

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学号: 32020111152715

UDC\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

碳纤维增强树脂基复合材料涡流无损检测  
有限元分析

Finite Element Analysis of Eddy Current Testing of Carbon  
Fiber Reinforced Polymers

孙 磊

指导教师姓名: 曾志伟 教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩日期: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 6 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

碳纤维增强型复合材料因其优越的性能在飞机制造、汽车制造、化工、造船与电气设备等领域得到广泛的应用，尤其是在航空、船舰、核能设备等方面受到高度重视。然而，复合材料结构在制造和使用过程中不可避免地会存在缺陷和遭受损伤。并且，碳纤维复合材料在损坏之前几乎没有先兆，其破坏具有突然性，这往往会造成严重的后果。因此对碳纤维复合材料进行损伤检测显得尤为重要。

目前应用较多的碳纤维复合材料检测方法有红外检测、X射线检测、超声检测等，这些技术都达到了一定的检测效果。使用涡流检测技术来检测碳纤维复合材料的研究则很少。本文基于电磁场理论和有限元数值仿真对碳纤维复合材料的涡流检测展开研究。首先建立碳纤维复合材料涡流检测的三维有限元仿真模型，使用 Fortran 语言编写程序，对涡流检测进行分析，得到碳纤维复合材料结构内的涡流分布规律，线圈感应电压和结构表面处的磁场信号，在此基础上得到碳纤维复合材料的缺陷信息。

对碳纤维复合材料涡流检测的有限元仿真可以指导碳纤维复合材料涡流检测的研究。有限元模拟得到的复合材料结构中的涡流分布规律符合碳纤维复合材料电各向异性的特点，并且通过分析线圈阻抗变化的解析解，验证了有限元仿真的可靠性。在此基础上研究了涡流检测中电各向异性材料中的趋肤效应，研究发现碳纤维复合材料中的涡流衰减速度比电各向同性材料中的更快。本文还对碳纤维复合材料结构的纤维断裂和分层两种常见缺陷的涡流检测进行了有限元分析，分别得到了线圈的感应电压信号及结构表面处的磁场信号。结果表明，涡流检测技术可以很好的检测到碳纤维复合材料结构中的纤维断裂和分层缺陷。

**关键字：**碳纤维复合材料；涡流检测；有限元分析

## Abstract

Because of the superior performance carbon fiber reinforced composites (CFRP) are widely used in manufacturing of aircrafts, automobiles and ships, chemical engineering, electrical equipment and other fields, and are especially highly valued in aviation, ships and nuclear power equipments. However, composite structures have defects during manufacturing and are damaged in using inevitably. Most of defects occur suddenly without omen, which will cause serious consequences. Therefore, nondestructive testing of CFRP is very important.

Infrared testing, X-ray testing and ultrasonic testing are the major and effective testing techniques for CFRP at present. Few studies have been done in the eddy current testing (ECT) of CFRP. In this thesis, we study the ECT of CFRP based on the electromagnetic field theory and the finite element (FE) method. A three-dimensional FE model is developed using Fortran language to simulate the ECT of CFRP. By analyzing the simulation results, we can get the eddy current distribution in CFRP, the induced voltage of coil, and the magnetic field signals on structure surface, which contribute to obtaining defect information.

FE simulation is of guiding significance to the research of ECT of CFRP. The computed eddy current distribution in CFRP follows the characteristics of electric anisotropy of CFRP. The agreement between the analytical solution of coil impedance variation and the simulation result proves that the FE simulation is reliable. The skin effect in electrically anisotropic materials has also been studied. Simulation results show that eddy current in CFRP decays faster than that in isotropic materials. The thesis also investigates the testing of fiber breakage and delamination. The induced voltage and magnetic field signals are computed. Results show that the ECT technique is good for testing fiber breakage and delamination.

**Key words:** Carbon fiber reinforced composites; eddy current testing; finite element analysis

目录

摘要.....	I
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景及意义</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 碳纤维复合材料概述</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 复合材料概述.....	2
1.2.2 碳纤维复合材料简介.....	2
1.2.3 碳纤维复合材料的应用.....	3
<b>1.3 涡流检测技术概述</b> .....	<b>4</b>
1.3.1 涡流检测的基本原理及特点.....	4
1.3.2 涡流检测的趋肤效应.....	6
<b>1.4 碳纤维复合材料涡流检测的研究现状</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 本文主要研究内容</b> .....	<b>9</b>
<b>第二章 碳纤维复合材料涡流检测的电磁场理论</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 碳纤维复合材料的电各向异性</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 涡流分析的数学表述</b> .....	<b>13</b>
2.2.1 麦克斯韦方程组.....	13
2.2.2 涡流分析的 $A, V-A$ 表述.....	14
2.2.3 涡流分析的 $A_r, V-A_r$ 表述.....	18
<b>第三章 碳纤维复合材料涡流检测的有限元分析</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 电磁场有限元分析概述</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 形函数推导</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3 数值计算</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 频域控制方程及等效积分形式.....	25
3.3.2 弱式的离散化.....	26

3.4 分解区域算法 .....	33
3.5 边界条件 .....	35
3.6 程序设计 .....	36
3.6.1 分析程序设计 .....	36
3.6.2 程序收敛判据 .....	36
<b>第四章 计算结果 .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 碳纤维复合材料中的涡流分布规律与模型验证 .....</b>	<b>38</b>
4.1.1 电各向异性对涡流分布的影响 .....	38
4.1.2 模型验证 .....	43
4.1.3 纤维方向对涡流的影响 .....	49
<b>4.2 碳纤维复合材料中的涡流趋肤效应研究 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 纤维断裂的涡流检测 .....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 分层缺陷的检测 .....</b>	<b>58</b>
4.4.1 固定线圈位置的分层缺陷涡流检测 .....	60
4.4.2 使用线圈扫描的分层缺陷涡流检测 .....	64
<b>第五章 总结与展望 .....</b>	<b>66</b>
5.1 本文总结 .....	66
5.2 展望 .....	67
<b>参考文献 .....</b>	<b>68</b>
<b>攻读硕士期间发表的论文 .....</b>	<b>72</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>73</b>

---

## Table of Contents

<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Background and significance</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Overview of carbon fiber reinforced polymers (CFRP)</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Overview of composites .....	2
1.2.2 Introduction to CFRP.....	2
1.2.3 Applications of CFRP .....	3
<b>1.3 Overview of eddy current testing (ECT) technique</b> .....	<b>4</b>
1.3.1 Principle and features of ECT .....	4
1.3.2 Skin effect of ECT.....	6
<b>1.4 Research status of ECT of CFRP</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5 Main tasks of the thesis</b> .....	<b>9</b>
<b>Chapter 2 Electromagnetic theories of ECT of CFRP</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Electric anisotropy of CFRP</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 Mathematical formulations of eddy current analysis</b> .....	<b>13</b>
2.2.1 Maxwell's equations .....	13
2.2.2 $A, V-A$ formulation of eddy current analysis .....	14
2.2.3 $A_r, V-A_r$ formulation of eddy current analysis.....	18
<b>Chapter 3 Finite element (FE) analysis of ECT of CFRP</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 Overview of the finite element method</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 Derivation of shape functions</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3 Numerical computation</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 Governing equations in frequency domain and the weak form .....	25
3.3.2 Discretization of the weak form.....	26

---

<b>3.4 Domain decomposition method .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Boundary conditions .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6 Program design .....</b>	<b>36</b>
3.6.1 Design of analysis program.....	36
3.6.2 Criterion of convergence.....	36
<b>Chapter 4 Computation results .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Regularities of eddy current distribution in CFRP and model validation. 38</b>	<b>38</b>
4.1.1 Influence of electric anisotropy on eddy current distribution.....	38
4.1.2 Model validation.....	43
4.1.3 Influence of fiber direction on eddy current distribution.....	49
<b>4.2 Research on skin effect in CFRP .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 ECT of fibre breakage .....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 ECT of delamination.....</b>	<b>58</b>
4.4.1 ECT of delamination with static coil.....	60
4.4.2 ECT of delamination with coil scanning .....	64
<b>Chapter 5 Summary and prospect.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Summary of the thesis.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2 Future work.....</b>	<b>67</b>
<b>References .....</b>	<b>68</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>72</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>73</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

复合材料优越的性能使其得到越来越多的关注和应用。不少人预料，人类在材料应用上正从钢铁时代进入到一个复合材料广泛应用的时代。复合材料的研究深度和应用广度，及其生产发展的速度和规模，已成为衡量一个国家科学技术发展水平的重要标志之一<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪以来，全球复合材料市场快速增长，亚洲尤其中国市场增长较快。在航空领域，碳纤维复合材料被广泛应用，但是碳纤维复合材料的无损检测研究则相对滞后，成为阻碍碳纤维复合材料在航空领域继续发展的一大障碍。

众所周知，航空领域无论是军用飞机还是民用飞机都需要极高的安全系数，对探伤的精确度要求很高。碳纤维复合材料的无损检测与金属材料相比难度会更大。现有的比较成熟的检测方法有红外热成像检测、X 射线检测、超声检测等。这些技术都达到了一定的效果。但是随着航空技术的发展，对材料性能安全系数的要求越来越高，所以对检测技术的要求也越来越高。涡流检测较传统检测方法在某些方面有一定的优势，不仅可靠性高，而且在探测时不需清除零件表面的油脂、积碳和保护层，很多时候可在不分解飞机的前提下，在外场对飞机进行原位探伤<sup>[2]</sup>。所以，涡流检测在航空维修中应用很广泛。

涡流检测是根据电磁感应原理发展起来的一种无损检测方法，即交变磁场在导电材料中感应出涡流，导电材料的表面层和近表面层的缺陷影响涡流的大小和分布，从而影响探头测得的信号，根据信号的变化可得出缺陷的信息。

涡流检测在金属材料的检测上已趋成熟，然而碳纤维复合材料相比于金属材料，结构更加复杂，电导率很低，且呈电各向异性，所以涡流检测技术在碳纤维复合材料上的应用要比金属材料更加复杂。

碳纤维复合材料的涡流检测研究是近年来才开始的，国内外的相关文献还都很少，还有很多工作要做。本论文正是基于这一现实情况，研究涡流检测技术在碳纤维复合材料性能检测和探伤方面的应用。本论文基于有限元法，模拟碳纤维

复合材料的涡流检测，为检测研究提供理论指导。

## 1.2 碳纤维复合材料概述

### 1.2.1 复合材料概述

根据国际标准化组织（ISO）为复合材料所下的定义，复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。其中每一种组成材料成为复合材料的“组分”。包容其他材料的组分称为基体，而被包容的组分称为增强体，基体与增强体的结合面称为界面。这些组分虽然在宏观上相互牢固的结合成一个整体，但它们之间既不发生化学反应也不互相溶解，通常在界面上可以物理的区分开来，因此复合材料是一种多相材料<sup>[3,4]</sup>。

按其增强体的形状不同，复合材料可分为纤维增强复合材料、薄片增强复合材料、粒子增强复合材料三类。其中以纤维增强复合材料发展最快，应用最广。目前常见的纤维增强复合材料有树脂基碳纤维增强复合材料（CFRP）、玻璃纤维增强复合材料（GFRP）、硼纤维增强复合材料（BFRP）、碳/碳复合材料和碳/石英复合材料等<sup>[3]</sup>。

由于增强纤维的表面状态，树脂粘度，低分子物含量，线性高聚物向体型高聚物转化的化学反应速度，树脂与纤维的浸渍性，组分材料热膨胀系数的差异以及工艺参数控制等因素的影响，复合材料在生产制造过程中不可避免地存在缺陷。而且复合材料结构在使用过程中也难免遭受损伤。树脂基纤维增强叠层结构复合材料中的常见缺陷包括分层、脱粘、孔隙、纤维弯曲、夹杂、富脂、贫脂、划痕、涂层损伤、铺层损伤、穿透性损伤、热损伤、鼓包等<sup>[5,6]</sup>。

与传统金属材料相比，复合材料具有比强度和比模量大、耐疲劳性能好、破损安全性高等优点，因而在国民经济和国防建设各领域，尤其在航空航天领域，得到了广泛的应用。随着时间的推移，复合材料技术受到越来越多的关注，发展日趋成熟。随着科技的进步，复合材料将具有更广泛的应用前景。

### 1.2.2 碳纤维复合材料简介

碳纤维是主要由碳元素组成的一种特种纤维，其含碳量随种类不同而异，一般在 90%以上。在纤维增强材料中，碳纤维是发展最迅速，应用范围最广，可适

用于不同领域要求的纤维材料。碳纤维是一种新型非金属材料。它和它的复合材料具有密度低、耐热、耐化学腐蚀、耐摩擦、抗辐射、减震、降噪等一系列优异性能，而且作为纤维它还有柔软性和可编、可纺织性，特别突出的是它的高比强度和高比模量两大特性<sup>[7,8]</sup>。

碳纤维增强复合材料是八十年代后期发展起来并倍受重视的一类结构材料。随着制备技术的不断进步，其发展十分迅速，被广泛应用在航空航天、舰船、核工业、兵器工业、汽车工业、民用建筑、电力电子等领域<sup>[9,10]</sup>。碳纤维增强复合材料在制备和使用过程中由于各种原因，会造成材料制品存在不同类型的缺陷。与金属材料不同，碳纤维增强复合材料在断裂或损坏之前几乎没有先兆，其破坏具有突然性，并往往对结构造成致命威胁，直至造成重大安全事故，因而对碳纤维复合材料的在役无损检测就显得格外重要。

### 1.2.3 碳纤维复合材料的应用

航空工业最早大量采用碳纤维复合材料。碳纤维复合材料因其独特、卓越的性能，在航空领域特别是飞机制造业中应用广泛。在航空工业中，飞行器的质量减轻，就意味着油耗的降低，速度的加快。碳纤维强度高、密度低、变形量低的特点决定了它是理想的航空材料<sup>[8]</sup>。目前，碳纤维复合材料在小型商务飞机和直升飞机上的使用量已占 70%~80%，在军用飞机上占 30%~40%，在大型客机上占 15%~50%<sup>[9]</sup>。碳纤维复合材料在飞机上的应用已从非承力部件扩大到主承力部件，如机翼、垂尾、前机身、鸭翼、腹鳍、方向舵及升降副翼。另外，碳纤维复合材料还大量用作高超音速飞机的刹车片，飞机上的发热元件和机械紧固件，涡轮发动机叶片，内燃机活塞等<sup>[2,8,9]</sup>。近几年，碳纤维复合材料也开始应用于航天领域。目前，主要应用于卫星结构、运载火箭、精密支撑结构件、光学镜体及空间相机等方面<sup>[11,12]</sup>。

90 年代后期，碳纤维复合材料逐渐在汽车、土木建筑及文体用品等民用领域大显身手。碳纤维复合材料扩大应用的最大希望在于在汽车工业的应用。在汽车车身、零部件中使用碳纤维复合材料，不但可以降低汽车的重量，而且可以更加经济环保，降低油耗。碳纤维复合材料刹车片是其中非常重要的应用之一。碳纤维复合材料刹车片主要用于高速列车。随着我国高速列车的飞速发展，这一应用具有美好的前景<sup>[8,13]</sup>。水泥在土木建材领域中用量最大，但水泥也有诸如脆性

大、抗拉强度低等缺点。而现在用混凝土或水泥为基体制成的碳纤维增强复合材料,克服了水泥强度低,在混凝土中易开裂,易受到氯盐、硫酸盐等侵蚀的缺点,在冬季及寒冷地区有很大的应用空间<sup>[8,14,15]</sup>。碳纤维在体育用品方面的用量,占全世界碳纤维总消耗量的40%左右。碳纤维增强复合材料由于其高的比强度和高的阻尼特性主要被用在高尔夫球棒、钓鱼竿、网球拍、羽毛球拍、越野赛汽车和滑雪板等的制造<sup>[8,16]</sup>。近年来,随着碳纤维产量的增加和价格的下降,碳纤维被广泛应用于基础设施、能源运输工具、环保和农业等领域<sup>[17]</sup>。为了解决全球气候变暖、温室气体排放等环境问题,碳纤维复合材料在核电、风电、电力传输、天然气压缩存储、电动汽车等新能源领域的应用也受到广泛的关注和研究<sup>[18]</sup>。

### 1.3 涡流检测技术概述

无损检测(Nondestructive testing 或 NDT)技术是发展现代工业必不可少的重要技术措施之一。无损检测是在不损伤原材料和被检测构件的前提下,检测构件内部或表面缺陷及有关物理量的综合性应用技术。它在材料加工、零件制造、产品组装乃至产品使用的整个过程中,不仅保证了质量,保障了安全,而且在节约能源及资源,降低成本,提高成品率和劳动生产率方面起到了积极的作用<sup>[19]</sup>。材料的缺陷和损伤检测是材料结构修理的基础和前提,也是评估其性能的依据。针对不同的材料及不同的缺陷和损伤形式,可以采用不同的无损检测手段。目前,常用无损方法有涡流检测、超声检测、射线检测、激光检测、声发射检测、红外热成像检测、声振检测、微波检测等。涡流检测技术是最重要的检测技术之一,应用非常广泛。

#### 1.3.1 涡流检测的基本原理及特点

涡流检测的基本原理是电磁感应现象,如图 1.3.1 所示。当载有交变电流的励磁线圈接近导体表面时,线圈周围的交变磁场在导体中产生感应电流(即涡流)。涡流也是交变的,它会产生一个磁场,阻碍穿过线圈的磁通的变化,导致检测线圈阻抗与感应电压的变化。由于涡流的大小、相位及分布与导体的电导率、磁导率、形状、尺寸和缺陷等因素有关,这些因素的变化都会影响涡流,使涡流产生的感应磁场发生变化,进而引起检测线圈的阻抗与感应电压的变化。涡流检测正

是通过观察由涡流改变引起的线圈电压或阻抗的这种变化来间接地发现导体内的缺陷或物理性质的变化的<sup>[20]</sup>。

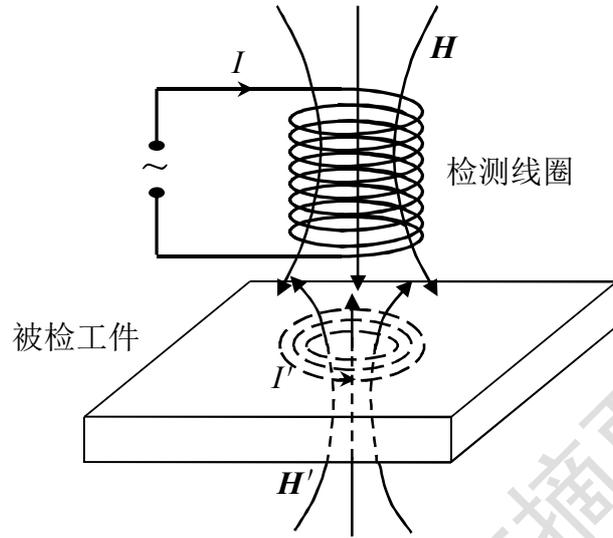


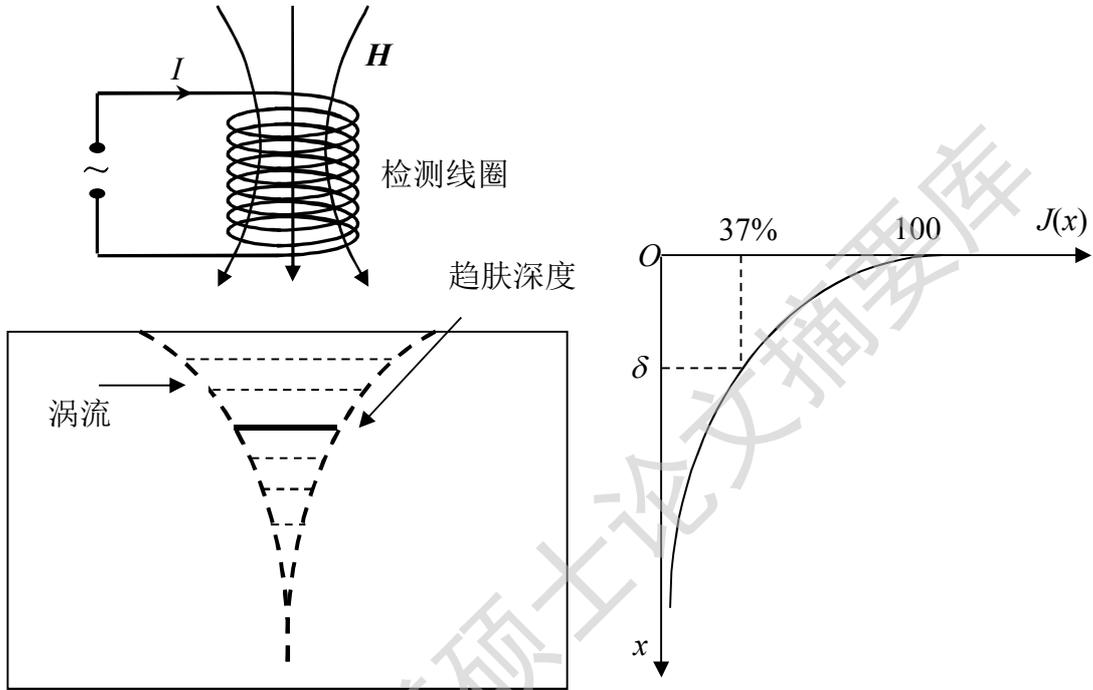
图 1.3.1 涡流检测原理示意图

由于涡流检测是以电磁感应为基础的检测方法，因此它适用于各种金属材料的检测。少数非金属导电材料（如石墨、碳纤维复合材料等）也能进行涡流检测。涡流检测对材料中的表面和近表面缺陷的探测灵敏度高。另外，涡流检测还可用于检测材料的电导率、磁导率等物理参数，对材料的磁导率和电导率等有较强的检测能力。而且利用它在对导体试件进行检测时无需与工件接触，也不需要类似超声检测所需要的耦合介质的特点，可在高温环境下实现检测。涡流检测速度快，适合用于在线自动化检测，并且其检测信号采用电显示，易于实现数据的存储、再现和处理。当然，涡流检测也有其局限性，它不能用于对非导体试件进行检测。由于趋肤效应的存在，涡流渗透深度受激励频率的影响，检测深度受到制约，不适于检测较深的内部缺陷。涡流检测目前仍处于当量比较检测阶段，定性定量检测还需进一步研究<sup>[19,21]</sup>。

尽管涡流检测还存在一些难题尚待解决，但因其独特优势仍得到越来越多的关注与应用。在航空检测领域，飞机机体及航空发动机上的组合构件结构复杂，检测难度非常大<sup>[22]</sup>。使用涡流检测技术对这些复杂构件进行探伤，不仅可靠性高，对零件表面清理要求不高，而且可在不分解飞机的前提下，在外场对飞机进行原位检测。所以，涡流检测已经成为航空领域最重要的无损检测方法之一。此外，涡流检测在冶金、机械、核能、电力、化工等其他领域也发挥着越来越重要

的作用。碳纤维复合材料是一种导电的非金属材料，理论上也可以使用涡流检测技术进行检测。随着碳纤维复合材料在各领域中的应用不断增加，随之而来的安全隐患也越来越多。所以，对碳纤维复合材料的涡流检测研究至关重要。

### 1.3.2 涡流检测的趋肤效应



(a) 导体中涡流密度大小随深度的变化

(b) 归一化涡流密度图

图 1.3.2 趋肤效应示意图

当线圈通以交变的电流时，导体中产生的感应涡流也是一种交变电流，它在导体纵截面上会出现电流密度分布不均匀的现象，如图 1.3.2 (a) 所示。导体表面的涡流密度最大，越远离表面涡流密度越小，按负指数规律衰减，如图 1.3.2 (b) 所示。当频率较高时，涡流几乎只在导体表面附近的薄层内流动。这种涡流主要集中在导体表面附近的现象，称为趋肤效应<sup>[19,21]</sup>。涡流透入导体的距离称为透入深度。定义涡流密度衰减到其表面值  $1/e$  时的透入深度为趋肤深度，用符号  $\delta$  表示。趋肤深度表示涡流在导体内的趋肤程度<sup>[21]</sup>。电各向同性的良导体材料的趋肤深度为：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.3.1)$$

式中： $\delta$ ——趋肤深度，单位：米 (m)；

$f$ ——激励信号的频率，单位：赫兹（Hz）；

$\mu$ ——被检工件的磁导率，单位：亨利/米（H/m）；

$\sigma$ ——被检工件的电导率，单位：西门子/米（S/m）。

从方程（1.3.1）中我们可以看出，频率越高、导电性能越好或导磁性能越好的材料，趋肤效应越显著。在实际工程应用中，趋肤深度是一个很重要的参数，因为在 2.6 个趋肤深度处，涡流密度一般已经衰减了约 90%。工程中，通常定义 2.6 倍的趋肤深度为涡流的有效透入深度<sup>[21]</sup>。其意义是：对涡流检测线圈产生有效影响的涡流只包含在 2.6 倍趋肤深度范围内的涡流，而其他涡流对线圈产生的影响是可以忽略不计的。

#### 1.4 碳纤维复合材料涡流检测的研究现状

碳纤维复合材料在生产制造和使用过程中不可避免地会存在缺陷和遭受损伤<sup>[23]</sup>。随着碳纤维复合材料的优越性能被熟知，碳纤维复合材料在各行各业的应用与日俱增，随之而来的安全隐患也不断增多，对碳纤维复合材料结构的无损检测更显重要。

针对不同的材料及不同的缺陷和损伤形式，可以采用不同的无损检测手段。目前，复合材料无损检测的常用方法有超声检测、涡流检测、X 射线检测、激光检测、计算机层析照相（CT）、声发射检测、红外热成像检测、声振检测、微波检测等<sup>[22, 24, 25]</sup>。而碳纤维复合材料比较成熟的检测方法是超声检测、X 射线检测以及红外热成像检测。这几种检测方法都取得了一定的效果。但这些检测方法也都有各自的缺点：超声检测检测时要求被检测表面有一定的光滑度，对小、薄和复杂零件难以检测，在检测过程中还需要使用耦合剂<sup>[26]</sup>；X 射线检测成本高，检测效率低，检测分层缺陷困难，不易发现与射线垂直方向上的裂纹，经常需要和超声反射法互补使用<sup>[27]</sup>；红外热成像检测要求被测件传热性能好，表面发射率高，并且这种方法检测深度比较小，不适合内部缺陷的检测，对缺陷的定性、定位与定量比较困难<sup>[28, 29]</sup>。碳纤维复合材料具有一定的导电能力，理论上可以用涡流检测技术进行检测。而且涡流检测有成本低、设备简单、操作方便等优点，所以碳纤维复合材料涡流检测的研究具有重要意义。

虽然碳纤维复合材料具有导电能力，但是其电导率较金属材料低得多，并且

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库