

文章编号: 0258-7025(2009)05-1086-05

# 光栅取样远场监测系统精度分析

高妍琦 刘代中 朱宝强 丁莉 彭增云 林尊琪

(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** 光束自动准直系统是高功率激光惯性约束聚变装置的重要子系统, 激光远场监测技术是光束自动准直系统的关键技术, 基于光栅取样的新型远场监测系统可以利用光栅衍射灵活取样激光远场。对影响光栅取样系统远场监测精度的主要因素进行了分析, 结果表明, 系统误差为小孔直径的 7.49%, 包括投影误差和斜成像误差; 随机误差小于小孔直径的 1%, 包括物像关系误差和衍射光耦合误差。

**关键词** 激光技术; 光束准直; 光栅取样; 远场准直

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1086

## Precision Analysis of New Far-Field Alignment System Using Grating Sampling

Gao Yanqi Liu Daizhong Zhu Baoqiang Ding Li Peng Zengyun Lin Zunqi

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

**Abstract** Beam automatic alignment system is an important sub-system used in high power laser inertial confinement facility for beam adjustment. Far-field alignment is a key technique of the automatic alignment system. Based on the character of diffraction grating, the new far-field alignment system can sample far-field flexibly. The main factors that affect the precision of the far-field detection system are analyzed. The result shows that the systemic error which includes projection error and aslant imaging error is 7.49% of the spatial filter pinhole, and stochastic error which includes object-image error and diffraction light suited error is less than 1% of the pinhole.

**Key words** laser technique; beam alignment; grating sampling; far-field alignment

### 1 引言

应用于惯性约束聚变的高功率激光装置是目前最大的一类激光器。激光惯性约束聚变的快速发展不仅对激光光束的能量提出了越来越高的要求, 而且对激光光束的质量提出了更为苛刻的要求<sup>[1,2]</sup>。这些要求使得此类激光器光路长度不断增加、光路数和器件数成倍增长, 这些变化对光路自动准直系统提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。远场取样技术是光路自动准直的关键技术之一, 原有取样技术一般采用光路中某块反射镜的漏光或者直接插入取样平板的方

法, 此类方法对成像系统的稳定性要求高, 占用空间巨大, 难以满足准直系统发展的要求<sup>[4~6]</sup>。光栅取样新型远场调整方案是利用光栅取样远场成像技术来实现光束指向(角移)的调整, 它可以挂靠在激光装置空间滤波器侧壁上, 使得光束准直系统空间排布更加灵活。为了提高新型远场监测系统的测量精度, 本文针对新型光栅取样远场监测方案, 分析了影响取样精度的主要因素: 投影误差、孔板厚度误差、斜成像误差、物像关系误差、衍射光耦合误差。结果表明: 投影误差、孔板厚度误差、斜成像误差均为系

收稿日期: 2008-05-09; 收到修改稿日期: 2008-08-08

基金项目: 国家 863 计划(2007SQ804)和中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究资助课题。

作者简介: 高妍琦(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高功率激光系统准直以及相关技术。

E-mail: liufeng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光惯性约束聚变、高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zqlin@fudan.sh.cn

统误差,可以通过系统标定加以消除;物像关系误差和衍射光耦合误差为随机误差,其精度影响小于1%的小孔直径。

## 2 准直系统原理

### 2.1 准直原理

光路自动准直的目的是调整光束的位置与方向

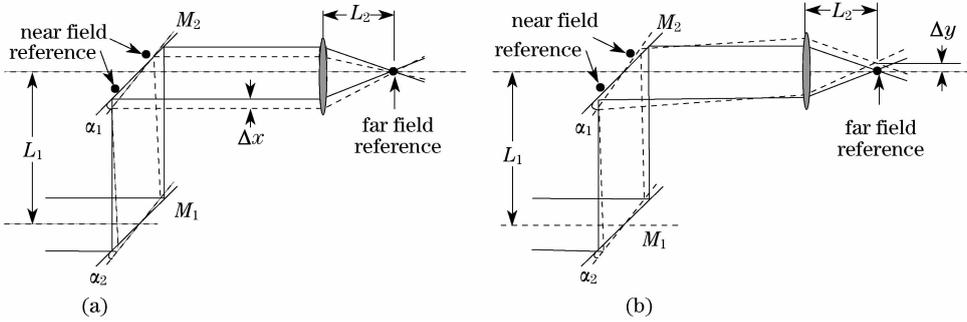


图1 准直调整原理。(a)近场调整;(b)远场调整

Fig. 1 Principle of alignment. (a) near-field reference adjustment; (b) far-field reference adjustment

### 2.2 光栅取样原理

光栅取样主要包含空间滤波器小孔的取样和光束焦斑的取样,其中空间滤波器小孔中心为远场基准。空间滤波器小孔的取样是利用发光二极管(LED)宽谱非相干平行光照明,小孔投影到光栅上,成像系统对光栅透射光的一级衍射光成像,再通过计算机图像处理获取光斑的中心位置,用这个中心位置来标记小孔中心,如图2所示。光束焦斑取样为:激光焦斑直接打在光栅上,利用光栅反射光的一级衍射光对焦斑成像,检测激光焦斑的中心。

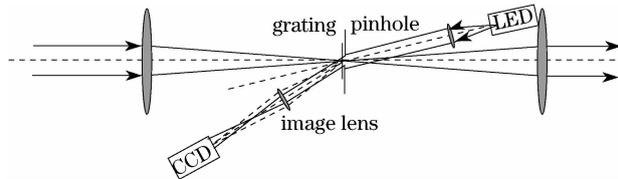


图2 光栅远场取样

Fig. 2 Far-field sampling with grating

光栅的衍射角计算公式为  $d_g(\sin \theta_i \pm \sin \theta_k) = K\lambda$ , 其中  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_k$  为衍射角,  $k$  为衍射级次<sup>[8]</sup>,  $d_g$  为栅距。可见当两束不同波长的光入射时,可以通过调整各自的入射角使两束光同一级衍射光方向重合。将照明光和激光的一级衍射光方向调整重合,就可以用同一个 CCD 探测到激光焦斑与小孔的图像,通过图像处理技术测出两者的中心位置。光栅取样的光路排布如图2所示,主激光正入射到光栅上,其一级衍射光的衍射角为:  $\theta_{k1} =$

使之达到激光装置的总体要求。根据两点确定一线的原理,对于每段光路,设置两个基准:近场基准和远场基准。通过调整反射镜  $M_1$ , 使光束的近场(位置信息)与近场基准重合,调整反射镜  $M_2$ , 使光束的远场(指向信息)与远场基准重合,就可以实现光束的位置与方向的调整<sup>[7]</sup>, 如图1所示。

$\arcsin\left(\frac{\lambda_1}{d_g}\right)$ , 其中  $\lambda_1$  为主激光的波长;照明光的入射角  $\theta_i$  可由公式  $d_g(\sin \theta_i - \sin \theta_{k2}) = K\lambda_2$  获得,其中  $\theta_{k2} = \theta_{k1}$ ,  $k = -1$ ,  $\lambda_2$  为照明光的中心波长。

## 3 新型远场准直系统

远场准直的目的是使光束的远场位置(即空间滤波器中的焦斑中心)与基准(空间滤波器小孔中心)相重合,调整过程是由光栅取样方法得到激光焦斑中心与小孔中心的误差值,通过误差反馈来控制调整反射镜  $M_2$  实现,如图3所示。具体过程如下:

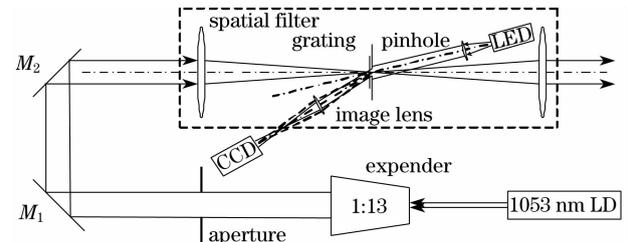


图3 远场准直系统

Fig. 3 Far-field alignment system

1) 获取小孔和焦斑图像。紧贴小孔板插入光栅,打开 LED 非相干照明光源,用平行光照明小孔,同时打开主激光,此时需满足照明光一级衍射光与主激光的一级衍射光同时进入取样成像系统,成像系统利用一级衍射光对小孔在光栅上的投影和焦斑位置进行成像,CCD 获取此时的图像。

2) 计算偏差值。利用计算机图像处理算法<sup>[9]</sup>,

获取小孔和焦斑的中心位置坐标,计算两者的偏差值。

3) 反馈调整。根据上述误差,输出反馈控制量,调整反射镜  $M_2$ ,使焦斑中心和滤波器小孔中心相重合<sup>[10]</sup>。

## 4 远场监测系统精度分析

影响取样系统精度的因素主要分为两部分,一部分是系统误差,可以精确计算,另一部分是随机误差无法估算。

### 4.1 系统误差

系统误差主要包含投影误差和斜成像误差。

本实验中的投影误差分为两种。第一种是由取样方案本身引起的。对于本方案中小孔中心的估值实际上是通过照明光照射小孔后,小孔在光栅上投影的一级衍射光成像所得,如图 4 所示。即用小孔在光栅上的投影来估计小孔位置。所以,投影精度直接影响小孔中心的估值精度。

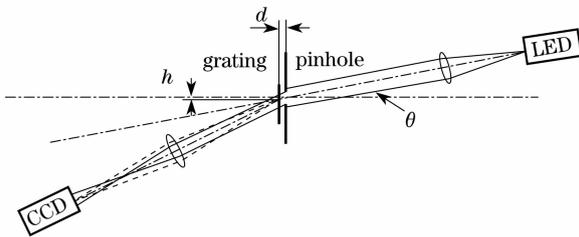


图 4 投影误差

Fig. 4 Projection error

LED 平行照明光入射角不为零,引起了投影误差。误差大小与光栅和小孔板的距离成正比,同时与照明光的入射角度有关,表示为  $h = d \times \tan \theta$ , 其中  $h$  为小孔中心位置与小孔在光栅上的投影中心位置的误差, $d$  为光栅与小孔板的距离, $\theta$  为入射光与光轴的夹角。为了减小投影误差,必须减小照明光角度,同时照明光角度受到主激光与照明光的一级衍射光方向相重合的限制,因为在照明光源中心波长选定后,照明方向不能再改变,所以必须选择合适的照明光源,本系统中选用中心波长为 470 nm 的蓝光 LED,光栅为 255 刻线,入射角  $\theta$  为  $8.55^\circ$ ;缩小光栅与小孔板的间距有利于减小投影误差,但在实际准直过程中,光栅是可移入移出的,这就不可能使  $d = 0$ ,取  $d = 2$  mm,则  $h = d \tan \theta = 2 \times \tan 8.55^\circ = 0.30$  mm,为小孔直径的 14.9%。因为  $\theta$  也为固定值,所以一旦系统确定之后, $h$  为一固定值,可以通过后续计算机处理软件加以消除。

投影误差的另一个原因是在照明光斜入射时由于孔板厚度的存在致使投影中心与小孔实际中心不完全重合而造成的。理想情况下,小孔投影到光栅上为圆形,由于小孔板厚度的存在,就使得投影变为椭圆形,如图 5 所示。小孔板厚度为  $d_p$ ,照明光入射角度为  $\theta$ ,理想情况下小孔投影直径为  $d_2$ ,其中心距离投影上边缘为  $d_2/2$ ,实际小孔投影直径为  $d_1$ ,其中心距离投影上边缘为  $d_1/2$ 。误差  $h_p$  为

$$h_p = d_2/2 - d_1/2 = d_p/2 \times \tan \theta. \quad (1)$$

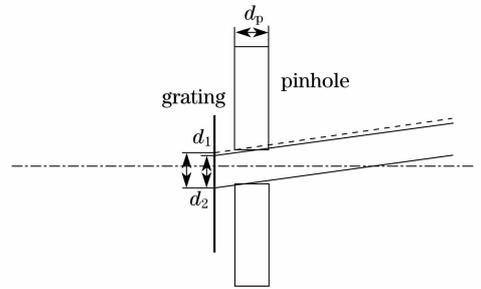


图 5 孔板厚度误差

Fig. 5 Error caused by pinhole plan

系统采用 2 mm 厚度的小孔板,其误差  $h_2 = 0.15$  mm,为小孔直径的 7.5%,误差方向与第一种投影误差相反,由此可得,由于投影误差而引起的系统误差  $h$  为两者的差值 7.4%。孔板厚度误差可以通过中心估值算法的优化减小,如采用圆拟合的中心估值算法。同时,这一误差也是可精确估算的误差,可以作为系统误差加以消除。

斜成像误差是成像系统引入的误差,由于取样系统采用的是离轴成像,这就要求成像系统必须满足斜成像条件,这就使得小孔中心的估值发生了一定误差。斜成像条件要求像面、物面以及物镜面交于同一直线上,如图 6 所示。

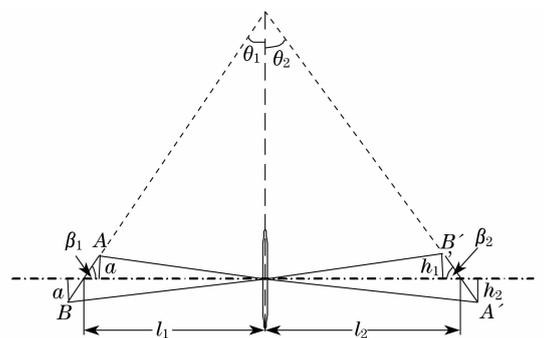


图 6 斜成像误差

Fig. 6 Skew imaging error

成像系统放大倍数为 1:1,物镜焦距 15 cm,物距  $l_1$  等于像距  $l_2$ ,都为 30 cm,小孔直径为 2 mm,成像系统与光轴的夹角等于激光的一级衍射角,所以

小孔板与成像系统光轴的夹角等于像面与成像系统光轴的夹角,即  $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ - 15.57^\circ = 74.43^\circ$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = 15.57^\circ$ 。理想情况下成像系统光轴过小孔中心,小孔上下边缘在光轴方向的高度相等,均为  $a$

$$a = r \times \sin \beta_1 = 1 \times \sin 74.43^\circ = 0.963, \quad (2)$$

小孔上边缘 A 对应的像距  $l_A$  为

$$l_A = l_1 - r \times \cos \beta_1 = 300 - 1 \times \cos 74.43^\circ = 299.73, \quad (3)$$

由成像公式可以得出 A' 的像距  $l'_A$  为

$$l'_A = \frac{l_A \times f_2}{l_A - f_1}, \quad (4)$$

其中  $f_1$  为物方焦距,  $f_2$  为像方焦距。计算得  $l'_A = 300.27$ 。同理可得  $l_B = 300.27, l'_B = 299.73$ 。A', B' 点对应的像高分别为

$$h_2 = a \times \frac{l'_A}{l_A} = 0.963 \times \frac{300.27}{299.73} = 0.9650, \quad (5)$$

$$h_1 = a \times \frac{l'_B}{l_B} = 0.963 \times \frac{299.73}{300.27} = 0.9616, \quad (6)$$

像中心、物中心对应的像点高度分别为

$$\frac{(h_1 + h_2)}{2 \sin \beta_2} = \frac{(0.9650 + 0.9616)}{2 \sin 74.43^\circ} = 1.0000, \quad (7)$$

$$\frac{h_2}{\sin \beta_2} = \frac{0.9650}{\sin 74.43^\circ} = 1.0018. \quad (8)$$

误差为 0.0018 mm, 由此得出, 对于确定系统而言, 斜成像误差可以精确计算。同时, 由于斜成像误差远小于一个像素(一个像素对应于 0.008 mm), 对系统的精度影响很小, 可以忽略。

#### 4.2 随机误差

随机误差主要包括: 物像关系误差和衍射光耦合误差。

实验中发现, 当激光与照明光的衍射光方向不重合时, 成像系统的物像关系误差对实验结果影响较大, 这主要是由于成像误差所致。

由于照明光与激光的衍射光光束口径不同, 方向存在误差等, 就使得物像关系误差与衍射光耦合误差对小孔中心和焦斑中心的相对位置产生一定影响, 如图 7 所示。图 7 反映了衍射光耦合误差和物像关系误差对小孔中心与焦斑中心相对位置的影响, 其中虚线表示激光光束, 实线表示照明光光束。当满足物像关系时, 即当 CCD 位于平面 O 处时, 小孔像与焦斑像的相对位置精确地反映了小孔与焦斑的相对位置关系; 当 CCD 位置存在一定误差, 例如位于 A 处, 焦斑中心与小孔中心就存在一定的误差  $a_3, a_3$  可近似计算为

$$a_3 = d_3 \times \tan \theta_3, \quad (9)$$

其中  $d_3$  为像距误差值,  $\theta_3$  为照明光与激光的衍射光夹角。验证系统中像距误差  $d_3$  小于 2 mm, 照明光与激光的衍射光夹角  $\theta_3$  小于  $0.5^\circ$ , 物像关系误差与衍射角耦合误差的综合误差小于 1% 的小孔直径。为了减小这一误差的影响, 首先要尽量减少像距误差; 其次要尽可能使激光衍射光与照明光衍射光相重合; 成像系统设计为远心系统也有助于减小此类误差。

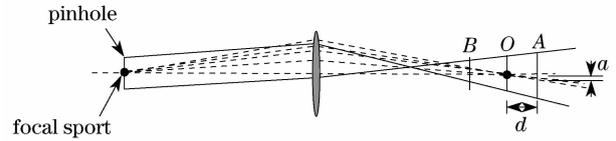


图 7 像距误差引起的误差

Fig. 7 Error caused by image distance error

## 5 结 论

新型光栅取样远场监测系统存在较大的系统误差, 总体为小孔直径的 7.49%。其中, 投影误差为小孔直径的 7.40%, 斜成像误差为小孔直径的 0.09%。这些误差可以通过计算机软件初始标定加以消除; 影响系统精度的随机误差, 包括物像关系误差和衍射光耦合误差, 小于小孔直径的 1%。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Zhihong, Peng Zhitao, Liu Hua *et al.*. Calculated methods of high power laser near field parameters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 544~548  
孙志红, 彭志涛, 刘 华 等. 高功率激光近场空域计算方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 544~548
- 2 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjing *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 255~258  
于永爱, 张玲玲, 唐前进 等. 激光束质量实时测量技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 255~258
- 3 R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. National ignition facility alignment and wave front control[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 168~179
- 4 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(2): 1~5  
刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 激光聚变装置光束自动准直系统的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(2): 1~5
- 5 Zai Xuefeng, Wang Guofu, Da Zhengshang. Design of SG-III 3ω laser beam auto-collimation system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(2): 177~180  
翟学锋, 王国富, 达争尚. 神光-III 3ω 光路自动准直系统设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(2): 177~180
- 6 Chen Qinghao, Xu Renfang, Peng Zengyun *et al.*. Automatic optical 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): 531~533.
- 7 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Qiu Lirong *et al.*. Laser beam

- collimation method and technology in given beam direction[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(1):61~64
- 赵维谦,谭久彬,邱丽荣等.激光光束特定方向准直方法与技术[J].*光电子·激光*,2004,**15**(1):61~64
- 8 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics (Second volume) [M]. Beijing: Peking University Press, 2004. 1~15
- 赵凯华,钟锡华.光学(下册)[M].北京:北京大学出版社,2004. 1~15
- 9 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.
- 10 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Study of cavity mirror alignment in multi-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