

基于超声相控阵三维成像的水工混凝土结构内部缺陷量化评估方法

党安华¹, 湛晓颖², 赵中亚^{2*}

(1. 山东禹科检测技术有限公司, 山东 东营 257000;
2. 山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 水工混凝土结构是水利工程的重要部分, 长期在复杂的环境中工作容易产生内部缺陷, 影响工程的安全性、稳定性和耐久性, 因此精准检测和量化评价就显得十分重要。超声相控阵技术依靠声束可控制、检测效率高、成像直观等特点, 成为水工混凝土缺陷检测的主要技术。基于此, 本文以该技术以及三维成像、量化评估为基础, 论述相关的基础内容, 设计相应的检测系统, 确定硬件选择、数据处理和评价算法, 用工程实例证明其可行性与可靠性, 从而达到对缺陷进行精确定位、三维可视化和量化评价的目的, 为结构的运维加固提供技术支持。结果表明, 该方法可以很好地解决检测难题, 准确地识别出缺陷, 并给出评价指标来客观地反映出缺陷的特征, 检测结果可靠且具有工程应用价值。

关键词 超声相控阵; 水工混凝土; 内部缺陷; 三维成像; 量化评价

中图分类号: TV54

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.042

0 引言

水工混凝土结构广泛用于各种水利工程中, 并发挥着重要作用, 它的服役性能直接影响到水利工程的安全以及人民的生命财产安全。由于施工复杂并且经常受到水压、温度等不利因素的影响, 结构内部容易出现隐蔽的缺陷, 如果不能及时得到有效的控制, 就很容易导致事故发生, 因此准确检测和定量评价成为工程安全运维的重要工作。传统的检测技术精度低、成像差, 不能实现三维可视化和定量评价, 不能满足精细化检测的要求。超声相控阵技术依靠相位控制来完成声束扫描, 与三维成像一起可以清楚地展现缺陷, 配合评估算法可以准确计算出缺陷的参数, 弥补传统方法的不足。该技术在工业检测上使用较多, 但是由于混凝土的非均匀性等特性, 在水工领域应用还有一定困难。因此, 本文对超声相控阵三维成像技术以及量化评价方法进行研究, 建立完善的检测系统, 经过工程应用来检验其可行性, 为水工混凝土缺陷检测提供技术参考。

1 相关理论与技术基础

1.1 超声相控阵技术基本原理及特性

超声相控阵技术的核心是用多个阵元换能器发出不同的相位激励信号, 利用超声波干涉叠加的原理,

实现声束的聚焦、偏转和扫描控制, 获得被检测物体内部声学信息。相比传统的超声检测, 具有以下优点: 声束可控、可以定制扫描模式提高检测精度; 检测效率高, 适合大体积的水工混凝土结构检测; 成像清晰, 容易发现缺陷; 适应性强, 能适应复杂的检测环境, 给水工混凝土缺陷精准检测赋予了关键的支持。

1.2 水工混凝土结构内部缺陷类型及检测难点

水工混凝土内部缺陷主要有裂缝、疏松、孔洞、结合面脱空四种, 都会影响到结构的性能。其检测存在明显的困难, 混凝土的非均匀性会造成超声信号的识别产生困难, 结构体积大、形状复杂, 不利于探头的布置和扫描, 而且缺陷声学特征重叠、形态不规则, 很难准确地进行识别和量化描述, 给超声相控阵三维成像技术提出更高的要求。

1.3 三维成像与量化评估核心技术支持

超声相控阵三维成像及量化评价需要四个关键技术: 阵列信号处理来改善信号、提取缺陷信息; 三维数据融合把二维数据合并起来, 创建出缺陷三维可视化的模型; 缺陷识别和特征提取区分缺陷和干扰, 得到缺陷参数; 量化评估理论用科学的模型来评定缺陷的严重程度, 给结构维护提供依据^[1]。

作者简介: 党安华(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。

*通信作者: 赵中亚(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。E-mail: 1107522660@qq.com

2 超声相控阵三维成像检测系统构建

2.1 检测系统硬件选型与集成方案

超声相控阵三维成像检测系统硬件选型和集成,直接影响检测的精度及稳定性,要根据水工混凝土检测需要来确定合理的方案。系统硬件由阵列换能器、多通道超声发射/接收模块、数据采集卡、运动控制模块、计算机终端及辅助设备组成。选择时,阵列换能器要符合检测深度和分辨率的要求,具有良好的抗干扰能力;发射/接收模块需要精确控相、稳定传信;数据采集卡需要有高的采样率和高的精度;运动控制模块需要准确定位、灵活扫查;计算机终端需要满足运算及图形处理的要求。在集成的过程中要重视各个模块之间的兼容性和协同性,改善连接方式减小信号干扰,构造紧凑、稳定、方便的现场检测系统。

2.2 三维成像数据采集与预处理流程

三维成像数据采集及预处理属于精准成像和定量化评价的重要环节,要按照规范的流程来开展工作,并用科学的方法。数据采集要先确定检测区域、合理布置探头,再根据混凝土特性确定超声频率、扫查速度等参数,用运动控制模块驱动换能器进行扫查,同时采集并储存多通道声学信号。由于原始信号中含有环境、设备等噪声,需要做预处理:用滤波器去除干扰、增大弱信号的强度、相位校正保证测量结果准确、对数据进行归一化统一尺度、去掉异常数据以保证可靠,最后给之后的三维成像和定量化评价提供高质量的数据支持。

2.3 定量化评估指标与算法设计

定量化评价指标和算法设计是缺陷评价的中心,需要根据缺陷的特点来建立科学体系、设计高效的算法^[2]。评价指标分为几何参数(长度、深度、体积等)和危害程度指标(扩展趋势、强度衰减等),可直观地反映出缺陷的特点及对结构造成的影响。算法设计分三个步骤,即用模式识别法来识别缺陷、用图像处理法提取出缺陷参数、用加权分析法、模糊综合评价法对缺陷进行定量化,并根据定量结果来分级评定缺陷的严重程度并预测发展趋势,给结构运维加固提供科学依据,又兼顾算法的准确性和适用性。

3 水工混凝土结构检测应用与效果验证

3.1 工程实例选取及检测工况设定

为检验超声相控阵三维成像技术和定量化评价方法在水工混凝土结构内部缺陷检测中是否可行、可靠,选择典型的水工混凝土结构作为工程实例进行检测应用,根据结构的服役特点及检测要求来确定检测工况,

保证检测结果能真实地反映出结构内部缺陷的实际状况^[3]。工程实例选择遵照代表性、典型性原则,选择长期处于复杂服役环境中的、存在潜在缺陷风险的水工混凝土结构,此类结构主要起挡水、输水作用,结构尺寸大,施工工艺复杂,长期受水压、温度变化、干湿交替等不利因素的影响,在内部容易产生各种缺陷,有很好的代表性和体现性。在检测工况设定时,要根据结构实际的服役状况、检测要求及现场环境条件来确定检测的目的、检测区域、检测的内容和检测的标准,合理地设置检测工况参数。确定检测的目的就是准确地发现结构内部缺陷的种类、位置、形状和分布情况,对缺陷进行定量评价,判断缺陷的严重程度以及对结构性能的影响,给结构的运维和加固提供技术依据。检测区域选择结构关键受力部位及容易出现缺陷的地方,如结构的浇筑接缝处、应力集中的地方、厚度较大的地方等,保证检测区域可以涵盖结构的薄弱环节。检测内容主要是内部裂缝、疏松、孔洞、结合面脱空等各种缺陷的检测及定量评价。同时,根据现场环境条件,合理确定检测环境温度、湿度等参数,防止环境因素对检测结果造成影响;根据结构表面情况,对检测区域表面做相应的处理,保证探头同结构表面良好接触,减少信号衰减;合理设置扫查路径、扫查速度、超声波参数等检测工况参数,改进检测流程,提高检测效率和检测精度,保证检测工况的合理性与科学性,为后续检测实操实施及结果验证打下基础。

3.2 三维成像与定量化评估实操实施

工程实例检测时严格按照预设的检测工况、检测流程来开展超声相控阵三维成像及定量化评价实操操作工作,保证检测过程规范有序,检测结果准确可靠^[4]。在实操开始之前,对检测系统进行全面的调试与校准,检查各个硬件模块的工作状况,即阵列换能器、多通道超声发射/接收模块、数据采集卡、运动控制模块等,保证所有模块都能正常工作;对超声参数、相位控制参数、数据采集参数等做校准,改善参数设定,使检测系统满足检测要求。另外,对检测区域表面进行清理,清除表面的灰尘、油污、浮浆等杂物,打磨平整,保证探头与结构表面能紧密接触,减少超声波信号的反射和衰减,提高信号采集的质量。在实操过程中,根据预设的检测区域划分及扫查路线,用运动控制模块控制阵列换能器按预定的扫查顺序进行有规律地扫查,多通道超声发射/接收模块按照事先设定好的超声参数发出超声波信号,超声波信号穿过混凝土结构之后,碰到内部缺陷就会发生反射,反射回来的信号被阵列换能器接收到以后,再传送到数据采集卡上进行采集

并保存。数据采集过程中实时监测采集信号的质量,随时调节扫查参数及探头位置,保证采集到的超声信号清楚、有效,可以正确地反映出结构内部缺陷的情况。数据采集完成后,根据事先所设定好的预处理程序来对收集到的原始数据做滤波、放大、相位校正、数据归一化及异常数据剔除等预处理工作,除去噪声干扰,提取出有用的缺陷信号。之后,用三维成像软件以及数据融合算法来对预处理过的多通道数据进行融合处理,得到结构内部的三维成像模型,可以清楚地显示出来内部缺陷的位置、形状和分布情况。最后用设计出的量化评价算法来对三维成像模型中的缺陷进行识别与特征参数提取,代入到量化评价模型里,对缺陷的严重程度进行分级评价,得到量化评价报告,完成整个检测实操实施过程。实操时严格按照操作规程进行,重视每个操作环节,在保证检测结果准确的同时也不允许任何的操作错误给检测带来不利的影响,保证检测过程的规范性以及检测结果的真实性。

3.3 检测结果可靠性与应用价值分析

检测结果的可靠度是超声相控阵三维成像技术和量化评价方法应用的基础,从应用价值也体现出技术的工程实用性的角度上来说,需要对检测结果的可靠性进行全面验证,对技术的应用价值做深入的分析^[5]。检测结果可靠性验证主要是从一致性验证、稳定性验证和合理性验证这三方面入手:一致性验证就是对比同一检测区域不同的扫查次数、不同的检测位置的检测结果,看缺陷识别的结果以及量化评价参数的一致性,如果一致良好,则说明检测系统重复性好,检测结果稳定可靠;稳定性验证是在相同的检测条件下,对多次检测结果进行比较,考察检测结果的波动情况,如果波动小则说明检测系统的稳定性好,可以长时间稳定运行;合理性验证结合水工混凝土结构的施工过程、服役环境及结构性能特点来分析检测结果中的缺陷类型、位置、形态和分布特征是否符合实际,量化评价结果是否与结构实际服役状态相符,如果符合,则说明检测结果有较高的合理性、可靠性。经过多方面验证可知,超声相控阵三维成像技术可以精确识别出水工混凝土结构内部的各种缺陷,三维成像模型能清楚、直观地表现出现象的空间分布特点,量化评价参数可以客观、准确地体现出来缺陷的严重程度,检测结果有很高的可靠性及重复性,能满足水工混凝土结构内部缺陷精细化检测的要求。技术应用价值分析主要是从工程实践价值、技术创新价值和社会经济效益三个方面入手:在工程实践价值方面,该技术可以给水工混凝土结构的运维、加固提供准确的技术支

持,及时发现隐蔽性的缺陷,防止缺陷继续扩大,降低工程安全事故发生的概率,保证水利工程长期安全稳定运行;在技术创新价值方面,该技术弥补了传统检测技术的不足,实现对水工混凝土结构内部缺陷的三维可视化成像与量化评价,推动水利工程建设无损检测技术的发展;在社会效益方面,该技术检测速度快、精度高,能减少检测费用和维护费用,延长水工混凝土结构的使用寿命,避免由于结构缺陷造成的安全事故,保护人民的生命财产安全,有明显的经济和社会效益以及广泛的应用前景。

4 结束语

通过以水工混凝土结构内部缺陷的超声相控阵三维成像技术及量化评价为研究对象,从相关理论和技术基础、检测系统建立、工程应用与效果验证三个方面展开论述,给水工混凝土缺陷检测提供一种高效准确的技术手段,保证水利工程的安全稳定运行。本文首先介绍了超声相控阵技术原理、水工混凝土内部缺陷类型及检测难点、三维成像与量化评估的技术支持,为后续的研究打下理论基础;接着构建适合的超声相控阵三维成像检测系统,确定硬件选择、数据处理流程和评价指标以及算法;最后通过工程实例来证明该技术的可行性与可靠性,并对它的应用价值进行分析。研究表明,超声相控阵三维成像技术可以很好地解决水工混凝土检测的难题,达到缺陷准确定位、三维可视化和量化评价的目的,检测结果可靠且具有工程实用性,能够为水工混凝土结构的运维加固提供科学的技术支持。

参考文献:

- [1] 王禹迪,杨述,崔庆华.探地雷达法与超声相控阵法水工建筑缺陷检测应用研究[J].中国水能及电气化,2025(12):17-23.
- [2] 高昊,曹恩铭.超声相控阵检测技术的应用与发展[J/OL].机械工程师,1-8[2025-10-17][2026-01-30].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Klkw5nWhgJFd-f4szksqRwn-lbaE2LOX8r65wM28UGFZvUM1mvLjRBH7-WdxlJLE0hOqgs1mEqvoPPiomuWOMQk05wzO7pVeqm6wFnM13hub2NJR01Jk7cLJwlcOCYfUPiQ0uBcfmK5CBAoiG0VQYvc6HCI25eSzBffQ7M7gV_2-UMcuoBT1kw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 王禹迪,杨述,梁梓煜.基于超声横波法的混凝土内部缺陷检测及验证[J].珠江水运,2024(23):94-96.
- [4] 杨君奕.超声雷达综合法检测钢筋混凝土构件内部缺陷研究[J].四川建材,2024,50(08):51-53.
- [5] 徐昆杰,马伟斌,彭旻,等.超声相控阵在隧道衬砌精细化检测中的应用[J].铁道建筑,2024,64(05):13-17.