无损检测技术在工程检测中的应用

李冬海
中国建材检验认证集团湖南有限公司　湖南　长沙　410000

摘　要：无损检测技术以不损伤工程结构为前提，依托声、光、电、磁等物理方法完成构件质量检测，是现代工程质量管控的重要手段。本文介绍超声波、回弹、雷达、红外热成像等主流检测技术的原理与特点，梳理检测流程与质量影响因素，分析其在建筑、交通、市政水利工程中的实际应用。结合工程案例总结应用成效，指出当前技术局限、行业乱象与智能化不足等问题，提出优化措施与发展策略，为工程检测提质增效提供参考。

关键词：无损检测技术；工程检测；应用

引言：基础设施建设规模持续扩大，工程结构安全与服役耐久性愈发受到重视，传统破坏性检测损耗大、适用性有限，无法满足在役结构常态化检测需求。无损检测技术具备无损、精准、可重复、适配性强等优势，能够有效识别结构表面与内部缺陷，广泛应用于各类工程检测场景。为进一步规范技术应用、挖掘技术价值，本文系统研究无损检测技术的核心内容、工程应用及现存问题，探索科学可行的优化发展路径。

1 无损检测技术核心理论与主流技术类型

1.1 无损检测技术基本概述

（1）无损检测技术是在不损伤工程结构、构件性能的前提下，借助声、光、电、磁等物理手段，对材料内部及表面质量进行检测的技术方法，其核心原理在于利用物理场与介质的相互作用获取结构完整性信息。（2）技术特征体现为无损性（不破坏被检对象）、精准性（缺陷定量定位准确）、实时性（现场快速获取数据）、重复性（检测可复现）和全域性（覆盖构件整体或隐蔽区域）。（3）相较于传统破坏性检测，无损检测无需制样、不浪费材料，适用于在役结构定期监测，而破坏性检测在材料性能精确标定、失效机理研究方面仍不可替代，两者形成互补。

1.2 主流无损检测技术原理及特点

（1）超声波检测利用高频声波在材料中传播，遇缺陷产生反射、衰减变化，优势在于内部缺陷检测灵敏度高，适用于焊缝、锻件等内部裂纹、夹杂检测，但对粗糙表面耦合要求高，薄板检测受限。（2）回弹检测通过弹击锤反弹高度推定混凝土表面硬度，进而换算强度，操作便捷、效率高，特别适用于混凝土强度现场批量快速普查，但受碳化深度、骨料影响较大，检测精度偏低。（3）雷达检测发射高频电磁波，遇介电常数变化界面产生反射，可全域扫描、实时成像，特别适合隐蔽工程中钢筋分布、管线探测及空洞识别，但对高含水率介质穿透深度有限。（4）红外热成像检测通过捕捉物体表面温度场差异识别内部缺陷，非接触、大面积快速筛查优势突出，适用于建筑渗漏、蜂窝、脱空等热传导异常缺陷，但受太阳辐射、表面发射率等环境因素干扰显著[1]。

1.3 无损检测技术检测流程与规范标准

（1）工程检测前期准备涵盖现场勘查，全面了解结构类型、材料特征及预估缺陷类型；设备校准，确保仪器状态满足量值溯源要求；检测方案制定，明确测区划分、检测方法选用及验收标准。（2）现场标准化检测操作流程包括测点定位标记、仪器参数设置、数据采集记录及异常点复核，全过程须严格执行作业指导书和操作规程，确保采集数据的真实性与可追溯性。（3）检测数据整理与分析按行业标准进行统计计算，异常值剔除、测区强度换算、缺陷尺寸判定等均需符合相应规范要求，最终依据标准给出合格与否的明确结论。

1.4 无损检测技术质量影响因素

（1）设备精度与参数设置直接决定检测分辨率与灵敏度，仪器未经周期检定或参数选择不当将导致误判或漏检。（2）现场环境中温度、湿度及干扰介质均对检测信号产生显著干扰，如高温影响回弹值、高湿降低雷达信号信噪比、电磁场干扰红外测温精度，需采取针对性补偿措施。（3）操作人员专业水平与实操规范性是影响检测质量的核心因素，耦合操作是否得当、波形判读是否准确、测区选取是否合理，均直接影响最终结论的可靠性，须持证上岗并定期能力验证。

2 无损检测技术在工程检测中的具体应用

2.1 在建筑工程结构检测中的应用

（1）混凝土结构检测中，回弹法及超声-回弹综合法用于批量推定构件强度，结合钻芯取样修正可显著提高推定精度；超声波对穿法或平测法可精准测定裂缝深

度，并通过声时变化判断内部空洞位置及不密实区范围；雷达法对钢筋间距、保护层厚度进行快速扫描；碳化深度采用酚酞酒精溶液显色法现场测定，多项指标综合评定为混凝土结构质量评价提供完整数据支撑。（2）钢结构检测中，超声波相控阵技术对对接焊缝、角焊缝内部未熔合、气孔及微裂纹检出率高、定位准确；磁粉检测用于表面及近表面缺陷筛查，渗透检测用于非铁磁性材料表面开口缺陷识别；涂层厚度与腐蚀电位联合评价构件锈蚀程度，超声测厚仪对钢板截面锈蚀减薄量进行定点监测，激光断面仪用于钢结构变形损伤的快速评估，确保承重构件安全可靠[2]。（3）砌体结构检测中，雷达法可根据介电常数差异识别砌筑砂浆不饱满区域及内部空洞位置；红外热成像技术利用墙体表面温度场异常精准定位空鼓及渗水部位；超声波平测法用于砌体结构性裂缝深度与发展趋势的定量追踪，多种方法联合应用为砌体结构安全评估与加固改造提供可靠依据。

2.2 在交通工程检测中的应用

（1）道路工程检测中，探地雷达以连续扫描方式快速查明路面结构层厚度、面层裂缝发育带及基层脱空区分布；落锤式弯沉仪无损评价路基整体承载能力；无核密度仪实时检测沥青面层密实度，多技术协同实现道路病害快速普查、养护分级决策与预防性维护规划。（2）桥梁工程检测中，超声波法对预应力梁孔道灌浆密实度及主梁腹板裂缝深度进行定量检测；声波透射法用于桩基完整性分类评价；磁记忆检测可早期发现钢结构应力集中与疲劳损伤预兆；红外热成像用于支座脱空及构件内部缺陷的大面筛查，系统保障桥梁结构运营安全。（3）隧道工程检测中，探地雷达沿纵向测线连续扫描高效查明衬砌厚度、背后空洞范围及钢拱架分布情况；超声波法对围岩松动圈及衬砌裂缝深度进行准确测定；红外热成像结合表面温度场差异快速锁定渗漏水隐患区域，为隧道运维安全与病害整治提供全面系统的基础数据。

2.3 在市政与水利工程检测中的应用

（1）市政管网检测中，CCTV管道内窥系统直观判定管壁破损、变形、堵塞及接口渗漏状况；超声波壁厚测量与涡流检测配合用于金属管道腐蚀减薄程度的定量评价；探地雷达实现非金属管道定位与埋深探测，有效支撑市政管网健康诊断、清淤修复与更新改造决策。（2）水利堤坝检测中，跨孔超声波CT技术对坝基帷幕灌浆均匀性及密实度进行层析成像评价；高密度电法联合探地雷达探测坝体内部裂隙、松散带及潜在渗漏通道分布；红外热成像对坝体迎水面渗水异常区实施大面快速筛查，有效保障水利设施运行安全与防洪能力[3]。（3）给排水构筑物检测中，超声波测厚与回弹法联合用于混凝土池壁强度及截面尺寸复核；渗漏巡检仪结合声波传感技术对池体渗漏点进行高精度定位；裂缝综合检测仪对结构受力裂缝宽度及深度持续监测，综合评估构筑物结构完整性与长期耐久性能，确保给水排水设施安全服役。

2.4 典型工程应用案例分析

（1）建筑混凝土缺陷检测：某高层剪力墙拆模后现大面积蜂窝麻面，检测人员现场勘查后制定超声对穿法方案，沿墙高每1.5m布设测线、测点间距0.3m逐层扫描，发现3处严重不密实区，波速较正常区域降低25%～30%，结合红外热成像温度异常区验证圈定缺陷范围，经钻孔取芯确认后实施压力注浆补强，复检波速恢复至正常水平。（2）桥梁钢结构焊缝检测：某高速公路钢箱梁桥建成后，依据规范采用超声波相控阵技术对全部现场对接焊缝全覆盖检测，共发现6处超标缺陷（根部未熔合、密集型气孔及微裂纹），经定位标记后实施碳弧气刨清除、重新焊接并复检合格，消除了运营期疲劳开裂隐患。（3）检测成效：无损检测定量数据直接确定了加固范围和返修方案，相较传统开窗检查节约工期约20天、节省费用约35%；同时为交工验收提供完整质量证明，积累的检测数据为后续运维监测建立基准档案，充分体现了无损检测在质量控制、安全保障与全寿命周期管理中的核心支撑价值。

3 无损检测技术应用现存问题与优化发展策略

3.1 工程检测应用中的现存问题

（1）技术应用局限性方面，单一检测方法受物理原理制约，难以适配复杂工况。超声波在粗骨料密集区及高衰减材料中信号衰减严重，深层细小裂纹识别困难；红外热成像仅反映表层温度异常，对埋深较大或热传导差异不明显的缺陷判别不足；雷达法在钢筋密集或高含水介质中穿透深度锐减，成像分辨率下降。多重局限导致早期损伤及微裂纹检出率偏低，易引发漏判与误判。（2）行业应用乱象方面，部分中小检测机构现场操作不规范、测区布设随意、仪器校准执行不严，同一构件不同单位结论差异明显，标准落地参差不齐。同时，报告格式多样、判定尺度不一，影响检测权威性与工程各方采信度，给质量安全管控带来隐患。（3）智能化水平不足方面，多数检测仍依赖人工布点、手动采集与离线判读，数据碎片化存储、信息利用率低，缺陷自动识别与定量评价薄弱，缺乏实时在线监测与智能预警手段，难以满足大规模工程检测对快速分析与科学决策的需求。

3.2 无损检测技术应用优化措施

（1）推行多技术联合检测模式，针对不同检测对象

与缺陷类型组合应用超声、雷达、红外、磁粉等多种方法，实现优势互补与交叉验证，建立联合判据与综合评定模型，有效弥补单一技术短板，显著提升缺陷检出率与判定准确度。（2）规范现场检测全流程操作，严格执行设备使用前校准、测区合理布设、数据规范采集与原始记录完整存档等各环节标准化要求，定期组织检测人员理论考核与实操比对，统一缺陷分级评定尺度，从源头消除人为因素导致的结论偏差[4]。（3）优化设备参数校准与数据处理方法，建立环境影响因素修正系数模型，剔除温度、湿度、表面耦合条件等干扰，引入自适应滤波、小波去噪等信号增强技术，提高信噪比，有效降低系统误差与随机环境干扰对检测结果的负面影响。

3.3 无损检测技术智能化发展路径

（1）推动智能化检测设备迭代升级，研发集成多传感器、具备自动扫查与实时成像功能的新型轻量化检测仪器，提升复杂工况现场数据采集效率，实现检测设备与移动终端、云端平台之间的无线数据传输与远程协同。（2）融合大数据与人工智能技术，构建涵盖各类工程典型缺陷的特征样本数据库，训练卷积神经网络等深度学习算法实现缺陷自动识别、分类与定量评价，结合历史检测数据构建结构性能退化模型，开展剩余寿命预测与安全预警分析。（3）搭建数字化检测管理平台，统一数据格式与接口标准，实现检测方案编制、原始数据采集、分析评定、报告生成到维护决策的全过程数字化存档与溯源管理，为结构全生命周期动态监测提供统一可靠的数据底座[5]。

3.4 行业推广与应用保障策略

（1）完善无损检测行业规范与质量验收标准体系，细化各检测方法的技术规程、仪器性能指标及缺陷等级评定标准，建立检测机构资质动态评价与能力验证机制，整体提升行业服务规范化水平。（2）加强技术普及与人才培养，在高校土木工程、材料科学等专业课程中强化无损检测理论与实践教学比重，搭建产学研用协同创新平台，定期组织新技术新方法交流培训，持续壮大高水平复合型检测人才队伍。（3）推动无损检测技术向施工过程质量预控、竣工验收全面评定、运营期定期监测及老化评估等全工程周期各阶段延伸覆盖，构建事前预防、事中控制、事后评价的闭环质量管理体系，为工程质量安全与可持续发展提供坚实技术保障。

结束语

无损检测技术贯穿工程建设与运维全周期，是排查结构缺陷、把控工程质量、防范安全风险的关键技术。目前该技术在实际应用中仍存在单一技术局限性突出、现场操作不规范、智能水平偏低等问题。未来应推行多技术联合检测模式，规范行业作业标准，融合大数据与人工智能推进智能检测升级，完善行业保障体系，助力工程检测行业规范化、数字化、高质量发展。

参考文献

[1]刘昊,李海峰.水下结构缺陷无损检测技术与应用研究进展[J].长江科学院院报,2025,42(11):149-156.

[2]陈迪杨.冲击回波法隧道二衬质量智能检测系统开发及应用[J].应用基础与工程科学学报,2025,33(04):789-798.

[3]周乐琳.基于超声波技术的桥梁水下结构内部缺陷检测研究[J].工程力学,2025,42(S1):260-267.

[4]沈正祥,季慧宇.基于多微磁融合的钢材疲劳损伤在线无损监测技术[J].无损检测,2025,47(10):44-51.

[5]韦智.无损检测技术在建筑钢结构工程检测中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024,9(13):82-84.