

# 面向水平定向钻的透地测深系统设计

王鑫,吴键,奚润开,师恬恬,陈灵

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为提高水平定向钻施工中透地测深的精度,提出一种基于磁感应的双线圈测深模型并予以实现。系统采用单天线发射、三天线接收的设计方案,以 STM32F103 作为主控芯片,设计甚低频信号收发模块,并将三天线接收的信号用 LABVIEW 和 MATLAB 进行处理,计算出深度,最终实现透地测深。系统的测试结果证明了该设计的正确性,并表明了所设计的透地测深系统有较高的透地测深精度。

**关键词:**水平定向钻进;磁感应;甚低频;DDS

**中图分类号:**TP206+.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0120-04

## Design of Penetrating Sounding System for Horizontal Directional Drilling

WANG Xin, WU Jian, XI Runkai, SHI Tiantian, CHEN Ling

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of depth sounding in the construction of horizontal directional drilling, a dual-coil sounding model based on magnetic induction is proposed and implemented. The system adopts a design scheme of the single-antenna transmission and three-antenna reception. With STM32F103 as main control chip, the VLF signal transceiver module is designed, and the signals received by the three antennas are processed with LABVIEW and MATLAB to calculate the depth and finally realize the penetration test deep. The test results prove the correctness of the design and show that the designed penetration sounding system has higher penetration sounding accuracy.

**Keywords:** horizontal directional drilling; magnetic induction; VLF; DDS

## 0 引言

自从水平定向钻进技术开发以来,西方国家的高校、科研院所和企业投入了大量的人力、物力对水平定向钻进导向定位系统进行研究,经过 40 年的研究,取得了大量的研究成果<sup>[1]</sup>。美国电力工程研究所、美国 DCI 公司、美国 Ditch Witch 公司和英国雷迪公司等相继开发了针对不同使用场景且功能强大的水平定向钻进导向定位系统<sup>[2]</sup>。这些企业生产的导向定位设备基本上垄断了世界的水平定向钻进导向定位仪器市场。其中,美国 DCI 公司的猎鹰 F 系列,英国雷迪公司的 RD385、DrillTrack 系列是世界上最畅销的导向定位仪器。这些公司的产品经过多年的发展和改进已经推出了成熟的产品,这些产品具有自动化水平高、测深定位精度高、探测范围广、故障率低的优点,能满足大多数非开挖施工的要求。这些产品一经问世就牢牢占据了大部分的市场份额<sup>[3]</sup>。

我国的水平定向钻进导向定位系统的发展落后于西方国家,直到 21 世纪初,国防科技大学在“863”项目的支持下与中联重科公司合作,对水平定向钻进导向定位系统进行了较为深入的研究<sup>[4-6]</sup>,研制出了基于单片机和 DSP 的地下钻具姿态测量和导向定位系统,并设计了工程样机。但是该样机在实际应用中存在测深定位精度低、范围

小的缺点,与西方国家的产品相比还存在不小的差距。自“863”项目之后,国内的高校和科研机构对水平定向钻进导向定位系统进行了一系列的研究,但是都没有取得突破。西方国家凭借技术壁垒占据了我国的市场,而国外产品高昂的价格、维修的不便大大制约了我国水平定向钻进技术的发展。

为加快我国水平定向钻进导向系统的研制步伐,提高水平定向钻的透地测深精度,本文提出一种基于磁感应的双线圈测深模型的设计方案,并进行了系统研制和实验验证。具体过程阐述如下。

## 1 双线圈测深模型

如图 1 所示,由 A、B 两个线圈组成接收天线阵列,同时接收发射天线产生的磁场,其中 B 线圈紧贴地面,A 线圈在 B 线圈的正上方。A、B 两线圈的距离为  $d_0$ ,A、B 两线圈之间的介质为空气;C 线圈作为发射天线,在 B 线圈的正下方,B、C 两线圈之间的距离为  $d$ 。B、C 两线圈之间的介质为土壤层。 $d$  就是需要测量的量。

假设 3 个天线都在一个竖直平面内,接收天线 A、B 的感应电动势分别为  $\phi_A$ 、 $\phi_B$ ,离发射天线的距离分别为  $d+d_0$ 、 $d$ ,由式(1)可以推导出接收线圈 A 和 B 的感应电动势为

第一作者简介:王鑫(1996—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为透地测深定位。

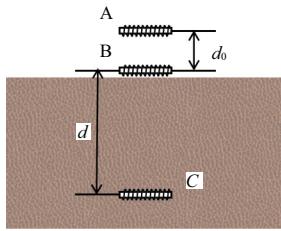


图 1 双线圈测深

$$\begin{cases} \phi_A = -\frac{A}{(d+d_0)^3} \\ \phi_B = -\frac{A}{d^3} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $A = -\frac{\mu_0 \mu \omega L I_m \cos \theta t}{4\pi d} \Delta S$ , 代入式(1), 得

$$\frac{\phi_A}{\phi_B} = \frac{d^3}{(d+d_0)^3} \quad (2)$$

将上式继续进行变化, 即可得到双天线测深模型, 其测量公式为

$$d = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{\phi_B}{\phi_A} - 1}} d_0 \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 消除了 A 对 d 的影响。

## 2 透地测深系统设计

### 2.1 信号发射模块设计

发射模块的主要功能: 产生处于甚低频段的 20 kHz 电磁波信号并通过螺旋天线发射。如图 2 所示, 发射模块主要可以分为信号发生模块、功率放大模块、天线模块和电源模块。

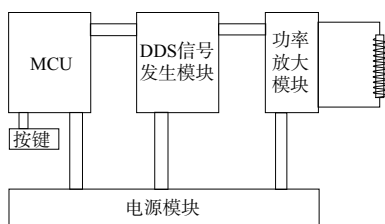


图 2 信号发射模块结构框图

信号发生模块采用的是目前常用的 DDS 技术<sup>[7-9]</sup>, 即直接数字频率合成技术, 其能够实现频率的快速切换, 拥有较高的频率分辨率, 并且容易实现频率、相位和幅度的程控变化。

DDS 芯片是信号发生模块的主要器件, 也是整个模块的核心。结合本系统的需求, 主要从输出信号的频率分辨率、输出信号的频率范围、功耗和性价比四个方面进行考量和筛选。最终选择 AD9834 作为 DDS 芯片。

本系统设计的 AD9834 原理图如图 3 所示。

此外, AD9834 的输出是根据奈奎斯特采样原理进行采样的信号, 其输出频谱包含基波和混叠信号(镜像), 且

镜像频率为参考时钟频率和所选输出频率的倍数, 混叠镜像的突出程度取决于输出频率和参考时钟频率的比值。如果比值非常小, 混叠镜像将非常突出且能量水平较高。为此本系统在输出末端设计了一个低通滤波器, 截止频率为 30 kHz, 以进一步抑制混叠镜像效应。

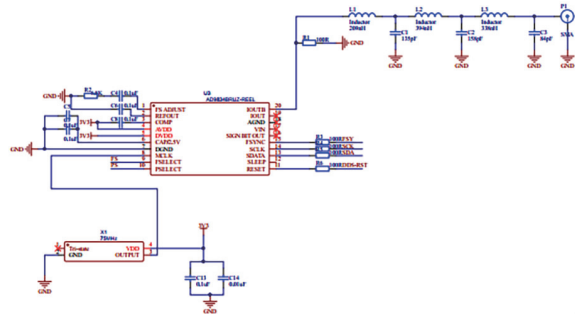


图 3 AD9834 原理图(DDS 模块)

针对发射天线, 本系统选择 PREMO 公司的 20 kHz 含芯螺线管天线(图 4), 具体型号为 KGEA-BFCR 系列的 0422J。这款天线是目前市场上性能最好的甚低频信号发射天线, 尺寸为 145 mm×26 mm(长×宽), 其最远收发距离为 4 m, 可以在 -40 °C ~ 80 °C 的温度范围内正常工作。



图 4 PREMO 公司的 20 kHz 含芯螺线管天线

天线谐振式天线模块的输入阻抗为 4 Ω, 功率为 16 W, 峰值电流为 5 A。为了满足以上需求, 本系统选择 DY-AP3001 系列功放模块。工作电压为 12 V, 信号输入方式为单端输入, 输入阻抗为 1 000 Ω。当输出负载为 4 Ω 时, 输出功率可达到 20 W, 满足天线正常工作的需求。

信号发射模块的 PCB 图如图 5 所示。

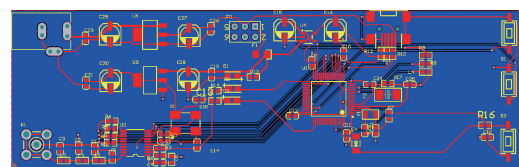


图 5 发射模块的 PCB

### 2.2 信号接收模块设计

信号接收模块的主要功能包括: 接受磁场信号, 并将信号进行滤波放大处理, 使信号满足 A/D 采样的需求。如图 6 所示, 接收模块主要可以分为接收天线模块、程控小信号放大模块、硬件滤波模块和电源模块。

本系统采用的是双天线测深法, 双天线测深法需要两根相互平行的含芯螺线管线圈作为接收天线。由于尺寸限制, 本系统中两根天线之间的距离设置为 30 cm。此外, 为了实现噪声的采集, 本系统利用磁场具有方向性这一特

征,设计了专门的噪声接收天线,再通过 LMS 自适应噪声消除算法对采集的信号进行噪声抵消。如图 7 所示,天线 A 和 B 为两根互相平行的信号接收天线,天线 C 与天线 A 和 B 互相垂直,位于 A 和 B 两根天线中间。由于测深距离远大于天线的尺寸,所以可以认为天线 C 接收到的噪声信号就是天线 A 和 B 的噪声信号。根据电磁场的接收特性,接收天线使用与发射天线相同型号的磁场天线。

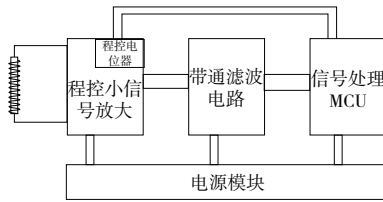


图 6 接收模块结构图

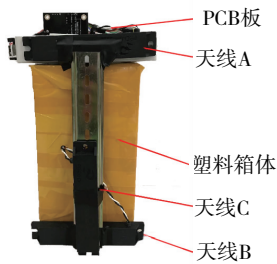


图 7 接收天线阵列

当接收天线与发射天线之间的距离较远时,接收天线产生的感应电动势很小,会影响 A/D 采样后的精度。此外,甚低频电磁信号在传输过程中会收到较大的噪声干扰。所以,首先需要对接收天线接收到的信号进行放大和滤波。信号的放大和滤波电路原理图如图 8 所示。

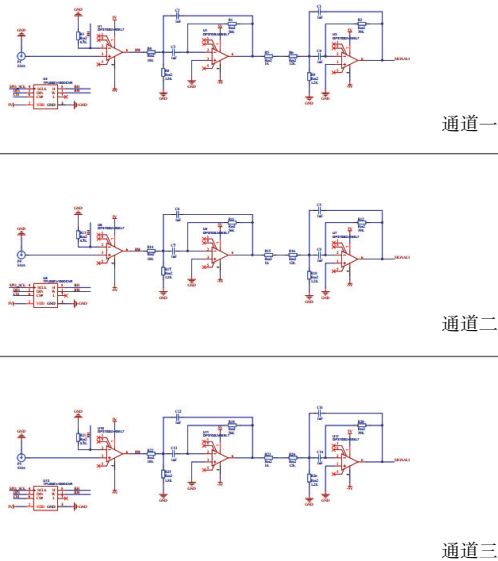


图 8 三通道信号调理原理图

信号接收模块采用的 A/D 采样芯片为 AD7606,这是一款 8 通道、16 位电荷再分配逐次逼近型 A/D 采样芯片,单通道的采样频率为 200kHz。AD7606 的原理图如图 9 所示。

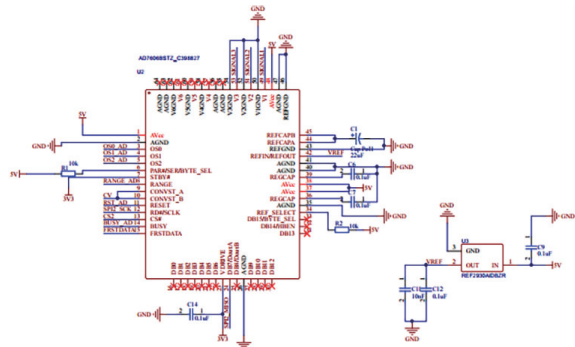


图 9 AD7606 及其周围电路原理图

本系统选择的外部存储器为 W25Q64。W25Q64 是华邦公司推出的一款大容量高速串行闪存产品,其容量为 64 MB 即 8 M 个字节。ADC 的采样频率为 200 kHz,一次采样的大小为 2 字节,所以 3 个通道 1 秒钟采样的数据量约为 120 KB 个字节,理论上 W25Q64 可以存放 66s 的数据,满足后续自适应噪声消除算法的需求。W25Q64 的原理图如图 10 所示。

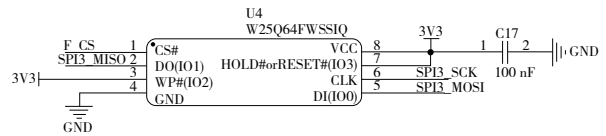


图 10 W25Q64 的原理图

信号接收模块的 PCB 图如图 11 所示。

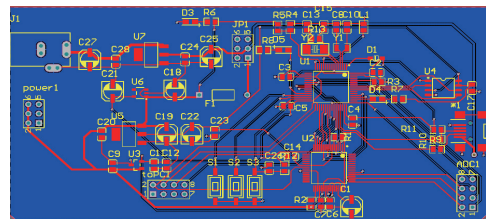


图 11 信号接收模块 PCB 图

### 3 透地测深系统性能验证

#### 3.1 甚低频段电磁波信号发射和接收实验

为了验证信号收发模块的功能,搭建了如图 12 所示的实验平台。

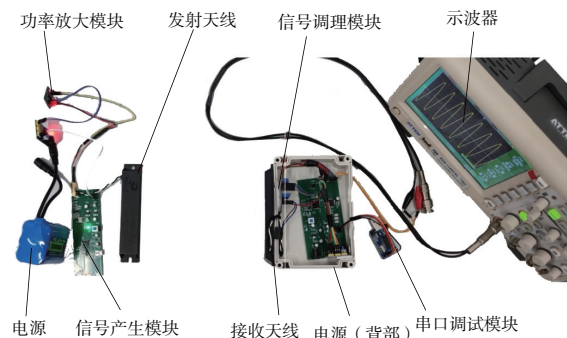


图 12 实验平台

实验系统包括信号发射模块、功率放大模块、信号接收模块、ADS1102CAL 示波器、计算机终端等。设计了如下实验:

1) 通过软件对 AD9834 进行配置,产生 10 kHz、15 kHz、20 kHz 和 25 kHz 的正弦波信号,并通过天线发射;

2) 使用天线接收磁场信号,并通过信号调理滤波电路,将信号的幅值控制在 $-3\text{ V}\sim 3\text{ V}$ 。

实验结果如图 13 所示。

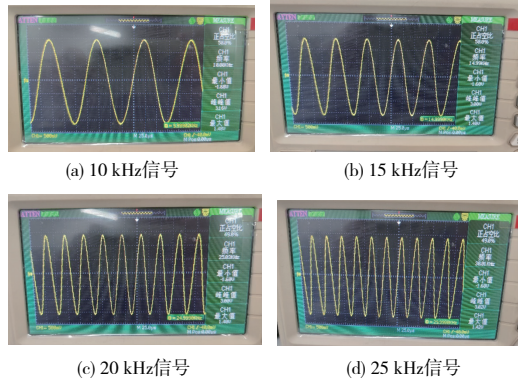


图 13 接收到的不同频率的甚低频信号

### 3.2 透地测深精度实验

实验搭建的测试平台如图 14 所示,包括 1 根天线、1 个信号发射模块、1 个信号接收模块和计算机终端。信号发射模块通过螺线管天线发射 20 kHz 的电磁波,信号接收模块接收信号并把信号传输给计算机终端,计算机终端信号处理程序对数据进行处理,最后在上位机中显示出最终数据。

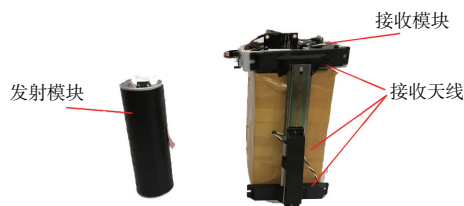


图 14 透地测深系统

同样,本文将测试地点分为 3 个场景,空旷的室外、有较多设备的室内和嘈杂的大街。受限于天线的发射功率,本次实验将测试距离定为 1 m~4 m,测试结果见表 1。表 1 中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别表示在空旷的室外测得的距离、在有较多设备的室内测得的距离和在嘈杂的大街上测得的距离。

表 1 3 个场景下天线间距离的测量值 单位:m

实际距离	测得距离 $D_1$	测得距离 $D_2$	测得距离 $D_3$
1.0	1.017 4	0.989 4	1.018 6
1.5	1.493 2	1.519 1	1.496 6
2.0	2.016 0	2.008 1	1.989 7
2.5	2.489 7	2.484 7	2.483 5
3.0	3.011 2	2.908 6	3.030 5
3.5	3.551 1	3.536 2	3.471 6
4.0	4.008 9	3.889 7	4.096 6

## 4 结语

1) 从甚低频电磁信号收发实验数据可以看出:本文设计的信号发生模块能输出多种甚低频波形,并且信号接收模块能够把电压的幅值控制在 $-3\text{ V}\sim 3\text{ V}$ 。

2) 从透地测深精度实验数据可以看出:在 0~4 m 的范围内,3 个场景下的测量误差一直保持在 5% 以内,与传统的测深方式相比,误差明显降低,说明本文设计的测深系统具有较好的测深精度。

### 参考文献:

- [1] 颜纯文. 认识新常态、适应新常态——用数据分析和展望我国非开挖行业的发展[C]//2015 年非开挖技术会议论文集. 青岛:2015:21-30.
- [2] ALFT K L, DRAPER G W, KELPE H. Horizontal directional drilling machine and method employing configurable tracking system interface; US, US6484818[P]. 2002-11-26.
- [3] 赵丁选,杨力夫,李锁云,等. 国内外非开挖定向钻机及其智能控制技术[J]. 吉林大学学报(工学版),2005,35(1):44-48.
- [4] 鲁琴,罗武胜,徐涛,等. 水平定向钻进跟踪与导向仪中地下传感发射探头的设计[J]. 电子技术应用,2004,30(5):10-12.
- [5] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [6] 徐涛,罗武胜,吕海宝,等. 地下定向钻进姿态测量系统的设计[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(2):5-8.
- [7] 王佳荣. 基于 DDS 技术的信号发生器设计[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [8] 徐国栋,陶安利,徐士敏,等. 基于 FPGA 的 DDS 函数发生器的设计与实现[J]. 机械制造与自动化,2010,39(5):91-94.
- [9] 汤兵兵. 基于 DDS 技术的信号发生器设计与实现[D]. 南昌:南昌大学,2015.

收稿日期:2020-12-25