

Identification Methods and Effectiveness Analysis of Ultrasonic Guided Waves for Common Defects in Hydraulic Steel Pipes

Bo Huang

China Datang Corporation Science and Technology Research Institute General Co., Ltd., Hydropower Science Research Institute, Nanning, Guangxi, 530022, China

Abstract

To address the challenges in detecting defects in hydraulic steel pipes, this study systematically investigates the methods and effectiveness of ultrasonic guided wave identification. It clarifies the types and characteristic mechanisms of defects such as cracks, corrosion, and weld flaws, and delves into the propagation characteristics of guided waves and their interaction mechanisms with defects. The research optimizes excitation parameters and transducer placement, innovates a signal processing workflow encompassing filtering, noise reduction, and feature extraction, and designs and applies multi-angle high-frequency guided wave transducers. By integrating pattern recognition and machine learning, a defect identification algorithm system is constructed. Validated through numerical simulations, experiments, and practical case studies, this technology demonstrates advantages such as long-range rapid detection, high sensitivity, and non-contact operation, effectively identifying various types of defects and ensuring the safe operation of hydropower stations. The study also analyzes limitations, including insufficient accuracy in identifying complex defects, and outlines future development trends such as technological integration and intelligentization. Recommendations are provided on the selection of detection technologies, determination of inspection cycles, and personnel training. This research offers an efficient and feasible solution for defect detection in hydraulic steel pipes, holding significant theoretical and engineering value.

Keywords

Hydropower steel pipes; Ultrasonic guided waves; Nondestructive testing; Machine learning

水电钢管常见缺陷的超声导波识别方法及效果分析

黄波

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司水电科学研究院, 中国·广西 南宁 530022

摘 要

为解决水电钢管缺陷检测难题,本研究系统探究超声导波识别方法及效果。明确裂纹、腐蚀、焊缝缺陷等类型及特征机理,深入研究导波传播特性与缺陷作用机制,优化激励参数及换能器布置,创新滤波-降噪-特征提取信号处理流程,设计应用多角度高频导波换能器,结合模式识别、机器学习等构建缺陷识别算法体系。经数值模拟、实验及实际案例验证,该技术具备长距离快速检测、高灵敏度、非接触式等优势,可有效识别各类缺陷,为水电站安全运行提供保障。同时分析了复杂缺陷识别准确性不足等局限性,展望技术融合、智能化等发展趋势,提出检测技术选择、周期确定及人员培训建议,为水电钢管缺陷检测提供高效可行方案,具有重要理论与工程价值。

关键词

水电钢管; 超声导波; 无损检测; 机器学习

1 引言

水电作为清洁能源核心,水电钢管是输水系统关键,长期受多重因素影响易产生裂纹、腐蚀等缺陷,可能引发安全事故,传统检测方法存在范围有限、效率低等局限。超声导波技术具备长距离快速检测、高灵敏度、非接触式等优势,研究其在水电钢管缺陷检测中的应用,对保障水电设施安全

意义重大。本研究目标是建立高效准确的超声导波识别方法并评估效果,具体内容包括分析水电钢管常见缺陷类型及特征、探究超声导波检测原理与技术、优化创新识别方法、验证评估检测效果。研究采用文献研究、数值模拟、实验研究及案例分析相结合的方法,技术路线为:先通过文献梳理奠定基础,再经数值模拟获取初步参数,随后通过实验优化方法,最后结合实际案例验证应用效果,总结成果与改进方向^[1]。

【作者简介】黄波(1988-),男,中国江西抚州人,本科,工程师,从事水电站电力技术监督及技术服务研究。

2 超声导波识别水电钢管常见缺陷的方法

2.1 信号处理方法

信号处理是超声导波检测水电钢管缺陷的关键，直接决定识别准确性。实际检测中信号易受环境噪声、仪器干扰，需经滤波、降噪、特征提取三步优化。滤波针对性去除干扰，如巴特沃斯带通滤波可提升信噪比；降噪采用小波降噪与 EMD，分离噪声后重构信号，突出缺陷特征；特征提取分时域与频域，时域提取幅值等参数判断缺陷情况，频域通过 FFT、STFT、WPT 分析频率能量分布，适配不同缺陷检测。三类方法协同，为缺陷识别筑牢基础。

2.2 缺陷识别算法

缺陷识别算法基于模式识别、机器学习、深度学习技术，实现超声导波信号的缺陷特征提取与分类。模式识别类中，模板匹配通过比对信号相似度判断缺陷类型，但对信号一致性要求高；人工神经网络（如 BP 神经网络）自适应能力强，经训练学习缺陷信号模式，对噪声有鲁棒性，可识别裂纹、腐蚀等缺陷。机器学习以数据驱动为核心：SVM 通过最优分类超平面分类，适配小样本、非线性场景；决策树结构直观、可解释性强，基于特征参数分类；随机森林通过多棵决策树综合判断，减少过拟合，提升复杂缺陷识别稳定性。深度学习优势显著：CNN 可将导波信号转为图像形式，自动提取深层特征；LSTM 擅长处理时间序列信号，捕捉缺陷动态趋势^[2]；GAN 能生成逼真数据扩充样本，提升模型泛化能力。实际应用需结合检测需求与数据特点，选择单一算法或组合使用。

2.3 多角度高频导波换能器设计与应用

换能器是超声导波检测核心部件，多角度高频导波换能器经结构优化大幅提升检测性能。其设计基于导波传播特性：采用圆周阵列布局实现多角度扫描，通过楔块结构完成波型转换生成高灵敏度横波，优化高频激励频率增强微小缺陷分辨率。该换能器具有检测灵敏度高、缺陷识别能力强、检测效率高三大优势，可捕捉隐蔽缺陷、精准判断缺陷参数、实现大范围快速检测。实际应用中，在某水电站检测中成功检出传统方法遗漏的微小裂纹与内部腐蚀缺陷，精准量化缺陷参数，缩短检测周期，兼具技术可靠性与经济性，为水电钢管安全运行提供有力保障。

3 超声导波识别水电钢管常见缺陷的效果分析

3.1 数值模拟分析

为探究超声导波与水电钢管缺陷的作用机制，采用 ANSYS、COMSOL 等有限元软件建立精确缺陷模型。建模时充分还原管道几何尺寸、弹性模量、泊松比等材料属性，针对裂纹（明确长度、深度、方向）、腐蚀（模拟形状、深度分布）、焊缝缺陷（标注未焊透、夹渣等特征）进行精细化定义，并对缺陷区域与关键部位加密网格，保障模拟精度。模拟中设置正弦调制脉冲波等激励源，选定适配的激励频率

与模态，通过管道表面及内部的多个接收点采集反射波、散射波等信号。结果表明，裂纹会引发导波强烈反射与散射，幅值、相位随裂纹尺寸增大而变化更显著；腐蚀区域因材料不均导致导波能量衰减，频谱变化与腐蚀程度正相关；焊缝缺陷中，未焊透、未熔合产生特征反射信号，夹渣、气孔则造成信号杂乱与幅值降低。该模拟明确了不同缺陷对应的导波特征参数（幅值、相位、频谱等），为实际检测提供缺陷识别依据，同时优化了激励频率、换能器布置等关键参数，可提前评估检测方案，减少实际检测的盲目性。

3.2 实验研究

为验证数值模拟结果，搭建超声导波检测实验平台，包含压电换能器激励接收装置、高精度数据采集处理系统及含缺陷管道试件。换能器选用 100kHz-500kHz 频率范围，适配 L (0,2)、T (0,1) 等模态，通过耦合剂与试件紧密贴合；试件按实际管道规格加工，采用电火花加工、化学腐蚀等方法制作不同类型、尺寸的裂纹、腐蚀及焊缝缺陷，并标记缺陷参数以便对比。实验流程如下：安装换能器并确保耦合良好，通过信号发生器产生激励信号，经功率放大器驱动换能器激发导波；接收换能器采集缺陷回波信号，由系统完成滤波、降噪与特征提取；利用缺陷识别算法判断缺陷类型、位置与尺寸。实验中多次重复检测，记录温度、湿度等环境参数，确保数据可靠性。实验结果与数值模拟基本吻合，证实超声导波可有效检测各类缺陷：精准识别裂纹位置及尺寸范围，通过信号衰减与频谱变化判断腐蚀区域及严重程度，清晰分辨焊缝各类缺陷。同时发现，耦合条件、噪声干扰、材料不均等因素会影响检测效果，为此提出优化耦合剂选择、采用高效降噪算法、预处理管道材料等改进措施^[3]。

3.3 实际案例分析

选取多个代表性水电工程案例，评估超声导波检测的工程实用性。在某运行多年的水电站检测中，采用优化后的识别方法与多角度高频导波换能器，成功检出焊缝附近长度 50mm、深度为管壁 1/3 的轴向裂纹，及多处局部腐蚀缺陷，为修复与防腐工作提供精准依据。相较于传统方法，该技术大幅提升检测效率、降低成本，且能发现内部及微小缺陷；但水流干扰与噪声会导致信号质量下降，通过增加采集次数、采用自适应滤波算法后，缺陷识别准确性显著提升。在另一水电站检测中，针对水流冲刷与地质变化引发的磨损、焊缝缺陷，调整检测参数与识别算法，成功定位多处未焊透、未熔合缺陷及管壁变薄区域，经及时修复加固保障了管道安全运行。

通过案例总结核心经验：检测前需充分了解管道运行历史、环境及结构，制定个性化方案；检测中严控耦合质量、减少外界干扰，持续优化信号处理与识别算法；加强检测人员专业培训，保障工作质量。同时明确，复杂缺陷识别能力与定量分析精度仍需提升，将作为未来研究重点方向。

4 超声导波检测技术的应用与展望

4.1 超声导波检测技术在水电工程中的应用现状

超声导波检测技术凭借独特优势,已成为水电钢管无损检测的重要手段,在水电工程中应用日益广泛。通过在水电钢管上布置换能器,该技术能快速高效地对长距离钢管进行检测,实现管道整体状况的快速评估,例如某大型水电站便借助其对长达数千米的引水钢管完成全面检测,成功发现多处潜在裂纹和腐蚀缺陷,为后续维护修复提供了关键依据。其显著优势体现在:传播距离远,一次检测可覆盖大范围管道,相较传统逐点检测大幅提升效率、减少检测时间与工作量,能快速定位缺陷位置;对管道内部和表面缺陷均具备高灵敏度,可有效识别微小裂纹、腐蚀等缺陷,即便隐藏缺陷也能精准捕捉;且无需大面积拆卸或破坏管道,属于非接触式检测,不会影响管道正常运行,降低了检测成本与生产干扰。但该技术在中应用中也存在局限性:水电钢管复杂的工作环境中,水流、温度变化、电磁干扰等因素会影响超声导波信号的传播与接收,导致信号衰减、畸变或噪声增加,进而影响检测准确性,如水流会改变导波传播速度和方向,温度剧烈变化会改变管道材料属性,均增加信号分析难度;导波传播过程中的频散现象会导致信号波形畸变,提升信号处理与缺陷识别的复杂度;而多个缺陷相互靠近、缺陷形状不规则等复杂情况,会使导波反射和散射信号相互干扰,给缺陷类型与尺寸的准确判断带来挑战。

4.2 超声导波检测技术的发展趋势

随着科技的不断进步,超声导波检测技术持续发展并呈现出三大重要趋势:一是与其他无损检测技术深度融合,为克服单一技术局限性,该技术将越来越多地与超声相控阵技术结合,通过精确控制导波发射和接收角度实现缺陷精准成像与定位,或与漏磁检测技术联用,借助后者对铁磁性材料表面及近表面缺陷的高灵敏度与自身对内部缺陷的检测能力,形成全方位、多层次检测体系,通过优势互补提升缺陷检测的全面性与结果可信度;二是向智能化方向进阶,依托人工智能、机器学习和大数据分析技术,利用机器学习算法对海量检测数据进行学习分析,自动完成缺陷识别与分类,例如通过训练深度神经网络模型,从导波信号中自动提取特征并精准判断缺陷类型、位置及严重程度,同时结合大数据分析对比不同时期检测数据,预测缺陷发展趋势,助力制定预防性维护计划,大幅提升检测效率与准确性,减少人为干扰;三是拓展应用领域,除水电钢管检测外,该技术将逐步应用于水电站大坝检测,排查内部裂缝、空洞等缺陷以评估结构安全性,还可用于水轮机叶片、主轴等关键部件的无损检测,及时发现潜在隐患,同时随着海上风电的快速发展,其也有望应用于海上风电管道和结构件检测,为相关设施安全运行提供技术支持,进一步发挥技术优势,为水电工

程及相关领域的安全稳定运行提供更全面保障^[4]。

4.3 对水电钢管安全检测的建议

基于本研究结果,为更好保障水电钢管安全运行,在安全检测工作中可从三方面提出建议:一是科学选择检测技术,需结合管道材质、工作环境、缺陷类型及检测要求等实际情况,长距离、大面积检测优先采用超声导波检测技术,充分发挥其高效、广覆盖的优势,而对关键部位或复杂缺陷的高精度检测,可搭配超声相控阵、射线检测等其他无损检测技术进行补充验证,确保结果准确,同时需关注技术发展动态,及时引入新方法与新设备以提升检测水平;二是合理确定检测周期,依据管道运行年限、工作条件、历史检测数据等因素差异化设定检测频率,对运行年限久、环境恶劣或曾出现缺陷的管道段缩短周期、加强监测,对运行状况良好的管道段可适当延长周期,但仍需坚持定期检测,通过科学安排及时掌握缺陷发展变化,为维护修复提供及时依据;三是强化检测人员培训,既要开展超声导波检测原理、设备操作、信号处理、缺陷识别、数据分析等专业知识与技能培训,也要注重安全意识和责任心培养,确保检测工作规范开展,同时鼓励检测人员持续学习新的检测技术与方法,提升解决实际问题的能力,为水电钢管安全检测提供坚实人才保障。

5 结语

本研究聚焦水电钢管缺陷的超声导波识别,明确裂纹、腐蚀、焊缝缺陷等类型及特征机理,奠定研究基础。通过探究导波传播特性与缺陷作用机制,建立相关模型,优化激励频率、换能器布置等参数,创新信号处理方法,借助多角度高频导波换能器提升微小与复杂缺陷检测能力。经数值模拟、实验及实际案例验证,该技术具备长距离快速检测、高灵敏度、非接触式等优势,可有效保障水电站安全运行。研究存在复杂缺陷识别准确性、定量测量精度不足等问题,易受材料不均、环境干扰影响。未来需深化复杂缺陷机制研究,结合深度学习优化算法,完善影响因素模型,推动检测系统智能化、自动化、网络化发展,融合物联网构建全生命周期智能监测系统,强化水电工程安全保障。

参考文献

- [1] 董兴明.水利水电工程深基坑钢管桩支护施工技术应用研究[J].中国高新科技,2024,(23):86-88.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.23.27.
- [2] 魏虎明,高怡.论大斜度水电压力钢管装焊台车的发明与应用[J].机电产品开发与创新,2025,38(03):25-27+36.
- [3] 俞磊.基于超声导波的方钢管损伤识别研究[D].:哈尔滨工业大学,2022.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.002439.
- [4] 杨婷婷.方钢管超声导波传播特性与损伤识别方法研究[D].:哈尔滨工业大学,2025.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2025.000222.