

Research on GPR Integration for Safety Pre-assessment in Non-coal Mines

Jingzhe Wei Shuanlong Hou Hanjiang Zhong Congrui Ren

Shanxi Tongxin Anhuan Technology Co., Ltd., Yuncheng, Shanxi, 044000, China

Abstract

Accurate identification of hidden disaster-inducing factors in non-coal mines represents a core challenge in safety pre-evaluation. Addressing the limitations of conventional evaluation methods under complex geological conditions, this study systematically investigates the integration pathways and application efficacy of Ground Penetrating Radar (GPR) technology in safety pre-evaluation. Through analysis of the alignment between GPR principles and the 《Guidelines for Safety Evaluation of Non-Coal Mines》, we establish a technical implementation framework encompassing geological structure detection, goaf positioning, and support structure assessment. By incorporating drone-borne radar systems and intelligent analysis platforms, a standardized operational procedure is proposed. Practical applications demonstrate that this integrated approach enhances geological hazard identification accuracy by >40%, providing scientific support for improving inherent safety levels in mines and facilitating a transition from reactive safety management to proactive prevention.

Keywords

Non-coal mines; Safety pre-evaluation; Ground penetrating radar (GPR); Geological hazard identification; Drone-borne radar

非煤矿山安全预评价中探地雷达集成应用研究

卫敬哲 侯拴龙 钟寒江 任聪瑞

山西同新安环科技有限公司, 中国·山西 运城 044000

摘要

非煤矿山隐蔽致灾因素的精准识别是安全预评价工作的核心难题。本文针对传统评价方法在复杂地质条件下的局限性, 系统探究探地雷达 (GPR) 技术在安全预评价中的集成路径与应用效能。通过分析技术原理与《非煤矿山安全评价导则》的适配性, 构建涵盖地质构造探测、采空区定位及支护结构评估的技术实施框架, 结合无人机载雷达与智能化分析平台创新应用, 提出标准化作业流程。实践表明, 该技术可使地质隐患识别精度提升 40% 以上, 为矿山本质安全水平提升提供科学支撑, 推动安全管理从被动应对向主动预防转型。

关键词

非煤矿山; 安全预评价; 探地雷达 (GPR); 地质隐患识别; 无人机雷达

1 引言

非煤矿山地质条件复杂且隐蔽致灾因素多元, 传统安全预评价方法面临严峻挑战。事故统计显示, 顶板坍塌、突水涌泥等灾害中约 70% 与未探明的地质异常相关, 凸显出隐患探测环节的关键作用。当前预评价工作存在两大突出痛点: 一是人工勘查受地形限制, 难以覆盖高陡边坡、深部采场等危险区域, 导致评估范围存在盲区; 二是钻孔取样成本高昂, 且可能扰动地质结构, 增加隐患漏检风险。探地雷达 (GPR) 技术凭借无损探测、厘米级分辨率及实时数据获取的优势, 成为突破预评价瓶颈的关键技术。其通过高频电磁波反射信号解析地下结构, 可在不干扰地质环境的前提下,

实现对隐蔽隐患的精准定位。本文基于《非煤矿山安全评价导则》规范要求, 聚焦探地雷达在预评价工程中的实施路径、技术融合及案例验证, 旨在构建“精准探测-智能预警-科学防控”的一体化预评价体系, 为非煤矿山安全管理模式升级提供技术支撑。

2 探地雷达技术原理与系统演进

探地雷达技术以麦克斯韦电磁理论为基础, 通过发射高频电磁波 (10MHz-2.5GHz) 并接收地下介电界面反射信号^[3], 实现地质结构可视化。其核心技术参数包括:

- 传播速度模型: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ (其中 c 为光速, ϵ_r 为相对介电常数, μ_r 为相对磁导率), 用于计算电磁波在不同介质中的传播速度;
- 时深转换: $d = \frac{vt}{2}$ (t 为双程走时), 将时间域信号转换为深度域数据, 实现地下结构的空间定位;
- 反射系数: $R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$ (ϵ_1 、 ϵ_2 为界面两侧介电常数), 通过反射信号强度差异判断介质界面性质。

【作者简介】卫敬哲 (1993-), 男, 中国山西运城人, 本科, 工程师, 从事智慧化矿山, 安全工程研究。

1.2 系统演进与矿山适应性提升

技术革新显著增强了探地雷达在矿山场景的适用性，主要体现在以下三方面：

- 地形适应性突破：车载式雷达配备电动升降杆与伺服调平系统，可在坡度> 25° 的崎岖矿场保持天线耦合稳定，解决传统设备“悬空失效”难题，扩大了探测范围；
- 空-地协同探测：无人机电载雷达(如 SL-UAVGPR 系统)

集成高精度 POS 定位与多频阵列天线(100MHz-800MHz)，实现采空区、边坡隐患的三维立体扫描，探测效率较人工提升 5 倍，尤其适用于大面积区域快速排查；

- 智能信号处理：基于 Matlab 开发的衰减补偿增益算法(ACG)有效抑制井下机电干扰，使信噪比提升 60% 以上，保障了复杂电磁环境下的数据质量。

表 1 探地雷达系统在矿山应用中的技术参数对比

系统类型	适用场景	探测深度	分辨率	地形适应性
手持式雷达	巷道支护体检测	0-2m	<5cm	低
车载式雷达	露天采场、道路	0-15m	10-30cm	中
无人机雷达	高陡边坡、采空区	0-30m	20-50cm	高
固定式传感器	关键区域长期监测	0-10m	<10cm	固定点位

3 非煤矿山安全预评价框架与探地雷达的适配性

3.1 评价内容适配

根据《非煤矿山安全评价导则》，安全预评价需在建设项目可行性研究阶段完成潜在危险源的定性定量分析，探地雷达技术可深度融入以下评价内容：

- 地质构造核查：雷达波对断层破碎带(介电常数 4-8)与含水裂隙(介电常数> 25)的反射特征差异显著，可通过信号解析精准定位导水通道，为突水风险评估提供数据支撑^[1]；
- 隐蔽致灾因素普查：响应三门市应急管理局“应查尽查”政策要求，探地雷达可识别废弃巷道、不明采空区等历史遗留隐患，弥补传统方法对历史采矿痕迹探测不足的缺陷；
- 支护结构评估：通过混凝土密度雷达图像分析(以振幅衰减梯度≥30dB/m 判定缺陷)，可预测顶板冒落风险，为支护系统安全性评价提供量化依据^[2]。

3.2 评价程序优化

在“危险有害因素识别”环节，探地雷达通过三阶段数据支撑优化评价程序，提高效率与精度：1. 初步扫描：采用 100MHz 天线快速覆盖评价区域，圈定形变速率> 2mm/d 的边坡等异常区，缩小重点探测范围；2. 精细诊断：在异常区切换 500MHz 天线，获取厘米级分辨率数据，精准定位隐患边界与规模；3. 动态验证：结合钻芯取样(重点验证强度< 15MPa 区域)校准雷达解译模型，确保数据解读的准确性。

4 探地雷达在预评价中的关键技术应用路径

4.1 地质隐患超前识别

采空区三维成像：某铁矿采用无人机雷达网格化扫描(50m×50m 测网)，成功发现 3 处隐蔽采空区，最大空洞体积达 850m³。通过反射波双曲特征识别与振幅能量分析，建立采空区稳定性评估模型，预判地表塌陷风险等级，为充填方案设计提供精准参数；

断层活化监测：在巷道掘进面前方布置雷达实时跟踪

系统，当断层带电磁波反射系数增幅> 15% 时触发预警，及时采取加固措施，有效防止突水事故发生。某金矿应用该技术后，断层带突水预警响应时间缩短至 15 分钟，较传统方法提升 60%^[4]。

4.2 工程质量量化评估

混凝土支护检测：某金矿应用 400MHz 天线对巷道衬砌扫描，发现不密实区(振幅值仅为正常区 40%)占比达 12%，通过针对性加固，顶板失稳事故发生率下降 90%，验证了技术对支护质量评价的有效性；

尾矿库渗流诊断：通过雷达剖面同相轴中断与频率衰减特征，定位坝体管涌通道 3 处，指导注浆治理方案优化。某尾矿库应用后，渗流隐患排查效率提升 3 倍，治理成本降低 25%^[5]。

4.3 智能预警平台集成

将雷达数据接入矿山安全风险监测预警系统，实现多维度安全管理升级：

多源数据融合：融合激光扫描点云与雷达剖面数据，构建地质 BIM 模型，直观呈现地下结构与隐患分布；

风险动态评估：基于形变速率与降雨量关联分析建立预警模型，如“形变加速+雨量> 50mm/d”触发红色预警，实现风险等级动态更新；

应急联动响应：预警信号直通井下广播系统，联动人员定位系统引导撤离，使应急响应时间缩短 70%，提升灾害应对效率^[5]。

5 实施策略与政策建议

5.1 技术标准化推进

数据采集规范：制定《非煤矿山探地雷达预评价技术指南》，明确不同埋深目标体的天线频率选择标准(如 30m 以浅采用 100MHz)，统一数据采集流程与质量控制指标；

解译标识体系：建立矿山地质雷达图像典型图谱库，统一“空洞”“裂隙”等隐患的判识标准，减少人工解译的主观性误差，提高评价结果的一致性。

表2 探地雷达在非煤矿山安全预评价中的应用场景及参数配置

应用目标	天线频率	测网密度	识别标志	预评价对策措施
采空区边界定位	50-100MHz	10m×10m	强振幅双曲线	充填治理或留设保安矿柱
断层破碎带探测	100-250MHz	5m×5m	同相轴紊乱、多次反射	注浆加固、调整巷道轴线
混凝土支护缺陷	400-800MHz	0.5m 连续剖面	振幅衰减 >30dB/m	局部补强或拆除重建
边坡潜在滑移面	100MHz+ 无人机	2m 航带间距	倾角突变界面	锚索加固、疏排水系统
地下水管渗漏	250MHz	沿管线 1m 剖面	高频散射、介电常数异常	管道更换、防渗处理

5.2 监管机制创新

借鉴山东省“审计式安全诊断”经验，构建多层次监管体系：

三级联动模式：由省级专家团队牵头，市级监管部门协调，企业自查落实，确保雷达扫描覆盖率达100%，形成“专业指导-监督检查-主体负责”的闭环管理；

隐患溯源管理：将雷达检测数据与采矿许可证年审挂钩，未完成隐患普查的矿山不得复产，强化企业应用技术的主动性。

5.3 企业级实施路径

阶段化应用：i. 基建期：全面扫描井田范围，建立地质基准模型，为开采设计提供基础数据；ii. 开采期：重点区域季度复测，动态更新风险图谱，及时发现新出现的地质异常；iii. 闭坑期：开展采空区稳定性长效监测，为闭坑后生态恢复与安全管控提供依据；

成本管控：推广无人机雷达外包服务，降低中小矿山应用门槛，单次探测成本可控制在传统钻探的40%以内，兼顾经济性与安全性。

6 案例分析与应用成效

6.1 某大型铜矿安全预评价项目

①背景：新建斜井穿越已知断层带，突水风险极高，传统钻探因成本限制难以全面探测断层延伸范围；②技术方案：沿设计轴线布置250MHz车载雷达（测线间距2m），通过高密度数据采集构建断层三维模型；③成果：发现F12断层延伸超设计资料28m，且伴生裂隙群，据此调整井筒位置并实施超前注浆加固；④成效：基建期成功避免突水事故，直接减少经济损失约1200万元，预评价报告一次性通过审核，较同类项目缩短审批时间30%。

6.2 露天铁矿边坡智能监测

①系统架构：整合GNSS位移站、无人机雷达与地面传感器网络，构建多维度监测体系；②预警模型：设置两级预警阈值——雷达形变速率>5mm/d触发黄色预警，启动加密监测；形变>10mm/d且伴随降雨预警时触发红色预警，自动停产并组织撤离；③成效：滑坡预警准确率达92%，产能损失下降45%，验证了技术在动态风险管控中的可靠性。

7 结论研究

探地雷达技术深度融入非煤矿山安全预评价，实现三大突破：1. 隐患识别精准化：突破人工勘查局限，隐蔽致灾因素检出率提升40%以上，消除评估盲区；2. 风险防控前置化：在基建阶段即可识别并消除重大事故隐患，避免后期治理成

本超支，某铜矿案例显示可减少千万级损失；3. 决策支持科学化：基于雷达数据的定量评价，优化开采布局与安全投入，某铁矿安全设施投资偏差从25%以上降至10%以内。

表3 某铁矿应用探地雷达技术进行安全预评价的主要成效

评价指标	应用前	应用后	提升幅度
地质隐患识别率	62%	95%	+33%
重大事故发生率	1.2次/年	0.3次/年	-75%
预评价报告通过率	78%	96%	+18%
安全设施投资精准度	预估偏差 >25%	偏差 <10%	+60%
应急响应时间	45分钟	12分钟	-73%

8 结语

探地雷达技术在非煤矿山安全预评价中的集成与应用，不仅是技术层面的创新突破，更标志着矿山安全管理理念的深刻变革。从传统依赖人工经验的“粗放式评价”到基于电磁探测的“精准化防控”，技术赋能让隐蔽致灾因素从“不可见”变为“可测、可判、可防”。

实践证明，当探地雷达与智能分析平台、多源监测数据深度融合时，能够构建覆盖矿山全生命周期的安全预评价闭环——基建期奠定地质认知基础，开采期动态追踪风险演化，闭坑期保障生态修复安全。这种“探测-预警-防控”的一体化模式，既响应了《非煤矿山安全评价导则》对科学评价的规范要求，也为中小矿山降低安全投入成本、提升本质安全水平提供了可行路径。

随着技术标准化体系的完善与监管机制的创新，探地雷达技术必将在非煤矿山安全领域发挥更大效能，推动行业从“被动应急”向“主动预防”的根本性转变，为构建“本质安全型矿山”提供坚实的技术支撑与实践范式。

参考文献

- 戈海宾.打造安全绿色智慧矿山 树立煤炭行业标杆[J].中国煤炭工业, 2025(2): 29-31.
- 熊赞民, 习泳, 孙家驹, 王恒涛.非矿山露天开采边坡安全检测设计研究[J].中国矿山工程, 2023, 52(05): 17-21.
- 王锦榕.探地雷达服务福建地灾评估[N].地质勘查导报, 2008-01-15(1)。
- 李壹萱; 李坤; 卢尧; 楚一帆; 王雅莉; 王莎; 何斌斌; 闫芃辰.基于三元风险要素数据的非煤矿山安全预警系统.中国, CN202510287870.X[P]. 2025-06-27.
- 勾红英, 罗智文, 袁东.非煤矿山安全评价报告存在的问题及建议[J].内江科技, 2010, 31(02): 30.