

建筑结构无损检测方法研究

胡 昶

湖州东成建设工程检测股份有限公司 浙江 湖州 313000

摘要：随着建筑行业蓬勃发展，建筑结构安全备受关注。本文聚焦建筑结构无损检测方法展开研究。首先阐述无损检测技术的理论基础，包括核心原理、技术要求及分类依据。接着深入分析超声、回弹、电磁感应、红外热成像、雷达等主流无损检测方法。最后探讨其应用与发展趋势，涵盖多种技术的联合应用，以及智能化、微型化与便携化发展方向。旨在为建筑结构检测提供全面、系统的理论支持与实践指导，助力建筑行业提升检测水平与质量保障能力。

关键词：建筑结构；无损检测；检测方法；发展趋势

引言：建筑结构的安全与稳定关乎人们的生命财产安全及社会的正常运转。传统检测方法往往对建筑结构造成一定程度的破坏，且检测精度有限。在此背景下，无损检测技术应运而生，成为保障建筑结构质量的关键手段。它能在不损害建筑结构的前提下，精准获取其内部信息，为评估结构性能、发现潜在隐患提供可靠依据。随着建筑行业的不断发展，对无损检测技术的要求也日益提高。深入研究建筑结构无损检测方法，对于提升建筑质量、保障建筑安全具有至关重要的现实意义。

1 建筑结构无损检测技术的理论基础

1.1 无损检测的核心原理

无损检测的核心原理在于利用材料内部结构异常或缺陷引发的物理特性变化进行检测。当材料存在裂纹、气孔、夹杂等缺陷时，其热、声、光、电、磁等特性会与正常区域产生差异。例如，超声波在缺陷界面会发生反射、折射，通过分析反射波的时间、幅度等参数可定位缺陷；射线穿透材料时，密度差异会导致影像对比度变化，从而识别内部缺陷；电磁感应检测则通过缺陷引起的涡流分布改变，检测线圈电参数变化来发现缺陷。这些原理基于物理现象，无需破坏被检对象即可获取其内部信息^[1]。

1.2 无损检测的技术要求

无损检测需满足严格的技术要求以确保检测结果的可靠性。首先，检测设备需具备高精度与稳定性，如超声波检测仪的频率误差需控制在 $\pm 1\%$ 以内，射线检测设备的分辨率需达到行业标准。其次，操作人员需具备专业资质，需通过国家或国际认证机构的考核，熟悉检测标准与流程。再者，检测环境需符合规范，如射线检测需设置防护区域，避免辐射泄漏；电磁检测需排除外界电磁干扰。此外，检测结果需可追溯，需保存原始数据与

影像资料，并依据相关标准（如GB/T11345-2023）进行判定，确保检测结论的科学性与权威性。

1.3 无损检测的分类依据

无损检测的分类依据主要包括检测原理、适用材料与缺陷类型。按原理可分为五大类：超声波检测（UT）利用声波反射定位缺陷；射线检测（RT）通过影像对比识别内部结构；磁粉检测（MT）适用于铁磁性材料表面裂纹检测；渗透检测（PT）通过渗透液显示表面开口缺陷；涡流检测（ET）利用电磁感应检测导电材料表面及近表面缺陷。按适用材料可分为金属检测（如钢结构）、混凝土检测（如超声回弹综合法）与复合材料检测（如红外热成像）。按缺陷类型可分为体积型缺陷检测（如气孔、夹渣）与平面型缺陷检测（如裂纹、未熔合）。不同分类方法相互补充，形成完整的检测体系。

2 建筑结构主流无损检测方法分析

2.1 超声检测技术

超声检测技术是建筑结构无损检测领域应用最广泛的方法之一，其核心原理基于超声波在材料中的传播特性。(1)超声波在传播过程中遇到缺陷（如裂缝、空洞）时，会发生反射、折射或散射现象，通过分析回波信号的时间差、振幅变化及波形畸变，可精准定位缺陷位置并评估其尺寸。例如，在混凝土结构检测中，超声波遇到内部缺陷时，声速会降低，声时相应增大，波幅明显衰减，这些参数变化为缺陷判定提供了可靠依据。(2)超声检测技术具备高灵敏度与强穿透性。高频超声波（20kHz—100kHz）可检测微小缺陷，甚至能识别0.1mm级的裂缝，且对金属、非金属及复合材料均适用。在高层建筑钢结构检测中，超声波可穿透厚壁构件，检测焊接接头处的气孔、夹渣等内部缺陷，避免因缺陷导致的结构安全隐患。(3)超声检测技术操作便捷且成本低廉。

现代检测设备体积小、便于携带，支持自动化扫描与云平台数据存储，可实时上传检测数据至云端，实现远程分析与决策。例如，结合红外热成像技术，可同步评估钢结构表面与内部缺陷，提升检测全面性。尽管对复杂形状构件的检测存在一定局限，但通过多传感器融合与智能化算法优化，超声检测技术正逐步突破传统瓶颈，成为保障建筑结构安全的核心手段。

2.2 回弹检测技术

(1)回弹检测技术作为建筑结构无损检测的关键手段，首先凭借其无损特性在工程中广泛应用。该技术通过弹簧驱动弹击锤冲击混凝土表面，测量回弹距离（回弹值），利用混凝土表面硬度与抗压强度的正相关性，结合经验公式或标准曲线推算强度。其核心优势在于操作简便、成本低廉且检测效率高，例如在大型建筑项目中，回弹法可在数小时内完成大面积混凝土墙体的初步强度评估，为施工进度控制提供关键数据支持。(2)回弹检测技术具有显著的现场适应性。其设备便携、无需复杂辅助条件，尤其适用于施工现场快速筛查。例如，在桥梁、隧道等线性工程中，检测人员可沿结构均匀布点，通过多测区数据综合分析，高效识别强度异常区域。此外，该技术对已投入使用的建筑进行质量复核时，能最大限度减少对结构完整性的干扰，保障既有建筑的安全评估。(3)回弹检测需严格遵循规范以提升精度。检测前需确保混凝土表面干燥、平整，避免蜂窝麻面等缺陷；检测中需控制环境温度在 4°C — 40°C 范围内，并垂直施压回弹仪；检测后需结合碳化深度修正数据，剔除异常值后取平均值。例如，在超高层建筑检测中，通过每平方米布设9个测点、取20次测量平均值，可将误差控制在 $\pm 0.5\text{MPa}$ 以内，满足工程验收要求^[2]。

2.3 电磁感应检测技术

电磁感应检测技术以法拉第电磁感应定律为核心，通过检测导体在交变磁场中产生的涡流或感应电动势，实现对建筑结构内部缺陷与性能的评估。(1)该技术具备非接触式检测优势，无需耦合剂即可穿透混凝土、金属等材料，检测效率显著提升。例如在地铁隧道检测中，通过发射高频交变磁场，利用计算机软件分析电磁场变化，可快速定位钢筋位置、评估混凝土密实度，并生成三维剖面图辅助病害诊断。(2)电磁感应检测适用范围广泛，可检测钢铁、有色金属等导电材料的表面及近表面缺陷，如金属管道的裂纹、腐蚀，以及混凝土结构中钢筋的锈蚀程度。在管体检测中，该技术可在 30mm 壁厚范围内同步识别内外壁缺陷，且检测速度可达每分钟数米，满足大规模工程需求。此外，其抗干扰能力强，在

潮湿、高温等恶劣环境下仍能保持稳定性能，例如在桥梁钢结构检测中，可有效排除环境电磁噪声干扰。(3)该技术存在一定局限性。受材料导电性限制，仅适用于铁磁性或导电材料；对深部缺陷检测能力不足，通常仅能识别表面下 $2\text{—}3\text{mm}$ 的缺陷；且对复杂形状结构（如曲面、不规则构件）的检测精度较低。尽管如此，随着多频电磁感应、阵列式传感器等技术的发展，其检测深度与分辨率正逐步提升，在建筑结构健康监测领域的应用前景愈发广阔。

2.4 红外热成像检测技术

红外热成像检测技术基于物体表面温度分布与红外辐射强度的关联性，通过捕捉红外辐射信号并转化为热图像，实现对建筑结构缺陷与性能的非接触式评估。(1)该技术具备高效直观的检测优势。其利用红外热像仪快速扫描建筑表面，生成可视化热场分布图，缺陷区域因热传导异常会呈现明显温差，例如墙体内部空鼓或脱粘区域因空气隔热性导致表面温度偏低，在热图像中呈现为低温斑块，检测人员可据此快速定位隐蔽缺陷，大幅缩短排查时间。(2)红外热成像技术适用场景广泛。在建筑节能检测中，可通过分析外墙、门窗等部位的热损失分布，评估保温性能；在渗漏检测中，潮湿区域因水分蒸发吸热会形成低温异常区，辅助定位渗漏点；在结构损伤检测中，钢筋锈蚀或混凝土碳化会导致局部热传导性能变化，热图像可反映结构健康状态。(3)该技术受环境因素影响较大。环境温度、风速、日照等条件会改变建筑表面热平衡，需在夜间或阴天等稳定环境下检测，或通过差值处理消除环境干扰。尽管如此，随着人工智能算法的引入，红外热成像技术正逐步实现自动化缺陷识别与定量分析，在建筑结构健康监测领域的应用价值日益凸显。

2.5 雷达检测技术

雷达检测技术基于电磁波反射原理，通过发射高频电磁波并接收目标体反射信号，实现对建筑结构内部缺陷与埋设物的非破坏性探测。(1)该技术具备高分辨率与强穿透性优势。其采用宽频带电磁波（通常为 100MHz — 2GHz ），可穿透混凝土、沥青等非金属材料，检测深度可达数米，且能清晰分辨钢筋、管线等埋设物的位置与尺寸。例如，在桥梁检测中，雷达可精准定位预应力筋锈蚀导致的截面变化，或识别混凝土内部空洞、裂缝等缺陷，为结构安全评估提供关键数据。(2)雷达检测技术操作便捷且适应性强。其设备轻便、扫描速度快，支持手持式或车载式检测，适用于复杂结构与大面积区域的快速筛查。例如，在隧道衬砌检测中，雷达车可沿轨

道移动,实时生成衬砌厚度与脱空分布图,检测效率较传统钻孔法提升数十倍。此外,该技术对环境干扰不敏感,可在潮湿、高温等恶劣条件下稳定工作,满足现场检测需求。(3)雷达检测存在一定局限性。其检测精度受材料介电常数影响较大,需通过标定修正参数;对金属构件的检测效果较差,因金属会强烈反射电磁波导致信号失真;且对深层微小缺陷的识别能力有限。尽管如此,随着三维雷达、阵列式天线等技术的发展,雷达检测正逐步实现高精度三维成像,在建筑结构健康监测领域的应用前景愈发广阔^[3]。

3 建筑结构无损检测技术的应用与发展趋势

3.1 无损检测技术的联合应用

建筑结构无损检测中,单一技术常因材料特性、缺陷类型及环境干扰存在局限性,联合应用成为提升检测精度与可靠性的关键。例如,超声检测对内部缺陷敏感,但易受构件形状限制;红外热成像可快速定位表面异常,却难以量化内部损伤。将两者结合,可先通过红外热成像实现大面积快速筛查,再利用超声检测对疑似区域精准分析,形成“面-点”协同检测模式。此外,电磁感应与雷达检测的联合应用,可同时获取金属构件的锈蚀信息与非金属结构的内部缺陷数据,弥补单一技术的盲区。未来,多技术融合将向数据共享与算法协同方向发展,通过构建统一的数据处理平台,实现不同检测技术的优势互补,提升复杂结构检测的全面性与准确性,为建筑结构健康监测提供更可靠的依据。

3.2 无损检测技术的智能化发展

随着人工智能与机器学习技术的突破,建筑结构无损检测正从传统经验驱动向数据智能驱动转型。智能化检测系统可通过深度学习算法对海量检测数据进行训练,自动识别缺陷特征并分类评估,减少人工干预与主观误差。例如,基于卷积神经网络的图像识别技术,可快速分析红外热成像或雷达扫描图像中的异常区域,并量化缺陷严重程度。同时,智能传感器与物联网技术的结合,可实现检测设备的实时数据采集与远程传输,构建建筑结构健康监测云平台,通过大数据分析预测结构劣化趋势,提前预警潜在风险。未来,智能化检测将进

一步融合多模态数据与数字孪生技术,实现建筑结构全生命周期的动态评估与智能维护,推动无损检测向自动化、精准化方向升级。

3.3 无损检测技术的微型化与便携化发展

建筑结构检测场景的复杂性对检测设备的便携性与适应性提出更高要求,微型化与便携化成为技术发展的重要趋势。微型化传感器通过集成化设计与新材料应用,在保持检测精度的同时大幅缩小体积,例如基于MEMS技术的超声换能器与电磁感应探头,可嵌入手持设备或无人机,实现狭窄空间或高空结构的灵活检测。便携化设备则通过优化硬件结构与软件算法,降低操作门槛与能耗,例如轻量化红外热像仪与一体化雷达检测仪,支持单人快速部署与实时数据分析。此外,无线通信与低功耗技术的融合,使检测设备可脱离电源与线缆限制,适应野外或应急检测场景^[4]。

结束语

建筑结构无损检测方法的研究,是保障工程安全、延长结构寿命、推动建筑行业高质量发展的关键支撑。从超声、回弹到电磁感应、红外热成像与雷达技术,单一方法不断突破精度与深度极限,而多技术联合应用、智能化与微型化发展更标志着检测体系向系统化、精准化跃迁。未来,随着人工智能、物联网与新材料技术的深度融合,无损检测将实现从“被动检测”到“主动预警”的转变,为建筑结构全生命周期健康管理提供更高效、更可靠的技术保障,助力智慧城市建设与可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1]申昌洙.试论无损检测技术在建筑工程检测中的应用[J].科学技术创,2022(24):179-179.
- [2]袁金锋.无损检测技术在建筑工程检测中的应用分析[J].科技风,2021(17):157-157
- [3]王茹,郝保兴.无损检测技术在建筑工程检测中的应用分析[J].建材与装饰,2022.409(05):64-65.
- [4]韩晓亮.港口水工建筑混凝土结构微小裂缝超声波检测方法研究[J].黑龙江水利科技,2021,49(01):122-124.