

doi:10.3788/gzxb20174611.1114002

# 基于光斑形状光束快速自动准直算法

李红,林强,杨朋千,张艳丽,刘代中,朱宝强,朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室,上海 201800)

**摘 要:**为满足高功率激光装置光路自动准直系统的高精度要求,提出一种光束非垂直过孔状态下椭圆光斑的光斑差值快速调节法,并引入局部自适应阈值二值化算法提高准直图像的的定位精度.当椭圆光斑长短轴差值较大时,利用基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法,求出椭圆光斑长短轴的轴长,通过远场反射镜调节长短轴轴长差值以调节光斑形状,直到获得规则的圆形光斑.分析了圆光斑中心与基准位置的偏差值,将差值转为闭环控制的步进电机调整步数,实现了高功率激光装置光束的快速自准直.该算法应用在某高功率激光装置光路自动准直系统中,结果表明,远场指向精度优于  $0.033''$ , 优于目前高功率激光准直系统准直效果,提高了激光光束的指向性精度.

**关键词:**高功率驱动激光器;自动准直;长短轴差值法;图像处理;反馈控制

**中图分类号:**TP751.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2017)11-1114002-7

## The Fast Algorithm of Auto-alignment Based on Spot Shape

LI Hong, LIN Qiang YANG Peng-qian, ZHANG Yan-li, LIU Dai-zhong,  
ZHU Bao-qiang, ZHU Jian-qiang

(High Power Laser Physics Joint Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** To meet the accuracy of the high power lasers auto-alignment system, a new method of elliptic light spot differential quick adjustment in the state of non-vertical was put forward, introducing the local adaptive threshold and binarization algorithm which improve the auto-alignment system positioning accuracy of the image. When the axle differential is big the ellipse fitting based on least square method is improved to calculate the length of ellipse light spot major axis and minor axis, and to adjust the far field reflector to shape the light spot to get the regular circular spot, and then to calculate the deviation of circular light spot center and the reference center, which is transformed to the steps of closed-loop control stepping motor, achieving high power lasers beam auto-alignment. the algorithm is used in a high power laser facility auto-alignment system, the results show that the far field pointing accuracy is better than  $0.033''$ , which is better than the original system.

**Key words:** High power lasers; Auto-alignment; Axle differential method; Image processing; Feedback control

**OCIS Codes:** 140.3295; 100.2000; 110.2970

## 0 引言

随着激光核聚变技术的不断深入研究,高功率激光驱动装置也朝着多路化、复杂化方向发展,光路长度

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(No.2007SQ804)和中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究课题(No.2012DFG62040)资助

**第一作者:**李红(1986—),女,助理研究员,硕士研究生,主要研究方向为高功率激光光束控制与准直.hongli\_0309@163.com

**导师(通讯作者):**朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要研究方向为激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等.Email:jzhu@mail.shcnc.ac.cn

**收稿日期:**2017-05-25;**录用日期:**2017-07-03

<http://www.photon.ac.cn>

及原器件的数目也随之增长,系统结构也更加复杂.为保证光束准确地通过光路、精确地照射在微型靶丸中心点上,自动准直系统在高功率激光驱动器中的作用越来越明显<sup>[1-2]</sup>.

目前自动准直过程只对光束位置误差进行分析,并没有分析光束指向性对准直过程的影响<sup>[3-4]</sup>.而光束的指向性问题对高功率激光装置的成功打靶起着决定性的作用,因为光束能否垂直入射到靶心上直接影响着激光能量的集中分布问题,即影响高功率激光装置的效率<sup>[5-6]</sup>.因此,光束的入射状态是影响高功率激光装置打靶成功的关键因素之一<sup>[7]</sup>.实际过程中存在远场光斑虽过孔,但激光光束非垂直过孔的问题,即光束指向性偏差问题.传统准直系统中没有有效地分析、解决办法,因为通过反射镜的光束指向性变化引起的 CCD 上光斑图像的椭圆化变化量无法识别<sup>[8]</sup>.针对这一问题,本文在增加扩束系统的前提下提出了基于光斑形状分析的快速自动准直算法,首先引入局部自适应阈值二值化算法提高准直图像的定位精度,然后采用最小二乘法椭圆拟合改进算法求出光斑的几何信息,分析椭圆光斑长短轴的长度差,当长短轴差值较大时,将该差值转为闭环控制的步进电机调整步数,通过近远场反射镜调节长短轴轴长差值以调节光斑形状,直至差值近似为零,获得规则的圆形光斑,实现光束垂直入射;然后分析圆光斑中心与基准位置的偏差值,将差值转为闭环控制的步进电机调整步数,实现高功率激光装置光束的自动准直.

## 1 基于光斑形状调整的自动准直方案设计

针对传统准直方法无法分析光束指向性的局限性,本文在传统准直方法的基础上增加了对光斑形状调整的步骤.准直开始时,首先进行光斑形状识别与判断:如果光斑为椭圆形,说明光束存在指向性偏差,需要进行指向性调整;如果光斑为圆形,说明光束已经垂直入射,只需进行传统准直流程即可,系统准直流程见图 1.

传统的自动准直系统无法对光束的指向性进行识别,原因主要有以下两点:一是反射镜引起的光束指向性偏差在 CCD 上的形状变化低于 CCD 的分辨率.二是传统自动准直系统中的图像处理方案只分析光斑的中心位置,不分析光斑的实际形状.本文提出的自动准直方案在传统自动准直方案基础上,首先在远场 CCD 前增加一个扩束器,放大光斑的形状变化,以满足 CCD 的处理精度.二是在图像处理过程中增加对光斑形状的处理算法,采用最小二乘法椭圆拟合改进算法,分析实际椭圆光斑的几何参数,将椭圆光斑长短轴的长度差值转为闭环控制的步进电机调整步数,通过近远场反射镜调节长短轴轴长差值以调节光斑形状,至长短轴轴长相近,差值近似为零,获得规则的圆形光斑,实现激光光束的垂直入射条件.

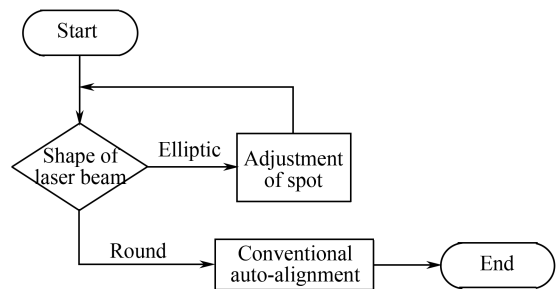


图 1 准直流程

Fig.1 The process of alignment

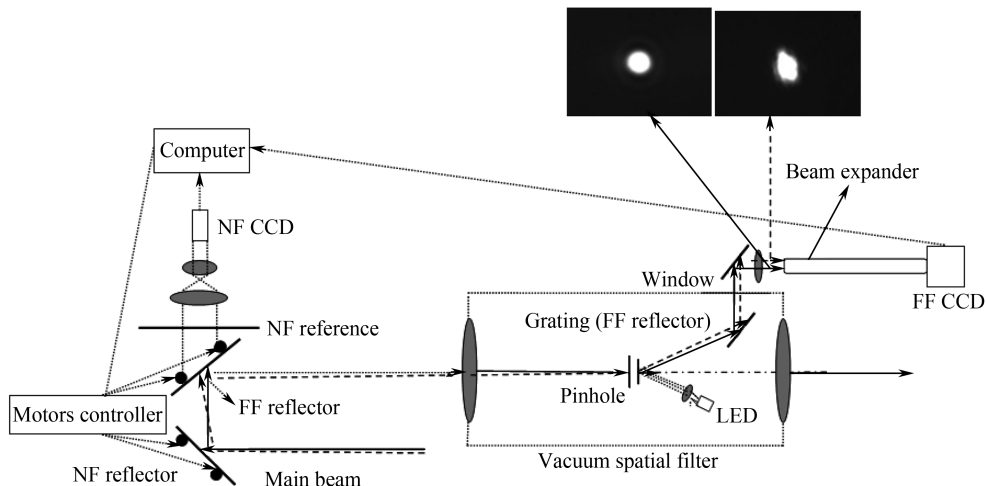


图 2 成像系统

Fig.2 The imaging system

图 2 给出了某高功率激光装置预放系统第一级空间滤波器的准直示意图.从图中可以看出,从再生放大器输出的光束经近场反射镜、远场反射镜反射后,进入空间滤波器<sup>[9]</sup>.近场基准取样板放置于远场反射镜后,通过远场反射镜的漏光,成像到 CCD 中<sup>[10]</sup>.空间滤波器共焦面上放置滤波小孔,抑制小尺度自聚焦,光栅基准中心与小孔中心完全重合,利用光栅的衍射特性,实现对远场图像的高分辨率在线取样.空间滤波器小孔面通过导光反射镜的漏光,通过扩束系统成像到 CCD 中,通过对 CCD 上光斑位置及形状的分析判断实现光路快速准直<sup>[11]</sup>.

## 2 光斑形状分析

### 2.1 光斑提取与分析

激光光束非垂直入射到 CCD 像面上时,会在 CCD 像面上形成一个椭圆光斑,因此激光光束的指向精度可以通过 CCD 像面上光斑的椭圆化程度来衡量,椭圆光斑的长短轴差值越大,则表明光束的指向精度越低,其长短轴越接近,则表明光束的指向精度越高.结合图 3 进行定量分析,假设椭圆中心点坐标为 $(x_s, y_s)$ ,长轴长度为 $2a$ ,短轴长度为 $2b$ ,激光光束入射角度的偏差与椭圆光斑的长轴和短轴长度之差相关,而 CCD 像面上的椭圆光斑有曲线方程和几何图形两种表达方式.

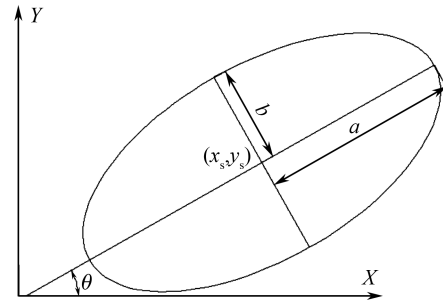


图 3 二维平面坐标系中的椭圆光斑  
Fig.3 Two-dimensional plane coordinate system of elliptic spot

椭圆光斑曲线方程的一般形式为

$$F(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = \mathbf{H} \cdot \mathbf{m} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{H} = [A \ B \ C \ D \ E \ F]$ ,  $\mathbf{m} = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ , 平面内的任何椭圆都可以用  $\mathbf{H}$  表示,且  $\mathbf{H}$  中的参数对应的几何意义,可以由式(2) ~ (5) 转化

$$x_s = \frac{B \cdot E - 2C \cdot D}{4A \cdot C - B^2} \quad (2)$$

$$y_s = \frac{B \cdot D - 2A \cdot E}{4A \cdot C - B^2} \quad (3)$$

$$a = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A + C - \sqrt{B^2 - \left(\frac{A - C}{F}\right)^2}}} \quad (4)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{-2F}{A + C + \sqrt{B^2 - \left(\frac{A - C}{F}\right)^2}}} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A - C} \quad (6)$$

因此可将图像处理问题转化为求椭圆参量  $\mathbf{H}$  的问题.

### 2.2 最小二乘法拟合椭圆

为了获得光斑的偏差信息,需要对椭圆光斑进行拟合分析<sup>[12-13]</sup>.常用的椭圆拟合算法主要有两大类,一种是聚类算法,例如 hough 变换,另一类就是基于最小二乘法的算法.其中最小二乘法是在随机误差为正态分布时,由最大似然法推出的一个最优估计方法,它可以使得测量误差的平方和最小,因此也被认为是从一组测量数据中求出未知量的最可信赖方法之一<sup>[14]</sup>.

假设从图像提取出了  $N$  个点 $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2 \dots N$ , 则基于最小二乘法的目标函数为

$$G = \sum_{i=1}^N (\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}_i)^2 \quad (7)$$

式中  $\mathbf{m}_i = [x_i^2 \ x_i y_i \ y_i^2 \ x_i \ y_i \ 1]^T$ . 因此,得到关系

$$G = \sum_{i=1}^N \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{m}_i^T \cdot \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{H} = \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{H} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{S} = \mathbf{m}_i^T \cdot \mathbf{m}_i$ , 是一个  $6 \times 6$  的方阵.

为了保证所拟合的数据为一个椭圆元素, 式(1)需要同时满足  $4AC - B^2 \geq 0$ , 因此引入约束条件

$$4AC - B^2 = 1$$

写成矩阵的形式为

$$\mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H} = 1$$

式中

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

因此, 椭圆拟合问题转化为椭圆条件优化问题

$$\begin{cases} \min_H G = \min_H \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

为了求解带有约束条件的最优化问题, 引入拉格朗日乘数  $\lambda$ , 并定义拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{H}, \lambda) = \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{H} - \lambda(\mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H} - 1) \quad (10)$$

式(10)取得极值的条件是为

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\mathbf{H}, \lambda)}{\partial \mathbf{H}} = 0 \\ \frac{\partial L(\mathbf{H}, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

即

$$\begin{cases} \mathbf{S} \mathbf{H} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{H} \\ \mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

则

$$\min_H G = \min_H \mathbf{H}^T \mathbf{S} \mathbf{H} = \min_H \mathbf{H}^T \lambda \mathbf{C} \mathbf{H} = \min_H \lambda \mathbf{H}^T \mathbf{C} \mathbf{H} = \min_H \lambda \quad (13)$$

同时, 由于  $\mathbf{S} = \mathbf{m}_i^T \cdot \mathbf{m}_i$  是一个  $6 \times 6$  的正定方阵, 式(12) 第一个方程式两边都左乘  $\mathbf{S}^{-1}$ , 得到

$$\frac{1}{\lambda} \mathbf{H} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{H} = \mathbf{X} \mathbf{H} \quad (14)$$

即  $\mathbf{H}$  为矩阵  $\mathbf{H} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}$  最大特征值  $1/\lambda$  对应的特征向量.

于是最小二乘法最优解问题转化为求解矩阵  $\mathbf{X} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}$  最大特征值  $\lambda^{-1}$  对应的特征向量  $\mathbf{H}$  问题, 然后通过式(2) ~ (6) 得到椭圆的半长轴  $a$ 、半短轴  $b$  和长轴倾角  $\theta$  等几何信息.

### 2.3 反馈控制算法

激光光束的倾斜角与椭圆光斑长短轴的关系以及反射镜调整量与椭圆光斑几何信息的关系是反馈控制部分最关键的因素, 它们共同决定步进电机在反馈控制过程中的调节量<sup>[15-16]</sup>.

#### 2.3.1 激光光束倾斜角与椭圆长短轴的关系

图 4 为三维坐标中的椭圆光斑示意图. 激光光束以入射角  $\beta$  入射到 CCD 像面上, 并在 CCD 像面上形成了半长轴为  $a$ , 半短轴为  $b$  的椭圆光斑.

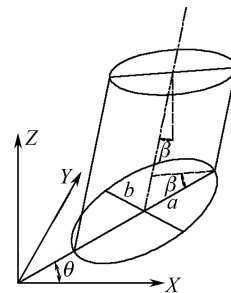


图 4 三维平面坐标系中的椭圆光斑  
Fig.4 Three-dimensional plane coordinate system of elliptic spot

由几何关系可得

$$\cos \beta = b/a \quad (15)$$

### 2.3.2 反射镜调整量与椭圆几何量的关系

假设 CCD 像面上椭圆光斑长轴与 X 轴的夹角为  $\theta$ , 则有几何关系可得, 激光光束在 X、Y 方向上的倾斜角度分别为

$$\begin{aligned} \beta_x &= \beta \cdot \cos \theta = \arccos(b/a) \cdot \cos \theta \\ \beta_y &= \beta \cdot \sin \theta = \arccos(b/a) \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

光栅方程的普遍形式为

$$d(\sin \varphi \pm \sin \gamma) = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (16)$$

式中,  $\varphi$  为入射角,  $\gamma$  为衍射角.

当激光光束分别以  $\varphi_1, \varphi_2$  入射到衍射光栅上时,  $\gamma_1, \gamma_2$  分别为对应的衍射角, 则由光栅方程可得

$$\sin \varphi_1 + \sin \gamma_1 = \sin \varphi_2 + \sin \gamma_2$$

当角度很小时, 有

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \gamma_1 - \gamma_2$$

即

$$\Delta \varphi = \Delta \gamma \quad (17)$$

式(17)表明, 衍射光角度的微小变化等于入射光角度的微小变化, 所以反射镜对应的调整量也等于 CCD 像面上激光光束的角度倾斜量. 即

$$\begin{aligned} d_x &= \arccos(b/a) \cdot \cos \theta \\ d_y &= \arccos(b/a) \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

式中,  $d_x, d_y$  分别为反射镜需要调节的角度值.

## 3 结果及数据分析

图 5 为椭圆光斑的图像处理的流程. 首先采用自适应阈值二值化方法对原光斑进行识别处理, 处理结果如图 5(b), 然后通过 Canny 算子提取图像边缘信息<sup>[17]</sup>, 处理结果如图 5(c), 最后根据提取到的边缘图像利用最小二乘法拟合出椭圆光斑, 处理结果如图 5(d). 利用得到的椭圆长短轴差值量作为步进电机闭环控制过程的输入量, 通过对近远场反射镜的控制实现对光束指向性偏差的调整, 实现对光束位置、指向的双定位.

图 6(a)为调整前系统远场图像, 图6(b)为基于反馈控制调整后的远场图像. 由图6可以看出系统光斑

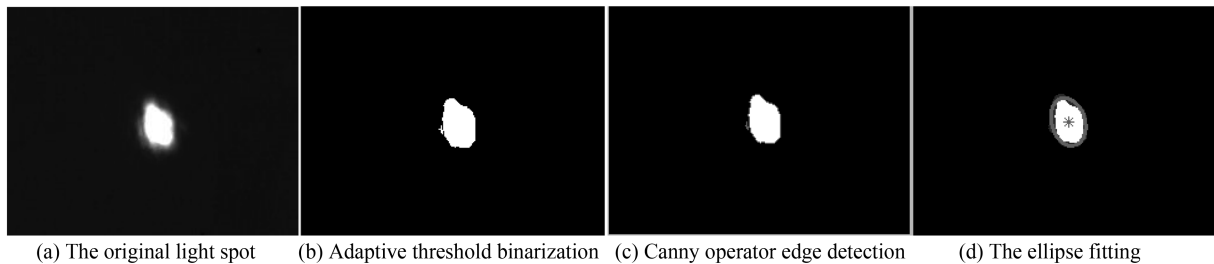


图 5 图像处理过程  
Fig.5 Image processing

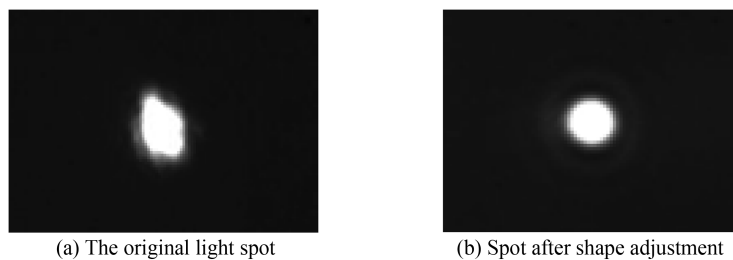


图 6 光斑处理过程  
Fig.6 Spot processing

经长短轴差值法处理后呈现出标准圆光斑,即光束不存在指向性误差,符合系统设计需求。

表 1 为原准直方案与本文方案的光斑中心误差对比,由表 1 可以看出采用本文的准直方案后远场光斑 X、Y 轴的准直误差均在一个像素范围内,小于原系统误差,提高了准直精度。

表 1 光斑中心误差对比

Table 1 Comparison of spot center error

|                                 | Actual value | Reference value | Error |
|---------------------------------|--------------|-----------------|-------|
| The original system far field X | 372.84       | 371.69          | -1.15 |
| The original system far field Y | 289.67       | 278.73          | -1.94 |
| This scheme far field X         | 370.74       | 371.69          | 0.95  |
| This scheme far field Y         | 279.17       | 278.73          | -0.44 |

图 7 为远场误差调整曲线,由图 7 可知:在准直系统中,远场 X、Y 轴准直误差均通过 5 次反馈调节收敛到一个像素内,在保证准直时间的同时大大提高了远场的准直精度。

在远场测量中,为了利用光束指向性及形状分析进行快速准直,并精确测量光束光斑的中心,需要用扩束系统把光斑像放大到与 CCD 光敏面孔径匹配的尺度,CCD 每个像素单元为  $8 \mu\text{m}$ ,系统空间滤波器中光栅到 CCD 焦面的距离为 0.5 m,远场的焦距为 4 m,前置扩束器的放大倍数为 16 倍.通过基于椭圆拟合的最小二乘算法可以计算出椭圆长短轴的像素值,然后根据式(6)、(15)~(17),利用三角函数关系式可计算出此方法光束远场的指向精度可达到  $0.033''$ .而原方法光束远场的指向精度为  $0.656''$ .因此采用此方法可以大大提升远场的指向精度,计算结果如表 2.

表 2 光束指向误差对比

Table 2 Comparison of light pointing error

|                     | Major axis of the spot ellipse/pixel | Minor axis of the spot ellipse/pixel | Pointing Error/arcsec |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| The original system | 18.91                                | 17.32                                | 0.656                 |
| The new system      | 17.35                                | 17.27                                | 0.033                 |

## 4 结论

在高功率激光装置自动准直系统中通过对光斑形状的分析,利用最小二乘法及长短轴差值法,以差值量作为步进电机闭环控制过程的输入量,通过对近远场反射镜的控制实现对光束指向性偏差的调整,实现光束的位置、指向双定位,为激光打靶的成功提供了保证,同时大大提高了远场准直精度.该方案在某高功率激光装置实验平台上进行了验证.实验结果表明,图像远场指向精度优于  $0.033''$ ,优于目前高功率激光准直系统准直效果,提高了激光光束的指向性精度。

### 参考文献

- [1] LIU Cheng-an, SHI Xue-ming. Introduction of american laser inertial fusion energy[J]. *Nucleus Physical Review*, 2013, **30**(1): 89-93.  
刘成安,师学明. 美国激光惯性约束聚变能源研究综述[J]. 原子核物理评论, 2013, **30**(1): 89-93.
- [2] FAN Dian-yuan, ZHANG Xiao-min. Laser fusion and high power lasers: history and progress[J]. *Physics*, 2010, **39**(9): 6,589-596.  
范滇元,张小民. 激光聚变与高功率激光:历史与进展[J]. 物理, 2010, **39**(9): 589-596.

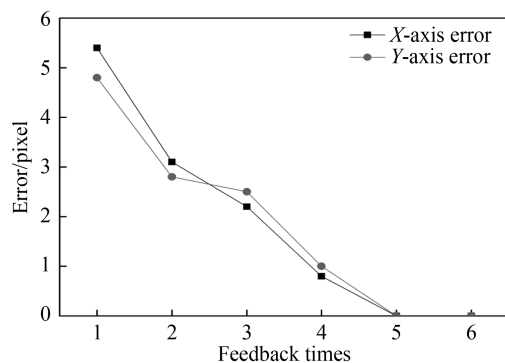


图 7 远场误差曲线

Fig.7 Far-field Error curve

- [3] LIU Dai-zhong, LIU Feng-nian, CAO Jin-zhou, *et al.* Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier.[J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, **4**(1): 96-99.  
刘代中,吕凤年,曹金洲,等. 基于像传递的多程放大器的激光光束准直系统的设计和应用[J]. *光学学报*, 2006, **4**(1): 96-99.
- [4] PENG Han-sheng, ZHANG Xiao-min, FAN Dian-yuan, *et al.* Status of high power solid state lasers and engineering science[J]. *Engineering Science*, 2001, **3**(3): 1-8.  
彭翰生,张小民,范滇元,等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. *中国科学工程*, 2001, **3**(3): 1-8.
- [5] WILHLELMSEN K C, AWWAL A, FERGUSON S W, *et al.* Automatic alignment system for the national ignition facility[C]. *International Conference on Accelerator and Large*, 2007.
- [6] SAYRE D B, BARBOSA F, CAGGIANO J A, *et al.* Calibration of scintillation-light filters for neutron time-of-flight spectrometers at the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific*, 2016, **87**: 11D802.
- [7] 刘芳. 高功率激光装置光束稳定性分析及改进[D]. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 2012.
- [8] WAXER L J, MAYWAR D N, KELLY J H, *et al.* High-energy petawatt capability for the omega laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, **16**(7): 30-36.
- [9] LIU Dai-zhong, XU Ren-feng, FAN Zhen-yuan. Study of cavity mirror alignment in muti-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.
- [10] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *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.
- [11] ZENG Pei-ying, LIU Dai-zhong, PENG Zeng-yun, *et al.* Research of auto-alignment system based on ethernet[J]. *Chinese Lasers*, 2014, **41**(3): 0302009.  
曾沛颖,刘代中,彭增云,等. 基于以太网的自动准直系统研究[J]. *中国激光*, 2014, **41**(3): 0302009.
- [12] AWWAL A, COHEN S, LOWE-WEBB R, *et al.* Alignment mask design and image processing for the advanced radiographic capability (arc) at the national facility[C]. SPIE International Symposium on Optical Engineering, 2015.
- [13] SPAETH M L, MANES K R, BOWERS M, *et al.* National ignition facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, **69**(1): 366-394.
- [14] LI Chun-cai, GONG Yan. Measurement of lens centering error based on joint transform correlator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10): 2785-2793.  
李春才,巩岩. 采用联合变换相关的透镜中心偏差测量[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10): 2785-2793.
- [15] LEACH R, BELTSAR I, BURKHART S, *et al.* Near field intensity trends of main laser alignment images in the National Ignition Facility (NIF)[J]. *High Power Lasers for Fusion Research III*, 2015.10.1117/12.2084006.
- [16] WEI Peng-fei, LIU Jun, LI Xiao-fang, *et al.* Design of beam real-time monitoring and adaptive collimation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1590-1595.  
尉鹏飞,刘军,李晓芳,等. 激光光束实时监测与自动准直系统设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1590-1595.
- [17] AO Lei, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen, *et al.* Fast and precise center location for circle target of CCD laser auto collimator [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **2**(27): 253-258.  
敖磊,谭久彬,崔继文,等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **2**(27): 253-258.