

# 大深度多功能电磁探测技术研究

林品荣, 郭 鹏, 石福升, 郑采君, 李 勇, 李建华, 徐宝利

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

**摘 要:** 通过对大功率多功能电磁法发射系统所涉及关键技术的研究, 研制出具有自主知识产权的大功率(70kw)多功能(具有 CSAMT, IP 供电功能)电磁发射样机; 通过对多功能电磁法接收系统所涉及关键技术的研究, 研制出多功能(具有 AMT, CSAMT, IP 测量功能)电磁法接收样机; 研究开发了与多功能仪器样机相配套的数据处理技术; 在试验区开展了自主研制的多功能电法系统与 GDP32 的场地对比试验, 取得了良好效果。

**关键词:** 多功能电磁法系统; 发射机; 接收机; 数据处理; 对比试验

中图分类号: P631.33; O441.5; P631 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)02-149-06

## A Study of the Techniques for Large-depth and Multi-functional Electromagnetic Survey

LIN Pin-rong, GUO Peng, SHI Fu-sheng, ZHENG Cai-jun, Li Yong, LI Jian-hua, XU Bao-li

*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000*

**Abstract:** Based on a study of the high-power and multi-functional launching system of the electromagnetic method and its corresponding key technologies; the authors developed a high-power (70 kw) and multi-functional (with the power supply function of CSAMT and IP) intelligent transmitting prototype that has independent intellectual property rights. Accordingly, the multi-functional (with the measurement function of AMT, CSAMT and IP) receiving prototype was also designed and developed. As a result, the matched data processing technology of the multi-functional electromagnetic system has been successfully resolved. A comparative trail was carried out between the self-developed multi-functional electrical system and the GDP32 system, with some good results achieved.

**Key words:** multi-function electromagnetic system; transmitter; receiver; data processing; comparative trail

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, 实现多项技术突破, 研制出具有自主知识产权的、大功率多功能电磁探测仪器及配套的数据处理技术, 填补了我国在这一领域的空白。研究取得的主要进展与成果如下。

### 1 大功率电磁发射系统研究

#### 1.1 多频等幅同步供电技术

多频等幅波形是密集频点供电和提高工作效率

的关键技术, 其基本思想是采用同步方式, 一次供出包含多个频率成分的、幅值基本相等的方波(图 1), 以实现 CSAMT 方法的多频同时观测、获取多元信息, 并提高工作效率(石福升, 2007)。CSAMT 方法要求发射与接收间严格同步, 以便实现相关检测。多频等幅供电波形合成基于 CPLD 技术和 VHDL 编程技术实现, 全部由硬件电路完成(图 2), 这就保证了供电波形的时基精度和同步精度。

#### 1.2 密集频点供电技术

密集频点供电是大功率 CSAMT 发射系统的一

本文由 863 重点项目课题(编号: 2007AA060601)和地质调查项目(编号: 1212010660301 与 1212010916002)联合资助, 获中国地质科学院 2009 年度十大科技进展第九名。

收稿日期: 2010-03-02; 改回日期: 2010-04-08。

第一作者简介: 林品荣, 男, 1963 年生。研究员。长期从事地球物理电磁探测技术研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。电话: 0316-2267662。E-mail: linpinrong@igge.cn。

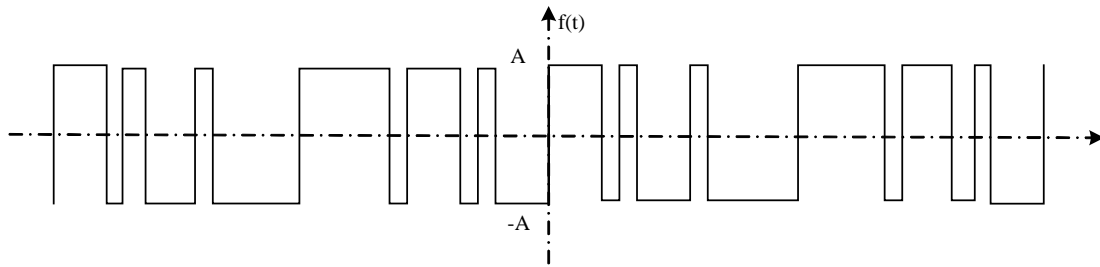


图1 多频等幅供电波形示意图

Fig. 1 Sketch map of multi-frequency power supply waveform

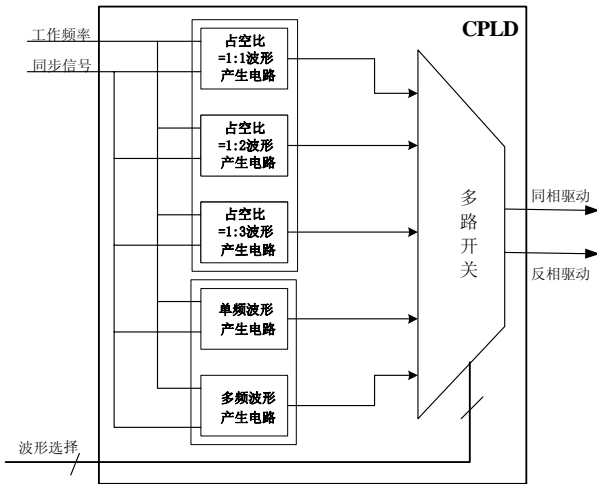


图2 多频波形合成原理框图

Fig. 2 Wave-form synthesizing block diagram

项关键技术,其意义在于:频点密度高,有利于刻画异常特征和提高探测分辨率。为此,研究开发了基于DDS(直接数字频率合成技术)的频点细化技术,实现了大功率发射系统密集频点供电功能,克服了传统电磁法发射系统工作频点密度不足这一技术难题。基于DDS技术的频点细化原理如图3所示。基于该技术的频率步长最小可为0.004Hz,因此,供电频率可以根据工作需要任意设置,在强干扰地区工作时,可通过该功能实现实时变频发射,避开干扰频率,提高信噪比,获取有效数据。

### 1.3 电性源条件下高频供电技术

大功率电性源条件下的高频供电技术,是发射系统研究的难点。晶体管的功率损耗除与电压、电流有关外,还与工作频率成线性关系。高频条件下,模块的功率损耗与频率的关系更为显著,功率损耗随着工作频率的升高线性上升,相当一部分功率消耗在功率模块上,致使输出功率减小,严重时损坏功率模块。为解决此问题,对高压大电流条件下的高频供电技术开展了攻关研究,实现了电性源条件下的高压大电流高频(8kHz)供电(表1)。

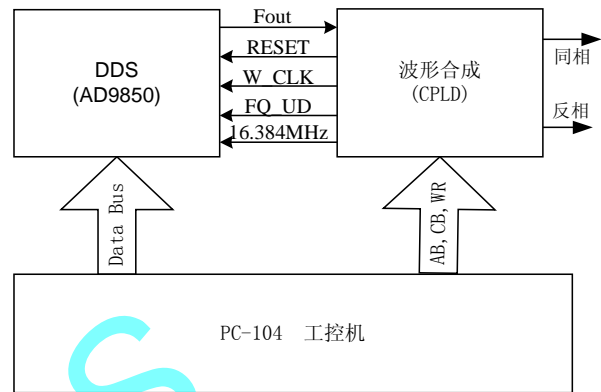


图3 频点细化原理框图

Fig. 3 Frequency refinement block diagram

表1 大功率发射机测试数据

Table 1 Test data of high-power transmitter

测试频率 (Hz)	供电电压 (V)	输出电流 (A)
1Hz	744	114.0
1kHz	646	59.0
8kHz	733	43.5

### 1.4 大功率励磁稳流供电技术

将发电机励磁调压技术引入电磁法发射系统,在不采用调压变压器的条件下,可大范围调节供电电压(0 - 1000VAC),通过调节励磁实现稳压供电或稳流供电(石福升, 2004),实现高压大电流条件下稳流技术的突破。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(图4)。大功率励磁调压稳流技术的实现,填补了国内电磁探测技术领域在功率电源开发中的一项空白。

### 1.5 大功率逆变和保护技术

逆变是将直流电转换成频率、幅值和波形可变的交流电输出。通过对IGBT(绝缘栅双极性晶体管)模块关断时尖峰过电压产生的原因进行理论分析,采用可行的尖峰电压抑制措施和IGBT关断技术,研究开发了可在高压(1200V)大电流(100A)条件下

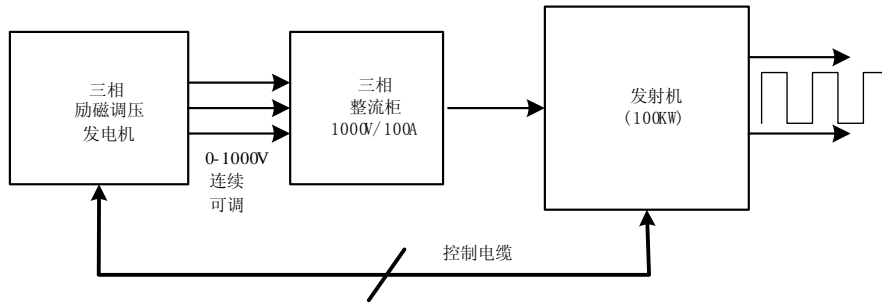


图 4 励磁调压功率电源

Fig. 4 Excitation voltage power supply

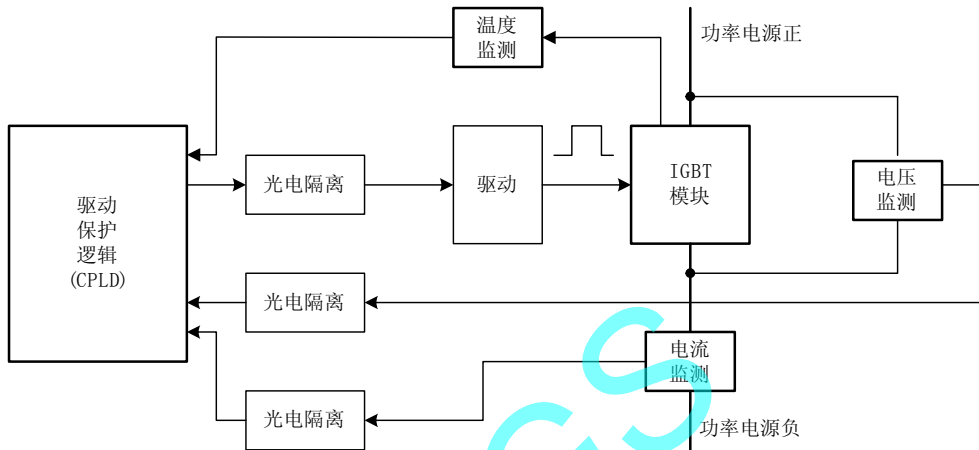


图 5 逆变器功率模块保护原理框图

Fig. 5 Inverter power module protection diagram

可靠运行的快速逆变装置。同时，由于大功率发射系统工作在强电环境，系统的任何误动作都可能带来灾难性的后果。为此，开发了过热、过压、过流和短路等多种保护技术，为将能量供入大地提供了硬件技术保障，逆变器原理框图如图 5 所示。

## 2 分布式多功能电磁接收系统研制

### 2.1 微弱信号同步检测技术

在开展人工场 CSAMT 方法观测时，发射和接收间的距离较大(几公里)，接收端的 CSAMT 信号被淹没于天然场信号和各种人文噪声(广播电台，电视台，移动通信和工频干扰等)中，常规的测量方式很难分辨有用信号(郑采君，2005)。为此，利用高精度的同步机制，开发了微弱信号同步检测技术，只有

当接收信号与供电信号同步时，才能被检测到，其它信号将被作为噪声滤除，最终实现对微弱信号的同步测量(图 6)。

### 2.2 宽带大动态信号数字化技术

多功能电法接收系统，涉及的工作方法多(AMT、CSAMT、IP 等)，接收信号的动态范围宽，有用信号强度从微伏到伏，涵盖 6 个量级超过 120dB；频率范围广，从 32KHz 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。为了保证在全频带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(每通道)，这样既保证了系统有足够的通带，又能保证系统具有足够的动态范围(郑采君，2004)，系统信号数字化电路原理框图如图 7 所示。

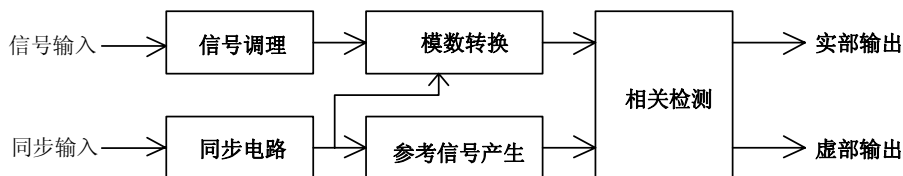


图 6 同步检测电路原理框图

Fig. 6 Synchronous detection circuit diagram

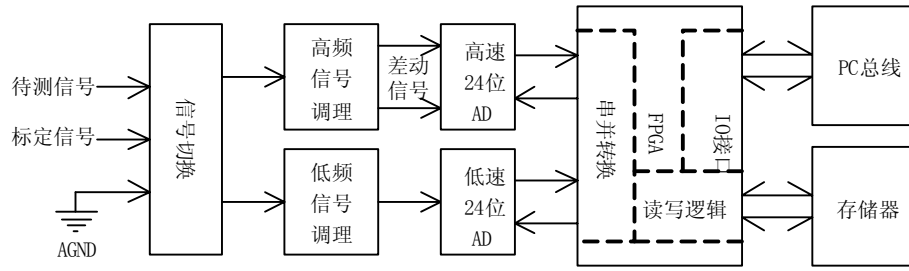


图7 系统信号数字化电路原理框图

Fig. 7 Digital signal system circuit diagram

### 2.3 高精度混合同步技术

高精度同步系统是现代地球物理勘探工作的新技术,利用高精度的同步机制,可以实现发射与接收之间、多个接收子机之间的严格同步,可以实现对于目标场阵列方式的精确同步观测。对天然场而言,同步测量可以变时空二维问题为与时间无关的一维问题,有利于干扰识别及信号的提取。对人工场而言,则可以实现直接测量绝对相位。在研究分析各种同步方式优缺点的基础上,研究开发了GPS+恒稳石英钟的混合同步技术(图8)。混合同步技术既克服了GPS同步系统惧怕遮挡的缺点,也克服了石英钟同步有误差累积、需要定时对钟的矛盾,实

现了全天候同步供电与测量。

### 2.4 无线数据传输与控制技术

无线数据传输和控制是实现系统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,较好地解决了数据校验远距离接力传输等技术难题。通过子机中继接力方式实现了在主机通讯范围以外的子机与主机的传输控制(图9),使得原来需要最远传输三千米距离的要求降低到只需可靠传输100米即可,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。

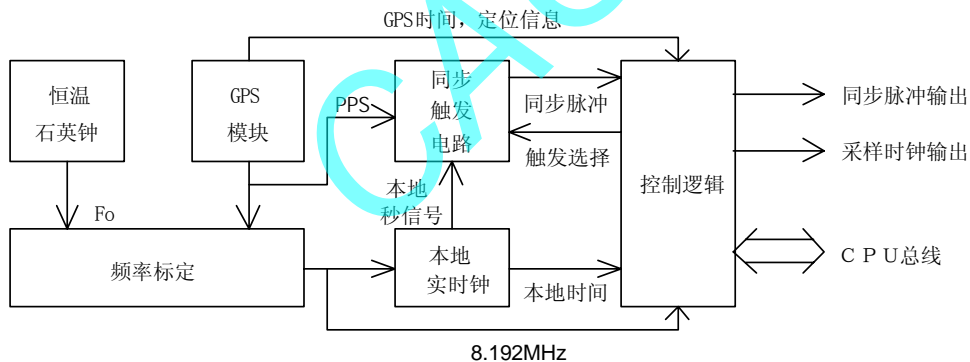


图8 GPS和石英钟混合同步电路原理框图

Fig. 8 GPS and quartz mixed synchronous circuits diagram

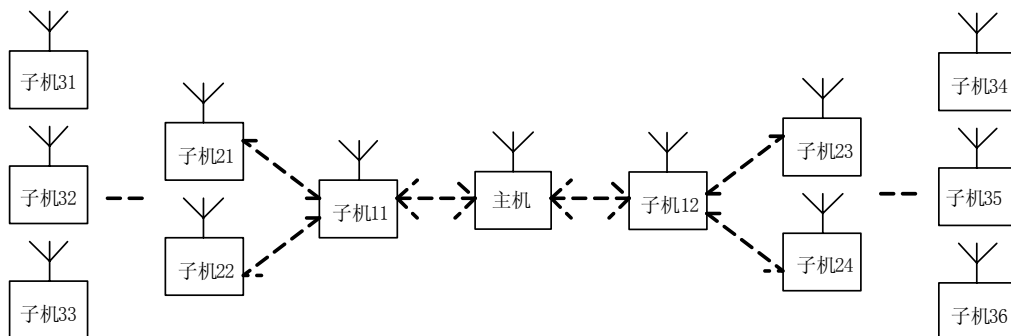


图9 无线通讯组网示意图

Fig. 9 Sketch of wireless networking

### 3 数据处理研究

开发了实用的 CSAMT 信号提取和处理技术(李建华, 2009)。采用幅值相位比较法、加窗数字带通滤波器、整周期叠加法等信号处理技术, 研究开发了可对 CSAMT 多频供电信号进行解编、具有较强抗干扰能力的微弱信号提取和处理技术。

图 10 为接收机所记录到的一组多频供电波形的电场信号(图 10-a)和磁场传感器所输出的电压信号(图 10-b)以及经过滤波叠加后的电压波形。由图可见, 原始记录波形受到各种干扰的影响, 通过压制工频干扰和带通滤波后, 其波形得以恢复, 再经多次叠加后, 随机变化的天然电磁场之影响得到进一步消除。

### 4 场地试验取得成功

对研制的大功率多功能电磁探测仪器样机, 经测试合格后, 在内蒙古某矿区开展了方法技术场地试验, 与国外同类仪器(GDP-32)进行了同发射源、同测线、同测点的 CSAMT 对比试验工作。从试验所获取的原始视电阻率曲线和阻抗相位曲线来看, 与国外仪器基本一致(图 11)。由于自行研制的分布式多功能仪器具有较高的频点密度(林品荣, 2001),

因而视电阻率和阻抗相位曲线细节更丰富, 能更好地刻画异常特征。矿区试验表明, 新研制的以 CSAMT 功能为主的多功能电法仪器样机是成功的, 并因采用了大功率、高密度频点的发射-接收技术、抗干扰数据处理技术, 使得该套系统具有高的数据观测精度以及对微弱信号的分辨能力。

值得指出的是, 大深度多功能仪器样机系统集成多种电磁探测技术(林品荣, 2006), 有天然源场的 AMT、人工源场的激电 IP 和可控源音频大地电磁测深(CSAMT), 并具有进一步扩展的潜力。该系统的大功率多频等幅发射、高密度频点发射和接收等特色技术, 是国外系统目前所不具备的。该系统的成功研制, 使我国地质勘查多功能电法系统研制进入世界前列, 将对我国电磁法勘查技术的研究、发展、推广应用起到积极的推动作用。

### 5 结论

大深度多功能电磁探测样机系统的研究成功, 是一项自主创新科技成果。该系统具有技术含量高、软硬件集成度高等特点, 不仅为电磁法多参量融合探测提供了技术准备, 而且打破了国外多功能电法仪器一统天下的局面, 为实现我国地质装备多功能电法仪器的国产化和产业化奠定了坚实基础。

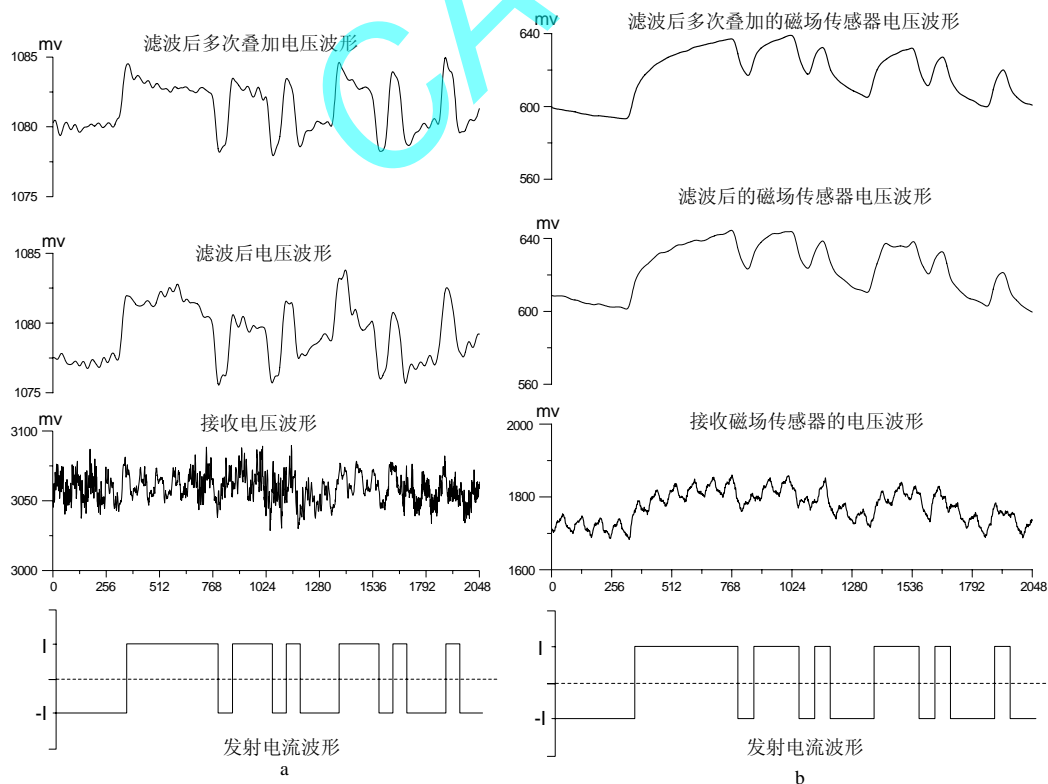


图 10 接收电场和磁场的电压波形滤波叠加前后的变化

Fig. 10 Voltage waveform changes of electric and magnetic fields through filtering and superposition



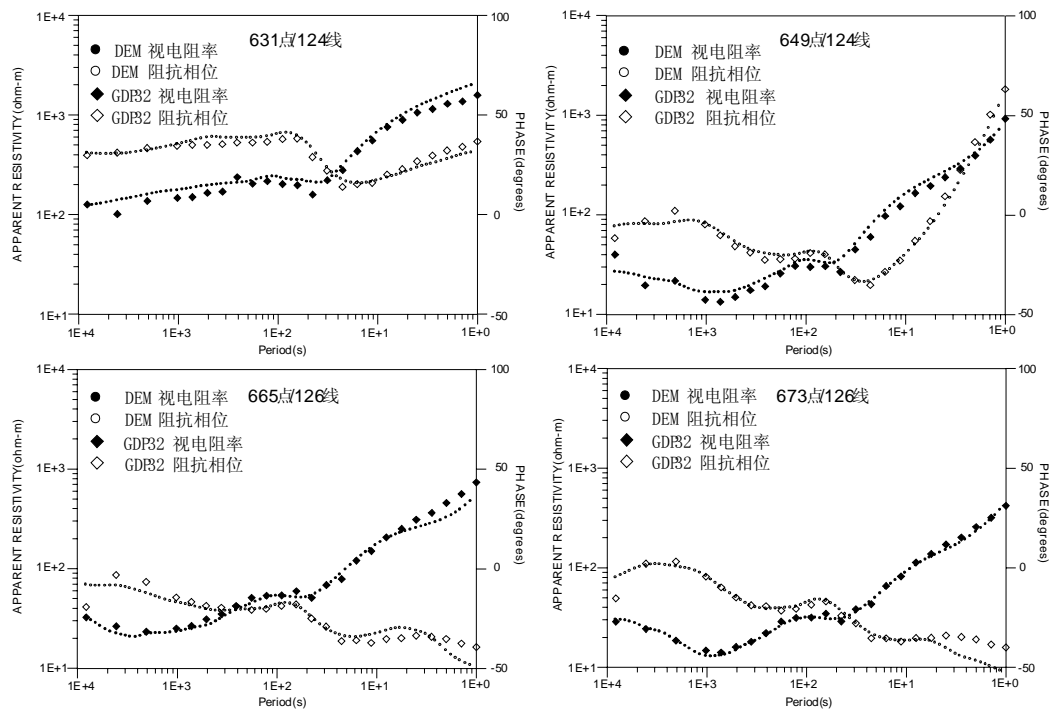


图 11 阵列电磁大功率系统 DEM 与 GDP32 系统同点 CSAMT 测量结果对比

Fig. 11 Comparison of CSAMT results between DEM and GDP32

## 参考文献:

- 林品荣, 赵子言. 2001. 分布式被动源电磁法系统及其应用[J]. 地震地质, 23(2): 138-142.
- 林品荣. 2006. 电磁法综合探测系统研究[J]. 地质学报, 80(10): 1539-1548.
- 李建华, 林品荣. 2009. 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, 31(1): 33-38.
- 石福升. 2004. 高精度数字稳流技术研究[J]. 物探与化探, 4(28):78-80.
- 石福升. 2007. 小功率智能多频发射系统研究与应用[J]. 物探与化探, 29(s1): 19-26.
- 郑采君. 2004. 采样率为 192kHz 的 24 位 AD 转换器 CS5361 原理及应用[J]. 电子设计工程, 5: 50-53.
- 郑采君. 2005. 减小数据采集系统噪声的方法[J]. 地质装备, 2: 37-40.

## References:

- LIN Pin-rong, Zhao Zi-Yan. 2001. A brief description of distributive passive electromagnetic system and its application[J]. Seismology and Geology, 23(2): 138-142(in Chinese with English abstract).

- LIN Pin-rong. 2006. General electromagnetic detection system Studies[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1539-1548(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-hua, Lin Pin-Rong. 2009. Extraction of CSAMT signal based on multi-rate FIR digital filtering technology[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 31(1): 33-38(in Chinese with English abstract).
- SHI Fu-sheng. 2004. A study of the high-precision current-regulation technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 4(28): 78-80(in Chinese with English abstract).
- SHI Fu-sheng. 2007. A study of low-power intelligent multi-frequency transmitter and application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, s1: 19-26(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Cai-jun. 2004. Principle and Application of 192kHz, 24bit AD Converter CS5361[J]. Electronic Design Engineering, 5: 50-53(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Cai-jun. 2005. The method of noise-reduction in data acquisition system[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2: 37-40(in Chinese).