

基于 Nd:YAG 激光回馈干涉效应的 PZT 精密测量技术与系统

邓 勇, 刘 宁, 曹红蓓, 郭龙秋

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 压电陶瓷在精密控制中具有重要作用, 而其在快速控制中的实际高频响应却缺少有效且精密的方法。总结了目前测量压电陶瓷特性的方法, 分析了测量中存在的困难和不足, 使用基于激光回馈干涉原理的 Nd:YAG 微片激光回馈干涉测量系统对压电陶瓷的动态特性进行了研究。使用两种压电陶瓷在 100 Hz~7 kHz 驱动电压下对位移响应进行了测量, 相应测量位移范围 7~34 nm。测量精度达到纳米量级, 对较高的振动频率实现了准确测量。该方法具有很高的测量精度, 对被测对象要求较低。

关键词: Nd:YAG; 激光回馈; 压电陶瓷

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3434-05

Nd:YAG laser feedback interference effects based PZT precision measurement technology and system

Deng Yong, Liu Ning, Cao Hongbei, Guo Longqiu

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The piezoelectric ceramic plays an important role in the precision control system, but it lacks effective and precise measurement methods for its actual high frequency response in fast control system. The present methods of measuring characteristics of piezoelectric ceramics were summarized in this paper and their difficulties and shortages were also analyzed, the laser feedback interference principle based Nd:YAG microchip laser feedback interference measurement system was used to study the dynamic characteristics of piezoelectric ceramics. The displacement of two kinds of piezoelectric ceramics was measured with the drive frequency range from 100 Hz to 7 kHz, and the corresponding displacement scale was 7–34 nm. The accuracy could reach nanoscale, accurate measurement under higher drive frequency was also achieved. The method has very high measurement accuracy, and lower requirements on the measured object.

Key words: Nd:YAG; laser feedback; piezoelectric ceramics

0 引言

压电陶瓷微位移器是近年来发展起来的新型微位移器件,它具有体积小、质量轻、精度和分辨率高、频响高、出力大等优点,在光学、电子、航天航空、机械制造、生物工程、机器人等技术领域得到了广泛应用,而且日益受到重视^[1]。目前对于压电功能材料的研究主要集中在逆压电效应中的静态特性,而对于动态特性方面的研究则显得相对落后^[2]。如在精密异形曲面的加工中,一般圆度的变化在几十纳米至几百微米之间,常规的加工手段难以加工,压电陶瓷为解决这一问题提供了契机,而 PZT 输出位移、工作频率和负载能力之间存在着密切的关系,在需要较高频响场合位移输出幅度受到很大限制^[3]。在一些精密动态控制应用中,不仅对压电陶瓷静态特性提出较高要求,在高频域的位移响应也同样起到了至关重要作用。目前测量压电陶瓷基本特性的仪器和方法有电涡流位移计、应变式位移传感器、激光测距仪^[3]、电感测微仪^[4]、迈克尔逊干涉法^[5-6]、光纤 Fabry-Perot 干涉法^[7]、光纤位移干涉仪^[8-10]、激光散斑照相法^[11]等。上述方法中,电涡流位移计、应变式位移传感器和电感测微仪精度较低,而且电涡流位移计受环境影响较大。激光测距仪的分辨率是亚微米量级,迈克尔逊干涉法和光纤 Fabry-Perot 干涉法光路调节困难,压电陶瓷的非平行振动或干扰可能使激光偏离光路无法形成干涉从而使方法失效,而且需要在压电陶瓷上粘贴反射镜,不仅将对压电陶瓷的静态输出特性产生影响^[12,31],尤其测量高频动态特性时也会产生不可忽略的影响,通过干涉条纹的计数使精度达到 $\lambda/2$ 。光纤位移干涉仪法虽然不需要配合反射镜,经过改进的装置^[8]可以使测量精度低于 $\lambda/2$,但是压电陶瓷所加电压较低时将出现严重偏差。激光散斑照相法使用计算机处理 CCD 成像难免出现误差。文中实验采用清华大学精密仪器系张书练老师课题组研制的 Nd:YAG 激光回馈系统对几种压电陶瓷的频率响应特性分别进行了测量。测量结果精度高,可达纳米量级,比常规方法具有较高的精度。由于是通过物体表面漫反射光进行测量,所以不需要靶镜,实现了非接触测量,压电陶瓷的振动可能引起的反射光的微小偏离不会影响测量,克服了常规干

涉法对光路要求严格的问题。

1 实验原理

微片 Nd:YAG 激光回馈测量光路系统^[13]如图 1 所示,基本原理是微片 Nd:YAG 激光器的移频光回馈效应和外差式相位测量原理。

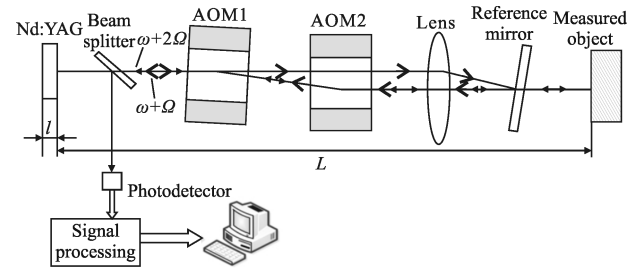


图 1 微片 Nd:YAG 激光回馈效应测量物体运动位移的基本原理
Fig.1 Principle of microchip Nd:YAG laser feedback effects measuring displacement of moving object

激光回馈系统由内腔和外腔构成:内腔是激光器谐振腔,腔长用 l 表示;外腔是激光器输出端面与待测目标之间的部分,腔长用 L 表示,外腔长的变化量 ΔL 即为待测目标的运动位移。微片 Nd:YAG 激光器输出频率为 ω 的激光,光束经过两个声光移频器 AOM1 和 AOM2 后,入射到待测目标上,部分反射或散射光沿入射光路再次经过两个声光移频器后回到激光器谐振腔内,使微片激光器的输出光产生功率调制。移频光回馈引起的激光器输出功率相对调制为^[14]:

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I} = G(2\Omega)\kappa \cos(2\Omega t + \varphi + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: I 为激光器稳态输出功率; $G(2\Omega)$ 为增益项,它与移频量 2Ω 相关; κ 为外腔反射系数; φ_0 为信号的固定相位偏移; φ 与回馈外腔的腔长有关,其变化量 $\Delta\varphi$ 反映了被测物体的运动位移。功率调制信号经光电探测器转化为电信号后经电路处理形成测量信号。

图中实心箭头为测量光光路,用于测量物体的位移,空心箭头为参考光光路。参考光的作用是测量系统内部由热效应等因素引起的误差。参考光移频后经过光电探测器成为信号为 40 kHz 的电信号,并使用带宽 40 kHz 的带通滤波器滤波,通过相位卡与电路中的电信号比较相位得到系统内部光程变化。测量光经过移频后最终形成 80 kHz 的电信号,通过

带宽 40 kHz 的带通滤波器和相位卡后得到系统内部和被测对象引起的光程变化。两路探测信号测得值相减避免了仪器自身不稳定造成的影响。

从声光移频器 AOM 的驱动源中可以获得标准的正弦电信号:

$$U=|U|\cos(2\Omega t-\varphi_1) \quad (2)$$

比较光信号和电信号,通过外差测相即可解调出相位 φ 的变化量 $\Delta\varphi$ 。

$$\Delta L = \frac{c}{2n\omega} \Delta\varphi \quad (3)$$

式中: c 为真空中光速; n 为空气折射率; ΔL 为待测目标的运动位移。

2 实验系统与装置

2.1 测量系统结构图

实验测量系统结构如图 2 所示。

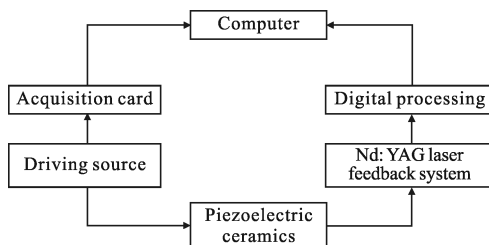


图 2 实验测量系统图

Fig.2 Experimental measurement system diagram

实验中使用信号发生器作为驱动电源对压电陶瓷提供幅值为 5 V 的正弦电压,同时将电压信号通过采集卡 AD 转换后作为位移同步信号。Nd:YAG 激光回馈系统对压电陶瓷的测量信号通过信号处理后送入计算机。

2.2 测量装置

图 3 为 Nd:YAG 激光回馈系统,其输出 1 064 nm



图 3 Nd:YAG 激光回馈系统

Fig.3 Nd:YAG laser feedback system

红外测量光经过其右侧空心金属杆头部的棱镜被转向下,压电陶瓷放在金属杆头部下方。测量光打在压电陶瓷端面上,对于一些薄壁压电陶瓷,由于系统内部有聚焦透镜,测量光光斑大小小于 1 mm,照射在薄壁上的部分散射光仍能满足测量要求。

图 4 是实验中使用的两种压电陶瓷,左侧是在中国科学院声学研究所定制的压电陶瓷,规格为 20 mm×18 mm×20 mm,即外径 20 mm,内径 18 mm,长 20 mm,标称 0.3 $\mu\text{m}/100\text{V}$ 。测量时使测量光打在陶瓷 1 mm 宽的端面上。右侧是中国电子科技集团第二十六研究所研制的 WTYD 型叠片压电陶瓷,厚度 4.5 mm,最大驱动电压 200 V,最大位移 2.3 μm 。

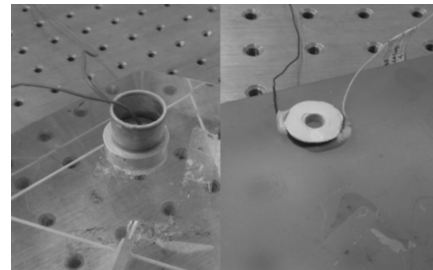


图 4 两种压电陶瓷

Fig.4 Two kinds of piezoelectric ceramics

3 实验

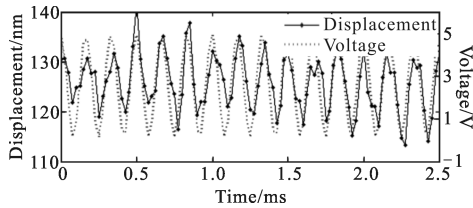
3.1 动态响应的测量

动态响应是衡量压电陶瓷的一个重要指标。在精密异形曲面的加工中,原理上 PZT 的输出位移将随曲面回转角度的不同而变化,其输出的变化频率将与曲面的回转速度成正比,而 PZT 输出位移、工作频率和负载能力之间存在着密切的关系对 PZT 的动态应用意义重大^[3]。

图 5 为声学所定制的压电陶瓷 6 000 Hz 频率点的测量结果。

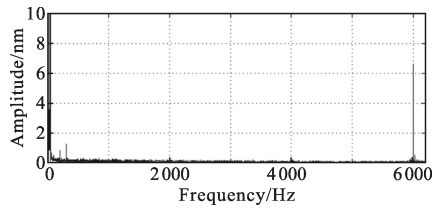
图 5 中,信号发生器提供的电压为幅值 5 V 正弦电压,频率为 6 000 Hz 时的测量结果。图 5 中(a)图为位移原始测量信号,由于仪器在长期工作中存在缓慢零漂,所以初始位移不为 0,但对动态测量没有影响。图中实线为位移数据测量曲线,可以看出明显周期性,且与虚线的电压信号周期性一致(但并不代表两信号同相位)。图(b)为原始位移信号的频谱图,从图中看出存在明显的 6 000 Hz 的信号,同时在低频附近存在较强的干扰。通过带通滤波方法过滤干

扰和偏置的位移信号如图 5(c)所示,与电压信号周期非常一致,滤波后的频谱图如图 5(d)所示。图中读出在电压为幅值 5 V 正弦信号时,频率为 6 000 Hz 位移变化范围约 14 nm。



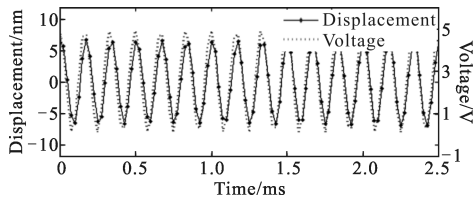
(a) 原始信号(6 kHz)

(a) Original signal(6 kHz)



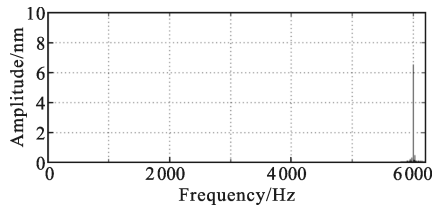
(b) 原始信号频谱

(b) Amplitude spectrum of original signal



(c) 滤波信号(6 kHz)

(c) Filtered signal(6 kHz)



(d) 滤波信号频谱

(d) Amplitude spectrum of filtered signal

图 5 定制压电陶瓷在幅值 5 V,6 000 Hz 电压条件下的响应

Fig.5 Response of customized piezoelectric ceramics under the condition of amplitude 5 V, 6 000 Hz

通过上面的测量方法对两种压电陶瓷分别从 100 Hz~7 kHz 范围内的一些频率点的动态响应进行了测量,测量结果如图 6 所示。

图中曲线上方为 WTYD 型叠片压电陶瓷、下方为声学所定制压电陶瓷在幅值 5 V 正弦电压,不同

频率下的位移峰峰值大小曲线。WTYD 型压电陶瓷在 100~800 Hz 位移在 32 nm/5 V 左右,与 2.3 μm/200 V 有一定差距。从 1~3.5 kHz 范围内位移幅度随着电压频率的增大而逐渐减小,从 4~5.5 kHz 频率范围内位移相对保持稳定,从 5.5~7 kHz 响应位移迅速减小。而下方位移曲线为声学所定制的压电陶瓷的位移-频率曲线。图中看出 100 Hz~5 kHz 频率范围内位移输出为 15 nm/5 V 左右,与标称的 0.3 μm/100 V 比较一致,而且在比较宽的频率范围内保持一定的位移输出,在 5~7 kHz 输出位移逐渐减小。

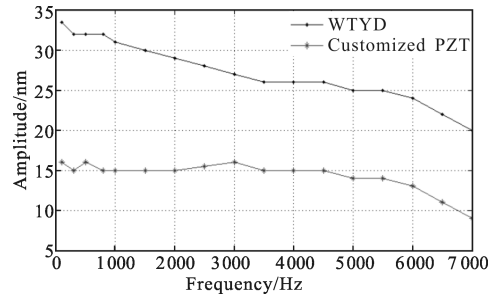


图 6 振幅与驱动电压频率之间的关系

Fig.6 Relationship between amplitude and voltage frequency

从以上数据看出,不同压电陶瓷位移振幅对频率的响应存在一定的差距,同一种压电陶瓷对不同频率的响应也不同。在低电压下的实际位移与高电压下的宏观位移计算出的微观位移可能存在不可忽略的差距。所以,在实际精密加工应用中,通过理论计算在低电压下的位移输出可能将对精密加工带来较大误差。

3.2 实验分析

在压电陶瓷振动过程中,测量光将产生 Doppler 移频:

$$v_D = \frac{2dx}{\lambda dt} \quad (4)$$

式中: v_D 为 Doppler 移频频率; x 为位移; λ 为波长。根据公式(4)可得到速度与移频频率之间的关系:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\lambda}{2} v_D \quad (5)$$

系统中带通滤波器的带宽为 40 kHz,最大允许 Doppler 移频为 ± 20 kHz,可得最大测量速度约为 ± 10 mm/s。根据图 6 中 WTYD 型压电陶瓷在 7 kHz 的位移 20 nm,假设其位移函数为:

$$s = 10 + 10 \cos(2\pi ft + \psi) \quad (6)$$

式中: s 为位移; f 为压电陶瓷振动频率; ψ 为初相位。

对公式(6)求导可得在振动频率 $f=7\text{ kHz}$ 时最大瞬时速度约 0.44 mm/s ,远小于系统的测量速度。随着频率的增高,位移量将减小,所以该系统可以测量更高的频率。由于相位卡的采样率不能高于信号的频率,而参考信号的频率 40 kHz 制约了采样率不能超过 40 kHz 。增大声光移频器的移频量,使测量光和参考光频差更大,带通滤波器带宽更宽,可进一步提高测量速度,也可相应提高相位卡采样率。

4 结 论

在超精密加工中,压电陶瓷的实际位移对加工质量起到了至关重要的作用,而传统的对压电陶瓷的测量方法存在一定的不足,要么精度不高,要么测量要求高,而且在不影响压电陶瓷本身特性情况下对高频的动态信号进行直接测量比较困难。由于输出存在非线性的问题,通过计算得出的位移往往与实际位移存在不可忽略的差距,同型压电陶瓷位移输出也不完全相同,这对精密加工控制等领域的应用产生较大影响。该实验使用 Nd:YAG 激光回馈系统对压电陶瓷的动态位移特性进行了实验研究,测量可达纳米级的分辨率,实现非接触的测量从而消除了附加实验装置对压电陶瓷本身的影响。使用该方法可以对低频和高频特性直接进行直观的微小位移测量,尤其能对纳米级的位移实际测量以及对输出位移在不同频率下的响应特性的研究对工业中超精密加工具有极为重要的意义。

参考文献:

- [1] Zhang Tao, Sun Lining, Cai Hegao. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 26–32. (in Chinese)
- [2] Wang Tao, Wang Xiaodong, Wang Liding. Study on fast response characteristic and application of piezoceramics [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6): 785–789. (in Chinese)
- [3] Xu Liming, Hu Dejin, Deng Qilin, et al. Study on PZT microdisplacement driving technology in precision machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38: 43–47. (in Chinese)
- [4] Miao Jian, Zhu Ruogu, Guo Bing, et al. Nonlinear effect of piezoelectric ceramics on the phase modulation Fabry-Perot interferometry [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2010, 21(4): 327–331. (in Chinese)
- [5] Zhang Xinyang, Xia Liyan, Zhou Hengwei. Evaluation on PZT response curve by optical interference phase shift method [J]. *Journal of Yili Normal University (Natural Science Edition)*, 2009(1): 25–29. (in Chinese)
- [6] Wu Shouqiang. Measurement of an micro vibration piezoelectric ceramic interference filter [J]. *Journal of Minjiang University*, 2006, 27(5): 62–66. (in Chinese)
- [7] Fan Yanping, Zhu Ling, Wu Dongjian, et al. A new method of detecting the microdisplacement of PZT [J]. *Piezoelectric and Acoustooptics*, 2010, 32(1): 82–85. (in Chinese)
- [8] Wang Detian, Li Zeren, Peng Qixian. Direction-judgable fiber displacement interferometer for vibration measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(10): 86–89. (in Chinese)
- [9] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(8): 083108.
- [10] Weng Jidong, Tan Hua, Wang Xiang, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11): 111101.
- [11] Wang Zhongping, Zhang Quan, Zhu Ling, et al. Study on voltage-displacement characteristics of piezoelectric ceramic by laser speckles [J]. *Physics Experimentation*, 2013, 33(3): 39–42. (in Chinese)
- [12] Wang Ju, Li Nan. Analysis of characteristics of piezoelectric ceramic in micro-control applications [J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2013, 40(2): 24–26. (in Chinese)
- [13] Ren Zhou. Microchip Nd:YAG laser feedback interferometer and applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [14] Lacot E, Day R, Stoeckel F. Coherent laser detection by frequency-shifted optical feedback [J]. *Phys Rev A*, 2001, 64: 043815.