

地质雷达探测技术研究进展与前沿展望

赵德生

山东省路桥集团有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

地质雷达(GPR)凭借高分辨率、无损高效、图像直观等优势,成为地下掩埋物探测的核心技术。其工作原理基于电磁波在介电常数差异界面的反射特性,通过分析反射波旅行时间、幅度与波形,精准识别脱空、空洞、富水等病害。该技术自1935年起步,历经军事应用、工程推广及设备革新,中国于90年代后在数值模拟与病害识别领域取得突破。当前技术发展呈现多维度跃迁:硬件端通过极化天线与无人机平台突破环境限制;算法端依托EEMD降噪与AI解译实现“波形-结论”的智能诊断;应用端构建道路全周期监控链,并推动水利、岩溶等场景从隐患探测向风险预测转型。未来需深化多物理场耦合反演理论,发展数字孪生平台,完成“探测即评估”的智能管控范式升级。

关键词

地质雷达, 探测技术, 综合运用, 未来发展

Research Progress and Frontier Outlook of Geological Radar Detection Technology

Desheng Zhao

Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) has become a core technology for detecting underground buried objects due to its advantages such as high resolution, non-destructive efficiency, and intuitive images. Its working principle is based on the reflection characteristics of electromagnetic waves at interfaces with different dielectric constants. By analyzing the travel time, amplitude and waveform of the reflected waves, it can accurately identify diseases such as voids, cavities and water-rich conditions. This technology began in 1935 and has gone through military applications, engineering

promotion and equipment innovation. China made breakthroughs in the fields of numerical simulation and disease identification after the 1990s. The current technological development shows multi-dimensional leaps: the hardware end breaks through environmental limitations through polarized antennas and unmanned aerial vehicle platforms; The algorithm end relies on EEMD noise reduction and AI interpretation to achieve intelligent diagnosis of “waveform-conclusion”. The application end builds a full-cycle monitoring chain for roads and promotes the transformation of scenarios such as water conservancy and karst from hidden danger detection to risk prediction. In the future, it is necessary to deepen the theory of multi-physics field coupling inversion, develop digital twin platforms, and complete the upgrade of the intelligent control paradigm of “detection as assessment”.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Detection Technology, Comprehensive Application, Future Development

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景及意义

地质雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)检测技术[1], 又叫探地雷达检测技术, 它凭借分辨率高、无损性、效率高及雷达图像直观等特点, 在众多无损探测方法中迅速成为了用于探测地下掩埋物的首选技术。

地质雷达在探测过程中, 由于钢筋、金属管道、水泥管道以及不同材质文物等属性不同, 因此存在着明显的介电常数差异[2]。而不同掩埋物在雷达图像中因属性不同其特征表现各不相同, 然而该特征是GPR 图像解译的关键[3]。

目前, 该技术作为一种较为成熟的地球物理技术被广泛应用于探测地下掩埋物, 如考古、管道、矿产调查、地雷、地质勘探、管线勘探、市政设施维护等。因此, GPR 技术在实际工程中具有很广泛的应用前景[4]。

2. 地质雷达检测原理及其发展

2.1. 地质雷达原理

地质雷达主机通过天线向地下发射高频宽带电磁波, 当电磁波遇到不同媒质的界面时便会发生反射, 反射波返回地表面后被接收天线所接收。电磁波在介质中传播时, 其传播路径、电磁场强度和波形将随所通过介质的电性差异(由介质物理、化学性质变化引起的)及几何形态不同而变化。因此, 根据接收波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料, 可推断出路面脱空、空洞、土体疏松、土体富水等病害类型。地质雷达工作原理示意图如图1所示。

地质雷达发射的电磁波在存在介电常数差异的两种介质界面上, 将产生反射和折射。反射和折射符合反射定律与折射定律, 反射波能量和折射波能量的大小取决于反射系数 R 和折射系数 T 。

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad T = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为界面上、下介质相对介电常数。

由式(1)可知,当电磁波传播到存在介电常数差异的界面时,其反射回来的电磁波能量将有所变化,界面上、下介质的尺寸差异不一样时,在雷达图像上反应为正、负峰值的强反射。

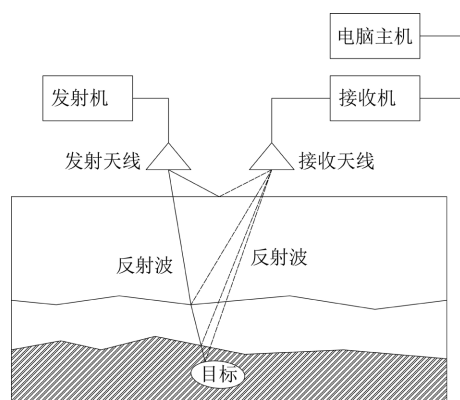


Figure 1. Schematic diagram of the working principle of geological radar

图 1. 地质雷达工作原理示意图

2.2. 地质雷达的发展

地质雷达技术自 1935 年英国物理学家罗伯特·沃特森-瓦特研制首台雷达系统起步,历经多国应用拓展与技术创新。1940 年英国学者首次利用 30~300 MHz 无线电波探测冰河厚度;1960 年代美国军方为越南战场开发地下坑道探测技术,奠定地质雷达的工程应用基础。20 世纪 70 年代起,美国联邦公路局(FHWA)率先探索其在隧道与桥梁检测中的潜力,同时北欧国家(加拿大、丹麦、瑞典)和日本相继投入公路病害探测与设备研发(如日本 YL-R2 型雷达探测深度达 30 米)。1985 年首台车载公路雷达系统问世,80 年代末北美已广泛应用于路面厚度测量、混凝土空洞及桥面隐患检测。中国于 80 年代末引进该技术,90 年代至今在数值模拟、波场分析、含水率检测及病害识别等领域取得显著进展,推动公路无损检测技术发展,但仍需深化研究以实现技术标准化与体系完善[5]-[12]。

3. 地质雷达研究现状及分析

3.1. 地质雷达信号处理与人工智能驱动图像增强技术

3.1.1. 地质雷达信号处理技术方面

地质雷达信号处理技术正从单一降噪向多维特征增强跃迁。面对地下目标响应微弱、背景干扰复杂、成像模糊三大挑战,研究者通过信号域变换、物理场建模与智能滤波三轴联动,重构了雷达数据的解析维度。从经验模态分解到广义 S 变换,从时域有限差分模拟到自适应滤波优化,技术创新不仅显著提升特征识别精度,更为复杂地质场景的量化诊断提供了核心算法支撑。

Yih Jeng 等[13]在城市潜在塌陷区域进行地质雷达探测,采用对数变换的经验模式分解(EEMD)提高图像提取质量。Andrea Benedetto 等[14]综述了地质雷达在道路工程中的应用及信号处理技术。Mehran Eskandari Torbaghan 等[15]认为,裂缝的数量和严重程度是道路状况评估的关键标准,并利用奇异值分解(SVD)算法实现道路裂缝的自动检测。Mezgeen A. Rasol 等[16]使用地面耦合天线的探地雷达系统对不同类型裂纹进行实验室模拟,利用时域有限差分(FDTD)方法的软件包(gprMax2D)识别水泥混凝土路面早期裂缝。Mezgeen A. Rasol 等[17]还采用实验室和现场试验评估刚性路面损伤,发现裂纹宽度的增加与双曲线振幅相关,是检测到的最薄裂纹。王石磊[18]建立雷达信号时频特征指标,量化评价道床状态。任非等

[19]采用累积叠加法提高成像分辨率,抑制杂波干扰。杨昌民[20]运用地质雷达分析构件,结合 MATLAB 拟合得到三维图像计算公式。刘宗辉[21]研究了地质雷达在岩溶性不良地质中的应用,提出基于广义 S 变换的雷达波吸收衰减参数计算方法。王鹏越[22]对比三种测试方法,发现滑动高通滤波效果最佳。周黎明[23]利用二维时域有限差分法模拟隧道不良地质,并进行地质雷达剖面研究。隋昕展[24]通过时域有限差分法分析瞬时振幅图像,判断脱空病害。刘洋洋[25]基于时域有限差分法和 GprMax 模拟管道特征波形。

综上所述,当前技术发展呈现“算法精细化、模型实体化、评价量化”的演进逻辑:在信号层, EEMD 与 S 变换实现从噪声抑制到特征增强的跨越;在建模层, gprMax 与 FDTD 构建起实验室-现场的双向验证闭环;在应用层,道路裂缝识别、隧道地质定位等场景形成标准化评价体系。未来需深化全波形反演算法、开发多参数融合诊断平台,推动信号处理从“特征增强”向“智能诊断”的范式升级,最终实现“波形即结论”的智能勘探愿景。

3.1.2. 人工智能驱动图像增强技术方面

地质雷达图像解译正经历从人工判读到智能诊断的革命性转变。面对地下目标识别中特征模糊、干扰复杂、样本稀缺的核心挑战,人工智能技术通过多模态算法融合与数据增强策略,重构了雷达图像的解析范式。从卷积神经网络的特征提取到支持向量机的分类优化,从模拟数据生成到轻量化部署, AI 驱动的研究不仅显著提升了解译精度,更开辟了地下空间智能感知的新路径。

Umut Özkaya 等[26]提出了具有双向长短时记忆(Bi-LSTM)模型的残差卷积神经网络(CNN),用于分析地质雷达 B 扫描图像,性能优于其他 CNN 结构。Umut Ozkaya 等[27]提出了一种卷积支持向量机(CSVM)网络,用于分析 B 扫描图像,利用线性支持向量机(SVM)滤波器生成特征图,提高分类性能。T. Noreen 等[28]使用定向梯度特征直方图(HOG)的支持向量机检测双曲特征,利用 Voila-Jones 算法训练分类器,能够较好地检测探地雷达图中的电缆和管道特征。Minh-Tan Pham 等[29]使用 gprMax 工具箱生成多种模拟雷达图,并将 Faster RCNN 框架应用于探测 B 扫描图像中的地下埋藏物体,解决训练样本不足的问题。肖洋等[30]运用卷积神经网络对地质雷达图像进行智能识别,取得显著效果。余洋等[31]根据电性差异,通过探地雷达获取目标特征信息,为矿山地质环境问题提供系统解释。张建智[32]研究基于数学变换的频谱分析方法,实现空洞积水区的快速识别。

综上所述,当前 AI 解译技术已形成“多算法协同-跨模态学习-场景化落地”的完整生态链:在算法层, CNN 与 SVM 的融合创新突破特征提取瓶颈;在数据层,物理仿真与频谱分析有效化解样本稀缺困境;在应用层,矿山、隧道、市政等多场景验证了解译系统的工程适用性。未来需重点突破少样本自适应训练、多物理场联合反演等关键技术,发展边缘计算赋能的实时解译终端,推动地质雷达从“成像工具”向“诊断专家”的范式跃迁。

3.2. 地质雷达技术优化与联合探测

地质雷达技术的革新正从单机探测向多源协同范式跃迁。面对复杂地下环境的探测挑战,研究者通过硬件升级、多技术耦合与平台集成三维突破,显著提升探测精度与场景适应性。从无人机载系统到车载阵列装备,从极化天线优化到实时处理框架,技术创新持续突破传统探测的物理局限与信号干扰瓶颈,为城市地下空间透明化提供全新解决方案。

Fabio Tosti 等[33]结合地质雷达和轻型落锤挠度计(LFWD)评估道路刚度,并开发了基于刚度的时效性方法。María García Fernández 等[34]将基于地质雷达的地下图像获取系统搭载于无人机,有效探测地雷等危险埋物,具有高精度、低杂波和高分辨率等优点。胡晓等[35]结合地质雷达与冲击回波法,在隧道衬砌检测中取得良好效果。张湘桂[36]利用垂直极化天线探测隧道衬砌后的隐伏洞穴,降低双层钢筋网屏蔽效应。许献磊[37]开发低频地质雷达屏蔽天线系统,提升信号质量,构建 FPGA 实时数据处理框架。刘国

超[38]结合地质雷达与三维内窥镜技术,准确定位道路地下病害。李华[39]利用多种探测技术对成都浅地表进行研究,以“一图一表”总结表达。姜勇[40]将地质雷达与冲击回波法结合,在隧道衬砌中取得显著效果。贾龙[41]结合地质雷达与地面工程地质钻探,提供土地规划和地质灾害防治技术支持。武桂芝[42]等研究大型车载阵列地质雷达系统的高效便捷性。

综上所述,当前技术发展呈现“硬件智能化、探测立体化、数据融合化”的演进特征:在硬件层,极化天线与屏蔽系统突破电磁干扰壁垒;在方法层,力学-声学-光学多技术协同形成探测矩阵;在应用层,无人机/车载移动平台与智能表达体系重构工程探测范式。未来需进一步开发自适应滤波芯片、建立多物理场耦合解释模型,推动探测系统向实时诊断-智能决策一体化方向演进,最终实现“扫描即解析”的智慧勘探愿景。

3.3. 地质雷达工程应用场景

3.3.1. 道路工程场景应用方面

道路塌陷作为城市基础设施安全的重大威胁,其成因复杂且危害深远。近年来,学者们通过多维度研究揭示了塌陷的深层机理,并构建起系统的风险评估体系。从地下管道破裂到岩溶地质活动,从水力侵蚀到人工结构失效,多源致灾因素的交叉作用被逐步解构。这些研究不仅深化了对塌陷物理过程的理解,更通过创新建模手段为风险预警提供了科学依据,为城市韧性建设奠定了理论基础。

HwiYoung Chae 等[43]利用 3D GPR 研究不同地下结构的塌陷机制。Kyriaki Papadopoulou Vrynioti 等[44]制作岩溶塌陷易发性图,以支持可持续城市规划。Christopher B. Vierrether 等[45]研究认为高次生渗透性的可溶性基岩和水的渗透是影响道路崩塌的主要因素。Emilia Kuliczowska 等[46]将因下水道渗漏引发的路面塌陷分为六种类型并分析原因。Thanop Thitimakorn 等[47]针对曼谷道路塌陷问题,使用地质雷达调查潜在道路空隙的延伸,检测到多个空洞异常并通过钻探确认其存在。陈楠[48]研究了物探方法在施工阶段的应用,提出应对策略。唐夺等[49]探讨了矿山地质灾害的成因与特征,介绍了地质雷达和瞬变电磁技术在灾害预防中的应用。赵缙等[50]利用 GprMax 软件对管道及空洞进行了数值模拟,建立正演特征模型。杜衍庆[51]建立了多孔疏松病害模型,并通过复信号技术验证结果。陈素敏等[52]研究层次分析法与 Yaahp 软件,量化预报手段对最佳方案的权重。

综上所述,当前研究已形成机理认知-模型构建-工程应用的完整技术链:在机理层面,突破单一归因局限,建立管道失效、岩溶活动、水力侵蚀等多源致灾理论框架;在建模层面,融合现场验证、数值模拟与决策算法构建三维度评估体系;在应用层面,覆盖城市规划、施工监管、矿山安全等多元场景。未来需进一步探索多物理场耦合机制,发展基于机器学习的动态风险评估模型,推动从被动治理向主动防控的范式转变。

3.3.2. 其他工程场景应用方面

地质雷达的工程应用正从单一目标探测向复杂场景智能诊断跨越。面对城市基建隐蔽病害、特殊地质体识别、多干扰环境探测等挑战,研究者通过场景化算法适配、多源数据融合与工程经验嵌入三维协同,构建起覆盖交通、水利、市政等领域的精准探测体系。从城市道路空洞预警到水库坝体隐患识别,从岩溶发育区勘察到活动断层定位,专项场景的技术突破正在重塑地下空间风险防控的新范式。

Matthew Cornick 等[53]使用基于先验地图的定位探地雷达(LGPR)定位行驶中的车辆,有效解决了传统 GPS 在噪声和高层建筑下失效的问题。Man-Sung Kang 等[54]提出基于三维探地雷达图像的地下空腔探测网络(UcNet),用于复杂城市道路的空洞预防,通过分析地下空洞的相位信息提高可探测性。关艳丽[55]通过地质雷达对建筑场地岩溶地质进行详细探测。王韵[56]通过地质雷达探测水库坝前的淤

泥土, 获得最佳叠加次数和土质图像。黄真萍[57]设计的探测剖面有效探测未知涵洞并提供施工建议。马佳浩[58]发现地质雷达能有效探测泥石流堆积物的厚度及分层。郝全明等[59]利用高密度电法与地质雷达对断面进行探测, 发现破碎带和水对边坡稳定性的重要影响。巨德彬[60]的研究表明, 电解质差异较大地区, 地质雷达探测结果较好。姚显春[61]提出区分地下金属与非金属材料管线的判别方案。谭磊[62]研究海水对电磁波的影响, 提出需结合钻孔检测综合判定。苏鹏[63]研究表明, 高频地质雷达对活动断层探测更为准确。朱占升[64]等指出, 衬砌中钢筋网对探测结果影响, 但能识别冻结区, 为后续探测提供经验。

综上所述, 当前专项应用呈现“场景精细化、技术定制化、验证标准化”的发展态势: 在交通领域, LGPR 定位与 UcNet 预警构建起道路设施全生命周期监控链; 在水利岩土工程, 多方法融合显著提升地质风险量化评估能力; 在特殊场景, 海水衰减补偿、钢筋干扰抑制等关键技术突破环境限制。未来需发展数字孪生驱动的智能诊断平台, 深化多物理场耦合反演理论, 推动地质雷达从“隐患探测”向“风险预测”的跨越, 最终实现“探测即评估”的工程智能管控目标。

4. 未来的发展趋势

近年来, 随着人工智能技术的快速发展, 许多研究者将深度学习技术应用到 GPR 图像目标检测中并取得了显著的研究成果。由于深度学习技术能够自动发现数据中的特征并对其进行分类。

从“数据采集工具”转向“自主诊断终端”是必然趋势。基于百万级病害样本训练的专用 AI 解译引擎将内置于雷达主机, 实现扫描同时输出结构化报告。在标准建设方面, 亟需制定相应的标准, 统一公路、铁路、水利等行业的病害判识指标与数据交付格式, 并建立省级雷达检测数据库, 最终推动形成“一次探测、多部门共享”的基础设施健康管理生态。

针对智慧城市、碳中和基建等国家战略需求, 地质雷达需与 BIM 运维系统、市政感知网络深度耦合。在道路塌陷防控领域, 形成“雷达车年度普查 + 光纤传感实时监测 + AI 风险预警”的三级防控体系; 在水利工程中, 通过与无人机热成像联动, 实现坝体渗漏“空-地一体化”诊断。重点突破市政管线数字孪生应用, 将雷达探测数据自动生成地下 3D 管网模型, 支撑老旧小区改造的精准施工。

5. 总结

1) 当前研究已构建多源致灾理论框架, 突破单一归因局限。通过融合现场验证、数值模拟与决策算法, 建立三维风险评估体系, 应用于城市规划、矿山安全等场景。未来需发展多物理场耦合机制与机器学习动态模型, 推动被动治理向主动防控转型。

2) 硬件智能化与多技术协同成为核心趋势。无人机/车载移动平台实现数据融合化, 重构工程探测范式。未来需开发自适应滤波芯片和耦合解释模型, 向“扫描即解析”的智能决策系统演进。

3) AI 解译形成“多算法协同-跨模态学习-场景化落地”生态链, 解决特征模糊与样本稀缺问题。矿山、隧道等场景验证工程适用性, 实现从人工判读到智能诊断跃迁。未来需突破少样本训练与多场联合反演, 发展边缘计算实时终端, 推动“成像工具→诊断专家”范式升级。

4) 算法精细化与模型实体化驱动技术演进。道路裂缝识别、隧道定位等应用实现量化评价。未来需深化全波形反演算法, 构建多参数诊断平台, 完成“特征增强→智能诊断”跨越, 达成“波形即结论”目标。

5) 专项应用呈现场景精细化、技术定制化、验证标准化三特征。LGPR 定位与 UcNet 预警保障交通设施安全, 多方法融合提升水利岩土风险评估能力。未来需发展数字孪生诊断平台, 深化多物理场反演理论, 实现“隐患探测→风险预测”跨越和“探测即评估”智能管控。

参考文献

- [1] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 吕玉增, 王洪华, 龚俊波. 探地雷达逆时偏移在隧道衬砌空洞成像中的应用[J]. 应用地球物理: 英文版, 2020, 17(2): 277-284.
- [3] Qiao, X., Yang, F. and Zheng, J. (2019) Ground Penetrating Radar Weak Signals Denoising via Semi-Soft Threshold Empirical Wavelet Transform. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, **24**, 207-213. <https://doi.org/10.18280/isi.240213>
- [4] 赵永峰, 李卫东, 柳俊敏. 联合探地雷达和管线仪反演技术在平行地下管线探测中的应用[J]. 无损检测, 2020, 42(11): 42-45.
- [5] 银卓. 探地雷达在道路检测技术中的应用性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [6] 江凯. 探地雷达在路基检测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [7] 张爱军, 程瑞, 孙涛, 等. 沥青路面探地雷达快速检测技术应用分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2021, 21(3): 6-10.
- [8] 刘震, 顾兴宇, 李骏, 等. 探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法[J]. 地球物理学报, 2024, 67(6): 2455-2471.
- [9] 周黎明, 张杨, 付代光, 等. 道路地下空洞探地雷达波场和时频特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 77-85.
- [10] 王伟, 郑睿. 基于探地雷达的道路半刚性基层含水率检测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(12): 1248-1255.
- [11] 王诚龙, 刘万里, 张学亮, 等. 基于探地雷达的工作面异常体精准探测技术[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3198-3208.
- [12] 王振东. YL-R2 地质雷达[J]. 国外地质勘探技术, 1985(9): 20.
- [13] Jeng, Y. and Chen, C. (2012) Subsurface GPR Imaging of a Potential Collapse Area in Urban Environments. *Engineering Geology*, **147**, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.009>
- [14] Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L. and D'Amico, F. (2017) An Overview of Ground-Penetrating Radar Signal Processing Techniques for Road Inspections. *Signal Processing*, **132**, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.016>
- [15] Eskandari Torbaghan, M., Li, W., Metje, N., Burrow, M., Chapman, D.N. and Rogers, C.D.F. (2020) Automated Detection of Cracks in Roads Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, **179**, Article ID: 104118. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104118>
- [16] Rasol, M.A., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Pais, J.C., Fernandes, F.M. and Santos, C. (2020) An Experimental and Numerical Approach to Combine Ground Penetrating Radar and Computational Modeling for the Identification of Early Cracking in Cement Concrete Pavements. *NDT & E International*, **115**, Article ID: 102293. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102293>
- [17] Rasol, M.A., Pérez-Gracia, V., Fernandes, F.M., Pais, J.C., Solla, M. and Santos, C. (2020) NDT Assessment of Rigid Pavement Damages with Ground Penetrating Radar: Laboratory and Field Tests. *International Journal of Pavement Engineering*, **23**, 900-915. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778692>
- [18] 王石磊, 赵志刚, 刘宏江, 等. 铁路碎石道床雷达检测技术研究与应用进展[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 116-126.
- [19] 任非. 改进后向投影算法在地质雷达混凝土裂隙成像中的应用[J]. 现代雷达, 2022, 44(1): 71-76.
- [20] 杨昌民, 潘元乐, 常博源. 基于地质雷达测算地基基础缺陷的体积研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 237-247.
- [21] 刘宗辉, 刘毛毛, 周东, 等. 基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3282-3290.
- [22] 王鹏越, 郝丽生, 刘杰. 宜万线路基岩溶地质雷达快速探测试验与应用[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 94-96.
- [23] 周黎明, 付代光, 张杨, 等. 典型不良地质体地质雷达探测正演试验研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 47-52+58.
- [24] 隋昕展, 杜衍庆, 师海, 等. 道路路基脱空病害雷达波场数值模拟与瞬时属性分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 782-788.
- [25] 刘洋洋, 尹奇峰, 倪圣军, 等. 地质雷达正演模拟及其在地下管道探测中的应用[J]. 给水排水, 2022, 58(S2): 532-536.
- [26] Özkaya, U., Öztürk, Ş., Melgani, F. and Seyfi, L. (2021) Residual CNN + Bi-LSTM Model to Analyze GPR B Scan

- Images. *Automation in Construction*, **123**, Article ID: 103525. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103525>
- [27] Ozkaya, U., Melgani, F., Belete Bejiga, M., Seyfi, L. and Donelli, M. (2020) GPR B Scan Image Analysis with Deep Learning Methods. *Measurement*, **165**, Article ID: 107770. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107770>
- [28] Noreen, T. and Khan, U.S. (2017) Using Pattern Recognition with HOG to Automatically Detect Reflection Hyperbolas in Ground Penetrating Radar Data. 2017 *International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, Ras Al Khaimah, 21-23 November 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/icecta.2017.8252064>
- [29] Pham, M. and Lefevre, S. (2018) Buried Object Detection from B-Scan Ground Penetrating Radar Data Using Faster-RCNN. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, 22-27 July 2018, 6804-6807. <https://doi.org/10.1109/igarss.2018.8517683>
- [30] 肖洋, 孟露, 卢松, 等. 地质雷达法在岩溶隧道探测及图谱智能识别中的应用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(S1): 182-186.
- [31] 余洋, 许献磊, 张志鹏, 等. 探地雷达在矿山地质环境调查中的应用探讨[J]. 煤炭工程, 2017, 49(10): 145-148.
- [32] 张建智. 城市道路病害特征地质雷达正演模拟及快速识别[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5499-5505.
- [33] Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., D'Amico, F., Alani, A.M. and Benedetto, A. (2018) An Experimental-Based Model for the Assessment of the Mechanical Properties of Road Pavements Using Ground-Penetrating Radar. *Construction and Building Materials*, **165**, 966-974. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.179>
- [34] García Fernández, M., Álvarez López, Y., Arboleya Arboleya, A., González Valdés, B., Rodríguez Vaqueiro, Y., Las-Heras Andrés, F., *et al.* (2018) Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board a Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Access*, **6**, 45100-45112. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2863572>
- [35] 胡晓. 地质雷达法与冲击回波法在铁路隧道衬砌质量检测中的综合运用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(S1): 187-191.
- [36] 张湘桂, 邹明, 刘宗辉, 等. 隧道衬砌后方隐伏洞穴地质雷达响应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1598-1605.
- [37] 许献磊, 张朝阳, 彭苏萍, 等. 低频地质雷达屏蔽天线开发及在地下空间工程探测应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 140-149.
- [38] 刘国超, 彭卫平, 杨水华, 等. 地质雷达+三维测量内窥镜的城市道路病害检测与应用[J]. 测绘通报, 2022(7): 134-137.
- [39] 李华, 王东辉, 张伟, 等. 地球物理探测技术在成都市浅表地质结构调查中的应用研究[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1438-1457.
- [40] 姜勇, 吴佳晔, 冯源. 铁路隧道衬砌缺陷检测中地质雷达法和冲击回波法的联合应用研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(12): 6-11.
- [41] 贾龙, 蒙彦, 吴远斌, 等. 地面与孔中地质雷达方法联作在覆盖型岩溶塌陷隐患识别中的应用[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 437-443.
- [42] 武桂芝, 张宝森, 李春江, 等. 阵列地质雷达在黄河堤防隐患探测中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(8): 113-116.
- [43] Chae, H.-Y. (2017) Study on Subsurface Collapse of Road Surface and Cavity Search in Urban Area. *Tunnel and Underground Space*, **27**, 387-392.
- [44] Papadopoulou-Vrynioti, K., Bathrellos, G.D., Skilodimou, H.D., Kaviris, G. and Makropoulos, K. (2013) Karst Collapse Susceptibility Mapping Considering Peak Ground Acceleration in a Rapidly Growing Urban Area. *Engineering Geology*, **158**, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.02.009>
- [45] Vierrether, C.B. (2013) Urban Development in Karst and Collapse-Prone Geologic Environments. *Carbonates and Evaporites*, **28**, 23-29. <https://doi.org/10.1007/s13146-013-0153-6>
- [46] Kuliczowska, E. (2016) An Analysis of Road Pavement Collapses and Traffic Safety Hazards Resulting from Leaky Sewers. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **11**, 251-258. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.29>
- [47] Thitimakorn, T., Kampananon, N., Jongjaiwanichkit, N. and Kupongsak, S. (2016) Subsurface Void Detection under the Road Surface Using Ground Penetrating Radar (GPR): A Case Study in the Bangkok Metropolitan Area, Thailand. *International Journal of Geo-Engineering*, **7**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0017-8>
- [48] 陈楠, 陈世锋, 吴强, 等. 物探技术在隧道工程全生命周期中的应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(S2): 224-236.
- [49] 唐夺, 高成林, 朱筱宇. 矿山地质灾害和工程地质水文地质环境问题的预防策略探析[J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 120-123.

- [50] 赵镇, 黄勇, 冯昆. 三维探地雷达在道路检测中的研究与应用[J]. 测绘通报, 2024(2): 148-152.
- [51] 杜衍庆, 隋昕展, 师海, 等. 公路路基浅层疏松病害地质雷达正演模拟及复信号分析[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(6): 147-153.
- [52] 陈素敏, 王馨霆, 袁真秀, 等. 基于层次分析法的综合超前地质预报及应用[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(5): 86-91+116.
- [53] Cornick, M., Koechling, J., Stanley, B. and Zhang, B. (2015) Localizing Ground Penetrating RADAR: A Step toward Robust Autonomous Ground Vehicle Localization. *Journal of Field Robotics*, **33**, 82-102. <https://doi.org/10.1002/rob.21605>
- [54] Kang, M., Kim, N., Im, S.B., Lee, J. and An, Y. (2019) 3D GPR Image-Based UcnNet for Enhancing Underground Cavity Detectability. *Remote Sensing*, **11**, Article No. 2545. <https://doi.org/10.3390/rs11212545>
- [55] 关艳丽, 李天, 侯秋平, 等. 地质雷达法在岩溶建筑场地精细化探测的应用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(S1): 181-186.
- [56] 王韵, 王红雨, 常留成, 等. 基于探地雷达的水库坝前淤积土沉积规律研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 152-158.
- [57] 黄真萍, 吴阳, 邱宗新, 等. 地质雷达探测地铁沿线未知涵洞的研究与应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 254-260.
- [58] 马传浩, 陈剑. 地质雷达技术在泥石流灾害调查中的应用——以北京房山南安主沟泥石流为例[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4): 1066-1072.
- [59] 郝全明, 任杰. 基于物探探查某露天矿边坡地质情况研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(10): 90-92.
- [60] 巨德彬. 地面穿透雷达检测公路路基岩溶洞穴的应用研究[J]. 公路工程, 2018, 43(6): 269-273.
- [61] 姚显春, 闫茂, 吕高, 等. 地质雷达探测地下管线分类判别方法研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1740-1747.
- [62] 谭磊, 张震, 梁东辉, 等. 地质雷达在防波堤抛石底界探测中的应用[J]. 地质论评, 2023, 69(S1): 417-418.
- [63] 苏鹏, 鲁人齐, 徐芳, 等. 地质雷达在城市活动断层探测中的应用——以鹤壁市汤东断裂为例[J]. 地质论评, 2021, 67(S1): 40-42.
- [64] 朱占升, 李学聪, 杜小虎, 等. 基于地质雷达法探测冻结帷幕研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1253-1256.