

三维电磁阵列剖面法的基本原理及应用^①

刘 宏

(石油物探局第五调查处, 河北,
定兴, 固城 072656)

王家映

(中国地质大学, 武汉 430074)

摘 要 本文论述了三维电磁阵列剖面(三维 EMAP)法的基本原理, 并从理论上论述了大地电磁测深(MT)中的静态效应是由电磁响应中与频率无关的静态项引起的. 基于这一原理, 本文提出了三维 EMAP 野外采集方式和数据处理方程.

三维 EMAP 法不仅能消除 MT 中的静态效应, 而且由于采集信息量大大增加, 较常规 MT 有更好的地质效果, 文中给出的实例证明了这一点.

关键词 三维电磁阵列剖面法 有效阻抗 网格采集法 十字采集法 静态效应

1 引言

近年来作为一种有效的地球物理勘探方法, 大地电磁测深法在国内外获得了广泛应用. 但是, 近地表不均匀体和地形起伏的影响往往造成视电阻率曲线畸变. 为消除这种影响国内外许多地球物理学家都进行了深入的探讨和研究, 提出了一些校正的方法. 其中, 电磁阵列剖面法(Electromagnetic Array Profiling, 简称 EMAP)就是一种能压制静态影响, 提高资料质量的有效方法.

EMAP 自美国著名地球物理学家 F·X·Bostick^[20] 提出后, 已有一定程度的发展, 但仅局限于二维异常体的研究. 地质构造和地形影响实际上大都是三维的. 例如, 构造复杂地区, 火成岩发育区, 近地表或出露有火成岩体地区, 丘陵地区及山区的地形影响等都具有三维特征. 常规 EMAP 对压制二维静态效应虽然有一定的效果, 但难以较彻底地消除三维静态效应, 满足地质家对勘探精度越来越高的要求. 因此, 开展三维 EMAP 方法的研究势在必行.

三维 EMAP 是从常规 EMAP 法中衍生出来的, 从野外资料采集到室内处理都较常规 EMAP 法有了重大改进, 因而在压制静态影响, 提高 MT 资料解释效果方面有特殊精度.

^①本文1995年元月26日收到.

由(1)、(2)式知: 在波数域中, 静态项表现为高通特性, 且埋深(z_0)越浅, 高通特性越明显. 若令 $R(\xi, \eta, z_0)$ 为归一化电阻率 $\rho_n(x, y, z_0)$ 的付氏变换, $O(\xi, \eta)$ 表示二次异常场相对于一次场的付氏变换, 不难证明:

$$O(\xi, \eta) = \int_0^\infty \wedge_{\epsilon_i}(\xi, \eta, z_0) R(\xi, \eta, z_0) dz_0$$

由于 $\wedge_{\epsilon_i}(\xi, \eta, z_0)$ 呈高通特性, 所以 $O(\xi, \eta)$ 是电阻率异常 $R(\xi, \eta, z_0)$ 经高通滤波后的结果. 因此, 我们可设计一低通滤波器 $H(\xi, \eta)$ 来压制静态项影响:

$$\begin{aligned} O'(\xi, \eta) &= H(\xi, \eta) \cdot O(\xi, \eta) \\ &= H(\xi, \eta) \int_0^\infty \wedge_{\epsilon_i}(\xi, \eta, z_0) R(\xi, \eta, z_0) dz_0 \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式知, 只要选择合适的 $H(\xi, \eta)$ 就能使静态影响压制到最小. 对电场 $E(\xi, \eta)$ 而言, 下式也成立:

$$E'(\xi, \eta) = H(\xi, \eta) \cdot E(\xi, \eta) \quad (8)$$

根据褶积定理, (8)式空间域表达式为:

$$E'(x, y) = E(x, y) * h(x, y) \quad (9)$$

其中, $E'(x, y)$ 、 $E(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 分别是 $E'(\xi, \eta)$ 、 $E(\xi, \eta)$ 、 $H(\xi, \eta)$ 的付氏变换.

2.2 数字方程

如图2所示, 设 $E_x(x, y)$ 、 $E_y(x, y)$ 为沿 x 、 y 方向上经低通滤波后的电场, $z_{xx}(x, y)$ 、 $z_{xy}(x, y)$ 、 $z_{yy}(x, y)$ 、 $z_{yx}(x, y)$ 表示按常规方法由基站磁场(H_x 、 H_y)与 $E_x(x, y)$ 、 $E_y(x, y)$ 求得的阻抗张量. 则有:

$$E_x(x, y) = z_{xx}(x, y)H_x + z_{xy}(x, y)H_y \quad (10)$$

$$E_y(x, y) = z_{yx}(x, y)H_x + z_{yy}(x, y)H_y \quad (11)$$

如图2b所示, 设测点极化电场为 $E_r(x, y)$, 极化方向为 r 方向, 与测线 x 夹角为 $\psi(x, y)$, $E_{xr}(x, y)$ 、 $E_{yr}(x, y)$ 为极化电场的两个电场分量. 利用有关理论^[17], 则(10)、(11)式又可表示为:

$$E_x(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) E_{xr}(x, y) \cos\psi(x, y) dx dy \quad (12)$$

$$E_y(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) E_{yr}(x, y) \sin\psi(x, y) dx dy \quad (13)$$

式中 $k(x, y)$ 为归一化因子, $r(x, y)$ 为加权系数.

把测网表示的坐标系顺时针旋转角度 $\psi(x, y)$, 与极化方向一致, 将 MT 的有关旋转理论用于(10)、(11)式, 并对(10)~(13)式进行对比, 则有:

$$\begin{aligned} E_x(x, y) &= k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_1 + z_2 \cos 2\psi(x, y) \\ &\quad + z_3 \sin 2\psi(x, y)] \cos\psi(x, y) dx dy H_x + k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_4 \end{aligned}$$

$$+ z_3 \cos 2\psi(x, y) - z_2 \sin 2\psi(x, y)] \cos \psi(x, y) dx dy H_y \quad (14)$$

$$E_y(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_3 \cos 2\psi(x, y) - z_2 \sin 2\psi(x, y) - z_4] \sin \psi(x, y) dx dy H_x + k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_1 - z_2 \cos 2\psi(x, y) - z_3 \sin 2\psi(x, y)] \sin \psi(x, y) dx dy H_y \quad (15)$$

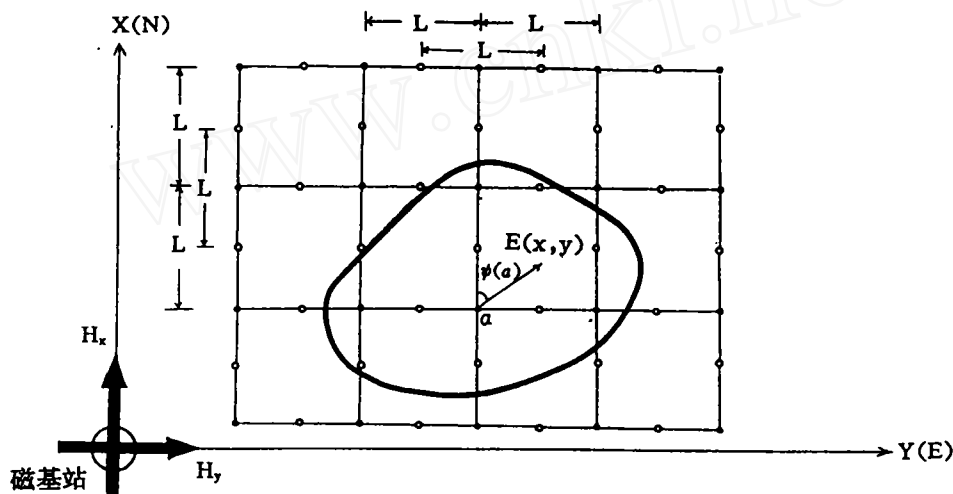


图 2 网格采集法布置图

• 是偶极子 · 为测点

其中： $z_1 = \frac{1}{2} [z_{xx}(x, y) + z_{yy}(x, y)]$ 、 $z_2 = \frac{1}{2} [z_{xx}(x, y) - z_{yy}(x, y)]$ 、 $z_3 = \frac{1}{2} [z_{xy}(x, y) + z_{yx}(x, y)]$ 、 $z_4 = \frac{1}{2} [z_{xy}(x, y) - z_{yx}(x, y)]$ ，

$$z_{xx}(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_1 + z_2 \cos 2\psi(x, y) + z_3 \sin 2\psi(x, y)] \cos \psi(x, y) dx dy \quad (16)$$

$$z_{xy}(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_4 + z_3 \cos 2\psi(x, y) - z_2 \sin 2\psi(x, y)] \cos \psi(x, y) dx dy \quad (17)$$

$$z_{yx}(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [-z_4 + z_3 \cos 2\psi(x, y) - z_2 \sin 2\psi(x, y)] \sin \psi(x, y) dx dy \quad (18)$$

$$z_{yy}(x, y) = k(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x, y) [z_1 - z_2 \cos 2\psi(x, y) - z_3 \sin 2\psi(x, y)] \sin \psi(x, y) dx dy \quad (19)$$

我们便得到了经过低通滤波后的四个阻抗张量.

引入 Berdichevsky 定义的有效阻抗(effective impedance)来求取 (x, y) 点阻抗:

$$z(x, y) = \sqrt{z_{xx}(x, y)z_{yy}(x, y) - z_{xy}(x, y)z_{yx}(x, y)} \quad (20)$$

$z(x, y)$ 是消除静态影响后的阻抗(或称有效阻抗), 根据视电阻率计算公式:

$$\rho_a(x, y) = \frac{|z(x, y)|^2}{\omega \mu_0} \quad (21)$$

便可求得测点的有效电阻率值.

显然, 通过引入低通滤波和有效阻抗计算, 可把三维不均匀体及地形起伏产生的静态影响尽可能消除, 把三维的问题转化为一维的问题来处理. 但必须首先求得归一化因子 $k(x, y)$ 和加权系数 $r(x, y)$ 等.

2.3 滤波函数的选择

由于三维问题的需要, 滤波器设计要考虑整个 (x, y) 平面. 因此根据数字处理理论设计了二维空间域汉宁窗:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}} (1 + \cos \frac{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}}) & |x| \leq W_x/2 \text{ 和 } |y| \leq W_y/2 \\ 0 & |x| > W_x/2 \text{ 或 } |y| > W_y/2 \end{cases} \quad (22)$$

式中 W_x 、 W_y 分别为 x 、 y 方向上的滤波窗口宽度. 离散的二维汉宁窗记为:

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M r_{ij}(x, y) g(x_i - x, y_j - y) \quad (23)$$

其中 N 、 M 分别为在测点附近沿 x 、 y 轴的电偶极子数. 式中 $g(x_i - x, y_j - y)$ 记为:

$$g(x_i - x, y_j - y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & |x| \leq L/2 \text{ 和 } |y| \leq L/2 \\ 0 & |x| > L/2 \text{ 或 } |y| > L/2 \end{cases} \quad (24)$$

2.4 加权系数 $r_{ij}(x, y)$ 的确定

根据(23)式, 为使 $h(x, y)$ 与期望窗函数 $h_D(x, y)$ 拟合最好. 设方差函数为:

$$\varphi(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [h(x, y) - h_D(x, y)]^2 dx dy \quad (25)$$

欲求得 $\varphi(x, y)$ 的最小值, 在 $1 < i < N$, $1 < j < M$ 的范围内一定有 $\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial r_{ij}(x, y)} = 0$ 成立.

从而:

$$r_{ij}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}} \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} \int_{-\frac{W_y}{2}}^{\frac{W_y}{2}} (1 + \cos \frac{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}}) g(x_i - x, y_j - y) dx dy \quad (26)$$

2.5 $\psi(x, y)$ 与 $k(x, y)$ 的确定

图 1 中 (x, y) 点极化电场可表示为:

$$\begin{aligned} E_r(x, y) &= E_x(x, y)\cos\psi(x, y) + E_y(x, y)\sin\psi(x, y) \\ &= k(x, y)\cos\psi(x, y)\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}r(x, y)E_x(x, y)dxdy \\ &\quad + k(x, y)\sin\psi(x, y)\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}r(x, y)E_y(x, y)dxdy \end{aligned} \quad (27)$$

由于在极化方向上 $E_r(x, y)$ 取极大值, 故有 $\frac{\partial E_r(x, y)}{\partial \psi(x, y)} = 0$, 于是:

$$\psi(x, y) = \arctg \frac{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}(1 + \cos \frac{2\pi\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{W_x^2+W_y^2}})g(x_i-x, y_j-y)E_y(x, y)dxdy}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}(1 + \cos \frac{2\pi\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{W_x^2+W_y^2}})g(x_i-x, y_j-y)E_x(x, y)dxdy} \quad (28)$$

对于确定的测点来说在极化方向上测得的电场 $E(x, y)$ 取得极大值, 并为一确定值:

$E(x, y) = E_r(x, y) = E_0(x, y)$, 可得:

$$k(x, y) = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}h(x, y)dxdy} \quad (29)$$

式中的 W_x, W_y 由下式给出:

$$\left. \begin{aligned} W_x &= C_0 \sqrt{\frac{\rho_a(x, y, \omega)}{\omega\mu_0}} & y=0 \\ W_y &= C_0 \sqrt{\frac{\rho_a(x, y, \omega)}{\omega\mu_0}} & x=0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

其中 C_0 是自适应滤波窗口控制系数, 它根据具体情况以下式动态给出:

$$C_0 = Ae^{-C(\frac{f_i}{f_l}-1)} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (31)$$

式中 A 是常数, $C = \log \frac{\rho_i}{\sum_{i=1} \rho_i}$, f_1, f_l 为频率, i 为某特定频点, n 为频点数.

3 三维 EMAP 的野外工作方法

三维 EMAP 一方面采用空间域低通滤波的办法, 压制与地表不均匀体及地形起伏有关的静态影响; 另一方面采集资料时, 测站采用电偶极子首尾相接的网格或十字阵列形式测量多道电场分量, 进一步扩大了信息量, 较常规 EMAP 更有效地消除地形影响, 更准确、详细反映地下介质的电性特征.

3.1 网格采集法

图 2 是三维 EMAP 网格采集法的野外工作布置图.它在野外进行数据采集时同常规 EMAP 一样,采用基站、测站同时观测的办法.而在测站观测时却与常规 EMAP 不同,需观测所有电偶极子的 E_x 、 E_y 两个电场分量.基站一般选择在地形平坦,构造简单,干扰较小,位置适中的地方.象常规大地电磁方法一样进行基站布站,并观测 E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 、 H_z 五个分量.测站沿 x 、 y 轴采用电偶极子首尾相连的方式呈直线延伸,形成等间距的网格.电偶极子间距离可从 30~200m 不等,取决于地表不均匀体的大小及勘探对象的情况.

由于三维体无明显走向,因此测线布置可沿任意方向布置,只要 x 、 y 轴相互垂直就可.为统一起见,在此规定 x 轴正向指向正北, y 轴正向指向正东.

野外工作时,基站和测站之间一般用石英钟进行同步,当一组网格观测完毕,再搬至下一组网格进行观测.由于在测站采取了面积测量的工作方式,所以与常规 EMAP 和 MT 相比,虽布极、放线工作量增加,但效率并不会降低.只是效率提高的程度受仪器本身采集道数的限制.这种布极方法要求仪器具有较多采集道数,地表条件较好.

3.2 十字采集法

如图 3 所示,由于受十分恶劣的地表勘探条件及仪器本身采集道数的限制,我们又提出了十字采集法.十字采集法的基站选择、观测,以及测站电偶极子的布设方式、距离及观测方式都与网格采集法一样.只是网格采集法一次观测一个面,而十字采集法一次只能观测两条相互垂直的测线.同网格采集法相比,它的效率可能会降低.但是,它却比网格采集法灵活,对仪器的采集道数要求也不算太高.

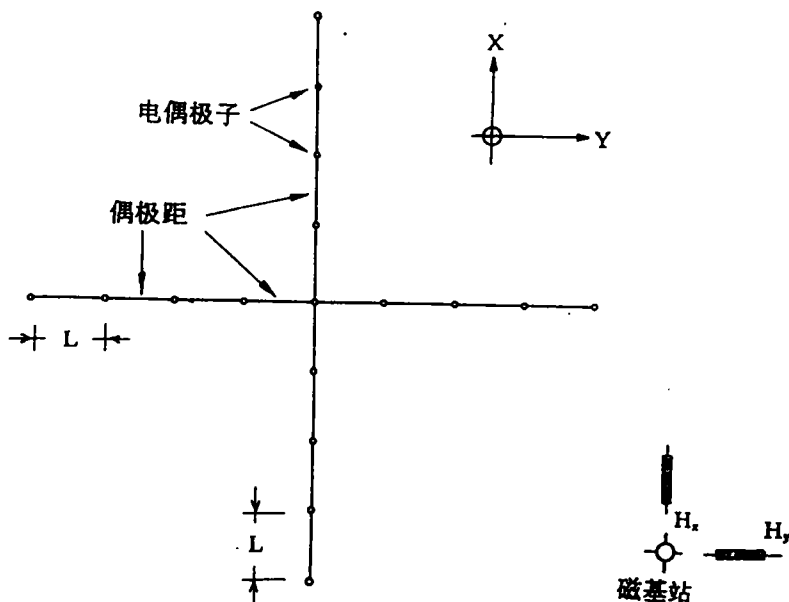


图 3 十字采集法布置图

总之,这两种方法各有自身的特点,在实际工作中可视具体情况而定.

4 三维 EMAP 的效果

4.1 理论计算

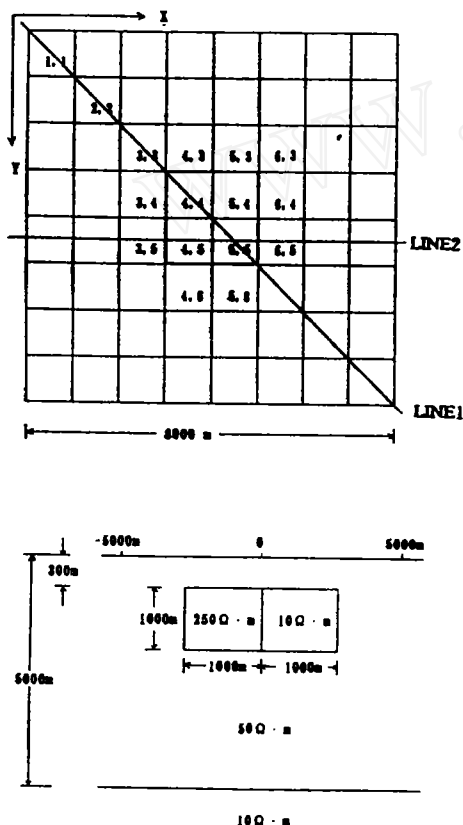


图4 三维正演理论模型

种与趋肤深度成正比例的关系,由此便导致了浅层静态效应消除不彻底.加之三维 EMAP 的处理对固定频点来说是一个平面上的积分,因此这种不彻底又会引起某个频段范围内的剩余静态效应.

6. 要想彻底消除静态效应,杜绝剩余静态效应产生,最好的办法便是增大滤波窗口控制系数 C_0 中的常数 A ,而这样又会将深部,甚至中部的有效信息滤除掉.怎样解决这一矛盾十分关键.

7. 采用有效阻抗、有效电阻率的计算公式,对经过自适应滤波处理后的阻抗进一步处理,其消除剩余静态效应效果更好.

图4模拟了一个近地表处存在的高、低阻异常体,两个不均匀体相邻,共处于均匀介质包围中即区域异常是一维的.图5~8分别是模型经三维正演后得到的部分视电阻率曲线及依 LINE1、LINE2 线切得的视电阻率剖面.图9~11分别是模型的有效电阻率曲线及依 LINE1、LINE2 线切得的有效电阻率剖面.综合分析上述图件可得到如下结论:

1. 由于局部异常体的存在产生了电流畸变,使得视电阻率曲线受静态效应影响,整个频段发生畸变.

2. 三维情况下静态效应同时在 TE、TM 两种极化方式中全频段存在.

3. 静态效应主要存在于不均匀体附近,随着距不均匀体距离增加,静态效应逐渐减弱.

4. 经三维 EMAP 处理后的视电阻率曲线互相靠近;曲线形态也与不存在静态效应时的一维正演曲线一致.由视电阻率剖面可知:其构造已接近一维.显然,经过 EMAP 处理后基本上消除了静态影响.

5. 由于静态效应是全频段存在的,而滤波窗口却随着频率的降低由窄变宽,呈现出一

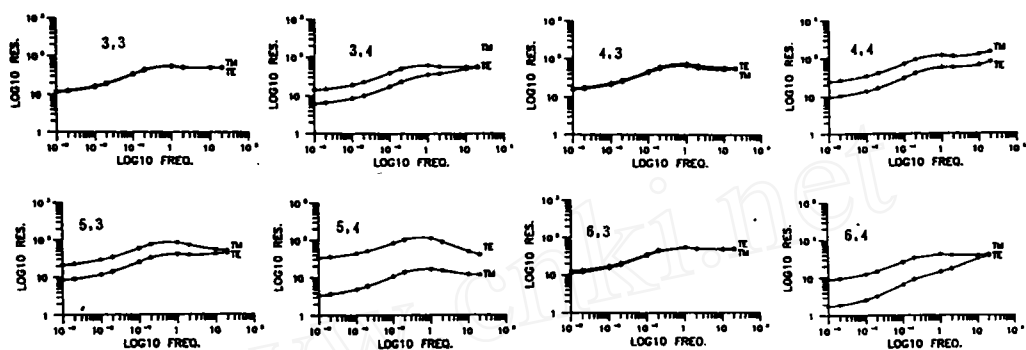


图 5 三维正演后视电阻率曲线

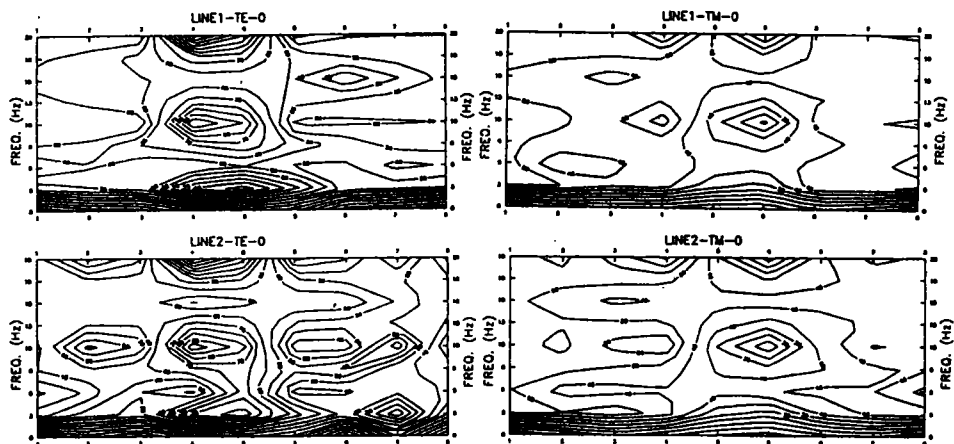


图 6 三维正演后, 依 Line 1 in Line 2 线切得的视电阻率剖面

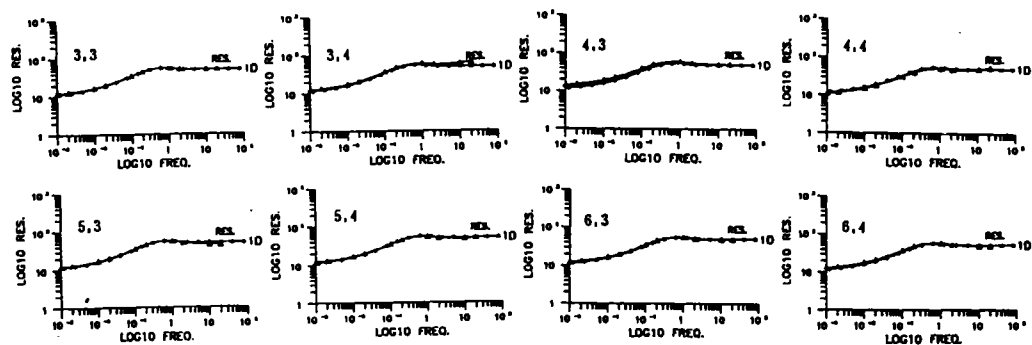


图 7 三维 EMAP 处理后, 视电阻率曲线

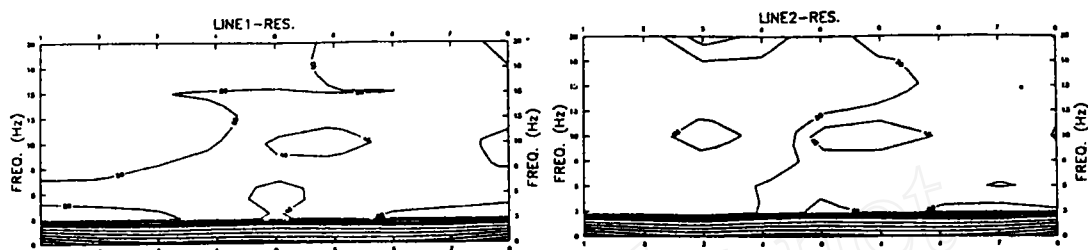


图8 三维EMAP处理后依LINE1及LINE2线切得的视电阻率剖面

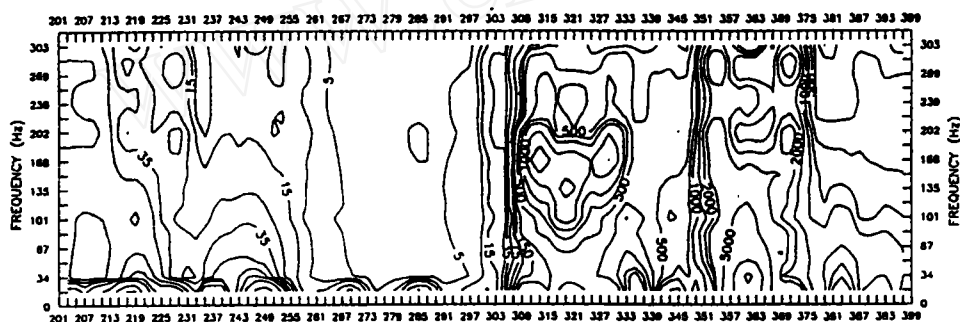


图9 经过常规处理后的实测视电阻率剖面

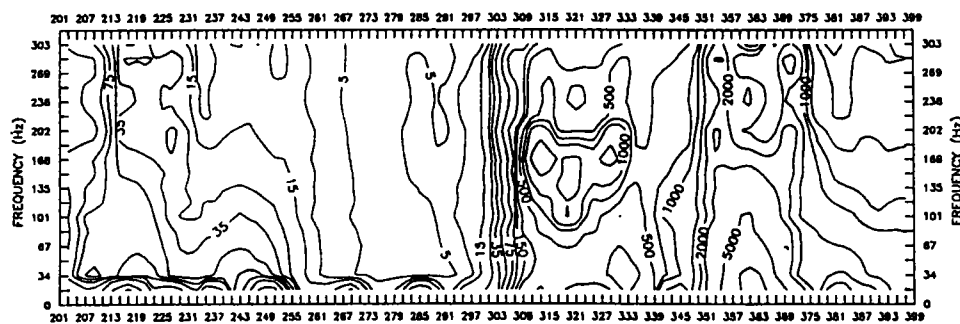


图10 经过常规EMAP处理后的实测视电阻率剖面

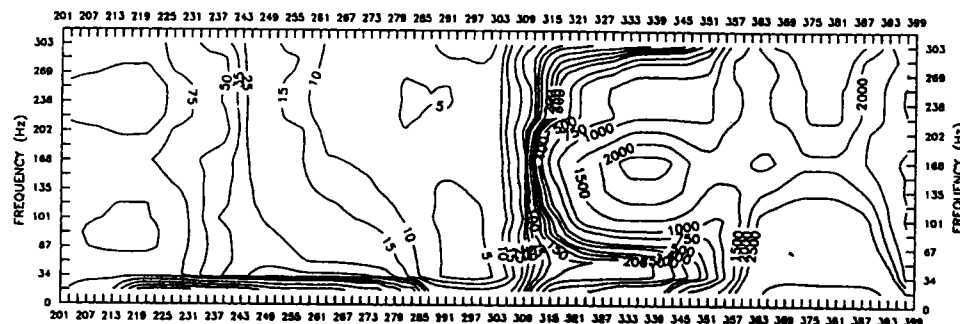


图11 经过三维EMAP处理后的实测视电阻率剖面

4.2 实际应用

目前国内外还未见到有关三维 EMAP 理论的报导,更谈不上野外工作的开展.国内也只有很少一些单位开展过 EMAP 野外工作,而且大都是采用一条直线观测电场的方法.因此我们对某地实测资料进行三维 EMAP 模拟处理,得到如图 9 所示的经过常规 MT 处理后的视电阻率剖面,图 10 所示的经过常规 EMAP 处理后的视电阻率剖面和图 11 所示的经过三维 EMAP 处理后的电阻率剖面.

对比这三张图可知:图 9 构造支离破碎,互不连贯,静态效应引起的团状构造遍布全图.如果依此剖面图进行解释,恐怕会与真实地质构造出入很大.图 10 同图 9 相比曲线变得比较光滑,等值线密集带及团状构造明显减少;基本构造形态已初步显示出来.图 11 同图 10 相比曲线变得更光滑,等值线疏密自然,表层不均匀体影响基本上完全被滤除.图 9 中显示为三条大断裂的等值线密集带,变成了一条陡缓有变的断裂带,高阻礁体的形态及低阻盆地的形态及界线,接触关系都清楚地显示出来.与实际地质资料及地震勘探的结果都基本吻合,更真实地反映了地质构造的实际面目.

通过以上理论、实际资料的处理,充分说明了采用三维 EMAP 的方法开展实际工作是可行的.尤其在三维构造发育地区开展三维 EMAP 工作是必要的、有效的.

5 结语

通过上述工作得到如下结论:

1. 浅层电性不均匀体及地形起伏的存在会产生电流畸变.在三维情况下这种畸变同时存在于 TE、TM 两种电场极化模式上,导致视电阻率曲线全频段失真.因此,对存在电流畸变的资料进行三维 EMAP 处理,消除静态效应是十分必要的.
2. 静态效应在波数域具有高通特性,采用低通滤波的手段便可消除其影响.
3. 三维 EMAP 处理时滤波窗口选择十分重要,窗口选择一定要合适.窗口的选择与趋肤深度、地质构造及浅层不均匀体大小、埋深有关.为了尽可能压制静态效应,最少量损失有关信息,选用了自适应滤波窗口和有效阻抗进行自动滤波,消除剩余静态效应.
4. 当浅层三维不均匀体相当发育时,采用三维 EMAP 的手段处理资料要比采用常规 EMAP 手段处理资料效果更好、更真实.

三维 EMAP 方法目前在国内、国外都还是刚刚起步,还有许多不成熟的地方,还有必要进一步研究和完善.

参 考 文 献

- (1) 王家映编《石油电法勘探》 石油工业出版社.
- (2) 王家映《电磁阵列剖面法的基本原理》 《地球科学》 1990年第15卷增刊 中国地质大学学报.

- (3) 罗志琼《用电磁阵列剖面法压制MT静态效应影响的研究》 《地球科学》1990年第15卷增刊 中国地质大学学报.
- (4) 罗志琼《2DEMAP》 1990 中国地质大学硕士研究生毕业论文.
- (5) 宋文渺《并矢格林函数和电磁场的算子理论》 中国科学技术大学出版社.
- (6) (瑞典) M.巴特著, 郑治真等译《地球物理学中的谱分析》 地震出版社.
- (7) 林为干、符果行、邬琳、刘仁厚著《电磁场理论》 人民邮电出版社.
- (8) 郑南宁编《数字信号处理》 西安交大出版社.
- (9) 石应骏等编《大地电磁测深法教程》 地震出版社.
- (10) 刘国栋、陈乐寿主编《大地电磁测深研究》 地震出版社.
- (11) (美)A.A.考夫曼, G.V.凯勒著, 刘国栋等译《大地电磁测深法》 地震出版社.
- (12) 陈乐寿、王光镔编《大地电磁测深法》 地质出版社.
- (13) 《大地电磁测深译文集(第一集)》 地质出版社.
- (14) Vozoff K., 1987, "The Magnetotelluric Method" Submitted to SEG.
- (15) Jones Alan G., 1988, "Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment" GEOPHYSICS VOL.53, NO.7.
- (16) Wannamaker Philip E., etc., 1984, "Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths" GEOPHYSICS VOL.49, NO.9.
- (17) Gouoau Wolfgang M., 1978, "Magnetotelluric data analytics: removal of bias" GEOPHYSICS VOL.43, NO.6.
- (18) Hermance John F., 1982, "The asymptotic response of three-dimensional basin offsets to magnetotelluric fields at long periods: The effects of current channeling" GEOPHYSICS VOL.47, NO.11.
- (19) Lilley F.E.M., 1993, "Magnetotelluric analysis using Mohr Circles" GEOPHYSICS VOL.58, NO.10.
- (20) Bostick F.X. "Electromagnetic Array Profiling (EMAP)" The 56h Annual SEG Meeting, 1986.

THE BASIC PRINCIPLE AND APPLICATIONS THE ELECTROMAGNETIC ARRAY PROFILING

Liu Hung

(Geophysical exploration Bureau,

Hebei, Gucheng 072656)

Wang Jiaying

(China University of Geosciences,

Wuhan 430074)

Abstract

In the present paper, we discuss the principle of 3-D Electromagnetic Array Profiling (3-D EMAP) and demonstrate theoretically that static effect in magnetotelluric (MT) is caused by the static component which is independent on frequency. Based on this principle, we design the data acquisition and data processing methods.

The 3-D EMAP can not only eliminate the static effect, but also increase the acquired data message. So its geological effect would be better than MT, just on the field example in this paper.

Key words 3-D Electromagnetic Array Profiling methods effective impedance
methods of grid acquiring methods of cross acquiring static effect