

基于多次压电效应理论微动传感器的研究

基于经典压电学理论、电介质物理学理论，利用压电陶瓷体的一次正压电效应可产生电荷、二次逆压电效应可输出微位移的多次压电效应理论，提出一种基于多次压电效应微动传感器研制的方法，将传感器和执行器集成一体，实现传感和微动执行功能。通过理论研究和实验验证，设计了微动传感器的内部连接和外形结构，确定了总体方案。

魏喜雯^{1*} 史丽萍² 刘刚¹ 史云玲¹ / 1. 黑龙江工业学院电气与信息工程系
2. 黑龙江大学机电工程学院



魏喜雯/助教

在传感技术不断更新变换的时代，压电类传感器和执行器逐渐向智能人性化、多功能一体化、精密微型化及低耗绿色化方向发展。而且其应用领域也不断拓宽，例如，它们被广泛应用在机械加工、煤炭开采、汽车产业、超精密加工和建筑测量等多领域^[1-4]。这些压电式传感器和执行器都是利用同一压电体上的一次效应，即一次正压电效应和一次逆压电效应，然而学者们并没有注意到压电材料具有交叉耦合这一特性。根据压电传感器和执行器的微机电系统（MEMS）技术，利用同一压电陶瓷体的多次压电效应理论，研究设计出一种实时、可靠和节能环保的微动传感器，在可测得力的情况下，还可输出微位移，实现传感和微动执行功能^[5-6]。

关键词/Keywords

压电陶瓷体 ·
多次压电效应 ·
微动传感器 ·

多次压电效应理论研究

压电体的电学和力学状态是根据边界条件的形式确定的，因此，压电体的边界条件在研究多次压电效应时起着至关重要的作用。压电体存在四类边界条件，在每一类边界条件下都对应一组压电方程，它们的具体形式如表1所示^[7-8]。

表1 压电体的四类边界条件和方程组

类别	边界条件	方程组
第一类	机械自由和电学短路	$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_n$; $D_m = d_{mj} T_j + \epsilon_{mn}^T E_n$
第二类	机械夹持和电学短路	$T_j = c_{ji}^E S_i - e_{nj} E_n$; $D_m = e_{mi} S_i + \epsilon_{mn}^S E_n$
第三类	机械自由和电学开路	$S_i = s_{ij}^D T_j + g_{mi} D_m$; $E_n = -g_{nj} T_j + \beta_{nm}^T D_m$
第四类	机械夹持和电学开路	$T_j = c_{ji}^D S_i - h_{mj} D_m$; $E_n = -h_{ni} S_i + \beta_{nm}^S D_m$

通过对第一类压电方程组和第三类压电方程组进行化简，可得出同一压电体在外力作用下多次压电效应产生的理论电压值和理论微位移值的化简公式分别为

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{nd_{33}F}{C} \quad (1)$$

$$\delta = -ntg_{33}d_{33}\frac{F}{A} \quad (2)$$

式中， n 为压电片的片数； F 为施加的外力； C 为压电体的等效电容； t 为压电片的厚度； A 为压电体的受力面积； d_{33} 为压电应变常数； g_{33} 为压电电压常数。

利用压电产生的理论电压值和理论微位移值，即可测量出施加外力的大小，实现传感功能，又可在无外电源的基础上对外产生微位移，实现微动执行功能，为微动传感器的研制奠定了基础。

多次压电效应实验研究

在本次的多次压电效应实验中选用了PZT-5压电体，YE6232B数据采集器，WDW-100D型微机控制电子式万

能试验机, MDS系列LVDT测微仪, YE5850型电荷放大器, 微小型石英测力传感器, VC9806

万用表及PC机等, PZT-5的基本参数如表2所示^[9]。

表2 PZT-5基本参数

类型	压电系数/ (10^{-12}C/N)	压电电压常数/ (m^2/C)	压电应力常数/ (C/m^2)	弹性系数/ $(10^{10}\text{N}/\text{m}^2)$	压电刚度常数/ (10^9N/C)
PZT-5	$d_{33}=800$	$g_{33}=0.019$	$e_{33}=34.4$	$c_{33}=4.3$	$h_{33}=2.15$
类型	晶片片数	单片厚度/mm	电容/ μF	绝缘电阻/ $\text{M}\Omega$	外形尺寸/mm
PZT-5	250	0.12	1.75	$R>50$	$10\times 10\times 30.4$

电学开路时, 在压电体上施加外力, 利用数据采集器收集压电体产生的电荷, 再通过计算机得到压电体输出的电压, 即压电体一次压电效应产生的电压, 实现传感器功能。一次正压电效应实验结构如图1所示。

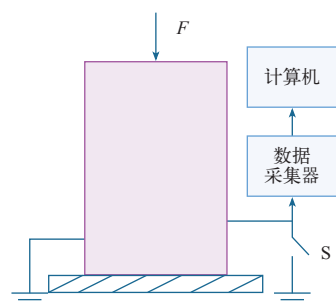


图1 一次正压电效应实验结构图

电学开路时, 在压电体上施加外力, 通过其自身的弹性效应和二次逆压电效应会产生应变, 利用边界条件的改变, 即由电学开路变为电学短路, 将一次正产生的电压中和掉, 二次逆压电效应输出的应变也随之消失, 使用LVDT测微仪和测力传感器可分别测出二次逆输出应变和应力的大小, 实现微动执行器功能, 即微动执行器无需外加电源便可工作, 一方面减少了能源的消耗; 另一方面提高了执行器的准确度。多次压电效应实验结构如图2所示^[10-11]。

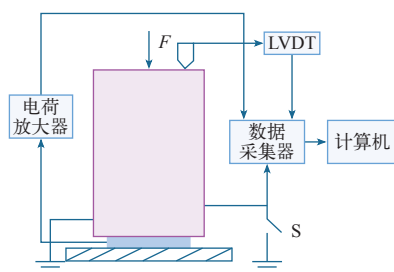
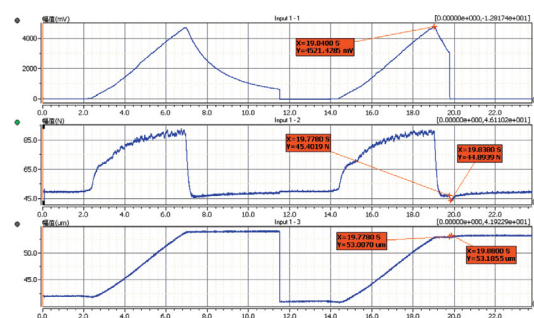
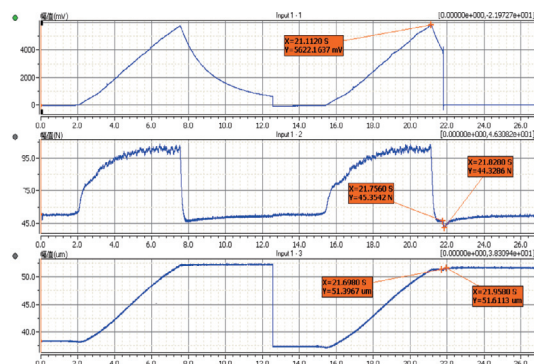


图2 多次压电效应实验结构图

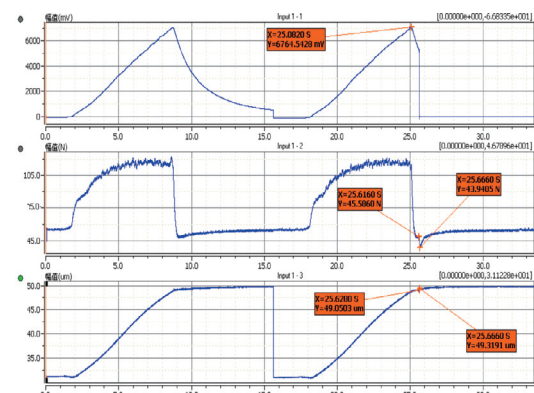
利用上述实验结构, 从0开始分别施加40 N、50 N、60 N和70 N的外力, 则一次正输出的电压与二次逆输出的微位移、微力如图3所示。



(a) 40 N下



(b) 50 N下



(c) 60 N下

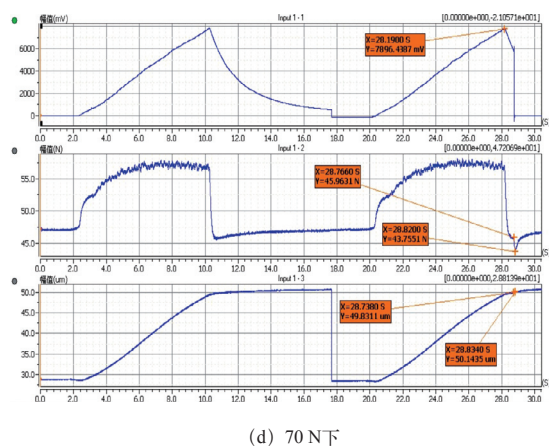


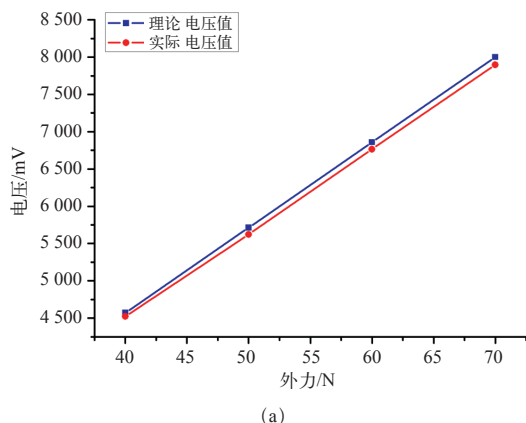
图3 多次压电效应实验测试结果

根据理论公式和实验结构,可得出 40 N、50 N、60 N 和 70 N 外力下输出的电压与输出微位移的实验输出结果与理论输出结果如表3所示^[12]。

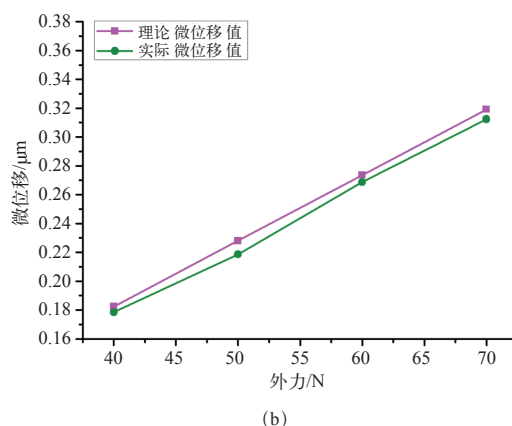
表3 一次正、二次逆理论与实验输出结果

力/N	一次正理论 输出电压 /mV	一次正实际 输出电压 /mV	二次逆理论 输出微位移 /μm	二次逆实际 输出微位移 /μm
40	4 571.428 4	4 521.428 5	0.182 4	0.178 5
50	5 714.285 5	5 622.163 7	0.228 0	0.214 6
60	6 857.142 6	6 764.542 8	0.273 6	0.268 8
70	7 999.999 7	7 896.438 7	0.319 2	0.312 4

利用表3中的数据,将一次正、二次逆压电效应输出的理论值和实际值绘制成曲线,如图4所示。通过图4可知,输出的电压和微位移与外力具有很好的线性关系。因此,多次压电效应的实验结构可作为微动传感器的基础结构,加以改进即可制成微动传感器。



(a)



(b)

图4 一次正、二次逆理论与实际的输入、输出关系曲线

微动传感器的总体方案设计

利用压电陶瓷体的多次压电效应的理论分析和实验研究,可进行微动传感器的研究。以一次正压电效应的传感器功能为主,二次逆压电效应的微动执行功能为辅,研制出一种微动传感器,无需外加电源的情况下,即可测得外力,还可输出微位移。对多次压电效应的实验结构稍作改动,便设计出微动传感器的实验结构部分,如图5所示。

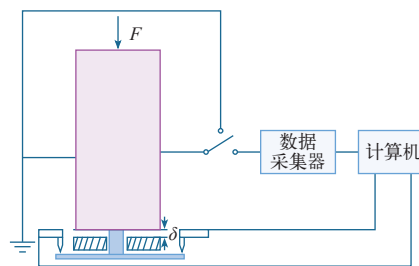


图5 微动传感器实验结构

为了使微动传感器更加精密、可靠,并能够与外电路进行合理的连接,对其机械结构进行了详细的设计。在上述实验的基础上增加了上盖、调整垫、执行板、底座和螺钉等部件。底座是由两个长和宽相等的长方体组成,为了能够固定,在4个角设置了4个通孔,上面是一个带有凹槽的长方体,将压电陶瓷体正好放入凹槽内。将执行板与压电陶瓷体的上表面用绝缘胶固定住,再将调整垫放置在执行板上,来修正上盖与底座上表面之间的预紧余量,然后将带有凸台的上盖与凹

槽的中心重合,并将上盖与底座用两个预紧螺钉连接在一起。此机械结构用于实现受力与精密定位,图6为微动传感器的机械结构示意图。

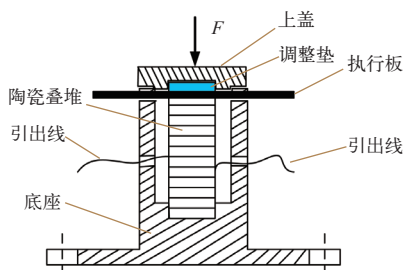


图6 微动传感器的机械结构

最终,将微动传感器的机械结构与已成熟的硬件电路和软件配合工作,实现微动传感器的功能。总体实现电路流程如图7所示。

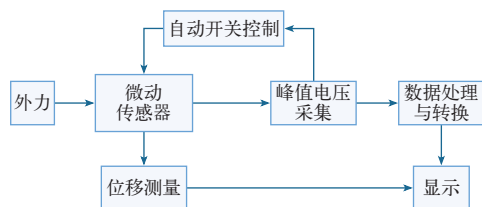


图7 总体实现电路流程图

结束语

对同一压电陶瓷体的多次压电效应进行了理论分析和实验研究,并利用该理论和实验设计了微动传感器,实现传感和微动执行功能。用于受力和精密定位的机械结构部分在封装设计过程中可能存在微小误差,因此接下来将研究更精密的设计。

参考文献

- [1] Lee BS, Lin SC, Wu WJ. Fabrication and evaluation of a MEMS piezoelectric bimorph generator for vibration energy harvesting [J]. Journal of Mechanics, 2010, 12 (26): 493-499.
- [2] Zhang Zhonghua, Kan Junwu, Cheng Guangming. A piezoelectric micropump with an integrated sensor based on space-division multiplexing [J]. Sensors and

Actuators A: Physical, 2013, 203: 29-36.

- [3] N C Tsai, C Y Sue. Review of MEMS-based drug delivery and dosing systems [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 134: 555-564.
- [4] Lee BS, Lin SC, Wu WJ. Fabrication and evaluation of a MEMS piezoelectric bimorph generator for vibration energy harvesting [J]. Journal of Mechanics, 2010, 12 (26): 493-499.
- [5] Paul M Weaver, Markys G Cain, Tatiana M Correia. Electromechanical coupling and temperature-dependent polarization reversal in piezoelectric ceramics [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58 (9): 1730-1736.
- [6] 张忠华,程光明,阚君武,等.基于多次压电效应的微执行器[J].仪器仪表学报,2011,32(9): 1998-2003.
- [7] 史丽萍,孙宝元,钱敏.利用一次正、二次逆压电效应设计可作动传感器研究[J].大连理工大学学报,2008,48(4): 519-522.
- [8] Sun Kang, Zhang Fuxue. Piezoelectricity [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 128-136.
- [9] Wei Xiwen. Research of street lighting system based on piezoelectric energy generator [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609: 1412-1416.
- [10] 史丽萍,孙宝元,钱敏.一次正、二次逆压电效应你设计可作动传感器研究[J].大连理工大学学报,2008,48(4): 512-522.
- [11] Shi Liping, Huang Jie, Wei Xiwen, et al. Investigation on multi-piezoelectric effects from the first positive piezoelectric effect [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609: 1398-1403.
- [12] Wei Xiwen, Shi Liping, Wei Yanbo, et al. Research of street lighting system based on piezoelectric energy generator [J]. Key Engineering Materials, 2014, 609: 1412-1416.

(收稿日期:2015-04-28) EA