

基于磁天线的电磁波CT系统研制及应用

孙红林¹, 刘 剑¹, 王华雄², 刘 铁¹, 化希瑞¹, 姬勇力², 刘铁华¹

¹中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉

²中国电子科技集团公司第二十二研究所, 河南 新乡

收稿日期: 2022年1月11日; 录用日期: 2022年2月11日; 发布日期: 2022年2月23日

摘 要

由于城市城区勘察环境复杂、受限因素众多, 传统的地质钻探、挖探、触探等手段不能做到全覆盖、连续性勘察。如昆明地铁5号线圆通山 - 翠湖公园站、深圳地铁15号穿西乡房屋密集区段, 由于地表建筑物阻挡造成钻探无法实施, 形成勘探盲区。针对城市地下勘探盲区和城市空间存在的抗干扰能力弱、探测精度低、分辨率差等问题研制了新型电磁波CT系统, 该系统针对现有电天线CT近场强非线性的缺点, 采用磁天线和磁场幅度相位联合反演技术, 实现地铁沿线勘探、帷幕检测和溶洞探测等领域的有效测量, 为各类基建地质勘探提供了新方法。

关键词

磁天线, 钻孔电磁波, 电磁波CT

Development and Application of EM CT System Based on Magnetic Antenna

Honglin Sun¹, Jian Liu¹, Huaxiong Wang², Tie Liu¹, Xirui Hua¹, Yongli Ji², Tiehua Liu¹

¹China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

²The 22nd Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Xinxiang Henan

Received: Jan. 11th, 2022; accepted: Feb. 11th, 2022; published: Feb. 23rd, 2022

Abstract

Due to the complex survey environment and many limited factors in urban areas, the traditional geological drilling, excavation and penetration methods can not achieve full coverage and continuous survey. For example, Yuantongshan-Cuihu Park Station of Kunming Metro Line 5 and Shenzhen Metro Line 15 pass through the dense housing section of Xixiang, the drilling cannot be carried

文章引用: 孙红林, 刘剑, 王华雄, 刘铁, 化希瑞, 姬勇力, 刘铁华. 基于磁天线的电磁波 CT 系统研制及应用[J]. 天线学报, 2022, 11(1): 1-9. DOI: 10.12677/JA.2022.111001

out due to the obstruction of surface buildings, forming a blind area for exploration. Aiming at the problems of weak anti-interference ability, low detection accuracy and poor resolution in urban underground exploration blind areas and urban space, a new electromagnetic wave CT system is developed. Aiming at the shortcomings of the nonlinearity of the near-field strength of the existing electric antenna CT, the system adopts the joint inversion technology of magnetic antenna and magnetic field amplitude and phase to realize the effective measurement in the fields of exploration along the subway, curtain detection and karst cave detection, It provides a new method for various infrastructure geological exploration.

Keywords

Magnetic Antenna, Borehole Electromagnetic Wave, Electromagnetic Wave CT

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前国内外钻孔电磁波 CT 有基于电偶极子模型的天线系统例如和基于磁偶极子模型的磁天线系统。天线系统仪器主要有：中国水电贵阳勘测院的 EWCT-1 型孔间电磁波层析成像仪，岳阳奥成科技有限公司的 HX-JDT-02 型透视仪和中国地质科学院物化探研究所的 JW-6 型电磁波 CT 系统等；磁天线系统仪器主要有：斯伦贝谢公司的 DeepLook-EM 井间电磁成像系统(5 Hz~1 kHz)。由于天线需要满足天线准则(波长的 1/4 或者 1/2)因而长度较长，当天线模型传播距离与尺度可比时，由于近场的强非线性以及方向性会受到结构影响因而电偶极子模型等效性差。基于磁天线的 CT 仪器此时由于频率结构的特点，磁偶极子模型等效性好[1]。本系统基于实际工程需求，研究了低频磁天线(30 kHz~300 kHz)在地下孔间电磁场分布特征、电磁场信号大小，在传统的钻孔电磁波利用电偶极子天线单一测量幅度衰减系数的基础上，增加了磁场相位信息，提高了可测孔间距。

2. 磁天线 CT 工作原理

图 1 所示基于磁天线的电磁波 CT 是利用交变磁场通过改变钻孔中收发探头位置获取相应场强，对两个钻孔或多个钻孔之间的电阻率进行单频扫描测量[2]。根据两个钻孔之间的距离，优化合适的发射频率，测量接收到的幅度信息与相位信息，继而利用计算机层析成像技术，获得所测地层电阻率分布图，最终实现两孔间的地质勘探。

系统采用数值模式匹配算法作为正演算法，数值模式匹配算法与有限差分算法相比，采用半解析半近似方法，速度更快，但是其地质模型为轴对称模型，故收发互易原理无法应用于雅克比矩阵的计算，本文对 Gauss-Newton 算法中雅克比矩阵的计算提出了利用 Green 函数进行快速计算的方法，极大地提高了反演效率。系统采用低频感应场正演利用数值模式匹配(NMM)进行求解，该方法把波膜的概念与有限元结合起来，属于半解析、半有限元解法，把二维数值问题转化为一维解析解和一维数值解的结合，大大减少了计算量，设计在优化的计算结构上加上并行计算，形成适用于本系统的并行数值模式匹配(PNMM)方法。反演采用基于格林函数灵敏度矩阵计算的高斯-牛顿反演方法，利用格林函数快速计算全空间灵敏度矩阵(即雅克比矩阵)，实现低频感应场的快速精确反演。

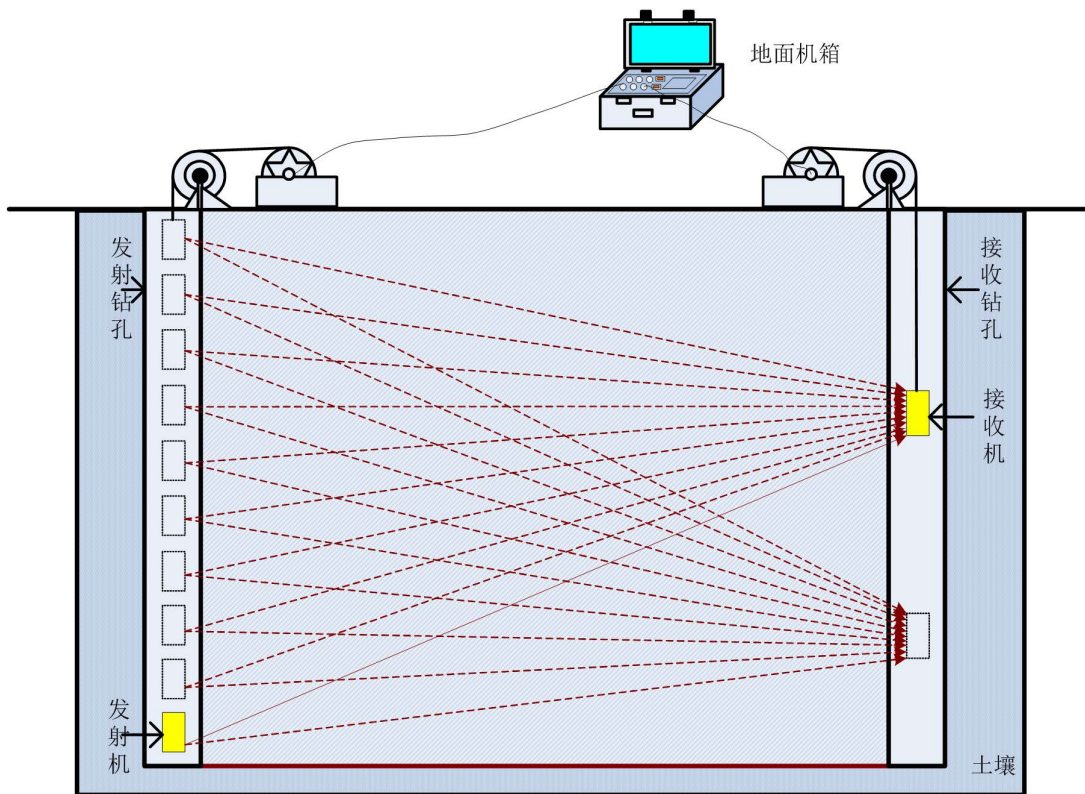


Figure 1. Working diagram of magnetic antenna CT system
图 1. 磁天线 CT 系统工作示意图

充分考虑城市空间环境，系统采用磁加载技术，实现磁偶极子天线强信号发射，采用高精度弱磁传感器提高微弱信号检测能力，采用选频发射、超低噪声设计、高 Q 值滤波、互相干解调技术抑制空间电磁干扰。系统可用于铁路沿线勘探，帷幕检测，垃圾、化工防渗墙检测，暗河、断裂破碎带和溶洞探测等领域，在多种背景电阻率条件下可确保 50 m 孔间距的有效 CT 测量。系统可满足城市复杂环境勘察，不受地面建筑物影响，全面详细快速的探测识别地下不良地质，具有轻量化、自动化、智能化等优点。

3. 系统研制



Figure 2. Physical object of magnetic antenna CT
图 2. 磁天线 CT 实物图

图 2 所示磁天线 CT 系统由地面机箱、绞车、井口滑轮、发射短节和接收短节组成。其中地面机箱是控制中枢，实现各部分协调工作、作业监测、测试数据处理及反演成像。地面机箱负责与计算机、绞车、发射短节、接收短节的通讯和供电；收发绞车实现收发短节的提拉下放，及深度信号的上传；发射短节的功率通过地面直流高压电源进行调节，在配置完成后向外连续发射既定频率磁场；接收短节在接收钻孔中放置，接收发射孔传播来的磁场信号、计算既定频率信号的幅度信息并将处理结果上传。

3.1. 发射短节设计

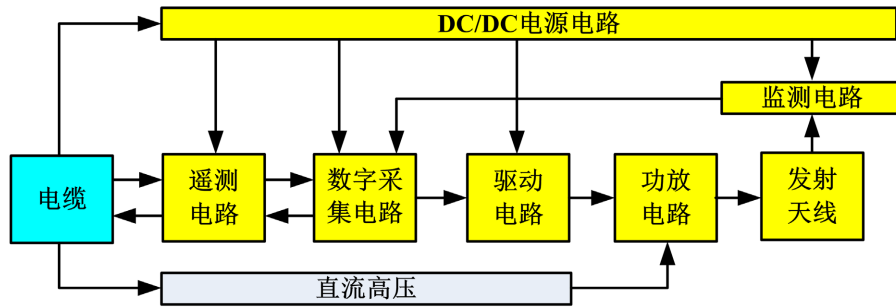


Figure 3. Composition block diagram of launching nipple
图 3. 发射短节组成框图

如图 3 所示，发射短节由发射电路和发射天线组成，发射电路由 DC/DC 电源电路、遥测通讯电路、数字采集电路、驱动电路、功放电路和监测电路组成。其中，DC/DC 电路将经由电缆传输的地面系统 AC/DC 模块直流电源转换成遥测电路、数字采集电路、驱动电路和监测电路所需的二次电源；遥测电路实现地面和孔下通讯；驱动电路实现对 MOSFET 功放管的开关控制；功放电路根据驱动电路的控制逻辑将经由电缆传输至孔下的直流高压转换成对发射天线的交流激励；监测电路实现对发射天线辐射强度的监测。

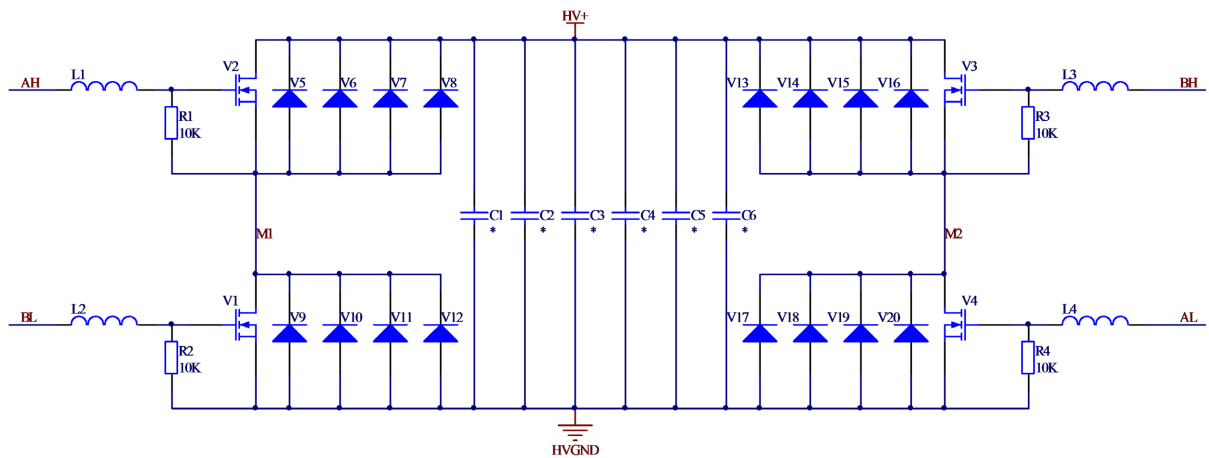


Figure 4. H-type power amplifier circuit
图 4. H 型功放电路

发射短节功放电路采用 H 型拓扑，其电路如图 4 所示。根据指标要求 H 型拓扑中的功放管(V1~V4)应耐压 $\geq 400\text{ V}$ 额定电流应 $\geq 5\text{ A}$ ，考虑功放管的降额，在同等尺寸条件下根据耐压及额定电流最大原则进行选取，并兼顾开通和关断延迟时间。根据上述原则设计选用 Infineon 公司的 IPW65R080CFDA 型

MOSFET, 其额定电压为 650 V、漏极连续工作电流为 27.4 A、最大工作结温 150℃、开通延迟时间为 20 ns、关断延迟时间为 85 ns。图 4 中并联在 MOSFET 两端的快速恢复二极管 MUR460 (V5 等)的额定电流为 4 A 耐压为 600 V, 在不调谐发射时与发射天线形成续流电路。当 MOSFET 管关断时, 续流电路可以释放掉发射天线储存的能量, 防止感应电压过高击穿 MOSFET。

为降低 MOSFET 开关应力并抑制高频振荡, 在 MOSFET 栅极端连接了磁珠(L1~L4)抑制高频干扰, 同时设计了 MOSFET 过压保护电路(缓冲电路)。由于较高频率时普通的 RC 缓冲电路已不再适用, 因此缓冲电路采用集成型薄膜电容电路(C1~C6), 该电路的特点是形式简单、对关断浪涌电压有较好的抑制效果。发射功放电路技术指标要求耐压应大于 400 V, 电流能力大于 5 A, 实际考虑器件降额、电缆压降及孔下高压纹波, 设计天线磁矩大小时应以最大激励电压 200 V、最大电流 2.5 A 进行限制。

发射天线工作原理直接起源于法拉第电磁感应定律。其实现形式是缠绕在磁芯上的螺线管线圈, 当线圈通过交变电流时, 将向外发射交变磁场[3]。发射天线采用磁偶极子不调谐发射形式, 由磁芯、监测线圈和发射线圈组成。磁芯的作用是增强天线发射强度; 天线发射强度通过改变功放电路的输出功率来实现调节, 其大小可以通过缠绕在磁芯中心的监测线圈进行测量。

3.2. 接收短节设计

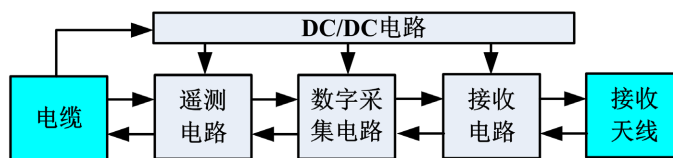


Figure 5. Composition block diagram of receiving nipple
图 5. 接收短节组成框图

如图 5 所示, 接收短节由电路部分和天线部分组成, 电路部分由 DC/DC 电源电路、遥测通讯电路、数字采集电路和接收电路组成。其中, DC/DC 电路将经由电缆传输的地面系统 AC/DC 模块直流电源转换成遥测电路、数字采集电路和接收电路所需的二次电源; 遥测电路实现地面和孔下通讯; 接收电路对接收线圈的输出进行前置放大和信号调理, 数字采集电路对接收电路信号输出进行采集及处理。接收天线实现形式是缠绕在磁芯上的螺线管线圈, 其原理为法拉第电磁感应定律, 当线圈内通过交变磁场时, 其线圈两端电压将随之产生变化[4]。

DC/DC 电路由 1 块电源滤波器、2 块隔离型 $\pm 12V$ 模块、2 块隔离型 $+5V$ 模块和 1 块 $+7.5V$ 模块组成。其中电源滤波器实现对地面 AC/DC48V 直流母线通过电缆后的输入进行差模滤波、共模滤波和阻抗匹配; 2 块隔离型 $\pm 12V$ 模块一块用于遥测通讯电路供电、另一块用于接收电路供电; 2 块隔离型 $+5V$ 模块一块用于数字采集电路 DSP 和晶振供电另一块用于 CAN 总线或 485 总线供电; 隔离型 $+7.5V$ 模块用于数字采集电路 A/D 供电。

遥测通讯电路采用标准曼彻斯特码编解码方式, 通讯速率为 20.83 Kbps。从模式变压器接收的下发命令经过差分放大、高通滤波、低通放大、微分整形后将曼彻斯特码转换为 TTL 脉冲输入到 MCU 模块中进行解析后通过 CAN 总线与数字采集电路进行通讯。数字采集电路对指令进行解析并通过 CAN 总线将数据发送给 MCU, MCU 对上传数据进行编码后将 TTL 脉冲转换为曼彻斯特码, 经差分驱动后耦合到模式变压器进行上传。

3.3. 数字采集电路设计

如图 6 所示收发短节的数字采集电路原理完全相同, 主要由晶振电路、DSP 电路、和 A/D 电路组成。

其中晶振电路向 A/D 电路和 DSP 电路提供工作时钟；DSP 电路通过 CAN 总线与遥测电路通信、控制其 PWM 模块输出既定频率方波信号，控制 A/D 电路工作及数据存储以及实现对采集数据的数字处理；A/D 电路在 DSP 的控制下实现对监测电路模拟输出的数据采集。

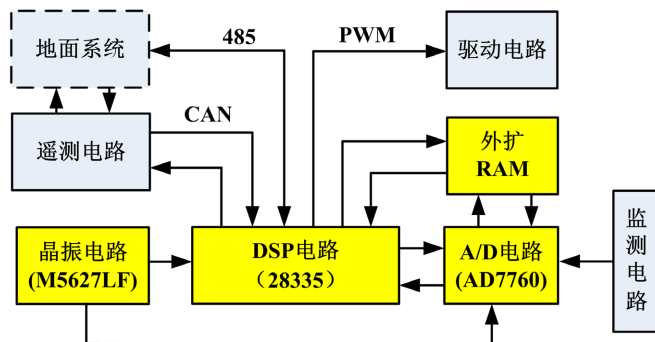


Figure 6. Digital acquisition circuit
图 6. 数字采集电路

由于接收和发射短节不同源特点，较小的频率偏差将对计算精度有较大的影响。经仿真计算在满足接收幅度精度要求的条件下，晶振的稳定度应不大于 ± 50 ppb。设计采用 ABRACON 公司的 M5627LF 型 20 MHz 恒温晶振，其供电电压为 3.3 V，频率稳定度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 温度范围可达 ± 20 ppb。其优点是频率稳定性好，缺点是功耗大，升温加热阶段功耗为 1 W，稳定工作阶段功耗为 0.4 W，升温过程如图所示耗时约需 2 分钟。

数字信号处理器(DSP)采用 TI 公司的 32 位高性能浮点型处理器 TMS320F28335。DSP28335 内核工作电压为 1.8 V，I/O 口电压为 3.3 V，连接 20 MHz 外部恒温晶振时通过内部动态锁相环变频，设置 DSP 工作频率为 140 MHz。DSP 电路与遥测电路的通过 28335 内部 CAN 核外接 TJA1050 + IL712 隔离型 CAN 总线驱动器实现 CAN 通讯。DSP 电路通过设置内部 PWM 模块，实现既定频率方波输出，此频率源经光耦隔离后送至驱动电路作为发射频率源。DSP 电路通过设置 GPIO、读写片选、外扩片选等内部功能实现对 A/D 电路、驱动电路使能和外扩存储器的控制

设计采用 ADI 公司的 AD7760 芯片，AD7760 是一款高性能、低功耗、24 位 Σ - Δ 型模数转换器，最高采样速率可达 20 MSPS。它集宽带输入和高速 Σ - Δ 转换于一体，具有宽动态范围，集成缓冲器参考驱动，用于信号缓冲和电平转换的差分放大器，超界标志，内部增益和补偿寄存器，低通数字滤波器，在 2.5 MSPS 时信噪比可达 100 dB 非常适合高速数据采集。此外 AD7760 还提供了可编程的抽样率，也可对数字 FIR 滤波器进行调整，在要求高信噪比而没有复杂的前端信号处理设计时 AD7760 是较为理想的应用选择。

采集过程如图 7 所示。DSP 通过 16 位双向并行接口控制、配置 AD7760 和采集数据，该时序依靠 CS 和 RD/WR 信号来控制采样、转换和数据输出。当 AD7760 一次转换完成，由 DRDY 下降沿触发 DSP 外部中断，DSP 在中断服务中读取 AD7760 的转换结果。从 AD7760 中读一个转换结果需要执行两次 16 位的读操作。CS 和 RD/WR 都为低电平就去执行第一次读操作。CS 和 RD/WR 都为低电平后，数据总线被激活，转换结果的高 16 位数据通过数据总线输出。在执行第二次读操作之前，CS 和 RD/WR 必须回到高电平一个 ICLK 周期。第二次读的数据包括转换结果的低 8 位和 6 个状态位。CS 和 RD/WR 回到高电平后数据总线回到高阻态。A/D 与 DSP 之间采用并行通信模式，转换数据先存储在外扩 RAM 中，当达到设定的采样长度后，采集过程结束。在接收到地面系统传的取数命令后，可通过 CAN 总线或者 485 总线发送给遥测系统。

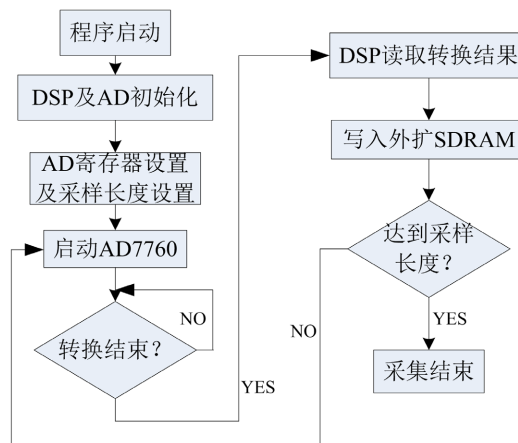


Figure 7. Collection process
图 7. 采集过程

3.4. 地面机箱设计

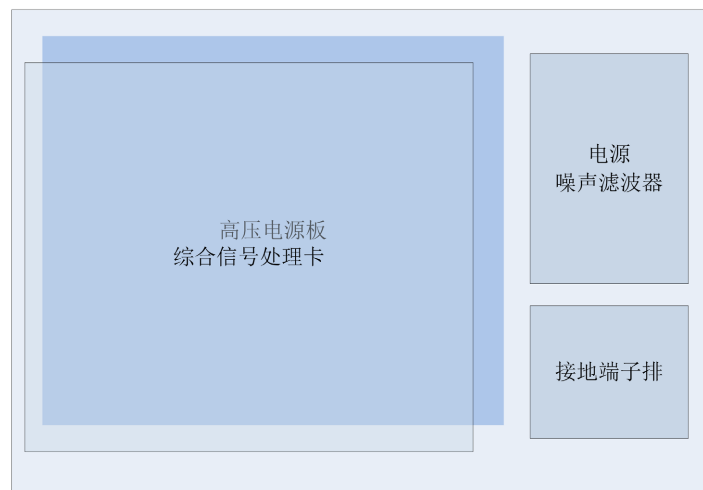


Figure 8. Internal schematic diagram of ground chassis
图 8. 地面机箱内部示意图

如图 8 所示地面机箱由上面板、综合信号处理卡及深度卡等部分组成。上面板包含井下供电开关及数码双显表头、地面系统复位开关、状态显示卡和测试插座等。井下供电开关用于对孔下发射、孔下接收和地面接收等短节的直流供电进行统一控制，实现井下各短节的同时供电和断电；数字地面系统复位开关用于对综合信号处理卡进行局部复位，实现深度处理芯片和解码芯片从异常工作状态中复位退出，同时可以起到应对绞车程控失效等突发状况、提升操作安全性的作用。

在上面板的中间上部，有三个直流双显数码管表头，指示当前地面系统给井下供电的直流电压和电流，可以对孔下发射、孔下接收和地面接收等三路直流供电的情况进行直观显示，以实时监控各井下仪器的供电状态；状态显示卡位于上面板的中间下部，用于辅助显示综合信号处理卡的工作状态，主要包括网络总线的链接和活跃状态指示、收到下发命令指示、深度同步指示以及地面解码状态显示等；同时为便于板卡调试、面板整洁美观起见，兼顾到上面板空间有限，将部分重要的测试端点通过 DB-9 座引至上面板，一方面可以用于关键测量点信号的示波测量，另一方面便于外接进行串口调试。

综合信号处理卡网络芯片采用 LPC1788 微控制器, 与上位机之间进行基于 Ethernet-TCP/IP 技术的以太网总线通讯。LPC1788 内嵌 MAC 以太网控制器, 支持精简的媒体独立接口 RMII 和带缓存 DMA 接口, 实现 10 M/100 Mbps 的以太网接入; DP83848C 作为物理接口 PHY, 其 MII_MODE 和 SNI_MODE 管脚分别被配置为高电平和低电平, 实现与 LPC1788 芯片的 RMII 精简模式连接。综合信号处理卡工作在客户端模式, 板卡上电并完成初始化后, 立即启动 tcp_connect()进程, 尝试建立与目标主机的 TCP 连接。上位机工作在服务器模式, 服务程序开启后, 响应板卡的网络链接请求, 实现 TCP 的三次握手过程, 与地面板卡之间建立起可靠的 TCP 传输链路, 开始基于 Ethernet-TCP/IP 协议的命令与数据的实时交互。测井完成后, 上位机程序启动 close_socket()服务进程, 发起四次挥手来终止 TCP 连接, 从而结束整个总线通讯过程。

输入的深度信号分别来自发射绞车和接收绞车, 可以为单端对地信号 A、B, 也可以为差分信号 A+、A-、B+、B-。当信号为 A、B 对地信号时, SW4_1 和 SW4_3 拨到 ON 位置, 信号滤波后经过 74HC14 整形, 消除信号线上的杂波和尖脉冲干扰, 然后进入 CLPD 深度处理单元。当输入信号为差分信号时, SW4_2 和 SW4_4 拨到 ON 位置, A+、A- 和 B+、B- 分别经过差分芯片 AM26LS33 变为单端信号, 经过滤波整形后进入 CLPD 深度处理单元。信号预处理电路上, 采用 AM26LS33 进行差分信号的电平转换。当输入信号差值 $A - B > 500 \text{ mV}$ 时, 输出 R 为高电平(5 V); 当输入信号差值 $A - B < -500 \text{ mV}$ 时, 输出 R 为低电平(0 V); 当输入信号差绝对值在 500 mV 内时, 处于混乱区间。考虑到收发端绞车的深度信号走线较长, 且建筑工地环境恶劣, 因此在差分信号输入端增加匹配电阻。同时, 将差分输入端的正信号进行弱上拉, 防止空载情况下深度信号线上耦合干扰信号, 造成电路处于混乱状态, 从而确保任何时刻都逻辑正确。

4. 工程应用

九峰山位于武汉市洪山区内, 山间盆地地势平坦是典型丘陵地势地貌, 系统在九峰山某地铁沿线勘探中选择了 R64、R65 和 R66 三个钻孔进行工程应用测试。反演结果如图 9 所示, R64-R65 剖面(20 m)和 R64-R66 剖面(40 m)随着接收深度的变化, 测量曲线的变化符合电磁波在地层中的传播规律。从成像图中明显可以看出 10 m 以上为高吸收层(低阻层 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下), 10 m 以下, 尤其是 15 m 以下为低吸收层(高阻层), 经验证反演结果与实际取芯结果一致。

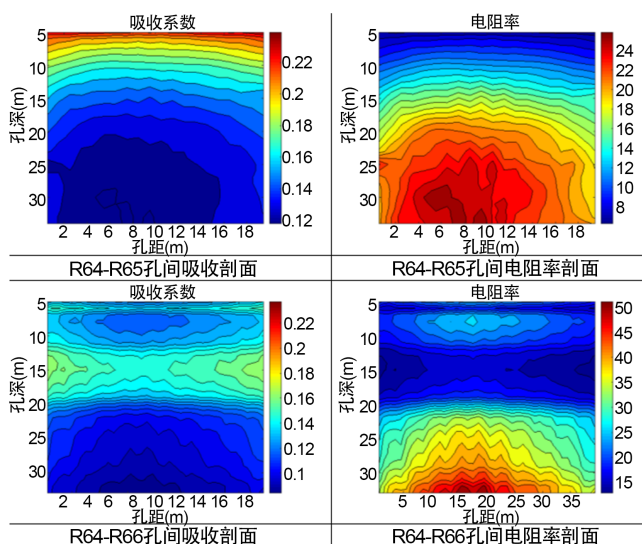


Figure 9. Antenna scale and sensitivity characteristic diagram
图 9. 天线刻度及灵敏度特性图

5. 结论

结合国内外电磁波 CT 及城市空间勘探现状, 设计了 30 kHz~300 kHz 频段的基于磁天线的新型电磁波 CT 系统, 利用磁场幅度相位联合反演方法和多种抗干扰技术提高了测量距离, 简化了作业流程。在多个地铁沿线实际勘探中, 该系统工作良好, 技术指标满足实际工程要求。

参考文献

- [1] 任志良, 黄玉盈. 磁偶极子天线方向性的边界元解法[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(6): 37-39.
- [2] 巨汉基, 朱万华. 磁芯感应线圈传感器综述[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1870-1876.
- [3] Tumanski, S. (2007) Induction Coil Sensors—A Review. *Measurement Science and Technology*, **18**, R31-R46. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/3/R01>
- [4] Bozorth, R. and Chapin, D. (1942) Demagnetizing Factors of Rods. *Journal of Applied Physics*, **13**, 320-327. <https://doi.org/10.1063/1.1714873>