

应用于高能激光器的XY离焦像差校正方法

冯亚飞 韦承甫 任晓明 郭建增 王杰

An XY defocus aberration correction method for high-energy lasers

FENG Ya-fei, WEI Cheng-fu, REN Xiao-ming, GUO Jian-zeng, WANG Jie

引用本文:

冯亚飞, 韦承甫, 任晓明, 郭建增, 王杰. 应用于高能激光器的XY离焦像差校正方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 366–373. doi: 10.37188/CO.2023–0142

FENG Ya-fei, WEI Cheng-fu, REN Xiao-ming, GUO Jian-zeng, WANG Jie. An XY defocus aberration correction method for high-energy lasers[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 366–373. doi: 10.37188/CO.2023-0142

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0142>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

板条激光器光束质量控制技术研究进展

Progress on beam quality control technology of slab lasers

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 767 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0767>

采用色差先验约束的像差校正技术

Aberration correction technology based on chromatic aberration prior constraints

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 560 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0560>

高光束质量高斯非稳腔固体激光器研究

Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 559 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0559>

基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究

Reflective laser protective coating based on plasma spraying

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 578 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0578>

高度方向性多光束有机激光

High directional multi-beam organic laser

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 576 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0576>

激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理

Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating

中国光学 (中英文). 2017, 10(2): 249 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0249>

文章编号 2097-1842(2024)02-0366-08

应用于高能激光器的 XY 离焦像差校正方法

冯亚飞, 韦承甫, 任晓明*, 郭建增, 王 杰
(中国船舶集团有限公司第七一八研究所, 河北邯郸 056027)

摘要:针对高能激光器出光过程中出现的大量离焦和 0° 像散低阶像差现象, 提出了基于哈特曼波前传感器和二维整形光路的 XY 离焦像差校正方法。首先, 通过对 Zernike 多项式的离焦项和 0° 像散项进行线性组合得到 XY 离焦像差的表达式, 该 XY 离焦像差系数的大小可直接表征 X 离焦和 Y 离焦的波前 PV 值。同时, 通过微调高能激光器中二维整形光路中的镜子间距, 可实现激光器输出光束 XY 离焦波面的补偿。因此, 首先利用哈特曼波前传感器提取出光束的 XY 离焦像差系数大小, 而后再根据 XY 离焦像差系数的大小实时闭环微调二维整形光路中的镜子间距, 从而实现 XY 离焦像差的校正, 改善输出光束的光束质量。实验结果表明, 该方法可有效地将高能激光器输出光束 XY 离焦量的 PV 值由 $5.2 \mu\text{m}$ 和 $1.1 \mu\text{m}$ 校正到 $0.5 \mu\text{m}$ 以下, 相应的光束质量 β 因子由 3.1 降到 1.8, 光束质量得到明显改善。

关键词: 高能激光; 光束质量; 像差校正; 光束整形; 矩阵光学

中图分类号: TN248 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0142

An XY defocus aberration correction method for high-energy lasers

FENG Ya-fei, WEI Cheng-fu, REN Xiao-ming*, GUO Jian-zeng, WANG Jie
(The 718 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Handan 056027, China)

* Corresponding author, E-mail: ren.xiaoming@163.com

Abstract: A method for correcting XY defocus aberrations, based on Hartmann-Shack wavefront sensor and two-dimensional beam-shaping light path, was presented due to the large percentage of defocus and 0° astigmatism aberrations with large PV values in high-energy laser beam. The first step is to derive an expression for XY defocus aberrations by linearly combining the defocus and 0° astigmatism terms of Zernike polynomials. The coefficients directly characterize the wavefront peak-to-valley (PV) values of X and Y defocus. At the same time, compensation for XY defocus wavefronts of the laser beam can be achieved by fine-tuning the mirror spacing in the two-dimensional shaping optics of the high-energy laser. Therefore, the Hartmann wavefront sensor is used to extract the coefficients of XY defocus aberrations from the laser beam. The computer dynamically adjusts the mirror spacing in the two-dimensional shaping optics based on these coefficient values to correct XY defocus aberrations and improve the beam quality of the output laser beam. The results of the experiment showcase a significant decrease in PV value of XY defocus aberrations from $5.2 \mu\text{m}$ and $1.1 \mu\text{m}$ to less than $0.5 \mu\text{m}$, as well as a decrease in β factor from 3.1 to 1.8, resulting in substantial improvement in beam quality.

Key words: high energy laser; beam quality; aberration correction; beam shaping; matrix optics

收稿日期: 2023-08-20; 修订日期: 2023-09-08

基金项目: 国家高技术发展计划 (No. 51326010201)

Supported by National High-tech R&D Program (No. 51326010201)

1 引言

光束质量是高能激光器的一项重要指标,因为激光的作用效果不仅取决于激光器的输出功率,与光束质量也有密切关系^[1-2]。在化学激光器的空间光路系统中,通常包含平面反射镜、球面镜、柱面镜、强光分光镜和透射窗口等光学元件,而在高能激光的产生和传输过程中,这些光学元件不可避免地会吸收少量激光能量,反射和透射光学元件吸收激光能量后会产生热变形,从而出现较强的热透镜效应^[3],使得激光器输出光束存在大量的离焦和0°像散低阶像差,造成光束质量变差,严重影响激光远场作用效果。因此,在化学激光器出光过程中若能有效抑制离焦和0°像散低阶像差,则能极大地提高输出光束的光束质量。

如何实时检测和校正高能激光束的波前畸变已成为当前高能激光领域极其重要的研究领域之一^[4-8]。2016年,Lai B H等人提出了基于低阶校正器和59单元变形镜的混合式自适应光学系统^[9],该系统的波前像差校正量程可达100 μm,并且在激光器全功率模式下成功将光束质量β因子优化到1.9。2017年,Yu X等人提出了一种在约束条件下的低阶像差自动校正技术^[10],以出射光束尺寸为约束条件,将光束波前PV值由57.26 μm减小到了1.87 μm。2020年,余江川等人提出一种基于新型环形边缘驱动变形镜的环境像差校正方法^[11],该方法对大遮拦比窄环薄管激光的环境像差具有很好的校正效果。2022年,李国会等人提出了采用水冷式13单元一维变形镜和95单元二维变形镜相结合的双变形镜组合模式对Yb:YAG板条激光器的波前畸变进行闭环校正^[12],将激光器的开环光束质量β因子由9.03提升至闭环的1.98。

在化学激光领域,当激光器出光时长较长时(甚至长达几十秒),其输出光束会包含大量的离焦和0°像散低阶像差,严重影响激光器的输出光束质量^[13-17]。与此同时,在化学激光器中通常包含对谐振腔输出激光束具有X方向和Y方向的缩束或扩束功能的空间二维整形光路,因此,根据二维整形光路工作原理,如果可以通过电动

调整机构对空间二维整形光路的镜子间距进行微调,则可实现激光束在X方向和Y方向的离焦波面补偿^[18-19]。基于此,提出了利用哈特曼传感器和空间二维整形光路系统的低阶像差校正方法。首先,阐述了光束波前X离焦和Y离焦像差的概念,即对Zernike多项式的离焦项和0°像散项进行线性组合即可得到XY离焦项,且XY离焦项的像差系数大小直接表征XY离焦波面的PV值。而后将空间二维整形光路中的镜子安装在高精度电动平移台上,利用计算机控制电动平移台微调镜子间距即可对输出光束的XY离焦波面进行补偿。最后,搭建了实验系统以验证该低阶像差校正效果。由于该方法直接利用激光器现有的二维整形光路系统实现低阶像差补偿功能,故仅需将镜子安装在电动平移台上即可,不需要额外增加用于像差校正的其他光学器件。同时,仅利用哈特曼传感器即可实现XY离焦低阶像差检测功能。该方法具有光路结构简单、成本低和低阶像差校正量大的优点。

2 理论模型

2.1 XY离焦像差检测原理

根据哈特曼波前传感器的像差检测原理^[13-14],基于Zernike多项式的模式法波前重构算法可精确地复原出检测波前,不同阶次的Zernike多项式系数大小即代表对应的像差(如离焦和像散等)在光束中所占像差的比重,正如公式(1)所示^[20-21]

$$W(x,y) = \sum_{j=1}^J a_j Z_j(x,y) \quad (1)$$

式中: $W(x,y)$ 为光束波前, a_j 为第j阶Zernike多项式 $Z_j(x,y)$ 的系数, (x,y) 为单位圆域内的直角坐标。

根据文献[22]所述,在化学激光器出光过程中,由于光学元件受热变形,当激光器出光时长较短时,光学元件受热变形还不明显,此时输出光束的光束质量一般会比较,即使存在光束波前畸变,也是相对少量的高阶像差。但激光器若保持长时间高功率出光,则光学元件会持续受热变形,而且由于输出光斑通常为规则的中心对称

形状,因此会导致输出光束包含大量的离焦像差和 0° 像散像差(占比至少80%)。若能有效抑制光束中的离焦像差和 0° 像散像差,则可大大提高激光器输出光束的光束质量。根据 Zernike 多项式的定义^[20],离焦和 0° 像散分别对应 Zernike 多项式的第3阶和第5阶,其相应的表达式为

$$\begin{cases} Z_3(x,y) = \sqrt{3}(2x^2 + 2y^2 - 1) \\ Z_5(x,y) = \sqrt{6}(x^2 - y^2) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $-1 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1$ 。图1(a)和1(b)(彩图见期刊电子版)分别为离焦和 0° 像散的波前形状示意图。

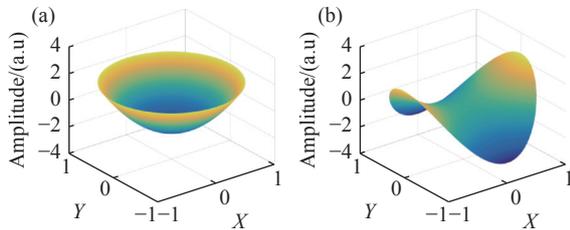


图1 (a)离焦波前和(b) 0° 像散波前

Fig. 1 (a) Defocus wavefront and (b) 0° astigmatism wavefront

参考 X 方向柱面镜和 Y 方向柱面镜面形的定义,并结合图1所示的离焦和 0° 像散的波前形状以及公式(2),将离焦和 0° 像散的 Zernike 表达式进行线性组合,即可得到类似于 X 方向柱面镜和 Y 方向柱面镜面形的波前形状,在此将其定义为 X 离焦和 Y 离焦,其相应的表达式分别为

$$\begin{cases} Z_x(x,y) = x^2 + C_x \\ Z_y(x,y) = y^2 + C_y \end{cases}, \quad (3)$$

式中: C_x 和 C_y 为待求解常数项。假设离焦、 0° 像散、 X 离焦和 Y 离焦满足下面的线性关系式:

$$\begin{cases} m_x Z_3(x,y) + n_x Z_5(x,y) = Z_x(x,y) \\ m_y Z_3(x,y) + n_y Z_5(x,y) = Z_y(x,y) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: m_x, m_y, n_x 和 n_y 均为常数。结合式(2)、式(3)和式(4),整理可得: C_x 和 C_y 的值均为 -0.25 。 X 离焦和 Y 离焦的波前形状分别如图2(a)和2(b)(彩图见期刊电子版)所示。

假设某个特定光束波前 W 的 Zernike 多项式为

$$W(x,y) = a_3 Z_3(x,y) + a_5 Z_5(x,y) + a_0 Z_0(x,y), \quad (5)$$

式中: a_3 和 a_5 分别为离焦项 Z_3 和 0° 像散项 Z_5 的系数, Z_0 和 a_0 为除离焦项和 0° 像散项之外的其他像差以及相应的像差系数。根据前面所述, X 离焦和 Y 离焦可由离焦和 0° 像散的 Zernike 表达式进行线性组合得到,因此该光束波前 W 同样可以用 X 离焦项 Z_x 和 Y 离焦项 Z_y 来表示,即

$$W(x,y) = a_x Z_x(x,y) + a_y Z_y(x,y) + a_0 Z_0(x,y), \quad (6)$$

式中: a_x 和 a_y 为 X 离焦项 Z_x 和 Y 离焦项 Z_y 所对应的像差系数。结合式(2)、式(3)、式(5)和式(6),整理可得

$$\begin{cases} a_x = 2\sqrt{3}a_3 + \sqrt{6}a_5 \\ a_y = 2\sqrt{3}a_3 - \sqrt{6}a_5 \end{cases}. \quad (7)$$

根据公式(7)可知,当通过 Zernike 多项式的模式法对光束波前进行像差解算并得到离焦项和 0° 像散所对应的像差系数 a_3 和 a_5 后,可以直接利用公式(7)求得 X 离焦项和 Y 离焦项所对应的像差系数 a_x 和 a_y 的大小。另外,根据公式(3),不难得知 XY 离焦像差系数 a_x 和 a_y 的值可直接表征 X 离焦和 Y 离焦的波前 PV 值,因此 a_x 和 a_y 可在计算机进行 XY 离焦像差补偿时直接作为闭环控制算法的反馈参数,从而大大降低了像差补偿算法的复杂度。

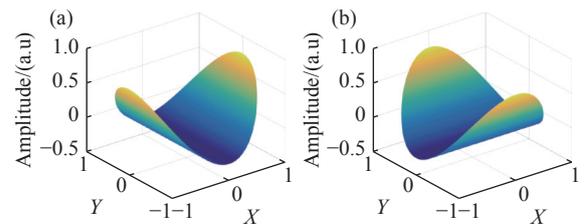


图2 (a) X 离焦波前和(b) Y 离焦波前

Fig. 2 (a) X -defocus wavefront and (b) Y -defocus wavefront

2.2 XY 离焦像差补偿原理

在能化学激光器中,其谐振腔振荡输出的激光束通常为具有一定长宽比的矩形,与光束定向器的圆形孔径不匹配,无法用于直接发射^[22]。因此谐振腔输出的激光束需要通过空间二维整形光路,使激光束在 X 方向和 Y 方向分别进行尺寸变换。

以激光束在 X 方向的整形为例,其对应的整形光路系统如图3所示。

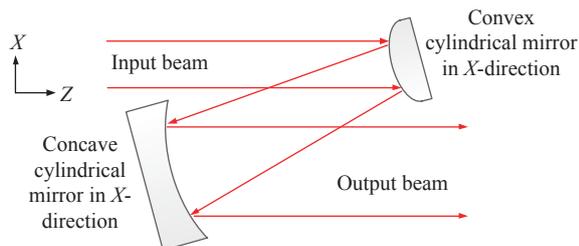


图3 X方向整形光路结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shaping optical path structure in X direction

根据几何光学理论^[23],当X方向凸柱面镜与X方向凹柱面镜的间距为共焦间距时,可使平行入射的光束平行输出,并实现X方向的扩束。在图3中,设X方向凸柱面镜和X方向凹柱面镜的曲率半径分别为 R_{x1} 和 R_{x2} ,光束相对柱面镜法线在X方向的入射角为 θ_x (其在Y方向的入射角为 0°),则镜子的共焦间距 L_x 为

$$L_x = \frac{(R_{x1} + R_{x2}) \cos \theta_x}{2} \quad (8)$$

随着X方向凸柱面镜和凹柱面镜间距的减小或增大,则分别会导致输出光束在X方向偏于发散或汇聚。因此,在实际应用中,通过微调镜子间距 L_x ,可实现X方向离焦像差的补偿。Y方向整形光路的像差补偿原理与X方向相同。

为了更好地实现XY离焦像差的补偿效果,采用经典的PI(Proportional-integral)闭环控制算法,利用公式(7)中的XY离焦像差系数 a_x 和 a_y 作为闭环控制的反馈信号,其具体表达式为

$$\begin{cases} \Delta L_x(k) = A_x a_x + B_x \Delta L_x(k-1) \\ \Delta L_y(k) = A_y a_y + B_y \Delta L_y(k-1) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: ΔL_x 和 ΔL_y 分别为凸柱面镜和凹柱面镜的间距相对共焦间距的偏移量(正值表示镜子间距大于共焦间距,负值则表示镜子间距小于共焦间距), k 和 $k-1$ 分别表示当前迭代和上一次迭代, A_x 、 B_x 、 A_y 和 B_y 为常数。

3 实验及结果讨论

3.1 实验装置

针对上述低阶像差校正原理,在实际的高能化学激光器装置上,对基于哈特曼波前传感器和

二维整形光路的低阶像差校正效果进行了实验研究,实验系统原理图如图4所示。

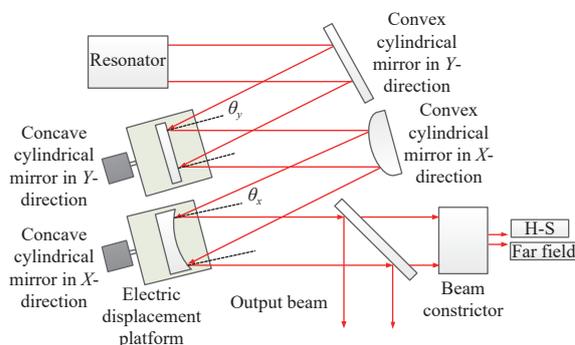


图4 低阶像差校正实验系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of low-order aberration correction experiment system

在实验系统中,Y方向凸柱面镜(R_{y1})和凹柱面镜(R_{y2})的曲率半径分别为 -1705 mm和 2770 mm,对应的光束入射角(θ_y)为 15° ,X方向凸柱面镜(R_{x1})和凹柱面镜(R_{x2})的曲率半径分别为 -411.5 mm和 1337 mm,对应的光束入射角(θ_x)为 10.5° 。根据式(8)可知,Y方向和X方向的整形光路共焦间距分别为 551.3 mm和 455 mm。

在二维整形光路系统中,Y方向凹柱面镜和X方向凹柱面镜分别放置在高精度电动平移台上,计算机通过微调整形光路的镜子间距实现对输出光束低阶像差的补偿。图5为本实验系统所使用的电动平移台实物图。

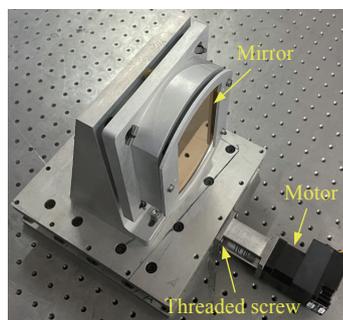


图5 高精度电动平移台实物图

Fig. 5 Physical picture of a high-precision electric displacement platform

在图5中,电机采用鸣志STM17C-2CN系列的智能型集成式步进电机,其电机轴每转所对应的脉冲数为20000,另外与电机连接的螺纹丝

杆螺距为 4 mm, 电动平移台的位移控制精度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。在本实验系统中, 由于电动平移台的移动方向与柱面镜镜面的法线方向平行, 因此整形光路中的凸柱面镜和凹柱面镜的等效间距变化量可表示为

$$\begin{cases} \Delta L_x = \Delta L'_x \cos(\theta_x) \\ \Delta L_y = \Delta L'_y \cos(\theta_y) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: ΔL_x 和 ΔL_y 分别为载有 X 方向凹柱面镜和 Y 方向凹柱面镜电动平移台的相对平移量。

在图 4 所示的实验系统中, 根据矩阵光学理论^[24], 谐振腔振荡输出的截面尺寸为 $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的光束经过整形光路进行二维扩束后, 光束尺寸变为 $65 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 。整形后的激光束经过高反强光分光镜, 反射光为输出的高能激光束, 另外, 透过分光镜的弱光则经过缩束器缩束后进入哈特曼传感器和远场监测相机, 分别实现 XY 离焦像差和远场的实时检测。远场监测相机采用红谱科技 IRMC-615BB 系列的相机, 其像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$, 探测面尺寸为 $9.6 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 。

在激光器启动前, 二维整形光路均处于共焦位置, 保证初始输出光束为平行光束。在出光过程中, 由哈特曼波前传感器对激光器输出光束进行实时像差检测, 并根据公式(7)得到输出光束的 XY 离焦像差系数 a_x 和 a_y 的大小, 计算机根据计算得到的 XY 离焦量实时控制整形光路中的电动平移台, 从而实现 X 离焦和 Y 离焦补偿, 使输出光束恢复平行出射。根据前面所述的 XY 离焦像差计算原理与补偿原理, 并结合式(8)和式(10), 计算了整形光路中凸柱面镜和凹柱面镜相对共焦间距有不同偏移量时, 对应输出光束的理论 XY 离焦量大小, 其结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

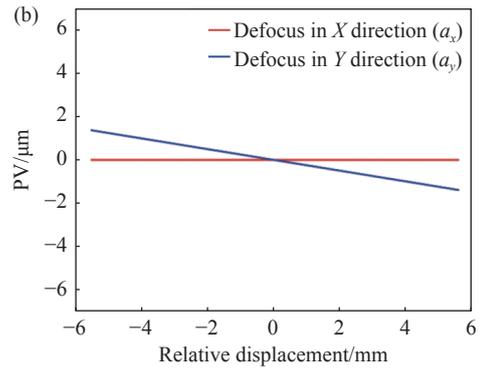
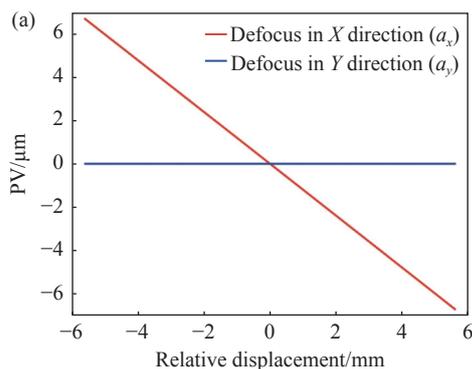


图 6 整形光路中凸柱面镜和凹柱面镜相对共焦间距不同偏移量时的 XY 离焦量变化曲线。(a) X 方向整形光路; (b) Y 方向整形光路

Fig. 6 The XY defocus variation curves with the relatively different deviation of the co-focal distance of the convex cylindrical mirror and the concave cylindrical mirror in the (a) X -direction and (b) Y -direction shaping optical path

3.2 结果讨论

实验系统调试完成之后, 进行了出光时长为 4.2 s 的 XY 离焦像差校正对比实验。图 7(彩图见期刊电子版)为未进行 XY 离焦像差校正时的 XY 离焦量随时间的变化情况。

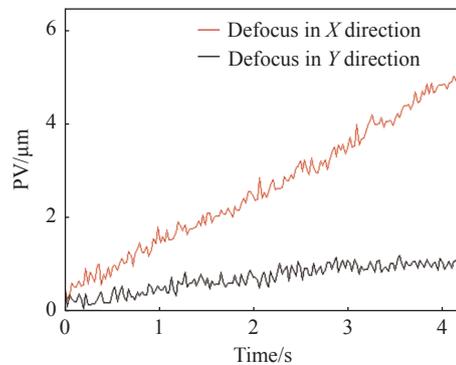


图 7 像差未校正时 XY 离焦量变化曲线

Fig. 7 PV curve of XY defocus aberrations with uncorrected aberration

由图 7 可知, 在激光器出光过程中, 光束的 X 离焦量逐渐增大, 而 Y 离焦量虽然也逐渐增大, 但变化明显相对小一些。在 4.2 s 激光器出光结束这一时刻的 X 离焦量和 Y 离焦量的 PV 值分别为 $5.2 \mu\text{m}$ 和 $1.1 \mu\text{m}$, 其所对应的远场光斑如图 8(彩图见期刊电子版)所示, 可以看出输出光束在水平方向的 X 离焦量明显大于竖直方向上的 Y 离焦量。图 9 为未校正像差时的激光器输出功率随时间的变化曲线。由于本实验系统为基于非稳

腔结构的高能化学激光器, 因此, 可采用被测实际光束远场发散角和理想光束远场发散角的比值, 即衍射极限倍数因子 β , 来衡量输出光束的光束质量。经计算, 图 8 中远场光斑的光束质量 β 因子为 3.1, 光束质量明显较差。

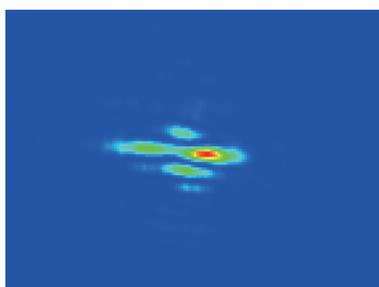


图 8 像差未校正时出光 4.2 s 时刻的远场光斑

Fig. 8 Far-field spot at 4.2 s with uncorrected aberration

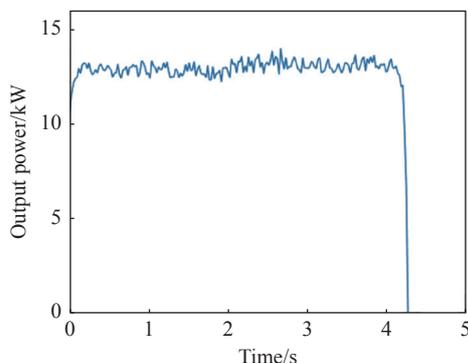


图 9 像差未校正时激光器输出功率随时间的变化曲线

Fig. 9 Laser output power over time with uncorrected aberration

图 10(彩图见期刊电子版)为在激光器出光过程中实时进行闭环 XY 离焦像差校正时的 XY 离焦量随时间的变化情况。由图 10 可知, 在出光过程中 X 离焦和 Y 离焦像差均得到了很好的校正效果。图 11(彩图见期刊电子版)为出光结束时的远场光斑图样, 经计算其光束质量 β 因子为 1.8, 可见光束质量得到了明显改善。图 12 为相对应的激光器输出功率随时间的变化曲线。另外, 在激光器出光时的整个闭环控制过程中, 载有 X 方向凹柱面镜的平移台和载有 Y 方向凹柱面镜的平移台的相对偏移量分别为 4.12 mm 和 3.68 mm。根据图 6 所示的理论曲线, 其对应的理论离焦校正量分别为 $4.96 \mu\text{m}$ 和 $0.92 \mu\text{m}$, 均小于图 7 所示的像差未校正时的 XY 离焦量。本次实验误差的产生原因主要有 3 个方面: (1)空间二维整形光路系统中的结构参数(如镜面曲率半径、

镜子间距和入射角度等)存在一定的加工和测量误差; (2)为了保证低阶像差校正的稳定性, 在闭环控制算法中加入了像差校正阈值判断, 当光束离焦量大于某固定阈值时才进入闭环校正过程; (3)激光器输出光束不可避免地会存在少量的高阶像差, 受哈特曼传感器检测精度的影响, 其同样会导致 XY 离焦像差解算结果存在一定的误差。

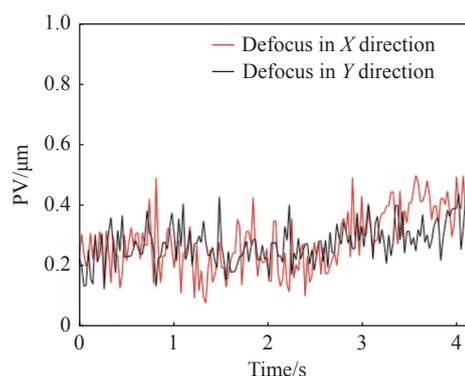


图 10 像差闭环校正时 XY 离焦量变化曲线

Fig. 10 PV curve of XY defocus aberrations with closed-loop aberration correction

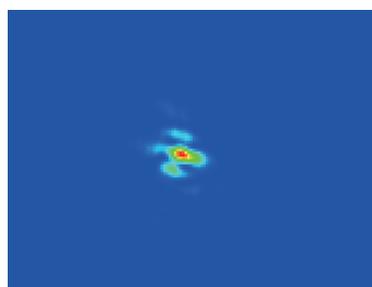


图 11 像差闭环校正时出光 4.2 s 时刻的远场光斑

Fig. 11 Far-field spot at 4.2 s with closed-loop aberration correction

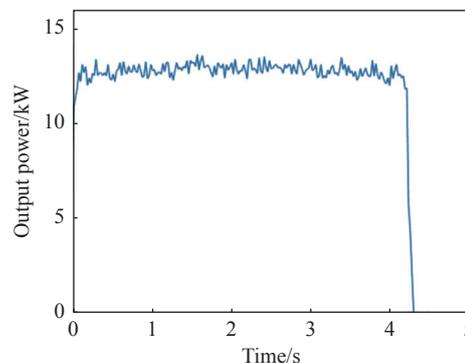


图 12 像差闭环校正时激光器输出功率随时间的变化曲线

Fig. 12 Laser output power over time with corrected closed-loop aberration

4 结 论

本文提出了一种基于哈特曼波前传感器和空间二维整形光路的低阶像差校正方法,该方法尤其适用于校正高能激光器中存在的大量 XY 离焦像差。实验结果表明,该方法可将高能化学激光器中输出光束的 XY 离焦量的 PV 值由 $5.2\ \mu\text{m}$ 和 $1.1\ \mu\text{m}$ 校正到 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下,相应的光束质量 β 因子由 3.1 降到 1.8,输出光束质量得到了明显

改善。由于该方法直接利用高能激光器中现有的空间二维整形光路系统来实现低阶像差补偿功能,仅需将其中的两块凹柱面镜安装在高精度电动平移台上,无需额外增加波前像差校正光学器件,同时在激光器的监测光路中增加一路哈特曼传感器即可实现 XY 离焦像差的检测功能。该方法在保证低阶像差校正效果的前提下,具有结构简单和应用成本低的优点,在高能激光器中具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 王艳茹,王建忠,冉铮惠,等. 高能激光光束质量 β 因子的影响因素分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 353-360.
WANG Y R, WANG J ZH, RAN ZH H, *et al.*. Analysis of effects on the beam quality β factor of high power laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 353-360. (in Chinese).
- [2] 刘泽金,周朴,许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 773-778.
LIU Z J, ZHOU P, XU X J. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 773-778. (in Chinese).
- [3] 王启晗,姚强强,冯驰. 热透镜焦距和球差影响光束质量的分析模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081402.
WANG Q H, YAO Q Q, FENG CH. Analytical model for thermal focal length and spherical aberration on beam quality[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081402. (in Chinese).
- [4] 牛志峰,郭建增,周小红. 变形镜受热变形引起的波前畸变仿真及补偿[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1): 011010.
NIU ZH F, GUO J Z, ZHOU X H. Simulation and compensation of wavefront aberration caused by deformable mirror thermal deformation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 011010. (in Chinese).
- [5] 胡小川,彭家琪,张彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102003.
HU X CH, PENG J Q, ZHANG B. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0102003. (in Chinese).
- [6] RODDIER F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [7] JEONG T M, KO D K, LEE J. Method of reconstructing wavefront aberrations from the intensity measurement[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3507-3509.
- [8] 潘国涛,闫钰锋,于信,等. 矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 306-317.
PAN G T, YAN Y F, YU X, *et al.*. Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 306-317. (in Chinese).
- [9] LAI B H, DONG L ZH, CHEN SH Q, *et al.*. Hybrid adaptive optics system for a solid-state zigzag master oscillator power amplifier laser system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(9): 091402.
- [10] YU X, DONG L ZH, LAI B H, *et al.*. Automatic low-order aberration correction based on geometrical optics for slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(6): 1730-1739.
- [11] 余江川,田博宇,钟哲强,等. 大遮拦比薄管激光环像差校正方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0905001.
YU J CH, TIAN B Y, ZHONG ZH Q, *et al.*. Method for annular aberration correction of large-aperture thin-wall tube lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905001. (in Chinese).
- [12] 李国会,杜应磊,徐宏来,等. 双变形镜对 Yb: YAG 板条激光器光束质量校正技术[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20210800.
LI G H, DU Y L, XU H L, *et al.*. Correction of beam quality correction of Yb: YAG laser with double deformable mirrors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210800. (in Chinese).
- [13] 赵宪宇,薛栋林,程强. 哈特曼原理子口径斜率扫描检测及误差研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 0813003.

- ZHAO X Y, XUE D L, CHENG Q. Research on Hartmann principle based on sub-aperture slope scanning detection and error[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0813003. (in Chinese).
- [14] 朱沁雨, 陈梅蕊, 陆焕钧, 等. 微透镜阵列衍射效应对夏克—哈特曼波前探测器的影响分析[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 94-102.
- ZHU Q Y, CHEN M R, LU H J, *et al.*. Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 94-102. (in Chinese).
- [15] YANG P, LIU Y, YANG W. Adaptive mode optimization of a continuous-wave solid-state laser using an intracavity piezoelectric deformable mirror[J]. *Optics Communications*, 2007, 278(2): 377-381.
- [16] 王海铭, 权佳宁, 葛宝臻. 适用于近地面成像的自适应光学系统研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(4): 843-852.
- WANG H M, QUAN J N, GE B ZH. An adaptive optics system suitable for near-ground imaging[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 843-852. (in Chinese).
- [17] YANG P, NING Y, LEI X, *et al.*. Enhancement of the beam quality of non-uniform output slab laser amplifier with a 39-actuator rectangular piezoelectric deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7121-7130.
- [18] 张天宇, 王钢, 张熙, 等. 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 545-551.
- ZHANG T Y, WANG G, ZHANG X, *et al.*. Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 545-551. (in Chinese).
- [19] LIU G L, YANG H F, RAO CH H, *et al.*. Experimental verification of combinational-deformable-mirror for phase correction[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(10): 559-562.
- [20] 张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操控[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 17-26.
- ZHANG Y D, RAO CH H, LI X Y. *Adaptive Optics and Laser Manipulation*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 17-26. (in Chinese)
- [21] MAHAJAN V N. Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(34): 8121-8124.
- [22] 郭建增, 刘铁根, 王振华, 等. 基于整形光路的低阶像差校正方法[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(8): 1797-1800.
- GUO J Z, LIU T G, WANG ZH H, *et al.*. Method for lower order aberration correction based on beam shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1797-1800. (in Chinese).
- [23] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 380-390.
- SHI SH X, ZHANG H X, LIU J S. *Physical Optics and Applied Optics*[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2000: 380-390. (in Chinese)
- [24] 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 48-82.
- LU Y X, LV B D. *Matrix Optics*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2000: 380-390. (in Chinese)

作者简介:



冯亚飞(1989—),男,河北邯郸人,博士,高级工程师,2017年于浙江大学光电学院获得博士学位,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: fengyafei@zju.edu.cn



任晓明(1971—),男,河北邯郸人,研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: ren.xiaoming@163.com