

地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测中的应用

李嘉欣

广东省有色工业建筑质量检测站有限公司 广东 广州 510725

【摘要】：地下结构隐蔽空洞具有极强的隐蔽性和潜在危害性，易引发地面塌陷、结构损毁等安全事故，精准检测此类空洞是保障地下结构安全的关键。地质雷达探测技术凭借无损、高效、高分辨率的核心优势，成为地下结构隐蔽空洞检测的核心技术手段。该技术依托电磁波反射原理，可精准捕捉地下介质的电性差异，实现对隐蔽空洞的位置、形态等关键信息的精准识别，有效弥补传统检测方法的局限性。结合实际检测场景优化技术应用流程，能够提升隐蔽空洞检测的精准度与效率，为地下结构安全防控、隐患治理提供可靠技术支撑。

【关键词】：地质雷达；地下结构；隐蔽空洞；检测技术

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.011

引言

地下结构隐蔽空洞广泛分布于城市管网、道路路基、矿山采空区等多个场景，由地质演化、人为施工、地下水侵蚀等多种因素共同形成，其隐蔽性强、形态复杂，难以通过常规观察发现。隐蔽空洞的长期存在会不断侵蚀地下结构完整性，降低结构承载能力，诱发地面沉降、坍塌等安全事故，威胁公共安全与基础设施正常运行。传统探测方法存在效率低下、探测范围有限、易对结构造成损伤等弊端，难以满足隐蔽空洞精准检测的实际需求。地质雷达探测技术凭借非接触、无损、实时成像的独特优势，可快速穿透地下介质，捕捉空洞引发的电磁波异常信号，成为破解隐蔽空洞检测难题的有效路径，其合理应用对提升地下结构安全管理水平具有重要意义。

1 地下结构隐蔽空洞检测的核心难题

地下结构隐蔽空洞深埋地下，地表无明显特征，无法通过肉眼识别，是检测工作的首要难题。其形成过程隐蔽，自然地质坍塌、人为施工遗留及管线破损侵蚀等形成的空洞，发育过程均处于地下，难以被及时发现。地下介质成分复杂，岩土体、地下水、地下管线等会干扰检测信号，影响空洞信号捕捉精度^[1]。且空洞形态多样，规则与不规则形态对检测信号响应不同，易出现漏判、误判。传统检测方法存在明显局限，钻探法探测范围有限、易损伤结构且效率低，高密度电法、地震波法等受环境影响大、分辨率低，在城市密集区等场景应用受限。复杂检测环境进一步增加难度，管网干扰、地质不均、水位变化等均会降低检测精度与结果可靠性。

2 地质雷达探测技术的核心特性与检测原理

2.1 地质雷达探测技术的核心特性

地质雷达探测技术作为一种无损探测技术，具有诸多核心特性，使其成为地下结构隐蔽空洞检测的优选手段。该技术具有无损性，无需开挖、钻孔，通过高频电磁波穿透地下介质实现检测，不会对地下结构和周边环境造成任何损伤，适用于各类敏感区域的检测工作。其检测效率极高，可通过车载或手持

设备快速移动检测，能够在短时间内完成大面积区域的探测，大幅提升检测工作效率，解决传统方法效率低下的问题^[2]。同时，该技术具有高分辨率优势，能够精准捕捉地下介质的细微变化，清晰呈现隐蔽空洞的位置、形态等关键信息，检测结果直观易懂，便于技术人员快速判断空洞情况。该技术操作便捷、适应性强，可适应不同地质条件和检测场景，无论是城市道路、地下管网，还是矿山采空区，都能稳定发挥检测作用。

2.2 地质雷达探测技术的检测原理

地质雷达探测技术的核心检测原理基于电磁波的反射与传播特性，其工作过程可分为信号发射、传播、反射与接收四个环节。检测时，地质雷达主机通过发射天线向地下定向发射高频宽带电磁脉冲，电磁脉冲穿透地下岩土体、混凝土等介质，沿着地下介质传播。当电磁波遇到不同介电常数的介质界面时，会发生反射和折射现象，其中部分反射波会返回地表面，被接收天线捕捉并传输至主机。由于隐蔽空洞内部多为空气，其介电常数与周边岩土体、混凝土等介质存在显著差异，电磁波传播至空洞界面时会产生强烈的反射信号，且反射信号的传播时间、振幅等参数会发生明显变化。通过对接接收的反射信号进行分析解读，可推断出地下隐蔽空洞的位置、深度、形态等关键信息，实现对空洞的精准检测。

2.3 地质雷达探测技术的应用适配性

地质雷达探测技术的特性使其与地下结构隐蔽空洞检测的需求高度适配，能够有效破解检测过程中的各类难题。其无损性适配于城市基础设施、古建筑周边等不能进行开挖破坏的区域，可在不影响现有结构正常使用的前提下，完成隐蔽空洞检测。高分辨率特性能够精准识别小型、不规则形态的隐蔽空洞，有效解决传统方法漏判、误判的问题，提升检测结果的准确性。高效性适配于大面积检测需求，可快速完成地下结构的全面排查，及时发现隐蔽空洞隐患，为隐患治理争取时间。同时，该技术对不同类型的隐蔽空洞均具有良好的检测效果，无论是施工遗留空洞、岩土体坍塌空洞，还是地下水侵蚀形成的空洞，都能通过电磁波反射信号精准识别，适配不同场景下的

检测需求，为地下结构安全防控提供可靠技术支持。

3 地质雷达探测技术在隐蔽空洞检测中的应用流程

3.1 检测前期的准备工作

地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测中的应用，需做好前期准备工作，为后续检测工作的顺利开展奠定基础。首先要明确检测区域的基本情况，收集检测区域的地下管线分布图、地质勘察报告、过往检测记录等相关资料，了解地下介质成分、岩土体性质、地下设施分布等信息，避开地下管线等干扰源，确定检测范围和重点区域。其次要根据检测需求选择合适的地质雷达设备，结合检测深度、分辨率要求，选择对应的天线频率，高频天线适用于浅层小型空洞检测，低频天线适用于深层空洞检测。最后要对检测设备进行全面检查，确保设备性能稳定，发射天线、接收天线、数据采集单元等部件正常工作，同时清理检测区域的地表杂物，平整地表，避免地表障碍物影响检测信号的传播与接收，保障检测工作的顺利进行。

3.2 现场探测的规范操作

现场探测是地质雷达检测隐蔽空洞的核心环节，规范的操作是保障检测精度的关键。检测时，按照预先确定的检测路线，将地质雷达天线紧贴地表，保持匀速移动，移动速度需控制在合理范围，避免速度过快导致信号遗漏，速度过慢影响检测效率。在检测过程中，实时观察数据采集情况，重点关注信号的连续性和振幅变化，当出现异常反射信号时，及时标记该区域位置，放慢移动速度，进行多次重复探测，确保异常信号的准确性。对于地下管线密集、地质复杂的重点区域，采用交叉探测的方式，从不同方向进行探测，减少干扰，提升检测精度。同时，做好现场记录工作，详细记录检测位置、设备参数、信号异常情况等信息，为后续数据处理和分析提供依据。

3.3 检测数据的处理与解读

现场探测完成后，需对采集到的原始数据进行系统处理与解读，才能准确识别地下隐蔽空洞信息。首先对原始数据进行预处理，通过滤波、增益控制等技术，去除环境干扰、设备噪声等无关信号，净化数据，提升信号的清晰度。然后对预处理后的 data 进行成像处理，通过专业软件生成二维或三维雷达剖面图，将地下介质的分布情况直观呈现出来^[3]。在数据解读过程中，结合检测区域的地质资料和现场记录，分析雷达剖面图中的反射信号特征，根据信号的振幅、传播时间等参数，判断异常区域是否为隐蔽空洞，同时确定空洞的位置、深度、形态等关键信息。对于疑似空洞区域，结合现场实际情况进行综合判断，排除地下管线、岩石裂隙等非空洞因素的干扰，确保解读结果的准确性和可靠性。

4 地质雷达探测技术应用中的优化措施

4.1 干扰因素的防控与削弱

地下环境中的各类干扰因素会影响地质雷达探测的精度，

需采取针对性措施进行防控与削弱。针对地下管线、金属设施等产生的电磁干扰，在检测前详细查阅地下管线资料，精准定位干扰源位置，合理规划检测路线，避开干扰源区域；对于无法避开的干扰源，采用屏蔽技术，减少干扰信号对检测信号的影响^[4]。针对地下介质不均匀、含水率变化等产生的干扰，根据检测区域的地质条件，调整设备参数，优化电磁波发射频率和功率，提升信号的穿透能力和抗干扰能力。同时，在数据处理过程中，采用先进的滤波技术，进一步去除干扰信号，净化检测数据，确保检测结果的准确性，避免因干扰导致的漏判、误判问题。

4.2 探测设备与技术的优化升级

探测设备与技术的优化升级是提升地质雷达检测效果的重要途径。结合隐蔽空洞检测的实际需求，对地质雷达设备进行优化，研发小型化、便携化的检测设备，适应复杂地形和狭小空间的检测需求，提升设备的适用性。同时，优化天线设计，开发多频段复合天线，实现不同深度、不同大小空洞的精准检测，兼顾检测深度和分辨率。在技术层面，优化数据处理算法，提升信号分析和解读的效率与精度，实现对隐蔽空洞的快速识别和精准定位。推动地质雷达技术与其他探测技术的融合应用，弥补单一技术的局限性，进一步提升检测效果，满足不同场景下的检测需求。

4.3 检测人员专业能力的提升

检测人员的专业能力直接影响地质雷达探测技术的应用效果，需加强检测人员的专业培训，提升其综合素养。开展系统的专业培训，涵盖地质雷达技术原理、设备操作规范、数据处理方法、信号解读技巧等内容，让检测人员熟练掌握检测技术的核心要点。结合实际检测案例，进行实操训练，提升检测人员的现场操作能力和问题处理能力，使其能够应对检测过程中的各类复杂情况，规范操作设备，精准解读数据。同时，建立完善的考核机制，定期对检测人员的专业能力进行考核，确保检测人员具备相应的专业素养，能够高质量完成隐蔽空洞检测工作，保障检测结果的可靠性和准确性。如图1所示：



图1 地质雷达空洞检测质量提升策略

5 地质雷达探测技术应用的实践价值与完善路径

5.1 地质雷达探测技术的实践应用价值

地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测中的应用，具有显著的实践价值，为地下结构安全管理提供了有力支撑。该

技术有效解决了隐蔽空洞检测难度大、效率低、易损伤结构等难题,实现了对隐蔽空洞的高效、精准、无损检测,能够及时发现地下结构中的空洞隐患,为隐患治理提供可靠依据,有效防范地面塌陷、结构损毁等安全事故的发生,保障公共安全和基础设施正常运行^[5]。在城市建设、矿山开采、道路维护等领域,该技术的应用能够大幅提升地下结构检测的效率和质量,降低检测成本,减少因空洞隐患引发的经济损失,同时为地下结构的合理规划、维护和改造提供技术支撑,推动相关领域的健康发展。

5.2 地质雷达探测技术的应用完善方向

地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测中的应用虽已取得良好效果,但仍有进一步完善的空间,需明确完善方向,持续提升技术应用水平。在设备研发方面,进一步优化设备性能,提升设备的抗干扰能力和检测精度,开发智能化检测设备,实现检测过程的自动化、智能化,减少人为操作误差。在技术应用方面,结合不同场景的检测需求,制定标准化的检测流程和技术规范,规范检测操作,确保检测结果的统一性和可靠性。同时,加强技术研究,深入探索地质雷达技术与其他无损检测技术的融合应用,拓展技术应用范围,提升检测技术的综合性和适用性,更好地满足地下结构隐蔽空洞检测的实际需求。

参考文献:

- [1] 谢亮.地质雷达探测技术在复杂地质岩土勘察中的应用[J].工程技术研究,2026,11(02):202-204.
- [2] 陈豪,陈送祥,张伟,等.煤田断层破碎带三维地质雷达探测技术与应用[J].矿业科学学报,2025,10(06):1029-1041.
- [3] 陈刚.地质雷达探测技术在复杂地质岩土勘察中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(11):49-51.
- [4] 唐国俊.地质雷达探测技术在金属矿勘察中的应用优化[J].冶金与材料,2025,45(10):76-78.
- [5] 王坤.论隧道检测中地质雷达无损探测技术的应用[J].交通科技与管理,2025,6(18):56-58.

5.3 技术应用的推广与普及策略

推动地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测中的推广与普及,能够充分发挥该技术的优势,提升地下结构安全管理水平。加强技术宣传,通过行业展会、技术交流、案例分享等方式,普及地质雷达探测技术的原理、优势和应用效果,让更多相关单位了解和认可该技术,提高技术的认知度。针对不同行业、不同场景的检测需求,制定个性化的技术应用方案,提供专业化的技术服务,提升技术的适用性和实用性,增强技术推广的吸引力。同时,加强技术培训和人才培养,培养一批专业的检测人才,为技术的推广应用提供人才支撑,推动地质雷达探测技术在地下结构隐蔽空洞检测领域的广泛应用,为地下结构安全防控提供更有力的技术保障。

6 结语

本文明确地下结构隐蔽空洞检测面临诸多难题,其深埋地下、形成隐蔽、形态多样,且地下介质复杂、传统检测方法存在局限、检测环境干扰大,导致检测难度高、精度难保障。地质雷达探测技术凭借无损、高效、高分辨率的优势,可有效破解这些难题,精准捕捉空洞信息。未来需持续优化技术应用,削弱干扰、完善流程,提升检测可靠性,为地下结构安全防控提供有力技术支撑。