

学校编码: 10384  
学号: 19920121152719

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

感应式磁声检测技术在  
钢板缺陷检测中的研究

The Research on Steel Plate Defects Inspection by  
Magneto-acoustic Testing with Induction

游德海

指导教师姓名: 吴德会 副教授  
专 业 名 称: 机械电子工程  
论文提交日期: 2015 年 月  
论文答辩时间: 2015 年 月  
学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2015 年 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 日

## 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

随着工业化的发展，钢材被应用在了各种各样的领域，比如：天然气管道、轮船、汽车等等。然而，随着时间的推移，钢材在使用过程中会出现腐蚀、裂纹等缺陷，这些缺陷严重影响了使用的安全，所以必须在事故发生之前对其进行检测以评估其安全性。本文在对比多种无损检测方法及研究感应式磁声成像的基础上提出了感应式磁声检测的新方法。该方法是在静态磁场下，通过脉冲电流激励被测钢板表面，进而在钢板内部发生电—磁—声的相互转化，最后提取钢板表面的磁声信号。该方法与被测材料无接触，无耦合，可在恶劣环境下进行工作，非常适合钢板的在线检测。

本文首先分析了基于磁致伸缩机理下的感应式磁声检测技术的基本原理，并且推导出了磁声信号的波动方程及接收方程，同时简要介绍了铁磁性材料的磁化与磁致伸缩特性；接着为了确定磁声信号的模式，介绍了无损检测常用的超声信号；最后在理论分析的基础上，研制出一套感应式磁声检测的实验装置。该实验装置主要包括信号发生器、功率放大器、阻抗匹配电路和放大滤波电路等。

本文利用研制出的感应式磁声检测实验平台，在不同厚度的钢板上激发出了瑞利波与兰姆波，然后分别利用这两种波模式实现了对缺陷的检测，同时利用兰姆波检测出了缺陷的具体宽度。最后研究了不同激励脉冲，磁声线圈偏转角度，磁声线圈的提离值与缺陷相对磁声线圈的不同位置等因素对检测结果的影响，为后续的研究打下了基础。

**关键词：**磁声检测，铁磁性材料，缺陷检测，超声波

## Abstract

With the development of industrialization, steel is used in a variety of areas, such as: natural gas pipelines, ships, cars, etc. However, with the time gone, the steel will appear corrosion, cracks and other defects, which seriously affect the use. Before the accident, we test the steel to assess its safety. This paper proposed a new detection method—Magneto-acoustic Testing with Induction which based on analysis of kinds of NDTs and studying of Magneto-acoustic Tomography with Magnetic Induction. In this method, we apply a time-varying pulse electric current on steel plate in the static magnetic field. Then inside the steel plate occurs Electric - Magnetic - Sound into each other. Finally extracts Magneto-acoustic signal which contains the defects signal. The method has many advantages of non-contact, coupling, removable online detection in the harsh environments.

This paper first analysis the theory of the Magneto-acoustic Testing with Induction based on magneto-strictive, and deduces equation and receive equation of the magneto-acoustic signal. Then induces the magnetization for ferromagnetic and magneto-strictive properties. In order to determine the pattern of magneto-acoustic signal, describes some ultrasonic signals which frequently used in the NDT. At last, based on the theoretical analysis, this dissertation developed an Magneto-acoustic Testing equipment, which contains signal generator, power amplifier, Magneto-acoustic Coil, impedance-matching circuit and amplifier-filter circuit.

Using the equipment designed above, we stimulating the Rayleigh wave and Lamb wave on different thickness steel plate. Then realize to detect the defect with using the two kinds of waves, and realize the Lamb wave to detect the defect depth. Last, study the influence of different excitation pulse, deflection angle of

magneto-strictive coil ,Lift-off of magneto-strictive coil and different position of the defect, which laid the foundation for the following research.

**Key Words:** Magneto-acoustic Testing; Ferromagnetic material; Defect detection; Ultrasonic wave

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目录

摘要 .....	I
Abstract .....	II
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景与研究意义 .....	1
1.2 无损检测常规方法 .....	2
1.3 国内外研究现状 .....	6
1.4 本文研究的主要内容及工作 .....	8
<b>第二章 感应式磁声检测技术的物理研究 .....</b>	<b>10</b>
2.1 感应式磁声检测技术的原理 .....	10
2.1.1 感应式磁声检测技术的物理机理 .....	10
2.1.2 感应式磁声检测技术的物理方程 .....	12
2.2 铁磁性材料磁致伸缩特性 .....	16
2.2.1 铁磁性材料的磁化特性和磁导率 .....	16
2.2.2 基于磁致伸缩的磁声检测技术 .....	17
2.3 磁声信号的传播 .....	19
2.3.1 超声波的传播模式 .....	20
2.3.2 趋肤效应对磁声信号的影响 .....	22
2.4 本章小结 .....	23
<b>第三章 感应式磁声检测系统的研究 .....</b>	<b>24</b>
3.1 感应式磁声换能器的设计 .....	25
3.1.1 磁声换能器的结构分析 .....	25

3.1.2	感应式磁声线圈的设计 .....	26
3.1.3	激发频率的选择 .....	28
<b>3.2</b>	<b>感应式磁声检测激励电路的设计 .....</b>	<b>28</b>
3.2.1	控制电路的设计 .....	28
3.2.2	驱动电路的设计 .....	29
<b>3.3</b>	<b>感应式磁声检测信号接收电路的设计 .....</b>	<b>35</b>
3.3.1	接收放大电路的设计 .....	35
3.3.2	信号滤波电路的设计 .....	37
<b>3.4</b>	<b>本章小结.....</b>	<b>39</b>
<b>第四章</b>	<b>感应式磁声检测波模式的激发及缺陷的检测实验 .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>瑞利波对缺陷的检测 .....</b>	<b>41</b>
4.1.1	瑞利波的激发 .....	41
4.1.2	瑞利波对不同深度缺陷的检测 .....	44
<b>4.2</b>	<b>兰姆波对缺陷的检测 .....</b>	<b>46</b>
4.2.1	兰姆波的激发 .....	46
4.2.2	兰姆波对缺陷宽度的检测实验 .....	48
4.2.3	兰姆波对不同缺陷深度的实验 .....	49
<b>4.3</b>	<b>本章小结.....</b>	<b>51</b>
<b>第五章</b>	<b>感应式磁声信号的特性研究实验及信号处理.....</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>缺陷位置对磁声信号的影响实验 .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>磁声线圈提离实验 .....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>磁声信号指向性实验 .....</b>	<b>55</b>
<b>5.4</b>	<b>脉冲个数对磁声信号的影响 .....</b>	<b>57</b>
<b>5.5</b>	<b>磁声信号处理.....</b>	<b>59</b>
<b>5.6</b>	<b>本章小结.....</b>	<b>61</b>
<b>第六章</b>	<b>总结.....</b>	<b>62</b>



参考文献.....	63
致谢.....	67
攻读硕士学位期间的研究成果.....	68

厦门大学博硕士论文摘要库

## CONETNTS

<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 The background and significance of the subject .....	1
1.2 The routine methods of Nondestructive Testing .....	2
1.3 The reseach in inland and abroad .....	6
1.4 Major contents of study .....	8
<b>Chapter 2 The physics research of Magnetoacoustic Testing .....</b>	<b>10</b>
2.1 The Principle of Magnetoacoustic Testing .....	10
2.1.1 The mechanism of Magnetoacoustic Testing .....	10
2.1.2 The physical equations of Magnetoacoustic Testing .....	12
2.2 The characteristic of magnetostriction of ferromagnetic material .....	16
2.2.1 The characteristic of magnetization and permeability of ferromagnetic material .....	16
2.2.2 The Magnetoacoustic Testing based on magnetostriction .....	17
2.3 The propagation of Magnetoacoustic singal .....	19
2.3.1 The mode of ultrasonic wave .....	20
2.3.2 The skin effect on the Magnetoacoustic singal .....	22
2.4 Summary .....	23
<b>Chapter 3 The study of hardware of Magnetoacoustic Testing .....</b>	<b>24</b>
3.1 The design of Magnetoacoustic transducer .....	25
3.1.1 The analysis of Magnetoacoustic transducer .....	25

3.1.2	The design of Magnetoacoustic transducer .....	26
3.1.3	The choice of excitation frequency .....	28
<b>3.2</b>	<b>The Magnetoacoustic Testing signal excitation circuit design.....</b>	<b>28</b>
3.2.1	The control circuit design.....	28
3.2.2	The drive circuit design.....	29
<b>3.3</b>	<b>The Magnetoacoustic Testing signal receiving circuit design.....</b>	<b>35</b>
3.3.1	Amplifier circuit design.....	35
3.3.2	The Magnetoacoustic Testing signal filtering circuit design .....	37
<b>3.4</b>	<b>Summary.....</b>	<b>39</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>The excitation of the wave mode and defects detection .</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Rayleigh wave detection of defects .....</b>	<b>41</b>
4.1.1	Rayleigh wave excitation .....	41
4.1.2	Rayleigh wave detection of defects at different depths.....	44
<b>4.2</b>	<b>Lamb wave detection of defects .....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Lamb wave excitation .....	46
4.2.2	Lamb wave detection of defects at different widths.....	48
4.2.3	Lamb wave detection of defects at different depths.....	49
<b>4.4</b>	<b>Summary.....</b>	<b>51</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>The study of properties of the Magnetoacoustic signal and</b>	
<b>signal processing .....</b>	<b>.....</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>Experiments on different defect location .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>Experiments on different lift-off of the Magnetoacoustic coil .....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Experiments on different directionality of the Magnetoacoustic coil ...</b>	<b>55</b>
<b>5.4</b>	<b>Experiments on numbers of pulses.....</b>	<b>57</b>
<b>5.5</b>	<b>Signal processing.....</b>	<b>59</b>

5.6 Summary.....	61
Chapter 6 Summary.....	62
References.....	63
Thanks.....	67
Publication.....	68

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景与研究意义

在石化工业，储罐是储装原油、中间及成品油、石化产品、各种气体和石化原料等的重要工具。油气长输管道也是能源运输的主要方式，仅我国油气长输管道就已超过 3 万余公里。由于油气长输管道和储罐输送介质属于易燃、易爆物质，并且含有硫化氢、氧化硫、水份、粉尘等腐蚀杂质，以至于管道和罐体长期处于内外腐蚀条件之下，安全性与可靠性极易存在隐患。而大中型油气储罐及长输管道的泄露事故不但会直接关系到环境污染和经济损失，甚至会引发火灾、爆炸等恶性灾难，从而直接危害人民群众的生命安全。我国每年因管道和储罐的泄漏、污染及抢修等造成的直接经济损失都以亿元计算。

1958 年开始建设的克拉玛依至独山子炼油厂的输油管道，标志着我国管道运输业的开端。2002 年 7 月 4 日开工建设的西气东输工程，是我国继长江三峡工程之后的又一项世界级特大工程。该工程将我国新疆塔里木盆地的天然气资源通过约 4200km 长的管道，跨越新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、浙江和上海等 10 个省市自治区，最终运送到上海和浙江，同时供应沿线各省市自治区的居民和工业用气。据测算，西气东输工程中，仅仅管道工程一项的投资就达到 400 亿元。2004 年 9 月 6 日，西气东输工程实现了全线贯通。

2008 年 2 月 22 日，西气东输二线管道工程开工建设。西气东输二线工程西起新疆霍尔果斯口岸，南至广州，东达上海，途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、江苏、安徽、湖北、江西、湖南、广东、广西、浙江、上海等 14 个省市自治区，一条干线八条支线，总长 9102km。该工程主干线全长 4843km，采用 X80 级管道钢，管径 1219mm，设计最高压力 12MPa，输气能力 300 亿立方米/年，总投资约 1420 亿元。该工程计划于 2009 年底干线西段（霍尔果斯—中卫）

及中卫—靖边支干线建成投产，2011年6月底干线东段（中卫—广州）及翁源—深圳支干线建成投产，2011年底全线贯通。西气东输二线工程与目前国内已建管道工程相比，具有六大特点：一是设计压力最高，二是输气量最大，三是距离最长，四是所使用的钢材等级最高，五是投资最大，六是经过的省市自治区最多。

天然气管道在长年运行过程中由于受到腐蚀、应力等因素的作用而可能出现多种缺陷，这些缺陷必将影响管道的安全运行。一旦管道破裂，往往造成巨大的经济损失、环境污染和人员伤亡，所以必须有效检测管道的各种缺陷。

为了保证油气管道和储罐的安全运行，许多国家都制定了相应的行业标准或国家标准以加强其检测与维修。如：美国石油学会制定的 API 653 标准涉及《油罐检验、修理、改建和翻新》，我国石油天然气管道局发布的企业标准《立式圆筒形钢制焊接原油罐修理规程》。我国非常重视油气管道和储罐的安全问题，2000年就颁布相关法令，规定：主干线油气输送管道每隔3~5年为一个周期进行管道在线检测以进行维护。可见，油气长输管道和大型储罐的定期检测和腐蚀状态的检测与维修是一项强制性的重要工作。

## 1.2 无损检测常规方法

目前，工程上为了不给长输管道和储罐钢板造成更大的伤害，采用的都是无损检测的方法。无损检测是指不对材料造成伤害的前提下，对制成品进行缺陷的检测，实现材料的几何测量，化学组分、结构组织和力学性能变化的评定，同时对制成品进行特定环境使用适用性评价的一门学科，又称无损探测（Nondestructive Testing，简称 NDT）。以下就现阶段常用的无损检测方法进行简单的比较：

涡流检测法(Eddy Current Testing)<sup>[1-2]</sup>

涡流检测法（如图 1.1 所示）是基于电磁感应原理的基础上发展起来的一种无损检测技术。该方法对被测材料表面通以交变的大电流，交变电流在被测材料表面感应出交变磁场，然后通过检测传感器接收相应信号，进而得出该涡流的相位变化及大小，最后通过相应的计算得出被测材料表面的缺陷情况。

涡流检测法适用于各种导电材料，但是该方法在铁磁性材料中的投射能力比较弱。这是因为存在趋肤效应，涡流主要是分布在材料的表面及亚表面，因此他比较适合表面缺陷的检测。涡流能够实现非接触检测，可以在高温环境下进行，但是该方法只能对检测结果进行定性的分析，不能根据缺陷的信号分析出缺陷的深度及形状。

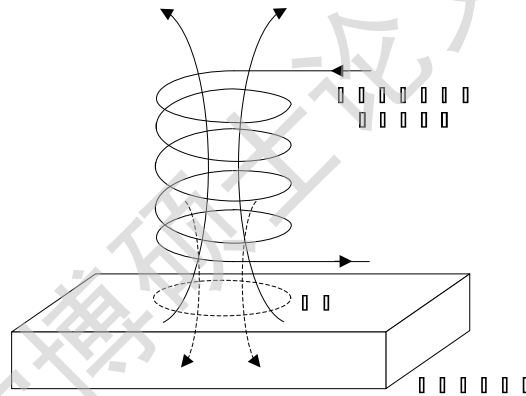


图 1.1 涡流检测原理

漏磁检测法（Magnetic Flux Leakage Testing）<sup>[3-5]</sup>

漏磁检测法（如图 1.2 所示）是将被测铁磁性材料进行磁化，如果材料是连续且均匀的，则材料中的磁力线将被束缚在材料内部，不会发生磁力线泄露出材料内部；若被测材料出现了缺陷或裂纹，则材料的磁导率发生改变，进而改变磁力线的分布，从而导致除了大部分的磁力线在材料内部外，还有小部分的磁力线会离开材料内部，进入空气中再进入材料内部，然后采用磁敏感元件就可以检测出泄露到空气的漏磁场进而转化为电信号，分析这些点信号即可获得有关缺陷的信息。该技术被广泛的应用于管道的检测是一种常用的比较完善的

检测方法。但是漏磁法的检测能力是十分有限，应用范围较狭小，不能用于复合材料及非金属材料的检测。同时，缺陷的裂纹一般很窄，引起的漏磁通量很小，并不利于缺陷的检测所以这种方法的检测灵敏度低，只能检测较大尺寸的缺陷。

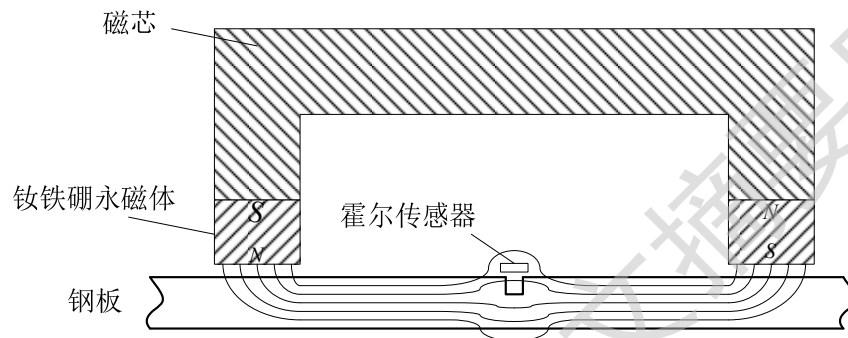


图 1.2 漏磁检测原理

声发射检测法 (Acoustic Emission Testing) [6-7]

声发射检测法 (如图 1.3 所示) 是根据被测金属材料受外力或者产生形变断裂, 进而产生超声波, 然后以超声波的形式体现被测材料的缺陷。声发射是一种比较常见的物理现象, 但是当声发射应用到无损检测领域时, 由于声发射产生的信号非常的微小, 人体器官根本无法感受都, 因此必须应用灵敏的电子传感器才能检测出来, 而且还不容易得到信号信息, 这给工程检测应用带来相当大的麻烦。



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.