

# 偏置电压对磁致伸缩/压电层合换能结构 磁电性能影响\*

李平<sup>†</sup> 黄娴 文玉梅

(重庆大学光电工程学院, 传感器与仪器研究中心, 重庆 400044)

(2011年8月31日收到; 2011年11月28日收到修改稿)

分析和测试了偏置电压调整时 PZT5/Terfenol-D/PZT8 层合换能结构磁电性能. 提出了一种磁致伸缩/压电层合磁电换能结构的一阶谐振频率控制方法. 通过改变压电驱动层的直流电压对磁电层合结构的预应变进行改变, 从而调整谐振频率. 分析偏置电压、应变、弹性模量、谐振频率和谐振磁电电压系数之间关系. 分析表明: 在较小应变情况下, 控制电压几乎可以线性调节谐振频率, 而层合结构谐振磁电电压系数几乎与偏置电压无关. 实验研究验证: 理论与实验结果较好吻合. 在  $-170\text{ V}$ — $+170\text{ V}$  的偏置电压时, 谐振频率可以几乎线性调整. 最大频率调整量达到  $1\text{ kHz}$ , 偏置电压对一阶纵振频率的控制率达到:  $2.94\text{ Hz/V}$ . 在偏置磁场为  $0$ — $225\text{ Oe}$  时, 谐振频率调整量与偏置磁场无关. 偏置磁场会改变谐振磁电电压系数, 在大于  $178\text{ Oe}$  静态磁场偏置时, 磁电电压系数最大, 达到  $1.65\text{ V/Oe}$ .

**关键词:** 压控谐振频率, 磁致伸缩/压电层合结构, 预应变, 磁电效应

**PACS:** 75.80.+q, 75.85.+t, 77.65.-j

## 1 引言

叠层复合磁电材料是将磁致伸缩和压电材料复合在一起, 形成的磁电敏感材料. 2001年, Ryu 等人将 Terfenol-D 和压电陶瓷  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  叠层复合, 得到磁电系数达  $4.68\text{ V/cm}\cdot\text{Oe}$  ( $1\text{ Oe} = 79.5775\text{ A/m}$ ) 的磁电复合材料<sup>[1]</sup>, 比颗粒复合磁电材料磁电转换系数大 36 倍. 研究表明层状复合结构的磁电转换能力远远高于颗粒复合结构<sup>[2]</sup>. 国内外众多学者针对层状复合结构的材料特性、结构和工作模态进行了深入研究. Dong 等<sup>[3-5]</sup> 用构造  $\text{Fe-Ga/PZT}$  层合材料, 在低频时的磁电电场系数可达  $345\text{ mV/cm}\cdot\text{Oe}$ . Li 等<sup>[6,7]</sup> 将磁致伸缩材料和压电材料复合于弹性基板上, 使磁电复合材料在能量转换过程中应变得到放大或能量得到聚集, 从而提高器件谐振状态下的磁电响应特性. 他还将 PZT8H 与  $\text{FeNi}$  合金构造成为音叉结构, 得到  $10\text{ V/Oe}$  ( $100\text{ V/cm}\cdot\text{Oe}$ ) 以上的磁电转化系

数<sup>[8,9]</sup>. 杨伟伟<sup>[10]</sup> 推导了 GMM/弹性板/PZT 层状复合结构的运动方程, 在推导中考虑了层间胶层的作用. Chen<sup>[11]</sup> 研究了增加铁磁薄膜对磁电层合结构性能的影响. Or<sup>[12]</sup> 将 Cymbal 弯张结构的压电材料置于两层磁致伸缩材料之间, 利用 Cymbal 结构的应变放大功能有效提高了磁电层合结构的磁电效应. Wang<sup>[13]</sup> 用永磁体  $\text{NdFeB}$  与  $\text{PMN-PT}$  压电单晶横向复合, 在低频处 ( $0.1$ — $30\text{ kHz}$ ) 磁电电场系数达到了  $32.7\text{ mV/cm}\cdot\text{Oe}$ . Srinivasana 等<sup>[14,15]</sup> 利用薄膜层状复合技术制备了镍铁氧体/PZT 叠层复合材料, 双层与多层膜复合结构的磁电转换系数分别为  $460\text{ mV/cm}\cdot\text{Oe}$  和  $1500\text{ mV/cm}\cdot\text{Oe}$ . 叠层磁电复合材料制备简单, 磁电转换性能高, 成为近几年的研究热点.

由于层合结构磁电电压系数在谐振时比非谐振时大 1—2 个数量级<sup>[16,17]</sup>, 因此, 层合结构的磁电换能器通常工作在谐振频率附近能够得到更强的磁场探测能力. 目前, 通过扩展磁电层合材料频率响应带宽, 能够扩展其应用. 例如, Yu 用串联和

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50830202, 61071042) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: liping@cqu.edu.cn

并联压电层的方法扩展了磁电层合材料谐振频率的带宽 [18], 但带宽扩展, 其磁电电压系数则降低. 为了在更加宽广的频率范围提高磁电层合换能器的磁电灵敏度, 研究一种针对磁电层合结构的谐振频率控制方法, 能够提高磁电材料在磁传感器领域的应用范围. 材料尺寸、形状和体积分数均会影响到磁电层合材料的谐振频率 [19,20]. 为了得到需要的谐振频率, 可以让材料按照既定的尺寸、形状和体积分数制备, 然而, 一旦复合材料制备完成, 这些因素就很难再改变, 对谐振频率的控制作用很小. 由于磁致伸缩/压电层合材料的谐振频率可随着温度的变化 [5], 但这种变化较小, 且还会影响到磁电效率, 不易控制. Dong 等, 阳昌海等 [21,22] 分别研究了偏置磁场对磁致伸缩/压电层合材料的谐振频率和谐振磁电电压转换系数的影响. Jiles 等 [23] 研究了磁弹性内耗与偏置磁场的关系. 偏置磁场对磁电性能的影响比谐振频率的影响大, 为了让磁电电压系数达到最高, 总是设法使磁电复合材料工作在最佳偏置磁场 [5,20,24], 因此, 也不宜采用控制偏置磁场的方法来进行谐振频率的控制.

本文分析和测试了偏置电压对于磁致伸缩/压电层合磁电材料的性能影响, 提出了一种谐振频率可控的压电/磁致/压电层合结构. 介绍了谐振频率可控的磁致伸缩/压电复合磁电换能器原理. 分析了压电驱动的直流电压与磁电层合结构的应变关系. 制备了磁致伸缩/压电复合磁电换能器. 理论和实验较好的一致. 通过偏置电压改变, 调整施加给磁电复合材料的预应力/应变, 实现了对谐振频率的控制. 这种方法结构简单, 易于实现, 使磁电层合结构可工作在更宽的频率范围, 提高磁探测能力, 对于磁电复合材料的可控宽频带磁传感器研究有重要意义.

## 2 压控谐振频率的磁致伸缩/压电层合换能结构理论分析

### 2.1 电压控制谐振频率的磁电换能结构

由于 Terfenol-D 在压力时磁致伸缩特性将会改变 [25], 采用压电材料控制磁致伸缩材料, 可以实现压控磁电换能器. 可控频率层合磁电换能器基本结构是将 Terfenol-D 与 PZT8, PZT5 复合, 得到“三明治”形状的重叠结构 PMP 结构, 如图 1 所示. 用支架固定中间节点, 即波节点处, 能够提高复合结

构品质因数, 减小损耗. PZT5 具有高介电常数和较高的压电常数, 类似压电双晶片, 可以通过施加电压产生可控应力和应变, 因此 PZT5 作为复合结构的应变驱动层. PZT8 的 Q 值较高, 在复合结构中作为电信号输出层能够取得较高的响应特性.

层合磁电结构的谐振频率控制原理是通过改变 PZT5 上的电压, 从而改变磁电结构的预应力来实现的. 当 PZT5 在直流电压的作用下, 将产生应力或应变, 此形变经粘结层传递到 Terfenol-D 和 PZT8, 使整个层合结构形成可控预应力. 通过调节直流电压可以对预应变的大小进行控制. Terfenol-D 和 PZT8 的层合结构是一种较为常见的磁电结构, 当外来磁场引起 Terfenol-D 形变或机械振动, 此形变或机械振动通过胶层传递到 PZT8, 在 PZT8 上产生电压输出. Terfenol-D 和 PZT8 分别沿长度和厚度方向极化, 层合结构工作在 L-T 模式. PZT5 上的直流电压改变, 改变 Terfenol-D 预应变或应力, 预应变或应力将改变层合材料的弹性模量, 从而改变磁电换能器的磁电转化特性, 特别是改变层合结构的谐振频率, 使得换能器能根据需要通过施加在 PZT5 上的直流电压进行谐振频率控制.

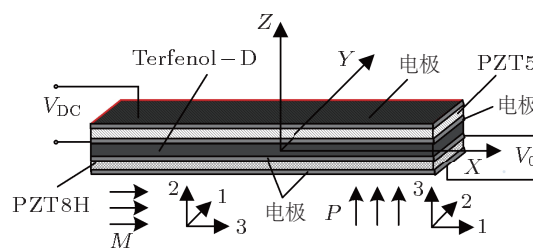


图 1 电压控制谐振频率的层合磁电换能结构

### 2.2 电压与预应变关系

在图 1 的层合结构中, 假设压电陶瓷与超磁致伸缩材料之间为理想耦合. PZT5 作为电压控制应变元件, 压电层场强在厚度方向为常数. 其表征逆压电效应的压电方程如下 [26]:

$$S_{1p} = s_{11p5}^E T_{1p} + d_{31p5} E_3, \quad (1)$$

其中  $S_{1p}$ ,  $T_{1p}$  分别是沿长度方向的应变和应力,  $s_{11p5}^E$ ,  $d_{31p5}$  分别为 PZT5 电场强度  $E_3$  为零 (或常数) 的弹性柔顺系数和压电应变常数.

当压电驱动层 PZT5 处于自由拉伸状态, 即端部所受的应力为零. 根据式 (1), 当 PZT5 极化方向上施加直流电压  $V_{DC}$  时, PZT5 端部的纵向预应

变  $\varepsilon$  为:

$$\varepsilon = d_{31,p5} V_{DC} / h_{p5}, \quad (2)$$

其中  $d_{31,p5}$ ,  $h_{p5}$  分别表示 PZT5 的压电应变常数与厚度. 可以看到, 由于压电常数为负, 所以施加正电压时, 层合材料产生收缩; 而施加负电压时, 层合材料将被拉伸.

上述分析是基于层合结构长度尺寸远大于其厚度尺寸, 只讨论沿长度方向上的应变得到的. 而实际的多层结构是将压电驱动层 PZT5 的机械应变, 通过胶层的连接, 传递到 Terfenol-D 和 PZT8 片上. 由于这种“三明治”结构的不对称性, 会在长度伸缩的同时还会产生弯曲形变. 在自由端偏转量为 [27]:

$$\delta_c = \frac{3d_{31}l^2}{4h^2} V_{DC}, \quad (3)$$

其中,  $l$  为层合结构的长度,  $h$  为层合结构厚度. 可见, 弯曲形变与材料特性、长度、厚度以及 PZT5 上施加电压相关. 从式 (2) 和 (3) 可知, 在 PZT5 上施加电压, 不仅在长度方向产生应变, 而且会产生弯曲形变, 弯曲和纵向形变与电压关系皆为线性关系. 因此, 通过调整 PZT5 两端电压可以改变层合结构纵振和弯振谐振频率.

### 2.3 谐振频率与弹性模量关系

根据运动学方程、牛顿第二定理和压电、磁致伸缩材料的本构方程可得:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \frac{n_1}{s_{11p5}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{n_2}{s_{11p8}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ & + \frac{1 - n_1 - n_2}{s_{33}^H} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\bar{\rho} = (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \rho_3 A_3) / A$  为材料的平均密度,  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  分别为 PZT5, PZT8, Terfenol-D 的密度.  $A$  为层合结构在垂直于长度方向的总横截面积. 其中  $n_1 = A_1 / A = h_{p5} / h$ ,  $n_2 = A_2 / A = h_{p8} / h$  分别是 PZT5, PZT8 的体积分数,  $1 - n_1 - n_2 = A_3 / A = h_m / h$  是 Terfenol-D 的体积分数.  $h_{p5}, h_{p8}$  和  $h$  分别为 PZT5, PZT8, Terfenol-D 以及层合结构的总厚度.  $s_{11p5}^E, s_{11p8}^E, s_{33}^H$  分别是 PZT5, PZT8, Terfenol-D 的柔顺系数.

由简谐运动方程 [28]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (5)$$

比较式 (4) 和 (5), 可以求出层合结构在谐振时的声速  $v$ :

$$v^2 = \frac{1}{\bar{\rho}} \left( \frac{n_1}{s_{11p5}^E} + \frac{n_2}{s_{11p8}^E} + \frac{1 - n_1 - n_2}{s_{33}^H} \right). \quad (6)$$

三种材料的宽度  $w$  和长度  $l$  均相等, 因此  $n_1, n_2, 1 - n_1 - n_2$  也可表示 PZT5, PZT8, Terfenol-D 的厚度比/体积比. 由于层合结构处于中间夹持, 振动波节点位于中间, 将式 (6) 代入文献 [29], 可求得一阶纵振频率  $f_s$  为:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{v}{2l} \\ &= \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\bar{\rho}} \left( \frac{n_1}{s_{11p5}^E} + \frac{n_2}{s_{11p8}^E} + \frac{1 - n_1 - n_2}{s_{33}^H} \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

此层合材料中的压电层 PZT5 与压电层 PZT8 的厚度不等, 是不对称结构, 所以存在弯曲振动, 将式 (6) 代入文献 [29], 还求得求得一阶弯振频率  $f_B$ :

$$\begin{aligned} f_B &= \frac{\pi h v \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \\ &= \frac{\pi h \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \sqrt{\frac{1}{\bar{\rho}} \left( \frac{n_1}{s_{11p5}^E} + \frac{n_2}{s_{11p8}^E} + \frac{1 - n_1 - n_2}{s_{33}^H} \right)}. \end{aligned} \quad (8)$$

磁电层合材料的等效弹性模量  $\bar{E}$  为 [22]:

$$\bar{E} = \frac{n_1}{s_{11p5}^E} + \frac{n_2}{s_{11p8}^E} + \frac{1 - n_1 - n_2}{s_{33}^H}. \quad (9)$$

一阶纵振频率式 (7) 和 (8) 可简化为:

$$f_s = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\bar{E}}{\bar{\rho}}}, \quad (10)$$

$$f_B = \frac{\pi h \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \sqrt{\frac{\bar{E}}{\bar{\rho}}}. \quad (11)$$

其中,  $\beta_1 \approx (1 - n_1 - n_2) + 1/2$ . 由式 (10), (11) 可以发现, 当弹性模量  $\bar{E}$  增大, 谐振频率也增大, 反之谐振频率减小. 根据式 (7) 与 (8), 可求得一阶纵振谐振频率  $f_s$  与一阶弯振谐振频率  $f_B$  分别为 109 kHz 和 46 kHz. 当直流电压  $V_{DC}$  在  $-170 \text{ V} \sim 170 \text{ V}$  变化时, 层合材料的应变量为  $10^{-6}$  量级, 所以对层合材料的体积、长度、密度这些参量的改变非常微弱, 这些量基本不对谐振频率产生影响.

### 2.4 谐振磁电电压系数与弹性模量关系

在偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  恒定, 交流磁场  $H_{\text{ac}}$  沿层合结构长度方向叠加时, 磁电层合结构的损耗主要来自于机械损耗, 磁损耗相对较小 [17], 可以近似为 0. 由于 PZT5 外部并联的电容远远大于 PZT8

和 PZT5 的静态并联电容, 设  $\omega_p$  为层合结构的并联谐振频率, 可以得到谐振磁电电压系数  $V_{ME}^{\text{reson}}$  [30]

$$\begin{aligned} V_{ME}^{\text{reson}} &= \left| \frac{dV_0}{dH_{ac}} \right| \\ &= \left| \frac{\varphi_{p8}\varphi_m}{\omega_p C_{08} R_{\text{mech}}} \right|, \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $R_{\text{mech}}$  对应机械损耗,  $C_{08}$  是 PZT8 的静态并联电容,  $\varphi_{p8}$ ,  $\varphi_m$  分别为 PZT8 和输入的电弹耦合系数,  $V_0$  表示 PZT8 电极两端感应到的交流电压,  $Q_{\text{mech}}$  是磁电层合结构的机械有效品质因数.  $Q_{\text{mech}}$  可表示为 [17]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q_{\text{mech}}} &= \frac{n_1}{Q_{\text{piezo5}}} + \frac{n_2}{Q_{\text{piezo8}}} \\ &\quad + \frac{1 - n_1 - n_2}{Q_{\text{mag}}}. \end{aligned} \quad (13)$$

机械损耗来自于压电材料和磁致伸缩材料振动损耗. 将  $\varphi_{p8} = (wd_{31,p8})/s_{11p8}^E$ ,  $\varphi_m = (A_3 d_{33,m})/s_{33}^H$ ,  $C_{08} = [lw\varepsilon_{33}(1 - k_{31}^2)]/h_p$ ,  $R_{\text{mech}} = (\pi\rho vwh)/8Q_{\text{mech}}$ ,  $\omega_p \approx \omega_s = \pi v/l$  和式 (13) 代入式 (12). 其中  $\varepsilon_{33}$  表示压电材料 PZT8 的自由介电常数,  $d_{33,m}$  是超磁致伸缩材料的动态磁致伸缩系数,  $d_{31,p8}$  和  $d_{31,p5}$  分别是 PZT8 和 PZT5 的压电应变常数,  $\omega_s$  是串联谐振角频率 (机械共振频率),  $k_{31}$  是 PZT8 的机电耦合系数, 化简可求得:

$$\begin{aligned} V_{ME}^{\text{reson}} &= \left[ 8Q_{\text{mech}} d_{31,p8} d_{33,m} h n_2 (1 - n_1 - n_2) \right] \\ &\quad \times \left\{ \varepsilon_{33} \pi^2 (1 - k_{31}^2) [n_1 s_{33}^H s_{11p8}^E / s_{11p5}^E \right. \\ &\quad \left. + n_2 s_{33}^H + (1 - n_1 - n_2) s_{11p8}^E] \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

将式 (9) 代入, 可以得到:

$$V_{ME}^{\text{reson}} = \frac{8Q_{\text{mech}} d_{31,p8} d_{33,m} h n_2 (1 - n_1 - n_2)}{\varepsilon_{33} \pi^2 (1 - k_{31}^2) s_{11p8}^E s_{33}^H \bar{E}}. \quad (15)$$

由式 (7), (8) 和 (14) 可知, 一阶纵振频率、一阶弯振频率和谐振磁电电压系数均与三种材料的柔顺系数  $s_{11p8}^E$ ,  $s_{11p5}^E$ ,  $s_{33}^H$  密切相关, 而且可以观察到如果柔顺系数增大, 谐振频率减小、谐振电压幅度减小. 由式 (10), (11) 可知, 一阶纵振频率、一阶弯振频率与等效弹性模量  $\bar{E}$  直接相关, 弹性模量越大, 一阶纵振频率、一阶弯振频率也越大. 从式 (15) 可知, 虽然谐振磁电电压系数与等效弹性模量  $\bar{E}$  相关, 但是根据式 (9) 可知, 等效弹性模量  $\bar{E}$  是由柔顺系数  $s_{11p8}^E$ ,  $s_{33}^H$  等参数的倒数求出, 在式 (15) 中,  $\bar{E}$  与  $s_{11p8}^E$ ,  $s_{33}^H$  的变化会相互抵消, 所以弹性模量的变化对谐振磁电电压系数影响较小. 而在式 (15)

中, 品质因素, 压磁系数、压电常数、机电耦合系数随磁场大小或外部环境发生改变, 将会对谐振磁电电压系数产生明显影响. 换言之, 改变 PZT5 上施加电压改变谐振频率, 但是, 对于磁电电压系数影响不大.

## 2.5 弹性模量与应力/应变关系

根据铁磁材料的  $\Delta E$  效应, Terfenol-D 受到应力作用时, 将导致磁畴磁化状态发生变化, 即引起畴壁移动和磁矩转动, 而凡是影响到畴壁移动和磁矩转动的因素都会影响弹性模量 [31]. 磁致伸缩材料的线性本构方程中的弹性模量是假设应力为恒定, 不能反映应力与弹性模量之间的函数关系, 磁致伸缩材料的应力 - 应变之间并不是简单的线性关系, 材料内部应力变化会引起磁化状态的变化, 而磁化状态的变化又会影晌应变, 所以弹性模量可以随着应力的变化而发生变化, 图 2 便反映了这种变化. 由图可知弹性模量与应力呈非线性关系, 在偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  较小 (小于 500 Oe) 的情况下, 当压应力超过一定值时, 弹性模量随着压应力的增加而单调递增. 综上所述, 可利用  $\Delta E$  效应对超磁致伸缩材料组成的磁电复合材料的机械共振频率 (谐振频率) 进行调节.

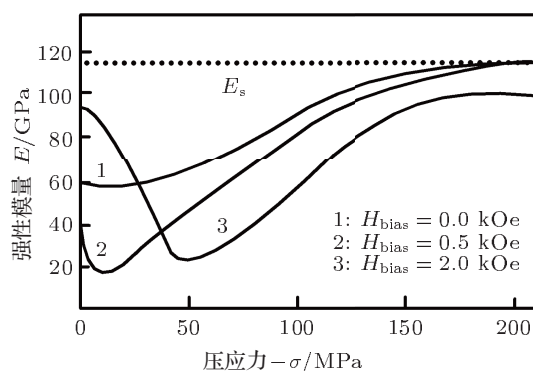


图 2 超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的弹性模量与压应力关系曲线 [32]

将层合结构的等效弹性模量  $\bar{E}$  的公式 (9) 改写为:

$$\bar{E} = n_1 E_{11p5}^E + n_2 E_{11p8}^E + (1 - n_1 - n_2) E_{33}^H, \quad (16)$$

式中  $E_{11p5}^E$  和  $E_{11p8}^E$  分别表示压电材料 PZT5 和 PZT8 在恒电场下的弹性模量. 即层合结构的弹性模量与压磁/压电三个部分的弹性模量的线性组合相关. 由图 2 知, 磁致伸缩材料的弹性模量  $E_{33}^H$  是应力 (或者应变) 的非线性函数, 因此, 层合结构

的等效弹性模量  $\bar{E}$  也是应力 (或者应变) 的非线性函数. 为了分析方便, 假设层合结构各层的应变相同. 由于超磁致伸缩材料 Tefenol-D 的弹性模量与应力/应变间存在非线性关系, 根据非线性弹性理论 [33], 各层弹性模量与应变  $\varepsilon$  之间存在关系为:

$$E_{11P5}^E = E_{11P5}^{E_0}(1 + \beta_{p5} \times \varepsilon) \quad (17)$$

$$E_{11P8}^E = E_{11P8}^{E_0}(1 + \beta_{p8} \times \varepsilon) \quad (18)$$

$$E_{33}^H = E_{33}^{H_0}(1 + \beta_H \times \varepsilon), \quad (19)$$

式中,  $E_{11p5}^{E_0}$ ,  $E_{11p8}^{E_0}$  和  $E_{33}^{H_0}$  分别是应变  $\varepsilon$  为 0 时 PZT5, PZT8 和 Tefenol-D 的弹性模量.  $\beta_{p5}$ ,  $\beta_{p8}$  和  $\beta_H$  是 PZT5, PZT8 和 Tefenol-D 各层应变时的对应非线性参数. 在较小应变时,  $\beta_{p5}$ ,  $\beta_{p8}$  和  $\beta_H$  保持不变 [33]. 式 (17)—(19) 表示了 PZT5, PZT8 和 Tefenol-D 各层弹性模量随应变 (或应力) 的增加关系. 将式 (17), (18), (19) 代入式 (16), 可以得到弹性模量与应变的关系为:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= n_1 E_{11P5}^{E_0} + n_2 E_{11P8}^{E_0} + (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \\ &+ [n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} + n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H] \times \varepsilon \\ &= \bar{E}_0 + [n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} + n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H] \times \varepsilon, \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $\bar{E}_0$  为层合结构应变为 0 时的弹性模量. 从式 (20) 可知, 在应变很小时, 应变对于结构的弹性模量影响小; 随着应变增加, 弹性模量的改变量不仅与各个材料厚度、初始弹性模量有关, 还与各个材料弹性模量 - 应变非线性对应参数相关. 因此, 整个材料弹性模量与应变是非线性关系.

## 2.6 谐振频率与控制电压的关系

由式 (10) 和 (11) 可知, 一阶纵振和弯振谐振频率 ( $f_s$  和  $f_B$ ) 与层合材料弹性模量  $\bar{E}$  相关. 而层合结构的等效弹性模量  $\bar{E}$  与应变之间满足式 (20). 应变与 PZT5 上施加电压满足式 (2). 因此, 将式 (2) 和 (20) 代入式 (10) 和 (11), 可以得到一阶纵振和弯振谐振频率与控制电压之间关系:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{1}{2l} \left\{ \frac{1}{\rho} \left\{ \bar{E}_0 + \frac{d_{31p5} V_{DC}}{h_{p5}} \left[ n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} \right. \right. \right. \\ &+ n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H \left. \left. \left. \right\} \right\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_B &= \frac{\pi h \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \left\{ \frac{1}{\rho} \left\{ \bar{E}_0 + \frac{d_{31p5} V_{DC}}{h_{p5}} \left[ n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} \right. \right. \right. \\ &+ n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H \left. \left. \left. \right\} \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (22)$$

式 (21) 和 (22) 表明, 随着控制正电压增加, 一阶纵向和弯曲谐振频率会增加; 反之, 控制负电压负向增加, 一阶纵向和弯曲谐振频率则会减小. 该层合结构在 PZT5 上施加电压会使 PZT5 和层合结构产生纵向 (弯曲) 应变和应力, 通过改变应力/应变使层合结构的弹性模量发生变化, 使一阶纵向和弯曲谐振频率改变, 从而实现电压控制一阶纵向和弯曲谐振频率调节. 正如前面分析, 在较小应变时,  $\beta_{p5}$ ,  $\beta_{p8}$  和  $\beta_H$  基本保持不变. 令

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{d_{31p5} V_{DC}}{\bar{E}_0 h_{p5}} \left[ n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} + n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \right. \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H \left. \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

将式 (23) 代入式 (21) 和 (22), 并利用泰勒级数展开:

$$f_s = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\bar{E}_0}{\rho}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \lambda - \frac{1}{8} \lambda^2 + \frac{1}{16} \lambda^3 - \dots \right], \quad (24)$$

$$f_B = \frac{\pi h \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \sqrt{\frac{\bar{E}_0}{\rho}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \lambda - \frac{1}{8} \lambda^2 + \frac{1}{16} \lambda^3 - \dots \right]. \quad (25)$$

当施加电压较小时 (200 V 左右), 由式 (23) 可知,  $\lambda < 1$ . 式 (24) 和 (25) 中高次项可以忽略. 一阶纵振和弯振谐振频率与控制电压之间可以近似为:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\bar{E}_0}{\rho}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{d_{31p5} V_{DC}}{\bar{E}_0 h_{p5}} \left[ n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} \right. \right. \\ &+ n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H \left. \left. \right\}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} f_B &= \frac{\pi h \beta_1^2}{2\sqrt{12}l^2} \sqrt{\frac{\bar{E}_0}{\rho}} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{d_{31p5} V_{DC}}{\bar{E}_0 h_{p5}} \left[ n_1 E_{11P5}^{E_0} \beta_{p5} \right. \right. \\ &+ n_2 E_{11P8}^{E_0} \beta_{p8} \\ &+ (1 - n_1 - n_2) E_{33}^{H_0} \beta_H \left. \left. \right\}. \end{aligned} \quad (27)$$

从式 (26) 和 (27) 可知, 在控制电压较小时, 一阶纵振和弯振谐振频率与控制电压之间近似成线



性关系. 这也是采用电压控制 PZT5, 能够非常方便控制磁电层合结构的一阶纵振和弯振频率.

### 3 实验与讨论

层合结构的制备过程是将片状压电陶瓷 PZT5、PZT8 和超磁致伸缩材料 Terfenol-D 清洗后, 用环氧树脂胶进行粘合, 置于 80 °C 烤箱中经一小时恒温固化, 用支架固定中间节点, 得到如图 1 的层合结构. 超磁致伸缩材料 Terfenol-D(台州椒光公司提供) 的尺寸为 12 mm × 6 mm × 1 mm 沿纵向 (110) 晶轴取向它除了具有大的磁致伸缩系数, 其快速的响应时间和高机电耦合性能也确保了磁能与机械能之间有效转换, 超磁致材料 Terfenol-D 处于中间层, 沿长度方向磁化, 不仅具有较大的磁致伸缩系数还能快速响应、高效进行磁机电能量转换 PZT5(12 mm × 7 mm × 0.7 mm) 和 PZT8 (12 mm × 6 mm × 0.8 mm) (中电集团第 26 研究所提供) 均沿厚度方向极化. 各材料的参数见附录.

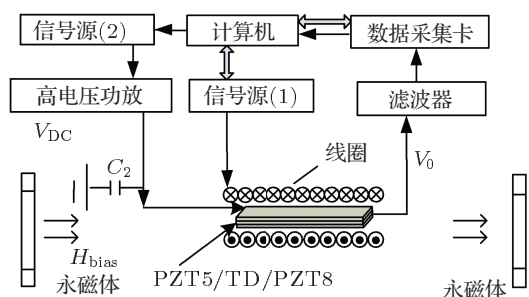


图3 实验测试系统

实验测试系统如图 3 所示. 为了使超磁致伸缩材料工作在较灵敏区域, 需要施加一定的偏置磁场. 实验测试系统用两块永磁体提供所需的偏置磁场  $H_{\text{bias}}$ , 层合结构位于两永磁体的中心线上, 偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  的方向始终沿层合结构长度方向. 用高斯计测量出两永磁体之间的距离与其中心位置处磁场的关系, 通过调节两永磁体之间的距离来得到所需的偏置磁场大小. 信号源 (1) (Aglient33250A) 激励线圈产生交流磁场  $H_{\text{ac}}$ , 该交流磁场  $H_{\text{ac}}$  方向沿长度方向, 为超磁致伸缩材料提供交流激励. 计算机控制信号源 (2) 的直流输出电压经高电压功放器 (MODEL603) 放大后输入到 PZT5 层, 调节信号源 (2) (Aglient33250A) 的输出幅度可获得可变的直流电压  $V_{\text{DC}}$ . 由于功放通常工作在较宽频带范围, 输入输出阻抗较高, 容易产生交流噪声, 干扰层

合结构的自由振动. 为此, 在功放的输出并联一电容, 滤除高频交流噪声. 磁电层合结构的电信号输出来源于 PZT8, 由于工频和低频噪声的干扰, 首先将 PZT8 输出电压  $V_0$ . 滤波除噪声后, 再送入数据采集卡和计算机的 GPIB 接口进行模数转换, 最终将采集数据保存到计算机中. 计算机采集并控制信号源 (1) 和数据采集卡, 完成对于不同交流激励频率及幅度的磁场自动产生和相应磁电信号采集, 通过编程实现对层合结构磁电特性的自动测量. 本实验计算机通过 Labview 程序编写和设定, 控制信号源 (1) 输入电压的频率和幅值, 保证线圈产生的交流磁场  $H_{\text{ac}}$  幅值为 0.5 Oe. 将计算机中采集到的数据时, 还应当考虑压电陶瓷驱动层 PZT5 产生蠕变现象. 为了得到稳定输出, 每次测量应当间隔一段时间, 还采用多次平均和剔除粗大干扰等措施保证采集数据的稳定和可靠.

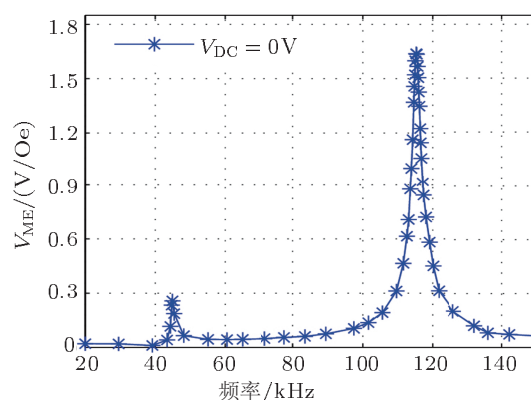


图4 磁电电压系数与交流磁场频率关系

在直流偏置磁场  $H_{\text{bias}} = 178$  Oe, 偏置电压  $V_{\text{DC}} = 0$  V 时, 在 20—150 kHz 频率范围内层合结构磁电电压系数随交流磁场频率的变化曲线存在两个谐振频率点, 分别为一阶弯振 (45 kHz 附近) 和一阶纵振 (115 kHz 附近) 谐振频率, 如图 4. 将在 PZT5 上施加电压  $V_{\text{DC}}$  分别设置为 -170 V, 0 V 和 170 V, 测得在一阶弯振和一阶纵振谐振频率附近的磁电电压系数与磁场频率的关系如图 5 所示. 由图 5 可知, 随着直流控制电压在正向增加 ( $V_{\text{DC}}$  从 0 V 到 +170 V), 一阶弯振和纵振谐振频率均得到提高; 而负向增加控制电压 ( $V_{\text{DC}}$  从 0 V 到 -170 V), 一阶弯振和纵振谐振频率则减小, 直流控制电压对两谐振磁电电压系数的影响均不大. 这与式 (21) 和 (22) 分析一致. 从图 5(a) 和 (b) 可知,  $\pm 170$  V 直流电压下纵振频率的可控频率范围达 1 kHz, 而一阶弯振的可控频率范围为 0.6 kHz.

可见,施加直流电压对纵振频率和弯振频率均能产生影响,考虑纵振时磁电电压系数比弯振时大7倍多,达到1.65 V/Oe. 因此,接下来主要针对一阶纵振磁电响应特性进行测试和讨论.

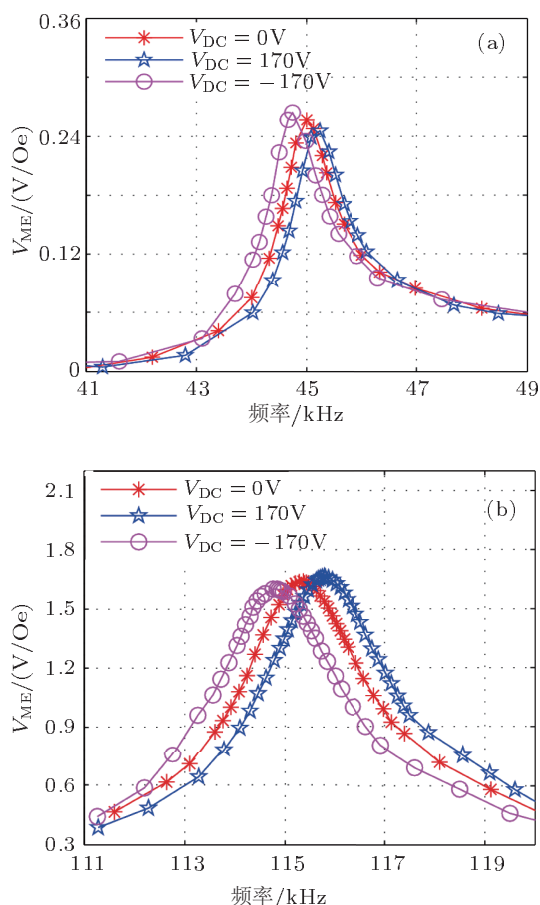


图5 谐振点附近磁电电压系数与交流磁场频率关系 (a) 一阶弯振附近磁电电压系数与频率关系; (b) 一阶纵振附近磁电电压系数与频率关系

磁电层合结构对于磁场偏置敏感,将电压  $V_{DC}$  设定为  $-170\text{ V}$ ,  $0\text{ V}$  和  $170\text{ V}$ , 得到一阶纵振频率  $f_s$  与偏置磁场  $H_{bias}$  的关系如图6所示. 由图可知当  $H_{bias}$  小于  $178\text{ Oe}$  时,  $f_s$  随着  $H_{bias}$  的增大而增大; 当  $H_{bias}$  超过  $178\text{ Oe}$  时,  $f_s$  不再随着  $H_{bias}$  变化. 图6中磁场改变产生最大的频率偏移小于  $700\text{ Hz}$ . 然而, 磁场偏置改变将大幅度影响磁电灵敏度, 一阶纵振磁电电压系数  $V_{ME}^{reson}$  与偏置磁场  $H_{bias}$  的关系如图7所示. 由图7可知,  $H_{bias}$  处于  $0-178\text{ Oe}$  时,  $V_{ME}^{reson}$  随着  $H_{bias}$  的增大而增大, 在  $H_{bias} = 178\text{ Oe}$  时  $V_{ME}^{reson}$  达到最大, 改变磁场, 无法使磁电换能器工作在最佳磁电响应的偏置处. 由图7还可知, 直流电压  $V_{DC}$  引起的预应力/应变变化对层合结构的谐振磁电电压系数影响不大. 而

改变 PZT5 上的电压, 无论在各种偏置磁场处, 可控幅度均为  $1\text{ kHz}$  左右 (图5), 这更体现电压控制谐振频率的优越性. 从图6和7可知,  $178\text{ Oe}$  为该磁电层合结构的最优偏置磁场值.

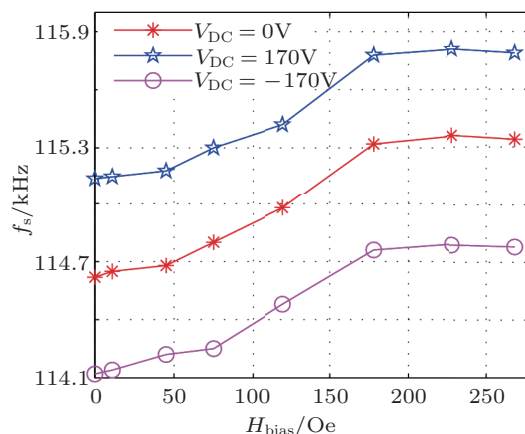


图6 一阶纵振频率与偏置磁场关系

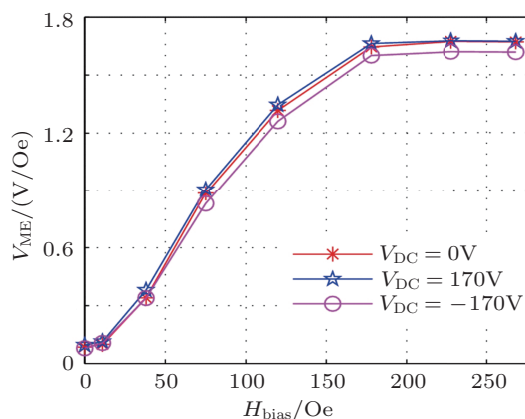


图7 谐振磁电电压系数与偏置磁场关系

当  $H_{bias}$  分别为  $178\text{ Oe}$  和  $75\text{ Oe}$  时,  $f_s$  与 PZT5 上偏置电压  $V_{DC}$  的变化关系如图8所示. 其测量过程是调节  $V_{DC}$  值, 从  $0\text{ V}$  开始, 增大到  $170\text{ V}$  再减小到  $-170\text{ V}$ , 然后再回到  $0\text{ V}$ . 从图8可见,  $V_{DC}$  正向增大时谐振点增大, 当  $V_{DC}$  减小时  $f_s$  也减小,  $f_s$  与  $V_{DC}$  近似呈线性关系变化. 直流电压  $V_{DC}$  对谐振频率的调整是由于初始应变对谐振频率的作用, 对于理想粘连, 可将压电驱动层 PZT5 端部的应变等同于整个层合材料在端部的应变, 得到一阶纵振频率与层合材料端部应变关系如图9所示. 图8与图9中的曲线呈轴对称. 当应变从  $-58 \times 10^{-6}$  变化到  $58 \times 10^{-6}$ , 偏置磁场为  $178\text{ Oe}$  时, 一阶谐振频率从  $115.7$  下降到  $114.7\text{ kHz}$ ; 偏置磁场为  $75\text{ Oe}$  时, 一阶谐振频率从  $115.3\text{ kHz}$  下降到  $114.3\text{ kHz}$ . 图8

和 9 中曲线的近似线性是由于在  $-170\text{--}170\text{ V}$  范围内应变较小, 与式 (26) 的结论相吻合. 当然, 如果进一步加大控制电压, 产生更强应变将会得到非线性关系. 本文采用的 PZT5 耐压只有  $300\text{ V}$  左右, 因此, 实验选定  $170\text{ V}$  电压提供偏置, 得到近似线性关系. 从图 8 可知, 当  $V_{\text{DC}}$  在  $-170\text{--}170\text{ V}$  范围内变化时,  $V_{\text{DC}}$  对  $f_s$  的可控幅度达  $1\text{ kHz}$ . 偏置电压  $V_{\text{DC}}$  对一阶纵振频率  $f_s$  的控制率达到:  $2.94\text{ Hz/V}$ . 所以可通过变化  $V_{\text{DC}}$  可以对谐振频率进行控制. 不过, 由于压电陶瓷的迟滞效应和磁致伸缩的磁滞效应,  $f_s$  随  $V_{\text{DC}}$  的变化存在滞后现象, 在高精密频率控制时应当加以考虑.

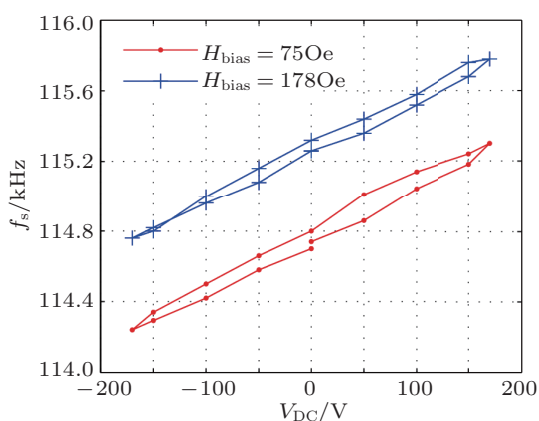


图 8 一阶纵振频率与 PZT5 偏置电压关系

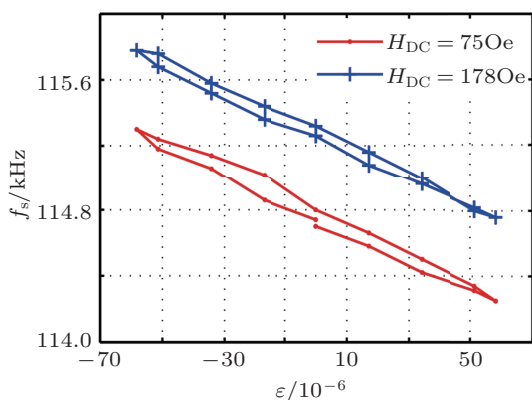


图 9 一阶纵振频率与层合材料端部应变关系

将偏置磁场分别设置为  $178\text{ Oe}$  和  $75\text{ Oe}$ , 分别测试它们的谐振磁电电压系数与直流电压关系如图 10 所示. 由图可见, 当偏置磁场不变, 它们的谐振磁电电压系数数值与直流电压关系不大, 所以直流电压  $V_{\text{DC}}$  对谐振磁电电压系数的影响很小, 用调节直流电压的方法来控制层合材料的预应变时, 谐振磁电电压系数的变化可以忽略, 不会影响谐振磁电

电压转换. 这与式 (15) 所分析的谐振磁电电压系数几乎不受 (应力、应变所引起的) 弹性模量影响的结论一致.

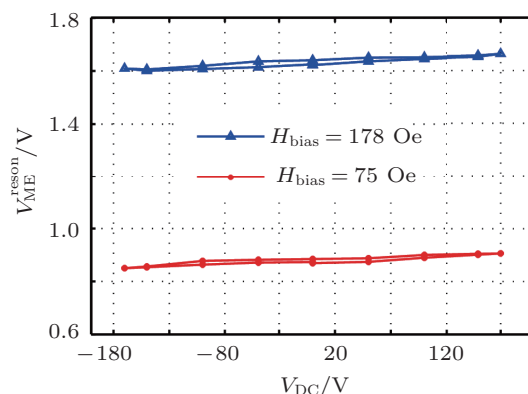


图 10 谐振磁电电压系数  $V_{\text{ME}}^{\text{reson}}$  与直流电压  $V_{\text{DC}}$  关系

## 4 结论

本文提出了一种针对磁电层合结构的谐振频率控制方法. 通过改变压电驱动层的直流电压对磁电层合结构的预应变进行调节, 从而改变层合结构谐振频率. 分析和测试了 PZT5 控制电压与应变关系, 分析了一阶纵振和弯振谐振频率、谐振磁电电压系数与弹性模量关系, 分析了弹性模量与应力/应变关系, 在此基础上分析并测试了一阶纵振谐振频率、谐振磁电电压系数与控制电压的关系, 发现了电压控制层合结构谐振频率的机理. 研究表明: 理论与实验结果相吻合. 该原理可以作为宽带或频率可调磁电传感器分析设计的基础. 在  $-170\text{--}+170\text{ V}$  的控制电压时, 谐振频率可以几乎线性调整, 调整量达到  $1\text{ kHz}$ , 偏置电压对一阶纵振频率的控制率达到:  $2.94\text{ Hz/V}$ . 而控制电压改变对于磁电电压系数几乎没有影响. 因此, 增加控制电压和提高层合结构应变, 有望在更宽的频带范围内实现谐振频率调整. 由于采用电信号对谐振频率进行控制, 方法简单, 调整量较大. 对展宽磁电层合结构的带宽, 扩展磁电复合材料在磁传感领域的应用, 具有重要意义.

## 附录 本文中用到的材料参数

Terfenol-D 的参数:  $d_{33,m} = 11\text{ nm/A}$ ,  $s_{33}^H = 40 \times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{N}$ ,  $k_{31} = 0.7$ ,  $\rho = 9200\text{ kg/m}^3$ ,  $Q_m = 10$

PZT8H 的参数:  $d_{31p8} = -93\text{ pC/N}$ ,  $s_{11p8}^E = 11.1 \times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\varepsilon_{33} = 1000$ ,  $k_{31} = 0.3$ ,  $\rho = 7600\text{ kg/m}^3$ ,



$Q_m = 1000$ PZT5 的参数:  $d_{31p5} = -280 \text{ pC/N}$ ,  $s_{11p5}^E = 16.5 \times$  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\varepsilon_{33} = 3800$ ,  $k_{31} = 0.39$ ,  $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$ ,  $Q_m = 65$ 

- [1] Ryu J, Caraza A V, Uchino K 2001 *J. Appl. Phys.* **40** 4948
- [2] Zhang H, Yang J F, Fang L, Yang W M 2003 *Materials Review* **17** 64 (in Chinese) [张辉, 杨俊, 方亮, 杨卫明 2003 材料导报 **17** 64]
- [3] Dong S X, Li J F, Viehland D 2003 *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **50** 1253
- [4] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2625
- [5] Dong S X, Zhai J Y, Wang N G, Bai F M, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 222504
- [6] Li P, Wen Y M, Bian L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022503
- [7] Li P, Wen Y M, Liu P G, Li X S, Jia C B 2010 *Sensors and Actuators A* **151** 100
- [8] Li P, Wen Y M, Jia C B, Li X S 2011 *IEEE Trans. on Industrial Electronics* **58** 2944
- [9] Li P, Wen Y M, Jia C B, Li X S 2011 *Journal of Magnetism* **16** 1
- [10] Yang W W, Wen Y M, Li P, Bian L X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 546 (in Chinese) [杨伟伟, 文玉梅, 李平, 卞雷祥 2009 物理学报 **58** 546]
- [11] Chen L, Li P, Wen Y M, Wang D 2011 *Journal of Alloys and Compounds* **509** 4811
- [12] Guo S S, Lu S G, Xu Z, Zhao X Z, Or S W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 182906
- [13] Wang Y J, Or S W, Chan H L W, Zhao X Y, Luo H S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 123510
- [14] Srinivasan G, Rasmussen E T, Hayes R 2003 *Phys. Rev.* **B 67** 14418
- [15] Srinivasan G, Rasmussen E T, Bush A A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **A 78** 721
- [16] Dong S X, Cheng J R, Li J F, Viehland D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4812
- [17] Yang F, Wen Y M, Li P, Zheng M, Bian L X 2008 *Sensors and Actuators A* **141** 129
- [18] Yu H, Zeng M, Wang Y, Wan J G, Liu J M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 32508
- [19] Bi K, Wang Y G, Wu W 2011 *Sensors and Actuators A* **166** 48
- [20] Zhai J Y, Xing Z P, Dong S X, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 062510
- [21] Dong S X, Zhai, J Y, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 082907
- [22] Yang C H, Wen Y M, Li P, Bian L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7292 (in Chinese) [阳昌海, 文玉梅, 李平, 卞雷祥 2008 物理学报 **57** 7292]
- [23] Jiles D C 1992 *IEEE Trans. Magn.* **28** 2602
- [24] Shi Z, Ma J, Lin Y, Nan C W 2007 *J. Appl. Phys.* 101 043902
- [25] Jia Y H, Tan J B 1999 *China Mechanical Engineering* **11** 1213 (in Chinese) [贾宇辉, 谭久彬 1999 中国机械工程 **11** 1213]
- [26] Zhang Y F, Wen Y M, Li P, Bian L X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 546 (in Chinese) [张延芳, 文玉梅, 李平, 卞雷祥 2009 物理学报 **58** 546]
- [27] Li D M, Shun B Y, Dong W J, Zhang H L 2003 *China Mechanical Engineering* **14** 1498 (in Chinese) [李东明, 孙宝元, 董维杰, 张化岚 2003 中国机械工程 **14** 1498]
- [28] Ristic V M 1988 *Acoustic Device Principle* (Publishing House of Electronics Industry) p5 (in Chinese) [里斯蒂克 V M 1988 声学器件原理 (电子工业出版社) 第 5 页]
- [29] Wan J G, Li Z Y, Wang Y, Zeng M, Wang G H, Liu J M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 202504
- [30] Bian L X, Wen Y M, Li P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 883 (in Chinese) [卞雷祥, 文玉梅, 李平 2010 物理学报 **59** 883]
- [31] Jia Z Y, Guo D M 2008 *Theory and Applications of Giant Magnetostrictive Microdisplacement Actuator* (Beijing: Science Press) [贾振元, 郭东明 2008 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用 (北京: 科学出版社)]
- [32] Zheng X J, Liu X L 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 053901
- [33] Yao L Q, Wang W 2008 *Chinese Journal of Solid Mechanics* **29** 341 (in Chinese) [姚林泉, 王伟 2008 固体力学学报 **29** 341]

# Effect of adjustable bias voltage on magnetoelectric properties of magnetostrictive/piezoelectric laminated transducer structure \*

Li Ping<sup>†</sup> Huang Xian Wen Yu Mei

(Research Center of Sensors and Instruments, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 31 August 2011; revised manuscript received 28 November 2011)

## Abstract

The magnetoelectric properties of PZT5/Terfenol-D/PZT8 laminated transducer structure are analyzed and detected for adjusting the bias voltage across PZT5. A control method of one-order resonant frequency for a magnetostrictive/piezoelectric laminated magnetoelectric transducer structure is proposed. The resonant frequency and the prestrain of the magnetoelectric laminated structure can be adjusted by changing the bias voltage across PZT5. The relationships between the control voltage, the strain, the Young's modulus, the resonant frequencies and the resonant magnetoelectric coefficient are analyzed. Theoretical analyses show that the resonant frequency of the laminated structure is almost a linear function of the applied dc bias voltage at a small strain. The magnetoelectric coefficient is hardly related to the control voltage. The experimental results verify the theoretical analyses. For a control voltage of  $-170$  V to  $+170$  V, the resonant frequency can be linearly adjusted. The adjusted maximum of the resonant frequency is 1 kHz. The ratio of the adjusted value to the bias control voltage is 2.94 Hz/V. For a bias magnetic field from 0 Oe to 225 Oe, the resonant frequency is almost unrelated to the bias magnetic field. The magnetoelectric voltage coefficient changes with the bias magnetic field. A maximum magnetoelectric voltage coefficient of 1.65 V/Oe is obtained at a bias magnetic field of  $> 178$  Oe.

**Keywords:** voltage-controlled resonance frequency, magnetostrictive/piezoelectric laminated structure, prestrain, magnetoelectric effect

**PACS:** 75.80.+q, 75.85.+t, 77.65.-j

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50830202, 61071042).

<sup>†</sup> E-mail: liping@cqu.edu.cn