

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.s1.062

城市供水管道渗漏程度的渗流模型分析与探地雷达信号正演*

沈宇鹏^① 董淑海^② 王 卿^③ 黄乐艺^①

(①北京交通大学土木建筑工程学院 北京 100044)

(②中交第三航务工程勘察设计院有限公司 上海 200032)

(③中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 应用探地雷达进行城市地下管道的探查已经在市政工程中广泛采用,但是利用探地雷达进行地下管道泄漏的探查在我国尚未被广泛采用。本文研究了探地雷达在城市地下供水管道渗漏探查中的应用。首先利用 Geo-studio 软件模拟了不同工况下的管线渗流情况,分析了不同管线大小,不同渗漏位置与不同时间下的渗漏区的分布、渗漏部位含水量发育特征等几何和物理参数;在此基础上,通过采用 GprMax 探地雷达正演模拟软件对管道的渗漏进行了病害正演,建立了不同埋深、不同管线大小、不同渗漏位置和程度的系列探地雷达响应特征数据。为实际利用探地雷达探测城市供水管道渗漏提供了基础的参数数据和识别参考。

关键词 探地雷达 渗漏区 正演模拟 Geo-studio GprMax

中图分类号:P642 文献标识码:A

DIFFERENT DEGREES OF WATER PIPELINES LEAKAGE MODEL ANALYSIS AND GPR SIGNAL FORWARD SIMULATION

SHEN Yupeng^① DONG Shuhai^② WANG Qing^③ HUANG Leyi^①

(①School of Civil Engineering Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

(②CCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032)

(③Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Application of ground penetrating radar on underground pipeline detection has been widely used in municipal engineering, However, the use of ground penetrating radar to detect underground pipeline leak has not yet been widely adopted in China. This Paper investigates the application of GPR in detecting urban water supply pipeline leakage. Firstly the seepage law of pipeline leakage area under different conditions were simulated by Geo-studio seepage Software, the geometric and physical parameters of the leakage area under different line sizes, different leakage sites and different times are analyzed. On this premise, using simulation software GprMax to study the radar geological image simulating of pipeline leakage under different conditions. It provides the basis parametric data and identification information for the actual use of ground penetrating radar in detect water supply pipeline leakage.

* 收稿日期: 2016-02-25; 收到修改稿日期: 2016-05-20.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015JBM064)资助.

第一作者简介: 沈宇鹏(1977-), 男, 副教授, 主要从事路基工程的教学和科研工作. Email: ypshe@bjtu.edu.cn

Key words Ground Penetrating Radar, Leakage region, Forward simulation, Geo-studio, GprMax

0 引言

城市供水系统是城市居民生活和经济发展的基础设施,由城市供水水源、给水处理系统和输配水管网系统等组成(李学军等,2010;肖文军等,2010)。近几十年来,随着城市化进程的不断加快,城市地下管网不断增加和扩建,但供水管道仍存在一些问题,如管线长、管龄长、管道腐蚀等,使管道泄漏事故频频发生(陈立道等,2002)。城市供水管道的渗漏,不仅造成了严重的资源浪费,并且已经对供水系统以及城市居民的供水造成了严重的影响。

在我国,供水管线依照材质划分主要有钢管、铸铁管、预应力混凝土管以及聚乙烯管等几种不同类型的管线。以北京市为例,目前现在供水管线总长度近8000km,并且大多数的供水管材采用的都是铸铁管,由于铸铁管强度较低,并且脆性大,因此在外力条件下很容易产生变形,导致管道漏水甚至爆管。供水管道的渗漏类型主要分为3种:明漏、暗漏和背景渗漏。其中,供水管道的渗漏主要以暗漏与背景渗漏为主。据统计,供水管网中90%以上的漏水形式都是暗漏,暗漏形成的因素有很多,主要为管网系统的压力,管道运行状况、腐蚀情况、管道受力状况等。由于暗漏数量巨大,不易察觉,并且采用一般的管线渗漏探测方法难以探查,因此暗漏成为了供水管线漏损的主要来源。如何能够准确的探查管线的暗漏与背景渗漏,是有效减少供水管网漏损,节约水资源的重要课题。

在国外,利用探地雷达管线探测管道泄漏已经有了很多年尝试和研究。在我国市政方向,探地雷达主要还是应用于地下管线管网的埋深以及走向的探测,而在管线病害的探查方面还是应用的较少。苏兆锋等(2014)等研究了探地雷达天线频率、测线布置以及电磁波传播速度等几个因素对城市管线病害探测的影响。何亮等(2012)等通过对雷达测线剖面图和单道波形图进行图像分析,阐述了探地雷达在探测地下管线周围地基病害中的应用,证明了探地雷达技术是一种有效的地基病害快速探测方法,值得大力推广。沈宇鹏等(2015)等建立了管线病害正演模型,通过结合探地雷达数据的均方根属性、甜点属性和分频属性对正演结果进行研究,证明了通过3种不同属性的结合,能够对城市水管泄露

导致的地质灾害进行有效的识别和监控。

本文首先利用Geo-studio渗流模拟软件,对单一土层下管线产生漏水后的渗漏区的渗流规律进行了研究,得到了在供水管线渗漏情况下不同直径的管线、不同渗漏部位的渗漏区发育的规律。并进一步采用GprMax正演模拟软件对不同工况下的管线渗漏病害进行了系统的正演模拟,并对正演结果进行了解释。为管线渗漏雷达图谱的经验分辨提供借鉴,也为探地雷达探查供水管线渗漏实际应用提供基础。

1 探地雷达探测管线病害原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar)是一种用于对介质本身覆盖下的物体(如管道、钢筋等)进行探测的一种方法。利用探地雷达可以用来探测地下目标,它通过向地面发射高频电磁波,利用电磁波在介质表面产生折射和反射,并根据电磁波反射回地面的一些特征来推断地下介质的结构(杨可等,2011)。当管线在产生泄漏后,水与周围土层混合后其介电常数等电磁波动力学属性已发生了变化,使得渗漏区存在与原地层出现不一样的物理特征。利用探地雷达探测管线渗漏的先决条件是管线渗漏区介电参数的异常。探地雷达探测管线渗漏原理图如图1所示。

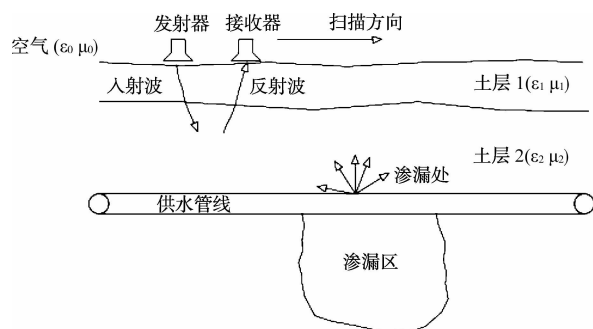


图1 探地雷达探测管线渗漏原理图

Fig. 1 Schematics of GRP to detect pipeline leakage

探地雷达接收到的反射波的波幅和时距等参数是介电常数的函数,探地雷达图像的处理、解释和反演都必须依赖于介质的介电性能。基于以上原理,可以利用渗漏区与周围地层的电磁参数差异进行供水管道漏水检测。目前常用介质的电磁参数如下表1所示:

表1 常用介质电磁参数表

Table 1 The electromagnetic parameters of common media

介质名称	电导率 σ (S/m)	相对介电常数 ϵ_r
空气	0	1
纯水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81
干砂土	1.4×10^{-4}	2.6
湿砂土	6.9×10^{-3}	25
干沃土	1.1×10^{-4}	2.5
湿沃土	2.1×10^{-2}	19
干黏土	2.7×10^{-4}	2.4
湿黏土	5.0×10^{-2}	15

2 电磁波正演模拟理论基础

目前,常用的电磁波数值模拟方法主要为时域有限差分法(Finite Difference Time Domain)。时域有限差分理论(FDTD)是 Yee (1966)在 1966 年提出的。FDTD 方法是由微分形式的麦克斯韦旋度方程出发进行差分离散,从而得到一组时域推进公式。该方法的优点是基于简单的公式迭代,而不需要复杂的渐进逼近或者格林函数,并且可以很容易的处理由不同媒质构成的电磁结构。麦克斯韦时域旋度方程形式为:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \quad (1a)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1b)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (1c)$$

$$\nabla \cdot B = \rho_m \quad (1d)$$

其中, E 为电场强度,单位为 $V \cdot m^{-1}$; H 为磁场强度,单位为 $A \cdot m^{-1}$; B 为磁通量密度,单位为 $Wb \cdot m^{-2}$; J 为电流密度,单位为 $A \cdot m^{-2}$; J_m 为磁流密度,单位为 $V \cdot m^{-2}$; D 为电位移,单位为 $C \cdot m^{-2}$; ρ_e 为电荷密度,单位为 $C \cdot m^{-2}$; ρ_m 为磁荷密度,单位为 $Wb \cdot m^{-2}$ 。

对 GPR 而言,物质材料的磁场和电场属性尤为重要。本构关系是用来描述物质材料受外部电磁场影响的关系函数。各向同性线性介质中的本构关系为:对于线性和各项同性媒质,其电磁性质的本构关系如下式所示:

$$B = \mu H \quad (2a)$$

$$D = \epsilon E \quad (2b)$$

$$J_m = \delta_m H \quad (2c)$$

$$J = \delta E \quad (2d)$$

其中, μ 为表示导磁系数,单位为 $H \cdot m^{-1}$; ϵ 表

示介质介电常数,单位为 $F \cdot m^{-1}$; σ 表示导电率,单位为 $S \cdot m^{-1}$; σ_m 表示导磁率,单位为 $\Omega \cdot m^{-1}$ 。 σ 和 σ_m 分别为介质的电损耗和磁损耗。

在电磁波的正演模拟计算时,电场与磁场在空间和时间内的取样都是在离散点进行的。取样的周期,即计算中的空间步长和时间步长,必须遵守一定的限制,以确保解的稳定性。因此时间步长的确定,必须要满足以下条件:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3)$$

并且,当采用 FDTD 法进行时域计算时,由于计算机的容量的限制,只能在有限区域进行,只考虑在截断空间内的电磁波数值计算,不考虑截断空间外的电磁波数值模拟。因此,在计算区域的截断边界处必须给出吸收边界条件。目前,发展采用较广泛的吸收边界为完全匹配层,而本文软件默认采用的是三阶 Higdon 吸收边界条件。

GprMax 软件是基于 FDTD 算法的电磁波正演模拟软件,可以用于各向同性均匀介质中电磁波的传播规律以及电磁波与目标体的相互作用。软件根据介质的介电特性设置介质参数、采用探地雷达探测原理设定雷达参数,并根据 FDTD 原理设定相关正演模拟参数,然后通过编写正演模拟模型的输入文件程序进行模拟仿真得到正演模拟图像。因此,本文采用 GprMax2D 软件对管线病害的建立探地雷达正演模型,模拟探地雷达对实际管线的病害探查,为探地雷达在管线病害的探查的应用中提供基础。

3 管线漏水渗流模型建立

为了描述供水管网渗漏时的渗漏区形态特征与含水率分布规律,确定不同管线直径与不同渗漏位置情况下渗漏区的发育规律,本文利用 Geo-studio 渗流模拟软件建立了不同工况下的管线渗漏模型,分析了管破坏后不同管线直径、不同渗漏位置情况下的渗漏区形态特征与含水率分布规律。

由于管道周围土体绝大部分为非饱和土,因此本文结合管道基础的实际埋设条件,建立了管道产生渗漏作用下的渗流模型。其中管道基础模型为 8m × 8m。为了简化模型,基础采用了单一土层,并且基础土层选用渗透性能中等的粉砂土作为基础土层的填料,其饱和渗透率为 $10^{-6} m \cdot s^{-1}$; 并且由典型粉砂土的土水特征曲线可以得到粉砂土的饱和含水

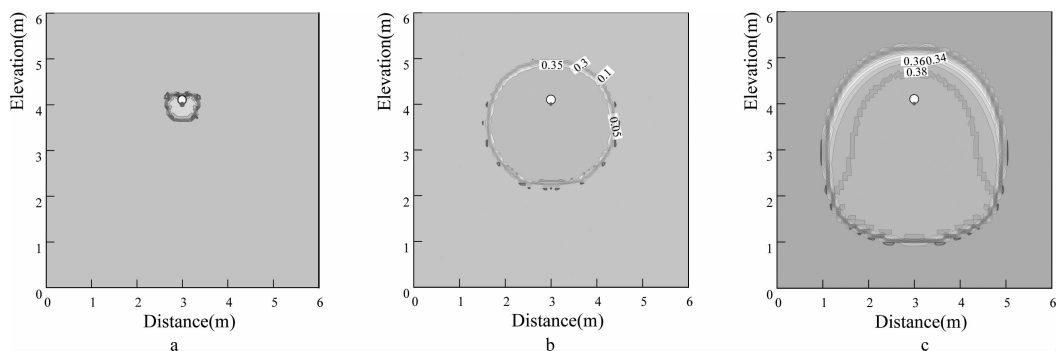


图2 小直径管线渗漏不同时间渗流区发育图

Fig. 2 Small diameter pipeline leakage area seeps development at different times

a.漏水 1d 含水率图;b.漏水 5d 含水率图;c.漏水 10d 含水率图

率取值为 0.38,残余含水率为 0.001。

本文分别模拟了管线直径分别为 200mm、1000mm 的两种不同直径的管线在不同渗透位置下的渗流规律;其中,直径为 200mm 的小直径管线渗透位置为顶部渗透;为了模拟大直径管线下不同渗透部位对渗流区产生的影响,直径为 1000mm 的大直径管线渗透位置分别选用了顶部渗透、侧部渗透以及底部渗透 3 种不同的工况。

通过模型计算,得到小直径管线产生渗漏情况下的不同时间渗流区的发育规律结果如图 2 所示;大直径管线不同渗透部位发生渗漏时渗流区随时间的发育规律结果如图 3 所示。

由以上模拟结果分析可知,当管线直径较小时,在渗流到达第一天以后便越过了管线向上方渗透(图 2a)。而由于大直径管线的管线直径大,当管线开始产生渗漏时,在不同的区域会形成不同渗透特性(图 3):大直径管线顶部发生渗漏时,水会随着时间的推移不断的向四周和顶部渗流(图 3a);侧

部渗透的情况下,由于管线的阻挡,水只能向上下渗流,并且渗流的速度发生了改变,因此在向左边的作用下形成了上下两个不同区域的非饱和带(图 3b);底部渗透时,管线阻止了水流向上的渗流,因此形成的渗流区的位置位于管线的正下方(图 3c)。

当渗流区发育区域渗流趋向稳定时,土体含水率的变化范围为 0.05~0.38,即渗流区的中间部分为饱和区,饱和区外为含水率不断减小的非饱和带。当模拟时间达到 10d 时,小直径管线的渗流区的面积相对于大直径管线的渗流影响区域相当。并且,除了大管线的侧部渗透,其他的渗流区的形状类似一个圆形;依照含水率的不同,渗流区可以看作为底部相切的圆形形成的区域,其中,中部饱和区的直径约为 2.0m,四周非饱和区的宽度除了上部分由于顶部重力水头与基质吸力的方向相反,形成的非饱和区较大,其他的地方可以忽略。

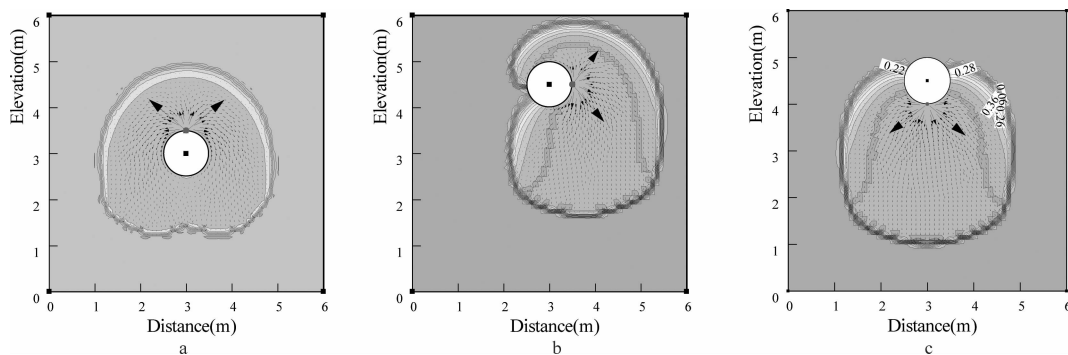


图3 大直径管线不同部位渗漏 10d 时渗流区发育规律图

Fig. 3 Large diameter pipeline leakage area seeps development in different part at 10th day

a.大直径管线上漏;b.大直径管线侧漏;c.大直径管线下漏

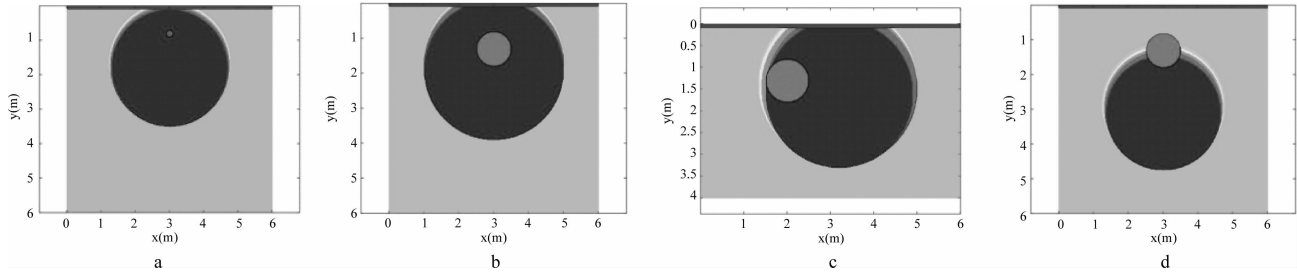


图4 管线不同部位渗漏模型图

Fig. 4 Different parts of the pipeline leakage model

a.小直径管线漏水;b.大直径管线上漏;c.大直径管线侧漏;d.大直径管线下漏

4 管线渗漏正演模拟分析

经过调查可知,我国供水管线埋深范围一般为0.7~2.0m。为了简化模型,本节结合上节得到的土体的管线渗漏规律模型,设计了管线埋深为1.0m、2.0m两种不同深度的正演模拟,得到的模拟模型如图4所示,其中黑色部分为管道,模型中管线部分设置为导磁体,管壁厚度设为0.02m,管道中间部分为有压水。

渗漏区介电常数计算采用了Topp(Topp, 1980)模型对砂土不同含水率下的砂土介电常数进行计算,其公式如式4所示:

$$\varepsilon_r = 30.3 + 9.3\theta_v + 146(\theta_v)^2 - 76.6(\theta_v)^3 \quad (4)$$

其中, ε_r 为介电常数; θ_v 为体积含水量。在介质损耗较低的土壤土中,土壤的电导率与土壤的含水量具有指数相关性($R^2 = 0.75$) (Mccutcheon等, 2012)。因此,不同含水率下的砂土的土壤电导率由相关方程计算得到,回归方程为如公式5所示:

$$\sigma = 4.504e^{8.2635\omega} \quad (5)$$

其中, σ 为土壤的表观电导率(mS/m), ω 为体积含水量。由以上各式计算得到不同含水率下的介电参数估算表(表2)。

表2 模型介电参数表

Table 2 Permittivity table of the model

含水率/%	5	10	20	30	40
介电常数	4	6	10	17	25
电导率	0.0068	0.0103	0.0235	0.0537	0.1041

4.1 不同渗漏部位的对雷达探测效果的影响

本文基于渗漏模拟结果,分别模拟了不同埋深情况下的探地雷达探测结果;模拟网络步长为 $\Delta x =$

$\Delta y = 0.025\text{m}$;天线移动的步长为0.02m;时窗#time_window选为 $t_w = 80\text{ns}$ 。为了更好的模拟探地雷达的探测效果,采用了全尺寸的模型,模型尺寸为6000mm 6000mm。选用Ricker子波,模拟中心频率分别为200MHz、400MHz、700MHz下的正演结果(如图4所示)。

由图4分析可知,当管线埋深较浅时,管线的侧部渗漏与上部渗漏很容易就已经到达地面小直径管线在渗漏10天后到达了地表,而除了大直径管线底部渗漏的情况,其他工况下的大直径管线渗漏区的顶部已经发育已经超过了地表,使地表的土体达到了饱和状态。

通过利用GprMax2D对一下几种不同工况下的管线渗漏进行正演模拟,得到的正演结果图形如图5所示。

正演模拟结果分析:

(1)通过对比不同频率下的正演结果可知:浅埋工况下,当频率不断提高后,3种频率下的分辨率不断提高。当频率增加到700MHz后,由于渗流过程的梯度积累效果,介质出现细层状的物性变化,高频电磁波可以有效地对其进行识别,进而判断渗流的程度和速度。但是由于渗漏区存在较大的电磁损耗,因此在高频情况下,探地雷达信号衰减强烈。

非饱和区域虽然在渗漏区所占的比例较小,但是非饱和区由于介质的电磁性质的连续变化也会形成连续的反射波,这对判断渗漏区的位置将会有很大的帮助。

(2)小直径管线的渗漏与大直径管线的渗漏正演对比可知:小直径管线在的渗漏区内所占的比例较小,因此当小直径管线发生渗漏后,更能够容易判定管线是否存在渗漏;而在大直径管线渗漏的情况下,由于管线面积所占的比例较大,因此探测结果与渗漏的部位会有很大的相关性。当渗漏点位于管线

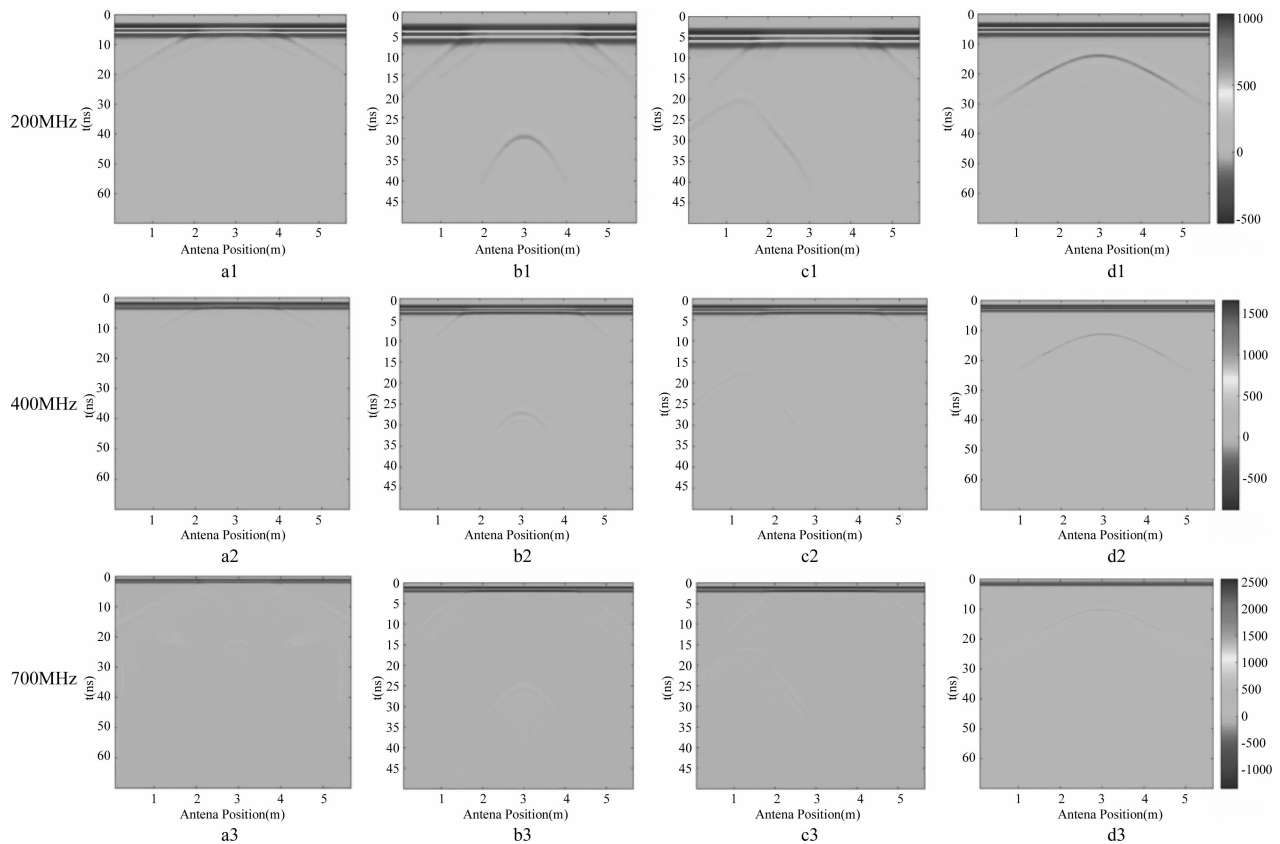


图5 管线不同部位渗漏的正演图

Fig. 5 Different parts of the pipeline leakage forward results

(1) 200MHz; (2) 400MHz; (3) 700MHz

的不同位置时,根据管线反射波到达接收器的时间与非渗漏部位的反射波时间进行对比,确定周围是否存在渗漏,如图4b与图4d两者的正演结果分析可知,上部渗漏时管线的反射波到达地表的时间大于底部渗漏。通过电磁波速差异分析,渗漏区存在的部位。

(3)通过分析反射波的双曲线形,可以分析渗漏区的范围。如大直径管线的侧漏(图4c)正演结果可知,由于管线位于渗漏区介电常数连续变化的非饱和土区域,而右边属于饱和土区。而电磁波在含水率较高的土壤中的传播速度要小于干燥条件的速率。因此,管线的双曲线反射波不是规则的双曲线型,而是在双曲线右半部分向下偏移。因此,可通过观察管线反射波的波形判断渗漏的位置。并且可以通过渗漏区上表面的反射波与管线反射波的位置差异判断渗漏的部位。此外,由于含水介质对电磁波能量的吸收,导致含水区电磁波向下传播能量减弱,成像效果变差,射线路径出现弯曲,在侧漏位置往往出现反射双曲线的缺失。

4.2 不同埋深对雷达探测效果的影响

一般自然界绝大多数土壤都是非磁化土壤,土壤的含水率越大,对应的导电率和相对介电常数越大,电磁波传播阻力就越大,能量衰减也就越大。如在损耗率高的湿黏土中,探地雷达的有效探测深度可能只有1m左右。但是在干燥的砂土中,探测深度有可能达到了十几米。因此,为了研究不同深度范围内的管线渗漏对探地雷达的探测效果,本节模拟了当管线埋深为2m时的情况下,探地雷达的探测效果。为了与上小节中的正演结果进行对比,举例了4种深理工况下的管线漏水情况,分别为:小直径管线漏水、大直径管线深埋上部漏水、大直径管线深埋侧部漏水、大直径管线深埋底部漏水,如图6所示。

根据电磁波的电损耗的规律,频率越高电损耗越大。因此,700MHz的高频探测条件下,并不适用与深埋的模型,因此在深埋情况下仅采用了200MHz与400MHz两种频率进行探测模拟。模拟正演结果图如图7所示。

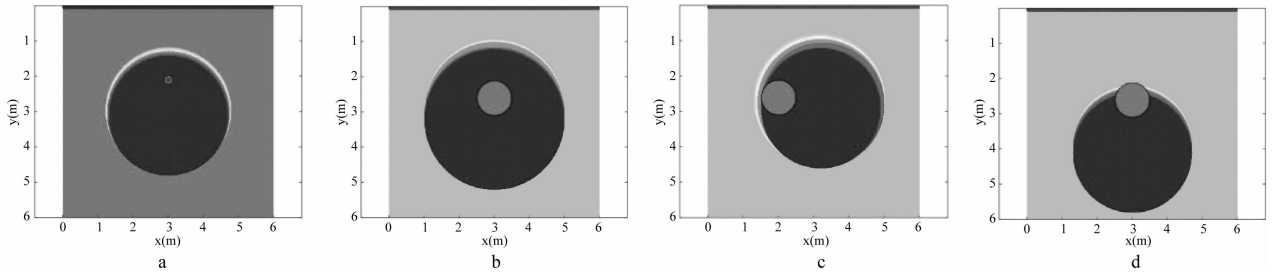


图6 深埋下不同渗漏部位管线渗漏模型

Fig. 6 Different parts of the buried pipeline leakage model

由于对比分析深埋情况下的正演结果可知：

(1)对比浅埋的正演结果可知,当管线的埋深增加时,探地雷达只能分辨含水介质和干燥土壤的边界和管线的强反射,对于渗流程度的梯度改变并不能准确刻画成像。这是由于随着管线埋深度的增加,电磁波的损耗增加,因此反射信号强度减小,在高频信号下甚至看不到回波,如图6c工况下的正演结果所示。当大管线侧部产生渗漏时,出现了小部分的双曲线形。由于左半部分属于干燥和半干燥的非饱和区,电损耗较小,因此出现了管线的反射波双曲线;而右半部分由于电损耗较大,因此并无法观察到双曲线。

(2)在深埋情况下,通过分析渗漏区反射波到达地面的时间和管线反射波到达地面的时间差对渗漏区的范围进行判断。但由于电损耗的较大,对于何种管线,何种渗漏部位的分辨能力降低了。

(3)对比大直径管线的下部渗漏工况(图6c)

的正演可知。由于上部土体依旧处于干燥状态,因此并不能判定出管道是否产生了漏水。因此,这在工程实践中是十分值得注意的问题,为了能够进一步探测管线的底部是否产生了渗漏,可进一步采用其他方法确定。

5 结论

(1)通过对管线渗漏区的发育规律进行了模拟,确定了管线渗漏区的形状,为一个类似于圆形的形状。并发现管线渗漏后的渗漏区的形状和发育规律与管线的直径与发育的时间有关。模拟结果显示,小直径管线发育形成的渗漏区很容易绕过管线。而大直径管线由于管线的阻碍而只在管线的一侧形成渗漏区,并且形状与含水量的分布与管线渗漏部位有关。

(2)以渗漏区的发育时间为10d时的渗漏区形

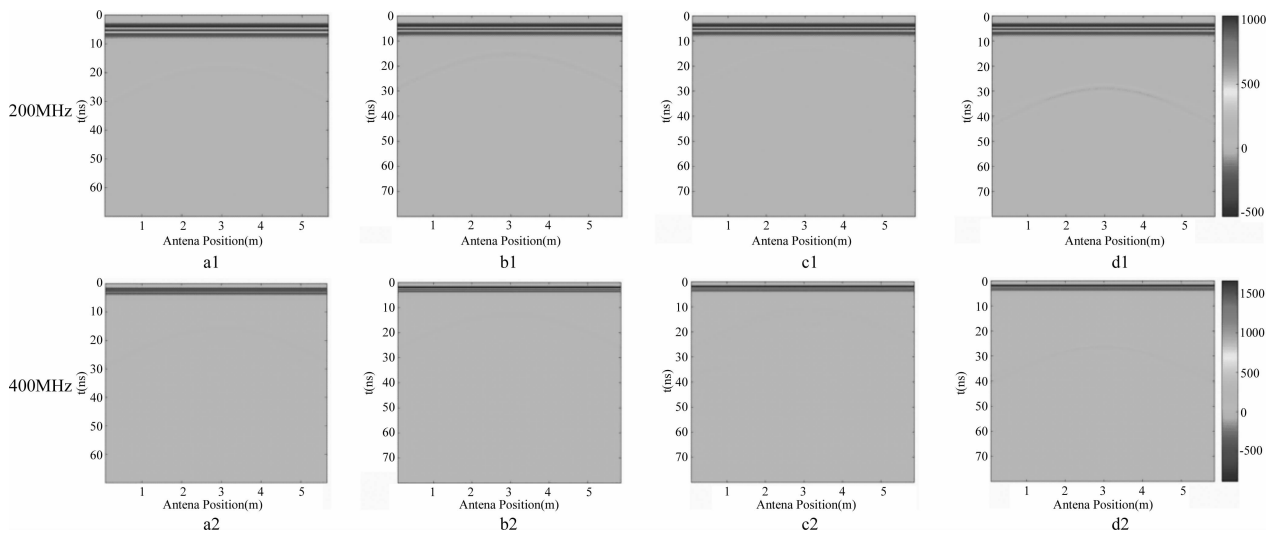


图7 不同工况下的深埋管线渗漏正演结果图

Fig. 7 Different parts of the buried pipeline leakage forward results

a.200MHz;b.400MHz

态特征为基础,采用 GPRmax2D 探地雷达正演模拟软件在 200MHz、400MHz、700MHz 的条件下进行了对实际的管线渗漏病害进行了二维数值模拟。模拟结果显示:①浅埋情况下,探测频率在 400~700MHz 之间,对不同管线位置渗漏的探测情况较好,可以通过检测点实验确定最佳的探地雷达天线频率。②随着管线埋深的增加,由于电磁波能量的衰减,应采用高频和低频探测信号结合的方式进行探测,可以最大程度的对深部渗流情况进行成像;探地雷达的探测效果与土壤的含水量密切相关,含水量越高,探测效果越差,可以通过跨频段雷达波预测土壤含水程度。③深埋情况下,由于探地雷达的分辨率降低,在对管线不同部位的渗漏探查中可以根据反射波到达地表的时间差异来判断渗漏区位置。④当管线存在底部的渗漏时,探地雷达的探测的能力与管线直径与渗漏的分布范围有关。当管线直径较大时,渗漏区可能不能越过管线,从而影响探地雷达的探测。在探地雷达的实际应用中,为避免漏探、错探的情况,应该采用正演模拟和实际探测参数实验等综合方式方法来确定底部渗漏位置和渗漏程度的存在。

参 考 文 献

Chen L D, Shi L Z, Zhu B L. 2002. Causes for Urban Sewer Damage and Repair Methods[J]. *China Municipal Engineering*, **1**: 49~51.

He L, Zhang Q B. 2012. GPR for Detecting Underground Pipelines of Foundation Diseases[J]. *JiangSu Construction*, **2**: 75~77.

Jiang L P. 2011. Reason of Damage to Urban Water Supply Pipeline and Repair Measures[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, **4**: 30~31.

Lin X J, Hong L B. 2010. Development and Applications of Urban Underground Pipelines Detection and Survey and Management Techniques[J]. *Urban Geotechnical Investigation & surveying*, **4**: 5~11.

Mccutcheon M C, Farahani H J, Stednick J D et al. 2006. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field[J]. *Biosystems Engineering*, **94**(1): 19~32.

Shen Y P, Wang Q et. 2015. Based on the electromagnetic properties to detect the disaster due to leakage in urban underground water pipe[J]. *Journal of Engineering Geology*, **23**(S): 786~787

Xiao W J, Yang B G, Zhang F Z. 2010. Study on Information System for Beijing Pipe Network[C]. 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application: 340~345.

Yee K S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag*, **14**(3): 302~307.

陈立道,施兰章,朱保罗. 2002. 城市下水道损坏原因分析与修复对策研究[J]. *中国市政工程*, **1**: 49~51.

何亮,张清波. 2012. 探地雷达探测地下管线的地基病害[J]. *江苏建筑*, **2**: 75~77.

郭立,崔喜红,陈晋. 2012. 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*, **4**: 1754~1763.

李学军,洪立波. 2010. 城市地下管线探测与管理技术的发展及应用[J]. *城市勘测*, **4**: 5~11.

沈宇鹏,王卿,何井运,等. 2015. 基于电磁波属性特征探测城市地下水管漏水病害的研究[C]. *中国吉林长春*: 786~787.

苏兆锋,陈昌彦,贾辉,等. 2014. 探地雷达探测城市地下管线周边病害的几个要点分析[J]. *办公自动化*, **S1**: 140~143.

肖文军,杨伯刚,张飞舟,等. 2010. 面向北京市城区综合管网信息系统研究[C]. *中国湖北武汉*: 340~345.

杨可,赵新生,赵钦. 2011. 探地雷达方法的原理及工作方法技术简介[J]. *西部探矿工程*, **6**: 151~152.