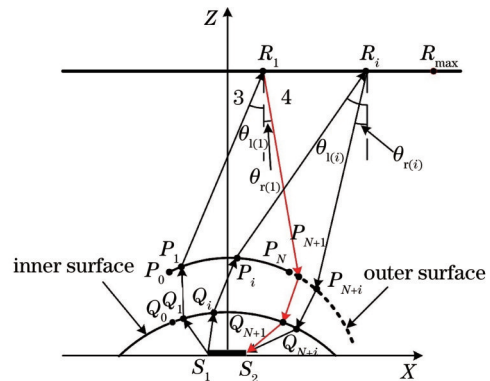


图 3 内外自由曲面迭代求解

Fig. 3 Iterative calculation of internal and external freeform surfaces

下一步,通过逆向追迹光线 4 折射到达 S_2 的条件来计算点 P_{N+1} 处的法向量。在保持原有的曲线参量 a_i 、 b_i 不变的同时,将内自由曲面进行三次样条拟合,这样内自由曲面上 Q_0, Q_1, \dots, Q_{N+1} 点的坐标以及切向量 $T_{Q_N}, T_{Q_{N+1}}, \dots, T_{Q_{N+i}}$ 均已知,求解过程如图 4 所示。 P_{N+1} 、 Q_{N+1} 点的坐标已知,折射光线 $\overrightarrow{P_{N+1}Q_{N+1}}$ 向量可求出, P_{N+1} 点处的入射向量为 $\overrightarrow{R_1P_{N+1}}$,则 P_{N+1} 点的法向量可通过式(10)求出。重复此切线迭代计算过程,直到 R_{max} 处。

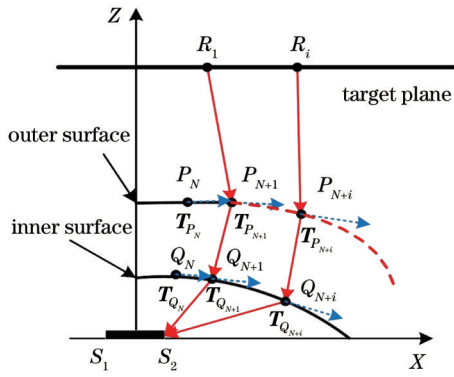


图 4 切线迭代法求解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of solution of tangent line iterative method

2.2.3 模拟仿真

计算出自由曲面离散点后,需要先将离散点进行参数化拟合,本文采用B样条曲线来实现光滑的自由曲面。B样条曲线^[26]可表示为

$$C(t) = \sum_{j=1}^{n+1} B_j M_{j,k}(t), \quad (12)$$

式中: B_j 为控制点; $M_{j,k}(t)$ 为 B 样条基。利用位置矢量

的长度或者选择光学表面上每个数据点的坐标作为一个变量。对这些离散的数据点进行插值,得到光滑的 B 样条曲线,最后通过旋转样条曲线就得到了光滑的自由曲面。

将计算得到的离散点导入三维建模软件中,利用软件中内置的 B 样条曲线构建功能将所有离散点拟合为曲线,再将拟合曲线绕 Z 轴旋转即可得到自由曲面透镜的三维实体模型。使用光学仿真软件进行模拟,采集仿真结果数据,计算照度均匀性 U 与能量利用率 η 。照度均匀性可以表示为

$$U = \frac{E_{\text{average}}}{E_{\text{max}}}, \quad (13)$$

式中: E_{average} 为目标面的平均照度值; E_{max} 为目标面的最大照度值。能量利用率 η 可表示为

$$\eta = \frac{\Phi_T}{\Phi_s}, \quad (14)$$

式中: Φ_T 为目标面接收到的能量; Φ_s 为光源发出的总能量。图 5 为双自由曲面透镜设计流程图,计算均匀性与能量利用率,判断其是否达到设计要求,若未达到要求,则继续优化初始点直至达到设计要求,一般初始点由设计者根据经验以及设计目标给出。

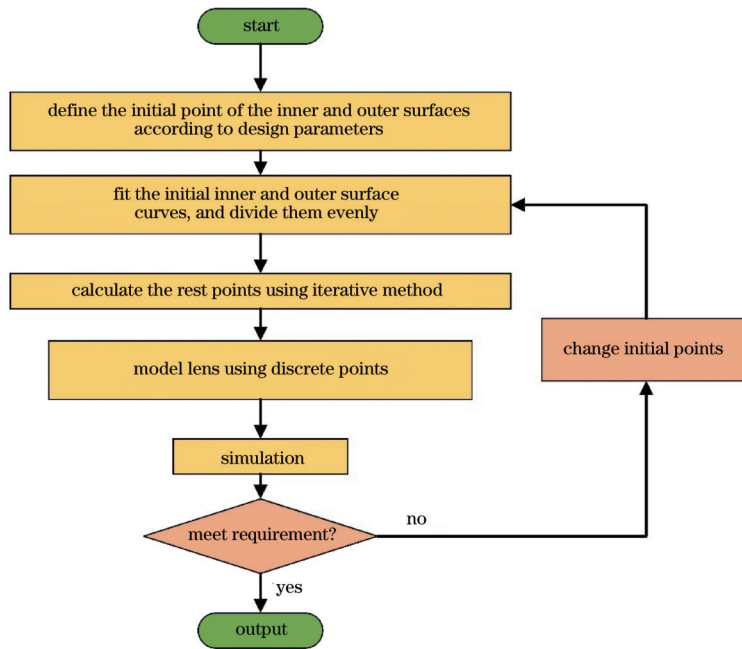


图 5 双自由曲面透镜设计流程图

Fig. 5 Design flow chart of double freeform surface lens

3 设计实例

3.1 近场照明设计

为了验证所提出设计方法的有效性,设计了用于近场照明的双自由曲面透镜,设计参数如表 1 所示。在 XOZ 平面上,设置外自由曲面的初始高度 $h=2\text{ mm}$,预设 I_1 点坐标为 $(0.4, 0.6)$, O_1 点的 Z 坐标值设为 0.19 mm , O_1 点的 X 坐标值可以根据 R 和光源与目标面之间的距离 H 的关系求出。

表 1 近场设计参数

Table 1 Design parameters in near field

Parameter	Value
Diameter of the source D / mm	1
Distance of target plane H / mm	25
Radius of target plane R / mm	25
Refractive index of lens n	1.59102

根据所提出的设计方法,结合式(10)、(11)并运用折射定律可以得到透镜出口以及入口轮廓的初始曲线 O_1O_2 、 I_1I_2 ,通过迭代循环求解内外自由曲面离散点,得到透镜轮廓曲线,如图 6 中实线部分所示。同时,根据王海宏^[25]提出的方法,构造一个内表面为球面的单自由曲面透镜,并与本文所提出的设计方法所构造的双自由曲面透镜进行对比。通过数值计算软件来求解两种类型透镜的轮廓曲线,结果如图 6 所示,实线为双自由曲面透镜轮廓,虚线为单自由曲面透镜轮廓。其中:双自由曲面透镜直径为 4 mm,透镜高度 $h=2$ mm, $h/D=2$;单自由曲面透镜直径为 3.98 mm,透镜高度 $h=2$ mm, h/D 同样为 2。将单、双自由曲面的自由曲面离散点导入 SolidWorks,拟合样条曲线,通过绕 Z 轴旋转得到透镜实体模型,如图 7 所示。

将透镜实体导入 LightTools 中,设置透镜材料,设置圆形的直径为 1 mm 的朗伯型光源,追迹 1×10^7 条光线进行仿真。单自由曲面透镜照明光学系统的光线追迹如图 8(a)所示,仿真结果如图 8(b)所示;双自由曲面透镜照明光学系统的光线追迹如图 8(c)所示,仿真结果如图 8(d)所示。将光学仿真软件中的仿真数据代入式(13)和式(14)进行计算,结果显示:单自由曲面

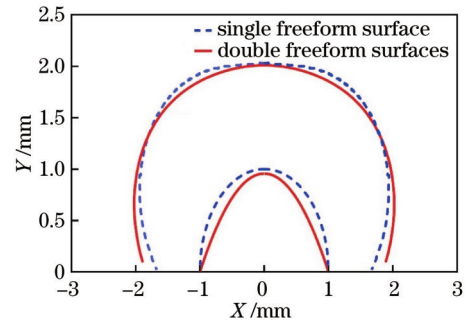


图 6 近场单双自由曲面透镜轮廓图

Fig. 6 Profiles of near field single and double freeform surface lenses

光学系统的能量利用率为 91.21%,目标面的照度均匀度为 81.23%;双自由曲面光学系统的能量利用率为 99.52%,目标面的照度均匀度为 95.81%。经过对比可以发现,本文所设计的双自由曲面透镜的光学性能相较于单自由曲面透镜,系统能量利用率提高了 8.31 个百分点,均匀度提高了 14.58 个百分点,系统的光学性能得到明显的提高。实验过程中,不考虑菲涅耳损耗以及光学元件的吸收。

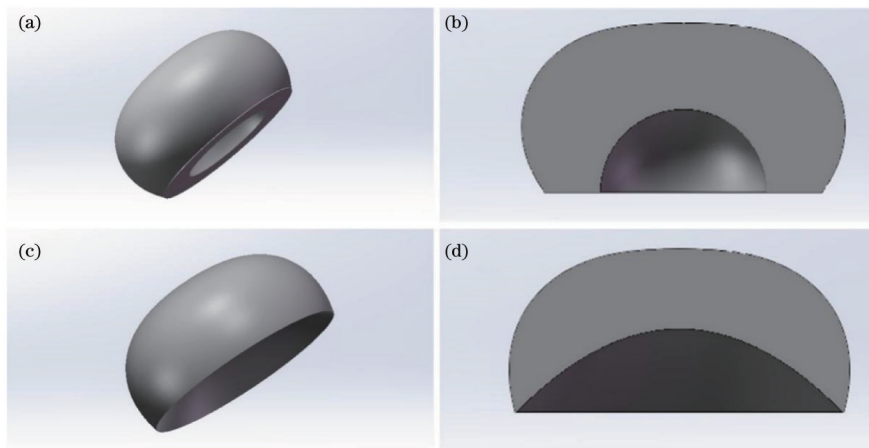


图 7 自由曲面透镜三维模型。单自由曲面透镜的(a)三维结构和(b)截面图;双自由曲面透镜的(c)三维结构和(d)截面图

Fig. 7 Three-dimensional models of freeform surface lenses. (a) Three-dimensional structure and (b) cross-sectional view of single freeform surface lens; (c) three-dimensional structure and (d) cross-sectional view of double freeform surface lens

由图 9 可知:光线经过双自由曲面透镜后,光斑半径小于 25 mm,达到设计目标,且目标面半径内能量利用率高、均匀度高;而单自由曲面只有一个面来控制光线的走向,仅将光线控制在半径为 20 mm 的目标范围内,光斑半径未达到设计目标。单自由曲面光学系统相比于双自由曲面光学系统,自由度低,对光线的控制能力较差,因此系统能量利用率和目标面照度均匀度较低;双自由曲面匀光透镜对光线的控制更好,可以实现更加优异的光学性能。

当设计完成之后,需要考虑实际加工问题。因为实际中得到的自由曲面透镜均会产生一定的制备误差,为了评价所设计自由曲面透镜的可加工性,对近场双自由曲面透镜加工过程中可能产生的误差对透镜的

光学性能的影响进行了公差分析。由于本文透镜是旋转对称的,所以决定透镜性能的最根本的变量还是拟合 B 样条曲线所需要的自由曲面离散点。以目标面均匀性为评价指标,对自由曲面离散点在公差范围为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 内的变化量对透镜光学性能的影响进行了公差分析,如图 10 所示。图 10 中横坐标为自由曲面离散点位移量,纵坐标为目标面照度均匀度。根据分析结果,当加工误差控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内,近场 25 mm 处目标面的均匀度最大变化量为 0.6%,仍然可以保持在 95% 以上。

为了验证所提出的设计方法在近场照明中的稳定性,设置光源到目标面的距离 H 等于目标面半径 R ,在保持 $h/D=2$ 的情况下,针对直径为 1 mm 的 LED 光源

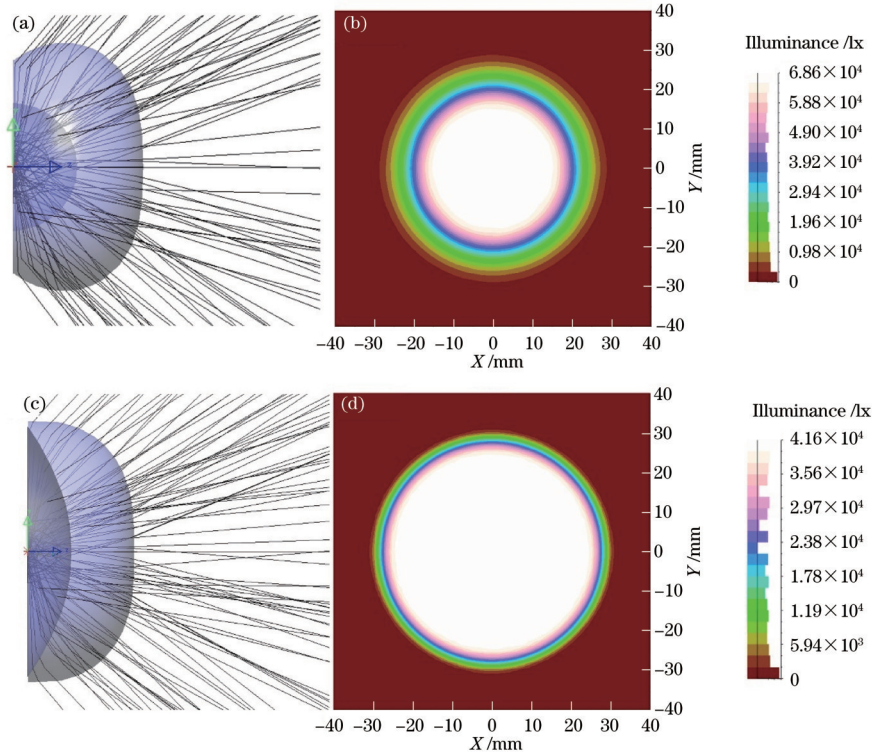


图 8 在 25 mm 远处的目标面上的模拟结果。单自由曲面透镜的(a)系统光线追迹和(b)仿真结果;双自由曲面透镜的(c)系统光线追迹和(d)仿真结果

Fig. 8 Simulation results on target plane 25 mm away. (a) System ray tracing and (b) simulation result of single freeform lens; (c) system ray tracing and (d) simulation result of double freeform lens

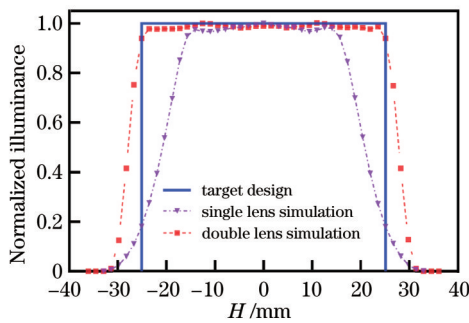


图 9 单自由曲面透镜与双自由曲面透镜的仿真结果对比
Fig. 9 Comparison of simulation results of single and double freeform surfaces lenses

设计了在 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm 处的双自由曲面透镜。导入 LightTools, 将仿真数据代入式(13)和式(14)进行计算, 得到了在 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm 处的目标面照度均匀度 U 以及透镜的能量利用率 η , 结果如图 11 所示。由图 11 可知: 在 10 mm 处的目标面照度均匀度为 79.13%, 能量利用率为 98.52%; 在大于 15 mm 处的目标面上, 照度均匀度均可达到 80.00% 以上。在近场照明中, 照明系统的性能对于照明距离的变化十分敏感, 在距离小于 20 mm 的情况下, $h/D=2$ 时, 光源与目标面之间的距离 H 与透镜的高度 h 的比值越来越小, 透镜尺寸对辐照度分布的影响越来越大, 透镜尺寸对辐照度分布

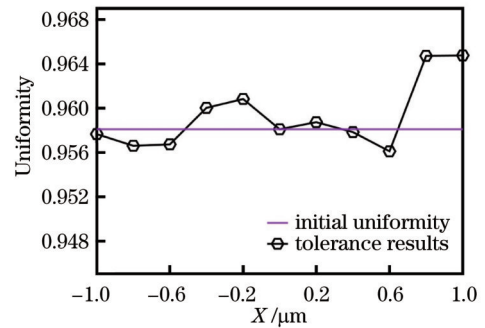


图 10 离散点在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 内的位移误差对照度均匀性的影响
Fig. 10 Influence of displacement error within $\pm 1 \mu\text{m}$ on illumination uniformity of discrete points

的影响是不可忽视的, 这就导致在近距离处照度均匀度下降。虽然在 10 mm 距离处照度均匀度较低, 但是基于所提方法设计的初始结构可以作为下一步优化的良好起点。

3.2 远场照明设计

为了验证此方法同样适用于远场照明, 设计适用于远场照明的双自由曲面透镜, 设计参数如表 2 所示。预设初始点 I_1 的坐标为 (8, 6), O_1 点的 Z 坐标为 18.9 mm, O_1 点的 X 坐标可以通过三角关系求出。

通过迭代计算得到的透镜轮廓曲线如图 12 所示, 透镜直径约为 45.7 mm, 透镜高度 $h=20$ mm, $h/D=2$ 。透镜实体模型如图 13 所示。

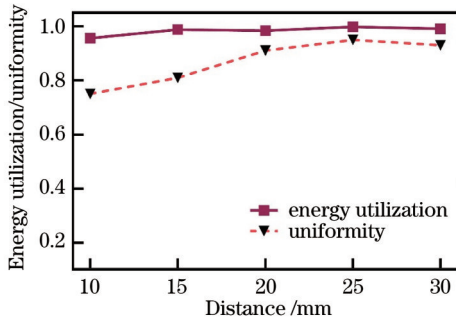


图 11 近场不同距离下系统的能量利用率与均匀性

Fig. 11 Energy utilization and uniformity of system at different distances in near field

表 2 远场照明设计参数

Table 2 Design parameters for far field illumination

Parameter	Value
Diameter of the source D /mm	10
Distance of target plane H /m	10
Radius of target plane R /m	10
Refractive index of lens n	1.59102

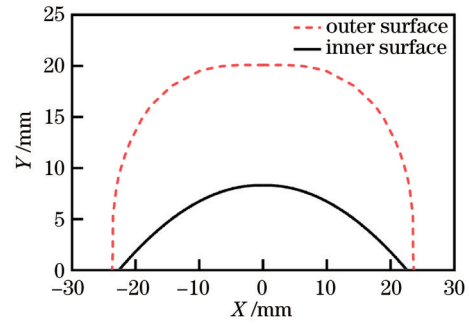


图 12 远场设计的双自由曲面透镜轮廓图

Fig. 12 Lens profile of far field double freeform surface design

将透镜实体导入 LightTools 中进行仿真,设置圆形的直径为 10 mm 的朗伯型光源,追迹 1×10^7 条光线,系统光线追迹图及仿真结果如图 14(a)、(b)所示。将采集的仿真结果及数据代入式(13)和式(14),得到光学系统的能量利用率为 98.67%,目标面照度均匀度为 92.49%。归一化照度示意图如图 15 所示,在半径为 10 m 的目标面内,照度均匀度超过 90.00% 以上,光线逸散少,光线落点控制在设计目标半径内。

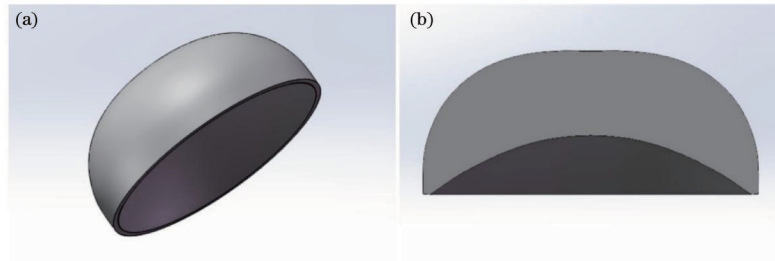


图 13 远场透镜的三维模型。(a)三维结构;(b)截面图

Fig. 13 Three-dimensional model of far-field lens. (a) Three-dimensional structure; (b) cross-sectional view

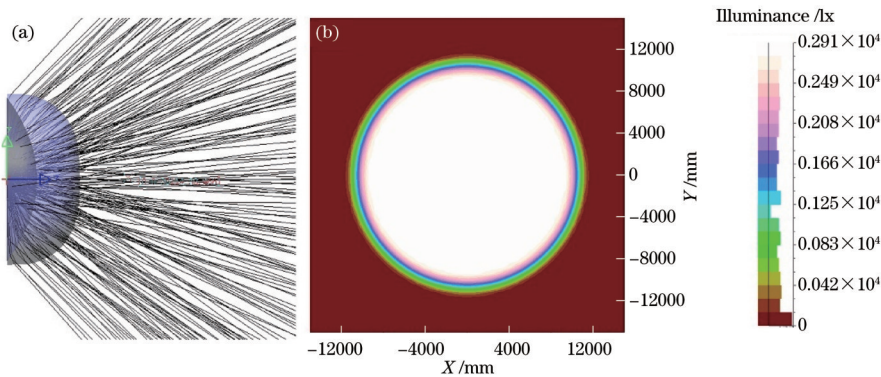


图 14 在 10 m 远处目标面的模拟仿真结果。(a)系统光线追迹;(b)仿真结果图

Fig. 14 Simulation results on target plane 10 m away. (a) Ray tracing of system; (b) simulation results

同样地,为了验证透镜的加工误差,对远场双自由曲面透镜的公差容忍度进行了分析。以目标面均匀性为评价指标,自由曲面离散点公差范围为 $\pm 1 \mu\text{m}$,公差分析结果如图 16 所示。结果显示,均匀性的最大变化量为 0.3%,不足 1.0%,当加工误差控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内,远场 10 m 处的目标面的均匀度仍然可以保持在

93.0% 以上。

为了验证所提出的设计方法在远场照明中不局限于单一照明距离,令目标面半径和光源与目标面的距离相等,即 H 与 R 相等,在保持 $h/D=2$ 的情况下,设计了目标面距离分别为 1 m、2 m、3 m、5 m、8 m 的双自由曲面透镜。将计算得到的离散点数据导入

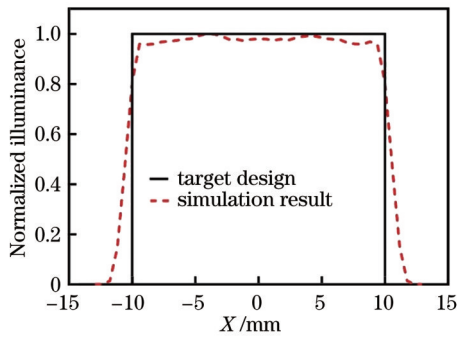
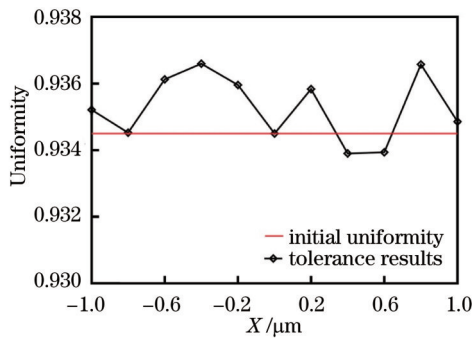


图 15 10 m 远处归一化照度示意图

Fig. 15 Diagram of normalized illuminance 10 m away

图 16 自由曲面离散点在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内的误差与均匀度的关系Fig. 16 Error of discrete points at freeform surface with error in range of $\pm 1 \mu\text{m}$ varying with uniformity

SolidWorks, 拟合曲线, 建立透镜实体。将透镜实体导入 LightTools 进行光学仿真, 将采集的仿真数据代入式(13)和式(14), 计算目标面照度均匀性以及系统能量利用率, 得到的结果如图 17 所示。结果表明: 在保持高能量利用率的前提下, 在 1 m、2 m、3 m、5 m、8 m 距离处的目标面照度均匀度均在 90% 以上。

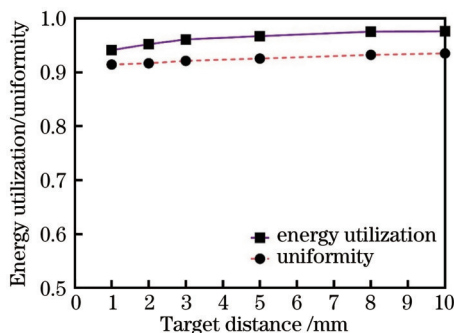


图 17 远场不同距离下目标面照明能量利用率与均匀性

Fig. 17 Illumination energy utilization and uniformity of target surface at different distances in far field

4 结 论

提出了一种旋转对称的适用于 LED 扩展光源的双自由曲面透镜设计方法, 此方法根据左右边缘光线

在目标面投影角度的差值以及 LED 光源亮度不随空间位置改变的特性, 直接计算在目标表面产生的照度分布, 以达到匀光效果。基于数值计算及仿真, 设计了应用于扩展光源的结构紧凑、高能量利用率、匀光性能优异的旋转对称双自由曲面透镜。文中所用光源为圆形扩展光源, 但是所提出的设计方法同样适用于矩形的扩展光源。设计的双自由曲面透镜在 $h/D=2$ 的情况下, 在 25 mm 处目标面的照度均匀度达到 95.81%, 在 10 m 远处目标面的照度均匀度为 93.54%, 远场、近场双自由曲面光线系统的能量利用率分别为 99.12% 和 99.52%。在近场 15~30 mm 距离处的仿真结果表明, 目标面均匀度均在 80.00% 以上, 系统能量利用率均在 90.00% 以上; 在远场 1~10 m 距离处的仿真结果表明, 目标面均匀度达到 90.00% 以上, 系统能量利用率均在 92.00% 以上。实验过程中不考虑元件的吸收和非涅耳损耗。同时, 对近场、远场自由曲面透镜的加工过程中可能造成的误差进行了公差分析, 结果表明: 在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内, 目标面照度均匀度变化小于 1%。本文所提出的设计方法将对实现轻量化、高效率、高均匀度的含有扩展光源照明系统的设计具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 全向前, 陈祥子, 全永前, 等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 153-165.
Quan X Q, Chen X Z, Quan Y Q, et al. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 153-165.
- [2] 刘展宇, 王沛沛, 金志樑, 等. 用于 LED 集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522003.
Liu Z Y, Wang P P, Jin Z L, et al. Free-form lens design for LED fishing lamp with stable illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522003.
- [3] 荆雷, 王尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0208001.
Jing L, Wang Y, Zhao H F, et al. Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0208001.
- [4] 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.
Luo Y, Li L B, Feng Y T, et al. Design method for initial structure of freeform surface optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2422002.
- [5] 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.
Sun Y J, Liu H, Li J H, et al. Smoothing the edge of DMD scanning pattern by free surface lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0411002.
- [6] 荆雷, 刘华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222001.
Jing L, Liu H, Zhao H F, et al. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. Acta

- Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222001.
- [7] Feng Z X, Cheng D W, Wang Y T. Transferring freeform lens design into phase retrieval through intermediate irradiance transport[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5501-5504.
- [8] 司徒, 冯泽心, 程德文, 等. 实现给定能量比离散光斑阵列的自由曲面分束器[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1722004.
Si J, Feng Z X, Cheng D W, et al. Freeform surface beam splitter for discrete spot array with prescribed energy proportion[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1722004.
- [9] Wu R M, Yang L, Ding Z H, et al. Precise light control in highly tilted geometry by freeform illumination optics [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2887-2890.
- [10] Sorgato S, Chaves J, Thienpont H, et al. Design of illumination optics with extended sources based on wavefront tailoring[J]. Optica, 2019, 6(8): 966-971.
- [11] Feng Z X, Huang L, Jin G F, et al. Designing double freeform optical surfaces for controlling both irradiance and wavefront[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28693-28701.
- [12] Gu G C, Zhang B, Su R H. A ray-mapping design method of freeform illumination system based on solving a simplified Monge-Ampère equation[J]. Optics Communications, 2021, 486: 126749.
- [13] Wei S L, Zhu Z B, Fan Z C, et al. Least-squares ray mapping method for freeform illumination optics design [J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3811-3822.
- [14] Benítez P, Miñano J C, Blen J, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions [J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [15] 曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的 optics 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.
- [16] 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.
- [17] 吴涛, 苏宙平. 基于加权叠加法的扩展 LED 光源自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 122202.
Wu T, Su Z P. Design of free-form lens for extended LED source based on weighted overlap algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 122202.
- [18] 李登高, 殷松峰, 凌永顺, 等. 用于扩展光源均匀照明的自由曲面反馈设计[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0422001.
Li D G, Yin S F, Ling Y S, et al. A feedback design method of freeform reflector for uniform illumination with extended sources[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0422001.
- [19] 李潇, 黄逸峰, 谭叶青, 等. 基于 SelPSO 算法的紧凑型照明器件优化方法[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 595-601.
Li X, Huang Y F, Tan Y Q, et al. Optimization method for compact lighting system based on SelPSO algorithm [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 595-601.
- [20] Wang K, Han Y J, Li H T, et al. Overlapping-based optical freeform surface construction for extended lighting source[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19750-19761.
- [21] 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.
- [22] Wu R M, Hua H, Benitez P, et al. Design of compact and ultra efficient aspherical lenses for extended Lambertian sources in two-dimensional geometry[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5078-5086.
- [23] Li X F, Ge P, Wang H. Prescribed intensity in 3D rotational geometry for extended sources by using a conversion function in 2D design[J]. Applied Optics, 2017, 56(6): 1795-1798.
- [24] Hu S X, Du K, Mei T, et al. Ultra-compact LED lens with double freeform surfaces for uniform illumination[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20350-20355.
- [25] 王海宏. 大功率 LED 扩展光源的 optics 设计方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 28-30.
Wang H H. Research on optical design method of high power LED extended light source[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 28-30.
- [26] Pourazady M, Xu X. Direct manipulations of B-spline and NURBS curves[J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(2): 107-118.