

# 三维探地雷达在城市市政管线渗漏探测中的应用

胡群芳<sup>1</sup>, 郑泽昊<sup>2</sup>, 刘 海<sup>3</sup>, 陈不了<sup>2</sup>

(1. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 2. 厦门大学 电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005;

3. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 以城市给排水管网基地测试管道为对象, 针对一根埋深0.6 m, 直径100 mm水管, 通过现场实验探讨三维探地雷达(GPR)探测管线渗漏的可行性。实验中在渗漏点附近沿垂直于管线方向布设了31条平行测线, 采集了C扫描雷达数据。对比渗漏前后的二维雷达剖面以及雷达数据三维偏移成像图可知, 三维探地雷达可更加有效地探测和识别地下目标几何形态, 判断由于地下水管渗漏形成的周围土壤浸润区的范围和大小, 从而确定渗漏位置。

**关键词:** 三维探地雷达; 地下管线; 渗漏特征; 漏点探测定位  
**中图分类号:** P319.3 **文献标志码:** A

## Application of 3D Ground Penetrating Radar to Leakage Detection of Urban Underground Pipes

HU Qunfang<sup>1</sup>, ZHENG Zehao<sup>2</sup>, LIU Hai<sup>3</sup>, CHEN Buliao<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200292, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

**Abstract:** Taking the test pipeline of urban water supply and drainage network base as an object, the field experiment was carried out on a buried depth 0.6 m water pipe with a diameter of 100 mm, to explore the feasibility of 3D ground-penetrating radar (GPR) in detecting pipeline leakage. Perpendicular to the pipeline, 31 parallel test lines were set around the leak-point and the C-scan GPR data were collected in the experiment. By comparing the 2D radar profile and 3D migration imaging of radar data before and after the leakage, it is found that 3D GPR can detect

and identify the geometric shape of the underground target more effectively, and determine the scope and size of the surrounding soil infiltration area caused by the leakage of underground water pipes, so as to determine the leakage location

**Key words:** 3D ground penetrating radar; underground pipeline; leakage characteristic; leak-point detection and location

地下管线作为城市重要的生命线工程, 在城市给排水方面发挥着重要的作用。随着我国经济发展和城市规模扩大, 给排水管线的铺设总长度逐年增加。根据国家统计局统计, 近15年来我国供水管道长度增长了120%, 排水管道长度增长了187%。与此同时, 由于管线老化、不规范施工、超负荷供水等诸多原因, 地下管线的渗漏问题日益严重。一方面, 供水管的渗漏会造成严重的水资源浪费。据统计, 我国供水管道漏失率超过20%, 每年漏失量超过100亿立方米, 远远超过发达国家平均水平<sup>[1]</sup>。另一方面, 排水管道中工业废水和生活污水的渗漏还会造成环境污染。由于排水管道的渗漏, 全国295个地级以上城市中, 有216个存在黑臭水体。此外, 一旦带压地下管线发生爆管, 则极易在渗漏处形成地下空洞, 进而发生路面塌陷和地基下沉等事故<sup>[2]</sup>。据不完全统计, 仅2018年我国就发生了上百起道路塌陷事件, 严重影响了城市的出行安全。因此, 对地下供排水管道渗漏点进行快速准确的探测和定位, 为管线维护和修复工作提供准确信息, 可有效降低经济损失, 避免人员伤亡。

目前, 检测管线渗漏的常规方法有音听检漏法、

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802400); 国家自然科学基金(51878510, 41874120)

第一作者: 胡群芳(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市市政运行安全与防灾。

E-mail: huqunf@tongji.edu.cn

通信作者: 刘 海(1986—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为无损检测技术与智能监测技术。

E-mail: hliu@gzhu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

相关测漏法、管道内窥法、红外检测法、声呐检测法、时域反射法、电阻率层析成像法、流量计法、压强法等。其中,音听检漏法是使用音听设备检测管线漏声来进行渗漏点定位的一种方法,包括阀栓听音法和地面听音法,分别用于漏点的预定位和精确定位,其缺点是极易受到外界环境噪音的干扰<sup>[3]</sup>。相关测漏法是使用相关仪(leak noise correlator, LNC)进行渗漏检测的方法,需要将两个传感器分别放在同一管线的两个相隔有限距离的暴露点上。这种方法适用于环境噪声大、管线埋设深的区域,可以快速测出地下管道漏水点的位置,但是需要在渗漏点两侧的适当距离处有竖井,因此该项技术有较大的局限性<sup>[4]</sup>。管道内窥法(CCTV)是使用带有高清镜头的机器人在管道内爬行,通过实时传回的图像来检测渗漏点。这种方法一般适用于管径较大的管线,且需要在探测前先将管线待测段的水排除,大大增加了探测成本<sup>[4]</sup>。红外检测法是利用红外摄像机检测由于渗漏导致的温度差异来识别渗漏区域,其缺点是容易受到其他热源的干扰<sup>[5]</sup>。声呐检测法是将声呐传感器置于管道内,进而测算管道的断面尺寸、形状,以及检测管内沉积物和凝结物等,可以识别大于3 mm的开放型裂隙。这种方法的缺点是声呐传感器需要通过线缆与位于地面的声呐处理系统相连,这就要求待测区域要有检修井,此外检测范围也会受到线缆长度的限制<sup>[6]</sup>。时域反射法(time domain reflectometry, TDR)是指将电磁探针插入介质中,通过测量反射系数进而判断渗漏情况的方法。这种方法的缺点是当渗漏时间较长,水扩散区域较大时,其精度会降低<sup>[7]</sup>。电阻率层析成像法(electrical resistivity tomography, ERT)是利用电极阵列采集的电阻率数据重建二维或三维电阻率分布图的方法,可以较好区分电导率增大的区域(渗漏区域),但是分辨率较低,且需要将电极插入土壤中进行测量,在城市环境中难以适用<sup>[7]</sup>。流量计法是使用基于霍尔效应的液体流量传感器检测水管的流量,当流量低于标准值时,则可以说明此处测量点附近有渗漏发生。这种方法的缺点是流量计需要接触管线才能工作,此外该方法只有在管线中的水处于流动状态时才能使用,因此具有一定局限性<sup>[8]</sup>。压强法是根据一段管线两点间的压强差来检测渗漏,这种方法的缺点是只能判定渗漏管段,不能精准定位渗漏点<sup>[9]</sup>。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是一种新型的无损探测方法,其原理是在地表用天线向

地下发射超宽带脉冲电磁波,通过接收来自地下目标的反射回波,来实现对地下目标的探测和成像<sup>[10]</sup>。探地雷达具有快速、无损、不易受到干扰等优点,被广泛地应用于土木工程检测和深空探测中<sup>[11-17]</sup>。目前,已经有多位学者对探地雷达探测渗漏管线问题进行研究。其中,Lai等<sup>[18]</sup>在实验室利用不同频率的探地雷达天线探测了渗漏金属管和塑料管,并合成三维数据进行了研究。Demirci等<sup>[19]</sup>选择平行于管线的测线对渗漏塑料管进行了探测,用反投影法重建了雷达图像并总结了渗漏区域的特征。Crocco等<sup>[20]</sup>利用层析成像反演方法研究了管线渗漏早期的雷达图像。总结现有研究,大多只采集了一条测线或几条稀疏的测线,无法合成三维图像,也没有对雷达数据进行偏移处理。为此,本文在前人研究的基础上,使用偏移和三维数据合成等方法,结合现场模拟实验,验证三维探地雷达在地下水管渗漏探测和漏点精准定位方面的潜在优势。

## 1 探地雷达

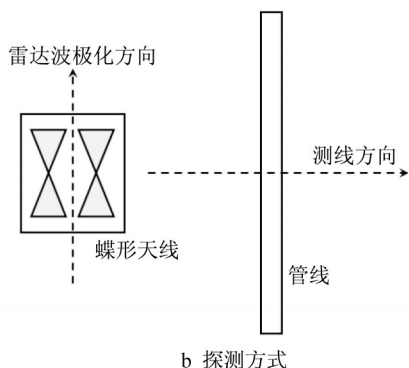
### 1.1 基本原理

探地雷达系统一般由主机、天线和显示器组成,其中,天线为其最重要的组成部分,一般包括发射天线(Tx)和接收天线(Rx)<sup>[21]</sup>。本文使用的是收发一体的屏蔽商业探地雷达,如图1a所示。发射天线将高频电磁波以宽频带短脉冲形式(脉宽约5 ns)辐射到地下,经地下目标体或不同电磁性质的介质分界面反射后返回地面,被屏蔽盒内另一接收天线所接收,而其余电磁能量则穿过界面继续向下传播,在更深的界面上继续反射和折射,直至电磁能量被地下介质全部吸收。电磁波在介质中传播特性由地下界面上下介质的电性差异(主要包括介电常数和电导率)决定。上下介质的介电常数差异越大,反射波越强。常用的探地雷达扫描方式为横向扫描(B扫描),雷达天线沿指定测线移动时,由测距轮或测线盒上的编码器记录雷达移动的距离,并每隔一段距离触发雷达主机记录一道反射信号,一条测线上各测点所采集的波形通过堆积,以伪彩色或灰度图的形式显示,称为雷达剖面。通过分析雷达剖面中反射信号的振幅、相位、双程走时和频率等,可以对地下目标进行定位,分析其几何形态和物理性质。

本文主要研究管线渗漏的雷达图像特征。一般情况下,地下管线发生渗漏后,对于地下水位以上的埋管地层,渗漏点周围土壤的含水量会发生变化。



a 探地雷达天线



b 探测方式

图1 探地雷达天线及其探测方式

Fig.1 GPR antenna and detection mode

而土壤的介电常数随其体积含水量的增加而增大,可以用Topp经验公式<sup>[22]</sup>近似表达为

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3 \quad (1)$$

式中: $\epsilon_r$ 为相对介电常数; $\theta_v$ 为体积含水量。当地下水管发生渗漏时,其周围土壤的介电常数会增大。渗漏区与非渗漏区土壤就会出现介电差异,从而增强雷达波反射信号。

土壤中的雷达波速 $v(\text{m}\cdot\text{ns}^{-1})$ 与相对介电常数 $\epsilon_r$ 的算术平方根成反比,可近似表达为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中: $c$ 为真空中的光速,约 $0.3\text{ m}\cdot\text{ns}^{-1}$ 。

因邻近管道发生渗漏后,直接导致管道周边土壤的介电常数增大,从而引起渗漏区土壤中的雷达波速减小,则相应目标物对应的双程走时就会增加。

## 1.2 探测方法

由于探地雷达天线一般选用偶极子天线或蝶形天线,其辐射的电磁波以线性极化为主,极化方向沿偶极子长轴方向。当探地雷达用于地下细长线性目标探测时,若天线极化方向与线性目标走向垂直,理论上反射信号强度为零<sup>[23-24]</sup>。因此,在实际测量中,天线极化方向应当与地下管线走向平行以增强反射信号,如图1b所示。

当地下管道的直径相对电磁波在地下介质中的波长较短时,在二维剖面中可视为一个点目标,在雷达剖面中其呈现双曲线的反射信号特征,如图2所示。反射信号的双程走时 $t$ 与天线水平位置 $x$ 之间满足如下关系:

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4z^2 + x^2} \quad (3)$$

式中: $z$ 为管线顶部的埋深,m。

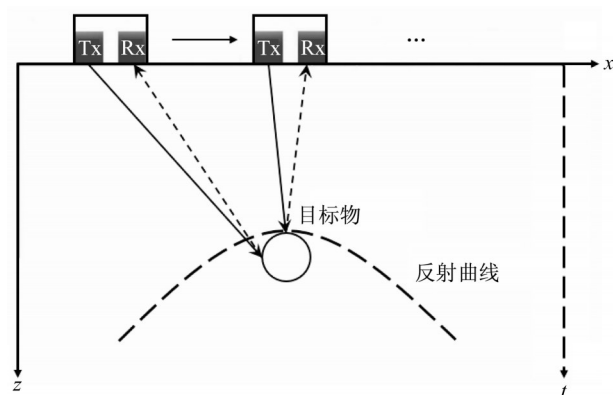


图2 探地雷达探测地下管线示意图

Fig.2 Schematic diagram of GPR detecting underground pipe

三维雷达数据一般需通过C扫描方式获取,即利用二维雷达B扫描方式,设定相邻测线的间距小于最小波长的四分之一,然后采集一系列测线相互平行的二维剖面,并将这些二维数据组合成三维数据<sup>[25]</sup>。最常见的三维数据展示方法是切片法,即对得到的三维数据取水平切片或竖直切片,切片中同样以灰度值显示反射波幅度,以便于目标物的辨识。

## 1.3 偏移成像

管线在二维雷达图像中显示为双曲线,这是由雷达波的散射导致的。为了使散射波收敛以及让倾斜反射归位到它真正的地下界面位置,本文使用基尔霍夫偏移处理雷达数据。基尔霍夫偏移又分为二维和三维两种情况,分别适用于二维雷达剖面图和三维雷达数据。在三维条件下,雷达波在媒质中的传播可用波动方程表示,其远场条件下的解为<sup>[26-27]</sup>

$$P_{\text{out}}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\Delta x \Delta y}{4\pi} \sum_A \frac{\cos \theta}{vr} \frac{\partial}{\partial t} P_{\text{in}}(x, y, t) \quad (4)$$

式中: $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 分别为沿着测线和垂直于测线两个方向的相邻间距; $A$ 为雷达孔径平面的面积; $\theta$ 为雷达波传播方向与竖直方向夹角; $r = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{1/2}$ ;  $t = r/v$ ;  $P_{\text{out}}$ 为点 $(x_0, y_0, z_0)$ 处的雷达波幅度;  $P_{\text{in}}$ 为 $z=0$ 处的雷达波幅度。



## 2 现场模拟实验

### 2.1 场地介绍

为了研究渗漏前后雷达图像的区别,在上海市某试验测试基地开展了地下水管渗漏的探测实验。实验场地埋设了一根埋深0.6 m,直径100 mm的球墨铸铁水管,管道内供水具有稳定的压力约220 kPa。该场地表面铺设约0.25 m厚混凝土路面层,其中埋有一根电缆线,混凝土层下方是约0.25 m厚填土层,再往下是砂土层。目标管线位于砂土层中,且位于地下水位(距地面0.8 m)以上,如图3所示。

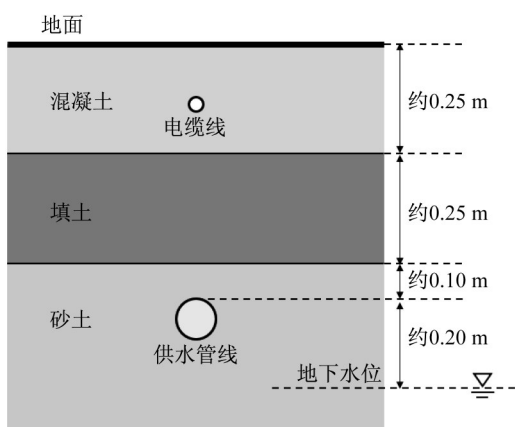


图3 场地地层剖面图

Fig.3 Site stratigraphic profile

待测目标管线穿过一个竖井,在竖井内有一个阀门。阀门打开后管线上会设置一个模拟破损点,管线内有压水会形成渗漏,并逐渐充满整个竖井。在此过程中,由于水的渗透作用,竖井周围土壤的含水量会逐渐增大。竖井内管线的正常状态和渗漏状态现场如图4所示。

现场实验时,先在阀门正常状态下采集雷达数据,然后打开阀门,等待约30 min后关闭阀门,此时竖井中水面已淹没管线,再使用同样参数进行测量,得到渗漏后的雷达数据。

### 2.2 测线和雷达参数设置

本文采用垂直于管线的测线,共31条,每条测线的长度为2.7 m,道间距10 mm,相邻两条测线的间距为100 mm,形成了一个3.0 m×2.7 m的测点网络,方形竖井则位于测量区域的中心,测线分布如图5a所示。

考虑到探测深度和分辨率两方面需求,本文选用中心频率为200 MHz的天线,时窗和采样点数分别设置为60 ns和512个。现场探测实验的照片如图



a 正常状态



b 渗漏状态

图4 竖井内阀门的工作状态

Fig.4 Working status of valves in shaft

5b所示,该图中天线位于经过竖井正上方测线上,采用天线右侧测距轮触发雷达发射机采集数据。

### 2.3 数据处理方法

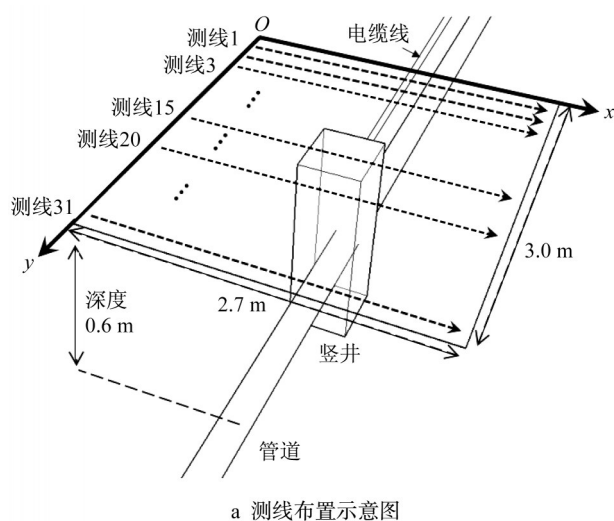
为了提高信噪比和增强地下目标信号的辨识度,通常需要对原始的雷达图像进行处理。本文主要对原始雷达图像进行了零时校正、去背景、增益、带通滤波和偏移处理。每个步骤的详细流程如下:

(1)零时校正。零时校正的目的是修正雷达系统时延,使得地面反射信号基本处在零时刻的位置。

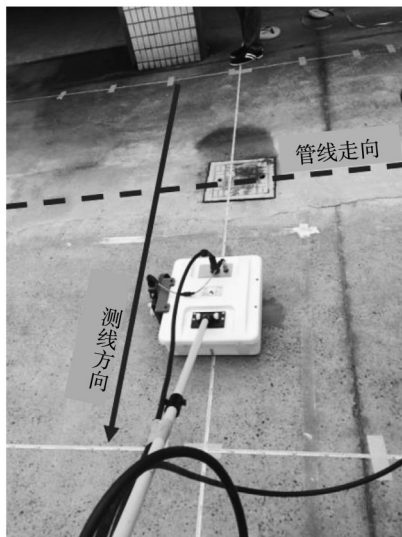
(2)去背景。采用减平均道的方式去除雷达剖面中水平背景信号,即对雷达剖面图中所有道数据取平均,再从每道数据中减去。

(3)增益。为了补偿电磁波在扩散和传播过程中能量损失,更加清晰地显示深处的目标信号,研究使用线性增益和指数增益处理雷达数据。其中,线性增益是为了补偿波前扩散导致的雷达波幅值衰减,指数增益是为了补偿雷达波在有耗介质中的衰减。

(4)带通滤波。使用通带为100~500 MHz的带



a 测线布置示意图



b 实验照片

图5 实验现场情况

Fig.5 Experiment field conditions

通滤波器进行滤波,以抑制雷达图像中的低频和高频噪声。

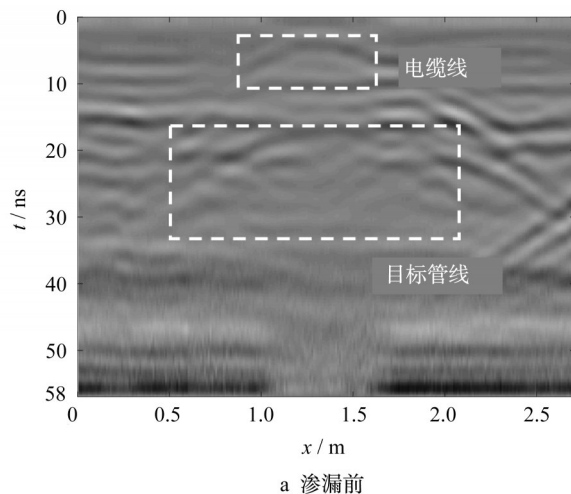
(5)偏移处理。分别使用二维偏移和三维偏移进行数据处理。二维偏移的处理对象是单个二维剖面图,三维偏移的处理对象则是整个三维雷达数据。偏移速度取  $0.08 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,即地下介质中雷达波速的估计值。

### 3 实验结果

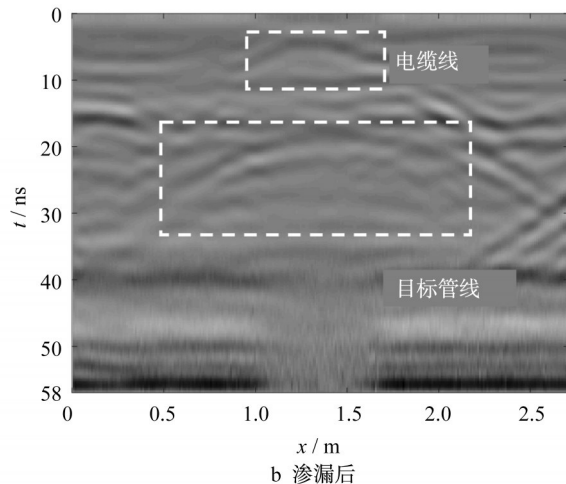
#### 3.1 偏移前的二维雷达剖面

本文选取了3条具有代表性的测线对管线渗漏的雷达图像特征进行解释,它们分别为测线3(离渗漏位置较远)、测线15(位于渗漏正中央,竖井正上方),测线20(离渗漏位置很近,而不在竖井正上方)。

这3条测线的位置已在图5a中标出。所选3条测线的二维剖面图数据如图6~8所示。图6~8中,a图、b图分别为探测区域管道渗漏前后的雷达原始数据,并经零时校正、去背景、增益处理和带通滤波后的雷达图像。



a 渗漏前



b 渗漏后

图6 测线3的原始雷达图像

Fig.6 Original radar image of No.3 survey line

第3条测线的雷达图像如图6所示。由于离渗漏中心较远,渗漏前后土壤含水量无明显变化,因此,渗漏前和渗漏后目标管线的双曲线基本保持相同的形态,基本可以判定该处无明显渗漏情况。需要注意的是,两幅雷达图像中均可以看到上下两条双曲线,分别是一条埋深较浅的电缆线和埋深在0.6 m处的目标水管。

第15条测线的雷达图像如图7所示。由于位于竖井正上方,可以明显看到中间区域有强烈的井盖反射信号,对雷达图像的辨识产生了严重的干扰,基本无法分辨目标管线。渗漏后,在井盖反射信号两侧30~60 ns 范围内出现了一些多次震荡的双曲线

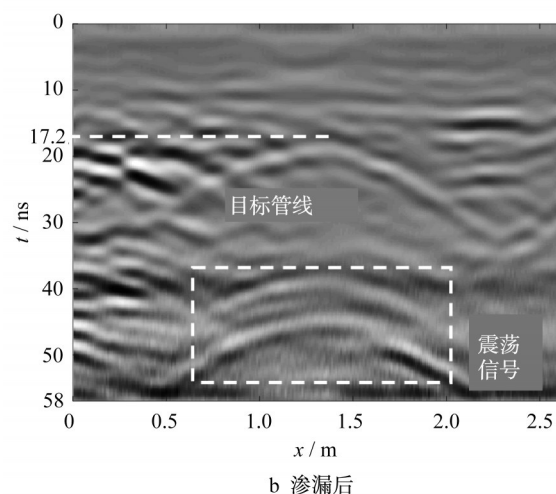
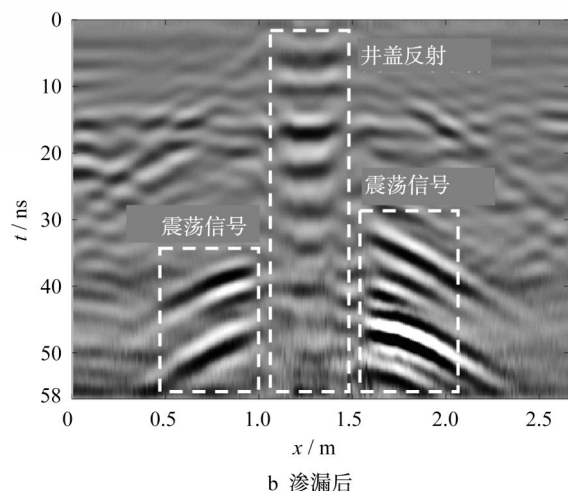
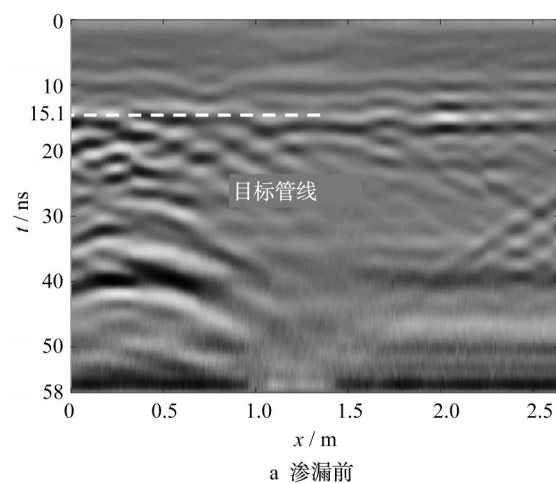
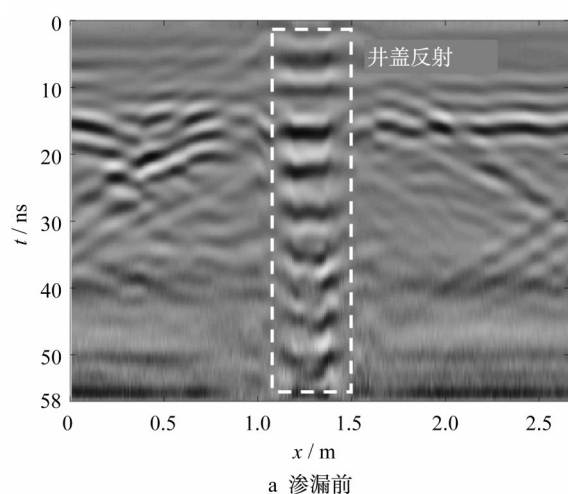


图7 测线15的原始雷达图像

Fig.7 Original radar profile of No.15 survey line

图8 测线20的原始雷达图像

Fig.8 Original radar profile of No. 20 survey line

反射,可以肯定这些反射信号是由于渗漏造成的。此外可以明显看出,竖井右侧的震荡信号更多,强度更大,推测是由于右侧的渗漏量更大造成的。这些震荡信号是入射电磁波绕管道一周后返回地表被接收天线所接收,亦称为爬行波(creeping wave)。

第20条测线的雷达图像如图8所示。由于离渗漏发生位置很近,渗漏发生后土壤含水量很高,又由于该测线不在井盖正上方,从而避免了井盖的影响,因此这是分析渗漏对管线图像影响的最佳测线。由于发生了渗漏,土壤含水量的增大导致其介电常数增大,雷达回波在其中的传播速度变慢,在图像中表现为目标管线对应的双曲线下移(双曲线顶点由15.1 ns下降至17.2 ns)。同时,可以看到渗漏后在目标管线以下又出现了震荡信号,其原因与测线15类似。

### 3.2 偏移后的二维雷达剖面

上面的二维剖面图数据未做偏移处理,所以由

于散射效应,管线在雷达图像中都呈现为双曲线。对上面的数据进行二维偏移处理,之后再做时间-深度转换。处理后第20条测线的剖面图如图9所示。

图9a是渗漏前的偏移结果,金属水管的绕射双曲线得到了很好的聚焦,深度约为0.6 m,与实际埋深吻合。图9b是渗漏后的偏移结果。与图9a对比可以看出,金属水管的反射能量增强,这是由于渗漏后土壤的介电常数较大,因而雷达波反射更强。同时可以看出,渗漏后金属管的图像稍向下移动,这是由于水管上方有部分土壤被浸湿,含水量增大导致雷达波速减小所致。在1.5~2.0 m深度处出现了不规则的反射信号,根据之前对偏移前雷达二维剖面图的分析,这些是入射电磁波绕管道旅行一周或数周后的爬行波震荡信号的偏移结果。

### 3.3 三维雷达图像的合成

以上只是针对3条特定位置测线进行分析,讨论了管线渗漏的雷达图像特征。利用采集到的31



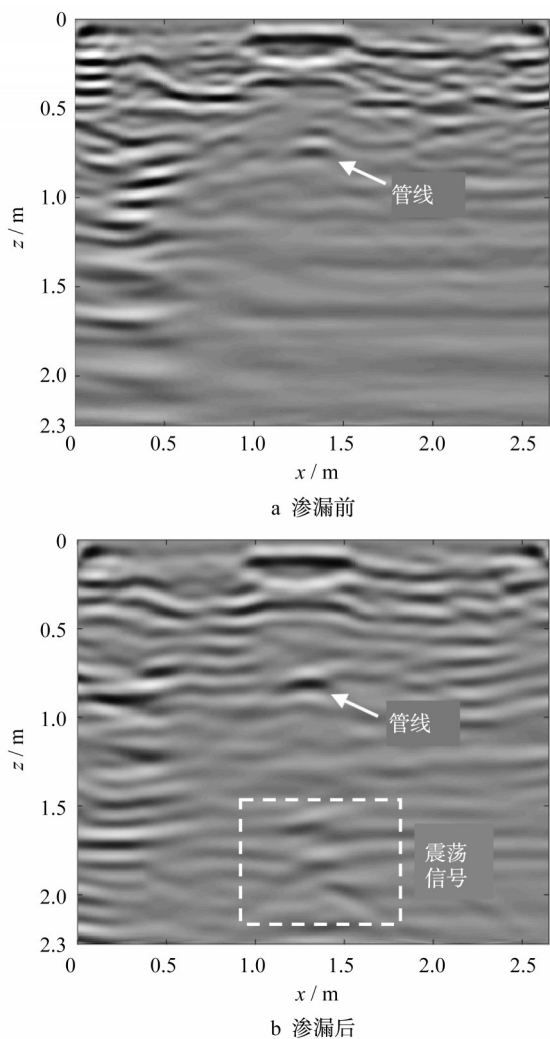


图9 偏移后的雷达剖面

Fig.9 Radar profile after migration

条测线数据,经过零时校正、去背景、增益、带通滤波处理后,合成三维数据,再做三维偏移处理,得到三维雷达图像。最后,取3个方向的切片观察图像特征。

### 3.3.1 $y$ 方向切片

平行管线走向的 $y$ 方向切片如图10所示,渗漏前后各取3个切片,以观察不同位置的特征。渗漏前,在位于中间的切片中可以看到浅层电缆线和目标管线,同时还能看到金属井盖的强烈反射。而位于两边的切片中则没有明显的目标物。渗漏之后,由于井盖反射的影响,中间的切片中并未与渗漏前出现明显差异,但是此时在两边切片的底部(约1.5 m深处)可以看到明显的反射,与渗漏前的切片呈现出明显不同。按照之前的分析,该反射对应于渗漏后出现的震荡信号。

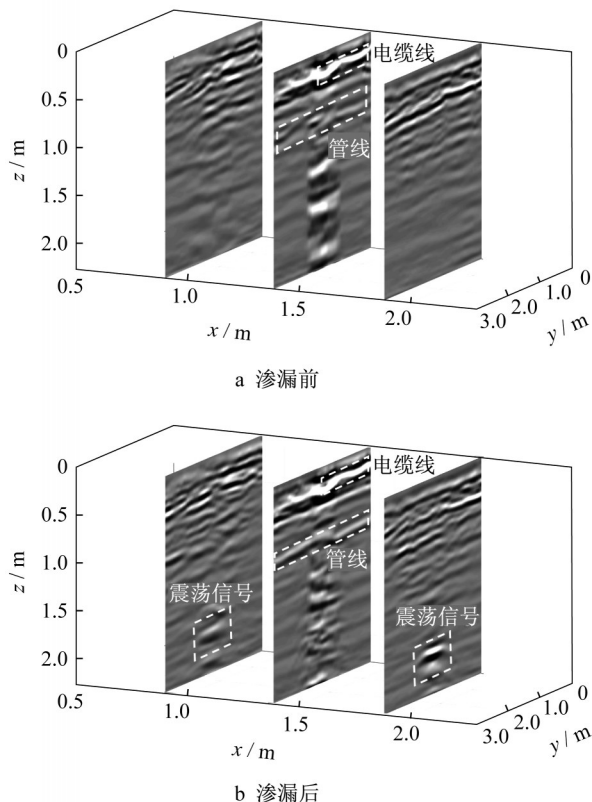


图10 平行管线走向方向的切片

Fig.10 Slices parallel to the pipeline

### 3.3.2 $x$ 方向切片

垂直管线走向的 $x$ 方向切片如图11所示。由于管线轴线沿 $y$ 方向,因此在所有切片中都能看到目标管线,并且由于此时做过了偏移处理,管线的双曲线反射得到了很好的收敛,使得目标的几何形状解译成为可能。同时,渗漏后可以在中间两个切片中看到不规则的反射,这些同样是由于爬行波震荡信号引起。

### 3.3.3 水平切片

由于地下介质的不均匀性,处于同一深度但是水平位置不同的目标物,其反射波的双程走时可能有微小差异。因此,在取水平切片时,若取单个切片进行分析,则可能看不到反射能量较弱的目标物。所以在取水平切片时,先对所有道数据取包络,然后对目标深度上下各20个采样点(约2.34 ns)的数据求和,再取平均值,作为该深度的信号值,以此方法得到3个不同深度的切片。使用这种方法可以更容易地看到反射较弱的目标物。

渗漏前后的三维水平切片如图12所示。第1个切片的深度约0.20 m,在此切片中可以看到一段电缆线。可以看出该电缆线仅在 $y < 1.3$  m的区域出现,而之前展示的几条测线中,只有测线3位于这一

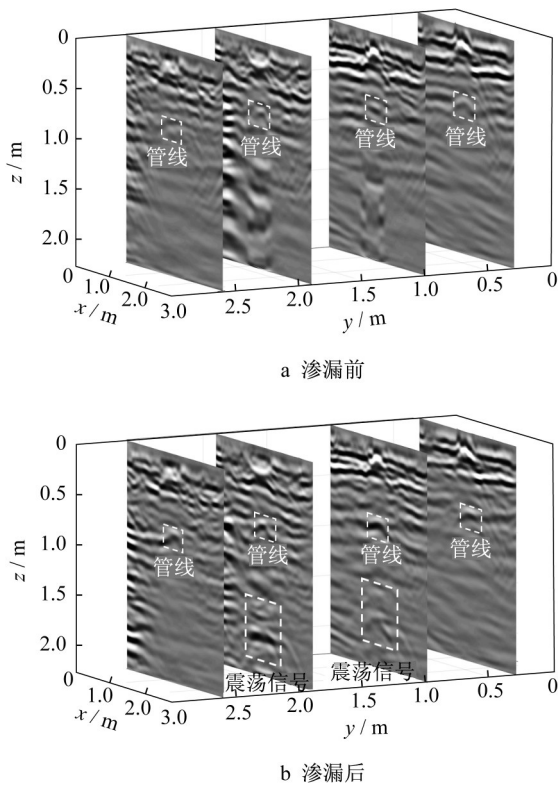


图11 垂直管线走向的切片

Fig.11 Slices vertical to the direction of pipeline

区域,也只有测线3中出现了这个电缆线,这从另一个角度说明了三维图像和二维图像是对应的。第2个切片的深度约0.75 m,此切片中可以看到管线,管线的方向平行于y轴。第3个切片的深度约为1.80 m,渗漏后可在切片中看到强烈的散射,如图中虚线框内所示。由于这些反射在渗漏后才出现,可以断定它们来自于爬行波震荡信号。根据震荡信号所在的区域,可以估计浸润区(渗漏水扩散所至的区域)在水平方向的范围。但是震荡信号并不反映实际深度,因此为了估计浸润区在竖直方向的范围,需要结合测量数据进一步计算。根据图8,渗漏后管线对应的双曲线顶点的双程走时由 $t_1=15.1$  ns下降至 $t_2=17.2$  ns。由时域反射计(TDR)估计渗漏前后地下介质中的雷达波速分别为 $v_1=0.08$  m·ns<sup>-1</sup>和 $v_2=0.06$  m·ns<sup>-1</sup>。假定渗漏后浸润区顶部距管线的距离为 $\Delta h$ ,则

$$\frac{\Delta h}{v_2} - \frac{\Delta h}{v_1} = \frac{t_2 - t_1}{2} \quad (5)$$

由式(5)可解得 $\Delta h=0.254$  m。通过这种方法可以确定浸润区上界。由于管线底部较为接近地下水位,因此可以认为浸润区底部与地下水位相接。

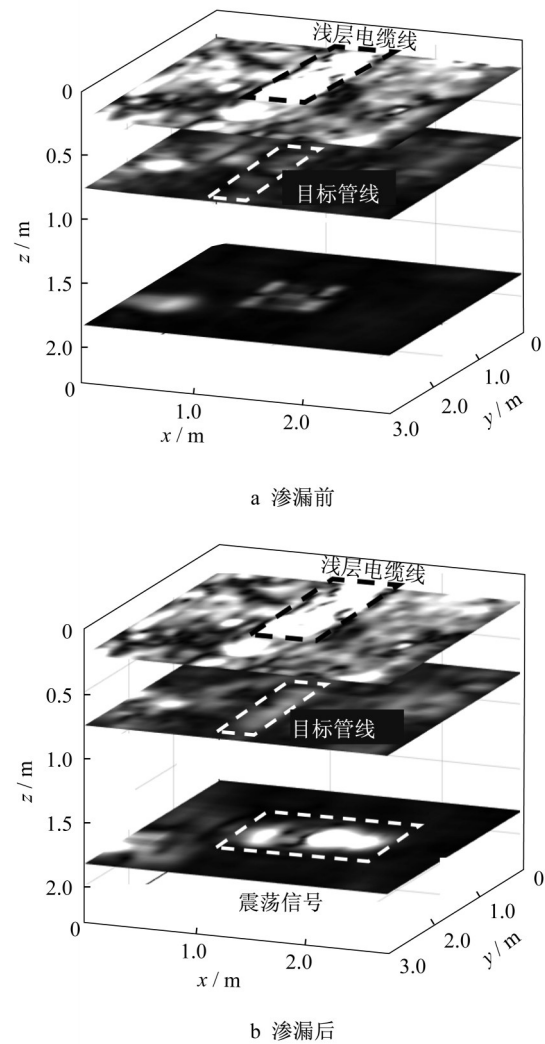


图12 偏移后的水平切片

Fig.12 Horizontal slices after migration

### 3.3.4 目标物三维显示

为了更加直观地显示目标物的实际尺寸和位置,在每个切片中用不同颜色手动标记出目标物,然后再组合成立体图形,就得到了各个目标物的三维显示。

渗漏前后的目标物三维显示图如图13所示。在渗漏前后的图形中均可看到电缆线和目标管线,其位置已在图中标出。其中电缆线深度较浅,且长度较短,这与z方向切片图对应。

渗漏之后在目标管线的下方可见到立体显示的浸润区,其位置已在图13b中标注。可以根据三维图形估计浸润区的尺寸和位置,其在x方向介于1.0~2.2 m,y方向介于1.0~2.0 m,z方向介于0.39~0.90 m。而渗漏点可以近似认为处在浸润区的中心,即(x,y,z)坐标位于(1.6,1.5,0.65)位置,这一区域位于管线上的阀门(渗漏点)附近。



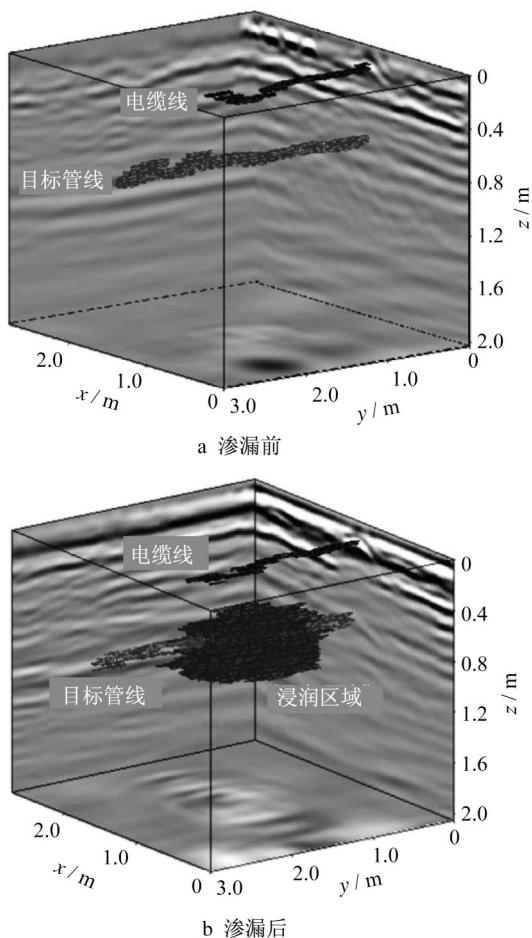


图13 主要目标物的三维显示

Fig.13 3D view of main objects

## 4 结论

本文利用探地雷达探测了地下管线正常和渗漏两种不同状态下的反射信号,并总结出渗漏前后雷达图像的差异。当渗漏发生时,由于介质含水量增加导致雷达波速减小,在二维雷达剖面图上可以看到管线稍向下移动。同时,由于渗漏后地下分层两侧介质的介电常数差异比渗漏前更明显,分界面的反射增强,在管线下方还会出现一些多次震荡反射信号。利用二维雷达剖面图合成三维雷达数据后,可以更直观地看到渗漏发生的区域,并能够估计浸润区的分布范围和渗漏中心的位置。

本文通过实例说明,三维探地雷达技术可以准确判断供排水管线发生渗漏的位置,并可以估计渗漏区域的大小。需要指出的是,本文实验中的目标水管位于地下水位以上,因此渗漏区的雷达图像特征十分明显。如果管线位于地下水位以下,考虑到地下管线周边土层含水量已经饱和,因此,探地雷达

可能无法准确探明渗漏区,需要研究其他方法来进行更为有效的探测。

## 参考文献:

- [1] 贾亚杰. 供水管道漏点检测技术优化开发研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.  
JIA Yajie. Optimization research and development pipeline leak location technology of water supply project [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [2] LIU Zheng, KLEINER Y. State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes [J]. Measurement, 2013, 46(1):1.
- [3] GAO Y, BRENNAN M J, JOSEPH P F, *et al.* On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes [J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 283(3):927.
- [4] HAO T, ROGERS C D F, METJE N, *et al.* Condition assessment of the buried utility service infrastructure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28:331.
- [5] ATEF A, ZAYED T, HAWARI A, *et al.* Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks [J]. Automation in Construction, 2016, 61:162.
- [6] MORIOT J, MAXIT L, GUYADER J L, *et al.* Experimental results of passive vibro-acoustic leak detection in SFR steam generator mock-up [C]// International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods & Their Applications. Marseille: IEEE, 2014:1-6.
- [7] CATALDO A, PERSICO R, LEUCCI G, *et al.* Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: a comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes [J]. NDT & E International, 2014, 62:14.
- [8] RAHMAT R F, SATRIA I S, SIREGAR B, *et al.* Water pipeline monitoring and leak detection using flow liquid meter sensor [C]// 3rd IAES International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI). Semarang: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, 2017(190):1-6.
- [9] ABDULSHAHEED A, MUSTAPHA F, GHAVAMIAN A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69:902.
- [10] JOL H. Ground penetrating radar: theory and applications [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2009.
- [11] LIU H, SATO M. In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array [J]. NDT & E International, 2014, 64:65.
- [12] LIU Hai, DENG Zhihao, HAN Feng, *et al.* Time-frequency analysis of air-coupled GPR data for identification of

- delamination between pavement layers [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154:1207.
- [13] METJE N, ATKINS P R, BRENNAN M J, *et al.* Mapping the underworld - state-of-the-art review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(5):568.
- [14] 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.  
LIU Lanbo, QIAN Rongyi. Ground penetrating radar: a critical tool in near-surface geophysics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8):2606.
- [15] 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.  
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.
- [16] 赵永辉,谢雄耀,王承.地下管线雷达探测图像处理及解释系统[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(9):1253.  
ZHAO Yonghui, XIE Xiongyao, WANG Cheng. Study on ground penetrating radar image processing and interpretation system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005,33(9):1253.
- [17] 王洪华,龚俊波,王敏玲,等.三维探地雷达技术在道路塌陷空洞探测中的应用[J].CT理论与应用研究,2018,27(5):609.  
WANG Honghua, GONG Junbo, WANG Minling, *et al.* The application of three dimensional ground penetrating radar for detecting road collapse [J]. CT Theory and Applications, 2018, 27(5):609.
- [18] LAI W W L, CHANG R K W, SHAM J F C, *et al.* Perturbation mapping of water leak in buried water pipes via laboratory validation experiments with high-frequency ground penetrating radar (GPR) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 52:157.
- [19] DEMIRCI S, YIGIT E, ESKIDEMIR I H, *et al.* Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method [J]. NDT&E International, 2012, 47:35.
- [20] CROCCO L, PRISCO G, SOLDVIERI F, *et al.* Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(4):270.
- [21] LIU Hai, XING Bangan, ZHU Jinfeng, *et al.* Quantitative stability analysis of ground penetrating radar systems [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4):522.
- [22] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574.
- [23] LIU Hai, ZHAO Jianguo, SATO M. A hybrid dual-polarization GPR system for detection of linear objects [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14:317.
- [24] LIU Hai, HUANG Xiaoyun, HAN Feng, *et al.* Hybrid polarimetric GPR calibration and elongated object orientation estimation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(7):2080.
- [25] GRASMUECK M, WEGER R, HORSTMAYER H. Full-resolution 3D GPR imaging [J]. Geophysics, 2005, 70(1): K12.
- [26] YILMAZ O. Seismic data processing [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [27] FENG X, SATO M, LIU C, *et al.* Profiling the rough surface by migration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2):258.