

基于GprMax正演模拟的直埋电缆探测效果影响因素分析

李国伟¹, 王俊波¹, 张殷¹, 唐琪¹, 简淦杨², 姬煜轲², 何智鹏³

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 广州南网科研技术有限责任公司, 广州 510663; 3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 直埋电缆地理位置是市政建设与电力运维的重要信息。探地雷达常用于探测直埋电缆位置, 但影响其探测效果的因素尚不明确。采用GprMax正演模拟方法分析电缆埋深、土壤介电常数、天线中心频率、管线材质以及电缆通道结构对探地雷达回波图像的影响, 通过地下管线模拟测试比较电缆、金属管、PVC管在0.4 GHz与0.9 GHz天线下的探测效果, 并进行了直埋电缆的实地探测。结果表明直埋电缆的探地雷达回波图像为典型的双曲线, 其形状主要由电缆埋深、土壤介电常数决定。在尺寸、埋深相近时通过探地雷达图像难以区分不同材质的管线。同时, 直埋电缆敷设的细沙与盖板会削弱回波信号, 造成双曲线分层。实测时采用中心频率0.4 GHz天线, 将电缆通道作为整体目标, 探测效果最优。

关键词: 直埋电缆; 探地雷达; 时域有限差分; 回波图像

Influence Factor Analysis on Detection Effect for Directly Buried Cable Based on GprMax Forward Modeling

LI Guowei¹, WANG Junbo¹, ZHANG Yin¹, TANG Qi¹, JIAN Ganyang², JI Yuke², HE Zhipeng³

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China; 2. China Southern Power Grid Research Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Geographic location of underground cable is important information in urban construction and power operation and maintenance. Ground penetrating radar is always used in detection for directly buried cable, but the influencing factors of its detection effect for underground cable is unclear. GprMax forward modeling method is used to analyze the ground penetrating radar echo image of underground cable, including buried depth, soil dielectric constant, antenna center frequency, pipeline material and cable channel structure. Furthermore an experiment is carried out to compare the ground penetrating radar image of cable, metal and PVC pipes at 0.4 GHz and 0.9 GHz antenna center frequency. Finally a field test for underground cable is carried out. There is a distinctive hyperbola in the ground penetrating radar image. The hyperbola shape is mainly influenced by burial depth and soil dielectric constant. It is difficult to distinguish different material pipeline based on the hyperbola shape. The fine sand and cover plate around underground cable can weaken the echo signal, and lead to hyperbola layering. In order to obtain good detection effect, it needs to detect the whole cable channel instead of the cable with 0.4 GHz center frequency antenna.

Key words: directly buried cable; ground penetrating radar; FDTD; echo image

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0205100); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20220265)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFE0205100); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220265).

0 引言

城市电缆线路不断增加, 部分地区电缆化率已超 90%^[1-3]。虽然电缆线路信息化程度不断提升, 但老旧线路施工年限久远, 地理信息缺失, 给城市建设和电力运维造成不便^[4-7], 因此直埋电缆探测十分重要。

由于电缆敷设在地下且带电运行, 其探测难度较大, 目前主要手段有电磁法与探地雷达法。其中电磁法是测量电缆上方地表的磁场分布, 可利用运行电缆自身的电磁波^[8], 但由于电缆外包钢制铠装以及金属屏蔽等影响, 其向外发射电磁波信号较弱。一般通过注入、耦合或感应等方式在外部设置激励^[9], 但不太适用于带电运行电缆。探地雷达具备高分辨率、高效性、无损性等优势, 在物探领域应用较多, 例如沙丘、冻土等地质特征的形成机理检测^[10]以及地基、堤坝中空洞检测等^[11]。其原理是通过天线向地下发射电磁波, 然后接收电磁波在地下传播过程中的反射和散射信号。根据电磁波传播规律处理和解译后可得到地下介质的结构信息^[12-14]。随着设备的小型化, 探地雷达也广泛用于城市地下管道探测, 例如混凝土水管、金属水管以及钢筋等结构^[15-16]。而电力系统中也存在较多难开挖的直埋设施, 探地雷达也逐步尝试进行接地网检测^[17-18]、直埋电缆定位^[19-20]等。但这类应用主要是借鉴物探领域技术或产品, 工作量在于回波图像的处理与识别^[21-24]。

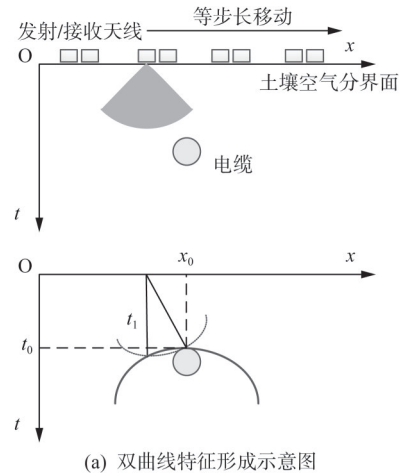
而直埋电缆尺寸、结构、敷设工艺等都有显著特性, 其探地雷达回波特点及影响因素并不明确。为达到最优的探测效果, 需针对性分析不同条件下直埋电缆回波图像才能选择或改进探地雷达相关参数。为此本文采用时域有限差分法正演模拟了直埋电缆的探地雷达图像, 分析了天线中心频率、土壤参数以及电缆敷设结构等因素对探测效果的影响; 同时通过地下管线模拟实验与直埋电缆的实地探测, 进一步确定其探测特征。

1 探地雷达及其正演模拟方法

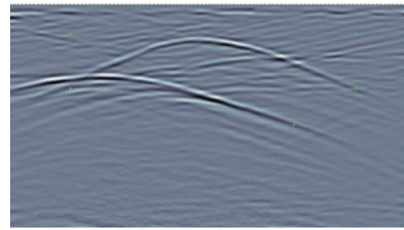
1.1 探地雷达基本原理

探地雷达通过天线向地下发射电磁波, 然后接收电磁波在地下传播过程中的反射和散射信号。检测时一般将收发天线按相同步长移动, 其原理如图

1 所示。



(a) 双曲线特征形成示意图



(b) 实际回波图像

图 1 探地雷达原理

Fig. 1 Principles of ground penetrating radar

将探地雷达沿测线水平移动, 经过固定间隔后向地下发射电磁波并接收回波, 得到一系列一维回波数据, 然后组合成二维回波数据, 根据信号幅度以灰度或颜色进行显示, 即为探地雷达回波图像。点状目标回波呈双曲线特征, 面状目标呈直线层状特征。电缆回波一般为双曲线, 其外径较小。不考虑外径的条件下, 以水平位置 x 为横轴, 回波时间 t 为纵轴, 双曲线方程可表示为^[25]:

$$\frac{t^2}{t_0^2} - \frac{4(x - x_0)^2}{(vt_0)^2} = 1 \quad (1)$$

式中: x_0 为电缆在水平方向的坐标; t_0 为探地雷达在电缆正上方时接收回波信号的时延; v 为波速。

反演得到电缆埋深 h_0 可表示为:

$$h_0 = \frac{vt_0}{2} \quad (2)$$

除电缆埋深、水平位置等地理参数外, 回波的双曲线特征主要受电磁波波速的影响。而回波是地下目标对电磁波的反射, 其强度受电磁波衰减与反射的影响。其中衰减程度取决于传播介质的电导率与相对介电常数。根据电磁场基本原理, 假设电磁

波在理想均匀介质中沿着 z 轴方向传播, 则信号强度 E 为:

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (3)$$

式中: E_0 为发射信号的初始强度; α 和 β 分别为衰减常数与相位因子, 可由式(4)—(5)计算^[26]。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_c}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_c}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

式中: ω 为角频率; $\mu = \mu_0 \mu_r$ 为介质的绝对磁导率, $\mu_0 \approx 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$, μ_r 为介质相对磁导率; $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 为介质绝对介电常数, $\varepsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, ε_r 为介质相对介电常数; σ_c 为介质的电导率。

电磁波在地下介质中的传播速度 v 如式(6)所示。

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\left\{ \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_c}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

由于探地雷达在绝大多数工况下的介质均满足 $\frac{\sigma_c}{\omega \varepsilon} \ll 1$, 且 $\mu = \mu_0$, 所以 α 、 β 和 v 可以简化为:

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (8)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (9)$$

同时根据波在多层介质中的传播特性, 电磁波由介质 1 传入介质 2 时的反射系数 $R_{1,2}$ 为^[27]:

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \quad (10)$$

式中: ε_{r1} 为介质 1 的相对介电常数; ε_{r2} 为介质 2 的相对介电常数。

由上述原理可知, 回波图像双曲线特征受埋深、电磁波波速影响, 信号强度受介质相对介电常数、信号频率等影响。根据理论分析, 结合探地雷达实际情况, 本文主要研究天线中心频率、土壤介电常数以及管线材质对直埋电缆探测效果的影响。

1.2 正演模拟方法

正演模拟可有效分析电磁波传播过程, 研究探

地雷达探测效果的相关因素。GprMax 是用于探地雷达建模和仿真的开源软件^[28], 通过设定电磁波传播介质、边界条件以及地下目标参数等, 采用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 迭代求解 Maxwell 方程组, 从而模拟电磁波在地下的传播过程。本文建立的模型边界尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 0.002 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, 在 x 、 y 、 z 方向上空间离散步长均为 0.002 m , 总的模拟时长为 60 ns 。探地雷达天线为点源天线, 激励电流波形为探地雷达中常用的雷克子波。接收天线和发射天线相距 0.02 m , 水平布置于地面。初始位置为模型左端, 探测时沿 x 轴向右移动, 移动间距为 0.025 m 。通过形状与参数命令设置不同材质结构, 土壤厚度为 2 m , 空气厚度为 0.5 m , 如图 2 所示。

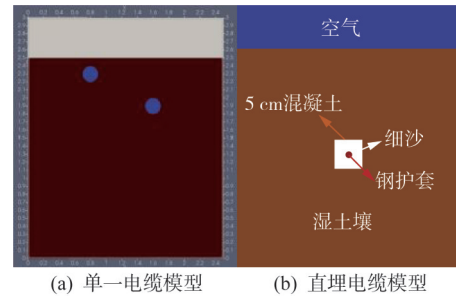


图 2 正演模型

Fig. 2 Forward model

典型材料参数如表 1 所示, 相关参数在 1.1 节中进行了说明。探地雷达电磁波向下传播时在地表会产生较强的反射信号, 即直达波, 影响目标物图像识别。本文采用平均抵消法去除直达波^[20], 突出地下目标的回波信息。

表 1 正演模型中材料参数

Tab. 1 Material parameters in forward model

介质	相对介电常数 ε_r	电导率 $\sigma_c / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	相对磁导率 μ_r
空气	1	0	1
湿土壤	15	0.05	1
钢护套	1	106	4 000
混凝土	12	0.003	1
细沙	8	0.01	1

2 单一电缆探测效果仿真分析

本文首先针对单一电缆模型, 在土壤中直接埋设单根电缆分析天线中心频率、土壤介电常数、管

线材质的影响。

2.1 天线中心频率

由于应用场景不同, 探地雷达选配的天线中心频率较多, 主要包括 0.2 GHz、0.4 GHz、0.9 GHz 以及 1.5 GHz。在这 4 种频率下分别设置 0.5 m、1.0 m、1.5 m 以及 2.0 m 4 个埋深, 电缆探测效果如图 3 所示。不同条件下电缆回波均呈现明显的双曲线特征。同一频率下, 随着电缆埋深增加回波图像中双曲线逐渐下降, 且开口变大, 顶点曲率变小。由于高频电磁波信号在土壤中衰减更强, 天线中心频率越高则回波信号强度越弱, 但形成的双曲线更细, 识别的分辨率越高。

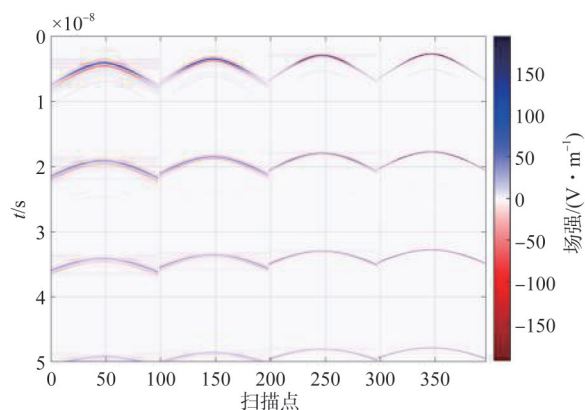


图 3 不同天线中心频率的回波图像(从左至右为 0.2 GHz、0.4 GHz、0.9 GHz 以及 1.5 GHz)

Fig. 3 Echo images of different antenna center frequencies (0.2 GHz, 0.4 GHz, 0.9 GHz and 1.5 GHz from left to right)

探地雷达发射的电磁波是窄带信号, 中心频率更高, 波速更快^[29-30]。在相同埋深的情况下, 随着天线中心频率的增加回波中双曲线整体上升。

2.2 土壤介电常数

土壤电磁参数影响电磁波传播, 其中含水量差异会造成土壤介电常数在 6~20 间变化^[31]。为此本文在 0.5 m、1.0 m、以及 1.5 m 3 个埋深下采用 1.5 GHz 中心频率天线得到 6、10、15、20 4 种土壤介电常数的回波图像, 如图 4 所示。介电常数影响电磁波波速与衰减, 介电常数越大则电磁波速越小, 其损耗越大。即便电缆埋深相同, 但随着土壤介电常数的增加, 电缆回波的双曲线整体下沉。同时回波信号顶点曲率变大, 两翼延伸缩短。

2.3 不同材质

城市地下管线众多, 探测时相互干扰。部分管

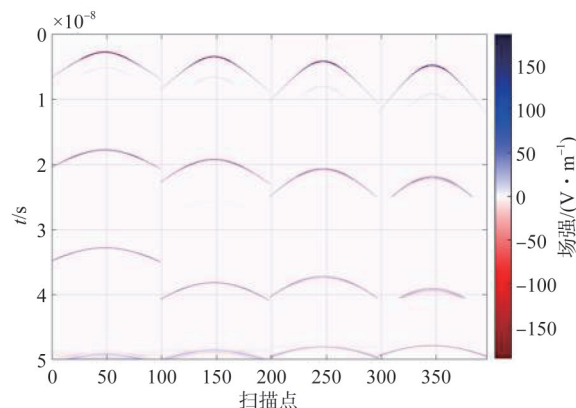


图 4 不同土壤介电常数的回波图像(从左至右为 6、10、15、20)

Fig. 4 Echo images of different soil dielectric constants (6, 10, 15 and 20 from left to right)

线尺寸有显著差异, 回波信号分辨比较简单。如果管线尺寸接近, 回波信息难以处理。本文建立了 PVC、混凝土、铝、钢 4 种材料管线, 直径皆为 0.1 m, 在 0.5 m 埋深下得到对应的回波图像, 如图 5 所示。地下管线与土壤介电常数相差越大, 反射波幅值就越大。故金属管回波信号最明显, PVC 管信号最弱。但双曲线特征主要受埋深、土壤参数影响, 管线尺寸相近的情况下难以区分不同材质的差异。

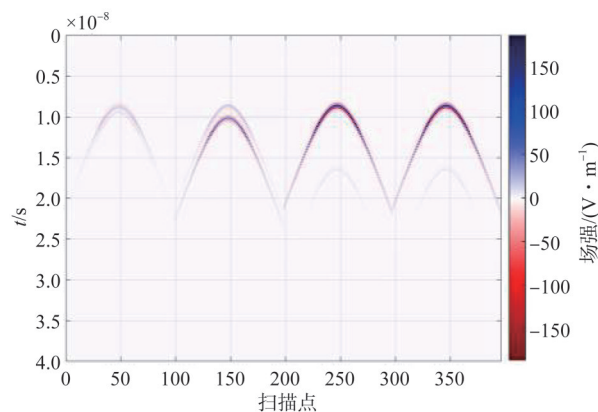


图 5 不同管线材质的回波图像(从左至右为 PVC、混凝土、铝、钢)

Fig. 5 Echo images of different pipeline materials (PVC, concrete, aluminum and steel from left to right)

3 直埋电缆探测效果仿真分析

实际工况下, 为保护电缆免受外力破坏, 电缆通道中会敷设细沙, 将电缆包裹, 同时细沙上层铺

设混凝土盖板。本文根据实际工况仿真得到直埋电缆回波图像,如图6所示。模型中电缆外径为钢护套尺寸,埋深为0.5 m,四周敷设100 mm厚度细沙,上端布置5 cm厚度的混凝土盖板。在1.5 GHz天线中心频率下得到单一电缆、电缆敷设细沙、电缆敷设细沙与盖板工况下回波图像。单一电缆回波为单根双曲线,敷沙后回波中出现大量杂波,同时回波强度降低;增加混凝土盖板后回波变化不大,出现盖板与细沙的分层。

在电缆通道中敷设细沙包裹电缆,同时细沙上层铺设混凝土盖板的条件下,对比0.4 GHz、0.9 GHz以及1.5 GHz 3种频率下的回波图像。采用高频率天线的分辨率较好,但杂波较多,回波强度比较弱。随着天线中心频率的降低,回波图像中不同结构分层现象减弱,回波强度增加。对于直埋电缆而言,细沙、盖板结构与电缆共存,电缆通道应作为整体进行探测。同时部分电缆埋深可达1 m以上,为此采用低频天线探测直埋电缆的效果更佳。

4 直埋电缆探测实地测试与应用

4.1 实地测试

为确定探地雷达对直埋电缆的探测效果,本文搭建了模拟测试环境,为室外无水泥管、燃气管等干扰的空地(图7),在地下填埋4根管线,参数如表2所示。管线长度均为1.5 m,其中电缆型号为ZRYJLV22,截面积分别为 $3 \times 70 \text{ mm}^2$ 与 $3 \times 300 \text{ mm}^2$,对应外径分别为6.15 cm、8.81 cm,是目前最常用的两种配电电缆尺寸。

为避免管线间的干扰,同一深度的管线相距超过2 m。在0.4 GHz、0.9 GHz两种天线中心频率下采用距离模式分别探测4根地下管线,回波图像如图8所示。

对于0.3 m埋深的电缆,0.9 GHz天线探测效果最佳,电缆回波呈现的双曲线清晰度较高;0.4 GHz天线的成像相对模糊,但双曲线区域更大。同时,0.4 GHz下回波时刻在7 ns左右,0.9 GHz下回波时刻在6 ns左右,即天线中心频率增加后回波速度更快,该规律与仿真结果一致。

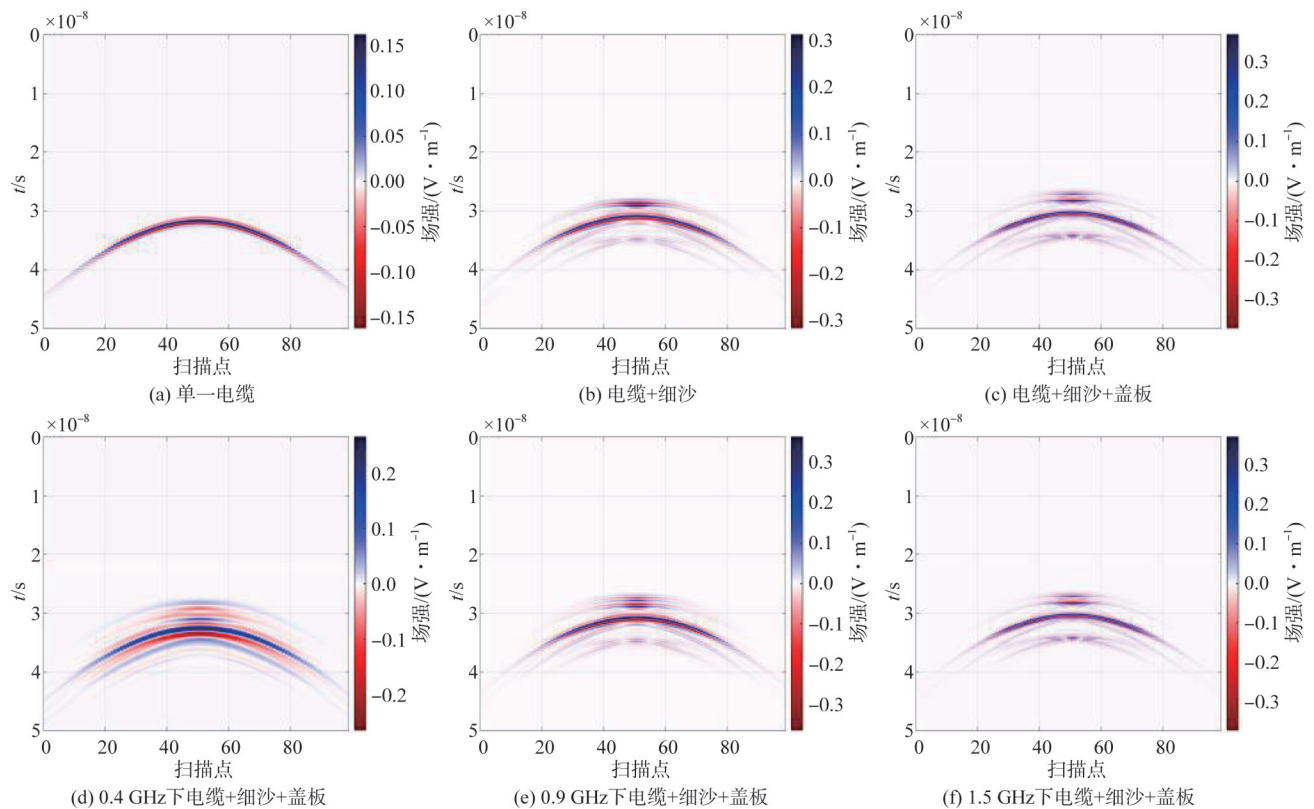


图6 直埋电缆回波图像

Fig. 6 Echo images of underground cables



图7 模拟测试场地

Fig. 7 Simulation testing site

表2 管线参数

Tab. 2 Pipeline parameters

编号	埋深/m	外径/cm	备注
1	0.3	6.15	电缆, $3 \times 70 \text{ mm}^2$ 截面
2	0.6	8.81	电缆, $3 \times 300 \text{ mm}^2$ 截面
3	0.3	7.6	镀锌钢管, 壁厚 2.5 mm
4	0.6	11	PVC 管

0.3 m 埋深的镀锌钢管也有相同的效果, 由于两种管线尺寸接近, 通过探地雷达无法区分。0.9 GHz 天线已无法探测到 0.6 m 埋深电缆, 高频天线难以应用。0.4 GHz 天线依旧可以探测到 0.6 m 埋深电缆, 相比于 0.3 m 埋深电缆, 回波双曲线整体下移, 且成像区域变小。两种频率天线均不能探测

PVC 管。

4.2 现场应用

由实地测试效果可知, 虽然 0.9 GHz 天线分辨率最高, 但探测埋深较浅, 回波信号不强。同时直埋电缆有细沙与盖板结构, 对信号散射更加严重, 采用低频天线效果会更好。为验证低频天线的探测效果, 本文选用 0.4 GHz 天线, 以电缆通道为整体, 进行实际直埋电缆探测。探测区域为某配电房到 1 号箱变, 以及 2 号箱变到电缆井, 探地雷达回波如图 9 所示。在配电室到 1 号箱变的探测结果中, 0.4 m 深度处出现 4 次典型的回波特征信号, 且信号可以复现。在电缆井到 2 号箱变的探测结果中, 0.3 m 深度处出现 6 次典型的回波特征信号, 也可以复现。

采用 0.4 GHz 天线进行实际直埋电缆探测, 回波图像比较清晰, 双曲线特征与模拟测试环境下的结果类似, 双曲线无分层, 探测对象为电缆通道整体。这 10 组回波图像大多为单一双曲线, 且顶点清晰, 与仿真以及模拟测试一致。在配电室到 1 号箱变的探测结果中存在一个比较特殊的回波图像, 即图 9(a) 左起第 3 个波形。该图像回波明显, 但顶

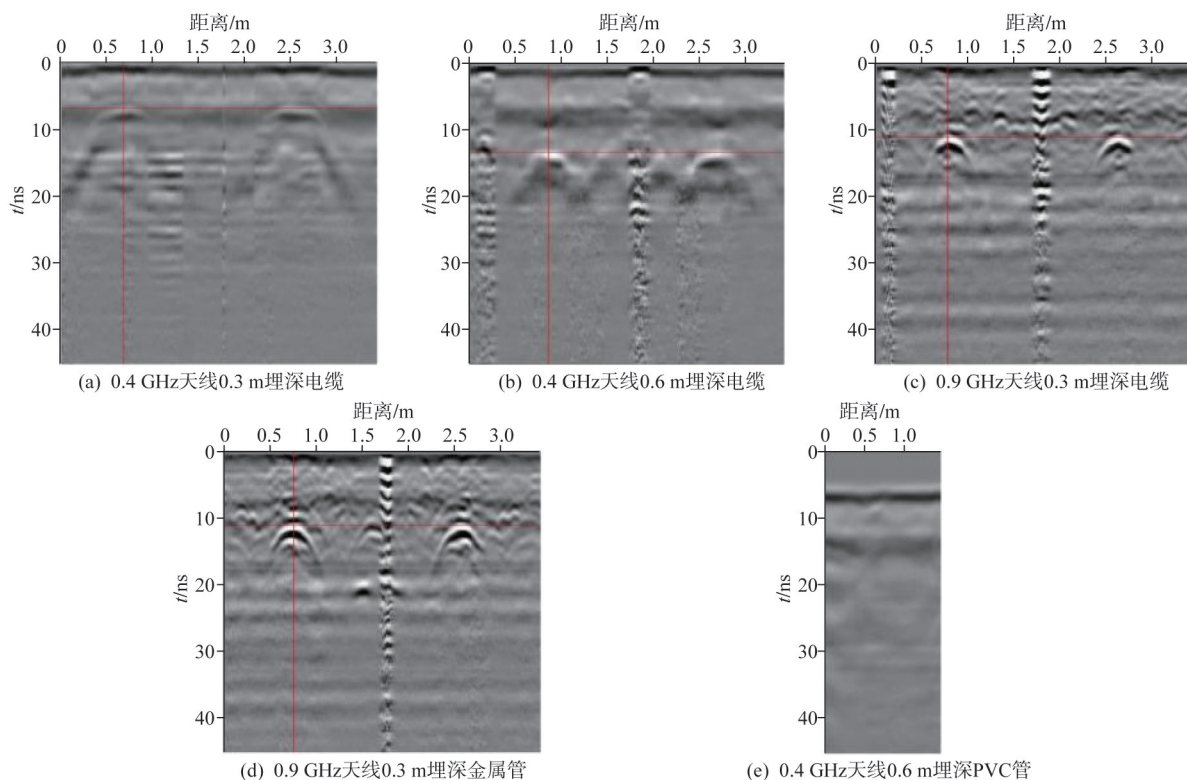


图8 实地测试时地下管线回波图像

Fig. 8 Echo images of underground pipelines during field testing

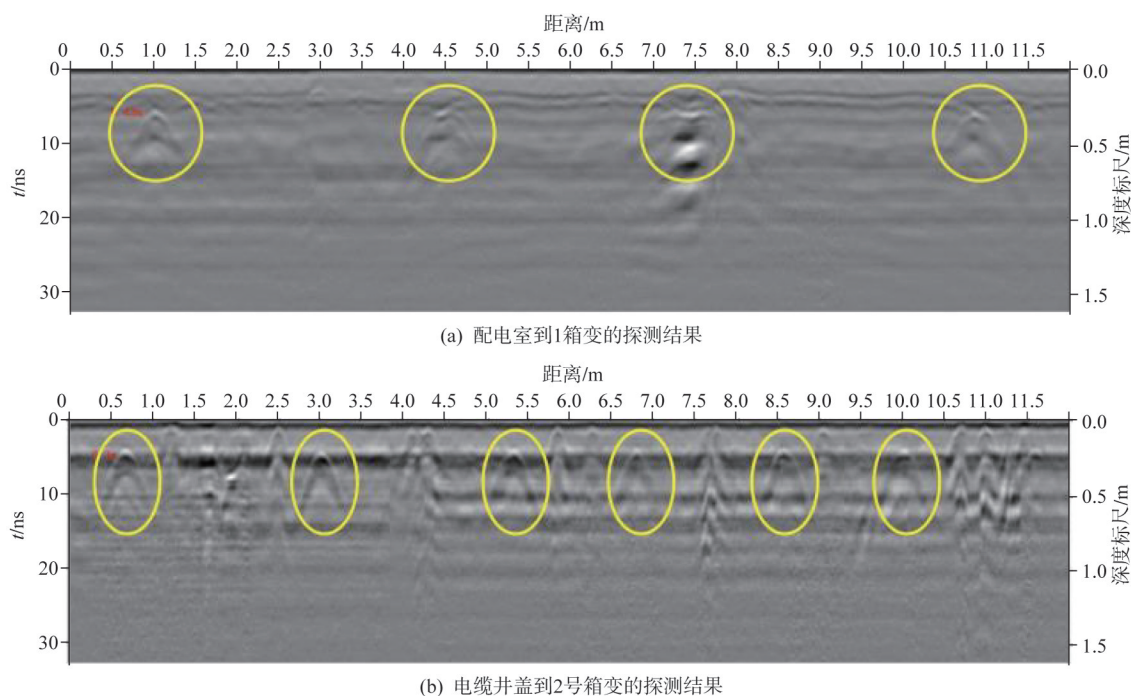


图9 现场应用时实际直埋电缆回波图像

Fig. 9 Echo images of underground cable in on-site application

点更加平坦。这是由于探测路径与电缆走向存在重合，在重合区段，回波信号持续且变化较小，会造成回波图像顶点平坦。

5 结论

本文采用GprMax正演模拟研究了直埋电缆的探地雷达回波图像特征，结合实测图像分析了直埋电缆探测效果的影响因素，得到的主要结论如下。

1) 直埋电缆探地雷达回波图像中双曲线形状主要受电缆埋深、土壤介电常数影响。随着埋深的增加，双曲线开口变大，顶点曲率变小。土壤介电常数越大，电磁波速越小，相同埋深时，回波信号顶点曲率越大，开口越小，同时两翼延伸越短。地下管线尺寸相近时双曲线形状难以反映材质差异。探地雷达天线中心频率越大，回波信号分辨率越高，但回波信号强度越弱。

2) 直埋电缆通道中会敷设细沙，铺设混凝土盖板，造成回波图像中出现大量杂波，降低回波强度。由于细沙、盖板结构与电缆共存，电缆通道应作为整体进行探测，采用低频天线探测效果更佳。

3) 实测表明，0.4 GHz天线可探测到0.6 m埋深的电缆，回波图像清晰，但更深层的电缆探测效果不佳。

参考文献

- [1] 吴吉, 唐作鑫, 彭向阳, 等. 基于TFDR波形时域包络线的电缆故障定位技术[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 18–27.
WU Ji, TANG Zuoxin, PENG Xiangyang, et al. Cable fault location technology based on TFDR waveform time-domain envelope [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 18–27.
- [2] 吴照国, 黄会贤, 王谦, 等. 压力作用下高压电缆缓冲层表面电阻特性及等效模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 133–141.
WU Zhaoguo, HUANG Huixian, WANG Qian, et al. Surface resistance characteristics and equivalent model of buffer layer in HV cable under pressure [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 133–141.
- [3] 陈臻, 陈林, 康宁, 等. 基于天线近场测量的电力电缆局部放电在线检测方法[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 89–99.
CHEN Zhen, CHEN Lin, KANG Ning, et al. On-line detection method of partial discharge in power cables based on antenna near-field measurement [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 89–99.
- [4] 黄莉, 梁云, 黄辉, 等. 基于代理模型的电力电缆温度场快速计算方法及其应用[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 178–187.
HUANG Li, LIANG Yun, HUANG Hui, et al. Surrogate model-based fast calculation of power cable temperature field: method and application [J]. Electric Power, 2024, 57(5): 178–187.
- [5] 李宏川, 赵宇, 李彬, 等. 配电物联网边缘计算场景下基于改进ANFIS的电缆通道综合评估及智能预警方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 94–103.
LI Hongchuan, ZHAO Yu, LI Bin, et al. Comprehensive as-

- assessment and intelligent early warning of cable passages based on improved ANFIS in the edge computing scenario of PDIoT [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 94 – 103.
- [6] 孙伟,郭海涛,徐青,等.基于广义 Hough 变换的探地雷达图像地下管线提取方法[J].测绘科学技术学报,2013,30(3): 251 – 254, 259.
SUN Wei, GUO Haitao, XU Qing, et al. Underground pipeline extraction method in ground-penetrating radar images based on the generalized hough transform [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(3): 251 – 254, 259.
- [7] 韩佳明,仲鑫,景帅,等.探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J].物探与化探,2020,44(6): 1476 – 1481.
HAN Jiaming, ZHONG xin, JING Shuai, et al. The application of geological radar to urban geological pipeline detection in the loess area [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1476 – 1481.
- [8] 栗宝鹏,刘栋臣,王志豪,等.基于电磁原理的浅地表地质病害探测方法及应用[J].工程地球物理学报,2022,19(6): 753 – 761.
LI Baojuan, LIU Dongchen, WANG Zhihao, et al. Electromagnetic method and application for geological defects detection in shallow surface [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(6): 753 – 761.
- [9] 祝美灵,刘舒雨,韦依,等.基于六线圈的地下电力电缆定位技术研究[J].电子测量技术,2021,44(3): 176 – 180.
ZHU Meiling, LIU Shuyu, WEI Yi, et al. A novel underground cable positioning system based on six induction coil [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 176 – 180.
- [10] DONG Z, QIAN G, LV P, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on earth: China's Badain Jaran sand sea [J]. Earth-Science Reviews, 2013, (120): 20 – 39.
- [11] 刘澜波,钱荣毅.探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J].地球物理学报,2015,58(8): 2606 – 2617.
LIU Lanbo, QIAN Rongyi. Ground penetrating radar: a critical tool in near-surface geophysics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2606 – 2617.
- [12] 胡群芳,郑泽昊,刘海,等.三维探地雷达城市市政管线渗漏探测中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(7): 972 – 981.
HU Qunfang, ZHENG Zehao, LIU Hai, et al. Application of 3D ground penetrating radar to leakage detection of urban underground pipes [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(7): 972 – 981.
- [13] 方宏远,马铎,王念念,等.基于融合卷积神经网络的多种类管道病害检测方法[J].北京工业大学学报,2022,48(6): 561 – 571.
FANG Hongyuan, MA Duo, WANG Niannian, et al. Detection algorithm for multiple underground pipeline diseases based on a fusion convolutional neural network [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(6): 561 – 571.
- [14] 胡进峰,周正欧.浅地层探地雷达目标探测和定位新方法[J].仪器仪表学报,2006,27(4): 371 – 375.
HU Jinfeng ZHOU Zhengou. Target detection and orientation in sub-surface penetrating radar data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(4): 371 – 375.
- [15] 李炎清,张关发,崔志猛,等.基于YOLOX-MobileNetV3 模型的路面病害智能识别研究[J].交通节能与环保,2023,19(3): 11 – 17.
LI Yanqing, ZHANG Guanfa, CUI Zhimeng, et al. Automatic pavement disease identification research based on YOLOX-MobileNetV3 model [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, 19(3): 11 – 17.
- [16] 张劲松,丛鑫,杨伯钢,等.地下管线探测雷达图特征分析[J].地球物理学进展,2019,34(3): 1244 – 1248.
ZHANG Jinsong, CONG Xin, YANG Bogang, et al. Characteristics analysis of radar map on underground pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1244 – 1248.
- [17] 陈文涛,周利兵,李山,等.基于探地雷达对变电站接地网的成像检测技术[J].电瓷避雷器,2018,283(3): 54 – 59.
CHEN Wentao, ZHOU Libing, LI Shan, et al. Imaging detection technology of substation grounding network based on ground penetrating radar [J]. Insulators and Surge Arresters, 2018, 283(3): 54 – 59.
- [18] 程江洲,陈秋航,卞九洲,等.探地雷达技术在变电站地层隐蔽管线探测中的应用[J].现代雷达,2021,43(2): 82 – 88.
CHENG Jiangzhou, CHEN Qiuhang, BIAN Jiuzhou, et al. Application of ground penetrating radar to substation concealed pipeline detection [J]. Modern Radar, 2021, 43(2): 82 – 88.
- [19] 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 Jingxiang, ZHAO Ming, LAI Hao, et al. Imaging detection and recognition technology of underground cable based on ground penetrating radar [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1482 – 1489.
- [20] 张业,师学明,余海忠.地下金属供水管与电力电信线缆的探地雷达图像特征分析[J].工程地球物理学报,2012,9(6): 770 – 775.
ZHANG Ye, SHI Xueming, YU Haizhong. Analysis of the GPR image features for the underground water supply metal tube and electric cable and telecommunications cable [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(6): 770 – 775.
- [21] DELBO S, GAMBA P, ROCCATO D. A fuzzy shell clustering approach to recognize hyperbolic signatures in subsurface radar images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 38(3): 1447 – 1453.
- [22] HASKETT H T, BROACH J T. Automatic mine detection algorithm using ground penetrating radar signatures [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 39(5): 942 – 952.
- [23] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A. A novel piecewise linear recursive convolution approach for dispersive media using the finite-difference time-domain method [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(5): 2669 – 2678.
- [24] 郝彤,赵杰.面向双曲线形态的探地雷达图像识别技术综述[J].电子学报,2019,47(6): 1366 – 1372.
HAO Tong, ZHAO Jie. A brief review of the hyperbola signature recognition techniques for ground penetrating radar [J]. ACTA Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1366 – 1372.
- [25] 薛丽君.基于探地雷达 B-scan 图像双曲线特征的目标检测与定位研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [26] 高宇辰.基于雷达信号穿透的电力隐蔽目标无开挖检测技术[D].北京:华北电力大学,2021.

- [27] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] WARREN C, GIANNOPOULOS A, Giannakis I. GprMax: open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar[J]. Computer Physics Communications, 2016, 209(12): 163 – 170.
- [29] LAWRENCE B C. Ground-penetrating radar for archaeology [M]. Walnut Creek: Altamira Press, 2004.
- [30] 郭立, 崔喜红, 陈晋. 基于 GprMax 正演模拟的探地雷达根系探测敏感因素分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1754 – 1763.
GUO Li, CUI Xihong, CHEN Jin. Sensitive factors analysis in using GprMax for detecting plant roots based on forward modeling[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1754 – 1763.
- [31] 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.
WANG Wei, ZHENG Rui. Water content detection of road semi-rigid base based on ground penetrating radar[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(12): 1248 – 1255.

收稿日期: 2023-09-06; 网络首发日期: 2024-03-25

作者简介:

李国伟(1977), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电气试验, 1957852@qq.com;

王俊波(1986), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压试验与大数据分析, 279853371@qq.com;

简淦杨(1989), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能配电网, jiangy@csg.cn.

(上接第 9 页 Continued from Page 9)

- [21] 鲁月华, 樊艳芳, 罗瑞. 适用于交直流混联系统的时域全量故障模型判别纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 81 – 88.
LU Yuehua, FAN Yanfang, LUO Rui. A time domain total fault model for discriminating pilot protection schemes applicable to AC/DC hybrid systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 81 – 88.
- [22] 李猛, 贾科, 毕天姝, 等. 适用于直流配电网的测距式保护[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 719 – 724.
LI Meng, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Fault distance estimation-based protection for DC distribution networks [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 719 – 724.
- [23] 张怿宁, 张大海, 武传健. 基于直流电抗器电压曼哈顿距离的单端保护方案[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 58 – 66.
ZHANG Yining, ZHANG Dahai, WU Chuanjian. Single-ended protection scheme based on Manhattan distance of DC reactor voltage[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 58 – 66.
- [24] 季路, 汤亚芳, 袁旭峰, 等. 基于限流电抗暂态电压的直流配电网单端量保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 15 – 23, 41.
JI Lu, TANG Yafang, YUAN Xufeng, et al. Single-ended protection of DC distribution network based on current-limiting reactance transient voltage[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(10): 15 – 23, 41.
- [25] 高淑萍, 沈渠旺, 宋国兵, 等. 采用余弦相似度的混合三端直流输电线路保护原理[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 92 – 103.
GAO Shuping, SHEN Quwang, SONG Guobing, et al. Cosine similarity-based protection of hybrid three-terminal DC transmission line [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 92 – 103.
- [26] 郑涛, 李紫肖, 陈颖. 基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 1 – 12.
ZHENG Tao, LI Zixiao, CHEN Ying. Protection scheme for a multi-terminal flexible DC grid line based on low frequency transient energy ratios of different outgoing lines at the converter station [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 1 – 12.
- [27] 沙兆义, 王聪博, 詹荣荣, 等. 基于故障全电流多阶突变的换流器并网线路纵联保护[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 62 – 71.
SHA Zhaoyi, WANG Congbo, ZHAN Rongrong, et al. Pilot protection for converter-interconnected lines based on multi-stage mutation of fault current [J]. Electric Power, 2024, 57(2): 62 – 71.

收稿日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2024-04-25

作者简介:

何东(1986), 男, 讲师, 博士, 研究方向为直流电网故障特性分析及其保护控制, hd861116@163.com;

甘贝贝(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流配电网保护;

兰征(1985), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用。