

像散法对微位移和微振动的实时测量

贺锋涛^{1,2} 白永林^{1,2} 冯晓强^{1,2} 侯 洵¹

(1 中科院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)
(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 提出了一种通过对光学像散量的检测来实现对物体的微位移和微振动进行实时非接触测量的新方法. 该方法采用四象限光电探测器测量由于物体相对于光学系统焦点的偏离而引起的像散量, 参照已标定的物体位置与像散量之间的关系, 可计算出物体的实际位移或振幅. 利用这套系统对压电陶瓷片的振动状态进行了测量, 得到了振动的振幅及频率. 测量结果表明, 该系统的测量灵敏度优于 17 nm.

关键词 像散; 四象限探测; 微位移; 微振动
中图分类号 TH822 **文献标识码** A

0 引言

物体微位移和微振动的实时测量, 在信息技术与微电子机械系统 (MEMS) 等领域具有至关重要的意义. 目前能够实现亚微米位移测量的测量方法有多种, 而光学测量作为一种重要的非接触无损检测技术, 具有结构简单、精度高、稳定性好及易于实现等优点得到了广泛的应用^[1~4]. 通常把光学法测量微振动分为两类: 一类为光学干涉法, 包括偏振干涉, 外差干涉及多光束干涉等; 另一类为光学非干涉法, 如刀口法, 狭缝法等^[5].

由于光学干涉法具有灵敏度高的优点, 被广泛用于高精度微振动的测量, 而在实际使用中, 由于干涉仪腔长易受环境温度、振动、机械变形等因素影响, 使干涉仪的输出产生漂移, 在实际使用中必须采用光学反馈稳腔长系统, 以保证干涉仪的稳定性, 这使得测量系统相对较为复杂. 同时对于空间尺度在微米量级物体微振动的测量, 干涉法测量较为困难. 因此基于光学像散法原理, 本文提出了一种新型的非干涉测量方法. 通过检测物体微振动引起像散量的变化, 实现了对微米量级物体微位移和振动的实时精确测量. 与干涉法相比, 结构更加简单, 易于实现.

1 像散法理论

像散法基本原理如图 1 所示. 首先分析物体位置关系对四象限光电探测器 (S) 输出信号的影响.

根据透镜成像公式, 得

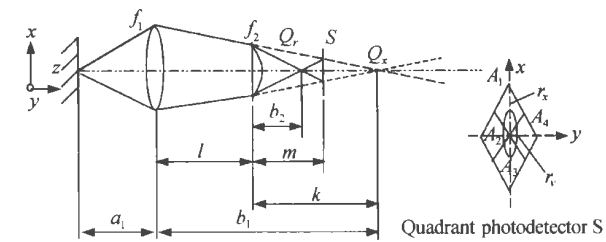
$$\left. \begin{aligned} 1/a_1 + 1/b_1 &= 1/f_1 \\ -1/k + 1/b_2 &= 1/f_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$


图 1 像散法光学系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of astigmatism measuring mode
设 r_x 、 r_y 分别为四象限探测器椭圆光斑的长轴和短轴, r_1 和 r_2 分别为物镜和柱透镜的口径半径, m 为柱透镜至四象限光电二极管的距离. 由几何关系可得

$$\left. \begin{aligned} r_x &= r_2(m - b_2)/b_2 \\ r_y &= r_2(k - m)/k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$k = b_1 - l = (a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l)/(a_1 - f_1) \quad (3)$$

因为

$$r_2 = r_1 k / b_1$$

所以

$$r_2 = r_1 - r_1 l(a_1 - f_1)/a_1 f_1 \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)、(4)可得

$$\left. \begin{aligned} r_x &= r_1 \left[1 - \frac{l(a_1 - f_1)}{a_1 f_1} \right] \times \left[\frac{m}{f_2} - 1 + \frac{m(a_1 - f_1)}{a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l} \right] \\ r_y &= r_1 \left[1 - \frac{l(a_1 - f_1)}{a_1 f_1} \right] \times \left[1 - \frac{m(a_1 - f_1)}{a_1 f_1 - a_1 l + f_1 l} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将四象限光电二极管上的光点形状呈圆形时, 即 $r_x = r_y$ 时的 a_1 值作为基准位置, 该位置即为光学系统的正焦位置, 此时

$$a_1 = \frac{2mf_1 f_2 + 2lf_1 f_2 - mlf_1}{2mf_2 - 2f_1 f_2 + 2lf_2 + mf_1 - lm} \quad (6)$$

因为 $r_1 > r_2$, 所以有

$$a_1 > f_1 \text{ 且 } 2f_1 > m$$

当给出 f_1 、 f_2 、 l 、 m 和 $a_1 + \Delta a_1$ 时, 即可求出有微

小离焦量 Δa_1 时的 r_x 和 r_y ·

假设进入物镜的光线全部进入四象限光电二极管,而能量与物镜通光孔径面积成正比,所以总光强为

$$I_0 = C_1 \pi r_1^2 \quad (C_1 \text{ 为常量})$$
$$S_1 + S_3 = C_1 \pi r_1^2 \frac{A_1}{A_1 + A_4} \quad (7)$$

二、四象限中接收到的光强为

$$S_2 + S_4 = C_1 \pi r_1^2 \frac{A_4}{A_1 + A_4} \quad (8)$$

设 C_2 为光电转换系数,则输出信号 T 为

$$T = C_1 C_2 [(S_1 + S_3) - (S_2 + S_4)] =$$
$$C r_1^2 \left[\pi - 4 \arcsin \left(\frac{|r_y|}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right) \right] \quad (9)$$

这里称 T 为聚焦误差信号,将光学系统参量 f_1 、 f_2 、 m 、 l 、 r_1 代入上面推导公式,可通过计算机算出偏离焦面一微小位移相对应的输出信号的变化,即计算出聚焦误差随离焦量的变化关系·图2为当 f_1 分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm,而其他参量为定值时聚焦误差随离焦量变化的曲线·从图2可以看出,对于每一组光学系统参量,在焦点附近都有一段聚焦误差信号线性变化的区域,在线性区我们可根据聚焦误差信号的大小得知物体位移量的大小·光学系统的参量不同,计算出的线性区大小不同,即测量范围不同,同时系统的灵敏度也不同·灵敏度高时测量范围较小,可取不同的参量得到合适的灵敏度和测量范围·

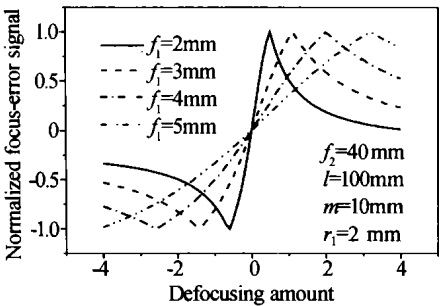


图2 计算得到的聚焦误差随离焦量变化曲线
Fig.2 Calculated FES curve in different

2 实验测量装置及结果

实验装置如图3所示,半导体激光器中心波长为 650 nm,最大功率为 100 mW,由半导体激光 LD 发出的椭圆的线偏振光,经过准直镜 CL 成平行光束,穿过偏振分束镜 PBS 及 1/4 波片 QWP,此波片的光轴与入射的线偏振光成 45° 夹角,经由 1/4 波片的作用而形成圆偏振光,最后通过物镜聚焦到测量物体

上·从测量体反射的圆偏振光经物镜,再一次通过 1/4 波片形成与原入射光相互垂直的线偏振光,此时激光束不在通过偏振分束镜,而是经过偏振分束镜被四象限探测器 QD 所接收,其产生的光电信号经过一个四输入端的加减运算放大器,将信号经过加减运算放大之后形成聚焦误差信号·装置中采用数值孔径 0.65 的物镜,可使测量光点大小达到微米量级,这使得我们可对空间尺度在微米量级的物体进行测量·由于测量光点很小,所以对测量物体表面的平整度也要求较低·

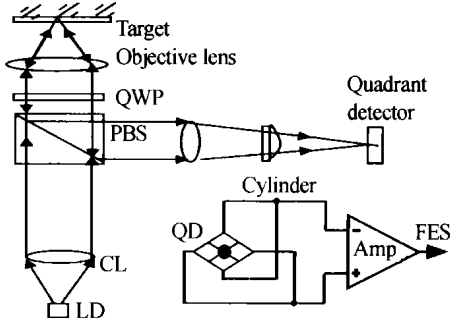


图3 测量装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of astigmatism measuring system

由前面的计算分析可知,当被测物体沿光轴振动时,将会引起四象限探测器的聚焦误差信号发生变化,在焦点附近这一变化是线性的·因此,精确测量出系统聚焦误差信号随测量物体位置的变化曲线后,可根据曲线的线形确定系统的线性响应范围,对于某一确定的光学系统,这一线性区的大小是固定的·为了精确测量被测物体位置与聚焦误差输出之间的关系,将一平面反射镜固定在高精度电控微动平台上,使反射镜沿光轴方向匀速扫描·这里使用的微动平台是 PI 公司的 M-111 型,其移动最大范围 15 mm,最大速度 2.5 mm/s,设计分辨率为 7 nm,测量中我们使用的扫描速度为 210 $\mu\text{m/s}$,移动范围 1 mm·实验中使用 HP50543A 数字示波器采集聚焦误差曲线·

图4是测出的物体位置与聚焦误差信号输出之间的关系曲线,从图4可以确定系统输出信号随物体位置线性变化的区域为 5.04 μm ·对设计好的测

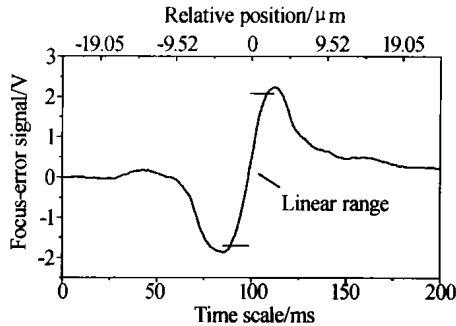


图4 线性响应区测量曲线
Fig.4 The FES curve for linear response distance measuring

量系统,这一线性范围将为一固定值.在这一区域,可根据四象限探测器的输出变化得出物体位置的变化.由于四象限探测器的响应频率最高可以达100 MHz,所以这套系统可对振动频率小于100 MHz,振幅在测量灵敏度范围内的振动做出响应.

采用这套系统对压电陶瓷片的振动幅度进行了测量.进行测量之前,首先必须重新测量压电陶瓷片在系统线性区变化所对应输出电压信号的变化值,因为对不同的测量物体,其表面反射率、系统测量时的激光功率等可能都会发生变化,这将导致在线性区内同样的振动变化其信号输出会有所不同.为此我们先将压电陶瓷片固定,使物镜上下扫描,在焦点附近的扫描曲线如图5所示.再根据曲线的线形判断与线性区对应的输出电压变化值为4.18 V.由于前面已测出系统的线性区为5.04 μm,即在线性区内,对该压电陶瓷样品5.04 μm的位置变化对应聚焦误差输出为4.18 V.因此,在线性区内,只要我们测出振动时聚焦误差输出电压的变化量,即可根据这一电压变化量得出压电陶瓷片的振动幅度.

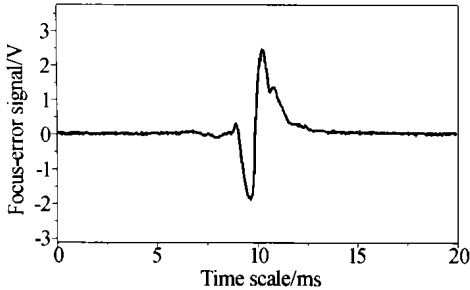


图5 压电陶瓷片的线性区聚焦误差信号
Fig.5 The FES output when the piezoelectric ceramic slice move over the focus point

测量时,采用微调装置将压电陶瓷片调至系统的测量区域,然后用标准的正弦电压信号激励压电陶瓷片使其起振.图6为测量结果:(a)图为激励电压峰值6 mV、频率8.1 kHz时采集到的压电陶瓷片振动曲线,由该振动曲线测量其振幅为17 nm;(b)图为激励电压峰值42 mV、频率10.3 kHz时采集到的压电陶瓷片振动曲线,由该振动曲线测量其振幅为112 nm;两次测量得到的压电片振动频率与激励电压频率相同.可以看出,本文设计的这种像散振幅测量系统可以在较高频率内比较精确地表现出物体的微小振动,其测量分辨率优于17 nm(试验中观察到的最小振幅).由于此系统只有对沿光轴方向的位移作出响应,因此必须调整光学系统光轴或测量体的方向,使得测到的误差信号输出最大,以保证测量体的振动位移方向与光轴方向相同.实验中,外界的振动会严重影响振动系统在小振幅情况下的振动稳定性,从而影响测量的准确度,应采取防震措施以尽量避免外界振动干扰.同时放大电路的

噪音会影响系统的探测灵敏度,测试中,对放大电路也要优化设计,以尽量降低电路噪音.

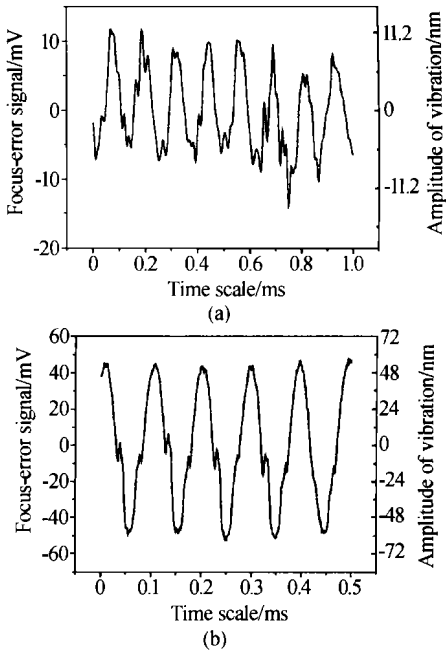


图6 压电陶瓷片的振动曲线,(a)振幅为17 nm,
(b)振幅为112 nm

Fig.6 Vibration curve of the piezoelectric ceramic slice,the amplitude measured of the curve in Fig.(a) in 17 nm, and 112 nm in Fig.(b)

3 结论

本文提出了一种利用像散检测系统对微位移和微振动进行测量的新方法,采用四象限检测及加减运算放大电路实现了对物体微位移和微振动过程中像散量的检测,经过简单变换,最终实现了对微位移和微振动的高准确度实时测量.该方法相对于干涉方法而言,具有以下特点:结构简单,易于实现;对反射面没有特殊要求,测量时可直接将光点聚焦到测量物体表面,不用在物体表面加反射镜;聚焦后微米大小的光斑可对空间尺寸在微米量级的物体进行测量.

参考文献

1 Chen J, Ishii Y, Murata K. Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode. *Appl Opt*, 1988, **27**(1): 124~128

2 Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T, et al. Measurement of spatially nonuniform phase changes of a self-pumped phase-conjugate mirror. *Opt Eng*, 1999, **38**(9): 1553~1559

3 Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T, et al. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Appl Opt*, 2000, **39**(25): 4593~4597

4 Wang X F, Wang W, Qian F, et al. Laser diode interferometer used to measure displacements within large range with a few

nanometer accuracy · *Opt & Laser Tech*, 2001, **33** (4): 219 ~ 223

5 Yan Y, Chen F, Hu X, et al · *J of Tianjin University*, 2001, **34** (5): 615~618

An Astigmatic Method for Real-time Nanometer Vibration Measurement

He Fengtao^{1,2}, Bai Yonglin^{1,2}, Feng Xiaoqiang^{1,2}, Hou Xun¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an, China, 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2002- 10- 16

Abstract A simple, compact and non-contact astigmatic method for real-time nanometer displacement and vibration measurement is presented. A quadrant detector measures the astigmatism caused by the deviation of the target to the focus point, and the focus error signal, composed of the outputs of the quadrant detector, indicates the amount of the deviation. Referenced to the calibrated linear correlations between the deviation and the focus error signal, the deviation or the amplitude of vibration can be obtained. The measurement system is setup and the vibration of a piezoelectric ceramic slice that excited by the low AC voltage is measured. The results show that the system can recognize the displacement less than 17 nm.

Keywords Astigmatism; Quadrant detector; Nanometer vibration; Nanometer displacement



He Fengtao was born in 1974. He received his master degree in 2000 from the Department of Physics, Northwest University. Now he is a Ph.D. candidate in State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His current research interest lies in the near-field optics and height density optical data storage.