

用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计

彭亚蒙 苏宙平

江南大学理学院江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 提出了一种激光光束整形自由曲面透镜的设计方法, 这种方法可以对有一定发散角的激光光束进行整形。设计分为两个过程: 1) 设计初始结构, 以准直激光光束作为输入光束, 采用能量网格划分法, 设计自由曲面整形透镜, 将设计好的透镜作为下一步设计的初始结构; 2) 逆向反馈优化法, 以带有一定发散角的光束作为输入光束, 用上一步获得的透镜作为初始结构, 采用逆向反馈优化的方法作进一步优化设计。应用这种方法, 以束腰为 10 mm, 发散半角为 2.5° 的发散激光光束为例, 将其整形为 40 mm×40 mm 的方形光束, 辐射照度均匀度达到了 90.4%。最后, 对设计的透镜进行了加工误差分析和安装误差分析。分析结果表明: 透镜表面面形误差在 ±5 μm 范围内对目标平面辐射照度的均匀度几乎没有影响; 透镜安装时, 纵向位移误差 dz 对目标平面辐射照度的均匀度影响较小, 横向误差 dx、倾斜角误差 dφ 对辐射照度均匀度影响较大。

关键词 光学设计; 激光光束整形; 自由曲面; 发散激光光束; 逆向反馈优化; 辐射照度均匀性

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0522003

Design of Freeform Surface Lens for Shaping Divergent Laser Beam

Peng Yameng Su Zhouping

Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology,
School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract A design method of laser beam shaping freeform surface lens is proposed, which can be applied to shape the diverging laser beam. Freeform surface lens design is a two-step process. Firstly, an initial lens layout is designed by establishing the input-output energy mapping relationship. Then, the reverse feedback optimization method is used to optimize the initial freeform lens when the divergent beam is applied. By this method, a freeform lens is designed for shaping a laser beam with beam waist of 10 mm and a half divergence angle of 2.5°. The simulation results show that the freeform lens can transform a Gaussian beam into a 40 mm×40 mm top-hat beam with an irradiance uniformity of 90.4%. Finally, the machining error analysis and the assembly tolerance analysis of the freeform lens are performed. It is shown that the uniformity is almost unchanged while the process error varies from -5 μm to 5 μm. And the longitudinal deviation error dz has little influence on the irradiance uniformity, but the lateral deviation error dx and slant angle error dφ have a significant influence on the irradiance uniformity.

Key words optical design; laser beam shaping; freeform surface; divergent laser beam; reverse feedback optimization; irradiance uniformity

OCIS codes 220.3620; 140.3300; 080.4295; 080.2740

1 引言

激光因其相干性、单色性、方向性好及亮度高等诸多优点已被广泛应用于光刻、材料加工以及生物医学等领域^[1-2]。在激光光束应用过程中, 由于其能量呈现高斯分布, 如若直接应用, 将导致局部温度过高而损坏材料^[3]。因此, 需对激光光束进行整形, 将其转化为能量均匀分布的光束^[4-6]。

目前, 激光整形主要有液晶空间光调制器^[7-8]、非球面透镜组^[9-10]、微透镜阵列^[11-13]、二元光学元件

收稿日期: 2015-12-21; **收到修改稿日期:** 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(60908041)、上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(2012ADL03)

作者简介: 彭亚蒙(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: aamon_peng@163.com

导师简介: 苏宙平(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学设计、LED 照明技术等方面的研究。

E-mail: zpsu_optics@163.com(通信联系人)

法^[14-15]、双折射透镜组^[16]以及自由曲面透镜^[17-19]等方法。其中自由曲面透镜具有设计自由度高,光学系统结构简单,可控制波前并同时有效实现辐射照度均匀等诸多优点。V Olikier^[20]提出了一种双自由曲面透镜光束整形的设计方法,该方法可将准直入射激光光束整形为所需能量分布的准直出射光束。但该方法给出的自由曲面面形方程为 Monge-Ampère 类型非线性偏微分方程组,数值计算与编程都十分复杂。Zexin Feng 等^[21]也提出了一种采用双自由曲面透镜设计光束整形系统的方法,该方法先通过能量网格划分,寻找输入和输出辐射照度映射关系,再根据边缘光线理论、能量守恒和光程相等获得自由曲面面形。该方法可对准直入射的高斯光束进行整形,并可同时控制出射光束的辐射照度分布和波前分布。上述的方法在设计整形系统的过程中只考虑了光束准直入射的情况,然而激光器输出的激光束都带有一定发散角,使用准直光束设计的整形系统应用于带有发散角的光束时,会导致能量分布的均匀度下降,光斑边缘的锐度下降。

本文针对准直激光光束,使用能量网格划分的方法设计了自由曲面透镜,以此透镜作为一个初始结构对有发散角的激光光束应用反馈优化方法作进一步优化,提高其整形后的辐射照度均匀度。应用这种方法,以束腰为 10 mm,发散半角为 2.5° 的发散激光光束为例,将其整形为 40 mm×40 mm 的方形光束,辐射照度均匀度达到了 90.4%。最后,对设计的透镜进行了面形加工误差分析,分析表明,透镜表面面形误差在 ±5 μm 范围内对目标平面辐射照度均匀度几乎没有影响。同时,进行了公差分析,分析结果表明,纵向位移误差 dz 对目标平面辐射照度均匀度影响较小,横向误差 dx、倾斜角误差 dφ 对辐射照度均匀度影响较大。

2 自由曲面激光光束整形原理

针对带有发散角激光光束设计了自由曲面整形透镜,设计过程分为两步:1)设计透镜的初始结构,以准直光束作为输入光束,运用能量网格划分法来设计;2)运用逆向反馈优化方法,针对带有发散角的光束,以上一步获得的透镜作为初始结构,对透镜进行进一步的优化,使优化之后的透镜对发散激光束也能产生高均匀度的辐射照度分布。

2.1 自由曲面透镜初始结构设计

首先采用单片自由曲面透镜对准直激光光束进行整形,为简化设计,透镜的前表面采用平面,后表面为自由曲面。如图 1(a)所示,入射光束为一个矩形孔径的准直光束,辐射照度为高斯分布,光束入射到透镜的平面上经过自由曲面透镜折射后,从透镜的自由曲面一侧出射,在目标面上产生一个均匀分布的矩形光斑。光束整形的原理为:将输入光束的截面按等能量划分为 $M \times M$ 个网格,目标面按等面积划分为 $M \times M$ 个网格,控制输入光束每个网格的能量经过自由曲面后,入射到目标面上对应的网格,如图 1(b)所示。这样目标面上每个网格的能量相同,每个网格的面积又相等,目标面辐射照度就可以变得均匀。

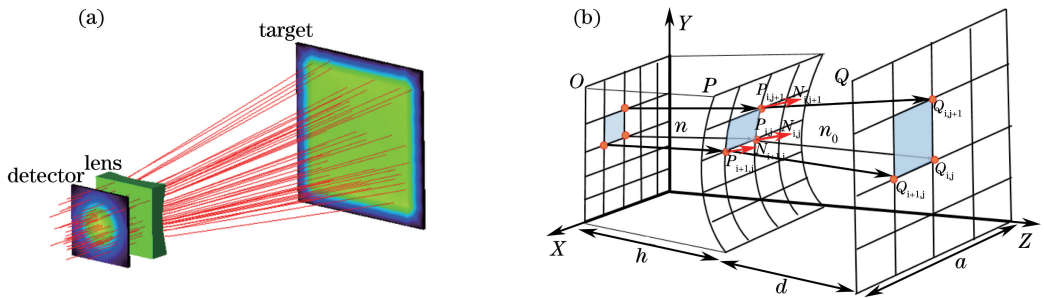


图 1 准直激光光束整形系统示意图。(a) 三维示意图;(b) 原理图

Fig. 1 Schematic of collimated laser beam shaping system. (a) Three-dimensional diagram; (b) schematic diagram

2.1.1 等能量网格划分原理

采用的光束为高斯光束,其辐射照度表达式^[22]为

$$I(r, z) = I_0 \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \exp \left[\frac{-2r^2}{\omega^2(z)} \right], \quad (1)$$

式中, r 为场点距离光轴中心的径向距离, z 为光轴上光波最狭窄位置束腰的位置坐标, $\omega(z)$ 为电磁场振幅

降到轴向的 $1/e$ 、强度降到轴向的 $1/e^2$ 的点的半径, ω_0 为激光的束腰宽度。由于光束是准直入射, 即光束在束腰位置, 则 $z = 0$, 有

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (2)$$

高斯光束孔径为矩形孔径, 在束腰位置的截面上, 按等能量划分为 $M \times M$ 份, 如图 2(a) 所示。

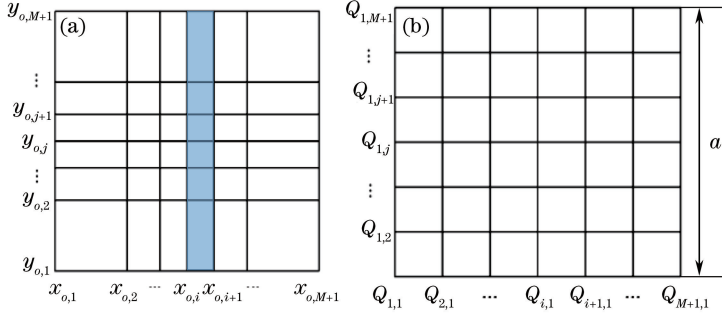


图 2 等能量网格划分示意图。(a) 入射光束截面能量网格划分示意图; (b) 目标平面网格划分示意图

Fig. 2 Grids dividing diagram with equal energy. (a) Grids on the input beam cross-section; (b) grids on the target plane

由于激光光束在 x, y 两个方向上均呈高斯分布的特性, 入射光束可变量分离, 则入射光束的总能量为

$$\Phi_t = \int_{x_{o,1}}^{x_{o,M+1}} I(x_o) dx_o \int_{y_{o,1}}^{y_{o,M+1}} I(y_o) dy_o, \quad (3)$$

则入射光束在 X 轴方向上每份能量 $\Phi_0(x)$ 为

$$\Phi_0(x) = \int_{x_{o,i}}^{x_{o,i+1}} I(x_o) dx_o \int_{y_{o,1}}^{y_{o,M+1}} I(y_o) dy_o = \frac{\Phi_t}{M} \quad (4)$$

可由(4)式解得光源能量网格上所有格点横坐标 $x_{o,i} (i=1, 2, \dots, M+1)$, 同理可得纵坐标 $y_{o,j} (j=1, 2, \dots, M+1)$ 。

假设目标平面 Q 的边长为 a , 目标平面按等面积均分为 $M \times M$ 份, 如图 2(b) 所示, 则可得目标平面网格格点的纵横坐标。

2.1.2 构建自由曲面透镜

自由曲面透镜的入射面为平面, 光线经过入射面后方向不发生改变, 则可得自由曲面透镜出射面 P 各网格点纵横坐标 $x_{p,i}, y_{p,j} (x_{p,i} = x_{o,i}, i=1, 2, \dots, M+1; y_{p,j} = y_{o,j}, j=1, 2, \dots, M+1)$ 。因此要获得自由曲面透镜面形, 只需求出各网格点 Z 轴坐标即可。

如图 1(b) 所示, 沿 X 轴方向, 入射光线 $O_{i,j}P_{i,j}$, 经过透镜折射后, 其出射光线为 $P_{i,j}Q_{i,j}$ 。假设透镜折射率为 n , 空气折射率为 1, 根据折射定律的矢量形式^[23]

$$\mathbf{O} - n\mathbf{I} = [1 + n^2 - 2n(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \mathbf{N}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{I} 为入射光线的单位方向矢量, \mathbf{O} 为出射光线的单位方向矢量, \mathbf{N} 为折射面上相对应点的单位法线矢量。由(5)式可求得入射光线 $O_{i,j}P_{i,j}$ 在 $P_{i,j}$ 点的法向量 $\mathbf{N}_{i,j}$ 。假设网格数量划分足够多, 为保证透镜表面光滑, 由微分几何思想, 下一条光线 $O_{i+1,j}P_{i+1,j}$ 将与过 $P_{i,j}$ 点的切面交于点 $P_{i+1,j}$, 该点的 Z 轴坐标很容易求出。不断重复以上过程, 便可得到 X 轴方向自由曲面透镜表面所有点的 Z 轴坐标。因此可得各网格点 Z 轴坐标递推关系式

$$z_{i+1,j} = -(x_{i+1,j} - x_{i,j}) \frac{N_{x,i}}{N_{z,i}} + z_{i,j} \quad (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, M), \quad (6)$$

同理, 可以求得沿 Y 轴方向各格点 Z 轴坐标递推关系式

$$z_{i,j+1} = -(y_{i,j+1} - y_{i,j}) \frac{N_{y,j}}{N_{z,j}} + z_{i,j} \quad (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, M). \quad (7)$$

这样就可得到自由曲面上所有采样点的坐标。设定透镜的初始厚度为 h , 这样就可以构建出自由曲面

透镜。

2.2 逆向反馈优化

自由曲面透镜初始结构是基于准直激光光束设计的。使用准直光束设计的整形系统应用于带有发散角的光束时,会导致能量分布的均匀度下降,光斑边缘的锐度下降。因此需要采用反馈优化方法以提高能量分布均匀度。采用逆向反馈优化^[23],通过调节光源横截面能量网格,对目标平面入射能量进行补偿或削弱,从而使目标平面辐射照度均匀分布。以下将阐述其主要过程^[23]。

首先采用发散激光光束对透镜初始结构进行光线追迹,获取目标平面各网格辐射照度 $E_{i,j}(0)$ (其中 i, j 分别代表各网格点横、纵方向的下标, $i = 1, 2, \dots, M + 1; j = 1, 2, \dots, M + 1$), 同时获取目标平面辐射照度平均值 $\bar{E}(0)$ 。光线追迹以后,每个网格的辐射照度 $E_{i,j}(0)$ 将偏离辐射照度平均值 $\bar{E}(0)$ 。反馈优化的目的就是调整透镜自由曲面形,使目标面上每个网格的辐射照度逐渐逼近平均值。反馈过程中,目标面上的网格划分保持不变,而输入光束截面上的每个网格面积要根据反馈不断调整。

令 $\eta = \frac{E_{i,j}(0)}{\bar{E}(0)}$ 为反馈系数,目标面上网格 (i, j) 的辐射照度值为 $E_{i,j}(0)$, 为使其逼近平均值,应将其调整为 $\eta \cdot E_{i,j}(0)$, 为了实现这个目标,输入截面处对应的网格能量要变化为原先的 η 倍,即

$$\Phi_0 = \eta \cdot \frac{\Phi_i}{M} \quad (8)$$

假设原先各网格面积为 $\Delta S_{i,j}(0)$, 要使网格能量发生变化,则各网格面积也要发生相应的变化,变化为 $\eta \cdot \Delta S_{i,j}(0)$, 逆向反馈优化过程如图 3 所示。

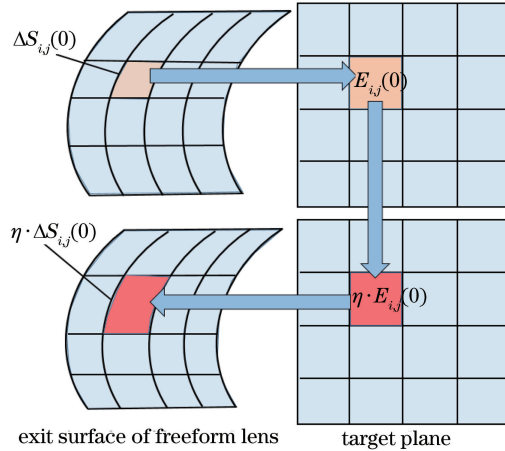


图 3 逆向反馈优化示意图

Fig. 3 Schematic of reverse feedback optimization

这样就得到了输入光束截面上新的网格分布,有了这个新的网格分布,应用 2.1 节的步骤可以设计出一个新的自由曲面透镜。发散光束通过这个新的自由曲面透镜,辐射照度均匀度将有一定提高。由于反馈优化不能一次性完成,需要重复多次,则 $\eta' = \frac{E_{i,j}(0)}{\bar{E}(0)} \cdot \frac{E_{i,j}(1)}{\bar{E}(1)} \cdot \frac{E_{i,j}(2)}{\bar{E}(2)} \cdot \dots$, 每一次反馈优化,自由曲面都有所变化,经过多次优化后得到最终的自由曲面透镜。发散光束通过最终的自由曲面透镜辐射照度值变为了 $\eta' \cdot E_{i,j}(0)$, 输入光束截面各网格能量变化为原先的 η' 倍。当经过 N 次反馈优化后的辐射照度值为 $E_{i,j}(N)$, 辐射照度平均值为 $\bar{E}(N)$, 并计算辐射照度均匀度,若均匀度达到设计要求,则停止优化。

2.3 设计流程

基于光学自由曲面的发散激光光束整形系统设计流程如图 4 所示。

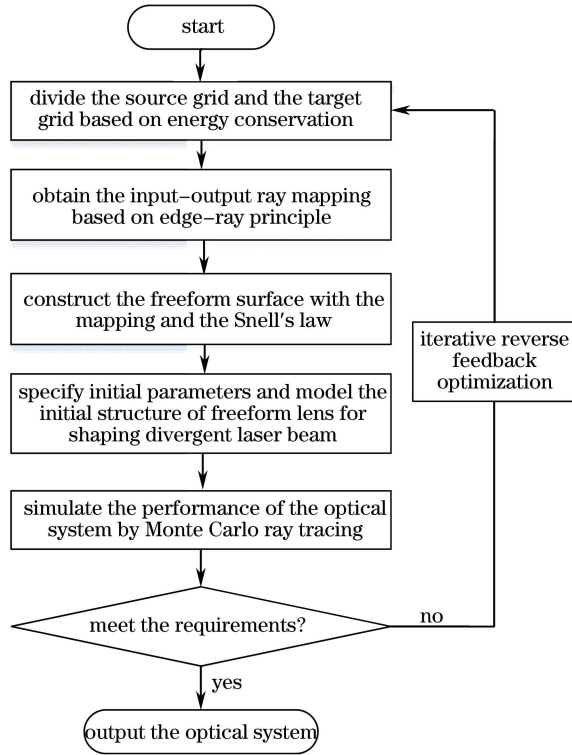


图 4 自由曲面透镜设计流程图

Fig. 4 Design flow chart of freeform lens

3 设计实例及优化

3.1 准直激光光束的自由曲面透镜设计实例

以束腰 ω_0 为 10 mm 的准直矩形激光光束为例,其辐射照度分布如图 6(a)所示。透镜设计中,一些初始参数设置如下:网格划分数 100×100 ,透镜初始厚度 h 为 3 mm,透镜折射率 n 为 1.4935,透镜距目标平面 d 为 100 mm,目标平面边长 a 为 40 mm。按照 2.1 节的方法设计的自由曲面透镜如图 5 所示。

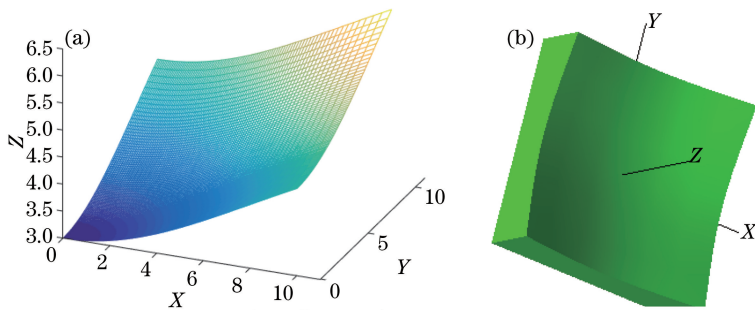


图 5 自由曲面透镜。(a) 曲面图; (b) 三维图

Fig. 5 Freeform surface lens. (a) Surface diagram; (b) three-dimensional diagram

使用光学仿真软件 Tracepro 对准直光束通过自由曲面透镜进行光线追迹分析,获得了目标面上的辐射照度分布图如图 6(b)所示。

矩形有效区域内的辐射照度均匀度为

$$\gamma = \bar{E} / E_{\max}, \quad (9)$$

式中, \bar{E} 和 E_{\max} 分别为矩形有效区域内的辐射照度平均值和最大值。通过数据计算得,目标平面矩形有效区域内的辐射照度均匀度为 90.5%。

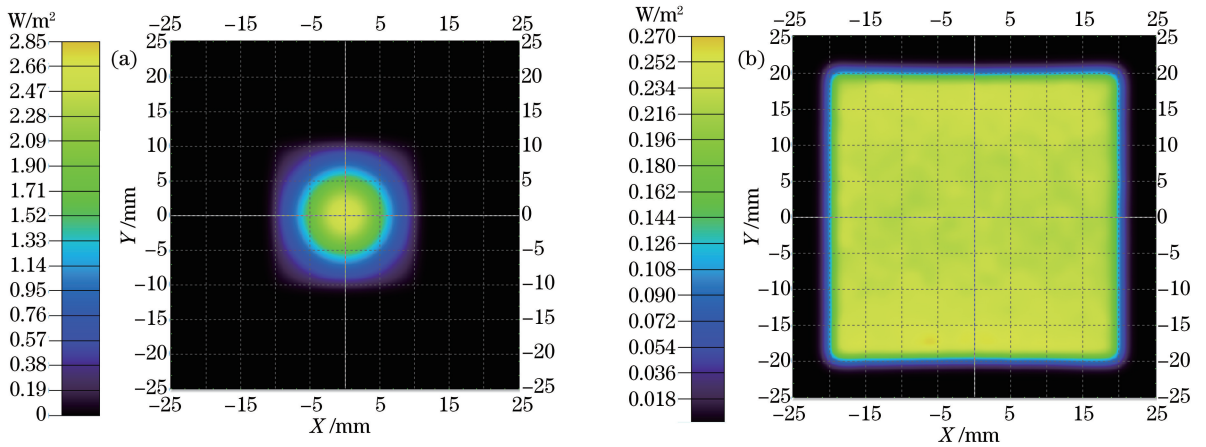


图6 目标面的辐射照度分布图(入射光为准直激光光束)。

(a) 输入激光光束辐射照度分布图; (b) 准直激光光束经整形后在目标面的辐射照度分布图

Fig. 6 Irradiance map of target plane (input beam is collimated laser beam). (a) Irradiance map of input beam; (b) irradiance map of collimated laser beam passing through freeform surface lens

3.2 发散激光光束的自由曲面透镜设计实例

本例设计使用束腰 ω_0 为10 mm,发散半角为 2.5° 的发散激光光束。直接使用3.1节中设计出来的自由曲面透镜,进行光线追迹,得到了辐射照度分布图如图7(a)所示,经计算其辐射照度均匀度为82.7%。

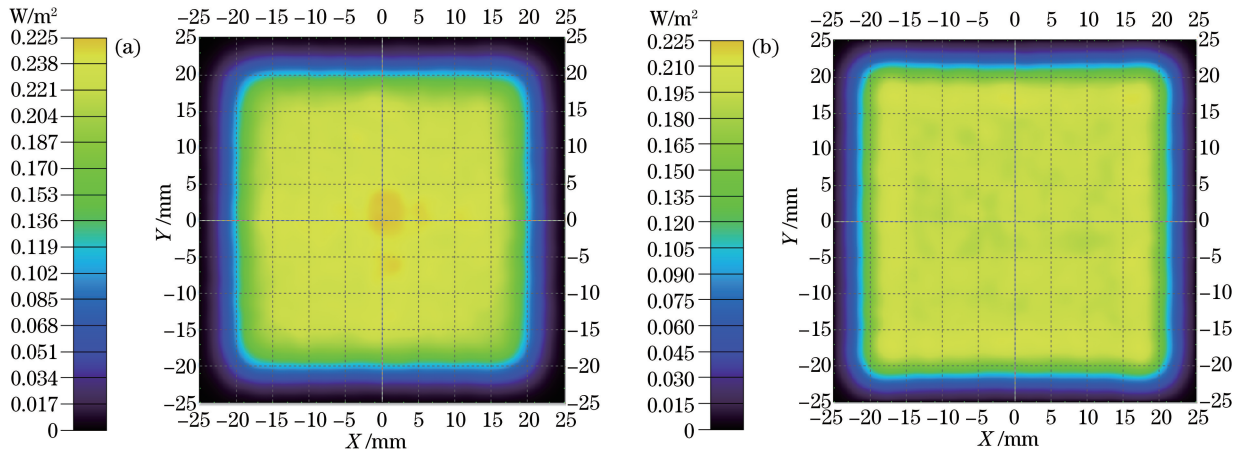


图7 目标面的辐射照度分布图(入射光为发散激光光束)。

(a) 发散激光光束经整形后在自由曲面透镜的辐射照度分布图; (b) 逆向反馈3次后的辐射照度图

Fig. 7 Irradiance map of target plane (input beam is divergent laser beam). (a) Irradiance map of divergent laser beam passing through initial freeform surface lens; (b) irradiance map after 3-cycle reverse feedback optimization

对比图6(b)和图7(a)可知,发散角的引入直接导致辐射照度均匀度下降,光斑边缘加宽,因此需要进行优化。采用逆向反馈法以提高目标平面辐射照度均匀度。根据2.2节中介绍的反馈优化方法,进行了3次逆向反馈,第3次逆向反馈后目标面的辐射照度分布如图7(b)所示。图7(b)中,目标平面辐射照度均匀度为90.4%,光束通过整形透镜光能损失率为7.3%,满足设计要求,由于在反馈进行的同时,边缘光斑不断扩展,因而停止进一步反馈优化。

经过3次逆向反馈优化,目标平面辐射照度均匀度有很大改善,但目标平面辐射照度边缘扩散现象没有解决,且随着逆向反馈的进行,边缘光斑进一步扩展。原因是由于初始边缘辐射照度值较小,随着逆向反馈的进行,边缘网格尺寸逐步增大,中间光束逐步对边缘做补偿,所以导致边缘光斑不断扩展。但在整形激光光束应用中并不需要完全将边缘做到非常明显的截止,因此该设计是符合设计要求的。

为便于直观地描述自由曲面面形,将透镜自由曲面拟合为多项式,自由曲面面形方程为 $F(x, y)$,则

$$F(x, y) = \sum_k A_k C_k(x, y) \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (10)$$

式中, A_k 为第 k 项项式所对应的系数, $C_k(x, y)$ 为第 k 项项式,

$$C_k(x, y) = x^p y^q \quad (p = 0, 1, 2, \dots; q = 0, 1, 2, \dots). \quad (11)$$

假设在自由曲面任意一点的拟合误差为 $\Delta W_k(x, y)$, 拟合误差平均值为 $\Delta \bar{W}(x, y)$, 则

$$\Delta W_k(x, y) = F'_k(x, y), \quad (12)$$

$$\Delta \bar{W}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta W_k(x, y), \quad (13)$$

式中, $F_{k(x,y)}$ 为曲面数据点实际值, $F'_k(x, y)$ 为拟合值, N 为数据点的总数。以拟合均方根(RMS)误差 E_{RMS} 作为拟合误差评估值, 则

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\Delta W_k(x, y) - \Delta \bar{W}(x, y)]^2}, \quad (14)$$

E_{RMS} 值越小, 表示拟合误差越小, 可通过增加多项式项数, 即提高多项式阶数, 降低 E_{RMS} 值。

根据上述方法, 将所设计的整形透镜自由曲面拟合为一个 5 阶多项式, E_{RMS} 为 6.58×10^{-3} 。拟合参数和多项式如表 1 所示, 拟合面形结果如图 8(a) 所示。用本例的发散激光光束对拟合后的整形自由曲面透镜进行追迹, 追迹结果如图 8(b) 所示, 经计算目标面辐射照度均匀度为 88.3%, 拟合误差在可接受的范围之内, 可以判定自由曲面拟合成功。

表 1 自由曲面拟合结果

Table 1 Fitting results of freeform surface

k	A_k	$C_k(x, y) = x^p y^q$
0	1.585	$C_0 = 1$
1	4.202×10^{-16}	$C_2 = x$
2	-9.769×10^{-17}	$C_3 = y$
3	2.479×10^{-2}	$C_4 = x^2$
4	6.737×10^{-20}	$C_5 = xy$
5	2.516×10^{-2}	$C_5 = y^2$
6	6.217×10^{-18}	$C_6 = x^3$
7	2.460×10^{-18}	$C_7 = x^2 y^1$
8	4.317×10^{-19}	$C_8 = xy^2$
9	8.833×10^{-19}	$C_9 = y^3$
10	-7.760	$C_{10} = x^4$
11	1.746×10^{-20}	$C_{11} = x^3 y$
12	-1.106	$C_{12} = x^2 y^2$
13	-1.266×10^{-20}	$C_{13} = xy^3$
14	-7.897×10^{-5}	$C_{14} = y^4$
15	-1.215	$C_{15} = x^5$
16	6.060×10^{-20}	$C_{16} = x^4 y$
17	-6.902	$C_{17} = x^3 y^2$
18	8.236×10^{-21}	$C_{18} = x^2 y^3$
19	-1.307	$C_{19} = xy^4$
20	3.399	$C_{20} = y^5$

4 自由曲面透镜面形加工误差分析

在自由曲面透镜加工中, 面形精度要求一般为微米级, 甚至亚微米级^[24], 面形误差的存在直接导致光学系统的光学性能降低。因此, 以目标平面辐射照度均匀度为评估值, 分析 3.2 节中设计的整形透镜, 经束腰 ω_0 为 10 mm, 发散半角为 2.5° 的发散激光光束追迹。当透镜出射表面各点在给定范围内随机增加或减少高度值, 即在理想的自由曲面上加入随机面形误差时(如图 9 所示), 自由曲面面形变化范围 R 对目标平面辐

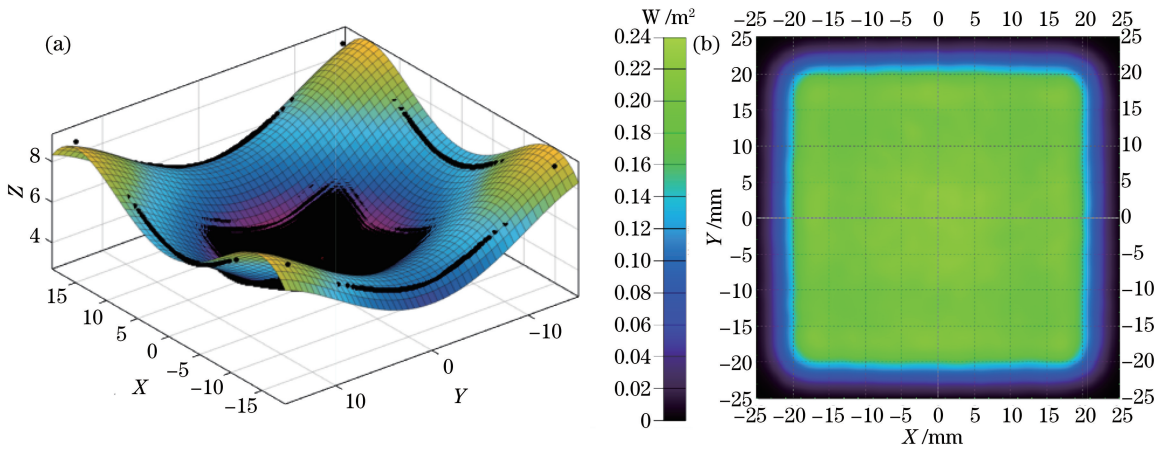


图 8 自由曲面拟合结果示意图。(a) 自由曲面面形拟合结果示意图；
(b) 发散激光经拟合自由曲面透镜整形后在目标平面的辐射照度分布图

Fig. 8 Schematic of the fitting results of freeform surface. (a) Fitting results of freeform surface shape; (b) irradiance map of divergent laser beam passing through fitting freeform surface lens

射照度均匀度的影响。

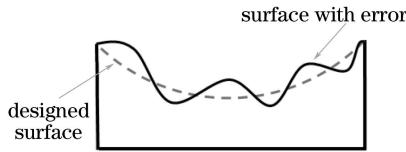


图 9 面形误差示意图

Fig. 9 Surface schematic of shape errors

进行了 3 次面形误差模拟，面形误差变化范围 R 与目标平面辐射照度均匀度之间的关系如图 10 所示。当面形变化范围为 $(-5.0 \sim 5.0 \mu\text{m})$ 时，面形变化对目标平面辐射照度均匀度几乎没有影响，均匀度保持在 90.2% 左右。随着变化量变化范围增大，辐射照度均匀度开始降低，当面形变化范围超过 $(-7.5 \sim 7.5 \mu\text{m})$ 时，目标面辐射照度均匀度降到 90% 以下，且开始大幅度波动。

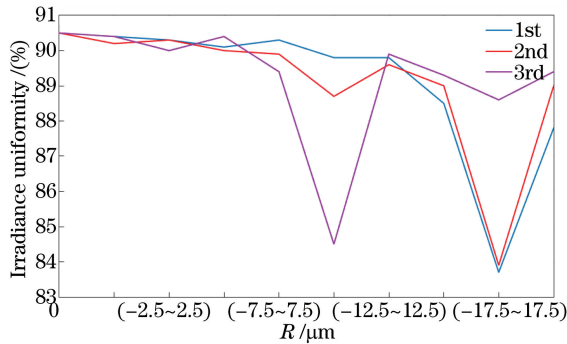


图 10 面形误差分析

Fig. 10 Surface shape errors analysis

由上述分析可见，加工误差控制在 $(-5.0 \sim 5.0 \mu\text{m})$ 范围，对目标面辐射照度均匀度影响并不大。目前，针对自由曲面透镜的加工主要的方法有：磨削研磨抛光、计算机控制光学表面成型技术、超精密单点金刚石切削等方法^[25]。这些方法将加工精度控制在 $(-5.0 \sim 5.0 \mu\text{m})$ 比较容易实现。

5 公差分析

以目标平面辐射照度均匀度为评估值，分析经逆向反馈优化后得到的透镜，经束腰 ω_0 为 10 mm，发散半角为 2.5° 的发散激光光束追迹，在安装时，横向位移误差 dx 、纵向位移误差 dz 以及透镜光轴与目标平面

法线方向的倾斜误差 $d\varphi$ 均对目标平面辐射照度均匀度有影响,如图 11 所示。其中 d_z 为正值和负值时,分代表透镜相对于光源沿光轴正向和负向移动的距离。 $d\varphi$ 为正值和负值时,分别代表透镜沿顺时针和逆时针方向倾斜。

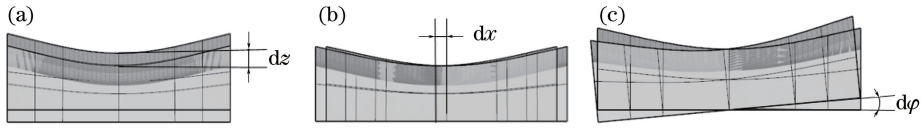


图 11 装配误差示意图。(a) 横向位移误差 d_z 示意图; (b) 纵向位移误差 d_x 示意图; (c) 倾斜误差 $d\varphi$ 示意图

Fig. 11 Schematic of assembly errors. (a) Schematic of longitudinal displacement error d_z ; (b) schematic of lateral error d_x ; (c) schematic of slant angle error $d\varphi$

装配误差分析结果如图 12 所示。由图 12 可知,纵向位移误差 d_z 对辐射照度均匀度影响较小,辐射照度均匀度保持在 90.3% 附近,变化不明显。而横向误差 d_x 对辐射照度均匀度影响较大,当透镜在 $(-0.5 \sim 0 \text{ mm})$ 范围内横向移动时,辐射照度均匀度随横向位移增加而增加,由 79.6% 提高到 90.4%; 在 $(0 \sim 0.5 \text{ mm})$ 范围内横向移动时,辐射照度均匀度随横向位移增加而降低,降低到 81.2%。倾斜误差 $d\varphi$ 对辐射照度均匀度也有较大影响,当倾斜角在 $[-3^\circ \sim 2^\circ]$ 范围内变化时,辐射照度均匀度变化较小,均匀度在 90.0% 附近浮动,但当倾斜角进一步增大,均匀度开始迅速下降,最低为 69.8%。

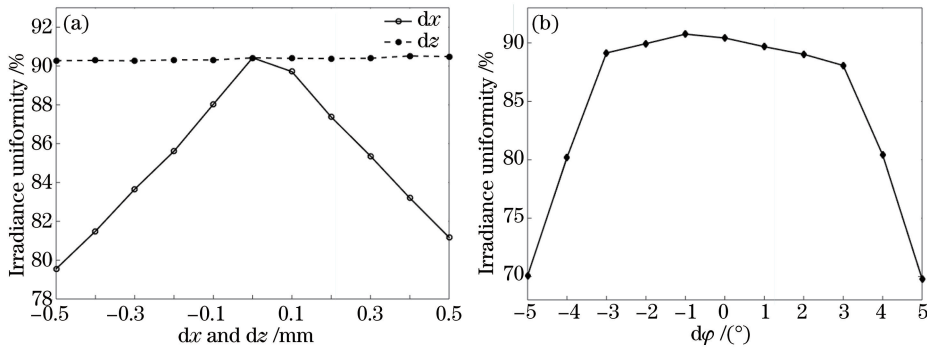


图 12 透镜装配公差分析。(a) 横向位移误差 d_x 和纵向位移误差 d_z 与辐射照度均匀度关系示意图;

(b) 倾斜误差 $d\varphi$ 与辐射照度均匀度关系示意图

Fig. 12 Tolerance analysis of lens assembly. (a) Schematic of d_x and d_z versus irradiance uniformity;

(b) schematic of $d\varphi$ versus irradiance uniformity

6 结 论

提出了一种自由曲面整形发散激光光束的设计方法,采用逆向反馈优化有效提高了发散激光光束经整形后的辐射照度均匀度,为光学设计工作者应用自由曲面整形发散激光光束提供了新思路。应用本方法整形准直激光光束,可将束腰为 10 mm 的准直高斯光束整形为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的方形光束,辐射照度均匀度为 90.5%。同时,应用本方法整形发散激光光束,结合逆向反馈优化,通过 3 次逆向反馈优化,使束腰为 10 mm,发散半角为 2.5° 的激光光束整形后的辐射照度均匀度从 82.7% 提高到了 90.4%。之后,对所设计整形透镜进行了面形加工误差分析,分析表明,当面形变化范围为 $(-5.0 \sim 5.0 \mu\text{m})$ 时,对目标面辐射照度均匀度几乎没有影响,均匀度保持在 90.2% 左右。随着面形变化范围增大,辐射照度均匀度开始下降且大幅度波动。最后,对设计的透镜进行了安装误差分析。分析表明,纵向位移误差 d_z 对辐射照度均匀度影响较小;横向误差 d_x 对辐射照度均匀度影响较大,辐射照度均匀度随横向左右位移增加而降低;倾斜误差 $d\varphi$ 对辐射照度均匀度也有较大影响,当正负倾斜角在 3° 以内时,均匀度变化较小,当正负倾斜角进一步增大时,均匀度开始迅速下降,当倾斜角为 5° 时,均匀度最低,为 69.8%。

参 考 文 献

- 1 F M Dickey, S C Holswade. Laser beam shaping: theory and techniques [M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2014.
- 2 Li Hongxia, Lou Qihong, Ye Zhenhuan, *et al.*. Research on evaluating norm of excimer laser beam uniformity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 729-732.
李红霞, 楼祺洪, 叶震寰, 等. 准分子激光光束均匀性的评价指标研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 729-732.
- 3 Xu Guojian, Tian Xiyu, Hang Zhengxiang, *et al.*. Formation principle of ring laser beam and research on laser welding of polymer materials[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0906001.
徐国建, 田希玉, 杭争翔, 等. 环形激光束形成及高分子材料焊接性能的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0906001.
- 4 D L Shealy. Historical perspective of laser beam shaping[C]. SPIE, 2002, 4470: 28-47.
- 5 F M Dickey, L S Weichman, R N Shagam. Laser beam shaping techniques[C]. SPIE, 2000, 4065:338-348.
- 6 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Li Hongxia, *et al.*. Beam homogenizing technology for UV excimer laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 207-212.
叶震寰, 楼祺洪, 李红霞, 等. 准分子激光光束均匀技术[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 207-212.
- 7 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1107-1111.
陈怀新, 隋展, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1107-1111.
- 8 Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 285-291.
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 285-291.
- 9 Fan Zengming, Li Zhuo, Qian Lixun. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2):353-357.
范增明, 李卓, 钱丽勋. 非球面透镜组激光光束整形系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 353-357.
- 10 Shi Guangyuan, Yang Xiaoping, Liang Yanmei. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1):0122001.
史光远, 杨晓苹, 梁艳梅. 基于非球面柱透镜的激光束整形[J]. 光子学报, 2014, 43(1):0122001.
- 11 Enguo Chen, Rengmao Wu, Tailiang Guo. Design a freeform microlens array module for any arbitrary-shape collimated beam shaping and color mixing[J]. Opt Commun, 2014, 321:78-85.
- 12 Liu Lihong. Optimization design method for microlens array laser beam shaping devices based on optics non-imaging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
刘丽红. 基于非成像光学的微透镜阵列激光整形器件优化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- 13 Jin Yuhua, Zhao Yan, Jiang Yijian. Microlens beam shaping and homogenizing optical system for excimer laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602003.
靳羽华, 赵艳, 蒋毅坚. 准分子激光微透镜整形均束装置[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602003.
- 14 Meng Yingli. The design of binary optical elements for laser beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
孟英利. 用于激光光束整形的二元光学元件的设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 15 Zhang Wei, Liang Chuanyang, Li Jin, *et al.*. Design of optical elements for beam shaping and uniform illumination in laser digital projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0805001.
张巍, 梁传样, 李金, 等. 用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0805001.
- 16 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 698-1704.
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 698-1704.
- 17 P J Smilie, T J Suleski. Variable-diameter refractive beam shaping with freeform optical surfaces[J]. Opt Lett, 2011, 36(21): 170-4172.
- 18 Rengmao Wu, Peng Liu, Yaqin Zhang, *et al.*. A mathematical model of the single freeform surface design for collimated beam shaping[J]. Opt Express, 2013, 21(18): 20974-20989.
- 19 Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Wei Zhonglun, *et al.*. Maskless lithography illumination system with double freeform surfaces for beam shaping[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1505-1510.

- 孟祥翔, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 采用双自由曲面整形的无掩模光刻照明系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1505-1510.
- 20 V Olikier. On design of free-form refractive beam shapers, sensitivity to figure error and convexity of lenses[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(12): 3067-3076.
- 21 Zexin Feng, Lei Huang, Mali Gong, *et al.*. Beam shaping system design using double freeform optical surfaces[J]. Opt Express, 2013, 21(12):14728-14735.
- 22 E Hecht. Optics[M]. Zhang Cunlin Transl. Beijing: Higher Education Press, 2004: 703-718.
赫克特. 光学[M]. 张存林 改编. 北京: 高等教育出版社, 2004: 703-718.
- 23 Ran Jing. Design and research of the free-form lens based on reverse feedback optimization method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 39-70.
冉 景. 基于逆向反馈优化方法的 LED 自由曲面透镜设计与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 39-70.
- 24 杨 辉. 光学自由曲面的先进制造技术[C]. 提高全民科学素质、建设创新型国家——2006 中国科协年会论文集(下册), 2006: 86-93.
- 25 Tie Guipeng. Research on key technology in turning of freeform optics based on slow tool servo[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
铁贵鹏. 自由曲面光学元件慢刀伺服加工关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.