

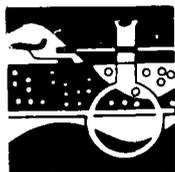
CSAMT 的非远场改正和二维解释问题

杨 生 施婉华 王庆乙

(中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所)

本文讨论了可控源音频大地电磁测深法 (CSAMT) 的场区特征, 并对现有的非远场改正方法进行了理论分析和模型验证, 指出目前所有的非远场改正方法均有缺陷, 可能导致错误的解释。应用笔者近期开发的 CSAMT 一维反演程序, 可以直接对观测结果进行解释。还提出了一种近似的二维解释方法。

关键词 场区 负尖峰 正反演



勘探与理论

可控源音频大地电磁测深法 (CSAMT) 可大幅度提高信噪比, 所以观测精度很高, 加之采用了多点排列、同时观测, 野外观测效率比 AMT 法高 30~50 倍, 大大地降低了成本。但在应用中, 收一发距离不能无限制地加大, 因而使得 CSAMT 的理论计算、观测数据的处理和异常的地质解释十分复杂。

为克服人工场源带来的弊病, 国外学者提出了非远场的改正方法, 即将 CSAMT 观测的非平面波结果转化为 MT 观测的平面波结果, 这样可简化 CSAMT 的解释方法。

本文简要讨论 CSAMT 的场区特征, 并对国外学者提出的 CSAMT 非远场改正方法进行了分析, 指出其存在问题。笔者还根据理论和实际上已解决了一维 CSAMT 正反演的方法, 并认为可以直接用来进行解释, 没有必要进行非远场的改正。同时, 文中还提出了一种有效的二维 CSAMT 解释方法。

CSAMT 场区定义

CSAMT 的视电阻率 ρ_a , 是通过测量相互垂直的电场 E_x 和磁场 H_y , 并由下式计算的:

$$\rho_a = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

式中 ρ_a 又称卡尼亚电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$; f 为信号源发射频率(Hz); E_x 和 H_y 的单位分别为 mV/km 和 nT 。

CSAMT 的相位 φ 定义为 E_x 与 H_y 之间的相位差。

对于均匀的大地, 假设信号源如图 1 所示的水平偶极子, 偶极距为 $M_0 = I \cdot dl$, dl 为偶极长度, I 为供电电流。选取坐标原点位于偶极的中心, X 轴和 Y 轴分别平行和垂直于偶极距, Z 轴垂直向下。假设接收点位于发射偶极的垂直平分线上, 则距发射偶极子为 r 的 P 点的电场与磁场表达式为:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{M_0 \rho}{2\pi r^3} \{ 2 - [1 + (1 + \\ & i) \cdot B] \cdot e^{-(1+i) \cdot B} \} \quad (2) \\ H_y &= \frac{M_0}{2\pi r^2} \{ 3 \cdot I_1(\lambda) \cdot K_1(\lambda) + \end{aligned}$$

本文 1992 年 4 月收到, 于纯烈编辑。

$$\lambda \{ I_1(\lambda) \cdot K_0(\lambda) - I_0(\lambda) \cdot K_1(\lambda) \} \quad (3)$$

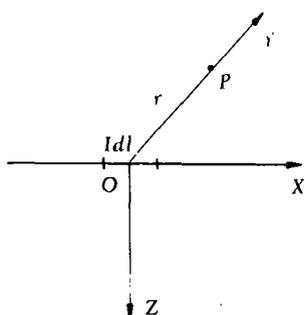


图1 均匀大地水平电偶极子坐标

其中 $\lambda = B \cdot (1 + i) / 2$; $i = \sqrt{-1}$; $B = r / \delta$; $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{w\mu}}$, $w = 2 \cdot \pi f$; $\mu = 4\pi \times 10^{-7}(\text{H/m})$; ρ 为均匀大地的电阻率; $I_0(\lambda)$ 、 $I_1(\lambda)$ 和 $K_0(\lambda)$ 、 $K_1(\lambda)$ 分别为以 λ 为宗量的第一类和第二类虚宗量贝塞尔函数, 下脚标“0”或“1”表示贝塞尔函数的阶数。

将公式 (2)、(3) 代入 (1) 式, 可发现在电阻率为 ρ 的均匀大地下, 偶极子场源的视电阻率不是一个常数, 而是 r/δ 的函数, 即有:

$$\rho_a = \rho F(r/\delta) \quad (4)$$

其函数关系如图 2 所示。

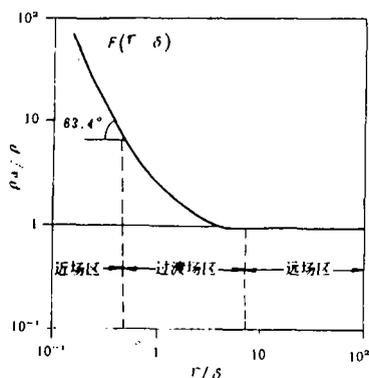


图2 均匀大地 CSAMT 视电阻率归一曲线

比值 r/δ 可用来定义 CSAMT 的不同场区。

远场区 当 $r/\delta \gg 1$ 时, 称为远场区。这时 (2)、(3) 式可写成:

$$E_x = \frac{M_0 \rho}{\pi r^3} \quad (5)$$

$$H_y = \frac{M_0}{\pi r^3} \sqrt{\rho / \mu w} e^{-\frac{\pi}{4}} \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可得 $|\frac{E_x}{H_y}| = \sqrt{\mu w \rho}$, 它

是平面波的阻抗表达式, 说明在远场区 CSAMT 和 MT 的测量是一致的。由于接收点距发射偶极的相对距离较远, 场源由地下传来的电磁波已衰减趋于零, 接收点处的电磁波完全是由空中垂直入射到地面的平面电磁波, 故远场也称为辐射场。

由(5)、(6)和(1)式可知, 在均匀大地的情况下, 远场区的视电阻率等于大地的真电阻率, 磁场相位落后于电场相位的 $\pi/4$ 。

计算结果表明 (图 2), 均匀大地情况下, 当 $r \gg 3\delta$ 时, 可近似地认为属于远场区条件。

近场区 当 $r/\delta \ll 1$ 时, 称为近场区。这时 (2)、(3) 式变为:

$$E_x = \frac{M_0 \rho}{2\pi r^3} \quad (7)$$

$$H_y = -\frac{M_0}{4\pi r^2} \quad (8)$$

将 (7)、(8) 式代入 (1) 式有:

$$\rho_a = 2\left(\frac{r}{\delta}\right)^{-2} \rho \quad (9)$$

由于 $r/\delta \ll 1$, 故 $\rho_a \gg \rho$, 即在近场区由 (1) 式计算的视电阻率大于真电阻率。

由 (9) 式可求得 $\frac{d \log \rho_a}{d \log \frac{r}{\delta}} = -2$, 即近

场区视电阻率曲线为一条与横轴夹角为 63.4° 的直线。由 (7)、(8) 式不难看出, 在近场区, 电场 E_x 和磁场 H_y 相位相同 ($\varphi = 0$), 都与频率无关, 因此近场也称为感应场。

由此可知, 在近场区为获得深部电阻率

信息, 须改变收发距的几何位置, CSAMT 观测一旦进入近场区, 企图再降低频率来获得深部信息是不可能的, 这一点对野外工作非常重要, 即在近场区内不要作徒劳无益的观测。

过渡场区 当 $r/\delta \approx 1$ 时, 称为远、近场区之间的过渡场区, 或称中场区。在过渡场内, 电磁波不仅有从空中传来的成分, 也有从地下传来的成分, 是两者的叠加。这种叠加场随频率和观测位置的不同变得十分复杂, 可导致 CSAMT 数据解释的困难。

在过渡场区, 由近场区到远场区, 电场 E_x 单调增加, 由 $\frac{1}{2} \frac{M_0 \rho}{\pi r^3}$ 变为 $\frac{M_0 \rho}{\pi r^3}$, 相对变化为 2。磁场 H_y 则逐渐减小, 由 $\frac{M_0}{4\pi r^2}$ 变为 $\frac{M_0}{4.24\pi r^2}$, 但相对变化比较小, 等于 0.94。而式 (1) 可近似地写成:

$$\rho_a = 3.58 \left(\frac{r}{\delta} \right)^{-1.16} \rho \quad (0.5 \leq r/\delta \leq 3) \quad (10)$$

表明在均匀大地条件下, 过渡场区的视电阻率也大于真电阻率, 即 $\rho_a > \rho$, 视电阻率比值 ρ_a/ρ 随 r/δ 的变化率为 -1.16, 小于近场区的变化率, 相位由零变为 $\pi/4$ 。

在层状介质的情况下, 某些 CSAMT 视电阻率曲线在过渡区出现明显的“负”尖峰, 其频率范围很窄。这种负尖峰的出现主要是由于电场在过渡区的变化特点所致。

图 3 中划出了两层介质电场与视电阻率随频率的变化曲线。在远场区, 电场为 $\frac{M_0}{3} \rho_1$, 当降低频率, 由远场区进入过渡区时, 平面波向非平面波转化, 使得电场变小, 曲线下降。但如果 $\rho_2 > 2 \cdot \rho_1$ 时, 则近场区的电场 $\frac{M_0}{2\pi r} \rho_2$ 大于远场区电场, 所以

得电场曲线形成一个极小点 (图 3 中 $f=300\text{Hz}$ 处) 后, 逐渐增大。这样相应地在 CSAMT 视电阻率曲线上产生负尖峰。

应该指出, 并非所有 CSAMT 视电阻率曲线都有负尖峰, 只有在基底为高阻介质时 (相对于第一层的电阻率而言), 才会出现。凭借这一点可由 CSAMT 曲线定性地推断第一层的厚度及基底的电阻率。

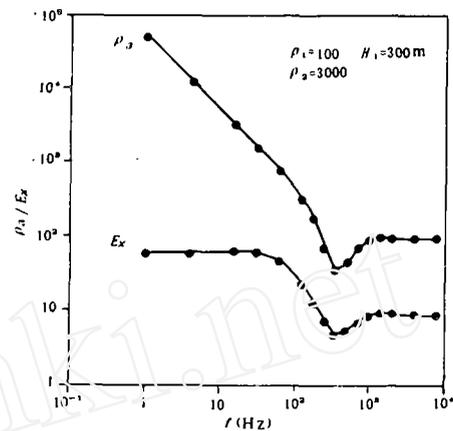


图 3 两层介质存在负尖峰的 ρ_a 与 E_x 曲线

图 4 是第一层为 $100\Omega \cdot \text{m}$, 厚度为 300m , 基底分别为 $1000, 3000$ 和 $10000\Omega \cdot \text{m}$ 三种不同电阻率的两层模型计算曲线。3 条曲线都有负尖峰, 所不同的是 ρ_2/ρ_1 越大, 负尖峰越明显, 并且向高频一侧偏移。可见负尖峰的特征受基底电性的影响。换言之, 负尖峰中包含着基底的电性信息。所以加密尖峰附近的频率测点, 充分利用这段数据, 可以提高 CSAMT 的解释水平。

非远区场改正方法和改正结果讨论

非远区场包括过渡场和近区场, 基于上述 CSAMT 场区的分析和讨论, 可知在过渡区 CSAMT 的实测结果歪曲了地下电性层的实际情况, 在近场区内降低频率并不能获得深部信息。这样根据实测 CSAMT 结果直接进行定性解释和选择反演的初始参数都

是十分困难的。为解决这一问题，国外学者提出了非远场的改正方法，即将 CSAMT 观测结果通过改正转化为 MT 结果，这样可使 CSAMT 结果的解释大为简化。

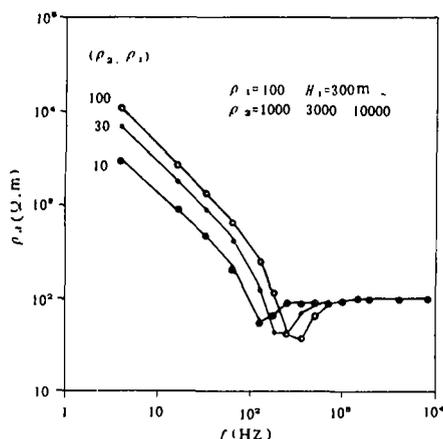


图 4 负尖峰随第二层电阻率变化特点

1. 山下的改正方法⁽¹⁾

山下的改正方法是目前 CSAMT 非远场改正中常用方法。它基于均匀大地情况下，将 CSAMT 实测的视电阻率 ρ_a ，改为均匀大地的电阻率 ρ 。即改视电阻率为真电阻率的方法。

$$\rho = K_f \rho_a \quad (11)$$

K_f 为山下的改正系数； ρ_a 是由实测电、磁场用公式 (1) 计算的视电阻率。将 (11) 式代入 (4) 式可得

$$K_f = \frac{1}{F(r/\delta)} \quad (12)$$

这是山下方法的计算系数公式，取得系数后由式 (11) 改正。

上述改正方法是在均匀大地条件下得到的改正方法，能否用于层状大地的改正，是本文重点讨论的内容。

为此，笔者设计了 6 个层状大地的理论模型：

- 两层介质 (a) $\rho_1 > \rho_2$ (D 型)
- (b) $\rho_1 < \rho_2$ (G 型)
- 三层介质 (c) $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ (Q 型)
- (d) $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ (K 型)

$$(e) \rho_1 < \rho_2 < \rho_3 \text{ (A 型)}$$

$$(f) \rho_1 > \rho_2 < \rho_3 \text{ (H 型)}$$

首先将层状模型分别进行 MT 和 CSAMT 的一维正演计算，再应用山下改正方法对 CSAMT 曲线进行改正，最后将改正后的曲线与 MT 曲线对比来评价山下方法的有效性。

山下方法对非远场的改正结果如图 5 所示，不难看出：

(1) 对于 D 型、Q 型的改正基本有效；

(2) 对 G 型、H 型、A 型和 K 型的改正无效。虽然改正后的曲线较未改正曲线（实测 CSAMT 曲线）有接近 MT 曲线趋势，但应指出，这种方法，在过渡区改正不足，而在近场区又改正过头时，导致测深曲线发生畸变。此外，山下法对负尖峰未能得到改正。

2. 铃木改正法⁽²⁾

铃木改正法也是基于均匀大地情况下，从公式 (5) 和 (7) 看到，远、近电场的比为 2 的关系，即：

$$E_x^{(\text{远})} = 2E_x^{(\text{近})} = \frac{\rho M_0}{\pi r^3} \quad (13)$$

电场是先于磁场进入过渡区，据此，铃木认为：非远场的改正应该是对电场的改正，即用远场区的电场代替过渡区和近场区的电场（令电场保持常值），将 (13) 式代入 (1) 式得：

$$H_y^2 = \rho M_0^2 / 5\pi^2 f r^6 \quad (14)$$

则：

$$\rho = 5\pi^2 f r^6 H_y^2 / M_0^2 \quad (15)$$

(15) 式是铃木的改正公式。铃木的改正方法实际上是将电场保持常值，根据实测的磁场，利用 (15) 式求得改正后的视电阻率。

笔者仍采用图 5 所示的 6 个层状理论模型，对铃木改正的结果进行验证，验证结果

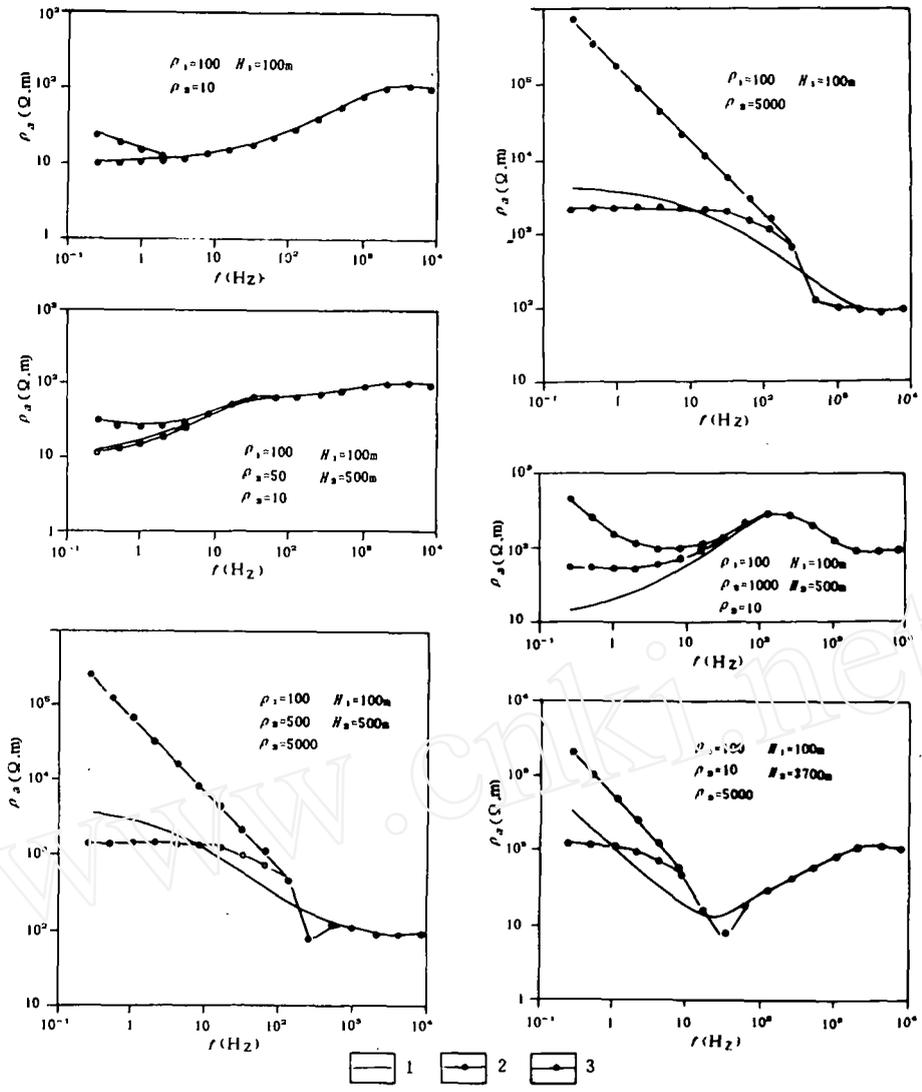


图5 山下法在层状介质情况下的改正实例

1—MT 理论计算曲线；2—CSAMT 理论计算曲线；3—改正曲线

(收发距 $T_x-R_x=4km$, ρ 为电阻率, H 为层厚度)

如图 6 所示, 可简要地归纳为:

(1) 对 CSAMT 出现的负尖峰有局部的改正能力;

(2) 对绝大部分过渡区和全部近场区, 无法改正 (出现很大的偏差)。

一维反演法

将均匀大地 CSAMT 非远区场的改正方法应用于层状大地非远区场的改正, 由于理论前提不同, 因此实际上未取得改正结

果。笔者已从理论上解决了 CSAMT 场的正反演计算, 还编制了实用程序^(3, 4), 因此层状大地 CSAMT 的解释已无必要对非远场进行改正, 可直接用反演计算得到实际地层模型, 若需要可由此模型正演计算出 MT 的数据, 这一过程称为一维反演法。

图 7 是在吉林某矿区野外实测的 CSAMT 曲线, 同时绘出由一维反演法计算的 MT 曲线和由山下改正法计算的改正曲线。

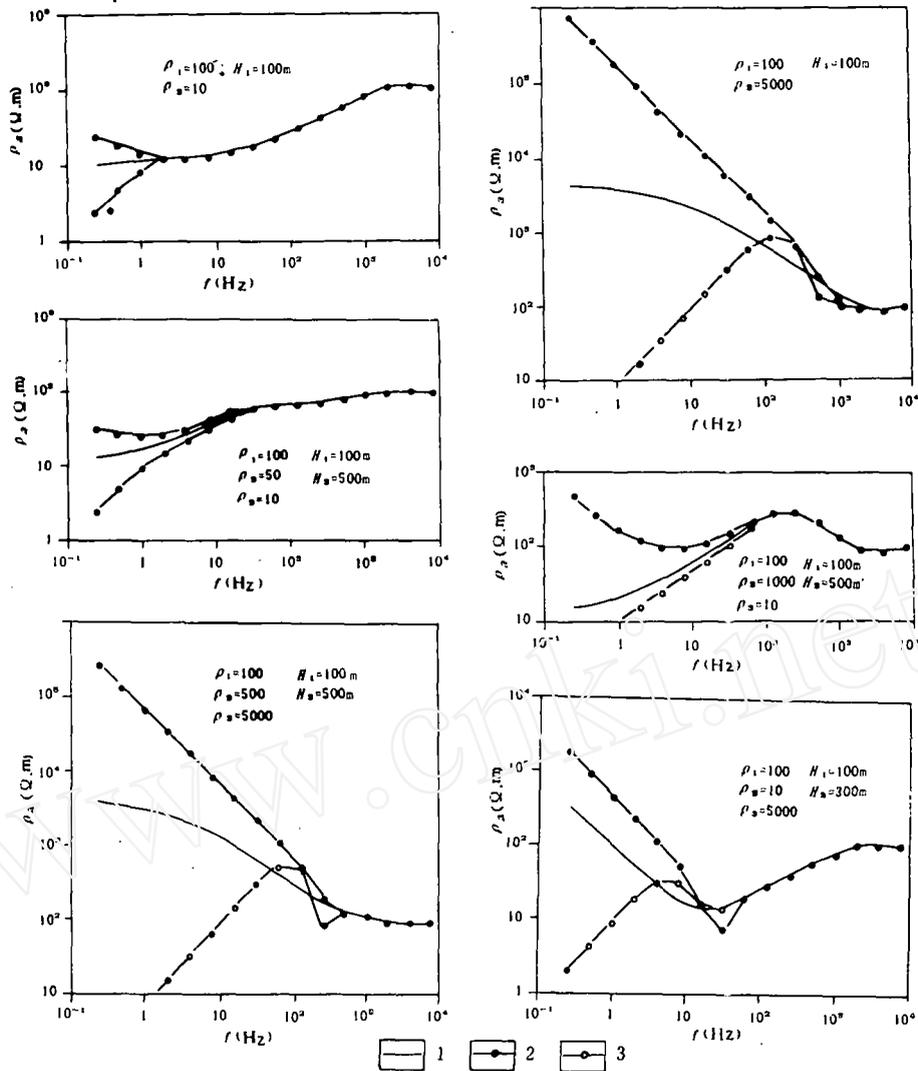


图6 铃木法在层状介质情况下的改正实例

1—MT 理论计算曲线；2—CSAMT 理论计算曲线；3—改正曲线

(收发距 $T_x-R_x=4\text{km}$, ρ 为电阻率, H 为层厚度)

测点附近的钻孔资料表明, 浅部为矿化的蚀变辉岩, 200m 以下为高阻的片麻岩。

对实测结果直接进行 CSAMT 一维反演得到地层模型为两层: $\rho_1=336\Omega \cdot \text{m}$, $H_1=220\text{m}$, $\rho_2=2760\Omega \cdot \text{m}$, 与实际地质情况相吻合。由该模型正演计算的 MT 曲线与山下改正曲线在形态上相差较大, 而用山下改正后的曲线进行 MT 反演, 则得到 4 层介质模型 ($\rho_1=344\Omega \cdot \text{m}$, $H_1=265\text{m}$, $\rho_2=518\Omega \cdot \text{m}$, $H_2=50\text{m}$, $\rho_3=6610\Omega \cdot \text{m}$,

$H_3=3700\text{m}$, $\rho_4=1600\Omega \cdot \text{m}$)。显然, 采用非远场改正方法, 即使在简单的情况下, 也能出现不可容忍的谬误。

目前, 在二维 CSAMT 正反演程序尚未问世之前, 笔者认为利用一维 CSAMT 的反演程序, 对二维 CSAMT 数据进行反演, 可近似地替代二维 CSAMT 的数据解释。图 8 中实线为二维地堑模型, 虚线为一维反演模型, 不难看出, 二维数据一维反演的模型, 虽其两侧陡度变缓, 垂向幅度有所

减小,但仍然能清晰地反映出地堑的存在。

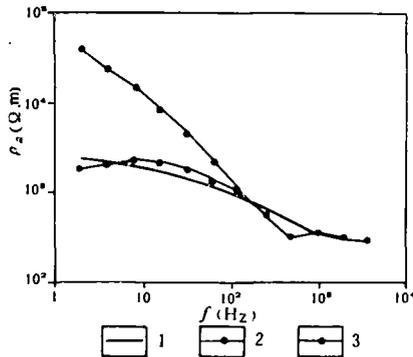


图7 实测数据改正实例

1—一维反演后正演的 MT 曲线; 2—CSAMT 实测曲线; 3—山下法改正曲线

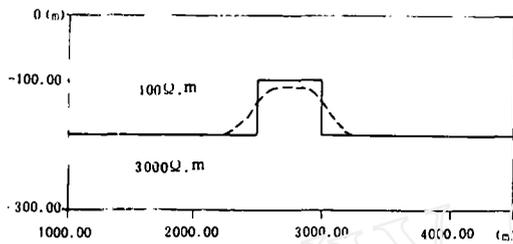


图8 二维模型(实线)与一维反演结果(虚线)

如有 一维 CSAMT 反演和二维 CSAMT 正演程序,就可较好的解决二维 CSAMT 的反演问题。即由二维数据获得一维反演模型,根据模型进行二维 CSAMT 正演,将正演结果与断面二维数据进行比较,并对模型作适当调整,即可获得令人满意的结果。这种方法应是可行的。虽然计算量有所增加,不过与二维 CSAMT 反演相比还是合算的,因此,对于 CSAMT 的数

据解释来说,加速开发二维正反演是十分必要的。

结 语

1.由于信噪比的限制,人工场源与接收点距离不能达到无穷远,这样 CSAMT 的观测受到过渡场和近区场的影响,导致 CSAMT 的解释复杂化。

2.山下非远场的改正法,是当前 CSAMT 法实践中常采用的改正方法,该法是在均匀大地条件下导出的,推广到层状大地,由于缺乏理论前提,实用中不仅误差很大,有可能导致错误的解释。

3.笔者已完成层状大地 CSAMT 的正反演理论计算和编制了实用程序,无必要再采用由国外引进的有严重缺陷的非远场改正方法,可直接应用 CSAMT 的一维反演程序进行数据解释,其效果均优于其他各类改正方法。在二维 CSAMT 反演程序尚未研制成功的条件下,CSAMT 一维反演程序与二维 MT 正演程序相结合,可以近似地解释二维的 CSAMT 问题。

参考文献

- [1] Yamashita, M. and Hallof, P.G. The 55th seg Annual meeting, Washington, D.C 1985.
- [2] 铃木澈,《物理探查学会昭和 60 年度秋季讲演会予稿集》,1985。
- [3] 王军等,地质与勘探,1992,第 3 期。
- [4] 朱添宝等,地质与勘探,1992,第 3 期。

Near-Field Correction and 2-D Interpretation of CSAMT Data

Yang Sheng Shi Wanhua Wang Qingyi

Characteristics of fields in various zones at different distances from the source in CSAMT surveys are discussed in this paper. With the focal point standing out on near-field data correction, Theoretical analysis and model verification conclude that the methods now available for near-field CSAMT data correction are not competent for this purpose due to their own shortcomings, and are also possible to bring about an interpretation inconsistent with the practical circumstances. However, our recently developed 1-D CSAMT Inversion method can be directly used in this respect. In addition, here we put forward an approximate method which is rather effective for 2-D CSAMT data interpretation.