

一种简单的大地电磁阻抗张量畸变分解方法

王立凤, 晋光文, 孙 洁, 白登海

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 提出了一种简单的大地电磁阻抗张量畸变分解方法. 引入 3d/2d 模型, 使得全畸变的大地电磁阻抗张量被简化. 通过对比 Swift 旋转和 Bahr 分解后的资料, 用联系二者的畸变矩阵表示浅层三维电性异常体对区域二维构造的局部畸变影响. 通过研究畸变张量矩阵, 并对其进行分解, 可将局部三维电性不均匀体产生的畸变与区域构造分离开来, 从而了解区域构造的维数特征和局部畸变类型及其对区域构造的影响. 最后, 应用 3 个测点的实际资料, 对这种简单的畸变分解方法进行了检验. 结果表明, 该方法简单且应用方便, 解释效果较好.

关键词: 大地电磁测深; 3d/2d 模型; 阻抗张量; 畸变分解

中图分类号: P631.3⁺25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2001)02-0172-09

0 引言

目前在大地电磁测深资料的解释工作中, 二维反演已经被广泛应用, 三维反演则尚处于研究和探索阶段^[1]. 由于实际地质条件的复杂性, 导致地电结构千变万化. 严格地说, 具有一、二维结构的地区是很少的, 大多数都是三维或近似三维的三维构造. 如果对从一个三维构造环境中收集的资料进行一维或二维反演解释, 可以想象, 其结果很难反映地下电性结构的真实面目. 对于三维模型, 要消除近地表的局部三维电性异常体的影响, 以恢复区域二维构造特征, 必须求解高次非线性方程, 这项工作非常困难^[2-3]. 局部三维异常体覆盖在区域二维构造之上的结构模型, 称为主要叠加模型, 又称为 3d/2d 模型. 如果应用主要叠加模型, 则可用非线性最小二乘法迭代求解, 求解的难度有所降低^[4-7]. 另外, 3d/2d 模型稍加简化, 即可以变成二维模型. 同时该模型也是二维和三维模型之间的一种过渡模型. 研究 3d/2d 模型的特征及其分解方法, 无疑对三维解释具有借鉴意义和促进作用.

经验表明, 可将经 Swift 旋转后的构造主轴方位上的观测资料看作是区域构造与局部构造的综合贡献, 把经 Bahr 分解后的资料看作是区域构造主轴方向上的贡献, 二者的差则代表近地表局部三维电性不均匀体的影响. 这种表层局部三维电性异常体的影响可通过畸变张量矩阵反映出来. 根据这个思路, 即可以建立一种简单的阻抗张量畸变分解方法. 本文提出了一种基于 3d/2d 模型确定畸变因子, 从而进行大地电磁阻抗张量畸变分解的方法.

1 大地电磁阻抗张量畸变分解方法

来自高空的平面电磁波若垂直入射到地表, 对于符合 3d/2d 模型的构造, 其地表观测的大地电磁阻抗^[8~13]

$$Z = (I + P_h)Z^0(I + Q_h Z^0)^{-1} \quad (1)$$

式中: Z 和 Z^0 分别代表存在与不存在近地表局部三维电性不均匀体时的区域阻抗; P_h 和 Q_h 分别是水平的电场畸变张量和磁场畸变张量. P_h 表示产生于表层电性不均匀体界面上的电荷积累或边界二边的电性变化梯度, Q_h 表示电流沟道效应对磁场的影响.

在任意方向上测量时, 式(1)变成:

$$Z = R(\theta)(I + P_h)Z^0(I + Q_h Z^0)^{-1}R^T(\theta) \quad (2)$$

其中:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

为旋转矩阵, θ 是逆时针转角.

在式(2)中不仅考虑了电场的电流型畸变, 而且还考虑了磁场的电流型畸变, 因此该式可称为大地电磁阻抗张量的全畸变模型. 全畸变模型阻抗的振幅和相位都发生变化时, 对观测资料的影响表现为位移和形态变化二者兼而有之.

假设地表电性不均匀体尺度较小, 电导率很低, 则在大地电磁测深所用的频率范围内, 感应效应很弱, P_h 和 Q_h 中的各元素均蜕化为与频率无关的常数, 且 $Q_h Z^0$ 趋于零, 因此, 式(2)简化成^[14]:

$$Z = R(\theta)CZ^0R^T \quad (4)$$

其中:

$$C = I + P_h \quad (5)$$

在式(4)中只考虑了电场的电流型畸变效应, 故该式称为电场的电流型畸变模型. 由于它只考虑了视电阻率曲线的平行移动, 而假定相位保持不变, 所以亦叫做静位移畸变模型.

对二维模型或 3d/2d 模型, 传统的大地电磁测深资料处理方法是根据观测的阻抗, 运用 Swift 旋转, 使阻抗张量的对角元素极小而非对角元素极大, 来确定电性主轴方向, 并以此主轴方向上获得的 Z_{TE} 和 Z_{TM} 2 条曲线进行解释. 但由式(4), 若测量就在电性主轴方向上进行, 有:

$$Z = CZ_{2-d} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{TE} \\ -Z_{TM} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{xy}Z_{TM} & C_{xx}Z_{TE} \\ -C_{yy}Z_{TM} & C_{yx}Z_{TE} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(6), 运用 Swift 旋转技术不能确定区域电性主轴方位, 因为这时阻抗张量对角元素为零或很小. 只有当 $C_{xy} = C_{yx} = 0$, 即:

$$C = \begin{bmatrix} C_{xx} & 0 \\ 0 & C_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

时, 也就是当测量轴与表层局部电性不均匀体的对称轴一致时, 才能合理地确定区域电性构造的主轴方位. 另外, 当观测轴与区域构造主轴一致时, 阻抗张量每一列元素的相位相同, 并分别为 Z_{TE} 和 Z_{TM} 的相位. 因此, 当存在表层电流型畸变的情况下, 可以旋转阻抗张量直至第一列与第二列元素各自具有相同的相位, 以达到确定电性主轴方向的目的.

对 3d/2d 模型的观测资料, 当作 Bahr 分解之后, 得到的场已经没有表层局部三维电性不

均匀体的影响,完全是区域场. 设该区域电场为 E^r , 由于近地表局部电性异常体的存在, 产生的电流型畸变电场 E^g 与区域场 E^r 成比例, 且同相位. 因此, 如果在 x 方向上的区域电场为 E_x^r , 则因异常体边界电荷积累产生的电流型畸变电场为 $E^g(E_x^r)$, 可以写成 2 个水平分量组成的一个列向量:

$$E^g(E_x^r) = \begin{bmatrix} C_{xx} \\ C_{yx} \end{bmatrix} E_x^r \tag{8}$$

在 y 方向上, 同样有:

$$E^g(E_y^r) = \begin{bmatrix} C_{xy} \\ C_{yy} \end{bmatrix} E_y^r \tag{9}$$

在任何其它方向的区域电场 E^r 可以写成 x 和 y 2 个方向分量之和. 相应的电流型畸变电场为:

$$\begin{bmatrix} E_x^g \\ E_y^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} \tag{10}$$

在野外测量中, 测量的电场 E^m 为区域电场 E^r 与电流型畸变电场 E^g 之和, 即:

$$\begin{bmatrix} E_x^m \\ E_y^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & 1 + C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} = DE^r \tag{11}$$

式中: D 称为畸变矩阵; 第一列元素 $1 + C_{xx}$ 和 C_{yx} 为 x 方向上的单位区域电场产生畸变后的观测电场的振幅; 第二列元素 C_{xy} 和 $1 + C_{yy}$ 则是 y 方向上的单位区域电场产生畸变后的观测电场的振幅.

D 可以写成另一种参数化形式:

$$D = \begin{bmatrix} g_x \begin{bmatrix} \cos\beta_x \\ \sin\beta_x \end{bmatrix} & g_y \begin{bmatrix} -\sin\beta_y \\ \cos\beta_y \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中: g_x 是 x 方向的区域电场分量 E_x^r 被放大的倍数(或 E_x^r 的增益); β_x 是 E_x^r 顺时针旋转的角度; g_y 是 y 方向的区域电场 E_y^r 被放大的倍数(或 E_y^r 的增益); β_y 是 E_y^r 顺时针旋转的角度.

结合式(4), 只考虑电场的电流型畸变, 有:

$$Z^m = DZ^r = \begin{bmatrix} g_x \cos\beta_x & -g_y \sin\beta_y \\ g_x \sin\beta_x & g_y \cos\beta_y \end{bmatrix} Z^r \tag{13}$$

设在区域二维构造或近似区域二维构造的主轴方向上进行观测, 则表示主轴方位角的参数 θ 可以忽略, 这样, 不仅减少一个未知数, 使分解技术变得更简单, 而且物理意义更明确, 更有利于揭示 3d/2d 模型大地电磁阻抗张量的畸变影响特征. 在此坐标系中, 令 Z^B 为经 Bahr 旋转后的阻抗, Z^S 为经 Swift 旋转后的阻抗, 即:

$$Z^B = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy}^B \\ -Z_{yx}^B & 0 \end{bmatrix}, \quad Z^S = \begin{bmatrix} Z_{xx}^S & Z_{xy}^S \\ Z_{yx}^S & Z_{yy}^S \end{bmatrix} \tag{14}$$

综合考虑式(14)、式(13)和式(11), 则得:

$$\begin{cases} 1 + C_{xx} = Z_{xy}^S / Z_{xy}^B \\ C_{xy} = -Z_{xx}^S / Z_{yx}^B \\ C_{yx} = Z_{yy}^S / Z_{xy}^B \\ 1 + C_{yy} = -Z_{yx}^S / Z_{yx}^B \end{cases} \tag{15}$$

应用式(13)和式(11)中 D 的对应元素的关系, 得:

$$\begin{cases} g_x \cos \beta_x = 1 + C_{xx} \\ g_x \sin \beta_x = C_{yx} \\ g_y \cos \beta_y = -C_{xy} \\ g_y \sin \beta_y = 1 + C_{yy} \end{cases} \quad (16)$$

解式(16), 得:

$$\begin{cases} \beta_x = \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \frac{C_{yx}}{1 + C_{xx}} \right\} \\ \beta_y = \operatorname{tg}^{-1} \left\{ -\frac{C_{xy}}{1 + C_{yy}} \right\} \\ g_x = \sqrt{C_{yx}^2 + (1 + C_{xx})^2} \\ g_y = \sqrt{C_{xy}^2 + (1 + C_{yy})^2} \end{cases} \quad (17)$$

若记电场的平均旋转和微分旋转为:

$$\begin{cases} \beta_{av} = (\beta_x + \beta_y)/2 \\ \beta_{dif} = (\beta_x - \beta_y)/2 \end{cases} \quad (18)$$

则式(12)变成:

$$D = \begin{bmatrix} \cos \beta_{av} & -\sin \beta_{av} \\ \sin \beta_{av} & \cos \beta_{av} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_{dif} & \sin \beta_{dif} \\ -\sin \beta_{dif} & \cos \beta_{dif} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_x & 0 \\ 0 & g_y \end{bmatrix} \quad (19)$$

再记平均增益 g_{av} 和微分增益因子 s 分别为:

$$\begin{cases} g_{av} = (g_x + g_y)/2 \\ s = (g_x - g_y)/(g_x + g_y) \end{cases} \quad (20)$$

则 D 还可以表示成:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -\operatorname{tg} \beta_{av} \\ \operatorname{tg} \beta_{av} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \operatorname{tg} \beta_{dif} \\ \operatorname{tg} \beta_{dif} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix} g_{av} \cos \beta_{av} \cos \beta_{dif} \quad (21)$$

进行 G - B 分解, 则

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix} g \quad (22)$$

相对比可以看出: 扭曲因子 $t = \operatorname{tg} \beta_{av}$; 剪切因子 $e = \operatorname{tg} \beta_{dif}$; 各向异性因子等于微分增益因子 s ; 测点增益 $g = g_{av} \cos \beta_{av} \cos \beta_{dif}$.

在同一坐标系中, 2 个正交电场向量向相同方向旋转各自角度的平均效果相当于一种扭曲作用, β_{av} 称为扭曲角; 而向相反方向旋转各自角度的平均效果则相当于一种剪切作用, β_{dif} 称为剪切角. 2 个正交的电场向量放大不同的标量因子自然反映各向异性的影响, 测点增益 g 乃是平均增益 g_{av} 的一个特殊变换.

2 应用实例

为了检验上述大地电磁阻抗张量畸变分解方法的应用效果, 选用某地区 207.503 和 104.3 个测点的实际资料, 计算了各种参数(图1~图3). 这些参数包括二维偏离度 $Skew$, 经 $Swift$ 旋转后的视电阻率 ρ_{axx} 、 ρ_{axy} 、 ρ_{ayx} 和 ρ_{ayy} 与阻抗相位 φ_{axx} 、 φ_{axy} 、 φ_{ayx} 和 φ_{ayy} , 经 $Bahr$ 分解后的视电

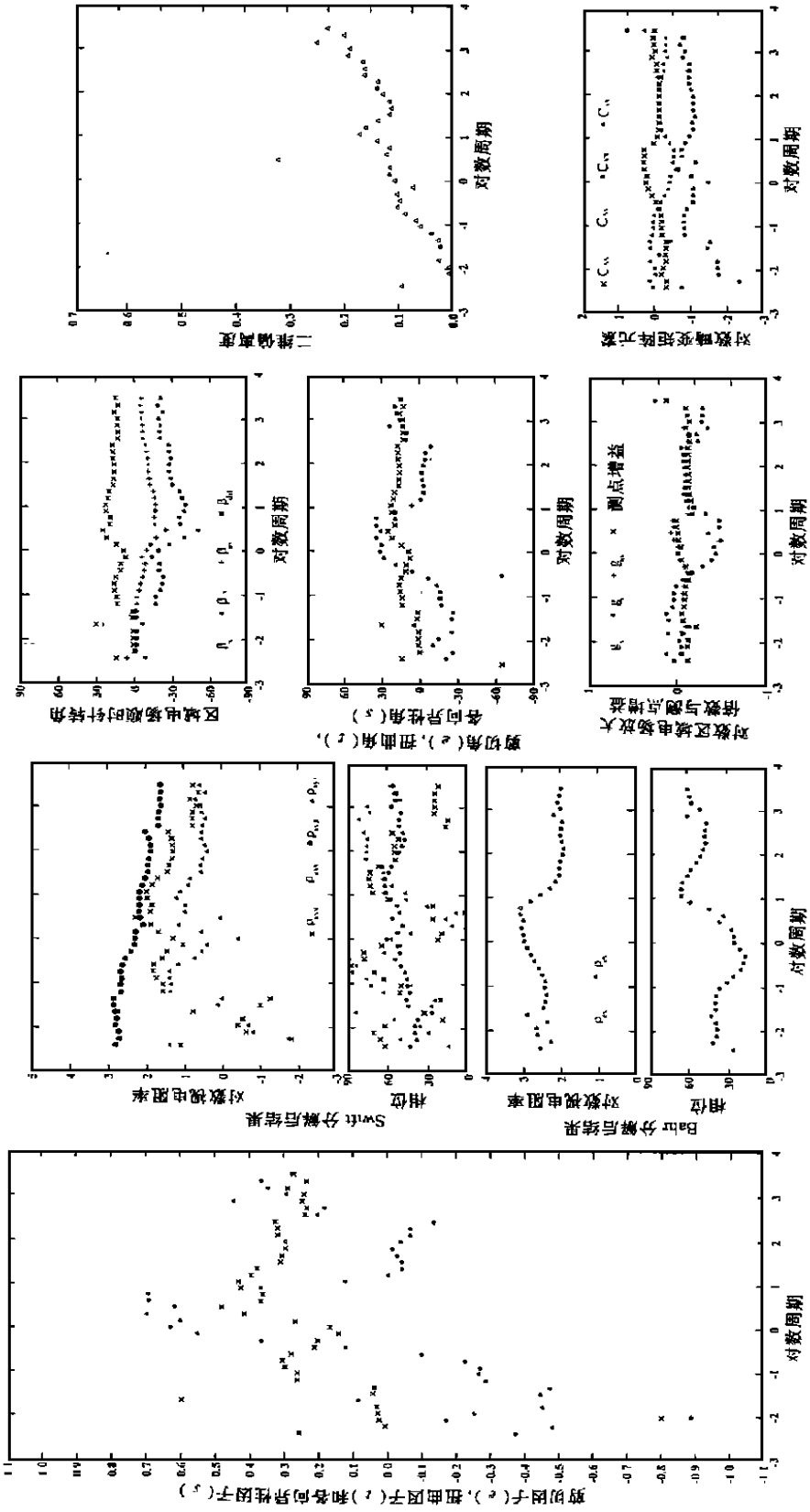


图 1 207 号测点阻抗张量畸变分解结果

Fig. 1 Impedance tensor distortion decomposition results from site 207

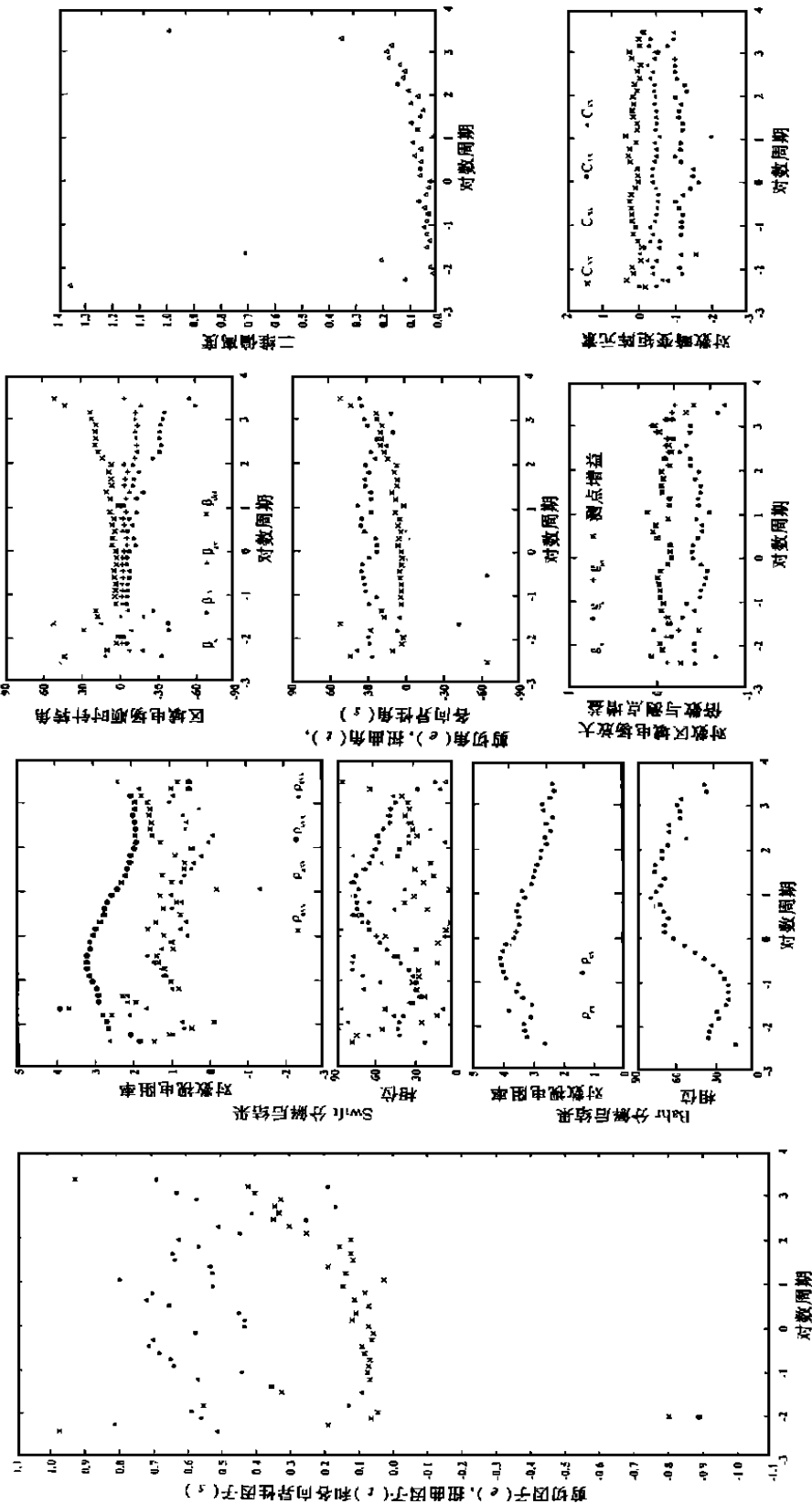


图 2 503 号测点阻抗张量畸变分解结果

Fig. 2 Impedance tensor distortion decomposition results from site 503

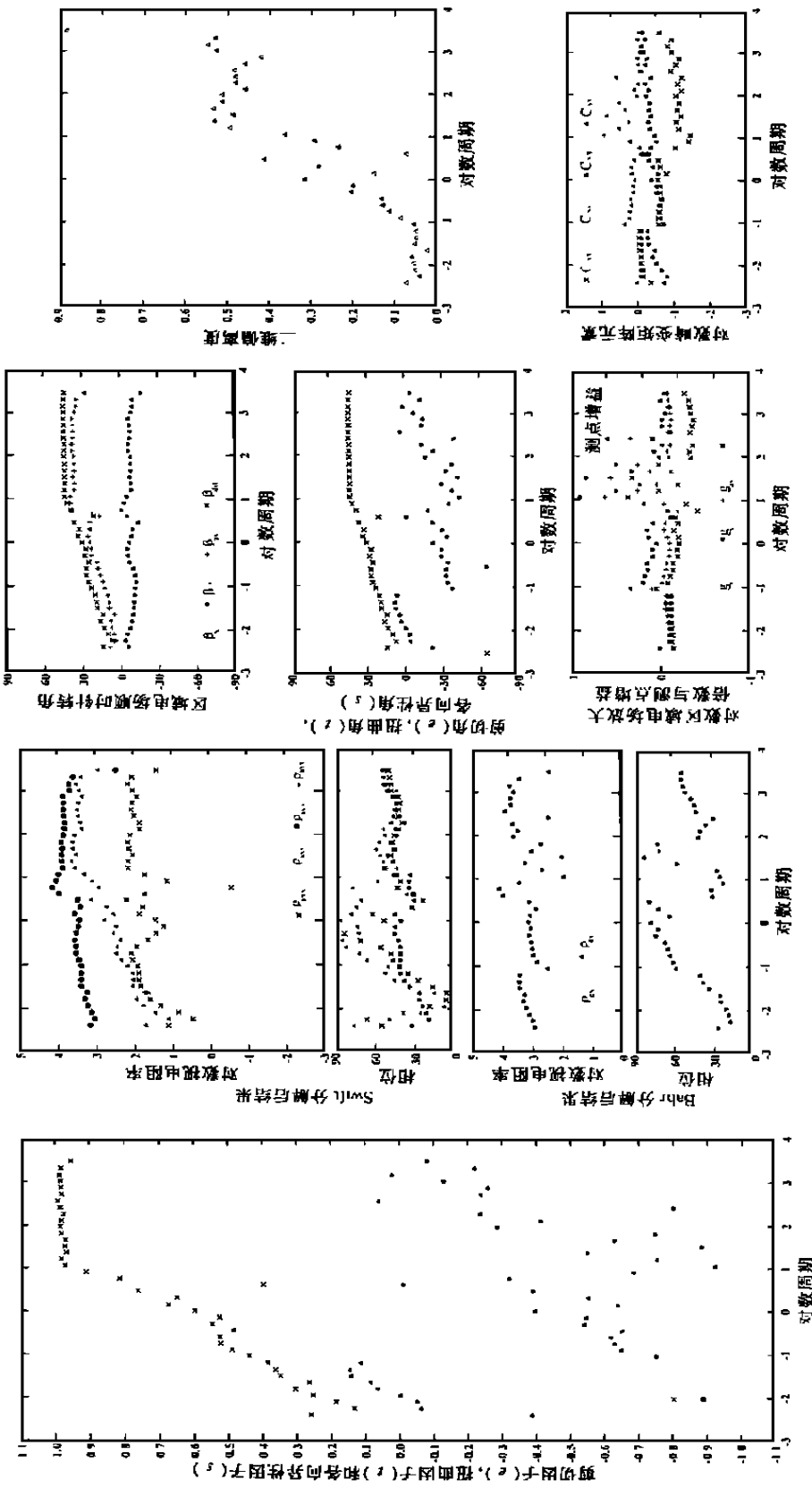


图 3 104 号测点阻抗张量畸变分解结果

Fig. 3 Impedance tensor distortion decomposition results from site 104.

阻率 ρ_{ex} 和 ρ_{ey} 与阻抗相位 φ_{ex} 和 φ_{ey} , 表征畸变效应的扭曲因子 t 、剪切因子 e 、各向异性因子 s 及其对应的扭曲角 φ_t 、剪切角 φ_e 和各向异性角 φ_s , 相互正交方向电场 E_x 和 E_y 分量的增益 g_x 与 g_y 及其顺时针旋转角 β_x 与 β_y , 平均增益 g_{av} , 微分增益 g_{dif} , 平均转角 β_{av} 和微分转角 β_{dif} , 畸变张量矩阵元素 C_{xx} 、 C_{xy} 、 C_{yx} 和 C_{yy} 的实测值。图中纵坐标除了对视电阻率和畸变矩阵元素取对数之外, 其余都是实际值, 横坐标均是周期 T 的对数。

从图1~图3可以看出:207号和503号测点的 Skew 值均小于0.2, 说明2个测点所处区域的电性结构近似二维。对于104号测点, 当周期小于1s时, Skew 值小于0.2, 周期大于1s时, 则 Skew 值大于0.2, 最大值可达0.5左右, 说明该测点所在区域构造在浅部近似二维, 在深部则接近三维。当周期较长时, 104号测点的视电阻率 ρ_{axx} 和 ρ_{ayy} 较大, 几乎接近主视电阻率 ρ_{axy} 和 ρ_{ayx} , 这也可以作为104号测点深部结构近似三维的一个证据。

就局部构造的畸变影响而言, 3个测点各不相同。在503号测点, $s > 0.5$, φ_s 达 30° 以上, 表明主要受各向异性畸变影响; 同时, 作 Swift 旋转和 Bahr 分解后的资料对比, 揭示出明显的静位移畸变特征。因此可以认为, 各向异性畸变是产生静位移的原因。在207号测点, 浅层 s 值较大, 反映了较强的各向异性畸变影响; 中等深度处, s 值也较大, 且反相, 反映在此深度的各向异性畸变较之于浅部发生了方向性的变化, 而且 t 值近于-0.3, 说明也有一定的扭曲畸变影响; 从中部到深部, e 值达0.3左右, 故有较强的剪切畸变作用。该测点因局部畸变的复杂性, 导致视电阻率曲线不只一处发生交叉, 其 β_{dif} 接近 30° , 也揭示了较强的剪切畸变, 这可能是使视电阻率曲线发生交叉的一个重要原因。在104号测点, 从浅层到深层, t 、 e 和 s 值均由小变大, φ_t 、 φ_e 和 φ_s 大于 30° , 说明该测点受到强烈的多种畸变的影响。视电阻率曲线从数值到形态都发生了变化, 这不仅是局部畸变影响的结果, 也是区域构造大于二维部分的影响所致。而且在该测点, 当周期大于1s时, β_{av} 和 β_{dif} 均大于 30° , 说明扭曲畸变和剪切畸变强烈, 使原来分离的2条主视电阻率曲线靠拢。

3 结语

本文提出的方法是利用已有的 Swift 旋转和 Bahr 分解结果, 通过对比, 求出局部畸变矩阵, 而区域二维阻抗和主轴方位均已知。Groom-Bailey (G-B) 分解方法^[15 16] 则直接从观测资料出发, 待求未知量太多, 不仅包括局部畸变矩阵, 还包括区域二维阻抗和主轴方位角, 需要对高阶非线性方程进行多次迭代求解, 才能得到解答。本文的方法是在 G-B 分解方法的基础上发展的, 该方法已大为简化。除上述3个测点之外, 作者还将该方法应用于新疆玛纳斯大震区和太行山某地区的大地电磁观测资料解释, 均取得了较好的效果。实际上, 凡是在电性构造的二维性较好的地区, 应用该方法都会取得较好的效果。

[参考文献]

- [1] Smith J T and Booker J R. Rapid inversion of two- and three dimensional magnetotelluric data[J]. J Geophys Res. 1991, 96(2): 3905—3922.
- [2] Juanjo L, Pilar Q and Jaune P. Effects of galvanic distortion on magnetotelluric data over a three dimensional regional structure[J]. Geophys J Int, 1998, 132(2): 295—301.
- [3] Utada H and Munekane H. On galvanic distortion of regional three dimensional magnetotelluric impedances[J]. Geophys J Int, 2000, 140(2): 385—398.
- [4] 王书明. 表面局部三维大地电磁曲线畸变校正——MT畸变校正阻抗张量分解方法[J]. 西北地震学报, 1998, 20(4):

1—11.

- [5] Lilley F E . Magnetotelluric analysis using Mohr circles[J] . Geophysics, 1993, 58(10): 1498—1506.
- [6] 谭捍东, 陈乐寿, 魏文博, 等. 先进的大地电磁资料处理和反演方法在 INDEPTH-MT 中的应用研究[J] . 现代地质, 1997, 11(3): 393—400.
- [7] Smith T S . Understanding telluric distortion matrices[J] . Geophys J Int, 1995, 122(1): 219—226.
- [8] Groom R W and Bahr K . Correction for near surface effects; Decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities; A tutorial[J] . Surv Geophys, 1992, 13(1): 341—379.
- [9] Chave A D and Smith J T . On electric and magnetic galvanic distortion tensor decomposition[J] . J Geophys Res, 1994, 99 (B3): 4669—4682.
- [10] Zhang P, Roberts R G and Pedersen L B . Magnetotelluric strike rules[J] . Geophysics, 1987, 52(3): 267—278.
- [11] 魏胜, 王家映, 罗志琼. 全 MT 张量阻抗分解及其应用[A] . 见: 应用地球物理学进展[C] . 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [12] 晋光文, 孙洁, 王继军. 地形对大地电磁资料的影响[J] . 地震地质, 1997, 19(4): 363—369.
- [13] 晋光文, 赵国泽, 徐常芳, 孙洁. 二维倾斜地形对大地电磁资料的影响与地形校正[J] . 地震地质, 1998, 20(4): 454—458.
- [14] 王家映. 石油电法勘探[M] . 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [15] Groom R W and Bailey R C . Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion[J] . J Geophys Res, 1989, 94(B2): 1913—1925.
- [16] Groom R W and Bailey R C . Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decompositions[J] . Geophysics, 1991, 56(4): 496—518.

A SIMPLE DECOMPOSITION METHOD OF DISTORTION IN MAGNETOTELLURIC IMPEDANCE TENSOR

WANG Li-feng, JIN Guang-wen, SUN Jie, BAI Deng-hai
(*Institute of Geology, CSB, Beijing 100029, China*)

Abstract: The necessity of establishing a 3d/2d model is discussed. Owing to introducing the model, the full electric and magnetic field galvanic distortion tensor is simplified. The effects of a surface 3-d conductivity anomaly on a regional 2-d structure is derived by comparing data through Swift rotation with data through Bahr decomposition, then is expressed by a distortion matrix. The effect of a local anomaly can be separated from a regional structure by researching and decomposing the distortion tensor matrix. So it is available to find out the regional structure dimensionality, classification of the local structure and the effect of it on the regional structure. Eventually, the simple distortion decomposition method is tested through three sites of practical data.

Key words: Magnetotelluric sounding; 3d/2d model; Impedance tensor; Distortion decomposition