

基于地磁场理论的管线探测技术研究与应用

何江龙^{1,2,3}

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100081; 2. 中国科学院大学 北京 100081;

3. 昆明市城市地下空间规划管理办公室 昆明 650011)

摘要: 长期以来,对地下非金属管线探测缺乏行之有效的办法,各类常规的管线探测仪器其实际探测效果都不理想。目前,一种利用地磁场原理探测新技术的出现,为有效解决地下非金属管线的探测带来曙光。利用基于地磁原理的探测设备,创新性的将该技术应用于昆明市某区域地下大管径非金属给水管线的探测,经过对数据合理的分析处理,取得了良好的探测效果,并总结出该区域地下非金属管线的地磁成像特征,这将对未来该类管线探测提供指导方法。

关键词: 地磁场、非金属地下管线、探测、探地成像仪

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

The underground pipeline detection technologies' research and application based on the geomagnetic field theory

He Jianglong^{1,2,3}

(1. Institute Of Electronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Kunming Management Office of Urban Undergrangd Space Planing, Kunming 650011, China)

Abstract: For a long time, Lack of effective methods to detecting nonmetal pipeline, all kinds of conventional pipeline detection instrument which effect is not ideal. Now, a new method which based on the principle of magnetic of detection nonmetal underground pipeline is being used. In this paper, the author used the detection equipment which based on the principle of magnetic to detect some big diameters underground water pipelines of non-metal in kunming as an example. Through rational analysis of the data processing, Good detection methods were obtained, and the paper summarizes the magnetic imaging characteristics of the non-metal underground pipeline in this region and provides guidance method of detection for the similar underground pipeline detection.

Keywords: geomagnetic field; non-metal underground pipeline; pipeline detection; underground imaging device

0 引言

近年来,随着中国城镇化建设进程的加快,城市地下管线越来越受到各级政府部门的重视,城市地下管线被喻为城市的“生命线”。然而,各城市在摸清城市家底,获取管线基础信息的过程中,地下非金属管线探测成为最棘手的问题。非金属管线由于其弱导电、导磁性,常规的各类专业管线探测仪器无法对其进行有效探测,致使城市建设过程中潜在的管线安全事故发生率大大提高。可以说,非金属管线探测是一个世界性难题。长期以来,基于地磁原理的探测设备主要应用于导航、游戏、姿态控制及考古等工作中,本文创新性的将基于地磁原理的探测技术应用于地下非金

属管线探测,并经过试验,进一步验证了该技术的可行性。近两年,管线安全事故频发,造成重大的城市居民生命财产损失和恶劣的社会影响,直接威胁到城市和谐和可持续发展。研究如何有效的探测地下非金属管线有其必要性和迫切性。

1 非金属地下管线探测现状

非金属地下管线是综合管线的一种,大多数城市中非金属地下管线主要为排水,部分涉及建设年代较长的原水管及煤气套管。城市排水管线基本可以通过开检查井的方式调查清楚,但原水管及煤气套管属于压力管,可供调查的明显点很少,因此,存在施工安全隐患的非金属主要是指以

上两类管线。近年来,PE材质管线得以大力应用,施工单位在埋设管线过程中忽略失踪线的布设,加之对管线竣工测量不重视,未来PE材质的管线探测也是难点之一。

最常见的非金属管线探测技术及方法主要有以下几种:

1.1 探地雷达

探地雷达(ground penetrating radar,GPR)法是利用超高频电磁波探查地下介质分布的一种地球物理方法,使用的仪器称为地质雷达。其探测的主要原理为:地下介质与被探测目标存在明显的物性差异(主要是电导率和介电常数差异),这种物性差异对电磁波具有不同的波阻抗,探地雷达探测过程中通过发射高频电磁脉冲波,进入地下的电磁波在穿过地下各地层或某一目标时,由于地面两侧的波阻抗不同,电磁波在介质的界面上会发生反射和折射,发射回地面的电磁波脉冲,其传播路径、电磁场强度与波形随所通过介质的电性质及几何形态所变化^[1-3]。

其探测原理如图1所示。

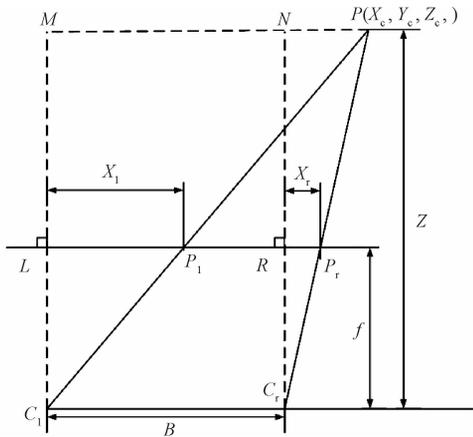


图1 雷达探测原理

由于探地雷达受地下水和埋深的影响较大,因此,当探测区域地下水位较高或者探测目标埋深超过5m后,其探测效果收效甚微。

1.2 陀螺仪管线探测技术

陀螺仪基本原理:陀螺仪是一种用来传感和维持方向的装置,基于角动量守恒理论^[4]。定位仪地理位置坐标的获取主要通过以下两步:

1)获取定位仪的速度分量:即对运动加速度 a_N 、 a_E 进行一次积分并与北、东向初始速度 V_{NO} 、 V_{EO} 求和得到定位仪的速度分量:

$$\begin{aligned} V_N &= \int a_N dt + V_{NO} \\ V_E &= \int a_E dt + V_{EO} \end{aligned} \quad (1)$$

2)通过对速度 V_N 和 V_E 位置变化量进行积分后与初始经纬坐标相加:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{R_E} \int_0^t V_N dt + \varphi_0 \\ \lambda &= \frac{1}{R_E} \int_0^t V_E \sec \varphi dt + \lambda_0 \end{aligned} \quad (2)$$

陀螺仪管线探测是将陀螺仪放置到管子中经过拖拽,得到其运行轨迹的坐标,从而得到管线的坐标,有一定的便捷性,但其要求目标管线要有出口和入口,以能将陀螺仪放入进行探测,加之管径太小或管径过大都不适宜陀螺仪探测。日常非金属管线探测中,能满足以上探测条件的极少,因此,使用陀螺仪进行非金属管线探测的方法局限性较大。

1.3 电子标识技术

地下管线电子标识器探测原理:探测设备发送一定频率的信号,该信号被地下标识器识别并激活,标识器发射预置信息,探测设备通过寻找接收该信号来确定标识器位置,信号最强处即为正确位置,标识器应埋设在地下设施附近作为其身份标志,并在地下管线施工过程中将电子标识器埋设于管线的关键部位如:弯头、接头、分支点、维修点等,以方便对目标设施进行精准定位、查找、识别和管理,显然,城市中大部分管线为已埋设的管线,此方法无法使用^[5-6]。

1.4 穿线法

穿线法探测原理是用常规的管线探测仪器,通过穿线器将探头导入目标管线,用常规管线探测的方法对探头位置进行探测,探头的行进轨迹即为管线的埋设位置。该方法使用前提是目标管线至少有一端有开口能放入探头,且目标管道埋深不能超过管线探测仪的探测深度范围。实际作业过程中很少具备这样的探测条件。

1.5 其他探测方法

目前,市场上有基于声波原理的非金属管线探测仪,但由于其使用条件的限制,探测效果也不理想。

非金属管线探测过程中,以上各种方法都会在不同的场合单独使用或综合使用,但往往由于客观条件与探测条件的矛盾,探测效果并不理想或完全无法解决。

2 工作原理

2.1 地磁场基本理论

地磁又称“地球磁场”或“地磁场”,指分布在地球周围空间的磁场,地球磁场近似于一个位于地球中心的磁偶极子的磁场,它的磁南极(S)大致指向地理北极附近,磁北极(N)大致指向地理南极附近,地表各处地磁场的方向和强度都因地而异,地磁强度两级最强(约为0.7奥斯特),赤道附近最低(约为0.3~0.4奥斯特)。地球磁场磁力线分布有其特点,主要是磁场方向不同:赤道附近磁场的方向是水平的,两极附近则与地表垂直,受各种因素的综合影响,地球表面的磁场随时间发生变化,地磁的南北极与地理上的南北极相反^[7-8]。

地球某一点的地球磁场向量 H_e 的三维图如图2所示。其中, x 和 y 轴与地球表面平行, z 轴垂直指向下,磁

场北极 H_{eh} , 即地球磁场的水平分量与前进方向的夹角 α (即方位角, 是从磁场的北极顺时针计算的, 如东为 90° , 西为 270°); 磁倾角 δ 是地球磁场向量与水平面的夹角 (赤道处为零, 极点处达到 $\pm 90^\circ$); 磁偏角 λ 是地理北极与磁场北极间的夹角^[9]。

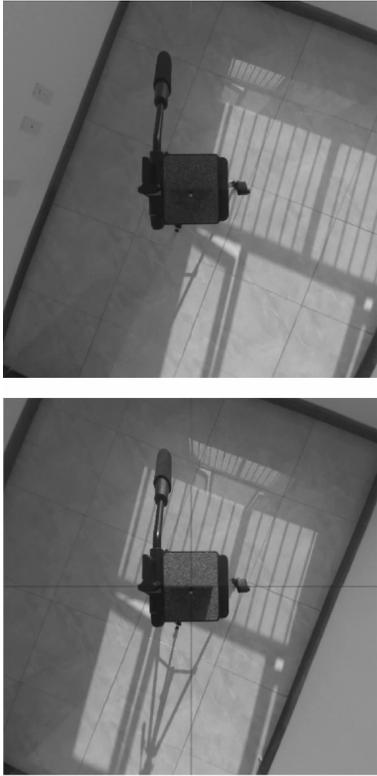


图 2 地磁场向量

某一时间和地点的地球磁场数值 (最少在几百年以内) 可以通过对地球磁场及其变化率的数学近似比较准确地估计^[10]。地表的磁场大致是个标量的势场, 并服从拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \Psi_m = 0$$

这个方程可以改写为:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2}{\partial \gamma^2} (\gamma \psi_m) + \frac{1}{\gamma^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\gamma^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial \varphi^2} = 0$$

这个方程的一个解是:

$$\psi_m = \frac{U(\gamma)}{\gamma} P(\theta) Q(\phi)$$

对地球磁场, 一般可以写作半径为 r , 纬度余弦 θ , 经度 ϕ 的标量势:

$$\psi(\gamma, \theta, \phi) = \frac{\alpha}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_l^m(\cos \theta)$$

$$\left[\left((g_e)_i^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (g_i)_i^m \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right)^{l+1} \right) \cos \theta m \phi + \left((h_e)_i^m \left(\frac{r}{a} \right)^l + (h_i)_i^m \left(\frac{\alpha}{\gamma} \right)^{l+1} \right) \sin \theta m \phi \right]$$

式中: g 和 h 是高斯系数, 可以从特定的年代计算得出, 单

位为 nT ; 角标 e 和 i 代表外场或内场的起源; a 是地球半径 ($6.371 \times 10^6 \text{ m}$); μ_0 是自由空间的磁导率, P_l^m 正比于勒让德多项式, 其由传统的施密特多项式归一化而来^[11]。

一般来讲, 如果下标 l 和上标 m 的差为奇数 (比如, 轴向偶极子 g_1^0 和八极子 g_3^0), 则相应的地球磁场对于赤道是非对称的, 反之则为对称的。

2.2 探地成像仪

所有探测仪器实现对目标体的识别主要是基于不同物质物性差异导致的探测信号差异。探地成像仪探测地下管线也主要是通过管线与其周边环境的物性差异, 并由此导致其地球磁场的信号幅度和相位与周边环境的不同, 从而实现不同目标识别探测的目的^[12]。

探地成像仪最大标称探测深度可达到 25 m, 目前, 各类主动源法的常规管线探测仪器都无法达到如此探测深度。但也有其局限性, 由于容易受到周边磁场的干扰, 其探测精度不理想, 但对成果精度要求不是第一考虑因素的工程来说, 探地成像仪不失为一种探测地下非金属管线的优选设备。

3 应用案例

以某一地块探测为例。该地块即将开发施工, 施工方提前了解到该地块内有非金属给水管线, 但不清楚其位置及埋设深度。本文采用探地成像仪对该地块进行探测, 取得了较好的效果。

3.1 测区概况

3.1.1 现场调研及踏勘

测区为待施工开发的空地, 作业条件较好。测区西侧临近河流, 主要功能为城市泄洪, 因此, 其水位对探测带来的影响可以忽略不计; 测区南侧为市政主干道, 道路下铺设综合管沟, 且车流量大, 这些因素都会对探测精度带来影响, 但可以通过远离该路段进行探测测区布设的方式来避免; 测区北侧为田地, 地质条件与测区基本相同; 测区东侧为城市另一条主干道, 可以采取与测区南侧相同的布设测线方式避免对探测造成影响。

通过对测区的调查了解, 初步确定该区域内目管线有 5 根, 基本属性如表 1 所示。

表 1 管线基本属性表

管类	材质	管径/mm	埋设年代	埋深/m
给水原水管	玻璃夹砂	1 200	5	约 2.5
给水原水管	砼	600	30	约 0.8
给水原水管	玻璃夹砂	1 200	5	约 2.5
给水原水管	砼	800	30	约 1.2
给水原水管	玻璃夹砂	1 200	5	约 3.0

3.1.2 已有资料情况

对测区内可利用的资料进行了尽可能多的收集, 主要

内容如下:

1)测区影像图:对测区的基本位置和测区基本环境进行初步理解和分析;

2)测区管线资料:了解测区周边管线分布基本情况:测区东侧与测区南侧的道路上分有管线。东侧道路管线主要有排水、给水、通信、电力、煤气等主要管线;南侧道路上有排水、煤气及综合管沟,综合管沟断面尺寸约为高3 m,宽5 m,目前入廊管线主要有:电力、给水及通讯管线。

3)测区其他资料:对测区内已有的水文资料、气象资料、地质资料等进行收集,作为后期数据处理时的参照。

3.2 测区分析

通过对测区踏勘和已有资料分析,测区基本情况如下:

1)测区土质浅层为粘土土质,次层为人工回填土,土质条件符合探测要求性较好;

2)测区内地下水位较浅,埋深在0.40~2.90 m,主要由临近河道下渗及大气降水补给,无明显流向,对探测带来一定难度。

3)测区探测目标埋设时间为5年和30年,探测目标具备地磁条件,满足探测目标识别要求;

4)周边道路管线及车辆给探测带来的潜在影响可以通过将测区布设在远离影响源处而避免。

综合分析,测区各项条件满足探测基本要求。

3.3 网格建立

先确定测区位置,考虑测区东侧和南侧道路管线及车辆对探测潜在影响,测区布设在保证覆盖所有待探测管线的前提下,尽量远离对探测有潜在影响的干扰区域。确定好测区位置后,在测区范围建立坐标网格:测区内待测目标管线为南北走向,建立东西长约32 m,南北宽约5 m的大范围。再将该范围分割为长8 m,宽5 m的4个小测区。综合考虑目标探测管线管径,为保证探测效果,每个小测区以间距为0.8 m建立网格,并撒石灰线进行实地标识,实施网格如图3所示。

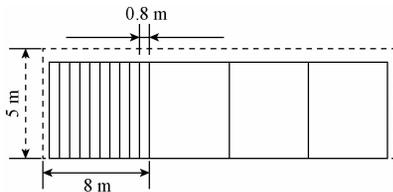


图3 测区地面规范网格设定

3.4 数据采集

1)扫描方向选择:由于该仪器是利用地磁原理工作,采用南、北方向效果最好,但由于场地中的管线为南北走向,探测以横断面扫描效果最佳,故本次探测方向选择东、西方向。

2)场地信息记录:对测区内的基本地理条件和探测目标体基本信息进行记录,包括:土壤类型、地形地貌、气象资

料、管线材质、管径、埋设时间等。基本信息采集主要为后期数据处理及结果分析提供辅助支持。

3)数据采集与存储:本次探测区域内土质主要为粘土层,获取正确的大地均衡后,开始数据采集工作。作业过程中传感器的方向必须保证其面对同一方向。数据采集过程中作业人员行走速度不能太快且要尽可能的保持匀速。

作业人员严格按照布设的测线进行数据采集,采集完一个区域后,对数据进行保存。依次按照顺序完成其他测区的数据采集。为了保证探测成果质量,每个测区至少重复采集3次,若结果尚不理想,考虑增加重复探测次数。

数据存储:为防止数据丢失,数据采集工作完成后,及时将数据备份至电脑。

3.5 图像识别

获取测区数据后,经后处理软件进行图像处理,2号区域原始扫描图像如图4所示。

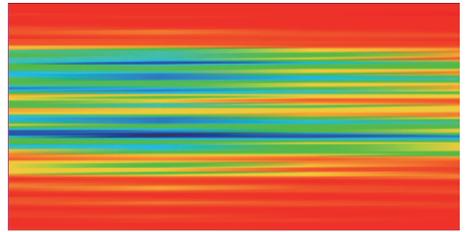


图4 原始扫描图像

通过数据异常处理,排除干扰信号,处理后的图像如图5所示。

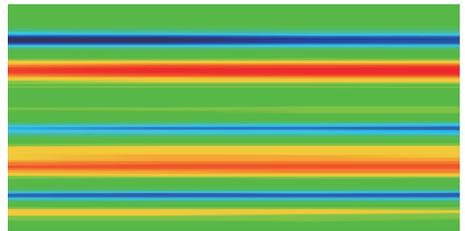


图5 干扰信号处理后的图像

3.6 图像处理结果

对探测数据处理后,得到探测目标的分布图像,图像中从上至下管线材质依次为玻璃夹砂管、砼管、玻璃夹砂管、砼管和玻璃夹砂管。根据不同物质对应地磁强度的不同,处理软件对不同探测目标体进行分色显示,其分色原则为:强地磁物质如金属、水泥等颜色用红色、棕色表示,田地等用绿色表示,水体用蓝色表示。本成果图中,3处蓝色异常代表玻璃夹砂原水管,两处红色异常代表水泥原水管,黄色表示管线周边钙化的土质,绿色代表田地。

图像可以通过3D及2D模式显示,分别如图6、7所示。

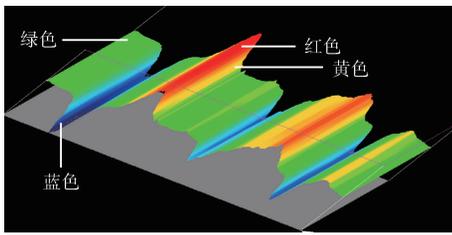


图 6 三位显示

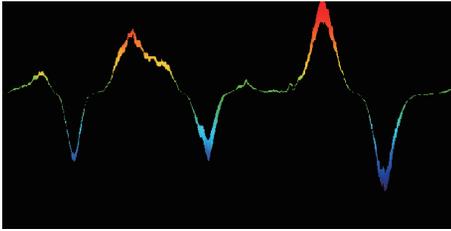


图 7 平面显示

4 结 论

本文研究的基于地磁原理的地下管线探测方法是目前国内正在推广使用的一种新型探测方法,通过实例,笔者验证了该项技术的先进性和可行性,但实际使用过程中也有其局限性:1)对探测环境要求严格,容易受到周边强磁场物体的干扰,导致在后续数据处理时,对目标图像识别和判读困难;2)探测成果精度低,不能满足当前国家相关行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 高云泽,叶盛波,张晓娟,等. 基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统[J]. 电子测量技术,2015,38(9):128-134.

- [2] 晋良念,钱玉彬,刘庆华. 超宽带穿墙雷达偏离网格目标稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):743-748.
- [3] 肖圣兵. 某型雷达通用自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术,2016,39(4):96-100.
- [4] 湛尧周,王夏霄,高洋洋,等. 地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响机理研究[J]. 电子测量技术,2016,39(1):147-150.
- [5] 李军,何婷婷,陈柯. 超高频 RFID 标准和测试技术演进[J]. 国外电子测量技术,2015,34(9):13-16.
- [6] 王建平. 一种射频功率检测控制系统的设计方法[J]. 电子测量技术,2016,39(8):191-195.
- [7] 张聪聪,王新珩,董育宁. 基于地磁场的室内定位和地图构建[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):181-186.
- [8] 王勇军. 基于磁阻和加速度传感器的三轴电子罗盘研制[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2010.
- [9] 刘素,刘鲁源,韩尧松. 基于 KMZ52 的电子指南针设计[J]. 电子产品世界,2005(7):90-92,97.
- [10] 胡晓. 水下导航系统的地磁匹配算法研究[D]. 泰安:山东农业大学,2011.
- [11] 彭琰举. 旋转导向钻井中新型数据采集系统研究及应用[D]. 西安:西安石油大学,2011.
- [12] 解智强,何江龙,王贵武,等. 基于地磁原理的非金属地下管线探测技术的研究与应用[J]. 地矿测绘,2010(3):13-16,19.

作者简介

何江龙,工学博士,高级工程师,主要研究方向为工程测量、地理信息、超宽带雷达应用等。

E-mail:wind9158@126.com