

# 压电陶瓷频率响应及振动面幅值激光外差测量

王凯旋<sup>1,2</sup>, 武俊峰<sup>1</sup>, 舒风风<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**压电陶瓷已广泛应用于检测、通讯等各个领域。该文采用外差式激光干涉测量法,开展了压电陶瓷振动特性研究。首先给出了激光外差干涉测振仪测试压电陶瓷振动特性的测量方法,并通过实验测得了压电陶瓷片单点振动的频率响应曲线,同时测量了径向直线上若干点的振动响应曲线,进而进行了整个压电陶瓷圆环表面在其谐振频率点的振动测量。实验结果表明,实测压电陶瓷片的谐振频率为 30 710 Hz,与其产品标定值 30 000 Hz 存在 710 Hz 偏差。其圆环表面振动的振型具有不对称性,这对压电陶瓷的应用设计提供了指导意义。

**关键词:**激光干涉仪;压电陶瓷;外差检测;振动分析;频率响应;信号处理

**中图分类号:**TN29;TH744.3 **文献标志码:**A

## Laser Heterodyne Measurement of Frequency Response and Amplitude of Vibrating Surface of Piezoelectric Ceramics

WANG Kaixuan<sup>1,2</sup>, WU Junfeng<sup>1</sup>, SHU Fengfeng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The piezoelectric ceramics have been widely used in various fields such as detection and communication. In this paper, a heterodyne laser interferometry method is used to study the vibration characteristics of piezoelectric ceramics. First, the method of measuring the vibration characteristics of piezoelectric ceramics by a laser heterodyne interferometer is introduced, and the frequency response curve of single-point vibration of piezoelectric ceramics is obtained through the experimental measurement. At the same time, the frequency response curves of several points on a radial line are also measured, and then the vibration measurement of the entire piezoelectric ceramic ring surface at its resonant frequency point is carried out. The experimental results show that the measured resonant frequency of the piezoelectric ceramic is 30 710 Hz, which has a 710 Hz deviation from the product calibration value of 30 000 Hz, and the vibration mode of the ring surface vibration is asymmetric. The study provides guidance for the application design of piezoelectric ceramics.

**Key words:** laser interferometer; piezoelectric ceramic; heterodyne detection; vibration analysis; frequency response; signal processing

### 0 引言

压电材料是一种能够实现电能与机械能相互转化且具有压电效应的功能性材料,具有体积小、位移分辨率高、易控制等优点<sup>[1]</sup>,被广泛应用于无损检测<sup>[2-3]</sup>、生物医疗<sup>[4]</sup>、通讯技术<sup>[5]</sup>及军事科技<sup>[6]</sup>等领域<sup>[7-8]</sup>。因此,研究压电振子的振动特性具有很重要的意义。国内有许多学者对压电陶瓷的振动特性进行了研究。张泉等<sup>[9]</sup>采用电阻式应变传感器(SGS)

和基于锁定放大信号调理方法来检测压电执行器微位移。赵斌兴等<sup>[10]</sup>建立了迈克尔逊干涉测振系统,运用干涉条纹大小数拟合计数软件方法,对不同正弦电压驱动的压电陶瓷蜂鸣片微小振动进行了测量。刘永刚等<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 软件对压电陶瓷的径向振动进行分析,得到其谐振频率。CHEN C Y 等<sup>[12]</sup>通过对不同尺寸的环状压电陶瓷的模拟分析,对谐振频率和环结构之间的关系进行了研究。目前

收稿日期:2021-04-29

基金项目:南京市科技创新基金资助项目(20200406kc)

作者简介:王凯旋(1995-),女,山东潍坊人,硕士生,主要从事激光多普勒测振及其模态分析的研究。通信作者:武俊峰,男,副研究员,主要从事微纳器件及恒星振动测量、模态分析等领域的研究。

国内对压电陶瓷性能<sup>[13-14]</sup>研究较多,对压电陶瓷整个表面振型进行测量的研究较少。本文采用激光多普勒外差干涉测量法<sup>[15]</sup>对圆环形压电陶瓷径向振动进行测量,通过扫描测得其圆环面上的振动振型,并得到压电陶瓷的振动特性。

### 1 测量原理

图 1 为激光测振仪的工作原理。从氦氖激光器发出的激光,经分光镜得到参考光束和测量光束。参考光束经过反射镜反射后,再经声光调制器产生 40 MHz 外差移频,然后经分光镜后进入光电探测器。测量光束经过偏振分束镜后,再经透镜聚焦后到达被测物体表面并反射,最后经过分光棱镜后进入光电探测器。两光束产生干涉,通过光电探测器得到差频信号。被测物体的位移变化引起的光波相位变化或多普勒频移载于此差频信号上,该差频信号经射频放大器进行信号放大后再由功分器分为两路,与两路正交信号混频、滤波后得到两路正交解调信号。

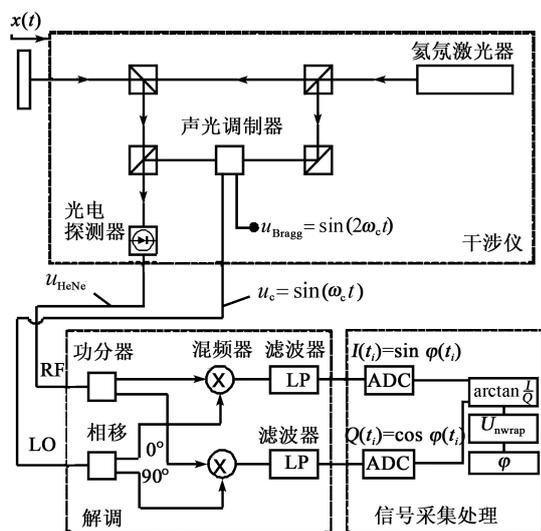


图 1 激光测振仪原理图

图 1 中,I、Q 分别表示 I/Q 调制中的同相信号和正交信号,对数字化 I、Q 信号进行反正切变换得到相位角为

$$\varphi(t_n) = \arctan \frac{u_q(t_n)}{u_i(t_n)} + m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中: $u_q(t_n)$ 、 $u_i(t_n)$ 分别为 I、Q 两路信号; $\varphi(t_n)$ 为相位角。由此可求得被测物的位移信号为

$$s(t_n) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t_n) \quad (2)$$

式中  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  为氦氖激光器波长。

对相位角求导可得速度信号为

$$v(t_n) = \frac{d\varphi(t_n)}{dt} \quad (3)$$

因此,通过计算相位角可实现具有高分辨率的位移测量。

如图 2 所示,将 I、Q 信号描述为矢量图中的旋转矢量,则系统的信噪比<sup>[16]</sup>为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\rho}{\sigma} \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为信号; $\sigma$ 为噪声。

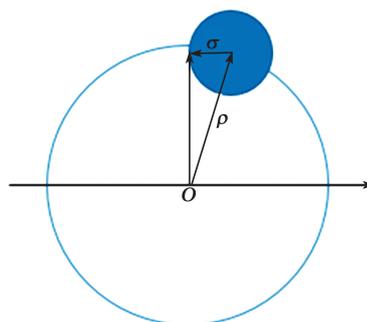


图 2 I、Q 信号矢量示意图

图 3 为测量光斑在不同聚焦程度下的 I、Q 信号曲线及信噪比计算结果。

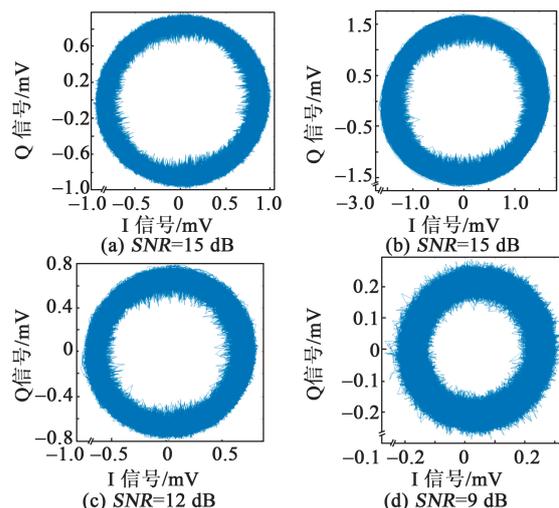


图 3 I、Q 信号曲线及信噪比计算结果

### 2 实验

图 4 为实验室采用的实验装置。在压电陶瓷的正负极上焊上电线,直接数字频率合成技术(DDS)发出的信号经高压放大器与压电陶瓷连接。由 DDS 给压电陶瓷提供激振信号,激光干涉仪采集光干涉信号,转换为电信号后进行 I/Q 调制和数据采集(DAQ),经信号处理后得到振动位移信号。表 1

为用到的主要实验仪器型号。实验采用压电陶瓷型号为 YH43( $\varnothing 50\text{ mm} \times \varnothing 20\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$ ),其他产品参数如表 2 所示。表中,  $C$  为电容量,  $\tan \delta$  为介质损耗,  $f$  为谐振频率,  $f_r$  为反谐振频率,  $Z$  为阻抗,  $k$  为耦合系数,  $Q_m$  为机械品质因数。

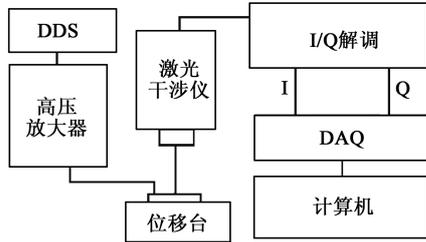


图4 激光多普勒测振仪测量压电陶瓷振动实验装置图

表1 主要实验仪器型号

器件	型号	器件	型号
激光器	HRS015B	高压放大器	HVA200
声光移频器	I-FS040-2S2E-1-GH66	DDS	AD9959 开发板
偏振分束镜	CCM1-PBS25-633/M	数据采集	NI USB-6356
非偏振分束镜	CCM1-BS013/M	光电探测器	S6045-5
解调器	AD8333	射频放大器	ZHL-32A+

表2 压电陶瓷产品参数

$C/\text{pF}$	$\tan \delta/\%$	$f/\text{kHz}$	$f_r/\text{kHz}$	$Z/\Omega$	$k/\%$	$Q_m$
2 861	0.3	30	33	13	60	1 000

利用激光多普勒测振仪测量了圆环形压电陶瓷片的振动振幅(见图 5(a))。图 6 为激励频率 30 600 Hz 下测得压电陶瓷的振动幅值曲线和进行傅里叶变换后得到的曲线。由图可知,压电陶瓷的振动是频率 30 600 Hz、振幅 58 nm 的正弦曲线。图 5(b) 为测点示意图,在压电陶瓷环上取 6 个测点,相邻测点距离为 2 mm,测试区间长度为 10 mm。对压电陶瓷片进行 30 000~31 500 Hz 的扫频激励,得到了振动振幅和激励频率之间的关系,如图 7 所示。

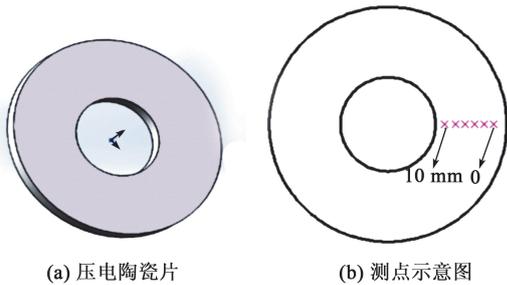


图5 压电陶瓷片及测点示意图

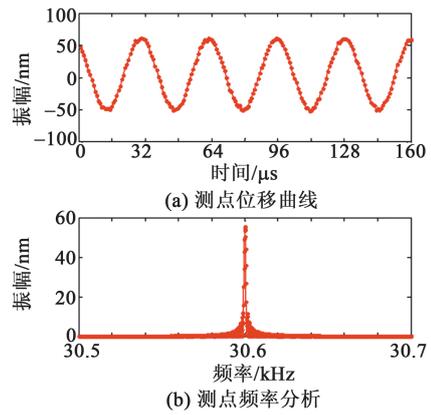


图6 测点位移曲线和频率分析

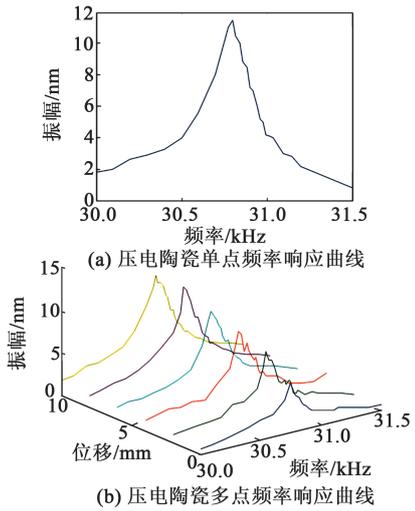


图7 压电陶瓷频率响应曲线

由图 7 可以看出,压电陶瓷的实测谐振频率为 30 710 Hz,且压电陶瓷外侧边缘振动幅值小于内侧边缘振动幅值。以其谐振频率作为激励频率(即激励频率为 30 710 Hz),每隔 0.5 mm 扫描图 5(b)中压电陶瓷,得到曲线如图 8 所示。由图可看出,其振动幅值由压电陶瓷外侧向内侧变大。

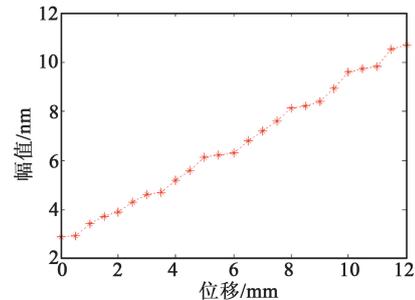


图8 谐振频率下压电陶瓷振动幅值

扫描测量压电陶瓷整个圆环面的振动幅值<sup>[17]</sup>。理论上期望振幅呈均匀规则分布,即圆周对称。图 9 为实际测试结果。由图可看出,对压电陶瓷施加

30 710 Hz 的激励频率时,其振动幅值呈不均匀分布,整体呈现由圆的内缘向外缘振动幅值变小。同时存在圆周不对称性,一侧幅值大于另一侧幅值。

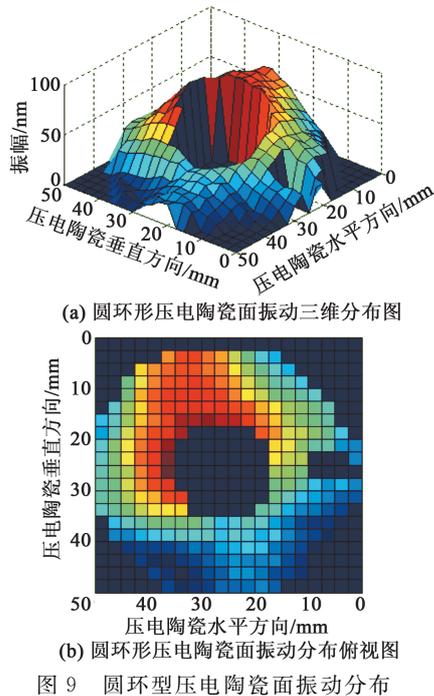


图9 圆环型压电陶瓷面振动分布

### 3 结论

本文利用外差激光干涉测量法对圆环形压电陶瓷在低电压正弦信号驱动下的振动进行测量,其测量结果如下:

1) 压电陶瓷的振动是与激励电压同频率的振动曲线,且振动幅值随激励频率的变化而变化,在压电陶瓷片的谐振频率处取得最大值。

2) 圆环形压电陶瓷振动幅值在空间分布上存在不均匀性,其振动振型与理想状态存在较大偏差,因此在实际应用中可能会有误差。

综上所述,基于激光干涉测量技术实现了微小振动的测量,并通过实验测得压电陶瓷的振动分布不均匀,由此可为利用压电陶瓷的逆压电效应进行驱动或测量提供理论支持。

### 参考文献:

- [1] 罗肖. PYN-PZT 体系压电陶瓷的制备及性能研究[D]. 上海:中国科学院上海硅酸盐研究所,2018.
- [2] 赵玉博. 基于 DDS 的压电陶瓷激励源设计[D]. 石家庄:河北科技大学,2012.
- [3] 王海圣,翁新全,许静玲,等. 应用于高温压电传感器的铋层状无铅压电陶瓷综述[J]. 中国陶瓷,2019(2):1-6  
WANG Haisheng, WENG Xinquan, XU Jingling, et al.

Review of bismuth structure lead-free piezoelectric ceramics applied for high temperature piezoelectric sensors[J]. China Ceramics,2019(2):1-6.

- [4] PALEVICIUS A, JANUSAS G, CEKASE E, et al. Composite piezoelectric material for biomedical micro hydraulic system [C]//London: International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering,2018.
- [5] 鲁倩,任斌,边晶莹,等. 激光通信压电陶瓷型精跟踪机构驱动技术[J]. 空间电子技术,2017,14(3):38-41.  
LU Qian, REN Bin, BIAN Jingying, et al. Driving technique of piezoelectric ceramic transducer fine tracking actuator of laser communication[J]. Space Electronic Technology,2017,14(3):38-41.
- [6] LI K, LIU J K, YANG R, et al. Simulation research on bearing lubricating micro-jet driven by piezoelectric ceramic[C]//Cape Town:2017 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), IEEE,2017.
- [7] 姜世平. 基于两自由度压电驱动快反镜的星光跟踪控制[J]. 压电与声光,2019,41(6):877-899.  
JIANG Shiping. Startracking control system based on two degree-of-freedom piezo-actuated fast steering mirror[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,2019,41(6):877-899.
- [8] 任宗金,刘帅,张军,等. 三向力作用下石英晶块应力分布及力传感研究[J]. 压电与声光,2019,41(5):661-665.  
REN Zongjin, LIU Shuai, ZHANG Jun, et al. Study on stress distribution and force sensing of quartz block under action of three-dimensional force[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,2019,41(5):661-665.
- [9] 张泉,尹达一,李清灵. 高分辨率压电陶瓷微位移检测电路设计与实现[J]. 压电与声光,2017,39(6):903-906.  
ZHANG Quan, YIN Dayi, LI Qingling. The design and implementation of high-resolution micro-displacement detection circuit of piezoelectric ceramic actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,2017,39(6):903-906.
- [10] 赵斌兴,王亚非,高椿明. 基于激光干涉测振技术的压电陶瓷蜂鸣片质量监控[J]. 电子科技大学学报,2015(3):133-137.  
ZHAO Binxing, WANG Yafei, GAO Chunming. Quality control of the piezoelectric ceramic buzzer based on laser interferometer vibration measurement technique [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2015(3):133-137.

(下转第 704 页)

- progress of bulk acoustic wave circulator[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2020, 42(3):307-311.
- [3] 杨天颖. 微波铁氧体器件在现代电子设备中的应用[J]. *通信电源技术*, 2020, 37(3):99-100.
- [4] ESTEP N A, SOUNAS D L, SORIC J, et al. Magnetic-free non-reciprocity and isolation based on parametrically modulated coupled-resonator loops[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12):923-927.
- [5] ESTEP N A, SOUNAS D L, ALU A. On-chip non-reciprocal components based on angular-momentum biasing[C]//Phoenix, Arizona, USA: 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2015), IEEE, 2015:1-4.
- [6] ESTEP N A, SOUNAS D L, ALU A. Magnetless microwave circulators based on spatiotemporally modulated rings of coupled resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(2):502-518.
- [7] FLEURY R, SOUNAS D L, ALU A. Subwavelength ultrasonic circulator based on spatiotemporal modulation[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(17):174306.
- [8] JALAS D, PETROV A, EICH M, et al. What is - and what is not-an optical isolator[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8):579-582.
- [9] MAZNEV A A, EVERY A G, WRIGHT O B. Reciprocity in reflection and transmission: What is a "phonon diode" [J]. *Wave Motion*, 2013, 50(4):776-784.
- [10] 陈瑞宜. 非互易光波导的若干基础问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- 
- (上接第 683 页)
- [11] 刘永刚, 毛亚洲, 李冬颖, 等. 圆形压电陶瓷径向振动的研究[J]. *煤炭技术*, 2017(5):310-312.  
LIU Yonggang, MAO Yazhou, LI Dongying, et al. Study on radial vibration of circular piezoelectric ceramics[J]. *Coal Technology*, 2017(5):310-312.
- [12] CHEN C Y, WANG L K, QIN L, et al. Analysis of radial thickness vibration modes of piezoelectric ceramic ring based on ANSYS[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 712/715(2):1918-1922.
- [13] 孙宝光, 杨文艳, 程文德. 直流驱动电压下的压电陶瓷特性研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(4):643-645.  
SUN Baoguang, YANG Wenyan, CHEN Wende. Study on features of piezoelectric ceramic under constant-current slaving voltage[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2015, 37(4):643-645.
- [14] 殷豪, 左承基. 压电陶瓷片压电特性的测试与分析[J]. *电子测试*, 2019(15):60-62.  
YIN Hao, ZUO Chengji. Measurement and analysis of piezoelectric characteristics of piezoelectric ceramic plates[J]. *Electronic Test*, 2019(15):60-62.
- [15] 孙宝光, 谭仁兵, 张启义. 迈克尔逊干涉仪对压电陶瓷动态特性的研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(5):888-891.  
SUN Baoguang, TAN Renbing, ZHANG Qiyi. Study on dynamic features of piezoelectric ceramic based on michelson interferometer[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2015, 37(5):888-891.
- [16] LI Y. Miniaturized laser doppler vibrometer integrated on a silicon photonics platform [D]. Ghent: Ghent University, 2013.
- [17] YAN X, REN W, SHI P, et al. Transformation of vibration shapes in resonances of micromachined piezoelectric circular membrane[J]. *Ferroelectrics*, 2013, 450(1):1-6.