

水工建筑物混凝土无损检测技术应用与精度提升研究

张小宇

广东丰源建设工程检测有限公司，广东 河源 517200

DOI:10.61369/ADA.2025020033

摘要：水工建筑物混凝土无损检测技术对保障工程质量与安全意义重大。本文介绍超声波、冲击回波等多种检测方法原理及应用场景，分析各技术在水工环境适用性，阐述在大坝等不同水工建筑的应用案例。针对水下结构和大体积混凝土检测难点提出解决方法，并探讨数据融合等多种提升检测精度的技术与措施。

关键词：水工建筑物；混凝土无损检测；检测精度

Research on the Application and Accuracy Improvement of Non destructive Testing Technology for Concrete in Hydraulic Structures

Zhang Xiaoyu

Guangdong Fengyuan Construction Engineering Testing Co., Ltd., Heyuan, Guangdong 517200

Abstract : The non-destructive testing technology for concrete in hydraulic structures is of great significance in ensuring engineering quality and safety. This article introduces the principles and application scenarios of various detection methods such as ultrasound and impact echo, analyzes the applicability of each technology in hydraulic environments, and elaborates on application cases in different hydraulic structures such as dams. Propose solutions to the difficulties in detecting underwater structures and large volume concrete, and explore various technologies and measures such as data fusion to improve detection accuracy.

Keywords : hydraulic structures; non destructive testing of concrete; detection accuracy

引言

《水利工程质量检测管理规定》于2008年颁布，强调对水利工程质量检测活动实施监督管理，保障工程质量。在此政策背景下，水工建筑物混凝土无损检测技术意义重大。该技术虽已取得成果，但仍需提升精度。文中阐述多种无损检测技术在水工建筑中的应用、面临难点及解决措施，还涉及数据融合、智能算法等技术及相关体系构建。这些探讨对规范检测流程、推进智能化设备研发、完善质量管理体系，实现无损检测技术与人工智能和物联网深度融合，提升检测精度，保障水利工程质量与安全具有重要意义。

一、水工建筑物混凝土无损检测技术概述

(一) 常用无损检测技术类型

在水工建筑物混凝土无损检测中，超声波法应用广泛。其原理是通过超声波在混凝土中的传播速度、波幅和频率等声学参数变化，来判断混凝土内部缺陷及强度等情况。适用于检测混凝土内部空洞、裂缝深度及分布等。冲击回波法利用机械冲击在混凝土表面产生应力波，当应力波遇到内部缺陷或边界时会反射形成回波，依据回波信号分析缺陷，常用于检测混凝土厚度、内部缺陷及脱空等。红外热像法基于混凝土表面温度差异，因内部缺陷影响热量传导，使表面温度分布异常，通过红外热像仪获取温度场图像来识别缺陷，适用于大面积混凝土表面缺陷及内部缺陷检测^[1]。

(二) 水工环境下的技术适用性分析

在水工环境下，需着重考量无损检测技术的适用性。水利工

程工况复杂，对各项无损检测技术的检测精度、抗干扰能力及操作限制有不同要求。例如，超声法在检测混凝土内部缺陷时，虽对微小缺陷敏感，但水工环境中的湿度、水流等因素易干扰超声传播，影响检测精度^[2]。而回弹法操作简便，然而水工混凝土表面可能因长期水蚀、冻融等出现损伤，导致回弹值与实际强度关系偏离，降低检测精度。探地雷达法对浅层缺陷检测效果好，但水工结构中的金属预埋件等会产生强反射干扰信号。因此，需综合评估各项技术在水工环境特定工况下的表现，根据实际需求选择合适技术，以确保检测结果的准确性与可靠性。

二、水利工程无损检测技术应用实践

(一) 典型水工建筑应用案例

在大坝检测中，运用超声回弹综合法对大坝混凝土强度进行

检测。依据相关标准布置测点，采集超声声速与回弹值数据，经数据分析处理，准确评估大坝混凝土强度状况，及时发现强度异常区域，为大坝维护加固提供依据^[3]。对于输水渠道，采用地质雷达技术对衬砌混凝土内部缺陷进行探测。通过扫描获取渠道衬砌结构的雷达图像，清晰显示出空洞、脱空等缺陷位置与规模，以便针对性地制定修复方案。在防洪堤检测时，利用探地雷达结合钻孔取芯法，先利用探地雷达进行大范围快速普查，确定可疑区域，再通过钻孔取芯进行验证与精确分析，全面掌握防洪堤混凝土质量，保障其防洪安全。这些案例充分展示了无损检测技术在不同水工建筑中的有效应用。

（二）现场检测难点与解决方案

在水利工程无损检测现场，水下结构检测与大体积混凝土内部缺陷识别存在诸多难点。水下结构检测时，由于水的干扰，信号传输会受到影响，导致检测数据不准确^[4]。并且水下环境复杂，检测设备的稳定性和操作性面临挑战。对于大体积混凝土，其内部缺陷分布复杂，传统无损检测技术难以精确分辨缺陷的位置、大小和性质。针对水下结构检测，可采用防水性能好、抗干扰能力强的检测设备，并优化信号处理算法，提高数据的准确性。对于大体积混凝土内部缺陷识别，结合多种无损检测技术，如超声法与雷达法联用，相互补充信息，同时利用先进的数据分析模型，提高对缺陷特征的提取与分析能力，从而更精准地识别内部缺陷。

三、检测精度提升关键技术研究

（一）信号处理算法优化

1. 数据融合处理技术

数据融合处理技术旨在研究多源检测数据协同分析方法，建立缺陷解译的综合判定模型。水工建筑物混凝土检测中，会获取如超声、雷达等多源数据，这些数据从不同角度反映混凝土状况，但单一数据难以全面精准解译缺陷。通过数据融合处理技术，将多种检测数据进行协同分析，挖掘数据间潜在联系与互补信息^[5]。利用先进的算法对多源数据进行特征提取与融合，构建能够综合判定混凝土缺陷的模型。该模型可整合不同检测手段的优势，更准确地识别缺陷类型、位置与程度，从而有效提升无损检测精度，为水工建筑物混凝土结构的健康评估提供可靠依据。

2. 智能算法应用

智能算法应用在提升水工建筑物混凝土无损检测精度方面发挥着关键作用。构建基于深度学习的特征提取框架，能够有效应对混凝土无损检测中复杂信号的处理难题。深度学习算法具有强大的自学习能力，可自动从大量检测数据中挖掘出隐含的特征信息，实现复杂信号的有效分离与解析^[6]。通过对这些特征的精准提取与分析，可更为准确地识别混凝土内部的缺陷、裂缝等状况。例如卷积神经网络（CNN），能在处理检测信号图像时，利用卷积层和池化层，自动提取图像中的关键特征，从而大幅提升对混凝土内部状况判断的准确性，为水工建筑物混凝土无损检测精度的提升提供有力技术支撑。

（二）检测设备升级方案

1. 传感器阵列优化设计

传感器阵列优化设计旨在提升水工建筑物混凝土无损检测精度。优化设计时要综合考虑多个因素。一方面，合理规划传感器的布局，依据水工建筑物的结构特点与检测需求，让传感器均匀且全面地覆盖检测区域，确保各个部位都能被有效检测，避免检测盲区^[7]。另一方面，选择性能优越的传感器，其灵敏度、分辨率等参数直接影响检测结果的精度，高灵敏度的传感器能捕捉到混凝土内部细微的变化，高分辨率的传感器可更精准地定位缺陷。此外，优化传感器的数量，数量过少可能无法获取足够信息，过多则会增加成本与数据处理难度，需权衡找到最优数量，通过这些优化措施，提升传感器阵列整体性能，进而提高水工建筑物混凝土无损检测精度。

2. 环境补偿系统研发

在水工建筑物混凝土无损检测中，恶劣环境对检测结果干扰显著。为此，需研制温度-湿度耦合补偿模块以优化环境补偿系统。温度与湿度变化会影响混凝土物理特性，干扰检测信号，降低检测精度^[8]。该模块能实时监测检测环境的温度与湿度数据，借助先进算法深入分析温湿度变化对检测信号的影响规律。通过建立精确的温湿度-检测信号修正模型，将实时监测数据代入模型，对检测数据进行动态补偿与修正，有效降低温湿度变化带来的干扰，使检测结果更接近混凝土真实状态，大幅提升检测精度，为水工建筑物混凝土无损检测提供更可靠的数据支撑。

四、工程检测管理体系构建

（一）标准化检测流程设计

1. 检测参数标准化

对于水工建筑物混凝土无损检测，检测参数标准化至关重要。需针对不同水工结构特点，确定各类混凝土检测参数的标准值与允许误差范围。比如，超声法检测混凝土内部缺陷时，波速、波幅等参数要明确标准范围，以准确判断缺陷状况；回弹法测强，需依据水工混凝土特性规定回弹值与强度换算关系。同时，对雷达法、探地雷达法等检测钢筋分布、混凝土厚度等参数也应制定统一标准。这些标准的确立要充分考虑水工建筑物的使用环境、设计要求等因素。通过统一规范检测参数，可有效避免不同检测人员或机构因参数理解差异导致的检测结果偏差，提高检测精度与结果的可靠性，从而更好地保障水工建筑物的质量与安全^[9]。

2. 质量控制体系

建立质量控制体系，需构建全链条质量保障机制，涵盖过程监督与数据复核。在过程监督方面，对检测的各个环节，从检测准备、现场操作到数据采集，均进行严格把控。详细制定各环节的操作规范，确保检测人员按标准执行，避免因操作不当影响检测结果。比如在混凝土回弹检测时，要规定回弹仪的使用方法、测点布置等细节。数据复核层面，设置专门的复核岗位，对采集的数据进行二次审核，检查数据的准确性、完整性。运用统计分

析等手段，对比同类数据，查看是否存在异常值。对于异常数据及时追溯源头，重新检测。通过这样的质量控制体系，保障水工建筑物混凝土无损检测的高精度，为工程质量评估提供可靠依据^[10]。

（二）检测人员能力提升

1.专业技能培训体系

构建专业技能培训体系，应打造一套包含设备操作、数据分析、报告撰写的阶梯式培训方案。在设备操作培训方面，针对水工建筑物混凝土无损检测的各类设备，如超声检测仪、雷达探测仪等，开展实操演练，让检测人员熟练掌握设备特性、参数设置及正确操作方法，以保障检测数据的准确性。在数据分析培训环节，着重讲解针对混凝土无损检测数据的解读与分析技巧，使检测人员能够透过数据洞察混凝土内部结构状况，识别潜在缺陷。对于报告撰写培训，规范报告格式，强调内容应准确反映检测结果与分析结论，确保报告的专业性与严谨性。通过这种阶梯式培训方案，全面提升检测人员的专业技能。

2.资质认证制度

为提升水工建筑物混凝土无损检测技术应用水平，需制定水利行业无损检测工程师认证标准及继续教育机制。认证标准应涵盖理论知识与实践技能，理论方面包括混凝土结构原理、无损检测技术原理及水工建筑物特点等知识；实践技能上，对诸如超声、回弹等各类无损检测操作规范与流程进行考核，确保检测人员能精准操作设备并获取有效数据。同时，建立继续教育机制也十分关键。随着技术发展，新的无损检测方法与设备不断涌现，通过定期组织培训，让检测人员及时掌握新技术、新规范，更新知识体系，始终保持专业素养与检测能力的与时俱进，进而提升水工建筑物混凝土无损检测精度。

（三）检测数据管理系统

1.BIM技术集成应用

在水工建筑物混凝土无损检测中，BIM技术集成应用重点在于研究检测数据与BIM模型的动态关联方法，实现可视化数据分析。借助BIM技术强大的三维建模能力，构建与实际水工建筑物

一致的BIM模型，将混凝土无损检测所获取的数据，如超声声速、回弹值等，通过特定算法和接口，动态关联至BIM模型的相应位置。如此，检测数据不再孤立存在，而是与建筑物的空间位置紧密结合。基于此，能实现可视化数据分析，以直观图形、图表等形式展示检测数据分布规律，例如直观呈现混凝土强度薄弱区域。这不仅方便检测人员对数据进行深度分析，快速定位问题区域，还为后续制定针对性的修复和加固方案提供有力支持，大大提升水工建筑物混凝土无损检测的精度与效率。

2.云端共享平台构建

构建云端共享平台，旨在实现水工建筑物混凝土无损检测数据的高效共享与协同。该平台具备强大的多项目数据存储功能，能将不同水工项目的检测数据有序整合，确保数据的完整性与安全性。同时，平台搭载先进的数据分析模块，可对存储的数据进行深度挖掘，例如分析不同区域混凝土的性能变化趋势，为后续检测与维护提供有力依据。此外，还设有专家会诊板块，借助网络的便捷性，邀请各地行业专家对复杂检测问题进行远程会诊。专家们可通过平台实时查看检测数据与现场情况，共同研讨并给出科学合理的解决方案，有效提升检测精度与工程质量，推动水工建筑物混凝土无损检测技术的广泛应用。

五、总结

综上，水工建筑物混凝土无损检测技术在保障工程质量与安全方面意义重大。目前技术应用已取得一定成果，但仍存在精度提升空间。建立行业标准，能规范检测流程与技术指标，确保检测结果的一致性与可靠性。推进智能化检测设备研发，可提升检测效率与自动化水平。完善全生命周期质量管理体系，从设计、施工到运行阶段全面把控，为技术应用提供坚实保障。未来，人工智能与物联网技术深度融合是重要发展方向，通过实时监测与数据分析，实现对水工建筑物混凝土状态的精准评估，推动无损检测技术迈向新高度，更好地服务水利工程建设与运维。

参考文献

- [1] 张涛.水工混凝土结构无损检测方法的比对与分析 [D].华北水利水电大学, 2022.
- [2] 杜雨晨.基于Autoclam法对混凝土抗渗性无损检测技术应用研究 [D].沈阳建筑大学, 2021.
- [3] 李斯拓.基于小排列多道冲击回波混凝土结构无损检测技术的研究 [D].重庆交通大学, 2021.
- [4] 余鸿鸣.激光测距机性能检测技术研究 [D].电子科技大学, 2023.
- [5] 茹袆杰.钢纤维混凝土纤维分布无损检测与受拉性能研究 [D].华北水利水电大学, 2023.
- [6] 张秀霞.水工建筑物混凝土结构施工技术难点 [J].中国高新科技, 2022(15):111-113.
- [7] 李珍, 冯青, 韩炜, 等.水工建筑物混凝土新型防护材料研究与应用 [J].长江科学院院报, 2021, 38(10):140-147.
- [8] 夏宏达.小型水工建筑物地基处理技术研究与应用 [J].水上安全, 2023.
- [9] 张震.基于改进ROV技术的水工建筑物水下检测应用 [J].自动化与仪表, 2021, 36(9):40-44.
- [10] 顾兴宇, 赵龙, 张健, 等.水工建筑物混凝土缺陷处理施工技术 [J].云南水力发电, 2022(005):038.