

基于单压电变形镜的平顶光束整形研究

徐卢浩, 韩小帅, 张 昕, 姚 琪, 马剑强*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对光束整形问题, 本文提出了一个基于单压电变形镜的方法和相关的搜索算法, 用于整形出不同形状和不同尺寸的平顶光束. 利用随机并行梯度下降算法找到平顶光束整形所需的调制相位, 控制变形镜重构光斑对应的调制相位, 实现对不同形状、不同尺寸平顶光束的整形. 结果表明: 所生成的圆形、方形平顶光束质量较高, 且对不同尺寸(0.25、0.30、0.35、0.40 mm)的圆形、方形平顶光束均有较好的整形效果.

关键词: 自适应光学; 平顶光束; 单压电片变形镜; 光束整形

中图分类号: TH751

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 06-0074-05

高斯光束的光斑能量为高斯分布, 当激光对工件进行切割、焊接、抛光等加工时, 因能量密度分布不均而严重影响工件表面的平整程度^[1-2]. 因此, 研究人员通过光束整形将高斯光束整形为能量均匀分布的平顶光束^[3], 使平顶光束在激光加工中对工件表面有更好的平整度.

光阑拦截是最初的一种获得平顶光束的整形方法^[4], 这种靠光阑拦截来获得均匀光强分布的方法使得能量损失严重. Laskin 等^[5]利用非球面镜整形系统整形出了质量较好的圆形平顶光束, 但这种方法只能针对特定束腰半径的高斯光束, 而不能对一定范围内任意腰斑半径的高斯光束进行整形, 只适用于静态的光束整形问题^[6]. González-Núñez 等^[7]利用变形镜通过相位检索算法成功整形出具有均匀光强分布的圆环平顶光, 但是圆环平顶光束在加工应用中局限性太大. Sheldakova 等^[8]采用 27 电极的 20 mm 微型双压电变形镜生成了方形平顶光束, 但是整形效果尚不够理想.

本文提出一种不同形状平顶光束的整形方法, 首先结合光波衍射理论和随机并行梯度下降算法 (Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD) 仿真模拟出平顶光束整形所需的波前相位, 基于 62 单元单

压电变形镜, 以波前传感器采集到的波前信息为反馈, 实时控制变形镜重构出平顶光束整形所需的波前相位, 整形出不同形状和尺寸的平顶光束.

1 平顶光束物理模型与仿真

平顶光束是一种在特定区域内有几乎一致能量密度的激光光束或电子束. 本研究所采用的平顶光束物理模型为超高斯光束模型, 产生的平顶光束为圆形平顶光束和方形平顶光束, 其中圆形平顶光束的光强分布公式为^[9]:

$$I_{\text{desired}} = \exp\left(\frac{-2(x^2 + y^2)^n}{(w^2)^n}\right), \quad (1)$$

当相位为方形平顶相位时, 经傅里叶变换后的方形平顶光束的光强分布公式为:

$$I_{\text{desired}} = \exp\left(\frac{-2(x^{2n} + y^{2n})}{(w^2)^n}\right), \quad (2)$$

式中: I_{desired} 表示目标平顶光束的光强分布; x 和 y 分别表示 x 轴与 y 轴上的坐标值; n 为超高斯分布阶数, 其取值决定光束的基本形状; w 为平顶光束的光斑半径.

根据衍射理论, 当平行入射光束经过变形镜调制之后, 再通过透镜聚焦得到调制后的聚焦光

收稿日期: 2021-03-24.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51805280); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金(SJLY2020002).

第一作者: 徐卢浩(1995-), 男, 浙江杭州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 光束整形. E-mail: 743267491@qq.com

*通信作者: 马剑强(1983-), 男, 浙江台州人, 副教授, 主要研究方向: 压电器件与自适应光学. E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

斑. 若要在远场焦面获取特定形状与能量分布的光强, 可通过算法求解出目标光场相对应的目标相位^[10-11], 变形镜根据目标相位调制, 实现光束整形. 在自适应光学中, SPGD 算法是一种较为实用、高效的搜索算法, 可以通过对目标光强分布性能指标直接迭代优化, 从而找到最优解^[12-14]. 因为 Zernike 多项式在定义域内为单位圆, 一般采用 Zernike 多项式来表示波前相位, 因此想要得到调制相位只需求解出 Zernike 多项式系数. 基于 Zernike 模式的 SPGD 算法的主要步骤为:

(1)以 65 项 Zernike 系数为初始优化目标, 为使迭代尽快收敛, 其中 Z_4 项为 $0.25 \mu\text{m}$, 其余为 0.

(2)设第 k 次调制相位为 $\phi^{(k)} = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N)$, 式中: $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ 表示 Zernike 多项式系数. 对于第 k 次迭代时, 随机产生一组小幅的扰动向量 $\Delta\phi^{(k)} = (\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3, \dots, \Delta Z_N)$, 其服从伯努利分布.

(3)以焦点处的模拟强度分布和期望形状之间的绝对差求和作为近场光强整形性能的评价函数 J , 其公式为:

$$J = \sum \sum |I_{\text{desired}}(x, y) - I_{\text{simulated}}(x, y)|^2. \quad (3)$$

(4)对控制信号分别施加正扰动 $\Delta\phi^{(k)}$ 和负扰动 $-\Delta\phi^{(k)}$, 计算出远场焦斑的光强分布. 根据式(3)计算出相应的正负扰动后的性能指标 J , 进而得到梯度估计值 $\Delta J^{(k)}$, 其表达式为:

$$\begin{aligned} J_+^{(k)} &= J(\phi^{(k)} + \Delta\phi^{(k)}), \\ J_-^{(k)} &= J(\phi^{(k)} - \Delta\phi^{(k)}), \\ \Delta J^{(k)} &= J_+^{(k)} - J_-^{(k)}, \end{aligned} \quad (4)$$

然后使用性能评价指标的变化量 $\Delta J^{(k)}$ 和 $\Delta\phi^{(k)}$ 随机扰动来估计第 k 次梯度, 求出第 $k+1$ 次的调制相位:

$$\phi^{(k+1)} = \phi^{(k)} + \gamma \Delta J^{(k)} \Delta\phi^{(k)}, \quad (5)$$

式中: 当 γ 为正值时优化方向为性能指标极大方向, 当 γ 为负值时优化方向为性能指标极小方向.

(5)计算最终优化的评价函数 J 是否达到预设的目标值, 如达到, 则跳出循环, 迭代终止.

仿真结果如图 1 所示, 图 1(a)和图 1(c)分别为圆形和方形的目标平顶光斑, 图 1(b)和图 1(d)分别为圆形和方形的仿真光斑.

由图 1 可知, 圆形和方形仿真光斑的大小和光强纵切平整度与目标光斑基本相符, 但是存在细微差异, 如方形仿真光斑的平顶区域有略微波动.

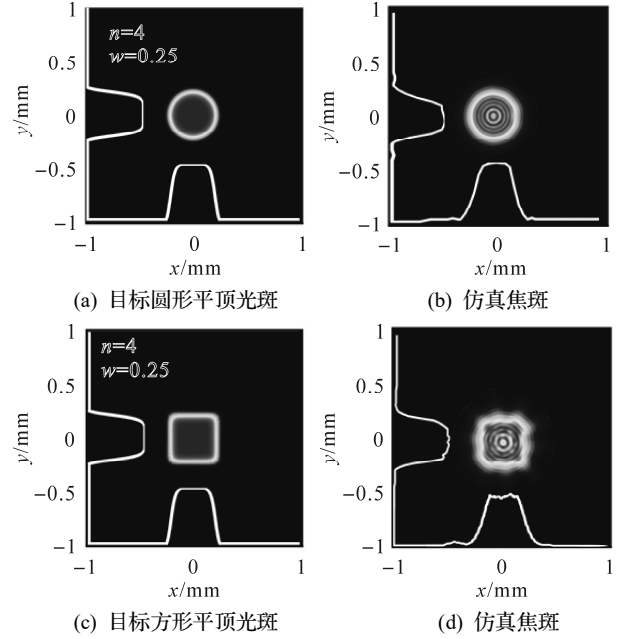


图 1 平顶光斑仿真优化结果

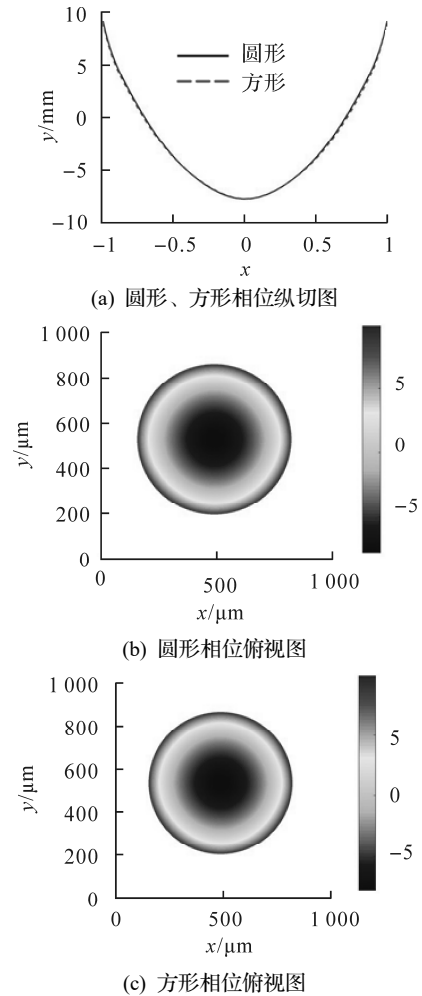


图 2 不同形状变形镜平顶光仿真相位重构比较

仿真中变形镜重构的平顶相位截面对比如图 2 所示. 在仿真结果对比图 2(a)中, 圆形和方形相位的截面大致重合.

2 实验平台

激光束整形实验平台如图 3 所示. 采用波长为 635 nm 的半导体激光器作为光源, 光束通过透镜 L1(焦距: 120 mm)准直后经过光阑到达变形镜镜面进行相位调制, 调制后反射经过缩束比为 0.2 缩束系统(由 L2 和 L3 两个凸透镜组成), 再经半透半反镜, 一部分光束被夏克-哈特曼波前传感器(WFS)接收, 波前传感器将实时测得的波前相位反馈给控制系统, 再由控制系统控制变形镜进行实时矫正; 另一部分光经过聚焦透镜 L4(焦距: 200 mm), 由 CCD 相机采集到整形后的平顶光束光斑. 移动 CCD 相机可以记录焦点位置前后的光斑形貌.

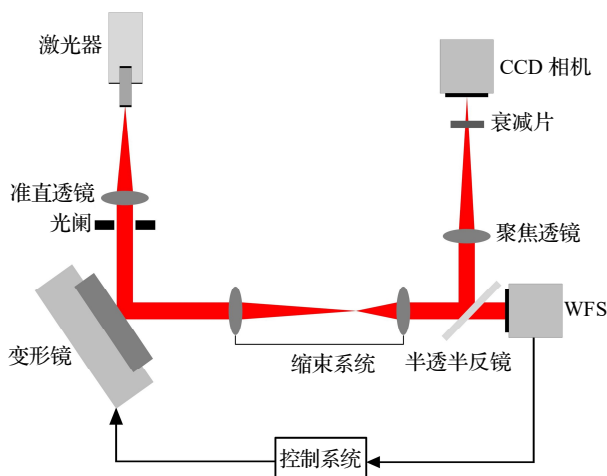


图 3 激光束整形实验平台

3 结果与分析

通过仿真得到最优的 65 项 Zernike 系数, 利用最速下降法对变形镜进行控制, 使变形镜重构出仿真求解得到的平顶光束相位所需的面形, 最终在 CCD 上采集到平顶光斑. 为了能够更直观地展示实测的平顶光斑形貌质量, 将目标平顶光斑与焦点位置的实测光斑进行对比, 结果如图 4 所示. 其中图 4(a)和(b)分别为圆形平顶光斑目标与实测形貌. 由整形结果可知, 对于圆形平顶光斑整形后的形貌质量较理想, 平顶光斑的圆形度和光斑大小与目标光斑基本一致. 图 4(c)和(d)分别为方形平

顶光斑目标与实测形貌. 通过对比可以发现, 方形平顶光斑与目标形貌较为相似, 但方形平顶光斑与圆形平顶光斑相比, 光斑周围的杂散光较多, 原因可能是实验输入光源为圆形光束, 相比于整形成圆形平顶光斑, 方形平顶光束更难整形.

将圆形和方形平顶光中的实测光强纵截面与目标形貌进行归一化拟合(图 4(e)和(f)), 圆形目标光斑的平顶区域半径为 0.25 mm, 实际生成的平顶光斑平顶区域大致为 0.22 mm, 实际光斑大小与目标非常接近, 在平顶区域与目标形貌相比仅存在较小起伏变化. 方形目标光斑的平顶区域半径为 0.25 mm, 实际生成的平顶光斑平顶区域大致为 0.21 mm, 实测焦斑基本符合方形形貌特征.

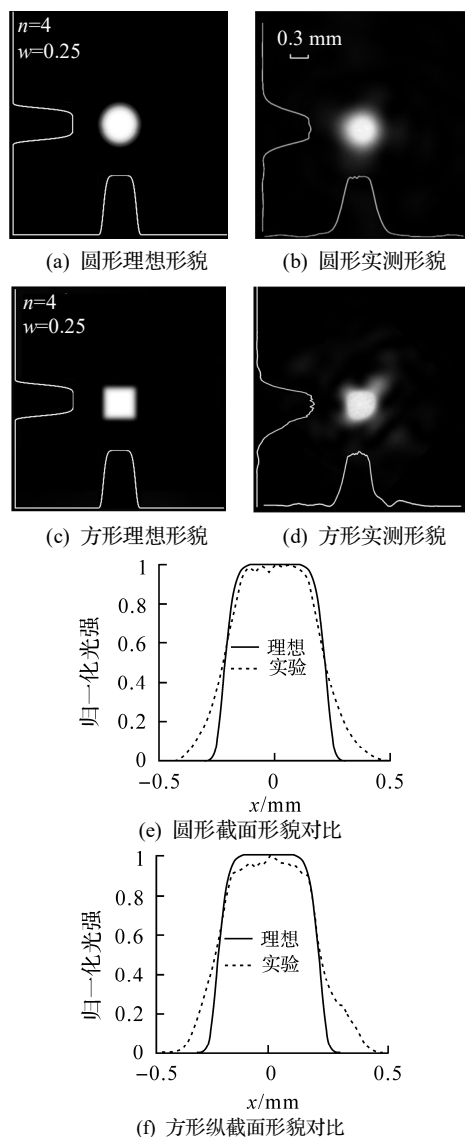


图 4 不同形状目标与实测光斑对比

通过移动 CCD 相机来记录平顶光束传播到不同位置的光强分布. 光束传播过程中实验的不同位置的平顶光束形貌变化如图 5 所示. 圆形平顶光束的光场大致集中在焦点($f=200$ mm)前后 10 mm 之间, 焦点位置(0 mm)是平顶光斑形貌最好的位置, 在焦点前后-6 mm 至 4 mm 位置都能保持较好的平顶形貌.

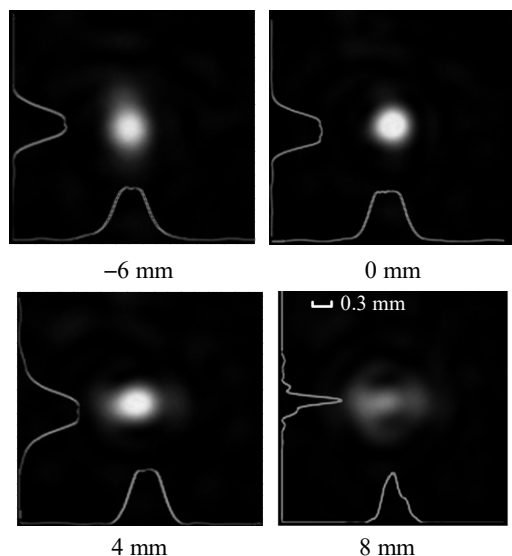


图 5 不同位置平顶光束形貌变化

为了验证本研究方法能够整形出不同尺寸的平顶光束, 对不同尺寸($w=0.25$ 、 0.30 、 0.35 、 0.40 mm)的圆形和方形平顶光斑进行实验整形, 结果如图 6 所示.

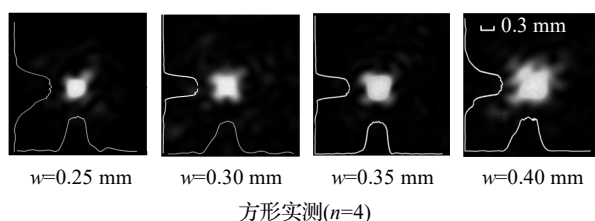
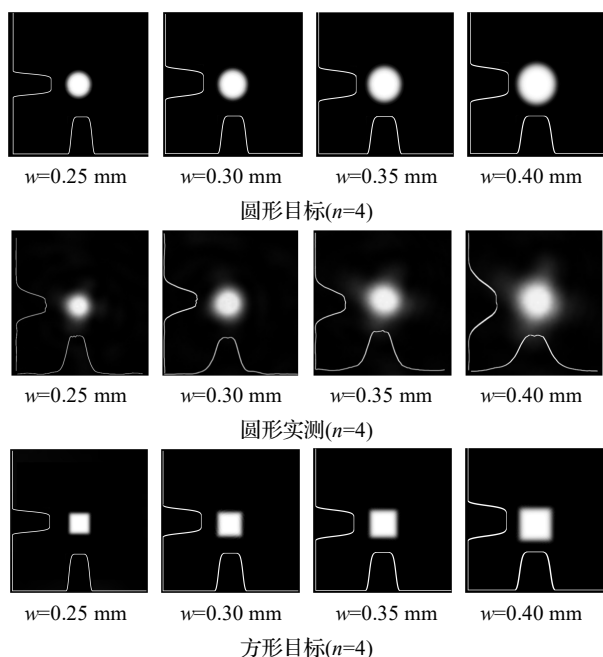


图 6 不同尺寸平顶光斑整形

从图 6 可知, 对于圆形平顶光斑, 所整形形成的平顶光斑的大小和平整度与目标基本一致, 仅在光斑尺寸较大($w=0.40$ mm)时, 光斑周围存在略微的杂散光. 而对于方形平顶光斑, 尺寸小的光斑要比尺寸大的光斑整形效果好. 在小尺寸($w=0.25$ 、 0.30 、 0.35 mm)方形平顶光斑中, 光斑的大小与平整度与目标基本一致, 特别是尺寸为 $w=0.35$ mm 的光斑, 光斑的方形度与目标光斑一致且几乎不存在杂散光. 但随着尺寸的增大, 在尺寸为 $w=0.40$ mm 的方形平顶光斑中, 会出现一些杂散光.

4 结论

本文采用变形镜生成不同形状、不同尺寸的高质量平顶光束. 通过光波衍射理论和 SPGD 算法仿真模拟出平顶光束整形所需的波前相位, 利用 62 单元单压电变形镜, 重构出平顶光束整形所需的调制相位, 实现了对不同形状(圆形和方形)和不同尺寸($w=0.25$ 、 0.30 、 0.35 、 0.40 mm)平顶光斑的整形, 并且都得到了质量较好的平顶光形貌, 为其工程应用提供了保障.

参考文献:

- [1] Smarra M, Strube A, Dickmann K. Micro drilling using deformable mirror for beam shaping of ultra-short laser pulses[C]//SPIE LASE. Proc SPIE 9736, Laser-based Micro- and Nanoprocessing X, California, USA. 2016, 9736:139-152.
- [2] Suttman O, Moalem A, Kling R, et al. Drilling, cutting, welding, marking and microforming laser precision micro-fabrication[BE/OL]. [2021-01-10]. DOI:10.1007/978-3-642-10523-4_13.
- [3] 王文君. 飞秒激光金属加工中的形状及形貌控制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
- [4] 罗时荣, 吕百达. 三维平顶高斯光束通过环形光阑的传输特性[J]. 激光技术, 2000, 24(4):256-259.
- [5] Laskin A, Laskin V, Ostrun A. Freeform beam shaping in optical systems of high-power lasers[C]//SPIE LASE.

- High Power Lasers for Fusion Research III, California, USA. 2015, 9345:134-142.
- [6] 马学, 李琦, 鲁建业. 太赫兹高斯光束整形环形光束[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5):206-213.
- [7] González-Núñez H, Béchet C, Ayancán B, et al. Effect of the influence function of deformable mirrors on laser beam shaping[J]. Applied Optics, 2017, 56(6):1637-1646.
- [8] Sheldakova J V, Toporovsky V, Galaktionov I, et al. Flat-top beam formation with miniature bimorph deformable mirror[C]//SPIE Optical Engineering + Applications. Laser Beam Shaping XX, Online Only. 2020, 1148:75-81.
- [9] Włodarczyk K L, Bryce E, Schwartz N, et al. Scalable stacked array piezoelectric deformable mirror for astronomy and laser processing applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2):024502.
- [10] 刘岚, 张海涛, 陈子阳, 等. 贝塞尔高斯光束经菲涅尔波带片产生特殊聚焦光强分布[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5):1491-1495.
- [11] 马剑强, 李艳, 喻奇志, 等. 基于单压电变形镜的可控环形焦斑整形[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6):1322-1329.
- [12] Lei X, Xu B, Yang P, et al. Beam cleanup of a 532 nm pulsed solid-state laser using a bimorph mirror[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(2):48-51.
- [13] 蒋鹏志, 马浩统, 袁凌峰, 等. 基于并行梯度下降算法的自适应任意口径光束整形[J]. 中国激光, 2011, 38(12):42-46.
- [14] 刘磊, 郭劲, 赵帅, 等. 随机并行梯度下降算法在激光束整形中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(2):260-266.

Flat-top beam shaping using unimorph deformable mirrors

XU Luhao, HAN Xiaoshuai, ZHANG Xin, YAO Qi, MA Jianqiang*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: For beam shaping problem, a unimorph deformable mirror method and a search algorithm are proposed to realize the shaping of flat-top beams in different shapes and sizes. The random parallel gradient descent algorithm is used to find the modulation phase required for flat-top beam shaping, and the deformable mirror is further controlled to reconstruct the corresponding modulation phase of the spot, which realizes the shaping of flat-top beams of different shapes and sizes. The experimental results show that the generated round and square flat-top beams are of high quality and have good shaping effects on round and square flat-top beams of different sizes (0.25, 0.30, 0.35, 0.40 mm).

Key words: adaptive optics; flat-top beam; unimorph deformable mirror; beam shaping

(责任编辑 史小丽)