

doi:10.3788/gzxb20154402.0214002

高功率激光光束的自准直算法

许瑞华¹, 何俊华¹, 王伟¹, 王拯洲^{1,2}, 张志军¹, 赵娟宁², 马彩文¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:为满足高功率激光装置全程光路自动准直快速性及高精度的要求,提出了一种光斑对应椭圆的长短轴差值法对光斑形状调节,并结合重心法快速、高精度的获取光斑图像中心位置.利用大律法、 3×3 邻域法及 8 向链码法对光斑图像进行处理,得到面积最大的光斑;分析最大光斑区域中心距,求出最大光斑对应椭圆的长短轴长,并根据长短轴差值调节光斑形状,至长短轴差值近似为零,获得形状最规则的光斑;分析形状最规则光斑的中心位置与其基准位置在 x 和 y 方向的偏差,并将该差值转为闭环控制的步进电机所需要调整的步数,实现激光光束的自准直.该算法应用在高功率激光装置中,结果表明,主放大光路的准直时间缩短为 15 min,近场准直的准确度优于 0.2%,远场指向准确度优于 $1 \mu\text{rad}$,满足高功率激光光束的准直要求.

关键词:自动准直;闭环控制;图像处理;长短轴差值法;光斑中心;高功率激光器;步进电机

中图分类号:TN242

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0214002-6

Automatic Alignment Algorithm of High-power Laser Beam

XU Rui-hua¹, HE Jun-hua¹, WANG Wei¹, WANG Zheng-zhou^{1,2},
ZHANG Zhi-jun¹, ZHAO Juan-ning², MA Cai-wen¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract: A quick and high-precision image center locating algorithm based on the difference between the corresponding ellipse's long and short axe method was proposed, to meeting the requirements for high precision and time-saving in real time beam automatic alignment process of the high power laser device. The maximum value of the spot's area is obtained by acting the Big Law Method, 3×3 Neighborhood Method and Eight-Neighborhood Method on the spot image in turn; Lengths of the long and the short axis are obtained by the analyzing the center distance of the maximum spot, and adjust the spot shape by the deviation of the ellipse's long and short axe until to the deviation approach to zero; Through analysis the deviation between the actual spot center and the corresponding reference position, the adjusting steps of stepping motor controlled by the closed-loop control method is obtained, and the automatic alignment is realized. This algorithm is verified in the high-power laser device, the experiment results shows that the alignment time of the main amplification of the optical path is shortened to 15 min, the near-field alignment accuracy is better than 0.2%, and the far-field pointing accuracy is better than $1 \mu\text{rad}$, all of them meet the alignment requirements of the high-power laser device.

Key words: Automatic alignment; Closed-loop control; Image processing; Difference method between the long and short axis; Spot center; High power laser; Stepping motor

OCIS Codes: 140.3295; 110.2960; 100.2000; 120.4820

基金项目:国家自然科学基金(No. 61275134)资助

第一作者:许瑞华(1977-),女,工程师,博士,主要研究方向为通信及信息处理. Email: xuruihua@opt.ac.cn

收稿日期:2013-12-29; 录用日期:2014-08-27

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

0 引言

高功率激光驱动器是惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)装置中最重要、最复杂的激光系统,光路总长达 100 多米,包含有大量的激光器件、光学元件、光学组件、调整机构及支撑机构,结构极其复杂.为了确保每次运行时振荡器发出的光束稳定、准确地穿过整个光路,并精确地照射到靶场的微型靶丸中心点,快速、准确的光路自动准直过程是激光装置的关键环节^[1].光束自动准直是对采集的光斑图像进行一定的算法处理,计算光斑中心位置以获得光束实际位置与基准位置偏差,通过伺服控制系统调整光路中相应的反射镜,使光束调整在光路可允许的误差范围内^[2-3].在该过程中有两个关键点:1)激光光束真实中心位置的获取.只有高精度地获得图像光斑中心位置,才能为反射镜的调整提供准确数据,提高自准直的精度.2)电机控制策略的选择.合理的电机控制策略,在提高控制精度的同时也可以大大缩短准直的时间^[4-6].

传统的光斑中心检测算法有重心法^[7]、中值法^[8]、Hough 变换法^[9]及圆拟合算法^[10],前两种算法要求激光光斑分布比较均匀,第三种算法所用时间较多,而且精度也不高,最后一种算法则要求光斑的边缘连续性好.由于在光束的自准直过程中采集的光斑图像分布不均匀、边缘不完整且形状也在不断的变化,特别是远场光斑上述特点更加明显,所以上述算法在远场光斑中心获取中都存在一定弊端.本文针对高功率激光驱动器自动准直环节中所采集的光斑图像不规则且形状不断变化的特点,提出了以光斑图像对应椭圆的长短轴差值作为反馈信息的光路自准直方法,该方法可以实现对非均匀异形光斑重心的精确定位,大大提高了自准直的精度和速度.

1 光束自动准直的原理

高功率装置中光路准直是通过调整伺服反射镜来校正光束方向,每两块反射镜调整一段光轴.光束近场图像反映光斑的实际位置信息,远场图像反映光束的方向信息,在原始光路中取近场中心点和远场中心点作为光轴的两个基准点.根据 CCD 采集到的近远场光斑图像,并对其处理得到近、远场图像的实际光斑中心与基准位置的偏差.步进电机根据这一偏差驱动调节反射镜使其在俯仰和水平两个方向上做出相应的调整,最终将激光束调整到准直位置.

自准直控制流程由五部分组成,即光束取样、图像采集、图像处理、伺服反射镜及计算机控制系统,如图1.

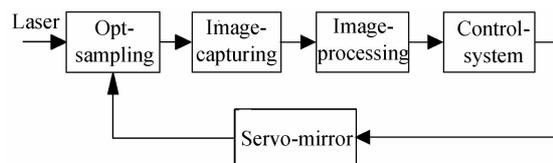


图1 准直系统闭环反馈控制流程图

Fig. 1 The flowchart of closed-loop feedback control for alignment system

图2为本文中高功率激光驱动器准直示意图. PA_{1-1} 小孔和 PA_{1-2} 小孔对称分布并共轭成像,在取样镜 IM_0 后设置近场监测点 $NFCCD_{12}$,在 BM_1 后设置远场监测点 $FFCCD_{12}$.远场接收点是 PA_{1-2} 小孔,它的中心为远场基准点.由于小孔 PA_{1-1} 和 PA_{1-2} 共轭成像,所以小孔 PA_{1-1} 的像将依次传递到 $FFCCD_{12}$ 的监测面上,利用上述像传递关系,在准直一、二程光路前,调整好腔镜 CM ,检测近、远场与其对应基准点的误差信号,由计算机控制反射镜 IM_0 和 IM_1 转动,使光束准确的穿过小孔 PA_{1-1} 和 PA_{1-2} ,即可完成一、二程光路的准直.

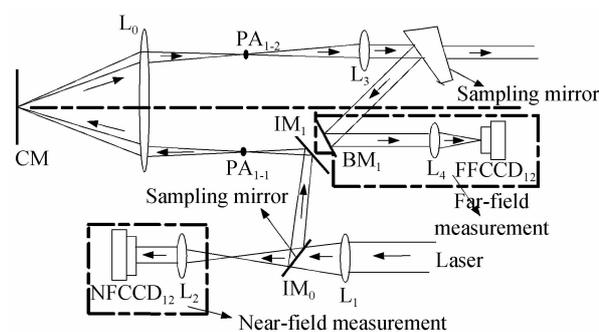


图2 一、二程光路准直示意图

Fig. 2 Schematic plan of the one-pass and two-pass beams alignment

自准直过程分为两大步骤,一是利用初始光斑对应椭圆的长短轴差值作为反馈信息,调整光斑形状到最规则;二是利用上一步得到的形状最规则光斑的中心位置与其基准位置差控制电机进行自准直调节.在第一步中,采用椭圆长短轴差值作为反馈信息进行光斑的调节,避免了以光斑面积和长短轴之比作为反馈信息调节时的缺点(如二维电机不能同时动作、移动的方向不确定及自准直的闭环震荡等),在准直过程中不仅可以同时动作二维电机,而且避免了长短轴近似相等时闭环震荡的问题,提高了准直速度及精度^[11].在第二步中,利用上一步调整得到的形状最规则光斑,通过重心法求出中心位置,由于经过调整后图像形状规则,所以求出的中心位置精度更高,为伺服电机的运动提供更精确的数据,所以准直精度也较高.在远场自准直过程中,通过上述两步的反复运行,能够满足快速、准确的自准直要求.

在准直中精确获得光斑实际中心位置是整个过程的核心,只有这样才能为闭环控制提供精确的数据,自准直的精度才有保障.

2 近、远场光斑中心获取

2.1 近场光斑中心获取

由于试验中近场图像形状最规则,如图 3(a),所以对近场图像直接利用重心法计算实际的光斑中心位置,通过与其基准位置的比较,得到偏差,进而控制相应的伺服反射镜电机运动,实现近场自准直.

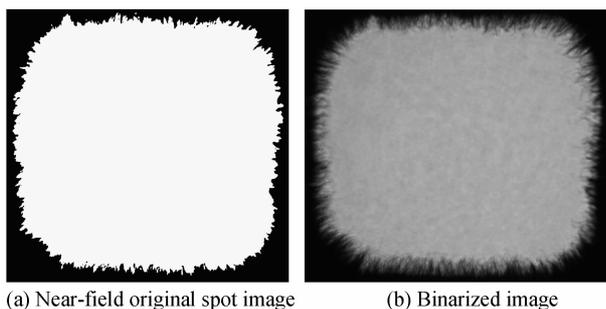


图 3 近场光斑原始图像

Fig. 3 Near-field original spot image

重心法是将激光光斑图像处理为 256 级的灰度图像,然后求出光斑中心.假设图像的尺寸为 $M \times N$ 像素, $f(i, j)$ 代表第 i 行第 j 列像素点的灰度值,则光斑重心表示为

$$X = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i \cdot f(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N j \cdot f(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)} \quad (2)$$

对图 3(a)的光斑图像进行阈值处理后得到二值化图像,如图 3(b) ($M=544, N=523$),则其灰度表示为

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, & (\text{光斑区}) \\ 0, & (\text{背景区}) \end{cases} \quad (3)$$

因为光斑比较均匀,所以采用重心法得到的光斑中心为

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{544} \sum_{j=1}^{523} i \cdot f(i, j)}{\sum_{i=1}^{544} \sum_{j=1}^{523} f(i, j)} = 489.50$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{544} \sum_{j=1}^{523} j \cdot f(i, j)}{\sum_{i=1}^{544} \sum_{j=1}^{523} f(i, j)} = 518.20$$

该方法要求光斑分布比较均匀,且对称性好,否则会产生较大的误差,且鲁棒性较差.

2.2 远场光斑中心获取

由图 2 可知,由于远场 CCD 采集的图像为小孔 PA_{1-1} 的图像,因为衍射等原因远场图像可能不均匀、边缘不完整或者形状不断变化.传统的光斑中心计算

方法不能满足使用要求,所以对远场的准直采用本文提出的方法,即先调整光斑到形状最规则,然后求取光斑中心,并与基准中心位置比较,将其差值作为反馈信息,控制伺服电机运动并实现自准直.

在二值化图像中对于任何一个光斑都能够根据其面积、重心和二阶矩来计算与它对应的椭圆参量.光斑和椭圆越相似,其参量一致性越好.

图 4 为一个空间位置任意的随机椭圆,设椭圆横

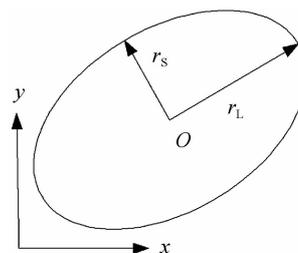


图 4 椭圆参量图

Fig. 4 The ellipse parameters

坐标为 x 、纵坐标为 y ,椭圆中心 O 的坐标为 (x_0, y_0) .则椭圆的方程表示为

$$\begin{Bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{B} \cdot \begin{Bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{Bmatrix}^T = 1 \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} D(x) & \text{COV}(x, y) \\ \text{COV}(x, y) & D(y) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $D(x)$ 、 $\text{COV}(x, y)$ 、 $D(y)$ 为椭圆区域所有点的横坐标方差、协方差和纵坐标方差.

则椭圆的二阶矩、二阶列矩、二阶混合矩分别为

$$\mu_{(2,0)} = \frac{D(x)}{4[D(x)D(y) - \text{COV}(x, y)^2]} \quad (6)$$

$$\mu_{(0,2)} = \frac{D(y)}{4[D(x)D(y) - \text{COV}(x, y)^2]} \quad (7)$$

$$\mu_{(1,1)} = \frac{-\text{COV}(x, y)}{4[D(x)D(y) - \text{COV}(x, y)^2]} \quad (8)$$

椭圆的长、短轴分别为

$$r_L = \sqrt{2(\mu_{(2,0)} + \mu_{(0,2)}) + \sqrt{(\mu_{(2,0)} - \mu_{(0,2)})^2 + 4\mu_{(1,1)}^2}} \quad (9)$$

$$r_s = \sqrt{2(\mu_{(2,0)} + \mu_{(0,2)}) - \sqrt{(\mu_{(2,0)} - \mu_{(0,2)})^2 + 4\mu_{(1,1)}^2}} \quad (10)$$

设图 5 为任意的非规则光斑区域,区域面积为 S ,



图 5 任意形状光斑

Fig. 5 Arbitrary shape spot

区域内像素点数为 N , 且像素的尺寸为单位 1, 则有

$$S = |N| = \sum_{x \in R} \sum_{y \in R} 1 \quad (11)$$

对图像做二值化处理后, 其重心为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{S} \sum_{x \in R} x \\ \bar{y} = \frac{1}{S} \sum_{y \in R} y \end{cases} \quad (12)$$

则光斑的 (p, q) 阶中心距 $\mu_{(p, q)}$ 为

$$\mu_{(p, q)} = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in R} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q \quad (13)$$

由式(13)可得任意光斑的二阶矩 $\mu_{(2, 0)}$ 、 $\mu_{(0, 2)}$ 、 $\mu_{(1, 1)}$, 因为对于任意的非规则光斑根据其面积、重心和二阶矩都有一个椭圆与其对应^[16-17], 所以通过式(9)和(10), 即可获得任意光斑对应的椭圆长短轴 r_L 和 r_S .

图 6(a) 为采集到的远场原始光斑图像, 为求出最规则光斑中心, 具体的算法步骤为

- 1) 采用大律法对远场图像进行二值化, 光斑区域记为 R , 如图 6(b).
- 2) 采用 3×3 邻域法, 反复进行开、闭运算, 形成一系列联通域^[12-13], 如图 6(c).
- 3) 采用 8 向链码分别对图 6(c) 进行边界跟踪, 搜索一系列的非联通域, 选出面积最大的区域 R_m 作为光斑的有效区域, 如图 6(d).

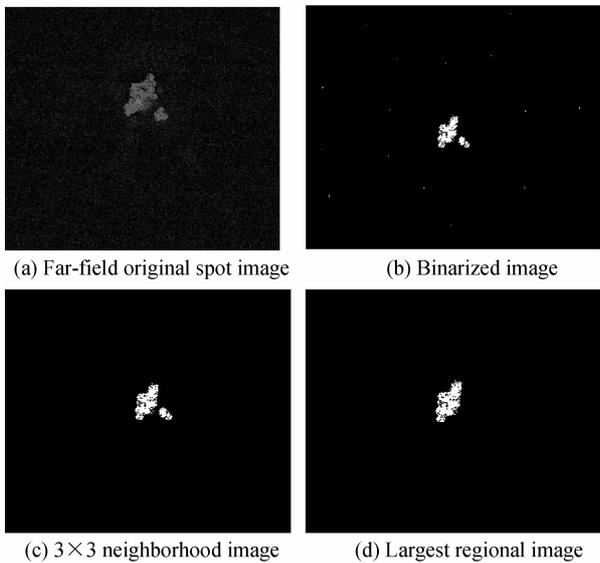


图 6 远场光斑及图像处理过程

Fig. 6 Far-field spot and image processing

4) 分别求出面积最大光斑对应椭圆的长轴 r_L 、短轴 r_S 及其差值 Δ_1 , 如图 7(a).

由式(11)计算区域 R_m 的面积(像素数)为

$$S = |N| = \sum_{(x, y) \in R_m} 1 = 846$$

式中心 (\bar{x}, \bar{y}) 为

$$\bar{x} = \frac{1}{S} \sum_{x \in R_m} x = 360.92$$

$$\bar{y} = \frac{1}{S} \sum_{y \in R_m} y = 364.46$$

由式(13)知

$$\mu_{(2, 0)} = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in R} (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^0 = 254.6502$$

$$\mu_{(0, 2)} = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in R} (x - \bar{x})^0 (y - \bar{y})^2 = 162.9607$$

$$\mu_{(1, 1)} = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in R} (x - \bar{x})^1 (y - \bar{y})^1 = 123.7804$$

则由式(9)、(10)知, 光斑区域 R_m 对应的椭圆长短轴半径为

$$r_L = 36.9217, r_S = 17.5280$$

长短轴差值为

$$\Delta_1 = r_L - r_S = 19.3937$$

5) 将长短轴差值 Δ_1 按照一定的模型转化为步进电机需要移动的步数^[14-15], 控制电机运动, 如果 Δ_1 变小, 电机继续按照原来方向移动, 否则以电机运动的总步数作为基数进行黄金分割运算得到需要运动的步数后进行反向电机运动, 反复该过程, 直至 $\Delta_1 \approx 0$, 则停止调节, 得到形状最规则的光斑, 然后采用重心法求出形状最规则光斑中心 $(x_r = 357.12, y_r = 367.53)$, 如图 7(b).

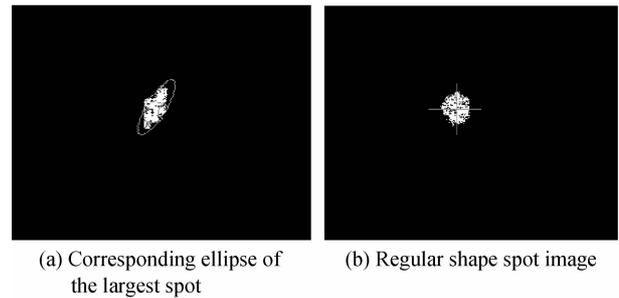


图 7 对应的椭圆及最规则光斑

Fig. 7 Corresponding ellipse and regular shape spot image

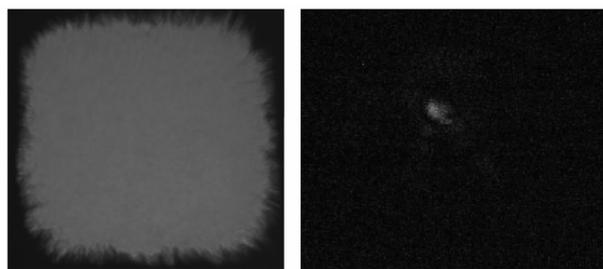
3 自准直过程分析

在光斑自动准直中, 以光斑面积作为反馈信号, 二维电机不能同时动作, 并且在自准直过程中由于方向的不准确, 闭环收敛速度较慢, 不能满足快速准直收敛的要求. 若以光斑长短轴之比作为反馈信号, 在长短轴差值较大时, 收敛速度较快, 但随着长短轴之比接近于 1, 反馈信号变化不再敏感, 收敛速度变慢, 一个微小的扰动就会导致闭环过程的震荡, 甚至收敛失败.

本文以长、短轴差值作为反馈信号, 这样不仅解决了反馈信号变化不敏感的问题, x 、 y 轴的差值正好对应二维驱动的步进电机, 可以使二维电机运行的反馈信号互不影响, 实现二维电机的同时调节, 不仅提高了步进电机的控制精度, 而且也大大缩短了准直时间.

4 结果及数据分析

图 8(a)、(b) 分别为另外采集到的一组近场和远场光斑原始图像.



(a) Near-field original spot image (b) Far-field original spot image

图8 近、远场光斑原始图像

Fig. 8 Near-field and Far-field original spot image

表1为图3和图8(a)所示的近场图像的标定中心位置与重心法获得的光斑中心位置误差(单位:像素)。

表1 近场图像标定中心与重心法获得光斑中心误差

Table 1 The spot center error between the calibration center and center of gravity method

Object	Actual value	Calibration value	Error
Fig. 3	489.57, 518.23	489.0, 517.5	0.57, 0.73
Fig. 8(a)	507.62, 526.31	506.95, 527.24	0.67, -0.93

表2为图6(a)和图8(b)所示的两组远场光斑采用本文方法和传统的重心法、圆拟合法获得的远场光斑中心位置与标定中心位置的误差。

表2 本文方法和重心法、圆拟合法获得光斑中心误差比较
Table 2 The spot center error comparison among the article method, the gravity method and the circle fitting method

Object	Method	Actual center	Calibration center	Error	
Fig. 6(a)	1	349.51,		-8.49,	
		351.25		-15.55	
		363.21,	358.00,	5.21,	
	2	360.56	366.80	-6.24	
		3	357.12,		-0.88,
			367.53		0.73
Fig. 8(b)	1	382.72,		-6.28,	
		368.25		-14.55	
	2	394.61,	389.00,	5.61,	
		376.25	382.80	-6.55	
	3	388.17,		-0.83,	
		383.39		0.59	

注:1;The gravity method;2;The circle fitting method;3;The proposed method

图9是近、远场的位置偏差分别由(34.28, 45.94)、(58.25, 86.30)准直到2个像素误差范围的曲线图。

从表1、表2可以看出,对于近场图像直接采用重心法计算光斑中心,其误差在1个像素以内,满足精度要求;对远场光斑通过本文方法求出的光斑中心误差在1个像素之内,远远小于直接对原始光斑采用重心法和圆拟合法求出的光斑中心误差,这大大提高了自准直精度.结合闭环控制原理,在自动准直过程中,近、

远场图像能够在5次左右稳定地收敛到2个像素的范围,如图9。

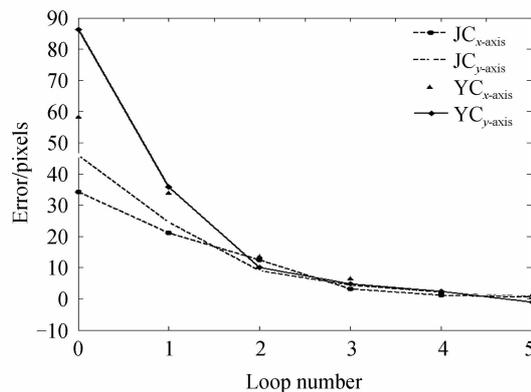


图9 近、远场自准直误差曲线

Fig. 9 Error curve of alignment

5 结论

在高功率主机装置自动准直系统中,结合光斑长短轴差值法和重心法,得到光斑中点位置与基准位置的精确偏差,作为步进电机闭环控制的输入量,对两个伺服反射镜方位、俯仰进行调整,减少了闭环调整的次数,缩短了调整时间.该自动准直算法使主放大系统全部光路的自准直时间由原来的20 min缩短到15 min,光路近场准直的精确度和远场指向的精度分别提高到0.2%和1 μrad.

参考文献

- [1] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, et al. Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6): 065204-1-065204-4. 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): 065204-1-065204-4.
- [2] LÜ Feng-nian, LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, 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.
- [3] LIU Dai-zhong, ZHU Jian-qiang, XU Ren-fang, 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.
- [4] ZHAO Yi-yan. The study of auto-focus based on the intelligent control of stepping-motor[D]. Taiyuan University of Technology, 2008. 赵轶彦.步进电机的智能控制在自动聚焦中的应用研究[D].太原理工大学,2008.
- [5] ZHANG Tao. Fast positioning study for stepping motor[D]. North China University of Technology, 2012. 张涛.步进电机的快速定位方法研究[D].北方工业大学,2012.
- [6] WENG Fu-da, ZHOU Qi-hua. High-accuracy control method on the stepping motor closed-loop servo control system[J]. *Guidance & Fuze*, 2013, **34**(1): 13-17. 翁孚达,周起华.步进电机闭环伺服系统的高精度控制[J]. *制导与引信*, 2013, **34**(1): 13-17.

- [7] IE Y, LONG X. CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(3): 1362-1365.
- [8] ZHANG Yu-jin. Image project (media), image analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 222-223.
- [9] YANG Yao-quan, SHI Ren, YU Xi-ning, *et al.* An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on hough transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1655-1660.
杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1655-1660.
- [10] KONG Bing, WANG Zhao, TIAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *The Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 275-279.
孙兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 275-279.
- [11] ZHOU Wei, HU Dong-xia, ZHAO Jun-pu, *et al.* Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. *Chinese Journal of 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.
- [12] AO Lei, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen, *et al.* Precise center location Algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6): 668-673.
敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(6): 668-673.
- [13] GONZALEZ C, WOODS R E. Digital image processing, Second edition [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [14] DA Zheng-shang, LI Dong-jian, 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速度模型研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2534-2538.
- [15] XIE Yue, TANG Zhong, GUO Zhong-ping. 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, 魏仲平. 光路自动准直中腔镜及反射镜控制算法[J]. *信息与电子工程*, 2010, **8**(1): 111-113.
- [16] FAN Hong-shen, NI Guo-qiang, SHEN Hui-tang. Using ellipse properties to find eyes in binary image[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(4): 307-309.
范宏深, 倪国强, 沈会堂. 用黑斑的椭圆性质在二值化图像中探测眼睛[J]. *光学技术*, 2001, **27**(4): 307-309.
- [17] ZHANG Hai-ou, YU Yang, WANG Gui-lan. Visualization of morphologic characteristics of power/liquid plasma spray jets[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **39**(1): 54-57.
张海鸥, 于洋, 王桂兰. 液相/粉末等离子射流形态特征可视化分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(1): 54-57.