

基于GMM转换器 喷嘴挡板伺服阀的研究

Jiyu GMM Zhuanhuanqi Penzui Dangban Sifufa De Yanjiu

王传礼 丁 凡 许贤良 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

基于 GMM 转换器 喷嘴挡板伺服阀的研究

王传礼 丁 凡 许贤良 著

中国矿业大学出版社

内容摘要

本书从 GMM 的唯象理论和工程实际应用的角度出发,介绍了磁致伸缩现象的产生机理和各种有实用意义的物理效应,并根据磁力学理论,给出磁致伸缩方程式;介绍了 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的设计理论及方法,提出了一种新型的自适应温度实时补偿机构,并进行了理论分析和实验验证,建立了相应的设计、评价准则。分析了 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的几种建模方法并进行了计算机仿真。在建立 GMM 转换器轴对称磁场数学模型的基础上,利用有限元方法对磁场进行数值计算并分析了计算结果。在构建了基于 GMM 喷嘴挡板伺服阀控制压力的液压系统和测试系统基础上,实验研究 GMM 喷嘴挡板伺服阀的控制压力的静态、动态及滞回特性。结果表明,基于 GMM 喷嘴挡板伺服阀具有较宽的控制压力特性,良好的线性度,较快的响应速度,为进一步将其应用于两级电液伺服阀提供了设计和实验依据。

本书可作为高等学校机电专业高年级学生或研究生教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究/王传礼,
丁凡,许贤良著. —徐州:中国矿业大学出版社,
2006.10

ISBN 7-81107-288-2

I. 基… II. ①王… ②丁… ③许… III. 转换器
—喷嘴—伺服阀—研究 IV. TP335

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 124236 号

书 名 基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究

著 者 王传礼 丁 凡 许贤良

责任编辑 钟 诚

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 225 千字

版次印次 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

定 价 19.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

国民经济各部门和高科技各领域的发展,都不可避免地受到材料发展的制约或推动。作为主要传动与控制方式之一的流体传动与控制技术,当然也不例外。超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, 简称为 GMM)是近年才出现的一种新型功能材料,具有应变大、响应速度快、能量传输密度高、输出力大等优异性能。利用 GMM 设计新型的电-机转换器,取代传统型电-机转换器,如力矩马达或力马达等,可提高整个电液伺服阀的响应速度和控制精度。

本书以 GMM 为基础,以 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀为研究对象,采用理论分析、计算机仿真、静态磁场有限元计算、动态磁场磁路计算和实验研究相结合的方法,对其进行系统、深入的分析和研究,提出了基于 GMM 转换器的喷嘴挡板伺服阀的实现方案和具体结构,研制了 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀,建立了 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀设计、评价准则;通过动态磁场磁路计算、磁场有限元仿真及实验验证,得出了 GMM 转换器磁场分布和磁感应强度的变化规律。研究表明,由 GMM 转换器的输出杆直接驱动挡板的结构形式,不仅切实可行,而且具有简单、可靠和便于控制的特点;采用温度补偿机构、预压力施加机构、可调动态偏置磁场和添加导磁环等措施,提高了压力控制性能。提出了伺服阀用 GMM 电-机转换器自适应热补偿机构,并进行了理论分析和实验验证,结果表明,所提出的补偿机构能有效地补偿 GMM 棒的热变形,提高了 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀控制压力的输出精度。提出了测量动态磁场的简便实用方法,实现了测试装置在对电流-控制压力测量的同时,还能对动态磁场磁通变化率进行检测,解决了动态磁场不便测量的难题。

本书共七章,介绍了 GMM 的性能优越性和 GMM 电-机转换器在流体元件中的应用;磁致伸缩现象的产生机理和各种有实用意义的物理效应等;基于 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的结构组成、工作原理和性能特点,建立了相应的设计、评价准则;GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的建模方法,建立了 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的静、动态数学模型并进行仿真分析;利用有限元方法对磁场进行数值计算并分析了计算结果;GMM 喷嘴挡板伺服阀控制压力的静态、动态及滞回特性。

特别感谢浙江大学流体传动及控制国家重点实验室的吴根茂教授和李其朋博士对本书的修改和审阅。本书的出版得到了安徽理工大学领导、安徽理工大学机械工程系和科技开发处的大力支持,在此也表示真诚谢意。

因编者水平所限,本书难免存在缺点和错误,热忱期望读者批评指正。

编 者

2006. 6

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 电-机转换器的作用、分类及原理特点	(1)
1.1.1 传统型电-机转换器	(2)
1.1.2 新型电-机转换器	(3)
1.2 超磁致伸缩材料及其优点	(4)
1.2.1 GMM 的性能优越性	(5)
1.2.2 GMM 的发展历程	(6)
1.2.3 材料成分研究及其制备	(7)
1.3 国内外应用研究概况	(8)
1.3.1 主要应用领域	(8)
1.3.2 相关理论研究进展	(16)
1.4 课题研究意义及研究内容	(16)
1.4.1 课题研究意义	(16)
1.4.2 技术研究难点	(17)
1.4.3 课题研究内容	(18)
第二章 磁致伸缩现象机理及超磁致伸缩材料的特性	(19)
2.1 磁致伸缩现象的诱发机理	(19)
2.1.1 磁致伸缩现象	(19)
2.1.2 磁致伸缩的唯象理论	(20)
2.2 超磁致伸缩材料的基本特性	(22)
2.2.1 晶体晶向及表示方法	(22)
2.2.2 “倍频”现象	(23)
2.2.3 压应力特性	(24)
2.2.4 温度特性	(26)
2.3 磁致伸缩的物理效应及压磁方程	(27)
2.3.1 磁致伸缩的物理效应	(27)
2.3.2 压磁方程	(28)
2.4 磁-机耦合特性	(30)
2.4.1 磁-机耦合系数	(30)
2.4.2 压力、温度对 k_{33} 的影响	(31)
本章小结	(32)

第三章 基于 GMA 喷嘴挡板伺服阀的结构综合与分析	(34)
3.1 总体结构和原理	(34)
3.1.1 结构原理	(34)
3.1.2 关键技术	(35)
3.2 热变形抑制的方法与原理	(37)
3.2.1 热变形抑制方法	(37)
3.2.2 热补偿机构的原理	(39)
3.2.3 理论分析	(40)
3.2.4 实验结果分析	(41)
3.3 能量转换过程	(43)
3.3.1 GMM 转换器能量分析	(43)
3.3.2 GMM 转换器的能量损耗	(45)
3.4 GMA 喷嘴挡板伺服阀特性分析	(47)
3.4.1 控制压力特性方程	(47)
3.4.2 压力灵敏度分析	(48)
3.4.3 特性分析	(50)
3.5 GMM 喷嘴挡板的结构参数选择	(51)
3.5.1 喷嘴直径 D_N 的确定	(51)
3.5.2 零位间隙 x_{f0} 的确定	(52)
3.5.3 固定节流孔直径 D_0 的确定	(52)
3.5.4 供压比 $\frac{p_c}{p_s}$ 的确定	(52)
3.6 基于 GMM 转换器两级电液伺服阀的实现方案	(53)
3.6.1 单 GMM 转换器方案	(53)
3.6.2 双 GMM 转换器方案	(54)
本章小结	(55)
第四章 GMM 转换器及其喷嘴挡板伺服阀的建模与仿真	(56)
4.1 GMM 转换器的输出模型	(56)
4.1.1 静态模型	(56)
4.1.2 动态模型	(58)
4.2 GMM 转换器的动态特性仿真	(60)
4.2.1 仿真模型的建立	(60)
4.2.2 仿真结果及分析	(61)
4.3 GMM 喷嘴挡板伺服阀的建模与仿真	(65)
4.3.1 GMM 喷嘴挡板伺服阀的模型	(65)
4.3.2 阀的仿真结果及分析	(67)
4.4 GMM 转换器其他数学模型简介	(70)
4.4.1 磁-机耦合模型	(70)
4.4.2 滞回特性模型	(72)

4.4.3 谐振模型	(74)
4.5 GMM 转换器的实验研究	(76)
4.5.1 测试系统组成	(76)
4.5.2 GMM 转换器输出位移	(76)
4.5.3 GMM 转换器输出力	(79)
本章小结	(79)
第五章 GMM 转换器磁路设计和磁场有限元分析	(81)
5.1 GMM 的驱动形式	(81)
5.1.1 驱动形式	(81)
5.1.2 双线圈的连接方式	(82)
5.2 GMM 转换器磁路分析	(83)
5.2.1 磁路构成与原理	(83)
5.2.2 磁路计算及分析	(84)
5.3 驱动和偏置线圈的设计	(86)
5.3.1 线圈最大驱动电流的确定依据	(86)
5.3.2 线圈的功率优化和参数计算	(88)
5.3.3 线圈参数计算	(89)
5.4 驱动磁场均匀性分析	(91)
5.4.1 驱动磁场的轴向均匀性	(91)
5.4.2 驱动磁场的径向均匀性	(92)
5.5 磁场有限元分析	(92)
5.5.1 磁场有限元模型	(92)
5.5.2 有限元结果及分析	(95)
5.6 动态磁场的仿真与实验	(102)
5.6.1 动态磁场的建模	(102)
5.6.2 仿真与实验结果	(105)
本章小结	(107)
第六章 基于 GMA 喷嘴挡板伺服阀的实验研究	(109)
6.1 液压与测试系统的构建	(109)
6.1.1 液压系统组成	(109)
6.1.2 测试系统组成	(109)
6.1.3 测试原理及方法	(111)
6.2 实验测量误差分析	(112)
6.2.1 测量误差来源	(112)
6.2.2 系统误差分析	(113)
6.3 控制压力静态特性实验	(114)
6.3.1 控制压力静态实验	(115)
6.3.2 控制压力滞回特性实验	(117)
6.4 控制压力动态特性实验	(118)

6.4.1 阶跃特性实验	(118)
6.4.2 正弦特性实验	(120)
本章小结	(123)
第七章 总结和展望	(125)
7.1 总 结	(125)
7.2 工作展望	(126)
参考文献	(127)

第一章 绪 论

本章介绍了传统和新型两类电-机转换器的作用、原理及特点,并对其性能进行了比较;概述了超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material,简称为 GMM)的性能优越性和发展历程;着重阐述了超磁致伸缩电-机转换器 GMA(Giant Magnetostrictive Actuator,简称为 GMA)在流体元件中的应用,并总结了该类转换器的最新研究成果及应用研究现状;简要概括了本课题的研究意义、研究难点和主要研究内容。

1.1 电-机转换器的作用、分类及原理特点

液压技术是以液体(或气体)为介质,实现信息、运动、力能传递与控制的技术。作为三大主要传动和控制方式之一,它具备功率密度高、结构小巧、元件组装和配置灵活、动态性能好、易于实现直线运动等独特的技术优势,已成功地用于一切需对运动过程进行灵活控制和调节的大、中功率的机械设备中,成为农业、工业、国防和科学技术现代化进程中不可替代的一项重要的基础技术。

随着现代科学技术的飞速发展,它已经不再仅仅充当一种传动方式,更多地是作为一种控制手段,充当了连接现代微电子技术和大功率控制对象之间的桥梁,成为现代控制工程中不可缺少的技术手段和环节。近年来,微电子技术、传感检测技术、近代控制理论和计算机技术得到了蓬勃发展。与此相对应,液压传动与控制技术也取得了质的飞跃。多学科的交叉融合,使传统的液压伺服控制发展成为现代的电液伺服控制和电液比例控制。

复杂的机电液一体化元件——电液伺服阀,是电液伺服控制系统的核心部件。它主要由电-机转换器、液压前置级(通常为喷嘴挡板伺服阀)、液压放大级和适当的反馈机构等组成。在航空航天和军事等领域及工业中精密位置控制中,常需要高频响电液伺服阀。而在电液伺服阀各环节中,电-机转换器(通常是力矩或力马达)响应速度最低。要提高电液伺服阀的频宽和响应速度,必须提高电-机转换器的频宽。

电-机转换器作为连接电气元件和液压机械元件的桥梁,是电液伺服阀乃至液压控制系统的关键元件之一。电-机转换器性能的优劣,直接关系到液压控制系统的性能指标,有些指标甚至关系到系统的性能能否实现。无论从历史和现实的角度,电-机械转换器频响和带载能力的提高,是提高电液伺服阀频响的前提。目前,随着先进制造技术、微电子技术和以新型功能材料为基础的转换器研制开发的成功,使新型高频响电-机转换器的实现和

应用成为现实,这已成为电液伺服阀发展重要的基础。因此,对其进行深入研究不仅必要,而且具有重要现实意义。

1.1.1 传统型电-机转换器

目前,根据传统电-机转换器的结构型式和性能特点,主要可分以下几种类型^[1~6]:

1.1.1.1 动圈式力马达

它是基于载流导体在磁场中受力的原理而工作的,有激磁式和永磁式两种,激磁式现已很少采用。永磁式力马达的原理是永久磁铁在气隙中产生一固定磁通,当载流线圈通过直流电时其便受到一电磁力,改变线圈电流的大小和方向就可以产生相应大小和方向的输出力和位移。永磁式力马达的优点是工作行程大、线性好、滞环小、结构简单;缺点是输出力小、体积大且线圈因油的阻尼较大而影响动态响应。

1.1.1.2 动铁式力矩马达

它是基于衔铁在磁场中受力的原理而工作的,即利用控制磁场调制极化磁场来改变不同气隙中的磁通,使衔铁上得到与输入电流大小和方向相应的净输出力矩。目前它是电液伺服阀中应用最广泛的一种,具有响应快、体积小、输出力矩大和灵敏度高等优点;缺点是线性范围小、制造精度高、价格贵和易产生因磁性刚度而造成的稳定性问题。

1.1.1.3 比例电磁铁

比例电磁铁作为目前电液比例阀中应用最广泛的电-机转换器,是电液比例控制系统的关键元件之一,其结构原理如图 1-1 所示。它是一种基于电磁系统产生的电磁吸力,使衔铁作机械运动,从而对外做功的电-机转换器。其功能是将比例控制放大器的电流信号转换成为力或位移信号输出。其优点是电磁铁推力大、结构简单、价格低廉、维护方便、技术成熟。其激励方式为直流、交流和永久磁铁;其结构可分单向和双向型两种,一般常用单向型比例电磁铁。

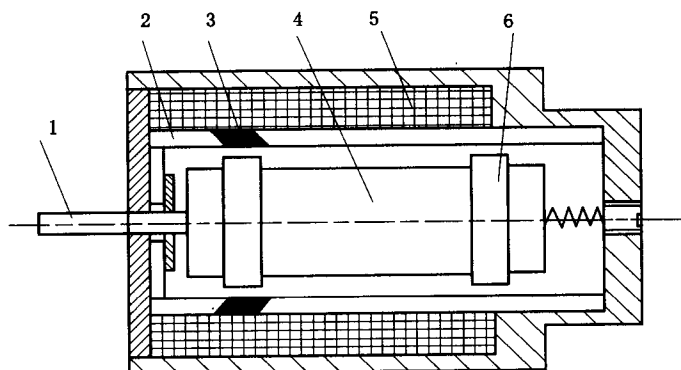


图 1-1 比例电磁铁结构原理图

1——推杆；2——导套；3——隔磁环；4——衔铁；5——线圈；6——轴承环

1.1.1.4 步进电机

它是一种基于电脉冲信号进行控制,并将电脉冲信号转换成相应的角位移的控制电动机。每输入一定脉冲,其输出轴就跟着转动一定步距角,实现步进式运动,所以称为步进电机,有时也称为步进马达。小型步进电机常用作电-机械转换器。其优点是性能稳定、结构简单、维护方便,且因输入信号为数字信号,便于计算机控制;缺点是动态响应慢、效率低、承

载能力差。

1.1.2 新型电-机转换器

常用的新型电-机转换器可分为压电 PZT/电致 PMN 伸缩型、超磁致伸缩、形状记忆合金型和谐振驱动型等多种^[7~13]。

1.1.2.1 压电 PZT /电致 PMN 伸缩型

压电陶瓷 PZT 和电致伸缩材料 PMN 都是电介质,在一定电场作用下都能产生轴向机械应变,它们的宏观表现比较类似,故将它们归为一类分析。但从产生机理上讲,它们是两种不同的效应。两者的不同之处主要有两点:一是 PZT 的应变大小与外加电场强度成正比,且应变方向与磁场方向有关,即所谓“逆压电效应”;而 PMN 应变大小却与电场成平方关系,且应变方向与磁场方向无关,即所谓“电致伸缩效应”。二是 PZT 的电场-应变存在严重的磁滞现象,一般为 15%~20%;而 PMN 却很小,一般为 1.5%~2%。因此,在电液伺服阀的应用中主要以 PMN 为主,其特点是响应快、输出力大。

PMN 喷嘴挡板伺服阀的结构如图 1-2 所示。图 1-2(a)为其挡板结构,弹性板上下面的 PMN 元件 1 由多层压电叠片组成。当上、下 PMN 加以相反大小的电压时,两 PMN 叠片的伸缩量一个增加,一个减小,使弹性板上、下变形,从而引起挡板和喷嘴间距变化,达到驱动伺服阀的目的。实验研究表明:其频宽比一般的电液伺服阀的频宽有了很大的提高,幅频宽(-3 dB)达到 1 500 Hz 左右。

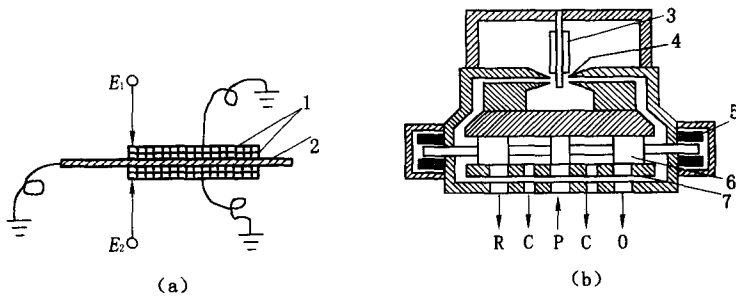


图 1-2 PMN 喷嘴挡板伺服阀原理图

1——PMN 元件; 2——弹性板; 3——PMN 挡板; 4——喷嘴;
5——位移传感器; 6——主阀芯; 7——固定节流孔

由于它位移输出小(为 GMM 的 1/10 左右)、工作电压高、电绝缘要求高、具有漂移和滞回等缺点,加之材料本身的居里点温度低,限制了它们在电液控制技术方面的进一步应用。

1.1.2.2 形状记忆合金 SMA 型

形状记忆合金(Shape Memory Alloy,简称 SMA)其特点是具有形状记忆效应:将 SMA 高温定型后,冷却到低温状态,若对其施加外力产生变形,一般金属在超过其弹性变形后会发永久变形,而 SMA 却不同,将其加热到某一温度之上,它会重新恢复形状。形状记忆合金虽变形量大,但其响应速度慢,且变形不连续,无法精确控制,因此限制了其在流体控制元件中的应用范围。

日本 Shinichi Yokota 等人研制的 SMA 小型比例伺服阀结构如图 1-3 所示。该阀采用

差动结构,左右两端的 SMA 转换器是由一组细丝状的形状记忆合金绕制而成。对该阀进行性能测试实验时,采用通电加热和强制油冷方法来驱动 SMA 转换器,对阀芯两端分别进行加热或冷却,形状记忆合金则相应地收缩或伸长,驱动伺服阀的阀芯左右移动,同时加入位置反馈以提高伺服阀的控制性能。

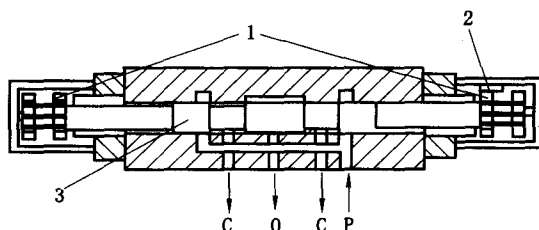


图 1-3 SMA 比例阀

1——SMA 执行器; 2——位置传感器; 3——阀芯

1.1.2.3 稀土超磁致伸缩型

GMA 及其在电液伺服阀上的应用是本课题的重点研究内容,下面将详细介绍。

此外,还有光致伸缩型和电、磁流变液体等类型的新型转换器。但由于这几种转换器尚处于实验研究阶段且应用范围也比较有限,这里不予详细介绍。与其他转换器相比,GMA 的优势在于它的快响应,高精度和大输出力,表 1-1 对几种转换器的性能进行了比较。

表 1-1 几种转换器的性能比较

	电 机转换器	精度/ μm	频宽/Hz	特 点
传 统	比例电磁铁	约 20	小于 100	结构简单、磁滞大、价格低
	动圈式力马达	小于 20	小于 200	滞环小、行程大、体积大、价格低
	动铁式力马达	约 10	约 200	滞环大、线性差
	永磁力矩马达	10	小于 400	频响较高、线性差、结构复杂
新 型	PZT	约 0.1	大于 10^3	应力大、位移小、滞环大
	GMM	小于 0.1	大于 10^3	结构简单、应力大、重复性好

1.2 超磁致伸缩材料及其特点

稀土超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material,简称 GMM)是继稀土永磁、稀土磁光和稀土高温超导材料之后的又一种重要的新型功能材料,被誉为 21 世纪战略性高科技功能材料。它能有效地实现电磁能-机械能的可逆转化,具有应变大、响应速度快、能量传输密度高和输出力大等优异性能。它是 20 世纪 70 年代初由美国海军武器中心的 A. E. Clark 等人首先研制出来的。最常用超磁致伸缩材料的稀土元素成分为 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$ (一般 $x=0.27\sim 0.35$, $y=0.05\sim 0.1$)。

目前,在 GMM 制备和应用研究方面,美国、瑞典、日本等国处于领先水平,其主要产品已商品化,如美国 Edge Technologies 公司的 Terfenol-D、瑞典 Feredyn AB 公司的 Magmek86 等,日本住友轻金属工业株式会社、英国稀土制品公司(REP)也有相应的产品。另外,国内北京科技大学、包头稀土研究院和中科院上海冶金材料研究所等几家单位已能批量生产同类产品,其性能已接近或达到国际先进水平。GMM 一经问世,就以其优异的特性引起各国高科技领域的高度重视,发达国家投入了大量技术力量和科研经费进行理论研究和应用开发,积极开展其在机械、电子、军事和国防等方面的应用研究,现已广泛应用于机器人、传感器、航海、声纳、换能器、微驱动器、微机电系统和流体元件等诸多领域^[14~41]。

1.2.1 GMM 的性能优越性

铁磁晶体在外磁场中被磁化时,其长度及体积均发生变化,这一现象是焦耳在 1842 年发现的,称为磁致伸缩效应,也称焦耳效应。磁致伸缩的大小用材料的相对伸长量 $\lambda = \Delta L / L$ 来表示,称为磁致伸缩系数。饱和时的磁致伸缩系数称为饱和磁致伸缩系数,记为“ λ_s ”。纵向或横向磁致伸缩统称为线磁致伸缩,具体表现为铁磁体在磁化过程中具有纵向的伸长或缩短,横向磁致伸缩的工程应用不多见。磁致伸缩是由于物质中原子或离子的自旋与轨道的耦合作用而产生的,是满足能量最小条件的必然结果。在一定的磁场作用下,该材料与传统的镍基或铁基磁致伸缩材料相比会产生大得多的长度或体积变化。

与压电材料(PZT)和传统磁致伸缩材料 Ni、Co 等相比,GMM 具有独特的性能:

- (1) 在室温下的磁致伸缩应变大,是 Ni 的 40~50 倍,是 PZT 的 5~8 倍;
- (2) 能量密度高,是 Ni 的 400~500 倍,是 PZT 的 10~25 倍;
- (3) 响应速度快,一般在几十毫秒以下,甚至达到微秒级;
- (4) 输出力大,带载能力强,可达到 250~900 N;
- (5) 其磁机耦合系数大,电磁能-机械能的转换效率高,一般可达 72%;

(6) 居里点温度高,工作性能稳定,对大功率而言,因器件的过热易使 PZT 的永久性极化完全消失;而 GMM 即使工作到居里点温度以上也只会使其磁致伸缩特性暂时消失,当冷却到居里点温度以下时,其磁致伸缩特性又完全恢复。此外,声速低,约是 Ni 的 1/3、PZT 的 1/2。

GMM 与其他磁(电)致伸缩材料的性能比较如表 1-2 所示。

表 1-2 GMM 和几种磁(电)致伸缩材料的特性比较

性 能	GMM	纯 Ni	PZT1	PZT2(PMN)
	Tb _x D _{1-x} Fe _{2-y}	Ni>98%	钛酸钡	钛酸盐+铝+锆酸盐
密度/kg·m ⁻³	9 250	8 900	5 600	7 500
磁致伸缩率(10 ⁻⁶)	1 500~2 000	-40	80	400(电致伸缩)
耦合系数	0.72	0.16~0.25	0.45	0.68
热胀系数(H=0)	12.9×10 ⁻⁶	12×10 ⁻⁶	—	(2~9)×10 ⁻⁶
能量密度/J·m ⁻³	14 000~25 000	30	960	960
居里温度/℃	387	354	125	300
电阻率/Ω·cm ⁻¹	60×10 ⁻⁶	6.7×10 ⁻⁸	1×10 ⁸	1×10 ⁸
磁导率/H·m ⁻¹	5~10	60	1 300	1 300

续表 1-2

性 能	GMM	纯 Ni	PZT1	PZT2(PMN)
	Tb _x D _{1-x} Fe _{2-y}	Ni>98%	钛酸钡	钛酸盐+铝+锆酸盐
磁致伸缩率	1.7×10 ⁻⁷ /mA	—	1.6×10 ⁻¹⁰ /mV	3.0×10 ⁻¹⁰ /mV
抗拉强度/Pa	28×10 ⁶	—	28×10 ⁶	28×10 ⁶
压缩强度/Pa	700×10 ⁶	—	—	—
偏置场/Oe	40~100	10~20	—	—

1.2.2 GMM 的发展历程

传统磁性材料的磁致伸缩应变很小,饱和应变值均小于 100×10^{-6} ,致使磁致伸缩元件的应用长期受到限制。超磁致伸缩材料(GMM)是指具有极大磁致伸缩效应的金属与稀土金属间化合物,典型的稀土超磁致伸缩材料 TbFe₂、SmFe₂ 和 Tb_xD_{1-x}Fe_{2-y}等,式中的 x 表示 Tb/Dy 之比, y 对应 Re 与 Fe 之比, x 一般为 0.27~0.35, y 为 0.1~0.35。当 $x=0.3$ 时,有高的磁致伸缩和很低的磁各向异性,且磁损耗小。 $y=0$ 时,虽说有最佳的磁伸缩应变值,但材料较脆。当 $y>0$ 时,能提高材料的强度和弹性模量。目前,稀土超磁致伸缩材料的应用开发工作在世界上许多公司进行,如美国的 Edge Technologies 公司、瑞典的 ABB 和 Feredyn AB 公司、日本的 Toshiba 公司以及英国的 Johnson Mattkey 公司等。

20 世纪 60 年代,人们发现稀土金属铽(Tb)和镝(Dy)具有较过去磁致伸缩材料大一百到一万倍的磁致伸缩应变,这个记录一直保持到现在。因为这些巨大的磁致伸缩应变只能在低温时才能获得,其实用性受到限制,因此人们在以后的年代里就开始了系统的探索,希望找到居里点在室温以上的稀土合金材料。人们发现 ReFe₂(Re:稀土元素 Tb、Dy 等)化合物不仅居里点可达 400℃左右,且在室温下仍然具有巨大的饱和磁致伸缩。但因 ReFe₂ 化合物具有很强的磁各向异性,从而影响该类材料的实际使用。

自 1970 年开始,在 ReFe₂ 化合物的基础上,美国海军表面武器研究中心(NSWC)和爱阿华州立大学开始探索具有实用意义的稀土。他们对 Re-Co、Re-Ni、Re-Fe 系化合物和合金进行了系统研究,发现 ReFe₂ 系立方莱夫斯(laves)相化合物不仅磁致伸缩应变变大,而且居里点温度高,是最有希望的体系。为降低 ReFe₂ 化合物的各相异性,A. E. Clark 等人用磁致伸缩符号相同、各相异性常数符号相反的 TbFe₂ 和 DyFe₂ 组成准二元 ReFe₂ 系。1973 年他发现 Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 的各相异性最低,且磁致伸缩应变降低较少。这就是美国超磁致伸缩材料“Terfenol-D”的基础。它的发现为超磁致伸缩材料的工业应用打下了坚实的基础。

自 20 世纪 70 年代末以来,GMM 研究的重点在材料的制备工艺方面,目的是改善组织状态,提高材料性能。这方面的进展主要有:用延性稀土相降低低脆性;采用定向凝固技术生产取向晶体,提高低磁场下的应变量,增大材料的相对导磁率、磁致伸缩率和磁-机耦合系数;改变磁畴结构,产生具有 Jump(跃变)效应的材料(轴向压应力对磁畴结构的改变作用很大)。90 年代前后,一些国家已有商品化材料供应,超磁致伸缩材料的研究开发进入快速发展阶段且应用研究也日趋活跃。

我国对稀土铁系 GMM 研究起步较晚,但进展迅速。北京钢铁研究总院、中科院沈阳金属所、中科院上海冶金所、包头稀土研究院、北京科技大学、武汉工业大学、中南大学等陆

续开展了这方面的研究工作。初步研制出了 Tb-Dy-Fe 三元及四元系、Sm-Fe 二元及多元系多晶和定向晶超磁致伸缩材料。如钢铁研究总院杜挺等和中科院声学研究所协作研制的水声换能器具有低频大功率的特性,其性能远远优于同规模的压电换能器。总体来说,目前我国制备的稀土超磁致伸缩材料性能与国际水平已接近,但产量及商品化程度还不能与发达国家相比。表 1-3 总结了对 GMM 的发展历程及应用领域。

表 1-3 GMM 的发展历程及应用领域

年 代	GMM 的发展及应用的相关事项
1842 年	焦尔发现磁致伸缩效应,又称焦尔效应
20 世纪 40 年代	开始使用 Ni、Co 晶体,磁致伸缩系数只有 40×10^{-5}
20 世纪 50 年代	采用 Fe-13%Al 合金,如俄罗斯研制的 Fe-13%Al 声发射器
20 世纪 60 年代	铁氧体材料等陆续被采用,它们的磁致伸缩最高可达 110×10^{-5}
1963~1965 年	在 Tb、Dy 等重稀土类金属中发现很高的磁致伸缩现象
1972 年	开发成室温下具有超磁致伸缩效应的 ReTe_2 (Re: 稀土元素如 Tb、Dy 等) 金属间化合物
1973 年	A. E. Clark 等人公开发表命名为 Terfenol-D 的超磁致伸缩材料 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$
1984 年	超磁致伸缩材料国际会议(瑞典)
1986 年	第一次超磁致伸缩材料国际会议(西班牙)
1987 年	美国、日本等对超磁致伸缩材料的研究开发进入快速发展阶段
1988 年	第二次超磁致伸缩材料国际会议(西班牙),发表论文近 20 篇
1990 年	国际上开发四元系 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}(\text{Fe}_{1-y}\text{T}_y)_{1.9}$ 材料,国内对 GMM 的研究开始活跃
1992 年	超磁致伸缩材料及其应用国际专门会议(日本),主要应用领域:伺服机构,动力机构部件,传感器等
1993 年	日本 MOOG 公司开发了 GMM 直动式伺服阀
1994 年	国内开始了 GMM 换声器的应用研究
1995 年	德国的 E. Quandt 和日本的荒井贤一等人开展了 GMM 薄膜驱动器的研究工作,将其应用到微流体元件和微机器人等领域
1996 年	第二次超磁致伸缩材料及其应用国际会议(美国)
1997 年	美国 IEEE 国际磁学会议,发表关于超磁致伸缩材料的研究论文近 20 篇
1999 年	美国 IEEE 国际磁学会议,发表关于超磁致伸缩材料的研究论文近 30 篇

1.2.3 材料成分研究及其制备

为了选择超磁致伸缩材料和更好地研究其性能,了解材料成分研究进展及常用制备方法是非常必要的。

1.2.3.1 材料成分研究进展

超磁致伸缩材料在室温下应变量大,输出功率大,能量密度高、机电耦合系数大,而且具有杨氏模量或声速随磁场变化,磁滞现象小等优点,但也存在原料成本高、材料脆、制造成型及加工困难的不足。

为了开发性能更优异的超磁致伸缩材料,要通过调整合金成分和改进工艺来改善材料的组织状态,从而提高材料的性能。主要研究进展有:① 研究用不同的稀土元素和铁的化合物组合获得不同性能的磁致伸缩材料,特别是 Sm-Dy-Fe 化合物具有负的磁致伸缩系数,可以用于一些特殊场合,与 Tb-Dy-Fe 合金相配合可以制造杠杆放大机构等。国内关于这

方面的研究工作还比较少。② 用其他元素部分地置换合金中的 Fe, 从而改变 Tb-Dy-Fe 合金的磁致伸缩性能。如用元素 Co、Ni、Mn、Al、Ti、B、Ca 等分别部分置换 Tb-Dy-Fe 化合物中的 Fe, 就可以改变化合物磁晶各向异性, 使磁晶各向异性补偿时 Tb 和 Dy 的相对成分发生改变。有关这方面的研究工作在国外开展得比较广泛, 国内的研究者也做了大量的实验, 例如北京大学物理系研究了用 B、Mn 和 Al 置换 Fe, 发现 Al 可以明显提高 Tb-Dy-Fe 合金的磁致伸缩性能。③ 改变磁畴结构, 产生跃变效应。用单轴压应力、磁热处理等技术使 $\langle 112 \rangle$ 取向的 Tb-Dy-Fe 孪生单晶的 λ_s , 由 $1\,300 \times 10^{-6}$ 提高到 $2\,000 \times 10^{-6}$ 。④ 提高母合金的制备工艺。磁致伸缩材料对母合金纯度的要求极高(杂质总量应小于 0.05%), 制取纯度高、成本低的母合金十分重要等等。

1.2.3.2 常用制备方法

粉末冶金制备方法主要有合金粉直接烧结法和磁场热处理烧结法。其主要工艺过程是将一定成分的 Tb-Dy-Fe 合金在氩气保护下破碎, 在酒精介质中球磨, 真空干燥后将粉末在橡皮模中压制, 并在静态磁场中取向, 然后在氩气保护下烧结成型。其优点是: ① 由于超磁致伸缩合金是金属间化合物, 相当脆, 不能用常规方法制备、成型及加工, 而粉末冶金法却可以制备出具有复杂形状及各种尺寸的产品, 因此具有商业价值; ② 通过对合金原料预先磁场定向处理, 可以生产出具有晶体取向的合金材料, 生产效率高、成本低。

1. 棒材制备主要方法

(1) 压力差法: 将已配制熔炼好的母合金放于坩埚内, 坩埚置于可抽真空和加压的容器里, 容器上部通过密封环插入可移动的带石英管的杆。抽真空, 熔化合金并保温一定时间。将石英管插入熔体中, 充氩加压, 将熔体压入石英管中, 冷却后即成棒材。

(2) 合金熔体顺序凝固法: 坩埚底部有一孔用于浇注。坩埚孔下部安装铸模, 铸模底部安装水冷铜盘。加热熔化坩埚中的合金并保温一定时间, 然后提起柱塞棒, 使合金充满铸模并自下而上定向凝固, 可制备具有晶粒取向的合金棒材。

2. 定向晶及单晶制备的主要方法

(1) Bridgman 法: 一般将预先熔炼的母合金放于适当的坩埚中, 用电阻丝或高频感应加热熔化合金, 然后以一定的速度使坩埚下降或热源上移, 进行单向凝固以得到定向晶或单晶。晶体取向为 $\langle 112 \rangle$ 方向。

(2) 区熔法: 该法分为垂直悬浮区熔法和水平区熔法。先将合金熔炼成棒材, 然后用感应加热进行区熔, 以得到定向晶或单晶。晶体取向也为 $\langle 112 \rangle$ 方向。

(3) 提拉法: 将预先制备的合金放于坩埚中, 用电阻丝、高频感应或电弧加热熔化合金, 用籽晶以一定速度向上提拉, 熔体将逐渐固化而生长出定向晶或单晶。常用的 GMM 合金的产业化制备方法主要是区熔技术和改进的 Bridgman 技术, 前者获得直径 3~7 mm 的孪生单晶, 性能较高; 后者得到直径 5~8 mm 的定向晶, 性能稍低。

1.3 国内外应用研究概况

1.3.1 主要应用领域

GMM 的研制和应用对于高科技领域、军事技术和传统产业的现代化具有非常重要的

意义。近年来,GMM 在工程中的应用研究相当活跃,涉及领域也非常广泛,在美国申请的专利已达几百项之多。这里就以下几个方面加以介绍。

1.3.1.1 换能器^[42~47]

换能器是 GMM 最早应用的领域之一。自 1971 年起美国海军开始 GMM 的低频大功率水声换能器的研究开发工作以来,英国、瑞典、日本等国也开发了相应的 GMM 换能器。例如,日本在 1992 年成功地将 GMM 棒(成分为 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$)制成的环形换能器用于海洋断层探测。图 1-4 是其研制的换能器的原理简图,外形尺寸为 $\phi 940\text{ mm} \times 370\text{ mm}$ (直径 $\times$ 高),重为 410 kg。驱动器由 8 个 $\phi 20\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的磁致伸缩棒组成,内部的高压氢气用于平衡周围的水压。在 10 m 深的开阔水域中测得其谐振频率为 236 Hz,带宽为 600 Hz(机械品质因数 $Q=3.9$,声源级为 190.5 dB,电声效率为 25%左右)。该换能器能探测到千公里以上的范围。GMM 水声换能器在海军、航海、海洋工程等领域的水下通信、海底油田探测、跟踪定位及材料探伤等方面已得到了应用。国内北京钢铁研究总院和中科院声学所进行过水声换能器研制工作,其共振频率为 2.4 kHz,频宽为 800 kHz,发射电流灵敏度为 173 dB,电声效率为 45%。与压电陶瓷换能器相比,谐振频率降低了 $1/2 \sim 4/5$,重量减轻了一半,性能明显优于压电陶瓷换能器。

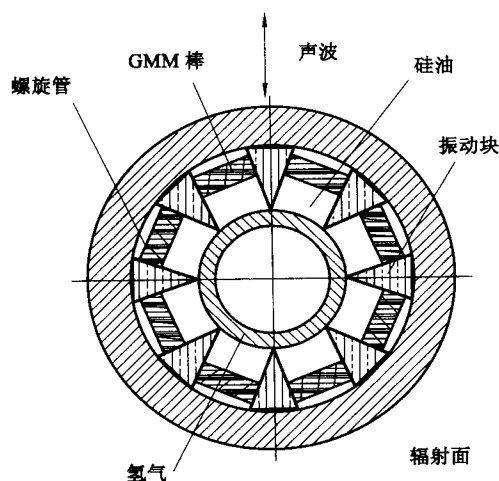


图 1-4 GMM 换能器原理图

1.3.1.2 流体元件^[48~59]

瑞典、日本、美国等国最早开展这方面的研究,其中瑞典研制的燃料喷射阀、日本研制的直动伺服阀已进入实用阶段。

GMM 在流体元件中主要用作电-机转换器,GMM 转换器能有效地实现电磁-机械能(信息)转换,是超磁致伸缩材料应用的基础。直动型 GMM 转换器主要采用 GMM 棒作为驱动元件,其主要组成有输入信号发生器、驱动线圈、GMM 棒、预压机构、偏置磁场和外壳等。预压机构产生的预压力,可使 GMM 在外加激励磁场作用下,获得较大的轴向磁致伸缩位移,同时可提高转换器电磁能向机械能的转换效率。偏置磁场的施加可提高 GMM 棒