

许韬, 彭功勋, 吴涛, 等. 基于电磁静力触探法的深埋金属管线探测探头设计与应用[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1355-1363. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221009002

XU Tao, PENG Gongxun, WU Tao, et al. Design and application of a probe for deep buried metal pipeline detection based on electromagnetic method and cone penetration method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1355-1363. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221009002

## 基于电磁静力触探法的深埋金属管线 探测探头设计与应用

许韬<sup>1,2</sup>, 彭功勋<sup>1</sup>, 吴涛<sup>3</sup>, 沈旭章<sup>2</sup>, 袁忠明<sup>1</sup>

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060;

2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082;

3. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 设计一种基于电磁感应法的地下金属管线探头, 其特点在于可以采用静压贯入的方式接近目标管线进行探测, 在贯入的过程中可以实时读取电磁场的强度和锥尖阻力, 从而安全地获取地下管线的空间位置信息, 以防止对地下设施造成破坏。在设计中, 探头创新性地利用感应线圈磁芯传递锥尖阻力, 并使用非金属外壳防止信号屏蔽, 拟通过滤波放大电路减少外界干扰。通过模型试验和现场试验, 对探头探测效果进行验证, 认为可以将管线埋深探测误差控制在 5 cm 以内, 探测精度远高于现行规范要求。研究对深埋管线的高精度探测和地下管线保护具有积极意义。

**关键词:** 管线探测; 电磁法; 静力触探; 深埋管线; 高精度定位

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1355-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221009002

## Design and application of a probe for deep buried metal pipeline detection based on electromagnetic method and cone penetration method

XU Tao<sup>1,2</sup>, PENG Gongxun<sup>1</sup>, WU Tao<sup>3</sup>, SHEN Xuzhang<sup>2</sup>, YUAN Zhongming<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, Guangdong, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China;

3. School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** This paper has designed an underground metal pipeline detection probe based on the electromagnetic induction method. The advantage of this probe is it can approach and detect the target pipeline by means of static pressure penetration. During the penetration process, the electromagnetic field strength and the cone tip resistance can be read in real time to obtain the location information of underground pipelines safely and prevent any damage to underground facilities. In the probe design, the magnetic core of an induction coil was used to transmit the cone tip resistance, the nonmetallic shell was also used to prevent signal shielding, and a filter amplification circuit was used to reduce external interference. Through model and field tests, the detection

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230305)

第一作者简介: 许韬(1993-), 男, 江西万年人, 博士, 主要从事岩土工程勘察研究。E-mail: ironway@163.com。

effect of the proposed probe was verified. The results showed that the detection error of the pipeline's buried depth can be controlled within 5 cm. This study has a positive significance for high-precision detection and underground pipeline protection of deep-buried pipelines.

**Keywords:** pipeline detection; electromagnetic method; cone penetration; deep buried pipeline; high-precision positioning

## 0 引言

城市的发展离不开地下管线,城市地下管网体系具有规模庞大、综合复杂的特点。因此,地下管线探测关系到每个居民的切身利益,也关系到城市的可持续性发展<sup>[1]</sup>。在城市规划、设计、施工和管理工作中,如果没有完整准确的地下管线信息,就会寸步难行甚至发生破坏,从而造成重大安全事故和经济损失<sup>[2]</sup>。在实际工程中,可能由于管线过于老旧,或者涉密等原因无法获取资料,对于非开挖工法施工的管线<sup>[3]</sup>,中间段的位置也难以确定。

一般深埋管线具有埋深大、重要性高、危险性高等特点,一旦破坏将对社会影响巨大。目前常用的非开挖探测方法主要是地球物理方法<sup>[4]</sup>,包括:磁测法<sup>[5]</sup>、电磁法、探地雷达法<sup>[6]</sup>、声波法、浅层地震法等,这些方法大多在地面上进行<sup>[7]</sup>,但由于实际应用中易受到探测环境、管线交叠、地下其他异常情况干扰,从而造成探测不准<sup>[8]</sup>。

为解决深埋管线探测的难题,可以采用减小探测设备与目标管线距离的方法,如余继红等<sup>[9]</sup>提出先利用管线探测仪在地面确定水平位置,再通过静力触探设备在水平点贯入,通过贯入阻力判断探头是否触碰到目标管线。张永命等<sup>[10]</sup>通过预钻孔,在孔中下放线圈测量电磁场获得更清晰的信号,称之为“竖直剖面法”。郑启炳等<sup>[11]</sup>通过小型背包钻将测量探头压入地下的方式,实现了深埋管线的电磁法竖直剖面探测,其缺点在于钻孔施工过程中,不能监测贯入阻力,存在破坏浅层未知管线或其他构筑物的风险<sup>[12]</sup>。

为解决现有管线探测中的静力压入法不能实时测量探头贯入时的锥尖阻力问题,研究了一种新型地下管线探测设备,将电磁传感器的尺寸压缩,集成到静力触探探头中进行贯入。该设备不仅可以通过电磁传感器探测金属管线,还可以在压入过程中实时测量锥尖阻力,在其超过某安全阈值时停止贯入,从而有效避免贯入过程对地下设施的破坏,从而有效提升地下管线探测的准确性和安全性。

## 1 工作原理

地下金属管线在探测范围内通常可以近似为长

直导线,通过信号发射机向目标管线施加特定频率的激励信号,地下金属管线在交变电流的作用下,在周围产生感应电磁场。根据电磁场理论<sup>[13]</sup>,无限长直导线周围产生的电磁场遵循毕奥-萨伐尔定律。

$$H(r_0) = \frac{\mu_0}{2\pi r_0} I_0 e^{-i\omega t} \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  为常数; $I_0 e^{-i\omega t}$  为谐变电流大小; $\omega$  为电流角频率; $H$  为电磁场强度; $r_0$  为探测点到管线的距离。由式(1)可知,在不考虑衰减的情况下,电磁场强度与距离成反比,与电流大小成正比<sup>[14]</sup>。

通过贯入安装有电磁感应线圈的探头测量电磁场的大小,即可反映出所探测管线的信息(图1)。探测线圈只能得到轴向分量的电磁场强度,线圈处电磁场强度分量  $H_z$  随深度  $z$  的变化关系式为:

$$H_z(z) = H \cdot \cos\theta = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{d}{z^2 + d^2} I_0 e^{-i\omega t} \quad (2)$$

式中: $\frac{\mu_0}{2\pi}$  为常数; $I_0 e^{-i\omega t}$  在一次测量中可以认为是定值,将其设为1。不考虑电磁波在土体中的衰减,由式(2)计算得到电磁场强度与钻孔距离的关系如图2所示。只需要知道电磁场强度峰值的位置,即可以推测出管线的位置,物探中称为峰值法,也称极大值法<sup>[14]</sup>。

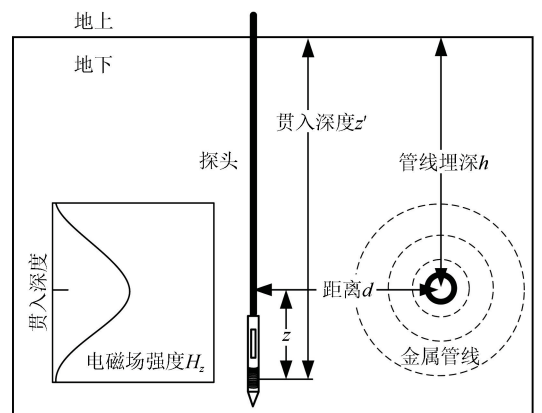


图1 电磁感应法探测管线埋深原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of pipeline depth detection by electromagnetic induction method

在常规的地面探测中,得到的是水平剖面信息,因此可以直接得到管线的平面位置,而埋深则需要

通过反演或特征点法间接得到,其误差通常大于水平位置误差,规范<sup>[15]</sup>要求隐蔽管线平面位置和埋深的探测中误差分别为  $0.05h$  和  $0.075h$ ,这里  $h$  指地面探测时管线的埋深。而采用垂直贯入的方式可以得到竖直剖面,利用峰值法可以直接得到管线埋深,且由于探测距离缩短,满足规范要求的情况下,埋深探测中误差降低为  $0.05d$  ( $d$  为距离,如图 1 所示),可以显著降低深埋管线的探测误差。

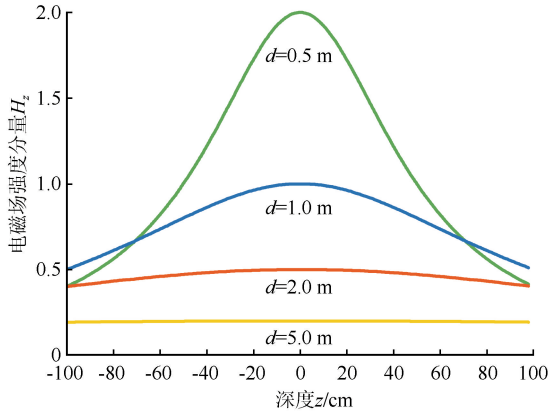


图 2 电磁场强度分量在空间中的分布

Fig.2 Spatial distribution of the electromagnetic field intensity component

## 2 硬件设计

### 2.1 探头整体设计

用于电磁法探测地下金属管线的探头,需要能够探测特定频率的电磁波信号,相当于静力触探探头集成管线探测仪接收机的功能。由于需要贯入土层,探头应兼具强度高、体积小、抗干扰强、防水耐磨等性能,因此在结构、材料、电路等方面需要专门设计。本文创新之处在于,电磁感应线圈的磁芯作为增大电感的元器件的同时,可以传递锥尖阻力。这样就不再需要通过下端侧壁摩擦筒传递锥尖阻力,因此下端侧壁摩擦筒可以使用非金属材质,避免了探头外壳对电磁信号的屏蔽,探头结构如图 3 所示。

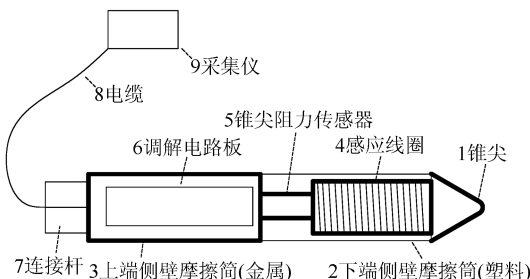


图 3 探头结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the probe structure

常规的静力触探锥尖为  $60^\circ$  尖角,为防止在贯入过程中对 PE 等塑料材质管线造成刺入破坏,本文将锥尖设计成圆角。设计图和实物图如图 4 所示。

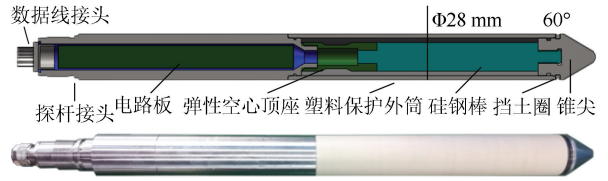


图 4 电磁静探探头设计图及实物图

Fig.4 Design and physical maps of electromagnetic cone penetration probe

### 2.2 硬件电路设计

#### 2.2.1 电磁感应硬件电路设计

在测量过程中,对不同类型的地下金属管线可能需要施加不同频率的信号,因此设计可选频率的接收电路,电磁感应法探测系统硬件电路整体方案如图 5 所示。

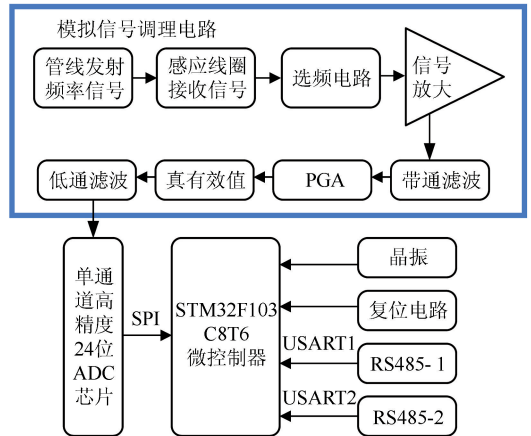


图 5 电磁感应法探测系统硬件电路结构图

Fig.5 Hardware circuit structure diagram of electromagnetic induction detection system

电磁感应法硬件电路由感应信号接收线圈、多路 LC 谐振选频电路、前级信号放大电路、带通滤波电路、程控放大电路 (PGA)、真有效值电路、低通滤波电路、ADC 采集电路、单片机最小系统电路、通讯电路和电源电路组成。感应线圈用于将外界交变磁场信号转化为感应电动势输出;感应电动势经过多路 LC 谐振选频电路、前级信号放大电路、带通滤波电路和程控放大电路 (PGA) 被选频和放大;然后采用真有效值电路将选频和放大后的信号转换为其均方根值输出;再由 24 位高精度模数转换芯片 ADS1255 完成信号同步采集;最终将采集的信号经单片机处理后,通过 RS485 通讯电路上传到上位机

进行数据分析和处理。

### (1) 感应线圈的设计

感应线圈设计分为两部分：一为磁芯的选取；二为感应线圈的绕制。磁芯的选取要考虑两个方面：①磁芯为探头机械结构的一部分，要保证探头向下贯入的过程中，磁芯在外力作用下不能发生明显的形变、弯曲和破损。②磁芯材料要具有较高的导磁率、较低的矫顽力及较高的电阻率。由于所检测的频率为低频信号，最终磁芯材料选定为硅钢，感应线圈绕制在硅钢加工而成的圆柱棒上（直径 17.5 mm）。硅钢的弹性模量约为 200 GPa，在常见岩土体中进行贯入应变小于 1/10 000，磁导率几乎不发生变化。为了减小集肤效应的影响，感应线圈应采用多股线绕制，线圈外径  $d_1 \leq 22.5$  mm，线圈高度为 70 mm。同时，为了降低线圈的寄生电容对线圈的频率特性的影响，对线圈采用分段绕制的方式。通过阻抗测量仪对绕制线圈进行测量，根据测量数据匹配谐振电容，进行前级 LC 谐振选频。

### (2) 程控多路 LC 谐振选频电路

感应线圈在接收到外界激励磁场后会产生感应电动势。虽然地下相对地面干扰源较少，但地下可能存在相邻管线如高压电缆、信号线等，也会产生干扰噪声。由于感应线圈产生的电动势很微弱（mV 级），同时含有其他频率成分的干扰信号，因此，感应线圈前级采用选通电路（电压谐振，8 选 1），对其他频率信号进行过 LC 串联谐振抑制。通过程序控制模拟多路开关 74HC4051 导通回路，匹配谐振电容，以实现 940 Hz、2 kHz、4 kHz、8 kHz、33 kHz 等不同频率的信号进行选频。信号经 RLC 谐振选频电路后，选用 JEFT 运算放大器 ADA4622，以保证信号完整输入并减小信号的损耗，同时对信号进行初级放大。

### (3) 带通滤波电路

常用的带通滤波器有巴特沃斯、切比雪夫、贝塞尔带通滤波器。为有效地滤除 8 kHz 和 33 kHz 以外的杂波信号，并且获得较好的选频效果，需要设计较高品质因数  $Q$  的带通滤波器。在此选用增益带宽积为 420 MHz、压摆率为 180 V/ $\mu$ s 的低噪声轨道输出运行 LTC6226，设计 Sallen-Key 拓扑结构的四阶巴特沃斯带通滤波电路，从而有效滤除杂波信号。

### (4) 有效真值电路

感应线圈接收信号经选频、放大及滤波后，采用真有效值电路将感应信号（正弦交流信号）转化为其

均方根值。真有效值转换器能够精确测量输入信号中直流和交流两个分量的真有效值。相比于求平均值电路，输入信号波形较为复杂时，均方根直流转换器都能测量输入信号的均方根值。AD637 集成均方根直流转换器的性能、精度、带宽和动态范围，可有效地计算出复杂波形的均方根值。

AD637 的真有效值转换硬件电路在设计中，需要确定求平均值的时间常数。求平均值时间是真有效值转换器计算期间保持输入信号的时间，直接影响着真有效值测量精度。时间常数通过设置有效真值电路中  $C_{33}$  的容值来确定，计算如下：

$$\tau = \frac{0.025}{1\mu F} \times C_{33}, (\tau \text{ 的单位: s}) \quad (3)$$

### (5) 低通滤波电路

实际真有效值电路转换过程中，正弦信号输入真有效值转换器 AD637 无法得到真理想值；经过真有效值转换器后，会同时包含直流和交流误差分量。直流误差分量为输出信号平均值  $\overline{E_0}$  与理想输出  $E_0$  之间的直流电压差。交流分量输出误差以输出纹波的形式存在，纹波频率为输入信号频率的 2 倍。因此，在真有效值电路信号输出端设计低通滤波电路，来消除转换器输出中交流误差的纹波。

### (6) ADC 模数转换电路

线圈接收信号经模拟信号调理电路，由单通道、低噪声、24 位 ADS1255 进行 A/D 转换。ADS1255 内部由输入缓冲器（Buffer）、可编程增益放大器（PGA）、模拟调制器、可编程数字滤波器、时钟发生器控制器和串行外设接口等构成。时钟从外部输入，采用 7.68.M 有源晶振，频率信号更稳定，同时也减少了其他杂散信号的干扰。

### (7) 主控电路

依据实际测量系统的需求，主控单元设计采用 LQFN 封装的 STM32 系列单片机—STM32F103C8T6，实现感应电压测量、控制及数据处理。

### (8) 电源模块电路

因感应线圈接收信号为交流信号，由正分量和负分量构成。单电源供电会造成信号失真，因此，模拟信号调理电路采用  $\pm 5$  V 进行供电。模拟信号调理电路对精度和噪声要求较高。因此，在设计时选用低噪声 LDO 模块中的 TPS7A3001 和 TPS77401 分别来提供  $\pm 5$  V 电压。LDO 模块相较于 DC/DC 模块，虽然输出功率较小，但是无开关噪声，非常适合为模拟信号中的调理电路供电。电磁感应硬件电

路实物如图 6 所示。

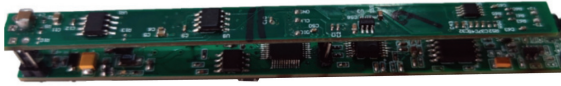


图 6 电磁感应硬件电路实物图

Fig.6 Photo of electromagnetic induction hardware circuit

### 2.2.2 锥尖阻力硬件电路设计

锥尖阻力硬件电路主要包括主控电路、电源电路、信号调理电路、通信接口几个部分,其主要实现功能是:将探头中的电桥原始信号放大和滤波,通过主控芯片的 ADC 进行模数转换,经通信接口将转换后的数字信号发送到上位机。为了配合探头的尺寸,在器件选型上尽量选择小封装的器件,PCB 的尺寸为 8.5 mm×110 mm。硬件电路整体方案如图 7 所示。

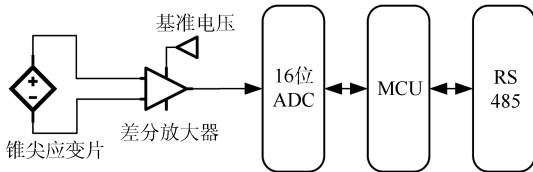


图 7 锥尖阻力探测系统硬件电路结构图

Fig.7 Hardware circuit structure diagram of cone tip resistance detection system

#### (1) 主控电路

主控采用 NXP Kinetis 系列中的 KL17 芯片, KL17 芯片最高时钟可达到 48 MHz,内部集成 16 通道的高精度 16 位 ADC,软件可使用 SW 模式调试下载,在深度睡眠情况下消耗的电流仅为 1.96 μA,最小封装仅为 2.8 mm×2.7 mm,适用于小型传感器和探头的设计。

#### (2) 电源电路

通过 DC/DC 转换芯片 LM22673 将输入电源转换为 5 V 的直流稳压电源,再进一步降压分别给信号调理电路、主控电路、通信接口电路供电。

#### (3) 信号调理电路

电桥输出的原始信号十分微弱,电路上通过差分放大电路进行放大,通过调节 R25/R26/R32/R33 的电阻值,即可调节放大的倍数;放大后的信号经过一个二阶低通滤波器,最后接入主控芯片的 16 位 ADC 中。

#### (4) 通信接口电路

锥尖硬件电路与上位机的通信采用的是 RS485 通信,通过一个 485 串口通信芯片进行电平转换实现。最终锥尖阻力测量电路板实物如图 8 所示。



图 8 锥尖阻力电路板实物

Fig.8 Physical circuit board of cone tip resistance

## 3 软件设计

软件适用于 Windows 7/8/10 系统环境,使用 C++ 语言,Qt Creator 4.10.0 (Community)平台开发。

软件可以针对不同的探测任务,建立不同的孔号、不同的孔号名称和孔号属性工程文件,并具有参数可视化功能,包括数据显示和图形显示两部分,数据显示通过数字量的形式在特定区域;图形显示将主要的磁场信号绘制成曲线,更加直观、方便。实时显示物理量主要包括:电导率、线圈电磁感应强度、三轴姿态角、锥尖压力、侧壁压力以及深度等。可调整的参数主要有:采集速率、增益、频率等,如图 9 所示。

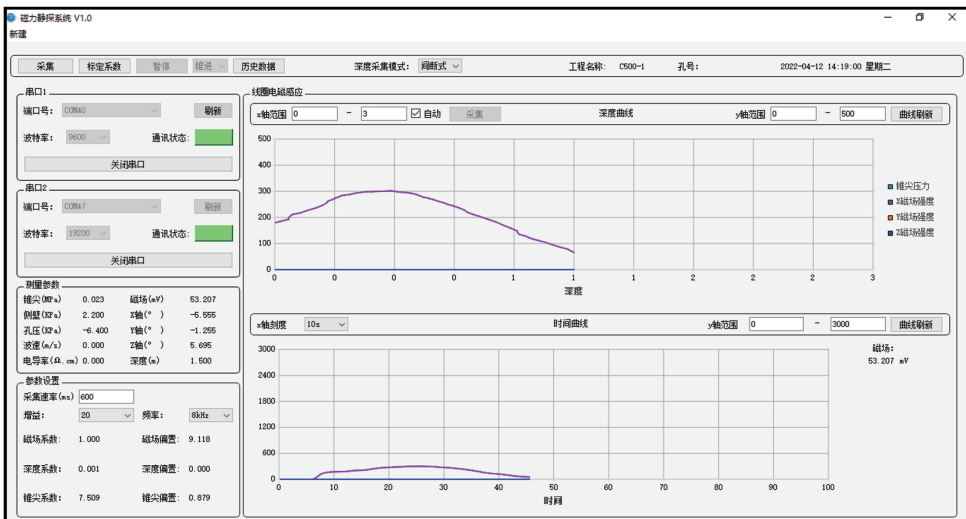


图 9 软件显示界面

Fig.9 Software display interface

### 4 试验测试

为检验探头的性能,进行了一系列模型试验和现场试验测试。其中模型试验使用圆形导线通过交流电产生电磁场,电磁场的空间分布可由电磁场理论求解得到。探头朝向和运动方向均为竖直,模拟贯入探测的工作过程,并设计了圈内探测和圈外探测,以模拟工作中距离管线较远和存在地下水的情形,如图 10 所示。

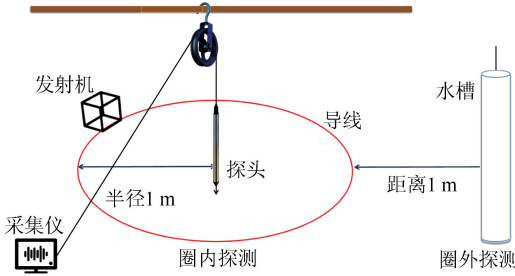


图 10 模型试验示意图

Fig.10 Schematic diagram of the model test

#### 4.1 线性度测试

由图 2 知,需要通过电磁场强度曲线反演得到管线位置信息,因此探头需要良好的线性度来保证电磁场强度探测的准确性。将探头固定在圆形导线中间,通过改变电流大小调节电磁场强度,得到读数与电流的关系如图 11 所示,说明线性度良好。

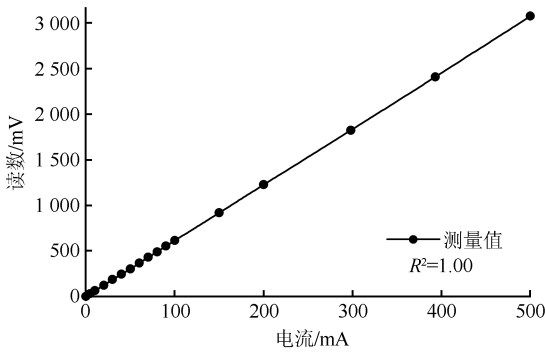


图 11 电流强度与读数的关系

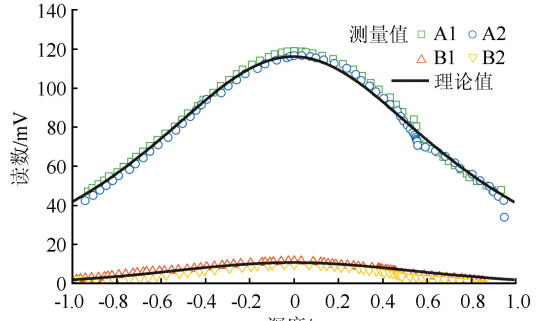
Fig.11 The relationship between current intensity and reading

#### 4.2 模型试验

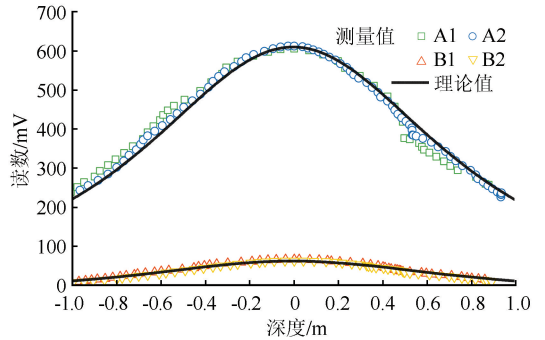
模型试验以半径为 1 m 的圆形导线为载流体,使用定滑轮牵引探头垂直运动,具体方案为:A 圈内探测;B 圈外探测;C 圈外水下探测。

横梁、导线支架均采用木制结构,发射机使用雷迪的 Tx-10,电流频率 8 kHz,电流强度根据需要依次使用 20/100/500 mA。探头从导线圆心正上方

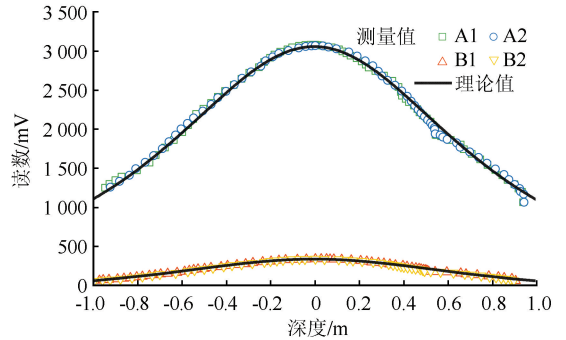
约 1 m 处垂直向下运动,在圆心正下方约 1 m 处停止,使用拉绳式深度计记录位移变化,试验过程中采样间隔固定为 600 ms,探头的运动速度控制在 5 cm/s 以下。每个测量参数,重复进行两次试验,结果如图 12 所示。



(a) 电流 20 mA



(b) 电流 100 mA



(c) 电流 500 mA

图 12 模型试验实测值与理论值

Fig.12 Measured and theoretical values of model test

模型试验的理论值通过电磁场理论得到。当导线半径为  $R$ ,电流为  $I_0$  时,圆环轴线上距离中心  $z$  处的电磁场强度为:

$$H = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} I_0 \tag{4}$$

圈外磁场分布解析解较为复杂,可以通过数值积分求解。给出导线在空间中的参数曲线表达式  $U(\theta)$ ,电流为  $I_0$ ,待测点位置为  $P$ ,坐标  $(x, y, z)$ ,电流元为  $d\vec{l}$ ,电流元到  $P$  点的单位矢量为  $\vec{e}_r$ ,可得

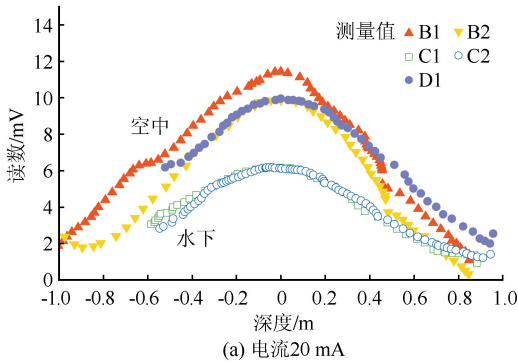
导线在  $P$  点产生的感应磁场  $\vec{H}$  为:

$$\vec{H} = \frac{\mu_0}{2\pi} I_0 \int_0^{2\pi} \frac{\partial U(\theta)}{\partial \theta} \times \vec{e}_r \frac{1}{[P-U(s)]^2} \quad (5)$$

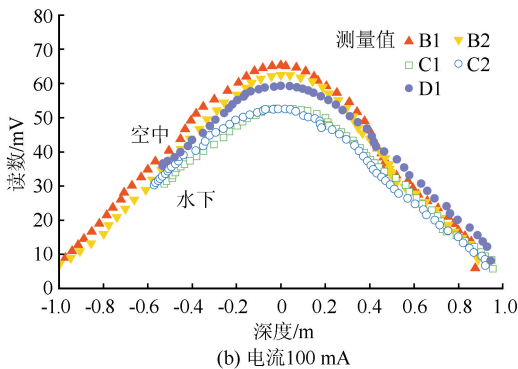
观察发现试验测量值和理论值吻合较好,试验结果曲线基本呈对称分布,且曲线光滑(除 0.5 m 处由于重新搭接深度计发生一点波动),峰值明显且唯一。

试验采样间距 2~4 cm,加之读数存在波动导致读数最大值和理论电磁场强度最大值的位置存在偏差,分析数据发现该误差通常为 1~2 cm,最大不超过 4 cm,与采样间距相当,属于正常的测量误差。由于数据对称性好,如果采用峰值附近的采样点数据拟合,可以减小误差值。

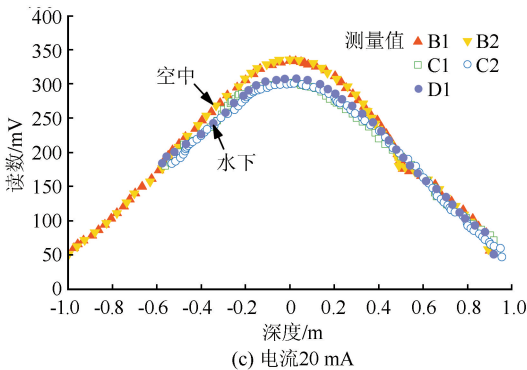
将探头移至圈外从水中放入,进行 C 组试验,后将水槽移走,进行 D 组试验,试验结果如图 13 所示。



(a) 电流 20 mA



(b) 电流 100 mA



(c) 电流 20 mA

图 13 水下与空中试验结果对比

Fig.13 Comparison between underwater and aerial test results

水下测量读数会有所减小,可能由于电磁信号衰减导致。对比不同电流下的测量结果发现,电流较大时读数波动相对较小,实际应用中应尽量加大信号电流。试验结果表明,探头防水效果好,水下电磁场分布依然符合一般规律,该探头可以用于位于地下水位以下的超深埋金属管线的探测。

### 4.3 现场试验

广州市黄埔区埔北路某交叉路口存在多条牵引管线,需要探明埋深,管线为 PVC 套管,探测时利用穿线器将金属导线从 PVC 套管的工作井中穿入,发射机使用雷迪的 Tx-10,电流频率 8 kHz,电流大小约为 200 mA。先利用接收机 RD8000 在地面确定水平位置,再在距离目标管线约 1 m 处贯入探头,记录深度和电磁场读数,探测结果如图 14 所示。

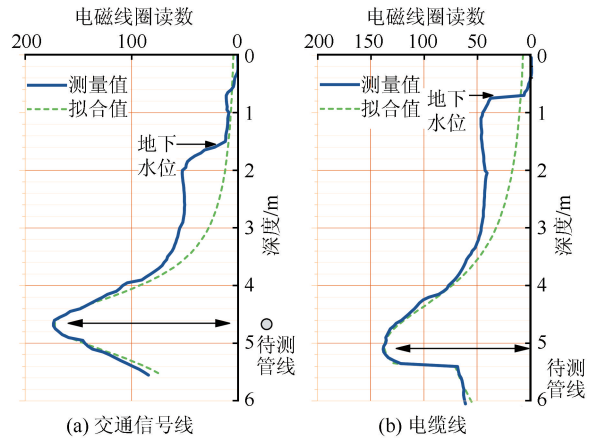


图 14 现场试验结果

Fig.14 Field test results

试验现场通过路面开挖和搜集资料发现,填土层中有多条供水、电力等管线,给深埋管线探测造成了较大影响。现场试验结果表明,电磁静探法在接近管线深度附近读数较大,受浅层干扰较小,峰值清晰。拟合得到的峰值位置与示踪探头定位的实际埋深位置相差小于 10 cm,其中,电缆线在第一次开孔过程中,水管插到了同管廊内临近的 PVC 套管,深度约 5.1 m,第二次开孔后顺利贯入,使用探头测量峰值处深度读数为 5.12 m,如果待测管线与临近管线埋深相同,可以认为探测误差小于规范要求的  $0.075h$ 。由于采用贯入探测的方式,相当于探测了竖直剖面,其探查中误差应满足规范要求的“平面位置探查中误差”,即  $0.05d$ ,  $d$  为贯入点与待测管线的平面距离。

对比土层中的试验结果(图 14)、空气中的试验结果(图 12)和水中的试验结果(图 13)发现,空气和水属于均匀介质,测量曲线对称性好,而土层属于非

均匀介质。因此,峰值附近的曲线不一定对称,介质的非均匀会使测量产生误差。采用贯入法探测的优势是探头距离待测管线更近,如本案例小于 1 m。如果采用常规的地面探测,设备距离待测管线大于 5 m,期间跨越的介质类型更多,不均匀性引起的误差更大,因此采用贯入探测的方式可以最小程度地减小介质不均匀的影响。

#### 4.4 刺入破坏测试

管线探测的前提是保护管线,常规的竖直剖面探测往往需要钻头成孔或探头压入,如果探头无法实时获取锥尖阻力,或锥尖过于尖锐,可能在贯入过程中对既有管线造成损坏。因此本文需要进行对管线的刺入破坏测试,以验证设备的安全性能。

燃气管线常使用 PE 塑料,韧性较好,分别使用常规的静力触探探头(60°尖角)和改进后的圆角探头进行贯入测试,结果对比见图 15、16。发现常规尖角探头在约 6 kN 的贯入力下,就会将 10 mm 厚的 PE 管刺破,安全性不佳。而改进的圆角探头,在 10 kN 的贯入力下,没有出现刺破管壁的情况,说明安全性好。



图 15 常规探头(尖角)刺入试验

Fig.15 Penetration test using conventional probe (sharp corner)



图 16 改进探头(圆角)刺入试验

Fig.16 Penetration test using improved probe (rounded corner)

在贯入过程中同步测量锥尖阻力,发现在土层中贯入顺利,遇到障碍物时贯入受阻,锥尖阻力读数陡增,且探杆出现明显反弹,可以判断为遇到障碍

物,此时应停止继续贯入,防止造成破坏。贯入过程中锥尖阻力曲线如图 17 所示。

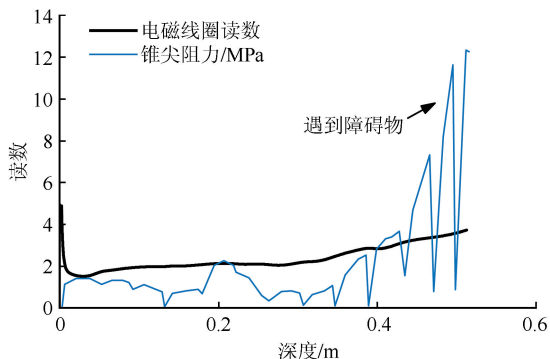


图 17 贯入试验锥尖阻力曲线

Fig.17 Cone tip resistance curve from penetration test

同时贯入结果也表明,使用图 15 中的便携式贯入设备可以提供超过 12 MPa 的锥尖阻力,且探头形态完好,各项读数正常。探头的标定锥尖阻力最高可达 40 MPa,实际工程中能达到的锥尖阻力与贯入设备提供的贯入力有关。工程经验表明 12 MPa 的锥尖阻力可以贯入密实砂等大部分土层<sup>[16]</sup>,在城市地区可将硬化路面和地表杂填土清除后使用,该探头适用性较好。

## 5 结论

本文设计了基于电磁静力触探法的地下金属管线探头,探头可采用贯入的方式对深埋地下管线进行精准探测,可以同时测量电磁场和锥尖阻力的大小,在探测管线的过程中,避免对既有地下设施造成损害。通过模型试验和现场试验,验证了探头对管线埋深的测量精度高于规范要求,且具有足够的强度和防水性能,适用于城市地区的深埋地下管线探测,对管线保护有重要意义。

## 参考文献(References)

- [1] 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,2021,36(3):1236-1247.  
CHEN Sijing, HU Xiangyun, PENG Ronghua. Review of urban underground pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1236-1247.
- [2] 杜兵,丁年.高度城市化条件下的城市地下管线建设管理体系探讨[J].中国给水排水,2021,37(6):48-55.  
DU Bing, DING Nian. Investigation on municipal underground pipeline construction management system under high urbanization [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 48-55.
- [3] 陈洪涛,王绍华,郭嘉谕,等.市政管线非开挖水平定向钻导向轨迹设计探讨[J].天津建设科技,2021,31(4):72-74.



- CHEN Hongtao, WANG Shaohua, GUO Jiarong, et al. Discussion on guiding track design of trenchless horizontal directional drilling for municipal pipeline[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2021, 31(4): 72-74.
- [4] 姚鹏君, 王少广, 王庆婵, 等. 几种深埋管线探测技术的特点及应用效果探讨[J]. 勘察科学技术, 2019(1): 53-57.
- YAO Pengjun, WANG Shaoguang, WANG Qingchan, et al. Characteristics and application effect of several deep-buried pipeline detection technologies[J]. Site Investigation Science and Technology, 2019(1): 53-57.
- [5] ZHAO D D, GUO Z Y, DU J, et al. Geometric modeling of underground ferromagnetic pipelines for magnetic dipole reconstruction-based magnetic anomaly detection[J]. Petroleum, 2020, 6(2): 189-197.
- [6] AMELIA R, BAGASKARA A, SANTOSO S B, et al. Application of ground-penetrating radar method to detect underground pipes in Pair Batan utility area[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2309(1): 012029.
- [7] 王勇. 城市地下管线探测技术方法研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- WANG Yong. Study and application of detection techniques and methods of urban underground pipelines[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [8] 杨志军, 吉小军. 电磁法探测地下金属管线的理论与误差分析[J]. 电子测量技术, 2009, 32(6): 7-11.
- YANG Zhijun, JI Xiaojun. Underground metal pipeline EM detecting theory and error analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(6): 7-11.
- [9] 余继红, 孙希莹, 陆伟华, 等. 管线探测仪和静力触探仪相结合的探测方法与应用[J]. 现代测绘, 2018, 41(4): 16-20.
- SHE Jihong, SUN Xiyang, LU Weihua, et al. Methods and application of the combination of pipeline detector and cone penetration testing to detect underground pipelines[J]. Modern Surveying and Mapping, 2018, 41(4): 16-20.
- [10] 张永命, 肖顺, 陈锐杰. 利用“竖直剖面法”实现超深地下管线的精确定位[J]. 城市勘测, 2014(3): 173-176.
- ZHANG Yongming, XIAO Shun, CHEN Ruijie. Realizing the accurate location of super deep underground pipeline by using “the vertical section method”[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(3): 173-176.
- [11] 郑启炳, 张永命. 非开挖施工超深管线高精度探测技术[J]. 城市勘测, 2019(S01): 230-233.
- ZHENG Qibing, ZHANG Yongming. High precision detection technology for non-excavation construction of ultra-deep pipeline[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(S01): 230-233.
- [12] 韩立, 程林. 孔中磁梯度法在超深金属管道探测中的应用[J]. 土工基础, 2020, 34(2): 258-260.
- HAN Li, CHENG Lin. Application of downhole magnetic gradient method in locating of deeply buried metal pipelines[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(2): 258-260.
- [13] 张宗岭, 张效良. 地下管线探测电磁场异常特征的理论与实践[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 83-85.
- ZHANG Zongling, ZHANG Xiaoliang. The theory and practice of the abnormal character of electromagnetic field in detecting underground pipeline[J]. Geology and Exploration, 2002, 38(1): 83-85.
- [14] 张汉春, 莫国军. 特深地下管线的电磁场特征分析及探测研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1314-1322.
- ZHANG Hanchun, MO Guojun. Study on electromagnetic field feature and probing effect about very deep buried pipeline[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1314-1322.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下管线探测技术规程: CJJ 61—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for urban underground pipeline detection and survey: CJJ 61—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [16] 林之恒, 冯涛, 孟少伟, 等. 砂土内摩擦角与静探锥尖阻力的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 639-644.
- LIN Zhiheng, FENG Tao, MENG Shaowei, et al. Study on the relevance between angle of internal friction and cone resistance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Suppl02): 639-644.

(本文编辑:任 栋)