

CSAMT 的静态效应校正及应用

黄兆辉¹, 底青云², 侯胜利¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 CSAMT 方法在地下近地表存在电性横向不均匀时, 在双对数坐标系中视电阻率曲线会出现沿着视电阻率轴平行移动的现象, 称之为静态效应。静态效应对深部电性结构处理解释结果影响重大, 需对其进行合适的校正。本文介绍了目前通常使用的几种静态校正方法, 并且分析了各方法的优缺点。在新疆某地进行的 CSAMT 铜矿勘探中, 应用了曲线平移法进行静态校正, 取得了较好的效果。

关键词 CSAMT, 静态校正, 工程应用

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)04-1290-06

CSAMT static correction and its application

HUANG Zhao-hui¹, DI Qing-yun², HOU Sheng-li¹

(1. China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract When there is small-scale lateral shallow electric inhomogeneous blocks beneath the surface, there is a phenomena in CSAMT called static shift. The apparent resistivity would parallel move along the axis of apparent resistivity in the log-log coordinate. The static shift affects the qualitative and quantitative interpretation of CSAMT. To solve this problem some methods have been introduced to correct the apparent resistivity data in this paper. The advantages and disadvantages of these methods have been discussed here. At last an example of static correction has been given uses which curve moving method to the data of the covellite exploration in Xinjiang province. It shows the method is more effective.

Keywords CSAMT, static correction, application on covellite exploration

0 引言

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是在大地电磁法(MT)的基础上, 针对解决大地电磁法场源的随机性强和信号微弱而发展成的一种人工源电磁测深方法。作为一种频率域测深方法, CSAMT 常常会出现这种情况: 在地表或近地表存在局部电性不均匀二、三维地质体, 当电磁波波长比不均匀体的几何尺寸大得很多时, 不均匀体的表面会形成一种电荷积累效应, 而使电场发生畸变, 且畸变值与发射频率无关, 其突出表现是在 $\rho-f$ 双对数坐标中视电阻率曲线沿视电阻率轴出现一个平行移动, 这就是我们常说的静态效应。在实际数据资料中, 静态效应有别

于地质异常, 静态效应的视电阻率曲线形态和相位曲线形态以及相位曲线的位置都保持不变。如果视电阻率曲线形态及相位曲线形态和位置都发生变化, 那么这是由于地下存在某种电性异常而产生的结果。

静态效应严重影响 CSAMT 方法的定性解释结果, 出现虚假的陡立深大断裂或垂向大延深的异常体。同时也会严重影响一维定量解释结果, 无论电阻率或层厚度都将产生不可忽略的误差。

1 静态效应的产生机制

为了有效地压制静态偏移效应, 我们首先得要了解静态偏移的规律。按照电磁理论, 若层状介质中

收稿日期 2006-02-10; 修回日期 2006-05-25.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-134); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702)资助。

作者简介 黄兆辉, 男, 1980 年生, 福建上杭人, 学士, 现为中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院硕士研究生, 主要从事电磁方法的研究。(E-mail: fh_huang@163.com)

电磁场是沿水平方向极化,则感应电流沿水平方向流动,如果有浅层局部不均匀体存在则会改变介质中水平方向电流密度的均匀性,从而在浅层局部不均匀体周围引起电流密度的密集或稀疏分布的畸变现象,导致地表观测的电场分量增强或减弱^[1]。我们知道,在不均匀体的界面上,所有穿过边界的场和位都是连续的,只有电感应强度的法向分量不连续:

$$D_{N_1} - D_{N_2} = q_s. \quad (D \text{ 的法向分量不连续}) \quad (1)$$

q_s 为物体表面的面电荷密度,其中 $D = \epsilon E$, 假设 ϵ 是标量并且 $\epsilon \perp \epsilon_0$, 则

$$E_{N_1} - E_{N_2} = q_s / \epsilon_0. \quad (2)$$

其中电流密度 $J = \sigma E$, 假定频率依从关系为 $e^{i\omega t}$, 对交流情况可将其写成

$$(\sigma_1 - i\epsilon_0\omega)E_{N_1} = (\sigma_2 - i\epsilon_0\omega)E_{N_2}. \quad (3)$$

由前两式联立得出:

$$q_s = E_{N_2} \epsilon_0 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - i\epsilon_0\omega} \right). \quad (4)$$

假设在准静态条件下 ($\sigma \gg \epsilon_0\omega$), CSAMT 大部分情况下符合这个假设,故有

$$q_s = E_{N_2} \epsilon_0 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1} \right). \quad (5)$$

虽然这个和频率无关的面电荷密度相当小,但它对电场的作用却是不可忽略的。Ward 和 Hohman 给出了它的电场表达式为^[2]:

$$E = -\nabla W = -\nabla \int \frac{q_s}{4\pi\epsilon_0 |r|} ds. \quad (6)$$

Hedlin^[3] 给出了电场二次场和一次场的关系为:

$$E_s \approx \frac{-1}{4\pi} \int \frac{E_p \cdot \nabla \sigma}{\sigma |r|^2} r_0 dv. \quad (7)$$

(6)式中 ds 为分布有电荷的表面的面积元。当趋肤深度比不均匀体的尺寸大得很多时,便能察觉到这种表面电荷的附加电场影响。可以看出,此时二次场与一次场是成一定比例关系并且同相位的,注意到二次场与频率无关,近地表电性不均匀体对电场产生了一个乘法因子的影响。Wannamaker 指出^[4]:

$$\rho_a = k \left| \frac{E}{H} \right| = k \left| \frac{aE'}{H} \right| = \rho_a', \quad (8)$$

$$\log \rho_a = \log \rho_a' + g_s. \quad (9)$$

E' 和 ρ_a' 是不失真的电场和视电阻率,这就意味着静态效应在双对数坐标系中视电阻率曲线是向上或向下平移的。

2 静态效应的校正

由于在目前野外采集的数据资料中,静态效应

是不可避免的,也是不可以任何方式预测的。因此我们必须对受静态效应影响严重的实测数据做静态效应校正,简称静校正。静态效应的校正 CSAMT 数据资料处理中的一个关键环节,如果校正不当,会使后续的反演解释得出严重错误的结果。针对这个问题,国内外很多专家学者做了大量的工作,提出了一系列校正的方法和技术。

根据查找的文献资料,对静态效应的校正方法可以分为:(1)曲线平移法做静校正;(2)数值分析法做静校正;(3)联合反演法做静校正;(4)利用相位换算资料做静校正;(5)利用磁场数据做静校正;(6)直接的二维以及多维反演方法。下面对各种校正方法做简要的介绍。

2.1 曲线平移法做静校正^[5~6]

在一个小区域局部范围内,对于其深部可以看成地层连续性较好,这样就可以考虑相邻测点的低频数据在没有地质异常的情况下是有一定的连续性的,由此,我们可以先用某种办法给出背景频率—视电阻率数据,然后用在这个测区的每个测点数据与之比较,判别各条曲线不连续是受静态效应影响还是地下确有异常体所致,分析所受静态位移影响的原因和受影响的程度,通过对受静态效应影响的整条曲线进行平移归位的方法来进行校正。

这种曲线平移法可以很好的消除静态偏移,但是它也有其不足之处。这种曲线平移法效果的好坏很大程度上取决于处理人员对数据的认知水平,对静态效应的判断和处理经验起着很关键的作用,容易误将那些并非静态效应引起的异常当作静态效应给“校正”了,此外还经常会有校正过头或校正不足的情况出现。为了克服这种负面影响,可以在识别静态效应方面加强做功夫,具体可以通过求取视电阻率曲线与背景值曲线的相关性、与周围测点曲线的相关性,相位曲线的连贯性等等来综合判别。

2.2 数值分析法做静校正

由于曲线平移的方法做静校正人为的因素影响比较大,很多人也尝试着用数值分析的方法来进行消除或者压制静态效应。包括:空间域滤波法、数值模拟法、时频分离与压制等等。

2.2.1. 空间域滤波法^[7~9]

利用空间滤波法作静校正的基本出发点,是认为地下电性异常体或地质构造引起的视电阻率沿测线的变化是平缓渐变的;而地表局部电性不均匀体或局部地形不平则会引引起视电阻率沿测线急剧变化。这样,若设计某种低通滤波器沿测线作空间滤

波,则可压制“高频”的静态效应.常见的有五点、七点或汉宁滤波、中值滤波以及电磁阵列剖面法(EMAP)等.

2.2.2. 数值模拟方法^[10~12]

对于某些地形背景简单的静态效应,尤其是地形影响产生的静态效应,可以采用数值模拟的方法来进行识别并作出校正.可以利用 2.5 维正演的方法,模拟地下电性分布情况,通过正演进行理论计算.不过进行数值模拟要求事先给出地下地质特征和局部不均匀体的初始几何和电性模型,而在实际野外条件下这些往往是未知的,所以只能是作为参考研究用.通过大量的数值模拟我们可以从中找出特定地形的静态效应影响的某些规律,从而有助于进行静态效应的识别和校正.

2.2.3 时频分离与压制^[13~17]

在波数域中,近地表电性不均匀体对电场的影响表现为高通性质,高波数的电导异常对电场产生较大的影响,并通过滤波器叠加到各个不同频率的大地电磁响应(即视电阻率)曲线上,从而引起视电阻率曲线的畸变.

在小波变换中,通过 $|W_a \rho(x)|$ 寻找的极大值点就能确定各种异常体的横向分布,在数学上用 Lipschitz 指数^[16] a 来刻画函数奇异性强弱,函数 $f(x)$ 在区间 (a, b) 上,存在常数 $K > 0$,使得对所有的 $x \in (a, b)$, $f(x)$ 的小波变换 $W_a f(x)$ 满足不等式

$$W_a f(x) \leq KS^a. \quad (10)$$

实际中原始卡尼亚电阻率 $\{\rho(n)\}$ 是离散的,所以在实际计算中要用(10)式的离散形式:

$$|W_{2^j} \rho(n)| \leq K2^{ja}, \quad (11)$$

其中, n 为观测点点号, 2^j 为小波尺度 a 的 2 进离散值, $j=0, 1, 2, \dots, J$.

对原始卡尼亚电阻率 $\{\rho(n)\}$, 首先计算其离散小波变换 $\{W_{2^j} \rho(n)\}$. 然后选出 $\{W_{2^j} \rho(n)\}$ 的极大值,每一对极大值对应一异常.最后根据不等式(11),结合带约束条件的最优化方法求出每一异常的 Lipschitz 指数 a 的最优解.

对(11)式两边取对数,

$$\log |W_{2^j} \rho(n)| \leq \log K + ja \log 2, \quad (12)$$

构造目标函数

$$\sum_{j=0}^J [\log |W_{2^j} \rho(n)| - \log K - ja \log 2]^2 \quad (13)$$

我们求在约束条件(12)之下使(13)式取最小值的 a 与 K 作为(11)式的最优解.

通过大量的理论模型和实例,发现如下规律:

近地表局部不均匀体产生的静态效应奇异性强,表现为其 Lipschitz 指数 a 为负值.

深部有一定规模的大构造异常,奇异性弱,表现为其 Lipschitz 指数 a 为正值.

因此,根据异常的 Lipschitz 指数 a 的正与负容易区分大构造异常与静态效应.再结合小波变换的极大模与异常体边界的对应关系,还能容易圈定异常体的横向分布范围.

2.3 利用相位换算资料做静校正^[7, 18~19]

Bostick, K. L. Zonge^[19] 等人曾导出了相位与电阻的近似关系式

$$\varphi(f) \approx \frac{\pi}{4} \left[1 + \frac{d \ln \rho_s(f)}{d \ln f} \right], \quad (14)$$

表明阻抗相位 $\varphi(f)$ 只与视电阻率 $\rho_s(f)$ 在双对数坐标系中频率测深曲线的斜率 $\left(\frac{d \ln \rho_s(f)}{d \ln f} \right)$ 成正比,静态效应只是使双对数坐标系中的 ρ_s 频测曲线上下平移,而不改变其对斜率和沿频率轴的位置.所以,静态效应对阻抗相位的频测结果 $\varphi(f)$ 无影响.故而我们可以通过积分相位数据,计算由相位导出的视电阻率 ρ_s , 以获得无静态位移的视电阻率资料.

2.4 利用磁场实测数据作静校正^[7]

静态效应是局部不均匀体表面积累电荷形成的附加电场,使实测电场产生了畸变,但附加电场对磁场分量几乎无影响.因此,如果利用实测磁场分量计算视电阻率,便可避免静态效应.根据文献^[7],在均匀大地条件下,对于中心位于坐标原点,沿 x 轴方向的地面双极源 AB ,当其中供以谐变电流 $I = I_0 e^{-i\omega t}$ 时,在地面测点 (x, y) 产生的磁场分量(复振幅) H_y 的远区表达式为

$$H_y = -\frac{I}{2\pi k} \left[\frac{x_d}{(x_d^2 + y^2)^{3/2}} \right]_{x_d=x_A}^{x_d=x_B} + \frac{x_d}{y^2(x_d^2 + y^2)^{1/2}} \Big|_{x_d=x_A}^{x_d=x_B} \quad (15)$$

式中,

$$x_A = x + \frac{AB}{2},$$

$$x_B = x - \frac{AB}{2},$$

$$k = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho}.$$

由此,可定义双极源远区磁场视电阻率

$$\rho^H = 4\pi^2 \omega \mu_0 \left| \frac{H_y}{I \cdot R} \right|^2. \quad (16)$$

式中,

$$R = \frac{\left(x - \frac{AB}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(x - \frac{AB}{2}\right)^2 + y^2} + \frac{1}{y^2} \right]}{\left[\left(x - \frac{AB}{2}\right)^2 + y^2 \right]^{1/2}} - \frac{\left(x + \frac{AB}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(x + \frac{AB}{2}\right)^2 + y^2} + \frac{1}{y^2} \right]}{\left[\left(x + \frac{AB}{2}\right)^2 + y^2 \right]^{1/2}} \quad (17)$$

这样,便可由双极源 CSAMT 法野外观测数据,按(16)和(17)式计算几乎不受静态效应影响的磁场视电阻率 ρ^H 。利用 ρ^H 对卡尼亚视电阻率 ρ_c 进行作静校正,校正的方法与前述空间滤波法相似,不过校正正是逐个测点进行的。

2.5 联合反演法做静校正^[20~23]

静态效应是由于地表电性不均匀体的存在,在外电场作用下,不均匀体界面上形成积累电荷,从而导致电场观测值的偏移,而不影响磁场观测值。在此认识基础上,我们可以用非电场观测的电磁法,获取无静态效应的测深资料,来对 CSAMT 进行静态校正。瞬变电磁测深法(TEM)是一种时间域电磁方法,它观测的是建立在大地的场源在消失时产生的瞬变磁场响应信号,因此在观测数据中不受静态效应的影响。

Sternberg 等提出了一种用 TEM 来进行静态校正的技术。其基本原理是利用时间和频率之间存在这样的转换关系式:

$$194/f = t. \quad (18)$$

将 TEM 时间坐标的视电阻率曲线转换成频率坐标的视电阻率曲线,然后与我们的 CSAMT 视电阻率实测曲线进行对比,结合曲线平移法并校正静态偏移。

2.6 直接的二维与多维反演方法^[24~25]

一维的空间滤波有可能把浅部的一些有用信息滤掉,尤其是在作浅层地球物理时,浅层的一些电性不均匀体,往往正是所需要的目标。2D、2.5D、3D 反演,是在有限元或有限差分法等基础上,充分考虑到了地下电性的空间不均匀性,从而反演的结果就不带有静态效应的影响。

3 各种静校方法的优缺点

曲线平移法是一种有效实用的静校正方法,人机交互的界面比较友好,直观明显,然而也正是因为这样,比较依赖于处理人员正确识别曲线的能力,如

果经验不足,容易将某些有用的异常特征当作静态效应给“校正”了,例如,垂直倾斜构造、低阻裂隙、高阻溶洞等等。此外,曲线平移法只能一条一条曲线判断校正,工作量比较大。结合岩性测试或者是综合分析得出不受静态偏移的背景电性参数进行曲线平移法校正可以取得很好的静态校正效果。

空间滤波法是一种低通滤波方法的空间平均效应,校正的好坏关键在于选择滤波窗口的宽度和滤波系数。如果窗口系数选择不合理经常会出现校正不足或者是校正过头的现象。使用这类方法可以通过选择不同的参数,算出不同的结果进行分析对比,找出其中的合理规律,选择正确的滤波窗口系数,从而达到消弱和减少静态效应的目的。EMAP 滤波由于其极大限度地提取了勘探区域的地电信息,在消除静态和地形影响,提高勘探精度,简化数据处理方法,提高解释精度和分辨率等方面的一种行之有效的方法,它的缺点还是在于滤波窗口的选择,选择太小可能难以压制静态效应,太大又会降低分辨能力。中值滤波是具有阻止绝对高频噪声,很好的保真性,不改变阶跃函数的空间形态和位置,因而特别适用于地下存在陡立电性分界面的情况,不致于因采用空间滤波而使地电构造变平缓 and 位移。由于它采用的是“中位数”而不是加权平均值,所以有些小异常信息也常常会被滤除。

小波变换用于频率域电磁测深中的静态效应校正,为静态效应的压制提供了一种有效的方法。在分析时,提供的识别静态效应的参数,能把地表不均匀性引起的静态效应与大地构造引起的异常在数学上进行直观的区分,而且计算速度快。在实践中,小波分析的方法虽在静态效应的压制中起到了很好的作用,但在压制的过程中,也会引起校正不足或者校正过头。这时须借助别的方法综合使用。这样不但能保障校正的彻底性,而且能提高工作效率。

相位数据作静校正,要求事先给出某一不受静态效应影响的频率的参考视电阻率,而在实际工作中,由于不易找出这样的参考视电阻率,常取表层视电阻率值,然而许多地区表层视电阻率是随着测点变化的,通过分区或分段选区的表层视电阻率作参考计算出来的电阻率,这样便有可能遗漏或者模糊地下深部实际存在的横向电性变化。此外,由于野外经常会出现相位数据观测精度不高,误差较大,此时可以考虑用观测电阻率数据通过换算来得到相位数据,这样在换算过程中可能会引入计算误差并且传递增大。

磁场数据作静校正,要求通过磁场分量来计算

不受静态效应影响的磁场视电阻率,由式(16)(17)我们可以看出需要知道电流大小、测点相对位置、导磁率等一些参数,但是由于 CSAMT 法通常采用标量测量方法,一个排列只在其中中心共用一个磁场分量数据,不能反映整个排列的真实磁场数据分布情况。

利用 TEM 数据作时频转换采用的是一种近似的关系式,此外,TEM 数据中的视电阻率数据在反映地下电性时还存在一个真实有效性问题。当然在用 TEM 数据做 CSAMT 静校正在理论和实验上是可行的,然而在真正的实际工作中,相当于重复做了两种类似的地球物理方法,这样成本太高,实际可行性意义不大。

总之,CSAMT 静校正应该结合实际地质情况,正确分析并分辨静态效应和异常的区别,合理采用校正方法,必要时多种方法并用,才能取得良好的效果。

4 曲线平移法做静校正方法的实际应用

4.1 曲线平移法简介

曲线平移法就是通过读取并展示相邻各测点上的频测曲线,分析是否存在静态效应,并参考背景曲线和相邻曲线进行频点或者曲线平移,来达到消除静态效应的影响。

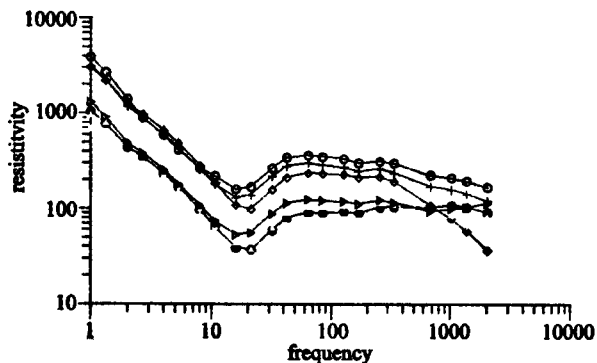


图 1 CSAMT 静态效应影响曲线

Fig. 1 Typical CSAMT curves of static shift

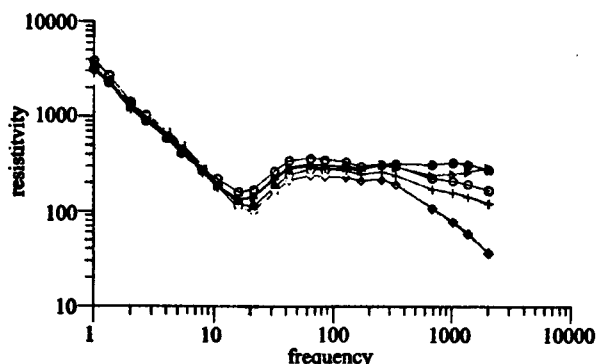


图 2 用曲线平移法校正后的 CSAMT 曲线

Fig. 2 CSAMT curves after Static Correction using curve moving method

由图 1 可以看出相邻测点的曲线形态相似,而各曲线沿着视电阻率轴整体错位,通过计算相邻曲线之间的相关系数,均大于 0.90,这是静态效应的典型特征,图 2 是用曲线平移法校正后可以使受到静态效应影响的曲线很好的“归位”。

4.2 曲线平移法做静校正应用实例

2005 年夏天我们在新疆小热泉区进行 CSAMT 铜矿勘探工作,工区内出露的主要地层为火山碎屑岩,凝灰质砂岩,砂砾岩,在地表多为风化的残坡积物,在沟内有第四系沉积,主要为砂砾岩层。地质情况复杂,近地表存在许多电性不均匀体,静态效应影响大,严重影响了处理解释结果。

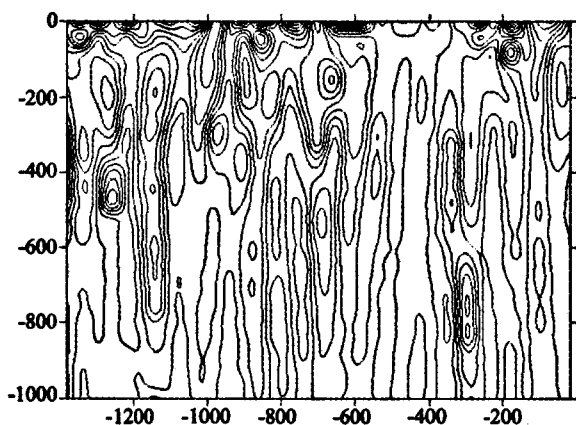


图 3 64 线 CSAMT 未作静校正的视电阻率剖面图

Fig. 3 The CSAMT apparent resistivity section of line 64 without static correction

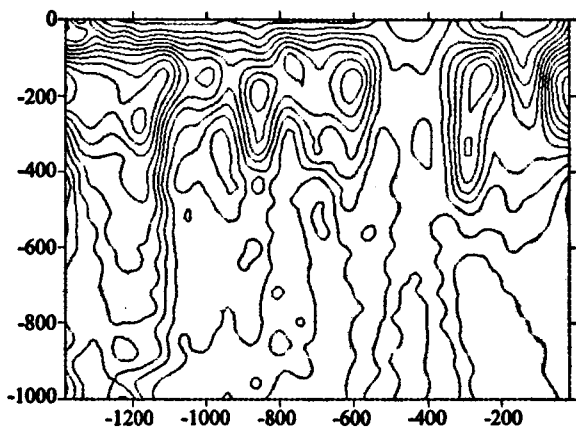


图 4 64 线 CSAMT 用曲线平移法作静校正后的视电阻率剖面图

Fig. 4 The CSAMT apparent resistivity section of line 64 with static correction using curve moving method

图 3 是新疆小热泉 1 号矿区 64 线 CSAMT 未作静校正的反演断面图,可以看出受静态效应的影响比较严重,通过曲线平移法对数据作静校正后,再进行后续的处理、反演,得到图 4 的结果,可以看出有效地削弱了静态效应的影响,为进一步的地质解释提供了更好的依据。

5 结 论

克服静态效应是可控源音频大地电磁处理中的一大难点,如何正确识别静态效应,并选择合适的方法进行静态校正,是提高 CSAMT 数据静态效应校正的重点,本文总结了前人提出的各种静态效应的方法手段,提出利用电阻率曲线之间以及相位曲线之间的相关系数来区分判断静态效应和地质异常,并且用曲线平移法来进行静态校正,在实际工作中取得了较好的效果。

参 考 文 献 (References):

- [1] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1990,107~108.
- [2] Ward S H, Hohmann G W. Electromagnetic theory for geophysical applications in Nabighian, M. N., Ed., E. M. methods-theory and practice[J]. Society of Exploration Geophysicists, 1987, 1, 131~311.
- [3] Hedlin C. Removal of static shift in two dimensions by regularization inversion[J]. Geophysics, 1991, 56, 2102~2106.
- [4] Wannamker P E, Hohmann G W, Ward S H. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths[J]. Geophysics, 1984, 49, 1517~1533.
- [5] 陈清礼,张翔,胡文宝. 南方碳酸盐岩区大地电磁测深曲线静态偏移校正[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(3), 30~32.
- [6] 黄潜生,王友胜,汪卫毛. 大地电磁曲线校正技术在六盘山盆地研究中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(3), 76~78.
- [7] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京:地质出版社, 1996, 37~41.
- [8] 杨生. EMAP 处理方法在 CSAMT 勘查中的应用[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(6), 345~348.
- [9] 阎述,陈明生. 频率域电磁测深的静态偏移及校正方法[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(2), 238~247.
- [10] 底青云, Martyn U, 王妙月. 复杂介质有限元 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4), 723~730.
- [11] 底青云, Martyn U, 王妙月. 有限元 2.5 维 CSAMT 数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2), 317~324.
- [12] Zonge K L. Internal company report on removal of static shift effect. 1985.
- [13] 宋守根,汤井田,何继善. 小波分析与电磁测深中静态效应的识别、分离及压制[J]. 地球物理学报, 1995, 38(1), 120~128.
- [14] 张翔,胡文宝,严良俊. 小波变换在大地球磁测深静校正中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(2), 40~41.
- [15] 解海军,陈明生,阎述. 利用小波分析压制静态效应[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(4), 61~65.
- [16] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans. On Information theory, 1992, 38, 617~643.
- [17] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets[M]. Montpelier, Capital city press, Vermont, 99.
- [18] 何展翔. 相权静校正[C]. 电磁方法研究与进展, 1993, 117~124.
- [19] Zonge K L. Comparison of time, frequency and phase measurement in IP[J]. Geophysical Prospecting, 1972, 20, 626~648.
- [20] 姚治龙,王庆乙,胡玉平,刘俊昌. 用 TEM 测深校正 MT 静态偏移的技术问题[J]. 地震地质, 2001, 23(2), 257~263.
- [21] 鲁新便,田春来,李琳. 瞬变电磁测深在大地球磁深曲线静校正中的应用[J]. 石油物探, 1995, 34(1), 86~95.
- [22] 王庆乙. TEMS-3S 瞬变电磁测深系统的研制[J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5(3), 169~175.
- [23] 方文藻,李予国,等. 用瞬变电磁测深校正 MT 静态效应[C]. 电磁方法研究与进展, 1993, 111~116.
- [24] 雷达,孟小红,等. 复杂地形条件下的可控源音频大地电磁测深数据二维反演技术及应用效果[J]. 物探与化探, 2004, 28(4), 323~326.
- [25] 王若,王妙月. 可控源音频大地电磁数据的反演方法[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2), 197~202.