

水利工程检测中探地雷达检测技术运用研究

何凯 潘磊 杜乃鹏

苏源检测有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5086

[摘要] 水利工程隐蔽部位多、质量检测难度大,探地雷达作为一种高效无损检测技术具有重要应用价值。本文阐述探地雷达系统构成与电磁波传播机理,分析其在堤防隐患探测、混凝土质量检测、渗漏通道识别、水下结构探测及输水建筑物损坏检测等场景的运用,针对高含水率环境适应性、探测深度与分辨率矛盾、复杂地质干扰等关键技术问题,提出频率优选、多频组合、时移检测及智能解译等优化对策。研究表明,合理运用探地雷达可有效提升水利工程隐蔽缺陷检测精度与效率。

[关键词] 水利工程; 探地雷达; 无损检测; 堤防隐患; 混凝土检测

中图分类号: TV512 文献标识码: A

Application of Ground Penetrating Radar Technology in Water Conservancy Engineering Inspection

Kai He Lei Pan Naipeng Du

Suyuan Testing Co., Ltd.

[Abstract] Water conservancy projects contain numerous concealed components, making quality inspection challenging. As an efficient non-destructive testing technology, ground penetrating radar (GPR) has significant application value in this field. This paper introduces the system composition of GPR and the propagation mechanism of electromagnetic waves, and analyzes its applications in embankment hazard detection, concrete quality inspection, leakage channel identification, underwater structure investigation, and damage detection of water conveyance structures. In response to key technical challenges such as adaptability to high-moisture environments, the trade-off between detection depth and resolution, and interference from complex geological conditions, optimization strategies including frequency selection, multi-frequency combination, time-lapse detection, and intelligent interpretation are proposed. The study shows that the proper application of GPR technology can effectively improve the accuracy and efficiency of detecting hidden defects in water conservancy projects.

[Key words] Water Conservancy Engineering; Ground Penetrating Radar; Non-Destructive Testing; Embankment Hazards; Concrete Inspection.

引言

水利工程承担防洪、供水、发电等重要功能,其质量安全直接关系到公共安全。堤防、大坝、渠道等水工建筑物隐蔽部位多,传统钻孔取芯、人工巡查等检测方法存在破坏性强、效率低、定位不准等局限。探地雷达利用高频电磁波反射原理,具有无损、快速、连续、高分辨率的技术优势,在水利工程检测领域应用前景广阔。然而,水利工程高含水率环境对电磁波强烈衰减,复杂地质条件产生干扰,制约了探测效果。本文系统分析探地雷达技术原理与运用场景,针对关键技术问题提出优化对策。

1 探地雷达检测技术的基本原理

1.1 探地雷达的系统构成

探地雷达系统由主机、天线、编码器及电源模块四部分组成。主机是控制单元,负责发射高频电磁脉冲、接收反射信号、进行数据处理和图像显示,其性能决定系统整体工作能力。天线是发射与接收电磁波的核心部件,频率范围10至2000MHz,低频天线(10至100MHz)探测深度大但分辨率低,适用于深层普查;高频天线(500至2000MHz)分辨率高但探测深度小,适用于浅层精细检测。编码器又称测距轮,记录天线移动的水平距离,实现测线定位和剖面图像构建。电源模块为系统供电,便携式设备采用蓄电池,保证野外作业持续供电。各部件协同工作,构成完整的探测系统。合理选配天线频率是保证探测效果的关键,需根据检测目标深度和尺寸综合确定^[1]。

1.2 电磁波传播与反射机理

探地雷达通过发射天线向地下发射高频电磁脉冲,电磁波在介质中传播时遇到介电常数差异界面即发生反射。反射信号的强度与界面两侧介电常数差值成正比,差异越大反射越强。水的介电常数为81,显著高于干土(3至5)、湿土(10至30)、混凝土(6至11)和岩石(4至10),因此含水区、渗漏通道等表现为强反射特征,这是探地雷达识别水利工程隐患的物理基础。接收天线记录反射波的到达时间、振幅和相位信息。根据双程走时可计算目标深度,根据振幅可判断介质性质差异,根据相位变化可识别异常类型。电磁波在导电介质中传播时能量迅速衰减,高含水黏土、盐碱土等对探测深度影响较大。理解传播与反射机理是合理应用探地雷达的技术前提。

2 探地雷达在水利工程检测中的主要应用场景

2.1 堤防工程隐患探测

堤防工程隐患探测是探地雷达应用最广泛的场景之一。检测目标包括堤身裂缝、洞穴、松散区、动物巢穴及管涌通道等。探测时沿堤顶和堤坡布设纵向与横向测线,重点关注历史险工段、穿堤建筑物周边及曾经发生渗漏的部位。典型异常识别特征为:空洞呈双曲线强反射,高含水区呈强振幅水平条带,松散区反射杂乱且振幅减弱。低频天线(50至100MHz)用于深层普查,探测深度可达5至8米;高频天线(200至400MHz)用于浅层详查,可识别直径0.3米以上的空洞。实际工程中,例如江苏某水库大堤探测发现深度2至3米处存在松散区,经验证为动物洞穴,及时处理消除了安全隐患。汛前探测可提前发现隐患,为防汛决策提供依据。

2.2 混凝土结构质量检测

混凝土结构质量检测是探地雷达的重要应用方向。检测目标包括混凝土厚度、钢筋分布、裂缝深度、蜂窝空洞及衬砌脱空区。采用高频天线(900至1500MHz),测网密度一般为10厘米乘10厘米,可获取高分辨率剖面图像。钢筋识别特征为连续强双曲线反射,可准确测量保护层厚度,精度可达正负5毫米。脱空检测应用于隧洞衬砌、渠道底板等部位,衬砌与围岩间脱空区表现为强反射界面,界面下方信号缺失。裂缝检测中,垂直裂缝表现为反射波同相轴错断,水平裂缝表现为强反射层。例如江苏省江都水利枢纽某大型渡槽检测发现底板脱空区5处,最大脱空高度8厘米,为加固设计提供了量化依据。混凝土检测应在干燥条件下进行,表面水膜会严重干扰信号,检测前需清理表面并保持干燥^[2]。

2.3 渗漏通道与高含水区探测

渗漏通道与高含水区探测利用水的高介电常数特性。水与周围介质的介电常数差异可达数倍至数十倍,含水区反射振幅极强,在雷达剖面中呈现醒目的高亮异常。检测时沿堤坝轴线及下游坡脚布设测线,重点关注浸润线出逸点附近及历史渗漏部位。时移检测是水利工程特有的探测方法,同一测线在不同水位期重复探测,对比反射特征变化,可动态追踪渗流发展过程。低频天线(50至100MHz)用于深层渗漏通道探测,可识别深度5至8

米的集中渗水带。例如江苏省淮河入海水道沿线某土石坝下游坡脚探测到强反射异常带,经验证为集中渗漏通道,经劈裂灌浆处理后复测,雷达反射明显减弱。渗漏通道探测应结合地质资料综合解译,避免将砾石层等非含水异常误判为渗漏。

2.4 水下结构与掩埋物体探测

水下结构与掩埋物体探测是探地雷达的特殊应用领域。检测目标包括水下抛石、护底结构、淤积层厚度、掩埋管线及沉船等。采用低频天线(25至100MHz),从水面或冰面拖曳作业,需根据水体电导率调整参数。淡水(电导率低)中电磁波衰减较小,探测深度可达3至5米;海水(电导率高)中衰减极快,探测深度通常不足1米。冰层厚度测量是高寒地区水利工程的重要应用,冰与水的介电常数差异显著,可准确测量冰厚,相对误差小于百分之五。水库淤积探测中,淤积层与原始库床界面清晰可辨,可计算淤积厚度和淤积量。水下检测时,天线需保持与水面平行且距离稳定,风浪较大时数据质量下降。水下掩埋金属管线呈强双曲线反射,非金属管线反射较弱,需结合已知管线资料辅助识别。

2.5 输水建筑物损坏检测

输水建筑物损坏检测涵盖涵洞、渡槽、倒虹吸等结构。检测目标包括衬砌脱落、管壁腐蚀、接缝渗漏及内部淤积等。涵洞检测可采用孔中雷达技术,将天线置于钻孔内进行360度扫描,探测深度可达钻孔周围3至5米范围,有效发现衬砌背后空洞和围岩松动圈。渡槽检测需在槽身表面布设纵向测线,重点关注跨中部位和支座附近,裂缝和钢筋锈蚀均可清晰识别。倒虹吸管壁腐蚀检测中,金属管壁厚度变化可通过反射波振幅变化间接判断,混凝土管壁腐蚀则表现为反射界面模糊。输水建筑物检测的难点在于内部常存积水,发射天线难以贴近结构表面。应对措施包括停水期组织检测、采用屏蔽天线减少水面反射干扰、通过时窗设置滤除水体反射信号。

3 水利工程中探地雷达检测的关键技术问题

3.1 高含水率环境的适应性

高含水率环境是探地雷达检测面临的主要制约因素。水介电常数高、电导率大,电磁波在水中迅速衰减。高含水黏土中,900MHz天线探测深度仅0.5至1米,远低于干燥环境的2至3米,导致深部目标信号微弱甚至消失。这一问题在堤防浸润线以下、水库淤积层等区域尤为突出。高电导率还降低信噪比,噪声掩盖真实缺陷信号,限制了雷达在饱和土层、水下结构的应用。现场操作时,天线与湿软地面耦合变差,部分能量反射而非传入地下,进一步降低深度^[3]。高含水率还使介电常数变化范围增大,取值不准直接影响深度计算精度。应对策略包括选用低频天线、避开水位高峰期检测、采用孔中雷达及增益补偿技术。

3.2 探测深度与分辨率的矛盾

探测深度与分辨率的矛盾是探地雷达的固有特性。低频天线波长长、穿透深,但分辨率低,100MHz天线深度5至8米,最小可识别尺寸约0.5米。高频天线波长短、分辨率高,但深度小,900MHz天线可识别厘米级裂缝,深度仅1至2米。水利工程常需兼顾深度和分辨率,例如既要发现5米以上深层渗漏通道,又

要识别毫米级裂缝,单一频率无法同时满足。深度3至5米、尺寸0.2至0.3米的中间尺度目标形成检测盲区:低频分辨率不足、高频深度不够。解决方法是多频天线组合探测,先低频普查定位异常,再高频详查确认形态;双频天线一次采集获取多尺度信息,通过时频分析分离不同频率成分。

3.3 复杂地质条件下的干扰抑制

复杂地质条件下的干扰抑制是探地雷达检测的又一关键难题。水利工程所处地质环境复杂,多层介质叠加反射导致雷达图像上出现大量虚假信号,增加了目标体判读的难度。金属构件如钢筋、预埋件等对电磁波产生强烈屏蔽效应,使其后方区域信号完全消失,形成探测盲区。地表粗糙度不均匀导致天线与地面耦合不一致,产生强烈的直达波和地面反射干扰。此外,施工现场的电力线路、通信设备等电磁噪声源也会对雷达信号造成干扰。

4 探地雷达检测技术优化的对策措施

4.1 高含水率环境的应对策略

针对高含水率环境,采取多维度应对策略。天线频率优选是首要措施,饱和土层中采用25至50MHz超低频天线取代常规100MHz天线,牺牲分辨率换取探测深度,30MHz天线在湿黏土中探测深度可达3至5米。检测时机选择同样重要,宜安排在旱季或低水位期组织检测,避开雨季和高水位时段,堤防浸润线下降后含水率降低,探测深度可增加百分之五十以上。孔中雷达技术将天线置于钻孔中,绕开表层高含水层直接从内部探测,可有效规避地表衰减。数据处理方面,采用增益补偿技术对不同深度信号进行差异化放大,深层弱信号得以增强;时频分析将时域数据转换至频域,提取特定频率成分抑制含水层干扰。多方法综合验证,在含水率极高区域,探地雷达与高密度电法联合探测,利用电法对水体敏感的特性相互印证,弥补雷达深度不足^[4]。

4.2 深度与分辨率的平衡方法

平衡探测深度与分辨率的矛盾需采用组合技术策略。多频天线联合探测是首选方法,先以低频天线(25至100MHz)进行大范围普查,快速定位异常区域并确定深度范围,再以高频天线(400至900MHz)对异常区进行精细扫描,获取高分辨率图像确认缺陷形态和尺寸。双频或宽频天线同时发射多个频率成分,一次采集获取多尺度信息,后期处理通过时频分析分离不同频率成分,兼顾深度与分辨率。偏移成像处理将倾斜反射面归位至真实空间位置,可改善低频天线的横向分辨率。已知目标标定是工程

实用方法,在现场选取已知深度和尺寸的目标进行测试,建立频率与探测能力的对应关系,为正式检测提供参数依据。目标尺度与频率选择存在经验关系:探测目标尺寸大于0.3米选用100MHz天线,0.1至0.3米选用200至400MHz天线,小于0.1米需选用500MHz以上天线。

4.3 复杂地质干扰的抑制技术

抑制复杂地质干扰依靠采集优化与处理技术双重手段。采集阶段,背景去除通过采集空测道(天线悬空)获取系统噪声和直达波特征,从数据中减去以压制水平层状干扰。共中心点测量获取速度信息用于偏移校正,同时可识别和压制多次波。天线屏蔽技术采用屏蔽天线减少地表杂波,在建筑物密集区域尤为有效。处理阶段,滤波技术包括低通滤波压制高频随机噪声、带通滤波保留有效频带、中值滤波消除孤立点状干扰。偏移成像将绕射波归位至其真实位置,砾石产生的点状绕射被收敛,图像清晰度显著提升。小波变换具有良好的时频局部化特性,可分离有效信号与干扰信号。基于深度学习的智能识别技术,利用大量已知样本训练神经网络,自动识别并剔除地质干扰,突出异常目标。

5 结束语

探地雷达为水利工程隐蔽缺陷检测提供了高效无损的技术手段。本文阐述了雷达系统构成与电磁波传播机理,分析了堤防隐患、混凝土质量、渗漏通道、水下结构及输水建筑物等典型应用场景,针对高含水率环境适应性、深度与分辨率矛盾、复杂地质干扰等关键技术瓶颈,提出了频率优选、多频组合、时移检测、偏移成像及智能解译等优化对策。随着阵列雷达、三维成像及人工智能技术的融合发展,探地雷达在水利工程检测领域将发挥更大作用。

[参考文献]

- [1]马志飞.水利工程检测中探地雷达检测技术运用研究[J].水上安全,2025(19):61-63.
- [2]刘永盛.基于探地雷达的水利工程无损检测技术研究[J].科学技术创新,2026(6):185-188.
- [3]闫永峰.探地雷达在水利工程隧道衬砌脱空质量检测中的应用[J].广东水利水电,2023(2):15-19.
- [4]徐玮,蒋婉,周松.水利工程质量检测中探地雷达的应用分析[J].科技创新导报,2022,19(19):58-60.