

埋地非金属管道定位仪的设计

刘 辉¹, 陈 波², 谢明华¹, 杨 追²

(1. 长沙学院 电子信息与电气工程学院, 长沙 410022;
2. 湖南普奇水环境研究院有限公司, 长沙 410201)

摘要: 设计了一种基于音频定位法的埋地非金属管道定位仪, 该定位仪以 STM32F103C8T6 微控制器为核心, 由发射机和接收机组成; 首先介绍了系统的工作原理, 然后对发射机和接收机的硬件电路组成和控制软件设计作了详细的介绍; 测试结果表明该定位仪定位比较准确, 抗干扰能力强, 平均检出率达到 80% 以上, 水平精度最高达到 0.2 m, 检测有效埋深 1.8 m, 有效长度达 1 000 m。能够满足城市建设施工开挖、自来水管测漏等对埋地非金属管道定位的需求, 为管理和维护城市埋地管网带来了方便。

关键词: STM32 微控制器; 非金属管道; 音频定位法

Design of Positioning Instrument for Buried Non-metal Pipeline

Liu Hui¹, Chen Bo², Xie Minghua¹, Yang Zhui²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China; 2. Hunan Puqi Water Environment Research Institute Limited Company, Changsha 410201, China)

Abstract: A positioning instrument for buried non-metallic pipeline based on audio positioning method is designed. The positioning instrument is based on STM32F103C8T6 micro controller and consists of transmitter and receiver. Firstly, the working principle of the system is introduced, then the hardware circuit composition and control software design of transmitter and receiver are introduced in detail. The test results show that the positioning instrument is accurate and has strong anti-interference ability. The average detection rate is more than 80%, the highest horizontal accuracy is 0.2 m, the effective depth of detection is 1.8 m, and the effective length is 1 000 m. It can meet the needs of urban construction excavation, water pipe leakage detection and other buried non-metallic pipeline positioning, and bring convenience for the management and maintenance of urban buried pipe network.

Keywords: STM32 micro controller; Non-metallic pipeline; Audio positioning method

0 引言

随着城市化建设的普及, 国内相继在供水、排水和天然气输送管网中铺设越来越多聚乙烯材质制成的塑料管(简称 PE 管)。

PE 管具有耐磨、耐腐蚀、质轻、流体流动阻力小、使用寿命长、安装方便等许多优点。但 PE 管材为惰性材质, 不导电、不导磁, 埋地敷设后, 很难精准探测其位置及埋深^[1]。目前对于金属管道已经有比较成熟的探测技术^[2]。但是对于 PE 等非金属材质管道的探测技术, 均具有一定的局限性。如: 探地雷达定位法, 只适用于管径较大, 埋设较浅, 地面平坦的管道, 易受地质条件、周围环境影响, 不适用于管网密集、管道类型复杂地区^[3]; 超声定位法, 容易受管道周围交通状况、道路施工其他声源等外加声场影响, 水平、垂直精度和检出率较低^[4]; 示踪导线法、地面标识法, 虽然方法简单实用, 但需要在管道施工时铺设辅助设施, 不适用于运行期的非金属管道^[4-5]。

近年来, 在役埋地管道穿孔、泄漏等事故时有发生。管网日常维护、抢险和城市建筑施工过程中的开挖现象越来越普遍, 由于难以确定地下非金属管道的具体位置, 无法完全避免施工开挖造成挖断、挖漏等第三方破坏事故, 给人民群众的生命和财产造成损失, 也给管理和维护管网安全带来了很大的难题。

因此, 开发一种操作方便、体积小、成本低廉的埋地非金属管道定位仪器, 准确定位埋地 PE 管道具有重要意义。

1 系统结构及原理

本设计的非金属管道定位仪采用音频定位法, 利用声波在管道内传播时会发出特定频率的声波, 以及在管道正上方与周围土壤之间声音的差异, 对管道进行定位^[3]。主要由音频信号发射机和音频信号接收机组成。发射机为一个音频振动器, 有恒频、变频和脉冲发射 3 种探测模式, 可以根据管道现场地质情况、埋深深度来选择不同的发射

收稿日期: 2020-10-07; 修回日期: 2020-11-05。

作者简介: 刘 辉(1968-), 男, 湖南双峰人, 长沙学院电子信息与电气工程学院教授, 工学硕士, 主要从事智能测控技术与自动化装置方向的研究。

引用格式: 刘 辉, 陈 波, 谢明华, 等. 埋地非金属管道定位仪的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 251-255.

频率，根据探测距离来调节发射功率。

接收机接收音频振荡器发射的信号，将接收机的接收信号频率调整到和发射机相同的频率，将外界杂音过滤除掉，只接收音频振荡器发出的音频信号。

如图 1 所示，定位仪工作时，通过音频信号发射机向管道内发射一个特定频率的音频信号，音频信号带动气体振动，沿管道往前传播，通过管壁上方土壤传到地面。由于音频信号是在管道内传播的，所以在管线点位置音频信号最强。使用接收机在管道上方的地面上采集音频信号并解算，从而实现埋地非金属材料管道的准确定位。

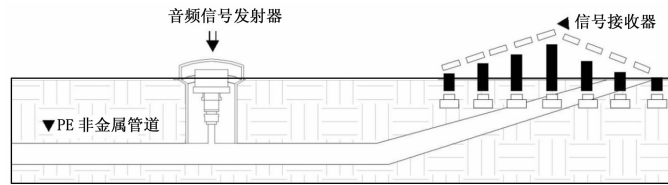


图 1 埋地非金属管道定位仪的工作原理示意图

2 系统硬件设计

2.1 发射机

如图 2 所示，发射机主要由 STM32 主控芯片，OLED 显示屏，键盘，蓝牙接收电路，移动控制端，隔离电路，信号幅值调节电路，音频功率放大电路和高音驱动头组成。音频信号由主控器内部定时器产生，主控器通过幅值调节电路和音频功率放大电路，实现输出信号幅值和功率的精确调节。

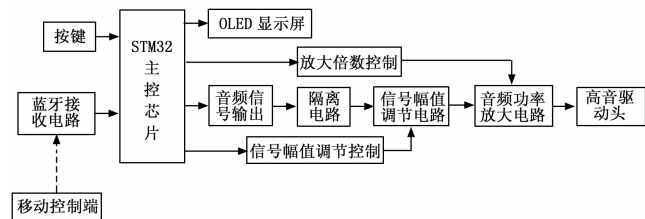


图 2 音频发射装置原理框图

2.1.1 主控模块

如图 3 所示，主控制器采用 STM32F103C8T6 单片机，单片机的引脚 OSC_IN、OSC_OUT 外接一个 8 MHz 的石英晶体振荡器作为系统时钟。引脚 PA5、PA6 用 IIC 接口连接 OLED 显示屏，用来显示输出模式、信号频率、输出功率等参数。引脚 PA8 输出 PWM 音频信号。引脚 PB12、PB13、PB14、PB15 接 4 个独立式按键，用来设置探测模式、调节输出音频信号频率和发射功率等参数。引脚 PB4、PB5、PB6 连接 x9c102s 数字电位器，用来调节音

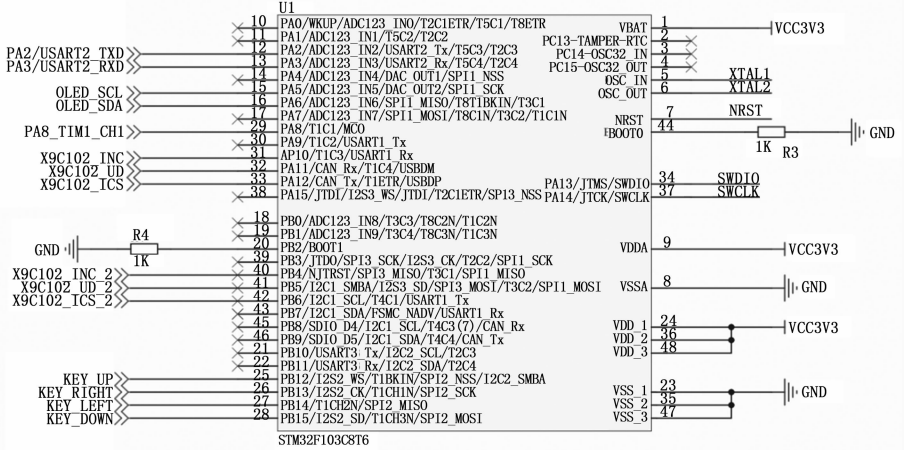


图 3 主控制器硬件连接图

频功率放大电路的放大倍数。

2.1.2 音频功率放大模块

在本设计中，需要将主控制器输出的微弱音频模拟信号进行放大。音频功率放大模块可以将输入的音频模拟信号进行放大，使其能驱动一定阻抗的高音驱动头。

功放模块采用 TPA3116 功放芯片来完成，TPA3116 是 TI 公司出品的一款高效的数字音频功率放大芯片，片内集成的 120 m 欧姆 MOSFET，可提供高达 7.5 A 的输出电流，具有高效率、性能好、非线性失真低等优点^[6]。在电源电压满足的情况下，可以提供 2 × 50 W 的功率。TPA3116 可以输入单端信号和差分信号，两路输入分别为左右声道，并且内置了故障保护电路，保证芯片正常工作，其外部连接电路如图 4 所示。本设计中使用的主要引脚功能如下。

RINP：右声道音频输入正极。

RINN：右声道音频输入负极。

PLIMIT：功率限制水平调整，在 GVDD 到 GND 之间连接一个电阻分压器来设定功率限制。

BSNR：右声道负输出引导，需要连接 280nF 的电容至 OUTNR。

OUTNR：右声道音频输出负极。

OUTPR：右声道音频输出正极。

BSPR：右声道正输出引导，需要连接 280nF 的电容至 OUTPR。

音频信号由数字电位器引脚 3 端通过电容 C26 输入 TPA3116 功放芯片右声道音频正极 RINP，通过电容 C27 将右声道音频负极 RINN 输入交流接地，电容 C27 的值等于正极上的输入电容 C26。其他未使用的信号输入端接地，以实现最佳的噪声性能。

2.1.3 电源模块

发射机需要提供 3 种不同的电压值才能正常工作，使用降压稳压技术设计电源模块来使发射机可以用同一个电池供电。电源模块电路如图 5 所示。采用三次降压方式，18 V 直流电源为音频功放电路供电。18 V 直流电源经过

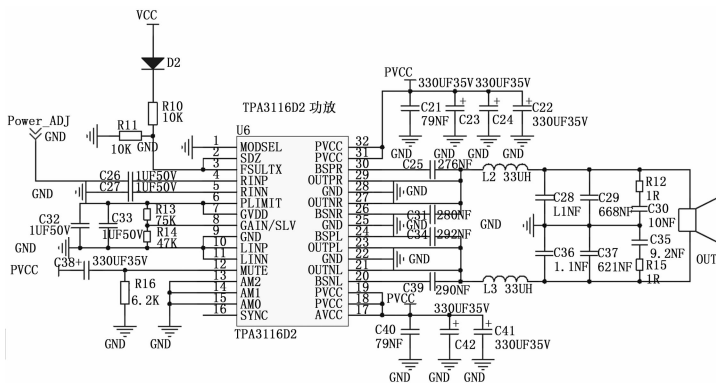


图 4 音频功率放大电路原理图

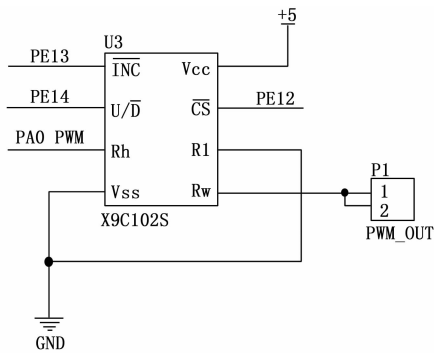


图 7 数字电位器连接电路图

LM2596S DC-DC 直流可调降压稳压模块后输出 5 V 直流电压为蓝牙通信模块、隔离电路和信号幅值调节电路供电, 再利用 AMS1117 降压稳压芯片将 5 V 转换输出 3.3 V 直流电压为 STM32 微控制器和 OLED 显示屏供电。

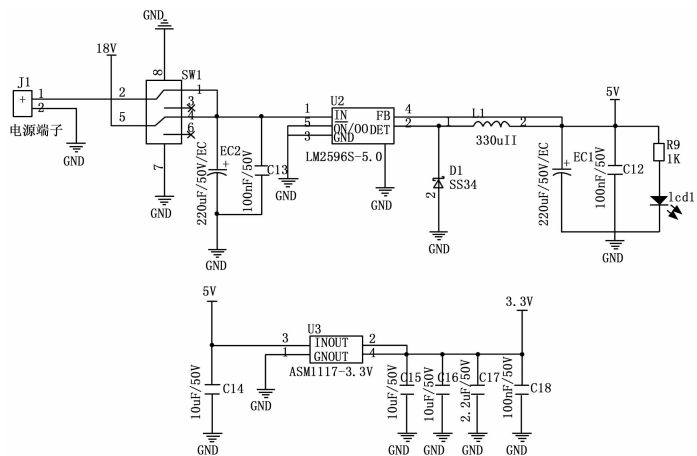


图 5 电源电路原理图

2.1.4 蓝牙模块

将手机等无线设备当做主机, 将音频发射机作为从机, 将主控制器与手机进行无线连接, 通过手机蓝牙发送不同的指令来实现输出信号模式和参数的无线调节控制。控制系统中采用 BT04-A 蓝牙模块, 直接将其 RX、TX 端口连接到 STM32F103 芯片的 USART_TXD 和 USART_RXD, 如图 6 所示。

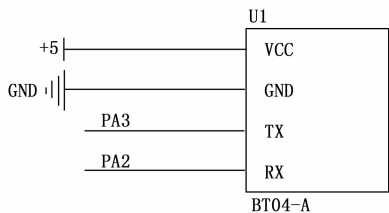


图 6 蓝牙模块连接电路图

2.1.5 数字电位器模块

数字电位器通过微控制器写入数字量来调整阻值, 具有阻值调节范围大、调节的阻值精准、稳定等优点, 是一

种新型的可编程电阻器。本设计中采用数字电位器对输出的 3.3 V 峰值信号进行分压, 调节输出信号的电压幅值, 电路连接如图 7 所示。主控芯片引脚 PE12、PE13、PE14 引脚分别连接数字电位器的 CS、INC 和 U/D 三根信号控制线。CS 控制片选, 低电平有效。INC 控制阻值调整, INC 下降沿使数字电位器阻值加、或者减 10 欧姆。U/D 控制阻值调整方向, 高电平为加、低电平为减。

2.2 接收机

接收机包括 STM32 微控制器、振动传感器、电压放大电路、数字滤波器、降噪模块、触摸屏和监听耳机, 如图 8 所示。接收机在工作状态下, 通过振动传感器采集管道中发射机产生的音频信号, 然后将接收到的音频信号传递到放大电路进行信号放大处理, 经 CPU 进行数字滤波/频谱分析后, 生成频谱并发送给触摸屏显示出来, 频谱的幅度表示音频信号的强度, 幅度越大, 表示音频信号越强。操作人员可针对不同土质灵活的选取不同频率段的电信号, 并根据该电信号生成频谱, 实现在不同的环境中定位探测, 并准确的判断出管道的位置。同时还可以通过耳机监听音频信号, 协助操作人员做出更准确的判断。

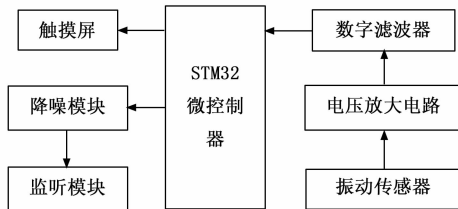


图 8 音频接收装置组成结构图

放大电路设计:

振动传感器将管道内的轻微振动转换为电压信号, 通过电压放大电路将该信号进行前置放大, 保证信号在传输过程中不会因为信号强度太小导致信号丢失, 确保信号传递的完整性以及信号分析的准确性^[7]。

如图 9 所示, 电压放大电路采用三运放数据放大器, A1 和 A2 组成了前级输入, A1 的同向输入端作为第一信号 U_1 输入端, A2 的同向输入端作为第二信号 U_2 输入端, A3 为后级的差分式减法电路, 作为信号输出端。在该电

路中, 由于第一级为串联电压负反馈, 输入电阻很高, 当 A1 和 A2 特性相同时, 能够很好地抑制共模信号, 减小温度漂移。

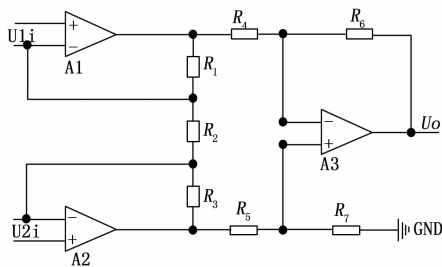


图 9 放大电路原理图

2.3 设计参数

适用管道: 外网;

频率: 1~10 000 Hz;

增益: 10 级可调;

音量: 10 级可调;

工作环境温度: -20~+50 ℃;

探测深度: ≤200 mm;

充电时间: 15 小时;

待机时间: 7~8 小时;

接收机功率: ≈2 W; 发射机功率: 可以从 5 W 到 50

W 调节;

充电器: 5 V、2 A、USB 充电;

主机重量: 0.7 kg;

主机尺寸: 长: 214 mm, 宽: 146 mm, 高: 48 mm。

3 系统软件设计

发射机控制软件由微处理器初始化模块、蓝牙接收数据处理与信息回传模块、信号输出控制模块和屏幕显示信息控制模块组成。

3.1 发射机主程序设计

主程序先进行各种外设和微控制器初始化, 然后进入无限循环, 在循环程序中完成蓝牙串口通信数据处理与信息回传、音频信号输出及控制、按键扫描及处理和数据显示更新等功能, 程序流程如图 10 所示。

STM32 主控芯片使用一个 32 位定时器, 带输出比较功能的通道产生 PWM (脉宽调制) 音频信号, 根据需要输出的信号频率设置 ARR (自动重装) 寄存器的值, 实现音频信号输出频率控制。

所有按键识别及处理都在扫描按键的定时器中断服务函数中实现; 对手机发送信息的处理需要利用 STM32F103 芯片的串口中断完成, 然后把数据存入蓝牙接收数组, 再进行数据识别及处理。

3.2 按键和蓝牙接收程序设计

通过定时器中断产生固定的时间间隔, 定时扫描 I/O 口电平进行参数调整按键检测, 可以避免使用外部中断时在中断服务函数中使用延时消抖的弊端。可以实现短按和

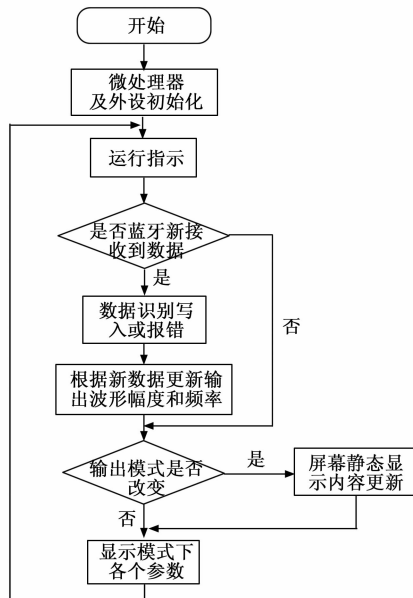


图 10 主程序流程图

长按效果, 为了兼顾按键的灵敏度和准确度, 实现每次短按必定被检测到且不被多次触发, 按键的定时扫描间隔时间设置较短。为了防止一次按键多次触发, 程序中判断连续两次按下的时间间隔, 只有时间间隔超过一定时间, 才会成功触发。

蓝牙串口开启 IDLE 中断, 可以接收不定长度字节数据且不用数据帧帧尾。程序流程图分别如图 11~12 所示。

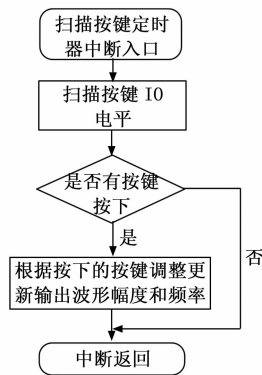


图 11 按键检测程序流程图

3.3 接收机数字滤波程序设计

管道上方接收到的音频信号会与外界噪声混在一起, 对定位的准确性形成有效干扰。为了解决这一问题, 设计音频信号数字滤波器, 程序设计步骤如下:

- 1) 对音频数据流进行分帧;
- 2) 将连续两帧数据组合, 再将组合后的数据进行 FFT (fast Fourier transform) 变换, 得到信号的频率和幅值;
- 3) 对 FFT 结果加汉宁窗;
- 4) 对加窗后的 FFT 结果进行 FFT 反变换;
- 5) 将 FFT 反变换结果剔除不需要的频率成分, 消除边

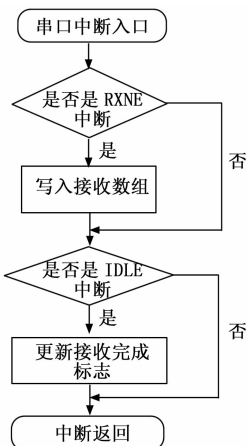


图 12 蓝牙串口程序流程图

界效应的影响, 取出中间二分之一, 得到一帧实际需要的音频数据。

按上述步骤对接收到的音频信号进行数字滤波, 既能满足滤波器对幅度和相位特性的严格要求, 又可以避免模拟滤波器所无法克服的电压漂移、温度漂移和噪声等问题, 提高了定位的准确性。

4 测试结果与分析

4.1 测试场实验测试

在室外开阔地域埋地 PE 管道三根, 长度均为 1 000 m, 管径分别为 50 mm、150 mm、300 mm, 间隔 1 m, 埋深 50~180 cm, 斜放。在不同的埋深及不同管径情况下记录测定的水平精度、检出率及有效距离, 测试结果如表 1 所示。

表 1 非金属管道探测的实验数据

管径/mm	埋深/cm	水平精度/cm	检出率(%)	有效长度/m
50	75	20	100	1 000
	100	25	100	1 000
	150	30	80	1 000
	180	40	60	1 000
150	75	20	100	1 000
	100	25	100	1 000
	150	30	80	1 000
	180	40	60	1 000
300	75	20	100	1 000
	100	25	100	1 000
	150	30	80	1 000
	180	40	60	1 000

由表 1 可知该定位仪定位比较准确, 抗干扰能力强, 不同管径和不同埋深的平均检出率达到 80% 以上, 检测有效长度达 1 000 m。

4.2 市政自来水管网测试

由于市政自来水管网覆盖范围大, 先从阀门井或者消防栓开始, 沿着管道走向以 3~5 m 为一段间距, 使用定位模式探测。在间距区域内对相关点进行信号采集对比, 定

位模式下最多可采集 16 个点位, 每一个检测点位可直接进行信号柱的对比, 如图 13 所示。从左至右依次检测对比各点信号强度, 当所测点粗柱状条最高, 数值最大, 可以判断该处为管道位置点。还可以通过听耳机内的声音进行各点的比对来协助判断。沿管道找出下一个位置点, 并依次做出标记。在无法确定管道的大致走向时, 以接入点为圆心, 以 3~5 m 为半径, 沿着圆周线盲找, 找出柱状条最高的点标记为管道第一个位置点, 把接入点与第一个点连接起来, 就可以判断出管道大致走向。

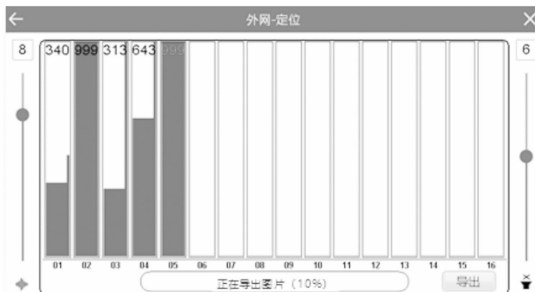


图 13 定位信号频谱变化图

5 结束语

本文针对目前大量地下非金属管道没有明显的地表标识, 难以确定管道的具体位置这一问题, 设计了一种基于音频定位方法的埋地非金属管道定位仪, 介绍了定位仪的工作原理, 音频发射装置和接收装置的系统组成、主要硬件原理图和控制软件的开发与设计。测试结果表明: 该定位仪定位比较准确, 抗干扰能力强, 水平精度达 20 cm, 埋深探测有效深度达 180 cm, 不同管径和不同埋深的平均检出率达到了 80% 以上, 检测有效长度达 1 000 m。

该定位仪用于城市建设施工开挖过程中对埋地管道进行探测, 可以有效避免管道被挖断, 造成自来水和燃气泄漏等事故, 保护人民群众的生命和财产安全, 同时也为管理和维护城市中的埋地管网带来方便。

参考文献:

- [1] 袁厚明, 李兆华, 袁晓华. 埋地 PE 管道探测技术与设备 [J]. 燃气技术, 2018 (7): 8-13.
- [2] 刘博昱. 关于埋地非金属管道完整性管理技术的思考 [J]. 化学工程与装备, 2020 (1): 194-196.
- [3] 董本万, 岳建新, 李国政. 城镇 PE 燃气管道定位方法研究 [J]. 检测技术, 2018, 35 (4): 55-59.
- [4] 田 峰. 地下非金属管线实用探测方法浅析 [J]. 华北国土资源, 2017 (5): 103-105.
- [5] 徐长虹, 朱宏斌, 朱能发. 示踪导线法在非金属材料探测中的应用 [J]. 城市勘测, 2011 (1): 159-163.
- [6] 刘昱州. 一种基于 WIFI 通信的音频功率放大器研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 27-32.
- [7] 陈 波. 一种管道定位装置 [P]. 中国专利: 201920155745.3, 2019-11-26.