

# 无损检测技术在建筑工程质量检测中的应用

文 / 马 冲 山东特检方圆检测有限公司

王可鑫 山东特检方圆检测有限公司

**摘要：**为解决建筑工程质量检测中传统方法存在的破坏性和局限性问题，本文以无损检测技术为研究对象，系统分析了超声波、射线、电磁波及热成像等技术在建筑工程质量检测中的具体应用，探讨了其在结构完整性检测、材料性能评估、施工质量控制及耐久性预测等方面的实践价值。此外，针对无损检测技术的局限性提出多技术集成的优化策略，以期为工程检测和质量评估提供科学指导，为相关人员在复杂工程条件下的技术选择和决策提供参考。

**关键词：**无损检测技术；建筑工程；质量检测；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.029

## 引言

建筑工程质量直接关系到结构安全和使用寿命，传统检测方法在一定程度上因破坏性及适用性受限，难以满足现代工程的复杂需求。无损检测技术因其高效、非破坏性及多样化的检测手段，成为建筑工程质量检测的关键技术手段。通过利用超声波、射线、电磁波等先进方法，可以实现结构缺陷检测、材料性能评估及施工质量控制，有效提升检测的科学性和可靠性，从而推动建筑工程质量管理向精细化方向发展。

### 一、无损检测技术的基本概念与原理

#### （一）无损检测技术的定义与特点

无损检测技术（Nondestructive Testing, NDT）是一种在不对被测对象造成任何损害或破坏的前提下，利用物理原理和工程技术对材料、构件或系统的物理性能、结构特征以及潜在缺陷进行评估和检测的方法。该技术以其独特的非侵入性特点，被广泛应用于建筑工程质量检测领域。无损检测技术的核心优势在于能够以非破坏性的方式实时获取被检对象的内部和表面信息，并通过先进的信号处理手段实现对缺陷类型、位置、大小及其他特性参数的精准识别。与传统破坏性检测相比，无损检测技术具有更高的经济性和效率，适用于复杂工程条件下的在线监测和质量评估<sup>[1]</sup>。

#### （二）常见无损检测方法的分类

##### 1. 超声波检测技术

超声波检测技术（Ultrasonic Testing, UT）是一种基于高频声波传播原理的无损检测方法，通过分析声波在材料内部的传播特性来评估结构完整性和检测缺陷（见图1）。其核心原理是利用压电换能器将电信号转换为高频超声波，声波在传播过程中遇到介质界面、缺陷或材料不连续性时会发生反射、散射或折射，通过接收和处理这些回波信号可以准确判断缺陷的形状、位置和尺寸。超声波检测具有极高的灵敏度，能够检测尺寸达到0.1mm级别的微小缺陷，其检测深度可达数十米，尤其适合厚度较大的构件如混凝土和钢结构。常用的超声波

检测方法包括脉冲反射法、透射法和共振法，其中脉冲反射法因其较高的精度和广泛适用性而被广泛使用。该技术具有实时性强、检测效率高的特点，但其效果受材料声学特性、表面粗糙度及耦合介质的影响较大，因此在实际操作中需要精密校准以确保结果的准确性。

##### 2. 射线检测技术

射线检测技术（Radiographic Testing, RT）是一种利用高能电磁波穿透材料的能力对内部缺陷进行无损检测的方法，其核心原理是基于射线穿过材料时的衰减规律，射线的能量变化反映了材料密度分布和内部结构特征。常用的射线包括X射线和 $\gamma$ 射线，其中X射线适用于薄壁材料和小型构件的检测，而 $\gamma$ 射线由于其高穿透力更适合厚度较大的结构，如混凝土和钢材的内部缺陷检测。射线检测通过感光胶片、数字探测器或平板成像技术记录射线强度的变化，从而生成反映材料内部结构的图像。这种技术具有高精度和直观性的优势，能够分辨直径低至0.01mm的微小缺陷，同时还可准确识别气孔、夹杂物、裂纹等多种缺陷类型。射线检测技术广泛应用于焊缝质量检查和混凝土密实性评估。然而，其操作要求严格，需要防护设备和专业技术人员，以避免射线辐射对人体的危害。

##### 3. 电磁波检测技术

电磁波检测技术（Electromagnetic Wave Testing）是一种利用电磁波与材料内部介电常数和导电性变化关系进行分析的无损检测方法。该技术通过电磁波在材料中传播时的反射、透射和散射特性，探测内部结构的均匀性和潜在缺陷。常见的电磁波检测技术包括地质雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）和电磁感应法。地质雷达是一种高频电磁波探测技术，工作频率通常在10MHz~2.5GHz之间，通过天线发送和接收信号，探测深度可达30m，分辨率达到毫米级别，尤其适用于地下工程中的管线分布和隐蔽结构检测。电磁感应法则利用材料在交变电磁场中的感应电流变化，适合评估金属部件的裂纹、锈蚀及厚度。电磁波检测技术具有非接触性、

高效率 and 适应性强的特点，能够在复杂环境中实现快速检测，广泛应用于钢筋混凝土内部构件分布、腐蚀评估

及地下设施勘探<sup>[2]</sup>。地质雷达与电磁感应法关键数据见表1。

表1 地质雷达与电磁感应法关键数据

技术	工作频率范围	探测深度	分辨率	适用场景
地质雷达 (GPR)	10MHz ~ 2.5GHz	0.3 ~ 30m	毫米~厘米级	地下管线、隐蔽结构检测
电磁感应法	几 kHz ~ 数 MHz	0.01 ~ 2m	毫米~亚毫米级	金属裂纹、锈蚀及厚度评估

4. 热成像技术

热成像技术 (Thermal Imaging Technology) 是一种基于物体表面热辐射特性的无损检测方法，通过捕捉物体表面红外辐射能量的分布，分析其温度变化以评估内部结构的完整性和缺陷情况。热成像检测依赖于材料热导率、热容和辐射率等物理特性，能够非接触地识别温度异常引起的缺陷区域。其核心设备是红外热像仪，常用波长范围为 8 ~ 14 μm，探测灵敏度达到 0.03℃，可对大面积目标进行快速扫描。该技术广泛应用于外墙保温系统的空鼓、脱落检测，以及建筑材料的湿气侵入或裂纹监测。通过分析热图像中的温度梯度和热点分布，可以识别深度达到几厘米的内部缺陷。热成像技术具有高效、直观和无接触的优势，尤其适合复杂表面及动态监测场景。然而，其效果受到外部环境温度变化、太阳辐射及风速等因素的影响，需严格控制检测条件以确保数据的准确性。

及混凝土内部水分含量，探测深度可达 15m，适合大体积结构的无损评估。结合热成像技术，通过捕捉温度分布异常，可以识别外墙保温系统的空鼓和剥离等问题<sup>[3]</sup>。



图1 地质雷达检测现场

二、无损检测技术在建筑工程质量检测中的具体应用

(一) 建筑结构完整性检测

建筑结构完整性检测是确保工程质量和安全性能的重要环节，通过无损检测技术，可以有效识别结构内部的缺陷、裂缝、空洞以及其他可能影响结构稳定性的因素。超声波检测技术是其中的重要手段，其通过声波在混凝土、钢结构等材料中的传播特性，检测裂缝深度和钢筋分布，深度精度可达 ±1mm。此外，射线检测技术在焊缝质量和混凝土密实性评估中具有显著优势，能够直观呈现结构内部的空洞和夹杂物，其分辨率通常可达 0.05mm。地质雷达技术可用于检测钢筋分布 (见图1)

(二) 材料性能评估

材料性能评估是建筑工程质量控制的核心内容，通过无损检测技术，可以对混凝土、钢材等材料的关键性能参数进行定量分析。混凝土抗压强度评估通常采用超声波回弹综合法，回弹值和声速的结合分析使得强度评估误差控制在 ±5%。射线检测技术通过监测材料内部密度变化，可以有效识别钢材中的气孔、夹杂物和裂纹，分辨率达到 0.02mm。热成像技术可用于分析材料表面的热导率变化，从而评估保温材料的热性能，其灵敏度可检测到 0.03℃ 的温差。电磁感应法在钢筋锈蚀和涂层厚度评估中表现出色，能够检测钢筋表面腐蚀层厚度，精度可达 0.01mm。材料性能评估的无损检测技术及关键数据见表2。

表2 材料性能评估的无损检测技术及关键数据

无损检测技术	应用领域	关键参数	检测精度	检测深度
超声波回弹综合法	混凝土抗压强度评估	声速、回弹值	强度误差 ±5%	≤ 1m
射线检测技术	钢材内部缺陷检测	气孔、夹杂物、裂纹尺寸	分辨率 0.02mm	≤ 500mm
热成像技术	保温材料热性能评估	表面温度梯度	温差灵敏度 0.03℃	≤ 数厘米
电磁感应法	钢筋锈蚀及涂层厚度检测	锈蚀层厚度、涂层厚度	精度 0.01mm	≤ 10mm

(三) 施工过程中的质量控制

在建筑施工过程中，质量控制是确保工程按设计要求实现的重要环节，无损检测技术为实时监测和评估施工质量提供了科学工具。超声波检测技术在混凝土浇筑过程中表现出重要作用，通过测定混凝土内部波速分布，可评估其密实度和均匀性，波速误差控制在 ±10m/s 以

内。射线检测技术在焊缝质量检测中广泛应用，其能够检测直径 0.02mm 以上的焊接缺陷，包括气孔、未焊透和夹渣等问题，提供直观的成像结果。地质雷达技术用于检测地下基础施工时管线的精确定位，其探测深度可达 15m，分辨率达到毫米级，有效避免施工中对隐蔽设施的破坏。热成像技术通过实时监测施工表面的温度变化，

可有效识别混凝土早期水化反应异常区域，其温差检测灵敏度可达 $0.03^{\circ}\text{C}$ 。结合多种无损检测手段，可以全面控制施工过程中材料的均匀性、接缝的质量以及隐蔽区域的完整性，从而降低返工率，提高施工效率和工程安全性<sup>[4]</sup>。

#### （四）隐蔽工程检测

隐蔽工程的质量检测是建筑工程验收中的重要内容，无损检测技术为地下管线、钢筋混凝土和隐蔽结构的评估提供了精准方法。地质雷达技术能够高效探测地下管线及隐蔽设施的分布，其探测深度通常在30m以内，精度达到厘米级，适用于复杂地质条件下的隐蔽目标识别。电磁感应法在钢筋分布及混凝土保护层厚度测量中具有优势，其检测误差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内，能够准确评估隐蔽钢筋的埋深和排列密度。超声波检测技术通过脉冲反射原理，可以检测混凝土内部空洞、裂缝及其他缺陷，其分辨率可达毫米级，适合大体积结构的无损评估。热成像技术能够识别地下管道渗漏或热损失问题，通过温度异常分布，确定隐蔽缺陷的具体位置和范围，温差检测灵敏度可达 $0.02^{\circ}\text{C}$ 。

#### （五）耐久性与寿命预测

耐久性与寿命预测是建筑工程质量评估的重要内容，无损检测技术为其提供了科学依据和精确手段。通过超声波检测技术可以监测混凝土内部微裂纹的发展情况，其波速变化与裂纹深度的关系能够准确评估结构老化程度。射线检测技术则可用于识别钢筋锈蚀及混凝土中空隙的扩展情况，通过对射线强度的衰减分析，确定材料密度的变化规律，并预测其长期性能退化趋势。电磁感应法通过监测金属材料在交变磁场中的感应电流变化，评估钢筋的锈蚀速率及厚度损失，检测精度可达 $0.01\text{mm}$ 。声发射技术是一种实时监测手段，通过捕捉材料内部释放的弹性波信号，分析材料应力集中和疲劳累积情况，从而预测结构在长期荷载作用下的寿命。结合长期监测数据和数学模型分析，可以构建基于无损检测的耐久性预测模型，为关键构件的维护决策提供科学指导。

### 三、无损检测技术在建筑工程中的技术挑战与解决策略

#### （一）技术局限性分析

尽管无损检测技术在建筑工程质量检测中具有广泛应用，但在实际操作中仍存在一定的技术局限性。首先，检测精度受制于设备性能和环境条件。例如，超声波检测在大体积混凝土中因波能衰减导致信号失真，从而影响裂缝深度和内部缺陷的识别精度。射线检测技术的穿透能力虽然较强，但在厚度超过500mm的混凝土中，其分辨率可能显著下降，难以有效检测深层缺陷。此外，电磁波检测技术在强干扰环境下容易受金属物体 and 湿度变化的影响，导致信号噪声增加，数据分析复杂化。其

次，不同检测技术对材质的适用性存在局限，例如热成像技术难以穿透密实材料而仅限于表面缺陷检测。再者，操作难度和数据分析复杂性增加了对技术人员专业素养的要求，特别是在多种检测手段集成应用时，如何处理多源数据并实现高效融合仍是一个挑战<sup>[5]</sup>。

#### （二）多技术集成的必要性

随着建筑工程复杂程度的提高，单一无损检测技术往往难以全面覆盖所有检测需求，多技术集成已成为一种必要趋势。各类无损检测技术在工作原理、检测精度和适用范围上各有优势与不足，通过技术集成，可以实现互补性和功能扩展。例如，在混凝土结构检测中，超声波检测可以提供裂缝深度信息，而射线检测则能够直观呈现内部缺陷的形状与分布，两者结合可大幅提高检测的全面性和准确性。地质雷达和电磁感应技术集成应用在地下管线探测中表现突出，通过融合雷达成像和电磁参数分析，可有效区分管线材质及深度位置。此外，多技术集成还可以提高数据的可信度，通过对多个信号源的对比分析，降低单一技术出现的误差。随着人工智能和大数据技术的发展，多技术集成正在向智能化方向发展，通过实时处理多源数据，实现自动识别和分析，为建筑工程质量检测提供更加精准和高效的技术支持。这种集成策略在提升检测深度、扩大适用范围和增强分析能力方面具有重要意义，为复杂工程提供了全面的质量保障。

#### 结语

总而言之，无损检测技术在建筑工程质量检测中具有不可替代的重要作用。凭借其非破坏性、高精度和多样化的检测手段，无损检测技术能够全面评估结构完整性、材料性能及施工质量，同时为隐蔽工程的检测和耐久性预测提供科学依据。通过不断优化技术应用和克服实际挑战，无损检测技术为建筑工程的安全性、可靠性和可持续性提供了坚实保障，在现代工程建设中展现出广阔的发展前景和实用价值。

#### 参考文献

- [1] 高妮霞. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用[J]. 品牌与标准化, 2024, (06): 202-204.
- [2] 柯乐. 无损检测技术在建筑工程质量检测中的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (19): 95-97.
- [3] 韦智. 浅议无损检测技术在钢结构建筑工程检测中的应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (13): 82-84.
- [4] 伍俊宇. 无损检测技术在建筑工程实体检测中的应用策略[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (06): 105-107.
- [5] 陈加伟. 无损检测技术在建筑工程质量检测中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (01): 84-86.