

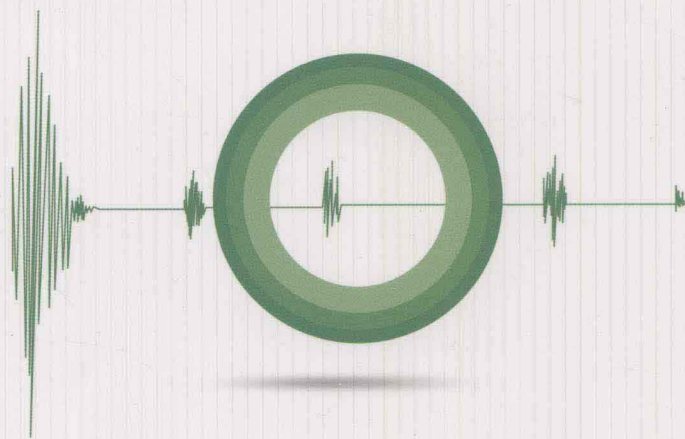
电子信息与电气工程技术丛书 E&E

NOVEL ELECTROMAGNETIC NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGY

# 电磁无损检测 新技术

黄松岭 编著

Huang SongLing



清华大学出版社



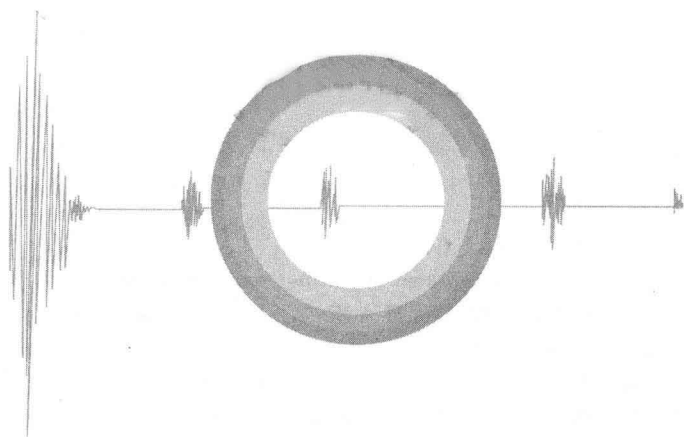
电子信息与电气工程

NOVEL ELECTROMAGNETIC NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGY

# 电磁无损检测 新技术

黄松岭 编著

Huang SongLing



清华大学出版社

北京

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了电磁无损检测的研究热点技术,主要包括电磁超声导波检测、脉冲涡流检测、远场涡流检测、低频涡流测油气管道变形、磁记忆、漏磁检测缺陷量化和脉冲漏磁等方面内容。全书共分6章。第1章介绍电磁超声导波检测方法,第2章论述脉冲涡流检测原理和实现方法,第3章介绍远场涡流检测的数学模型和仿真分析方法,第4章介绍低频涡流测距的仿真优化设计和实现方法,第5章探讨磁记忆检测的理论和应用问题,第6章介绍漏磁检测的关键技术。

本书结合作者近十年在电磁无损检测方面开展的研究工作,介绍电磁无损检测技术的研究与工程应用成果,对高校师生和相关无损检测工程技术人员均具有参考价值,也可作为无损检测人员的资格培训和高等院校相关专业的参考教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

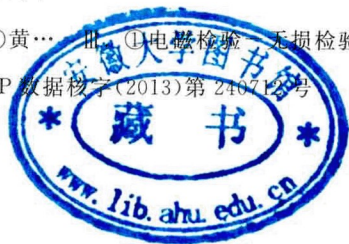
电磁无损检测新技术/黄松岭编著.--北京:清华大学出版社,2014

电子信息与电气工程技术丛书

ISBN 978-7-302-34101-7

I. ①电… II. ①黄… III. ①电磁检验—无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第240718号



责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.75 字 数:264千字

版 次:2014年1月第1版 印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:056061-01

## 前言

电磁无损检测技术近几年发展较快,出现了一些新的检测方法或新的应用,比如针对在役压力容器应力集中的磁记忆检测技术就是 20 世纪末新出现的无损检测方法;脉冲漏磁检测技术也是针对带保温层或防腐层管道腐蚀缺陷快速检测而对原有技术的新发展。近几年,电磁超声导波检测、远场涡流检测、漏磁检测缺陷量化方法和脉冲涡流检测的理论与应用方面得到了长足发展,广泛应用于油气管道缺陷在线内检测、铁轨缺陷检测和压力容器缺陷检测等方面。

本书介绍电磁无损检测新方法和新技术,主要包括电磁超声导波检测技术、脉冲涡流检测技术、远场涡流检测技术、低频涡流检测技术、磁记忆检测技术和漏磁检测关键技术等几个方面内容,并结合每种电磁检测方法给出相应的理论模型、仿真计算和设计方法、检测影响因素分析、检测仪器实现方法和典型工程应用实例。

作者近十多年来在电磁无损检测方面不断研究和实践应用,书中大部分内容来源于作者指导的博士和硕士研究生的学位论文,这些学生是王坤、崔伟、郝宽胜、叶朝锋、童允、张永生、李鹏、辛君君、苏志毅、苏宇航、吴欣怡等,同时,也参考借鉴了国内外相关同行在本领域的最新研究成果。在相关技术的实施中,得到了中石化、中石油和中海油等相关单位领导和工程技术人员的大力协助,使得相关技术在实践中不断完善,在此表示衷心的感谢!

在国外,电磁无损检测技术研究较早,并在某些技术方面形成垄断。随着国内检测需求的增长,我国在电磁无损检测方面的研究工作越来越得到重视,工业应用也越来越广泛,希望本书的出版能为广大的研究开发人员、高校师生和工程技术人员提供参考。对于书中错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

黄松岭

2013 年 8 月

于清华园

<b>第 1 章 电磁超声导波检测</b> .....	<b>1</b>
1.1 概述 .....	1
1.2 EMAT 的影响因素 .....	3
1.2.1 线圈折间距对 EMAT 性能的影响 .....	3
1.2.2 线圈回折数对 EMAT 性能的影响 .....	3
1.2.3 线圈提高对 EMAT 性能的影响 .....	4
1.3 管道轴向导波 EMAT .....	4
1.3.1 纵向导波的波模式和频散 .....	4
1.3.2 纵向导波 EMAT 的结构和换能原理 .....	5
1.4 导波的频散特性 .....	6
1.4.1 平板 Lamb 波的频散特性 .....	6
1.4.2 平板 SH 导波的频散特性 .....	7
1.5 电磁超声导波检测技术 .....	7
1.5.1 电磁超声测厚 .....	7
1.5.2 管道轴向电磁超声导波检测 .....	12
1.5.3 天然气管道裂纹电磁超声导波检测 .....	24
<b>第 2 章 脉冲涡流检测</b> .....	<b>28</b>
2.1 基本电磁原理 .....	28
2.1.1 渗透深度与趋肤效应 .....	28
2.1.2 探头设计原理 .....	29
2.1.3 脉冲涡流检测原理 .....	30
2.2 脉冲涡流检测的线圈式探头 .....	32
2.2.1 检测线圈的分类 .....	32
2.2.2 检测线圈的工作方式 .....	32
2.2.3 脉冲涡流检测探头 .....	33
2.2.4 探头设计的互易规律 .....	45
2.3 脉冲涡流检测电路 .....	46
2.3.1 电源模块 .....	47
2.3.2 激励源 .....	48
2.3.3 模拟信号处理模块 .....	49
2.3.4 单片机子系统 .....	50

# 目录

第 3 章 远场涡流检测 .....	52
3.1 概述 .....	52
3.2 管道远场涡流的数学模型 .....	54
3.2.1 基本方程 .....	54
3.2.2 交变磁场在铁磁管壁中的传播 .....	57
3.2.3 检测线圈的信号电压 .....	58
3.3 管道远场涡流有限元仿真建模 .....	59
3.3.1 有限元法及 ANSYS 简介 .....	59
3.3.2 远场涡流模型建立 .....	61
3.4 管道远场涡流的二维有限元仿真 .....	68
3.4.1 电磁分解分析 .....	71
3.4.2 内壁处磁场的估计模型 .....	73
3.4.3 全周向缺陷分析 .....	75
3.4.4 缺陷信号与缺陷尺寸的关系 .....	78
3.5 管道远场涡流的三维有限元仿真 .....	80
3.5.1 凹槽缺陷信号 .....	80
3.5.2 轴向缺陷信号与缺陷尺寸的关系 .....	85
第 4 章 低频涡流检测 .....	93
4.1 电涡流位移探头线圈的有限元仿真 .....	93
4.1.1 探头线圈的有限元仿真模型 .....	93
4.1.2 探头线圈的有限元仿真结果 .....	94
4.1.3 探头线圈模型的理论分析 .....	101
4.2 管道变形低频涡流检测系统 .....	107
4.2.1 系统设计 .....	107
4.2.2 数字交流不平衡电桥测量电路 .....	108
4.2.3 信号处理及显示模块 .....	111
第 5 章 磁记忆检测 .....	113
5.1 检测原理 .....	113
5.2 地磁场与铁磁性材料磁记忆的关系 .....	115
5.2.1 地磁场对磁记忆检测的影响 .....	115
5.2.2 地磁场对磁记忆现象产生过程的影响 .....	121

5.3 用磁记忆检测应力分布 .....	123
<b>第 6 章 漏磁检测 .....</b>	<b>125</b>
6.1 漏磁检测原理 .....	125
6.2 漏磁检测影响因素 .....	126
6.2.1 影响因素的分类 .....	126
6.2.2 磁化环节的影响 .....	127
6.2.3 漏磁和数据采集环节的影响 .....	129
6.3 漏磁检测缺陷量化方法 .....	133
6.3.1 基于统计识别的缺陷量化方法 .....	138
6.3.2 径向基函数神经网络量化方法 .....	142
6.3.3 三维有限元神经网络量化方法 .....	147
6.4 脉冲漏磁检测 .....	156
<b>参考文献 .....</b>	<b>158</b>

## 1.1 概述

超声检测作为无损检测领域的一个重要分支,已被广泛应用于钢铁、电力、石油、交通运输、医疗等领域。超声换能器是超声检测中超声波激发和接收的核心部件,主要有压电超声换能器和电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)两种。与压电换能器相比,EMAT 具有非接触、无需耦合介质、方便产生水平切变波(SH波)等诸多优点,可应用于高温、有隔离层等特殊场合,具有重要的应用价值和广泛的应用前景。

EMAT 的局限性在于换能效率比压电换能器低,从而造成其产生的超声波信号的信噪比低。通过合理设计,提高 EMAT 的换能效率和信噪比,激发出和接收到更纯净模式的超声波,降低其他模式超声波信号的干扰,是 EMAT 研究领域的重点和难点问题。较早对电磁超声换能的研究多基于试验的方式,研究成本高,并耗费了大量时间。后来,人们探索通过建立 EMAT 数学模型,以理论分析和数值仿真的方法对 EMAT 的物理机理等进行更深入的研究。截至目前,已分别建立了基于洛伦兹力机理和基于磁致伸缩机理的 EMAT 数学模型,并已有相关数值仿真计算方法和解析分析方法被提出。

然而,由于对 EMAT 的理论分析涉及静态磁场、脉冲电磁场、超声场等多场的耦合问题,且与被测试样的材料特性密切相关,其数值仿真计算十分复杂,特别是针对铁磁试样基于磁致伸缩机理的 EMAT,其完整换能过程与铁磁材料的机械特性、磁致伸缩特性以及逆磁致伸缩特性等均相关,对其实施数值仿真分析更为困难。

EMAT 由三部分组成——提供偏置磁场的磁体、产生脉冲磁场的线圈以及在其内部激发和传播超声波的被测试样。线圈和磁体的不同组合方式,可产生多种类型和模式的超声波,例如在板型试样中可激发出 Lamb 波、Rayleigh 波、SH 波和体波;在管道型试样中可激发出 L 模式和 T 模式的管道轴向导波。EMAT 既可工作在自发自收模式,此时仅需要一个探头即可;也可实现一发一收模式,此时则需



要 2 个探头分别实施激发和接收。一般而言,EMAT 激发和接收探头的结构是相类似的。

在板型试样或者直径远大于 EMAT 尺寸的管道试样的周向检测中,EMAT 的线圈均为平面型线圈结构,而提供偏置磁场的磁体多采用永磁体。常用 EMAT 的线圈结构有回折形的、螺旋线形的和跑道形的,磁体的结构有方形、马蹄形和周期性永磁体等,它们分别如图 1-1 和图 1-2 所示。



图 1-1 EMAT 的线圈结构

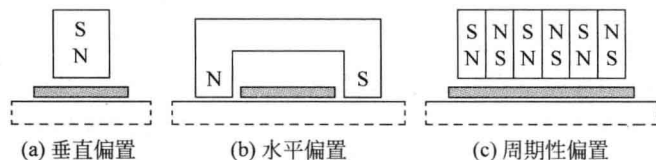


图 1-2 EMAT 的磁体结构

不同结构线圈、磁体与不同被测试样的组合,可在被测试样内部激发出不同类型或模式的超声波,并有不同的应用。回折形线圈与方形永磁体组合,可在非铁磁试样内激发出 Lamb 波;回折形线圈与马蹄形永磁体组合,可分别在铁磁试样和非铁磁试样中激发出 Lamb 波和 Rayleigh 波,具体能激发出哪种类型的超声波,与线圈的尺寸和激励信号的频率等有关,还可能在铁磁试样中激发出 SH 模式的导波。螺旋形线圈和跑道形线圈则主要用于在铁磁试样中激发体波,用于对被测试样厚度的测量,而它们与方形永磁体组合,可能产生横波,或与马蹄形永磁体组合,能产生纵波。跑道形线圈与周期性永磁体组合,可在铁磁和非铁磁材料中激发出和接收到 SH 导波。

不同结构的 EMAT,通过改变偏置磁场的大小和方向、高频电流的大小及其频率、线圈的形状和尺寸,可以控制其产生的超声波的类型、强弱、频率及其传播方向等参数,同时,也可改变接收超声波的工作带宽等参数。

为在被测试样表面和近表层形成强偏置磁场,需要采用高场强的磁性材料制作磁铁,具体地,既可采用永磁铁,也可采用电磁铁。采用电磁铁的好处,是其磁场强度容易被调节,用在交流磁化场合时,其形成的磁场具有一定的趋肤效果,能够增强偏置磁场的强度。采用永磁体的优点,是磁铁体积小,可使整个 EMAT 的结构紧凑。要注意的是,虽然使用永磁铁可使 EMAT 结构较为紧凑,但同时会受到温度和磁场强度的限制。对于 EMAT 所需的磁体,须要进行合理设计,以产生较强的磁场以及合适的磁场方向。

EMAT 用线圈主要有螺旋形、跑道形、折线形线圈,先后经历了排线、薄膜、导线、印刷电路等制作工艺的改进。

## 1.2 EMAT 的影响因素

试样内产生超声波的动力来源于洛伦兹力和磁致伸缩力,在洛伦兹力机理 EMAT 中,待测试样所受的洛伦兹力与偏置磁场以及式样内的涡流成正比。对于磁致伸缩机理 EMAT,待测试样所受磁致伸缩力与待测试样工作点的压磁系数和动态磁场对坐标的导数成正比。这两个力的大小和方向均与静态磁场和动态磁场的大小和方向有关。对回折线圈 EMAT 来说,力的方向决定了试样内产生的超声波的模式,力的大小决定了产生的超声波幅值的大小。

### 1.2.1 线圈折间距对 EMAT 性能的影响

在回折线圈的设计过程中,一般需满足导波的波长与线圈结构的匹配条件,即

$$D = (2n + 1)\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-1)$$

其中, $D$  为回折线圈的空间周期; $\lambda$  为导波的波长。一般取  $n=0$ , 即  $D=\lambda$ 。其目的是采用回折线圈的空间周期性特点通过对超声波的叠加或抵消来增强所要激发的超声波模式的信号,减弱其他模式的超声波信号。

导波的波长与频率间满足关系

$$D = \lambda = c/f \quad (1-2)$$

其中, $c$  为选定模式超声波的相速度。

通过改变线圈的折间距,研究折间距的变化对 EMAT 特性的影响。在激励频率为 310kHz,激励  $A_0$  模式 Lamb 波时对应的回折线圈的空间周期  $D=6.5\text{mm}$ ,分别改变激发和接收线圈的空间周期,观察接收线圈接收到的信号的变化。当增大和减小接收线圈的空间周期时,接收信号的幅值都会减小,且信号的波形也会发生变化。可见,改变激发线圈和接收线圈的空间周期对接收信号有相同的影响。

因此,在进行回折线圈的设计时,保证激发线圈和接收线圈具有相同的空间周期,且该周期与所要激发的超声波模式的波长相匹配时,可实现该种模式超声波的最大效率激发和接收。

### 1.2.2 线圈回折数对 EMAT 性能的影响

回折线圈的多折结构可增强所要激发的超声波模式的信号,减弱其他模式的超声波信号。保证线圈的激励电流不变,分别改变激发线圈和接收线圈的回折数,观察接收信号的变化情况。

当激发线圈折数增加时,由于线圈回折结构的调节作用,导波接收信号的幅值增加,信号波包宽度增加。因此,在进行回折线圈折数选择时,需综合考虑线圈回折数变化的影响,当需要较大的信号幅值和较小的其他模式信号干扰来提高检测灵敏度而不需考虑信号波包的宽度时,可增加回折线圈的回折数;当需要信号波包宽度较窄来提高检测信号的分辨率时,可减少的回折线圈的回折数。一般情况下需要兼顾这两个方面来设计回

折线圈的回折数,视实际应用情况而定。

### 1.2.3 线圈提高对 EMAT 性能的影响

线圈提高是影响 EMAT 性能的一个重要因素。随着线圈提高的增加,接收信号的幅值呈指数规律衰减,因此在 EMAT 的设计中,应尽量减小线圈的提高。

分析上述结果,线圈回折数和折间距对 EMAT 性能的影响可通过对机械场的分析解释,实现最佳设计的方式是使得所需超声波模式的质点振动增强,进行合适折间距设计和增加线圈回折数均可实现此目的。

为进一步增强接收信号的幅值和信噪比,可在满足回折数和折间距的前提下,将回折线圈设计成多层多分裂的结构。多层多分裂结构增加了激励线圈的安匝数和接收线圈感应导体的数目,进而提高信号的幅值。

## 1.3 管道轴向导波 EMAT

回折形线圈由于其多折线圈的调节,线圈间距与激励频率之间满足匹配关系,使得线圈尺寸的设计更为简单,可更好地控制所要激励出的超声波的类型和模式;同时,可通过调节线圈的折数和导体的尺寸,来调节超声波信号的幅值和宽度。借鉴这样的线圈结构,将其应用于铁磁性材料制成的管道缺陷的检测,可有效解决目前单簇线圈结构的缺点。

### 1.3.1 纵向导波的波模式和频散

对管道而言,其纵向模式导波是频散的,管道纵向导波的相速度和群速度频散曲线如图 1-3 和图 1-4 所示。这两图中给出了 4 种纵向导波模式, $L(0,1)$ 、 $L(0,2)$ 、 $L(0,3)$  和  $L(0,4)$ 。由于典型的纵向导波 EMAT 的工作频率为几十到几百 kHz,在这个频率范围内,经常选择采用  $L(0,1)$  和  $L(0,2)$  模式的导波。但是,由于  $L(0,1)$  和  $L(0,2)$  模式在很大频率范围内共存,则在同一频率下,将会同时激发出这两种波模式。至于具体究竟会激发出何种波模式,这与线圈的结构紧密相关。

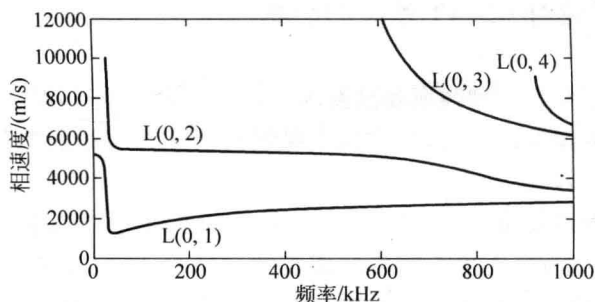


图 1-3 管道的相速度频散曲线

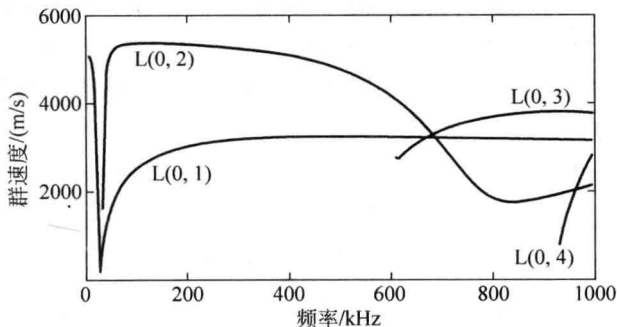


图 1-4 管道的群速度频散曲线

### 1.3.2 纵向导波 EMAT 的结构和换能原理

一种新的多簇线圈结构的 EMAT 示意图如图 1-5(a)所示。为了保持偏置磁场在管道圆周方向各位置处均匀分布,用螺线管电磁铁来代替马蹄形磁铁。多簇线圈可以采用漆包线绕制,或者采用柔性制板技术(FPC)制造,用以提供周期性动态偏置磁场。激发探头和接收探头采用相同的结构。

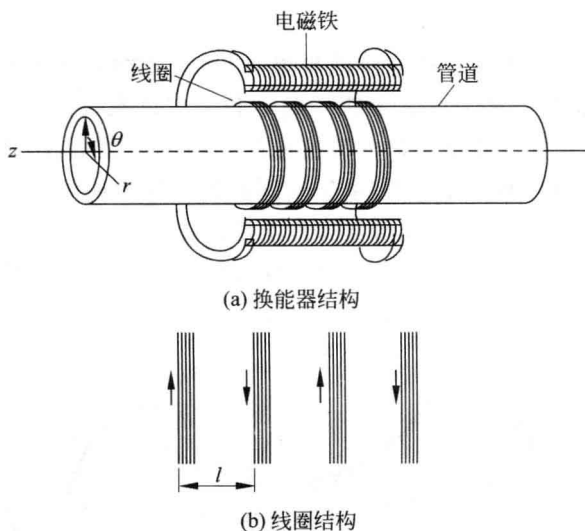


图 1-5 多簇线圈 EMAT 的结构

图 1-5(b)给出了将多簇线圈沿周向展开并忽略线圈端部连接细节的线圈结构。线圈的相邻簇所通电流方向是相反的,用以产生相反方向的动态磁场。根据用于板材试样检测的 EMAT 回折形线圈的结构和原理,线圈相邻簇之间的距离应为纵向导波的半波长。因此,超声波的频率为

$$f_L = \frac{c_L}{\lambda} = \frac{2c_L}{l} \quad (1-3)$$

其中,  $f_L$  为纵向导波的频率;  $c_L$  为相速度;  $\lambda$  为波长;  $l$  为半波长; 如果  $c_L$  已选定, 则  $f_L$  唯一地被  $l$  所确定。

当 EMAT 工作时,电磁铁将会感应静态偏置磁场  $H_s$ ,多簇线圈将会感应动态磁场  $H_d$ ,两者的方向均沿管道的轴向。静态磁场和动态磁场的叠加产生动态变化的合成磁场  $H_c$ ,如图 1-6 所示。在  $H_c$  的作用下,引起管道内磁畴运动,从而产生超声波。引起质点振动的磁致伸缩力的表达式为

$$F_{ms} = -\frac{1}{2}(3\tau + 2\mu)(1 - 2\nu) \frac{\partial \xi}{\partial M_0} \frac{\partial m_z}{\partial z} \quad (1-4)$$

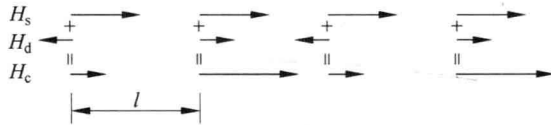


图 1-6 动态磁场和静态磁场的叠加

超声波的检测原理与产生超声波的原理相反。当超声波传播到接收线圈的位置时,管道内质点的振动引起磁场变化,在感应线圈内产生感应电动势。

## 1.4 导波的频散特性

### 1.4.1 平板 Lamb 波的频散特性

导波在传播过程中一般存在所谓频散现象,即导波传播的速度不仅与构成波导的材料有关,还与波导的几何结构有关;波速一般是频率的函数,并且同时存在多条模式曲线。相速度频散曲线记录了稳态导波的传播速度与频率的关系,而群速度频散曲线则描述了一段脉冲串或“波包”的传播速度,由于实际的超声导波检测中一般使用有限长度的脉冲串作为激励,故导波信号的实际传播速度为群速度。

1mm 厚钢板中传播的 Lamb 波的相速度频散曲线如图 1-7(a)所示,其中,  $S_n$  表示对称模式,  $A_n$  表示反对称模式,它们的下标  $n=0,1,2\cdots$ 。

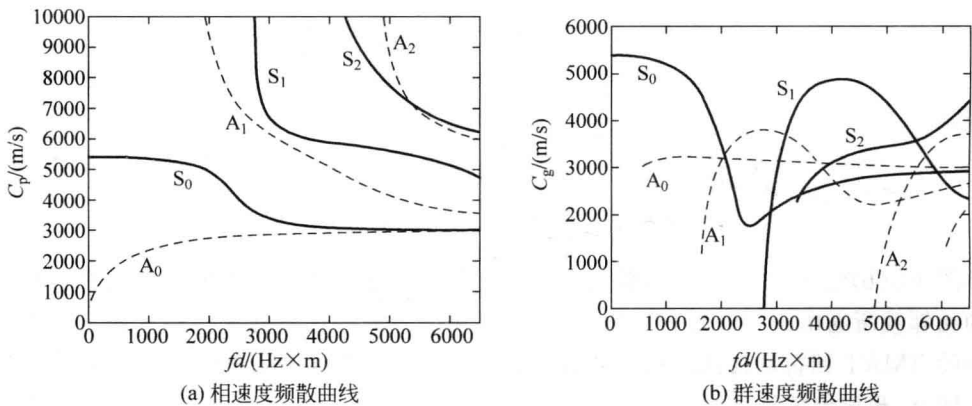


图 1-7 1mm 厚钢板中 Lamb 波的频散曲线

相速度频散曲线对应于稳态激励的情况,而实际检测中是以有限时长的脉冲串作激励,其传播速度为群速度。群速度可由相速度求得。与图 1-7(a)对应的群速度频散曲线

在图 1-7(b)中给出。

### 1.4.2 平板 SH 导波的频散特性

平板 SH 导波只有平行于平板波导界面方向的位移,因此与垂直于截面伸展的缺陷的作用简单,具有良好的应用前景。平板 Lamb 波可视为由纵波和 SV 波充分叠加而形成,而 SH 导波可以视为由在板内不断反射的 SH 体波充分叠加而形成。

平板 SH 导波的振动模式比较简单,不需要采用势函数分解法求解其频散特性。SH 导波的频散方程存在解析解,因而不需要进行数值求解,且其群速度也存在解析表达式。图 1-8 中示出了 1mm 厚钢板中 SH 导波的频散曲线。由图 1-8 可以看到,SH<sub>0</sub> 模式不存在频散现象,即相速度和群速度都与激励频率无关,这种特性使得平板 SH 导波中经常选择 SH<sub>0</sub> 模式进行缺陷检测。图 1-8 的曲线标注 SH<sub>n</sub> 中, $n$  为偶数对应对称模式; $n$  为奇数对应反对称模式。

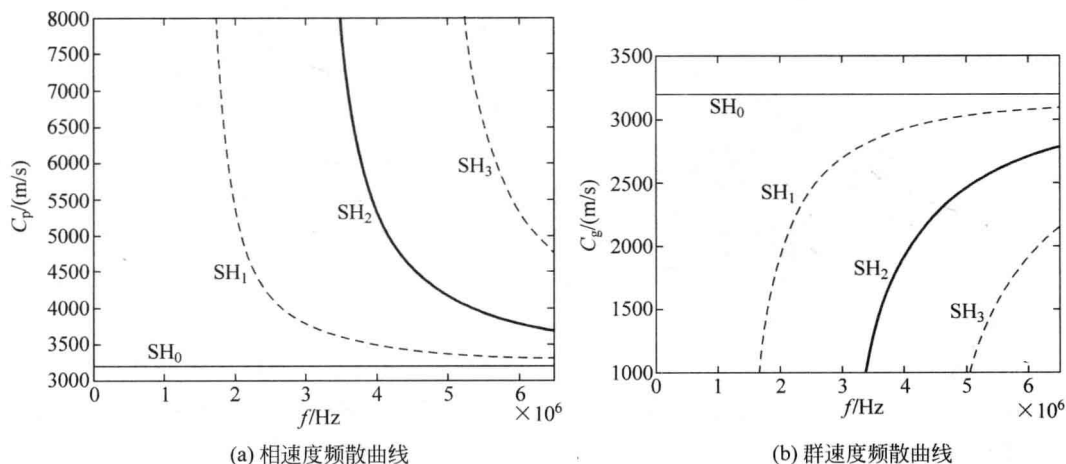


图 1-8 平板 SH 导波频散曲线

## 1.5 电磁超声导波检测技术

### 1.5.1 电磁超声测厚

电磁超声测厚的原理有两种:一种是基于洛伦兹力,适用于导体材料;另外一种是基于磁致伸缩力,适用于铁磁性导电材料。铁磁性导电材料,在测厚的过程中,同时受到两种力的作用。

电磁超声测厚法采用直声束脉冲反射法,而当进行快速扫描和高分辨率检测,或者对薄材料进行检测时,也可以应用斜声束一发一收技术。

超声波在传播的过程中,遇到两种介质交界面会发生反射和透射现象。垂直入射波在工件上下表面来回反射的过程中,在工件和空气的上下交界面会反射和透射。假定工件(金属材料)和空气的声阻抗分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ ,对于超声波垂直入射的情况,可以得到反

射系数  $R$  和透射系数  $T$  分别如下:

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \times 100\% \quad (1-5)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \times 100\%$$

由于空气中的声阻抗  $Z_2$  远远小于工件中的声阻抗  $Z_1$ , 所以,  $R$  近似于 1, 而  $T$  近似于 0, 超声波在交界面处基本发生全反射, 可以在工件的上下表面处来回多次反射。则被测工件的厚度可以用下式计算得出:

$$d = \frac{CT_n}{2} \quad (1-6)$$

其中,  $d$  为被测工件厚度,  $T_n$  为两个回波信号波峰之间的时间差, 即为超声波在被测工件上下表面往返的传播时间,  $C$  为电磁超声在被测体中的声速。测厚原理如图 1-9 所示。由于在不同温度下, 超声波在工件中的传播速度有所不同, 所以, 有时还需要对超声波的传播速度进行温度补偿修正。

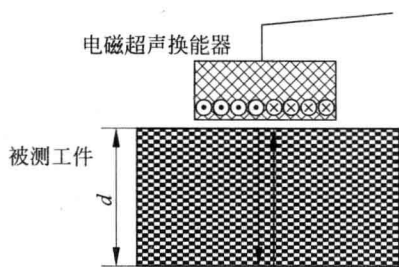


图 1-9 电磁超声测厚示意图

电磁超声测厚系统主要由五个部分组成: 电磁超声换能器、匹配电路、超声发射电路、回波信号接收放大电路和数据采集与处理电路。永磁体可以提供高达 1T 的恒定偏置磁场。匹配电路使换能器的转换效率提高。被测工件为铁磁性材料或导体。超声发射电路包括功率放大器、脉冲产生电路和频率调节器。功率放大器为脉冲产生电路进行充电, 频率调节器调节产生的窄脉冲的脉宽和正弦波的频率, 该电路核心器件是可编程逻辑器件(FPGA),

可以通过在线编程调节任意频率的波形。电磁超声换能器接收超声回波信号后, 经过放大、滤波、数据采样, 进入 PC, 经过数字信号滤波, 进行厚度的求值运算。放大滤波后的波形也可以通过示波器进行观察。系统的结构如图 1-10 所示。

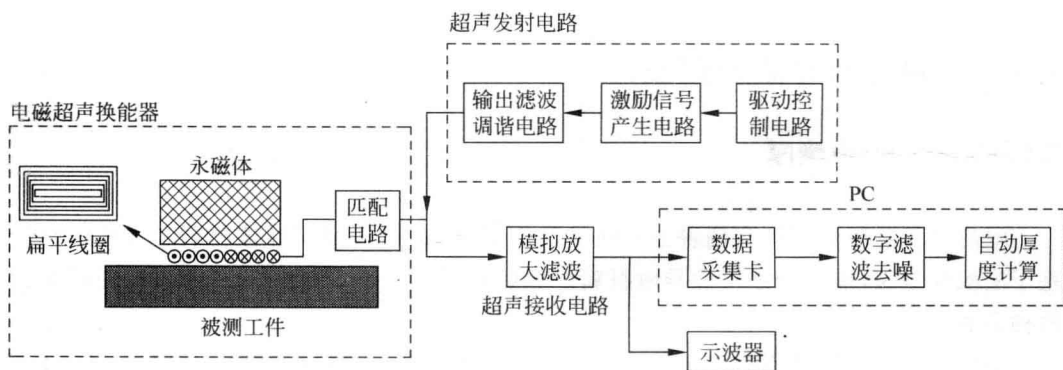


图 1-10 电磁超声测厚装置结构

在电磁超声测厚装置中, 信号的接收和放大最为关键, 直接关系到测量的精度。从电磁超声换能器接收到的回波信号需经放大、滤波等处理过程, 如图 1-11 所示。

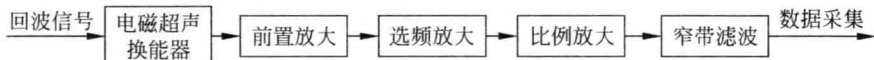


图 1-11 电磁超声测厚回波信号接收处理过程

电磁超声换能器接收到回波信号,输出给滤波放大电路;前置放大器一般为宽带、低增益器件,可对整个幅度范围的超声信号进行线性放大。将信号提升到足以克服后续放大级和滤波级的噪声电平的电压水平,可以使信噪比达到最大;放大器将超声回波信号幅度放大到让信号处理电路正常工作的程度;滤波器为窄带,可以消除 EMAT 不必要的频率响应,降低来自电源的干扰。带通滤波器决定信号的频率特性,对放大后的信号频带进行控制,有助于提高信噪比。放大滤波后的信号进入采集系统进行数据采集。

通常当电路达到良好匹配且发射线圈电流峰峰值为 50A 时,接收线圈上的电压也仅为数十微伏。同时,大功率发射电路会在工作时产生强烈的电磁干扰,导致 EMAT 系统存在严重的噪声。因此,为了得到高信噪比的接收信号,EMAT 接收电路必须具备强噪声背景下的微弱信号检测能力。为降低外界干扰,接收电路的接线均采用屏蔽性能良好的同轴电缆和 BNC 接头。另外,需要避免激励高压干扰对接收电路的危害,图 1-12 给出了对放大电路进行保护和选频放大等信号处理硬件框图。

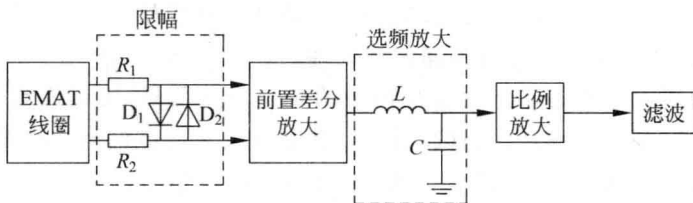


图 1-12 接收电路限幅与放大环节

线圈激励需用一个高压大功率发射电路为线圈提供激励,发射电路要产生高频的正弦信号或脉冲信号,根据现有技术及电磁超声测厚的要求,采用全桥逆变功率放大电路产生正弦波,采用单个开关管对电容进行充放电以产生高压窄脉冲。

全桥逆变功率放大发射电路的原理如图 1-13 所示,220V 工频交流市电通过一个可调变压器接入整流桥,通过全桥整流变为直流,为逆变电路提供输入电压,在交流输入端,四个二极管组成的全桥整流电路把交流电压转变为最高可达 400V 的直流电压。全桥逆变电路输出电压的峰值接近于输入端的直流电压,而半桥电路的输出电压峰值只有前端整流后的直流电压一半左右。相对于半桥逆变电路来讲,全桥电路的效率要高。电感  $L_1$  为整流后的滤波环节,可以滤掉整流过程中产生的高频尖刺脉冲,后端的电容  $C$  为大容量的高压充电电容,使输入端形成比较稳定的直流电压。 $F_1$  为可熔断保险丝,防止开关管中通过的电流过流,起到限制通过开关管平均电流的作用。全桥逆变电路主要包括驱动模块、逆变模块和调谐滤波模块三部分。信号产生模块产生的脉冲信号驱动能力有限,首先需要经过驱动模块放大后再驱动功率开关管;逆变模块选用高频高压电力电子大功率开关管,通过控制开关管的开通和关断,输出对称方波脉冲;最后,经过调谐模块将其调谐为近似正弦脉冲。其中,缓冲电路用于吸收开关管导通和关断过程中产生的尖脉冲和噪声。



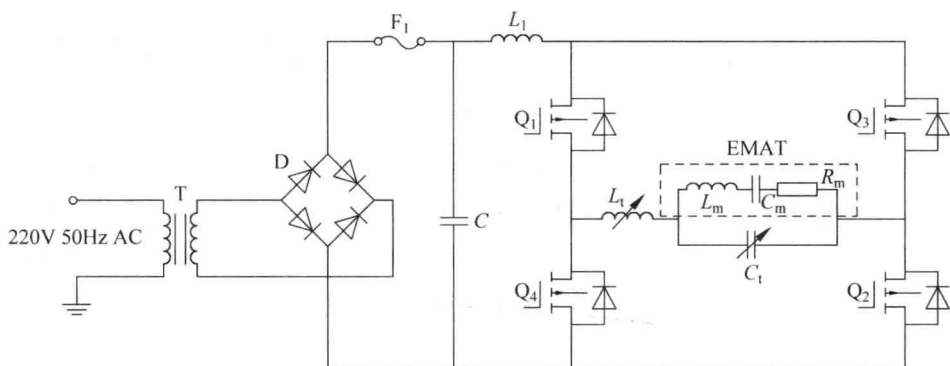


图 1-13 发射电路全桥逆变原理

电磁超声测厚与传统压电超声测厚一样，采用脉冲反射法，超声波在被测工件内部的多次反射产生的回波具有严格的重复性，波形特征明显，利用这些峰值对应的时间差计算厚度。由于测厚的激励多采用脉冲能量，如脉冲调制正弦波激发换能器，其回波信号为频率与激励脉冲频率相同的调幅信号。电磁超声换能器的反射信号通常被噪声高度污染，信噪比较低，噪声的叠加使得输出信号为非稳态信号，其中各种频率正弦成分的幅值、相位等均为时变参数。然而模拟滤波电路在处理非稳态信号的随机噪声方面能力不足，所以有必要对信号进行数字滤波和处理。

采用时域分析方法来提取淹没在噪声中的时变正弦信号，可以提高 EMAT 信号的质量。平均技术就是利用噪声的随机性特点，在时域上对回波信号多次采样取平均的方法提高接收信号的信噪比，目前已成为处理 EMAT 接收信号的常用方法。对于重复出现的 EMAT 接收信号，在误差范围内的波形每次都基本相同，而信号中的噪声则是随机的。经过多次采集有用信号，将对应的采样点求和并进行平均，就可以明显减少有用信号中的噪声含量，增强回波信号。

如图 1-14 所示为对 29.2mm 厚铝板，采用中心频率为 2MHz、周期数为 12 的正弦 burst 信号激发产生的超声回波信号，图 1-14(a) 为原始信号，图 1-14(b) 为平均 128 次后的波形。从图中可以看出，随机噪声得到了有效地抑制，有用信号没有明显衰减，信噪比提高。

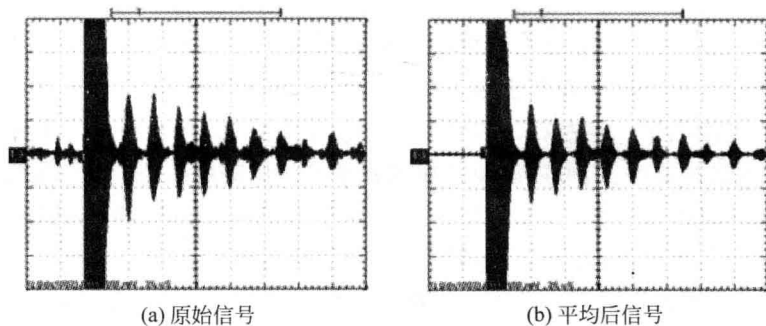


图 1-14 回波信号平均处理

为了测量回波的时间差以得到被测件厚度，需要先获得检测信号的包络线。包络线就是信号的各个极大值点或者极小值点顺序连接形成的包裹信号的上下两条线。