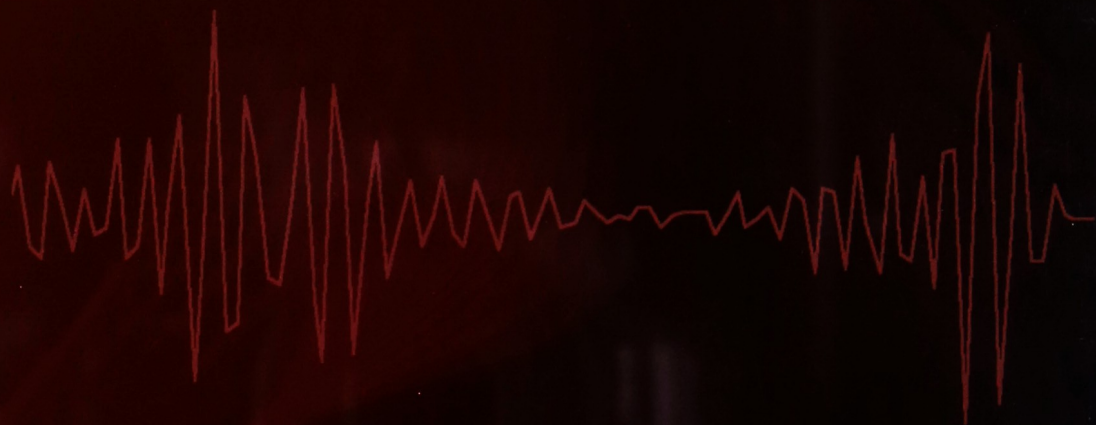


CIZHI SHENSUO DAOBO WUSUN JIANCE
LILUN YU FANGFA

磁致伸缩导波无损检测 理论与方法

王悦民 杨 波 著



科学出版社

磁致伸缩导波无损检测理论与方法

王悦民 杨 波 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

内 容 简 介

本书系统地介绍磁致伸缩导波无损检测技术，主要内容包括绪论、磁致伸缩导波检测原理、管道中超声导波传播理论、磁致伸缩纵向导波激发和接收模型、导波频率选择与管材特征关系、管道中导波传播方向的控制方法、超声导波传播形态可视化模拟、导波信号处理及缺陷定位方法、管道导波模式控制和模式识别方法，以及磁致伸缩导波检测应用。

本书汇集了著者十多年来在磁致伸缩导波无损检测技术方面的研究工作，对科研院所从事无损检测工作的相关人员具有一定的指导作用，可作为无损检测研究人员、工程应用技术人员及管理工作者和相关兴趣爱好者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

磁致伸缩导波无损检测理论与方法/王悦民，杨波著. —北京：科学出版社，2015.6

ISBN 978-7-03-044798-2

I. 磁… II. ①王… ②杨… III. ①磁致伸缩-超声检测-无损检测 IV. ①O482.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 124404 号

责任编辑：黄彩霞 纪四稳/责任校对：胡小洁

责任印制：高 嵘/封面设计：苏 波

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

湖北卓冠印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张：12

字数：280 000

定价：56.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

无损检测技术与其他工程应用技术相同,除了有其自身的发展特点,还存在一个共同的规律,即优点与不足并存。迄今为止,几乎每种无损检测方法都或多或少存在技术上的不足或应用范围的局限性。但是,正因如此,无损检测技术自身的不断完善和向前发展才是无损检测技术创新的动力源泉。

目前,超声导波无损检测技术已成为国内外无损检测界的研究热点之一,它不仅可以克服常规无损检测方法的一些局限性,还具有以下优点:可以实现非接触、大范围、长距离的快速检测;可以克服构件表面有油污、弯曲或有包覆层等限制性条件;可以对难以接触或不可达的构件进行检测;可以实现在线监测,对构件的健康状况进行评估或寿命预测等;可以对构件各种缺陷进行判断和定位,缩小检测、维修范围,避免不必要的拆卸和更换;等等。随着国内外研究工作者对超声导波无损检测技术的不断深入研究和应用改进,其必将具有更广阔的发展和应用前景。

十多年来,著者带领研究团队一直从事超声导波无损检测技术方面的教学和科研工作,深入研究了磁致伸缩起源机理、磁致伸缩超声导波无损检测基本理论以及超声导波传播理论等,掌握了磁致伸缩导波无损检测若干关键技术,研制了多种磁致伸缩导波传感器和三代磁致伸缩导波无损检测仪,并开展了大量的实验及应用研究。在此基础上,将多年的研究工作成果归纳总结编写成书,书中的主要内容来源于著者的博士学位论文和博士后研究报告,以及著者指导的博士和硕士研究生的学位论文,这些学生是沈立华、申传俊、曾帆、李城华、周方俊、朱龙翔、宗侣、陈乐和耿海泉等,在此对他们的辛勤工作表示感谢!

在本书的编写过程中,得到了海军工程大学孙丰瑞教授、华中科技大学康宜华教授的热情帮助和指导,也得到了教研室全体同志的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

本书在编写过程中参阅了很多著作和文献资料,特向有关作者表示感谢!

计算机技术、现代信息处理技术以及交叉学科的综合发展,为超声导波无损检测技术的发展注入了新的活力,使其不断向前发展。由于本书涉及知识面广,书中难免会存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2014年3月于武汉

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 常规无损检测技术	1
1.2 超声导波无损检测新技术	2
1.2.1 基于压电效应的超声导波	3
1.2.2 基于磁致伸缩效应的超声导波	5
1.2.3 空气耦合超声导波	5
1.2.4 电磁超声导波	6
1.2.5 激光超声导波	7
1.2.6 混合超声导波	8
1.3 磁致伸缩导波无损检测技术的发展	8
第 2 章 磁致伸缩导波检测原理	10
2.1 磁致伸缩效应	10
2.2 磁致伸缩产生机理	10
2.3 基于磁致伸缩效应的导波检测原理	18
第 3 章 管道中超声导波传播理论	21
3.1 超声导波	21
3.1.1 群速度与相速度	22
3.1.2 导波的频散现象	23
3.2 导波在管道中的传播	23
3.2.1 导波运动方程	23
3.2.2 频散方程	31
3.3 管道中导波的模态	35
3.3.1 纵波	35
3.3.2 扭转波	37
3.3.3 弯曲波	38
3.4 频散曲线的有限元求解方法	39
3.4.1 管道中导波传播的有限元模型	40
3.4.2 模态特征及频散曲线	41
第 4 章 磁致伸缩纵向导波激发和接收模型	44
4.1 管道纵向导波激发模型	44
4.1.1 磁致伸缩作用力	45
4.1.2 传感器结构	48

4.1.3	静态偏置磁场	49
4.1.4	交变磁场	49
4.2	管道纵向导波接收模型	51
4.2.1	基本耦合方程	51
4.2.2	弹性导波位移	52
4.2.3	接收电压	55
第5章	导波频率选择与管材特征关系	57
5.1	管道中纵向导波频散特性	57
5.2	管材特征与纵向导波频率关系	59
第6章	管道中导波传播方向控制方法	63
6.1	单通道激励时导波传播方向控制	64
6.1.1	改变激励信号的初始相位	66
6.1.2	单通道激励双磁致伸缩传感器	67
6.2	双通道激励时导波传播方向控制	68
6.2.1	双通道激励控制理论	69
6.2.2	影响因素	71
6.3	导波传播方向控制的应用	83
第7章	超声导波传播形态可视化模拟	87
7.1	直管中的纵波	87
7.1.1	正常直管	87
7.1.2	缺陷直管	89
7.2	直管中的扭转波	91
7.2.1	正常直管	91
7.2.2	缺陷直管	92
7.3	直管中的弯曲波	93
7.3.1	正常直管	93
7.3.2	缺陷直管	94
7.4	弯管中的纵波	95
7.4.1	正常弯管	95
7.4.2	缺陷弯管	97
7.5	弯管中的扭转波	97
7.5.1	正常弯管	97
7.5.2	缺陷弯管	98
7.6	弯管中的弯曲波	99
7.6.1	正常弯管	99
7.6.2	缺陷弯管	101
第8章	导波信号处理及缺陷定位方法	102
8.1	导波反射回波信号的特征	102

8.2 Hilbert 变换	103
8.3 数字滤波	104
8.3.1 窗函数滤波	104
8.3.2 小波变换方法	105
8.4 高阶谱分析	106
8.5 匹配追踪	110
8.6 缺陷定位	113
8.6.1 轴向定位	113
8.6.2 周向定位	113
第 9 章 管道导波模式控制和模式识别方法	116
9.1 导波模式控制	116
9.2 导波模式识别	120
第 10 章 磁致伸缩导波检测应用	128
10.1 充水管道无损检测	128
10.1.1 水圆柱体中导波传播特性	128
10.1.2 自由管道中导波传播特性	132
10.1.3 水对管道中导波传播影响	134
10.1.4 应用实例	138
10.2 高压气管道无损检测	141
10.2.1 气体中声波传播速度	142
10.2.2 充气管道中导波频散特性	143
10.2.3 应用实例	147
10.3 螺旋圆杆结构无损检测	151
10.3.1 频散方程	151
10.3.2 频散曲线计算	154
10.3.3 应用实例	156
10.4 弯管无损检测	160
10.4.1 弯管中导波频散曲线	160
10.4.2 U 形管检测	168
10.4.3 多弯头弯管检测	173
参考文献	177

第1章 绪 论

1.1 常规无损检测技术

无损检测技术 (Non-Destructive Testing Technology, NDT) 又称非破坏检查技术, 是第二次世界大战后迅速发展起来的一门新兴的工程科学技术。无损检测技术最突出的特点是“无损检查”, 即在不损伤被检物使用性能、用途及形态的条件下实现检查。该技术可以用来发现材料或工件内部和表面所存在的缺陷, 并能测定材料或工件的内部组成、结构、物理性能和状态等, 因此, 在工业生产、制造、科学研究等领域得到重视和迅速发展。

在石油、化工、舰船、钢铁和机械等行业中, 一些结构比较特殊的部件, 如绳、杆、管、板等, 是无损检测中经常遇到的检测对象, 上述部件常工作在比较特殊或恶劣的环境中, 经过一定时间的运行后, 可能出现锈蚀、腐蚀、裂纹、破损等缺陷, 如果不能及时地将缺陷检测出来, 可能导致严重的后果, 带来巨大的经济损失和人员伤亡。在军事装备中, 为确保装备安全、可靠、高效的运行, 以及正常的使用, 对裂痕、裂缝、破损、腐蚀和锈蚀等缺陷进行定期检测是非常必要的。目前, 最常用的无损检测方法有五种: 磁粉、液体渗透、射线、超声波和涡流, 其各自的特点如下。

(1) 磁粉检测 (Magnetic Particle Testing, MT)。磁粉检测是基于构件缺陷处漏磁场与磁粉的相互作用而显示铁磁性材料表面和近表面缺陷的无损检测方法。

主要特点: 显示直观, 检测灵敏度高, 可检测开度小至微米级的裂纹。

局限性: 只能检测铁磁材料表面和近表面缺陷; 不适于非铁磁性材料检测; 另外, 需清洁被检测构件表面, 效率较低。

(2) 液体渗透检测 (Liquid Penetration Testing, PT)。液体渗透检测是基于毛细管现象、揭示非多孔性固体材料表面开口缺陷的无损检测方法, 主要有荧光渗透检测和着色检测, 适用于铁磁性和非铁磁性材料表面裂纹、折叠、疏松等缺陷的检测。

主要特点: 显示直观, 操作简单, 灵敏度很高, 可检出开度小至微米级的裂纹。

局限性: 只能检出表面开口的缺陷, 对表面粗糙和孔隙较多的构件难以识别, 需清洁构件表面。

(3) 射线检测 (Radiographic Testing, RT)。射线检测是基于被检测件对透入射线的不同吸收来检测零部件内部缺陷的无损检测方法。

主要特点: 适用于体积型缺陷, 如气孔、疏松、夹杂等。

局限性: 对裂纹类缺陷的检测有方向性要求, 被检裂纹走向与射线照射方向夹角不宜超过 10° , 否则很难检出裂纹; 对三维结构二维成像易造成缺陷重叠, 无法分辨; 射线的辐射生物效应可对人体造成损伤, 必须采取严格的防护措施。

(4) 超声波检测 (Ultrasonic Testing, UT)。超声波检测是利用超声波 (常用频率为

0.5~25MHz)在介质(工件)中传播时产生衰减,遇到界面产生反射的性质来检测缺陷的无损检测方法。

主要显示方法有三种:显示缺陷深度和缺陷反射信号幅度的A型显示(A扫描);显示缺陷深度及其在截面分布状态的B型显示(B扫描);显示缺陷在平面视图上分布的C型显示(C扫描)。

主要优点:适用于多种材料与工件的检测,检测钢件厚度可达几米,对裂纹类缺陷比较敏感,能对缺陷进行定位。

局限性:常用的脉冲反射仪存在盲区,表面与近表面缺陷难以检测,对检测人员要求高;需要清洁表面和耦合剂;接触式点到点检测,效率低。

(5) 涡流检测(Eddy Current Testing, ET)。涡流检测是以电磁感应原理为基础的一种无损检测方法。当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时,由于激励线圈磁场的作用,试件中会产生涡流,而涡流的大小、相位及流动形式受试件导电性能的影响;同时,产生的涡流也会形成一个磁场,这个磁场反过来又会使检测线圈的阻抗发生变化,因此通过测定检测线圈阻抗的变化,就可以判断出被测试件的性能及有无缺陷等。

主要特点:对工件表面或近表面缺陷有较高的检出灵敏度;不需要耦合剂,可对管、棒、线、内孔等实现高速高效探伤;适用于高温条件下的检测,能对矩形、三角形、带形等异形薄壁管等进行探伤;能测量金属覆盖层或金属材料上非金属涂层的厚度。

局限性:只能对金属材料进行检测,对试件边缘部分检测无效;点到点检测,效率低。

可见,上述各种无损检测技术均有各自的特点和适用范围。随着科技的发展与社会的进步,传统的无损检测技术已不能满足一些行业或构件检测的需要。这导致人们不断改进已有的无损检测技术,并研究和开发新的无损检测技术,以满足国内外检测市场不断增长的需求。

1.2 超声导波无损检测新技术

针对常规无损检测方法的局限性和现代检测行业的需求,近年来发展了一种能够实现快速、长距离、大范围检测的新技术——超声导波无损检测技术。导波(Guided Wave)定义为沿着构件表面或沿着杆、管、绳或板等结构而导向传播的机械波(弹性波)。导波与常规超声波的最大区别是导波在传播时存在频散(Dispersion)特性,即导波的传播速度随着频率、构件几何边界形状的变化而变化,导波传播在构件不连续处会发生模式转换或产生多模式。另外,导波所用的检测频率比常规超声波的低,通常所用频率不超过500kHz,而常规超声波所用的频率超过500kHz,通常可达几兆赫兹或几十兆赫兹。导波检测原理包括两部分,一是在构件中激励或产生导波,二是在构件中检测或接收导波。当激励的导波在构件中传播时,遇到构件中不连续处或有缺陷的地方,会出现异常反射信号,通过捕捉反射信号并进行分析,即可判断出构件中是否存在缺陷。

使用导波对管道进行检测的方法为在管道中发射超声导波并对脉冲回波进行检测。通

通过对脉冲回波进行分析,可以确定管道中缺陷的位置并测算出缺陷的尺寸大小,如图 1.1 所示。

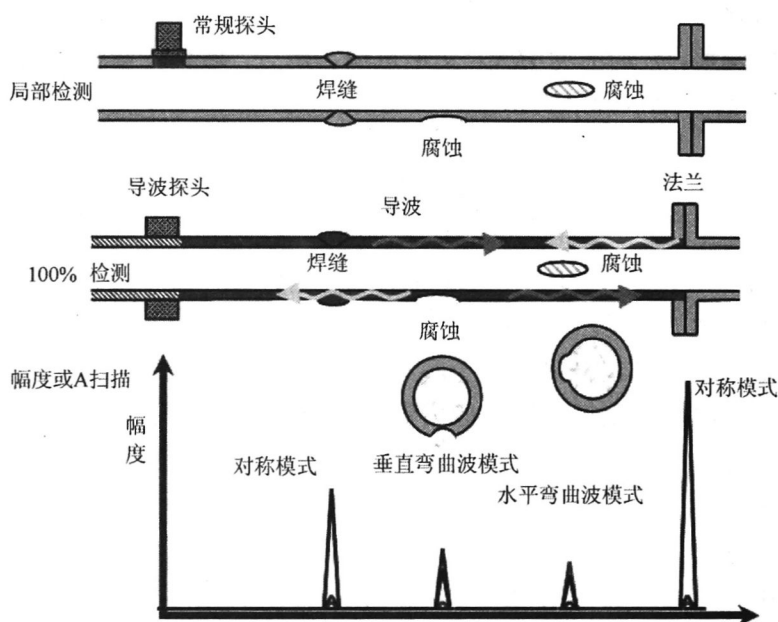


图 1.1 导波无损检测与常规无损检测的比较

与传统无损检测技术相比,导波无损检测技术具有以下优势。

- (1) 可以实现非接触检测。
- (2) 可以大范围、长距离快速检测,检测效率高。
- (3) 适用于不可到达地方的构件检测,如埋地管道,穿过墙、公路等的管道。
- (4) 无需剥除构件表面包覆层,即可对构件进行检测,如包覆层管道的无损检测。
- (5) 无需耦合剂,传感器提离高度可达几十毫米。
- (6) 除可对整个管道长度缺陷快速检测,还可对管道截面积的缺陷进行检测,即可实现管道的体积检测。
- (7) 能够实现在线检测,对构件的健康状况实时监控。
- (8) 整个检测过程成本低,无需准备辅助设备或材料等。

因此,近些年来,导波无损检测技术受到国内外无损检测界的极大关注,成为研究的热点技术之一。

根据传感器类型的不同,超声导波技术可细分为接触式检测方法(如压电式)和非接触式检测方法(如静电传感器技术、空气耦合超声传感器方法、电磁超声传感器(EMAT)方法、激光超声方法、光全息摄影或干涉技术、磁致伸缩传感器方法等)。下面对目前比较流行的几种导波无损检测方法进行简述。

1.2.1 基于压电效应的超声导波

对于某些单晶体或多晶体陶瓷电介质,当沿着一定方向对其施力而使之变形时,

内部会产生极化现象，同时在它的两个对应晶面上会产生符号相反的等量电荷，当外力取消后，电荷也消失，又重新恢复为不带电状态，这种现象称为压电效应。相反，当在电介质的极化方向上施加电场（加电压）作用时，这些电介质晶体会在一定的晶轴方向产生机械变形，外加电场消失，变形也随之消失，这种现象称为逆压电效应（电致伸缩）。具有这种压电效应的物质称为压电材料或压电元件。压电材料的压电方程可表述为

$$T = c^E S - e_i E \quad (1.1)$$

$$D = eS + \epsilon^S E \quad (1.2)$$

式中， T 为应力， E 为电场强度， S 为应变， D 为电位移。式（1.1）描述的是逆压电效应，而式（1.2）描述的是正压电效应。

压电陶瓷是压电多晶体材料，由于其具有较高的机电耦合系数和压电应变常数，以及较好的时间和温度稳定性，所以成为制作压电式导波传感器的常用材料。在使用中，将长度伸缩型压电陶瓷片制作成长条状，布置在被测管道的外表面，呈圆周向阵列分布。在压电陶瓷上下表面镀以银电极，给压电陶瓷的上下表面施加电压，压电陶瓷会由于逆压电效应在其长度方向（即管道轴向方向）产生变形，通过耦合作用给管道施加相应的作用力，进而在管道中激励出导波^[1]。压电陶瓷工作原理及压电传感器布置示意图如图 1.2 和图 1.3 所示。

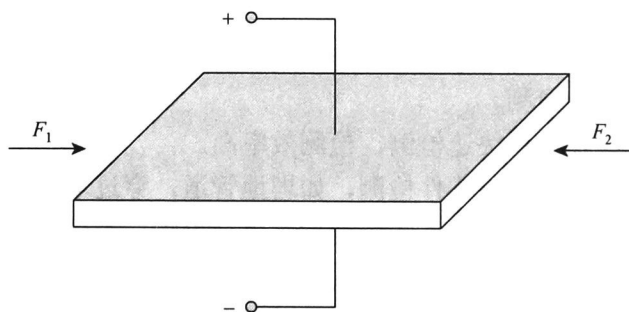


图 1.2 压电陶瓷工作原理

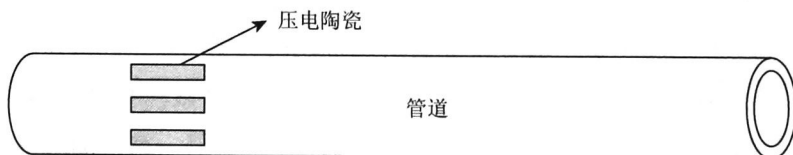


图 1.3 压电传感器布置

由于使用方便、价廉、灵敏度高以及技术完善，压电式传感器在管道导波检测中应用较广泛。然而，耦合剂的使用使压电超声导波检测技术的应用受到了一些限制。首先，要求被检工件的表面比较光洁，因为粗糙的表面不宜于耦合剂的渗润；其次，耦合剂要均匀，油脂中的杂质、水中的气泡都会对声波的耦合造成影响；最后，在高温状态下，耦合介质会迅速气化，使耦合条件遭到破坏；另外，当压电探头与工件发

生快速相对移动时, 容易造成耦合介质中气泡的产生和来不及渗润的情况。因而压电式超声导波不适于高温、高速、表面粗糙工件的检测。

1.2.2 基于磁致伸缩效应的超声导波

磁致伸缩效应是铁磁性材料的固有特性, 利用这一特性研制的磁致伸缩传感器可以在管道中激励和检测弹性导波。磁致伸缩效应, 是指铁磁性材料受磁场作用时, 它的尺寸大小、形状会发生微小变化的效应。根据磁致伸缩效应及其逆效应, 可以使用传感器在管道中激励出超声导波并对其回波进行测量。

图 1.4 为典型的磁致伸缩导波传感器示意图。传感器由激励线圈、接收线圈和磁化线圈组成, 通过在激励线圈中通以交变电流, 即可在被测构件中产生交变磁场, 同时, 在偏置磁场的作用下, 磁致伸缩效应产生导波。该类型的传感器超声转化效率高, 当检测对象为铁磁性构件时, 构件本身即换能器的一部分。传感器装置简单, 操作容易, 无需与被测构件紧密接触, 适合对铁磁性构件进行检测。当检测对象为非铁磁性物体时, 需要在检测对象表面粘贴一种具有磁致伸缩特性的合金材料(如铁钴镍合金等), 类似于耦合剂的作用, 同样适合对非铁磁性构件进行检测。常见的管道为铁磁性和非铁磁性管道, 而且管道表面常有油污、脏物、隔热层或包覆层, 在这种情况下, 基于磁致伸缩效应的导波无损检测技术具有非常大的优势。

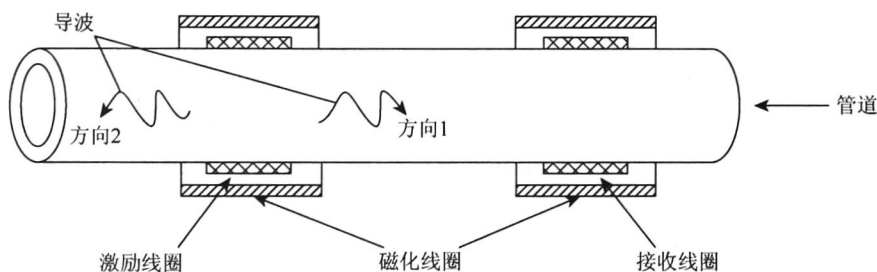


图 1.4 磁致伸缩导波传感器示意图

1.2.3 空气耦合超声导波

目前, 最常用的空气耦合传感器是基于压电效应或静电效应设计^[2-4]的, 压电空气耦合传感器通常使用压电陶瓷元件, 其主要问题是由于声阻抗不匹配, 导致发射和接收声波效率很低。为了减少能量损失, 通常使用匹配层材料(然而理想的声阻抗匹配材料很难找到), 或是通过改进传感器所用压电材料自身的机械和电气性能以提高发射和接收声波的效率。另一种空气耦合传感器是用电容(或静电)设计的, 它比压电型传感器的频率带宽要宽, 能量相对比较容易耦合到被测物体中, 在电容传感器里面通常安装有固体支撑板, 并用聚合物薄膜拉伸, 此结构能较好地改进声阻抗不匹配的问题。空气耦合超声无损检测系统示意图如图 1.5 所示。

空气耦合超声波传感器的主要优点是使用空气耦合介质可以避免弄脏被检测物体,

无需液体耦合剂即可实现快速扫描。其主要局限性在于灵敏度较低，这主要是因为固体-空气交界面的声阻抗不匹配，有五个数量级的差别^[5]，在界面上有极大的能量损耗，因此高频空气超声换能器不仅要求发射功率大，且必须有良好的电气与声匹配性能。另外，当频率高于 500kHz 时，超声波在空气中衰减极快。

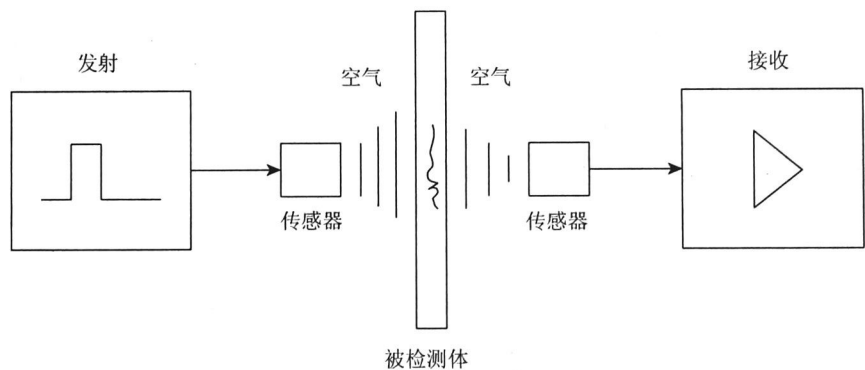


图 1.5 空气耦合超声无损检测系统示意图

1.2.4 电磁超声导波

电磁超声传感器是一种新型的超声发射接收装置。由于电磁超声产生和接收过程中，具有换能器与媒质表面非接触、无需加入声耦合剂、重复性好、检测速度高等优点而受到广大无损检测与评估工作者的关注^[6-9]。电磁超声检测激发超声波的机理与压电超声完全不同。电磁超声传感器方法是基于涡流和磁场的交互作用，利用电磁超声探头产生和接收超声导波。它是将高频电流通入靠近被检金属表面的发射线圈中，在金属表面的趋肤层内感应出相同频率的涡流，同时在金属表面施加一个磁场，金属中的涡流在磁场的作用下就会产生一个与涡流频率相同的力，即洛伦兹力。洛伦兹力带动金属材料晶格的振动，并在工件内传播形成声波，其结构原理图如图 1.6 所示。由此可见，电磁超声波是通过电磁感应直接在金属材料中产生的，不需要使用耦合介质。由于电磁超声传感器方法不使用耦合介质，所以它可以应用于高温、高速、表面粗糙工件的检测。

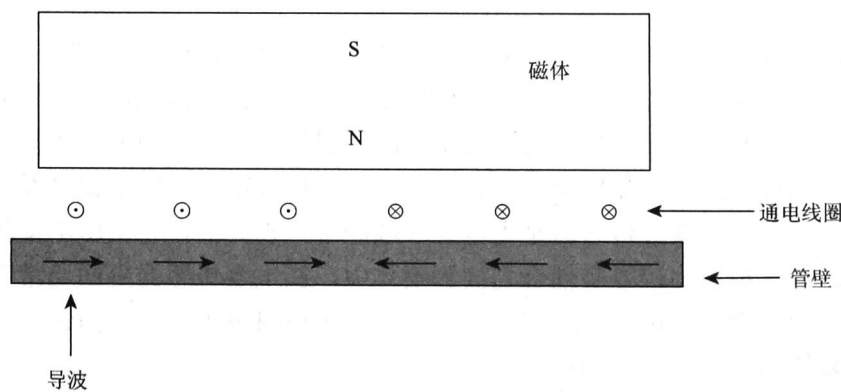


图 1.6 电磁超声传感器结构原理图

电磁超声导波检测方法具有的优点包括：无需耦合剂；可实现非接触检测；可耐高温检测；适合发射和接收瑞利波、Lamb 波和 SH 波；然而，使用电磁超声检测的材料必须具有导电性或铁磁性，或导电性和铁磁性都具有；相对压电传感器其效率比较低；另外，电磁超声传感器的工作距离比较有限，通常只有几毫米。

1.2.5 激光超声导波

激光超声技术是近几年发展起来的产生超声导波的一项新技术^[10-12]，用强度调制的激光束射入闭合介质空间而产生声波，所用激光为脉冲激光。其他类型的传感器在使用过程中，由于超声导波换能器本身带宽的限制及换能器与试件之间的耦合等因素影响，无法产生很窄的单个超声脉冲，而激光超声技术可以重复产生很窄的超声脉冲，在时间和空间均具有极高的分辨率。激光可以在不同形状的试件中激发超声导波，而且无需与试件接触，易于在高温、高压、有毒和放射性等恶劣环境下进行超声导波检测，适合于超薄材料的检测和物质微结构的研究。

热膨胀激光超声导波示意图如图 1.7 所示。该技术采用脉冲宽度极窄的高能量密度光束照射介质，吸收光能的部分温度上升，这部分介质发生膨胀，膨胀后介质发生形变。由于入射光波是脉冲的，形变也是周期性的，周期形变在周围介质中激发出超声导波。

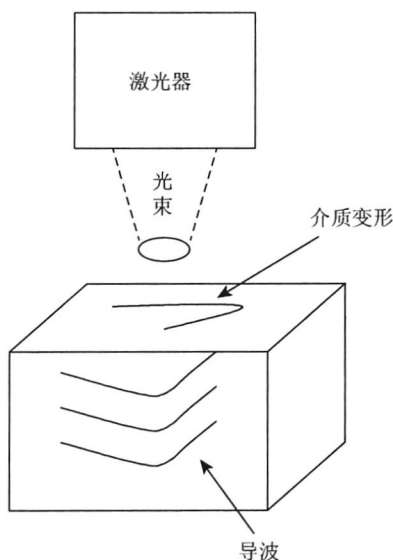


图 1.7 热膨胀激光超声导波示意图

激光超声能以非接触方式对物体进行无损检测，激光发射源到被测物之间的距离可以达到 10m，而且激光束的发散很小，这就可以检测人们不能接近的物体，如高温、高压、有毒及放射性等恶劣环境内的物体。由于激光超声无需任何耦合剂，可以不考虑耦合剂的易变性和耦合的可靠性及匹配问题，能够用于粉末、多孔材料、胶体及薄膜等通常接触式换能器不能激发超声的材料检测。激光超声对被测试件的要求较低，对表面粗糙、曲率大和几何形状十分复杂的物体均能检测。但在研究过程中，也发现了一些问题

必须进一步解决。一是由激光能量到超声能量的转换效率问题。要提高激光超声的强度,可以加大激光辐射能量,但不能太大,否则会损伤被测试件表面。二是激光超声信号检测灵敏度问题。对于激光超声信号检测一般使用光学检测法。光学检测法特别适合窄脉冲激光产生的宽频带超声信号检测,但光学检测法检测灵敏度较低,因此提高光学检测法的灵敏度是目前发展趋势之一。

1.2.6 混合超声导波

由于每一种无损检测方法都有其自身优势和不足,所以,人们想出了结合几种无损检测方法的优点,实行优势互补,称为混合超声检测技术。目前,国外已有许多学者对此进行了探讨。Wright 等^[13]使用激光产生超声波图像,并用压电空气耦合传感器检测缺陷信号,取得了比较好的效果。Guo 等^[14]利用 EMAT 在薄平板中产生单个 Lamb 波模式信号,利用高空间分辨率的激光干涉仪来检测像裂纹一样的刻痕。Baldwin 等^[15]成功开发了混合窄带激光激励和空气耦合检测超声波的检测系统,但该系统对复合材料表面缺陷的检测灵敏度很高,适合在线过程控制应用。Dixon 等^[16]利用脉冲激光作为激励源,用 EMAT 检测钢板的焊缝缺陷,可以实现非接触、快速检测,该系统不能精确地给出各种情况下的缺陷大小和位置。Murray 等^[17]利用激光在材料表面激励表面波、纵波和剪切波,并用 EMAT 检测返回来的波,该系统利用纵波和剪切波,以及剪切波和纵波之间模式的转换,可以同时监测材料远表面两个不同的点,因此可以清楚地识别材料厚度的变化。

1.3 磁致伸缩导波无损检测技术的发展

基于磁致伸缩效应的无损检测技术最早由英国学者 Kaule^[18]于 20 世纪 60 年代初提出,并取得了一些探索性的研究成果。随着材料学、物理、磁学、电子技术以及信号处理技术的发展,该技术得到不断发展。在 20 世纪 90 年代,美国学者 Kwun 等^[19,20]利用设计的磁致伸缩传感器对钢丝绳、杆、管、板等结构进行了无损检测。对于钢丝绳、杆、管结构的检测,传感器外形为线圈状,缠绕在这类结构表面;对于平板类型结构,传感器外形为直槽矩形。利用磁致伸缩传感器对钢丝绳的断丝情况进行检测时,钢丝绳的最大直径达 45mm,使用 10kHz 的低频信号,检测长度可达 100m。Kwun 等还利用磁致伸缩传感器技术对 6m 长、38cm 外直径的钢管隔热层下腐蚀缺陷检测进行了可行性研究。为了模拟热隔离层,样管包裹了一层聚乙烯泡沫材料,材料厚度约为 30mm。实验结果清楚地显示出,即使传感器和钢管外表面之间间隙相对较大,弹性导波也可用磁致伸缩传感器进行发射和探测。此外,Kwun 的研究表明,使用磁致伸缩传感器技术可以检测薄层和圆周分布的裂缝型缺陷,只需装一个探头即可检测很长一段钢管(100m 以上),而且检测所用的导波遍布于整个壁厚(与涡流探伤只能检测内表面或外表面的缺陷不同,磁致伸缩传感器技术对整个管体进行 100%检测并可以检测内外表面缺陷)。这些优点说明磁致伸缩传感器技术对隔热层下钢管进行高效的在线探伤具有良好潜力。

近些年来, Kwun 等研发了导波检测仪器, 还将此技术应用到各种科学和工程领域, 包括结构中波的传播研究、长管检测、机械状态监测 (如内燃机、车辆安全)。1998 年, 研制了第一台现场使用探测仪器 (MsSR1000 型), 这套探测仪器被美国《研究与开发》杂志评选为当年前 100 名最显著的技术成就并获“研发 100”奖。此后 MsS 系统又升级为脉冲-回波和数字输出的 MsSR2020D 型与 MsSR3030 型, 除了能够检测沿长度延伸的构件如管道、棒材及电缆等, MsS 系统也能用于对板状构件的检测。另外, 在 2001~2002 年开发的铁磁性薄带传感器使得 MsS 技术更方便地使用, 并且进一步将 MsS 技术应用拓展到有色金属结构、非金属材料以及采用永久性预埋传感器以到达长期监控结构健康状况的目的。

2002 年, 法国学者 Laguerre 等^[21]用相似的方法对圆柱形结构钢铁材料缺陷进行了实验检测研究。2003 年, 韩国学者 Kim 等^[22-24]开发的磁力学传感器在圆柱体中产生纵波和弯曲波模式, 并分别利用这两种模式对缺陷进行检测, 取得了比较好的效果。2004 年, 西班牙学者 Fernando 等^[25]提出了利用磁致伸缩效应在铁磁性材料中产生超声波的数学模型。另外, 人们还利用力学、磁学特性对磁致伸缩传感器进行了大量研究, 建立了相关的数学模型, 为磁致伸缩传感器的推广应用奠定了理论基础^[26-30]。

近年来, 国内对超声导波无损检测技术的研究也非常活跃, 代表性的单位和学者有清华大学黄松岭、同济大学刘镇清^[31]、北京工业大学何存富和吴斌^[32]、复旦大学他得安^[33]、北京航空航天大学周正干^[34]、华中科技大学康宜华和武新军^[35]等。然而, 以上大多数研究的是基于压电效应的超声导波技术及 EMAT 超声导波技术。著者所在的海军工程大学^[36,37]多年来对基于磁致伸缩效应的超声导波技术进行了系统的研究, 对磁致伸缩起源机理、磁致伸缩无损检测技术的基本原理、导波激励与检测模型、导波信号处理等进行了深入研究, 开发了大功率磁致伸缩智能检测仪器和多种磁致伸缩导波传感器。国内外学者前期研究的工作多数局限于在实验室条件下, 通过实验研究和理论研究验证其可行性。尽管 Kwun 等研发出了导波检测仪器, 但没有得到广泛应用, 原因在于还有一些关键技术问题有待研究、完善和解决。在不久的将来, 相信磁致伸缩导波无损检测技术中的技术难点会逐步得到解决, 并不断拓展其在无损检测领域中的应用。

第2章 磁致伸缩导波检测原理

2.1 磁致伸缩效应

磁致伸缩是一切铁磁性物质所具有的固有特性。所谓磁致伸缩效应，是指铁磁性材料受磁场作用时，它的尺寸大小、形状会发生变化的效应，或者说，当铁磁性物体在原有恒定磁场作用下，同时受外力作用发生形变瞬间会引起内部磁场发生变化的效应。依据形状变化的不同，磁致伸缩效应可分为线磁致伸缩效应、体积磁致伸缩效应和扭转磁致伸缩效应。其中，线磁致伸缩效应又分为正效应和逆效应。

线磁致伸缩正效应是由英国物理学家焦耳（Joule）1842年发现的，故又称焦耳效应：一根铁磁性材料的棒受外磁场作用，沿磁力线方向产生伸缩相对形变的效应。在相同磁场强度或磁感应强度作用下，不同材料的棒所产生的相对形变的大小和方向是不同的；所有磁致伸缩材料均具有磁致伸缩饱和现象，即外加磁场强度由小逐渐增大时，产生的形变也随之增大，当磁场增大到某一值时，形变不再增大；各类材料的磁致伸缩形变受温度的影响很大，温度升高会使磁致伸缩性能降低，当温度超过居里点时，磁致伸缩效应将完全消失。线磁致伸缩逆效应是由维拉里（Villari）1865年发现的，故又称维拉里效应：对已极化的磁棒，当它沿长度方向受外力作用而产生相对形变时，棒内磁场强度发生变化。

体积磁致伸缩效应是在磁场作用下铁磁物质会产生微小的体积伸缩效应。其相对体积的变化约为 10^{-7} 数量级，而且只有在很强的磁场作用下才能显示出来。

扭转磁致伸缩效应是由魏德曼（Viedeman）发现的，故又称魏德曼效应：沿圆管状磁致伸缩材料的轴向通以电流，同时沿该轴向施加磁场，则圆管周边发生扭曲的现象。其逆效应为：使圆管状磁致伸缩材料沿管轴发生周向扭曲，同时沿轴向施加交变磁场，则沿圆周出现交变磁化的现象。

2.2 磁致伸缩产生机理

铁磁体的磁致伸缩起源于原子或离子的自旋与轨道耦合作用。磁致伸缩的产生是满足能量最小最稳定条件的必然结果：如果铁磁晶体的变形大小和性质变化能够导致其总能量等于极小值，则这种变形就会产生。因此，磁致伸缩是由自旋轨道耦合作用能量和物质的弹性能平衡而产生的。

1. 磁畴理论^[38-40]

从微观角度来看，磁致伸缩可以用称为畴的磁性区域特征化，磁畴可定义为自旋呈整齐平行排列的小区域。根据热力学平衡原理，稳定的磁状态，一定与铁磁体内总自由