

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目: 基于磁电效应的非接触式线-角

位移传感器研究

学生姓名:	
学生学号:	5092019024
专业:	机械工程及自动化
指导教师:	杨斌堂 教授
学院(系):	机械与动力工程学院



基于磁电效应的非接触式线-角位移传感器研究

摘要

随着现代科技的发展,信息社会三大支柱中的信息采集技术作为薄弱一环越来越限制了社会科技 生产进步。传感技术亟待提高。特别是伴随着高精密和微型化的发展方向。传统的位移传感器已经不 能满足实际需求。本文从磁电效应的乘积特性出发,将两种类型的智能材料(磁致伸缩材料和压电材 料)相结合,提出了一种新型位移传感机理。以两种材料的本构方程为基础,在现有条件下充分考虑了 其非线性特征,并基于此,建立了传感过程的模型。利用超磁致伸缩材料和压电陶瓷/PVDF/EFMi设计 了两套原型样机和一套测试系统平台。以数学模型和实验平台为基础,充分利用 LabVIEW 虚拟仪器 平台进行了仿真和实验设计。初步进行了一维线位移、角位移和两维平面运动的测试实验,取得了令 人满意的效果。其中,一维线位移测量实现了 990 nm 的分辨率,而角位移测量实现了 0.013°的分辨 率。同时,将实验结果数据与仿真数据进行比对,验证了传感机理的可行性与传感器结构的合理性。本 研究为未来进一步优化复合材料的结构和拓展测量维度奠定了基础。

I

关键词:磁电效应,精密传感,线-角位移测量,非线性模型,LabVIEW 实验与仿真



STUDY ON A NOVEL NON-CONTACT TRANSLATION-ROTATION SENSOR BASED ON MAGNETOELECTRIC EFFECT

ABSTRACT

Information acquisition technology, as a gap in the three pillars of information age, which has restricted the productivity progress advancement, has to be enhanced urgently. Especially accompanied by the trends of high precision and miniaturization in industry, traditional displacement sensor cannot meet the actual demand, given their compact structure and single measurement feature. With the concept of magnetoelectric effect, this thesis proposes a novel non-contact translation-rotation sensor (Nc-TRS) combining two kinds of smart material, namely magnetostrictive material and piezoelectric material. To begin with the constitutive equation of the materials, we build mathematical model of the sensing mechanism, most factors taken into fully consideration including non-linear character on current condition. We design and produce two prototypes with giant magnetostriction material (GMM) rod and three kinds of piezoelectric material (PZT, PVDF and EFMi). Based on the mathematical model and experiment platform, simulation and several experiment are executed with the assistance of LabVIEW, including one-dimensional linear and angular displacement, two-dimensional in-plane displacement. Satisfactory result has been achieved, by current study, our Nc-TRS has realized the resolution of 990 nm and 0.013 °. The experiment matches well with simulation, which proves the sensing mechanism to be feasible. This study lays a foundation for optimizing the Nc-TRS structure and expanding its measuring dimensions.

Key words: Magnetoelectric effect, high-precision sensing, translation-rotation measurement, non-linear modeling, simulation and experiment with LabVIEW



	=
	W
н	~

第一章 绪论	1
1.1 自动化系统与传感技术	1
1.2 位移传感技术及发展概述	1
1.3 磁电效应与磁电复合材料	2
1.4 新型非接触式线—角位移传感器概念设计	3
1.4.1 磁致伸缩效应与超磁致伸缩材料	3
1.4.2 压电效应与压电材料	4
1.5 基于 GMM/PZT 磁电效应的非接触式线-角位移传感器设计	5
1.6 研究内容	6
本章小结	6
第二章 超磁致伸缩材料和压电材料特征及系统理论模型	7
2.1 超磁致伸缩材料特性与非线性特征	7
2.1.1 磁致伸缩的唯象理论	7
2.1.2 磁滞和饱和特性与非线性特征	8
2.1.3 超磁致伸缩材料位移建模	9
2.2 压电材料特性与系统模型建立	11
本章小结	12
第三章 传感器测试系统设计、建模与仿真	13
3.1 磁场强度的确定	13
3.2 LabVIEW 仿真	14
3.3 单一传感器仿真	16
3.3.1 单一传感器线位移仿真	16
3.3.2 单一传感器角位移仿真	17
3.4 双传感器两自由度线位移仿真	19
本章小结	24
第四章 样机设计制作	25
4.1 位移模块	25
4.2 传感器主体部分	25
4.2.1 第一代传感器样机	26
4.2.2 第二代传感器样机	27
4.3 实验半台	
4.4 永磁体材料	29
4.5 信号米集模块	
4.5.1 电压信号米集	
4.5.2 位移信号米集	
4.6 数据米集与处理半台	
本草小结	
第九草 头验结果与分析	
5.1 第一代原型拜机实验结果	
5.1.1 弟一代原型杆机线位移头验结果	
5.1.2 弟一代尿型杆机用位移头验结果	
5.2 第二代原型拜机测试	
5.3 二维直线运动检测	42

本章小结	45
第六章 总结与展望	
6.1 论文总结	46
6.2 展望	
参考文献	
谢辞	



第一章 绪论

随着云技术如火如荼的发展,大数据(Big Data)也开始受到更多的关注,而所谓大数据,指的 海量数据的存储,处理和分析,其核心特征是数据的海量化、速度化、多样化和真实性(Volume、 Velocity、Variety、Veracity,4V)^[1]。海量数据的获取需要借助于多样化的来源,其中一个重要的分 支就是遍布于手机、电脑、汽车等设备以及其他各处的传感器。身处一个信息时代,信息采集技术已 经同信息处理技术和通讯技术一起成为信息技术的三大支柱。确切地讲,信息的采集与获取是大数据 和信息系统的开端,传感技术是信息采集技术的主体内容。

近年来,随着计算机和网络技术的进步,信息处理和通讯技术已经有了长足发展,而信息采集技术亦即传感技术则呈现出相对滞后的趋势。发展传感技术,满足信息时代的要求,是社会进一步发展的迫切要求。

1.1 自动化系统与传感技术

典型的自动化和测试系统主要包含三个模块:控制器、作动器和传感器。其中,控制器将来自输入和反馈的信号施加给作动器,作动器负责执行控制器的指令,而传感器则是联系被控量与输入量的桥梁,它负责将作动器的执行情况反馈给执行器,以修正被控量与输入量之间的误差,最终达到预期的控制精度。



1.2 位移传感技术及发展概述

从微观的角度来看,现代科技正向着微型化、超精密的方向发展,随着微纳米技术的兴起,对位移传感的要求也越来越高。特别是在芯片制造、超精密加工、MEMS系统和微振动测试系统等领域,都迫切地需要更加精确的位置控制。精密位移控制和传感技术已经成为前沿科学和工程技术领域的关键技术之一。

位移测量从被测量来的角度可分为线位移测量和角位移测量;从测量参数特性的角度可分为静态 位移测量和动态位移测量。许多动态参数,如力、扭矩、速度、加速度等都是以位移测量为基础的。 位移测量的本质是将位移信号通过某种介质或方法转换为方便可测的物理量的过程,根据这一原理, 常见的位移传感器类型有电阻式、电感式、电容式、霍尔组件、感应同步器、光栅、磁栅和角度编码 器等。

但是现有的传感器都或多或少存在一些不足,以电阻电容式传感器为例,存在传感精度不高,受 外界影响大的缺点。而精确度更高的传感器如激光位移传感器和光栅尺则价格较贵,结构复杂,不便



安装,且都是接触式的,测量范围也存在限制。此外,最重要的一点是现有传感器单一的测量特性,即在一种结构下只能实现单一的线位移或角位移的测量。

1.3 磁电效应与磁电复合材料

磁电效应(Magnetoelectric effect, ME)的概念最早是由 P. Curie 在 1894 年推测并提出的^[2],而事 实上 Magnetoelectric 这个词直到 1926 年才被 P. Debye 创造出来^[3]。它指的是材料在磁场影响下被电极 化的现象。1961 年 G.T.Rode 和 V.J.Folen 证实了逆磁电效应的存在^[4]。

1972 年 J. van Suchtelen 最早制备了磁电复合材料,并引入了乘积效应(Product tensor property)的概念^[5]。1974-1976 年 Philips 实验室利用 J. van Suchtelen 的发现制备出了室温下磁电电压系数达到 0.13 mV/cm.Oe 的磁致伸缩-压电相磁电复合材料^[6,7],比单相磁电材料高了两个数量级。1990s Newnham 等采用烧结的方法制备了颗粒固相磁电复合材料^[8]。不过值得注意的是,固相烧结磁电复合材料的磁电转换系数最初是比 Philips 实验室的成果要弱,但是却由此推动了磁电复合材料的理论研究,开发了新型的结构,其中 2-2 层状复合材料的磁电电压系数达到了数百个 mV/cm.Oe 的水平。2001 年 Terfenol-D 的出现极大的带动了磁电复合材料的发展。2002 年,南策文发展了三相的磁电复合材料^[9]并由此引出了一系列问题。董蜀湘等发展了层状磁电复合材料的各种形式和理论^[10]。

磁电复合材料的制备工艺包括原位复合、固相烧结、聚合物固化、薄膜和层状等,其制备工艺也 体现了结构形式。其中,磁电耦合系数相对较高、也是目前研究趋势的是层状磁电复合材料。

主要的研究方法有数学上的格林函数法^[11]、控制工程中的状态空间法^[12,13]以及电子电路中的等效 电路法^[10,14]。等效电路法是用数字技术模拟磁电复合材料内部的磁-机械耦合关系用等效电路的形式表 现出来,这种方法比较适合模拟层状磁电材料的磁电感应行为。

根据南策文的观点,在未来,磁电复合材料的主要发展发展方向和潜力在于优化材料的结构和制备工艺,努力实现微尺度级材料的研制。此外,一个迫切的问题为,当前的研究主要集中于材料层面,需要有更多具有应用潜力和应用价值的产品被开发出来^[15]。



图 1-2 典型层状磁电复合材料结构形式

资料来源: NAN C-W, BICHURIN M, DONG S, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(3)



1.4 新型非接触式线一角位移传感器概念设计

基于上述传感器形式诸多不利因素,尤其是单一测量特性的局限性,我们设计了一种基于磁电效应的新型非接触式线—角位移传感器(Non-contact translation-rotation sensor, Nc-TRS)^[16]。传感基于乘积特性,将位移与磁场联系,通过磁致伸缩材料和压电材料的复合磁电效应将磁场信号转换为电信号输出。现将详实的原理阐释如下。

1.4.1 磁致伸缩效应与超磁致伸缩材料

磁致伸缩效应(Magnetostrictive effect)指的是对软磁体进行磁化后,其形状、大小会发生变化的物理现象效应,它最早是在 1842 年被焦耳(J.P.Joule)发现的,因此又被成为焦耳效应^[17]。此后不久的 1865 年,维拉里(E.Villari)又发现了磁致伸缩的逆效应,即铁磁体发生变形或受到应力的作用要引起材料的磁化状态变化的现象^[18]。磁致伸缩逆效应于磁致伸缩效应一起,表征了铁磁体的形变与磁化之间的密切关系。

根据磁畴理论,当单畴晶体从居里温度以上冷却下来以后,交换力会使晶体发生自发磁化,同时, 晶体形状改变。当无外部磁场时,大量磁畴的磁矩方向是随机的,因此不表现出宏观形变;而一旦有 外部磁场诱发,大量磁畴的磁矩则趋向外磁场方向,宏观形变由此产生。



图 1-3 磁致伸缩材料磁化过程

资料来源: 贾振元, 郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用 [M]. 科学出版社, 2008.

1.4.1.1 正/逆磁致伸缩效应

铁磁体的磁致伸缩可分为两种: 一种是线磁致伸缩,表现为铁磁体在磁化过程中具有线度的伸长 与缩短,线磁致伸缩系数通常用 λ 表示, $\lambda=\Delta L/L$,其中L为铁磁体的长度, ΔL 为铁磁体长度L方向上 的伸长量, λ 有±,分别对应于正/逆磁致伸缩效应;另一种是体磁致伸缩,表现为铁磁体在磁化过程 中发生体积的膨胀或收缩,体磁致伸缩系数用 ω 表示, $\omega=\Delta V/V$,其中V为铁磁体的原始体积, ΔV 为 铁磁体磁化后的体积变化, ω 有±,分别对应于正/逆磁致伸缩效应。体磁致伸缩通常很小,大量的研 究工作和工程应用主要集中在线磁致伸缩领域,因此,在无特别说明的情况下,磁致伸缩一词通常是 指线磁致伸缩。

1.4.1.2 超磁致伸缩材料

超磁致伸缩材料(Giant Magnetostriction Material, GMM)指的是 1970s 发展起来的一系列磁致伸缩系数比较大的新型材料。自从磁致伸缩效应被发现以来,人们对磁致伸缩效应的研究就没有停止, Joule 最早发现的是 Ni,其应变量与热膨胀系数差不多,约为 10⁻⁵~10⁻⁶,其使用范围仅限于超声换能器 方面。1960s 初 Legvold^[19]、Clark^[20]等相继发现稀土材料具有异常的磁性,特别是重稀土材料 Tb 和 Dy 在 4.2K 的低温时可以表现出巨大的磁致伸缩效应(系数高达 8×10⁻³,被称为超磁致伸缩现象。对 超磁致伸缩材料的研究自此展开。Koon^[21]和美国水面武器研究中心 Savage, Clark 等^[22]分别发现了 TbFe₂、DyFe₂、和 SmFe₂等具有 Laves 相的化合物,这些化合物具有较高的居里温度,在室温条件下 表现出极好的磁致伸缩效应,其饱和磁致伸缩系数是 Fe、Ni 等传统磁致伸缩效应的 100 倍左右。 1974年, Van Den Boomgaard J等人^[6]成功开发出在常温下显示出巨大磁致伸缩系数而异性常数 K 几乎为零的三元稀土合金材料 TbDyFe,并使其逐步走向实用化。从 1970s 中期开始,研究人员在研究 不同材料及结构对磁致伸缩系数的影响的同时,也开始展开了对 GMM 的制备工艺研究。终于,在 1987年,GMM 实现了商品化生产,典型成分为 TbxDy₁-xFe₂-y,其中 x 表示 Tb/Dy,一般为 0.27~0.35; y 表示 R/Fe,一般为 0.1~0.05。最典型的牌号为 Terfenol-D: Ter 表示元素 Tb (Terbium); fe 表示元素 Fe (Ferrum); nol 代表 Naval Ordinance Laboratory; D 表示 Dy (Dysprosium),表明加入 Dy 后磁 晶各向异性变小。

同传统的磁致伸缩材料相比,GMM 具有独特的性能:室温下的磁致伸缩应变量很大 (1500~2000ppm);能量密度高(14000~25000J/m³);机磁(电)耦合系数大;响应速度快(达到 µs级别);输出力大,可达220~800N;频率特性好,频带宽,可在几十至二十千赫兹的频率范围内 工作;温度稳定性好,可靠性高,无过热失效问题;可承受高到200MPa的压力等^[23]。

性能	Terfenol-D	Ni	PZT
化学成分	Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe _{1.93}	Ni>98%	锆钛酸铅
杨氏模量 E/Gpa	25~35	320	73
压缩强度 σ _c /Mpa	700	-	-
热膨胀系数 α/(×10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	12	13.3	10
伸缩应变 ε/ppm	1500-2000	-40	250
		8.9×10	
密度 p/(kg/m³)	9.25×10 ³	3	7.5×10 ³
能量密度 ω/(J/m ³)	14000~25000	30	960
居里温度(T _c /℃)	380	354	300
		0.16~0.	
机磁(电)耦合系数 k	0.72	25	0.68

++			He Thi	Add.	┶┶	ようわら	1+.	Let.	114	بد ا
₹	1-	1	血切	44 7	出不	てわし	·宋芊'	ΓŦF	HY.	£Υ
\overline{v}	÷	_	77 E			J /1~1			~~	고스

1.4.2 压电效应与压电材料

上海交通大学

压电效应(Piezoelectric Effect)指的是存在于特定的电介质材料中的一种机械能与电能相互转换 效应,其最早是由居里兄弟(Pierre Curie 和 Jacques Curie)在 1880 年于一种单晶体(电气石)中发现 的。首先被发现的是正压电效应(Direct piezoelectric effect),次年即 1881 年,居里兄弟通过实验验证 了逆压电效应(Inverse piezoelectric effect)的存在,并进一步获得了正逆压电常数^[24]。

1.4.2.1 正/逆压电效应

当对压电材料施以物理压力时,材料体内的电偶极矩会因压缩而变短,为抵抗这种变化,压电材料会在相对的表面上产生等量正负电荷以保持原状。从本质上来讲,正压电效应实际上是机械能转换为电能的过程。

$$P = \mathrm{d}\sigma \tag{1.1}$$

其中, P为晶体的电极化率(C/m^2), d为压电常数(C/N), σ 为应力, 单位是 N/m^2 。

相反,当在压电材料表面施加电场时,因电场作用,电偶极矩会被拉长,为抵抗这种变化,压电 材料会沿电场方向而伸长。逆压电效应本质上是电能转换为机械能的过程。

$$S = d_t E \tag{1.2}$$

其中,S为压电材料的杨氏模量,dt为压电常数(m/V),E为电场强度矢量(V/m)。

1.4.2.2 常见的压电材料

压电效应的获得原因在于电介质中晶格内原子间特殊排列方式,使得材料有应力场与电场耦合的 效应。按材料的结构可分为压电单晶体、压电多晶体、压电聚合物和压电复合材料四种。

第4页 共50页



在 1942 年发现钛酸钡(BaTiO₃)具有压电性质后,科学家陆续发现陶瓷类的钛酸铅、锆钛酸铅(Lead zirconate titanate, PZT)及单晶类的铌酸锂、铌酸钾、石英、电气石、罗德盐(Rochelle salt, Potassium sodium tartrate)与薄膜类的氧化锌等都具有压电的特性。此外,天然的高分子中亦有一些物质具有此种性质,如骨骼、聚氨基酸、DNA、木材等。人工合成的聚合物中的聚氯乙烯、聚偏氟乙烯、聚偏氟氯乙烯等也具有较强的压电性能。

传统的压电材料以钛酸钡及锆钛酸铅等无机陶瓷材料为主。压电陶瓷材料具有体积小、反应快速、 位移消耗功率低等特色,但使用上仍有限制(如材质易脆等),因为虽然陶瓷材料可以承受较大的正 向应力,但是当它承受不均匀的应力时,材料的结构则很容易受到破坏。近年来以聚偏氟乙烯

(Polyvinylidene, PVDF)为代表的有机高分子材料最受注目,PVDF高分子聚合物的强压电效应是 在 1969 年在不经意的情况下发现的。PVDF具有压电效应是因分子链的构形(Conformation)不同而 有各种结晶型态,其中 β型的分子链是反式)的锯齿状(Zigzag)排列,由于此分子链上 CF₂偶极

(Dipole)在同一方向相互平行而产生自发性分极的极性结晶构造。当对此 PVDF 结晶的某一方向施加压力而产生形变时,偶极的大小及方向也随之变化,因此电荷量也随之变化,而产生电压。

PVDF 高分子压电材料具有以下的特点:

- 1) 成型加工简单,可制成超薄而面积大的薄膜;
- 2) 具有可屈挠性及耐冲击性;
- 3) 音响阻抗小,很接近水及生物体值;
- 4) 可局部产生压电效果等。

1.5 基于 GMM/PZT 磁电效应的非接触式线-角位移传感器设计

基于当前传感技术的发展,以及对一种综合性能优异(高精度、分辨率高、安装方便、成本低等)、特别是能综合线位移测量和角位移测量两种测量特性的位移传感器的需求,借助于上述两种智能材料的可喜特性,我们设计了一种非接触式线-角位移传感器(Non-Contact Translation-Rotation Sensor, Nc-TRS),其实现位移传感功能的原理图如下。



图 1-4 非接触传感线-角位移传感器传感原理图

首先,我们将磁致伸缩棒(GMM rod)和压电片(PZT/PVDF/EMFi)用 L-T hybrid 的模式连接在一起,通过一个固结在被测物体上的永磁体,可以将被测物体的位移量转换为磁致伸缩棒对磁场感应强度的变化,这一感应强度的变化通过 GMM 变化为机械能的输出(位移或应力的形式),这一机械能通过边界进一步传递给压电片并经由压电片转换为电荷量的输出。至此,通过这种传感装置完成了位移量到方便可测的电荷量的转换过程。



这种传感机理事实上是乘积效应(Product tensor property)的利用。如上文所述, Van Suchetelen 为了区分磁电单相材料和复合相材料的磁电效应,首次引入了乘积效应的概念^[5]。

磁电效应 = K ×
$$\frac{\overline{\text{dd}}}{\overline{\text{dt}}}$$
 × $\frac{\overline{\text{dt}}}{\overline{\text{dt}}}$

其中 K 为磁电耦合系数,K=k₁×k₂×x×(1-x),其中 k₁和 k₂是因两相材料相互稀释而引起的各单相特性的减弱系数,x 和 (1-x)为复合材料中铁磁相和铁电相的体积分数。

在层状磁电复合材料中,因为包含了磁致伸缩层和压电层,复合材料的磁电效应是基于磁致伸缩 层的磁-弹性耦合和压电层的电-弹性耦合效应的基础上实现的,因此其研究设计磁场、电场以及弹性 场之间的相互耦合关系、各组元的性质、组份配比关系、界面耦合状态等多种机械和物理属性。

鉴于课题时间的关系以及正处于探索阶段,我们采用的是最普通的 L-T hybrid 模式,将一条沿轴向磁化的磁致伸缩棒与一片极化方向与之垂直的压电片通过预应力机械耦合,超磁致伸缩材料和压电材料之间无第三方连接介质(假设其理想耦合,K=1)。

在此基础之上,我们设计了 Nc-TRS 的第一代原型样机和第二代原型样机。其中,第一代原型样机采用的压电材料为块状的压电陶瓷传感器,第二代原型样机采用的了 PVDF 和一种更新型的压电薄膜 EMFi。

1.6 研究内容

在对磁电效应的研究现状回顾以及相关文献综述的基础上,确定了本论文的研究重点,即基于磁电效应的非接触式线-角位移传感器设计。利用上海交通大学机械振动与噪声国家重点实验室现有的实验 设备和实验条件,根据毕业设计任务书的要求,本论文讲就以下内容进行研究。

- 1. 基于超磁致伸缩材料和压电材料的特性,充分考虑其非线性特征,建立传感机理的数学模型。
- 2. 基于实验系统的设计与磁场分布状况,建立整个实验系统的数学模型,并利用 LabVIEW 进行实验仿真。
- 3. 选用合适的模块实际搭建实验平台。
- 对传感器进行相关测试,分别进行单自由度线位移、角位移测试实验和两自由度平面内运动 测试实验,将实验结果与仿真结果相比对,并进行相关讨论。

本章小结

从信息社会和大数据时代出发,考察了传感技术的重要性。并在自动化基础之上提出了新型位移 传感器的需求。介绍了实现传感的两种智能材料,并由此引出了磁电复合材料的研究概述。提出了新 型线-角位移传感器的传感机理,即基于乘积特性,完成从磁(与位置信号绑定)到电的转换。



第二章 超磁致伸缩材料和压电材料特征及系统理论模型

2.1 超磁致伸缩材料特性与非线性特征

2.1.1 磁致伸缩的唯象理论

晶体的物理性质通常由可测的各物理量之间的关系来表征。磁致伸缩材料作为一种磁性晶体,其 磁、机械和热力学性质之间的关系相对较强。其中一些物理量可以视为"广义力",譬如温度、应力、 磁场强度;而另外一些物理量可视为由这些"广义力"作用产生的"广义位移",譬如熵、应变和磁 感应强度^[23]。



图 2-1 磁性晶体各物理量之间的关系

资料来源:王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计[M]. 冶金工业出版社, 2003.

对于磁致伸缩材料,我们选择 H、 θ 、 σ 作为独立变量,B、S*、 ϵ 作为因变量,相应的热力学方程的积分形式为

$$\varepsilon = s\sigma + d_T H + \alpha \Delta \theta \tag{2.1}$$

$$B = d\sigma + \mu H + p\Delta\theta \tag{2.2}$$

$$\Delta S^* = \alpha_T \sigma + p_T H + (c/\theta) \ \Delta \theta \tag{2.3}$$

其中, s 是恒磁场、恒温下的弹性柔顺系数矩阵; d 是恒应力、恒温下磁致伸缩系数矩阵; p 是恒磁场、恒应力下热转换系数矩阵; α 是恒磁场、恒应力下的热膨胀系数矩阵; μ 是恒应力、恒温下的磁导率系数矩阵; c 是恒应力、恒磁场下的单位体积的热容量。

若磁致伸缩材料在工作时处于恒温状态(Δθ=0)或温度变化不大(Δθ≈0),则上式简化为



$$\varepsilon = s^{H} \sigma + d_{T} H \tag{2.4}$$

$$B = d\sigma + \mu^{\sigma} H \tag{2.5}$$

其中,s^H是恒磁场下的柔顺系数矩阵; μ^{σ} 是恒应力下的磁导率系数矩阵;磁致伸缩系数d的定义为: $\sigma=0$ V常数或H=0V常数。

两式被称为第一类边界条件下的第一类磁致伸缩方程(线性化本构方程)。第一类边界条件为机 械自由(σ=0 V 常数)和磁场短路(H=0 V 常数)。

2.1.2 磁滞和饱和特性与非线性特征

Tb_xDy_{1-x}Fe_{2-y}超磁致伸缩材料具有如下伸缩特性:

- 形变随外磁场的大小而改变,不随外磁场方向而变化。而外磁场强度增大到一定临界数值后, 存在饱和现象。
- 具有强烈的各向异性,在不同方向上所测得的磁致伸缩效应相去甚远。因此,一般采用单晶 或取向多晶的制备工艺,使其变现出更大的磁致伸缩。典型的 Terfenol-D 棒材的轴向接近<11

2>,和<111>方向之间的最小夹角为 19.5°。

3) 磁致伸缩与磁场的关系为非线性的,并存在一定的磁滞现象。



图 2-2 磁场-磁致伸缩系数关系曲线

资料来源:王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计[M]. 冶金工业出版社, 2003.

磁滞回性是铁磁材料普遍存在的一个问题,它指的是材料在不用磁场激励下由于磁致伸缩效应所 输出的位移并不是线性的和可逆的,原因在于磁畴畴壁的不可逆移动会产生能量损失,这种损失带有 一定的随机性。饱和特性指的是外界磁场强度达到一定程度时,几乎所有磁畴都向外磁场方向偏转, 因而表现出的位移增长会异常缓慢。

磁滞回特性在不同的励磁强度下是不同的,中等励磁强度下,能量损失比较大,故而磁滞回也就 比较大。而随着励磁强度的增加到 H_{max}时,则会出现正向饱和现象,磁滞回则会减小。此后,逐渐减 小外磁场,直到外磁场为零,但此时磁畴和磁壁并不能完全恢复到未被磁化之前的状态,铁磁体会在 宏观上表现出一定的剩磁。要使其恢复到初始状态,就必须继续施加反向外磁场到 H_c,此时剩磁消失。 继续施加反向磁场会使其达到反向饱和磁化,形成磁滞回线。





图 2-3 磁致伸缩材料磁滞回线 资料来源: 王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计 [M]. 冶金工业出版社, 2003.

磁滞损耗的大小一般用去—回两条曲线的包围面积来衡量,面积越大,则磁滞回越严重。

2.1.3 超磁致伸缩材料位移建模

目前描述磁滞特性的模型主要有 Preisach、Jiles-Atherton(J-A 模型)以及自由能磁滞模型。其中, Preisach 最早是由德国物理学家 Preisach 针对铁磁体的磁滞特性提出的一种物理磁滞模型,随着技术的 进步,在铁电、超导、机械等材料中相继发现磁滞现象,且在不同的研究领域,尽管模型名称不同, 但是本质相同,因此,前苏联数学家 Krasonesel'skii 和 Pokrovskii 开始对磁滞现象进行数学抽象, Preisach 也就逐渐脱离了铁磁磁滞的本质,演变成了一种抽象的纯数学的磁滞描述方法,只关心输入 与输出的关系,无法反应系统内在信息^[25]。由能磁滞模型则需要复杂的数值算法进行双重积分,实用 性差。近年来也发展了许多基于热力学的非线性模型^[26-28],在描述磁致伸缩材料非线性特征方面,精 度要优于 J-A 模型,但是考虑到实验环境中温度变化不大,因此本文采用 J-A 模型进行系统建模。

2.1.3.1 Weiss 铁磁理论

根据 Weiss 铁磁理论^[29],铁磁体从初始磁化到达到饱和磁化需要一个较宽的磁场范围,在此范围 内铁磁体物质内部的原子磁矩之间存在很强的相互作用,并有转动到相互平行的趋势,而外磁场的作 用仅仅是改变自发磁化形成的磁矩方向,Weiss 称这种很强的内部磁场为分子场 H_m,且有 H_m=αM,α 是分子场参数,M 是实际磁化强度,如果外磁场的方向平行于磁化强度的方向,则铁磁体内部的有效 磁场为

$$H_e = H + H_m + H_\sigma = H + \alpha M + H_\sigma \tag{2.6}$$

其中H为偏置磁场,H_o为与预应力相关的磁化强度,且有

$$H_{\sigma} = \frac{9\lambda_{\rm s}\sigma_0 M}{2\mu_0 {M_{\rm s}}^2} \tag{2.7}$$

其中 λ_s 和 M_s为饱和磁致伸缩系数和饱和磁化强度, σ_0 为预应力, μ_0 为真空磁导率。合并得

$$H_{e} = \tilde{\alpha}M + H \tag{2.8}$$

其中 $\alpha=\alpha+9\lambda_s\sigma_0/2\mu Ms^2$,被称作畴壁相互作用系数。

再由体磁化理论和 Langevin 函数 L(z)的定义,有无滞回磁化强度 Man 表达式



$$M_{\rm an} = M_s L(z) = M_s coth\left((z) - \frac{1}{z}\right)$$
(2.9)

其中, M_s是饱和磁化强度, 且 M_s=Nm, N 为单位体积内的分子数, m 为原子磁矩的模, M_s一般 由制造商提供; z=H_e/a, a 为无磁滞磁化强度形状系数,通常通过实验测定。

2.1.3.2 J-A 模型

Jiles 和 Atherton 指出,在外磁场的作用下,铁磁体磁化分为两个阶段,在初始磁化阶段,铁磁体内部的磁畴移动和磁畴转动是完全可逆的,这阶段也属于起始磁导率 µi范围;接下来知道饱和磁化之前为第二阶段,此时铁磁体的磁畴移动和磁畴转动是不完全可逆的,即可逆部分 M_{rev}和不可逆部分 M_{irr}同时存在,此时铁磁体内部的实际平均磁化强度可表示为

$$M = M_{rev} + M_{irr} \tag{2.10}$$

且存在可逆磁化强度 Mrev 和不可逆磁化强度 Mirr 同无磁滞磁化强度 Man 的关系式

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{irr}}}{\mathrm{d}H} = \frac{\delta_M \left(M_{\mathrm{an}} - M_{\mathrm{irr}} \right)}{\delta k - \tilde{\alpha} (\mathrm{M}_{\mathrm{an}} - \mathrm{M}_{\mathrm{irr}})} \tag{2.11}$$

$$M_{\rm rev} = c(M_{\rm an} - M_{\rm irr})$$
(2.12)

$$0, H < 0 \land M_{an}(H_e) - M(H) > 0$$

- 0, $\dot{H} > 0 \land M_{an}(H_e) - M(H) < 0$

$$\delta_{M} = \begin{cases} 0, H > 0 \land M_{an}(H_{e}) - M(H) < 0 \\ 1, \dot{H}(M_{an}(H_{e}) - M(H)) \ge 0 \end{cases}$$
(2.13)

$$\mathbf{k} = \frac{p\varepsilon_{\pi}}{2m\mu_0 \left(1 - c\right)} \tag{2.14}$$

其中

p-钉扎点的平均密度;

ε_π - 180° 畴壁的平均能量;
 c 一可逆系数;

m-单位体积磁畴的磁矩;

δ – 磁场方向系数,当H 增加时, δ = 1,当H 减小时, δ = -1;

 $k - 不可逆损耗系数, 表征挣脱钉扎点所需的平均能量, 由于 p, <math>\epsilon_{\pi}$ 和 m 都很难通过实验测得, 所 以这个参数在实际运用中是通过参数辨识得到的;

 δ_{M} 一防止接近饱和时微分磁化率出现负值而引入的参数,可以保证在磁场方向发生反转时畴壁存在可逆运动^[30]。

综合以上各式可得

$$\frac{dM}{dH} = f(\mathbf{M}, \mathbf{H}) = \frac{\left(\frac{\delta M \left[M_s \left(\coth(z) - \frac{1}{z}\right)\right] - M}{k\delta - \frac{\tilde{\alpha}}{1 - c} \left[M_s \left(\coth(z) - \frac{1}{z}\right) - M\right]^+ \frac{1}{\tilde{\alpha}}\right)}{1 + \left(cM_s \tilde{\alpha}\right) \left[\csc h^2 \left(z\right) - \left(\frac{1}{z}\right)^2\right]} - \frac{1}{\tilde{\alpha}}$$
(2.15)

其中,

$$z = \frac{H + \tilde{\alpha}M}{a} \tag{2.16}$$

超磁致伸缩材料的实际磁化强度为

第10页 共50页



$$M = \int f(\mathbf{M}, \mathbf{H}) \,\mathrm{d}\mathbf{H} \tag{2.17}$$

由于这是一个非线性方程,无法得到解析解,只能通过数值计算的方法得到一个近似解。 结合第一类磁致伸缩方程(2.4) 有当 ε=0 时,

$$\sigma = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{s}}H = -\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{s}\mu} = -\frac{\mathrm{d}\int f(\mathrm{M},\mathrm{H})\,\mathrm{d}\mathrm{H}}{\mathrm{s}\mu} \tag{2.18}$$

2.2 压电材料特性与系统模型建立

同磁致伸缩材料一样,压电材料也存在磁滞现象,表现在形变与电场的关系上则呈现出非线性特征,显示为一条蝶形曲线。卡斯帕利(Caspori)和梅尔茨(Merz)认为,形变与电场强度之间为蝶形回线的原因是"线性的压电效应迭加到电畴反转效应上的结果"。



图 2-4 压电材料非线性蝶型曲线



但是同磁致伸缩效应的非线性特征而言,压电材料特别是 PVDF 压电薄膜的非线性特征相对比较小,此外,非线性主要是针对逆压电效应即将压电材料用作驱动器输出位移时而言。本文中采用线性化的压电方程^[31]。

$$S = s^{D}T + gD \tag{2.19}$$

$$E = -gT + \beta^T D \tag{2.20}$$

在无外界电场施加的一维情况下, 方程简化为

$$D_{\rm p} = d_{\rm p}\sigma \tag{2.21}$$

其中, D_p 为压电材料电位移, d_p 为压电应力常数, 对于压电材料的电荷量 Q_p 有



$$Q_{\rm p} = \iint_{A} D_{p} dA = \iint_{A} d_{p} \sigma dA = \int_{0}^{l} d_{p} \sigma w_{p} dx$$
(2.22)

其中,w_p与1分别为压电片的长度和宽度。将式(2.18)代入,得

$$V = \frac{Q_{\rm p}}{C_{\rm p}} = \frac{-\int_{0}^{1} d_{\rm p} \frac{d \int f(M, H) dH}{s\mu} w_{\rm p} dx}{C_{\rm p}} = \frac{-d_{\rm p} w_{\rm p} l d \int f(M, H) dH}{s\mu C_{\rm p}}$$
(2.23)

本章小结

本章基于磁致伸缩材料和压电材料的本构方程和实际传感器设计条件建立了从磁场输入到电压输出的数学模型。其中,考虑到超磁致伸缩材料的磁滞特性建立了 J-A 模型基础之上的非线性模型,而考虑到压电材料的非线性特征相对很小,故在此做了简化,忽略压电材料的非线性,仅采用了线性的一维压电方程。



第三章 传感器测试系统设计、建模与仿真

基于第一章的传感机理概念设计和第二章传感数学模型的建立,设计了一套测试系统。现针对实际系统进行仿真与建模。

3.1 磁场强度的确定

传感所需磁场由永磁体提供,根据李景天和宋一得采用等效磁荷法计算永磁体磁场的结论^[32],对 于一个 2a×2b×h 长方体永磁体而言,其对空间一点(p,q,r)的磁场强度分为 X,Y,Z 三个方向的分量,H_x、 H_y和 H_z。而 H_x、H_y和 H_z又分别在±两个面上存在两个分量。



图 3-1 长方体永磁体磁场分布

分别为 X 方向正面,

$$H_{x+} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\ln \frac{q-a+\sqrt{(p-a)^{2}+(q+b)^{2}+r^{2}}}{q-a+\sqrt{(p-a)^{2}+(q-b)^{2}+r^{2}}} + \ln \frac{q+a+\sqrt{(p+a)^{2}+(q-b)^{2}+r^{2}}}{q+a+\sqrt{(p+a)^{2}+(q+b)^{2}+r^{2}}} \right] (3.1)$$

X方向反面,

$$H_{x-} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\ln \frac{q - a + \sqrt{(p-a)^2 + (q+b)^2 + (r+h)^2}}{q - a + \sqrt{(p-a)^2 + (q-b)^2 + (r+h)^2}} + \ln \frac{q + a + \sqrt{(p+a)^2 + (q-b)^2 + (r+h)^2}}{q + a + \sqrt{(p+a)^2 + (q+b)^2 + (r+h)^2}} \right] (3.2)$$

Y 方向正面,

$$H_{y+} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\ln \frac{p - a + \sqrt{(p-a)^2 + (q+b)^2 + r^2}}{p - a + \sqrt{(p-a)^2 + (q-b)^2 + r^2}} + \ln \frac{p + a + \sqrt{(p+a)^2 + (q-b)^2 + r^2}}{p + a + \sqrt{(p+a)^2 + (q+b)^2 + r^2}} \right] (3.3)$$

Y方向反面,

第13页 共50页

$$H_{y_{-}} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\ln \frac{p - a + \sqrt{(p - a)^{2} + (q + b)^{2} + (r + h)^{2}}}{p - a + \sqrt{(p - a)^{2} + (q - b)^{2} + (r + h)^{2}}} + \ln \frac{p + a + \sqrt{(p + a)^{2} + (q - b)^{2} + (r + h)^{2}}}{p + a + \sqrt{(p + a)^{2} + (q + b)^{2} + (r + h)^{2}}} \right] (3.4)$$

$$Z \, \bar{D} \, \bar{D} \, \bar{E} \, \bar{D},$$

$$H_{z+} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\arcsin\frac{(p-a)(q-b)}{\sqrt{(p-a)^2 + r^2}\sqrt{(q-b)^2 + r^2}} - \arcsin\frac{(p-a)(q+b)}{\sqrt{(p-a)^2 + r^2}\sqrt{(q+b)^2 + r^2}} \right]$$

$$-\frac{Br}{4\pi\mu} \left[\arcsin\frac{(p+a)(q-b)}{\sqrt{(p+a)^2 + r^2}\sqrt{(q-b)^2 + r^2}} - \arcsin\frac{(p+a)(q+b)}{\sqrt{(p+a)^2 + r^2}\sqrt{(q+b)^2 + r^2}} \right]$$
(3.5)

Z 方向反面,

$$H_{z-} = \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\arcsin\frac{(p-a)(q-b)}{\sqrt{(p-a)^2 + (z+h)^2}\sqrt{(q-b)^2 + (z+h)^2}} - \arcsin\frac{(p-a)(q+b)}{\sqrt{(p-a)^2 + (z+h)^2}\sqrt{(q+b)^2 + (z+h)^2}} \right] \\ - \frac{Br}{4\pi\mu} \left[\arcsin\frac{(p+a)(q-b)}{\sqrt{(p+a)^2 + (z+h)^2}\sqrt{(q-b)^2 + (z+h)^2}} - \arcsin\frac{(p+a)(q+b)}{\sqrt{(p+a)^2 + (z+h)^2}\sqrt{(q+b)^2 + (z+h)^2}} \right]$$
(3.6)

而

$$H_{x} = H_{x+} - H_{x-}, H_{y} = H_{y+} - H_{y-}, H_{z} = H_{z+} - H_{z-}$$
(3.7)

且总磁场强度为

$$H = \sqrt{H_{x}^{2} + H_{y}^{2} + H_{z}^{2}}$$
(3.8)

3.2 LabVIEW 仿真

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench,实验室虚拟仪器工程平台) 是由美国国家仪器公司所开发的图形化程序编译平台。LabVIEW 早期是为了仪器自动控制所设计,至 今转变成为一种逐渐成熟的高级编程语言。图形化编程与传统编程主要的不同之处在它的编程流程采 用了"数据流"(data flow)的概念,在构思问题解决步骤即流程图的过程中就完成了程序结构的搭建。

对实验室人员而言,更加重要的一点是 LabVIEW 率先引入了虚拟仪器的概念,用户可通过人机 界面直接控制自行开发之仪器。此外 LabVIEW 提供的库包含:信号截取、信号分析、机器视觉、数 值运算、逻辑运算、声音震动分析、数据存储等。。此外 LabVIEW 通信接口方面支持:GPIB,USB, IEEE1394, MODBUS,串行接口等接口。例如本毕业设计实验部分 Keyence 激光位移传感器与 LabView 的通讯就是串口实现的。

LabVIEW 独有的用户界面(称为前面板)上的每一个模块都对应一个真实或虚拟的仪器工作,我 们可以很方便的将各种实验仪器整合在一起依托 LabVIEW 这个平台构成一个完整的实验系统,可以 涵盖数据采集、数据处理、运动控制等多种功能。LabVIEW 的程序或子程序都称为 VI (Virtual Instrumentation),而每个 VI 都有三个组成部分:程序框图(Block Diagram)、前面板 (Front Panel) 和图标/连接器 (Icon/Connector)。我们可以方便地利用前面板上的控制控件将数据输入正在运行的 VI,或者用显示控件将运算结果输出。前面板还可以作为程序的接口:每个虚拟仪器(VI)既可以把 前面板当作用户界面,作为一个程序来运行;也可以作为一个节点放到另一个 VI 程序框图中,通过连 接器面板连接起来,而前面板则定义 VI 的输入和输出。



LabView 还可以广泛的同其他软件结合运用,本文中从永磁体位移到压电材料电压输出的仿真就 是通过 LabView 的 Mathscript real time module 来实现第二章所提到的非线性方程的数值求解。

仿真程序的前面板如图 3-2 LabVIEW 前面板所示,可以在其中指定相关参数,最令人振奋的是图 形显示功能,可以将仿真或者数据采集的结果实时的以图线的方式展现出来。



图 3-2 LabVIEW 前面板

程序面板如图 3-3 LabVIEW 程序框图所示,变量和数据流在后台进行处理,在这里可以设置各种逻辑关系,数据类型,输入输出文件,控制仪器。本次仿真主要用到的是 Mathscript real time Module 进行磁致伸缩棒的实际磁化强度的计算,以及通过数据转换、寄存器节点等将数据实时绘制成图线和输出到测量文件,以便后续更进一步的利用 Matlab 等软件进行处理。



图 3-3 LabVIEW 程序框图



3.3 单一传感器仿真

3.3.1 单一传感器线位移仿真

在单一传感器位移一维直线位移测试实验中, 永磁体对超磁致伸缩棒中轴线上一点 P(0,0,r)的磁感 应强度为

$$H = H(r) = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$
(3.9)

将其作为 J-A 模型的初值条件,通过 LabView 进而得到仿真的电压输出。

程序前面板与后面板如图 3-4 单一传感器线位移仿真 LabVIEW 前面板所示。在单一位移传感器 线位移中,需要指定的参数为长方体永磁体的尺寸参数,永磁体的初始位置参数(p=q=0),压电片 面积。仿真的工况为永磁体匀速从距离超磁致伸缩棒 10mm 处沿 Z 轴靠近直到与其贴合。



图 3-4 单一传感器线位移仿真 LabVIEW 前面板





运行程序后利用得到的测量文件在 Matlab 中绘图如下。





其中,红色的线为进程,而蓝色的线为回程,两者之间的差距是十分小,以第 500 个和第 1500 个 采样点为例,两者坐标分别为(500,0.014526)和(1500,0.014503),相差为2.3e-5数量级。亦即 磁滞非线性十分小,在牺牲一定精确性的条件下可以忽略。

3.3.2 单一传感器角位移仿真



图 3-7 单一传感器角位移测试工况图

在单一传感器一维角位移测试实验中, 永磁体对超磁致伸缩棒中轴线上一点 P(0,0,r₀)的磁感应 强度为

$$H_{\theta} = H\sin\theta \tag{3.10}$$

其中 H 由(3.9)式确定, r=r₀为永磁体与超磁致伸缩棒中心点的距离, 为一个常数。

$$H = \sin\theta \sqrt{H_{x}^{2} + H_{y}^{2} + H_{z}^{2}}$$
(3.11)

引入一个参数θ表示永磁体的转角。同样,将该方程作为 J-A 模型的初值条件,可以得到仿真电 压输出。

衣 3-1 切具及试验中用到的相大参数			
压电材料参数	超磁致伸缩材料参数	永磁体参数	
$d_p = 2.2 \times 10 - 11 \text{ C/N}$	$dm = 3.92 \times 10 - 9 m/A$	$\mu = 0.4$	
$Cp = 2.8 \times 10 - 9 nF$	$s_m = 3.33 \times 10 11 \text{ m}^2/\text{N}$	Br = 1.231T	
	$\Phi 10 \times 35 \text{ mm} (\text{Terfenol-D})$	$10 \times 10 \times 50 \text{ mm}$ (RbFeB-N35)	

及过险由田刻的相关会粉

第17页 共50页



在本次仿真中,需要确定的参数为长方体永磁体的尺寸参数,永磁体初始位置,初始角度(永磁体与超磁致伸缩棒平行时为0°)。仿真的工况为永磁体从0°开始匀速旋转到180°并匀速回转至0°。LabVIEW VI的前面板与后面板如图3-8单一传感器角位移仿真LabVIEW 前面板、图3-9单一传感器角位移仿真LabVIEW 程序框图所示。



图 3-8 单一传感器角位移仿真 LabVIEW 前面板



图 3-9 单一传感器角位移仿真 LabVIEW 程序框图

根据 LabVIEW 得到的测量文件数据利用 Matlab 绘图如下所示。其中红线是从 0°旋转到 180°的 曲线,而蓝线为从 180°旋转到 0°的曲线。角位移曲线同线位移一样,也存在磁滞非线性,但是非线 性同样很小。以第 157 和第 314 个采样点处的数据为例,两者分别为(157,0.028603),(471,0.028469),数值上相差 1.34e-4,同样在牺牲一定精确性的情况下,可以忽略这种微小的磁滞非线性。





3.4 双传感器两自由度线位移仿真



图 3-11 双传感器两自由度线位移测试工况图

在双传感器二维线位移仿真实验中,考虑如图所示的磁场分布,永磁体与两个超磁致伸缩棒处于同一个X平面内,理想状况下,提出如下合理化假设: A 区域中磁力线与Y轴大致平行,则永磁体沿Y轴方向的移动不会对Nc-TRS(1)磁感应强度产生影响。同样的,B 区域中磁力线与Z轴大致平行,则永磁体沿Z轴方向的移动不会对Nc-TRS(2)磁感应强度产生影响。这样,在目前的研究阶段,牺牲一定精度的条件下,便可以忽略Z 方向位移对 Nc-TRS(2)的影响,而用 Nc-TRS(1)来检测Z 方向的位移; 忽略Y 方向位移对 Nc-TRS(1)的影响,而用 Nc-TRS(1)来检测Y 方向的位移。





图 3-12 双传感器两自由度线位移测试磁场分布图

本部分的仿真我们分三块进行,首先是固定 r 或固定 q 而只让另外一个变量变化即永磁体仅沿一 个方向运动,考察其对超磁致伸缩材料的感应强度以及最后输出的电压信号。



图 3-13 双传感器两自由度线位移仿真 LabVIEW 前面板





图 3-14 双传感器两自由度线位移仿真 LabVIEW 程序框图

首先,固定q,只让永磁体沿Z方向运动。其前面板和程序框图如图 3-13、图 3-14 所示。该仿 真程序除了可以绘制某个方向的位移,还可以将运动轨迹实时复现,显示在右侧的图形面板里。

当 q==0 时,其结果与沿 Z 轴中心的一维仿真无区别,故此处仅选取 q=2 和 q=4 两个值分别作仿 真,工况为永磁体从 Z 轴上距 GMM(1)10mm 远处沿 Z 轴匀速靠近超磁致伸缩材料直至贴合,之后直 线匀速运动回到原位置。下面两幅图分别为 q=2 和 q=4 的情况,滞回特性依旧很小,因此,我们着重 于研究 p 对永磁体位移-压电材料输出电压曲线的影响。



图 3-15 双传感器两自由度线位移 Z 轴方向仿真曲线(初始 Y 方向位置)

将 q=0(即沿 Z 轴一维的状况)、q=2 和 q=4 三条曲线置于同一幅图中,可以发现,随着偏置位 置的增大磁电转换系数越来越大,非线性特征也愈加明显,这可以用磁力线的分布状况来解释。越偏 移 Z 轴,磁力线密度越强,因此超磁致伸缩材料磁感应强度越大,其内部磁化强度也就越大,涡电流效 应同样越大,其结果就是导致了非线性特征的加剧。该结论同样可以由下面的仿真得到证明。

下面的仿真设计的工况是永磁体初始位置位于距 GMM(1)10mm,距 GMM(2)5mm 处,之后沿 Y 轴靠近 GMM(2),直至贴合,再返回初始位置。可以看出,在 0~3.5mm 区间内,永磁体的移动对压电 材料电压输出几乎没有影响。而在 4mm 以后,特别是 4.7mm 以后,则上升很快,呈现出很大的非线性。





图 3-16 双传感器两自由度线位移 Y 轴方向仿真曲线

以上是单一传感器的响应曲线仿真,为了研究永磁体的单一方向位移对两个传感器的影响,做了以下仿真,工况为永磁体初始位置位于距 GMM(1)10mm,距 GMM(2)5mm 处,沿 Z 轴向 GMM (1) 匀速运动 5mm。



图 3-17 Z 轴方向位移两传感器响应仿真 LabVIEW 前面板





图 3-18 Z 轴方向位移两传感器响应仿真 LabVIEW 程序框图

其仿真结果绘图如下,其中上部红色曲线为 Nc-TRS(1)的传感曲线,下部蓝色曲线为 Nc-TRS(2)的 传感曲线,可以看出,Z 轴方向的位移对传感器 2 的影响同对传感器 1 相比是十分小的(以 Z=5 处的 电压输出值为例,仅为 0.000642/0.01453=4e-2)。



第23页 共50页



以上是单一维度运动的仿真,而实际工作环境下,物体的运动即使是两维运动也是极其复杂的,因此,做了平面内特定运动轨迹的两维位移与对传感器1电压输出仿真。

其前面板与程序框图如图 3-20、图 3-21 所示,将 Z 轴方向位移、Y 轴方向位移和输出电压绑定 为一个三维数组,输出到 3D 图表中,可实时显示位移轨迹与电压输出。位移轨迹可以在程序框图的 Mathscript 节点部分利用参数方程的方式指定。



图 3-20 两自由度运动仿真 LabVIEW 前面板



本章小结

根据第二章的系统数学模型,设计了实验系统,加入了长方体永磁体磁场分布函数,利用 LabVIEW 平台上进行了仿真,分别得到了单一传感器线-角位移,双传感器两自由度线位移的仿真数 据和曲线,并对仿真结果呈现的相关特征做了分析。



第四章 样机设计制作

基于第三章的系统设计,我们搭建了一个实验平台。整个实验系统搭建在气浮动平台上,以减小 测量误差。实验系统主要位移模块,传感器主体部分,平台,永磁体材料,信号产生与采集模块,数 据处理模块等几部分组成,各部分详述如下。

4.1 位移模块

位移模块采用了步进电机、两轴微动平台和实验室自制的超磁致伸缩驱动器三套实现方案。其中 步进电机负责产生角位移,而两轴微动平台负责一维、二维线位移。步进电机由单片机和步进电机驱 动器控制。两轴微动平台为手动控制。

表 4-1 两轴精密微调平台参数				
行程	台面大小	精 度	平行度	最小刻度
±12.5mm	60mm×60mm	0.01	0.02	10um

采用步进电机进行转角控制的原因在于步进电机的位置控制在不加运转量传感器(sensor)或编码器的情况下,精确度较高。在非超载的情况下,电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度。尽管采用了开回路(Open Loop)控制方式,但是由于我们可以精确控制脉冲信号的宽度,而且步进电机只存在周期误差而不存在累积误差,故稳定性好,精度高。

农 4-2 少 近 电 机 多 致				
型号	步距角(°)	螺距(mm)	步距(mm/step)	相数(NO.)
42HBWL34281	1.8	2	0.01	4

超磁致伸缩驱动器(Giant Magnetostrictive Actuator,GMA)是精密位移驱动器的一种,是基于超磁致伸缩材料的正磁致伸缩效应的一种应用,由于磁致伸缩材料的形变是微尺度的,所以,假以有效的控制策略,超磁致伸缩驱动器可以实现精密位移驱动。与其他精密位移驱动方式相比,超磁致伸缩驱动器具有响应时间短、行程大、带负载能力高等优点^[33]。



图 4-1 超磁致伸缩驱动器结构图与实物图

4.2 传感器主体部分

传感器分为第一代和第二代,其差别在于两者的尺寸以及其中压电传感器。

第25页 共50页



4.2.1 第一代传感器样机

图 4-2 为第一代传感器的工程图,主体由一块完整的铝合金加工而成,左侧铣 10×62mm 的槽, 用于放置磁致伸缩棒,棒的两侧分别放置 10×30 的铁棒,作用是引导磁路。左端铣圆头。中部为直径 20 的光孔,右侧车 M20×1.5 的细牙螺纹,用于给压电传感器施加预应力。





图 4-3 第一代传感器三维图及实物图

第一代传感器样机中采用的压电器件为美国 Lance 公司生产的 LC1104 型压电传感器。量程分别为 25kg 和 50kg,灵敏度为 1.09mV/V,误差小于 0.5%。实验环境在其正常工作状态下。传感器需要 24V 电压作为其输入的工作电压,由恒压源提供。



▶ 量程:25,100, 200, 500kg, 1, 2, 5, 10, 20, 30t

▶ 外型尺寸:



图 4-4 LC 1104 压电传感器尺寸参数



图 4-5 LC1104 压电传感器实物图及检定数据

4.2.2 第二代传感器样机

第二代传感器样机的结构与第一代大致相似,得益于压电薄膜材料的引入,使得整体尺寸大大降低,主体部分为一块铝合金,左侧车 M14×1.5 螺纹,用于调节预紧力,右侧开直径为 10mm 的通孔。 通孔的一侧用小铝合金块封闭,中间放置压电薄膜片。



图 4-6 第二代传感器三维图与实物图

第二代传感器样机中,先后用到了两种压电薄膜材料,第一种是美国 MEAS 公司(Measurement Specialties Inc)生产的 DT1-028K 型压电薄膜传感器,是 PVDF 压电薄膜的一种,其结构如图 4-7 所示。





第二种是上海贝辛电子科技公司的 SS 压电薄膜传感器,是 EMFi 的一种(Electro Mechanical Film)。SS 压电薄膜传感器的最大特征为高灵敏度,压电载荷系数比 PVDF 压电薄膜高 10 倍以上,可达 350pC/N。其核心技术为压电驻极体技术、薄膜储存荷技术和传感封装技术。其中,最重要的是一点是薄膜储荷技术,作为孔洞型薄膜材料,可以将电荷注入材料孔洞内,同时,电荷能够相对比较持久、均匀和稳定的储存。如图 4-8 所示,当 eTouch-SS 传感器受到压力的作用时,其厚度发生变化,并随之产生了相应的电荷,这些电荷在薄膜的上下电极上积聚,从而产生了与作用力大小相对应的电荷。



实验结果表明,MEAS 公司的 PVDF 膜对动态力的响应效果更好。而如贝辛科技的 EMFi 膜灵敏 度比 PVDF 膜要高, 且归因于材料孔洞的存在,能够测量静态力。

4.3 实验平台

实验平台由铝合金底座和厚度 10mm 的铝合金板拼装而成,主体分为三部分,首先是主平台,用于固定一个传感器,为第二个传感器后板和位移机构提供安装接口。





图 4-9 主平台与线位移机构小平台

线位移机构小平台由三块板搭接而成,上开槽用以固定两轴精密微调平台。角位移测试机构见图 4-10,步进电机由台虎钳夹持,具体安装见图。



图 4-10 角位移实现机构

整个实验在上海天核机电有限公司生产的光学平台上进行,以减小振动等因素对位移测量造成的误差。

4.4 永磁体材料

实验中采用的永磁体是由上海胜磁磁业有限公司生产的钕铁硼磁铁(NdFeB magnet),牌号 N35。 钕铁硼磁铁是一种由钕、铁、硼(Nd₂Fe₁₄B)形成的四方晶系晶体,也是现今磁性最强的永磁体。最 早与于 1982 年,住友特殊金属的佐川真人(Masato Sagawa)发现钕磁铁。后来,住友特殊金属发展 成功粉末冶金法(powder metallurgy process),通用汽车公司发展成功旋喷熔炼法(melt-spinning process),能够制备钕铁硼磁铁。这磁铁是现今磁性最强的永久磁铁,也是最常使用的稀土磁铁。

4.5 信号采集模块

信号采集主要包括电压信号的采集和位移信号的采集。

4.5.1 电压信号采集

实验过程中我们需要对压电传感器输出的信号做一定调理。由于信号变化很微弱,需要对其进行放大。实验中采用了如图 4-11 所示的放大电路。但加入放大器相应的会引入噪声,故只是在实验的初期测试过电荷放大器,后期主要采用高精度的万用表来进行信号采集,满足了精度需求。

最大电压范围



图 4-11 电荷放大电路

电压信号采集初期是采用 NI 的数据采集卡 USB 6229 型采集卡,优点是与 LabVIEW 的集成性好,可以直接将所有的数据后期处理与控制集成于一个用户界面上;但是缺点是采样频率低,精度差,无法准确测量压电片输出电压。



图 4-12 NI USB 6229 实物图及引脚图

表 4-3 NI USB 6229 模拟量米集参数			
模拟输入参数			
通道	32 , 16		
单端通道	32		
差分通道	16		
分辨率	16 位		
采样率	250 kS/s		

-10V~10 V



续表 4-3

最大电压范围精度	3100 μV
最大电压范围敏感度	97.6 μV
最小电压范围	-200 mV , 200 mV
最小范围精度	112 μV
最小范围敏感度	5.2 μV
板载内存	4095 样本

后期的电压信号采集采用日本 NF 回路设计株式会社的 DM2561 数字万用表进行。NF 由负反馈 (Negative Feedback)一词而来。负反馈技术是一种提高电路稳定性和高性能的技术,广泛应用于电 子电路和控制系统之中。但是,由于控制方法不同,也可能会得不到预期的性能,甚至会使稳定性 受到损失。NF 的负反馈控制技术,可最大限度发挥设备的性能,并且能够实现使其处于稳定状态的 最佳控制,因此可以得到足够高的精度。从微小信号的放大,到宽频带的功率放大负反馈技术是覆盖 NF 整个技术领域的核心技术。DM2561 的测量特性见下表。

表 4- 4 DM2561 参数				
性能	特征	接口模块		
高精度: 0.0035%	多功能: ACV, DCV, ACI, DCI, 2W/4W R,etc	电压/电阻/温度输入		
大电流量程: 10A	手动或自动量程	16 通道扫描		
高电压量程: 1000V	实时记录	4W 检测输入		
快速响应: 300kHz		USB /RS232/GPIB(可选)/LAN(可选)		
		9 针输入输出模块		



图 4-13 NF DM 2561 数字万用表及数据采集软件

4.5.2 位移信号采集

由于两轴微动平台是手动操作,为校验初始位移,我们采用了一款激光位移传感器(Laser Displacement Sensor, LDS)来进行位移信号的采集,日本基恩士公司的LK-G80 CCD高精度激光位移 传感器,它拥有目前最快的采样速率(50KHz),极高的精确度,±0.02%,且重复精度高。激光位移传 感器与 PC 机的通讯既可以通过其自带的软件实现,也可以通过 RS232 缆线与 LabView 通讯。





图 4-12 激光位移传感器及其配套软件

4.6 数据采集与处理平台

数据采集与处理同样是在 LabVIEW 平台下实现的。LabVIEW 支持与各种测量仪器的通讯,同时 有生动的控件,可以实时绘制出测量曲线,同时,可以将数据写入测量文件。

以下是 LabVIEW 通过 RS232 接口与 Kenyce 公司的激光位移传感器通讯,进而采集两路位移信号的程序,以及 RS232 通讯协议的子程序。在程序中,我们可以指定 com 口,读取延时,而在子程序中则可以指定更加具体的通讯的波特率等参数。



图 4-14 激光位移传感器信号采集 LabVIEW 前面板





图 4-15 激光位移传感器信号采集 LabVIEW 程序框图



图 4-16 RS 232 通讯子 VI

本章小结

本章主要介绍了实验系统的搭建,实验系统主要包括实验平台、运动实现及控制模块、信号采集 模块,数据采集和处理模块。详细描述了各个部分器件的功能、选用及参数。



第五章 实验结果与分析

5.1 第一代原型样机实验结果

根据前述的原理与方法,我们首先采用第一代原型样机对传感机理进行了验证,实验分为线位移和两大部分。其中第一代原型样机的实验基于前期研究成果,发表于 *Sensors*^[34](*ISSN: 1424-8220, IF:1.739 (2011)*)。本节部分采用了当时的数据和资料。

5.1.1 第一代原型样机线位移实验结果

线位移测试系统原理图及实际系统搭建如图所示。



图 5-1 线位移测试系统原理图与实际系统搭建

首先在一个大量程内用微动平台沿 Z 轴方向移动永磁体,记录输出的电压与位移的关系。整个数据采集过程用 LabVIEW 实现,激光位移传感器与 LabVIEW 的通讯遵循 RS232 协议。实验数据记录如图所示。同时,用实际采集得到的数据同理论模型做出的图线进行比对,绘制于图 5-4 中。从实验结果可以看出,永磁体的位移为0 mm 到 9.7 mm,在 0~2 mm 和 6~9.7 mm 区间的线性度要优于 2~6 mm,理论模型与实验数据吻合度较高。同时,永磁体位移与电压之间的关系是呈现一定非线性的,因此,我们对最初的实现曲线进行了求导操作,以得到斜率最大亦即最敏感的区间。从其斜率曲线图 5-5 可以看出,6 mm 到 9.7 mm 的斜率大致为常数 (大约 1/1.578 μV/μm)。6~8.5 mm 要比其他的区间都要稳定,7.2745 mm 处斜率最大亦即敏感度最好。因此我们选取了 6~8.5 mm 区间为优化区间,7.2745 mm 处为区间中心点,进行优化和精密实验。





基于上述结果,将永磁体固定在 7.2745 mm 处,采用 GMA 驱动器进行位移驱动,进行精密位移 测量实验。GMA 驱动器的激励信号为 I=Amplitude×sin(2πft) A,实验结果见图,相关实验数据见下表。

	上海交通大学	7
	Shanghai Jiao Tong Universit	Y

超磁致伸缩驱动 器激励电流幅值		1 A	0.5 A	0.2 A	0.1 A	0.05 A	
激光位移 传感器位 移数据 (μm)	从	7,271.9333	7,273.05	7,274.4205	7,274.8484	7,274.183	
	到	7,284.5333	7,278.6	7,276.247	7,275.8149	7,275.5761	
Nc-TRS 位 移数据 (μm)	从	7,272.1815	7,272.9158	7,274.2333	7,274.7333	7,274.49	
	到	7,284.2104	7,278.4498	7,276.3667	7,275.9667	7,275.40	
Nc-TRS 输 出由压	从	11.9917	11.9789	11.9377	11.9376	11.8860	
(mV)	到	11.9994	11.9826	11.9391	11.9384	11.8866	
Nc-TRS 对邊 移传感器的 (μm)	改光位 〕误差	0.3074	0.0757	0. 1334	0.0765	0.0103	

表 5-1 精密测量实验数据分析

激励电流均为 10HZ,其幅值从 1A 对应变化到 0.1A。图 5-6 中,激励电流幅值为 1A,永磁体位移 从 7,272.1815 µm 到 7,284.2104 µm,而产生的电压信号从 11.9917 mV 到 11.9994 mV。图 5-7 的幅值为 0.5A,而电压变化是从 11.9789 mV 到 11.9826 mV。图 5-8 和图 5-9 电流幅值分别为 0.2 和 0.1A,相对 应的位移和输出电压变化分别为(2.1334 µm,0.0014 mV)(1.2334 µm,0.0008 mV)。由于电流幅 值为 0.1A 时误差上已相对较大,故我们改为施加方波电流信号激励(如图 5-10 所示),幅值 0.005,频率 10HZ。永磁体位移为 7,274.49 µm 到 7,275.40 µm(910 nm),而相对应的电压输出变化量为 0.0006 mV(从 11.8860 mV 到 11.8866 mV)。







第37页 共50页



图 5-8 I(t) = 0.05square(2πft) A (f = 10 Hz).方波激励下传感器响应曲线

在上图所示的实验结果中,永磁体位移数据由激光位移传感器获取,同时也用我们的线-角位移传 感器获取(对电压信号进行滤波后数据)。通过对两者进行比较,在上图所示的几种情况中,平均误 差分别为 0.3074 μm (2.4%), 0.0757 μm (1.3%), 0.1334 μm (6.3%), 0.0765 μm (7.7%), 0.0103 μm (1%)。这 就表明,我们设计的线角位移传感器具有一定的精度。

5.1.2 第一代原型样机角位移实验结果

对线位移测量特性进行测试之后,我们继续测试了其角位移测量特性。实验平台搭建如图所示。 采用步进电机进行转角控制。



图 5-9 角位移测试系统原理图与实际系统搭建

图 5-12 是大行程的转角测量(0~180°)数据(°型线)曲线和理论曲线的比较(输出的最大电 压为 0.04113 mV)。结果表明,无论是从大范围还是小区间内的角位移,理论模型都是具有一定有效 性的。此外,还对实验曲线进行了拟合,其方程如下:

 $IV = (-4.949 \times 10 - 6) a^{2} + (8.468 \times 10 - 4) a + 5.642 \times 10^{-3}$ (5.1) 其中 IV 与 a 分别为压电材料输出电压和永磁体的沿 Z 轴的转角。



图 5-13 显示的是另一个大区间角位移测量的结果,旋转角度的两个极限位置设定为 40°和 80°, 同时,利用步进电机控制永磁体旋转的速度。其中,上半部分是压电材料输出曲线(由 DM 2561 万用 表采集),针对于每个电压的旋转角度可以由拟合的方程求解得到,因此,可以得到一条计算的转角 曲线(在下半部分图中用蓝色实线标注),下半部分的红色断线为实际转角曲线(是在假定步进电机 输出角度精确的条件下由控制程序得到的)。转角的第一个峰值出现在第 32 个采样点,为 63.2146°; 第二个峰值点出现在第 143 个采样点,为 63.2146°。同时,从实验曲线可以看出,角位移测量特性 是不受角速度制约的,基本上能实时复现角位移轨迹。

图 5-14 显示的是小角度角位移的传感特性实验的结果,同样,上半部分是压电材料输出曲线。在这个实验中,永磁体初始姿态角被设置为 41°,而在此处的电压变化率根据大行程测试曲线得到为 4.8508e-4。因此,同样,由每一个电压输出值,可以根据拟合方程得到一个计算的角位移值(称为理论曲线),如图 5-11 的虚线所示。







图 5-12 小行程角位移精密测试数据曲线与理论曲线

综上所述,第一代传感器原型样机在单一自由度线测试中实现了 0~9.7mm 的大行程位移测量;而 在精密位移测量实验中,结果表明设计的位移传感器样机有达到纳米级线位移测量精度的可能性与潜 力,现阶段最好的分辨率达到了 990nm,与实验中采用 Keyence 公司生产的商用激光位移传感器接近。 而在角位移传感实验中,实现了 0~180 的大行程测量和 1~2 的小位移测量,现阶段实现的最高分辨率 为 0.013 °。

5.2 第二代原型样机测试

在第一代传感器样机的基础之上,我们设计制造了第二代传感器样机,同第一代样机一样,同样 对其做了一系列测试,很遗憾的是,实验的效果出乎意料。图 5-13 是我们对传感器做直线位移粗略测 量的得到的数据,当永磁体缓慢平稳靠近超磁致伸缩棒时,电压信号在 1V 上下波动,并没有呈现出 与第一代样机类似的与永磁体位移近似线性的曲线。



「【イギイ】レズ |以口リーノハロス |平 |立 1多之」|以らえ |エロリ 皿 ら ① Sete new toolbur bettens: data bruhing & linked plots 4 〇 Play video

图 5-13 第二代原型样机初始线位移测试实验曲线



为证实传感器的性能,我们手动施加了一个交变的预紧力,其结果如图 5-14 所示,其中虚线为滤 波前的数据,实线为滤波后的数据,可以清晰的看到一个交变的电压输出。而事实上施加的交变预紧 力幅值是极大的,以至于压电薄膜材料的结构已经被破坏掉了。



鉴于第二代原型样机初始测试的结果表明其对位永磁体的位移信号不敏感,所以,未将其进一步 运用于实验。关于失败的原因将在第六章详述。



图 5-15 压电薄膜(从左至右依次为,完整 PVDF,破坏的 PVDF 和破坏的 EFMi)



5.3 二维直线运动检测



图 5-16 二维线位移测试系统原理图与实际系统传感器安装工况

二维直线运动检测的测试系统如上图所示,依靠二维微动平台来实现平面运动,两个分量的位移 分别用两个激光位移传感器检测,并通过 RS232 线缆与 PC 端通讯。两个 Nc-TRS 按照图 5-15 中的方式 垂直布置。

电压信号同样是通过 DM2561 来采集, PC 端则采用万用表独立的 DMM Viewer 来采集。DM 2561 支持同时采集 16 路信号,但是速度相对较慢,因此在本实验中我们还是采用了单路采集,重复试验的方法(相同的初始位置由激光位移传感器示数保证)。

首先进行的是沿 Z 轴方向的位移传感试验,这部分试验分两次进行,即分别测试两个传感器的感应特性。图 5-17 是 Z 方向位移下传感器的输出电压的实验曲线与仿真曲线。其中,实验曲线相对平滑,并未进行滤波处理,仿真与实验数据吻合度高。



图 5-17 Z 轴方向位移 Nc-TRS(1)的响应曲线(实验数据)





图 5-19 是 Z 方向位移对 Nc-TRS(2)电压输出的实验曲线,其中蓝色 o 型线为原始实验数据,红 色实线为滤波之后的曲线。从这张图来看,Z 方向位移对于 Nc-TRS(2)的信号输出影响很小(为 1e-4 量级),这也符合之前我们对 Z 轴方向位移传感器响应仿真曲线,即 Z 轴方向的位移对于 Nc-TRS(1)的影响显著而对 Nc-TRS(2)的影响微乎其微。



图 5-19 Z 轴方向位移 Nc-TRS(2)的响应曲线(实验数据)



图 5-20 Z 轴方向位移 Nc-TRS(1)和 Nc-TRS(2)的响应曲线对比(仿真数据)

第43页 共50页



之后是Y轴方向运动的实验,传感器1的输出电压实验数据曲线及滤波曲线如图5-21所示。该 实验的实验曲线与仿真曲线具有较大的差异性,原因可能在于当永磁体十分靠近 Nc-TRS 时,永磁体实 际充磁的磁感线与理论磁感线仿真存在一定差异,且磁感应强度变化剧烈,导致实验曲线有一定误差。



图 5-21 Y 轴方向位移 Nc-TRS(1)的响应曲线(实验数据)



图 5-23 是永磁体沿 Y 轴运动时 Nc-TRS(2)电压输出的实验数据曲线与仿真曲线,实验与仿真趋势吻 合度高,在 0~3mm 的位移量下,电压输出分别为 0.05V 和 0.073V。



图 5-23 Y 轴方向位移 Nc-TRS(2)的响应曲线(实验数据)





图 5-24 Y 轴方向位移 Nc-TRS(2)的响应曲线(仿真数据)

尽管各实验曲线与仿真曲线趋势一致,输出值量级一致。但是在具体数值上则存在一定差异,原 因可能在于 J-A 模型中超磁致伸缩棒的参数存在一定误差,且由于压电片采用的均为商用的压电传感 器,故其参数与材料参数存在一定误差,对传感器面积估计存在问题;此外一个极其重要的问题就是 两种材料的界面耦合特性,在仿真中假定两者理想耦合,系数为1,实际中远非如此。

很遗憾由于 DM 2561 需要 GPIB 通讯卡才能与 LabVIEW 通讯,而实验室暂时未购置该扩展功能。 且双通道电压采集时采样频率较慢,因此未能搭建完成基于 LabVIEW 平台的双位移通道和双电压通 道实时信号采集及处理系统。

本章小结

本章的主要内容是实验的开展与数据的分析。分别进行了第一代与第二代原型样机的单自由度位 移测试,结果表明第二代不具备实验能力,故均采用第一代原型样机进行实验。因此,进行了单自由 度线位移和单自由度角位移的实验,结果表明第一代原型样机具有线位移 990 nm 和角位移 0.013°的 分辨率。证实了根据磁电效应提出的将超磁致伸缩材料和压电材料结合起来进行位移传感这一传感机 理的可行性与准确性。继而进行了两自由度线位移的实验,分别考察了 Z 轴方向位移和 Y 轴方向位移 对两个传感器输出电压的影响,得到了实验数据,并与仿真曲线进行了比对,吻合度高。从而证实了 将本传感机理扩展到二维平面运动的可行性,并为进一步将传感机理运用于三维运动和多自由度运动 检测提供了基础和可能。



第六章 总结与展望

6.1 论文总结

本文基于超磁致伸缩材料和压电材料两种智能材料良好的物理场耦合特性,构思了从位移量所绑 定的磁场到应力场再到电场的位移一电压输出的位移测量机理,设计并加工了这种基于磁电效应的非 接触式线-角复合位移传感器,根据所采用材料的不同,先后有两代原型样机。

通过仿真与实验证明了传感机理以及传感器结构的可行性,实验结果与理论仿真的吻合度高,而 且证实在依靠永磁体提供磁场的情况下,磁滞回特性很小,在目前的研究阶段,可以忽略。具体而言, 设计的非接触式线-角复合位移传感器在最佳的测试环境下实现了线位移 990 nm 和角位移 0.013°的分 辨率,且能够实现二维平面内直线运动条件下的位置传感。

本研究创新点在于将超磁致伸缩材料和压电材料结合起来用于位移的传感,基于两种材料的特性, 实现了非接触式的便捷测量,以及单一结构下线-位移和角位移的双重传感特性,而且用证明了这种传 感方式具有相当的分辨率和检测多维运动的潜力。

本次研究属于探索性的机理验证阶段,因此,也存在诸多不完善的地方。其中,最大的不足在于 超磁致伸缩材料和压电材料的结构上,尽管目前在国际上已经有磁电耦合系数更高的磁电复合材料结 构形式,但是限于时间的局促和制备条件的不足,故采用了相对容易加工的结构形式。而这并没有影 响到由位移(磁场)到电压输出的传感机理的验证。

J-A 模型尽管是目前比较理想的磁致伸缩材料磁滞模型,但是其只考虑了磁化理论,而对更加复杂的弹性力学、热力学问题则没有详细考虑。今年来发展了多种基于热力学的磁致伸缩非线性模型, 在未来的研究中可以对这些新的非线性模型进行考察。而且,本论文中模型的建立和仿真的实现过程 中,采用的都是线性化的压电材料本构方程,主要考虑是压电材料的非线性与磁致伸缩材料的非线性 相比很小,但不得不说这也是本研究的一个缺憾,在未来,也应该成为研究的一个重点。

值得注意的是,截至论文结束,本研究的重点集中在磁电复合材料用于位移测量的传感机理验证,包括一维线位移、角位移和二维线位移,建立的理论和仿真模型也都是正向的由位移量到电压输出值的关系,还没有建立由电压输出值到位移量的逆模型,从而实现终端产品实时给出位移量的特性。逆 模型的建立与信号处理,以及由电压信号实时推演位移量的工作将在下一步的研究中实现。

此外需要说明的一点是,第二代传感器样机未用于具体实验测试,原因在于压电薄膜的特殊性, 设计中忽略了超磁致伸缩材料和压电薄膜的连接方式对于乘积效应的影响(以界面耦合系数 k 的形 式),事实上,当超磁致伸缩棒这一刚性圆柱体与一个膜状物直接连接时,两者通常情况下不是理想 的面接触而是多个线接触,导致超磁致伸缩棒的宏观形变与应力输出并不能有效的传递给压电片。此 外,MEAS 的 PVDF 压电薄膜特性犹差,原因在于其结构决定了不能存贮电荷,只对动态力敏感,而 对低频率的激励相应差。其解决方案为改进结构,在两种智能材料中添加聚酯材料,形成类三明治的 层状结构,提高磁致伸缩材料形变应力传递的效率。

长方体永磁体的磁场分布相对不均匀、不对称,加剧了不同位置传感器的差异性,增加了建模的 难度,从而降低了传感的精度。未来可以考虑采用替代性的对称性更好的磁场,譬如可以采用线圈产 生相对可控的磁场。

商用传感器与原始压电材料之间特性仍旧存在差异,故在未来的研究中,应采用原始压电材料制 备和搭建磁电复合材料。

6.2 展望

如第一章所述,磁电复合材料的实际运用稀缺,本文将其运用于位移测量是磁电效应的一个可行 应用。从一维线位移、单轴角位移,到二维线位移,通过仿真和实验都证实了这种传感器的有效性,

第46页 共50页



因此,可以畅想从1个自由度到2个自由度到3个自由度直至6个自由度的位移传感,最终实现对空间中一个物体6个自由度的运动姿态的实时检测,形成一个空间传感系统,而这只需要在相应的节点 布置多个结构完全相同的非接触式线-角复合传感器,以及一套信号处理系统。

位移的测量也只是一个开端,速度、加速度都可以由时间和位移量构成的数据簇经过一定的运算 得到。而针对角位移传感,则有望扩展到角速度、角加速度甚至扭矩的传感。基于磁电效应的传感器 在一系列的物理量传感中具有广阔的发展前景。

目前完成的传感器结构形式并不是最优化的但已呈现出一定的传感性能,在未来,需要采用更加 紧凑、高效的结构形式和磁致伸缩相、压电相分布形式,以实现更高的磁电耦合系数,促进结构的小 型化,初步的愿景是能将其做成小型的芯片,集成信号处理模块(信号的放大与调理),从而可以更 加方便的运用于工业生产制造环境中。而从未来的发展趋势来看,磁电复合材料有望实现纳米尺度, 进而可以完成微尺度、MEMS环境下的应用。



参考文献

- [1] MAYER-SCHONBERGER V, CUKIER K N. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think [M]. Eamon Dolan/Houghton Mifflin Harcourt, 2013.
- [2] P C. J. Physique [M]. 1894.
- [3] P D. Z Phys, 1926, 36(300.
- [4] RADO G, FOLEN V. Observation of the magnetically induced magnetoelectric effect and evidence for antiferromagnetic domains [M]. Physical Review Letters. 1961: 310-1.
- [5] VAN SUCHTELEN J. Product properties: a new application of composite materials [J]. Philips Res Rep, 1972, 27(1): 28-37.
- [6] VAN DEN BOOMGAARD J, TERRELL D, BORN R, et al. An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material [J]. Journal of Materials Science, 1974, 9(10): 1705-9.
- [7] VAN DEN BOOMGAARD J, VAN RUN A, SUCHTELEN J V. Magnetoelectricity in piezoelectricmagnetostrictive composites [J]. Ferroelectrics, 1976, 10(1): 295-8.
- [8] HARRSHE G, DOUGHERTY J, NEWNHAN R. Theoretical modeling of multilayer magnetoelectric composite [J]. Int J Appl Electromagn Mater, 1993, 4(145-59.
- [9] NAN C-W, LIU L, CAI N, et al. A three-phase magnetoelectric composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and polymer [J]. Applied physics letters, 2002, 81(20): 3831-3.
- [10] DONG S, LI J-F, VIEHLAND D. Longitudinal and transverse magnetoelectric voltage coefficients of magnetostrictive/piezoelectric laminate composite: theory [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2003, 50(10): 1253-61.
- [11] NAN C-W. Magnetoelectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases
 [J]. Physical Review B, 1994, 50(9): 6082.
- [12]朱保兵,李国强,王建国, et al. 层状压电压磁弹性介质空间问题的数据分析与处理 [J]. 力学季刊, 2004, 25(4): 502-8.
- [13] 关群,何顺荣. 压电,压磁弹性体平面问题的通解 [J] [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1417-22.
- [14] DONG S, LI J-F, VIEHLAND D. Longitudinal and transverse magnetoelectric voltage coefficients of magnetostrictive/piezoelectric laminate composite: experiments [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2004, 51(7): 794-9.
- [15] NAN C-W, BICHURIN M, DONG S, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(3): 031101--35.
- [16] 杨斌堂. 用于检测精密机构高精度转角和转矩的传感器, CN101975548A [P/0L]. 2011-02-16].
- [17] JOULE J P. XVII. On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1847, 30(199): 76-87.
- [18] VILLARI E. Change of magnetization by tension and by electric current [J]. Ann Phys Chem, 1865, 126(87-122.
- [19] LEGVOLD S, ALSTAD J, RHYNE J. Giant magnetostriction in dysprosium and holmium single crystals [J]. Physical Review Letters, 1963, 10(12): 509-11.

第48页 共50页

- 上海交通大学 Shanghai Jiao Tong University
- [20] CLARK A, DESAVAGE B, BOZORTH R. Anomalous thermal expansion and magnetostriction of single-crystal dysprosium [J]. Physical Review, 1965, 138(1A): A216.
- [21] KOON N, SCHIMDLER A, CARTER F. Giant magnetostriction in cubic rare earth-iron compounds of the type RFe< sub> 2</sub> [J]. Physics Letters A, 1971, 37(5): 413-4.
- [22] SAVAGE H, CLARK A, POWERS J. Magnetomechanical coupling and ΔE effect in highly magnetostrictive rare earth-Fe 2 compounds [J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1975, 11(5): 1355-7.
- [23] 王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计 [M]. 冶金工业出版社, 2003.
- [24] UCHINO K. Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology [M]. Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [25] 贾振元, 郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用 [M]. 科学出版社, 2008.
- [26] CARMAN G P, MITROVIC M. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials with applications to 1-D problems [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1995, 6(5): 673-83.
- [27] ZHENG X. A nonlinear constitutive model for magnetostrictive materials [J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 21(3): 278-85.
- [28] ZHENG X J, SUN L. A nonlinear constitutive model of magneto-thermo-mechanical coupling for giant magnetostrictive materials [J]. Journal of applied physics, 2006, 100(6): 063906--6.
- [29]ANDERSON P. Generalizations of the Weiss molecular field theory of antiferromagnetism [J]. Physical Review, 1950, 79(705-10.
- [30]徐彭有. 超磁致伸缩驱动器精密位移驱动控制研究 [D]; 上海交通大学, 2010.
- [31] STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE ULTRASONICS F, AND FREQUENCY CONTROL SOCIETY, 1987.
- [32]李景天, 宋一得. 用等效磁荷法计算永磁体磁场 [J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 1999, 19(2): 33-6.
- [33] YANG B, MENG G, XU P, et al. Magnetostrictive Blocked-Force Clamping Mechanism for Secure and Heavy-Load Inchworm Motion, F, 2009 [C]. ASME.
- [34] YANG B, LIU Q, ZHANG T, et al. Non-Contact Translation-Rotation Sensor Using Combined Effects of Magnetostriction and Piezoelectricity [J]. Sensors, 2012, 12(10): 13829-41.



谢辞

时光飞逝,随着毕业论文的定稿,四年的大学本科生活也即将画上句号。经过了四年的大学学习 生活我感觉自己成熟许多,掌握的许多知识和道路,为今后的继续深造打下了良好的基础。

首先,我要感谢在我的指导老师一杨斌堂老师。本文从选题到定稿,都是在杨老师的亲切关怀和 悉心指导下完成的。杨老师待人和蔼,认真处事、治学严谨,作为一名优秀的经验丰富的教师,具有 丰富的理论知识和实践经验,在整个论文实验和论文写作过程中,对我进行了耐心的指导和帮助,提 出严格要求,引导我不断开阔思路,为我答疑解惑,包容我的瑕疵和失误,鼓励我大胆创新,使我在 这一段宝贵的时光中,既增长了知识、开阔了视野、锻炼了心态,又培养了良好的实验习惯和科研精 神。这是我人生中一笔重要的精神财富。

在本文的实验研究及撰写过程中,实验室的师兄师姐们在实验工作中提供的热心帮助和指导,孙 晓芬小师姐、赵龙师兄和邓凯、蔡培师兄,以及已经毕业的两届师兄在平时的研究过程中给予我的鼓 励和帮助,让我受益匪浅。尤其是张婷师姐两年来的指导,让我对实验操作和对研究方法逐渐熟悉, 在此致以诚挚的谢意。

在交大的四年中,我的生活充实、多彩而又美好,这也要感谢我的室友,罗建南,陈定邦和徐言; 感谢我的好朋友冯天恒、孙永斌、郑斌等;感谢机动特别是十班的各位同学。他们在我四年的学习上 给予我的无私指导和帮助,在生活中对我的包容和照顾。特别是陪我度过了大二那段艰难的日子,对 此,我永远心存感激。衷心的祝福他们能在接下来的生活中一帆风顺。

我还要感谢我亲爱的母校--上海交通大学提供给我们最好的学习、生活环境,让我们可以专心的 学习先进的知识,提高自己的各项技能与素质。让我们茁壮成长,顺利的毕业!

在即将毕业之际,我还要感谢我的父母,焉得谖草、言树之背、养育之恩、无以回报,他们永远 健康快乐是我最大的心愿!

在论文即将完成之际我的心情无法平静,从开始进入课题到论文的顺利完成有很多可敬的师长、 同学、朋友给了我无言的帮助,请在这里请接受我诚挚谢意。

感谢我的指导老师! 感谢所有给我们授课的老师和辅导老师! 感谢师兄、同学和室友们! 也衷心感谢我的父母和家人! 衷心感谢您们!

刘庆伟

二零一三年六月于交通大学



STUDY ON A NOVEL NON-CONTACT TRANSLATION-ROTATION SENSOR BASED ON MAGNETOELECTRIC EFFECT

Introduction

With the development of modern technology, Information acquisition technology, as a gap in the three pillars of information age, which has restricted the productivity progress advancement, has to be enhanced urgently. Especially accompanied by the trends of high precision and miniaturization in industry, traditional displacement sensor cannot meet the actual demand, given their compact structure and single measurement feature.

While the magnetoelectric (ME) effect is the phenomenon of inducing (electric) polarization by applying an external electric (magnetic) field. The magnetoelectric effect was first conjectured by P. Curiein 1894 while the term "magnetoelectric" was coined by P. Debye in 1926. But the problem is ME effect in monophase material is quite weak and research was in a low state until 1972 when J. van Suchtelen discovered the product tensor property and prepared the very first piece of ME composite. Hereafter several ways of preparation and structures were found, among them the coupling interaction between piezoelectric and magnetic substances could produce a large ME response at room temperature. While by now few composite magnetoelectric material have been implemented into an actual device.

Thus the ME effect is a result of the product of the magnetostrictive effect in magnetostrictive material and piezoelectric effect in piezoelectric one. Thus we proposes a novel non-contact translation-rotation sensor (Nc-TRS) by connecting these two materials in series.

The sensing mechanism of it can be elaborated as follows:

The magnetic field, generated by a permanent magnet (PM), changes accompanying the displacement of the PM. The change can be perceived by a GM rod in terms of its length or stress, which will be transmitted to the piezoelectric material cause our design of a rigid structure. In the end, the stress given by GM to piezoelectric material will induce a charge. By monitoring the charge (in form of voltage), we then can decide the position of the PM according to mathematical and physical model.

Magnetostriction is a property of ferromagnetic materials that causes them to change their shape or dimensions during the process of magnetization. The variation of materials's magnetization due to the applied magnetic field changes the magnetostrictive strain until reaching its saturation value, λ . The effect was first identified in 1842 by James Joule when observing a sample of iron. And piezoelectricity is the electric charge that accumulates in certain solid materials in response to applied mechanical stress. Piezoelectricity was discovered in 1880 by French physicists Jacques and Pierre Curie.

Unfortunately both magnetostrictive and piezoelectric material have non-linear property, which will effect the sensing process seriously, bring a coupling non-linear property into our whole system. It can cause damage to the precision and resolution of our Nc-TRS. Hence we must take the non-linear property into consideration during modeling of the sensing mechanism.

With respect to magnetostricitive material, there has several non-linear model for it, including Preisach model, Jiles-Atherton model and other non-linear model based on thermal dynamics recently. Given to the time we have for this graduation field work, we choose J-A model for our system modeling and simulation.

As to piezoelectric material, he non-linear property of it is rather small compared to that of magnetostrictive material, while the current non-linear model for it is quite complicated. Hence we adapt a linear constitutive equation for piezoelectric material.

To begin with the non-linear and linear constitutive equation of these two materials, we build mathematical model of the sensing mechanism, most factors taken into fully consideration including non-linear character on current condition. We design and produce two prototypes with giant magnetostriction material



(GMM) rod and three kinds of piezoelectric material (PZT, PVDF and EFMi). To be noted, commercial piezoelectric sensor LC1104, DT1-028K and SSeTOUCHcn are used for implementing the experiment for convenience at this moment. The proposed sensor features fewer components, more satisfactory precision and convenience in utilizing, easier assembly into host structures and lower cost compared to other high precision displacement sensors.

The experiment system consist of Nc-TRS, a giant magnetostrictive material (GM) actuator made inhouse, a permanent magnet block (PM, RbFeB-N35, $BH_{max}/35MGOe$, size $10 \times 10 \times 50$ mm), a fine-tuning platform, a laser displacement sensor (Keyence LK-G30), a digital multimeter (NF DM2561, 100 nV resolution), a stepper motor, and a power supply.

The motion of permanent magnet was provided by a two axis fine tuning platform(both linear), the housemade GMA(responsible for coarse and fine linear displacement respectively); a stepper motor (responsible for angular displacement).

All of our simulation and experiment are excuted with the assistance of LabVIEW software. on Based on the mathematical model and experiment platform, simulation and several experiment are executed with the assistance of LabVIEW software by National Instrument inc., which offers visualization and convenient features for data acquisition and experimental device control.

Our experiments are set into two main sections, namely one-dimension linear displacement and angular measurement, two-dimension in-plane displacement measurement, several sets of system are built respectively. Satisfactory result has been achieved, by current study, our Nc-TRS has realized the resolution of 990 nm and 0.013 °.

We have acquired mounts of experiment data and simulation data of displacement of permanent magnet and the induced voltage, then draw the figures with Matlab. Several typical experiment are executed and we have compared the raw data curve, filtered curve and theoretically simulation data. The experiment matches well with simulation, which proves the sensing mechanism to be feasible.

However, due to time and device restriction, our experiments still have several limits, or exactly, several important experiments cannot be executed as we have assumed. That can be mainly attributed to the NF DM 2561's dysfunction to communicate with LabVIEW while we laboratory has not purchased the GPIB communication card option. While in the future we can fix this and do more experiments.

Besides, at present, many structures of composite magnetoelectric material have been found to exhibit a much more strong ME effect. While we have no such equipment to prepare them, hence we choose a rather basic type of composite magnetoelectric material. But it do have verified the sensing mechanism we have proposed. What's more, the non-linear model we choose for modeling magnetoestrictive material is a rather coarse one, while we use a linear constitutive equation for piezoelectric material. If we can adapt a more precise model for magentostrictive material and a non-linear model for piezoelectric material, the resolution and precision of our Nc-TRS can be improved substantially.

Results, conclusion and vision

In summary, we have proposed a new sensor that is able to measure both translation and rotation displacement by combining magnetostrictive and piezoelectric effects. A non-contact displacement sensor prototype is constructed and tests specifically designed to verify the performance of the sensor are conducted. At the current research stage, through both theoretical and experimental study, the non-contact displacement sensor makes it feasible to measure both translation and rotation either in coarse or fine measurement, and its measurement dimension can be expanded to two by arranging two identical Nc-TRS, which feature can be expanded to six-dimension in the future.

In C.W.Nan's view, in the future, more research should be done in bulk ceramic composites and magnetic alloy based composites. And what's most important to the work we have done in this thesis is that multiferroic magnetoelectric composites have the potential to develop into nanostructure. Thus our Nc-TRS can be made as small as commercial electric chips, with signal processing and conditioning module integrated. In a word, this study lays a foundation for optimizing the Nc-TRS structure and expanding its measuring dimensions.

Our vision is to build a sensing system, which can measure 6 degree of freedom (DOF) movement in three-dimension space.