

# 偏置磁场对磁致伸缩/弹性/压电层合材料磁电效应的影响\*

阳昌海 文玉梅† 李 平 卞雷祥

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

(2007 年 10 月 30 日收到, 2008 年 2 月 25 日收到修改稿)

根据磁致伸缩材料的非线性本构关系得到其动态杨氏弹性模量和动态压磁系数, 结合等效电路法得到磁致伸缩/弹性/压电层合材料的磁电效应与磁致伸缩材料的动态杨氏弹性模量和动态压磁系数的关系, 讨论了偏置磁场对这种层合材料的谐振频率和谐振磁电电压转换系数的影响. 理论推导和实验结果均表明, 存在最佳偏置磁场使磁致伸缩/弹性/压电层合材料的谐振磁电电压转换系数最大.

关键词: 磁致伸缩/弹性/压电层合材料, 磁电效应, 偏置磁场, 非线性本构关系

PACC: 7580, 7760, 4340

## 1. 引 言

磁致伸缩材料和压电材料复合而成的磁电材料具有良好的磁电效应<sup>[1]</sup>. 磁致伸缩材料的输出应变、输出位移与外加磁场(包括偏置磁场和激励磁场)存在非线性关系<sup>[2]</sup>, 因此偏置磁场会影响复合磁电材料的磁电效应. 研究偏置磁场对复合材料磁电效应的影响, 确定复合磁电材料的最佳偏置磁场, 对复合磁电材料的应用有重要意义. 万建国、Dong 等人实验研究了偏置磁场对复合材料磁电效应的影响<sup>[3-6]</sup>, 而没有进行理论分析. 万永平等根据 Terfenol-D 的双曲正切本构关系研究了偏置磁场对复合材料磁电效应的影响, 仅仅分析了 Terfenol-D/PZT 复合材料两端固定这一种边界条件下的响应<sup>[7]</sup>. 利用双曲正切本构关系进行分析需要较多的参数, 复合磁电材料作为换能器应用时, 在自由边界条件下具有高的谐振磁电电压转换系数, 有必要分析自由边界条件下偏置磁场对复合磁电材料谐振响应的影响.

Li 等人提出了磁致伸缩/弹性/压电层状复合磁电材料<sup>[8]</sup>, 该材料由磁致伸缩片、压电片和高弹性片(如铍青铜、石英晶体等)通过环氧树脂粘贴而成. 实

验研究表明, 该层合材料具有多谐振峰和高谐振磁电电压转换系数的特性, 并且谐振频率和谐振磁电电压转换系数随偏置磁场的改变而变化. 为了得到更大的谐振磁电电压转换系数以及其对应的谐振频率值, 了解偏置磁场对层合磁电材料谐振响应的影响机理, 本文结合磁致伸缩材料 Terfenol-D 的非线性本构关系和层合材料的等效电路, 分析了偏置磁场对磁致伸缩/弹性/压电层合材料纵向谐振频率和纵向谐振磁电电压转换系数的影响, 并进行了实验验证. 本文采用文献[9]提出的磁致伸缩材料的非线性本构关系, 该本构关系具有能用少量参数准确描述磁致伸缩材料的非线性特性的特点.

## 2. 理论分析

### 2.1. 层合结构描述

所研究的磁致伸缩/弹性/压电层合材料的结构如图 1(a)所示, Terfenol-D, PZT 分别粘贴在弹性片的上下两面, 理想粘贴状态下 Terfenol-D, PZT 的预应力为零. Terfenol-D, PZT 和弹性片均为矩形, 宽度都为  $w$ , Terfenol-D, PZT 和弹性片的厚度分别为  $t_m$ ,  $t_p$ ,  $t_b$ , Terfenol-D, PZT 长均为  $l_1$ , 弹性片长为  $l_1 + 2l_2$ . 所

\* 国家自然科学基金(批准号: NASF10776039, 50677072)和国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号: 2006AA04Z337)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

采用的磁致伸缩层沿长度方向磁化、压电层沿厚度方向极化,定义层合材料的这种工作模式为  $L-T$  模式,如图 1(b)所示。

结构应用于微弱交变磁场环境下,  $H_{ac}$  的幅度远小于  $H_{bias}$  的幅度,即  $|H_{ac}| \ll |H_{bias}|$ ,可以忽略  $H_{ac}$ ,为了讨论方便用偏置磁场  $H_{bias}$  代替外加磁场  $H$ 。

根据杨氏弹性模量的定义, Terfenol-D 的杨氏弹性模量为

$$E_{33m} = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \right)_{H_{bias}} \quad (3)$$

根据(1)(2)式不易求得  $E_{33m}$  的显示表达式,运用数值差分法,求得在预应力  $\sigma$  为零时 Terfenol-D 的杨氏弹性模量和偏置磁场的关系  $E_{33m}-H_{bias}$ ,如图 2 所示,其中用到的 Terfenol-D 参数见附录。从图 2 可以看出,随着偏置磁场  $H_{bias}$  的增大,杨氏弹性模量  $E_{33m}$  先逐渐减小后逐渐增大,在  $H_{bias}$  为 25.7 kA/m 时,  $E_{33m}$  达到极小值  $2.08 \times 10^{10}$  Pa。

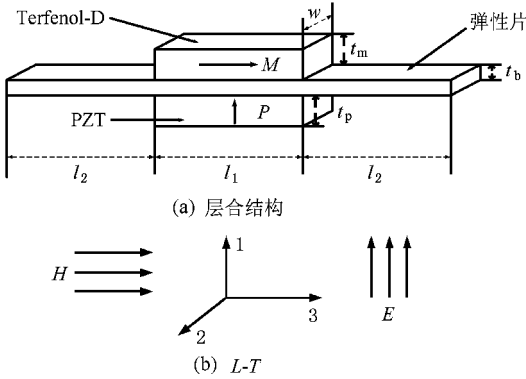


图 1 层合结构示意图

### 2.2. 偏置磁场对 Terfenol-D 特性的影响

由文献 [9] 提出的磁致伸缩材料的非线性本构关系,得到图 1 所示的 Terfenol-D 在 3 方向上的一维本构关系为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \lambda_0(\sigma) + \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_s^2} M^2, \quad (1)$$

$$H = \frac{1}{\eta} f^{-1} \left( \frac{M}{M_s} \right) - \frac{\lambda \lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)}{\mu_0 M_s^2} M, \quad (2)$$

其中

$$\lambda_0(\sigma) = \lambda_s \begin{cases} \tanh\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) & (\sigma \geq 0), \\ \tanh\left(\frac{2\sigma}{\sigma_s}\right)/2 & (\sigma < 0), \end{cases}$$

$$\Lambda_0(\sigma) = \lambda_s \sigma_s \begin{cases} \ln\left(\cosh\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)\right) & (\sigma \geq 0), \\ \ln\left(\cosh\left(\frac{2\sigma}{\sigma_s}\right)\right)/4 & (\sigma < 0), \end{cases}$$

$$\sigma_s = \lambda_s E_s E_0 / (E_s - E_0)$$

$$f(x) = \coth(x) - 1/x,$$

$$\eta = \frac{3\chi_m}{M_s},$$

$\epsilon$  为应变,  $M$  为磁化强度,  $M_s$  为饱和磁化强度,  $\lambda_s$  为饱和磁致伸缩应变系数,  $E_0$  为初始杨氏弹性模量,  $E_s$  为饱和杨氏弹性模量,  $\chi_m$  为初始磁化系数,  $\sigma$  为预应力,  $\sigma_s$  为饱和预应力,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率,  $H$  为 Terfenol-D 的外加磁场。外加磁场  $H$  分为两部分 ( $H = H_{bias} + H_{ac}$ ), 一是偏置磁场  $H_{bias}$ , 二是所加的交变激励磁场  $H_{ac}$ 。所研究的层合

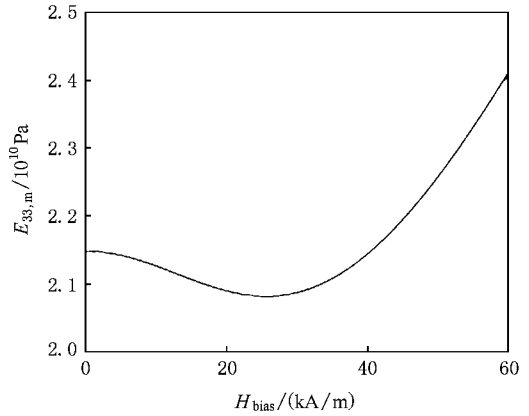


图 2 杨氏弹性模量-偏置磁场关系图

在预应力  $\sigma$  为零的条件下, 根据(1)(2)式得

$$\epsilon = \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2, \quad (4)$$

$$\frac{M}{M_s} = \coth(\eta H_{bias}) - \frac{1}{\eta H_{bias}}. \quad (5)$$

把(5)式代入(4)式得

$$\epsilon = \lambda_s \left[ \coth(\eta H_{bias}) - \frac{1}{\eta H_{bias}} \right]^2. \quad (6)$$

(6)式对偏置磁场  $H_{bias}$  求偏导得压磁系数

$$\begin{aligned} d_{33m} &= \frac{\partial \epsilon}{\partial H_{bias}} \\ &= 2\lambda_s \left[ \coth(\eta H_{bias}) - \frac{1}{\eta H_{bias}} \right] \\ &\quad \times \left\{ \eta \left[ 1 - \coth(\eta H_{bias}) \right]^2 + \frac{1}{\eta H_{bias}^2} \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

采用附录中的参数(7)式计算结果如图 3 所示。观察图 3 可知, 随着偏置磁场  $H_{bias}$  的增大,  $d_{33m}$  先逐渐

增大后逐渐减小,在  $H_{bias}$  为 30.2 kA/m 时,  $d_{33m}$  达到极大值  $1.02 \times 10^{-8}$  m/A. Terfenol-D 的杨氏弹性模量和压磁系数随偏置磁场改变而改变,可分别称为动态杨氏弹性模量和动态压磁系数.

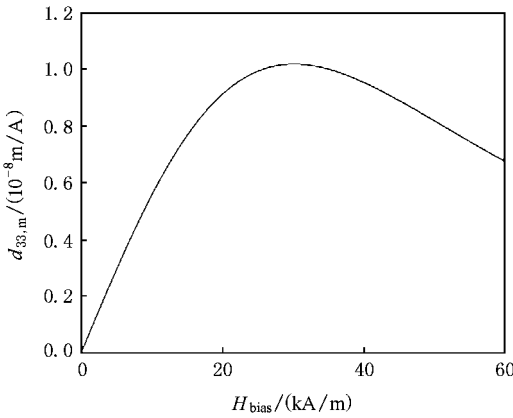


图 3 压磁系数-偏置磁场关系图

### 2.3. 考虑偏置磁场的层合电磁材料谐振响应

文献 [10, 11] 应用等效电路法分析图 1 所示层合结构电磁材料,可以得到如图 4 所示的层合结构纵向振动的等效电路.

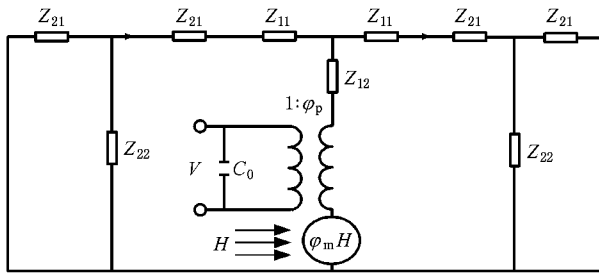


图 4 层合结构的等效电路

图 4 中  $Z_{11} = jAv_1\bar{\rho}\tan\left(\frac{k_1l_1}{2}\right)$ ,  $Z_{12} = \frac{Av_1\bar{\rho}}{j\sin k_1l_1}$ ,  $Z_{21} = jA_bv_2\rho_b\tan\frac{k_2l_2}{2}$ ,  $Z_{22} = \frac{A_bv_2\rho_b}{j\sin k_2l_2}$ ,  $C_0 = \frac{l_1w\epsilon_{11}}{t_p}$ ,  $\bar{\epsilon}_{11} = \epsilon_{11}(1 - k_{31}^2)$ ,  $v_1^2 = \frac{1}{\bar{\rho}s}$ ,  $k_1^2 = \frac{\omega^2}{v_1^2}$ ,  $v_2^2 = \frac{1}{\rho_b s_{33b}}$ ,  $k_2^2 = \frac{\omega^2}{v_2^2}$ ,  $\bar{\rho} = \frac{(\rho_b A_b + \rho_p A_p + \rho_m A_m)}{A}$ ,  $\varphi_p = \frac{wd_{31p}}{s_{33p}}$ ,  $\bar{s} = \frac{s_{33p}s_{33b}s_{33m}}{n_b s_{33p}s_{33m} + n_p s_{33p}s_{33b} + n_m s_{33b}s_{33p}}$ ,  $\varphi_m = \frac{A_m d_{33m}}{s_{33m}}$ .  $s_{33p}$ ,  $\rho_p$ ,  $s_{33b}$ ,  $\rho_b$ ,  $s_{33m}$ ,  $\rho_m$  分别为 PZT、弹性片和 Terfenol-D 的柔顺系数和密度.  $\epsilon_{11}$  和  $k_{31}$  分别为 PZT

的相对介电常数和机电耦合系数.  $\bar{s}$ ,  $\bar{\rho}$  分别是重叠部分的有效柔顺系数和有效密度. 弹性片、PZT 和 Terfenol-D 的横截面积分别为  $A_b = t_b w$ ,  $A_p = t_p w$ ,  $A_m = t_m w$ , 三层总横截面积为  $A = A_b + A_p + A_m$ . 重叠部分的弹性片、PZT 和 Terfenol-D 体积分率分别为  $n_b = \frac{A_b}{A}$ ,  $n_p = \frac{A_p}{A}$ ,  $n_m = \frac{A_m}{A}$ . 把 Terfenol-D 的动态杨氏弹性模量代入重叠部分的有效柔顺系数得

$$\bar{s} = \frac{s_{33p}s_{33b}/E_{33m}}{n_b s_{33p}/E_{33m} + n_p s_{33b}/E_{33m} + n_m s_{33b}s_{33p}} \quad (8)$$

图 4 所示等效电路可简化为图 5, 其中  $Z$  为机械端等效阻抗. 等效阻抗  $Z$  的计算见下式:

$$\begin{aligned} Z &= Z_{12} + \frac{1}{2}(Z_{11} + Z_{21} + Z_{21} // Z_{22}), \\ &= \frac{1}{2}jA_bv_2\rho_b\tan k_2l_2 \\ &\quad - \frac{1}{2}jAv_1\bar{\rho}\cotan\left(\frac{k_1l_1}{2}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

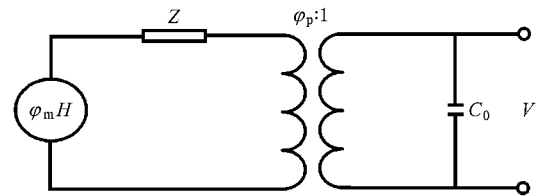


图 5 简化的等效电路

当等效阻抗的虚部等于零 ( $\text{Im}(Z) = 0$ ) 时, 可得层合材料的谐振频率方程 [12]

$$A_bv_2\rho_b\tan k_2l_2 - Av_1\bar{\rho}\cotan\left(\frac{k_1l_1}{2}\right) = 0. \quad (10)$$

在图 5 中,  $H = H_{bias} + H_{ac}$ ,  $H_{bias}$  为直流偏置磁场,  $H_{ac}$  为交流激励磁场, 由电路原理可得

$$\left| \frac{V}{\varphi_m H_{ac}} \right| = \left| \frac{\frac{\varphi_p}{j\omega C_0}}{Z + \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0}} \right|, \quad (11)$$

则层合材料的磁电电压转换系数为

$$\alpha = \left| \frac{V}{H_{ac}} \right| = \left| \frac{\frac{\varphi_p}{j\omega C_0}}{Z + \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0}} \right| \varphi_m. \quad (12)$$

在 (12) 式中加入振动损耗, 并令  $\text{Im}(Z) = 0$ , 可得到考虑振动损耗的谐振状态磁电电压转换系数 [6]. 层合磁电材料在振动时存在磁、机、电三种损耗, 其中机械损耗为主要损耗, 为简化分析在此只考

虑机械损耗. 根据文献 [13] 的讨论可以得到长为  $l_1$

部分的动态机械损耗阻抗  $R_{\text{mech1}} = \frac{\pi A v_1 \bar{\rho}}{8Q}$ , 长为  $l_2$  部

分的动态机械损耗阻抗  $R_{\text{mech2}} = \frac{\pi A_b v_2 \rho}{8Q_b}$ , 整个结构

总的机械损耗阻抗  $R_{\text{mech}} = R_{\text{mech1}} + 2R_{\text{mech2}}$ , 其中  $\frac{1}{Q} =$

$\frac{n_b}{Q_b} + \frac{n_m}{Q_m} + \frac{n_p}{Q_p}$ ,  $Q_p$ ,  $Q_b$  和  $Q_m$  分别为 PZT、弹性片和 Terfenol-D 的机械品质因数. 则考虑振动损耗的谐振磁电电压转换系数为

$$\alpha^r = \left| \frac{V}{H_{\text{ac}}} \right| = \left| \frac{\frac{\varphi_p}{j\omega C_0}}{R_{\text{mech}} + \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0}} \right| \varphi_m. \quad (13)$$

化简谐振频率方程 (10) 式可得到

$$n_b \rho_b \tan(2\pi \sqrt{\rho_b s_{33,b}} f_r l_2) \sqrt{\rho_b s_{33,b}} = \bar{\rho} / \{ \tan[\pi \bar{\rho} \bar{s}(H_{\text{bias}}) f_r l_1] \bar{\rho} \bar{s}(H_{\text{bias}}) \}, \quad (14)$$

其中  $f_r$  为谐振频率. 方程 (14) 中只有  $\bar{s}(H_{\text{bias}})$  随着  $H_{\text{bias}}$  改变而变化, 而 (8) 式中只有  $E_{33,m}$  随着  $H_{\text{bias}}$  改变而变化, 可见偏置磁场通过影响 Terfenol-D 的动态杨氏弹性模量而影响纵向谐振频率. 方程 (14) 为三角函数方程, 对于同一  $H_{\text{bias}}$   $f_r$  有多个解, 各解对应层合材料的各阶纵向谐振频率 (用  $f_{r_n}$  表示第  $n$  阶纵向谐振频率), 当  $H_{\text{bias}}$  改变时, 各阶纵向谐振频率  $f_{r_n}$  随着  $H_{\text{bias}}$  改变而变化.

化简 (13) 式得到

$$\alpha^r = \frac{wd_{31,p} A_m d_{33,m}(H_{\text{bias}}) E_{33,m}(H_{\text{bias}})}{s_{33,p} \sqrt{(\omega_r l_1 w \varepsilon_{11} R_{\text{mech}} / t_p)^2 + (wd_{31,p} / s_{33,p})^2}}, \quad (15)$$

其中  $\omega_r = 2\pi f_r$ . 由 (15) 式可得到谐振磁电电压转换系数  $\alpha^r$  与偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  的关系, 并且可知谐振磁电电压转换系数与  $d_{33,m}$  和  $E_{33,m}$  的乘积成正比, 偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  是通过影响 Terfenol-D 的动态压磁系数  $d_{33,m}$  和动态杨氏弹性模量  $E_{33,m}$  而影响谐振磁电电压转换系数的.

采用附录中的参数, 解方程 (14) 得到图 6 所示的一阶纵向谐振频率  $f_{r1}$  与偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  的关系. 由图 6 可见随着偏置磁场的增大, 一阶纵向谐振频率先逐渐减小后逐渐增大, 在偏置磁场为 25.7 kA/m 时, 一阶纵向谐振频率最小. 对比图 2 和图 6 发现, 杨氏弹性模量极小值点对应的偏置磁场 (25.7 kA/m) 与一阶纵向谐振频率极小值点对应的偏置磁场

相同.

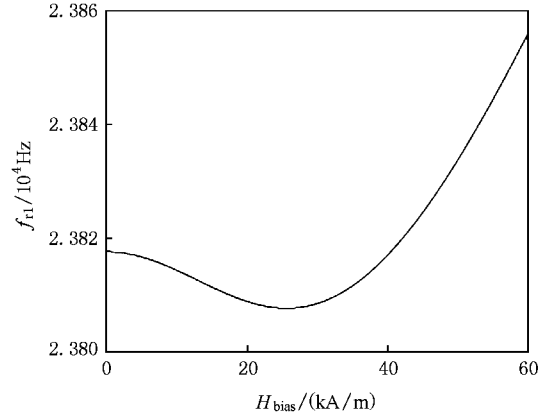


图 6 一阶纵向谐振频率-偏置磁场关系的理论值

把一阶纵向谐振频率  $f_{r1}$  代入 (15) 式计算得到一阶纵向谐振磁电电压转换系数  $\alpha^{r1}$ , 如图 7 所示. 由图 7 可见随着偏置磁场的增大, 一阶纵向谐振磁电电压转换系数先增大后减小, 在偏置磁场为 31.0 kA/m 时, 一阶纵向谐振磁电电压转换系数达到极大值 16.0 mV/(kA/m). 对比图 3 和图 7 发现压磁系数的极大值点对应的偏置磁场 (30.2 kA/m) 小于一阶纵向谐振磁电电压转换系数对应的偏置磁场 (31.0 kA/m) 即使压磁系数达到最大的偏置磁场并不等于使磁电电压转换系数达到最大的偏置磁场. 这是因为纵向谐振磁电电压转换系数不仅与动态压磁系数有关, 还与动态杨氏弹性模量有关.

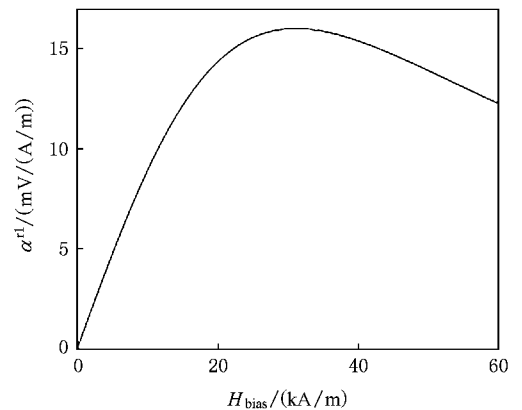


图 7 一阶纵向谐振磁电电压转换系数-偏置磁场关系的理论值

### 3. 实验讨论

用 Terfenol-D/弹性片 (镀青铜)/PZT-5H 为样片

进行实验,各参数见附录.先用有机溶剂将实验样片清洗干净,再用环氧树脂粘贴后放置于烤箱中,在 $100^{\circ}\text{C}$ 条件下烘烤 $1\text{ h}$ ,取出冷却,得到层合磁电材料.将层合材料置于测量系统中,改变偏置磁场大小,从而得到不同偏置磁场下的材料的谐振频率和谐振磁电电压转换系数.图8所示为在不同偏置磁场下的一阶纵向谐振频率的实验数据,图9所示为在不同偏置磁场下的一阶纵向谐振磁电电压转换系数的实验数据.

由图8可知,在偏置磁场为 $22.4\text{ kA/m}$ 时,一阶纵向谐振频率最小.对比图6和图8发现理论和实验所得的一阶纵向谐振频率随偏置磁场的变化具有相同趋势,但是谐振频率的理论值比其实验数据偏大,这是因为没有考虑粘贴层对谐振频率的影响,谐振频率的理论值随偏置磁场变化比其实验数据随偏置磁场变化缓慢,且实验所得的一阶纵向谐振频率最小值点对应的偏置磁场( $22.4\text{ kA/m}$ )小于其理论最小值点对应的偏置磁场( $25.7\text{ kA/m}$ ),这是因为没有考虑预应力对 Terfenol-D 的影响. Terfenol-D 的预应力来自于粘贴产生的应力和弹性片对 Terfenol-D 的剪切应力.

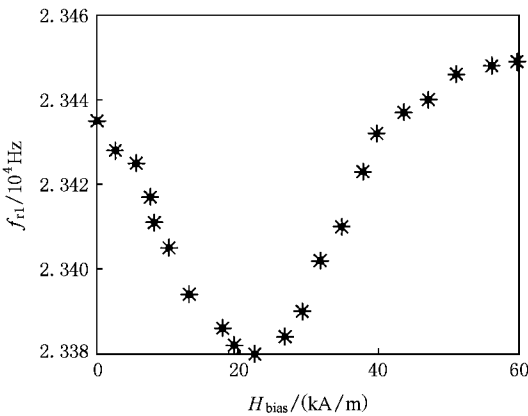


图8 一阶纵向谐振频率-偏置磁场关系的实验数据

由图9可知,在偏置磁场为 $35.8\text{ kA/m}$ 时,一阶纵向谐振磁电电压转换系数达到极大值 $14.4\text{ mV}/(\text{A}/\text{m})$ .对比图7与图9发现理论和实验所得的一阶纵向谐振磁电电压转换系数随偏置磁场的变化具有相同的趋势,但在偏置磁场为零时,磁电电压转换系数的理论值为零,而其实验数据不为零,这是因为偏置磁场为零时不能忽略 $H_{\text{ac}}$ 对压磁系数的影响.观察图7和图9中的曲线下降段,发现一阶纵向谐振磁电电压转换系数的实验数据随偏置磁场变化比其理论值随偏置磁场变化要缓慢些,且实验所得的磁电电压转换

系数极小值点对应的偏置磁场( $35.8\text{ kA/m}$ )大于其理论极小值点对应的偏置磁场( $31.0\text{ kA/m}$ ),这也是因为没有考虑预应力对 Terfenol-D 的影响.

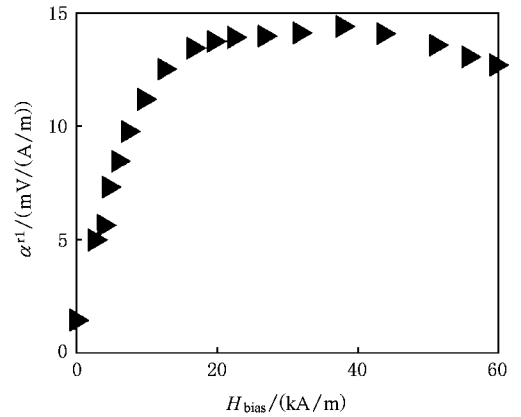


图9 一阶纵向谐振磁电电压转换系数-偏置磁场关系的实验数据

## 4. 结 论

根据 Terfenol-D 的非线性本构关系,推导出 Terfenol-D 的动态杨氏弹性模量、动态压磁系数与偏置磁场的关系.利用等效电路法得到层合材料的等效电路,把动态杨氏弹性模量、动态压磁系数代入等效电路中,得到层合材料的谐振频率和谐振磁电电压转换系数与偏置磁场的关系.制作了 Terfenol-D/铍青铜/PZT-5H 实验样片,在不同偏置磁场下进行了实验.通过理论和实验对比分析得到如下结论:

1. 随着偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  的增大,层合材料的纵向谐振频率先逐渐减小后逐渐增大.
2. 随着偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  的增大,层合材料的纵向谐振磁电电压转换系数先逐渐增大后逐渐减小,存在最佳偏置磁场  $H_{\text{bias}}$  使层合材料的纵向谐振磁电电压转换系数最大.

## 附录 本文中用到的材料参数

Terfenol-D 的参数:  $E_0 = 2 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $E_s = 6 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $\chi_m = 20$ ,  $\lambda_s = 0.001$ ,  $\mu_0 M_s = 1.6 \text{ T}$ ,  $\rho_p = 9250 \text{ kg/m}^3$ ,  $Q_m = 40$ , 几何尺寸为  $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ .

PZT-5H 的参数:  $d_{31p} = 274 \text{ pC/N}$ ,  $s_{33p} = 2.06 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\rho_p = 7500 \text{ kg/m}^3$ ,  $k_{31} = 0.38$ ,  $\epsilon_{11} = 3800$ ,  $Q_p = 50$ , 几何尺寸为  $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ .

弹性片(铍青铜)的参数:  $s_{33b} = 1.34 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\rho_b = 8260 \text{ kg/m}^3$ ,  $Q_b = 500$ , 几何尺寸为  $90 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ .

- [ 1 ] Manfred Fiebig 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** R123
- [ 2 ] Wan Y P, Fang D N 2003 *Acta Mechanica Sinica* **19** 324
- [ 3 ] Wan J G, Liu J M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9916
- [ 4 ] Dong S X, Li F J, Viehland D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5305
- [ 5 ] Dong S X, Zhai J Y, Bai F M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062502
- [ 6 ] Dong S X, Li J F, Viehland D 2006 *J. Mater. Sci.* **41** 97
- [ 7 ] Wan Y P, Zhong Z 2004 *Modern Physics Letters B* **18** 963
- [ 8 ] Li P, Wen Y M, Bian L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 022503
- [ 9 ] Zheng X J, Liu X E 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 053901
- [ 10 ] Dong S X, Li J F, Viehland D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2625
- [ 11 ] Dong S X, Li J F, Viehland D 2003 *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* **50** 1253
- [ 12 ] Zhang P L, Zhang Z Y 1983 *Piezoelectric Measure* ( National Defence Industry Press ) p32 ( in Chinese ) [ 张沛霖、张仲渊 1983 压电测量( 国防工业出版社 )第 32 页 ]
- [ 13 ] Yang F, Wen Y M, Li P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3539 ( in Chinese ) [ 杨帆、文玉梅、李平 2007 物理学报 **56** 3539 ]

## Influence of bias magnetic field on magnetoelectric effect of magnetostrictive/elastic/piezoelectric laminated composite \*

Yang Chang-Hai Wen Yu-Mei<sup>†</sup> Li Ping Bian Lei-Xiang

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

( Received 30 October 2007; revised manuscript received 25 February 2008 )

### Abstract

The dynamic Young's modulus of elasticity and the dynamic piezomagnetic coefficient of magnetostrictive material are derived based on the nonlinear constitutive model of magnetostrictive material. Based on the equivalent circuit method, the relation between magnetoelectric effect of the laminated composite and the dynamic Young's modulus of elasticity, and the dynamic piezomagnetic coefficient of magnetostrictive material is established. The influences of bias magnetic field on the resonant frequencies and the resonant magnetoelectric voltage coefficients of the laminated composite are discussed. The theoretical analysis and the experimental results indicate that there is an optimal bias magnetic field at which the resonant magnetoelectric voltage coefficient of the laminated composite reaches its maximum.

**Keywords:** magnetostrictive/elastic/piezoelectric laminated composite, magnetoelectric effect, bias magnetic field, nonlinear constitutive model

**PACC:** 7580, 7760, 4340

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10776039, 50677072 ) and the National High Technology Research and Development Program of China ( 863 Program ) ( Grant No. 2006AA04Z337 ).

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