

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学 号: 19920121152746

UDC\_\_\_\_\_

# 厦 门 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

### 感应式磁声发射无损检测数值模拟 及实验研究

#### Numerical Simulation And Experiment Study On Magnetoacoustic Emission with Magnetic Induction

李 超

指导教师姓名: 吴德会 副教授

专业名称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2015 年 04 月

论文答辩时间: 2015 年 05 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2015 年 04 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于     年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年    月    日

## 摘要

铝合金板材具有高强度、低密度、强耐腐蚀、高断裂韧性和良好的高低温特性等优点，是制造宇宙飞船、运载火箭、飞机、舰船、坦克、装甲车和高速列车的主要材料。然而，由于加工工艺限制，铝合金板材在生产过程中不可避免地存在分层、夹杂、裂纹和氧化膜等缺陷。无损检测技术是一种在不破坏待测物材质与性能前提下实现构件质量检测的技术，目前已在许多领域成为确保产品质量和可靠性的强制性措施。

本文研究的感应式磁声发射无损检测方法是利用线圈在导体感应出的涡流在静态磁场的作用下会受到洛伦兹力的作用使导体发生机械振动，进而产生磁声信号，该磁声信号包含了导体表面缺陷的电特性信息，通过声传感器接收该磁声信号，通过电磁场与声场的逆问题计算得出导体的电特性参数，最终实现导体缺陷电特征参数图像的重建。

本文首先对感应式磁声信号激发过程中激励电流在导体中产生的涡流场和涡流引起的洛伦兹力场进行了机理分析，并对洛伦兹力激发磁声信号基本方程进行了推算。然后利用有限元仿真软件 ANSYS 对用于铝板缺陷检测的磁声发射装置进行仿真。采用建模仿真的方式分析在磁声线圈中通入脉冲电流后在铝板表面激发的磁场、涡流场以及洛伦兹力分布等，并仿真分析了磁声线圈结构尺寸和提离值等参数对磁声信号强度的影响规律。在此基础上分别讨论了横向、竖向和倾斜三种方位的表面缺陷对涡流场和洛伦兹力场分布的影响，并通过二维仿真得到缺陷与铝板表面夹角对涡流强度的影响。

为了验证仿真结果的合理性，本文在搭建的磁声信号激励实验平台上进行一系列物理实验，在不同厚度的铝板上进行磁声信号激发实验，验证激发的磁声信号波模式，并对缺陷磁声信号进行了一系列实验研究。

**关键词：**感应式磁声发射 无损检测 ANSYS 数值模拟

## ABSTRACT

Aluminum plates have many advantages such as high strength, low density, good corrosion resistance, high fracture toughness and good performance under high or low temperature, and are the main materials for manufacturing spacecraft, rockets, aircraft, ships, tanks, armored vehicles and high-speed trains. However, due to limitation of processing technology, there are inevitably hierarchy, cracks and oxide inclusion defects in aluminum plates during the production process. Nondestructive detection is a kind of technology which detects components' quality without destroying the material and performance of the object to be measured. It has become compulsory measures to ensure product quality and reliability in many areas.

The Magnetoacoustic Emission with Magnetic Induction method studied in this paper is to use the coil to induce eddy currents which will be affected by Lorentz force in static magnetic field and cause mechanical vibration of the conductor. The magnetoacoustic signal contains the electrical characteristics information of defects on the surface of conductor. We can receive the signal by acoustic sensors and calculate electric parameters of conductor through the inverse problem of electromagnetic and acoustic field, finally realize the reconstruction of electrical characteristic parameters image of the defect.

This paper first analyzes the eddy current generated in the conductor and Lorentz forces caused by eddy current during the excitation of the magnetoacoustic signal and deduces the basic equations of Lorentz force. Then we simulate the plate defect detection device using the finite element simulation software ANSYS and analyze the magnetic and eddy current field and the Lorentz force distribution on the aluminum plate surface when the magnetoacoustic coil excited by pulse current. We also simulate the influence on the amplitude of the magnetoacoustic signal by parameters such as coil size and the lift-off value. On this basis we discuss respectively the influence of horizontal, vertical and inclined surface defects on the

eddy current and Lorenz force field and the influence of the angle between the plate surface and defects on eddy current intensity by two-dimensional simulation.

In order to verify the rationality of simulation results, this paper conducts a series of experiments on magnetoacoustic signal excitation platform. We excite magnetoacoustic signal on aluminum plates of different thickness, and verify the wave model excited. Finally we conduct a series of experiments on the magnetoacoustic signal of surface defects.

**Keywords:** Magnetoacoustic Emission with Magnetic Induction; Nondestructive Testing; ANSYS; Numerical Simulation

# 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景及研究意义 .....	1
1.2 常规无损检测方法介绍 .....	2
1.3 感应式磁声成像研究现状及最新进展 .....	4
1.4 感应式磁声发射方法与涡流检测、电磁超声的比较 .....	6
1.5 课题主要研究工作 .....	7
<b>第二章 感应式磁声信号激发机理研究.....</b>	<b>9</b>
2.1 磁声线圈感应涡流场解析模型 .....	9
2.2 感应涡流洛伦兹力场分析 .....	10
2.3 洛伦兹力激发磁声信号基本方程 .....	14
<b>第三章 感应式磁声发射机理仿真研究.....</b>	<b>16</b>
3.1 有限元仿真软件介绍 .....	16
3.2 铝板感应式磁声发射有限元模型 .....	17
3.2.1 永磁体模型.....	17
3.2.2 交变磁场模型.....	19
3.2.3 磁声发射整体模型.....	23
3.3 主要参数对涡流、洛伦兹力强度的影响分析 .....	30
<b>第四章 感应式磁声发射缺陷影响仿真研究.....</b>	<b>35</b>
4.1 横向缺陷仿真研究 .....	35
4.2 竖向缺陷仿真研究 .....	39
4.3 倾斜缺陷仿真研究 .....	42
4.4 缺陷与表面夹角对涡流强度的影响 .....	44
4.5 上下表面缺陷的区分 .....	46
<b>第五章 感应式磁声发射检测硬件系统.....</b>	<b>50</b>
5.1 实验系统的总体结构 .....	50
5.2 全桥逆变电路工作原理 .....	50
5.2.1 驱动电路.....	51
5.2.2 缓冲电路.....	52
5.2.3 输出调谐及滤波.....	54

5.3 接收电路 .....	54
5.4 匹配电路 .....	56
<b>第六章 感应式磁声信号实验研究 .....</b>	<b>58</b>
6.1 缺陷磁声信号实验研究 .....	58
6.1.1 Lamb 波磁声信号激发实验 .....	58
6.1.2 铝板表面波磁声信号激发实验 .....	61
6.1.3 缺陷与铝板表面角度对磁声信号的影响实验 .....	62
6.1.4 横向、竖向、倾斜缺陷磁声信号对比 .....	63
6.2 对比性实验 .....	65
6.2.1 线圈间距对磁声信号强度的影响 .....	65
6.2.2 线圈长度、导线宽度和提离值对磁声信号强度的影响 .....	66
6.2.3 线圈匝数对磁声信号强度的影响 .....	67
6.2.4 激励电压对磁声信号强度的影响 .....	68
<b>第七章 结论与展望 .....</b>	<b>69</b>
7.1 结论 .....	69
7.2 展望 .....	70
参考文献 .....	71
致谢 .....	75
攻读硕士学位期间的研究成果 .....	76



# Content

<b>ABSTRACT in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT in English</b> .....	<b>II</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Background and significance .....	1
1.2 Conventional nondestructive testing methods.....	2
1.3 MAT-MI research status and recent progress .....	4
1.4 Comparison of MAE-MI, eddy current testing and Electromagnetic Acoustic.....	6
1.5 Major Contents of Study .....	7
<b>Chapter 2 Magnetoacoustic signal excitation mechanism study</b> .....	<b>9</b>
2.1 Analytical model of induced eddy current field .....	9
2.2 Analysis of Lorenz force field .....	10
2.3 Basic equations of magnetoacoustic signal excitation by Lorenz .....	14
<b>Chapter 3 Simulation on MAE-MI mechanism study</b> .....	<b>16</b>
3.1 The finite element simulation software .....	16
3.2 MAE-MI finite element model of aluminum plate .....	17
3.2.1 The permanent magnet model.....	17
3.2.2 Dynamic magnetic field model.....	19
3.2.3 The whole MAE-MI model .....	23
3.3 Analysis of influence of main parameters on the eddy current and Lorenz force .....	30
<b>Chapter 4 MAE-MI simulation study on the influence of defect</b> .....	<b>35</b>
4.1 Simulation study on horizontal defect .....	35
4.2 Simulation study on vertical defect .....	39
4.3 Simulation study on inclined defect .....	42
4.4 Influence of the angle between the plate surface and defects on eddy current intensity .....	44
4.5 Distinction between upper and under surface defects.....	46
<b>Chapter 5 MAE-MI detection hardware system</b> .....	<b>50</b>
5.1 The overall structure of the experimental system.....	50
5.2 Operational principle of full bridge inverter circuit.....	50
5.2.1 Drive circuit .....	51
5.2.2 Buffer circuit.....	52
5.2.3 Output tuning and filtering.....	54
5.3 Receiving circuit.....	54

<b>5.4 Building-out circuit</b> .....	<b>56</b>
<b>Chapter 6 Experimental study on MAE-MI signal</b> .....	<b>58</b>
<b>6.1 Experimental study on magnetoacoustic signal of defect</b> .....	<b>58</b>
6.1.1 Lamb wave magnetoacoustic signal excitation experiment.....	58
6.1.2 Surface wave magnetoacoustic signal excitation experiment.....	61
6.1.3 Influence of the angle between the plate surface and defects on magnetoacoustic signal experiment .....	62
6.1.4 Contrast of magnetoacoustic signal of horizontal,vertical and inclined defect.....	63
<b>6.2 Comparative experiment</b> .....	<b>65</b>
6.2.1 Influence of coil spacing on magnetoacoustic signal intensity.....	65
6.2.2 Influence of coil length,conducting wire width and lift-off value on magnetoacoustic signal intensity .....	66
6.2.3 Influence of number of turns of coil on magnetoacoustic signal intensity.....	67
6.2.4 Influence of excitation voltage on magnetoacoustic signal intensity ...	68
<b>Chapter 7 Conclusion and Prospect</b> .....	<b>69</b>
7.1 Conclusion .....	69
7.2 Prospect.....	70
<b>References</b> .....	<b>71</b>
<b>Achnowledgement</b> .....	<b>75</b>
<b>Publication</b> .....	<b>76</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 选题背景及研究意义

铝合金板材具有低密度、强度高、耐蚀性等优点，在航空、航天、船舶、核工业及兵器工业都有着广泛的应用前景及不可替代的地位<sup>[1]</sup>。随着载人航天<sup>[2]</sup>、国产大飞机<sup>[3]</sup>和高速铁路<sup>[4]</sup>等项目的不断成熟，铝合金板材越来越发挥着不可替代的作用。然而，由于加工工艺限制，铝合金板材在生产过程中不可避免地存在分层、夹杂、裂纹和氧化膜等缺陷。作为控制产品质量的必要环节，铝板在生产、存储、运输、加工过程中必须通过无损检测技术及时剔除超标的残次品<sup>[5]</sup>。无损检测是一种在不破坏待测物材质与性能前提下实现构件质量检测的技术，目前已在许多领域成为确保产品质量和可靠性的强制性措施<sup>[6]</sup>。

目前板材缺陷在线检测方法主要分为漏磁法、涡流法和超声波法三种。对于裂纹的有效检测方法主要还是超声波法，分为压电超声检测法和电磁超声检测法。压电超声的一个致命弱点是需要耦合剂，且需要对材料表面进行预处理。在对材料进行检测时，操作起来比较困难且费用较大。电磁超声检测法无需耦合剂，也不需要表面进行预处理。近年来不少国内学者前后开展了大量电磁超声检测技术的相关研究工作并研发了一系列实际生产应用中的检测设备。

本文提到的感应式磁声发射无损检测是基于医学成像<sup>[7]</sup>领域的感应式磁声成像方法。该方法是一种新兴的电磁成像技术，利用声场、电场和磁场的耦合作用来对试验样本进行无损检测，可以准确地获取被测样本的电导率分布。目前，感应式磁声成像技术在国际上是前沿和热点方向，已在机理模型、声电激励、信号转换、信息检测及图象重建方法方面开展了研究工作。国内，中国科学院电工研究所、中国医学科学院生物医学工程研究所、中南民族大学等不同领域的学者近几年陆续开展了磁声成像<sup>[8]</sup>的研究，从不同学科角度取得了一些初步成果。国内学者（殷涛，许国辉等）初步在磁体技术、成像方法、脉冲磁场<sup>[9]</sup>激励、磁声检测方面进行研究工作，并开展了瞬态电磁场、位移应力场和声场耦合数值模拟等重建算法<sup>[10]</sup>的研究。

由于感应式磁声成像方法是一种较新的成像方法，涉及电磁学、电子学、电

工学、声学、计算科学等多学科的交叉，研究过程中涉及的理论较多，实现起来也有一定的难度，因此该技术与实际应用领域的结合还不是很广泛，目前仅在医学成像和资源探测领域有应用研究。将该技术应用于油气管道、储罐、铝合金材料等金属构件的无损检测领域，国内外鲜有此类相关研究和学术报告。

因此，本论文在现有的研究基础上，对金属板材感应式磁声发射无损检测新技术进行了初步研究，并且通过数值仿真和实验相结合的方式探讨了利用磁声发射信号对金属构件进行无损检测的可行性，为进一步开展金属板材缺陷磁声成像方法的理论和实验研究奠定了基础。

本学位论文依托于国家自然科学基金：基于感应式磁声成像和漏磁成像的复合无损检测技术基础研究（基金号：51177141）以及航空科学基金项目：飞行器构件亚表面非接触磁声成像无损检测技术研究（基金号：2012ZD68003）。

## 1.2 常规无损检测方法介绍

目前最常用的无损检测方法主要有涡流检测法、漏磁检测法、超声波检测法、电磁超声检测法等，这些检测技术都可以在线检测出各种缺陷，为一些事故的预防提供了科学的依据。

### 1、涡流检测法<sup>[11]</sup>

涡流检测是基于电磁感应定律的无损检测方法。涡流检测法是通过在被测导体内感应涡流，当被测体表面有裂纹时，其涡流阻抗就会发生变化的现象来检测裂纹的。但是，由于集肤效应的存在，涡流检测法只能检测表面的裂纹。涡流检测具有非接触，且适用于高温探伤的优点，但涡流探伤只能对有无缺陷进行判断，不能对缺陷的形状、深度等信息进行判断。

### 2、漏磁检测法<sup>[12]</sup>

漏磁检测法是石油储罐缺陷检测中应用最广泛的一种在线无损检测方法。当被测铁磁材料被饱和磁化时，若被测材料不存在腐蚀等缺陷，则材料中的磁感应线将全部被约束在材料中，几乎没有磁感应线从表面穿出，被检表面没有磁场。但是当材料表面存在着缺陷时，缺陷的存在会使得磁导率发生变化，由于缺陷的磁导率很小，磁阻很大，使磁路中的磁通发生畸变，磁感应线会改变途径，除了一部分磁通直接通过缺陷或在材料内部绕过缺陷外，还有部分的磁通会离开材料

表面，通过空气绕过缺陷再重新进入材料，在材料表面缺陷处形成漏磁场。

漏磁检测的过程是：首先用永磁体对储罐底板进行磁化至其达到磁饱和，然后用磁敏传感器测量其漏磁信号<sup>[13]</sup>，通过分析判断检测结果。该方法具有探头简单，易于实现自动化，检测灵敏度高，检测过程无需清理表面及使用耦合剂等优点，因此是现阶段石油储罐底板缺陷检测最常用的方法。

### 3、超声波检测法

超声波检测法是利用超声波在介质不连续界面会发生部分反射的特性，对管道缺陷进行检测的<sup>[14]</sup>。超声探头发出的超声波在被测材料的裂缝处会产生反射，被超声波接收探头接收，通过对接收到的超声波进行分析计算，就可以判断出被测材料缺陷的位置信息。

超声无损检测技术与其他常规无损检测技术相比，具有被测对象范围广、缺陷定位准确、检测灵敏度高、成本低、使用方便等特点<sup>[15]</sup>。因此，超声无损检测技术是国内外应用最广泛的无损检测方法之一。

### 4、电磁超声检测法

电磁超声检测是二十世纪六十年代发展起来的一种新型超声检测技术<sup>[16]</sup>。它利用电磁感应原理，通过电磁超声换能器（electromagnetic acoustic transducer, 简称 EMAT），在被检测体内感应出高频电流和磁场，在洛伦兹力、磁致伸缩效应<sup>[17]</sup>和磁性力等的作用下，使被检测体产生局部振动，从而直接在被检测体内激发出超声波。对于非铁磁性材料，主要是洛伦兹力起作用；而对于铁磁性材料，则主要是磁致伸缩效应起作用，洛伦兹力和磁性力居次要地位。目前，人们重点研究的是洛伦兹力和磁致伸缩效应这两种机理。EMAT 包含三部分：线圈、偏置磁铁和被检测体。其中，线圈内通以高频电流，用来激发超声波；偏置磁铁用来提供合适的工作点，超声波在被检测体内产生并传播。电磁超声本质上属于超声范畴，只是产生超声的机理不同，所以其检测方法与压电超声检测方法基本相同。

电磁超声检测方法的优点包括：不需要耦合介质，相应换能器结构设计简单；非接触，可用于高温材料的检测；检测传感器与被检材料之间可以有其它非金属材料，对被检测材料表面是否平顺要求不高；比较容易调节波模式，使用方便；对人体及环境无危害，是环保型技术。它的缺点是：电磁超声换能器能量转换效率比压电超声换能器低，需要大功率脉冲电流来激励。

### 1.3 感应式磁声成像研究现状及最新进展

磁声成像<sup>[18]</sup>早在 1988 年就有国外学者提出，而感应式磁声成像 (Magnetoacoustic Tomography with Magnetic Induction, MAT-MI) 则在 2002 年才出现公开文献报道，国内则从 2005 年开始开展此领域的研究工作。1988 年 B.C. Towe 提出了基于磁声耦合效应的非介入生物电流检测方法，随后 Montalibet 报道了利用磁声效应检测生物电流的方法。比较显著的进展是美国明尼苏达大学的 Bin He 教授于 2005 年提出感应式磁声成像技术<sup>[19]</sup>。

感应式磁声成像技术的数学模型由两大基本问题<sup>[20]</sup>构成，一为正问题<sup>[21]</sup>，即在已知物体内部电特性参数分布的情况下，对给定的电磁场激励求解其在物体内部引发的感应电流强度及由电磁耦合产生的声场分布情况；一为逆问题，即通过采集到的声信号强度重建物体内部电导率<sup>[22]</sup>的分布。

感应式磁声成像的原理图如图 1.1 所示。当把成像物体放置于如图所示的静磁场中，施加脉冲磁场后，样本中会感生出涡流。该涡流在静磁场作用下会受到洛伦兹力的作用而激发出超声，沿成像物体的圆周布置若干个超声接收探头采集超声信号，通过对接收到的超声信号进行算法重建即可得到电导率分布<sup>[23]</sup>。

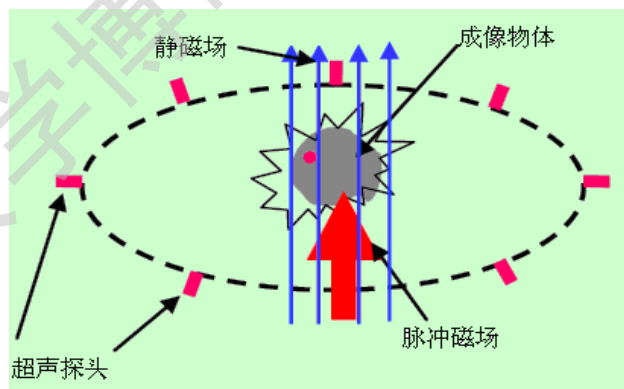


图 1.1 感应式磁声成像原理示意图

图 1.2 为感应式磁声成像<sup>[24]</sup>典型实验装置示意图。超声探头与被测样本处于同一个平面内，且都放置于水中。由步进电机带动超声探头对样本进行圆周扫描，每转过固定的角度扫描记录一次，采集到足够的就可以对样本的边界进行重建。接收到的数据经过前置放大和高通滤波等处理之后被计算机采集。一块永磁体被安置在样本下方，它用于提供 Z 轴方向的恒定磁场。函数发生器一方面通过线圈放电，激发脉冲磁场，另一方面控制脉宽，使得与示波器采样同步。

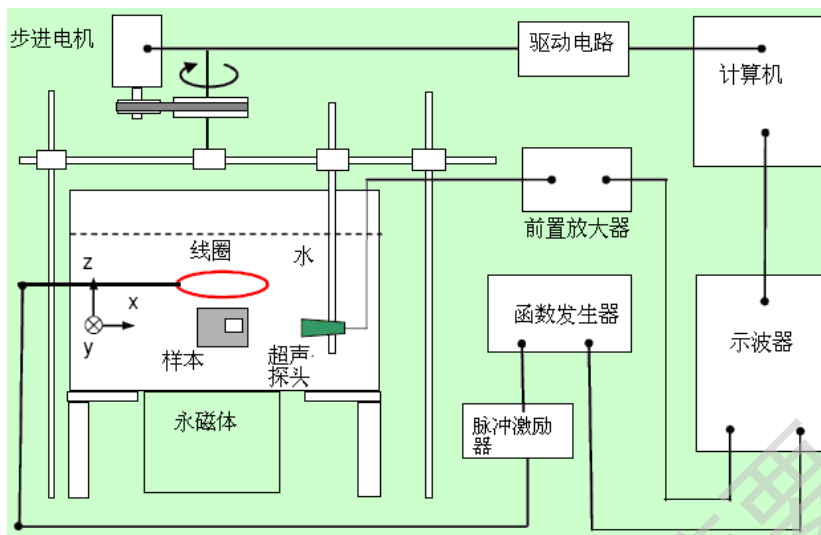


图 1.2 感应式磁声成像典型实验装置

在电磁场逆问题分析的图像重建算法<sup>[25]</sup>上主要采用两种方法：基于电导率分段光滑的假设和依赖于硬件系统的机械旋转。由于第一种假设方法与实际情况不相符，在实际应用中存在很多问题，而第二种方法主要不足是需要旋转静磁场的方向，而且计算的环节比较多，影响成像速度，导致感应式磁声成像技术的实际应用遇到了巨大的阻碍<sup>[26]</sup>。

中国科学院电工研究所的刘国强和王浩基于电磁场基本理论，推导了感应式磁声成像中的电磁场逆问题计算公式，提出一种基于单分量洛仑兹力密度的非接触感应式磁声成像方法，这种方法研究了不需要旋转静磁场的逆问题重建方法，并验证了方法的正确性和可行性，得到分辨率较高的电导率绝对值图像，但是由于在硬件系统上仍然需要磁体装置，使得整个装置结构复杂、成本较高。

由传感器接收到的声压到电导率的反推是感应式磁声成像技术进行电导率图像重建的基础。该问题的求解可分为两个部分，首先是由测得的声压计算出声源分布，然后是由声源重建电导率分布<sup>[27]</sup>。

对于前一部分的研究，Yuan Xu 在正问题中声源分析的基础上应用无界媒质声波方程解析解计算 MAT-MI 声场的空间分布；Qingyu Ma 应用声场传递函数方法计算二维对称多层电导率模型的空间声场分布<sup>[28]</sup>；以上两种算法均基于时间反演算法，由于该算法可能导致对介质边缘的声源重建<sup>[29]</sup>结果存在吉布斯效应，陈晶等提出了一种矩阵投影格式并在此基础上给出迭代求解的新算法。针对后一部分的研究，Yuan Xu 提出两种方法，一种是根据声源与电导率的理论推导关系，直接对某一均匀介质内部的电导率<sup>[30]</sup>进行求解，但是对于不同介质的边界则需

要迭代处理；另外一种方法是旋转静磁场，使其分别为 X、Y、Z 方向，进而求解成像体内的涡流密度分布，应用声源、涡流密度和电导率分布的关系重建电导率。针对后一种方法由于旋转磁场在计算中带来了不便，王浩推导了三维电磁场逆问题的计算公式，在此基础上提出了一种不需要旋转静磁场的逆问题重建方法；李宜令在二维环境下对感应式磁声成像的图像重建工作进行了仿真。

#### 1.4 感应式磁声发射方法与涡流检测、电磁超声的比较

本论文研究的感应式磁声发射无损检测是针对医学上的感应式磁声成像 (MAT-MI) 在导体无损检测领域的创新性探索，本论文将集中精力针对 MAT-MI 技术用于金属探伤和缺陷识别的可行性进行了初步的讨论和研究。传统的涡流检测法是通过在被测导体内感应涡流，当被测体表面有裂纹时，其涡流阻抗就会发生变化的现象来检测裂纹的。但是涡流探伤只能对有无缺陷进行判断，不能对缺陷的形状、深度等信息进行判断。

首先从装置上，我们可以明显看到，用涡流检测进行金属无损探伤时不需要有永磁体提供偏置磁场，因为涡流检测过程中并不需要利用偏置磁场与涡流的相互作用产生洛伦兹力，进而激发出包含有缺陷信息的磁声信号。其次涡流探伤只能根据检测结果进行定性分析，不能根据缺陷信号的幅度分析出缺陷的深度和形状。而感应式磁声成像技术能利用接收到的超声信号进行算法重建，从而得到导体表面的电导率分布，这将能极大地方便我们快速地判断出缺陷的形状和位置，因此如果能用 MAT-MI 技术进行金属无损探伤将是无损检测领域的一个重大突破。因此本课题具有前沿性和研究意义。

电磁超声是近年来兴起的一种非接触式无损探伤技术，电磁超声检测技术本质上是超声波探伤。在 EMAT 激励线圈中施加高频交变电流，当 EMAT 线圈靠近被测金属表面时，将在被测金属中感生出相同频率的感生电流，该感生电流在外加恒定磁场的作用下，将产生同频率的洛伦兹力作用于金属的结晶点阵上，使金属晶体产生周期性的振动，从而激发出超声波。它的探测本质是利用超声波在金属不连续表面发生部分反射的特性进行探伤检测的。因此 EMAT 线圈对于发射线圈下方的区域是检测盲区<sup>[31]</sup>。而感应式磁声成像是将利用缺陷引起磁声线圈下方铝板表面的涡流场和洛伦兹力场分布改变的特性从而对缺陷进行检测，根



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.