

水利工程质量检测中超声波检测技术运用研究

刘皓男

江河安澜工程咨询有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17204

[摘要] 水利工程质量检测对保障工程安全意义重大,超声波检测技术是重要手段。本文先介绍超声波基本特性、检测原理、方法及关键设备参数选择。接着阐述在水利工程混凝土结构、金属结构、机械电气系统检测中的应用场景。然后分析设备操作、材料环境、信号处理等因素对检测的影响及优化策略。最后展望技术融合、新型传感器研发、标准化建设等未来发展趋势。

[关键词] 水利工程; 超声波检测技术; 检测应用; 影响因素; 发展趋势

中图分类号: TV523 文献标识码: A

Research on the Application of Ultrasonic Testing Technology in Hydraulic Engineering Quality Inspection

Haonan Liu

Jianghe Anlan Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] Quality inspection in hydraulic engineering is crucial for ensuring project safety, and ultrasonic testing technology serves as an important method. This paper begins by introducing the fundamental characteristics of ultrasonic waves, testing principles, methods, and the selection of key equipment parameters. It then elaborates on the application scenarios of ultrasonic testing in concrete structures, metal structures, and mechanical-electrical systems within hydraulic engineering. Furthermore, the influence of factors such as equipment operation, material environment, and signal processing on testing accuracy is analyzed, along with optimization strategies. Finally, future development trends are discussed, including technology integration, development of new sensors, and standardization efforts.

[Key words] Hydraulic Engineering; Ultrasonic Testing Technology; Testing Applications; Influencing Factors; Development Trends

引言

水利工程关乎国计民生,其质量检测至关重要。传统检测方法存在诸多局限,难以满足现代水利工程高精度、高效率检测需求。超声波检测技术凭借独特优势,在水利工程领域应用日益广泛。该技术能无损检测材料内部缺陷,为工程质量评估提供可靠依据。深入研究超声波检测技术在水利工程中的运用,对保障工程安全、提升工程质量、推动行业发展具有重要意义。

1 超声波检测技术基础

1.1 超声波的基本特性

超声波是频率高于20千赫兹的机械波,按频率分低频、中频与高频三类,适用不同检测场景。传播介质上,超声波能在固体、液体和气体中传播,在固体中传播速度最快、衰减最小,适合长距离检测;在气体中传播速度最慢、衰减剧烈,检测范围受限。超声波传播遵循几何光学规律,遇界面会发生反射、折射、衍射及衰减^[1]。反射现象是检测缺陷的基础,声波从一种介质进入另

一种介质,部分能量返回原介质,分析反射波传播时间与幅度变化,可推断界面位置与性质。折射现象发生在声波斜入射至不同介质界面,传播方向偏转,为斜探头检测提供条件。衍射现象指声波绕过障碍物边缘传播,可检测微小缺陷或复杂结构内部状态。衰减现象指声波传播中能量逐渐减弱,影响检测深度与灵敏度。能量集中性与方向性是超声波检测核心优势。超声波能量高度集中于声束轴线附近,形成窄束状传播,使检测精准定位缺陷。方向性体现在声束扩散角小,能量分布均匀,远距离传播仍能保持较高分辨率,为深层缺陷检测提供支撑。

1.2 检测原理与核心方法

脉冲反射法用单一探头交替发射与接收。探头向被测物发射短脉冲超声波,遇缺陷或底面产生反射波,接收后转换为电信号,经处理显示波形图。分析反射波传播时间、幅度及波形特征,可判断缺陷位置、大小及性质。脉冲透射法采用双探头对置布置,一发一收协同工作。发射探头发射连续超声波,接收探头接

收透射波。内部存在缺陷时, 声波传播路径改变, 透射波能量减弱, 通过监测能量变化评估内部质量。共振法利用材料共振频率与厚度关系。探头发射连续超声波, 匹配材料固有频率时引发共振, 接收信号幅度达峰值。测量共振频率结合已知声速, 可计算材料厚度或推断内部缺陷。衍射时差法用多探头对称布置, 利用缺陷边缘衍射波定位。发射探头斜入射超声波, 遇缺陷边缘产生衍射波, 接收探头接收后分析传播时间差, 精确计算缺陷位置及高度。

1.3 关键设备与参数选择

换能器是检测核心部件, 分直探头、斜探头与双晶探头。直探头声束垂直入射, 适合表面及近表面检测; 斜探头声束倾斜入射, 可检测倾斜缺陷; 双晶探头采用双晶片结构, 抑制近场区干扰, 提升灵敏度。频率选择需平衡穿透力与分辨率。高频超声波方向性好、分辨率高, 但穿透力弱, 适合薄层材料检测; 低频超声波穿透力强, 但分辨率低, 适合大厚度材料检测。实际应用需综合被测物材质、厚度及缺陷类型确定。耦合剂排除探头与被测物表面空气间隙, 确保声波高效传播。甘油粘度适中, 耦合效果好但易污染; 水玻璃成本低但易残留; 合成机油润滑性好但可能腐蚀材料。选择需考虑检测环境、被测物材质及精度要求。

2 超声波检测技术在水利工程中的核心应用场景

2.1 混凝土结构检测

在水利工程中, 混凝土结构质量关乎工程安全与耐久性, 超声波检测技术为混凝土性能评估提供有效手段。强度检测方面, 超声波在混凝土中的传播速度与材料强度有明确相关性。通过大量试验建立波速与强度的数学模型, 检测时测量波速代入模型推算强度, 为工程验收与长期监测提供数据支撑。裂缝检测是重点。针对浅层裂缝, 透射法能精准定位。双探头对置布置, 一发一收, 声波传播路径被裂缝阻断时透射波能量显著衰减, 分析能量变化可确定裂缝位置与走向。对于深层裂缝, 平行反射法更具优势。探头沿裂缝走向平行移动, 声波遇裂缝界面产生反射波, 根据反射波传播时间与幅度变化, 可分析裂缝深度与内部形态。密实度检测反映混凝土内部均匀性。超声波在密实混凝土中传播时声幅衰减减小; 若内部有孔洞、疏松等缺陷, 声幅衰减加剧。通过测量声幅衰减程度, 可评估混凝土密实度, 为结构加固与维修提供依据。

2.2 金属结构检测

水利工程中的金属结构, 如钢闸门、压力钢管等, 长期处于水环境中, 易出现焊缝缺陷、壁厚减薄及腐蚀等问题, 超声波检测技术能有效识别这些隐患。钢焊缝质量检测中, 超声波对气孔、裂纹等缺陷敏感度高。探头沿焊缝移动, 声波遇缺陷时产生反射波, 接收探头接收信号后, 通过分析反射波特征, 可识别缺陷类型、位置及大小, 评估焊缝完整性, 确保金属结构承载能力。钢管壁厚测量是保障管道安全运行的关键^[2]。反射法结合已知材料声速, 能快速计算钢管壁厚变化。探头向钢管发射超声波, 声波遇内壁产生反射波, 测量发射波与反射波传播时间差, 结合声速即可计算壁厚。定期检测可及时发现壁厚减薄部位, 预防管

道破裂事故。金属腐蚀检测方面, 材料劣化会导致声速变化。腐蚀区域材质疏松, 声速降低, 通过测量声速分布, 可判断金属腐蚀程度与范围, 为防腐处理与结构更换提供决策依据。

2.3 机械电气系统检测

机械电气系统的稳定运行是水利工程正常运转的保障, 超声波检测技术在流量测量与渗漏检测中发挥重要作用。泵站、水电站流量与流速测量中, 非接触式超声流量计应用广泛。该设备通过发射超声波束, 测量声波在流体中顺流与逆流传播时间差, 结合流体截面面积, 计算流量与流速。非接触式测量避免了对流体的干扰, 测量精度高, 适用于大口径管道与复杂流场环境。渠道与管道渗漏检测是水资源高效利用的关键。渗漏会导致声波传播特性改变, 在渠道或管道沿线布置超声波传感器, 声波遇渗漏点时传播路径改变, 产生异常反射或散射信号。通过分析信号特征, 可定位渗漏点位置, 为及时修复提供精准信息, 减少水资源浪费。

3 超声波检测技术的影响因素与优化策略

3.1 设备与操作因素

扫查速度控制是保障检测完整性的关键。若扫查速度过快, 声束无法充分覆盖检测区域, 易导致缺陷漏检; 扫查速度过慢则降低检测效率, 增加时间成本。实际操作中需根据被测物尺寸、缺陷类型及检测精度要求, 设定合理的扫查速度范围, 确保声束与被测物充分接触, 捕捉所有潜在缺陷信号。探头移动方式直接影响检测效果。垂直入射适用于表面平整、结构简单的被测物, 声束垂直进入材料内部, 反射波传播路径单一, 便于缺陷定位与定量分析。斜入射则针对倾斜缺陷或复杂结构, 声束倾斜进入材料, 通过调整入射角度可优化检测灵敏度, 扩大检测范围。选择移动方式时需综合被测物结构特征与缺陷类型, 确保声束能有效传播至缺陷部位。

3.2 材料与环境因素

混凝土表面平整度对检测信号质量影响显著。表面凹凸不平会导致耦合层厚度不均, 声波传播过程中能量损失加剧, 信号幅度衰减, 甚至产生虚假反射波, 干扰缺陷判断。检测前需对混凝土表面进行打磨处理, 去除浮浆、油污等杂质, 确保表面平整光滑, 减少耦合层厚度变化对信号的影响。温度与湿度是影响声速与衰减的重要环境因素。温度升高会导致材料内部粒子振动加剧, 声速加快; 湿度增加会改变材料含水率, 影响声波传播特性。检测时需记录环境温度与湿度, 通过建立声速-温度、衰减-湿度修正模型, 对检测数据进行补偿处理, 消除环境因素干扰, 提高检测精度。介质均匀性对复杂材料检测提出挑战。钢筋混凝土中钢筋与混凝土声阻抗差异大, 声波遇钢筋界面产生强反射波, 干扰缺陷信号识别。为抑制信号干扰, 可采用多探头组合检测技术, 通过调整探头位置与角度, 优化声束传播路径, 避开钢筋干扰区域; 或采用信号处理算法, 对反射波进行滤波分离, 提取缺陷特征信号。

3.3 信号处理与分析技术

噪声滤波是提高信噪比的核心手段。数字信号处理算法通

过设定阈值或频域滤波,有效抑制环境噪声与设备噪声,保留缺陷特征信号。自适应滤波算法能根据噪声特性自动调整滤波参数,实现动态噪声抑制,提升信号清晰度。缺陷定量分析依赖反射波传播时间计算模型。声波遇缺陷界面产生反射波,测量发射波与反射波传播时间差,结合已知材料声速,可计算缺陷深度与尺寸。建立精确计算模型需考虑声束扩散、材料衰减等因素,通过大量试验修正模型参数,提高缺陷定量精度^[3]。多参数综合评估能提升缺陷诊断准确性。声速反映材料弹性模量,声幅体现材料密实度,频率变化关联材料内部结构。结合声速、声幅、频率等多参数指标,构建联合诊断模型,通过数据融合分析,可全面评估材料质量状态,准确识别缺陷类型与严重程度,为工程维护提供科学依据。

4 超声波检测技术的未来发展趋势

4.1 技术融合与创新

超声波检测技术正加速与前沿科技融合,推动检测能力跃升。与人工智能结合成为重要方向,深度学习算法通过海量缺陷样本训练,能自动提取声波信号中的特征模式,辅助完成缺陷识别与分类任务。相较于传统人工判读,人工智能可大幅缩短分析时间,降低误判率,尤其适用于复杂结构或微小缺陷的精准检测。与5G技术的联动为远程检测开辟新路径。5G网络高速率、低时延的特性,支持超声检测设备实时上传数据至云端,专家可远程操控设备、分析信号,实现跨地域协同检测。这一模式突破了地理限制,使偏远地区水利工程能及时获得专业检测服务,提升整体运维效率。多模态检测系统的开发是技术融合的另一突破。超声-红外-激光复合检测系统整合多种物理场信息,超声提供内部结构数据,红外反映表面温度分布,激光测量三维形貌,通过数据融合分析,可全面评估材料质量状态。这种综合检测手段能识别单一技术难以发现的复合型缺陷,为水利工程安全提供更可靠保障。

4.2 新型传感器与设备研发

新型传感器的研发正推动检测技术向更精准、更灵活方向发展。柔性超声探头采用柔性基底材料,可贴合复杂曲面结构,如弧形闸门、异形管道等,实现无盲区检测。其自适应形变能力消除了传统刚性探头与被测物间的间隙,提升了信号耦合效率与检测精度。微型化设备的发展使超声检测更便捷高效。便携

式超声检测仪集成高性能处理器与小型化换能器,体积小、操作简单,可现场快速完成检测任务。这类设备尤其适用于应急抢修或临时检测场景,为水利工程实时监测提供有力支持。量子超声传感器的探索为检测灵敏度与分辨率提升带来新可能。量子效应赋予传感器更高的能量感知能力,能捕捉更微弱的声波信号变化,甚至可检测纳米级缺陷。尽管目前仍处于研发阶段,但量子超声传感器有望成为未来高精度检测的核心工具。

4.3 标准化与规范化建设

标准化建设是超声检测技术广泛应用的基石。检测流程标准化涵盖从采样点布置、检测参数设置到结果分析的全流程规范,确保不同检测人员、不同设备获得的结果具有可比性,为工程质量评估提供统一依据。数据库构建是标准化建设的重要支撑。通过收集水利工程典型缺陷的超声信号特征,建立缺陷特征库与对比模型,可为缺陷识别提供参考标准。随着数据库不断完善,超声检测的智能化水平将进一步提升,实现缺陷的快速匹配与精准诊断。行业协作机制的完善能加速技术推广应用。水利行业各主体通过共享检测数据、联合研发技术、制定行业标准等方式,形成协同发展格局。这种协作模式可整合资源、突破技术瓶颈,推动超声检测技术在水利工程领域的深度普及,为行业高质量发展注入新动能。

5 结束语

超声波检测技术在水利工程领域展现出巨大应用价值与发展潜力。凭借丰富检测方法与灵活设备选择,有效应对多种检测场景。尽管存在设备操作、材料环境等因素影响,但通过优化策略可提升检测精度。未来,技术融合创新、新型传感器研发与标准化建设将推动其进一步发展。水利行业应积极应用该技术,保障工程安全,推动行业高质量发展。

[参考文献]

- [1]吕永强.水利工程质量检测中超声波检测技术运用研究[J].水上安全,2024(17):21-23.
- [2]胡春涛.超声波在水利工程质量检测中的应用[J].水科学与工程技术,2022(1):82-85.
- [3]蒋网所.探析超声法在水利工程质量检测中的应用[J].居业,2021(02):7-8.