

混凝土结构无损检测技术应用及精度优化研究

余卓

武汉中和工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ETQM.2026070039

摘 要：为解决当前混凝土无损检测存在的精度不足、误检漏检率高、通用适配性差等行业痛点，本文系统梳理回弹法、超声波法、冲击回波法、电磁感应法、红外热成像法五类主流无损检测技术的工作原理与工程适配场景。从材料内部特性、外部检测环境、仪器设备与人工操作、数据处理与推演模型四个维度，深度剖析影响无损检测精度的核心因素，明确混凝土非均质结构、现场复杂工况、操作不规范、传统经验模型局限性是检测误差的主要来源。在此基础上，从硬件操作标准化、信号降噪与特征提取、多源检测数据融合、人工智能模型构建四个层面，提出全方位的精度优化策略。研究可为混凝土结构无损检测的提质增效、技术革新及工程标准化应用提供理论参考与技术支持，对保障建筑工程结构安全、延长结构服役寿命具有重要实践意义。

关 键 词：混凝土结构；无损检测；精度影响因素；数据融合

Research on the Application and Accuracy Optimization of Non-Destructive Testing Techniques for Concrete Structures

Yu Zhuo

Wuhan Zhonghe Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract： To address industry pain points in current concrete non-destructive testing, such as insufficient accuracy, high rates of false positives/negatives, and poor universal adaptability, this paper systematically reviews the working principles and engineering application scenarios of five mainstream non-destructive testing techniques: rebound method, ultrasonic method, impact-echo method, electromagnetic induction method, and infrared thermal imaging method. It delves into the core factors affecting non-destructive testing accuracy from four dimensions: internal material properties, external testing environments, instrumentation and manual operations, and data processing and inference models. The study identifies the heterogeneous structure of concrete, complex on-site conditions, non-standardized operations, and limitations of traditional empirical models as the primary sources of testing errors. Building on this analysis, comprehensive accuracy optimization strategies are proposed across four levels: standardization of hardware operations, signal denoising and feature extraction, multi-source data fusion, and artificial intelligence model development. The research provides theoretical references and technical support for enhancing the quality and efficiency of non-destructive testing for concrete structures, driving technological innovation, and standardizing engineering applications. It holds significant practical importance for ensuring the structural safety of construction projects and extending the service life of structures.

Keywords： concrete structures; non-destructive testing; factors affecting accuracy; data fusion

引言

无损检测技术凭借无损伤、高效率、可原位检测、可重复监测的核心优势，彻底弥补了传统检测技术的短板，成为混凝土结构质量检测的主流技术。基于此，本文聚焦混凝土结构无损检测技术，系统阐述各类主流检测技术的原理与工程应用场景，全面剖析检测精度的各类影响因素，针对性提出多维度精度优化策略，融合数字化技术、多源数据融合技术与人工智能算法构建新型无损检测体系，旨在解决传统检测技术的精度短板，提升混凝土结构检测的精准度与全面性，为工程质量管控、结构安全评估、运维加固提供科学的技术支撑，推动混凝土无损检测技术向智能化、精准化、标准化方向发展。

一、混凝土无损检测技术原理及应用分析

（一）混凝土无损检测技术分类与原理

混凝土结构具有稳定性高、承载力强的结构优势，因而被广泛使用在各地的建筑工程项目中，为了确保混凝土结构的性能质量符合预期目标、达到施工规范的标准，为了减少不同单位之间的责任纠纷，需要对混凝土结构进行检测，同时避免检测过程中破坏原有的结构，避免降低混凝土结构各项性能^[1]。混凝土无损检测技术依托混凝土声学、力学、电磁学等物理特性，借助专业仪器采集结构信号，结合分析模型，判定混凝土强度、内部缺陷、钢筋状态等参数，工程常用技术分为五类^[2]。回弹法基于混凝土表面硬度与抗压强度的关联性，依托弹性碰撞原理，结合碳化深度修正推算表层强度，设备便携、操作简便，适用于强度普查。超声波法依靠声波传播特性，通过声波参数变化，精准检测混凝土内部空洞、裂缝等缺陷，是内部质量检测核心技术^[3]。冲击回波法通过低频应力波反射信号，测算结构厚度、定位内部缺陷，适配厚大结构及隐蔽部位检测。电磁感应法利用电磁场变化，可检测钢筋数量、间距、保护层厚度及锈蚀程度。红外热成像法基于热辐射差异，通过表面温度场筛查空鼓、渗漏等缺陷，支持大面积非接触式检测。

（二）典型无损检测技术的工程应用场景

建筑、交通、水利等工程常用无损检测技术特性与适配场景差异显著，可按需择优选用^[4]。回弹法设备轻便、检测高效、无死角，适合梁、板、柱等常规现浇混凝土构件表层强度检测，多用于工程验收、结构强度复核，但仅能检测表层，无法排查内部缺陷。超声波检测法适配混凝土内部精细化检测，可排查空洞、深层裂缝等缺陷，适用于大坝、隧道等厚大重要结构，与回弹法结合的综合法，可大幅提升混凝土强度检测精度^[5]。冲击回波法可解决厚大、隐蔽混凝土结构检测难题，规避超声波信号衰减问题，精准检测深层病害与结构厚度。电磁感应法为钢筋专用检测技术，可核查钢筋保护层、间距及锈蚀损伤情况，为结构验算与加固提供数据。红外热成像法支持非接触式大面积筛查，适配高空、难作业场景，可快速锁定外墙、路面、隧道等结构隐蔽缺陷区域。

二、无损检测精度影响因素深度剖析

（一）材料内部因素影响

混凝土自身材料特性与内部结构状态，是决定其无损检测精度的核心内因，直接把控各类检测信号的传播规律与响应特征^[6]。作为由水泥、砂石、骨料等构成的非均质多孔复合材料，混凝土内部随机分布着大量微气孔、界面缝隙等缺陷，会对声波、电磁波等检测信号造成散射、衰减与折射干扰，引发信号失真和检测误差。骨料特性对检测精度影响突出，其粒径、硬度、分布均匀度会改变应力波传播速度，大粒径、高硬度及密集分布的骨料，易造成检测参数偏移，导致强度推算偏差、缺陷误判^[7]。同时，混凝土水胶比、密实度会影响信号衰减速度，水胶

比偏高、密实度较差的混凝土，检测数据离散性更强。此外，结构服役产生的碳化、老化问题会改变表层物理特性，加大回弹检测偏差；内部原生微缺陷易掩盖真实病害，造成漏检误检，且密集钢筋会阻挡信号、干扰电磁场，进一步导致检测数据失真。

（二）外部环境因素影响

工程检测现场温湿度、风力、光照、振动等外部环境，是无损检测系统误差的主要外因，会不同程度干扰检测精度^[8]。其中温湿度影响范围最广。温度波动会改变混凝土弹性模量、导热及声波传播速率，低温提升构件刚度、加快信号传输，高温易使材质软化、加剧信号损耗，直接偏差回弹与声波检测数据。潮湿、淋雨工况会让混凝土表层浸水，改变表面硬度与声学状态，致使回弹数值偏低、超声波信号不稳，还会扰乱红外热成像温度场，误生成缺陷影像。强光易造成构件表面局部升温，破坏热成像测温均匀性，引发缺陷误判；大风加速表面散热，造成温度分布失衡，降低检测准确度。现场机械运转、车辆及作业产生的振动，会干扰冲击回波、超声波信号采集，滋生杂讯、丢失有效数据。雨雪沙尘还会污染检测接触面、遮挡探测设备，轻则数据失真，重则检测工作无法推进。

（三）检测操作与仪器因素影响

仪器性能与操作规范是工程检测精度的核心影响因素，也是检测误差的主要成因。设备方面，仪器校准情况、探头工况、精度等级直接左右数据准确度，各类无损检测设备必须按期校准。回弹仪力度偏差、超声探头灵敏度下降、电磁设备磁场偏移、红外仪器温控失效，都会形成系统固定误差，致使整体数据偏离真实数值^[9]。而探头损耗、线路老化、供电不稳等问题，还会造成信号采集波动、数据异动，加大检测数据离散程度。人员操作层面，专业能力与作业规范度对检测结果影响显著。回弹检测的击打角度、速率、点位排布及构件表面处理，都会改变检测数值；超声检测耦合剂涂抹不均、探头贴合不到位、点位错位，易引发声波损耗与计时偏差；冲击回波检测敲击力度、频次、位置不一，会造成回波信号特征悬殊。作业人员若不熟检测标准与工况要求，随意选取测点、遗漏参数修正，会进一步加剧误差，削弱检测结果可信度。

（四）数据处理与模型因素影响

数据处理模式与推演模型精度，是无损检测结果精准度的核心收尾要素，也是现阶段混凝土无损检测提质的主要制约点。传统数据处理手段偏粗放，普遍依靠均值核算、线性及经验修正，难以筛除环境、操作与设备产生的异常数据，干扰数据混入运算流程，致使检测数值波动偏大、准确度偏低。现场原始检测信号蕴藏诸多细节特征，人工判别与基础统计方式难以挖掘有效信息，信号资源利用率偏低。现有推演模型适配性与拟合效果欠佳，工程常用强度推算、缺陷判定公式均为标准工况下拟合的经验模型，无法贴合不同地域、配比、养护时长及服役年限的混凝土实际性状^[10]。面对特种、老旧、大体积混凝土结构时，通用模型测算偏差显著。且单一模型仅能调取单项检测数据，不能融合多维度检测信息，抗干扰性能薄弱，难以精准识别细微及隐蔽病害，漏检、误检情况频发。

三、无损检测精度优化策略与方法

（一）硬件与操作层面的优化

硬件设备校准升级与检测操作标准化，是提升无损检测精度的核心基础，可有效消除设备系统误差和人工操作误差，从源头控制检测偏差。硬件优化上，需建立设备定期校准与运维制度，所有检测仪器进场前及检测周期内，须完成专项校准，校验回弹仪、超声波探头、红外热像仪等设备核心性能，确保符合规范。及时更换磨损、老化配件，定期维护传感器，同时升级高精度、抗干扰检测设备，配套环境监测、定位辅助等专用装置，适配复杂工程工况。操作层面需落实标准化作业，消除人工操作随意性。检测前精细化处理混凝土检测表面，清理杂质并打磨平整，保障仪器贴合度。严格规范测点布置，把控测点间距与检测范围，统一回弹角度、耦合剂厚度、敲击力度等操作标准。此外，需强化人员专业培训，熟练掌握工况适配与误差修正技巧，针对特殊工况制定专项检测方案，提前做好参数修正，最大限度降低人工误差。

（二）信号处理与特征提取优化

针对传统检测信号噪声偏高、有效特征提取匮乏的短板，依托数字化信号处理技术优化信号品质、精准抓取有效特征，显著提高检测数据可靠度与精度。运用信号降噪技术，针对超声波、冲击回波等原始信号的环境、设备及振动干扰噪声，采用小波降噪、傅里叶变换降噪与自适应滤波算法，滤除杂讯并留存真实结构响应信号，改善信号紊乱、特征模糊弊病。相较常规滤波，小波降噪可同步解析时频域信息，留存缺陷细微信号，强化微小病害识别效果。同时革新特征提取模式，打破单一参数提取局限，多维挖掘时频域、幅值、衰减、相位等特征。按信号类型分别提取对应核心参数，全方位表征混凝土内部状况。配套搭建特征筛选体系，剔除异常数据，筛选高关联有效特征，为后续分析建模筑牢优质数据基础。

（三）基于多源数据融合的综合检测技术

为克服单一无损检测技术信息片面、精度有限、存在检测盲区等弊端，本文运用多源数据融合技术，汇聚各类检测手段数据实现优势互补，切实增强混凝土结构检测的全面性与精准度。该技术依托检测原理与适用场景互补特性，整合回弹表层硬度、超声波内部声学、冲击回波深层结构、电磁感应钢筋状态及红外热

成像温度场数据，搭建多维检测数据库。实际工程可按检测目标搭建专属融合体系：强度检测采用超声-回弹融合方式，抵消碳化、骨料带来的测算误差；缺陷检测实行红外初筛、超声细判、冲击回波复核的组合模式，高效完成缺陷定位与尺寸量化。借助分层融合算法完成数据归一化处理，依据检测精度与工况适配度分配数据权重，削弱环境、材料、设备带来的干扰，有效减少检测偏差，满足复杂混凝土结构高精度检测要求。

（四）基于人工智能的测强/缺陷识别模型构建

依托人工智能与机器学习搭建智能检测识别模型，是突破混凝土无损检测精度瓶颈的关键路径，可有效弥补传统经验模型通用性弱、精度不足、人工判读偏差大的短板。研究依托海量工程检测数据，分别构建强度预测与缺陷识别智能模型。强度预测整合配合比、养护时长、环境温湿度及回弹、超声、碳化深度等多维数据，运用BP神经网络、随机森林、支持向量机算法，以钻芯实测强度为样本标签训练模型，自主习得参数关联规律，自适应抵消各类干扰误差，相较传统公式测算精度与适用性显著提升。缺陷识别依托超声、冲击回波、红外热成像信号，借助卷积神经网络深挖图像与信号特征，自动完成孔洞、裂缝等病害分类定位及尺寸量化，减少微小缺陷漏检与判定误差。模型同步搭载迭代更新机制，持续吸纳实测数据优化参数。多源数据融合赋能检测全流程智能化，为混凝土结构健康研判与质量评定筑牢技术根基。

四、结束语

混凝土无损检测技术是保障工程结构质量安全、实现结构运维管控的核心技术，在土木工程领域具有不可替代的应用价值。本文系统梳理了五类主流混凝土无损检测技术的核心原理与工程适配场景，全面剖析材料特性、外部环境、仪器操作、数据模型四大维度的精度干扰因素，针对性构建了从硬件操作、信号处理、数据融合到智能建模的全流程精度优化体系。研究明确，传统单一检测技术受工况、设备、模型等多重限制，存在显著检测误差，而通过标准化作业管控、数字化信号降噪、多源数据融合互补、人工智能智能建模的组合优化方式，可有效解决传统检测漏检、误检、精度不足的问题，大幅提升混凝土结构强度检测与缺陷识别的精准性、通用性。

参考文献

- [1] 薛鹏. 混凝土结构无损检测技术[J]. 环球市场, 2018(17):380.
- [2] 徐杨, 付广坤. 钢筋混凝土结构无损检测技术应用[J]. 模型世界, 2025(16):111-113. DOI:10.3969/j.issn.1008-8016.2025.16.037.
- [3] 谭恢军. 混凝土结构无损检测技术[J]. 百科论坛电子杂志, 2020(12):1334. DOI:10.12253/j.issn.2096-3661.2020.12.2894.
- [4] 杨维武, 刘海峰, 宋建夏. 混凝土结构无损检测技术研究[J]. 宁夏工程技术, 2006, 5(3):217-220. DOI:10.3969/j.issn.1671-7244.2006.03.002.
- [5] 刘聪莹. 钢筋混凝土结构无损检测技术应用[J]. 建筑机械, 2025(1):137-140. DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2025.01.018.
- [6] 石珂. 基于毫米波雷达的钢筋混凝土结构无损检测研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2024.
- [7] 孙树民. 混凝土结构无损检测技术的发展[J]. 广东建材, 2003(2):30-32. DOI:10.3969/j.issn.1009-4806.2003.02.010.
- [8] 张志波. 混凝土结构无损检测与耐久性评估[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015, 5(12):4548-4549.
- [9] 蒋凯辉. 新老混凝土结构无损检测比较分析[J]. 无损检测, 2002, 24(4):182-184. DOI:10.3969/j.issn.1000-6656.2002.04.015.
- [10] 李诗海, 王良超. 混凝土结构无损检测技术的发展与展望[J]. 装饰装修天地, 2017(1):289.