

离轴双反射自由曲面激光整形系统的设计

潘红响^{1,2**}, 苏宙平^{1,2*}

¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 设计了一种离轴双反射自由曲面激光整形系统, 不仅可以使输出光束辐照度分布变均匀, 而且可以控制输出波前和扩束率。通过设置两个约束条件和初始条件, 获得自由曲面上相邻采样点之间的迭代关系, 从而计算整个自由曲面上所有采样点。利用软件对系统进行验证, 将 16 mm×16 mm 的方形高斯束分别整形为 80 mm×80 mm 的方形均匀光斑和 120 mm×20 mm 的矩形均匀光斑, 出射光束均为准直光束。结果表明: 方形光斑均匀度为 90.74%, 光束扩束率为 5; 矩形光斑均匀度为 94.75%, 水平方向扩束率为 7.5, 竖直方向扩束率为 1.25。

关键词 激光整形; 自由曲面; 离轴反射; 辐照度均匀性

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.070801

Design of Off-Axis Two-Mirror Laser-Shaping System with Freeform Surface

Pan Hongxiang^{1,2**}, Su Zhouping^{1,2*}

¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract In this paper, an off-axis two-mirror system that can not only make the output beam irradiance distribution uniform, but also control the output beam wave-front and beam-expansion ratio, is designed for laser shaping. By setting two constraints and initial conditions, the iterative relationship between the adjacent sampling points on the free surface can be obtained, and all the sampling points on the whole free surface can be calculated. We use a software to verify the system, and the 16 mm×16 mm square aperture is transformed into an 80 mm×80 mm square aperture and a 120 mm×20 mm rectangular aperture; the outgoing beams are all collimated beams. The results show that the square spot uniformity is 90.74%, and the beam expansion ratio is 5; the rectangular aperture spot uniformity is 94.75%, and the beam expansion ratios in the horizontal and vertical directions are 7.5 and 1.25, respectively.

Key words laser beam shaping; freeform surface; off-axis reflection; irradiance uniformity

OCIS codes 080.4035; 140.3300; 220.2740

1 引言

激光作为一种高亮度的光源, 广泛应用于激光加工、3D 打印、液晶面板退火、激光照明等领域^[1-4]。然而激光的光强一般呈高斯分布, 会对使用场景造成严重影响, 因此设计合理的整形系统, 将激光的光强转化为均匀分布^[1-4], 具有重要

的意义。国内外学者研究了一系列激光整形方法, 使用蝇眼透镜阵列产生均匀分布光束的方法被广泛用于准分子或半导体激光整形^[1-2], 但可能使激光产生干涉效应, 影响整形效果。其次该方法虽然可以控制输出激光辐照度分布的均匀性, 但无法控制输出激光的波前。空间光调制器 (SLM) 可以通过编程控制输出激光的辐照度分布

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2019-11-11; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(2012ADL03)

* E-mail: zpsu_optics@163.com; ** E-mail: 852063127@qq.com

和波前^[5-6],但对光的利用率较低,且无法承受高功率激光的照射。衍射光学元件通过合理的相位设计也可以控制输出激光的辐照度分布,但效率不高^[7]。非球面透镜组作为一种激光整形系统^[8-9]可用于高功率激光束整形,但只能用于旋转对称的激光束。与非球面透镜相比自由曲面透镜有更多的自由度,广泛应用于激光整形系统中^[10-13]。Feng等^[11]使用自由曲面透镜组,同时控制了输出激光的辐照度分布和波前。Wei等^[12]将自由曲面构造耦合到光线映射的计算过程,使用双自由曲面同时控制辐照度分布和波前,产生了特定的照度分布图。文献[8-12]都是利用几何光学近似设计的传统光学透镜或反射镜对激光整形,取得了不错的研究结果,这表明激光的衍射特性对使用几何光学原理设计的整形系统影响不大。上述的自由曲面透镜整形系统都是同轴的透射系统,难以应用在很多激光应用装置中,如为使系统结构紧凑需将光路进行转向的系统。Oliker^[13]提出了一种双反整形系统,但设计过程复杂。

本文提出了一种离轴双反射自由曲面激光整形光学系统,是由两个自由曲面反射镜组成的反射式系统。不仅可以实现输出激光在目标面辐照度分布均匀,还可以控制输出激光束的波前,使出射光束为准直光束。使用准直光束进行激光加工时,与工件面的距离有很大的调节公差。此外,还可以控制扩束率,即输出光束与输入光束口径之比。尽管商用的光学软件 Tracepro、Lighttools 以及 ASAP 等都有光学自由曲面优化功能,但很难通过这些软件优化离轴双反射自由曲面系统产生均匀的辐照度分布。软件优化的本质是一种试错法,优化过程中每改变一组面形数据,就要追迹一次光线,计算辐照度的分布数据,如果辐照度的均匀度比上一组好就舍弃上一组面形数据,使用最新的面形数据,相反则保留上一组面形数据。然后重复该过程,直到均匀度满足要求。每优化1次,要追迹50~100万条光线,运算量非常大。如果初始面形偏离最终面形较远,会陷入最优化过程的局部最小问题中,若在约束条件中加上输出波前和扩束率,且离轴系统还要控制两个自由曲面反射镜之间不能有遮拦,则优化就更难完成。因此提出了一种不需要对面形进行优化的方法,设置了两个约束条件:1)输入光束和输出光束之间满足预定的能量映射关系;2)入射光束截面到目标面上所有光线都要满足光程相等的条件。基于

这两个约束条件和初始条件,可以获得自由曲面上相邻采样点之间的迭代关系,从而计算整个自由曲面上所有采样点,将这些数据点导入结构设计软件,就可得到两个自由曲面。利用光学仿真软件对该设计进行验证,结果表明:输出光束在目标面上产生了均匀的辐照度分布,且该方法只需在验证设计结果时追迹一次光线,不用做任何优化。

2 离轴双反射自由曲面激光整形系统设计原理

离轴双反射自由曲面激光整形系统工作原理如图1所示, S 为入射光束的截面,截面上的激光辐照度分布为高斯分布, T 为目标面, P 和 M 为两个反射镜,面形均为自由曲面。 P 和 M 构成了一个离轴双反射自由曲面激光整形系统。设计原理:将入射截面 S 分成 $M \times N$ 个网格,每个网格有相等的能量,将目标面 T 分成 $M \times N$ 个网格,每个网格按等面积划分。输入光束中通过 S 面每个网格的子光束经过自由曲面反射镜 P 和 M 反射后入射到目标面 T 上对应的网格。因为每个子光束具有相等的能量,且目标面上每个网格面积相等,所以整个光束经过整形系统入射到目标面会产生均匀的辐照度分布。除了控制输出光束在目标面上照度均匀分布,还要将其波前控制为平面波,即输出光束为准直光束,因此需要对 P 和 M 进行设计。主要分为两步:1)输入光束截面和目标面的网格划分;2)自由曲面反射镜上采样点的计算。

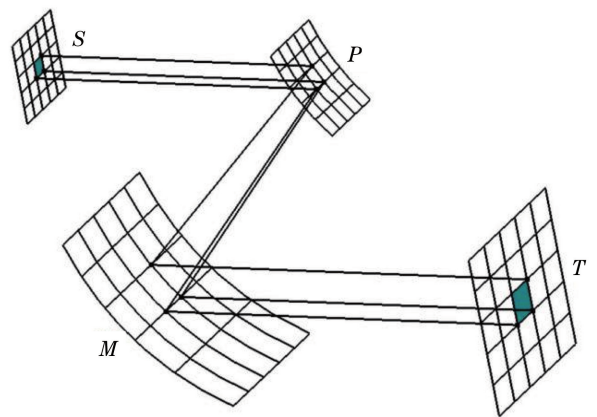


图1 离轴双反射激光整形系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of off-axis two-mirror laser shaping system

2.1 输入光束截面和目标面的网格划分

入射光束截面上网格的能量要入射到目标面上

对应网格中,如图2所示。图2(a)将入射光束截面划分为 $M \times N$ 个网格,确保每个网格有相等的能量,因为截面上水平和垂直两个方向辐照度分布为高斯分布,所以中心区域的网格面积小,而边缘区域的网格面积大;图2(b)将目标面按等面积划分 $M \times$

N 个网格。对入射光束截面和目标面网格的划分可以参考文献[4],当网格划分完成后,入射光束截面和目标面上每个网格点的坐标 S_{ij} 和 T_{ij} 均为已知量,作为计算两个自由曲面反射镜上采样点的初始条件。

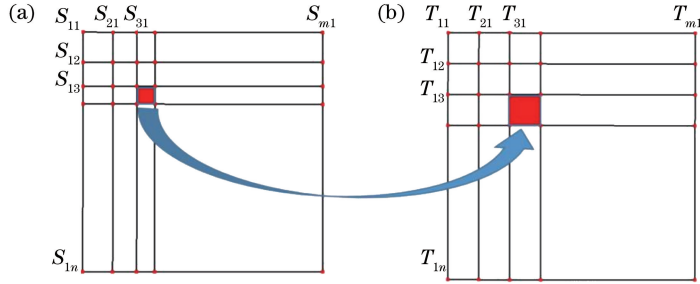


图2 网格划分。(a)矩形入射光束截面;(b)目标面

Fig. 2 Grid division. (a) Cross section of rectangle incident beam; (b) target surface

2.2 自由曲面反射镜上采样点计算方法

两个自由曲面的设计过程如图3所示,设计步骤:

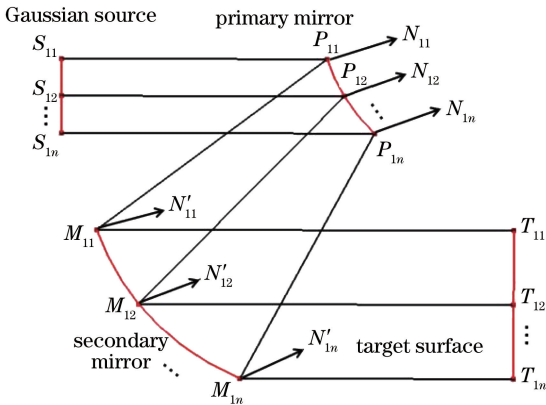


图3 自由曲面上采样点计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling point calculation on freeform surface

1) 确定初始条件。预先给定的初始条件有:入射光束为矩形口径的准直光束,目标面形状为矩形,入射光束的截面为光束束腰所在位置。入射光束截面和目标面上网格点坐标均可根据2.1节计算。如图3所示,设自由曲面反射镜 P 和 M 上的第一个点 $P_{11}(x'_{11}, y'_{11}, z'_{11})$ 和 $M_{11}(x''_{11}, y''_{11}, z''_{11})$ 为初始点, $P_{11}(x'_{11}, y'_{11}, z'_{11})$ 位于从 $S_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ 点出射的光线上,从入射光束截面 S 上初始点 $S_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ 出射的光线经过 P_{11} 和 M_{11} 反射后入射到目标面 T 上的初始点为 T_{11} , M_{11} 与 T_{11} 在同一水平线上, S_{11} 与 P_{11} 在水平方向的距离、 M_{11} 与 T_{11} 相互之间的距离没有严格要求,根据系统的尺寸来定。

2) 计算每个自由曲面上的第一条曲线。光线 $S_{11}P_{11}$ 经过 P_{11} 点反射后,出射光线为 $P_{11}M_{11}$, 可得到入射光线 $S_{11}P_{11}$ 和出射光线 $P_{11}M_{11}$ 的光线的矢量表式

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= (x'_{11} - x_{11})\mathbf{i}' + (y'_{11} - y_{11})\mathbf{j}' + (z'_{11} - z_{11})\mathbf{k}' \\ \mathbf{O}_{11} &= (x''_{11} - x'_{11})\mathbf{i}' + (y''_{11} - y'_{11})\mathbf{j}' + (z''_{11} - z'_{11})\mathbf{k}', \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{I} 为 $S_{11}P_{11}$ 的入射光线矢量, \mathbf{O}_{11} 为 $P_{11}M_{11}$ 的出射光线矢量, $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ 分别为 X, Y, Z 方向上的单位矢量。

根据反射定律的矢量形式,可得到通过反射镜 P 上的 P_{11} 点法向矢量为^[14]

$$\mathbf{N}_{11} = \frac{\mathbf{O}_{11} - \mathbf{I}}{\sqrt{2 - 2(\mathbf{O}_{11} \cdot \mathbf{I})}}. \quad (2)$$

利用相同的方法,根据入射在 M_{11} 光线 $P_{11}M_{11}$ 和经过 M_{11} 反射后出射的光线 $M_{11}T_{11}$ 计算出通过点 M_{11} 的法向矢量 \mathbf{N}'_{11} 。由 \mathbf{N}_{11} 可以求出过 P_{11} 点的切平面,根据已知条件可计算反射面 P 上第二点 P_{12} 。经光束截面上点 S_{12} 处的出射光线与过 P_{11} 点处的切平面相交,交点为反射面 P 上第二点 P_{12} 。因出射光束为平面波前即垂直于目标面,入射光束也为平面波前,所以出射光束从入射光束截面到目标面的光程是相等的^[11], (3)式给出了第一条光线与第二条光线光程相等的条件,其中 $[\]$ 表示光程。

$$\begin{aligned} [S_{11}P_{11}] + [P_{11}M_{11}] + [M_{11}T_{11}] = \\ [S_{12}P_{12}] + [P_{12}M_{12}] + [M_{12}T_{12}]. \end{aligned} \quad (3)$$

对第2条光线,点 P_{12} 计算出来之后可得到 $[S_{12}P_{12}]$, 因出射光束为平面波,所以 M_{12} 和 T_{12} 有相同的纵坐标,根据(3)式即可求过 M 面上的第二

个点 M_{12} 。不断重复上述过程,可以求得自由曲面反射镜 P 上的第 1 条曲线,如图 4(a)中的曲线 1 所示,其中下标 i 和 j 表示网格的行列坐标。将这条曲线称为种子曲线,使用同样的方法也可以求得反射镜 M 上的第 1 条曲线。

3) 计算整个自由曲面上所有采样点。确定种子曲线 1 之后,返回初始点计算自由曲面上的下一

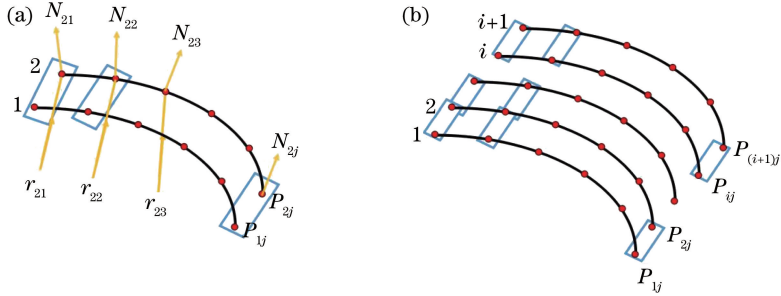


图 4 数据点的计算。(a)相邻曲线上数据点的计算;(b)反射面上所有数据点的计算

Fig. 4 Calculation of data points. (a) Calculation of data points on adjacent curves; (b) calculation of all data points on the reflective surface

3 设计实例

利用高斯激光束设计了一个离轴双反射自由曲面激光整形系统,输入的激光光束为方形口径,光束口径为 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm}$,所照射目标面为 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,截面与目标面网格划分数为 161×161 。根据上述方法计算的两个自由曲面采样点如图 5(a)所示,将三维数据点导入三维建模软件中构建的实体模型如图 5(b)所示。

使用光学仿真软件对该系统进行光线追迹,如图 6 所示。输入光束辐照度分布如图 7(a)所示,目

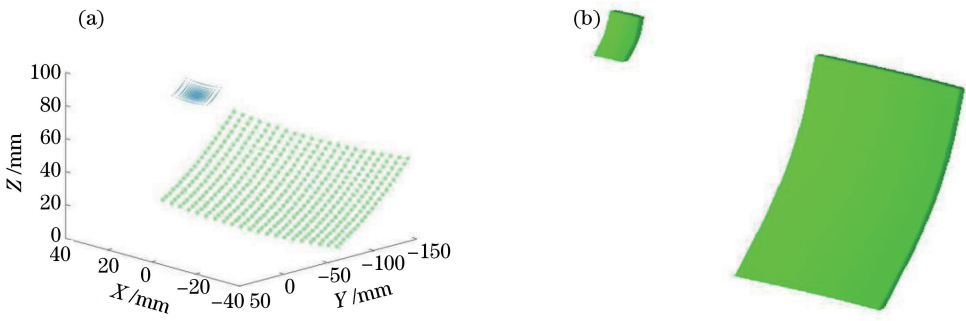


图 5 自由曲面反射镜。(a)表面三维数据点;(b)曲面图

Fig. 5 Freeform mirror. (a) Three dimensional data points on the surface; (b) curved surface

激光加工应用中,有时需要输出矩形光斑,本方法也可以将方形光束整形为矩形均匀准直光束,将入射激光横截面设置为 $120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,目标面按照等面积划分为长条形,如图 8 所示。

条曲线,如图 4(a)所示。过 P_{11} 点处切平面与从点 S_{21} 发射出的光线 r_{21} 交点为曲线 2 上的第一点 P_{21} 。然后根据等光程原理和准直出射条件计算出反射面上点 M_{21} ,重复上述过程可计算出反射镜 P 和 M 上的第二条曲线,从曲线 2 计算出曲线 3 上的采样点,然后计算出反射面 P 和 M 上所有数据点,如图 4 (b)所示。

标面上的照度分布如图 7(b)所示。为定量比较输入光束和输出光束辐照度的均匀度变化,将激光辐照度分布的均匀度定义为

$$U = \bar{E} / E_{\max}, \quad (4)$$

式中, \bar{E} 为矩形区域内辐照度平均值, E_{\max} 为辐照度最大值。计算得出经过整形系统激光束的辐照度均匀度从 35.55% 提高到 90.74%,其中第一面反射镜大小为 $16\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,第二面反射镜大小为 $80\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 。

按上述方法设计了一个离轴双反射自由曲面激光整形系统,使输出光束在目标面产生均匀的矩形光斑。对该系统进行光线追迹,仿真结果如图 9(a)所示,目标面上的辐照度分布如图 9(b)所

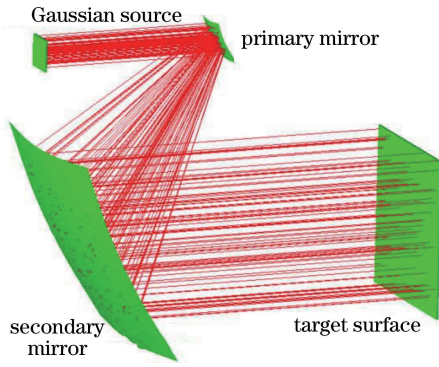


图 6 离轴双反射整形光学系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of off-axis two-mirror optical system

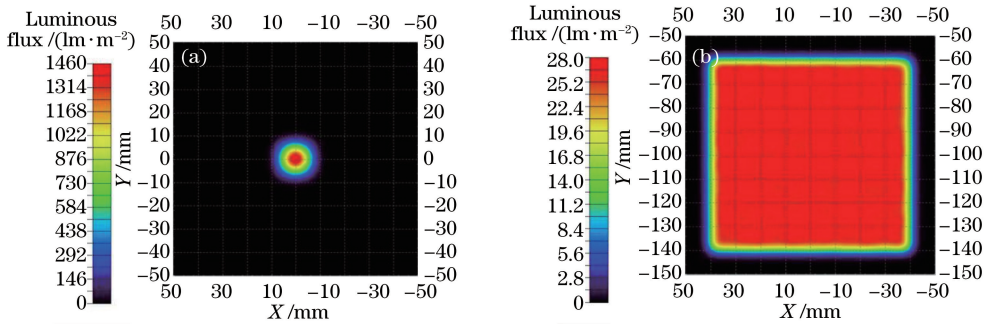


图 7 辐照度分布图。(a)入射激光横截面；(b)目标面

Fig. 7 Irradiance distribution. (a) Cross section of incident laser light; (b) target surface

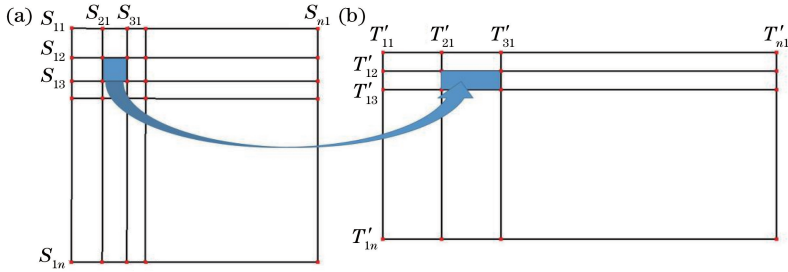


图 8 网格划分。(a)方形入射光束横截面；(b)目标面

Fig. 8 Grid division. (a) Cross section of square incident beam; (b) target surface

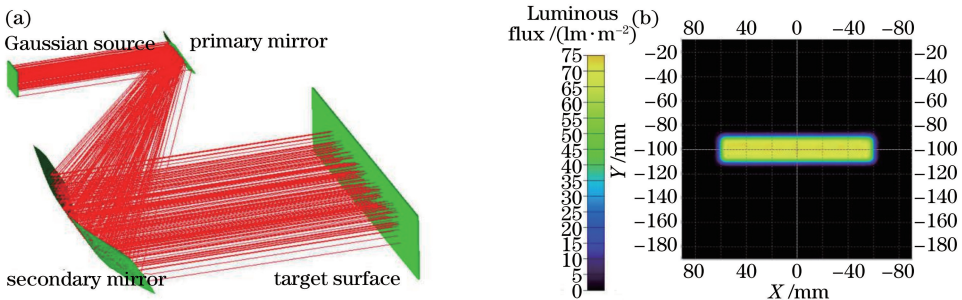


图 9 整形系统及其目标面辐照度分布。(a)整形系统光路图；(b)目标面辐照度分布图

Fig. 9 Irradiance distribution of the shaping system and its target surface . (a) Optical path diagram of the shaping system; (b) radiation distribution of the target surface

示。由仿真结果可知，该系统可以将高斯分布的方形孔径光束整形为矩形均匀光束，输出光斑大小为 $120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，输出光束为准直光束，输出

光束在目标面辐照度均匀度为 94.57% ，其中第一面反射镜大小为 $16\text{ mm} \times 18.4\text{ mm}$ ，第二面反射镜大小为 $120\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ 。输出光束的口径与输

入光束口径相比在两个方向的扩束率分别为 7.5 和 1.25。

从实验结果可以看出,使用本方法设计的整形系统可以将激光束的光强从高斯分布变为均匀分布。虽然实际中激光光强分布与理想高斯分布有一定的偏差,但只要测出了输出光横截面上的光强分布,通过该整形系统,就可以按照等能量将入射光束分成若干个子光束。

4 面型加工误差分析

光学面型的加工误差会导致光学系统的性能下降,可通过给定自由曲面表面采样数据点在一定范围内的随机变化值 Δz 来模拟实际面型加工误差,即理想离散数据点的坐标为 (x, y, z) ,存在加工误差后的实际坐标为 $(x, y, z + \Delta z)$ 。可通过目标平面辐照度均匀度变化来分析面型加工误差对整形系统的影响。

面型误差变化范围 Δz 与目标面辐照度均匀度之间的关系如图 10 所示。由图可知,将辐照度均匀度的变化范围控制在 6% 以内,对 80 mm × 80 mm 的方形均匀光斑系统加工误差需控制在 1.4 μm 以内,对 120 mm × 20 mm 的矩形均匀光斑系统加工误差需控制在 1.2 μm 以内。可以看出该系统的加工精度对目前的光学加工能力要求不高。

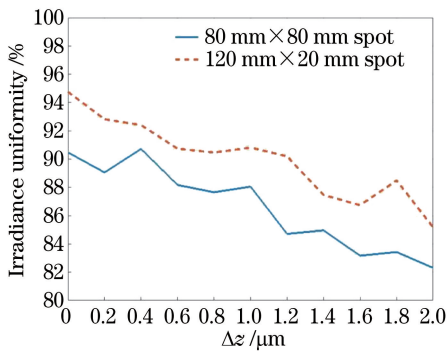


图 10 面型加工误差对均匀度的影响

Fig. 10 Effect of surface processing error on uniformity

5 结 论

设计了一种离轴双反射自由曲面光学系统对激光光束进行整形,该系统由两个自由曲面光学反射镜构成。可实现对光路转向,使系统结构更为紧凑,实现输出激光辐照度分布均匀化的同时还可以控制输出激光波前及扩束倍率。通过构建输入输出能量之间的映射关系,划分光束的截面和目标面网格,结合等光程的要求,构建每个自由曲面上相邻采样点

的关系,不断迭代计算出两个自由曲面反射镜上的所有采样点。通过光学软件对设计的两个实例进行验证,结果表明,输出光束在目标面上产生了均匀的辐照度分布。方形光斑均匀度为 90.74%,光束的扩束率为 5;长条形光斑整形均匀度为 94.57%,水平方向扩束率为 7.5,竖直方向扩束率为 1.25,输出光束均为准直光束。

参 考 文 献

- [1] Jin Y H, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [2] Yin G Y, You L B, Fang X D. ELA-beam shaping systems for flat panel display prepared by LTPS [J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 383-387.
尹广玥, 游利兵, 方晓东. 用于平板显示 LTPS 制备的 ELA 光束整形系统 [J]. 激光技术, 2016, 40(3): 383-387.
- [3] Zhang W, Liang C Y, Li J, 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, 梁传祥, 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.
- [4] Peng Y M, Su Z P. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522003.
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522003.
- [5] Chen H X, Sui Z, Chen Z P, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1103-1106.
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): 1103-1106.
- [6] Ma H T, Zhou P, Wang X L, et al. Near-diffraction-limited annular flattop beam shaping with dual phase only liquid crystal spatial light modulators [J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8251-8260.
- [7] Meng Y L. 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.
- [8] Fan Z M, Li Z, Qian L X. 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.
- [9] Shi G Y, Yang X P, Liang Y M. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(S1): 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(S1): 0122001.
- [10] Wu R M, Liu P, Zhang Y Q, 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 X, Huang L, Gong M L, et al. Beam shaping system design using double freeform optical surfaces[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14728-14735.
- [12] Wei S L, Zhu Z B, Fan Z C, et al. Double freeform surfaces design for beam shaping with non-planar wavefront using an integrable ray mapping method[J]. Optics Express, 2019, 27(19): 26757-26771.
- [13] Oliker V. Optical design of freeform two-mirror beam-shaping systems[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(12): 3741-3752.
- [14] 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.
- 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.