

基于NURBS曲线的LED扩展光源双自由曲面匀光透镜优化设计

庞亚军 刘剑阳 李婷婷

Optimization design of double freeform surface uniform lenses for LED extended light sources based on NURBS curve

PANG Yajun, LIU Jianyang, LI Tingting

引用本文:

庞亚军, 刘剑阳, 李婷婷. 基于NURBS曲线的LED扩展光源双自由曲面匀光透镜优化设计[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1376–1384. DOI: 10.5768/JAO202546.0601004

PANG Yajun, LIU Jianyang, LI Tingting. Optimization design of double freeform surface uniform lenses for LED extended light sources based on NURBS curve[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1376–1384. DOI: 10.5768/JAO202546.0601004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自由曲面的LED铁路信号机透镜结构优化设计

Structural optimization design of LED railway signal lens based on free-form surface

应用光学. 2025, 46(1): 80–88 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101007>

基于自由曲面反光杯的LED阵列系统优化设计

Optimized design of LED array system based on free-surface reflective cups

应用光学. 2024, 45(6): 1115–1124 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601002>

基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统

Panoramic fisheye optical system based on freeform surface design

应用光学. 2022, 43(3): 392–398 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301003>

用于头盔显示液晶像源的透镜薄膜设计与制备

Lens film design and preparation for LC image source in helmet display

应用光学. 2021, 42(1): 182–187 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0105001>

一次透镜封装的单片集成LED光源

Monolithically integrated LED light source with encapsulation of primary optical lens

应用光学. 2022, 43(1): 137–143 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105003>

基于改进粒子群算法的LED光源阵列优化

Optimization of LED light source array based on improved particle swarm algorithm

应用光学. 2022, 43(3): 524–531, 543 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0305003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1376-09

引用格式: 庞亚军, 刘剑阳, 李婷婷. 基于 NURBS 曲线的 LED 扩展光源双自由曲面匀光透镜优化设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1376-1384.

PANG Yajun, LIU Jianyang, LI Tingting. Optimization design of double freeform surface uniform lenses for LED extended light sources based on NURBS curve[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1376-1384.



在线阅读

基于 NURBS 曲线的 LED 扩展光源双自由曲面匀光透镜优化设计

庞亚军^{1,2}, 刘剑阳^{1,2}, 李婷婷^{1,2}

(1. 河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401)

摘 要: 基于边缘光线理论, 提出一种针对 LED 扩展光源的双自由曲面匀光透镜优化设计方法, 旨在提升照明系统的匀光效果。通过斯涅尔折射定律和能量守恒定律计算自由曲面初始面型, 利用 NURBS (non-uniform rational B-splines) 曲线拟合并参数化自由曲面, 优化过程以模拟照明与期望照明的相对标准差 (relative standard deviation, RSD) 以及能量利用率为指标。仿真结果表明: 优化后的透镜高度与光源直径比为 2.32 : 1, 实现了 RSD<0.113, 能量利用率高达 98%, 目标面照度均匀度高达 95.9%, 有效提升了照明均匀性和光学系统紧凑性。

关键词: 非成像光学; 扩展光源; 双自由曲面透镜; 优化设计; 均匀照明

中图分类号: TN312.8

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0601004

Optimization design of double freeform surface uniform lenses for LED extended light sources based on NURBS curve

PANG Yajun^{1,2}, LIU Jianyang^{1,2}, LI Tingting^{1,2}

(1. College of Electronical and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on the edge ray theory, an optimization method for the design of double freeform surface uniform lenses for LED extended light sources was proposed. The initial surface shape was calculated by Snell's law of refraction and energy conservation law. The NURBS (non-uniform rational B-splines) curve was used to fit and parameterize the free surface. The RSD (relative standard deviation) and energy efficiency of simulated illumination and desired illumination were taken as the indexes in the optimization process. The simulation results show that the ratio of lens height to light source diameter is 2.32 : 1, RSD<0.113, energy efficiency up to 98%, uniformity of target surface illumination up to 95.9%, illumination uniformity and optical system compactness are effectively improved.

Key words: non-imaging optics; extended light source; double freeform surface lens; optimize design; uniform lighting

引言

作为 21 世纪最具发展前景的半导体照明器

件, 发光二极管 (light emitting diode, LED) 因其低能耗、绿色节能、高可靠性等特点, 逐渐成为高新技

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61905063); 河北省自然科学基金 (F2020202055); 河北工业大学创新研究院 (石家庄) 市科技合作专项基金 (SJZZXC23011)

第一作者: 庞亚军, E-mail: yjpang@hebut.edu.cn

术领域的重点研究对象^[1], 已广泛应用于汽车前照灯^[2]、交通监控^[3]、头盔显示^[4]等领域。LED 由于其设计构造特点, 展现出与朗伯体相似的发光特性, 这种特性可能导致其在能量效率和照明均匀度方面存在一定的损失^[5]。因此, 设计 LED 自由曲面透镜具有重要的研究意义。

在非成像光学设计领域, 实现照明系统的高均匀度和高光能效率是重要目标^[6]。ZHU Z B 等人^[7]采用辐照度计算与高斯优化函数相结合的策略, 对目标平面的辐照度分布进行了精细优化。刘百芬等人^[8]利用 LED 光源的发光特性, 通过自由曲面的漫反射, 在目标检测平面上实现了超过 90% 的目标面照度均匀度(以下简称“均匀度”)。WANG K 等人^[9]通过调整点光源自由曲面(PFSs)的位置和光分布模式, 设计了一个高度为光源半径 4 倍的系统, 显著提高了均匀度且保持了 80% 以上的光能效率。在此基础上, 潘浩等人^[10]采用基于三次样条的设计方法, 进一步优化了双自由曲面透镜, 针对单个朗伯光源和非类朗伯光源, 在模拟验证中实现了高于 86% 的均匀度和 80% 的光能效率, 其设计优势在于自由度高, 适用于不同类型的光源。曾翌^[11]等人设计了距高比(DHR)为 3 的双自由曲面透镜, 最终在目标检测平面上, 均匀度达到 87.5%, 能量利用率为 91.23%, 有效地提升了系统的辐照均匀度和整体性能。LI Y Y 等人^[12]提出了一种设计双自由曲面透镜的方法, 用于重新分配 LED 扩展光源的辐照度分布, 但其优化过程较慢, 需要超过 16 h 的计算时间。张文裕等人^[13]通过二维面形加权叠加和粒子群算法优化自由曲面透镜, 提高了扩展 LED 光源的均匀度至 75%, 优化过程中还存在提升空间, 以获得更高的均匀度。

为了提升光学系统的性能, 特别是在均匀度和能量利用率方面, 本文针对 LED 扩展光源的双自由曲面透镜, 提出了一种创新的优化设计方法。基于非成像光学的边缘光线理论、斯涅尔折射定律和能量守恒定律, 首先计算双自由曲面透镜的内外自由曲面的初始形状, 然后使用 NURBS 曲线对自由曲面的内外表面轮廓进行拟合, 通过控制点的权重对双自由曲面透镜的内外自由曲面进行参数优化, 最后导入光学仿真软件进行验证分析。

1 设计方法

1.1 设计原理

光学照明系统的发光强度和照度分析示意图

如图 1 所示。假设 Z 轴为光轴, X 轴为横轴, 设计基于 XOZ 平面。在二维条件下, 以 θ_1 方向出射的光线到达与目标面距离为 H 的平面上, 光强为 $I_{2D}(\theta_1)$, 在目标平面上 dx 区域上的照度 $E_{2D}(x)$ 与光强 $I_{2D}(\theta_1)$ 的关系为

$$E_{2D}(x) = \frac{\cos^2 \theta_1}{H} I_{2D}(\theta_1) \quad (1)$$

式中: H 为光源与目标平面的距离, θ_1 为出射光线相对于光轴的角度。

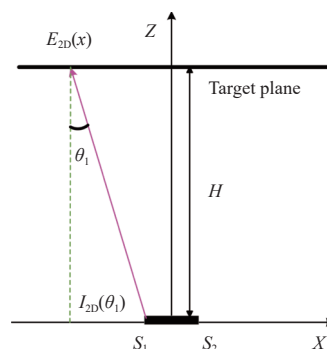


图 1 发光强度和照度

Fig. 1 Luminous intensity and illuminance

假设系统无损, LED 为朗伯光源, 如图 2 所示, 则光强与亮度之间的关系为

$$I_{2D}(\theta_2) = L_{2D} \cdot \cos \theta_2 \cdot \int dx = L_{2D} \cdot W(\theta_2) \quad (2)$$

式中: L_{2D} 为 LED 扩展光源的发光亮度; $W(\theta_2)$ 为通过透镜后 LED 扩展光源在 θ_2 方向上的投影长度; θ_2 为经过透镜出射的光线相对于光轴的角度。投影长度 $W(\theta_2)$ 决定了光线在目标平面上的覆盖范围, 余弦项 $\cos \theta_2$ 反映了光线与目标平面法线之间角度的影响。当光线与法线夹角增大时, 单位面积上的光强会减小。亮度 L_{2D} 是一个常数, 表示 LED 光源单位面积的发光强度不随角度变化。

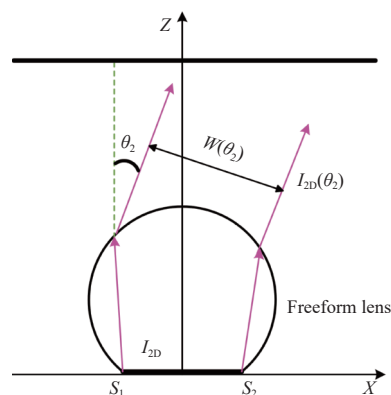


图 2 发光强度和光源通过透镜的投影长度

Fig. 2 Luminous intensity and projection length of light source through lens

若期望在目标面上生成均匀照度分布 $E_{2D}(x) = E_0$, 其中 E_0 为目标面任意点的照度值, 则通过式 (1) 和式 (2) 可以得到:

$$W(\theta_2) = \frac{W_0}{\cos^2 \theta_2} \quad (3)$$

式中: W_0 为光线经过透镜折射后出射角为 0° 时光源的轴向投影长度。

为了在目标面上实现均匀照度 E_0 , 必须根据光源亮度 L_{2D} 和光源到目标平面的距离 H 来调整投影长度 $W(\theta_2)$, 对于不同的角度 θ_2 , 需要不同的投影长度来保证照度的一致性。一维优化关注的是光线沿着特定方向的传播和聚焦特性, 通过调整自由曲面透镜的形状, 能够控制 LED 光源边缘光线在特定出射方向上的投影长度, 从而实现精确的光线分布。这意味着通过一维上的光线优化, 可以实现二维目标面上不同位置的照度均匀分布。

1.2 设计步骤

设计自由曲面透镜时, 首先用抛物线作为初始曲线, 然后根据确定的初始曲线进行迭代计算, 由此得出自由曲面剩余部分, 如图 3 所示。图 3 中 $I_1 I_2$ 和 $O_1 O_2$ 为初始曲线, 且 I_1 与 I_2 、 O_1 与 O_2 点关于 Z 轴对称。从光源左侧边缘 S_1 发出的射线 $S_1 I_1 O_1$, 在透镜轮廓的点 I_1 和 O_1 处折射。两条边缘光线 $S_1 I_1$ 和 $S_2 I_2$ 经过第一个自由曲面折射后分别到达 O_1 点和 O_2 点, 出射光线最终以光线 1 和光线 2 平行于 Z 轴出射。

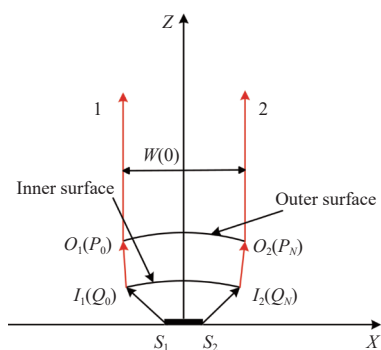


图3 初始曲线求解

Fig. 3 Initial curve solving

此时光线 1 和光线 2 与 Z 轴的夹角为 0° , 光线 1 与光线 2 相隔的距离为 $W(0)$, 由 $W(0)$ 可以计算出曲线 $I_1 I_2$ 和 $O_1 O_2$ 在 I_1 点和 O_1 点的一阶导数。具体在透镜界面上, 法向量存在以下表达式^[14]:

$$N = N_x \hat{x} + N_z \hat{z} = \frac{n_0 \mathbf{e}_0 - n_1 \mathbf{e}_1}{\sqrt{n_0^2 + n_1^2 - 2n_0 n_1 \mathbf{e}_0 \mathbf{e}_1}} \quad (4)$$

式中: N_x 和 N_z 分别为 N 在 X 和 Z 方向上的分量; $\mathbf{e}_0$ 和 $\mathbf{e}_1$ 分别为出射光线和入射光线的单位法向量; n_0 和 n_1 分别为折射介质和入射介质的折射率; $\hat{x}$ 和 $\hat{z}$ 为单位基。

将 O_1 和 I_1 作为初始坐标点, $I_1 I_2$ 和 $O_1 O_2$ 作为初始多项式曲线, 则有:

$$z = a_i x^2 + b_i \quad (5)$$

经 (4) 式可求得端点 I_1 的斜率, 由端点 I_1 法向量可知, $k_{I_1} = (N_z/N_x)_{I_1}$ 。二次多项式曲线 $I_1 I_2$ 的参数 a_1 和 b_1 可以导出为

$$a_1 = k_{I_1}/2x_{I_1}; b_1 = z_{I_1} - a_1 x_{I_1}^2 \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2$, 表示内、外透镜轮廓; $a_i b_i$ 为方程系数; z_{I_1} 和 x_{I_1} 分别为对应点 I_1 处 Z 和 X 的坐标; k_{I_1} 为法线的斜率。

光线在端点 O_1 折射后的光线与 Z 轴平行, 在满足透镜尺寸要求下, 曲线 $O_1 O_2$ 的参数 a_2 、 b_2 也可以根据上述过程类似导出。为了确保所有光线都能进入透镜内部, 需要保证曲线 $I_1 I_2$ 在点 I_1 处向下开口, 也就是要确保点 I_1 处的一阶导数为正值。点 O_1 的坐标取决于 $W(0)$, 同时 O_1 的 Z 坐标必须符合预设的透镜口径尺寸的要求。当初始曲线准备好时, 透镜的子午线轮廓曲线的其余部分可以从多项式曲线表示的部分外推, 如图 4 所示。图 4 中沿 X 轴均分初始曲线 $O_1 O_2$, 划分一系列数据点 $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 点 $Q_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是光线 $S_1 Q_i$ 经过 Q_i 进入透镜之后到达 P_i 点, Q_i 点坐标可以通过光线的逆向追迹计算出来^[15]。

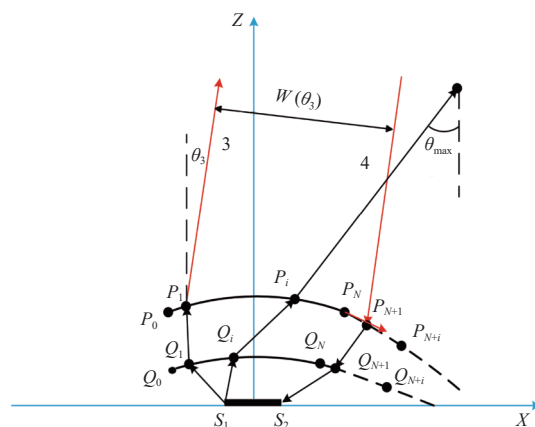


图4 初始曲线剩余部分求解

Fig. 4 Remaining part solving of initial curve

首先, 对于边缘光线 $S_1 Q_1$ 来说, 在 P_1 点出射的光线标记为光线 3, 光线 3 的出射角已知为 θ_3 , $W(\theta_3)$ 的值由公式 (3) 求得。然后, 逆向追迹平行于

光线 3 且距离光线 3 为 $W(\theta_3)$ 的由 S_2 发射的光线 4, 因为光线 4 与 Z 轴的夹角也为 θ_3 , 所以其直线方程也可以根据上述方法推导出。又因为光线 4 与前一点 P_N 处切线的交点为 P_{N+1} , 于是根据公式 (4) 可以求出 P_{N+1} 点的法向量。当 P_{N+1} 点的法向量与 θ_3 方向上的入射向量都求得后, 通过 Snell 定律即可得到出射向量 $\overrightarrow{P_{N+1}Q_{N+1}}$:

$$n_i \mathbf{e}_1 \times \mathbf{N} = n_o \mathbf{e}_0 \times \mathbf{N} \quad (7)$$

由于点 Q_{N+1} 在点 Q_N 的切线上, 所以很容易求出点 Q_{N+1} 坐标, Q_{N+1} 的法向量经公式 (4) 求得。自由曲面剩余部分轮廓是通过重复这些步骤完成的, 直到 S_1 左侧边缘光线在 P_i 输出。输出角 $\theta_{\max}$ 是均匀照明的最大角度, 必须满足以下照明要求:

$$\theta_{\max} = \tan^{-1}\left(\frac{R}{H}\right) \quad (8)$$

式中: R 为均匀照明区域的半径; H 为照明距离。

2 优化方法

2.1 优化原理

一条 p 次 NURBS 曲线定义为^[16]

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i}, \quad a \leq u \leq b \quad (9)$$

式中: P_i 为控制点; w_i 为权重因子; i 为第几个节点; p 为多项式曲线的次数; u 为节点; a 和 b 为节点取值的下限和上限; $N_{i,p}(u)$ 定义为在非周期、非均匀节点矢量 U 上的 p 次 B 样条基函数, 表示为

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (11)$$

U 为曲线上的非均匀节点矢量, 即:

$$U = \{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \} \quad (12)$$

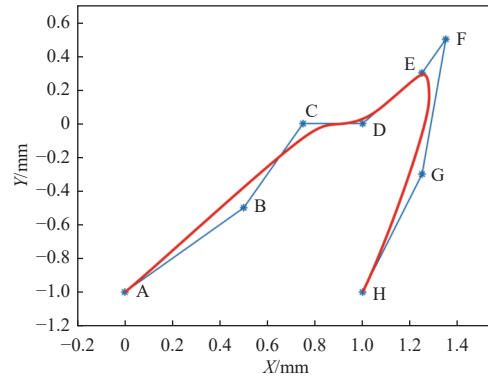
节点个数 $(m+1)$ 、控制点数量 n 和曲线阶数 p 之间的关系满足: $m = n + p + 1$ 。除非另外声明, 一般都假定 $a = 0, b = 1$, 并且对于所有的 $i, w_i > 0$ 。令:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (13)$$

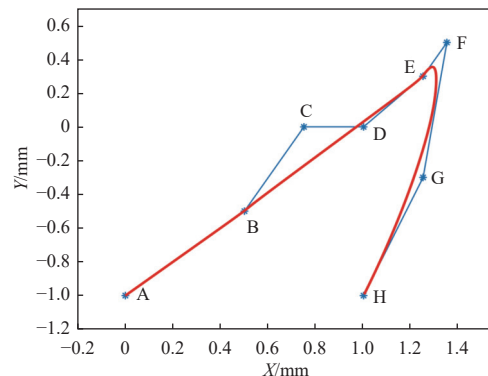
$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad (14)$$

式中: $R_{i,p}(u)$ 称为有理基函数, 是 $u \in [0, 1]$ 上的分段有理函数。

一般来说, 修改曲线形状可以通过调整控制点的位置或者它们的权重来实现, 控制点通常由控制多边形构成, 它是 NURBS 曲线的线性近似。NURBS 曲线随权重改变示意图如图 5 所示。图 5(a) 中, 控制点权重依次为 $\{0.09, 0.01, 0.16, 0.24, 0.20, 0.03, 0.03, 0.24\}$, A-H 为形成的控制点多边形, 实线为经过控制点后形成的 NURBS 曲线。如上所述, NURBS 曲线是由控制点、基函数和控制点的权重决定, 当控制点位置不变, 改变控制点 A-H 的权重, 生成的 NURBS 曲线也会有明显变化。图 5(b) 中, 控制点权重为 $\{0.08, 0.21, 0.00, 0.01, 0.18, 0.17, 0.15, 0.20\}$ 。



(a) 第1次生成曲线



(b) 第2次生成曲线

图 5 NURBS 曲线随权重改变示意图

Fig. 5 Schematic diagram of NURBS curve changing with weight

2.2 优化步骤

该透镜是基于扩展光源进行设计的, P_1 和 Q_1 受到光源大小和初始点坐标影响, 初始设计的仿真结果会与期望的照度分布之间存在很大偏差。为了解决上述问题, 首先对设计的自由曲面初始曲线进行参数化, 然后对自由曲面曲线取控

制点,进行NURBS曲线拟合,并对控制点的权重因子 w_i 进行优化,同时以实际照明照度分布与期望照度分布之间的标准偏差和双自由曲面透镜之间的能量利用率作为评价函数,对自由曲面透镜初始曲线进行优化,直到达到设计目标。评价函数定义如下:

$$MF = w \times E_{\text{eff}} + (1 - w) \times RSD \quad (15)$$

式中: E_{eff} 为自由曲面匀光系统的能量利用率,定义为光学系统目标面的能量与光源发出的总能量之比; w 为权重,取值范围为 $0 < w < 1$; RSD 为模拟照明照度分布与期望照度分布之间的相对标准差。通常将理想情况下的照明区域分为 $M+1$ 个区域,因此 RSD 可以定义为

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^M \left(\frac{E_r(r_k) - E_d(r_k)}{E_d(r_k)} \right)^2}{M+1}} \quad (16)$$

式中: E_r 和 E_d 分别为实际照度分布和期望照度分布; r_k 为目标面半径; $M+1$ 为照明区域划分的数量。

为了获得目标平面上真实分布和期望分布的最小偏差,建立了约束条件,可以写为 $\min_{n_i} : MF(n_i)$ 。其中 n_i 为优化参数的数量, MF 为优化过程中的性能指标。 MF 的值越小,实际分布与期望分布之间的偏差越小,同时也要结合透镜仿真效果进行综合考虑。

3 设计实例与分析

为了验证所提出的参数化自由曲面曲线方法的可行性,采用该方法构建自由曲面透镜初始模型。考虑到透镜的紧凑性并结合设计原理,设置了扩展光源和透镜的参数,初始透镜轮廓曲线数据通过软件计算得到,系统结构示意图如图6所示。具体设计参数如下:光源直径 $D = 3 \text{ mm}$,透镜材料选用聚碳酸酯(Polycarbonate),折射率 $n = 1.591$,光源与目标面垂直距离 $H = 222 \text{ mm}$,目标面半径 $R = 168 \text{ mm}$ 。设置外自由曲面初始高 $h = 6.98 \text{ mm}$,预设 I_1 点坐标为 $(1.16, 1.35)$, O_1 点的 $Z_{O_1} = 6.62$, X_{O_1} 点坐标可以根据 R 以及 H 建立三角关系求出。根据公式(4)和公式(6)通过曲线拟合和斯涅尔定律,推导出透镜2个出口和入口的轮廓的初始曲线 O_1O_2 、 I_1I_2 。

双自由曲面透镜初始结构轮廓图如图7所示。将初始离散点利用NURBS曲线进行拟合,取样离散点并导入光学仿真软件,利用软件内建模

功能建立透镜模型,追迹250万条光线进行透镜性能分析。

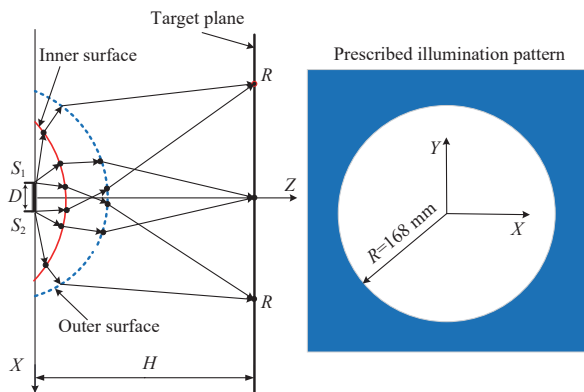


图6 系统结构示意图

Fig. 6 System structure diagram

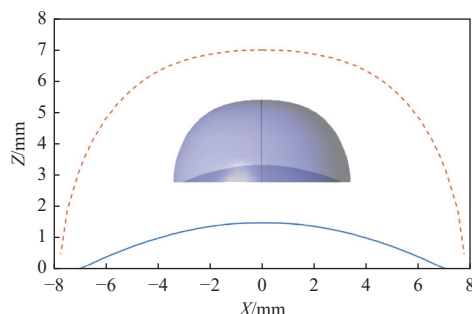


图7 双自由曲面透镜初始结构轮廓图

Fig. 7 Initial structure outline of double freeform surface lens

初始系统结构及模拟仿真结果如图8所示。扩展光源光线经过2个自由曲面透镜折射之后到达目标面,根据模拟照度图可以看出,未经优化的初始系统结构在照明中心位置附近区域出现了较高的照度峰值,影响整体的照明均匀性。初始系统结构在目标面 $X = 0, Y = 0$ 方向上的模拟照度分布如图9所示。从图9可以看出,在照明中心附近 $X = 0$

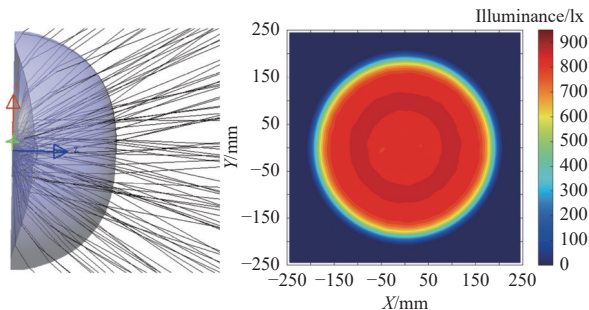


图8 双自由曲面透镜初始结构仿真结果

Fig. 8 Simulation results of initial structure of double freeform surface lens

方向和 $Y=0$ 方向照度波动明显, 此时 $RSD=0.410$, 由此可见, 初始系统结构匀光效果不理想。

为了验证所提方法的有效性, 在基于蒙特卡洛光线追迹的基础上, 追迹 300 万条光线来评估每一次迭代过程中自由曲面透镜的性能。为避免计算的复杂性增加, 选择曲线阶数 $p=3$, 考虑照明需求和透镜尺寸, 经算法拟合后节点个数 $(m+1)=27$, 设置控制点个数 $n=22$, 权重 $w=0.5$ 。首先识别照度不均匀区域并确定关键控制点, 利用光学仿真软件对控制点权重进行模拟调整。通过迭代优化, 根据优化函数 MF 的结果不断调整权重, 改善光线在目标面上的分布。该过程重复进行, 直至达到最优解。

经过 6 次优化后, $MF<0.55$, $RSD=0.112$, 迭代过程中均匀度变化情况如图 10 所示。由图 10(f) 可以看出, 此时均匀度相比初始结构已经有明显

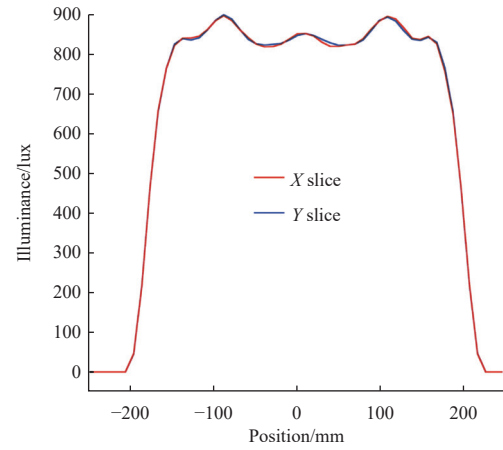


图 9 目标面 $X=0, Y=0$ 方向上照度分布

Fig. 9 Illumination distribution in direction of $X=0, Y=0$ on target surface

改善, 从右侧曲线图也可以看出, 照明中心附近照度波动得到明显降低。最终得到的透镜直径

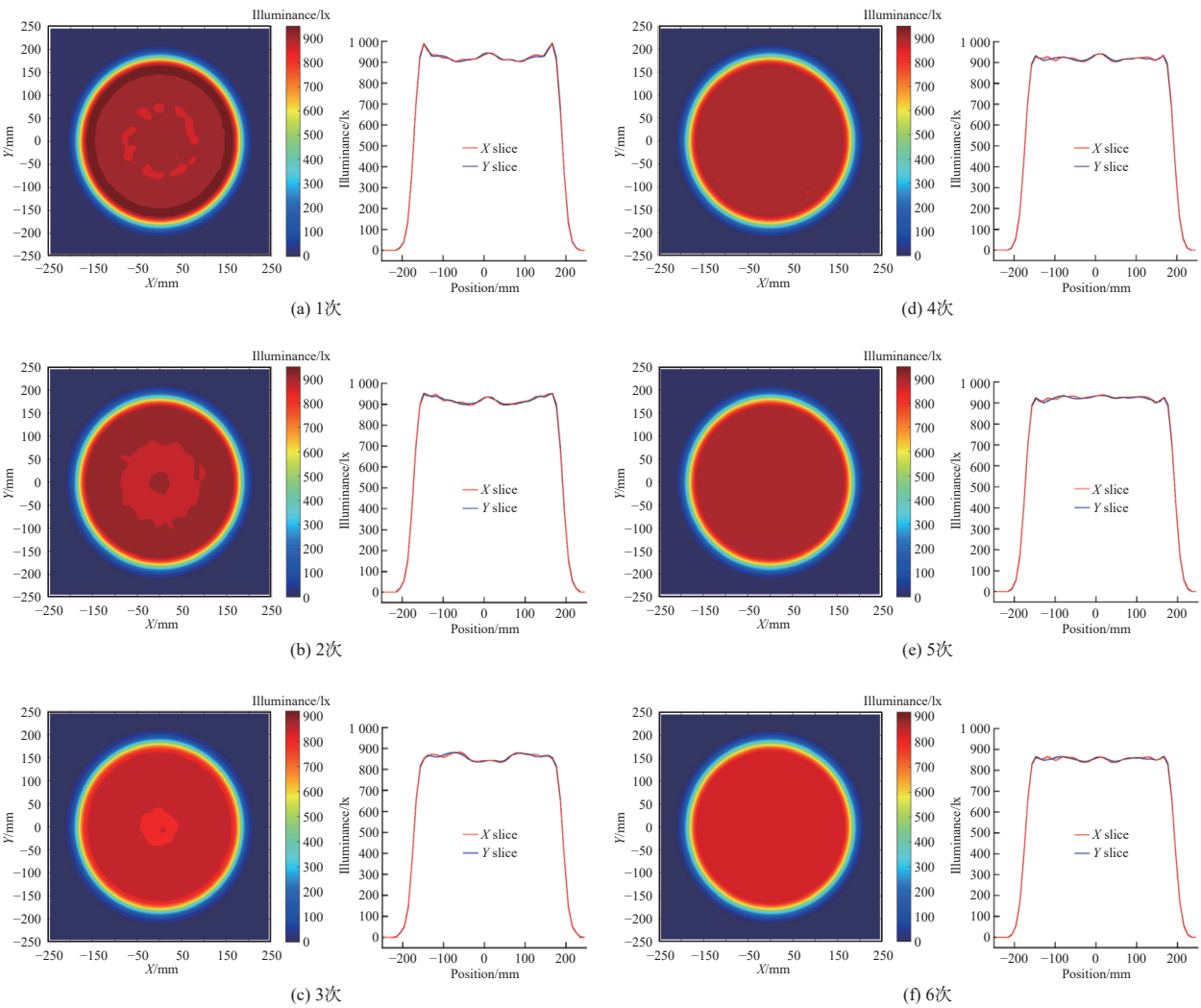


图 10 不同优化次数的双自由曲面透镜照度对比图

Fig. 10 Comparison of illuminance of double freeform surface after different optimization times

$\phi = 15.5$ mm, 透镜高度 $h = 6.98$ mm, 透镜高度与光源直径之比 $h/D = 2.32:1$, 透镜结构紧凑, 尺寸小, 有效地减少了系统的长度及体积。

双自由曲面透镜经过优化设计后, 系统能量利用率从 93% 提高到 98% (不考虑菲涅尔损耗), 均匀度从 84.8% 提高到 95.9%。迭代过程中能量利用率和均匀度的变化如图 11 所示。图 11(a) 为迭代次数与能量利用率曲线; 图 11(b) 为迭代次数与 RSD 和均匀度曲线。在优化过程中受优化算法的影响, 均匀度与能量利用率会有一些起伏, 最终经过权重因子 w_i 的平衡, 得到一个最佳值。

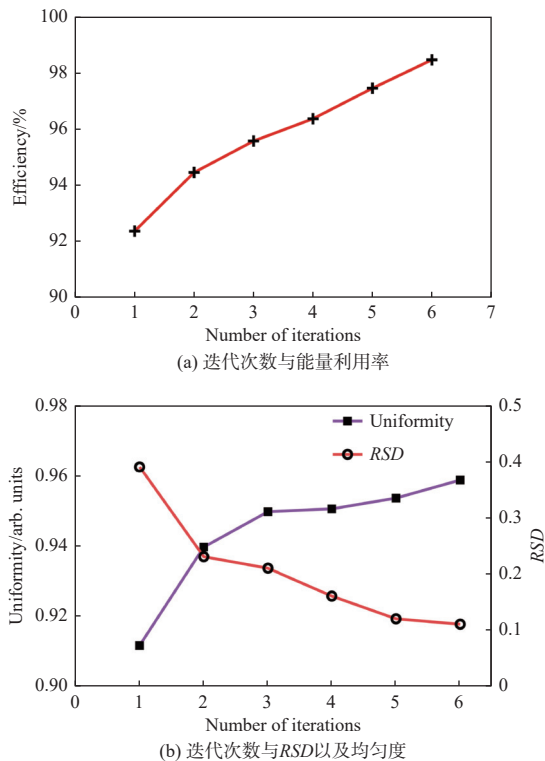
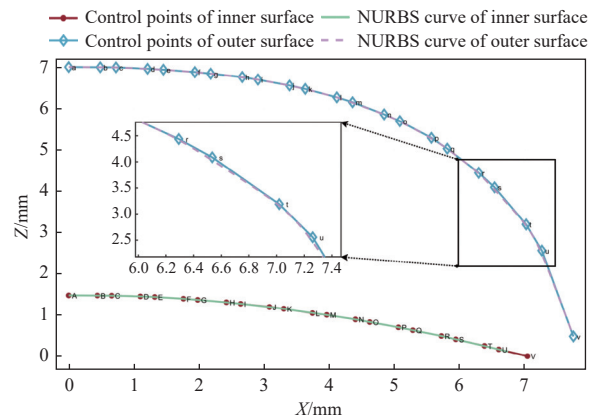


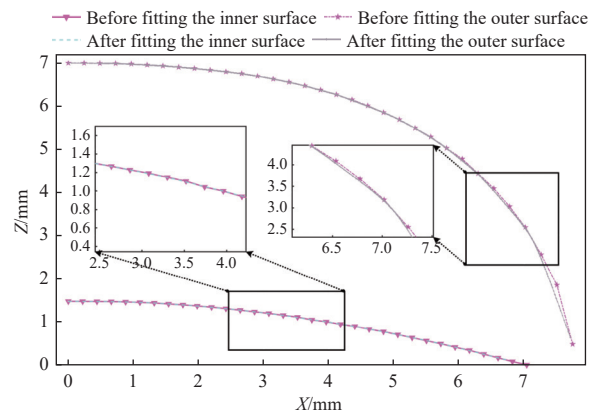
图 11 迭代过程中能量利用率和均匀度的变化

Fig. 11 Changes in energy utilization efficiency and uniformity during iteration process

优化前后的透镜轮廓对比图如图 12 所示。图 12(a) 为控制点与优化后的 NURBS 曲线之间的关系, 显示了权重调整对曲线形状的影响。图 12(b) 为初始轮廓与优化后的 NURBS 曲线对比, 强调了优化过程对曲线精度的提升。这些变化反映了优化算法在改善透镜设计中的有效性。图 13 直观地比较了优化前后内外透镜控制点的权重变化, 图中用不同字母区分内外透镜控制点。从图 13 中可以看出, 权重的调整影响了透镜的光学性能和光线传播路径, 从而优化了透镜的整体性能。



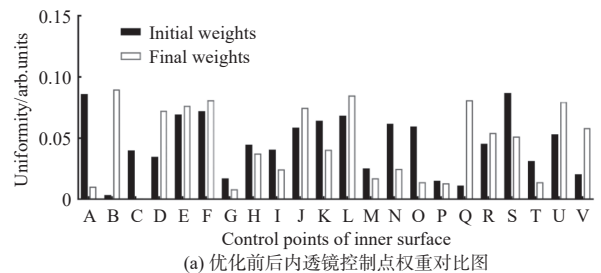
(a) 控制点与实际优化后的NURBS曲线之间的关系图



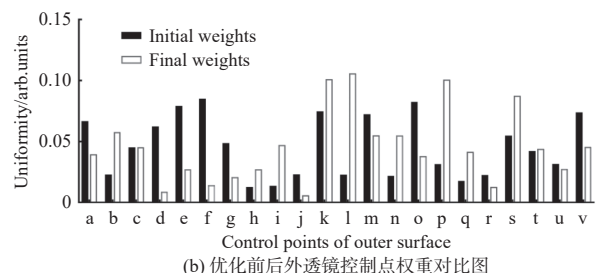
(b) 初始轮廓曲线与实际优化后的NURBS曲线之间的对比图

图 12 优化前后透镜轮廓对比图

Fig. 12 Comparison of lens profiles before and after optimization



(a) 优化前后内透镜控制点权重对比图



(b) 优化前后外透镜控制点权重对比图

图 13 优化前后内外透镜控制点权重对比图

Fig. 13 Comparison of weight of control points for inner and outer lens before and after optimization

图 14 给出了优化后的 NURBS 曲线与原始设计曲线取样点之间的误差。尽管最大误差仅为

0.1 mm, 这一微小差异却对自由曲面透镜的性能产生了显著影响, 优化后的 NURBS 曲线不仅在形状上更接近理想的设计曲线, 而且在模拟验证中表现出更高的能量利用率和更好的匀光效果。因此, 根据传统设计方法计算得到的自由曲面透镜还是有不足之处, 主要原因是切线迭代法会造成累积误差, 若无优化, 则最终得到的自由曲面透镜性能不是最佳。表 1 给出了优化前后自由曲面透镜的关键性能指标对比结果。由表 1 可知, 这些改进不仅优化了照明效果, 而且也增强了系统的能效和可靠性。

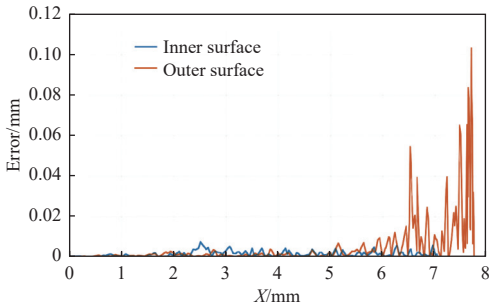


图 14 NURBS 曲线与原始曲线取样点的误差
Fig. 14 Error of sampling points between NURBS curve and original curve

表 1 优化前后关键性能指标对比

指标	传统方法	本文方法
照度非均匀性/%	>10	<5
能量利用率/%	93	98
<i>RSD</i>	0.410	0.112
累积误差	较高	显著减少

优化前后目标面照度分布与期望分布之间的差异如图 15 所示。从图 15 可以看出, 相较于优化前, 优化后目标面上的光线分布更加均匀, 减少了中心区域的照度峰值, 提升了照明的整体均匀性。这一改进, 凸显了所采用优化方法的有效性, 确保了照明系统在实际应用中可达到预期的性能指标。

4 结论

提出了一种新的双自由曲面透镜优化设计方法, 该方法基于控制点重构 NURBS 曲线, 针对 LED 扩展光源设计。首先, 通过计算目标面照度

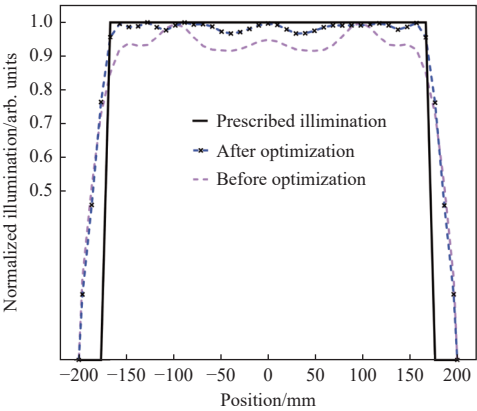


图 15 优化前后目标面照度分布
Fig. 15 Distribution of illumination on target surface before and after optimization

分布与光源光强分布之间的映射关系, 确定自由曲面透镜的初始轮廓曲线, 然后利用 NURBS 曲线插值, 经过 4~6 次迭代优化, 成功将目标面上的照度非均匀性降低至 5% 以下, 最终透镜高度与光源直径之比为 2.32 : 1。与传统的切线迭代法相比, 该优化方法显著减少了累积误差, 有效控制了光线的传播路径, 从而使透镜的性能达到了最佳状态。此外, NURBS 曲线的应用为光学透镜设计带来了创新与灵活性, 其优化潜力与技术进步为未来光学系统的性能提升和设计多样性铺平了道路。

参考文献:

[1] 李竞. 实现 LED 矩形均匀照明的透镜设计[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 211-214.
LI Jing. Lens design for uniform illumination of rectangle area with LED[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 211-214.

[2] 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
CHENG Dewen, WANG Yongtian, CHANG Jun, et al. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 309-311.

[3] 庄亚宝, 刘杰, 薛豪, 等. 用于辅助驾驶汽车的红外照明系统[J]. 红外技术, 2023, 45(9): 990-995.
ZHUANG Yabao, LIU Jie, XUE Hao, et al. Vehicle infrared illumination system for assistant driving[J]. Infrared Technology, 2023, 45(9): 990-995.

[4] 高东东, 徐晓婷, 李博. 红外/白光混合补光系统在智能

- 交通中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 337-343.
- GAO Dongdong, XU Xiaoting, LI Bo. Research on application of infrared and white light mixed supplemental lighting system in intelligent transportation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 337-343.
- [5] 李梦远, 韩姗, 李柏承, 等. LED 路灯矩形均匀照明方法综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(10): 14-18.
- LI Mengyuan, HAN Shan, LI Baicheng, et al. Methods of uniform rectangular spot for LED street lighting[J]. Laser Journal, 2014, 35(10): 14-18.
- [6] 金骥, 余桂英, 林敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 680-684.
- JIN Ji, YU Guiying, LIN Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 680-684.
- [7] ZHU Z B, WEI S L, FAN Z C, et al. Freeform illumination optics design for extended LED sources through a localized surface control method[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11524-11535.
- [8] 刘百芬, 金小龙, 祝振敏. 基于 LED 阵列与漫反射自由曲面的均匀照明光源设计[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 598-602.
- LIU Baifen, JIN Xiaolong, ZHU Zhenmin. Uniform illumination design based on LED array and diffuse reflection freeform surface[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(4): 598-602.
- [9] 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.
- [10] 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): 203-210.
- 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): 203-210.
- [11] 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): 134-141.
- ZENG Yi, ZHAO Huifu, DUAN Wenju. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 134-141.
- [12] LI Y Y, FENG Z X, CHENG D W, et al. Designing double freeform surfaces for large ray bending irradiance tailoring of extended LED sources[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13469-13485.
- [13] 张文裕, 苏宙平. 基于二维面形加权叠加的扩展 LED 光源自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 399-406.
- ZHANG Wenyu, SU Zhouping. Design of free-form surface lens of extended LED light source based on two-dimensional surface shape weighted superposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 399-406.
- [14] 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.
- [15] 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.
- 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.
- [16] ZHUANG Z F, SURMAN P, YU F H. A freeform optics design with limited data for extended LED light sources[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(21): 2151-2158.