2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2309-2318
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

张梦坤,杨淼鑫,侯征.2026.复杂地下管线探地雷达正演模拟与特征分析.地球物理学进展,41(5):2309-2318,doi:10.6038/pg2026JJ0440.
ZHANG MengKun, YANG MiaoXin, HOU Zheng. 2026. Forward modeling and feature analysis of ground penetrating radar for complex underground pipelines. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2309-2318,doi:10.6038/pg2026JJ0440.

复杂地下管线探地雷达正演模拟与特征分析

Forward modeling and feature analysis of ground penetrating radar for complex underground pipelines

张梦坤[1],杨淼鑫[1,2*],侯征[1,2]
ZHANG MengKun[1], YANG MiaoXin[1,2*], HOU Zheng[1,2]

1. 河北地质大学地球科学学院,石家庄 052161
2. 自然资源部京津冀城市群地下空间智能探测与装备重点实验室,石家庄 052161
1. *School of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang* 052161, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Detection and Equipment for Underground Space in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, Ministry of Natural Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang* 052161, *China*

摘 要 本研究针对城市地下管线普查与安全运维中探地雷达(GPR)精度不足的问题,引入 GprMax 正演数值模拟软件,系统性地量化了管线埋深、管径、管材及填充介质等关键参数对电磁波场响应的影响机制.研究发现,地下介质的相对介电常数是决定雷达波场能量衰减与反射强度的核心控制因素.基于此,针对当前复杂地下管线三维空间结构难以准确表征的问题,提出一种"三维切片重构+沿切片 B-scan 结构化特征提取+三维属性体融合"的联合分析方法.该方法有效突破了传统二维剖面仅能展示图像或单一属性的局限,能够精准揭示管线在厚度延伸方向上的空间走向,为现场探测方案优化、数据解译提供了坚实的理论依据,同时也为构建高精度的三维可视化地质模型奠定了详实的数据基础.

关键词 探地雷达;正演模拟;地下管线;GprMax

中图分类号 P631
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0440
CSTR:32085.14.pg2026JJ0440

Abstract This study addresses the issue of insufficient accuracy in Ground Penetrating Radar (GPR) for urban underground pipeline census and safe operation and maintenance by introducing the GprMax forward numerical simulation software to systematically quantify the influence mechanisms of key parameters, including pipeline burial depth, diameter, material, and filling medium on electromagnetic wave field responses. The research reveals that the relative permittivity of subsurface media serves as the core controlling factor determining radar wave field energy attenuation and reflection intensity. Building upon this finding, and targeting the current challenge of accurately characterizing the three-dimensional spatial structure of complex underground pipelines, this study proposes a joint analysis method integrating "three-dimensional slice reconstruction + structured feature extraction along slice B-scan + three-dimensional attribute volume fusion." This method effectively overcomes the limitations of traditional two-dimensional profiles that can only display images or single attributes, enabling precise revelation of pipeline spatial orientation in the thickness extension direction. It provides a solid theoretical basis for optimizing on site detection schemes and data interpretation, while also establishing a comprehensive data foundation for constructing high-precision three-dimensional visual geological models.

Keywords Ground Penetrating Radar (GPR); Forward modeling; Underground pipelines; GprMax

收稿日期 2025-12-21; **修回日期** 2026-04-26. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 克拉通边缘稀土富集带岩石圈结构探测(2025ZD1004801)和河北地质大学博士科研启动基金项目(BQ2024031)资助.
第一作者简介 张梦坤,女,2001 年生,硕士研究生,研究方向为地球探测与信息技术.E-mail:zhangmengkun01@163.com
***通讯作者** 杨淼鑫,女,1988 年生,博士,讲师,研究方向为电磁法正演模拟与反演研究.E-mail:yangmiaoxin27@163.com

0 引 言

近年来地下管线作为城市运行的“生命线”,担负着传递信息和输送能量的重要职责.然而,随着现代化城市的快速发展,地下管线错综复杂、质量不一、地下管线信息不完善等问题凸显.大雨内涝、管线泄漏、路面塌陷等事件频发,严重影响了人民群众生命财产安全和城市运行秩序(郭士礼等,2019).据《全国地下管线事故统计分析报告》,2023 年度因地下管线所引发的安全事故 1406 起.在此背景下,探地雷达(GPR)作为一种新兴的无损检测技术,凭借其高分辨率、快速成像、非破坏性等显著优点,在道路探测领域得到广泛应用(Liu *et al.*,2021).

GPR 这一概念最早于 20 世纪 10 年代由 Letmbach 和 H.Lowy 所提出,用于研究利用无线电波探测电离层高度(李华等,2010).GPR 正演模拟最早采用时域有限差分法(FDTD)进行数值求解.它在计算机程序中具有易实现性,与其他方法如有限元和有限积分法相比,具有良好的可扩展性(冯德山等,2006).梁小强等(2017)通过 Matlab 平台编写了 GPR 正演的 FDTD 程序,准确定位地下管线的埋深等位置信息.针对当前 FDTD 法存在步长限制及计算耗时等问题, Wang 等人(2025)开发了一种基于 leapfrog ADI-FDTD 的 GPR 数值模拟方法,提升了计算效率实现快速模拟.1996 年,一款基于 FDTD 和完美匹配层(PML)边界吸收条件的探地雷达正演模拟软件,凭借其高效求解麦克斯韦方程组的能力,为探地雷达正演模拟提供了精准可靠的数值计算平台.周奇才等(2008)首先利用 GprMax2D 软件对探地雷达地质图像进行了正演模拟并对地下雷达图像进行识别分析.针对地下管线信息解译工作的局限性,张鹏等在 2015 年提出了一种判识地下管径的新方法,并借助 GprMax 对不同情况管线进行正演模拟,判识新方法的可靠性.朱四新等(2024)结合有限时域差分方法和矢量分量有限差分方法研究非金属管线的不同参数对雷达响应的影响.Meşecan 等人(2020)基于 GprMax 数据提出的三步地下目标检测法,为探地雷达检测技术带来新突破.Li 等人在 2024 年引入 Swin-YOLOX 算法,验证 GprMax 仿真样本可行性,提升了道路地下缺陷检测模型的性能.

通过以上研究调查发现,当前探地雷达地下管线探测研究多以二维正演模拟为重点.在应对城市地下空间中普遍存在的复杂场景时,因缺乏垂直方向电磁响应数据支撑,常导致管线厚度延伸特征模糊、纵向空间定位偏差以及三维结构误判等问题(李少杰, 2020).尽管三维切片可视化与属性体融合技术已在部分商业或开源平台中有所应用,但其在复杂管线的精细化响应特征关联与空间映射方面,仍缺乏系统性分析.为此,本文基于 GprMax3.0 电磁仿真平台及 Matlab 数据可视化平台在系统进行二维正演模拟构建管线电磁响应数据的基础上,通过为典型管线模型添加厚度参数并构建三维 FDTD 计算体系,提取不同深度层电磁场强分布,为城市地下管线精细化探测提供可靠的技术支撑.

1 基本原理

探地雷达(GPR)是一种利用高频电磁波探测地下结构和病害的无损检测技术,广泛应用于道路、桥梁、隧道、考古、地下管线探测等领域(陈思静等,2021).其基本原理是通过发射天线向地下发射高频电磁波,当电磁波遇到地下介质的不均匀界面时,会发生反射和折射,接收天线则接收这些反射信号并将其转化为雷达图像.通过分析反射波的振幅、相位和时间信息,可以推断地下结构的分布情况.

1.1 电磁波传播的基本理论

1.1.1 麦克斯韦方程

探地雷达的工作原理基于麦克斯韦方程组,该方程组描述了电磁场的基本规律.在无源区域,麦克斯韦方程组的两个旋度方程可以表示为:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \sigma \boldsymbol{E} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}, \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{E}$ 为电场强度(单位:V/m),$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度(单位:A/m),σ 为电导率(单位:S/m),ε 为介电常数(单位:F/m),μ 为磁导率(单位:H/m).

1.1.2 电磁波反射理论

在探地雷达的探测方法中,反射系数是判断散射体性质和属性的重要依据.反射系数的菲涅尔公式可以简写为:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}\sqrt{\varepsilon_2}}, \tag{3}$$

其中 ε 为介质的介电常数.依据公式(3)可以看出,反射界面两侧介质的电磁属性差异越大,反射波的能量越强.反射系数的符号决定了反射波振幅的正负,进而可以通过反射振幅判定两侧介质的性质和属性.

2　二维正演模拟

为了深入理解探地雷达在不同地下管线探测场景下的工作机制和响应规律,提高实际工程中探地雷达的参数设置合理性、数据解释准确性,以下分别针对道路管线不同埋深、管径、填充物质等情况开展二维正演模拟研究. 在依据实际工程情况并参考《公路工程物探规程》(JTG/T 3222-2020)等行业规范基础上,设置模型相关参数. 模型区域大小为 4.8 m×3.0 m,第一层为道路的空气层,空气的相对介电常数取 1,电导率取 0 S/m;第二层为道路的路面层,由厚度 20 cm 的沥青材料构成,沥青的相对介电常数取 6,电导率取 0.01 S/m;第三层是基层,主要由水泥稳定碎石组成,这里基层的厚度设为 60 cm,相对介电常数取 9,电导率取 0.001 S/m;第四层为道路的路基层,主要成分为土壤,相对介电常数取 12,电导率取 0.01 S/m. 基于相关工程案例及探地雷达应用技术规范,考虑到本文研究对象多为浅层管线,故选用 500 MHz 中心频率的雷达天线进行模拟试验.

2.1　探地雷达对不同埋深管线的响应分析

在实际工程中,由于城市建设的复杂性和多样性,地下管线的埋深呈现出显著差异. 因此以下分别设置了埋深为 1.3 m、1.7 m 和 2.1 m 的三个半径均为 30 cm 的圆形金属(pec)材质管道进行模拟试验,模拟结果如图 1 和图 2 所示.

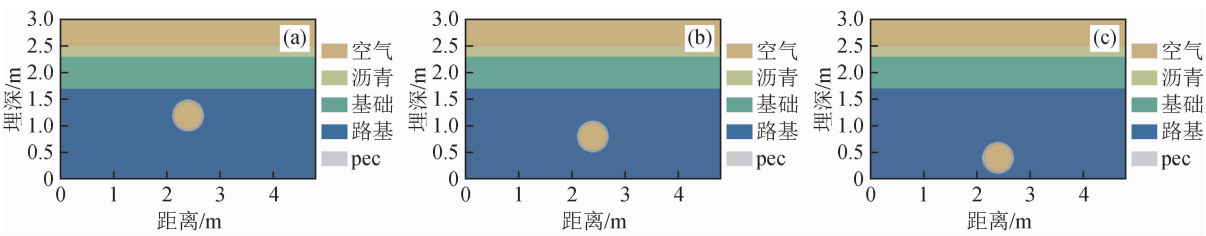


图 1　不同埋深管线模型图

(a) 1.3 m 埋深管线模型;(b) 1.7 m 埋深管线模型;(c) 2.1 m 埋深管线模型.

Fig. 1　Model diagram of pipelines at different burial depths

(a) 1.3 m buried pipeline model; (b) 1.7 m buried pipeline model; (c) 2.1 m buried pipeline model.

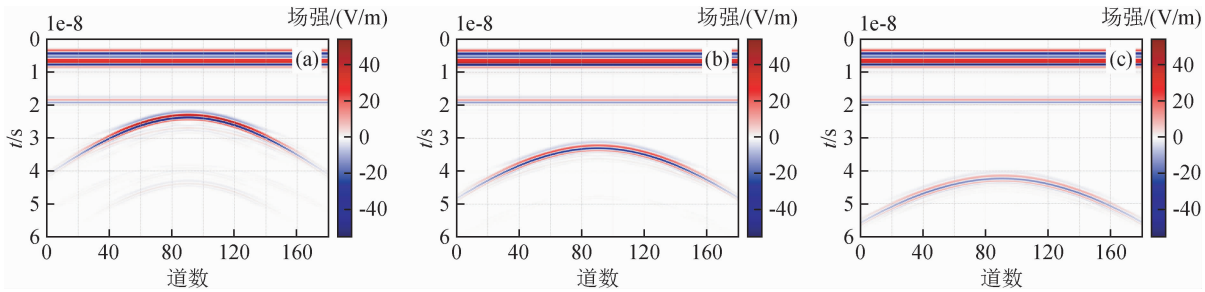


图 2　不同埋深管线电场响应图

(a) 1.3 m 埋深管线电场响应;(b) 1.7 m 埋深管线电场响应;(c) 2.1 m 埋深管线电场响应.

Fig. 2　Electric field response of pipelines at different burial depths

(a) E-field response of 1.3 m buried pipeline; (b) E-field response of 1.7 m buried pipeline; (c) E-field response of 2.1 m buried pipeline.

由图 2 可以清晰地观察到不同埋深的管线呈现出具有规律的响应特征. 首先从图 2(a)中可以观察到有两条开口向下的双曲线,这分别是管道顶部与底部的响应特征. 由纵轴时间轴可知,这两条双曲线最早出现的时间间隔约为 16 ns,可以计算得出圆形管道的厚度即管径约为 69 cm,这与预设管径基本相符. 随着埋深的增加,电磁波传播路径变长,能量衰减相对增大,只能观察到管顶部反射曲线的出现. 由此可知不同埋深的管线,电场响应特征不同. 具体而言,当发射频率等参数一致时,管线埋深越深,反射曲线的信号强度越低,双曲线的离心率越小.

2.2　探地雷达对不同管径的响应分析

不同类型、不同用途的管线,其管径大小存在显著差异. 而不同大小的管径可能改变电磁波在管线表面的反射面积和反射角度,从而影响反射信号的强度和特征. 以下分别设置了三个不同管径的圆形

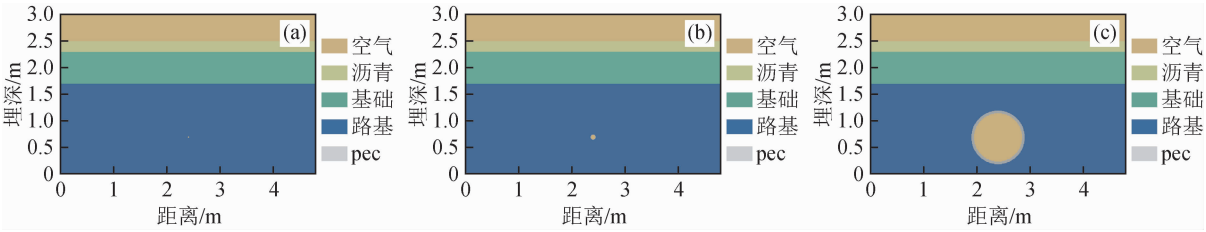


图 3 不同管径模型图

(a) 0.01 m 管径模型;(b) 0.1 m 管径模型;(c) 1.0 m 管径模型.

Fig. 3 Models of pipelines with different diameters

(a) 0.01 m diameter pipeline model;(b) 0.1 m diameter pipeline model;(c) 1.0 m diameter pipeline model.

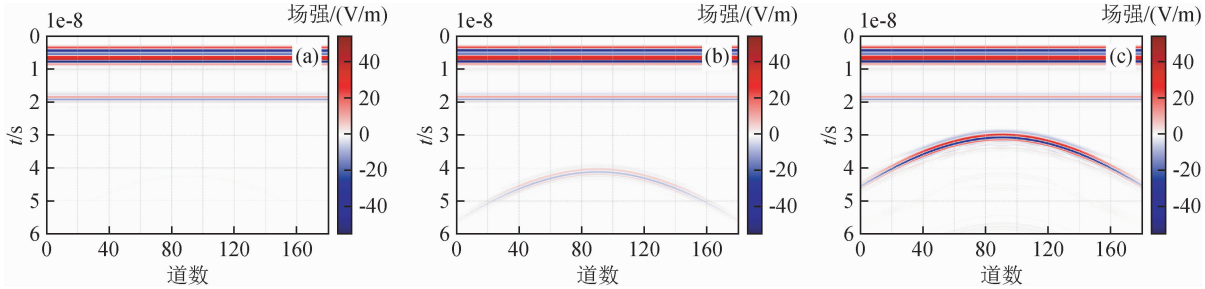


图 4 不同管径电场响应图

(a) 0.01 m 管径电场响应;(b) 0.1 m 管径电场响应;(c) 1.0 m 管径电场响应.

Fig. 4 Electric field response of pipelines at different diameters

(a) E-field response of 0.01 m pipe;(b) E-field response of 0.1 m pipe;(c) E-field response of 1.0 m pipe.

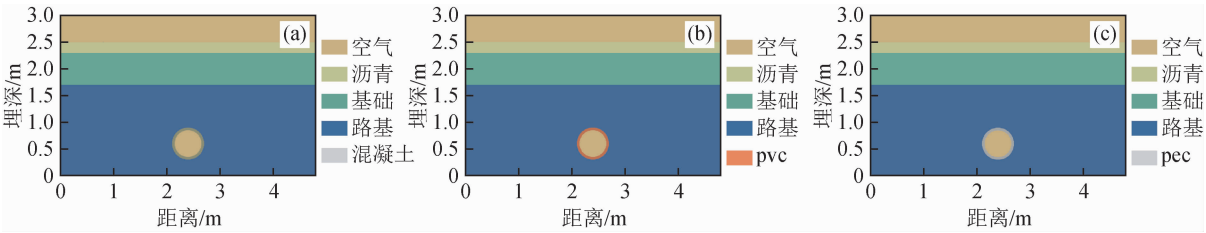


图 5 不同材质管线模型图

(a) 混凝土材质管线模型;(b) pvc 材质管线模型;(c) pec 材质管线模型.

Fig. 5 Models of pipelines with different materials

(a) Concrete pipeline model;(b) Pvc pipeline model;(c) Pec pipeline model.

管道进行模拟研究,模拟结果如图 3 和图 4 所示.

由图 4 可知当管径过小时,雷达波场强极弱,几乎观察不到管线的反射曲线;随着管径增大,电场强度曲线明显增强,且响应信号的到达时间逐渐提前.同时,响应曲线的双曲线形态更加明显.

2.3 探地雷达对不同材质管线的响应分析

考虑到实际道路中的管线材质涵盖塑料、金属及混凝土等多种类型.且不同材质的电磁特性差异显著,为此分别对混凝土材质管线、塑料(pvc)管线与金属(pec)管线进行正演模拟,参考规范要求混凝土材质管线的相对介电常数取 10,电导率取 0.05 S/m;pvc 管线的相对介电常数取 3.4,电导率取 0.001 S/m.pec 管线的相对介电常数与电导率默认为极大值的理想导电体.除材质的相对介电常数不同外,其余各项参数相同.正演模拟结果如图 5 和图 6 所示.

由图 6 可知,金属材质管线的电场响应曲线较清晰,反射曲线的强度较大.由于金属材质的相对介电常数与背景场介质相对介电常数的差异相较于其他材质要大,因此电场响应曲线更清晰,这与上述公式(3)的理论相一致.由此可知,管线材质相对介电常数与背景场的差异越大,异常曲线场强值越大,图

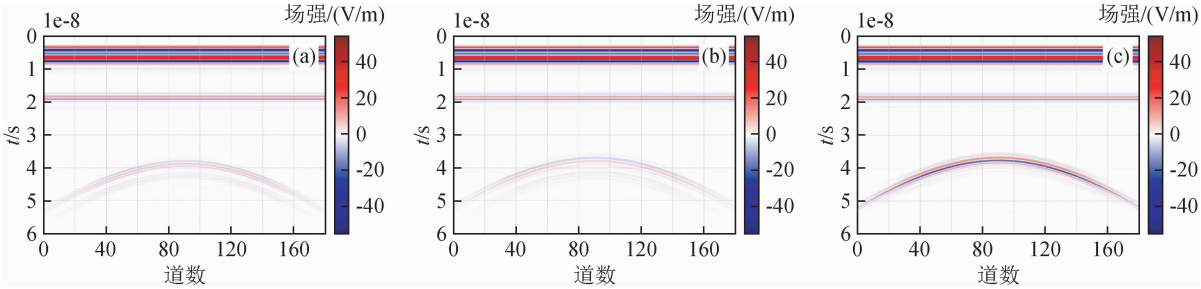


图 6　不同材质管线电场响应图

(a) 混凝土材质管线电场响应;(b) pvc 材质管线电场响应;(c) pec 材质管线电场响应.

Fig. 6　Electric field response of pipelines at different materials

(a) E-field response of concrete pipe;(b) E-field response of pvc pipe;(c) E-field response of pec pipe.

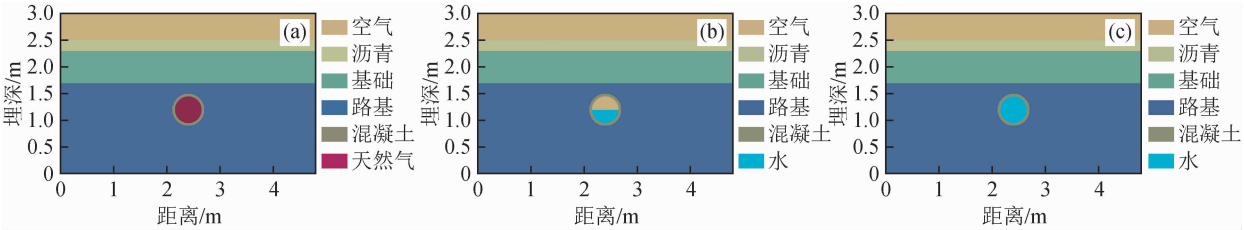


图 7　填充不同介质管线模型图

(a) 填充燃气管线模型;(b) 填充半水管线模型;(c) 填充满水管线模型.

Fig. 7　Models of pipelines with different media

(a) Pipeline model filled with gas;(b) Pipeline model partially filled with water;(c) Pipeline model filled with fully water.

像越清晰. 且当背景介质相对介电常数大于管线材质的相对介电常数时,反射波同相轴相位与直达波相位一致;当背景介质相对介电常数小于管线材质的相对介电常数时,反射波同相轴相位与直达波相位相反. 由此,为了方便后续正演模拟及图像分析,本文主要采用金属(pec)材质的管线进行模拟.

2.4　探地雷达对填充不同介质管线的响应分析

地下管道的探测效果不仅取决于管道本身的材质,还与其内部填充介质密切相关. 不同填充介质具有不同的介电常数和电导率,进而会产生不同的响应结果. 以下分别对三组不同填充介质的管线进行正演模拟试验. 为了更好地观察不同填充介质的电场响应结果,管壁选用混凝土材质,取相对介电常数为 10,电导率为 0.05 S/m. 其中供水管道填充水,取相对介电常数为 80,电导率为 0.05 S/m;燃气管道输送天燃气,主要成分为甲烷,纯甲烷气体在常温常压下的相对介电常数约为 1.001,非常接近空气. 但在实际工程中,管道内输送的天然气通常含有少量杂质、水汽或处于一定的压力下,其有效介电常数会略有升高. 因此,本文为突出其与空气的微小差异并便于在模拟中观察到可辨别的响应,选取燃气相对介电常数为 2,电导率为 $1e^{-6}$ S/m. 其余各向参数不变,模拟结果如图 7 和图 8 所示.

为了更加直观展示振幅强度的具体数值差异,图 8 提取了过管线中心的单道波形进行对比. 由于燃气的相对介电常数与背景场的差异最小,所以从图中可以观察到其电场场强最小,但由公式(3)反射系数公式可知,只要存在差异就会存在反射异常,所以在图 8(a)中仍能观察到反射曲线. 而水具有较高的相对介电常数,即使仅填充一半水,其电场响应反射信号也稍强于燃气. 但由于半水填充状态下,管道内介质不均匀,电磁波在传播过程中遇到不同介电常数的介质界面时,产生复杂的反射和折射现象,导致反射信号不如满水填充时更加强烈.

2.5　探地雷达对管线漏水情况的响应分析

由于材料老化、施工质量、外部荷载以及地质条件变化等因素的影响,地下管线发生泄漏现象时有发生,不仅造成资源浪费,还可能引发地面沉降、环境污染甚至安全事故(蓝逸,2021). 因此,图分别进行了管道不漏水、中心漏水以及部分漏水的正演模拟试验. 管壁仍为金属(pec)材质. 道路各层参数不变,设置管道中心漏水时向外扩散的土壤厚度为 0.3 m,侧向漏水向外扩散的厚度为 0.6 m. 湿润土壤的相对介电常数取 25,电导率为 0.1 S/m,正演模

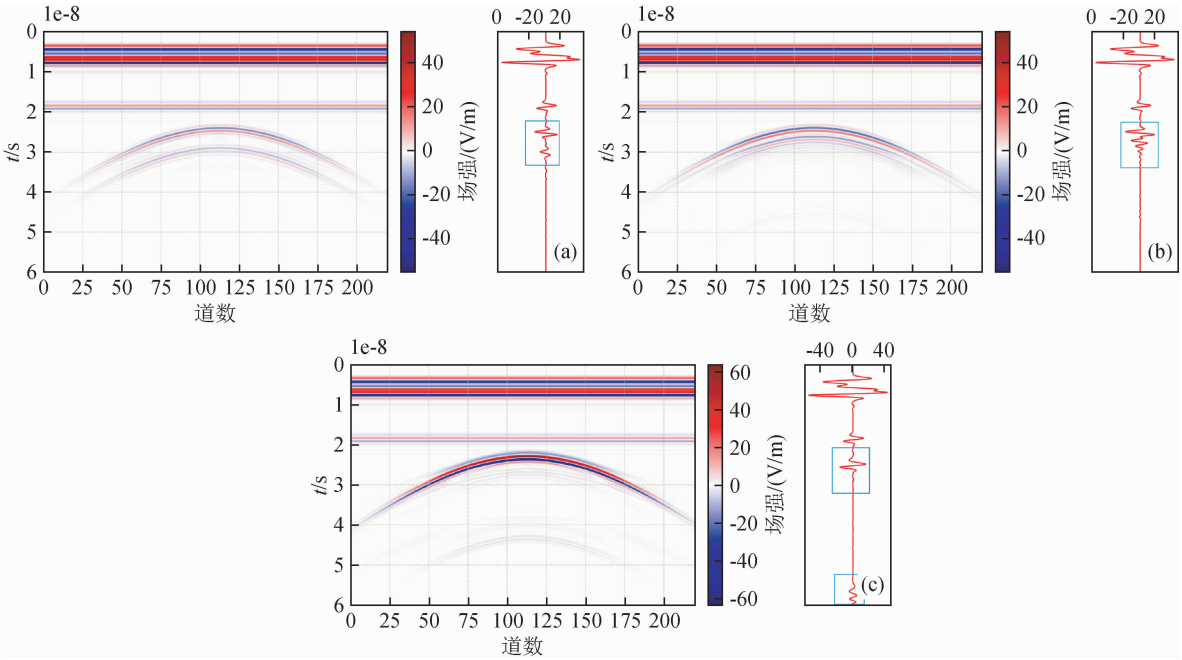


图 8 填充不同介质管线电场响应图

(a) 填充燃气管线电场响应;(b) 填充半水管线电场响应;(c) 填充满水管线电场响应.

Fig. 8 Electric field response of pipelines filled with different media

(a) E-field response in gas-filled pipelines; (b) E-field response in partially water-filled Pipelines; (c) E-field response in water-filled pipelines.

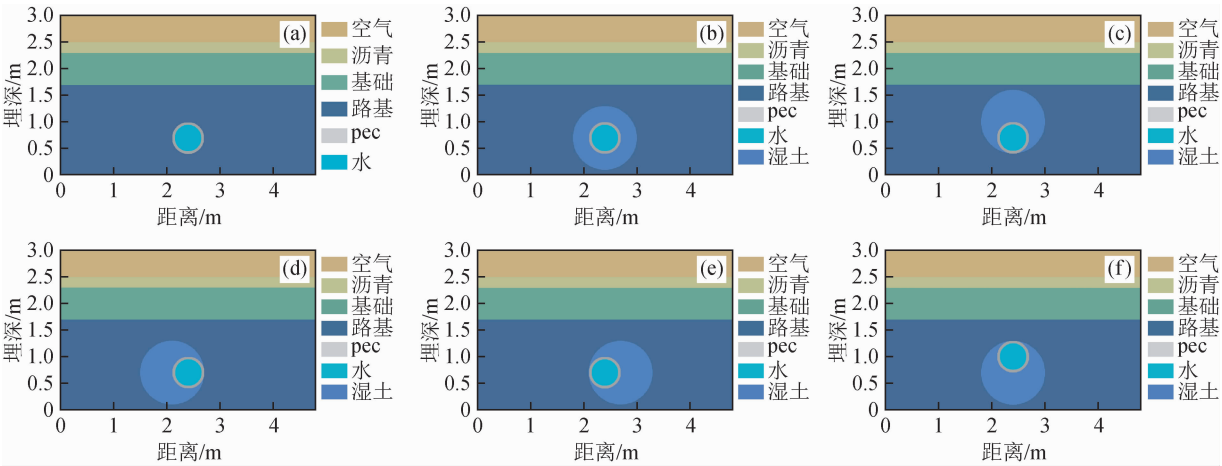


图 9 不同漏水方向管线模型图

(a)不漏水管线模型;(b)中心管线漏水模型;(c)上侧管线漏水模型;

(d)左侧管线漏水模型;(e)右侧管线漏水模型;(f)下侧管线漏水模型.

Fig. 9 Pipeline models with different leakage directions

(a) Intact pipeline model; (b) Central pipeline leakage model; (c) Upper pipeline leakage model;

(d) Left-side pipeline leakage model; (e) Right-side pipeline leakage model; (f) Bottom pipeline leakage model.

型图和模拟结果如图 9、图 10 所示.

当管道出现漏水情况时,周围土壤的含水量会增加,其相对介电常数,电导率也随之增大,但相比于水的相对介电常数要小,与周围介质的差异减小,所以电场响应的分辨率会减弱. 且从图 10(b)中可以看到两条双曲线图像,上部为湿润土壤的电场响应结果,下部为充水管道的响应结果,再根据双程走时公式可以计算出渗水的厚度约为 0.33 m 与初始设置的 0.3 m 基本吻合. 当管线左右侧向漏水时,电场响应曲线呈不对称分布,可以根据曲线的偏向大

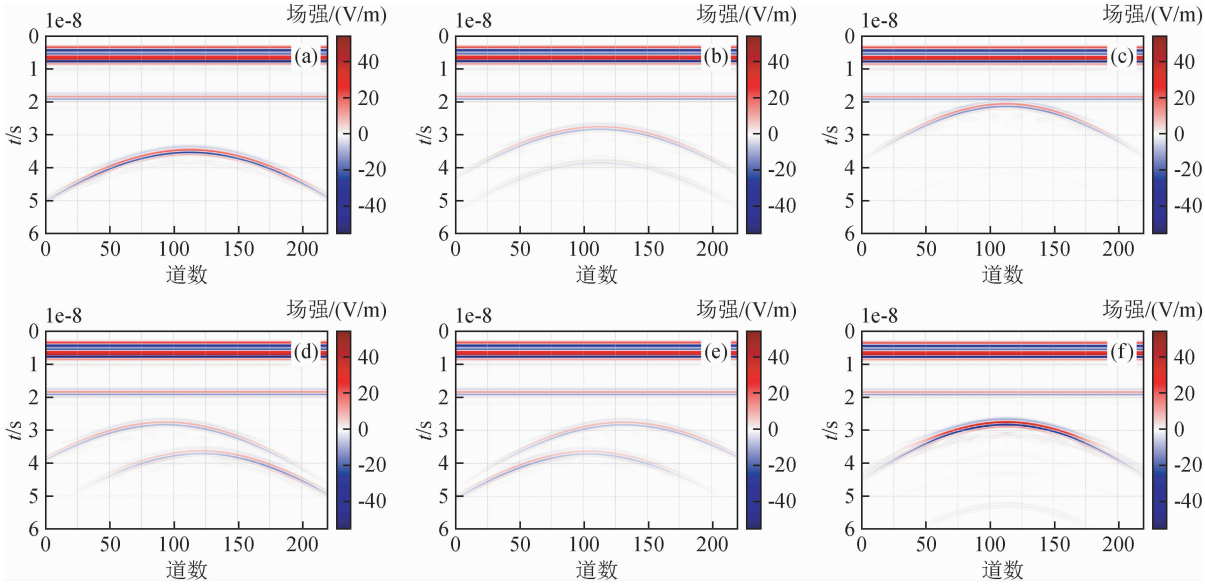


图 10　不同漏水方向管线电场响应图

(a)不漏水管线电场响应;(b)中心管线漏水电场响应;(c)上侧管线漏水电场响应;(d)左侧管线漏水电场响应;(e)右侧管线漏水电场响应;(f)下侧管线漏水电场响应.

Fig. 10　Electrostatic field response diagrams of pipelines with different leakage directions

(a) E-field response of intact pipelines;(b) E-field response to leakage in the central pipeline;(c) E-field response to leakage in the upper pipeline(d) E-field response to leakage in the left-side pipeline;(e) E-field response to leakage in the right-side pipeline;(f) E-field response to leakage in the lower pipeline.

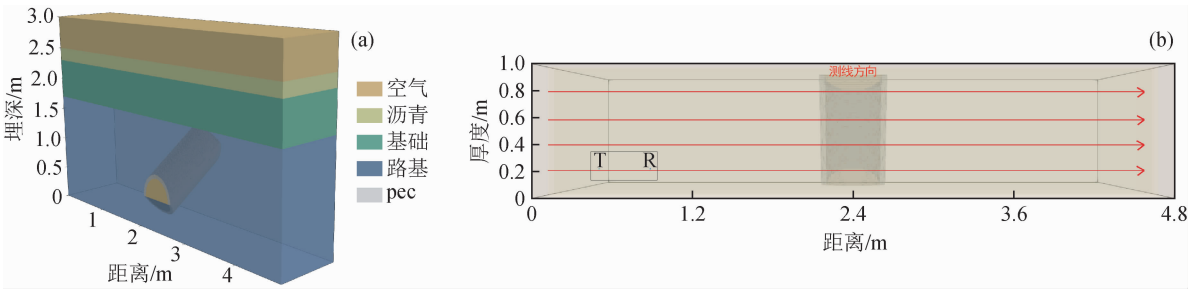


图 11　倾斜管线三维模拟图

(a)倾斜管线模型图;(b) 测线布置图.

Fig. 11　Three-dimensional simulation diagrams of inclined pipelines

(a) Model diagram of inclined pipelines;(b) Survey line layout diagram.

致判断管道漏水方向.这有助于对管道渗漏位置的及时、准确排查,进一步缩小渗漏位置的范围,快速定位渗漏点,从而及时采取修复措施,减少水资源的浪费以及因漏水引发的地面塌陷等安全隐患.

3　三维正演模拟

通过二维正演模拟已初步了解探地雷达在各类管线与道路模型中的响应特征及位置埋深情况,然而实际地下环境及管线分布具有鲜明的三维特征,二维模拟在呈现电磁波三维特征方面存在局限.为了更精准地模拟和分析实际地下管线场景,以下引入三维切片与 B-scan 特征提取分析相结合的方法,对不同排布走向的管线进行三维正演模拟试验.

3.1　探地雷达对地下倾斜管线的响应分析

针对地下埋深的倾斜管线这一具体场景,模拟区域为 4.8 m×1 m×3.0 m 地下空间,在路基层埋设一个距水平地面 35 度的倾斜管线,雷达各向参数与基础模型一致.如图 11 所示共布置 4 条测线,分别进行正演模拟,模拟结果如图 12 所示.

观察三维模型,随着切片向厚度方向深入,管线埋深越浅.在测线 1 处,管线埋深相对较深,雷达图像中的反射波同相轴相对较为平直,这表明在该深

度,由于管线埋深较大,管线距离探测面较远,其对雷达波的反射影响相对较小;沿着测线向深部探测,管线埋深相对变浅,雷达波的反射作用逐渐增强,反射波同相轴开始出现不同程度的弯曲.管线的倾斜形态开始对雷达波的传播路径产生影响,反射波的最早到达时间逐渐变早,结合上述 2.1 节雷达对不同埋深管线的响应结论可知管线埋深逐步增加.根据以上分析可以大致确定管线的倾斜方向.

3.2 探地雷达对交叉管线的响应

接下来对地下相互交叉的管线进行三维模拟.如图 13 所示,道路路基层分别设置埋深为 1.7 m 和 1.3 m 相互交叉的地下管线,同样沿管线延伸方向布置 4 条测线.其余各向参数不变,分别进行正演模拟试验.模拟结果如图 14 所示.

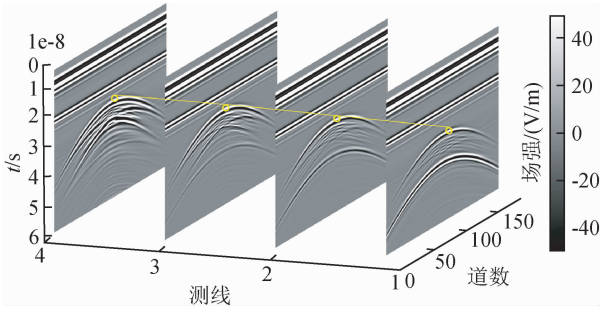


图 12 倾斜管线三维切片图

Fig. 12 Three-dimensional slice diagram of inclined pipelines

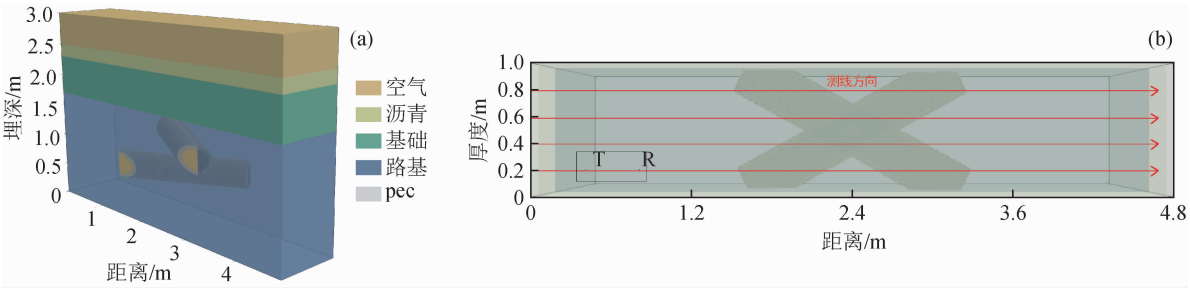


图 13 交叉管线三维模型图

(a)交叉管线模型图;(b) 测线布置图.

Fig. 13 Three-dimensional simulation diagrams of intersecting pipelines

(a) Model diagram of inclined pipelines;(b) Survey line layout diagram.

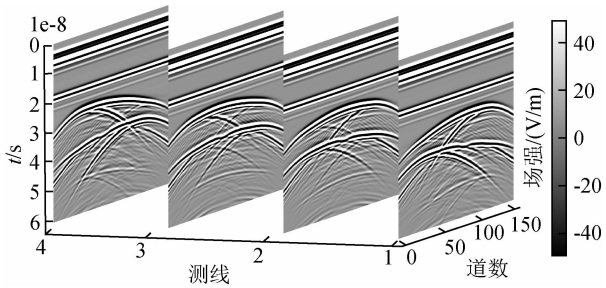


图 14 交叉管线三维切片图

Fig. 14 Three-dimensional slice diagram of intersecting pipelines

由图 14 三维切片图可见,沿管线延伸方向,在不同深度剖面上的电场响应特征呈现显著空间差异.四条测线均可测到上下两个管线的异常情况,其中测线 1 上部双曲线峰值向右偏移,下部双曲线峰值向左偏移;测线 2、3 两条双曲线峰值均收敛于中心位置,测线 4 上部双曲线峰值向左偏移,下部双曲线峰值则向右偏移,空间分布特征与第一条测线呈镜像对称.这也进一步验证了交叉管线的空间几何关系.结合二维正演模拟所建立的响应特征判识经验可知,上述三维电场响应形态与预设交叉管线模型高度吻合.

3.3 探地雷达对雨水管线堵塞的响应分析

在实际的雨水管道系统中,常常会出现因淤泥堆积而导致的堵塞问题.这种复杂的介质分布不仅会影响管道的正常排水功能,还可能对管道的结构安全构成潜在威胁.以下对此情况进行正演模拟,三维模型图如图 15 所示.其中水的相对介电常数、电导率与上文一致.淤泥的相对介电常数取 25,电导率取 0.1 S/m.模拟结果如图 16 所示.

由于雨水的相对介电常数与周围介质的差异相比于淤泥段较大,理想状态下雨水管道段的电场响应曲线应强于淤泥段,且分辨率更高.然而,实际得到的图像却与理论预期存在偏差.深入分析其原因,一方面,由于混凝土管壁的屏蔽效应导致进入管道内部信息的电磁波能量减弱,与周围介质的反射信

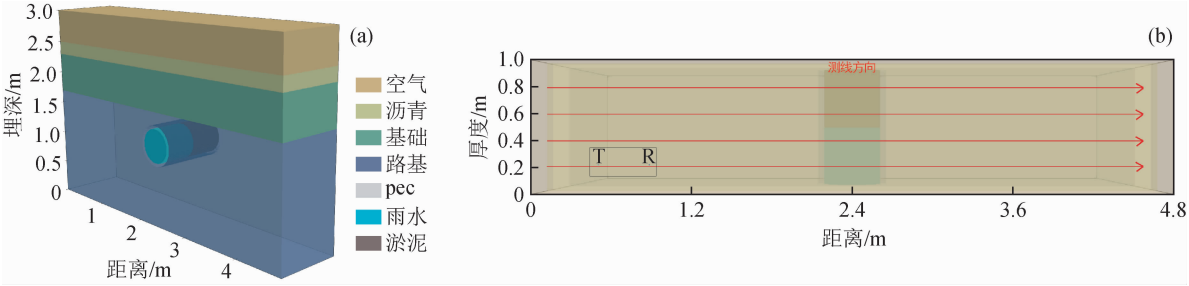


图 15　雨水管线三维模型图

(a)雨水管线模型;(b)测线布置图.

Fig. 15　Three-dimensional model diagrams of rainwater pipelines

(a) Rainwater pipeline model; (b) Survey line layout diagram.

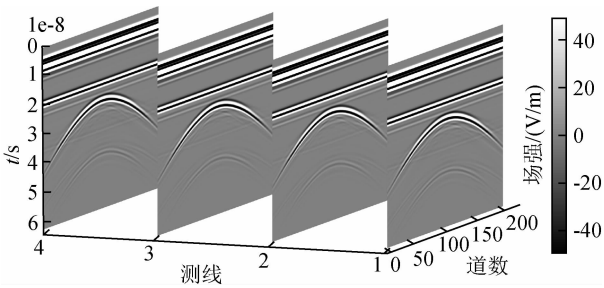


图 16　雨水管线三维切片图

Fig. 16　Three-dimensional slice diagram of rainwater pipelines

号混合后,难以清晰区分,从而掩盖了理论上的差异.另一方面,淤泥与水在管底的反射特征被管道的几何形态所掩盖,淤泥与水在管底的反射信号与管道几何形态引起的反射信号相互叠加,使得原本能够反映淤泥与水特性的反射特征变得模糊,难以从剖面图像中准确辨识出理论上的差异.此外,不同介质之间的介电常数差异较小也是一个潜在因素,导致雷达波反射强度变化不明显,进一步增加了辨识的难度.

本章通过构建倾斜、交叉及雨水堵塞等典型复杂管线的三维正演模型,系统开展了多测线 GPR 响应特征分析,提出并实践了一套将 Matlab 三维切片可视化与 B-scan 图像定量特征提取深度融合的分析框架,从而实现了对管线三维几何形态的空间映射.

4　结　论

本研究聚焦于城市复杂地下环境中管线探测的难点,基于 GprMax 平台构建了多参数的二维与三维正演模型,系统揭示了各参数对 GPR 电磁波场响应的控制机制与特征表现.主要研究结论如下:

(1)地下管线的埋深、管径、管材及填充介质等参数均对 GPR 图像产生显著影响.其中,埋深越浅、管径越大,其雷达反射信号强度越高,且双曲线形态的离心率越大,呈现出明显的几何特征规律.

(2)地下介质的相对介电常数是决定电磁波响应强度的关键物理参数.金属材质管线因高导电性产生极强的电磁反射;而当管线内填充水时,介质差异进一步放大了响应特征,可作为辅助定位漏水点的有效依据.相比之下,淤泥等低介电差异介质在非均匀填充条件下,往往难以在正演模拟图像中形成清晰的分辨边界,限制了其特征识别能力.

(3)通过引入三维切片与 B-scan 特征提取分析相结合的方法,有效揭示了地下管线在厚度延伸方向上的空间走向,突破二维剖面在空间信息表达上的局限性,提升复杂城市地下管网环境下目标的识别精度与解译可靠性.

综上,本研究通过多参数正演模拟与响应特征分析,系统建立了管线参数与响应特征的定量关系及三维复杂场景的空间映射,为优化现场探测方案、提高数据解译提供了理论依据与方法指导.但是由于本文模型对地下介质进行了均质化及理想化的设置,导致数值模拟结果与实际野外探测数据间可能存在一定的系统性偏差.故本文的模拟结果宜作为理论参考基准,而非对真实物理场景的复现.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chen S J, Hu X Y, Peng R H. 2021. Review of urban underground pipeline detection. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 1236-1247, doi: 10.6038/pg2021EE0257.

Feng D S, Dai Q W, He J S, *et al*. 2006. Finite difference time domain

method of GPR forward simulation. Progress in Geophysics (in Chinese), 21(2): 630-636, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.02.046.

Guo S L, Duan J X, Zhang J F, *et al*. 2019. Application of GPR in urban road hidden diseases detection. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(4): 1609-1613, doi: 10.6038/pg2019CC0438.

Lan Y. 2021. Research on GPR detection and forward modeling of urban water supply and drainage pipeline leakage [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Xihua University, doi: 10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000353.

Li H, Lu G Y, He X Q, *et al*. 2010. The progress of the GPR and discussion on its future development. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(4): 1492-1502, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.043.

Li S J. 2020. Underground pipeline detection and forward simulation calculation based on GPR system [Master's thesis] (in Chinese). Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, doi: 10.27397/d.cnki.gxaku.2020.000873.

Liang X Q, Yang D X, Zhang K N, *et al*. 2017. Application of FDTD numerical simulation of ground penetrating radar in pipeline detection. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(4): 1803-1807, doi: 10.6038/pg20170453.

Liu H, Shi Z S, Li J H, *et al*. 2021. Detection of road cavities in urban cities by 3D ground-penetrating radar. Geophysics, 86(3): WA25-WA33, doi: 10.1190/geo2020-0384.1.

Meşecan İ, Çiço B, Ömür Bucak İ. 2020. Feature vector for underground object detection using B-scan images from GprMax. Microprocessors and Microsystems, 76: 103116, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103116.

Wang B H, Shen H Y, Che H, *et al*. 2025. Numerical simulation of GPR via Leapfrog ADI-FDTD. Journal of Applied Geophysics, 237: 105691, doi: 10.1016/j.jappgeo.2025.105691.

Zhou Q C, Li B J, Zheng Y X, *et al*. 2008. Forward simulation of GPR image based on GPRMax2D. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 5(4): 396-399

Zhu S X, Wang H L, Zhu A F, *et al*. 2024. Response of ground penetrating radar to different parameters of non-metallic pipelines. Science Technology and Engineering (in Chinese), 24(31): 13540-13552, doi: 10.12404/j.issn.1671-1815.2308043.

附中文参考文献

陈思静, 胡祥云, 彭荣华. 2021. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势. 地球物理学进展, 36(3): 1236-1247, doi: 10.6038/pg2021EE0257.

冯德山, 戴前伟, 何继善, 等. 2006. 探地雷达 GPR 正演模拟的时域有限差分实现. 地球物理学进展, 21(2): 630-636, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.02.046.

郭士礼, 段建先, 张建锋, 等. 2019. 探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用. 地球物理学进展, 34(4): 1609-1613, doi: 10.6038/pg2019CC0438.

蓝逸. 2021. 城市给排水管道渗漏探地雷达探测及正演模拟研究[硕士论文]. 成都: 西华大学, doi: 10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000353.

李华, 鲁光银, 何现启, 等. 2010. 探地雷达的发展历程及其前景探讨. 地球物理学进展, 25(4): 1492-1502, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.043.

李少杰. 2020. 基于探地雷达系统地下管线探测及正演模拟计算[硕士论文]. 西安: 西安科技大学, doi: 10.27397/d.cnki.gxaku.2020.000873.

梁小强, 杨道学, 张可能, 等. 2017. FDTD 数值模拟在 GPR 管线探测中的应用. 地球物理学进展, 32(4): 1803-1807, doi: 10.6038/pg20170453.

周奇才, 李炳杰, 郑宇轩, 等. 2008. 基于 GPRMax2D 的探地雷达图像正演模拟. 工程地球物理学报, 5(4): 396-399.

朱四新, 王浩蔺, 朱安福, 等. 2024. 非金属管线不同参数对探地雷达响应的影响. 科学技术与工程, 24(31): 13540-13552, doi: 10.12404/j.issn.1671-1815.2308043.