

电子信息与电气工程技术丛书 E&E

本书英文版由Springer出版发行

THEORY AND METHODOLOGY  
OF ELECTROMAGNETIC  
ULTRASONIC GUIDED  
WAVE IMAGING

电磁超声导波成像  
理论与方法

黄松岭 张宇 魏争 王坤 著  
Huang Songling Zhang Yu Wei Zheng Wang Shen

清华大学出版社

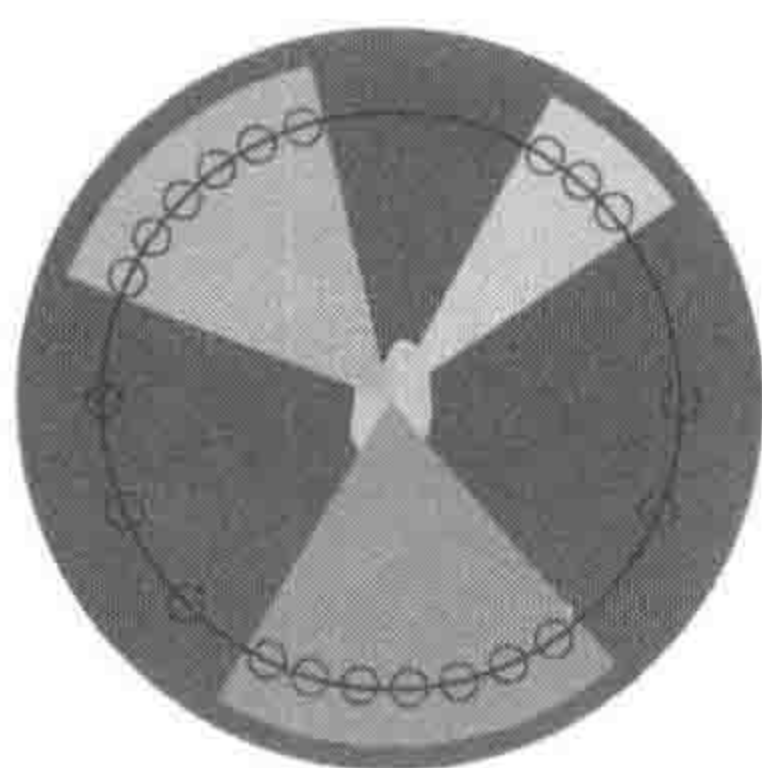


电子信息与电气工程技术丛书 (E&E)

THEORY AND METHODOLOGY OF  
ELECTROMAGNETIC ULTRASONIC GUIDED  
WAVE IMAGING

# 电磁超声导波成像 理论与方法

黄松岭 张宇 魏争 王坤 著  
Huang Songling Zhang Yu Wei Zheng Wang Shen



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书介绍电磁超声导波检测缺陷识别、成像理论及其实现技术,主要包括方向性和可控性电磁超声换能器、电磁超声导波检测信号走时提取方法、层析成像方法、散射成像方法等几个方面内容。全书共分5章。第1章介绍超声导波成像技术研究现状,第2章论述方向可控超声导波换能器,第3章论述电磁超声导波检测信号走时提取方法,第4、5章论述电磁超声导波成像方法。

本书的内容是作者近10年来在电磁超声导波检测理论方面不断研究和实践应用的总结,可供无损检测相关技术人员参考,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

电磁超声导波成像理论与方法/黄松岭等著. —北京:清华大学出版社,2018

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-49421-8

I. ①电… II. ①黄… III. ①电磁场—应用—超声检测—成像系统 IV. ①TB553-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第015139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:刘海龙

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:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.25

字 数:297千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:077124-01

电磁超声导波具有衰减小、传播距离远、声场 100% 覆盖构件厚度、易于调节导波模态、无需耦合介质等特点,可实现单端激励、长距离检测以及复杂结构和服役环境金属构件的持续监测,其应用已拓展到石油、化工、汽车、航空航天、铁路、轮船等行业,几乎覆盖人们生产生活所涉及的全部领域,尤其是对于服役环境无法直接接触的场合,电磁超声导波检测更能够发挥其独特的优势。

随着对金属构件安全的要求日益严格,其检测工程已不能满足常规的判断缺陷有无及获得缺陷当量尺寸层面,缺陷定量描述必须向缺陷轮廓形状描述、缺陷高精度成像、缺陷检测结果可视化方向发展。

本书介绍电磁超声导波检测缺陷识别、量化及成像理论及其实现技术,主要包括方向性和可靠性电磁超声换能器、电磁超声导波检测信号走时提取方法、层析成像方法、散射成像方法等几个方面内容。

本书的内容是作者近 10 年来在电磁超声导波检测理论方面不断研究和实践应用的总结,在相关技术的实施中,得到了中国石化、中国石油和中国海油等相关单位领导和工程技术人员的大力协助,使得该理论和技术在实践中不断完善,在此对他们表示衷心的感谢!

第 1 章由黄松岭教授执笔,第 2.1 节由王坤博士执笔,第 2.2 节、第 3 章和第 5 章由张宇博士执笔,第 4 章由魏争博士执笔。

在国外,电磁超声导波检测技术研究较早,有些技术至今仍垄断着市场。随着国内无损检测需求的增长,我国的这项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。书中不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

于清华园

2018 年 3 月

<b>第 1 章 绪论</b>	1
1.1 引言	1
1.2 超声导波成像技术研究现状	3
1.2.1 电磁超声换能器研究现状	3
1.2.2 超声导波层析成像方法研究现状	8
1.2.3 超声导波散射成像方法研究现状	12
<b>第 2 章 方向性和可控性电磁超声换能器</b>	15
2.1 用于铝板层析成像的全向 Lamb 波 EMAT	15
2.1.1 单匝环形线圈 EMAT 收发全向 Lamb 波的完整模型	15
2.1.2 基于 COMSOL Multiphysics 的 EMAT 有限元仿真	28
2.1.3 螺旋形线圈 EMAT 的解析建模与计算	35
2.1.4 回折形线圈 EMAT 的解析建模与计算	43
2.1.5 全向模态可控 Lamb 波 EMAT	53
2.1.6 实验验证	55
2.2 基于磁致伸缩的钢板 SH 导波方向可控 EMAT	58
2.2.1 铁磁材料的磁化和磁滞伸缩特性	59
2.2.2 基于磁致伸缩机理 EMAT 的有限元分析方法	61
2.2.3 SH 导波 EMAT 的解析建模和计算	78
2.2.4 钢板 SH 导波及基于磁致伸缩的 EMAT 理论基础	81
2.2.5 钢板 SH 导波方向可控 EMAT 结构设计	87
2.2.6 钢板 SH 导波方向可控 EMAT 性能实验与验证	91
<b>第 3 章 电磁超声导波检测信号走时提取方法</b>	97
3.1 时域混叠导波检测信号 EMD 模态识别方法	98
3.1.1 EMD 模态识别方法原理	99
3.1.2 EMD 模态识别方法实验验证	100
3.2 窄带导波检测信号时频能量密度析出走时提取方法	107
3.2.1 时频能量密度析出走时提取方法原理与步骤	108
3.2.2 时频能量密度析出走时提取方法实验验证	110
3.2.3 时频能量密度析出走时提取方法灵敏度分析	114
3.3 钢板缺陷导波散射检测信号模态识别与走时提取实验验证	119
<b>第 4 章 电磁超声导波层析成像方法</b>	124
4.1 电磁超声直射 Lamb 波跨孔层析成像方法	124
4.1.1 电磁超声直射 Lamb 波跨孔层析成像基本原理	124

# 目录

4.1.2	改进的电磁超声直射 Lamb 波跨孔层析成像方法	125
4.1.3	电磁超声多模态直射 Lamb 波跨孔层析成像方法	128
4.2	电磁超声弯曲射线 Lamb 波跨孔层析成像方法	137
4.2.1	基于 BI 的 Lamb 波试射 RT 算法	138
4.2.2	改进的 Lamb 波试射 RT 算法	140
4.2.3	基于试射 RT 的电磁超声弯曲射线 Lamb 波跨孔层析成像方法	146
第 5 章	电磁超声导波散射成像方法	152
5.1	定向发射-全向接收磁声阵列导波散射成像方法	152
5.1.1	定向发射-全向接收磁声阵列导波散射成像模型	153
5.1.2	定向发射-全向接收磁声阵列导波散射成像方法步骤	160
5.1.3	钢板规则轮廓缺陷导波散射成像实验验证	162
5.1.4	钢板复杂轮廓缺陷导波散射成像实验验证	166
5.2	全向发射-全向接收磁声阵列结构优化及导波散射成像方法	168
5.2.1	全向发射-全向接收磁声阵列导波散射成像模型	169
5.2.2	全向发射-全向接收磁声阵列导波散射成像方法与步骤	172
5.2.3	全向发射-全向接收磁声阵列结构优化方法	175
5.2.4	钢板规则轮廓缺陷导波散射成像及阵列调整实验验证	178
5.2.5	钢板复杂轮廓缺陷导波散射成像及阵列调整实验验证	182
参考文献		186

## 1.1 引言

相比于超声体波,超声导波具有衰减慢且波场分布于整个板厚范围内等特点。因此,超声导波检测技术在继承了传统体波检测技术指向性好、效率高且对人体没有损害等优点的同时,还具有检测距离远且能同时检测平板上下表面和内部不同深度的缺陷等优势。此外,由于超声导波具有多模态特性,且不同模态的超声导波对不同类型的缺陷灵敏,当利用不同模态导波进行检测时,所获得的检测波形可提供丰富的缺陷信息,有助于更准确地分析和掌握各种类型和尺寸的缺陷的详细特征信息。正因为超声导波具有上述优点,将超声导波检测技术用于结构件缺陷检测,不仅能够实现对结构件中不同部位、不同类型和不同尺寸缺陷的快速准确检测,还可实现对结构件中不可触及部位存在的缺陷进行检测。

基于压电超声换能器的超声导波检测技术常用于对金属板材缺陷和损伤进行在线检测,该技术需要利用压电超声换能器激发超声波振动,并依托耦合剂将超声波振动传播到金属板材内部,从而实现超声导波检测。但是,基于压电超声换能器的超声导波检测技术由于压电换能原理的限制,需要依托耦合剂将超声波振动耦合到待测金属板内,因此很难适用于具有非接触要求及高温等特殊工况下的检测。微加工空气耦合式换能器具有非接触和不依赖于耦合介质等优点,其通过空气耦合的方式传递超声波,所产生的超声波在通过空气以及空气与被测固体材料之间的分界面时会发生较严重的能量衰减。电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer,EMAT)依赖于电磁耦合方式完成换能器线圈内的交变电流到被测材料内机械振动的能量转换,无需耦合介质,可以直接在金属板材内产生超声导波,并易于调节超声导波模式,可用于非接触及高温等特殊工况下的检测。因此,有必要采用磁声换能器作为钢板缺陷超声导波检测的激励源和接收器,从而实现非液体耦合检测。采用电磁超声换能器来完成超声导波的激发和接收,称为电磁超声导波。

金属板材结构件检测工程中,大多只能判断缺陷的有无并确定其位置,然而更重要的是获得缺陷的尺寸乃至轮廓形状等定量化的信息,这些定量信息是评价金属板材结构健康状况、指导其维修和维护工作的重要

依据。缺陷量化通常采用基于缺陷当量尺寸的直接量化方法,即将与真实缺陷波形特征相同的标准缺陷的尺寸作为真实缺陷的近似尺寸,可根据需要建立导波检测的标准缺陷数据库。这种直接量化方法受限于所能得到的信息量,只能获得近似的求解结果,有时与缺陷真实尺寸差距较大。随着对金属板材构件安全的要求日益严格,其检测工程已不能满足于常规的判断缺陷有无及获得缺陷当量尺寸层面,缺陷定量描述必须向缺陷轮廓形状描述、缺陷高精度成像、缺陷检测结果可视化方向发展。

在工业金属板材结构件内传播的低频超声导波一般用于对大面积、长距离结构件进行缺陷扫查;长期以来,若要求对超声导波检测出的缺陷进行细致入微的检测或成像一般需要借助于其他方法。而近年来提出的超声导波成像检测技术为缺陷的高精度检测提供了解决方案,使得采用超声导波对工业金属板材结构件进行大面积、长距离缺陷扫查的同时,有望实现对缺陷的高精度成像检测。但由于磁声换能器换能效率较低,导致缺陷检测信号信噪比较低,不利于缺陷成像。因此,有必要建立基于磁声阵列的导波成像检测方法,从多角度进行阵列所包围区域的导波检测,为缺陷的高精度成像提供更为丰富、准确的缺陷信息。

当超声导波遇到缺陷时,按照其传播方向的不同,可分为两部分能量导波:一部分能量导波沿着原来的传播方向透过或绕过缺陷继续向前传播,另一部分能量导波改变了传播方向,向其他方向传播。为便于统一描述,将第一种能量导波称为透射导波,将第二种能量导波称为散射导波。本书将分别对其成像方法进行研究和论述;此外,本书的缺陷成像检测对象为工业常用的铝板和钢板,旨在重点阐述电磁超声导波成像的理论和方法,至于其他材料或形状的结构件检测,可针对需求,通过合理设计电磁超声换能器及其阵列的方法,实现对不同材料及形状结构件的缺陷成像检测。

超声 Lamb 波是一种常用的超声导波,常规 Lamb 波检测技术,通常是利用单个或一对 Lamb 波换能器实施脉冲-反射式检测,确定铝板中是否有缺陷,并较粗略地确定缺陷的位置和大小。然而,为了更准确地掌握铝板中缺陷的严重程度和发展趋势,仅使用常规 Lamb 波检测结果是不够的,还需要掌握缺陷的确切形状、轮廓尺寸和分布情况等详细特征信息。因此,Lamb 波成像技术已成为 Lamb 波检测领域的研究热点。常用的 Lamb 波成像方法包括相控阵成像法、层析成像法、偏移法和时间反转法等。其中,Lamb 波层析成像方法源于 X 射线的计算机层析成像(Computed Tomography, CT)方法,利用的是透射导波。使用 Lamb 波层析成像方法,可以在不破坏被测铝板结构和物理特性的情况下获取缺陷的图像,从而精确地获得缺陷的详细特征信息。该方法的实施过程为:首先利用换能器阵列沿不同方向进行 Lamb 波激发和接收(即沿不同方向进行 Lamb 波投影),以获得一系列含有缺陷信息的 Lamb 波检测波形;随后,从各检测波形中提取出成像所需的投影数据;最后,通过特定算法重建出铝板中被换能器阵列所包围成像区域内的缺陷图像。近年来,Lamb 波层析成像方法得到了国内外研究学者的广泛关注。这主要是因为该方法具有以下优点:

(1) 相比于其他 Lamb 波成像方法,Lamb 波层析成像方法的重建准确度更高,能够准确获得复杂缺陷的详细特征信息。

(2) 换能器阵列组合形式和投影方式灵活多样,可用于各种规格和形状铝板的缺陷成像。

(3) 激励方式简单,无需对激发用换能器阵列进行复杂的时序控制和激励波形计算。

当导波遇到较强程度的缺陷散射时,散射的影响和作用占主导地位,散射作用会使传统



导波成像方法重建的缺陷图像中产生较多膺像,造成检测盲区,严重影响了金属材料结构件的缺陷定位及成像精度;虽然有些模式分类及信号处理方法试图减弱散射检测信号的影响,但达到的效果并不明显,并没有从根本上解决问题,治标不治本。另一方面,实际缺陷的形状和散射特征多种多样,传统固定式和规则式的传感器阵列结构无法保证对实际缺陷散射特征的最佳匹配度和灵敏度,导致对实际缺陷的成像精度十分有限。因此,有必要研究基于导波散射的金属板材缺陷磁声阵列成像方法。由于导波与缺陷作用机理复杂、缺陷形状及散射特征多样,使得金属板材缺陷导波散射成像领域的研究缺乏完整的模型和理论指导,特别导波散射缺陷成像模型和算法、阵列结构与缺陷形状的关联映射关系、导波检测信号走时提取方法等方面仍存在大量的基础理论问题亟待研究和解决。对这些核心基础理论问题的深入研究和解决,是金属板材结构件缺陷导波散射成像检测的基础。

## 1.2 超声导波成像技术研究现状

本节从电磁超声换能器研究现状、超声导波层析成像方法研究现状以及超声导波散射成像方法研究现状三方面来论述。

### 1.2.1 电磁超声换能器研究现状

#### 1.2.1.1 铝板 Lamb 波 EMAT 的研究现状

Lamb 波具有多模态特性,即在平板厚度和超声波频率一定的条件下,平板中可能同时存在振动方式不同且波速各异的多种模态的 Lamb 波。按照振动方式的不同,Lamb 波的模态主要分为两大类:对称模态(S 模态)和反对称模态(A 模态)。对于每种模态的 Lamb 波,其相速度是指单一频率下该模态 Lamb 波的传播速度;而其群速度,则是指由一系列频率相近的该模态 Lamb 波的子波叠加而成的合成波(即波包)的传播速度。此外,Lamb 波还具有频散特性:当某一模态 Lamb 波在铝板内传播时,其相速度和群速度会随着频率、板厚以及铝板材料特性的不同而改变。

由于多模态特性的存在,一方面,不同模态 Lamb 波对铝板中不同类型和尺寸的缺陷灵敏,因此,在实际应用中,需要通过模态控制手段,针对特定的检测工况和需求,选择性地收发适当模态的 Lamb 波,以充分利用各模态 Lamb 波的优势;另一方面,Lamb 波的检测波形十分复杂,含有大量相互重叠的不同模态波的检测信号,使得波形中的有用信息难以被准确识别和提取,因此,需要通过模态控制手段,抑制干扰模态的产生,以提高 Lamb 波检测波形中有用信息的可辨识度。由此可知,实现模态控制是 Lamb 波 EMAT 研究和设计中的首要问题之一。

此外,对于大面积铝板,通常需要以扫查的方式实施电磁超声 Lamb 波层析成像,即将 EMAT 阵列相对于被测大面积铝板进行平移,并在平移过程中以固定的空间间隔进行 Lamb 波层析成像,最终将各次成像的结果进行拼接以获得完整的重建图像。为了满足扫查速度的要求,每一次成像均需有限的时间内完成,因此,无法通过依次旋转阵列中的各个 EMAT 的方式逐步完成沿各个方向的 Lamb 波的激发和接收,而需要使用能够沿  $360^\circ$  方

向(即所谓全向)收发 Lamb 波的全向 EMAT,并行且高效地完成 Lamb 波的全向收发。

综上所述,实施铝板电磁超声 Lamb 波层析成像需要使用全向模态可控 Lamb 波 EMAT。对此类 EMAT 的研究,主要涉及两个方面的问题:①全向 Lamb 波的模态控制方法;②全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的换能机理和设计方法。其中,前者构成了后者的部分研究基础。下面,主要从上述两方面对国内外已有研究成果进行综述。

### 1. 全向 Lamb 波模态控制方法

在实际检测中,能否激发和接收到正确模态的 Lamb 波,取决于诸多的影响因素,如各模态 Lamb 波的波结构、频散特性和衰减特性等。美国宾夕法尼亚州立大学的 Rose J. L. 等人基于弹性力学理论,分析并阐明了 Lamb 波模态选择的理论依据。在此基础上,他们深入研究了平板中振源的结构和尺寸与所激发 Lamb 波模态之间的关系,并提出,激发 Lamb 波所用换能器的结构和尺寸对所产生 Lamb 波的模态种类有着重要的影响。传统的模态可控 Lamb 波换能器主要有斜入射式换能器、叉指式换能器和梳状换能器等。使用这些换能器,通过改变超声波入射角度或换能器的空间结构和尺寸等,可以实现不同模态 Lamb 波的激发和接收。但是,这些传统模态可控换能器均为具有指向性的 Lamb 波换能器,而不能实现特定模态 Lamb 波的全向收发。

双元激励法是一种较为简单的全向模态可控 Lamb 波激发方法,其通过在平板的上、下表面各布置一个圆盘形压电换能器,以在平板的上、下表面产生对称或反对称的离面位移,从而选择性地激发 S 模态或 A 模态全向 Lamb 波。该模态控制方法同样适用于全向 Lamb 波 EMAT。然而,该方法需要在平板的双面布置换能器,导致其应用受到一定的限制。

20 世纪 90 年代开始,随着结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 技术的快速发展,全向 Lamb 波换能器因适用于对大面积平板实施高效 SHM 而受到越来越多的关注。但是,针对全向 Lamb 波收发和传播过程的理论模型的研究相对较少;且在实际应用中,全向 Lamb 波各参数的选择缺乏数学基础的支撑。对此,2004 年, Raghavan A. 和 Cesnik C. E. S. 基于三维弹性力学基本方程,建立并分析了由圆形压电振源产生的全向 Lamb 波声场的三维解析模型,并通过数值计算和实验手段对模型的有效性进行了验证。随后,他们又建立了由微小矩形压电振源产生的全向 Lamb 波声场的三维解析模型;对该模型的有效性进行了数值仿真和实验验证;并利用所建立的模型对全向 Lamb 波压电换能器的尺寸进行了优化。但是,上述研究并未给出对全向 Lamb 波进行模态控制的方法。

Giurgiutiu V. 等人在深入研究和分析 Lamb 波声场解析模型的基础上,采用对压电换能器进行频率调谐的方法实现全向模态可控 Lamb 波激发,通过实验对该模态控制方法的有效性进行了验证,并将基于该方法的全向 Lamb 波压电换能器应用于 Lamb 波相控阵缺陷检测和时间反转缺陷检测。研究表明,使用该方法可以在一定程度上控制所激发 Lamb 波的模态,从而降低检测波形中 useful 信号的提取难度。但是,该方法只能在一定程度上增强或削弱某一种模态 Lamb 波的幅值,而当平板中含有较多模态的 Lamb 波时,该方法无法同时抑制有用模态以外所有其他模态 Lamb 波的出现,即其模态控制能力存在一定的局限性。

近年来,一些研究者尝试采用阵列式压电换能器实现全向 Lamb 波模态控制。Glushkov E. V. 等人基于理论分析提出了一种全向 Lamb 波模态控制方法:通过给阵列式

压电换能器中多个独立环形换能单元施加不同幅值的激励信号,以激发特定模态的全向 Lamb 波。但是,层析成像需要使用大量换能器,每个换能器中又包含多个独立换能单元,因此,在实际应用中难以对如此大量的独立换能单元进行精确的激励幅值控制。Koduru J. P. 等人将具有指向性的压电换能器中的叉指电极结构和梳状电极结构引入阵列式全向 Lamb 波压电换能器,从而使得只需对阵列式换能器中各换能单元施加相同幅值的激励信号即可实现模态控制。但是,上述电极结构和 Lamb 波模态控制方法只适用于压电全向 Lamb 波换能器,而无法用于全向模态可控 Lamb 波 EMAT。

国内对全向 Lamb 波模态控制方法的研究起步相对较晚。张海燕等人基于有限元分析软件 ANSYS 建立了全向 Lamb 波双元激励的仿真模型,并研究了双元激励法参数选择对 Lamb 波模态控制效果的影响。郑阳等人应用有限元分析软件 ABAQUS 建立了全向 Lamb 波双元激励的仿真模型,并利用所建模型激励单一  $S_0$  模态 Lamb 波,用以研究  $S_0$  波在缺陷处的二维散射特性。吴斌等人基于频率调谐方法,通过实验手段实现了单一模态 Lamb 波的激发,并研究了实验条件,如黏接剂的性能和换能器上黏结位置等,对 Lamb 波模态控制效果的影响。

综上所述,国内外研究者针对 Lamb 波模态控制方法和模态可控 Lamb 波换能器开展了大量的研究,对于全向 Lamb 波模态控制方法的研究也取得了一定的进展,为针对全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的研究奠定了较好的基础。但是,已有的全向 Lamb 波模态控制方法仍具有一定的局限性,如需要在平板的双面布置换能器以及不能完全抑制所有干扰模态波的出现等。此外,已有方法大多针对压电换能器,无法直接用于指导全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的设计。因此,仍需要进一步研究适用于 EMAT 的全向 Lamb 波模态控制方法。

## 2. 全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的换能机理和设计方法

EMAT 在铝板中激发和接收 Lamb 波,主要基于洛伦兹力机理。一直以来,国内外研究者针对洛伦兹力 EMAT 的换能机理和设计方法进行了大量的研究。

国外针对洛伦兹力 EMAT 换能机理的研究兴起于 20 世纪 70 年代。1973 年,Thompson R. B. 开创性地提出了具有重要应用价值的 Lamb 波 EMAT 结构,并通过理论分析和实验研究了洛伦兹力 EMAT 的换能机理和特性。但是,他所提出的 EMAT 为具有指向性的 Lamb 波 EMAT,只能沿特定方向收发 Lamb 波。20 世纪 90 年代初,Ludwig R. 和 Dai X. W. 等人推导了洛伦兹力 EMAT 的系统控制方程,建立了洛伦兹力 EMAT 的二维有限元模型,并详细介绍了该模型的求解方法。他们建立的模型包括五个部分:①电磁铁所提供静态磁场的分布;②铝板表面涡流的分布;③洛伦兹力的分布;④洛伦兹力产生超声波;⑤超声波信号在接收用 EMAT 中产生感应电动势。但是,他们所建立的模型只针对超声表面波,未涉及 Lamb 波的声场模型。Shapoorabadi R. J. 在采用解析方法和有限元方法对洛伦兹力 EMAT 进行的过程中,着重考虑了 EMAT 线圈各匝导体间的集肤效应和邻近效应,提高了理论分析和仿真计算的准确性。但是,该研究仅对 EMAT 中的电磁耦合关系进行了计算,未涉及超声场。Dhayalan R. 应用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 与 ABAQUS 相结合,实现了洛伦兹力 EMAT 的电磁场仿真分析以及 Lamb 波在被测试样中传播的仿真分析。但是,他所研究的 EMAT 为具有指向性的 EMAT,而非全向 Lamb 波 EMAT。

我国对洛伦兹力 EMAT 换能机理的研究起步较晚。清华大学的郝宽胜等人对具有指向性的模态可控 Lamb 波 EMAT 进行了三维解析建模。哈尔滨工业大学的康磊等人以提高 EMAT 检测信号强度和模态控制能力为目标,对具有指向性的模态可控 Lamb 波 EMAT 进行了参数优化设计。

上述国内外研究者针对洛伦兹力 EMAT 换能机理的研究,仅涉及表面波 EMAT 和具有指向性的 Lamb 波 EMAT,未涉及全向 Lamb 波 EMAT。为使用洛伦兹力 EMAT 在铝板中实现全向 Lamb 波的收发,Wilcox P. D. 等人提出了一种洛伦兹力全向 Lamb 波 EMAT 的设计方法,并对 EMAT 收发全向 Lamb 波和实施 Lamb 波模态控制的原理进行了分析和实验验证。他们所设计的 EMAT(以下简称“传统 EMAT”)的结构如图 1.1(a)所示,主要由圆柱形永磁体、通有脉冲激励电流  $I$  的密绕螺旋线圈和被测铝板三部分组成。该 EMAT 基于  $A_0$  模态 Lamb 波以离面位移为主导、 $S_0$  模态 Lamb 波以面内位移为主导的特性,通过令永磁体产生的静态磁场的方向垂直于铝板表面,使得基于洛伦兹力产生的振动位移只有面内分量,从而使激发出的全向 Lamb 波以  $S_0$  波为主。但是,一方面,该 EMAT 只能实现以  $S_0$  波为主的 Lamb 波收发;另一方面, $A_0$  波也包含少量的面内位移分量,即该 EMAT 不能完全抑制  $A_0$  波的产生。Nagy P. B. 提出了另一种洛伦兹力全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的设计方法:以图 1.1 所示的 EMAT 结构为基础,通过调整圆柱永磁体的直径,以控制静态磁场和洛伦兹力的角度,使得铝板中离面位移被增强、面内位移被抑制,从而使激发出的 Lamb 波以  $A_0$  波为主。该 EMAT 的原理和局限性均与传统 EMAT 类似。

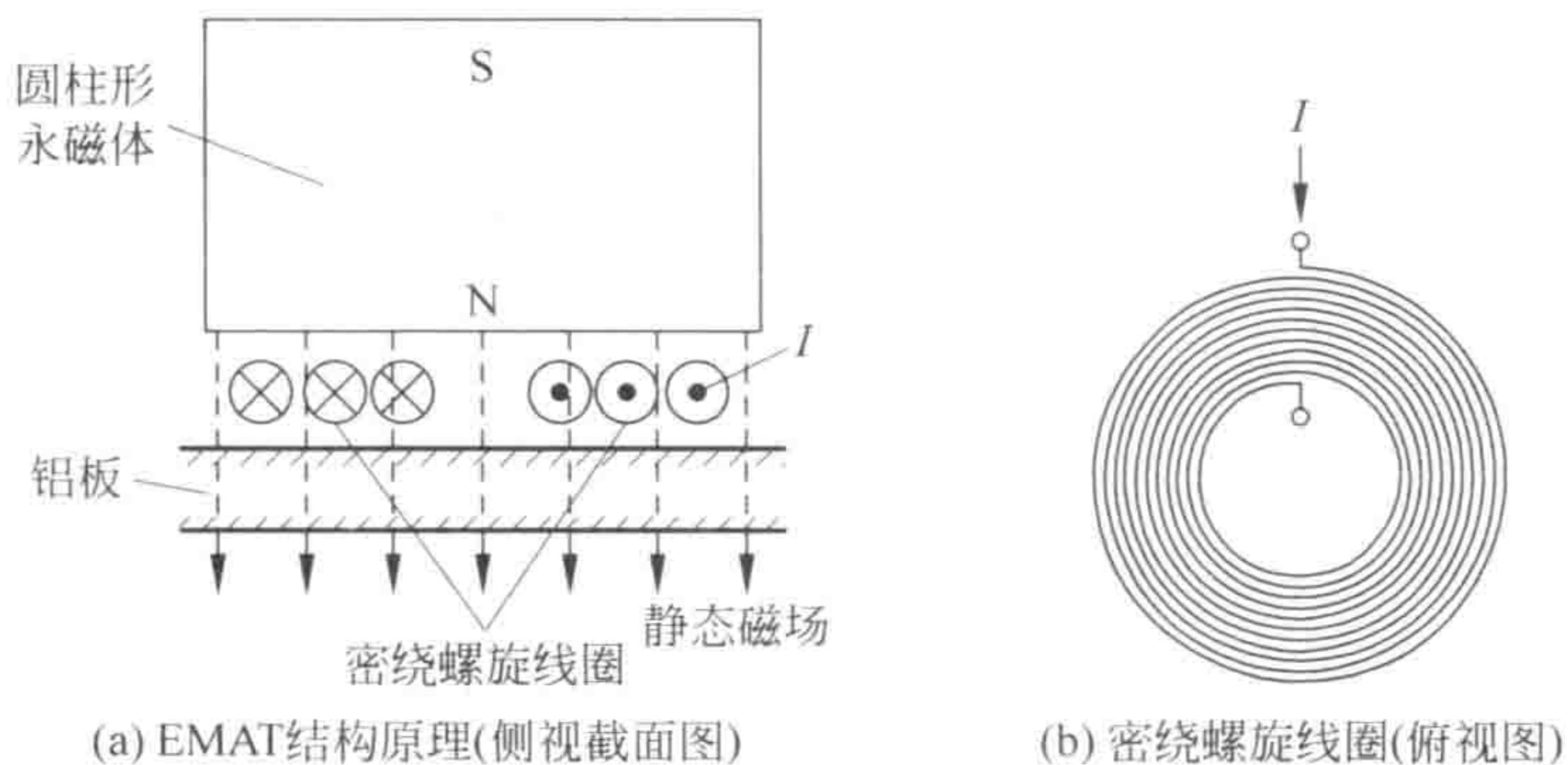


图 1.1 传统 EMAT 的结构原理示意图

综上所述,国内外目前针对洛伦兹力 EMAT 换能机理的研究大多仅涉及表面波 EMAT 和具有指向性的 Lamb 波 EMAT,很少涉及全向 Lamb 波 EMAT,更鲜有涉及全向模态可控 Lamb 波 EMAT;而对于已有基于洛伦兹力的全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的设计方法,其所设计出 EMAT 的模态控制能力具有一定的局限性,难以满足层析成像中准确提取有用模态 Lamb 波检测信息的需求。因此,有必要针对基于洛伦兹力的全向模态可控 Lamb 波 EMAT 的换能机理和有效设计方法开展相应的研究。

### 1.2.1.2 钢板 SH 导波方向性 EMAT 的研究现状

基于磁致伸缩原理,一般利用 EMAT 在钢板中激发水平剪切波(Shear-horizontal guided waves,简称 SH 导波)。由于压电换能器结构和换能原理上的限制,使得压电换能

器不易产生 SH 导波,而 EMAT 更容易产生,因此,实际检测工程中也常采用 EMAT 作为激发和接收 SH 导波并进行缺陷检测的换能器。金属板中的  $SH_0$  导波是最常用的导波模式之一,相对于金属板中的 Lamb 波,优势在于发生有缺陷的散射过程时导波信号强度衰减小,其传播过程中不会发生模式转换,其波速不随工作频率发生变化即没有频散现象,且在低频工作区域内能够实现单一模式控制,能够在一定程度上简化电磁超声导波检测信号的分析过程,在待测金属板中提供模式单一、纯净的  $SH_0$  模式导波,有利于提高导波检测信号的分析效率及金属板导波检测效率。此外,SH 波不产生平面外的质点位移,因此质点运动和波的传播不会受到钢板承载介质的影响。

钢板 SH 导波方向性 EMAT,旨在探究 EMAT 激发 SH 导波的方向性问题,包括能否实现激发 SH 导波的方向控制、SH 导波在钢板传播过程中体现的方向特性、接收 EMAT 对钢板 SH 导波的定向接收特性等。钢板 SH 导波 EMAT 的方向性问题是本书钢板缺陷轮廓导波散射成像模型和方法的重要组成部分,能够为钢板缺陷轮廓导波散射成像模型的求解提供先验条件,提高钢板缺陷轮廓成像精度。

目前国内外关于 EMAT 或其他类型超声导波换能器的研究,大多集中于如何改善换能器的性能,其中也包括了一些对于激发出的超声导波在传播过程中方向性的研究。Xie 采用仿真和实验的方法,对基于洛伦兹力原理的铝板弯曲线圈 EMAT 激发瑞利波束的方向性问题进行了研究;通过对不同部位弯曲线圈长度的改变,增强了铝板中瑞利波传播过程的聚焦性,减小了旁瓣的信号强度。Hill 采用基于周期永磁体 (periodic permanent magnet, PPM) 的 EMAT,充分利用 PPM EMAT 的周期特性,通过改变 EMAT 中线圈输入信号的频率来实现导波发射角度的改变。Seung 采用一对环形永磁体提供偏置磁场,基于铁磁性材料的磁致伸缩原理,研发了一种全向激发 SH 导波的 EMAT。Wilcox 针对大面积金属板状结构件的快速扫查检测需求,设计了一种基于  $S_0$  模式导波的全向 EMAT 阵列。Roh 通过改变给定压电元件上的指叉状电极结构 (inter-digital transducer, IDT),设计了一种工作频率和指向性具有一定可控性的 IDT 类型 Lamb 波换能器,并做成环形和矩形分别用于铝板人工裂纹缺陷的长度和倾斜角度检测,相对于一般的压电换能器,在工作频率和激发 Lamb 波方向上具有了一定的可控性。Masuyama 通过数值仿真计算的方法,设计了一种环形的换能器阵列,来激发给定辐射方向的窄波束,并实现窄波束辐射方向的可控性。Dixon 将等离子燃烧器应用于超声波的激发,用较宽带宽的稳定迈克尔逊干涉仪测量超声波振动的离面位移响应,并采用 EMAT 测量和研究了所产生纵波的方向性模式。Bernstein 采用激光光源在铝板中产生超声横波,利用 EMAT 接收在铝板中传播的超声横波,对比研究了激光线性源与点源所产生横波的幅值方向性问题。Ogi 设计了在钢板中产生垂直剪切弹性波的线聚焦 EMAT,试图通过改变弯曲线圈各匝之间的距离实现垂直剪切弹性波的线性传播,并研究了其检测灵敏度与提高值的关系。中科院声学所的吴迪等人用 EMAT 在铝块表面产生超声横波,通过分析铝块表面非均匀水平剪切力的分布对表面超声横波的方向性模式进行了研究。

综上所述,目前国内外关于 EMAT 激发或接收超声导波的方向性研究,多为全向 EMAT 或方向单一的产生线性超声波 EMAT,在对 EMAT 激发超声导波方向的精确性和可控性方面缺乏研究,而能否精确控制 EMAT 激发超声导波的方向,直接影响着其对缺陷的检测灵敏度以及缺陷导波检测信号的准确性和可靠性。因此,需要研发激发或接收超声

导波方向精确可控的 EMAT, 从而为缺陷轮廓导波散射成像提供准确、丰富的导波检测信号, 这对于提高缺陷轮廓导波散射成像精度具有重要意义。

## 1.2.2 超声导波层析成像方法研究现状

### 1. Lamb 波层析成像方法的研究现状

“层析成像”一词最早源于医学领域, 专指 X 射线计算机层析成像(Computer Tomography, CT), 是一种利用 X 射线扫描所得信息反演计算被扫描物体中介质分布情况的图像重建技术。之后, 层析成像技术主要应用于医学和地球物理学领域, 与前者不同, 后者利用声波对被测对象进行扫描。

1990 年, Jansen D. P. 和 Hutchins D. A. 首次将层析成像技术引入了 Lamb 波检测领域。他们采用医学 CT 领域中常用的滤波反投影(Filtered Back Projection, FBP)算法, 针对铝板上的通孔型缺陷进行图像重建; 在每次重建过程中, 采用平行投影方式获取投影数据, 即通过旋转换能器阵列, 从数十个不同的方向进行投影, 每次投影包含数十条平行的 Lamb 波射线, 如图 1.2 所示。以下将此类基于 FBP 和平行投影的 Lamb 波层析成像方法称为 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法。在研究中, 他们分别选择 Lamb 波信号的能量衰减(以下简称“衰减”)和走时(Time-Of-Flight, TOF, Lamb 波从激发用换能器传播到接收换能器所用的时间)作为投影数据。研究结果表明, 选择后者作为投影数据, 可以获得更高的缺陷重建准确度。随后, Hutchins D. A. 等人基于 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法, 采用 Lamb 波信号中心频率的偏移量(以下简称“频移”)作为投影数据, 对通孔型缺陷进行图像重建, 结果表明, 可以获得相比于使用前两种投影数据更高的缺陷重建准确度。Wright W. 等人以衰减和频移作为投影数据, 研究了 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法应用于槽型缺陷时的成像效果。Zhao X. 等人将插值法引入 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法, 以减少成像所需的投影数据量。

上述 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法的局限性在于, 需要不断旋转换能器阵列, 以获得足够多的投影数据, 因此, 其成像效率低且工作量巨大。针对此, 1999 年, McKeon J. C. P. 和 Hinders M. K. 等人将地球物理学层析成像领域中常用的跨孔投影方式用于 Lamb 波层析成像, 形成 Lamb 波跨孔层析成像方法。跨孔投影方式的原理如图 1.3 所示, 收发换能器分别沿直线布置于成像区域两侧, 且任意一对收发换能器组合均用来进行 Lamb 波投影。相比

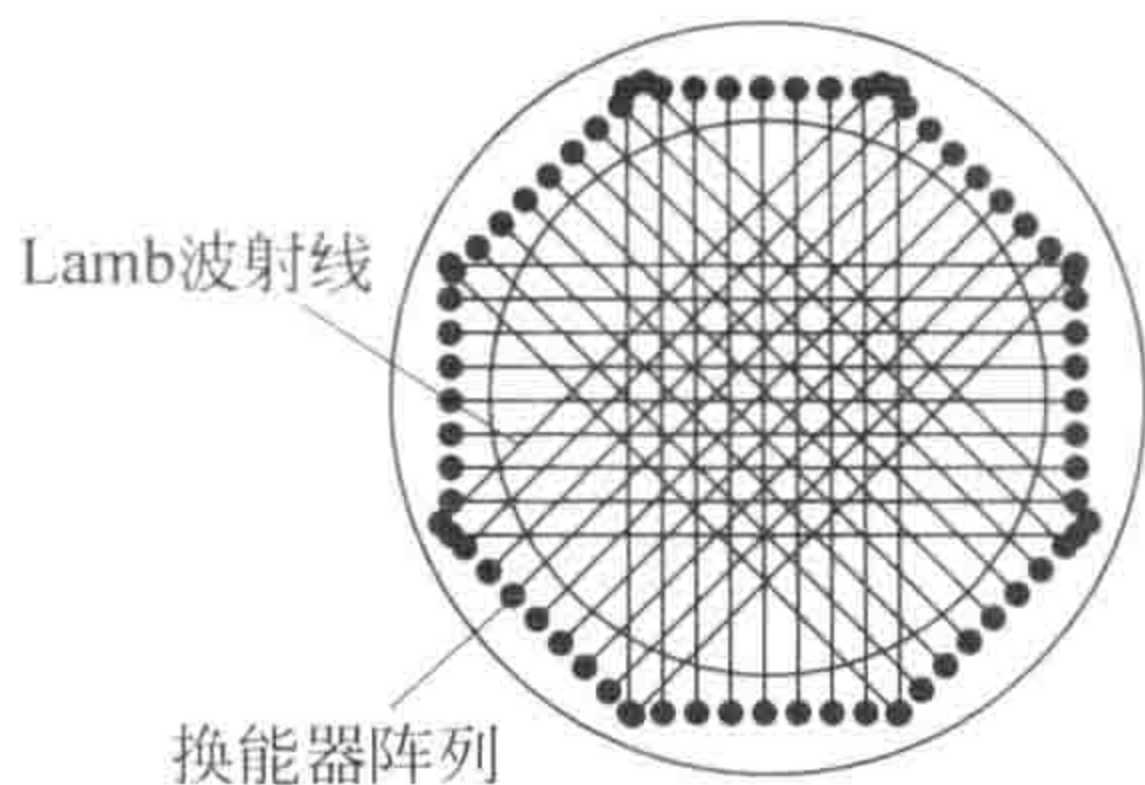


图 1.2 平行投影方式原理示意图

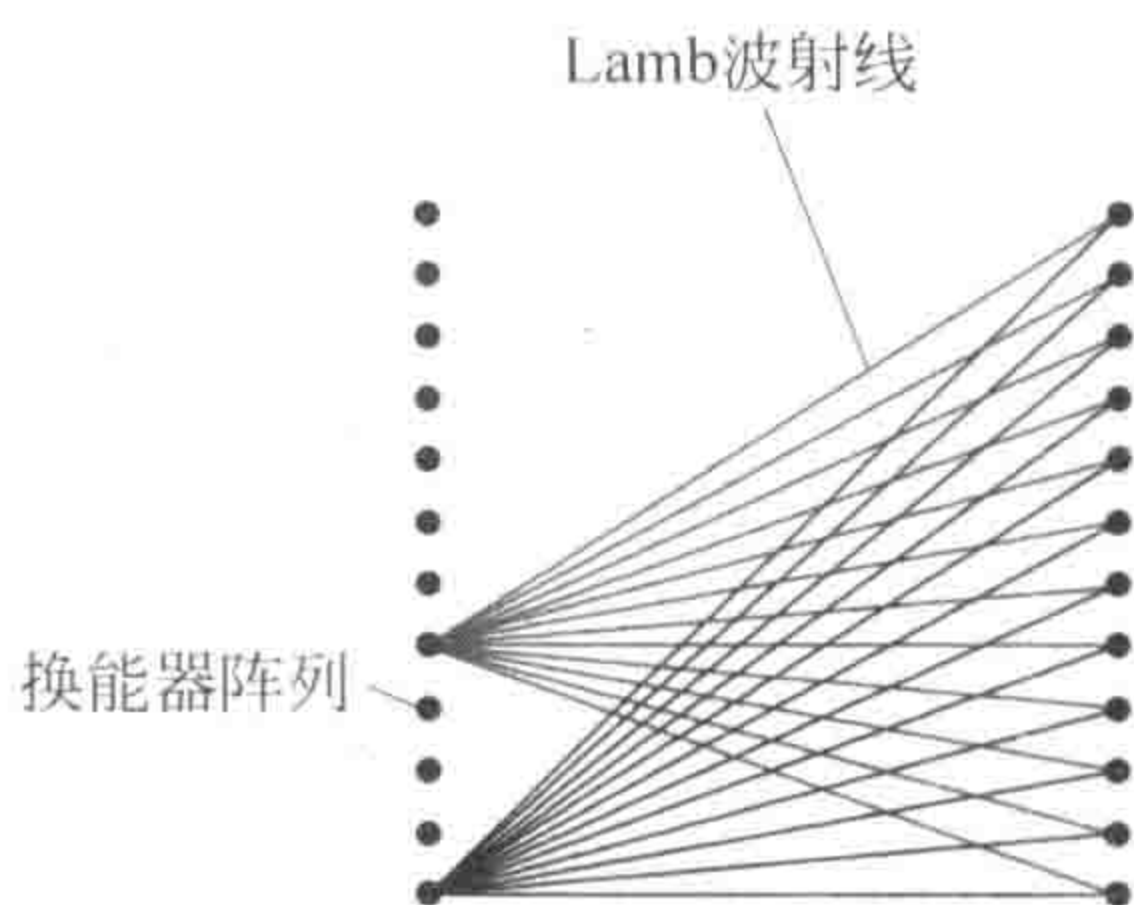


图 1.3 跨孔投影方式原理示意图

于 Lamb 波平行 FBP 层析成像方法, Lamb 波跨孔层析成像方法无需旋转换能器阵列,且所需投影数量较少,可工作于投影密度较低或不均匀的工况下。Lamb 波跨孔层析成像方法因所用的投影数量较少而无法使用传统的 FBP 算法,其需要使用迭代方法进行图像重建,常用的迭代方法主要有代数重建技术(Algebraic Reconstruction Technique, ART)和联合迭代重建技术(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT)等。此外,该方法通常需要以 Lamb 波的走时(Time of Flight, ToF)作为投影数据。Prasad S. M. 等人通过实验手段,对 Lamb 波跨孔层析成像所用换能器阵列中的换能器间距和数量进行了改进和优化。

近年来,缺陷概率性检测重建算法(Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage, RAPID)在 Lamb 波层析成像领域受到了较多关注。基于该算法的 Lamb 波层析成像方法(以下简称“Lamb 波 RAPID 层析成像方法”)使用 Lamb 波检测信号的差异系数(Signal Difference Coefficient, SDC)作为投影数据。SDC 可通过计算含缺陷情况下检测信号和无缺陷情况下检测信号之间的互协方差获得。Lamb 波 RAPID 层析成像方法使用呈圆形、方形或不规则形状的环绕式换能器阵列进行投影,其优点是只需使用少量的换能器即可完成图像重建。Rose J. L. 等人对 Lamb 波 RAPID 层析成像方法进行了深入研究,并将其用于飞机机翼缺陷的检测、定位和监测。Wang D. 等人将虚拟敏感路径和数字损伤指纹技术引入 Lamb 波 RAPID 层析成像方法,以提高该方法的缺陷图像重建质量。

相比于 Lamb 波平行 FBP 和 RAPID 层析成像方法, Lamb 波跨孔层析成像方法具有较高的缺陷重建准确度,且只需在成像区域两侧很窄的线性区域内布置换能器即可完成成像,非常适合用于进行铝板被大面积遮挡或覆盖等工况下的缺陷成像,因此,有着重要的研究和应用价值。基于此,本书主要针对 Lamb 波跨孔层析成像方法展开更深入的理论和实验研究工作。

## 2. Lamb 波跨孔层析成像方法的研究现状

Lamb 波跨孔层析成像方法的基本思想是,将成像区域划分成若干个像素网格,然后,根据从检测波形中提取出的各条 Lamb 波射线的走时和计算所得的各条 Lamb 波射线的传播路径,迭代求解各像素网格内的剩余板厚,从而实现缺陷图像重建。因此, Lamb 波射线走时提取和传播路径求解的准确与否直接决定着 Lamb 波跨孔层析成像方法的成败和性能。此外,由于不同模态 Lamb 波对不同类型和尺寸的缺陷灵敏,如何充分和有效地利用不同模态 Lamb 波的优势也是 Lamb 波跨孔层析成像中需要重点考虑的问题。由此可知,针对 Lamb 波跨孔层析成像方法的研究主要涉及三个方面的问题:①如何准确地提取 Lamb 波的走时;②如何通过实施多模态 Lamb 波跨孔层析成像提高成像性能;③如何准确求解 Lamb 波的传播路径。围绕上述三个方面的问题,国内外研究者进行了大量的理论和实验研究。

### 1) 电磁超声导波检测信号走时提取方法的研究现状

电磁超声导波的走时信息,是指从激励换能器激发出超声导波到接收换能器接收到超声导波所经历的时间内超声导波的传播过程以及与缺陷的相互作用过程等信息。超声导波的走时是电磁超声导波检测信号重要的特征量之一,能够为基于超声导波检测的缺陷定位提供最为直接的信息,同时也是近年来发展起来的多种超声导波成像方法的直接输入量,其

提取精度直接影响到缺陷定位精度以及导波成像模型和算法的缺陷成像精度,因此,亟需对电磁超声导波检测信号的走时提取方法开展研究,以提高电磁超声导波检测信号的走时提取精度。

由于 EMAT 的换能效率相对于压电换能器、激光换能器等较低,为提高超声导波的信号强度以及导波检测信号的信噪比,在采用 EMAT 激发窄带电磁超声导波时,输入 EMAT 线圈的激励电压为多个周期的 tone-burst 激励信号,导致接收换能器接收到的导波检测信号在时域上所占的时间尺度范围较宽,大多以波包的形式存在,难以确定该导波检测信号的具体到达时刻。另一方面,在一般常用的电磁超声导波检测系统中,为提高导波检测信号的信噪比,对激励换能器施加的激励信号功率较大,在激励信号施加瞬间,接收换能器会接收到来自激励换能器及其激励信号的空间感应脉冲波,在接收换能器接收到的导波检测信号波形上表现为初始脉冲波,其在时域上所占的时间尺度范围也较宽;由于初始脉冲波是激励换能器受到的大功率激励信号空间感应形成的,其包含了激励换能器在介质中激发出超声导波的时刻信息,因此,超声导波检测信号的计时起点信息包含在了具有一定时域宽度的初始脉冲波,不利于超声导波信号走时数据的提取。上述问题是造成超声导波检测数据走时提取难度大、精度不高的重要原因,是电磁超声导波检测领域的难点问题。

国内外关于超声导波检测信号的走时提取问题有一些相关研究,主要集中于对超声导波检测信号走时的估算。Legendre 采用小波变换算法从导波检测信号的主峰中提取出时间信息。为提高 Lamb 波层析成像算法的成像质量和精度,Leonard 提出一种动态小波变换指纹方法(dynamic wavelet finger-print,DWFP)来提取 Lamb 波检测信号的走时。还有学者采用小波神经网络方法测量超声波脉冲与待检测目标反射回波之间的走时差距。上海交通大学振动冲击噪声研究所的李富才基于信息熵的概念,选择了最优小波母函数来确定导波信号波包的具体位置;对于光纤传感器得到的带通滤波信号,利用此信号的希尔伯特变换获取信号包络,进而进行信号特征提取和缺陷探测。为提高缺陷成像的空间分辨率,有学者提出一种扭曲频率变换方法(warped frequency transform,WFT),主要针对压电换能器阵列产生的 Lamb 波检测信号频移问题进行中心频率修正,减少导波检测信号波包的失真问题。Moll 基于匹配追踪分解算法,提出一种时变的反转滤波器对导波检测信号进行处理,提高了一发一收导波检测信号的时间分辨率,并获得了所需的导波到达时间。西安交通大学的学者采用线调频小波变换和瞬时频率估计的方法计算了铝板中超声导波检测信号的到达时间。

上述对于超声导波检测信号走时提取的研究均有自身较为特定的应用条件,目前缺乏对于电磁超声导波检测信号通用且准确的走时提取方法。因此,需要研究一种通用的电磁超声导波检测信号走时提取方法,从而准确提取出导波检测信号走时,为缺陷的定位以及缺陷成像算法和模型提供准确可靠的参考依据或输入量,提高缺陷电磁超声导波检测的检测精度及缺陷成像精度。

## 2) 多模态 Lamb 波跨孔层析成像方法

由于不同模态的 Lamb 波对不同类型和尺寸的缺陷灵敏,利用多个不同模态的 Lamb 波进行层析成像,不仅有助于实现对不同类型缺陷的有效成像,更有助于实现对变深度缺陷等具有复杂特征的缺陷的高质量图像重建和准确特征信息提取。因此,如何充分而有效地利用各模态 Lamb 波的优势,也是 Lamb 波层析成像领域重要的研究内容之一。



Hutchins D. A. 等人分别将  $A_0$ 、 $S_0$ 、 $A_1$  和  $S_1$  模态 Lamb 波应用于平行 FBP 层析成像实验。Ho K. S. 等人分别使用  $S_0$ 、 $A_1$  和  $S_1$  波对圆孔形缺陷进行了平行 FBP 层析成像实验,结果表明,使用  $A_1$  波可以获得更高的图像重建准确度。Koduru J. P. 等人通过实验,比较了  $A_1$  和  $S_1$  波在 RAPID 层析成像中对铝板上水负载的灵敏度。

由于 Lamb 波平行 FBP 和 RAPID 层析成像的原理与 Lamb 波跨孔层析成像的原理不同,上述研究结果对多模态 Lamb 波跨孔层析成像方法研究的借鉴意义相对较小。Leonard K. R. 等人采用宽频激励信号沿个方向进行 Lamb 波激发,从各检测波形中分离出  $A_0$ 、 $S_0$  和  $A_1$  模态 Lamb 波,提取这三种波的走时,随后,分别利用这三种波单独进行跨孔层析成像实验,并对结果进行比较。在上述研究基础上,他们提出了一种走时分类算法,旨在降低因各模态波相互干涉造成的不利影响,从而提高各模态波走时提取的准确度。随后,他们使用上述三种波对不同尺寸的圆孔形缺陷进行了跨孔层析成像实验,并对缺陷重建效果进行了比较。

综上可知,已有的针对多模态 Lamb 波跨孔层析成像方法的研究,仅限于通过实验手段比较不同模态 Lamb 波的成像效果,其中每次成像只使用某一种模态的 Lamb 波,未给出不同模态波在多模态 Lamb 波跨孔层析成像中相互配合的原则和方法,因此,并未实现真正意义上的多模态 Lamb 波跨孔层析成像。因此,对于多模态 Lamb 波跨孔层析成像方法,仍有一些问题有待进一步研究。一方面,有必要研究常用模态 Lamb 波与跨孔层析成像有关的特征参数随工作条件变化的规律,以便能够根据不同的工作条件,在跨孔层析成像中更加充分和有效地利用这些模态的 Lamb 波。另一方面,有必要研究使用多种模态 Lamb 波进行跨孔层析成像的方法,且应重点探索各模态 Lamb 波之间相互配合的原则和方法。

### 3) Lamb 波传播路径的求解方法

在上述已有研究中,Lamb 波跨孔层析成像均基于直射模型进行,即认为 Lamb 波始终沿直线传播。但在实际情况下,当铝板中的 Lamb 波射线遇到缺陷时,其传播方向会发生偏转,即 Lamb 波射线将表现为沿弯曲的路径传播。因此,在含缺陷铝板中,基于直射模型求得的 Lamb 波射线传播路径相比于实际情况存在一定的误差,这将影响直射 Lamb 波跨孔层析成像的性能。上述问题的一个有效解决办法是,在跨孔层析成像中引入射线追踪(Ray Tracing,RT)技术:首先,通过直射跨孔层析成像求出缺陷的大致分布情况;随后,根据缺陷分布情况,利用 RT 技术搜索更接近真实情况的弯曲的 Lamb 波射线传播路径;最后,利用修正后的路径重新进行跨孔层析成像。上述过程称为“弯曲射线 Lamb 波跨孔层析成像”。

常规的超声 RT 算法主要分为两大类:一类是边值问题的弯曲 RT 算法,另一类是初值问题的试射 RT 算法。应用效果较好的弯曲 RT 算法主要包括:有限差分法、线性插值法和最短路径法等。此外,模拟退火法也被引入弯曲 RT 算法,以克服传统弯曲 RT 算法过分依赖初始模型准确性的问题。而试射 RT 算法的原理是根据给定的入射角计算出一条射线路径,并通过不断修正入射角来找到连接收发换能器的射线路径。Andersen A. H. 等人通过特征法和角位移计算给出了实现试射 RT 的数值算法。Wang Y. Q. 等人将费马原理用于各向异性介质中的超声体波试射 RT,并通过仿真模拟和实验手段实现了基于试射 RT 算法的超声体波跨孔层析成像。

上述研究均聚焦于声波或超声体波的 RT 算法,而非 Lamb 波的 RT 算法。Lamb 波具