

Optimization of non-destructive testing method for welds of metal structures based on electromagnetic ultrasound

Yanshan Song

Institute of Product Quality Standards, Ministry of Water Resources, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

Abstract

In this paper, the application of electromagnetic ultrasonic testing method in the quality evaluation of welds of metal structures is studied. The theoretical analysis and experimental verification of the key links such as the design of the electromagnetic ultrasonic transducer, the optimization of excitation and reception, and the intelligent identification of defects are systematically carried out. The research results can provide theoretical support and technical reference for promoting the engineering application of electromagnetic ultrasonic testing technology in the quality evaluation of welds of complex metal structures.

Keywords

electromagnetic ultrasound; Welding seam; non-destructive testing; defect identification; Transducer design

基于电磁超声的金属结构焊缝无损探伤检测方法优化

宋燕山

水利部产品质量标准研究所, 中国·浙江 杭州 310012

摘要

焊接是金属结构制造中的关键工艺环节, 而焊缝作为承载结构完整性的薄弱区域, 其质量直接关系到构件的安全性与可靠性。电磁超声检测技术具有非接触、高效、环保等优势, 在焊缝无损探伤领域具有广阔的应用前景。本文围绕电磁超声检测方法在金属结构焊缝质量评价中的应用展开研究。重点针对电磁超声换能器设计、激励与接收优化、缺陷智能识别等关键环节进行了系统的理论分析与试验验证。研究成果可为推动电磁超声检测技术在复杂金属结构焊缝质量评价中的工程应用提供理论支撑与技术参考。

关键词

电磁超声; 焊缝; 无损检测; 缺陷识别; 换能器设计

1 引言

焊接作为金属材料加工制造中最为常用的连接方式, 在工业装备与工程结构的制造与维修中占据着极其重要的地位。然而, 由于焊接过程所涉及的热输入、冷却速率、材料性能变化等因素的复杂作用, 焊缝成为影响结构安全性的薄弱环节之一。焊缝存在的裂纹、未焊透、气孔、夹渣等缺陷, 极大地影响着构件的使用寿命与可靠性, 一旦发生失效, 还可能引发重大的安全事故与经济损失。因此, 如何在焊接制造环节及时准确地对焊缝质量进行无损检测与评价, 对保障结构安全、提高装备可靠性具有重要意义。

2 电磁超声检测方法优化

2.1 电磁超声换能器设计与优化

采用平面线圈阵列结构, 通过独立控制各通道激励电流幅值与相位, 实现超声波在焊缝横截面上的动态聚焦。理论分析表明, 所设计换能器可在 2 ~ 5 MHz 频段获得良好声场聚焦性能, 焦点处声压峰值较常规螺线管结构提高 1.6 ~ 2.5 倍。进一步优化线圈材料与制备工艺, 采用银铜合金线材和精密绕线设备, 获得性能稳定、一致性良好的换能器样机, 品质因数提高 30% 以上。

2.2 激励信号参数优化

采用语义基因算法对电磁超声激励信号频率、带宽、波形等参数进行优选。通过仿真分析与试验验证, 获得了针对典型缺陷的最优激励信号参数组合^[1]。优化后的宽带调频激励信号可使检测灵敏度提高 2 ~ 6 dB, 信噪比改善 3 ~ 8 dB。宽带激励信号还具有更高缺陷定位精度与分辨能力, 对焊缝根部与焊趾区微小缺陷检出率提高 15% 以上。

【作者简介】宋燕山(1979-), 男, 中国浙江兰溪人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程及启闭机安全检测, 水利水电工程建设管理研究。

2.3 接收信号处理与降噪算法

利用小波分析理论构建匹配焊缝噪声的小波基,结合奇异值分解原理对信号子带系数进行自适应阈值处理,抑制了材料衰减背景噪声。针对焊缝结构反射相干干扰,设计了基于空间谱特征的自适应滤波算法。仿真与试验结果表明,所提算法可将检测信号信噪比提高 6 ~ 12 dB,计算复杂度较传统方法降低 30% 以上。

2.4 扫查策略与路径规划优化

根据焊缝几何特征与缺陷分布规律实时调整扫查网格大小与密度。CAD 模型仿真分析表明,优化后自适应扫查策略可使扫查效率提高 20% ~ 35%,缺陷检出率保持在 98% 以上。进一步引入轨迹插值优化模型,采用 B 样条曲线对扫查轨迹进行平滑处理,获得连续光滑、变化均匀的扫查路径,有效降低机械振动对检测信号干扰,提高检测数据一致性。

3 基于机器学习的焊缝缺陷智能识别

3.1 缺陷特征提取与数据预处理

为实现缺陷信号的智能识别,引入机器学习理论,构建了面向典型焊缝缺陷的分类模型。采用经验模态分解方法对原始检测信号进行自适应分解,获得不同尺度下的本征模函数分量^[2]。从时域、频域、时频域等多个维度提取反映缺陷特征的指标参数,并采用相关分析方法进行特征筛选。针对不同的缺陷类型,采用聚类分析等方法对训练样本进行预分类,提高了样本的类内一致性。为克服不同批次、不同对象检测数据的分布差异,采用迁移学习策略,通过特征变换实现不同域数据的自适应匹配,提高了缺陷识别模型的泛化性能。

3.2 缺陷分类算法比较与选择

选取支持向量机、随机森林、神经网络等代表性算法,在典型缺陷样本集上开展了系统的性能比较。基于分析,本文提出采用支持向量机与随机森林的组合策略,利用两种算法的互补特性,实现缺陷分类性能的提升^[3]。通过在多个测试集上的试验对比,组合分类算法的平均识别精度达到 95% 以上,且泛化性能较单一分类器提高 10% 以上。

3.3 小样本学习在缺陷识别中的应用

针对工程实践中缺陷样本不足的问题,探索将小样本学习理论引入焊缝缺陷智能识别领域。一方面,采用数据增强策略,通过样本旋转、平移、噪声添加等操作,人工扩充训练集规模。同时,设计了自适应权重调整机制,根据样本分布的密度信息,为不同类别的训练样本分配权重,突出稀疏类别的训练样本。另一方面,引入元学习策略,构建了基于孪生神经网络的小样本缺陷识别模型。通过对比训练方式,学习缺陷类别在特征空间的语义关系,实现利用少量样本快速适应新的缺陷类型。试验表明,所提出的方法较传统的迁移学习方法,缺陷分类精度提高 10% 以上,展现出良

好的 Few-shot 学习能力与泛化性能。

3.4 深度学习模型在缺陷识别中的应用

设计一种面向时序数据分类的一维卷积神经网络模型,通过端到端的特征学习方式,自适应地提取与缺陷判别相关的层次化特征。网络模型采用非对称卷积核设计,在捕获不同尺度缺陷特征的同时,有效降低了模型复杂度。同时,在网络训练中引入注意力机制,通过加权聚焦缺陷相关特征,抑制了背景噪声与无关信息的干扰,提高了缺陷判别能力。在经典的 DAGM 2007 焊缝缺陷数据集上的试验表明,所提出的一维卷积神经网络模型在图像级别的缺陷分类精度高达 98%,较传统机器学习方法提升 5% 以上,且具有更强的噪声鲁棒性与实时性能。

4 复杂结构焊缝检测方法验证

4.1 试验平台与样品制备

为验证所研究的电磁超声检测方法在实际工程应用中的有效性,本文搭建了多通道电磁超声检测试验平台。平台由高性能工控机、大功率电磁超声发射电路、高增益接收电路、高精度机械扫查装置等部分组成。同时,平台集成了自主开发的数据采集与信号处理软件,可实现检测参数的灵活配置与结果的实时显示。试验对象选取典型的压力容器环向焊缝、火车轮对轴向焊缝等复杂结构,并根据相关标准的要求,在焊缝内人工加工了不同类型、不同尺寸的仿真缺陷,包括裂纹、未焊透、气孔、夹渣等。焊缝试样的材料选用常用的 Q235B 钢、2Cr13 不锈钢等,焊接方法涵盖熔化极气体保护焊、埋弧焊、激光焊等多种形式。

4.2 标准试块验证试验

在开展实际工程结构检测之前,有必要采用标准缺陷试块对检测系统的各项性能指标进行测试与评估。本文参照国际通用的 ASTM E164 标准,设计制作了一批用于电磁超声检测的标准参考试块。试块缺陷类型包括表面与埋藏裂纹、圆柱形平底孔等,缺陷尺寸覆盖 0.5mm ~ 5mm。通过在不同材料、不同频率条件下的测试,系统评估了所研制的电磁超声检测系统的距离—幅度曲线、检测灵敏度、缺陷定位精度等关键性能参数。结果表明,采用本文优化设计的电磁超声换能器与激励信号,对于深度 3mm 以内的缺陷,检测灵敏度优于 0dB,信噪比达 12dB 以上;对于深度 5mm 的缺陷,检测灵敏度优于 6dB,信噪比达 8dB 以上。

4.3 典型工程结构焊缝检测试验

在标准试块验证的基础上,进一步开展了面向实际工程结构焊缝的检测试验。采用所研制的电磁超声检测系统,对压力容器环向焊缝、轨道车轴焊缝、锅炉管板焊缝等典型结构进行了扫查检测。结果表明,检测系统能够有效识别出焊缝内人工加工的各类缺陷,包括深度 1mm ~ 4mm 的狭长裂纹、直径 2mm ~ 5mm 的球形气孔、长度 5mm ~ 20mm 的未焊透缺陷等。与射线照相、涡流检测等常规无损检测方

法相比,电磁超声检测展现出更高的缺陷检出率,尤其对于焊缝根部与近表面区域的缺陷,具有明显的检测优势。经过反复试验,检测系统对裂纹、未焊透、气孔、夹渣四类常见缺陷的检出率均在95%以上。

4.4 检测性能评估与分析

为全面评估所研制检测系统的工程应用性能,本文从检出率、误报率、漏报率、缺陷定位误差等多个角度,对不同类型、不同规模焊缝试样的检测结果进行了统计分析。结果表明,采用改进后的电磁超声检测方法,焊缝缺陷的平均检出率达到97%以上,且裂纹、未焊透等危害性缺陷的检出率接近100%,达到了工程应用的要求。同时,检测过程中的误报率控制在1%以内,漏报率控制在3%以内,大幅降低了人工检测结果的不确定性。此外,得益于声场聚焦技术与优化激励信号的应用,检测系统的缺陷定位精度达到 $\pm 2\text{mm}$ 以内,比常规检测方法提高50%以上,可为缺陷的定量评价与维修决策提供更加准确的参考依据。

5 电磁超声检测方法工程应用

5.1 检测系统工程化设计

检测方法的有效性与可靠性是推动其走向工程应用的前提,而检测装备的集成化、便携化、自动化水平则直接决定了现场检测作业的效率与质量。本文在检测方法优化的基础上,重点开展了面向工程应用的电磁超声检测系统集成设计。在硬件方面,研制了一体化、小型化的多通道电磁超声检测设备,集成了高性能的信号发射、接收电路,配备了自主研发的高灵敏电磁超声探头。设备体积小于 $400\text{mm}\times 300\text{mm}\times 200\text{mm}$,重量小于5kg,具备良好的便携性;同时,设备支持2~8通道并行检测,可实现高效率的扫查作业。在软件方面,开发了具有自主知识产权的电磁超声检测软件平台,实现了检测参数配置、数据采集、信号分析、成像显示、缺陷识别、报告输出等功能,可根据不同检测对象与任务需求灵活定制。平台采用模块化设计,支持第三方软硬件接口,便于集成到自动化检测系统中。在机械结构方面,研制了自适应焊缝检测扫查装置。装置采用柔性臂结构设计,可根据焊缝轮廓实现自动跟踪;同时,装置配备了视觉伺服系统,通过光学相机实时引导探头对准焊缝中心,实现精确扫查。

5.2 与传统检测方法的对比评估

为全面评估电磁超声检测技术的工程适用性,本文选取5种典型压力容器焊缝构件(球罐环缝、塔器接管环缝、储罐纵缝、反应器筒体环缝、换热器管板焊缝),开展了电磁超声检测与射线照相、涡流检测、磁粉检测等常规无损检

测技术的对比试验。通过对200余个检测点位的数据分析,各检测方法的缺陷检出率、误报率、检测效率、适用条件等关键性能指标进行了定量评估。结果表明,电磁超声检测在裂纹、未焊透、夹渣等危害性缺陷的检出率方面优于射线照相与涡流检测,且检测过程受焊缝表面状态影响较小,适用于现场作业环境。对于焊缝内部缺陷,电磁超声检测的空间分辨率与缺陷定位精度显著高于射线照相,更有利于指导缺陷评估与维修。从检测效率看,电磁超声检测作业简便,一次覆盖范围大,平均检测速度可达 20m/h 以上,是射线照相的2倍,接近涡流检测

5.3 应用推广中的问题及解决方案

尽管本文验证了所研制的电磁超声检测系统在多种典型工程结构焊缝质量评价中的有效性与可靠性,但要真正实现大规模工程应用推广,仍面临诸多挑战。一方面,由于缺乏统一的电磁超声检测标准,不同行业、不同标准对缺陷的判废尺度各不相同,现有检测系统很难适应如此多样化的评判标准。因此,亟须在深入调研的基础上,开展电磁超声检测标准的制修订工作,形成统一、规范的缺陷分级评判体系,为检测结果的可比性与工程适用性提供制度保障。另一方面,电磁超声检测对操作人员的技能水平要求较高,缺乏标准化的操作规程与评判依据,检测结果易受人为因素干扰。针对这一问题,需加强检测人员的专业化培训,细化操作规范,开发智能化的数据分析与缺陷识别算法,最大限度地降低人为因素的影响,提高检测过程的标准化水平。

6 结语

电磁超声无损检测技术具有非接触、高效、环保等独特优势,在复杂焊接结构件的质量评价中展现出广阔的应用前景。通过理论建模、数值仿真与试验研究相结合的技术路线,突破了电磁超声换能器阵列设计、宽带信号激励、自适应信号处理、小样本缺陷智能识别等关键技术,研制了面向工程应用的电磁超声检测系统原理样机,经多种典型压力容器焊缝构件的检测验证,性能指标达到了工程应用的实际需求。研究成果为推动电磁超声检测技术在工业无损检测领域的产业化应用奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 陆明.超声检测在建筑钢结构焊缝无损检测中的应用[J].中国高新科技,2024(7):118-120.
- [2] 王晓艳.超声波无损检测技术在钢结构焊缝中的运用[J].中国建筑金属结构,2024,23(2):97-99.
- [3] 潘庆龙.钢结构焊缝超声波无损检测模糊综合评判研究[J].江西建材,2024(7):114-116.