

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106125

# 可控源音频大地电磁观测资料预处理方法\*

葛双超

(中北大学 仪器与电子学院 太原 030051)

**摘要:**可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种重要的电磁勘探方法。由于CSAMT法频带范围较宽,野外作业过程中容易受噪声干扰影响。针对这一问题,研究了CSAMT法观测资料实时处理方法。主要介绍了发射频率表的设计方法、全相位分析方法、数据处理中的异常值判断和剔除方法等。综合利用多种误差检验法以及异常极值识别方法,实现了强干扰下的卡尼亚视电阻率和相位测量。野外试验证明,所提出的数据处理方法能够从信噪比很低的原始数据中提取有效的卡尼亚视电阻率和阻抗相位,有助于提高CSAMT法的抗干扰能力,扩大其应用范围。

**关键词:**CSAMT;数据采集;异常识别;误差检验;对比试验

**中图分类号:**TP2 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.1050

## Data preprocessing methods for controlled source audio frequency magnetotelluric method

Ge Shuangchao

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** As an important electromagnetic surveying method, controlled source audio frequency magnetotelluric (CSAMT) method is operated within a very broad bandwidth, so observational data is vulnerable to varies noise. To solve this problem, real-time data processing method for CSAMT was studied in this paper. The frequency table design method, all-phase analysis, and the judgment and elimination of abnormal value were discussed. Cagniard resistivity and phase measurement under strong disturbances was achieved by integrated utilization of multiple error inspection method as well as anomalous extremum value identification method. Field tests confirmed that the data processing method described can extract effective Cagniard apparent resistivity and impedance phase from the original data with very low SNR, helping to improve the anti-interference capability and expand the application scope of CSAMT.

**Keywords:** CSAMT; data acquisition; anomalous value identification; error inspection; comparison test

### 0 引言

大地电磁法(MT)基于电磁感应原理,通过观测天然存在或者人工建立的电磁场在地面的分布情况进行电法勘探。天然大地电磁场的频带范围很宽,因为集肤效应,不同频率的电磁场穿透深度不同,所以可用于研究不同深度的地质电性信息。大地电磁法具有探测深度大、不受高阻层屏蔽影响、成本低等特点<sup>[1,2]</sup>,在油气田探测以及地热资源勘查等领域有重要应用<sup>[3-5]</sup>。该方法最初以天然大地电磁场为场源,利用的频率范围为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^3$  Hz。为了更好地研究人类采矿活动深度范围内的地电结构信息,1969年,Berdichevski提出了音频大地电磁法(AMT),该

方法利用雷电产生的音频信号作为激励源来进行数据采集,观测频带为 $1 \sim 10$  kHz<sup>[6-8]</sup>。但是音频范围内的天然信号较为微弱,而人文干扰又较大<sup>[9]</sup>。为克服这一问题,Goldstein在Strangway教授的指导下提出利用人工建立的音频电磁场作为激励源来进行MT观测,其观测的方式与AMT相同,而电磁场的频率、强度以及方向等均由人工控制,该方法称为可控源音频大地电磁法(CSAMT)。与AMT法相比,CSAMT法的抗干扰能力更强<sup>[10-11]</sup>。

利用CSAMT法进行野外作业时,可以利用磁性场源或电性场源来产生人工源激励信号,而后者应用更为广泛<sup>[12]</sup>。根据使用的场源个数和观测对象的不同,CSAMT法可分为3种:张量法、矢量法和标量法。张量CSAMT以

收稿日期:2021-03-24

\* 基金项目:国家自然科学基金(41904080)、山西省重点研发计划(201903D121118)项目资助

两组正交场源作为激励,观测每个场源产生的 5 个场分量 ( $E_x, H_y, E_y, H_x, H_z$ ), 这种测量方法获得的信息量非常丰富,但是工作效率较低。矢量 CSAMT 是张量法的一种简化,用一个场源,测量该场源产生的 5 个场分量。而标量 CSAMT 法更简便,仅使用一个场源,测量两个正交的场分量。标量 CSAMT 法具有效率高、成本低、操作简单等优点,在实际应用中可取得良好的地质效果。

### 1 CSAMT 法数据预处理

#### 1.1 CSAMT 观测方法

进行标量 CSAMT 测量时,通常采用赤道偶极装置,如图 1 所示,发射机沿一定方向 X 通过供电电极 AB 将某一频率  $f$  的交变电流供入地下,然后在其一侧或两侧  $60^\circ$  张角的扇形区域内,接收机利用电场传感器和磁场传感器沿 X 方向逐点同时观测与场源平行的电场  $E_x$  和正交的磁场  $H_y$ , 并利用观测资料计算视电阻率。

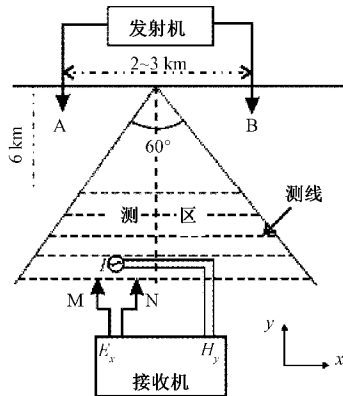


图 1 CSAMT 测量装置示意图

但是在复杂多变的野外环境中,要想获得令人满意的 CSAMT 观测结果,还需开发有效的数据处理算法<sup>[13]</sup>。为了从强干扰数据中获取准确的卡尼亚视电阻率,本文用如图 2 所示的方法实时处理 CSAMT 的观测数据。

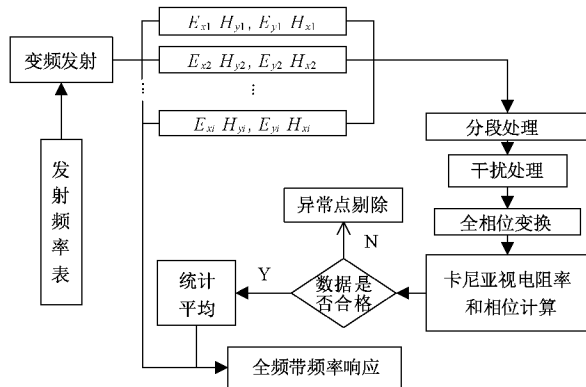


图 2 CSAMT 数据采集与实时处理方法

采用发射频率表来控制激励信号的频率和发射时间,数据采集过程中要求正交的电通道和磁通道同步采集。数

据处理过程中,首先根据当前信号频率和发射持续时间对数据进行分段,分段原则是保证高频信噪比和低频叠加次数。对分段截取的数据进行干扰抑制和频域变换来获得卡尼亚视电阻率。然后利用统计的方法计算当前频点处的有效视电阻率和相位值,最后将不同频点处的结算结果进行综合,获得测区在全频带内的频率响应情况。下面具体介绍 CSAMT 数据采集与处理的实现过程。

#### 1.2 CSAMT 发射频率表

CSAMT 法的发射电流频率-时间表包括如下内容:频率、电流强度、发射结束时间。因为 CSAMT 法的频带非常宽,所以制定频率表的时候既要保证高频电流有充足的发射持续时间又要保证低频信号有足够的叠加次数。一般来说,至少要满足 40 s 发射持续时间和 5 次叠加次数。这样随着频率降低,数据量也会逐渐减少,所以在设置发射频率表时需要综合考虑信号频率  $f_{in}$ 、发射持续时间  $t_i$  以及最低叠加次数  $n_{ovw}$  等参数。采样率  $f_s$  与信号频率的关系如表 1 所示。

表 1 CSAMT 采样率和信号频率之间的关系 Hz

$f_{in}$	$\leq 0.25$	$0.25 \sim 4$	$4 \sim 39$	$\geq 600$
$f_s$	15	150	2 400	24 k

对 CSAMT 法观测数据进行谱分析时,常用分析方法有直接离散傅里叶变换(DFT)<sup>[14]</sup>、加窗 DFT 法、滑动功率谱检测<sup>[15]</sup>等。直接 DFT 和加窗 DFT 都是建立在经典傅里叶变换的框架之内的,所以都会在一定程度上受到频谱泄露作用的影响<sup>[16]</sup>。为获得较为精确的频谱参数,尤其是相位,本研究采用了全相位频谱分析法,该方法是天津大学的王兆华教授等<sup>[17]</sup>在 1983 年提出的,最早应用于数字图像处理中。具有计算量小、相位精度高的优点。因为观测方法的常用信号源为方波,所以本文以方波信号为例分析了直接 DFT、加窗 DFT 以及全相位变换的频谱分析性能。原始数据由 128 Hz 方波和随机噪声构成,采样率为 2 400 Hz。对比了不同信噪比以及整周期和非整周期截断情况下的频谱分析的相位误差结果。加窗 DFT 法的频谱校正方法为相位差分法。对比结果如表 2 所示。其中整周期截断的数据长度为  $N = 750$ ,而非周期截断为  $N = 700$ 。加窗 DFT 的窗函数为汉宁窗,同样全相位处理的自卷积窗也是由汉宁窗获得的。

表 2 表明,在无噪声情况下,整周期截断的直接 DFT 方法的相位计算精度最高,而非整周期下的全相位分析法的相位精度最高。在受噪声干扰情况下,理论上全相位法的相位误差是加窗 DFT 的 2/3,而频谱泄露仅为直接 DFT 的 1/2。总的来说,整周期截断相位计算精度高于非整周期截断。与直接 DFT 和加窗 DFT 相比,全相位谱分析可以简化计算量并提高计算精度。

本文对 CSAMT 数据进行频谱分析时,一次全相位变

表2 不同频谱分析方法的相位精度对比

N	SNR	直接 DFT	加窗 DFT	全相位法
750	$+\infty$	0	-1.826 8	$2.45 \times 10^{-10}$
	44.782 2	-0.000 3	-0.003 4	$8.18 \times 10^{-6}$
	19.659 8	-0.038 2	-0.145 5	$-2.80 \times 10^{-3}$
	10.796 7	-0.011 2	0.073 8	$-5.59 \times 10^{-3}$
700	$+\infty$	0.208 7	-0.000 1	$8.00 \times 10^{-8}$
	44.782 2	0.206 3	-0.003 3	$-1.03 \times 10^{-3}$
	19.659 8	0.124 0	-0.155 4	$-1.11 \times 10^{-2}$
	10.796 7	0.244 3	-0.044 5	$3.19 \times 10^{-2}$

换需要的数据长度为:

$$l_{seg} = 2n_{fft} - 1 \quad (1)$$

式中:  $n_{fft}$  为全相位窗长。

设制定发射频率表时设定的最短持续发射时间为  $t_f$ 。则频率为  $f_{in}$  的信号在这段时间内的数据量为:

$$N_{total} = f_{in} \times t_f \quad (2)$$

那么该信号的持续发送时间由式(3)决定:

$$t_l = \begin{cases} t_f, & N_{total} \geq l_{seg} \times n_{ovr} \\ \frac{l_{seg} \times n_{ovr}}{f_{in}}, & N_{total} \leq l_{seg} \times n_{ovr} \end{cases} \quad (3)$$

相应的频率表制作流程如图3所示。

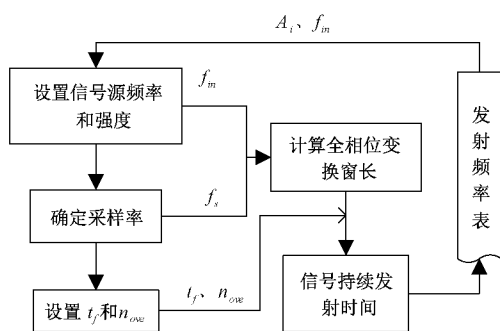


图3 CSAMT发射频率表生成方法

图3中,  $A_i$  为电流强度, 设定该值时需要保证足够的信噪比。

以上介绍的就是CSAMT法发射频率表的生成方法, 本文为该方法编写了C++程序。在实际操作中, 用户只需输入需要观察的频点、单频信号最短发送持续时间以及最少叠加次数, 之后算法程序会自动计算其他参数, 并生成相应的发射频率表。发射机开始工作后, 将按照该发射频率表依次将相应频率的电流信号供入地下。同时, 多功能电法接收机同步采集正交的电场和磁场信号, 并实时完成卡尼亚视电阻率和相位参数计算。

### 1.3 卡尼亚视电阻率和相位算法

利用原始观测数据计算卡尼亚视电阻率时, 首先根据信号频率  $f_{in}$ 、采样率  $f_s$ 、通道数  $n_{channel}$  以及数据量  $N_{block}$  等参数信息, 利用上一节介绍的算法计算  $l_{seg}$ 。当  $N_{block}$  非  $l_{seg}$

的整数倍时, 最后一小部分不足  $l_{seg}$  的数据段会被舍弃。

这样, 一次处理的数据点个数为  $l_{seg} \times n_{channel}$ 。首先是干扰去除。主要是去除观测信号中的工频干扰, 使用的滤波器为文献[18]中设计的工频谐波陷波器。需要注意的是, 该陷波器对工频基频及其奇次谐波频点处的频率分量有一定的压制作用, 所以在工频干扰较严重地区进行观测时应尽量避开这些频点。

对于单个电通道和一个磁通道而言, 每一段长度为  $l_{seg}$  的数据可实时计算一个对应的卡尼亚视电阻率和相位值。当单个频点的所有数据段均处理完成后, 先利用异常判断准则对粗大误差进行判定和剔除, 然后利用叠加平均法来抑制随机误差, 从而获得当前频点处的有效卡尼亚视电阻率和阻抗相位。

### 1.4 异常值判断和剔除方法

CSAMT法测量过程, 粗大误差可能是由于仪器或周围环境的突然变化等原因导致的明显错误。这种异常表现为数值明显高于或低于样本均值, 可能会令测量结果产生畸变。如果测量结果中含粗大误差, 需要先将其舍去再进行后续处理。在进行粗大误差判定时, 应遵循一定的准则, 常用判断方法包括:  $3\sigma$  检验法(又称拉依达检验法)、肖维勒检验法、格拉布斯检验法、狄克逊检验法以及罗马诺夫斯基检验法等, 这些检验法都是建立在测量数据符合正态分布的基础之上的。

对于一组测量值  $x_r = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 利用这几种异常检验方法的基本原理和步骤都是相同的。

1) 对原始测量序列  $x_r$  进行从小到大顺序, 得到序列  $x$ 。其次将最小值  $x_{\min}(x_1)$  和最大值  $x_{\max}(x_n)$  定为异常怀疑值。

2) 计算  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  的误差统计量。

3) 将步骤2)获得的误差统计量与准则临界值对比, 大于临界值则为粗大误差, 需要剔除, 否则为需要保留的有效数据。

$3\sigma$  准则的误差判断标准如下:

$$|x_i - \bar{x}| > 3\sigma, \quad x_i \text{ 为粗大误差, 剔除} \quad (4)$$

$$|x_i - \bar{x}| \leq 3\sigma, \quad x_i \text{ 为有效数据, 保留}$$

其中,  $\bar{x}$  和  $\sigma$  分别为序列  $x$  的均值和均方根误差。计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

对于序列  $x$  而言, 其在  $3\sigma$  范围以外的残差概率不超过  $0.3\%$ <sup>[19]</sup>, 所以  $3\sigma$  准则认为如果某一数据  $x_i$  的剩余误差大于  $3$  倍标准差, 则该值即为粗大误差。该检验法是最简单也是最常用的粗大误差判断方法, 对于重复测量次数较大的情况应用效果较好。因为这种情况下  $\sigma$  值会很小, 所以异常值判断的可靠性较高。而  $\sigma$  是由贝塞尔公式计算获得的, 要求重复测量次数不低于  $10$  次, 否则无法利用该方法提取出粗大误差。

肖维勒检验法是为了弥补拉依达准则的不足提出来的,其临界值不再为固定值  $3\sigma$ ,而是与测量重复次数  $n$  有关。肖维勒准则如下:

$$\begin{aligned} |x_i - \bar{x}| > z \times \sigma, \quad x_i \text{ 为粗大误差, 剔除} \\ |x_i - \bar{x}| \leq z \times \sigma, \quad x_i \text{ 为有效数据, 保留} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $z$  是与  $n$  相关的肖维勒判断系数,通常  $z < 3$ ,所以肖维勒准则比拉依达准则更为苛刻。

格拉布斯检验法也是一种应用范围很广的异常判定方法。这种异常判断方法考虑了测量次数以及标准差自身误差。格拉布斯准则使用的统计量为:

$$g_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma}, \quad x_i = x_{\min}, x_{\max} \quad (7)$$

格拉布斯准则临界值  $g(a, n)$  利用查表的方法获得,其中  $a$  为显著性水平。通常将  $a$  值取为 0.05,此时置信度水平为 95%。格拉布斯准则判断标准如下:

$$\begin{aligned} g_i > g(n, a), \quad x_i \text{ 为粗大误差, 剔除} \\ g_i < g(n, a), \quad x_i \text{ 为有效数据, 保留} \end{aligned} \quad (8)$$

与  $3\sigma$  准则相比,格拉布斯准则理论上更为严谨,在测量次数较少 ( $< 100$ ) 的情况下更为适用,尤其是对样本中仅存在一个异常值的情况下,该方法的异常判断能力是各类方法中最高的。

狄克逊检验法的原理与格拉布斯法类似,都是通过查表的方法判断怀疑值是否异常。狄克逊准则参考量公式如下:

$$d_{\max} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}, \quad d_{\min} = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1} \quad (9)$$

判断准则为:

$$\begin{aligned} d_i > d(n, a), \quad x_i \text{ 为粗大误差, 剔除} \\ d_i < d(n, a), \quad x_i \text{ 为有效数据, 保留} \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $d(n, a)$  通过查找狄克逊准则临界值表获得。

式(10)表明,狄克逊准则无需计算  $\bar{x}$  和  $\sigma$ ,方法较为简便。适用于测量重复次数不太高的情况。

罗马诺夫斯基检验法又称  $t$  检验。该方法首先将怀疑为粗大误差的异常值剔除,然后用其余  $(n-1)$  个测量值及剩余误差来计算标准差:

$$x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (11)$$

罗马诺夫斯基检验准则为:

$$\begin{aligned} \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} > t(n-2, a) \times \left(\frac{n}{n-1}\right)^2, \quad x_i \text{ 为粗大误差, 剔除} \\ \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} < t(n-2, a) \times \left(\frac{n}{n-1}\right)^2, \quad x_i \text{ 为有效数据, 保留} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $t(n-2, a)$  为自由度为  $n-2$  的  $t$  分布临界值,该值同样通过查表获得。

罗马诺夫斯基准则在几种方法中最为严格,且异常值判断的准确度较高,但是其计算方法较为复杂。

以上分析表明,这些准则都具有一定的优缺点,且适用

情况不同。所以,在数据处理时应该根据情况选取合适的检验准则。

由于信号频率、采集时间和 FFT 长度的不同,不同频点对应的卡尼亚视电阻率的测量值个数  $n$  也有所差异。通常,  $n$  随信号频率升高而增加,最高频率信号的  $n$  值可能会比最低频率信号的高 2 个数量级。所以对不同频点的卡尼亚视电阻率进行粗大误差判断时要根据测量数据个数来选择不同的检验方法。

另外,由于野外环境的不确定性,计算结果中可能会出现明显超出预期值的异常值,下文称为异常极值。异常极值可能是异常极大值或异常极小值,这些值的存在可能会导致异常判别失效或漏判。所以首先应剔除这些极值点,然后再利用误差检验法来去除剩余数据的粗大误差。

本文对卡尼亚视电阻率的振幅和相位分别进行异常值剔除。根据上一节的介绍可知,频率为  $f_{in}$  的信号对应的卡尼亚视电阻率计算个数为:

$$n_{total} = \text{floor}\left(\frac{N_{block}}{l_{sec}}\right) \quad (13)$$

其中,  $\text{floor}()$  表示向下取整运算。

以振幅计算结果为例,首先对卡尼亚视电阻率序列由小到大进行排序,得  $\{amp_1 \ amp_2 \ \dots \ amp_{n_{total}}\}$ 。然后按照式(14)判断异常极值点:

$$\begin{aligned} amp_{n_{total}} > 2 \times \sum_{i=2}^{n_{total}-1} amp_i, \quad \text{极大异常值} \\ amp_1 < 0.2 \times \sum_{i=2}^{n_{total}-1} amp_i, \quad \text{极小异常值} \end{aligned} \quad (14)$$

异常极值点剔除流程如图 4 所示。

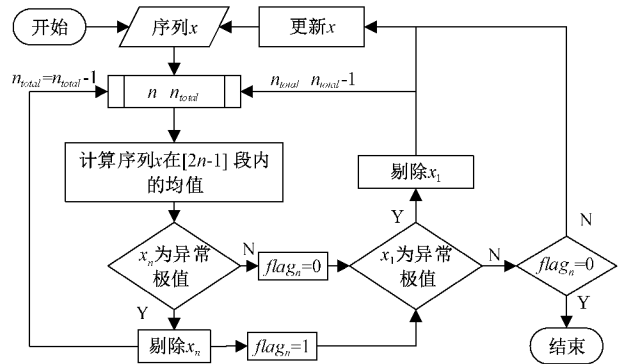


图 4  $x$  序列异常极值点剔除流程

利用图 4 描述的过程,不断地循环剔除振幅序列中的极大异常值和极小异常值,直至所有异常极值全部去除。设此时剩余数据个数为  $n$ 。然后根据  $n$  的大小选择合适的粗大误差检验方法,选择标准如表 3 所示。

表 3 CSAMT 异常检验方法

数据量	$\leq 10$	10~100	$\geq 100$
检验方法	t 检验法	格拉布斯检验法	$3\sigma$ 检验法

粗大误差剔除过程与异常极值点剔除过程类似,都是每次剔除一个异常值,然后不断重复异常值检验和剔除,直至去除序列中的所有粗大误差为止。

通过以上处理得到的卡尼亚视电阻率序列包含的干扰为随机噪声干扰,且这些干扰值均在误差判断准则范围内,通过叠加平均即可消除,故该序列的统计均值即为该频点对应的卡尼亚视电阻率的振幅。

相位序列的处理过程与振幅序列基本相同。但是要注意相位的周期性<sup>[26]</sup>,比如序列  $\phi = \{-359.5 - 0.46 - 0.42 - 0.3 0.38 0.5 0.51 359.4\}$ 。其最大值和最小值明显偏离中间数据段的均值,但是对其进行异常判断时不能将这两个值直接剔除。进行异常判断之前应先将它们校正到  $\pm 180^\circ$  的范围内,校正公式如下:

$$\phi_i = \begin{cases} \phi_i + 360, & \phi_i < -180^\circ \\ \phi_i - 360, & \phi_i > +180^\circ \end{cases} \quad (15)$$

校正之后的序列  $\phi$  变为  $\{-0.6 - 0.46 - 0.42 - 0.3 0.38 0.5 0.5 0.51\}$ ,可见该序列并无异常值。

以上介绍的是某一频点处卡尼亚视电阻率和阻抗相位的计算方法,扫频测量完成后即可获得测区在目标频带内的所有视电阻率参数,然后利用磁传感器以及仪器测量通道的标定数据对这些计算结果进行拟合校正,最终可获得有效的频率响应曲线。

## 2 试 验

为验证上述各方法的有效性和准确性,开发了 CSAMT 法数据处理软件(图 5)并进行了 CSAMT 对比观测试验。进行 CSAMT 法野外试验时,共布设了 9 台数据采集站,每台采集 3 通道平行电磁数据和 1 通道垂直磁场数据。试验过程中,利用凤凰公司的 MTU-5A 进行了对比观测。以其中一台采集站为例,利用以上方法获得的 CSAMT 野外实时处理结果如图 5 所示。

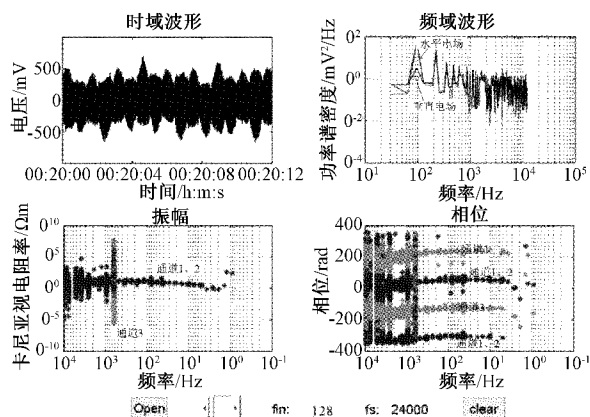


图 5 CSAMT 野外试验结果

从图 5 可见,CSAMT 观测数据的高频段干扰较为严重,一方面是由于该频带的环境噪声较大,另一方面是由于高频电流衰减较为严重,所以信噪比较低。高频段的卡尼

亚视电阻率和相位均满足正态分布。而低频段计算结果随机误差较小。另外,试验过程中通道 3 的测量电极接反,所以该通道的相位与其余两道相反。

利用本文提出的 CSAMT 观测数据处理算法获得的全频带频率响应曲线如图 6 所示。

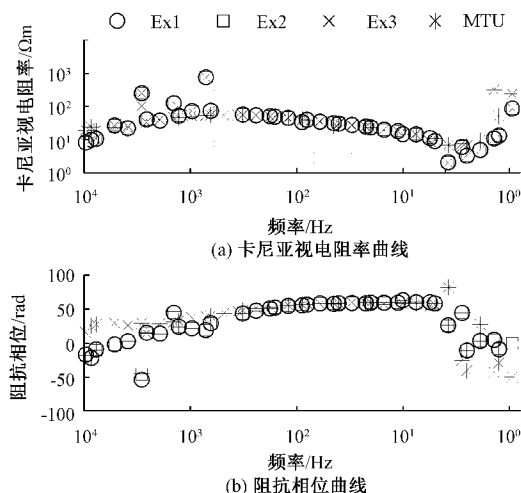


图 6 CSAMT 法结果曲线

图中“\*”代表 MTU 的测量结果,其他标记代表本研究获得的结果。结果表明,虽然 CSAMT 观测数据受到了严重干扰,但利用本文提出建立在全相位分析之上的数据处理方法获得的卡尼亚视电阻率和阻抗相位曲线与先进的大地电磁观测系统 MTU 5A 的测量结果基本一致。

## 3 结 论

CSAMT 法是一种频带范围非常宽的电磁勘探方法,利用该方法进行测量时,观测数据中会包含大量的噪声干扰。为了提高 CSAMT 法的抗噪声能力,本文设计了一种 CSAMT 数据处理方法。首先设计合理的发射频率表,保证高频段有足够的数量来进行叠加平均,其次利用全相位分析法计算不同频点处的频率响应,之后对每个频点的所有计算结果进行异常值判断和剔除,最后再利用标定数据拟合校正可获得测区全频带内的频率响应曲线。

野外 CSAMT 法观测过程中,附近有频率大约为 4 000 Hz 的发电机作业,所以高频信号受到了严重干扰,几乎看不到有效信号,数据信噪比很差。利用本文设计的 CSAMT 数据处理方法对观测数据进行处理后,得到卡尼亚视电阻率和相位曲线与凤凰公司的 MTU 5A 大地电磁仪的测量结果具有较好的一致性。证明了本文提出的 CSAMT 数据处理方法的有效性和可靠性。

## 参考文献

- [1] MAITHYA J, FUJIMITSU Y. Analysis and interpretation of magnetotelluric data in characterization of geothermal resource in Eburru geothermal field, Kenya [J]. Geothermics, 2019, 81:12-31.

- [2] TRIPATHI A, SHALIVAHAN S S, BAGE A K, et al. Audio-magnetotelluric investigation of Bakreswar Geothermal Province, Eastern India [J]. Journal of Earth System Science, 2019, DOI:10.1007/s12040-019-1115-8.
- [3] SINGH S, MAURYA V P, SINGH R K, et al. Audio-magnetotelluric investigation of sulfide mineralization in Proterozoic-Archean greenstone belts of Eastern Indian Craton [J]. Journal of Earth System Science, 2018, 127(3):34.
- [4] TAUBER S, BANKS R, RITTER O, et al. A high-resolution survey of the Iapetus Suture Zone in south-west Scotland [J]. Geophysical Journal International, 2018, 153(3):548-568.
- [5] AIVAZPOURPORGOU S, THIEL S, HAYMAN P C, et al. Decompression melting driving intraplate volcanism in Australia: Evidence from magnetotelluric sounding [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(2):346-354.
- [6] ERLSTRÖM M, PERSSON L. Radio magnetotelluric mapping of marlstone and limestone in the Silurian bedrock of Gotland [J]. GFF, 2014, 136(4): 571-580.
- [7] WEN L, CHENG J, LI F, et al. Global optimization of controlled source audio-frequency magnetotelluric data with an improved artificial bee colony algorithm [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 170:103845.
- [8] ZX A, GL B, HX A, et al. Hydrogeological prospecting in the Da Qaidam area of the Qaidam Basin using the audio-frequency magnetotelluric method-ScienceDirect [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 182:104179.
- [9] BASTANI M, SAVVAIDIS A, PEDERSEN L B, et al. CSRMT measurements in the frequency range of 1~250 kHz to map a normal fault in the Volvi basin, Greece [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(2): 180-195.
- [10] YOUNIS A, EL-QADY G, ABD ALLA M, et al. AMT and CSAMT methods for hydrocarbon exploration at Nile Delta, Egypt [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1965-1975.
- [11] DI Q, FU C, AN Z, et al. An application of CSAMT for detecting weak geological structures near the deeply buried long tunnel of the Shijiazhuang-Taiyuan passenger railway line in the Taihang Mountains [J]. Engineering Geology, 2020, 268(1):105517.
- [12] 张健. 可控源音频大地电磁法一维正反演研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2011.
- [13] AYKAÇ S, TIMUR E, SARI C, et al. CSAMT investigations of the Caferbeyli (Manisa/Turkey) geothermal area [J]. Journal of Earth System Science, 2015, 124(1): 149-159.
- [14] 刘畅, 张丕状, 姚金杰, 等. 基于 FFT+FT 的 FMCW 雷达高精度测距算法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 65-69.
- [15] 戴忠华, 周穗华, 孙玉绘, 等. 舰船地震波信号的滑动功率谱实时检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):79-85.
- [16] 闫涵, 张旭秀, 丁鸣艳. 一种改进的非局部均值去噪算法 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(22):150-154.
- [17] 王兆华, 黄翔东. 基于全相位谱分析的相位测量原理及其应用 [J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 777-782.
- [18] GE S, DENG M, CHEN K. The research and realization of digital power line interference filter in magnetotelluric [J]. 2013 IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing(DASC), 2013: 78-81.
- [19] 姚熊亮, 陈海龙, 赵新, 等. 基于拉依达准则的舰载设备抗冲击薄弱环节判定 [J]. 中国舰船研究, 2007, 2(5): 10-14.
- [20] 杨辉跃, 涂亚庆, 毛育文. 科氏流量计相位差估计的 ap-Hilbert 法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):35-42.

#### 作者简介

葛双超, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为微弱信号检测等。

E-mail: geshch@nuc.edu.cn