

环形结构涡流传感器的研制

摘 要

随着涡流检测技术的快速发展和工业应用的需要，使得开发研制具有较高性能的电涡流传感器显得尤为必要。

本文开篇介绍了涡流检测的发展现状及趋势，通过和其它几种常见的非接触式位移传感器的比较，给出了电涡流传感器在特定环境下独特的优越性，然后从电涡流传感器的测距原理出发，概述了电涡流分布的相关理论知识。

为了设计和研制一种环形结构探头的电涡流传感器，首先需要对影响传感器性能的各个方面的因素做出分析，电磁场有限元理论是对电涡流传感器进行有限元分析的基础，文章接着论述了有限元方法及其具体的分析过程。根据电涡流传感器测距系统的模型，运用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对电涡流传感器的电磁特性做了分析，研究了电涡流探头线圈的形状结构对传感器灵敏度和线性度的影响，模拟了被测金属导体中电涡流的径向分布和贯穿深度，并就被测工件的电导率和磁导率以及工作频率对涡流分布的影响做了探讨，给出了电涡流探头线圈的电感和电阻值随距离变化的情况。

设计和制作了了一个环形结构的电涡流传感器探头，通过用不同结构参数的线圈进行具体的实验以及对试验结果的分析，验证了涡流探头线圈结构对传感器性能的影响。

最后介绍了电涡流传感器几种常见的信号处理电路，并就定频调幅测量电路做了详细的分析和仿真模拟，主要包括振荡源、方波变换电路、谐振电路、交流放大电路、滤波整流电路等几个环节。

关键词：电涡流传感器，有限元法，电磁场，位移

Development of Ring Shaped Eddy Current Sensors

ABSTRACT

With the rapid development of the eddy current testing technique and its industrial application needs, it is important to develop high-performance eddy current sensor.

First of all, the development and the trend of eddy current testing is introduced. The unique advantage of eddy current sensors in a particular environment is given in comparison with other non-contact displacement sensors. Then, the relevant theories of eddy current distribution is overviewed from the viewpoint of the principle of the distance measurement using eddy current sensors.

In order to design and develop an eddy current sensor with a ring shaped probe, firstly the factors the affect all aspects of sensor performance is analyzed, then the finite element method and its application in the design of the eddy current sensor are analyzed in detail. According to the model of distance measurement system using eddy current sensors, the electrical and magnetic properties of eddy current sensor are analyzed using the finite element analysis software COMSOL Multiphysics. The affect of the coil shape of the eddy current probe on the sensor sensitivity and linearity has been investigated, and the radial and vertical eddy current distribution in metallic conductors has been simulated. Furthermore, the conductivity and magnetic permeability of the measured part and the impact of the operating frequency on the eddy current sensor has been explored, and the relationship between the inductance and resistance of the coil with the distance has been given.

An eddy current probe with ring shaped structure has been designed and fabricated. Through the experiments with the coils of different structural parameters, the impact of the coil structure of the probe on the sensor properties has been verified.

At last, several signal processing circuits for eddy current sensor are described, and a detailed analysis and simulation, including oscillation, square-wave conversion circuit, resonant circuit, AC amplifier circuit, filtering rectifier circuit, and so on, of fixed-frequency amplitude measurement circuit are given in the thesis.

Keywords: eddy current sensor, finite element method, electromagnetic field, displacement

插图清单

图 2-1	电涡流传感器原理图和等效电路图	7
图 3-1	二维电涡流传感器有限元仿真模型	17
图 3-2	几何图形的建立	19
图 3-3	网格的划分	19
图 3-4	求解与可视化	19
图 3-5	不同距离下电磁场和电涡流分布的情况	21
图 3-6	加入 SPICE 谐振电路下涡流探头的输出	21
图 3-7	不同外径下探头线圈的磁场分布状况	22
图 3-8	不同厚度下探头线圈的磁场分布状况	23
图 3-9	不同内径下探头线圈磁场的分布状况	23
图 3-10	被测金属导体中电涡流的径向分布	24
图 3-11	不同的工作频率下被测金属导体中电涡流的贯穿深度	25
图 3-12	不同金属材料条件下探头线圈的电感和电阻随距离的变化情况	27
图 3-13	不同工作频率下的电磁场分布和涡流分布	28
图 3-14	不同频率下被测金属导体（铁）中涡流的集肤深度	29
图 3-15	涡流探头线圈的电感和电阻值随频率的变化情况	29
图 4-1	电涡流探头结构图	32
图 4-2	传感器探头主要的制作工具	33
图 4-3	制作完毕的探头线圈	34
图 4-4	涡流探头和延长电缆	35
图 4-5	实验系统实物示意图	35
图 4-6	1#线圈探头的位移-电压输出图	36
图 4-7	2#线圈探头的位移-电压输出图	37
图 4-8	3#线圈探头的位移-电压输出图	37
图 4-9	4#线圈探头的位移-电压输出图	38
图 5-1	电桥电路测量原理图	40
图 5-2	调幅式测量电路原理图	41
图 5-3	调频式测量电路原理图	41
图 5-4	定频调幅式测量电路原理图	42
图 5-5	谐振曲线	43
图 5-6	测量电路系统图	43
图 5-7	石英晶体振荡器	44
图 5-8	石英晶体振荡电路	45
图 5-9	巴特沃斯低通滤波电路及波形图	46
图 5-10	并联谐振回路及输出波形图	47

图 5-11 功率放大电路及波形图.....	48
图 5-12 精密半波整流电路及波形图	49
图 5-13 滤波电路及波形图	49

表格清单

图 3-1	电涡流传感器的电器参数	18
图 3-2	边界条件的属性设定	19
图 3-2	探头结构参数	22
图 4-1	实验线圈参数	35
图 4-2	线圈 1 的实验数据	36
图 4-3	线圈 2 的实验数据	37
图 4-4	线圈 3 的实验数据	37
图 4-5	线圈 4 的实验数据	38
图 4-6	实验结果比较	38

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及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标志和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业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谢意。

学位论文作者签字：张凯 签字日期：2010年4月26日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将学位论文的全部或部分论文内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

张凯

导师签名：



签字日期：2010年4月26日

签字日期：2010年4月28日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

致 谢

本学位论文是在导师卢荣胜教授的悉心指导和关怀鼓励下完成的。在两年多的课题工作中，卢老师渊博的理论知识、丰富的实践经验、开阔的眼界使我受益匪浅。他严谨的治学态度，诲人不倦、做事认真负责的精神深深的影响着我，在以后的生活和工作中，我将深深铭记导师对我的教诲，在此，谨向卢老师表示由衷的感谢和诚挚的敬意！

论文的研究过程中还得到了张勇副教授、李勇副教授、李维诗老师及其他老师许多有益的指导和建议，在此，衷心感谢他们无私的帮助和大力支持。

感谢课题组的李琪博士、巫荣闻硕士以及光机电研究所的魏小林硕士、芮会会硕士、汪庆花硕士和朱晋文硕士等给予的帮助。

在论文完成之际，借此机会向我的父母和亲人表示深深的敬意和感激，他们的爱和奉献激励着我不断的努力向上。

作者：孙 凯

2010年4月1日

第一章 绪 论

1.1 引言

目前, 测量技术的重要发展方向之一就是非接触测量方法将得到广泛的应用^[1], 这是由于非接触测量方法具检测效率高, 不接触、因而不划伤零部件表面, 适合于柔软物体的测量等优点, 近年来非接触测量方法发展迅速^[2]。作为一种重要的非接触无损检测方法, 涡流检测是以电磁感应原理为基础, 其基本理论是对处于检测线圈形成的电磁场中的工件及其周围空间区域, 列出麦克斯韦方程及定解条件, 然后进行求解, 以确定检测线圈阻抗特性(或感应电压)的变化与被检工件各影响因素之间的关系。经过理论上的发展和实践上的不断创新, 涡流检测技术实现了从实验性应用到生产实用阶段, 逐步被工业生产和科学研究所接受, 已经成为五大常规无损检测技术之一^[3]。

1.2 涡流检测的发展及新技术

1.2.1 涡流检测技术的发展过程

涡流检测技术基本原理的建立与发展起源于早期电磁学的发现。1820年, 奥斯特(Oersted)就发现当一个导体通有电流时, 会产生环绕导体的磁场。同年, 安培(Ampere)发现在靠近导体的区域通一同样大小、方向相反的电流将会抵消该导体电流产生的磁场。1824年, 加贝(Gambey)观察到当一个摆动的磁针放置于一个无磁性导体盘附近时, 磁针的摆动会迅速的衰减下来, 第一个验证了电涡流存在的实验。在之后几年, 傅科(Foucault)在研究了这些电磁现象后指出: 在强的不均匀的磁场运动的铜盘中会有电流存在。1831年法拉第(Faraday)发现了电磁感应现象, 并在实验的基础上提出了电磁感应原理。因此, 电磁感应现象一直是用来阐述涡流实验基本原理所依据的重要客观规律。1873年, 麦克斯韦(Maxwell)系统的总结了前人有关电磁学说的全部成就并加以发展, 得出了著名的麦克斯韦电磁方程组, 建立了严密的电磁场理论, 这也是分析涡流实验方法的理论基础。而有关的涡流检测的实际应用则始于1879年, 休斯(Hughes)首先用感生电流的方法对不同金属和合金进行了实验判断。他利用钟的滴答声在微音器里产生激励信号, 得到的电脉冲通过一对彼此相同的线圈, 并使放在线圈里面的金属物体感生涡流, 当再用电话听筒谛听这个滴答声的同时, 调节一个平衡线圈系统使话筒里的滴答声消失^[4]。休斯发现, 当金属材料的形状、大小和成分不同时, 平衡线圈所调节的程度不同, 首次将电涡流的物理现象同测量联系起来, 从而揭示了应用涡流对导电材料和零件进行检测的可能性。

从休斯以后的很长一段时间内, 涡流检测一直发展缓慢。尽管在20世纪

20 年代中期出现了涡流测厚仪，第一台涡流探伤仪(用于检验焊接钢管质量)也于 1935 年研制成功，但是，直到第二次世界大战期间，德国和美国等少数国家的研究单位和大企业里才开始少量应用实用化的涡流检测设备。1950 年~1954 年，德国的福斯特(Foerster)博士发表了一系列关于涡流检测的论文，提出了阻抗分析法，为涡流检测机理的分析和设备的研制提供了理论依据，涡流技术的发展才得到了实质性的突破，并步入工业实用化的阶段，从此，涡流检测技术有较快的发展并为生产检验所接纳，各种类型的涡流仪器相继出现于国际市场，目前国际上制造电涡流传感器的厂家首推美国的 Bently 公司，其产品占我国市场的 70%以上，此外还有德国的 Philips、瑞士的 Wabrometer、日本的 shikawa 等，其中性能最高的当属美国 Bently 公司的产品。

在我国，涡流检测技术的应用与研究可以追溯到 60 年代初。当时，航空、冶金和有色金属等部门已开始采用涡流法来检测成型金属管(棒)材的表面缺陷，许多不同行业的技术队伍组织研制管材涡流探伤设备^[5]。70 年代中期福建厦门第二电子仪器厂在北京航空材料研究所的支持下成功研制了 FQR7501 型和 FQR7502 型涡流电导仪，FQR7503 型和 FQR7504 型膜层测厚仪以及 FQR7505 型涡流探伤仪等一系列涡流检测设备。80 年代中期，由于涡流检测技术仅仅局限于导电材料的表面检测，涡流检测设备在抑制提离效应的干扰和分辨力及可靠性等方面尚存在较大的不足，涡流检测技术在各工业部门的推广应用一度不如超声、射线和磁粉等常规方法那么普遍。90 年代，涡流检测技术在我国出现了一个快速发展的时期，以爱德生公司(厦门)电子有限公司为代表，研制成功并生产出了多款类别的智能全数字化涡流设备，并发展了脉冲涡流、阵列涡流等先进的涡流检测技术。目前，涡流检测的应用领域非常广泛，已扩展到航天、航空、核工业、机械、冶金、石油、化工、电力、有色金属及汽车等十余个部门。

1.2.2 涡流检测新技术及其应用

1、远场涡流检测技术

远场效应于 20 世纪 40 年代被人们发现，1951 年 Maclean W. R. 获得了此项技术的美国专利。50 年代，壳牌公司的 Schmidt T. R. 再次独立地发现了远场涡流无损检测技术，在世界上首次研制成功检测井下套管的探头，并用来检测井下套管的腐蚀情况，1961 年他将此项技术命名为“远场涡流检测”，以区别于普通涡流检测^[6]。远场涡流(Remote field eddy current, 简称 RFEC)检测技术是一种能穿过金属管壁的低频涡流检测技术，当用一个激励线圈和一个距激励线圈约二倍管内径的较小的测量线圈同时放入被检管内，测量线圈能有效地接收穿过管壁后返回管内的磁场，从而检测管子内壁缺陷与腐蚀。远场涡流技术于 50 年代末提出，但直到 80 年代中期，随着理论的完善和实验验证，人们才认识到其用于管道(特别是铁磁性管)检测的优越性，并在石油、天然气输送

管道及被市煤气管道的检测中得到实际应用。

2、脉冲涡流检测技术

脉冲涡流(Pulsed Eddy Current,简称 PEC)检测技术是用以亚表面缺陷检测的一种新型无损检测技术,是涡流检测的一种新的应用领域,它以测得的磁场最大值出现的时间来确定缺陷位置,从而实现缺陷的无损检测和定量化描述。脉冲涡流具有许多优势,传统涡流采用单一频率的正弦电流作为激励电流,脉冲涡流采用具有一定占空比的方波作为激励电流,传统涡流检测对感应磁场进行稳态分析,即通过测量感应电压的幅值和相位来确定缺陷的位置,而脉冲涡流则对感应磁场进行时域的瞬态分析,以直接测得的感应磁场最大值出现的时间来进行缺陷检测^[7]。在一般情况下,噪音的存在使得难以充分提取更多关于缺陷的信息,然而由于激励的复杂性,又使这种检测方法能在被检试样上提取更多的信息,从而获得其在无损检测中的应用地位。

3、阵列涡流检测技术

阵列涡流(Array Eddy Current,简称 AEC)检测技术是罗曼开发的一种崭新的技术^[9],它的研究始于20世纪80年代中期,到90年代初,已经出现了一批阵列涡流传感器测试方面的文献和专利。这种探头在常规探头的基础上,运用计算机技术和数字化信号处理技术,采用n个线圈组成阵列,所有探头元素形成多路检测、传输并进行数字化处理,构造成一种独特的探头,简称阵列探头。阵列探头对关键零件生产过程的质量控制和航空、航天等领域的安全性部件检测具有重要意义,这种探头检测平面、曲面、凹凸面准确可靠,灵敏度高,速度快,并可直接加工成柔性结构,或做成分立式组合探头。柔性阵列探头可将动态检测转变成“准静态”检测,而且灵敏度更高。近十年来,随着传感器技术的发展以及加工水平的提高,电磁涡流传感器阵列测试的研究和应用得到极大的发展。不仅可用来测量大面积金属表面的位移,而且由于具有同时检测多个方向缺陷的优点,被广泛应用于金属焊缝的检测和飞行器金属部件的疲劳、老化和腐蚀检测以及涡轮机、蒸汽发生器、热交换器以及压力容器管道等的无损检测。

4、多频涡流检测技术

多频涡流(Multi-frequency eddy current)检测技术是在计算机处理、阻抗平面分析、信号转换处理、信息传输理论以及相关的电子线路的基础之上,实现了多参数的检测。根据所需检测的参数和所要排除的干扰信号,适当选取多个频率组合电流去激励检测线圈,然后对受作用参数调制的输出信号按多个检测通道加以放大,分别进行解调,把解调信号的各个分量以指定的方式组合起来,综合分析处理。对于n个参数,要求有n个或2n个独立的检测通道,以便

能将所有的参数分离，使每个通道表示一个参数^[9]。该技术在 大亚湾核电站冷凝器管道检测中取得了巨大成功。

5、磁光涡流成像检测技术

以电涡流效应与法拉第磁光效应为理论基础的磁光涡流成像 (Magneio-Optic eddy current Imaging, MOI) 技术于 20 世纪 80 年代末发展起来。磁光涡流成像技术的原理实际上是法拉第电磁感应定律与磁光效应的综合应用，根据法拉第磁光效应：当线偏振光在介质中传播时，若在平行于光的传播方向上加一强磁场，则光振动方向将发生偏转。根据涡流检测原理可知，只要在被测试件中的被检区域内产生直线流动、均匀分布的层状电涡流，此涡流会在空间感应出垂直与被测试件的磁场。如果试件中在该区域含有缺陷，则缺陷处的涡流的流动将发生变化，并引起该处的垂直磁场发生变化。此时，磁光传感元件将涡流磁场的这种变化转换成相应的光强度的变化，经 CCD 摄像机成为“黑”或“亮”的图像，即实现了对表面或亚表面缺陷的实时成像^[10]。在工程实际应用中，磁光涡流成像技术倍受青睐，该技术既可以实现对亚表面细小缺陷的可视化无损检测，又能进行快速、精确的大面积实时检测，实现了“非可视现象实时可视化”，适合飞机表面现场检测。此法的不足之处在于对被检工件表面状况的要求较高，在被检测时需要操作频率，源输入电流和感应元件参数等作合理的选择。

1.3 电涡流传感器和其它几种非接触式位移传感器的比较

本文研究的环形结构的电涡流传感器主要是用来检测位移的变化情况。位移传感器又称为线性传感器，一般而言，常见的非接触式位移传感器主要有以下几种：

1、电感式位移传感器

结构简单可靠、输出功率大、输出阻抗小、抗干扰能力强、对工作环境要求分辨率较高、稳定性好。但是缺点是体积大、频响低、不宜用于快速动态的测量^[11]。

2、电容式位移传感器

电容式位移传感器的电容量取决于两金属极板间的距离，极板的面积以及极板间的介质，利用极板间电容量的变化来测得距离，响应频率约在 5kHz 到 100kHz 之间。电容器传感器的优点是结构简单、体积小、价格便宜、分辨率高、过载能力强、动态响应特性好。缺点是输出有非线性，寄生电容和分布电容对灵敏度和测量精度的影响较大，极易受极板间距离的影响和介质的影响，空气中的湿度和杂质也会影响到电容式位移传感器的精度。

3、光电式位移传感器

光电式传感器结构简单、响应速度快，但是不适合应用于环境比较恶劣(污浊和灰尘比较多)的场合。

4、超声波式位移传感器

用超声波式传感器检测金属被测物体的位移变化有共振法和脉冲反射法，它具有连续自动测量、可以在较差的环境中使用等优点，通常能够满足测量精度发要求，但是需要耦合剂，而且对于声衰减很大的材料，以及表面凹凸不平或形状很不规则的零件，超声法测厚比较困难，此外，被测对象厚度过小时也会影响到检测的精度。

5、霍尔式位移传感器

霍尔式位移传感器结构简单、体积小、频率响应宽、动态范围大、灵敏度分辨率高、寿命长，但受介质和温度影响大、非线性也大、如果在传感器附近出现强磁场，则会引起误差。

电涡流传感器是非接触式位移传感器的一种，它能准确的测量被测金属导体与探头端面之间静态和动态的相对位移变化。它的最大的特点就是能够对位移、厚度、材料探伤等进行非接触连续的测量，频率响应特性好，弥补了其它电感传感器的不足。另外，电涡流传感器还具有灵敏度高、结构尺寸简单、体积小、环境适应能力强、安装方便等优点。近年来，电涡流传感器被广泛应用于高速旋转机械的轴向位移、径向振动、转速、轴心轨迹^[12]等测量中，已经发挥出了越来越大的作用。此外，它还可以在生产进行实时的监测和保护，以消除安全隐患，保证生产人员和生产设备的安全，因此，电涡流传感器的研制有着特殊重要的意义。

1.4 本论文研究的内容及意义

1.4.1 研究内容

本论文来源于校创新群体课题，依托项目是：“大范围高精度橡胶厚度在线测量仪”的设计。“大范围高精度橡胶厚度在线测量仪”的设计的目的是实现在工厂高温环境条件下对橡胶材料厚度的非接触精密测量，其基本思路是：反射式气动传感器和电涡流传感器组合，实现橡胶件厚度的单向测量，气动传感器测量测头与橡胶件表面的距离，电涡流传感器测出支持橡胶件钢辊与测头的距离，两者的差值即为被测橡胶件的厚度。本课题的主要任务是研制一种高性能的电涡流传感器，以结合气动传感器实现对橡胶厚度的组合测量，本论文的主要内容安排如下：

第一章综述了电涡流检测技术的发展历程及研究现状，介绍了几种当前最新的电涡流检测技术及应用，对电涡流传感器和其它几种非接触式位移传感器做了比较，提出了本论文的研究内容和研究意义。

第二章简要的介绍了电涡流传感器的测距原理，并在此基础上，论述了电

涡流传感器工作时电涡流分布的相关理论，以及温度对其性能的影响。

第三章就有限元分析所必备的相关电磁场理论知识和有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 做了介绍。通过 COMSOL Multiphysics 对电涡流传感器建模，分析了电涡流传感器工作时的电磁场和涡流分布特性，探讨了探头线圈结构参数以及工作频率对传感器性能的影响，给出了探头线圈电感和电阻随着工作距离的改变的变化情况。

第四章对电涡流传感器工作特性进行了实验研究。制作了电涡流探头壳体和不同结构参数的探头线圈，并进行了相关的实验分析。

第五章介绍了传感器信号处理的原理，并对振荡源、方波变换、并联谐振、放大电路、整流滤波等环节的电路进行了分析和仿真。

第六章对全文做了一个系统的总结，对研究重点做了系统的归纳，并对今后的研究提出了建议和展望。

1.4.2 意义

电涡流传感器的设计主要有实验型设计、解析型设计和数值型设计。传统的设计方法主要是通过大量的实验来获得满意的结果，这样使得整个设计过程周期非常长，而且十分繁琐。自多德等人用数值求解与线圈响应有关的解析积分表达式来实现对传感器性能的模拟后，数值方法(有限元法和有限微分法)开始得到应用。对于简单的几何结构，电涡流检测的解析解已经被求解出来了，但对于形状结构复杂材料的电涡流信号，可以借助于数值型设计的方法进行分析，以求得它的近似解。在电涡流传感器的硬件实现之前，可以通过数值方法来模拟仿真各种电涡流的变化情况，以节省硬件设计的时间和成本。

1.5 本章小结

本章概述了涡流检测技术的发展历程，介绍了几种当前正在进行研究的最新涡流检测技术。分别对几种非接触式位移传感器的优缺点进行了比较，提出了本论文的主要研究内容及其意义。

第二章 电涡流传感器的测距原理及相关理论

2.1 电涡流传感器测距的原理

将一个通有交变电流 I_1 的扁平线圈置于金属导体上方附近，由于电流的变化，在线圈周围就会产生交变的磁场 H_1 ，此时处于交变磁场中的金属导体将产生感应电动势，从而形成电涡流 I_2 ，电涡流 I_2 也是交变的，同样会产生一个交变的磁场 H_2 ， H_2 的方向和 H_1 的方向相反，因此部分的抵消 H_1 线圈磁场，从而使得产生磁场的线圈的阻抗、电感、品质因数等发生变化^[13]。

把被测金属导体近似看做一个短路线圈^[14]，这样，就可以得到如图 2-1 所示的空心变压器等效电路图。线圈和被测金属导体之间定义一个互感系数 M ， R_1 为线圈电阻， L_1 为线圈电感， R_2 为导体电阻， L_2 为导体电感， U 为激励电压。

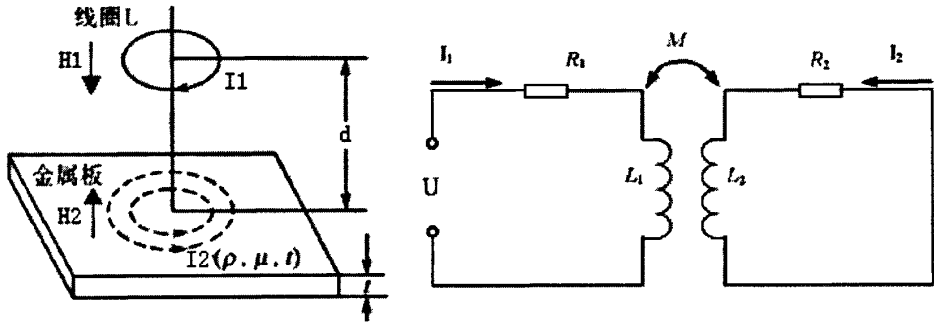


图 2-1 电涡流传感器原理图和等效电路图

根据等效电路，由基尔霍夫定理可知：

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U} \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

可解得：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2]} \quad (2-2)$$

$$\dot{I}_2 = j\omega \frac{M \dot{I}_1}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{M \omega^2 L_2 \dot{I}_1 + j\omega M R_2 \dot{I}_1}{R_2^2 \omega^2 L_2^2} \quad (2-3)$$

因此，可得线圈受到被测金属导体影响后的等效阻抗为：

$$Z = \frac{U}{I_1} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2] \quad (2-4)$$

线圈的等效电阻和电感分别为：

$$R = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \quad (2-5)$$

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \quad (2-6)$$

被测导体中电涡流的大小和金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、金属导体的厚度 t 、通过探头线圈的电流强度 I_1 、频率 f 、以及其与金属导体之间的距离 d 有关。由上可知：这些都将通过涡流效应和磁效应与线圈阻抗发生联系，换言之，线圈的阻抗也是这些参数的函数，它可以表示为：

$$Z = F(\rho, \mu, t, I_1, f, d) \quad (2-7)$$

当涡流探头和金属导体之间的距离 d 发生变化，而控制上面多个参数中的其它参数不变时，探头线圈阻抗 Z 就成为 d 的单值函数，即被测体与传感器之间的相对位置发生改变时，电涡流传感器的电参数也随之发生变化。虽然整个函数是以非线性的，其函数特征为“S”型曲线，但可以选取它近似为线性的一段，通过电子线路的处理，将线圈阻抗 Z 的变化，即探头线圈与被测金属之间距离 d 的变化转化为电压或电流的变化，电涡流传感器就是根据这一原理实现对金属物体的位移、振动等参数的测量。

2.2 电涡流传感器中涡流分布的相关理论

为了更好的指导电涡流传感器的具体设计计算和使用，还必须进一步研究电涡流形成的范围。电感线圈受一定的交变电流激励后，只能在一定范围内形成磁路，当然也只能在一定的范围内形成电涡流，下面分别讨论电涡流大小随着电感线圈与被测金属导体距离、电涡流环半径及涡流贯穿深度等变化的规律。

2.2.1 电涡流强度与被测距离 d 之间的关系

线圈的有效阻抗 Z 是线圈与被测金属导体之间互感系数 M 的函数，若认为电涡流分布是均匀性的，可以推导出被测金属导体中的电涡流强度 I_2 随线圈与被测金属导体之间的距离 d 变化的函数关系为：

$$I_2 = I_1 \left[1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r_b^2}} \right] \quad (2-8)$$

式(2-8)中, I_1 : 线圈中的激励电流; d : 线圈与被测金属导体之间的距离; r_b : 线圈的外半径。

电涡流强度随着线圈与被测金属导体之间的距离的增加而迅速的衰减, 当 $d > r_b$ 时, 电涡流的强度已经很小。在电涡流传感器设计时, d 选在什么范围, 视各种设计参数而定。通常, 实际经验为: $d = 0.05 \sim 1r_b$ 。

2.2.2 电涡流的径向分布

式(2-8)是认为电涡流均匀分布时得到的, 实际上在被测金属上激发的电涡流的密度是不一样的, 这使得电涡流强度也不一样。距离 d 固定后, 可用麦克斯韦方程进行积分得到电涡流强度 I_2 与电涡流半径 r 的函数关系, 但这种计算十分复杂, 而且误差也很大。劳斯(H. R. Loos)提出了一种叫“分割法”的分析计算方法, 这种方法实际上是将电涡流分割成 n 个同心的短路环, 计算精度主要取决于环的分割数目。对此模型进行推算, 电涡流 I_2 随半径的变化规律可以用下式表示^[15]:

$$\begin{cases} I_b v^4 e^{-4(1-v)} & \text{当 } 0 \leq r \leq r_b \text{ 时} \\ I_b v^{14} e^{-14(1-v)} & \text{当 } r \geq r_b \text{ 时} \end{cases} \quad (2-9)$$

式(2-9)中, v : 大小为 r/r_b ; r : 电涡流环半径; r_b : 线圈的外半径; I_b : $v=1$ 处的最大电涡流密度。

2.2.3 电涡流的贯穿深度

由于高频电磁场具有“趋肤效应”, 使得进入导体中的磁场强度随着离表面距离的增大而按指数规律衰减, 所以电涡流 I_x 也同样按指数规律衰减, 可以用下式表示:

$$I_x = I_0 e^{-sx} \quad (2-10)$$

式(2-10)中, I_x : 距被测金属表面 x 处的电涡流密度的大小; I_0 : 被测金属表面电涡流强度, 为最大值; x : 被测金属中距表面某一点的距离; s : 当电涡流衰减到 $I_x = I_0/e$ 离被测金属导体表面的距离。

这里的 s 就是贯穿深度, s 处深度的电涡流强度 I_s 等于表面处强度 I_0 的 $1/e$, 即 $I_s = 0.368I_0$ 。贯穿深度 s 的大小与线圈的激励频率 f , 导体的材料性质有关, 可由下公式计算得出:

$$s = 500 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}} \quad (2-11)$$

式(2-11)中, ρ : 被测导体的电阻率 ($\Omega \cdot m$); μ_0 : 真空中的电导率

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$; μ_r : 被测导体的相对磁导率; f : 激励频率 (Hz)

由式(2-11)可以看出: 贯穿深度随电阻率 ρ 增大而增大, 随相对磁导率 μ_r , 激励频率 f 增大而减小。

2.3 温度对电涡流传感器的影响

由于电涡流的反射作用, 使线圈阻抗的实数部分增加、虚数部分减少从而使线圈的品质因数减小, 这是由于涡流损耗增加的结果。

为了能看出实数部分和虚数共同作用时的直接影响, 引入品质因素 Q 值, 其定义为:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2-12)$$

没有导体在线圈附近时, 线圈的品质因素为:

$$Q_0 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (2-13)$$

有导体影响时, 线圈的品质因数为:

$$Q = Q_0 \frac{1 - \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2}}{1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2}} \quad (2-14)$$

令涡流环的阻抗为: $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + W^2 L_2^2}$, 则:

$$Q = Q_0 \frac{1 - (L_2/L_1)(\omega M/Z_2^2)^2}{1 + (R_2/R_1)(\omega M/Z_2^2)^2} \quad (2-15)$$

在式(2-4)中, 传感器线圈阻抗 Z 由线圈的交流电阻 R_1 和感抗 ωL_1 两部分组成。其中, L_1 的表达式为:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 r \Phi \quad (2-16)$$

式(2-16)中, μ_0 : 真空导磁率; N : 线圈的匝数; r : 线圈的平均直径; Φ : 由制订好的图表曲线上查取的数据。可见, 线圈的电感值仅与线圈的匝数、几何形状有关, 而与温度没有直接的关系, 仅几何尺寸随温度有微小变化^[16]。

线圈因集肤效应引起的交流电阻 R_1 在一定范围内与温度的关系为:

$$R_1 = \frac{l}{S} \frac{a}{2} \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \rho_0 (1+at)} + \frac{1}{4} \rho_0 (1+at) + \frac{3}{32} \sqrt{\frac{\rho_0^3 (1+at)^3}{\pi d \mu_r \mu_f}} \quad (2-17)$$

式(2-17)中, l : 导线的长度; S : 导线的横截面积; ρ_0 : 导线材料在 0°C 时的电阻率; α : 导线材料电阻率的温度系数; t : 温度; f : 线圈中交流电的频率; μ_r : 导线材料的相对导磁率; μ_0 : 真空导磁率。

可以清楚地看到, 线圈交流电阻 R_1 是温度 t 的函数, 线圈电阻将随温度的增加而增加。若 R_1 随温度的变化越大, 线圈的品质因数 Q 就降低, 导致电涡流传感器线圈的输出漂移就增加。因此, 即使在被测量条件不变的情况下, 由于高温导致传感器线圈的电阻值改变, 从而使线圈等效阻抗及传感器的输出发生改变。

2.4 本章小结

本章对电涡流传感器的测距原理进行了相关的介绍, 为了更好的了解电涡流传感器的工作机理和设计时所要注意的基本事项, 对电涡流传感器的电涡流强度与被测距离 d 之间的关系, 电涡流的径向分布和贯穿深度以及温度对其的影响分别给予了阐述。

第三章 电涡流传感器的有限元建模及仿真分析

3.1 电磁场的基本理论

3.1.1 麦克斯韦方程组

分析和研究涡流检测问题的出发点是麦克斯韦方程组的求解和实验验证。麦克斯韦方程组是支配所有宏观电磁现象的一组基本方程，是研究和分析电磁现象的一个基本依据，在电磁场中有限元法所用的偏微分方程式从麦克斯韦方程组推导出来的。这组方程既可写成微分形式，又可写成积分形式，但我们在此只给出它们的微分形式，因为它们能给出用有限元方法处理电磁问题的微分方程。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{法拉第电磁感应定律} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{安培全电流定律} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho & \text{高斯定律} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 & \text{磁通连续性定律} \end{array} \right. \quad (3-1)$$

式(3-1)中， \vec{H} ：磁场强度 A/m ； \vec{E} ：电场强度 V/m ； \vec{D} ：电位移矢量 C/m^2 ； \vec{B} ：磁感应强度 $1T=1Wb/m^2$ ； \vec{J} ：电流密度 A/m^2 ； ρ ：电荷密度 C/m^3 。

3.1.2 电磁场物质本构关系

在线性、各向同性介质中：

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{array} \right. \quad (3-2)$$

式(3-2)中， ε ：介电常数 F/m ； ε_r ：相对介电常数； ε_0 ：真空介电常数 $8.854 \times 10^{-12} F/m$ ； μ ：磁导率 H/m ； μ_r ：相对磁导率； μ_0 ：真空磁导率 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ； σ ：电导率 S/m 。

对于线性介质，这七个量是常量，不随位置变化，而对于非线性介质，它们随场量的变化而变化，是位置的函数。

3.1.3 电磁场分析中的边界条件

由于区域、介质和激励的不同，电磁场的微分方程常常由边界条件和初始

条件来限制，在电磁场问题中，存在着各种各样的边界，通常可以归纳成三种

1) 狄利克莱边界条件

狄利克莱边界条件也称为第一类边界条件，该边界条件可以表示为：

$$u|_{\Gamma_1} = g(\Gamma_1) \quad (3-3)$$

式(3-3)中， Γ_1 为第一类边界， $g(\Gamma_1)$ 为位置的一般函数，在特殊情况下， $g(\Gamma_1)$ 可以为常数或零，该条件表明物理量 u 在某个边界的值是给定的。

2) 诺伊曼边界条件

诺依曼边界条件也称第二类边界条件，该边界条件可以表示为：

$$\frac{\partial u}{\partial n}|_{\Gamma_2} = h(\Gamma_2) \quad (3-4)$$

式(3-4)中， Γ_2 为第二类边界， $h(\Gamma_2)$ 为已知函数， n 为边界的外向法相矢量，在特殊情况下， $h(\Gamma_2)$ 可以为常数或零。诺伊曼边界条件常常表达几何尺寸和激励源的对称性。

3) 齐次边界条件

如果狄利克莱和诺伊曼边界条件中的一半函数都为零，则边界条件分别简化为齐次狄利克莱边界条件和齐次诺伊曼边界条件，可以表示为：

$$u|_{\Gamma_1} = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}|_{\Gamma_2} = 0 \quad (3-6)$$

式(3-5)和(3-6)表示在某个边界上的势函数为零，在计算电磁场时，大地和无限远处的电势和磁势被认为是零，因而齐次狄利克莱条件适用于这种类型的边界^[17]。

3.2 有限元法及有限元数值分析软件 COMSOL Multiphysics 简介

有限元法(Finite element method)是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法，是解决工程实际问题的一种有力的数值计算工具。有限元法最初是在二十世纪五十年代作为处理固体力学问题的方法出现的，在1945~1955这十年间发展起来的结构分析矩阵(位移)法可以说是它的雏形。

“有限元法”这一名称是克拉夫(Clough)在1960年首先引用的，第一个成功的尝试是对于飞机结构的分析。上世纪70年代在英国科学家 Zienkiewicz 等人的努力下，随后很快广泛的应用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。由于这一方法的灵活、快速和有效性，使其迅速发展成为求解各领域的数理方程的一种通用的近似计算方法，目前，它在许多学科领域和实际工程问题

中都得到广泛的应用。

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件^[18]。广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算，被当今世界科学家称为“第一款真正的任意多物理场直接耦合分析软件”。COMSOL Multiphysics 模拟科学和工程领域的各种物理过程，以高效的计算性能和杰出的多场双向直接耦合分析能力实现了高度精确的数值仿真。COMSOL 公司于 1986 年在瑞典成立，COMSOL Multiphysics 起源于 MATLAB 的 Toolbox，最初命名为 Toolbox 1.0。后来改名为 Femlab 1.0 (FEM 为有限元，LAB 是取自于 Matlab)，这个名字也一直沿用到 Femlab 3.1。从 2003 年 3.2a 版本开始，正式命名为 COMSOL Multiphysics。COMSOL Multiphysics 以其独特的软件设计理念，成功地实现了任意多物理场、直接、双向实时耦合，在全球领先的数值仿真领域里得到广泛的应用。

3.3 有限元法的分析过程

有限元方法是求边值问题的数值过程，该方法的原理是用许多子域来代表整个连续区域。在子域中，未知函数用带有未知系数的简单插值函数来表示^[19]。因此，无限个自由度的原边值问题被转化成了有限个自由度的问题，或者换句话说，整个系统的解用有限数目的未知系数近似。然后，用里兹变分或伽辽金方法得到一组代数方程。最后，通过求解方程组得到边值问题的解。所以，边值问题的有限元分析应包括以下几个基本步骤：

1、求解区域的离散化

从数学意义上说，一个连续域可以分割为有限个子域，每个子域的场函数只包含有限个参数的简单场函数，用这些子域的场函数的集合就能近似地代表整个连续域的场函数。其最终结果就是把微分方程组转化为代数方程组，起到化难为易的作用。所谓离散化，即由无限个质点组成的连续体转化为有限个元素组成的集合体。这些元素越小，越逼近原连续的求解域。把实际问题的整体求解域剖分为有限个(基本)元素，这可以通过有限个互不重叠的多边形或多面体来分割求解区域。对于二维的问题，简单的元素形状可以是三角形、四边形等，对于三维的问题，简单的元素则可以是四面体，六面体等。对于各种不同结构形状的问题，有各种不同形式的单元可以采用，对于所考虑的问题，必须决定元素的数目、大小和排列，以便精确的表示所给定的系统，这是进行有限元分析的第一步。

2、选择插值函数

对求解域离散后，重点是分析每个元素的特性，首先要对元素中的场变量分布做一定的假设，假设所考虑的关注的场变量是坐标的某种函数，这种函数就称为插值函数，通常大多数用多项式作为场变量的插值函数，因为它们易于

积分和微分，另外，任意阶次的多项式可以近似的表示真实解，当然在一般情况下，所选取的插值函数不可能恰好精确的表示元素中场变量的变化，因为只有无限次的多项式才与真实解相对应，为了实用，通常只取有限项多项式，因此有限元法在过程中引进了基本的近似性。多项式次数的选择取决于每个元素上指定的节点数目，每个节点上未知量的性质和数目以及加在节点上和元素边界上的某些连续性的要求。

3、建立元素的特征矩阵

有限元模型一经建立，就可以建立每个元素的特征矩阵。元素的系数矩阵取决于内插函数、元素的形状以及该元素的材料性质。通过对连续结构中不同的元素规定不同的材料性质就能够考虑非均值问题。

4、求出特征矩阵的方法

1) 直接法：利用直接的物理推导来确定元素内变量之间的关系，并应用相应的变量，以建立元素性质(特征矩阵和特征向量)，这种方法仅用来求解简单形式的元素。

2) 变分法：是一种近似的方法，是把能量函数最小化的一种方法，而函数是有满足边界条件场问题的微分方程式所推导而来的，因为大部分的物理及工程上的问题都能用变分法列出公式，所以可以利用有限元法以获得近似解，应用此方法最主要的限制是相关的物理或工程上的问题能够用变分的形式来表示。

3) 加权残余法：如已知求解问题的微分方程，假定一个近似解，将该近似解代到该微分方程中，这种运算必定产生误差项(余数)。虽然不能让这些误差为零(余数为零)，但可以让该余数项的加权积分为零。也就是在求解区域中，余数项和加权因子的乘积的积分等于零，它给出了求积分近似解的直接方法。元素矩阵和元素向量可直接由问题的主要微分方程来求解，而不需要经变分法则，这种方法也是导出有限元方程式最常用的方法^[20]。

5、组合元素矩阵及向量，并导出系统矩阵

要求出用元素集合体所表示的整个系统特性，必须将每一个元素性质的特征矩阵加以合并，形成表示整个区域或系统的线性联立方程组。在每个元素间互相连接的节点处，对于每个共有节点的元素来说，在这个节点上场变量的值是相同的，组合有限元素方程系统的工作，就交由计算机来处理。

6、求解有限元素方程式

所求的有限元素方程式是一组联立的代数方程式，在求解方程组之前，必须要考虑问题的边界条件，适当的修改方程式，然后解出每个节点的未知场变量。由此即可算出元素内任一点的场变量。

7、按照需要求出其它想要的参数

利用有限元法求得节点场变量之后，可以经由这些场变量来计算其他重要的参数，例如有限元法求出电流密度之后，可以进一步计算电流、阻抗等我们想要的参数。

3.4 有限元法的优缺点

有限元法的主要优点可以归纳如下：

1、以简单逼近复杂，即把原本复杂的求解区域分成一个一个单元，在相对简单的单元内建立公式，然后总体合成，逼近真实解。在一定条件下，随着单元分得越来越细，逼近真实解的程度越来越高。

2、采用矩阵形式表达，便于编制计算机程序，可以充分利用电子计算机所提供的方便。

3、边界条件是在建立结构总体刚度方程后再引入的，边界条件和结构模型具有相对的独立性，可以从其它 CAD 软件中导入创建好的模型。

4、有限元法不需要适用于整个结构的插值函数，而是每个单元本身有各自的插值函数。这就使得数学处理比较方便，对复杂形状的结构也能适用。

5、有限元法很容易处理非均匀连续介质，可以求解非线性问题。

6、可以进行耦合场分析。

7、有限元法可以与优化设计方法相结合，以便发挥各自的优点。

然而，有限元法自身也存在缺点：

1、有限元计算，尤其是复杂问题的分析计算，所耗费的计算时间、内存和磁盘空间等计算资源是相当惊人的。

2、对无限求解域问题没有较好的处理方法。

3、尽管现有的有限元软件多数都使用了网格自适应技术，但是在具体应用时，采用什么类型的单元、多大的网格密度等等完全依赖于使用者的经验。实际中，经常采用网格密度加大一倍，然后比较两次分析的结果的方法，来考察分析的精度，这势必进一步增大计算资源的耗用量。

3.5 电涡流传感器 COMSOL Multiphysics 有限元模型的建立

由于电涡流检测系统的电磁场属于似稳交变场，电涡流传感器检测线圈为轴对称结构，被测导体也可视为轴对称的结构，这样便可将电涡流检测系统三维涡流场的一般问题转化为轴对称似稳交变电磁场问题。对于一般的轴对称问题，若求得某轴对称截面上的电磁场分布，便可以很容易得到整个分析区域的电磁场分布。由于在本电涡流传感器测距系统中，线圈，被测金属导体和周围空气的结构是呈平面轴对称的，取其结构部分的 1/4 来建模，这样便大大简化了分析计算量。基于上面所述的思路，可以建立电涡流传感器测距系统的仿真

模型如图 3-1 所示。

由于探头线圈匝数比较少和传感器的工作频率较低，模型需做以下几个方面的假设：1、探头线圈中的激励电流密度是均匀分布的。2、模型中各种材料的电导率和磁导率的值为一常数。3、忽略涡流探头提离运动带来的影响。4、不考虑涡流探头线圈自身的集肤效应。5、忽略电阻率的温度效应。

在传感器仿真模型的二维轴对称平面 RZ 上，ABCD 区域为包围在电涡流传感器周围的空气介质。探头线圈置于被测金属导体的上表面，被测金属表面理论上应视为无穷大，在本涡流检测系统中，被测金属导体等效为一个圆柱型的平板，当平板直径与线圈直径比例大于 5，且金属板厚度与集肤深度比例大于 4 时，可认为金属平板对线圈阻抗的影响与无穷大平板一致^[21]。

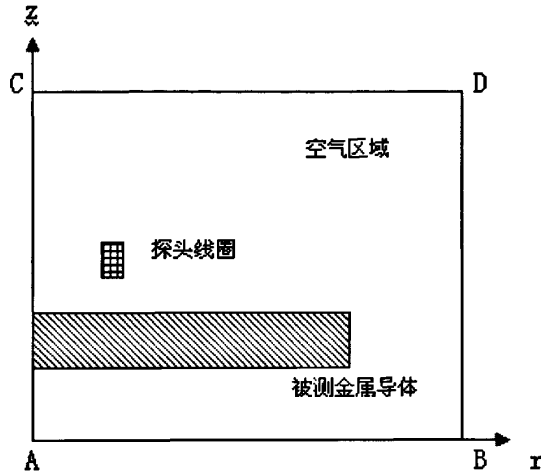


图 3-1 二维电涡流传感器有限元仿真模型

在这里，设定被测金属平板半径为 80mm，厚度为 40mm，并假设周围的空气介质为一圆柱体，其半径为 160mm，厚度为 200mm，探头线圈与被测平板置于空气介质的中间区域。

3.6 电涡流传感器 COMSOL Multiphysics 有限元仿真的基本步骤

1)、绘制几何模型

在 COMSOL Multiphysics 中，有多种方法来绘制几何模型对象。几何模型可以通过其图形界面里的绘图工具直接构建，也可以通过其它的 CAD 绘图软件如 Pro/E、SolidWorks 等事先设计好几何模型，然后导入。另外，还可以利用脚本编程建模，COMSOL Multiphysics 与 MATLAB 完全兼容，可利用数学公式直接编写脚本建模。在这里，通过直接绘图来建立电涡流传感器的几何图形（如图 3-2）。定义通过线圈截面的总电流为 0.5A，即单匝电流幅值和匝数的乘积，并设定工作频率为 1000Hz。

2)、子域模块物理参数的设定

在图 3-2 中, 电涡流传感器模型中有三个子域模块 R_1 、 R_2 和 R_3 。在二维轴对称模型 RZ 上, R_1 为被测金属导体的截平面, R_2 为探头线圈的截平面, R_3 为包围在传感器周围的空气。其中, 子域 1 定义为 1 atm 的空气, 子域 2 定义为结构钢, 子域 3 定义为铜, 它们的电气参数特性如表 3-1 所示。

表 3-1 电涡流传感器的电器参数

	电导率	相对介电常数	外部电流密度
外围空气	0	1	0
结构钢	4.032e6[s/m]	1	0
铜	5.998e7[s/m]	1	8333.33[A/m ²]

通常不太可能把多匝线圈的每一匝作为单独的几何体进行建模, 一般是把线圈处理成一个电流均匀分布的区域。为了在模型上加载正确的电流密度, 需要计算出通过线圈的总电流。如果 N 匝线圈每匝通过的电流是 I , 总电流 I_{tot} 就等于 $I * N$ 。

对于电涡流探头线圈、被测金属导体和包围它们的空气区域, 分析磁场和感应电流时, 使用准静态方程求磁向量位能 A_ϕ , 该量服从如下的关系式^[22]:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)A_\phi + \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times A_\phi) = J_\phi^e \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中; ω : 角频率; σ : 电导率; μ : 磁导率; ε : 介电常数; J_ϕ^e : 电流密度。

根据电磁场物质本构关系, 电流密度 J_ϕ^e 和磁场强度 H 能够通过下式计算:

$$J_\phi^e = \sigma E = -\sigma(\nabla V + \frac{\partial A_\phi}{\partial t}) \quad (3-8)$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_0\mu_r} = \frac{\nabla \times A_\phi}{\mu_0\mu_r} \quad (3-9)$$

式 (3-8) 和 (3-9) 方程中定义的电势 V 和磁向量位能 A_ϕ 可分别通过法拉第定律和高斯定律计算得出。

在 COMSOL Multiphysics 中, 有两种方法可将电流加载到电磁模型上: 在求解域上加载电流密度, 或是在边界上加载表面电流密度。在求解域上加载电流密度可按方程 (3-10) 定义:

$$\int_s J_\phi^e \cdot ds = I \quad (3-10)$$

当电流密度加载于求解域时, 因为已假设代表线圈的区域内没有集肤效应,

所以电流密度在整个区域内应为常数。如果要求解的是瞬态或时谐问题，则必须将电导率设置为零并使用外部电流密度来规定区域内的电流密度。外部电流密度应该设置为 I_{tot}/A ，其中 A 是线圈截面的面积。

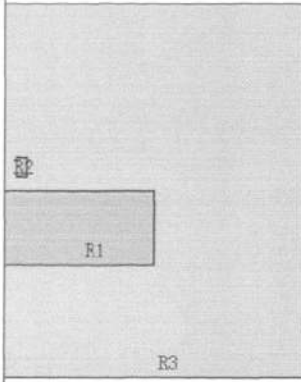


图 3-2 几何图形的建立

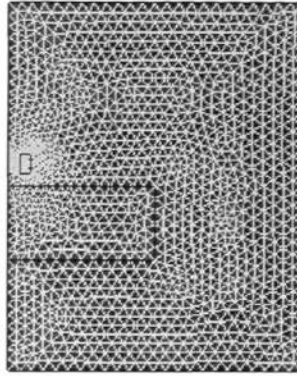


图 3-3 网格的划分

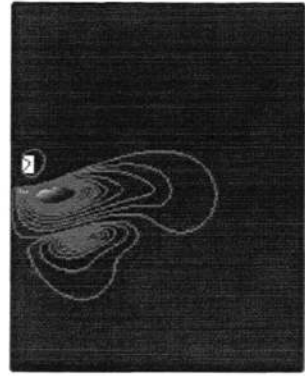


图 3-4 求解与可视化

3)、模型中边界条件的设定

有限元计算主要就是解微分方程，而解方程要有定解，就一定要引入条件，这些附加条件称为定解条件。对于二维磁场分析所定义的边界问题为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \beta \phi = f \quad (x, y) \in \Omega \quad (3-11)$$

式 (3-11) 中， ϕ 是未知函数， a_x ， a_y 和 β 是与区域物理性质有关的已知参数， f 是源或是激励函数。在这里，边界条件为：

$$\phi = p\Gamma_1 \quad (3-12)$$

$$\left(a_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{x} + a_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{y} \right) \cdot \hat{n} + \gamma \phi = q\Gamma_2 \quad (3-13)$$

式 (3-13) 中 $\Gamma (= \Gamma_1 + \Gamma_2)$ 表示包围面 Ω 的轮廓或边界， \hat{n} 是外法向单位矢量， γ ， p ， q 是与边界物理性质有关的已知参数。

外部边界和对称轴需要施加边界条件，并在需要的地方施加边界电流。通过设定向量位能为零和在外边界施加零磁流量，然后施加对称边界条件，同样可以通过表面电流方程式 (3-14) 在边界上加载表面电流密度。式 (3-14) 中， c 为线圈截面的周长。

$$\oint_C (n \times J_s) \cdot dl = I \quad (3-14)$$

表 3-2 边界条件属性的设定

轴对称	磁绝缘	连续性
1、3、5	2、7、13	4、6、8、9、10、11、12

4)、划分有限元网格

网格生成器可以把几何结构模型划分为四面体或三角形的网格单元^[23]。三维模型的内部被划分成四面体网格，外部的面被划分成三角形的网格，二维模型面上被划分成三角形网格，几何边界被划分成边界元素，独立的几何点则被划分成顶点集合。根据需要，COMSOL Multiphysics 按自适应网格原则划分区域以提高网格质量。也还可以通过修改参数，通过对某一特定区域，来改变网格单元的大小。通常而言，网格划分的数量与仿真的精度密切相关，网格数量划分越多，精度也就越高，网格数量划分得越少，则精度相对来说越低。但是划分的数量越多，模型的整个计算时间也就越长，从而对计算机性能的要求越高。在进行线性分析时，时间并不是一个很严重的问题，但是对于非线性问题的分析，时间将是一个很重要的问题，因此，网格不宜无限细分。由于本模型是二维轴对称结构，对其进行二次网格划分一般就可以了。网格的划分如图 3-3 所示，全局的网格点数为 1791 个，三角形网格数为 3464 个，边界单元数 166 个，顶点元素数目为 12 个。

5)、计算与求解

求解器是基于 C++程序采用最新的数字计算技术编写而成，其中包括最新的直接求解和迭代求解、多极前处理器、高效的时间步运算法则和本征模型。避免了研究者使用一般的电磁场分析软件所涉及到的数值计算等比较繁琐和复杂的问题。本模型利用线性系统求解器（直接 UMFPACK）的模式，非线性相对公差设定为 1.0E-6, 最大迭代数为 25，采用消去形式的约束处理方式。

6)、后处理与可视化

可以对求解后的模型进行所需参数的显示和后处理，为了得到模型中磁场磁力线的分布状况，在通用→绘图类型中选择表面、流线和几何边。表面数据的内建物理参数设置为：总的电流密度，模。流线数据的内建物理参数设置为磁通密度，流线的起点点数为 2。

3.7 电涡流传感器的提高效应

线圈与被测金属导体之间的间隙称为“提离”，检测探头与被测金属导体之间距离变化引起检测线圈阻抗变化的现象称为“提离效应”。线圈探头的提离变化改变了进入金属导体的磁通量，从而改变了线圈和被测金属导体之间的

耦合程度,其中相互作用的过程最终反映在线圈阻抗的变化上。电涡流传感器探头与金属导体之间的距离的变化正是通过这种提离效应而得以反映的。

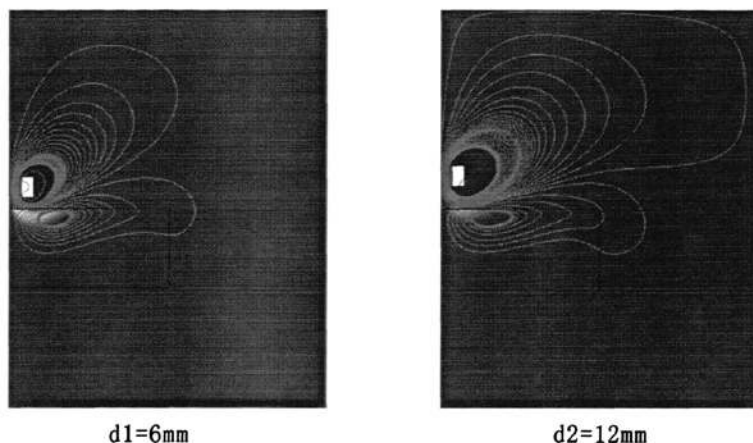


图 3-5 不同距离下电磁场和电涡流分布的情况

图 3-5 所示的是在各种不同距离条件下,电涡流探头的磁场分布和在被测体中所激发的电涡流分布状况。当探头线圈距被测金属导体距离逐渐靠近时,在金属板上所激发的电涡流越强,涡流探头的磁场分布也会相应的发生变化^[24],由于电涡流探头电磁场和被测金属导体中涡流所产生的电磁场相互作用,从而使电涡流探头的阻抗发生改变。提离越小,线圈阻抗的改变越大,这是因为提离小,线圈和导体之间的耦合更紧,导体对线圈的反作用也就越强。当线圈越靠近导体,轻微的提离变化引起的阻抗变化越明显,而当线圈离导体较远时,提离改变对阻抗的影响越弱;当线圈离导体足够远时,线圈的阻抗不再发生改变。

把涡流探头线圈连接到一个简单的 SPICE 谐振电路中^[25],通过施加一个固定的电压(15V)和频率(10KHz),可以得到传感器探头在不同距离下的电压输出,图 3-6 给出了探头线圈距被测金属导体 1mm 和 8mm 的距离时,探头线圈两端的输出电压输出情况。

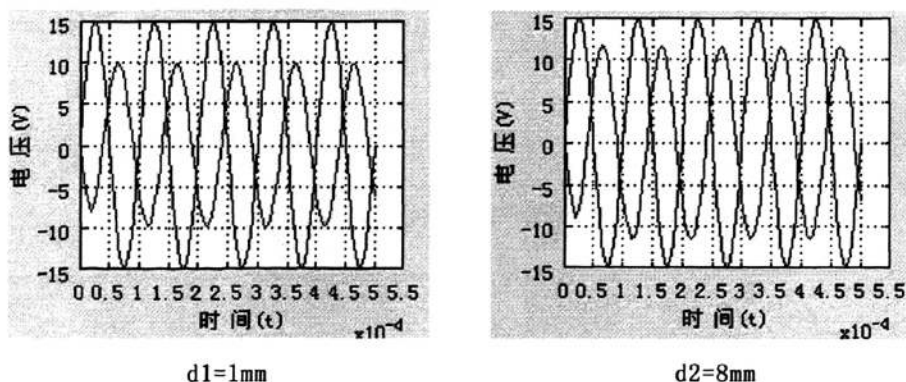


图 3-6 加入 SPICE 谐振电路下涡流探头的输出

3.8 涡流探头线圈的形状结构对传感器性能的影响研究

电涡流探头线圈的结构参数对传感器的性能影响是很大的，因而研究线圈几何参数对其影响规律十分必要，线圈的几何参数主要有外半径、内半径、厚度和匝数，下面分别对其进行分析。

实际上，用于位移测量的电涡流传感器探头是一个扁平的线圈^[26]，它可以看成多个载流圆线圈在同轴线上叠加而成，根据毕奥-萨伐定律，单匝载流圆线圈在轴线上的磁感应强度可表示为：

$$B_p = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{r^2}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3-15)$$

假设探头线圈共有 N 匝，则可以通过计算得出探头线圈在轴线上某处的磁感应强度 B 为：

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2(r_b - r_a)h} \left\{ (x+h) \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + (x+h)^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + (x+h)^2}} - x \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + (x+h)^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + (x+h)^2}} \right\} \quad (3-16)$$

在式 (3-15) 和 (3-16) 中， r ：线圈的半径； r_a ：线圈的内半径； r_b ：线圈的外半径； x ：轴线上某一点到线圈中心的距离； h ：探头线圈的厚度； μ_0 ：介质的磁导率； N ：线圈的匝数； I ：激励电流强度。在确保 NI 一定的前提下，即保证通过线圈截面的总电流为一定值的情况下，通过改变探头线圈的几何结构参数，分析其对电涡流传感器性能带来的影响规律。

表 3-3 探头线圈的结构参数

线圈编号	外径 (mm)	内径 (mm)	厚度 (mm)
1#	12	6	10
2#	8	6	10
3#	12	6	5
4#	12	10	10

1、在内径和厚度保持不变的情况下，探头线圈外径对电涡流传感器的影响。

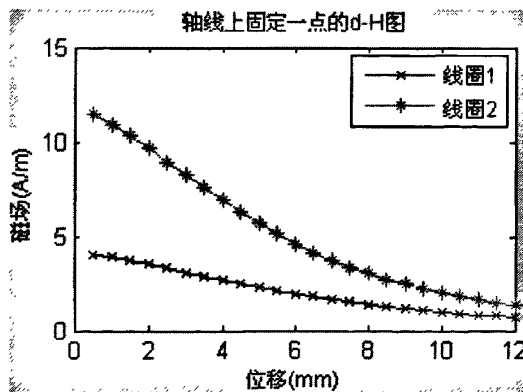


图 3-7 不同外径下探头线圈的磁场分布状况

从图 3-7 可以看出：线性范围受传感器线圈外径影响较大。线圈的外径大，线性范围大，外径小，线性范围也就越小。但是线圈外径增大时，相应的其灵敏度会降低，所以应根据实际要求来合理的确定探头线圈的外径。理论上，设计时传感器的线性范围一般为线圈外径的 $1/3 \sim 1/5$ ，在工程应用中，多取 $1/2 \sim 1/4$ 。

2、在外径和内径保持不变的情况下，探头线圈厚度对电涡流传感器的影响。

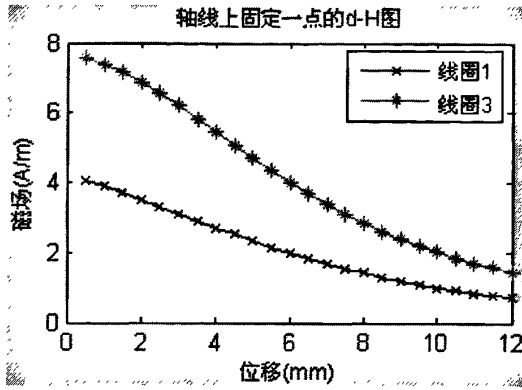


图 3-8 不同厚度下探头线圈的磁场分布状况

电涡流探头线圈的厚薄程度也会影响到传感器灵敏度和线性度的大小。图 3-8 表明：在离探头线圈很近的地方，薄线圈的磁感应强度随位移变化梯度较大，灵敏度较高，线性度也较好；在探头线圈距被测金属导体较远时，厚线圈的线性度较好，而线圈的厚薄程度对灵敏度的影响不大。

3、在保持外径和厚度保持不变的情况下，探头线圈内径对电涡流传感器的影响。

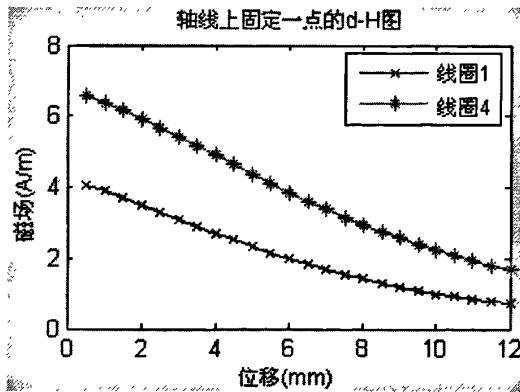


图 3-9 不同内径下探头线圈磁场的分布状况

在图 3-9 中，探头线圈 1 和探头线圈 4 的磁场分布形态比较相似，探头线圈内径的变化对传感器的灵敏度和线性度的影响都很小，在一般的情况下，基本可以忽略。

3.9 被测金属导体中电涡流的径向分布

给定如表 3-3 所示的四种不同几何参数的电涡流探头线圈，当电涡流探头线圈端面距离被测金属导体 5mm 的情况下，在被测金属导体的表层，电涡流密度的径向分布情况分别如图 3-10 所示：

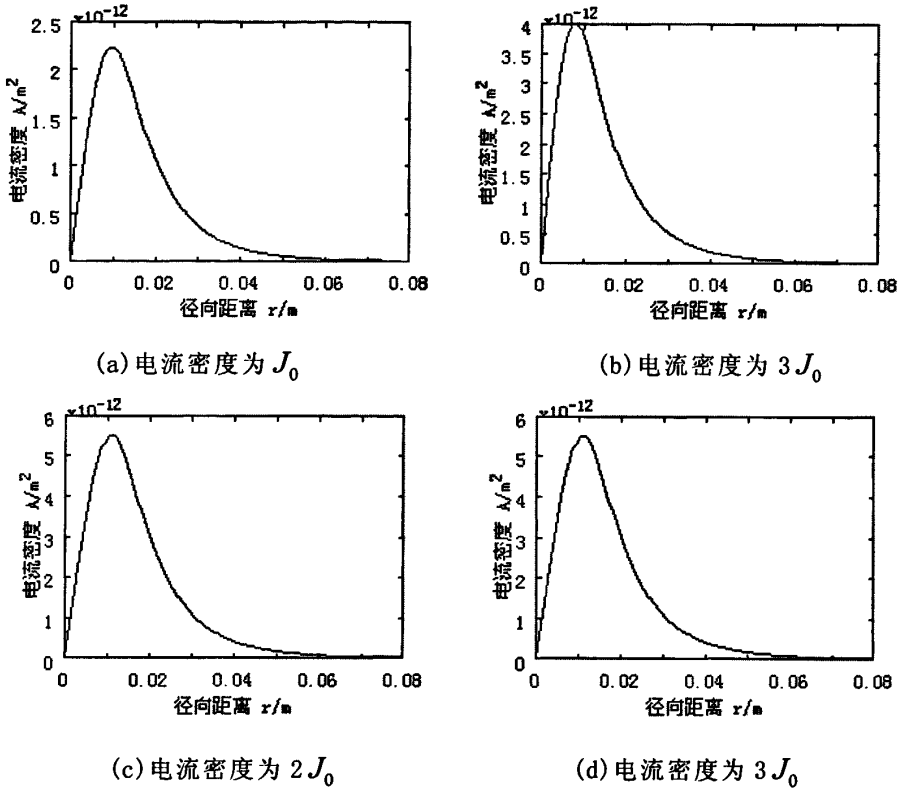


图 3-10 被测金属导体中电涡流的径向分布

由上面被测金属表层电涡流密度的径向分布情况来看，一开始，当被测金属导体表面距涡流探头线圈中心轴线之间的距离增大时，在径向范围内，电涡流密度逐渐增大，但当距离增大到一定的值时，径向电涡流密度开始逐渐的减小，直到最后变为零。电涡流密度的最大值几乎都出现在电涡流探头线圈的外径处，通常在距离增大到 2 倍的探头线圈外径时，电涡流几乎为零。由此可见，电涡流的径向形成范围分布不均匀的。设计时，当距离为 1.89 倍的线圈外径，即认为电涡流为零，这说明线圈尺寸的大小影响着电涡流的径向形成范围。

3.10 被测金属导体中电涡流的贯穿深度

被测金属导体表层的电涡流密度和贯穿深度均和导体的电导率、磁导率以及工作频率有关，电导率、磁导率以及工作频率越小，则金属导体表层的电涡流密度越大，贯穿深度越深，反之相反。通常，被测金属导体的电导率、磁导

率已知且固定不变，电涡流的贯穿深度仅与传感器的工作频率有关。

在表 3-3 中，任选一种结构参数的探头线圈（如 1#探头线圈）。对其加载的电流密度 J_0 ，探头线圈端面距离被测金属导体 5mm，在激励频率分别为 1000Hz 和 200Hz 情况下，被测导体贯穿深度方向上 $[(0.01, 0), (0.01, 0.04)]$ 位置处电涡流的分布如图 3-11 所示：

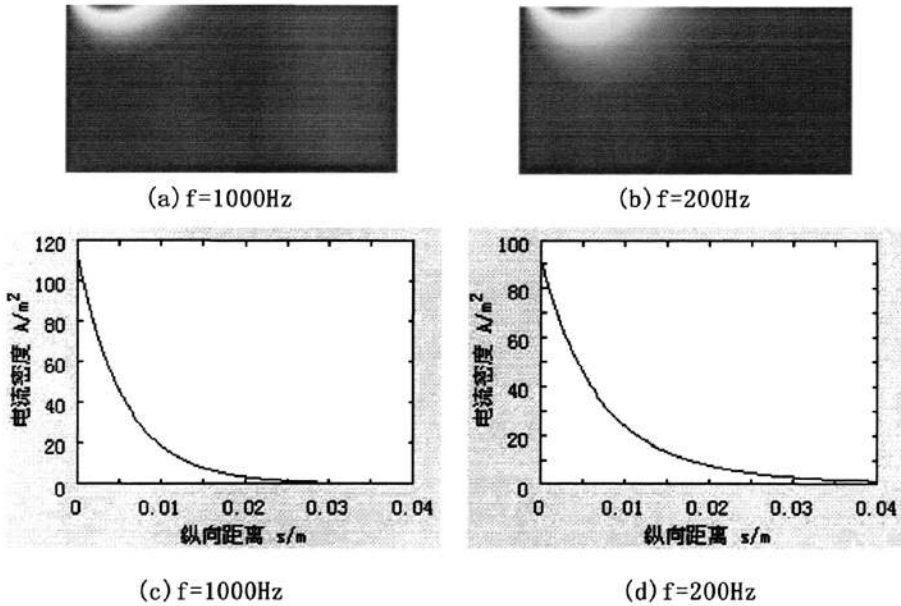
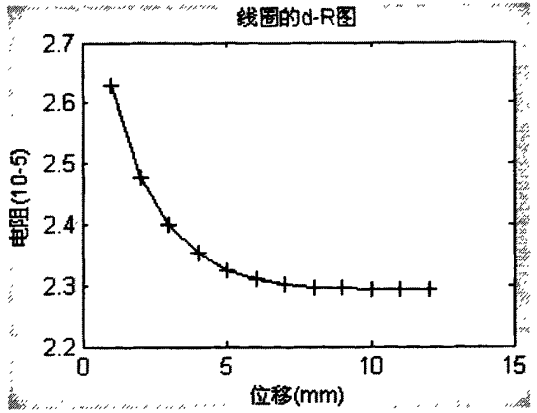
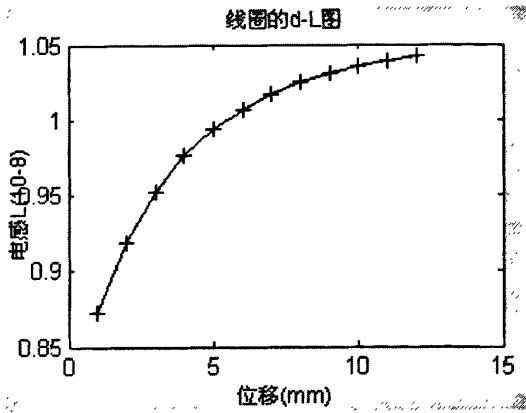


图 3-11 不同的工作频率下，被测金属导体中电涡流的贯穿深度

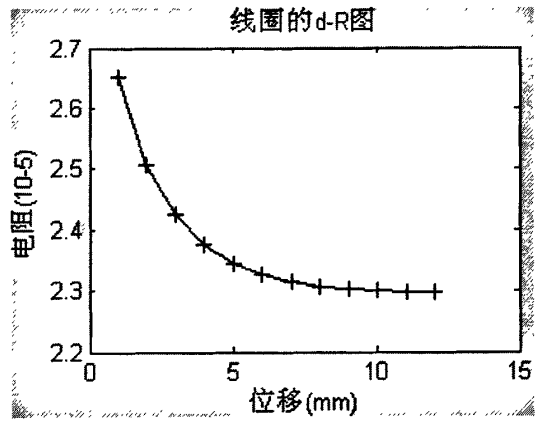
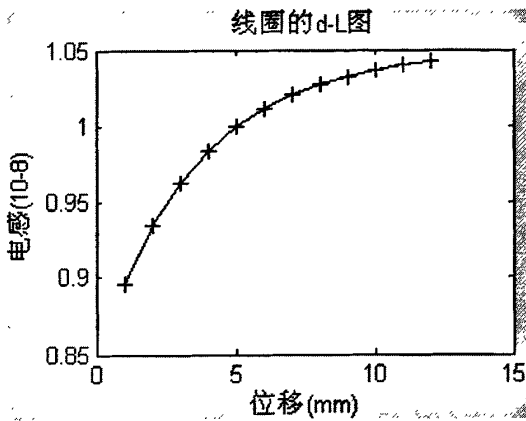
从图 3-10 中可以看出：电涡流在被测金属导体中感应产生，作用于导体表面的薄层内，但并非在导体中均匀分布，电涡流在导体表面的密度较高，它的幅度衰减和导体的厚度呈指数关系^[27]，在距离表面 3 倍的涡流标准深度的地方，涡流密度只有表面值的千分之五。当激励频率为 200Hz 时，电涡流在被测体内的贯穿深度要比激励频率为 1000Hz 的大，这表明低频越低，涡流的贯穿深度越大；频率越高，涡流的贯穿深度越浅，这与第二章节中关于电涡流传感器阐述的涡流分布理论是一致的。

3.11 被测工件电导率 σ 和磁导率 μ 对电涡流探头的影响

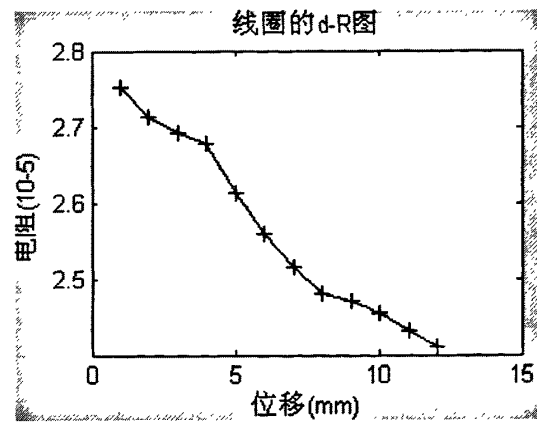
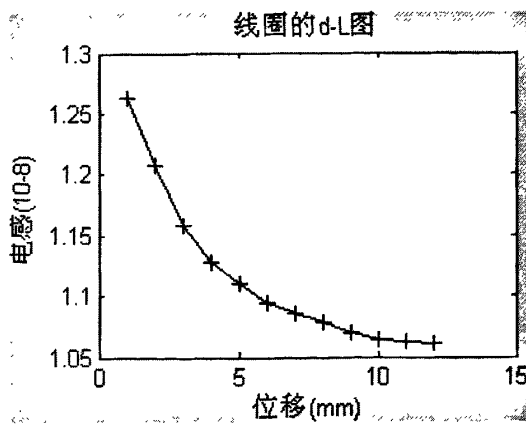
涡流探头线圈和被测金属导体是电涡流传感器必不可少的两个部分，它们一起构成了电涡流传感器测量系统，电涡流传感器的设计需要考虑被测金属导体的材料特性、几何尺寸及形状等因素。将探头线圈置于各种不同电导率的被测金属材料上，在其它条件均相同的情况下，由于被测金属材料的电导率不同，获得的信号也是不同的。



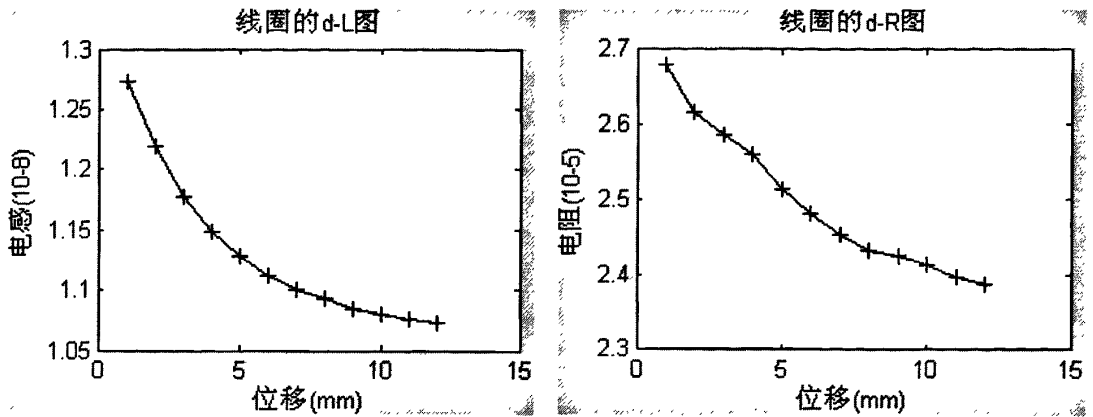
a) 铜工件 (相对磁导率 1, 电导率 $51.8 \times 10^6 S/m$) 非磁性材料



b) 铝工件 (相对磁导率 1, 电导率 $35.5 \times 10^6 S/m$) 非磁性材料



c) 铁工件 (相对磁导率 4000, 电导率 $1.12 \times 10^7 S/m$) 磁性材料



d) 钢工件 (相对磁导率 4000, 电导率 $4.032e6 S/m$) 磁性材料

图 3-12 不同金属材料条件下探头线圈的电感和电阻随距离的变化情况

当被测金属材料的电阻率的增加时, 阻抗值也会随之而增大。非磁性材料的相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 为一常数, 因此不影响阻抗, 但磁性材料的相对磁导率 μ_r 从远大于 1, 对阻抗影响显著。在对高磁导率的材料进行检测时, 微小的磁导率变化都会引起很大的本底噪声, 影响着检测的效率和质量^[28]。

在图 3-12 中, 被测金属导体分别为铜工件 (相对磁导率 1, 电导率 $51.8e6 S/m$) 非磁性材料、铝工件 (相对磁导率 1, 电导率 $35.5e6 S/m$) 非磁性材料、铁工件 (相对磁导率 4000, 电导 $1.12e7 S/m$) 磁性材料和钢工件 (相对磁导率 4000, 电导率 $4.032e6 S/m$) 磁性材料, 涡流探头线圈的电感值和电阻值呈现出规律的变化趋势, 铁工件和钢工件是磁性材料, 电涡流传感器探头的电感和电阻都随位移的增大而减小, 而作为非磁性材料的钢工件和铝工件, 其电感值随位移的增大而增大, 电阻值随位移的增大而减小。因此, 对于不同材料的被测金属导体, 在利用电涡流传感器进行位移的测量时, 必须考虑到上述变化规律对电涡流探头所产生的影响。

3.12 工作频率对电涡流传感器的影响

电涡流传感器是依赖探头线圈和被测金属导体之间电磁感应机理而工作的, 它的工作频率不仅会影响到涡流的分布状况, 还会给检测的灵敏度带来影响。对于一定尺寸的涡流探头线圈和给定的被测金属材料, 往往要求传感器工作在某一特定的频率下, 才有可能得到最佳的检测效果。图 3-12 分别反映了工作频率分别为 200Hz、500 Hz、1000 Hz 和 2000 Hz 的条件下, 涡流探头线圈的电磁场分布和被测金属物件上电涡流的分布状况。

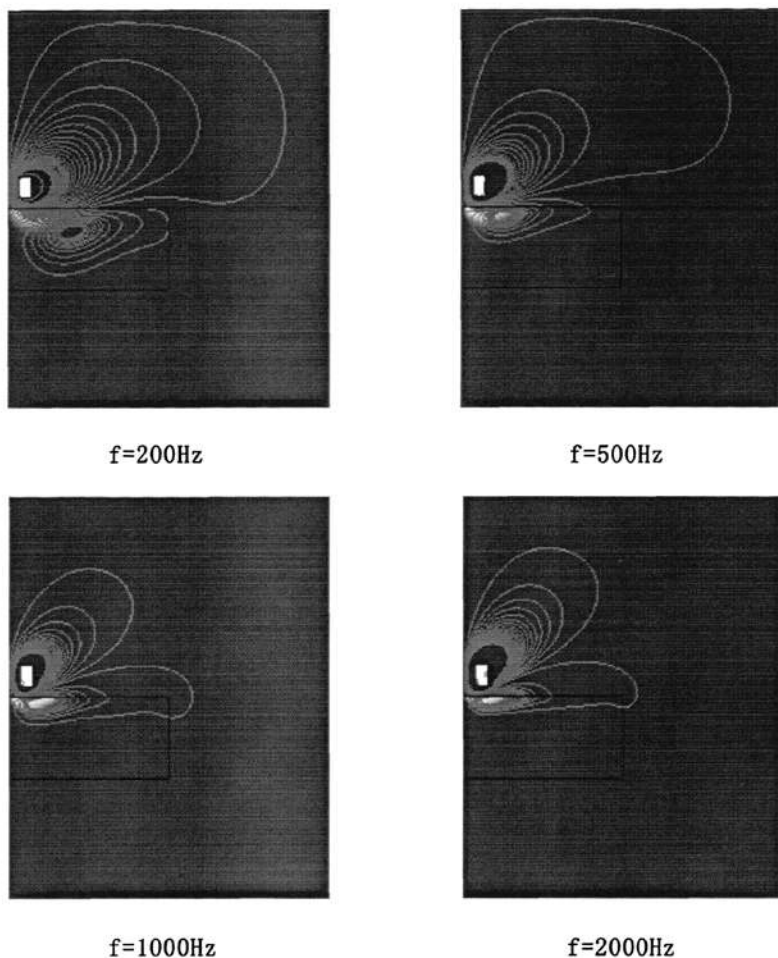


图 3-13 不同工作频率下的电磁场分布和涡流分布

由第二章所阐述的电涡流传感器相关理论可知：电涡流的集肤深度 t 与工作频率 f 的关系为 $t = 500 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}}$ ，所以当工作频率增加时，电涡流的集肤深度变小，是的磁滞增大，阻抗值变小。相反，工作频率如果减小，则电涡流集肤深度增大，阻抗值变大。在工作频率很低的情况下，由涡流效应所引起的阻抗主要由电阻组成，而电阻则依赖于被测金属导体和涡流探头线圈的温度，即温度的变化会对电涡流检测产生不良的影响，下面给出了同一被测金属导体材料（铁）在不同工作频率下集肤深度的变化情况。

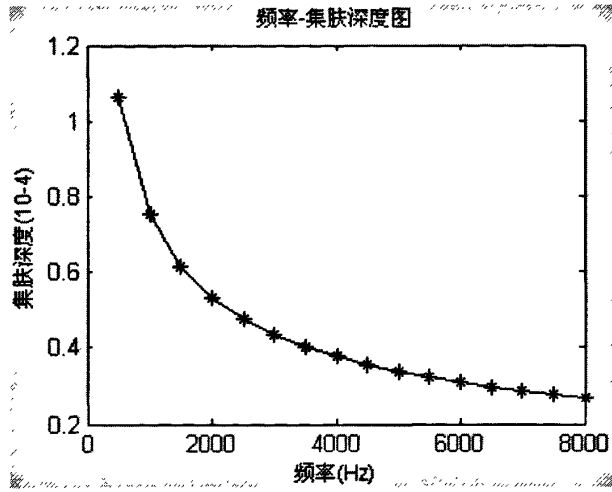


图 3-14 不同频率下被测金属导体（铁）中涡流的集肤深度

图 3-14 表明了不同工作频率对被测金属导体中电涡流的集肤深度的影响，随着工作频率的增加，被测金属导体中的集肤深度随之而减小，这说明较低的频率有利于对被测金属深层缺陷的探测，而高的频率适合于被测金属表面缺陷的探测^[29]。当然，电涡流传感器的工作频率的也不是越高越好，要根据所分析的对象而确定，来选择合适的频率。当测量厚度较大的金属板材时，需要贯穿深度比较大，因而选用低频 f 激励，其线性就好；当测量薄的金属板时，所需的贯穿深度比较小，则选取高频 f 激励，但此时的响应曲线会随被测金属厚度的减小而非线性变大。

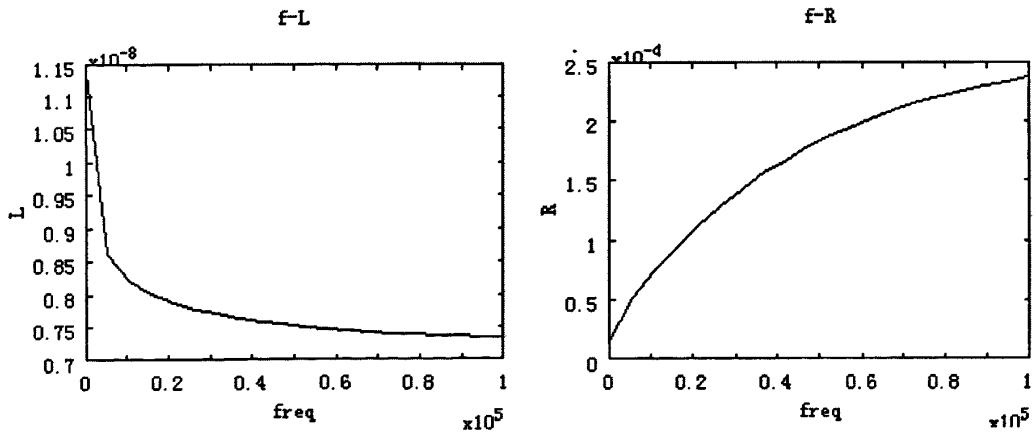


图 3-15 涡流探头线圈的电感和电阻值随频率的变化情况

图 3-15 研究了在相同被测金属材料（铁）情况下，涡流探头线圈的电感值和电阻值和工作频率之间的关系，随着传感器工作频率的增加，电涡流探头的电感值逐渐的减小，而电阻值则不断的增大，这也间接的说明了频率的不稳定

性也会给电涡流传感器的测量误差带来不可避免的影响。

3.13 本章小结

本章首先介绍了对电涡流传感器电磁特性进行分析所必备的电磁场基础知识：麦克斯韦方程组的微分形式，电磁场中的物质本构关系和电磁场分析中的边界条件。然后对有限元法和仿真应用软件 COMSOL Multiphysics 做了一个简单的了解。讲解了有限元法的整个分析过程和它所存在的优缺点。接着通过对电涡流传感器进行有限元建模，分析了电涡流传感器的提离效应，就涡流探头线圈的几何结构形状对传感器性能的影响做了研究。给出了在一定条件下，被测金属导体中电涡流的径向分布状况和贯穿深度，探究了工件电导率 σ 和磁导率 μ 对电涡流探头的影响，最后研究了工作频率对电涡流传感器性能的影响。

第四章 电涡流传感器探头的设计制作与实验

4.1 电涡流探头的功能

电涡流探头线圈接受从信号处理电路中来的高频电流，在其周围产生高频磁场，该磁场穿过靠近它的被测金属表面，在其中产生一个电涡流，这个电涡流产生的磁场方向和线圈的磁场方向相反，改变了原线圈的感抗，该感抗的变化随探头顶部到金属表面的间隙变化而变化。检测电路检测电涡流探头线圈的感抗的变化，通过变换放大电路将感抗变化量变换放大成相应电压变化信号输出，电涡流探头的主要功能便是把外界条件所引起的线圈感抗的变化传递给后续的信号处理电路。

通常，涡流检测探头的结构是由线圈绕组以及骨架和外壳组成，为了增强线圈的聚磁能力和提高电涡流传感器的灵敏度，有些还用到磁芯^[30]。在实际的设计中，一般考虑的基本参数包括：空间磁场分布、线圈电感、线圈电阻、线圈对相关材料特性变化的响应等。电涡流探头的选取原则主要有：1、屏蔽性良好，信号不受外界干扰；2、高输入阻抗，对被测电路的影响最小；3、频率范围内特性平稳；4、与信号处理电路相匹配的阻抗；5、质量和结构稳定可靠。信号传输的导线要求传输能力强，并且屏蔽良好，不易受杂波干扰，反射特性也能很好的传送，以使探头达到最佳的状态。

4.2 电涡流探头的设计与制作

4.2.1 电涡流探头的设计

电涡流传感器探头的设计通常有三种基本的方法：1、试验型或经验型设计；2、解析型设计；3、数值型设计^[31]。

试验型设计方法没有一个具体明确的方法和套路，设计者的实际经验和主观因素占有较多的成分，它通过建立某个特定的设计，在测量所得到的试验结果的基础上进行修正、反复的试验和不时的摸索，尽管过程比较繁琐，但是大多数电涡流探头性能的重要改进仍需要通过试验的方法来验证，很多电涡流探头就是由此而不断的发展起来的。

通过查阅相关电磁理论公式，计算传感器的电阻和电抗，确定线圈尺寸、匝数，这种方法被称为解析型设计方法，没有通过对电涡流传感器最简单几何结构和尺寸的估算，要对它进行精确的解析计算几乎是不可能的。它的一个很大的局限性在于：只能处理线圈截面几何形状比较规则的电涡流探头（如矩形截面和圆形截面），对于形状结构比较复杂的探头，利用解析型设计就有着很大的难度。

自多德等人用数值求解与线圈响应有关的解析积分表达式来实现对传感器

性能的模拟后，数值方法(有限元法和有限微分法)开始得到应用。对于简单的几何结构，电涡流检测的解析解已经被求解出来了，而对于形状结构复杂材料的电涡流信号，则可以借助于数值型设计的方法进行分析，以求得它的近似解。在电涡流传感器的硬件实现之前，可以通过数值方法来模拟仿真电涡流传感器的工作特性，以节省硬件设计的时间和成本。

当然，上面的这几种设计方法并不是孤立的，它们可以相互交叉的使用于电涡流传感器的整个设计过程之中。可以首先通过试验型设计的思路，确定电涡流探头的大致结构，然后用数值型设计的方法为探头结构的合理设计提供一个必要的参考和依据，用解析型设计的方法来计算各种与涡流探头结构相关的参数，再通过试验型设计的方法对其性能进行评估，这样反复几次，以对现行的结构进行优化，就可以得到一种比较合理的方案。

论文第三章通过有限元分析，对电涡流传感器探头线圈进行了数值仿真，得出了探头线圈在通以交变电流激励的情况下，线圈的磁场分布特性以及涡流分布的状况，进而总结归纳出：探头线圈外径大，传感器的线性范围大，灵敏度低；探头线圈外径小，线性范围小，但灵敏度低；探头线圈越薄时，灵敏度越高；探头线圈的内径对电涡流传感器的线性范围和灵敏度的影响很小，因此，可以通过有限元仿真得出的规律来优化探头线圈，得到灵敏度和线性度同时达到较好的结构尺寸，这对于电涡流传感器探头线圈结构的设计具有重要的指导意义。

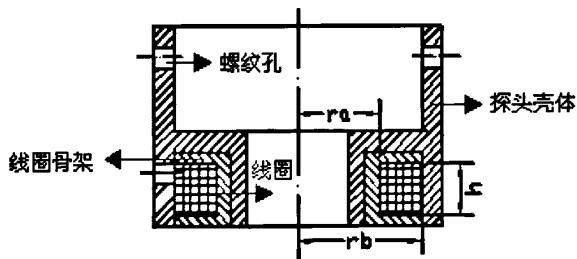


图 4-1 电涡流探头结构图

根据实际需要，设计了如图 4-1 所示的电涡流传感器探头，线圈选用电阻温度系数小的导线(比如康铜导线，主要成分：Ni39~41%，Mn1~2%，Cu 余量；电阻率 $\rho = 0.48 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ (20℃)；电阻温度系数 $\alpha_r = 50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ；最高工作温度 500℃；抗氧化性能好)，可以使传感器的温度稳定性增加。

一般用高强度的漆包线，采用不同线径组合的多股漆包线绕制线圈，也可以能得到较好的温度稳定性。另外，探头线圈还需要浸渍固化。由于绕制线圈的金属导线的松紧程度会影响到传感器线圈的电感和分布电容，绕制线圈时应使其紧密均匀。

探头线圈一般固定在电涡流传感器的前端，可以绕在线圈骨架的槽内，也

可以用粘合剂粘贴在传感器的端部，线圈骨架的材料可以选用聚四氟乙烯、高频陶瓷、聚酞亚胺或玻璃钢等。本探头线圈固定方式选用绕制在一个环形的线圈骨架槽内，线圈骨架材料采用聚四氟乙烯。

4.2.2 电涡流探头的制作方法

一、主要的制作工具：

主要用到的制作工具有：游标卡尺；电烙铁；香松；焊锡；绝缘胶带；纱布；尖嘴钳；扳手；小刀；剪刀；同轴电缆线；高频接头；电吹风；绝缘套管；线圈骨架；探头外壳；高强度胶水；漆包线等，如图 4-2 所示。

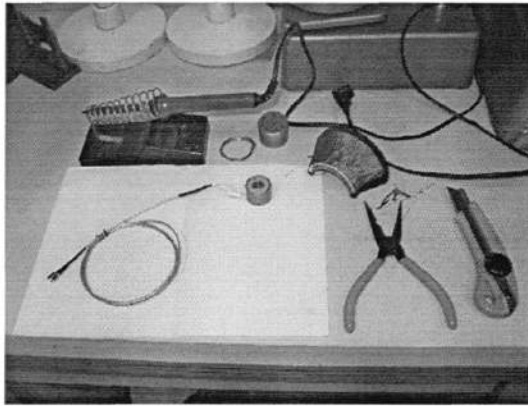


图 4-2 传感器探头主要的制作工具

二、电涡流探头具体的制作方法：

探头线圈的制作主要包括以下几个步骤：

1、用剪刀截取一定长度的漆包线，在保证足够绕制线圈匝数的情况下，要留一定的长度余量，以便和延长电缆线的连接。

2、将漆包线从线圈骨架上面一孔引入，并且固定，均匀用力拉紧漆包线的另一端，一层一层的紧密的绕制线圈，中间可以用小刀调整加紧上下层线圈的间距，待绕到固定的线圈圈数后，用绝缘胶带固紧住线圈的另一端。

3、用高强度胶水将所绕线圈和探头外壳粘牢，在阴凉的地方晾干固化 4~5 分钟。

4、用电烙铁加热线圈的两端，然后迅速用小刀刮去漆包线上的绝缘漆层（也可以用纱布轻轻的磨一下）。

制作完毕的探头线圈如图 4-3 所示。

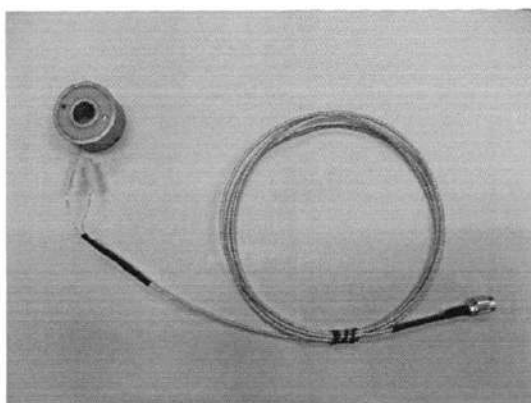


图 4-4 涡流探头和延长电缆

4.3 实验系统方案与结论

为了研究和验证涡流探头线圈的结构参数对电涡流传感器性能的影响，特制作了一组电涡流探头线圈，它们的结构尺寸参数分别如表 4-1 所示：

表 4-1 实验线圈参数

线圈	外径	内径	厚度	线径	股数	匝数
1#	12mm	8mm	2mm	0.3mm	1	89
2#	10mm	8mm	2mm	0.3mm	1	45
3#	12mm	9mm	2mm	0.3mm	1	67
4#	12mm	8mm	1mm	0.3mm	1	45

构建了如图 4-5 所示的试验系统：其中，涡流探头(1)被夹持在一个微动测量台架(2)的夹具上，而被测金属(3)则被平放在另一个微动平台(4)上，涡流探头通过延长电缆和涡流变换器(7)相连接，线性直流电源(6)提供给涡流变换器 $\pm 15V$ 的直流电压，三用表用来测量涡流变换器的输出电压。



图 4-5 实验系统结构实物图

- 1、涡流探头 2、微动测量台架 3、被测金属 4、微动平台 5、纳米微动位移台
6、线性直流电源 7、涡流变换器 8、微动台控制器

一开始，上下调整夹持电涡流探头(1)的微动测量台架(2)，使电涡流探头的下端面和被测金属(3)上表面刚好相接触，这时，再调整放置被测金属的纳米微动位移台控制器(8)，使显示的示数为零。使微动平台以固定间隔的距离向下移动，并且每移动一次时，记录下涡流变换器的输出电压。

由于受电涡流探头线圈参数、后续信号处理电路以及周围环境等因数的影响，电涡流传感器在一定程度上存在着非线性，下面对表 4-1 中的每一个不同几何结构参数的涡流探头线圈分别进行试验，然后取其线性段较好的部分做最小二乘曲线拟合^[32]，得到下面的试验结果。

表 4-2 线圈 1 的实验数据

位移量 (mm)	输出电压值 (V)	位移量 (mm)	输出电压值 (V)
0.5	-0.07	1.6	1.77
0.6	0.12	1.7	1.89
0.7	0.33	1.8	2.01
0.8	0.52	1.9	2.12
0.9	0.70	2.0	2.22
1.0	0.88	2.1	2.32
1.1	1.05	2.2	2.41
1.2	1.21	2.3	2.50
1.3	1.36	2.4	2.59
1.4	1.50	2.5	2.66
1.5	1.64		

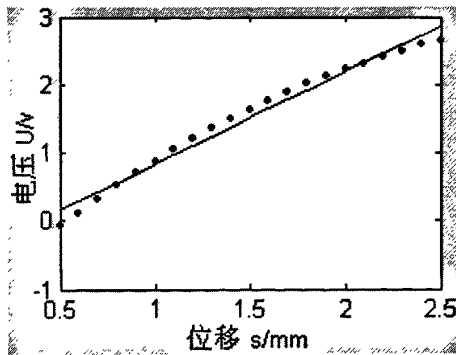


图 4-6 1#线圈探头的位移-电压输出图

根据图 4-6 得到的最小二乘拟合曲线为： $y=1.358x-0.526$

表 4-3 线圈 2 的实验数据

位移量 (mm)	输出电压值 (V)	位移量 (mm)	输出电压值 (V)
0.16	2.50	0.26	3.72
0.18	2.72	0.28	4.01
0.20	2.96	0.30	4.32
0.22	3.21	0.32	4.63
0.24	3.45	0.34	4.95

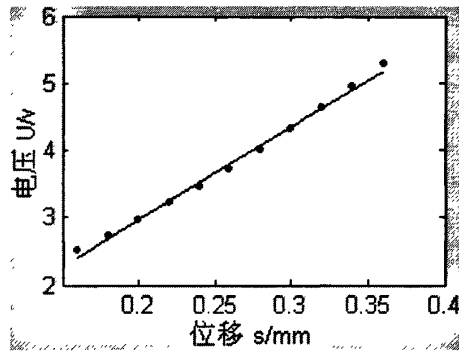


图 4-7 2#线圈探头的位移-电压输出图

根据图 4-7 得到的最小二乘拟合曲线为： $y=13.60x+0.246$

表 4-4 线圈 3 的实验数据

位移量 (mm)	输出电压值 (V)	位移量 (mm)	输出电压值 (V)
0.04	1.43	0.20	3.03
0.06	1.57	0.22	3.30
0.08	1.72	0.24	3.58
0.10	1.91	0.26	3.87
0.12	2.10	0.28	4.19
0.14	2.32	0.30	4.51
0.16	2.54	0.32	4.84
0.18	2.78	0.34	5.18

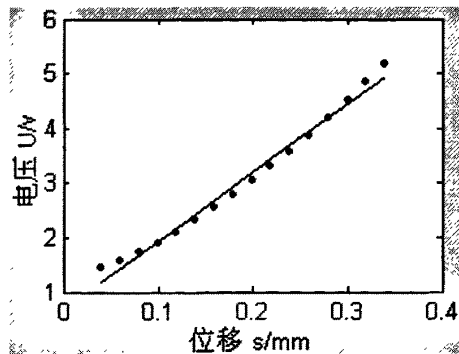


图 4-8 3#线圈探头的位移-电压输出图

根据图 4-8 得到的最小二乘拟合曲线为： $y=12.588x+0.663$

表 4-5 线圈 4 的实验数据

位移量(mm)	输出电压值(V)	位移量(mm)	输出电压值(V)
0.5	-0.24	1.0	2.55
0.6	0.21	1.1	3.30
0.7	0.73	1.2	4.17
0.8	1.27	1.3	5.10
0.9	1.88		

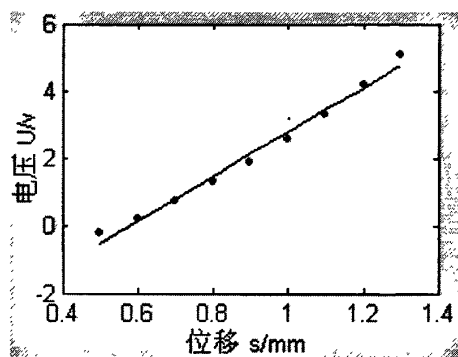


图 4-9 4#线圈探头的位移-电压输出图

根据图 4-9 得到的最小二乘拟合曲线为： $y=6.610x-3.841$

表 4-6 实验结果比较

	外径(mm)	内径(mm)	厚度(mm)	匝数	线性范围(mm)	灵敏度(V/mm)
1#	12	8	2	89	0.40~3.00	1.358
2#	10	8	2	45	0.16~0.36	13.60
3#	12	9	2	67	0.04~0.34	12.588
4#	12	8	1	45	0.50~1.30	6.610

通过上面实验结果的对比表明：外径较大的 1#线圈和 3#线圈的线性范围也较大，但灵敏度不及外径较小的 2#线圈。从 4#线圈和 1#线圈的数据比较可以看出，当涡流探头线圈的厚度较薄时，传感器的灵敏度也较大，这充分验证了第三章中关于不同探头线圈结构参数对电涡流传感器性能影响的仿真实验结果。

4.4 本章小结

本章首先从电涡流探头的功能出发，阐述了电涡流探头的几种常用设计方法。给出了本课题电涡流探头设计和制作的具体步骤，主要包括探头线圈制作，延长电缆和探头外壳的制作。构建了一个电涡流传感器测试实验系统，就不同的探头线圈结构对电涡流传感器的影响做了实验，实验结果分析表明：探头线圈的外径越大，其线性范围也就越大，但传感器的灵敏度会降低；探头线圈厚度越薄，其灵敏度也越高，然而线性范围也会随之而减小。

第五章 电涡流传感器电路的设计与分析

5.1 电涡流传感器测量电路的种类

根据电涡流传感器的工作原理，位移量的变化可以由电涡流传感器探头转换为传感器线圈的等效阻抗 Z 、等效电感 L 和 Q 值等三个参数的变化。实际中，究竟利用哪个参数并将其转换为电压或电流信号输出，由测量电路来决定。一般而言，常用的电涡流传感器测量电路有以下几种：1)、阻抗 Z 变换电路，常用电桥电路；2)、等效电感变换电路，常用谐振电路；3)、 Q 值转换电路，很少使用。

1、电桥测量电路

电桥测量电路如图 5-1 所示^[33]，它是将传感器线圈的阻抗作为电桥的一个桥臂，或用两个相同的电涡流线圈（一个是测量线圈，另一个则为标准线圈）组成差动形式。初始状态下，电桥平衡，线圈 A 和 B 的电感量相等，输出为零。当测量时，线圈阻抗 A 、 B 发生差动变化，电桥失去平衡，输出电压的大小就反映了被测体位移量的变化。

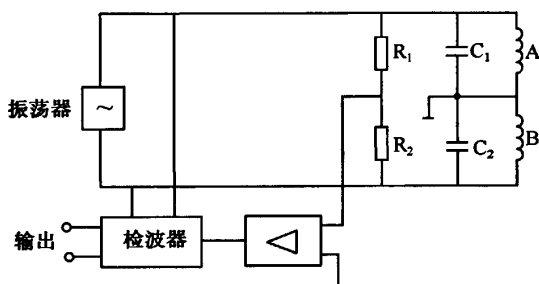


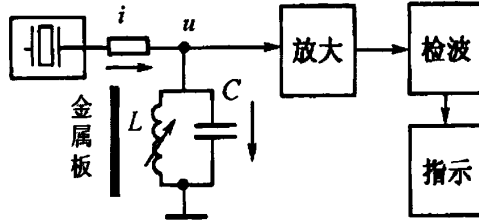
图 5-1 电桥电路测量原理图

2、定频调幅测量电路

所谓调幅式测量电路，简单地说就是将输入量位移的变化通过谐振电路变成传感器中阻抗 Z 的变化进而转换为电压幅值的变化，然后经检波得出与输入位移变化相对应的电压信号而输出的一种测量电路。在实现这一功能中，可采用各种不同的方法，但最常用的是将传感路线圈配以谐振电容，组成一谐振回路，当回路中加一高频信号时，由于传感器中电感的变化，使回路谐振阻抗 Z 和谐振频率 f_0 改变。定频调幅测量电路就是频率不变，而幅值随测量位移的变化而改变的一种电路形式。

定频调幅测量电路原理如图 5-2 所示。传感器线圈 L 和电容 C 并联组成谐振电路，由石英晶体振荡电路提供一个稳定的高频激励电流 i 。当没有被测金

属导体时， LC 并联谐振电路处于谐振状态，此时输出阻抗最大， u 也最大；当金属导体靠近传感器时，线圈的等效电感 L 发生变化，导致回路失谐，而 LC 并联电路在失谐状态下的阻抗下降，从而使电压 u 也下降， L 随检测距离而变化，阻抗跟随变化，导致 u 也变化，经放大、检波调整后可直接显示距离的大小。



5-2 调幅式测量电路原理图

3、调频式测量电路

调频式测量电路原理如图 5-3 所示，电涡流传感器线圈接入 LC 振荡回路，组成振荡器的振荡元件。当传感器与被测导体距离 x 改变时，由于电涡流的影响，线圈的电感量 L 发生改变，导致振荡器频率改变，这样，振荡器就输出一个幅值不变而频率发生变化的高频振荡信号，该频率可由数字频率计直接测量或通过频率电压变换后，再由电压表测得。电涡流传感器调频式测量电路的特点是：电涡流传感器的电感线圈本身就是激励振荡器中的一个振荡元件。所以线圈电感量的变化可以直接使振荡器的振荡频率发生变化，从而实现频率调制。

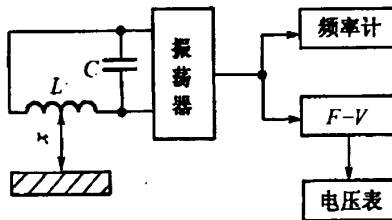


图 5-3 调频式测量电路原理图

电桥式电路结构简单，但是高精度的标准电感线圈比较难以获得，并且其它的影响因数也比较多。从灵敏度上讲，调频法优于调幅法，但从测量的线性范围来讲，调幅法又优于调频法。在稳定度上来看，调幅法又是最好的，因为不论那种测量电路中振荡频率的变化都将引起输出量的改变。如果我们采用调频法，探头作为电容三点式振荡器的一个元件，频率稳定度一般到 10^{-4} 已很好，而采用调幅法时，如果采用石英晶体振荡器，频率稳定度达到 10^{-6} 是很容易的。由于现场的在线测量过程中，对传感器的稳定性的要求是比较高的，所以本电

涡流传感器采用定频调幅式的测量电路。

5.2 定频调幅式测量电路的设计与实现

5.2.1 定频调幅式测量电路的总体结构

定频调幅式测量电路的输出可以被调为直流电压，而对直流电压进行数据采集的速度快、时间短、可以降低功耗，这也是整个电路设计过程中需要考虑的因素之一。

定频调幅式测量电路的具体工作原理是：由频率稳定的石英晶体振荡器提供一个高频信号，激励由传感器探头线圈 L 和并联电容 C 共同组成的并联回路。当回路的固有频率 f_0 等于振荡器的高频信号频率时，输出的电压 u 最大，并设为 u_m 。在进行测量时，被测金属导体相对于传感器探头线圈移动，传感器探头线圈的等效阻抗发生变化，使回路失谐，输出电压随之也发生变化。

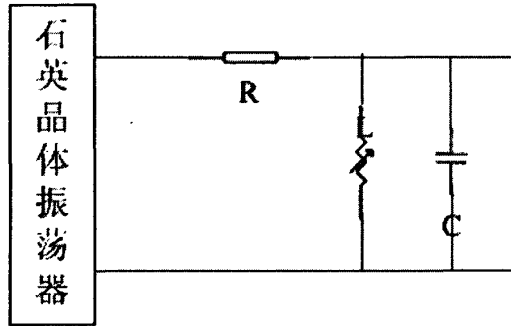


图 5-4 定频调幅式测量电路原理图

传感器探头线圈 L 和并联电容 C 组成的并联回路的谐振频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-1)$$

电阻 R 是用来降低传感器对振荡工作状态的影响，它的数值大小与整个测量电路的灵敏度有关，因而其阻值的选择应综合考虑。

当传感器探头远离被测金属导体时，调整 LC 回路使其谐振频率等于石英晶体振荡器的振荡频率，当传感器探头接近被测金属导体时，线圈的等效电感发生变化，使回路失谐而偏离励磁频率，回路的谐振峰值将向左右移动。若被测金属导体为非磁性材料，传感器探头线圈的等效电感减小，回路的谐振频率提高，谐振峰将向右移动，回路所呈现的阻抗减小为 Z'_1 或 Z'_2 ，输出的电压由 u 降为 u_1 或 u_2 ；当被测金属导体为磁性材料时，由于磁路的等效磁导率增大使传感器的等效电感增大，回路的谐振频率降低，谐振峰将向左移动，探头线圈的阻抗和传感器的输出电压分别减小为 Z_1 或 Z_2 和 u_1 或 u_2 ，因此可以由输出电压的变

化来表示传感器与被测金属导体间距离的变化^[34]。

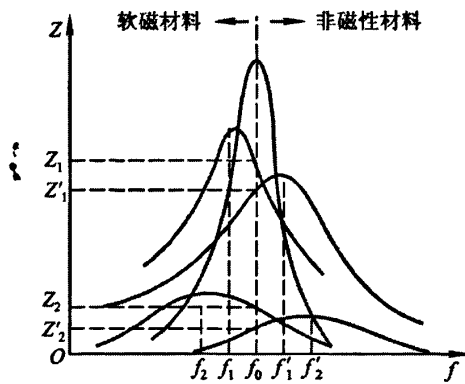


图 5-5 谐振曲线

从由探头电感线圈 L 和并联电容 C 组成的谐振电路出来的高频谐振信号的幅值比较小，有必要对其进行放大处理，放大后的信号经过检波、滤波等电路的调理，就可由转换电路输出给数据采集系统。传感器测量电路主要由振荡源电路、低通滤波电路、功率放大电路、整流滤波电路信号调理电路几个基本部分组成，整个测量电路系统框架图如图 5-6 所示。

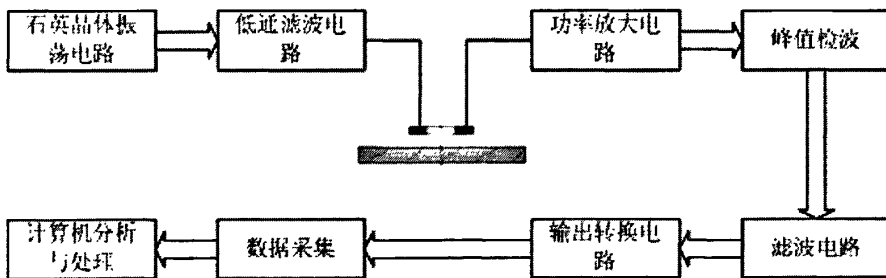


图 5-6 测量电路系统图

5.2.2 振荡源的设计

在电涡流检测系统中，信号频率及其稳定性对检测效果影响很大。通常，振荡频率变化 1%，则输出要变化 10%，由于对高频振荡信号的幅值和频率的稳定性要求比较高，而石英晶振可以达到很高的精度，故本设计首要考虑采用石英晶振作为振荡源。

晶振是为电路提供频率基准的元器件，通常分成有源晶振和无源晶振两大类，无源晶振需要芯片内部有振荡器，并且晶振的信号电压根据起振电路而定，允许不同的电压，但无源晶振通常信号质量和精度较差，需要精确匹配外围电路（电感、电容、电阻等），如需更换晶振时要同时更换外围的电路。有

源晶振不需要芯片的内部振荡器，可以提供高精度的频率基准，信号质量也较无源晶振要好。

有源晶振的主要组成部分是石英晶体，石英晶片之所以能当为振荡器使用，是基于它的压电效应：在晶片的两个极上加一电场，会使晶体产生机械变形；在石英晶片上加上交变电压，晶体就会产生机械振动，同时机械变形振动又会产生交变电场，虽然这种交变电场的电压极其微弱，但其振动频率是十分稳定的。当外加交变电压的频率与晶片的固有频率（由晶片的尺寸和形状决定）相等时，机械振动的幅度将急剧增加，这种现象称为“压电谐振”。压电谐振状态的建立和维持都必须借助于振荡器电路才能实现，有源晶振有 4 只引脚，是一个完整的振荡器，其中除了石英晶体外，还有晶体管和阻容元件，因此体积较大^[35]。

有源晶振型号众多，而且每一种型号的引脚定义都有所不同，接法也不同，方形有源晶振引脚分布：正方的使用 DIP-8 封装，打点的是 1 脚。 1-NC； 4-GND； 5-Output； 8-VCC。

值得提出的是：振荡器的 1 脚为控制脚，常规是 NC 悬空，或者是通过一个电阻接到 VCC。实际上控制 1 脚还可以作为停止振荡器工作的功能，当控制脚输入高电平“1”或者悬空的时候，振荡器一上电就一直工作；当控制脚接低电平“0”时，振荡器输入为高阻态，没有波形输出。这样的好处是可以使电路有待机功能，减少功耗。

有源晶体振荡器选用北京晶宇兴科技有限公司生产的石英晶体振荡器^[36]（型号 X008NBGTG2.00MHz）（如图 5-7 所示）。有个点标记的为 1 脚，按逆时针（管脚向下）分别为 8、5、4。有源晶振通常的用法：1 脚悬空，8 脚接电压，5 脚接输出，4 脚接地。

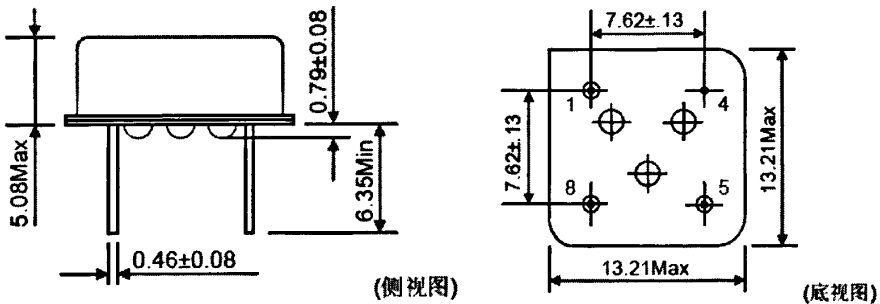


图 5-7 石英晶体振荡器

有源晶振不需要处理器的内部振荡器，信号质量好，比较稳定，而且连接方式相对简单（有源晶振的 VCC 端不要直接接 VCC，主要是要做好电源滤波，典型的接法是使用一个电容(104)和电感（几毫亨，也可不用）构成的 PI 型滤波网络如图 5-8 所示：

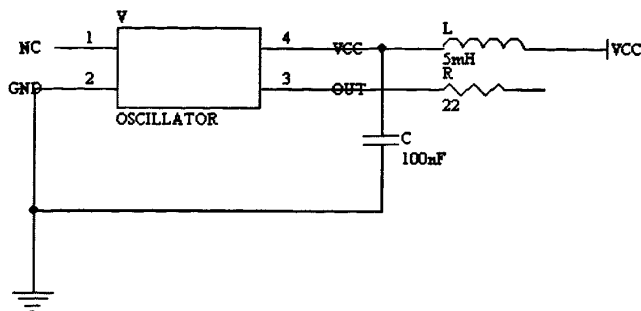


图 5-8 石英晶体振荡电路

输出端用一个小阻值的电阻（ 22Ω ）起过滤信号的作用，它可以防止时钟的边缘过陡，它的作用是：

一、减少谐波，有源晶体输出的是方波，这将引起谐波干扰，尤其是阻抗严重不匹配的情况下，加上电阻后，该电阻将与输入电容构成 RC 积分平滑电路，将方波转换为近似正弦波，虽然信号的完整性受到一定影响，但由于该信号还要经过后级放大、整形后才作为传感器的激励信号，因此，性能并不受影响，该电阻的大小需要根据输入端的阻抗、输入等效电容，有源晶体的输出阻抗等因素选择。

二、阻抗匹配，减小回波干扰及导致的信号过冲。我们知道，只要阻抗不匹配，都会产生信号反射，即回波，有源晶体的输出阻抗通常都很低，一般在几百欧以下，而信号源的输入端在芯片内部结构上通常是运放的输入端，由芯片的内部电路与外部的无源石英晶体构成谐振电路（使用有源晶体后就不需要这个晶体了），这个运放的输出阻抗都在兆欧以上。

有源晶振不需要复杂的配置电路。相对于无源晶体，有源晶振也有其自身的不足之处，它的信号电平是固定的，需要根据实际需要选择好合适输出电平，灵活性较差，而且价格也相对高一些。

5.2.3 方波变换（无源三阶巴特沃斯低通滤波电路）

上面所述的有源晶振输出是固定频率的方波，按照傅立叶分析的原理，任何类型的周期信号都可以用如下形式三角函数 $\{\sin(2\pi n f_0 t), \cos(2\pi n f_0 t)\}$ 的组合来表示：

$$x(t) = a_0/2 + a_1 * \sin(2\pi f_0 t) + b_1 \cos(2\pi f_0 t) + a_2 * \sin(4\pi f_0 t) + b_2 \cos(4\pi f_0 t) + \dots \quad (5-2)$$

也就是说，我们可以用一组正弦波和余弦波来合成任意形状的周期信号，对于典型的周期为 T，振幅为 A 的方波，其时域表达式为：

$$x(t) = \begin{cases} -A(-T/2 < t < 0) \\ A(0 < t < T/2) \end{cases} \quad (5-3)$$

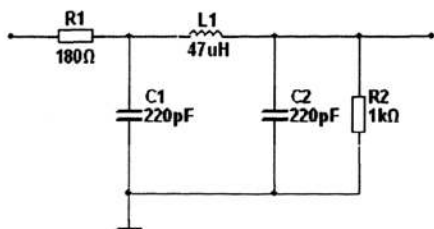
根据傅立叶变换，其三角函数展开式为：

$$\begin{aligned} X(t) &= \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right) \\ &= \frac{4A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega_0 t \\ &= \frac{4A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(n\omega_0 t - \frac{\pi}{2}) \quad n=1,3,5,7,9,\dots \end{aligned} \quad (5-4)$$

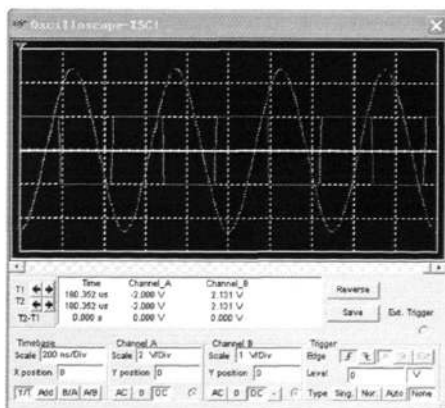
由此可见，周期方波是由一系列频率成分成谐波关系，幅值成一定比例，相位角为 0 的正弦波叠加合成的，若从中抽出高次谐波，即可得到所需正弦波。

由于本次电路设计需要滤掉方波中频率成分高于 2M 的信号，因此可以选用低通滤波电路将方波变成正弦波。滤波电路有多种形式，大致分为有源滤波和无源滤波，二者最大的差别在于滤波电路中是否使用了有源元器件—运算放大器。对于截止频率为 MHz 数量级的滤波电路，则有源滤波器对运算放大器等的高频特性要求非常严格。

通常情况下考虑以下 3 种滤波器：巴特沃斯滤波器（最大的通带平坦度）、切比雪夫滤波器（过渡带最陡峭）、贝塞尔滤波器（时延最平坦）。其中巴特沃斯滤波器在线性相位、衰减斜率和加载特性三方面在各种滤波器中表现是最均衡的，且这种滤波器对构成滤波器的元件 Q 值要求较低，易于设计且满足设计的要求，因此在本电路中，将采用结构相对简单的无源巴特沃斯低通滤波电路，如图 5-9(a) 所示。



(a)



(b)

图 5-9 巴特沃斯低通滤波电路及波形图

5.2.4 并联谐振回路

传感器探头线圈 L_2 和可变电容 C_4 组成并联谐振回路(如图 5-10(a)), 相当于一个分压电路。有源晶振经低通滤波电路所产生的高频正弦信号加到 L_2C_4 并联回路和 R_3 串联电路的两端, 在 L_2C_4 的两端输出。当被测金属导体与传感器探头线圈发生相对位移时, 传感器探头线圈对于恒定频率的阻抗就会发生改变, 从而使 L_2C_4 并联回路的等效阻抗 Z 发生改变, 进而引起输出电压 U 的变化, 这时载波的频率仍保持不变, 但输出波形的幅值已经发生了变化。回路中耦合电阻 R_3 的大小会影响到检测电路的灵敏度, R_3 增大, 灵敏度会降低, R_3 减小, 灵敏度会变高, 但是 R_3 如果太小的话, 灵敏度也会减小。耦合电阻的选择应该考虑到有源晶振的输出电阻和传感器探头线圈构成的谐振回路的品质因数, 在本电路中, 通过仿真可以得出当 $R_3=250\sim 300\ \Omega$ 时, 电路的灵敏度最高。

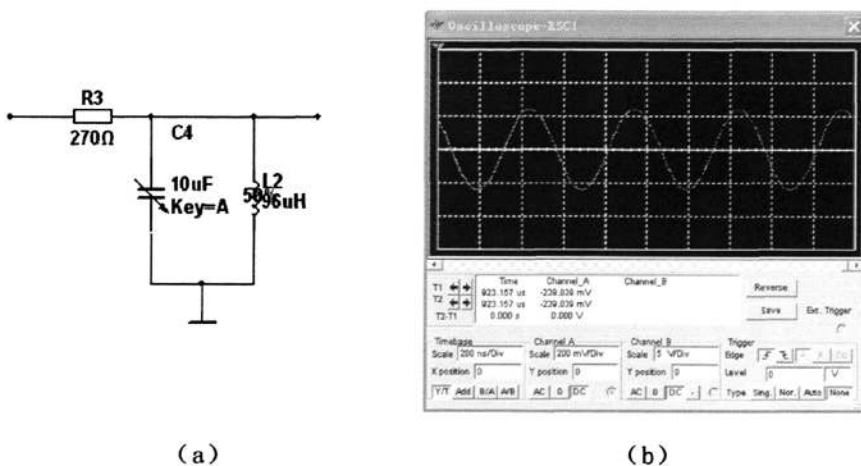
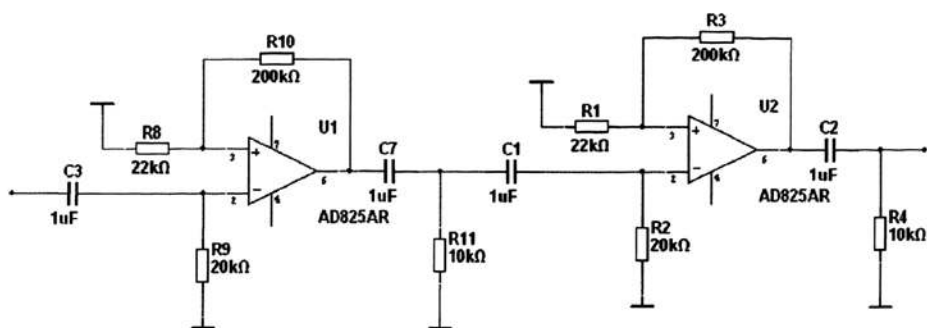


图 5-10 并联谐振回路及输出波形图

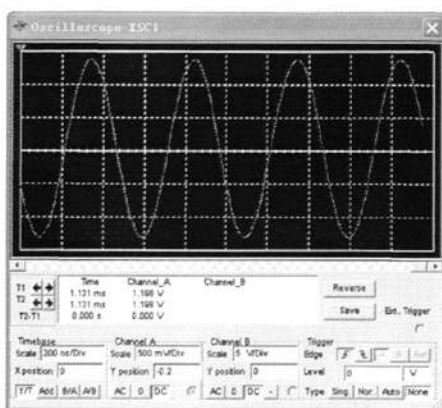
5.2.5 交流放大电路

有源晶振经方波变换后, 输出的 2M 正弦波信号施加在传感器检测线圈上, 相对而言, 线圈产生的交流电磁场和被测金属导体上所产生的涡流都很弱, 从线圈 L_2 和可变电容 C_1 组成的谐振电路出来的信号比较小, 是毫伏级的微弱电压信号, 为了实现后续电路环节的整流、检波滤波等, 对输入的前端进行电压信号的放大显得尤为重要。图 5.11(a) 中采用两级放大, 这样可以防止放大信号的失真和振荡, 在放大电路和整流电路之间加一个隔直电容 C_1 , 可以保证整流的信号全部来自测量信号。考虑到在稳定性、高速和直流性方面都比较平衡, 本电路中选择 AD 公司的 AD825 运算放大器。

从交流放大电路输出的是信号幅值可达 1.2V, 频率为 2M 的正弦波, 输出的波形如图 5.11(b) 所示。



(a)



(b)

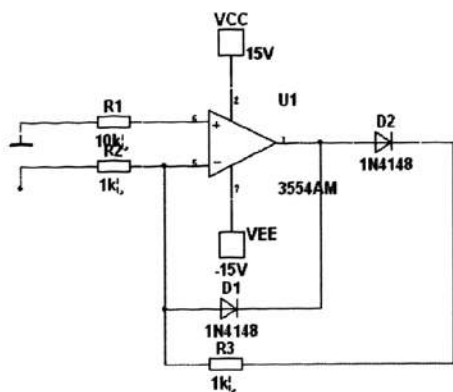
图 5-11 功率放大电路及波形图

5.2.6 精密半波整流电路

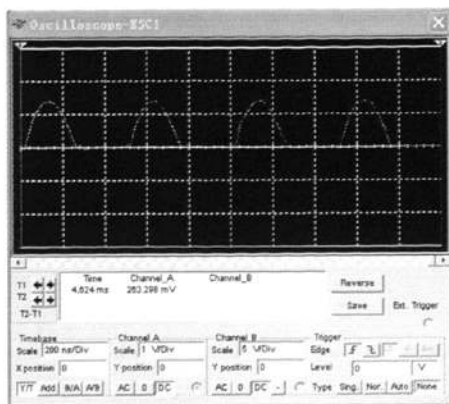
图 5.12(a) 为由运算放大器 3554AM 组成的精密有源半波整流电路，检波二极管 D_1 接在反馈支路中，检波二极管 D_2 接在运算放大器 U_1 的输出端和电路输出端之间。当输入电压 $u_i > 0$ 时，则 D_1 导通， D_2 截止，输出电压信号 $u_o = 0$ 。

当输入电压 $u_i < 0$ 时，则 D_1 截止， D_2 导通，输出电压信号为 $u_o = -\frac{R_3}{R_2}u_i$ 。

本电路能克服诸如普通小信号二极管检波电路失真大、传输效率低及输入的检波信号需大于起始电压（约为 0.3V）的固有缺点，使检波效率大大的得到了提高，图 5.12(b) 所示为检波后未经滤波的输出波形，仿真实验证明它有很好的半波输出波形。



(a)

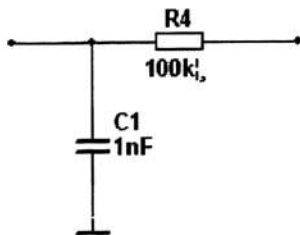


(b)

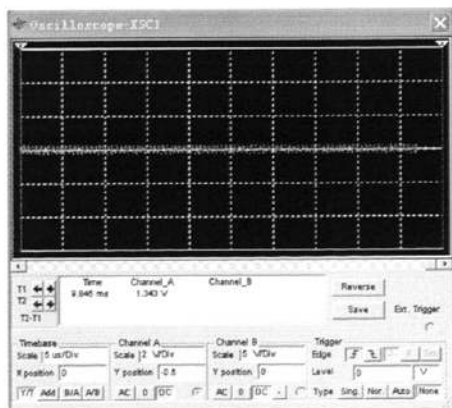
图 5-12 精密半波整流电路及波形图

5.2.7 滤波电路

信号经精密半波整流电路出来以后，得到的输出信号虽然为单一方向，但任然存在很大的波动，还有大量的谐波成分，影响对后续电路的处理，因此，信号经整流以后还要采用滤波电路将脉动的直流电压变为平滑的直流电压。在这里，采用最简单的 RC 阻容滤波电路（如图 5.13(a)所示），通过滤波电容 C_1 的充放电作用，是输出电压接近平滑，提高输出电压的平均值。



(a)



(b)

图 5-13 滤波电路及波形图

电涡流传感器探头和被测金属导体表面之间位移的变化引起线圈阻抗的变化，经过信号的调理与变换，可以转换为电压幅值的变化，输出转换给数据采集卡，最后可由计算机进行相应的数据处理。

5.3 本章小结

本章首先介绍了电涡流传感器测量电路的种类及其各自的优缺点，确定了一种定频调幅式测量电路的总体框架，其主要由振荡源电路、波形变换电路、谐振电路、交流放大电路、整流滤波电路组成，分别对各个部分环节的电路做了设计和仿真分析。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

本文围绕环形结构电涡流传感器的设计这一问题，介绍了电涡流传感器测距的基本工作原理和相关的理论知识，结合电磁和有限元分析的方法，运用COMSOL Multiphysics 软件对电涡流传感器的做了电磁特性方面的分析，并探讨了各种不同因数对电涡流传感器性能的影响，对一种定频调幅式电涡流传感器信号处理电路做了详细的分析。最后设计制作了一种环形结构的电涡流传感器探头和延长电缆，构建了电涡流传感器测距的实验系统，展开了相关的实验研究和分析。本文主要分析和研究了以下几个方面的问题：

- 1、在掌握电涡流传感器测距基本原理和电磁场基本理论的基础上，通过构建二维电涡流传感器的有限元模型，对电涡流传感器的电磁特性和被测试材料对其性能的影响等因素做了仿真分析。

- 2、设计制作了一种环形结构电涡流传感器探头，并且绕制了各种不同几何参数结构的线圈，以探究涡流探头线圈结构形状对电涡流传感器的影响。

- 3、构建了一个电涡流位移测量系统，并对制作的电涡流探头进行了相关的实验研究，就实验结果做了分析。

- 4、研究了电涡流传感器电信号处理的方法和原理。对定频调幅式测量电路中的振荡源、检波、滤波各个环节做了相关的介绍和仿真研究。

6.2 未来展望

结合环形结构电涡流传感器的仿真研究和设计，对于需要进一步研究和解决的问题，可以归纳如下：

- 1、后续处理电路需要得到进一步的完善和改进。本文简要讲述了一种定频调幅式电涡流信号的处理方法，对于涡流变换电路的具体实验和调试实验还有待完成。

- 2、温度是影响电涡流传感器性能的一个重要的因数，不仅体现在探头结构方面，还存在于涡流信号处理的电路中，把温度影响的程度降到最低限度也是一个值得探讨的问题。

- 3、传感器的输入和输出存在着一定程度上的非线性问题，这对于测距是很不利的，怎么在量程范围内取得较大的线性段是需要考虑解决的一个问题。

电涡流传感器的设计是一个复杂的过程，本文进行了理论分析、软件仿真和实验研究，随着工程应用的进一步的需要，必然会对其性能提出更高的要求，这需要我们不断的研究和改进。

参考文献

- [1] 游凤荷. 涡流检测技术的某些新进展[J]. 无损检测, 2001年2月第二期
- [2] 庄汉忠, 顾键. 电涡流位移传感器位移测量应用[J].
- [3] 徐可北, 周俊华. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004年8月
- [4] 任吉林, 吴礼平, 李林. 涡流检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985
- [5] 任吉林. 涡流检测技术近20年的进展[J]. 无损检测, 1998年5月第20卷第5期
- [6] 严舒. 远场涡流无损检测技术的发展与应用[J]. 石油科技论坛, 2008年第3期
- [7] 林俊明. 电磁(涡流)检测技术在中国[J]. 第17届世界无损检测会议专题报道, 2008年8月
- [8] 帅家印. 涡流检测技术的创新全新的涡流检测仪器[J]. 航空制造技术, 2004年第九期
- [9] 侯维娜, 屈双惠. 涡流检测的现状及其新进展[J]. 重庆工学院学报, 2007年8月第二十一卷第八期
- [10] 王雅萍, 朱目成. 磁光/涡流成像无损检测技术的研究[J]. 光电测量与系统, 2005年7月第35卷第7期
- [11] 王媛媛. 耐高压电涡流位移传感器的研究[硕士学位论文]. 2006
- [12] 汪家铭. 非接触式位移传感器应用简介[J]. 中国设备管理, 1992
- [13] 俞志根. 传感器与检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [14] 杜方芳, 祝长生. 电涡流传感器前置器的参数对测量系统特性的影响[J]. 传感检测技术, 2004年第九期
- [15] 李楚, 郑宏才. 传感技术大全-位移、长度、角度及速度传感器[M]. 1986年12月
- [16] 方秋华, 田新启, 茅佩. 涡流传感器温漂补偿[J]. 东南大学学报, 1995年第五期
- [17] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社 1998
- [18] 中仿科技. 功能强大的多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics(原 FEMLAB) [产品说明书]
- [19] 张溜晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996年
- [20] 荣先成. 有限元法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007
- [21] 任吉林, 刁海波, 唐继红, 俞佳, 宋凯. 涡流传感器提离效应的 ANSYS 模拟[J]. 传感技术学报, 第21卷第6期, 2008年6月
- [22] COMSOL Multiphysics Help. AC/DC Module User's Guide
- [23] 夸克工作室编译. 有限元分析教学范本 FEMLAB 与 Mathematica[M]. 北

京：清华大学出版社

- [24] Osamu Nagano, Yuichiro Yamazaki, Motosuke Miyoshi, Hisashi Kaneko, Tetsuo Matsuda. EDDY CURRENT LOSS MEASURING SENSOR, THICKNESS MEASURING SYSTEM, THICKNESS MEASURING METHOD, AND RECORDED MEDIUM[United States PATENT]. Mar. 27, 2001
- [25] COMSOL Multiphysics Help . AC/DC 模块模型库算例
- [26] 刘少强, 张靖. 传感器设计与应用实例[M]. 中国电力出版社, 2008 年
- [27] Roland Mandl, Axel Seikowsky, Andreas Spang. EDDY CURRENT METHOD OF ACQUIRING THE SURFACE LAYER PROPERTIES OF A METALLIC TARGET[United States PATENT]. Aug. 18, 1994
- [28] 将齐密, 张新防, 刘士光, 周济. 电涡流检测系统中的电磁场仿真[J]. 计算机仿, 2000 年 9 月
- [29] 刘迎春. 传感器原理设计与应用(第二版)[M]. 1995 年 4 月
- [30] Harold A. Sabbagh, A Model of Eddy-Current Probes with Ferrite Cores[J]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, May, 1987
- [31] 张科红, 孙坚, 徐红伟, 涡流检测探头的设计应用研究[J]. 科技创新导报, 2008 年
- [32] 周开利, 邓春晖. MATLAB 基础及其应用教程[J]. 北京: 北京大学出版社
- [33] 周乐挺. 传感器与检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005 年 12 月
- [34] 宋文绪, 扬帆. 自动检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004 年 11 月
- [35] John R. Vig 著, 王骥, 胡文科译. 石英晶体谐振器和振荡器[M]. 宁波大学压电器件技术实验室
- [36] 北京晶宇科技. X008-NBGTD-2MHz 型型号石英晶体振荡器规格说明书. 2008 年 11 月

攻读硕士学位期间发表的论文

- 1、孙凯，卢荣胜，张勇. 环形反射式电涡流传感器的设计. 中国仪器仪表, 2010年第4期