

基于无损检测技术的建筑工程混凝土结构质量评估方法研究

郑少展

广东省建设工程质量安全检测总站有限公司 广东 广州 510500

【摘要】：采用无损检测技术的建筑混凝土结构质量评价法，首先，系统化阐述了无损检测技术在混凝土结构质量评估领域的具体应用情形，全面阐述其在各环节与情境中的运用成效，接着，深入剖析了当前该技术应用中存在的众多问题，检测精度可靠性欠佳、数据解析及分析繁复、检测设备存在局限，面临环境与结构复杂性交织的多重挑战，最后，提出了具有针对性的优化措施，提高检测设备精度、研发前沿数据处理分析技术、集成运用多种无损检测手段、培育高水平专业人才，强化相关规范与标准化构建，旨在为混凝土结构质量评估提供科学系统的参考依据。

【关键词】：无损检测技术；混凝土结构；质量评估；检测精度；数据处理

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.078

引言

建筑工程界，混凝土结构质量问题至关重要，直接作用于建筑物的安全与使用寿命，无损检测技术凭借其独特优势，若结构无损且检测效率高，混凝土结构质量评估的关键方法之一，然而，当前无损检测技术在实际应用中仍面临众多待解难题，这些问题严重损害了评估结果的准确性与可信度，因此，进行相关研究，深入剖析无损检测技术在混凝土结构质量评价领域的应用及优化，为提高混凝土结构质量评估的整体标准、确保建筑工程的安全性能、促进无损检测技术的不断进步，该表述具有深远理论与实践价值。

1 基于无损检测技术的建筑工程混凝土结构质量评估概述

基于无损检测技术对建筑工程混凝土结构进行质量评定，正从单一参数检测迈向多模态数据融合的智能化发展，该领域以超声波透射、回弹取芯、雷达波扫描及电磁感应等关键技术为支撑，研究混凝土内部应力波传播特性介电常数变化及电磁响应规律，实现强度离散性隐蔽空洞裂缝深度及钢筋锈蚀度的量化评定，其创新之处在于深度学习算法被融入实时检测系统中，构建声速-强度修正模型及雷达波反射特征数据库，成功攻克了传统检测技术在异形构件诸如大跨度拱体曲面墙等领域中信号迅速衰减及边界效应明显的难题^[1]。但技术实施面临多重挑战：密集钢筋区域电磁干扰易致缺陷定位误差，在高温高湿条件下对超声波声速修正系数进行动态校准面临较大挑战，建筑加固层与原结构界面脱空处的微波检测分辨率需进一步提高，工程师需依据工程地质状况调整检测路线，运用多种技术交叉验证增强评估可信度，为结构全生命周期安全监管提供精确数据支持。

2 基于无损检测技术的建筑工程混凝土结构质量评估中存在的问题

2.1 检测精度和可靠性问题

在建筑工程混凝土结构质量评价领域运用无损检测技术时，检测精度及其可靠性常常面临多重技术关卡和挑战。由于不同检测方法所依据的物理原理各不相同，它们得出的检测结果往往存在固有差异。例如，超声波检测对混凝土内部缺陷的敏感性，显著受骨料粒径分布影响，可能导致检测结果出现偏差；而回弹法则易受混凝土表面碳化层厚度影响，使其评估结果不够准确。单一技术手段通常难以充分、全面地反映混凝土结构的真实状况^[2]。在尝试融合多种检测技术进行应用的过程中，信号耦合效应又易引发误判特征，进一步增加评估的复杂性。例如，雷达波在钢筋密集区域产生的反射叠加效应，可能掩盖混凝土内部空洞的信号，导致这些缺陷难以准确识别。此外，环境因素的变化动态也会加剧检测精度的波动。温度梯度的变化可能导致应力波在混凝土中的传播速度异常，而湿度波动则会干扰电磁感应信号的稳定性，这些因素均对检测结果的准确性构成威胁。

2.2 数据解释和结果分析困难

数据解析及成果剖析阶段的技术繁杂性构成限制无损检测效能发挥的核心难题，各类检测技术所产出的原始数据展现出丰富的多维特性，超声波时域波形、雷达二维图像及电磁频谱曲线需综合运用跨学科知识解读，单一领域技术人员难以精确区分信号中的真实缺陷特征及干扰噪声，深度学习算法已广泛应用于数据处理，训练样本与实际工程场景存在差异进而影响模型泛化能力，针对标准试块构建的裂缝识别模型在复杂结构中遇到斜向裂缝时易产生误判，各类缺陷信号特征间存在相互交织的现象，钢筋锈蚀与混凝土碳化在电磁反应中呈现相似特征，评估结果可能引起误解，此外，评估数据与实际结构承

载能力间关系的量化模型尚不完善,将微观缺陷参数转换成宏观结构安全评估指标颇具挑战,结果分析的不确定性有所提升。

2.3 技术设备的局限性

当前无损检测技术在建筑混凝土结构评估方面存在明显的性能短板,超声波检测仪的信号穿透力与分辨率间存在固有冲突,高频探头能够探测出细微缺陷,在厚实结构中衰减迅速,低频探头适用于对深部位置的检测,却难以辨别缺陷的细微之处,雷达扫描设备受限于天线尺寸,复杂配筋区域易出现信号盲区现象,混凝土缺陷探测对钢筋下方灵敏度显著降低^[3]。电磁感应仪器检测精度易受环境电磁场干扰影响显著,工程于变电站及高压线路周边易遭遇数据失真问题,便携设备续航及存储空间受限,难以满足大型工程持续检测需求,高精度台式设备在搬运与架设方面存在限制,设备校准需借助标准试块,然而实际工程混凝土材料特性(诸如骨料类型、配比变动)与之存在差异进而引发校准误差,现有设备对新型复合材料结构检测如钢纤维混凝土和再生骨料混凝土适应性不够,评估效果受影响。

2.4 环境和结构复杂性带来的挑战

建筑环境与结构复杂性共存的领域,向无损检测技术施加了多层面的严苛挑战,检测过程遭遇自然环境动态变化的显著干扰,在高温天气条件下,表层与内部混凝土温差明显,温差引发超声波传播速度的非线性变化现象,进而降低检测结果的可靠性。潮湿气候条件下,混凝土的介电特性经历变化,解析精度受干扰之扰,导致实际检测结果失真,持续干扰源自强电磁场对电磁感应检测设备的侵袭,该干扰也对设备运作构成妨碍,造成检测数据的误差现象,复杂性非单一维度所限,多维度全面铺展。异形构件如曲面梁和弧形墙的存在,引发检测探头耦合稳定性降低,信号采集的连贯性遭遇直接削弱,进而引发检测问题群集,历经既有建筑结构改造与加固阶段,界面层累积生成,界面间信号反射易引发误判,检测过程面临更大挑战,宽广跨度的结构凭借其独特的空间尺度属性,声波与电磁波易受散射及衰减影响,该衰减显著削弱了深部缺陷的探测精度,精度未达理想。

3 基于无损检测技术的建筑工程混凝土结构质量评估方法策略

3.1 提高检测设备的精度和灵敏度

硬件创新与技术优化双管齐下,以显著增强无损检测设备的精度与灵敏度,在传感器技术范畴,可开发基于压电复合材料的阵列型探头,多阵元联合采集技术,实现应力波信号的空间分散接收,减少由探头指向性限制引起的信号损失,曲面结

构及复杂界面检测,其适用性尤为突出^[4]。聚焦信号衰减的挑战,采纳低噪声预放大器及自适应滤波器模块,通过实时识别环境噪声特征(如电磁干扰、机械振动)动态调整滤波参数,显著提升微弱缺陷信号的捕捉质量,设备集成技术范畴,开发集成惯性导航的便携式检测单元,通过实时校正探头与结构表面的耦合角度偏差,针对人工贴合不紧密现象导致的检测误差进行矫正,通过数字化信号处理芯片实现快速并行数据运算,显著增强信号采样与分辨能力,使设备能精准捕捉混凝土内部微裂缝(微米级)引发的声学特性变化,构建结构早期损伤评估的硬件支撑架构。

3.2 开发先进的数据处理和分析方法

构建高端数据处理与分析体系是突破无损检测效能瓶颈的核心举措,可实施多模态信息融合技术,对超声波时域波形、雷达波成像数据及电磁感应频谱等异质信息,实施特征映射以统一至单一特征空间,采用注意力方法强化关键缺陷特征权重,应对数据单一来源的片面性挑战。构建自适应修正模型,采用迁移学习策略,将标准试块训练得到的缺陷识别技术转嫁至实际工程应用,自动调整至不同强度混凝土及配筋结构信号间的差异,降低样本分布不均引起的错误识别概率,探讨非线性信号特性,整合小波包分解与希尔伯特-黄变换手段,精准提取缺陷信号在时频域的瞬时特征,有效区分混凝土碳化、钢筋锈蚀等相似缺陷的信号差异,实施数字孪生驱动的可视化分析系统开发,将检测数据与结构三维模型实时关联,模拟缺陷扩散路径追踪,实现数据采集至安全评估的智能化分析全序列。

3.3 多种无损检测技术的综合应用

无损检测技术综合应用,需构建科学协同体系,挖掘技术互补潜能,实施混凝土强度检验,依托回弹-超声波综合检测法,以回弹值揭示表层硬度特征,以超声波声速体现内部致密程度,采用钻芯法对关键区域实施精准核实,构建“宏观扫描与微观核实”的检测闭环,消除强度评估单一方法引入的系统偏差现象。实施隐蔽缺陷的检测工作,实施雷达波扫描与电磁感应的联合检测模式,雷达波快速定位疑似缺陷区域后,电磁感应技术聚焦检测该区域钢筋分布状态,避免钢筋回波信号被错误地识别为混凝土空洞,以超声波透射法对缺陷的深度及范围进行确认,采用多技术数据融合验证,大幅增强缺陷的定性定量分析准确性。在结构耐久性评估中,合并钢筋锈蚀检测与氯离子渗透数据,采用碳化层深度检测的成果,设立多变量综合的耐久性退化模型,全面揭示环境要素对结构性能的交互制约,形成技术适配性评价规范,根据结构形态(例如梁柱节点、楼板、墙体)及缺陷类型(裂缝、空洞、钢筋锈蚀),实施动态技术组合挑选,实现检测效率与精度的协同优化。

3.4 培养专业检测人员和加强技术培训

培养专业检测人员与加强技术培训需构建多层次能力提升体系,在知识结构培养上,突破传统操作技能培训壁垒,构筑多学科融合课程,集材料科学、结构力学、信号处理及人工智能等知识于一体,让检测人员深入掌握超声波传播机制及电磁感应原理等基础理论,也能熟练运用数据建模与算法技术,消除“知其然不知其所以然”的技术认知盲区。在实践能力训练方面,设立虚拟与实体相结合的实训系统,借助数字仿真手段对钢筋密集区及异形构件等复杂场景的检测信号特征进行模拟,通过实体试块(预制各类缺陷类型与程度)开展对比训练,加强识别干扰信号与实际缺陷的能力水平,打造案例库引导的进阶培训体系,归纳典型工程检测数据、缺陷图解及处理流程,依托案例复现与技术研究,锻炼员工的工程问题转化实力。实施“技术资质+终身学习”体系,将掌握新技术应用(如深度学习模型调优、多设备协同操作)纳入考核要求,同步推进员工技术成长与行业进步同步。

3.5 增强检测规范和标准化建设

需设立动态技术架构,以应对工程复杂性,提升检测规范与标准化水平,在基础性标准范畴,调整检测方法适用性手册,针对结构类型(新建/既有)与材料特性(普通/高性能混凝土),

确立技术选择标准,防止因错误引用标准而产生的评估偏差。构建设备校准及性能评估体系,编制全面校准规范,涉及探头灵敏度、信号稳定性和数据重复性等关键要素,借助第三方认证,实现设备量值溯源的统一性,在数据采集标准方面,规范检测流程的路径规划、耦合条件调控与参数调整等关键步骤的实施,针对高温、高湿等特殊气候,编制专项操作手册,降低人为操作对结果准确性的干扰。加强标准化与数字化融合步伐,构建集成缺陷分类编码、数据格式规范及评估等级的数字化标准平台,实现检测数据在项目与机构间的互通互享机制,制定标准动态优化路径,持续追踪雷达与超声等前沿技术动态,即时采纳创新方法至规范标准,加强标准对工程应用的引领地位^[5]。

4 结语

无损检测技术在混凝土结构质量评估中展现出显著成效,面临众多挑战与困扰,实施一整套改进计划,提升检测设备精密密度,精炼数据处理及分析流程,整合各类无损检测手段,锻造专业人才队伍,促进规范与标准化实施,显著优化混凝土结构质量评估的精确度与效能水平,需要持续进行技术创新与方法改进,不断完善标准体系,提升混凝土结构质量监控质量,强化无损检测技术实施,巩固建筑工程安全与耐久性的技术后盾。

参考文献:

- [1] 姚菊香.基于无损检测技术的水利工程混凝土结构质量评估方法[J].中国品牌与防伪,2025,(08):197-199.
- [2] 曹敏,林秀松.无损检测技术在水利工程混凝土结构质量检测中的应用[J].水利技术监督,2025,(09):30-32+148.
- [3] 徐博文.无损检测技术在混凝土结构工程质量检测中的运用[J].大众标准化,2023,(10):184-186.
- [4] 吴文光.无损检测技术在混凝土结构工程质量检测中的运用[J].广东建材,2007,(11):171-172.
- [5] 张荣成.特殊结构混凝土工程质量无损检测技术的研究.北京市,中国建筑科学研究院,2007-09-26.