

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,提供阅览服务,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 赵晓光

导师签名:



签字日期: 2010 年 3 月 10 日

签字日期: 2010 年 3 月 10 日

中图分类号: TP212
UDC: 621

学校代码: 10004
密级: 公开

北京交通大学

硕士学位论文

磁性液体加速度传感器的理论与实验研究

Theoretical and Experimental Study on Magnetic Fluid Accelerometer

作者姓名: 赵晓光

学 号: 07121770

导师姓名: 李德才

职 称: 教授

学位类别: 工学

学位级别: 硕士

学科专业: 机械设计及理论

研究方向: 机电液磁一体化

北京交通大学

2009 年 12 月

致谢

本论文的工作是在我的导师李德才教授的悉心指导下完成的，李德才教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来李德才老师对我的关心和指导。

李德才教授悉心指导我们完成了实验室的科研工作，在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助，在此向李德才老师表示衷心的感谢。

李德才教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，何新智、杨文明等同学对我论文中的磁性液体加速度传感器研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

中文摘要

摘要：磁性液体是一种新型的功能材料，它具有流动性与磁性材料的磁性，是唯一可以在常温下存在的液态超顺磁性物质。磁性液体加速度传感器是利用磁性液体永磁悬浮理论设计的新型传感器，结构简单可靠且低频性能良好，被广泛应用于军事及航空领域。

本文主要研究工作包括：

(1) 本文在详细分析磁性液体的永磁悬浮理论的基础上，实验研究了传感器外壳尺寸、永磁体尺寸、磁性液体的饱和磁化强度及其注入量对永磁悬浮力的影响，得出了磁铁尺寸及磁性液体注入量为永磁悬浮力的主要影响因素。

(2) 根据实验结果，分析了以上因素对传感器性能的影响规律。

(3) 基于理论分析和实验结论，设计出了传感器的本体。

(4) 实验研究了传感器励磁频率对传感器性能的影响，根据该实验研究结果设计出传感器的电路。

(5) 最后，对传感器的性能进行了测试，得出其灵敏度大约为 15.3V/g 。

本文对磁性液体永磁悬浮原理的实验研究不仅为磁性液体加速度传感器设计进行了前期准备，而且为磁性液体二阶浮力原理的其它应用奠定了基础。设计出的传感器电路和传感器本体为本项目的后续研究提供了铺垫。

关键词：磁性液体；加速度传感器；永磁悬浮；线性可变差动变压器

分类号：TP212

ABSTRACT

ABSTRACT: Magnetic fluid is a new type functional material which is both magnetic and liquid, and it's the only super-paramagnetic material at room temperature. Magnetic fluid accelerometer is an application of magnetic fluid's self-levitation theory, and its structure is simple and reliable. With the advantage of detecting low frequency acceleration, magnetic fluid accelerometer could be widely used in military and aerospace area.

The main work of this thesis is as follow:

(1) Magnetic fluid's self-levitation is analyzed; Dependence of levitation on dimension of magnets and accelerometer's shell, volume and saturation magnetization of magnetic fluid are given out by experiments which show the main factors that influence levitation force are the dimension of magnets and the volume of magnetic fluid.

(2) The influence of the two factors on the sensor is given out.

(3) The structure of accelerometer is designed by conclusion of experiments.

(4) The frequency of exciting signal is given out by experiment. Finally, the circuit of sensor is designed.

(5) The sensor is tested which show the sensor's sensitivity is 15.3V/g.

Dependence of the self-levitation force on several factors are given out, the structure and circuit of accelerometer are designed and the accelerometer is tested. It's a good foundation for next work.

KEYWORDS: magnetic fluid; accelerometer; self-levitation; LVDT

CLASSNO: TP212

目录

中文摘要	iii
ABSTRACT	iv
1 绪论	1
1.1 传感器领域发展状况	1
1.2 磁性液体加速度传感器的产生与发展	3
1.2.1 磁性液体加速度传感器的产生	3
1.2.2 磁性液体加速度传感器的原理研究	4
1.2.3 磁性液体加速度传感器的发展	5
1.3 本课题的任务来源及主要工作内容	11
2 磁性液体及其相关理论	13
2.1 磁性液体的产生及发展	13
2.2 磁性液体的磁化强度	13
2.3 磁性液体的运动方程	16
2.4 磁性液体的 Bernoulli 方程	24
2.5 铁磁流体静力学	26
2.6 本章小结	29
3 磁性液体永磁悬浮理论的实验研究	30
3.1 磁性液体的永磁悬浮理论	30
3.2 永磁悬浮实验	33
3.2.1 实验用磁性液体的制备及其性质	35
3.2.2 实验方案与装置的设计	38
3.2.3 实验数据结果与分析	42
3.3 本章小结	51
4 磁性液体加速度传感器的结构与电路设计	52
4.1 磁性液体加速度传感器的原理及其总体设计	52
4.2 磁性液体加速度传感器的结构设计	54
4.2.1 传感器壳体与线圈骨架的设计	54
4.2.2 传感器所用的线圈、磁铁与磁性液体的选择	56
4.3 磁性液体加速度传感器的电路设计	58
4.3.1 励磁信号频率的确定	58

4.3.2 传感器电路的设计	60
4.4 磁性液体传感器的初步测试及其结果分析	64
4.5 本章小结	65
5 结论	66
5.1 理论及实验研究结论	66
5.2 研究中发现的问题及建议	67
5.3 磁性液体加速度传感器的前景与展望	68
参考文献	69
作者简介	71
独创性声明	72
学位论文数据集	73

1 绪论

在科学实验和生产实际中,很多物体和现象,具有明显和稳定的数量特征,我们可以通过测量和计算,确定被测量的大小,并用数字给出结果,如机械零件尺寸的大小。但是还有一些物体数量特征较少,进而得出这些量的大小数值,就需要传感器及检测技术。随着信息时代的发展,国内外已经普遍的将传感检测技术列为优先发展的科技领域之一。

能感受(或响应)规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号输出的器件或装置被称为传感器,传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成^{[1][2]}。传感与检测是实现自动控制、自动调节的关键环节,它与信息系统的输入端相联,并将检测到的信号输送到信息处理部分,是机电一体化系统的感受器官。

随着科学技术的快速发展,人类逐渐由工业化社会进入了信息化社会,而现代信息技术的基础是信息的拾取、传输与处理技术,因此与之对应的的传感技术、通信技术和计算机技术则构成了信息技术系统的“三大支柱”,它们相当于信息技术系统的“感官”、“神经”与“大脑”。传感技术位于信息技术之首,是获取信息的端口,传感技术显得尤为重要,因此,传感技术的应用研究得到了许多国家的重视。

在各国的大力支持下,传感技术的发展极为迅速,美国把近二三十年看作传感器时代,日本把传感技术列为十大技术之首,俄罗斯亦将传感技术列为重点发展技术。随着科学技术和生产发展的需要,传感技术已经发展成为一门完整的交叉型技术学科。它综合应用了现代电子技术、微电子技术、生物技术、材料科学、化学科学、光电技术、精密机械技术、微细加工技术等。

1.1 传感器领域发展状况

社会需求是科学技术发展的强大动力,在高科技发展的今天,新型制造业的发展加速了科学技术转化为生产力的速度和开发科研成果的应用程度。随着现代科学技术的发展,尤其是大规模集成电路技术的飞速发展和计算机技术的广泛普及,传感器技术在新技术革命中的地位和作用将更加突出。人们在运用先进电子技术的同时,研究并优化外部电路以最大限度的提高现有传感器的性能、降低生产成本。自 1980 年以来世界传感器的产值增长率达 15%~30%。1985 年世界传感器市场的年产值为 50 亿美元,1990 年年产值增加到 155 亿美元,90 年代国内、

外传感器市场看好,各方面对传感器的需求也越来越大。根据 1983 年开始连续 10 年日本传感器的市场和生产情况地调查统计,年产值逐年增加,1983 年 1417 亿日元,到 1991 年增加到 5217 亿日元,年均增长率为 16%。由此可以看出各国对传感器的需求是成倍增长。

传感器的市场会越来越广阔,这就要求强大的传感器技术作为后盾。但是目前的传感器技术,无论是在种类上、质量上,还是在性能上、成本上,都远不能适应社会多个方面的发展需要。然而现有传感器的核心元件本身的性质在一定程度上制约了这些测试产品的性能,所以人们正在积极寻求基于不同原理的、结合新型材料的技术来开发更加完善的传感器产品。

总的来说,开发新型的传感器有以下几个途径^{[1][2][3]}:

1.开发基于新型材料特性的传感器

材料学科的突飞猛进带来了生产力的大幅度提升,每一种有价值的材料的诞生都会带来技术的革新,新型材料的各种属性成为关注的焦点。新型纳米材料、新型磁性材料、金属材料、超导材料、复合聚合等材料的问世也给传感器设计制造领域注入了生机与活力。将这些材料的物理化学特性应用到传感器领域,成为开发新型传感器的一个重要途径。

2.开发基于新型原理的传感器

鉴于传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发我们进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型物性传感器,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。其中利用量子力学诸效应研制的高灵敏度传感器,用来检测极微信号,是传感器技术发展的新趋势之一。

3.传感器的集成化和多功能化

固体功能材料——半导体、电介质、强磁体的进一步开发和集成技术的不断发展,为传感器集成化开辟了广阔的前景。

所谓集成化,就是在同一芯片上,或将众多同一类型的单个传感器件集成为一维型、二维阵列(面)型传感器;或将传感器与调理、补偿等电路集成一体化。前一种集成化使传感器的检测参数由点到线到面到体多维图象化,甚至能加上时序,变单参数检测为多参数检测;后一种集成化使传感器由单一的信号变换功能,扩展为兼有放大、运算、干扰、补偿等多功能——实现了横向和纵向的多功能。

4.传感器的智能化、集成化、机械化和系统化

智能化传感器不仅具有信号检测、转换功能,同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。如进一步将传感器与计算机的某些功能集成与同一芯片上,就成为智能传感器;集成化是指信号采集、传输、处理、记忆、演算、驱动等过程的集成;自 1987 年第四届国际传感器和执行器会议结束

以来,由微加工技术与传统传感器技术结合创立了传感器和执行器的微机械化和系统化先河,开拓了微电子机械系统(MEMS)传感器技术的新领域。

5.研究生物感官,开发仿生传感器

仿生学的发展也给传感器的设计制造带来了新的理念。自然界的生物不仅造就了集多种感官于一身的人类本身,而且还设计了许多功能奇特、性能高超的生物传感器。例如狗的嗅觉(灵敏度为人的106倍);鸟的视觉(视力为人的8-50倍);蝙蝠、飞蛾、海豚的听觉(主动型雷达——超声波传感器);蛇的近视觉(分辨力达 0.001°C 的红外测量传感器)等等。这些生物的感官性能,是当今传感器技术望尘莫及的。研究它们的机理,开发仿生传感器,也是引人注目的方向。

综上所述,从各种复杂的工程系统到五花八门的科学试验,再到日常生活的衣食住行,几乎每个现代化项目都离不开各种各样的传感器。在基础科学和尖端技术的研究中,从高达 $5\times 10^4\text{--}10^8^{\circ}\text{C}$ 的超高温,或 $3\times 10^8\text{Pa}$ 的超高压,低到 0.01K 的超低温,或 10^{-13}Pa 的超真空,强到 25T 以上的超强磁场,弱到 10^{-11}T 的超弱磁场要检测如此极端细微的信号,单靠现在的传感器是很困难的,必须借助配有相应传感器的高进度或大型检测系统才能奏效。因此,我们提出了要设计新型传感器,以适应在这些恶劣的环境中工作。

1.2 磁性液体加速度传感器的产生与发展

1.2.1 磁性液体加速度传感器的产生

作为传感器的一个重要分支,加速度传感器已越来越广泛地应用于航天、航空、常规武器、船舶、交通运输、冶金、机械制造、化工、轻工、生物医学工程、自动检测与计量、称重等技术领域,而且也逐步走入了人们的日常生活,从太空中的航天飞船到海洋中的深海探测机器人,甚至是普通电脑所用的硬盘上,加速度传感器都留下了它的身影。

加速度传感器发展到今天,出现了许多的种类,主要种类有压电式、应变片式、变电容式、压阻式、伺服式、磁电式、电位计式等,其中:压电式加速度传感器受温度、噪声等的影响大,需与高阻抗前置放大器配用;压阻式加速度传感器比较脆弱,易损坏,受温度影响大;应变式加速度传感器寿命稳定性差,易受温度、湿度、磁场等的影响,适用频率范围窄;磁电式加速度传感器频响低,只适宜测量机械设备的稳态振动,不宜测量冲击振动;电位计式加速度传感器分辨率有限,精度不高,动态响应差,不适宜测量快速变化量。此外,由于传感器微型化的趋势,大部分的传感器都有对应类型的微传感器,并且还出现了其他一些新的传感

器,譬如热电偶式、谐振式以及光电导式等,上述微传感器也有着优异的性能,但由于自身技术的限制又有各自的缺陷,且安装比较麻烦^[1]。

为了解决上述各种类型传感器的不足,科学家与工程人员都在不断的研究和设计新的传感器来弥补现存传感器存在的缺陷。其中,磁性液体加速度传感器就是这些新的传感器中的佼佼者。

1.2.2 磁性液体加速度传感器的原理研究

磁性液体由被表面活性剂包覆的纳米级的铁磁性颗粒(一般为 Fe_3O_4) 稳定悬浮在基载液中构成,并且在重力场、磁场以及电场作用下也可以稳定长期存在。目前磁性液体是唯一的可以在常温下存在的液态超顺磁性物质,也正由于它这种独特的性质,科学家们将它用于了传感器的研制^{[4][5]}。

利用磁性液体的独特性质,科学家们根据不同的原理研制了各种的传感器。

罗马尼亚学者 V.Iusan、N.Ilias 等人^{[6][20-27]}总结出了几种设计传感器时主要运用的原理:

(1) 外加磁场对磁性液体液面形状的影响。在无外加磁场的条件下,磁性液体的液面与普通液体一样为水平面;而在有外加磁场的情况下,磁性液体的表面就会出现极为明显的变化。利用这个原理可以设计出能检测磁场的强度与方向的传感器,这个原理也可以用来设计可以检测直导线电流强度的传感器。

(2) 磁性液体一阶浮力原理^{[4][5]}。如果把一个非磁性体浸没在磁性液体中,并放置在非均匀磁场中,在磁场强度适当时,该物体会悬浮起来。这个原理可以用来设计可以检测未知物体密度以及复杂物体体积的传感器,也可以反过来用于设计测量磁场强度的传感器。

(3) 磁性液体的磁光效应。在外加磁场的作用下,液体中的微小颗粒将随着磁场方向有序排列,形成类似于光栅的结构,将会对透射过去的光的强度产生影响。由此可以利用这种性质进行精确的未知磁场的检测。

(4) 磁性液体的流动性与超顺磁性。

图 1-1 所示为一个磁性液体加速度传感器的理论模型,管中磁性液体被永磁体吸附在中间,当传感器受到一个加速度作用时,此段液体会偏离中心;由于这段液体还同时起到了线圈铁芯的作用,两边线圈的电感就都会发生变化从而可以测量出加速度的大小。由于这种方法能够直接得将其他信号转化为电信号,因此现在很多磁性液体传感器都用了类似的原理。

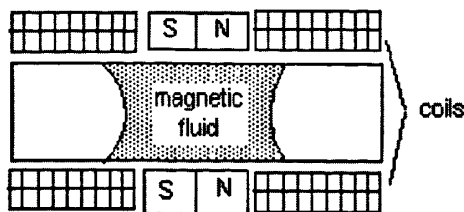


图 1-1 电感型磁性液体传感器

Fig.1-1 Inductively magnetofluidic sensor

此外,国内学者刘桂雄等人^[7]提出了除上述几种原理之外,还有可能被用于磁性液体传感器设计的几个其他原理,如磁通门原理等。还认为可以利用磁性液体的粘度特性设计一些新型智能传感器。

1.2.3 磁性液体加速度传感器的发展

磁性液体传感器的研制,国外要早于国内十年左右。早在 1983 年美国新墨西哥州阿尔帕克基应用技术公司就与美国空军签订了合同,美国新墨西哥州阿尔帕克基应用技术公司便开始研制基于磁性液体动力学原理(MHD)的主动式和被动式传感器。该公司研制出一系列用以测量冲击、振动以及运动的传感器,并已将其用于计算机磁盘驱动器、汽车特性测试系统。其客户包括通用汽车公司、福特汽车公司,丰田汽车公司以及得克萨斯仪表公司,还有一些国家实验室及国立大学。据应用技术公司提供,被动式传感器可在便携式磁盘驱动器上得到广泛的应用。例如,当计算机受到碰撞时,磁头就会在错误的磁道上记录数据,从而使以记录的数据遭到了破坏。MHD 传感器便可通过探测冲击情况,向电子控制线路发出信号,以切断通向磁头的电流,从而使原有数据免遭破坏。被动式 MHD 传感器的局限性是:当输入运动是恒速时,其输出信号便减为零。由于导电流体随着传感器外壳及磁场转动,因而这种以恒速运动的情况是完全可能发生的。1990 年,应用技术公司的工程师又开始研制既可测试变速运动,又可测试恒速运动的 MHD 传感器,目前,他们研制出的模型,已从基本原理上得以证明。

下面我将列出最近几年由外国学者所设计的磁性液体加速度传感器模型以及相关的分析。

首先是由 R.Olaru, D.D.Dragoi 等人^[8]设计的电感式倾斜加速度磁性液体传感器,如图 1-2。

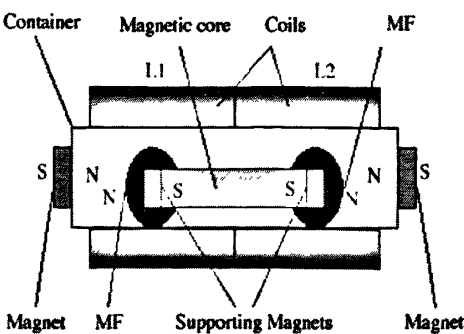


图 1-2 电感型倾斜加速度传感器

Fig.1-2 Tilt acceleration sensor

这个传感器由以下这几个部分构成：非铁磁性材料制成的密闭容器、铁芯、四块永久磁铁、磁性液体以及线圈。其中这个传感器的惯性质量是由铁芯和两块固定在其两端的永久磁铁构成，并且在其两端永久磁铁处吸附有磁性液体；根据磁性液体的二阶浮力原理，这个两端带有永磁体的铁芯将会被支撑起来。另外，在容器两端也固定有永久磁铁，按照原理图 2 中的磁铁的方向放置，这几个永磁体之间的相互作用力将提供给铁芯回复力。当传感器倾斜或者受到一定的加速度时，容器内铁芯将会沿容器壁发生移动，这样外面缠绕的两个线圈 L1 和 L2 的电感将发生变化，传感器的倾斜角度或者加速度就会转化为电信号被检测出来。这样的传感器结构决定了它有很高的灵敏度、在量程范围内的高线性度以及很高的抗干扰性与可靠性。此外设计者还对这个传感器分别从理论分析和实验中进行了测试，说明了此传感器的高可靠性以及高灵敏度。

图 1-3 是由罗马尼亚学者 M.I.Piso^[9]设计的双轴低频磁性液体加速度传感器。

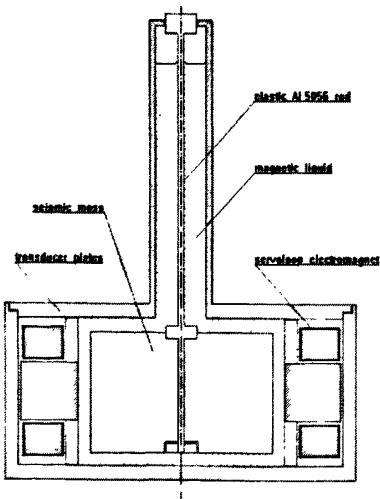


图 1-3 双轴加速度传感器

Fig.1-3 Two-axis accelerometer

如图 1-3 所示,此加速度传感器的惯性质量为圆柱形低碳钢容器容器中央的铝制圆柱体,其弹性元件是一根铝棒,它的刚度为同等长度的重力摆等效刚度的 2/3。这个惯性质量悬浮在磁性液体中,被周围的被 4 个 1/4 圆柱的电极所感受,其中每一个电极包括一个高磁导率的磁芯和电磁线圈。这样,只要传感器受到水平任何方向的加速度都能通过检测四个电极检验出来。这个传感器是将非磁性体作为惯性质量,并利用了磁性液体的一阶浮力原理,将惯性质量悬浮在容器中,这种结构对外界扰动磁场不敏感,制成后的传感器具有很高的精度和灵敏度。现在这种结构的传感器已经实际应用于地震检测中。

如图 1-4, M.I.Piso^[9]还进一步的设计出了三轴加速度传感器。

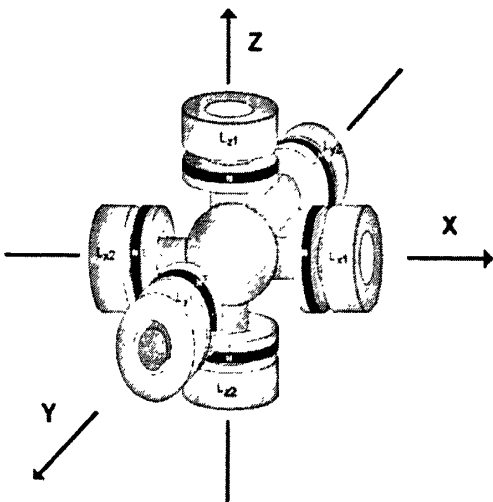


图 1-4 三轴加速度传感器

Fig.1-4 Three-axis accelerometer

如图所示,这是一个小尺寸的传感器,在其 X、Y、Z 轴三个方向上的长度均为 15mm。中间灰色的就是装有磁性液体的容器,容器里面的磁性液体被三对永磁体束缚在容器中。当感受到加速度的时候,中间的磁性液体就会发生移动,进入轴向的管腔;由于每个轴方向都有一对线圈,这样三个轴向的加速度都可以探测出来。这是一个典型的电感式传感器,已经被应用于车辆、机器人以及航空器的惯性制导方面。

同上述几个传感器一样,大部分磁性液体传感器都是电感式传感器并且频繁的用到了磁性液体一阶浮力原理和二阶浮力原理。

罗马尼亚的 N.C.Popa 等人^[10-12]设计了一个可以通用于压力检测和加速度检测的磁性液体传感器,如图 1-5。

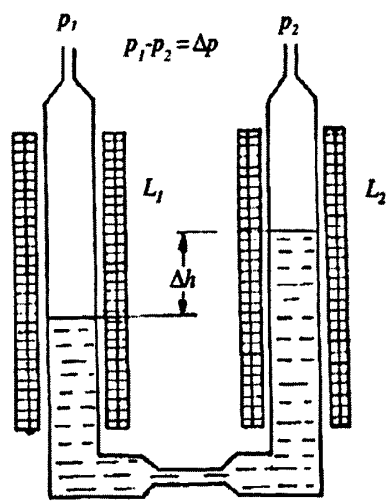


图 1-5 位压差型传感器原理图

Fig.1-5 Principle of differential pressure sensor

图 1-5 为此传感器的原型，在一个 U 型管中注入磁性液体并且在两侧的直管上绕有线圈，这样磁性液体就起到了铁芯的作用。当 U 型管两侧受到不同压力或者受到水平方向的加速度时，两侧液面就会有液面差；这样两侧线圈的电感也会发生变化，通过检测线圈里面电信号的变化，就能得出压力或者加速度的值。这个传感器现在已经被大量的应用于空气动力学设备的检测中用于检测管中气体流速、压差等方面，并且在实际运用中表现出了优异的性能。

印度学者 R.P.Bhatt^[13]设计了一个可以用来检测转速的电感式磁性液体传感器，如图 1-6 所示。

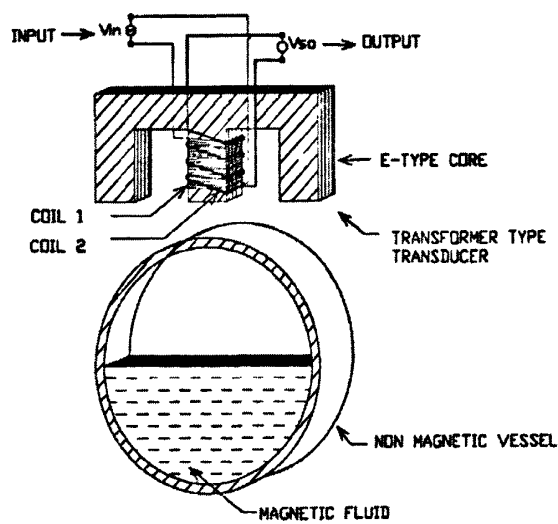


图 1-6 智能离心式开关

Fig.1-6 The smart centrifugal switch

如图所示，传感器的励磁线圈和感应线圈都缠绕在 E 型铁芯上，而中间装有磁性液体的滚筒与待测轴同轴并联接在一起。当轴转动带动滚筒转动的时候，磁性液体由于离心力的作用将会随着转动被甩到滚筒上方，这样通过感应线圈的磁通量将会随着转速发生改变，由此就可以测出转速的大小。这种离心式传感器最大的有点就是不会产生电火花，对于在矿山等容易发生爆炸的高危场合有着明显的优势。

由于国内在磁性液体的应用方面起步较晚，磁性液体传感器的设计成果也不像国外那样多，但近几年来随着国内磁性液体应用的长足发展，大家也开始了对磁性液体传感器展开了研究并且有了部分成果^{[14][15]}。

如图 1-7 所示为由杨文荣等^[16-17]设计的一个由重力场限定的电感式磁性液体加速度传感器。

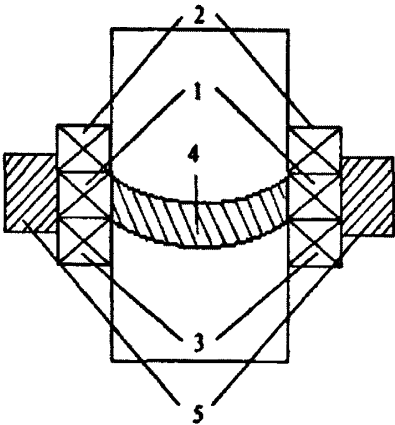


图 1-7 由重力场限定的磁性液体加速度传感器

Fig.1-7 Gravity field limited magnetofluidic sensor

图中 1、2、3 均为线圈或者次级线圈，4 为磁性液体膜，5 为环形磁铁；其中环形磁铁由 8 块扇形磁铁拼接而成，实现了辐射状充磁。在静止状态下，磁性液体膜受到了环形磁铁和重力的作用而平衡在中间；当受到加速度时，液体膜就会上下移动而引起次级线圈电感的变化，从而测量出加速度的大小。

图 1-8 为许海平，李德才等人^[18-19]设计的磁性液体水平传感器的工作原理图。

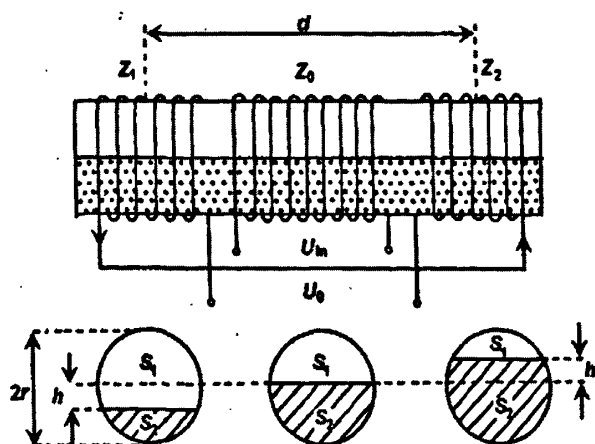


图 1-8 磁性液体水平传感器

Fig.1-8 Magnetic fluid level sensor

如上图所示，这个传感器为差动变压器式结构圆柱形有机玻璃管为差动变压器的“骨架”，玻璃管内注入的磁性液体为“磁芯”，“骨架”上均匀绕有一组激励线圈和两组感应线圈 Z_1 、 Z_2 。当传感器处于水平位置时，磁性液体在玻璃管内均匀分布， Z_1 、 Z_2 所产生的感应电动势相等；当传感器偏离水平位置发生倾斜时，玻璃管内的磁性液体向低处流动，相当于磁芯发生偏移，两组感应线圈 Z_1 、 Z_2 所产生的感应电动势不等，形成压差。对于一定的倾斜角 α ，相应地存在一个压差 U_0 与之对应，所以，通过检测压差 U_0 就可测得倾斜角 α 。

对国外已制作成产品的磁性液体加速度传感器以及国内学者的初步研究进行分析比较后，我们发现磁性液体加速度传感器具有下列优点：

- (1) 适用于低频振动检测，频率范围为 3~20Hz，振动速度 3~200mm/s，质量 125g，这是其它任何加速度传感器均不具备的性质；
- (2) 单轴静态加速度传感器的静态灵敏度优于 $10^{-8}g$ ；
- (3) 用磁性液体作为惯性质量的传感器灵敏度和线性度小于 0.01%，在 0~1g 范围内，分辨率优于 $10^{-3}g$ ；
- (4) 非磁性惯性质量传感器的灵敏度高于 $10^{-6}ms^{-2}$ ，响应时间小于 30ms；
- (5) 磁性液体系列传感器结构简单，体积小；
- (6) 耐冲击达 6000g；
- (7) 对静止和低频惯性和重力变化有强烈的响应，响应范围为 $10^{-7}ms^{-2}$ ~ $100ms^{-2}$ ；
- (8) 加速度传感器对材料没有特殊要求；
- (9) 性能价格比优于其他传感器。

基于这个原因，利用新型材料和原理的研究成果应用于传感器，来设计出磁性液体原理的高灵敏度、高精度、小体积、低成本、更高的耐冲击性和具有快速

反应能力的传感器。

1.3 本课题的任务来源及主要工作内容

本论文工作属于国家自然科学基金委员会批准的国家自然科学基金资助项目——《磁性液体加速度传感器的理论及实验研究》(NO.60471004)课题工作的一部分。

该项目课题的研究内容主要包括如下几个方面^[9]:

(1) 制备适用于磁性液体加速度传感器的磁性液体: 通常磁性液体加速度传感器对磁性液体的要求是粘度要低, 挥发性要小, 磁性液体内部颗粒大小要均匀、耐高低温, 粘温性能要好;

(2) 对所制备的磁性液体要进行粘度、密度、磁化强度、粒度分布等特性的测量和表征, 尤其是在磁性液体流变仪上研究磁性液体在磁场作用下粘度的变化规律;

(3) 对传感器的磁场源, 无论是永磁产生的, 还是通电线圈产生的, 都要进行磁场分析和计算;

(4) 根据制备磁性液体的特性, 将磁源的磁场和磁性液体的流场进行耦合分析, 计算磁性液体内部的压强分布;

(5) 当采用一阶浮力原理制造磁性液体加速度传感器时, 要分析和计算传感器所用磁性液体和非磁性物质的质量大小; 当采用二阶浮力原理制造磁性液体加速度传感器时, 要分析和计算传感器所用永久磁体的质量和体积大小;

(6) 当用磁性液体作为惯性质量而成为线圈内芯时, 要进行线圈电感大小和内芯长短之间关系的计算;

(7) 分析将磁性液体注入传感器内部时, 如何注入、注入多少才能避免磁性液体在磁场作用下表面不稳定性的发生、发展;

(8) 进行传感器控制线路的设计;

(9) 对加速度传感器的技术性能参数进行测试和校准。

本论文的研究内容属于该课题的一部分, 主要内容包括:

(1) 研究磁性液体加速度传感器的基础理论: 磁性液体永磁悬浮的二阶浮力原理, 磁性液体伯努利方程, 磁性液体加速度传感器所使用磁性液体的电磁学特性, 永磁悬浮计算等理论;

(2) 实验验证磁性液体永磁悬浮理论, 并得出磁性液体参数、容器形状、磁铁的各个参数等对永磁体悬浮的影响并详细研究永久磁铁的受力情况;

(3) 制备适用于磁性液体加速度传感器的磁性液体, 测量磁性液体的各项参

数：饱和磁化强度、黏度、密度等；并且讨论各项参数对磁性液体传感器性能的影响；

(4) 进行磁性液体加速度传感器的结构设计与电路设计，测试其各方面的性能；并讨论磁性液体、容器体积以及永磁体的各个参数对其性能的影响。

2 磁性液体及其相关理论

2.1 磁性液体的产生及发展

磁性液体是将众多铁磁性或亚铁磁性微粒高度弥散于液态载液中而构成的一种高稳定性胶体溶液，它由固相颗粒、基载液和表面活性剂三部分组成，固相颗粒与基载液通过表面活性剂浑成，这种磁性液体在重力场、磁场、电场作用下也能够长期稳定的存在，不产生沉淀也不发生分离^[4]。

磁性液体的组成如图 2-1 所示。

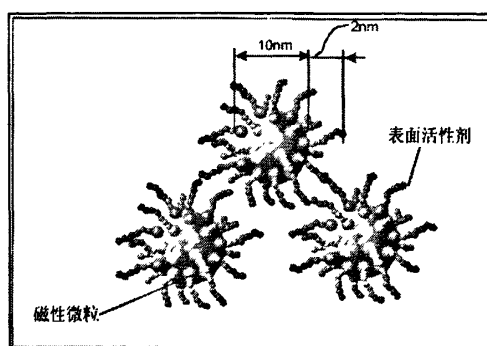


图 2-1 磁性液体的组成

Fig.2-1 The composition of magnetic fluid

磁性液体是在 1965 年美国宇航局为解决太空人宇航服头盔转动密封问题由 S.S.P Apple 研究成功的，而且他还获得了世界上第一个具有实际应用的制备磁性液体的专利。这种磁性液体是将磁铁矿粉、界面活性剂(油酸)和润滑油混合在一起，在球磨机中球磨，最后利用离心方法去掉大颗粒而合成成功的^{[4][5]}。

磁性液体作为一种新型的纳米材料，它的发明引起了各国科学家的广泛关注，其制备技术与性能也有了长足的进步。到了 80 年代，第二代金属磁性液体出现，使磁性能得到了提高；进入 90 年代日本研制出了第三代氮化铁磁性液体，既具有良好的抗腐蚀性能又具有较高的磁性能；而进入 21 世纪以后，氟碳化合物基磁性液体与纳米颗粒包覆研究也取得了巨大的成功，磁性液体的抗腐蚀性能有了大幅的提高，应用范围也得到了极大的拓宽。

2.2 磁性液体的磁化强度

磁性液体目前是唯一可以在常温下存在的液态超顺磁性物质；由于这种独特的性质，磁性液体在密封以及传感器等领域都有广泛的应用。而对于磁性液体传

感器来说, 磁性液体的磁化强度及其相关的理论是很重要的^[4]。

粒子直径足够小时, 磁性液体就是稳定的, 但是铁磁粒子的尺寸小于临界值时, 粒子就是单畴结构。大部分磁性颗粒的临界尺寸为 $10nm$ 量级, 因此, 磁性液体中所有粒子都可认为是单畴结构且不管某些离子磁化强度的铁磁性质。作为无相互作用粒子的总体, 必然是作为顺磁性那样磁化的。顺磁性物体的磁化规律是用朗之万函数 $L(\xi)$ 来描述的:

$$M = nm(ctg\xi - 1/\xi) = M_s L(\xi) \quad (2-1)$$

$$\bar{M} = M\bar{H}/H \quad (2-2)$$

$$\text{其中, } L(\xi) = coth(\xi) - \frac{1}{\xi}$$

式中, n 为单位体积内的粒子数, m 为粒子磁矩, $\xi = \mu_0 mH / (k_0 T)$, μ_0 为真空磁导率, H 是磁场强度, k_0 是波尔兹曼常数, T 是绝对温度。由于某些粒子的高磁矩值 m 这些系统可称为超顺磁性。

随着磁场的增加 ($\xi \rightarrow \infty$), 系统的磁化强度达到其饱和值 $M_s = mn$; 这时所有的粒子的磁矩都沿着磁场取向:

$$M = M_s [1 - k_0 T / (\mu_0 mH)] \quad (2-3)$$

由上式, 当 $\xi \geq 10$ 时 $M \approx M_s$. 对磁矩值 $m \approx 10^{-19} \text{JT}^{-1}$ 室温下的粒子, 这就相应于磁场 $H \geq 10^5 \text{Am}^{-1}$ 。

在弱场, 即 $\xi \ll 1$ 时, 流体的磁化强度随朗之万 (Langevin) 函数的自变量 ξ 做线性增加:

$$M = [\mu_0 nm^2 / (k_0 T)] H = \chi H \quad (2-4)$$

比例系数 χ 称为磁性液体的磁化率; 对应单位体积的粒子数为 $n \sim 10^{23} \text{m}^{-3}$ (相应于实际磁性液体的浓度) 及上面所用的 m 和 $k_0 T$ 值时, 其磁化率值为 $\chi \sim 1$, 这时的饱和磁化强度是 $M_s \sim 10^4 \text{Am}^{-1}$ 。

关系式 (2-3) (2-4) 使用磁化曲线分析磁性液体内部结构的基本关系式。通过建立以 $M(\xi)/M_s$ 和 $M(1/\xi)/M_s$ 为坐标的朗之万曲线, 来确定两者在初始部分的斜率, 就可以确定流体中的粒子尺寸:

$$d_m^0 = \sqrt[3]{18\chi k_0 T / \pi \mu_0 M_s M_l}; \quad d_m^\infty = \sqrt[3]{6k_0 T / \pi \mu_0 H_0 M_l}$$

这里 M_l 是粒子材料的磁化强度, H_0 是用 $M(1/\xi)/M_s$ 的斜率来确定的, 而 d_m^0 是用流体磁化曲线初始部分来确定粒子直径, d_m^∞ 是用其最末部分来确定的粒子直径。

实际磁性液体的磁化曲线不同于朗之万函数曲线, 其差别来自于下列几种因素, 其中最重要的是实际磁性液体中粒子的多分散性和在浓缩液体中粒子场之间的相互影响。离子的非球形形状也可起到重要作用。

如果已知了磁性液体中粒子尺寸的分布函数 $f(d_m)$, 则其磁化强度必然可用下

式描述:

$$M(H) = \frac{\pi}{6} M_s \int_0^\infty L(\xi) d_m^3 f(d_m) d(d_m)$$

这里显然没有考虑流体中粒子的相互作用。通过实验测出的 $M(H)$ 曲线并解上述方程, 就可以算出流体中的粒子尺寸分布。通常并不能得到流体内部结构的详情, 但却可以用几种方法去逼近实际流体的磁化曲线, 要构成朗之万函数曲线必须先确定流体的饱和磁化强度 M_s 和粒子的尺寸 d_m , 即它们的磁矩 m 。 M_s 的大小可由 $M(H^{-1})$ 的关系 $H^{-1} \rightarrow 0$ 时的值而明确获得, 而 d_m 的值可以选为 d_m^0 、 d_m^∞ 或某个平均值。朗之万曲线可分别与实验磁化曲线的初始部分、中间部分或最终部分相符合。在胶体系统中, 由于粒子的多分散性, d_m^0 的值也许会明显超过 d_m^∞ 的值, 这就造成了上面的差别。在流体中, 粗粒子在弱磁场下首先排列, χ 很高。较小的粒子则在相应较强的磁场下才排列, 因此在强磁场中的流体磁化曲线增加得比由 d_m^0 建立的朗之万函数要慢。

考虑到粒子尺寸分布函数, 仔细的测定磁化曲线表明在浓缩的磁性液体中 ($\phi_s \geq 0.05$), 磁化曲线和朗之万函数曲线之间的差不能仅用粒子的多分散性的假设式来解释。对小 H 值 ($\xi \ll 1$), 重要的是促使排列作用的外磁场即粒子的局域场, 这就是不考虑粒子相互作用时, 计算的 d_m^0 值总会超出估计的值得原因: 从显微镜所的数据, d_m^0 和 d_m^∞ 之差在 30%~40% 左右, 但从 $M(H)$ 曲线的分析给出的 d_m^0 之差 d_m^∞ 在 80%~100%, 要计入粒子间的相互作用, 可将朗之万函数自变量 H 用有效场 $H_{eff} = H + \lambda M$ 代替。有效场常数 λ 可由其他测量而从实验上确定。譬如说从磁化率的温度关系 $\lambda(T)$ 曲线来确定。当计入这些数据后, 由 $M(H)$ 所得的 d_m^0 和 d_m^∞ 之差与粒子尺寸分布函数的直接数据相一致。

现在给出表示磁性液体组成总体信息的简单关系式。由于粒子材料的磁化强度 M_d 是已知的, 磁性材料在流体中的体积分数可表示成比率

$$\phi_m = M_s / M_d$$

这一比率基于的前提是处于饱和状态时, 所有的粒子的磁矩都沿外磁场排列, 饱和磁化强度仅由磁性材料的体积含量来决定。

实际情况是磁性液体处于或运动于非均匀磁场中, 为了确定流体于外场的相互作用, 必须考虑磁化强度域外磁场之间的关系。借助于朗之万函数来对磁化曲线做近似的只能在一很窄的磁场范围内适用。因此在弱磁场下就要用 d_m^0 所得的朗之万函数, 而在强场下就要用 d_m^∞ 所得的朗之万函数才行。这种近似的缺点是他的形式复杂, 阻碍了描述磁性液体流动方程的分析解。

基于上面的考虑, *Vislovich* 给出了磁化曲线的一种简单近似, 它与实验数据的符合要好得多。

$$M = M_s H / (H_T + H)$$

这里 H_T 是磁化强度 $M(H_T) = M_s/2$ 时的磁场值, 上述的关系式比郎之万函数近似更接近。

实际曲线的磁化强度: 在 $H = H_T/8$ 处与实验值的最大偏差是 8%, 当 $H > H_T$ 时偏离小于 1%, 已经在实验误差范围以内。如果只要求在有限的 H 范围内达到 $M(H)$ 的近似, 则为了与实际曲线更符合, 可将 M_s 和 H_T 的下列形式用于上述关系式:

$$M_s = \frac{M_1 M_2 (H_2 - H_1)}{M_1 H_2 - M_2 H_1}, \quad H_T = \frac{H_1 H_2 (M_2 - M_1)}{M_1 H_2 - M_2 H_1}$$

这里的 H_1 和 H_2 是接近 H 范围的起点和终点的磁场强度值; 而 M_1 和 M_2 是对应的 H_1 和 H_2 处的磁性液体磁化强度试验值。Vislovich 曾表明, 在磁场范围内 $0 \sim 100 \text{ kAm}^{-1}$ 时, 以上两式为常数的近似式 $M = M_s H / (H_T + H)$ 可在误差小于 1% 的情况下描述实际磁化曲线。

2.3 磁性液体的运动方程

如何将磁性液体应用到传感器领域, 这就要联系起磁性液体加速度传感器理论基础的问题。磁性液体加速度传感器理论与磁性液体基础理论相关的主要有两个方面: 其一是磁性液体流体动力学特性, 其二为磁性液体的磁学特性。这两个理论是揭示永磁悬浮的重要依据。

作为一种均匀相磁性液体的运动方程, 磁性液体的彻体力项与普通流体不同。普通流体的彻体力一般是重力。磁性液体除了重力场产生重力以外, 还有外磁场产生的磁力。磁性液体中的磁性固相颗粒可以视为大分子, 按照分子电流的观点来讨论他们的磁化时, 每个固相颗粒就可以用一个分子电流环来代替, 电流环在外磁场中受到的力就构成了磁性液体的磁彻体力^{[4][5]}。

磁性液体的运动方程的基本形式是^[28]:

$$\rho_f \frac{dV}{dt} = f_g + f_m + f_p + f_\eta \quad (2-5)$$

式中, ρ_f 是磁性液体的密度; f_g 是重力, 其式为:

$$f_g = \rho_f g$$

f_p 是压力梯度, 它是一种表面力, 其表达式为:

$$f_p = -\nabla p \quad (2-6)$$

f_η 是黏性力, 也是一种表面力, 其表达式为:

$$f_\eta = \eta_H \nabla^2 V + \frac{1}{3} \eta_H \nabla (\nabla \cdot V) \quad (2-7)$$

式中 η_H 是磁性液体处于外磁场中的动力黏性系数。当不存在外磁场时, $H=0$, η_H 就是 η_0 , f_p 与 f_η 是表面力, f_g 和 f_m 是彻体力。

下面讨论在磁场作用后磁性液体产生的附加力 f_m :

Cowley 和 Rosensweig 提出了能量法, 他们的基本思想是将热力学功和机械力功相联系, 从而得到磁性液体的彻体力, 结果全面而且具有普适性。磁性液体的磁化强度 M 可表示为

$$M = nm(\coth \xi - \frac{1}{\xi}) = M_s L(\xi) \quad (2-8)$$

式中 $\xi = \mu_0 m H / (K_b T)$ 中均包含有温度 T 和饱和磁化强度 H 。所以式 (2-8) 磁性液体饱和磁化强度是磁场强度和温度的函数, 并且也是磁性固相颗粒体积分量 ϕ 的函数。而磁性液体的比容 v_f 是和 Φ 相关联的。所以能写出:

$$M = M(T, H, v_f)$$

磁性液体内的磁感应强度 B 是

$$B = \mu_0 (H + M)$$

对磁性液体而言, 固相颗粒磁化后, 比较容易地与外磁场方向一致。可以取 B 、 H 、 M 三矢量平行, 则磁性液体的磁导率 μ 可以写成

$$\mu = \mu_0 (1 + \frac{M}{H})$$

从而上面的关系显然可见 B 和 μ 均是 T 、 H 、 v_f 的函数, 即

$$B = B(T, H, v_f), \quad \mu = \mu_0 (1 + \frac{M}{H}) \quad (2-9)$$

往后为了方便, 用 v 代替 v_f 省去下表 “ f ”。取式 (2-9) 第一式的微分

$$dB = \frac{\partial B}{\partial T} dT + \frac{\partial B}{\partial H} dH + \frac{\partial B}{\partial v} dv \quad (2-10)$$

磁性液体的功, 从热力学上来看, 它是体积变化时所做的功, 即 $p dv$ 。若存在外磁场时, 外磁场对磁性液体所作的功包括两个方面: 一个是将磁性液体内的磁场强度从零提高到 H 时所完成的功; 另一个是使磁性液体磁化所作的功, 即磁化功。外磁场对磁性液体所作的功就是 $W = V_0 \int_0^H H \bullet dB$ 。考虑单位质量的磁性液体, 则将体积 V_0 换成比容 v , 同时假定 B 和 H 两矢量平行, 则有:

$$W_m = v \int_0^H H dB \quad (2-11)$$

单位质量的磁性液体对外部所作的微元功是:

$$dW = p dv - d(v \int_0^H H dB) \quad (2-12)$$

式中, $p dv$ 是磁性液体的膨胀功, 它是磁性液体对外部作的功。而 $d(v \int_0^H H dB)$ 是外磁场对磁性液体所作的功。展开式 (2-12) 右边第二项以后, 则得:

$$dW = p dv - d \left(vHB - v \int_0^H B dH \right)$$

在式中 v 是一个独立的变量, 可以将它写入积分号之内。于是上式可写成:

$$dW = p dv - d \left(vHB - \int_0^H B dv \right)$$

展开括号内的微分得到:

$$\begin{aligned} dW &= p dv - (vB) dH - Hd(vB) + (vB) dH + \int_0^H d(vB) dH \\ &= p dv - Hd(vB) + \int_0^H \frac{d(vB)}{dv} dv dH \end{aligned}$$

当 $H=\text{const}$ 和 $T=\text{const}$ 时, 由式 (2-10) 知道: 括号内 $(dB/dv) = (\partial B/\partial v)$ 。所以上面的积分号内的导数可以写成偏导的形式, 并且 dv 可写到积分号之外, 即:

$$dW = p dv - HB dv - HvdB + (dv) \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH$$

或写成:

$$dW = (dv) \left[p - HB + \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH \right] - vHdB \quad (2-13)$$

从上式可以看到, $\int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH$ 这一项可以体现一个磁化的过程。

再来考察一块磁性液体表面上的应力由于体积变化而作的功。图 2-2 为表示在两块平行板之间的充满有磁性液体, 两板之间的距离是 a , 两板面缠有线圈, 其螺旋角为 φ , 由于两板之间的距离远小于板的长和宽, 所以在讨论的范围内可以认为线圈在两板间产生的磁场是均匀的。在两板的外部, 具有非常高的磁导率。这表明两板外部的磁场强度非常小, 因为 $B=\mu H$, B 是有限值, 而 μ 非常大, 则可以认为 H 近似趋近于零, 由式 (2-11) 可以知道, 在这里没有磁场能量。

这里有几个假设是指的说明的:

- 1) 两块板之间的 B 是均匀的;
- 2) 两块板之间的距离远小于板的长和宽; 在所讨论的范围内可以近似的认为两极板之间产生的磁场是均匀的;
- 3) 在两极板外部 $\mu \rightarrow \infty$, 由于 $B=\mu H$, B 为有限值, 所以可以认为 $H \rightarrow 0$, 由 (2-11) 式可知这里的磁场是没有能量的。

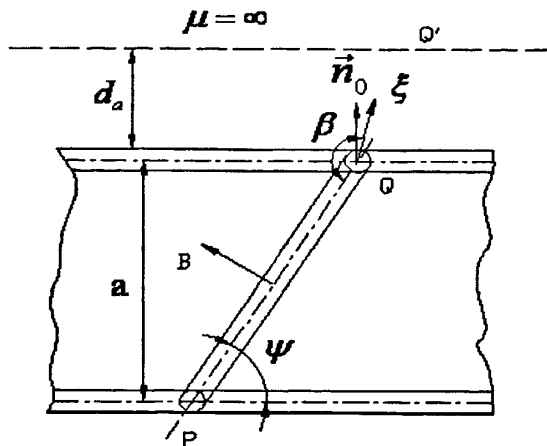


图 2-2 推导表面张力的几何图

Fig.2-2 Geometry for evaluating the stress tensor in magnetic fluid

设在板表面上的应力张量为 τ 。因为磁性液体不仅有体积变化，而且也发生变形。则板的点 Q 将移动到点 Q' ，其位移 ξ 不一定和板的法线 $\vec{n}_0$ 平行。这样表面应力所作的功可写成

$$dW = -S \vec{n}_0 \cdot \tau \cdot \vec{\xi} \quad (2-14)$$

式中， S 是表面积。 τ 是表面作用于磁性液体上的应力张量（为简单而省略下标“ ij ”）。所以 $-\tau$ 就是磁性液体施加于板上的反力。因而式（2-14）表示磁性液体所完成的功。

将式（2-13）和（2-14）联立求解可得：

$$\vec{n}_0 \cdot \vec{\tau} \cdot \vec{\xi} = \frac{dv}{S} \left[-p + HB - \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH \right] + \frac{v}{S} HdB$$

如果假定面积为 S 的上下板之间包容有单位质量的磁性液体，则两板之间的容积就是磁性液体的比容 v ，从图 2-2 不难知道：

$$v = Sa \quad \text{和} \quad dv = Sda$$

式中： da 是法向位移。这样一来上面的方程就成为

$$\vec{n}_0 \cdot \vec{\tau} \cdot \vec{\xi} = da \left[-p + HB - \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH \right] + aHdB \quad (2-15)$$

由图 2-2 中的几何关系

$$d(\overline{PQ}) = \overline{PQ'} - \overline{PQ} = \xi \cos \beta$$

无论平板是怎样的移动，通过线圈 $\overline{PQ}$ 的磁通 Φ_m 是守恒的，假设垂直于纸面的厚度为 1，则：

$$\Phi_m = B(\overline{PQ}) = \text{const}(\text{常数})$$

将此式微分得到：

$$\frac{dB}{B} = -\frac{d(\overline{PQ})}{\overline{PQ}}$$

上式可写成:
$$\frac{dB}{B} = -\frac{|\overline{PQ}|\xi \cos \beta}{|\overline{PQ}|PQ}$$

右边分子显然是 $\overline{PQ}$ 与 ξ 的数量积:

$$\frac{dB}{B} = -\frac{\overline{PQ} \cdot \xi}{|\overline{PQ}|PQ} = -\frac{i_{PQ}^0 \cdot \xi}{PQ}$$

式中, i_{PQ}^0 是 $\overline{PQ}$ 方向的单位矢量。由图 2-2 可以看到矢量 $\vec{B} \times \vec{n}^0$ 的方向指向纸面并与纸面垂直, 又由于矢量 B 垂直于 $\overline{PQ}$, 所以三矢量的矢性积 $(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B}$ 的方向与矢量 $\overline{PQ}$ 平行。于是 $\overline{PQ}$ 方向的单位矢量 i_{PQ}^0 可以表示成 $i_{PQ}^0 = \frac{(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B}}{|\vec{B} \times \vec{n}^0| |\vec{B}|}$

注意到矢量 $\vec{B}$ 与 $\vec{n}^0$ 的夹角是 ψ , 而 $(\vec{B} \times \vec{n}^0)$ 与 $\vec{B}$ 垂直, 即夹角是 $\pi/2$ 所以单位矢量 i_{PQ}^0 又可以表示成:

$$\vec{i}_{PQ}^0 = \frac{(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B}}{\vec{B}^2 \sin \psi}$$

此外图 2-2 给出几何关系 $\overline{PQ} \sin \psi = a$, 于是用 $\vec{i}_{PQ}^0$ 的表达式将 dB/B 的式子右边写成:
$$\frac{dB}{B} = \frac{-[(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B}] \cdot \vec{\xi}}{B^2 a}$$

或者可以改写成:
$$a dB = \frac{-[(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B}] \cdot \vec{\xi}}{B}$$

利用二重矢量积公式可以写出:

$$(\vec{B} \times \vec{n}^0) \times \vec{B} = (\vec{B} \cdot \vec{B}) \vec{n}^0 - (\vec{B} \cdot \vec{n}^0) \vec{B}$$

结果给出:

$$a dB = -B \vec{n}^0 \cdot \vec{\xi} + \frac{(\vec{B} \cdot \vec{n}^0)(\vec{B} \cdot \vec{\xi})}{B}$$

此外由图 2-2 给出几何关系: $da = \vec{n}^0 \cdot \vec{\xi}$

将上面的两个关系式带入到式 2-15 右边, 就可以得到:

$$\begin{aligned} \vec{n}^0 \cdot \vec{\tau} \cdot \vec{\xi} &= \vec{n}^0 \cdot \vec{\xi} \left[-p + HB - \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH \right] \\ &+ H \left[-B \vec{n}^0 \cdot \vec{\xi} + \frac{(\vec{n}^0 \cdot \vec{B})(\vec{B} \cdot \vec{\xi})}{B} \right] \end{aligned}$$

化简后得出:

$$\vec{n}^0 \cdot \vec{\tau} \cdot \vec{\xi} = \vec{n}^0 \cdot \vec{\xi} \left[-p - \int_0^H \frac{\partial(vB)}{\partial v} dH \right] + (\vec{n}^0 \cdot \vec{B})(\vec{B} \cdot \vec{\xi}) \quad (2-16)$$

由单位并矢 $\vec{I}^0$ 的性质知: $\vec{n}^0 \cdot \vec{I}^0 = \vec{n}^0$ 或 $\vec{I}^0 \cdot \vec{\xi} = \vec{\xi}$

由式 (2-16) 可以看出表面应力张量 $\vec{\tau}$ 的表达式为:

$$\vec{\tau} = - \left[p + \int_0^H \frac{\partial(Bv)}{\partial v} dH \right] \vec{I}^0 + \vec{B}\vec{H} \quad (2-17)$$

注意, 矢量 $\vec{B}$ 和 $\vec{H}$ 是平行的, 所以 $\vec{B} = \mu\vec{H}$, 从而并矢 $\vec{B}\vec{H} = \vec{H}\vec{B}$ 。利用 $B = \mu_0(H + M)$, 并且 H 是与 v 无关的独立变量。则式 (2-17) 可以改写成:

$$\vec{\tau} = - \left[p + \int_0^H \mu_0 \frac{\partial(Mv)}{\partial v} dH + \frac{\mu_0}{2} H^2 \right] \vec{I}^0 + \vec{B}\vec{H} \quad (2-18)$$

再从表面力求彻体力, 从磁性液体中取出一个微元体积 dV_0 , 它具有表面积 dS 。作用于微元上的彻体力 $\vec{f}dV_0$, 表面力 $d\vec{S} \cdot \vec{\tau}$ 。由平衡

$$\int_S d\vec{S} \cdot \vec{\tau} = \int_{V_0} \vec{f}dV_0 \quad (2-19)$$

由散度定理得:

$$\int_S d\vec{S} \cdot \vec{\tau} = \int_{V_0} \nabla \cdot \vec{\tau} dV_0 \quad (2-20)$$

再比较式 (2-19) 和式 (2-20), 可以看出

$$\vec{f} = \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2-21)$$

将式 (2-18) 代入到式 (2-21) 的右边, 就有:

$$\vec{f} = -\nabla \cdot \left[p + \int_0^H \mu_0 \frac{\partial(Mv)}{\partial v} dH + \frac{\mu_0}{2} H^2 \right] \vec{I}^0 + \nabla \cdot \vec{B}\vec{H} \quad (2-22)$$

先分析式 (2-22) 右边的第一项。设一个数量 q , 由

$$\begin{aligned} \nabla \cdot q \vec{I}^0 &= \nabla \cdot \vec{I}^0 q = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \cdot (\vec{ii}) q \\ &= \left[(\vec{i} \cdot \vec{i}) \vec{i} \frac{\partial}{\partial x_i} \right] q = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x_i} \right) q = \nabla q \end{aligned}$$

此外, 注意到 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 和 $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$, 则式 (3.19) 右边的第二项展开有:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\vec{B}\vec{H}) &= \vec{H}(\nabla \cdot \vec{B}) + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{H} \\ &= \mu_0 \vec{H} \cdot \nabla \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \\ &= \frac{\mu_0}{2} \nabla H^2 + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \end{aligned}$$

将上面的关系式代入到 (2-22) 的右边:

$$\vec{f} = -\nabla \left[p + \mu_0 \int_0^H \frac{\partial(Mv)}{\partial v} dH \right] + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-23)$$

展开积分, 写成:

$$\vec{f} = -\nabla \left[p + \mu_0 \int_0^H M dH + \mu_0 \int_0^H v \frac{\partial M}{\partial v} dH \right] + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-24)$$

因为 $v = 1/\rho_f$, 还可以写成为:

$$\vec{f} = -\nabla \left[p + \mu_0 \int_0^H M dH - \mu_0 \int_0^H \rho_f \frac{\partial M}{\partial \rho_f} dH \right] + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-25)$$

式中括号内第一项为体积力，第二项为磁性液体的磁化压力，第三项的物理意义表示考虑磁致伸缩压力后的结果。

该式为麻省理工学院研究成果，Rosensweig 和 Siliomas 两位磁性液体理论研究元老做出了主要贡献。

现将 $\vec{f}$ 写成如下形式：

$$\vec{f} = -\nabla p^* + \vec{f}_k \quad (2-26)$$

这里

$$p^* = p + p_m + p_s \quad (2-27)$$

式中 p_m 称为磁性液体磁化压力。

$$p_m = \mu_0 \int_0^H M dH \quad (2-28)$$

p_s 是磁性液体在磁场中磁场作用后由于体积变化而产生的压力成为磁致伸缩压力，其表达式为：

$$p_s = \mu_0 \int_0^H v \frac{\partial M}{\partial v} dH = -\mu_0 \int_0^H \rho_f \frac{\partial M}{\partial \rho_f} dH \quad (2-29)$$

f_k 是 Kelvin 力，它是由外磁场梯度而引起的体积力。

$$\vec{f}_k = \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-30a)$$

在磁性液体中，通常总能实现 $\vec{M}$ 与 $\vec{H}$ 平行。于是 $\vec{f}_k$ 可以写成：

$$\vec{f}_k = \mu_0 \frac{M}{H} \vec{H} \cdot \nabla \vec{H} = \mu_0 \frac{M}{H} \left[\frac{1}{2} \nabla (\vec{H} \cdot \vec{H}) - \vec{H} \times (\nabla \times \vec{H}) \right]$$

$\nabla \times \vec{H}$ 称为传导电流，在磁性液体中没有传导电流，这也就是说 $\nabla \times \vec{H} = 0$ ，而 $\nabla (\vec{H} \cdot \vec{H}) = \nabla H^2 = 2H \nabla H$ ，结果就得出在 $\vec{M}$ 和 $\vec{H}$ 平行条件下的 Kelvin 力：

$$\vec{f}_k = \mu_0 M \nabla H \quad (2-30b)$$

下面讨论几种简化的情况：

定义在磁场作用后的附加力

$$\vec{f}_m = -\nabla (p_m + p_s) + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-31)$$

(1) 磁性液体的磁化强度 M 正比与外磁场强度 H 的情况；

设在磁性液体中 $\vec{B}$ 、 $\vec{H}$ 、 $\vec{M}$ 三矢平行，则有：

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu H$$

$$\text{因此 } \mu_0 M = (\mu - \mu_0) H \quad (2-32)$$

在一般情况下磁化强度 M 和磁导率 μ 的函数关系为：

$$M = M(T, v, H), \quad \mu = \mu(T, v, H) \quad (2-33)$$

如果等温或者温度远低于 Curie 温度，则 M 、 μ 均可以认为与温度 T 无关。

进一步, 对于线性磁化过程, 即磁性液体的磁化强度 M 正比于外磁场强度 H , 则磁导率 μ 仅取决于比容 v 而与磁场强度 H 无关。这时有:

$$M = (v, H), \quad \mu = \mu(v)$$

将式 (2-32) 代入到 (2-31)、(2-33) 和 (2-30b) 中, 得到:

$$\begin{aligned} p_m &= \int_0^H \mu_0 M dH = (\mu - \mu_0) \frac{H^2}{2} \\ p_s &= - \int_0^H \rho_f \frac{\partial(\mu_0 M)}{\partial \rho_f} dH = - \rho_f \frac{\partial \mu}{\partial \rho_f} \frac{H^2}{2} \\ \vec{f}_k \mu_0 M \nabla H &= (\mu - \mu_0) \nabla \left(\frac{H^2}{2} \right) \end{aligned}$$

于是式 (2-31) 成为:

$$\vec{f}_m = - \nabla \left[(\mu - \mu_0) \frac{H^2}{2} - \rho_f \frac{\partial \mu}{\partial \rho_f} dH \right] + (\mu - \mu_0) \nabla \left(\frac{H^2}{2} \right)$$

上式简化以后得到:

$$\vec{f}_m = - \nabla \left[\rho_f \frac{\partial \mu}{\partial \rho_f} \left(\frac{H^2}{2} \right) \right] + \frac{H^2}{2} \nabla \mu \quad (2-34)$$

(2) 磁性液体的磁化强度 M 正比于其密度 ρ_f 的情况——线性磁性液体;

因为磁性液体的磁化强度 M 就正比于其密度 ρ_f , 从而有 $Mv = c$, 则

$\frac{\partial(Mv)}{\partial v} = 0$, 于是由式 (2-24) 可得:

$$f = - \nabla p + \mu_0 \vec{M} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2-35)$$

若矢量 $\vec{H}$ 、 $\vec{M}$ 平行, 则 $\vec{f} = - \nabla p + \mu_0 M \nabla H$

所以线性磁性液体的磁彻体力就是 *kelvin* 力。由 *Lebniz* 对积分上限取导数的公式可得:

$$\nabla \int_0^H M dH = M \nabla H + \int_0^H (\nabla M)_H dH$$

假定磁性液体的密度为常数, 则其磁化强度仅于 H 与 T 有关, 即 $M = M(H, T)$, 于是 $(\nabla M)_H = \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T$ 。

在下述情况下, 上式的右边为零: ①若温度场是均匀的, 则 $\nabla T = 0$; ②若温度远低于 *Curie* 温度, 则 $\partial M / \partial T \approx 0$, 结果有

$$M \nabla H = \nabla \int_0^H M dH \quad (2-36)$$

代入到式 (2-31) 中, 就有

$$\vec{f} = - \nabla \left(p - \mu_0 \int_0^H M dH \right) \quad (2-37)$$

或者可以写成

$$\vec{f} = -\nabla p^* \quad (2-38)$$

而此时的 p^* 可以写成:

$$p^* = p - \mu_0 \int_0^H M dH = p - p_m \quad (2-39)$$

(3) 磁性液体处于低温下或者均匀温度场中;

所谓的低温就是温度远低于 Curie 温度, 而均匀温度场就是 $\nabla T = 0$ 。这两种情况中的任意一种都能使式 (2-36) 成立。而式 (2-36) 实际上就是 $f_k = \nabla p_m$, 所以将式 (2-36) 用于 (2-31) 中可知

$$\vec{f}_m = -\nabla p_s \quad (2-40)$$

此时的 p^* 是

$$p^* = p + p_s = p + \mu_0 \int_0^H v \frac{\partial M}{\partial v} dH \quad (2-41)$$

而磁性液体的彻体力 f 是:

$$f = -\nabla p^* = -\nabla(p + p_s) \quad (2-42)$$

2.4 磁性液体的 Bernoulli 方程

在工业管道流动中, 使用 Bernoulli 方程作为水力学分析是最常用的手段。对于普通流体, Bernoulli 方程是一个机械能守恒方程, 使用它可以很方便地给出明确的结果和物理概念。但对于磁性液体, Bernoulli 方程不完全是机械能守恒的方程, 它包括磁能在内, 反映磁场对磁性液体流动的影响。一般按照需要对外磁场进行调整, 实现对磁性液体流动的控制^[28]。这种控制是磁性液体在工业应用中的基础。

由上一节中得出的磁性液体的运动方程, 将其展开我们可以得到^{[4][5]}:

$$\rho_f \frac{\partial V}{\partial t} + \rho_f V \cdot \nabla V = \rho_f g - \nabla p^* + \mu_0 M \cdot \nabla H + \eta_H \nabla^2 V + \frac{J}{2t_s} \nabla \times (\Omega - \omega) \quad (2-43)$$

假设:

① 磁性液体的密度 $\rho_f = \text{const}$, 可知

$$\nabla \cdot V = 0$$

② 流动是具势的, 即

$$\nabla \times V = 0 \text{ 或 } \omega = 0$$

并且存在速度势 φ_v , 则

$$V = -\nabla \varphi_v \quad (2-44)$$

□ 外磁场变化不造成磁性固体颗粒的旋转, 同时认为磁性液体的磁化强度矢量 M 和外磁场 H 平行, 因而由式 (2-30) 给出

$$\mu_0 \bar{M} \cdot \nabla \bar{H} = \mu_0 M \nabla H$$

利用 Leibniz 对积分上限取导数的公式可得

$$\nabla \int_0^H M dH = M \nabla H + \int_0^H (\nabla M)_H dH$$

对于 $\rho_f = \text{const}$ 的磁性液体, 其磁化强度 M 仅与外磁场 H 和 T 有关, 即存在函数关系 $M = M(H, T)$, 所以

$$(\nabla M)_H = \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T$$

结果给出

$$M \nabla H = \nabla \int_0^H M dH - \int_0^H \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T dH \quad (2-45)$$

注意到重力 $\rho_f g$ 是具势的, 设磁性液体和参考点之间的距离是 h , 则

$$\rho_f g = i \rho_f g \cos(x, h) + j \rho_f g \cos(y, h) + k \rho_f g \cos(z, h) = -\rho_f g \left(i \frac{\partial h}{\partial x} + j \frac{\partial h}{\partial y} + k \frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

所以有

$$\rho_f g = -\nabla(\rho_f g h) \quad (2-46)$$

由恒等式

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v}) = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right)$$

及恒等式

$$\nabla^2 \mathbf{v} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v}) = 0$$

将上面所有结果, 按项代入到式 (2-43) 中就有

$$\rho_f \frac{\partial}{\partial t} (-\nabla \phi_v) + \rho_f \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) = -\nabla(\rho_f g h) - \nabla p^* + \mu_0 \nabla \int_0^H M dH - \mu_0 \int_0^H \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T dH = 0$$

合并算子 ∇ 下的各项, 就有

$$\nabla \left[-\rho_f \frac{\partial \phi_v}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho_f V^2 + \rho_f g h + p^* - \mu_0 \int_0^H M dH \right] + \mu_0 \int_0^H \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T dH = 0 \quad (2-47)$$

方程(2-47)是磁性液体的 Bernoulli 方程的一般形式。在下述两种情况下, 它可以得到简化: □若流动是等温的, 即 $\nabla T = 0$; □流场中的温度远低于 Curie 温度, 这时 $\partial M / \partial T \approx 0$, 于是可以得到

$$\mu_0 \int_0^H \frac{\partial M}{\partial T} \nabla T dH = -f(t) \quad (2-48)$$

右边函数 $f(t)$ 的出现是因为过程可能是非定常的。代入到式(2-47)中:

$$\nabla \left[-\rho_f \frac{\partial \phi_v}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho_f V^2 + \rho_f g h + p^* - \mu_0 \int_0^H M dH \right] = f(t) \quad (2-49)$$

如果流动是定常的, 则式(2-49)成为

$$p^* + \frac{1}{2} \rho_f V^2 + \rho_f g h - \mu_0 \int_0^H M dH = C \quad (2-50)$$

右边的 C 是一常数, 对于磁化强度 M 与密宽 ρ_f 成正比的磁性液体, $p_m + p_s = 0$, 就得到更为简单的结果:

$$p + \frac{1}{2} \rho_f V^2 + \rho_f gh - \mu_0 \int_0^H M dH = C \quad (2-51)$$

2.5 铁磁流体静力学

由本课题中将要使用的传感器构造原理, 下面来讨论 Bernoulli 方程在铁磁流体静力学方面尤其是计算磁性液体中浸没物悬浮力中的应用。

一、在平行磁场作用下磁性液体的浮力

如图 2-3 所示, 将一块立方体非磁性物质沉浸于磁性液体中。平行于磁性液体液面的外磁场强度是垂直坐标 z 的函数, 即

$$H = H(z) \quad (2-52)$$

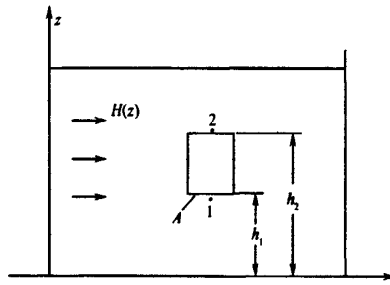


图 2-3 沉浸于磁性液体中的非磁性块

Fig.2-3 The nonmagnetic body immersed in magnetic fluid

由 Bernoulli 方程 (2-51) 有

$$p_1^* + \rho_f gh_1 - \mu_0 \int_0^{H_1} M dH = p_2^* + \rho_f gh_2 - \mu_0 \int_0^{H_2} M dH \quad (2-53)$$

边界条件: 在六面体之上下两表面上, p_1^* 和 p_2^* 分别等于物体表面之反压, 即

$$p_1^* = p_1, \quad p_2^* = p_2$$

代入方程(2-50)给出

$$p_1 - p_2 = \rho_f g(h_2 - h_1) + \mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH \quad (2-54)$$

若六面体的横截面积是 A , 则浮力 $F_z = (p_1 - p_2)A$, 从而有

$$F_z = \rho_f g V_0 + \left(\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH \right) A \quad (2-55)$$

式中, V_0 是六面体的体积, $V_0 = (h_2 - h_1)A$

二、在垂直磁场作用下磁性液体的浮力

在图 2-3 中, 若外磁场 $H(z)$ 平行 z 轴即垂直于磁性液体的表面, 则方程(2-53)仍然可以使用, 但在六面体上下表面的边界条件为

$$p_1^* + p_{1n} = p_1, \quad p_2^* + p_{2n} = p_2 \quad (2-56)$$

注意, p_n 仅存在于磁性液体中, 而六面体物质是非磁性的, 所以它不产生 p_n 。
将定义式

$$p_n = \frac{\mu_0}{2} M_n^2$$

和边界条件(2-56)代入方程(2-53)可得

$$p_1 - p_2 = \rho_f g (h_2 - h_1) + \mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH + \frac{\mu_0}{2} (M_{1n}^2 - M_{2n}^2) \quad (2-57)$$

于是浮力公式为

$$F_z = \rho_f g V_0 + \left(\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH \right) A + \frac{\mu_0}{2} (M_{1n}^2 - M_{2n}^2) \quad (2-58)$$

从式(2-55)和式(2-58)可以看到, 只有外磁场 H 具有梯度时, 磁场才对浮力有贡献。若磁场沿 z 方向是均匀的, 则 $H_1 = H_2$, $M_{1n} = M_{2n}$, 此时磁性液体的浮力和一般流体没有什么不同。其次, 可以看到控制磁场的梯度, 可以改变磁性液体浮力的大小, 从而可以浮起不同比重的物体。这就是磁性液体浮选的基本原理。磁性液体浮选的特殊优点就是利用改变磁场来浮选非磁性的物质。

若外磁场很强, 以致使整个磁性液体达到饱和磁化状态, 则式(2-55)和式(2-58)都给出浮力, 其公式变为

$$F_z = \rho_f g V_0 + \mu_0 M_s (H_1 - H_2) A \quad (2-59)$$

三、静止非磁性淹没物体受到的磁性液体作用力、磁性液体的当量有效密度

从边界条件式(2-56), 淹没于磁性液体中的非磁性物体的表面反压是 p , 所以可以将磁性液体对淹没物体的作用力表示成

$$F = \oint_S -p dS \quad (2-60)$$

式中, S 是物体的表面积。利用式(2-56)和方程(2-50)

$$p = p^* + p_n$$

$$p^* = C - \rho_f g h + \mu_0 \int_0^H M dH$$

于是有

$$F = - \oint_S \left[C - \rho_f g h + \mu_0 \int_0^H M dH + \frac{\mu_0}{2} M_n^2 \right] dS \quad (2-61)$$

使用散度公式:

$$\oint_S q dS = \int_{V_0} \nabla q dV_0$$

则式(2-61)可以写成

$$F = - \int_{V_0} \nabla \left[C - \rho_f g h + \mu_0 \int_0^H M dH + \frac{\mu_0}{2} M_n^2 \right] dV_0 \quad (2-62)$$

式中, V_0 是 S 所包围的体积, 因为 C 是常数, 所以

$$\nabla C = 0$$

而式 (2-36) 给出

$$\nabla \int_0^H M dH = M \nabla H$$

以及

$$\nabla \frac{1}{2} M_n^2 = M_n \nabla M_n$$

将上面的关系式代入到式 (2-62) 中就得

$$F = \int_{V_0} (\rho_f g \nabla h + \mu_0 M \nabla H - \mu_0 M_n \nabla M_n) dV_0 \quad (2-63)$$

若 ∇h , ∇H 和 ∇M_n 均与体积 V_0 无关, 并且定义平均值 $\overline{M}$ 和 $\overline{M_n}$ 为

$$\overline{M} = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} M dV_0, \quad \overline{M_n} = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} M_n dV_0 \quad (2-64)$$

则式 (2-63) 就成为

$$F = (\rho_f g \nabla h - \mu_0 \overline{M} \nabla H - \mu_0 \overline{M_n} \nabla M_n) V_0 \quad (2-65)$$

方程 (2-63) 和 (2-65) 就是磁性液体作用于非磁性的淹没体上的力。若仅考虑垂直于液面方向的力, 它就是浮力 F_z , 并且注意到

$$h = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

所以

$$\nabla h = i \frac{\partial h}{\partial x} + j \frac{\partial h}{\partial y} + k \frac{\partial h}{\partial z}$$

而

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{x}{h} = \cos(h, x)$$

同样可有

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \cos(h, y), \quad \frac{\partial h}{\partial z} = \cos(h, z)$$

从而得

$$\nabla h = i \cos(h, x) + j \cos(h, y) + k \cos(h, z) \quad (2-66)$$

浮力 F_z 是 F 在 z 方向的分量, 则式 (2-65) 给出

$$F_z = \left[\rho_f g \cos(h, z) - \mu_0 \overline{M} \frac{\partial H}{\partial z} - \mu_0 \overline{M_n} \frac{\partial M_n}{\partial z} \right] V_0 \quad (2-67)$$

若 h 和 z 轴平行, 则 F_z 就成为

$$F_z = \left[\rho_f g - \mu_0 \overline{M} \frac{\partial H}{\partial z} - \mu_0 \overline{M_n} \frac{\partial M_n}{\partial z} \right] V_0 \quad (2-68)$$

定义当量等效密度 $\rho_{f,e}$ 为

$$\rho_{f,e} = \rho_f \left(1 - \mu_0 \frac{\overline{M}}{\rho_f g} \frac{\partial H}{\partial z} - \mu_0 \frac{\overline{M_n}}{\rho_f g} \frac{\partial M_n}{\partial z} \right) \quad (2-69)$$

则式(2-68)就成为:

$$F_z = \rho_{f,e} g V_0 \quad (2-70)$$

设非磁性物体的密度 ρ' , 则当 $\rho_{f,e} > \rho'$ 时, 物体就将飘浮于磁性液体之液面上, 而当 $\rho_{f,e} < \rho'$ 时, 物体就将沉没于磁性液体之底。所以改变外磁场梯度, 总可以使重的物体飘浮或使轻的物体沉底。

以上本节中的三个部分均为在外磁场作用下对磁性液体中浸没的非磁性物体的浮力计算, 上述理论结果对利用磁性液体选矿等有着重要的意义。而当磁性液体中浸没的是永磁体的时候, 由于磁性液体内部磁场分布的变化, 就不能简单的套用上述理论了, 下一章将主要针对永磁体在磁性液体中时的受力情况进行展开, 同时这也将是本项目所设计的传感器的理论基础。

2.6 本章小结

本章主要介绍了磁性液体的磁化强度、运动方程和 Bernoulli 方程及其在铁磁流体静力学方面的应用。

3 磁性液体永磁悬浮理论的实验研究

正如在第一章中提到过的,国内外的各种磁性液体加速度传感器大多利用磁性液体一阶浮力原理、磁性液体二阶浮力原理以及磁性液体顺磁性与流动性等来设计。而大家经过研究后发现利用磁性液体二阶浮力原理所设计的传感器往往结构简单可靠、无需外置磁场源,对环境依赖度小,发展改进潜力大等诸多优点,因此,本课题设计的传感器就是利用磁性液体二阶浮力原理即磁性液体永磁悬浮理论设计的。

接下来本章将对永磁悬浮理论进行一系列的分析并设计相关实验,最后将对实验结果进行较为深入的分析。

3.1 磁性液体的永磁悬浮理论

在对磁性液体进行研究的过程中,大家发现:在外加磁场的作用下,磁性液体可以浮起实际密度比磁性液体要大的非磁性物质。接下来,大家就对永磁体在磁性液体中的情况展开了研究 [28~33]。

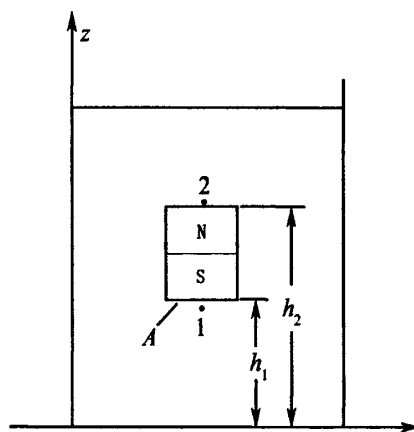


图 3-1 悬浮于磁性液体中的永磁体

Fig.3-1 Levitation of a permanent magnet in magnetic fluid

为了进行对比,将图 2-5 中的物体换成永久磁铁,将外磁场去掉,如图 3-1。同样,可以从 Bernoulli 方程 (2-51) 中得到:

$$p_1^* + \rho_f g h_1 - \mu_0 \int_0^{h_1} M dH = p_2^* + \rho_f g h_2 - \mu_0 \int_0^{h_2} M dH \quad (3-1)$$

经过推导,仍然能得到:

$$F_z = \rho_f g V_0 + \left(\mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH \right) A \quad (3-2)$$

式中， V_0 是六面体的体积， $V_0=(h_2-h_1)A$ 。

这里我们可以注意到，提供磁场的为浸没在磁性液体中永磁体，其提供的为非均匀变化的磁场。而且，通过 2.2 节中所介绍的内容，磁性液体的磁化强度 M 是随着外磁场 H 的变化而变化的，变化的规律如下图中的磁化曲线所示。

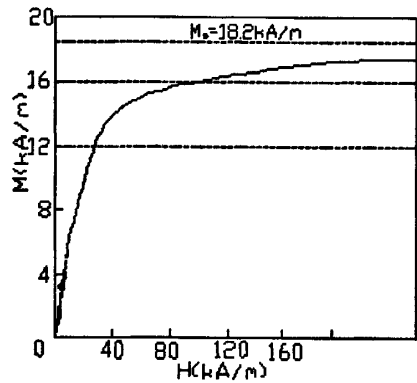


图 3-2 某磁性液体的磁化曲线

Fig.3-2 The hysteresis loop of a certain magnetic fluid

由此我们可以看出，式 3-2 是无法直接得到解析解的。

虽然无法直接计算出永磁体在磁性液体中的受力情况，但在研究中，Rosensweig^[5]发现当永久磁铁浸没在磁性液体中，就会出现自悬浮现象，而且在无外力作用下，永磁体有向磁性液体中心移动的趋势。对此现象，本项目组也进行了实验观测，如下图^[29]。

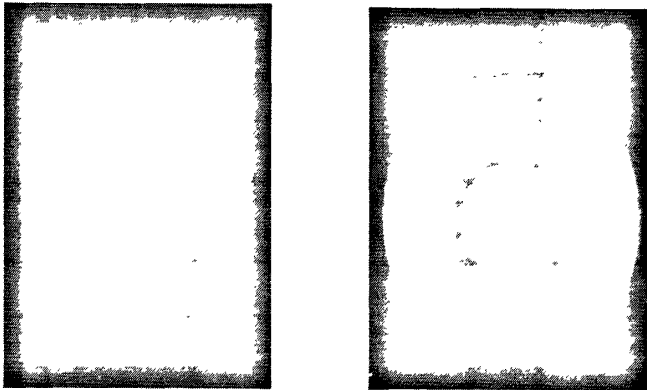


图 3-3 磁性液体永磁悬浮现象的 X 光照片 1

Fig.3-3 The X-ray image of self-levitation of permanent magnet in magnetic fluid NO.1

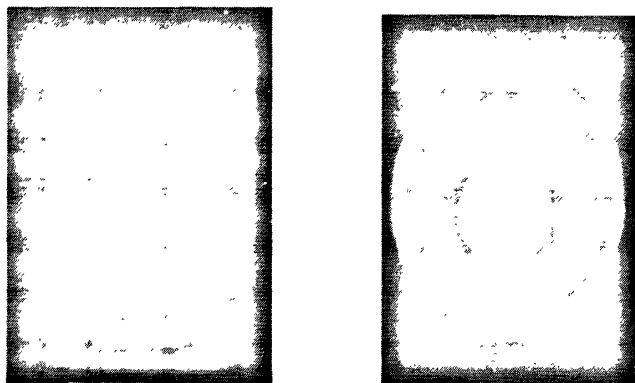


图 3-4 磁性液体永磁悬浮现象 X 光照片 2

Fig.3-4 The X-ray image of self-levitation of permanent magnet in magnetic fluid NO.2

由于磁性液体为非透明液体且呈现为黑色，在不外加磁场的情况下，一般强度的光线无法穿透，本课题组成员对其进行 X 光拍照，如图 3-3、3-4。两组图片分别是盘形永久磁铁放在不同的磁性液体中时拍到的侧视与俯视图，从俯视图中我们可以明显的看出盘形磁铁位于杯子的正中心；从侧视图来看，磁铁悬浮在了液体的中心偏下的位置。

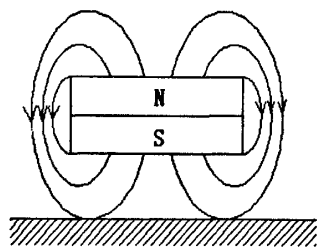


图 3-5 盘形永磁体的磁场分布

Fig.3-5 Magnetic field lines about a permanent magnet

现在对其悬浮位置进行分析，可以看出：由于在水平方向上，永磁体没有受力且磁性液体中磁场在水平方向上对称分布，受到的压力也是中心对称的，磁铁自然地就悬浮在了正中心；而在垂直方向上，永磁体受到了重力的作用向下移动，而杯子是不导磁的，磁力线在磁铁下方被压缩(如图 3-5)，由此密集的磁力线磁铁下方产生了比上方更大的磁场强度梯度，从而使磁铁的上下表面产生出一个向上的压力差来与重力平衡，最终使盘形磁铁悬浮在了磁性液体中部偏下的位置。

以上就是初步的对永磁悬浮理论的分析。下面对永磁体在磁性液体中的受力进行了进一步的表达。

首先，磁流体对浸没物的作用力公式为：

$$F = (\rho_f g \nabla h - \mu_0 \overline{M} \nabla H - \mu_0 \overline{M}_n \nabla M_n) V_0 \quad (3-3)$$

式中, $\overline{M} = \frac{1}{V} \int_0 M dV_0$, $\overline{M}_0 = \frac{1}{V_0} \int_0 M_n dV_0$, M 是磁性液体的磁化强度矢量;
 H 是外界施加于磁性液体内的磁场强度。若仅考虑垂直于液面方向的力, 那么浮力

$$F_z = \left(\rho_f g \cos(h, z) - \mu_0 \overline{M} \frac{\partial H}{\partial z} - \mu_0 \overline{M}_n \frac{\partial M_n}{\partial z} \right) V_0 \quad (3-4)$$

当 h 与 z 轴平行时

$$F_z = \left(\rho_f g - \mu_0 \overline{M} \frac{\partial H}{\partial z} - \mu_0 \overline{M}_n \frac{\partial M_n}{\partial z} \right) V_0 \quad (3-5)$$

上述几个式子表明了磁性液体对浸没物的作用力分为: 作为非磁性液体产生的浮力; 在磁场作用下磁性液体由于磁化而施加给浸没物的磁压力。

而浸没于磁性液体内部永久磁铁的压力(不包括作为一般液体时产生的浮力)表达式为^[31]

$$F_{mi} = -\frac{\mu_f - \mu_s}{8\pi} \int_{s_v} H_m^2 n_i dS \left(1 + \frac{\mu_f - \mu_s}{\mu_s} \right) \quad (3-6)$$

H_m 是磁铁在磁流体内部形成的非均匀磁场, 并且 $H_m = \nabla \frac{m\vec{r}}{r^3}$, $m = \frac{3V_m M_m}{1 + 2\mu_f}$, M_m

是磁铁材料的磁化强度矢量, V_m 是磁铁体积。可以看出, 磁压力由磁场梯度产生(若 H_m 恒定, 则 $F_{mi}=0$); 当浸没物为非磁性材料时, 其自身磁化强度和磁流体内部产生的磁场 H 几乎可以忽略不计; 若浸没物为磁性材料, 则须考虑 M 、 H , 无外部磁场作用时, 磁铁块可在自身磁场梯度下自悬浮。

由上述分析以及公式可以得出, 在永磁悬浮中, 永磁体材料以及尺寸、磁性液体的相关性质直接影响浮力大小的关键因素。

接下来, 将针对以上几点因素并结合本课题中传感器的机构特点进行永磁悬浮系列实验。

3.2 永磁悬浮实验

为了对永磁悬浮理论进行进一步分析, 本节将针对影响永磁悬浮力大小的几个因素: 磁铁的尺寸、形状以及材料, 磁性液体饱和磁化强度 M , 容器的形状、容积以及磁性液体的注入量。

实验中测量的数据主要为永久磁铁在磁性液体中移动的距离与其所受到的悬浮力之间的关系。经过仔细分析, 笔者设计出如图 3-6 中的一个设计方案。

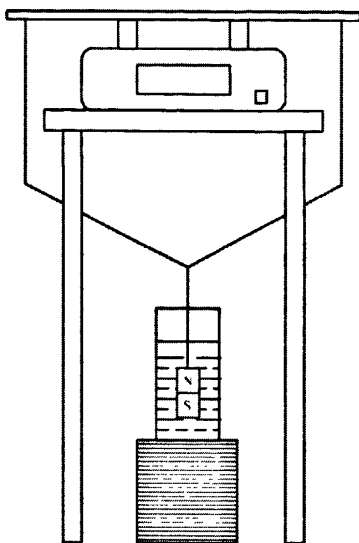


图 3-6 永磁悬浮实验示意图

Fig.3-6 The sketch of experiment about self-levitation of
permanent magnet in magnetic fluid

图 3-6 中，永磁体悬浮于容器中，其上部连接有绳子；而绳子最终连接在一个架在电子天平上的支架上。方案中，容器下的支持物高度可变，它高度的减少或者增大都可以造成磁铁在磁性液体中的高度发生变化，这样的话，脱离了悬浮点平衡位置的磁铁就会受到绳子的拉力，而电子天平就会测出这个力的大小。

在磁性液体中，永久磁铁受重力 G ，普通液体浮力 F_1 ，磁性液体悬浮力 F 和线给磁铁的拉力 F_2 ，设线拉力向上为正方向，根据其受力平衡可以得到：

$$G = F_1 + F + F_2 \quad (3-7)$$

则磁性液体悬浮力 $F = G - F_1 - F_2$ ；

假设实验时测量值为质量 $m_{\text{测}}$ ，铁架和绳子的质量和为 m_1 ，则线上的拉力为：

$$F_2 = m_{\text{测}}g - m_1g$$

又因为 $F_1 = \rho_{\text{液}}gV_{\text{磁体}}$ ， $G = m_{\text{磁体}}g$ ；

得：

$$F = m_{\text{磁体}}g - \rho_{\text{液}}gV_{\text{磁体}} - (m_{\text{测}}g - m_1g) \quad (3-8)$$

假设 $F = mg$ 的话，

$$m = m_{\text{磁体}} - \rho_{\text{液}}V_{\text{磁体}} - (m_{\text{测}} - m_1) \quad (3-9)$$

通过最终统计的质量 m 的曲线就可以比较清晰的反应出磁性液体悬浮力的变化规律来。

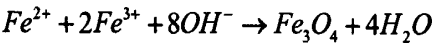
而在本实验中，为了方便对最终的数据进行比照，将会采用多种磁性液体、磁铁并采用多个容器不同和磁性液体注入量进行实验。

3.2.1 实验用磁性液体的制备及其性质

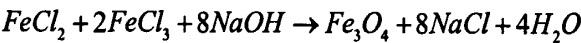
磁性液体于上世纪 60 年代出现于美国，刚开始的时候，采用的是粉碎法制备。该法是将分散质和表面活性剂与溶媒放在一起，在球磨机上进行长时间的研磨，而后通过过滤或离心分离去除粗粒子而制得磁性液体。但是该法研磨时间很长、成本过高，因而并没得到推广。

经过各国学者长时间的研究，开发出了阴离子交换法、氢还原法、火花电蚀法等方法，而目前使用最广的是共沉淀法^[4]。

铁盐和亚铁盐在水中反应，会生成磁性 Fe_3O_4 粒子，化学式如下：



如氯化铁和氯化亚铁在氢氧化钠水溶液中反应，由下列反应可得 Fe_3O_4 固体粒子。



也可以用硫酸铁和硫酸亚铁生成磁性 Fe_3O_4 。如此形成的 Fe_3O_4 超微粒子吸着油酸离子水洗脱水，分散于二甲苯等溶媒中，即可生成磁性液体。

将稀释的 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 和 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 在温度为 $70^{\circ}C$ 的条件混合，加入过量的 NaOH，然后连续搅拌，为了获得高度分散的共沉液，高速搅拌以限制粒子的增长是非常有必要的，通常用 NH_4OH 代替 NaOH 更能提供 $FeO \cdot Fe_2O_3$ 生成的条件，否则 $mFeO \cdot nFe_2O_3 (m \neq n)$ 可以使其组成的磁性能变坏。为了确保分散剂和 Fe_3O_4 粒子的作用，必须用水多次清洗反应物，以去掉 Cl^{-} 和盐的离子，为了确保共沉淀反应的彻底，碱的数量要过量。反应的温度为 $25-40^{\circ}C$ 之间。

用这种方法制备的 Fe_3O_4 粒子的直径范围为 $2-20nm$ ，其平均直径为 $7nm$ ，粒子的表面吸附能力好。

这种方法提供了较之其他制备 Fe_3O_4 粒子方法的基本优点，该方法的生产效率高，反应迅速，可以自动化、机械化，可以被工业生产所采纳。

本次实验中制备磁性液体的方法就是共沉淀法，实验中制备的磁性液体共 6 种，经北京科技大学材料国家重点实验室测定其饱和磁化强度如下：

表 3-1 试样饱和磁化强度

Tab.3-1 Saturation magnetization of magnetic fluid samples

试样编号	实验测量号	饱和磁化强度 (emu/g)	剩余磁化强度 (emu/g)	矫顽力 (Oe)
1	RL060416	18.62	0.3800	2
2	RL060417	23.02	0.3022	7
3	RL060418	25.35	0.0516	4

4	RL060419	25.01	0.1458	2
5	RL060420	30.38	0.05958	-
6	RL060421	32.28	0.5545	3

表 3-2 试样密度与粘度

Tab.3-2 Density and viscosity of magnetic fluid samples

试样编号	密度 (g/cm ³)	修正密度 (g/cm ³)	粘度 (mPa·s)	饱和磁化强度 (emu/g)
1	0.9349	0.9775	1.91	18.62
2	1.0102	1.0563	2.29	23.02
3	1.0148	1.0611	2.43	25.01
4	1.0328	1.0799	2.51	25.35
5	1.1479	1.2000	3.70	30.38
6	1.2344	1.2907	5.33	32.28

同时测出了试样的磁化曲线为：

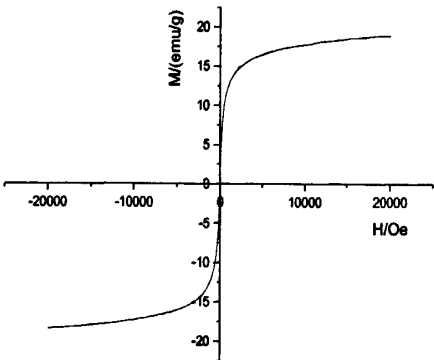


图 3-7 1 号磁性液体磁化曲线

Fig.3-7 Hysteresis loop of the first magnetic fluid

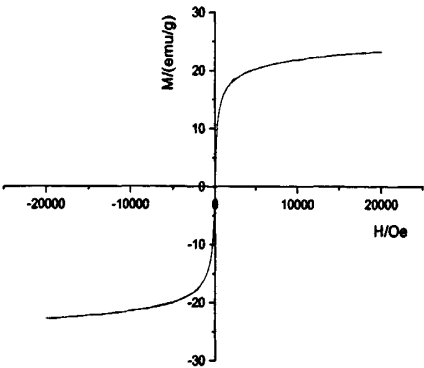


图 3-8 2 号磁性液体磁化曲线
Fig.3-8 Hysteresis loop of the second magnetic fluid

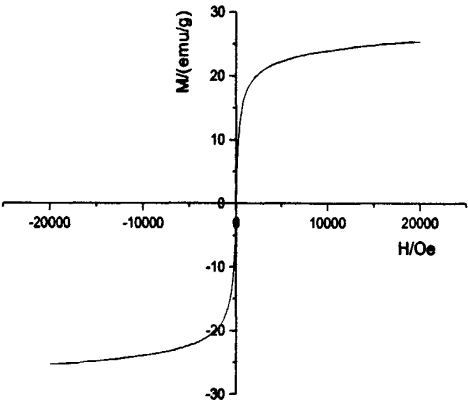


图 3-9 3 号磁性液体磁化曲线
Fig.3-9 Hysteresis loop of the third magnetic fluid

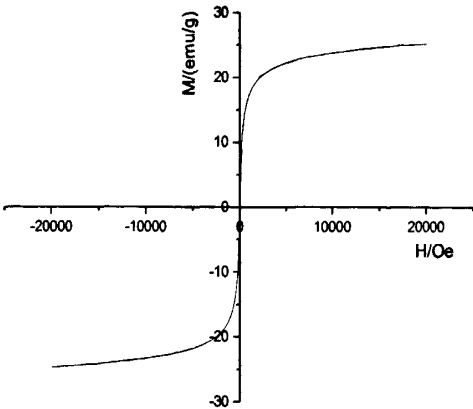


图 3-10 4 号磁性液体磁化曲线
Fig.3-10 Hysteresis loop of the fourth magnetic fluid

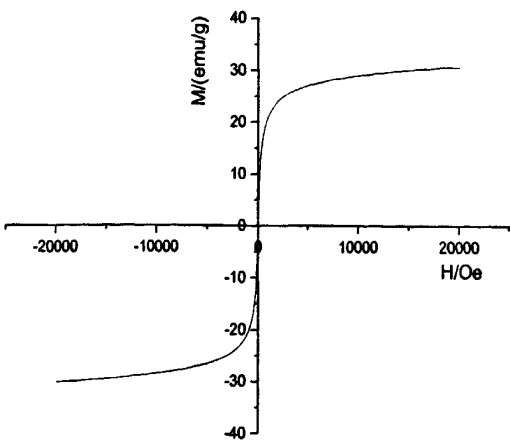


图 3-11 5 号磁性液体磁化曲线

Fig.3-11 Hysteresis loop of the fifth magnetic fluid

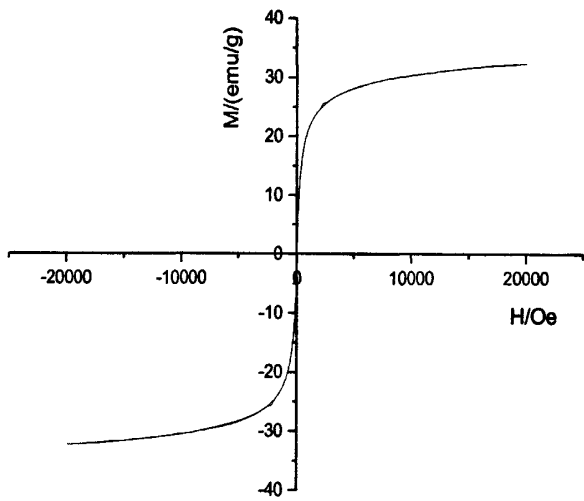


图 3-12 6 号磁性液体磁化曲线

Fig.3-12 Hysteresis loop of sixth magnetic fluid

3.2.2 实验方案与装置的设计

一、实验装置的选取

首先，根据图 3-6 中所示进行实验装置的选择。

本实验中使用电子天平作为测量力大小的装置，这样可以方便而精确的测出

悬浮力由于微小位移而产生的变化,而且不会发生读数错误。根据实验需要,采用 LP3102 型电子天平,可以精确到 0.01g,也就是可以测出 0.1N 大小的力的变化,完全可以满足本实验的要求与精度。

对于实验中所用的支撑物,必须满足可以微小的改变高度并且完全可控,而且它的微小变化是可以精确测出的。本项目组创造性的使用了一种简单的方法来满足上述苛刻的条件:使用普通的 A4 纸来充当支持物,这样就可以有效的微调支撑物的高度来实现微小位移,并且可以通过测试纸的厚度来测出并有效控制位移。经多次测试,本课题组所使用的 A4 纸张的厚度为 0.96mm/10 张。根据估算,每次抽取 10 张 A4 纸造成的微小位移完全可以测量并且不会造成关键数据被遗漏等问题。

悬挂磁铁所用的支架采用铁丝制成形状与图 3-6 中一样。为了悬挂磁铁,将铜片用 AB 胶粘在磁铁顶端,再用尼龙绳穿过将磁铁悬挂起。具体的磁铁悬挂高度由每次实验时支撑物高度、磁性液体高度与容器决定。悬挂起磁铁以后,整个装置效果如图 3-13 所示。

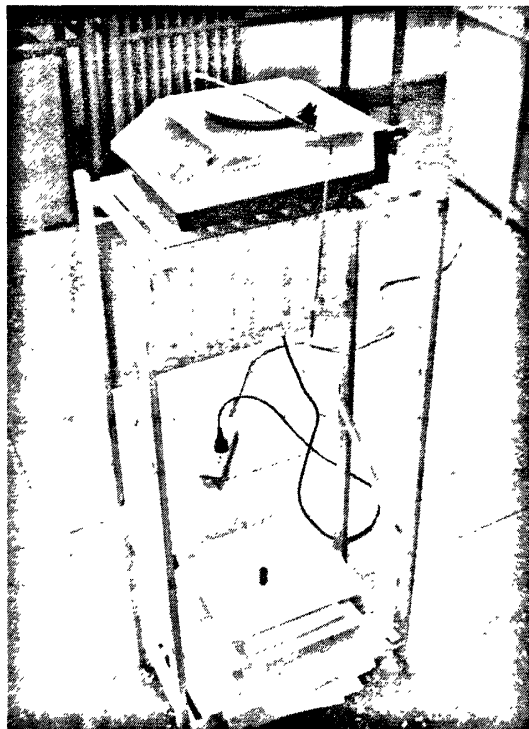


图 3-13 永磁悬浮实验装置

Fig.3-13 The instruments of experiment about self-levitation of permanent magnet in magnetic fluid

二、实验方案设计

本次实验的实验目的为:实际测量出磁铁的体积大小、磁性液体的饱和磁化

强度、容器的大小以及容器内磁性液体量的多少对浸没在磁性液体中的永磁铁受到的悬浮力的大小所造成的影响。

首先，根据实验要求选择所用的永久磁铁。本实验决定采用钕铁硼（NdFeB）材料的永久磁铁。这种材料属第三代稀土永磁材料，是当代磁性最强、性能价格比最好的永磁材料，被广泛的应用于工业与科研中，将其用于本实验非常合适。

表 3-3 实验用永久磁铁的尺寸与型号

Tab.3-3 Dimension and type of magnets

磁铁型号	质量（g）	体积（ cm^3 ）	牌号
Φ10×30	16.73	2.36	N40
Φ14×30	33.04	4.62	N40
Φ20×32	75.39	10.05	N40
Φ24×35	119.58	15.83	N40
Φ24×40	137.77	18.10	N40
Φ30×35	187.10	26.89	N40

为了测出磁铁体积对磁性液体悬浮力的影响，本实验使用 6 种磁铁，根据本实验的实际情况进行估算，其牌号均为 N40，尺寸分别为 Φ10×30，Φ14×30，Φ20×32，Φ24×35，Φ24×40，Φ24×40，Φ30×35。其质量与体积如上表所示。

实验使用量筒分别为 250ml 和 500ml 量筒，这两种量筒的直径不相同，而实验的时候又可以控制磁性液体的注入量，这样就相当于可以控制整个磁性液体的体积与呈现出来的形状，可以分别进行对照实验进行观察这两个因素对悬浮力的影响。

下面介绍实验的具体步骤。

每次实验开始前，先将电子天平调平，将没有拴着磁铁的支架和绳子放在天平上称重并且记住这个质量 m 。然后将磁铁拴在绳子上，将注入一定量磁性液体的量筒置于磁铁的正下方。而后将磁铁缓缓放入磁性液体之中，在确认磁铁下方没有混入气泡之后，观察此时电子天平的读数，假如读数是 m 或者相差很小的话，此时磁铁已经处于悬浮状态了；而如果不是 m 或者还有相差一定距离的话，那就适当调整绳子的长度或者支撑物的高度使磁铁悬浮起来。

实验一开始，首先记录下磁铁悬浮时电子天平的读数；接着开始抽取量筒下的 A4 纸，每次抽取 10 张，在抽取 10 张并且电子天平示数稳定即磁铁在磁性液体中的位置稳定后读数并记录下来；每次实验抽取纸张的次数由磁铁的位置决定，即每次到磁铁即将浮出液面为止。最后得到的数据与磁铁的位移即抽取纸张的数量一起绘制数据曲线，将得到磁铁悬浮力的变化情况与磁铁垂直方向的位移之间

的关系。实验时图片如图 3-14 所示。

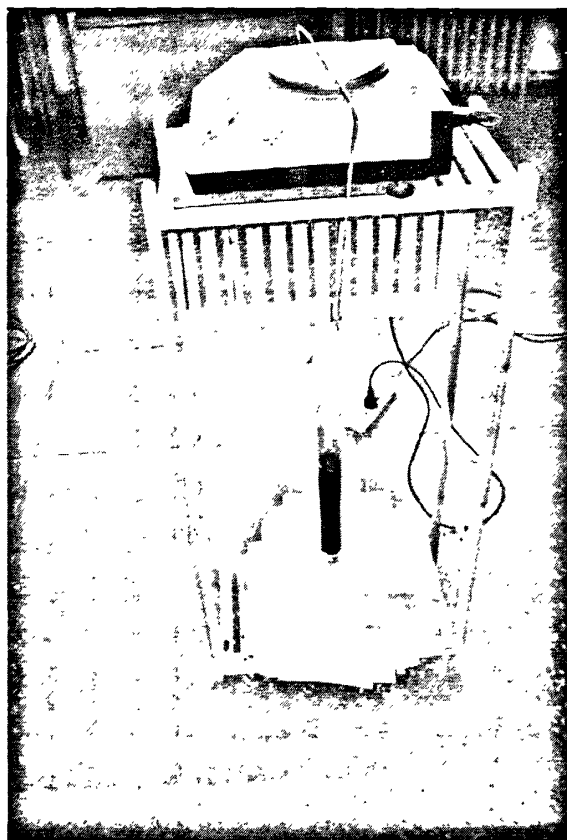


图 3-14 永磁悬浮实验

Fig.3-14 The experiment of self-levitation of
permanent magnet in magnetic fluid

根据本实验的实验目的，将进行以下几组对比实验：

- 1.使用相同量筒、相同磁铁、相同磁性液体在磁性液体注入量不同的情况下悬浮力的变化情况；
- 2.使用不同量筒、相同磁铁、相同磁性液体在磁铁注入高度相同的情况下悬浮力的变化情况；
- 3.使用相同量筒、不同磁铁、相同磁性液体并且同样的磁性液体注入量的情况下悬浮力的变化情况；
- 4.使用相同量筒、相同磁铁、不同磁性液体并且同样的磁性液体注入量的情况下悬浮力的变化情况。

以上每组实验所需要做的对比实验的实验个数由具体实验情况而定，每次实验所需测量的数据个数同组内相同，不同组间的数据个数可以有所不同，但差距不可过大。

三、实验注意事项

另外，整个实验时要注意室温的控制，整个实验过程中，室温变化不可超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，防止室温变化过大导致磁性液体的粘度以及其他的性质发生较大的变化影响对比结果。同时，所有实验的完成应该具有连续性，因为实验所用的煤油基磁性液体挥发性较强，如果实验不能在一个连续的时间段完成，磁性液体的基载液发生挥发造成体积分数的相对增加就会使磁性液体的性质发生明显的变化。此外，为了保证电子天平的读数正确，应该保证实验周围环境没有明显的振动而造成磁铁在磁性液体中的位置不稳定。

3.2.3 实验数据结果与分析

本节接下来介绍整个磁性液体悬浮实验的实验结果并且分析实验数据中所体现出来的规律。

一、使用相同量筒、相同磁铁、相同磁性液体在磁性液体注入量不同的情况下悬浮力的变化情况

1. $\Phi 10 \times 30$ 磁铁在 250ml 量筒、使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度不同的情况下产生的几组悬浮力变化曲线

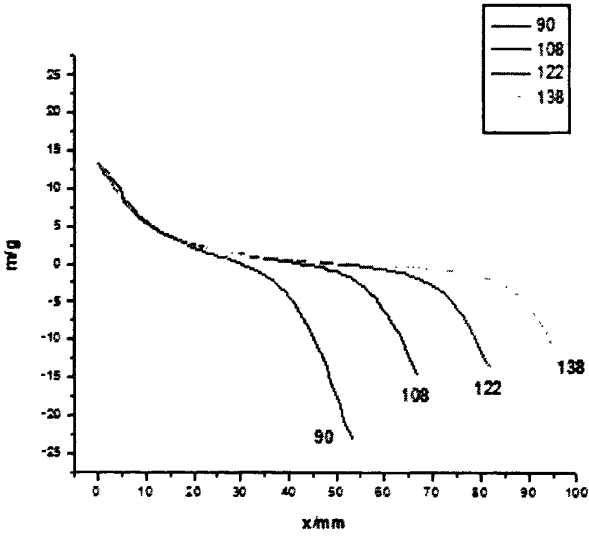


图 3-15 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（ $\Phi 10 \times 30$ 、250ml、6 号磁性液体、不同磁性液体注入量）

Fig.3-15 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
($\Phi 10 \times 30$ 、250ml、MF06、different volume of magnetic fluid)

2. $\Phi 14 \times 30$ 磁铁在 250ml 量筒、使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度不同的情况下产生的几组悬浮力变化曲线

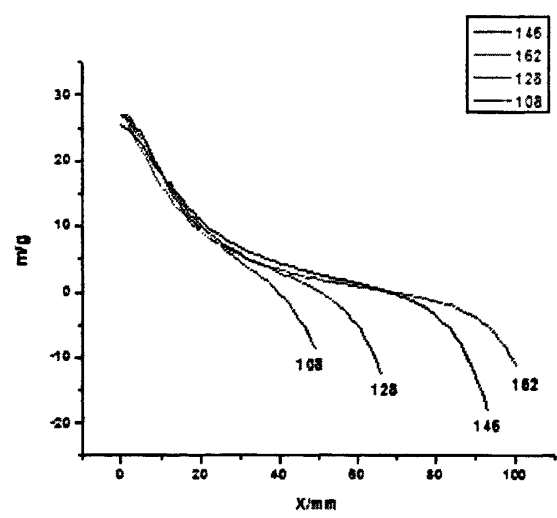


图 3-16 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ14×30、250ml、6 号磁性液体、不同磁性液体注入量）

Fig.3-16 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ14×30、250ml、MF06、different volume of magnetic fluid)

3. Φ14×30 磁铁在 250ml 量筒、使用 1 号磁性液体并且在注入磁性液体高度不同的情况下产生的几组悬浮力变化曲线

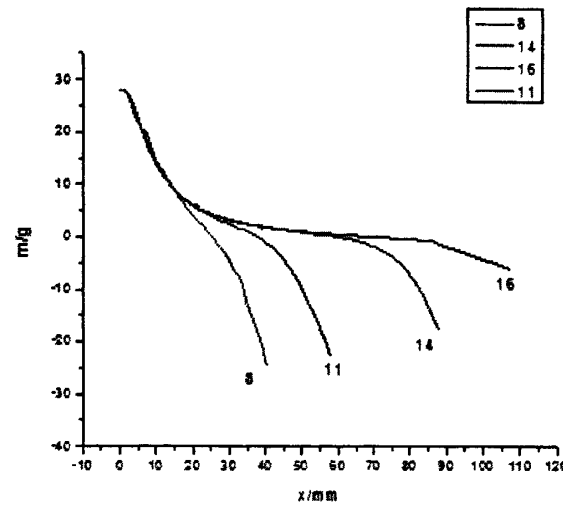


图 3-17 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ14×30、250ml、1 号磁性液体、不同磁性液体注入量）

Fig.3-17 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ14×30、250ml、MF01、different volume of magnetic fluid)

4. Φ10×30 磁铁在 250ml 量筒、使用 3 号磁性液体并且在注入磁性液体高度不同的情况下产生的几组悬浮力变化曲线

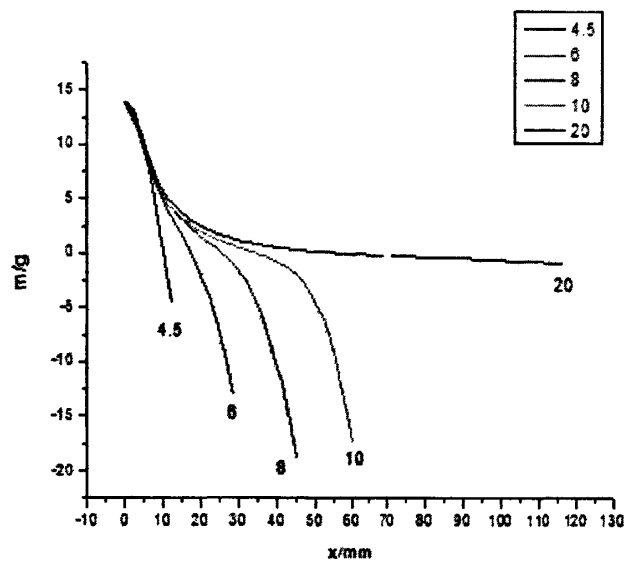


图 3-18 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ10×30、250ml、3 号磁性液体、不同磁性液体注入量）

Fig.3-18 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ10×30、250ml、MF03、different volume of magnetic fluid)

5. Φ20×32 磁铁在 250ml 量筒、使用 3 号磁性液体并且在注入磁性液体高度不同的情况下产生的几组悬浮力变化曲线

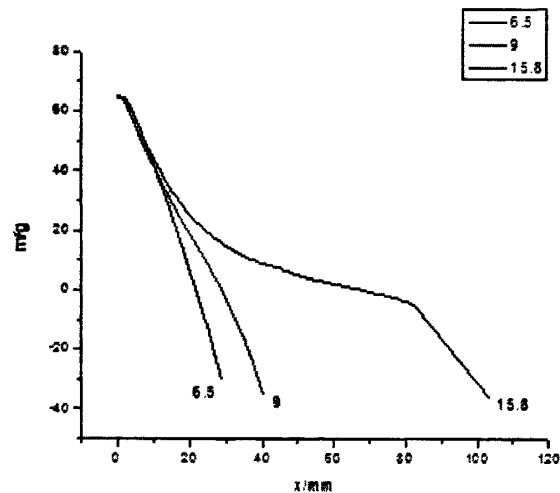


图 3-19 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ20×32、250ml、3 号磁性液体、不同磁性液体注入量）

Fig.3-19 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ20×32、250ml、MF03、different volume of magnetic fluid)

以上 5 个实验都是测试关于量筒内磁性液体高度对磁性液体中磁铁悬浮力影

响的。从以上 5 个图中可以发现每条曲线的共同点是：每条曲线的起始与末端的斜率较大，而且接近于直线，属于线性段；而中间的那段经过悬浮力零点的那段曲线比较平滑，斜率也低，也属于线性段。

为了排除实验中其他几项因素对这组实验的影响，项目组又使用不同量筒、不同磁性液体、不同磁铁分别做了上述实验。发现基本上曲线形状都有一个共同点，即每段曲线的开始端与末端线性段的斜率都大致相同。而且，从每组的实验所得到的曲线还可以看出，当磁性液体的高度逐渐下降即磁性液体注入量变少时，整个曲线的平滑段明显缩短。

二、使用不同量筒、相同磁铁、相同磁性液体在磁铁注入高度相同的情况下悬浮力的变化情况

1. $\Phi 10 \times 30$ 磁铁在使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度相同的情况下，在两个量筒中产生的两组悬浮力变化曲线

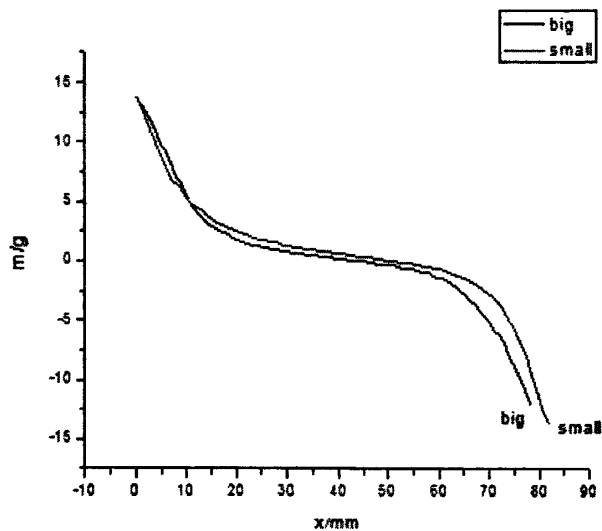


图 3-20 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（ $\Phi 10 \times 30$ 、6 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、不同量筒）

Fig.3-20 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
($\Phi 20 \times 32$ 、MF06、different dimension of measuring cylinder)

2. $\Phi 14 \times 30$ 磁铁在使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度相同的情况下，在两个量筒中产生的两组悬浮力变化曲线

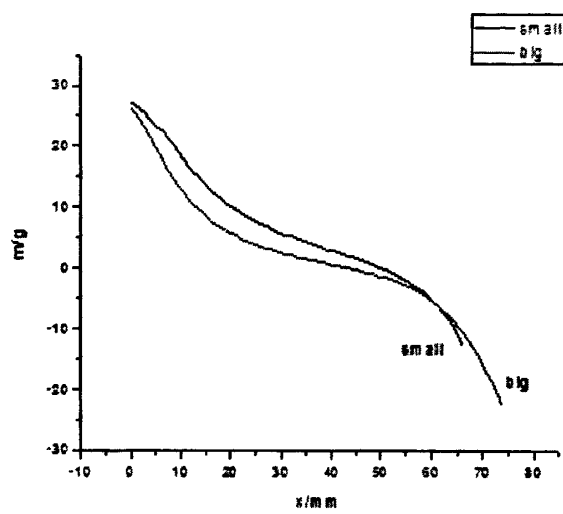


图 3-21 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ14×30、
6 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、不同量筒）

Fig.3-21 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ14×30、MF06、different dimension of measuring cylinder)

3. Φ20×32 磁铁在使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度相同的情况下，
在两个量筒中产生的两组悬浮力变化曲线

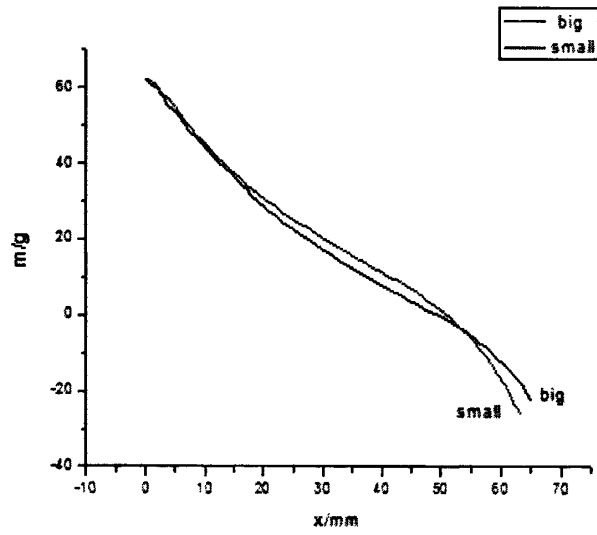


图 3-22 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ20×32、
6 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、不同量筒）

Fig.3-22 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ20×32、MF06、different dimension of measuring cylinder)

4. Φ24×35 磁铁在使用 6 号磁性液体并且在注入磁性液体高度相同的情况下，
在两个量筒中产生的两组悬浮力变化曲线

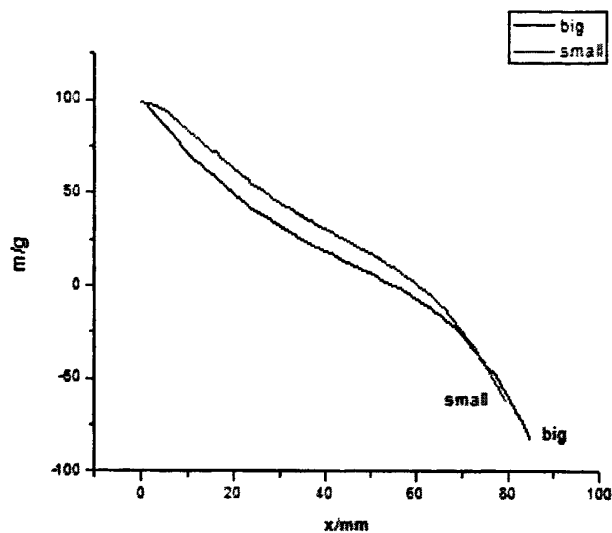


图 3-23 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（Φ24×35、
6 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、不同量筒）

Fig.3-23 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction
(Φ24×35、MF06、different dimension of measuring cylinder)

本组实验是使用不同量筒在磁性液体高度相同下对同一磁铁的悬浮力情况进行测量，其实可以认为是测量量筒直径对磁铁悬浮力的影响。为了进一步进行分析，本组实验采用了 4 个磁铁进行了重复对照实验，来验证磁铁直径与量筒直径之间的比例关系对悬浮力的影响。

从以上 4 个图中曲线我们可以看出，更换量筒前后的两次实验得到的曲线基本相同，可见：在其他的条件不变的情况下，量筒直径的变化不会影响悬浮力的大小变化。

对以上 4 幅图进行对比，可以看出：当磁铁的直径逐渐变大的时候，曲线的起始端与末端的斜率逐渐变大，但是变化不明显。据此可以看出，当磁铁与量筒之间的直径比逐渐增大的时候，悬浮力变化曲线的起始端与末端斜率会相应略微的增加。

三、使用相同量筒、不同磁铁、相同磁性液体并且同样的磁性液体注入量的情况下悬浮力的变化情况

1.使用 1 号磁性液体、同一量筒并且在磁性液体注入高度相同的情况下，不同的磁铁在磁性液体中的悬浮力变化情况

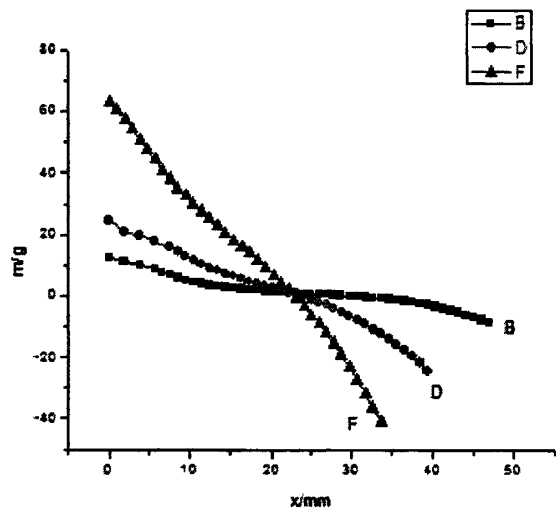


图 3-24 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（1 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、相同量筒、不同磁铁）

Fig.3-24 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction (MF01、same measuring cylinder、same volume of magnetic fluid、different magnets)

2. 使用 2 号磁性液体、同一量筒并且在磁性液体注入高度相同的情况下，不同的磁铁在磁性液体中的悬浮力变化情况

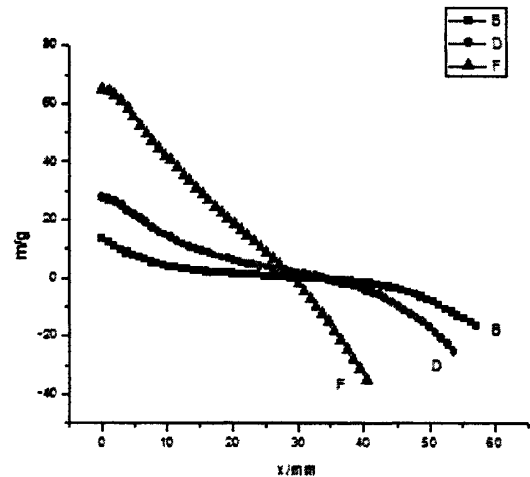


图 3-25 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（2 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、相同量筒、不同磁铁）

Fig.3-25 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction (MF02、same measuring cylinder、same volume of magnetic fluid、different magnets)

3. 使用 5 号磁性液体、同一量筒并且在磁性液体注入高度相同的情况下，不同的磁铁在磁性液体中的悬浮力变化情况

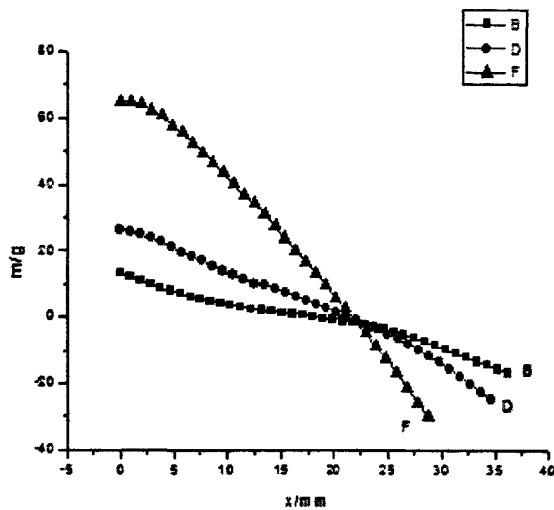


图 3-26 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（5 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、相同量筒、不同磁铁）

Fig.3-26 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction (MF05、same measuring cylinder、same volume of magnetic fluid、different magnets)

4. 使用 6 号磁性液体、同一量筒并且在磁性液体注入高度相同的情况下，不同的磁铁在磁性液体中的悬浮力变化情况

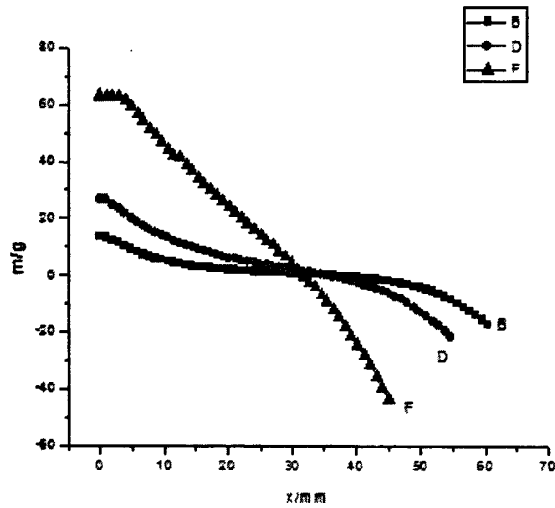


图 3-27 永磁悬浮力与磁铁轴向移动距离之间的关系（6 号磁性液体、相同磁性液体注入高度、相同量筒、不同磁铁）

Fig.3-27 The force exerted on the magnet versus the distance in the axial direction (MF06、same measuring cylinder、same volume of magnetic fluid、different magnets)

本组实验是使用同一种磁性液体、同一量筒在磁性液体注入高度相同的情况下观察不同磁铁对悬浮力大小变化的影响。在这组对比实验中，我们可以看出磁

铁的直径、长度对于磁性液体悬浮力变化的影响。

为了进行对比,上述4次实验中每次使用3个磁铁进行实验,而为了排除磁性液体的影响,4次实验都采取4种磁性液体。

从以上4幅图中曲线,可以看出磁铁的尺寸对于曲线的形状具有明显的影响。每幅图中的3条曲线都是在零点附件发生交叉,而且初始段与末端的斜率相同;从图中曲线还可以看出:在量筒直径不变的情况下,磁铁的直径与长度变大以后,曲线的初始端与末端斜率变大,并且中间的平滑线性段变短同时斜率变大;相应的,当磁铁直径与长度变小的时候,线性段斜率变小,中间的平滑的线性段变长同时斜率也变小。

四、测量使用相同量筒、相同磁铁、不同磁性液体并且同样的磁性液体注入量的情况下悬浮力的变化情况

由于前几组实验中为了进行对比,已经涉及到了测量同种实验条件下不同磁性液体对在磁性液体中悬浮的磁铁的悬浮力大小情况。故本组不再进行重复实验,将直接根据已有数据进行对比。

通过对前面所有的数据进行比较,可以发现:在本实验所提供的各种实验条件范围内,磁性液体的饱和磁化强度不同对于悬浮力的大小基本上影响不大,但是磁化强度较低的磁性液体中做实验得出的曲线的平滑段往往比较长。

五、实验数据分析

通过上述四组实验对比,项目组分别对量筒直径、磁铁尺寸、磁性液体注入高度以及磁性液体饱和磁化强度对磁性液体中永久磁铁的悬浮力变化的影响进行了测量。接下来将综合上述数据进行进一步的分析。

从数据图中的曲线可以看出:每条曲线都有线性的起始段与末端,也有长度不一的中间平滑线性过渡段,其中起始段斜率与末端斜率基本相同且斜率大于中间的线性段。其中平滑段随着量筒内磁性液体高度的增加而变长,同时也随着磁铁直径与长度的缩小而变长。而影响曲线所有线性段斜率的因素主要是磁铁的直径与长度以及量筒的直径,即这三个线性段的斜率随着磁铁直径与长度的增大而增大,并且当磁铁与量筒直径比变大的时候,斜率也会略微的增大。

从上述结论我们可以看出,磁铁的尺寸是决定悬浮力大小变化的主要因素。究其原因,应该是由磁铁的尺寸与磁性强弱直接决定了磁性液体中磁场的分布,这样就成了影响悬浮力的主要因素。而本实验中磁性液体的饱和磁化强度对悬浮力没有形成明显的影响,可以看出:在本实验的这种实验条件下,由于几种磁性液体都没有到达磁化曲线的饱和磁化段,使得它们在本实验中表现出来的性质相差不多,因此在本实验中,磁性液体的饱和磁化强度不影响悬浮力的变化。

本实验的最终目的是为设计磁性液体加速度传感器提供理论支持,需要对上

面的结论进行进一步的分析。

显而易见，本课题中的传感器需要以本实验中测试出的曲线线性段为其工作的区域，假如传感器工作中永磁体经过较长的非线性段的话，会造成曲线斜率的不稳定，使电路设计工作无法进行。而且为了使传感器足够灵敏，需要是磁性液体中悬浮的永磁体对于较小的力也有反应，那么曲线中悬浮力的线性段的斜率必然不能过大，这时我们需要使曲线中的平滑线性段较长，但传感器的量程将受到限制。同时，当需要设计大量程传感器的时候，设计时就要考虑如何减小平滑段或者考虑使用电路的方法来对信号进行处理。

另外，在实验的过程中，我们还发现当磁铁的体积较大并且同时使用饱和磁化强度较高的磁性液体时，磁性液体中的磁铁移动较慢、且不容易稳定，对读数造成很大困难。因此，当设计相关传感器时，会使传感器反应变慢且严重降低精度，应该注意避免这种情况的发生。而且，过小的加载加速度可能会由于磁性液体本身存在粘性而使传感器没有反应。

综上所述，在利用磁性液体永磁悬浮理论设计加速度传感器的时候，为了尽量使传感器工作在线性段，减少甚至避免非线性段的出现，不能采用过大或者过小尺寸的磁铁，有效地控制悬浮力曲线的斜率；同时避免在加速度加载的方向上整个磁性液体容器的长度过长，使传感器工作在非线性段。

在下一章，课题组将会结合以上的结论进行实际的传感器的设计工作并对其进行初步的测试。

3.3 本章小结

本章介绍了磁性液体的永磁悬浮理论，设计并完成了磁性液体的永磁悬浮实验，最后对结果进行了详细的分析并给出了设计磁性液体传感器需要注意的事项，为传感器的设计做了理论上的准备。

4 磁性液体加速度传感器的结构与电路设计

在前一章中，主要对磁性液体的永磁悬浮理论进行了实验研究，并且深入分析了影响磁性液体永磁悬浮力的因素。在本章中，将利用前面实验中所得到的实验成果进行传感器的设计，包括结构设计与电路设计。本章还将对制成的传感器进行初步的测试。

4.1 磁性液体加速度传感器的原理及其总体设计

下图为本课题中所设计传感器的原理图^[38-40]。

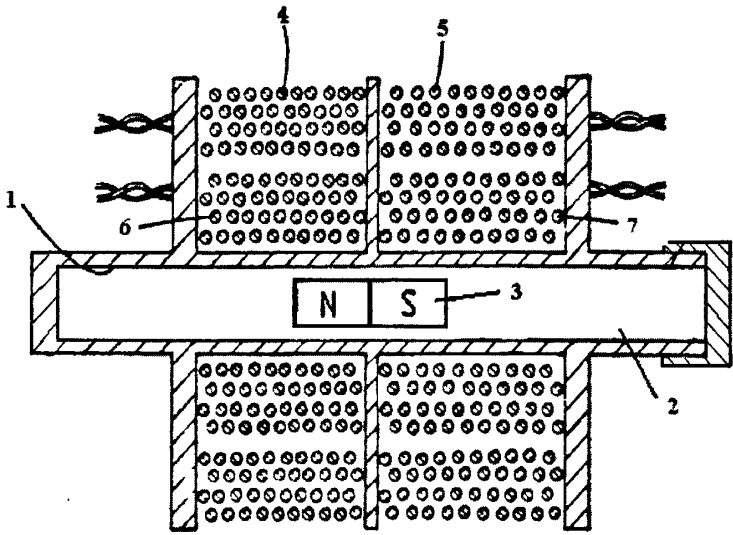


图 4-1 磁性液体加速度传感器结构图

Fig.4-1 The structure of magnetic fluid accelerometer

如图 4-1 所示，图中 1 为一个不导磁的壳体，里面注满磁性液体 2，永磁体 3 悬浮在容器中；壳体外 4、5 为感应线圈，6、7 为励磁线圈。

当整个传感器轴向没有加速度的时候，永久磁铁将会悬浮在水平中心位置。这时，给励磁线圈 6、7 通入相同的正弦交流信号，这样感应线圈 4、5 中将会分别得到一个感应电压；由于此时充当铁芯的永久磁铁位置在正中心，两侧感应线圈 1、2 产生的电压相等。

假如给图中传感器一个轴向的加速度，这时传感器中悬浮的永磁体就会发生水平方向的位移，导致左右两组线圈的铁芯长度就会发生变化，这样，感应线圈 4、5 中就会感应出不同的电压，产生出一个电压差，而这个电压差是同铁芯移动距离

直接相关的。通过测量这个电压差，就可以得到加速度的大小。

当轴向的加速度撤去的时候，永久磁铁就会收到一个指向中心的磁性液体悬浮力，这样，充当铁芯的永磁体就会自动回复到中心位置。

从以上传感器原理以及结构可以看出，本传感器其实是一种 LVDT 型传感器 (Linear Variable Differential Transformer)，即差动变压器型传感器。其工作原理可以说是铁芯可动变压器。大部分这种传感器由一个初级线圈，两个次级线圈，铁芯，线圈骨架，外壳等组成；而且基本上所有类似的传感器的铁芯向两侧移动时，次级两个线圈输出之差与铁芯移动距离成线性关系。这种结构往往用于位移传感器与加速度传感器中。

本课题中选择 LVDT 型的传感器结构，是因为该结构的传感器有其自身独特的优点并且能够有效的发挥其作为磁性液体传感器的优势。

首先是这种结构使传感器无摩擦测量并且有无限的机械寿命。因为这种结构的铁芯与线圈或者其他部位都无需接触，不存在摩擦力的影响，更没有磨损的存在。而磁性液体传感器中充当铁芯的永磁体悬浮在磁性液体中，同样没有摩擦和磨损，具有极长的机械寿命。

其次是 LVDT 结构的轴向抑制的性质，这种结构对铁芯的轴向移动相当敏感，但对于径向移动比较迟钝。这样，磁性液体传感器中由于受到重力而造成的永磁体径向位移将不会造成明显的影响，且当加载的加速度非轴向时，传感器也能避开非轴向加速度的影响而精确测量出轴向加速度来。

第三、LVDT 拥有极高的分辨率。这种结构的无摩擦量与其感应原理决定了这种传感器的分辨率决定于其电路与外部电子设备，只要其电路能感应出微小的电感的变化，就能检测出极其微小的加速度来。

第四、LVDT 型传感器非常的坚固耐用，拥有的极强的环境适应性。其简单的结构就决定了其坚固的特性，而磁性液体加速度传感器更是能耐极高的冲击加速度，因为永磁体周围会吸附大量的磁性液体而且越靠近磁性液体吸附越紧密，经测试可以在受到很大的力时磁铁也不会接触到容器壁，相当于有缓冲垫的存在；同时它的封闭型结构使它可以在极其恶劣的环境下工作而不受干扰。在恶劣的工作环境下极长的寿命决定了这种传感器广阔的应用前景。

最后，由于这种结构的传感器属于变压器式的。其输入与输出信号完全的隔离，使其信号品质很好，调理电路简单高效。

本课题中的 LVDT 型磁性液体加速度传感器与一般的此结构的传感器有一点不一样：根据磁性液体永磁悬浮力的变化规律，其位移的大小与力的大小直接的关系曲线会发生斜率的突变，这样，LVDT 型磁性液体传感器一般应该设计成限定量程或者是需要分段刻度使用的传感器。

4.2 磁性液体加速度传感器的结构设计

本节将详细地介绍本传感器的壳体与线圈骨架的设计，以及磁铁、线圈与磁性液体的选择。

4.2.1 传感器壳体与线圈骨架的设计

从图 4-1 中可以看出，线圈骨架与壳体是一体的，但是在实际的实验中，课题组所设计的传感器壳体与骨架是分开的两部分，这样的话，就更加容易加工；而且实验的时候假如需要进行对比实验，可以轻易的更换线圈或者磁铁，同时也使传感器的组装更加方便。

首先是壳体的设计。

本实验中，传感器的壳体采用有机玻璃加工而成，这里的有机玻璃化学名称叫聚甲基丙烯酸甲酯，这种材料的主要特点是：高度透明性；机械强度高，有机玻璃的强度比较高，抗拉伸和抗冲击的能力比普通玻璃高 7~18 倍；重量轻，有机玻璃的密度为 $1.18\text{kg}/\text{cm}^3$ ，同样大小的材料，其重量只有普通玻璃的一半，金属铝的 43%；易于加工，有机玻璃不但能用车床进行切削，钻床进行钻孔，而且能用丙酮、氯仿等粘结成各种形状的器具。

本实验中壳体是用有机玻璃管切割后制成，其一端粘好，另外一端攻螺纹，再加上一个同用有机玻璃加工好的旋盖。首先，需要确定有机玻璃管的直径。由于悬浮力变化曲线主要还是由磁铁的尺寸决定的，因此在此不是主要考虑因素。但是，为了使磁铁在管内受到的阻力很小，不影响测试的结果。课题组粗略的测试了中等尺寸的磁铁吸附磁性液体的能力，如图 4-2。

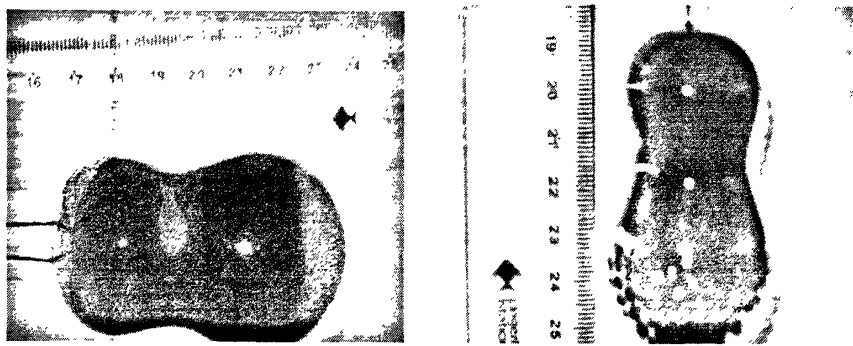


图 4-2 吸附磁性液体后的永久磁铁

Fig.4-2 Magnets absorbed with magnetic fluid

如图 4-2 所示，磁性液体自由吸附在磁铁上的话，两端磁性液体球体直径一般在 30mm 左右，因此选择外径 40mm，内径为 30mm 的有机玻璃管为原料加工。这

样的话，永久磁铁悬浮在磁性液体中运动时，不会受到很大的液体阻力而导致运动的迟缓；而且也不会造成过大的径向位移。

对于壳体的长度确定，课题组参考了前一章的实验结果。由于壳体的长度变长就会增加悬浮力曲线平滑线性段的长度，经过反复实验测量，决定壳体长度为100mm。如图 4-3 所示为本课题组所设计的传感器壳体。

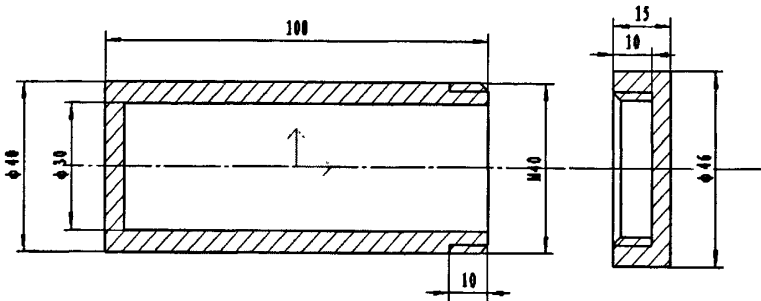
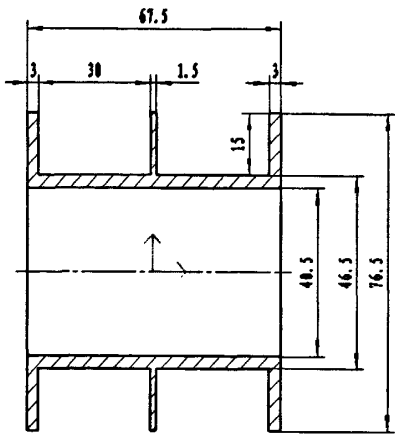


图 4-3 磁性液体传感器的外壳

Fig.4-3 The shell of accelerometer

在设计壳体的时候，原设计使用的是左边壳体为内螺纹而端盖为外螺纹，但是这种设计容易导致磁性液体的泄露与气泡的混入，难以安装；经重新设计，传感器壳体结构与尺寸确定如上图所示。

为了可以使传感器安装方便，实验时能够方便的替换线圈，本课题设计的传感器采用线圈骨架与壳体分离的方式。线圈骨架结构如图 4-4 所示。



材料为尼龙

图 4-4 磁性液体传感器的线圈骨架

Fig.4-4 The support of magnetic fluid accelerometer

线圈骨架由尼龙加工而成，为了方便缠线圈，中间加工出一个 1.5mm 宽的隔

板来，也可以用来确定中心位置。骨架内径为 40.5mm，为壳体预留出 0.5mm 的间隙来，容易装配。

当传感器装配起来以后，线圈骨架可以顺着壳体移动，这样的话，假如永久磁铁的中心与线圈的中心不相对的时候，可以左右移动使其重合。

4.2.2 传感器所用的线圈、磁铁与磁性液体的选择

一、线圈的选择

本传感器的线圈共有两组，分为四个线圈：分别是外侧线圈 1、2 为感应线圈，其导线颜色为蓝色、绿色；还有内侧线圈 3、4 为励磁线圈，导线颜色分别为红色与黄色。四个线圈连接与缠绕方向如图 4-5 所示。

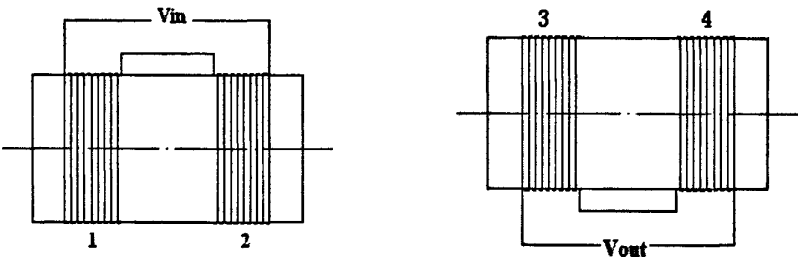


图 4-5 加速度传感器的线圈

Fig.4-5 The coils of magnetic fluid accelerometer

以上 4 个线圈均由 $\Phi 0.25\text{mm}$ 的导线缠绕而成，每个线圈均缠绕 2000 匝；线圈缠绕完成后，线圈长度均在 30mm 左右，内径为 46.5mm。实验时，按照导线抽头颜色来分辨线圈。经测量，每个线圈的电阻与电感如下表所示。

表 4-1 传感器线圈的电阻与电感

Tab.4-1 Resistance and inductance of the coils of accelerometer

序号	线圈颜色	线圈电阻 R (Ω)	线圈电感 L (mH)
1	蓝—蓝	212	492
2	绿—绿	213	495
3	红—红	174	423
4	黄—黄	173	425

以上 1、2 两个线圈起感应线圈的作用，而 3、4 为内侧线圈，通交流信号，起励磁线圈的作用。其实在实验中，假如加载在传感器上的加速度撤去时永久磁铁回复到中心的速度过慢的话，可以在内侧线圈 3、4 交流信号的基础上在通入直流电，提供一个额外的回复力，使其更快的回复到中心位置。

二、传感器所使用磁铁的选择

从上一章实验获得的结果可以知道,磁铁的尺寸大小对磁性液体悬浮力的大小起到了至关重要的作用。磁铁的直径与长度直接决定了悬浮力曲线的斜率与其三个线性段的长度。

磁铁直径与长度的变大会导致曲线的三个线性段的斜率都变大,这样的意义是,给传感器加载同样大的加速度,磁性液体中的磁铁移动的距离就会变小;这样的话,传感器的量程就会变大;但是在同样的外部电路的情况下,曲线斜率的变大也就意味着传感器分辨率与灵敏度的降低。

而磁铁直径与长度变小的话,三个线性段的斜率都变小,而且中间的平滑段长度将会增加。这样的话,整个传感器的量程会变小;但是由于曲线整体斜率的下降尤其是中间低斜率平滑段长度的增加,同等外部电路条件下,传感器的分辨率与灵敏度就会大大提高。但是,这样的话,悬浮力变化曲线就会有明显的拐点,在这两点的时候,斜率会明显地变化;这时,传感器就必须设置一个分界点,以这个点为界限进行分段的读数。

综合以上的分析,再结合本实验将要使用的电路分辨率以及将所进行的测试,决定采用前面实验中所使用过的尺寸为 $\Phi 24 \times 35$ 的永久磁铁为本传感器使用的永磁体,其牌号为 N40。使用这个中等尺寸的磁铁既可以控制曲线线性段斜率提高传感器分辨率,也可以控制曲线平滑段的长度,使其长度适中。在本实验中,为了进行测试与进一步观察,并不回避曲线拐点的出现,因此只要三个线性段的长度适当即可。

三、传感器所使用磁性液体的选择

从磁性液体永磁悬浮实验的结果可以看出,磁性液体的饱和磁化强度对于悬浮力曲线斜率的影响不是很大;但磁性液体的磁化强度降低的话,曲线的平滑段会有一定的延长。

此外,在实验过程中,课题组还发现:在饱和磁化强度高的磁性液体中,永久磁铁的移动较慢,而且需要很长的稳定时间,这是由于高饱和磁化强度的磁性液体含有较多的固体磁性颗粒,粘度往往比较大,造成永久磁铁在磁性液体内部移动较慢;而同时,磁性液体在管内的流动也很慢,造成了磁铁位置难以稳定。这种情况假如在传感器中出现的话,会严重影响传感器的动态性能与精确性,必须避免这种情况的发生。

综合以上的分析,传感器中所使用的磁性液体将是 3 号磁性液体,饱和磁化强度大约在 320Gs 左右。据实验观测,使用这种磁性液体不会影响传感器的动态性能,并且有较为理想的悬浮力变化曲线。

到此为止,已经完成了对传感器本体组件的设计与选择。

在组装本体时，应该注意一个重要的问题就是避免让气泡混入传感器磁性液体之中。据永磁悬浮实验统计，磁铁体积与磁性液体饱和磁化强度越大就越可能混入体积巨大的气泡，严重得影响实验结果。

为了避免这个问题，课题组采用了比较独特的组装方式。将向壳体内注入磁性液体并放入磁铁的整个过程移入磁性液体中，即将整个壳体浸泡入所要灌注的磁性液体，然后将磁铁放入其中，最后再在磁性液体中将旋盖盖上。完成整个过程后，将壳体从磁性液体中拿出清洁即可，使用这种方法可以完全避免混入气泡的问题，且不需要附加设备，操作简单可靠。同时，这也是为什么本传感器采用线圈骨架同壳体分开的另外一个原因。如图 4-6 为组装好的传感器本体。

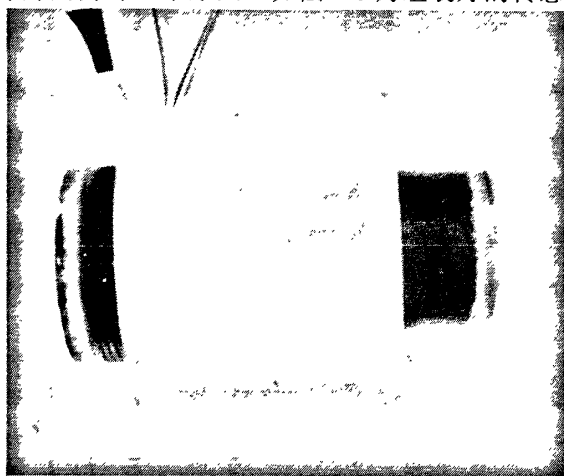


图 4-6 磁性液体加速度传感器

Fig.4-6 Magnetic fluid accelerometer

4.3 磁性液体加速度传感器的电路设计

本节将详细地介绍本传感器的电路设计过程，包括励磁频率的确定与电路元件参数的确定。

4.3.1 励磁信号频率的确定

在设计 LVDT 型传感器的电路时，必须首先确定励磁线圈的励磁频率，即输入信号的频率才能根据此频率进行进一步的设计。

为了找出合适的励磁频率来，课题组先进行了一个实验^[29]。

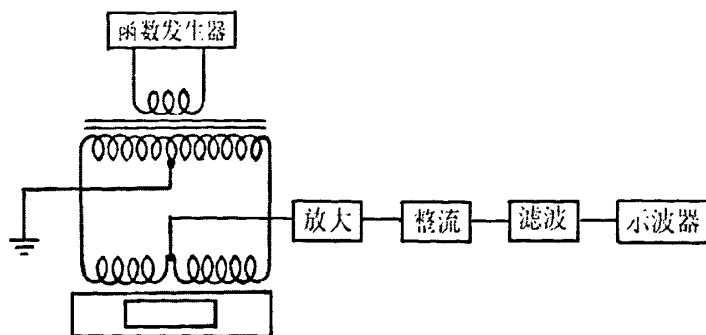


图 4-7 实验电路结构框图

Fig.4-7 Experimental block diagram of the circuit structure

图 4-7 为本实验的实验电路框图。图中信号源采用的是 CA1640-02 型函数发生器, 其开路输出峰—峰电压范围为 $1\text{mV}\sim 20\text{V}$, 频率范围为 $0.2\text{Hz}\sim 2\text{MHz}$ 。函数发生器产生的信号接入传感器的励磁线圈, 传感器感应线圈的中心抽头接地。另外两端按照如图所示相连构成电桥。电桥输出电压 ΔU 经过放大、整流、滤波后转化为直流电压通过示波器读出来。

在本实验中，加载加速度是通过给传感器倾斜一个角度实现的。假如传感器与水平面的夹角为 θ ，则加载到传感器轴上的加速度为 $g\sin\theta$ 。那么，通过改变传感器轴与水平面的夹角就可以逐渐地改变加载到传感器上的加速度。

当设置函数发生器激励信号峰值电压 U_i 为 7.2V，使传感器的倾斜角度 θ 分别为 5.5° 、 12° 、 18.5° 和 27.3° 时，传感器输出电压 U_0 与激励信号频率 f 的关系曲线如下图所示。

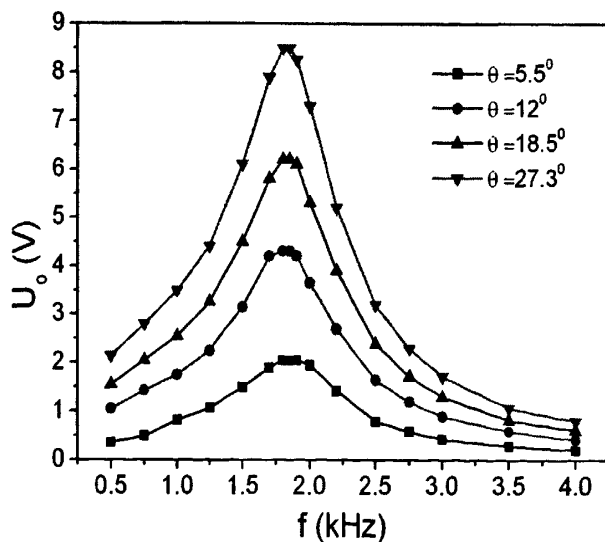


图 4-8 输出电压与激励信号频率的关系曲线

Fig.4-8 Dependence of output voltage on frequency of the exciting signal

由图 4-8 中的曲线可以看出,在传感器具有一定角度的情况下,传感器输出电

压 U_0 随着励磁频率 f 的增加先增加后减少，中间出现了一个峰值。这是由于当 f 较小时，随着 f 的增大，电感线圈的品质因素 Q 增大，传感器的灵敏度有一定的提高，输出电压 U_0 随之上升。但是当频率增加到一定程度以后，磁芯涡流损耗增加、导线与磁芯的集肤效应明显、寄生电容（包括线圈匝间电容）以及外界干扰的影响增强等，这些都可导致传感器的灵敏度降低。所以当 f 增大到一定程度时，传感器的输出电压 U_0 便开始下降。

因此，在这里应该选择峰值电压所对应的频率 f_c 励磁信号频率。在本课题中，取励磁频率 $f=1.85\text{KHz}$ 。

4.3.2 传感器电路的设计

一、AD698 及其特点^[34]

LVDT 型传感器是由霍德利（G.B.Hoadley）于 1940 年获得的专利，可以直接用于检测位移以及加速度等物理量，这种传感器检测的关键在于检测出铁芯的移动距离来，也就是怎样测出两个感应线圈之间的电压差。往往传统的方法都是采用差动整流电路与相敏检波电路，这两种测量电路都是通过分立的电子元件搭建而成，电路比较复杂，不易调试。本文中采用的 AD698 线性位移差分变压器信号调理芯片弥补这方面的缺陷，电路集成度高而且增益可调。

AD698 是美国 Analog Devices 公司生产的单片式线性位移差分变压器(LVDT)信号调理系统。AD698 与 LVDT 配合，能够高精确和高再现性地将 LVDT 的机械位移转换成单极性或双极性的直流电压。AD698 具有所有必不可少的电路功能，只要增加几个外接无源元件来确定励磁频率和增益，就能把 LVDT 的次级输出信号按比例地转换成直流信号。下图所示为 AD698。

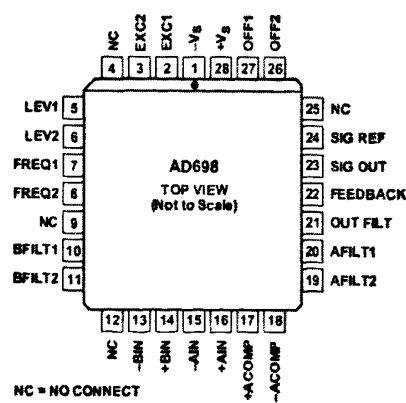


图 4-9 AD698

Fig.4-9 Connection diagrams of AD698

下面来介绍一下 AD698 的特点：

(1) AD698 提供了用单片电路来调理 LVDT 信号的完整解决方案，它含有内部的晶振与参考电压源，只须附加极少量的无源元件就可实现位置的机械变量到直流电压的转换，并且无需校准。而且其单极性或双极性直流电压输出正比于 LVDT 的位移变化；

(2) AD698 能够适用于多个不同类型的 LVDT。因为 AD698 的输入电压、输出电压及频率适应范围都很宽，其电路的优化设计，使得它与任何类型的 LVDT 配合使用都能获得理想效果；

(3) 驱动 LVDT 的激励信号频率为 20Hz~20kHz，它取决于 AD698 的一个外接电容器。AD698 的输出电压有效值达 24V，能够直接驱动 LVDT 的初级激励线圈，LVDT 的次级输出电压有效值可以低于 100mV；

(4) 振荡器的幅值随温度变化不会影响电路的整体性能。AD698 通过计算次级电压与初级电压的比值来确定 LVDT 的位置和方向，无需调整；

(5) 只要电源不过载，一个 AD698 可以串联或者并联驱动多个 LVDT。其励磁输出具有热保护功能。

二、AD698 的工作原理

LVDT 传感器的输入量为铁芯的位移，输出量为与位移成正比的交流电压信号；它的初级线圈由外部参考正弦波信号激励，两个次级线圈反向串联。这样，铁芯的移动会改变初次级线圈间的耦合磁通，从而产生出两个幅值不同的电压信号。通过测试串联的次级线圈的输出电压就可以得出铁芯的移动距离，而通过测量输出电压的相位就可以得知铁芯的移动方向。AD698 与 LVDT 的传感器连接功能框图如下。

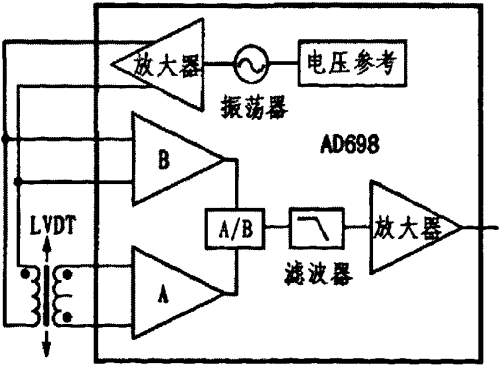


图 4-10 AD698 与 LVDT 的连接框图

Fig.4-10 Functional block diagram of AD698

工作时，AD698 用一个正弦波函数振荡器和功率放大器来驱动 LVDT，并用

二个同步解调级来对初级和次级电压进行解调，再通过一个除法电路来计算比率 A/B。其后的滤波级和放大器可按比例整输出结果。

振荡器中包含一个多谐振荡器，该多谐振荡器产生一个三角波，并驱动正弦波发生器产生一个低失真的正弦波，正弦波的频率和幅值由一个电阻器和一个电容器决定。输出频率在 20Hz~20kHz 可调，输出有效幅值在 2V-24V 可调。总谐波失真的典型值是 50Db。

AD698 的输入包括二个独立的同步解调通道 A 和 B。B 通道是用来监测驱动 LVDT 的激励信号，A 通道的作用与之相同，但是它的比较器引脚是单独引出来的。因为在 LVDT 处于零位的时候，A 通道可能达到 0V，所以 A 通道解调器通常由初级电压（B 通道）触发。另外，可能还需要一个相位补偿网络给 A 通道增加一个相位超前或滞后量，以此来补偿 LVDT 初级对次级的相位偏移。

一旦二个通道信号被解调和滤波后，再通过一个除法电路来计算比率 A/B，除法器的输出是一个矩形波信号。当 A/B 等于 1 时，矩形波的占空比为 100%。输出放大器测量 500μA 的参考电流并把它转化成一个电压值。当 I_{REF}=500μA 时，其传递函数如下：

$$V_{OUT} = I_{REF} \times A / B \times R_2$$

其中，R2 为增益调节电阻。

三、传感器电路设计与元件选择

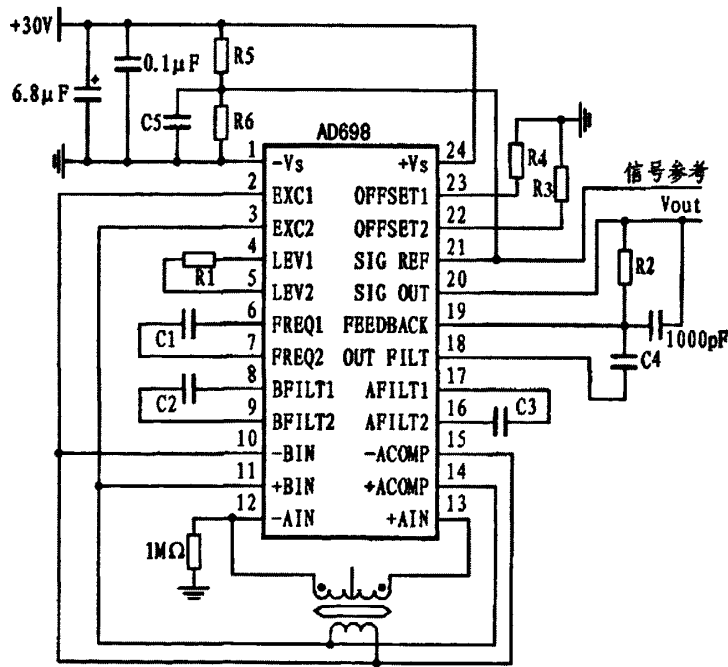


图 4-11 AD698 的单电源供电电路

Fig.4-11 Interconnection diagram of AD698 for single supply operation

AD698 可由单电源或者双电源供电，单电源工作范围为 13V~36V，双电源工作范围为±12V~±18V。根据本课题传感器与实验的相关情况，决定采用最为常见的单电源供电方案^[34-37]。传感器的外围电路图如图 4-11 所示。

AD698 电路中可由外接无源元件确定的参数包括：激励电压频率、激励电压幅值、AD698 系统频带宽、增益系数及标定系数。这些参数都可以通过计算得出：

(1) 所有电路中元件参数可以通过励磁频率 $f_{\text{EXCITATION}}$ 确定。

经过前面的实验，本传感器的励磁频率 $f_{\text{EXCITATION}}$ 确定为 1.85KHz。而由于系统频带宽度 $f_{\text{SUBSYSTEM}}$ ：

$$f_{\text{EXCITATION}} = 10 \times f_{\text{SUBSYSTEM}} \tag{4-1}$$

因此，确定 $f_{\text{SUBSYSTEM}}$ 为 185Hz。

(2) 由于励磁频率由电容 C_1 决定。在励磁频率确定的情况下，

$$C_1 = 35 \mu\text{FHz} / f_{\text{EXCITATION}} \tag{4-2}$$

根据以上公式及实验结果，取 $C_1=0.01\mu\text{F}$ 。

(3) C_2 、 C_3 、 C_4 决定了 AD698 的系统频带宽度，通常它们取值相等。同时，直流输出电压具有一定的宽度，其大小也由滤波电容 C_2 、 C_3 、 C_4 决定。根据公式：

$$C_2 = C_3 = C_4 = 10^{-4} \text{Farad Hz} / f_{\text{SUBSYSTEM}} (\text{Hz}) \tag{4-3}$$

经计算并结合实验结果最后决定取滤波电容 C_2 、 C_3 、 C_4 为 0.47μF。

(4) 与 R2 并联的电容为旁路电容，它对输出波形进行滤波，取其值为 1000pf。

(5) R1 可以调节励磁信号电压 V_{EXC} 的大小，R1 与 V_{EXC} 的关系如图 4-12 所示。

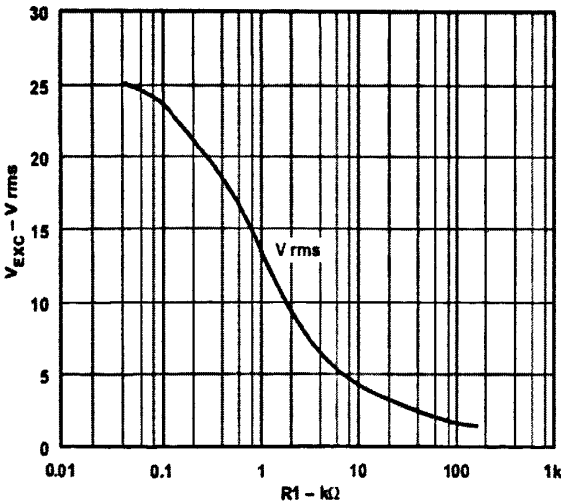


图 4-12 激励电压与 R1 的关系

Fig.4-12 Excitation voltage V_{EXC} VS R1

根据前面实验的结论, 取 $R_1=5.1K\Omega$ 。

(6) R_2 决定了 AD698 的增益系数, 在实际连接电路时, 项目组将其设成可变电阻。

(7) 电路中 R_3 、 R_4 可实现正、负输出电压补偿调节。如不需要补偿调节, 这两个电阻应该被开路。其阻值可由下述公式推算得出:

$$V_{os} = 1.2V \times R_2 \times \left(\frac{1}{R_3 + 2k\Omega} - \frac{1}{R_4 + 2k\Omega} \right) \quad (4-4)$$

其中 V_{os} 是正或者负输出电压补偿值。在本实验中, 暂时不需要进行电压补偿调节, 在此将这两个电阻开路。

(8) 电阻 R_5 、 R_6 有这样的关系:

$$R_5 + R_6 \leq V_{PS} / 100\mu A \quad (4-5)$$

另外, 为了使 R_5 上有足够的压降, 应该:

$$R_5 \geq \frac{2 + 10k\Omega \left(\frac{1.2V}{R_4 + 2k\Omega} + 250\mu A + \frac{V_{OUT}}{4 \times R_2} \right)}{100\mu A} \quad (4-6)$$

实际连接电路时, 将两个电阻都连成可变电阻。

(9) C_5 为旁路电容器, 其值应该在 $0.1\mu F \sim 1\mu F$ 之间。经过反复实验, 本传感器中 C_5 定为 $0.22\mu F$ 。

在实际调试电路中, 一定要仔细调试几个可变电阻的大小, 反复调节使得示波器上得到清晰而稳定的信号。

至此, 传感器的电路设计部分已经全部完成。

4.4 磁性液体传感器的初步测试及其结果分析

本节将对已经设计完成并且连接好外围电路的磁性液体加速度传感器进行初步的性能测试并对其进行分析。

为了给传感器加载加速度, 将传感器倾斜, 其轴向与水平面成 θ , 这样, 传感器轴向的加速度为 $g \sin \theta$ 。在本次实验中, 从 0° 开始, 每次增加 5° 然后读出传感器电路的输出电压, 直到道传感器与水平面垂直为止。实验时要注意一定要等到传感器输出电压即磁性液体中悬浮的永磁体稳定为止才能读数; 由于本课题中采取的传感器中的磁铁的尺寸与磁性液体的饱和磁化强度比较合适, 实验中传感器的动态性能比较理想, 没有出现长时间永磁体无法定位的情况。

下图为实验中对传感器进行测试而得出的曲线。

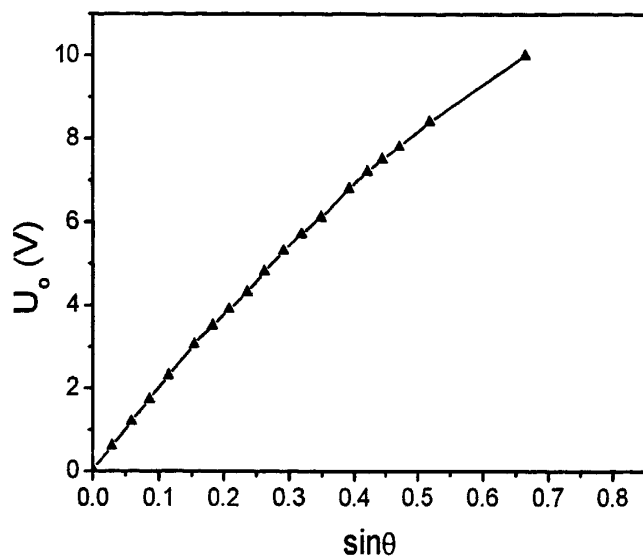


图 4-13 传感器输出电压与加速度的关系

Fig.4-13 Dependence of output voltage on acceleration

从图 4-13 可以看出，传感器的输出电压大小与传感器所受的加速度大小基本成线性关系。从图中数据我们可以得出，本课题中所设计的传感器在测试实验时的电路状况下，其灵敏度约为 15.3V/g。

4.5 本章小结

本章对设计并制作了磁性液体加速度传感器，并对其进行了初步的测试。

5 结论

本论文工作属于国家自然科学基金资助项目——《磁性液体加速度传感器的理论及实验研究》(NO.60471004)课题工作的一部分。通过对磁性液体永磁悬浮力进行了实验研究,确定了影响磁性液体永磁悬浮力的几个关键因素并且初步掌握了这几个因素与永磁悬浮力之间的关系。利用磁性液体永磁悬浮力设计出一个磁性液体加速度传感器,并且利用永磁悬浮实验中的结果确定并优化了传感器的相关尺寸。最后设计出了传感器的外围电路并且对传感器进行了初步的测试。

5.1 理论及实验研究结论

一、磁性液体永磁悬浮实验

(1) 详细推导了磁性液体 Bernoulli 方程,对其进行了深入分析,并据此确定了实验方案;

(2) 针对可能影响磁性液体永磁悬浮力大小的因素设计出一个实验,并对实验结果进行分析,得出以下结论:

首先,永久磁铁在磁性液体内所受到的永磁悬浮力与其距离平衡位置的距离呈现出类似于分段线性的关系。其关系变化曲线的开头与末端斜率大而且相同,中间段的斜率要较低,比较平滑。

其次,磁铁的尺寸大小是影响磁性液体悬浮力变化曲线斜率的主要因素。磁铁的直径与长度越大,曲线线性段的斜率越大,中间平滑段的长度也会略微缩短。

第三,磁性液体注入量也会影响到磁性液体悬浮力的变化曲线。磁性液体的注入量越大,中间平滑段的长度越长,但是对各个线性段斜率都没有影响。

最后,量筒直径与磁性液体的饱和磁化强度对磁性液体的悬浮力变化曲线影响不大。量筒直径的变化在其他所有因素不变的情况下不会影响悬浮力;磁性液体由于在实验环境下不会达到饱和磁化,其饱和磁化强度的不同对悬浮力的影响在实验中也并没有表现出来。

二、传感器的设计

(1) 根据永磁悬浮实验结果对可能影响传感器性能的因素进行了分析,得出以下结论:

首先,磁铁的尺寸变大会使传感器的量程变大但是灵敏度与分辨率降低,尺寸过小的话会使量程缩短、分辨率与灵敏度提高但是会出现明显的分段线性情况。

其次,整个外壳的长度变大也会使传感器明显的出现分段线性的情况。

最后, 磁性液体饱和磁化强度的提高虽然不会影响传感器的静态性能, 但是会由于液体内固体颗粒的增多而影响其流动性, 从而影响传感器的精确性与动态性能。

(2) 根据永磁悬浮实验结果确定了传感器的结构与其尺寸, 选择了合适的磁性液体与永久磁铁。

(3) 通过实验确定出了合适的励磁频率为 1.85KHz。

(4) 利用 AD698 搭建了传感器的外围电路。

(5) 对传感器进行测试, 结果表明在加载加速度不大于一个 g 的时候, 其线性度良好, 且在实验所用电路条件下, 其灵敏度大约为 15.3V/g。

5.2 研究中发现的问题及建议

在本课题研究中尤其是在传感器的设计与测试中, 笔者发现了一些不足之下, 就这些问题提出一些建议并希望对此传感器的发展有所帮助。

(1) 本文中设计的传感器所用的磁铁为圆柱形, 在管内移动的时候, 液体阻力较大, 会影响到传感器的动态性能, 接下来改进的话, 应该将磁铁设计为中空型即由一组环状磁铁吸附而成, 减小其液体阻力, 提高其动态性能;

(2) 本文中对传感器的测试还不够全面, 尤其是在动态性能方面磁性液体加速度传感器与传统的加速度传感器会有较大的不同, 应该对其进行进一步的动态性能测试; 而且可以预见的是, 不同饱和磁化强度的磁性液体与磁铁的尺寸会影响管内液体的流动性, 必然会对传感器的动态性能造成影响, 应该对其进行对照实验;

(3) 本文中使用的磁性液体只有煤油基的, 应该再采用酯基磁性液体等更加在工业上常用的磁性液体进行测试对比;

(4) 本文中测试传感器性能的时候, 加载的加速度没有超过 g , 线性度很好; 但是, 假如超过 g 的话, 有可能会出现分段线性的情况, 下一步应该用专业的加速度试验台对其加载加速度超过 g 的情况下进行测试;

(5) 本传感器的电路只是输出了一个电压差, 还需要用示波器或者万用表读取, 在下一步的发展中, 应该对其添加 A/D 转换电路, 使其可以数字显示或者可以录入到计算机中处理。

另外, 本课题还需要在理论分析的下面几个方面进一步深入:

(1) 本文中永磁悬浮实验得出了一系列的结论, 但都是定性分析的, 应该利用所得到的数据得出特定情况下各种因素与悬浮力大小变化的一个关系式;

(2) 根据实验数据对磁性液体内磁场分布的特点进行深入的分析, 得出磁场

分布的规律;

(3) 找出磁性液体的粘度对传感器相关动态性能可能造成的影响。

5.3 磁性液体加速度传感器的前景与展望

传感器技术自 20 世纪以来已经有了极大的发展,推动着其他科学领域也有了更大的进步;随着各个科技领域的飞速发展,人们对传感器也有了越来越高的要求。传统传感器的质量、成本、性能等方面渐渐成了制约其发展的因素,因此,大家都开始大力地投入到新型传感器的研发过程当中,磁性液体传感器就是在这种背景下形成的。

在过去的二十年中,磁性液体传感器有了长足的进步。美国、德国、日本、罗马尼亚等国在这个方面做了大量的研究,许多类型的磁性液体传感器不断地涌现;尤其是在美国,磁性液体传感器已经应用到了计算机、军事、航空航天等方面并且逐渐形成了产业。而我国对于磁性液体传感器的研究起步较晚,目前都只是停留在实验室研制阶段,没有投入工业化应用的产品。

无论是从现有的资料还是本文所做的实验中,都可以看出:磁性液体加速度传感器拥有结构简单可靠、成本低廉、性能优异以及抗干扰能力强等众多优异的性能。而目前我国正在大力地推动航天技术、军事技术等领域的发展,必然需要可以在极限工作条件下仍可以表现良好的传感器,在这种情况下,已经在美国相关领域大展身手的磁性液体传感器必将成为我国未来军事、航天领域中不可或缺的一员并得到广阔的发展。

参考文献

- [1] 董永贵, 传感器技术与系统, 北京, 清华大学出版社, 2006
- [2] 孙传友、孙晓斌, 感测技术基础[M], 北京, 电子工业出版社, 2002
- [3] 刘好, 温志渝, 微加速度传感器的研究现状及发展趋势, 光学精密工程, 2004.12.
- [4] 李德才, 磁性液体理论及应用, 北京, 科学出版社, 2003;
- [5] R.E.Rosensweig, Ferrohydrodynamics, Cambridge, Cambridge University Press, 1985;
- [6] V.Iusan, N.Ilias, Magnetofluidic effects usable for sensors achievement, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 272-276;
- [7] 曹东, 刘桂雄, 基于磁流体独有特性的各种潜在传感器, 功能材料, 2006.5;
- [8] R.Olaru, Inductive tilt sensor with magnets and magnetic fluid, Sensors and Actuators, 2005, 424-428;
- [9] M.I.Piso, Applications of magnetic fluids for inertial sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 380-384;
- [10] N.C.Popa, I.De Sabata, Magnetic fluids in aerodynamic measuring devices, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 385-390;
- [11] N.C.Popa, A.Siblini, Influence of the magnetic permeability of materials used for the construction of inductive transducers with magnetic fluid, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 398-400;
- [12] N.C.Popa, A.Siblini, Aspects concerning the dimensioning of the inductive transducers with magnetic fluids, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 242-245;
- [13] R.P.Bhatt, Magnetic-fluid-based smart centrifugal switch, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 347-349;
- [14] 曹东, 刘桂雄, 磁流体传感器研究现状与发展趋势, 传感器与微系统, 2006.5;
- [15] 王瑞金, 王常斌, 磁流体技术的工业应用, 力学与实践, 2004.6;
- [16] 杨文荣, 杨庆新等, 磁流体加速度传感器的特征参量分析, 仪器仪表学报, 2006.27;
- [17] 杨文荣, 杨庆新等, 磁流体加速度传感器的研究与设计, 仪表技术与传感器, 2006.8;
- [18] 杨文荣, 杨庆新等, 磁流体倾斜角传感器的研究, 华北电力大学学报, 2005.32;
- [19] 许海平, 李德才等, 磁性液体水平传感器的研究, 功能材料, 2006.8;
- [20] M.I.Piso, Applications of magnetic fluids for inertial sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 380-384;
- [21] Raj K, Moskowitz B, Casciari R. Advances in ferrofluid technology[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1995, 149: 174-180.

- [22] A.Stanci, V.Iusan, Magnetofluidic sensor for mineral quality control in preparation processes, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 391-393;
- [23] Popa N C, Potencz I, Brostean L, et al. Some applications of inductive transducers with magnetic liquids[J]. *Sensors and Actuators A*. 1997, 59: 197-200.
- [24] R.P.Bhatt, Magnetic-fluid-based smart centrifugal switch, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 347—349;
- [25] A.Stanci, V.Iusan, Magnetofluidic sensor for volume measurement, *Sensors and Actuators*, 2000, 246-249;
- [26] R.Olaru, A.Salceanu, Magnetic fluid actuator, *Sensors and Actuators*, 2000, 290—293;
- [27] C.D.Buioca, V.Iusan, Computer aided design of a high electric current magnetofluidic sensor, *Sensors and Actuators*, 2001, 161—164;
- [28] 池长清等编著,铁磁流体动力学,北京,北京航空航天大学出版社,1993
- [29] 何新智,李德才等,磁性液体倾角传感器的实验研究,计量学报,2010.01;
- [30] 张大伟,刘桂雄等,永磁体在磁流体中自悬浮能力的数值计算,科学技术与工程,2007.3;
- [31] 刘桂雄,王文萍等,磁流体惯性传感中二阶浮力实验因素分析,科学技术与工程,2007.1;
- [32] 刘桂雄,蒲尧萍等,磁流体浸没物磁场力分析及磁浮特性,功能材料,2007.38
- [33] A.Stanci, V.Iusan, Magnetofluidic sensor for mineral quality control in preparation processes, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 391-393;
- [34] LVDT Signal Conditioner AD698 DataSheet[Z].Analog Devices
- [35] 王敬亭,廖力清等,AD698 型 LVDT 信号调理电路的原理与应用,国外电子元器件,2005.9;
- [36] 段中华,王中训等,AD698 在 DGC-6PG/A 差动电感式位移传感器中的应用,传感器技术,2008.4;
- [37] 洪志刚,杜维玲等,半桥式电感位移传感器信号变送电路设计,国外电子测量技术,2006.05
- [38] Michael King Russell, Anthony William Russell, Magnetic Liquid Supported Linear Accelerometer, England.United States Patent.4047439.1977.P1~P3.
- [39] Michael K.Russell, Kenneth S.Evans.Magnetic Liquid Supported Linear Accelerometer, England.United States Patent.4845988.1989.P1~P6.
- [40] Takaharu Idogaki, Ikuo Hayashi, Toshihisa Ishihara, Tatsuo Sugitani, Hideo Inoue, Acceleration Sensor, Japan.United States Patent.4922753.1990.P1~P19.

作者简历

赵晓光，男，1986年2月8日出生于山西省晋中市。2003年~2007年就读于北京交通大学机电学院机械工程及自动化专业；2007~2010年就读于北京交通大学机电学院机械设计及理论专业，研究方向为机电液磁一体化。

在攻读硕士论文期间，曾参加国家自然科学基金项目和载人航天二期工程预研项目，并以第二作者的身份发表 EI 核心文章一篇。在论文研究方面，主要完成了对磁性液体永磁悬浮理论的实验研究工作，并设计了磁性液体加速度传感器的结构与外围电路并对其进行了测试。

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：赵晓光 签字日期：2010 年 3 月 10 日

学位论文数据集

表 1.1： 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
磁性液体；加速度传感器；永磁悬浮；线性可变速差动变压器	公开	TP212	621	国家自然科学基金；北京市自然科学基金
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工学	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
磁性液体加速度传感器的理论及实验研究				汉语
作者姓名*	赵晓光		学号*	07121770
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西直门外上园村 3 号	100044
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*
机械设计及理论		机电液磁一体化	2.5 年	2010
论文提交日期*				
导师姓名*	李德才		职称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
电子版论文提交格式 文本（ ） 图像（ ） 视频（ ） 音频（ ） 多媒体（ ） 其他（ ） 推荐格式：application/msword； application/pdf				
电子版论文出版（发布）者		电子版论文出版（发布）地		权限声明
论文总页数*				
共 33 项，其中带*为必填数据，为 22 项。				