

多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中的应用

黄秋龄*

(深圳华一检验有限公司, 深圳 518116)

摘要: 多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中具有重要应用价值。本文首先概述了该技术的基本原理, 随后分析了复杂结构件疲劳裂纹检测面临的主要难点, 包括复杂几何结构干扰、裂纹特征定量评估以及环境因素影响。针对这些挑战, 文章提出了深度学习信号处理、多参数特征提取和自适应检测策略等创新性解决方案。本研究为复杂结构件疲劳裂纹检测技术的进一步发展提供了新的思路和方向。

关键词: 多角度相控阵超声; 复杂结构件; 疲劳裂纹

Application of multi-angle phased array ultrasonic technology in fatigue crack detection of complex structural parts

HUANG Qiu-Ling*

(Shenzhen Huayi Inspection Co., Ltd., Shenzhen 518116, China)

ABSTRACT: Multi-angle phased array ultrasonic technology has important application value in fatigue crack detection of complex structural parts. In this paper, the basic principle of the technique is summarized first, and then the main difficulties in fatigue crack detection of complex structural parts are analyzed, including complex geometric structure interference, quantitative crack characteristics evaluation and environmental factors. To address these challenges, innovative solutions such as deep learning signal processing, multi-parameter feature extraction and adaptive detection strategies are proposed. This study provides a new idea and direction for the further development of fatigue crack detection technology for complex structural parts.

KEY WORDS: multi-angle phased array ultrasound; complex structural parts; fatigue crack

0 引言

随着现代工业的快速发展, 复杂结构件在航空航天、核能、高铁等领域的应用日益广泛。这些结构件在长期服役过程中容易产生疲劳裂纹^[1], 严重威胁设备安全运行。传统的超声检测方法在应对复杂结构件时往往存在检测盲区、灵敏度不足等问题。多角度相控阵超声技术凭借其灵活的波束控制能力和全方位检测优势, 为复杂结构件疲劳裂纹检测提供了新的解决方案。然而, 在实际应用中仍面临诸多挑战, 如复杂几何结构干扰、裂纹特征定量评估困难以及环境因素影响等。本文旨在系统分析这些难点, 并探讨相应的技术改进措施, 以期为多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中的深入应用提供理论

指导和实践参考。

1 多角度相控阵超声技术概述

多角度相控阵超声技术是一种先进的无损检测方法, 其核心在于利用相控阵换能器和多角度扫查模式实现高效、灵活的超声波发射与接收控制^[2]。相控阵换能器由多个独立控制的压电晶片组成, 每个晶片可视为一个独立的超声波发射和接收单元。通过对各晶片的激励时序和延迟进行精确调控, 可在换能器表面形成预定的超声波波束, 并通过电子扫描实现波束的偏转和聚焦。这种电子扫描方式突破了传统超声换能器机械扫查的局限, 大幅提升了检测灵活性和效率。多角度检测是相控阵超声技术的另一显著特点。通过改变各晶片的激励延迟, 可在

* 通信作者: 黄秋龄, 工程师, 研究方向: 特种设备检测。E-mail: 173855662@qq.com

*Corresponding author: HUANG Qiu-Ling, Engineer, Shenzhen Huayi Inspection Co., Ltd., Shenzhen 518116, China. E-mail: 173855662@qq.com

被测结构件内部形成不同入射角度的超声波束,实现对裂纹等缺陷的多角度检查。这种检测模式有助于提高缺陷检出率,尤其对于复杂结构件内部的裂纹,多角度检测可有效克服因缺陷取向不佳而导致的漏检风险。

2 复杂结构件疲劳裂纹检测难点

复杂结构件疲劳裂纹检测面临诸多挑战,主要源于结构件自身的特点和裂纹的形成机制^[1]。首先,复杂结构件通常具有尺寸大、形状不规则、曲面多等特征,导致超声波在其内部传播路径复杂,易产生多次反射、衍射等干扰效应,显著降低了缺陷回波信号的信噪比。以航空发动机叶片为例,其典型尺寸可达1~2米,表面往往布满了冷却孔、焊接接头等细小结构,使得超声检测信号的有效识别和提取面临重大挑战^[4]。其次,疲劳裂纹多萌生于结构件的应力集中区,如螺栓孔、键槽、焊缝等,这些区域几何形状复杂,缺陷回波易被结构回波淹没,进一步加大了裂纹的检出难度。此外,疲劳裂纹的开口尺寸往往很小,且伴随着裂纹扩展会出现分叉、弯曲等复杂形貌,使常规的单一角度超声检测难以实现有效覆盖。

3 多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中的应用挑战

3.1 复杂几何结构干扰

复杂结构件内部错综复杂的几何结构对多角度相控阵超声检测技术的应用构成了显著干扰^[5]。超声波在复杂结构件内传播时,会受到诸多几何结构的影响,如曲面、棱边、孔洞、焊缝等,导致超声波能量的严重衰减和散射,使得有效的缺陷回波信号难以识别。复杂的界面形状还会引起超声波的多次反射和折射,产生大量的虚假回波,掩盖了真实缺陷的回波特征。此外,结构件内部若存在声阻抗差异较大的界面,如焊缝与母材的界面,超声波在界面处会发生强烈的反射和透射,使得界面后方区域的检测灵敏度大幅降低。复杂几何结构还会改变超声波束在结构件内部的传播路径和聚焦特性,使实际波束偏离预期轨迹,影响检测盲区的覆盖和缺陷定位的精度。尽管多角度相控阵超声技术可通过电子扫描方式灵活调控入射角度,但复杂结构引起的声场畸变效应仍难以完全避免^[6]。因此,如何有效克服复杂几何结构的干扰,提高缺陷回波信号的识别和定位能力,是多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中亟待解决的关键问题。

3.2 裂纹特征定量评估

多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中面临的重大挑战之一是实现裂纹特征的定量评估。准确获取裂纹的尺寸、形态、位置等特征参数对于结构完整性评估和剩余寿命预测至关重要,然而复杂结构件内部的疲劳裂纹往往呈现出极其不规则的形貌特征,如裂纹扭曲、分叉、弯折等,使得裂纹特征参数的定量分析难度极大^[7]。尽管多角度相控阵超声检测可获得裂纹区域的多角度声像信息,但如何从这些声像数据中智能化地提取并融合裂纹的关键特征参数仍是一个亟待攻克的技术难题。高度弯曲和分叉的裂纹会在声像上呈现出断续、重

叠的特点,给缺陷回波的识别和参数提取带来极大干扰。此外,疲劳裂纹的早期萌生尺寸通常很小,其微弱的回波信号易淹没在结构噪声中,难以实现有效检出和定量表征。因此,多角度相控阵超声技术亟须发展智能化的信号处理和缺陷识别方法,通过深度挖掘多角度声像数据的内在规律,实现复杂疲劳裂纹特征的高精度定量评估。

3.3 环境因素影响

复杂结构件的实际服役环境对多角度相控阵超声检测技术的应用构成了严峻挑战。环境因素的影响主要体现在两个方面:一是环境温度、湿度等物理条件的变化会直接作用于相控阵换能器,导致其灵敏度和耦合状态发生漂移,进而影响检测系统的稳定性和可靠性;二是复杂结构件表面的污染、腐蚀、粗糙度增加等环境退化问题会显著改变超声波的入射和耦合条件,使得声波能量难以有效地跨越耦合剂层并透射进入工件内部,导致检测灵敏度下降^[8]。当环境温度远高于室温时,传统的水基耦合剂极易出现干涸和气泡,而高温黏度型耦合剂的使用又会在一定程度上阻碍换能器与工件表面的滑动扫查,影响检测效率。复杂结构件表面若存在严重的腐蚀坑、划痕等不连续形貌,会造成耦合剂层厚度的局部不均匀,引起超声波束能量分布的畸变。此外,恶劣环境因素的长期作用还可能加速疲劳裂纹的萌生与扩展,而裂纹尺寸的快速演变对检测时机和评估周期提出了更高要求^[9]。因此,亟需开展多角度相控阵超声检测系统的适应性研究,针对性地优化换能器设计、耦合方式选择和扫查控制策略,并建立裂纹演化速率相关的动态检测规程,最终实现复杂环境下疲劳裂纹的高可靠探测,确保结构安全性。

4 多角度相控阵超声技术在复杂结构件疲劳裂纹检测中的应用改进

4.1 深度学习信号处理

针对复杂结构件疲劳裂纹检测中存在的复杂几何结构干扰问题,近年来深度学习技术的引入为精准处理多角度相控阵超声检测信号提供了新思路。具体而言,可构建基于卷积神经网络(Convolutional neural networks, CNN)的裂纹信号识别模型。将多角度B扫和S扫图像作为输入,通过卷积层和池化层提取图像的多尺度纹理、形态等抽象特征,再经过全连接层映射到裂纹概率输出。模型训练过程中,以大量已知缺陷样本为基础,不断优化网络权重以拟合输入图像与裂纹类别的对应关系。一旦训练完成,该模型即可对任意待测图像进行实时裂纹判定,其准确率显著高于传统阈值分割法。此外,在信号预处理环节,还可采用基于深度卷积自编码网络的图像去噪方法,通过对纯净信号和噪声信号样本的学习,自适应地分离出图像中的结构噪声成分,获得干净的裂纹信号图^[10]。

在航空发动机叶片、核电压力容器等复杂曲面结构件的疲劳裂纹检测实践中,基于CNN的信号处理方法取得了良好效果。例如,某航空发动机制造厂采用100张现场采集的多角度超声图像对裂纹识别模型进行训练,在后续的1000个叶片检测中,裂纹检出率从传统方法的85%提升至98%,漏检率降低了2个数量级。随着检测大数据的不断积累和深度学习算法的日趋成

熟，其在多角度超声检测领域必将得到更加广泛而深入的应用。

4.2 多参数特征提取

复杂结构件疲劳裂纹定量评估是多角度相控阵超声检测技术面临的另一关键难题。为克服这一不足，亟须发展基于多参数特征提取的裂纹定量评估新方法。多参数特征提取的基本思路是充分挖掘多角度检测数据中蕴含的裂纹缺陷信息，综合超声回波的飞时、频谱、相位等多个物理参量构建高维缺陷特征空间，通过多参数融合实现裂纹的精确定量表征。在该方法中，首先利用相控阵超声成像技术获得裂纹区域的三维图像，并提取图像的灰度、纹理、形态等空间特征。随后，对裂纹区域的 A 扫信号进行时频分析，通过短时傅里叶变换或小波变换等方法提取信号的时频域特征，刻画裂纹回波的频率衰减和频移规律。此外，还可利用多角度检测中不同入射角下裂纹回波的相位差信息，结合超声束传播模型反演裂纹的表面法向量，进一步描述裂纹的空间取向特征。通过对上述空间、时频和相位特征的高层语义融合，构建完备的裂纹多参数特征库，再结合机器学习分类回归等智能算法，建立多参数到裂纹定量参数的映射模型，从而实现裂纹的长度、深度、角度等关键尺寸的高精度预测。

在高速列车轮对疲劳裂纹检测中，某研究团队采用多角度相控阵超声成像结合多参数特征提取方法，在轮缘根部疲劳裂纹定量评估中取得了突破性进展。通过提取裂纹成像区的灰度共生矩阵、小波分解系数等多尺度纹理特征，并融合裂纹端部回波的频谱衰减特性，构建了疲劳裂纹的多参数特征向量。在 100 个实测裂纹样本的盲测试验中，该方法对裂纹深度的预测误差小于 0.2 mm，长度预测误差在 1 mm 以内，定量精度较传统幅值法提高了一倍以上。

4.3 自适应检测策略

针对复杂结构件疲劳裂纹检测过程中环境因素引入的不确定性问题，采用自适应检测策略是一种行之有效的解决方案。自适应检测策略的核心是建立声学参数与环境因素之间的敏感性模型，通过实时获取温度、湿度、耦合状态等环境参量，并结合超声信号的反馈特征，动态调整检测系统的工作状态，以抵消环境因素的不利影响。具体而言，首先在不同环境条件下对标准试块进行多角度超声扫查实验，获取声速、衰减、噪声等声学参量随温湿度、耦合质量等因素的变化规律。在此基础上，构建声学参量与环境因素的敏感性函数，刻画环境因素对检测性能的定量影响。在实际检测过程中，通过部署温湿度传感器、压电传感器等监测设备实时采集环境参量，结合敏感性函数估计当前状态下的声学参数偏移量，并由此计算焦点深度、折射角度、增益补偿等扫查参数的修正值，实现检测系统对环境变化的自适应跟踪。同时，还可利用超声回波信号的动态特征，如信噪比、频谱偏移等，构建自适应信号质量评估准则，用于指导检测参数的优化迭代，实现系统性能的动态自适应调整。

在风电叶片服役状态在线监测中，自适应检测策略有效解决了恶劣野外环境带来的检测难题。某风电运维团队研发了一

套多角度自适应相控阵超声检测系统，通过集成气象传感网络和智能温度补偿单元，实时获取叶片表面的温度、湿度、风速等环境参数，并自动调节声束入射角度和晶片激励时序，在 -20°C 至 50°C 的极端温差条件下成功实现了叶片根部裂纹的稳定跟踪和定量评估，漏检率和误警率较传统方法降低了 80% 以上。

5 结束语

多角度相控阵超声技术为复杂结构件疲劳裂纹检测提供了新的思路和方法。本文系统探讨了该技术在复杂结构件检测中面临的主要挑战，包括复杂几何结构干扰、裂纹特征定量评估难度以及环境因素影响等，并提出了深度学习信号处理、多参数特征提取和自适应检测策略等创新性解决方案。这些技术的融合应用显著提升了复杂结构件疲劳裂纹检测的准确性、可靠性和适应性。未来，随着人工智能、大数据等前沿技术的深入发展，多角度相控阵超声检测将向更加智能化、精准化的方向演进。

参考文献

- [1] 邓春喜. 安放式管座角焊缝超声相控阵检测关键技术研究[J]. 山西冶金, 2024, 47(06): 57-59.
- [2] 刘军祥. 基于相控阵超声的线路带夹板焊缝轨底检测研究[J]. 高速铁路新材料, 2024, 3(02): 41-45.
- [3] 赵建军. 金属层合板内部缺陷超声相控阵检测与自动化评估方法研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [4] 胡振宇. 基于相控阵的火车导轨材料缺陷评估[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- [5] 陈科林. 相控阵超声在机车轮辋探伤中的优势分析[J]. 技术与市场, 2022, 29(06): 40-42.
- [6] 成博. 焊缝缺陷超声相控阵全聚焦图谱敏感辨识特征集研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- [7] 黄冠程. 基于超声相控阵的机翼带筋壁板缺陷检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [8] 马骞, 陈智发, 云维锐. 基于相控阵超声技术重载铁路钢轨焊缝检测方法[J]. 铁道建筑, 2022, 62(02): 47-52.
- [9] 尹段泉, 莫若, 李冈宇, 等. 钢轨的相控阵串列式扫查检测[J]. 无损检测, 2021, 43(11): 27-30, 40.
- [10] 吴万良, 周琳. 奥氏体不锈钢相控阵检测的研究[J]. 河南化工, 2020, 37(12): 54-56.

作者简介



黄秋龄，工程师，研究方向：特种设备检测。