

大深度多功能电磁探测技术与系统集成

林品荣, 郑采君, 吴文鹂, 李建华

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000)

摘要: 大深度多功能电磁探测系统, 主要由多功能电磁探测仪器、数据采集与处理、电磁二三维正反演模拟等组成。系统研发中, 攻克了多功能电磁分布式接收、大功率发射、三分量高温超导磁传感器所涉及的多项关键技术, 并研究开发了配套的数据采集、处理与解释技术, 系统具备 AMT/MT、CSAMT、IP 等测量功能。对研发系统进行了与 GDP-32^{II} 的野外对比试验及典型矿区的应用, 取得显著的试验应用效果。

关键词: 多功能电磁探测仪器; 数据处理与解释; 对比试验与应用

中图分类号: P631; O441.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2015)08-0060-07

0 引言

多功能电磁探测系统是资源勘查中不可或缺的重要装备。长期以来, 因我国未开发大功率、多功能电磁探测系统, 在深部资源勘查中主要靠引进国外的多功能电法仪来开展工作。为提升我国勘查地球物理方法技术的自主创新能力和装备水平, 在国家科技部和中国地质调查局相关科研项目的支持下, 由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所牵头, 并联合中南大学、成都理工大学、吉林大学、重庆地质仪器厂等, 研发出我国自主的大深度多功能电磁探测系统。该系统经科技部组织的专家验收认为: 在多功能电磁探测仪器研制、数据处理与正反演模拟集成软件开发等方面取得了创新性成果, 所研发的大深度多功能电磁探测系统具有自主知识产权, 形成了大深度电磁综合探测技术研发团队, 所取得的成果具有良好的社会、经济效益, 建议尽快推广应用。目前该系统在大量试验应用和实用化开发的基础上, 已向相关地勘单位推广近 20 台套, 在我国隐伏资源的大深度探测中正在发挥其作用。

1 多功能电磁探测系统仪器开发

在地球物理方法技术研究的基础上, 基于先进

的设计理念, 采用高新实用的电子技术, 研制出多功能电磁探测仪器^[1], 主要包括分布式多功能电磁接收机、大功率电磁发射机、三分量高温超导磁传感器。各仪器主要技术指标如表 1、2、3 所示。

表 1 多功能电磁接收机主要技术指标

Tab. 1 Technical indicators of the multi-function receiver

项目	技术指标
测量功能	AMT/MT、CSAMT、IP
频率范围	32 000 ~ 1/128 Hz
通道数	1 ~ 8 通道可选
ADC 分辨率	24 位 ADC
频点分布	每频率数量级 20 个频点
采样率	128 k SPS ~ 31.25 SPS 程控选择
相位分辨率	±1 mRad@4Hz
信号分辨率	1 μVrms 可测
自动标定精度	0.025%
同步方式	GPS + 石英钟同步

表 2 大功率电磁发射机主要技术指标

Tab. 2 Technical indicators of the high-power transmitter

项目	技术指标
供电功能	CSAMT、IP
最高电压	1 200 V
最大电流	50 A
最大功率	60 kW
频率范围	8 000 ~ 1/128 Hz
高密度频点	每频率数量级 20 个频点
供电波形	多频组合方波
工作模式	全自动扫频供电
波形占空比	50%、100%
保护功能	过压、过流、过热、短路
同步方式	GPS

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-10-31。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题(编号: 2007AA060601)和中国地质调查局“大深度高分辨电磁测量技术与多功能电法仪器研制(编号: 1212010660301)”、“云南省保山西邑铅锌隐伏矿成矿理论及物化探找矿技术研究与应用(编号: 1212011310150)”项目联合资助。

第一作者简介: 林品荣(1963—), 男, 教授级高级工程师, 从事电磁法研究。Email: linpinrong@igge.cn。

表 3 三分量高温超导磁传感器主要技术指标

Tab.3 Technical indicators of the three component high temperature superconducting magnetic sensor

通道	磁通噪声 $\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$	磁场噪声 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$	摆速/ $(\text{mT} \cdot \text{s}^{-1})$	带宽/ kHz	动态范围/ dB
X	2.5×10^{-5}	80.0	0.81	> 51.2	107
Y	2.6×10^{-5}	83.2	0.81	> 51.2	108
Z	2.5×10^{-5}	80.0	0.81	> 51.2	107

1.1 基于高精度 GPS 与恒温晶体混合同步的电磁法分布式探测技术

在电磁法的多测站分布式测量中,要求不同仪器间的时钟严格同步,以便保证各测站的数据采集是同时进行和同时完成,因此研发高精度的同步技术是取得成功的保障^[2]。对比现有的几种同步技术(无线电同步、有线同步、石英钟同步、GPS 同步等),它们都各有特点和不足:无线电同步易受地形等条件影响,不宜用于远距离同步;有线同步受同步线限制,也不宜用于远距离同步;GPS 同步具有同步精度高,无误差累积,但易受地形和遮挡的影响;石英钟同步不受遮挡,但却存在同步误差累积的不足。综合考虑上述同步方式的特点,采用了将 GPS 同步和恒温晶体同步有机结合的方式^[3](图 1),形成本系统的同步技术。该技术的基本原理在于,当 GPS 定位正常时(野外绝大多数都可满足该条件)自动进入 GPS 同步状态,同时利用 GPS 秒脉冲实时不间断标定石英钟输出频率;当 GPS 出现短暂不定位情况时,将同步方式自动切换到石英钟同步,以标定所得石英钟频率作为输出频率,产生相对准确的同步脉冲。

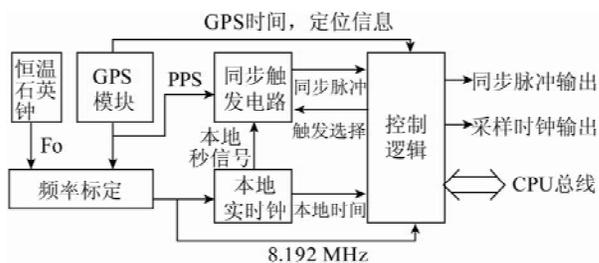


图 1 GPS 和恒温石英钟混合同步电路原理图

Fig.1 GPS and quartz mixed synchronous circuit diagram

1.2 基于中继和双 24 位 AD 大动态转换的无线遥测与高灵敏度数据采集技术

无线数据传输和控制是实现多测站组网工作和数据实时处理的基础,而无线数据传输和控制极

易受地形、植被等条件的影响,难于实现远距离通信。为此,开发了基于中继和 AX.25 协议的无线数据传输与控制技术^[3],较好地解决了数据校验远距离接力传输等技术难题。通过各测站中继接力方式实现了在主机通讯范围以外的测站与主机的传输控制,使得原来需要最远传输 3 000 m 距离的要求降低到只需可靠传输 100 m 即可,因此大大降低了地形对系统无线通讯的影响,实现了可靠的数据传输与控制。

多功能电磁法接收机,涉及的工作方法多(AMT、CSAMT、IP、SIP 等),接收信号的动态范围大,有用信号强度从微伏到伏,涵盖 6 个量级超过 120 dB;频率范围宽,从 32 kHz 到近直流。因此对接收系统的动态范围和频带宽度提出了很高要求。为了保证在全频段范围内实现大动态信号数字化,开发了双 24 位 AD 分频段数字化加数据缓存技术^[3-4](图 2),这样既保证了系统有足够的通带,又保证了系统能够实现高灵敏度数据采集。

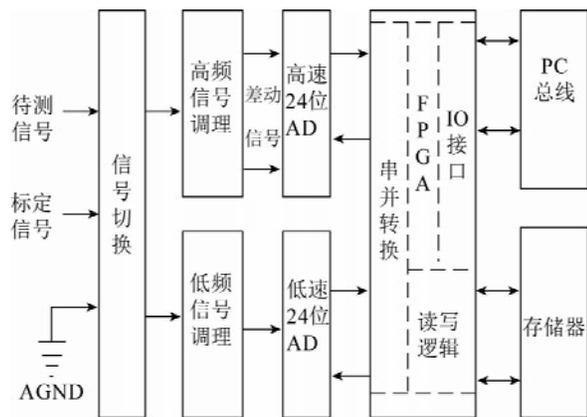


图 2 大动态信号数字化电路原理图

Fig.2 Large dynamic signal digitization circuit diagram

1.3 基于励磁调压的大功率稳流供电技术

将发电机励磁调压技术引入电磁法发射系统^[5-6],在不采用调压变压器的条件下,可大范围调节供电电压,通过调节励磁实现稳压供电或稳流供电,由于避开了笨重的变压器,大功率电源利用率高、设备较轻便。其组成包括大功率发射机、励磁调压发电机、整流单元、电流传感器、模数转换器、励磁调节器和大功率负载。工作过程为:励磁调压发电机在大功率发射机的控制下,输出 0 ~ 1 000 V 的三相交流电压;整流单元将交流电压变为直流电压,并加载到大功率负载上;电流传感器

对供电电流进行隔离检测；模数转换器将模拟信号转换为数字信号；励磁调节器控制励磁调压发电机的输出电压，使整个系统的供电电流保持在设定的电流值。高压励磁恒流供电技术的电路原理如图3所示。

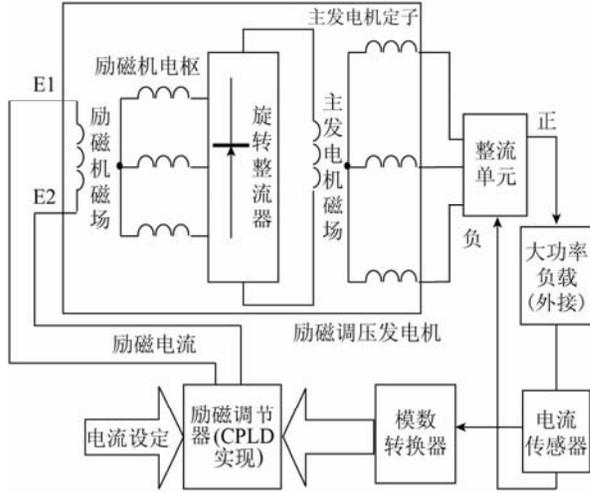


图3 高压励磁恒流供电电路原理图

Fig.3 High voltage excitation constant current power supplying circuit diagram

1.4 适宜于弱磁信号检测的三分量高温超导磁传感器技术

在地球物理电磁法的变化磁场测量中，通常采用感应线圈作为测磁传感器。由于感应线圈的灵敏度随接收信号的频率而变化，在低频段灵敏度很低，而低频段恰恰是反映地球深部的信息，因此传统感应线圈法测量的低频信号信噪比低。而高温超导弱磁测量传感器用高温超导量子干涉器作为磁场强度传感器，对磁场非常敏感，它的灵敏度高而且频带宽，在各频段灵敏度恒定，低频响应好^[7]。在地球物理电磁法弱磁信号测量中，可提高低频信号的信噪比，使测量更准确，以提高勘探深度。我们采用宽带低噪小信号的高频放大技术、高频信号的传输与屏蔽技术、光电隔离与自动补偿等技术，开发出具弱磁信号检测的三分量高温超导磁传感器。其硬件主要由高温超导器件和锁相闭环电路组成，锁相闭环电路由定向耦合器、高频放大器、混频器、低频放大器、高频振荡器、射频信号衰减器、积分器、反馈电路组成。工作原理为：高温超导器件的输出经定向耦合器送至高频放大器；高频放大器、混频器、低频放大器、积分器依次串联连接；高频振荡器的输出分为两路，一路接混频器的输

入，另一路经射频信号衰减器衰减后接定向耦合器；积分器的输出经反馈电路反馈至定向耦合器（图4）。

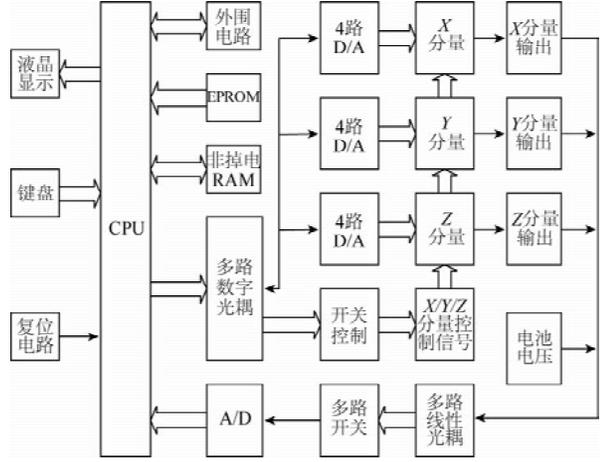


图4 三分量高温超导传感器原理图

Fig.4 Three component high temperature superconducting sensor circuit diagram

2 电磁多参数数据采集、处理与解释技术研究

2.1 基于全波形采样的数据采集技术

根据天然电磁场与人工发射电磁场的理论，结合多功能电磁探测仪器（DEM - V）的特点，研究了适合于分布式同步测量的数据采集方案。在 AMT/MT、CSAMT、IP、SIP 等各种方法的数据采集中，均采集全波形的原始时间域数据，为后期的数据处理提供全面的原始数据采样信息。图5为野外采集的一组阵列同步观测的天然电磁场时间域曲线。

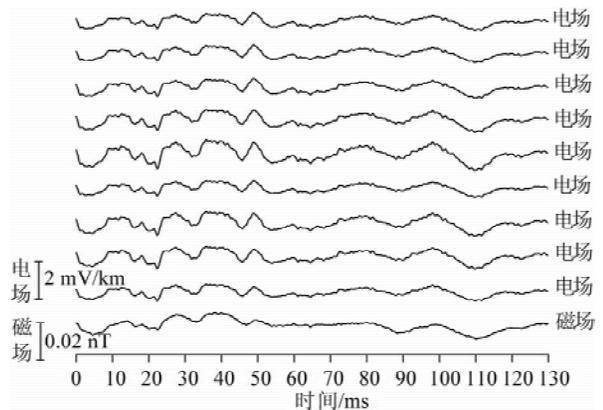


图5 阵列同步观测的天然电磁场时间域曲线

Fig.5 Time domain curve of natural electromagnetic field in array

2.2 基于抗干扰数据处理的电磁多参量信息提取技术

在采集的电磁法原始数据中,既有所需要的有用信息,同时也不可避免地包含环境电磁干扰、仪器本底噪声等信息,如何压制干扰、提取有用信息,是数据处理的关键。在对天然场电磁信号、人工电

磁场发射信号、环境电磁干扰、接收系统噪声的观测分析基础上,采用同步叠加、数字滤波、陷波、相关选频等技术^[8-9],研究开发了适宜于多功能电磁系统的电磁多参量数据信息获取与处理技术。图 6 展示了大功率多功能探测仪器测量的 CSAMT 时间域数据处理前后的变化。

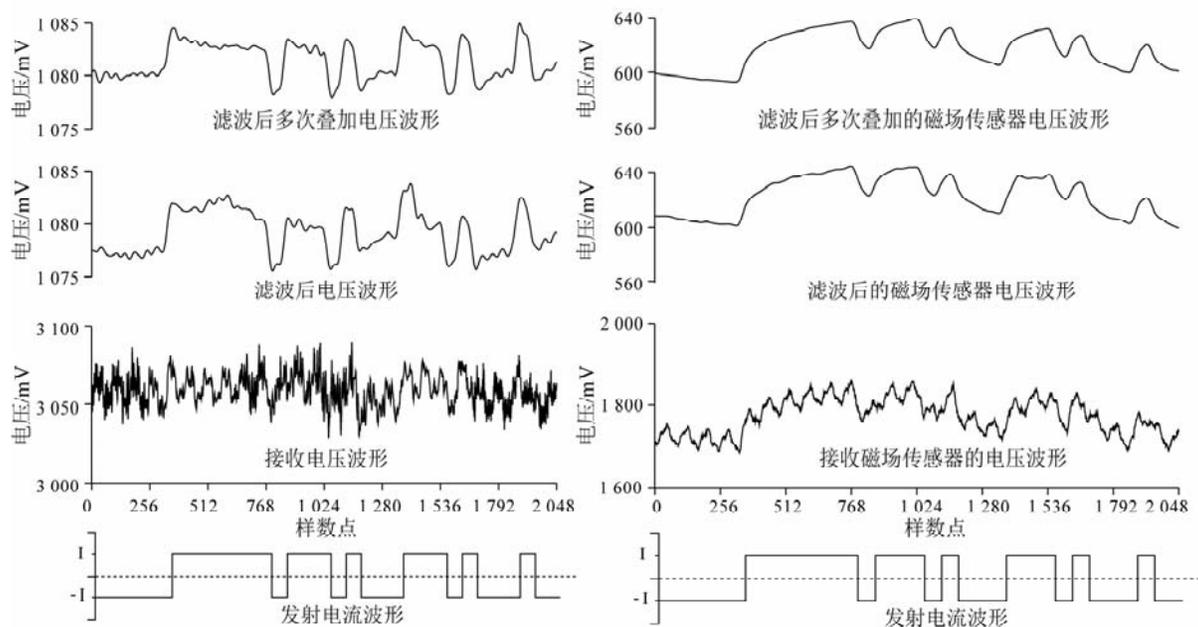


图 6 CSAMT 接收电场和磁场的电压波形处理前后的变化图

Fig. 6 Voltage waveform changes for electric and magnetic fields of CSAMT through filtering and superposition

2.3 基于二、三维正反演模拟的可视化解释技术集成

对地形条件下电磁法(AMT/MT、CSAMT、SIP)二、三维正反演模拟方法进行了研究^[10-14],编制出相关程序,并通过对程序相关接口、界面、数据成图的开发^[15],分别形成了 AMT/MT 法、SIP 法和 CSAMT 法正反演 3 个方法的软件子系统。软件系统的构建考虑了电磁勘探各方法的特性和共性,根

据前者,将 3 种电法(AMT/MT、CSAMT 和 SIP)的功能软件集成在相对独立的 3 个子系统中;根据后者,在每一个子系统中将程序划分为专用功能软件模块和共用功能软件模块两大部分。专用功能软件模块包括各方法的数据处理和正反演模块,共用功能模块包括数据的图示、人机交互建模等模块。多功能电磁法数据处理与解释软件系统结构如图 7 所示。

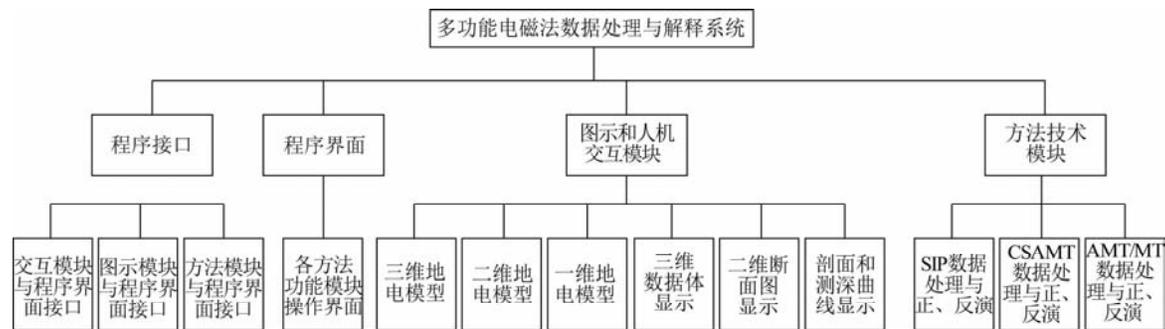


图 7 多功能电磁法数据处理与解释软件系统结构图

Fig. 7 Data processing and interpretation software structure diagram of the multi-function electromagnetic system

3 系统对比试验与应用

3.1 对比试验

对研制的大功率多功能电磁探测样机系统,经测试合格后,在内蒙古某矿区开展了与国外同类系

统(GDP-32^{II})的同发射源、同测线、同测点的CSAMT对比试验工作^[16]。从获取的原始视电阻率和阻抗相位的同测点对比数据(图8)可见,两套系统获取的相同参数其数值大小相近、曲线形态一致且均光滑连续。

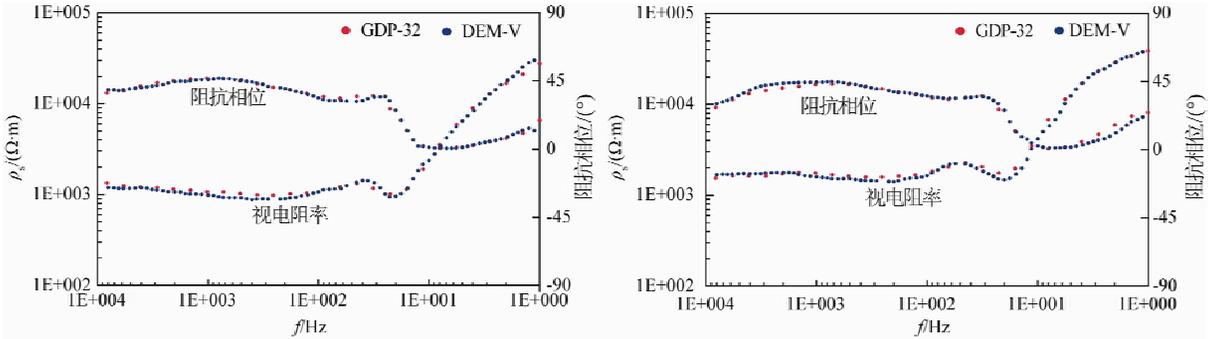


图8 多功能电磁法仪器与 GDP-32^{II} 同测点实测 CSAMT 数据对比
Fig.8 Comparison of CSAMT results between DEM and GDP-32^{II}

3.2 典型矿区应用

选择内蒙古阿巴嘎旗某矿区,开展了研制的多功能电磁法系统面积性试验与应用工作。该矿区矿床为岩浆多期侵入的脉状银铅锌矿,容矿的似斑状花岗岩和粉砂质板岩与围岩具有电性差异^[17]。在该区开展了 10 km² 的 TDIP 扫面和 CSAMT 剖面测深,并在部分剖面开展了 RPIP 测深。TDIP 测量中,采用中间梯度装置,技术参数为供电极距 2 500 m、接收极距 40 m、点距 40 m、供电周期 16 s、占空比 1:1、延时 100 ms。CSAMT 测深中,采用标量测量方式,技术参数为收发距 ≥9 000 m,发射极

距 3 000 m,频率范围 8 000 ~ 1/3.2 Hz,接收极距 40 m,点距 40 m。RPIP 测深中,采用偶极-偶极装置,技术参数为工作频率 5 个(4 Hz、2 Hz、1 Hz、2 s、4 s)、供电极距 80 m、接收极距 80 m、点距 40 m、隔离系数 n = 1 ~ 12。

通过多种电磁法的应用工作,获取了矿区的多功能电法综合异常,其异常除与已知矿体相对应外,还发现了新的找矿线索,为矿区的进一步地质勘查、钻孔布设和找矿突破提供了地球物理依据。图9显示了该区某测线的多种方法测量结果,包括 TDIP 的视电阻率与视极化率剖面曲线、RPIP 测深

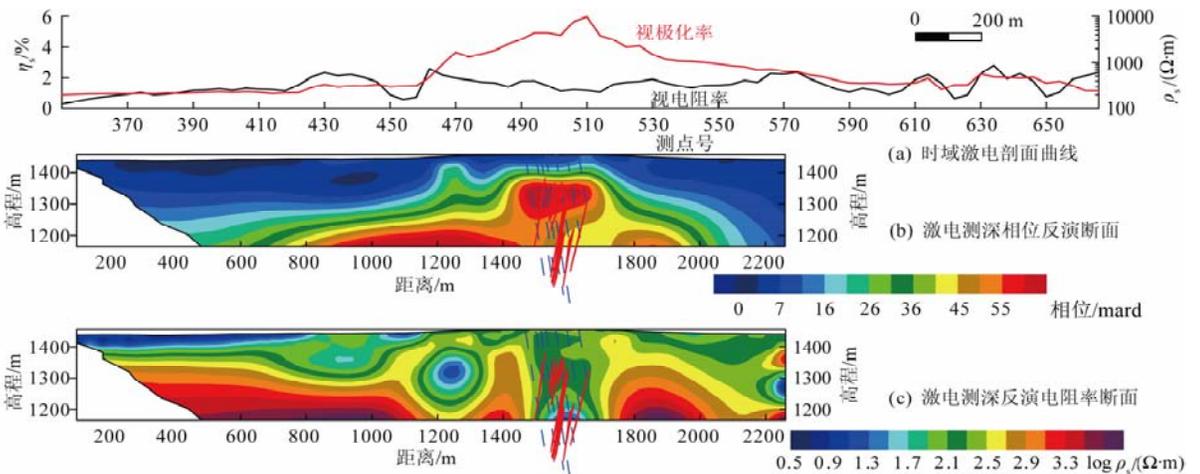


图9-1 多功能电磁法仪器在某测线上获取的综合异常

Fig.9-1 Comprehensive anomaly of multi-function electromagnetic instrument

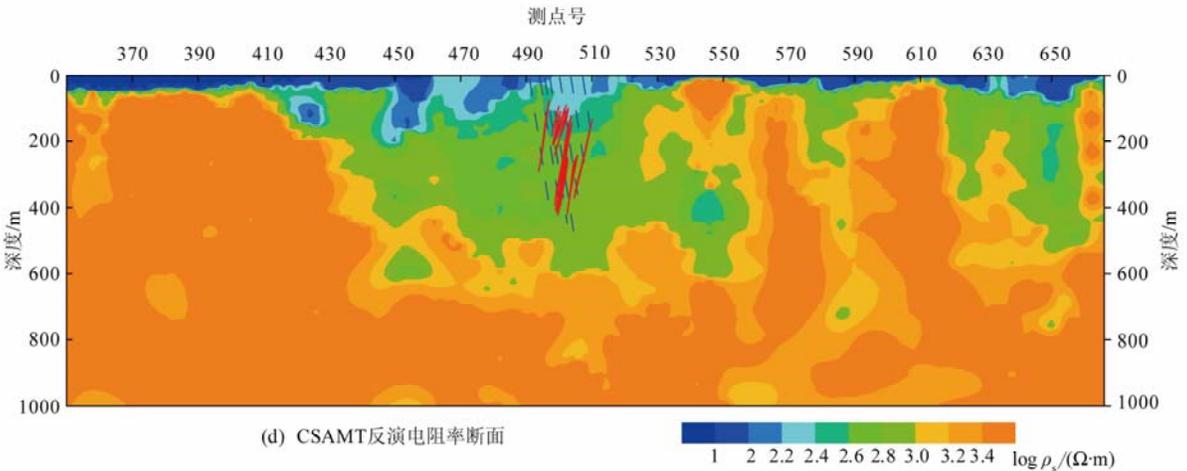


图 9-2 多功能电磁法仪器在某测线上获取的综合异常

Fig. 9-2 Comprehensive anomaly of multi-function electromagnetic instrument

的反演电阻率与相位断面、CSAMT 的反演电阻率断面,以及钻孔验证的见矿情况。经对比可见,自主研发的多功能电法仪器在测线上 500 号点获得明显的多功能电法综合异常,与矿体相对应,其电性表现为低阻高极化高相位的异常特征。同时在 470 号点附近还发现良好的多功能电法综合异常,异常特征为低阻中高极化中高相位。

4 结论

大深度多功能电磁探测系统,是在攻克电磁法的分布式多功能接收、大功率发射、数据采集与处理、正反演模拟等关键技术基础上,通过试验应用和实用化开发,形成了我国自主的可供推广应用的的多功能电磁法系统。该系统的成功研发和推广应用,不仅填补了国内空白、实现了产业化突破,而且为我国深部资源调查提供了自主的方法技术支撑。

参考文献:

- [1] 中国地质科学院地球物理地球化学勘查所. 大深度多功能电磁探测技术与系统集成成果报告[R]. 廊坊, 2012.
- [2] 林品荣, 郑采君, 石福升, 等. 电磁法综合探测系统研究[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1539-1548.
- [3] 林品荣, 郭鹏, 石福升, 等. 大深度多功能电磁探测技术研究[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 149-154.
- [4] 郑采君. 采样率为 192kHz 的 24 位 AD 转换器 CS5361 原理及应用[J]. 国外电子元器件, 2004(5): 51-54.
- [5] 石福升. 高精度数字稳流技术研究[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 358-360.
- [6] 石福升. 大功率多功能发射系统研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 1109-1114.
- [7] 陈晓东, 赵毅, 张杰, 等. 高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 702-708.
- [8] 李建华, 林品荣, 何畏, 等. MT 时间序列的 FIR 数字滤波分析[J]. 物探与化探, 2007, 31(增刊): 24-28.
- [9] 李建华, 林品荣, 郑采君, 等. 基于多采样率 FIR 数字滤波技术的 CSAMT 信号提取[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(1): 24-29.
- [10] 李勇, 林品荣, 郑采君, 等. 极化大地复电阻率正反演[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(增刊): 355-361, 373.
- [11] 李勇, 林品荣, 李桐林, 等. 基于异常复电位 2.5 维 CR 有限元数值模拟[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(5): 1596-1604.
- [12] 赵广茂, 李桐林, 王大勇, 等. 基于二次场二维起伏地形 MT 有限元数值模拟[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(6): 1055-1059.
- [13] 顾观文, 梁萌, 吴文鹏. 基于并行处理的 CSAMT 拟二维反演解释[J]. 物探与化探, 2010, 34(3): 399-402.
- [14] 张继锋, 汤井田, 喻言, 等. 基于二次插值的线源可控源有限元数值模拟[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(5): 929-935.
- [15] 何畏, 吴文鹏, 陈实, 等. 基于无向图的二维地质建模设计与应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 123-129.
- [16] 李建华, 林品荣. 野外实验场地球物理电磁数据采集与分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1377-1384.
- [17] Li J H, Lin P R, Xu B L, et al. Study on multifunctional electromagnetic prospecting technology in mineral exploration[J]. Advanced Materials Research, 2013, 734-737: 178-182.

Techniques and Systems for Large – depth and Multi – function Electromagnetic Survey

LIN Pin – rong, ZHENG Cai – jun, WU Wen – li, LI Jian – hua

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*)

Abstract: The large – depth, multi – function electromagnetic survey system is composed of the multi – function electromagnetic detection equipment, the techniques for data acquisition and processing and the software for electromagnetic two or three dimensional positive inversion simulation. Based on a study of its corresponding key technologies, a distributed multi – function receiver prototype is developed. Accordingly, the high – power multi – function intelligent transmitting prototype and the three component high temperature superconducting magnetic sensor are also designed and developed. As a result, the matched data acquisition, processing, and interpreting technology of the multi – function electromagnetic system have been successfully resolved. The system has the measurement function of AMT, MT, CSAMT and IP. A number of good results have achieved in comparative trail between the self – developed system and the GDP – 32^{II} system, and the application of typical mine areas.

Key words: multi – function electromagnetic instrument; data processing and interpreting technique; comparative trail and application

(责任编辑: 刘永权)