

分类号: TH878

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110141



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

# 硕士学位论文

题 目

基于变距离 T-R 探头的多频

涡流无损检测研究

论 文 作 者

周燕

校 内 导 师

陈玉(副教授)

校 外 导 师

李明俊

专业学位类别

机械

研究方向(领域)

智能制造

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TH878

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110141

## 基于变距离 T-R 探头的多频涡流无损检测研究

### Research on Multi-frequency Eddy Current Non-Destructive Testing Based on Variable Distance T-R Probes

学生姓名：\_\_\_\_\_周 燕\_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_陈 玉（副教授）\_\_\_\_\_

校外导师：\_\_\_\_\_李明俊\_\_\_\_\_

专 业：\_\_\_\_\_机 械\_\_\_\_\_

研究方向：\_\_\_\_\_智能制造\_\_\_\_\_

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：周燕

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：

周燕

指导教师签名：

陈玉

日期：2025年5月20日

日期：2025年5月20日

## 基于变距离 T-R 探头的多频涡流无损检测研究

### 摘要

碳纤维复合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）是现代工程技术的核心材料，有着强度高、质量轻和优越的抗腐蚀等优点，被广泛应用到航空航天、汽车制造等行业。CFRP 在制造过程中的许多不确定性的因素导致它难以完全避免制造误差和内部损伤。涡流无损检测技术因其检测速度快、自动化程度高、不需要耦合剂和检测成本低等优点，被广泛的应用到检测 CFRP 等材料中。多频涡流检测是一种创新的无损检测方法，其优势在于能够有效消除检测过程中的信息干扰，同时实现对被测物体多种特征参数的综合测量，它是通过多个不同频率正弦信号的合成信号激励，从而实现对材料和零部件的有效检测，这已经成为当前涡流检测技术的重要研究方向。本文通过评价涡流检测（ETC）对 CFRP 表面下裂纹的灵敏度，提出了一种量化方案来表征变距离发射-接收探头的有效性。本文的主要内容有：

（1）本文阐述了涡流检测的基本原理和理论基础，包括麦克斯韦电磁感应定律，电涡流传感器工作原理，通过感应电流和磁场的相互作用，实现对导体内部缺陷的检测，电路模型和等效电路分析为解释涡流检测系统的运作机制提供了清晰的框架，最后，介绍涡流信号的处理方法。

（2）根据被测件的外形特点设计了一种 T-R（发射-接收）探头，合理的布置激励线圈与接收线圈的位置，通过优化探头尺寸来抑制噪

音的干扰，提高了信噪比和检测的可靠性。通过对发射-接收线圈的工作原理进行参数分析，建立线圈间距和线圈方向仿真模型，确定线圈的各项参数值，进行了不同频率，不同线圈方向，有无损伤的参数化扫描，对比电流密度模和电压曲线的变化，得出了最佳检测频率以及线圈摆放的方向，从而实现对不同深度隐藏缺陷的检测。

(3) 搭建了一套多频涡流检测嵌入式检测系统，包括 PC 上位机，已封装的嵌入式硬件系统、三坐标轴位移平台，设计了上位机与下位机软件，上位机的功能是控制位移平台的运动和数据采集与存储工作，并对检测结果实时保存，下位机主要负责信号的发生和激励，输出不同的频率和电压。多频涡流检测系统采用单个检测通道就能一次实现不同深度的缺陷检测，并且频带集中于已知范围内，便于进行信号处理分析。

(4) 利用集成后的涡流检测系统对 CFRP 进行损伤实验验证，根据仿真的内容，采用工作频率为 500kHz 和 2MHz 去激励线圈，线圈不同的方向去检测碳纤维复合材料板以及叠层结构的裂纹损伤，发现工作频率为 500kHz 的低频能检测出深层次的缺陷，实验结果与仿真结果相一致，验证了系统的可行性以及实用性。

**关键词：**CFRP，涡流检测，相位旋转，缺陷成像，损伤识别

# Research on Multi-frequency Eddy Current Non-Destructive Testing Based on Variable Distance T-R Probes

## ABSTRACT

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is a core material in modern engineering technology, possessing advantages such as high strength, light weight, and superior corrosion resistance. It is widely applied in industries such as aerospace and automobile manufacturing. Many uncertainties during the manufacturing process of CFRP make it difficult to completely avoid manufacturing errors and internal damage. Eddy current non-destructive testing technology is widely used in the detection of CFRP and other materials due to its advantages of fast detection speed, high degree of automation, no need for coupling agents, and low detection costs. Multi-frequency eddy current testing is an innovative non-destructive testing method, which has the advantage of effectively eliminating information interference during the detection process while achieving comprehensive measurement of various characteristic parameters of the object being tested. It is realized through the excitation of a composite signal of multiple different frequency sine signals, thus effectively detecting materials and components. This has become an important research direction in current eddy current testing technology. This paper evaluates the sensitivity of eddy current testing

(ETC) to cracks beneath the surface of CFRP and proposes a quantitative scheme to characterize the effectiveness of variable-distance transmit-receive probes. The main contents of this paper include:

(1) This article expounds on the basic principles and theoretical foundations of eddy current testing, including Maxwell's electromagnetic induction law, the working principle of eddy current sensors, and the detection of internal defects in conductors through the interaction of induced currents and magnetic fields. The circuit model and equivalent circuit analysis provide a clear framework for explaining the operational mechanism of the eddy current testing system. Finally, it introduces methods for processing eddy current signals.

(2) A T-R (Transmit-Receive) probe was designed based on the shape characteristics of the test piece, with a reasonable arrangement of the positions of the excitation coil and the receiving coil. By optimizing the probe size, noise interference was suppressed, improving the signal-to-noise ratio and the reliability of detection. Through parameter analysis of the working principle of the transmit-receive coil, a simulation model for coil spacing and coil direction was established, and the values of various coil parameters were determined. Parametric scanning was performed at different frequencies, different coil directions, and with or without damage. By comparing the changes in current density mode and voltage curves, the optimal detection frequency and the direction of coil

placement were determined, thus achieving the detection of hidden defects at different depths.

(3) A multi-frequency eddy current detection embedded system based on frequency modulation has been established, including a PC host computer, an encapsulated embedded hardware system, and a three-axis displacement platform. The software for both the host and slave computers has been designed. The host computer's functions are to control the movement of the displacement platform, data acquisition, and storage, and to save the detection results in real-time. The slave computer is mainly responsible for signal generation and excitation, outputting different frequencies and voltages. The multi-frequency eddy current detection system can detect defects at various depths in a single channel, and the frequency band is concentrated within a known range, facilitating signal processing and analysis.

(4) Utilizing the integrated eddy current detection system to conduct damage experiments on CFRP, based on the simulation content, coils were excited at frequencies of 500kHz and 2MHz, and the carbon fiber reinforced plastic plates and laminated structures were inspected in different directions for crack damage. It was found that the low frequency of 500kHz could detect deep-seated defects, and the experimental results were consistent with the simulation results, verifying the system's feasibility and practicality.

**KEY WORDS:** CFRP, Eddy current testing, phase rotation, defect imaging, damage identification

## 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 摘要 .....                  | I   |
| ABSTRACT .....            | III |
| 第 1 章 绪论 .....            | 1   |
| 1.1 研究背景与意义 .....         | 1   |
| 1.2 涡流无损检测常用方法 .....      | 4   |
| 1.3 国内外研究现状 .....         | 11  |
| 1.3.1 高频涡流检测 .....        | 11  |
| 1.3.2 多频涡流检测 .....        | 12  |
| 1.3.3 远场涡流检测 .....        | 13  |
| 1.4 本文研究内容及章节安排 .....     | 14  |
| 第 2 章 涡流检测理论基础 .....      | 16  |
| 2.1 涡流检测的基本原理 .....       | 16  |
| 2.2 涡流检测趋肤效应 .....        | 21  |
| 2.3 涡流信号处理方法 .....        | 23  |
| 2.3.1 空间域与复数域信号处理 .....   | 24  |
| 2.3.2 多频信号处理方法 .....      | 25  |
| 2.4 本章小结 .....            | 28  |
| 第 3 章 涡流检测有限元建模仿真 .....   | 29  |
| 3.1 线圈参数选择 .....          | 29  |
| 3.2 有限元仿真分析 .....         | 31  |
| 3.2.1 COMSOL 仿真软件介绍 ..... | 31  |
| 3.2.2 线圈间距优化仿真分析 .....    | 32  |
| 3.3 CFRP 叠层结构隐藏缺陷分析 ..... | 40  |
| 3.4 本章小结 .....            | 48  |
| 第 4 章 涡流检测嵌入式系统设计 .....   | 49  |
| 4.1 涡流检测嵌入式系统硬件设计 .....   | 49  |
| 4.1.1 T-R 涡流探头设计 .....    | 49  |
| 4.1.2 正弦信号发生模块 .....      | 50  |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4.1.3 锁相放大模块 .....             | 51 |
| 4.1.4 高精度数据采集模块 .....          | 54 |
| 4.2 涡流检测嵌入式系统软件设计 .....        | 55 |
| 4.2.1 上位机软件设计 .....            | 56 |
| 4.2.2 下位机软件设计 .....            | 60 |
| 4.3 系统实验平台 .....               | 62 |
| 4.4 本章小结 .....                 | 65 |
| 第 5 章 CFRP 夹层结构的多频涡流损伤检测 ..... | 66 |
| 5.1 CFRP 层压板损伤检测 .....         | 66 |
| 5.2 金属夹层远场涡流损伤检测 .....         | 70 |
| 5.3 总结 .....                   | 76 |
| 第 6 章 总结与展望 .....              | 78 |
| 6.1 总结 .....                   | 78 |
| 6.2 展望 .....                   | 79 |
| 参考文献 .....                     | 80 |
| 攻读学位期间取得的成果 .....              | 85 |
| 致谢 .....                       | 86 |

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

随着现代工业和材料制造业技术的不断发展和创新，作为新型材料的代表，碳纤维复合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP）因其强度高、质量轻、耐腐蚀性等优良特性被广泛应用于各类设备和机械中，常常应用于航空航天、核电项目和军事领域。材料和零件在长期服役情况下会产生较为严重的损伤，例如材料结构的内部或者外部的损伤、腐蚀老化和疲劳裂纹，这些损伤可能尺寸较小，人肉眼难以辨别。如果在使用过程中，未能及时检测出这些损伤，可能会造成严重的人员伤亡和经济损失。

无损检测（NDT）技术能够在保持材料完整性的前提下，通过超声、涡流和 X 射线等多种物理手段，对构件的力学特性及潜在损伤进行评估和分析<sup>[1]</sup>。工程构件在加工或者服役期间均可能出现损伤，这一规律同样适用于碳纤维复合材料。航空领域广泛应用的碳纤维增强聚合物通常采用纤维树脂层合结构。CFRP 的非均质性和各向异性，会导致其在成型阶段面临工艺参数不稳定问题，加工参数的调控存在一定的难度，而这种不确定性可能会导致内部瑕疵的形成<sup>[2]</sup>。碳纤维复合材料制造过程中的每个环节，从预浸料铺层到高温固化成型，以及树脂传递模塑的预制体铺设和基体浸润效果等关键工序，均需采用无损检测方式，这种方式能够确保最终产品及其后续加工部件的工艺可靠性和服役性能<sup>[3]</sup>。如图 1-1 所示无损检测在生产中的应用，为保证产品的质量与使用安全，无损检测凭借着独特的优势在现代工业生产中发挥着关键的作用，主要应用于产品设计、生产到使用的阶段<sup>[4]</sup>。

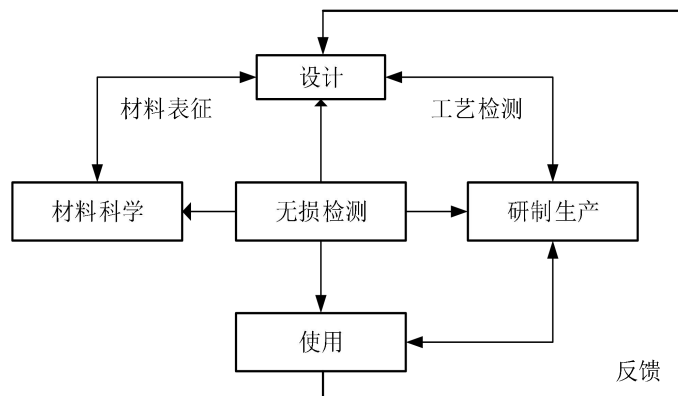


图 1-1 无损检测在生产中的应用

在当代科技发展进程中，生产安全始终是社会关注的首要议题。随着材料科学的进步，各类高性能工程材料被广泛应用于航空发动机、电力设施、轨道交通及海洋工程等关键领域，这些工程材料包括碳纤维增强聚合物、热防护涂层、合金等<sup>[5][6]</sup>。碳纤维增强复合材料在多个领域取得的显著发展在很大程度上受益于无损检测技术的不断改进和进步。与此同时，涡流检测技术的不断成熟和先进化也进一步扩展了 CFRP 材料在新兴行业和领域中的广泛应用。

CFRP 是由碳纤维和树脂聚合物复合而成的一种多项材料，碳纤维凭借优异的力学性能，在复合材料中主要起承受载荷以及抵抗变形和断裂的能力，而树脂基体发挥着粘结纤维、传递应力和保护的作用。如图 1-2 所示，碳纤维复合板在宏观层面的损伤主要包括裂纹、分层、凹陷和压痕，在细观层面的损伤主要表现在纤维断裂、纤维褶皱和基质开裂，表 1-1 列出了造成 CFRP 不同的损伤形式的原因。

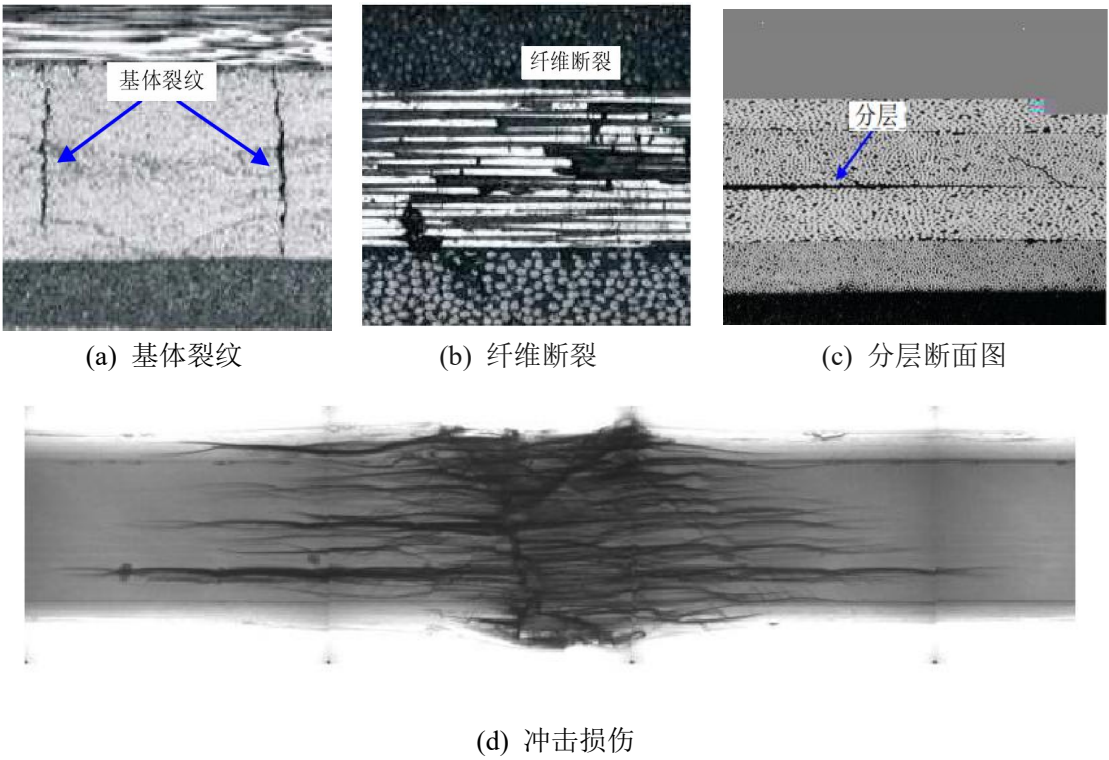


图 1-2 碳纤维复合材料损伤类型

表 1-1 损伤形式分类

| 损伤形式 |    | 造成损伤的原因     |
|------|----|-------------|
| 宏观   | 裂纹 | 外部受到冲击或负荷过大 |

|    |         |                                               |
|----|---------|-----------------------------------------------|
|    | 分层      | 不同层之间的分离                                      |
|    | 凹陷和压痕   | 受到外部冲击或压力                                     |
|    | 基体开裂    | 受到外部力的作用，材料中的树脂基体出现裂纹                         |
|    | 纤维断裂    | 碳纤维受到极端负载                                     |
| 微观 | 纤维褶皱    | 碳纤维复合材料的层叠过程中，纤维方向的排列不当或者堆叠顺序的错误所导致应力集中造成纤维褶皱 |
|    | 纤维/基体界面 | 碳纤维和树脂基体之间的粘接实效                               |
|    | 脱胶      |                                               |

涡流检测的优势：检测过程中无需耦合剂，检测速度快且对试件表面变化检测灵敏，适合工业生产中在线检测。被测试件的表面状态、几何特征、电导率和磁导率等参数均会对无损检测的准确性造成影响，通过控制变量法，保持其他条件不变的情况下，单独改变一个参数，可以借助涡流效应实现对材料厚度、电导率和磁导率的精确测定。涡流检测技术通过电磁感应原理将阻抗信号转化为电信号，基于此原理研制的微型涡流探测仪结合可视化成像功能，提高了在线检测的效率<sup>[7]</sup>。尽管涡流检测有许多优点，但其应用仍然存在一些局限性。该技术基于电磁感应原理，主要适用于具有导电特性的被测对象，包括金属构件及导电高分子材料。受趋肤效应的影响，涡流检测对表层缺陷具有较好的检出能力，但对内部缺陷的识别效果欠佳。此外，由于检测信号反映的是探头覆盖区域的整体响应，导致难以准确判定缺陷的具体方位。

涡流检测技术是基于电磁感应原理的无损检测方法，该方法通过分析导体中感应电流的变化特征，可实现对被测对象的多种性能检测。影响涡流分布的关键参数包括：材料厚度、导电特性、磁学性质、结构几何尺寸以及探头间距等物理因素。基于这些参数变化，该技术可有效应用于材料缺陷识别、导电性能测定、厚度测量、尺寸标定以及材质分类等工业检测场景。涡流检测的不同种类的具体应用如表 1-2 所示<sup>[8][9]</sup>。

表 1-2 涡流检测应用

| 检测种类  | 用途                  |
|-------|---------------------|
| 缺陷检测  | 生产过程的质量检测，在役设备的缺陷检测 |
| 电导率检测 | 非贴磁性试件的电导率测量        |
| 厚度检测  | 利用提离效应对导体上非导电涂层厚度测量 |
| 尺寸测量  | 尺寸、形状的控制            |
| 材料分选  | 对不同材料、是否热处理完全以及硬度测量 |

近年来，得益于计算机与微电子技术的发展，大型工业装备的市场需求与生产能力持续攀升。在此背景下，涡流检测技术呈现出若干重要发展趋势，归纳为以下几种方向：

1) 涡流传感器的性能优化正朝着专业化方向发展。当前探头设计理论体系尚未成熟，主要依赖计算机模拟和实验验证相结合的方法。深入探究涡流检测探头的理论模型，成为该领域亟待突破的关键研究方向。

2) 智能识别被测工件缺陷形状和深度是当前的研究热点。现阶段涡流检测技术主要运用等效对比法进行缺陷判别，但在精确量化评估方面仍缺乏可靠手段。因此开发高精度的缺陷可视化技术成为推动该领域发展的关键突破口之一。

3) 涡流检测技术在缺陷定性识别方面已较为成熟，但在定量评估能力上仍存在明显局限。随着相关研究的深入开展，该技术在缺陷尺寸、深度等参数的精确测量方面必将取得突破性进展，实现从定性检测到定量分析的重要跨越。

涡流检测在金属材料上的检测已趋于成熟，相比较金属，CFRP 的结构更加复杂，电导率低且有电各向异性，所以涡流检测在碳纤维上的应用比金属材料更加复杂。

## 1.2 涡流无损检测常用方法

碳纤维复合材料中的树脂基体基本不导电，而材料中的碳纤维具有导电性，由于纤维铺层的分布不同以及树脂基体含量的不同，复合材料的电导率也会有所不同。由于碳纤维复合材料的导电性较弱，采用涡流法进行检测时会面临信号响应微弱、信噪比不理想等技术挑战。

国内外科研人员正致力于开发创新性检测方法用于复合材料质量评估。值得注意的是，在碳纤维复合材料成型工艺中，电磁涡流检测是目前唯一可实现实时

缺陷检测的技术手段，这一显著优势使其在众多检测方法中脱颖而出。传统无损检测方法如超声、射线及热成像等技术对被测材料的形态特征具有特定要求。在预浸料固化前的加工阶段，由于碳纤维呈随机分布状态，导致上述检测手段对成型缺陷的识别能力有限。待材料完成固化工艺后，这些检测技术的灵敏度和可靠性才会显著提升。电磁涡流检测技术不需要接触被测物体，也不需要使用耦合剂，检测结果不受材料表面形态的影响，这些独特优势使得电磁涡流法成为检测 CFRP 的可靠方法之一。

无损检测（NDT, Non Destructive Testing）技术包含多种检测手段，基本原理是通过声波、电磁波、红外辐射等物理场与材料的相互作用，实现对构件内部缺陷、机械损伤及物化特性的表征与评估，对被测材料的导电性没有特殊要求，既适用于导体也适用于绝缘体<sup>[10]</sup>。目前，检测碳纤维复合材料的无损检测有超声检测、射线检测、红外热波成像检测、激光超声检测和电磁涡流检测等。这些方法不仅有助于及时发现材料损伤，还能帮助维修人员采取适当的维护和修复，确保材料在使用期间的可靠性和安全性。

### （1）超声检测

超声波在材料传播过程中会与材料的内部损伤或者界面发生反射或者折射，接收到的信号特征会发生改变，通过分析这些信号能够揭示损伤的深度、位置和大小，图 1-3 所示。超声检测技术的应用存在一定局限性，其对材料表面光洁度有严格要求，且检测过程中必须使用耦合介质确保声波有效传导。这些特性使得该方法难以满足航空复合材料大型构件的现场检测需求。

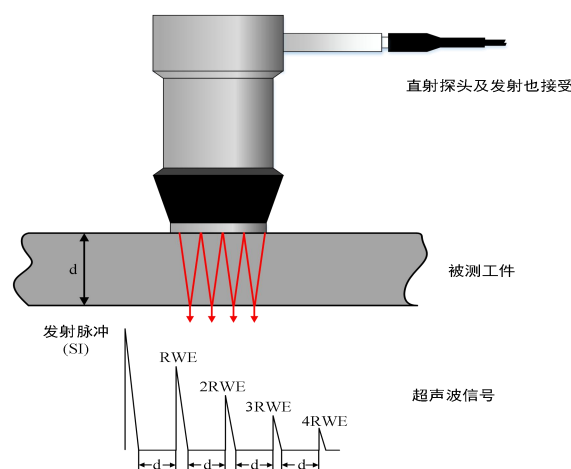


图 1-3 超声检测原理图

## （2）射线检测

伦琴最早发现 X 射线，它是一种电磁波，类似自然光，但是其波长非常短，达到  $0.001\sim 100\text{nm}$ <sup>[11]</sup>。射线检测技术的工作原理是：由辐射源产生的 X 射线以直线传播方式穿透待测样品，通过分析透射射线的强度分布变化，可获取材料内部缺陷的准确特征数据。如图 1-4 所示，射线穿透被检测物体后，其强度通过图像探测器接收，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<sup>[12]</sup>。由于 X 射线对人体有害，所以检测人员必须穿辐射防护服才能进行作业，此外，X 射线检测效率低且成本高。

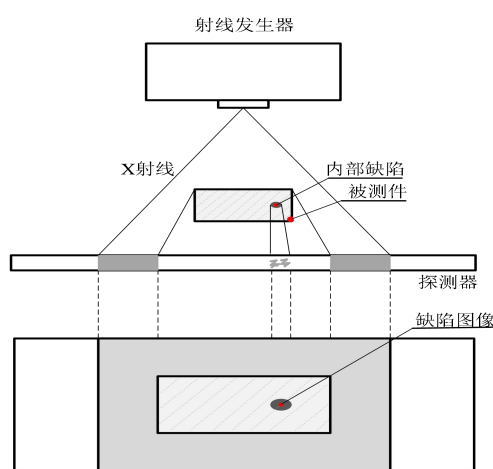


图 1-4 射线检测原理图

## （3）红外热波成像检测

如图 1-5，红外热波成像通过信号发生器和锁相模块发出正弦信号，控制热源激励装置在被测试件内部产生正弦热波，然后被红外热像仪接收，此技术可采用多种热源激励方式，包括大功率闪光灯、激光或者电磁波辐射<sup>[10]</sup>。红外热波成像适用于检测碳纤维复合材料的分层、蜂窝结构进水和冲击破坏。需要注意的是，红外热波成像检测受深度的限制，被检查对象的深度越大检测效果就越差，而且易受到外界环境的影响。

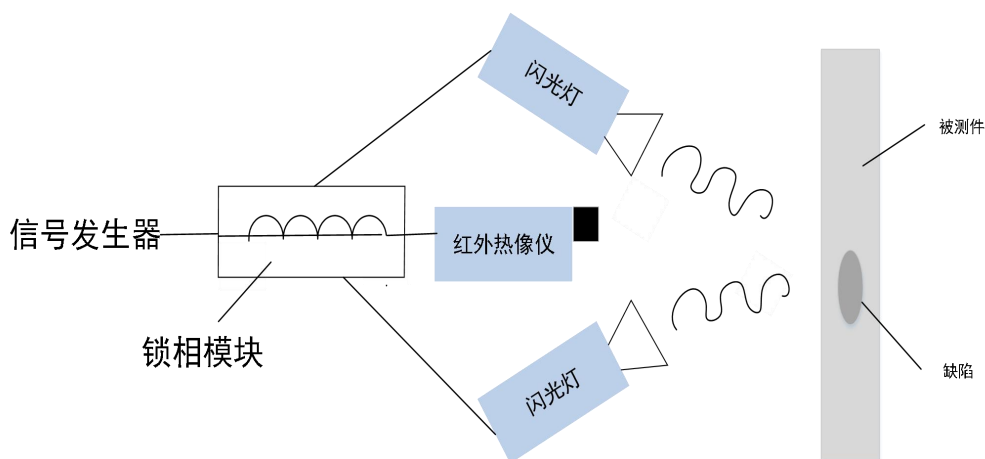


图 1-5 红外热波成像检测

#### (4) 激光超声检测

如图 1-6 所示，基于声学互易原理，采用激光扫描技术对被测件表面进行检测时，通过记录传感器位置接收的声学响应，在物理本质上等同于在固定位置施加激励源的同时获取全域波场信息<sup>[13]</sup>。激光超声能偶实现碳纤维复合材料的非接触式检测，现场原位检测出裂纹、可有效识别材料中的裂纹缺陷、异质夹杂以及冲击损伤等多种缺陷类型。

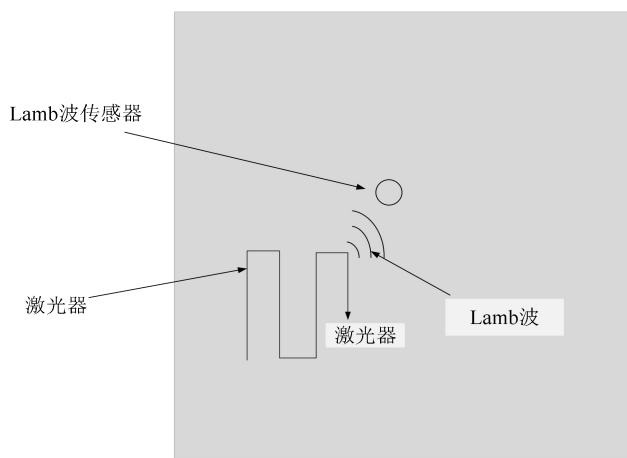


图 1-6 激光超声检测

#### (5) 电磁涡流检测

涡流检测是基于电磁感应的原理实现的，可以用于发现导电材料中的损伤<sup>[14]</sup>。电涡流检测的基本原理是通过涡流探头内的线圈产生初始磁场，并在被检测物体中感应出电涡流，这些电涡流产生次级磁场，影响激励磁场并改变涡流传感器的阻抗值，图 1-7 所示。通过提取和分析接收线圈在被检测物不同位置的阻抗值变化信息，可以确定内部损伤的类型和尺寸<sup>[15]</sup>。电磁涡流检测适用于碳纤维复合材料的各种缺陷，如分层，裂纹，纤维断裂等损伤，还可以利用信号处理技术对获

取的信号波形进行后续处理，以实现缺陷和损伤的准确定位。

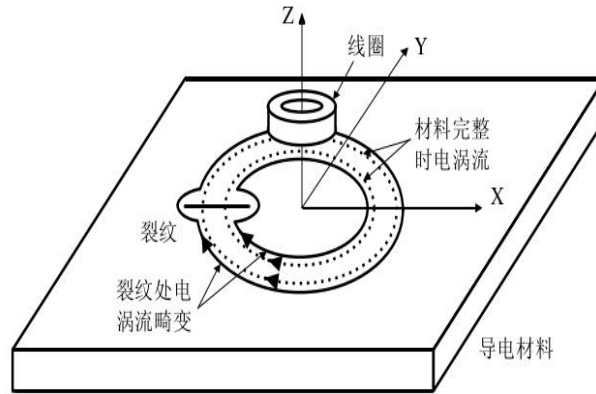


图 1-7 电磁涡流检测

每一种检测方法各有其优缺点，在表 1-3 中列出：

表 1-3 CFRP 无损检测方法的比较

| 检测方法     | 适用损伤种类                         | 优点                                        | 缺点                                                |
|----------|--------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 超声检测     | 平面型缺陷，如分层、冲击破坏、蜂窝夹层脱胶          | 检测结果直观，获得结果方便，缺陷定位准确                      | 需要耦合剂，要求表面平整，复合材料内部质量要求高                          |
| 射线检测     | 体积性缺陷，如空隙、冲击破坏、纤维分布不均          | 不受材料几何形状限制，结果直观                           | 难以发现与射线垂直方向的损伤，设备庞大，无法深度定位                        |
| 红外热波成像检测 | 检测碳纤维复合材料中的分层、夹层、蜂窝结构进水和冲击破坏   | 速度快，检测面积大，无接触，图像显示直观                      | 检测灵敏度随缺陷深度的增加而迅速下降，易受环境温度和空气流动的影响                 |
| 激光超声检测   | 用于发现碳纤维复合材料中的裂纹、夹杂和重加破坏        | 非接触，不受复合材料的结构外形的影响，可以实现对飞机的现场原位检测，图像显示直观  | 不能发现小损伤，无法确定损伤的形状、厚度和破坏范围，定位算法复杂                  |
| 电磁涡流检测   | 纤维方向和铺层顺序，纤维断裂、冲击破坏及铝蜂窝夹层的扭曲变形 | 能对碳纤维复合成型过程中的缺陷，检测速度快，自动化程度高，结果直观，可实现定量评价 | 只能用于导电材料，无法检测如基体断裂，纤维树脂界面脱粘，检测过程中需要保持探头和被测件表面距离恒定 |

随着现代工业技术的持续发展,产品质量控制标准日益严格。在这一背景下,传统涡流检测方法自身出现一些局限性,难以完全满足当前工业检测的严苛要求。如提离效应容易影响检测结果、检测效率低、有效检测深度有限等问题,提出了一些新的涡流检测技术<sup>[16-21]</sup>。当前,电磁无损检测技术的发展主要在以下几个方向:多频涡流检测技术、交变磁场测量技术、脉冲涡流检测技术、远场涡流检测技术、涡流阵列检测、磁光/涡流成像检测技术等。这些创新性的电磁无损检测技术凭借各自的优势,已在多个工业领域实现规模化的应用,有效的解决了传统涡流检测存在的技术瓶颈。

#### (1) 多频涡流检测技术

多频涡流检测技术最先是美国提出的,作为一种新型涡流无损检测技术,采用多个频率分量作为激励,能够有效的抑制多种干扰因素,一次性提取多个所需信号,例如缺陷信息、壁厚情况。实际应用中,为了达到“去伪存真”效果,可以针对目标特征参数参数(如材料缺陷、涂层厚度)与待消除的干扰信号(如基板效应、蒙皮和提离效应等影响),选择多频激励电流来驱动检测线圈,检测系统随后对特征参数调制的响应信号实施多通道同步放大与独立解调处理,最终将各解调分量按预设算法进行综合分析处理<sup>[22]</sup>。我国无损检测行业在改革开放后取得了显著发展,多家企业成功开发出先进的多频涡流检测设备。厦门爱德森推出的 EEC 系列产品与电大工业检测所研制的 ET 系列仪器,均已成为市场上技术成熟的代表性检测装备<sup>[23]</sup>。

#### (2) 交变磁场测量技术

近年来,交变磁场测量技术作为一种新型无损检测手段,在表面裂纹精确评估领域崭露头角。该技术由交流电势降(ACPD)方法演进而来,其核心优势在于可实现裂纹几何参数的准确测定。通过融合 ACPD 法的尺寸测量能力与涡流检测的非接触特性,ACFM 技术突破了传统方法依赖标准试件的限制,基于严谨的数学理论模型,为缺陷的定量化评估提供了可靠解决方案。当检测探头通入交变电流并接近导电材料时,会在其周围产生时变磁场,进而在被测体表层形成感应涡流。对于完好无损的导体表面,这些涡流呈现均匀分布状态,形成规则的涡流场,同时在周围空间产生稳定的交变电磁场分布。当材料表面存在损伤时,局部电阻特性的改变会扰乱涡流场的均匀性,导致电磁场分布产生异常。通过监测

这种电磁场扰动信号，即可有效识别材料表面缺陷的存在及其特征。

### （3）脉冲涡流检测技术

脉冲涡流检测技术使用周期性方波作为激励源，施加在探头上的激励信号会感应出脉冲涡流。脉冲涡流检测技术采用对比法进行损伤检查，在试件完好的情况下施加激励脉冲信号，系统将获取对应的响应信号，该信号经数字化处理后形成基准波形并存储。随后对被测对象进行二次扫描，通过将实测数据与基准值进行差分运算，最终获得的差值信号可有效反映材料表面特征变化<sup>[24]</sup>。传统涡流检测技术侧重于对感应磁场的稳态分析，脉冲涡流检测方法主要对感应电压的时域响应特性进行分析，利用信号的关键参数实现对材料异常状态的定量表征，包括缺陷的几何特征、类别及结构等参数的识别。从原理上分析，脉冲涡流检测技术所采用的激励波形可分解为多个频率成分的正弦波叠加，其频带范围较宽，因此本质上可被归类为一种多频涡流检测技术。

### （4）远场涡流检测技术

远场涡流检测作为一种特殊低频涡流检测方法，具备穿透金属管壁进行内部检测的能力。该技术采用内置式探头设计（图 1-8），主要包含激励单元和信号采集单元两部分，两单元间的间距通常设置为管道内径尺寸的 2 至 3 倍范围，当激励线圈通入低频交变电流时，激发的磁场会穿透被测管道外壁向外延伸，随后在远端区域重新贯穿管壁向内传播，最终由接收探头捕获相应信号。该技术可精准识别金属管道内外表面的损伤情况，同时还能准确反映管体材料厚度的变化特征。

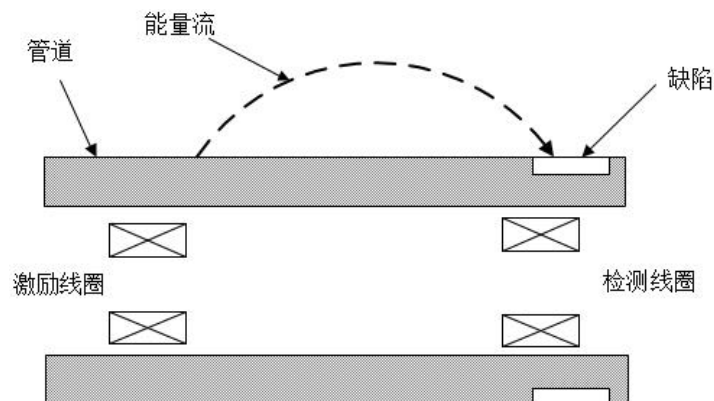


图 1-8 远场涡流检测的基本原理

### （5）涡流阵列检测技术

涡流阵列检测系统的核心优势在于采用多各独立工作的线圈设计，各线圈按

预定几何构型排布，激励单元与接收单元之间建立了正交电磁耦合机制，可有效识别各向异性分布的线性缺陷。探头内部密集排布着多个甚至数十个线圈单元，包括激励单元和感应单元。这些单元以紧凑的间距排列，通过精确的布局设计有效避免了激励磁场与感应磁场之间的串扰问题，这种独特的线圈配置方式正是实现涡流阵列检测的核心技术要素。

#### （6）磁光、涡流成像检测技术

磁光/涡流成像检测技术融合了电磁感应和磁光效应的一种新型无损检测方法<sup>[25]</sup>。磁光涡流复合检测技术通过交变（或脉冲）激励源在导电试件表面生成感应电流。这些电流产生的磁场会与磁光材料中的偏振光发生相互作用。依据电磁感应原理，若检测区域存在材料缺陷，该位置的感应电流分布及其对应的垂直磁场强度将呈现异常特征。

### 1.3 国内外研究现状

#### 1.3.1 高频涡流检测

涡流检测技术的起源可追溯至 19 世纪初，科学家加贝发现当铜接近摆动的磁铁时，磁铁会很快停止，这一现象首次证实了导体中感应电流对磁场产生的阻尼效应，成为人类历史上首个验证涡流存在的经典实验<sup>[26]</sup>。1831 年，著名的物理学家法拉第观察到导体在磁场中运动时会产生环形电流，这一重大发现揭示电磁感应原理。其定律奠定涡流检测基础为后续涡流无损检测技术的发展提供了重要的理论依据<sup>[27]</sup>。当前，全球范围内众多高等院校针对涡流检测技术进行了深入探索，但主要研究对象仍以各类金属为主，在碳纤维复合材料领域的应用相对有限。以德国学者 G Mook 教授为首的科研团队创新性地采用静态铁氧体磁芯线圈与可旋转线圈探头相结合的方式，成功实现了对碳纤维复合材料内部纤维取向的精确测定<sup>[28]</sup>。Carsten Schmidt 等人使用高频涡流检测 CFRP 材料在生产制造过程中出现的损伤<sup>[29]</sup>。德国弗朗霍菲无损检测研究所（Fraunhofer IZFP）通过多年对碳纤维复合材料的涡流探伤技术研究，取得重要突破。该机构科研人员经实验证实，随着激励频率的上升，材料缺陷的识别能力呈现显著增强趋势。基于这一发现，研究团队成功研制出专门针对碳纤维复合材料的全集成式涡流检测装置<sup>[30][31]</sup>。

刘建文团队开发了一种 GMR 传感技术的涡流检测装置,该设备在金属构件探伤方面表现出良好性能,但其工作频段相对较窄<sup>[32]</sup>。与金属材料相比,碳纤维复合材料具有显著不同的电学特性,其导电能力相对较差且呈现各向异性,这导致信号采集时更容易受到噪声影响。研究表明,采用高频涡流检测技术能够有效抑制此类干扰。基于这一原理,南京航空航天大学裘进浩教授团队成功开发了新型高频电磁检测装置,该设备能够实现对碳纤维增强聚合物(CFRP)结构的损伤识别与评估<sup>[33]</sup>。高分子复合材料的导电性能较弱,传统用于金属检测的涡流系统(工作频率通常低于 1MHz)难以有效激发足够的感应电流。当检测这类材料时,由于产生的涡流信号强度不足,系统往往无法辨识材料内部的细微缺陷。相比之下,高频涡流检测技术能够显著提升对碳纤维增强复合材料(CFRP)的检测灵敏度,使其成为识别此类材料内部损伤的有效手段<sup>[34]</sup>。

### 1.3.2 多频涡流检测

1970 年,美国学者 Libby H L 首创多频涡流法,对比单频激励方式,多频涡流检测技术可以同步获取到更丰富的有效损伤信号,同时显著降低各类干扰因素的影响。1983 年,德国 IBG 公司首创 PMFT 技术,其最高与最低频率比超 1:1000 以确保带宽,工作时依次激发各频点<sup>[35]</sup>。2000 年,Xiang P 团队运用旋转探头对核电蒸汽管道进行了多频涡流扫描检测,该研究开发了一套完整的信号处理流程,该流程涵盖数据预处理、特征提取、缺陷判定及分类识别四个核心步骤,在提升检出率的同时有效减少了误报<sup>[36]</sup>。2002 年,He D F 科研团队针对双频涡流检测中的提高干扰问题开展了深入研究,通过优化检测频率,成功的检测出了缺陷深度和铝板厚度<sup>[37]</sup>。Andrea Bernieri 团队创新性地开发了一套基于 GMR 传感技术的多频涡流检测装置,该系统通过集成先进的信号处理模块,实现了对材料表面及内部细长型裂纹的精确识别、准确定位以及特征判别<sup>[38]</sup>。A. C.Okafor 研究团队采用多频涡流检测技术对带有保护涂层的 2024-T3 铝合金铆接结构进行了深入研究。该团队通过该方法成功识别出机械加工过程中产生的腐蚀缺陷,并系统分析了此类缺陷对材料疲劳性能的影响规律<sup>[39]</sup>。

2009 年,厦门艾帝尔电子科技有限公司突破性地研制出融合多频及远场涡流探伤功能的一体化检测装置,随后在电力设施检修领域投入实用,显著提升了换热器与交换器等设备在运行状态下的检测效率<sup>[40]</sup>。高军哲<sup>[41]</sup>创新性地提出了一种

多频同步激励信号合成方法。该方法结合遗传算法优化技术优化激励波形的初始相位分布,有效降低了信号波峰因数。在信号处理方面,研究人员采用频谱分析方法,通过监测谱能量分布特征的变化实现缺陷检测,并进一步建立了基于频谱演化规律的缺陷智能分类模型。该团队还创新性地开发了基于频率调制激励与高精度谱分析的多频涡流检测方法。研究过程中,通过引入 Tukey 窗函数对检测信号进行优化处理,显著改善了频谱图像质量。同时,采用 Chirp-Z 变换算法进行信号频谱计算,使系统获得了更高的频率分辨能力<sup>[42][43]</sup>。张东利研究团队针对夹层结构焊接区域的裂纹定量评估问题开展了系统的理论分析与实验验证工作。该团队建立了基于多频涡流检测数据的裂纹特征反演算法,通过融合多频段检测信息,实现了焊接缺陷的精确重构与定量表征<sup>[44]</sup>。潘强华研究团队针对 H-3321 型换热器管道运行期间频发泄漏的问题,采用了差分式内插检测线圈结构,结合多频涡流检测技术实现了设备的在线监测。该检测方案有效消除了支撑结构等背景干扰,成功识别出管道壁厚减薄的缺陷特征,为设备维护提供了重要依据<sup>[45]</sup>。沈丁杰研究团队研发了马鞍形阵列涡流传感器及配套校准试块,对 ET-556H 型多频涡流检测设备进行了功能优化。实验结果表明,优化后的检测系统可准确识别受热面管外径 0.4mm 周向裂纹及 0.5mm 轴向裂纹等典型缺陷<sup>[46]</sup>。胡兆祥研究团队应用远程多频涡流监测系统,成功实现了田湾核电站卧式蒸汽发生器传热管的在线状态监测与智能诊断。该技术方案通过远程数据采集与智能分析模块的协同工作,可实时获取传热管的完整工况信息,为核电站关键设备的预防性维护和剩余寿命预测提供了可靠的技术支持<sup>[47]</sup>。

### 1.3.3 远场涡流检测

远场涡流检测技术是在传统电磁检测方法基础上创新发展而来的一种新型无损检测手段。1951 年, Mclean.W.R 在一份题为 "Ferromagnetic Pipe Thickness Measurement Device Using Magnetic Principles" 的专利文献中首次公开了远场涡流检测方法。这一方法早期未引起足够重视,直至 1961 年 T.R Schmidt 研究团队开发出全球首套远场涡流探伤装置,能够对工作中的管道实施外部损伤检查,并成功应用于内径 178~203mm、壁厚 9.5~12.7mm 的石油套管探伤,此举使远场涡流检测完成了从实验室研究到工程实践的跨越<sup>[48]</sup>。1984 年, T.R Schmidt 发现了磁场强度变化、相位差与检测探头方位的重要对应关系并系统阐述了远场涡流现

象的作用机理，并在发表的科研论文中开创性地提出能量传输的双路径理论：能量耦合通道分直接耦合通道和间接耦合通道两种模式<sup>[49]</sup>。2004 年，Vasic 研究团队在脉冲远场涡流检测技术领域取得重要突破。该团队首次揭示了检测信号过零点时间参数与管道壁厚之间存在显著线性相关性。基于这一发现，研究人员成功开发出新型管道壁厚测量方法，为工业管道的无损检测提供了创新解决方案<sup>[50]</sup>。2006 年，徐小杰研究团队研制了一种采用正交磁场激励机制的远场涡流传感器。通过数值仿真方法系统优化了工作频率、激励强度及电磁屏蔽等核心参数。实验验证表明优化后的检测装置对铁磁性管道中轴向、周向及点状等各类缺陷均表现出稳定的检测灵敏度，实现了对不同取向缺陷的均衡响应特性<sup>[51]</sup>。2011 年，Kobayashi 研究团队针对新型小型快堆螺旋双壁管结构，创新性地开发了一种特殊构型的远场涡流检测探头。检测系统配置了多个管内布置的接收单元，各接收线圈的轴向均与管壁法向垂直。实验结果表明，该检测方案可有效识别管壁表面直径 1mm、深度为壁厚 20% 的微小孔状缺陷<sup>[52]</sup>。2019 年，钱慧芳团队提出了一种改进型双激励脉冲远场涡流检测方法，该技术方案通过在管道两端施加不同频率的脉冲激励信号，并精确采集中间位置接收线圈的峰值响应信号，解决了小口径铁磁管道的缺陷识别问题。研究结果表明，基于接收线圈感应电动势峰值特征的分类算法，能够有效区分管道表面不同长度的缺陷特征<sup>[53]</sup>。

## 1.4 本文研究内容及章节安排

针对选题背景及目前存在的问题，目前涡流检测技术的国内外研究现状，还未有人研究线圈的不同参数对实验检测结果的影响以及未将多频涡流检测应用到检测碳纤维复合材料的隐藏缺陷和夹层结构中去，故而本研究通过设计一套多频涡流无损检测系统，可以自由的调节频率和增益，用于检测导电性能较弱的碳纤维复合材料，通过提高系统的检测频率（最高可达 3Mhz）从而提高检测灵敏度。论文的主要内容为建立线圈不同参数的仿真模型并对仿真结果进行分析，然后搭建实验平台进行实验验证，证明设计的 T-R 探头以及集成的嵌入式系统能够检测出 CFRP 表面及深层缺陷。

全文各章节研究内容如下：

第一章：绪论。首先介绍了论文的研究背景，说明检测碳纤维复合材料的必要性。接着介绍了涡流检测的常用方法，对比后总结了涡流检测技术的优势，进

而介绍了高频、多频和远场涡流检测的国内外发展现状。

第二章：阐述了涡流无损检测方法的理论基础，麦克斯韦方程组，阻抗分析法以及涡流的趋肤效应，为第三章的仿真提供理论依据，最后阐述了涡流信号的处理方法。

第三章：进行了线圈间距优化仿真，得出拉开线圈的间距有利于检测 CFRP 缺陷、然后接下来不同频率和不同线圈方向的有限元仿真，得出低频比高频更容易检测深层缺陷，线圈的方向也会影响到检测的效果，为第五章的实验提供了思路。

第四章：搭建了一套基于调频的多频涡流检测嵌入式检测系统，包括 PC 上位机，已封装的嵌入式硬件系统、三坐标轴位移平台，进而阐述每一部分的功能和用途。

第五章：根据第三章的仿真内容，采用 500kHz 和 2MHz 的工作频率去激励线圈，线圈左右摆放的形式，利用第四章集成后的涡流检测嵌入式系统采集 CFRP 的损伤信息，实验结果证明了涡流检测嵌入式系统能够检测到 CFRP 的裂纹损伤和夹层损伤。

第六章：总结了本文的研究内容和成果，针对论文工作的不足进行了展望。

## 第 2 章 涡流检测理论基础

本章节阐述了涡流检测的基本原理和理论基础,包括麦克斯韦电磁感应定律,电涡流传感器工作原理,通过感应电流和磁场的相互作用,实现对导体内部缺陷的检测。电路模型和等效电路分析为解释涡流检测系统的运作机制提供了清晰的框架,介绍探头的种类,阐述了涡流趋肤效应以及涡流信号的处理方法。

### 2.1 涡流检测的基本原理

涡流检测是基于电磁感应原理的无损检测方法<sup>[54]</sup>,图 2-1 是基于 T-R 型线圈探头的涡流检测原理示意图。当交流电通过线圈时导体材料中会产生电涡流,涡流会形成一个电磁场,反过来作用于原来的磁场。当导体中有损伤时,电涡流会在缺陷处产生畸变,形成的磁场也会随电涡流的变化而变化,最后表现在接收线圈电压和阻抗变化上。

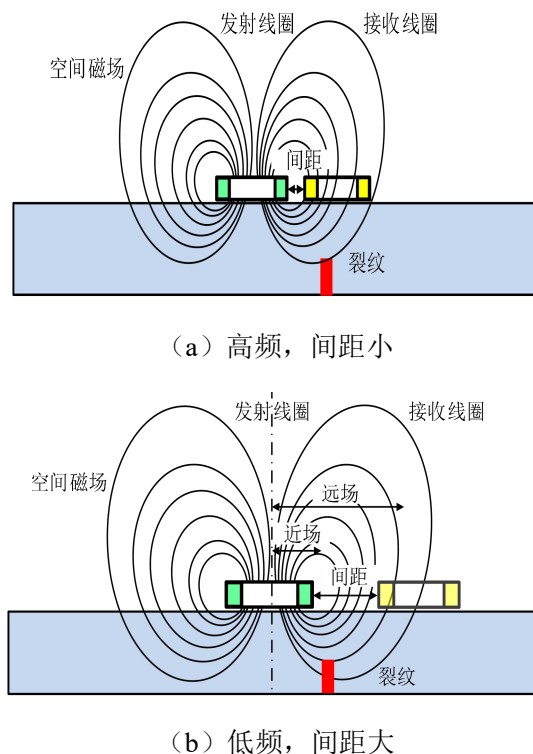


图 2-1 涡流检测原理示意图

从图 2-1(b)可以看出,增加两线圈的中心距可以提高 T-R 探头对导体深处损伤的检测灵敏度,从而提升对深层缺陷的探测能力<sup>[55]</sup>。增加发射与接收线圈之间

的距离，会造成接收线圈附近的磁通量衰减变大，线圈信号幅值减小。激励线圈产生的磁场会穿透被测材料，在深入导体内部后又返回到空气，最终由接收线圈接收并产生信号。

麦克斯韦电磁理论，也被称为麦克斯韦方程组，是电磁学的核心理论，奠定了电磁学的基础，统一了电场和磁场的理论框架，描述了电磁现象的本质，以及电磁波的传播<sup>[56]</sup>。在碳纤维复合材料的电磁数值分析中，检测线圈中通入激励电流密度  $J_s$ 。数值求解域中线圈区域记为  $\Omega_s$ ，导体区域记为  $\Omega_i$ ，空气域用  $\Omega_r$  表示。导体与空气区的边界记为  $\Gamma_r$ ， $n$  表示  $\Gamma_r$  上的边界法向量。各个求解域中的电磁场方程可以写成如下的微分方程式：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ (在 } \Omega_s, \Omega_i \text{ 和 } \Omega_r \text{ 中)} \quad (2-1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ (在 } \Omega_i \text{ 中)} \quad (2-2)$$

$$\nabla \times H = J_s \text{ (在 } \Omega_s \text{ 中)} \quad (2-3)$$

$$\nabla \times H = 0 \text{ (在 } \Omega_r \text{ 中)} \quad (2-4)$$

$$\nabla \times J = 0 \text{ (在 } \Omega_i \text{ 中)} \quad (2-5)$$

$$n \cdot J = 0 \text{ (在 } \Gamma_r \text{ 中)} \quad (2-6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (在 } \Omega_s, \Omega_i \text{ 和 } \Omega_r \text{ 中)} \quad (2-7)$$

电磁场量的本构关系可表示为：

$$D = \varepsilon E \quad (2-8)$$

$$B = \mu H \quad (2-9)$$

$$J = \sigma E \quad (2-10)$$

碳纤维增强复合材料(CFRP)的单层结构由单向纤维组成，其导电特性在不同方向上表现出显著差异。当交变电磁场沿材料厚度方向作用时，会在复合材料平面内形成环状电流分布，将公式(2-8)代入到(2-2)中可以得到，

$$\nabla \times H = J + j\omega\varepsilon E \quad (2-11)$$

在无损检测中，激励电流的频率一般小于  $10^6 \text{HZ}$ ，CFRP 的电导率约为  $10^4 \text{S/m}$ ，

空气环境的介电系数是 $10^{-9}/(36\pi)\text{F/m}$ ，可得：

$$J = \sigma E \gg j\omega\epsilon E \quad (2-12)$$

不考虑位移电流，公式（2-2）可变换成：

$$J = \nabla \times H \quad (2-13)$$

假设铺层中纤维沿  $x$  轴向排列，沿着  $y$  轴方向是垂直纤维方向， $z$  轴为厚度方向。因为涡流在 CFRP 平面内流通，所以对  $z$  方向上的涡流不进行考虑。电流密度在平面内的分量可进一步写成：

$$J_x(x, y) = \frac{\partial H_z}{\partial y}, J_y(x, y) = \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2-14)$$

阻抗分析法在电磁涡流检测中应用最广泛<sup>[57]</sup>。用阻抗分析法（如图 2-2）来求解电磁涡流检测具体的电路原理，电涡流检测系统的电磁耦合过程可类比于变压器工作原理。在该模型中，检测探头相当于初级绕组，由激励电源驱动的电感电阻串联网络构成；被测导体的响应特性则类似于次级绕组，形成另一个互相耦合的电感电阻串联回路。

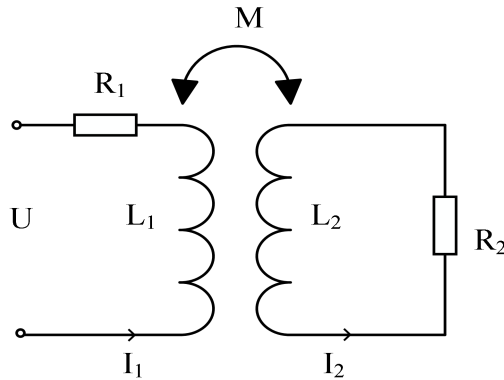


图 2-2 涡流检测耦合线圈电路模型

图 2-2 中， $R_1$  和  $L_1$  为激励线圈的等效电阻和等效电感， $I_1$  为激励线圈中产生的感应电流； $R_2$  和  $L_2$  为导体中的等效电阻和等效电感， $I_2$  为被测导体中产生的感应电流。将涡流探头和待测材料之间的互感表示为  $M$ ， $k$  为耦合系数，取值范围在 0~1 之间。 $M$  与  $k$  的关系式表达为：

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2-15)$$

根据基尔霍夫电压定律，两个电流回路的电压方程可表示如下：

$$(R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M I_2 = U \quad (2-16)$$

$$(R_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega M I_1 = 0 \quad (2-17)$$

式中 $\omega$ 为激励信号的角速度， $U$ 为激励电源的电压有效值，联立上式（2-16）和（2-17）可以得到一次、二次侧的电流表达式为：

$$I_1 = \frac{U}{\left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]} \quad (2-18)$$

$$I_2 = j\omega \frac{M I_1}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{\omega^2 M L_2 + j\omega M R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} I_1 \quad (2-19)$$

从而求出探头端的等效阻抗为：

$$Z = \frac{U}{I_1} = \left[ R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right] + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right] \quad (2-20)$$

则等效电阻和电感可以表示为：

$$R_{eq} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2-21)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2-22)$$

将上式处理可得：

$$R_{eq} = R_1 + \frac{M^2 R_2}{\frac{R_2^2}{(2\pi f)^2} + L_2^2} \quad (2-23)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{M^2 L_2}{\frac{R_2^2}{(2\pi f)^3} + \frac{L_2^2}{2\pi f}} \quad (2-24)$$

通过分析上述公式可知，当检测探头放在被测试件表面时，其等效电路参数（包括阻抗和感抗）不仅取决于探头自身的电学特性，同时受到导体材料电磁参数、工作频率以及两者间电磁耦合程度的综合影响。涡流检测系统的电磁耦合效率受多重因素影响，其中耦合系数 $k$ 的数值变化与多个关键参数密切相关。这些参数主要涉及被测材料的电磁特性（如磁导率和导电率）、物理状态（包括表面

粗糙度和温度)、工作条件(激励频率)以及空间参数(探头与被测体间距)等<sup>[58]</sup>。当导体材料出现缺陷时,检测探头的阻抗特性会随电磁耦合程度改变而发生相应改变。这种阻抗变化通过线圈的感应电压反映出来,分析输出电压的幅值、相位等特征量即可实现对缺陷位置和尺寸的定量评估。由公式(2-15)可知,对于导电性能差的复合材料,由于电磁耦合系数 $k$ 较低,互感 $M$ 相应减小,探头接近检测材料时,其等效电阻和电感变化并不明显,此时增大激励频率 $f$ 可以有效增强阻抗变化效应,使得电压的变化更容易被识别出来。

检测线圈即涡流传感器,是一种换能器,因为施加激励给检测线圈从而产生交变磁场,检测线圈把电信号变成磁信号。涡流检测系统的检测核心在于探头,探头内部一般采用多个线圈协同结构,可以提取复杂电路和高信噪比信号<sup>[14]</sup>。根据涡流检测线圈的形状及被检对象,可将其分为穿过式线圈、内插式线圈、探头式线圈。涡流探头分为同轴互感型探头和发射-接收(T-R)型探头。根据不同的感应类型,检测探头可分为自感型和互感型两种结构形式。图 2-3 展示了自感型线圈探头的构造原理,该类型采用单一线圈同时完成激励信号发射和感应信号接收的双重功能。

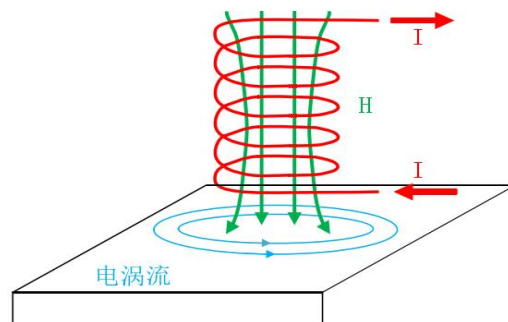
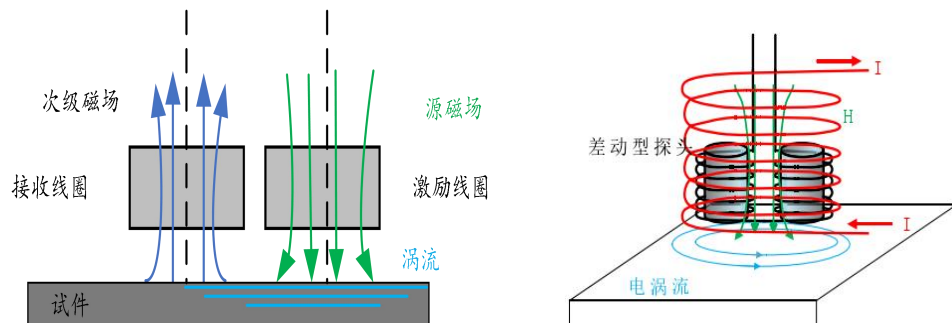


图 2-3 自感型探头

图 2-4 展示的是互感型线圈探头的构造原理,互感式探头采用双线圈结构设计,分别实现磁场激励与信号检测功能。其中激励线圈负责在导体中感生涡电流,检测线圈则主要接收涡流效应引起的磁场变化的信号。



(a)发射-接收型探

(b)差动接收型探头

图 2-4 互感型探头

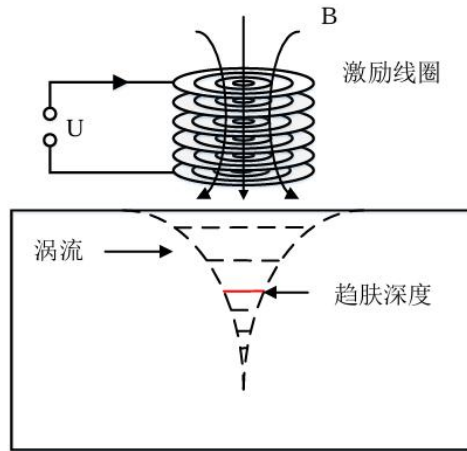
## 2.2 涡流检测趋肤效应

涡流检测中一个重要的性质是涡流趋肤效应。趋肤效应是指涡流检测时，由于电磁感应作用会引起试件厚度方向上的电流分布不均匀。电流密度从上到下呈指数衰减，因此涡流密度幅值衰减到其表面涡流密度值  $1/e$  的深度称为趋肤深度<sup>[59]</sup>。电涡流的趋肤深度是检测深层裂纹和提高分辨率的重要基础。各向同性良导体材料的趋肤深度 $\delta$ 可表示为：

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)} \quad (2-25)$$

式中， $f$  表示激励频率， $\mu$ 和 $\sigma$ 分别被测试件的磁导率和电导率。

在涡流检测过程中，将激励线圈接入交变电流，检测线圈在靠近导体时内部会产生电涡流，在靠近导体表面过程中，离导体表面越近电流密度模越来越小。如图 2-5 所示，涡流检测的趋肤效应示意图。



2-5 涡流检测的趋肤效应

在  $x>0$  的半无限区域中，存在平行于  $y$  轴方向的层状激励电流分布，该电流会在空间内激发垂直于  $xy$  平面的磁场分量，形成平面电磁波结构。如图 2-6 所示的趋肤效应分析模型，这种电磁场分布使得导体表面及内部仅需考虑  $H_z$  方向的磁场分量，从而简化了电磁渗透方程的求解过程。

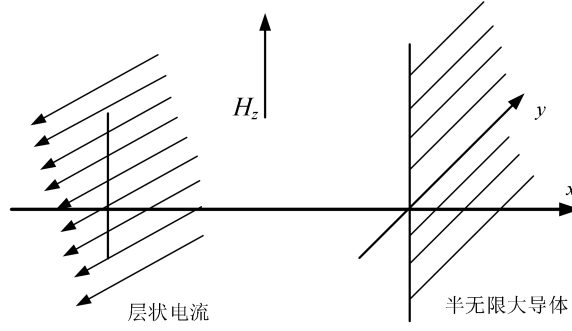


图 2-6 涡流趋肤深度求解模型

$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} = j\omega\mu\sigma H_z \quad (2-26)$$

或

$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} = K^2 H_z \quad (2-27)$$

式中,

$$K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma} \quad (2-28)$$

于是二阶常微分方程的通解为

$$H_z = c_1 e^{-Kx} + c_2 e^{+Kx} \quad (2-29)$$

$c_2$  为零, 于是有

$$H_z = c_1 e^{-Kx} \quad (2-30)$$

若  $H_{0z}$  是  $x=0$  处的边界条件, 得到:

$$c_1 = H_{0z} \quad (2-31)$$

因此, 磁场为

$$H_z = H_{0z} e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma} x} \quad (2-32)$$

设电磁场在导体中的传播系数可用复数  $K = \alpha + j\beta$  表征, 该系数将磁场分解为实部和虚部两个分量,  $\alpha = \beta = \sqrt{\omega\mu\sigma} / 2$ , 其中, 实部  $\alpha$  表征场强的衰减程度, 反映电流密度随深度呈指数递减的规律; 虚部  $\beta$  表示相位变化, 对应电磁波的相位延迟特性。

磁场的  $z$  向分量和坐标  $x$  变化关系如下:

$$\frac{dH_z}{dx} = -J_y \quad (2-33)$$

将公式(2-31)代入公式(2-32)，得到

$$J_y = -\frac{dH_z}{dx} = -\frac{d}{dx}(H_{0z}e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}x}) = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}H_{0z}e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}x} \quad (2-34)$$

设  $J_{0y}$  是  $x=0$  处电流密度，则有

$$J_{0y} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}H_{0z} \quad (2-35)$$

可以得到，

$$J_y = J_{0y}e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma}x} \quad (2-36)$$

式(2-35)表明沿  $y$  轴方向的的电流密度也是一个复数，包含实部和虚部两个分量。

在公式(2-31)和(2-35)中令  $x = \delta$ ，而且使  $\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \cdot \delta = 1$ ，得到标准趋肤深度  $\delta$ ，

随着感应电流向材料内部渗透，其电磁场强度逐渐减弱，同时出现相位延迟。 $\delta$  值被定义为电磁场衰减至表面值  $1/e$  时的特征穿透深度。

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-37)$$

这时有

$$H_z = H_{0z}e^{-(1+j)x/\delta} \quad (2-38)$$

$$J_y = J_{0y}e^{-(1+j)x/\delta} \quad (2-39)$$

## 2.3 涡流信号处理方法

在实施涡流探伤时，微弱的感应电流响应会受到测量设备自身电磁辐射、被测物几何形态与表层状态以及周边环境因素的多重影响，所获数据通常包含高频杂波与低频干扰，有时甚至完全被背景噪声掩盖，导致有效信息提取与识别面临困难<sup>[60]</sup>。本文所提取的信号处理采用空间域与复数域分析方法以及多频信号处理方法。2003 年，林俊明研究团队采用小波变换技术处理涡流响应数据，有效消除干扰成分并成功识别出微小的异常特征信号<sup>[61]</sup>。2005 年，Tian G Y 及其合作

者创新性地结合小波变换与主成分分析方法处理瞬态涡流响应数据,显著提升了缺陷类型判别和定量测量的精确度<sup>[62]</sup>。

### 2.3.1 空间域与复数域信号处理

涡流检测信号处理有两种方式,一种是空间域中的小波去噪处理,一种是复数域中的相位旋转处理。

空间域降噪技术作为经典的信号处理方法,其核心在于多尺度分解机制。如图 2-7 所示,通过小波变换将原始图像分解为多个频带分量,各频带分别承载不同特征:低频分量主要保留图像的主体结构和近似特征,这些成分通常反映目标的主要信息;高频分量则集中体现细节特征,包括纹理细节、边缘特征以及干扰噪声等无用信息。这种频域分离特性为选择性滤波提供了理论基础,基于上述频域分离特性,可采用选择性滤波策略:在各分解尺度上,首先滤去由噪声干扰产生的小波系数分量,同时保留并增强有效信号对应的小波系数。通过这种频域筛选处理后实施小波重构运算,最终获得经过噪声抑制的目标图像。

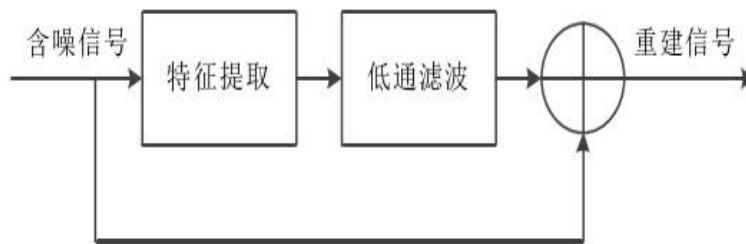


图 2-7 小波去噪处理流程

当前,基于小波变换的图像降噪技术中,小波阈值降噪法因其显著优势而获得普遍采用,该方法能够实现原始信号的最优近似估计、同时具备运算效率高、适用性强等特点。小波阈值降噪方法的实质是:正交小波分析技术能够有效降低数据间的相关性,特别是采用正交基函数时,可实现信号分量与噪声分量的高效区分。小波分解后的损伤信息通常集中在幅值较大的小波系数中,数目相对来说比较少,而噪声干扰则表现为大量幅值较小的系数分布在整个变换域空间。小波阈值降噪法的流程图如图 2-8 所示。

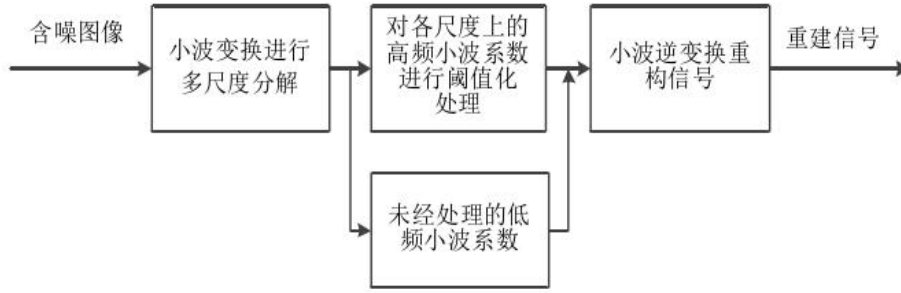


图 2-8 小波阈值降噪流程图

涡流信号是复数，包含了幅值和相位，从图 2-9 可知，利用信号幅值和相位的成像结果会导致关键信息表征的缺失，由于相位滞后效应，因此可以通过对涡流信号进行相位旋转处理，使特征信号仅有实部和虚部，这样成像效果会更加的理想。图中每一个像素点值如下式所示：

$$V = \begin{bmatrix} V_x & V_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

其中， $V_x$ 和 $V_y$ 是探头实部和虚部的电压，即电压信号在  $x$  和  $y$  轴上的投影，

$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$  为电压信号在复平面的旋转矩阵， $\theta$ 为旋转的角度。

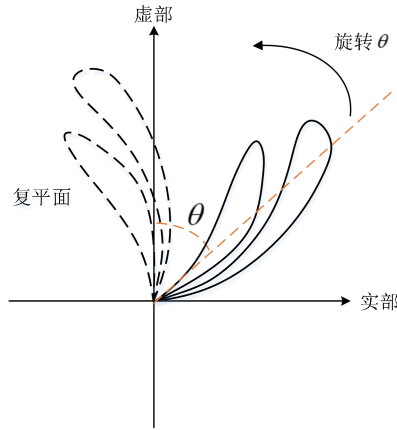


图 2-9 复数信号旋转处理

### 2.3.2 多频信号处理方法

在多频涡流检测技术中，通过分析检测波形中各频段特征参数（包括幅值、相位或实部与虚部数据），经综合计算处理后，可准确获取被测工件的状态信息。多频信号处理方法中最常用的是线性代数法和相位旋转相减法。

1) 矩阵运算理论认为多频涡流响应特征量是检测目标多个影响因素的线性组合，该结论已在弱信号工况下通过试验证实。

设定双频激励下的涡流响应处理模型，每个激励频率包含两个正交分量  $x$  与  $y$ ，分别对应探头阻抗的实部与虚部，其与待测特征量的线性关联可表述为以下形式：

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11}p_1 + a_{12}p_2 + a_{13}p_3 + a_{14}p_4 \\ y_1 &= a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + a_{23}p_3 + a_{24}p_4 \\ x_2 &= a_{31}p_1 + a_{32}p_2 + a_{33}p_3 + a_{34}p_4 \\ y_2 &= a_{41}p_1 + a_{42}p_2 + a_{43}p_3 + a_{44}p_4 \end{aligned} \quad (2-41)$$

式中， $x_1$ 、 $x_2$  分别是频率 1、频率 2 阻抗的电阻分量， $y_1$ 、 $y_2$  分别是频率 1、频率 2 阻抗的感抗分量， $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  是被检对象的作用参数， $a_{ij}$  是耦合系数。

公式表示成矩阵的形式：

$$AP = C \quad (2-42)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

式中， $A$  为待求变量， $C$  代表可实测获取的涡流特征参数。检测流程为：首先确定影响因素  $P$ ，采集涡流特征数据  $C$ ，进而求解未知量  $A$ ，经过多次标定验证。当  $A$  值确定后，即可依据给定公式对实际检测对象及相关参数  $P$  实施独立分析。

$$P = A^{-1}C \quad (2-44)$$

在多参数分析时，实际需求是分离变量，而非求解完整方程组。为此，可采用  $A$  的伴随矩阵  $\text{adj}[A]$  替代逆矩阵  $A^{-1}$ ，表达式为：

$$P = \text{adj}[A]C \quad (2-45)$$

所以，被检对象的作用参数通过上式得到：

$$\begin{aligned} P_1 &= b_{11}x_1 + b_{12}y_1 + b_{13}x_2 + b_{14}y_2 \\ P_2 &= b_{21}x_1 + b_{22}y_1 + b_{23}x_2 + b_{24}y_2 \\ P_3 &= b_{31}x_1 + b_{32}y_1 + b_{33}x_2 + b_{34}y_2 \\ P_4 &= b_{41}x_1 + b_{42}y_1 + b_{43}x_2 + b_{44}y_2 \end{aligned} \quad (2-46)$$

式中,  $b_{ij}$  为解耦系数。

2) 相位旋转相减法主要用于消除干扰信号, 在确定主检测频率后, 需选择一个经过优化的辅助频率, 该频点对干扰信号的响应灵敏度应高于主检测频段。

为有效消除干扰影响, 需对辅助频点的阻抗特性实施平移、旋转变换及比例调整, 令其干扰响应特性与主测量频段的干扰特征相匹配, 随后通过两频段阻抗特性相减实现干扰抑制。

该算法的核心处理步骤包含四个阶段: 设辅助频点测量数据的正交分量为  $x_a$  和  $y_a$ , 先利用缩放系数  $S_x$  和  $S_y$  调整幅值, 使各频段干扰的幅值一致; 再按顺时针方向旋转特定角度, 使两频点干扰分量相位对齐; 施加  $T_x$  和  $T_y$  的平移量, 实现频点空间位置重合; 最终将主频点数据与处理后的辅助频点数据相减, 获得消除干扰后的结果信号。

$$x_r = x_p - [(S_x x_a \cos \theta + S_y y_a \sin \theta - T_x)] \quad (2-47)$$

$$y_r = y_p - [(-S_x x_a \sin \theta + S_y y_a \cos \theta - T_y)] \quad (2-48)$$

式中,  $x_p$  和  $y_p$  分别为主检测频率阻抗的电阻分量和感抗分量,  $x_a$  和  $y_a$  分别为辅助频率阻抗的电阻分量和感抗分量,  $x_r$  和  $y_r$  是经过变换后的阻抗电阻分量和感抗分量,  $S_x$ 、 $S_y$  为尺度变换系数,  $T_x$ 、 $T_y$  为位移变换系数,  $\theta$  为旋转变换系数。所有变换参数均采用最小二乘拟合方法确定。

假设多频涡流检测信号处理是以多个频率激励的, 逐个提取每个频率分量的参数不容易实现, 可采用傅立叶变换对测量信号实施频域转换, 进而完成特征抽取与频谱解析。在图像处理领域, 二维傅立叶变换常应用于特征识别、噪声消除等图像增强任务。

函数  $f(x)$  的傅里叶变换如下所示,

$$F(\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad (2-49)$$

表示为指数形式如下所示:

$$F(\omega) = |F(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (2-50)$$

其中,

$$|F(\omega)| = \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2} \quad (2-51)$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \frac{I(\omega)}{R(\omega)} \quad (2-52)$$

式中 $|F(\omega)|$ 称作  $f(x)$  的傅里叶频谱， $\varphi(\omega)$  称为相位频谱。

## 2.4 本章小结

本章节阐述了涡流检测的基本原理和理论基础，包括麦克斯韦电磁感应定律，电涡流传感器工作原理，通过感应电流和磁场的相互作用，实现对导体内部缺陷的检测，电路模型和等效电路分析为解释涡流检测系统的运作机制提供了清晰的框架，介绍涡流信号的处理方法。

### 第3章 涡流检测有限元建模仿真

在制作 T-R 探头之前，首先确定发射与接收线圈内外径和线径尺寸等参数；其次利用 COMSOL 仿真软件建立仿真模型，包括线圈间距优化仿真、探头方向仿真，以及 CFRP 夹层结构隐藏缺陷分析。

#### 3.1 线圈参数选择

线圈的结构设计是涡流探头感应灵敏度和检测性能的直接决定因素。线圈的几何形状和大小决定了感应信号的强弱和空间分辨率的大小，增大线圈的尺寸可以增加感应信号的强度，提高了检测灵敏度但同时会降低空间分辨率。在制作线圈方面，考虑加工成本的同时明确对线圈的使用要求，选择合适的加工工艺能大大提高线圈的检测精度和接收信号的能力。

根据毕奥-萨伐尔定律可得，对于环形线圈，离中心距垂直距离  $x$  处的磁感应强度可由公式(3-1)计算<sup>[63]</sup>：

$$B_z = \frac{\mu_0 \times N \times I \times r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3-1)$$

式中： $B$  为磁感强度，真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \cdot H \cdot m^{-1}$ ， $N$  为匝数， $r$  为线圈半径， $I$  为电流强度。磁感应强度  $B_z$  的衰减与距离  $x$  的三次方成正比，其数值随着  $x$  定位增大而快速下降。

线圈的磁通量可通过公式(3-2)算出，在电流一定的条件下，若要 T-R 探头的线圈产生较大的磁通量，就必须增加线圈的匝数或面积。

$$\Phi = \int B_z \cdot dS \quad (3-2)$$

在涡流无损检测过程中，根据电磁感应定律通过积分运算可获得检测线圈两端的感应电压，为简化计算，假设线圈的横截面是由多个点构成，在圆柱形坐标下，每个点引起的瞬态感应电压  $V_p$  可表示为<sup>[64]</sup>：

$$V_p = -\frac{\partial}{\partial t} \iint B ds = -\frac{\partial}{\partial t} \iint (\nabla \times A) = -\int \frac{\partial A}{\partial t} dl \quad (3-3)$$

式中， $B$  为磁感应强度； $s$  为检测线圈的截面积。 $A$  为感应磁场矢量。

对于单匝线圈来说，其瞬态感应电压用  $V_f$  表示：

$$V_f = \frac{\iint V_p(r, z, t) dr dz}{\iint dr dz} \quad (3-4)$$

式中,  $r$ ,  $z$ ,  $t$ , 分别代表的是检测线圈的在圆柱形坐标系下的半径、高度和积分时间。

对上面(3-3)和(3-4)两式进行离散化计算, 得到:

$$V_p(t) = -\int_c \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl \cong -2\pi r \frac{\partial A_f(r, z, t, r_0, h_0)}{\partial t} \quad (3-5)$$

式中,  $r_0$ ,  $h_0$  分别为检测线圈的半径和提离高度。将上述两个公式进行整理得到离散化的瞬态感应电压的表达式:

$$V_f(t) = \frac{-2\pi i \sum_{i=1}^M r_{ci} \frac{\partial A_{ci}}{\partial t} \Delta i}{\sum_{i=1}^M \Delta i} \quad (3-6)$$

式中,  $r_{ci}$ ,  $A_{ci}$ ,  $\Delta i$  分别代表了有限元中第  $i$  单元的中心距离和磁矢位及其面积。

检测线圈通上正弦交流电后, 检测线圈的瞬态感应电压  $V_{emf}$  :

$$V_{emf} = N \frac{-2\pi i \sum_{i=1}^M r_{ci} \frac{\partial A_{ci}}{\partial t} \Delta i}{\sum_{i=1}^M \Delta i} \quad (3-7)$$

根据上述理论推导可以得出, 检测线圈两端的电压受线圈匝数、 $r_{ci}$ ,  $A_{ci}$ ,  $\Delta i$  等多重因素的共同影响。运用有限元分析思想, 可将检测探头化为无数个小单元, 通过矢量合成运算得到检测线圈两端的输出电压, 后续进行 COMSOL 仿真过程和实验验证。

本文设计的检测探头可近似看为螺线管, 实际检测过程中, 改变频率不改变电压, 通过线圈的电流可表示为:

$$I = U / Z \quad (3-8)$$

式中,  $U$  表示线圈两端电压,  $I$  为流过线圈的电流,  $Z$  表示阻抗, 其等效阻抗:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3-9)$$

式中,  $X_c$  为线圈的容抗,  $R$  为线圈电阻,  $X_L$  表示感抗。

对于激励线圈中的感抗, 计算公式如下:

$$X_L = 2\pi fL \quad (3-10)$$

式中,  $L$  为涡流传感器的自感系数,  $f$  为线圈激励频率。电感与线圈匝数、导线长度及导线横截面积有关, 可用(3-11)计算,

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} S \quad (3-11)$$

式中,  $N$ ,  $S$  分别是线圈的长度和横截面积,  $\mu_r$  为介质的相对磁导率,  $\mu_0$  为真空磁导率。将(3-11)带入(3-10)得到:

$$X_L = \frac{2\pi f \mu_r \mu_0 S N^2}{l} \quad (3-12)$$

整理公式后把(3-12)代入(3-9)计算得到:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f \mu_r \mu_0 S N^2 / l)^2} \quad (3-13)$$

导体中的电流可用(3-13)带入(3-8)中得到电流:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f \mu_r \mu_0 S N^2 / l)^2}} \quad (3-14)$$

通过(3-14)可知线圈中的电流大小与激励电压、线圈电阻、线圈匝数、工件磁导率都有关, 通过计算出电流值从而选出线圈的最佳匝数和线径。

## 3.2 有限元仿真分析

### 3.2.1 COMSOL 仿真软件介绍

COMSOL 全称为 COMSOL Multiphysics, 起源于 MATLAB 的 Toolbox。COMSOL 最大的特点是具有多个物理场仿真的能力, 允许使用者在单个仿真模型中同时考虑不同领域的物理效应, 如电磁场, 热传导, 流体力学、结构力学、声学 and 化学反应等。这种多物理场在空间中相互叠加, 相互影响, COMSOL Multiphysics 仿真平台特别适用于求解这类多物理场耦合问题, 能够精确模拟电磁-结构-热等多场相互作用机制, 并通过参数化分析揭示各物理场之间的耦合规律。

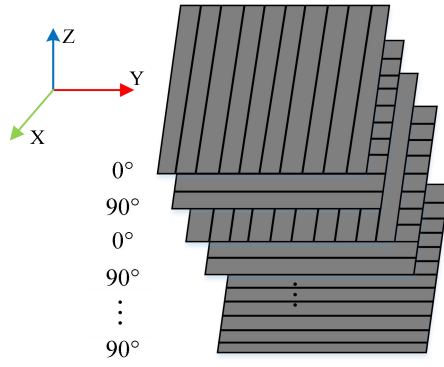
COMSOL 软件的用户界面设计极为友好,能够让用户轻松创建、编辑和解决仿真模型,无需用户掌握编程知识,降低了学习的门槛,此外,软件还提供了丰富的模型库,包括各种材料属性和物理场,这些预定义模型和材料属性可以用来快速建立仿真模型。COMSOL Multiphysics 仿真平台的核心优势在于其自适应网格剖分算法。用户仅需完成探头几何建模、材料参数定义及输出变量设置即可开展数值模拟。然而,在处理三维有限元模型时,单纯依赖自适应网格可能难以满足精度要求,此时需人工干预单元尺寸设置。该软件通过智能网格优化算法,在保证计算精度的同时显著降低计算资源消耗,这一特点使其特别适用于求解大规模复杂多物理场耦合问题。

COMSOL 的多物理场求解器非常的强大,支持各种类型的偏微分方程求解,包括静态、动态、线性和非线性、稳态和瞬态问题,用户可以根据自身的需要选择适当的求解器来解决问题。COMSOL 软件还提供了丰富的后处理和可视化工具,用户可以生成各种表格、动画和报告,以便更好的了解仿真模型。COMSOL 的扩展性是一个强大的优势,用户可以自定义编写插件和脚本,这些扩展性的功能适用于各种应用,从学术研究到工业设计,从医学应用到能源领域。

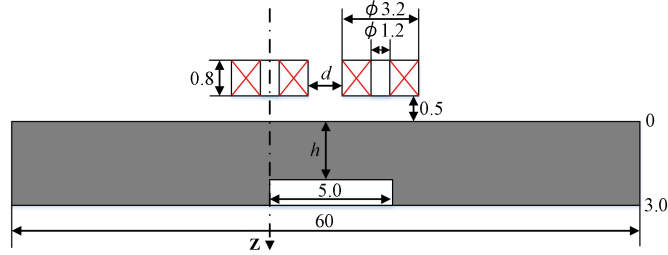
最后,COMSOL 提供广泛的教育资源和用户社区,包括教程和在线论坛,帮助用户学习软件从入门到精通。综上所述,COMSOL Multiphysics 是一个强大的多物理场仿真,适用于多领域的工程和科学应用,其多物理场耦合、用户友好的界面,丰富的模型库,强大的求解器和可视化工具。

### 3.2.2 线圈间距优化仿真分析

CFRP 材料的结构如图 3-1(a)所示,它是由不同纤维方向的单层材料组合制成的层压结构。每层的厚度为 0.125mm,按 0°和 90°方向铺成的叫正交铺设。CFRP 是一种典型的电各向异性材料,一般认为其沿纤维方向的电导率 $\sigma_L$ 为 5000~50000 S/m 之间,沿纤维垂直方向的电导率 $\sigma_T$ 为 10~100 S/m,叠层结构相邻铺层间的电导率 $\sigma_{cp}$ 为 10S/m 左右<sup>[55]</sup>。图 3-1(b)中 CFRP 的仿真模拟模型尺寸为 60mm×60mm×3mm,一共 24 层,每层的厚度为 0.125mm。将线圈置于模型中心处,内半径为 1.6mm,外半径为 0.6mm,高度 0.8mm,提离高度为 0.5mm,匝数设置为 100,通入 10mA 的电流,设定 0°铺层电导率设置为 $(\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{cp}) = (50000, 10, 10)$ S/m, 90°铺层的电导率设置为 $(\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{cp}) = (10, 50000, 10)$  S/m。



(a) 仿真模型



(b) 线圈和碳纤维复合材料

图 3-1 碳纤维复合材料建模（单位：mm）

为了更清楚地分析 CFRP 板的涡流衰减规律和趋肤深度，采用 COMSOL 软件进行有限元仿真分析。线圈激励频率取 500kHz 和 2MHz 两个典型值，由方程 (2-25)，在这两个频率下电导率为 50000 S/m 材料的趋肤深度分别为 3.2mm 和 1.6mm，正好与仿真模型的厚度对应起来。图 3-2 是在正交铺设的 CFRP 在  $x$  和  $y$  平面方向上的电流密度模，线圈激励频率为 500kHz，从图中可以看出材料中感应出的电涡流在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  铺层中分别沿着各自的纤维方向伸展。接着分别在  $x=1.6\text{mm}$ ， $y=0\text{mm}$  处的近场区和  $x=11.6\text{mm}$ ， $y=0\text{mm}$  处的远场区取三维截距线，选取试件上表面为原点提取电流密度模。电涡流密度衰减曲线如图 3-3 所示，通过寻找涡流密度从最大值衰减到  $1/e$  时的点坐标得到 CFRP 的实际趋肤深度。

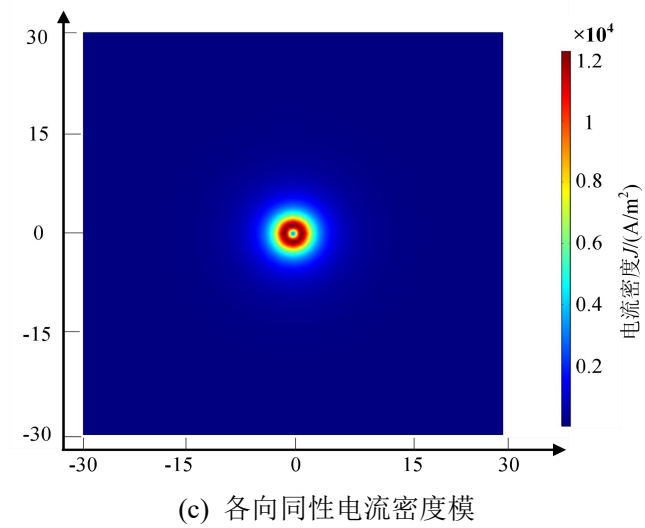
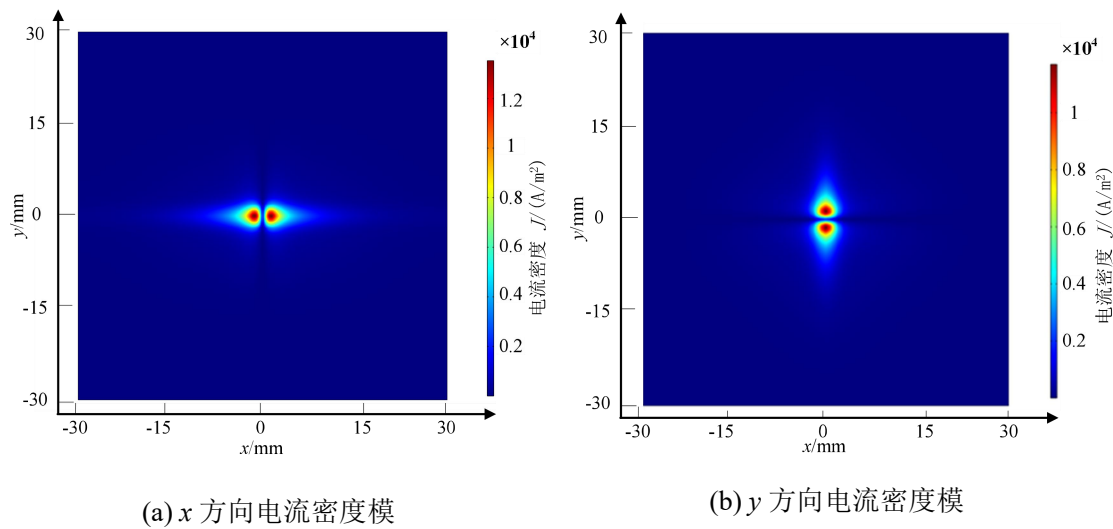
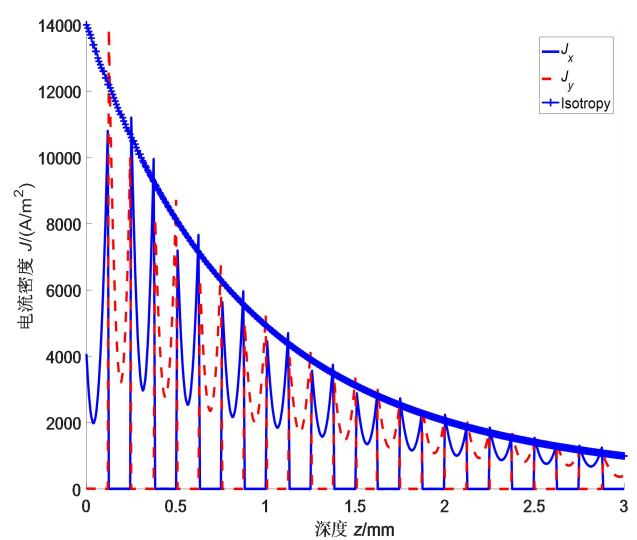


图 3-2  $x$ - $y$  平面电流密度模



经过计算，各向异性表面的实际趋肤深度如表 3-1 所示。从结果可以看出，涡流在近场区由于电流通路的电阻损耗导致其快速衰减，而在远场区涡流趋肤深度与公式(2-25)计算值基本相等，涡流和磁场可以穿透进入复合材料深处，这为深层缺陷的涡流检测提供了理论基础。

表 3-1 实际涡流趋肤深度

| 频率 ( $f/\text{kHz}$ )<br>$\delta/\text{mm}$ | 500  | 2000 |
|---------------------------------------------|------|------|
| 近场区                                         | 1.25 | 1.0  |
| 远场区                                         | 3.2  | 1.6  |

采用涡流检测时，改变线圈的间距对提高深层裂纹缺陷的分辨率有显著影响。为了研究线圈间距、线圈工作频率、基体电导率和裂纹深度之间的关系，开发了一个非线性仿真优化平台。图 3-4 为线圈间距优化流程图，其中线圈间距  $d$ 、工作频率  $f$ 、裂纹深度  $h$  为输入变量，这些变量的值如表 3-2 所示。

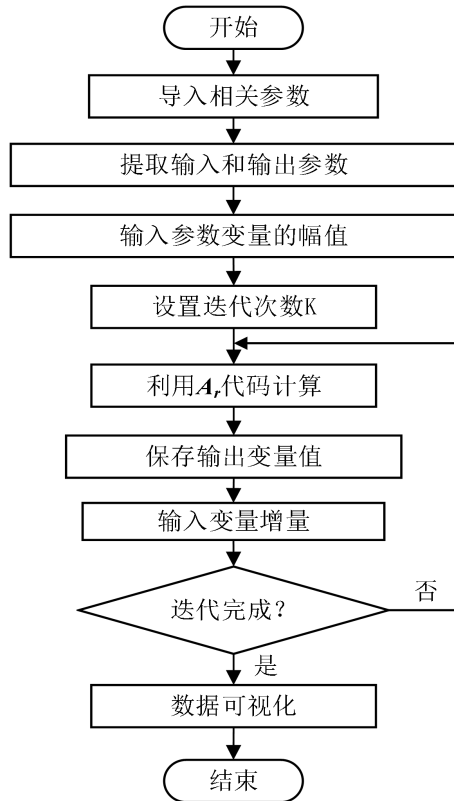


图 3-4 线圈间距优化仿真流程图

表 3-2 变量取值范围

| 设计变量       | 取值范围                                    |
|------------|-----------------------------------------|
| 线圈间距 $d$   | $3.2\text{mm} \leq d \leq 15\text{mm}$  |
| 裂纹深度 $h$   | $1.0\text{mm} \leq h \leq 2.0\text{mm}$ |
| 线圈工作频率 $f$ | 500kHz、2MHz                             |

优化平台利用 Isight 调用基于简化矢量磁位 Ar 方法的涡流检测仿真程序 Edge3d 来优化线圈间距。Ar 法选择一个或多个位函数作为未知函数，然后根据麦克斯韦方程、边界条件和和库伦规范等列出具有唯一解的数学方程。Ar 法仿真的求解域如图 3-5 所示， $\Omega_r$  表示边界计算区域， $\Gamma_r$  表示导体与空气交界面处的过渡边界层， $\Gamma$  定义为整个求解域的外边界。基于 Ar 方法的控制方程可表述为以下数学形式：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (3-8)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}_r = 0 \quad (3-9)$$

式(3-8)和(3-9)中分别是导体和空气中的矢量磁位求解方程。磁感应强度  $\mathbf{B}$  和电场强度  $\mathbf{E}$  均可以通过矢量磁位计算得到。

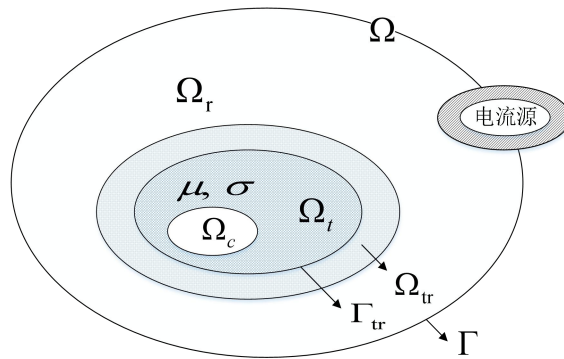


图 3-5 Ar 法仿真求解域

Isight 是一款仿真流程自动化（SPA）和多学科设计优化（MDO）软件，主要用于工程仿真、优化和自动化分析，融合多种算法策略和多学科优化设计计算环境，帮助广大设计人员完成从简单的部件到复杂的整体优化任务。打开 Isight 软件，在 sim-flow 菜单中选择 Application components，然后左击并按 1 的图标，拖至工作域中的粗红线上建立 Simcode；重复相同的步骤建立 Simcode-1，选择

process components, 左击并按 1 的图标, 拖至 2 的工作域中, 如下图 3-6 所示; 搭建出优化程序框图。

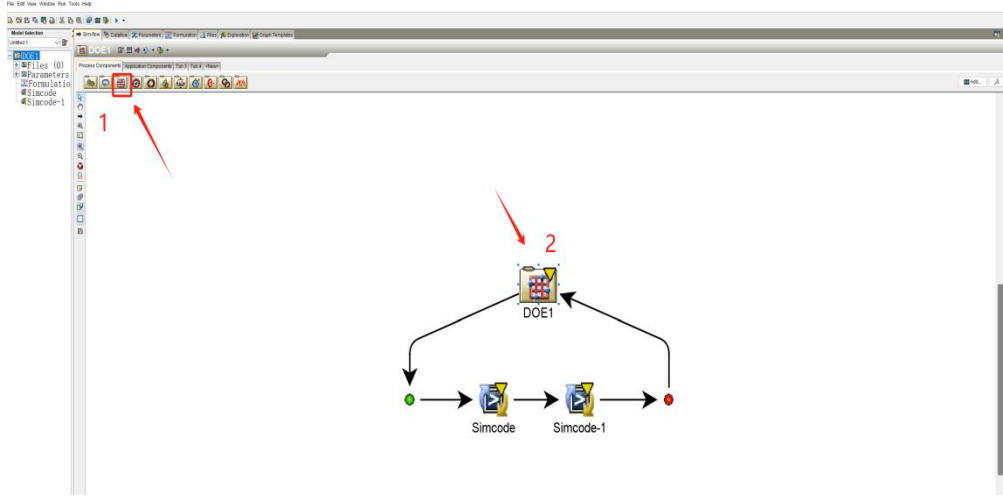


图 3-6 Isight 搭建优化平台图

采用实验设计分析确定设计变量对计算结果的影响, 选择接收线圈电压变化为信噪比幅值的大小作为表征深层裂纹缺陷的分辨率高低的目标参数, 定义公式 (3-10) 所示:

$$SNR = \frac{|V_d - V_{nd}|}{|V_{nd}|} \quad (3-10)$$

其中,  $V_{nd}$  为涡流探头在无损伤检测状态下的电压幅值,  $V_d$  为探头在有损伤状态下的电压幅值。

Isight 优化目标公式:

$$d^* = \arg \max SNR(d) \quad (3-11)$$

为了优化线圈间距, 以接收线圈电压信噪比幅值为优化目标, 进行实试验设计 (DOE) 分析。分析过程中通过全因子设计 (FFD) 方法选择变量, 其中为每个因素指定水平数 (参数数量), 并研究所有因子的全部参数组合。

线圈间距是影响 T-R 探头准确探测深度缺陷能力的关键参数。在本研究中, T-R 探头定位在厚度 3mm, 长度为 10mm, 宽度为 0.2mm 的 CFRP 深层裂纹上, 调整平行于裂纹方向的线圈间距, 间距从 3.2mm 增加到 15mm, 步长为 0.2mm, 激励线圈电流设为 0.01A。

如图 3-7 所示, 在相同条件下, 有缺陷和无缺陷的 CFRP 扫描得到的接收线圈电压绝对值不同, 说明通过分析信噪比, 调整线圈间距可以提高深层裂纹缺陷

的分辨率。在 500kHz 频率下得到裂纹深度为 1mm、1.5mm 和 2mm 时的接收线圈的幅值特性曲线,结果如图 3-8 所示。从曲线图可以看出,当工作频率为 500kHz 时,线圈电压在 6mm 前保持恒定,在 8mm 处拐点达到峰值,然后迅速下降。

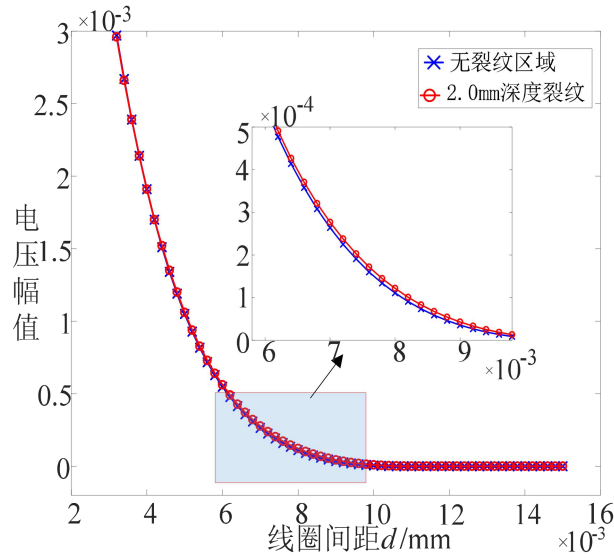
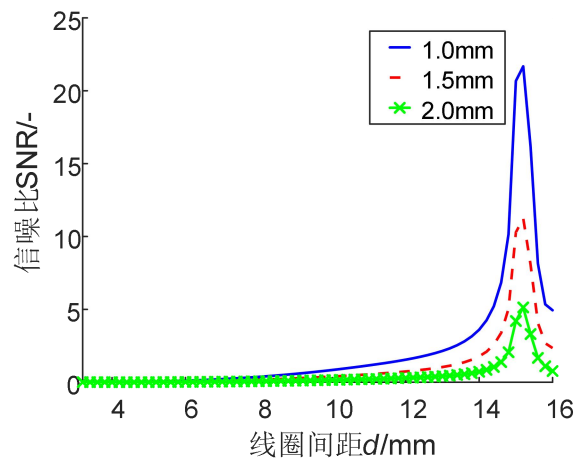
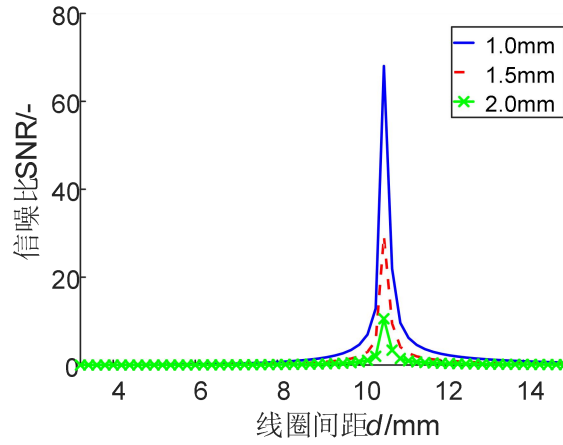


图 3-7 有缺陷和无缺陷电压绝对值

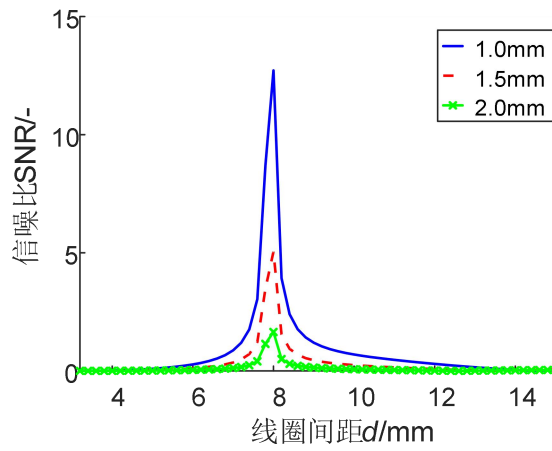
在相同裂纹深度下,线圈间距随频率的增加而减小,线圈检测的灵敏度提高,同时,在同一频率下,由于缺陷体积逐渐增大,线圈电压信噪比随裂纹深度的增加而减小,线圈探头的灵敏度随频率的增加而增加。由于裂纹深度的不同,缺陷的体积有所不同,综合表 3-1 的实际趋肤深度显示,工作频率为 300kHz 时,接收线圈的信噪比最大。



(a)工作频率 150kHz



(b)工作频率 300kHz



(c)工作频率 500kHz

图 3-8 相同裂纹深度下不同频率的优化结果

图 3-9 为 CFRP 取不同电导率下探头距离的优化结果。当工作频率为 500 kHz, CFRP 裂纹深度为 2mm, 基材电导率为  $1 \times 10^4 \text{S/m}$  时, 随着线圈间距的增大, 线圈电压幅值在 15 mm 处达到峰值。当电导率为  $3 \times 10^4 \text{S/m}$  时, 电压幅值直到 10 mm 才发生变化, 在 11.6 mm 时, 拐点达到最大信噪比后急剧下降。电导率为  $5 \times 10^4 \text{S/m}$  时的电压幅值在 7 mm 前变化不明显, 在 7.6 mm 处的拐点达到最大信噪比后急剧下降。因此, 随着基体电导率的增加, 线圈电压幅值的拐点出现在左侧, 线圈间距减小。从线圈的工作频率、裂纹缺陷深度以及 CFRP 不同电导率对线圈间距的影响可以看出, 调整线圈间距可以提高线圈探头检测深度缺陷的分辨率。频率越低, 实现高灵敏度所需的线圈间距越大。不同电导率下涡流的趋肤深度也是一个影响因素。

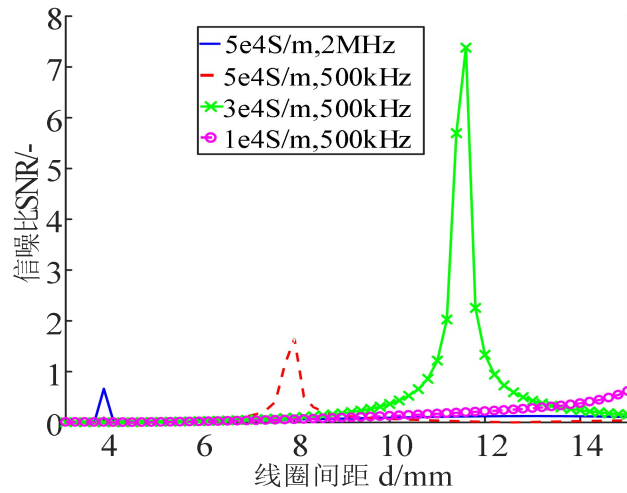


图 3-9 不同电导率下的优化结果

### 3.3 CFRP 叠层结构隐藏缺陷分析

有限元模型的优势在于建模简单步骤少，不需要较高的数学理论，由软件自动计算。在本文中，使用 COMSOL 软件建立了三维有限元模型，主要分为六个步骤，如图 3-10 所示。

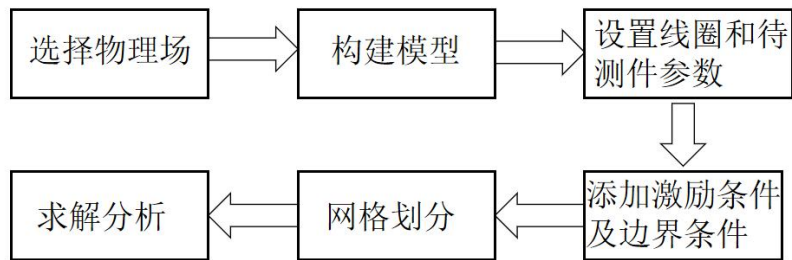


图 3-10 电涡流有限元建模流程图

仿真模型根据实际情况采用 T-R 型线圈进行仿真实验，目的是为了验证 ECT 方法能够检测出 CFRP 的裂纹，因此需要关注 CFRP 中纤维方向涡流密度和接收线圈的电压变化。如图 3-11 所示，在仿真过程中存在三组对照实验。首先建立了一个激励线圈和一个接收线圈，分别带有损伤裂纹的 CFRP 和金属板、空气域。

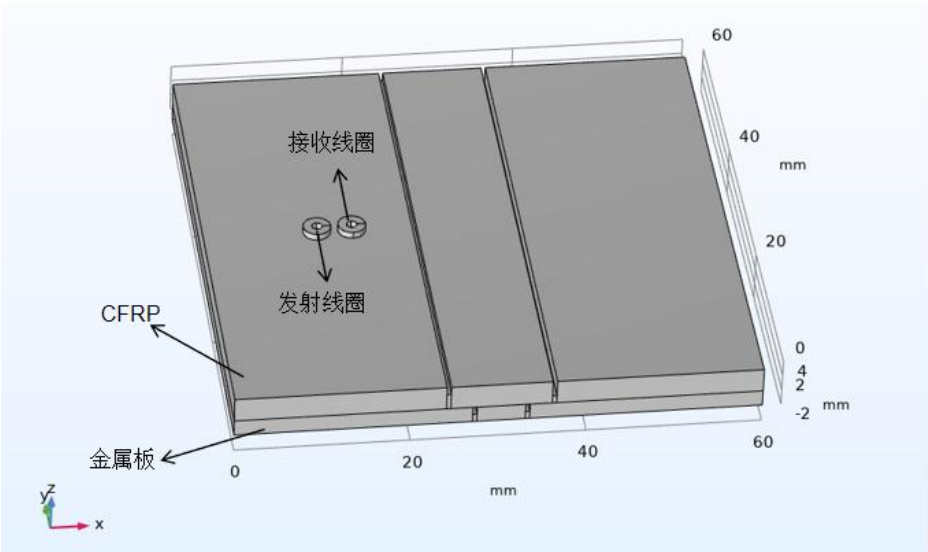


图 3-11 仿真模型

表 3-3 中列出了仿真的模型参数、CFRP 和探头的尺寸以及激励条件，利用 T-R 探头，对 CFRP 的纤维区域进行扫描，探头位于复合材料正上方，提离 0.2mm，激励线圈与接收线圈之间的距离 4mm。

表 3-3 仿真模型参数

|      |      |       |                                     |
|------|------|-------|-------------------------------------|
| CFRP | 尺寸   | 长度    | 0mm—60mm                            |
|      |      | 宽度    | 0mm—60mm                            |
|      |      | 厚度    | 3mm                                 |
|      | 电导率  | 碳纤维   | ( $2\times 10^4$ , 20, 10)<br>(S/m) |
| 金属板  | 尺寸   | 长度    | 0mm—60mm                            |
|      |      | 宽度    | 0mm—60mm                            |
|      |      | 厚度    | 2mm                                 |
|      | 电导率  | 金属板   | $1.45\times 10^6$ (S/m)             |
| 线圈   | 结构尺寸 | 内径    | 1.2mm                               |
|      |      | 外径    | 3.2mm                               |
|      |      | 高度&匝数 | 0.8mm & 100                         |
|      | 激励条件 | 电流    | 10mA                                |
|      |      | 频率    | 500kHz, 2MHz                        |

在 COMSOL 仿真实验中，网格划分会影响到检测的精度，对于二维空间几何模型，网格划分可以分为自由剖分三角形、四边形网格，在构建三维几何模型的数值模拟时，通常采用四面体自由网格、扫掠网格或映射网格等离散化方法。网格密度可根据具体需求选择手动调节或自动优化。涡流模型仿真网格划分过程中，为了提高计算精确度，一般将包含激励源的线圈进行细化处理，被观测对象做普通处理即可，如图 3-12 所示的网格划分模型，线圈采用自由三角形的网格划分，CFRP 和金属板采用的是自由四面体极细化的划分方式，由于空气域影响较小，因此采用常规的自由四面体划分方式来减少计算。

网格划分是确保仿真结果准确性和可信度的关键要素之一，网格划分的是否合适直接影响到仿真结果的正确性。划分后的每一个小单元格内部会进行新的数学计算形成一个数学结果，通过叠加定理得到整体的计算结果。

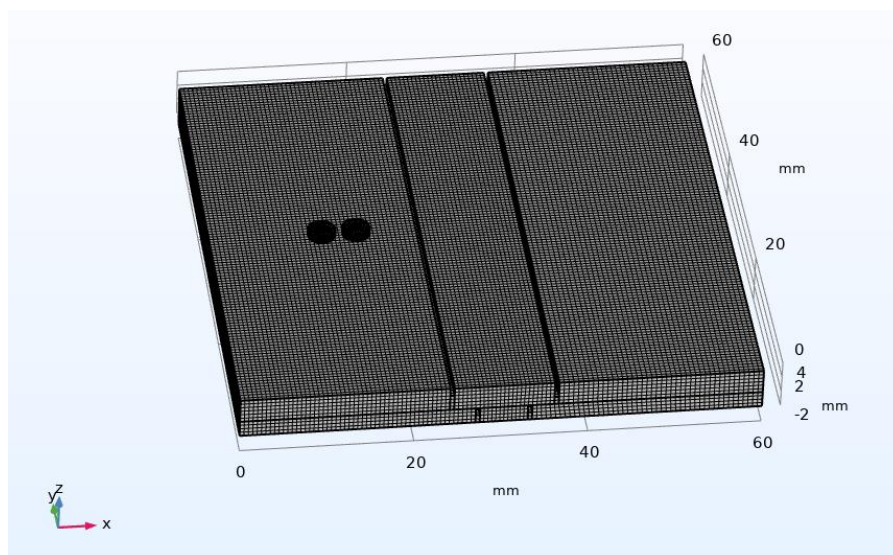


图 3-12 网格划分

划分完网格后，设置好参数化扫描（0，0.5，30），即扫描步长为 30，起点为 0，每 0.5mm 扫描一次，然后在参数设置里添加线圈交变电流的频率，对仿真模型进行求解计算，通过改变激励频率分析接收线圈的电压变化。选择合适的激励频率至关重要，本文仿真选取 250kHz、500kHz、1MHz 和 2MHz 的激励频率，对裂纹深度为 1mm 和 2mm 的缺陷进行参数化扫描，观察四种不同激励频率对分别带有损伤的 CFRP 和金属板的电压幅值影响，如图 3-13 所示，250kHz 时检测不到两条裂纹，500kHz 能检测出两道裂纹但是不明显，1MHz 的电压幅值最小，检测效果可能不理想，2MHz 能够很明显的检测出表面的两道裂纹且电压幅

值较大检测效果更好，故而接下来对 500kHz 和 2MHz 激励频率进行电流密度模拟仿真和电压曲线变化仿真分析。

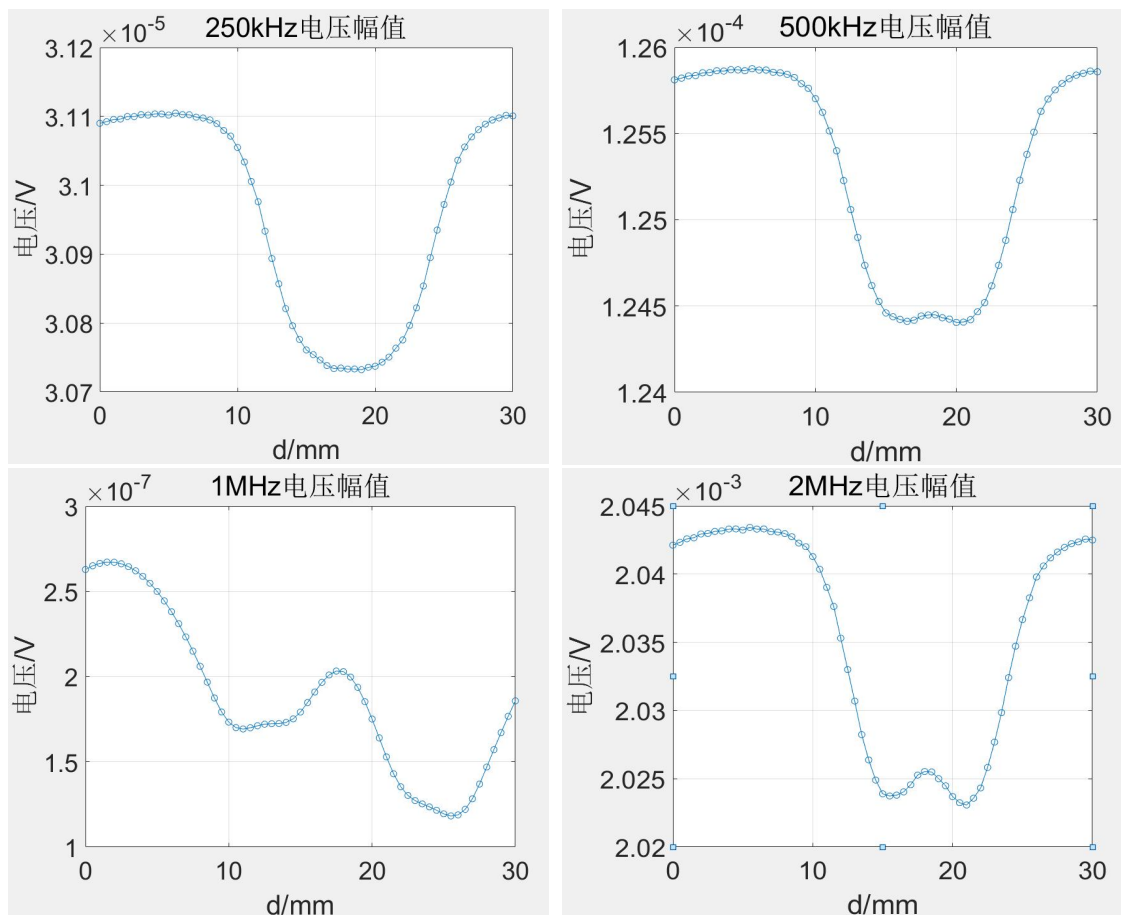
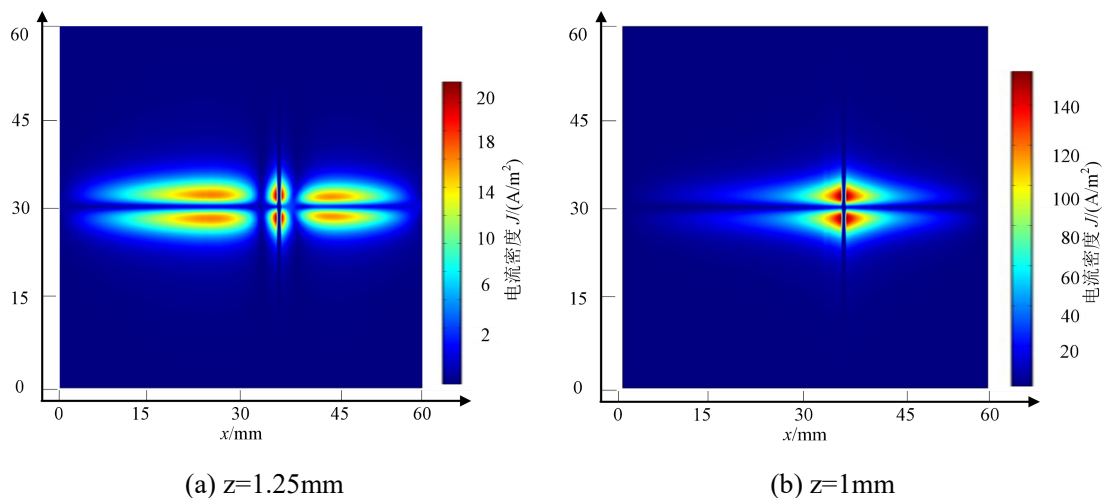


图 3-13 四种不同激励频率的电压幅值

当工作频率为 500kHz 时，沿  $z$  轴方向由上到下在  $z=1.25\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $0.25\text{mm}$ 、 $0\text{mm}$ 、 $-0.5\text{mm}$ 、 $-1.75\text{mm}$  处截取六个参数化表面，每个截面电流密度分布如图 3-14 所示。



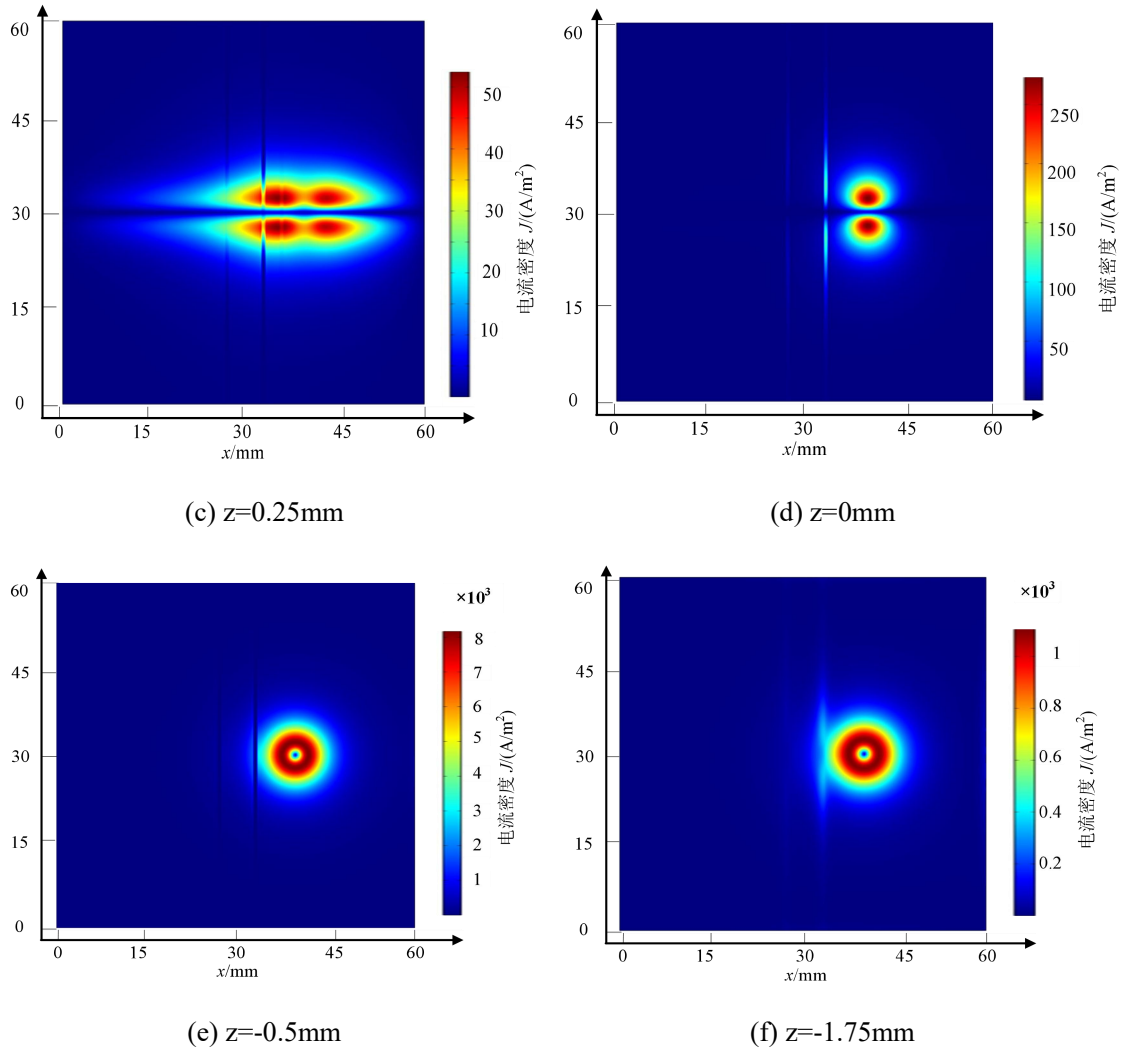


图 3-14 500kHz-电流密度模

当工作频率为 2MHz 时，沿  $z$  轴方向由上到下在  $z=1.25\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $0.25\text{mm}$ 、 $0\text{mm}$ 、 $-0.5\text{mm}$ 、 $-1.75\text{mm}$  处截取六个参数化表面，每个截面电流密度分布如图 3-15 所示。对比 500kHz 和 2MHz 的两种激励频率下的电流密度模，可以看出，涡流检测中，频率越高，涡流越集中在材料表面，适合检测表面缺陷，频率越低，涡流渗透的越深，适合深层缺陷的检测。相同频率下的电流密度模随着检测深度的变化受到影响，这是与涡流的趋肤深度有关，而趋肤深度与频率、材料的电导率与磁导率有关。

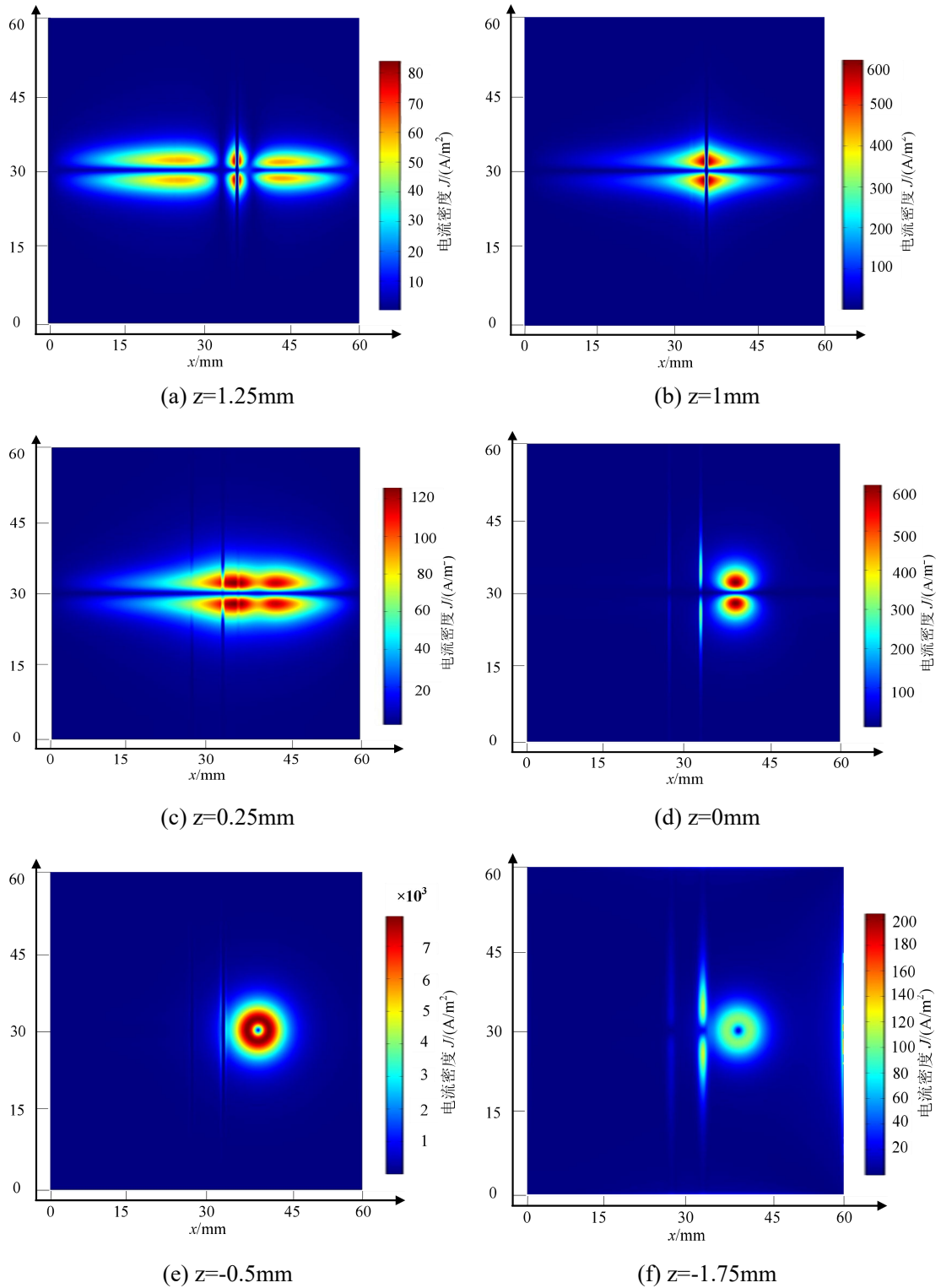
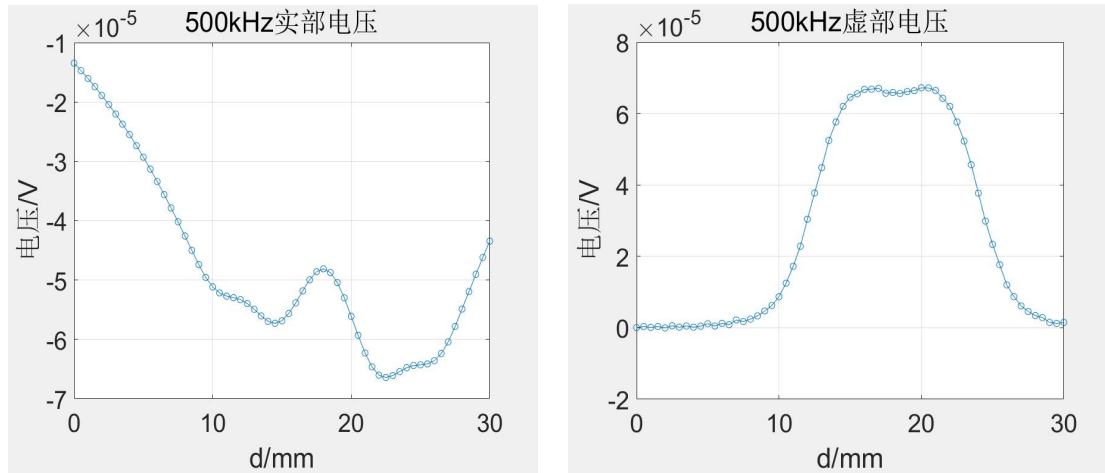


图 3-15 2MHz-电流密度模

对照前面有损伤的 CFRP 和金属板仿真，进行无损的 CFRP 和金属板叠层结构仿真，同样施加 500kHz 和 2MHz 的激励频率，进行参数化扫描。将扫描后的数据进行分析整理，例如线圈左右摆放的条件下，500kHz 有损伤的接收线圈的实部电压减去无损的实部电压，或者 500kHz 的有损伤的接收线圈的虚部电

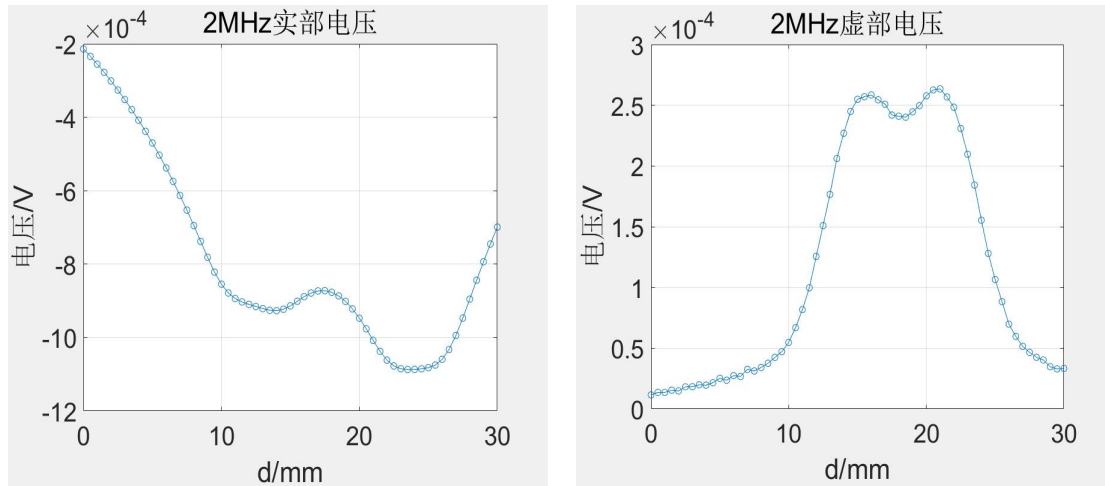
压减去无损伤的虚部电压，从而提取到有效的电压损伤信息,如图 3-15 所示。同样线圈左右摆放的条件下，提取出 2MHz 的激励频率下采集到的有效电压损伤信息，如图 3-16 所示。图中数值可以看出，反映能量损耗的实部较虚部更分散，虚部对称性良好显示相位角稳定，波谷靠近 20mm 左右，图中拐点显示缺陷的位置。



(a) 实部电压

(b) 虚部电压

图 3-15 500kHz 有效损伤电压曲线



(a) 实部电压

(b) 虚部电压

图 3-16 2MHz 有效损伤电压曲线

线圈的不同方向也会影响到仿真的结果，建立如图 3-17 所示仿真模型。CFRP 由多层厚度为 0.125 mm 的薄板组成，厚度 3mm，金属板的厚度 2mm。CFRP 上的损伤尺寸宽 0.5mm，长 60mm，深度分别为 1mm 和 2mm，金属板上的损伤宽 0.5mm，长 60mm，深度 1mm。

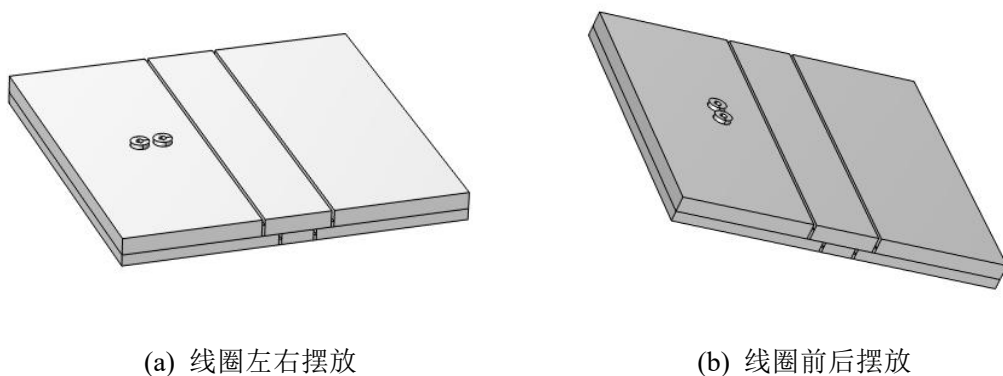


图 3-17 线圈方向仿真模型

同 500kHz 的工作频率下，线圈前后摆放的的电流密度模如图 3-18 所示，可以看出相同条件下检测损伤，电流密度越大信噪比就会越大，检测效果就越好。

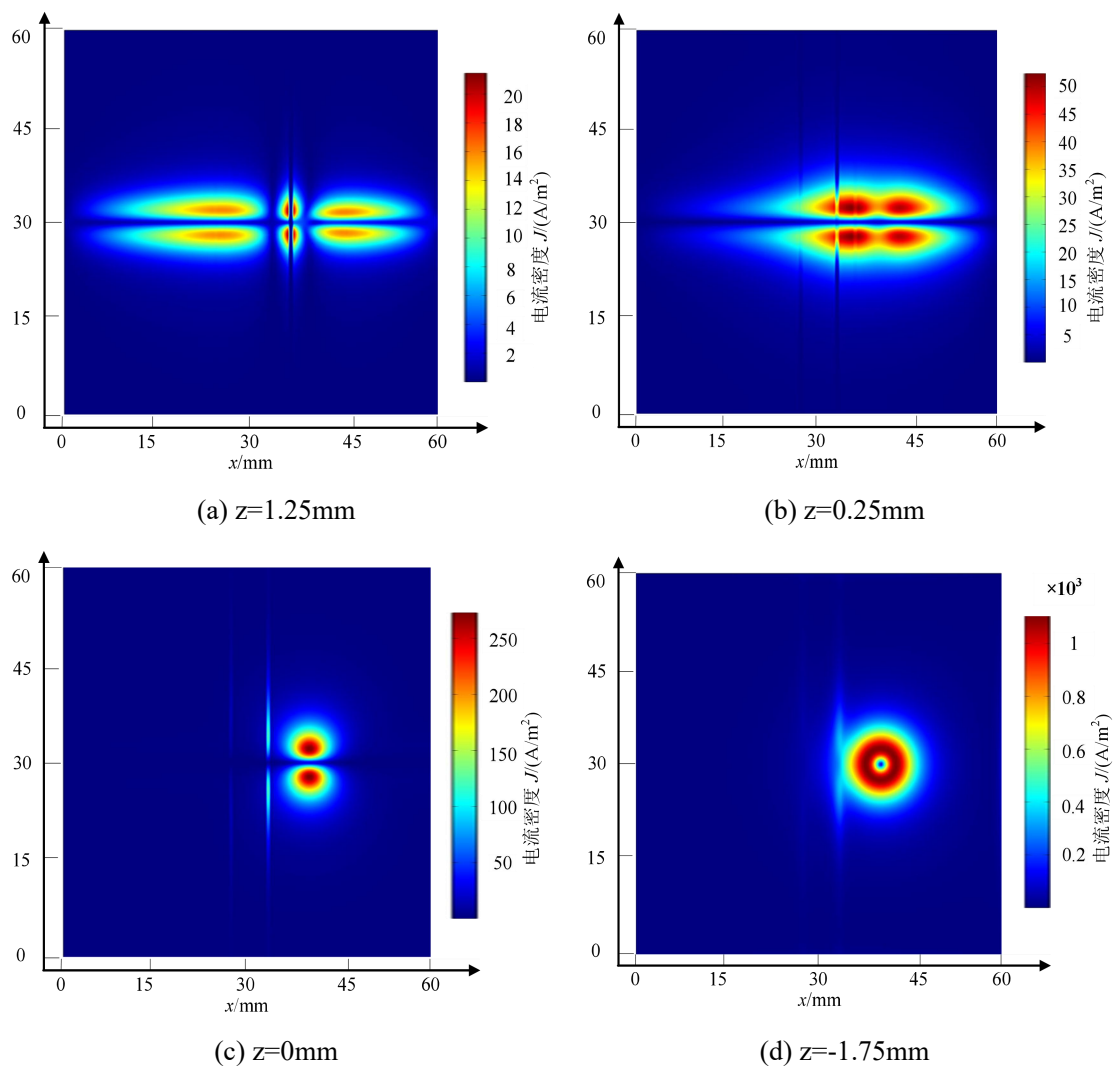


图 3-18 线圈前后电流密度模

控制相同的变量，相同频率(500kHz)以及相同部位的损伤，线圈不同摆放位

置的电压变化曲线如图 3-19 所示，观察实部电压发现线圈左右摆放时能检测出四道裂纹。

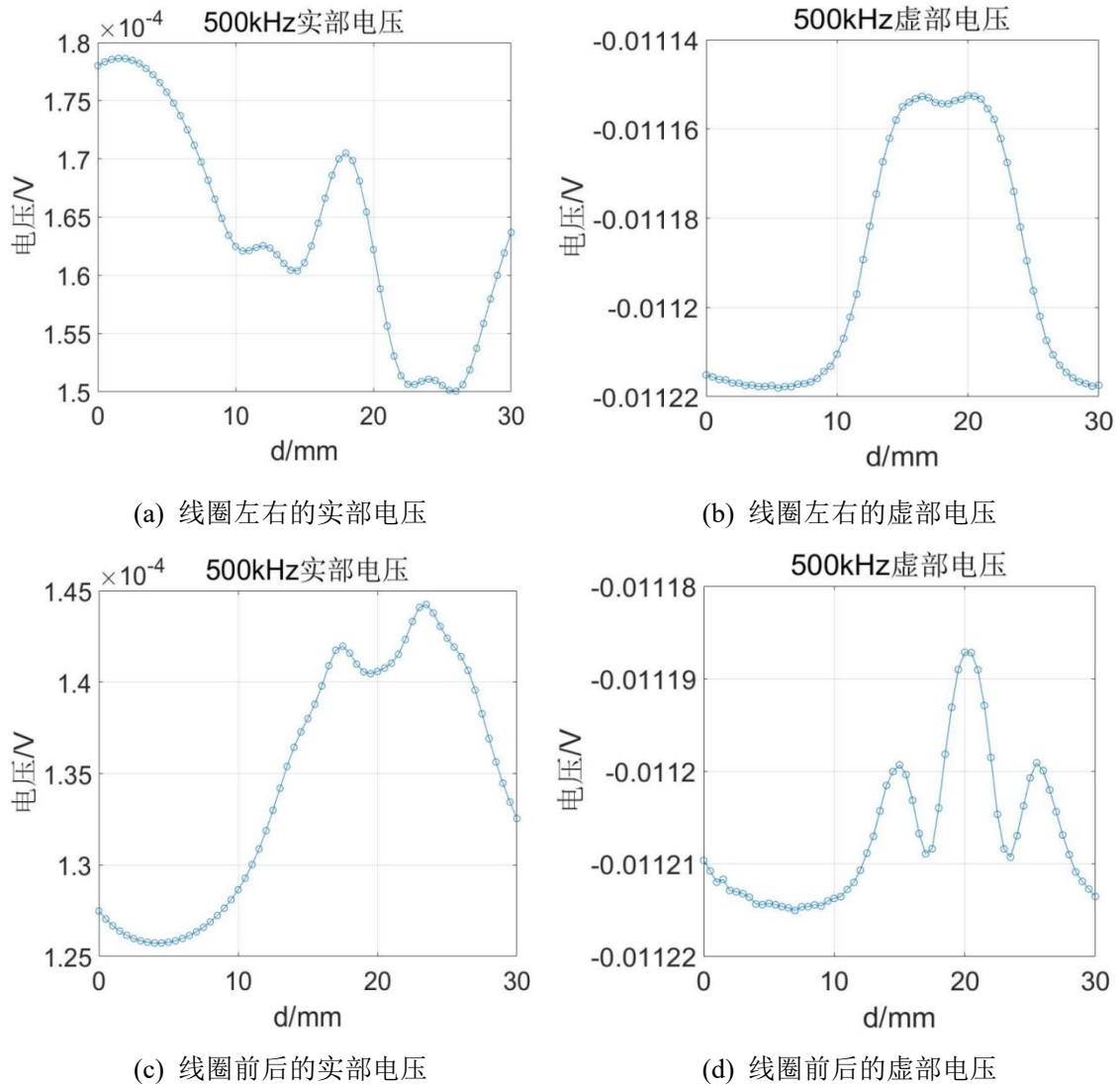


图 3-19 电压曲线

### 3.4 本章小结

根据被测件的外形特点设计了一种 T-R（发射-接收）探头，通过合理布置激励线圈与接收线圈的位置和优化探头尺寸，来抑制噪音的干扰，提高信噪比和检测的可靠性。通过对发射-接收线圈的工作原理进行参数分析，建立线圈间距和线圈方向仿真模型，确定线圈的各项参数值，获取最大检测灵敏度，从而实现对不同深度隐藏缺陷的检测。

## 第 4 章 涡流检测嵌入式系统设计

根据第 2 章中介绍的麦克斯韦方程组的原理,在 CFRP 和金属板的涡流检测嵌入式系统检测过程中要求有效信号的频率与激励信号的频率一致,采用锁相放大电路作为 CFRP 预浸料涡流检测探头的信号处理电路。涡流检测嵌入式检测系统分为硬件部分设计和软件部分设计,硬件设计主要集中在下位机部分,主要有正弦信号发生模块、相敏检波电路设计模块和高精度数据采集电路设计模块,其中,电源电路是用来给系统中其他电路板供电,正弦信号发生模块用来产生两路正交正弦信号,从而驱动激励线圈工作,相敏检波电路是用来放大信号,滤去杂波,高精度数据采集电路设计模块的作用是连续采集实部电压和虚部电压信号,实时读取采样点的数据。软件设计包括上位机和下位机部分。

### 4.1 涡流检测嵌入式系统硬件设计

#### 4.1.1 T-R 涡流探头设计

单根碳纤维在碳纤维复合材料中排列在一起,形成了预浸料铺层,或者多股纤维束通过编制过程被织造成纤维布。由于碳纤维和纤维束的尺度极为细微,探头的尺寸也必须足够精巧,才能够从涡流图像中看出复合材料的纤维排布情况,如若不然,探头会因为难以聚焦导致扫描过程中采集的数据不准确<sup>[10]</sup>。

涡流检测系统的扫描部件是电磁涡流探头,其结构的不同对检测结果产生显著影响。R. Hughes 等人发现,在探头的共振频率处检测灵敏度达到顶峰,信噪比亦显著增强,这是由于在共振频率点,线圈的阻抗增大,感应电压值随之升高,同时抗干扰能力亦得到加强<sup>[58]</sup>。因此,碳纤维复合材料的检测效果同样依赖于探头的频响特性。

如图 4-1 所示,涡流探头的原理图中,由两个 T-R 探头组成,外层塑料护套包裹着两个线圈。单个 T-R 探头的发射线圈与接收线圈并排的放置于同一平面,发射线圈的中心与接收线圈的中心距离设置为 4mm,两种线圈匝数都是 140,线径 0.05,外径 3.2mm,内径 1.2mm。图 4-2 是设计的 T-R 探头的实物图。

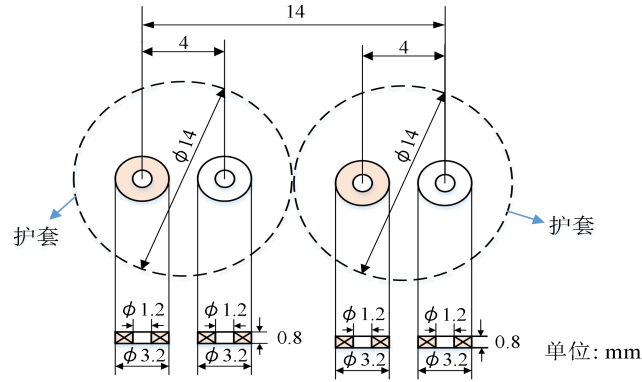


图 4-1 T-R 涡流探头设计尺寸图



图 4-2 T-R 涡流探头实物图

#### 4.1.2 正弦信号发生模块

ADI 公司生产了许多数字频率合成芯片，考虑到系统需要提供两路 10M 以内的正弦激励信号，最终选择 AD9958 作为 DDS 信号发生器。AD9958 信号发生器模块用于生成两路相位正交的正弦波，其相位差精确保持 90 度。其中一路信号经功率放大器增益后，驱动检测探头的激励线圈，从而在材料中产生涡电流效应。AD9958 数字频率合成器是一款高度集成的器件，采用先进的 DDS 技术，支持差分输出和频率与相位动态编程，系统时钟最高可达 500MHz。

模拟移相法和数字移相法这两种方法可以得到两路正交的正弦信号。其中，模拟移相法常采用 RC 积分或微分网络来完成信号相位偏移，然而该方式存在调节精度不足、偏差明显及分辨能力有限等缺陷，无法达到系统对相位控制的高准确度要求。本研究采用直接数字频率合成（DDS）方案生成激励信号，这是由于数字式相位调节技术能有效解决传统方案的局限性，具备优异的相位控制精度与分辨能力，同时支持通过软件编程自由配置输出信号的频相参数，操作灵活性突出。另外，高度集成的 DDS 芯片显著简化了外部电路设计，虽然相比模拟相位调节方案成本稍高，但其卓越的性能表现使其完美契合高精度检测的应用需求。

因此，DDS 技术成为本项目的最佳实施方案。

DDS，即直接数字频率合成技术，能够生成多种频率的波形，包括方波、正弦波和三角波等，并且具备对波形相位和幅度的控制能力。如图 4-3 所展示：在时钟信号触发下，相位累加器依据设定的频率控制字逐步增加，生成的相位地址随即被传输到波形存储 ROM。该存储器仅需存储 1/4 周期正弦波的数字化幅值数据，剩余 3/4 周期的波形数据可通过对称变换技术还原。数字化的幅值信息由波形 ROM 根据相位地址映射输出，这些数值随后送入数模转换器转变为连续信号，经过去除高频分量的滤波处理后，最终输出理想的正弦波形<sup>[65]</sup>。

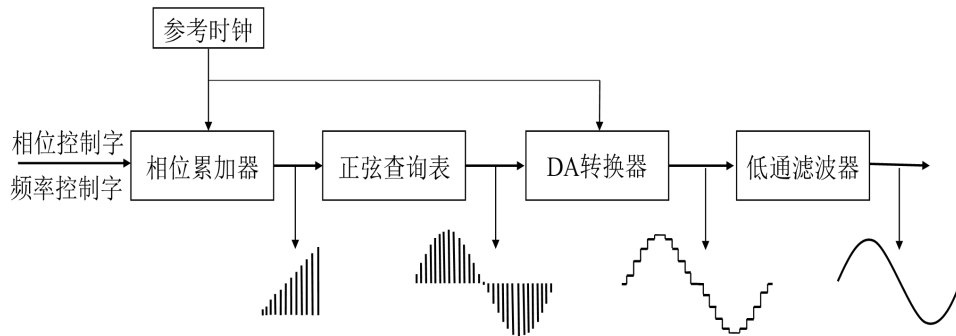


图 4-3 DDS 结构框图

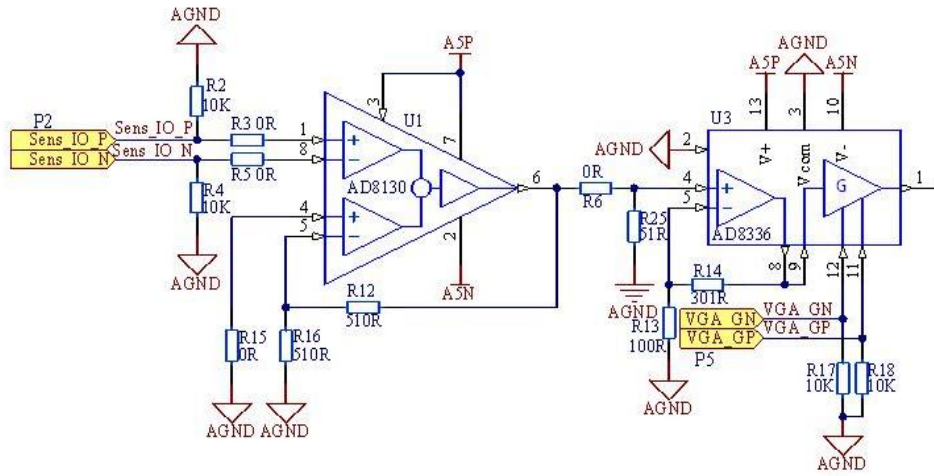
#### 4.1.3 锁相放大模块

使用锁相放大电路处理接收线圈输出的微小损伤信号，得到两路直流电压信号，从而提取出损伤信号的幅值和相位。锁相放大电路不仅能放大与参考信号频率相同的信号，还能有效抑制与参考信号不符的干扰及噪声信号。

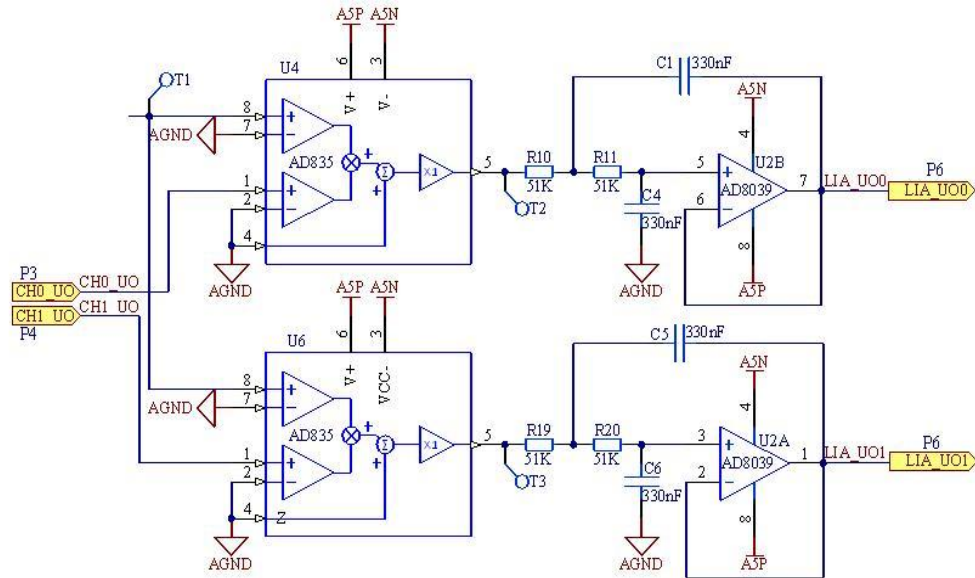
锁相放大电路主要由前置放大、乘法运算和低通滤波三个模块组成。前置放大模块整合了差分放大和增益调节功能，前者用于消除接收线圈输出中的共模干扰，后者则对信号幅度进行放大处理。在信号处理过程中，乘法运算模块将参考信号与输入信号进行混频，生成包含倍频分量和直流分量的复合信号。最终通过低通滤波模块的筛选作用，滤去其他高频信号，提取出包含损伤特征的直流信号，为供 ADC 芯片进行采集。

图 4-4 为锁相放大电路的原理图。该设计采用 AD8130 差分放大器处理接收传感器的双端输出信号，实现差分至单端的转换功能。选用了 AD8336 可编程增益放大器改变增益，由 STM32 微控制器的数模转换单元输出的模拟电压进行调控增益值。乘法器使用 AD835 芯片将线圈输出信号与参考信号相乘。低通滤波器利用 AD8039 芯片组成二阶低通滤波器，设置 10Hz 特征频率以抑制高频信号，

最终输出包含缺陷特征信息的低频直流信号。



(a) 前置放大电路



(b) 乘法电路和低通滤波电路

图 4-4 锁相放大电路图

锁相放大技术主要用于从复杂噪声背景中提取微弱的损伤特征信号。该电路通过选择性放大与参考信号同频的成分，同时抑制其他频率的杂波和噪声干扰，从而显著提升了信噪比。在检测过程中，受噪声干扰的缺陷响应信号与激励源同频的正弦基准信号进行混频运算，将产生倍频分量和直流分量，而噪声成分与基准信号混频后则形成高频信号。这些混合信号经低通滤波网络处理后，高频成分被有效抑制，最终保留的直流分量保存着缺陷特征的幅度与相位数据，完整展现

了锁相放大技术的核心工作机理。

假设接收线圈的信号表达式(包括损伤信号和噪声)为:

$$S = A \sin(\omega t + \theta) + A_n \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (4-1)$$

公式中  $A$ 、 $\omega$ 、 $\theta$  分别代表了损伤信号的幅值、频率和相位,  $A_n$ 、 $\omega_n$ 、 $\varphi$  分别表示噪声信号的幅值、频率和相位。

两个正交正弦信号分别为:

$$S_1 = B \sin \omega t \quad (4-2)$$

$$S_2 = B \cos \omega t \quad (4-3)$$

式中  $B$ 、 $\omega$  为正交参考信号的幅值、频率。

经过乘法器相乘后分别得到:

$$\begin{aligned} S * S_1 &= [A \sin(\omega t + \theta) + A_n \sin(\omega_n t + \varphi)] \times B \sin(\omega t + \theta) \\ &= \frac{1}{2} AB \cos \theta - \frac{1}{2} AB \cos(2\omega t + \theta) \\ &\quad + \frac{1}{2} A_n B [\cos(\omega_n - \omega)t + \varphi] - \frac{1}{2} A_n B \cos[\cos(\omega_n - \omega)t + \varphi] \end{aligned} \quad (4-4)$$

同理:

$$\begin{aligned} S * S_2 &= [A \sin(\omega t + \theta) + A_n \sin(\omega_n t + \varphi)] \times B \cos(\omega t + \theta) \\ &= \frac{1}{2} AB \sin \theta - \frac{1}{2} AB \sin(2\omega t + \theta) + \frac{1}{2} A_n B [\sin(\omega_n - \omega)t + \varphi] \\ &\quad - \frac{1}{2} A_n B \sin[\cos(\omega_n - \omega)t + \varphi] \end{aligned} \quad (4-5)$$

设计一个低通滤波器, 其截止频率  $f_c$  需满足以下条件, 且截止频率应足够小:

$$f_c < \frac{|\omega_n - \omega|}{2\pi} \text{ 且 } f_c < \frac{\omega}{\pi} \quad (4-6)$$

通过该低通滤波器后, 相乘以后的叠加信号中, 除了多项展开式的第一项外, 其余各项均被滤除, 从而得到了两个直流信号:

$$U_1 = \frac{1}{2} AB \cos \theta \quad (4-7)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} AB \sin \theta \quad (4-8)$$

联立 (4-7) 和 (4-8) 就可以得到损伤信号的幅值和相位:

$$A = \frac{2\sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{B} \quad (4-9)$$

$$\theta = \arctan \frac{U_2}{U_1} + [1 - \text{sgn}(U_1)] \frac{\pi}{2} \quad (4-10)$$

#### 4.1.4 高精度数据采集模块

作为涡流检测系统的关键组件，ADS1256 数据采集模块专门负责处理相敏检波电路输出的两路直流电压信号。当计算机发出采集命令时，嵌入式系统随即启动采样过程。在编码器脉冲信号的精准同步下，嵌入式处理器通过 USB 通信通道将获取的双通道数据传送至计算机终端，完成检测数据的同步存储与可视化呈现。

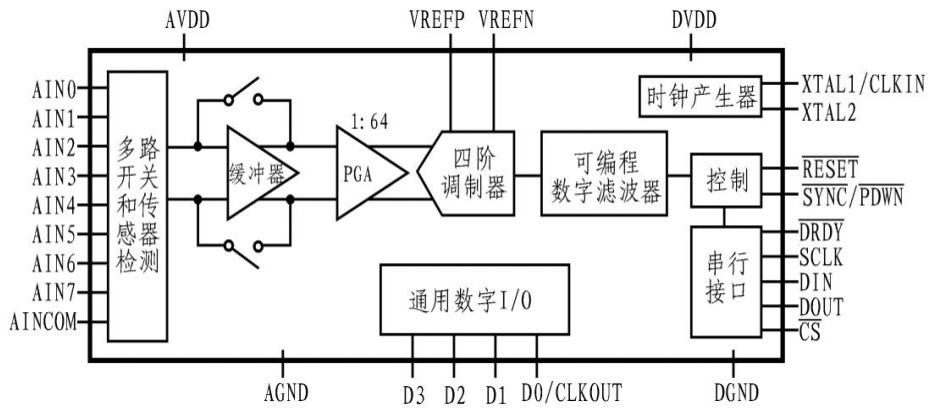


图 4-5 ADS1256 芯片内部结构图

ADS1256 芯片需要配置三种供电电源：5V 模拟工作电压、3.3V 数字电路电压以及 2.5V 外部参考基准。该模块需采集双通道电压量，采用单端输入配置方式，并将 AINCOM 引脚连接至地电位。ADS1256 芯片采用 SPI 总线协议与微控制器建立数据交互，其通信接口包含四根信号线：时钟线（SCLK）、数据输出线（DOUT）、数据输入线（DIN）以及片选线。这些信号线分别对应连接到微控制器的 PD9、PB13、PB14 和 PB15 引脚。为确保信号传输质量，在数字输入通道上特别增设了 100 欧姆的限流电阻，用以优化传输线路的阻抗匹配特性。另外 ADS1256 数据采集系统中，特别需要注意的是模拟地与数字地之间的等点位要求，采用直接连在一起或用 0Ω 电阻隔开两种方案。ADS1256 数据采集电路如图 4-6 所示：

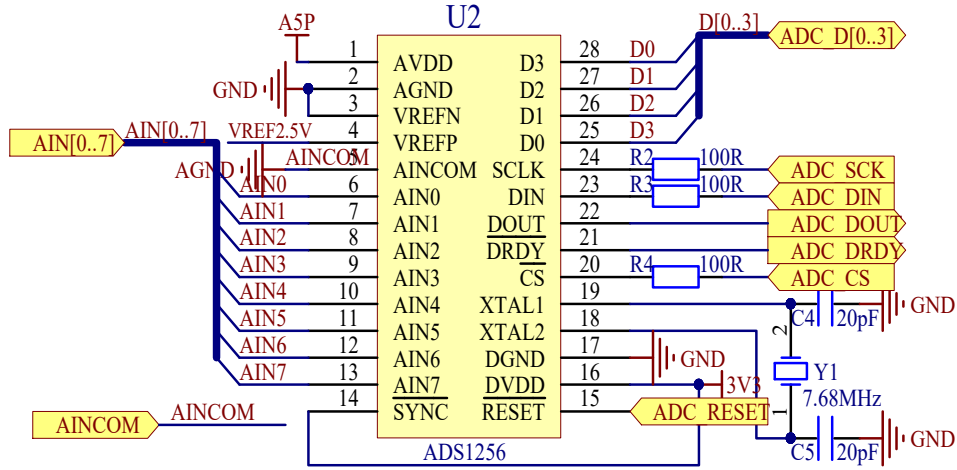


图 4-6 ADS1256 数据采集电路

ADS1256 采用 2.5V 基准电压，若需检测微弱信号，可适当调节可编程增益放大器（PGA）的放大系数。本设计选用 REF5025 作为基准源，该器件具有极低的噪声特性（ $3\mu\text{Vpp/V}$ ）和优异的热稳定性（温漂仅  $3\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ），属于高精度电压基准芯片系列。电路图如 4-7 所示。

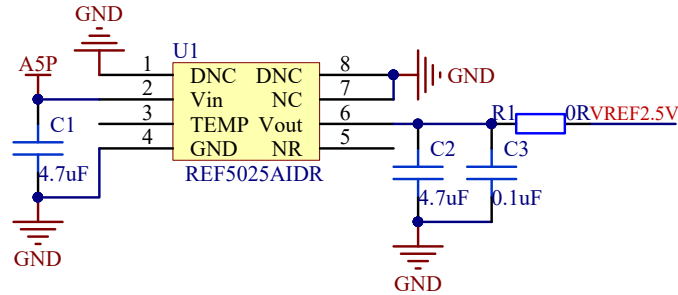


图 4-7 2.5V 基准电压

## 4.2 涡流检测嵌入式系统软件设计

本系统采用上位机和下位机协同的软件结构设计。下位机程序基于 Keil MDK 平台，运用 C 语言进行开发，充分利用 STM32F1 系列芯片的官方 HAL 库资源，有效提升了开发效率。其核心功能模块涵盖主控制器（MCU）、AD9958 信号发生器驱动、ADS1256 数据采集驱动、数模转换（DAC）以及 USB 通信等程序。上位机程序则采用 NI-LabVIEW 图形化编程环境开发，作为人机交互的核心平台，负责参数设置、数据可视化及存储等任务。具体而言，上位机向下位机发送频率参数、增益设置及采集指令，同时接收并处理下位机传输的检测数据，实现实时存储与可视化分析。通过上下位机的协同运作，确保了整个检测系统的完整功能实现。

ST 公司为开发者提供了多种编程接口，包括寄存器库函数、标准库以及硬件抽象层（HAL）库。其中，寄存器级操作较为复杂，开发效率较低。标准库曾是最常用的开发工具，而 HAL 库作为新一代解决方案，近年来应用日益广泛。鉴于 ST 已停止标准库更新，HAL 库的推广已成为必然趋势。为提升开发效率，ST 同步推出了 STM32CubeMX 配置工具，该软件通过图形化界面自动生成初始化代码，显著简化了 HAL 库的配置流程。基于上述优势，本设计采用 HAL 库进行开发，并利用 STM32CubeMX 快速生成各模块初始化代码。

#### 4.2.1 上位机软件设计

作为人机交互的核心平台，上位机整合了涡流检测嵌入式系统的全部控制功能。其主要职责包括调控位移平台控制器和下位机的运行参数，具体涉及位移平台的移动速度、加速度以及 X-Y 轴向的行程设定；同时负责下位机的工作频率调节、增益控制、数据采集启动与传输等任务。在开发工具选择方面，VB、C++Builder、LabVIEW、Matlab 等都是常见选项，各具特色且适用于不同场景。综合考虑系统对操作界面、数据处理及图形显示的要求，本方案采用 LabVIEW 作为开发平台。该平台具有多项显著优势：

（1）LabVIEW 运用直观的可视化编程语言，其图形化的开发与展示界面为非专业编程人员提供了一个易于上手的开发平台。

（2）在测量测试领域，LabVIEW 展现出卓越的应用价值，尤其在数据获取、过程控制及信息分析等方面表现突出。该平台配备强大的可视化功能，能够以动态形式实时呈现检测结果；

（3）在基于单片机的数据采集系统中，借助 LabVIEW 的 VISA 串口功能模块，能够便捷地建立两者之间的数据传输通道。这种通信方式具有接口简洁、经济实用且操作灵活的特点。

上位机运行的流程图如图 4-8 所示。①设备上电后，软件首先对运动平台进行初始化设置，包含 X/Y 轴起止坐标定位、步距设定、运行速率及加速度参数配置等。②运行串行通信检测模块，操作者需从识别到的 COM 端口中选取目标端口并验证连接状态。通信正常建立时状态指示灯显示绿色，异常时保持灰色。③通信连接完成后，操作人员需在人机界面设定工作频段和放大系数等参数，确认后下发配置指令。主控系统将参数传输至嵌入式控制器，待执行完毕后反馈确

认信号。④参数设置完毕后，系统激活数据采集模式，运动平台开始工作。嵌入式系统根据编码脉冲时序同步获取并上传检测数据，主控端实现数据的即时存储与可视化。⑤系统实时监控运动平台位置信息，未到达目标位置则持续采集，到达后自动复位。全部数据采集完成后，主控系统自动保存完整数据集，并生成用于分析的时域波形与强度分布图像。

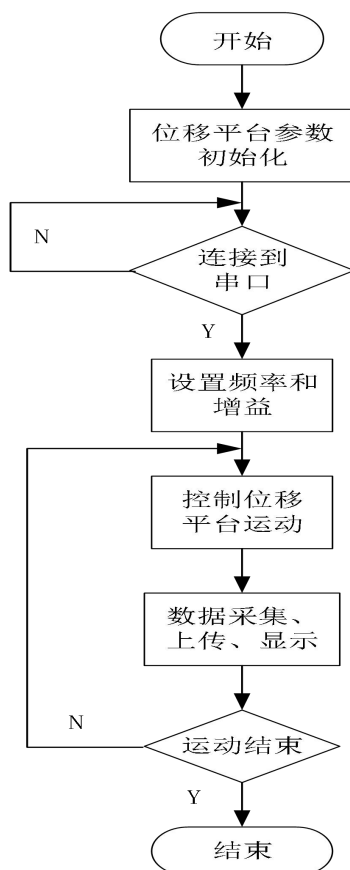


图 4-8 上位机程序流程图

上位机与位移平台之间通过 RS232 串行接口实现硬件连接。在 LabVIEW 环境中，系统借助 VISA 模块实现对 RS232 接口的识别与控制。VISA（虚拟仪器软件架构）作为一种 I/O 应用编程接口，提供了丰富的标准化仪器控制函数库。该架构支持多种通信接口的统一管理，包括常见的串行端口、USB、GPIB、以太网及 PXI 等设备。通过自动调用相应接口的驱动程序，VISA 有效屏蔽了底层通信协议的复杂性，为用户提供了便捷高效的仪器控制解决方案。

图 4-9 所示，展示了利用 VISA 串行通信接口向位移平台控制器发送电压及采样点数等参数配置的过程，同时演示了通过该接口触发平台执行预设行程的运动控制程序。



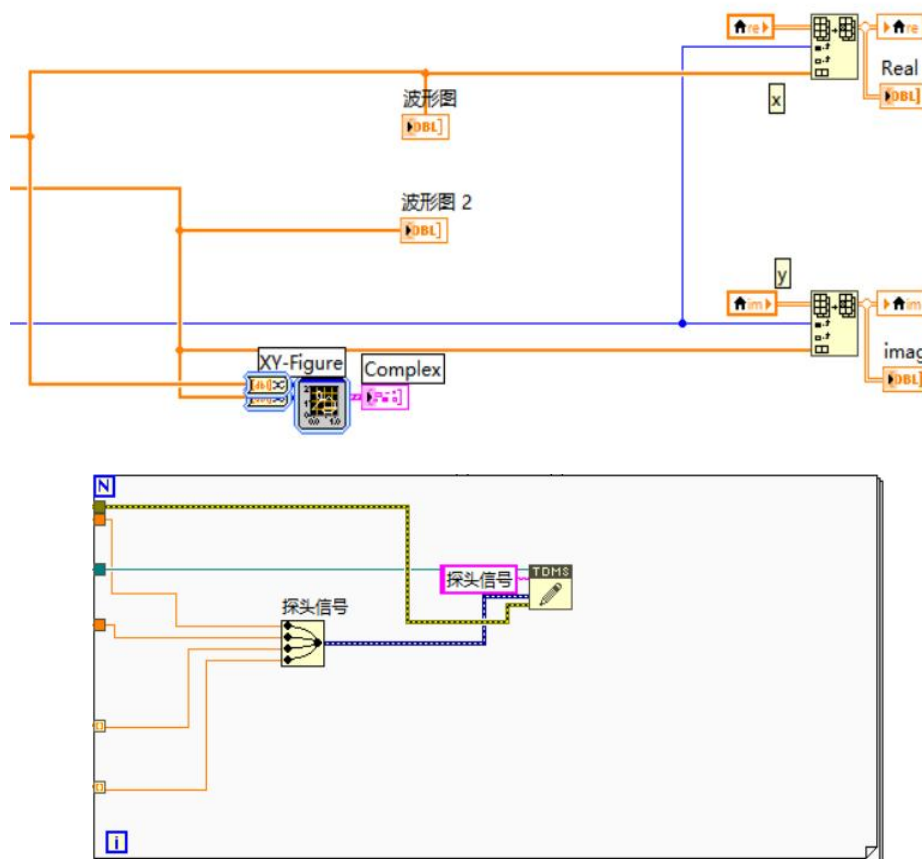


图 4-11 图像显示程序

作为人机交互的核心部分，前面板用于配置系统各项运行参数。其操作界面如图 4-12 所示。其中，VISA 串口由下位机的 USB 接口模拟生成，可在计算机的设备管理器中识别，传输速率可根据实际需求调整。根据系统的开发需求，最高频率设置为 3MHz，最高电压 10Vpp，最高电流 100mA，增益调节范围为 0-40dB，由模拟前端的可调增益放大器实现。界面右侧区域用于配置位移平台的运行参数，涵盖移动速率、加减速值、单步距离、目标位置以及等待时间等关键指标。完成参数配置后，状态指示灯将转为红色，表示系统已就绪可执行检测流程。操作流程说明：点击运行按钮后，位移平台开始移动并同步进行数据记录，此时采集状态灯显示红色。若需临时中断，可使用暂停功能停止平台移动和数据获取。待平台完全静止后，终止按键可结束整个采集过程。检测完成后，用户可通过结果查看界面观察测量图像，并调取已存储的检测数据文件进行分析。



图 4-12 上位机主界面

#### 4.2.2 下位机软件设计

下位机软件主要实现以下功能：接收主控系统的控制命令并完成对应操作，核心任务包含：设定激励信号频率与增益参数、执行信号采集及数据传输等。该下位机软件由以下功能模块构成：AD9958 波形发生器驱动模块、ADS1256 数据采集驱动模块、数模转换控制模块以及 USB 通信接口模块等。下文将阐述各模块的程序设计方法。

下位机软件的流程图如图 4-13 所示，其主要运行过程为：①系统启动时，微控制器自动执行各功能单元的初始化流程。首先加载硬件抽象层（HAL）库，随后依次配置系统时钟、LED 指示灯、按键输入、数模转换器、AD9958 频率合成器、模数转换模块、USB 通信接口以及外部中断服务程序。②系统主程序进入循环等待状态，持续监听上位机的控制命令。当检测到有效指令时，程序将根据指令类型跳转至对应的功能模块执行特定操作。③具体执行流程，频率调节指令是通过 AD9958 的寄存器配置实现输出频率调整，增益设置指令是利用内置 DAC 输出控制电压来调节放大电路增益，数据采集过程由 ADC 触发信号启动采样并获取转换数值，通过外部中断机制响应。实时读取当前采样值并经由通信总线传输。完成所有指定操作后，系统进入待命状态接收新指令。在待机期间，当中断请求产生时立即执行对应的中断处理例程。以下阐述各功能模块的驱动实现

方案。

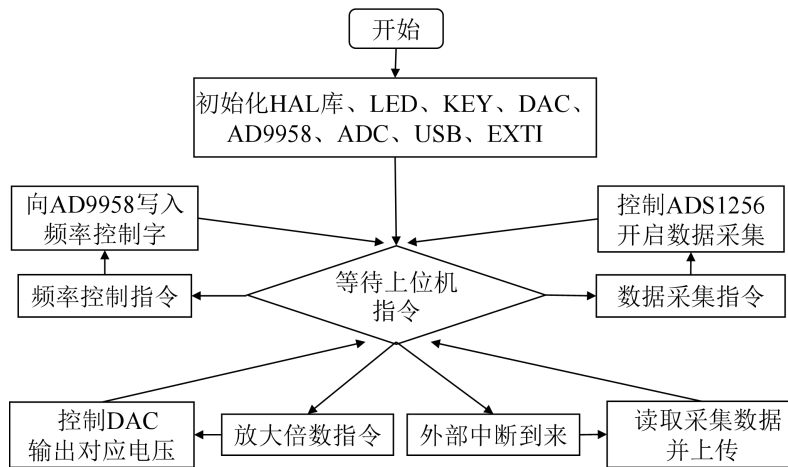


图 4-13 下位机程序流程图

#### (1) AD9958 驱动程序

AD9958 的初始化流程如下：首先配置通用输入输出端口，对芯片执行复位操作，并初始化 SPI1 通信接口。随后激活通道 0，依次写入频率和相位参数配置值；完成配置后关闭该通道，启用通道 1 进行相同参数的设置。所有参数配置完毕后执行数据更新操作，此时 AD9958 即可产生符合预设要求的正交正弦波信号。

AD9958 共有四种工作模式：单频模式、调制模式、线性扫频和输出幅度控制模式。本系统需产生两路正交正弦波信号，其频率保持一致而相位差固定为 90 度。信号频率初始设定后保持稳定，但能根据上位机指令实时调整。为实现这一功能，AD9958 芯片工作在单频输出模式下最为合适。该模式下芯片仅输出单一频率的正弦波，其频率值和相位偏移均可通过编程设置相应的控制寄存器来实现精确调控。AD9958 上电后默认为单频模式，无需设置。

#### (2) ADS1256 驱动程序

本系统采用 ADS1256 模数转换器对锁相放大电路生成的两路直流电压信号进行采样。当微控制器获取上位机发出的采集命令时，随即触发 ADC 启动采样过程。若检测到外部中断信号，则立即读取双通道的转换结果，并通过 USB 接口将采集数据实时传输至上位机进行处理，ADS1256 数据采集程序流程图如图 4-14 所示。

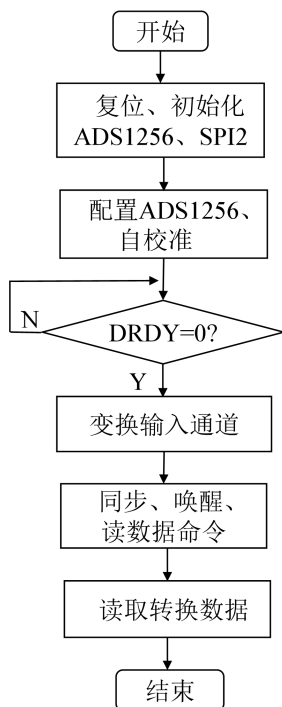


图 4-14 ADS1256 程序流程图

### (3) 软件调零

损伤定位算法通过分析信号幅值变化来确定损伤位置。系统首先采集无损伤状态下的实部和虚部数据作为参考基准，后续测量值均与该基准进行差分运算，实现数据调零处理。这一调零功能由下位机程序实现，具体流程为：以首次采集值为基准，后续数据均进行基准值扣除运算。当更换被测材料时，需重新初始化下位机系统，确保基准值随材料特性同步更新，保证测量准确性。

## 4.3 系统实验平台

基于涡流效应的成像方法通过扫描探头在复合材料表面移动，依据碳纤维增强结构中各组分电导率的不同，获取特征响应并构建图像，采用灰度对比或彩色方式清晰呈现被测材料内部结构特征。本研究采用的实验装置—嵌入式涡流检测系统的整体架构如图 4-15 所示，包含硬件部分与软件部分。

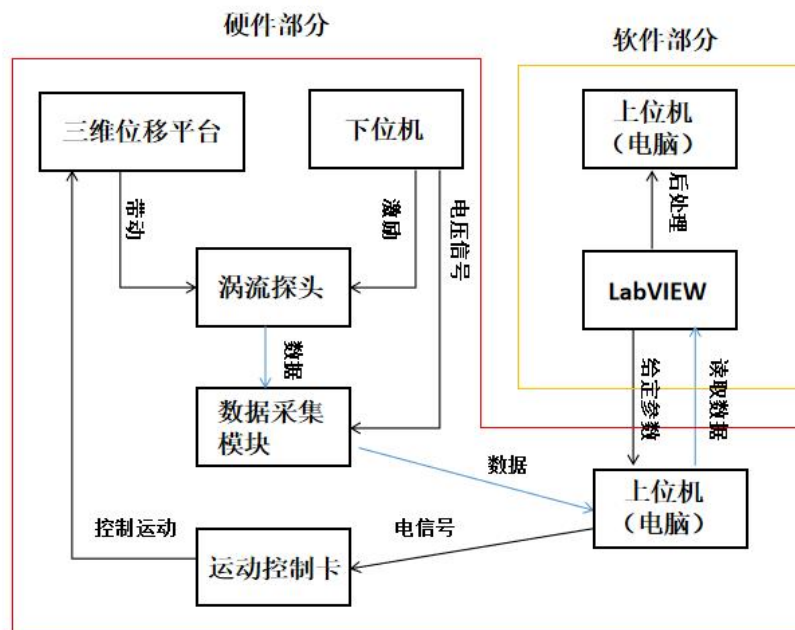


图 4-15 涡流检测实验系统总体设计

实验测试系统主要由上位机（电脑）、下位机、三坐标轴位移平台及其控制器、涡流探头构成，如图 4-16 所示。上位机利用 LabVIEW 软件程序主要负责三维坐标轴位移平台的运动、原始信号的采集、信号后处理、数据保存、数据可视化成像这五部分内容。如图 4-16 所示的下位机是由电源、模拟电路和数字电路三个模块组成，封装在了一个  $30 \times 40 \times 20 \text{cm}^3$  的定制机箱内。下位机的功能主要负责信号的发生和提取，为激励线圈提供信号源，采集探头扫描的数据，控制位移平台的定长运动，这些都利用上位机的 LabVIEW 软件完成。

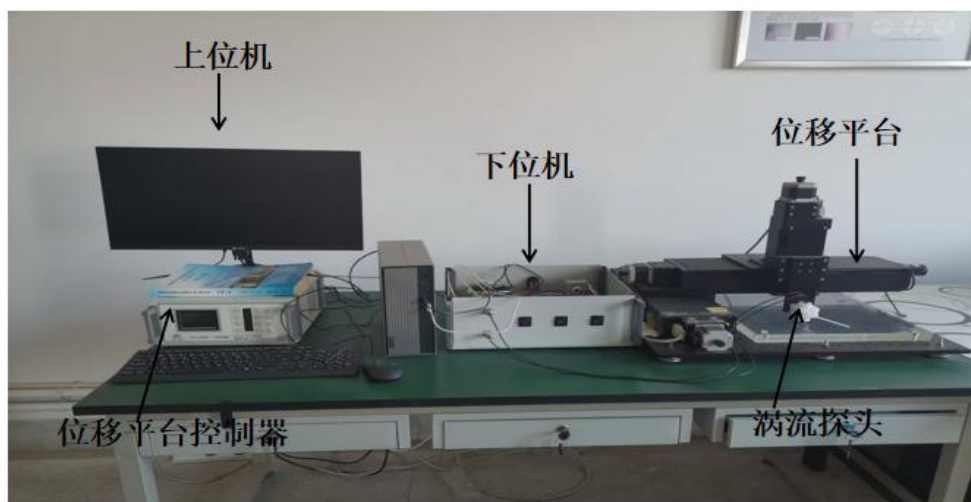


图 4-16 涡流检测系统

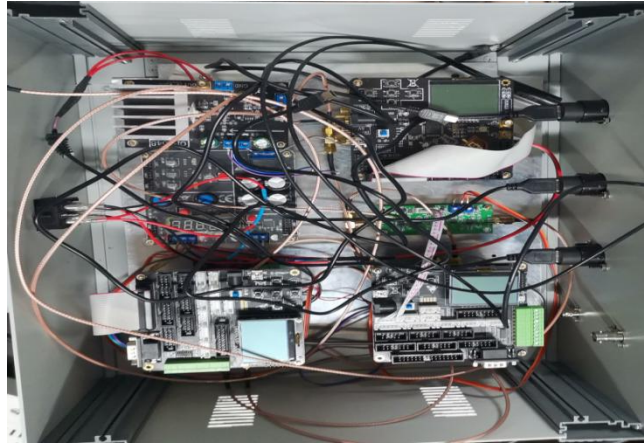


图 4-17 下位机

检测系统的工作流程如下：将待测碳纤维复合材料试样水平固定于运动平台，平台位移由上位机（电脑）通过串行通信接口精确调控。平台运动期间，检测探头与运动机构 Z 轴保持恒定间距，形成探头与试样间的相对运动，实现材料的线扫描和面扫描检测。检测过程中，上位机主界面同步呈现检测信号的时域波形与强度分布图谱，通过分析这些特征图像，可准确识别材料缺陷位置并评估损伤区域尺寸。系统检测原理示意如图 4-18 所示。

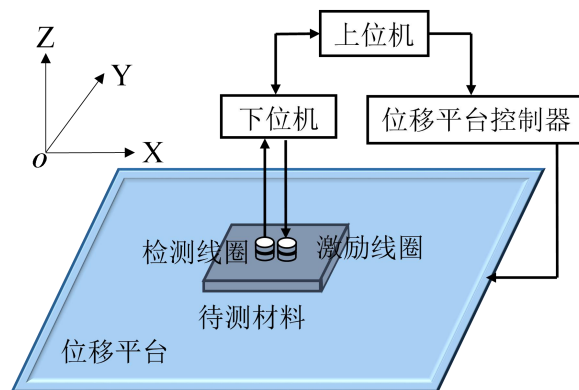


图 4-18 涡流检测示意图

本系统进行碳纤维复合材料扫描检测时采用平面 C 扫描方式。通常涡流无损检测有三种扫描方式，分别表示为 A、B、C 扫描方式，如图 4-19 所示。A 扫描是一种离散点检测方法，其工作流程为：探头在预设检测位置完成单次测量后，自动移至相邻测试点继续采集。B 扫描采用线性扫描方式，探头沿预定轨迹匀速移动并实时采集检测信号。当经过缺陷区域时，材料电导率的局部变化会引起检测线圈输出电压突变。通过分析电压幅值的时域变化特征，可以准确判断损伤是否存在。C 扫描实现的是二维平面检测，能够对被测工件特定深度截面进行完整

成像，其坐标系统通常设定为：两个轴向代表探头空间位置，第三个维度对应信号强度数值。考虑到该扫描方式会产生海量数据，直接观察原始波形难以有效识别缺陷特征，因此常规做法是将检测信号幅值转换为灰度图像，通过不同位置的明暗变化直观呈现被测区域的异常情况。

涡流 C 扫查技术采用往复运动方式对 CFRP 特定区域实施检测，获取阻抗的电阻分量与电抗分量，生成伪彩色图缺陷的平面分布图像。综合比较，A、B 扫查模式检测效率高适用于定向快速检测，而 C 扫查模式既能实现局部精查又可完成全域检测且数据信息完整。基于此优势，本研究选择 C 扫查模式开展检测路径规划，如图 4-20 所示。

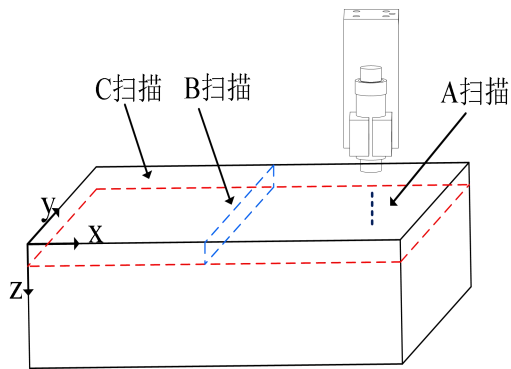


图 4-19 扫查方式示意图

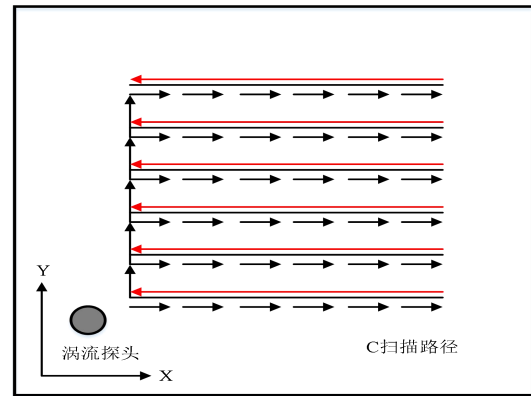


图 4-20 涡流探头二维平面扫描路径

#### 4.4 本章小结

搭建了一套基于调频的多频涡流检测嵌入式检测系统，包括 PC 上位机，已封装的嵌入式硬件系统、三坐标轴位移平台，设计了上位机与下位机软件，上位机的功能是控制位移平台的运动和数据采集与存储工作，并对检测结果实时保存，下位机主要负责接收上位机发来的指令。多频涡流检测系统采用单个检测通道就能一次实现不同深度的缺陷检测，并且频带集中于已知范围内，便于进行信号处理分析。

## 第 5 章 CFRP 夹层结构的多频涡流损伤检测

利用 4.4 节提到的涡流检测实验系统平台，进行碳纤维复合材料的裂纹检测实验，通过改变探头的间距、频率、线圈的方向其中的任意一个变量，将采集到的电压损伤数据利用 Matlab 软件绘制成像，从实验中可以得出低频可以检测更深层次的缺陷，线圈间距和线圈方向的改变都会影响到检测的结果。

### 5.1 CFRP 层压板损伤检测

设置下位机的灵敏度设置为 20mV，增益设置为 20dB，输入限制 160mV，时间常数是 20ms，电压设置为 2V，工作频率设置为 500kHz 和 2MHz。实验先使用单个 T-R 扫描图 5-1 中 3 个区域的裂纹，然后使用两个 T-R 涡流探头扫描区域 1。实验所用试件为长 300mm，宽 300mm，高 5mm 的碳纤维复合板，其中区域 1 和区域 2 的条形裂纹的长度 10mm，裂纹宽度 1mm，区域 1 从上到下的深度分别是 1mm, 2mm, 3mm，区域 2 从上到下的深度分别是 4mm, 2.5mm, 3.5mm。区域 3 形状从上到下的第一行是直径为 10mm、8mm 和 6mm 的正方形，第二行是直径为 10mm、8mm 和 6mm 的圆形，第三、四行的裂缝长 10mm, 宽 1mm。区域 3 的三列从左到右的裂纹深度分别为 2mm、3mm、4mm。区域 1、区域 2 和区域 3 如图 12 所示。

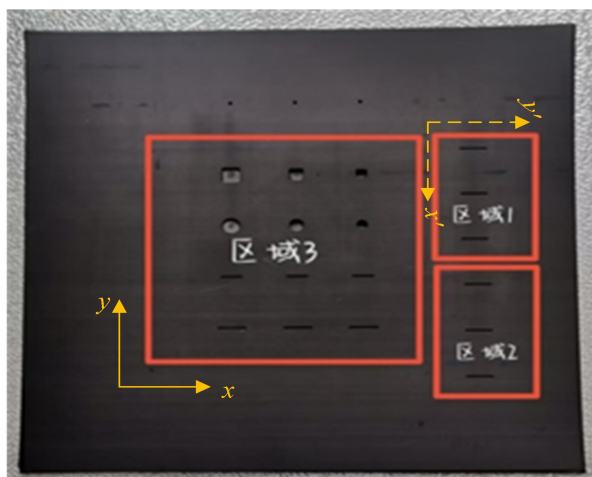
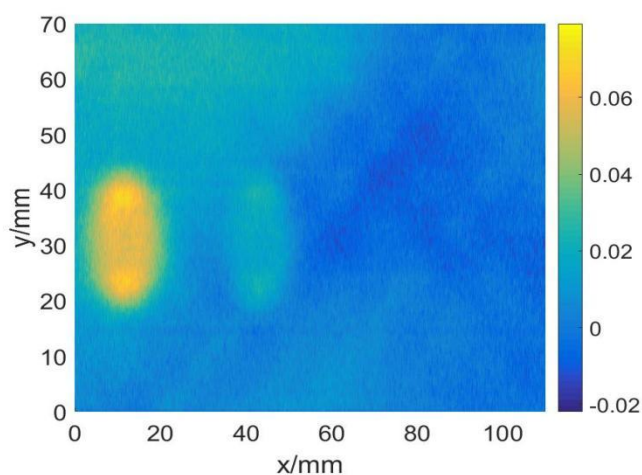


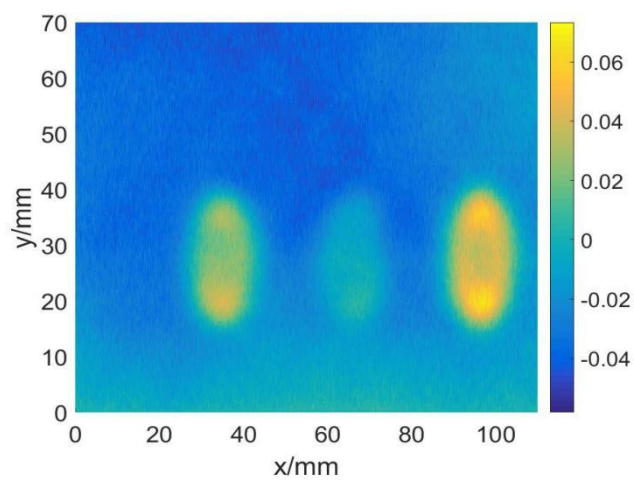
图 5-1 CFRP 扫描区域

将碳纤维复合板水平放置于三坐标轴位移平台上，有裂纹的正面朝下，无裂纹的背面朝上。T-R 探头由夹具固定在位移平台上，随着位移平台运动而运动。区域 1 和区域 2 的扫描范围都是 110mm×70mm，区域 3 的扫描范围是 150 mm ×

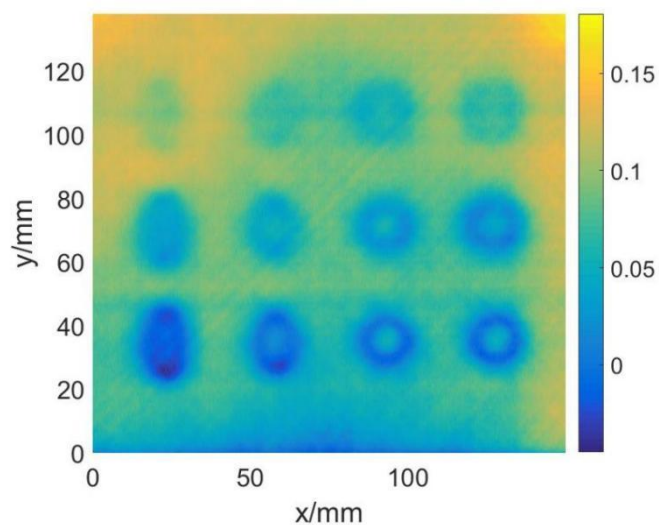
150mm。实验过程中，先将下位机工作频率设置为 2MHz，电压设置为 2V，用单个 T-R 探头扫描区域 1、区域 2 和区域 3 的背面，如图 5-2 所示，3 个区域所得的伪彩色图像均经过相位旋转，在  $60^\circ$  时取最优图，可以看出区域 1 只能检测出到最深的一条 3mm 缝隙，区域 2 的三条缝隙都能扫描到，区域 3 的伪彩色图像显示出 12 处缺陷。



(a) 区域 1



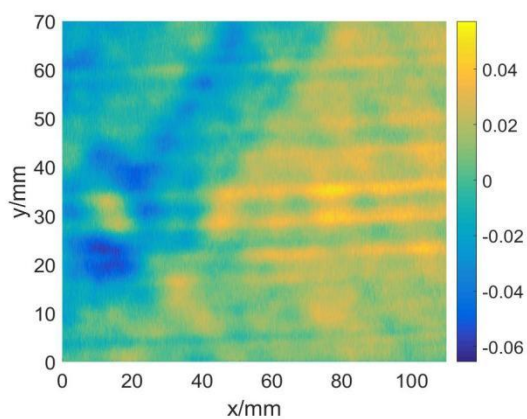
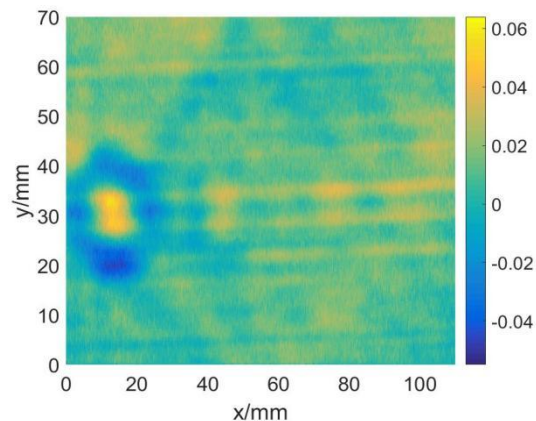
(b) 区域 2



(c) 区域 3

图 5-2 区域 1、2、3 的伪彩色图像

由于区域 1 的伪彩色图像的效果不理想,故而接下来只对区域 1 进行涡流扫描,通过拉开 2 个 T-R 探头距离来提高检测的准确率。信号发生器的工作频率设置为 2MHz,电压设置为 2V,用涡流探头扫描区域 1 的背面,绘制的区域 1 背面伪彩色图如图 5-3 所示,图 5-3 分别为相位旋转  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  的图像。

(a) 相位旋转  $0^\circ$ (b) 相位旋转  $30^\circ$

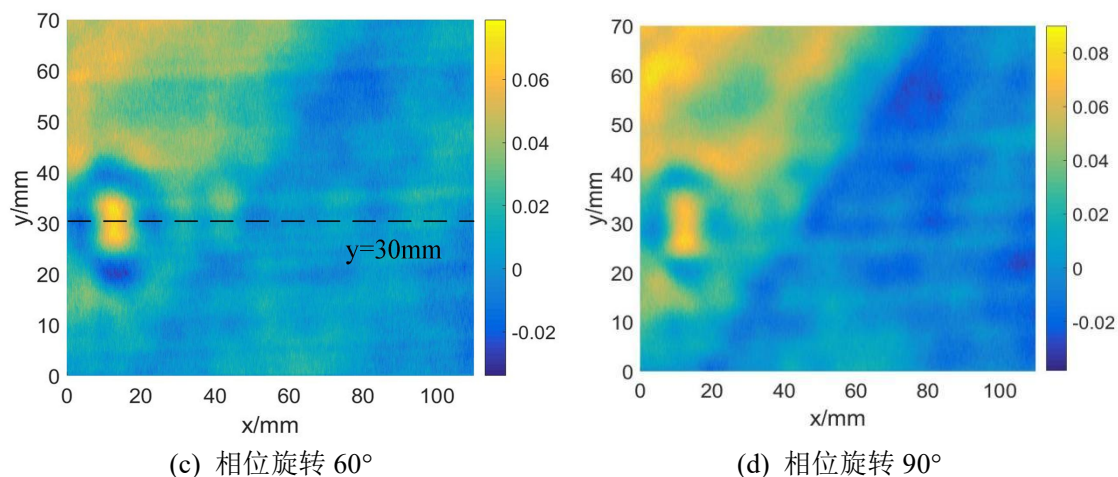


图 5-3 2MHz 涡流探头扫描图像

可以看出，工作频率 2MHz 的涡流探头扫描区域 1 后绘制的伪彩色图像经过旋转相位，依旧只能检测出最深的那道裂纹。最后考虑降低频率来提高检测率，将信号发生器的工作频率设置为 500kHz，电压设置为 2V，用涡流探头扫描区域 1 的背面，绘制的区域 1 背面伪彩色图如图 5-4 所示，可以看出降低频率后涡流能够检测出区域 1 的 3 条裂纹。

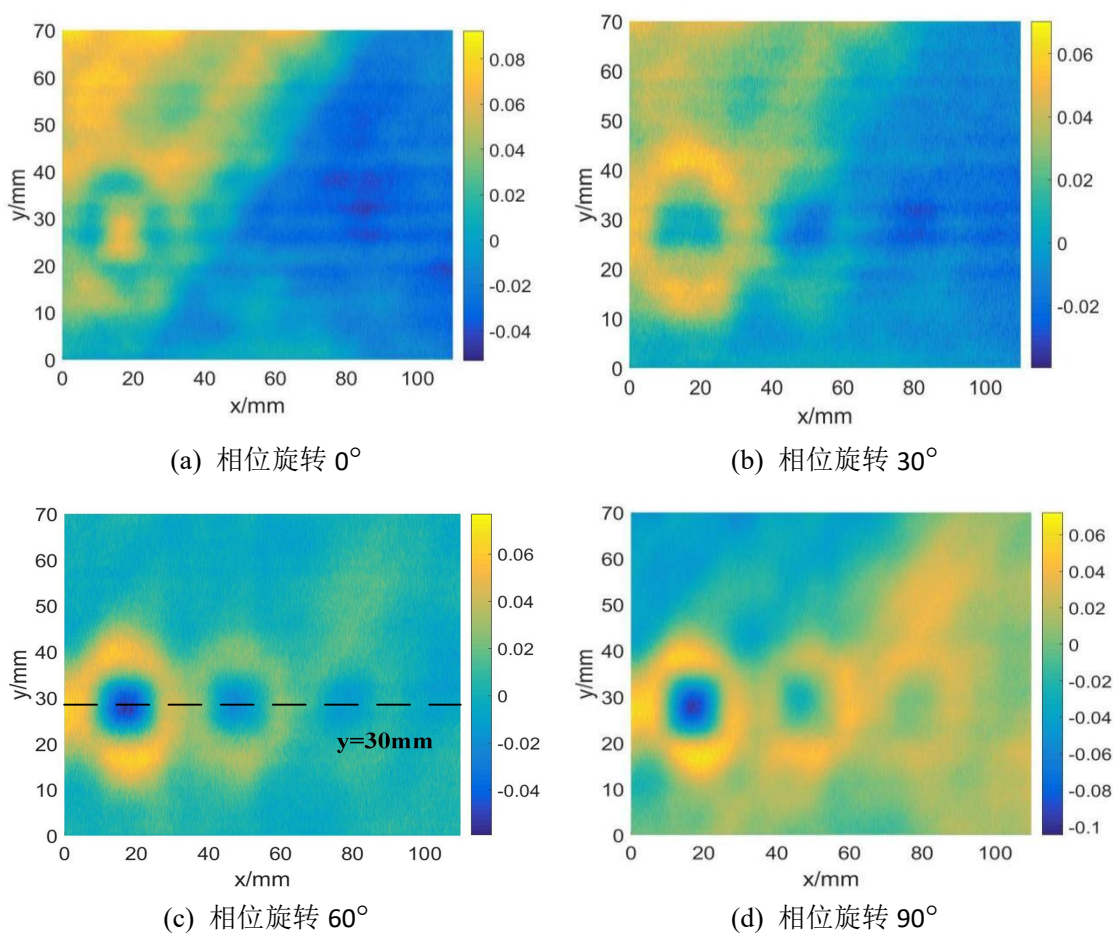


图 5-4 500kHz 涡流探头扫描图像

图 5-5(a)是从工作频率为 2MHz，涡流探头扫描区域 1 后经过相位旋转 60° 的伪彩色图像中提取的电压损伤信号值，图 5-5(b)是从工作频率为 500kHz，涡流探头扫描区域 1 后相位旋转 60° 的伪彩色图像中提取的损伤信号值，对比两图，可以清晰的看出工作频率 500kHz 的 3 处裂纹损伤的波谷更明显。从图 5-3、5-4、5-5 中可以看出，使用低频涡流检测可以更清楚地揭示深层缺陷。

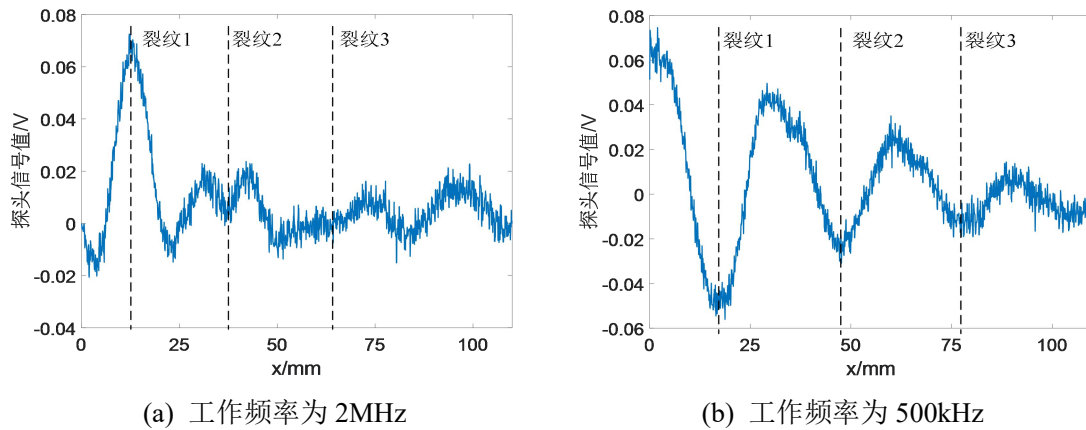


图 5-5 不同频率下区域 1 损伤的信号值

使用涡流 T-R 探头检测 CFRP 的深层缺陷，并通过优化线圈间距，不同频率、裂纹缺陷深度和电导率下获得最大的检测灵敏度。涡流检测方案基于 Ar 法，利用 Isight 搭建的线圈间距非线性仿真优化平台，建立涡流检测探头间距、线圈工作频率与 CFRP 电导率之间的相关性。通过测量不同工作频率引起的信号幅值变化，观察线圈电压与工作频率之间的关系，发现随着工作频率和电导率的增加，需要减小线圈间距以获得更高的分辨率，并提高深裂纹检测的灵敏度。在涡流扫描检测实验中，采用不同线圈间距对 CFRP 深裂纹缺陷进行扫描，增大线圈间距提高了低频深裂纹检测的信噪比。

## 5.2 金属夹层远场涡流损伤检测

由于目前对于冲击破坏的仿真方法还不成熟，所以只对冲击破坏的层合板和金属板叠层结构进行实验检测。首先制备冲击破坏的层合板，将落锤置于一定高度后自由砸落到板上产生冲击破坏。如图 5-6(b)所示，可以看到板在冲击的作用下产生了一个明显的凹坑，背面可以明显看到纤维断裂和基体开裂，改变冲击条件会影响到层合板内部纤维断裂和分层情况，通过降低冲头下落的高度使得层压板表面不出现明显的凹坑。叠层结构上方的冲击层合板长 150mm，宽 100mm，

厚度为 3mm，冲头的直径在 22mm，冲头砸出来的凹坑小于 22mm，叠层结构下方的金属板（图 5-6(a)）长 200mm，宽 100mm，厚度为 5mm，其中两道裂纹的深度分别为 1mm 和 2mm。

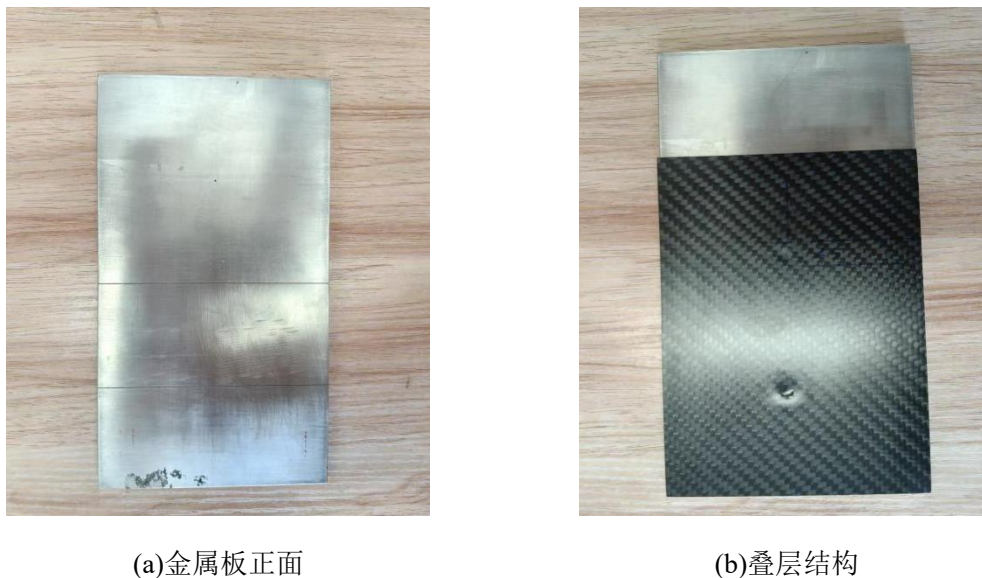


图 5-6 待测试件的实物图

检测方法的最终结果都是通过图像来呈现的，涡流成像是涡流检测技术的重要组成部分，是实现快速化、可视化无损检测不可或缺的关键技术。探头扫描方向分别采用第三章线圈方向仿真 3-15(a)和(b)的摆放方式，检测对象为冲击破坏层合板和金属板,叠放的方式如图 5-6(b)。下图是冲击破坏层合板和金属板在工作频率为 500kHz、2MHz 下的成像结果。可以看出，线圈采用左右摆放的位置检测的效果最好，工作频率为 500kHz 时可以看到金属板上的损伤，工作频率为 2MHz 可以看到冲击层合板上的损伤，因为线圈左右摆放时，两线圈距离最远且磁场垂直于损伤处，所以检测效果好。线圈前后摆放时，无论是 500kHz 还是 2MHz 都看不到金属板上的损伤。

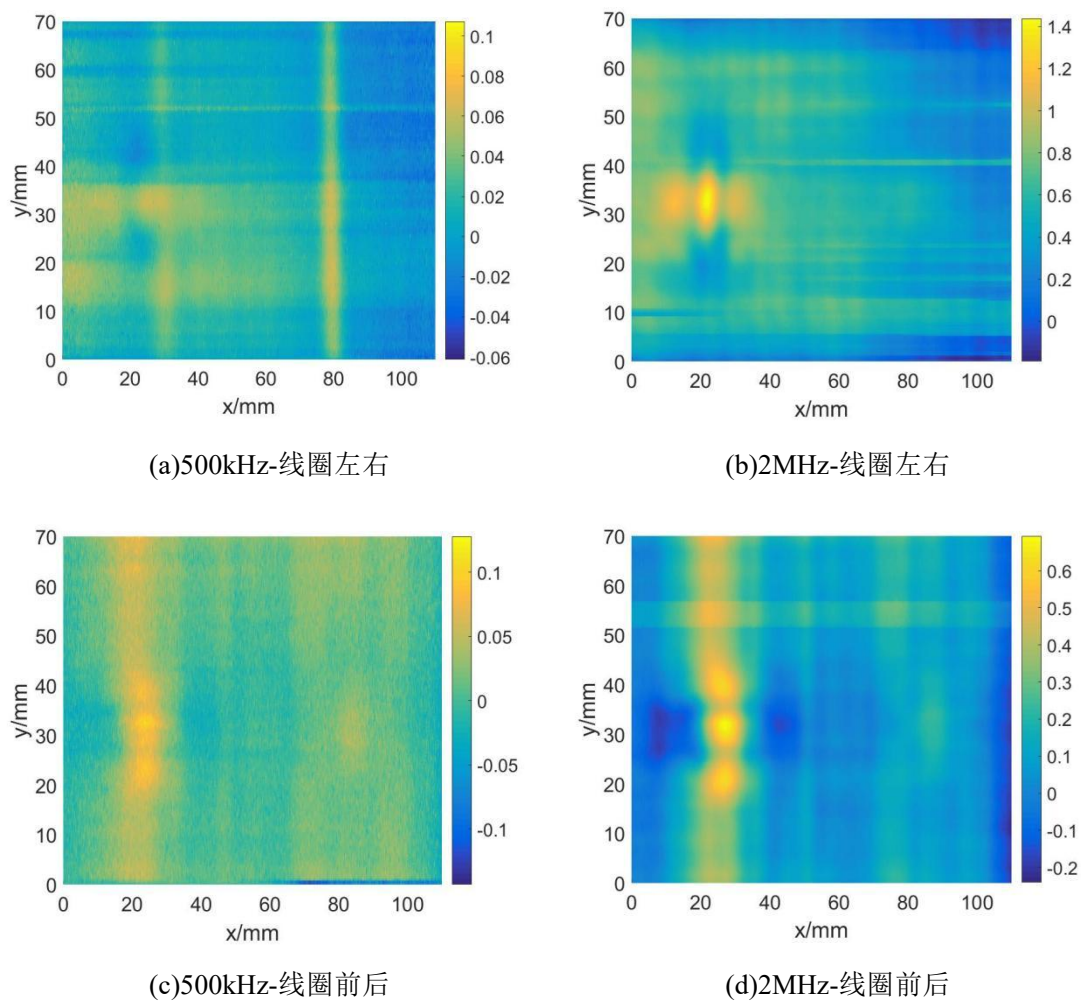


图 5-7 冲击板和金属板叠层成像图

将图 5-7 的图像都经过相位旋转处理后，如图 5-8 所示，发现只有工作频率为 500kHz，线圈摆放的位置为左右的时候，可以同时看见冲击板上和金属板上的损伤，说明降低工作频率和拉远线圈距离可以采集深层次的缺陷。若未能从经过相位旋转的图像观察到明显的损伤，也不能说明没有损伤信号，可能是冲击板和金属板的损伤信息耦合在一起，通过相位旋转这种处理方式观察不到。

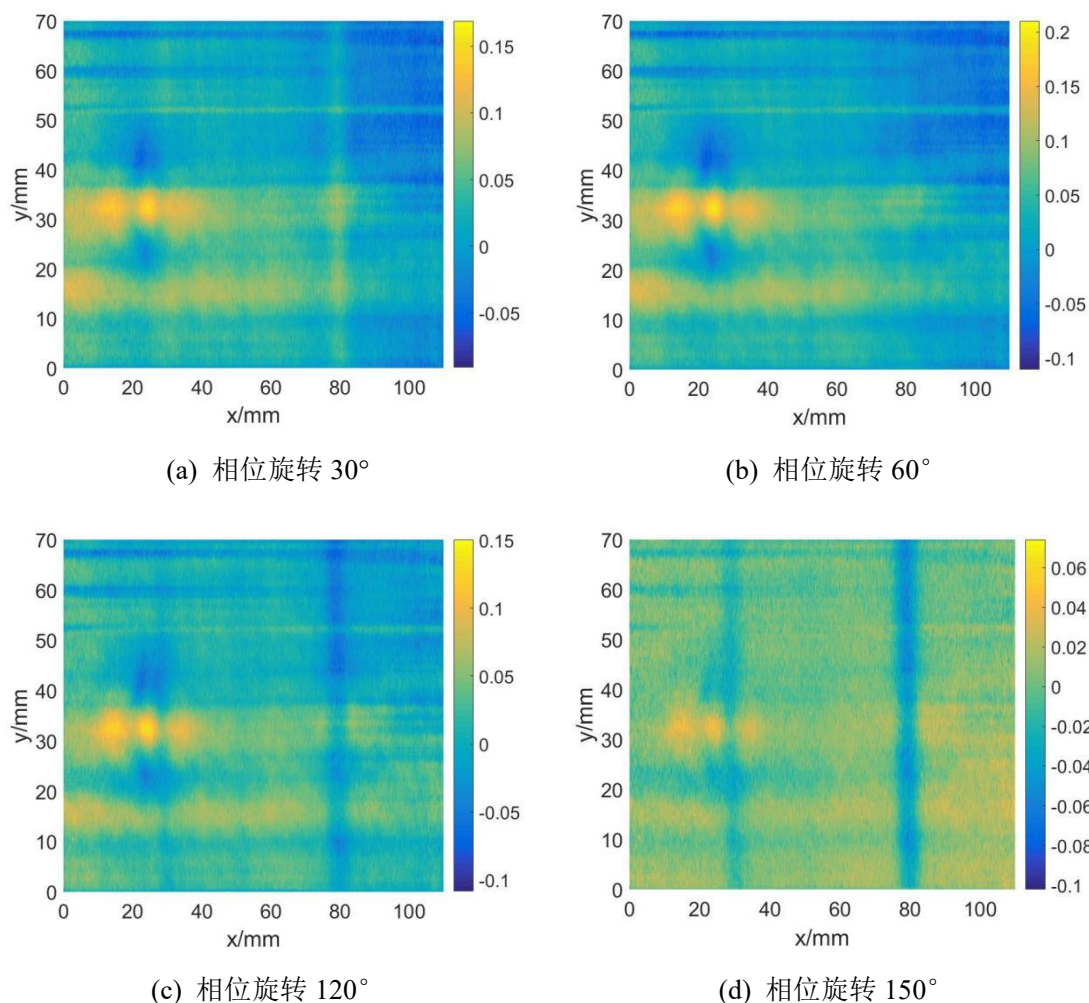


图 5-8 500kHz-线圈左右，相位旋转图像

同样使用工作频率为 500kHz、2MHz 激励线圈，去检测都有两道裂纹的 CFRP 和金属板，叠层结构上方的 CFRP 长 150mm，宽 100mm，厚度为 6mm，叠层结构下方的金属板长 200mm，宽 100mm，厚度为 5mm，其中两道裂纹的深度分别为 1mm 和 2mm。将采集到的实部电压和虚部电压数据通过 Matlab 软件绘图成像，如图 5-9 所示，实验表明，线圈不同方向上的摆放会影响检测结果，线圈的左右摆放采集到的数据比线圈前后摆放采集到的数据效果更好。未经处理的图像都可以看到 CFRP 上的两道裂纹损伤，但看不到下层金属板的两道损伤。

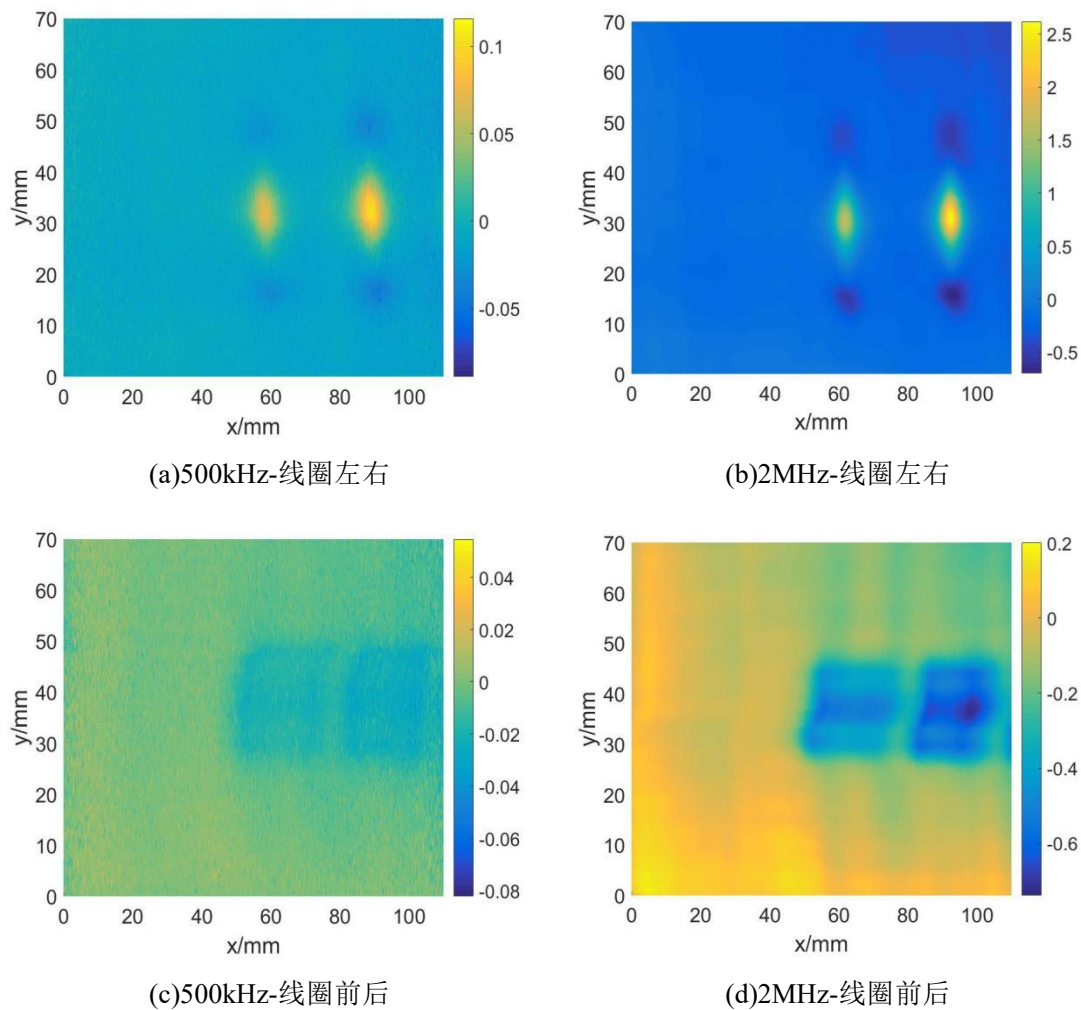
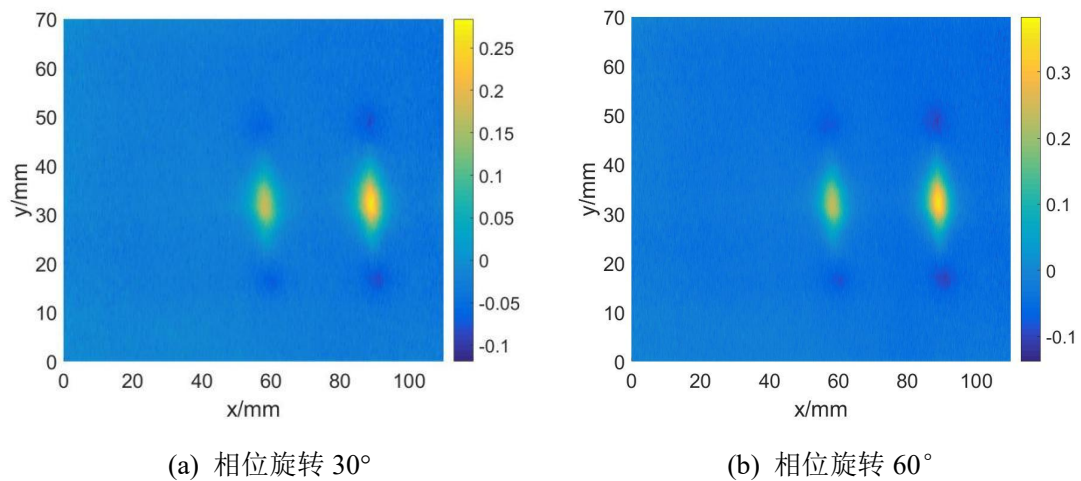


图 5-9 CFRP 和金属板叠层成像图

图 5-10 是工作频率为 500kHz，线圈左右摆放条件下，经过不同角度的相位旋转的伪彩色图像，将这些图像经过相位旋转处理后发现，只有相位旋转  $150^\circ$  的图像能看到金属板上不太明显的损伤。



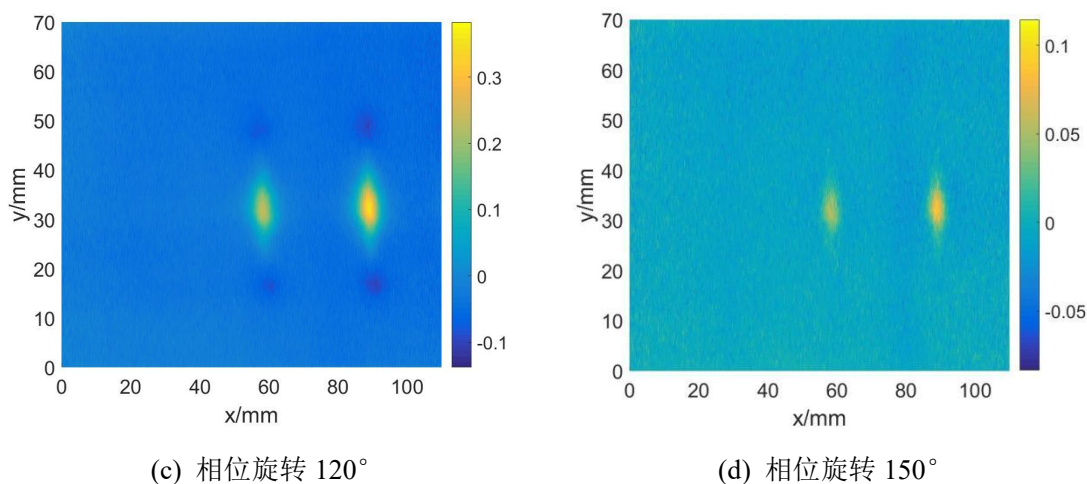


图 5-10 500kHz-线圈左右, 相位旋转图像

考虑到 Parula 伪彩色图像可能会掩盖一些损伤信息, 将图 5-10(c)和(d)中的图像进行灰度处理, 得到图 5-11, 可以看出相位旋转  $150^\circ$  时, 图像上有金属板的两处损伤。

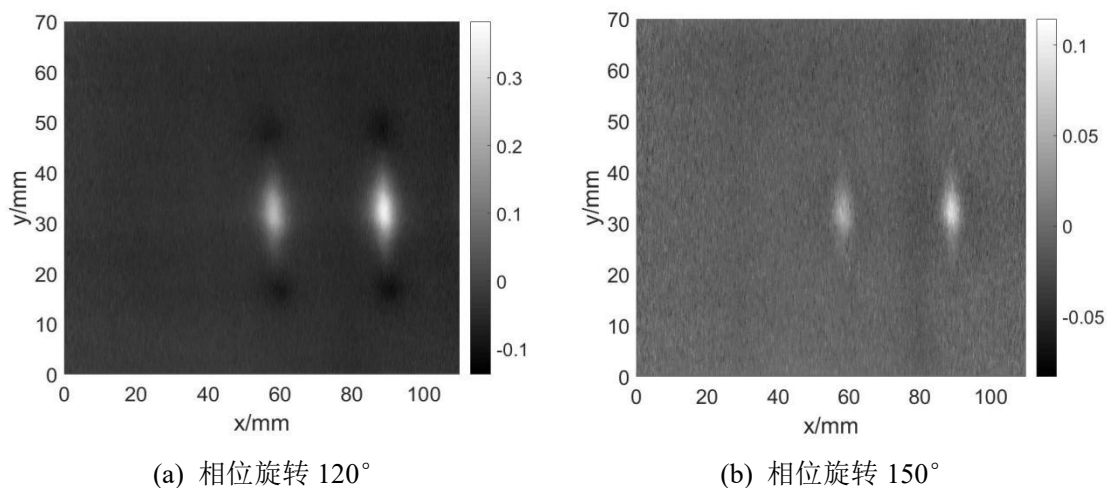


图 5-11 灰度图

铝蜂窝夹层结构作为一种创新的复合材质体系, 采用三层异质材料复合而成。该材料具有显著的技术优势: 整体密度低但力学性能突出, 在抗压方面表现尤为出色, 同时具备良好的声学阻隔和热绝缘特性。基于这些卓越的物理特性, 该材料在飞行器制造等高端领域已实现规模化应用。铝蜂窝夹层主要由三个部分组成, 如图 5-12, 上面板和下面板, 铝蜂窝芯, 胶粘剂。



图 5-12 铝蜂窝夹层结构实物图

分别使用 500kHz、2MHz 的工作频率激励线圈，检测有两道裂纹的铝蜂窝夹层结构，铝蜂窝大小 150mm×150mm，裂纹长 20mm，宽 1mm，深度分别为 0.1mm 和 0.2mm，将采集到的电压数据绘成如图 5-13 伪彩色图。从图中可以看出 500kHz 和 2MHz 均能检测出铝蜂窝上面的两道裂纹，相位旋转 120° 和 150° 可以看到铝蜂窝中间的铝蜂窝芯分布。

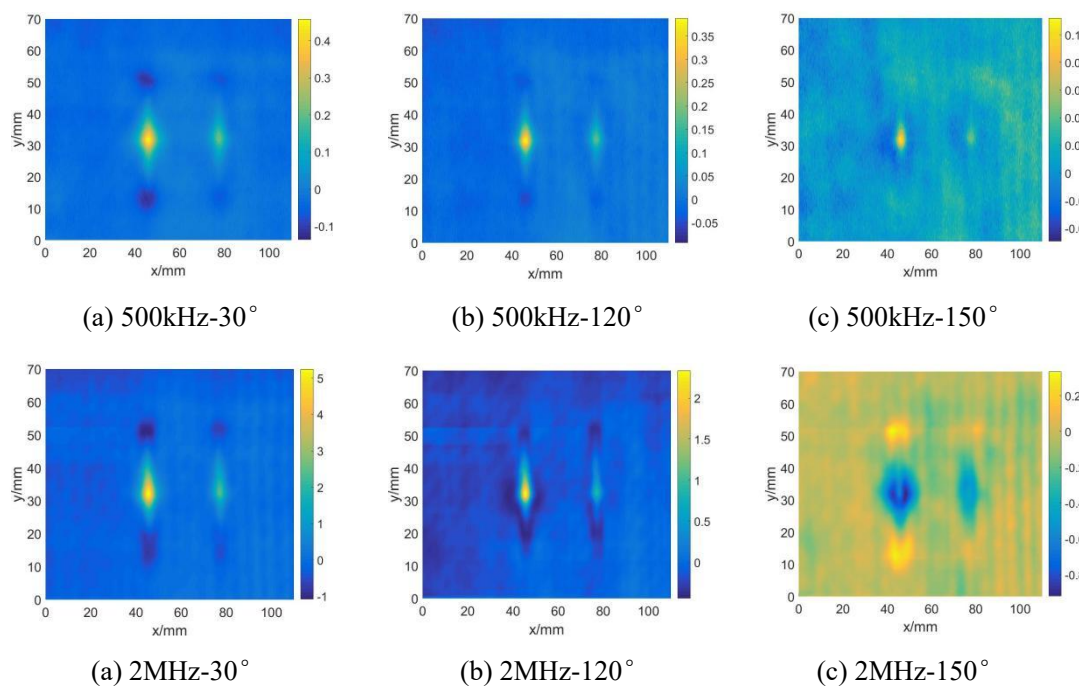


图 5-13 铝蜂窝成像图

### 5.3 总结

本章节主要进行了碳纤维复合材料的裂纹和夹层结构实验，其中夹层结构分为三组不同检测对象实验，冲击板和金属板，CFRP 和金属板以及铝蜂窝碳纤维

复合板。通过控制变量法，改变探头的间距、频率以及线圈的方向其中的任意一个变量，然后利用 T-R 探头扫描有损伤的 CFRP，采集实部和虚部电压值，然后利用 Matlab 软件画出损伤的伪彩色图像，实验验证了第四章搭建的系统可以检测出 CFRP 的损伤。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 总结

碳纤维复合材料作为一种新型的材料，具有极高的强度与刚性、密度低与轻质、耐疲劳性和耐腐蚀性，与金属材料相比，碳纤维复合材料能在恶劣的情况下保持稳定，这对航空航天、汽车领域非常重要，其密度低重量轻可以显著提高燃油效率和性能。碳纤维复合材料的这些优点使其成为航空航天、汽车、体育器材、建筑、能源等多个领域的理想材料。为了航空航天、汽车等结构的安全性，检测碳纤维复合材料在制造和使用过程中出现的损伤是十分重要的，通过涡流检测手段及时发现材料内部的缺陷，如裂纹、分层和纤维断裂等，避免因材料失效导致的事故。

近年来，国内外针对碳纤维复合材料无损检测技术取得了一定的研究成果，大部分的研究处在检测碳纤维复合材料表面的缺陷，目前还没有一种能检测到 CFRP 深层损伤的技术，基于这一研究现状，本文首先分析了 CFRP 无损检测的常用几种方法，根据涡流检测基本理论对碳纤维复合材料检测进行仿真分析，然后搭建了一套涡流检测嵌入式系统进行实验验证。主要成果如下：

(1) 根据被测件的外形特点设计了一种 T-R（发射-接收）探头，合理的布置激励线圈与接收线圈的位置，通过优化探头尺寸来抑制噪音的干扰，提高了信噪比和检测的可靠性。通过对发射-接收线圈的工作原理进行参数分析，建立线圈间距和线圈方向仿真模型，确定线圈的各项参数值，进行了不同频率，不同线圈方向，有无损伤的参数化扫描，对比电流密度模和电压曲线的变化，得出了最佳检测频率以及线圈摆放的方向，从而实现对不同深度隐藏缺陷的检测。

(2) 搭建了一套基于调频的多频涡流检测嵌入式检测系统，包括 PC 上位机，已封装的嵌入式硬件系统、三坐标轴位移平台，设计了上位机与下位机软件，利用集成后的涡流检测系统对 CFRP 进行损伤实验验证，采用工作频率为 500kHz 和 2MHz 去激励线圈，线圈不同的方向去检测碳纤维复合材料板以及叠层结构的裂纹损伤，发现工作频率为 500kHz 的低频能检测深层次的缺陷，实验结果与仿真结果相一致，验证了系统的可行性以及实用性。

## 6.2 展望

本文对碳纤维复合材料损伤结构的成像以及损伤识别进行了研究,仿真结果表明本文设计的 T-R 探头能检测碳纤维复合材料深层损伤,后续的实验也证实了这一点,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) 实验所采用的涡流检测嵌入式系统适用于二维平面的碳纤维复合材料检测,有利于检测体积小但不利于检测大型或者整体结构的碳纤维复合材料,故而在工业现场检测困难。

(2) 本文通过寻找最佳相位旋转角度的方式来使损伤形式表现得更加准确,但是不清楚每一个损伤的具体深度,所以损伤深度位置的确定也是一个研究难点。

## 参考文献

- [1] Mix P. E. Introduction to nondestructive testing: a training guide[M]: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] 葛邦, 杨涛, 高殿斌, 李明. 复合材料无损检测技术研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(06):67-71.
- [3] 朱煜龙. 多尺度特征解耦的CFRP损伤涡流检测方法研究[D]. 安徽工程大学, 2024.
- [4] 刘拓. 无损检测技术在机械工业中的应用和发展[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2020(06):173-174.
- [5] 任吉林, 林俊明. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [6] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势[J]. 化学工业, 2019, 37(04):12-16+25.
- [7] 何敏, 黄志锋. 涡流检测和交流电磁场检测方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(06):109-112.
- [8] Lu M Y, Xu H Y, Zhu W Q, et.al. Conductivity Lift-off Invariance and measurement of permeability for magnetic plates[J]. NDT & E International, 2018, 95:36-44.
- [9] Sophian A, Tian G Y, Taylor D, et al. Electromagnetic and eddy current NDT: A review[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2001, 43(5):302-306.
- [10] 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.
- [11] 侯建华. 9 多叶光栅放射治疗系统中若干关键技术研究[D]. 大连理工大学, 2006.
- [12] Bull D J, Helfen L, Sinclair I, et al. A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage[J]. Composites Science & Technology, 2013, 75(2):55-61.

- [13]张超, 季宏丽, 裘进浩, 吴郁程.激光超声检测中干涉特征提取算法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7):0714001-1-9.
- [14]任吉林, 林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社, 2008,8.
- [15]程军, 徐帅, 汪步云等.一种自调零平切型电涡流探头及其在碳纤维复合材料细观成像中的应用[J].机械工程学报, 2021, 57(04): 27-35.
- [16]Hellier C J. Handbook of Nondestructive Evaluation[M]. New York: McGraw-Hill, 2003:1-2.
- [17]康宜华, 宋凯, 杨建桂等.几种电磁无损检测方法的工作特征[J].无损检测, 2008, 30(12):928-930, 933.
- [18]候维娜, 屈双慧.涡流检测的现状与新进展[J].重庆工学院学报, 2007, 21(8): 67-70.
- [19]游凤荷.涡流检测技术的某些新进展[J].无损检测, 2001, 23(2):70-73,77.
- [20]任吉林.电磁无损检测的新进展[J].无损探伤, 2001, (5):1-2, 28.
- [21]刘宝,徐彦霖,王增勇等.涡流检测技术及进展[J].测控技术, 2006, 25(3):80-82.
- [22]江菡.基于调频的多频涡流无损检测研究[D].南京航空航天大学, 2013.
- [23]赵亚飞.基于涡流技术的钢板表面缺陷检测系统研究[D].沈阳工业大学, 2017.
- [24]周德强, 王俊, 张秋菊等.铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J].仪器仪表学报, 2015, (05):989-995.
- [25]程玉华, 周肇飞, 蔡鹏.法拉第磁光效应在可视化涡流检测中的应用[J].激光技术, 2007, 31(1):22-24, 28.
- [26]李肖寒.基于高频涡流的热障涂层厚度检测方法研究[D].中国矿业大学, 2020.
- [27]吴桔生, 吴承燕.电涡流技术与应用[M].湖南:中南大学出版社, 2014.
- [28]郭太平.基于 ARM 和 LabVIEW 的高频电磁涡流检测系统集成设计[D].南京航空航天大学, 2016.
- [29]Schmidt C, Schultz C, Weber P, et al. Evaluation of eddy current testing for quality assurance and process monitoring of automated fiber placement [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56:109-116.

- [30]Heuer H, Schulze M H. Eddy Current Testing of Carbon Fiber Materials by High Resolution Directional Sensors[C]. Proceedings of Smart Materials & Structures, NDT in Aerospace, Canada, 2011.
- [31]Heuer H, Schulze M H, Meyendorf N. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: eddy current techniques[J]. Non-Destructive Evaluation of Polymer Matrix Composites: Techniques and Applications, 2013:33-55.
- [32]刘建文.基于 GMR 传感器的无损探测系统的设计[D].杭州电子科技大学, 2013.
- [33]彭俊华.用于碳纤维复合材料的高频电磁涡流检测系统集成[D].南京航空航天大学, 2017.
- [34]游勇.涡流实时扫描成像检测系统的设计与集成[D].南京师范大学, 2021.
- [35]单韶峰.涡流及预多频检测技术[J].汽车制造业, 2008, (7):48-50, 54.
- [36]Xiang P, Ramakrishnan S, Cai X, et al. Automated Analysis of Rotating Probe Multi-Frequency Eddy Current[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2000, (12): 151-164.
- [37]He D F, Yoshizawa M. Dual-Frequency Eddy-Current NDE Based on High-Tc RF SQUID[J]. Physica C-Superconductivity and Its Applications, 2002, (383): 223-226.
- [38]Andrea Bernieri,Giovanni Betta,Luigi Ferrigno, et al. Multi-frequency Eddy Current Testing using a GMR based instrument[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS. 2012. 39 (1-4) : 355-362.
- [39]A. C. Okafor,S. Natarajan. Multifrequency eddy current inspection of corrosion in clad aluminum riveted lap joints and its effect on fatigue life[M], 2007: 1274-1281.
- [40]陈金贵.多频/远场涡流检测技术在电力系统中的应用[J].无损检测, 2009, 1(1):847-850.
- [41]高军哲,罗飞路,潘孟春等.基于 DDS 技术的模块化多频涡流检测系统设计[J].仪表技术与传感器. 2009, (10):105-107.

- [42]高军哲,潘孟春,张琦等.基于调频激励和细化谱分析的多频涡流检测技术研究[J].仪器仪表学报.2011, (11):2628-263.
- [43]Junzhe Gao,Mengchun Pan,Feilu Luo, et al. Spectrum Analysis and Defect Classification of Pulsed Eddy Current Testing[J]. Proceedings of the CSEE. 2011, 31(28):154-160.
- [44]张东利,陈振茂,武美先等.多频涡流裂纹重构方法及其在金属夹芯板焊部裂纹定量检测中的应用[J].无损检测.2010, (08):556-559.
- [45]潘强华,朱志斌.换热器管的多频涡流检测技术[J].无损探伤.2012, (04):32-34.
- [46]沈丁杰,邹建伟,胡彬.锅炉受热面奥氏体不锈钢管弯头表面裂纹涡流检测技术研究[J].湖南电力. 2011, (03):5-7
- [47]胡兆祥,吴小亮.卧式蒸汽发生器传热管涡流检验方法与系统[J].电子世界. 2012, (14):67-69.
- [48]Thirunavukkarasu S, V A, Rao B P C, et al. Development of a high-sensitive dual frequency remote field eddy current instrument for inspection of ferromagnetic steam generator tubes[J]. IETE Technical Review, 2019, 36 (2): 203-208.
- [49]常金鹏.基于远场涡流的平板及管道缺陷在役检测技术研究[D].燕山大学, 2023.
- [50]张晨浩.金属平板阵列远场涡流检测研究[D].厦门大学, 2022.
- [51]Xu X, Liu M, Zhang Z.et al.A novel high sensitivity sensor for remote field eddy current non-destructive testing based on orthogonal magnetic field [J]. Sensors,2014,14(12): 24098-2411.
- [52]Kobayashi N, Ueno S, Nagai S, et al.Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor. Nuclear Engineering & Design, 2011, 241(12):4643-4648.
- [53]王戈,钱慧芳,李喜文.铁磁性小径管道的脉冲双远场涡流检测[J].无损检测, 2018,40(9):14-18.
- [54]李晴.弱导电复合材料的高频电磁涡流检测系统开发[D].南京师范大学, 2020.

- [55]CHENG J, ZHU Y, WANG B, et al. Noncontact visualization of multiscale defects in CF RP composites using eddy current testing with T-R probe[J]. NDT and E International, 2024, 145:103138.
- [56]刘蒙蒙.高频涡流检测阵列探头阻抗设计与缺陷成像研究[D].安徽工程大学, 2024.
- [57]后雪冰.飞机多层金属铆接结构阵列脉冲涡流检测技术研究[D].南昌航空大学, 2019.
- [58]Weipeng Zhang a, Chenglong Wang b, Fengqin Xie c, et al.Defect imaging curved surface based on flexible eddy current array sensor[J]. Measurement, 2019-11-20.
- [59]CHENG J, WANG B, XU D, et al.Resistive Loss Considerations in the Finite Element Analysis of Eddy Current Attenuation in Anisotropic Conductive Composites[J]. NDT & E International, 2021, 119(15):102403.
- [60]高军哲.多频涡流无损检测的干扰抑制和缺陷检测方法研究[D].国防科学技术大学, 2011
- [61]何岭松, 周义刚, 康宜华.数字化电磁无损检测信号的频域数字滤波[J].无损检测, 2003, 25(4): 195-197.
- [62]Tian G Y, Sophian A, Taylor D, et al. Wavelet-Based PCA Defect Classification and Quantification for Pulsed Eddy Current NDT[J]. IEEE Proceedings-Science Measurement Technology, 2005, 152(4): 141-148.
- [63]曹祥玉, 高军, 曾越胜, 等.微波技术与天线[M].西安电子科技大学出版社, 2008.
- [64]郭晓婷.涡流管道内检测管壁内外缺陷识别技术研究[D].沈阳工业大学, 2013.
- [65]李蓬勃.基于 DDS 的高速任意信号发生器设计[D].北京交通大学, 2019.

## 攻读学位期间取得的成果

### 一、论文

[1]周燕,陈玉,程军,汪步云,许德章.基于 T-R 探头的碳纤维复合材料缺陷涡流检测[J].淮阴工学院学报,2025 (录用)

### 二、专利

[1] 陈玉,周燕,等.一种陶瓷原料制粒机用切刀自动调节装置[P].FPTC20239324.

## 致谢

行文至此，思绪万千，提笔谢辞，落笔为终。在安徽工程大学学习和生活的三年是我毕生难以忘怀的时光，三年光阴仿佛弹指一挥间，回首往昔，一幕幕画面如同电影般浮现在我眼前，目之所及，皆是回忆。毕业论文即将完成之际，我对给予自己无私教诲、热心帮助和鼎力支持的各位师长、同学、朋友和亲人表示最诚挚的感谢！

首先，特别感谢我的导师陈玉副教授和程军副教授在这三年中对我付出的心血，对我的毕业论文的开题、写作提出很多宝贵的意见。感谢校外导师李明俊老师的指导。老师们对我的科研学习孜孜不倦的教诲，老师严谨的科研精神，精益求精的工作态度让我受益终身。本论文从选题到定题再到写作定稿，每一步导师们都为我指点迷津，答疑解惑。师从陈玉老师和程军老师是我毕生荣幸，感谢老师们无私的帮助。

其次，我要感谢我的家人，感谢家人对我二十多年的悉心照顾，让我无忧无虑的长大，考研和读研的过程中都离不开你们的支持与陪伴，是你们让我心无旁骛地踏出走向未知走向未来的每一步，使我在每一次选择的时候都有敢于面对的勇气，正是这一次次次的选择才有了如今的自己。父母之恩，常记于心。

最后，愿岁并谢，与友长兮。感谢可爱的室友们，感谢同门师兄弟们，这三年大家一起成长，一同经历着丰富多彩的时光。感谢我的男朋友，在我改论文和找工作两头忙的时候陪在我身边，给予我鼓励与支持。前路漫漫亦灿烂，心怀热忱，感谢这一路平凡但坚持的自己。

欲买桂花同载酒，终不似，少年游。终有一别，但我们来日方长。

尚禮敦學 唯實惟新

