

文章编号: 1001-1749(2023)06-0796-07

# 探地雷达对非金属管线有效探测深度的研究

陈少博<sup>1</sup>, 朱盛延<sup>1</sup>, 石宗源<sup>2</sup>, 黄建国<sup>1</sup>, 黄礼杰<sup>1</sup>,  
罗小乾<sup>1</sup>, 姜彤<sup>2</sup>, 朱四新<sup>2</sup>

(1. 华东勘察设计院(福建)有限公司, 福州 350000;

2. 华北水利水电大学, 郑州 450046)

**摘要:** 为优化城市生态, 加强水环境治理, 全国各地近年来全面展开“正本清源”等管线普查工作, 而探地雷达因无损、便捷、直观等特点在管线探测领域得到了广泛应用, 但探地雷达对非金属管线的有效探测深度一直难以界定。为提高探地雷达对非金属管线探测的效率和准确度, 利用电磁波模拟软件 GPRMax3.0, 以 1:10 的经验径深比为基准设计正演模型, 采用不同频率的天线对不同条件下的非金属管线进行正演探测模拟。通过模拟与实际探测结果的相互验证, 总结了 100 M、270 M 和 400 M 天线对于非金属管线的有效测深范围。实验结果可对探地雷达在城市地下非金属管线探测起到一定的参考意义。

**关键词:** 探地雷达; GPRMax; 正演模拟; 非金属管线

**中图分类号:** P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.12

## 0 引言

管线作为城市的生命线, 承担着信息、能量、城市用水的传输和循环<sup>[1-3]</sup>。随着城市建设的不断进行, 地下管线构成了复杂而庞大的系统<sup>[4]</sup>。在当今的城市地下管线普查中, 由于存在大量私改、私接、管线原始数据丢失的情况, 导致管线间的连接关系需要通过人工撬井盖来确认。因此亟需精准快捷的探测技术对管线的位置、埋深进行精确定位, 而探地雷达高效、直观、无损的特点十分适用于城市地下管线的探测<sup>[5]</sup>。

虽然探地雷达在超前地质预报、冰川盐岩等低耗介质探测领域有着较好的表现, 但在对不均匀杂填土, 随机地下水位非金属管线的探测中却存在如

下问题<sup>[6-7]</sup>: ①探地雷达对非金属管线的响应微弱, 实际探测中甚至弱于干扰引起的假异常; ②不均匀的杂填土如介质中许多小空洞等, 都会导致背景的杂乱或响应双曲线不连续<sup>[8-9]</sup>; ③部分含水非金属管线周围介电常数和电导率数倍于干燥值, 导致电磁波高耗而降低探测能力<sup>[10-11]</sup>。针对此类问题, 探地雷达天线频率的选择以及相关采集参数的设置, 对目标非金属管线探测结果起到了至关重要的作用。

针对上述问题, 笔者使用 GPRMax3.0 对探地雷达非金属管线探测进行正演模拟, 通过总结常用的 100 M、270 M、400 M 天线对不同埋深、管径、材质的非金属管线探测深度, 并结合实际非金属管线探测结果进行对比, 为探地雷达在城市地下非金属管线探测工程应用提供一定的参考。

收稿日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1704243)

第一作者: 陈少博(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程、海洋勘察、工程物探等方面工作, E-mail: 252273430@qq.com。

通信作者: 姜彤(1973—), 男, 教授, 主要从事岩土力学及地学信息方面的研究, E-mail: jiangtong@ncwu.edu.cn。

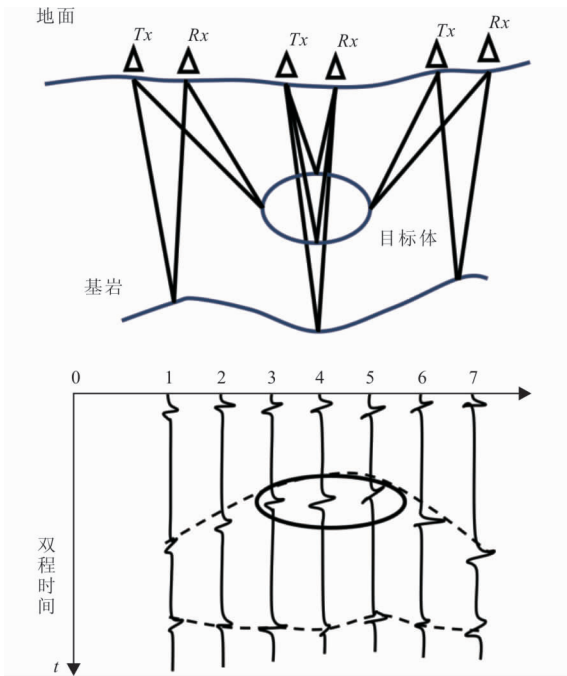


图 1 探地雷达工作示意图

Fig. 1 Ground-penetrating radar working schematic

## 1 基本原理

### 1.1 探地雷达工作原理

Hulsenbeck (1926)指出介电常数不同的界面会使电磁波发生反射,提出了利用电磁脉冲探测地下物体的方法,从而形成了探地雷达的雏形<sup>[12]</sup>。随着电子信息技术发展和数字处理技术的应用,当前的探地雷达由计算机主机控制天线收发,并存储回波到达接收天线( $R_x$ )的走时、相位、电场强度等运动和波型特征,形成直观地下扫描剖面。发射天线( $T_x$ )向地下发射特定主频的高频电磁波(1 M—10 GHz),当到达不同的介质分界面时,电磁波会发生反射透射和折射<sup>[13-14]</sup>,进而由接收天线( $R_x$ )接收到不同振幅、走时、同相轴等特征的电磁信号。通过分析此类电磁信号,则可较为准确的推断出地下异常体的埋深、形态、结构等性质(图1)。

### 1.2 电磁波及正演模拟基本理论

宏观电磁场变化遵循 Maxwell 方程组。假设各向同性半无限介质电磁性质稳定,在无源空间中,电流密度和电荷密度为零<sup>[15]</sup>。可将依赖时域的麦克斯韦方程写为:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$



图 2 人行道层状模型

Fig. 2 Sidewalk laminar model

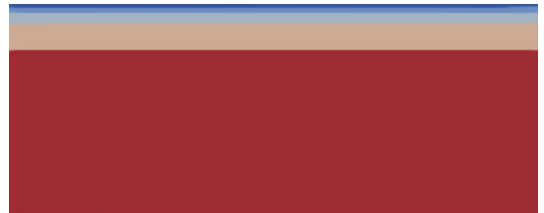


图 3 公路层状模型

Fig. 3 Highway laminar model

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = 0$$

$$\nabla \cdot E = 0$$

对式(1)两边取旋度,然后带入式(2)便可得到无源区域中电场强度矢量  $E$  形成波动方程形式:

$$\nabla^2 E - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

式中: $H$  为磁场强度; $E$  为电场强度; $\mu$  为磁导率; $\epsilon$  为相对介电常数。

除电场强度外,同理可得磁场强度  $H$  在此无源区域满足的波动方程。在直角坐标系中,可以将电场和磁场分解,每个波动方程便可写为 3 个标量方程,每个方程针对一个分量场,即形成 FDTD 的基础式。

GPRMax 基于 Maxwell 方程组和有限差分时间域 (FDTD) 方法,是一种数值模拟工具。GPRMax 通过定义介质的电导率,介电常数,磁导率和边界条件等参数来模拟电磁波在地下介质中的传播和反射,从而得到地下介质的响应剖面,为工程实践提供理论经验支撑。

## 2 GPRMax 层状模型设置

笔者采用各向同性层状介质来模拟人行道和公路两种不同工况。人行道层状模型自上而下分为 0.1 m 砖石层、0.5 m 填土层和半无限黏土层(图2)。

公路层状模型以我国常用典型结构半刚性沥青路面为例<sup>[16-17]</sup>,自上而下分为 0.1 m 沥青层、0.2 m 混凝土层、0.5 m 填土层和半无限黏土层(图3)。

表 1 层状模型介质电性参数

Tab.1 Laminar model dielectric parameters

名称	相对介电常数	电导率
沥青	6	0.001
填土	8	0.001
黏土	10	0.003
干混凝土	6.5	0.001
湿混凝土	15	0.003
PVC	3	0

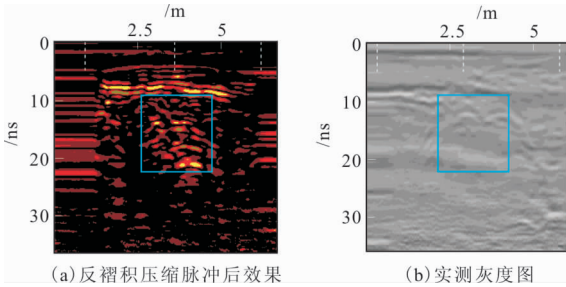


图 4 400 M 天线实测剖面

Fig. 4 400 M antenna measured DN400 pipeline effect

其中各材料的相对介电常数和电阻率如表 1 所示。

### 3 GPRMax 正演模拟实验

本文中 GPRMax 正演模拟采用经验基准径深比 1 : 10, 非金属管线的埋深则以 0.1 m 深度差递加, 覆盖非金属管线中心埋深的范围自 0.3 m 到 3 m。

#### 3.1 400 M 天线非金属管线探测实验

图 4 为某小型公路下铺设的同一雨水管线不同位置剖面, 中间标记位置为管线位置, 管顶实际埋深均为 1.1 m, 管径为 400 mm。由图 4 可知, 400 M 天线在 1.5 m 以内可以获得清晰的非金属管线响应, 但埋深大于 1.5 m 后 400 M 天线探测效果较不稳定, 双曲线连续性较差, 对干扰较大或者衰减严重的区域, 非金属管线响应的有效信息表现微弱, 难以识别甚至会被完全掩盖。

以此实测数据为依据, 设置非金属管线中心基准埋深为 0.5 m、1 m 和 1.5 m 的三组对照实验, 实验的模型均为人行道层状模型。

1) 当非金属管线中心基准埋深为 0.5 m, 时窗为 60 ns 时, 设置 5 组管径为 0.05 m 的 PVC 管线, 该管线对应的中心埋深由左至右分别为 0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m。

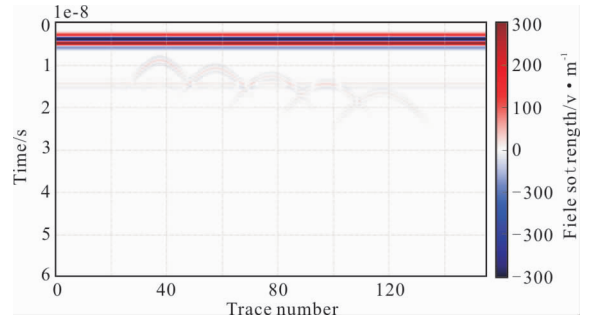


图 5 400 M 天线 0.5 m 埋深基准的正演结果

Fig. 5 Orthorectification results of 400 M antenna with 0.5 m burial depth reference

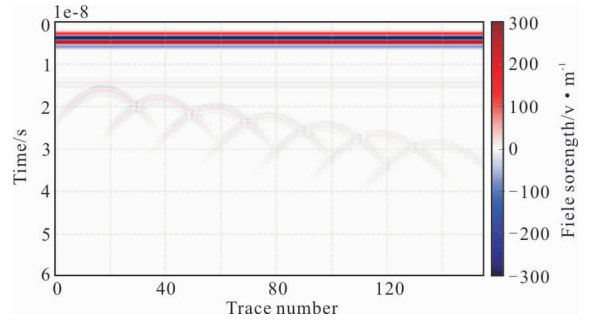


图 6 400 M 天线 1 m 埋深基准的正演结果

Fig. 6 Orthorectification results of 400 M antenna with 1 m burial depth reference

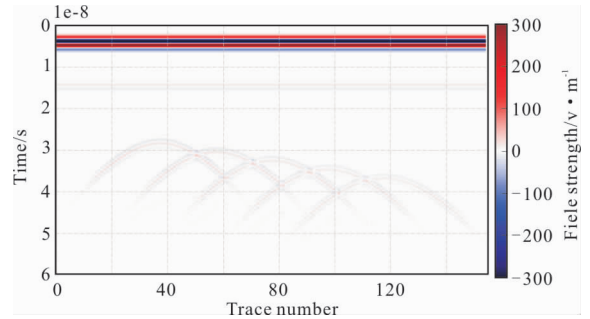


图 7 400 M 天线 1.5 m 埋深基准的正演结果

Fig. 7 Orthorectification results of 400 M antenna with 1.5 m burial depth reference

2) 当非金属管线中心基准埋深为 1 m, 时窗为 60 ns 时, 设置 7 组管径为 0.1 m 的 PVC 管线, 该管线对应的中心埋深由左至右分别为 0.7 m、0.8 m、0.9 m、1 m、1.1 m、1.2 m、1.3 m。

3) 当非金属管线中心基准埋深为 1.5 m, 时窗为 60 ns 时, 设置 5 组管径为 0.15 m 的 PVC 管线, 该管线对应的中心埋深由左至右分别为 1.3 m、1.4 m、1.5 m、1.6 m、1.9 m。

通过图 5、图 6、图 7 可知, 当非金属管径相同

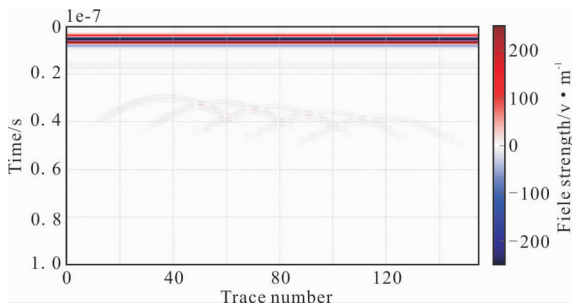


图 8 270 M 天线 1.5 m 埋深基准的正演结果  
Fig. 8 Orthorectification results of 270 M antenna with 1.5 m burial depth reference

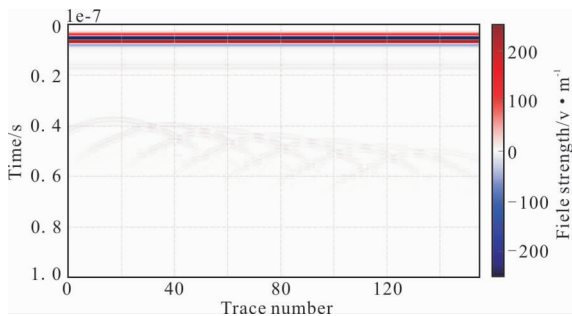


图 9 270 M 天线 2 m 埋深基准的正演结果  
Fig. 9 Orthorectification results of 270 M antenna with 2 m burial depth reference

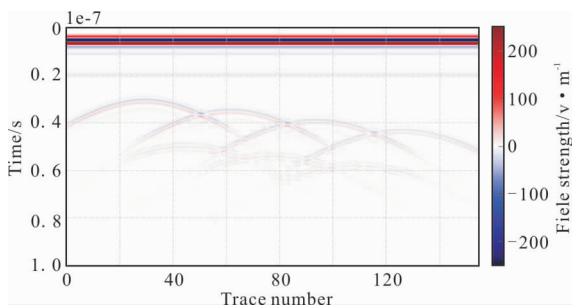


图 10 270 M 天线 2 m 埋深基准大管径管线正演结果  
Fig. 10 270 M antenna 2 m burial depth reference large diameter pipeline orthorectified results

时,400 M 探地雷达的回波信号随着埋深显著衰减,三次模拟整体上回波强度是递减的,同时双曲线曲率也随着深度变大而变小。当非金属管线中心埋深大于 1.6 m 时,回波能量仅为直达波的 1/45,且 10 次叠加就可将其异常平滑掉,难以识别。故 400 M 探地雷达的探测深度不宜超过 1.5 m,1 m 以内效果较好。

### 3.2 270 M 天线非金属管线探测实验

根据实际探测经验,270 M 天线对部分非金属

管线的探测深度可达 3 m,故针对 270 M 探地雷达 GPRMax 正演模拟实验,设置非金属管线中心基准埋深为 1.5 m 和 2 m 的两组对照实验,实验模型均为人行道层状模型。

1)当非金属管线中心基准埋深为 1.5 m,时窗为 100 ns 时,设置 5 组管径为 0.15 m 的 PVC 管线,该管线对应的中心埋深由左至右分别为 0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m。

2)当非金属管线中心基准埋深为 2 m,时窗为 100 ns 时,设置 7 组管径为 0.2 m 的 PVC 管线,该管线对应的中心埋深由左至右分别为 1.7 m、1.8 m、1.9 m、2.0 m、2.1 m、2.2 m、2.3 m。

由图 8、图 9 可知,当非金属管线在高耗介质中且管线中心埋深大于 1.5 m 时,经验基准径深比 1 : 10 丧失了其参考意义。当非金属管线的中心埋深大于 2 m 时,小管径管线的回波最大强度仅为直达波的 1/44,由于两翼能量的衰减,270 M 探地雷达对于中心埋深大于 2 m 的小管径管线识别效果不佳。

3)通过对某市主要区域非金属管线的统计发现,城市主干道以下 2 m~3 m 存在较多的 0.6 m 大管径非金属主管,故再设置非金属管线中心基准埋深为 2 m 和 2.6 m,管径为 0.6 m 的两组对照实验,实验的模型公路层状模型。又因大管径的非金属主管线多为雨污水管线,故设置对应的介质为湿混凝土构造。两组实验中湿混凝土管线对应的中心埋深由左至右分别为 1.6 m、1.8 m、2.0 m、2.2 m 和 2.4 m、2.6 m、2.8 m、3.0 m。

由图 10、图 11 可知,适用 270 M 探地雷达对中心埋深 2 m~3 m,管径 0.6 m 的湿混凝土管线探测,探测的效果要明显优于浅埋深的 PVC 管线。这是由于潮湿导致非金属管线具有了更大的相对介电常数,从而获得更强的回波能量值,但 270 M 探地雷达的有效探测深度仍在 3 m 以内。

### 3.3 100 M 天线非金属管线探测实验

图 12 为实测某公路下方埋深为 3 m 的混凝土套管,中间标记位置为管线位。由实测数据及经验知,100 M 探地雷达对于非金属管线的有效探测范围为 3 m~4 m,故针对 100 M 探地雷达 GPRMax 正演模拟实验设置非金属管线中心基准埋深为 2 m 和 3 m 的两组对照实验,实验的模型均为公路层状模型。

1)当非金属管线中心基准埋深为 2 m 时,设置 7 组管径为 0.2 m 的 PVC 管线,该管线对应的中心

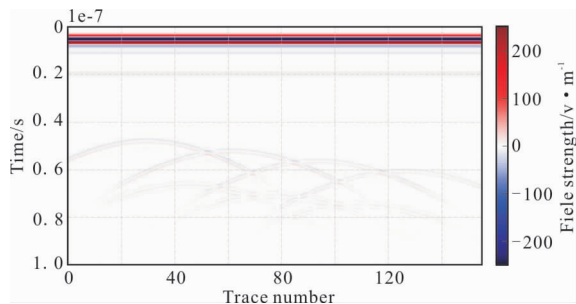


图 11 270 M 天线 2.6 m 埋深基准  
大管径管线正演结果

Fig. 11 270 M antenna 2.6 m burial depth  
reference large diameter pipeline  
orthorectified results

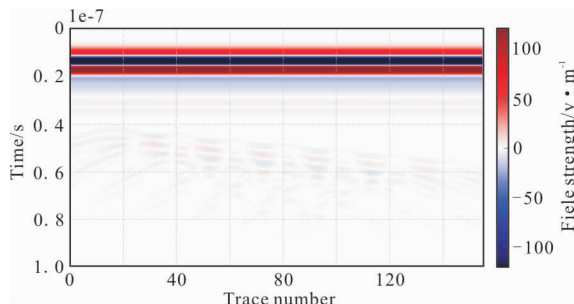


图 13 100 M 天线 2 m 基准埋深正演结果

Fig. 13 100 M antenna 2 m reference burial  
depth orthorectified results

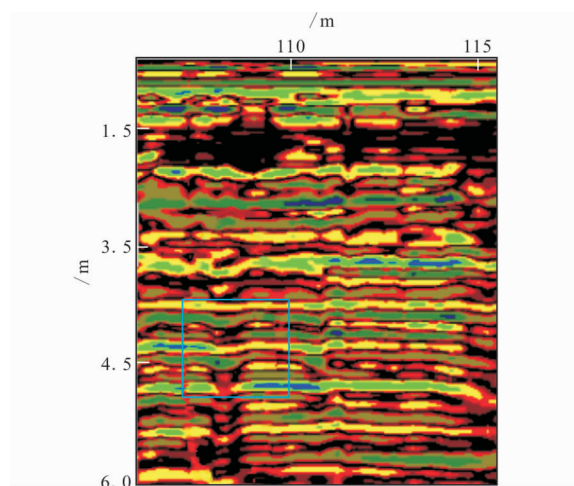


图 12 100 M 天线实测剖面

Fig. 12 100 M antenna real measurement profile

埋深由左至右分别为 1.8 m、1.9 m、2.0 m、2.1 m、2.2 m、2.3 m、2.4 m。

由图 13 可知,当 100 M 探地雷达扫描中心埋深为 2 m,管径为 0.2 m 的 PVC 管线时,最大的回波能量仅为直达波的 1/39,其能量衰减比率要小于高频天线,符合极化衰减理论。但由于 100 M 探地雷达所产生的波长较大,当介质不均匀时易产生散射、色散等不利影响,导致其整体探测效果的优势相对高频天线并不明显。因此在对小管径非金属管线的探测工作中,100 M 探地雷达的探测深度不宜大于 2 m。

2) 鉴于埋深 3 m 左右的非金属管线多为湿混凝土管线,故当湿混凝土管线的中心基准埋深为 3 m,设置 5 组管径为 0.3 m 的管线,对应的中心埋深由左至右分别为 2.7 m、2.9 m、3.1 m、3.3 m。

3) 当湿混凝土管线的中心基准埋深为 3 m,设置 5 组管径为 0.6 m 的管线,对应的中心埋深由左

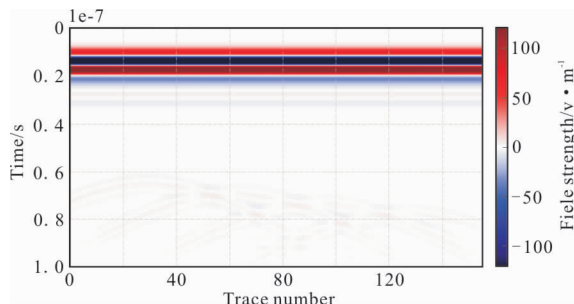


图 14 100 M 天线 3 m 埋深基准正演结果

Fig. 14 100 M antenna 3 m reference burial  
depth orthorectified results

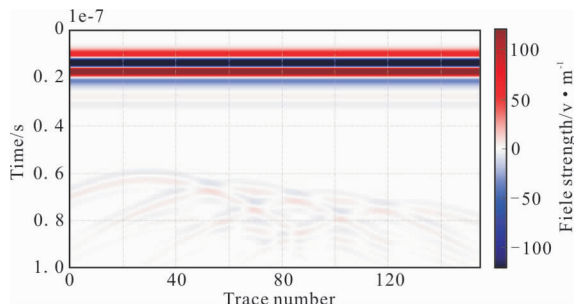


图 15 100 M 天线 3 m 埋深基准正演结果

Fig. 15 100 M antenna 3 m reference burial  
depth orthorectified results

至右分别为 2.7 m、2.9 m、3.1 m、3.3 m。

由图 14、图 15 可知,当非金属管线埋深较大时,同一埋深基准对应不同管径的非金属管线探测回波强度差异极小,非金属管线材质及管径的变化都不足以补偿埋深的增大。埋深大于 3 m 时,探地雷达对非金属管线的响应很难辨识,故认为对湿混凝土管线的有效探测深度为 3 m 之内。

## 4 结语

通过 GPRMax 正演模拟,可直接观测到探地雷

达频率与非金属管线的有效探测深度的负相关关系。又因不同频率天线对于非金属管线的有效测深度无统一界定标准,故在工程的实测环境中就需要根据实际干扰强度和地下介质情况,通过标定介电常数、测量电导率,来获得相应的电磁属性,进而通过正演获得回波的特征,观察不同天线的效果差异,选择最佳的天线进行探测。

笔者依据实际非金属管线探测资料,主流探测经验以及正演验证的结果汇总得到以下结论:

1)在上述假定地质状况的前提下,不同频率探地雷达对非金属管线探测深度为:①400 M 天线对非金属管线的有效测深为 1.5 m 以内;②270 M 天线对 PVC 管线的有效测深在 2 m 以内,对湿混凝土管线则在 3 m 范围以内;③100 M 天线的最佳测深同样在 3 m 以内。

2)实际工程勘测中,不同类型非金属管线周围的介质会有较大差异(例如供水管线常常渗漏,其周围土体介电常数可以到达 20 左右)。介质差异会导致不同的电磁波速,除影响有效测深外,还对非金属管线有效响应的双曲线曲率有所影响,速度越大,曲率越小,双曲线越平缓,当同一幅实测图像出现两翼不同收敛的响应,可判断收敛大的异常区域含水量大,其实际深度也较小。笔者基于经验以及工程实测数据进行正演研究,并从理论上对非金属管线探测的经验进行了佐证,给出了各频率天线对非金属管线的有效测深范围,对东南沿海城市地下非金属管线探测有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 曹振. 西安地铁盾构施工安全风险评估及施工灾害防控技术[D]. 西安:西安科技大学,2013.  
CAO Z. Safety risk assessment and construction disaster prevention technology of shield tunnel in Xi'an Metro[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2013. (In Chinese)
- [2] 梁小强,杨道学,张可能,等. FDTD 数值模拟在 GPR 管线探测中的应用[J]. 地球物理学进展,2017,32(4): 1803—1807.  
LIANG X Q, YANG D X, ZHANG K N, et al. Application of FDTD numerical Simulation in GPR pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (4):1803—1807. (In Chinese)
- [3] 张军伟,刘秉峰,李雪,等. 基于 GPRMax2D 的地下管线精细化探测方法[J]. 物探与化探,2019,43(02):435—440.  
ZHANG J W, LIU B F, LI X, et al. A refined exploration method for underground pipelines based on GPRMax2D[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(02):435—440. (In Chinese)
- [4] 秦镇. 基于探地雷达的城市地下非金属管线探测识别研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2019.  
QIN Z. Research on detection and identification of urban underground non-metallic pipelines based on ground penetrating radar[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2019. (In Chinese)
- [5] 陈思静,胡祥云,彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展,2021:1—17.  
CHEN S J, HU X Y, PENG R H. Research progress and development trend of urban underground pipeline detection[J]. Progress in Geophysics, 2021: 1—17. (In Chinese)
- [6] 邓诗凡. 城市老旧小区复杂地下管线综合探测研究[D]. 西安:西北大学,2021.  
DENG S F. Research on comprehensive exploration of complex underground pipelines in old urban districts [D]. Xi'an:Northwest University, 2021. (In Chinese)
- [7] 尹燕京,马向阳,王笏勇. 城市地下管线探测技术的应用[J]. 大坝与安全,2019(04):35—41.  
YIN Y J, MA X Y, WANG W Y. Application of urban underground pipeline detection technology[J]. Dam and Safety, 2019(04): 35—41. (In Chinese)
- [8] 罗小龙. 基于 GPRMAX 的地下管线探地雷达图像正演模拟[D]. 荆州:长江大学,2018.  
LUO X L. GPRMAX based ground penetrating radar image forward simulation of underground pipeline[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018. (In Chinese)
- [9] 赵欣. 探地雷达在地下管线探测中的应用研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2015.  
ZHAO X. Research on application of ground penetrating Radar in Underground pipeline detection[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2015. (In Chinese)
- [10] 王春辉,刘四新,黄玲. 探地雷达方法测量近地表含水量模拟研究[J]. 地球物理学进展,2009,24(02):737—741.  
WANG C H, LIU S X, HUANG L. Simulation of near-surface water content measurement by ground penetrating radar [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (02):737—741. (In Chinese)
- [11] HAGREY S A, MULLER C. GPR study of pore water content and salinity in sand[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(1): 63—85.
- [12] HÜÜLSENBECK P V. Verfahren zur elektrischen Boden-

- forshung[J]. German Pat, 1926: 489—434.
- [13] 李铂, 霍延焯. 地质雷达在地下管线探测中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2008(s): 461—462.  
LI B, HUO Y Q. Application of geological radar in underground pipeline detection[J]. Railway Construction Technology, 2008(s): 461—462. (In Chinese)
- [14] 王勇, 陈伟. 近间距平行地下管线探测方法研究[J]. 测绘通报, 2011(3): 22—25.  
WANG Y, CHEN W. Research on detection methods of near—distance parallel underground pipelines[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011 (3): 22—25. (In Chinese)
- [15] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
XIE C F, RAO K J. Electromagnetic Field and Electromagnetic Wave[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (In Chinese)
- [16] 花晓鸣, 吴丰收. 地质雷达在水电站坝基工程中的应用研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(3): 94—96.  
HUA X M, WU F S. Application of georadar in dam foundation engineering of hydropower station[J]. Journal of North China Institute of Water Resources and Hydropower, 2012, 33(3): 94—96. (In Chinese)
- [17] 许景辉, 赵钟声, 王一琛, 等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 322—331.  
XU J H, ZHAO Z S, WANG Y C, et al. Research on soil dielectric measurement based on Bilinear theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 322—331. (In Chinese)

## Research on effective detection depth of non—metallic pipelines by ground—penetrating radar

CHEN Shaobo<sup>1</sup>, ZHU Shengyan<sup>1</sup>, SHI Zongyuan<sup>2</sup>, HUANG Jianguo<sup>1</sup>, HUANG Lijie<sup>1</sup>,  
LUO Xiaoqian<sup>1</sup>, JIANG Tong<sup>2</sup>, ZHU Sixin<sup>2</sup>

(1. Huadong engineering(fujian) corporation limited, Fuzhou 350000, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and accuracy of ground—penetrating radar for non—metallic pipeline detection, this paper uses the electromagnetic wave simulation software GPRMax3.0 to design the orthorectified model based on the empirical diameter—to—depth ratio of 1 : 10 and applies different frequency antennas to carry out orthorectified detection simulation of non—metallic pipelines under different conditions. The effective bathymetric range of 100 M, 270 M, and 400 M antennas for non—metallic pipelines is summarized through the mutual simulation verification and actual detection results. This paper's experimental results can play a specific reference significance for ground—penetrating radar in urban underground non—metallic pipeline detection.

**Keywords:** ground—penetrating radar; GPRMax; forward simulation; non—metallic pipeline