

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306440

埋地非金属管道雷达探测成像定位方法研究^{*}

肖小汀¹ 李 怡¹ 葛 亮² 吴佳晔² 徐 杨¹ 陈莎莎¹

(1. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 2. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500)

摘 要:非金属管道在地下管网建设中得到广泛应用。探地雷达法作为地下公共设施主要检测方法之一,常被用于地下非金属管线探测中。由于探测过程中存在非金属管道回波信号微弱、地下结构复杂、波速难以精确估算等问题,使雷达探测成像及定位成为难题。针对上述问题,研究了适用于埋地非金属管道的波速估算和回波信号处理方法,提出了空间频域插值成像和二值化定位算法;通过数值仿真验证了所述成像定位方法的可行性,并进行了 0.400、0.600 和 1.100 m 埋深的非金属管道现场测试。实验结果表明,所提方法能够有效消除双曲线效应,探测区域的成像定位误差分别为 0.006、0.006 和 0.012 m,满足埋地非金属管道定位需求。研究成果可为埋地非金属管道成像及定位提供技术支持,有益于提高探地雷达对地下非金属管线的探测精度。

关键词: 探地雷达;非金属管道;SAR 成像;回波信号处理;波速估算

中图分类号: TN957; TU990.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research on imaging and positioning method of buried non-metallic pipeline radar

Xiao Xiaoting¹ Li Yi¹ Ge Liang² Wu Jiaye² Xu Yang¹ Chen Shasha¹

(1. School of Electric and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Non-metallic pipelines are widely used in the construction of underground pipe networks. As one of the main detection methods of underground public facilities, the ground penetrating radar method is often used in the detection of underground non-metallic pipelines. Due to the weak echo signal of non-metallic pipelines, complex underground structures, and difficulty in accurately estimating wave velocity in the detection process, radar detection imaging and positioning have become a problem. In response to the above questions, the wave velocity estimation and echo signal processing methods suitable for buried non-metallic pipelines are studied, the spatial frequency domain interpolation imaging and binarized positioning algorithms are proposed, the feasibility of the imaging positioning method is verified by numerical simulation, and the field tests of non-metallic pipelines buried at 0.400, 0.600 and 1.100 m are carried out. The experimental results show that the proposed method can effectively eliminate the hyperbolic effect, and the imaging positioning errors in the detection area are 0.006, 0.006 and 0.012 m, respectively, which meet the positioning requirements of buried non-metallic pipelines. The research results can provide technical support for the imaging and positioning of buried non-metallic pipelines and are conducive to improving the detection accuracy of ground penetrating radar on underground non-metallic pipelines.

Keywords: GPR; non-metallic pipes; SAR imaging; echo signal processing; wave velocity estimation

0 引 言

地下管线作为城市的生命线,已成为日常生活中不

可或缺的基础设施^[1]。随着科技的发展,城市地下管线的材质逐渐发生变化^[2],过去大量使用金属管道,而现在,塑料、陶瓷、混凝土等非金属管道在各种管网中的应用日益广泛。由于非金属具有质轻、耐腐蚀性强、耐热性

好、抗污染性强等优点,金属管道逐渐被其代替。随着管线运行时间的增加,管道会逐渐出现老化和损坏现象,同时还存在管线错综复杂和老旧管线修建图纸遗失等问题^[3]。在管线检修过程中,管线位置的误判导致安全事故频发。据统计,2022 年 7 月,全国地下管线相关事故共 118 起,其中地下管道破坏事故占 79.66%,路面坍塌事故占 20.34%,事故共造成 5 人死亡,23 人受伤。为降低此类事故发生频率,保证管线系统的正常运行并减少人员伤亡,亟需对地下非金属管线进行探测,准确定位管道所在位置。

常见的地下非金属管线探测方法包括电磁-示踪线法^[4]、声学探测法^[5]、红外热成像法^[6]和探地雷达法^[7]等。其中电磁-示踪线法对示踪线的依赖性较大,示踪线一旦出现问题该方法就会失效;声学探测法中声波在土壤中的传播速度较慢、衰减较高且易受外界干扰;红外热成像法易受周围热源干扰;而探地雷达法(ground penetrating radar, GPR)作为地下公共设施检测方法之一,具有非开挖、探测速度快、分辨率高、操作简单便捷等优点,已被广泛应用于地下非金属管线探测中^[8-11]。但在利用探地雷达进行非金属管道探测时,存在目标回波信号微弱和电磁波传播速度难以精确估算等问题,使埋地非金属管道成像及定位精度降低。因此,研究埋地非金属管道雷达探测成像定位方法,对改善非金属管道成像效果,提高非金属管道定位精度,并最终实现地下非金属管线的安全、准确检修有着重要的指导意义。

目前,针对非金属管道雷达探测成像定位问题,国内外学者从回波信号处理、电磁波在地下介质中的传播速度估算和成像及定位算法等方面进行了大量研究,为非金属管道雷达探测成像定位方法的研究奠定了基础。赵兴友^[12]通过对不同埋深和不同环境下的非金属管线进行正演模拟分析,总结了埋深与环境 and 发射波能量之间的关系。为提高探地雷达回波信号信噪比和分辨率,王伟^[13]对探地雷达地下大埋深非金属管道回波信号进行了零点校正、增益调整和滤波处理,有效压制了多种干扰信号,成功探测到管线的地下分布情况。Jin 等^[14]开发了一种基于小波散射网络的机器学习方法,通过对 GPR 数据进行自动分类和识别,确定了地下非金属管道的位置、形状和直径等参数。Hu 等^[15]和 Liu 等^[16]提出了一种用于地下非金属管线自动检测的深度学习方法,通过偏移成像和二值化方法,提高了地下非金属管道埋深定位精度。梁小强等^[17]对影响非金属管线探测的多种参数关系进行了研究,成功定位了 PVC 管线的位置和顶部埋深。张军伟等^[18]对地下非金属管线研究了水和管线周围岩体介电常数对管线反射信号的影响,推导了目标埋深与反射信号强度的关系,并准确探测出管线的埋深位置。为了有效识别地下目标类型和地质构造,Wang

等^[19]提出一种基于 DNN 的反演方法来估计目标的相对介电常数,通过仿真和地下雨水管的现场实验测试,表明所提方法估计精度较高。彭建等^[20]提出一种估算电磁波在地下介质中传播速度的三维速度谱方法,然后将该估算速度用于地下非金属管道的背向传播偏移成像算法,但该成像算法数据量较大,成像实效性较低。

综上所述,研究学者对非金属管道雷达探测成像定位方法的研究通常集中于回波信号、电磁波传播速度和成像定位算法中的一点或者两点,没有综合考虑回波信号、电磁波传播速度和成像算法对非金属管道雷达探测成像定位精度的影响。因此,针对上述问题,本文提出了一种基于多方法融合的非金属管道雷达探测信号处理方法,与其他研究成果相比更具综合性:首先研究了探地雷达探测原理,分析了探地雷达在非金属管道探测过程中存在的问题;然后对波速估算方法和回波信号处理方法进行了研究,并提出了空间频域插值成像和二值化相结合的定位算法;其次对非金属管道的成像定位进行了数值仿真分析,验证了本文所述波速估算和成像定位算法的可行性;最后通过现场实验测试和分析,验证了本文所述方法的准确性。研究成果可以提高埋地非金属管道成像定位精度,对埋地非金属管道雷达探测成像及定位具有实际应用价值。

1 非金属管道雷达探测成像定位方法研究

1.1 非金属管道雷达探测原理及存在的问题

探地雷达作为探测定位地下介质分布的一种地球物理方法,主要由计算机、控制单元、发射机、接收机、收发天线以及电源电缆等辅助元件构成,探地雷达探测原理如图 1 所示。

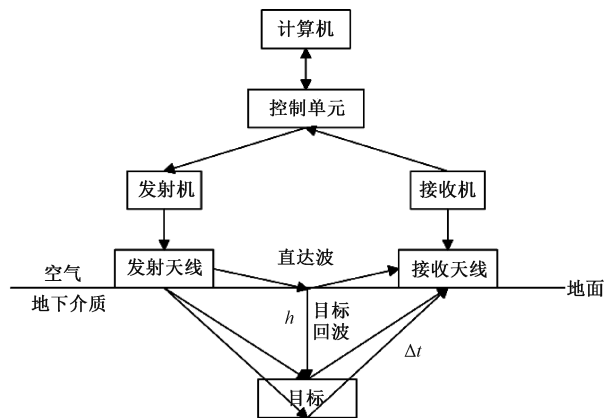


图 1 探地雷达探测原理

Fig. 1 Ground-penetrating radar detection principle

利用发射天线向地下发射电磁波,电磁波遇到不同介电特性的介质表面时发生反射并产生反射波,接收天

线接收此反射波再传到探地雷达主机进行数据处理、存储和显示。电磁波在地下介质中的传播速度可由式(1)表示^[21],由此可知介电特性对波速有直接影响。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在真空中的传播速度, ε_r 为介质的相对介电常数。设电磁波从地面到达目标上表面再反射回地面被接收天线接收的时间(即双程走时)为 Δt ,埋深 h 为目标上表面到地面的垂直距离,当收发天线间的距离可忽略不计时,埋深近似表示为:

$$h = \frac{v \times \Delta t}{2} \quad (2)$$

在实际探测过程中,由于地下介质情况复杂且地下介电常数未知,在利用探地雷达进行地下非金属管道探测时,存在因回波信号微弱和电磁波传播速度难以精确估算而导致的管道成像定位难的问题。要想提高探地雷达非金属管道成像定位精度,需要解决电磁波传播速度估算、回波信号处理和成像定位问题。

1.2 电磁波在地下介质中的传播速度估算方法

由式(2)可知,地下非金属管道埋深的确定主要取决于双程走时和电磁波在地下介质中的传播速度,其中双程走时可由扫描图像直接读取,而波速的获取较为困难。波速估算的准确度成为管道埋深估计准确度的关键。式(1)仅适用于地下介质介电常数已知时的波速计算,但在实际探测中,地下介质的介电常数往往是未知的,需要采用其他方法估算波速。本文采用双曲线拟合法^[22-23]进行估算,探地雷达埋地非金属管道探测的回波

$$\begin{cases} s_1 = \sqrt{[(h+r) - r \times \sin\theta]^2 + \left[(x_i - r \times \cos\theta) + \frac{a}{2}\right]^2} \\ s_2 = \sqrt{[(h+r) - r \times \sin\theta]^2 + \left[(x_i - r \times \cos\theta) - \frac{a}{2}\right]^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 表示收发天线间距。故电磁波在地下介质中的传播速度估算公式可写为:

$$v(x) = \frac{s_1 + s_2}{t_i} \quad (5)$$

式中: t_i 为天线相对于目标倾斜位置处的双程走时。该波速估算方法利用双曲线读取双程走时,同时考虑天线间距以及非金属管道的实际埋深和管道半径,最大程度减小波速估算误差,并利用双曲线上每个离散速度,提高了速度估算的准确性,离散速度越多,速度估算越准确。

1.3 非金属管道雷达探测回波信号处理方法

1) 非金属管道直达波去除

探地雷达探测地下非金属管道时,接收天线接收到的信号包括直达波、管道回波和其他噪声,其中直达波的能量最大,削弱了深层非金属管道的探测能力,管道回波

呈双曲线效应,其几何示意图如图2所示。

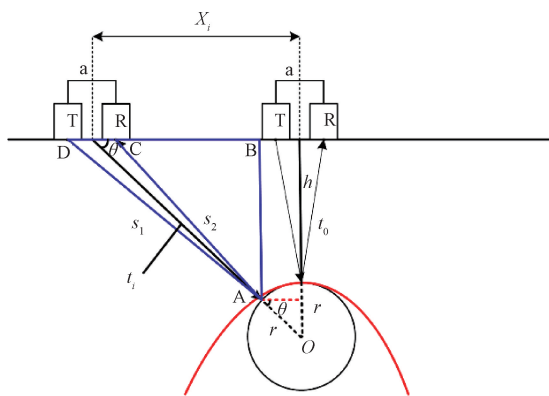


图2 探地雷达剖面法测量几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of GPR profiling method

设水平测线方向与天线相对于目标非金属管道的倾斜位置之间的夹角为 θ ,则:

$$\begin{cases} \sin\theta = \frac{h+r}{\sqrt{(h+r)^2 + x_i^2}} \\ \cos\theta = \frac{x_i}{\sqrt{(h+r)^2 + x_i^2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_i 表示天线相对于目标的倾斜位置和垂直位置收集的横向检测范围内任意两个GPR波形之间的距离, h 为管道的实际埋深, r 为管道半径。由此可知,天线相对于目标非金属管道的倾斜位置处,发射天线到目标的路程 s_1 (DA)和目标反射回接收天线的路程 s_2 (AC)可表示为:

很有可能因能量较弱而淹没在直达波中^[24]。因此,本文采用时域矩形滤波法去除直达波以达到增强非金属管道回波信号的目的。矩形滤波的时域矩形函数表达式如式(6)所示。

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: t_0 表示时间域上截取的窗口大小,该值的选取取决于直达波时域上的信号长度。将时域回波信号与矩形函数相乘即可得到去除直达波后的信号,如式(7)所示。

$$s'(t) = s(t) \times h(t) \quad (7)$$

其中, $s(t)$ 表示原始时域回波信号, $s'(t)$ 表示去除直达波后的时域信号。

2) 非金属管道回波信号时间零点校正

时间零点位置并不是固定不变的,它取决于单个天线、天线位于表面上方的高度以及天线下方介质的介电

特性。时间零点校正使雷达剖面零点与地面相对应,它的准确设置对非金属管道埋深的确定起着非常重要的作用。零点位置的选择通常包含 5 种类型,如图 3 中的 A~E 点所示。

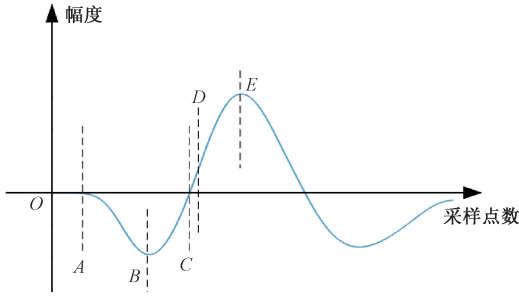


图 3 时间零点位置的选择

Fig. 3 Selection of time zero position

图 3 中, A 点为首次中断位置, B 点为第 1 个波谷, C 点是波谷和波峰之间的零振幅点, D 点为波谷和波峰的中点, E 点是第 1 个波峰。大部分人倾向于选择峰值处或零振幅点作为零点位置, 在实际应用中也可做适当调整。为了使埋深误差最小, 本文选取第 1 个波谷位置 (B 点) 作为时间零点。

1.4 非金属管道探地雷达成像定位算法

1) 非金属管道空间频域插值成像算法

典型的探地雷达地下非金属管道扫描图像 B-scan 是关于时间 t 和位移 x 的二维灰度图像, 电磁波在遇到目标管道后回波会呈现出双曲线效应, 从而降低图像的分辨率。为了解决这个问题, 本文引入了合成孔径雷达 (SAR) 技术中的聚焦算法—空间频域插值成像算法进行图像的重构, 以期将散射能量聚焦在非金属管道空间中的真实位置。SAR 成像可实现双曲线聚焦, 并将雷达扫描剖面图从时间相关转化为深度相关, 以便更直观地显示出管道的位置。空间频域插值成像算法的原理框图如图 4 所示。

其具体实现步骤如下^[25]:

- (1) 利用探地雷达获取原时域波场 $e_s(x, t)$;
- (2) 通过二维傅里叶变换将信号从时域波场转换到频域 $E_s(k_x, \omega)$;

$$E_s(k_x, \omega) = \iint e_s(x, t) e^{-jk_x x} e^{-j\omega t} dx dt \quad (8)$$

- (3) 利用式 (9) 对信号进行重构, 使得信号由 $E_s(k_x, \omega)$ 变换为 $E_s(k_x, k_z)$:

$$k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2} \quad (9)$$

式中: k_x, k_z 分别表示 x 和 z 方向上的波数, k 为波数矢量的幅度, 其表达式如式 (10) 所示:

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (10)$$

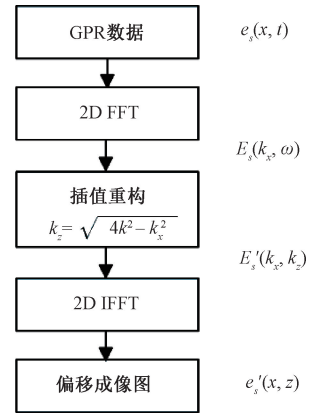


图 4 空间频域插值成像算法原理

Fig. 4 Block diagram of spatial frequency domain interpolation imaging algorithm

式中: ω 为角频率, v 为电磁波在地介质中的传播速度。由于式 (9) 的非线性导致变换到 k_z 域后原频域均匀分布的点变为非均匀分布, 因此为了使最终数据均匀分布在 (k_x, k_z) 域上, 需要在空间频域进行 SINC 插值处理, 如式 (11) 所示:

$$E'_s(k_x, k_z) = \sum_n E_s(k_x, k_z) h(k_x - n\Delta k_x) \quad (11)$$

其中, $h(k_x) = \text{sinc}(\frac{k_x}{\Delta k_x})$ 是 sinc 插值函数, Δk_x 是 k_x 域中的等间距点, n 是间距点个数。

为减少上述插值计算成本, 在插值中使用加窗版本的 $h(k_x)$, 记为 $h_\omega(k_x)$, 如式 (12) 所示:

$$E'_s(k_x, k_z) = \sum_{|k_x - n\Delta k_x| \leq N_s \Delta k_x} E_s(k_x, k_z) h_\omega(k_x - n\Delta k_x) \quad (12)$$

其中:

$$h_\omega(k_x) = \begin{cases} h(k_x) \omega(k_x), & |k_x| \leq N_s \Delta k_x \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_s 是 sinc 旁瓣个数的 1/2。选择 $\omega(k_x)$ 作为汉明窗口, 如式 (14) 所示:

$$\omega(k_x) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos(\frac{\pi k_x}{N_s \Delta k_x}), & |k_x| \leq N_s \Delta k_x \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

- (4) 进行二维傅里叶逆变换得到 (x, z) 域的偏移成像图 $e'_s(x, z)$, 如式 (15) 所示。

$$e'_s(x, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint E'_s(k_x, k_z) \times \frac{v}{2} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} e^{-jk_x x} e^{-jk_z z} dk_x dk_z \quad (15)$$

2) 非金属管道二值化定位算法

偏移成像处理将双曲线聚焦为一个点,该点所在位置即为非金属管道的顶点位置,要想准确定位管道的位置,还需进一步获取聚焦点的质心。首先将成像后的图像灰度化,其次进行二值化处理,使整个图像呈现出明显的黑白效果,其中二值化阈值的选取使用最大类间方差法(Otsu)^[26],然后计算二值化图像的连通区域,并获取各连通区域的质心坐标(X,Y),如式(16)所示:

$$\begin{cases} X = \frac{\sum (x_i \times l_i)}{\sum (l_i)} \\ Y = \frac{\sum (y_i \times l_i)}{\sum (l_i)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: l_i 为像素点的灰度值, x_i 和 y_i 分别表示第 i 个像素的纵横坐标。最后根据质心像素坐标以及图像像素大小和 B-scan 大小即可计算出管道的位置。

2 成像及定位算法仿真研究与分析

建立非金属管道数值模型并进行仿真分析,用于验证前述波速估算和成像定位算法的可行性。

2.1 仿真模型建立

模型的建立包括模型电磁参数和空间参数的定义及设置。建立如图 5 所示的 PVC 管道仿真模型,该模型为 x - z 坐标下的二维模型,模型中第 1 层为空气,第 2 层为土壤。管道圆心距底部 0.6 m,管道半径为 0.1 m,管道顶点位置为(1.0 m,0.3 m)。

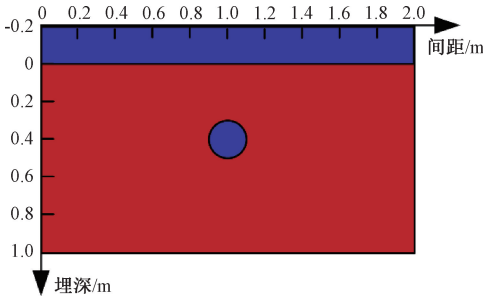


图 5 PVC 管道仿真模型

Fig. 5 PVC pipeline simulation model

模型中材料电磁参数设置如表 1 所示。

表 1 材料电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of materials

	相对介电常数	电导率/ ($S \cdot m^{-1}$)	相对渗透率	磁导率/ ($H \cdot m^{-1}$)
空气	1	0	1	0
PVC 管	4	0	1	0
土壤	6	0.01	1	0

仿真参数的设置如表 2 所示。发射信号为 Ricker 脉冲,收发天线位于空气层和土壤层的交界处,间距为 0.1 m,坐标(x,z)分别为(0.1 m,0 m)和(0.2 m,0 m)。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数名称	参数大小
天线中心频率	900 MHz
时窗	20 ns
扫描步长	0.05 m
采样点数	2 121
采集道数	36
垂直模型大小	2.0 m×1.2 m

将探地雷达水平测线设置在 $z=0$ m 处,沿测线从左往右进行剖面扫描的正演模拟,获得扫描图像 B-scan。

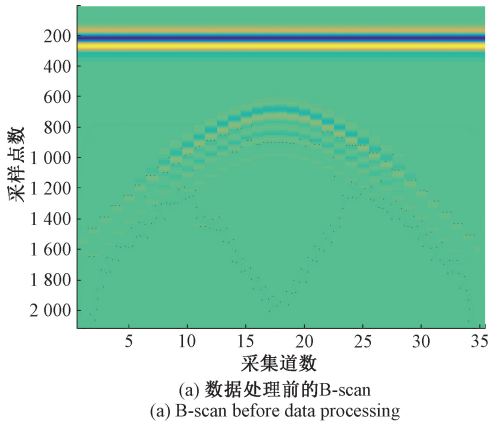
2.2 仿真结果与分析

首先对雷达回波数据进行处理,包括直达波去除、时间零点校正和时深转换。时深转换即把利用式(5)估算出的波速代入式(2),从而将纵坐标的时间尺度转换为深度尺度。将表 1 中土壤的相对介电常数代入式(1),得到电磁波在地下介质中的实际传播速度为 1.225×10^8 m/s,再利用式(5)得到估算波速为 1.222×10^8 m/s,波速估算误差仅为 0.24%,误差的产生可能与双程走时的读取有关,验证了本文所述波速估算方法的准确性。数据处理前后的正演结果如图 6(a)和(b)所示。

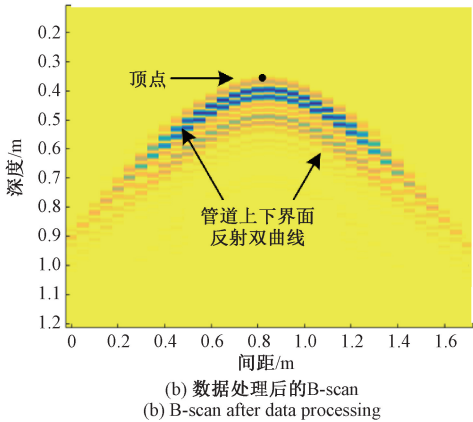
对比图 6(a)和图 6(b)可知,电磁波能够穿透非金属管道并在管道上下表面发生反射,从而在正演模拟结果中呈现出两条开口向下的双曲线,且经过数据处理后的目标回波信号强度更强,能更直观地看出管道所在的位置。然后利用空间频域插值成像算法进行偏移处理,得到如图 7 所示的偏移成像图。

图 7 中深色区域即为偏移处理后管道顶点所在的位置,可见双曲线效应已被消除,且没有出现伪影,也没有偏移不足或过偏移现象,成像效果较好。最后利用二值化定位算法对偏移成像图进行灰度化和二值化处理并提取成像区域的质心坐标,如图 8 所示。

从图 8 可知,该二值化定位算法能准确定位到成像区域的质心,有助于管道位置的确定。时间零点校正后的 B-scan 大小为 1.70 m×1.10 m,再利用图像像素大小(434,345)和质心坐标(216,97),计算得到管道水平位置为 $216/434 \times 1.70 = 0.846$ m,埋深位置为 $97/345 \times 1.10 = 0.309$ m,则管道顶点坐标为(0.846 m,0.309 m)。由于收发天线初始位置的中点为(0.15 m,0 m),则修正后的管道估计位置为(0.996 m,0.309 m),管道顶点实际位置为(1.0 m,0.3 m),故管道顶点位置的误差为(0.004 m,0.009 m),可知利用该算法定位管道的位置是



(a) 数据处理前的B-scan
(a) B-scan before data processing



(b) 数据处理后的B-scan
(b) B-scan after data processing

图 6 仿真数据正演结果

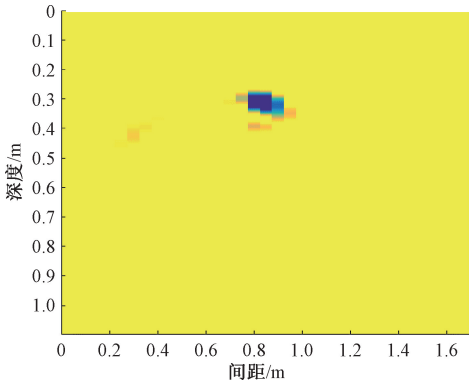


图 7 仿真数据偏移成像图

Fig. 7 Simulation data drift image

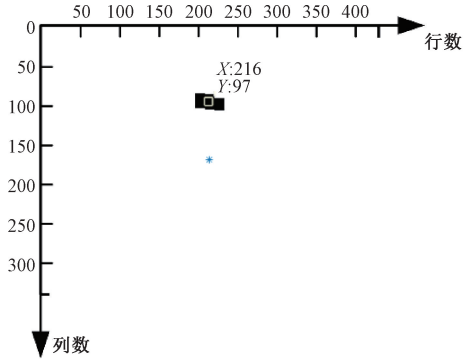


图 8 图像二值化和质心提取

Fig. 8 Image binarization and centroid extraction

了现场测试。管道顶点埋深分别为 0.40、0.60 和 1.10 m,管道半径均为 0.1 m 且都位于西南石油大学校园北区。实验参数的设置如表 3 所示。

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

参数名称	参数大小
时窗	40 ns
扫描步长	0.01 m
采样点数	1 024
采集道数	190(253)(265)
垂直模型大小	1.89 m×1.55 m(2.52 m×2.15 m)(2.64 m×1.96 m)
天线间距	0.165 m

3.1 0.40 m 现场测试实验与分析

0.40 m 埋深现场测试示意图如图 9 所示。由于地下介质的介电常数未知,故先利用式(5)估算波速,估算结果为 7.59×10^7 m/s。然后利用矩形滤波法去除直达波,选择如图 3 所示第 1 个波谷位置(B 点)作为时间零点,实现时间零点校正,并进行时-深转换,得到 0.40 m 埋深管道剖面图如图 10 所示。

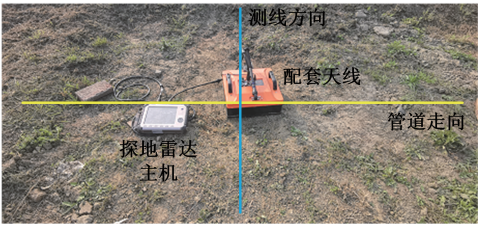


图 9 0.40 m 埋深现场测试示意图

Fig. 9 Schematic diagram of 0.40 m buried depth field test

可行的。

3 实验测试与分析

为了验证本文所述空间频域插值成像和二值化定位算法对埋地非金属管道成像定位的实际效果,本研究使用携带 270 MHz 天线的 LTD-2600 型探地雷达系统进行

图 10 中,管道的剖面图为开口向下的双曲线弧形,其顶点所在位置即管道的埋深。经时间零点校正后的 B-scan 大小为 1.89 m×1.46 m,利用空间频域插值成像算法进行偏移处理,成像结果如图 11 所示。

从图 11 可知,经空间频域插值成像处理后,可以清

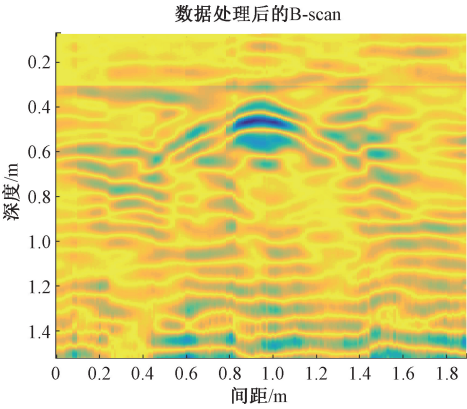


图 10 0.40 m 埋深管道剖面图

Fig. 10 Profile of 0.40 m buried pipeline

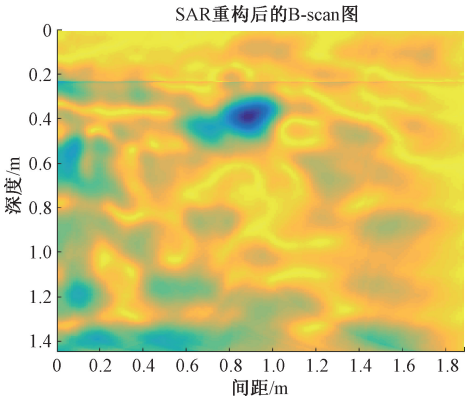


图 11 0.40 m 埋深管道偏移成像图

Fig. 11 Imaging image of 0.40 m buried deep pipe offset

晰地看到在 0.40 m 深处有一个聚焦点,其双曲线效应已被消除。利用二值化定位算法对偏移成像图进行灰度化和二值化处理并提取成像区域质心,如图 12 所示。根据质心坐标(204,93)以及图像像素大小(434,345)和 B-scan 大小计算得到管道顶点坐标为(0.888 m,0.394 m),考虑收发天线间距得到修正后的管道顶点坐标为(0.971 m,0.394 m),与管道实际位置(0.950 m,0.400 m)相比误差为(0.021 m,0.006 m)。产生误差的原因可能是波速估算过程中双程走时的读取精确度不够,二值化定位时连通区域划分和质心提取不够准确。

3.2 0.60 m 现场测试实验与分析

0.60 m 埋深现场测试示意图如图 13 所示。电磁波在地下介质中的传播速度估算结果为 1.05×10^8 m/s。经数据处理后,得到其管道剖面图如图 14 所示。

经时间零点校正后的 B-scan 大小为 $2.52\text{ m}\times2.05\text{ m}$,利用空间频域插值成像算法进行偏移成像的结果如图 15 所示。

由图 15 可知,双曲线效应被消除,在 0.60 m 深处存

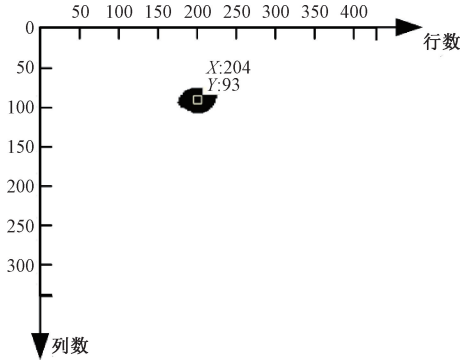


图 12 0.40 m 埋深图像二值化和质心提取

Fig. 12 0.40 m buried depth image binarization and centroid extraction

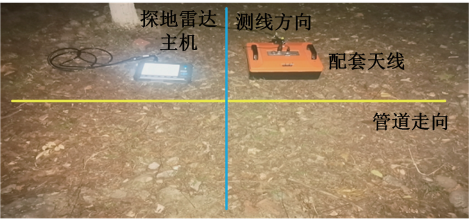


图 13 0.60 m 埋深现场测试示意图

Fig. 13 Schematic diagram of 0.60 m buried depth field test

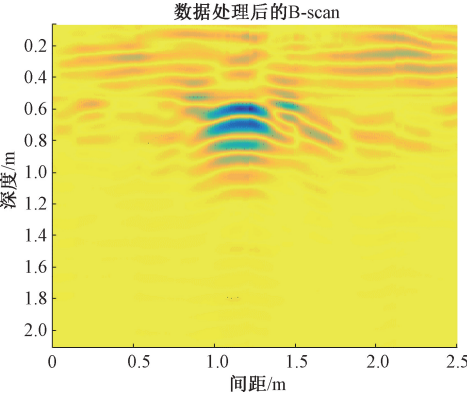


图 14 0.60 m 埋深管道剖面图

Fig. 14 Profile of 0.60 m buried pipeline

在一个明显的聚焦点。利用二值化定位算法对偏移成像图进行灰度化和二值化处理并提取成像区域质心,如图 16 所示。可见图中除了管道所在位置,还存在其他伪影,其可能是回波信号的背景噪声。根据图像像素大小(434,345)及质心坐标(178,100)和 B-scan 大小计算得到管道顶点坐标为(1.034 m,0.594 m),修正后的顶点坐标为(1.117 m,0.594 m),与管道实际位置(1.160 m,0.600 m)相比误差为(0.043 m,0.006 m)。误差产生的原因与 0.40 m 埋深时相同。

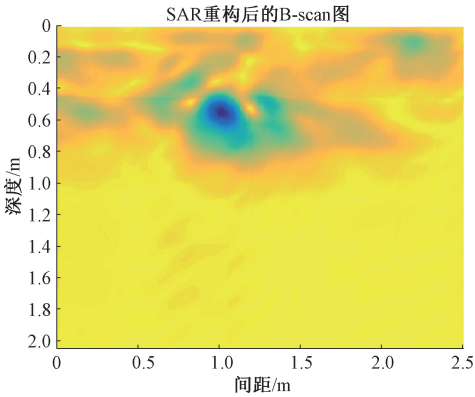


图 15 0.60 m 埋深管道偏移成像图

Fig. 15 Imaging image of 0.60 m buried pipe offset

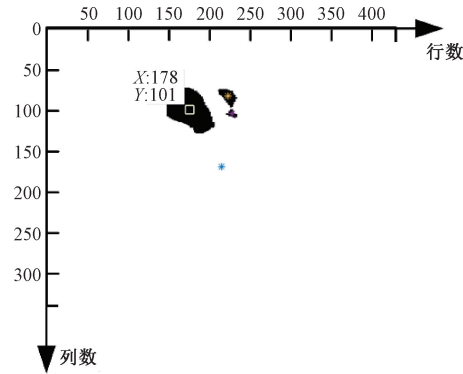


图 16 0.60 m 埋深图像二值化和质心提取

Fig. 16 0.60 m buried depth image binarization and centroid extraction

3.3 1.10 m 现场测试实验与分析

1.10 m 埋深现场测试示意图如图 17 所示。电磁波在地下介质中的传播速度估算结果为 9.85×10^7 m/s。经数据处理后,得到其管道剖面图如图 18 所示。

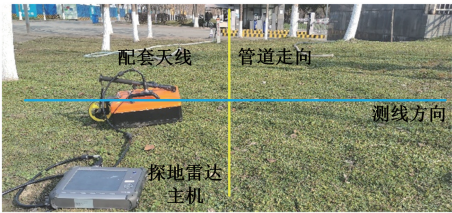


图 17 1.10 m 埋深现场测试示意图

Fig. 17 Schematic diagram of 1.10 m buried depth field test

经时间零点校正后的 B-scan 大小为 $2.64 \text{ m} \times 1.90 \text{ m}$,利用空间频域插值成像算法进行偏移成像的结果如图 19 所示。

如图 19 所示,双曲线效应被消除,在 1.10 m 深处存在一个明显的聚焦点。利用二值化定位算法对偏移成像图进行灰度化和二值化处理并提取成像区域质心,如图

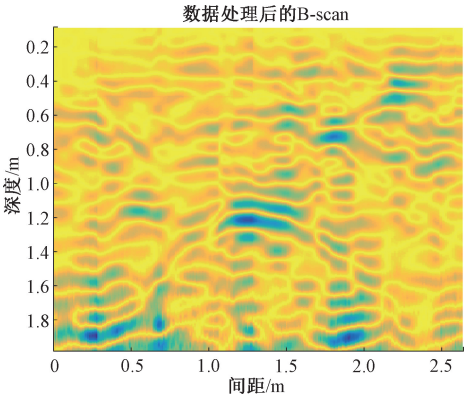


图 18 1.10 m 埋深管道剖面图

Fig. 18 Profile of 1.10 m buried pipeline

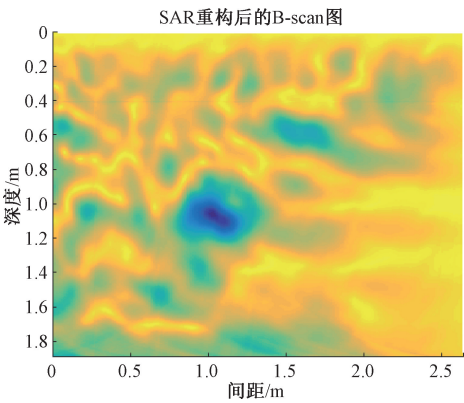


图 19 1.10 m 埋深管道偏移成像图

Fig. 19 Imaging image of 1.10 m buried pipe offset

20 所示。可见图中仍然存在许多伪影,这些伪影可能是回波信号的背景噪声。根据图像像素大小(434,345)及质心坐标(172,202)和 B-scan 大小计算得到管道顶点坐标为 (1.046 m, 1.112 m),修正后的顶点坐标为 (1.129 m, 1.112 m),与管道实际位置 (1.250 m, 1.100 m) 相比误差为 (0.121 m, 0.012 m)。误差产生的原因与 0.40 m 埋深时相同。

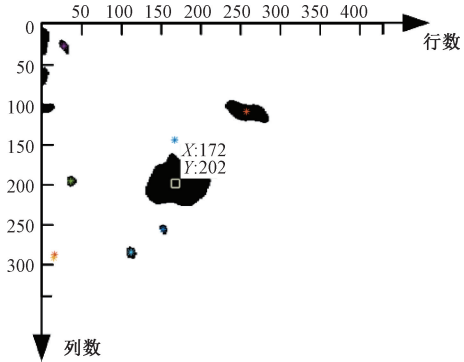


图 20 1.10 m 埋深图像二值化和质心提取

Fig. 20 1.10 m buried depth image binarization and centroid extraction

为了更好地分析定位结果,将探地雷达非金属管道定位的实验结果进行对比,如表 4 所示。

表 4 探地雷达非金属管道定位实验结果对比

Table 4 Comparison of ground penetrating radar non-metallic pipeline positioning experimental results (m)

	实际位置	估计位置	误差
0.40 m 埋深	(0.950,0.400)	(0.971,0.394)	(0.021,0.006)
0.60 m 埋深	(1.160,0.600)	(1.117,0.594)	(0.043,0.006)
1.10 m 埋深	(1.250,1.100)	(1.129,1.112)	(0.121,0.012)

通过对相同管径不同埋深的非金属管道进行现场实验可知,管道剖面图中双曲线顶点位置与管道的实际埋深相对应,埋深较浅的管道双曲线相对更尖锐也更清晰。三者的偏移成像图均能清晰地看到在管道对应埋深处存在一个聚焦点,且聚焦效果较好。其定位结果图表明伪影的存在与回波信号的背景噪声有关,且背景噪声的信号强度越强伪影越多,可通过增益处理削弱背景噪声强度以达到去除伪影的效果。表 4 结果表明,0.400、0.600 和 1.100 m 管道埋深误差分别为 0.006、0.006 和 0.012 m,满足埋地非金属管道定位需求,误差产生的原因与电磁波在地下介质中的传播速度及定位过程中质心的提取有关。实验结果表明本文所提空间频域插值成像和二值化相结合的定位算法能有效消除双曲线效应,聚焦效果较好,没有出现聚焦不足或过度聚焦的情况,能够准确定位管道的位置。

4 结 论

本文研究了探地雷达埋地非金属管道探测成像与定位技术,首先研究了探地雷达探测原理,分析了探地雷达在非金属管道探测过程中存在的问题;其次对电磁波在地下介质中的传播速度、回波信号处理和成像定位算法进行了研究;然后对非金属管道的成像定位进行了数值仿真分析,验证了本文所述方法的可行性;最后进行了 3 次不同埋深的非金属管道现场测试。主要取得了以下成果:

- 1) 将速度估算、回波信号处理、成像定位算法融合运用,解决了非金属管道雷达探测过程中由于目标回波信号微弱和电磁波传播速度难以精确估算而导致的管道成像及定位难的问题。
- 2) 建立了非金属管道二维模型,利用仿真软件实现了非金属管道的正演模拟,并进行波速估算、回波信号处理、空间频域插值成像和二值化定位。仿真结果表明,本文所述波速估算方法精确度较高,所提算法成像效果较好,能够有效消除双曲线效应,没有聚焦不足或过聚焦现象,管道埋深误差为 0.009 m,验证了空间频域插值成像以及二值化定位算法的可行性。

3) 开展了 0.400、0.600 和 1.100 m 不同埋深的非金属管道成像定位测试。测试首先根据双曲线拟合法估算出电磁波在地下介质中的传播速度;其次对雷达数据进行回波信号处理;最后利用本文所述空间频域插值成像和二值化定位算法进行成像和定位,3 次实验的埋深误差分别为 0.006、0.006 和 0.012 m,提高了非金属管道成像效果和定位精度。

在今后的工作中,应在伪影去除和多根管道材质、大小判断方面进行进一步研究,以便更好地确定地下非金属管线的埋深,同时适应更复杂的地下情况。

参考文献

[1] BAROUDI U, AL-ROUBAIEY A, DEVENDIRAN A. Pipeline leak detection systems and data fusion: A survey[J]. IEEE Access, 2019, 7:97426-97439.

[2] WANG T, CAO J, PEI L. A novel underground pipeline surveillance system based on hybrid acoustic features[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2):1040-1050.

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

CHEN S J, HU X Y, PENG R H. Review of urban underground pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2021,36(3):1236-1247.

[4] 高显泽, 刘亮, 冯骋, 等. 电磁感应法在埋地非金属管道探测中的应用[J]. 科学技术创新, 2022(21): 175-178.

GAO X Z, LIU L, FENG CH, et al. The application of electromagnetic induction method in the detection of buried non-metallic pipelines [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(21):175-178.

[5] 李勇. 声波检测法在燃气 PE 管线探测中的应用[J]. 西部资源, 2021(2): 157-161.

LI Y. Application of acoustic detection method in gas PE pipeline detection [J]. Western Resources, 2021(2): 157-161.

[6] 王琳, 吴正鹏, 陈楚, 等. 低空热红外遥感在探测输油管道中的应用[J]. 测绘科学, 2018, 43(3):142-147.

WANG L, WU ZH P, CHEN CH, et al. Using low altitude thermal infrared remote sensing technique to detect the underground oil pipelines [J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(3):142-147.

[7] 胡启华, 王红根, 桂磊峰. 探地雷达对地下管线探测的应用研究[J]. 江西测绘, 2019(3):12-15.

HU Q H, WANG H Y, GUI L F. Research on the application of ground penetrating radar to underground pipeline detection [J]. Jiangxi Surveying and Mapping, 2019(3):12-15.

[8] AMELIA R, BAGASKARA A, SANTOSO S B, et al.

- Application of ground-penetrating radar method to detect underground pipes in PAIR BATAN utility area [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2309(1): 012029.
- [9] 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.
- YAO X CH, YAN M, LYU G, et al. Research on underground pipeline classification and discrimination method based on geological radar detection [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1740-1747.
- [10] 刘冬梅, 石鑫, 张志宏. 探地雷达在非金属材料管线探测中的简要研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(21): 116-117.
- LIU D M, SHI X, ZHANG ZH H. A brief study of ground penetrating radar in non-metallic pipeline detection [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2017, 37(21): 116-117.
- [11] 赵迪, 叶盛波, 周斌. 基于 Grad-CAM 的探地雷达公路地下目标检测算法 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 113-118.
- ZHAO D, YE SH B, ZHOU B. Ground penetrating radar anomaly detection based on convolution Grad-CAM [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11): 113-118.
- [12] 赵兴友. 探地雷达在非金属管线探测中的应用 [J]. 江西建材, 2021(13): 130-132.
- ZHAO X Y. The application of ground penetrating radar non-metallic pipeline detection [J]. Jiangxi Building Materials, 2021(13): 130-132.
- [13] 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(10): 1221-1234.
- WANG W. Study on the application of radar technology in the detection of deep buried pipelines [J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(10): 1221-1234.
- [14] JIN Y, DUAN Y. Wavelet scattering network-based machine learning for ground penetrating radar imaging: Application in pipeline identification [J]. Remote Sensing, 12 (Advanced Techniques for Ground Penetrating Radar Imaging), 2020, 12(21): 3655.
- [15] HU H, FANG H, WANG N, et al. A study of automatic recognition and localization of pipeline for ground penetrating radar based on deep learning [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [16] LIU H, YUE Y, LIU C, et al. Automatic recognition and localization of underground pipelines in GPR B-scans using a deep learning model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 134: 104861.
- [17] 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 in ground penetrating radar in pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1803-1807.
- [18] 张军伟, 刘秉峰, 李雪, 等. 基于 GPRMax2D 的地下管线精细化探测方法 [J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 435-440.
- ZHANG J W, LIU B F, LI X, et al. Refined detection method of underground pipelines based on GPRMax2D [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 435-440.
- [19] WANG H, OUYANG S, LIU Q H, et al. Deep learning based method for estimating permittivity of ground penetrating radar targets [J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4293.
- [20] 彭建, 杨泽帆, 白洁, 等. 基于探地雷达的地下管线埋深估计方法 [J]. 雷达科学与技术, 2022, 20(1): 79-86.
- PENG J, YANG Z F, BAI J, et al. Depth estimation of underground pipeline using ground penetrating radar [J]. Radar Science and Technology, 2022, 20(1): 79-86.
- [21] ANDRIAWAN T, ALI E. Ground penetrating radar analysis for detecting void in concrete [J]. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020, 9(1.5): 226-231.
- [22] LAI W W L, SHAM J F C, XIE F. Correction of GPR wave velocity with distorted hyperbolic reflection in underground utility's GPR survey [C]. International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE, 2016, DOI:10.1109/ICGPR.2016.7572629.
- [23] LAI W L, KIND T, SHAM J F C, et al. Correction of GPR wave velocity at different oblique angles between traverses and alignment of line objects in a common offset antenna setting [J]. NDT and E International, 2016, 82(1): 36-43.
- [24] 郑俊, 刘婉萍, 马念茹, 等. 探地雷达信号杂波抑制 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 63-66.
- ZHENG J, LIU W P, MA N R, et al. Clutter reduction for ground penetrating radar signal [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(21): 63-66.
- [25] ÖZDEMİR C, DEMİRCİ S, YIGİT E, et al. A review on migration methods in B-scan ground penetrating radar imaging [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014.
- [26] 蓝雄光, 赖肱, 周东国, 等. 一种多层融合处理的 GPR B-Scan 双曲线提取方法 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(14): 97-103.

LAN X G, LAI X, ZHOU D G, et al. A GPR B-Scan hyperbola extraction method for multilayer fusion processing [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(14):97-103.

作者简介



肖小汀, 2010 年于重庆邮电大学获得学士学位, 2013 年于华南理工大学获得硕士学位, 2016 年于法国南特大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为探地雷达无损检测技术和成像算法。

E-mail: xt_xiao@foxmail.com

Xiao Xiaoting received her B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2010, M. Sc. degree from South China University of Technology in 2013, and Ph. D. degree from University of Nantes, FR, in 2016, respectively. Now she is a lecturer in Southwest Petroleum University. Her main research interests include ground penetrating radar non-destructive testing technology and imaging algorithms.



李怡, 2021 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达无损检测和地下空间探测。

E-mail: swpuliyi@163.com

Li Yi received her B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in Southwest Petroleum University. Her main research interest includes non-destructive testing of ground penetrating radar and underground space detection.



葛亮 (通信作者), 2007 年于西南石油大学获得学士学位, 2010 年于西南石油大学获得硕士学位, 2017 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为复杂环境下的检测技术研究。

E-mail: cgroad@163.com

Ge Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2007, M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2010, and Ph. D. degree in from Sichuan University in 2017, respectively. Now he is a professor in Southwest Petroleum University. His main research interest includes detection technology research in complex environment.



吴佳晔, 1991 年和 1995 年于清华大学分别获得学士学位和博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: wujy@scentralit.com

Wu Jiaye received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 1991, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 1995, respectively. Now he is a professor in Southwest Petroleum University. His main research interest is non-destructive testing.



徐杨, 2019 年于成都信息工程大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达和数据处理。

E-mail: 202022000189@stu.swpu.edu.cn

Xu Yang received his B. Sc. degree from Chengdu University of Information Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Southwest Petroleum University. His main research interests include ground penetrating radar and data processing.



陈莎莎, 2022 年于四川旅游学院获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达无损检测和地下空间探测。

E-mail: 2667117247@qq.com

Chen Shasha received her B. Sc. degree from Sichuan Institute of Tourism in 2022. Now she is a M. Sc. candidate in Southwest Petroleum University. Her main research interests include non-destructive testing of ground penetrating radar and underground space detection.