

大地电磁静位移 (Static Shift) 及其校正

王家映

2010,03,01

自从上个世纪60年代末，70年代初在我国引入MT以来，MT在石油、天然气勘探，深部电性结构研究，以及环境和工程勘查中发挥了重要作用。但是，大量实际资料表明，影响MT方法的解释精度和水平的最重要一个问题，仍然是表层电性不均匀所带来的MT视电阻率的位移，通常称之为静位移。

虽然，对MT静位移的发现和研究的仅有30年，但是，在国内外许多学者的共同努力下(尽管美国和前苏联的学者研究的思路并不完全一致)，对它的研究，仍取得了丰富的成果。

我国是MT的大国，应该对MT，特别是在像严重影响生产质量的静位移这样的大问题有较大的贡献，努力把MT大国变成MT强国，这是我们每一位在坐同志的责任。

一、什么是静位移？研究静位移的意义

静位移是地表电性不均匀造成的MT两条视电阻率曲线 (ρ_{TE}, ρ_{TM}) 首支 (高频端) 发生移动, 而相位位曲线却影响不大的现象。如果, 在做静位移校正之前, 就对曲线进行解释, 必然会产生误差, 甚至严重的错误。理论研究和实践工作证明, 静位移实际上是大地上电磁时间域和频率域采样不足的结果。

图1. 是具有静位移的实测MT曲线。

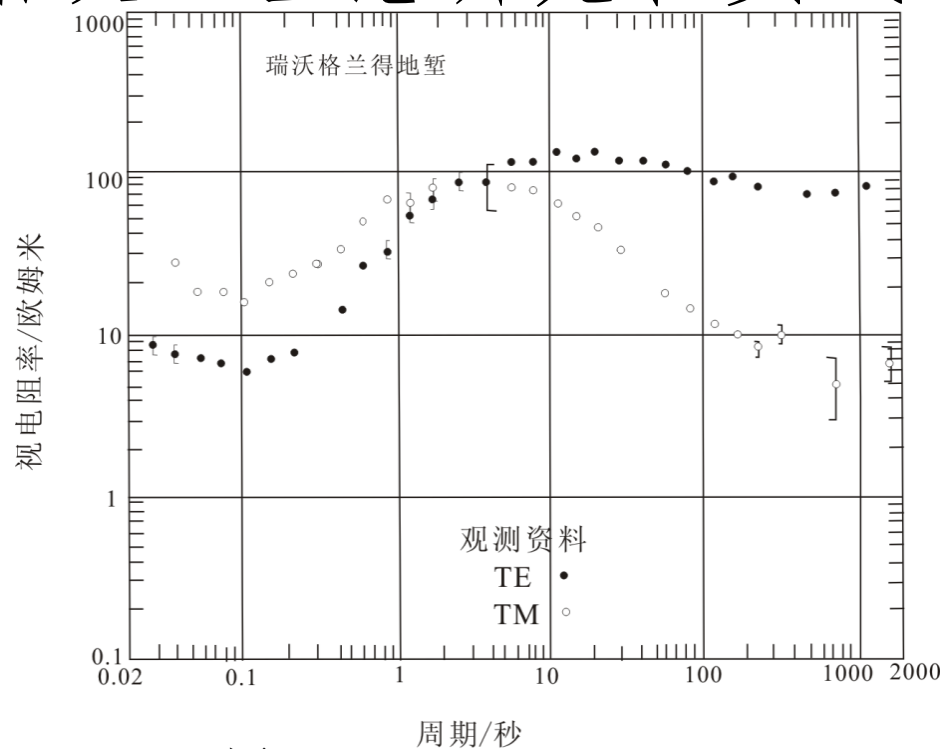


图1

近年来，MT学者习惯把与区域构造不一致的局部构造引起的异常，称为畸变。因此，凡是与区域构造不一致的表层电性不均匀所引起的异常，也应该纳入畸变的范围来研究。从而把静位移的研究理论、模型表示、校正方法和张量阻抗的畸变分解的理论、模型表示、校正方法统一起来了。

不难理解，表层电性不均匀既包括测点附近的表层岩石的电性不均匀，也包括表层构造和地形所引起的表层岩石的电性不均匀。如图2—6所示，图2是表层电性不均匀，图3-6是表层构造和地形所引起的表层岩石的电性不均匀，及其静位移。

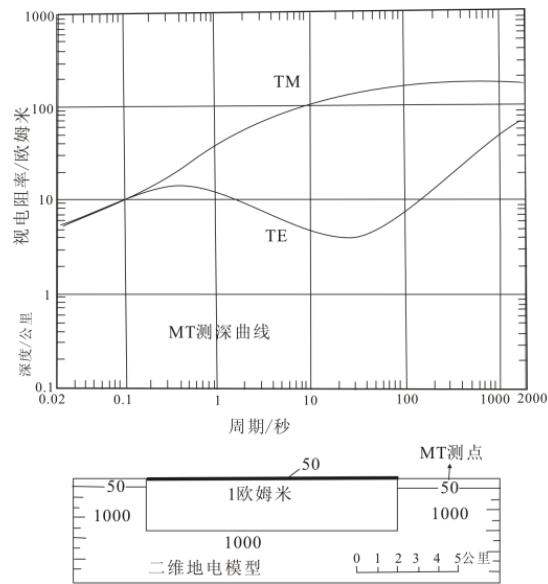


图6.9 TE极化模式中的虚假导电层. 浅层二维导电盆地型的地电模型以及在附近大地电磁测深点人工合成的TE和TM测深曲线

图2

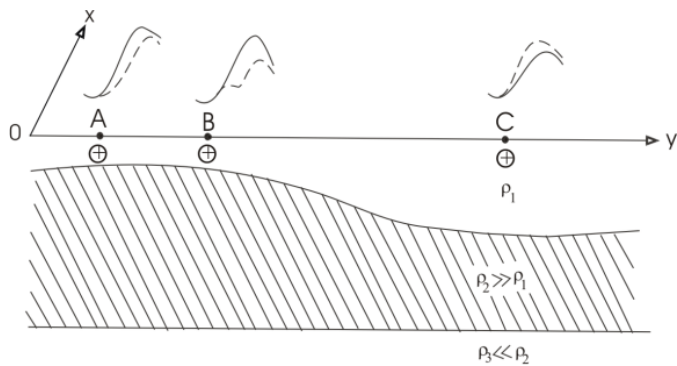


图6.12 纵向视电阻率曲线的区域感应畸变效应示意图. 实线为水平岩层理论曲线; 虚线为畸变曲线

图4

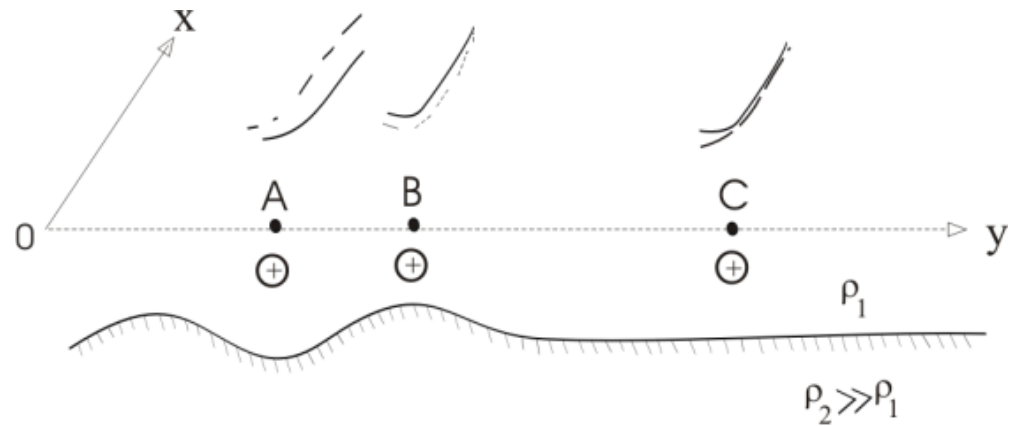


图6.11 纵向视电阻率曲线的局部感应型畸变效应示意图. 实线为水平岩层理论曲线; 虚线为畸变曲线

图3

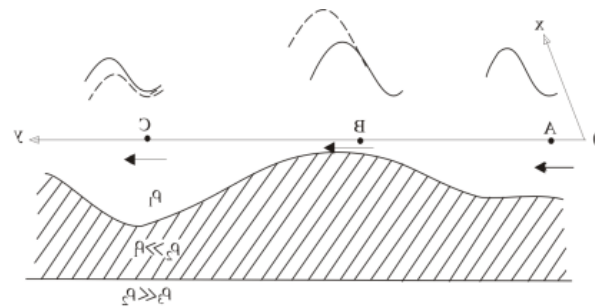


图5 纵向视电阻率曲线的区域感应畸变效应示意图. 实线为水平岩层理论曲线; 虚线为畸变曲线

图5

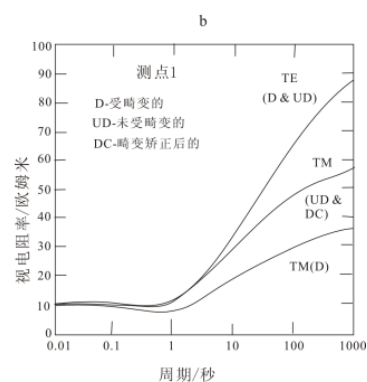
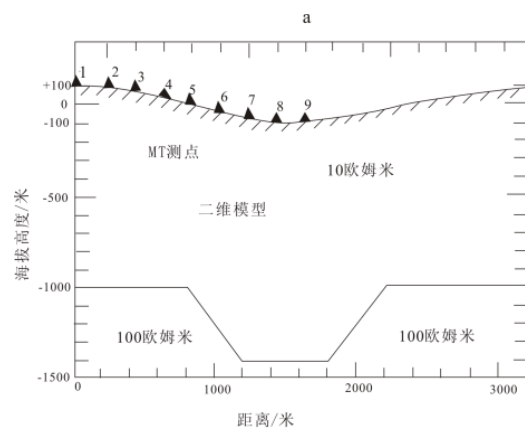


图6.20 二维余弦地形的畸变分解结果

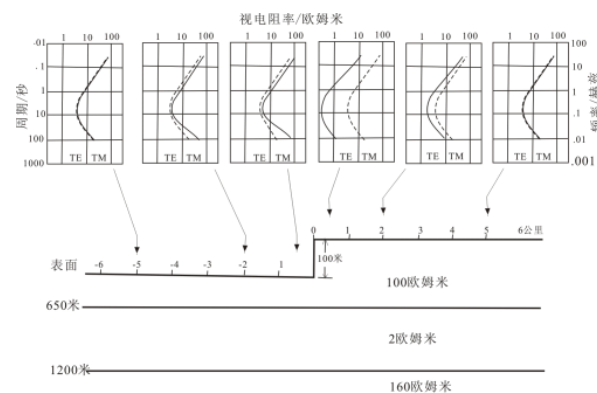


图 6.5 地形引起的静位移

图6

但是，地形对MT曲线的影响和真正的表层电性不均匀对MT曲线的影响，有相同的一面，也有不完全相同的一面。研究表明,表层电性为二维的情况下，TM曲线的静位移表现为沿视电阻率曲线的平移,其位移量与频率关系不大。而地形产生的位移量与频率有关。

但是，表层电性不均匀呈三维时，电流将穿过不均匀体的前后、左右、和上下电性分界面，这时，视电阻率和相位都具有静位移，而且都与频率有关，而且关系相当复杂。

由于表层电性不均匀体的存在，使得MT视电阻率曲线发生了位移，因而相邻测点的视电阻率曲线，就发生突变，所以在视电阻率断面图上就出现等值线挂面条的现象。

不言而喻，静位移及其校正的研究，不仅有重大的理论意义，而且有十分重要的现实意义。这对指导大地电磁资料的正确解释，甚至提出新的解释方法和理论都有重要的作用。

二、引起静位移的原因分析

如果假设电磁场的测量坐标和区域构造的走向一致,即 x 是地层走向, y 为地层倾向, z 轴垂直向下。对TM极化模式(H_x, E_y, E_z)而言,由于电场 E_y 穿过不同岩层的电性分界面,导致界面上的电荷积累,引起电流,此电流再引起磁场的改变,故称为电流型畸变; TE极化模式(E_x, H_y, H_z)场,由于 E_x 与岩层的走向平行,电场不穿过电性分界面,只存在“感应型”异常场,即感应磁场及其引起的电场引起的畸变,叫做感应型畸变。

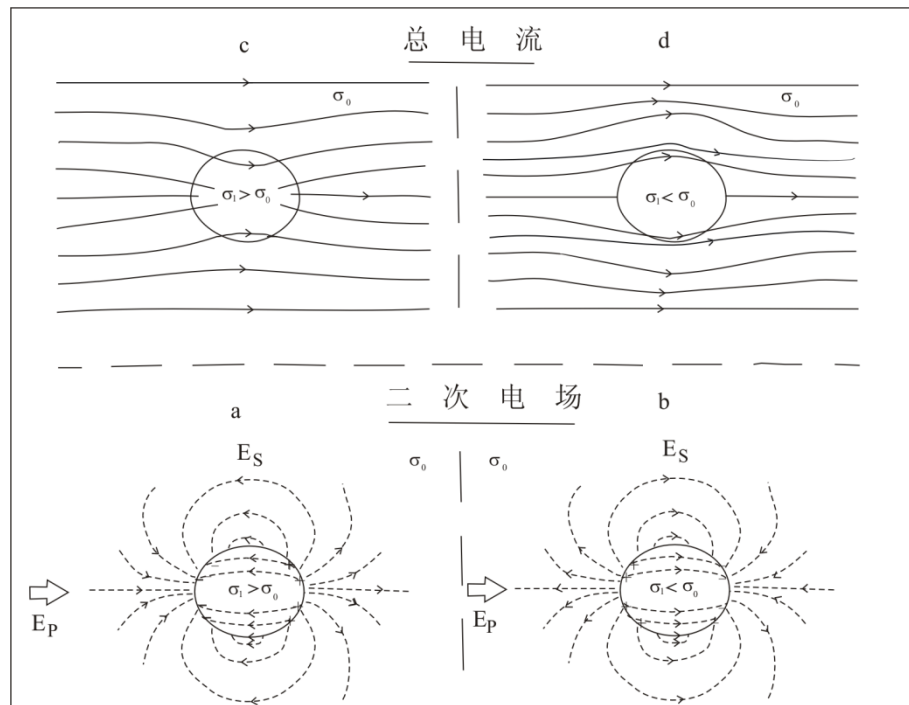


图6.3 表面局部电性异常体的电流型畸变效应

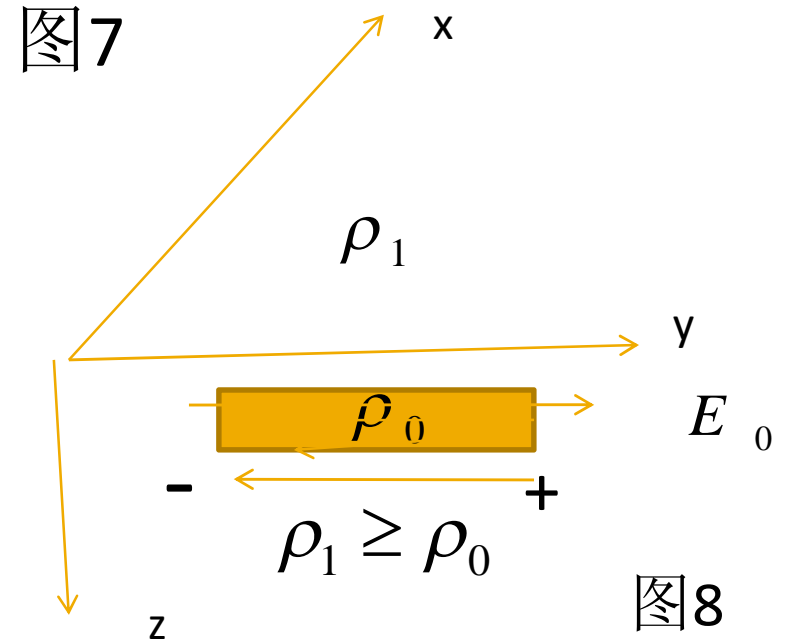


图8

在TM情况下,在界面上的附加电荷,形成的附加电场,与正常电场相叠加,以致使正常的电场结构、分布发生变化,由此而引起的畸变,主要为电流型畸变。电流型畸变的强度依赖于剩余电荷的密度和分布。

如果设x轴代表地层的走向，y轴代表倾向，而z轴垂直向下，则 ρ_{yx} 代表的极化，是横向电阻率； ρ_{xy} 代表TE极化，是纵向电阻率。研究表明，在区域构造为一维和二维，表层不均匀为二维的情况下，主要影响TM极化。

在TE极化模式中，电流线与构造走向平行，构造带上的剩余电荷比前一种情况少得多，所以电流效应不起主要作用，岩层间表现为电流感应关系。由于电阻率分布的不均匀性，导致电流密度和方向发生变化（因低阻岩层中的电流密度高于高阻岩层层中的电流密度），由此在TE极化模式中引起的畸变，称为感应型畸变。

两种模式的区域电磁场畸变的机理不同，引起的电磁场畸变不同，对视电阻率产生的影响，即位移，也不同。因而采取的对策，即校正的方法也不应该一样。

下面,我们将对此进行定量分析。

设区域构造和浅层构造 均是三维, 且坐标如上所示。其中,

$$E = E_0 + PE_0$$

这里, $H = H_0 + DE_0$

E 和 H 是总场, E_0 和 H_0 是一次场, 即区域场, 而 P 和 D 是因表层不均匀产生的畸变张量, 表示为:

$$P = \begin{bmatrix} P_h \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \\ P_{zx} \quad P_{zy} \end{bmatrix}$$
$$D = \begin{bmatrix} D_h \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \\ D_{zx} \quad D_{zy} \end{bmatrix}$$

这里，我们把散射张量分解为水平张量和垂直张量部分， P_h, P_z 和 D_h, D_z 部分分别表示在表层不均匀的作用下，由区域电场产生的水平和垂直电、磁场分量 E_{0h}, H_{0h}

当表层电性不均匀不存在时，表层区域电磁场及其阻抗 Z_0 之间的关系为：

$$E_{0h} = Z_0 H_{0h}$$

利用以上诸式得

$$E_h = (I + P_h) E_{0h}$$

$$H_h = (I + D_h Z_0) H_{0h}$$

根据定义, $E_h = ZH_h$
利用以上各式经简单的推导, 得

$$Z = \frac{E_h}{H_h} = \frac{(I + P_h)E_{0h}}{(I + D_h Z_0)H_{0h}} = (I + P_h)Z_0(I + D_h Z_0)^{-1} \quad (1)$$

这是具有表层电性不均匀时,阻抗张量的一般表达式。

讨论

1、在区域构造为一维，表层电性不均匀为二维时，

$$Z_0 = \begin{bmatrix} 0 & Z_0 \\ -Z_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_h = \begin{bmatrix} P_{xx} & 0 \\ 0 & P_{yy} \end{bmatrix}, \quad D_h = \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix}, \quad \text{则}$$

$$Z = \frac{1}{1 + D_{xx} D_{yy} Z_0^2} \begin{bmatrix} -(1 + P_{xx}) D_{yy} Z_0^2 & (1 + P_{xx}) Z_0 \\ -(1 + P_{yy}) Z_0 & (1 + P_{yy}) D_{xx} Z_0^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

即

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

可见，此时表层不均匀，导致阻抗张量要素的振幅和相位均不相同

表层电性不均匀体的尺寸不大，电磁波的频率相当低时， D_{xx} D_{yy} 均为零，此时，

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & (1 + P_{xx})Z_0 \\ -(1 + P_{yy})Z_0 & 0 \end{bmatrix}$$

即在一维区域背景情况下，表层电性不均匀使阻抗张量变为二维，其 P_{xx} P_{yy} 均不相同，此时

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |(1 + P_{xx})Z_0|^2, \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |(1 + P_{yy})Z_0|^2$$

$$\phi_{xy} = \arg((1 + P_{xx})Z_0), \quad \phi_{yx} = \arg((1 + P_{yy})Z_0)$$

$$\therefore \rho_{xy} = \left(\frac{1 + P_{xx}}{1 + P_{yy}} \right)^2 \rho_{yx}, \quad \phi_{xy} = \phi_{yx}$$

此时，由于表层电性不均匀，使原本一维的电性，变成有方向性。而且两个方向的视电阻率曲线，在双对数坐标上发生了一个常数因子的平移，而相位仍保持不变。这就是一般静位移的特征。显然，静位移使相邻测点视电阻率

曲线发生跳动。

2、如果表层电性不均匀是三维、区域构造是一维时， P_h 、 D_h 中的四个要素都存在，当频率很低时 P_h ， D_h ，的各个要素变为实数，(1) 式中的分母 $(I + D_h Z_0)^{-1} \rightarrow 1$ ，因此，(1) 可简化为

$$Z = (I + P_h)Z_0 = \begin{bmatrix} P_{xy}Z_0 & (1 + P_{xx})Z_0 \\ (1 + P_{yy})Z_0 & P_{yx}Z_0 \end{bmatrix}$$

此时，Z的四个要素都存在，是 Z_0 与实常数之积。即

$$\rho_{xx} = \frac{1}{\omega\mu} |P_{xy}Z_0|^2; \quad \rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |(1 + P_{xx})Z_0|^2;$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |(1 + P_{yy})Z_0|^2; \quad \rho_{yy} = \frac{1}{\omega\mu} |P_{yx}Z_0|^2;$$

3、当区域构造是二维或三维时，这时MT的阻抗的振幅和相位要比以上情况复杂得多，这里不再叙述。

同样的方法,可知在有电性表层不均匀存在时,倾子表达式为:

$$T_z^T = (T_{0z}^T + D_Z^T Z_0)(I + D_h Z_0)^{-1} \quad (2)$$

其中,

$$T_z^T = \begin{bmatrix} T_{zx} \\ T_{zy} \end{bmatrix}, \quad T_{0z}^T = \begin{bmatrix} T_{0zx} \\ T_{0zy} \end{bmatrix}, \quad D_z = \begin{bmatrix} D_{zx} \\ D_{zy} \end{bmatrix}, \quad D_h = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix},$$

并且

$$Z_0 = \frac{E_{0h}}{H_{0h}},$$

推导

因为,

$$H_z = T_z^T H_h = T_z^T (H_{0h} + D_h E_{0h})$$

$$H_{0z} = T_{0z}^T H_{0h},$$

于是,

$$H_z = T_z^T (H_{0h} + D_h Z_0 H_{0h}) = T_z^T (I + D_h Z_0) H_{0h}$$

$$H_z = H_{0h} + D_z^T E_{0h} = H_{0h} + D_z^T Z_0 H_{0h} = (T_{0z}^T + D_z^T Z_0) H_{0h}$$

由此二等式有,

$$T_z^T (I + D_h Z_0) H_{0h} = (T_{0z}^T + D_z^T Z_0) H_{0h}$$

得,

$$T_z^T = (T_{0z}^T + D_z^T Z_0) (I + D_h Z_0)^{-1} \quad (2)$$

讨论 T_z^T ,

1、当区域构造是一维时, $D_h = 0$,
此时,

$$T_z^T = (T_{0z}^T + D_Z^T Z_0) = \begin{bmatrix} T_{zx} \\ T_{zy} \end{bmatrix}$$

2、当区域构造是二、三维时,

$$D_h \neq 0,$$

$$T_z^T = \begin{bmatrix} T_{zx} \\ T_{zy} \end{bmatrix}$$

三、静位移校正方法

前面讲述了TM、TE极化情况下，MT曲线静位移的一般特征，下面再讲它们的校正方法。应该说明，在两种极化模式中，TM极化的表层电性不均匀的影响最为明显，所以这里主要将TM极化模式，即电流畸变引起的静位移的校正。

1、曲线平移类

确定移动量的方法不同，校正的方法也不一样。

1)、曲线平移法

在沉积盆地中，由于各层岩性比较稳定，所以，如果已知某层，如标致层，的电阻率，则可以以此为标准，对曲线进行平移。

由于瞬变电磁测深或时间域电磁测深受表层电性不均匀影响不大，用这种方法测得的结果，比较接近于实际情况，
可以用作静校正的移动标准。

曲线平移既可以以短周期为标准，也可以以长周期为标准。如图10所示。

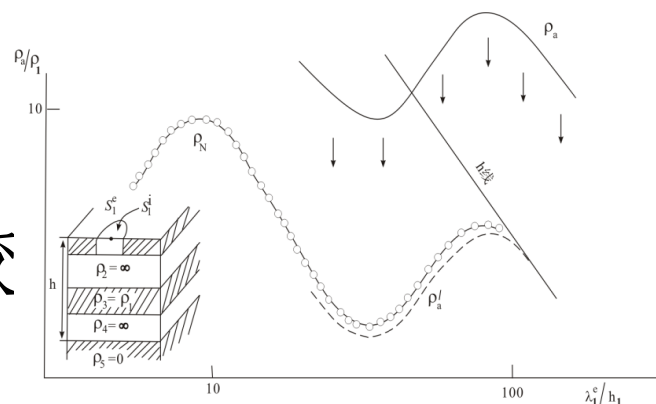


图10

图6.15 将大地电磁测深曲线移动到长周期正常枝所作的畸变校正

2)、统计平均法

这种方法将表层电性不均匀和地形看作是一种随机的地质噪音，从而用平滑滤波来消除不希望的畸变影响。当然，统计平均法存在明显的主观性，参加平均的资料范围取多大？滤波器的参数如何选择等等都是必须认真考虑的问题。用统计平均法，在任何情况下，都会矢掉一些信息。

如图11a和b分别是加拿大和俄罗斯某测区的TM模式资料。测点间的距离都不大，但曲线间非常相似。所以采用平均值为解释资料，并得到了较好的结果。

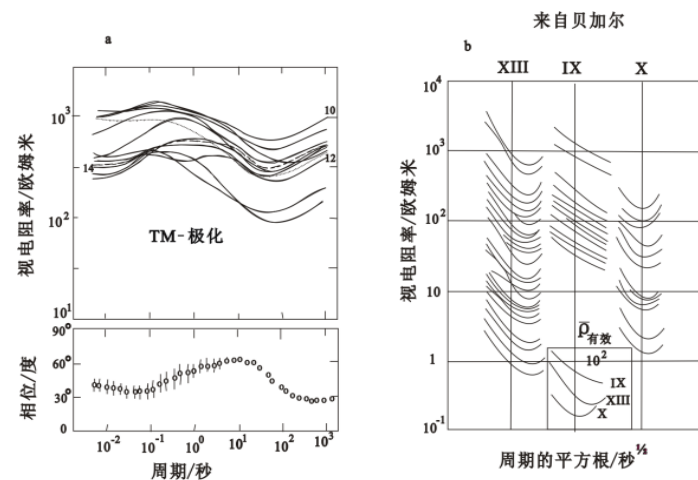


图11

图6.16 用统计平均方法说作的曲线移动

3)、阻抗相位积分法

根据希尔伯特变换，对于满足线性时不变系统，其相位谱和振幅谱之间有如下关系：

$$\phi = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{d \log \rho_a(f)}{d \log f} \right)$$

$$\rho_\phi = \rho_N e^{-\frac{\pi}{4} \int_{f_H}^f \left(\phi - \frac{\pi}{4} \right) d \log f}$$

由于静态效应对相位移测量没有影响，因此可以从相位曲线来计算视电阻率曲线。这里， ρ_N 代表没有静位移时视电阻率的正常值，它相当于 $f \rightarrow \infty$ 、 $\phi = \pi/4$ 时的视电阻率值。 ρ_ϕ 是频率 f 处、相位为 ϕ 时的视电阻率计算值。显然，如知道 ϕ 以后，就可以用上式由相位作静校正。这就是所谓的相位积分法。

显然，相位积分法，不需要知道整个测区或测线的视电阻率曲线。仅根据一个测点的视电阻率振幅和相位，即可对静位移进行校正。在相位观测资料质量较高，而又缺少其它信息，特别是畸变信息的情况下，相位积分法不

失为一种可供选择的校正方法。不过，实测相位 $\phi(f)$ 相对实测振幅 $\rho_a(f)$ 来说，缺少有关电阻率绝对值的信息，因而单纯对相位资料作解释，或单纯利用相位资料作静校正，有可能遗漏或模糊地下实际存在的横向电性变化。在研究地下平缓变化的地质构造时，尤其容易出现这种危险。

4)、不变量参数法

MT阻抗张量有三种基本的旋转不变量，它们是：

$$Z_1 = (Z_{xy} - Z_{yx}) / 2 \quad Z_2 = (Z_{xy} + Z_{yx}) / 2$$

$$\det(Z) = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}) = Z_1^2 - Z_3^2 + Z_2^2 - Z_4^2$$

每一种都可用于解释。有些甚至可以用于静校正。据研究，已有两种不变量参数用于校正。第一种有效阻抗是阻抗张量非对角元素的算数平均，即

$$Z_B = Z_1 = (Z_{xy} - Z_{yx}) / 2$$

第二种有效阻抗是阻抗张量矩阵行列式的平方根，即

$$Z_D = \det(Z) = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{\frac{1}{2}}$$

在这两个有效阻抗表达式中， Z_{ij} 是 2×2 阻抗张量的复数元素。使用不变量参数校正方法，具有无需识别极化模式 (TE 或 TM)、不作静位移校正或其它校正以及不考虑资料维数的优点。基本思想是，用有效阻抗作一维解释，因此运用一维反演方法即可。使用有效阻抗的物理基础是，当构造接近等轴非均匀性时，定向在两个方向的视电阻率曲线，其静位移相反。前苏联不少作者指出，有效阻抗的一维模型化与某些真正的多维模型之间，具有很好的一致性，但是由于应用的是阻抗张量的算术平均或几何平均也附带滤掉了某些有效结果。

对区域一维或二维构造表面的三维电流型畸变而言 Z_D 计算较之于真正的区域结果，只是发生了静位移，而 Z_{ij} 却是区域主阻抗的一种未知组合。不难看出，最适合于不变量参数条件的构造为近似的一维构造，或两个方向的电性分布成相似变化的二维构造，或者说为近似等轴的构造。应用不变量响应参数法，得到的是平滑的构造格架，自然对小的构造细节有所损失，我们不应该指望，用这种方法来提取精细结构。

在实际解释工作中，大多是应用视电阻率资料和阻抗相位资料，而不是阻抗本身，因此，应该将有效阻抗转换成相应的有效视电阻率和相位。与Berdichevsky平均阻抗对应的有效视电阻率和相位是

$$\rho_a = \frac{1}{4} \left[\rho_{xy} + \rho_{yx} - 2\sqrt{\rho_{xy}\rho_{yx}} \cos(\phi_{xy} - \phi_{yx}) \right]$$

$$\phi_a = \arctg \frac{\sqrt{\rho_{xy}} \sin \phi_{xy} - \sqrt{\rho_{yx}} \sin \phi_{yx}}{\sqrt{\rho_{xy}} \cos \phi_{xy} - \sqrt{\rho_{yx}} \cos \phi_{yx}}$$

而与行列式阻抗对应的有效视电阻率和相位则是

$$\rho_a = \left[\rho_{xx}\rho_{yy} + \rho_{xy}\rho_{yx} - 2\sqrt{\rho_{xx}\rho_{xy}\rho_{yx}\rho_{yy}} \cos(\phi_{xx} + \phi_{yy} - \phi_{xy} - \phi_{yx}) \right]^{1/2}$$

$$\phi_a = \arctg \frac{\sqrt{\rho_{xx}\rho_{yy}} \sin(\phi_{xx} + \phi_{yy}) - \sqrt{\rho_{xy}\rho_{yx}} \sin(\phi_{xy} + \phi_{yx})}{\sqrt{\rho_{xx}\rho_{yy}} \cos(\phi_{xx} + \phi_{yy}) - \sqrt{\rho_{xy}\rho_{yx}} \cos(\phi_{xy} + \phi_{yx})}$$

2、空间滤波法

理论可以证明，在一维波恩近似条件下，表层电性不均匀在TM极化模式中，在频率空间域中引起的电场，由动态项和静态项两项组成。动态项与电磁波的频率 ω 电导异常体之埋深 z_0 有关， z_0 愈小， ω 愈高，对电磁场的影响愈大。当 ω 趋于零时，近地表电导异常体对电磁场的影响也趋于零。而静态项是与电磁波的频率关系不大，表现为静态。它导致了不同频率的电场，因而电磁波的阻抗和视电阻率，相对于无表层不均匀体而言，就发生了位

了位移，即静位移。这种静位移，在频率空间域中表现为高通。在三维地球的情况下，TM极化也有相似的结论。

为了消除静位移的影响，即对静位移进行校正，必须在频率空间域中进行低通滤波运算。这就是空间滤波的依据，也就是Bostick提出的EMAP法的原理。

石油物探局刘宏等人提出CMAP。原理上和EMAP无异。

要用EMAP消除静位移，必须要有大量的、连续的电场观测。所以EMAP采用沿测线布置偶极，连续观测，然后对观测数据（可以是电场，可以是组抗，也可以是视电阻率）每频率都进行频率空间域的数值滤波。然后对滤波结果进行解释，即可得到比较满意的结果。

3、畸变张量分解法

分解理论认为，观测的张量阻抗，由区域异常和各种局部异常所组成。人们通过数学的物理的方法，将它们分开，了解各种局部畸变对区域构造的作用。消除畸变效应后，可获得反映地下电性结构的真实区域构造响应，用其作反演解释，将得到真实、可靠的区域构造模型。同时，由分解得到的畸变因子，可以研究局部畸变效应的特点和规律，以便进行包括静校正在内的各种改进校正，以提高地质解释效果。

目前已发表的分解方法包括Swift分解法、Bahr分解法、GB分解法、Smith分解法、组合分解法、三维/三维模型分解法、里勒的莫尔圆分解法、特征态分解法、奇异值分解法、修正的奇异值分解法正则分解法等。

4、带表层不均匀体反演法

5、 地形影响及其校正

前面讲了，地形影响可以看为静位移，但又与静位移不同。概括起来有：

1)、地形对视电阻率和相位均有影响，但对视电阻率的影响更大。地形对TE和TM均有影响，但对TM的影响更大；

2)、地形和电磁波的波长可以比拟时，对TM曲线的影响最大，随T的增大，地形对视电阻率和相位均有影响就逐渐变小；

3)、山峰比山谷地形对视电阻率和相位均有影响更大。

校正方法：

(1)、计算地形影响因子 $d(f)$

其中

$$\rho_{aD}(f) = d(f)\rho_{aN}(f)$$

这里 $\rho_{aD}(f)$ $\rho_{aN}(f)$ 分别表示有和没有地形时的视电阻率。
在计算 $d(f)$ 时, 我们选择 $\rho_{a0D}(f)$ 有地形之均匀半空间的视电阻率, 选 $\rho_{a0N}(f)$ 为均匀半空间的电阻率 ρ_0 。

即

$$d(f) = \frac{\rho_{a0D}(f)}{\rho_0}$$

实践证明, $d(f)$ 为均匀半空间电阻率选择关系不大。

$$\rho_{aN}(f) = \rho_{aD}(f) / d(f) = \rho_0 \rho_{aD} / \rho_{a0D} \quad (4)$$

(2)、按上式进行地形校正

这里 $\rho_{aN}(f)$ 即为校正后之无地形影响的区域构造的视电阻率。

四、结束语

1、研究MT曲线的静位移及其校正不仅有重要的理论意义的, 而且有巨大的实用价值;

2、目前的校正方法仅基于区域构造为一维和二维，静校正近似的，只是形式化校正；

3、进一步加强张量阻抗的畸变分解的研究，把它作为解决静位移问题的最佳途径之一。目前张量阻抗的畸变分解的方法不下十种，但是均非最佳途径，距定量要求还有很大距离。特别是对三维区域构造和三维表面电性不均匀体来说，还有许多理论和实际问题，需要我们进一步研究和探索。

参考文献

晋光文, 孔祥儒. 大地电磁阻抗张量的畸变与分解, 北京, 地震出版社, 2006年.

王家映, 关于大地电磁的静校正问题, 地质科技情报. V11 (1), P69-76, 1992年.