

无损检测技术在水利水电结构检测中的应用研究

白忠威

湖北韩宇检测有限公司 湖北 武汉 841306

摘 要：本文系统梳理水利水电结构检测的主要需求与难点，概述超声波、冲击回波、地质雷达、红外热成像及声发射等主流无损检测方法的基本原理与适用条件，重点分析各技术在混凝土坝、输水隧洞、金属闸门及水下结构等典型场景中的应用要点与优势局限。在此基础上，从环境干扰抑制、多技术融合及定量化评估等维度探讨当前应用中的技术瓶颈与改进方向。研究表明，无损检测技术在水利领域的应用正从单一方法探测向多源信息综合诊断转变，其发展需依托水利结构特点进行针对性的方法适配与标准建设。

关键词：无损检测；水利水电结构；混凝土检测；超声波；冲击回波

引言

水利水电结构是国民经济的重要基础设施，其安全运行关乎防洪、供水及生态安全。混凝土大坝、水闸、输水隧洞等水利建筑物长期承受水力荷载、温度变化、冻融循环及水流冲刷等作用，材料劣化与结构损伤难以避免。及时准确掌握结构损伤状况和剩余寿命，是制定维修加固方案、保障工程安全的前提。传统检测方法常需钻孔取样或局部破损，效率低且易造成二次损伤，难以满足大规模、高频次检测需求。无损检测技术（NDT）能在不损害被检对象的前提下获取内部质量信息，在水利结构检测中应用日益广泛，涵盖坝体密实性检测、隧洞衬砌脱空识别、闸门焊缝探伤及水下缺陷排查等。然而，水利结构作业面大、环境干扰强、形式多样，给无损检测带来特殊挑战。

1 水利水电结构检测的特点与技术需求

1.1 水利结构检测的主要对象与病害类型

水利水电结构检测的主要对象包括：混凝土坝（重力坝、拱坝、碾压混凝土坝）、水闸与泵站、输水隧洞与涵管、渡槽与倒虹吸、金属闸门及启闭机械、压力钢管等。不同结构的主要病害类型各异：混凝土坝体常见裂缝、渗漏、冻融剥蚀、碱骨料反应及内部不密实等；隧洞衬砌则易出现背后脱空、开裂、渗水及钢筋锈蚀；金属结构的主要病害为焊缝缺陷、腐蚀减薄及疲劳裂纹。这些病害的隐蔽性强、发展缓慢但后果严重，亟需有效的检测手段进行早期识别。

1.2 水利结构的特殊环境约束

水利结构检测面临一系列特殊的环境约束。第一，大范围与高落差——大坝动辄数十米至上百米高，检测工作

面大且高空作业风险高。第二，水下部位的不可达性——坝体水下部分、输水隧洞内壁等无法直接目视检查。第三，强环境干扰——水流噪声、电磁场、温度梯度及湿度变化对检测信号形成显著干扰^[1]。第四，结构表面状况复杂——混凝土表面常存在沉积物、生物附着或修补层，影响传感器耦合。这些约束要求水利无损检测技术必须具备远距离、抗干扰和适应恶劣工况的能力。

1.3 水利结构检测的技术需求层次

水利结构无损检测的需求可划分为三个层次。第一层次为缺陷普查——快速大范围筛查，发现可疑区域，要求检测效率高、成本低。第二层次为精细检测——对可疑区域进行详细探测，确定缺陷的类型、位置和规模，要求分辨率和定位精度高。第三层次为长期监测——对关键部位或已知缺陷进行定期复测，掌握其发展演变趋势，要求检测结果具有良好的可重复性和可比性。不同层次的需求对应不同的技术方法和实施策略。

2 主流无损检测技术及其水利适用性

2.1 超声波检测技术

超声波检测（UT）利用高频声波在介质中的传播特性来探测内部缺陷。其基本原理是：声波在均匀介质中匀速传播，遇到缺陷（裂缝、空洞、不连续界面）时发生反射、折射和绕射，通过分析接收到的透射波或反射波的声时、波幅和频率变化，可判断缺陷的位置和相对大小。在混凝土检测中，常用的超声脉冲法通过测量声速和波幅来评价混凝土的均匀性和内部质量——声速降低或波幅显著衰减通常意味着存在不密实区或裂缝。超声波检测在水利混凝土中的应用包括：大坝混凝土的裂缝深度检测（采用单面平测法或对测法）、碾压混凝土

施工质量检测（层间结合质量评价）以及隧洞衬砌厚度测量。其优势在于设备便携、操作相对简单、对表面状况要求不高；局限性是检测深度有限（一般不超过数米），对多孔、粗骨料含量高的混凝土散射强烈，信号信噪比下降明显。在金属结构方面，超声探伤是闸门焊缝和压力钢管的主要检测手段，灵敏度高且定位准确。

2.2 冲击回波法

冲击回波法（IE）是一种基于应力波反射原理的检测方法。通过机械方式在结构表面产生瞬时冲击，激发出纵波（P波）在构件内部传播，当应力波遇到构件底面、内部空洞或裂缝时产生反射，反射波与入射波叠加产生共振。通过分析表面位移响应信号的频谱特征，可确定构件厚度或缺陷深度。该方法尤其适用于板状、柱状混凝土结构的厚度测量和内部空洞、脱空检测^[2]。在水工结构中，冲击回波法最典型的应用是检测输水隧洞衬砌与围岩之间的脱空缺陷，以及大坝廊道衬砌、溢流面混凝土的粘结质量。其不依赖于相对的两个表面，单面测试即可完成，非常适用于隧洞、涵管等内部空间有限的场合。该技术对缺陷的定位精度较高，但受结构几何形状影响显著，不适用于形状过于复杂的构件。

2.3 地质雷达检测技术

地质雷达（GPR）通过发射天线向结构内部发射高频电磁波（数十 MHz 至数 GHz），电磁波在介质中传播时遇到介电常数差异界面（如混凝土与空气、钢筋与混凝土、含水层与干燥层）产生反射回波，被接收天线捕获。通过分析回波的双程走时和幅值，可推断目标体的埋深、位置和大致规模。GPR 具有连续、快速、高分辨率成像的优势，尤其适合大面积的快速普查^[3]。在水工结构中，地质雷达主要用于：大坝坝体内部缺陷和分层检测、输水隧洞衬砌厚度及背后空洞的快速扫测、水闸底板钢筋分布与保护层厚度检测、以及堤防隐患（蚁穴、动物洞穴）的排查。其检测效率高、图像直观，但探测深度受介质电导率制约——混凝土湿度较大时电磁波衰减显著，探测深度可能大幅缩减，这是水工 GPR 应用中最大的限制因素。

2.4 红外热成像检测技术

红外热成像检测通过测量结构表面的温度分布来推断内部状况。当结构内部存在缺陷（如脱空、含水区域、裂缝）时，缺陷部位的导热性能与周围完好混凝土存在差异，在日照或自然温度变化条件下，缺陷区域的表面温度会出现相应的异常（“热点”或“冷点”）。

红外热像仪可快速捕捉这些温度异常，从而定位内部缺陷。红外热成像技术适用于大坝上游面、溢流面及隧洞内壁的大面积快速检测，可在不接触结构的情况下远距离操作，安全性高^[4]。其主要局限在于：检测深度较浅（一般仅数厘米至十余厘米），受表面辐射率和环境温度变化影响大，缺陷的定量评估较为困难。尽管如此，在坝体渗漏区域排查、保温层脱空检测及隧洞渗水部位识别等场景中，红外热成像仍具有独特优势。

2.5 声发射检测技术

声发射（AE）技术是一种被动式检测方法，通过布置在结构表面的传感器阵列，接收材料在受力变形或裂纹扩展过程中释放的瞬态弹性波信号，实现对结构损伤活动的实时监测。与其他方法不同，声发射检测的是“损伤正在发生”的信号，而非静态缺陷，因此特别适合结构的在线监测和早期预警。在水工结构中，声发射技术被应用于大坝运行期的裂缝活动性监测，通过分析声发射事件的计数、能量和定位分布，判断裂缝是否在持续扩展、扩展速率如何。在金属闸门和压力钢管的疲劳裂纹监测中亦有应用。其优势在于实时性和敏感性高；挑战在于环境噪声（水流声、机械振动）干扰严重，需要进行有效的信号滤波和事件识别。

3 典型水工场景中的检测技术应用要点

3.1 混凝土坝体质量检测

混凝土坝体检测的首要目标是评价混凝土的均匀性、密实性和裂缝状况。针对大坝结构厚度大、双面可达的特点，通常采用超声脉冲法进行透射检测——在坝体两侧布置发射和接收换能器，测量声波穿透的声速，绘制声速等值线图，据此圈定低速异常区。对于大坝上游面水下部位的裂缝和缺陷，可采用水下超声探测方法，由潜水员或水下机器人搭载换能器实施检测。冲击回波法可用于坝体廊道内壁的衬砌厚度和脱空检测。

3.2 输水隧洞与涵管检测

输水隧洞衬砌的常见病害为背后脱空、衬砌厚度不足和裂缝。由于隧洞是狭长结构，检测范围大且作业空间受限，地质雷达是脱空普查的首选工具——沿隧洞轴线连续扫描，快速识别脱空区段，大幅提高检测效率。对疑似脱空区段，再采用冲击回波法进行定点确认和深度测定，两者形成“普查+详查”的互补组合。裂缝检测则可采用超声平测法，沿裂缝走向多点测试，推断裂缝深度。

3.3 金属闸门与压力钢管检测

金属结构检测以焊缝缺陷和腐蚀减薄为主要目标。

焊缝超声波探伤是常规手段,对对接焊缝和角焊缝内部的气孔、夹渣、未熔合等缺陷具有较高检出率。针对大面积钢板的均匀腐蚀和局部点蚀,可采用超声测厚方法,通过布设网格测点获取壁厚分布图,识别减薄严重区域。对于水下金属结构,可采用水下磁粉探伤或交流电磁场检测技术,在无需清除表面涂层的情况下检测近表面裂纹。

3.4 水下结构检测

水下结构检测是无损检测技术在水利领域最具挑战性的应用场景。当前的技术手段包括:水下超声测厚(用于水下钢板腐蚀检测)、水下磁粉探伤(用于焊缝表面裂纹检查)、水下摄像与声学成像(用于结构外观检查和地形测绘)。近年来,多波束声呐和侧扫声呐被引入水工结构水下检测,可对坝体上游面、消力池底板等大面积水下表面进行快速声学成像,发现表面冲刷坑、剥蚀区等宏观缺陷。水下检测的共同难点是作业难度大、成本高、信号衰减严重,目前仍是以“设备潜水员”为主的模式,无人化检测装备的推广应用是未来的重要方向。

4 应用中的技术瓶颈与发展方向

4.1 环境干扰抑制与信号增强

水工结构检测面临的环境干扰比一般土木工程更为突出。水流噪声、水泵振动、电磁场等因素严重降低检测信号的质量。改进方向包括:研发适应水下环境的高灵敏度、低噪声传感器;发展自适应滤波和小波变换等信号处理算法,有效分离有效信号与干扰信号;采用编码激励和脉冲压缩技术,提高声波信号的能量和抗干扰能力。在数据采集层面,应优化传感器耦合方式,消除水中气泡和表面附着物的影响。

4.2 多元技术融合与综合诊断

单一无损检测方法难以全面解决水工结构的复杂检测需求。多技术融合是发展的必然趋势。一方面,不同方法的优势互补——地质雷达普查+冲击回波详查+钻孔验证,已在隧洞检测中形成较为成熟的技术组合;另一方面,多源数据的数据融合技术正在发展中,将不同方法的检测结果在同一坐标系中叠加比对,通过联合反演提高缺陷识别的准确率和可靠性。基于多传感器信息融合的智能诊断系统,是未来水工结构无损检测的重要技术形态。

4.3 缺陷量化评估与标准建设

目前水工无损检测大多停留在定性或半定量层面

——判断“有无”缺陷、大致定位“在哪里”,但对缺陷的几何尺寸、体积及力学影响的量化评估能力不足。这需要建立更精确的缺陷定量反演算法,结合数值模拟和物理模型试验,建立缺陷参数(尺寸、填充状态、位置)与检测信号特征之间的定量关系。更为关键的是,水工结构无损检测的行业标准尚不完善,检测方法、仪器标定、数据判读和质量评定等方面缺乏统一的技术规程,制约了检测成果的规范化和互认。应加快水工无损检测技术标准的编制,明确不同结构类型、不同检测目的下的方法选择、操作要求和评定准则。

4.4 智能化与无人化检测装备

水工结构检测的高空、水下和高危环境呼唤智能化、无人化的检测装备。无人机搭载红外热像仪和激光测距仪,可用于大坝上游面和泄洪建筑物的外表缺陷快速巡检;水下机器人搭载多波束声呐、水下摄像及超声探头,可实现水下结构的无人化、全覆盖检测。这类装备正在从原型验证逐步走向工程应用,其技术发展方向是提高运动稳定性、增强传感器集成度以及提升自主避障和自动检测路径规划能力。

结束语

无损检测技术在水利水工结构检测中的应用,正处于从单一方法探测向多技术综合诊断、从定性判断向定量评估、从人工操作向智能化装备的深刻转变之中。超声波、冲击回波、地质雷达、红外热成像及声发射等技术各有其优势适用场景,也各自面临环境干扰、探测深度和量化能力等瓶颈。应对水工结构大范围、高落差、水下和高危环境的特殊检测需求,没有哪一种技术可以包打天下,多方法协同、多源数据融合是提升检测质量的必由之路。未来应着力于抗干扰硬件的研发、信号处理算法的优化、量化评估模型的建设以及检测标准的完善,推动无损检测技术从“辅助工具”真正成长为水工结构全生命周期安全保障的核心支撑技术。

参考文献

- [1] 张建伟,王磊,李明.水工混凝土结构无损检测技术研究进展[J].水利学报,2022,53(10):1198-1210.
- [2] 刘浩,陈思,赵岩.冲击回波法在水工隧洞衬砌质量检测中的应用研究[J].水力发电学报,2023,42(4):89-97.
- [3] 王平,孙涛,周明.地质雷达在堤防隐患探测中的应用效果分析[J].工程地球物理学报,2024,21(3):312-320.
- [4] 陈刚,张华,杨帆.红外热成像技术在混凝土坝渗漏检测中的应用探索[J].水利水电技术,2023,54(8):102-109.