

### 第三章 影响高频大地电磁测深的因素及改正方法

高频大地电磁测深法的影响因素很多,主要分为三个方面,一、主动型噪声,它来源于人类活动,如低频通信、电台、及电网波动等。二、野外工作中人为因素的影响,如测量电极长度误差,磁棒的水平误差等。三、被动型噪声,是指地表不均匀体产生的干扰,也称地质噪或静态效应和地形影响。

#### 3.1 主动型噪声

主动型干扰因素非常多,可以说凡是与电磁有关的人类生产,生活活动都可能是干扰源。在工业城镇及矿山附近,由于电气设备的接地和漏电等因素,在地下形成一个复杂的工业流散电流,造成地电干扰,使实测的电磁场信号波型杂乱无章,毫无规律。特别是在地下介质电阻率较大,干扰噪声衰减缓慢,使得影响范围很广。而电台,雷达站,载波电话,有线广播,铁路,动力线的开关和控制信号等构成最普遍的无线电干扰类型。常表现为磁场受严重干扰,随这些设备的开停,磁场形成许多杂乱无章的干扰信号,电道的输出的记录无对应关系。高电压的输电网负荷的变化也是主要的干扰源之一,所记录的信号与高压线上的电压波动的规律一致,电道的输出有时会出现零点的来回跳动。此外风会导致电磁探头和信号传输线的摆动,以及树木的晃动导致地表微震,都会引起干扰噪声,这种干扰主要影响磁场信号<sup>[22]</sup>。

##### 1、高压线的影响

一般城区及经济发达区及矿区供电相对密集,实测结果表明,沿高压线两侧100~150 m 的范围内,高压线所产生的电磁场强度远远大于天然场和人工场。因此,这个范围是几乎所有电磁法不可逾越的“禁区”。

图 3-1 中序列(左)  $H_n$ 、 $E_n$  可以看出明显的周期性波动,周期为 20ms,是低频段的 50Hz 交流电干扰。图 3-2 是 50Hz 干扰的阻抗、相位频谱特征, X 方向电阻率的误差棒比 Y 方向明显得大,这从原始采集的时间序列图 3-1 中也可以看出,  $H_n$ 、 $E_{xt}$  受到的干扰明显大于  $H_n$ 、 $E_n$ , 从数据的相关性上也可以说明这一点。

图 3-3 是河北灵寿金矿第 24 号点 50Hz 干扰的电磁场频谱特征,可见,电磁场的频谱特征的宏观规律与前面分析的几乎一样,但 50Hz 及其奇次谐波值很高。

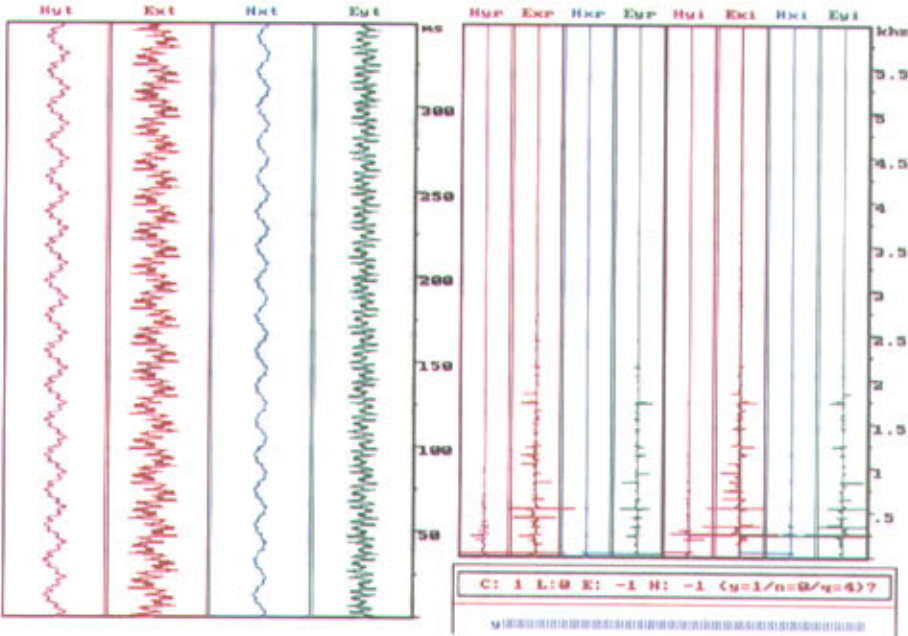


图 3-1 50Hz 干扰时间序列和频谱特征

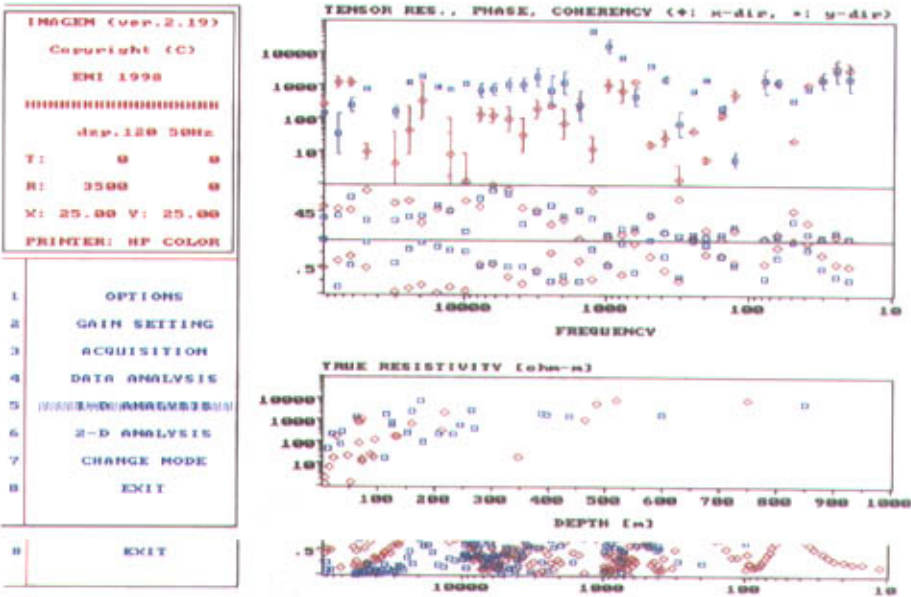


图 3-2 50Hz 干扰的阻抗、相位频谱特征 50Hz 干扰的电磁场频谱特征

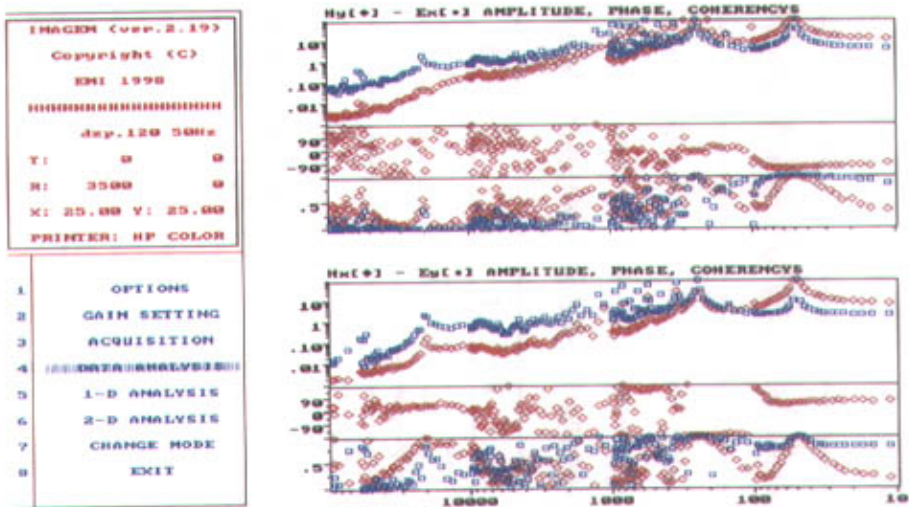


图 3-3 50Hz 干扰的电磁场频谱特征

对于有 50Hz 干扰的测点，通常可以在数据处理过程中对阻抗、相位频谱特征曲线对有干扰的频段进行删除。50Hz 频率对应的深度在一千米以下，如所需求探测目标体的深度在一千米以上，可以不进行处理。

2、风的干扰

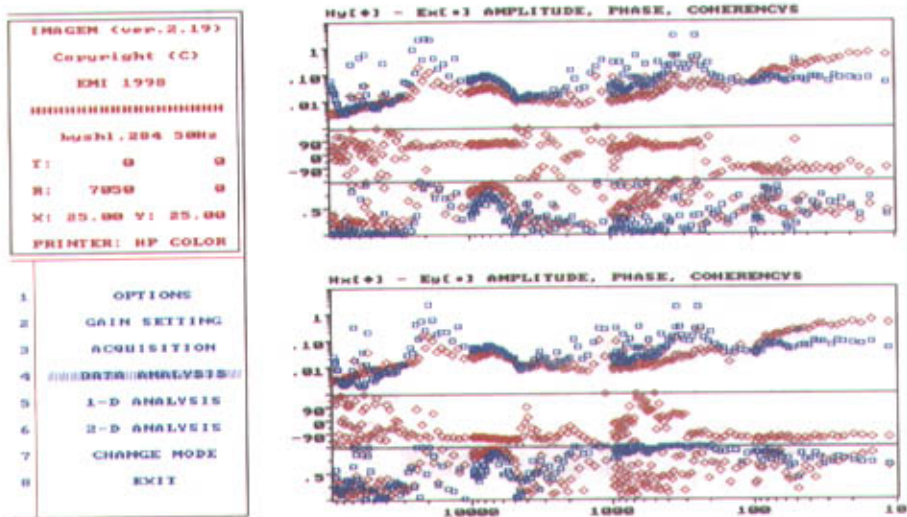


图 3-4 风的干扰的电磁场频谱特征

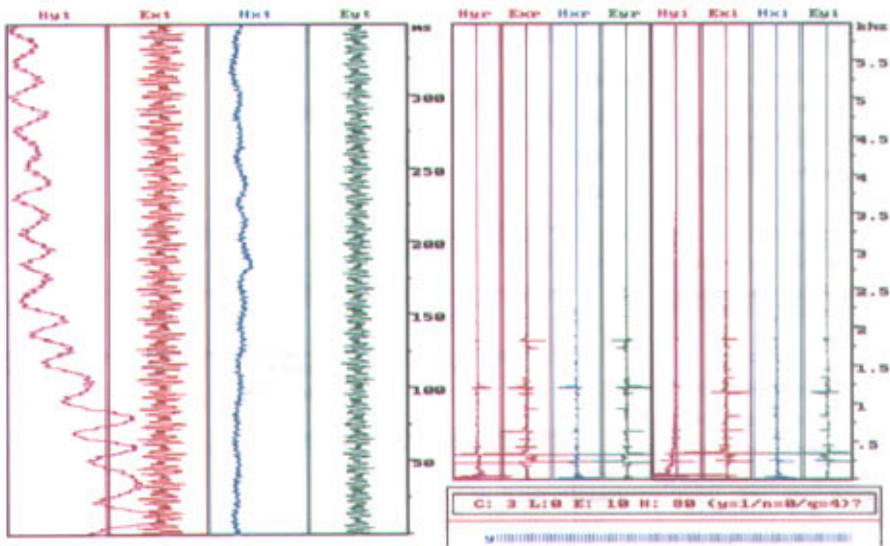


图 3-5 风的干扰的时间序列和频谱特征

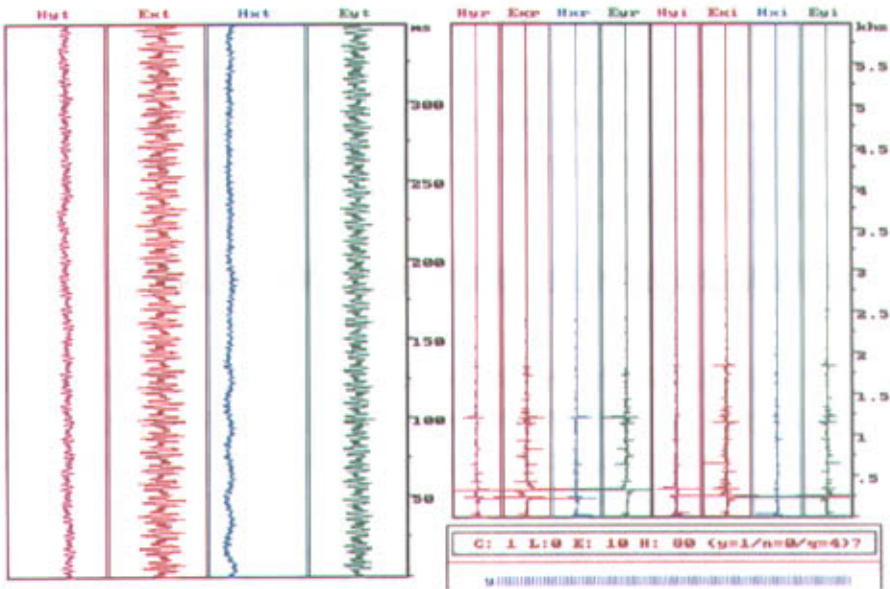


图 3-6 消除风的干扰的时间序列和频谱特征

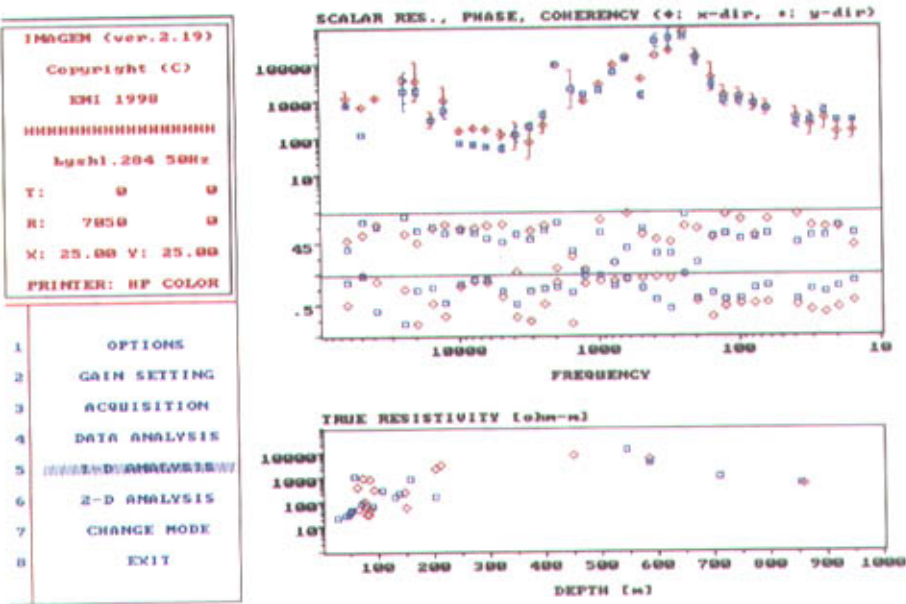


图 3-7 风的干扰的阻抗、相位频谱特征

图 3-5 是在风很大时候实测的的电磁场，可见磁道上的时间序列的波不在轴的正中，经现场处理后，时间序列的波恢复在轴的正中，可见，风的干扰后主要影响磁场信号。对于有风大时采集信号时，可以把磁棒线埋入土中，消除由于风吹动线而产生时间序列的波的摆动。

3.2 水平磁场探头方向偏差、测量电极距及接地电阻的影响

高频大地电磁测深作为一种频率域电磁法，其工作方式与传统的直流电测深方法相比有很大的区别，野外工作中某些参数对视电阻率的影响特征与直流电测深有明显的不同。水平磁场探头方向偏差、测量电极距误差及接地电阻的大小均会对测量结果产生较大的影响<sup>[23]-[25]</sup>。

1、水平磁场探头方向偏差对卡尼亚视电阻率的影响

在高频大地电磁测深中，视电阻率  $\rho$  是通过观测测线方向的  $E_x$  和与之垂直的磁场  $H_y$  求得，但在在实际工作中磁探头的摆放方向总会存在一定的误差，图 3-8 是带有偏角  $\theta$  时磁探头平面摆放示意图，假设磁探头的摆放方向与  $y$  方向存在一偏角  $\theta$ ，

由于存在偏角  $\theta$ ，实际观测到的  $H_y'$  应是  $H_x$  和在  $H_x$  在  $H_y'$  方向的矢量和，设  $Y$  向磁场值  $H_y$ ，带有偏角  $\theta$  时测得的磁场值为  $H_y'$ ，即

$$H_y' = H_y \cos \theta + H_x \sin \theta \quad (3-1)$$

将卡尼亚视电阻率表达式和公式(3-1)代入

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_y' - \rho_y}{\rho_y} = \frac{\rho_y'}{\rho_y} - 1 = \left| \frac{H_y}{H_y'} \right|^2 - 1$$

经推导可得到卡尼亚视电阻率相对误差表达式：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \tan^2 \theta \quad (3-2)$$

从公式(3-2)卡尼亚视电阻率相对误差与  $\theta$  的正切值的平方成正比。

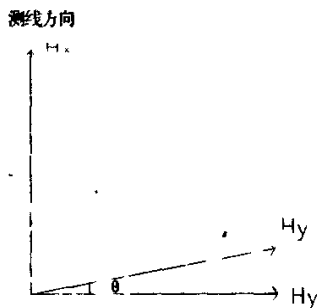


图 3-8

表 3-1 是河南铝土矿实验 1 号测点中两种  $\theta$  角时不同频率的卡尼亚视电阻率  $\rho$  值，从图中可见，当  $\theta$  值为  $10^\circ$  时测得的  $\rho$  比  $\theta$  值为  $0^\circ$  时要偏大，平均  $\Delta \rho / \rho$  统计为 12%。从理论上和实际的实验结果都表明水平磁场探头方向偏差会对卡尼亚视电阻率的产生一定的影响。

## 2、测量电极距长度误差对卡尼亚视电阻率的影响

在野外测量工作中，实际的测量电极距长度难于与原设计的电极距一致，由此造成的卡尼亚视电阻率的误差是不可忽视的，设  $MN$  (测量电极距) 无误差时测得的电位差为  $V_c$ ，当  $x$  方向存在长度误差  $\Delta MN$  时测得的电位差为  $V_r$ ，将卡尼亚电阻率计算公式代入  $\rho$  中得：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_r - \rho_c}{\rho_c} = \left| \frac{E_r}{E_c} \right|^2 - 1 \quad (3-3)$$

实际工作中，通过测量  $MN$  间的电位差  $V$ ，并用  $MN$  对  $V$  归一换算成电场值，由  $E = \frac{V}{MN}$ ，(3-3) 式变为：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left( \frac{V_r}{V_c} \right)^2 - 1 = \left( \frac{V_c \pm \Delta V}{V_c} \right)^2 - 1 = \pm \frac{2\Delta V}{V_c} + \frac{\Delta V^2}{V_c^2} \approx \pm \frac{2\Delta V}{V_c} = \pm \frac{2E_c \cdot \Delta MN}{E_c \cdot MN} = \pm \frac{2\Delta MN}{MN}$$

由直流测深视电阻率计算公式  $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$  可得：

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{V_r - V_c}{\Delta V_c} = \frac{V_c \pm \Delta V - V_c}{V_c} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta MN}{MN} \quad (3-4)$$

由 3-4 式可见, 在 MN 同等误差下, 高频大地电磁测深测量计算的卡尼亚电阻率的误差约是直流电测深电阻率误差的两倍<sup>[26]</sup>。

表 3-1 河南铝土矿实验 1 号测点两种  $\theta$  角时卡尼亚视电阻率  $\rho$  值

$\theta=0^\circ$		$\theta=10^\circ$	
$f(\text{Hz})$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\Delta\rho/\rho_1$
20	119	99.7	16.21849
25.1	64	82.1	28.28125
31.6	51.4	75.4	46.69261
39.8	58.8	56.7	3.571429
50.1	85.3	92.4	8.323564
63.1	35	46.8	33.71429
79.4	41.4	45.3	14.7343
100	49	49	0
126	28.9	39.6	37.02422
158	44.6	60.1	34.75336
200	54.4	61.1	12.31618
251	112	127	13.39286
316	56.3	63.3	12.43339
398	57	62.1	8.947368
501	57.1	57.3	0.350263
631	47	50.5	7.446809
794	40.9	39.9	2.444988
1000	32.7	33	0.917431
1260	26	25.5	1.923077
1580	22.4	23	2.678571
2000	19.4	19.8	2.061856
2510	16.9	16.7	1.183432
3160	15.6	15.7	0.641026
3980	14	14.4	2.857143
5010	7.88	8.45	7.233503
6310	5.15	6.31	22.52427
7940	3.79	3.55	6.332454
10000	4.03	4.83	4.962779
12600	11.1	9.62	13.33333
15800	10	8.76	12.4
20000	18.4	22.5	22.28261
25100	4.5	4.64	3.111111
31600	7.56	8.95	18.38624
39800	12.7	17.3	36.22047
50100	17.6	17.7	0.568182
63100	20.9	20.9	0
79400	1.35	1.08	20
100000	8.74	10.3	17.84897



### 3.3 地形的影响及校正的方法和实例

地形影响主要指地形起伏大于电磁波的趋肤深度时对大地电磁测深(MT)的影响。大地电磁测深的测点受各种因素的限制,大多数测点只能布在山沟,垂直山体方向受高电阻体对电场的排斥作用的影响,造成垂直山体方向与平行山体方向的电磁场分布不均匀,从而引起 TE(电场平行于构造走向)、TM(磁场平行于构造走向)极化的两条视电阻率曲线出现差异。当山体不规则时,影响就更复杂。为了更好地处理和解释山区大地电磁测深资料,必须首先弄清山区地形对大地电磁测深资料的影响特征。TE 和 TM 极化模式的均匀半空间场分布示于图 3-9(冈崎金雄等, 1985)<sup>[27]~[30]</sup>。

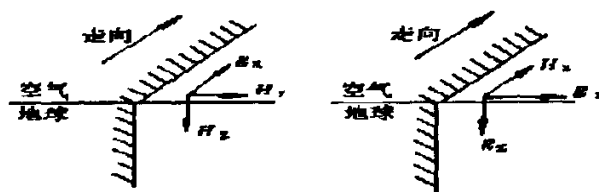


图 3-9 TE(左)和 TM(右)极化

设区域构造表面水平,其电性结构和地形均为任意形态。由于地形起伏的影响,使电磁场发生畸变,地形对大地电磁测深(MT)视电阻率的影响规律一般为 TM 模式比 TE 模式易受地形影响,山顶比谷底易受地形影响,悬崖的落差越大、山顶的宽度越窄,地形影响越大。从理论上可以解释 TM 模式易受地形影响的原因。在二维结构中,TE 极化模式下电场与构造走向平行,磁场与构造走向垂直,而 TM 极化模式下电场与构造走向垂直,磁场与构造走向平行。在 TE 和 TM 两种极化中,磁场一般变化平缓,不随地形起伏而发生突变。然而在 TM 极化模式中,由于电流垂直于水平非均匀界面流动,导致电场在空间上的分布受地形起伏的影响严重,且随着频率的不同,畸变影响显示出不同的特点,这是因为电场的水平分量(与走向垂直的方向)是由一次电场和二次电场构成。所谓二次电场是由垂直且穿过悬崖面的一次场在悬崖面上产生的面电荷所引起的,而在离悬崖面不同的地方,由面电荷引起的二次电场是不相同的,特别在近悬崖处总电场的水平分量(与走向垂直的方向)将产生急剧的变化从而引起视电阻率的突变。在 TE 极化模式中,电场的水平分量仅仅是沿走向方向的一次通过电场,不存在与走向垂直方向的电场,电场通常与悬崖面(边界面)平行,在界面处不产生面电荷积累。因此,TE 模式的视电阻率几乎不受地形的影响。

图 3-10 是野三关隧道苦桃溪槽谷采用 TM 模式用 EMAP 的方法消除静态效应反演



的结果，在槽谷中明显有条带状的低阻异常，当时初步成果推测为 F5 断层，之后再 用 TE 数据之间反演，其结果如图 3-11 所示，从图 3-11 中可以看出不但低阻条带状 异常被消除，而且突出了浅部的低阻异常。为了验证处理的结果，在苦桃溪槽谷中 布置了 Jz-III703-野 9 孔，结果只在 56m 处钻到溶洞，没有发现断层，说明初步成 果的异常是地形静态效应引起的<sup>[22]</sup>。

可见在地形剧烈变化的地区最好采用 TE 模式的数据反演，可以最大限度地降低 静态效应。

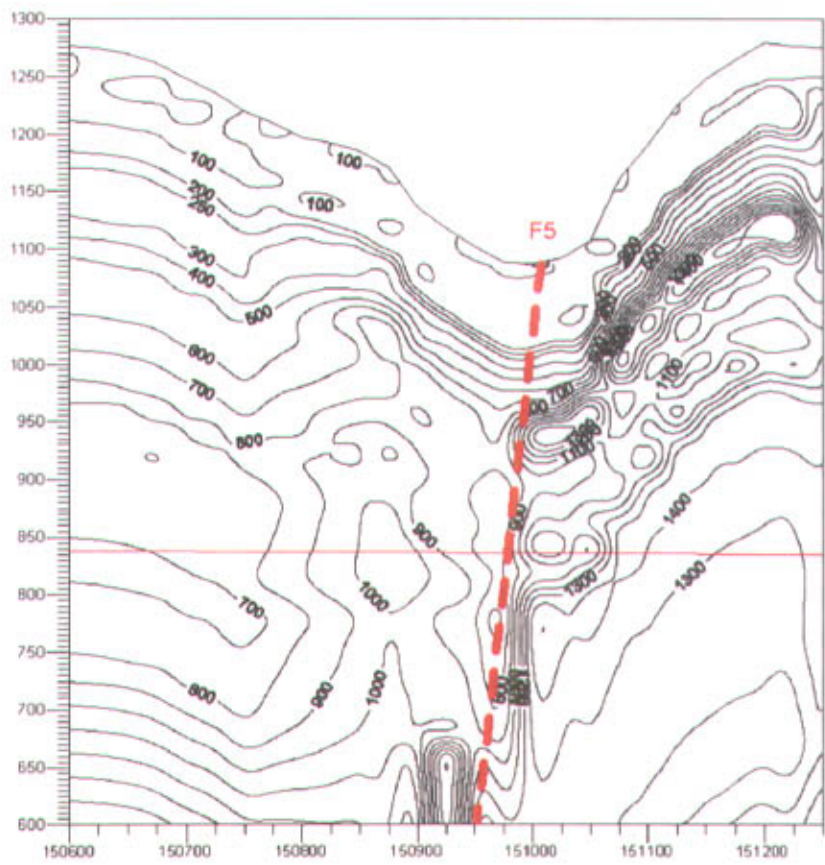
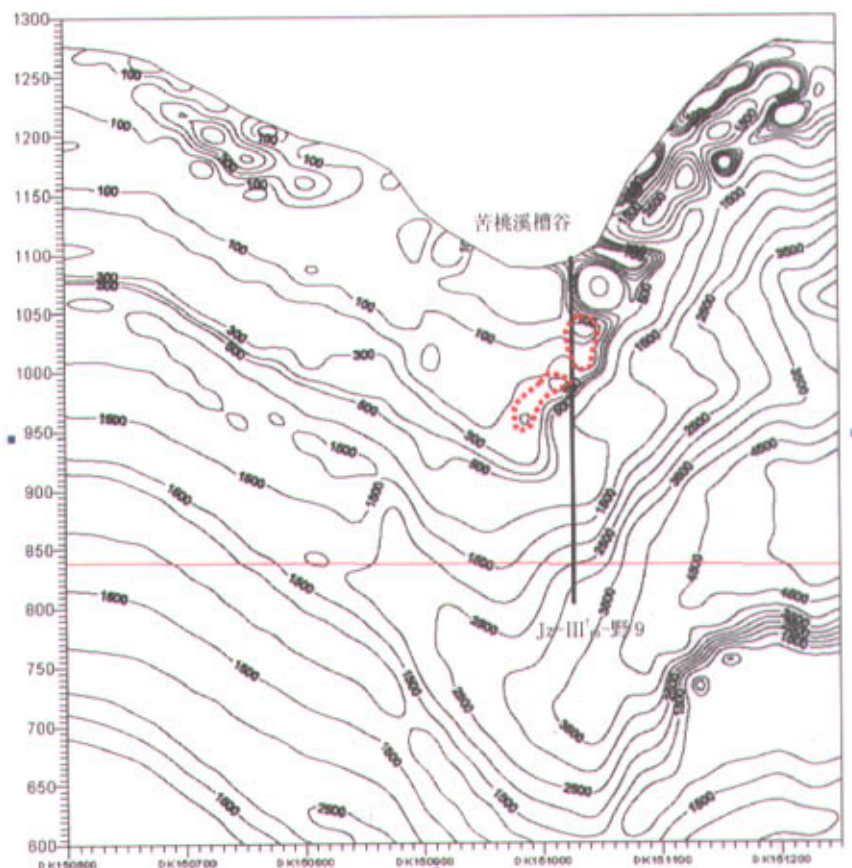


图 3-10 苦桃溪槽谷 CMT 法静态效应现象



### 3.4 浅部电性不均匀体的静态效应及其校正的方法和实例

静位移(Static Shift)是大地电磁测深中一种重要的畸变(Distortion)形式,它产生的原因是由于在测点附近存在浅层的、表面富集静电荷的小尺度电性异常体,这种电性异常体的尺度远小于趋肤深度,聚集在它们表面的静电荷在很宽的频率范围内影响到实测的电场强度幅值。在传统深部大地电磁测深研究中,静位移被看成是一种地质噪音,如果不能有效地消除静位移的影响,势必会导致对深部的电性结构解释出现偏差<sup>[31]-[33]</sup>。例如在一维反演解释中存在静位移的数据反演得到的模型在结构形态上可以保持不变,但模型中每一层的视电阻率和厚度却发生明显的放大或缩小;在二维甚至三维反演解释中,存在显著静位移的数据会使反演得到的模型中

出现冗首先了解一下静位移产生的基本原理, 当沿不均质体电导率梯度方向存在电场  $E$  时, 会在其边界上聚集起电荷, 这种在导电介质周围聚集起来的电荷也称作体电荷  $\rho_v$ :

$$\rho_v = \frac{\epsilon_0}{\sigma} E \cdot \nabla \sigma \quad (3-4)$$

式中  $\sigma$  为电导率,  $\epsilon_0$  为介电常数。那么由体电荷产生的二次场  $E_s$  可表示为:

$$E_s = -\frac{\partial A_s}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (3-5)$$

式中  $A_s$  是由边界电荷引起的二次磁场矢量势,  $\Phi$  为静电势。如果不均质体的尺度小于电磁场的趋肤深度, 那么上式中第一项可以忽略。

静态校正用来消除由地形起伏或表层电性不均匀产生的静态效应影响。根据测点相似和区域相似原理, 在横向均匀介质情况下, 同一测点的 2 支视电阻率曲线的高频段在数值上应趋一致, 相邻测点的视电阻率曲线的高频段在数值上也应该接近。为此在校正过程中采取以下步骤: 首先分析各测点高频段数值, 研究其变化规律, 提取测线上 2 支表层电阻率分布曲线进行加权平均, 得到静校正曲线和相应的校正因子; 然后对整条测线所有测点的 2 支视电阻率曲线实施校正, 达到区域相似的目的。图 3-12 中的图 a 和图 b 分别为测线静校正前及校正后表层电阻率( $\rho_s$ )的统计曲线<sup>[34]</sup>, 可以看出, 校正后表层不均匀体引起的假象被消除了。

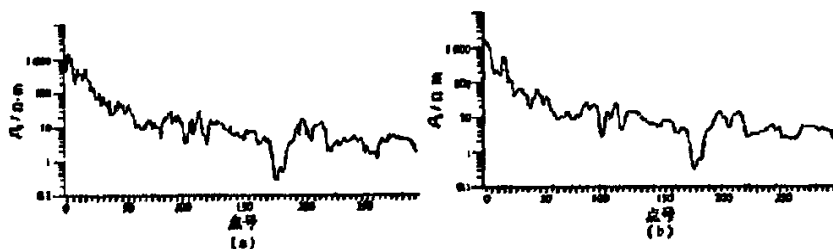


图 3-12 测线静校正前及校正后表层电阻率( $\rho_s$ )的统计曲线

静态漂移一般由近地表不均匀体所引起, 它产生的结果是视电阻率上下移动, 通常在实地实际工作中, 对每个测点数据进行观测存在多少的静态漂移是件困难的, 通过设立静态漂移改正参考曲线是切实可行的, 它的办法是对某些频率带通常是高频区的进行平均, 然后根据平均值计算出一个合适的曲线作为静态参考。再比较曲线对测点进行改正。图 3-13 为未进行改正的静态漂移改正参考曲线, 从图中看出有些测点的视电阻率值离参考曲线偏离较远, 这时对照曲线可进行改正。图 3-14 为改正静态漂移后的视电阻率值。

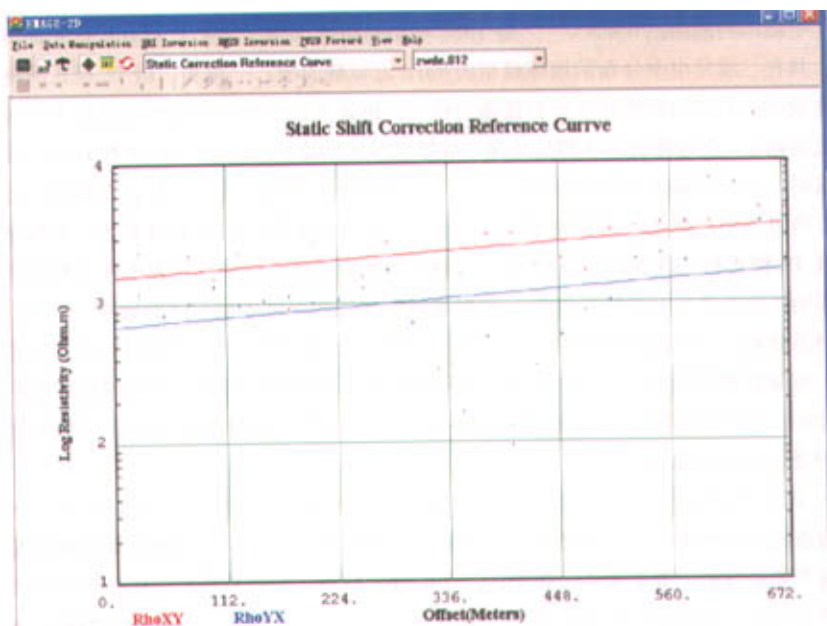


图 3-13 河北灵寿县 × × 金矿 27 线未改正的静态漂移改正参考曲线

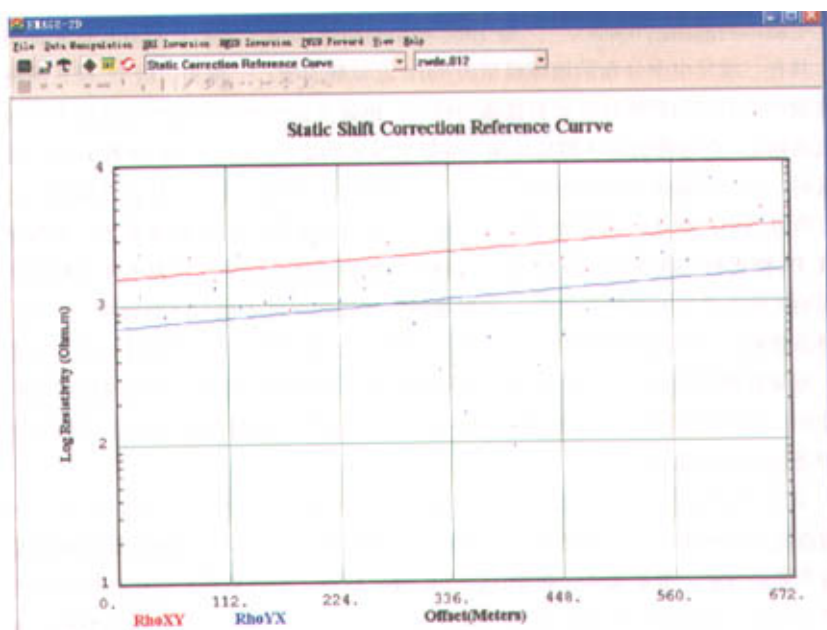


图 3-14 河北灵寿县 × × 金矿 27 线根据静态漂移改正后视电阻率曲线

电磁阵列剖面法(EMAP)<sup>[35]-[38]</sup>是1986年由美国地球物理学家Bostick首先提出的。具有二维导电率分布的地球模型的Born近似解表明:一维和二维TE模式的电场传输函数的空间频率特性具有低通的特点,也就是说电场分量是地下电阻率分布的低通输出,在这种情况下测量结果不受静态效应的影响。而在二维TM模式和三维情况时,电场传输函数中又增加了一项产生静态效应的静态项,它具有高通输出特征。所以当沿剖面进行高密度采样后,通过改变窗口宽度,进行低通滤波,来抑制二维TM模式和三维资料的静态效应。EMAP处理的思路不仅消除地表电性不均匀体的影响(通常意义下的静态效应),同时也消除了深部电性不均匀体的影响(广义上的静态影响)。所以处理后的资料,相当于测点下方的电性介质在平面上(X和Y方向)无限延伸时的响应。其实质是一种降维处理,将资料一维化。因此对这些资料只能用一维反演的方法去定量解释。下面以河北灵寿金矿静态效应校正为例说明EMAP静态效应的效果。

图3-15和图3-16是河北灵寿××金矿静态效应改正前后的二维反演剖面,区内构造存在两种类型,一是褶皱、二是断裂。燕山期近南北向、北西向断裂构造是区内主要的导矿、容矿构造。根据区内金矿成矿特点,北西或南北向张扭性断裂破碎带是项目主要找矿评价目标类型。由于金矿体位于石英脉中,就矿石类型而言含金石脉的导电性应呈高阻反应。本区的石英脉型金矿体几乎都赋存在断裂破碎带内,但由于断裂破碎带的富水性较强,使其呈低电阻反应。从图3-15河北灵寿××金矿静态效应更正前的二维反演剖面不难发现,从300-600m这一段剖面从地表到深部,呈现的低阻带状异常特别明显,如把F2和F3这些异常带推测为断裂,很有可能也是成矿区。经过EMAP静态校正后,这些条带状异常基本消失,这与以前的钻孔的资料相吻合。可见静态效应不但可以改变剖面的电性形态,而且可能改变了重要的异常。但是,不论CSAMT还是CMT静态效应是可以校正的。

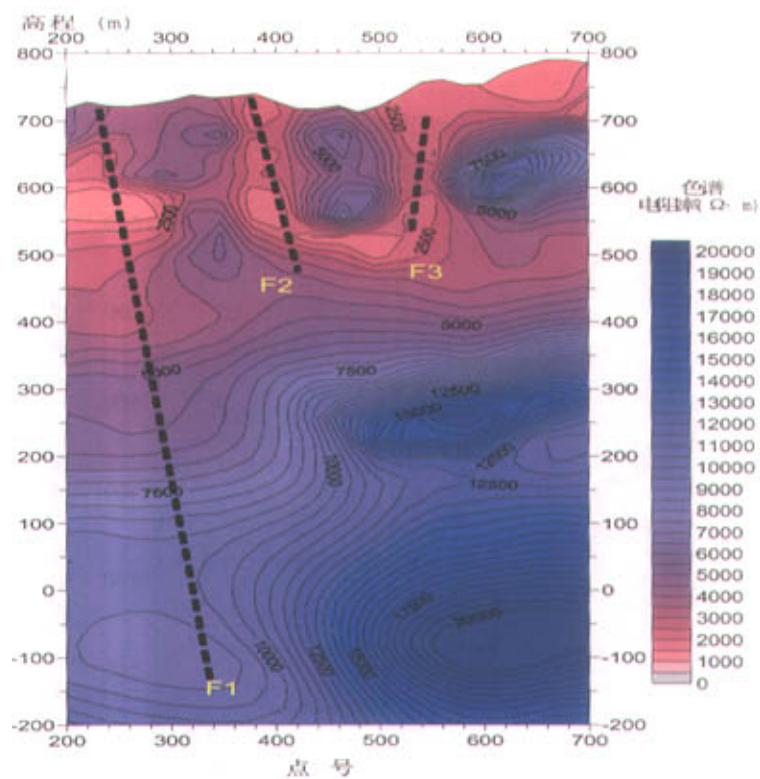


图 3-15 河北灵寿××金矿 27 线静态改正前二维反演拟断面图



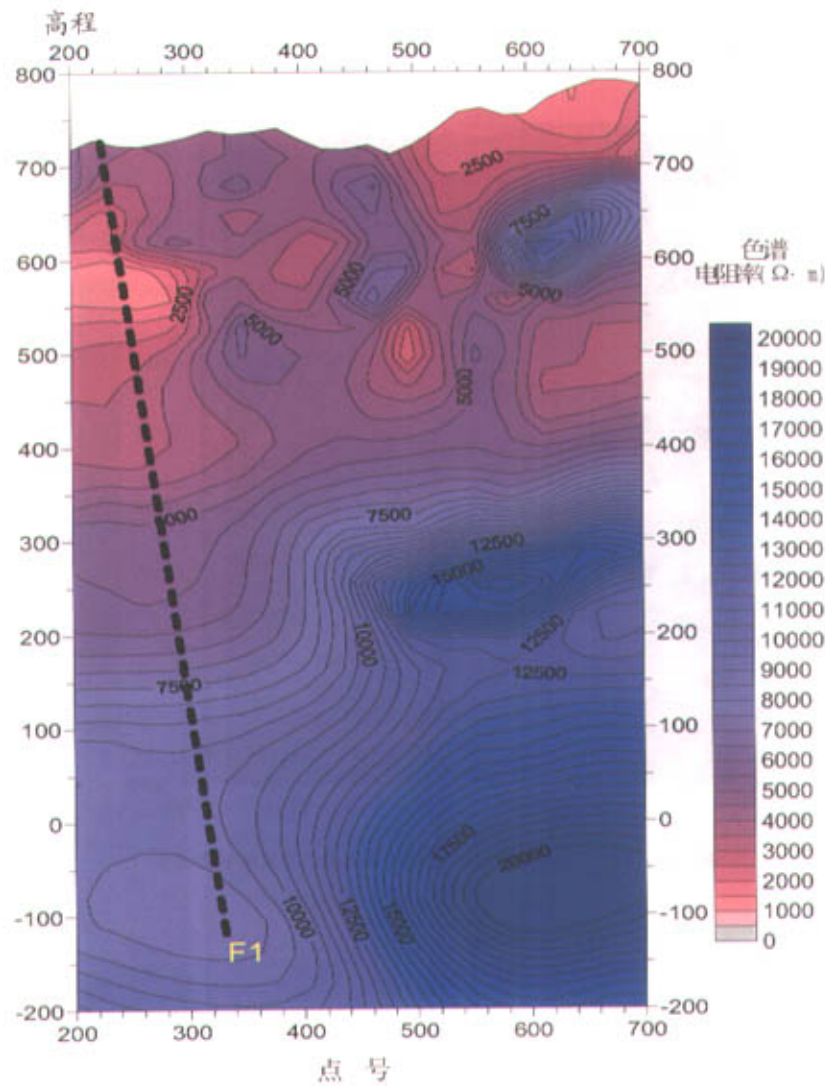


图 3-16 河北灵寿 × × 金矿 27 线静态校正后视电阻率二维反演拟断面图