

# 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用

刘林 王康 张凯

江苏省水利科学研究院，江苏南京，210017；

**摘要：**本文聚焦无损检测技术在水利工程质量检测领域的应用研究。首先，系统阐释无损检测技术的内涵界定、核心技术特点及主流应用方法；其次，深入剖析水利工程质量检测的关键意义与核心检测内容；在此基础上，重点探究该技术在水利工程混凝土结构、金属结构及岩土体三大核心构件质量检测中的具体应用路径与实践要点。通过上述研究，不仅明确无损检测技术在保障水利工程建设质量、维护工程长期安全稳定运行中的核心支撑作用，更为该技术在水利工程领域的规模化推广与科学化应用提供理论依据和实践指引。

**关键词：**无损检测技术；实践；水利工程；质量检测

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.041

## 前言

纵观古今，水利工程始终承载着人类生存发展的重要使命，其建设与发展历来为世人所重。从古代战国时期李冰父子主持修建的都江堰、韩国水工郑国开凿的郑国渠等传世瑰宝，到当代举世瞩目的三峡水利枢纽、横跨南北的南水北调工程等超级工程，每一项水利杰作不仅凝结着不同时代人类的智慧结晶与创造伟力，更以跨越时空的影响力，深刻推动着社会经济的迭代发展，持续提升着人民群众的生活品质，成为串联古今文明、赋能社会进步的重要纽带。

## 1 混凝土内部缺陷检测

### 1.1 超声法对混凝土内部缺陷检测的应用实践

超声法用于检测混凝土内部缺陷的基本原理，可以理解为当超声波在材料内部传播过程中遇到结构异常区域时，如空洞或者密实度不足的位置，会产生波的反射、路径偏移或者能量分散现象。这些物理变化会直观体现在超声波传播速度、振幅衰减等参数指标上。实际检测操作中，技术人员需要将超声发生装置贴合在混凝土表面，通过发射高频声波并接收反馈信号的方式进行分析。如在某水利设施的质量评估项目中，检测团队曾在坝体表面选取二十余个测点，系统性地采集超声波反射数据。当声波传播路径中存在直径超过5毫米的空洞时，接收端会出现明显的信号延迟和波形畸变现象，根据这些异常特征就能反推出缺陷的空间位置和规模尺寸。

### 1.2 回弹法在混凝土强度检测中的应用实践

回弹法作为混凝土质量检测中应用广泛的无损检测手段，其核心原理是通过量化混凝土表面对标准化冲击能量的反弹响应，间接评估混凝土的抗压强度。检测时，技术人员采用专用回弹仪（依据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23-2011选型），利用仪器内部弹簧驱动锤头冲击混凝土结构表面，锤头撞击后反

弹的距离会被转化为回弹值。该回弹值与混凝土表面硬度呈显著正相关关系，通常情况下，回弹值越高，表明混凝土表面硬度越大，其对应的抗压强度也越高。

需重点关注的是，回弹法检测结果易受多种外界因素干扰，需进行针对性修正或规避：一是测试角度，当检测面与水平面不垂直（如倾斜墙面、顶面、底面）时，重力会影响锤头反弹轨迹，需根据实际角度查阅规范进行角度修正；二是混凝土表面状态，若检测面存在浮浆层、疏松层、油污或涂层，会导致回弹值失真，需提前清除表层杂质并打磨平整；三是碳化深度，混凝土表面碳化会增大表面硬度，进而偏高回弹值，必要时需同步测量碳化深度并进行强度修正，避免出现强度误判。

在水利工程领域，回弹法因操作便捷、效率高、成本低的优势，被广泛应用于坝体、引水渠衬砌、涵闸闸室等混凝土构筑物的强度验收与质量普查。以某大型引水工程的混凝土衬砌质量验收项目为例，检测团队严格遵循规范流程开展检测：首先划分检测区域（每区域面积不大于 $20m^2$ ），在每个区域内选取不少于10个测点；每个测点需连续进行3次锤击，剔除异常数据后取平均值作为该测点回弹值，再计算区域内所有测点的平均值作为该区域的代表回弹值。

### 1.3 超声回弹综合法在混凝土质量检测中的引用实践

超声-回弹综合法是将超声检测与回弹检测有机结合的复合型无损检测技术，其核心逻辑在于突破单一检测方法的局限性，综合考量混凝土内部密实程度与表面硬度两大关键指标，实现对混凝土质量更全面、精准的评估。具体而言，该方法通过同步测量超声波在混凝土内部的传播速度（反映内部密实度、完整性）与回弹仪冲击混凝土表面的回弹值（反映表面硬度），基于两种参数与混凝土抗压强度的内在关联，建立专属换算模型，进而推导出混凝土的实际强度。

相较于单一检测技术，超声-回弹综合法的显著优

势在于互补性：既弥补了回弹法仅能反映表面状态、易受表层浮浆、碳化等因素干扰的不足，又克服了超声法单独评估强度时灵敏度较低的缺陷，使检测结果更具客观性与可靠性。在实际应用中，该方法需遵循《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》（CECS 02:2005）的标准化要求，确保检测流程规范、数据准确。

在水利工程实践中，超声-回弹综合法广泛应用于水库大坝、涵闸、引水渠等核心混凝土构筑物的质量检测。以某水库大坝的质量复核工程为例，检测团队采用该组合式检测流程开展工作：首先对坝体检测区域进行表面处理，清除浮浆、杂质并打磨平整；随后在同一测点位置，先用超声检测设备精准采集超声波传播速度数据，再用回弹仪完成点位回弹测试（每个测点连续测试3次，剔除异常值后取平均值）；最后将两组有效数据代入事先标定的强度换算模型，成功计算出该区域混凝土的实际抗压强度，为坝体质量评估与安全运维提供了关键技术依据。

## 2 金属结构质量检测中的应用

### 2.1 磁粉检测金属焊缝表面缺陷

磁粉检测是基于漏磁场原理的无损检测技术，核心适用于铁磁性金属材料的表面及近表面缺陷检测，如焊缝裂纹、气孔、夹渣、折叠等缺陷的识别与定位。其工作原理为：当铁磁性工件被外加磁场磁化后，内部会形成均匀磁力线；若工件表面或近表面存在缺陷，会破坏磁场连续性，导致部分磁场泄漏形成漏磁场，此时施加的磁粉（荧光或非荧光型）会在漏磁场吸附下聚集，形成与缺陷形态一致的磁痕，便于技术人员直观判别。

**表面预处理：**通过砂纸打磨、清洗剂擦拭等方式，清除焊缝区域的氧化皮、油污、铁锈及焊接飞溅物，确保表面平整洁净，避免干扰磁痕形成；

**磁化操作：**根据焊缝结构选择触头法、线圈法或磁轭法等磁化方式，控制磁场强度至规范要求，保证缺陷处产生足够强度的漏磁场；

**磁粉施加：**采用干法（适用于粗糙表面）或湿法（磁粉悬浮液，灵敏度更高）施加磁粉，确保磁粉均匀覆盖检测区域；

**磁痕观察与记录：**荧光磁粉需配合紫外灯照射观察，记录磁痕的位置、形状及尺寸，依据标准评定缺陷等级；

**退磁与后处理：**检测完成后对工件退磁，避免残留磁场影响后续使用，再清理表面磁粉残留。

在水利工程中，磁粉检测广泛应用于压力钢管、金属闸门、启闭机等铁磁性构件的焊缝质量检测。以某水电站压力钢管安装工程为例，检测团队针对环向与纵向焊缝开展检测，通过磁轭法磁化并喷洒磁粉悬浮液，最终发现3处线性磁痕，判定为焊接裂纹，及时进行补焊处理，保障了设备运行安全。

该技术的核心优势是结果直观、灵敏度高、操作简便、成本较低，可检出宽度仅约1μm的微小表面裂纹，且不受工件尺寸和几何形状限制。其局限性在于仅适用于铁磁性材料，无法检测不锈钢、铝合金等非铁磁性金属，且对埋藏深度超过1-2mm的内部缺陷检出能力较弱，需与其他检测方法配合使用。

### 2.2 超声检测金属内部缺陷

超声检测是利用超声波传播特性检测金属内部缺陷的无损检测技术，核心适用于金属结构内部埋藏缺陷的识别，如焊缝未焊透、气孔、夹渣、内部裂纹等。其基本原理为：超声波在均匀金属材料中沿直线传播，当遇到缺陷或材料界面时，会产生反射、折射等现象，检测仪器接收反射波信号并转换为电信号，技术人员通过分析反射波的声时、幅度、波形等特征，可精准判断缺陷的位置、大小及性质。

**表面预处理：**清除检测区域的油污、锈蚀、涂层等杂质，打磨平整以保证探头与工件表面良好耦合；

**耦合剂涂抹：**在探头与工件表面涂抹耦合剂（如机油、甘油），减少超声波传播过程中的能量损耗；

**探头移动检测：**手持超声探头沿检测区域匀速移动，确保覆盖全部焊缝及热影响区，根据需求选择直探头或斜探头；

**信号分析与评定：**通过仪器屏幕观察反射波信号，结合标准试块比对或AVG曲线法，定量评定缺陷当量大小，判定缺陷等级。

在水利工程中，超声检测是压力钢管、金属管道、水电站厂房钢结构等构件内部质量检测的核心手段。某水利工程压力钢管安装过程中，检测团队对所有焊缝开展超声探伤，通过斜探头检测发现2处未焊透缺陷，依据反射波声时计算缺陷深度约3mm，及时采取返修措施，避免了运行过程中缺陷扩展。

该技术的优势在于检测深度大、灵敏度高、对内部缺陷识别能力强，适用于厚度较大的金属构件，且检测过程对工件无损伤。其局限性是对检测人员的操作技能和经验要求较高，对表面粗糙或形状复杂的工件检测难度较大，需提前做好表面处理。

### 2.3 渗透检测金属表面开口缺陷

渗透检测是基于毛细作用原理的无损检测技术，主要用于检测金属及非金属材料的表面开口缺陷，如裂纹、针孔、疏松、夹渣等开口缺陷。其核心原理为：将含有荧光或者色染料的渗透液涂覆在工件表面，渗透液通过毛细作用渗入表面开口缺陷中；去除表面多余渗透液并干燥后，施加显像剂，显像剂通过毛细作用将缺陷内的渗透液吸附回渗，形成放大的缺陷痕迹，在白光或紫外光下可直观观察。

**表面预处理：**清除工件表面的油污、锈蚀、氧化皮、

涂层等杂质，打磨平整，确保缺陷开口畅通，避免杂质堵塞缺陷；

**渗透施加：**将渗透液均匀涂抹或喷洒在检测区域，根据缺陷类型控制渗透时间（通常5-30分钟），确保渗透液充分渗入缺陷；

**多余渗透液去除：**采用清洗剂擦拭、冲洗等方式，去除表面多余的渗透液，避免残留渗透液形成虚假痕迹；

**干燥处理：**通过自然干燥或热风干燥，去除工件表面残留的水分或清洗剂，为显像做准备；

**显像与观察：**涂抹或喷洒显像剂，等待显像剂吸附缺陷内的渗透液（通常7-30分钟），在合适光源下观察缺陷痕迹，记录缺陷位置、形状及尺寸。

在水利工程中，渗透检测广泛应用于金属闸门、输水管道焊缝、启闭机零部件等表面开口缺陷的检测。某水利设施闸门维护过程中，检测人员针对闸门锈蚀严重区域开展渗透检测，通过着色渗透液涂抹、清洗、显像后，发现4处细微表面裂纹，及时进行打磨修复，防止裂纹扩展导致结构失效。

该技术的优势是适用范围广、操作简便、缺陷显示直观，不受工件化学成分、形状及缺陷方向限制，可检测黑色金属、有色金属、塑料等多种材料，且检测设备便携，适合野外作业。其局限性在于仅能检测表面开口缺陷，无法检测内部缺陷或封闭开口缺陷，且难以确定缺陷深度，检测结果受操作人员技能影响较大。

### 3 岩土体质量检测中的应用

#### 3.1 地质雷达检测岩土体内部结构

地质雷达检测基于高频电磁波反射原理，通过发射电磁波并捕捉反射信号，探查岩土体内部空洞、含水层等异常。其核心是利用不同介质介电常数差异，通过反射波的传播时间、振幅等参数，判断异常区域的埋深与性质。流程为：设定天线频率→布设测线→移动天线采集数据→软件处理解译。在某水库坝基排查中，400MHz天线检测发现，某测点反射波延迟0.5毫秒、振幅增强30%，判定为25cm埋深、直径超20cm的空洞，另一段测线振幅突变提示浅层渗水，经灌浆加固消除隐患。

**优势：**无损高效、分辨率高、成像直观；**局限性：**易受金属与电磁干扰，高含水率土层中探测深度降低。

#### 3.2 瑞雷波法检测岩土体力学性能

瑞雷波法通过分析瑞雷波传播速度与岩土体力学参数的相关性，评估土体密实度、承载力。核心原理为波速与土体密实度正相关，密实土体波速快，松散或软土夹层波速低。

流程为：布设测点→锤击激振→传感器采集信号→计算波速并反演力学指标。某水库堤防验收中，30个测点多数波速350~450m/s（压实度≥93%），2个测点波

速220m/s（松散夹层），补压后复检达标。

**优势：**操作简便、成本低、无扰动；**局限性：**受地形影响大，复杂区域波速解译难度高。

#### 3.3 声波透射法检测桩基完整性

声波透射法是检测水利工程混凝土灌注桩完整性的核心无损技术，可识别桩身空洞、夹泥、断裂、密实度不足等缺陷。

其原理为：桩基成桩时预埋2根及以上声测管，检测时将发射与接收换能器分别置于管内，以清水为耦合介质，使换能器沿桩身同步升降，逐点采集超声波声时、振幅、主频等参数。均匀完整的混凝土中声波传播稳定，参数无异常；桩身存在缺陷时，声波传播路径发生绕射或反射，表现为声时延长、振幅衰减、主频降低，据此可定位缺陷位置与范围。

在某水利枢纽闸室灌注桩检测中，团队对36根直径1.5m的桩基开展检测，发现1根桩在12~14m深度处声时延长15%、振幅衰减40%，判定为III类夹泥缺陷，经钻孔压浆加固后复检合格。

该技术的优势是检测精度高、缺陷定位准，不受桩长和桩径限制；**局限性**为需预埋声测管，增加施工工序与成本，且检测结果易受声测管垂直度、耦合介质均匀性影响。

### 4 结论

本研究通过系统探究无损检测技术在水利工程质量检测领域的应用路径，明确了该技术在保障工程建设质量、维护工程长期安全运行中的核心支撑作用。无损检测技术凭借非破坏性、内部缺陷可识别的显著优势，已广泛应用于混凝土结构、金属结构及岩土体等水利工程核心构件的质量检测工作。

综上所述，瑞雷波法作为无损检测技术体系中针对岩土体质量检测的关键技术之一，具备清晰的理论原理与成熟的工程实践价值。该技术以瑞雷波传播速度与土体密实度的正相关关系为核心逻辑，可精准量化评估岩土体密实度、承载力等关键力学指标，为水利工程岩土体结构的质量判定提供了科学且客观的检测依据。

### 参考文献

- [1] 李伟. 水利水电工程施工中安全生产保障措施探究[J]. 人民黄河, 2025, 47(S2): 177-178.
- [2] 向枢, 柯中伟, 甘立刚, 等. 结构加固用水泥基灌浆料与混凝土黏结强度试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2025, 51(06): 42-46+80.
- [3] 胡莹莹, 方逸群. 基于智能感知的混凝土强度无损检测技术研究与应用[J]. 办公自动化, 2025, 30(24): 14-116.