

文章编号:1004-4213(2011)07-0994-4

用光纤光栅传感器研究压电陶瓷的特性

余有龙,谭玲,邹李刚,王浩

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,合肥 230009)

摘 要:提出了一种利用光纤光栅传感器研究压电陶瓷特性的新方法.该方法采用非平衡 Michelson 扫描干涉仪对光纤光栅传感信号进行相位解调,通过观测波长漂移引起的相移,从而获得压电陶瓷的位移量与所加电压间的关系.实验分析了迟滞特性和蠕变现象,得到了压电陶瓷的电压-位移特性曲线以及蠕变特性曲线.实验表明,光源功率的波动对压电陶瓷迟滞特性不能造成影响且压电陶瓷的蠕变特性与电压方向无关.

关键词:光纤光栅;压电陶瓷;迟滞;蠕变;干涉解调

中图分类号:TP212.12

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114007.0994

0 引言

压电陶瓷(Piezoelectric Ceramics, PZT)由于体积小、响应速度快、易于控制等优点,被广泛应用于微位移驱动^[1-2]、纳米定位^[3]、电源驱动器^[4]、扫描干涉^[5-6]等方面.其外加电压与由逆压电效应及电致伸缩效应所产生的位移量之间并非严格的线性关系,存在迟滞、蠕变和非线性等特性.该位移量一般在微米甚至以下量级,精确描述该微位移量随电压的变化关系,有利于进一步拓展 PZT 的应用范围.已有的观测方法主要基于干涉原理,无论利用 Michelson 干涉^[7]还是 Mach-Zehnder 干涉^[8-9],或索菲型干涉仪^[10],都有很高的准确度,但系统抗干扰能力差,易受光源波动(波长变化和功率稳定性)影响.

本文提出一种基于光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感和非平衡干涉解调的 PZT 特性观测法,该方法利用 FBG 传感器波长编码的特点,采用全光纤结构,有很高的测量准确度,测量结果受环境因素(如振动)干扰有限.该研究有利于进一步了解通电后 PZT 的变化规律.

1 原理分析

电场作用下,压电陶瓷一方面出现电致伸缩效应;另一方面会出现逆压电效应.由电致伸缩效应产生的形变与所加电压的平方成正比,由逆压电效应产生的应变大小则与电压成线性关系.单层陶瓷片

产生的形变比较小,实际应用中,为获得大的伸长量通常采用多层压电陶瓷堆叠结构.压电陶瓷堆叠的伸长量(Δc)与所加电压(U)的关系为

$$\Delta c = NdU + \frac{NMU^2}{t} \quad (1)$$

式中 N 为压电陶瓷片数, d 为压电系数(m/V), M 为电致伸缩系数($m^4 C^{-2}$), t 为每片陶瓷的厚度.

为精确观测 PZT 伸长量随电压的变化情况,引入光纤光栅作为传感元. FBG 采用波长编码,环境温度(ΔT)和轴向应变(ϵ_x)的变化均能引起其布喇格波长 λ_B 的漂移($\Delta \lambda_B$),两者的总贡献为^[11]

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中 P_e 为光纤光栅的有效弹光系数, α 为热胀系数, ξ 为热光系数. 硅纤介质中 $P_e = 0.22$,

$$\alpha = 5.5 \times 10^{-7}, \xi = 6.67 \times 10^{-6}.$$

保持环境温度不变,波长漂移引起臂长差为 L 的 Michelson 干涉仪的相移^[12]为

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda_B} (1 - P_e)\epsilon_x \quad (3)$$

式中 n 为纤芯的折射率. 记 FBG 所在光纤的长度为 l , 若上述应变由 PZT 的电致伸缩及逆压电效应对该段光纤的轴向拉伸(Δl)提供, 则 $\epsilon_x = \frac{\Delta l}{l}$, 代入上式得

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi nL(1 - P_e)}{\lambda_B} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

若被粘贴光纤段未出现滑脱现象, 则有 $\Delta l = \Delta c$, 式

第一作者:余有龙(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤光栅传感器及网络化技术、光无源器件、光纤激光技术及其应用.
Email: youlongyu@163.com

通讯作者:谭玲(1984—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感、压电陶瓷. Email: xiaolindatan@163.com

收稿日期:2011-02-23;修回日期:2011-03-01

(1)代入式(4)得

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi nL(1-P_e)}{\lambda_B} \cdot \frac{NdU + \frac{NMU^2}{t}}{l} \quad (5)$$

可见,观测的相移与 PZT 上实际施加的电压有关.

2 实验结果与分析

实验使用截面呈正方形的柱状压电陶瓷堆,其长度为 2 cm,输入电压的范围为 0-150 V,最大位移为 $17.4 \mu\text{m} \pm 2.0$. 实验装置如图 1,宽带光源 (Light-Emitting Diode, LED) 发出的光波经 FBG 反射后由 3dB 耦合器提供给非平衡 Michelson 扫描干涉仪,其输出经光电转换、放大和滤波后,作为检测信号输入相位计,扫描干涉仪的驱动信号作为参考信号同步提供给相位计.

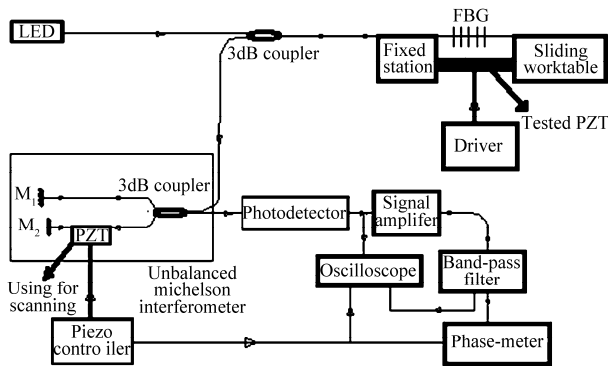


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

PZT 一端粘贴于固定台内侧,另一端与光滑导轨上的滑动平台(简称“滑台”)相连,两台上表面平行. PZT 的伸缩将推动滑台右移,进而拉伸光纤,引起 FBG 的布喇格波长漂移.

实验中,被粘贴光纤段长度为 12 cm,干涉仪两端镜通过对 FC/PC 型插头端面镀银膜制作而成,其反射率均接近 90%,臂长差为 1.96 mm,光纤介质的折射率为 1.455 6. LED 光源的波长范围为 1 410 nm 至 1 610 nm;自由状态下,传感光栅的长度为 1 cm,中心波长为 1 562.777 7 nm,带宽 $\Delta\lambda_{1/2} = 0.162 1 \text{ nm}$,对应地相干长度为 15.07 mm. 用于扫描的压电陶瓷,其锯齿波驱动信号频率为 120 Hz,占空比接近 1,电压峰值为 25.1 V,直流电压为 6.0 V. 放大器的放大倍数为 300;相位计的响应时间为 $3 \times 10^2 \text{ ms}$,灵敏度为 $5 \times 100 \text{ mV}$,分辨率为 0.01° ,主值区间为 $(-180^\circ, 180^\circ)$;带通滤波器的滤波频率为 115 Hz 至 125 Hz,增益设为 40 dB;示波器的三个输入端分别连接参考信号、待测信号以及经滤波后的待测信号.

保持 FBG 所在环境的温度不变,LED 光源的输出功率 13 mW,相位计初始相位调整为零. 将施

加在测试 PZT 上的直流电压步距设为 5 V,电压由 0 V 升至 100 V,再回到 0 V,每次操作完成 5 s 后读取相位值,得到电压与相位的关系如图 2. 相应地,从示波器上可观察到电压上升时干涉条纹左移;反之则右移.

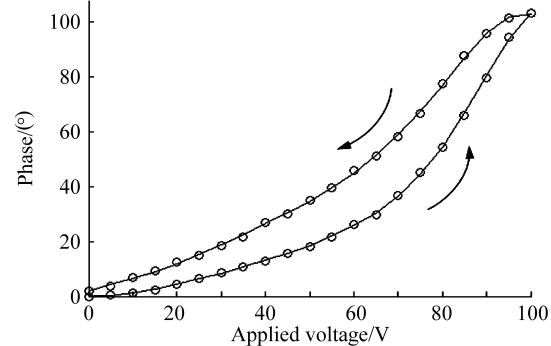


图 2 电压与相位的关系

Fig. 2 The relationship between applied voltage and phase

从图 2 中可以看出,电压上升与下降时相位并不重合,存在一定的滞回. 依据式(4)计算压电陶瓷位移量,得到压电陶瓷位移量与电压间的迟滞特性曲线如图 3 中曲线 1-1' 所示. 从图 3 中可以看到,驱动电压在 0~20 V 区间范围内,PZT 产生的形变较小, $U=20 \text{ V}$ 时产生的形变仅为 $0.53 \mu\text{m}$;之后形变较明显. $U=100 \text{ V}$ 时,PZT 伸长量为 $11.84 \mu\text{m}$,与所购压电陶瓷给出值相比,其绝对误差为 $0.24 \mu\text{m}$,相对误差为 2.07%,造成与理论值不符的原因为:实验中,受实验仪器的限制,测试 PZT 与 FBG 传感器的纵向距离仅有 0.5 cm,随着测量时间的增加,PZT 因通电所产生的热量将会引起 FBG 布喇格波长的漂移,对相位计读数造成了一定的影响.

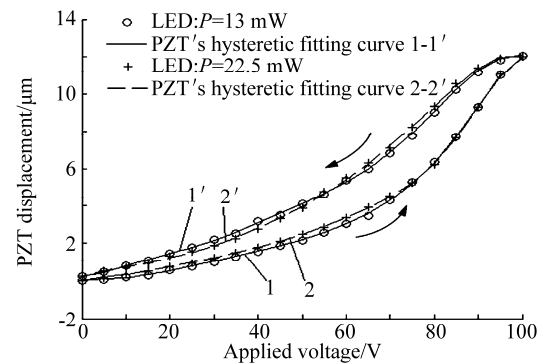


图 3 PZT 的迟滞特性曲线

Fig. 3 PZT hysteretic characteristics curve

为验证功率波动对观测结果是否有影响,将 LED 的输出功率调整为 22.5 mW,驱动步距保持 5 V 不变,重复图 3 中 1-1' 的实验,得到的结果如图 3 中曲线 2-2' 所示. 通过两次实验结果比较可知光源功率的波动并未引起测量结果的明显变化,两回线未能完全重合的原因在于两次实验的环境可能有微小变化,且 PZT 自身的蠕变特性对结果亦有影响.

压电陶瓷的蠕变特性是指其位移量对时间的滞后. 当给 PZT 施加电压后, 起始段短时间内 PZT 产生较大位移量, 之后较长时间完成微量形变, 即蠕变量. 为观测电压往返时 PZT 的蠕变情况, 实验中将驱动电压设为 80 V, 待相位计读数稳定后, 再调为 100 V, 60 s 内读取相位值, 重复测量一次. 依据式 (4) 计算 PZT 伸长量, 得其随时间的变化曲线如图 4(a); 电压从 100 V 返回至 80 V 时采取同样的操作, 其结果如图 4(b). 对 15~45 s 时间段的伸长量进行处理, 得到该时间段内 PZT 的蠕变曲线如图 5. 由图 4 和图 5 可知, 驱动电压在 80~100 V 往返控制时, PZT 位移曲线及蠕变曲线的变化趋势基本相同, 具有良好的重复性. 电压从 80 V 上升至 100 V, PZT 的实际伸长量为 $2.247 \mu\text{m}$, 蠕变量为

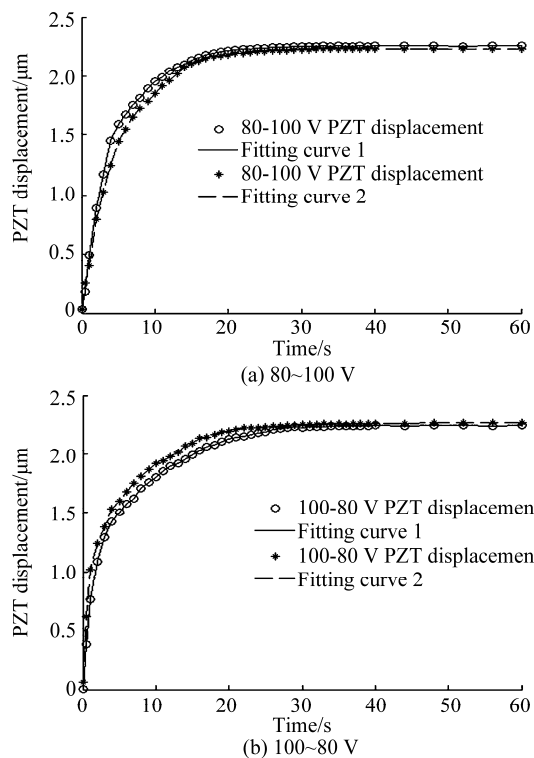


图 4 80 V~100 V 往返控制时 PZT 的伸长量与时间的关系
Fig. 4 The relationship of PZT displacement-time when driver voltage back and forth around 80~100 V

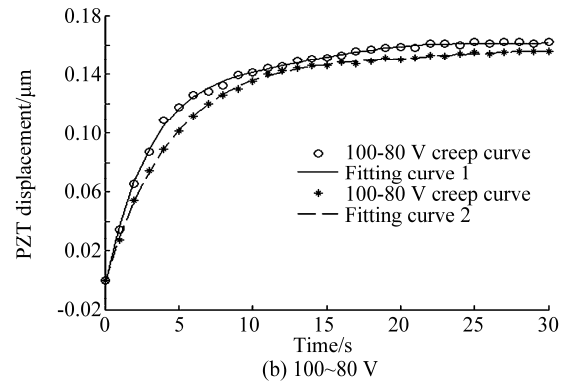
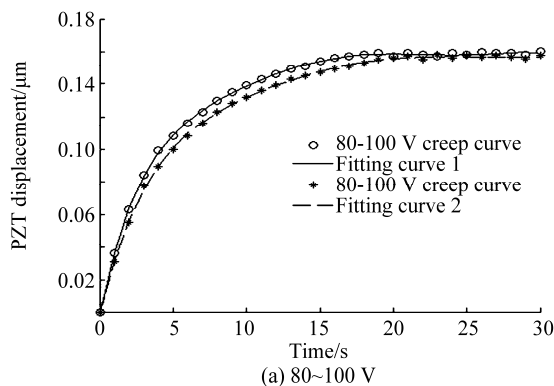


图 5 80~100 V 往返控制时 PZT 的蠕变特性曲线
Fig. 5 The curve of PZT creep when driver voltage back and forth around 80~100 V

0.159 μm ; 从 100 V 回至 80 V 时, 其伸长量为 2.257 μm , 蠕变量为 0.158 μm , 从结果中可以看出往返控制时 PZT 的伸长量以及蠕变量接近相等.

3 结论

本文利用光纤光栅传感器波长编码的特性, 借助非平衡 Michelson 扫描干涉仪对传感结果进行相位解调, 得到 PZT 位移量与驱动电压的关系, 成功分析了 PZT 的迟滞和蠕变特性, 并通过实验验证了: 1) PZT 的迟滞特性与光源功率波动无关; 2) PZT 的蠕变特性与电压的方向无关, 即电压往返过程中 PZT 蠕变量基本相同. 该方法理论推导简单, 准确度高, 响应速度快, 稳定性好, 对 PZT 的应用具有实质性的意义.

参考文献

- [1] JING Yang, LOU Jian-bin, LU Xin-chun. Preparation and properties of piezoelectric elements by Sol-Gel process for micro-actuator application[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2006, **28**(2):147-149.
荆阳, 雒建斌, 路新春. 压电微致动器元件的制作及特性分析[J]. *压电与声光*, 2006, **28**(2):147-149.
- [2] ZHANG Zhen-peng. Development of piezoelectric Micro displacement actuator and its applications [D]. Harbin: Harbin University of science and technology, College of electrical & electronic engineering, 2007.
张振鹏. 压电微位移致动器的研制及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 2007.
- [3] POZZI M, KING T. Piezoelectric actuators in micro-positioning [J]. *Engineering Science and Education Journal*, 2001, **10**(1):31-36.
- [4] LIU Yuan-Ping, VASIC D, COSTA F, et al. Design of fixed frequency controlled radial-mode stacked disk-type piezoelectric transformers for DC/DC converter applications [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, **18**(8):211-223.
- [5] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett*, 1992, **28**(3):236-238.
- [6] KOO K, SIGEL G. An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film in a single-mode fiber Interferometer [J]. *IEEE Microwave Theory and*

- Techniques Society*, 1982, **30**(4):670-675.
- [7] LI Shu-min, TANG Jun. Studying the characteristics of piezoelectric ceramics with Michelson interferometer [J]. *Physics Experimentation*, 2008, **28**(6):42-46.
李书民,唐军.应用迈克耳孙干涉仪研究压电陶瓷的特性[J]. *物理实验*, 2008, **28**(6):42-46.
- [8] LI Bao-sheng, LIU Yong, WANG An. Design of optical fiber piezoelectric phase modulator with large scan range [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(1):127-130.
李保生,刘勇,王安.大扫描范围光纤压电相位调制器设计[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(1):127-130.
- [9] ZHANG Jian-liang, CHENG Xin-zhi, WU Chong-qing. Measurement of phase-shift coefficient of the piezoelectric phase modulator with spatial fiber M-Z Interferometer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(1):47-49.
张建亮,盛新志,吴重庆.利用光纤空间 M-Z 干涉仪测量压电陶瓷相移系[J]. *压电与声光*, 2009, **31**(1):47-49.
- [10] ZHU Ri-hong, WANG Qing, CHEN Lei, *et al.* Automatic interference method measuring the characteristic curve of PZT displacement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2):180-183.
朱日宏,王青,陈磊,等.压电晶体位移特性曲线干涉自动测量方法[J]. *光子学报*, 1998, **27**(2):180-183.
- [11] MOREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fiber optic Bragg grating sensors [C]. *SPIE*, 1989, **1169**:98-106.
- [12] YU You-long, TAN Hua-yao, ZHONG Yong-kang. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):987-989.
余有龙,谭华耀,钟永康.基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):987-989.

Piezoelectric Ceramic Characteristics Using Fiber Grating Sensor

YU You-long, TAN Ling, ZOU Li-gang, WANG Hao

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A method for characteristics of piezoelectric ceramics was presented using a fiber Bragg grating sensor. An unbalanced Michelson interferometer was utilized to demodulate the fiber Bragg grating sensor signals. The relationship between the displacement of piezoelectric ceramic and the applied voltage was shown by observing the phase-shift induced by wavelength-shift. The hysteretic and creep properties of the piezoelectric ceramic were demonstrated experimentally, and the applied voltage-displacement curve and the creep curve were obtained. The results show that the fluctuations of light power had no effect on hysteretic, and the voltage direction has nothing with creep.

Key words: Fiber Bragg grating; Piezoelectric ceramic; Hysteretic; Creep; Interferometric demodulation