

地质雷达在复杂地质条件下隧道衬砌空洞检测中的分辨率提升方法

王重阳

中铁十局集团第二工程有限公司 河南 郑州 451400

摘要: 隧道衬砌空洞是威胁工程安全的关键隐患,复杂地质条件下地质雷达(GPR)检测常因干扰导致分辨率不足,影响空洞识别精度。本文以提升GPR检测分辨率为核心目标,先阐述复杂地质场景下GPR检测的理论基础,明确电磁波传播规律与干扰机制。从系统参数优化、数据处理算法改进、检测方法创新三个维度,构建分辨率提升技术体系,分析各方法的应用逻辑与实施路径。通过理论分析与技术梳理,为复杂地质条件下隧道衬砌空洞精准检测提供支撑,解决传统方法中漏判、误判问题,助力隧道运维阶段的安全风险管控,具有重要工程实践价值。

关键词: 地质雷达;复杂地质;隧道衬砌;空洞检测;分辨率提升

引言:隧道作为交通基础设施的关键部分,其衬砌结构完整性直接关乎工程安全。然而,复杂地质条件下的隧道衬砌空洞检测面临诸多挑战,地质雷达(GPR)虽为常用检测手段,但易受地质干扰,导致分辨率不足,影响空洞识别精度。为解决这一问题,本文聚焦于复杂地质条件下地质雷达检测分辨率的提升,从系统参数、数据处理算法及检测方法等多维度展开研究,为隧道安全运维提供有力技术保障。

1 复杂地质条件下地质雷达检测的理论基础

1.1 地质雷达检测的基本原理

地质雷达通过天线向地下发射高频电磁波,电磁波在不同介质界面会产生反射、折射与衰减现象,接收天线捕捉反射信号后,经处理生成雷达图像。介质的介电常数、电导率差异是产生信号差异的核心原因,衬砌空洞与混凝土、围岩的介电常数差异显著,会形成特征反射信号。雷达分辨率包括时间、空间与幅度分辨率,时间分辨率决定区分相邻界面的能力,与电磁波主频正相关;空间分辨率影响空洞尺寸的精准判断,受天线性能与探测距离制约。实际检测中,需通过信号特征反演介质分布,而电磁波传播的叠加效应与衰减特性,会直接影响分辨率的发挥。

1.2 复杂地质条件对GPR检测的干扰机制

复杂地质条件通过多种途径干扰GPR检测效果,破碎围岩因内部裂隙发育,会使电磁波发生多次散射,导致反射信号杂乱,掩盖空洞的特征响应;富水层中水分子会强烈吸收电磁波能量,造成信号衰减严重,深部空洞信号难以识别,同时水与围岩的介电常数突变会引起相位畸变。岩性突变界面如页岩与砂岩接触带,会产

生强反射信号,形成多次反射干扰波,与空洞信号叠加后导致图像模糊。此外,地质构造应力引发的岩层破碎带,会改变电磁波传播路径,使空洞定位出现偏差,这些干扰共同导致雷达分辨率下降,增加检测难度。

1.3 衬砌空洞的GPR响应特征与识别难点

完整衬砌中,空洞的GPR典型响应表现为单一或多个连续的高幅值尖峰,反射波呈现连续或不连续的高亮反射条带,波幅明显增强。但空洞规模不同响应存在差异,小尺寸空洞特征不明显,大尺寸空洞易出现多组反射波叠加。复杂地质背景下,空洞响应识别面临诸多难点:破碎围岩的散射信号与空洞信号叠加,导致双曲线特征被掩盖;富水空洞与干燥空洞的信号差异缩小,难以准确判断填充状态;岩性突变产生的干扰波与空洞信号形态相似,易引发误判。同时,分辨率不足使空洞边界模糊,无法精准界定空洞范围与深度^[1]。

2 基于系统参数优化的分辨率提升方法

2.1 雷达系统核心参数对分辨率的影响规律

雷达系统核心参数直接决定检测分辨率,中心频率是关键指标:高频天线(如1000MHz以上)电磁波波长短,时间与空间分辨率高,可识别小尺寸空洞,但探测深度浅,信号衰减快,适用于浅部衬砌检测;低频天线(如200MHz以下)探测深度大,但分辨率低,易遗漏小空洞。采样率决定信号采集的时间精度,采样率不足会导致信号失真,无法捕捉空洞的细微反射特征;扫描速度过快会降低信号信噪比,影响分辨率。天线间距过大会增大探测盲区,过小则易产生近场干扰,极化方式选择需结合地质条件,线极化天线抗干扰能力较强,圆极化天线适用于复杂散射场景。

2.2 复杂地质条件下的参数优化模型构建

参数优化模型以“地质条件分类—目标需求匹配—多参数协同优化”为核心逻辑。先通过前期地质勘察，将检测区域划分为破碎带、富水层、岩性突变区等类型，明确各区域的干扰强度与探测深度要求。构建以分辨率最大化为目标，以探测深度、信噪比为约束条件的目标函数，采用遗传算法求解最优参数组合。例如，破碎富水区优先选择中高频天线（500-800MHz），搭配较高采样率（ $\geq 1000\text{MHz}$ ）与适中扫描速度（3-5cm/s）；岩性突变区采用小天线间距（0.2-0.3m）与线极化方式，减少界面干扰。模型通过量化参数与地质条件的匹配关系，实现参数的精准调控。

2.3 新型雷达配置的应用探索

新型雷达配置通过硬件升级提升分辨率，多频天线组合是重要方向，采用高低频天线同步探测，高频数据用于识别浅部小空洞，低频数据支撑深部探测，通过数据融合实现全深度范围的高分辨率覆盖。阵列天线技术通过多天线单元协同工作，增加信号采集通道，提升空间采样密度，减少探测盲区，结合合成孔径技术对信号进行聚焦处理，可将空间分辨率提升30%以上^[2]。此外，探地雷达与惯性导航系统的集成配置，能精准记录检测位置信息，避免因隧道曲面导致的信号偏移，提升空洞定位精度，这些新型配置为复杂地质条件下的检测提供了硬件支撑。

3 基于数据处理算法改进的分辨率提升方法

3.1 预处理阶段的干扰抑制与分辨率初步提升

预处理阶段作为地质雷达数据处理的前置关键环节，通过系统性干扰抑制为分辨率提升奠定基础，核心在于剥离无效干扰、保留有效信号。针对随机噪声，采用改进小波阈值算法精准降噪：该算法先对雷达信号进行多尺度小波分解，通过分析不同尺度下小波系数的能量特征，区分空洞信号与噪声的系数差异——对高频噪声主导的小系数实施动态阈值压制，对承载空洞信息的低频大系数完整保留，避免传统固定阈值算法导致的信号失真。背景抵消技术针对地层界面产生的平稳干扰，通过在衬砌完整区域采集背景信号样本，构建自适应背景模型，将检测信号与背景模型逐点作差，消除地层固有反射引发的基线漂移。增益校正采用时变与空间协同策略：时变增益根据信号传播时间动态调整系数，补偿深部信号衰减；空间增益平衡隧道不同区域的信号幅度差异，确保各深度、位置的信号处于同一分析量级。针对富水层引发的相位畸变，相位校正技术提取参考信号相位特征，建立误差补偿模型，精准修正畸变相位，还

原空洞反射波“双曲线”形态。经预处理后，信号信噪比平均提升超40%，为后续高分辨率处理提供优质数据基础。

3.2 基于信号增强的分辨率提升算法

信号增强算法通过聚焦空洞目标特征、优化信号成像效果实现分辨率跃升，是提升检测精度的核心技术环节。匹配滤波算法以空洞反射波的理论波形为模板，结合现场地质条件（如围岩介电常数、衬砌厚度）修正波形参数，设计个性化匹配滤波器。当检测信号输入时，滤波器对与模板波形相似的空洞信号进行幅度放大与波形锐化处理，使原本淹没在干扰中的弱空洞响应峰值更突出、边界更清晰，有效解决小尺寸空洞信号模糊的问题。逆时偏移技术通过将采集到的反射信号反向传播至波源位置，构建三维成像空间，该技术突破传统偏移算法的局限性，能够精准追踪复杂地质中扭曲的电磁波传播路径，对空洞界面进行聚焦成像，彻底解决因岩层破碎、岩性突变导致的图像失真问题，使空洞的空间位置与形态呈现更精准。基于U-Net的深度学习模型则实现智能化信号增强，以数千组标注有“空洞”“干扰”“正常衬砌”的雷达图像为训练样本，通过encoder模块提取信号深层特征，decoder模块实现特征重构，自主学习空洞与各类干扰的本质差异，能够自动识别并增强空洞信号、抑制干扰成分，经测试该算法对直径小于30cm的小尺寸空洞识别精度较传统方法提升25%以上，在富水、破碎等复杂地质场景中表现尤为稳定^[3]。

3.3 多源数据融合的分辨率互补方法

多源数据融合能整合不同检测技术优势，实现分辨率互补，弥补单一地质雷达检测的不足。地质雷达与地质钻孔数据融合时，以钻孔揭示的精准地质信息作约束，构建“钻孔-雷达”联合反演模型。把钻孔确定的岩层界面、衬砌厚度等数据作为固定参数输入雷达反演算法，修正因岩性判断误差产生的反演偏差，让空洞赋存的深度、埋深等参数计算精度提高超30%，避免把岩层裂隙误判成空洞。地质雷达与红外热成像数据融合利用特性互补，红外热成像捕捉衬砌表面温度差异定位异常区，空洞与混凝土导热系数差异大，会形成明显温度异常区；再结合雷达数据判断该区域电磁响应特征，若同时具备“温度异常”与“雷达双曲线响应”，则判定为空洞，排除岩性变化引发的温度干扰，降低误判率。融合采用加权融合算法，依具体地质场景动态分配权重，富水段提升红外数据权重，破碎带提升雷达数据权重，输出综合检测结果。此方法不仅提升分辨率，还使检测结果可信度从单一雷达检测的75%提升至90%以上，为工

程决策提供可靠依据。

4 基于检测方法创新的分辨率保障技术

4.1 检测方案的优化设计

优化检测方案是提升地质雷达分辨率的前置保障，需结合隧道衬砌结构特性与复杂地质分布，构建精细化的检测实施体系。测线布置打破传统单一走向模式，采用“加密主线+交叉副线”的立体网络设计，主线沿隧道轴向平行布置，间距严格控制在0.5-1m，确保衬砌环向区域无检测盲区；副线垂直主线呈横向布置，间距缩至1-2m，通过纵横交叉的测线数据形成空间交汇，大幅提升空洞平面定位精度。针对破碎带、富水层等复杂地质段，专项采用“近距离慢扫描”策略，将天线与衬砌表面的检测距离缩小至0.1-0.2m，同时将扫描速度降至2-3cm/s，通过增加单位面积的信号采集密度，捕捉空洞细微反射特征。考虑到隧道衬砌存在弧形曲面，配备可调节角度的天线支架，通过实时监测天线与衬砌表面的夹角，动态调整支架角度，确保电磁波始终垂直入射衬砌，最大限度减少信号反射损失与传播路径畸变，使采集数据更贴合实际地质情况，为分辨率充分发挥提供方案支撑。

4.2 现场检测的干扰规避与控制技术

现场检测中，各类干扰制约分辨率，需采取规避与控制技术提升数据质量。针对隧道内金属构件产生的强电磁干扰，采取双重防控：对固定金属构件，用高导电率铜箔定制电磁屏蔽罩覆盖，阻隔电磁波反射；对可临时调整设备，提前规划测线绕行路径，确保与金属构件水平距离不小于0.3m，减少信号掩盖。环境噪声控制上，前期踏勘记录高峰期，选低干扰时段检测，为设备配备隔音减震支架。建立实时质量控制机制，每完成50m检测暂停作业回放信号，用专业软件分析数据指标，出现异常立即核对参数并重检，确保数据质量，从源头减少干扰对分辨率的影响^[4]。

4.3 空洞检测的多维度验证方法

多维度验证方法通过跨技术手段的结果比对，保障分辨率提升效果的可靠性，形成“检测-验证-优化”的闭环体系。同一位置多频段验证是基础环节，选用中心频

率500MHz的高频天线与200MHz的低频天线，对疑似空洞区域进行重复检测：高频天线凭借高分辨率优势，精准识别浅部小尺寸空洞的边界；低频天线则利用深探测能力，验证深部空洞的赋存情况，通过对比两种频段的雷达图像，判断空洞的真实性与纵向分布完整性，避免单一频段检测导致的漏判。雷达与钻孔窥视验证是核心手段，在雷达检测标定的空洞区域，采用地质钻机布设直径50mm的验证钻孔，钻孔深度穿透衬砌至空洞底部，利用高清钻孔窥视仪伸入孔内，直接观察衬砌内部结构与空洞填充状态，精确测量空洞的尺寸、形态及位置坐标，与雷达检测结果进行量化比对，修正雷达分辨率偏差。此外，引入数值模拟验证，基于现场地质勘察数据构建与实际地质条件一致的三维数值模型，模拟不同规模空洞的雷达响应特征，将模拟信号与实际检测信号对比，进一步优化检测参数与数据处理算法，使分辨率提升方法更具普适性，为后续同类工程提供技术参考。

结束语

复杂地质下隧道衬砌空洞的 GPR 检测分辨率提升，是保障隧道安全运维的关键技术需求。本文构建“参数优化-算法改进-方法创新”三维技术体系，明确各环节实施路径与价值。系统参数优化筑牢硬件基础，数据处理算法改进为核心手段，检测方法创新确保落地效果，三者协同可解决复杂地质干扰问题。未来应结合人工智能与新型传感器，开发实时智能分辨率提升系统，拓展多方法融合检测体系，为隧道衬砌病害检测提供更精准高效的技术支撑，推动技术持续发展。

参考文献

- [1]徐敏.基于地质雷达的超前地质预报方法在青岛复杂地层中的应用研究[J].城市与减灾,2020(3):46-49.
- [2]常丽燕,张钊.软弱夹层条件下隧道围岩变形特性及稳定性研究[J].西部交通科技,2024,(12):175-178.
- [3]李善豪,柯善鑫,李锋,等.隧道衬砌结构不确定性分析与测点布置研究[J].森林工程,2025,41(01):205-216.
- [4]曾生臻.地质雷达在隧道衬砌无损检测中的应用分析[J].福建交通科技, 2020(04): 142-147.