

文章编号: 0258-7025(2010)01-0078-04

# 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化

周 维 胡东霞 赵军普 代万俊 张 崑 蒋学军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 光路自动准直系统用于高功率固体激光装置光路自动调整, 确保从预放注入的光束准确地通过主放大级光路到达靶点, 准直算法和流程控制是光路自动准直的两项关键技术。针对神光-III 原型装置光路自动准直系统的腔镜准直算法, 基于图像处理技术, 提出了基于空间滤波小孔图像信号区域面积最大, 长短轴控制以及  $x, y$  轴长度控制 3 种算法。在原型装置上开展的实验表明,  $x, y$  轴长度控制算法最有利于准直闭环控制的实现, 其准直精度优于  $90 \mu\text{m}$ 。在自适应波前校正系统完成波前预校正后, 针对灰度分布变化的远场图像, 再使用光路自动准直系统, 对光束远场重新准直定位。结果表明, 优化后的准直流程可以消除波前预校正对光束远场定位的影响。

**关键词** 激光技术; 自动准直; 准直算法; 优化

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0078

## Optimizing on Algorithm and Flow of Beam Alignment in High Power Solid-State Laser Driver

Zhou Wei Hu Dongxia Zhao Junpu Dai Wanjun Zhang Kun Jiang Xuejun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The beam automatic alignment system is used to adjust the beam of high power solid-state laser driver and to make the beam accurately point to target. Algorithm of alignment and flow control are two key techniques on beam automatic alignment. Considering the algorithm on alignment of cavity mirror in technical integration experiment line (TIL), three kinds of algorithms: the largest area of image signal, control of long-short axes and the length of  $x-y$  axes control are put forward based on image processing. The experiment on TIL indicates that the length of  $x-y$  axes control is propitious to closed-loop control of alignment, and the alignment accuracy is less than  $90 \mu\text{m}$ . After wave-front adjusting, alignment system is used to point the far-field again. Result indicates that the influence of the adaptive optics system which makes the far-field alignment error will be able to eliminate.

**Key words** laser technique; automatic alignment; alignment algorithm; optimizing

### 1 引 言

用于激光聚变的大型高功率固体激光器具有光路长、光学元件多、结构复杂等特点, 对于已经固定好的各光学元件, 由于温度变化, 反射镜机械结构不稳定, 地基和支撑框架微振动等因素的影响, 会造成光束的近场和远场位置偏离预定的基准位置, 因此在发射前, 激光器的光路需要快速校准<sup>[1~3]</sup>。光路自动准直的任务就是将采集到的光束近场和远场的位置偏差反馈给计算机控制系统, 计算机控制系统驱动反射镜架转动角度, 直到将光束的近、远场恢复

到预定的基准位置。计算机控制系统结合激光器的光路结构特点, 如何将光束的位置偏差量转化为电动反射镜的步进电机调节量, 并且实现快速准直闭环, 是光路自动准直的难点。

### 2 光路自动准直原理

光路自动准直是通过计算机控制系统自动调节反射镜来进行光路调节的。如图 1 所示, 光路自动准直系统主要包括光束取样、图像采集、计算机控制系统以及伺服反射镜。激光束的近场和远场通过光

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-12-08

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(9140C6803020804)资助课题。

作者简介: 周 维(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: ni\_he999@yahoo.com.cn

束取样系统成像到图像采集 CCD 上,计算机通过图像卡读取 CCD 采集到的光学图像,结合图像处理技术计算出的光束近场和远场的位置和基准位置的偏差<sup>[4~6]</sup>,根据控制量解算方法,解算出伺服反射镜的步进电机应该转动的步数和转动方向。将光束的位置偏差转化为伺服反射镜的步进电机转动量的算法,是光路自动准直的关键技术。

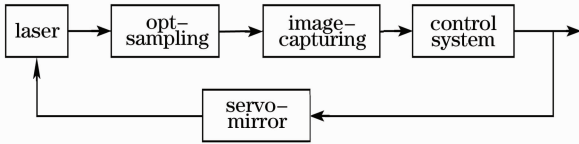


图 1 光路自动准直系统结构示意图

Fig. 1 Configuration schematic plan of beam automatic alignment system

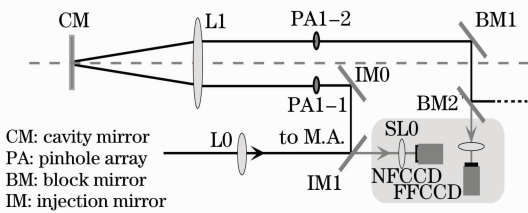


图 2 多程光路结构示意图

Fig. 2 Schematic plan of multi-pass beam

图 2 所示为高功率固体激光器多程光路结构示意图,这段光路的调整包括两段:注入 PA1-1 小孔的一程光束的位置和方向调整以及注入 PA1-2 小孔的二程光束的方向调整。由于 PA1-1 和 PA1-2 在 L1 的焦平面上对称分布,因此当腔镜(CM)垂直于 L1 的光轴时,PA1-1 通过 L1 成像的像点和 PA1-2 重合,因此这两段光路的准直可以先准直 CM 的角度。

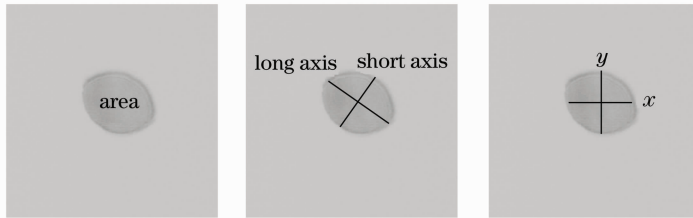


图 4 小孔图像特征参数。(a)面积;(b)长、短轴长度;(c) $x,y$ 轴长度

Fig. 4 Characteristic parameters of pinhole image. (a)area; (b)length of long and short axis; (c)length of  $x$  and  $y$  axis

以小孔面积作为反馈信号,存在伺服反射镜的二维步进电机不能同时工作的缺点,并且在准直过程中会由于方向探测的高度不确定性而导致准直闭环收敛速度变慢,这不满足快速准直闭环的要求。以长短轴长度之比作为反馈信号,能够保证准直初期的快速准直,但随着 CM 角度的逐步校准,小孔图像就越接近圆,长短轴的长度之比随 CM 的角度

图 2 中的远场 CCD(FFCCD)对 PA1-1 和 PA1-2 成像,于是可以通过照明 PA1-1,然后在 FFCCD 上观察 PA1-1 的孔像和 PA1-2 的重合情况,如图 3 所示。图 3(a)为 CM 准直前,由于 PA1-1 小孔关于 L1 的像和 PA1-2 不重合形成的,这是两个圆相交的公共部分的形状;图 3(b)为 CM 准直完成后,FFCCD 采集到的小孔图像,这是两个圆完全重合的图像,表示 PA1-1 关于 L1 的像完全落在 PA1-2 小孔上。

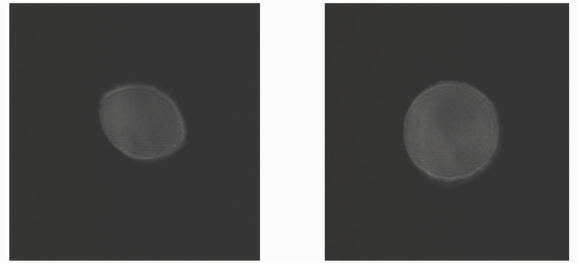


图 3 (a)CM 准直前小孔图像;(b)CM 准直完成后小孔图像

Fig. 3 (a)Pinhole image before CM alignment; (b)pinhole image after CM alignment

### 3 自动准直反馈算法

CM 准直的反馈信号为小孔图像,自动准直的算法就是要将该图像信号转化为伺服反射镜的步进电机的转动步数和转动方向。CM 的角度失调后,FFCCD 采集的小孔图像不能直接反应出光束指向变化引起的远场位置变化情况,但小孔图像的信号区域有 3 个基本特征参数会随着 CM 的角度变化而变化,这 3 个特征参数分别是:小孔的面积、长短轴长度之比以及  $x,y$  轴的长度,如图 4 所示。

变化不再敏感,这时准直收敛的速度就会变慢,一个微扰就会导致闭环过程的振荡,甚至是准直的失败。以  $x,y$  轴的长度作为反馈信号,不仅可以同时动作二维的电机,并且也不存在反馈信号变化不敏感的问题。 $x,y$  轴正好可以对应反射镜的二维驱动步进电机,这可以使二维电机运行的反馈信号互不影响,同时  $x,y$  轴的长度变化量和步进电机转动步数成

正比<sup>[7]</sup>。

如图 2 所示的光路,当 CM 的角度变化  $\theta$  ( $\theta$  是一个小量),激光束远场在 PA1-2 的位置变化量为

$$\Delta L \approx L \cdot \theta, \quad (1)$$

式中的  $L$  为 L1 的焦距,  $\Delta L$  为 PA1-2 位置的光束位置变量。由 (1) 式可知当 CM 小角度变化时, FFCCD 采集到的小孔图像  $x, y$  轴长度变化与 CM 角度变化成正比,即  $x, y$  轴长度变化和 CM 反射镜的步进驱动电机步进量成正比,其系数可记为  $\delta_x, \delta_y$ , 表示步进电机转动单位步数,  $x, y$  轴长度变化

表 1 (2)式中各参数符号的含义

Table 1 Meanings of the symbols in the equation (2)

Symbol	Meaning
$\Delta x, \Delta y$	D-value of the measured and standard value in $x$ and $y$ axis
$\delta_x, \delta_y$	length change in $x$ and $y$ axis when stepping motor rotate unit step
$m_x, m_y$	the steps that $x, y$ axis motors should rotate for correcting the length error of $x$ and $y$ axis

计算机控制系统根据 FFCCD 采集到的小孔图像  $x, y$  轴长度偏差值,计算出各维步进电机转动步数,并且驱动电机转动,完成对 CM 反射镜角度的控制,此过程不断迭代,直到准直闭环收敛为止。采用  $x, y$  轴长度变化信号反馈控制电机的算法迭代次数较少,能够满足快速准直的要求。

## 4 自动准直流程优化

在完成 CM 的姿态调整后, PA1-1 小孔像完全和 PA1-2 重合,根据成像原理,远场可以同时穿过 PA1-1 和 PA1-2 的中心。如图 2 所示的光路,准直调整注入光束的角度,可以使注入光束的远场准确地通过 PA1-1 和 PA1-2 孔的中心,如图 5 所示。

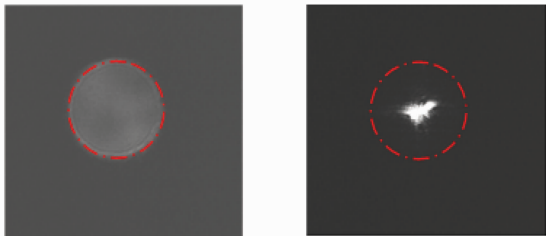


图 5 (a)CM 完成准直后的小孔图像;  
(b)远场通过小孔示意图

Fig. 5 (a)Pinhole image after CM alignment;  
(b) schematic plan of far-field after alignment

自适应光学系统用于激光装置的像差校正,采取的是发射前预校正的工作模式。自适应系统预校正工作后,会导致 PA1-1 小孔处的远场分布变差,

值,该系数为有符号量。

设 CM 角度没有偏差时,小孔图像的  $x, y$  轴长度为  $X, Y$ , 该长度值可以通过标定确定为基准值,而由于 CM 角度失调,实测的小孔图像  $x, y$  轴的长度为  $x, y$ , 则实测值与标准值的差值可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = x - X \\ \Delta y = y - Y \end{cases}, \begin{cases} m_x = \Delta x / \delta_x \\ m_y = \Delta y / \delta_y \end{cases}, \quad (2)$$

式中各参数的含义如表 1 所示,各参数都是有符号量,其中  $m_x$  和  $m_y$  的正负号表示步进电机的转动方向。

从而使准直完好的光路遭到破坏。对于这种情况,采取在光路自动准直前,自适应系统预加电的工作模式,并且对于注入光束的远场采用“形心”的定位方法,能有效地避免远场分布变化带来的准直精度降低的影响,如图 6 所示。

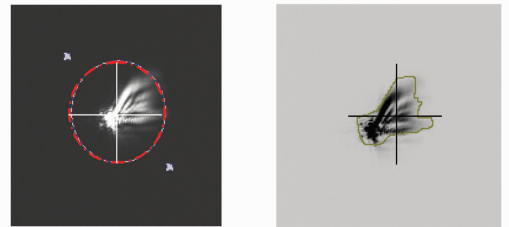


图 6 (a)远场“质心”定位; (b)远场“形心”定位

Fig. 6 (a)Centroid orientation of far-field; (b)centre of figure orientation of far-field

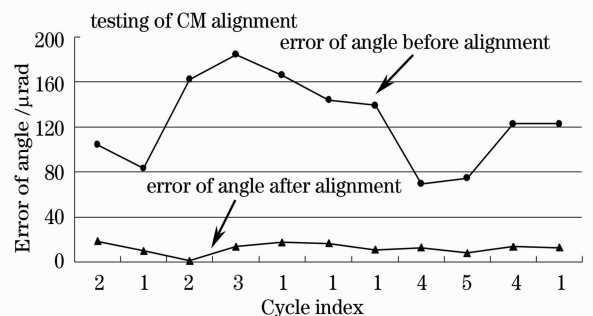


图 7 CM 准直测试结果

Fig. 7 Testing results of CM alignment

## 5 实验结果及结论

为了考核准直算法和流程优化的有效性,开展了数十次准直测试。图 7 所示为连续 11 次准直测试的实验结果,图中显示了准直前 CM 角度偏差、准直完成后 CM 角度残差,以及各次准直的迭代次数。

测试实验结果表明,准直完成后,CM 角度残差的均方根值为  $12 \mu\text{rad}$ ,准直闭环的迭代次数小于 5。优化后的 CM 准直算法和 workflows,能够满足光路自动准直 5% 小孔孔径精度的要求,并且能够保证准直收敛具有较高的速度,达到快速准直的要求。

文中的准直算法和 workflows 已经在神光-III 原型装置上得到了应用。

### 参 考 文 献

- 1 R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. Alignment and wavefront control system of National Ignition Facility [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2873~2884
- 2 Chen Qinghao, Xu Renfang, Peng Zengyun *et al.*. Automatic optical alignment for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 531~535  
陈庆灏,徐仁芳,彭增云等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 531~535
- 3 He Wei, Chen Qinghao, Xu Renfang *et al.*. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1279~1283  
何 为,陈庆灏,徐仁芳等. 激光核聚变装置中基于像传递的激光自动准直技术研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1279~1283
- 4 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 275~279  
孔 兵,王 昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 275~279
- 5 Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 335~337  
吕凤年,刘代中,徐仁芳等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. *光学技术*, 2005, **31**(3): 335~337
- 6 Zhou Wei, Hu Dongxia, Li Qiang *et al.*. Experimental study about stability of the main beam of SG-III prototype facility[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 400~403  
周 维,胡东霞,李 强等. 原型装置主放光路稳定性实验研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(4): 400~403
- 7 Zhai Xuefeng, Wang Guofu, Da Zhengshang *et al.*. Design of SG-III  $3\omega$  laser beam auto-collimation system[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(2): 177~180  
翟学锋,王国富,达争尚等. 神光-III  $3\omega$  光路自动准直系统设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(2): 177~180