

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221899

# 管道渗漏区探地雷达响应特征分析

徐 磊<sup>1</sup>, 吴海波<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001;

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 232000)

**摘要:** 探地雷达在供水管道渗漏区探测方面具有广阔的应用前景。为增强渗漏区探地雷达响应特征的认识, 提高渗漏区定位精度, 基于时域有限差分法, 模拟金属管道底部渗漏的探地雷达响应特征, 并提取“三瞬”地震属性进行分析。结果表明, 渗漏区上边界信号易识别, 内部信号存在多次反射和震荡现象; 渗漏区瞬时振幅属性与原始剖面反映效果相似, 瞬时相位属性同相轴错断明显, 瞬时频率属性明显衰减; 瞬时相位属性和瞬时频率属性对渗漏区的存在及微弱信号反映效果较好, 故渗漏区瞬时属性分析时优选瞬时相位属性和瞬时频率属性。结果可为探地雷达管道渗漏区探测图像解译和实际工程应用提供参考。

**关键词:** 管道渗漏; 探地雷达; 数值模拟; 瞬时属性

中图分类号: TV672<sup>+</sup>.2; TU992.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0124-04

## 1 引言

据城市供水统计年鉴的数据显示<sup>[1]</sup>, 我国2020年城市管道渗漏水量将近  $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 渗漏率维持在10%以上。管道渗漏已成为城市水利工程一项严峻的问题, 不仅浪费资源, 还会改变土体的力学性质, 形成地下空洞等病害, 需及时发现处理。探地雷达以无损高效的优势在城市管道渗漏探测领域具有良好的应用前景。郭新蕾等<sup>[2]</sup>通过管道漏损平台试验, 提出“箭形回波”与“孔下回波”识别特征; 刘海等<sup>[3]</sup>通过渗流场—电磁场仿真试验, 研究了电磁波在管道渗漏区的传播规律; 胡群芳等<sup>[4]</sup>基于现场试验, 探讨了三维探地雷达对渗漏区的识别效果; 金鑫<sup>[5]</sup>基于探地雷达数据提出了电场分量成像技术, 分析了渗漏区电场图谱分量特征。已有研究结果验证了探地雷达探测管道渗漏的可行性, 但单一的雷达剖面信息较少, 信号质量易受噪音的影响, 导致渗漏区定位效果不佳。为此, 本文引入属性分析的处理方法, 基于时域有限差分法模拟了金属管道底部破裂雷达响应特征, 提取结果的瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率属性, 并结合实例评价了“三瞬”属性在探地雷达管道渗漏区探测的应用效果, 提高了渗漏区定

位精度, 可为工程应用提供参考。

## 2 供水管道渗漏区特征

### 2.1 供水管道渗漏区电性参数特征

探地雷达法是通过向地下发射高频电磁波, 利用管道渗漏区域与周围土体的电磁性质差异, 推断渗漏区位置与形态的地球物理探测方法, 探测结果主要受介质的介电常数和电导率的影响。管道渗漏区常用介质电性参数见表1。

表1 管道渗漏区常见介质电性参数

Tab. 1 Electrical parameters of common media in pipeline leakage area

介质	电导率 $\sigma / (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	相对介电常数 $\epsilon$
空气	0	1
纯水	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	81
干砂土	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	2~6
湿砂土	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	15~30
PVC	$10^{-4}$	3

供水管道主要布设在0.7~2.0 m深度范围内, 渗漏区的介质主要为土壤, 本文以砂土作为研究对象。研究管道渗漏时, 渗漏区的介电常数与电导率主要受砂土含水率的影响, Topp模型<sup>[6]</sup>常用来描述土体体积含水率与土体介电常数的关系, 其公式为:

收稿日期: 2022-09-13, 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 安徽高校协同创新项目(GXXT-2021-016)

作者简介: 徐磊(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地球探测与信息技术, E-mail: 920391461@qq.com

通讯作者: 吴海波(1988-), 男, 博士、副教授, 研究方向为城市工程地球物理勘查, E-mail: wuhaibocumt@163.com

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3 \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_r$  为介电常数;  $\theta_v$  为体积含水率。

基于 Topp 模型的假设, 在低损耗材料介质中, 电导率与含水率为指数相关性 ( $R^2 = 0.75$ ), 其回归方程<sup>[7]</sup>为:

$$\sigma = 4.504e^{8.2635\omega} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为电导率;  $\omega$  为体积含水率。

### 2.2 供水管道渗漏区形态分析

管道发生渗漏后, 水通过渗漏点进入管道周围非饱和土壤形成渗漏区。渗漏区的形成遵循非饱和土的达西定律, 达西定律表明水的渗流速度与水力坡度呈线性关系, 其公式为:

$$v = k(\theta)j \quad (3)$$

式中,  $v$  为水的渗流速度;  $k$  为渗透系数;  $\theta$  为体积含水率;  $j$  为水力梯度。

在实际工程中, 由于供水管道上部和内部存在压力, 供水管道底部易在压力的作用下破裂。同时, 由于管道内部的水存在压力, 供水管道渗漏形成的渗漏区形态近似球体<sup>[8]</sup>, 以此为依据设计了渗漏区位于管道正下方的金属管道底部渗漏模型, 见图 1。

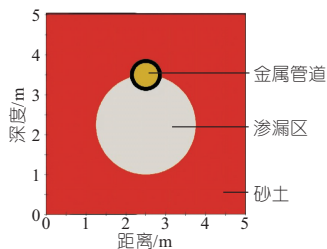


图 1 金属管道底部渗漏模型

Fig. 1 Bottom leakage model of metal pipe

## 3 “三瞬”属性计算方法

瞬时属性是指瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率, 是属性分析方法中最常用的属性。探地雷达的瞬时属性是通过实采信号进行 Hilbert 变化构建复信号进行分离得到的, 瞬时振幅属性反映了指定时刻反射信号的能量大小与衰减情况, 当电磁波穿过不同介质体时, 瞬时振幅会发生强烈变化; 瞬时相位属性反映了雷达剖面上同相轴连续性情况, 不受振幅影响, 对深部能量较弱的信号反映效果较好; 瞬时频率属性反映了指定时刻反射波频率变化, 是相位的时间变化率, 易受噪声影响, 对介质的物性变化反映较好<sup>[9]</sup>。

在提取探地雷达的瞬时属性时, 构建探地雷达信号的时间函数信号  $s(t)$  为:

$$s(t) = A(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (4)$$

式中,  $A(t)$  为振幅函数;  $t$  为时间;  $\omega_0$  为中心频率;  $\varphi(t)$  为相位函数。

经过 Hilbert 变化, 雷达信号的复信号形式  $Z(t)$  为:

$$Z(t) = A(t)\{\cos[\omega_0 t + \varphi(t)] + i\sin[\omega_0 t + \varphi(t)]\} \quad (5)$$

$Z(t)$  的实部为  $s(t)$ , 虚部为  $s(t)$  的 Hilbert 变化  $\sigma(t)$ 。

瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率分别为:

$$A(t) = \sqrt{s^2(t) + \sigma^2(t)} \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \arctan[s^2(t)/\sigma^2(t)] \quad (7)$$

$$\omega(t) = d\varphi(t)/dt \quad (8)$$

## 4 金属管道底部渗漏的探地雷达响应特征模拟

### 4.1 供水管道渗漏区正演模拟

数值模拟使用开源软件 gprMax<sup>[10]</sup> 进行, 建立了金属供水管道底部渗漏模型。模型的规格为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ , 背景介质为干砂土, 其相对介电常数取 4, 电导率取  $0.001\text{ S/m}$ 。以渗漏区为 40% 含水率的砂土为例, 通过式 (1)、(2) 计算得到 40% 含水率砂土的相对介电常数、电导率参数的估算值分别为 25、 $0.1228$ 。供水管道为金属材质, 内部充水, 其水平位置为  $2.5\text{ m}$ , 埋深  $1.5\text{ m}$ , 管径  $600\text{ mm}$ , 壁厚  $100\text{ mm}$ 。正演模拟参数设置如下: 发射天线频率为  $300\text{ MHz}$ , 选用 Ricker 子波, 移动步长为  $0.05\text{ m}$ 。网格划分  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  均为  $0.01\text{ m}$ , 时窗长度为  $50\text{ ns}$ 。渗漏区砂土含水率为 40% 条件下金属管道底部渗漏正演结果见图 2。由图 2 可看出, 时间深度  $5\text{ ns}$  处为直达波; A 为金属管道顶部界面反射, 时间深度为  $20\text{ ns}$ ; B 为渗漏区顶部的反射, 由于电磁波难以穿透金属管道传播, 管道正下方反射波双曲线 B 的顶部信号不可见, B 仅可见左右两尾支处存在微弱的反射信号, 时间深度为  $32\text{ ns}$ ; C 为金属管道与渗漏区的多次反射和信号震荡所致。

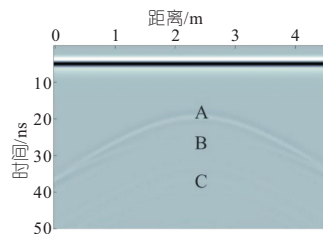


图 2 金属管道底部渗漏探地雷达正演模拟图

Fig. 2 Ground penetrating radar forward simulation diagram of metal pipe bottom leakage

为深入了解渗漏区雷达信号特征的形成过程,选取发射天线位于管道正上方时的模拟数据,分析该位置的管道渗漏区雷达信号的波场快照,分别选取  $t=15、25、35$  ns 的波场快照,结果见图 3。由图 3 可看出,雷达信号在介质中以球面波的形式传播,电磁波无法穿透金属管道壁,在接触金属管道后,一部分电磁波被反射,反射回的电磁波接触地面和渗漏区后,其中一部分电磁波会被继续反射向下传播,形成多次反射;雷达信号在渗漏区与周围干砂中呈不同的传播速度,内部信号传播较慢。

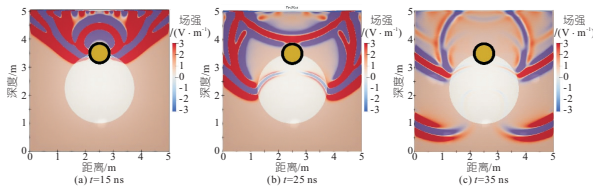


图 3 金属管道底部渗漏探地雷达波场快照图

Fig. 3 Snapshot of ground penetrating radar wave field of metal pipe bottom leakage

### 4.2 正演记录的“三瞬”属性分析

为提高探地雷达信号识别的准确度,获取不同渗漏程度下雷达信号的更多细节特征,提高渗漏区定位精度,对正演模拟结果进行 Hilbert 变换,提取瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率属性,从多参数角度进行评价。

正演模拟结果的瞬时振幅剖面、瞬时相位剖面、瞬时频率剖面见图 4。由于直达波对瞬时振幅属性影响较大,故图 4(a)的瞬时振幅剖面为正演记录切除直达波后通过 Hilbert 变换所得。由图 4(a)可看出,瞬时振幅剖面与原始的正演模拟剖面结果相差不大。渗漏区信号呈双曲线形态,渗漏区上部边界反射信号瞬时振幅强度较高,该模型下约为 60,被金属管道遮掩部分瞬时振幅强度为 0,渗漏区内反射信号瞬时振幅强度明显低于上部边界信号的瞬时振幅强度,处于  $0\sim 20$  的范围内,深部信号瞬时振幅强度与背景值接近,识别效果不佳。由图 4(b)可看出,瞬时相位剖面主要体现了反射信号同相轴的连续性,金属管道界面反射信号同相轴连续性较好,渗漏区上部边界

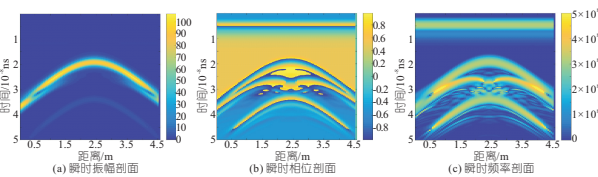


图 4 正演模拟结果的瞬时属性剖面

Fig. 4 Instantaneous attribute profile of forward simulation results

信号存在同相轴错断现象,渗漏区内部反射信号的同相轴错断现象更明显,相较于瞬时振幅属性,瞬时相位属性对深部及被强反射影响的微弱信号也有所反映。由图 4(c)可看出,瞬时频率剖面中金属管道上界面的瞬时频率为 300 MHz,金属管道与渗漏区边界交汇处瞬时频率明显超过 300 MHz,受到了金属管道强反射叠加的影响,由于渗漏区对高频的吸收作用,渗漏区边界及内部信号瞬时频率属性明显低于 300 MHz,渗漏区内部信号的瞬时频率明显衰减。瞬时频率属性同样能反映被管道影响的渗漏区上部边界信号及渗漏区深部的微弱信号。由此可知,瞬时相位属性和瞬时频率属性对渗漏区的体现效果优于瞬时振幅属性,故渗漏区瞬时属性分析时优先分析这两种属性。

## 5 实例分析

为进一步研究管道渗漏区探地雷达响应特征及瞬时属性分析效果,选取某路段进行探地雷达现场实测,试验路段下方存在排水管道渗漏区域。使用 500 MHz MALA 探地雷达探测该路段下方并进行瞬时属性分析,探测结果及瞬时属性分析结果见图 5。由图 5 可看出,瞬时振幅剖面与原始记录剖面效果相差不大,该路段浅层分层明显,实测瞬时振幅剖面显示水平位置为 4 m,时间深度为 15 ns 的双曲线反射信号瞬时振幅强度较高,为渗漏区上部边界,时间深度 15 ns 后的渗漏区内部信号十分微弱,瞬时振幅强度明显低于上部边界,时间深度 25 ns 后的信号瞬时振幅强度与背景值接近,反映效果不佳,渗漏区底部边界信号不可见,与数值模拟结果一致。瞬时相位剖面显示,位于时间深度 15 ns 的上部边界双曲线反

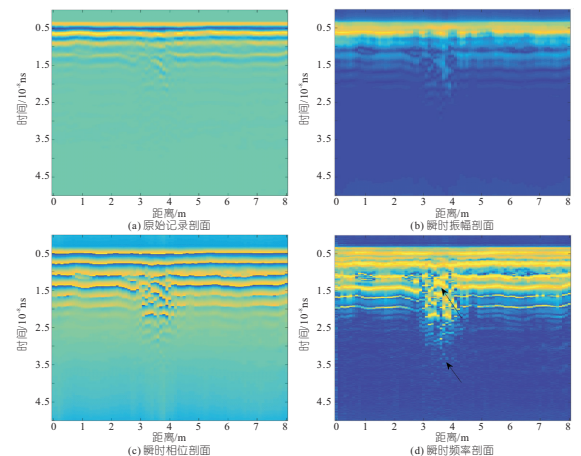


图 5 实测记录

Fig. 5 Measured record

射信号存在同相轴错断的现象,位于时间深度 15 ns 后的渗漏区内部信号比边界信号同相轴错断更明显,与数值模拟结果一致,瞬时相位剖面对位于时间深度 35 ns 的渗漏区底部边界信号也有所反映;瞬时频率剖面中位于 15 ns 的渗漏区上部边界反射波和位于 35 ns 的渗漏区下部边界反射波清晰可见,渗漏区内部震荡现象明显,与模拟结果一致,信号的瞬时频率在渗漏区内部明显衰减。通过实例分析,同样发现瞬时相位属性与瞬时频率属性对渗漏区上下边界及内部信号的体现效果优于瞬时振幅属性。

## 6 结论

a. 渗漏区上部边界雷达信号易识别,内部信号存在震荡现象,深部信号识别效果不佳。属性分析处理方法能从多参数角度丰富获取的信息,提高渗漏区定位的准确度。

b. 渗漏区信号的瞬时振幅属性与原始剖面反映效果相似,微弱信号瞬时振幅接近 0,反映效果不佳;瞬时相位属性同相轴错断明显,微弱信号也会出现相位的变化;瞬时频率属性明显衰减,数值上明显低于发射频率,内部信号衰减更严重,能分辨深部微弱信号。故“三瞬”属性分析时优先选取瞬时相位属性与瞬时频率属性。

### 参考文献:

[1] 中国城镇供水排水协会. 城市供水统计年鉴[M]. 北京:中国城镇供水排水协会, 2021.

- [2] 郭新蕾,郑飞飞,马朝猛,等. 输水管道泄漏的探地雷达检测原理和现象机理分析[J]. 水利学报, 2021, 52(7): 781-792.
- [3] 刘海,黄肇刚,岳云鹏,等. 地下管线渗漏环境下探地雷达信号特征分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1257-1264.
- [4] 胡群芳,郑泽昊,刘海,等. 三维探地雷达在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.
- [5] 金鑫. 管线渗漏异常探地雷达数据的电场分量成像分析[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 159-163.
- [6] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electro-magnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines[J]. Water resources research, 1980, 16(3): 574-582.
- [7] MCCUTCHEON M C, FARAHANI H J, STED-NICK J D, et al. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field [J]. Biosystems engineering, 2006, 94(1): 19-32.
- [8] 黄乐艺. 城市地下供水管线渗漏探地雷达正演模拟与解释方法应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [9] 刘宗辉,刘毛毛,周东,等. 基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3282-3290.
- [10] CRAIG WARREN, ANTONIOS GIANNOPOULOS, IRAKLIS GIANNAKIS. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar[J]. Computer physics communications, 2016, 209: 163-167.

## Response Characteristics Analysis of Ground Penetrating Radar in Pipeline Leakage Area

XU Lei<sup>1</sup>, WU Hai-bo<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Energy Laboratory), Hefei 232000, China)

**Abstract:** Ground penetrating radar (GPR) has a broad application prospect in detecting the leakage area of water supply pipeline. In order to enhance the understanding of the response characteristics of GPR in the leakage area and improve the positioning accuracy of the leakage area, based on the finite difference time domain method, this paper simulated the response characteristics of ground penetrating radar for leakage at the bottom of metal pipes, and extracted the "three instantaneous" seismic attribution. The results show that the upper boundary signal of the leakage area is easy to be identified, and the internal signal has multiple reflections and oscillations. The reflection effect of the instantaneous amplitude attribution in the leakage area is similar to that of the original profile. The instantaneous phase attribution is obviously staggered, and the instantaneous frequency attribution is obviously attenuated. Instantaneous phase attribution and instantaneous frequency attribution can reflect the existence of leakage area and weak signal well, so the instantaneous phase attribution and instantaneous frequency attribution are preferred when analyzing the instantaneous attribution of leakage area. The research results can provide a reference for the interpretation of GPR pipeline leakage detection images and practical engineering applications.

**Key words:** pipeline leakage; ground penetrating radar; numerical simulation; instantaneous attribution