

水利水电工程勘察中地质雷达技术的应用

费晓岭

中电建振冲建设工程股份有限公司 北京 100102

摘要: 地质雷达技术基于电磁波传播理论,具有非破坏性、高分辨率等特点,在水利水电工程勘察中应用广泛。本文介绍了其原理、设备系统组成及参数选择优化方法,阐述了在岩溶发育区、断裂构造、堤防隐患等多场景的典型应用,探讨了数据处理、图像解译及误差控制技术。该技术能快速获取连续地下剖面信息,为工程选址、设计、施工提供可靠地质依据,保障工程安全稳定运行。

关键词: 水利水电工程;地质雷达;工程勘察

引言:水利水电工程建设中,准确掌握地下地质情况至关重要,传统勘察方法存在局限性。地质雷达技术作为新兴物探手段,凭借独特优势在工程勘察领域崭露头角。它利用电磁波与地下介质的相互作用获取信息,能高效识别各类地质体。深入研究地质雷达技术在水利水电工程勘察中的应用,有助于提升勘察水平,为工程建设提供更精准的地质支撑,推动行业技术发展。

1 地质雷达技术原理与设备系统

1.1 技术基本原理

地质雷达技术基于电磁波传播理论,通过发射天线向地下发射高频电磁脉冲,脉冲在地下介质中传播时,遇到不同电性差异的界面(如岩性分界面、空洞、断层等)会发生反射、折射和散射,接收天线捕捉反射回地面的电磁波信号,经主机处理后形成包含地下介质信息的雷达剖面图。其核心原理是利用不同介质的相对介电常数、电导率等电性参数差异,实现对地下目标体的定位与识别。电磁波在介质中的传播速度与介电常数负相关,传播路径和反射强度则反映目标体的形态与埋深^[1]。该技术具有非破坏性、探测效率高、分辨率高的特点,相较于传统钻探技术,能快速获取连续的地下剖面信息,尤其适用于浅层地质勘察,为水利水电工程前期勘察提供基础数据支撑。

1.2 地质雷达系统组成

完整的地质雷达系统主要由发射天线、接收天线、主机(数据采集与处理单元)、供电系统及数据存储与显示设备五部分组成。发射天线负责生成并发射高频电磁脉冲,根据探测深度需求可选择不同中心频率的天线,高频天线(如1000MHz以上)分辨率高但探测深度浅,低频天线(如100MHz以下)探测深度深但分辨率较低。接收天线用于接收反射电磁波信号,将电磁信号转换为电信号并传输至主机。主机是系统核心,具备信号放大、滤

波、模数转换等功能,可实时采集和初步处理数据。供电系统为设备运行提供稳定电源,分为内置电池和外接电源两种模式,适配野外复杂勘察环境。数据存储与显示设备用于保存原始数据和显示雷达图像,部分设备支持现场数据预览,方便勘察人员实时判断探测效果,各组件协同工作确保系统高效稳定运行。

1.3 技术参数选择与优化

地质雷达技术参数的选择与优化直接影响探测精度和数据质量,需结合勘察目标、场地地质条件和探测深度需求综合确定。核心参数包括天线中心频率、采样率、扫描速度、时窗长度等。天线频率选择是关键,针对水利水电工程中浅层隐患(如堤防裂缝)可选用500-1000MHz高频天线,针对覆盖层厚度、基岩界面等深层探测需选用50-200MHz低频天线。采样率需满足Nyquist定理,确保准确捕捉高频信号,一般设置为发射脉冲频率的2-5倍。扫描速度需与勘察效率匹配,野外勘察通常控制在0.5-2m/s,同时保证相邻测点数据连续衔接。时窗长度根据最大探测深度计算确定,需覆盖目标体反射信号,避免信号截断。优化时需通过现场试验调整参数,结合地质资料预判介质电性差异,必要时采用多频率天线组合探测,平衡探测深度与分辨率,确保获取全面、精准的地质信息。

2 地质雷达在水利水电工程勘察中的典型应用场景

2.1 岩溶发育区探测

岩溶发育区是水利水电工程勘察的重点区域,溶洞、溶蚀裂隙等地质体易导致坝基渗漏、基坑涌水等工程隐患,地质雷达技术可有效识别此类目标体。探测时,根据岩溶发育深度选择合适频率天线,沿预设测线连续扫描,溶洞、溶蚀裂隙与周围岩体存在明显电性差异,在雷达图像上表现为强反射波组、波形紊乱或反射波缺失的“空白区”,结合反射波旅行时间可计算目标体埋深

与规模。对于深埋岩溶,可采用低频天线结合多次覆盖技术增强信号识别能力。在实际工程中,通过加密测线可精准圈定岩溶发育范围、走向及连通性,为坝基处理、防渗工程设计提供可靠依据。相较于传统钻探,该技术能快速覆盖大面积勘察区域,减少漏探风险,显著提升岩溶探测的效率与准确性。

2.2 断裂构造与软弱夹层勘查

断裂构造与软弱夹层是影响水利水电工程稳定性的关键地质因素,断裂带内岩石破碎、透水性强,软弱夹层则强度低、易变形,地质雷达技术可通过识别其与围岩的电性差异实现精准勘查。探测过程中,断裂构造因岩石破碎、充填物与围岩介电常数不同,在雷达图像上呈现连续或断续的强反射波带,波组错动、扭曲现象明显,可据此判断断裂走向、倾角及破碎带宽度。软弱夹层多由黏土、粉质黏土等组成,介电常数较高,雷达图像上表现为连续的强反射层,波幅大且波形平缓,结合速度分析可确定夹层厚度与埋深^[2]。在坝址、边坡等关键区域勘察中,通过网格状测线布置,能全面掌握断裂构造与软弱夹层的空间分布特征,评估其对工程稳定性的影响,为工程选址、基础处理方案制定提供核心地质数据。

2.3 堤防隐患检测

堤防作为防洪工程的核心设施,其内部的裂缝、孔洞、渗漏通道等隐患直接威胁防洪安全,地质雷达技术凭借非破坏性、快速高效的优点成为堤防隐患检测的主流技术。检测时,通常采用高频天线沿堤防顶面、坡面布置测线,裂缝、孔洞等隐患区域与堤防土体存在电性差异,在雷达图像上表现为反射波幅值增强、波形紊乱,渗漏通道因含水分质介电常数升高,呈现连续的强反射条带。通过分析反射波的传播特征,可精准定位隐患位置、埋深及延伸范围。针对堤防压实度不足区域,雷达图像会呈现波组松散、反射能量较弱的特征,可辅助判断堤防施工质量。在汛期前排查或日常维护中,地质雷达技术能快速完成大面积堤防检测,及时发现潜在隐患,为堤防加固、防渗处理提供精准指导,保障防洪工程安全运行。

2.4 地下管线与埋藏物勘查

水利水电工程施工前,需明确勘察区域内地下管线(如输水管、电缆、排水管)及埋藏物(如废弃构筑物、桩基)的分布,避免施工时造成管线破坏,地质雷达技术可高效完成此类勘查工作。地下管线与埋藏物多为金属、混凝土等材质,与周围土体存在显著电性差异,雷达图像上表现为强反射波峰,且反射波形态与目标体形状相关,圆形管线呈现对称的双曲线反射特征,矩形埋

藏物则表现为规则的强反射界面。通过分析反射波的双曲线形态、波峰位置及旅行时间,可确定管线的埋深、管径、走向及埋藏物的尺寸与位置。勘查时需根据管线埋深选择合适频率天线,浅层管线采用高频天线提高分辨率,深层管线采用低频天线增加探测深度。该技术能快速绘制地下管线与埋藏物分布图,为工程施工布置、基坑开挖等提供安全保障,降低施工风险。

2.5 覆盖层厚度与基岩界面探测

覆盖层厚度与基岩界面的精准探测是水利水电工程坝基选址、基础设计的关键前提,地质雷达技术可通过识别覆盖层与基岩的电性差异,快速获取基岩界面形态及覆盖层厚度分布。覆盖层多为第四系松散堆积物(如砂土、黏土、卵石层),介电常数较高,基岩则相对致密,介电常数与覆盖层存在明显差异,两者界面在雷达图像上表现为连续、稳定的强反射波组,反射波幅值大且波形规整。通过计算反射波从发射到接收的旅行时间,结合预先测定的覆盖层电磁波传播速度,可精准计算各测点覆盖层厚度,绘制覆盖层厚度等值线图,明确基岩起伏形态。在坝址勘察中,通过加密测线可详细掌握基岩界面变化特征,识别基岩凹陷、凸起等不良地质形态,为坝基承载力评估、基础开挖深度确定提供可靠地质依据,保障工程基础稳定性^[3]。

3 地质雷达数据处理与图像解译技术

3.1 数据预处理流程

地质雷达原始数据受仪器噪声、环境干扰(如电磁干扰、地形起伏)及探测系统自身因素影响,存在信号失真、信噪比低等问题,需通过预处理流程提升数据质量,为后续解译奠定基础。预处理流程主要包括数据加载与格式转换、零时刻校正、增益调整、滤波去噪、地形校正等步骤。数据加载后先完成格式转换,确保数据适配处理软件;零时刻校正通过识别发射脉冲与接收信号的起始时间差,消除系统延迟误差;增益调整根据信号衰减规律,对深层弱信号进行放大,使不同深度信号幅值均衡;滤波去噪采用频率滤波、空间滤波等方法,消除高频噪声、杂波及电磁干扰,保留有效反射信号;地形校正则通过实测地形数据,修正因地形起伏导致的信号传播路径偏差,使雷达图像真实反映地下地质体空间位置。预处理过程中需结合原始数据特征和勘察目标,合理选择参数,避免过度处理导致有效信息丢失。

3.2 图像解译方法

地质雷达图像解译是将处理后的雷达剖面转化为地质信息的关键环节,主要采用定性解译与经验判断相结合的方法,核心是识别反射波组的特征(如幅值、频率、

连续性、形态)与地质体的对应关系。首先进行区域性波组对比,划分不同地质层位的反射波组特征,明确正常地层的波组形态;然后识别异常波组,如强反射、弱反射、波形紊乱、波组错动等,结合场地地质资料、钻探数据,判断异常波组对应的地质体类型(如溶洞、断层、软弱夹层等);同时注重波组的连续性分析,连续稳定的波组通常对应均匀地层,断续或扭曲的波组则多与不良地质体相关。解译过程中需结合多条测线的交叉验证,通过平面投影圈定异常区域范围,必要时结合现场地质调查,补充验证解译结果的准确性,确保解译结论符合实际地质条件。

3.3 定量解释技术

定量解释技术旨在通过地质雷达数据计算地质体的关键参数(如埋深、厚度、规模),实现对地下目标体的精准量化分析,为工程设计提供具体数据支撑。核心计算参数包括电磁波传播速度、反射波旅行时间,关键公式为目标体埋深 = (传播速度 × 旅行时间) / 2。传播速度的确定是定量解释的核心,可通过钻孔标定法(利用已知钻孔深度校正速度)、共中心点法(通过多测点数据拟合速度)或经验公式法(根据介质类型估算速度)获取。对于规则地质体(如水平夹层、圆形溶洞),通过识别反射波的起止位置,结合速度参数计算厚度或直径;对于不规则地质体(如断层破碎带),通过追踪波组错动范围,量化破碎带宽度与延伸深度。定量解释过程中需结合多条测线数据进行拟合分析,消除单点数据误差,同时考虑介质电性参数的横向变化,对速度参数进行分区校正,提升量化结果的精准度。

3.4 解译误差控制

地质雷达解译误差可能导致地质判断偏差,进而影响工程设计安全性,需通过多维度措施实现误差控制。首先在数据采集阶段,严格控制探测参数选择、测线布置精度

及天线耦合状态,减少原始数据误差;预处理阶段合理选择滤波、增益等参数,避免有效信号失真,确保数据质量。解译过程中,采用“多方法验证”原则,结合钻探数据、地质调查资料对解译结果进行校准,减少主观判断误差;对于复杂地质区域,增加测线密度,通过交叉验证圈定异常范围,避免漏判或误判^[4]。同时注重人员专业能力提升,积累不同地质条件下的解译经验,建立解译数据库,为同类工程提供参考;针对关键工程区域,可采用多种物探技术(如地震映像法、电法)联合勘查,通过多技术数据互补,降低单一技术的解译误差,确保解译结论准确可靠,为水利水电工程提供科学的地质依据。

结束语

地质雷达技术通过电磁波与地下介质的相互作用,实现了对复杂地质条件的高效、精准探测,在水利水电工程勘察中展现出显著优势。从岩溶发育区隐患识别到堤防安全检测,从断裂构造定位到地下管线勘查,该技术为工程全生命周期地质保障提供了关键支撑。未来,随着数据处理算法优化与多源数据融合技术的深入应用,地质雷达的探测精度与适用性将进一步提升。建议加强技术标准化建设,推广多物探方法联合勘查模式,以应对复杂地质条件下的工程挑战,为水利水电工程高质量发展筑牢地质安全防线。

参考文献

- [1]孙彩霞.水利水电工程勘察中地质雷达技术的应用[J].地下水,2024,46(1):183-184,205.
- [2]潘杨简.地质雷达技术在水利水电工程勘察中的应用[J].水上安全,2024(22):13-15.
- [3]李智源.地质雷达技术在水利水电工程勘察中的应用[J].工程与建设,2023,37(3):849-852.
- [4]雷德义,胡宏达,吴杰,等.黑龙江省牡丹江堤防决口险情调查分析及对策建议[J].中国防汛抗旱,2021,31(1):38-42.