

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0308-04

# 小口径光学支撑镜架结构稳定性测试及分析

王大辉 赵 军 赵学庆 张永生 胡 云 华恒祺 郑国鑫 薛全喜

(西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要** 光学支撑镜架结构稳定性是影响光束定位精度的重要因素。基于光学法进行了镜架结构稳定性测量技术研究,编写了光学稳定性测试软件,开展了对不同透镜和反射镜镜架结构稳定性测量。实验得到了镜架调节及调节后长时间的漂移量及漂移规律,比较了不同种类和不同调节量情况下镜架的稳定性。实验建立的稳定性测试系统测量精度达到  $3.13 \mu\text{m}$ ,且使用方便,为光学镜架稳定性提供了快速的检测手段,并为高功率准分子激光系统镜架选型提供重要参考。

**关键词** 光学测量;支撑镜架;结构稳定性;光斑重心法;漂移

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0308

## Measurement and Analysis on Structure Stability of Optical Mirror Mounts with Small Aperture

Wang Dahui Zhao Jun Zhao Xueqing Zhang Yongsheng Hu Yun  
Hua Hengqi Zheng Guoxin Xue Quanxi

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** Optical mounts structure stability is crucial to beam position accuracy. The study on optical testing method for structure stability of mirror /lens mounts was involved and optical stability testing software was compiled. Structure stability of different kinds of mirror /lens mounts was measured. The variation of beam position drift versus time was experimentally obtained, and the comparison of stability properties among different kinds of mounts and different levels of adjustment were made. Stability test system was able to gives on accuracy of as high as  $3.13 \mu\text{m}$ . A rapid and handy testing mean for stability of optical mounts was provided, and the results can be used as a key guide to optical mounts choice for high power excimer laser system.

**Key words** optic measurement; mirror mounts; structure stability; barycenter of light spot; drift

### 1 引 言

对于大型高功率激光 MOPA(Master oscillator power amplifier)系统,光学元件数量多,光程长,靶物理实验对光束定位具有很高的要求,光束的高精度定位问题受到研究者的普遍关注。在 MOPA 系统光路中,镜架结构稳定性对光束稳定性具有决定性影响,透镜的平移和反射镜的偏移是影响光束定位精度的主要因素<sup>[1]</sup>,而通过 MOPA 系统光学元件误差分配,小口径光学元件的稳定性要求也很高(反

射镜偏移误差要求为  $9.8 \mu\text{rad}$ ,透镜平移误差要求为  $12.9 \mu\text{m}$ ),所以需要研究建立简便有效的镜架稳定性测试评价手段。

光学镜架稳定性的测量有很多方法<sup>[2~3]</sup>,可以利用光学法即通过光学原理将振动量转换为光信号。光学法测量范围大、精度和灵敏度高,适于多点、多物理量的测量,便于远距离遥测。光学镜架的测量通常有激光干涉法测量、激光多普勒测量及平行光管测量等几种方法。激光干涉法虽测量精度高,

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-06-03

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKL110904)资助课题。

作者简介: 王大辉(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光工程方面的研究。E-mail: chsslw@163.com

导师简介: 赵 军(1955—),男,研究员,主要从事信号与信息处理等方面的研究。E-mail: zhaojun@163.cjom

但受环境条件影响大,而且要求激光波长稳定、具有较长的相干长度;多普勒测量通常信噪比低,且包含光源、运动物体、接收器之间的角度因素,会引入较大的测量误差;平行光管测量数据记录不方便,不能够实时测量光学镜架上光束的变化规律,而且精度高的平行光管造价过高。

本文基于光学法进行镜架结构稳定性测量技术研究,编写了光学稳定性测试软件,开展了对不同透镜和反射镜镜架结构稳定性的测量,分析了测量结果可信性和测量方法精度。

## 2 测量方案

基于光学法提出的镜架结构稳定性测量布局方案如图 1 所示。对透镜测量光路来说,根据传输矩阵和光线追迹可以得到透镜变化  $\Delta x$  时,相应像面光束位移  $\Delta x' = 2\Delta x$ 。所以根据测得的 CCD 上光斑的位置变化得到透镜的平移量。对反射镜而言,在反射镜偏转  $\Delta\theta$  时,假定反射镜与 CCD 距离为  $L$ ,则 CCD 上光斑位置变化  $\Delta x' = \Delta\theta \times L$ ,由此亦可根据测得的 CCD 上光斑的位置变化得到反射镜的偏移量。

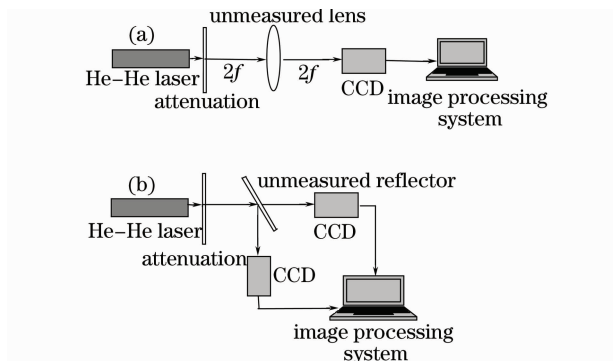


图 1 透镜(a)和反射镜(b)结构稳定性测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure stability measurement for lens (a) and reflectors (b)

实验为了使光束强度处于 CCD 安全工作范围要求,在激光源后放置了衰减片。待测透镜的位置根据成像关系,放置在分别与 He-Ne 激光器和 CCD 相距  $2f$  的地方。反射镜位置则放置在尽量靠近 He-Ne 激光源的地方,并尽量使 CCD 远离反射镜,同时保证光斑大小不超过 CCD 光敏面大小。实验中采用单个像素为  $6.25 \mu\text{m}$  分辨率的 CCD。图像处理系统具有图像采集、分析、处理、保存等功能。

为了实现定时间间隔的图像采集和处理,编写了光学稳定性测试软件<sup>[4~6]</sup>。软件工作界面如图 2 所示,软件对光束进行连续采集;软件可对采集图像进行阈

值滤波,阈值可以设定 0~245 灰度中的任意数值;采用全屏重心法对光斑位置进行计算,在边缘处理时以整个屏幕为计算范围,计算得到光斑重心,光斑重心精度随光斑大小变化,光斑越大,计算得到重心数据越精确;对上述计算得到的重心数据实时硬盘保存;整个程序等时间间隔循环执行,时间间隔可以自行设定软件。

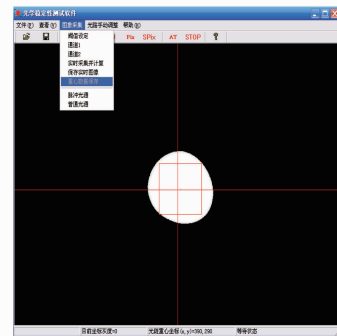


图 2 光学稳定性测试软件工作界面

Fig. 2 Work interface of optical stability testing software

## 3 实验结果及分析

实验目的是不同镜架在不同调节下的结构稳定性比较和调节长时间后在实验室环境包括振动、温度及气流等影响因素下的稳定性比较。透镜的平移和反射镜的偏移是影响光束定位精度的主要因素<sup>[1]</sup>,尤其对高功率准分子激光 MOPA 系统严格的物像共轭像传递光路,利用光线追迹和传输矩阵可以推算得到,若光束不出反射镜镜面且反射镜镜面质量均匀,反射镜的平移对像面处光束的定位影响为零;若透镜镜面质量均匀且透镜近似为薄透镜,透镜的偏移对像面处光束的定位影响为零。所以,本实验主要针对反射镜的偏移和透镜的平移进行测量。

### 3.1 反射镜镜架稳定性测量

鉴于反射镜镜架旋转量是影响靶点光束定位精度的主要因素<sup>[1]</sup>,实验针对反射镜镜架俯仰和旋转调节开展了镜架稳定性测量。镜架的稳定性测量实验布局如图 1 所示,实验中设定被测反射镜与 CCD 距离为 2 m,每隔 0.5 min 对采集光斑图像进行重心计算并实时保存,循环执行,数据记录时间为 90 min。实验内容如表 1 所示。反射镜镜架结构稳

表 1 不同种类不同调节量反射镜镜架

Table 1 Reflectors of different kinds and different adjustments

Number	Aperture /mm	Company	Adjustment
1#	φ30	A	large(270°)
2#	φ30	B	large(270°)
3#	φ30	A	small(90°)

定性测量曲线如图 3~5 所示。从图 3 可以看出,反射镜镜架调节后约 0.5 h 内,光斑重心在两个坐标方向上均有单方向持续漂移,而漂移量的大小则随反射镜镜架种类的不同而不同;反射镜调节 0.5 h 后,光斑重心位置在两个坐标方向上趋于稳定。理论上反射镜镜架在调节后存在一定的应力,随着应力的释放反射镜镜架单方向偏移<sup>[7]</sup>,这也与上述实验规律吻合。

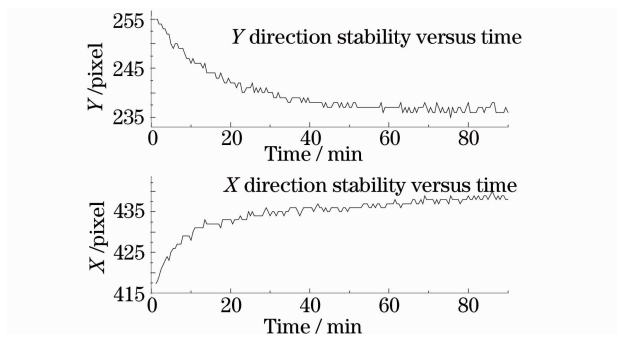


图 3 1<sup>#</sup> 结构稳定性测量曲线  
Fig. 3 Structure stability of 1<sup>#</sup>

从图 4 可以看出,反射镜在调节后,光斑重心位置在两个坐标方向上一直无规律性振荡,振荡范围最大为 3 pixel,长时间稳定后振荡范围为 1 pixel,所以此类反射镜镜架的稳定性比较好,适合高精度光路实验使用。与图 3 反射镜镜架比较看出,不同种类的镜架由于采用材料及设计结构等不同,结构稳定性和长时间调节后稳定性都有很大的差别。

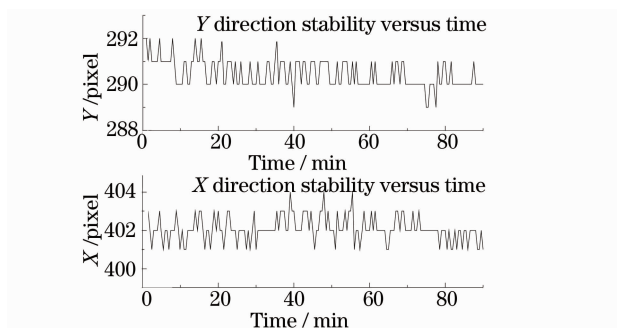


图 4 2<sup>#</sup> 结构稳定性测量曲线  
Fig. 4 Structure stability of 2<sup>#</sup>

图 5 中的反射镜光斑重心在两个坐标方向上一直是无规律性振荡,振荡范围为 3 pixel,稳定性较好。和图 3 反射镜镜架比较可以看出,同一反射镜镜架在不同的调节量下稳定性差异很大,在较大调节量下镜架应力释放大,稳定性较差,而如果对反射镜镜架进行小幅度的调节,镜架的稳定性则很好,能满足更高精度要求的光学实验。另外,调节长时间稳定后两者则趋于相同。

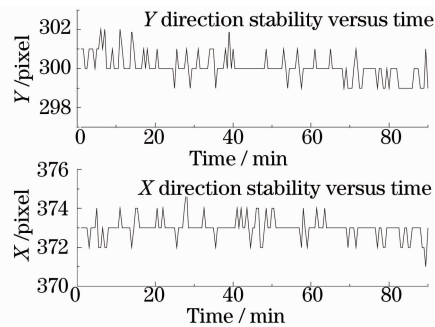


图 5 3<sup>#</sup> 结构稳定性测量曲线  
Fig. 5 Structure stability of 3<sup>#</sup>

### 3.2 透镜镜架稳定性测量

鉴于透镜镜架中心的平移是影响靶点光束定位精度的主要因素<sup>[1]</sup>,所以对 A 厂家  $\phi 30$  mm 透镜镜架在安装透镜后开展了镜架稳定性测量。

从图 6 可以看出,光斑重心在两个坐标方向上一直是无规律振荡,X 方向振荡平移最大 2 pixel,单个像素对应 CCD 分辨率为  $6.25 \mu\text{m}$ ,对应振荡平移为  $12.5 \mu\text{m}$ 。而单透镜平移  $\Delta x$  时,像面光束位移  $\Delta x' = 2\Delta x$ ,对应透镜镜架平移量为  $6.25 \mu\text{m}$ 。Y 方向起始阶段有小量单方向平移,随即趋于稳定的无规律性振荡,振荡平移范围为 3 pixel,对应透镜镜架平移量为  $9.375 \mu\text{m}$ 。而调节长时间稳定后透镜振荡范围为 1 pixel,即为  $3.13 \mu\text{m}$ ,所以透镜结构稳定性和长时间稳定性较好,能够满足分配要求。

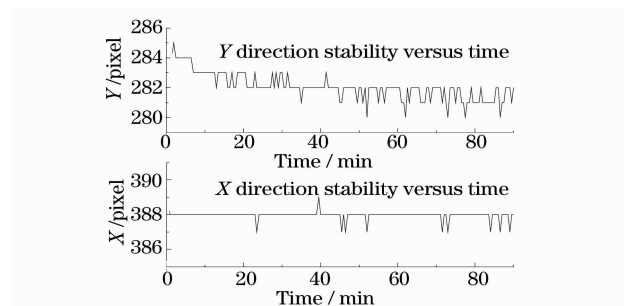


图 6 透镜镜架稳定性测量曲线  
Fig. 6 Structure stability of lens

### 3.3 测试精确度分析

为了能够获得可靠的稳定性测试结果,必须确保 CCD 采集的光束光斑重心的变化主要是由被测测量光学镜架的变化引起的<sup>[8~10]</sup>。实验中,整个测试系统在同一实验平台上,使得外界振动源对光学镜架稳定性测量结果影响很小,保证了很好的稳定性。但激光源稳定性,CCD 稳定性及衰减片稳定性均不可知,为此做了以下分析工作。

#### 3.3.1 激光源及采集设备 CCD 的稳定性

为了确定在光学镜架插入测量之前整个装置是

稳定的,实验中直接利用 CCD 测量了 He-Ne 激光源的稳定性,测量曲线如图 7 所示。

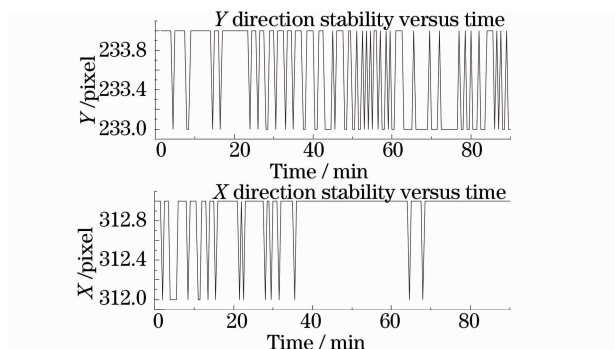


图 7 He-He 激光光源光斑稳定性测量曲线

Fig. 7 Beam stability of He-He laser

从图 7 可以看出,He-Ne 激光器光束最大抖动量为 1 pixel,而 CCD 一个像素为  $6.25 \mu\text{m}$ ,可知由 He-Ne 激光器和 CCD 测量装置带来的光斑偏移最大为  $3.13 \mu\text{m}$ ,所以此测量装置测量最好精度可达到  $3.13 \mu\text{m}$ 。激光源及测量设备对镜架稳定性测量结果影响不大。

### 3.3.2 衰减片对测量结果的影响

假定衰减片厚度为  $d$ ,空气折射率为  $n_1$ ,衰减片折射率为  $n_2$ ,衰减片偏移角度为  $\Delta\theta$ ,光线进入衰减片之后角度为  $\Delta\theta_1$ ,经过衰减片光束偏转距离为  $L$ 。则有

$$\begin{cases} \frac{\sin \Delta\theta_1}{\sin \Delta\theta} = \frac{n_1}{n_2} \\ L = d \tan \Delta\theta - d \tan \Delta\theta_1 \end{cases}, \quad (1)$$

由于  $\Delta\theta$  特别小,有  $\Delta\theta \approx \sin \Delta\theta \approx \tan \Delta\theta$ ,所以根据 (1) 式得到

$$L = \frac{n_2 - n_1}{n_2} d \Delta\theta, \quad (2)$$

式中衰减片厚度  $d$  为毫米量级,  $\frac{n_2 - n_1}{n_2}$  为  $10^{-1}$  量级,这样  $L$  的数值则非常小。假定  $\Delta\theta$  是毫弧度量级,则  $L$  是  $10^{-7} \text{m}$  量级,所以衰减片对镜架稳定性测量结果影响可以忽略。

## 4 结 论

自编光学稳定性测试软件、设计测量方法等能够满足光学元件镜架稳定性测量,测量方法简便快速有效。通过对反射镜镜架稳定性测量,得到了反射

镜镜架调节和调节后长时间的稳定性偏移量及其变化规律,结果表明不同种类和不同调节量镜架结构稳定性不同。通过对透镜镜架稳定性的测量,得到了透镜镜架调节和调节后长时间的稳定性偏移量及其变化规律。测量方法和分析结论都可以用于大型高功率激光 MOPA 系统镜架的选择和现有镜架结构稳定性的检测和监测。

### 参 考 文 献

- 1 S. C. Sommer. Beam positioning [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA 94551
- 2 Du Zhenhui, Li Shuqing, Jiang Chengzhi *et al.*. Small vibration measurement using laser grating Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 834~835  
杜振辉,李淑清,蒋诚志等. 激光光栅多普勒效应微小振动测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 834~835
- 3 Wang Boxiong. Foundation of Measurement Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 419~430  
王伯雄. 测试技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 419~430
- 4 Huang Weitong. Visual C++ Object Oriented and Visual Program Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 261~374  
黄维通. Visual C++ 面向对象与可视化程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 261~374
- 5 Wang Wenqian, Liu Guodong, Pu Zhaobang *et al.*. Measurement of two-dimensional small angle by means of matrix CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(2): 134~138  
王雯倩,刘国栋,浦昭邦等. 利用面阵 CCD 测量小角度的研究[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(2): 134~138
- 6 Zheng Defeng, Wang Xiangchao, Li Zhongliang *et al.*. Dynamic measurement of small angel with two prisms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1255~1259  
郑德峰,王向朝,李中梁等. 一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1255~1259
- 7 Paul R. Yoder, Jr.. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl.. Beijing: Chinese Machine Press, 2008. 20~200  
Paul R. Yoder, Jr. 著. 光机系统设计[M]. 周海宪,程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2008. 20~200
- 8 Zheng Defeng, Wang Xiangchao. Optimum design of parallel plate interferometer for angular displacement measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 422~426  
郑德峰,王向朝. 平行平板角位移干涉测量仪的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 422~426
- 9 Zhang Chengxiang, Qiu Dehui, Geng Guoqing. Angel measuring system based on CCD image processing [J]. *Computer Automated Measurement & Control*, 2004, **12**(1): 32~34  
张呈祥,邱德惠,耿国庆. 基于 CCD 图像处理的角度测量系统[J]. *计算机测量与控制*, 2004, **12**(1): 32~34
- 10 Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang. A new approach for improvement of CCD imaging resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 777~780  
卓宁,孙华燕,张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 777~780