文章编号：1007-2993（2026）04-0542-10

探地雷达管线探测响应特征研究

石宗源[1,2,3]　索　奎[4]　裴　鸿[1,2]　马　岩[1,2]　李阳阳[1,2]　陈世仲[4]　金　路[1,2]　张　卓[1,2]

（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南郑州　450000；2. 河南省自然资源科技创新中心（地球物理深部探测研究），河南郑州　450000；3. 四川省交通运输重点项目工作中心，四川成都　610000；4. 华北水利水电大学地球科学与工程学院，河南郑州　450000）

【摘要】 探地雷达是广泛应用于市政管线探测的浅部探测技术。为了提高对雷达探测地下管线雷达图像特征的认识，细化不同工况下雷达探测识别效果，提高雷达资料的解释精度，从雷达探测原理、时域有限差分模拟和管道探测现场工况出发，基于正演模拟软件 gprMax 建立不同材质、不同形态、不同管径、不同埋深、不同充水程度和不均匀介质等不同要素的模型，总结正演模拟剖面的特征，分析形成相应响应特征的因素，梳理不同参数对探测效果的影响。模拟与实测效果对比表明，可通过正演分析为工程实测提供参考。

【关键词】 探地雷达；管线调查；响应特征

【中图分类号】 P631；TU990.3　**【文献标识码】** A　doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0039

Response characteristics of ground penetrating radar (GPR) for pipeline detection

SHI Zongyuan[1,2,3]　SUO Kui[4]　PEI Hong[1,2]　MA Yan[1,2]　LI Yangyang[1,2]
CHEN Shizhong[4]　JIN Lu[1,2]　ZHANG Zhuo[1,2]

(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Geophysical Deep Exploration Research), Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Sichuan Transportation Key Project Work Center, Chengdu 610000, Sichuan, China; 4. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, Henan, China)

【Abstract】 Ground Penetrating Radar (GPR) is a shallow detection technology widely used in municipal pipeline detection. To enhance the understanding of GPR image characteristics for underground pipeline detection, refine the identification effects of GPR under different working conditions, and improve the interpretation accuracy of radar data, this research starts from the principles of GPR detection, finite-difference time-domain (FDTD) simulation, and on-site pipeline detection scenarios. Using the forward modeling software gprMax, models with different factors were established, including various materials, shapes, pipe diameters, burial depths, water-filling degrees, and heterogeneous media. The characteristics of forward modeling profiles were summarized, the forming factors of corresponding response characteristics were analyzed, and the impacts of different parameters on detection effects were sorted out. Through the comparison between simulation and field measurement results, it is proven that forward modeling analysis can provide references for engineering field measurements.

【Key words】 GPR; pipeline survey; response characteristics

0　引言

随着我国城市规模不断发展，地下空间不断被开发利用。管线作为城市的根系，通常形成庞大的系统。由于城市多阶段的发展，地下管网排布复杂，部分信息缺失，不利于地下管线的运维管理及后期相关工程的开展。地下管网承担着信息、能量、城市用水的传输任务，其形态和功能多种多样。近年来，由于不同材质的非金属管线大量应用，限制了基于电磁感应原理的管线探测仪的应用[1]。理论上探地雷达能识别各种地下介电常数差异界面，不仅对金属埋藏体敏感，也可对非金属管线进行探测，还具有成像直观、操作便捷、无损检测、对其他施工作业干扰小等优点，因此在管线探测领域应用广泛，成为近年来国内外工程物探领域的研究热点之一。

作者简介：石宗源，男，1996 年生，硕士，助理工程师，主要从事工程物探方面工作。E-mail: 862577245@qq.com
通信作者：张　卓，男，1981 年生，大学本科，高级工程师，主要从事地球物理探测工作。E-mail: 31790195@qq.com

雷达探测地下管线的相关研究主要采用正演数值模拟结合外业实地探测, 部分实验采用室内砂箱物理模拟。其中正演模拟主要通过时域有限差分(FDTD)和有限元(FEM)两种数值计算方法实现, Yee 于 1966 年提出了时域有限差分理论[2], 爱丁堡大学 Antonis Giannopoulos 博士于 1996 年开发了原始版本 gprMax2D, 2015 年发布了求解 3D 空间电磁场值的版本[3]。曾昭发等[4]、刘四新等[5−6] 自 2002 年起应用 FDTD 模拟了井中、机载雷达等多种应用场景。由于 gprMax 功能完备, 使用灵活, 目前应用比较成熟, gprMax3.0 版本更新后, 有大量学者采用 gprMax 进行道路、衬砌和管道的正演模拟研究, 分析了电磁波在不同工况下的传播特征, 其中梁小强等[7]、赵 欣等[8] 较早使用 gprMax 建立二维层状介质中不同类型的典型地下管线模型, 初步讨论了不同管线的雷达反射图像特征; 罗小龙[9]、秦 镇等[10] 系统地开展了雷达探测管线的模拟研究, 探讨收发距、管线间距、管线填充物、管径、埋深等因素对探测效果的影响规律; Shihab 等[11]、孙 伟[12] 对雷达探测管线的双曲线进行拟合, 并通过双曲线参数提取管线的半径、埋深等信息; 李靖翔等[13] 分析了地下电缆的反射图像特征及其与铸铁水管、排水管道、埋藏岩体的区别; 黄哲骢[14] 进行了砂箱实验对不同形式的管道渗漏进行了顺管道和垂直管道的雷达探测, 通过建立三维雷达成像数据体, 提升雷达探测效果; 杨 军等[15] 在实验室及室外布设不同材质、不同埋深、不同管径的管线模型, 利用不同中心频率的天线开展探测, 分析了真实的不均匀地下介质环境下地下管线回波传播规律及数据准确度。相关研究基本涵盖了雷达用于管线探测生产的主要方面, 但对实际探测时涉及个别细节不够完善, 如实验室砂箱实验较少考虑不均匀填土等不同高耗介质的效果; 含水管线未讨论管道干燥、细流、半水等不同填充情况。因此, 本文从实际探测角度出发, 结合 FDTD 正演, 对不同管道形态、材质、埋深、填充, 以及测线与管道相交角度、不均匀填土等情况进行数值模拟, 分析上述状态下雷达探测剖面的目标体响应特征, 为实测精细分析提供参考依据。

1 探地雷达基本原理及时域有限差分

1.1 雷达探测基本原理

探地雷达的核心装置是高频天线, 其中激发天线向地下发射特定主频的宽频带高频电磁波(1 ~ 10000 MHz)。电磁波在地下介质传播过程中发生吸收衰减, 在介电常数差异界面发生反射、透射和绕射。如图 1 所示, 接收天线接收回波信号后到达取样电路, 波形在时间轴上展开, 主机记录并存储反射波到达接收天线的走时、相位、振幅等传播和波形特征, 最终形成探地雷达二维剖面。根据反射回波信号的振幅、同相轴以及双程走时等特征来分析地下目标体的形态、埋深等信息。

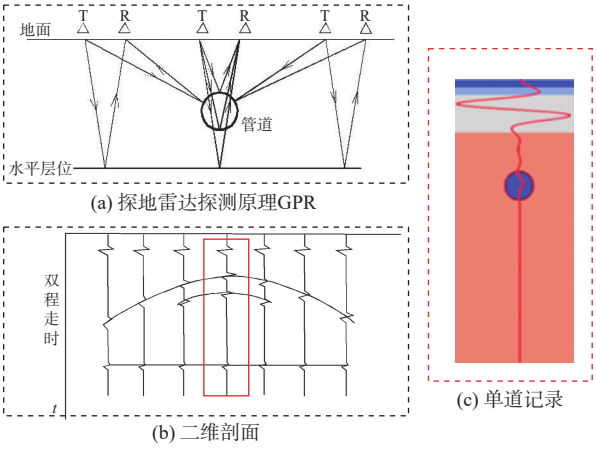


图 1 探地雷达探测原理示意图

Fig. 1 GPR detection principle schematic

实际探测应根据不同的应用场景选用不同的频率天线, 如主频<100 MHz 的低频杆状天线常用于较深的工程地质或矿产勘查, 其探测深度可突破 30 m[16]。主频 100 ~ 1000 MHz 的天线以碟形天线为主, 常要用于公路、管道、环境、岩溶及考古调查; 主频>1 GHz 的天线常用于探测混凝土结构和混凝土衬层、钢筋网、浅管等目标。用于市政管线探测的天线常为百兆级天线[17], 探测深度由介质对电磁波的吸收衰减决定, 电磁波在介质中的衰减速率由衰减系数表征(见式(1))。

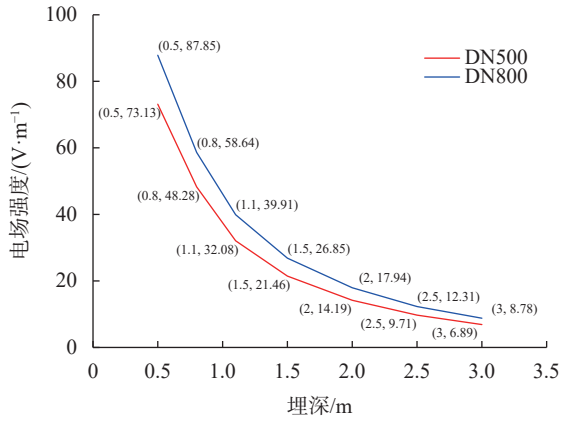
$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right)} \tag{1}$$

式中: α 为衰减系数; σ 为电导率, S/m; ε 为介电常数, F/m; μ 为磁导率, H/m; ω 为角频率, rad/s。

根据式(1)可知, 理想介质中电磁波的衰减系数 α 随频率 f 呈非线性增大。电磁波电场强度 $E=E_0e^{-\alpha z}$, 式中 E_0 为初始场强, α 为衰减系数, z 为深度, e 为自然对数底数, α 恒定时, 电场强度随深度呈对数趋势衰减。由图 2 可见, 270 MHz 天线模拟扫描 DN500 和 DN800 混凝土管道时, 其反射能量峰值随深度增大衰减, 其衰减速率随深度减小, 整体符合理论的对数衰减趋势。

1.2 时域有限差分模拟原理

时域有限差分是将连续交变的电磁场在空间和时间上离散为有限数量的空间网格和时间步长。将



注: 括号内数据为深度和接收到反射波峰值能量。

图 2 数值模拟 270 MHz 天线对 DN500/DN800 混凝土管反射波 E_z 随深度变化曲线

Fig. 2 Curves of reflected wave E_z varying with depth for 270 MHz antenna on DN500/DN800 concrete pipes by numerical simulation

Maxwell 方程组旋度方程转换为差分格式，应用二阶中心有限差分将微分方程转换为一组显式的代数方程[18]，然后电磁场可如图 3 所示随时间递推。

$$f'(x)\approx\frac{f(x+\Delta x)-f(x-\Delta x)}{2\Delta x} \tag{2}$$

二阶精度中心有限差分方程。

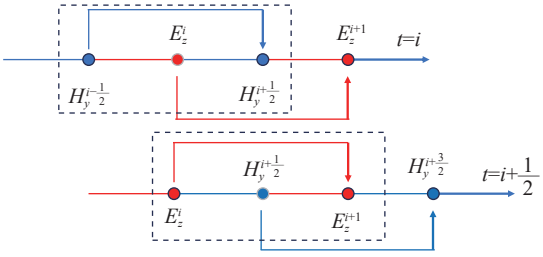


图 3 一维 FDTD 电磁场随时间递推过程

Fig. 3 One-dimensional FDTD electromagnetic field recursive process over times

$$\frac{\partial E_z}{\partial t}=-\frac{1}{\varepsilon_0}\frac{H_y}{\partial z} \tag{3}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t}=-\frac{1}{\mu_0}\frac{E_z}{\partial y} \tag{4}$$

亥姆霍兹方程不能直接求解，使用有限差分式在时间和空间上对电场和磁场进行离散化，将波动方程转化为时域有限差分代数方程，便可在计算机上模拟电磁场的传播和变化，式(1)和式(2)改写为二阶中心差分式如下：

$$\frac{E_z^{n+\frac{1}{2}}(i)-E_z^{n-\frac{1}{2}}(i)}{\Delta t}=-\frac{1}{\varepsilon_0}\frac{H_y^n\left(i+\frac{1}{2}\right)-H_y^n\left(i-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \tag{5}$$

$$\frac{H_y^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}\right)-H_y^n\left(i+\frac{1}{2}\right)}{\Delta t}=-\frac{1}{\mu_0}\frac{E_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1)-E_z^{n+\frac{1}{2}}(i)}{\Delta y} \tag{6}$$

2 探地雷达管线探测响应特征分析

采用探地雷达进行管线探测时，测线通常与管线走向呈垂直布置，以期获得更好的效果。此时地下管线可理想化为圆弧状或点状目标体，圆弧和点状目标的理论时距曲线为双曲线，但实测过程中响应形态会受到管线形态、填埋介质、管线埋深、管线材质、管道内填充物等因素的影响，也会受到仪器设备、叠加次数、扫描道间距等因素的影响。数值计算过程中模型物性参数主要为相对介电常数、电导率、磁导率和磁损，本文空气和金属(理想良导体)采用 gprMax 内置的参数进行模拟，水、土体、混凝土和 PVC 等非铁磁性材料磁导率均设置为 1，磁损设置为 0。涉及的主要材料相对介电常数及电导率采用如表 1 设置[19−20]。模型均为二维模型，网格剖分 0.002 m，扫描道间距 0.05 m，激励源为雷克子波(Ricker wavelet)。

表 1 正演模拟物性参数表

Tab. 1 Physical property parameters for forward modeling

介质	相对介电常数	电导率/(S·m⁻¹)
水	81	0.01
土体	10	0.003
混凝土	7.5	0.001
PVC	3	0
沥青	6	0.001

2.1 不同材质管线响应特征

为对比分析不同材质管线的响应特征，设置 8 m×2 m 均匀层状模型，采用 400 MHz 雷克子波模拟。模型如图 4 所示，第一层为半空间预留区域，厚度 0.1 m，第二层为混凝土硬化层，厚度 0.1 m，第三层为土体层，其下为半空间设置 DN400 的金属、PVC 及混凝土三种常见材质管道，管道埋深 0.5 m，管道间距 2.25 m，其中金属及 PVC 管壁厚度设置 0.01 m，混凝土管壁设置 0.02 m。

图 4 不同材质管线正演模型

Fig. 4 Forward modeling of pipelines with different materials

如图 5 所示, 不同材质管线响应特征如下: ①金属管道反射波能量显著高于非金属管道, 且存在较显著的二次波。②金属管道存在电磁波传播过程中波疏介质到波密介质的半波损失现象, 反射波电场 E_z 振幅方向与入射波相反, 区别于非金属管道。③由图 6 可见, 非金属管道间相对介电常数差异较小, 反射系数虽有差异, 但经介质的吸收衰减后, 其回波能量衰减至近似水平, 难以通过反射波的能量及形态区分不同类型的非金属管道。

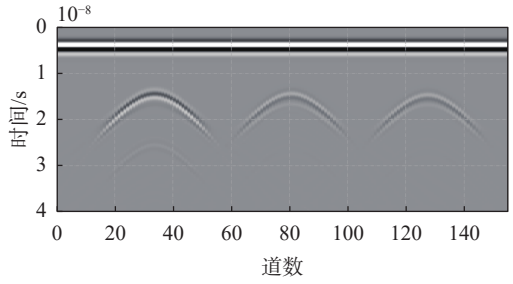


图 5 不同材质管线正演剖面
Fig. 5 Forward profiles of pipelines with different materials

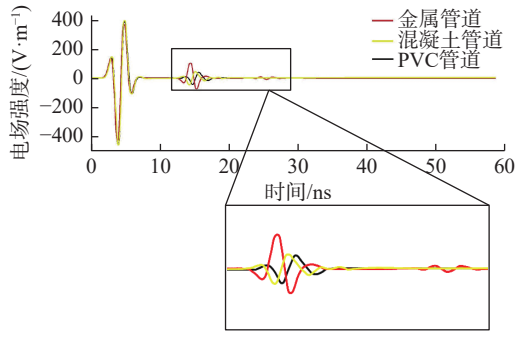


图 6 三种材质管线正上方反射波单道曲线
Fig. 6 Single-trace reflection curves directly above pipelines of three materials

2.2 不同形态管线响应特征

2.2.1 圆管、方管、管涵

为对比分析不同形态管线的响应特征, 设置 8 m×2 m 均匀层状模型, 采用 400 MHz 雷克子波模拟。模型如图 7 所示, 第一层为半空间预留区域, 厚度 0.1 m, 第二层为混凝土硬化层, 厚度 0.1 m, 第三层为土体层, 其下为半空间。本组模型设置三种不同形态的混凝土管道, 管壁厚度 0.03 m, 中心埋深均为 1 m, 其中圆管直径和方管边长均为 0.5 m, 管涵设置为 0.6 m×0.2 m。用于模拟常见的管道形态。由图 8 正演剖面可见, 不同形态管线响应有如下特征: ①显著的同相轴形态差异, 圆管同相轴为典型的单只双曲线, 而方管反射波能量集中于管顶部分, 其两翼能量较弱。②方管存在绕射波, 由于采用 400 MHz 天线, 管道周围介质设置为土体(相对介电常数 10), 管道尺寸与波长近似, 故在方管顶点处(尖灭处)产生了显著的绕射波, 同时对垂直于测线方向直立埋藏的管道侧壁, 雷达测线通过时会产生倾斜的直线型翼状响应, 该反射波于绕射波后到达。③方管存在多次波, 由管道 2 可见, 电磁波在管壁上下界面和管道内振荡, 表现为一系列多次波, 其中管底反射较为显著。④管道 3 反射波能量大于管道 2, 管道 2 管顶反射波 E_z 最大值 175.02 V/m, 其二次波 E_z 最大值 24.59 V/m, 管道 3 管顶反射波 E_z 最大值 205.53 V/m, 其二次波 E_z 最大值 35.31 V/m, 在常见管道尺寸范围内, 方管反射波能量强度与采用天线频率、管道宽度密切相关。

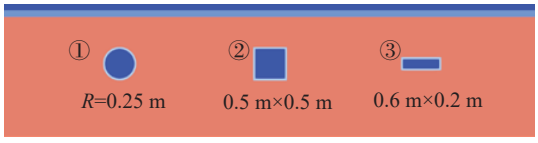


图 7 不同形态管线正演模型
Fig. 7 Forward modeling of pipelines with different shapes

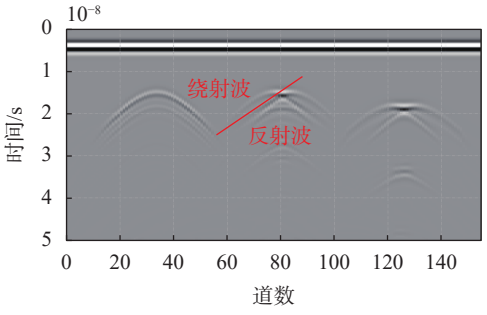


图 8 三种形态管线正演剖面
Fig. 8 Forward profiles of pipelines with three shapes

2.2.2 管涵中管道、管道上部脱空及下部脱空

实测过程中存在管涵洞室中布设管道或管道上方脱空至硬化层的情况, 如图 9 所示, 本组设置 14 m×4 m 均匀层状模型, 采用 270 MHz 雷克子波模拟。模型第一层为半空间预留区域, 厚度 0.1 m, 第二层为沥青层, 厚度 0.1 m, 第三层为混凝土体层, 厚度 0.2 m, 第四层为垫土层, 厚度 0.5 m, 第五层为土层, 其下为半空间。模型如图 9 所示, 左侧为 1 m×1 m 的方形混凝土洞室, 管顶埋深 0.3 m, 内置 DN500 的混凝土管道; 中间为 DN500 混凝土管道上部脱空, 脱空顶部埋深 0.4 m, 宽度 1 m, 管底埋深 1.35 m, 宽度 0.5 m; 右侧为 DN500 混凝土管道下部脱空, 管顶埋深 0.4 m, 宽度 0.5 m, 脱空底部埋深 1.3 m, 宽度 1 m。

由图 10 正演剖面可见, 本组模型响应有以下特征: ①由于目标体规模大于入射波波长, 故电磁波的传播以反射和折射为主(无明显绕射)。反射波能量

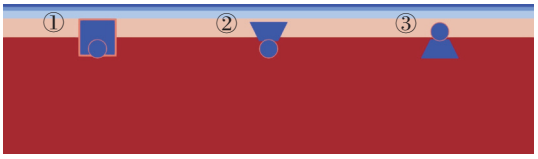


图 9 洞室内管线与管线脱空正演模型
Fig. 9 Forward modeling of pipelines and pipeline voids inside the cavity

主要集中于管涵或脱空顶部，同时对于地下垂直管壁或涵洞，产生倾斜的直线型翼状响应。②管涵内部存在管道时会形成一系列多次波，由于多次波包含管涵顶底之间的反射和管涵与内部管道之间的反射，其多次波在时间轴上连续且频次高于单纯的方形管道。而脱空模型中管道的响应更加显著，其多次波衰减更快，振荡频次较低。③管线上下部脱空存在显著差异，上部脱空时其响应更加类似于洞室，而下部脱空以点状异常响应为主，但脱空区域增大了响应的范围，其两翼表现为层叠同相轴，区别于单纯的圆管响应。

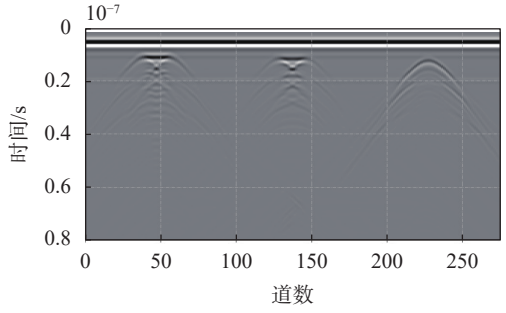


图 10 洞室与管线脱空正演剖面
Fig. 10 Forward-looking profile of cavity and pipeline air voids

综上，实测时主要可依据振荡的多次波和直线倾斜的两翼对管涵或脱空进行区分和判断。

2.2.3 测线与管道斜交响应特征

如图 11 所示，本组设置 16 m×3 m 模型，模型第一层为半空间预留区域，厚度 0.1 m，第二层为沥青层，厚度 0.1 m，第三层为混凝土体层，厚度 0.2 m，第四层为土层，其下为半空间。采用 100 MHz 天线，其波长更长，模拟效果更加直观显著，实测时衰减较小，可用于探查埋深至 3 ~ 5 m 的管线[21−22]。本模型 4 个管道，管顶埋深均为 1 m，其中 1 个为直径 0.3 m 的圆管，另外 3 个为短轴 0.3 m、长轴分别为 0.4, 0.5, 0.6 m 的椭圆形管道。模拟分析测线与管道不同程度斜交(与管线垂线方向夹角约 41°, 53°, 60°)时管线的响应特征。

图 11 测线与管线斜交正演模型
Fig. 11 Forward modeling of survey line obliquely intersecting with pipeline

测线与管线斜交正演剖面如图 12 所示，为方便能量大小对比显示，剖面采用彩色线性色尺。由剖面可见如下相应特征：①随着雷达散射截面的增大，管道回波能量增强，四管道反射波 E_z 峰值能量分别为 9.87, 14.52, 19.47, 25.22 V/m。②双曲线形态并无显著的区别，其下方开口随椭圆长轴增大而略有增大，50 ns 处四管道响应开口宽度分别为 3.392, 3.426, 3.631, 3.670 m。③本模型进一步说明了雷达扫描光滑连续曲线界面与具有突变点(尖灭点)的方形目标时电磁反射机制存在区别，另一方面说明实测时不易仅通过雷达剖面响应形态判断管线方向。

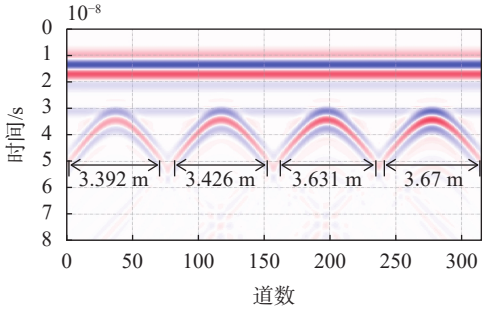


图 12 测线与管线斜交正演剖面
Fig. 12 Forward profile of survey line obliquely intersecting with pipeline

2.3 不同管径及不同埋深管线响应特征

管径及埋深均会对雷达剖面中管线响应的双曲线形态产生影响，整体规律为管径越大，雷达剖面上双曲线同相轴规模越大，埋深越大，双曲线曲率越小。本节通过正演模拟，探讨管径及埋深对雷达探测管线的响应特征规律。如图 13 所示，管道半径为 R，管顶埋深为 h，雷达与管顶上方水平距离为 x。则有 $(h+R)^2+x^2=(vt+R)^2$，可得标准双曲线方程 $\dfrac{x^2}{(h+R)^2}-\dfrac{\left(t+\dfrac{R}{v}\right)^2}{\left(\dfrac{h+R}{v}\right)^2}=1$，可见双曲线的离心率与渐近线均仅与波速 v 相关，说明在同种介质中，其时距曲线随 x 的延展在其两翼逐渐相近，区别集中于弧顶部分。对双曲线标准式变形可得 $t=\dfrac{1}{v}(\sqrt{h^2+R^2+2hR+x^2}-R)$，对 t 求导可得 $t'=\dfrac{x}{v\sqrt{h^2+R^2+2hR+x^2}}$，可见当 x 值在较小范围内变化时其双曲线斜率随 h(通常 R 数量级小于 h 且 R 值较小，所以 R 的变化对斜率影响并不显著)的增大而减小，但埋深较小时，双曲线形态取决于管径和埋深两因素。

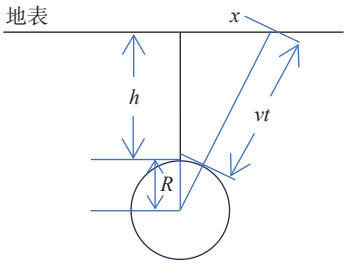


图 13　地埋管线时距关系示意图
Fig. 13　Schematic diagram of time–distance relationship for buried pipelines

根据上述现象和图 14 可见, 当埋深不同时, 管线双曲线形态有较大差异, 同一埋深管径不同时, 其形态十分近似, 当 x=2 m 时, R=0.5 m 和 R=0.3 m 的时距曲线走时差仅为 1 ns。理论上若能准确给定管道埋深、电磁波波速、雷达相对管顶偏移距离, 即可求得管径 R, 但工程实践中管线响应曲线拟合精度难以达到要求。

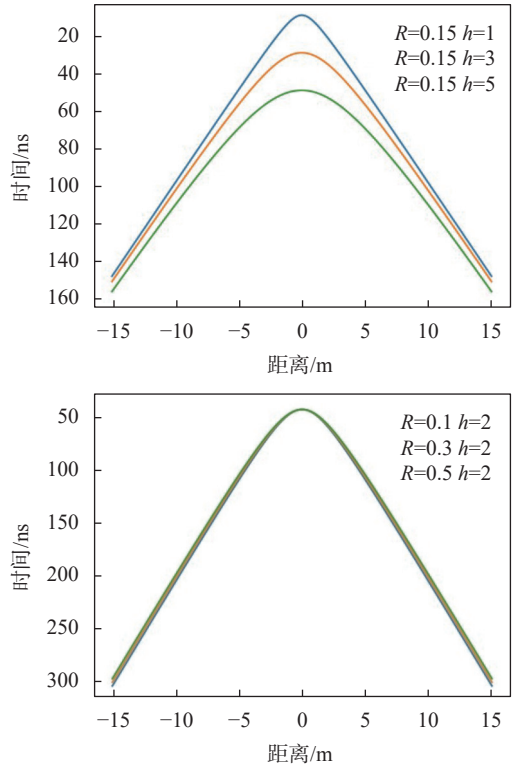


图 14　射线理论下管线响应时距曲线形态
Fig. 14　Morphology of time–distance curve of pipeline response under ray theory

2.3.1　不同管径管线响应特征

探地雷达探测管线时通常是进行存在与否的判断, 对管道管径的分析判断常常被忽视或缺乏依据。如图 15 所示, 本组设置 8 m×2 m 模型, 采用 400 MHz 雷克子波模拟。第一层为半空间预留区域, 厚度 0.1 m, 第二层为沥青层, 厚度 0.1 m, 第三层为土体层, 其下为半空间。设置管顶埋深 0.55 m 的 DN450、DN300、DN150 三个 PVC 管道, 对比分析管径对回波双曲线形态的影响。

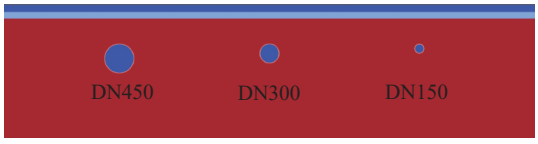


图 15　不同管径管线正演模型
Fig. 15　Forward modeling of pipelines with different diameters

由图 16 正演剖面直观可见, 相同埋深不同管径的整体变化符合上述理论推导, 其形态相似, 曲线斜率随管径变化并不显著。由于不同管径管线具有不同的反射截面, 管线的反射波能量随管径的减小呈非线性趋势减小, 本次模拟三管道反射波能量峰值分别是 64.35, 54.09, 34.67 V/m。由于大管径具有更大的反射波能量, 故雷达可以在更远的位置发现目标, 其剖面双曲线两翼就有更长的延伸。另一方面, 更大的管径可以通过多次波获得管道顶底界面, 管径小于 1/2 波长时会发生叠加或相消等变化。但实测时不含水的非金属管道多次波通常十分微弱、不易获得, 实际工作中通常难以通过反射波能量变化或多次波判断管径。

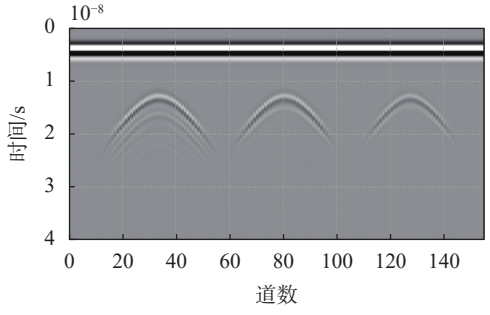


图 16　不同管径管线正演剖面
Fig. 16　Forward profiles of pipelines with different diameters

2.3.2　不同埋深的管线响应特征

如图 17 所示, 本组设置 8 m×2 m 模型, 采用 400 MHz 雷克子波模拟。第一层为半空间预留区域, 厚度 0.1 m, 第二层为沥青层, 厚度 0.1 m, 第三层为土体层, 其下为半空间。设置三个 DN300 管道, 管顶埋深分别为 0.35, 0.85, 1.35 m, 对比分析埋深对管线形态的影响。不同埋深管线正演剖面如图 18 所示。

由图 18 正演剖面可见, 除反射波能量随深度减小外, 埋深对管线响应影响的最显著特征是双曲线斜

率随着深度有明显减小。但由于雷达接收到的大埋深管道能量一般较弱，所以在工程应用中，埋深较大的管道常观察不到双曲线的两翼，表现为一截振幅或相位变化的弧顶(见图 19)。

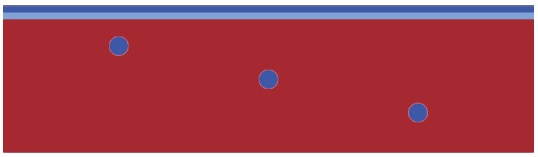


图 17 不同埋深管线正演模型
Fig. 17 Forward modeling of pipelines with different burial depths

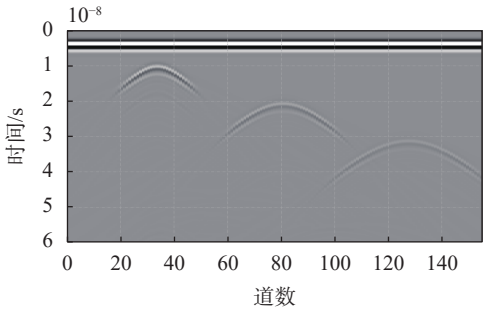


图 18 不同埋深管线正演剖面
Fig. 18 Forward profiles of pipelines with different burial depths

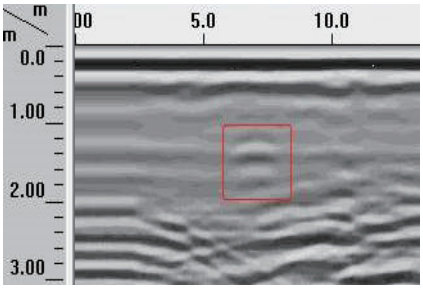


图 19 270 MHz 天线实测 1.2 m 埋深、DN500 混凝土管响应
Fig. 19 Measured response of DN500 concrete pipe at 1.2 m burial depth using 270 MHz antenna

2.4 不同充水程度的管线响应特征

如图 20 所示，本组模型设置 14 m×4 m 模型，采用 100 MHz 雷克子波模拟。第一层为半空间预留区域，厚度 0.1 m，第二层为沥青层，厚度 0.1 m，第三层为混凝土层，厚度 0.2 m，第四层为填土层，厚度 0.5 m，第五层为土体层，其下为半空间。设置 4 个含水程度不同的 DN500 砼管，自左向右分别是空管线、底部少量含水、部分含水和半填充四种填充情况，对比分析不同的含水程度对管线探测的影响。

为方便细节显示，对正演剖面(见图 21)进行了增益调整并采用彩色线性色尺显示。由剖面可见，空管、底部少量水和部分含水三种含水较少的情况未形成显著可见的多次波，而半水状态下形成了与满水管道能量近似的二次波，且二次波与一次波走时差 18.8 ns，据电磁波在空气和水中波速，可知该二次波为水与管底界面产生。管道中空气与水的界面反射波并不显著，不能通过该界面的反射判断管道含水情况。

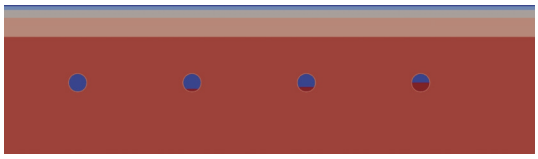


图 20 管线中水不同填充程度正演模型
Fig. 20 Forward modeling of pipelines with different water filling degrees

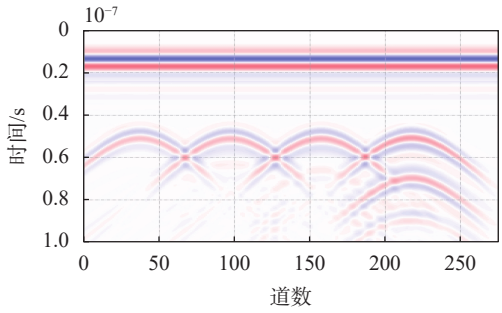


图 21 管线中水不同填充程度正演剖面
Fig. 21 Forward profiles of pipelines with different water filling degrees

2.5 存在渗漏时的响应特征

如图 22 所示，本节设置 14 m×4 m 模型，采用 100 MHz 雷克子波模拟。第一层为半空间预留区域，厚度 0.1 m，第二层为沥青层，厚度 0.1 m，第三层为混凝土层，厚度 0.2 m，第四层为填土层，厚度 0.5 m，第五层为土体层，其下为半空间。四个 DN400 的 PVC 管道模型内部填充水，分别模拟无渗漏、中心渗漏、垂向渗漏和侧向渗漏四种情况，其中渗漏管道通过设置相对介电常数和电导率渐变的圆环实现，其相对介电常数自 21 渐变至 12，电导率自 0.03 渐变至 0.008，渗漏区域为管道以外 0.3 m 范围内。

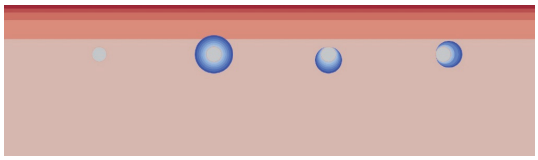


图 22 管道渗漏正演模型
Fig. 22 Forward modeling of pipeline leakage

由正演剖面图 23 可见，渗漏区域和无渗漏管道的响应形态无显著变化，区别主要在于多次波及反射波能量差异。其中中心渗漏管道由于含水界面反射及含水介质的吸收，其一次反射波能量明显小于无渗

漏的管道; 侧向渗漏管道同样存在反射波能量的减小, 且侧向渗漏区域的响应并不显著, 若地下介质物性连续均匀变化, 则难以形成有效的反射波; 垂向渗漏模型响应与未渗漏响应基本一致, 渗漏区域未产生明显可见反射。

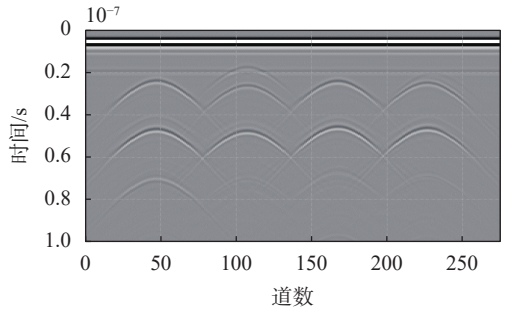


图 23 管道渗漏正演剖面
Fig. 23 Forward profiles of pipeline leakage

在工程实测中, 目前一般难以通过雷达探测直接判断较均匀土体中的渗漏, 通常是通过探测管道周围土体的不密实或脱空进行判断。图 24 为公路下埋管线渗漏导致不密实典型剖面。

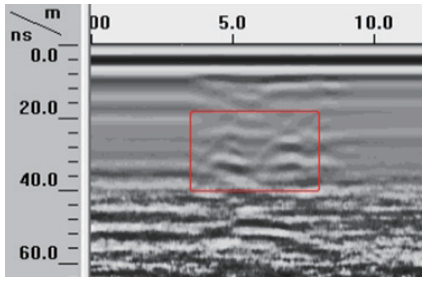


图 24 典型雨污水管线存在渗漏不密实实测剖面
Fig. 24 Typical profile of rainwater and sewage pipelines with leakage and compaction defects

2.6 不均匀介质中管道的响应特征

如图 25 所示, 本节设置 12 m×4 m 的层状模型, 采用 100 MHz 雷克子波模拟。第一层为半空间预留区域, 厚度 0.1 m, 第二层为沥青层, 厚度 0.1 m, 第三层为混凝土层, 厚度 0.2 m, 第四层为填土层, 厚度 0.5 m, 第五层为土体层, 其下为半空间。模型左半部分设置 2500 个随机的毫米级本构模型组合, 随机填充介质空气和水, 以模拟不均匀土体的孔隙, 右侧为均匀层状介质, 模型两侧设置两个埋深 2 m 的 DN500 混凝土管道。

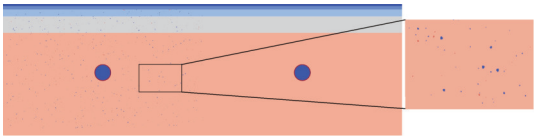


图 25 不均匀土体中管道正演模型
Fig. 25 Forward modeling of pipeline in heterogeneous soil

如图 26 所示, 正演剖面采用分段色标, 可见左侧背景场杂乱, 层位响应受到显著影响, 第一层位同相轴出现轻度的波动和断开, 第二层位响应严重波动断开, 难以识别。管线响应整体形态得以保留, 但雷克子波的第一个正相位受到较大干扰, 近乎不能识别, 而均匀背景下管线响应的正相位基本得以保留。由此可见, 对于同一管线, 不均匀介质会降低管线的识别程度和雷达的可探测深度。

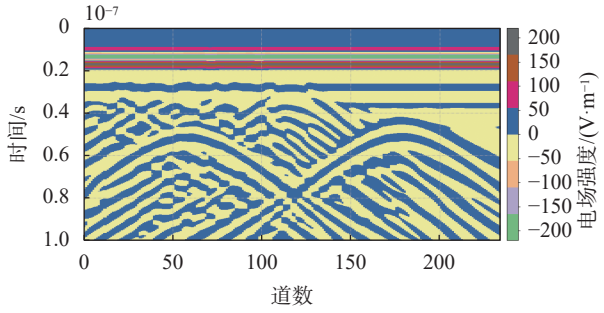


图 26 不均匀土体中管道正演剖面
Fig. 26 Forward profile of pipeline in heterogeneous soil

3 结论

本文基于 gprMax 正演模拟软件, 对雷达探测管线的影响因素(包括管线材质、形态、管径、埋深、充水程度、渗漏程度和不均匀介质)进行建模正演, 分析各因素对雷达探测管道响应特征的影响。主要结论如下:

(1)金属管道反射波能量显著高于非金属管道并存在多次波, 其相位存在半波损失现象。当管径及埋深近似时, 探地雷达对混凝土管道和 PVC 管道探测能力无显著差异。

(2)方管反射波能量集中于管顶部分, 方形管道尺寸与波长近似时, 方管顶点处(尖灭处)产生绕射波。地下近直立埋设的物体(管道侧壁反射)会产生倾斜的直线型翼状响应。

(3)当波速一定时, 时距曲线的曲率受埋深和管径控制, 由于管径数量级(如 0.3 m)通常低于埋深(如 3 m), 且管径数值一般在较小范围内(大多数 0 ~ 1 m), 所以其曲率主要受埋深影响。其斜率表现为受深度控制, 深度越大, 曲线越平缓。

(4)管道中少量填充水对响应形态影响不大, 当管道内填充水达到一半时会出现多次波, 该多次波为水与管底界面产生, 区别于少水和空管。关于通过雷达剖面判断管道充水程度的可靠性, 还需更多模拟和实测案例进一步研究验证。

(5)不均匀介质会产生大量杂乱的绕射和反射波, 显著降低管线的可探测深度。根据正演及实测经

验，以我国西北戈壁地区为典型代表，常用的频率 100 MHz 及以上的天线对 1 m 以下深度管道探测受到较大限制。

参 考 文 献

[1] 曹宏宇. 基于电磁法的地下金属管线探测系统研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023. (CAO H Y. Research on underground metal pipeline detection system based on electromagnetic method[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023, doi: 10.27107/d.cnki.ghbku.2022.000207.(in Chinese))

[2] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.

[3] GIANNOPOULOS A. Modelling ground penetrating radar by GprMax[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(10): 755-762.

[4] 曾昭发, 霍祉君, 李文奔, 等. 任意各向异性介质三维有限元航空电磁响应模拟 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2018, 48(2): 433-444. (ZENG Z F, HUO Z J, LI W B, et al. 3D vector finite-element airborne electromagnetic modelling in an arbitrary anisotropic medium[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(2): 433-444, (in Chinese))

[5] 刘四新, 佐藤源之. 井中雷达的数值模拟 [C]//中国地球物理学会年刊 2002——中国地球物理学会第十八届年会论文集. 北海: 中国地球物理学会, 2002: 219. (LIU S X, SATO G. Numerical simulation of borehole radar[C]//Annual Report of the Chinese Geophysical Society 2002-Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beihai: Chinese Geophysical Society, 2002: 219. (in Chinese))

[6] 刘四新, 宋梓豪, 程建远, 等. 利用钻孔雷达探测煤矿井下顶底板界面的数值模拟研究 [J]. 世界地质, 2021, 40(3): 711-720. (LIU S X, SONG Z H, CHENG J Y, et al. Numerical simulation research on detecting underground coal mine roof and floor using borehole radar[J]. Global Geology, 2021, 40(3): 711-720, (in Chinese))

[7] 梁小强, 杨道学, 张可能, 等. FDTD 数值模拟在 GPR 管线探测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1803-1807. (LIANG X Q, YANG D X, ZHANG K N, et al. Application of FDTD numerical simulation of Ground Penetrating Radar inpipeline detection[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1803-1807. (in Chinese))

[8] 赵 欣, 王希良, 刘珍岩, 等. 复杂条件下的地下管线探测模拟 [J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1307-1312. (ZHAO X, WANG X L, LIU Z Y, et al. Simulation of underground pipelines under complicated condition[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1307-1312. (in Chinese))

[9] 罗小龙. 基于 GPRMAX 的地下管线探地雷达图像正演模拟 [D]. 荆州: 长江大学, 2018. (LUO X L. Forward modeling of ground penetrating radar image based on GPRMAX[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018. (in Chinese))

[10] 秦 镇. 基于探地雷达的城市地下非金属管线探测识别研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019. (QIN Z. Research on detection and recognition of urban underground nonmetallic pipelines based on GPR[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019. (in Chinese))

[11] SHIHAB S, AL-NUAIMY W, ERIKSEN A. Radius estimation for subsurface cylindrical objects detected by ground penetrating radar[C]//Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Delft: IEEE, 2004: 319-322.

[12] 孙 伟. 地下管线探测数据处理及可视化技术研究[D]. 郑州: 网络空间部队信息工程大学, 2012. (SUN W. Research on detection data processing and visualization of underground pipeline[D]. Zhengzhou: Information Engineering University of Cyberspace Forces, 2012. (in Chinese))

[13] 李靖翔, 赵 明, 赖 皓, 等. 地下电缆的探地雷达图像特征与识别技术 [J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1482-1489. (LI J X, ZHAO M, LAI H, et al. Imaging detection and recognition technology of underground cable based on ground penetrating radar[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1482-1489, (in Chinese))

[14] 黄哲骢. 基于探地雷达的管道漏损检测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019. (HUANG Z C. Study on leak detection of pipeline based on ground-penetrating radar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese))

[15] 杨 军, 李 婷, 袁忠明, 等. 管线模型的探地雷达物理模拟实验 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(2): 912-927. (YANG J, LI T, YUAN Z M, et al. Ground penetrating radar physical simulation experiment of pipeline model[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(2): 912-927. (in Chinese))

[16] 许献磊, 杨 峰, 夏云海, 等. 矿井超深探测地质雷达天线的开发及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 124-129. (XU X L, YANG F, XIA Y H, et al. Development and application of mine geological radar antenna for mine ultra-deep detection[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 124-129, (in Chinese))

[17] 石宗源. 地下非金属管线雷达探测研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022. (SHI Z Y. Research on GPR detection of underground nonmetallic pipelines[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022. (in Chinese))

[18] SARKAR D. FDTD analysis of guided electromagnetic wave interaction with time-modulated dielectric medium[M]. Singapore: Springer, 2022

[19] 黎 霞, 高燕希, 宁黎磊, 等. 隧道衬砌介电常数试验与理论分析 [J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 70-74. (LI X, GAO Y X, NING L L, et al. Experimental and theoretical analysis on permittivity of tunnel lining[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 70-74, (in Chinese))

[20] 王天琪, 李 静, 白利舸, 等. 基于速度分析的探地雷达阻抗介电常数反演 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2021, 51(2): 561-570. (WANG T Q, LI J, BAI L G, et al. GPR impedance inversion of permittivity based on velocity analysis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 561-570, (in Chinese))

[21] 王 伟. 基于雷达技术的大埋深管线探测应用研究 [J]. 地球科学前沿, 2022, 12(9): 1221-1234. (WANG W. Study on the application of radar technology in the detection of deep buried pipelines[J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(9): 1221-1234, (in Chinese))

[22] 朱盛延, 李飞飞, 陈春阳, 等. 基于 gprMax 探地雷达管线探测径深比正演研究 [J]. 中华建设, 2020(27): 151-153. (ZHU S Y, LI F F, CHEN C Y, et al. Forward modeling research on the ratio relationship between pipe diameter and burial depth in ground penetrating radar pipeline detection based on gprMax[J]. China Construction, 2020(27): 151-153. (in Chinese))

收稿日期: 2025-01-21