

光干涉法测量压电装置的响应特性

杨彬^{1,2} 赵琦¹ 周军^{2,3} 陈延如¹ 吴佳滨² 宋维尔²

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

²南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038

³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 针对一种压电陶瓷预负载结构,利用光学干涉法测量了其位移-电压特性,在测量过程中观察到压电装置及其支撑结构本身的共振会影响测量结果的准确性。进而对不同材质的多种压电装置采用不同的驱动频率进行了对比实验,证明了基于传统的测量装置应采用多次测量以获得更严谨的压电响应参数。

关键词 测量;共振频率;干涉;压电装置

中图分类号 TN384

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081201

Measurement of Piezoelectric Device Response by Optical Interferometry

Yang Bin^{1,2} Zhao Qi¹ Zhou Jun^{2,3} Chen Yanru¹ Wu Jiabin² Song Weier²

¹*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

²*Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China*

³*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The displacement-voltage characteristics of a pre-load structure piezoelectric ceramic is measured by using optical interferometry. The influence of the resonance of piezoelectric device and its supporting structure on the accuracy of the measurement is observed. Furthermore, the comparative experiments are set up to study a variety of piezoelectric devices under several driving frequencies. It is proved that multiple-time measurement based on traditional device is necessary to get a more rigorous result of the piezoelectric response parameters.

Key words measurement; resonant frequency; interference; piezoelectric device

OCIS codes 120.3180; 030.1670; 040.1880; 140.3570; 230.2090; 260.5740

1 引言

压电材料在电子技术、精密机械、光学、超声、航天等领域得到了广泛应用^[1]。其中,压电陶瓷凭借着其体积小、重量轻、灵敏度高、集成度高、工作可靠等特点,在精密光学、微型机械、微电子技术等高新技术领域发挥着重要作用^[2]。压电陶瓷被普遍用于激光腔或干涉仪的腔长调节,以实现高精度稳频、激光器的单纵模输出等目的^[3-9],为提高系统设计精度,通常需要对压电陶瓷的位移-电压常数进行精确测量。

测量压电陶瓷响应特性的传统方法有动态线路传输法^[10]、多普勒外差法^[11]、显微动态散斑法^[12]、光杠杆法^[13]、电感测微法^[14]、光干涉法^[2,15]等。其中,光干涉法与其他传统方法相比,具有精度高、响应快、系统结构简单等特点。2002年,南京理工大学的吴新民等^[2]提出使用光干涉法测量压电陶瓷的动态频率响应特性,得到了压电陶瓷的动态频率响应范围。2011年,安徽工业大学的王东等^[15]利用光干涉法,得到了迈克耳孙干涉仪输出的光功率与压电陶瓷伸长量一一对应的结论,通过数据处理能够得到压电陶瓷的位移-电压曲线。本文根据实际需求,利用光干涉法测量了一种压电陶瓷预负载结构装置的位移-电压特性,在测量过程中观

收稿日期: 2015-04-03; 收到修改稿日期: 2015-04-09; 网络出版日期: 2015-07-11

作者简介: 杨彬(1991—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器等方面的研究。E-mail: ybin319@163.com

导师简介: 赵琦(1961—),男,教授,硕士生导师,主要从事光学工程等方面的研究。

E-mail: zslzhaoqi@163.com(通信联系人)

察到了压电装置及其支撑结构本身的共振会影响测量结果的准确性,同时提出了更为严谨的测量方法。

2 测量结构及原理

测量压电装置响应特性的实验装置如图1所示,整个系统以迈克耳孙干涉仪原理为基础。激光器发出的单色光由扩束镜组件(BE)扩束后经分光镜(BS)分为两束光,各自经过一段空间距离传输后由反射镜M和压电装置中的反射镜反射,再原路返回并由BS合束,最后在光电探测器(PD)处形成干涉条纹并由其探测。实验中,对激光进行扩束处理可对干涉条纹进行放大从而利于观察干涉现象以及数据采集。调整视场光阑(FS)的大小使得干涉单条纹通过,光电探测器连接到示波器上可观察到干涉条纹的光强信号。当对压电陶瓷施加一定频率的驱动电压时,可使得压电装置中的反射镜随着压电陶瓷做近似简谐振动,令两光路的光程差以相同频率发生变化,表现为空间干涉条纹的周期变化。通过示波器可以明显观察到在一个驱动电压周期内光电探测器能够探测到多个脉冲,即对应着干涉条纹的移动数。因而,通过简单的计算即可获得压电装置的位移-电压特性。

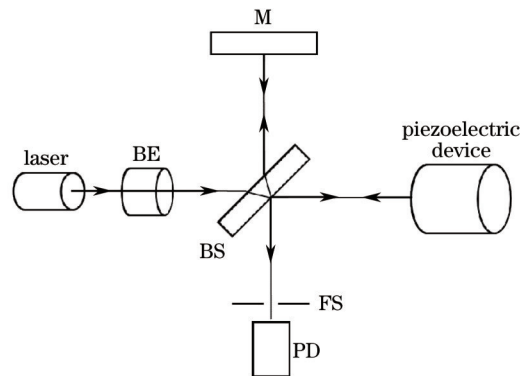


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

压电装置的基本工作原理基于压电陶瓷的逆压电效应,即对压电陶瓷施加交变电场时材料随之产生可控的应变^[16]。应变遵循基本的逆压电方程

$$\Delta L = KV, \quad (1)$$

式中 ΔL 为压电陶瓷的伸长量, K 为压电陶瓷的压电系数, V 为对压电陶瓷所施加的驱动电压。由(1)式可以看出,只要得知压电陶瓷的压电系数以及驱动电压,即可获取压电装置的位移-电压特性。不过考虑到压电陶瓷在压电装置中机械连接的影响以及压电系数的未知因素,以上述方法获取压电装置的位移-电压特性并不严谨。因此,基于迈克耳孙干涉仪原理设计了图1所示结构,压电装置的位移-电压特性则可表示为

$$d = N\lambda/2, \quad (2)$$

式中 d 为压电陶瓷的位移量, N 为半个电压周期内干涉条纹的移动数, λ 为入射激光波长。由(2)式可知,通过示波器数出光电探测器在半个电压周期内探测到的脉冲数即为干涉条纹的移动数,从而可以准确迅速地得出压电装置的位移-电压特性。并且,当选用波长更短的光源时可提高测量系统的精度。

3 实验结果

实验中采用波长为632.8 nm的氦氖激光器、Thorlabs公司型号为DET10A的光电探测器以及Tektronix公司型号为DPO 3014的示波器进行实验。将压电陶瓷的驱动电压信号以及光电探测器探测到的光信号输入至示波器的两个通道,以便在示波器上同时观测到对压电陶瓷施加的电压信号以及干涉条纹的移动信号。所测量的压电装置剖视图如图2所示,整个装置由压盖、压电陶瓷、镜片、套筒、弹簧和底座装配而成,其中,压盖采用钢材料,底座采用铝合金材料,此压电陶瓷预负载结构可使得压电陶瓷能够有效工作。该装置被用于种子注入的单频激光器对谐振腔腔长进行快速调整^[3,7],因此有必要对其响应特性做精确测量。实验中对压电陶瓷施加80 V正弦波电压,图3所示为50 Hz驱动电压频率下对应的示波器截图,通道1所示低频曲线为压电陶瓷的驱动电压信号,通道2所示高频曲线为光电探测器探测到的干涉条纹信号。

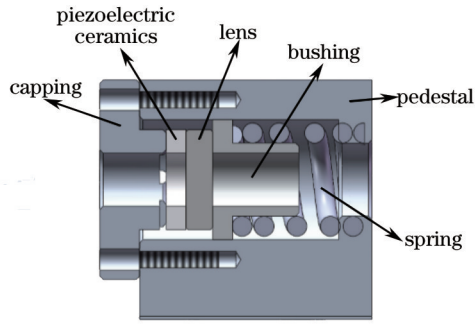


图2 压电装置剖视图

Fig.2 Sectional view of piezoelectric device

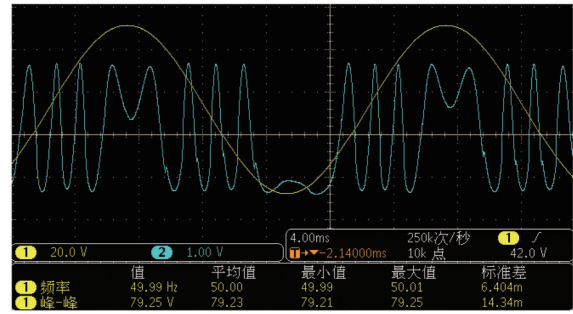


图3 频率为 50 Hz 时的示波器截图

Fig.3 Frequency of 50 Hz oscilloscope screenshot

如图 3 所示,在 50 Hz 频率的一个驱动电压周期内,光电探测器探测到的脉冲数为 9 个。通过(2)式计算得到在 80 V 驱动电压下压电陶瓷的位移量约为 1423.8 nm,对应的位移-电压系数约为 17.8 nm / V。对压电陶瓷施加不同大小的驱动电压可方便迅速地测得压电装置的位移-电压特性。图 4 所示即为压电装置在该状态下的位移-电压曲线图。

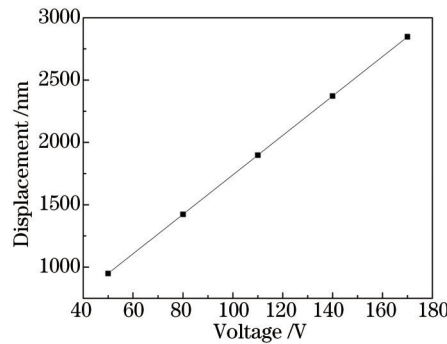


图4 压电装置的位移-电压曲线

Fig.4 Curve of piezoelectric device displacement as a function of voltage

理论上,采用该方法和流程可以快速准确地测得压电装置的位移-电压系数及曲线图,但在测量过程中观察到压电装置及其支撑结构本身的共振对测量结果有着一定的影响。实验中,对处在同样状态的压电装置上施加不同频率的 80 V 正弦波电压进行对比,图 5(a)~(c)所示分别是频率为 70、100、150 Hz 时对应的示波器截图,通道 1 所示低频曲线为压电陶瓷的驱动电压信号,通道 2 所示高频曲线为光电探测器探测到的干涉条纹信号。

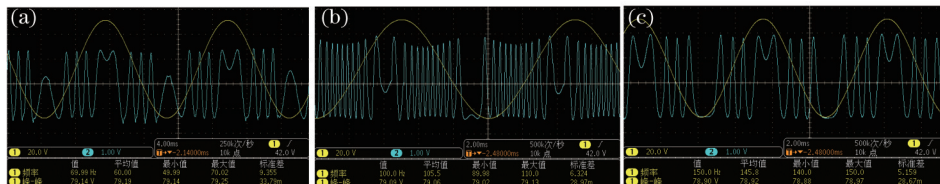


图5 不同频率时的示波器截图。(a) 70 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz

Fig.5 Oscilloscope screenshot at different frequencies. (a) 70 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz

从图 5 中可以看到,在一个驱动电压周期内,70、100、150 Hz 频率下光电探测器探测到的脉冲个数分别为 9、23 和 8,对应的压电陶瓷位移量分别为 1423.8、3638.6、1265.6 nm。由图 3、5 以及对其他频率下重复测量后发现,该状态下的压电装置在 100 Hz 处存在共振点。当驱动电压频率在 100 Hz 附近时,压电装置的振幅明显大于其它电压频率时的振幅,而且在 100 Hz 时达到峰值,而在其他远离 100 Hz 的频率下振幅大小则趋于稳定,光电探测器在一个电压周期内探测到的脉冲个数均为 8 或 9。因此,由脉冲数取整导致的误差可通过多次重复测量后取平均值以及对脉冲数小数点后一位估读的方法进行修正。由此,这里推断该状态下压电装置的共振频率为 100 Hz。据此推断,在其他条件不变的前提下,将压电装置原先的钢材质压盖换为铝合金材质压盖进行验证。由于铝合金材质的刚度和重量均小于钢材质的,因此理论上该压电装置的共振频率会有所不同。对该装置施加了不同频率的驱动电压,发现该压电装置的共振频率为 103 Hz,图 6(a)~(d)

所示分别是频率为70、100、103、150 Hz时对应的示波器截图。

从图6中可以看到,在一个驱动电压周期内,70、100、103、150 Hz频率下光电探测器探测到的脉冲个数分别为9、12、41和8,对应的压电陶瓷位移量分别为1423.8、1898.4、6486.2、1265.6 nm。由图6以及对其他频率下重复测量后发现,该状态下的压电装置在103 Hz处存在共振点。当驱动电压频率在103 Hz附近时,压电装置的振幅明显大于其他电压频率时的振幅,而且在103 Hz时达到峰值,而在其他远离103 Hz的频率下振幅大小则趋于稳定,光电探测器在一个电压周期内探测到的脉冲个数均为8或9,因此,验证了上述推论。通过更换压电装置底座的材质又做了两组实验后,都发现了各自压电装置在某一频率处压电陶瓷的振幅明显增大并且其他频率处振幅趋于稳定的现象。据此,得出结论即上述使得压电陶瓷振幅最大的频率即为各自压电装置的共振频率。因此,在测量压电装置响应特性的同时需注意共振现象,应在不同驱动频率下做多次测量以得到更为严谨的测量结果。另外,本实验结构可以用来快速寻找压电装置的共振频率,在实验过程中通过微调驱动电压频率进行对比可以准确地得到共振频率值,以便压电装置在实际应用中避开共振频率进行正常工作。

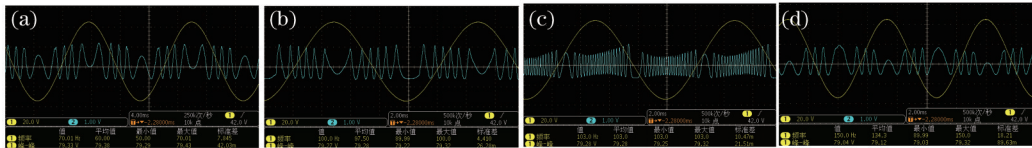


图6 铝合金材质压盖压电装置的不同频率时的示波器截图。(a) 70 Hz; (b) 100 Hz; (c) 103 Hz; (d) 150 Hz

Fig.6 Oscilloscope screenshot at different frequencies with aluminum alloy capping of piezoelectric device.

(a) 70 Hz; (b) 100 Hz; (c) 103 Hz; (d) 150 Hz

4 结 论

本文对使用光干涉法测量压电装置的响应特性进行了实验研究,利用示波器的两个通道分别检测驱动电压信号以及干涉条纹信号,可直观地反映出压电装置的响应特性,通过简单的计算获取了压电装置的位移-电压特性。同时,在测量过程中观察到了压电装置及其支撑结构本身的共振会影响测量结果的准确性,对其现象做了多组实验进行研究分析,提出了更为严谨的测量方法。为今后的科研实验及工业应用中可能碰到的问题提供了新的解决思路。

参 考 文 献

- 1 Yi Yingyan, Zhou Zebing. Study of modulated laser interferometry for piezoelectric characteristic measurement of piezoelectric ceramic[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 27-32.
易迎彦,周泽兵. 压电陶瓷压电特性的激光调制法测量研究[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 27-32.
- 2 Wu Xinmin, Chen Jinbang, Zhu Rihong, *et al.*. Measuring the dynamic frequency response of piezoelectric ceramic by interference method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 257-260.
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): 257-260.
- 3 Wang J, Zhu R, Zhou J, *et al.*. Conductively cooled 1-kHz single-frequency Nd:YAG laser for remote sensing[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(8): 081405.
- 4 J Wang, R Zhu, T Lu, *et al.*. Conductively cooled single frequency Nd:YAG laser for remote sensing[C]. SPIE, 2011, 8192: 819233.
- 5 Zhu Ren, Zhou Jun, Liu Jiqiao, *et al.*. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102011.
朱 韧,周 军,刘继桥,等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102011.
- 6 Briles T C, Yost D C, Ye J, *et al.*. Simple piezoelectric-actuated mirror with 180 kHz servo bandwidth[J]. Opt Express, 2010, 18(10): 9739-9746.
- 7 Zhou J, Zang H, Yu T, *et al.*. Development of single-frequency laser for direct-detection wind lidar[C]. SPIE, 2007, 6681: 66810R.
- 8 Sun Guixia, Liu Tao, Qian Jinning, *et al.*. Tunable all-solid-state continuous frequency-doubled Nd:YVO₄/LBO wave intra-cavity 671 nm ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602011.

- 孙桂侠, 刘涛, 钱金宁, 等. 可调谐全固态 Nd:YVO₄/LBO 倍频连续 671 nm 环形激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602011.
- 9 Li Chuncheng, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. A novel Fabry-Perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.
- 李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- 10 Li Yuan, Qin Zikai, Zhou Zhigang. Measurement of Piezoelectric and Ferroelectric Materials[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- 李远, 秦自楷, 周志刚. 压电与铁电材料的测量[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- 11 Huo Lei, Zeng Xiaodong, An Yuying, *et al.*. Vibration measurement and analysis by means of laser Doppler heterodyne principle[J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 600-602.
- 霍雷, 曾晓东, 安毓英, 等. 利用激光多普勒外差原理对振动物体测量及分析[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 600-602.
- 12 Zhu Meng, Huang Zhanhua, Wang Xiaojun, *et al.*. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 844-849.
- 朱猛, 黄战华, 王小军, 等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 844-849.
- 13 Pan Zaiyou, Liu Huilan, Feng Lishuang, *et al.*. Testing method of dilation of the piezoelectric ceramics based on optical lever theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 196-199.
- 潘在友, 刘惠兰, 冯丽爽, 等. 基于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(S1): 196-199.
- 14 Chen Chao, He Yulin, Zhang Haijun. The testing system of micro-nano dilation of the piezoelectric ceramics[J]. Optical Instruments, 2007, 29(2): 27-30.
- 陈超, 何玉琳, 章海军. 压电陶瓷微纳米伸缩量测试系统[J]. 光学仪器, 2007, 29(2): 27-30.
- 15 Wang Dong, Sun Wenbin. Piezoelectric characteristic measurement using laser interference method[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(6): 927-929.
- 王东, 孙文斌. 光干涉法测量压电陶瓷压电特性[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 927-929.
- 16 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezo-ceramic actuator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090003.
- 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090003.

栏目编辑: 何卓铭