

基于衍射对称性的多程光路腔镜准直算法

王渊承¹ 周 维¹ 谢兴全² 张 鑫^{1*} 邓学伟¹ 王德恩¹ 袁 强¹
代万俊¹ 邓 武¹ 胡东霞¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
(² 中国工程物理研究院计算机应用研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 腔镜准直是多程放大光路准直中的基础, 针对高功率固体激光装置多束组并行准直对腔镜准直的要求, 提出一套基于衍射对称性的腔镜准直算法, 可以避免腔镜准直受到图像质量的影响而导致精度偏低。在神光Ⅲ主机装置上进行了该腔镜准直算法的实验验证, 实验结果表明, 相对于传统算法, 采用基于衍射对称性的腔镜准直算法, 可以将腔镜准直精度由 $8 \mu\text{rad}$ 提升至 $3.96 \mu\text{rad}$ 。

关键词 图像处理; 自动准直; 腔镜; 多程放大

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1202009

Algorithm of Cavity Alignment in Multi-Pass Amplifier System Based on Diffraction Symmetry

Wang Yuancheng¹ Zhou Wei¹ Xie Xingquan² Zhang Xin¹ Deng Xuwei¹
Wang De'en¹ Yuan Qiang¹ Dai Wanjun¹ Deng Wu¹ Hu Dongxia¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² Institute of Computer Applications, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China)

Abstract Multi-pass amplification beam path alignment is based on cavity mirror alignment. To optimize multi-segmental parallel cavity mirror alignment algorithm of high power solid-state lasers, a new algorithm of multi-pass beam path cavity mirror alignment based on diffraction symmetry is proposed, and the algorithm avoids the problem of low alignment accuracy caused by image quality. The accuracy of multi-pass amplification beam path alignment is improved from $8 \mu\text{rad}$ up to $3.96 \mu\text{rad}$. It has been verified on SG-III facility.

Key words image processing; automatic alignment; cavity mirror; multi-pass amplification

OCIS codes 220.1140; 140.3530

1 引 言

光路自动准直的功能是在激光装置运行发射前快速、自动完成各束光路的准直, 确保在装置打靶运行发射时光路的畅通, 并确保输出光束指向满足各类物理实验对打靶精度的基本要求。腔镜准直是光路自动准直中的重要组成部分。现阶段国内外常用的腔镜准直技术通常采用对小孔照明成像, 并通过 CCD 采集光学图像, 结合图像处理技术, 将光束的偏差量

转换成电机的转动量^[1]。在图像处理上则存在边缘曲线参量分析算法^[2]、灰度投影算法^[3]、小孔图像正圆率算法^[4]等处理技术。腔镜准直精度可以达到近 $10 \mu\text{rad}$ 。随着高功率固体激光装置单束能量和负载能力的要求逐步提高, 需要保障数万焦耳激光安全过孔以及实现更小绝对尺寸的过孔偏差, 现使用的腔镜准直处理技术难以满足装置的要求。本文基于数字图像处理技术, 以多程放大光路腔内对称位置滤波孔

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家高技术发展计划

作者简介: 王渊承(1988—), 男, 学士, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: wyc_kaka@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: joyce522cn@163.com

“孔套孔”的准直图像反馈作为腔镜自动准直的依据,提出了一套采用正圆率结合图像对称性判据的高精度腔镜准直技术,可以实现更高精度且更高效准直闭环的腔镜准直算法。

2 腔镜准直的原理

在神光-III主机装置主放大系统多程放大光路中,腔镜是多程放大光路的基础,若腔镜角度失调,多程放大光路的准直偏差将随着激光束在放大链路中的传输而逐级累加,因而,完成腔镜准直是实现全光路准直的关键。

腔镜自动准直是通过计算机控制系统进行自动调节反射镜来进行光路调节的。主机装置空间滤波器小孔的圆心呈对称分布^[5],图1为高功率固体激光器多程光路中腔镜准直段的示意图,这段光路的调整包括注入 PA1-1 小孔的光路以及注入 PA1-2 的光路。由于 PA1-1 和 PA1-2 在透镜 L1 的焦平面上对称分布,PA1-1 通过 L1 成像的像点与 PA1-2 重合,因此这两段光路的调整需要先调整 CM 角度。CM 垂直于 L1 光轴时光路即调整到位。腔镜准直是整个系统光路准直的基础。

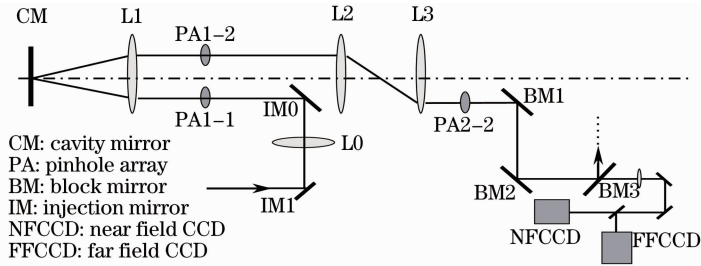


图 1 多程光路中腔镜准直段示意图

Fig.1 Schematic diagram of automatic alignment of multi-pass cavity mirror

为了控制光束质量,在腔镜位置应用了基于自适应光学(AO)技术的大口径变型镜^[6-7]以解决激光过孔的卡光问题。为了满足神光-III主机装置激光脉冲在 1~10 ns 范围内的工作需求,并且确保在长脉冲运行条件下有效规避等离子体堵孔效应和低频环效应^[8],空间滤波器小孔有严格的尺寸需求,腔镜准直所参考的两个空间滤波孔 PA1-1 和 PA1-2 的尺寸为 2.38 mm。

完成腔镜准直后,腔内滤波小孔 PA1-1 和 PA1-2 关于 L1 共轭成像,即 PA1-1 的像与 PA1-2

重合,如图 2(a),(b)所示为腔镜辅助准直,小孔监视 CCD 采集到的照明 PA1-1 滤波孔以及穿孔 PA1-1 的圆光斑与 PA1-2 重合的图像。将预放 1064 nm 准直光发散作为照明光源,照明 PA1-1 孔,并用反转器诊断包 FFCCD 观测其通过 PA1-2 孔后成的像,基于滤波孔准直图像反馈,完成 PA1-1 和 PA1-2 滤波孔的对准(PA1-1 和 PA1-2 滤波孔为相同衍射极限倍数的准直孔,并且可切换)。当腔镜准直准确完成后,该 CCD 可以采集到 PA1-2 与 PA1-1“孔套孔”的完整图像,如图 2(c)所示。

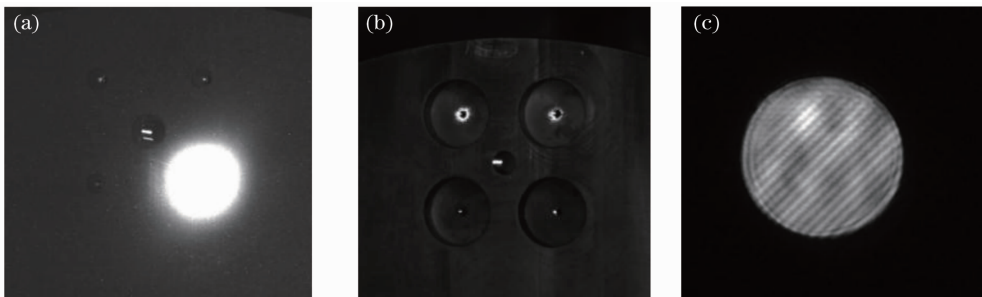


图 2 小孔监视图像。(a) PA1-1 小孔照明; (b) PA1-1 小孔及光斑; (c) 腔镜准直后的孔像

Fig.2 Image of pinhole. (a) Illumination of PA1-1 pinhole; (b) PA1-1 pinhole and spot; (c) image of pinhole after cavity alignment

3 高精度腔镜准直图像处理技术

原有腔镜准直的算法将正圆率作为图像处理的

判据。由于准直孔非共轭和非理想成像导致小孔图像大小不均匀且存在像差,CCD 采集到的照明图像

并不是一个易于处理的简单均匀圆,故采用面积和图像模板进行拟合的判据难以处理小孔非共轭情况下的准直图像,而采用正圆率作为图像处理判据无法处理存在相差较大的图像,采用边缘曲率分析判据难以处理边缘成像模糊的图像。正圆率处理方法

则对图像质量要求很高,准直精度不能满足多束组级别的准直要求。故提出以衍射对称性为判据的精准准直算法作为原准直(圆率判据)的后续流程。准直流程如图3所示。

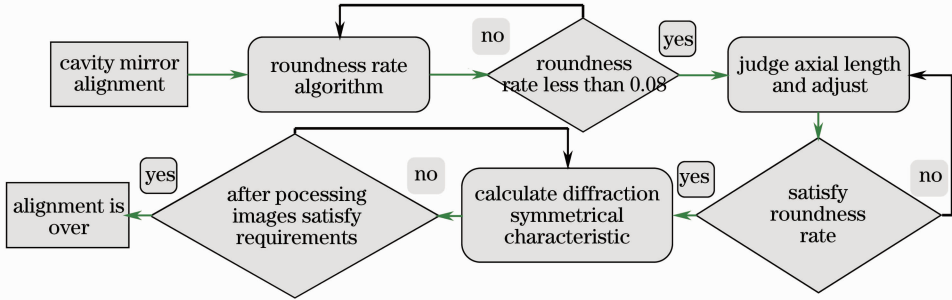


图3 衍射对称性腔镜准直流程

Fig. 3 Procedure of cavity mirror alignment based on diffraction symmetry

在腔镜准直过程中采用了包括二值化、图像填充、膨胀、边界检测和边缘对称性检测等图像处理方法。其中二值化用于图像有用信息提取,边缘对称检测性用于对称性判据提取。

从多值的数字图像中只取出对象物最常用的方法就是设定某一阈值 θ ,用 θ 将图像的数据分成两部分:大于 θ 的像素群和小于 θ 的像素群,假设输入图像为 $f(x,y)$,输出图像为 $g(x,y)$,则

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) \geq \theta \\ 0, & f(x,y) < \theta \end{cases} \quad (1)$$

数字图像二值化采用了迭代法二值化阈值算法。基于逼近的思想,记 T_0 为前景与背景的当前分割阈值,计算出前景部分的平均灰度为 u_0 ,背景部分的平均灰度为 u_1 ,则下一次的前景与背景分割阈值 $T=(u_0+u_1)/2$,重复计算直到 $T_0=T$ 。求出图像的最大灰度值和最小灰度值,分别记为 Z_{max} 和 Z_{min} ,令初始阈值为

$$T_0 = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2} \quad (2)$$

根据阈值 T_0 将图像分割为前景和背景,分别求出两者的平均灰度值 Z_0 和 Z_B ,再计算新阈值,即

$$T = \frac{Z_0 + Z_B}{2} \quad (3)$$

若 $T=0$,则所得即为阈值;否则 $T_0=T$,利用(2)式计算初始阈值,如此迭代。

边缘对称性判据提取流程如下:

通过图像中心,每 1° 画出一条射线,根据射线上的点的灰度值计算阈值并将射线上的点二值化,提取射线上内圆的边界,初步得到的内圆的边界;根据内圆的边界,去掉异常的内圆边界点,得到精确的内圆边界;根据内圆和外圆的边界点计算每两点之间的距离,得到 x 轴左右两段的长度和 y 轴上下两段的长度;再根据 x 轴两段长度的差值判断 x 方向的对称性,根据 y 轴两段长度的差值判断 y 方向的对称性。

由于图像的衍射对称性体现为数值,不体现运动方向;准直图像边缘模糊导致电机的运动响应非线性,引出了欠定方程求解的问题。采用随机并行梯度下降算法(SPGD)作为准直控制算法,对无定量控制参量施加扰动来生成移动量。

图4所示为衍射对称性判据算法的图像判读过程。对称性准直判据计算得到的准直偏差是标量,不具有方向信息,同时图像边缘的衍射环不等间距,

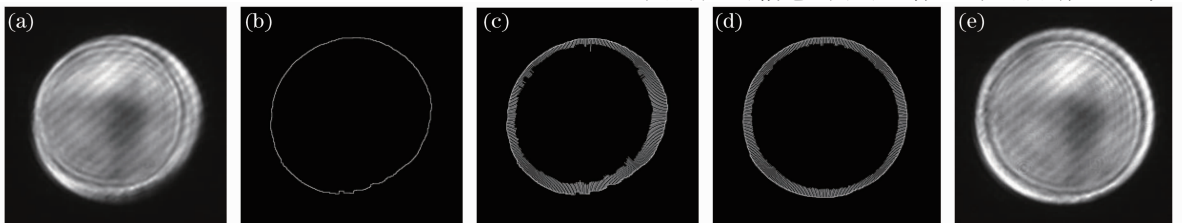


图4 (a) 初始状态; (b) 边界提取; (c) 边缘检测; (d) 对称性准直; (e) 准直完毕

Fig. 4 (a) Original state; (b) boundary extraction; (c) edge detection; (d) symmetry alignment; (e) completed state

这导致了准直闭环控制量的计算结果具有不确定性。随即 SPGD 可以解决非线性无定向腔镜自动准直的问题。采用 SPGD 算法,以图像边缘对称性为优化目标(边缘像素偏差数),通过此迭代方法可以在较短时间内完成腔镜的自动准直。

4 实验结果及分析

为了考核衍射对称性准直算法的有效性,在神光Ⅲ主机装置上配置新算法进行了流程考核。如图

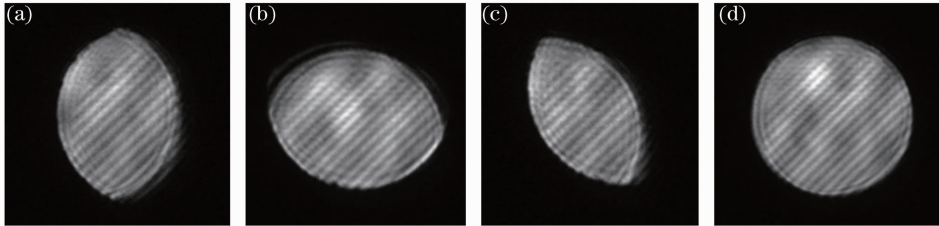


图 5 准直图像。(a)、(b)、(c)腔镜调偏后的孔像；(d) 准直完毕后的孔像

Fig. 5 Image of alignment. (a), (b), (c) Image of pinhole of mis-alignment; (d) image of pinhole after alignment

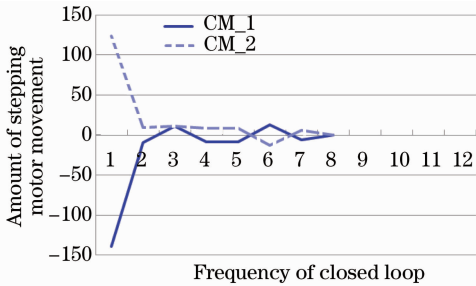


图 6 控制参量优化后收敛过程

Fig. 6 Convergence process after optimize control parameter

为了考核准直算法的有效性,开展了腔镜准直测试,使用神光-Ⅲ主机装置预放大器 1064 nm 准连续光作为准直光源,焦斑直径 300 μm , L1 透镜焦距 12 m,发散角 0.25 μrad 。如图 7 所示为数十次装置运行中腔镜准直的测试结果及准直前 CM 角度偏差及准直后 CM 角度残差及各次准直的闭环次数。

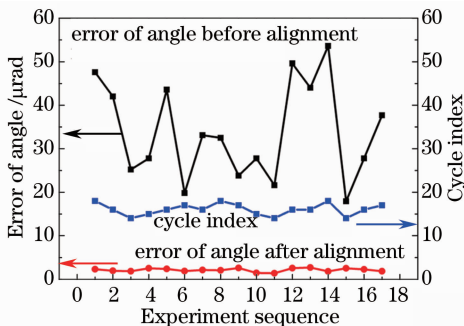


图 7 腔镜准直测试结果

Fig. 7 Testing results of cavity mirror alignment

5 所示,将腔镜 CM 的姿态手动调偏,分别调偏到如图 5(a)、(b)、(c)所示的三种不同状态,此时的孔像缺失严重,在这种条件下使用衍射对称算法进行自动光路调整,准直完成后的孔像如图 5(d)所示。

通过优化准直流程,同步并行采集处理诊断包数据,采用 PID 控制思路,优化单次准直步进量,避免振荡收敛。收敛过程如图 6 所示,采用控制思路的准直流程在 8 次反馈运动后迅速收敛闭环。

测试结果表明,CM 准直完成后,准直图像偏差均在 7 pixel 内(小孔全口径 365 pixel),圆率(m)不超过 5%滤波孔孔径,圆率通过由小孔图像计算得出,小孔图像中的最长轴 D_{max} 、最短轴 D_{min} 、平均轴长 D_{ave} , $(D_{\text{max}} - D_{\text{min}})/D_{\text{ave}} < m$ 。准直精度不超过 3.96 μrad 。多次试验角度残差的均方根为 2.28 μrad ,腔镜准直在不超过 18 次调整次数内完成并满足高精度要求;准直流程单路耗时不超过 2 min,准直效果满足多束组级实验需求。

5 结 论

采用“衍射对称性检测”的腔镜准直算法,在神光Ⅲ主机装置上得到运用,使多程放大系统光路的腔镜准直精度由 8 μrad 提升至 3.96 μrad ,解决了腔镜准直受到图像质量的影响而导致精度偏低的问题,避免了因图像质量影响而造成腔镜准直精度偏低,确保了装置的打靶精度;避免了大能量发射激光堵孔,保证了高功率固体激光装置的安全运行。

参 考 文 献

- Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu, *et al.*. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 78-81.
周 维, 胡东霞, 赵军普, 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 78-81.
- Dong Weibin, Li Dongjian, Da Zhengshang, *et al.*. Algorithm of far-field image in aligning cavity mirror based on edge curve characteristics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1288-1292.
董卫斌, 李东坚, 达争尚, 等. 基于图像边沿特征的强激光腔镜

- 准直处理方法[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1288—1292.
- 3 Hu Yongjun, Mao Hongjun, Fu Sihua, *et al.*. New criterion for alignment degree of cavity mirrors in unstable resonator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2244—2248.
- 胡永军, 毛宏军, 伏思华, 等. 非稳腔腔镜准直度判定的新方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2244—2248.
- 4 Xie Yue, Tang Zhong, Guo Zhongping. Control arithmetic for cavity mirror and reflector in beams automatic alignment system[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(1): 111—113.
- 谢 阅, 唐 钟, 虢仲平. 光路自动准直中空镜及反射镜控制算法[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(1): 111—113.
- 5 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Study of cavity mirror alignment in multi-pass amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(9): 1161—1165.
- 刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 多程放大腔镜准直研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1161—1165.
- 6 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei, *et al.*. Beam wavefront control of a thermal inertia laser for inertial confinement fusion application[J]. Appl Opt, 2009, 48(19): 3691—3694.
- 7 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei, *et al.*. Application of cavity deformable mirror in petawatt facility with U-turn reverser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2920—2923.
- 代万俊, 胡东霞, 周 维, 等. 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2920—2923.
- 8 Zhang Xin, Liu Hongjie, Zhao Junpu, *et al.*. Pinhole design of spatial filter in high energy solid-state laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 111402.
- 张 鑫, 刘红婕, 赵军普, 等. 高功率固体激光系统空间滤波小孔尺寸设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 111402.

栏目编辑: 史 敏