



层状磁电复合材料的磁电转换分析

王杰敏, 杨虹

重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065

摘要 提出层状磁电复合材料 L-T 模型, 从压电效应和压磁效应本构方程出发, 采用等效电路法对复合材料的磁电电压系数进行理论分析, 并对材料磁电响应进行了数值计算, 得出磁电响应仿真结果, 所推导的磁电电压系数公式与等效电路模型公式得出的计算值相符, 为磁电层材料的制备和优化提供理论工具。

关键词 磁电层状复合结构; 磁电系数; 磁电效应; 等效电路

中图分类号 TN3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0061-04

Magnetoelectric Conversion Analysis of Layered Magnetoelectric Composite Materials

WANG Jiemin, YANG Hong

College of Electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract In this paper, a L-T model of layered magnetoelectric composite materials is presented, which, based on piezoelectric effect and piezomagnetic effect constitutive equation, using the method of equivalent scheme, is used to analyze the magneto-ionic voltage coefficient of the composite materials, and to obtain various relations among physical parameters of the composite materials. Then a numerical computation is made of the materials magnetoelectricity response, and results are compared with those of interrelated finite-element experiments to obtain the magnetoelectricity response simulation result and the mechanical coupling in a composite where a magnetostrictive component is laminated with a piezoelectric one to achieve a giant magnetoelectric effect. It is shown that the direction of the applied magnetic field and the restriction upon the laminated composite affect the magnetoelectric coefficient markedly. It is found that the magnetoelectric voltage coefficient in the static method is quite close to that in the equivalent circuit approach, and it increases with the increase of the magnetostrictive/piezoelectric thickness ratio. So a clear relationship is found between voltage and magnetic

intensity, which provides a theoretical tool for the preparation and optimization of magnetoelectric materials. A new technology is developed in the field, for the environmental energy harvesting with the composite materials. Based on the simulation results, more studies will be carried out on using magneto electric materials as sensors.

Keywords magnetoelectric layered hybrid composites; magnetoelectric coefficient; magnetoelectric effect; finite element analysis

0 引言

磁电系数表明了外界磁场与转化电压之间的关系。而磁电效应是指材料在外加磁场 δH 的作用下产生电极化 δP 的现象或材料在外加电场作用下产生诱导磁化的现象^[1], $\delta P = \alpha \cdot \delta H$, 其中 α 为磁电系数; 若定义磁电电压系数为 $\alpha_E = \Delta E / \delta H$ (E 为感生电场强度), 则有

$$\alpha = \epsilon_0 \epsilon_r \alpha_E$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数。 α 和 α_E 为表征磁电转化效应的重要物理量^[2]。

由于耦合关系的复杂性, 难以给出磁电转化关系精确解。目前, 层状磁电复合材料磁电效应的主要分析方法包括弹性力学方法^[3], Green 函数法^[4]和等效电路法^[5]。其中, 弹性力学方法基于材料的力学本构方程及力学平衡方程, 并假设材料具有立方对称性且各处应力应变均匀; Green 函数法假设界面结合强度为理想状态; 等效电路法考虑了压电材料的机电耦合效率, 并基于交变磁场及电场下的动力学方程对磁电系数进行推导^[5]。由于磁电材料各处的应力和应变是不均匀的, 并且界面的结合也不是理想状态, 本文采用等效电路法建立磁电转换模型。

收稿日期: 2009-04-01

作者简介: 王杰敏, 研究方向为单片射频微波集成电路 MMIC, 电子信箱: fjwj_m_@126.com



1 磁电复合材料的 L-T 模型与工作原理

图 1 为三层磁电复合材料的结构示意图, PZT 层位于两层 Terfenol-D 之间, 并且在镀银层引出电极, 磁电复合材料的长和宽分别是 14 和 10 mm, Terfenol-D 层和 PZT 层的厚度分别为 0.8 和 0.5 mm。Terfenol-D 层沿长度方向磁化(L), PZT 层沿厚度方向极化(T), 故这种结构简称为 L-T 模型^[3]。

沿长度方向施加大的直流偏置磁场, 待测的交流磁场 H_{ac} 也必须沿长度方向, 由于三层磁电复合材料的长度明显大于宽度和厚度, 磁电材料主要沿长度方向振动; 因为磁致伸缩层与压电层耦合在一起, 使得压电层跟随磁致伸缩层一起振动, 压电效应就会产生厚度方向上的电压 V 。

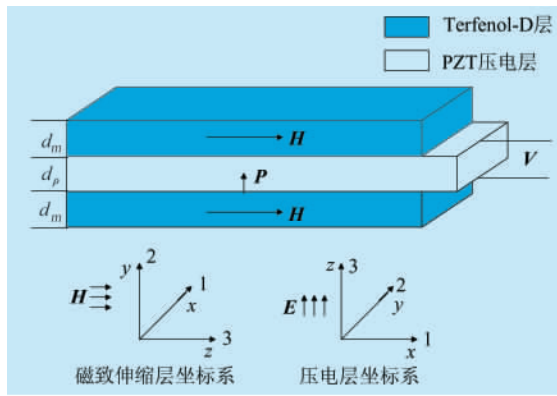


图 1 L-T 模型结构示意图

Fig. 1 L-T model configuration

2 磁电系数的理论计算

Shuxiang Dong 等^[5]对 L-L 型(磁致层沿长度方向磁化, 压电层沿长度方向极化)的磁电系数进行了详细的推导, 但未推导 L-T 磁电模型。

因压电的极化方向沿厚度方向, 则压电层的本构方程为

$$\begin{cases} S_1^p = S_{11}^E T_1^p + d_{31}^p E_3 \\ D_3 = d_{31}^p T_1^p + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, D_3 、 E_3 分别为沿厚度方向的电位移和电场强度, S_1^p 、 T_1^p 分别为压电材料的应变和应力, T 为应力, 上标 P 表示压电层。由于压电陶瓷存在压电效应, 压电材料在不同电学条件下具有不同的弹性顺度常数。在电场强度 $E=0$ 条件下, 测得的短路弹性顺度常数记作 S_1^E 、 S_{11}^E 、 d_{31}^p 、 ϵ_{33}^T 分别为压电材料的柔顺系数、压电常数、介电常数。磁致伸缩层的本构方程为

$$\begin{cases} S_3^m = S_{33}^H T_3^m + d_{33}^m H_3 \\ B_3 = d_{33}^m T_3^m + \mu_{33} H_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中, H_3 、 B_3 分别为外加磁场强度和磁感应强度, S_3^m 、 T_3^m 分别为磁致伸缩层的应变和应力, 上标 m 表示磁致伸缩相, S_{33}^H 、 d_{33}^m 、 μ_{33} 分别为磁致伸缩层的柔顺系数、动态磁致伸缩率、导磁率。

由于受到磁致层的挤压, 压电层产生耦合电压 V 和电流 I 。由式(1)得出电位移为

$$D_3 = \frac{d_{31}^p}{S_{11}^E} S_1^p + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (3)$$

式中, $\epsilon_{33}^T = \epsilon_{33}^T (1 - K_{31}^2)$ 为一维截止介电常数; K_{31} 为机电耦合系数, $K_{31}^2 = d_{31}^p / S_{11}^E \epsilon_{33}^T$ 。压电层的极面电荷量 Q 为

$$Q = \int_0^l \int_0^w D_3 dy dz \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)积分, 且 $S_1^p = \frac{\partial u}{\partial z}$, u 为磁电材料的纵

向(z 向)位移; $E_3 = \frac{V}{d_p}$, 积分得

$$Q = \frac{lw\epsilon_{33}'}{d_p} V + \frac{wd_{31}^p}{j\omega S_{11}^E} (u_2 - u_1) \quad (5)$$

式中, d_p 为压电陶瓷层的厚度, $u_1 = j\omega u(0)$ 和 $u_2 = j\omega u(l)$ 分别为压电层在 $z=0$ 和 $z=l$ 处的速度。由于是简谐激励, 电流为

$$I = j\omega Q = j\omega C_0 V + \varphi_p (u_2 - u_1) \quad (6)$$

式中, ω 为角频率, $C_0 = \frac{lw\epsilon_{33}'}{d_p}$ 为压电层的一维截止电容, $\varphi_p = \frac{wd_{31}^p}{S_{11}^E}$ 为机电转换系数。式(6)称为压电层的电路状态方程。

设 F_1 、 F_2 分别为作用在磁电材料 $z=0$ 、 $z=l$ 的外力, 已知磁电复合材料的长 X 和宽 W , $A = A_1 + 2A_2 = dW$ 为磁电材料的截面积, d 为磁电材料的总厚度。根据磁电材料的运动方程、边界条件和电路状态方程, 得到机械振动方程如下:

$$\begin{cases} F_1 = Z_1 u_1 + Z_2 (u_1 - u_2) + \varphi_p V + \varphi_m H_3 \\ F_2 = -Z_1 u_2 + Z_2 (u_1 - u_2) + \varphi_p V + \varphi_m H_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $Z_1 = j\rho v A \tan \frac{kl}{2}$ 和 $Z_2 = \frac{\rho v A}{j \sin kl}$ 为机械阻抗, $\sqrt{\frac{n}{S_{33}^H} + \frac{1-n}{S_{11}^H}}$ 为

磁电材料的纵波速, $k = \frac{\omega}{v}$ 为波数, $n = \frac{2A_2}{A}$ 为磁致伸缩层的体

积分数, $\rho = \frac{\rho_p A_1 + \rho_m (2A_2)}{A}$ 为磁电材料的平均密度, ρ_p 、 ρ_m 分别为

压电层和磁致伸缩层的质量密度, $\varphi_m = \frac{2A d_{33}^m}{S_{33}^H}$ 为磁弹性耦合系

数, φ_p 为机电转换系数。

由电路状态方程(6)和机械振动方程(7), 可以得到磁电复合材料的磁-机-电等效电路图, 如图 2 所示。

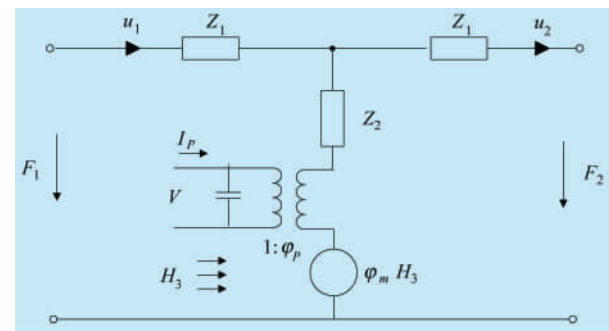


图 2 磁机电等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of magnetic and electromechanical elements

当磁电层作自由振动时,外力满足 $F_1=F_2=0$,相当于两个机械电压端短路,则可以将图 2 简化为图 3,其等效阻抗为

$$Z=Z_2+Z_1//Z_3=-\frac{1}{2}j\rho vA\cdot\cotan\frac{kl}{2}$$

式中, // 表示并联。在开路条件下,压电层产生的电流 I 为 0。对图 3,应用欧姆定律得压电层输出的电压 V 与磁场产生的等效磁电压 $\varphi_m H_3$ 的比值为

$$\left|\frac{V}{\varphi_m H_3}\right|=\left|\frac{\varphi_p}{\varphi_p^2+j\omega C_0 Z}\right| \quad (8)$$

当交变磁场的角频率 $\omega \ll 2\pi f_r$ (f_r 为磁电层纵向的共振频率)时, $\tan\frac{kl}{2} \approx \frac{kl}{2}$, 则 $Z=-j\frac{\rho v A}{\omega l}$ 可以化简为

$$\left|\frac{V}{H_3}\right|_{LT}=\left|\frac{\varphi_p \varphi_m l}{A C_0 \rho v^2+\varphi_p^2 l}\right| \quad (9)$$

将 $\varphi_p, \varphi_m, C_0, \rho v^2$ 分别代入上式并化简,对简化式求导后取模,得 L-T 型磁电复合材料的磁电系数

$$\alpha=\left|\frac{dV}{dH_3}\right|_{LT}=\frac{n(1-n)d\cdot d_{31}^p\cdot d_{33}^m}{\varepsilon_{33}^T[n(1-k_{31}^2)S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]} \quad (10)$$

式中, n 为磁致伸缩相的体积分数, k_{31}^2 为压电相的机电耦合系数。此前, Filippov 等^[2]曾推导出开路状态下的磁场与电输出之间的关系,但在推导过程只使用了开路电学边界条件,不能进一步分析材料在有负载和短路状态下的情况,也不能完整分析材料的磁电响应特征。而本文应用等效电路法可以较全面地分析磁电复合材料的磁电响应。

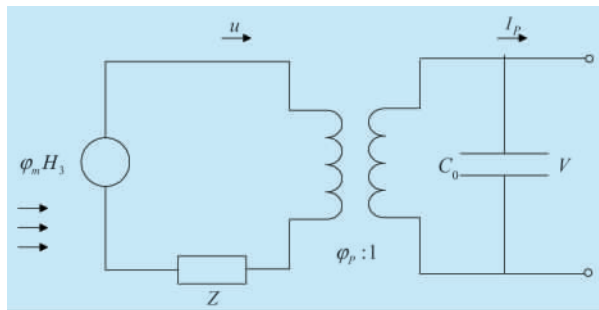


图 3 自由振动时的磁机电等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of magnetic and electromechanical elements when the magnetic layer is in a free vibration

将图 3 右端短路,可以得出

$$\frac{dI_s}{dH_3}=\varphi_p\frac{\varphi_m}{Z}=\frac{j\omega n w l d_{31}^p d_{33}^m}{[n S_{31}^E(1-n)S_{33}^H]} \quad (11)$$

由开路电压 V 和短路电流 I_s ,可以求出材料内阻为

$$r=\frac{V}{I_s}=\frac{d(1-n)[n S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]}{j\omega l w \varepsilon_{33}[n(1-k_{31}^2)S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]} \quad (12)$$

可以看出,在等效电路推导过程中,材料内阻相当于一个电容 C ,

$$C=\frac{w l \varepsilon_{33}[n(1-k_{31}^2)S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]}{d(1-n)[n S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]} \quad (13)$$

由上述分析可知,L-T 模式下的磁电伸缩层复合材料可以看成是一个平板电容,磁电材料可以提供的电功率为

$$P=\frac{1}{2}C V^2 f=\frac{(1-n)n^2 V_m(d_{31}^p)^2(d_{33}^m)^2 H_{ac}^2 f}{2 \varepsilon_{33}[n(1-k_{31}^2)S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H][n S_{11}^E+(1-n)S_{33}^H]} \quad (14)$$

其中, $V_m=w l d$ 为材料体积。分析以上表达式可知,复合材料的磁电响应不但与磁致伸缩系数、压电常数等物理参数有关,且与材料的几何尺寸息息相关,故可将上述等式对 n 求偏导后即可确定磁电材料最优化几何尺寸。

3 实验数据分析

将已知参数 $S_{33}^H=40\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $S_{11}^E=11.8\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $d_{33}^m=1.2\times 10^{-8} \text{ Wb}/\text{N}$, $d_{31}^p=125 \text{ pC}/\text{N}$; $k_{31}=0.58$, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0=1250$ 代入上式,并且总厚度为 $d=2.1 \text{ mm}$,计算得到的 Terfenol-D 层体积分数与磁电系数的关系如图 4 所示。

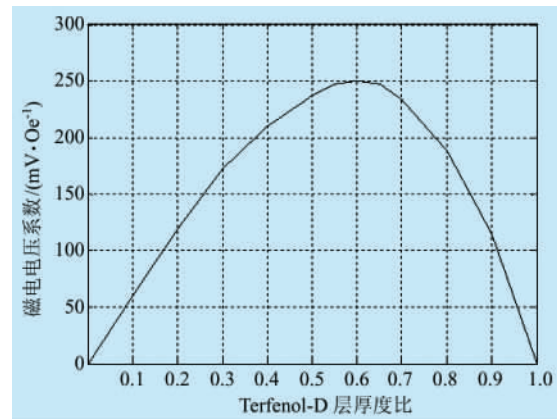


图 4 Terfenol-D 层体积分数与磁电层系数关系

Fig. 4 Coefficient relationship between Terfenol-D layer volume fraction and magnetoelectric layer

从图 4 可以看出,磁电材料必然存在一个最佳体积比,使得磁电系数最大。令 $\frac{\partial \alpha}{\partial n}=0$,有

$$n=\frac{1}{1+\sqrt{\beta}} \quad \beta=(1-k_{31}^2)\frac{S_{11}^E}{S_{33}^H}$$

代入已知参数,当体积分数为 0.620 8,磁电系数取得最大值 250.1 mV/Oe。

磁电层在平行于板长度方向施加外磁场时,磁致伸缩层板产生各向异性的变形,即沿长度方向产生伸长,而沿宽度和厚度方向产生收缩。在弹性力学模型中,假设同一层合板内,各处的应力状态相同,因此,在一定的压电板厚度下,随着磁致伸缩板厚度的增加,理论计算的误差加大。而在等效电路模型中,由于没有考虑沿板长度方向的磁致伸缩对板宽度和厚度方向的影响,所得到的理论计算值偏大。

有限元计算方法能有效地对层状磁电复合材料的磁电效应进行分析,对压电材料而言,一般的有限元方程为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}+\mathbf{G}\dot{\mathbf{u}}+\mathbf{e}\phi=\mathbf{F} \\ \mathbf{e}^T\mathbf{u}+\mathbf{E}\phi=\mathbf{Q} \end{cases} \quad (15)$$

其中, u 、 ϕ 分别为节点的位移和电势, M 、 G 、 e 、 E 分别为压电材料的质量矩阵、刚度矩阵、压电应力矩阵和电场, F 、 Q 分别为等效的节点力和电位移。

根据实验测定的材料常数, 分别利用推导公式和有限元分析软件 HFSS 对磁电复合材料的磁电电压系数进行计算, 将公式推导值与数值计算进行对比, 并考查磁致伸缩相和压电相的厚度比对磁电系数的影响。

4 结论

利用层状磁电复合材料制成的器件, 具有结构简单、磁电转换系数大、测量精度高等优点, 适应于测量低强度的交变磁场。磁电系数的计算结果表明, 磁电系数除了与材料本身参数有关, 还与各层所占的体积分数、总厚度、机电耦合程度有关。磁电系数使磁场与电压之间有了明确的对应关系, 对发展磁电薄膜器件具有指导性的意义。

参考文献 (References)

[1] Gan F X. Information materials [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.

- [2] Biehurin M I, Petrov V M. Theory of low-frequency magneto-electric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayer [J]. *Phys Rev B*, 2003, 68: 054402-054410.
- [3] Fillippov D A. Theory of the magneto-electric effect in ferromagnetic-piezoelectric heterostructures [J]. *Phys of Solid State*, 2005, 47 (6): 1080-1084.
- [4] Jiang Q H, Shen Z J, Zhou J P, et al. Magnetolectric composites of nickel ferrite and lead zirconate titanate prepared by spark plasma sintering[J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2007, 27: 279.
- [5] Dong S X, Li J, Viehland D, et al. Characterization of magneto-electric laminate composites operated in longitudinal-transverse and transverse-transverse modes[J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(5): 2625-2630.
- [6] Ding J M, Zhong C G. Impact of the external electric field on the magnetolectric effects of layer [J]. *Jornal of Suzhou University: Natural Science*, 2007, 23(2): 65-68.
- [7] Wan H, Shen R F, Wu X Z, et al. A theoretical study on symmetrical magnetostrictive/piezoelectric laminated composite[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(3): 1426-1429.
- [8] Wang X Z. Review on the study of ferroelectromagnetic materials[J]. *Chinese Materials Science Technology & Equipment*, 2007, 1: 38-40.
- [9] Li K S, Li H W, Yan H, et al. Progress in research of magnetolectric composites[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2008, 32(3): 369-374.

(责任编辑 岳臣)

中国地质学会 2009年学术年会

时间: 2009年10月22-25日
地点: 北京

主办单位
中国地质学会

议题: 地质为经济社会 发展服务

通信地址: 北京市西城区百万庄大街26号中国地质学会 (100037)
电 话: 010-68999023 传 真: 010-68995305
电子信箱: gsc2009meeting@126.com