

文章编号 1004-924X(2014)04-0822-07

## 衍射光栅非规则图像自适应调焦系统

王伟\*, 李东坚, 李红光, 王拯洲, 曹世康  
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要:**分析了大口径衍射光栅的焦斑特点,研究了衍射光栅非规则图像自适应调焦过程中出现的各种问题及处理方案。提出了适用于此类光栅非规则焦斑自适应调焦的控制技术和数据处理方法,并设计了一套自适应调焦装置用于离线检测衍射光栅的取样距离和取样角度。提出的方法用最优域值法将图像分割为焦斑和背景两部分,基于数学形态学求取光斑面积、以及长短轴长及图像中心。通过分析图像中心位置与水平电机的对应关系,以及长短轴长与轴向电机的对应关系,设计出自适应调焦方法。最后,结合面积最小化原则使用黄金分割算法进行对焦迭代和形心搜索。测试结果得到取样距离标准差为  $412.5 \mu\text{m}$ ,取样角度标准差为  $10.35''$ ,满足取样距离优于  $1\ 000 \mu\text{m}$ ,取样角度优于  $30''$ 的精度要求。该装置具有结构简单、可靠性高、抗干扰能力强等特点,已在大口径衍射光栅综合诊断平台上得到验证和应用。

**关键词:**衍射光栅;自适应调焦;非规则图像;图像分割;最优域值

**中图分类号:**O436.1;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0822

## Irregular image adaptive focusing system for diffraction grating

WANG Wei\*, LI Dong-jian, LI Hong-guang, WANG Zheng-zhou, CAO Shi-kang

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

\* Corresponding author, E-mail: gregwei@tom.com

**Abstract:** The characteristics of faculae for a larger diameter diffraction grating were analyzed, and different problems and their processing methods in self-adaptive auto-focusing of irregular images for the diffraction grating were discussed. A group of methods to control the auto-focusing of the irregular facula of the diffraction grating were proposed and a self-adaptive auto-focusing device were developed to achieve the offline detection of sampling distance and sampling angle for the diffraction grating. By optimizing threshold theory, the image was divided into two parts, facula area and background. On the basis of the mathematical morphology theory, the facula area, major and minor axis lengths and image center were calculated. Then, the adaptive focusing methods were implemented by analyzing the corresponding relationship between image center position and leveling motor, the lengths of major and minor axes and the axial motor. Finally, focusing iteration and centroid search were performed by combining the area minimization with the golden section algorithm. Test results show that the standard deviation of sampling distance is  $412.5 \mu\text{m}$  and that of sampling angle is  $10.35''$ , which meets the requirements for sampling distance and sampling angle less than  $1\ 000 \mu\text{m}$  and  $30''$ , respectively. This device is characterized by simple structure, high reliability, strong anti-in-

收稿日期:2013-08-12;修订日期:2013-10-07.

基金项目:国家重大专项

terference ability, and has been applied in a large aperture diffraction grating comprehensive diagnosis platform.

**Key words:** diffraction grating; adaptive focusing; irregular image; image segmentation; optimal threshold

## 1 引言

大口径衍射光栅是高功率激光装置的一个重要器件。取样距离和取样角度是该器件极为重要的两个参数,它们均由光栅的焦点位置决定<sup>[1-2]</sup>。由于光栅是衍射元件,在测量光栅的取样距离和取样角度时,所得的焦斑像差大、形状不规则,因此,准确获得焦点的位置对衍射光栅的参数测量至关重要。通常,非规则焦点的搜索是光学测试人员根据经验识别和定位焦斑的形状和位置的过程,但随着光束口径和路数的急剧增大,元器件数目成倍增长。为了减少人为主观误差,满足工程化的需要,需要设计出一套能够完全或者在很大程度上取代人工方式的自动化测量仪器,以提高大口径衍射光栅的检验效率,节省人力物力资源,实现数据的有序存储和自动分析。非规则图像自适应调焦装置的任务是将前后两次采集到的光斑图像偏差反馈给计算机控制系统,计算机控制系统将这个偏差解算为电机的运动方向及步数,同时驱动水平电机和轴向电机运动,直到光斑形态最佳。

目前,常用的非规则图像调焦方法有两种:一种是图形拟合法,首先将采集到的图像应用数学形态学等方法进行处理,然后用图形拟合算法将光斑边缘拟合为一个规则图形,将所得图形的中心作为焦斑中心。这种方法对于分布均匀且呈中心对称的规则焦斑非常有效,但对于实时变化着的非规则焦斑却不再适用<sup>[3]</sup>;另一种方法是选用光路上某个光学元件的几何中心作为一个参考点,以光路上空间滤波器的滤波小孔或十字叉的几何中心作为另一个参考点,以这两个参考点来进行对焦调节,该方法在许多光路准直系统中均有提及<sup>[4-6]</sup>,但其光路复杂,成本较高。本文详细分析了大口径衍射光栅的焦斑特点,并深入细致地研究了衍射光栅非规则图像自适应调焦过程中出现的各种问题及处理方案;研制出适用于大口径衍射光栅非规则焦斑自适应调焦的控制技术和数据处理方法,并设计了一套非规则光斑自适应调焦装置。

## 2 平台测量原理

大口径长焦反射镜综合诊断平台的主要功能是离线完成衍射光栅取样距离与取样角度等参数的测量。图1为衍射光栅焦点测量系统,将激光器置于 $O_1$ 处,光束从右向左传播,激光依次透过衍射光栅和汇聚透镜后入射到平面镜上,经平面镜反射后所得的平行光经过汇聚透镜和衍射光栅后衍射取样分开,对应参考光路和物光路。其中参考光路对应的汇聚点为 $O_1$ 衍射点;物光路对应的汇聚点为 $O_2$ 衍射点, $O_2$ 坐标为 $(d_1, d_2)$ 。根据图1,取样距离 $OO_2$ 为:

$$OO_2 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}. \quad (1)$$

由坐标关系可得取样角度 $\theta$ 为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_2}{d_1}\right). \quad (2)$$

通过精确测量 $O_2$ 点的位置获得参数 $d_1$ 和 $d_2$ ,再经计算即可实现取样距离和取样角度的测量。

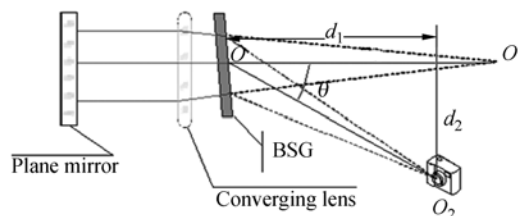


图1 长焦反射镜焦点测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of long focus reflector measuring system

衍射光栅本身的特点使光学系统中 $O_2$ 衍射点的光斑带有较大彗差,当CCD处于不同位置时,所得的焦斑形状会有不同,而且这类图像的亮度分布也很不均匀。人工判读这类不规则光斑会存在主观误差,而自动判读会大大减少人这种主观判断所带来的误差。非规则焦斑自适应调焦系统包括图像采集、数据处理、CCD位置调节以及伺服控制系统,通过计算机控制自动调节CCD位置来搜索衍射光栅的焦点,自动调焦过程如图2

所示。物光路的取样光斑成像到 CCD 上,计算机通过网络获得取样图像,经过图像处理技术获得光斑的中心坐标、长短轴长等参数,结合路径快速搜索算法解算出 CCD 水平电机与轴向电机应该移动的方向和步数。

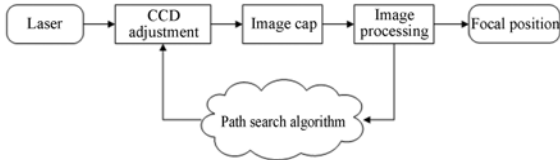


图 2 非规则光斑自适应调焦过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of irregular facula adaptive focusing process

### 3 衍射光栅非规则图像调焦方案

#### 3.1 非规则焦斑图像处理算法

在光学系统设计中,当焦斑的可调面积最小时,CCD 的中心位置被认定为焦点位置。由于质心法和形心法调节聚焦的效果都不理想,因此需要建立一套准确判定焦点位置的图像拟合算法;但由于整个自适应调焦过程中光斑形状在不断变化,建立出一套合适的拟合算法相当困难。

对于任意图像,区域的面积  $a$  就是区域内的点数  $|R|$ ,表示为:

$$a = |R| = \sum_{(r,c) \in R} 1. \quad (3)$$

若用非零像素表示区域,当  $p \geq 0, q \geq 0$  时,  $(p, q)$  阶矩被定义为:

$$m_{p,q} = \sum_{(r,c) \in R} r^p c^q f(r, c), \quad (4)$$

其中,  $r, c$  表示像素坐标,  $f(r, c)$  表示灰度。在二值情况下,  $m_{0,0}$  就是区域面积<sup>[7-8]</sup>。为了得到不依赖区域尺寸变化而变化的特征,当  $p+q \geq 1$  时,用式(4)除以式(3)可得归一化的矩阵:

$$n_{p,q} = \frac{1}{a} \sum_{(r,c) \in R} r^p c^q. \quad (5)$$

由式(5)可知,  $(n_{1,0}, n_{0,1})$  即为区域的重心。当  $p+q \geq 2$  时,可得不随图像中心位置变化的中心矩为:

$$\mu_{p,q} = \frac{1}{a} \sum_{(r,c) \in R} (r - n_{1,0})^p (c - n_{0,1})^q. \quad (6)$$

如图 3 所示,椭圆的长轴  $r_1$  和短轴  $r_2$  分别为:

$$r_1 = \sqrt{2(\mu_{2,0} + \mu_{0,2} + \sqrt{(\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2 + 4\mu_{1,1}^2})}, \quad (7)$$

$$r_2 = \sqrt{2(\mu_{2,0} + \mu_{0,2} - \sqrt{(\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2 + 4\mu_{1,1}^2})}. \quad (8)$$

通过椭圆参数得出各向异性  $r_1/r_2$ ,此特征量在区域缩放时将保持恒定不变<sup>[8]</sup>。

根据各同异性理论可知,当  $r_1/r_2 \approx 1$  且  $r_1, r_2$  可调长度最小时,焦斑面积最小,此时 CCD 的中心位置即为焦点位置。如果以长短轴之比作为反馈信号来进行聚焦调节,在调整初期能够快速聚焦,但在长短轴近似相等时,一个微小扰动就会导致闭环过程的振荡<sup>[9]</sup>。为了同时满足简化算法和准确判定焦点位置两个条件,本文根据长短轴之差来调节聚焦,即当长短轴之差趋于零且长短轴可调长度最小时,此时的位置即为聚焦的目标位置。

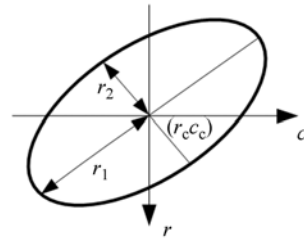


图 3 椭圆几何参数

Fig. 3 Geometrical parameters of ellipse

由于图像对比度的变化很大,在亮度直方图中噪声出现的频率和有效信号出现的频率用两个正态分布的概率密度函数来近似表示。选择焦斑和背景间灰度的最大变化来确定域值,其分割结果出现错误的像素数将最小<sup>[7]</sup>。用  $f(i, j)$  表示  $(i, j)$  点的灰度值,最优域值  $\delta$  的选择步骤为:

(1)以亮度值  $g$  为横坐标,亮度出现频率对数的 5 倍为纵坐标绘制亮度直方图,如图 4 所示。分析图 4 可知,有部分像素出现饱和,选择频率最大值对应的亮度值为  $T^1$ 。

(2)在第  $t$  步,分别计算焦斑和背景的均值  $\mu_0^t$  和  $\mu_b^t$ :

$$\mu_0^t = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{object}} f(i, j)}{\# \text{object\_pixels}}, \quad (9)$$

$$\mu_b^t = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{background}} f(i, j)}{\# \text{background\_pixels}}, \quad (10)$$

其中在第  $t$  步将图像分割为焦斑和背景的域值为  $T^t$ ,它在前一步确定(公式 11)。

(3)置:

$$T^{r+1} = \frac{\mu_0^r + \mu_B^r}{2} \quad (11)$$

(4) 如果  $T^r = T^{r+1}$  则停止计算,并令  $\delta = T^{r+1}$ ; 否则,返回步骤(2)。

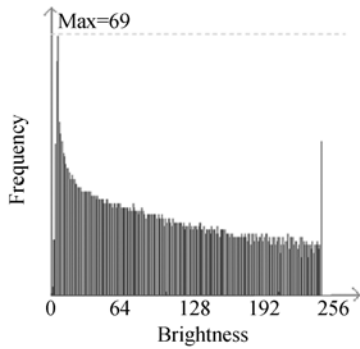


图 4 亮度直方图

Fig. 4 Brightness histogram



图 5 图像处理与分析

Fig. 5 Image processing and analysis

以  $\delta$  作为域值对图 5(a) 所示的原始图像进行域值处理,得到的二值图像如图 5(b) 所示,其函数可描述为:

$$f(g) = \begin{cases} 255, & g \geq \delta \\ 0, & g < \delta \end{cases} \quad (12)$$

将原始图像转化为二值图后,从原始图中分割出焦斑区域,记为 A;为使图像边缘平滑,用大小为  $3 \times 3$  的结构元素反复进行开、闭运算,从而

形成连通域<sup>[10-11]</sup>,记为 B,有:

$$B = C(O(A, g_{(3)}), g_{(3)}), \quad (13)$$

其中:C 表示闭运算,O 表示开运算, $g_{(3)}$  为大小为  $3 \times 3$  的结构元素。执行该公式完成开、闭运算后,得到一系列非联通区域,如图 5(c) 所示。

从左上方开始,利用 8 向链码对图 5(c) 中光斑进行边界跟踪,搜索到一系列非联通区域。将这些区域按照面积大小进行排序,形成链码表,选出面积最大的区域作为焦斑有效区域,如图 5(d) 所示。计算该区域的面积、长短轴长和形心位置即可获得用于 CCD 位置调整的形态数据。

### 3.2 自适应调焦控制

自适应调焦过程是将 CCD 采集到的光斑长短轴长以及中心位置的变化解算为水平方向与轴向电机需要运动的步数,并根据差值符号来确定运动方向<sup>[12]</sup>。图 6 为本文所采用的调焦装置,具体控制结构如图 7 所示。水平调节时,按照形心法计算当前的光斑中心,根据前后两次采集到的图像中心变化来调整电机的运动步数与方向,进行反复迭代,将像差为 3 个像素作为退出条件<sup>[13-15]</sup>。轴向调节时,根据光斑长短轴差的变化来驱动轴向电机运动,首先需要计算出当前图像的长短轴差,再以该值作为基准预设电机沿轴向移动的步数,如果长短轴差变小,电机继续按照原方向运动;否则,以电机运动的总步长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运动,反复进行迭代直到长短轴之差趋于零。由于在水平电机的调节过程中伴随着光斑形状的变化,轴向电机的调节会使得调整好的光斑中心脱离 CCD 的靶面中心。为了达到焦斑面积最小且图像尽可能位于 CCD 靶面中心,需迭代进行水

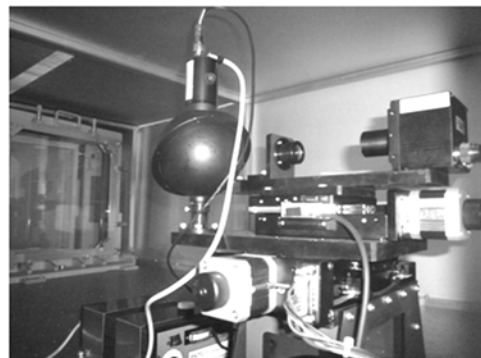


图 6 衍射光栅调焦装置

Fig. 6 Focusing device of diffraction grating

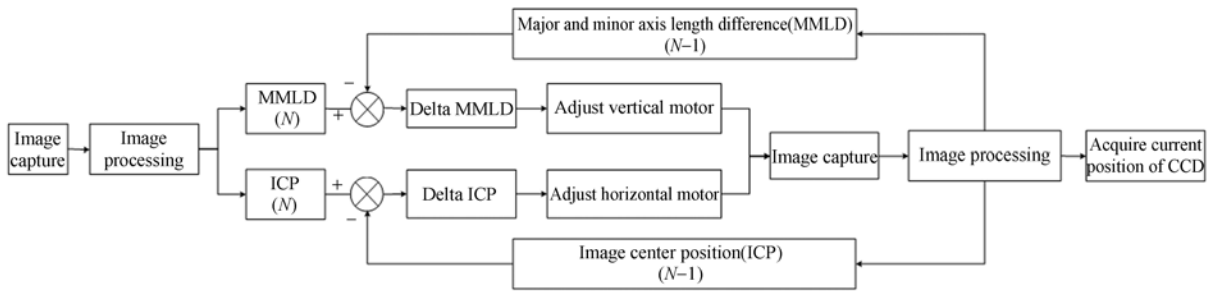


图 7 自适应调焦结构图

Fig. 7 Schematic diagram of automatic focusing system

平调节与轴向调节。调节结束后从光栅尺读取水平电机和轴向电机的绝对位移,计算可得取样距离和取样角度。

#### 4 实验结果

由式(1)、式(2)可知,取样距离与取样角度依赖于焦点的坐标位置。图 8 是衍射光栅自适应调焦过程的焦斑图像。为了验证取样距离与取样角度的有效性与复位精度,进行了 20 次自适应调焦

测试,测量结果如表 1 所示。图 9(a)和图 9(b)分别为取样距离和取样角度的分布曲线。取样率测量结果的标准偏差计算公式为:

$$S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (14)$$

式中:  $x$  为样本值,  $\bar{x}$  为样本平均值,  $n$  为样本个数。由表 1 及式(14)可得,取样距离的标准差为  $412.5 \mu\text{m}$ , 满足取样距离优于  $1\,000 \mu\text{m}$  的精度要求;取样角度的标准差为  $10.35''$ , 满足取样角度优于  $30''$  的精度要求。



(a)最初焦斑图像 (b)水平调节时的焦斑图像 (c)轴向调节时的焦点图像 (d)调节结束时的焦点图像  
(a) Initial focus image (b) Focus image during level adjustment (c) Focus image during axial adjustment (d) Focus image at end of adjustment

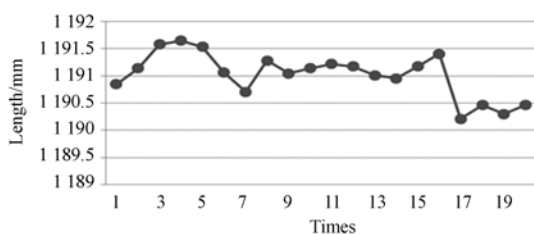
图 8 自适应调焦过程的焦斑图像

Fig. 8 Facula images in process of adaptive focusing

表 1 取样距离与取样角度

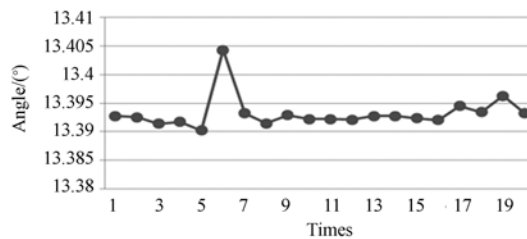
Tab. 1 Sampling distance and angle

Exp. No.	Dir. /mm	Ang. /( $^{\circ}$ )	Exp. No.	Dir. /mm	Ang. /( $^{\circ}$ )
1	1 190.849	13.392 72	11	1 191.219	13.392 18
2	1 191.143	13.392 51	12	1 191.178	13.392 10
3	1 191.580	13.391 41	13	1 191.011	13.392 72
4	1 191.648	13.391 73	14	1 190.957	13.392 72
5	1 191.538	13.390 21	15	1 191.174	13.392 37
6	1 191.065	13.404 25	16	1 191.409	13.392 03
7	1 190.709	13.393 21	17	1 190.212	13.394 49
8	1 191.283	13.391 45	18	1 190.467	13.393 44
9	1 191.047	13.392 87	19	1 190.300	13.396 26
10	1 191.144	13.392 22	20	1 190.466	13.393 27



(a) 取样距离测试记录

(a) Test records of sampling distances



(b) 取样角度测试记录

(b) Test records of sampling angles

图9 取样距离与取样角度测试结果

Fig.9 Test results of sampling distances and angles

## 5 结论

本文根据衍射光栅检测平台高精度、高效率的设计要求,提出了一种基于形心法与长短轴法的非规则焦斑自适应调焦方法,并完成了调焦系统的设计及长焦反射镜的取样距离和取样角度的

测量。实验结果表明:取样距离的标准差为  $412.5 \mu\text{m}$ ,取样角度的标准差为  $10.35''$ ,达到了衍射光栅综合诊断平台的设计要求。本方法具有较高的精确度和一致性,可作为各种衍射光栅非规则焦点离线位置判读的测试依据,并且已成功应用在某大口径衍射光栅综合诊断平台上。

## 参考文献:

- [1] HOLDENER F R, ABLES E, BLISS E S, *et al.*. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[J]. *SPIE*, 1997: 692-699.
- [2] 王大辉, 赵学庆, 张永生, 等. 电子束泵浦准分子激光放大器的双程光路自动准直[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1434-1439.  
WANG D H, ZHAO X Q, ZHANG Y SH, *et al.*. Automatic alignment of double paths in electron pumped excimer laser amplifier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1434-1439. (in Chinese)
- [3] KROHA H. Laser-alignment system with transparent silicon strip sensors and its application[J]. *Nuclear Physics B*, 1997, 53(3): 80-85.
- [4] 赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1472-1479.  
ZHAO H F, LIU H, SUN Q, *et al.*. Design of RIXR LED collimative system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1472-1479. (in Chinese)
- [5] BOEGE S J, BLISS E S, CHOCOL C J, *et al.*. NIF pointing and centering systems and target using a 351 nm laser source [J]. *SPIE*, 1997, 3047: 248-258.
- [6] 朱孝立, 陈军宁. 光电编码器 LED 光源的准直[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 750-756.  
ZHU X L, CHEN J N. Beam collimation of LED in optical encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 750-756. (in Chinese)
- [7] 艾海舟, 苏延超. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
AI H ZH, SU Y CH. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [8] 杨少荣, 吴迪靖, 段德山. 机器视觉算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
YANG SH Y, WU D J, DUAN D SH. *Machine Vision Algorithms and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 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.  
ZHOU W, HU D X, ZHAO J P, *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. (in Chinese)
- [10] SOILE P, JONES R. Recursive implementation of erosion and dilations along discrete lines at arbitrary angles [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*, 1996, 18(5): 562-567.
- [11] GONZALEZ C, WOODS R E. *Digital image processing*[M]. 2nd, ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [12] VAN ARSDALL P J, BRYANT R, CAREY R, *et al.*. The national ignition facility: status of the integrated computer control system[R]. CA: Lawrence Livermore Nation Laboratory, UCRL-ID-152832, 2003.
- [13] 方超, 向阳. 双光路成像干涉定心系统设计[J]. *光子学报*, 2012, 41(10): 1180-1185.  
FANG CH, XIANG Y. Design of centering system by using collimation and interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(10): 1180-1185. (in Chinese)
- [14] 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.  
LIU D ZH, ZHU J Q, XU R F, *et al.*. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 582-586. (in Chinese)
- [15] 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.  
WEI P F, LIU J, LI X F, *et al.*. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1590-1595. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 伟(1980—), 男, 陕西西安人, 硕士, 助理研究员, 2007 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 主要从事光学系统控制与信息处理方面的研究。E-mail: gregwei@tom.com



李东坚(1973—), 男, 陕西榆林人, 硕士, 副研究员, 1996 年于西安交通大学获得硕士学位, 主要从事强激光控制与信息处理方面的研究。E-mail: li-dongjian@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)