

# 一种新型测磁用传感器的设计与测试

李富安, 黄卫, 刘杰林, 程金标

(中国人民解放军 92557 部队, 广东 广州 510720)

**摘要** 根据磁致伸缩材料的特性,从磁传感器工作原理出发,通过仿真分析研究了结构设计和工艺,并对制作的过程进行了论述,讨论了偏置磁场对此传感器样品的影响,以及在地磁环境下此样品所能测试到的最大精度。

**关键词** 磁传感器;复合材料;偏置磁场

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## Design and Test of a New Sensor for Magnetic Measurement

LI Fu'an, HUANG Wei, LIU Jielin, CHENG Jinbiao

(Unit No. 92557 of PLA, Guangzhou 510710, China)

**Abstract** According to characteristics of magnetostrictive material and working principle of magnetic sensor, this paper analyzes and investigates structural design and process through simulation, and explicates the production process. Then it discusses the effect of bias magnetic field on sample of the sensor, and the maximum accuracy of the sample in geomagnetic environment.

**Key words** magnetic sensor; composite material; bias magnetic field

## 0 引言

目前,磁场的测量有多种方式,比如霍尔效应(Hall-effect)、测试线圈(search coil)、磁通门(flux-gate)、核运动(nuclear precession)、超导量子干涉仪(SQUID)、磁阻效应(magnetoresistive)等。在这些技术中,超导量子干涉仪显示了最强的磁灵敏度 $10^{-13} \sim 10^{-14}$  T,但一般需要工作在液氮或液氦温度下。其它的磁传感器灵敏度一般小于 $10^{-11}$  T<sup>[1]</sup>。

本文采用一种磁致伸缩相(又称压磁相)与压电机械复合新型高精度薄膜磁场传感器技术,从传感器的工作原理出发,论述了制作的过程,并从结构设计和工艺方面进行研究。在材料的选取过程中,由于压电材料 PZT 和铁磁材料 Terfenol-D 的磁电系数很高,且在同体积的复合材料中,能得

到更大的输出电压,能更大程度地提高灵敏度和抗噪声,也能更好地使这类复合材料应用在新型磁传感器的开发中。

## 1 基本原理

磁电效应是指材料在外加磁场中发生电极化响应的现象,或材料在外加电场中发生磁化改变的现象工作原理:在磁场下,上下3片磁致伸缩材料同时伸长或缩短,由于该磁致伸缩材料与压电材料紧密贴合,应变传递给了压电材料,导致压电材料产生形变。在压电效应的作用下,压电材料产生输出电压,通过测量压电材料的输出电压,即图1中的 $V_A$ 和 $V_B$ ,可测出磁致伸缩材料上的磁场大小。

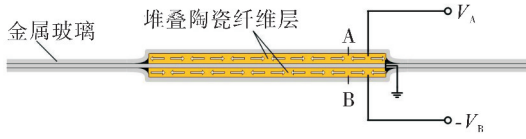


图 1 新型磁场传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of new magnetic field sensor

## 2 磁电传感器的仿真研究

在常见的磁致伸缩/压电层状磁电复合材料中,由于 PZT 陶瓷或者弛豫铁电单晶(如:PMN-PT)极易获取,它们是压电相材料的主要选择。由于其机械谐振处的磁电耦合系数与材料的机械品质因子有关<sup>[2]</sup>,这里只针对复合材料的低频准静态磁电耦合性能进行仿真<sup>[3-4]</sup>。在下面相关的算例中磁致伸缩材料固定为 Terfenol-D,其相关参数如下:压磁系数  $d_{33} = 1.1 \times 10^{-8}$  A/m,恒磁场强度条件下的柔顺系数  $s_{33}^H = 40 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$ 。

应变耦合型 L-T 模式为磁电耦合器件常见的工作模式。L-T 模式的磁致伸缩/压电层状磁电复合材料的典型结构(三明治结构)见图 2。图中  $M$  和  $P$  分别代表磁致伸缩层的磁化方向和压电层的极化方向。磁致伸缩层和压电层的局部坐标系见图 2,其“3”方向均指向各自的极化方向。如图 2 所示,复合材料的总厚度为  $t$ ,单层磁致伸缩材料的厚度为  $t_m = nt/2$ ,其中  $n$  为磁致伸缩层的体积分数,长度为  $l$ ,  $H_3$  为外加磁场强度。

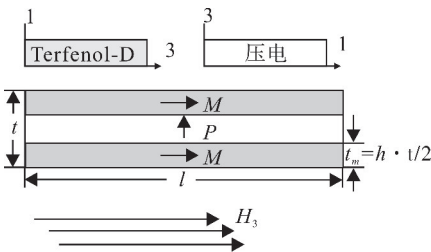


图 2 应变耦合型 L-T 模式层状磁电复合材料的典型结构

Fig. 2 Typical structure of strain coupled L-T mode laminated magnetolectric composite material  
复合材料中磁致伸缩材料的本构方程<sup>[5]</sup>为

$$S_{3,m} = s_{33}^H T_{3,m} + d_{33,m} H_3 \quad (1)$$

$$B_3 = d_{33,m} T_{3,m} + \mu_{33}^T H_3 \quad (2)$$

根据其中压电层的工作模式 ( $g_{31}/d_{31}$  模式),

其本构方程可以写为

$$S_{1,p} = s_{11}^D T_{1,p} + g_{31,p} D_3 \quad (3)$$

$$E_3 = -g_{31,p} T_{1,p} + D_3 / \epsilon_{33}^T \quad (4)$$

式中:下标“ $m$ ”和“ $p$ ”分别代表磁致伸缩相和压电相; $S$ 和  $T$  分别为复合材料中的应变和应力; $s_{33}^H$ 、 $d_{33,m}$ 、 $\mu_{33}^T$  分别是磁致伸缩材料的恒磁场强度条件下的柔顺系数、压磁系数和恒应力条件下的磁导率; $s_{11}^D$ 、 $g_{31,p}$ 、 $\epsilon_{33}^T$  分别是压电材料恒电位移条件下的柔顺系数、压电电压常数和恒应力条件下的介电常数。其力学边界条件可表达为

$$S_{1,p} = S_{3,m} \quad (5)$$

$$(1-n) \cdot T_{1,p} + n \cdot T_{3,m} = 0 \quad (6)$$

边界条件方程式(5)描述了应变耦合型层状磁电复合材料的力学耦合特征。在开路条件下,压电相材料的电位移  $D_3$  为 0。联立上述方程及边界条件,可得 L-T 模式的层状磁电复合材料的磁电电场系数表达式为

$$\alpha_{E,31} = \left| \frac{E_3}{H_3} \right| = \left| \frac{nd_{33,m}g_{31,p}}{(1-n)S_{33}^H + n \cdot s_{11}^D} \right| \quad (7)$$

式(7)表明该模式的层状磁电复合材料的磁电电场系数随磁致伸缩相体积分数  $n$  单调递增,当  $n$  趋近于 1 时,其磁电电场系数获得最大值:

$$\alpha_{E,31}^{\text{Max}} = \left| \frac{d_{33,m}g_{31,p}}{S_{11}^D} \right| \propto \left| \frac{g_{31,p}}{S_{11}^D} \right| \quad (8)$$

根据式(8),选取了一系列典型的压电材料,计算用它们复合而成的 L-T 模式层状磁电复合材料能获得的最大磁电系数,其相关性参数见表 1。计算结果在图 3 中做了比较,可以看出对于 L-T 模式的层状磁电复合材料,要使其磁电电场系数最大,压电单晶是最佳选择(36.6 V/cmOe),但如果要兼顾材料成本的话,硬性压电陶瓷 PZT-4 和 PZT-8 也是压电相材料的不错选择(10 V/cm · Oe)。式(8)显示了 L-T 模式的层状磁电复合材料能获得的最大磁电电场系数与其压电相材料的压电电压系数与恒电位移条件下的柔顺系数的比值成正比,而非单纯与压电电压系数成正比<sup>[6-7]</sup>。这就导致 PVDF 虽然具有很高的压电电压系数,但是高分子材料的材质使得其柔顺系数相对于其他压电材料来说也都高 1 个数量级,所以反

而不适合作为这种模式的磁电复合材料中压电相材料的候选。

表 1 几种典型压电材料的性能参数

Table 1 Performance parameters of several typical piezoelectric materials

压电材料	$g_{31,p}/$ ( $10^{-3} \text{V} \cdot \text{m}/\text{N}$ )	$S_{11}^p/$ ( $10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$ )	$ g_{31,p}/S_{11}^p $ ( $10^9 \text{V}/\text{m}$ )
PVDF	-200	325.5	0.614
PZT-5H	-9.11	14.1	0.646
PZT-5A	-11.4	14.4	0.792
PZT-4	-11.1	10.9	1.018
PZT-8	-10.9	10.1	1.079
PMN-PT	52.7	12.6	4.183

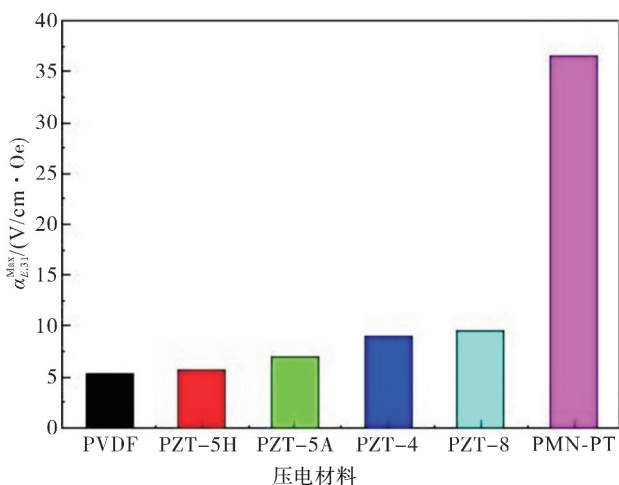


图 3 各种不同压电材料获得的最大磁电电场系数

Fig. 3 Maximum magnetolectric field coefficient obtained from various piezoelectric materials

在此传感器的制作过程中,我们关心的是磁电复合材料的磁电电压系数,即单位磁场激励下的输出电压。在固定层状复合材料的厚度为 3 mm 的情况下,几种压电材料复合的 L-T 模式层状磁电复合材料的磁电电压系数  $\alpha_v = (1-n)\alpha_E$  与磁致伸缩相体积分数的关系,如图 4 所示。结果显示压电单晶的优势依然很明显,其复合的磁电材料的最大磁电电压系数达到 1.42 V/Oe,是其它压电材料的至少 4.5 倍。

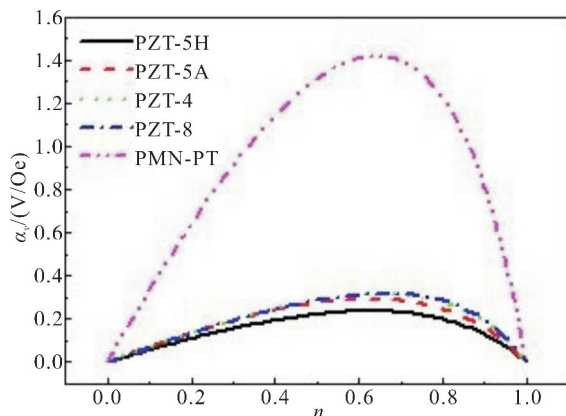


图 4 磁电电压系数与磁致伸缩相体积分数的关系

Fig. 4 Relation between magnetolectric voltage coefficients and volume fraction of magnetostrictive phase

### 3 制作与测试

#### 3.1 样品的制作

本实验所使用的压电材料为极化过的 PZT 材料,大小为 45 mm×7 mm×0.5 mm,磁致伸缩材料为金属玻璃 Metglas,厚度为 25 μm,将 Metglas 磁致伸缩材料裁剪成合适的大小。用棉签蘸取酒精将表面的记号及油污清洗干净,阴干备用。

将配胶板用酒精清洗干净,阴干,用电子天平将环氧树脂粘接胶的 AB 胶按 5:1 严格调配。转移到配胶板上,搅拌 5 min 使得胶水完全混合充分。

将配好的胶均匀的涂抹在磁致层上,覆盖压电层,轻轻压平,再次涂胶,压上另外一磁致层,轻压平整。然后将 3 层样品放在 2 层玻璃板中,用夹子夹好,使样品在压力作用下放置 24 h,使得其中的胶完全固化。注意使压电层的一端露出 2 mm,便于接电极。

将压好的样品从夹子中取出,在露出压电层的一端上下 2 面焊上电极,并要将导线编成双绞线,以减少外界的电磁干扰。并稍稍固定导线,以免不慎将电极拉扯下来。

#### 3.2 测试与讨论

步骤 1. 利用扫频法测试不同偏置磁场对磁电耦合系数随频率的变化。具体方法:1) 调节信号发生器输出信号峰峰值,使得输出的交变磁场为 0.01 Oe,固定 1 个偏置磁场,改变信号发生器的输

出频率,验证在固定偏置磁场下,磁电耦合系数跟频率的关系。频率由 1 kHz 测试到 60 kHz。2) 改变偏置磁场大小,重复上一个过程。

步骤 2。在非谐振频率下,测试偏置对磁电耦合系数的影响。固定信号发生器输出信号频率 25 kHz、33 kHz,固定信号发生器的峰峰值,使得偏置电压为 0.01 Oe。改变直流电源的电流值,得到不同的直流偏置,这样可以测得不同偏置下磁电耦合系数随偏置的变化关系。

步骤 3。在谐振频率下,测试偏置对磁电耦合系数的影响。固定信号发生器输出信号频率值 34 kHz(由步骤 1 得到),固定信号发生器的峰峰值,使得偏置电压为 0.01 Oe。改变直流电源的电流值,得到不同的直流偏置,这样可以测得不同偏置下磁电耦合系数随偏置的变化关系。

#### 4 实验结果与讨论

测试中固定交流磁场大小设定为 0.01 Oe,频率为 5 kHz。随着偏置磁场的增加,磁电耦合系数先增加后减小。最佳的直流偏置磁场大小为 20 Oe。图 5 为磁电耦合系数随外加直流偏置磁场的变化情况。

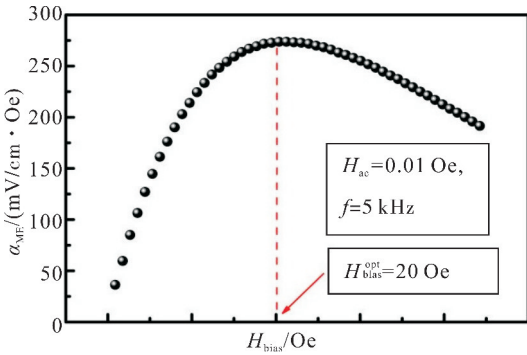


图 5 磁电耦合系数随外加直流偏置磁场大小的变化  
Fig. 5 Magnetoelectric coupling coefficient varies with applied DC bias magnetic field

测试中将交流磁场的大小设定为 0.01 Oe,直流偏置磁场的大小为 20 Oe。磁电传感器的谐振频率为 34 kHz,磁电耦合系数的变化成正态分布,谐振峰处的磁电耦合系数达到了 10 V/cm · Oe。图 6 为磁电耦合系数随外加交流磁场频率的变化情况。

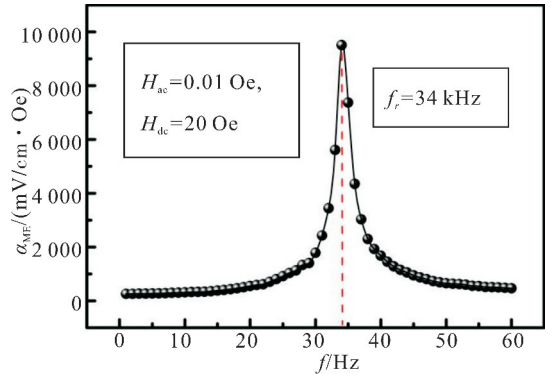
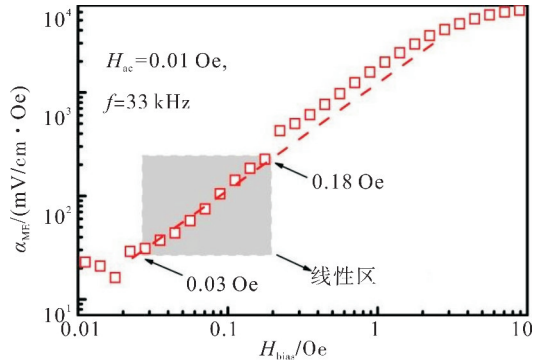
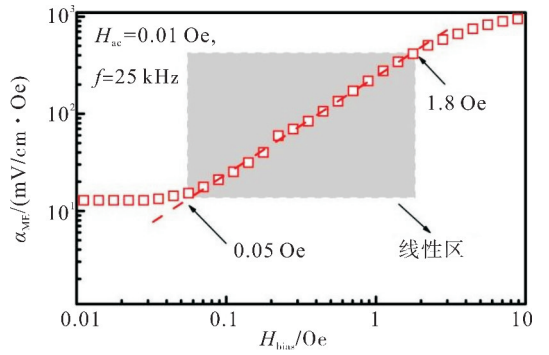


图 6 磁电耦合系数随外加交流磁场频率的变化  
Fig. 6 Magnetoelectric coupling coefficient varies with frequency of applied AC magnetic field

在交流磁场的大小设定为 0.01 Oe,频率分别为 25 kHz、33 kHz、34 kHz(谐振)的条件下,磁电耦合系数随所加交流磁场的变化而变化。图 7 为弱直流磁场下,磁电耦合系数随加交流磁场频率的变化。可以看到探测弱磁场的极限为  $3 \times 10^{-6}$  T。需要注意的是,本实验室由于没有磁屏蔽设备,所有测试均在地磁环境中测试,而地磁大小为  $5 \sim 6 \times 10^{-5}$  T,这也是本样品的测试中器件对外加直流磁场的探测精度无法进一步提高的主要原因<sup>[8]</sup>。





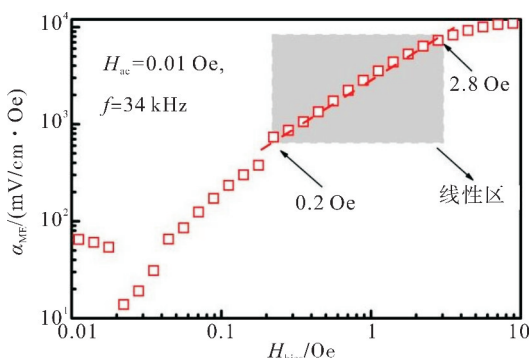


图7 弱直流磁场下磁电耦合系数  
随外加直流偏置磁场大小的变化

Fig. 7 Magneto-electric coupling coefficient  
varies with applied DC bias magnetic field  
under weak DC magnetic field

## 5 结束语

对一种新型的测磁传感器,从材料、结构、工艺等方面进行了介绍,选用磁电复合材料,并用环氧树脂粘结,制作了样品,并在不同偏置磁场情况下进行测试,通过理论分析和实验对比得出结论:1)随着偏置磁场的增加,磁电耦合系数先增加后减小;2)本样品的测试过程中,受地磁环境的影响较大,导致测量精度无法提高,需要在下一步工作中解决。

## 参考文献

- [1] 阳昌海,文玉梅,李平,等. 偏置磁场对磁致伸缩弹性压电层合材料磁电效应的影响[J]. 物理学报,2008, 57(11):7292-7297.
- [2] DONG S X, LI J F, VIEHLAND D. Magneto-electric coupling, efficiency, and voltage gain effect in piezoelectric piezomagnetic laminate composites[J]. Material Science, 2006, 41(1): 97-106.
- [3] 张纳,王博文,李淑英,等.磁致伸缩、压电层状复合磁电传感器非线性动态有限元模型[J]. 电工技术学报,2012,27(7):146-152.

- [4] 张纳,王博文,李淑英,等.基于磁场传感器的层状磁电复合材料动态特性的有限元模型研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1528-1534.
- [5] LIU G, ZHANG C L, DONG S X. Magneto-electric effect in magnetostrictive/piezoelectric laminated composite operating in shear-shear mode[J]. Journal of applied physics, 2014, 116: 074104.
- [6] GUO M S, DONG S X. Annul arbilayer magneto-electric composites: theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(2): 480- 489.
- [7] XING Z P, ZHAI J Y, DONG S X, et al. Modeling and detection of quasi-static nano tesla magnetic field variations using magneto-electric laminate sensors[J]. Meas. Sci. Technol., 2008, 19(1): 015206.
- [8] DONG S X, UCHINO K, LI L T, et al. Converse magneto-electric effect in laminated composite of met-glas and Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> with screen-printed interdigitated electrodes[J]. AIP Advances, 2014, 4: 067105.