

压力管道环焊缝缺陷的导波检测与定位精度研究

李焕焕

河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院焦作分院 河南 焦作 454000

摘要：本文聚焦压力管道环焊缝缺陷的导波检测与定位精度研究。介绍了环焊缝常见缺陷类型及危害，分析导波检测机理并构建定位模型。随后从管道自身特性、检测系统与参数、环境与工况、缺陷自身特性四方面剖析定位精度影响因素。提出了导波模式优化、传感器阵列改进、信号处理与算法优化、检测系统校准等定位精度优化策略，为提升压力管道环焊缝缺陷检测的可靠性提供理论依据。

关键词：压力管道；环焊缝缺陷；导波检测；定位精度

引言：压力管道在油气、化工等领域广泛应用，环焊缝作为关键连接部位，其缺陷易引发严重事故。导波检测凭借传播距离远、检测范围广等优势，成为环焊缝缺陷检测的重要手段。然而，实际检测中定位精度受多种因素影响。本文深入探讨压力管道环焊缝常见缺陷类型，分析导波检测机理与定位模型构建，剖析定位精度影响因素，并提出针对性优化策略，对保障压力管道安全运行意义重大。

1 压力管道环焊缝常见缺陷类型

压力管道环焊缝作为管道连接的关键部位，其缺陷产生与焊接工艺、材料特性、施工环境等多种因素相关，常见缺陷类型主要包括以下几类：一是裂纹类缺陷，多因焊接应力集中、焊缝金属韧性不足或焊后未充分消应力处理导致，如热裂纹、冷裂纹，此类缺陷危害性极大，易在介质压力作用下快速扩展，引发管道泄漏甚至爆裂。二是未焊透与未熔合缺陷，未焊透是焊缝根部未完全熔合，未熔合则是焊缝与母材或焊道之间存在未熔合区域，均会导致焊缝承载能力大幅下降。三是气孔与夹渣缺陷，气孔由焊接过程中气体未及时逸出形成，夹渣则是熔渣混入焊缝未清理干净所致，二者会破坏焊缝的致密性，降低焊缝强度和耐腐蚀性能。四是咬边与未焊满缺陷，咬边是焊缝边缘出现的沟槽，未焊满是焊缝高度未达到设计要求，都会造成局部应力集中，影响管道运行安全性^[1]。这些缺陷广泛存在于油气输送、化工介质输送等各类压力管道中，是引发管道事故的主要隐患。

2 压力管道环焊缝缺陷导波检测机理与定位模型构建

2.1 环焊缝缺陷导波检测机理分析

压力管道环焊缝缺陷导波检测基于弹性波传播原理，通过在管道表面布置传感器激励特定模式的导波，利用导波与缺陷的相互作用实现缺陷检测。导波作为一

种在弹性介质界面或薄层中传播的弹性波，具有传播距离远、检测范围广的特点，可沿管道轴向和环向传播，能够覆盖环焊缝及周边一定区域的管道本体。当导波传播至环焊缝缺陷处时，会发生反射、折射和散射现象，缺陷会改变导波的传播路径、幅值和相位特性。传感器接收经过缺陷作用后的导波信号，通过对信号的分析处理，提取与缺陷相关的特征参数，如反射波幅值、传播时间、频率变化等，进而判断缺陷的存在与否。不同类型的导波模式（如Lamb波、SH波、扭转波、纵向波）在管道中的传播特性存在差异，适用于不同类型缺陷的检测，例如扭转波对管道周向缺陷敏感性较高，纵向波对轴向缺陷检测效果更优。在环焊缝检测中，需根据管道尺寸、材质及缺陷类型选择合适的导波模式，确保导波能够有效作用于缺陷并产生可识别的信号差异，为缺陷检测提供可靠的信号基础。

2.2 环焊缝缺陷导波定位模型构建

环焊缝缺陷导波定位模型构建的核心是利用导波传播特性与传感器布置方案，建立导波传播时间、传播速度与缺陷位置之间的数学关系。首先需明确导波在管道中的传播速度，该速度与管道材质的弹性模量、密度、泊松比以及导波模式、频率密切相关，可通过理论计算或实验标定的方式确定。基于传感器阵列布置形式，常见的定位模型包括时差定位模型、幅值衰减定位模型和相位差定位模型等，其中时差定位模型应用最为广泛。时差定位模型通过在管道环向或轴向布置多个传感器，记录导波从激励点传播至缺陷再反射回各传感器的时间差。假设导波在管道中匀速传播，根据各传感器接收反射波的时间差，结合传感器之间的相对位置坐标，通过几何运算求解缺陷的空间位置。为提高定位精度，需建立管道坐标系，将传感器位置和缺陷位置均转化为坐标系中的坐标值，构建多传感器联合定位方程组，通过求

解方程组得到缺陷的精确坐标。同时,需考虑导波传播过程中的色散效应(不同频率成分导波传播速度不同)对传播时间的影响,在模型中引入色散校正系数,对传播速度进行修正。此外,还可结合机器学习算法优化定位模型,通过大量实验数据训练模型,提高模型对复杂管道结构和多缺陷场景的适应性,实现对环焊缝缺陷的精准定位。

3 压力管道环焊缝缺陷定位精度影响因素分析

3.1 管道自身特性影响

管道自身特性是影响环焊缝缺陷定位精度的基础因素,涵盖材质、几何参数与状态。材质上,不同材质弹性力学参数有别,致导波传播速度不同,材质不均或存在缺陷,会使传播速度波动,影响测量精度与定位^[2]。几何参数方面,直径、壁厚、椭圆度等影响导波模式传播特性,椭圆度使传播路径弯曲,余高、错边量等几何缺陷干扰导波传播。管道状态上,腐蚀、磨损改变局部壁厚,变形、弯曲使传播路径变长,内壁结垢、杂物附着削弱导波能量,降低反射波信噪比,影响缺陷反射信号识别精度,间接降低定位精度。

3.2 检测系统与参数影响

检测系统与参数合理性决定环焊缝缺陷定位精度,含传感器性能、激励参数、系统硬件精度。传感器性能上,灵敏度、频响范围、信号采集精度影响导波信号接收质量,耦合不佳会产生信号衰减干扰。激励参数方面,激励频率、电压、脉冲宽度影响导波模式纯度与能量,选择不当会干扰缺陷反射信号识别。系统硬件精度上,信号采集卡采样频率、数据存储精度影响数字化质量,数据传输干扰致数据失真,影响参数测量精度,降低定位准确性。

3.3 环境与工况影响

环境与工况条件间接影响环焊缝缺陷定位精度。环境因素中,温度变化改变管道材质弹性力学参数,影响导波传播速度;电磁干扰混入噪声,降低信噪比;湿度、粉尘影响耦合稳定性,增加测量误差。工况因素里,管道内压改变几何尺寸与应力状态;介质流动产生振动干扰;恶劣工况加速管道损伤,影响检测系统稳定性,降低工作精度。另外,现场机械振动、人员操作干扰等不利因素,降低缺陷定位可靠性。

3.4 缺陷自身特性影响

缺陷自身形态、尺寸和分布特性直接影响定位精度。形态上,不同类型缺陷界面特性不同,对导波反射、散射程度有差异,取向影响反射特性,垂直传播方向的缺陷定位更准。尺寸方面,小尺寸缺陷反射信号微

弱,易被噪声掩盖;大尺寸缺陷使传播路径改变大,降低定位精度。分布上,多个缺陷反射波相互叠加干扰,难以区分单个反射信号;靠近焊缝边缘的缺陷受几何突变干扰,定位难度大。

4 压力管道环焊缝缺陷定位精度优化策略

4.1 导波模式优化与激励参数自适应调整策略

导波模式优化与激励参数自适应调整是提升定位精度的核心策略之一,通过精准匹配导波特性与检测需求,增强缺陷反射信号的辨识度。在导波模式优化方面,基于管道材质、几何参数和缺陷类型,建立模式筛选模型,通过理论分析和仿真计算,筛选出传播损耗小、缺陷敏感性高、色散效应弱的最优导波模式。例如,针对管道环向裂纹,优先选择扭转波模式;针对轴向缺陷,优先选择纵向导波模式。同时利用模式分离技术,抑制多模式导波的叠加干扰,提高单一目标模式的纯度^[3]。在激励参数自适应调整方面,构建基于管道特性和检测环境的参数优化模型,实时采集管道的材质信息、几何尺寸、环境温度等数据,通过算法自动调整激励频率、激励电压、脉冲宽度等参数。例如,根据温度变化自适应调整激励频率,补偿导波传播速度的温度漂移;根据管道壁厚变化调整激励电压,确保导波能量充足且不会产生过度衰减。另外,引入自适应滤波技术,对激励信号进行预处理,减少信号失真,同时通过实验标定不同工况下的最优参数区间,建立参数数据库,实现激励参数的快速自适应匹配,为精准定位提供高质量的导波信号基础。

4.2 传感器阵列优化与布置方案改进

传感器阵列优化与布置方案改进通过提升导波信号的采集效率和空间覆盖能力,增强定位模型的求解精度。在传感器阵列优化方面,基于定位算法的需求,优化传感器的数量、类型和阵列形式,常用的阵列形式包括环形阵列、线性阵列和分布式阵列。针对环焊缝检测的特殊性,优先采用环形阵列布置,确保导波能够全方位覆盖环焊缝区域;通过增加传感器数量提高信号采集的冗余度,利用多传感器数据融合技术降低单一传感器的测量误差。选择高灵敏度、宽频响的传感器,提升信号采集质量,例如采用压电陶瓷传感器或光纤传感器,增强对微弱缺陷反射信号的捕捉能力。在布置方案改进方面,根据管道直径和环焊缝尺寸,合理确定传感器与环焊缝的距离,避免焊缝本身的几何突变对导波信号产生过度干扰;优化传感器之间的间距,确保相邻传感器的检测范围能够有效重叠,避免检测盲区;针对管道椭圆度、变形等问题,采用自适应布置方式,根据管道实

际几何形状调整传感器位置,确保传感器与管道表面良好耦合。通过仿真模拟不同布置方案下的检测效果,筛选出最优布置方案,提升定位模型的空间分辨率。

4.3 信号处理与定位算法优化

信号处理与定位算法优化是提升定位精度的关键环节,通过抑制噪声干扰、提取有效特征和优化算法模型,提高缺陷位置求解的准确性。在信号处理方面,采用多步骤信号增强技术,首先利用小波变换、傅里叶变换等方法对采集到的导波信号进行滤波处理,抑制电磁干扰、机械振动等噪声;然后通过信号幅值归一化、基线校正等预处理,消除信号基线漂移和幅值波动的影响;最后采用峰值检测、能量提取等方法,精准识别缺陷反射波的到达时间,为定位计算提供准确的时间参数。针对导波的色散特性,采用色散补偿算法,对信号进行时域拉伸或频域校正,消除色散效应导致的信号失真,提高反射波到达时间的测量精度。在定位算法优化方面,对传统时差定位算法进行改进,引入加权最小二乘法,根据各传感器的信号质量赋予不同权重,降低低质量信号对定位结果的影响;结合机器学习算法(如支持向量机、神经网络)构建智能定位模型,通过大量实验数据训练模型,提高模型对复杂干扰因素的适应性,实现缺陷位置的精准预测。此外,建立多算法融合定位策略,整合时差定位、幅值定位等多种算法的结果,通过数据融合降低单一算法的局限性,进一步提升定位精度。

4.4 检测系统校准与精度保障机制

检测系统校准与精度保障机制通过建立全流程的质量控制体系,确保检测过程的稳定性和定位结果的可靠性。在检测系统校准方面,定期对检测设备进行全面校准,包括传感器的灵敏度、信号采集卡的采样精度、激励源的输出稳定性等,采用标准试块(含已知尺寸和位置的缺陷)进行校准实验,获取设备的系统误差,建立误差补偿模型,对定位结果进行修正。针对导波传播速度的不确定性,在每次检测前,利用管道的无缺陷区域

进行现场速度标定,实时获取当前工况下的导波传播速度,替代理论计算值,降低速度误差对定位精度的影响^[4]。在精度保障机制方面,建立检测前的工况评估体系,对管道的运行压力、温度、腐蚀状态等进行全面检测,判断是否满足检测条件,若工况不稳定,需采取降温、降压等措施,确保检测环境稳定;制定标准化的检测操作流程,规范传感器耦合、参数设置、信号采集等操作环节,减少人为操作误差;建立检测后的结果验证机制,采用超声相控阵、射线检测等其他高精度检测方法对定位结果进行验证,若存在偏差,及时调整定位模型和检测参数,确保定位结果准确可靠。建立检测数据的追溯体系,记录检测过程中的各类参数和环境条件,为后续的结果分析和精度优化提供数据支持。

结束语

压力管道环焊缝缺陷导波检测的定位精度受多因素制约,通过导波模态优化、传感器阵列改进、信号处理与算法优化以及检测系统校准等策略,可有效提升定位精度。未来,随着技术发展,需进一步研究复杂工况下的检测技术,完善定位模型,提高检测系统的智能化水平,以更精准地检测和定位环焊缝缺陷,保障压力管道的安全稳定运行,减少事故发生。

参考文献

- [1]袁健伟,汤大赞,谢法航,等.复杂噪声干扰下的压力管道环焊缝X射线图像优化方法[J].无损检测,2025,47(10):1-9.
- [2]林桥,张卓凡,肖超波,陈成,徐加初.含缺陷压力管道安全评定系统的开发[J].化工自动化及仪表,2022,49(01):83-88.
- [3]王靖虎,王克刚.压力管道检验中发现的缺陷原因分析及处理[J].化工管理,2021(35):126-127.
- [4]李志浩,王东旭,王永帅.数字成像技术在薄板焊缝检测中的成像对比[J].无损探伤,2024,48(2):46-48.