

# 采用阶梯形弹性基底的磁致伸缩/压电复合结构 磁电响应研究<sup>\*</sup>

张延芳 文玉梅<sup>†</sup> 李 平 卞雷祥

(重庆大学光电工程学院 教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030)

(2008 年 1 月 24 日收到, 2008 年 7 月 3 日收到修改稿)

利用阶梯形变幅杆的应变放大作用, 构造了磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构. 采用等效电路法分析了沿长度方向振动复合结构的一阶磁电响应. 计算了 Terfenol-D/阶梯形铍青铜基底/PZT-5H 复合结构的磁电响应, 并与实际结构的磁电响应进行了比较. 由于理论分析中忽略了胶层产生的损耗, 理论值和实验结果的变化规律相似, 但是谐振频率点和磁电电压转换系数有一定的差异. 同时比较了阶梯形基底和等截面杆基底复合结构, 分析表明前者具有更高的磁电电压转换系数. 研究了阶梯形弹性基底长度比及层厚比对复合结构纵振动一阶模态的磁电电压转化系数的影响: 当 1) 阶梯形变幅杆宽端长度与总长的比值为 0.45 时; 2) 阶梯形弹性基底厚度是 Terfenol-D 厚度的 1/4 时, 复合结构的磁电电压转换系数最大.

关键词: 磁电效应, 磁致伸缩/压电复合结构, 磁电响应

PACC: 7580

## 1. 引 言

磁电效应是指材料在外加电场作用下产生诱导磁化或材料在外加磁场作用下产生电极化的现象<sup>[1,2]</sup>. 近来, 磁致伸缩、压电两相复合材料一直是研究的热点<sup>[3]</sup>, 目前磁电复合材料主要有颗粒混合<sup>[4,5]</sup>和层合结构<sup>[6-9]</sup>. 实验研究表明<sup>[10]</sup>, 层状复合材料的磁电效应远高于混相复合材料, 但是直接层合复合材料的磁电电压转换系数依赖材料的特性, 很难进一步提高<sup>[11]</sup>. 作者所在的课题组从结构而非材料本身特性入手, 提出了一种新的复合结构<sup>[11]</sup>, 即在磁致伸缩层和压电层下增加一个弹性变幅杆基底, 利用阶梯形弹性基底的应变放大作用提高磁电电压转换系数.

变幅杆是一种变截面结构, 具有应变放大作用, 其中, 阶梯形变幅杆与其他类型的变幅杆(如悬链形、指数形等)相比, 具有较大的应变放大系数<sup>[12]</sup>, 应变最大处在其截面突变处, 且制备简单. 由于压电材料输出电压与其所受应变成正比, 在相同的激励和接收条件下, 采用阶梯形基底的复合结构可以获

得更大的磁电电压转换系数.

纵振磁电复合结构的理论分析方法一般有弹性力学法<sup>[7,13]</sup>、格林函数法<sup>[14]</sup>及等效电路法<sup>[6,8]</sup>等. 格林函数法计算复杂, 而等效电路法在弹性力学方法的基础上, 引入材料的运动学方程, 不仅弥补了弹性力学方法在模型上的不足之处, 而且还可以进一步对材料磁电响应进行分析<sup>[6]</sup>. 利用等效电路法, 本文分析了磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构纵振模式下的磁电响应特性, 对 Terfenol-D/铍青铜/PZT-5H 材料的复合结构磁电响应进行了数值分析, 并讨论了阶梯形弹性基底长度比  $L_1/L$  以及层厚比  $m$  对复合结构磁电响应的影响.

## 2. 理论分析

### 2.1. 复合结构模型

采用阶梯形变幅杆作为基底的复合结构如图 1 所示. 磁致伸缩层沿长度方向(1 方向)磁化, 压电材料沿厚度方向(3 方向)极化. 外加磁场(交流磁场和

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10776039)和国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号:2007AA12Z132)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

偏置磁场)方向平行于 1 方向. 磁致伸缩层长度方向的中位线对齐弹性基底的位移零点即阶梯形弹性基底的固定处,其中阶梯形弹性基底尺寸:宽端长  $L_1$ ,宽  $t_{b1}$ ,窄端长  $L_2$ ,宽  $t_{b2}$ ,宽窄端厚度为  $h_b$ ,宽窄端截面比为  $t_{b1}/t_{b2}$ ;磁致伸缩层尺寸:长度为  $a$ ,宽度为  $t_m$ ,厚度为  $h_m$ ;压电层尺寸:长度为  $b$ ,宽度为  $t_p$ ,厚度为  $h_p$ .

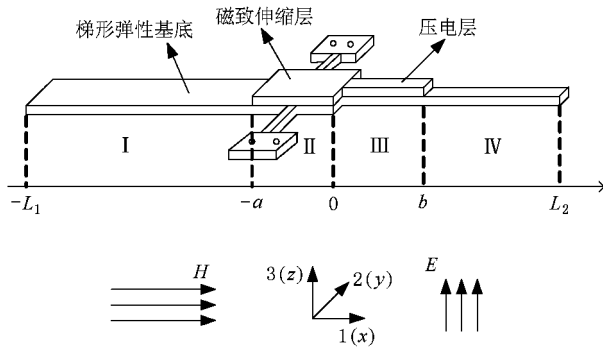


图 1 磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构示意图

## 2.2. 等效电路模型推导

为了分析方便,将图 1 所示复合结构分为四部分:第 I 部分 ( $-L_1$ )—( $-a$ );第 II 部分 ( $-a$ )— $0$ ;第 III 部分  $0$ — $b$ ;第 IV 部分:  $b$ — $L_2$ ,通过求出各部分的等效电路,利用分界面处位移连续、力平衡条件,将四部分的等效电路有机耦合,得到复合结构的等效电路模型.

### 2.2.1. 第 I 部分和第 IV 部分等效电路模型推导

第 I 部分与第 IV 部分都是无负载的等截面杆,对这两部分的分析方法相同. 根据运动学方程、牛顿定律及均匀杆与电波传输线的类比<sup>[12]</sup>,第 I(IV)部分等效电路如图 2 所示. 其中

$$Z_1 = j\rho_b v_b h_b t_{b1} \tan\left(\frac{k(L_1 - a)}{2}\right),$$

$$Z_2 = -j \frac{\rho_b v_b h_b t_{b1}}{\sin k(L_1 - a)},$$

$$Z_3 = -j\rho_b v_b h_b t_{b2} \cos\left(\frac{k(L_2 - b)}{2}\right),$$

$$Z_4 = j \frac{\rho_b v_b h_b t_{b2}}{\sin k(L_2 - b)},$$

$v_b = \sqrt{\frac{Y}{\rho_b}}$  是纵波在阶梯形基底中的传播速度,  $Y$  是阶梯形杆材料的杨氏模量,  $\rho_b$  是阶梯形杆材料的密度.  $u_1, u_2$  分别为  $x = -L_1, x = -a$  处的质点沿  $x$

方向的振动速度,  $u_3, u_4$  分别为  $x = b, x = L_2$  处的质点沿  $x$  方向的振动速度,  $F_{11}(F_{41}), F_{12}(F_{42})$  分别是第 I(IV)部分两端沿  $x$  方向的外加作用力.

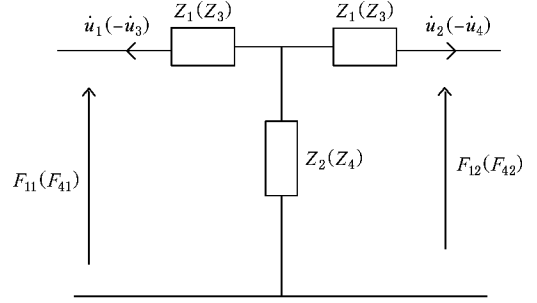


图 2 第 I(IV)部分等效电路图

### 2.2.2. 第 II 部分等效电路模型推导

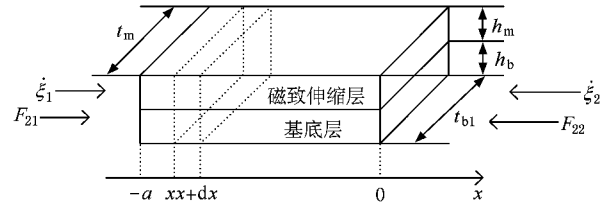


图 3 第 II 部分示意图

纵振动的磁致伸缩层本构方程为

$$S_{1m} = S_{11}^H T_{1m} + d_{11m} H_1, \quad (1a)$$

$$B_1 = d_{11m} T_{1m} + \mu_{11}^T H_1, \quad (1b)$$

其中  $H_1, B_1$  分别是外加的磁场强度和磁感应强度,  $s_{1m}, T_{1m}$  分别是磁致伸缩层的应变和应力,  $s_{11}^H, d_{11m}, \mu_{11}^T$  分别是磁致伸缩层在恒定磁场下的弹性柔顺系数、压磁系数和恒应力下的材料磁导率. 记  $A_{b1}$  是基底宽端横截面积,  $A_m$  是磁致伸缩层横截面积,  $A_1$  是第 II 部分的总横截面积, 则有  $A_1 = A_{b1} + A_m$ .

分析沿  $x$  方向的小体元 ( $x, x + dx$  所限定的区间) 的受力情况, 根据牛顿定律可以写出动力学方程

$$\frac{\partial}{\partial x} (A_m \cdot T_{1m} + A_{b1} \cdot T_{1b}) dx = (A_m \cdot \rho_m + A_{b1} \cdot \rho_b) \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} dx, \quad (2)$$

其中  $T_{1b} = Y s_{1b}$  是基底沿  $x$  方向的应力分布函数,  $s_{1b}$  是基底沿  $x$  方向的应变分布函数;  $\rho_m$  是磁致伸缩

层材料密度  $\rho_b$  是阶梯形杆材料的密度;  $\xi(x)$  是层合结构沿  $x$  方向位移分布函数.

在理想粘贴条件下, 磁致伸缩层与基底层沿  $x$  方向的位移、应变相等, 有

$$s_{1m} = s_{1b} = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (3)$$

$A_m, A_{bl}$  是与  $x$  无关的量, 从 (1a) 式中解出  $T_{1m}$ , 代入 (2) 式, 并结合 (3) 式, 得到波动方程

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v_{mb} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (4)$$

式中  $v_{mb} = \sqrt{\frac{1-m}{S_{11}^H} + Ym}$ , 为层合结构中纵波速;  $m$

$= \frac{A_{bl}}{A_1}$ , 为基底层横截面积占基底层与磁致伸缩层的总横截面积的比;  $\rho_{mb} = \rho_m(1-m) + \rho_b m$ , 为层合结构材料的平均密度. 对于简谐激励 (4) 式可以写为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + k_{mb}^2 \xi = 0, \quad (5)$$

式中  $k_{mb} = \omega/v_{mb}$ , 为圆波数,  $\omega$  是角频率. (5) 式的通解为

$$\xi(x) = A \cos k_{mb} x + B \sin k_{mb} x, \quad (6)$$

其中  $A, B$  是待定系数.

根据边界条件

$$\dot{\xi}_1 = j\omega u(-a), \dot{\xi}_2 = j\omega u(0), \quad (7)$$

$\dot{\xi}_1, \dot{\xi}_2$  分别是第二部分两端的端面质点沿  $x$  方向的振动速度, 代入 (6) 式得

$$\xi(x) = \frac{\dot{\xi}_2}{j\omega} \cos k_{mb} x + \frac{\dot{\xi}_2 \cos k_{mb} a - \dot{\xi}_1 \sin k_{mb} a}{j\omega \sin k_{mb} a} \sin k_{mb} x. \quad (8)$$

第二部分两端面沿  $x$  方向的外力  $F_{21}, F_{22}$  与端面应力的关系为

$$F_{21} = -T_{1m} A_m |_{x=-a} - T_{1b} A_{bl} |_{x=-a}, \quad (9)$$

$$F_{22} = -T_{1m} A_m |_{x=0} - T_{1b} A_{bl} |_{x=0}.$$

将从 (1a) 式中解出的  $T_{1m}$  及  $T_{1b} = Y s_{1b}$  代入 (9) 式中, 结合 (3) 式、(8) 式, 得机械振动方程

$$F_{21} = j\rho_{mb} v_{mb} A_1 \left[ \dot{\xi}_1 \tan \frac{k_{mb} a}{2} - \frac{1}{\sin k_{mb} a} (\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) \right] + \varphi_m H_1$$

$$= Z_{mb1} \dot{\xi}_1 + Z_{mb2} (\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) + \varphi_m H_1,$$

$$F_{22} = j\rho_{mb} v_{mb} A_1 \left[ -\dot{\xi}_2 \tan \frac{k_{mb} a}{2} \right]$$

$$- \frac{1}{\sin k_{mb} a} (\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) \Big] + \varphi_m H_1$$

$$= -Z_{mb1} \dot{\xi}_2 + Z_{mb2} (\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) + \varphi_m H_1, \quad (10)$$

其中  $Z_{mb1} = j\rho_{mb} v_{mb} A_1 \tan \left( \frac{k_{mb} a}{2} \right), Z_{mb2} = \frac{\rho_{mb} v_{mb} A_1}{j \sin k_{mb} a}$ ,  $\varphi_m = \frac{(1-m)d_{11m} A_1}{S_{11}^H}$ .

由 (10) 式根据基尔霍夫定律, 采用磁机电类比可画出如图 4 所示的等效电路图.

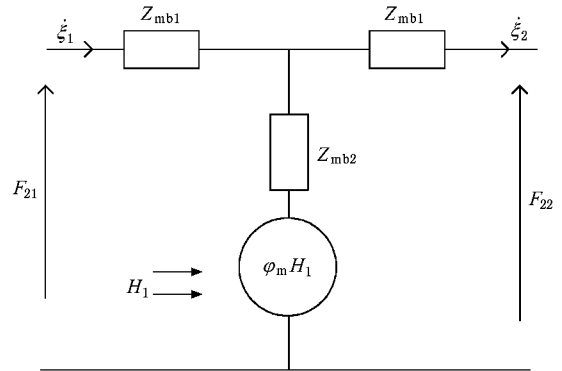


图 4 第 II 部分等效电路图

### 2.2.3. 第三部分等效电路

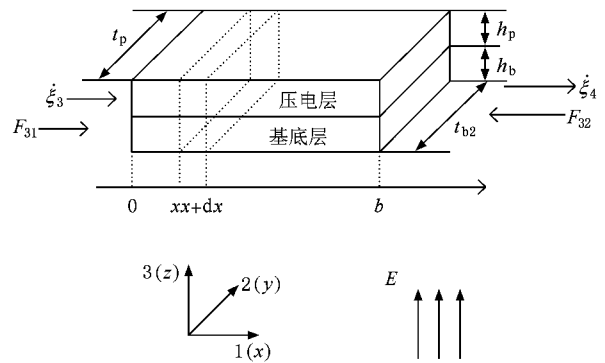


图 5 第三部分示意图

纵振动的压电层本构方程为

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

$$D_3 = d_{31p} T_{1p} + \epsilon_{33}^T E_3, \quad (11b)$$

其中  $E_3, D_3$  分别是沿厚度方向的电场强度和电位移,  $s_{1p}, T_{1p}$  分别是压电层的应变和应力,  $s_{11}^E, d_{31p}, \epsilon_{33}^T$  分别是压电层在恒定电场下的弹性柔顺系数、压电系数和恒应力下的材料介电常数. 记  $A_{b2}$  是基底窄端横截面积,  $A_p$  是压电层横截面积,  $A_2$  是第三部分的总横截面积, 则有  $A_2 = A_{b2} + A_p$ .

厚度方向极化,长度方向振动压电片的电路状态方程为<sup>[15]</sup>

$$I = j\omega c_0 V - \varphi_p(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_4), \quad (12)$$

式中  $c_0 = \frac{\epsilon_{33}^T(1 - k_{31}^2)bt_p}{h_p}$ ;  $k_{31} = \sqrt{\frac{d_{31p}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E}}$  是机电耦合

系数;  $\varphi_p = \frac{d_{31p}t_p}{s_{11}^E}$  是机电转换系数;  $V$  是压电片

输出电压;  $\dot{\xi}_3, \dot{\xi}_4$  分别是第三部分两端的端面质点沿  $x$  方向的振动速度。

第三部分机械振动方程求解过程与第二部分类似,在此不再详细叙述,只给出结果。

$$\begin{aligned} F_{31} &= j\rho_{mb} v_{mb} A_1 \left[ \dot{\xi}_3 \tan \frac{k_{pb} b}{2} - \frac{1}{\sin k_{pb} b} (\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_4) \right] + \varphi_p V \\ &= Z_{pb1} \dot{\xi}_3 + Z_{pb2} (\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_4) + \varphi_p V, \\ F_{32} &= j\rho_{pb} v_{pb} A_2 \left[ -\dot{\xi}_4 \tan \frac{k_{pb} b}{2} - \frac{1}{\sin k_{pb} b} (\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_4) \right] + \varphi_p V \\ &= -Z_{pb1} \dot{\xi}_4 + Z_{pb2} (\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_4) + \varphi_p V. \quad (13) \end{aligned}$$

推导过程中用到  $V = E_3 h_p$ 。式中  $F_{31}, F_{32}$  是第三部分两端面沿  $x$  方向的外力,

$$Z_{pb1} = j\rho_{pb} v_{pb} A_2 \tan\left(\frac{k_{pb} b}{2}\right), Z_{pb2} = \frac{\rho_{pb} v_{pb} A_2}{j \sin k_{pb} b};$$

$k_{pb} = \omega/v_{pb}$  是圆波数;  $v_{pb} = \sqrt{\frac{1-n}{s_{11}^E} + Y_n}$  是层合

结构中纵波速;  $n = A_{12}/A_2$  是基底层横截面积占基底层与压电层的总横截面积的百分比;  $\rho_{pb} = \rho_p(1-n) + \rho_b n$  是层合结构材料的平均密度;  $\rho_p$  是压电层的材料密度。

由(12)式(13)式根据基尔霍夫定律,采用机电类比可画出第三部分等效电路图如图6所示。

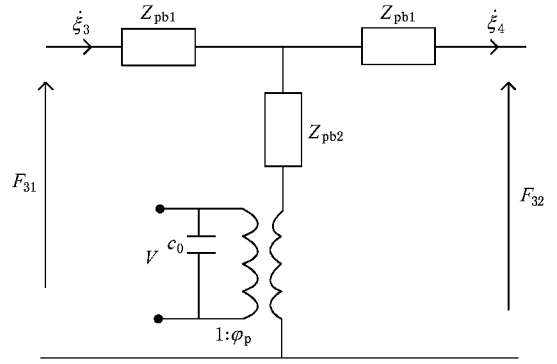


图6 第三部分等效电路图

### 2.2.4. 复合结构的等效电路模型

当截面突变比不太大(小于5)时,可以近似认为阶梯形弹性基底截面跃变处力是连续的<sup>[12]</sup>,复合结构四部分之间分界面处满足位移连续、力平衡条件,有

$$F_{12} = F_{21}, F_{22} = F_{31}, F_{32} = F_{41}. \quad (14)$$

根据(14)式,将2.2.1至2.2.3推导的各部分等效电路有机耦合起来得到复合结构的总等效电路图,如图7所示。

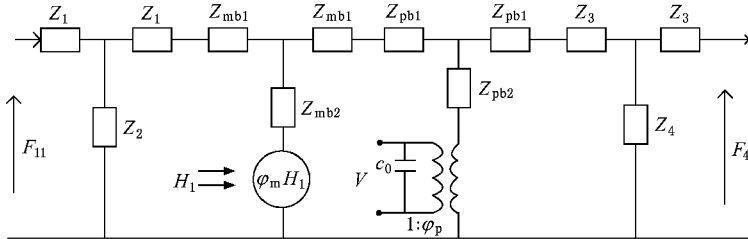


图7 磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构等效电路模型

### 2.3. 磁电响应及损耗分析

复合结构自由振动时,阶梯形弹性基底两端应力为零,即  $F_{11} = 0, F_{42} = 0$  相当于等效电路机械电压端短路,此时复合结构等效电路如图8所示。

根据图8可得到磁电电压转换系数表达式

$$\begin{aligned} \alpha_V &= \left| \frac{dV}{dH} \right| = \left| \frac{\varphi_m}{Z_{mb2} + Z_{IV}} \cdot \frac{Z_I}{Z_I + Z_{II}} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{Z_{II}}{Z_{pb2} + \varphi_p^2/j\omega c_0 + Z_{II}} \cdot \frac{\varphi_p}{j\omega c_0} \right|, \quad (15) \end{aligned}$$

其中  $Z_I = Z_1 Z_2 (Z_1 + Z_2) + Z_1 + Z_{mb1}$ ,  $Z_{II} = Z_3 Z_4 (Z_3 + Z_4) + Z_3 + Z_{pb1}$ ,  $Z_{III} = Z_{mb1} + Z_{pb1} +$

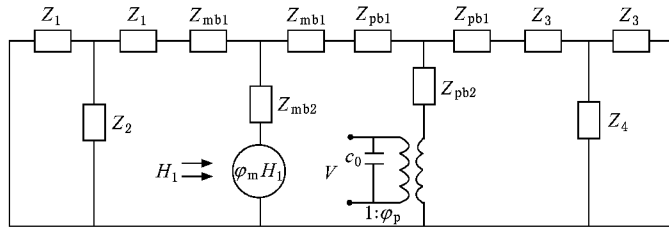


图 8 复合结构自由振动时的等效电路模型

$$Z_{II}(Z_{pb2} + \varphi_p^2/j\omega c_0)(Z_{II} + Z_{pb2} + \varphi_p^2/j\omega c_0), Z_{IV} = Z_I Z_{III}(Z_I + Z_{III}).$$

(1)–(15)式推导过程中,将压电材料、磁致伸缩材料、基底材料看成是理想弹性体,没有考虑其损耗。这意味着,利用上述公式分析谐振磁电响应时,会得到一个无穷大的磁电电压转换系数,这显然不符合实际。因此,引入复数电弹常数,将压电方程中的各常数替换为复数<sup>[15]</sup>。磁致伸缩材料与压电材料有相似性,所以考虑磁致伸缩层损耗的方法与考虑压电层损耗的方法类似。为了减少不必要的重复,压电层和磁致伸缩层的弹性柔顺系数都用  $s$  表示,压电常数与压磁常数都用  $d$  表示,则

$$s = s' - is'', \epsilon = \epsilon' - i\epsilon'', \\ d = d' - id'', \mu = \mu' - i\mu'', \quad (16)$$

磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构损耗有机械损耗、电损耗、磁损耗,然而在复合结构损耗中起主要作用的是机械损耗<sup>[9]</sup>。机械损耗产生的原因主要是材料内摩擦及各材料粘结面间的损耗,这里主要考虑材料内摩擦引起的损耗,采用机械品质因数  $Q_m$  来反映材料损耗的大小,  $Q_m = s'/s''$ 。由于所选基底是高弹性材料,其机械损耗可以忽略,因此,复合结构的机械损耗主要来自磁致伸缩层和压电层。将(1)–(15)式中所有的弹性柔顺系数改为复数形式,即  $s = s' - is''$ 。由于(15)式较复杂,很难化简为显式表达式,可以借助于计算机得到数值解。

### 3. 分析与讨论

#### 3.1. 分析

以 Terfenol-D/铍青铜/PZT-5H 材料的复合结构为例,根据(15)式分析其磁电响应。采用的 Terfenol-D 参数为  $d_{11m} = 4 \times 10^{-9} \text{ m/N}$ ,  $s_{11}^H = 4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ , 12

$\text{mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,  $Q_{m1} = 10$ ; PZT-5H 参数为  $d_{31p} = -2.70 \times 10^{-10} \text{ m/N}$ ,  $s_{11}^E = 16.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\epsilon_{33} = 3800$ ,  $12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ,  $Q_{mp} = 65$ <sup>[16]</sup>, 铍青铜阶梯形基底,杨氏模量  $Y = 13.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,总长为 71 mm,宽端尺寸  $38.5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,窄端尺寸  $32.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,宽窄端截面比为 3。

利用(15)式,计算得到 Terfenol-D/铍青铜/PZT-5H 材料复合结构的纵振磁电电压转换系数如图 9 中实线所示,虚线是相应的实验值。理论一阶谐振频率为 31.54 kHz,峰值为 1775.3 mV/Oe (1 Oe = 79.5775 A/m),实验得到的一阶谐振频率为 30.026 kHz,峰值是 1109.2 mV/Oe。可见,理论磁电电压转换系数约为实验磁电电压转换系数的 1.5 倍,频率点误差在 5% 以内,究其原因,是在等效电路模型中忽略了粘结层的损耗、泊松效应、引线焊点以及实验环境等。与文献[9]中的 M/P 层合结构(其中磁致伸缩层尺寸:  $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,压电层尺寸:  $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ )相比,该复合结构的一阶纵振磁电电压转换系数约是文献[9]中的磁致伸缩/压电材料直接层合的一阶纵振磁电电压转换系数的 2 倍,文献中的一阶纵振磁电电压转换系数仅为 600 mV/Oe。

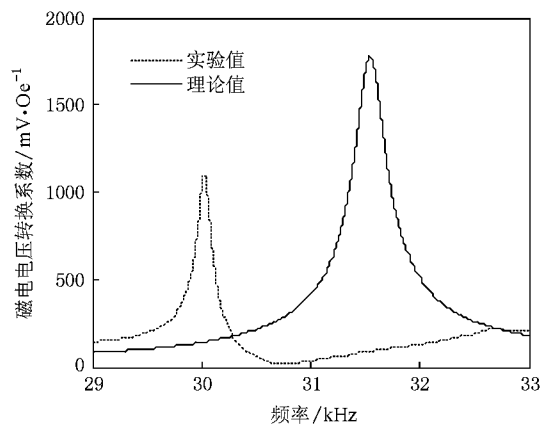


图 9 一阶纵振磁电电压转换系数

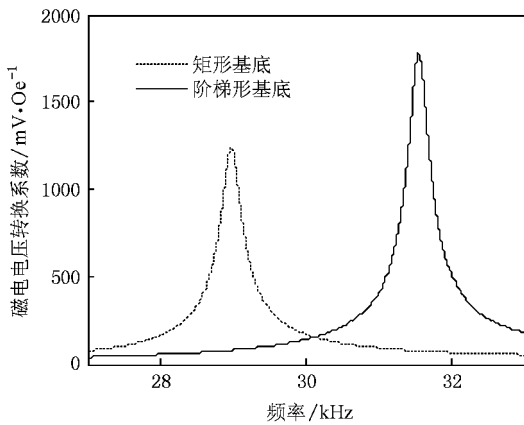


图 10 阶梯形杆基底结构与等截面杆基底结构比较

将阶梯形杆基底复合结构的理论磁电响应与等截面杆基底(基底尺寸:71 mm × 12 mm × 0.5 mm)复合结构的理论磁电响应进行比较,如图 10 所示,其中磁致层与压电层尺寸保持不变。阶梯形杆基底复合结构的一阶峰值为 1775.3 mV/Oe,等截面杆基底结构的一阶峰值仅为 1220 mV/Oe。阶梯形杆基底复合结构的一阶纵振磁电电压转换系数约是等截面杆基底复合结构的一阶纵振磁电电压转换系数的 1.5 倍,可见,阶梯形杆的应变放大作用能使整个复合结构的磁电电压转换系数增加。

### 3.2. 复合结构优化

由(15)式知磁电电压转换系数与复合结构的几何尺寸有关,在磁致伸缩、压电材料几何尺寸一定的情况下,可以通过改变阶梯形弹性基底的几何尺寸优化复合结构的磁电响应。

#### 3.2.1. 阶梯形弹性基底长度优化

记阶梯形弹性基底总长为  $L$ ,其宽端长度为  $L_1$ ,总长不变及其它条件不变时,通过(15)式计算  $L_1$  取不同值时的一阶磁电电压转换系数及频率点,得到磁电电压转换系数及频率与  $L_1/L$  的关系,如图 11 所示。图 11(a)是一阶谐振磁电电压转换系数与阶梯形弹性基底长度的关系图,图 11(b)是一阶谐振频率与阶梯形弹性基底长度的关系图。

由图 11 可知,阶梯形变幅杆长度  $L$  主要影响复合结构的谐振频率,不同长度的基底复合结构的谐振频率不同,在  $L_1/L$  恒定时, $L$  越大,谐振频率越小,而最大磁电电压转换系数却几乎相等。阶梯形变幅杆宽端长度  $L_1$  与总长  $L$  的比值存在一最优值,使得复合结构的磁电电压转换系数最大,该最优

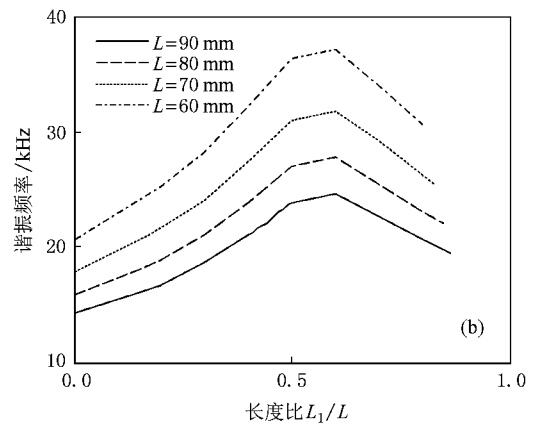
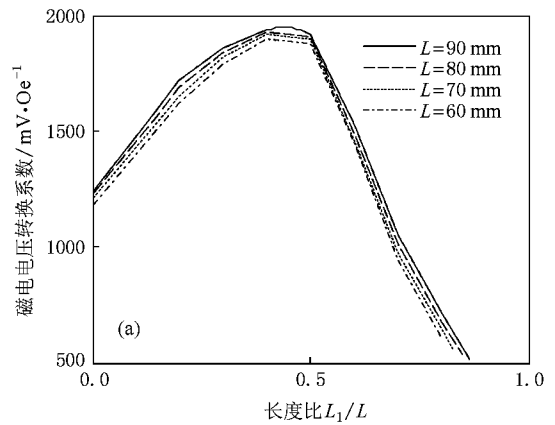


图 11 一阶磁电响应与阶梯形弹性基底长度的关系图 (a)  $\alpha_1$ - $L_1/L$  (b)  $f-L_1/L$

值是 0.45。

#### 3.2.2. 阶梯形弹性基底厚度优化

磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构的基底层宽端宽度等于磁致伸缩层宽度,基底层窄端宽度等于压电层宽度,即  $t_{b1} = t_m$ ,  $t_{b2} = t_p$ ,所以基底层宽端横截面积占基底层宽端与磁致伸缩层的总横截面积的比  $m = \frac{A_{b1}}{A_1} = \frac{h_b}{h_m + h_b}$ ,基底层窄端横截面积占基底层与压电层的总横截面积的比  $n = \frac{A_{b2}}{A_2} =$

$\frac{h_b}{h_p + h_b}$ ,即截面比等于相应的厚度比。 $n$  与  $m$  之间存在关系  $\frac{n}{m} = \frac{h_m + h_b}{h_p + h_b}$ 。

在基底层、磁致伸缩层与压电层的总厚度恒定及其他条件不变时,改变基底层厚度,即改变  $m$  的值,通过(15)式计算其对应的一阶磁电电压转换系数及频率点,得到磁电电压转换系数及频率与参数  $m$  的关系,如图 12 所示。图 12(a)是一阶谐振磁电

电压转换系数  $\alpha_{V-m}$  的关系图,图 1(a)是一阶谐振频率  $f-m$  的关系图.

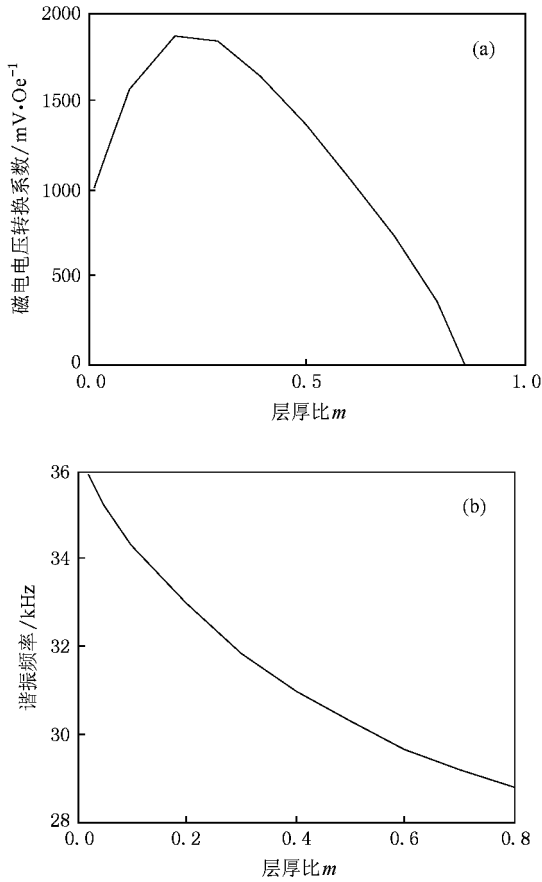


图 12 一阶磁电响应与阶梯形弹性基底横截面积的关系图  
(a)  $\alpha_{V-m}$  (b)  $f-m$

由图 1(a)可知,当  $m=0$  时,  $n=0$ ,复合结构中没有阶梯形弹性基底,此时仍有较高的磁电电压转换系数,这是 Terfenol-D 与 PZT-5H 直接耦合得到的磁电电压转换系数,尽管理论值很高,但是两种材料界面连接处能量损耗很大,实际上得到的电压远低于理论值<sup>[17]</sup>.随着阶梯形弹性基底厚度的增加,磁电电压转换系数先增大后降低,至  $m=0.8667$  时,下降为零,这是因为此时  $n = m(h_b + h_m)/(h_b + h_p) = 1$ ,复合结构中已经没有压电层了.在  $m=0.2$  时有一个极值点,即当阶梯形弹性基底厚度是 Terfenol-D 厚度的 1/4 时,磁电电压转换系数最大.而一阶谐振频率随阶梯形弹性基底厚度的增加逐渐下降,这是因为,随着  $h_b$  的增大,阶梯形弹性基底在

复合结构中所占的比例就越大,质量和刚度也随之增加,质量的增加导致固有频率的下降,而刚度的增加导致固有频率增大,一阶模态质量增加比值大于模态刚度的增加比值,复合结构的谐振频率减小.

综上所述,当阶梯形弹性基底宽端长度  $L_1$  与总长  $L$  的比值为 0.45,阶梯形弹性基底厚度是 Terfenol-D 厚度的 1/4 时,复合结构磁电电压转换系数最大.图 13 给出了复合结构参数优化后的磁电电压转换系数,此时阶梯形弹性基底的尺寸为:总长 71 mm,宽端  $31.95 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ ,窄端  $39.05 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ ,Terfenol-D 尺寸为  $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ ,PZT-5H 尺寸为  $12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ .通过比较图 9,图 13 知,优化后的磁电电压转换系数为 2113.3  $\text{mV}/\text{Oe}$ ,比未优化时的磁电电压转换系数高出近 400  $\text{mV}/\text{Oe}$ .

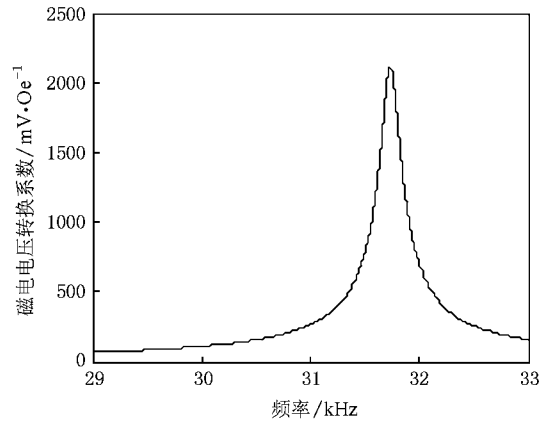


图 13 优化后的复合结构一阶磁电电压转换系数

## 4. 结 论

运用等效电路法对磁致伸缩/阶梯形弹性基底/压电复合结构的磁电响应特性进行了理论分析,以 Terfenol-D/铍青铜/PZT-5H 材料的复合结构为例,对其磁电响应进行了数值计算并与实验作了比较,理论与实验定性相符;分析了阶梯形弹性基底长度和厚度与磁电响应的关系,得到如下结论:

1. 阶梯形弹性基底宽端长度  $L_1$  与总长  $L$  的比值为 0.45 时,复合结构的磁电电压转换系数最大;
2. 阶梯形弹性基底厚度是 Terfenol-D 厚度的 1/4 时,复合结构的磁电电压转换系数最大.



- [ 1 ] Astrov D N 1960 *Sov. Phys. JETP* **11** 708 ( in Chinese ) [ 张 辉、杨峻峰、方 亮、杨卫明 2003 材料导报 **17** 64 ]
- [ 2 ] Rado G T, Folen V J 1961 *Phys. Rev. Lett.* **7** 310
- [ 3 ] Dong S X, Li J F, Viehland D 2006 *Journal of Materials Science* **41** 97
- [ 4 ] Nan C W, Li M, Feng X Q, Yu S W 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2527
- [ 5 ] Liu G, Nan C W, Sun J 2006 *Acta Materialia* **54** 917
- [ 6 ] Dong S X, Li J F, Viehland Dwight 2003 *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **50** 1253
- [ 7 ] Wan H, Shen R F, Wu X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1426 ( in Chinese ) [ 万 红、沈仁发、吴学忠 2005 物理学报 **54** 1426 ]
- [ 8 ] Dong S X, Zhai J Y, Wang N G, Bai F M, Li J F, Viehland D, Lograsso T A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 222504
- [ 9 ] Yang F, Wen Y M, Li P, Zheng M, Bian L X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3539 ( in Chinese ) [ 杨 帆、文玉梅、李 平、郑 敏、卞雷祥 2007 物理学报 **56** 3539 ]
- [ 10 ] Zhang H, Yang J F, Fang L, Yang W M 2003 *Master. Rev.* **17** 64
- [ 11 ] Li P, Wen Y M, Bian L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022503
- [ 12 ] Lin Z M 1987 *Principle and Design of the Ultrasonic Horn* ( Beijing : Science Press ) p31, 53, 95 ( in Chinese ) [ 林仲茂 1987 超声变幅杆的原理和设计(北京 科学出版社)第 31, 53, 95 页 ]
- [ 13 ] Filippov D A 2005 *Phys. of the Solid State* **47** 1118
- [ 14 ] Nan C W, Li M, Huang J H 2001 *Phys. Rev. B* **63** 144415
- [ 15 ] Zhang F X, Wang L K 2001 *Modern Piezoelectrics* ( Beijing : Science Press ) p132, 166 ( in Chinese ) [ 张福学、王丽坤 2001 现代压电学(上册)(北京 科学出版社)第 132, 166 页 ]
- [ 16 ] Luan G D, Zhang J D, Wang R Q 2004 *Piezoelectric Transducer and Transducer Array* ( Beijing : Peking Univ. Press ) p93 ( in Chinese ) [ 栾桂冬、张金铎、王仁乾 2004 压电换能器和换能器阵(北京 北京大学出版社)第 93 页 ]
- [ 17 ] Filippov D A, Bichurin M I, Nan C W, Liu J M 2005 *Journal of Applied Physics* **97** 113910

## Magnetolectric response of magnetostrictive/piezoelectric composite on a trapezoidal elastic substrate \*

Zhang Yan-Fang Wen Yu-Mei<sup>†</sup> Li Ping Bian Lei-Xiang

( College of Opto-Electronic Engineering , The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems , Ministry of Education , Chongqing University , Chongqing 400030 , China )

( Received 24 January 2008 ; revised manuscript received 3 July 2008 )

### Abstract

A magnetostrictive /elastic substrate /piezoelectric composite has been developed where the elastic substrate takes the form of trapezium to amplify the strain. By using the equivalent circuit , the magnetolectric response of the composite in the longitudinal vibration has been analyzed. The magnetolectric response of a Terfenol-D/trapezoidal Be-bronze/PZT-5H composite is calculated and is compared with the experiment. It is indicated that the theoretical response shows a similar variation tendency as the experimental in spite of the difference in resonant frequencies and the values of the magnetolectric voltage coefficients , which is the result of neglecting the glue behavior. At the same time , the composite on a trapezoidal substrate and the composite on a rectangular substrate are compared , which indicates that the former has higher magnetolectric voltage coefficient. The length ratio of the trapezoidal elastic substrate and the thickness ratio of the composite are further analyzed. It is found that the composite will have maximum magnetolectric voltage coefficient when : ( 1 ) the ratio of the length of wide section to the total length of a trapezoidal elastic substrate is 0.45 ; ( 2 ) the thickness of a trapezoidal elastic substrate is one fourth that of Terfenol-D layer.

**Keywords** : magnetolectric effect , magnetostrictive/piezoelectric composite , magnetolectric response

**PACC** : 7580

\* Project supported by the National Nature Science Foundation of China ( Grant No. 10776039 ) and the National High Technology Research and Development Program of China ( 863 Program ) ( Grant No. 2007AA12Z132 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : ymwen@cqu.edu.cn