

分类号: TH878

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120137



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 高频涡流检测阵列探头阻抗设计与缺陷
成像研究

论 文 作 者 刘蒙蒙

校 内 导 师 程军 副教授

校 外 导 师 李公文 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 涡流无损检测

论文提交日期: 2024 年 5 月 24 日

分类号：TH878

单位代码：10363

密 级：公开

学号：2210120137

高频涡流检测阵列探头阻抗设计与缺陷成像研究
IMPEDANCE DESIGN AND DEFECT IMAGING FOR
HIGH-FREQUENCY ECT ARRAY PROBES

学生姓名：_____刘蒙蒙_____

指导教师：_____程军 副教授_____

校外导师：_____李公文 高级工程师_____

专 业：_____机械_____

研究方向：_____涡流无损检测_____

论文答辩日期：_____2024 年 5 月 24 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：刘蒙蒙

日期：2024年5月24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。

本学位论文属于

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：刘蒙蒙 指导教师签名：程军

日期：2024 年 5 月 24 日

日期：2024 年 5 月 24 日

高频涡流检测阵列探头阻抗设计与缺陷成像研究

摘要

涡流无损检测技术已经在无损检测领域占有举足轻重的地位，因其具有非接触性，不需要耦合剂，检测速度快，检测成本低等特点，被广泛的应用材料的检测中。涡流阵列（Eddy Current Array, ECA）技术是涡流检测重要的技术分支，它是通过检测传感器结构的特殊设计，运用嵌入式系统技术和数字信号处理技术，实现对材料和零部件快速、有效的检测，已成为当前涡流检测技术和传感器技术中的重要发展方向。因此，本文针对材料深层缺陷的阵列检测开展了如下的研究工作：

（1）通过分析阵列涡流无损检测所依赖的麦克斯韦电磁感应定律和感应电流磁场的相互作用，实现对导体内部缺陷的敏感检测，并且将电路模型等效成电路，为研究涡流检测系统的运作机制提供了清晰的框架。此外，阵列涡流传感器的扫描方式通过多个线圈的协同工作，提高了检测效率和准确性，绝对式扫描适用于大面积平面型缺陷检测，而差动式扫描方式则在精细检测和适应不同形状的被测物体方面表现出色。

（2）设计一种高频 PCB 涡流阵列探头，通过阻抗分析和改变电缆长度的方式调整谐振频率，实现对不同深度隐藏缺陷的检测和获取最大检测灵敏度，并对高频 PCB 阵列线圈的工作原理进行参数分析，建立仿真模型，确定线圈的各项参数值，最后利用阻抗分析仪对高频 PCB 阵列线圈及其连接不同类型电缆线时进行阻抗分析，发现电缆线越长，线圈的谐振频率越小。

(3) 设计并制造一种阵列线圈专用夹具并搭建高频 PCB 阵列线圈检测系统,通过几个模块的程序搭建,将阻抗分析仪、电磁继电器、线圈夹具和三坐标位移台连接起来,组成高效的涡流扫查系统实现涡流检测的自动化和集成化,并根据使用顺序灵活调整参数,以达到检测材料缺陷的目的。

(4) 针对高频 PCB 阵列线圈涡流探头检测系统进行碳纤维复合材料不同深度以及形状缺陷的成像研究和实验验证。通过不同的线圈连接方式可知,线圈水平通道连接比倾斜通道连接在垂直缺陷扫描的检测效果要好,而在对竖向扫描时两者各有优劣可以互补;当高频 PCB 阵列线圈在连接 RLC 电路时可以很好的提高深层缺陷的检测信号,并且电缆线越长检测信号信噪比越好,随后用不同深度的分层进一步的验证 PCB 阵列线圈在连接 RLC 电路对于缺陷的检测能力有着显著的提高。

关键词: 涡流阵列检测; 高频 PCB 阵列线圈; 阻抗分析; 有限元分析; 缺陷成像;

IMPEDANCE DESIGN AND DEFECT IMAGING FOR HIGH-FREQUENCY ECT ARRAY PROBES

ABSTRACT

Eddy current nondestructive testing technology has played a pivotal role in the field of non-destructive testing, because of its non-contact, no need for couplant, fast detection speed, low detection cost and other characteristics, it is widely used in the detection of materials. Eddy Current Array (ECA) technology is an important branch of eddy current testing technology, which is an important development direction in the current eddy current detection technology and sensor technology through the special design of the detection sensor structure, the use of embedded system technology and digital signal processing technology, and the realization of fast and effective detection of materials and parts. Therefore, the following research work is carried out for the array detection of deep defects in materials:

(1) By analyzing Maxwell's law of electromagnetic induction and the interaction between the induced current and the magnetic field, which is relied on for the eddy current nondestructive testing of the array, the sensitive detection of internal defects in the conductor is realized, and the circuit model is equivalent to the circuit, which provides a clear framework for the study of the operation mechanism of the eddy current testing system. In addition, the scanning method of the array eddy current sensor improves the inspection efficiency and accuracy by working together with multiple coils, the absolute scanning method is suitable for large-area planar defect detection, and the differential scanning method is excellent for fine inspection and adaptation to different shapes of the measured object.

(2) Design a high-frequency PCB eddy current array probe, adjust the resonant frequency by impedance analysis and changing the cable length, realize the detection of hidden defects at different depths and obtain the maximum detection sensitivity, and analyze the parameters of the working principle of the high-frequency PCB array coil, establish a simulation model, determine the parameter values of the coil, and finally use the impedance analyzer to analyze the impedance of the high-frequency PCB array coil and its connection to different types of cables, and find that the longer the cable, the smaller the resonant frequency of the coil.

(3) Design and manufacture a special fixture for the array coil and build a high-frequency PCB array coil detection system, through the program construction of several modules, the impedance analyzer, electromagnetic relay, coil fixture and three-coordinate displacement table are connected to form an efficient eddy current scanning system to realize the automation and integration of eddy current testing, and flexibly adjust the parameters according to the use sequence to achieve the purpose of detecting material defects.

(4) Imaging research and experimental verification of carbon fiber composite materials at different depths and shape defects for the high-frequency PCB array coil eddy current probe detection system. Through different coil connection methods, it can be seen that the detection effect of coil horizontal channel connection is better than that of inclined channel connection in vertical defect scanning, and the advantages and disadvantages of the two can complement each other in vertical scanning. When the high-frequency PCB array coil is connected to the RLC circuit, the detection signal of deep defects can be well improved, and the longer the cable, the better the signal-to-noise ratio of the detection signal.

KEY WORDS: Eddy current array inspection, High-frequency PCB sensor,

Finite element analysis,Defect Imaging

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 无损检测常用方法.....	1
1.3 涡流检测研究现状.....	5
1.3.1 电涡流检测技术的发展.....	5
1.3.2 电涡流阵列检测研究现状.....	6
1.4 主要研究内容.....	8
1.5 论文章节安排.....	9
第 2 章 涡流阵列检测理论基础.....	12
2.1 引言.....	12
2.2 涡流检测的基本理论.....	12
2.3 电涡流传感器原理.....	13
2.3.1 电涡流传感器工作原理.....	13
2.3.2 涡流检测等效电路分析.....	14
2.3.3 涡流检测的趋肤效应.....	16
2.4 阵列涡流传感器扫描方式.....	17
2.4.1 绝对式扫描方式.....	17
2.4.2 差动式扫描方式.....	19
2.5 本章小结.....	20
第 3 章 高频 PCB 阵列涡流传感器的仿真及阻抗分析.....	22
3.1 引言.....	22
3.2 线圈参数选择.....	22
3.3 阻抗仿真分析.....	24
3.3.1 COMSOL 仿真软件介绍.....	24
3.3.2 线圈几何参数有限元仿真分析.....	25

3.3.3 层数对线圈阻抗的影响.....	26
3.3.4 匝数对线圈阻抗的影响.....	27
3.3.5 匝距对线圈阻抗的影响.....	28
3.4 阻抗实验分析.....	29
3.4.1 阵列线圈制作.....	29
3.4.2 线圈阻抗分析.....	30
3.4.3 线圈外接电容电阻等效电路.....	31
3.4.4 外接电路阻抗分析.....	32
3.5 本章小结.....	34
第 4 章 基于 LabVIEW 的阵列线圈涡流检测系统.....	36
4.1 引言.....	36
4.2 LabVIEW 简介.....	36
4.3 PCB 线圈夹具设计.....	37
4.4 上位机软件流程图.....	37
4.5 系统各功能模块开发.....	39
4.5.1 阵列线圈轮询接入控制.....	39
4.5.2 信号采集时序控制.....	40
4.5.3 运动控制.....	41
4.5.4 人机界面.....	42
4.6 本章小结.....	43
第 5 章 阵列线圈涡流扫描实验.....	45
5.1 引言.....	45
5.2 实验系统平台.....	45
5.3 信号选择与处理.....	46
5.3.1 线圈信号选择.....	46
5.3.2 采集信号处理.....	47
5.3.3 二维伪彩图信噪比.....	48
5.4 缺陷成像.....	49
5.4.1 CFRP 缺陷成像.....	49

5.4.2 钢板缺陷成像.....	53
5.5 缺陷检测.....	54
5.5.1 不同深度缺陷检测.....	54
5.5.2 分层损伤检测.....	57
5.6 本章小结.....	59
第 6 章 总结与展望.....	60
6.1 总结.....	60
6.2 展望.....	61
参考文献.....	62
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	67

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着社会的不断发展,先进材料广泛应用于各类设备和机械中,由于长期使用可能引发一系列损伤性问题,包括材料结构的损伤、在严酷环境下导致的腐蚀老化、疲劳裂纹以及材料内部的隐形损伤,尤其在航空航天、核电项目和军事领域。材料长期运行在高温、高压、高速等恶劣工作环境中,不可避免地会受到应力集中和承受交变载荷的影响,导致材料产生浅表裂纹损伤^[1]。然而,这些微小的缺陷形成的原因各异,且尺寸较小,位于亚表面,难以肉眼观察和识别,如果未能及时检测,在时间推移中可能引发严重的人员伤亡和经济损失^[2-4]。因此,在材料出厂和使用过程中,必须及时进行检测,以排除潜在的安全隐患。

随着工农业的迅速发展,对材料检测的要求日益严格,传统的无损检测方式已经无法满足新的检测标准,一些新兴的无损检测技术逐渐崭露头角^[5]。其中,涡流阵列(Eddy Current Array, ECA)技术作为涡流检测的重要研究方向之一,通过特殊设计的传感器结构,借助嵌入式系统技术和数字信号处理技术,能够快速、有效地对材料和零部件进行检测。通过对阵列线圈不同的拓扑连接方式的研究,利用有限元分析软件对阵列线圈的各项参数进行仿真分析以实现微小缺陷的最佳检测效果,并对采集的数据进行缺陷的成像系统性研究,已经成为当前涡流检测技术和传感器技术的重要发展方向,为材料检测提供了更为精确和可靠的手段,有助于及时发现和处理潜在的安全风险。

1.2 无损检测常用方法

无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)是一种工程和科学领域中的技术,它旨在评估材料、组件、结构或系统的质量、完整性和性能,同时不会对被检测对象造成永久性损伤或破坏。无损检测技术通过利用物理、化学、声学、电磁等原理来检测并识别可能存在的缺陷、裂纹、异物、腐蚀、疲劳等问题,以确保被检测对象的安全性、可靠性和性能达到预期要求^[6]。这些技术广泛用于制造业、航空航天、核能、医疗、建筑、交通运输等各个领域,以提高产品质量、减少事故风险、延长设备寿命和降低维护成本。下面介绍几种无损检测方法包括但不限于超声波检测、X 射线检测、声发射检测、热成像检测和电涡流检测^[7-10]。

1 超声检测

超声检测（Ultrasonic Testing, UT）是一种最先使用的无损检测技术，通过声波的传播来评估材料的质量和完整性。在超声检测中要选择适当的超声探头和耦合剂，以确保超声波能够有效地传播到被检测材料的内部，超声波脉冲会被发射进入材料内部，通过调整探头的位置和方向，可以精确控制超声波的传播路径和深度。当超声波与材料内部微小尺寸的缺陷，例如微小的裂纹和气孔、界面或其他不均匀性相互作用时，部分声能将会发生反射和散射，这些声波的特征可以被检测器捕获和记录，能够准确得到缺陷的大小和深度信息^[11-12]。然而，超声检测也存在一些限制，它通常适用于可以表面访问的检测，对于深埋或具有复杂几何形状的部件可能不太适用，并且也对适当的表面准备和耦合剂的使用有一定要求，以确保超声波的传播。复合材料由于工艺的限制，内部如果各层之间的粘连性不好且质量很差，则会导致声波反馈很弱不易检测出内部缺陷。

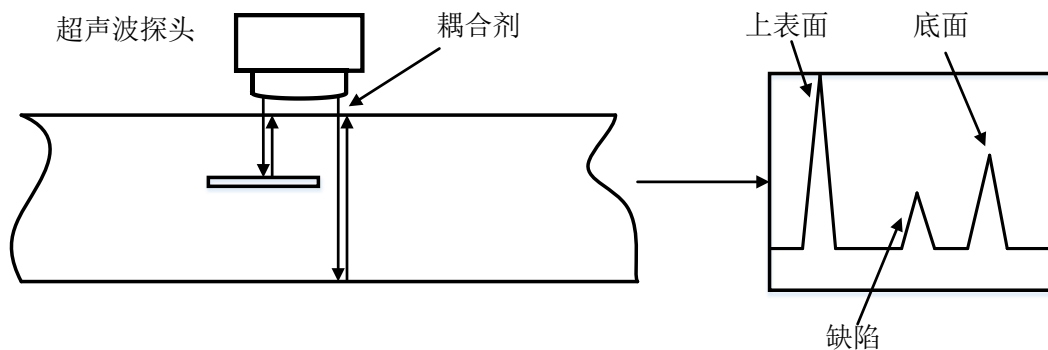


图 1.2 超声检测技术

2 X 射线检测

X 射线检测（X-ray Testing XT）是一种利用 X 射线的特性来评估材料的质量和检测内部缺陷的检测方法^[13-14]。这项技术在多个领域中得到广泛应用，包括工程、医学、制造业等。X 射线检测的基本原理是利用 X 射线穿透物体并被不同密度或材料的区域吸收的特性。当 X 射线通过被检测物体时，密度较高或材料吸收更多 X 射线，显示为较暗的区域（影子），而较少吸收的区域将呈现为较亮的区域。内部缺陷或异物会影响 X 射线的透射，从而在图像中产生特定的缺陷标志。然而，X 射线是一种电离辐射，对体会有一定的伤害并且对于高密度材料则透射率较低，检测效果差，同时碳纤维复合材料对射线的吸收性很差，极难得到清晰的缺陷损伤。

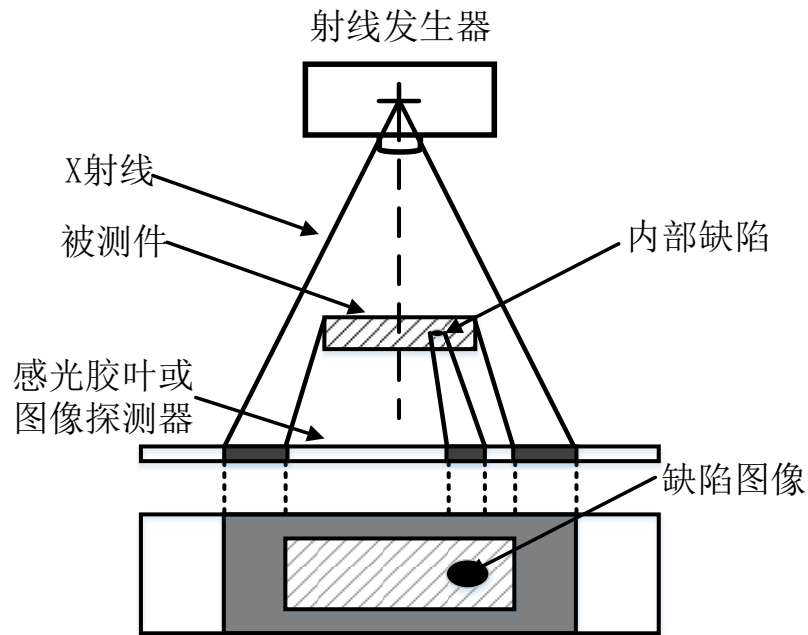


图 1.3X 射线检测

3 声发检测

声发射检测（Acoustic Emission Testing, AET）是一种依赖于材料或结构内部微小裂纹、缺陷或变化产生的声发射现象，通过捕获声波并进行分析的检测技术。通过加载或施加应力于被检测物体，当应力达到一定程度时，微小的声发射事件将产生。传感器捕获这些事件的信号，便可以探测到微小的裂纹和变化，有助于在问题扩大之前及时识别和解决，并且声发射检测能够提供实时监测^[15-16]。然而，声发检测极易受到背景噪音的干扰、信号复杂性和分析的主观性，因此需要经验丰富的现场经验，所以该方法只适用于复合材料承力件的检测。

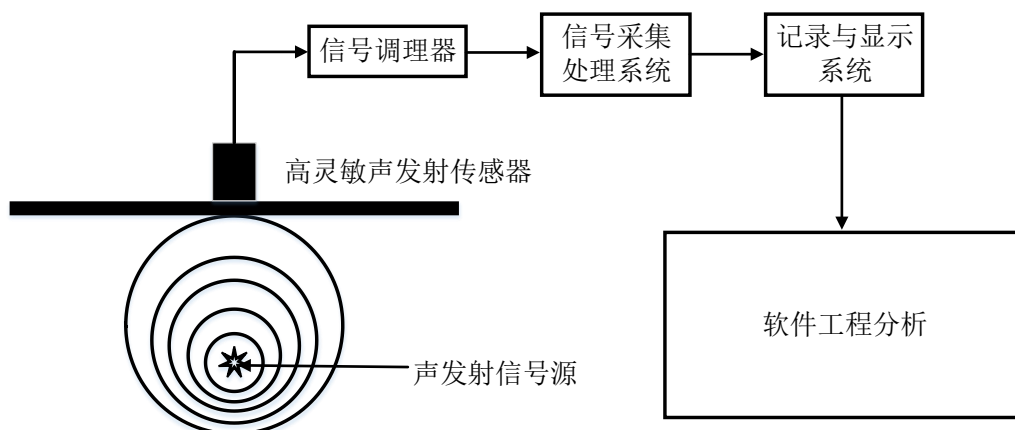


图 1.4 声发检测

4 热成像检测

热成像检测（Thermal Imaging Detection Testing, TIDT）是一种非接触的、非破坏性的检测技术，通过测量物体或场景的红外辐射来获取温度分布信息，能够可视化和识别异常温度分布，从而检测缺陷、故障或其他问题^[17-18]。热成像检测依赖于物体之间的温度差异，缺陷或故障通常会引起温度变化，这些变化可以通过红外成像设备捕捉到。红外相机将捕捉到的红外辐射数据转化为可视化的热画面，其中不同温度的区域用不同的颜色表示，形成清晰明了的直观图像。由于某些材料复杂的内部缺陷会引起传热的无规律性，致使检测结果难以精准，所以内部复杂的缺陷不适合此法检测，并且热成像检测基于热传导原理，不能进行大面积的进行损伤检测。

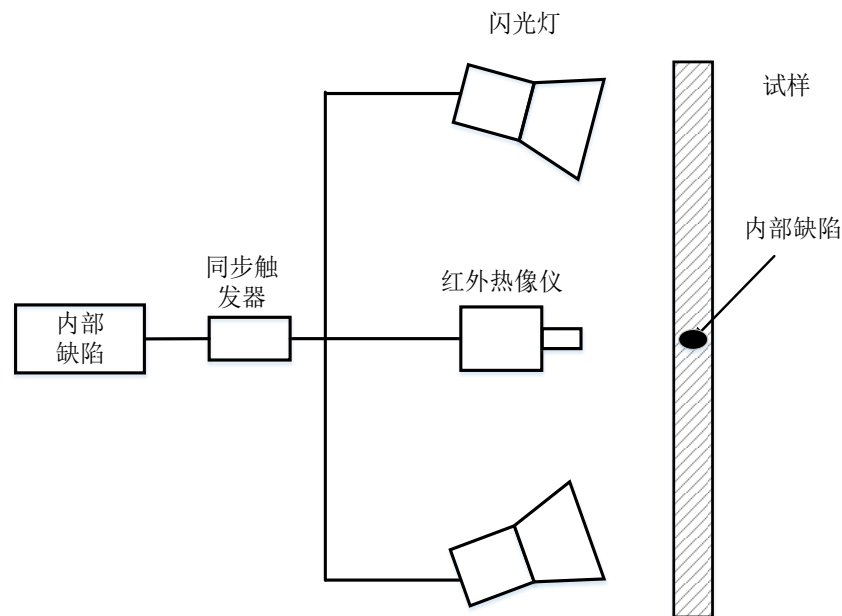


图 1.5 热成像检测技术

5 电涡流检测

电涡流检测(Eddy Current Testing, ECT)的核心原理是法拉第电磁感应法根据这个原理，当一个导电材料在交变电磁场中暴露时，会产生电流环（涡流）。这些电流环的形状和强度受到材料性质、电磁场频率和缺陷的影响。如果材料中存在缺陷（如裂纹、孔洞或腐蚀），则会干扰电流环的形成，导致涡流的变化，并通过分析来确定缺陷的位置、大小和性质^[19-20]。电涡流检测具有高精度、非破坏性、高灵敏度、速度较快、自动化程度高等优点，对待检材料的表面近表面处的缺陷有很大的检测精度，并且不会对检测人员造成伤害，对环境造成污染。

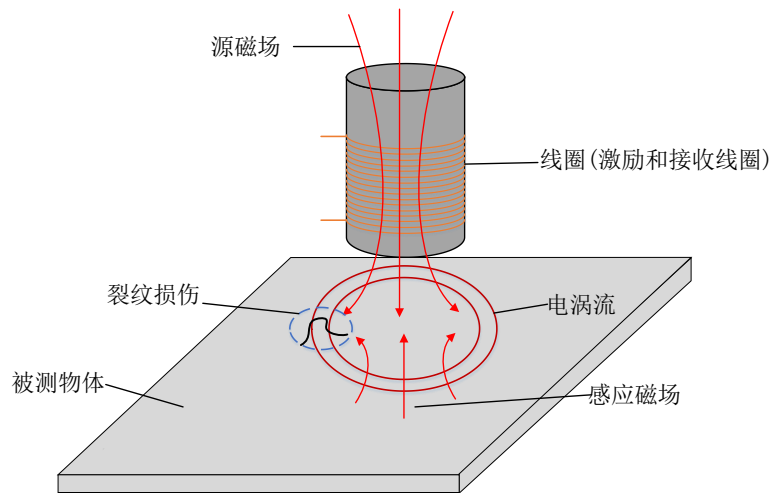


图 1.6 涡流检测

1.3 涡流检测研究现状

1.3.1 电涡流检测技术的发展

电涡流检测技术是一种重要的非破坏性材料检测方法,经历了一个漫长而充满成就的发展历程。这项技术最早的基础研究可以追溯到 19 世纪末,当时科学家们开始研究电磁感应现象。英国科学家迈克尔·法拉第(Michael Faraday)的工作为电涡流检测技术的理论奠定了基础,他于 1831 年首次发现了电磁感应现象,这一现象成为后来电涡流检测的核心原理之一。然而,真正的应用和发展始于 20 世纪初,当时一些关键的人物和事件推动了电涡流检测技术朝着成熟和广泛应用的方向发展。美国物理学家爱德华·霍尔(Edward A. Hall)在 1880 年代首次观察到了电涡流的现象,并提出了一些基本概念,为电涡流检测技术的发展打下了基础,20 世纪初期,法国工程师亨利·皮科特(Henri Pichot)将电涡流检测应用于铁路轨道的缺陷检测,开创了电涡流检测技术在铁路行业的应用,这个事件标志着电涡流检测技术开始在工业中发挥作用。同时,电涡流检测技术的发展也受到红外热成像技术的启发,红外热成像与电涡流检测相结合,提高了检测的全面性,尤其在航空航天和军事领域有了广泛的应用。20 世纪后期至 21 世纪初随着数字技术的发展,电涡流检测技术经历了显著的改进,检测设备变得更加精密和自动化,以及计算机化数据分析和图像处理使得检测结果更加准确和可靠。并且,非接触式电涡流检测技术也开始崭露头角,这种技术可以在不接触被检测物体的情况下进行检测,提高了效率 and 安全性,使电涡流检测技术更适合在大规模工业应用中使用。在国际层面,电涡流检测技术的发展也在不断推动,许多国际标准组

织和研究机构致力于推动电涡流检测技术的标准化和创新,有助于确保电涡流检测技术在全球范围内得到广泛应用,并保证了检测结果的一致性和可靠性。

随着中国工业制造业的快速增长,对质量控制和产品的安全的需求日益增加,电涡流检测技术在汽车制造、航空航天、电力行业和核工业等领域得到广泛应用。中国的研究机构和企业积极参与了电涡流检测技术的研发和创新,为国内外市场提供了先进的检测设备和解决方案。总的来说,电涡流检测技术的发展经历了一个丰富多彩的历程,受到了众多国内外的人物和事件的推动。从 19 世纪末的基础研究到 21 世纪初的自动化和非接触式检测,这项技术已成为现代工业中不可或缺的一部分,为产品质量和安全性提供了可靠的保障。未来,电涡流检测技术将继续受益于科学和技术的进步,为各个行业提供更高效、更准确的检测方法。在全球范围内,各国将继续合作,推动电涡流检测技术的进一步发展和创新,以满足不断增长的工业需求。

1.3.2 电涡流阵列检测研究现状

上个世纪 80 年代中期,电涡流检测技术便开始进行研究,随着研究的深入在 90 年代涌现出大量关于电涡流阵列检测方面的文章和国家专利。1993 年 10 月,在德国举行的国际传感器与系统技术博览会及学术会议上,首次亮相了一项引人注目的技术创新——集成涡流探测器阵列^[21],由 64 个磁阻元件组成,总长度达 25 毫米,采用了精密的薄膜工艺制造而成,这项技术的关键在于,通过环绕线列的环状共用线圈产生激励磁场,每个传感单元都可以精确地探测受检物体内部涡流所引起的磁场畸变,传感器能够获取到位于传感器下方的受检物体的几何形状或材料特性相关的分布轮廓线信息。Hedengren 等人在阵列式涡流无损检测领域提出了一项重要的创新,他们设计了一种无需机械扫描装置的线圈结构,这一结构采用了交错层叠的线圈单元,实现了对检测表面的全覆盖,同时消除了检测中的"盲点",提高了阵列式涡流无损检测的空间分辨率,然而,需要注意的是,这种构想尚未充分考虑到提高对检测信号的影响,并且对线圈制作工艺要求非常高^[22-23];Macecek 等人结合了阵列式涡流无损检测中多路信号的特点,尝试通过数字处理技术对一般缺陷和腐蚀缺陷进行 C 扫描可视化成像,这一方法为阵列式涡流检测成像技术的发展带来了新的思路和可能性^[24];随着磁传感器技术的进步,Ma Y P 等人应用了基于约瑟夫逊效应的超导量子干涉器件(SQUID)

于缺陷检测研究中,他们通过理论和实验研究,论证了磁场信号相位角与缺陷深度之间的关系^[25]; Smith C H 等人提出了一种巨磁阻传感器(GMR)的线性排布方法,由于其较小的物理尺寸,可以显著提高对各类缺陷的空间分辨率^[26]; Sun H 等人采用霍尔传感器实现了线性阵列,通过调制其电流来区分线圈互感效应和霍尔信号,这不仅实现了较高的空间分辨率,还改善了输出缺陷信号的信噪比^[27]; 此外, Goldfine N 等人将蜿蜒绕组磁强计(MWM)进行了阵列式排布,结合手动扫描仪和单轴位置编码器,用于检测飞机关键部件的损伤缺陷,他们成功地显示了 C 扫描后的二维图像,从而实现了缺陷的定性判断^[28]。Mizukami 等运用阵列涡流检测技术成功可视化多向 CFRP 层压板中的分层^[29]。Dietrich Berger^[研究团队]开发的基于阵列涡流传感器的碳纤维预制件检测系统,该系统由多个阵列涡流传感器组成,可以实现对预制件的多角度、高分辨率检测,同时,该系统还可以与机器视觉技术相结合,实现预制件的三维成像和损伤定位^[30]。Underhill 等介绍了一种利用涡流阵列技术检测受损碳纤维增强复合材料夹层板的方法,结果表明,涡流阵列技术可以检测到夹层板中的损伤,包括孔洞、裂纹和蜂窝状损伤^[31]。

在国内电涡流阵列检测技术还在起步阶段。陈祥林、丁天怀等人介绍了一种如图 1.7 所示的采用柔性印刷电路板工艺制作的新型接近式电涡流传感器阵列及其测试系统,设计了分叉式结构的线圈阵列及细长扁平引线电缆的柔性传感器探头^[32]; 岳明明等则采用 30 个刚性线圈等间距固定在柔性橡胶垫上组成的阵列线圈,能够迅速有效地检测 CFRP 微小裂纹缺陷,具有多种结构形式,非常适用于大面积快速扫描检测裂纹^[33]。刘波等将涡流阵列特征提取方法与图像方法相结合,提出了一种可以准确反映裂纹位置、长度和方向等特征信息的涡流阵列修正 C 扫描成像方法^[34]。杨洪斌等在检测对发电机叶片进行检测时,为了不拆卸叶片设计了柔性阵列涡流探头,使得两者可以的耦合效果非常出色^[35]。徐可北教授设计了如图 1.8 所示的一种称为 X 一型的、采用内穿过式进行管壁质量检测的阵列涡流探头^[36],它由一个与管截面为同心圆的常规线圈和 48 个轴线方向为被检管材直径方向的阵列线圈组成,这种阵列线圈不仅可以发现管道材料轴线方向的缺陷,还可以发现周向的缺陷。

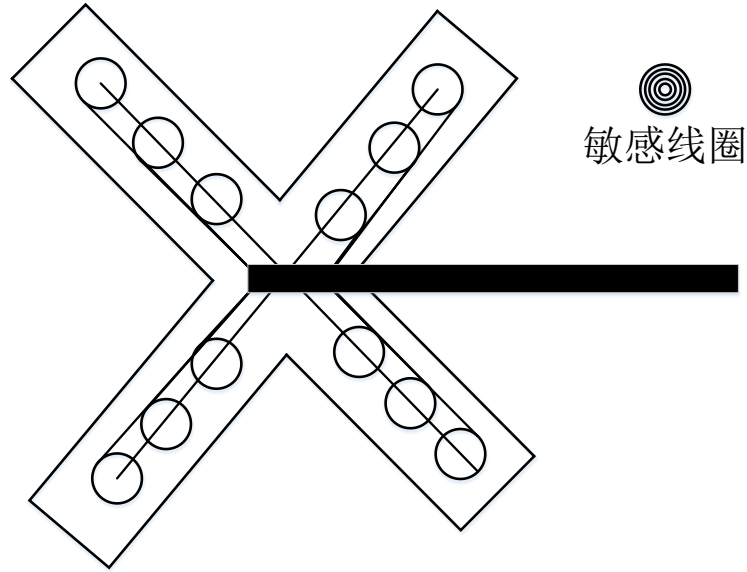


图 1.7 接近式柔性电涡流传感器

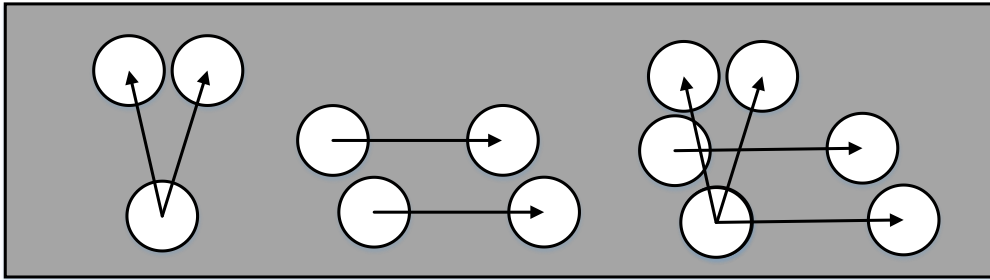


图 1.8X 一型阵列涡流探头

1.4 主要研究内容

从国内外研究现状来看，阵列式涡流线圈已经在众多领域扮演者至关重要的角色，尤其在检测碳纤维复合材料内部损失应用上，更是有着举足轻重的地位^[38]。然而，阵列线圈存在着较高的加工精度，制作成本高昂、不能保证每个线圈探头的尺寸大小相同，线圈之间的安装间距一致，以及校准难等问题。为此，本文提出了一种新型高频 PCB 阵列线圈涡流探头，这种高频 PCB 阵列线圈涡流探头采用普通的印刷电路板制作，具备成熟的工艺、低廉的价格和多样的形式，可根据被测对象的需求定制特殊形状的探头。研究内容共包括了：线圈参数的有限元仿真、线圈制作、线圈阻抗分析、高频 PCB 阵列涡流检测系统开发与集成、缺陷损伤的成像研究以及进行碳纤维复合材料隐藏缺陷和分层^[39-42]的实验检测。

在线圈参数的有限元仿真方面，从电磁场的方向出发，使用磁场分布不会均匀的概念，分析线圈的各项参数的改变对其磁场变化的影响程度。基于 COMSOL Mutiphysics 有限元仿真软件搭建线圈的二维轴对称仿真模型，研究线圈在阻抗

的大下变化与频率之间的关系，其中线圈的内径、外径、线径、匝数、层数的变化对阻抗的影响至关重要，通过数值仿真结果的分析，并考虑实际加工的可靠性和难度，选择合适的线圈几何参数。

在线圈制作方面，考虑加工成本以及对线圈的使用要求，选择合适加工方法，加工工艺的不同会直接影响线圈的检测精度以及实际使用的检测信号接收能力。在线圈制作时要保证线圈的铜线不会断开，层与层之间保持串联状态，并且外接引线也要引导合适的位置，方便外接线路的接入，最终成型后将其与 PCB 版进行整合并进行测试。

在线圈阻抗分析方面，根据线圈的阻抗特性，利用阻抗分析仪进行研究。由于线圈的检测效果的精确程度与线圈的谐振频率有着至关重要的关系，因此在使用前首先对线圈的阻抗进行分析，以计算其在该谐振频率下最佳的检测深度。同时，为了使线圈能够在较高的频率下也有很好的检测效果，使其接入电容电阻，不同的电容电阻时有不同的谐振频率。

在阵列线圈涡流检测系统集成方面，首先利用阻抗分析仪分析线圈电感以及电抗信号在线圈进行涡流扫描缺陷时信号的变化，定量的对缺陷进行检测，其次通过电磁继电器对线圈进行通断电处理，以及上位机对阻抗分析仪信号的提取，最后经过 Matlab 进行信号的终止滤波处理，即可得到缺陷的二维损伤伪彩图。

在损伤检测方面，首先对缺陷进行成像研究，分析不同接线方式下相同缺陷不同的成像，进而对比出其优劣；其次针对碳纤维复合材料的内部隐藏裂纹，缺陷进行检测，通过线圈电感变化曲线的分析即可的到缺陷损伤位置；最后在进行夹层检测时，利用超声检测装置检测夹层的具体位置以及夹层深度，并用高频 PCB 阵列线圈涡流探头进行验证，证明其信度和效度。

1.5 论文章节安排

综上所述，必须保证材料在各个领域的应用安全可靠，避免造成重大安全事故，然而，这些材料中又以碳纤维复合材料检测最为复杂，所以必须对其进行损伤检测以排除安全隐患^[43-49]。在众多无损检测方法中，电磁涡流检测方法凭借其低成本、非接触性和无需表面特殊处理等特点，引起了广泛的关注，更为重要的是，它被认为是可靠的用于检测碳纤维制造成型缺陷的方法。

由于碳纤维复合材料的弱导电性，内部电流较弱，传统的电磁涡流检测仪器

通常用于金属材料,无法满足 CFRP 的特殊需求^[50-58],因此,提高检测频率被视为提高检测灵敏度的关键^[59-60]。本文的主要工作是首先通过对高频 PCB 阵列线圈进行阻抗分析,进行线圈的阻抗匹配;其次使用不同的拓扑连接方式改变阵列线圈的扫描形式,以达到提高对材料内部缺陷检测的能力;最后针对不同线圈连接方式对缺陷成像进行系统性研究。该系统能够实现自动的二维平面扫描,即时成像扫描结果,并将数据存储以供后续分析之用,这一研究的目标是为 CFRP 损伤检测提供更加可靠和高效的解决方案。

本文的内容结构与章节的安排如下:

第一章,绪论,本章主要介绍了论文的研究背景,研究意义以及国内外阵列线圈的研究现状,以及材料无损检测技术的研究现状,由此引出本论文所研究的内容,并对本文的内容进行大致的概述。

第二章,涡流检测的基本理论,本章将深入研究涡流检测的基本理论和电涡流传感器的原理和阵列涡流传感器的扫描方式。首先,对麦克斯韦电磁理论进行深入分析,为后续涡流检测提供坚实的理论基础;其次,深入研究电涡流传感器的工作原理,包括涡流生成机制和趋肤效应等重要参数;随后,我们将建立涡流传感器的等效电路模型,以更好地理解涡流检测系统的工作原理;最后,介绍阵列涡流传感器的不同扫描方式,包括绝对式扫描和差动式扫描,并研究它们在提高检测效率和准确性方面的优势。

第三章,高频 PCB 阵列涡流传感器的仿真及阻抗分析,本章将研究线圈参数选择对涡流探头性能的影响,并分析对线圈参数进行的仿真分析和实验验证。首先,对高频 PCB 阵列线圈的参数进行研究,分析它们对磁感应强度和阻抗特性的影响,明确定义线圈的内外径、线径尺寸等关键参数;其次,通过 Comsol 仿真软件建立仿真模型,分析线圈不同层数对阻抗谐振频率的影响,深入研究线圈的层数、匝数以及匝距对谐振频率的调控作用,得出随着这些参数的增加,线圈的谐振频率显著降低的结论;最后,运用阻抗分析仪对 PCB 线圈及其连接不同类型 BNC 电缆线时的阻抗进行全面分析,结果表明电缆线的长度与线圈的谐振频率呈负相关关系,使用较长的电缆线可提高对深层缺陷的检测能力。

第四章,基于 LabVIEW 的阵列线圈涡流检测系统阵列线圈检测系统,本章采用 LabVIEW 软件建立了阵列线圈涡流检测系统,旨在实现高频 PCB 阵列线圈

的涡流自动化探伤扫描。首先，设计专用夹具，以便将线圈安装在三坐标位移台上；其次，编写阵列线圈的轮询通断程序，通过电磁继电器控制 20 路线圈的轮询通断，并设定通断时间，同时建立阻抗分析仪的上位机程序，使得上位机可以与阻抗分析仪进行通信；接着，设计阻抗分析仪的探头信号采集、存储以及三坐标位移台运动方向、起始和终点位置以及运动步长等参数的程序；最后，建立人机交互界面，以提升涡流扫描实验的便捷性，从而提高工作效率。

第五章，阵列线圈涡流扫描实验，本章首先将前文的成果集成为包含上位机与下位机的涡流检测系统；其次针对高频 PCB 阵列线圈采集的数据进行滤波处理计算出伪彩图成像的信噪比；最后通过对碳纤维复合材料的不同深度层次的损伤以及分层的涡流检测，验证高频 PCB 阵列涡流线圈探头在连接 BNC 电缆线时可以降低谐振频率并提高检测性能。

第六章，总结与展望，对本论文中已完成的工作进行归纳于分析，并且对于自身以及工作上的不足之处提出修改意见，进行后期工作的展望。

第 2 章 涡流阵列检测理论基础

2.1 引言

涡流检测作为一种无损检测技术，在工业领域广泛应用特别是在材料缺陷检测方面表现出色，本章将研究涡流检测的基本理论和电涡流传感器的原理，以及阵列涡流传感器的扫描方式。首先，对麦克斯韦电磁理论的学习，为接下来的涡流检测提供了坚实的理论基础；其次，深入研究电涡流传感器的工作原理，包括涡流产生的机制和趋肤效应的重要参数；再次，建立涡流传感器的等效电路模型，以便更好地理解涡流检测系统的工作原理；最后，提出阵列涡流传感器的不同扫描方式，包括绝对式扫描和差动式扫描，以及它们在提高检测效率和准确性方面的优势。

2.2 涡流检测的基本理论

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。它是 19 世纪中期由苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）基于以前的工作和自己的创新提出的，为本文理解电磁现象和电磁波的性质提供了坚实的理论基础。麦克斯韦电磁理论的主要内容包括四个基本方程，它们被称为麦克斯韦方程组。这四个方程涵盖了电场和磁场的相互关系，以及它们如何与电荷和电流相互作用。

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.4)$$

上式中： ρ —自由电荷密度(C/m³)；

J —电流密度(A/m²)；

H —磁场强度(A/m)；

D —电位移矢量(C/m³)；

E —电场强度(V/m)；

B —磁感应强度(T);

总之, 麦克斯韦电磁理论是电磁学的基础, 它描述了电场和磁场的行为以及它们如何相互关联, 推动了现代电子技术和通信技术的发展, 同时也为实验验证提供了坚实的支持。因此, 麦克斯韦电磁理论被认为是物理学中的经典之一, 对现代科学和技术产生了深远的影响。

2.3 电涡流传感器原理

2.3.1 电涡流传感器工作原理

电涡流传感器的工作原理如图 2.3 所示: 由法拉第电磁感应定律可知, 当线圈接入正弦交变电流时, 线圈势必会产生激励源磁场, 当这一磁场靠近被测导体时, 导体会产生涡旋状的电流, 被称为电涡流, 涡流的方向与入射磁场垂直。然而由于电磁感应定律, 涡流也会产生一个与激励源磁场方向相反的二级磁场, 并且抵消掉部分源磁场的强度, 当被测导体中存在损伤时, 涡流场会发生畸变, 会使得空间磁场的分布发生变化。涡流探头由激励线圈和接收线圈组成, 激励和接收可以是同一个线圈, 也可以不同。在涡流探头靠近导体时, 空间磁场的扰动会引起接收线圈的阻抗和电动势的变化, 包括幅值和相位的改变, 与被测导体的电导率、磁导率以及损伤的大小和位置有关。

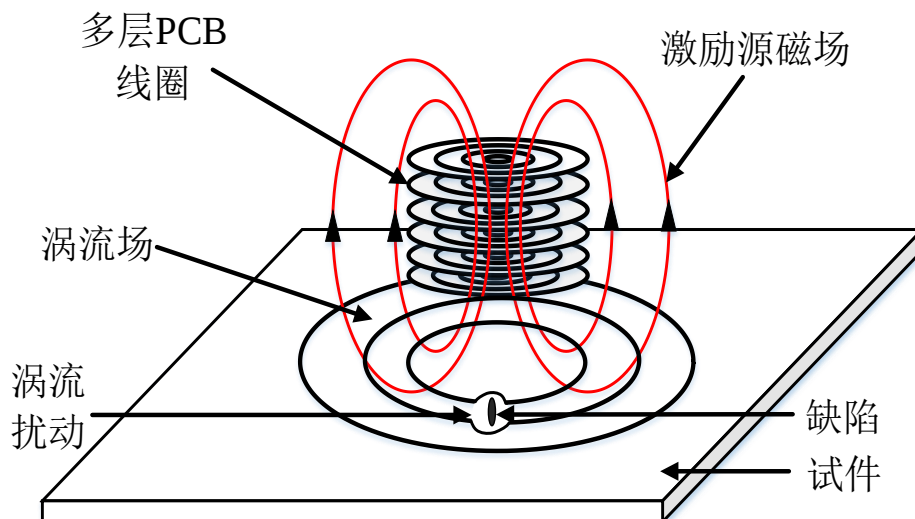


图 2.3 电涡流工作原理

2.3.2 涡流检测等效电路分析

线圈在理想状态下应该只有感抗部分，内部不存在电阻，然而在实际生产过程中，线圈是由铜线绕制而成的，不仅有电感还有电抗，同时线圈的匝与匝之间还存在着电容以及铜线本身的电阻，因此将线圈等效成一个由电感、电阻和电容串联的电路表示，同时理想的认为线圈匝与匝之间的电容为 0，因此该电路只用电阻和电感串联表示，对于电涡流线圈之间对应导体之间的耦合互感 M 为：

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2.5)$$

式中 k 是耦合系数，其大小与取决于线圈与被测物体之间的距离有关，取值范围在 0~1。

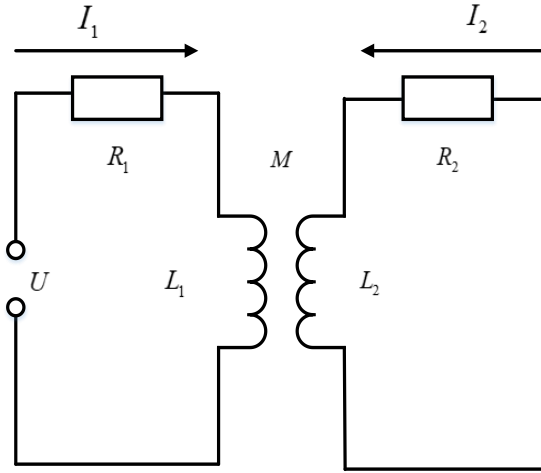


图 2.4 电涡流传感器耦合线圈电路模型

根据串联电路的电压规律得到两个回路的电压方程；

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1) \times i_1 - j\omega M \times i_2 = U \\ -j\omega M \times i_2 + (R_2 + j\omega L_2) \times i_1 = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

假设线圈在接入交变电流时线圈的自身阻抗为 Z_1 ，表示为线圈裸露在空气中的电阻抗，并且导体内部的电阻抗为 Z_2 。当激励线圈靠近被测导体时，线圈的初级和次级会和导体进行耦合，在互感的作用下，闭合的次级线圈内会产生感应电流，进而影响到电压与电流在初级线圈中的关系。因此，将影响用激励线圈作用到初级线圈的等效阻抗 Z_e 来表达。 Z_1 和 Z_e 之和 Z 被称为初级线圈的阻抗。

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2.7)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (2.8)$$

$$Z = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2} \quad (2.9)$$

式中 ω 为交变电流的角频率。

将式(2.18)进行整理变化得到：

$$Z = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R^2 + \omega^2 L_2^2} + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R^2 + \omega^2 L_2^2} \omega L_2 \right) \quad (2.10)$$

为了后续分析更加便捷方便，将初级线圈的内感抗幅值和电阻相等，可得 $\omega L_2 = R_2$ ，并将式(2.14)整理到式(2.19)中进行整合得到：

$$Z = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{2} \omega L_1 k^2 (1 - j) = Z_1 + Z_e \quad (2.11)$$

从式中可以再次看出次级线圈通过互感 M 整理到初级线圈上的等效电阻 Z_e 与激励信号的频率、线圈内部感抗以及耦合系数相关，进而再次整理可得：

$$Z = R_1 + \frac{1}{2} \omega L_1 k^2 + j\omega \left(L_1 - \frac{1}{2} L_1 k^2 \right) \quad (2.12)$$

因此我们可以将整个涡流检测系统等效成并联 RLC 电路，整理可以得到：

$$R_0 = R_1 + \frac{1}{2} \omega L_1 k^2 \quad (2.13)$$

$$L_0 = L_1 \left(1 - \frac{1}{2} k^2 \right) \quad (2.14)$$

将其等效成如图 2.5 所示：

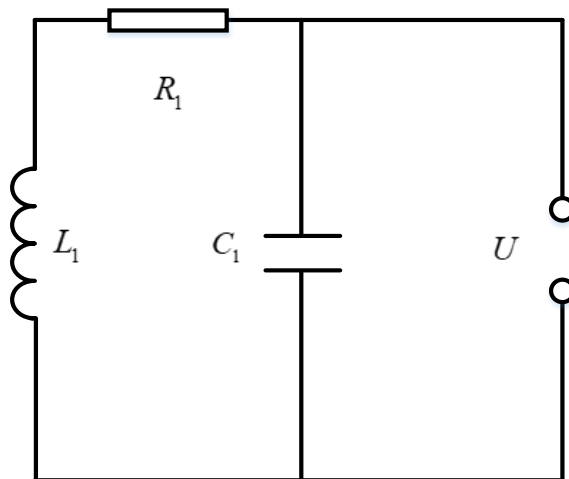


图 2.5 涡流系统等效电路图

2.3.3 涡流检测的趋肤效应

趋肤深度是涡流的趋肤效应中一个非常重要的参数,用于描述电磁波在导体内部的渗透深度。当电磁波传播到导体中时,电磁波的能量会被导体吸收,因为电磁波激发了导体内的涡流。这些涡流导致电流损耗,将电磁波的能量转化为热能。在涡流检测应用过程中,当激励线圈接入交变电流并且在接近导体的时,激励线圈在内部会产生电涡流,并且越靠近被测导体表面时,电流密度模越大,越往下越小依次递减,两者呈现出负相关,这就是涡流趋肤效应的基本理论。同时规定将涡流密度幅值衰减到距离被测导体上表面 $1/e$ 处时的深度称之为趋肤深度,用 δ 表示,在 Z 轴上的趋肤深度用式(2.24)表示^[61]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.15)$$

式中, δ 为渗透深度, f 为激励频率, μ 和 σ 分别是被测金属试件的磁导率和电导率。

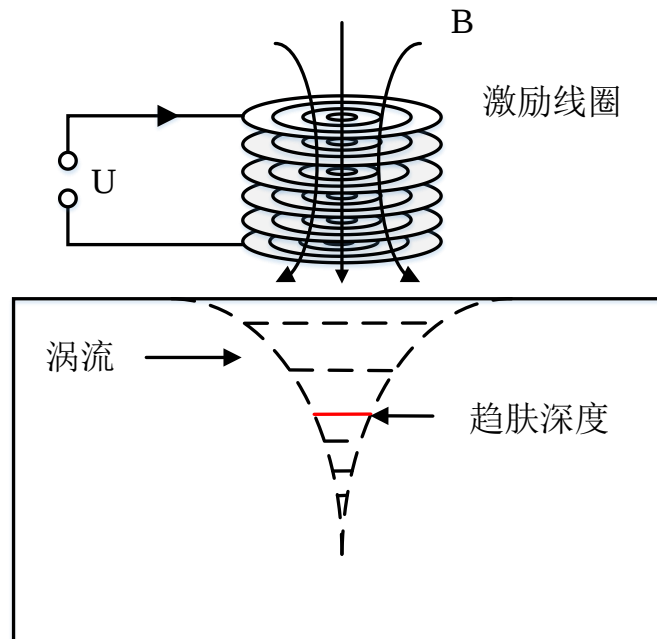


图 2.6 涡流检测中的趋肤效应

根据上式可以绘制出 2.6 所示的涡流检测显影趋肤深度图。当检测时施加较大的激励频率,电磁波穿透被测导体的能力很小,电流密度模只聚集在导体表面,同样,当被测导体的电导率较大时也会出现相同情况。根据以往的经验可知,被测导体的深度要比趋肤深度的三倍还要大,这是因为导体在第三个趋肤深度的地

方电流密度模衰减到只为原来的 10%, 如若被测导体的厚度小于这个三倍的趋肤深度时, 检测效果会在厚度方向上产生较大的误差, 因此将趋肤深度 δ 定义为有效趋肤深度。对于不同方向的碳纤维铺层的碳纤维复合材料试件, 其电导率可以通过将层间电场连续等效为一个两倍厚度的同向铺层计算出来, 然后得到对应的趋肤深度。

2.4 阵列涡流传感器扫描方式

阵列涡流检测与传统涡流检测相比, 其具有多个传感器, 使用者根据被测物体的不同形状, 不同结构进行不同的排布, 以实现快速, 灵敏的检测被测物内部的缺陷或者损伤。由于涡流阵列传感器具有多个传感器, 在检测物体时可以大面积的、快速的、灵活的进行检测, 同时, 对于微小的内部缺陷损伤依旧可以完整清晰的检测出来, 如图 2.7 所示。

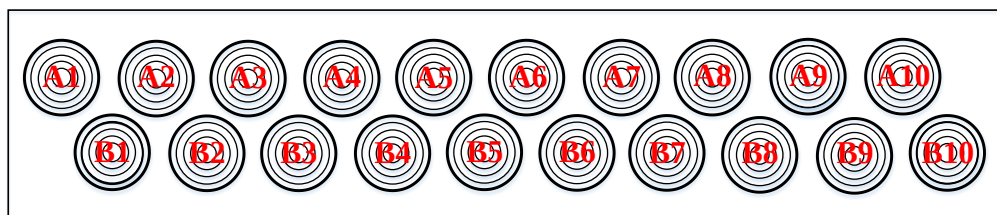


图 2.7 线圈阵列示意图

在使用涡流阵列传感器时, 根据激励方式的不同, 涡流阵列的检测方式可以分为绝对式扫描、差动式扫描, 其他方式扫描以及多频变频扫描^[62]等。

2.4.1 绝对式扫描方式

如图 2.8 所示, 这是一种绝对式扫描方式, 在进行涡流检测的时候只采用一个线圈, 仅针对被检测对象的某一位置的电磁特性直接进行检测的线圈, 不与被检测对象的其他部位或对比试样某一部位的电磁特性进行比较检测。两排线圈巧妙地交错排列, 这个排列方式在涡流检测中提供了出色的性能和效率, 特别适用于快速、大面积的平面型缺陷检测。在这种检测方式中, 单个线圈被用作激励源, 通入交流电。当电流经过线圈时, 产生的磁场会与导体互动。关键的创新在于, 当电流流经线圈遇到损伤或异常时, 这些损伤会引发电磁响应信号, 这些信

号随后被接收线圈捕获。同时，其他线圈按照特定顺序依次通入电流，如箭头所示，该策略允许系统对大面积区域进行快速而全面的检测，而不需要单独扫描每个点。

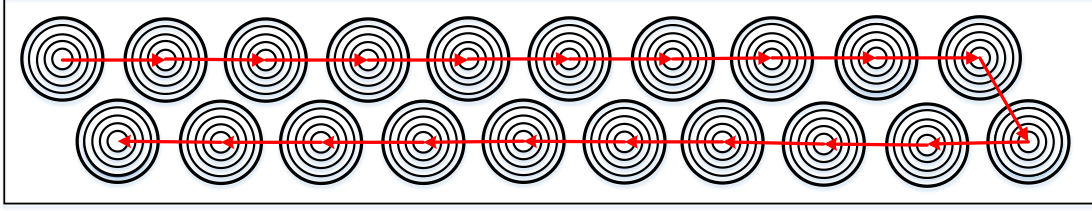


图 2.8 绝对值式扫描方式

这种线阵式扫描方式具有多方面的优点。首先，它显著提高了信号处理速度，由于多个线圈同时工作，可以短时间内获取多个数据点，从而加速整个检测过程。其次，这种方法简化了后续电路和信号处理的需求，减少了系统的复杂性，进一步提高了效率，此外，由于不需要频繁地切换线圈，可以节省能量和降低成本。最后在采集到的数据进行多中处理可以得到更多的结果。

由图 2.9 我们可知，线圈采集数据会有 A，B 两组数据，而这两组数据却有着一定的偏移量，相对于 A 组数据而言，B 组数据滞后一个线圈直径，同时向右也偏移一个线圈直径。对于 A、B 两组的数据处理采用相对值的方法进行数据处理分析，该方法可以有效的计算数值的相对变化，防止出现较大的偏差，提高数据的可靠性，如公式 2.16 所示：

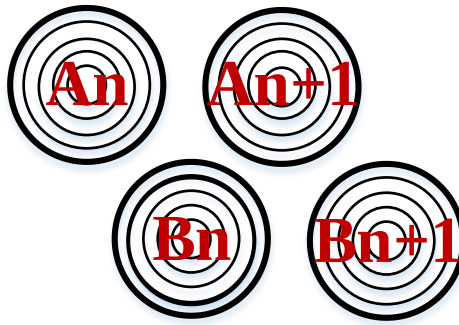


图 2.9 线圈数据相对值处理

$$\begin{cases} \Delta A = A_n - A_1 \\ \Delta B = B_n - B_1 \end{cases} \quad (2.16)$$

其次由图 2.10 可知，我们将数据进行差分处理利用公式 2.17，即 A_2-A_1 ， $A_3-A_2 \cdots A_{n+1}-A_n$ 进行数据处理，并且 B 组数据也同样进行该方法的数据处理。在使用差分法进行数据处理后，能够很大的减少噪声的干扰、突出趋势的变化、

消除周期性的影响以及进行数据压缩和简化。

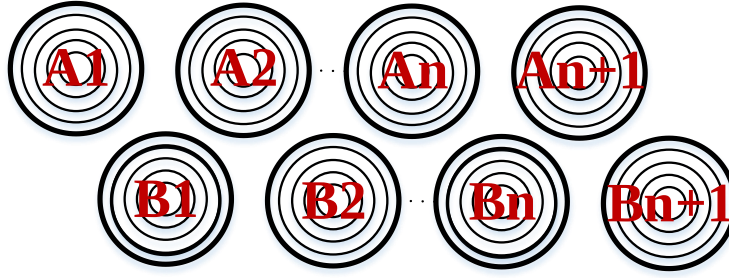


图 2.10 线圈数据差分处理

$$\begin{cases} A = A_{n+1} - A_n \\ B = B_{n+1} - B_n \end{cases} \quad (2.17)$$

2.4.2 差动式扫描方式

图 2.11 所示的是差动式扫描方式，其中传感线圈呈品字形排布在涡流检测中发挥着关键作用，为精确而高效的缺陷检测提供了可行性，涡流探头的线圈被分成上下两层，每层均可用于激励或者接收，也可以单个线圈激励或者接收，或每两个组成一个探头组。具有高度自动化和精确度，通过依次激励每个线圈，系统可以获取多个角度和位置的电磁响应数据，从而更全面地了解被测导体的状态，通过不断重复上述扫描步骤，可以覆盖整个被测区域，确保高效的缺陷检测。此外，差动式扫描方式还具有适应性强的特点，可以应用于各种不同形状和尺寸的被测物体，而无需显著的改变布局或配置，包括金属、复合材料和导电非金属材料涡流检测。

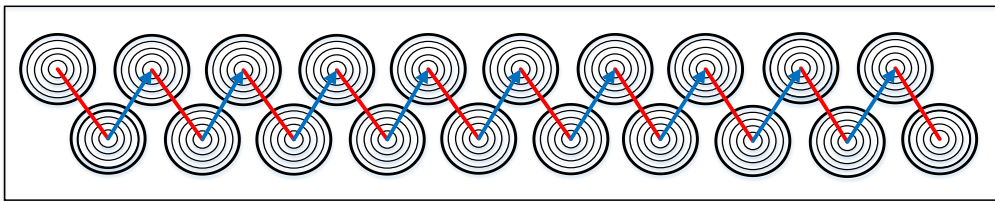
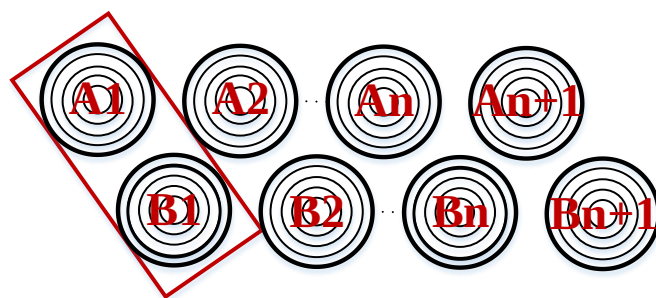


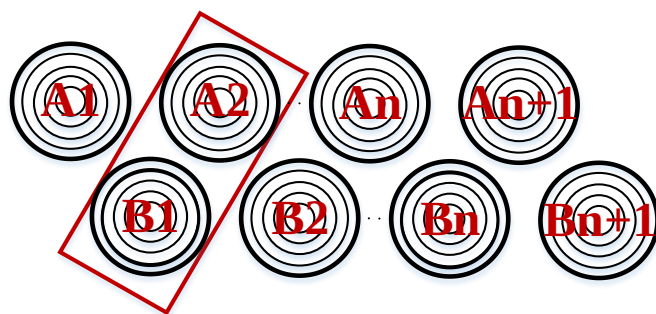
图 2.11 差动式扫描方式

对于差动式扫描方式来说，线圈的组合方式有很多，考虑到差分信号作为被监测对象，提出了四个通道连接方式，如图 2.12 所示：分别为左倾斜通道（TL）、右倾斜通道（TR）、上水平通道（HA）以及下水平通道（HB）。对于倾斜通道的扫描方式而言，在不同方向的涡流扰动是不同的，可以从多方向获得缺陷信息，水平通道对于缺陷的检测具有滞后性以及模糊性，相对于而言倾斜扫描的多通道

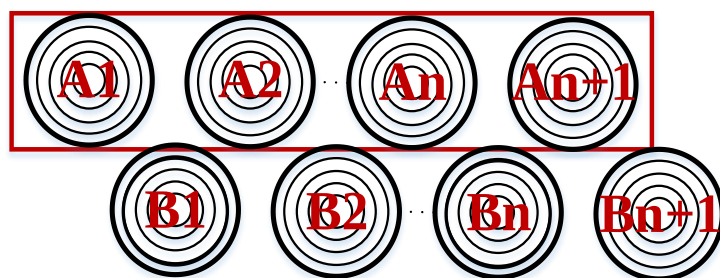
更有助于提供缺陷的完整信息。



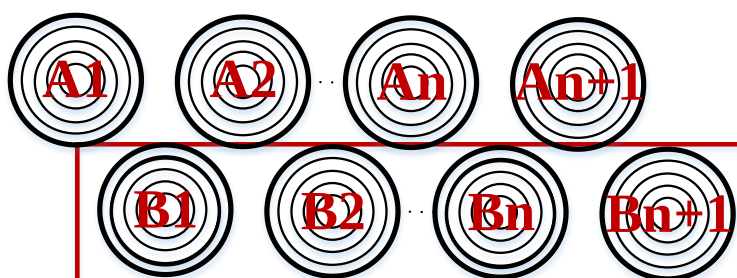
(a) TL 通道



(b) TR 通道



(c) HA 通道



(d) HB 通道

图 2.12 差动式扫描阵列示意图

2.5 本章小结

本章重点分析了涡流无损检测所依赖的麦克斯韦电磁感应定律，电涡流传感器理论。

(1) 通过感应电流和磁场的相互作用，实现对导体内部缺陷的敏感检测，

并且电路模型和等效电路分析为我们解释涡流检测系统的运作机制提供了清晰的框架。

(2) 阵列涡流传感器的扫描方式通过多个传感器的协同工作，提高了检测效率和准确性，绝对式扫描适用于大面积平面型缺陷检测，而差动式扫描方式则在精细检测和适应不同形状的被测物体方面表现出色。这些技术的发展推动了涡流检测在工业和科学研究中的广泛应用，为材料缺陷检测提供了一种高效可靠的解决方案。

第 3 章 高频 PCB 阵列涡流传感器的仿真及阻抗分析

3.1 引言

高频 PCB 线圈的设计和结构对涡流探头的感应灵敏度和检测性能具有决定性的影响，本章将研究线圈参数选择对涡流探头性能的影响，并分析对线圈参数进行的仿真分析和实验验证。首先，研究高频 PCB 阵列线圈的参数以及它们对磁感应强度、阻抗特性的影响，并确定线圈的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，研究线圈的不同层数对阻抗谐振频率的影响分析线圈的层数，匝数以及匝距对其谐振频率的影响，得出随着线圈的层数、匝数以及匝距的增大可以显著的降低线圈的谐振频率；最后，利用阻抗分析仪对 PCB 线圈以及线圈连接不同类型 BNC 电缆线时的阻抗进行分析，可知电缆线的长度与线圈的谐振频率呈负相关关系，较长的电缆线可提高对深层缺陷的检测能力。

3.2 线圈参数选择

高频 PCB 线圈的设计和结构是涡流探头感应灵敏度和检测性能的直接决定因素。线圈的尺寸和几何形状在决定感应信号强度和空间分辨率时发挥着关键作用。增大线圈尺寸可以增加感应信号的强度，提高探测灵敏度，但会降低空间分辨率。相反，减小线圈尺寸可以提高空间分辨率，但会导致感应灵敏度下降。线圈的匝数也是影响感应信号强度的重要因素，增加匝数可以增大感应信号的幅度，提高灵敏度，但会增加线圈的电阻和自感，从而提高线圈的阻抗并降低谐振频率。减少匝数可以减小线圈的电阻和自感，但感应信号强度会下降。因此，在设计线圈的参数时，必须平衡这些因素，以满足对较大磁通量 Φ 的需求，并确保功率匹配和无失真的信号传输。根据毕奥-萨伐尔定律可得，对于环形线圈，距中心距垂直距离 x 处的磁感强度可由公式 (3.1) 计算^[63]：

$$B_z = \frac{\mu_0 \times N \times I \times r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3.1)$$

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 为天线线圈的匝数， I 为线圈中电流强度， r 为线圈的半径。磁感强度 B_z 的衰减与距离 x 的三次方成正比，因此，随着距离的增加，磁感强度会急剧减小，它决定了探头的灵敏度和对

微小缺陷的探测能力。

线圈的磁通量 Φ 可通过公式(3.2)算出，在电流一定的条件下，若要 PCB 线圈产生较大的磁通量，就必须增加线圈的匝数或面积，但匝数或面积增加会增大线圈的电感，从而影响线圈的谐振频率和阻抗。

$$\Phi = \int B_z \cdot dS \quad (3.2)$$

为了得到稳定的高频传输信号，隔绝低频噪声，需要将线圈与电容并联或串联起来^[64]。电容 C 由线圈匝间电容 C_0 和线圈探头同轴电缆的寄生电容 C_1 组成。由公式 3 可知^[65]：

$$f' = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_1)}} \quad (3.3)$$

当考虑线圈本身的阻抗时，其谐振频率 f' 与电感 L 和 C_0 有关，线圈的尺寸越大，则 L 就越大，相对的电容就会变小。由阻抗公式 4，式中 S 表示有效截面积， ε_0 表示真空中的介电常数。铜线导线长度为 l ，绕组间距为 d ，线圈的匝数为 N ，线圈工作频率为 f ，PCB 基体相对磁导率为 μ_r ，铜的电阻率是 ρ 。线圈的阻抗直接影响其谐振频率和带宽，较低的线圈阻抗可以提高线圈的灵敏度，使得对微小缺陷引起的磁场扰动检测更为敏感，但过低的阻抗可能导致耦合效应增强，干扰邻近线圈的信号传输。反之，较高的线圈阻抗能够减少耦合效应，提高线圈的频率选择性，但可能会导致其灵敏度降低^[66]。因此，需在设计时需要平衡阻抗以获得最佳性能。

$$Z = \frac{\rho l}{S} + j \left[\frac{2\pi f \times (\mu_0 \times \mu_r \times N^2 \times S)}{l} - \frac{d}{2\pi f (\varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times S)} \right] \quad (3.4)$$

本文根据实际使用需求，将单个 PCB 阵列线圈设计成如图 3.1 所示的多层线圈。线圈一共有 n 层，每层 m 匝，共 $n \times m$ 匝，线圈内径为 d_2 ，外径为 d_1 ，高度为 h ，每匝线圈的中心距为 0.25 mm ，线径为 0.14 mm 。线圈采用多层设计既可以减小线圈的直径使其拥有更多的匝数，也可以增大磁导率以提高磁场检测的灵敏度^[67]。

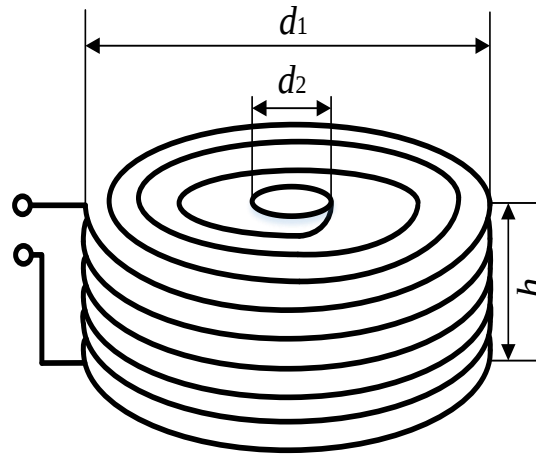


图 3.1 高频 PCB 线圈

3.3 阻抗仿真分析

3.3.1 COMSOL 仿真软件介绍

COMSOL Multiphysics 是一款在工程和科学领域广泛应用的有限元分析 (FEA) 和多物理仿真软件, 以其卓越的计算仿真和问题解决能力而著称。该软件汇集了一系列显著特点和功能, 使其成为处理多领域复杂物理现象的强大工具。

COMSOL 软件还提供了丰富的模型库, 包括各种材料属性和物理现象。这些预定义模型和材料属性可以被用来快速建立仿真模型, 从而提高问题解决速度。COMSOL 还自动处理网格生成, 确保数值解的准确性, 同时尽可能降低计算资源的使用。这一特性对于处理大规模和复杂问题尤为关键。COMSOL 的多物理场求解器非常强大, 支持各种不同类型的偏微分方程 (PDE) 求解, 包括静态、动态、线性、非线性、稳态和瞬态问题。用户可以根据具体需求选择适当的求解器, 以获取准确的数值解。软件还允许用户编写自定义方程和材料属性, 以扩展其功能, 满足更特定的模拟需求。COMSOL 提供丰富的后处理和可视化工具, 用户可以生成各种图表、动画和报告, 以更好地理解仿真结果。此外, 软件还提供各种应用模块, 这些模块包含特定领域的模型和工具, 用于快速解决特定应用问题, 如电力工程、MEMS、生物医学等。这些应用模块为不同行业的用户提供了专门定制的解决方案, 使他们更容易应对特定领域的挑战。COMSOL 的扩展性是一个强大的优势, 用户可以编写自定义插件和脚本, 以根据需要扩展软件的功能, 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, COMSOL 都提供了一个强大的仿真平台, 以帮助用户实现创新并解决现实世界

的问题。

3.3.2 线圈几何参数有限元仿真分析

为了确定线圈的层数、匝数和匝距，并深入分析它们对阻抗的影响，利用 COMSOL 有限元仿真软件绘制了如图 3.2 所示的二维轴对称仿真模型。

这个仿真模型被划分为三个主要区域，每个区域都具有特定的功能，以确保能够精确模拟线圈的性能。首先，创建了一个外层无限元域，其厚度为 1 mm，这个域的主要作用是构建一个近似于无限大的区域，以模拟线圈周围的环境，同时避免了许多不必要的外部因素对仿真结果的影响，有助于确保计算结果更加准确和可靠；其次，建立了一个矩形空气域，其长宽高分别为 $10\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，用于模拟线圈在空气中的性能，可以在这里详细研究线圈的电磁行为，特别是在不同参数设置下的阻抗情况；最后，是 PCB 阵列线圈区域，这个区域包括线圈的实际结构和几何形状，并进行深入的仿真来研究线圈的层数、匝数和匝距对其阻抗的影响。

通过结合这三个区域，创建一个综合的仿真模型，使本文能够全面研究线圈的性能特征为线圈参数的优化提供了坚实的理论基础，并在实际制作高频 PCB 阵列线圈时以实现最佳性能和适用性。

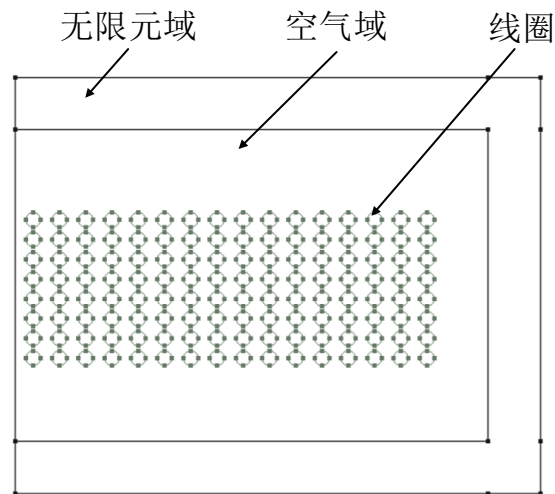


图 3.2 二维轴对称线圈模型

在创建二维仿真模型时，网格划分是确保仿真计算结果准确性和可信度的关键要素之一。为了在考虑计算时间和计算机性能的基础上获得可靠的结果，采用了不同的网格划分策略，具体如图 3.3 中的网格剖分图所示，不同区域采用了适应性的网格划分，以平衡计算精度和效率。

首先,模型的最外围无限元域采用了映射网格,这个选择有助于模拟一个无限大的区域,从而避免了不必要的计算开销,同时保持计算精度;其次,在无限元域与线圈之间的空气域,采用了自由三角形网格,这种网格类型允许更好地适应不规则的几何形状,确保了仿真的准确性。最后,线圈本身采用了边界层网格,这是为了更好地捕捉线圈的电磁特性,网格大小在整个模型中都被细化,以确保准确的仿真结果。仿真软件中的网格质量通常用百分比来衡量,其中 0 表示最差的网格质量,而 1 表示最佳的网格质量。在我们的模型中,总共划分了 426859 个网格单元,平均单元质量为 0.9148。这表明我们的网格划分质量较高,不会对计算结果产生明显影响。

在进行仿真参数设定时,将线圈串联连接,每匝线圈的激励电流设置为 0.01A,频率的扫描范围从 20MHz 到 80MHz。表 3-1 列出了仿真参数的具体数值,设计了三组对比实验,通过改变线圈的层数、匝数以及匝距,获得了线圈阻抗随频率变化的规律。对比实验对于深入了解线圈性能和优化设计提供了有力支持,通过仔细的仿真分析,我们可以更好地理解线圈的行为,为高频 PCB 阵列线圈的最佳性能和应用提供了理论基础,为后续实验和应用提供了关键的指导。

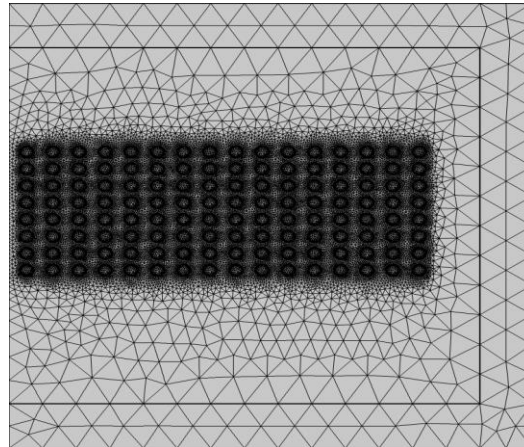


图 3.3 网格剖分图

表 3-1 PCB 线圈参数

线圈参数	线径	内径	外径
值/mm	0.14	0.2	8

3.3.3 层数对线圈阻抗的影响

设计三组对比实验改变线圈层数,使得线圈的层数分别为 4 层、8 层以及 12

层, 图 4 为高频 PCB 线圈阻抗特性曲线图。由图 3.4(a)的阻抗模曲线可知, PCB 线圈的阻抗模 $|Z|$ 随频率的增大均是先增大后减小, 并且随着线圈层数增加阻抗模到达峰值点的谐振频率值也在降低, 分别为 57MHz、37MHz、23MHz。由图 4(b)的相位角曲线可知, 相位 θ 随着线圈阻抗模值 $|Z|$ 的突变发生一次相位翻转。根据阻抗定义, 电阻为阻抗的实部, 电抗为阻抗虚部。线圈电阻和电抗随频率的变化趋势分别如图 3.4(c)和图 3.4(d)所示, 变化趋势与阻抗模的基本一致。因此可知, 随着线圈层数的增加谐振频率逐渐减小。

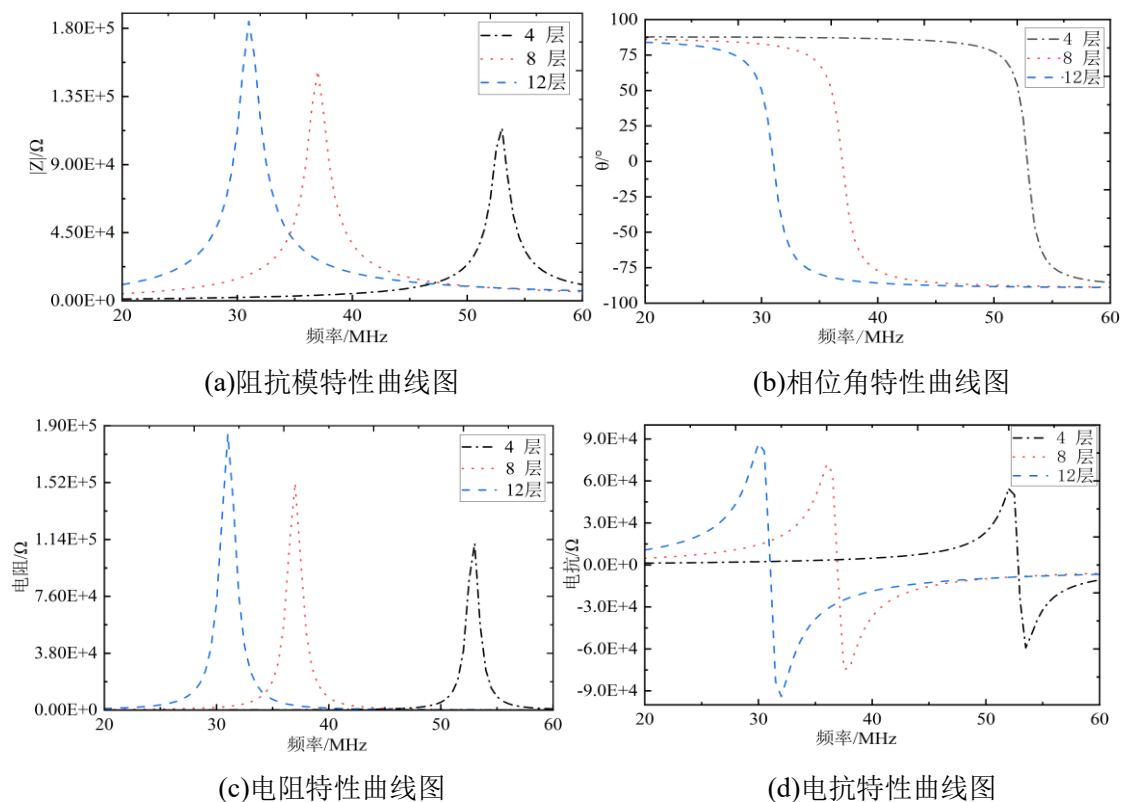


图 3.4 高频 PCB 线圈阻抗特性曲线

3.3.4 匝数对线圈阻抗的影响

对于 PCB 线圈来说, 线圈参数中的匝数是在计算线圈感抗时一个不可忽略的变量, 线圈感抗于线圈匝数呈二次关系, 因此根据此关系可以快速的对线圈的阻抗做出调整, 以满足设计要求。将线圈的匝数分为三组, 分别为 32 匝、80 匝以及 128 匝, 保证线圈终端与接入阻抗分析仪的引线相当, 并保证层数与匝距不变, 以降低其他因素对线圈阻抗特性的影响。图 3.5 所示为在线圈的频域响应范围内, 线圈阻抗特性的变化曲线。由图可见, 随着线圈匝数的增加线圈的阻抗峰值向着低频区域移动。并且线圈匝数与线圈的阻抗是二次关系, 这就使得线圈匝

数与突变频率点表现出非线性相关性,而当各线圈的阻抗特性突变出现在较高频率点位时,线圈匝数与突变频率间的非线性有减弱的趋势。因此,在设计 PCB 线圈时,可考虑非等间距地对各频率组分进行调节配置,以提高线圈与激励频率间的配置效率,并改善测试系统的精度。

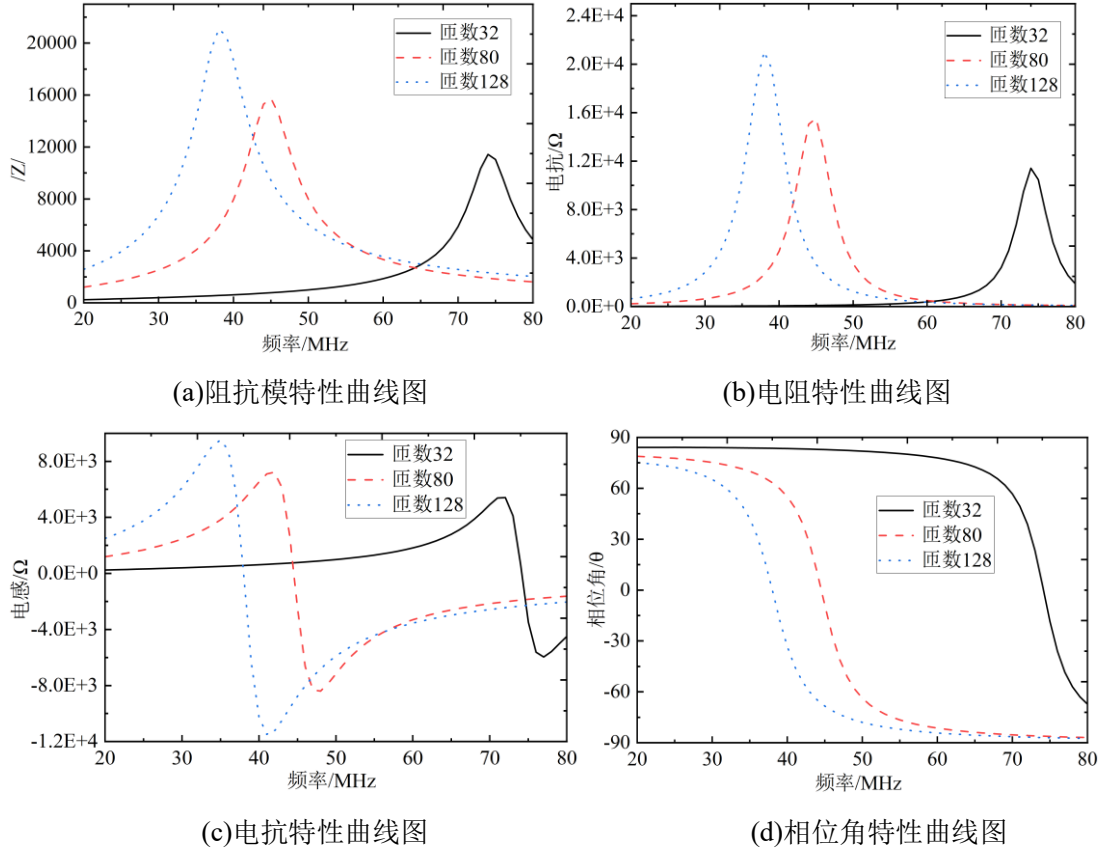


图 3.5 高频 PCB 线圈阻抗特性曲线

3.3.5 匝距对线圈阻抗的影响

从文中可以发现,线圈的匝距也是影响线圈阻抗的另一个重要结构参数。在线圈匝距分别为 0.2mm、0.25mm 以及 0.3mm 的情况下,分别对三者进行阻抗特性的仿真与分析。如图 3.6 所示,随着线圈匝与匝之间的距离逐渐减小,线圈的阻抗特性曲线向着高频区域移动,分别为 46MHz、35MHz 和 29MHz,并且也可以从图中看出两者呈现出近似的线性相关性,因此我们可知更小的线圈匝距谐振频率也越大。

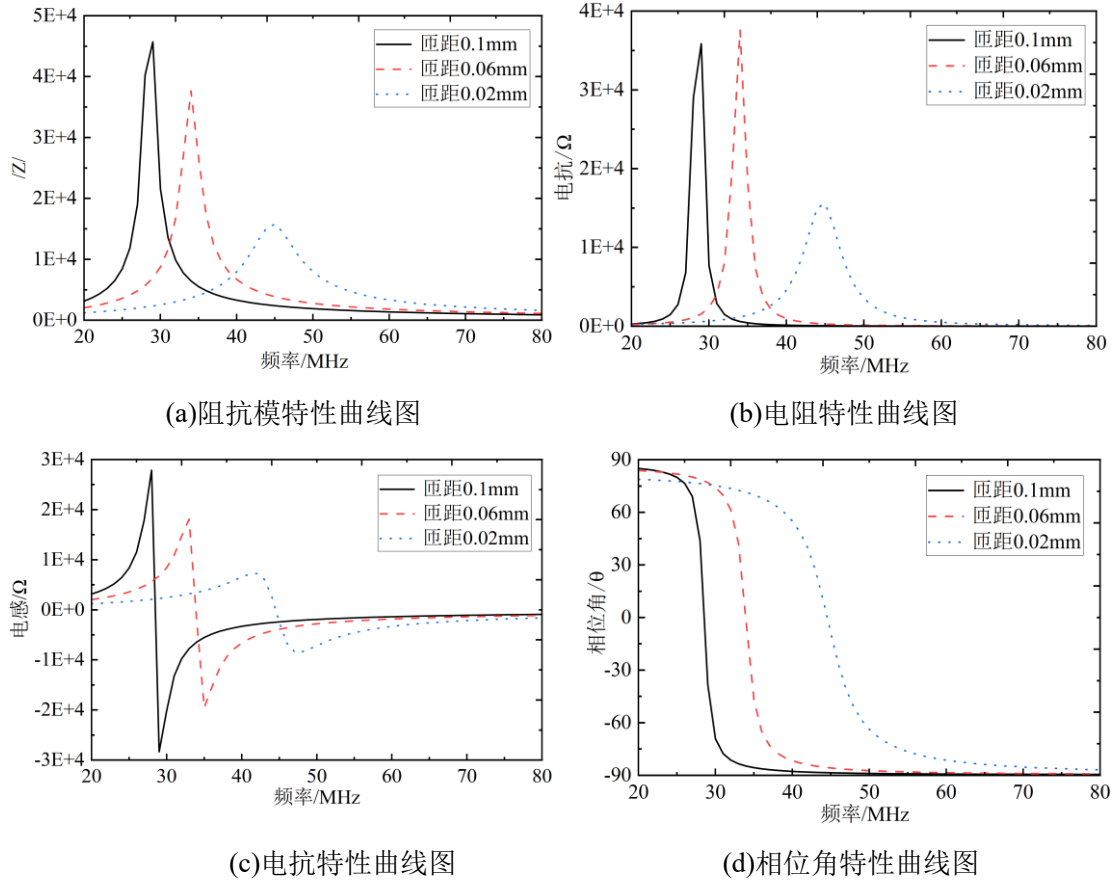


图 3.6 高频 PCB 线圈阻抗特性曲线

3.4 阻抗实验分析

3.4.1 阵列线圈制作

由上文分析可知,为了兼顾线圈尺寸以及加工工艺的限制,故将线圈设计成 8 层 128 匝,匝距为 0.25mm 的形状。

在制备高频 PCB 阵列线圈探头时,首先准备多个覆铜板,每个覆铜板包括一层导电铜箔和一层绝缘层,在每个覆铜板上绘制线圈的形状和布局,通过盲孔洞将多个覆铜板堆叠在一起;其次通过热压法,将多层覆铜板固定长 100mm,宽 24mm,厚度为 1.6mm 的 PCB 板上,每个线圈之间的中心距为 9mm,共 20 个线圈分上下两层排列每层十个线圈,上层与下层线圈偏移量为 5mm。线圈的上表面和下表面到 PCB 板底面的距离分别为 1.5mm 和 0.4mm;最后将线圈的接线引出至 PCB 的边缘方便外接线路。图 3.7 所示为高频 PCB 阵列线圈涡流探头实物图。

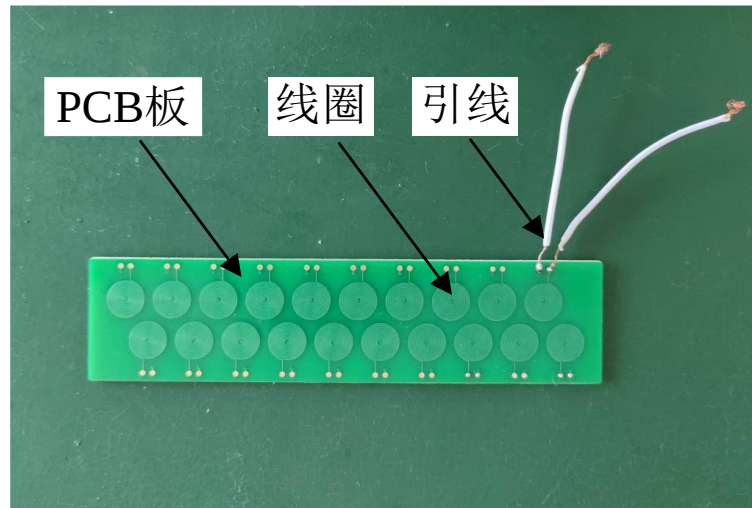


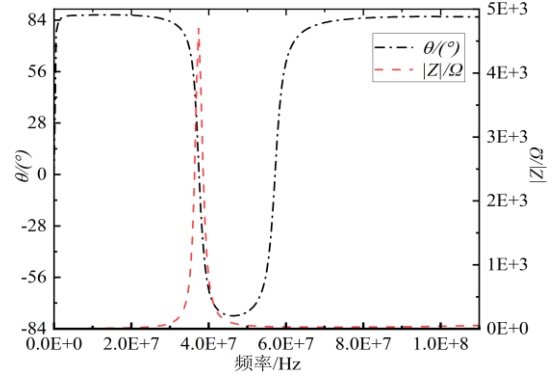
图 3.7 高频 PCB 阵列线圈涡流探头实物图

3.4.2 线圈阻抗分析

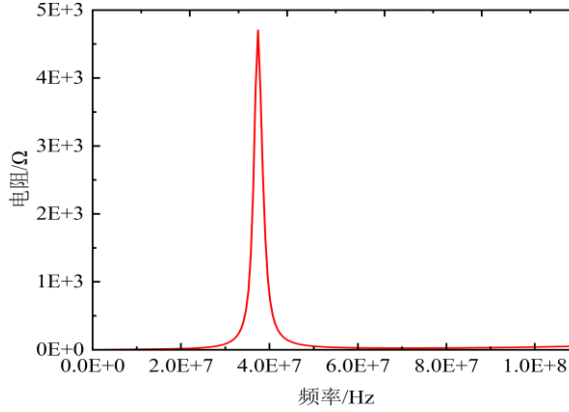
在制备好的高频 PCB 阵列线圈电极上焊接两条引线，对单个线圈进行阻抗测量。测量采用图 3.7(a)所示的 ZX-8590 阻抗分析仪，其高频 LCR 数字电桥的高精度、宽频率范围可以满足元件与材料绝大部分低压参数的测量要求，可广泛应用于诸如传声器、谐振器、电感器、陶瓷电容器、液晶显示器、变容二极管、变压器等进行诸多电气性能的分析及低 ESR 电容器和高 Q 电感器的测量，最高工作频率 110MHz。对线圈进行阻抗测试时，首先进行开尔文夹具的补偿和校准，然后将线圈接入阻抗分析仪，设定其测试信号电平为 1V，频率扫描范围为 10Hz~110MHz，最后通过上位机记录线圈频域内的阻抗响应结果 $|Z|$ 和 θ ，并绘制各参量随频率变化的响应曲线。图 3.7(b)所示为高频 PCB 线圈的阻抗模特性曲线，其阻抗随频率增长的变化趋势与有限元仿真结果几乎一致，在 37MHz 左右达到峰值，随后下降。图 3.7(c)所示为电抗特性曲线，随着测试频率的连续变化，线圈电抗值在若干频率点会出现脉冲突变，突变点分别在 10Hz、37MHz 和 60MHz 处，同时，线圈阻抗的相位 θ 会在线圈电抗值突变处伴随出现一次相位的翻转，图 3.7(d)线圈的电阻与阻抗模的变化曲线一致。在此参数下制备出的高频 PCB 线圈与仿真结果一致，结果可信。



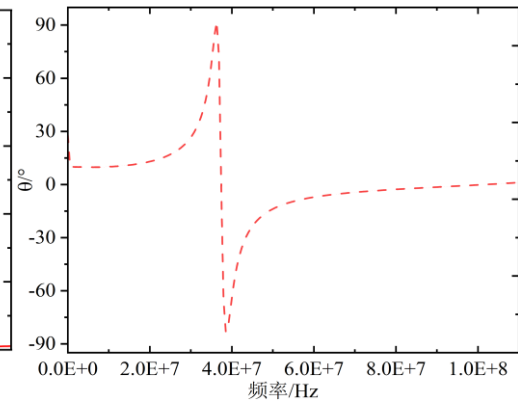
(a)ZX-8590 阻抗分析仪



(b)线圈阻抗模特性曲线



(c)线圈电阻特性曲线



(d)线圈电抗特性曲线图

图 3.7 高频 PCB 线圈阻抗测量

3.4.3 线圈外接电容电阻等效电路

为验证 BNC 电缆线对高频 PCB 线圈阻抗的影响，建立如图 3.8 所示的线圈-电缆系统电路模型，用以分析线圈阻抗与外接电阻-电容-电感分支电路的关系。电路模型中 R_0 、 L_0 、 C_0 是线圈的电阻、电感以及电容， R_1 、 C_1 、 L_1 是外接电路 BNC 电缆线的电阻、电容以及电感， Z_0 为线圈阻抗、 Z_1 为电缆阻抗、 Z 为总阻抗。为证明该模型的准确性，在 1000Hz 的激励频率下利用阻抗分析仪分别测出线圈、电缆 1+线圈、电缆 2+线圈的电感、电容值，如表 3-2 所示。根据公式 (3.5) 计算出三种情况下的谐振频率分别为 36.59MHz、10.05MHz 和 7.47MHz，并且谐振频率计算值与测量值基本相同。因此可知，线圈在连接不同电缆线后会降低谐振频率，该电路模型可用于定量分析阻抗特性的变化。

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0 \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{Z_1} = R_1 + \frac{1}{j\omega L_1} + j\omega C_1 \quad (3.6)$$

$$Z = \frac{Z_0 * Z_1}{Z_0 + Z_1} \quad (3.7)$$

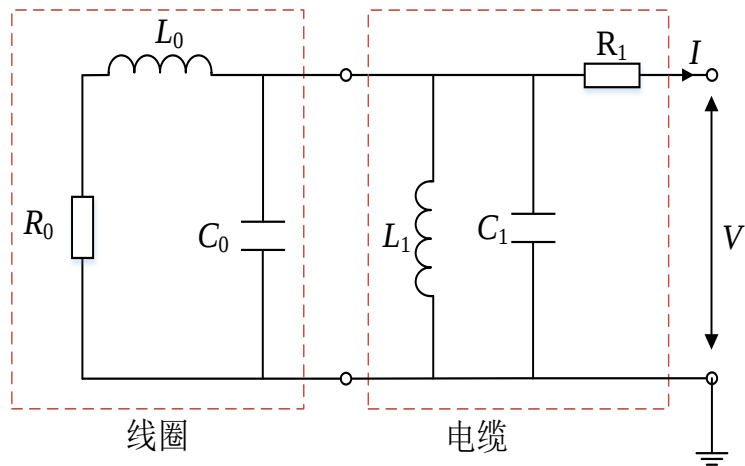


图 3.8 线圈-电缆系统电路模型

表 3-2 电感-电容测量数据

实验组	电感 L/ μ H	电容 C/pF	计算谐振频率/MHz
线圈	2.32	8.17	36.56
电缆 1+线圈	3.26	76.92	10.05
电缆 2+线圈	3.45	131.45	7.47

3.4.4 外接电路阻抗分析

图 3.9 所示为线圈—BNC 电缆线系统的阻抗测量结果，图 3.9(a)中 BNC 电缆线不带三通转接口且电缆线较短，图 3.9(b)为带三通转接口且电缆线较长，将其与高频 PCB 线圈进行连接并测量其阻抗。



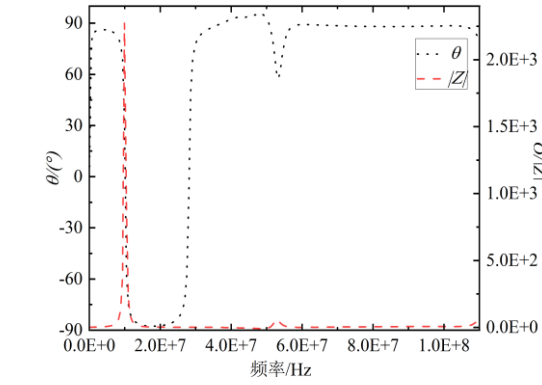
(a)电缆 1+线圈



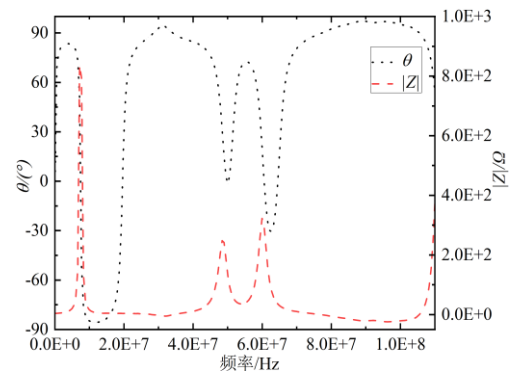
(b)电缆 2+线圈

图 3.9 线圈—BNC 电缆线阻抗测量

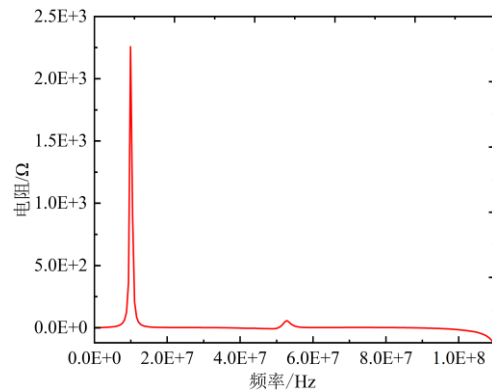
图 3.10(a)和图 3.11(a)分别绘制了两种不同 BNC 电缆线+线圈的阻抗分析结果,可见,选取不同电缆线会使得在频域范围内具有截然不同的阻抗特性表现,但其随频率变化线圈阻抗模值和相角的变化规律具有高度的一致性。两个电缆+线圈的电阻和电抗随频率增长的变化趋势分别如图 3.10(b)、(c)和图 3.11(b)、(c)所示,电缆+线圈的电阻和电抗的变化与阻抗随频率的变化趋势基本一致。此外,在阻抗模值的脉冲突变处,线圈的电抗由感性电抗转为容性电抗,随后再次恢复为感性电抗。随着测试频率的变化两种 BNC 电缆线+线圈的谐振频率分别为 10MHz 和 7.7MHz,因此,在线圈连接电缆后可以明显降低其谐振频率,这为后文提出 CFRP 不同深度缺陷检测灵敏度提升方法提供了理论及技术支持。



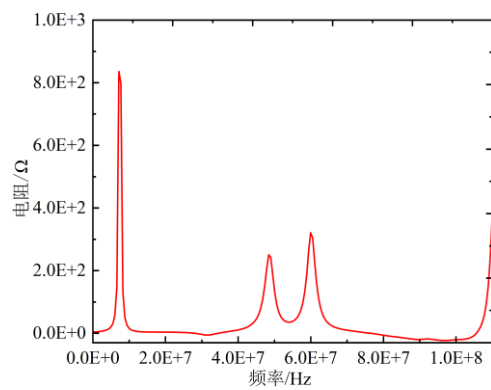
(a)阻抗模特性曲线



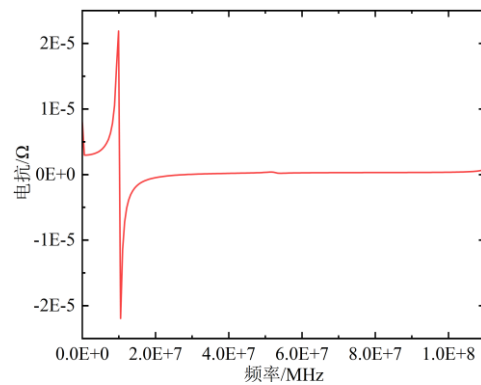
(a)阻抗模特性曲线



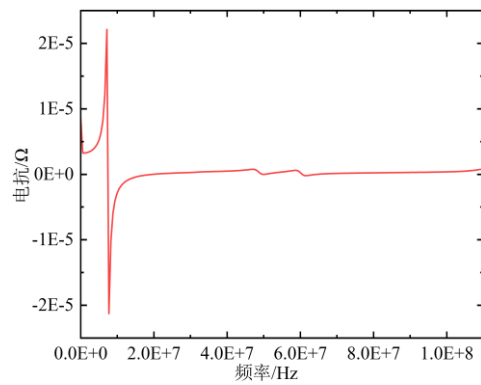
(b)电阻特性曲线



(b)电阻特性曲线



(c)电抗特性曲线



(c)电抗特性曲线

图 3.10 电缆 1+线圈阻抗特性曲线

图 3.11 电缆 2+线圈阻抗特性曲线图

3.5 本章小结

本节设计了一种高频 PCB 涡流阵列探头对碳纤维复合材料深层缺陷进行检测，通过对线圈连接不同类型长度的电缆改变线圈的谐振频率，达到对不同深度的隐藏缺陷检测和获取最大的检测灵敏度。首先，根据高频 PCB 阵列线圈的工作原理对线圈的各项参数进行分析，使得线圈的层数，匝数等处于一个合适的范围内。其次，根据线圈参数分析建立仿真模型，通过改变线圈的层数分析其谐振频率，结果表明，随着线圈的层数增加其谐振频率在逐渐减小，因此为综合考虑

线圈的制造工艺以及使用要求确定线圈为每层 16 匝分 8 层共 128 匝的模型。利用阻抗分析仪对高频 PCB 阵列线圈以及高频 PCB 阵列线圈连接不同类型电缆线时进行阻抗分析，发现电缆线越长线圈的谐振频率会越小。综上所述，本章研究可为高频 PCB 阵列线圈在连接不同 RLC 分支电路时对 CFRP 深层缺陷检测的应用提供参考。

第 4 章 基于 LabVIEW 的阵列线圈涡流检测系统

4.1 引言

本章利用 LabVIEW 软件搭建阵列线圈涡流检测系统,以实现高频 PCB 阵列线圈的涡流自动化探伤扫描。首先,设计 PCB 线圈的专用夹具,使得线圈能够安装在三坐标位移台上;其次,编写阵列线圈的轮询通断程序,通过电磁继电器控制 20 路线圈的轮询通断以及通断时间,并搭建阻抗分析仪的上位机程序,使得上位机可以与阻抗分析仪进行通信;再次,设计阻抗分析仪的探头信号进行采集,存储,以及三坐标位移台的运动方向,起始与终点位置以及运动步长的参数的程序;最后搭建出人机交互界面,使得进行涡流扫描实验时能够更加的便捷,提高工作效率。

4.2 LabVIEW 简介

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 是一款由美国国家仪器公司 (National Instruments) 开发的图形化编程环境和开发平台^[68],被广泛应用于工业自动化、医疗设备、航空航天、通信、教育等各个领域,为工程领域的创新提供了有力支持。

LabVIEW 的核心特点之一是其图形化编程语言 G,使用数据流图 (Dataflow Diagram) 的方式来表示程序逻辑,这种独特的编程方法使得用户能够通过拖放、连接和配置图形元素来构建程序,而不需要编写大量的代码,使其能够简单的实现各种功能。LabVIEW 提供了广泛的工具和功能库,支持多种硬件平台,包括各种传感器、数据采集卡、运动控制器等,这使得其成为一种多功能的平台,适用于各种不同的应用。LabVIEW 的用户界面设计也是其一个显著特点,用户可以创建自定义的前端界面,以便直观地监视和控制系统,这些界面可以包括图形、图表、按钮、滑块、数据显示等元素,通过直接与程序逻辑连接,实现用户友好的交互和可视化。

此外,LabVIEW 支持多种数据类型和格式,包括数字、文本、图像、音频等,以满足不同应用的需求,用户可以使用内置的信号处理和分析工具,进行数据处理和报告生成,这对于实验数据的分析和呈现非常有用。LabVIEW 还具备强大的通信和连接能力,可以与其他编程语言和系统集成,如 C/C++、MATLAB、

硬件设备等，这种灵活性使得 LabVIEW 成为一个通用的工程工具，能够与其他工具协同工作，实现更复杂的应用。

4.3 PCB 线圈夹具设计

高频 PCB 阵列线圈涡流探头，是由 20 个线圈阵列排布在长为 100mm，宽为 24mm 的 PCB 板上，为了能够使用该线圈进行涡流检测，设计了专门的夹具，如图 4.1 所示。PCB 线圈夹具主要由连接柱、限位件、注胶孔、引线编号以及连接线孔组成。连接柱的作用是让线圈夹具与三坐标位移台进行连接，使得线圈可以跟随三坐标位移台而移动，而限位件是为了防止夹具与三坐标位移台 Z 轴相接触，进而迫使线圈或者位移台出现损伤；连接线孔的作用是为了能够方便的对线圈引线进行整理与归纳；引线编号的目的是可以让使用者能够清晰的分辨出每个线圈所对应的连接线，便于后期的线圈检查；注胶孔的作用是防止 PCB 线圈安装进夹具里后出现损伤，对线圈起到保护的作用。

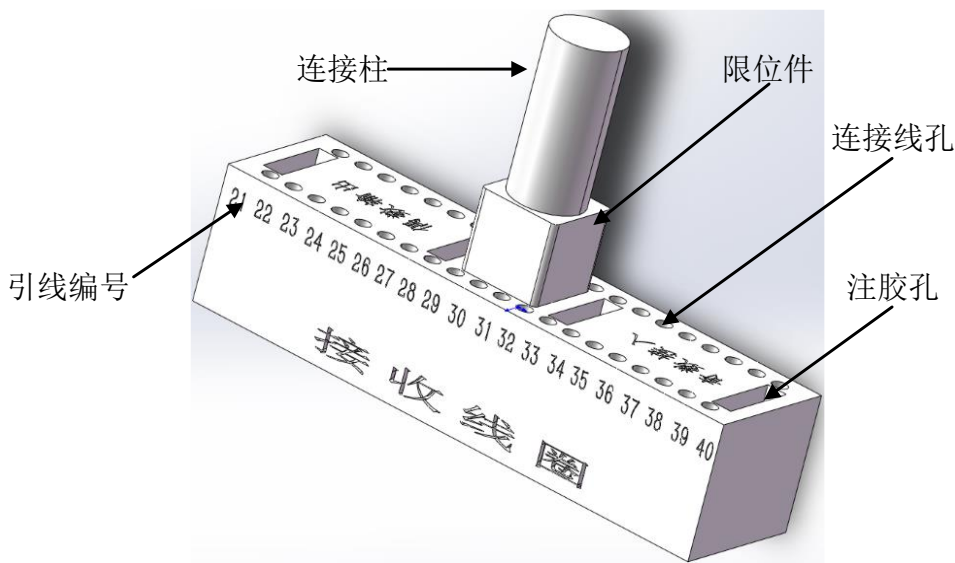


图 4.1 线圈夹具

4.4 上位机软件流程图

如图 4.2 所示为上位机流程图，具体的操作如下：（1）在给整个系统接入电源以后，程序会自动进行三坐标位移台位置的初始化，随后手动设定位移台 X 轴、Y 轴方向的起始位置、终止位置、步进长度、以及运动的速度和加速度的大小，最后设置 Z 轴下降距离；（2）用 USB 连接线将上位机与下位机进行连接，连接后上位机会自动识别 COM 口，如果连接成功，指示灯将会亮起，若未连接成功，指示灯则始终为灰色；（3）在上位机的前面板进行线圈频率以及工作电压的设定，

以满足检测条件；(4) 各项参数设定完成后，控制三坐标位移台的运动，启动系统的信号采集功能，下位机利用阻抗分析仪的电抗测量信号来进行外部信号的中断采集实时的将采集数据上传到上位机系统的缓冲区进行保存并且经上位机的读取后显示强度图。(5) 根据 X 轴的位置判断扫描过程是否完成。如若扫描已经结束，位移台回归起始位置，随后关闭 VISA 串口，如若未完成扫描，则回归到步骤 (4) 里面继续进行扫描。

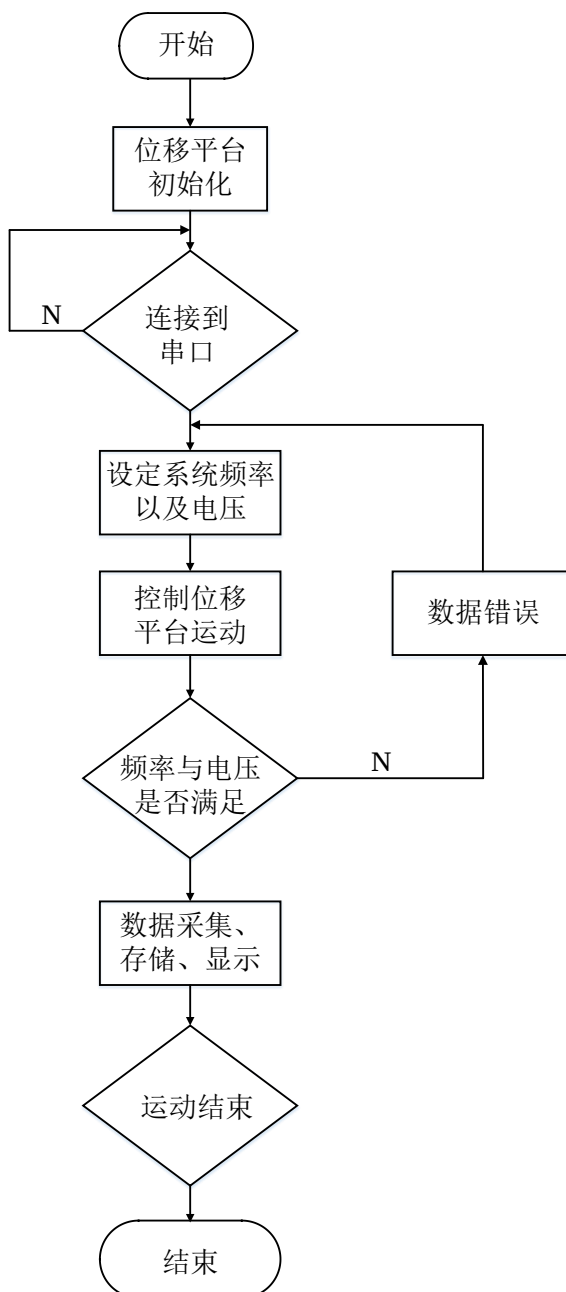


图 4.2 上位机软件流程图

4.5 系统各功能模块开发

4.5.1 阵列线圈轮询接入控制

高频 PCB 线圈是由 20 个单独线圈阵列排布在 PCB 板上，为了能够使用阵列式扫描方式，故需要对线圈进行轮询接入控制，使线圈可以按需求通断电，因此我们引入 36 路串口/RS485 继电器进行线圈的通断控制。36 路串口/RS485 继电器长（238mm）宽（140mm）高（25mm），硬件版本号：KMCZE-I36O36-V1.0 软件版本号：KMCZE-I36O36-V2.0T，通信方式：DB9 接口（串口）、485（MODBUS-RTU），可以自定义控制 16 进制、MODBUS-RTU 以及字符串协议，实时控制（发命令控制每一路通断）、延时通断、定次间歇通断和自动轮换，这为接下来的轮询控制程序的书写提供了极大的便利。除此之外，继电器还提供了多种控制模式，包括实时控制（即发送命令以控制每一路通断）、延时通断、定次间歇通断和自动轮换。这些控制模式为用户提供了极大的便利，使其能够灵活地适应不同实验和测试的要求。

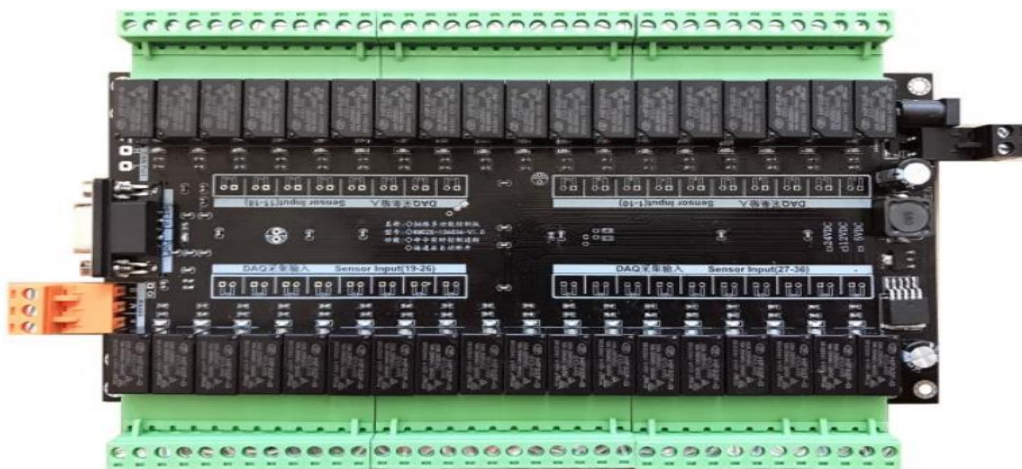


图 4.3 36 路串口/RS485 继电器

本段主要任务是对高频 PCB 线圈进行延时轮询通断的控制，为了实现这一目标，编写了一个详细的程序框图，如图 4.4 所示。这一程序框图包含了三个关键模块，每个模块都扮演着特定的角色，以确保继电器按照预定的通断序列工作。第一个模块涉及 VISA 串口的设置以及波特率的配置，它是与继电器通信的桥梁，确保了上位机能够与继电器进行有效的数据传输，在这一步骤中，需要确保 VISA 串口与继电器的通信参数正确设置，以便实现可靠的通断控制。第二个模块是控制继电器通断的核心部分，它包含一个 for 循环，该循环用于多次执行通断操作，

通过循环中的控制命令来实现,在这一模块中,定义了通断操作的次数,以确保继电器按照特定的频率工作。第三个模块负责确定继电器的通断序列,包括确定从第几路开始通断,通断到第几路结束,每路的通断次数以及每路通断的时间间隔,这些参数的设置允许用户根据具体的实验需求来定制继电器的工作方式。在实际操作中,当上位机成功连接到继电器时,继电器的蓝灯将亮起,表示连接成功,如果蓝灯未亮起,则表示连接失败,需要进行检查和调试。随后,上位机可以将这三个模块结合在一起,以实现对接电器的精确控制,包括通断操作的次数、频率和顺序。通过合理的设置和控制,能够实现对线圈的延时轮询通断,以满足特定的实验和测试要求。

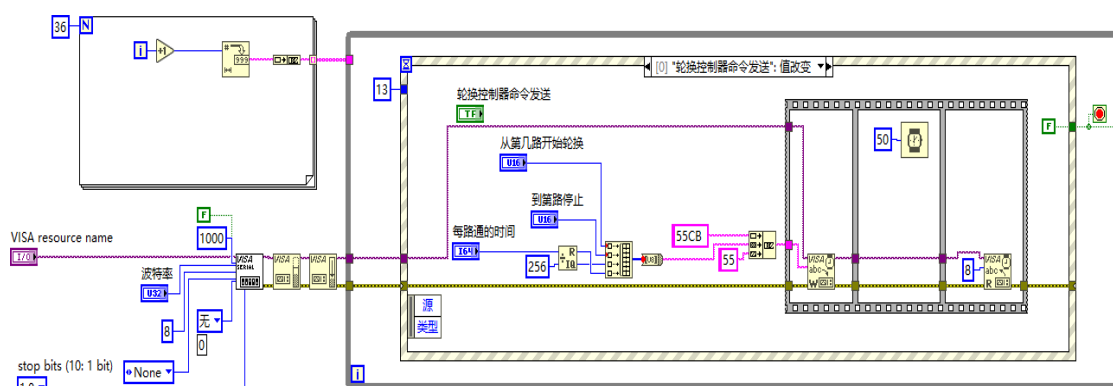


图 4.4 阵列线圈轮询控制程序

4.5.2 信号采集时序控制

根据上位机阻抗分析仪的通信协议,我们能够有效地控制阻抗分析仪,如图 4.5 所示的信号采集程序图所示。该程序的关键是确保能够以正确的参数设置进行信号采集,以满足实验的需求。在信号采集程序中,首先设置激励频率范围为 10Hz 至 110MHz,在这个范围内可以选择任何整数频率进行激励,适应不同频率下的涡流检测以满足各种测试要求。此外,还可以设置激励电压,其范围通常在 1 至 5V 之间,这个参数的设定有助于调整实验条件,以获得所需的数据。同时考虑到阻抗分析仪的多功能性,需要进行功能的选择,如阻抗、电感等,根据具体的实验目标来确保能够获取相关的数据,选择不同的功能将影响实验的结果和数据分析。最后,信号采集程序负责对阻抗分析仪的数据进行显示、存储和分析,这一步骤非常关键,因为它能够实时监测实验结果,记录数据以供后续分析使用,并且数据的存储和分析对于研究工作和实验结果的解释至关重要。

另外,图 4.6 所示的时序程序图对于上位机与阻抗分析仪的连接状态起着重

要的标志作用。如果连接成功，程序将不会报错，并且在上位机界面不会出现错误提示，如果连接失败，系统将会弹出错误面板，提示用户进行检查和修复。同时，这一程序也负责控制线圈在通电时每个线圈所采集的数据数量，并将数据传输到信号采集程序中，以供进一步的处理和分析。

这些程序的设计和运行确保了高效的信号采集过程，为实验和测试提供了可靠的数据基础，以支持涡流检测的各个方面。

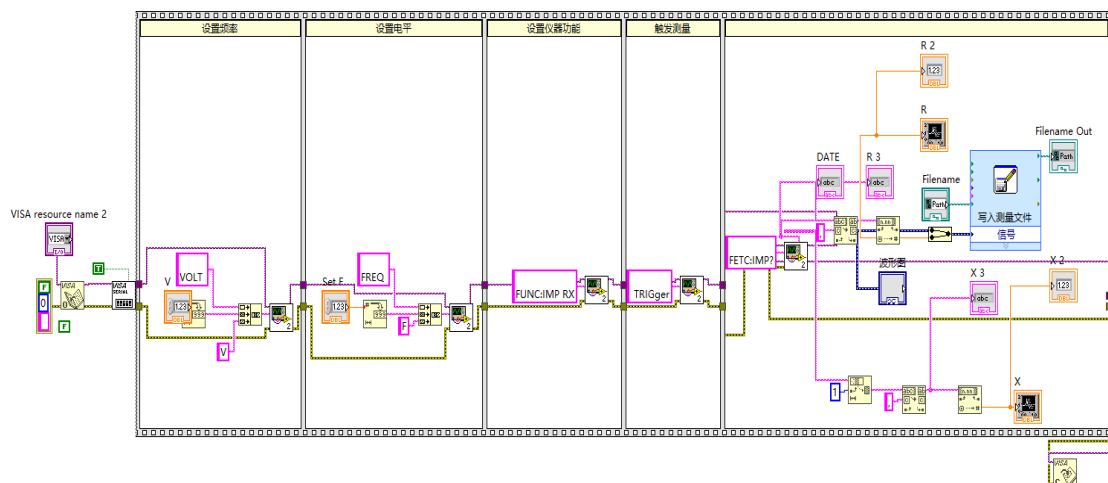


图 4.5 信号采集程序图

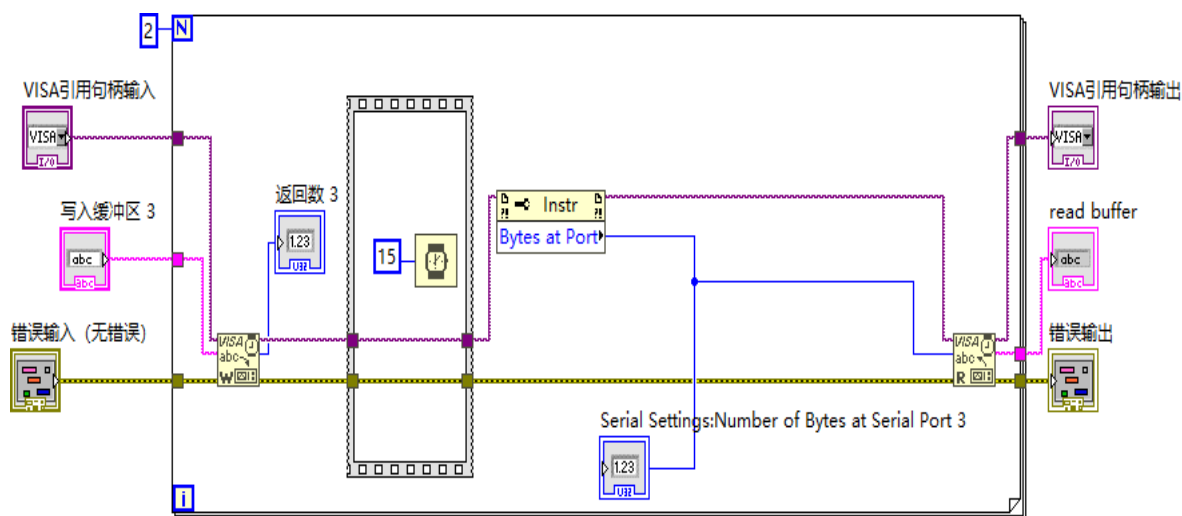


图 4.6 时序程序图

4.5.3 运动控制

运动参数的设置是整个涡流检测至关重要的一步，这是能否实现涡流检测自动化的关键。通过设定三坐标位移台的 X 轴、Y 轴的运动速度、加速度、运动的起始和终点位置以及运动步长等参数进行设定，以此来决定系统的涡流的扫描运动过程。由于所设参数众多，为了减小程序的复杂性，增强阅读性，因此采用循

环加数组索引的布局方式，对三坐标位移平台的运动速度、运动加速度以及步长等参数进行一次性设置，最后结合运动控制器的控制指令实现控制，具体的运动参数如图 4.7 运动参数设置程序图所示。

运动参数的设置在涡流检测中扮演着至关重要的角色，它直接影响着涡流检测的自动化程度以及检测的效果，正确的参数设置是确保系统能够按照预定的轨迹进行扫描运动的关键。在参数设置的过程中，需要考虑一系列关键因素，包括三坐标位移台的 X 轴和 Y 轴的運動速度、加速度、起始和终点位置，以及运动的步长，这些参数的设定将直接决定着涡流检测系统的扫描过程，包括扫描速度、精度和覆盖范围。考虑到参数众多，为了简化程序的复杂性并提高可读性，采用了一种循环加数组索引的布局方式，用于一次性设置三坐标位移平台的运动参数，这种方式允许我们在一个步骤中设置多个参数，从而降低了设置的复杂性，同时提高了程序的清晰度。具体而言在图 4.7 中展示了运动参数设置程序图。在这个程序中，可以通过循环结构一次性设置运动速度、运动加速度以及步长等参数。这些参数的设定将与运动控制器的控制指令结合使用，以实现对三坐标位移台的精确控制。

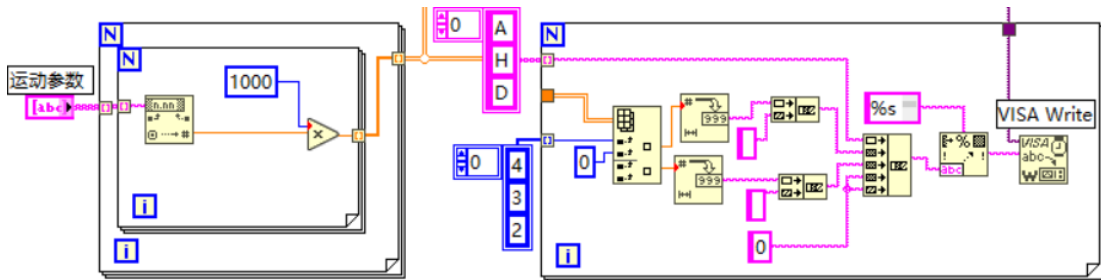


图 4.7 运动参数设置程序图

4.5.4 人机界面

LabVIEW 程序的前面板允许用户进行系统相关参数的设置，前面板按照图 4.8 的示意图被划分为四个主要模块，实现人机交互界面的功能。第一个模块（模块 1）用于选择 VISA 串口和设置波特率，在本系统中，VISA 串口 COM3 用于连接电磁继电器，而 COM4 用于与阻抗分析仪进行通信，两者的波特率均设置为 115200；第二模块（模块 2）是用于配置阻抗分析仪的电压和频率参数的设置模块，用户可以在此模块内设置电压的范围，允许范围从 1V 至 5V，并设置频率的范围，支持范围从 10Hz 至 110KHz，此外，该模块还提供了信号存储位置的

配置选项以及采集信号的实时显示功能；第三模块（模块3）专门用于电磁继电器的延时通断和轮询命令的控制，用户可以在此模块内精确控制阵列线圈的轮询通断操作，包括通断时间的设定；第四模块（模块4）负责控制三维坐标位移台的运动，该模块的 VISA 串口配置为 COM5，波特率设置为 9600，用户可以在此模块内设定位移台的起始位置、终止位置、运动步长、速度、加速度，以及去程和回程的扫描延迟参数。一旦用户完成了这四个模块中的各项参数的设定，可以运行上位机程序。如果系统没有检测到阻抗分析仪的电压和频率参数的错误，系统将显示运行正常的指示灯。

总之，LabVIEW 程序的前面板通过可视化的方式，为用户提供了直观、便捷的界面，用于配置和控制系统的各项参数，从 VISA 串口设置到电压和频率的调整，再到电磁继电器和位移台的精确控制。这种人机交互界面的设计使得系统的操作变得高效、直观，为实验和数据采集过程提供了重要的支持。

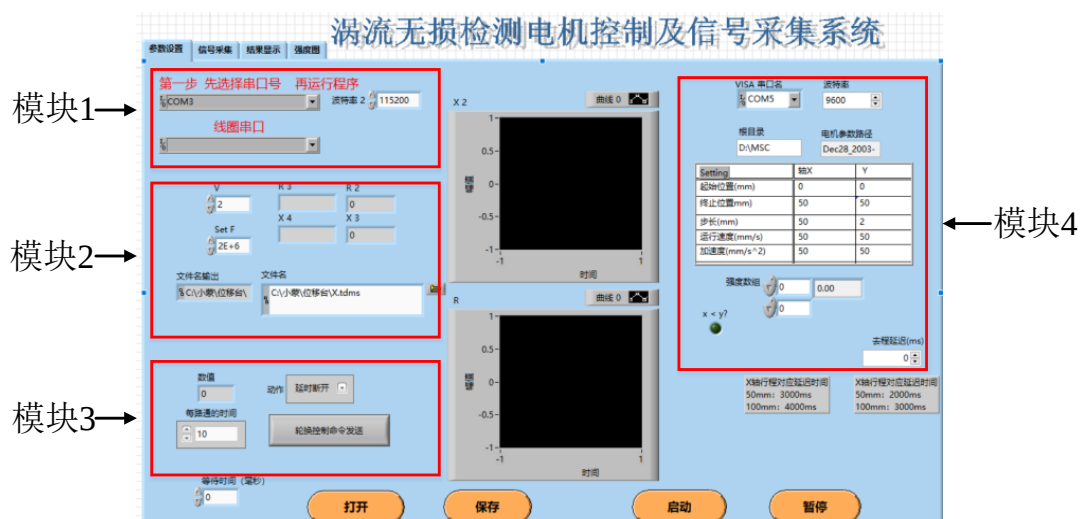


图 4.8 阵列涡流检测系统人机界面

4.6 本章小结

本章从高频 PCB 阵列线圈检测系统入手，通过对涡流检测系统的几个模块的程序搭建，将阻抗分析仪、电磁继电器以及三坐标位移台连接起来，随后制作 PCB 线圈的夹具，这样系统便可以进行涡流扫描。

(1) 由于自行设计的 PCB 线圈探头并没有与标准夹具相匹配，因此必须借助三维软件进行夹具的尺寸设计和加工。这个夹具的制作旨在实现线圈扫描的自动化。通过合理的设计，夹具能够确保线圈的稳固连接，使其能够精确扫描被测物体。

(2) 高频 PCB 线圈排布着 20 个线圈阵列，因此需要一种方式来控制每个线圈的通断电。这一任务通过电磁继电器的应用得以实现。通过上位机程序的控制，用户可以轻松实现每个线圈的独立通断控制，同时可以根据不同的应用需求来调整通断时间。

(3) 为了实时监测并提取高频 PCB 线圈的测量信号，引入了阻抗分析仪。上位机编写的程序能够有效地捕捉线圈在被测物体上引起的阻抗变化信号，并将这些数据进行存储。这一步骤至关重要，因为它使用户能够实时分析和解释数据，为进一步的研究和应用提供了坚实的基础。

第 5 章 阵列线圈涡流扫描实验

5.1 引言

本章搭建一个高频 PCB 阵列线圈探头涡流检测实验平台，旨在深入研究碳纤维复合材料的缺陷检测问题。该实验平台包括上位机、位移控制器、三坐标位移台、高频 PCB 涡流阵列探头等多个核心组件，通过精密的操作流程实现对待检区域的高密度涡流扫描，通过采用不同的线圈连接方式，并分析其对实验结果的影响，为后续信号分析提供了有力的数据支持。在信号分析阶段，通过对不同拓扑方式的线圈扫描结果的处理，阐述信号选择的重要性，并最终生成二维缺陷伪彩图，展示被检测对象表面的电抗分布情况，为快速识别潜在缺陷区域提供直观的工具。

5.2 实验系统平台

根据上文分析，搭建如图 5.1 所示的高频 PCB 阵列线圈探头涡流检测实验平台。该实验平台由多个核心组件组成，包括上位机、位移控制器、三坐标位移台、高频 PCB 涡流阵列探头、探头弹性夹具、碳纤维复合材料试件、继电器、RS232 串口、阻抗分析仪、阻抗测试夹具、十进一出端子和 BNC 电缆线，整个检测流程的实施如下：首先，高频 PCB 线圈涡流阵列探头通过探头柔性夹具巧妙地安装在三坐标位移台上，通过运动控制模块，能够控制三坐标位移台在 X 和 Y 方向的运动步长、速度以及具体点位；其次，当位移台运动停止时，继电器轮询通断模块通过 RS232 串口向继电器发送控制指令，以实现每个线圈的通断控制，这个过程能够让我们根据具体的应用需求，对每个线圈的通断时长和通断次数进行精确控制；最后，线圈通电时，数据读取与存储模块负责接收阻抗分析仪通过测试夹具测量的线圈电抗值信号，并将这些数据读取和保存，这一步骤的成功执行保证了实验结果的准确性和实时性，同时也为后续数据分析提供了坚实的基础。

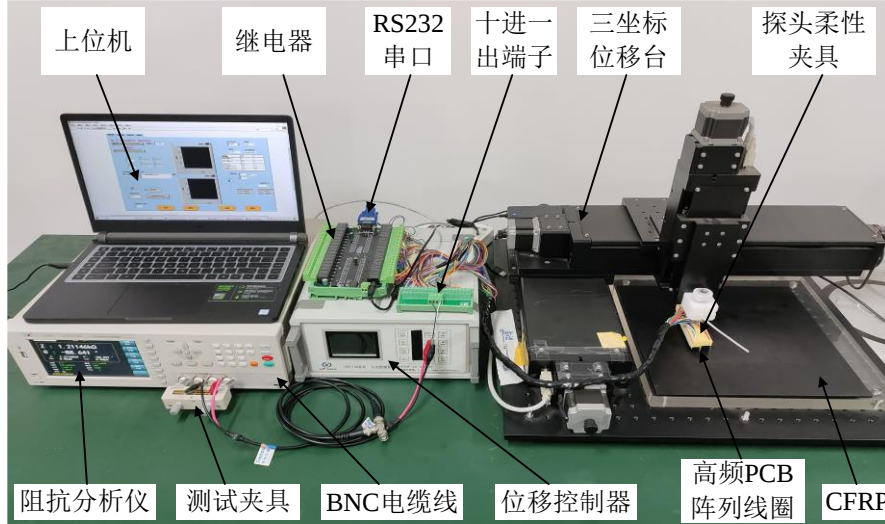


图 5.1 高频 PCB 阵列线圈探头涡流检测实验平台

5.3 信号选择与处理

5.3.1 线圈信号选择

通过对高频 PCB 阵列线圈连接方式的分析可知，在对碳纤维复合材料进行不同深度检测时轮询的检测能够确保完整地覆盖待检区域，同时通过不断地通断线圈获取大量的电抗 X 与电阻 R 的数据，这些数据在后续的分析中将发挥关键作用。

当线圈完成对待检区域的扫描后，可以得到每组通电线圈的电抗与电阻数据，其中 R_n 、 X_n 和 R_1 、 X_1 分别代表第 n 组和第 1 组线圈的扫描信号值， n 为 1, 2, 3...120, 扫描步长为 1mm, 这意味着我们对被检测对象进行了高密度的涡流扫描，以获得更加详细的数据。式(5.1)中的 ΔR 、 ΔX 代表了相邻组线圈的信号值之差，这个差值在数据处理中起到了重要的作用，因为它反映了不同组线圈扫描结果的变化情况。通过分析 ΔR 、 ΔX 的数值，我们能够别出潜在的缺陷区域，因为缺陷通常会引引起信号值的异常变化。最终，我们可以使用处理后的数据来绘制出二维缺陷伪彩图，通过不同颜色的区域来表示信号值的变化。这种图像是涡流检测结果的直观展示，可以帮助我们快速识别出潜在的缺陷区域，从而进行进一步的分析判断。

$$\begin{cases} \Delta X = X_n - X_1 \\ \Delta R = R_{n+1} - R_n \end{cases} \quad (5.1)$$

由于线圈是在轮询通断进行检测，所以在每次通之后均会采集两组数据，分

别是线圈的电阻和电抗，然而二维伪彩图只需要一组数据进行绘图即可，因此需要进行信号的筛选，绘制如图 5.2 所示的电感电抗伪彩图；(a)图和(b)图为电阻信号绘制的二维伪彩图，(c)图和(d)图是电抗信号所绘制的伪彩图。由(a)图和(c)图中我们可以看出在对于裂纹检测时，电抗信号值可以很好的控制信号的扩散，反映出裂纹的形状，在对于缺陷检测的(b)图和(d)图中，电抗信号所检测出的缺陷效果更为明显，也更加能够区分出缺陷的位置和大小。综上所述，在后期进行检测时均采用电抗信号作为二维伪彩图绘制数据。

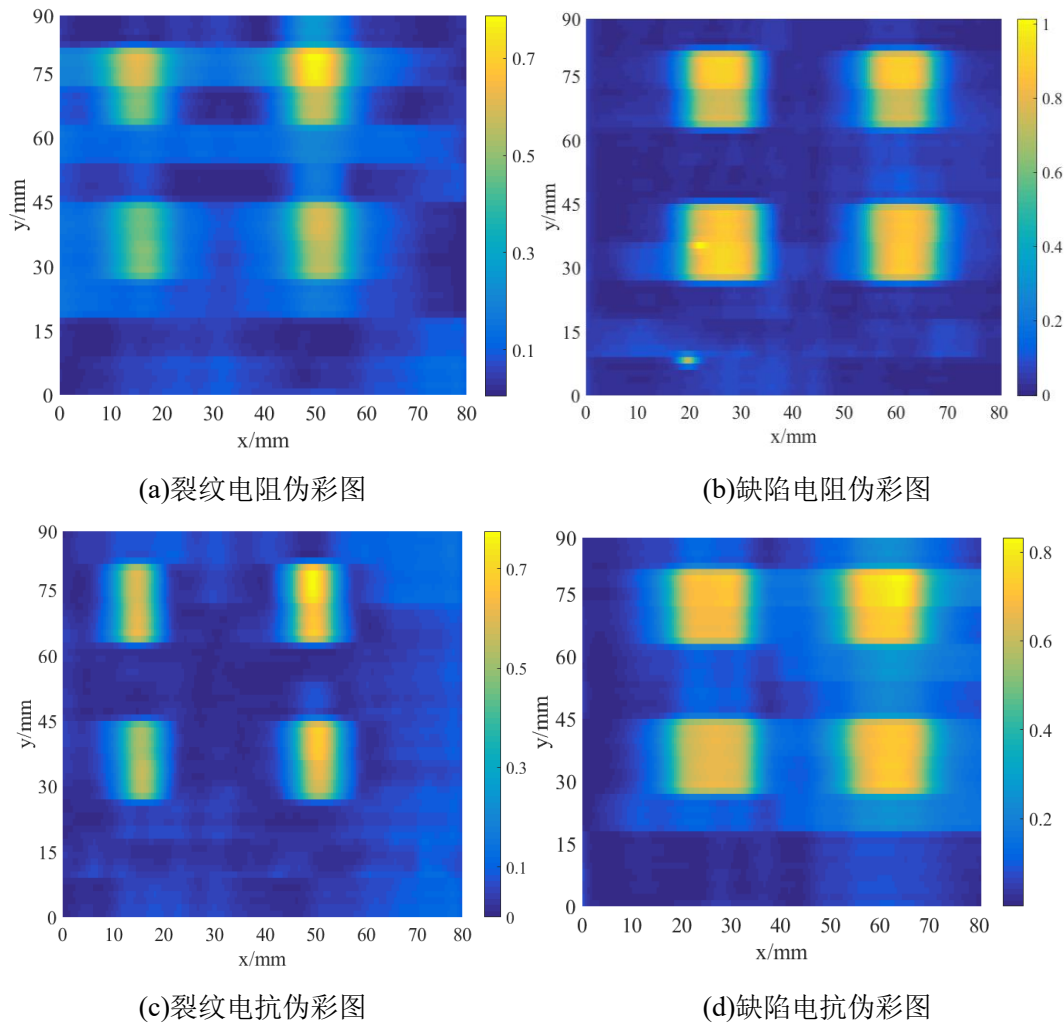


图 5.2 电阻电抗伪彩图

5.3.2 采集信号处理

为了消除在探头扫描过程中可能由外部干扰引起的孤立噪声点，我们采用了中值滤波方法对涡流检测的原始信号进行处理。这一操作的目的在于消除椒盐噪声，同时提高图像的分辨率。中值滤波是一种非线性信号平滑技术，其基本原理是将数字图像或序列中的某一点的值替换为该点邻域内各点值的中位数，从而利

用周围像素值逼近真实值，以消除孤立的噪声点如式（5.2）所示：

$$g(x, y) = \text{med} \{ f(x-k, y-l), (k, l \in W) \} \quad (5.1)$$

中值滤波的实现方式包括使用某种结构的二维滑动模板，也被称为采样窗口。在该窗口内，像素根据像素值的大小进行排序，生成一个单调递增或递减的二维数据序列^[69]。中值滤波操作作用于原始图像 $(f(x, y))$ ，通过中值算子（med）以及选择的二维模板（W）进行处理，生成处理后的图像 $(g(x, y))$ 。通常，这个二维模板的尺寸可以是 3×3 或 5×5 ，并且可以采用不同的形状，如线状、圆形、十字形、圆环形等。中值滤波的应用旨在消除噪声的同时保护图像的细节和边缘，从而获得更好的图像复原效果。这种方法在图像处理领域被广泛采用，能够轻松地在 MATLAB 等编程环境中使用 medfilt2 等命令来实现。中值滤波是一种经典的噪声平滑方法，对于涡流检测的信号处理至关重要，有助于提高图像质量和可靠性。

5.3.3 二维伪彩图信噪比

二维缺陷伪彩图是涡流检测的重要输出，但为了更准确地评估高频 PCB 线圈在检测碳纤维复合材料时的性能，我们引入了信噪比（CR）的计算方法。CR 是一种常用的性能度量，它可以帮助我们定量评估所得图像的质量和传输能力，计算方法如（5.2）所示：

$$CR = \frac{\max |L_d - \text{ave}(L_{nd})|}{\max |L_{nd} - \text{ave}(L_{nd})|} \quad (5.2)$$

式中 L_d 是缺陷区域信号 L_{nd} 为非缺陷区域信号值。通过计算 CR，我们能够了解信号与噪声之间的比例，从而判断图像的质量和清晰度。通常情况下，较高的 CR 值表示图像中信号相对于噪声更强，反之亦然。在涡流检测中，高 CR 值通常表明我们能够更准确地识别和定位碳纤维复合材料中的缺陷。因此，对不同二维缺陷伪彩图的 CR 进行计算和比较，我们可以评估线圈的检测性能，识别最优的检测条件，并进一步优化检测系统，有助于提高碳纤维复合材料的检测效率和准确性。

5.4 缺陷成像

5.4.1 CFRP 缺陷成像

所用的 CFRP 试件为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的双向正交板,如图 5.3 所示。试件由碳纤维预浸料铺层后经热压机加热加压固化而成,铺层方式为 $[0/90]$ 。在板表面通过磨削和铣削加工出不同深度和形状的凹槽以代表一维和体积型裂纹缺陷,形状分别是边长为 10mm、8mm、6mm 的正方形、直径为 10mm、8mm、6mm 的圆形和裂纹形状的长 12mm 宽 1mm 和长 16mm 宽 1mm 的矩形;深度分别为 2mm、3mm 和 4mm,并将其分为 1, 2, 3 三个区域。定义缺陷深度为凹槽最深处距板上表面的距离,缺陷高度与缺陷深度的对应关系如表 5-1 所示。

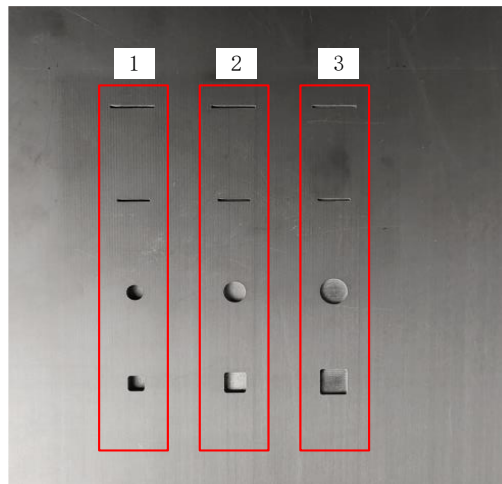


图 5.3 碳纤维正交板试件

表 5-1 缺陷深度

形状	缺陷高度	缺陷深度
边长为 10mm、8mm、6mm 的正方形	2mm、3mm、4mm	3mm、2mm、1mm
直径为 10mm、8mm、6mm 的圆形	2mm、3mm、4mm	3mm、2mm、1mm
长 12mm 宽 1mm 的矩形	2mm、3mm、4mm	3mm、2mm、1mm
长 16mm 宽 1mm 的矩形	2mm、3mm、4mm	3mm、2mm、1mm

图 5.4 是采用水浸超声装置测量到的裂纹图像,从该图中我们可以获知裂纹和缺陷的形状尺寸以及深度符合表中的数据,为接下来的阵列涡流检测提供参考。

对区域 1 和 2 进行空间采样 (Spatial Sampling) 和多采样 (Anti-aliasing),

如图 5.5 所示的缺陷示意图。(a) 图是空间采样图形, 通过在像素区域内均匀采样来确定像素的颜色值, 常见的空间采样算法包括最近邻采样 (Nearest Neighbor Sampling) 和双线性插值 (Bilinear Interpolation), 可以提高图像的清晰度和细节表现, 适用于静态图像或需要保留图像细节的情况。然而, 由于像素是离散的, 空间采样后的图像可能会出现锯齿状的边缘和失真现象。(b) 图是多采样图形, 通过对像素进行多次采样并对结果进行平均来减少锯齿和失真, 常见的多采样算法包括超采样 (Supersampling)、多重采样 (Multisampling) 和抖动采样 (Dithering)。多采样可以有效减少锯齿和失真, 提高图像的平滑度和真实感, 适用于动态图像或需要平滑渐变的情况。由 (c) 缺陷信号幅值图我们可以得知, 多采样和空间采样均可以很好的表达出缺陷的信息。为提高图像清晰度和细节表现、减少锯齿和失真、优化图像的质量和真实感, 并提高图像的渲染效率, 因此, 对于缺陷和损伤的成像采用多采样技术。

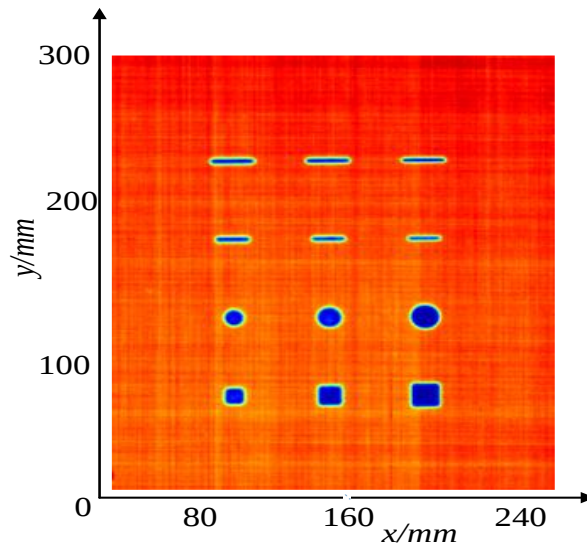
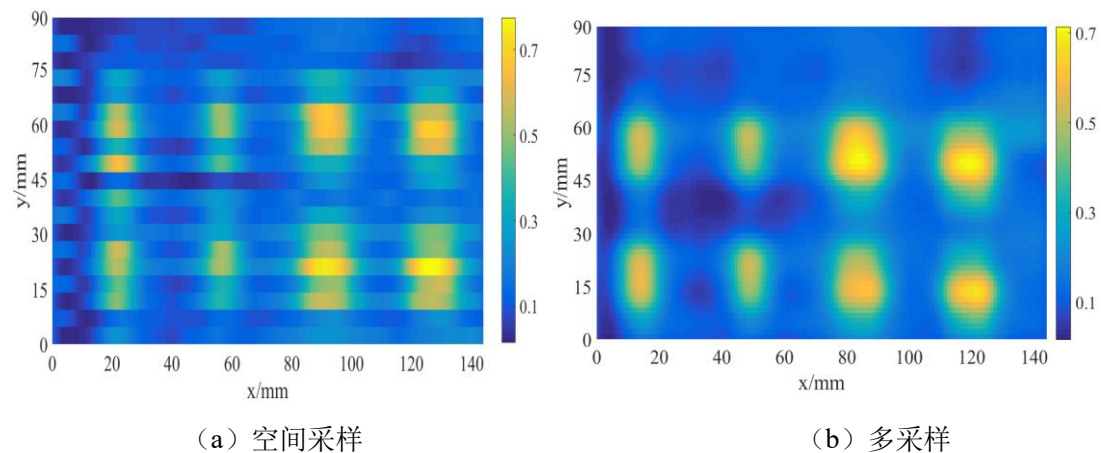
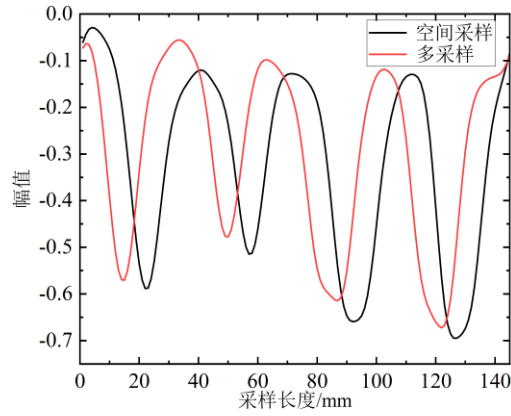


图 5.4 碳纤维正交板水浸超声图



(a) 空间采样

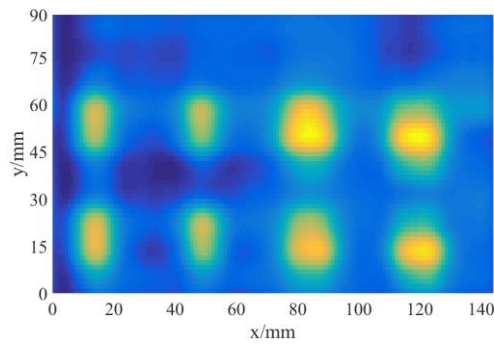
(b) 多采样



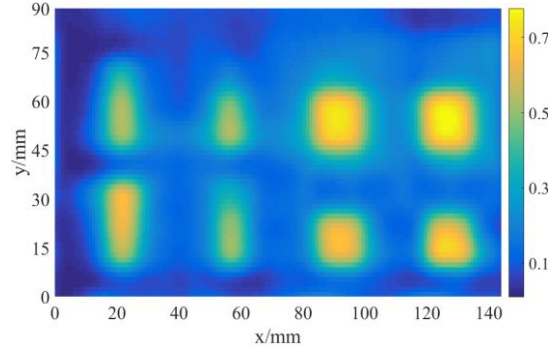
(c) 缺陷信号幅值图

图 5.5 缺陷采样图

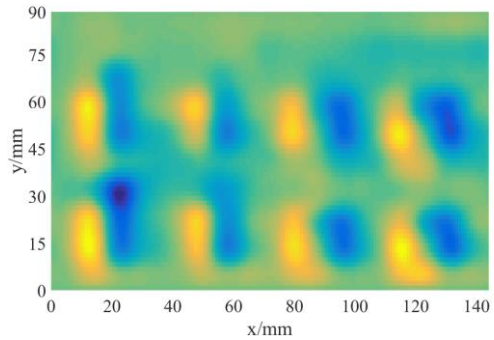
由上文分析可知，设置扫描频率为 2MHz 步长为 1mm，对 2, 3 区域分别采用四种不同的线圈连接方式进行由裂纹到缺陷的扫描检测。图 5.6 为水平通道的线圈连接的扫描结果，(a) 图和 (b) 图为 HA、HB 通道扫描结果，(c) 图和 (d) 图为 TL、TR 通道扫描结果，四个通道的图像模式是不同的。水平通道对于图像有定性的相似性，但是通道 TR、TL 的输出图像却是不同的，他们是由两个亮光组成的，二者均能正确反映出缺陷的形状和尺寸。由图 (e) (f) 中观察到，四个通道对于同一个缺陷产生的图像也有所区别，对于裂纹，倾斜通道的信号振幅高于水平通道的振幅；对于缺陷，水平通道的振幅高于倾斜通道的信号振幅。



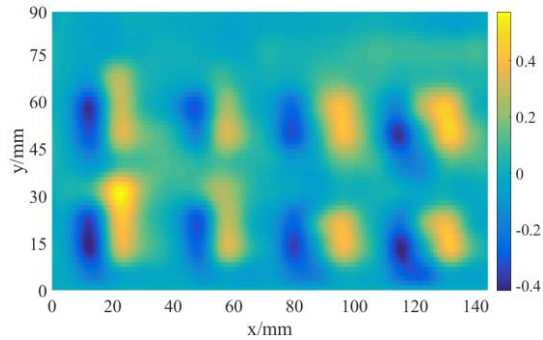
(a) HA



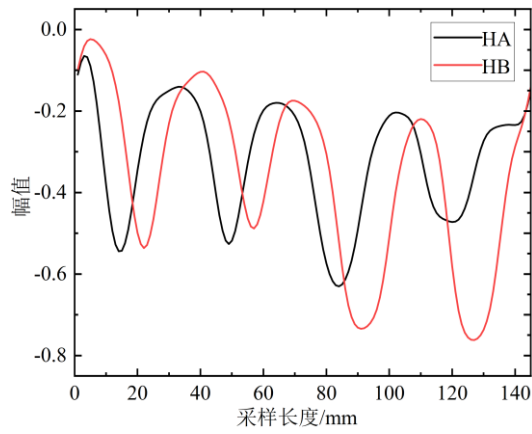
(b) HB



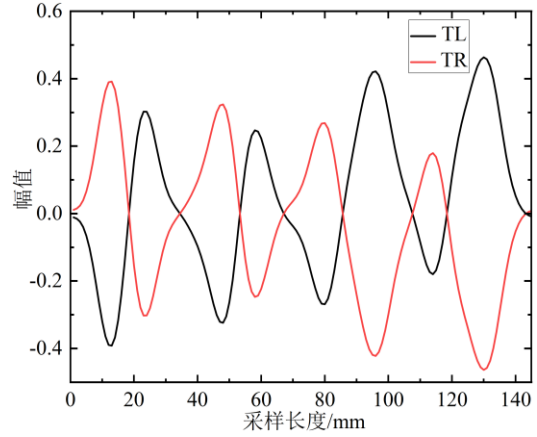
(c) TR



(d) TL



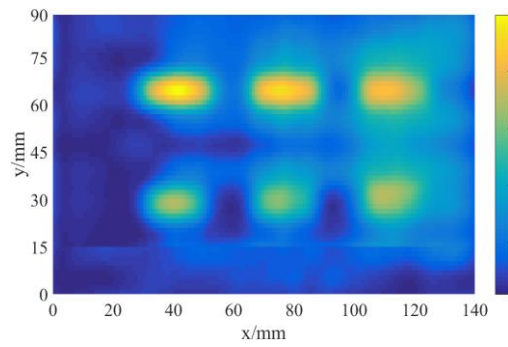
(e) 水平通道缺陷信号幅值图



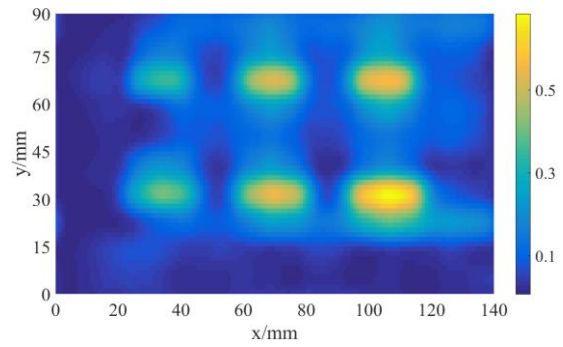
(f) 倾斜通道缺陷信号幅值图

图 5.6 区域 2, 3 扫描图

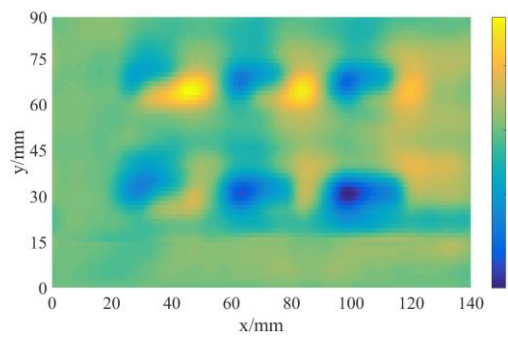
裂纹是长而窄的形状，相对于缺陷来说，裂纹的宽度远低于缺陷的宽度，因此对于裂纹的扫描方向也需要进行成像研究。由于上文对于裂纹的扫描方向是从上到下的，接下来我们将从左向右进行扫描实验。从图 5.7 中我们可以得出，水平通道对于裂纹的扫描成像远远好于倾斜通道的扫描结果。



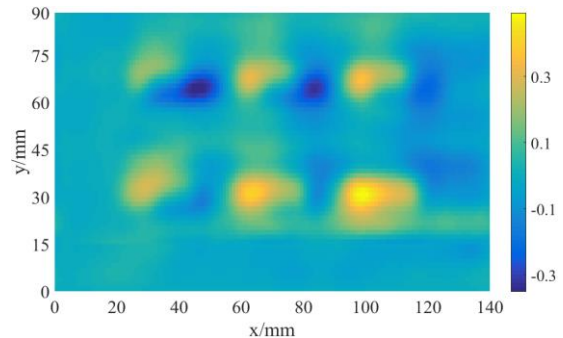
(a) HA



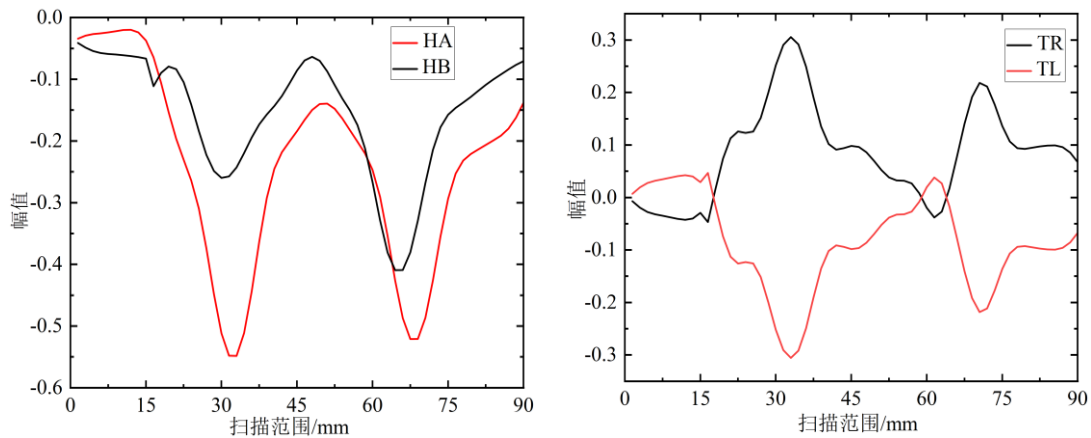
(b) HB



(c) TR



(d) TL



(e) 水平通道缺陷信号幅值图

(f) 倾斜通道缺陷信号幅值图

图 5.7 裂纹扫描图

5.4.2 钢板缺陷成像

由于碳纤维复合材料的弱导电性，为进一步的探究高频 PCB 阵列线圈的成像问题，选择带有裂纹的钢板进行进一步的探究如图 5.8 所示，板长 200mm 宽 100mm，裂纹尺寸如表 5-2 所示。不同通道的涡流扫描成像如图 5.9 所示，由图中我们可以观察到，对于高电导率，以及较长的裂纹，水平通道和倾斜通道均可以清晰的表现出来，并且对于裂纹细节也能够清晰的表达。

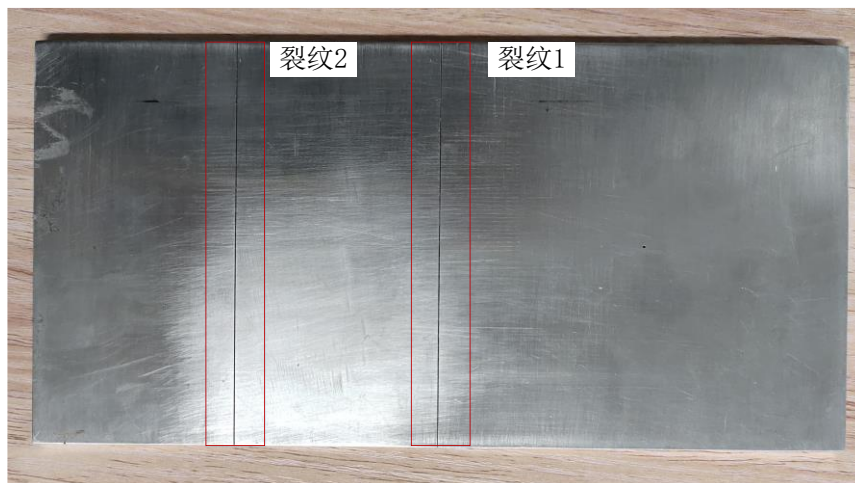


图 5.8 裂纹钢板

表 5-2 钢板裂纹参数

裂纹	长/mm	宽/mm	高/mm
裂纹 1	100.0	0.5	2.0
裂纹 2	100.0	0.5	1.0

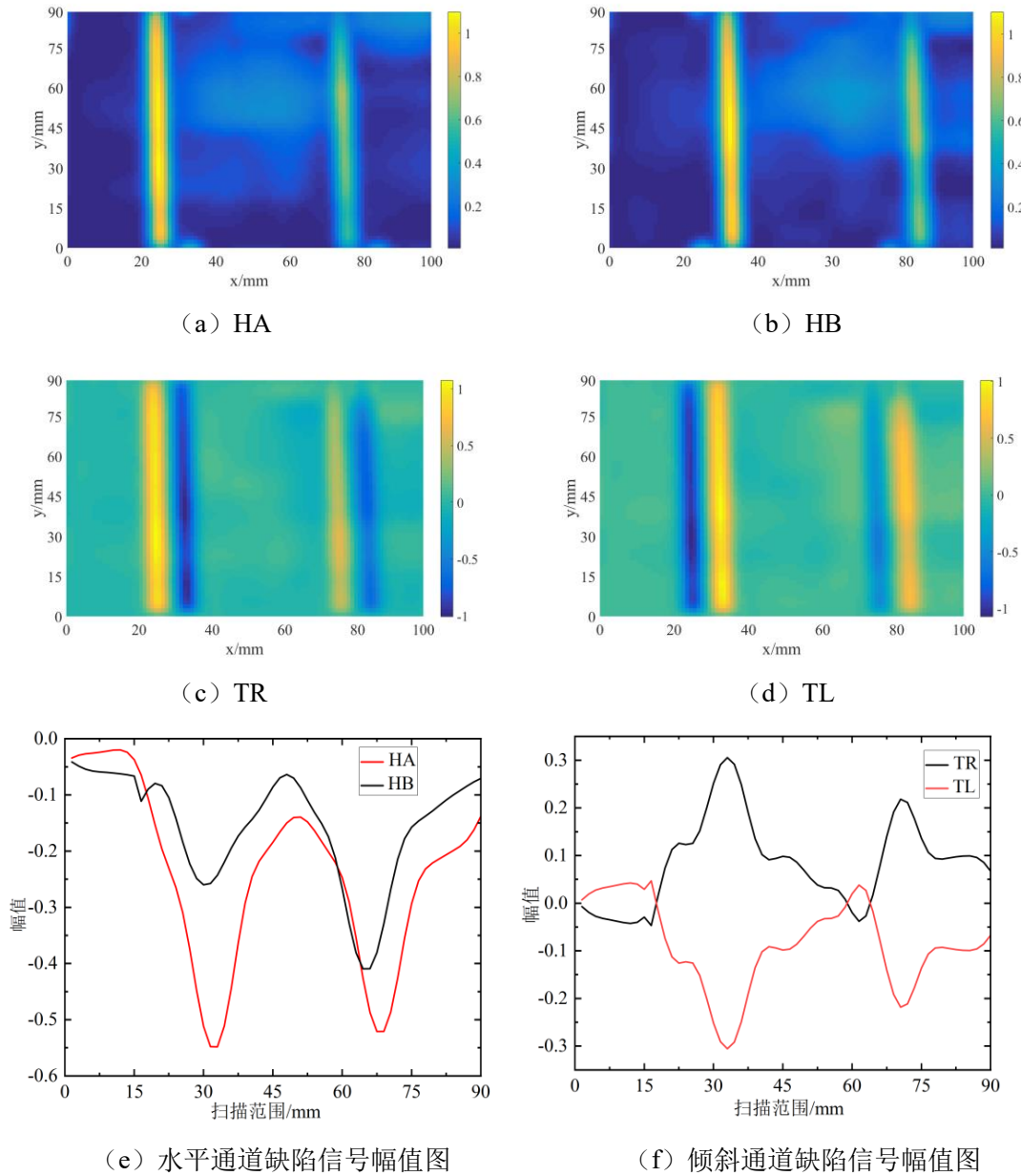


图 5.8 钢板裂纹扫描图

在研究裂纹缺陷成像时，水平通道的检测结果无论从平行裂纹还是垂直裂纹方向均好于倾斜通道的扫描结果，而对于方型和圆型缺陷两者各有优劣，综上所述在研究裂纹成像时尽可能的选择水平通道进行检测，研究方型缺陷时需要综合考量。

5.5 缺陷检测

5.5.1 不同深度缺陷检测

为进行不同深度隐藏缺陷的检测需要划定一个高清晰检测区域，因此在检测前将裂纹区和缺陷区进行背面成像对比。高频 PCB 线圈阵列涡流探头采用的激

励频率为 1MHz，激励电压为 1V，扫描图像如图 5.7 所示，(a)对应 CFRP 上的裂纹扫描结果，从图中可以清晰的反映出长条缺陷裂纹，(b)对应 CFRP 上的方型和圆型扫描结果，两个区域的缺陷均能检测出来，伪彩图颜色条刻度的单位是 Ω ，表示的是线圈的电感值。涡流检测有一个问题：裂纹图像宽度比实际的裂纹宽度大得多，这是涡流探头的点扩展特性造成的，一条很细的裂纹经过涡流成像后会产生一条扩散的粗条纹。同时由于 PCB 线圈的直径大于缺陷宽度，矩形缺陷的宽度检测结果大于实际矩形缺陷宽度，圆形缺陷检测出的伪彩图为方型，但是对于方型和圆形缺陷检测的尺寸与原缺陷几乎相同，因此在下文进行隐藏缺陷检测时，用圆型和方型区域作为隐藏缺陷进行涡流检测。

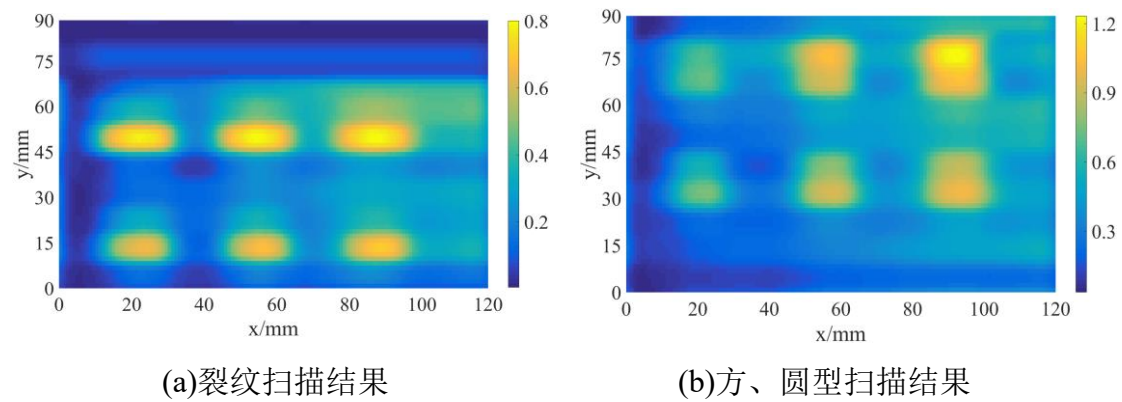


图 5.7 碳纤维正交板缺陷成像图

为了证明在高频 PCB 线圈涡流探头进行涡流检测时，通过连接不同 BNC 电缆线改变线圈的谐振频率以检测不同深度的缺陷，对碳纤维复合材料进行实验检测。基于上述分析，对未连接 BNC 电缆线，连接电缆 1 和连接电缆 2 的高频 PCB 阵列线圈涡流探头做 5 组扫描区域 2 的实验，每组实验频率分别为 0.5MHz、1MHz、1.5MHz、2MHz、3MHz，实验结果如图 5.8 所示，图中红框所示为线圈受到提离以及扰动所出现的异常数据可以忽略。当激励频率为 3MHz 时，三种扫描方式均不能够测出最深层缺陷，同样在 0.5MHz 时，未连接电缆线的线圈检测不出任何深层缺陷，而连接电线的线圈可以检测出缺陷；同样，在相同频率下，未连接电缆线的线圈始终小于连接电缆线的线圈信噪比；根据图中的结果，我们可以得出以下结论，随着线圈的激励频率逐渐增加，三者均在 1MHz 时可以最为完整清晰的检测出所有距上表面最深的隐藏缺陷，但是无电缆线圈的信噪比弱于电缆+线圈的信噪比；电缆 2+线圈的信噪比始终强于其余两者。图 5.9 的 CR-频率关系曲线图显示了线圈再有无电缆的信噪比，三者均是随着频率先增大后减小，

但是线圈连接电缆 2 时的信噪比最大，为较深的隐藏缺陷提供最佳的可视性。综上所述，线圈在连接电缆时可以降低谐振频率，提高高频 PCB 线圈的检测精度，因此针对不同深度的缺陷可以选择不同类型和长度的电缆线来达到提高其检测精度的目的。

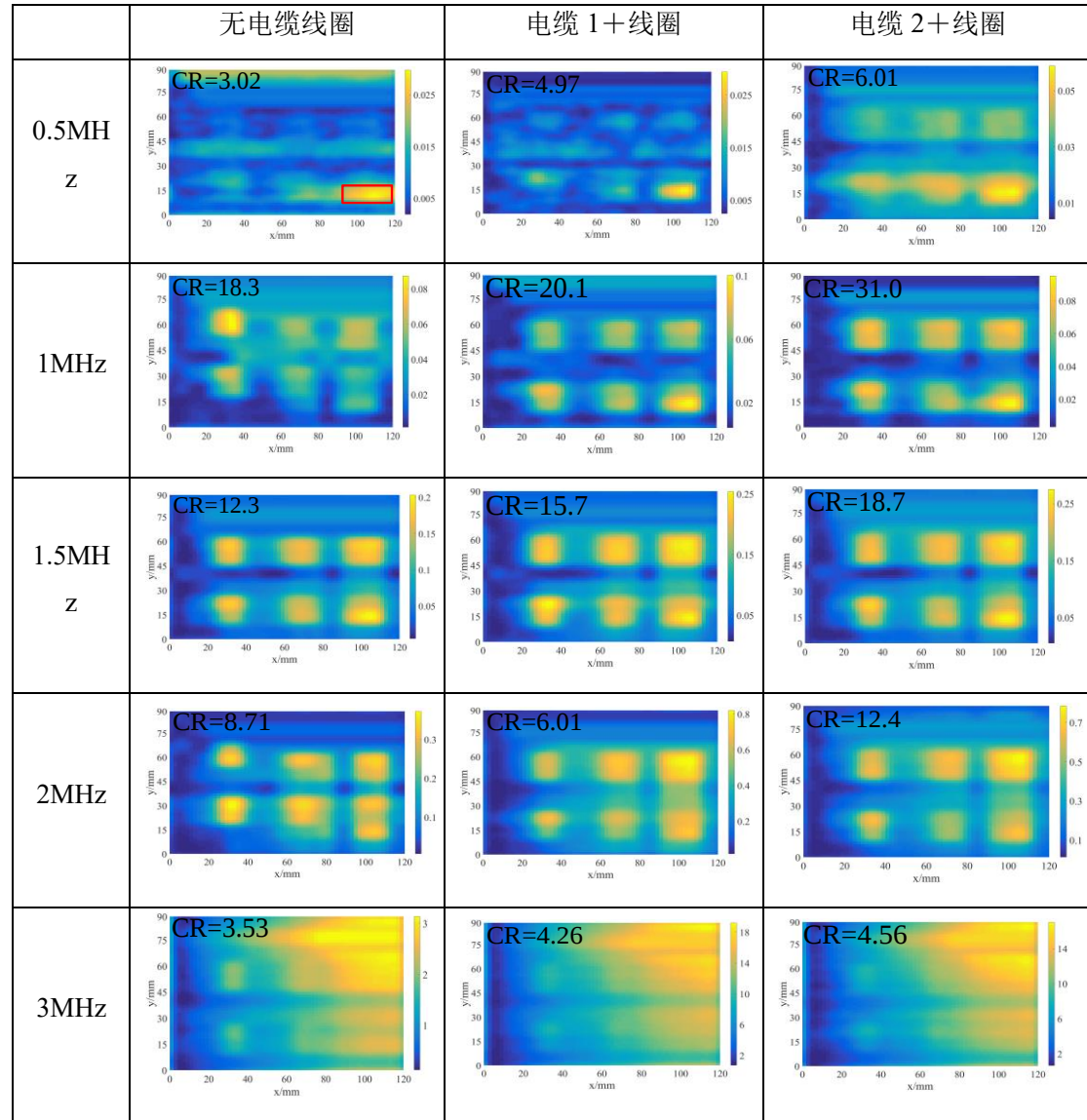


图 5.8 CFRP 背面检测实验结果

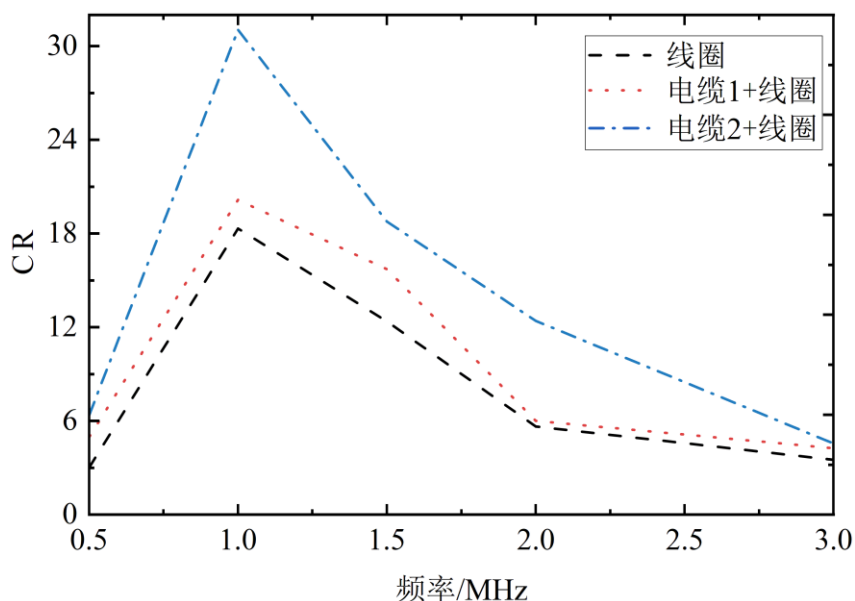


图 5.9 CR-频率关系曲线图

5.5.2 分层损伤检测

在 CFRP 的使用过程中, 分层损伤是一种常见的问题, 通常由生产和使用中的多种因素引起。在制造阶段, 如果预浸料中混入了杂质或空气, 这可能导致层与层之间的脱粘, 产生分层损伤, 此类损伤在使用过程中往往不会单独出现, 而是以混合的形式与其他损伤同时存在。举例而言, 当复合材料受到冲击时, 通常会同时引发分层损伤、纤维断裂等其他类型的损伤。分层损伤的出现会极大地降低材料的性能和可靠性, 因此对于分层损伤的检测变得至关重要^[70]。这种损伤的检测不仅有助于提前发现问题, 还有助于采取适当的措施来延长材料的使用寿命, 保障安全。

CFRP 的分层导致碳纤维之间的接触十分有限, 降低了该区域的电学性能, 因此, 根据分层这一电学特性, 使用高频 PCB 阵列线圈涡流探头连接 BNC 电缆线进行检测, 来验证 PCB 线圈在外接电缆线时可以降低谐振频率, 提高检测性能。碳纤维的铺层方向为 $[0/90]$, 铺层深度为 0.25mm、0.5mm、1.0mm、1.5mm 大小为 30mm×30mm 的薄膜处于 CFRP 的四个角处, 用于构造板子的内部缺陷, 板子大小为 300mm×300mm, 厚度为 3mm。将检测频率设置为 1.5MHz, 电压为 2V, 扫描区域设置为 $0\text{mm} < x < 160\text{mm}$ 、 $0\text{mm} < y < 90\text{mm}$, 分别采用无电缆, 线圈+电缆 1、线圈+电缆 2 三种扫描方式对分层进行检测, 得到的结果如图 5.10 所示。

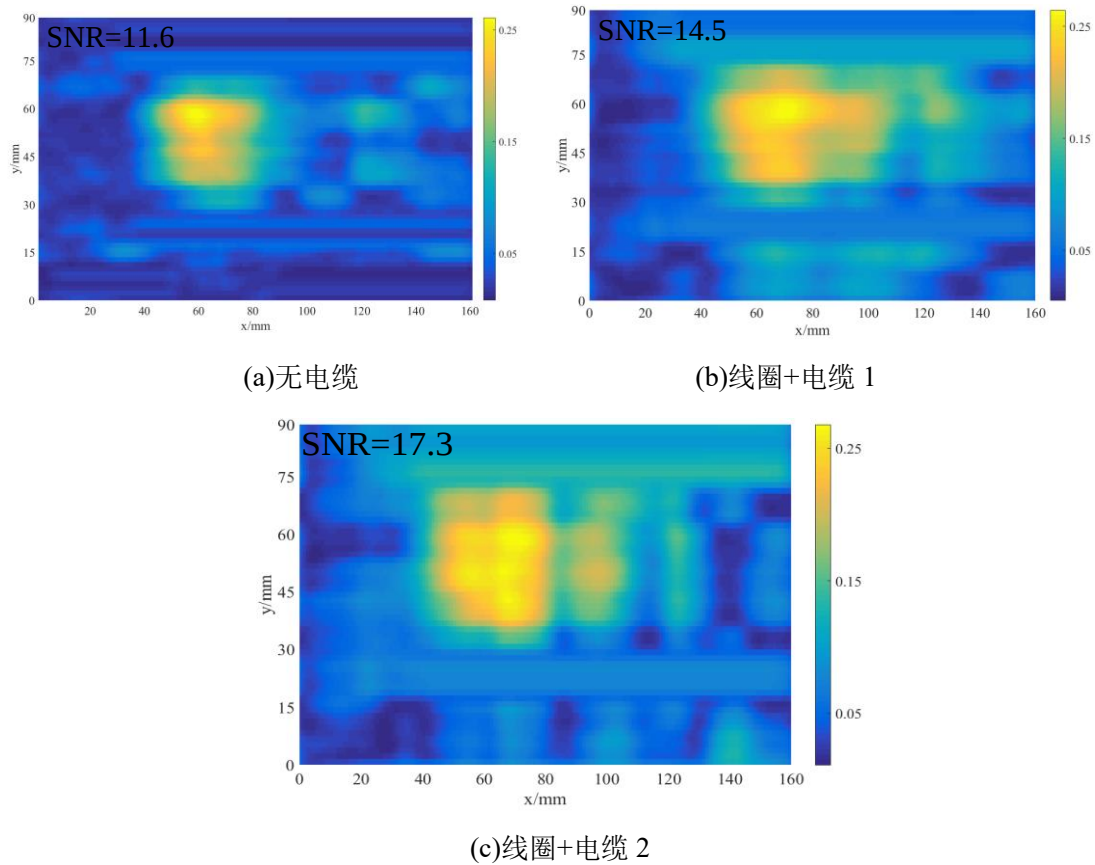


图 5.10 分层损伤检测结果

图 5.10 所示的是分层损伤检测结果, (a)图是纯线圈检测分层, (b)图是线圈+电缆 1 检测结果、(c)图是线圈+电缆 2 分层检测结果, 由此分析可得高频 PCB 线圈在连接电缆线后可以更加清楚的检测到分层, 并且线圈+电缆 2 检测出得分层大小与实际几乎一致, 同时信噪比也是最高。图 5.11 为超声进行的分层扫描实验, 由图中信息可知, 超声扫描完整的将分层信息呈现出来了。综上所述, 在对比了超声对分层的实验后我们可以得出, 线圈在连接电缆 2 后能够提高其检测能力。

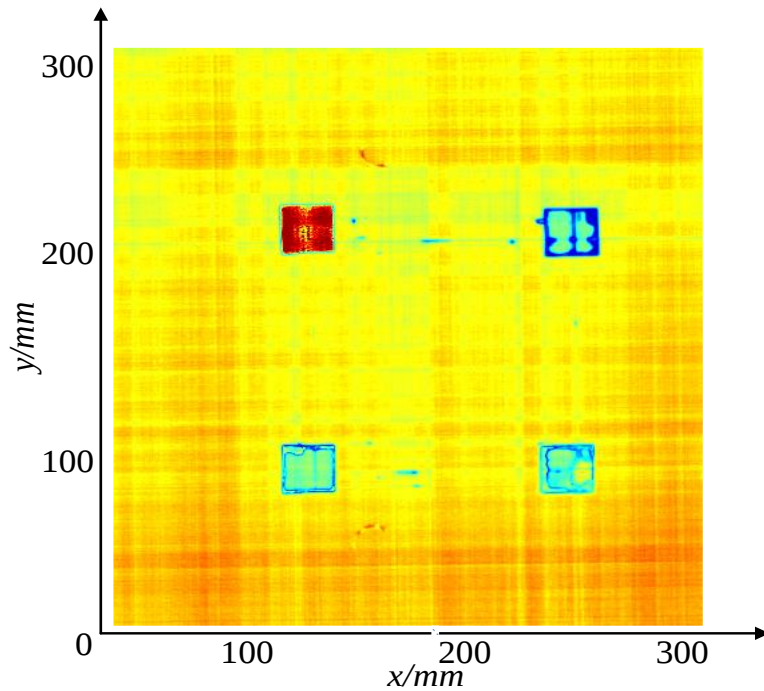


图 5.11 超声 C 扫分层结果

5.6 本章小结

本章针对高频 PCB 阵列线圈涡流检测系统进行了碳纤维复合材料不同深度以及形状缺陷的成像研究和实验验证。

(1) 通过不同的线圈连接方式我们可以得知，线圈水平通道的连接方式在垂直缺陷扫描时检测效果要远好于倾斜通道连接方式，而在对竖向扫描时两者各有优劣可以互补；

(2) 实验进一步验证了当高频 PCB 阵列线圈在连接 RLC 电路时可以提高深层缺陷的检测信号，并且电容电阻越大时检测信号信噪比越好，同时利用碳纤维复合材料里不同深度的分层验证 PCB 阵列线圈在连接电缆线时对于缺陷的检测能力有着显著的提高。

(3) 为高频 PCB 阵列线圈在不同接线方式的缺陷成像以及连接不同 RLC 分支电路时对 CFRP 深层缺陷检测的应用提供参考，下一步将围绕探头阻抗特性优化展开深入研究。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文主要针对碳纤维复合材料深层缺陷难以检测，检测精度不高，检测速度慢等问题进行深入细致的探究，研究出一种使用 PCB 阵列线圈检测缺陷的涡流扫查方式，并使用外接 BNC 电缆线改变线圈谐振频率的方式进行 CFRP 深层缺陷的检测研究。围绕着线圈的阻抗仿真分析、线圈加电缆线阻抗分析、阵列线圈涡流扫描系统的开发以及对深层缺陷以及分层缺陷的实验研究等方面进行工作的展开。

(1) 首先介绍了论文的研究背景，研究意义以及国内外阵列线圈的研究现状，同时介绍了对于碳纤维无损检测技术的研究现状，分析对比最终选用电涡流无损检测进行深层缺陷的检测，最后引出本论文所研究的内容，并对本文的主要内容进行了概括性的介绍。

(2) 对阵列涡流无损检测的探讨始于麦克斯韦电磁感应定律的分析，详细研究了线圈等效电路，从而推导出涡流线圈的阻抗公式，进一步深入探讨了电磁涡流渗透原理，并详细解释了趋肤效应的机制。对阵列涡流检测的两种主要方式，即绝对式和差动式，进行了细致的介绍。这一分析不仅有助于理解涡流无损检测的基本原理，同时为后续章节提供了重要的背景知识，为我们更深入地探讨如何运用阵列式涡流探头来检测材料中的深层缺陷奠定了基础。

(3) 设计一种高频 PCB 涡流阵列探头，并对其进行了阻抗分析，通过改变线圈连接不同类型长度的电缆，调整其谐振频率，以实现对不同深度的隐藏缺陷的检测，并优化检测灵敏度。根据高频 PCB 阵列线圈的工作原理，对线圈的各项参数进行了详细分析，确保线圈的层数、匝数等处于适当范围，建立仿真模型，通过改变线圈的层数来分析谐振频率，并确定线圈的各项参数值，利用阻抗分析仪对高频 PCB 阵列线圈以及连接不同类型电缆时进行阻抗分析，观察到电缆线长度增加时，线圈的谐振频率相应减小的现象。这些实验结果为深度隐藏缺陷的检测提供了实用的方法，同时也为优化检测系统的性能提供了重要信息。

(4) 搭建了高频 PCB 阵列线圈检测系统，通过建立涡流检测系统的各个模块的程序，实现了阻抗分析仪、电磁继电器以及三坐标位移台的有效连接。随后，

设计并制作了适用于 PCB 线圈的夹具，使系统能够进行涡流扫查。这套系统实现了高效的涡流扫查，为用户提供了自动化的检测流程，并允许根据具体需求进行灵活的参数调整，不仅为用户提供了方便的自动检测功能，而且通过可调参数的设计，使其具备适应不同检测需求的灵活性。这使得系统在实际应用中能够更好地满足多样化的涡流检测任务，并提高了整个检测流程的效率和准确性。

(5) 高频 PCB 阵列线圈涡流探头检测系统经过实验验证，针对碳纤维复合材料的不同深度缺陷和分层进行了详尽的研究。实验证实，高频 PCB 阵列线圈不同的连接方式我们可以得知，水平通道在垂直缺陷扫描时检测效果要远好于倾斜通道，而在对竖向扫描时两者各有优劣可以互补；也验证了线圈在连接电缆线时，能够有效提升对深层缺陷的检测信号，值得强调的是，随着电缆线长度的增加，检测信号的信噪比呈现出逐渐提高的趋势，提高了对于不同深度缺陷的显著提高的检测能力。尤其是在利用不同深度分层进行实验时，系统展现出卓越的缺陷检测性能。这一研究结果不仅强化了高频 PCB 阵列线圈涡流探头在深层缺陷检测方面的有效性，同时也为系统在实际应用中提供了更为可靠的实验支持。

6.2 展望

本课题设计研发的高频 PCB 阵列线圈涡流探头可以快速的对碳纤维复合材料深层缺陷进行检测，并通过外接 BNC 电缆线可以实现不同深度的检测。然而在工程应用上还需要进一步的优化，提高阵列线圈的实用性和可靠性，具体的需要从以下的几个方面进行修改完善：

- (1) 本文只对平面碳纤维复合材料的深层缺陷进行检测，没有应用到曲面检测中去。
- (2) 研究不同类型的曲面阵列线圈对曲面的检测能力的影响。
- (3) 进一步探究阵列线圈的阻抗对深层缺陷检测的影响程度。
- (4) 提高阵列线圈的检测信号的采集速率，优化二维伪彩图的像素。
- (5) 现有阵列线圈涡流检测系统具有集成化，但是硬件设备体积较大，不利于现场的检测，需要将系统进行小型集成化以提高工程中的实用性。

参考文献

- [1] 丁浩, 钟国强. 表面裂纹检测的现状与发展趋势[C]第二届钢材质量控制技术——形状, 性能, 尺寸精度, 表面质量控制与改善学术研讨会文集. 2012.
- [2] 沈建萍. 多种无损检测技术在压力容器制造与维修中的应用分析[J]. 化学工程与装备, 2012(11): 100-101. 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
- [3] Shull P J. Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications[M]. CRC press, 2023: 16-20.
- [4] 仲维畅. 中国无损检测简史[J]. 无损检测, 2022, 1: 16-17.
- [5] plastic by eddy current nondestructive testing [C]. Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace Conference, 2021.
- [6] Gros X. An eddy current approach to the detection of damage caused by low-energy impacts on carbon fiber reinforced materials[J]. Materials & Design, 1995, 16(3): 167-173.
- [7] Guo H. Design of a X ray detecting system for detecting conveyer belt with steel wire rope[J]. Microcomputer Information, 2020, 23(22): 122-123.
- [8] Cheng J, Ji H, Qiu J, et al. Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(5): 77-85.
- [9] Mizukami K, Mizutani Y, Kimura K, et al. Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional CFRP laminates using eddy current imaging[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2016, 90: 261-270.
- [10] Kersemans M, Martens A, Abeele K V D, et al. Detection and Localization of Delaminations in Thin Carbon Fiber Reinforced Composites with the Ultrasonic Polar Scan[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(4): 522-534.
- [11] Drinkwater B W, Wilcox P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. Ndt & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [12] Chilibon I. Non-destructive examinations of non-metallic materials by ultrasonic method[J]. 2009, 2(1): 73-80.
- [13] Stinchcomb W. Nondestructive evaluation of damage accumulation processes in composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 1986, 25(2): 103-

118.

- [14] Liang T, Ren W, Tian G, et al. Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed thermography [J]. Composite Structures, 2016, 143: 352-361.
- [15] Mizukami K, Watanabe Y. A simple inverse analysis method for eddy current-based measurement of through-thickness conductivity of carbon fiber composites [J]. Polymer Testing, 2018, 69: 320-324.
- [16] 吴敏生.一种用于检测金属物体轮廓和材料性能的新型传感器-涡流阵列[J].无损检测, 1995, 17(6): 177-178
- [17] V. K. H. Hedengren, R. O. Mccary, R. P. Alley, et al. Flexible eddy current surface measurement array for detecting near surface flaws in a conductive part: US, US5389876[P]. 1995
- [18] W. N. Podney, P. V. Czipott. An electromagnetic microscope for eddy current evaluation of materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(2):3241-3244
- [19] M. Macecek. Advanced eddy current array defect imaging[J]. NDT & E International, 1997,30(3):178-178(1)
- [20] Y. P. Ma, J. P. Wikswo. Techniques for depth-selective, low-frequency eddy current analysis for SQUID-based nondestructive testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1995, 14(3):149-167
- [21] C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, et al. GMR Magnetic Sensor Arrays for NDE Eddy - Current Testing[C]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. American Institute of Physics, 2003:419-426
- [22] H. Sun, R. Ali, M. Johnson, et al. Enhanced Flaw Detection Using an Eddy Current Probe with a Linear Array of Hall Sensors[C]. American Institute of Physics, 2005:516-522
- [23] N. Goldfine, V. Zilberstein, J. S. Cargill, et al. Meandering winding magnetometer array eddy current sensors for detection of cracks in regions with fretting damage[J]. Materials Evaluation, 2002, 60(7):870-877
- [24] Koichi Mizukami, Shuya Hioki, Keisuke Moriyama, Keiji Ogi, Wataru Miyaji, Kenshi Kimura, Eddy-current array-probe technique for imaging near-surface and deep-lying delaminations in multidirectional carbon fiber mposites, Composite Structures, Volume 276, 2021, 114537, ISSN 0263-8223

- [25] Berger D, Lanza G. Development and Application of Eddy Current Sensor Arrays for Process Integrated Inspection of Carbon Fibre Preforms[J]. *Sensors*, 2018, 18(2):4-15.
- [26] Underhill P R, Rellinger T, Krause T W, et al. Eddy Current Array Inspection of Damaged CFRP Sandwich Panels[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2020, 3(3):1-15.
- [27] 陈祥林, 丁天怀, 黄毅平. 新型接近式柔性电涡流阵列传感器系统[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(8): 150-153
- [28] 刘波, 罗飞路, 侯良洁. 涡流阵列检测修正 C 扫描成像技术研究[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(08):1172-1177.
- [29] 岳明明, 张卫民, 庞炜涵等. 涡流阵列检测缺陷的理论基础和仿真分析[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(02):150-154. 2018.02.007.
- [30] 杨洪斌, 全茂峰, 吴晓龙, 余超, 刘洋, 刘建屏, 尹建锋. 发电机风扇叶片的柔性阵列涡流检测[J]. *无损检测*, 2020, 42(02):42-47.
- [31] 赵磊. 阵列涡流无损检测技术的研究及进展[J]. *无损探伤*, 2009, 33(2): 19-20
- [32] 张卫民, 曾卫琴, 杨秀江等. 基于平面线圈阵列传感器的铝板材料裂纹电涡流检测[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(11):1101-1105. 2014.11.001.
- [33] Angelidis N. Damage sensing in CFRP composites using electrical potential techniques[D]. Cranfield University, 2004.
- [34] Todoroki A, Tanaka M, Shimamura Y. 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 & Technology*, 2002, 62(5):619-628.
- [35] Pratap B, Weldon W. Eddy currents in anisotropic composites applied to pulsed machinery[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(2): 437-444.
- [36] 徐可北. 阵列涡流检测技术[A]. .北京机械工程学会 2006 年优秀论文集[C]. 北京机械工程学会, 2006:5.
- [37] 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.
- [38] 于礼玮, 曹维宇. 碳纤维复合材料在海洋中的应用 [J]. *化工新型材料*, 2016, 44(8):4-5.

- [39] 张菡英, 刘明. 碳纤维复合材料的发展及应用 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(11): 132-135.
- [40] 李志君. 先进复合材料的无损检测. 宇航材料工艺, 2000, 5: 28-31.
- [41] Wang J, Gu M. Wear properties and mechanisms of nylon and carbon fiber reinforced nylon in dry and wet conditions [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 93(2): 789-795.
- [42] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [43] Dragan Kreculj, Boško Rašuo. Review of impact damages modelling in laminated composite aircraft structures. Technical Gazette, 2013, 20(3): 485-495.
- [44] 郭琼, 李庆飞. 碳纤维复合材料制孔分层缺陷的研究 [J]. 科技视界, 2015, (14): 69-70.
- [45] Feraboli P, Kawakami H. Damage of Carbon/Epoxy Composite Plates Subjected to Mechanical Impact and Simulated Lightning [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(3): 999-1012.
- [46] Ogasawara T, Hirano Y, Yoshimura A. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(8): 973-981.
- [47] Hirano S, Katsumata S, Iwahori Y, et al. Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1461-1470.
- [48] Feraboli P, Miller M. Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(6-7): 954-967.
- [49] Gros X. An eddy current approach to the detection of damage caused by low-energy impacts on carbon fiber reinforced materials [J]. Materials & Design, 1995, 16(3): 167-173.
- [50] 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: Engineering, 2014, 59: 196-203.
- [51] Saito H, Kimpara I. Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(12): 2226-2235.

- [52] Wang S, Wu L, Ma L. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates [J].Materials & Design,2010,31(1):118-125.
- [53] Koyama K, Hoshikawa. H, Hirano T. Investigation of impact damage of carbon fiber reinforced
- [54] 杜金强,何宇廷,李培源. 矩形柔性涡流阵列传感器裂纹检测研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (5): 12-14.
- [55] 曹祥玉,高军,曾越胜,等.微波技术与天线[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [56] 雷旭. UHF 射频识别系统中的天线分析与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [57] 张卫民,曾卫琴,杨秀江等.基于平面线圈阵列传感器的铝板材料裂纹电涡流检测[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(11): 1101-1105.
- [58] 付妍,谭超,肖志利等.基于阻抗特性分析的电磁层析成像传感器优化[J].传感器与微系统,2016,35(03):49-52.
- [59] 李焕,董和磊,卫凯龙.微型谐振式天线的阻抗匹配设计与优化[J].中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(04):349-354+360.
- [60] 张磊.基于虚拟仪器的便携式多功能综合电子实验平台的设计[J].科学技术创新, 2020, 35(9): 102-103.
- [61] 夏良正,李久贤.数字图像处理. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [62] 于丽娟. 碳纤维/环氧树脂预浸料及其复合材料的成型工艺和力学性能[D]. 东华大学, 2013.

在学期间的研究成果及发表的学术论文

一、攻读硕士学位期间论文发表情况

- [1] 程军, **刘蒙蒙**. 高频涡流阵列探头在 CFRP 缺陷检测中的应用[J], 振动、测试与诊断, 2024.3. (已录用, EI)
- [2] Jun Cheng, **Mengmeng Liu**. Inspection of Subsurface Cracks in CFRP Laminate by Eddy Current Testing with Variable-Distance T-R Probe[J]. Measurement, 2024.3.(Major revision, SCI)

二、攻读硕士期间申请的专利

- [1] 程军, **刘蒙蒙**. 一种用于碳纤维复合材料检测的探头制作方法及检测系统[P]. 专利申请号: CN202310925865.8, 国家发明专利, 实审.

致谢

随着研究生的学习生活即将结束，转眼间二十余年的求学生涯也落下帷幕，站在即将告别的人生节点，我想要深深地向我的导师、同窗好友、亲爱的家人，以及我深深爱着的女友表达我衷心的感谢之情。

感谢我的导师程军教授，是您的深厚学识、严谨治学的态度以及富有启发性的建议，使我在学术研究中迈出了坚实的步伐。您对知识的追求和对研究的激情深深地感染着我，让我更加热爱并专注于所从事的领域，在您的引导下，我逐渐明确了自己的研究方向和人生目标，感受到了成长的喜悦。您不仅是一位卓越的导师，更是一位为人师表的榜样，您的谦逊、严谨、责任心以及对学术的执着，深深地影响和启发着我，成为我学习和生活中的楷模。

感谢三年研究生活中遇到的同学、同门和朋友，是你们陪我一同漫步在求学的路上。你们如同星光一般闪耀在我生命的每个角落。在快乐的时光里，你们与我共庆胜利；在困难的日子里，你们与我同舟共济。感谢你们的理解、支持和陪伴，让我懂得了友情的珍贵。

感谢我的家人，是你们默默无闻地为我付出，为我撑起了坚实的后盾。你们的关爱和呵护，让我在追逐梦想的路上充满信心，感谢你们无私的奉献，是你们让我感受到了家的温暖。

特别要感谢的是我的女朋友，是你的陪伴让我的生命更加丰富，是你的理解和支持让我在风雨中找到前行的勇气，你是我生命中最美好的礼物。

谢谢你们，是你们让我的人生充满了绚丽多彩的色彩，在未来的日子里，我将怀着感激之心，带着对未知的勇气，继续奋斗前行。愿我们共同书写更加辉煌的人生篇章！

刘蒙蒙

2024年4月16日

尚德敏学 唯实惟新

