

高功率激光装置光束自动准直系统设计

李 红¹ 王东方² 邹 伟³ 林 强¹ 张艳丽¹ 姜卓俤¹ 刘代中¹ 朱宝强¹ 朱健强¹ 龚 蕾¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 中国科学院自动化研究所精密感知与控制中心, 北京 100190

摘要 利用 TMCM-351E 驱动控制板卡及自编的自动准直控制软件对高功率激光装置光束进行检测和准直, 并设计了一套新型光路监测准直系统。采用变结构控制算法实现了近远场基准中心和光斑中心的自动提取, 有效地提高了系统的精度、稳定性和准直效率。在实验平台上进行了验证。实验结果表明, 相对传统监测准直方法, 该监测准直系统平均准直误差为空间滤波器小孔直径的 0.9%, 能够满足准直系统远场调整精度(小于小孔直径的 5%)和近场调整精度(小于小孔直径的 1%)的要求, 在连续 10 h 测试过程中, 角度抖动为 $\pm 12.6 \mu\text{rad}$, 显示出高的稳定性。该系统在某高功率激光装置的光路自动准直中得到有效应用。实际验证表明, 8 路预放光路准直时间小于 3 min, 主放光路准直时间小于 7 min。

关键词 激光技术; 集控系统; 高功率激光; 自动准直; 图像处理; 光斑取样中心

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002003

Design of High Power Laser Beam Automatic Alignment System

Li Hong¹ Wang Dongfang² Zou Wei³ Lin Qiang¹ Zhang Yanli¹ Jiang Zhuochai¹
Liu Daizhong¹ Zhu Baoqiang¹ Zhu Jianqiang¹ Gong Lei¹

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³ Institute of Automation of Precision Sensing and Control Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract High power laser device beam is detected and aligned with TMCM 351E device control board and a self-made automatic alignment procedures, and a set of novel optical monitoring alignment system is designed. With the use of variable structure control algorithm, automatic extraction of the near and far field reference center and the spot center are achieved, and automatic alignment procedures are realized with high stability, high precision and high efficiency. Experiments are conducted on platform to verify the performance of the alignment system. Experimental results show that, compared to traditional method, the adjusted average error of spatial filter pinhole diameter is 0.9% in the monitoring collimation system, which can meet the precision requirement of far field adjusting collimation system (less than 5% of small hole diameter) and near field adjusting collimation system (less than 1% of small diameter). Stability test of 10 h shows that the control system has good stability with angle jitter of $\pm 12.6 \mu\text{rad}$. The system is verified in the high power laser device. The alignment time of eight pre-light road is less than 3 min and the alignment time of the main light path is less than 7 min.

Key words laser technique; centralized control system; high power laser; automatic alignment; image processing; spot sampling center

OCIS codes 140.3295; 100.2000; 110.2970

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家 863 计划(2007SQ804)、国家自然科学基金青年基金(61205137)、中日韩激光聚变高能时密度物理合作研究

作者简介: 李 红(1986—), 女, 本科, 助理研究员, 主要从事高功率激光光束控制与准直等方面的研究。

E-mail: hongli_0309@163.com

1 引 言

以惯性约束聚变(ICF)为代表的前沿科学技术,对解决未来人类能源危机、开发洁净新能源有重要意义。基于该技术,各国纷纷开展高功率激光驱动系统的研究,如美国的 OMEGA-EP^[1] 和国家点火装置(NIF)^[2]、法国的兆焦耳级激光装置(LMJ)^[3]、我国的神光 II 升级装置^[4-6] 以及神光 III 装置^[7] 等。光路自动准直是大型惯性约束聚变激光装置不可或缺的重要组成部分,是惯性约束聚变高效、精密运行的重要保证^[7-9]。随着激光聚变技术的迅速发展、光束口径和光路数的急剧增多、光路长度和元器件数目的成倍增长,对准直速度及精度的要求也越来越高,而相应的光束准直系统的空间却越来越少,对其可靠性、可操作性和易维护性也提出了越来越高的要求。对于已调好的高功率激光装置光路,由于温度变化、反射镜机械结构蠕变、地基和支撑框架微振动、振荡器输出光束方向漂移和其他随机因素的影响,会造成光束偏离原定光路^[10]。光路自动准直的任务就是通过逐段检测光束位置和方向的偏差,由前向后依次调整光路中的反射镜,使各路光束恢复到原定光路上。其主要难点是在不影响主光路的情况下准确地获得激光光束的真实位置和方向的误差信号,并设计合适的驱动方式及驱动程序。现存的光路自动准直系统在稳定度、光斑采样

准确度方面均存在一定程度的欠缺。

本文应用 TMCM-351E 硬件集成控制系统在神光 II 升级装置平台上,开发了基于视觉反馈和变结构控制技术的自动准直控制系统。自控系统的硬件设计不仅满足系统功能性、稳定性和可扩展性的要求,同时也符合目前自控系统的发展方向:简洁、方便。该自控软件系统的应用明显缩短了自动准直周期,提高了自动准直精度,同时也满足高功率激光器的总体要求。整套控制系统在神光 II 升级装置上进行了工程实验,获得了满意的效果。

2 光路自动准直系统的目标和方法

2.1 系统设计需求

光路自动准直系统的目标是在不影响主光路的前提下设置光束近场和远场的基准点和探测点,准确、快速、并行地完成光路自动准直调整,保证靶场系统准确无误地打在靶点上。预放、主放系统的主要控制点分别如图 1、2 所示。与其他光路准直系统相比较,本系统在硬件方面对系统的集成度、稳定度进行了优化,使得系统具有操作方便,易于二次开发等优点;软件上采用根据形心(形状的中心)确定质心的光斑采样处理方法,且实现了“一键到底”的功能,直接提高了准直的速度与精度。

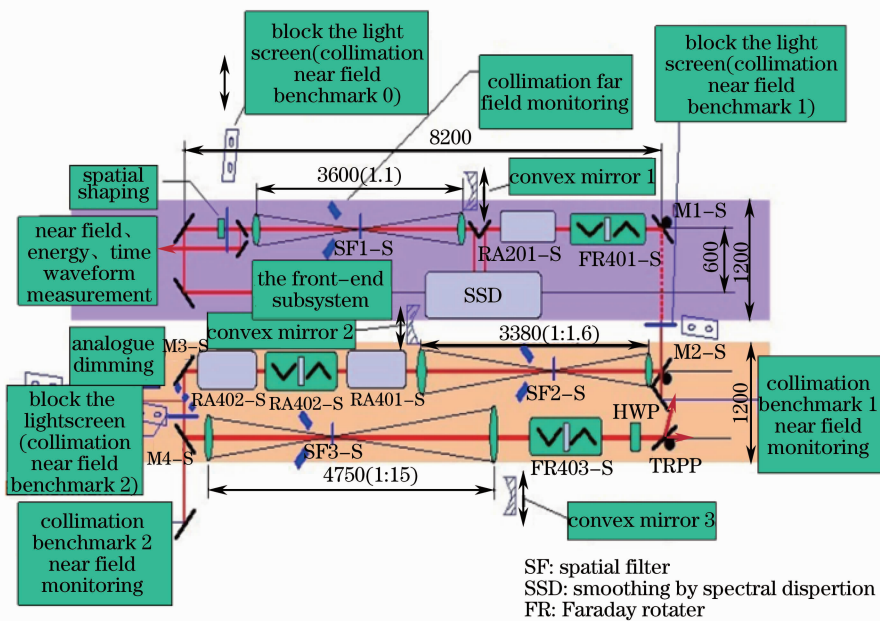


图 1 预放控制点示意图

Fig.1 Control point for preamplifier

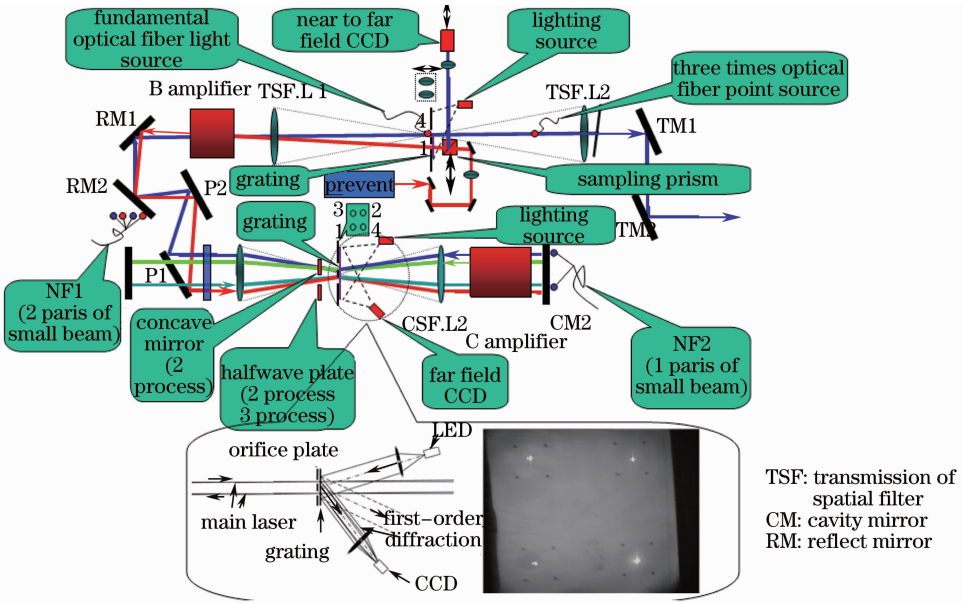


图 2 主放控制点示意图
Fig. 2 Control point for main amplifier

2.2 光束自动准直方法

神光 II 升级装置自动准直每个环节均包括近场准直和远场准直两个部分。近场和远场均利用光栅衍射特性设计实现了相应的基准光栅，分别如图 3(a)~(c)所示。在准直过程中，分别依据近场平行光斑中心和近场基准中心之间的偏差、远场点

光斑中心同远场基准中心之间的偏差、主放传输空间滤波器远场大光斑中心点同基准点的偏差，反馈调节相应的二维反射镜步进电机使光斑中心与基准中心重合。上述控制调节过程按照先近场后远场的顺序依次进行。

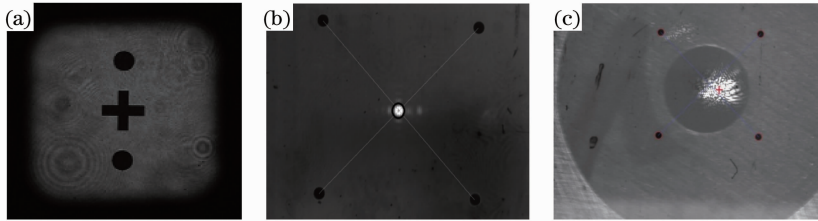


图 3 近远场光栅基准。(a) 近场；(b) 远场；(c) 主放远场

Fig. 3 Grating reference for near-field and far-field. (a) Near-field; (b) far-field; (c) main amplifier far-field

2.3 准直控制方法设计

由于高能像素点所确定的能量中心受图像质量影响较为严重，因此对采样图像信息的提取和精确处理是准直控制过程中比较关键的一环。以提取光斑或基准的几何构型为出发点，通过形心拟合获取其质心，以保证光斑取心的准确性以及准直控制过程的稳定性和收敛性。在准直过程中融入在线辨识环节，通过解耦获取每个电机运行所导致图像特征的变化方向，并据此估计出相应的特征命令映射参数。此外，为保证准直控制的快速性和收敛性，采用变结构控制思想实现准直控制率的设计。上述控制思路如图 4 所示。

2.4 新型图像信息处理和提取方法

采用了新型采样处理方法准确获取光斑与基准中心的位置，即根据质心确定形心的方法确定光斑中心及基准点中心，下面以图 5(a)所示的近场图像为例，详细介绍这一过程：

1) 应用大津法获取光斑图像前后景分割阈值 S ，并依据此阈值对光斑图像进行二值化处理，所得图像如图 5(a)所示。

2) 遍历图像以得到连通边缘线，以边缘线为起点进行爬虫处理，获取与初始点相连通的边缘像素点集。在所获得的所有相连通边缘点集内选取像素数量最大的 4 个进行后续处理，如图 5(b)所示，设

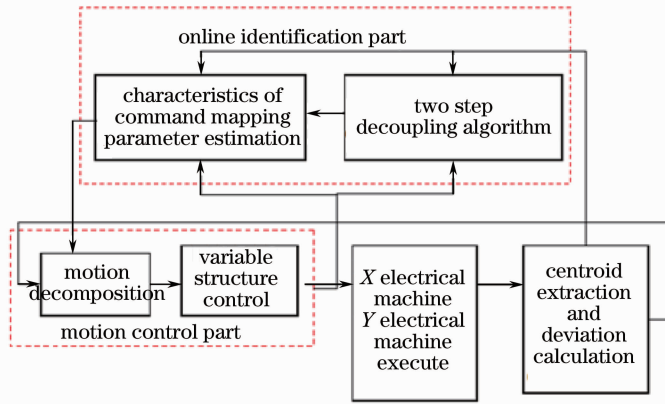


图 4 准直控制结构示意图

Fig. 4 Structural representation for alignment control

其按照像素数量排列分别为 P1、P2、P3 和 P4。

3) 对于 P1, 判断其所容纳像素的数量, 如果其值小于设定值, 则认为无光斑存在, 退出。

4) 光斑形心计算: 求取 P1 中所有像素点的质心 C_1 , 并以 C_1 为起始点, 分别在其正上、正下、正左、正右 4 个方向寻找 P1 中的 4 个像素点, 然后以该像素点为中心, 在其上下或是左右两个方向上获取需求宽度的边缘区域, 利用最小二乘法对该区域内的像素点进行直线拟合, 获得表征光斑区域的 4 条拟合边界线, 如图 5(c) 中的直线所示。获取其交点, 并根据交点的毗邻性确定边缘中点, 分别利用上下、左右两个中点确定两条边缘线, 两线交点作为平

行光斑中心。

5) 基准中心计算: 以椭圆拟合的方式分别对 P3、P4 中的像素点拟合, 获取椭圆参数^[8], 利用其尺寸不同及二者间的比例关系判定椭圆的合理性, 若合理则认为基准存在, 否则退出。计算两椭圆中心连线的中点, 记为 C_2 , 同时对 P2 中的像素点进行骨架搜索, 并对其进行直线拟合获得表征其骨架结构的两条直线, 记该两条直线的交点为 C_3 , 则基准中心确定为 C_2 和 C_3 两点的平均位置。

按照上述思路所确定的光斑中心和基准中心分别如图 5(c) 中的中心处圆斑和十字形叉丝所示。

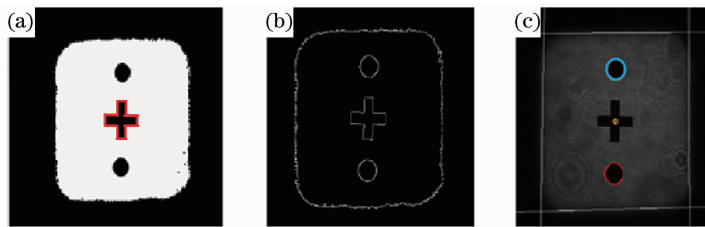


图 5 近场光斑和基准形心提取。(a) 二值图像; (b) 连接的边缘图像; (c) 最终结果图像

Fig. 5 Abstraction of laser beam's and reference's geometrical centers for near-field. (a) Binarized image; (b) connected edge image; (c) final result image

预放远场光斑取样采用形心的方法, 主放因经过四程放大光斑受外界的影响形成的光束抖动较为

严重, 故主放远场也采用根据质心找边缘最大点确定形心的方法, 预放远场光斑提取和基准的形心提

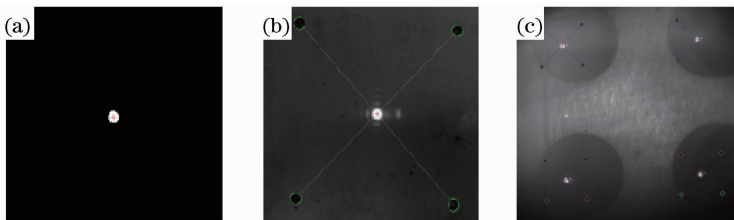


图 6 远场光斑和基准形心提取。(a) 点的二值化图像; (b) 最终结果图像; (c) 主放大器图像

Fig. 6 Abstraction of laser spot's and reference's geometrical centers for far-field. (a) Spot binarized image; (b) final result image; (c) main discharge reference image

取如图 6(a)、(b)所示,主放远场基准的形心提取如图 6(c)所示。

2.5 控制率设计

理想情况下,在光路准直过程中, X 轴反射镜电机调节时图像特征只沿图像平面的 X 轴方向运动, Y 轴反射镜电机调节图像特征只沿图像平面的 Y 轴方向运动。实际情况并非如此,二者所导致的图像特征运动方向分别与 X 轴和 Y 轴存在一个固定角度耦合关系,因此首先需要通过解耦来获得这一固定耦合关系,然后以准直过程的前两步为例说明准直电机的调节过程。设两步进电机的单位步进量引起反射镜在坐标系中偏移量为 (e_{x_1}, e_{y_1}) 和 (e_{x_2}, e_{y_2}) ,而图像光斑中心在图像平面内的相应移动量为 $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ 和 $(\Delta x_2, \Delta y_2)$,单位为像素。由于步进电机步进量同图像特征移动像素数目之间为固定比例关系,分别用参数 K_x 和 K_y 描述。则有

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} e_{x_1} & e_{x_2} \\ e_{y_1} & e_{y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{I} 为耦合矩阵, \mathbf{A} 为固定比例系数矩阵,即

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix}$$

式中 α, β 分别为 X 轴电机调节时图像特征沿 X 轴的运动偏角和 Y 轴电机调节时图像特征沿 Y 轴的运动偏角。由于矩阵 \mathbf{I} 和 \mathbf{A} 均为常量,记 $\mathbf{\Omega} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{A}$,

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x_1} & e_{x_2} \\ e_{y_1} & e_{y_2} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 \end{bmatrix}。故(1)式$$

可以写成

$$\mathbf{\Omega} \cdot \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

假设从 CCD 图像处理中获得当前光斑与基准中心的偏差为 $(\Delta x, \Delta y)$,则根据(2)式可以得到相应的电机步进量。

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \mathbf{\Omega}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

根据(3)式,步进电机的比例环节调节控制量 k_p 可确定,即

$$\begin{bmatrix} e_{x,p} \\ e_{y,p} \end{bmatrix} = k_p \mathbf{\Omega}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x(T) \\ \Delta y(T) \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

微分环节的控制调节量 k_D 为

$$\begin{bmatrix} e_{x,D} \\ e_{y,D} \end{bmatrix} = k_D \mathbf{\Omega}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x(T) - \Delta x(T-1) \\ \Delta y(T) - \Delta y(T-1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

积分环节的控制调节量 k_I 为

$$\begin{bmatrix} e_{x,I} \\ e_{y,I} \end{bmatrix} = k_I \mathbf{\Omega}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{k=T_0}^T \Delta x(k) \\ \sum_{k=T_0}^T \Delta y(k) \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

考虑到准直控制过程的快速性和收敛性,采用变结构控制思想实现步进电机控制率的设计:当光斑中心同基准中心之间的距离偏差大于设定值 D 时,采用比例微分控制以加速其调节快速性;当小于该设定值时,采用比例积分控制以保证其稳定性、收敛性及减小稳态误差。

综合上述各环节调节量,两步进电机的准直控制率为

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} e_{x,p} \\ e_{y,p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x,D} \\ e_{y,D} \end{bmatrix}, & s \geq D, \\ \begin{bmatrix} e_{x,p} \\ e_{y,p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x,I} \\ e_{y,I} \end{bmatrix}, & s < D, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $s = \sqrt{\Delta x^2(T) + \Delta y^2(T)}$ 为距离偏差。

3 系统软硬件设计及验证

3.1 系统软件设计

软件设计上本系统对传统准直方法进行了修改和完善。在软件上增加了对检测 CCD 的设置、自动检错跳出、一键准直、一键退出等功能。为了避免因为环境湿度等引起的光束抖动等现象,系统对光斑中心的计算采用通过形心确定质心的光斑校正方法,提高了光斑的调整精度。

3.2 系统硬件设计

由于高功率激光系统中有多条光路,而且每条光路中的反射镜数量略有不同,为实现光路自动准直功能,需要大量的电机同时参与调节,因此必须选择合理的驱动控制模块,以保证节约资源、易于软件开发、操作简单方便、易于管理维护等方面的要求。TMCM-351E 驱动控制板卡是一款综合能力很强的驱动控制板卡,不仅能保证系统所要求的全部功能,同时还具有良好的集成度和稳定性,易于操作、方便二次开发,与同类驱动板卡相比较,在稳定性、功能性、反应速度等方面均有显著的提高,不仅满足对马达控制精度的要求,而且还满足装置中马达的电流需求范围,在集成控制系统开发应用中的优势十分明显。图 7(a)为神光 II 升级装置单路光路应用 TMCM-351E 驱动卡的准直驱动控制箱内部链接实物图;图 7(b)为神光 II 升级装置光路准直集控系统

实物图;系统采用串口通信方式,通过计算机对步进电机、光栅尺反馈信号以及 CCD 图像信号等进行控

制,其控制系统结构图如图 7(c)所示。



图 7 集控系统示意图。(a) 控制箱示意图; (b) 控制柜; (c) 控制系统结构图

Fig. 7 Integrated control system diagram. (a) Control box image; (b) control cabinet; (c) control system structure diagram

系统的主控软件运行在 Windows7 环境下,采用 Visual C++6.0 作为程序开发语言,以多线程的编程技术实现,主要操作集中在主线程中进行,一个辅助的线程用于实时工作信息的显示和数据存储,线程之间采用消息对象的通信方法。

3.3 准直误差测试

图 8 所示为近场准直过程中平行光斑中心同基准中心之间偏差由 (-13.87, 22.14) 至 1 pixel 范围内的变化曲线图;图 9 所示为远场准直过程中焦点光斑中心同基准中心之间偏差由 (63.06, 123.68) 缩小至 1 pixel 误差范围内的变化曲线图。

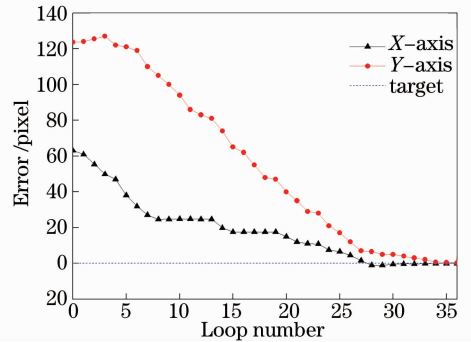


图 9 远场准直误差曲线

Fig. 9 Error curve of far-field alignment

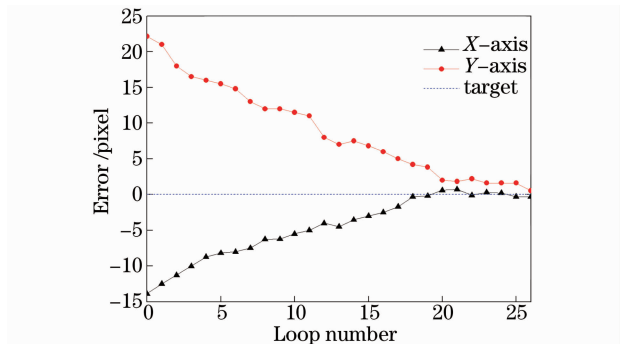


图 8 近场准直误差曲线

Fig. 8 Error curve of near-field alignment

由图 8、9 可知,采用本文所述的控制方法,无论近场还是远场,均能快速、稳定地收敛至允许误差范围内,且波动较小。在图 9 所示曲线的初始段, Y 轴误差有所增加,这主要是由两步进电机运行所导致的图像特征在变化方向上存在一定的耦合造成的。根据前两次步进电机的运行步数和图像特征的变化量,利用本文所述变结构控制算法很好地保证了后续误差曲线的一致收敛性。经计算该监测准直系统调整平均误差为空间滤波器小孔直径的 0.9%,能够满足准直系统远场调整精度(小于小孔直径的 5%)和近场调整精度(小于小孔直径的 1%)的要求。

3.4 系统稳定度测试

为了对系统准直稳定性进行测试,在光路准直完成后(每级光斑中心和基准中心偏差小于 ±1 pixel,满足准直精度要求)上电状态下,通过预放系统对准直稳定性进行了测试。每隔 5 min 记录一次远场基准和光斑位置,连续测量 10 h,系统关机断电,次日开机测量 1 h。任取其中一路进行分析,图 10 所示为 SF3 路远场基准和光斑稳定性的分析图。

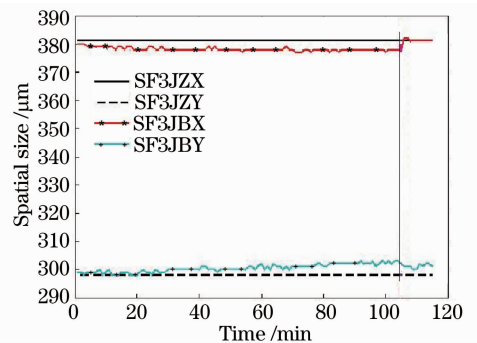


图 10 SF3 路光路稳定性分析图

Fig. 10 SF3 stability analysis chart

图 10 中,横坐标为记录时间,每 5 min 采集一个数据,1~105 min 为测量关机前记录,106~115 min

为开机后记录;纵坐标表示焦斑或者基准在远场成像 CCD 上的位置,单位为 pixel,系统中远场取样成像系统的放大倍数为 1,每个像素点对应的实际空间尺寸为 $8\ \mu\text{m}$ 。由图 10 可知,光斑的稳定性很好,最大横向抖动处,最大值小于 $\pm 3\ \text{pixel}$,对应于空间尺寸 $24\ \mu\text{m}$,转换为角度抖动为 $\pm 12.6\ \mu\text{rad}$,能够满足系统要求,约为第三程预放大器小孔直径的 5%。

4 结 论

采用自动准直集成系统设计及准直流程、检测和控制方法保证了系统的稳定性和可靠性,实现了集手动调节、自动准直和状态实时显示为一体的神光 II 自动准直软件系统。采用该软件系统可实现整体光路的“一键准直到底”的功能。实验结果表明,8 路预放光路准直时间小于 3 min,主放光路准直时间小于 7 min,整个准直流程平均耗时仅为 9~10 min。设计的准直系统可为更大规模高功率激光驱动器的高效精确准直提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 L J Waxer, D N Maywar, J H Kelly, *et al.*. High-energy petawatt capability for the Omega laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(7): 30-36.
- 2 F R Holdener, E Ables, E S Bliss, *et al.*. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[C]. *SPIE*, 1997, 3047: 692-699.
- 3 N Fleurot, C Cavailler, J L Bourgade. The laser mégajoule (LMJ) project dedicated to inertial confinement fusion;

- development and construction status[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74(1-4): 147-154.
- 4 Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, *et al.*. Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system [J]. *Journal of Physics*, 2011, 60(6): 065204.
高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 065204.
- 5 Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, *et al.*. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 582-586.
刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4 程放大光路自动准直系统研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 582-586.
- 6 Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. *Optical Technology*, 2005, 3(3): 72-74.
吕凤年, 刘代中, 旭仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. *光学技术*, 2005, 3(3): 72-74.
- 7 Chen Qinghao, Xu Renfang, Peng Zengyun, *et al.*. Automatic beam alignment for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5): 531-533.
陈庆浩, 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.
- 8 Fan Dianyuan. The Fresnel number in terms of ray matrix elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, 3(4): 319-325.
范滇元. 用光线矩阵元表达的菲涅耳数[J]. *光学学报*, 1983, 3(4): 319-325.
- 9 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, 陈庆浩, 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.
- 10 Da Zhengshang, Li Dongjian, Zhou Wei, *et al.*. Mathematical model for beam automatic fast alignment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2534-2538.
达争尚, 李东坚, 周 维, 等. 光路自动准直快速调整数学模型研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2534-2538.

栏目编辑:张 腾