

# 利用一次正、二次逆压电效应设计可作动传感器研究

史丽萍<sup>1,2</sup>, 孙宝元<sup>\*1</sup>, 钱敏<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;  
2. 黑龙江大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 进行了一次正压电效应、二次逆压电效应的理论分析与实验验证. 理论与实验均证明, 压电体通过一次正压电效应产生的电位移, 及通过二次逆压电效应产生的应变与应力均与施加外力具有良好的线性关系. 由于一次正、二次逆压电效应是在同一压电体内存在的双向效应, 其原理特别适合于传感器、执行器集成一体化的研究. 因此, 利用压电体的一次正压电效应可以测量外力, 作为传感器使用; 同时利用该压电体的二次逆压电效应可以输出一个微位移, 作为执行器使用. 提出了利用该原理设计“可作动传感器”的实现方案, 并证明了其可行性.

**关键词:** 一次正压电效应; 二次逆压电效应; 可作动传感器

**中图分类号:** O738 **文献标志码:** A

## 0 引言

压电传感器和压电执行器已广泛应用于许多研究领域, 而一次正压电效应原理、一次逆压电效应原理分别是设计压电传感器和压电执行器的理论基础.

同时利用压电材料的一次正、一次逆压电效应, 即利用压电材料的双向可逆效应可以进行传感器与执行器集成一体化研究. 传感执行器的研究是近十几年来压电应用领域内新兴的方向<sup>[1~3]</sup>, 其原理为在同一压电体上分别利用一次正、一次逆压电效应作为传感器和执行器使用, 例如基于空分复用与时分复用原理<sup>[4]</sup>可以在同一压电体上实现传感器功能与执行器功能的切换.

本文提出一种利用同一压电体的一次正压电效应作为传感器、二次逆压电效应作为执行器的新的压电传感器与执行器集成方法——可作动传感器的研究方法, 以为传感器与执行器集成一体化的理论与应用研究提供新的发展方向.

## 1 一次正压电效应理论与实验

### 1.1 一次正压电效应理论

选应力  $T$  和电场强度  $E$  为自变量, 应变  $S$  和

电位移  $D$  为因变量, 相应的第一类压电方程为

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_n \quad (1)$$

$$D_m = d_{mj}^T T_j + \epsilon_{mm}^T E_n \quad (2)$$

式中:  $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6; m, n = 1, 2, 3; s_{ij}^E$  为电场强度  $E = 0, C$  时的弹性柔顺常数, 即短路弹性柔顺常数;  $\epsilon_{mm}^T$  为应力  $T = 0, C$  时的介电常数, 即自由介电常数;  $d_{mi}$  和  $d_{mj}$  为压电应变常数.

压电材料在作为传感器使用时, 有外力施加在压电体上, 无外加电场, 此时压电方程简化为

$$S_i = s_{ij}^E T_j \quad (3)$$

$$D_m = d_{mj}^T T_j \quad (4)$$

### 1.2 一次正压电效应实验

一次正压电效应实验中使用的实验设备主要有压电石英叠堆、PZT-5 压电陶瓷叠堆、三向力加载器、YE5850 型电荷放大器、YE6230T16 通道数据采集卡等. 如图 1.

1.2.1 石英叠堆的一次正压电效应 使用 22 片  $X0^\circ$  切型(纵向伸缩型)石英晶片按机械串联、电学并联方式组成叠堆. 施加外力, 其一次正压电效应输入输出关系如图 2.

本实验可以证明, 该石英叠堆一次正压电效应具有比较好的线性, 基本没有迟滞现象.

收稿日期: 2006-09-01; 修回日期: 2008-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475152, 50675026); 黑龙江大学青年科学基金资助项目(QL200539).

作者简介: 史丽萍(1971-), 女, 博士, 副教授; 孙宝元\*(1937-), 男, 教授, 博士生导师.

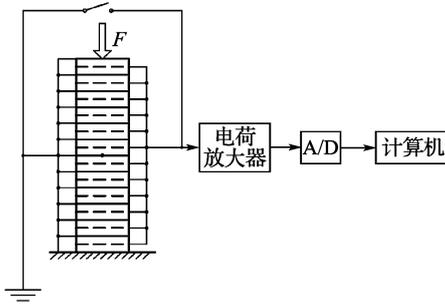


图1 一次正压电效应实验结构

Fig.1 The experimental structure diagram of the first direct piezoelectric effect

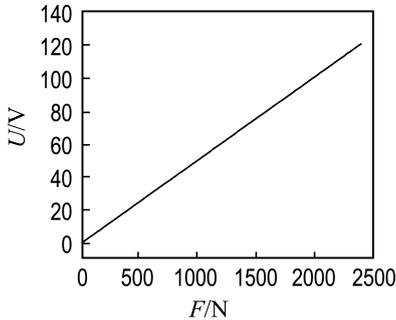


图2 石英叠堆一次正压电效应

Fig.2 The first direct piezoelectric effect of quartz stack

1.2.2 陶瓷叠堆的一次正压电效应 使用加载器在陶瓷叠堆上分别加载100、200、300、400 N外力,未使用电荷放大器,直接测量其输出电压.停留30 s,如图3.

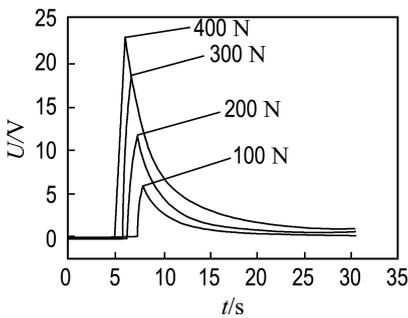


图3 陶瓷叠堆一次正压电效应

Fig.3 The first direct piezoelectric effect of ceramic stack

由于实验中未使用电荷放大器,本实验一方面说明陶瓷叠堆在外力作用下输出电压较大,另一方面可以看出陶瓷叠堆电荷泄漏较快.

## 2 二次逆压电效应理论与实验

### 2.1 二次逆压电效应理论

二次逆压电效应的存在与压电体边界条件密

切相关.当压电晶片处于电学开路边界条件时,晶片在外应力 $T_j$ 的作用下(外电场 $E$ 为0),通过一次正压电效应在电极面上产生的电荷将不会消失,此时电极面上因电荷积累形成电位移 $D_m^{(1)}$ ,从而使晶片内部产生了电场 $E_n^{(1)}$ .此压电电场 $E_n^{(1)}$ 将通过二次逆压电效应使压电体产生一个附加的压电应变 $S_i^{(2)}$ , $S_i^{(2)}$ 及其应力 $T_j^{(2)}$ 为<sup>[5,6]</sup>

$$S_i^{(2)} = d_m E_n^{(1)} = -d_{mj} g_{nj} T_j \quad (5)$$

$$T_j^{(2)} = e_{nj} E_n^{(1)} = -e_{nj} g_{nj} T_j \quad (6)$$

### 2.2 二次逆压电效应实验

二次逆压电效应实验中使用的主要设备除图1中各装置外,增加了LVDT测微仪,其量程为50  $\mu\text{m}$ ,分辨力为1 nm.

如图4,在电学开路边界条件下,在压电叠堆上施加外力,之后,将电学开路条件改为电学短路条件,即将叠堆两端开关闭合,由放电过程产生二次逆压电效应.由LVDT测微仪可以测得相应的二次逆压电效应产生的应变 $S_i^{(2)}$ ,同时由叠堆下面的石英测力传感器测得压电叠堆在这种边界条件下由二次逆压电效应产生的输出力 $T_j^{(2)}$ .

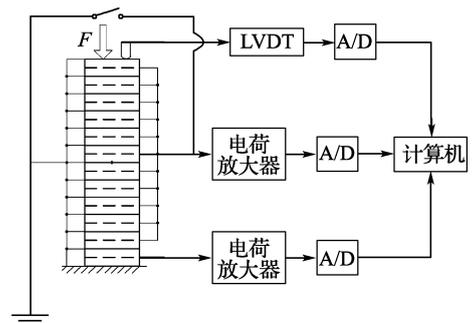


图4 二次逆压电效应实验结构

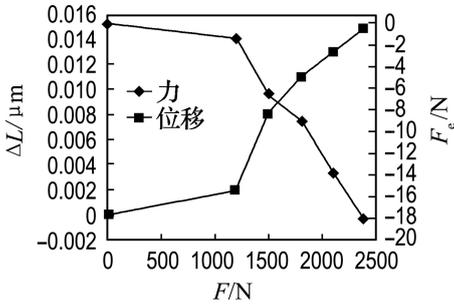
Fig.4 The experimental structure diagram of the secondary converse piezoelectric effect

由于压电石英和压电陶瓷压电系数的差距,其二次逆压电效应产生的位移与力的大小亦有很大差距.

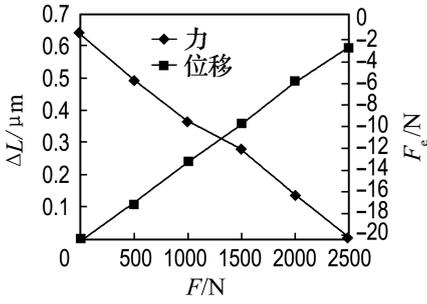
2.2.1 石英叠堆的二次逆压电效应 压电石英叠堆,通过二次逆压电效应产生的力 $F_e$ 、位移 $\Delta L$ 与施加外力 $F$ 的关系,如图5(a).

2.2.2 陶瓷叠堆的二次逆压电效应 压电陶瓷叠堆,通过二次逆压电效应产生的力 $F_e$ 、位移 $\Delta L$ 与施加外力 $F$ 的关系,如图5(b).

实验表明,压电石英叠堆和压电陶瓷叠堆通过二次逆压电效应所产生的形变和力均与施加在其上面的外力具有良好对应关系.



(a) 石英叠堆



(b) 陶瓷叠堆

图5 石英和陶瓷叠堆二次逆压电效应产生的力、位移与施加外力的关系

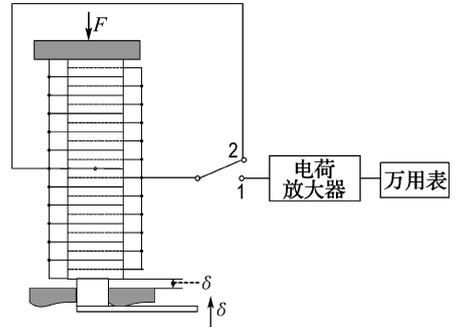
Fig. 5 Force and displacement generated as a function of applied force based on the secondary converse piezoelectric effect of quartz stack and ceramic stack

### 3 利用一次正、二次逆压电效应原理设计可作动传感器

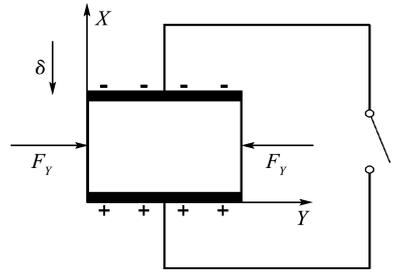
由上述实验可知,一次正、二次逆压电效应是同一压电体上存在的双向效应,可以利用其进行传感器、执行器一体化的研究.由于一次正压电效应的传感器功能为主,将这个能够根据所受外力的大小通过二次逆压电效应产生相应动作的传感器,称为“可作动传感器”,如图6.

#### 3.1 传感、执行功能在同方向的可作动传感器

如图6(a),以石英叠堆为例,开关首先接1点,连接电荷放大器,压电体通过一次正压电效应产生相应的  $D_m^{(1)}$ ,由式(4),测得施加外力  $F_1$  大小,实现传感器功能.然后开关接2点,使其短路,通过二次逆压电效应由式(5)、(6)输出相应的应变  $S_i^{(2)}$  或应力  $T_j^{(2)}$ ,实现执行器功能.公式中下标为  $i = j = m = n = 1$ ,传感器与执行器功能均在  $X$  轴方向,即使用压电石英的压电系数  $d_{11}$ .若为陶瓷叠堆,施加外力为  $F_3$ ,式(4)、(5)、(6)中下标为  $i = j = m = n = 3$ ,即使用压电陶瓷的压电系数  $d_{33}$ ,其传感器与执行器功能均在  $Z$  轴方向.



(a) 传感、执行功能为同一方向



(b) 传感、执行功能为不同方向

图6 可作动传感器原理

Fig. 6 The principle of generating actuation sensor

#### 3.2 传感、执行功能在不同方向的可作动传感器

如图6(b),选用  $Y0^\circ$  切型的石英晶片组成叠堆,利用其压电系数  $d_{12}$ ,在  $Y$  轴方向施加应力,电荷出现在与  $X$  轴垂直的平面上,将两电极间短路,在  $X$  轴方向上将产生微位移或微力.因此该石英晶片一方面可通过一次正压电效应测  $Y$  轴方向上外力,作为传感器使用;另一方面可通过二次逆压电效应在  $X$  轴方向输出微力或微位移,作执行器使用.对于压电石英晶体只在  $Y$  轴方向施加非零分量外力  $F_2$ ,外电场  $E_n$  为0,其压电方程为

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$D_1^{(1)} = d_{12} T_2 = -d_{11} T_2 \quad (8)$$

$$S_1^{(2)} = d_{11} E_1^{(1)} \quad (9)$$

由式(8),利用一次正压电效应作为传感器测  $Y$  轴方向力,由式(9)利用二次逆压电效应作为执行器在  $X$  轴方向产生位移.

由于压电石英的压电系数较小,为了使传感器在受外力作用的同时能够输出较大的位移或

力,同样可以使用压电陶瓷材料,利用其压电系数  $d_{31}$  来设计该可作动传感器。

对于压电陶瓷晶体只在  $X$  轴方向施加非零分量外力  $F_1$ , 外电场  $F_n$  为 0, 其压电方程为

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$D_3^{(1)} = d_{31} T_1 \quad (11)$$

$$S_3^{(2)} = d_{33} E_3^{(1)} = -d_{33} g_{31} T_1 \quad (12)$$

由式(11),利用一次正压电效应作为传感器测  $X$  轴方向力;由式(12),利用二次逆压电效应作为执行器在  $Z$  轴方向产生位移。

## 4 结 论

本文进行了一次正、二次逆压电效应的理论研究及实验验证。由于压电体的一次正、二次逆压电效应是同一压电体上存在的双向效应,可以利用其原理进行传感器、执行器一体化的研究。

本文另一方面利用该原理进行了可作动传感

器的结构设计,通过一次正、二次逆压电效应理论与实验证明了其可行性。

以上只是在同一压电体上同时应用一次正、二次逆压电效应原理的探索性研究,尚未在工程实践中加以使用。

## 参 考 文 献:

- [1] SINCARSIN G B, D'ELEUTERIO G M T, HUGHES P C. Dynamics of an elastic multibody chain: Part D-modelling of joints [J]. **Dynamics and Stability of Systems**, 1993, **8**(2):127-146
- [2] WONG K M, LIAO W H. Experimental investigation of an enhanced self-sensing active constrained layer damping treatment [J]. **Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering**, 2001, **4331**:468-479
- [3] 董维杰,孙宝元,崔玉国,等. 自感知执行器—传感器、执行器集成新概念 [J]. 压电与声光,2001, **23**(2):120-123
- [4] 王 波,殷学刚,黄尚廉. 一种新型自感知作动器及其应用 [J]. 压电与声光,2003, **25**(2):122-126
- [5] 孙 慷,张福学. 压电学 [M]. 北京:国防工业出版社,1984
- [6] 史丽萍,孙宝元,钱 敏. 二次压电效应研究及利用其原理设计微驱动器探析 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2005, **37**(11):1522-1525

## Investigation of generating actuation sensor applying the first direct and the secondary converse piezoelectric effect

SHI Li-ping<sup>1,2</sup>, SUN Bao-yuan<sup>\*1</sup>, QIAN Min<sup>1</sup>

( 1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China )

**Abstract:** The theory of the first direct piezoelectric effect and the secondary converse piezoelectric effect is analyzed and confirmed by experiments. There is good linear relationship between electric displacement generated by the first piezoelectric effect and strain and stress generated by the secondary converse piezoelectric effect and outside force. Because the first direct piezoelectric and the secondary converse piezoelectric effect are bilateral effect existing in the single crystal, it is especially suitable for the investigation of the integration of sensor and actuator. The proposal and realization of the structure of the generating actuation sensor are put forward through the principle that regards the first direct piezoelectric effect of crystal as sensor because of its measuring force and the secondary converse piezoelectric effect as actuator because of its output micro-displacement, and the feasibility is proved through the experiments.

**Key words:** the first direct piezoelectric effect; the secondary converse piezoelectric effect; generating actuation sensor