

分类号: TH8785

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110106



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目

基于涡流法的碳纤维复合材料电磁特

性分析与反演

论 文 作 者

张梦茹

校 内 导 师

程军（副教授）

校 外 导 师

王波波

专业学位类别

机械

研究方向（领域）

无损检测

论文提交日期: 2025 年 5 月 9 日

分类号：TH878

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110106

基于涡流法的碳纤维复合材料电磁特性分析与反演

Electromagnetic Property Analysis and Inversion of Carbon Fiber
Reinforced Composites Using Eddy Current Testing

学生姓名：_____张梦茹_____

校内导师：_____程军（副教授）_____

校外导师：_____王波波_____

专 业：_____机械_____

研究方向：_____无损检测_____

论文答辩日期：2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：张梦茹

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

学位论文作者签名：

张梦茹

指导教师签名：

程军

日期：2025 年 5 月 20 日

日期：2025 年 5 月 20 日

基于涡流法的碳纤维复合材料电磁特性分析与反演

摘 要

碳纤维复合材料（CFRP）凭借其优异的比强度、比模量及电磁屏蔽性能，在航空航天、汽车制造和电子设备等领域得到广泛应用。然而，CFRP 的各向异性电磁特性对传统检测手段提出了巨大挑战，尤其在高效、精准的电导率反演和缺陷检测方面存在局限。本研究通过建立理论模型并设计拟合方程，实现了接收线圈电压的直接计算，避免了传统方法中繁琐的实验测量过程。接着，研究结合遗传算法与共轭梯度法的优化策略，成功反演出 CFRP 各向异性电导率，确保了高精度与可靠性。此外，本研究还深入探讨了趋肤效应对隐藏缺陷检测的影响机制，并基于仿真结果设计了一套新型检测系统。实验结果表明，该系统的检测精度较传统方法有显著提升，为 CFRP 材料的质量评估和损伤检测提供了可靠的技术支持。本文主要内容有：

(1) 为了提高电导率反演的效率，本节提出了一种基于拟合方程的检测接收线圈电压的正向模型。由于 CFRP 材料的电导率表现出显著的各向异性，接收线圈的电压变化不仅受到材料特性的影响，还与激励线圈的频率和电压紧密相关。传统的损伤检测方法主要依赖实验测量，步骤繁琐且耗时，难以满足高效检测的需求。针对这一问题，本节提出的方法基于输入已知参数（如激励频率、电导率等），通过拟合函数直接计算接收线圈的电压值，从而避免复杂的实验过程。实验与仿真结果表明，基于仿真数据拟合的方程能够准确预测接收线圈的电压变化，计算结果与实际测量值之间的误差较小，验证了该方法的准确性和有效性。

(2) 为了实现高精度检测，提出一种基于最优化的求解电导率的反演新方法。通过阻抗分析仪测量电压，结合 COMSOL 有限元仿真构建电导率与电压的数学模型，并利用三维曲面拟合建立电压-电导率方程。采用遗传算法和共轭梯度法优化求解最优电导率，反演结果代入拟合方程后，计算电压与实际测量值的误差较小。该方法实现了 CFRP 各向异性电导率的反演，为复合材料的无损检测与性能评价提供了高效、可靠的技术手段。

(3) 为了提高隐藏缺陷检测的精度与可靠性，基于趋肤效应理论和 COMSOL 仿真分析优化探头参数，并结合图像处理设计了一套检测系统。基于趋肤效应公

式对探头参数与趋肤深度的关系进行了理论预测，并利用 COMSOL 仿真对不同参数的影响进行了系统分析。结果表明，频率越高，趋肤深度越浅，电流更集中于板表面；较大的探头尺寸在平面波条件下更有利于检测趋肤深度；而方形探头结构使电流更集中于表面，不利于深层缺陷检测。基于此分析，设计并实现了一套隐藏缺陷检测系统，并通过图像处理显著提升了检测的精度和可靠性。

关键词：涡流检测，碳纤维复合材料，有限元仿真，电导率反演，趋肤效应分析

Electromagnetic Characterization and Inversion of Carbon Fiber Reinforced Polymers Using Eddy Current Method

ABSTRACT

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), with its exceptional specific strength, specific modulus, and electromagnetic shielding properties, has been widely applied in aerospace, automotive manufacturing, and electronic devices. However, the anisotropic electromagnetic characteristics of CFRP pose significant challenges to traditional detection methods, particularly in terms of efficient and accurate conductivity inversion and defect detection. This study establishes a theoretical model and designs a fitting equation to directly calculate the voltage of the receiving coil, eliminating the cumbersome experimental measurements required by conventional methods. Subsequently, the research integrates an optimization strategy combining Genetic Algorithm (GA) and Conjugate Gradient Method (CGM) to successfully invert the anisotropic conductivity of CFRP, ensuring high precision and reliability. Furthermore, this study explores the impact mechanism of the skin effect on hidden defect detection and, based on simulation results, designs a novel detection system. Experimental results indicate that the detection accuracy of this system is significantly improved compared to traditional methods, providing reliable technical support for quality evaluation and damage detection of CFRP materials. The main contents of this study include:

(1) To improve the efficiency of conductivity inversion, this section proposes a forward model for detecting the voltage of the receiving coil based on a fitting equation. Due to the significant anisotropy of the electrical conductivity in CFRP materials, the voltage variation of the receiving coil is influenced not only by the material properties but also closely related to the excitation coil's frequency and

voltage. Traditional damage detection methods primarily rely on experimental measurements, which are cumbersome, time-consuming, and challenging to meet the requirements of efficient detection. To address this issue, the proposed method is based on known input parameters (such as excitation frequency, conductivity, etc.) and utilizes a fitting function to directly compute the voltage of the receiving coil, thereby avoiding complex experimental procedures. Experimental and simulation results demonstrate that the equation fitted from simulation data can accurately predict the voltage variations of the receiving coil, with minimal error compared to actual measurements, verifying the accuracy and effectiveness of the proposed method.

(2) To achieve high-precision detection, a novel inversion method for solving conductivity based on optimization is proposed. The approach involves measuring the voltage using an impedance analyzer and constructing a mathematical model of conductivity and voltage in combination with COMSOL finite element simulations. A voltage-conductivity equation is then established through three-dimensional surface fitting. Genetic Algorithm (GA) and Conjugate Gradient Method (CGM) are employed to optimize and solve for the optimal conductivity. After substituting the inversion results into the fitting equation, the calculated voltage shows minimal error compared to the actual measured values. This method successfully achieves the inversion of the anisotropic conductivity of CFRP, providing an efficient and reliable technical approach for nondestructive testing and performance evaluation of composite materials.

(3) To enhance the accuracy and reliability of hidden defect detection, a detection system was designed based on the skin effect theory and COMSOL simulation analysis to optimize probe parameters, combined with MATLAB image processing. The relationship between probe parameters and skin depth was theoretically predicted using the skin effect formula, and the influence of different parameters was systematically analyzed through COMSOL simulations. The results indicate that higher frequencies lead to shallower skin depths, concentrating the current closer to the surface of the plate. Larger probe sizes are more favorable for

detecting skin depth under plane wave conditions, while a square probe structure concentrates the current on the surface, making it less effective for deep defect detection. Based on this analysis, a hidden defect detection system was designed and implemented, with MATLAB image processing significantly improving detection accuracy and reliability.

Keywords: Eddy Current Testing, CFRP, Finite Element Simulation, Conductivity Inversion, Skin Effect Analysis

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目录	VI
插图清单	IX
插表清单	XII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 碳纤维复合材料的应用及损伤形式	1
1.1.2 碳纤维复合材料的物理特性	3
1.2 碳纤维复合材料无损检测常用方法	4
1.3 国内外研究现状	7
1.3.1 碳纤维复合材料电导率测量与反演	7
1.3.2 碳纤维复合材料趋肤效应研究现状	8
1.3.3 碳纤维复合材料损伤检测研究现状	9
1.4 本文研究内容及章节安排	9
第 2 章 CFRP 涡流检测原理及方法	12
2.1 引言	12
2.2 CFRP 的导电性	12
2.2.1 CFRP 的导电性能	12
2.2.2 电导率测量方法	13
2.3 涡流检测原理	15
2.3.1 电磁感应检测原理	15
2.3.2 趋肤效应公式	18
2.4 基于扫频法的电导率测量	20
2.5 基于标定法的趋肤深度测量	22
2.6 本章小结	25
第 3 章 涡流-电导率正向分析模型的构建	26

3.1 引言	26
3.2 构建模型	26
3.3 电压与频率关系	28
3.3.1 仿真分析电压与频率关系	28
3.3.2 拟合电导率曲线	32
3.4 碳纤维复合材料的制备与实验	35
3.4.1 制备碳纤维复合材料	35
3.4.2 实验验证	37
3.5 本章小结	39
第 4 章 基于遗传算法的各向异性电导率反演	40
4.1 引言	40
4.2 涡流检测技术及仿真分析	40
4.2.1 基于涡流法的电导率反演	40
4.2.2 有限元仿真分析	41
4.3 四电极法测量 CFRP 电导率	45
4.3.1 复合材料的阻抗测量	45
4.3.2 电导率测量原理	45
4.4 遗传算法反演电导率	48
4.4.1 有限元仿真结果验证	48
4.4.2 接收线圈电压函数拟合	49
4.5 电导率反演结果	50
4.6 本章小结	53
第 5 章 涡流趋肤深度标定与隐藏缺陷检测	54
5.1 引言	54
5.2 CFRP 趋肤效应分析	54
5.2.1 理论解析法	54
5.2.2 有限元分析法	55
5.3 探头参数对涡流趋肤深度的影响	57
5.3.1 探头频率的影响	57

5.3.2 探头尺寸的影响	59
5.3.3 探头空间结构的影响	61
5.4 隐藏缺陷检测	66
5.5 本章小结	70
第 6 章 总结与展望	71
6.1 全文总结	71
6.2 展望	72
参考文献	73
攻读学位期间取得的成果及参研项目	73
致谢	73

插图清单

图 1-1 雷击破坏	2
图 1-2 X 射线检测原理	5
图 1-3 脉冲红外热成像检测技术的工作原理	5
图 1-4 锁相红外热成像工作原理	5
图 1-5 超声检测应用	6
图 1-6 主体结构图	10
图 2-1 CFRP 的细观结构	13
图 2-2 四电极法测量电阻抗原理图	14
图 2-3 线圈和导体中的电磁感应	15
图 2-4 耦合线圈等效电路	17
图 2-5 半无限空间和坐标系统	18
图 2-6 旋转坐标系	21
图 2-7 涡流扫频检测仪原理图	22
图 2-8 铜箔标记法	23
图 2-9 压痕标记法	23
图 2-10 损伤裂纹标记法	24
图 3-1 模型尺寸和探头角度 α	28
图 3-2 变量后的电导率对电动势的影响	29
图 3-3 100kHz 至 2000 kHz 电动势变化曲线	30
图 3-4 不同探头角度下电压随频率关系	31
图 3-5 中心距为 4mm 的三维模型图	33
图 3-6 中心距为 8mm 的三维图	33
图 3-7 预浸料的铺层工艺	35
图 3-8 真空袋压封装图	36
图 3-9 真空干燥箱	36
图 4-1 CFRP 的电磁感应原理	40
图 4-2 有限元网格划分图	42

图 4-3 单向 CFRP 板接收线圈电压与电导率关系	43
图 4-4 单向板线圈电压与面内电导率的关系	44
图 4-5 正交板线圈电压与厚度方向电导率的关系	45
图 4-6 用于阻抗测量的单向 CFRP 试件	46
图 4-7 四电极法测量 CFRP 电导率	47
图 4-8 阻抗分析仪与试件安装	47
图 4-9 涡流检测实验平台示意图	48
图 4-10 实现框图	50
图 5-1 趋肤效应示意图	54
图 5-2 x - y 平面电路密度摸	56
图 5-3 趋肤深度对比图	56
图 5-4 不同频率电流密度曲线	58
图 5-5 y - z 平面的电流密度	58
图 5-6 x - y 平面的电流密度	58
图 5-7 不同尺寸探头的电流密度曲线	59
图 5-8 y - z 平面的电流密度	60
图 5-9 x - y 平面的电流密度	60
图 5-10 不同结构的仿真模型	61
图 5-11 不同探头结构的电流密度曲线	62
图 5-12 y - z 平面的电流密度	62
图 5-13 x - y 平面的电流密度	63
图 5-14 分层结构的仿真模型	64
图 5-15 分层结构的电流密度曲线	64
图 5-16 y - z 平面的电流密度	64
图 5-17 x - y 平面的电流密度	65
图 5-18 检测系统框架图	66
图 5-19 隐藏缺陷检测系统	67
图 5-20 待测板	68
图 5-21 涡流探头扫描路径	68

图 5-22 隐藏缺陷图	68
图 5-23 区域 2 隐藏缺陷图	69
图 5-24 不同频率下区域 2 损伤的信号值	69

插表清单

表 1-1 CFRP 的多尺度损伤形式.....	3
表 2-1 不同材料的电导率值与磁导率对比.....	13
表 2-2 标记法优缺点对比图.....	24
表 3-1 电导率正向分析模型参数.....	27
表 3-2 仿真参数值.....	32
表 3-3 电导率参数值.....	36
表 3-4 电压测量值.....	37
表 4-1 有限元模型参数.....	41
表 4-2 仿真和实验的线圈电压值对比.....	49
表 4-3 独立运算结果.....	51
表 4-4 单向板初始电导率的计算结果.....	52
表 4-5 单向板电导率反演结果.....	52
表 4-6 正交板初始电导率的计算结果.....	52
表 4-7 正交板电导率反演结果.....	52
表 4-8 正交板遗传算法电导率反演结果.....	53
表 4-9 正交板共轭梯度法电导率反演结果.....	53
表 5-1 探头形状.....	62

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来,随着制造业和高科技行业的迅猛发展,对碳纤维复合材料的需求持续增长。作为碳纤维与树脂基体的完美结合体,碳纤维增强复合材料(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer)凭借其高强度、轻质量、抗腐蚀以及耐高温高压等卓越性能,广泛应用于航空航天^[1]、汽车制造^[2]以及风电叶片^[3]等领域,是我国现阶段重点鼓励优先发展的高新技术^[4,5]。在这些应用中,CFRP 的电导率对其无损检测至关重要,因为它不仅影响电磁信号的传播与反射,还直接关系到涡流效应及阻抗变化等特性。通过分析这些电磁特性的变化,可有效检测和定位材料中的缺陷,从而确保 CFRP 构件在关键领域的安全性与可靠性。

1.1.1 碳纤维复合材料的应用及损伤形式

CFRP 具备独特的电磁特性,在航空航天电子设备、通信系统、隐身技术及电磁干扰(EMI)屏蔽等领域有广泛的应用场景。如飞机的防雷保护,在雷电环境下,为了有效防止雷击损伤,通常采用在 CFRP 机身表面涂覆导电涂层(如铜、镍、银涂层)或嵌入金属网(铜网、铝网),以增强材料的整体导电能力,使雷电流能够顺利分流到机身,从而减少局部电荷积聚,降低雷击损伤的风险,或者在 CFRP 结构内部掺杂导电填料(如石墨烯、碳纳米管、金属纳米颗粒)^[6],赋予复合材料更高的本体导电性,从而减少对外部金属网的依赖,并有效降低整体重量。这种方法不仅能够改善 CFRP 的雷击防护能力,还能优化材料的电磁屏蔽特性,提高飞机的综合性能。

CFRP 还可应用于风力发电机的防雷保护,通常在 CFRP 叶片主梁方向内部嵌入高导电性金属带(如铜带或铝带)、在叶片表面喷涂导电涂层和叶片尖端安装避雷针。叶片主梁内部高导电性金属带作为雷电流的主要传导通道。雷击发生时,电流可沿金属带快速传输至叶片根部,并通过风机塔架接地系统安全泄放,避免电流在 CFRP 结构内局部积聚,降低烧蚀和分层剥落风险。在复合材料结构表面增加一层导电性材料,如金属涂层、金属箔和金属网^[7]以增强整体导电性,使雷电流均匀扩散,降低局部电流密度,减少高温烧蚀。在叶片尖端安装避雷针,并利用 CFRP 内部的导电路径引导雷电流至风机塔架,再通过接地系统泄放。避

雷针可优先吸引雷电放电，降低雷击对叶片结构的直接损伤。结合金属导电带和表面导电涂层，可进一步增强整体防雷性能，确保风机在恶劣环境中的稳定运行。

在电磁屏蔽上，CFRP 也有广泛的应用，传统金属屏蔽材料虽具备优异的电磁屏蔽性能，但其较大的质量限制了轻量化设计的发展。相比之下，CFRP 凭借轻质、高强度及可调控的导电特性，在保持优良力学性能的同时，能够实现出色的电磁屏蔽效果。例如，CFRP 可用于电子设备外壳，在有效屏蔽外部电磁干扰的同时，降低设备整体重量，提升系统稳定性；在轨道交通领域，CFRP 可作为高铁车身材料，并结合导电增强层，以提高整体电磁屏蔽能力，减少电磁辐射对车载设备和通信系统的干扰，确保信号传输的稳定性。



(a) 飞机上的闪电灼烧

(b) 风力发电机组的叶片雷电破坏

图 1-1 雷击破坏

CFRP 与金属材料相比，具有质量轻、耐腐蚀等显著优势，这些优点使其在飞机制造、汽车制造以及风力发电等领域得到广泛应用。然而，尽管该材料具备诸多优异性能并广泛应用于各领域，在制造和使用过程中仍不可避免地会产生损伤，而这些损伤通常可以从宏观和微观两个层面进行分析。

CFRP 在制造和使用过程中可能造成结构损伤，其损伤可能存在于纤维本身或聚合物基体内^[8]，也可能位于材料表面或隐藏于材料内部，对结构造成致命损伤。比如：在 CFRP 材料成型过程中，容易产生空隙、疏松、基体开裂、分层和脱粘等多种类型缺陷和损伤^[9,10]，具体损伤形式如表 1-1 中所示。

表 1-1 CFRP 的多尺度损伤形式

损伤形式		造成的原因
内部	基体开裂	树脂基体内的微裂纹，通常由机械载荷或热应力引起。
	纤维断裂	碳纤维因超载而破坏，常见于局部应力集中的区域。长期的疲劳载荷会逐渐破坏纤维，最开始破坏的区域形成了局部应力集中最终导致了材料的逐渐损伤破坏 ^[11] 。
	纤维/基体界面脱粘	纤维与基体之间失去粘结，降低应力传递效率。当纤维和基体的膨胀系数不匹配时，热循环会在界面产生应力集中，从而导致界面脱粘 ^[12] 。
	层间分层	复合材料不同层之间分离，是复合材料独有且常见的内部损伤形式
外部	冲击损伤	通常由低速或高速撞击引起，主要模式是基体开裂和分层，基体开裂会引起分层，分层呈花生状，主要是由于层间剪应力引起的 ^[13] 。
	磨损损伤	材料表面因长期摩擦或机械接触而产生的破坏。
	热损伤	高温或热冲击引起的表面裂纹或变色。
	环境损伤	由湿气、化学物质和紫外线等外界因素引起

1.1.2 碳纤维复合材料的物理特性

CFRP 具有密度低（约 $1.5\sim 2.0\text{ g/cm}^3$ ）、热膨胀系数小、高比强（通常超过 3500 MPa ）、高比模（ $230\sim 600\text{ GPa}$ ）^[14]、抗热冲击性好及各向异性等一系列优异的性能，还具有良好的电磁屏蔽性能^[15]。

CFRP 的电学特性，主要受碳纤维的导电性和树脂基体的绝缘性影响，表现出独特的各向异性导电性、电磁屏蔽能力。由于 CFRP 由较高导电性的碳纤维和绝缘的环氧树脂等基体材料组成，使得整体的导电特性依赖于碳纤维的分布方式和铺层结构。在纤维方向上导电性几乎与碳纤维一样，在厚度方向和横向（垂直于纤维方向）的导电性极低^[16]。得益于其导电性，该材料能够有效屏蔽电磁波，

其电磁屏蔽效能 (SE) 可达 30~80 dB, 对静电场、交变电磁场 (如无线电波、雷达信号) 以及电磁干扰(EMI)具有良好的屏蔽效果。

CFRP 的力学特性主要包括高强度、高模量和低密度。碳纤维本身具有极高的强度, 这是由于碳原子以六边形结构排列, 类似于石墨的层状结构, 形成了强大的化学键合力, 使其能够承受较大的外部负荷, 尤其在拉伸方向上, 其强度远超许多传统材料。此外, CFRP 具有较高的杨氏模量 (刚性), 其结构高度有序, 纤维轴向排列规整, 能够有效传递应力, 在受力时不易发生形变; 相比金属材料, 该材料密度较低 (通常为 $1.5\sim 2.0\text{ g/cm}^3$), 能够显著减少结构自重。

CFRP 的损伤特性包括耐腐蚀、耐高温和抗疲劳等。其耐腐蚀性, 通常是由于加入改性组元 (需要有与纤维或基体碳有良好的化学相容性、不与基体碳发生反应、不破坏碳纤维复合材料原本的机械性能等特点^[17]), 使碳纤维复合材料具有良好的耐腐蚀性; 其耐高温性能^[18], 在无氧环境中可承受高达 2000°C 的温度, 而复合材料整体的耐温范围则因基体材料不同而有所变化, 一般为 200°C 至 400°C 。同时, CFRP 表现出较高的抗疲劳性能, 能够承受长时间的反复加载而不发生断裂或显著损伤。

1.2 碳纤维复合材料无损检测常用方法

无损检测 (NDT) 作为一种重要技术手段, 已从早期的简单视觉检查和经验判断, 发展为结合声学、光学、电磁学、热力学等多学科的复杂检测方法。传统的检测方法扫查速度慢、灵敏度低、准确性差、设备体积庞大^[19]不适合检测结构复杂、力学性能独特的碳纤维复合材料。目前广泛应用的是 X 射线检测、热成像检测、超声检测和涡流检测等方法^[20]进行无损检测, 使用这些方法可精确定位缺陷的位置、性质和规模, 进而提高产品质量、延长设备寿命并降低潜在风险。

(1) X 射线检测

如图 1-2 所示, 射线穿透被检测物体后, 由图像探测器接收, 进而转换成数字图像信号, 随后将这些信号输入计算机进行进一步处理^[21]。该方法特别适用于无法直接接触的部件, 如高温、高压或危险环境中。然而, X 射线检测也存在一些局限性, 对于较厚或高密度的材料 (如铝合金、钢等), 其穿透能力有限, 可能导致图像分辨率降低, 检测精度降低。

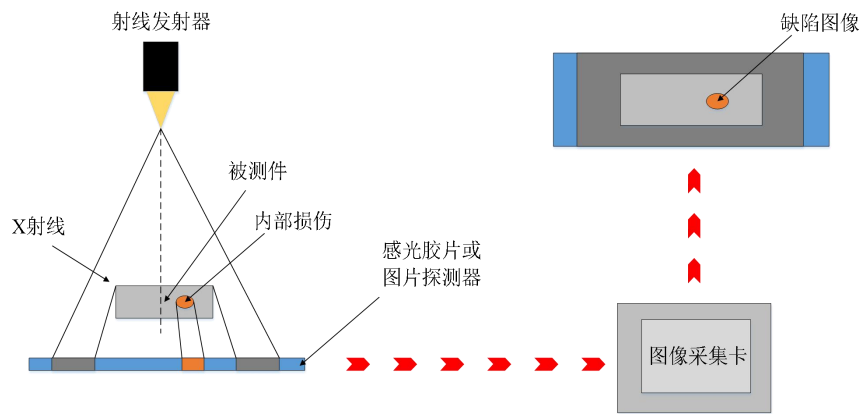


图 1-2 X 射线检测原理

(2) 热成像检测

热成像检测分为两种主要技术：其一是脉冲红外热成像技术，该技术广泛用于材料表面和近表面缺陷（如裂纹、孔洞）的检测，如图 1-3^[22]；其二是调制（锁相）红外热成像技术，该技术一般应用于航空航天复合材料、金属构件的深层缺陷检测，如图 1-4。但是以上两种热成像检测也有缺陷，比如灵敏度会随着缺陷深度的增加而迅速下降，还会受环境温度和空气流动影响^[23]。

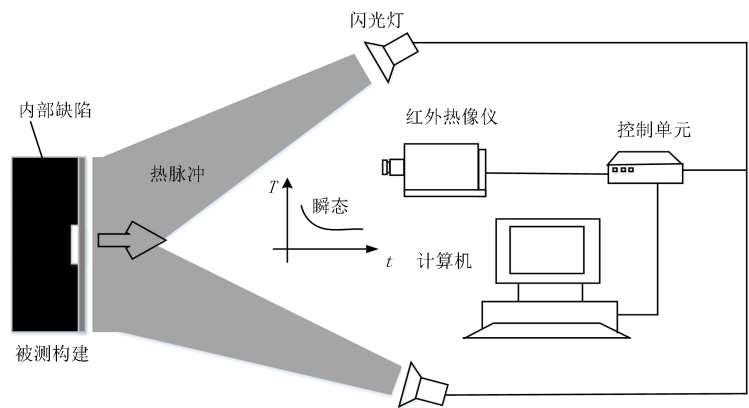


图 1-3 脉冲红外热成像检测技术的工作原理

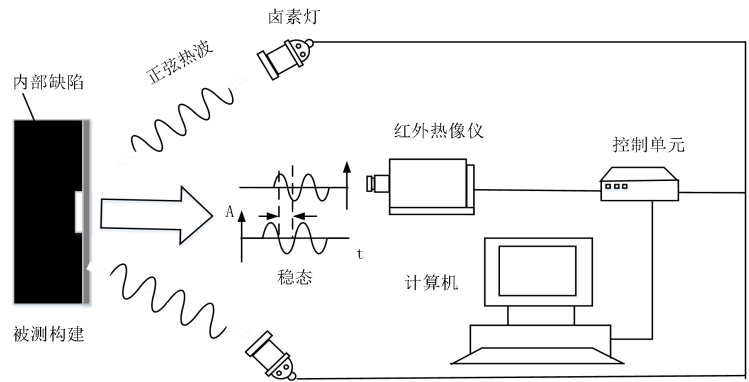


图 1-4 锁相红外热成像工作原理

(3) 超声检测

超声检测是通过耦合剂引导超声波进入被测物内部，通过分析回波信息（该信息能够揭示损伤的深度、位置和大小^[24]），判断被测物内部的损伤情况^[25]，如图 1-5 所示。该技术广泛应用于医疗领域以及建筑工程与基础设施等，但是超声检测的缺点是探头与表面的耦合困难、声波入射角的偏移、信号的衰减与散射增强以及缺陷定位的复杂性，同时常规设备和探头难以适应非平整表面，会导致检测覆盖不足和精度下降。

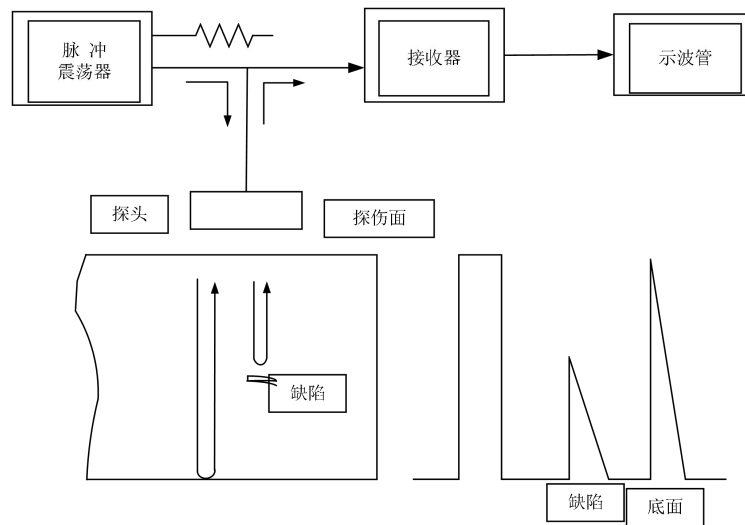


图 1-5 超声检测应用

(3) 电阻抗检测

阻抗测量的方法分为接触式和非接触式测量。非接触式一般需要施加电磁场利用涡流测量的原理实现间接的阻抗测量，但是这种方法对于系统的测量要求比较高，通常不采用这种方法^[26]。目前通常采用直接接触式的测量方法进行测量，基本原理是通过施加一定的电压或电流激励信号，测量相对应的电信号，并利用欧姆定律求解电阻抗大小^[27]。非接触测量的优点有材料内部存在缺陷、损伤或其他结构变化时，其电阻抗特性会随之发生变化，还有该测量方法完全利用结构自身的构造，无须在内部埋置传感器，也不会对结构强度产生影响^[28-30]。该方法可探测出复合材料中基体裂纹，纤维断裂、分层、冲击破坏的位置，还可以监测损伤在疲劳载荷作用下的扩展情况^[31]。电阻抗检测存在的缺陷是定位能力有限（需要与超声波或红外热成像等技术结合）、对电极布置要求较高（影响检测精度）以及噪声信号（影响测量结果）。

(4) 涡流检测

碳纤维具有较高的导电性,使得 CFRP 能够有效地传导涡流。由于 CFRP 的纤维部分具备导电性,涡流检测基于电磁感应原理进行,从而能够有效地检测导电材料中的损伤^[32]。检测过程中,探头向材料表面施加高频交流电流,产生交变的磁场,从而激发涡流在材料内部流动。当电磁波遇到裂纹、脱层、空隙等损伤时,会发生反射和散射,改变涡流的强度和分布。

1.3 国内外研究现状

涡流检测是以电磁感应原理为基础的无损检测方法,具有高效非接触、自动化程度高且无需耦合剂等优点,在材料损伤检测中的应用前景广阔^[32,33]。与其他无损检测技术相比,涡流检测不受材料形态限制影响,因为该检测技术不仅能检测成型件中的各类宏观损伤^[34-36],还能在纤维铺层原材料和预浸料半成品的细观缺陷检测中发挥优势^[37,38]。电涡流检测技术作为无损检测领域的重要手段,在未来具有广阔的发展前景。

1.3.1 碳纤维复合材料电导率测量与反演

在对碳纤维复合材料进行电导率测量时,国内外采用了多种测量方法,两电极法、四电极法、涡流法等。国内外的文章中也对电阻率测量方法进行了详细介绍。

两电极法是通过两个电极(一个用于电流输入,另一个用于电压测量)测量复合材料的电导率变化,以识别材料内部的损伤(如分层)。Todoroki^[31]研究了两电极法,指出该方法具有装置简单、操作方便的优点,适用于快速检测。Cardiff University^[39]探讨了电极接触对电导率测量结果的影响,尤其是在模拟雷击测试环境下。Zhao Q^[40]等人探讨了 CFRP 这类导电性较低的复合材料,快速评估电导率时,两电极法可以提供较为有效的结果,并且提到优化电极配置和改进接触技术(如使用导电胶或增大接触面积)是减少接触电阻影响的有效途径。国内的高先科^[41]等人讨论了两电极法通过测量 CFRP 的电导率,评估了其在防雷和电磁干扰(EMI)屏蔽中的性能。

四电极法测量电导率,国内外也有大量的学者进行了深入研究。Luis Waldo Escalona-Galvis^[42]等使用四电极法电导率测量中通过分离电流注入和电压测量,为了避免接触电阻对电导率测量结果的影响。Ruediger Schueler^[43]等发现四电极

法可以更精确地测量材料的真实电导率，而不受电极接触电阻的干扰，并且通过结合该方法和 EIT 技术，可以实现更高分辨率的实时损伤检测。Michele Zappalorto^[44]等通过四电极法测量复合材料电导率可以有效减少电极接触电阻的影响，从而提高电导率测量的精度。蒋中鑫^[26]分析了影响传感器性能的结构参数，结合性能指标进行结构优化，搭建检测系统验证传感器检测的损伤。

国内外在涡流法测量电导率的研究中都涉及多方面工作，但关注点和研究深度存在一定差异。Mizukami^[45]等人的研究通过涡流法估算多向碳纤维增强塑料层板的各向异性电导率，通过有限元仿真和实验验证，研究展示了涡流信号与材料纤维方向之间的密切关系，并提出了基于涡流法的电导率估算方法。Łukaszuk R^[46]通过调整探头参数、优化探头与材料表面的接触方式，研究成功提高了涡流法在 CFRP 材料电导率测量中的精度和适用性。程军^[47]探讨了基于涡流法的电导率测量技术，设计并实现了电导率检测系统，通过有限元仿真分析了涡流与复合材料电导率之间的关系，同时进行了实验验证。

1.3.2 碳纤维复合材料趋肤效应研究现状

由于趋肤深度的限制，涡流检测只能检测表面或近表面的缺陷^[48]，检测深度和有效面积大幅减小，因此，优化和完善趋肤效应的检测实验显得尤为重要。这不仅有助于提高检测的准确性，还能拓宽在不同应用场景中的适用范围。孙磊^[49]研究探讨了碳纤维复合材料在高频电磁场中电流分布的变化，重点分析了趋肤效应在不同频率下对电流传导深度的影响。邹雨峰^[50]探讨了高频电磁波趋肤深度较浅，适用于表面或接近表面的缺陷检测，而低频电磁波的趋肤深度较大，可以探测到较深层次的缺陷。Holloway CL^[51]讨论了电磁波在碳纤维复合材料中的传播行为，特别是随着频率升高，趋肤深度减小导致电磁能量更多集中于材料表层的现象。Wang XHQ^[52]利用太赫兹时域光谱技术（THz-TDS）研究了碳纤维复合材料在高频电磁波作用下，电流趋向材料表面，导致趋肤深度随着频率的增加而减小。频率升高和碳纤维含量增大会使趋肤效应更加明显，从而减小趋肤深度。虽然国内研究近年来发展迅速，逐渐向基础理论与应用技术并重的方向迈进，但在高频涡流检测设备的精度和效率等方面仍需进一步突破。

1.3.3 碳纤维复合材料损伤检测研究现状

CFRP 的损伤检测涉及无损检测、数据驱动检测、在线监测、多物理场耦合检测及数值模拟等技术。其中，无损检测可分为理论方法研究和工程应用优化。理论研究包括涡流检测的数学建模，分析趋肤效应与频率对灵敏度的影响，并结合信号处理、成像算法和人工智能识别缺陷。工程应用方面，涡流检测用于识别裂纹、脱层等缺陷，并优化频率以克服信号吸收问题，提升其在极端环境下的适用性和可靠性。Yunze He 和 Guiyun Tian^[53]将脉冲涡流用于检测复合材料和蜂窝夹层板的冲击破坏及分层损伤。Koichi Mizukami^[54]通过优化矩形探头尺寸、激励频率及摆放方式，实现对单向复合材料板面内外纤维弯曲的检测。Tytko G^[55]提出了一种基于传感器的数据分析方法，用于检测碳纤维复合材料中的损伤。占锦文^[56]讨论了结合模型驱动和数据驱动的智能识别算法来检测航空器损伤。杜禹樵^[57]讨论了如何结合碳纳米纸传感器和深度学习技术进行碳纤维复合材料的损伤检测。刘振宇^[58]在对损伤检测方面研究时，发现该技术可用于整合各类物理场的数据，帮助识别和分析材料损伤。苗玲^[58]研究探讨了电磁场与热场之间的耦合特性，建立了相关的理论模型，用于分析材料在耦合场下的行为特征。

1.4 本文研究内容及章节安排

综上所述，随着碳纤维复合材料在各领域的广泛应用，确保其高效使用变得愈加重要。本文通过分析接收线圈电压与电导率之间的关系，拟合出电导率与电压的相关方程，从而简化了传统的接收线圈电压测量过程。在此基础上，计算出接收线圈电压后，结合遗传算法和共轭梯度法对电导率进行反演，并将反演得到的电导率代入拟合曲线，与实验值进行对比，结果表明误差较小，成功实现了电导率的反演。此外，本文还深入研究了探头参数对趋肤深度的影响机制，进一步优化了探头设计，并基于这一分析，设计了结合优化探头参数和图像处理技术的检测系统，显著提升了碳纤维复合材料的无损检测精度和可靠性。

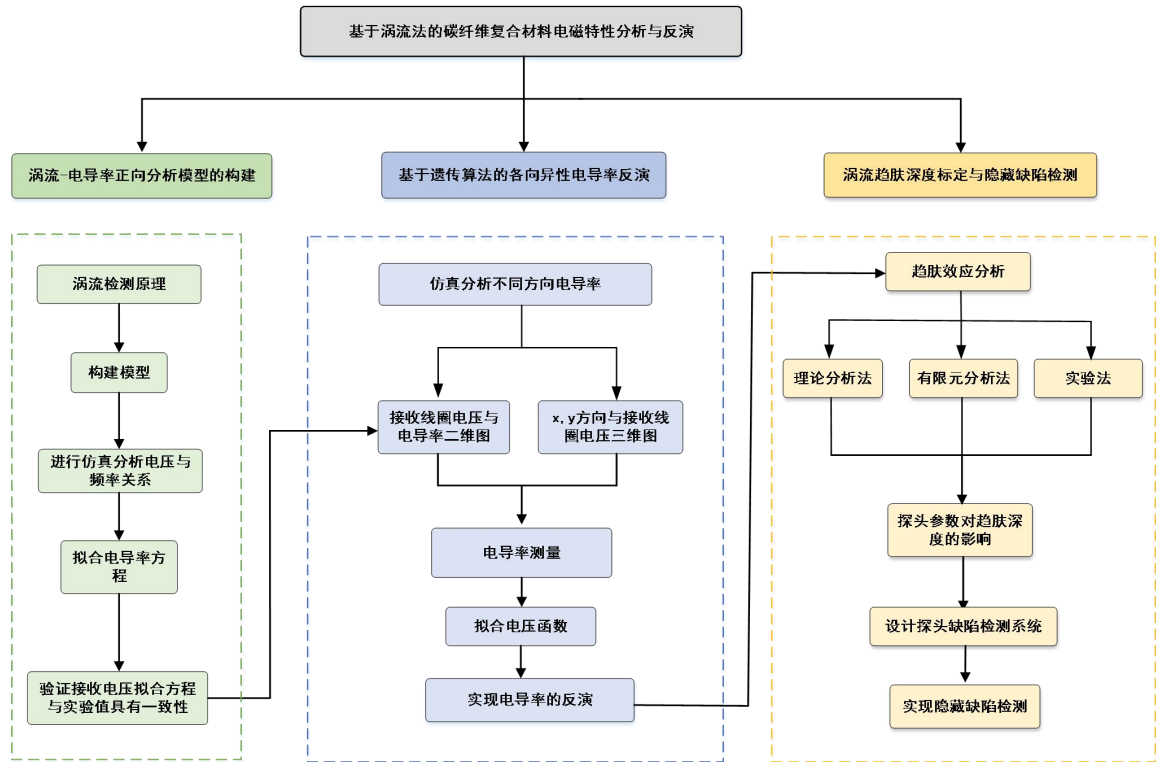


图 1-6 主体结构图

全文内容分为 6 章：

第一章：绪论。绪论部分主要介绍了研究的背景与意义，围绕碳纤维增强复合材料（CFRP）的物理特性、广泛应用及常见损伤形式展开。接着，对 CFRP 的几种无损检测方法进行概述，分析其技术特点及优缺点。此外，重点介绍了 CFRP 电导率测量与反演方法、趋肤效应特性，以及相关损伤检测技术的国内外研究现状，为本文的研究工作提供了充分的理论依据和背景支持。

第二章：CFRP 涡流检测原理及方法。介绍了 CFRP 的导电性能（电导率的测量方法）、CFRP 涡流检测的基本原理（电磁感应检测原理、趋肤效应公式）以及基于扫频法的电导率测量。最后介绍了实验所采用的基于标定法的趋肤深度测量系统及核心组件。

第三章：涡流-电导率正向分析模型的构建。利用 COMSOL 仿真软件分析接收线圈电压与电导率的关系。首先，建立了有限元仿真模型并进行了建模分析，随后根据仿真结果拟合出电导率与电压的关系曲线。最后，制备碳纤维复合材料并测量接收线圈电压，验证了拟合方程所计算的接收线圈电压值，从而提高了测量接收线圈电压的效率。

第四章：基于遗传算法的各向异性电导率反演。通过第三章的拟合方程计算接收线圈电压的方法，系统分析不同参数条件下的仿真结果。在此基础上，引入四电极法进行电导率测量；测量出来的电导率结合遗传算法和共轭梯度法进行反演。通过将反演结果与实验测量数据进行系统对比分析，验证了该方法的准确性。

第五章：涡流趋肤深度标定与隐藏缺陷检测。为了研究趋肤效应，本章提出了一种结合理论分析和有限元仿真的综合分析方法。首先，通过趋肤效应公式对探头参数对趋肤深度的影响进行了理论推导。然后，利用 COMSOL 软件进行了仿真分析，系统地对比了不同探头参数对趋肤深度的影响。研究表明，频率对趋肤深度有显著影响，频率越高，趋肤深度越浅，电流更集中于待测板表面；较大的探头尺寸在平面波条件下有助于更好地检测趋肤深度；而方形探头结构则使电流集中于导体表面，不利于检测较深的缺陷。基于这些分析，设计并实现了一套用于隐藏缺陷检测的系统，并通过图像处理技术显著提高了检测精度和可靠性。

第六章：工作总结与展望。首先，对每一章的研究内容和主要结论进行总结，梳理关键成果和创新点；通过综合这些展望，明确未来研究的重点和技术突破方向，为更好地实现碳纤维复合材料的性能优化和工程应用奠定基础。

第 2 章 CFRP 涡流检测原理及方法

2.1 引言

为了更有效地提高检测碳纤维增强材料(CFRP)的可靠性,研究其导电性是关键因素。首先,需要明确 CFRP 的导电性特点以及其对涡流检测的影响,同时深入理解涡流检测的基本原理。此外,还需要重点关注材料的电导率测量和趋肤深度的评估,因为这些参数对涡流信号的强弱、分辨率以及检测精度起着至关重要的作用;通过系统研究这些因素,可以优化检测方法,提升检测效率和可靠性。因此,本章首先对 CFRP 的导电性能和趋肤效应进行了介绍,并基于这些特性详细阐述了涡流检测的基本原理,以及电导率测量方法和趋肤深度测量的具体过程。

2.2 CFRP 的导电性

2.2.1 CFRP 的导电性能

CFRP 是一种典型的复合材料,主要由碳纤维增强相和基体材料(通常为聚合物树脂)组成。其导电性的各向异性主要源于碳纤维本身的导电特性以及纤维在复合材料中的排布方式。此外,由于碳纤维表面较为光滑,为了增强其与基体材料的结合性能,通常会进行表面处理(如氧化或涂覆树脂),这些处理方式在改善界面性能的同时,也可能影响纤维之间的电接触,从而对整体导电性产生一定影响。

碳纤维复合材料的导电性不仅取决于纤维的排列方式,还受到其微观结构的影响。碳纤维具有石墨化结构,其中石墨晶格在纤维方向上高度有序排列,形成连续的导电路径(如图 2-1(a)所示)。这种结构使电子能够沿纤维轴向快速迁移,使其导电性能接近金属材料。然而,在垂直于纤维的横截面方向,石墨晶格排列较为无序,电子难以在该方向自由传播,导电性主要依赖于纤维之间的物理接触或填充物形成的导电路径,因此导电效率相对较低。至于厚度方向,其导电性主要通过层间纤维的接触或填料形成的导电桥来实现。在该方向上,电子可能通过量子隧穿效应跨越微小间隙,但这种传导能力有限;同时,电流需要穿越多个纤维层以及绝缘的基体材料,使得厚度方向的导电性最弱(如图 2-1(b)所示)。对于厚度方向的导电性也有一些实验研究结果表明,厚度方向的电导率通常比垂直纤维方向低,这部分是由于厚度方向存在树脂积聚现象,阻碍了层间导电通路的

形成，从而降低了整体导电性能^[59]。

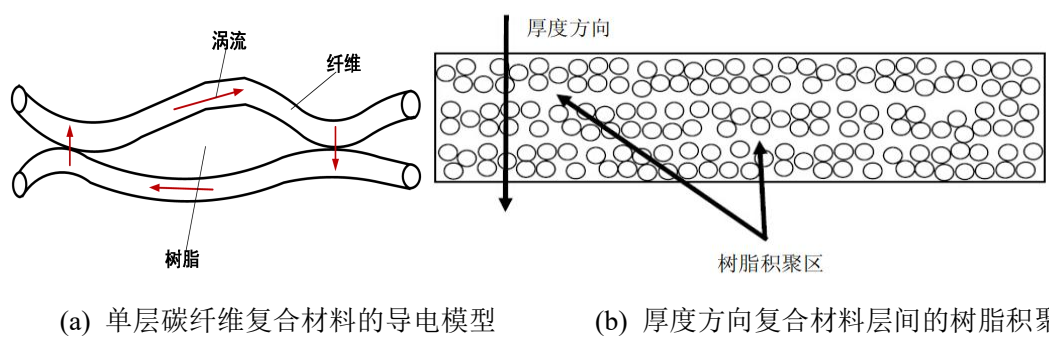


图 2-1 CFRP 的细观结构

CFRP 的导电性能呈现出显著的各向异性特征，其不同方向上的电导率存在明显差异。这种特性要求我们分别对其在纵向、横向和厚度方向的电导率进行系统性研究，并将其与典型金属材料（如铜、铝）的高导电性以及绝缘非金属材料（如树脂）的低导电性进行对比分析（如表 2-1 所示）。通过这种对比分析，可以更深入地理解 CFRP 在导电性能方面的独特性质及其与常规材料的差异。

表 2-1 不同材料的电导率值与磁导率对比

材料	电导率(S/m)	相对磁导率
铜	5.8×10^7	1
铝	3.5×10^7	1
聚合物树脂	$10^{-14} \sim 10^{-12}$	0.9998 ~ 1.0003
磁性铁	1×10^7	200
碳纤维	$(10 \sim 45.4) \times 10^4$ ，高模量 $>320\text{Gpa}$	1
	$(5 \sim 7.7) \times 10^4$ ，低模量 $<320\text{Gpa}$	
	$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ ，沿纤维方向	
碳纤维复合材料	$10 \sim 200$ ，垂直纤维方向 ^[50]	1
	1（接近绝缘体），沿厚度方向	

2.2.2 电导率测量方法

复合材料具有复杂的内部结构，其电导率的测量需要结合材料的特性和内部结构进行分析，前文提到的两种常用的电导率测量方法分别是电极法和涡流法。四电极法的测量原理如图 2-2 所示，在该图中 $R_{c1} \sim R_{c2}$ 表示接触阻抗，在接触点 2 号和 3 号之间设置了提取电压的点，值为 $V_S = (R_{c1} + R_{c2} + R_g) \times I_g = (I_S - I_g) \times R_s$ ，电压表电压值为 $V_V = R_g \times I_g$ ，因为 $R_{c1} + R_{c2} + R_g$ 远大于 R_s ， I_S 的值远大于 I_g ，根据这个方法

得到 V_v 和 V_s 近似值相等，所以四电极法相对于两电极法测量得到的电阻值更加准确。

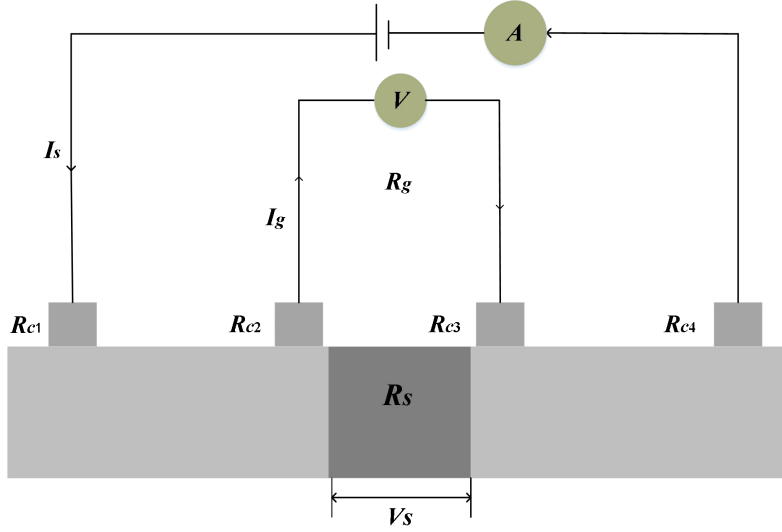


图 2-2 四电极法测量电阻原理图

涡流法测量电导率的原理是基于麦克斯韦方程组的微分形式。接下来，我们将通过电磁场的基本方程（麦克斯韦方程组）详细推导涡流法测量电导率的工作原理，并根据法拉第电磁感应定律，建立各物理量之间的关系式，如下式：

$$\Delta V = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} dS = - j\omega \int_L A dl \quad (2-1)$$

ΔV 接收线圈电动势， B 表示磁感应强度， A 是矢量磁位。矢量磁位 A 是基于毕奥-萨伐尔定律进行求解的

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega_c} \frac{J(r')}{|r - r'|} dV' \quad (2-2)$$

μ_0 表示真空磁导率， Ω_c 是导体中的涡流区域， $r-r'$ 是指从线圈区域某点 r 到涡流区域某点 r' 的距离矢量。电流 J （即涡流 J_e ）可表示为：

$$J = J_e = \hat{\sigma} E = -\hat{\sigma} \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2-3)$$

σ 表示电导率， E 表示电场强度，将(2-2)和(2-3)代入(2-1)中，接收线圈的电动势可写成：

$$V = - \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint_L \left\{ \int_{\Omega_c} \frac{J(r')}{|r - r'|} dV' \right\} \cdot dl \quad (2-4)$$

在公式(2-4)中可以解释涡流法测量电导率的原理。当探头的能量作用于被测试材料时，会在材料中激发涡流，由于被测材料具有显著的各向异性特性，涡流在空

间不同方向上的分布存在明显差异，具体表现为，材料的电导率越高，涡流强度越大，

如图 2-3 所示。随着探头与材料表面的距离变化，涡流响应会发生变化，从而影响信号的幅度和相位，通过分析这些变化可以确定材料的电导率。

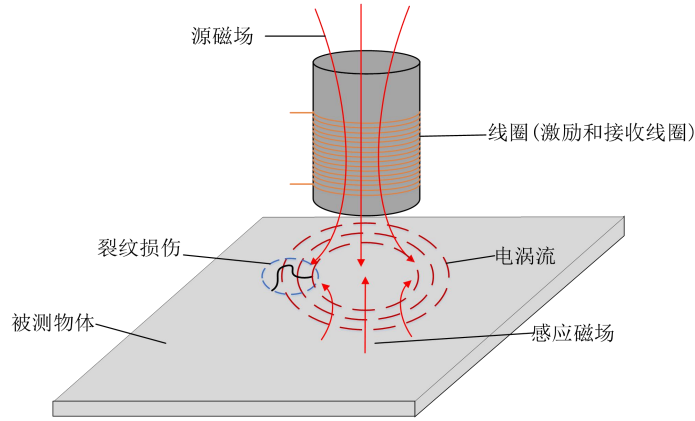


图 2-3 线圈和导体中的电磁感应

2.3 涡流检测原理

2.3.1 电磁感应检测原理

涡流检测是一种基于电磁感应原理的无损检测技术，其理论基础可由麦克斯韦方程组完整描述。麦克斯韦方程组作为电磁场的基本规律，为深入理解涡流检测的工作原理提供了理论框架。该方程组具体表述如下：

$$\nabla \times H = J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2-5)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2-6)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2-7)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-8)$$

ε 介电常数， μ 磁导率， D 电位移矢量， H 磁场强度，公式(2-5)中对式(2-6)取旋度，并应用(2-5)则得

$$\nabla \times \nabla \times E = -\nabla \times \left(\mu \frac{\partial H}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) = -(\mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t}) \quad (2-9)$$

应用矢量恒等式并考虑到式(2-7)则有

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla \nabla \cdot E - \nabla^2 \times E = -\nabla^2 \times E \quad (2-10)$$

把上式带入(2-9)则得

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (2-11)$$

这就是导电煤质中电场的波动方程。按照类似的方法，又可以得到磁场的波动方程：

$$\nabla^2 H - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2-12)$$

若所研究的电磁波为简谐波，则式(2-11)、(2-12)写为

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (2-13)$$

式中 γ 表示复传播常数， $\gamma = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon$ 若令 $\gamma = \alpha + j\beta$ ，则有以下关系式：

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right)} \quad (2-14)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} + 1 \right)} \quad (2-15)$$

α 为导电媒质中的衰减常数，表示沿传播方向单位长度上波的幅度的衰减量 (Np/m)。 β 为导电媒质中的相移常数(rad/m)。(2-13)可写成

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} - \gamma^2 E_x = 0 \quad \text{及} \quad \frac{d^2 H_y}{dz^2} - \gamma^2 H_y = 0 \quad (2-16)$$

式(2-16)的解可以写成 $E_x = E_0 e^{j\omega t - \gamma z} + E'_0 e^{j\omega t + \gamma z}$ 于是，往正 z 方向传播的电场 E_x 为

$$E_x = E_0 e^{j\omega t - \gamma z} \quad (2-17)$$

利用麦克斯韦方程由 E_x 求出磁场 H_y ， $H_y = \left(\frac{\gamma}{j\omega\mu} \right) E_0 e^{j\omega t - \gamma z}$

$$H_y = -\frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\gamma}{j\omega\mu} E_x \quad (2-18)$$

把式(2-17)的 E_x 代入上式则得 H_y ，

$$H_y = \left(\frac{\gamma}{j\omega\mu} \right) E_0 e^{j\omega t - \gamma z} \quad (2-19)$$

式(2-17)、(2-19)则为导电介质中电磁场的表示，通过控制电磁场的频率和强度，可以选择合适的检测深度和灵敏度，准确反映材料的导电特性。

电磁感应原理的研究不仅涉及电磁场的分析，还涉及线圈阻抗特性，其核心在于理解阻抗的影响机制及其作用原理。当线圈接近导体表面时，产生的交变磁场会穿透导体表层，并依据法拉第电磁感应定律在导体内部感应出涡流。而导体中的涡流会反过来影响线圈的磁场分布，从而改变其阻抗特性。此时涡流检测过程就和电感耦合电路类似，因此可以用耦合线圈的知识分析电涡流检测电路^[60]。图 2-4 展示了耦合线圈的等效电路模型，该模型为理解涡流检测的电磁耦合机制提供了理论依据。

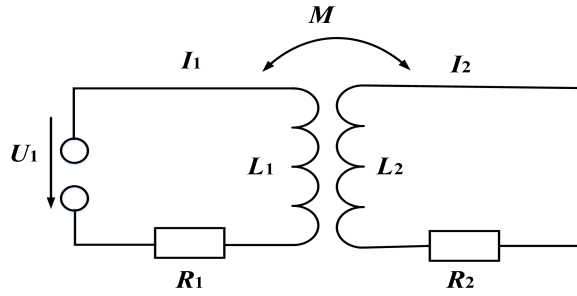


图 2-4 耦合线圈等效电路

阻抗公式为

$$Z = \frac{V_0}{I} = R + jX_L = R + j\omega L \quad (2-20)$$

公式中 Z 表示， X_L 表示感抗，等效电流公式：

$$\begin{cases} U_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega L_2 I_2 \\ 0 = (R_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega L_1 I_1 \end{cases} \quad (2-21)$$

把式(2-20)和(2-21)结合计算出初级磁场的等效电阻，如(2-22)式：

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U}{I} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} (R_2 - j\omega L_2) + j\omega L_1 \\ &= R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} \omega L_2) \end{aligned} \quad (2-22)$$

得到如下的次级磁场：

$$Z_e = \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} (R_2 - j\omega L_2) \quad (2-23)$$

通过上式可知耦合线圈的阻抗由初级阻抗和次级阻抗组合而成，其阻抗特性受工作频率的影响较大。不同频率的电磁场穿透深度不同，因此频率的选择对涡流检测的灵敏度和检测深度具有直接影响。耦合线圈的阻抗变化会显著影响涡流

检测的性能与准确性。通过合理设计线圈阻抗,选择合适的工作频率和检测条件,可以提高涡流检测的灵敏度和分辨率,从而更有效地识别材料内部的缺陷。

2.3.2 趋肤效应公式

在涡流检测时,导体内部会发生趋肤效应,交流电在导体中传输时,电流倾向于集中在导体的表面区域,而在导体的内部区域电流密度较低的现象,这就是趋肤效应。而趋肤深度是量化趋肤效应的参数,在计算趋肤深度时,当与表面的距离增大时,电流密度值从 100%很快衰减到 $1/e(37\%)$,当低于 $1/e$ 时,则变化不明显,故定义涡流密度衰减到其表面值 $1/e$ 时的深度为涡流标准渗透深度 δ ,也叫趋肤深度^[61]。由于趋肤效应是由感应电流产生的,在研究导体中的电磁场时应从麦克斯韦方程组出发。设定导体布置的位形如图 2-5 所示:

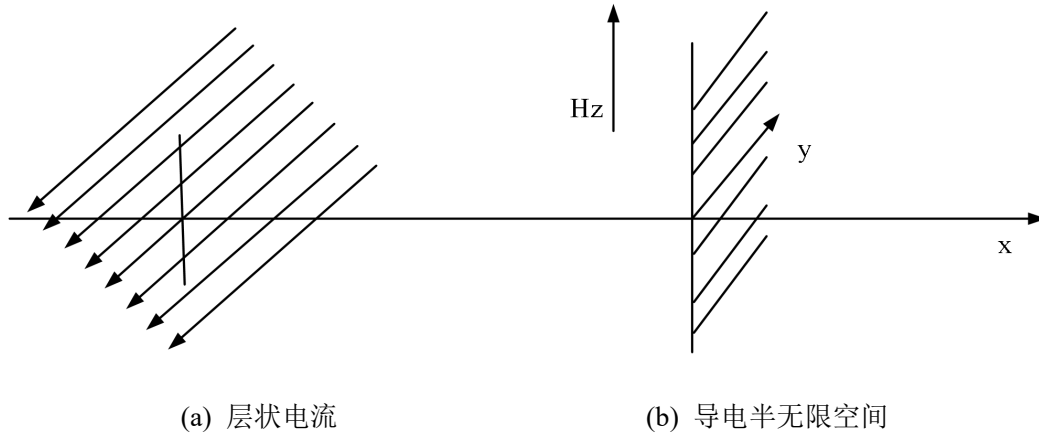


图 2-5 半无限空间和坐标系统

假设导体占据 y 轴右侧的半无限空间,并要求 y - z 平面通过原点。在距离原点一定距离处,存在一个与 x 轴垂直的平面,该平面内有一层沿 y 方向流动的激励电流。这个层状电流在导体表面和导体内部都会激发出一个沿 z 轴方向的磁场。换句话说,层状电流产生的电磁场会同时向正负 x 方向两个方向传播,形成一个平面电磁波。因此,电磁场的渗透方程可以表示为:

$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} = j\omega\mu\sigma H_z \quad (2-24)$$

式中 $K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}$ 这个二阶常微分方程的通解为

$$H_z = c_1 e^{-Kx} + c_2 e^{Kx} \quad (2-25)$$

式中,常数 c_1 和 c_2 边界条件来确定。结合图 2-6 分析可知,对于沿 x 轴方向无限延伸的半无限导体,为了保证无穷远处的磁场满足边界条件(即趋近于零),

常数 c_2 必须为零。如果 c_2 不为零，磁场在无穷远处将趋于无限大，这显然是不符合物理意义的。

$$H_z = c_1 e^{-Kx} \quad (2-26)$$

若令 $x = 0$ 处的 H_z 值为 H_{0z} （即 $x = 0$ 处的边界条件），可以得到系数 $c_1 = H_{0z}$

因此，磁场为

$$H_z = H_{0z} e^{\frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} x} \quad (2-27)$$

令 $K = \alpha + i\beta$ ， $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$ ，可见磁场由实部和虚部两部分组成。实部表示磁场的幅度随着电磁场进入导体深度的增加而作指数衰减，其衰减率由 $\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}}$ 决定，故称 α 为衰减因子；而 $\beta = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}}$ 为相位因子，决定了相位变化的快慢； K 则称为电磁场在导体中的传播系数。导体内的涡流流动场可以由方程 $\nabla \times H = J$ 求得。因为磁场 H 只有 z 向分量，而且只随坐标 x 变化，而与 y 、 z 无关，因而有方程

$$\frac{dH_z}{dx} = -J_y \quad (2-28)$$

将 (2-27) 带入 (2-28) 便得：

$$J_y = -\frac{dH_z}{dx} = -\frac{d}{dx} (H_{0z} e^{\frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} x}) = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} H_{0z} e^{\frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} x} \quad (2-29)$$

设在 $x = 0$ 处电流密度为 J_{0y} （即边界条件），其值为

$$J_{0y} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} H_{0z} \quad (2-30)$$

可以得

$$J_y = J_{0y} e^{\frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma} x} \quad (2-31)$$

式(2-31)同样由实部和虚部组成，它表明在导体内的涡流流动随着深度的增加，其幅值会衰减，而相位要滞后。在式 (2-29) 和式(2-31)中令 $x = \delta$ ，而且使

$\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \cdot \delta = 1$ ，可求得 δ （趋肤深度）的值为

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-32)$$

这时有

$$H_z = H_{0z} e^{-(1+j)}, J_y = J_{0y} e^{-(1+j)} \quad (2-33)$$

对于正交铺层的 CFRP 板, 其纤维铺层方向并非单一方向, 通常采用 $[45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / \dots]$ S 的铺层方式。在这种情况下, 可以将 $+45^\circ$ 和 -45° 层视为两倍厚度的 $\pm 45^\circ$ 层, 0° 和 90° 层也采用类似的处理方式。等效后的两倍厚度 $\pm 45^\circ$ 层的电导率可利用下式计算得到^[64]:

$$\delta_c = 2 \frac{1}{\sqrt{\omega \sigma_x \mu_0}} \quad (2-34)$$

综合上述分析可知, 不同材料的趋肤深度计算方法存在显著差异。对于金属材料, 由于其电导率呈现各向同性特征, 可直接采用公式(2-32)进行趋肤深度计算; 对于单向铺层的 CFRP, 由于材料电导率在纤维方向(x 方向)上具有主导性, 同样适用公式(2-32)进行计算; 然而, 对于正交铺层的 CFRP 材料, 由于其在 x 和 y 方向上的电导率存在显著差异, 则需要采用公式(2-34)进行计算。由此可见, 在计算不同材料的趋肤深度时, 必须充分考虑材料电导率的各向异性特征, 并据此选择相应的计算公式。

2.4 基于扫频法的电导率测量

扫频法测量碳纤维复合材料是基于涡流检测的电磁原理, 通过系统测量材料在不同激励频率下的电导特性来评估其厚度、导电性及其他电磁特性参数。该方法可以测量电导率张量的变化, 检测材料中的缺陷或损伤。基于欧姆定律和麦克斯韦方程组推导出电导率 σ 和电流密度 J 的关系式:

$$[J] = [\sigma] + [E] \quad (2-35)$$

碳纤维复合材料沿纤维方向的排列, 公式(2-13)可以表示为以下坐标轴分量的形式:

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_l & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

在(2-36)中, σ_l 表示纤维方向, σ_t 表示垂直于纤维方向, σ_{cp} 表示沿厚度方向。在原始的直角坐标系中, 电导率张量是对角矩阵, 仅包含沿坐标轴方向的分量。而在旋转坐标系下, 电导率的分量会发生变化, 且可能出现交叉项, 表明不

同方向上的电流相互影响。该变化通过坐标变换矩阵 G 来表示，简化关系如图 2-6 所示：

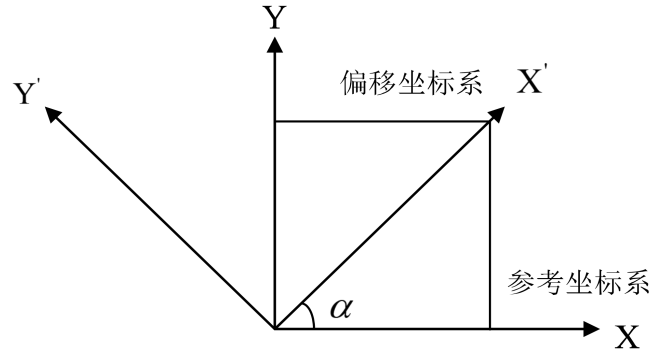


图 2-6 旋转坐标系

$$[J'] = [G] \cdot [J]; [E'] = [G] \cdot [E] \quad (2-37)$$

当坐标系旋转时，电导率张量的变换可以通过矩阵乘法实现。坐标变换矩阵的每个元素与旋转角度 α 相关，通常表示为：

$$[G] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

然后，通过使用坐标变换矩阵 G 及其转置 G^T 对电导率张量 σ 进行变换，可以得到旋转坐标系下的新电导率张量 σ' ：

$$[J] = [\sigma'] \cdot [E'] \quad (2-39)$$

结合(2-37)和(2-39)得：

$$[G][J] = [\sigma'] \cdot [E] \cdot [G] \quad (2-40)$$

(2-40)经过公式变换得到广义矩阵 σ'

$$[J] = [G]^{-1} [\sigma'] \cdot [G] \quad (2-41)$$

经过计算得电导率张量 σ' 。将(2-36)和公式(2-38)代入上式，化简后得到

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_l \cos^2 \alpha + \sigma_t \sin^2 \alpha & \frac{\sigma_l - \sigma_t}{2} \sin 2\alpha & 0 \\ \frac{\sigma_l - \sigma_t}{2} \sin 2\alpha & \sigma_l \sin^2 \alpha + \sigma_t \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

扫频法的检测步骤如图 2-7 所示：

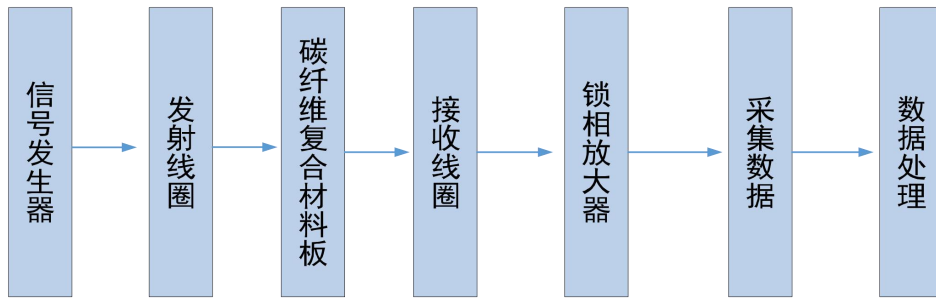


图 2-7 涡流扫频检测仪原理图

扫频法采用非接触式测量方式，通过探头与材料表面之间的电磁耦合实现交互作用，从而能够实现完全无损的检测过程。这一特性适用于具有复杂几何形状或难以直接接触的 CFRP 构件的检测。基于其非接触、高灵敏度和适应性强的特点，扫频法已成为碳纤维复合材料质量评估和损伤检测的理想方法之一。

2.5 基于标定法的趋肤深度测量

在无损检测领域，趋肤深度的精确测量是分析导体电磁特性和内部结构的关键参数之一。标定法通过在材料内部预设标记点，这些标记点采用特殊工艺嵌入碳纤维复合材料板中，当电磁波在检测过程中与标记点相互作用时，会产生显著的特征信号，从而准确反映材料中电流的衰减规律。目前，测量碳纤维复合材料趋肤深度的标定方法主要包括铜箔标记法、压痕标记法和损伤裂纹标记法。

其中，铜箔标记法通过在碳纤维复合材料的不同深度层间嵌入特定厚度的薄铜箔来实现电流分布的标定。铜箔厚度的选择需经过严格优化，以确保既能产生明显的检测信号，又不会干扰电流的自然衰减特性。在实验过程中，电磁探头向材料发射探测信号，当信号遇到铜箔时会产生强烈的反射。由于铜箔的导电性显著高于碳纤维基体，其反射信号与周围材料形成鲜明的对比特征，这为电流分布的测定提供了可靠依据。通过分析不同深度处反射信号的强度变化，可以准确揭示电流的衰减深度及速率，进而推算出趋肤深度和电流分布规律。

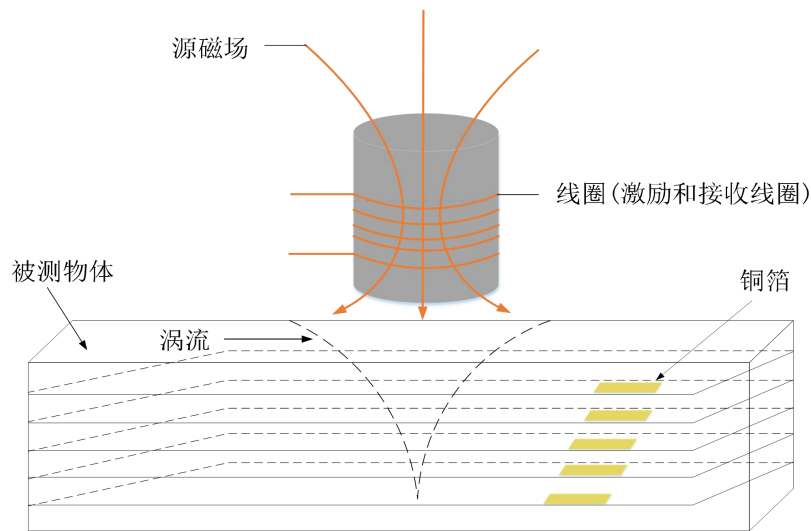


图 2-8 铜箔标记法

基于标定法的趋肤深度测量技术通过在碳纤维复合材料的特定层（如表面或中间层）施加可控压痕，改变局部区域的密度和导电性，从而影响电流的传播特性。该方法利用硬度测试仪或压痕机等精密设备在材料表面制造局部压痕，这些压痕会改变材料的微观结构和物理性质，进而影响电流的分布和衰减行为。当电流或电磁波穿透材料并遇到压痕区域时，由于材料物理性质的局部变化，会导致反射信号出现明显的增强或衰减特征。通过高灵敏度电磁波探测器监测这些信号变化，可以准确标定电流衰减规律，进而精确分析趋肤深度和电流衰减特性。

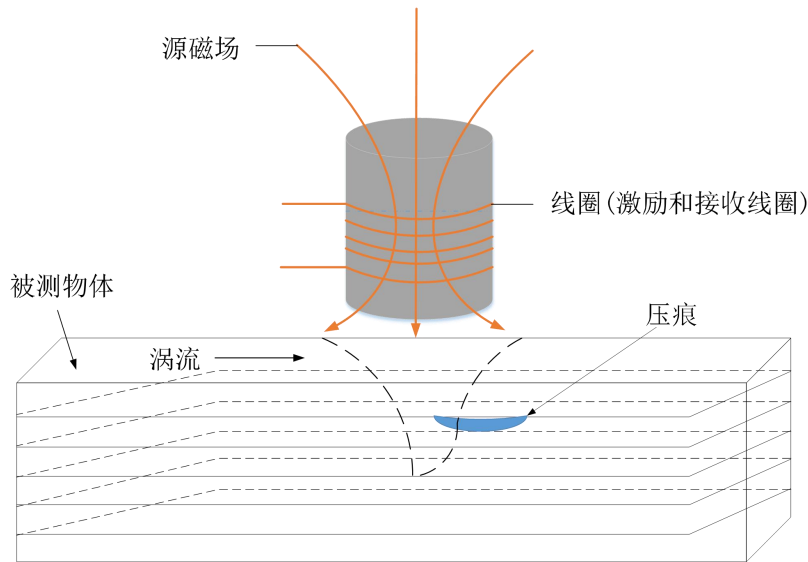


图 2-9 压痕标记法

损伤裂纹标记法则通过在碳纤维复合材料中人工引入可控裂纹或损伤来实现电流分布和趋肤深度的标定。该方法首先采用过载加载、机械刮擦或激光切割

等技术在材料表面或内部特定位置预制裂纹。这些裂纹会显著改变电磁波的传播特性，导致入射电磁波发生反射、散射或衰减，从而产生特征性的信号变化。在检测过程中，电磁波源向材料发射探测信号，探测器收集反射信号。由于裂纹区域的电磁特性与基体材料存在显著差异，反射信号的强度和波形会呈现明显的特征变化。通过对这些信号变化的定量分析，研究人员可以准确推算裂纹的位置、深度以及电流衰减特性，从而计算出材料的趋肤深度。

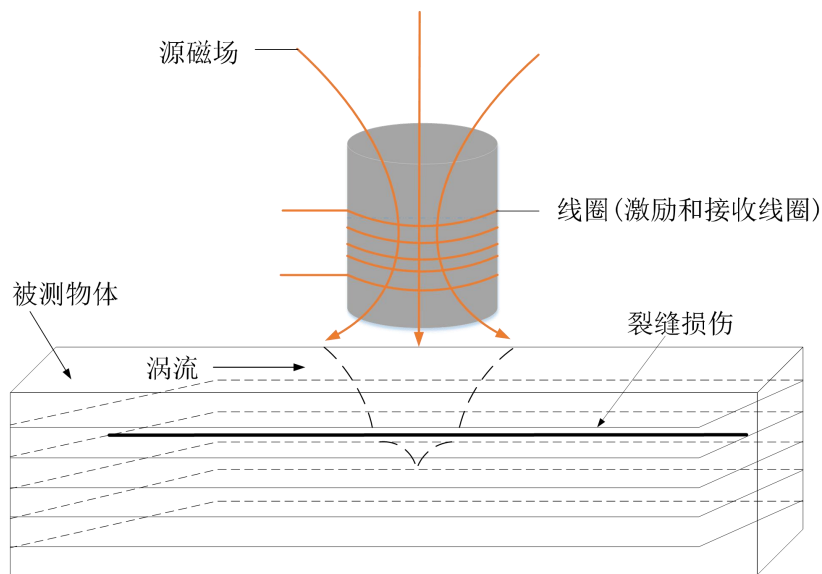


图 2-10 损伤裂纹标记法

上述研究基于趋肤深度理论，采用标定法对三种典型缺陷进行系统性测量与分析。实验过程中，重点选取具有代表性的第三种损伤裂纹标记法作为主要研究对象，通过该方法对裂纹特征进行精确检测与定量分析。具体的实验方案设计、实验系统构建及实施过程将在 5.3 章节进行详细阐述。通过标定法所获取的高精度实验数据为无损检测技术的深入研究提供了可靠的基础数据支撑。

表 2-2 标记法优缺点对比图

标记法	优点	缺点
铜箔标记法	1. 信号反射强烈，易于检测；	1. 铜箔的安装可能受材料表面形态
	2. 实验过程简单，数据处理方便；	和操作精度影响；
	3. 信号对比度高，易于准确标定电流分布。	2. 铜箔可能对材料的电磁特性产生一定干扰；
		3. 需要高精度设备来确保铜箔的布置。

续表 2-2 标记法优缺点对比图

标记法	优点	缺点
压痕标记法	1. 操作简便，可以局部改变材料特性； 2. 适用于不同层次，易于定位电流分布； 3. 无需额外材料，成本较低。	1. 压痕的深度和大小难以精确控制； 2. 压痕可能导致材料永久性损伤； 3. 可能会影响材料的力学性能，特别是在高应力区域。
损伤裂纹标记法	1. 裂纹模拟了实际应用中的损伤，有助于反映材料的实际表现； 2. 可在深层制造裂纹，适用于较大范围的深度测量； 3. 可提供材料的长期性能信息。	1. 人为制造裂纹可能影响实验的重复性和可控性； 2. 裂纹的形态和分布难以精确控制； 3. 可能对材料造成不可逆损伤，影响后续性能评估。

2.6 本章小结

本章系统性地介绍了CFRP的导电特性及其相关电磁性能。首先详细阐述了CFRP作为一种新型复合材料的导电机理，包括其各向异性的导电特性；随后深入探讨了电磁感应的基本原理及其在CFRP材料中的特殊表现；同时全面分析了趋肤效应的物理本质及其对材料电磁性能的影响。在实验方法方面，本章重点介绍了基于扫频法的电导率精确测量技术；同时详细说明了采用标定法进行趋肤深度测量的完整流程和技术要点。最后，本章还全面阐述了基于扫频法的电导率测量系统，对其核心组件的选型原则、系统架构设计以及各模块的功能实现进行了详尽说明。

第3章 涡流-电导率正向分析模型的构建

3.1 引言

在电导率反演过程中，由于 CFRP 材料的电导率表现出显著的各向异性特征，接收线圈的电压响应与激励线圈的频率及材料的电导率参数之间存在复杂的关联。传统的接收线圈电压获取方式主要依赖实验测量，过程繁琐且耗时。针对这一问题，本章提出了一种基于拟合方程的计算方法：通过建立拟合方程并输入已知的电导率和频率参数，即可直接计算出接收线圈的电压值，避免了实际测量的复杂过程。该方法有效量化了材料电导率与接收线圈电压之间的关系，为 CFRP 电导率的高效反演提供了一种简便可靠的技术途径。

3.2 构建模型

在电磁仿真过程中，需要将单向 CFRP 片层视为均匀且连续的各向异性材料，并通过三阶张量矩阵表征其电导率和磁导率，精确模拟电磁特性。由于碳纤维复合材料中的碳纤维和树脂均不具有铁磁性，其磁导率 μ 保持恒定，且数值接近于真空磁导率 μ_0 ，即相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 。磁导率 μ 依旧通过三阶张量来表示，具体矩阵形式如下：

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} = \mu_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

公式(3-1)中 μ 为对角阵， μ_0 为分量。CFRP 的电导率具有正交各向异性，在材料中单向层的电导率张量为：

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta & \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta & 0 \\ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta & \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

在进行仿真计算时 θ 设置为纤维方向与 x 轴的夹角，设纤维方向与模型坐标系的 x 轴平行，即 $\theta=0$ ，所以公式(3-2)可写为

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

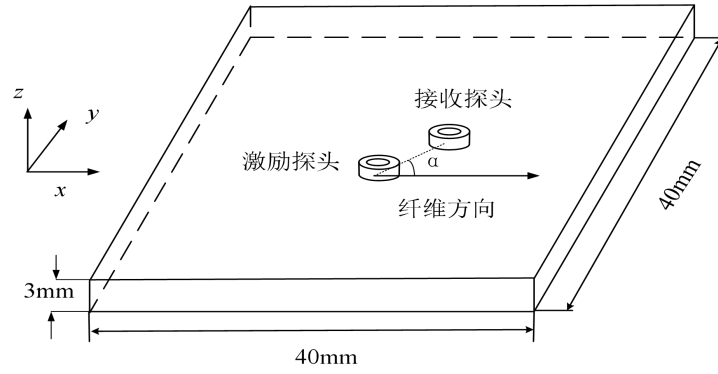
式中 σ_x 是沿纤维方向电导率, σ_y 是垂直纤维方向电导率, σ_z 是厚度方向电导率。

本章基于实验条件构建了高精度的正向仿真模型, 以确保数值模型能够准确反映实验现象。在模型设计过程中, 通过精确设置几何尺寸和结构参数, 实现了仿真关键参数与实验条件的完全匹配。为进一步验证仿真结果的稳定性和可靠性, 研究采用对比实验方法, 分别选取 5mm 和 8mm 两种不同的线圈中心距进行仿真分析。此外, 在仿真计算过程中, 为有效消除空气中潜在干扰因素对测量结果的影响, 采用数据校正方法将空气仿真数据从各向异性数据中予以扣除, 降低空气成分对测量结果的干扰。为增强模型的完整性和可复现性, 表 3-1 系统整理了模型中的各项关键参数, 包括空气域尺寸、线圈几何参数等未在图形中明确显示的重要信息。

表 3-1 电导率正向分析模型参数

模型	线圈	试件	空气
参数(mm)	内外径: 0.6/1.6	长: 40	长: 80
	高度: 0.8	宽: 40	宽: 80
	提离: 0.5	厚度: 3	厚度: 20
	中心距: 8/5		
电导率(S/m)	0	σ	0
相对磁导率	1	1	1

由于纤维方向与模型坐标系的 x 轴平行, 试件的电导率 σ 在模型中的赋值依据关系式(3-5)进行计算和设定。图 3-1 展示了包含纤维方向、坐标系以及电导率分布关系的完整模型示意图。


 图 3-1 模型尺寸和探头角度 α

研究采用双探头结构设计,该结构包含参数完全相同的激励探头和接收探头,分别用于施加激励信号和采集反馈信号。为进一步研究两探头的位置关系并精确表征探头与纤维方向的空间几何关系,模型中引入了关键参数 α ,用于定义激励线圈与接收线圈中心连线与 x 轴之间的夹角。

3.3 电压与频率关系

3.3.1 仿真分析电压与频率关系

研究基于法拉第电磁感应定律,对电压-频率关系开展了系统的仿真计算与实验验证。根据法拉第电磁感应定律,激励线圈产生的时变磁场会在接收线圈中感应出电动势,且感应电动势的大小与磁场随时间的变化率成正比。具体而言,接收线圈中产生的电动势可通过以下数学推导进行描述:首先,将公式(2-4)中的电导率参数代入式(2-32)的体积分项并进行展开;其次,将积分项中的向量场分解为正交分量形式,从而得到接收线圈电动势的完整数学表达式:

$$V = \frac{-\omega_2 \mu_0}{4\pi} \oint_L \left\{ \int_{\Omega} \left(\frac{\sigma_{xx} A_x(x') + \sigma_{yx} A_x(x')}{|x-x'|} + \frac{\sigma_{xy} A_y(y') + \sigma_{yy} A_y(y')}{|y-y'|} + \frac{\sigma_{xz} A_z(z')}{|z-z'|} \right) dV' \right\} \cdot dl \quad (3-4)$$

上式中 $\mu(\mu=x, y, z)$ 分别表示涡流区域和线圈区域在三个空间方向上的坐标值。

在探究电导率与电压关系时,选取 100 kHz 至 500 kHz 的探头频率范围,系统分析了各个方向电导率变化对电压实部、虚部及幅值的影响规律。考虑到碳纤维复合材料(CFRP)的电导率具有显著的各向异性特征,对于典型的 CFRP 板材(碳纤维体积分数约为 60%~70%),其纵向电导率(沿纤维方向)范围约为

$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4 \text{ S/m}$ ；横向电导率（垂直于纤维方向）范围为 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ S/m}$ ^[62]；厚度方向电导率通常为 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ S/m}$ ^[63]。基于此，仿真实验选择初始电导率为(30000, 4.8, 1.2)S/m。

为了探究电导率变化对电压响应的影响，我们分别调整了 x 、 y 、 z 三个方向的电导率值：将其中一个方向的电导率减小至原值的三分之一，同时保持另外两个方向的电导率不变，从而得到三组不同的电导率参数：(20000, 4.8, 1.2)S/m、(30000, 3.2, 1.2)S/m 和(30000, 4.8, 0.8)S/m。通过仿真计算，我们获得了这三组电导率条件下电压的实部、虚部和幅值变化曲线。分析图 3-2 结果可知，在 100 kHz 至 500 kHz 频率范围内，接收线圈的电压幅值及其虚部对初始电导率变化的响应较弱。即在此频率区间内，电导率的变化对电压响应的影响不够显著，导致电压变化难以被有效观测，从而限制了通过电导率调整来分析电压响应特征的能力。

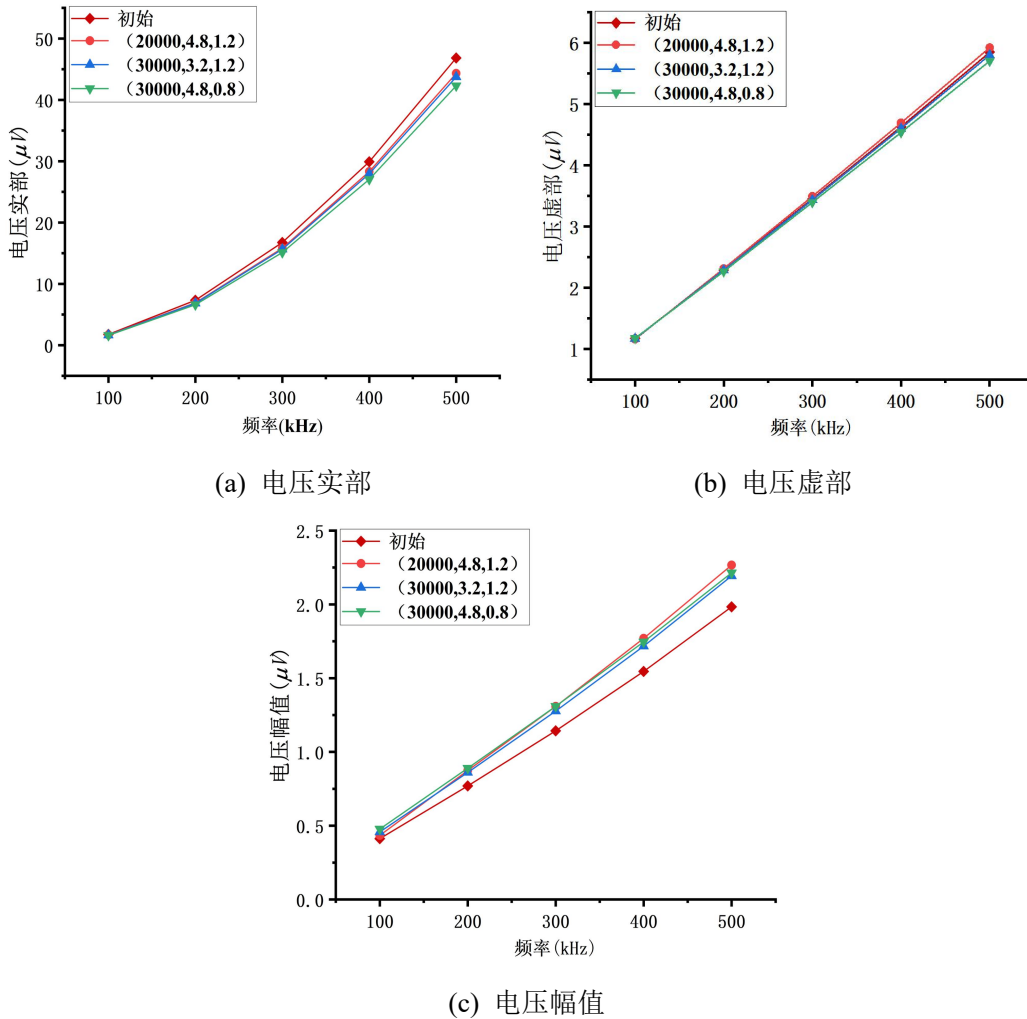


图 3-2 变量后的电导率对电动势的影响

为突破这一实验限制并提高电导率变化对电压响应的灵敏度,可以通过扩展探头频率范围进行了系统性仿真实验。研究将频率范围扩展至 100 kHz 至 2MHz,以期确定最佳实验频率。通过系统仿真获得的电压幅值结果如图 3-3 所示:

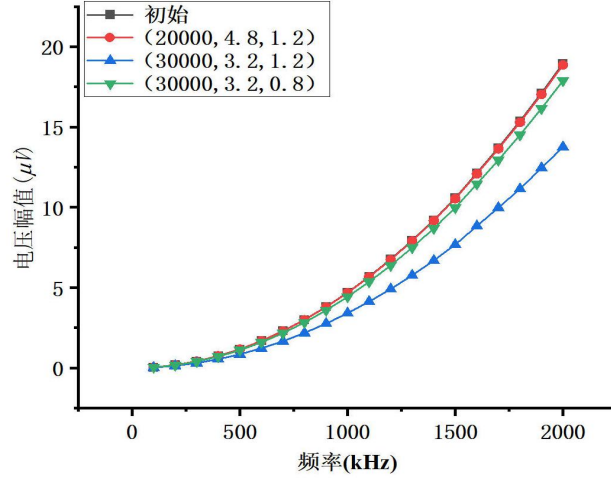


图 3-3 100kHz 至 2000 kHz 电动势变化曲线

根据图 3-3 的仿真结果可知,接收线圈电压对电导率变化的响应呈现出显著的频率依赖性:随着频率的升高,电压响应明显增强,且不同电导率条件下的曲线差异逐渐显著。基于上述分析,最终确定 1200k Hz 至 2000k Hz 为最佳频率范围,并将频率步长设置为 200 kHz,将该范围划分为五个等间距频率点(1200k Hz、1400 kHz、1600k Hz、1800 kHz、2000 kHz)进行后续仿真计算。

为了更好地分析不同角度对测量结果的影响,选择 0° 、 45° 和 90° 这三个典型角度进行研究。选择这三个角度的原因在于,它们能够全面覆盖探头与纤维方向之间的不同相对关系: 0° 表示探头完全平行于纤维方向, 90° 表示探头与纤维方向垂直,而 45° 则是两者之间的中间状态。在这些角度下,分别测量了不同电导率条件下,不同频率所得到的探头电压。为便于后续数值拟合分析,对图 3-4 中的仿真数据进行了归一化处理,即将探头电压值除以 $1 \mu V$ 进行去量纲化。

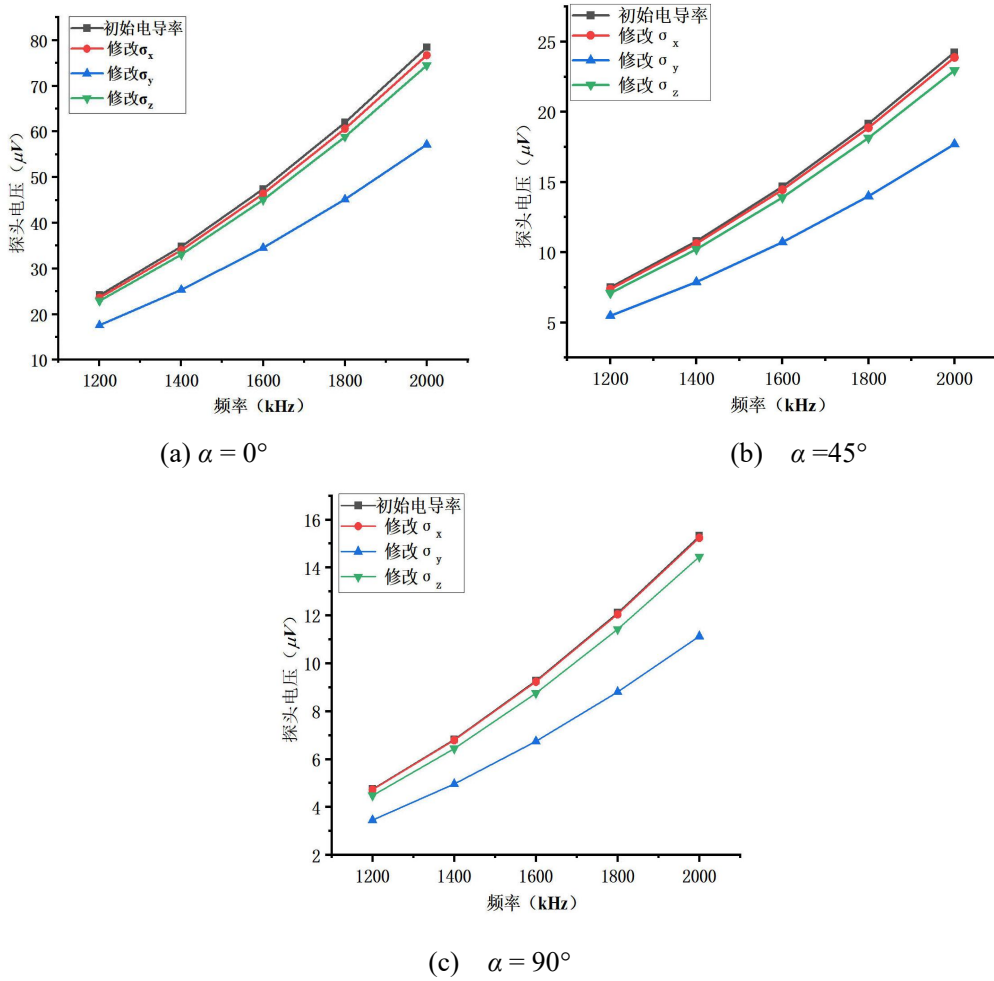


图 3-4 不同探头角度下电压随频率关系

通过对图 3-4 的系统分析,可得出以下重要结论:在 0° 和 90° 角度下,初始电导率(30000,4.8,1.2) S/m 与修改后的(20000,4.8,1.2) S/m 的响应曲线表现出高度一致性,其变化幅度较小,未呈现显著差异;而在 45° 角度下,初始与修改后的电导率响应曲线之间表现出明显的差异特征,这种差异为后续观察和分析提供了更直观的依据。基于以上分析结果,研究选择 $\alpha = 45^\circ$ 作为仿真实验的最佳角度。

在仿真计算中,为准确反映碳纤维复合材料的电导率特性,设定电导率为(σ_x , σ_y , 1) S/m, 其中: σ_x 取值范围为 5000 S/m 至 50000 S/m, 步长为 5000 S/m; σ_y 取值范围为 1 S/m 至 10 S/m, 步长为 1 S/m,具体电导率选取的参数值设置详见表 3-2:

表 3-2 电导率参数取值

$\sigma_x(\text{S/m})$	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
$\sigma_y(\text{S/m})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_z(\text{S/m})$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

在仿真计算中，保持 z 方向电导率不变，选取不同的 x 、 y 方向电导率组合进行仿真实验，系统分析电导率各向异性对涡流检测响应的影响规律。基于 COMSOL 仿真平台，按照表 3-2 所列参数，分别在中心距为 5 mm 和 8 mm 的条件下，各设计了 100 组不同电导率组合（如(5000,1,1)、(5000,2,1)、(5000,3,1)等），覆盖材料在 x 、 y 方向导电特性的变化范围，共完成 200 组仿真实验，为后续响应特性分析提供了充分的数据支持。

3.3.2 拟合电导率曲线

基于 3.1 节仿真实验获得的接收线圈电压数据，首先对原始数据进行了标准化处理，以消除量纲效应对建模精度的潜在干扰。随后，采用 MATLAB 曲线拟合工具，以激励频率 (f) 为自变量、接收线圈电压幅值 (U) 为因变量，建立了线性回归模型 ($U = a \cdot f + b$)。通过系统计算，提取了 100 组具有明确物理意义的回归系数（斜率 a 与截距 b ），有效表征了不同电导率组合下检测信号的频率响应特性。进一步地，为深化电导率参数与检测信号特征之间关系的理解，本研究引入基于空间插值算法的三维可视化分析方法，构建了 a 、 b 系数的三维分布图，直观揭示了各向异性电导率对检测信号演化规律的影响。具体而言，以 σ_x (x 轴)、 σ_y (y 轴) 和斜率 a (z 轴) 为坐标轴构建三维网格图，同时对截距 b 的数据也进行了相同的三维可视化处理。其中，图 3-5(a)和图 3-5(b)展示了中心距为 5mm 时的三维可视化结果，而图 3-6(a)和图 3-6(b)则呈现了中心距为 8mm 时的三维可视化效果。

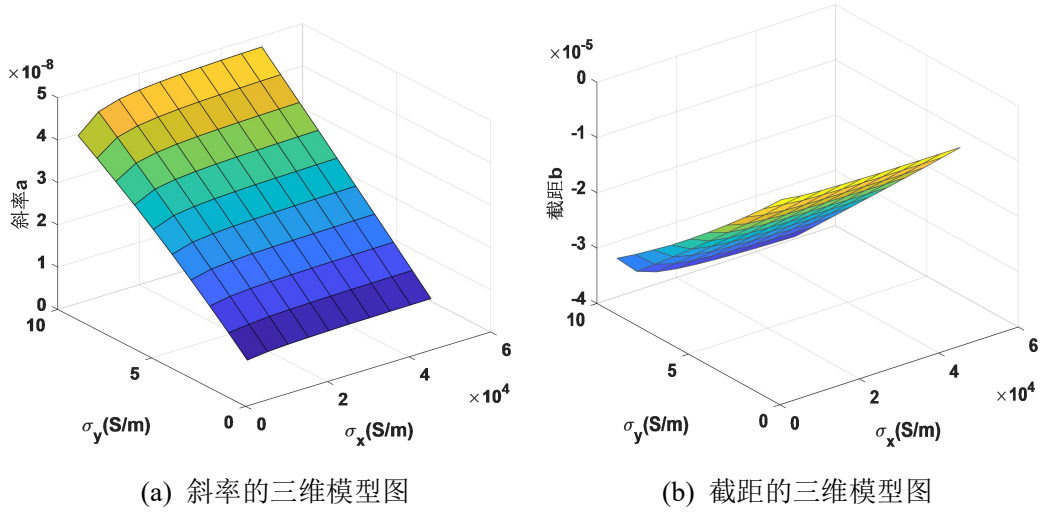


图 3-5 中心距为 4mm 的三维模型图

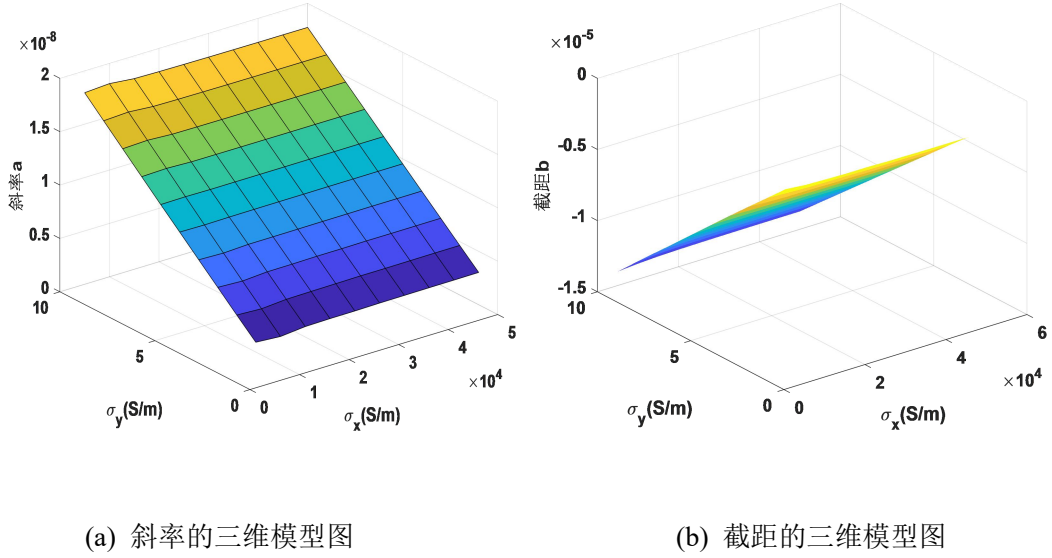


图 3-6 中心距为 8mm 的三维图

通过对三维模型图的分析可以发现,电导率与斜率之间的关系在不同方向上呈现出一致的规律性变化。具体而言,在沿纤维方向上,随着电导率 σ_x 的增大,斜率 a 呈现逐渐增大的趋势,而截距 b 则表现出逐渐减小的特征。同样,在垂直纤维方向上,随着电导率 σ_y 的增大,斜率 a 也呈现增长趋势,而截距 b 同样保持递减规律。这一发现为后续实验数据的验证提供了重要的理论参考。

基于上述数据关系,研究利用 MATLAB 中的 polynomial 工具,建立了沿纤维方向电导率(σ_x)和垂直纤维方向电导率(σ_y)与斜率 a 之间的定量关系模型,同时采用相同方法构建了 σ_x 和 σ_y 与截距 b 之间的拟合方程。以中心距为 5mm 为例,斜率 a 的拟合曲线可表示为公式(3-5):

$$\begin{aligned}
 a = & 0.001716 + (3.55e^{-7}) \cdot \sigma_x + (0.004097) \cdot \sigma_y + (-2.993e^{-11}) \cdot \sigma_x^2 \\
 & + (6.835e^{-8}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + (-8.912e^{-5}) \cdot \sigma_y^2 + (1.329e^{-15}) \cdot \sigma_x^3 + \\
 & (-4.978e^{-12}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (8.159e^{-9}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 + (-2.873e^{-6}) \cdot \sigma_y^3 \\
 & + (-2.767e^{-20}) \cdot \sigma_x^4 + (1.371e^{-16}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y + (-2.613e^{-13}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (9.117e^{-11}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^3 + (2.136e^{-7}) \cdot \sigma_y^4 + (2.123e^{-25}) \cdot \sigma_x^5 + \\
 & (-1.244e^{-21}) \cdot \sigma_x^4 \cdot \sigma_y + (2.482e^{-18}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y^2 + (-4.733e^{-17}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^3 \\
 & + (-3.699e^{-12}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^4 + (-5.567e^{-9}) \cdot \sigma_y^5
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

中心距为 5mm，截距 b 的拟合曲线为(3-6):

$$\begin{aligned}
 b = & -1.374 + (-2.873e^{-4}) \cdot \sigma_x + (-3.402) \cdot \sigma_y + (2.354e^{-8}) \cdot \sigma_x^2 \\
 & + (-5.708e^{-5}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + (0.05854) \cdot \sigma_y^2 + (-1.041e^{-12}) \cdot \sigma_x^3 \\
 & + (4.129e^{-9}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (-6.421e^{-6}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 + (5.475e^{-3}) \cdot \sigma_y^3 \\
 & + (2.186e^{-17}) \cdot \sigma_x^4 + (-1.156e^{-13}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y + (2.242e^{-10}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (-1.391e^{-7}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^3 + (-4.317e^{-4}) \cdot \sigma_y^4 + (-1.697e^{-22}) \cdot \sigma_x^5 \\
 & + (1.067e^{-18}) \cdot \sigma_x^4 \cdot \sigma_y + (-2.247e^{-15}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y^2 + (6.782e^{-13}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^3 \\
 & + (4.039e^{-9}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^4 + (1.363e^{-5}) \cdot \sigma_y^5
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

中心距为 8mm，斜率 a 的拟合曲线为(3-7):

$$\begin{aligned}
 a = & (1.434e^{-9}) + (-7.937e^{-14}) \cdot \sigma_x + (1.542e^{-9}) \cdot \sigma_y + (6.297e^{-18}) \cdot \sigma_x^2 \\
 & + (1.695e^{-14}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + (2.223e^{-11}) \cdot \sigma_y^2 + (-1.684e^{-22}) \cdot \sigma_x^3 + \\
 & (-1.147e^{-18}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (-7.186e^{-16}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 + (-2.552e^{-12}) \cdot \sigma_y^3 \\
 & + (1.509e^{-27}) \cdot \sigma_x^4 + (2.942e^{-23}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y + (1.059e^{-20}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (3.875e^{-17}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^3 + (1.88e^{-13}) \cdot \sigma_y^4 + (-4.689e^{-34}) \cdot \sigma_x^5 + \\
 & (-2.574e^{-28}) \cdot \sigma_x^4 \cdot \sigma_y + (-1.482e^{-26}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y^2 + \\
 & (-4.543e^{-22}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^3 + (-5.712e^{-19}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^4 + (-5.815e^{-15}) \cdot \sigma_y^5
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

中心距为 8mm，截距 b 的拟合曲线为(3-8):

$$\begin{aligned}
 b = & (-5.384e^{-7}) + (-5.867e^{-11}) \cdot \sigma_x + (-1.313e^{-6}) \cdot \sigma_y \\
 & + (2.834e^{-15}) \cdot \sigma_x^2 + (8.573e^{-12}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + (-1.229e^{-8}) \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (-6.71e^{-20}) \cdot \sigma_x^3 + (-4.49e^{-16}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (5.021e^{-13}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (1.139e^{-9}) \cdot \sigma_y^3 + (7.199e^{-25}) \cdot \sigma_x^4 + (9.437e^{-21}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y + \\
 & (-5.489e^{-18}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 + (-3.619e^{-14}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^3 + (-6.028e^{-11}) \cdot \sigma_y^4 \\
 & + (-2.71e^{-30}) \cdot \sigma_x^5 + (-6.519e^{-26}) \cdot \sigma_x^4 \cdot \sigma_y + (-4.388e^{-23}) \cdot \sigma_x^3 \cdot \sigma_y^2 \\
 & + (5.116e^{-19}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^3 + (3.994e^{-16}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^4 + (1.46e^{-12}) \cdot \sigma_y^5
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

仿真电压值是通过 COMSOL 有限元仿真直接计算得到的精确结果，而拟合电压值则是基于预先建立的数学方程（如 $U=a \times f+b$ ）通过输入电导率参数快速计算得出的近似值。两者的本质区别在于：仿真电压是经过完整电磁场数值求解的基准数据，计算成本较高但精度可靠；拟合电压则是为提升计算效率而建立的降阶模型，其核心价值在于避免重复仿真、实现快速预测，并为反演算法提供可微分的数学关系。为确保拟合方程的可靠性，必须通过仿真数据交叉验证、实验数据验证以及边界条件测试等多重验证环节。这种分层建模方法既保留了有限元仿真的准确性，又通过拟合方程显著提升了工程应用的效率。

3.4 碳纤维复合材料的制备与实验

3.4.1 制备碳纤维复合材料

在研究碳纤维增强塑料(CFRP)的导电特性时，首先需要制备具有特定结构和性能的 CFRP 试件。为此，采用预浸料铺层工艺来制备碳纤维复合材料，该工艺具有较高的强度和优良的层间界面质量，能够满足上述的实验和电学性能的需求。预浸料铺层工艺的流程如图 3-7 所示^[65]

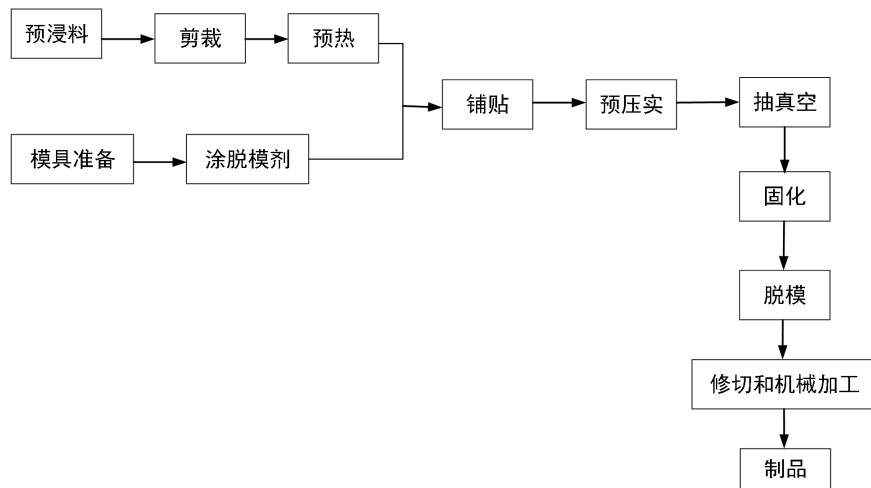


图 3-7 预浸料的铺层工艺

在进行纤维铺设工艺时，首先需要根据实验设计要求将纤维材料裁剪至预定尺寸，随后依据目标试件的厚度规格，通过计算确定 CFRP 板的铺设层数。铺层过程中，每一层预浸料都必须精确地加热和按压，以确保层与层之间的粘接质量；铺设方向需要严格控制，以避免因纤维方向不一致而影响最终材料的性能。

制备复合材料的过程不仅仅依赖于精确的铺层,还需要通过外部的压力和温度来保证材料的成型和固化,为排除铺层之间可能截留的空气,并确保叠层的紧密性,施加一定的压力至关重要。固化过程的控制同样重要,需要保证在固化过程中维持真空环境,以防止空气进入影响成品质量。

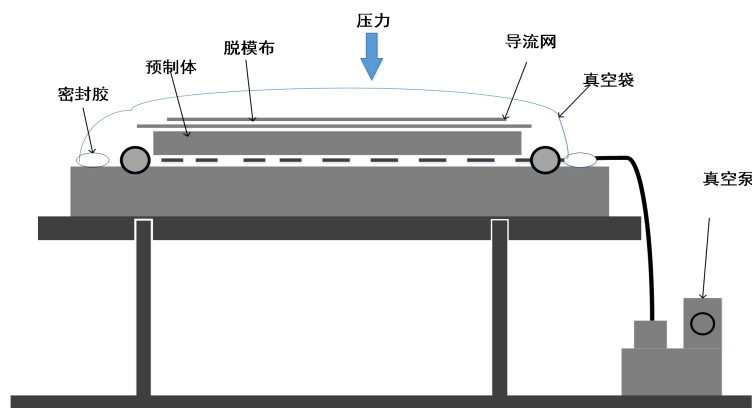


图 3-8 真空袋压封装图

在工业生产中,真空袋压固化法是一种常用的工艺方法,其过程如图 3-8 所示。具体操作步骤如下:首先,将模具与预浸料铺层一同置于真空袋内,随后利用真空泵将袋内空气抽除,使预制体处于真空状态;接着,向真空袋内施加约 0.05~0.07MPa 的外部压力,以完成固化过程。这种方法通过真空环境和外部压力的结合,确保了材料的高质量成型。实验采用的固化方法较为简便,将预浸料铺层依次置于底板表面,并按照"脱模布-吸胶层-盖板"的顺序进行封装,随后在盖板上施加恒定载荷以实现均匀加压。固化过程的温度参数和真空度(-0.1MPa)通过程序控温真空干燥箱(精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)进行精确控制。



图 3-9 真空干燥箱

在固化过程中，温度和压力的控制至关重要，为了降低环氧树脂的粘度并促使其发生化学反应，必须通过高温加热来实现。而在固化时施加的压力则有助于将每一层预浸料紧密压合在一起，防止气孔和分层现象的发生。固化过程中，必须严格遵守预浸料的固化曲线，具体包括保温温度、升温速率、保温时间、压力及加压时间等要求。

3.4.2 实验验证

本实验旨在验证一个核心问题：当激励线圈与接收线圈之间的中心距分别为 5mm 和 8mm 时，接收线圈实际测量的电压值是否与计算机仿真模型预测的电压值一致。根据 3.3.1 节的内容，可以在特定频率和电导率条件下获取仿真电压值；同时，基于 3.3.2 节的拟合方程，可计算得到拟合情况下的斜率 a 和截距 b ，并通过公式(3-9)计算出选定频率下接收线圈的拟合电压值：

$$U = a \cdot f + b \quad (3-9)$$

具体参数如表 3-3 所示。

表 3-3 电导率参数值

	中心距 5mm		中心距 8mm	
组号	1	2	3	4
电导率 (S/m)	(30000,5,10)	(40000,8,1)	(30000,5,1)	(10000,2,1)
频率(kHz)	1600	1400	1600	1800
仿真电压值(μ V)	19.605	22.3081	7.6009	4.4922
拟合电压值(μ V)	19.579	21.8542	7.6804	4.5659

首先选择第一组进行实验：将实验装置置于屏蔽箱内，使用高斯计检测背景磁场强度小于 10 nT ，确保环境噪声低于信号幅值的 1%。根据实验目标，将实验设备按照以下流程连接：信号发生器→发射线圈→碳纤维复合材料板→接收线圈→锁相放大器。其实际实验设备如图 3-10 所示。

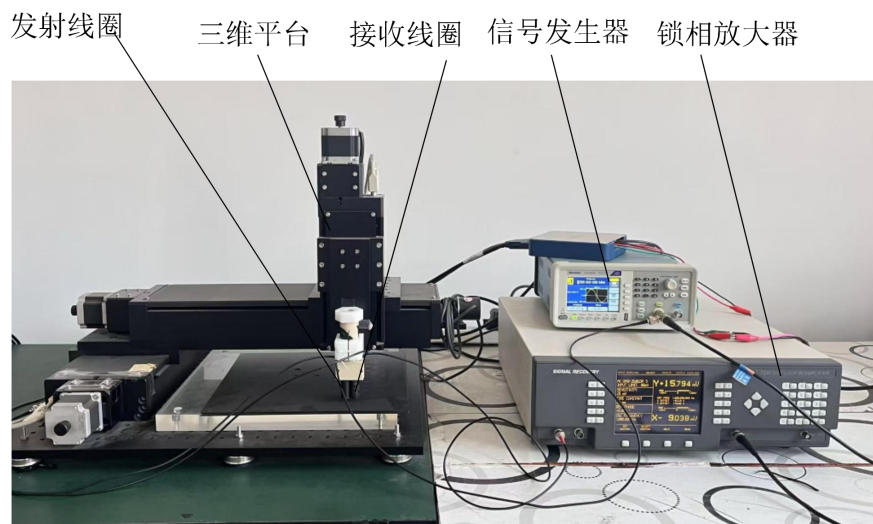


图 3-10 实验设备

信号发生器型号为 Tektronix 泰克 AFG1022, 设置信号输出: 频率 1600 kHz, 电压 $5V_{pp}$ (峰值), 正弦波形 (THD<0.1%)。首先, 移除样本, 记录无激励时锁相放大器的输出值, 以便进行校正。接下来, 通过三维平台调整接收线圈与样本表面的距离至 1mm。

实验中采用 Signal Recovery 7280 锁相放大器, 该设备支持 1 MHz 至 102.4 kHz 的检测频率范围, 完全满足实验需求。参数设置如下: 增益 20dB, 输入时间常数设定为 20 ms, 相位设置为 0° , 灵敏度调整至 20mV。

在实验测量过程中, 采用 3×3 网格(间距 2 mm)在样本表面均匀选取 9 个测量点, 每个测量点重复测量 3 次以提高数据可靠性。由于实验过程中施加的电压较高, 为确保数据准确性, 对原始测量值进行了必要的数据处理, 最终结果记录于表 3-4 中。

表 3-4 电压测量值

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电压 (μV)	19.46	19.50	19.58	19.54	19.51	19.53	19.57	19.49	19.55

数据处理:

对以上数据进行处理, 计算 9 个测点的电压平均值

$$\bar{U}_{\text{exp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = 19.53 \quad \mu V (n = 27) \quad (3-10)$$

根据平均值求与拟合值之间的标准差：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = 0.0564 \quad (3-11)$$

根据第一组的测量方法测得其他四组的数据，如表 3-5 所示：

表 3-5 实验测得值

	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
实验测得电压 (μV)	19.53	22.21	7.66	4.52
仿真电压值(μV)	19.605	22.3081	7.6009	4.4922
标准差	0.056	0.07	0.055	0.047

由表 3-5 可知，接收线圈的实测电压与拟合值的差异均小于 0.1，验证了实验过程与理论模型的高度一致性。

3.5 本章小结

本章探讨了碳纤维复合材料在损伤检测中的应用，重点分析了材料电导率与接收线圈电压之间的关系。传统的损伤检测方法通常依赖实验测量，而本章提出了一种基于拟合方程的新方法。通过输入已知参数，利用拟合方程直接计算接收线圈的电压值，从而避免了实际测量的复杂过程。通过仿真计算得到的接收线圈电压值与实验测量的电压值之间误差较小，验证了拟合方程的准确性。该方法不仅简化了实验步骤，还为提高损伤检测准确性提供了一种便捷的工具。通过这种方法，能够在不进行实际测量的情况下，根据电导率与电压的关系推断材料的健康状态，从而实现更加高效和精准的损伤检测。

第 4 章 基于遗传算法的各向异性电导率反演

4.1 引言

利用涡流检测（Eddy Current Testing, ECT）法测量碳纤维复合材料电导率是基于电磁感应原理，通过载流线圈在材料中激发涡流，利用线圈电压或阻抗的变化来评估材料的电导率^[47]。基于第三章建立的拟合方程，本章实现了电导率与接收线圈电压响应的定量表征，并通过 COMSOL 软件有限元仿真计算探头电压在不同方向电导率变化下的响应情况。通过与四电极法测量的电导率值以及实验测得的探头电压值进行对比，验证了有限元仿真计算结果的可靠性。最终，通过三维曲面拟合得到探头电压与各向异性电导率之间的函数关系方程，并结合遗传算法和共轭梯度法进行迭代优化，成功实现了碳纤维复合材料电导率的反演。

4.2 涡流检测技术及仿真分析

4.2.1 基于涡流法的电导率反演

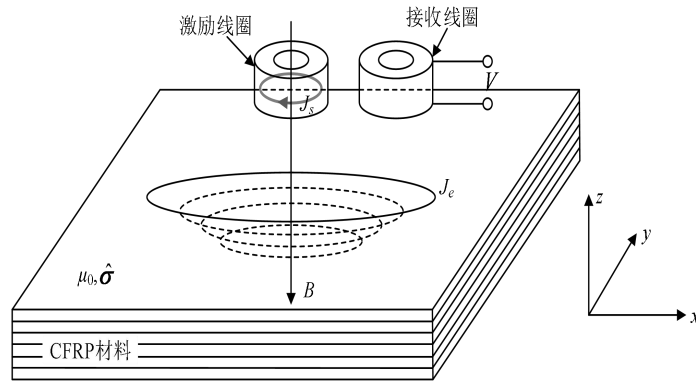


图 4-1 CFRP 的电磁感应原理

如图 4-1 所示，根据法拉第定律，导体中的电动势是由磁场变化引起的。在测量电导率时，接收线圈感应到的电动势 V 受磁感应强度 B 的变化率和矢量磁位 A 的变化率的影响。如下式所示：

$$V = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} = -j\omega \int_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (4-1)$$

上式中 S 和 l 分别表示线圈的截面和闭合环线， t 和 ω 为时间和角频率， j 是虚数符号。矢量磁位 A 是根据毕奥-萨伐尔定律计算得出的：

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \quad (4-2)$$

式中， μ_0 表示真空磁导率， Ω_c 是导体中的涡流区域， $r-r'$ 是指从线圈区域某点 r 到涡流区域某点 r' 的距离矢量。电流 J （即涡流 J_e ）可表示为：

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_e = \hat{\sigma} \mathbf{E} = -\hat{\sigma} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (4-3)$$

上式中 $\hat{\sigma}$ 表示 CFRP 电导率的张量矩阵，可写成

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_l & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cp} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

其中 σ_l 表示沿纤维方向、 σ_t 垂直于纤维方向、 σ_{cp} 厚度方向的电导率。如果纤维方向，即电导率主轴方向与笛卡尔坐标系的 x 轴对齐，则 $\sigma_l = \sigma_x$ ， $\sigma_t = \sigma_y$ ， $\sigma_{cp} = \sigma_z$ ， σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为三个坐标轴方向的电导率分量。

将公式(4-2)和(4-3)代入(4-1)中，可求得接收线圈的感应电动势 V ：

$$V = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint_L \left\{ \int_{\Omega_c} \frac{\mathbf{J}(r')}{|r-r'|} dV' \right\} \cdot d\mathbf{l} \quad (4-5)$$

计算接收线圈的感应信号以及分析感应信号与电导率的关系。考虑各电流分量对线圈信号的影响，公式(4-5)可写成：

$$V = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint_L \left\{ \int_{V'} \left(\frac{J_x(x')}{|x-x'|} + \frac{J_y(y')}{|y-y'|} + \frac{J_z(z')}{|z-z'|} \right) dV' \right\} \cdot d\mathbf{l} \quad (4-6)$$

将公式(4-5)带入(4-6)可得公式(4-7)：

$$V = -\frac{\omega^2\mu_0}{4\pi} \oint_L \left\{ \int_{V'} \left(\frac{\sigma_x A_x(x')}{|x-x'|} + \frac{\sigma_y A_y(y')}{|y-y'|} + \frac{\sigma_z A_z(z')}{|z-z'|} \right) dV' \right\} \cdot d\mathbf{l} \quad (4-7)$$

公式(4-7)详细解释了利用涡流法测量电导率的原理。当线圈接近被测试件表面时，由于电磁感应作用，会在试件内部激发出电涡流。涡流的强度与试件的电导率直接相关，即电导率越大的材料，在相同条件下产生的涡流也就越强。相应地，通过分析线圈的感应电压信号即可反演出 CFRP 材料的各向异性电导率。

4.2.2 有限元仿真分析

电导率反演是一个典型的反问题，它需要基于 ECT 正问题的数据结果进行逆向求解，获得快速且准确的解决方案。通常，构建 ECT 正向模型具有两种方法：使用理论公式的仿真求解法和使用实验信号的测量分析法。对于仿真求解法而言，需要将整个涡流场进行分割，并通过麦克斯韦方程计算每个子场，随后根据边界条件将各子场连接起来。测量分析法则需要对检测到的信号进行重构，并

通过神经网络或模糊推理建立映射关系，这依赖大量实验数据来保证鲁棒性。

本章提出了一种仿真和实验相结合的电导率反演方法。首先，将单向 CFRP 层合板的纤维方向 x 坐标轴对齐。利用 COMSOL 多物理场有限元软件的 AC-DC 模块构建正 ECT 正向模型。模型可视为一个电磁场域，包含激励线圈和接收线圈、CFRP 导体和包裹整个模型的空气区域。激励线圈和接收线圈匝数均为 140，激励信号为 10mA 正弦电流，频率为 2MHz。

表 4-1 有限元模型参数

模型	线圈	碳纤维复合材料	空气域
尺寸参数(mm)	内外径 0.6/1.6	长:40	长:80
	厚度:0.8	宽:40	宽:80
	中心距:4	厚度:2	厚度:40
电导率(S/m)	1	$\hat{\sigma}$	0
相对磁导率	1	1	1
相对介电常数	1	1	1

模型建立后，首先给材料属性赋值，然后进行六边形网格划分，网格划分结果如图 4-2 所示。最后，对模型进行电磁仿真计算，以求出接收线圈的感应电压值。

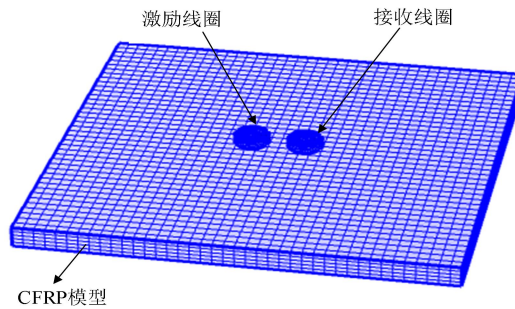


图 4-2 有限元网格划分图

如图 4-3 所示，对接收线圈电压幅值与不同方向电导率之间的关系进行分析。在进行仿真计算时， σ_x 的变化范围是(5000~50000)S/m，保持 σ_y 和 σ_z 为 10S/m 不变； σ_y 和 σ_z 的变化范围是(10~100)S/m，保持 σ_x 为 50000S/m 不变。结果表明，接收线圈电压随着电导率的增加而逐渐升高，呈单调非线性关系。

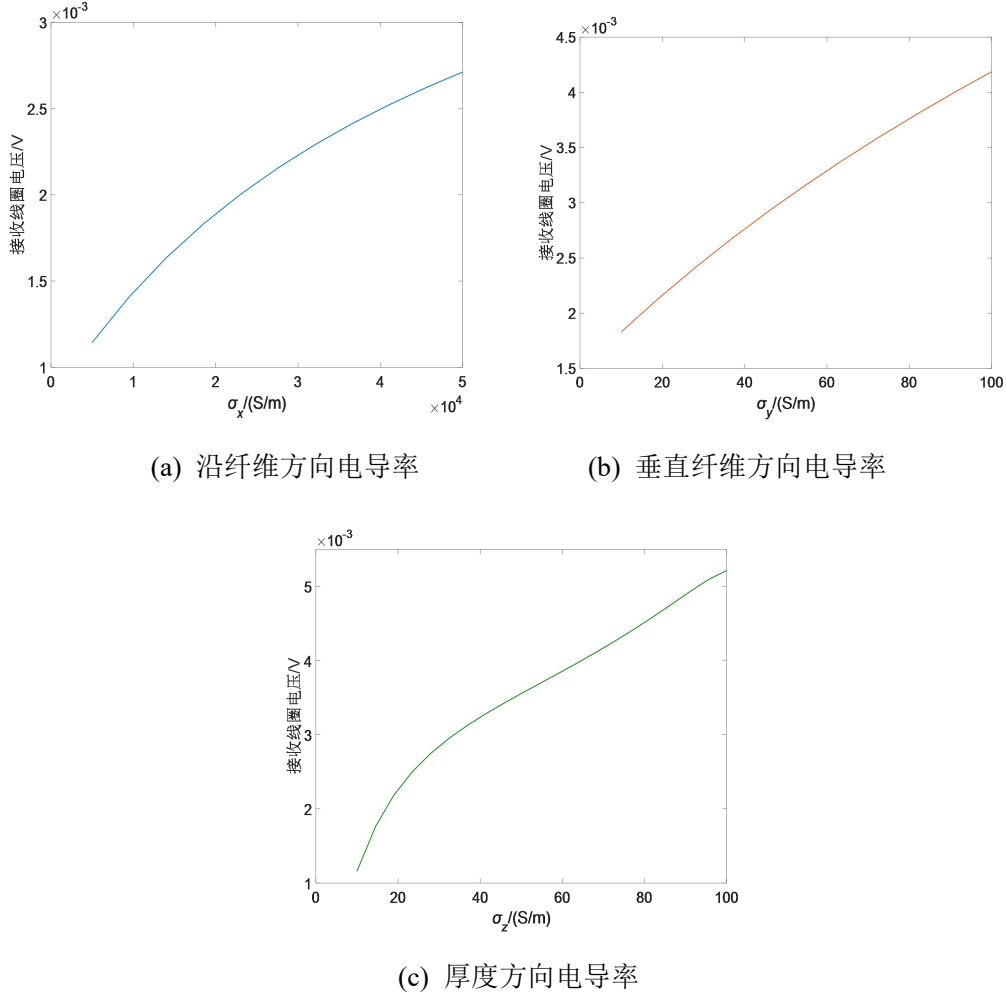


图 4-3 单向 CFRP 板接收线圈电压与电导率关系

本章主要对单向 CFRP 层合板 x 和 y 方向的面内电导率 σ_x 、 σ_y 以及正交层合板厚度方向的电导率 σ_z 进行反演。在对正交板进行仿真计算时，将碳纤维复合材料划分为八层，并以 0° 和 90° 方向交替排列。接下来，对单向板和正交板不同方向上的电导率进行了参数化扫描。根据 COMSOL 的计算结果，研究了单向板上接收线圈电压信号随 x 方向（沿纤维方向）和 y 方向（垂直纤维方向）的电导率变化特性，绘制出电压信号三维曲面图像，分别对应电幅值、实部和虚部，如图 4-4 所示。电压信号与实部 V_x 和虚部 V_y 之间的关系为：

$$V = V_x + jV_y \quad (4-8)$$

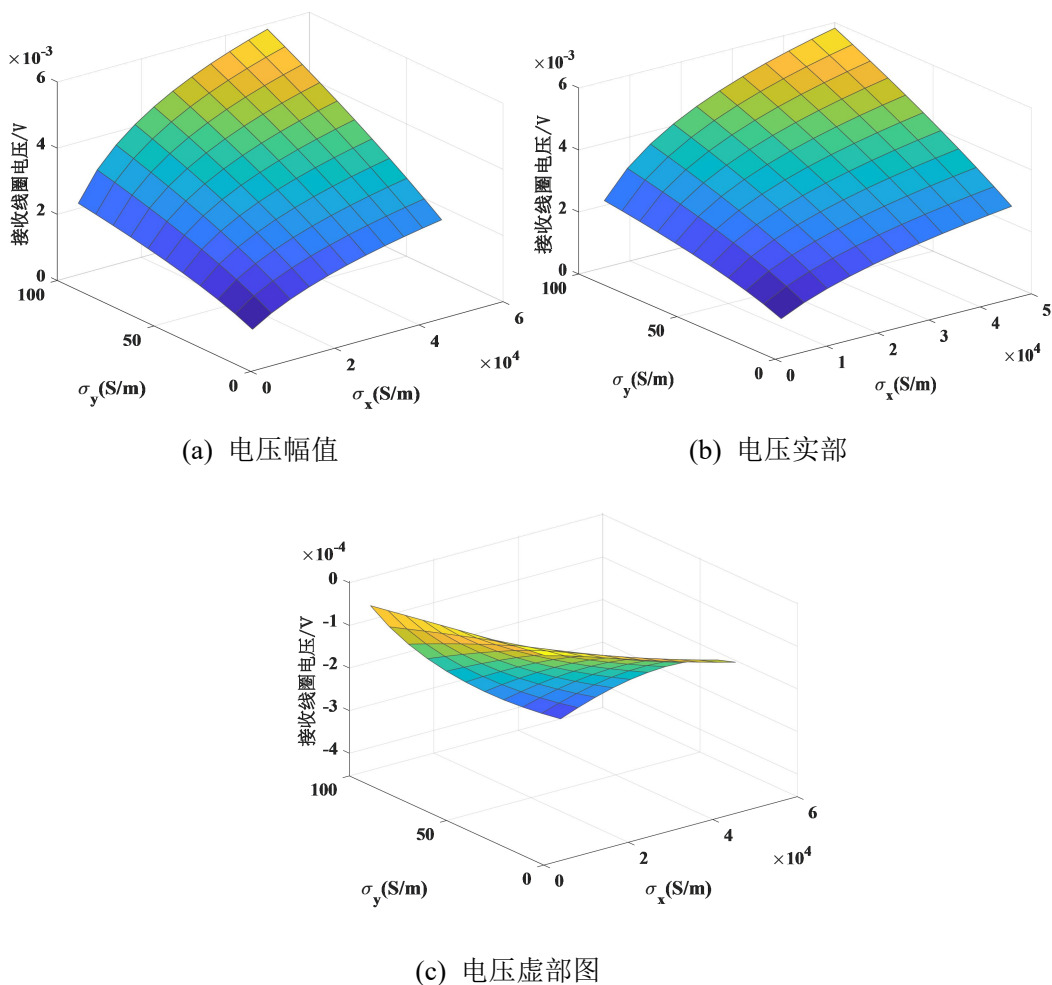
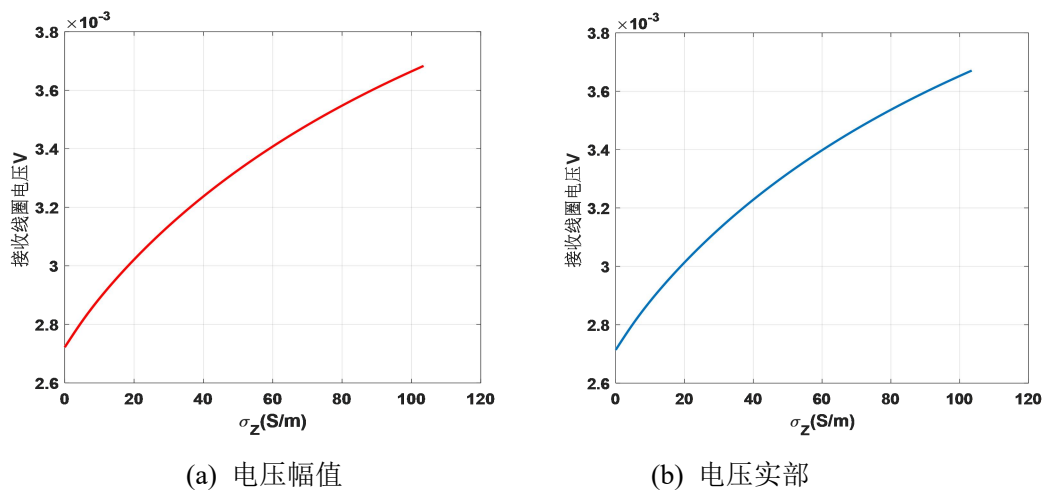
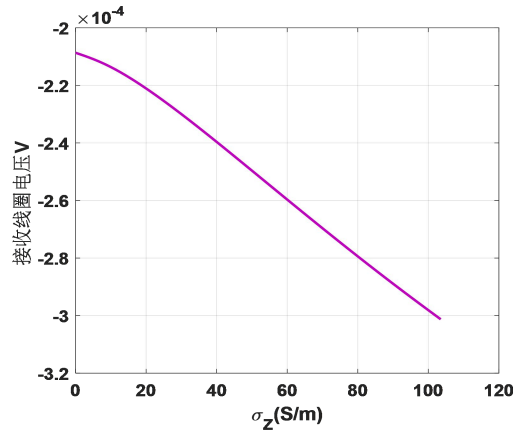


图 4-4 单向板线圈电压与面内电导率的关系

由图 4-4 可见，单向板线圈电压实部为正值，随电导率的增大呈上升趋势，虚部为负值，随电导率的增大呈负增长趋势，合成后的电压幅值则随电导率的增大呈上升趋势。对正交板厚度方向的电导率与接收电压实部和虚部的关系也绘制了曲线图，如图 4-5 所示。





(c) 电压虚部图

图 4-5 正交板线圈电压与厚度方向电导率的关系

由图 4-5 可以看出，正交板线圈电压实部随着电导率增大是呈上升趋势，电压虚部随着电导率增大是呈负增长状态，合成之后的电压幅值随着电导率增大也呈增长状态。

4.3 四电极法测量 CFRP 电导率

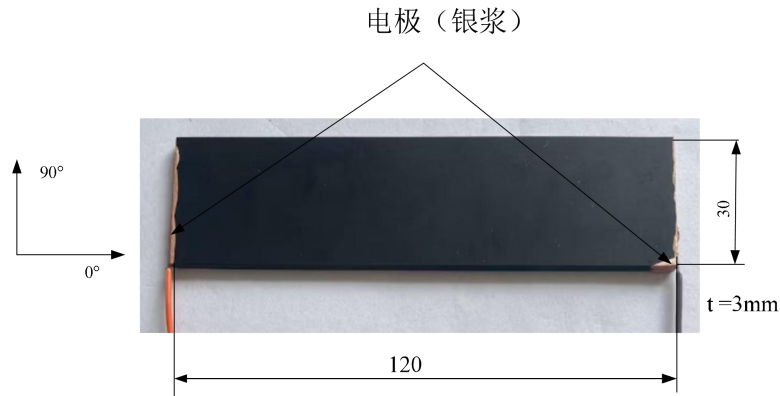
4.3.1 复合材料的阻抗测量

通过将四电极法电导率测量值及探头电压实验值与有限元计算电压值对比验证有限元仿真结果的可靠性。我们选择了碳纤维复合材料三个坐标轴方向的电导率进行测量，以全面评估碳纤维复合材料的电学各向异性。为了得到三个方向上的电导率，我们测量了材料的阻抗-频率特性，利用阻抗计算材料的电阻率，进而求得电导率值。采用预浸料铺层工艺和真空干燥箱制备单向碳纤维增强复合材料试件，并使用阻抗分析仪对其进行测量。当用阻抗分析仪测量时，设置为四电极模式，虽然物理上仅通过正负两个接口连接待测件，但每个接口内部均包含独立的 Force（电流激励）和 Sense（电压检测）通道，实际上在电气特性上等效形成了四个独立节点（Force+、Sense+、Force-、Sense-）。

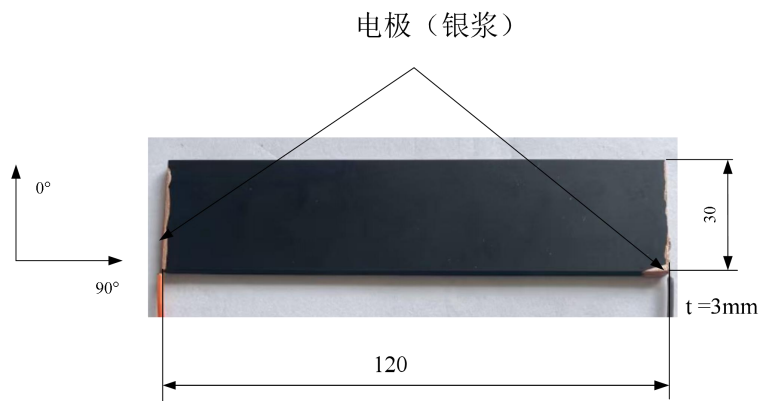
4.3.2 电导率测量原理

本章实验分别采用日本东丽 T300、T700 和 T800 碳纤维预浸料制备出了三批试件。为系统研究材料各向异性特征，从三批次 CFRP 板材中分别沿纤维轴向 (0°)、垂直纤维方向 (90°) 以及厚度方向 (z 向) 裁切标准试件，用于测量不同取向的阻抗特性。在导电涂层制备过程中，采用精密自动涂覆系统（精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ）沿试件轴向在起始端和末端进行均匀涂覆，严格控制涂层厚度在 (0.1

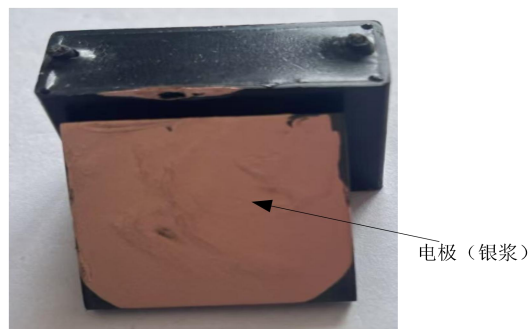
± 0.02) mm 范围内。随后,保持相同的工艺参数分别在 90° 和 z 向进行分层涂覆,如图 4-6 所示。涂覆完成后,将试件置于程序控温干燥箱(精度 $\pm 1^\circ\text{C}$)中,在 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下固化 120 分钟,期间采用专利设计的防变形夹具对试件进行固定,以减小热应力导致的变形。固化结束后,对涂层表面进行三维形貌分析,重点检测裂纹、气泡、针孔等缺陷,并评估涂层均匀性,确保所有试件满足实验要求。



(a) 沿纤维方向阻抗测量试件



(b) 垂直纤维方向阻抗测量试件



(c) 厚度方向阻抗测量试件

图 4-6 用于阻抗测量的单向 CFRP 试件

电阻率的测量包括三个方向：沿纤维方向、垂直于纤维方向和厚度方向。在沿纤维方向测量电阻率时，电流通过电极施加到样本上，主要沿纤维方向传导。基于 CFRP 的微观结构特征分析，其导电性能呈现显著的各向异性特性。这是由于碳纤维本身具有优异的导电性（电导率约为 10^4 S/m ），而环氧树脂基体的电导率极低（通常低于 10^{-12} S/m ），两者相差超过 16 个数量级。在这种结构特征下，当施加外部电场时，载流子将优先沿着低阻抗路径传输，即主要沿平行于碳纤维轴向（ 0° 方向）传导。垂直于纤维方向的测量电导率时，纤维之间被树脂隔开，电流主要通过纤维间的接触来形成通路。厚度方向与垂直纤维方向导电原理类似。图 4-7 给出了三个方向电导率的测量原理。阻抗测量采用了安捷伦 HP4294A 阻抗分析仪，如图 4-8 所示，测试电流设置为 3mA，测试频率范围覆盖 40Hz 至 110MHz。

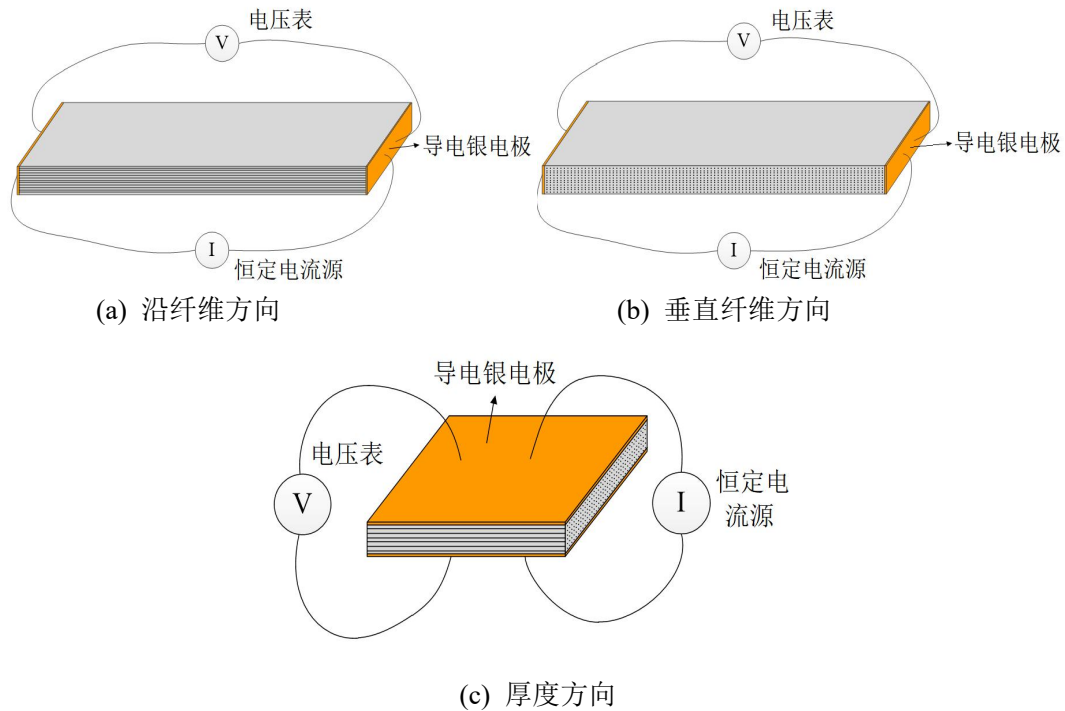


图 4-7 四电极法测量 CFRP 电导率

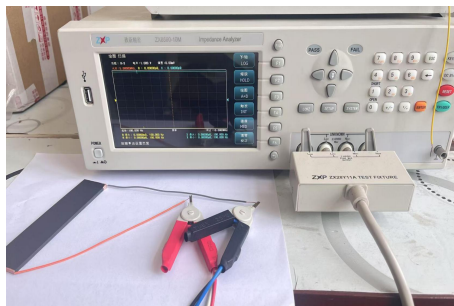


图 4-8 阻抗分析仪与试件安装

通过阻抗分析仪测量得到试件电极两端电压，将电压除以电流求得 CFRP 三个方向上的电阻，根据电阻值和试件长度、横截面积计算出三个方向的电阻率 ρ_x 、 ρ_y 、 ρ_z 。以 T300 为例，计算结果如公式(4-9)所示：

$$\left\{\begin{array}{l} \rho_x = 0.06995 \\ \rho_y = 152.66 \\ \rho_z = 1.155 \end{array}\right. \hat{\sigma} = 1/\hat{\rho} \left\{\begin{array}{l} \sigma_x = 19049.0704 \\ \sigma_y = 8.7344 \\ \sigma_z = 2.8600 \end{array}\right. \quad (4-9)$$

根据四电极法测量值，制备过程中的温度、压力和真空条件对垂直纤维方向和厚度方向的电阻率会有显著影响。

4.4 遗传算法反演电导率

4.4.1 有限元仿真结果验证

本研究制备了单向碳纤维增强复合材料（CFRP）标准试件，三组试件在 x 和 y 两个方向的电导率值如表 4-2 所示。利用图 4-9 所示的涡流检测实验平台采集三批试件表面接收线圈的电压信号，实验中激励线圈采用 5V 正弦电压激励，线圈尺寸与工作频率等参数与有限元仿真保持一致。

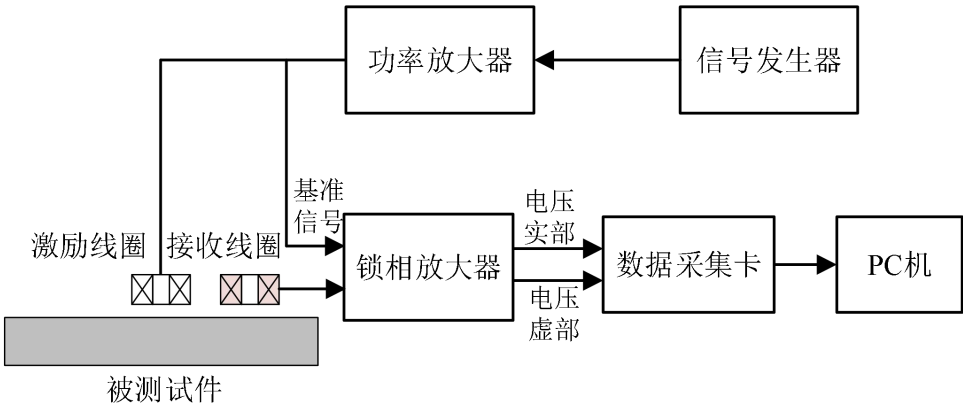


图 4-9 涡流检测实验平台示意图

表 4-2 仿真和实验的线圈电压值对比

试件 序号	电导率		仿真电压		实验电压	
	$\sigma_x/(S/m)$	$\sigma_y/(S/m)$	实部 V_x/V	虚部 V_y/V	实部 V_x/V	虚部 V_y/V
T300	19049.0704	8.7344	1.597×10^{-3}	-3.70728×10^{-5}	0.2283	6.7843×10^{-3}
T700	17762.93	4.7621	1.3851×10^{-3}	-2.98937×10^{-5}	0.1966	5.4556×10^{-3}
T800	16070.22	1.12044	1.1644×10^{-3}	-2.26043×10^{-5}	0.1676	4.1456×10^{-3}

将 COMSOL 仿真模型中的 CFRP 材料参数设为表 2 的实验测量值（厚度方向电导率为 10S/m），通过仿真计算得到可以得出三组电导率值对应的仿真电压

值。通过对比实验数据与仿真数据，实验电压实部是仿真电压实部的 143 倍，实验电压虚部是仿真电压虚部的-183 倍。这个差异是由实验平台中锁相放大器的增益和基准电压信号幅值相位造成的。由于锁相放大器的增益和基准电压在实验中保持恒定值，因此仿真电压与实验电压的比值也保持不变，这就验证了仿真与实验结果的一致性。接下来的反演计算中我们就可用仿真计算结果代替实验电压值。

4.4.2 接收线圈电压函数拟合

在 COMSOL 软件中导出单向板和正交板接收线圈电压随各个方向电导率变化的数据。利用图 6 的已知数据分析单向板线圈电压与沿纤维方向和垂直纤维方向电导率的关系。设定沿纤维方向电导率对应函数 x 轴，垂直纤维方向电导率为 y 轴，接收电压值为 z 轴。一阶和二阶多项式难以准确拟合图 4-4 和图 4-5 的函数关系，而三阶多项式能够更好地拟合，且更高阶多项式的拟合结果与三阶相似。综合考虑计算量和拟合准确率，本文采用三阶多项式进行拟合，以求得电压数据与关于 σ_x 和 σ_y 的函数方程式。单向板线圈电压实部拟合函数为：

$$\begin{aligned} V_x = & 4.449e^{-5} + (4.973e^{-8}) \cdot \sigma_x + (5.3e^{-5}) \cdot \sigma_y \\ & + (-6.729e^{-13}) \cdot \sigma_x^2 + (9.069e^{-10}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \\ & + (-6.34e^{-7}) \cdot \sigma_y^2 + (3.452e^{-18}) \cdot \sigma_x^3 \\ & + (8.894e^{-16}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (-5.182e^{-12}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 \\ & + (3.13e^{-9}) \cdot \sigma_y^3 \end{aligned} \quad (4-10)$$

单向板线圈电压虚部拟合函数为：

$$\begin{aligned} V_y = & -0.00078 + (4.975e^{-10}) \cdot \sigma_x + (-1.501e^{-6}) \cdot \sigma_y \\ & + (-5.054e^{-14}) \cdot \sigma_x^2 + (-6.524e^{-11}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \\ & + (5.35e^{-9}) \cdot \sigma_y^2 + (6.131e^{-19}) \sigma_x^3 \\ & + (-8.966e^{-16}) \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y + (4.976e^{-13}) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y^2 \\ & + (-5.078e^{-11}) \cdot \sigma_y^3 \end{aligned} \quad (4-11)$$

通过获得的正交板电压数据（见图 4-7），设定厚度方向电导率对应函数 x 轴，接收电压值为 z 轴。采用三阶多项式拟合求解，最终得到线圈电压关于 σ_z 的函数方程式。正交板线圈电压实部拟合函数为：

$$\begin{aligned} V_x = & (-4.428e^{-10}) \cdot \sigma_z^3 \cdot (2.309e^{-7}) \cdot \sigma_z^2 \\ & + (1.671e^{-5}) \cdot \sigma_z + 0.006643 \end{aligned} \quad (4-12)$$

正交板线圈电压实部拟合函数为：

$$V_y = (-8.907e^{-9}) \cdot \sigma_z^3 + (1.926e^{-6}) \cdot \sigma_z^2 + (-0.000138) \cdot \sigma_z - 0.009813 \quad (4-13)$$

4.5 电导率反演结果

利用遗传算法和共轭梯度法对接收线圈电压数据和上节得到的拟合函数方程进行迭代优化求解，如图 4-10 所示。

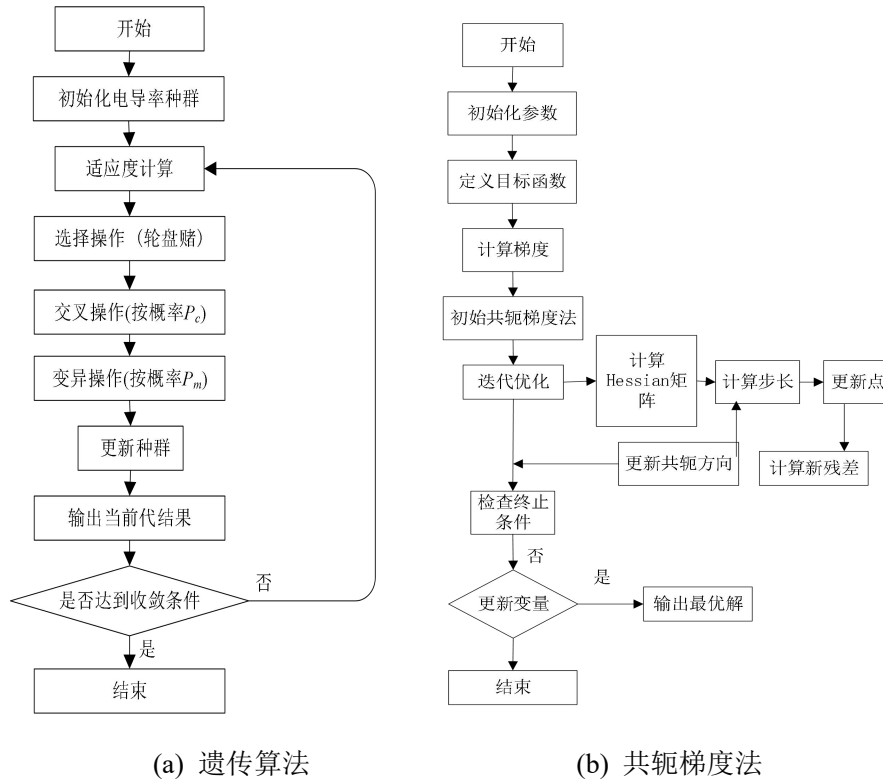


图 4-10 实现框图

研究采用 T300 试件进行遗传算法反演实验，通过 8 次独立运行验证结果的鲁棒性。算法采用 32 位二进制编码（前 16 位表示 $x \in [5000, 50000]$ ，后 16 位表示 $y \in [0.1, 20]$ ），设置种群规模 100、交叉概率 0.8 和变异概率 0.01，最大迭代次数 200 次。种群初始化采用混合策略（90%随机个体+10%基于目标值的个体）以保证多样性和加速收敛，同时采用单点交叉和精英保留策略。参数设置经过敏感性分析优化：交叉概率 0.8 平衡了探索与开发能力，变异概率 0.01 有效防止早熟收敛。实验结果表明，该算法配置在 200 代内能稳定收敛至目标误差范围（ $<1 \times 10^{-3}$ ），实现了计算效率与优化精度的良好平衡。8 次运行得到的目标电导率结果如表 4-3 所示：

表 4-3 独立运算结果

目标电导率	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_x : 19049.0704	19048.7671	19048.7661	19048.7671	19048.5700	19048.8671	19048.7671	19048.7671	19048.7671
σ_y : 8.7344	8.7335	8.7355	8.7355	8.7375	8.7355	8.7355	8.7355	8.7355

通过多次独立计算，获得 σ_x 的平均值为 19048.7671， σ_y 的平均值为 8.7355，分别对应的平均相对误差为 0.0017%和 0.015%。上述结果充分验证了反演算法的鲁棒性，同时也表明算法在多次独立运行中具有良好的稳定性与一致性。共轭梯度法与上述遗传算法在原理和结果上具有类似表现，此处不再赘述。

根据单向板的线圈电压实部和虚部的公式(4-10)和(4-11)，以及正交板的电压实部和虚部的两个公式(4-12)和(4-13)，即可求得碳纤维复合材料的预测电压。通过比较不同电导率下的迭代电压值与仿真电压值的差异，修正电导率。优化函数数学模型表示如下，单向 CFRP 层合板面内电导率反演：

$$(\sigma_x^*, \sigma_y^*) = \arg \min \left\{ [V_{x0} - V_x(\sigma_x, \sigma_y)]^2 + [V_{y0} - V_y(\sigma_x, \sigma_y)]^2 \right\} \quad (4-14)$$

正交层合板厚度方向的电导率反演：

$$\sigma_z^* = \arg \min \left\{ [V_{x0} - V_x(\sigma_z)]^2 + [V_{y0} - V_y(\sigma_z)]^2 \right\} \quad (4-15)$$

式中 σ_x^* 、 σ_y^* 和 σ_z^* 为反演得到的最优电导率值， V_{x0} 、 V_{y0} 为实验得到的探头线圈实部和虚部电压， V_x 、 V_y 则为拟合函数得到的预测电压。

电导率的优化受到多种因素的影响，材料的类型决定了其电导率特性；厚度影响电流流动路径和电阻，进而影响电导率的测量与优化结果；材料的尺寸影响电流的分布，可能改变优化结果的精度；碳纤维复合材料的电学各向异性使得电导率在不同方向上表现不同，因此方向性在优化过程中起着关键作用。这些因素共同决定了单向板初始电导率优化结果的准确性，具体结果见表 4-4 所示。

表 4-4 单向板初始电导率的计算结果

电导率(S/m)	仿真电压(V)	遗传算法迭代电压(V)	共轭梯度法迭代电压(V)
σ_x :	实部:	实部:	实部:
19049.0704	1.597×10^{-3}	$\sigma_x=19048.7671$	$\sigma_x=19048.7673$
σ_y :	虚部:	虚部:	虚部:
8.7344	-37.0728×10^{-6}	$\sigma_y=8.7355$	$\sigma_y=8.7336$

最终，通过遗传算法计算得出的单向 CFRP 层合板电导率分别为 19049 S/m（纤维方向）和 8.73S/m（垂直纤维方向）；采用共轭梯度法计算的电导率则分

别为 19049S/m 和 8.73S/m。将迭代得到的电导率代入公式(4-10)和(4-11)，计算出仿真电压实部和虚部。根据第 4.2 节仿真电压与实验电压之间存在的倍数关系，计算出结果，如表 4-5 和表 4-6 所示。

表 4-5 遗传算法单向板电导率反演结果

电导率 (S/m)	拟合电压 (V)	对应实验电压(V)
σ_{x1}^* :	实部:	实部:
19048.7671	1.597×10^{-3}	0.2283
σ_{y1}^* :	虚部:	虚部:
8.7355	-3.70727×10^{-5}	-6.7843×10^{-3}

表 4-6 共轭梯度法单向板电导率反演结果

电导率 (S/m)	拟合电压 (V)	对应实验电压(V)
σ_{x2}^* :	实部:	实部:
19048.7671	1.597×10^{-3}	0.2283
σ_{y2}^* :	虚部:	虚部:
8.7355	-3.70727×10^{-5}	-6.7843×10^{-3}

从表 4-5 和 4-6 可以看出，实验电压与最终计算电压值，差异满足 0.01 的收敛目标。同理，对于正交板的厚度方向，通过比较不同电压值下仿真与迭代值之间的差异来修正电导率。

表 4-7 正交板初始电导率的计算结果

电导率 (S/m)	仿真电压(V)	遗传算法迭代电压(V)	共轭梯度法迭代电压(V)
σ_z : 2.860	实部: 0.002765	实部: 0.002765	实部: 0.002765
	虚部: -0.0002098	虚部: -0.0002098	虚部: -0.0002097

表 4-8 正交板遗传算法电导率反演结果

电导率 (S/m)	拟合电压(V)	实验电压(V)
σ_{z1}^* : 2.8594	实部: 0.002765	实部: 0.002766
	虚部: -0.0002098	虚部: -0.0002098

表 4-9 正交板共轭梯度法电导率反演结果

电导率 (S/m)	拟合电压(V)	实验电压(V)
σ_{z2}^* : 2.8600	实部: 0.002765	实部: 0.002812
	虚部: -0.0002098	虚部: -0.0002100

根据表 4-8 和 4-9，最终反演得到的正交板 CFRP 层合板厚度方向的电导率为 2.86S/m，且与实验电压误差小于 0.01 的收敛目标。通过遗传算法和共轭梯度法的优化迭代，我们建立了电压与仿真电导率之间的关系。由于仿真数据与实验数据在不同方向上呈倍数关系，因此可以利用仿真获得的线圈电压函数表达式反

演出碳纤维复合材料的电导率。

4.6 本章小结

针对碳纤维复合材料的电导率非接触测量问题,提出了一种基于涡流检测的反演方法。通过 COMSOL 软件的有限元数值仿真,结合电压曲面函数方程拟合和基于遗传算法以及共轭梯度法的迭代优化求解,成功建立了 CFRP 电导率与接收电压之间的数学模型。该模型不仅描述了电压与电导率之间的关系,还考虑了碳纤维复合材料的各向异性及其他影响因素。研究结果表明,该方法能够有效地从仿真和实验数据中反演出 CFRP 的各向异性电导率,为复合材料的无损检测和性能评价提供了一种新的技术途径。

第 5 章 涡流趋肤深度标定与隐藏缺陷检测

5.1 引言

本章提出了一种结合理论分析和有限元仿真综合分析趋肤效应的方法。首先，通过趋肤效应公式对探头参数对趋肤深度的影响进行了理论推导。然后，利用 COMSOL 软件进行了仿真分析，系统地对比了不同探头参数对趋肤深度的影响；最后我们设计并实现了一套基于上述理论的缺陷检测系统，能够有效识别材料中的隐藏缺陷，并进行图像处理，进一步提高了缺陷检测的精度和可靠性。

5.2 CFRP 趋肤效应分析

5.2.1 理论解析法

当电磁波从表面进入导电介质时，随着深入距离的增加，场强幅度呈指数衰减，能量密度随之减小，这种现象称为趋肤效应，其示意图如图 5-1 所示。

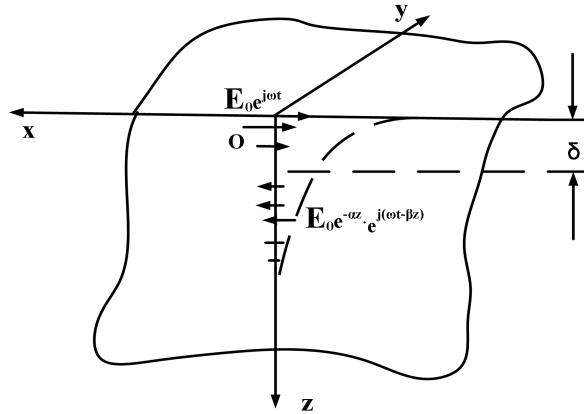


图 5-1 趋肤效应示意图

趋肤效应的分析首先需要明确被测材料的结构特性。以 CFRP 为例，其由导电性良好的碳纤维和绝缘的聚合物基体组成。由于碳纤维的特定排列方式，CFRP 表现出显著的电学各向异性特性。这种各向异性可以通过电导率张量 σ_x 来描述，其矩阵形式为：

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

其中， σ_x ， σ_y ， σ_z 分别表示 CFRP 在 x 、 y 、 z 方向上的电导率。通常情况下， $\sigma_x \geq \sigma_y$ ， σ_z 这意味着电流主要沿纤维方向流动，而在垂直于纤维的方向上，电流

衰减较快。由于 CFRP 的各向异性特性，在计算单向板和正交板的趋肤深度时，需要采用不同的计算公式。根据电磁场理论，场的幅度按 $e^{-(\alpha z)}$ 的规律衰减，其中 α 为衰减常数， z 为深入距离。当 $\alpha z = 1$ 时，对应的 z 值即为趋肤深度 δ 。

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (5-2)$$

将导电媒质中的衰减常数 α 的表达式代入上式，则得

$$\delta = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (5-3)$$

对于各向同性材料和单向板，趋肤深度的计算公式采用(2-32)；而对于正交板，则采用公式(2-34)。这些公式表明，趋肤深度与频率、材料的电导率以及磁导率密切相关。具体而言，当频率增大时，趋肤深度减小，电流更加集中在材料表面。这种趋肤深度与频率的反比关系表明，随着频率的增加，电流逐渐集中在材料表面，而在高频情况下，电流几乎不再深入到材料内部，趋肤效应表现得尤为明显。由于 CFRP 的各向异性特性，电流在纤维方向上的传播受到较大限制，趋肤效应在纤维方向上更为显著。相反，电流在垂直于纤维方向上的传播受到的限制较少，趋肤深度较大。

5.2.2 有限元分析法

有限元分析法是一种高效的数值模拟方法，广泛应用于电磁场问题的求解。该方法通过将连续的物理问题离散化为有限数量的小单元，从而实现对复杂物理现象的高精度模拟。在 CFRP 中的趋肤效应分析中，FEA 能够有效处理材料的各向异性特性，并精确捕捉电流分布、磁场分布等关键电磁场信息。在进行趋肤效应分析时，首先需要建立有限元模型并推导其控制方程。我们采用麦克斯韦方程组作为电磁场分析的基础，将导体域 Ω_t 和空气域 Ω_r 中的控制方程分别表示如下

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \times A \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \text{ 导体 } \Omega_t \text{ 中} \quad (5-4)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \times A \right) = J_s \text{ 空气 } \Omega_r \text{ 中} \quad (5-5)$$

通过求解方程(5-4)和(5-5)，FEA 能够模拟 CFRP 中电磁波的传播特性以及趋肤效应的分布规律。在有限元分析中，网格划分方法的选择对计算精度具有重要影响。

本节采用棱边缘法进行有限元划分，该方法无需标量点位，因此可将方程（5-4）简化为更高效的计算形式：

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5-6)$$

由于趋肤效应主要发生在导体表面附近，因此在表面区域需要使用较细的网格以提高计算精度。为了对比不同网格划分对计算结果的影响，本文分别采用了常规网格划分和极细化网格划分两种方案，并基于这两种方案分别绘制了电流密度模分布图（如图 5-2 所示）和趋肤深度分布图（如图 5-3 所示）。

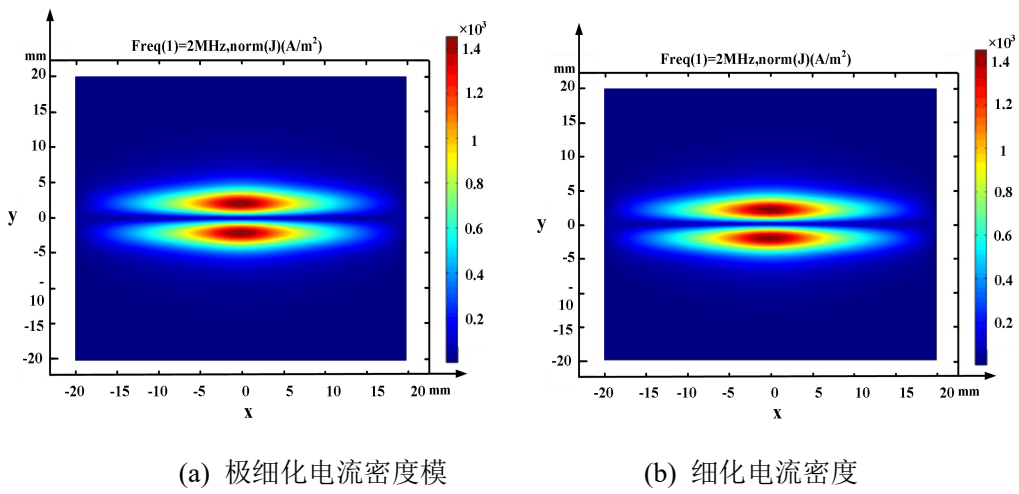


图 5-2 x-y 平面电路密度模

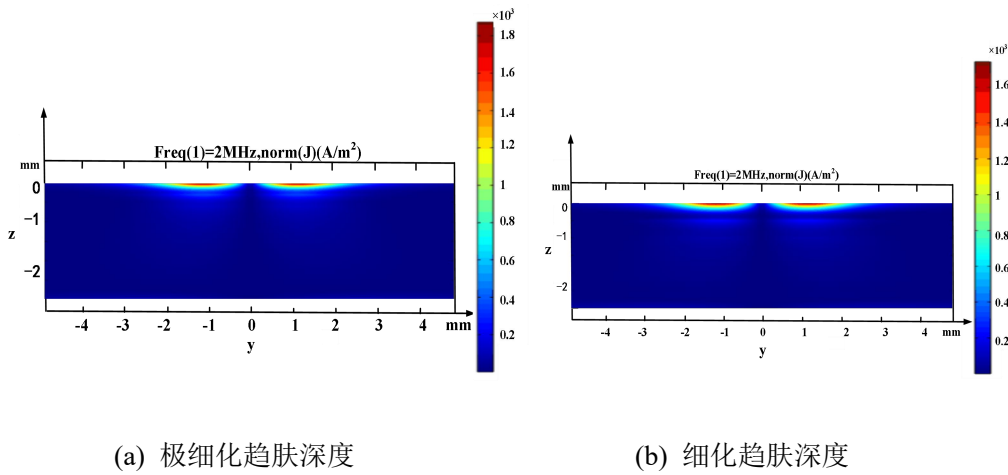


图 5-3 趋肤深度对比图

通过对图 5-2 的分析可以发现，在 x-y 平面上，电流密度值未出现显著变化，且极细化与常规细化的电流密度分布图像差异较小。这表明在 x-y 平面上，网格划分对电流密度模的影响有限。然而，图 5-3 的结果显示，极细化网格下的电流

密度值更加精确，其最大值达 $1.8 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ ，而常规细化网格下的最大值为 $1.6 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 。由此可见，为了获得更准确的趋肤深度和电流密度值，应尽量采用细化网格。

综合图 5-2 和图 5-3 的分析结果可知，有限元分析法能够直观地展示电流密度模在 x - y 平面和 y - z 平面上的分布情况。利用有限元分析法对 CFRP 材料中的趋肤效应进行研究，不仅可以精确预测高频电磁场下电流分布的变化规律，还能对 CFRP 材料在高频应用中的设计提供重要指导。通过合理的模型建立、网格划分、材料属性设置以及求解过程，可以深入理解 CFRP 中的趋肤效应及其对电磁性能的影响。

5.3 探头参数对涡流趋肤深度的影响

在涡流检测 (ECT) 中，趋肤深度是衡量涡流在材料中渗透能力的关键参数，直接影响检测的灵敏度和深度范围。探头的参数（如频率、空间结构、线圈尺寸等）对趋肤深度具有显著影响。

5.3.1 探头频率的影响

趋肤效应的影响因素较为复杂，其中探头频率是决定趋肤深度的关键参数。根据趋肤深度理论公式分析，趋肤深度与频率的平方根呈反比关系。具体而言，当频率升高时，趋肤深度减小，导致涡流主要集中于材料表层；反之，频率降低时趋肤深度增大，涡流则能够渗透到材料更深层区域。

为验证上述理论分析的准确性，采用控制变量法进行仿真实验。在实验设计中，固定材料参数（包括电导率和磁导率）、边界条件（包括激励源位置和检测区域）以及激励强度等变量，并选用内径为 2mm、外径为 4mm 的环形探头作为检测装置。基于此实验设置，选取 200kHz、2MHz 和 20MHz 三个特征频率点，其理论趋肤深度分别为 7.96mm、2.51mm、0.796mm。为确保不同频率下的曲线能够在同一图中清晰呈现，对三个特征频率进行归一化处理。仿真结果如下图所示：

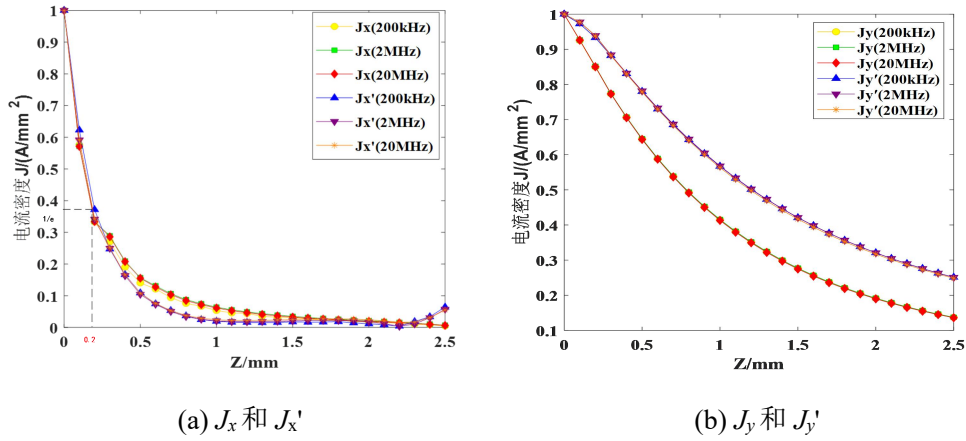
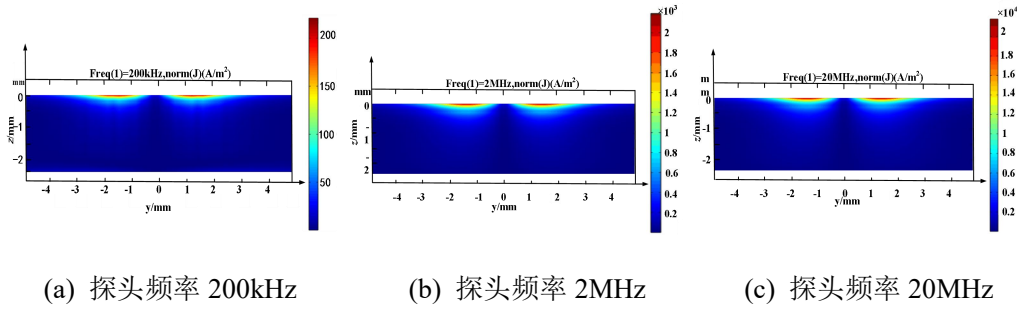
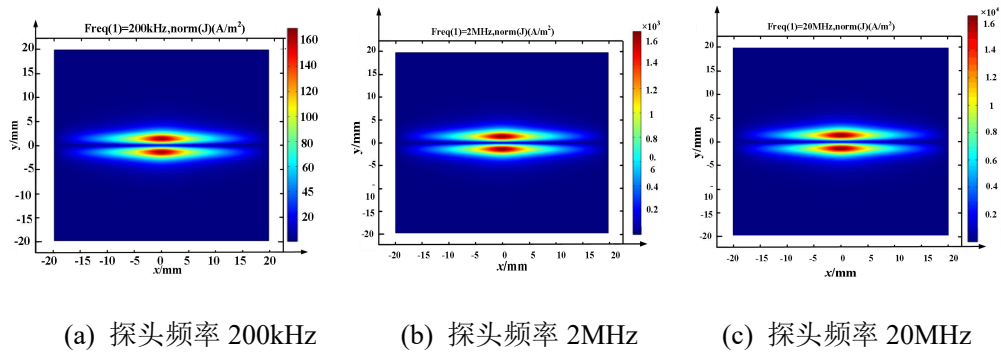


图 5-4 不同频率电流密度曲线


 图 5-5 y - z 平面的电流密度

 图 5-6 x - y 平面的电流密度

在碳纤维复合材料板中, J_x 和 $J_{x'}$ 分别表示在 x - y 平面内取点(0,1.5 mm)和(0,5 mm)时, 沿 x 方向的电流分量, 这些分量是在 y - z 平面内测量的; J_y 和 $J_{y'}$ 分别表示在 x - y 平面内取点(1.5 mm,0)和(5 mm,0)时, 沿 y 方向的电流分量, 这些分量是在 x - z 平面内测量的。通过综合分析图 5-5 和图 5-6, 我们观察到当待测点靠近探头时, 随着频率的增加, x 方向上的电流密度愈发高于 y 方向。这是因为高频条件下, x 方向的高电导率导致电流更倾向于集中在材料表面, 趋肤深度减小; 而在 y 方向, 较低的电导率使得电流能够分布到更深层次的区域, 趋肤深度较大。

结合图 5-4 和 5-5 对厚度方向的分析，可以发现随着频率的升高，电流在导体内部的衰减速度加快，且涡流更加集中于材料表面，同时随着深度的增加而快速衰减。这种现象表明，高频条件下趋肤效应更加显著，涡流难以渗透到深层区域，因此更适合检测表面或近表面的缺陷；而对于深层缺陷，则需要选择较低的频率。

通过对碳纤维复合材料三个方向电流密度的综合分析，可以得出结论：在测量碳纤维复合材料时，选择 y 方向并使用较低频率进行测量更为合适。这样做的原因在于 y 方向具有更大的趋肤深度，使得电流能够更均匀地分布在材料的整个厚度方向上，从而更有效地揭示材料的内部特性。

5.3.2 探头尺寸的影响

理论分析表明，趋肤深度主要由磁导率 μ 、电导率 σ 和频率 f 决定，值得注意的是，该理论公式显示趋肤深度与检测探头的几何尺寸无关。然而，探头尺寸会影响电磁场的分布特性，并影响测量系统的灵敏度，从而间接影响趋肤深度的测量结果。在涡流检测中，电磁波进入导体内部通常依赖电磁感应来激发涡流。当探头尺寸较小时，涡流效应更为明显；而当探头尺寸较大时，入射波可能更接近平面波特性，这可能会对趋肤效应产生额外的影响，从而改变测量结果。

基于上述理论，在保持其他参数不变的前提下，利用 COMSOL 仿真平台建立电磁场数值模型，对三种不同尺寸探头内外径为 2mm/4mm、4mm/8mm、8mm/16mm 的探头进行仿真计算。为了增强实验对比的显著性，对各尺寸探头计算得到的电流密度数据进行了归一化处理。具体仿真结果如下所示。

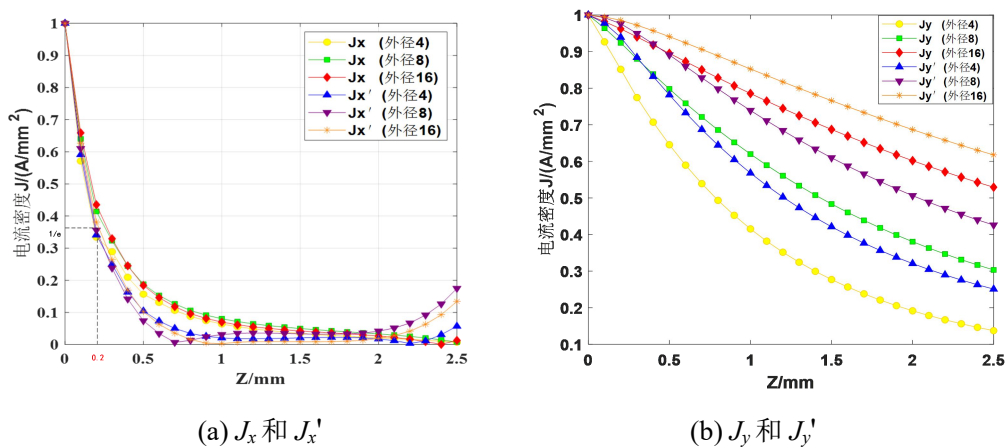
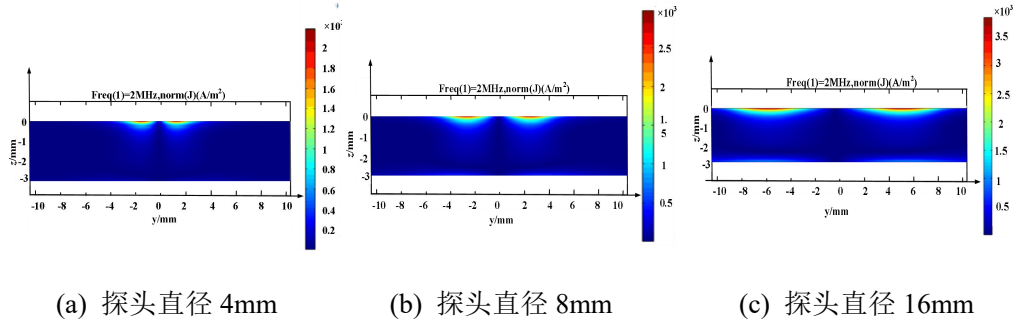
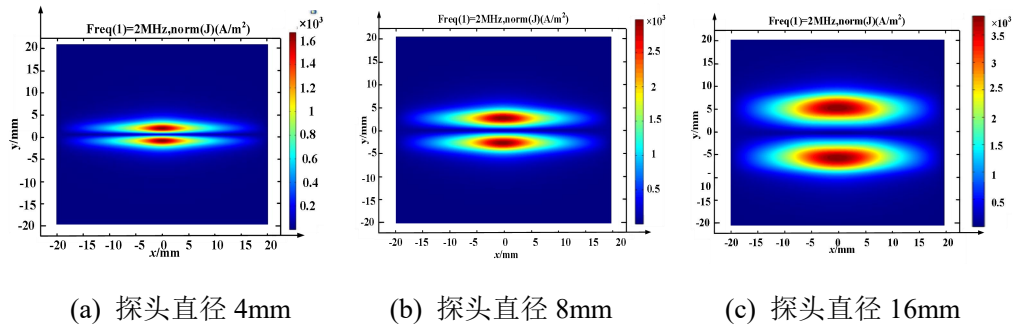


图 5-7 不同尺寸探头的电流密度曲线


 图 5-8 y - z 平面的电流密度

 图 5-9 x - y 平面的电流密度

J_x 和 J_x' 分别表示在探头正下方和远离探头位置的 CFRP 板上选取的测量点，用于获取 CFRP 板内部沿 y 轴的电流密度分布情况； J_y 和 J_y' 同理表示沿着 x 轴的电流密度分布。通过观察图 5-7(a) 可以发现， J_x' 的电流密度先减小到 0，随后小幅增加。这一现象的原因是：在远离探头的位置，测量点会更加靠近碳纤维板的边界，反射波与直接波容易发生干涉，导致电磁波强度出现先减小后增加的变化。由于干涉现象的存在，电磁波在材料中的传播特性变得复杂，趋肤深度不再是一个固定值，而是随着位置变化。

分析图 5-8 可知，探头尺寸越大，电流密度模的面积越大，并且电流密度模覆盖的面积显著增加。然而，趋肤深度的差异难以通过这些数据直接判定。结合图 5-8 和图 5-9 的分析，当探头尺寸增大时，电流密度值和电流密度模面积所覆盖的面积显著增大。这一现象可以通过天线孔径效应来解释。根据天线孔径效应，当发射源的孔径较小时，辐射特性类似于点源辐射；而当发射源的孔径增大时，波前变得更加均匀和平直，从而改变电磁波在材料中的传播方式和电流分布，间接影响趋肤深度的测量。进一步分析图 5-7(b) 以探究不同尺寸对趋肤深度的影响：当探头外径为 4mm 时，辐射源较为集中，电磁波呈现点源辐射特征，这时测量趋肤深度主要依赖于电磁波的传播；当探头外径为 8mm 时，电磁波和部分平面

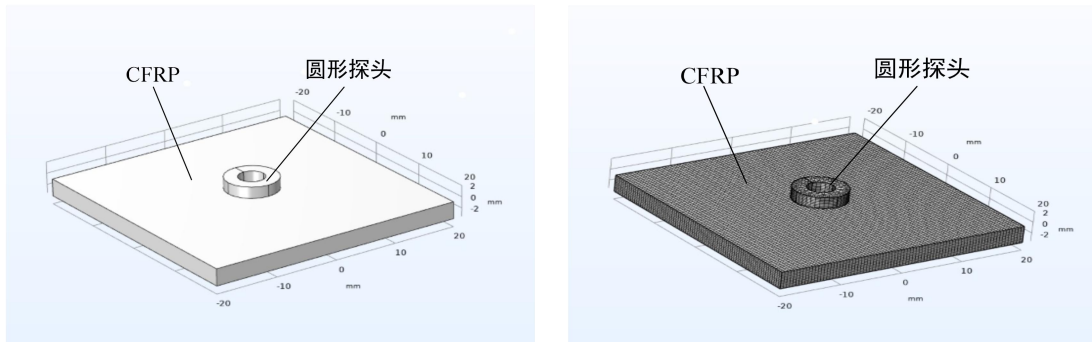
波的影响同时存在；当探头外径为 16mm 时，趋肤深度的测量主要由平面波主导。因此，随着探头尺寸的增大，平面波的贡献逐渐增大，从而对趋肤深度的测量产生影响。

5.3.3 探头空间结构的影响

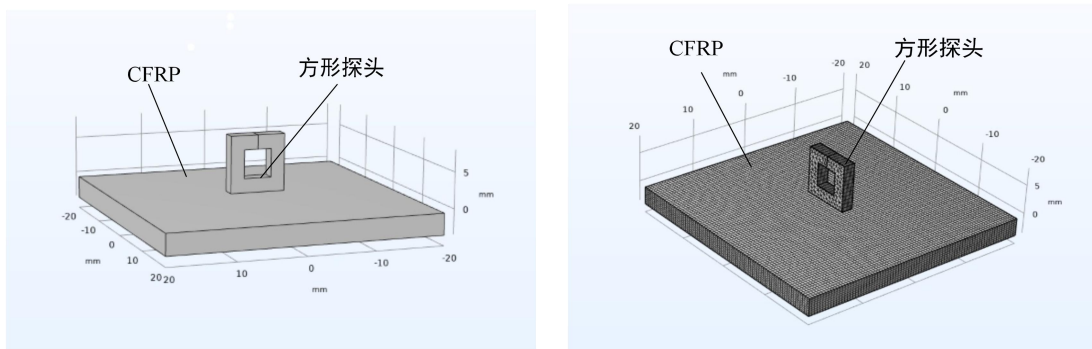
在涡流检测中，探头的空间结构通过改变磁场的分布和涡流路径，间接影响检测的有效趋肤深度。尽管圆形线圈是最常见的涡流探头类型，但在测量趋肤深度时，方形探头也常被使用。由于形状的差异，方形探头在 CFRP 板上形成的电流密度模的面积与圆形探头形成相比会有显著不同，这种差异会进一步影响电流的传播路径和密度，最终改变涡流的分布情况。本小节将从探头结构对单向板和正交板两个方面进行讨论。

（一）不同结构探头对单向板趋肤深度的影响

为了深入研究探头形状对单向板的趋肤深度具体影响，需要进行仿真实验。在开展仿真分析之前，首先建立了圆形和方形探头的仿真模型，如图 5-10 所示。



(a) 圆形探头模型和网格划分



(b) 方形探头模型和网格划分

图 5-10 不同结构的仿真模型

为了确保实验的准确性，保持探头其他参数一致，仅改变探头的形状。圆形

和方形探头的详细参数如表 5-1 所示。通过对比两种探头在相同条件下的仿真结果，可以更清晰地揭示探头形状对趋肤深度和涡流分布的影响机制。

表 5-1 探头形状

名称	内径(mm)	外径(mm)	厚度(mm)
方形探头	4	8	2
探头外径	4	8	2

为了增强实验对比的显著性，对各形状探头计算得到的电流密度数据进行了归一化处理。具体仿真结果如下所示。

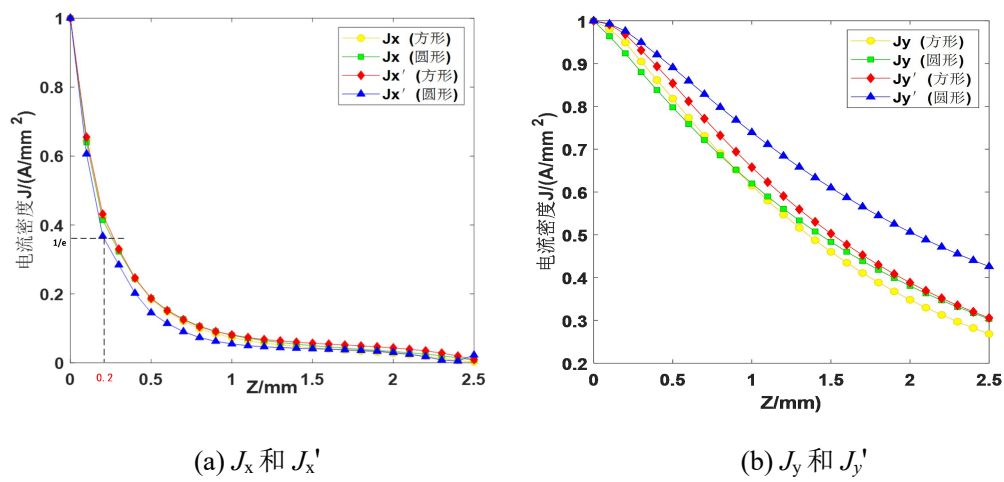


图 5-11 不同探头结构的电流密度曲线

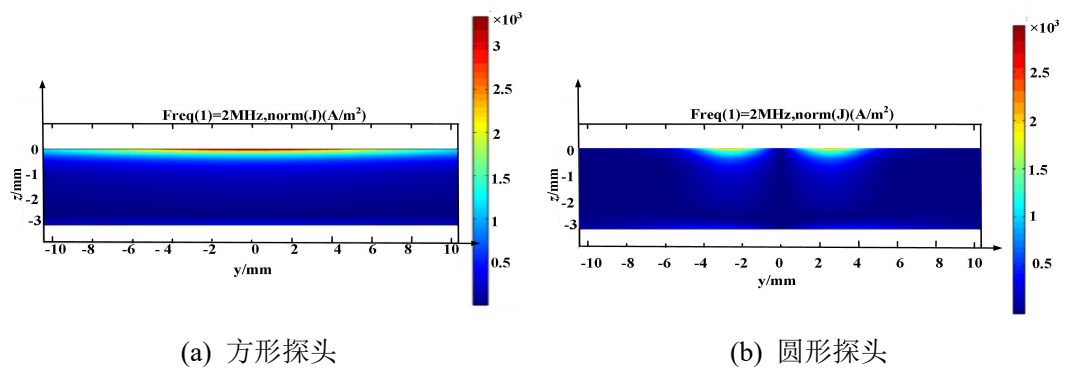


图 5-12 y-z 平面的电流密度

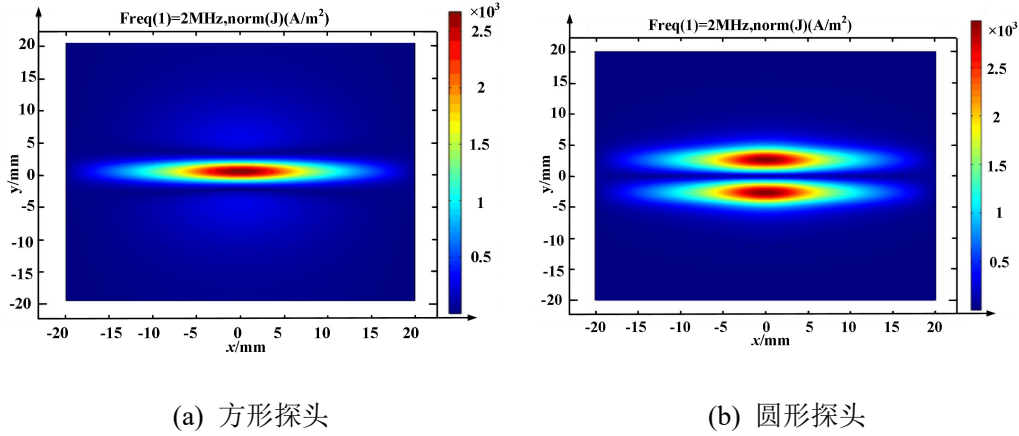


图 5-13 x - y 平面的电流密度

在实验中， J_x 和 J_x' 分别表示在探头正下方和远离探头位置的 CFRP 板上选取的测量点，用于获取 CFRP 板内部沿 y 轴的电流密度分布情况；同理， J_y 和 J_y' 表示沿 x 轴的电流密度分布。通过观察图 5-11(a)和(b)可以发现，尽管圆形探头和方形探头的结构不同，但两者的趋肤深度值接近相同。然而，在 x 轴方向上，圆形探头的电流密度明显高于方形探头。

进一步分析图 5-12(a)和(b)可以发现，在 y - z 平面上，方形探头的电流密度模分布更加广泛，且更接近待测板的表面；而圆形探头的电流分布更加集中，未向其他方向扩散。这表明在进行趋肤深度测量时，对于较深的缺陷，圆形探头的检测更具优势。此外，通过分析图 5-13(a)和(b)可以发现，在 x - z 平面上，方形探头的电流密度模的面积明显小于圆形探头。

综上所述，不同形状的探头对电流密度分布和趋肤深度的影响存在显著差异。圆形探头在电流集中性和深缺陷检测方面表现更优，而方形探头的电流分布更广泛且更接近表面。

（二）不同结构探头对正交板趋肤深度的影响

正交板采用的是 0° 和 90° 纤维方向铺设的，每一层的厚度为 0.25mm，总共铺设 12 层，如图 5-14 所示。

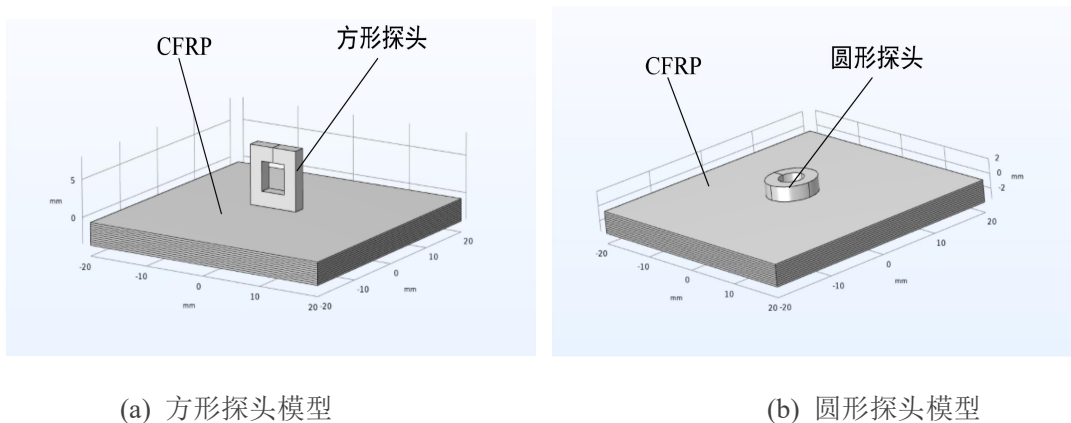


图 5-14 分层结构的仿真模型

探头采用的是检测单向板的圆形探头和方形探头。为了方便对比实验结果，把实验数据进行归一化处理。

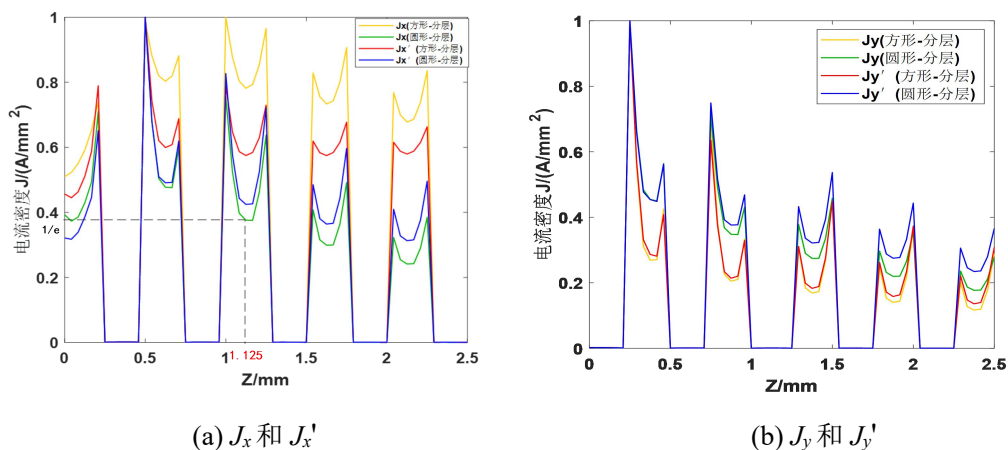


图 5-15 分层结构的电流密度曲线

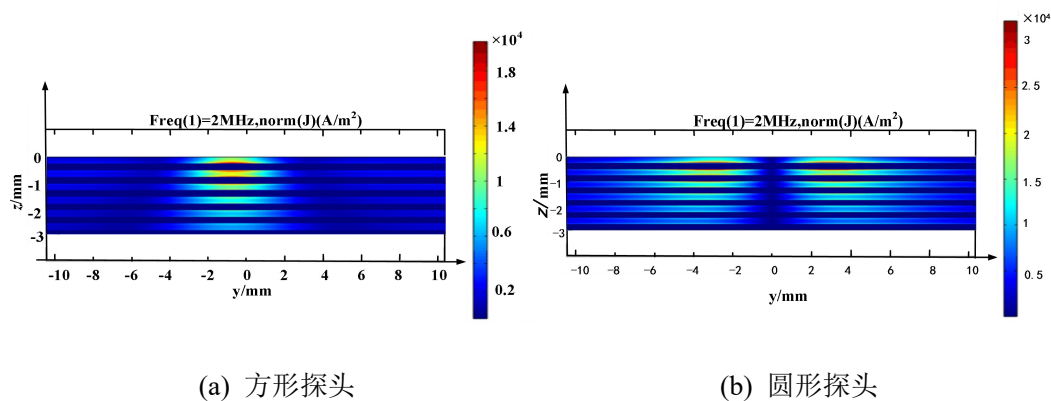
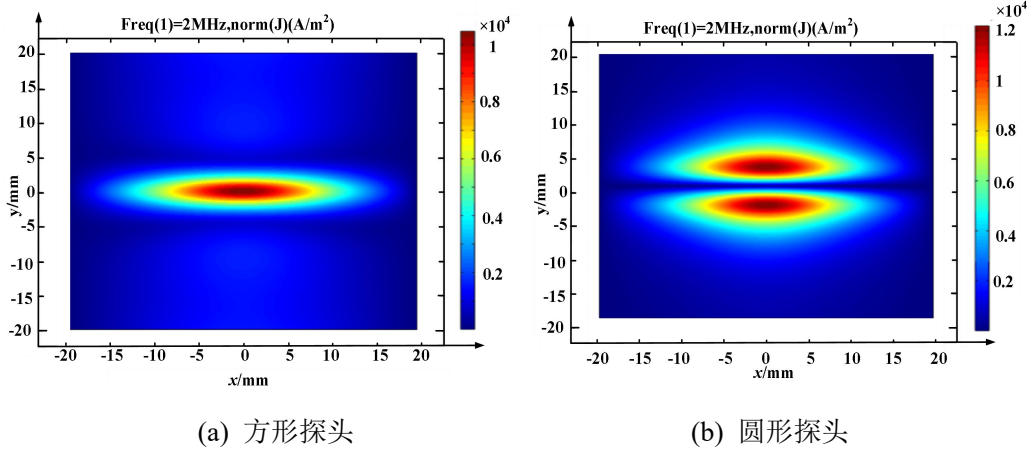


图 5-16 y - z 平面的电流密度


 图 5-17 x - y 平面的电流密度

探头检测获得的电流密度 J_x 和 J_x' 以及 J_y 和 J_y' 与单向板所在的位置一致。分析图 5-15 可知，当位于探头下方的 y 方向时，方形探头在 J_x 方向上的电流密度显著大于圆形探头；而在远离探头的位置，方形探头的电流密度仍然显著大于圆形探头。这一现象表明，方形探头在 CFRP 板上产生的电流分布更加广泛，且能够在更大范围内维持较高的电流密度。

进一步分析图 5-16 可以发现，在 y - z 平面上，圆形探头的电流密度显著高于方形探头，且其检测深度和覆盖范围均优于方形探头。这表明在进行趋肤深度检测时，圆形探头能够更有效地捕捉深层电流分布信息，性能更为优越。此外，通过分析图 5-17 可以发现，在 x - z 平面上，圆形探头的电流密度值更大，且电流密度模的分布面积也更广。这说明在进行缺陷检测时，圆形探头不仅能够检测深层缺陷，还在检测较浅缺陷时表现出更大的覆盖范围，从而提高了检测的全面性和准确性。

经过上述两节的讨论分析可知，方形探头和圆形探头无论是检测碳纤维单向板还是正交板的趋肤深度，圆形探头的效果都比方形探头更好。圆形探头不仅能够深入材料内部，准确检测深层缺陷和趋肤深度，还在浅层缺陷检测中表现出更大的覆盖范围。因此，在实际应用中，圆形探头是更优的选择，尤其是在需要高精度检测趋肤深度或深层缺陷时。如果仅需检测表面或近表面缺陷，方形探头也可以满足需求，但其综合性能不如圆形探头。

5.4 隐藏缺陷检测

在进行碳纤维复合材料的隐藏缺陷检测研究时，我们设计并开发了一套无损检测系统。该系统通过集成先进的传感技术与信号处理算法，能够有效识别碳纤维复合材料板内部的隐藏缺陷类型。

基于以上对于涡流检测系统各部分功能要求的分析，提出了系统的整体设计方案，如下图 5-18 所示，系统由上位机、下位机、检测平台三部分组成。

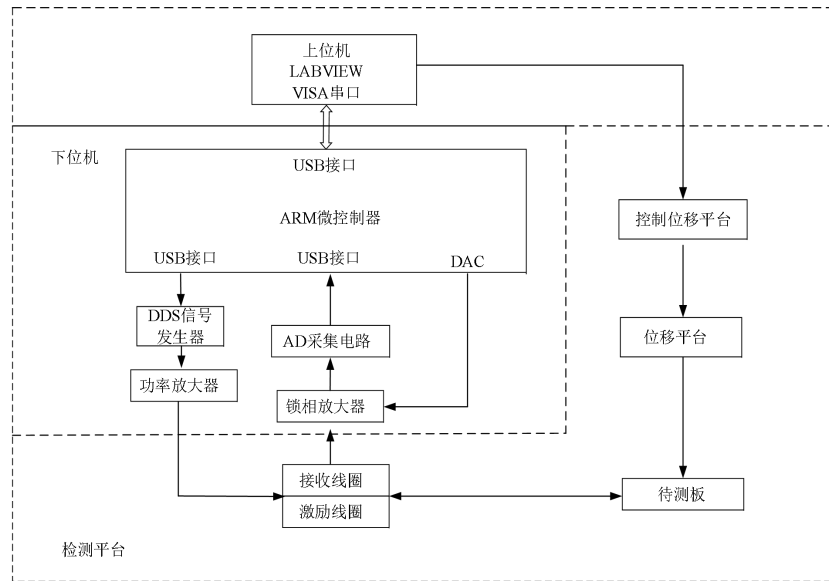


图 5-18 检测系统框架图

涡流扫描成像检测系统（如图 5-19 所示）由三轴机器人、下位机和上位机 PC 组成。在检测复合材料时，三轴机器人驱动探头在表面上进行扫描。探头接收到的信号是高频交变信号，需要通过锁相放大器解调，以提取出与损伤相关的直流信号。这些直流信号通过信号发生器和数据采集卡进行采集、存储和实时显示。整个过程由 LabVIEW 软件在计算机上控制，负责数据采集、存储和显示，同时对位移平台和探头进行精确控制，并实时监控扫描过程中的数据变化。

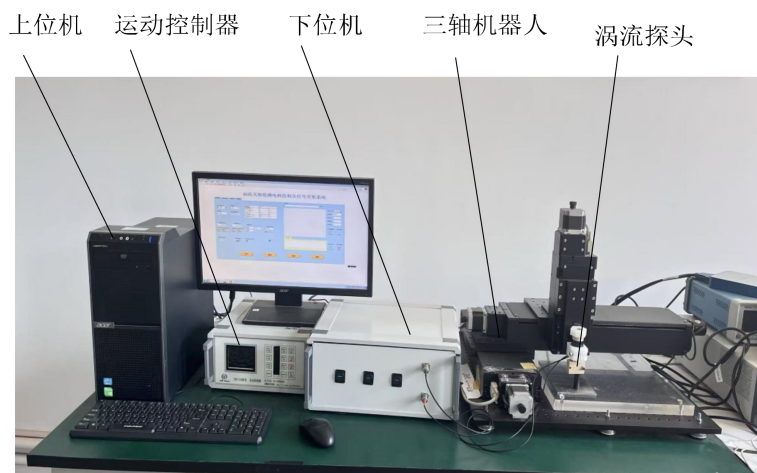


图 5-19 隐藏缺陷检测系统

本实验采用一块尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 CFRP 板作为检测对象，通过在板材正面设置三个特征各异的缺陷区域来评估检测方法的性能。区域 1 的左边第一行布置了边长为 10 mm 、 8 mm 和 6 mm 的正方形缺陷，第二行设置了直径相同的圆形缺陷，第三行和第四行均为长 10 mm 、宽 1 mm 的条形裂纹，且从左至右三列缺陷的深度依次为 2 mm 、 3 mm 和 4 mm 。区域 2 和区域 3 均包含三条长度 10 mm 、宽度 1 mm 的条形裂纹，区域 2 从上到下的三条裂纹深度则分别为 1 mm 、 2 mm 和 3 mm ，其中区域 3 的从上到下的三条裂纹深度依次为 4 mm 、 2.5 mm 和 3.5 mm 。实验采用背面检测方式，即所有激励和接收装置均布置在板材背面，通过测量信号响应来评估不同形状和深度缺陷的检测效果，具体区域分布情况如图 5-20 所示。

实验初始阶段，选用 2 MHz 作为基础检测频率进行趋肤深度测量。检测过程中，通过上位机编写并执行三轴机器人控制程序，探头按照图 5-21 所示的扫描路径进行精确扫描。采集到的数据实时上传至 PC 端，并以波形曲线的形式呈现。通过对波形曲线的特征分析，可准确判断材料内部隐藏缺陷的位置和分布情况。

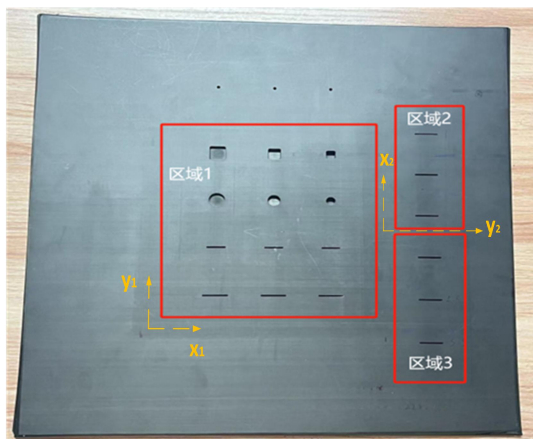


图 5-20 待测板

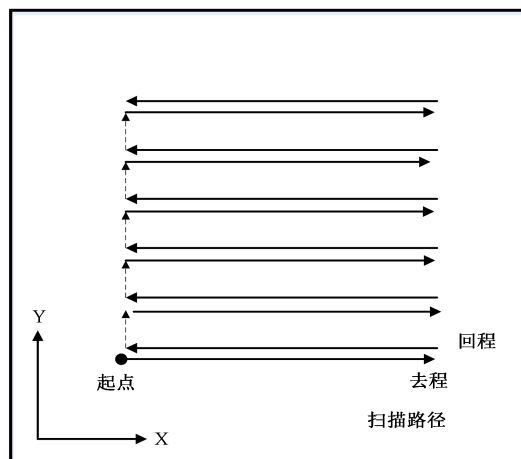
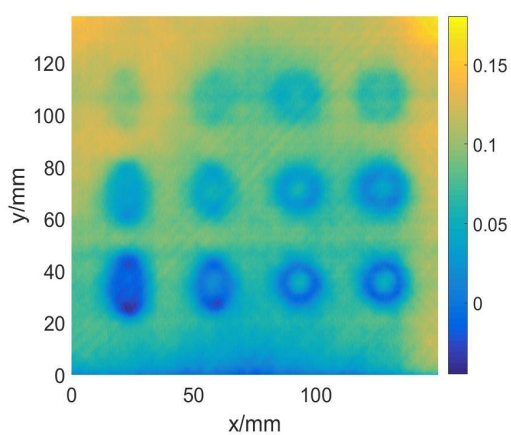
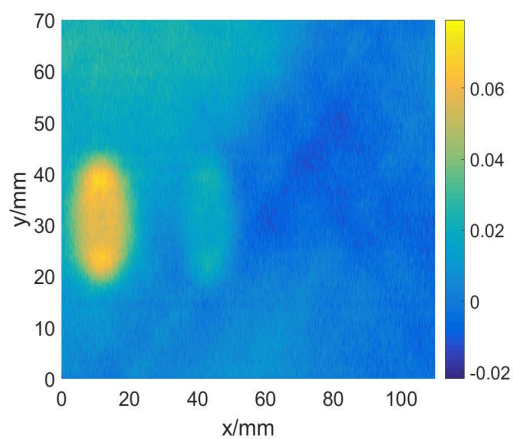


图 5-21 涡流探头扫描路径

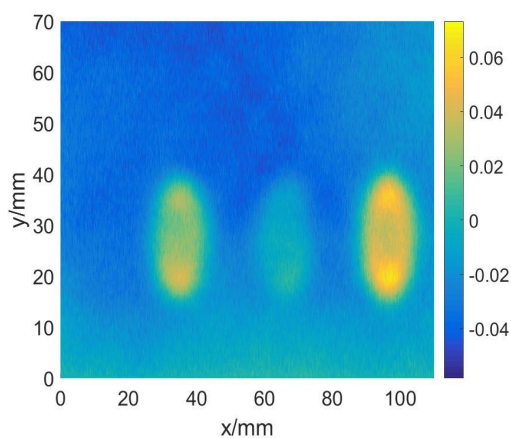
扫描完成后，探头采集到的直流信号通过信号发生器和数据采集卡传输至 PC 端进行存储。随后，利用 MATLAB 对这些数据进行处理，最终生成如图 5-22 所示的隐藏缺陷图。



(a) 区域 1



(b) 区域 2



(c) 区域 3

图 5-22 隐藏缺陷图

根据图 5-22 的检测结果分析, 区域 2 的信号响应相对较弱, 由于检测的是碳纤维板的背面, 区域 1 上面第一个缺陷正面深度为 1mm, 碳纤维板厚度为 5mm, 背面需要检测深度更深才可以检测到该缺陷。由表 5-1 CFRP 的趋肤深度可知探头频率为 2kHz 时候, 检测深度为 2.5mm, 难以检测到深度为 4mm 的裂缝。基于 5.3.1 中探头频率对趋肤深度影响的研究结论, 本研究采用降低探头频率的方法对区域 2 进行复测。具体而言, 选取 500kHz 的探头频率对区域 2 进行重新扫描, 并对获取的检测数据进行图像增强处理。优化后的检测结果如图 5-23 所示。

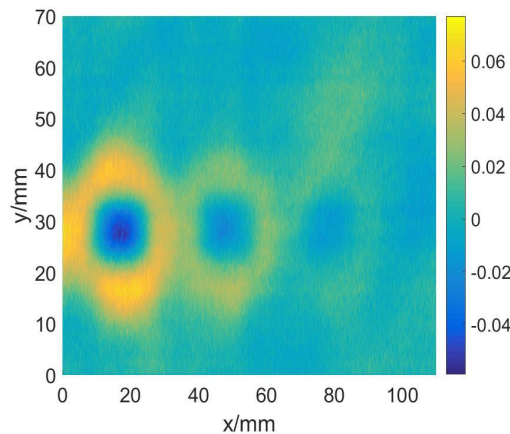


图 5-23 区域 2 隐藏缺陷图

根据趋肤深度理论计算, 当探头频率设置为 500 kHz 时, 理论趋肤深度达到 7.1 mm。通过对比实验数据分析发现, 适当降低探头工作频率可显著改善区域 1 的缺陷检测效果。

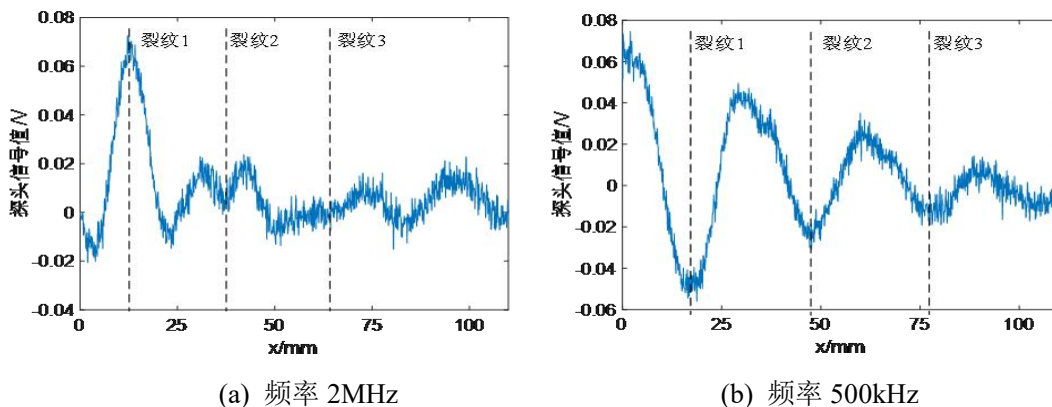


图 5-24 不同频率下区域 2 损伤的信号值

如图 5-24 所示, 通过对比 2MHz 和 500kHz 两种频率下区域 2 的检测信号可以发现: 在 500kHz 工作频率下, 对应的信号波谷特征明显增强, 信号分辨率显著提升。这一实验结果表明, 对于较深层的缺陷检测, 适当降低探头工作频率(从

2MHz 降至 500kHz) 能有效增强检测信号的穿透能力, 提高缺陷特征的辨识度。该发现为复合材料隐藏缺陷检测提供了重要参考: 当采用较高频率无法有效识别缺陷时, 可通过优化频率选择来改善检测灵敏度, 利用趋肤深度随频率降低而增大的特性, 实现对深层缺陷更有效的检测。

5.5 本章小结

本章通过仿真分析, 发现探头频率、探头尺寸、空间结构对趋肤深度的都产生影响。研究表明, 频率越高, 趋肤深度越浅, 电流更加集中在待测板表面; 当探头尺寸较大时, 其产生的电磁波更接近平面波特性, 从而在趋肤深度检测中表现出更高的测量精度。相比之下, 方形探头由于结构限制, 其电流分布会显著集中于导体表面, 导致在检测单向纤维增强复合板和正交各向异性板材的趋肤深度时, 其测量效果较圆形探头存在明显劣势。基于此, 设计了一套用于隐藏缺陷检测的系统, 并通过数据处理与成像技术, 实现了对缺陷的精准检测。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

CFRP 与金属材料相比具有多种优势，在工业制造、航天航空以及公共设施等众多领域已经取得广泛应用，因此对于在制造和使用的时候产生的损伤进行检测十分重要。涡流检测是一种常见的无损检测方法，具有弱导电性的 CFRP 可以采用电涡流法进行检测。本文提出了一种新型检测方法，通过拟合方程输入已知参数，直接计算接收线圈的电压值，从而避免了实际测量的过程。同时，研究了 CFRP 电导率与探头电压之间的关系，利用 COMSOL 软件进行有限元仿真，分析了探头电压随不同方向电导率变化的情况。最后，基于探头与电压的关系，探讨了探头参数对趋肤深度的影响。本文主要研究成果如下：

(1) 为简化 CFRP 损伤检测过程，本文提出了一种基于接收线圈电压预测的新方法。该方法通过将已知参数代入拟合方程，计算接收线圈电压，从而避免了传统检测方法中繁琐的实验测量过程。该方法基于材料电导率与接收线圈感应电压之间的函数关系，能够高效推断材料的结构健康状态。仿真计算结果与实验测量值进行了对比，验证了拟合模型的准确性，预测误差较小。该方法不仅显著简化了实验步骤，还为 CFRP 损伤检测提供了一种实用且高精度的技术手段，具有良好的应用前景。

(2) 为了测量 CFRP 的电导率，本文提出了一种基于涡流检测的电导率反演方法。通过 COMSOL 软件进行有限元仿真，建立了 CFRP 电导率与探头接收电压之间的数学模型，并采用三维曲面拟合得到了电压与各向异性电导率之间的函数关系。在此基础上，结合遗传算法（GA）与共轭梯度法进行迭代优化，实现了对电导率的有效反演。该方法不仅考虑了 CFRP 材料的各向异性特性，还通过与实验测得的电导率和探头电压进行对比，验证了仿真模型的准确性与可行性。

(3) 为了研究趋肤效应，提出了包括理论分析、有限元仿真在内的分析方法。首先，通过趋肤效应公式，对探头参数对趋肤深度的影响进行了理论预测。接着，利用 COMSOL 软件进行了仿真分析，系统地对比了不同参数对趋肤深度的具体影响。研究发现，频率对趋肤深度有显著影响，频率越高，趋肤深度越浅，电流更集中于待测板表面；而较大的探头尺寸采用平面波时候，检测趋肤深度效果更

好；方形探头结构使电流更集中于导体表面，不利于检测较深的缺陷。基于这些分析，设计并实现了一套用于隐藏缺陷检测的系统，进行图像处理，显著提高了检测的精度和可靠性。

6.2 展望

本文对碳纤维复合材料电压与电导率关系以及趋肤深度的影响因素进行了深入的研究，但是在实际应用上还需要进一步的研究，来提高 CFRP 检测的实用性和可靠性，以下方面还需要完善：

(1) 基于拟合方程优化损伤检测的方法

为了进一步提升碳纤维复合材料损伤检测方法的适应性和精度，基于拟合方程的检测方法有望在未来得到优化。通过结合更先进的数值仿真技术和机器学习算法，可以实现对材料健康状态的更精准预测和实时监测。随着研究的深入，预计该方法将在碳纤维复合材料的质量控制和无损检测领域发挥越来越重要的作用，为航空航天、汽车等行业的结构健康监测提供更加可靠的技术支持。

(2) 基于电导率反演方法的优化与应用前景

为了进一步提升基于涡流检测的电导率反演方法在 CFRP 损伤检测中的应用，未来将通过优化仿真模型并引入更高效的算法，尤其是在多参数耦合与实时数据处理方面，以提高方法的适应性和精度。此外，随着探头技术的不断发展和智能化检测设备的普及，该方法将在实际应用中变得更加高效便捷。

(3) 探头参数对趋肤效应的精确影响

为了进一步优化基于趋肤效应的分析方法，未来有望提升其在复杂材料中的适应性和精确性。随着数值仿真技术的发展和更高效的算法引入，趋肤效应的研究可以实现更精细的电流分布预测。此外，探头技术的进步和智能化检测设备的应用将使该方法在实际检测中更加高效、便捷。

参考文献

- [1] 沈真.碳纤维复合材料在飞机结构中的应用[J].高科技纤维与应用, 2010, 35(4): 1-4.
- [2] 丁叁叁, 田爱琴, 王建军, 等.高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J].电力机车与城轨车辆, 2015, 38(1): 1-8.
- [3] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等.国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J].电力建设, 2010(4): 90-93.
- [4] 董博.复合材料及碳纤维复合材料应用现状[J].辽宁化工, 2013, 42(5): 552-554.
- [5] 李慧, 武鲜艳, 吴美琴, 等.高温环境下三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能[J].复合材料学报,1-12[2025-05-07].
- [6] 朱韵伊.M Xene 基导电水凝胶的制备及其功能化的研究[D].湖南大学, 2021.
- [7] Kawakami H, Feraboli P. Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(9): 1247-1262.
- [8] 徐樛华, 王宇.国产高性能聚丙烯腈基碳纤维技术特点及发展趋势[J].科技导报, 2018, 36(19): 43-51.
- [9] Baltopoulos A, Polydorides N, Pambaguian L, et al. Damage identification in carbon fiber reinforced polymer plates using electrical resistance tomography mapping[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(26): 3285.
- [10] 唐荆, 陈啸, 杨科.碳纤维复合材料开孔层合板压缩损伤预测和模型比较[J].玻璃钢/复合材料, 2019(10): 33-39.
- [11] 陈俊涛.碳纤维增强复合材料在高低周载荷下的疲劳行为研究[D].哈尔滨工业大学, 2017.
- [12] 杨白凤.碳纤维/双马树脂基复合材料及其连接结构在空天环境温度下的力学行为[D].西北工业大学, 2018.
- [13] 李习习.复合材料层合板低速冲击损伤与剩余压缩强度研究[D].哈尔滨工业大学, 2014.

- [14] 张毛燕.碳/碳复合材料在模拟空间极端温度环境中的性能研究[D].西北工业大学, 2020.
- [15] 刘琳, 张东.电磁屏蔽材料的研究进展[J].功能材料, 2015, 46(3)3016-3022.
- [16] W. Li, D. Xiang L. Wang, E. Harkin-Jones, C. Zhao, B. Wang, Y. Li, RSC Adv. 2018, 8(26), 910.
- [17] NE LOBOIONDO, L E Jones, A G Clare. Halogenated glass system for the protection of structural Carbon/carbon composites[J]. Carbon, 1995, 33(4): 499-508.
- [18] 王琛琛.碳纤维树脂基复合材料 RTM 制备及其耐腐蚀性能研究[D].沈阳理工大学, 2023.
- [19] 杨宾峰.脉冲涡流无损检测若干关键技术研究[D].国防科学技术大学, 2006.
- [20] 付倩.基于激光超声检测技术的损伤定位及成像算法研究[D].南京航空航天大学, 2018.
- [21] BULL D J, HELFEN L, Sinclair I, et al. A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fiber composite impact damage[J]. Composites Science & Technology, 2013, 75(2): 55-61.
- [22] 刘元林, 赵国金, 高帅帅, 等.碳纤维复合材料缺陷无损检测方法研究[J].煤矿机械, 2017, 38(12): 64-66.
- [23] 王迅, 金万平, 张存林.红外热波无损检测技术及其进展.无损检测, 2004, 26(10): 497-501.
- [24] DUAN Y, ZHANG H, MALDAGUE X. Reliability assessment of pulsed thermography and ultrasonic testing for impact damage of CFRP panels[J]. NDT & E International, 2019, 102: 77-83.
- [25] 卢菲.金属材料超声无损检测技术应用研究[J].世界有色金属, 2023, (15): 181-183.
- [26] 蒋中鑫.基于四电极法的CFRP板电阻抗无损检测系统研究[D].中国民航大学, 2021.
- [27] 刘近贞. 基于扫描电极的开放式电阻抗成像的研究[D].天津: 天津大学, 2014.
- [28] TODOROKI A. Effect of number of electrodes and diagnostic tool for

- delamination monitoring of graphite epoxy laminates using electric resistance change. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 1871-1880.
- [29] TODOROKI A. Monitoring of electric conductance and delamination of cfrp using multiple electric potential measurements. *Advanced Composite Materials*, 2013, 23(2): 179-193.
- [30] ABRY J. C., CHOI Y. K., CHATEAUMINOIS A., DALLOZ B., GIRAUD G., SALVIA M. In-situ monitoring of damage in cfrp laminate. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 855-864.
- [31] TODOROKI A., OMAGARI K., SHIMAMURA Y., KOBAYASHI H. Matrix crack detection of cfrp using electrical resistance change with integrated surface probes. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(11-12): 1539-1545.
- [32] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测. 北京: 科学出版社, 2008, 8.
- [33] MOOK G, LANGE R, KOESER O. Non-destructive characterisation of carbon-fiber-reinforced plastics by means of eddy-currents[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 865-873.
- [34] DU Y, LI X, XIE S, et al. Reconstruction of cracks in a carbon fiber-reinforced polymer laminate plate from signals of eddy current testing[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(24): 3527-3536.
- [35] ZENG Z, TIAN Q, WANG H, et al. Testing of delamination in multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates using the vertical eddy current method[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 314-321.
- [36] DU Y, XIE S, CHEN Z, et al. Detectability evaluation of eddy current testing probes for inspection of defects in carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2017, 55: 185-193.
- [37] MIZUKAMI K, MIZUTANI Y, TODOROKI A, et al. Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 86: 84-94.
- [38] 程军, 杨继全, 裘进浩, 等. 基于涡流成像的碳纤维增强树脂基复合材料细观

- 结构可视化[J].复合材料学报, 2018, 35(8): 2074-2083.
- [39]MASTROLEMBO G. Understanding and Optimizing parameters for lightning strike testing of CFRP materials[D]. Cardiff University, 2017.
- [40]ZHAO Q, ZHANG K, ZHU S, et al. Review on the electrical resistance/conductivity of carbon fiber reinforced polymer[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2390.
- [41]RX-K. GAO, et al., Electromagnetic properties and measurements of conductive aircraft CFRP composites for lightning protection and EMI shielding, IEEE Trans. Instrum.Meas.,vol.72, pp.1-11, 2023.
- [42]ESCALONA GAALVIS L W, DIAZ MONTIEL P, VENKATARAMAN S. Optimum electrode configurations for two-probe, four-probe and multi-probe schemes in electrical resistance tomography for delamination identification in carbon fiber reinforced composites[J]. Journal of Composites Science, 2018, 2(2): 29.
- [43]SCHUELER R, JOSHI S P, SCHULTE K. Damage detection in CFRP by electrical conductivity map[J]. Composites science and technology, 2001, 61(6): 921-930.
- [44]ZAPPALORTO M, PANOZZO F, CARRARO P A, et al. Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments[J]. Composites Science and Technology, 2017, 143: 31-45.
- [45]MIZUKAMI K, WATANABE Y, OGI K. Eddy current testing for estimation of anisotropic electrical conductivity of multidirectional carbon fiber reinforced plastic laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021.
- [46]ŁUKASZUK R, CHADY T. Nondestructive examination of carbon fiber-reinforced composites using the eddy current method[J]. Materials, 2023, 16(2): 506.
- [47]程军.碳纤维复合材料的电磁涡流无损检测技术研究[D].南京航空航天大学, 2015.

- [48]白炯洁,李俭.基于涡流检测技术的腐蚀缺陷损伤研究[J].科技资讯,2025,23(05):114-116.
- [49]孙磊,焦少妮,杜飞,等.碳纤维复合材料趋肤效应研究[J].电子质量,2014(3):3.
- [50]邹雨峰.基于电磁涡流的碳纤维复合材料隐藏缺陷检测方法研究[D].南京航空航天大学[2024-11-27].
- [51]HOLLOWAY C L, Sarto M S, JOHANSSON M. Analyzing carbon-fiber composite materials with equivalent-Layer models[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 47(4): 833-844.
- [52]WANG XHQ. Study of the skin depth and defect detection in carbon fiber composites with Terahertz waves[J].Journal for Journal for Light-and Electronoptic, 2019, 178.
- [53]HE Y, TIAN G, Pan M, et al. Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current[J]. Composites Part B, 2014, 59(3): 196-203.
- [54]Mizukami K, Mizutani Y, Todoroki A, et al. Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 86: 84-94.
- [55]TYTKO G, ROGALA T, KATUNIN A, et al. Damage Detection in Carbon Fiber-Reinforced Composite Structures Using Eddy Current Pot-Core Sensor[J]. IEEE Access, 12[2024-11-27].
- [56]占锦文,任明翔.基于“模型+数据”驱动的航空器损伤智能识别算法[J].航空维修与工程, 2021, (11): 59-61.
- [57]杜禹樵,马成坤,王柏涛,等.基于碳纳米纸传感器和深度学习的碳纤维复合材料损伤监测[J].沈阳航空航天大学学报, 2024, 41(03): 43-52.
- [58]刘振宇,傅云,谭建荣.基于异构网格耦合的产品多物理场有限元数据集成与可视化仿真[J].机械工程学报, 2010(7): 8.
- [59]Todoroki A, Miho T. Measurement of orthotropic electric conductance of cfrp laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62:

619-628.

- [60]Idan, Palanisamy R., Lord W. Eddy Current Probe Design Using Finite Element Analysis[J]. Materials Evaluation, 2011, 41(11): 1389-1394.
- [61]徐可北, 周俊华.涡流检测[M].北京: 机械工程出版社, 2004.
- [62]赵倩, 张凯, 张荣华, 等.碳纤维增强塑料电导率的研究现状[J].河北科技大学学报, 2018, 39(06): 502-510.
- [63]Grimberg R, Savin A, Steigmann R, et al. Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and Kevlar [J]. International Journal of Materials & Product Technology - INT J MATER PROD TECHNOL, 2006, 27: 221-228.
- [64]Todoroki A. Electric current analysis for thick laminated cfrp composites. Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2012, 59(692): 252-257.
- [65]张玉龙.高技术复合材料制备手册.北京: 国防工业出版社, 2003.

攻读学位期间取得的成果及参研项目

一、论文

张梦茹,程军,汪步云,等.基于涡流法的碳纤维复合材料电导率非接触测量[J].蚌埠学院学报,2025,14(02):31-38. (已见刊)

致谢

硕士研究生阶段即将结束，回首这段充满挑战与收获的旅程，每一个学术思考与实践探索都让我不断成长。从课题的提出到论文的完成，这段时光不仅拓宽了我的专业视野，也塑造了我更加坚韧的科研态度，成为我未来道路上的宝贵财富。

衷心感谢我的导师程军老师。在学术道路上，程老师始终给予我耐心细致的帮助，从选题确定到论文撰写的每个环节，都倾注了宝贵的心血和智慧。他严谨的治学态度和渊博的学识让我受益匪浅，使我在科研探索中更加坚定前行。程老师的悉心教诲不仅是我顺利完成论文的重要保障，更成为我未来学术成长的宝贵财富。

我要感谢我的同门师兄姐妹们。在研究生期间，我们共同学习、共同进步，彼此之间建立了深厚的友谊。无论是学术上的讨论还是生活中的互助，大家总是互相支持、互相鼓励。特别是刘蒙蒙、朱煜龙、周燕等同学，你们的陪伴让我的研究生生活充满了欢笑和温暖。感谢你们在我遇到困难时给予的帮助和支持，你们的存在让我的学术之路更加顺利。

在此，我再次向所有帮助过我的人表示最诚挚的感谢！希望未来的日子里，我们都能继续努力，取得更大的成就！

尚德敏学 唯实惟新

