

文章编号 1004-924X(2011)04-0844-06

显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线

朱 猛,黄战华,王小军,蔡怀宇

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学),天津 300072)

摘要:采用显微动态散斑相关法来测量压电陶瓷的压电位移特性并标定其线性区间。推导了透射相位衍射体在显微系统中的散斑光强互相关函数,并讨论了显微系统分辨率与放大倍率对测量微位移的影响。为在计算中避免散斑去相关的影响,采用了逐级位移相关叠加法。设计了显微散斑采集系统并测量了压电陶瓷的位移磁滞曲线。实验结果表明:使用放大倍率为100、数值孔径为1.25的显微物镜,在测量光路放大倍率为42.1时,测量位移的理论精度达到0.082;考虑衍射极限时,实际的极限位移分辨率为0.348 μm 。本测量系统满足压电陶瓷位移曲线测量及线性区间标定的要求;与其他方法相比较,该方法简化了测量光路,提高了运算速度,且对装配误差要求低。

关键词:动态散斑;散斑相关;压电陶瓷;曲线拟合;磁滞曲线

中图分类号:O436.1;TN384 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111904.0844

Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation

ZHU Meng, HUANG Zhan-hua, WANG Xiao-jun, CAI Huai-yu

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University)
of the Ministry of Education, College of Precision

Instrument and Opto-electronics Engineering, University of Tianjin, Tianjin 300072, China)

Abstract: Dynamic speckle correlation method was presented to measure the piezoelectric ceramic characteristic curves and scale linear intervals in this paper. Firstly, the speckle intensity cross-correlation of a projection phase diffuser in the micro-system was calculated, and influences of the resolution and magnification of the micro-system on object displacement measuring were also discussed. During the calculation of cross-correlation, a progressive correlation method was used to avoid the de-correlation caused by the object surface. A sampling system for micro speckles was designed and the hysteresis curve of displacement induced by a piezoelectric ceramic was measured. Experimental results indicate that the theory precision of the measuring system is 0.082 μm when a micro objective is with magnification of 100 and NA of 1.25. In consideration of the diffraction limit, the theory precision of the measuring system is 0.348 μm . It concludes that the method satisfies the requirements of measuring and scaling of linear intervals. Comparing with other methods, the dynamic speckle correlation can improve the calculation speed and measuring precision.

Key words: dynamic speckle; speckle correlation; piezoelectric ceramic; curve fitting; hysteresis curve

收稿日期:2010-05-06;修订日期:2010-08-24.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2007BA000013)

1 引言

压电陶瓷是微位移、微制动的主要器件,在精密测量中有着重要作用。在干涉相位测量中压电陶瓷是相移的主要制动元件,目前测量相移最精确的方法是等步长法,该方法要求压电陶瓷的位移必须具有较高的线性度。压电陶瓷非线性位移包括单一非线性、磁滞现象和线性偏移^[1-2]。对于高精度相移来说,单一非线性的影响最小,磁滞现象和线性偏移则采用线性区间标定和分段线性的方法。所以,标定出线性区间是压电陶瓷位移测量的要点。

已有的测量压电陶瓷特性的方法是干涉条纹测量法、光杠杆法等^[3-5]。通常测量压电陶瓷压电与位移关系采用光学相干法,这种方式需要搭建稳定的干涉光路,后期的条纹数据图像处理过程繁琐,同时干涉条纹的质量也会影响测量的精度。而利用动态散斑技术测量位移,方法简单,数据处理方便,目前极受同行关注^[6-9]。散斑光强场服从高斯分布,在傍轴和非傍轴区域散斑位移相同,强度统计分布相同,所以在测量系统中无需考虑离轴及视场等影响。散斑位移表征了散射体表面的位移,物体位移和散斑位移的关系取决于光路与位移类型,通过计算位移前后光场强度的互相关函数即可得到散斑场的位移信息。散斑相关的方法具有非接触、高精度的优点,在测量面内位移及离面位移领域有着广泛的应用。动态散斑则利用位移与时间的对应关系测量物体的速度,也可以在光路中加入滤波元件,通过测量功率谱来测量速度。散斑相关和动态散斑都是通过物体表面的反射或投射的散斑位移来反映物体位移的,测量方式在本质上相同。本文提出采用显微动态散斑相关法来测量压电陶瓷的压电位移并标定其线性区间,利用显微镜测量提高系统的放大倍率,进而实现了微位移的测量,同时利用逐次叠加相关得到了压电陶瓷迟滞时间关系曲线。

2 动态散斑位移测量原理

2.1 接收面散斑强度互相关

如图1所示光路,平面波入射透明光学粗糙衍射体平面 O ,光束照明半径为 ω 。显微目镜位于 L_1 平面,散斑场经过显微系统成像在CCD接收平面 R 上。

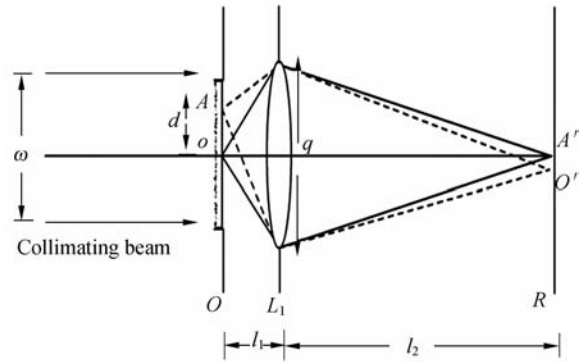


图1 测量系统光路原理图

Fig. 1 Block diagram of measuring optical system

接收面上动态散斑场的光强互相关函数可以表示为:

$$\langle I_1(X_1) I_2(X_1 + \Delta X) \rangle = \langle I_1(X_1) \rangle \langle I_2(X_1 + \Delta X) \rangle + |\langle J_1(X_1, X_1 + \Delta X) \rangle|^2, \quad (1)$$

其中 $I_1(X_1)$, $I_2(X_1 + \Delta X)$ 分别表示衍射体位移前后的散斑场强度。 $J_1(X_1, X_1 + \Delta X)$ 表示位移前后的散斑场复振幅交叉相关函数。考虑归一化后的光强互相关函数为:

$$\langle J_1'(X_1, X_1 + \Delta X) \rangle = 1 + \frac{|\langle J_1(X_1, X_1 + \Delta X) \rangle|^2}{\langle I_1(X_1) \rangle \langle I_2(X_1 + \Delta X) \rangle}, \quad (2)$$

其中 $J_1(X_1, X_1 + \Delta X) = \langle U(X_1) U^*(X_1 + \Delta X) \rangle$, 为复振幅互相关函数。

2.2 动态散斑

考虑复振幅为 $U = U_0 \exp(ikx)$ 的平面波入射到平面 O 的透明相位衍射体上,出射光场表示为:

$$U = U_0 a \exp(ikx) \exp[i\phi(x)], \quad (3)$$

其中, $\phi(x)$ 代表引入的随机相位因子, 这里假设衍射屏对光强分布的影响为常数 α , 随机相位因子表示散斑信号在接受面上的干涉叠加为随机的。任意两点的随机相位因子差的一阶矩可以表示为^[10]:

$$\langle \exp\{i[\phi(x) - \phi(x + \Delta x)]\} \rangle = \begin{cases} 1 & \Delta x \leq h \\ 0 & \Delta x > h \end{cases}, \quad (4)$$

其中 Δx 为物面距离, h 为物面相位相关距离。即当物面移动距离在相位相关距离内时可认为其相位调制因子恒等于 1。

如图 1 所示, 平面 R 上的复振幅可以表示为:

$$U_1(x_p) = \int U(x)K(x, x_p)dx, \quad (5)$$

其中 x_p 为平面 R 上一点, $K(x, x_p)$ 为平面 O 到平面 R 的脉冲响应函数。根据傅里叶光学理论 $K(x, x_p)$ 可以表示为^[10]:

$$K(x, x_p) = \frac{-kq^2}{4\pi l_1 l_2} \exp\left[\frac{-k^2 q^2}{4} \left(\frac{x}{l_1} - \frac{x_p}{l_2}\right)^2\right] \times \exp\left[ik\left(l_1 + l_2 + \frac{x^2}{2l_1} + \frac{x_p^2}{2l_2}\right)\right], \quad (6)$$

将式(4)、式(5)带入式(3), 经化简积分后带入式(2)得到平面 R 上距离为 ΔX 两点的散斑强度互相关函数表达式为:

$$\langle J_1'(X_1, X_1 + \Delta X) \rangle = 1 + \exp\left\{\left[-\frac{k_0 q}{2l_2} \left(\Delta X - \frac{l_2 - F}{F} d\right)\right]^2 - \frac{d^2}{2q^2}\right\}, \quad (7)$$

其中 q 为透镜孔径, f 为焦距, D 为物平面实际位移, ΔX 为接收平面相关距离。式(7)中 $\frac{l_2 - F}{F} = M$ 为成像系统的放大倍率。散斑光强的互相关

函数是一个中心在 Md 的高斯函数, 即通过测量接收平面强度互相关函数的峰值平移量可以测得物面位移, 并且两者之间存在 M 倍放大关系。

3 测量误差与精度分析

3.1 测量误差

测量光路如图 2 所示, 在位移测量中误差主要来源于两方面: 系统成像放大倍率的误差和相关曲线拟合中心峰值位置误差。实际位移与 CCD 采集信号的对应关系如下:

$$D = Md, \quad (8)$$

式中 M 为显微系统的成像放大倍率, 由物镜、目镜及 CCD 传感器三者的参数及位置决定; D 为 CCD 像面高斯函数的中心位置 $D = Na$, a 为 CCD 像素尺寸, N 对应离散高斯函数的移动像素数。则式(8)可以写为

$$d = \frac{Ma}{M}, \quad (9)$$

则位移测量误差为:

$$\delta d = a \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial M}\right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial N}\right)^2 \sigma_N^2} = a \sqrt{\left(\frac{N}{M}\right)^2 \sigma_M^2 + \frac{1}{M^2} \sigma_N^2}. \quad (10)$$

式(10)表明, 放大倍率 M 越大则曲线拟合的误差影响越小, 当 a 值已知为 $3.45 \mu\text{m}$, 一般曲线拟合的误差在 ± 0.2 像素以内, 测量位移间隔 N 为 5 个像素, 放大倍率取 100, 定标测量误差为 ± 0.5 , 这时位移测量的合成误差为 $0.014 \mu\text{m}$ 。

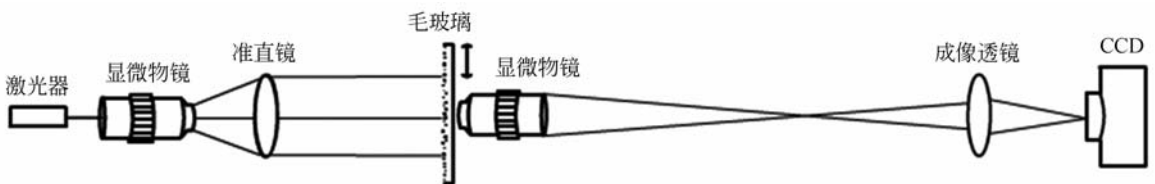


图 2 影像测量系统结构示意图

Fig. 2 Framework of image measuring system

3.2 精度分析

如式(10)所示,理论测量精度为单像素对应的实际位移,即 $N=1$ 时 d 的值。但考虑到实际物镜分辨率的影响,测量时的成像放大倍率不能过大,测量精度的下限为物镜的分辨率,上限为物体表面的相位相关距离,数值孔径为 NA ,测量使用波长为 λ ,显微物镜在相干光照明下的分辨率 Y 为^[11]

$$Y = 0.82 \frac{\lambda}{NA} . \quad (11)$$

常用的浸油显微物镜数值孔径最大为 1.25,波长为 530 nm 时,分辨率 $Y=0.348$,若要提高测量精度可以使用白光散斑法或采用反射式照明。

4 测量实验与结果

4.1 成像放大倍率标定实验

成像放大倍率是误差的主要来源,有效地标定 M 值可以减小误差,提高位移曲线测量的采样数量,对于准确标定线性区间有重要意义。标定光路采用图 2 所示的测量光路,将毛玻璃换成分辨率板,光源采用白光 LED。分辨率板的最小划线刻度为 0.1 mm。物镜采用 100 倍,数值孔径为 1.25 的浸油显微物镜,目镜放大倍率为 10。成像 CCD 单元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,像元数为 2448×2048 。

图 3 所示为分划板显微成像图,图中标尺长度为 0.05 mm。分划板单位刻度对应像面 1 220 个像素,计算得到系统的放大倍率为 42.1。由式(8)得到不考虑衍射极限时,理论精度可达到 $0.082 \mu\text{m}$ 。与式(11)计算出的精度相比应取后

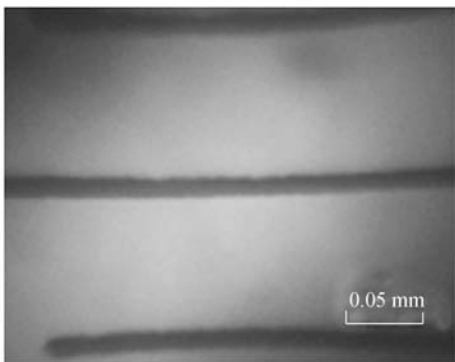


图 3 成像放大倍率标定图

Fig. 3 Image of M scaling measurement

者,即采用更高的放大倍率也不利于提高测量精度。

4.2 压电陶瓷位移测量实验

对被测压电陶瓷施加逐渐升高和降低的电压,并记录像面上的散斑强度图,图 4 为电压为 31.62 V 和 46.8 V 时的散斑一维强度信号。计算不同电压下的散斑强度图的互相关值,得到相关函数曲线如图 5 所示。

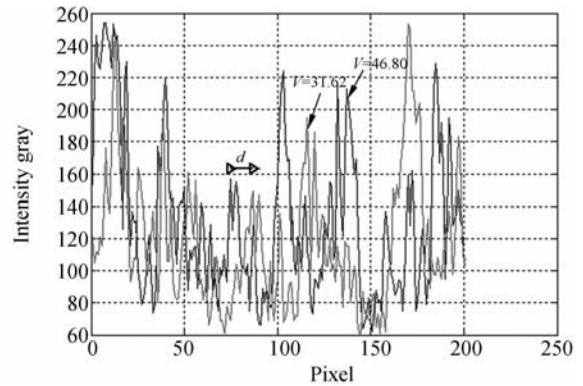


图 4 散斑一维位移图

Fig. 4 Experiment of scale establishment

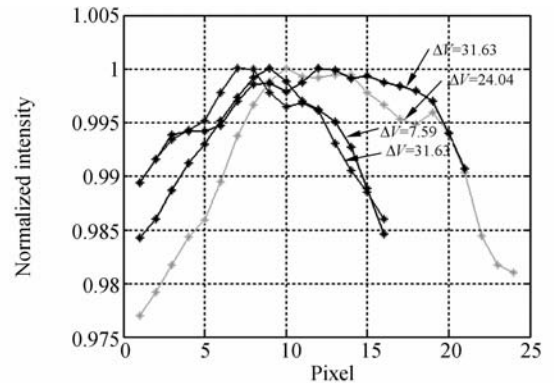
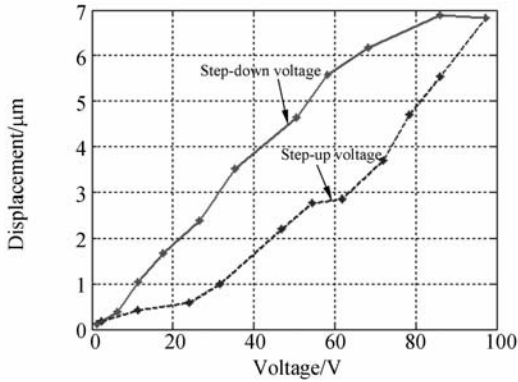


图 5 不同电压散斑强度相关曲线

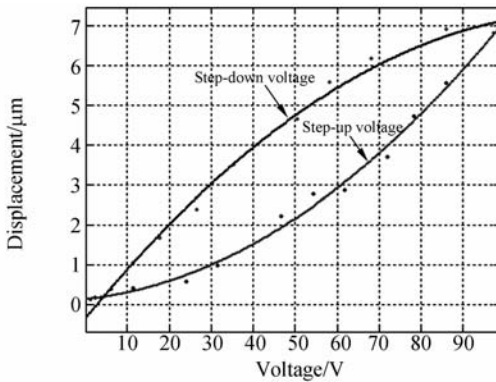
Fig. 5 Curve of speckle intensity correlation with different voltages

图 5 中位移量越小的两散斑强度相关性越强,当电压差值为 31.63 V 时曲线已失真,拟合误差较大,所以采取逐次相关的方法,利用电压差值在 10 V 左右的强度图进行相关运算,得到的位移结果逐次累加,这样既可避免位移过大导致的去相关,又能保证位移曲线的抽样精度。经计算得到的位移曲线如图 6,压电陶瓷的压电位移存在



(a) 压电陶瓷位移磁滞曲线

(a) Displacement characteristic curves



(b) 拟合曲线

(b) Fitting of characteristic curves

图 6 压电陶瓷位移测量曲线

Fig. 6 Piezo displacement measuring curves of piezo-electric ceramic

明显的磁滞现象,线性位移区间为 20.56~42.35 V 和 61.63~83.21 V。当需要较大的位移区间时,可以采用升压与降压分段标定。

5 结 论

本文采用动态散斑相关法有效地测量了压电陶瓷位移特征曲线,测量光路简单,但精度受限于使用物镜的分辨率极限,目前常用的大数值孔径的显微物镜 $NA=1.25$,激光波长 530 nm,相干照明情况下分辨率达到 $0.348 \mu\text{m}$ 。系统误差来自放大倍率的确定,通过分划板标定放大倍率可以准确地得到放大倍率。相关方法测量中相关距离应大于一个散斑距离并小于物面的相关尺寸,采用逐级相关的方法可以避免去相关性带来的误差。实验证明采用散斑相关方法的精度与干涉测量法在同一量级,但测量简单,也可以避免复杂的条纹处理过程。进一步提高测量的精度可以采用白光散斑法、反射式照明或提高物镜的分辨极限。

参考文献:

- [1] 崔玉国,孙宝元,董维杰,等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. 光学精密工程,2003,11(3):271-272.
CUI Y G, SUN B Y, DONG W J, *et al.*. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(3):271-272. (in Chinese)
- [2] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程,1998,6(5):26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H B, Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(5):26-32. (in Chinese)
- [3] 潘在友,刘惠兰,冯丽爽,等. 基光杠杆原理测量压

电陶瓷压电特性的方法[J]. 红外与激光工程,2008,37(Supp.):197-199.

PAN Z Y, LIU H L, FENG L S, *et al.*. Testing method of dilation of the piezoelectric ceramics based on optical lever theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(Supp.): 197-199. (in Chinese)

- [4] 吴新民,陈进榜,朱日宏,等. 用干涉法测量压电陶瓷的动态频率响应特性[J]. 红外与激光工程,2002,31(3):257-259.

WU X M, CHEN J B, ZHU R H, *et al.*. Measuring the dynamic frequency response of piezoelectric ceramic by interference method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002,31(3):257-259. (in Chinese)

- [5] 李明,薛晨阳,翟成瑞. 压电陶瓷微位移器特性测试

实验研究[J]. 纳米科技,2009,6(3):61-63.

LI M, XUE C Y, ZHAI C R. Laboratory study of characteristic testing for piezoelectric ceramic micropositioning[J]. *Nanoscience & Nanotechnology*, 2009,6(3):61-63. (in Chinese)

[6] HECTOR J RABAL, ROBERTO A BRAGA JR. *Dynamic Laser Speckle and Applications* [M]. New York: CRC Press, 2009.

[7] ALEXEI A KAMSHILIN, SERGUEI V MIRIDONOV, IGOR S SIDOROV, *et al.*. Statistics of dynamic speckle in application to distance measurements[J]. *Optical Review*, 2009,16(2):160-163.

[8] MIRIDONOV S V, SIDOROV I, NIPPOLAINEN E, *et*

al.. Accuracy of measuring systems using dynamic speckles[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009,26(4):745-753.

[9] LENCINA A, VAVELIUK P. Modulated speckle simulations based on the random-walk model [J]. *Optics Letters*, 2003,28(9):1748-1750.

[10] YOSHIMURA T. Statistical properties of dynamic speckles [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1986,3(7):1032-1042.

[11] MAXBORN, EMIL WOLF. *Principles of optics* [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.

作者简介:



朱 猛(1984—),男,河北秦皇岛人,博士研究生,2006年于燕山大学获得理学学士学位,2008年于天津大学获得工学硕士学位,主要从事全息与散斑检测、光学信息处理等方面的研究。E-mail:zhumeng@tju.edu.cn



王小军(1984—),男,内蒙古通辽市人,硕士研究生,2008年于天津大学获得工学学士学位,主要从事二维光谱检测与处理方面的研究 E-mail:nkwxj@163.com



蔡怀宇(1965—),女,湖南涟源人,博士,副教授,1988年、1991年、2000年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事信息光学、光电技术及仪器 and 图像处理等方面的教学和科研。E-mail:hycail@tju.edu.cn

导师简介:



黄战华(1965—),男,湖北省孝感人,博士,教授,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年、1992年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制的研究。E-mail:zhanhua@tju.edu.cn