

文章编号:1672-3392(2016)05-0068-06

光学系统的光束指向稳定性光电测试法研究

郑留念 黄宏彪 刘志刚 庞向阳

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

摘要 从振动的基本理论出发,应用矩阵光学理论,推导了光学图像法测试光束指向稳定性的原理。设计了光电法测试光束指向稳定性的测试应用,并搭建了实验光路,结果表明:光学图像法可以准确分析光束指向稳定性误差的大小、产生的误差的振动频率及其影响程度,并结合加速度计的电学法测试,可以探测光路中引起光束指向误差的来源。光电法测试结果正确可靠、简单方便,具有较好的工程应用价值,特别适合大型光学系统的光束指向稳定性测试。

关键词 光束指向稳定性; 电学法; 光学图像法; 振动频率

中图分类号 O435; O327; O329 **文献标识码** A

1 引言

激光光路系统,种子光源产生激光光束后,经过后续的各种光学元件改变光束的特性,其目标是各种要求的“打靶”。光束在传输过程中受到诸多因素的干扰,尤其是传输过程中受到不可控的振动引起的动态干扰的影响,当光束到达“靶”时,常常会在理想位置来回振动,影响了“打靶”的成功率,因而光束指向稳定性分析显得非常重要。

测量光束指向稳定性,有机械法、电学法、光学法等方法,随着技术的发展,又主要以电学法和光学法为主。电学法就是将被测对象的振动量转换成电量,然后用电量测试仪器进行测量,其优点是灵敏度高、频率范围及动态线性范围宽、便于分析和遥测,不足是容易受电磁场干扰、不能直接反映单纯光学元件上光束的振动情况,没有定量的振动导致的光束指向稳定性误差数据。光学法现有技术多数基于干涉的方法进行测量,其优点是不受电磁场干扰、测量精度高、适于对质量小及不易安装加速度计的物体作非接触测量,不足是测量系统比较复杂、设备昂贵。目前光路的振动测量大多基于普通机械振动的测试方法,少数文献研究了光学法测量的试验。如安徽光机所谭锐、上海光机所张国轩等人研究了 CCD 摄像机测量光束指向稳定性的试验^[1, 2],特点都是直接获得了激光光斑位置的微小指向稳定性变化,但是没有办法诊断出对位置变

化产生影响的光学元件及其影响的程度。因此本文进一步从理论和实验上讨论光束指向稳定性的测试方法,可获得光学系统的光束指向随时间的变化量,也可分析出造成光束指向偏移的振动信号频谱特征及各自的影响大小;这种光学方法测量范围大、精度和灵敏度高,测量结果更加直观,能快速准确判断光束指向稳定性数据和误差来源,以适应更高要求的“打靶”需要。

2 原理

光路系统的机械结构如镜架或者光学平台,其阻尼一般都较小,处于欠阻尼状态,因此本文主要基于欠阻尼情况分析。光束指向的稳定性误差,是机械结构受到外界激励后的响应。当激振频率在物体固有频率附近时,如果阻尼很小,振幅放大因子会特别大,物体的振动幅度也变得很大,此时承载光学元件的机械结构即发生共振,如图 1 所示,共振是光路中光束的指向稳定性误差产生的主要因素^[3, 4]。

以光束通过一个光学元件为例,考虑振动、变形等各种因素对光学系统的影响,可以将光学器件偏离理想光轴位置的距离和角度看成动态失调量。失调光学系统的光束描述,是在理想共轴光学系统描述的基础上加上失调量对其的影响,其失调矩阵可以表达为^[5, 6]:

收稿日期 2016-02-25; 收到修改稿日期 2016-04-10

作者简介 郑留念(1981—),男,硕士,工程师,主要从事精密机械设计及振动测量有关的研究工作。
E-mail: zln21c@163.com

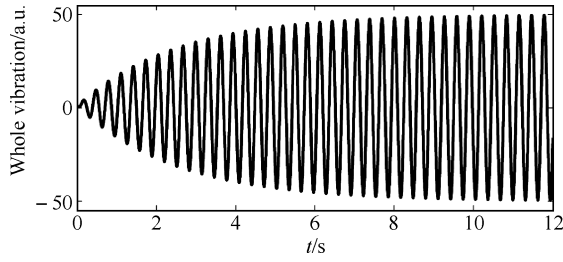


图1 共振效果

Fig. 1 Resonance effect

$$\begin{pmatrix} x' \\ \theta' \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & E(t) & F(t) \\ C & D & G(t) & H(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix}$ 和 $\begin{pmatrix} x' \\ \theta' \end{pmatrix}$ 分别是输入和输出光信息的失调位置和角度; $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 是光学器件在理想光轴位置的变换矩阵, 只与光学系统参数相关; $\begin{pmatrix} E(t) & F(t) \\ G(t) & H(t) \end{pmatrix}$ 是由于光学器件偏离理想光轴产生的失调量引起的光束的变化量, 它包括结构安装误差等静态失调和光学器件微振动引起的动态失调等等, 与光学系统参数和失调量相关。光学元件的振动是多种复杂振动的综合, 其最基本的微振动可以表示为^[7]

$$\begin{pmatrix} a_1(t) \\ \alpha_1(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11} \\ \alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, $a_1(t)$ 、 $\alpha_1(t)$ 分别为光学元件的位置和角度的失调状态, a_{10} 、 α_{10} 分别为失调振幅, a_{11} 、 α_{11} 分别为静态失调量, ω_{11} 、 ω_{12} 分别为失调振动频率, ϕ_{11} 、 ϕ_{12} 分别为失调初始相位。如选用的是一个透射光学元件, 则失调矩阵元可以表示为

$$\begin{aligned} E(t) &= (1-A)[a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11}] \\ F(t) &= (L-B)[\alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11}] \\ G(t) &= -C[a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11}] \\ H(t) &= (1-D)[\alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中 L 为光学元件分析参考面之间的距离, 计算得:

$$\begin{aligned} x' &= xA + B\theta + (1-A)[a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11}] + \\ &\quad (L-B)[\alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11}] \\ \alpha' &= xC + D\theta - C[a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11}] + \\ &\quad (1-D)[\alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11}] \end{aligned} \quad (6)$$

采样的光路终端的光束, 经薄透镜传输距离 L_0 后照射在光斑感光器件的失调位置和角度矩阵:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ \theta'' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ \theta' \end{pmatrix} \quad (7)$$

一般情况下, 光学元件的机械结构对光束指向稳定性的影响体现在位置变化上, 因此, 上述公式代入计算得到终端光束的失调位置:

$$\begin{aligned} x'' &= xA \left(1 - \frac{L}{f}\right) + B\theta \left(1 - \frac{L}{f}\right) + LxC + LD\theta + \\ &\quad \left(1 - \frac{L}{f} - A - CL + \frac{LA}{f}\right) [a_{10} \sin(\omega_{11}t + \phi_{11}) + a_{11}] + \\ &\quad \left(2L - LD - B - \frac{L^2}{f} + \frac{B^2}{f}\right) [\alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \phi_{12}) + \alpha_{11}] \end{aligned} \quad (8)$$

上式中有意义的为随时间变化的函数部分, 并简化其系数后, 可得:

$$x'' = M \sin(\omega_{11}t + f_{11}) + N \sin(\omega_{12}t + f_{12}) \quad (9)$$

对光束位置变化的时域信号进行傅式变换,

$$\begin{aligned} X''(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} [M \sin(\omega_{11}t + f_{11}) + \\ &\quad N \sin(\omega_{12}t + f_{12})] e^{-\omega t} dt \end{aligned} \quad (10)$$

变换后的频率域幅值:

$$|X''(\omega)| = \frac{1}{2} [Md(\omega - \omega_{11}) + Nd(\omega - \omega_{12})] \quad (11)$$

以上理论是光束通过一个光学元件聚焦到图像采集器件上的表达式。可见, 光束传输终端的图像采集元件获得的光学信号, 其振动频率 ω_{11} 和 ω_{12} , 来自施加于光学元件的微振动频率。

3 光电法测量光束指向的应用

环境微振动时将振动的频率特征传递给承载光学元件的机械机构(简称为镜架, 本文将镜架下方的平台等一起称为镜架)。如前文所述, 在光学系统的终端光束的指向稳定性误差数据中含有传输途中各镜架影响光束的频率信息, 且一般为镜架的固有频率。如图2所示, 光学系统的传输终端的输出光路中加入取样镜, 高速图像采集元件对该取样镜的采样光取样采集, 在一定时间内获得多幅光斑图像并输入计算机对采集的图像质心或重心处理后^[8], 得到图像质心或重心随时间的位移变化数据, 即时域内光束指向稳定性位移误差的误差图^[9]。对图像质心或重心的位移数据进行傅里叶变换, 得到对光束指向造成影响的光束指向稳定性误差的频谱图, 频谱图中不同频率对应应该频率影响光束指向稳定性的误差幅度。承载光学元件的镜架1到镜架 n 上一次性或分次安装测量振动的电

传感器,如加速度计等,测得的振动数据经采集仪采集到计算机中分析,获得各镜架的振动频谱图。将电传感器采集分析获得的各镜架的频率,和图像分析获得的光束指向稳定性误差的频谱图的幅度

峰值的频率相对照,判断出影响光学系统光束指向稳定性误差的镜架序号及该镜架影响光束指向稳定性的大小程度。

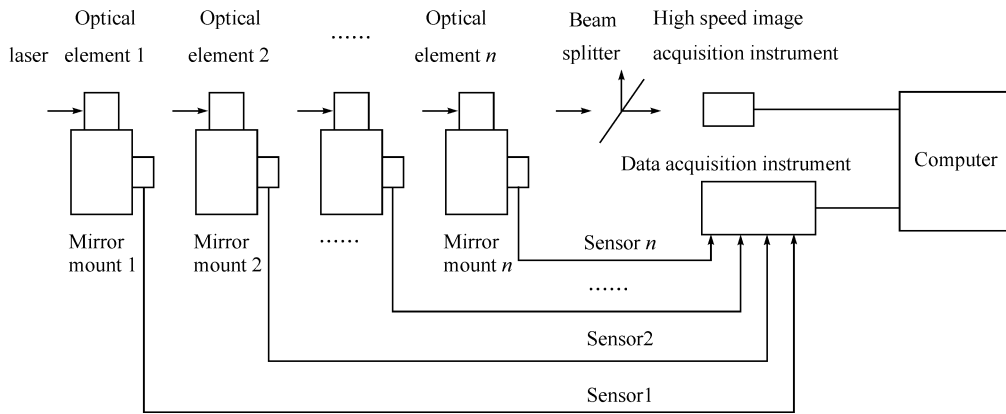


图 2 光电法测试光束指向稳定性误差原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the beam positioning stability error test by optical-electro test method

4 实验及结果分析

实验的光路排布如图 3 所示,氦氖激光器发出波长 632.8 nm 的可见红光,经过平面镜透射后,选用高速摄像机采集图像。高速摄像机像素大小为 $21 \mu\text{m}$,拍摄频率为 500 frame/s,实验中每次采集时间 3 s 共 1 500 幅图片。振动传感器采用加速度计,测量最大频率高于 1 000 Hz。为了测试和叙述的方便,本文光学图像法和加速度计电学法只选取竖直方向测试分析。同时为了获得更加显著的实验效果,在平面镜的镜架下面还放置了提供可选频率的振动仪。所有设备都放置在隔振平台上,尽可能消除地面或建筑产生的随机干扰。

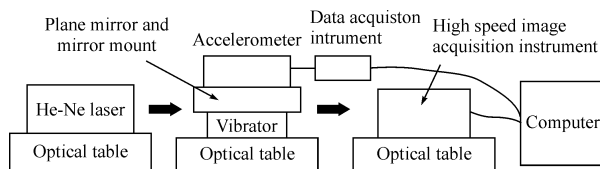


图 3 实验光路排布

Fig. 3 Optical arrangement of experiment

实验前,我们对氦氖激光器的平台稳定性进行了测试,高速摄像机直接采集激光,测试结果如图 4 所示,显示光学平台对氦氖激光器的影响较小,无明显特征频率,表明激光器输出的光源指向基本稳定。

平面镜片下振动仪启动后,振动频率设置在 23 Hz。采用上文叙述的光束图像采集和处理方

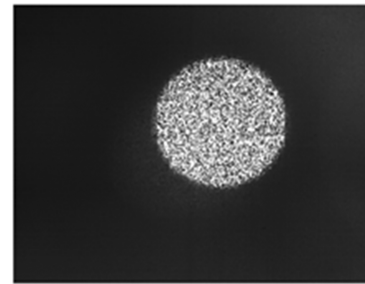


图 4(a) 光斑

Fig. 4(a) Spot image

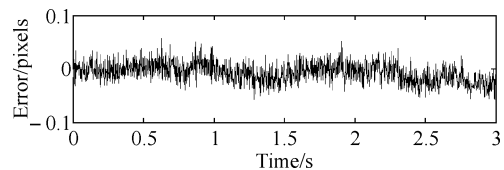


图 4(b) 位移误差

Fig. 4(b) Beam positioning error diagram

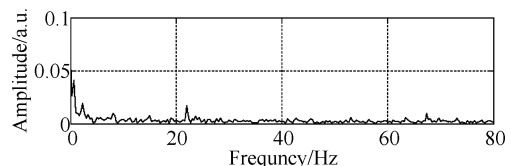


图 4(c) 频谱

Fig. 4(c) Spectrum diagram

法,对高速采集的 1 500 幅图像进行了分析,得到影响光束指向稳定性的特征频率为 23 Hz 和 17 Hz,其中 23 Hz 的影响幅度较大。实验中图像采

样的频率是 500 frame,根据奈奎斯特(Nyquist)采样定理^[10]最高得出 215 Hz 以内的频率特征谱,但考虑到分析的准确性,一般分析不超过采样频率 1/5 范围内的频率。

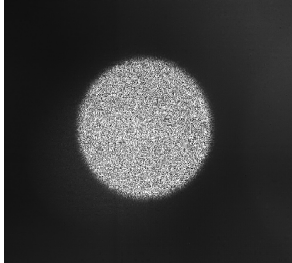


图 5(a) 光斑

Fig. 5(a) Spot image

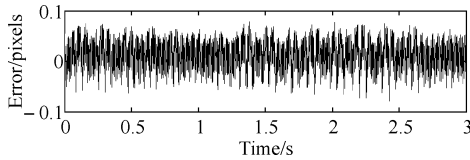


图 5(b) 位移误差

Fig. 5(b) Beam positioning error diagram

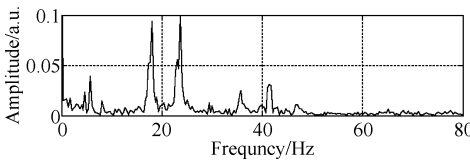
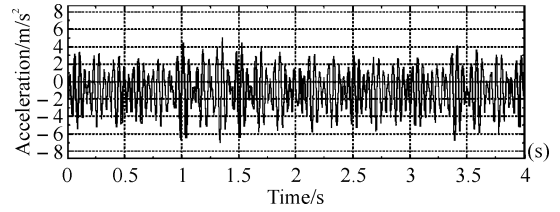


图 5(c) 频谱

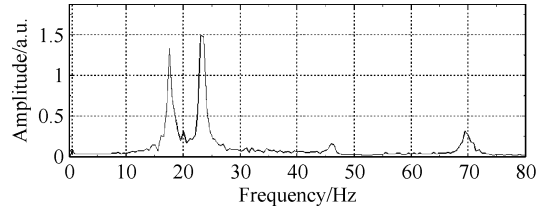
Fig. 5(c) Spectrum diagram

用加速度计的电学法测量振动信号,实验采用的是东方振动和噪声技术研究所的 DASP 系统采集分析,得到的加速度信号和频率谱图,如图 6 所示,特征频率值及其影响幅度和光学法基本相同,证明光学法分析光束指向稳定性是可靠的,并可认为光束指向稳定性误差来源于平面镜片 23 Hz 的振动。测试中发现了“多余”的 17 Hz 频率,经我们测试发现 17 Hz 是该振动仪的固有频率。在输入 23 Hz 的激振频率下,由于和振动台固有频率较为接近,引起了 17 Hz 的共振,并采用光学法和电学法都监测到该频率对光束指向稳定性的影响。

同样的实验方法,将振动仪振动频率设置在 42 Hz,光学法分析光束指向稳定性的情况,得出影响频率为 42 Hz,如图 7 所示,并用电学法采集平面镜架的振动特征频率也为 42 Hz,结论是光束指向稳定性误差来源于平面镜片 42 Hz 的振动,如图 8 所示。



(a)速度图



(b)频谱图

图 6 振动仪 23 Hz 时,电学法测得镜架的振动加速度图和频谱图

Fig. 6 When 23 Hz of Vibrator, the acceleration diagram and spectrum diagram of the mirror mount vibration by the electrical test method

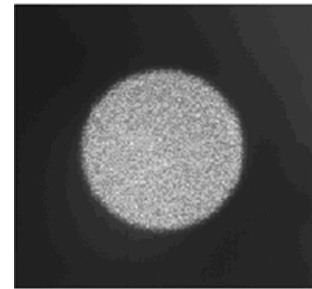


图 7(a) 光斑

Fig. 7(a) Spot image

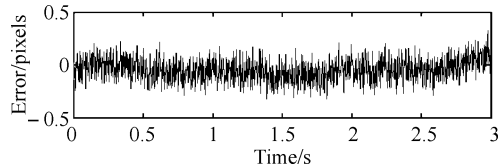


图 7(b) 位移误差

Fig. 7(b) Beam positioning error diagram

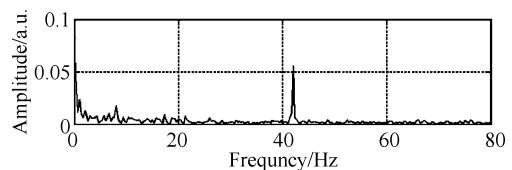
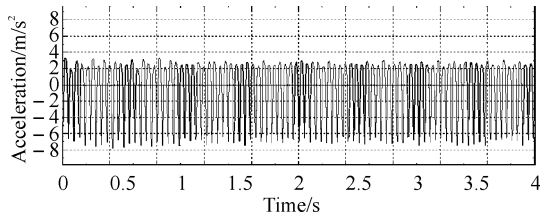


图 7(c) 频谱

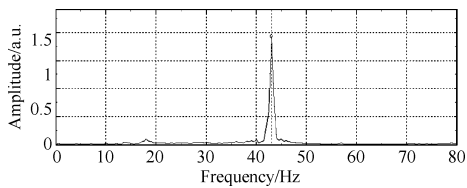
Fig. 7(c) Spectrum diagram

此外,为了验证光学图像法测试光束指向稳定性的方便性,实验中还随意调整了高速摄像机的位

置、对准光束的角度、摄像机镜头的焦距及采集光斑的明亮程度等,同样获得了光源静止和平面镜镜架施加 23 Hz 振动时的分析结果。光源静止时,分析得到的光源平台的振动频率特征和幅度完全相同(图 9 和图 4);对平面镜施加 23 Hz 频率振动时,频率的特征值相同,幅度有所不同(图 10 和图 5),造成幅度误差的原因是振动仪的振动幅度不稳定引起的,没有大幅度产生 17 Hz 频率的共振。两种情况下的实验可以得出,光学法测量光束指向稳定性,方法更加简单可靠。



(a)加速度



(b)频谱

图 8 振动仪 42 Hz 时,电学法测得的加速度图和频谱图
 Fig. 8 When 42 Hz of vibrator, the acceleration diagram and spectrum diagram of the mirror mount vibration by the electrical test method

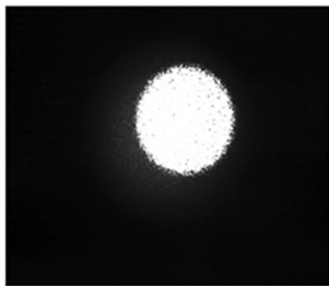


图 9(a) 光斑

Fig. 9(a) Spot image

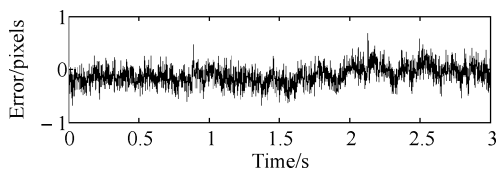


图 9(b) 位移误差

Fig. 9(b) Beam positioning error diagram

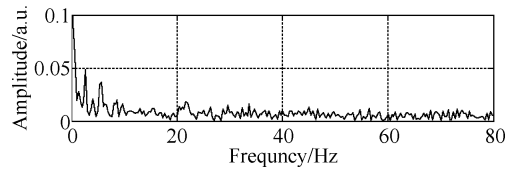


图 9(c) 频谱

Fig. 9(c) Spectrum diagram

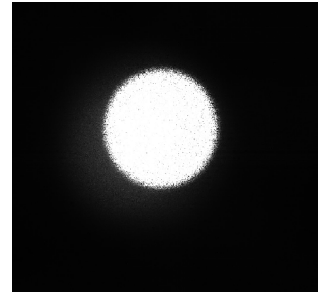


图 10(a) 光斑

Fig. 10(a) Spot image

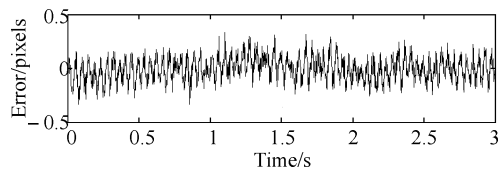


图 10(b) 位移误差

Fig. 10(b) Beam positioning error diagram

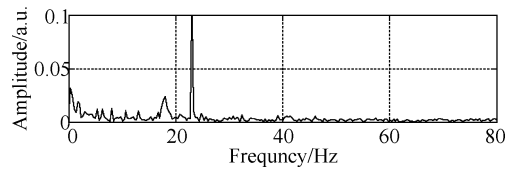


图 10(c) 频谱

Fig. 10(c) Spectrum diagram

5 结 论

本文推导了光电法测量光束指向稳定性理论基础,并从实验上进行了光电测试法的验证。结果表明采用的高速图像采集器件对在光学元件上传输的光信号取样分析,可得到对光束指向稳定性产生误差的振动信号频谱特征及各频率的影响大小,且取样简单而几乎不受任何条件限制。同时将振动测量的电学法用于分析光学元件镜架的频率特征情况,可快速准确判断光束指向稳定性误差的来源及其影响终端光束指向稳定性的大小程度,从而针对性地改进光学元件镜架结构或做好防振防干扰措施。本文以电学法和光学法为基础的光

束指向稳定性诊断方法,利用了两种振动测量方法的优点并避免了其缺点,特别适合大型激光装置光束指向稳定性的应用。

参考文献

- [1] 谭锬. 测量激光光束抖动的图像技术[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 32-37.
TAN Kun. Image processing techniques for measuring laser beam quivering[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 32-37.
- [2] 张国轩, 陈刚, 何红, 等. 用 CCD 摄像机检测激光器输出光束的指向稳定性[J]. 应用光学, 1998, 19(2): 15-18.
ZHANG Guo-xuan, CHEN Gang, HE Hong, *et al.* The beam-pointing stability for laser output measured by CCD camera[J]. Journal of Applied Optics, 1998, 19(2): 15-18.
- [3] 倪振华. 振动力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2007: 6-124.
NI Zhen-hua. Mechanics of vibration [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2007: 6-124.
- [4] 范国滨, 贾建援, 陈贵敏, 等. 机械振动对光学系统指向精度的影响[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2): 104-111.
FAN Guo-bin, JIA Jian-yuan, CHEN Gui-min, *et al.* Vibration effects on pointing precision of optical system[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(2): 104-111.
- [5] 卢亚雄, 吕百达. 关于失调矩阵的讨论[J]. 应用激光, 1989, 9(6): 255-256.
LU Yaxiong, LÜ Bai-da. Discussion on misalignment matrix[J]. Applied Laser, 1989, 9(6): 255-256.
- [6] 王绍明. 失调激光系统的矩阵和图论处理方法[J]. 杭州大学学报, 1979, (3): 42-52.
WANG Shao-min. Matrix and flow-graph methods in misalignment laser systems[J]. Journal of HangZhou University, 1979, (3): 42-52.
- [7] 刘芳, 徐嘉, 张燕, 等. 光学器件微振动引起的光束指向稳定性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1120001-1-1120001-7.
LIU Fang, XU Jia, ZHANG Yan, *et al.* Analysis on beam directing stability problem caused by micro-vibration of optical components[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1120001-1-1120001-7.
- [8] 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.
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.
- [9] 祈金刚, 李春杰. 激光光束指向稳定性的测量[J]. 物理实验, 2007, 27(12): 34-36.
QI Jin-gang, LI Chun-jie. Measuring the pointing stability of laser beam[J]. Physics Experimentation, 2007, 27(12): 34-36.
- [10] 江征凤. 测试技术基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 51-53.
JIANG Zheng-feng. Foundation of measurement technology[M]. Beijing: Beijing University Press, 2010: 51-53.

Study on Beam Positioning Stability of Optical System by Optical-Electro Test Method

ZHENG Liu-nian HUANG Hong-biao LIU Zhi-gang PANG Xiang-yang

(ShangHai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS Key Laboratory of High Power and Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the vibration theory and the matrix optics theory, the principle of the optical image method to test the beam positioning stability is derived. The test method of beam positioning stability is designed, and the experimental results show that the optical image method can accurately analyze the range of the beam positioning stability error, also can analyze the value and influence degree of vibration frequency of the error, and combined with the accelerometer by the electron test method, the source of the error can be detected in the optical system. The optical-electro test method is reliable, simple and convenient, and has good engineering application value, especially for large optical system.

Key words beam positioning stability; electron test method; optical image test method; vibration frequency