

Finite Element Analysis of the Magnetolectric Composite Using Elastic Substrate *

CHENG Lei, WEN Yu-mei^{*}, LI Ping, BIAN Lei-xiang, ZENG Jie
(Key Lab of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China,
College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : A magnetolectric composite by bonding magnetostrictive and piezoelectric materials onto an elastic substrate is presented. The magnetolectric composite using elastic substrate is analyzed by finite-element analysis. Given the dimensions of Terfenol-D, the influences of the length of PZT-5H and the elastic substrate on the magnetolectric behaviors at the first-order longitudinal resonant are presented. Results show that the optimized length of PZT-5H is equal to the length of Terfenol-D. When the lengths of Terfenol-D and PZT-5H are equal, the optimized length of elastic substrate makes the magnetolectric voltage coefficient of the magnetolectric composite highest, and the resonance frequency of the magnetolectric composite is controllable by changing the length of the elastic substrate. The results are validated by the experiments.

Key words : magnetolectric composite; elastic substrate; resonance; finite-element analysis

EEACC:3210

采用弹性基底的磁电复合结构有限元分析 *

程 磊,文玉梅^{*},李 平,卞雷祥,曾 婕

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘 要 :介绍了一种将磁致伸缩材料和压电材料粘贴于弹性基底上构成的磁电复合结构,并针对 Terfenol-D 尺寸确定情况下,PZT-5H 长度及弹性基底长度对结构一阶纵向谐振时的磁电特性的影响,采用有限元方法进行了优化分析和设计。结果表明:PZT-5H 的最优长度与 Terfenol-D 等长时,弹性基底存在最优长度,可使结构磁电转换系数最高,且改变弹性基底长度可以调整结构的谐振频率,并进行了实验验证。

关键词 :磁电复合结构;弹性基底;谐振;有限元分析

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)08-1357-05

磁电复合材料比磁电单相材料具有更加显著的磁电效应^[1]。目前磁电复合材料主要有两种结构:一种是颗粒混合结构,即将磁致伸缩相材料与压电相材料颗粒混合在一起,通过烧结或共熔,或采用第三相材料将两种颗粒混合,形成具有磁电效应的材料^[2]。另一种是块体层合结构,即将块状磁致伸缩相材料和压电相材料复合在一起,实现磁电转换的功能^[1,3]。在设计和制作块体层合结构时,要求结构具有尽可能高的磁电转换系数,从而可以在一定的激励磁场下得到高的磁电转换

电压。

磁致伸缩和压电材料两相层合结构发生谐振时,磁电转换系数高于非谐振时的磁电转换系数,这一现象首先由 Shuxiang Dong 等人报道,并用等效电路法对其进行了研究^[4,5]。本课题组 Ping Li 等人提出,将块体磁致伸缩和压电材料复合到弹性基底上,构成一种三相层合结构,谐振时比两相层合结构具有更高的磁电转换系数^[6]。对于这种采用弹性基底的磁电复合结构,由于增加了材料相,并且其形状和尺寸异于其它材料相,运用等效电路法建模

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10776039,60774055);国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)(2006AA04Z337,2007AA12Z132)

收稿日期:2008-01-28 修改日期:2008-03-23

计算十分复杂。有限元分析方法能够适应边界形状不规则、材料非均匀和各向异性等条件,不需要对分析对象作简化假设,就可以对结构的振动模态进行分析。Y. X. Liu^[7]、万红^[8]等人采用有限元方法对磁致伸缩与压电材料两相复合结构的磁电特性进行了研究,研究表明采用有限元方法能够有效地分析多相块体磁电复合结构的磁-机-电耦合转换特性。

本文对采用弹性基底的三相磁电复合结构进行有限元分析,针对结构在交变激励下,发生一阶纵向谐振时的磁电转换特性进行分析,研究压电材料的长度和弹性基底的长度对结构一阶纵向谐振时的磁电特性的影响。得到了磁致伸缩材料尺寸确定条件下压电材料的优化尺寸,以及不同长度弹性基底对结构的一阶纵向谐振频率以及磁电转换电压的影响,并进行了实验验证。

1 采用弹性基底的磁电复合结构

图1为采用弹性基底的磁电复合结构示意图,将磁致伸缩材料和压电材料粘贴在基底中心的正反两面构成磁电复合结构(两侧为固定结构的支架)。磁致伸缩材料选用 Terfenol-D,沿其长度方向磁化,压电材料选用 PZT-5H 压电陶瓷片,沿 31 方向极化。相比磁致伸缩与压电两相层合的结构,引入弹性基底的作用有两个:提高整个结构谐振时的机械品质因数以获得更高的磁电转换系数;通过调整弹性基底尺寸以调整结构的谐振频率。

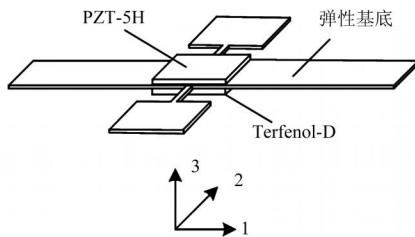


图1 采用弹性基底的磁电复合结构示意图

机械品质因数 Q_{mech} 为每周期内单位体积储存的机械能与损耗的机械能之比的 2 倍,它反映了材料储存机械能的能力。提高磁电复合结构的机械品质因数,可以提高结构的磁电转换系数^[9]。对于磁致伸缩和压电材料两相复合的结构,在谐振状态下,主要损耗来自机械损耗,其机械品质因数如式(1)所示^[10]。

$$\frac{1}{Q_{\text{mech}}} = \frac{V_{\text{mag}}}{Q_{\text{mech, mag}}} + \frac{V_{\text{piezo}}}{Q_{\text{mech, piezo}}} \quad (1)$$

$V_{\text{mag}}, V_{\text{piezo}}$ 分别为磁致伸缩材料和压电材料相

对总体积的体积比 ($V_{\text{mag}} + V_{\text{piezo}} = 1$), $Q_{\text{mech, mag}}, Q_{\text{mech, piezo}}$ 分别为磁致伸缩材料和压电材料的机械品质因数。引入弹性基底后整个结构的机械品质因数可以写为

$$\frac{1}{Q_{\text{mech}}} = \frac{V_{\text{mag}}}{Q_{\text{mech, mag}}} + \frac{V_{\text{piezo}}}{Q_{\text{mech, piezo}}} + \frac{V_{\text{sub}}}{Q_{\text{mech, sub}}} \quad (2)$$

$V_{\text{mag}}, V_{\text{piezo}}, V_{\text{sub}}$ 分别为磁致伸缩材料和压电材料相对总体积的体积比 ($V_{\text{mag}} + V_{\text{piezo}} + V_{\text{sub}} = 1$), $Q_{\text{mech, mag}}, Q_{\text{mech, piezo}}, Q_{\text{mech, sub}}$ 分别为磁致伸缩材料和压电材料的机械品质因数。若磁致伸缩材料和压电材料之间的体积比不变,代入式(1)得

$$\frac{1}{Q_{\text{mech}}} = (1 - V_{\text{sub}}) \frac{1}{Q_{\text{mech}}} + \frac{V_{\text{sub}}}{Q_{\text{mech, sub}}} = \frac{1}{Q_{\text{mech}}} + V_{\text{sub}} \left(\frac{1}{Q_{\text{mech, sub}}} - \frac{1}{Q_{\text{mech}}} \right) \quad (3)$$

可见,如果选用的基底材料的机械品质因数 $Q_{\text{mech, sub}}$ 大于两相复合结构原有的机械品质因数 Q_{mech} ,那么采用弹性基底的三相块体复合结构的机械品质因数 Q_{mech} 将大于 Q_{mech} ,将提高结构的磁电转换系数。

引入弹性基底也会改变结构的谐振频率。没有粘贴其它材料且无负载的弹性基底可以看作细棒,对于截面积不变,材料密度和弹性常数均匀且没有损耗的细棒,两端自由进行纵向振动的固有频率为^[11]

$$f_n = \frac{n C_L}{2l} \quad (4)$$

f_n 为 n 阶纵向谐振频率, C_L 为细棒材料的纵波传播速度, l 为棒长。当 $n = 1$ 时, f_1 为一阶纵向谐振频率。当弹性基底粘贴上磁致伸缩和压电材料块体所形成复合结构,其一阶纵向谐振频率会发生变化。

2 有限元分析

有限元法的基本思想是:将连续的求解区域离散为一组有限数目,且按一定方式相互联结在一起的单元组合体,通过求解一组微分方程,对系统的力学、热学或电磁学等问题进行分析。分析中采用压电-磁致伸缩类比,根据压电方程和磁致伸缩方程结构的相似性,将磁致伸缩方程中的磁学量类比为压电方程中的电学量,运用压电单元的有限元方程解决磁致伸缩问题^[12]。

2.1 建模

采用有限元分析软件 ANSYS 对复合结构建模并进行分析。根据结构尺寸和材料参数建立有限元模型,如图2所示。弹性基底选用 Solid186 单元,

磁致伸缩和压电材料均采用压电耦合场单元 Solid5 建模。

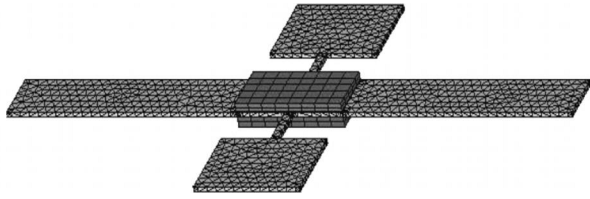


图 2 有限元分析模型

根据压电-磁致伸缩类比关系,对磁致伸缩材料施加磁场激励,类比为对压电材料施加电场激励。将基底单元的支架部分三个方向上的自由度约束为 0,即起固定作用;磁致伸缩单元垂直于其长度方向施加激励;压电单元垂直于极化方向的下表面(与基底粘贴的表面)的电势定义为 0,上表面节点的电势自由度通过耦合操作,使其具有相同的电势,模拟压电片表面的电极。由此,就可以通过对磁致伸缩单元施加激励,观测压电单元上表面的电势,得到仿真结构的磁电转换电压。有限元分析时,先对结构进行模态分析,确定一阶纵向谐振频率,之后在谐振频率附近进行谐响应分析,获得结构一阶纵向谐振时的磁电转换电压。

结构谐振时,如果不考虑阻尼,振幅将达到无穷大,但实际上由于阻尼的存在,振幅是有限的。要使振动问题的分析更接近事实,就必须考虑阻尼。实际中结构的阻尼难以确定,有限元分析时按照各个材料机械品质因数,为各个材料规定材料阻尼。考虑到与真实值的差异,将分析得到的所有磁电转换电压相对其中最大的磁电转换电压求比值,这样就可以给出一个电压变化的趋势,对所设计的结构进行实验前的预测,为结构设计和优化提供依据。

在研究中,磁电复合结构采用具有高机械品质因数的铍青铜材料作为弹性基底,铍青铜密度为 8 260 kg/m³,杨氏模量为 1.34 ×10¹¹ N/m²(0.134 TN/m²),泊松比为 0.35,机械品质因数为 1 000。磁致伸缩(Terfenol-D)和压电材料(PZT-5H)的相关参数^[7,10,13-14],如表 1、表 2 所示。

表 1 Terfenol-D 参数

弹性系数 / 10 ¹⁰ N · m ⁻²	磁致伸缩应力常数 / N · (A · m) ⁻¹	磁导率 / μH · m ⁻¹	机械品质因数	密度 / kg · m ⁻³
c ₁₁ = 8.2				
c ₁₂ = 4.0	11 = 156.8	μ ₁₁ = 6.28		
c ₁₃ = 4.0	21 = 31 = -60.9	μ ₂₂ = 6.28	40	9 200
c ₃₃ = 8.2	53 = 62 = 108.3	μ ₃₃ = 6.28		
c ₄₄ = 3.8				

表 2 PZT-5H 参数

弹性系数 / N · m ⁻²	压电应力常数 / C · m ⁻²	相对电导率	机械品质因数	密度 / kg · m ⁻³
c ₁₁ = 1.26 · 10 ¹¹				
c ₁₂ = 7.95 · 10 ¹⁰	e ₁₅ = 17.0	11 = 313 0		
c ₁₃ = 8.41 · 10 ¹⁰	e ₃₁ = -6.5	22 = 3 130	70	7 500
c ₃₃ = 1.17 · 10 ¹¹	e ₃₃ = 23.3	33 = 3 400		
c ₄₄ = 2.30 · 10 ¹⁰				

2.2 压电片长度对结构磁电特性的影响

在 Terfenol-D 尺寸,铍青铜基底以及 PZT-5H 宽度、厚度确定的情况下,研究 PZT-5H 长度对结构磁电特性的影响。选用 Terfenol-D 的尺寸为 12 mm ×6 mm ×1 mm,PZT-5H 和铍青铜基底与 Terfenol-D 等宽,厚度分别为 0.8 mm 和 0.5 mm。分析基底长度确定的情况下,PZT-5H 长度对结构一阶纵向谐振频率和磁电转换电压的影响。对于不同长度基底,PZT-5H 长度对结构一阶纵向谐振时的磁电转换电压的分析结果,如图 3 所示(基底长度分别取 20 mm、32 mm、48 mm、64 mm、80 mm 和 96 mm)。当 PZT-5H 长度与 Terfenol-D 的长度相等时,不同长度基底的结构均具有最高的磁电转换电压。

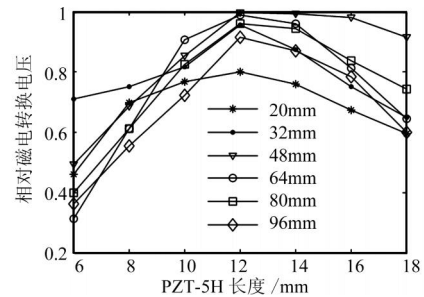


图 3 PZT-5H 长度对结构一阶纵向谐振磁电转换电压的影响

2.3 基底长度对结构磁电特性的影响

考虑到弹性基底与磁致伸缩及压电材料之间的相互作用,对于给定的磁致伸缩和压电材料尺寸,弹性基底应存在一个优化的长度使得结构的磁电转换电压最大。在 PZT-5H 与 Terfenol-D 等长的前提下,研究基底长度对结构磁电特性的影响。PZT-5H 与 Terfenol-D 取相等长度,分别为 4 mm、6 mm、8 mm、10 mm 和 12 mm 时,有限元分析得到的弹性基底长度对结构一阶纵向谐振频率和磁电转换电压的影响如图 4、图 5 所示。

当基底复合磁致伸缩和压电材料构成复合结构后,其一阶纵向谐振频率比无负载的弹性基底会提高,但变化趋势相同,随着基底长度的减小,结构的谐振频率升高。而对于采用不同长度的 Terfenol-D 与 PZT-5H 构成的复合结构,均存在最优的基底长

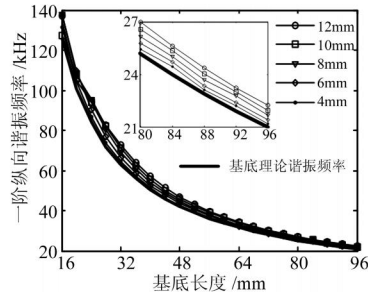


图4 弹性基底长度对结构一阶纵向谐振频率的影响

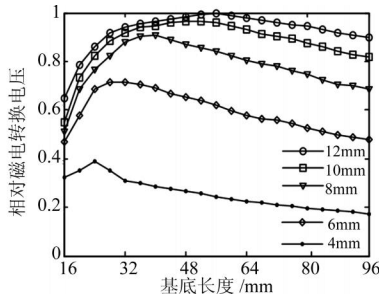


图5 弹性基底长度对结构一阶纵向谐振磁电转换电压的影响度,使结构的磁电转换电压最大。研究表明弹性基底与磁致伸缩及压电材料之间,存在最优的长度比,使结构的磁电转换系数最大,且随着磁致伸缩材料长度的增长,弹性基底与磁致伸缩材料的最优长度比逐渐减小,如表3所示。当 Terfenol-D 与 PZT-5H 的长度为 12 mm 时,基底长度为 56 mm 结构具有最大的磁电转换系数。

表3 弹性基底与 Terfenol-D 的最优长度比

Terfenol-D 长度/mm	4	6	8	10	12
弹性基底长度/mm	24	32	40	48	56
长度比	6	5.33	5	4.8	4.67

3 实验对比

制作如图 1 所示的磁电复合结构, Terfenol-D 和 PZT-5H 样片尺寸分别为 12mm × 6mm × 1mm, 12 mm × 6 mm × 0.8 mm, Terfenol-D 沿其长度方向极化, PZT-5H 沿 31 方向极化。镀青铜弹性基底宽度为 6 mm, 厚度为 0.5 mm。用有机溶剂将样品清洗干净, 然后用环氧树脂粘贴置于烤箱, 在 100 下烘烤 1 h, 取出冷却, 得到复合结构。对复合结构施加平行于 Terfenol-D 长度方向, 800 Oe 的偏置磁场(提高 Terfenol-D 的磁致伸缩系数, 同时避免倍频效果); 采用峰值为 1 Oe, 方向平行于 Terfenol-D 长度方向的正弦变化的磁场激励。几种长度基底结构一阶纵向谐振频率以及磁电转换电压, 如表 4 所示。比较有限元分析结果与实验结果, 有限元分析可以较准确地预测结构的一阶纵向谐振频率和磁电转换电压的变化趋势。

表4 几种长度基底磁电复合结构实验结果

基底长度/mm	28	52	56	60	90
实测磁电转换系数/V · Oe ⁻¹	1.054	1.454	1.490	1.457	1.078
实测谐振频率/Hz	8.420	42070	40066	36327	23320
有限元分析相对电压/V	0.917	0.995	1	0.989	0.918
有限元分析谐振频率/Hz	80626	42980	39628	36748	23236

4 结论

本文利用有限元方法, 对采用弹性基底的磁电复合结构进行了优化分析和设计。针对复合结构一阶纵向谐振模态, 在磁致伸缩材料尺寸, 弹性基底以及压电片宽度、厚度确定的情况下, 研究压电片长度和弹性基底长度对结构一阶纵向谐振时的磁电特性的影响。结果表明, PZT-5H 长度存在最优值, 即与 Terfenol-D 长度相等。在 PZT-5H 和 Terfenol-D 等长的情况下, 弹性基底存在优化长度, 使得结构的磁电转换系数最高, 且随着磁致伸缩材料长度的增长, 弹性基底与磁致伸缩材料的最优长度比逐渐减小。弹性基底的长度影响结构的谐振频率, 通过改变基底长度可以调整结构的谐振频率。经过实验对比, 有限元分析可以较准确地预测结构的谐振频率和磁电转换电压的变化趋势, 为类似结构的设计和优化提供依据。

参考文献:

- [1] Ryu J, Carazo A V, Uchino K and Kim H E. Magnetolectric Properties in Piezoelectric and Magnetostrictive Laminate Composites[J]. Japan. J. Appl. Phys. 2001, 40: 4948-4951.
- [2] Nan C W, Liu L, Cai N, etc. A Three-Phase Magnetolectric Composite of Piezoelectric Ceramics, Rare-Earth Iron Alloys, and Polymer[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81: 3831.
- [3] Wan J G, Liu J M, Chand H L W, etc. Giant Magnetolectric Effect of a Hybrid of Magnetostrictive and Piezoelectric Composites[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(12): 9916-9919.
- [4] Dong Shuxiang, Cheng Jinrong, Li J F, and Viehland D. Enhanced Magnetolectric Effects in Laminate Composites of Terfenol-D/ Pb(Zr, Ti) O₃ Under Resonant Drive[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(23): 4812-4814.
- [5] Dong Shuxiang, Li Jie-Fang, Dwight Viehland. Longitudinal and Transverse Magnetolectric Voltage Coefficients of Magnetostrictive/ Piezoelectric Laminate Composite: Theory [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(10): 1253-1261.
- [6] Li Ping, Wen Yumei, Bian Leixiang. Enhanced Magnetoelec-

- tric Effects in Composite of Piezoelectric Ceramics, Rare-Earth Iron Alloys, and Ultrasonic Horn[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90, 022503.
- [7] Liu Y X, Wan J G, Liu J M, Nan C W. Numerical Modeling of Magnetolectric Effect in a Composite Structure[J]. J Appl Phys. 2003, 94:5111-5117.
- [8] 万红, 谢立强, 吴学忠, 刘希从. TbDyFe/ PZT 层状复合材料的磁电效应研究[J]. 物理学报, 2005, 54 (8): 3872-3877.
- [9] Dong S X, Li J F, Viehland D. Magnetolectric Coupling, Efficiency, and Voltage Gain Effect in Piezoelectric-Piezomagnetic Laminate Composites[J]. Journal of Materials Science, January, 2006, 41(1): 97-106.
- [10] 杨帆, 文玉梅, 李平等. 考虑损耗的/压电层合材料谐振磁电响应分析[J]. 物理学报, 2007, 56(6):3539-3545.
- [11] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 科学出版社, 1987.
- [12] 莫喜平, 朱厚卿, 刘建国等. Terfenol-D 超磁致伸缩换能器的有限元模拟[J]. 应用声学, 2000, 9(4):5-8.
- [13] 南策文. 非均质材料物理-显微结构-性能关联[M]. 科学出版社, 2005, 第一版, 280.
- [14] 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞大. 压电振动[M]. 科学出版社, 1989, 第一版, 301-308.



程 磊(1982-),河北张家口人,2005 年毕业于重庆大学信息工程专业,获学士学位,2008 年 6 月毕业于重庆大学仪器科学与技术专业获硕士学位,研究方向为信息获取和处理,ymwen@cqu.edu.cn



文玉梅(1964-),女,1984 年毕业于北京航空航天大学电子工程系,获学士学位,1987 年航天部第一研究院研究生院毕业获硕士学位,1997 年重庆大学获博士学位。1988 年起在重庆大学光电工程学院工作至今,教授,博士生导师。1999 年至 2000 年英国牛津大学工程系高级访问研究员。主要研究兴趣包括传感器技术,信号(图象)处理,ymwen@cqu.edu.cn