

探地雷达探测地下管线机理研究及实例分析

刘 斌¹, 李文峰², 李术才¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中铁三局集团中铁工投资管理有限公司, 北京 100101)

摘 要: 探地雷达是一种适应快速、准确探测地下障碍物而迅速发展的新型电磁仪器。探讨了探地雷达探测地下管线的机理, 得出了走时曲线方程, 并通过对探测实例详细地分析亦探讨了复杂条件下探地雷达资料采集和图像解释的方法, 介绍了一维滤波、偏移回归、时深转换等数据处理方法和经验, 验证了该方法的可行性, 表明该技术具有良好地应用前景。

关 键 词: 探地雷达; 地下管线探测; 机理; 数据处理

中图分类号: TV 554

文献标识码: A

Research on mechanism of underground pipeline detection with ground penetrating radar and analysis of example

LIU bin¹, LI Wen-feng², LI Shu-cai¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. The Third Engineering Group of China Railing Investment Management Co. Ltd, Beijing 100101, China)

Abstract: Ground penetrating radar(GPR), a new electromagnetic instrument, has been quickly developed to meet the requirement for fast probing underground obstacle, precisely. The mechanism of underground pipeline detection with ground penetrating radar is studied; and equation of the curve is deduced. By the detailed analysis of example, the method to collect radar data and interpret the radar profile under complicated condition is studied; the processing method and experience such as one-dimensional filtration, migration processing and time-depth conversion are introduced; and it is proved that the method is feasible and it has good foreground, in application.

Key words: ground penetrating radar; underground pipeline detection; mechanism; data processing

1 前 言

探地雷达 (ground penetrating radar, 简称 GPR) 是利用频率介于 $10^6 \sim 10^9$ Hz 的无线电波来确定地下介质的一种地球物理探测仪器。随着微电子技术和信号处理技术的不断发展, 探地雷达技术被广泛应用于工程地质勘察、建筑结构调查、公路工程质量检测、地下管线探测等众多领域。本文在地下管线探测实例的基础上探讨探地雷达探测管线的机理, 并总结相关的经验^[1~5]。

2 探地雷达工作原理

探地雷达的基本原理如图 1 所示。发射天线将高频短脉冲电磁波定向送入地下, 电磁波在传播过

程中遇到存在电性差异的地层或目标体就会发生反射和透射, 接收天线收到反射波信号并将其数字化, 然后由电脑以反射波波形的形式记录下来。对所采集的数据进行相应地处理后, 可根据反射波的旅行时间、幅度和波形, 判断地下目标体的空间位置、结构及其分布。探地雷达是在对反射波形特性分析的基础上来判断地下目标体的, 所以其探测效果主要取决于地下目标体与周围介质的电性差异、电磁波的衰减程度、目标体的埋深以及外部干扰的强弱等, 其中目标体与介质间的电性差异越大, 二者的界面就越清晰, 表现在雷达剖面图上就是同相轴不连续, 实际上, 目标体与周围介质之间的电性差异是探地雷达探测的基本条件^[1~4]。

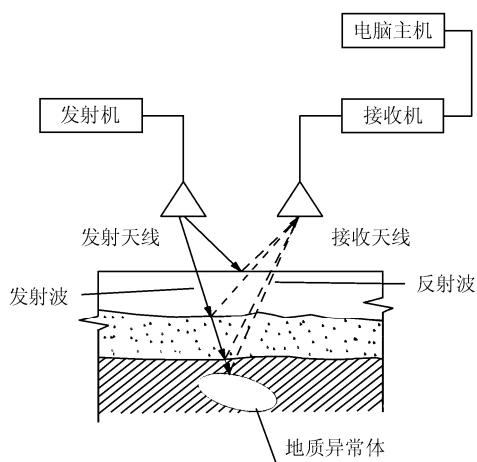


图1 探地雷达基本原理^[5]
Fig.1 The principles of GPR

3 探地雷达探测地下管线的机理

地下管线是指埋设于地下(或水下)的各种管(沟、巷)道和电缆。随着城市基础建设的发展,管线的密集度越来越大,而在市政施工时如何探测并避免破坏地下管线显得尤为重要,而探地雷达作为一种先进的地球物理探测仪器,以其高分辨率,在管线探测中越来越受到重视。

从雷达工作的基本原理可知,雷达能够探测地下管线的基本条件是管线与周围介质存在电性和物性差异,且差异越大效果越明显。常见的管线材料为金属、混凝土或塑料 PVC 等,而管线周围的介质多为岩石、砂土、黏土等。表 1 列举了以上几种材料和介质的电性和物性参数,可以看出管线与周围介质的电性和物性差异较大,能够产生较明显的反射波。

表 1 常见材料和介质的电性和物性参数
Table 1 Electrical and physical parameters of material and media

材质	相对介电常数	电导率 / $\text{ms} \cdot \text{m}^{-1}$	速度 / $10^9 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
粉质黏土	6.0	6.6	0.12
干砂	3~5	0.01	0.13
湿砂	20~30	0.1~1.0	0.06
金属	300	10^{10}	0.017
PVC 塑料	3.3	1.34	0.16
混凝土	6.4	0.5~2	0.12

根据几何光学的反射规律对管状体(圆形剖面)进行反射波的走时 $x-t$ 关系计算,见图 2(a)。设天线(发射和接收天线合二为一)位于 A 处,管顶距地面为 h ,管径为 D 、 A 点到反射点 R 的距离为 y ,由波的传播规律得:

$$y = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

式中 v 为电磁波波速; t 为电磁波的双程走时。则根据勾股定理,可得 $x-t$ 关系方程为

$$t = \frac{1}{v} \left[2 \sqrt{\left(h + \frac{D}{2} \right)^2 + x^2} - D \right] \quad (2)$$

显然,式(2)为双曲线方程,见图 2(b),这是管线反映在探地雷达剖面图中的基本反射形式。应当指出,分离天线与共天线计算结果的规律相同。由分析过程和计算结果可知,管线反射的走时同相轴呈双曲线形态,且正对双曲线顶峰下方就是管线顶部所在位置^[6]。

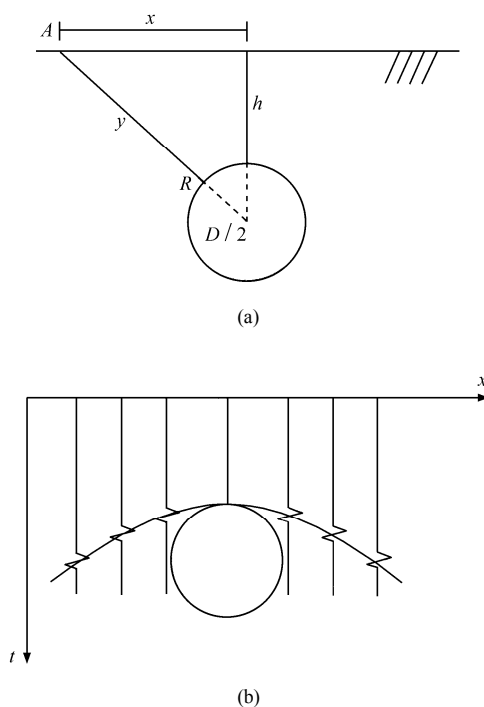


图2 管线走时曲线图
Fig.2 The curves of pipe reflection

需要指出的是,随着埋深的增加,电磁波的能量因介质的吸收而衰减,导致波的幅度减小,同相轴明显程度减弱,可见基于对双曲线同相轴的识别,探地雷达对探测浅部管线是可行的。

4 杂填土中的管线探测实例

4.1 测区概况和数据采集

北京市大屯路北侧施工场地因地铁明挖段的开挖,需探明该区域的地下管线。该区域场地极不平整,且表层为厚约 1 m 的杂填土,其中有很多带有

钢筋的混凝土碎块。由于电磁波遇混凝土碎块之后会产生绕射, 造成同相轴的不连续, 导致识别管线的难度大大增加。为解决这个问题, 在垂直于管线走向的方向上布置了 8 条平行的测线, 以期通过对 8 个剖面的对比分析, 识别出管线的双曲线形态。

本次探测采用 SIR-3000 型探地雷达, 配置 100 MHz 天线, 由施工方提供资料可知, 管线埋深在 1.5~4.0 m 范围内, 选择时窗为 150 ns, 采样数为 512, 64 次扫描, 采用连续探测方式。

4.2 雷达数据处理和图像解释

由于场地不平整和大量的混凝土碎块导致同相轴不连续, 给管线的识别带来了很大难度。在实测的 8 个剖面中, 有 5 个看不到较好的双曲线信号。但是通过分析对比, 还是能够提取出管线信号。图 3 为双曲线形态最明显的剖面, 可以看到图中 3 处椭圆圈定的范围内存在较明显的双曲线, 表明该处存在管线, 其中 5.3 m 处是一条已经开挖出露的 PVC 管, 深度为 2.70 m, 经反算得此处波速为 0.109×10^9 m/s。

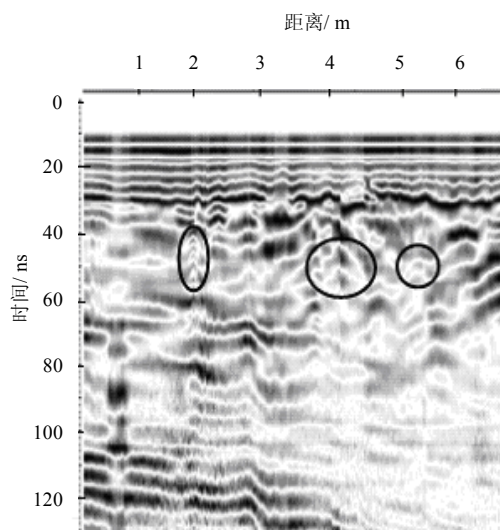


图 3 管线探测的雷达剖面图
Fig.3 Radar profile of pipe detecting

为了准确地确定管线的空间位置, 需要对雷达剖面进行相应的数据处理, 而数据处理的目标是压制随机和规则的干扰, 以最大可能的分辨率在探地雷达图像剖面上显示反射波, 提取反射波的各种有用的参数 (包括电磁波速, 振幅和波形等) 来帮助解释^[1]。由于实测得到的雷达图像 (图 3) 中双曲线形态较为明显, 所以主要进行偏移回归和时深转换。前面已经讲到, 管线反射波的走时关系呈双曲线, 也就是说管线上的反射点在雷达记录中发生了

偏移, 也可以这样认为, 如图 4 所示。发生偏移的原因是管线上 M 、 N 、 P 、 Q 点的反射波被分别记录在了测点正下方的 m 、 n 、 p 、 q 点。偏移回归的作用就是将反射点移到其本来位置, 而时深转换的作用是利用获得的波速参数将时间轴转换为深度轴。

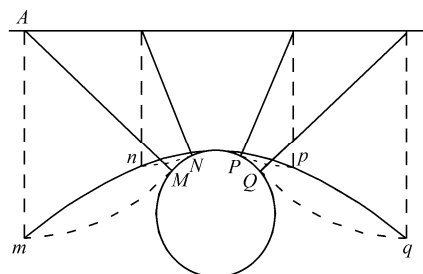


图 4 管线偏移成因图
Fig.4 The formation of pipe migration

在偏移回归和时深转换中, 波速参数的获得是关键。通常, 速度参数的获取有下列途径: (1) 利用已知目标体的深度进行反算得到波速; (2) 利用雷达后处理软件中的 Velocity adaptation 功能得到波速参数^[7]。在此采用第二种方法, 但为验证该方法的精度, 利用已开挖出露的 PVC 管, 通过 Velocity adaptation 得到波速为 0.11×10^9 m/s, 而反算的波速为 0.109×10^9 m/s, 可见二者十分相近。

图 5 为对雷达剖面进行了偏移回归之后的图像, 可见图中信号能量很好地收敛到了双曲线的顶点位置。图 6 为经过时深转换之后的图像, 由此图可以得到管线较为准确的空间位置, 其中, 由左到右深度依次为 2.10, 2.30, 2.75 m。经开挖后实测

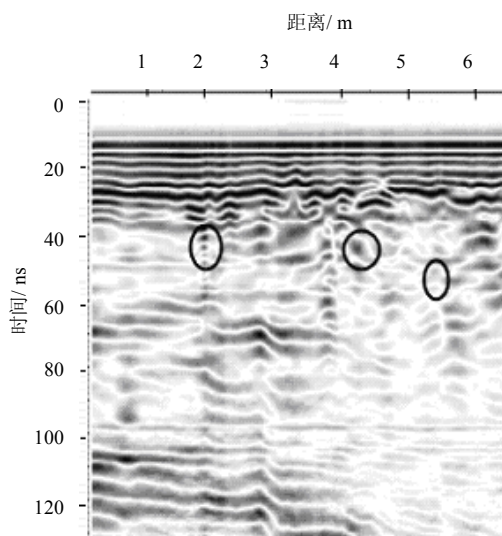


图 5 经偏移回归后的雷达剖面图
Fig.5 The radar profile after migration

得, 由左到右: 2.07 m (金属管, 见图 7(b), 管径为 10 cm), 2.25 m (混凝土管, 见图 7(a), 管径为 30 cm), 2.70 m (PVC 管, 管径为 15 cm), 可见探测精度为 ± 5 cm, 探测取得了很好的效果。

通过图 3 可以看到金属管线和非金属管线的绕射双曲线是有所不同的。金属管线发生了明显的多次反射, 而非金属管线明显的反射只有一次。对于金属管线, 无法识别其顶底界面, 而非金属管线的顶底界面非常明显。

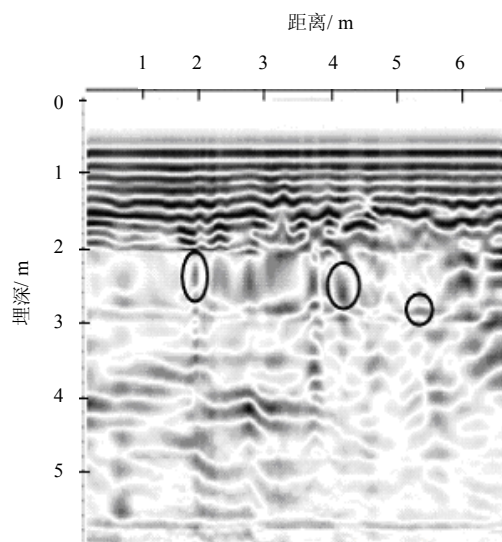


图 6 经时深转换后的雷达剖面图

Fig.6 The radar profile after time-depth conversion



图 7 开挖后的管线照片

Fig.7 The photo of pipe after excavation

5 墙体反射波干扰下的管道探测实例

5.1 测区概况及数据采集

测区位于北京市北一路, 因奥运支线地铁暗挖隧道段施工, 需要探明该路下分布的污水管道, 以便监测路基沉降对管道的影响, 防止管道受损。由于路两侧存在金属围墙, 电磁波遇墙体形成较强

的反射波, 影响管道探测效果。由于目前没有对这种干扰的有效压制方法, 为了在干扰条件下提取出管道信号, 在测区内布置 8 条平行测线, 以便对比分析。

本次探测采用 SIR-3000 型探地雷达, 配置 100 MHz 天线, 时窗为 130 ns, 采样数为 512, 64 次扫描, 采用连续探测方式。

5.2 雷达数据处理和图像解释

由于北一路路面比较平整, 在探测过程中雷达天线比较平稳。图 8 为雷达实测剖面中较好的一个, 可以看出剖面中存在较强烈的墙面反射波, 对管道信号有一定的影响, 但是由于墙体反射波较为明显, 可以识别并排除。通过 8 个剖面的对比分析, 确定该区域存在 2 条管道, 在图中由椭圆圈定; 位于 5.0 m 处由矩形圈定的部位出现了较为明显的同相轴不连续, 并观察到现场地面出现了沉陷迹象, 结合经验可以推断该处为一处空洞。空洞的存在使其下部的信号发生了畸变, 导致管线信号较难辨认。

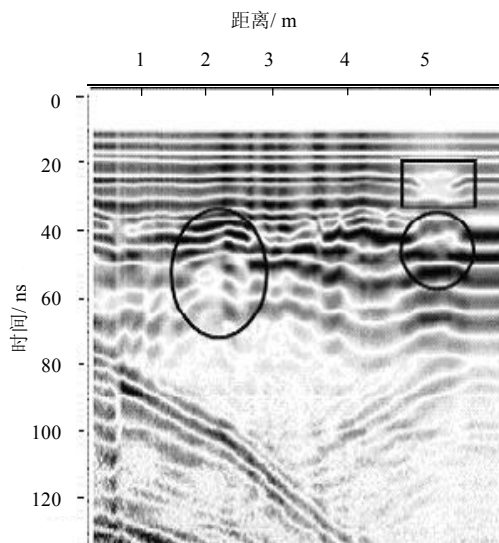


图 8 管线探测的雷达剖面图

Fig.8 Radar profile of pipe detecting

由于存在多种干扰, 首先选择进行一维滤波处理。其作用就是通过频谱分析识别干扰波的特征并加以压制, 以突出有效波。图 9 为经过一维滤波处理之后的雷达剖面图, 可以看到双曲线形态变得较为明显, 最后进行偏移回归和时深转换, 参数选择及处理过程同前面一样。图 10 为经过偏移回归和时深转换之后的雷达剖面图, 根据此图可以确定 2 条污水管道的埋深, 由左到右依次为 2.0, 2.1 m。

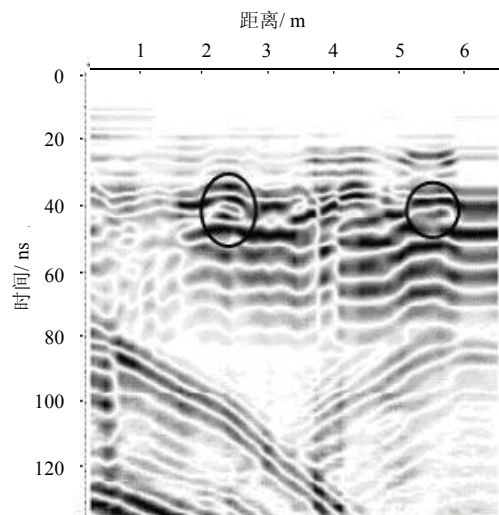


图9 经滤波后的雷达剖面图
Fig.9 The radar profile after filtration

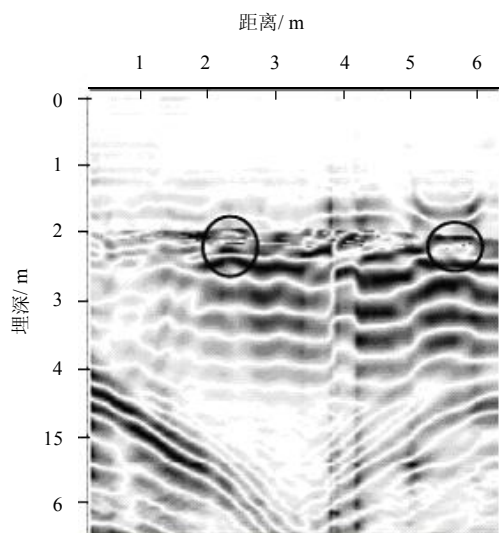


图10 经偏移回归和时深转换后的雷达剖面图
Fig.10 The radar profile after migration and time-depth conversion

6 结 语

探地雷达是一种先进的地球物理探测仪器, 只要采取合理地探测方法和数据处理方法, 应用探地雷达探测地下管线是科学有效的, 甚至在多种干扰和较为复杂的条件下探测也是可行的。相信, 随着电子技术的发展以及硬件和软件的不断升级改进, 探地雷达将能在更为复杂的条件下工作, 其探测精度和深度将进一步增加, 将为施工提供更加可靠的参考。

参 考 文 献

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M](第一版). 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 王惠廉. 探地雷达目的体物理模拟研究结果[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 18(3): 266—284.
WANG Hui-lian. Ground penetrating radar studies in physical analogue[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 1998, 18(3): 266—284.
- [3] 刘传孝. 探地雷达空洞探测机理研究及应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 238—241.
LIU Chuan-xiao. Research on the mechanism of probing cavity with ground penetrating radar and analysis on application examples[J]. **Chinese Journal of Mechanics and Engineering**, 2000, 19(2): 238—241.
- [4] 刘传孝, 蒋金泉, 杨永杰. 探地雷达探测地下管道的效果分析[J]. 山东科技大学报(自然科学版), 2001, 20(1): 57—60.
LIU Chuan-xiao, JIANG Jin-quan, YANG Yong-jie. Effect analysis of underground pipeline detection with the ground penetrating radar[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)**, 2001, 20(1): 57—60.
- [5] Alvin K Benson. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 1995, (33): 177—193.
- [6] 徐亚明, 刘宗星. GPR 在地下管线探测中的应用[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(3): 15—16.
XIU Ya-ming, LIU Zong-xing. Application of GPR subterranean pipelines detection[J]. **Journal of Geomatics**, 2004, 29(3): 15—16.
- [7] PENG Su-ping, YANG Feng. Fine geological radar processing and interpretation[J]. **Applied Geophysics**, 2004, 1(2): 89—94.