

文章编号: 1007-2993(2013)04-0191-05

# 探地雷达探测地下管线的机理和应用研究

苏兆锋 陈昌彦 肖敏

(北京市勘察设计院有限公司, 北京 100038)

**【摘要】** 地下管线无论其内部充填空气、水或其它介质,其介电常数、电导率等物性参数与周围介质均存在明显差异,具备探地雷达探测的地球物理前提。从探地雷达探测地下管线的极性分析入手,通过建立金属和非金属管线的正演数值模型,研究探地雷达电磁波在金属管线、非金属管线和组合管线中的传播机制。结合实际探测的地下管线探地雷达特征图谱,从反射波波形、极性、同相轴、电磁波能量吸收和衰减等方面分析探地雷达探测地下管线的波谱特征,建立探地雷达探测金属和非金属管线的识别方法,为准确探测地下管线起到很好的指导作用。

**【关键词】** 探地雷达;数值模拟;波谱特征;传播机制;识别方法

**【中图分类号】** P 631. 325

**【文献标识码】** A

doi:10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2013. 04. 008

## Research on Mechanism and Analysis of Underground Pipeline Detection with Ground Penetrating Radar

Su Zhaofeng Chen Changyan Xiao Min

(BGI Engineering Consultants LTD, Beijing 100038, China)

**【Abstract】** The dielectric constant and electrical conductivity of underground pipeline are obviously different with surrounding medium, regardless of its internal filling air, water or other medium. It is prerequisite with the ground penetrating radar for detecting underground pipeline. This paper analyzes the ground penetrating radar for detecting underground pipelines polarity. Through the establishment of metal and non-metallic pipeline forward numerical model, it focuses the transmission mechanism of GPR electromagnetic wave in metal pipeline, nonmetal pipeline. Combined with the actual detection of underground pipeline ground-penetrating radar feature mapping, it analyzes the spectrum characteristics from the reflection waveform, polarity, phase axis, electromagnetic wave energy absorption and attenuation. Finally, it establishes the identification method of GPR detecting metal and non-metallic pipeline. The results play a very good guidance for accurately detecting underground pipelines.

**【Key words】** ground penetrating radar; numerical simulation; spectral characteristics; communication mechanism; identification method

### 0 引言

随着城市化进程的加快,地下管线作为城市基础建设的重要组成部分,所起的作用越来越大,准确探测和定位地下管线尤为重要。探地雷达具有精度高、探测速度快、无损等特点,在地下管线探测中与其它探测方法相比存在明显的优势,近几年在管线探测领域取得广泛应用。曾昭发、袁明德、杨峰、战玉宝等对探地雷达探测金属管线的机理和方法进行过一些理论和实际研究,提出了几种计算土层介

质的电磁波传播速度的方法,比如介电常数法、几何刚度法、CMP法、双曲线弧度法、霍夫变换法、反射系数法、初至波法、迭代偏移法等,在确定金属管线埋设深度方面取得了大量成果<sup>[1-4]</sup>。本文通过选用合适的天线组合参数对实际埋设的金属和非金属管线进行探测,结合其正演数值模型,根据实测的地下管线探地雷达特征图谱,重点阐述和分析探地雷达电磁波在地下管线中的波谱特征,建立金属和非金属管线的识别方法。

**基金项目:**北京市科技计划课题项目资助(D101100049510003)和北京市交通委员会科技课题项目资助(Ky2009-20)

**作者简介:**苏兆锋,1980年生,男,汉族,山东郓城人,硕士,2006年毕业于东华理工大学地球探测与信息技术专业,工程师,主要从事工程物探、岩土工程综合测试、测绘等方面研究工作。E-mail:dk123456@163.com

## 1 探地雷达探测地下管线的极性分析

探地雷达电磁波在遇到介电常数不同的介质时会产生反射界面,反射波极性发生改变。物质的介电常数取决于物质在外场作用下的极化,极化一般可分为电子位移极化、离子位移极化和固有偶极矩的取向极化。地下管线主要包括非金属和金属管线,由于一般情况下非金属管线不会在外场作用下产生极化现象,所以其相对介电常数不会发生改变,探地雷达电磁波遇到非金属管线时,电磁反射波极性由非金属管线和周围介质的相对介电常数大小决定。

对于金属管线,由于金属大都属于原子晶体,且内部存在大量的自由电子,固有偶极矩不容易取向,原子核(离子实)的质量比电子大得多,离子运动速度甚微,离子位移极化的贡献较小,故金属的极化主要来自于电子的位移极化。按照经典电子论,金属的相对介电常数可表示为:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \sum_{j=1}^K \left[ \frac{f_j}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} + i \frac{Nf_0e^2}{m\epsilon_0\omega(\gamma_0 - i\omega)} \right] \quad (1)$$

可以看出  $\epsilon_r$  是外场频率  $\omega$  的函数,且是一个复数。下面分两种极限情况进行讨论。

1) 当外场频率  $\omega \rightarrow 0$  时,金属相对介电常数可近似表示为  $\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \sum_{j=1}^K \frac{f_j}{\omega_j^2} + i \frac{Nf_0e^2}{m\epsilon_0\omega\gamma_0}$ , 可见,在低频场作用下,金属相对介电常数趋于无穷大,表明金属对电磁波的吸收。

2) 当外场频率远远大于原子中电子的束缚频率时,金属的相对介电常数可近似表示为  $\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \sum_{j=1}^K \frac{f_j}{\omega^2} - \frac{Nf_0e^2}{m\epsilon_0\omega^2}$ , 可见在高频场作用下,金属不再是导体而是电介质,金属可以像绝缘体一样反射和透射电磁波,其相对介电常数较小<sup>[5]</sup>。

## 2 探地雷达探测地下管线的机理

根据几何光学的反射规律,对管状体(圆形剖面)进行反射波走时  $x-t$  关系计算(见图1),设天线位于A处,管顶距地面距离为  $h$ ,管径为  $D$ ,A点到反射点R的距离为  $y$ ,由波的传播规律得,  $y = vt/2$ ,其中  $v$  为电磁波传播速度,  $t$  为电磁波的双程走时<sup>[6-7]</sup>。由勾股定理得出  $x-t$  关系方程为:

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

显然上式是双曲线方程,这是管线在探地雷达剖面中的基本反映形式,由分析过程和计算结果可知,管线所产生的电磁反射波在时间域的同相轴呈双曲线形态,且双曲线弧顶对应下方的管线顶部位置。

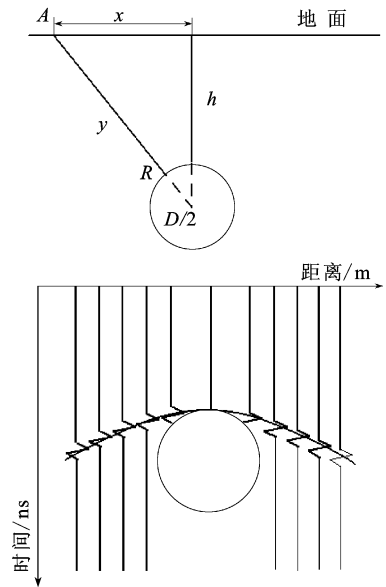


图1 管线走时曲线图

## 3 数值模拟

直径 1 200 mm 金属管线埋设深度为 1.0 m, 选用 200 MHz 天线进行探测, 由于在高频场作用下, 金属管线的相对介电常数一般为 1, 而周围土体介质相对介电常数取 8, 正演雷达特征图谱结果见图 2。从图 2 中可以看出, 由于金属管线的相对介电常数和周围土层存在较大差异, 在管线顶部形成较强的电磁反射波。根据探地雷达电磁反射波波阻的同相性形成同相轴, 圆形金属管线的波形特征为向下开口的抛物线且呈伞状。探地雷达探测金属管线电磁反射波信号以外层界面为主, 上管壁基本产生全反射, 不能产生底部反射波, 并且管顶多次反射波能量较弱, 无法根据管线顶、底部反射波时间差计算金属管线直径大小。金属管线电磁反射波起跳方向和入射波同向, 表明探地雷达电磁波从相对介电常数大的介质进入相对介电常数小的介质时, 反射系数为正, 即反射波振幅同向。

直径 1 600 mm 和 1 200 mm 平行埋设的组合非金属管线, 水平间距 2.0 m, 埋设深度 1.50 m, 根据经验非金属管线相对介电常数取 6.4, 周围土体介质相对介电常数取 8, 选用 200 MHz 天线进行探测, 正演雷达特征图谱见图 3。从图 3 中可以看出, 非金属管线的波形特征为倒悬双曲线, 与金属管线相似, 由于非金属管线和空气组成的介质与周围土层介质差异没有金属管线的差异大, 电磁波传播到非金属管线顶部时, 部分电磁波产生反射, 同时部分电磁波产生透射, 在非金属管线底部产生反射波, 可以根据管底和管顶反射波走时时差, 计算非金属管

线管径大小,这一点与金属管线明显不同。管顶电磁反射波与入射波极性相同,与管底反射波方向相反,可以根据这一点辨别非金属管线的底部位置。

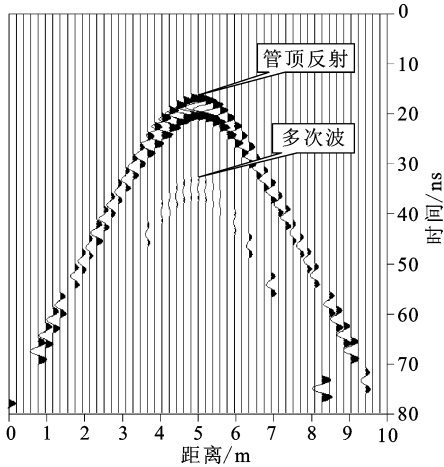


图2 直径1200 mm金属管线正演雷达图谱

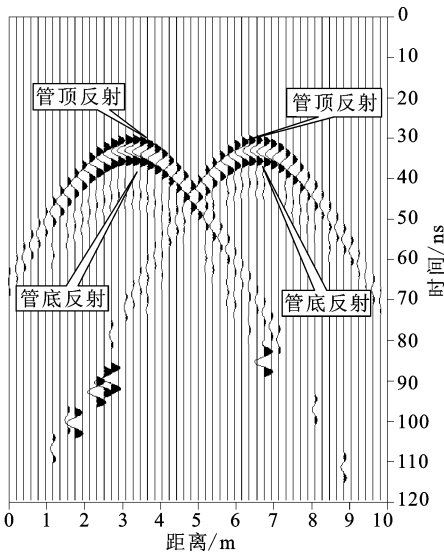


图3 组合非金属管线正演雷达图谱

#### 4 工程实例

##### 4.1 金属管线

直径800 mm埋设深度为3.20 m的金属管线,周围土体介质为粉质粘土,选用200 MHz中心频率天线进行探测,具体探地雷达探测参数设置见表1,探测的雷达特征图谱见图4,金属管线上方典型位置处探地雷达电磁波波形曲线见图5。

表1 探地雷达探测参数设置

时窗/ns	采样点数	扫描/m	扫描/s	分辨率
120	512	40	60	16

从图4中可以看出,金属管线波形特征表现为倒悬双曲线,由于金属管线的导电率极强,明显高于

周围一般介质,电磁波遇到金属管线界面基本产生全反射,形成振幅较强的电磁反射波界面,其强度明显强于周围介质,无管底反射波和管顶多次反射波,双叶均较明显,但由于粉质粘土对电磁波吸收较快,双叶影响宽度和深度较小。粉质粘土颗粒较小,含水量较高,其相对介电常数较高,从图5中可以读出管顶反射波走时为72.77 ns,根据电磁反射波时间和目标管线的埋设深度,计算出管线上方粉质粘土的综合相对介电常数为11.64,与实际相符。在高频场作用下,金属管线相对介电常数一般取1,探地雷达电磁波从相对介电常数大(速度小)的介质进入相对介电常数小(速度大)的介质,反射系数为正,即金属管线电磁反射波起跳方向和入射波同向,与正演结果相符。

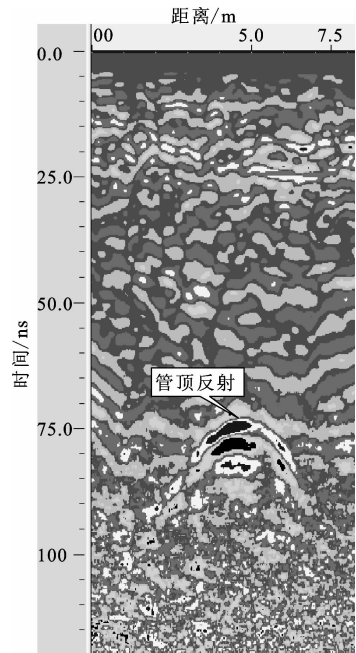


图4 直径800 mm金属管线雷达特征图谱

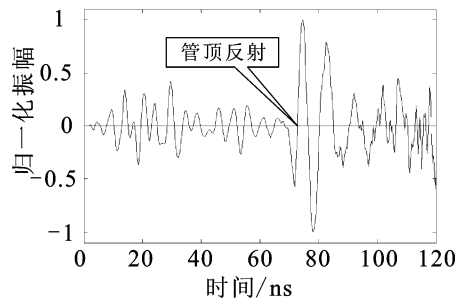


图5 金属管线上方典型雷达电磁波波形曲线

##### 4.2 非金属管线

直径500 mm非金属管线埋设深度为1.20 m,周围土体介质为细砂,选用100 MHz中心频率天线

进行探测,具体探地雷达探测参数设置见表2,探测的雷达特征图谱见图6,非金属管线上方典型雷达电磁波波形曲线见图7。

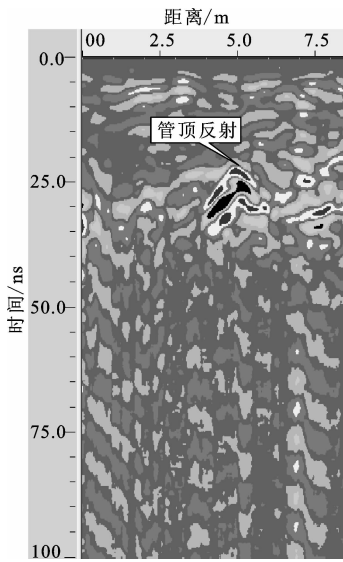


图6 直径500 mm非金属管线雷达特征图谱

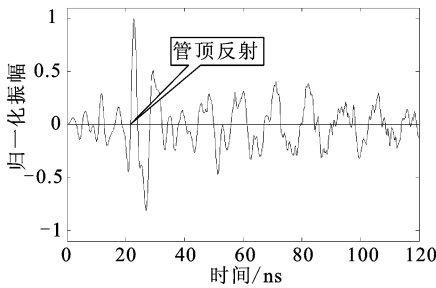


图7 非金属管线上方典型雷达电磁波波形曲线

非金属管线的导电率较差,其相对介电常数不大,电磁反射波在非金属管线顶部形成倒悬双曲线,但双叶影响宽度较小。反射波信号以外层界面为主,底部界面较弱,电磁波衰减一般,非金属管线的上管壁发生部分反射,管内多次波较金属管线较强,有能量传入下管壁,出现管底反射信号。管线直径较小时,一般很难分辨管线底部。从图7中可以读出管顶反射波走时为21.71 ns,根据电磁反射波时间和目标管线的埋设深度,计算出管线上方细砂的综合相对介电常数为7.36,与实际相符。电磁波从介电常数大(波速小)进入介电常数小(波速大)的介质,反射系数为正,即反射波方向与入射波同向,与正演结果相符。

4.3 组合管线

直径1 600 mm和1 200 mm平行埋设的组合非金属管线,水平间距2.0 m,埋设深度1.50 m,周围土体介质为成分相对均一的密实细砂,选用

200 MHz中心频率天线进行探测,具体探地雷达探测参数设置见表3,探测的雷达特征图谱见图8,组合非金属管线上方典型位置处探地雷达电磁波波形曲线见图9。

表3 探地雷达探测参数设置

时窗/ns	采样点数	扫描/m	扫描/s	分辨率
100	512	40	60	16

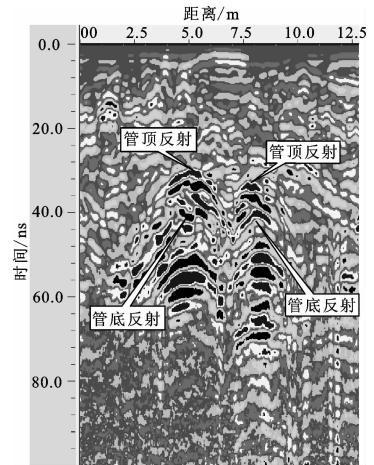


图8 组合非金属管线雷达特征图谱

从图8中可以看出,组合非金属管线管顶形成较强电磁反射波波形特征均表现为倒悬双曲线。管线直径较大时,根据管底和管顶反射波走时时差,可以计算非金属管线管径大小。管线的半径越大,管线底反射距顶反射越远。从图9中可以读出管顶反射波走时为30.87 ns,根据电磁反射波时间和目标管线的埋设深度,计算出管线上方密实细砂的综合相对介电常数为8.98,与实际相符。非金属管线周围土体介质的相对介电常数大小决定电磁反射波方向,电磁波从介电常数大(波速小)进入介电常数小(波速大)的介质,反射系数为正,即反射波方向与入射波同向,与正演结果相符。由于组合管线顶部之间可能存在一定距离,管线顶部产生的强反射电磁波不会相互干扰,倒悬双曲线的两叶在管顶下方产生一定的干扰,但不会影响判别管线位置和管径大小。

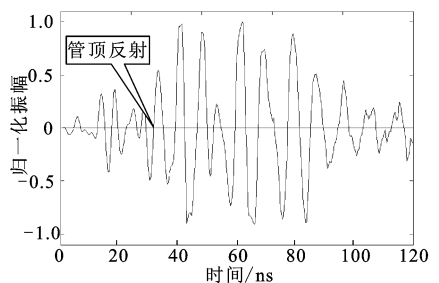


图9 组合非金属管线上方典型雷达电磁波波形曲线

## 5 结 论

通过分析探地雷达探测不同材质地下管线的极性和机理,建立金属和非金属管线的正演数值模型,研究探地雷达电磁波在地下管线中的传播特征,系统总结金属和非金属管线的雷达图谱特征。选取不同的测试参数对不同直径、不同埋深的金属、非金属和组合管线进行探测,对实际探测的管线雷达特征图谱进行分析,建立金属和非金属管线的识别方法,取得了以下几个方面的结论。

1)金属和非金属管线的波形特征均表现为倒悬双曲线,管线的埋深越小,双曲线形态越明显,埋深加大,双曲线变缓。相同属性的金属和非金属管线,金属管线管顶电磁反射波强度明显大于非金属管线,且双叶影响宽度较大。

2)金属管线管顶产生基本全反射,无管底反射,无法计算管线直径大小;非金属管线管顶产生部分反射和透射,管线直径达到一定规模,根据管底和管顶走时时差,可以计算管线直径大小。

3)金属管线的相对介电常数不确定,探地雷达探测时一般均处于高频场作用下,其相对介电常数

较小,一般取 1,管顶电磁反射波方向与入射波同向;非金属管线周围土体介质的相对介电常数大小决定管顶电磁反射波与入射波方向的关系。

## 参 考 文 献

- [1] 曾昭发,刘四新,鹿 琪,等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:250-255.
- [2] 袁明德. 探地雷达探测金属管线的能力[J]. 物探与化探,2002,26(2):152-156.
- [3] 杨 峰,彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京:科学出版社,2010:175-180.
- [4] 战玉宝,张利民,尤春安. 探地雷达探测地下管线的研究[J]. 岩土力学,2004,25(增刊):133-136.
- [5] 邝向军. 关于金属介电常数的讨论[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2006,19(2):75-78.
- [6] 丁海超,王万顺,吕 莉. 探地雷达探测地下管线技术与应用实例[J]. 中国煤田地质,2006,18(1):60-63.
- [7] 张汉春,曹震峰. RIS-K2 探地雷达在地下管线竣工测量中的应用[J]. 工程地球物理学报,2007,4(5):395-399.

收稿日期:2013-01-24

(上接第 166 页)

从表 1 可看出,中间设站法与二等水准测量方法所得观测点间高差较差最大值为 0.55 mm,而二等水准测量的高差中误差为 0.5 mm,由此表明,上述试验中中间设站法精密三角高程测量精度基本达到了二等水准测量精度的要求。

## 3 中间设站法精密三角高程测量在工程中的运用

前门东街牌楼变形监测工程是针对一牌楼进行的竖向位移变形监测,工程位于前门东路与大江胡同交界处,牌楼为大理石结构,牌楼高度约 5 m,牌楼由四根立柱支撑,牌楼已竣工半年。本工程竖向位移观测采用中间设站精密三角高程测量方式施测。本工程共计进行竖向位移监测 5 次,内业采取与水准相同的线路构网平差,平差后每测站高差中误差最大±0.41 mm,最弱点高程中误差为±0.50 mm,均达到规范二等水准测量精度要求。

## 4 结 论

中间设站法精密三角高程测量,结合高精度全

站仪 TCA2003,在基坑竖向位移监测中能够满足三等及以上水准测量精度要求。

中间设站法精密三角高程测量应用于基坑竖向位移监测,操作流程简单,能减轻作业劳动强度,提高作业效率,可在深基坑监测中推广应用。

## 参 考 文 献

- [1] 周水渠. 精密三角高程测量代替二等水准测量的尝试[J]. 测绘信息与工程,1999(3):15-17.
- [2] 余代俊. 全站仪中间法代替二等水准测量的精度分析与实验[J]. 测绘与空间地理信息,2006,29(5):117-120.
- [3] 周小华. 大高差单向光电三角高程测量中最佳测站位置的确定[J]. 华东地质学院报,2002,25(1):44-46.

收稿日期:2013-05-06