

蔡军涛, 赵国泽, 徐锡伟. 大地电磁局部畸变异常特征三维数值模拟研究 [J]. CT 理论与应用研究, 2017, 26(4): 391-402. doi:10.15953/j.1004-4140.2017.26.04.01.

Cai JT, Zhao GZ, Xu XW. The study of local distortion in magnetotelluric using three-dimensional modeling [J]. CT Theory and Applications, 2017, 26(4): 391-402. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140.2017.26.04.01.

大地电磁局部畸变异常特征三维数值模拟研究

蔡军涛^{1, 2}✉, 赵国泽³, 徐锡伟¹

1. 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京, 100029
2. 核工业北京地质研究院, 北京, 100029
3. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京, 100029

摘要: 局部畸变问题曾经困扰大地电磁资料反演解释几十年, 大地电磁三维数值模拟技术的发展为剖析局部畸变特点和得到可靠的反演成像结果提供了技术基础。本文采用三维数值模拟成像方法对典型三维局部畸变模型进行模拟分析。三维数值模拟结果显示: 电场分量垂直电性分界面的极化模式视电阻率曲线(对应二维情况下 TM 模式)在穿越低阻异常体界面时, 曲线会先上移后下移, 而在穿越高阻异常体界面时, 曲线会先下移后上移, 这与电性分界面处积累面电荷产生的二次电场有关。三维模型中 XY 模式、YX 模式视电阻率和相位在三维异常体附近的水平变化是呈现近似垂向对称的, 该现象与电场垂直跨越电性界面时视电阻率的变化规律是吻合的, 当测线分别沿 X 方向和 Y 方向展布时, 三维情况下的 XY 和 YX 模式分别对应二维情况下的 TM 模式。低阻小异常体对区域构造响应的畸变影响比高阻小异常体要严重。低阻小异常体对二维区域响应的两种极化模式视电阻率和相位都有非常明显的畸变影响, 相比较而言对 TE 模式的畸变要大于 TM 模式, 因此我们在做二维反演解释时, 可优先考虑拟合 TM 模式数据。位于小异常体中心上方测点的三维畸变响应虽然与对应真实二维区域响应的差异比较大, 但可以等效于某种二维模型响应, 这种由局部畸变造成的假二维响应在实际野外数据的解释中是需要注意的。

关键词: 大地电磁; 三维; 局部畸变; 数值模拟

doi:10.15953/j.1004-4140.2017.26.04.01 中图分类号: 0242; TP 391.41 文献标志码: A

大地电磁测深方法在深部地球动力学、矿产资源、环境和地质灾害等科学领域的研究中均做出巨大贡献, 已经取得了大量的成果^[1-7], 其在探测板块边界地震和板内地震发震构造方面具有越来越重要的作用^[8-12]。目前大地电磁常用的反演解释方法是二维的, 然而由于实际地球地质结构的复杂性, 野外的电性结构一般是三维的。但在大地电磁常用的探测频率范围内, 对于具有一定走向延伸的地质构造还是可以近似为二维构造。大地电磁实际野外数据观测时, 近地表附近往往存在一些小的三维异常地质体, 其几何尺度远远小于观测频率电磁波的趋肤深度, 这些小异常体会导致其附近测点的大地电磁响应曲线发生严重的畸变, 被称为“局部畸变”现象^[13-14]。

如果对这种受到局部畸变的观测资料作二维反演解释, 得到的电性结构一般是错误的。要得到地下真实的区域电性结构, 必须从实际观测数据中分离出区域构造响应和局部

畸变效应。要分离局部畸变效应，首先就必须了解局部畸变的变化特征和规律，然后才能评估消除局部畸变后的区域电性构造的可靠程度。但是要研究局部畸变对区域构造响应的影响，必须计算含有局部畸变异常体的电性结构的电磁场响应。

局部畸变问题实际上是一个三维问题，对于较简单的一维区域结构上叠加的三维小异常体，可采用解析表达式进行求解计算^[15]。但对于更一般的区域构造上叠加的三维小异常体模型，需要采用三维数值模拟成像方法，这就给研究局部畸变带来了比较大的困难。近几年随着计算机硬件和高维数值模拟算法的飞速发展，三维电磁场的数值模拟技术已经比较成熟^[16-18]，为研究局部畸变问题奠定了计算基础。

本文首先介绍局部畸变的理论基础，并依据野外常见的地质构造，设计了较典型的局部畸变模型，采用三维有限差分数值模拟方法^[19-20]进行模拟计算，分析和讨论局部畸变的影响特征和规律。

1 局部畸变理论

大地电磁测深所采用的频段范围，在忽略位移电流的情况下，可得到观测电场 $E(r)$ 满足的微分方程为^[21]：

$$\nabla \times \nabla \times E(r) = i\omega\mu\sigma(r)E(r) \quad (1)$$

电导率为 $\sigma_k(r)$ 的第 k 个近地表局部的三维电性小异常体产生的电场 $E_s(r)$ (r 表示位置) 满足的微分方程为

$$\nabla^2 E_s(r) + i\omega\mu\sigma_0(r)E_s(r) = -i\omega\mu\delta\sigma_k(r)E(r) \quad (2)$$

其中 $\sigma_0(r)$ 为区域构造的背景电导率， $\delta\sigma_k(r) = \sigma_k(r) - \sigma_0(r)$ 为三维小异常体与区域构造的电导率差异。以剩余电荷形式存在的异常场源的 $\delta\sigma_k(r)$ ，当受到外界电磁场作用时会形成散射电场（也称异常场）。根据场的叠加原理将所有异常体产生的散射电场叠加起来，再加上区域电场，就得到一般情况下观测的总电场 $E(r)$ ：

$$\begin{aligned} E(r) &= E_0(r) + i\omega\mu \sum_k \int_{V_k} g(r, r') \delta\sigma_k(r') E(r') dV' + \\ &\quad \frac{1}{\sigma_0(r)} \nabla \nabla \cdot \sum_k \int_{V_k} g(r, r') \delta\sigma_k(r') E(r') dV' = E_0(r) + e_l(r) + e_g(r) \end{aligned} \quad (3)$$

公式 (3) 中第一项 $E_0(r)$ 对应区域结构的背景电场，也就是一次场或正常场。第二项感应散射分量 $e_l(r)$ 和第三项电流散射分量 $e_g(r)$ 共同组成异常场（或畸变场），分别代表异常体内产生的电流影响和电荷影响。分析计算表明，感应型畸变 $e_l(r)$ 主要对高频段电磁数据有影响，电流型畸变 $e_g(r)$ 主要对低频段电磁数据有影响，与通常认识的畸变特点一致。

求解 (3) 式一般采用 Born 近似，该方法要求穿过不均匀异常体的总电场保持不变，这样异常体内部总电场可用区域电场值近似代替，这就对小异常体的尺寸有一定限制，一般要求远小于大地电磁常用观测频段范围的高频数据的趋肤深度。对 (3) 式进行推导可以得到局部畸变情况下，观测阻抗 $Z(r)$ 和区域阻抗 $Z_2(r)$ 之间的关系式：

$$\overrightarrow{Z(r)} = \overrightarrow{C(r)Z_2(r)} \left(I + \overrightarrow{D(r)Z_2(r)} \right)^{-1} \quad (4)$$

公式 (4) 表示大地电磁阻抗张量在构造主轴方向坐标系中同时包含电场和磁场畸变的

模型。在满足电流型畸变的频段, $\overrightarrow{C(r)}$ 是与频率无关的实常数矩阵, 表示对区域水平电场的电流型畸变作用。电流型畸变张量 $\overrightarrow{C(r)}$ 只会造成区域阻抗响应振幅曲线的上下平行移动(对数坐标下), 而相位不变。在满足感应型畸变的频段, 磁场畸变张量 $\overrightarrow{D(r)}$ 与频率相关, 表示对水平磁场的畸变作用, 其通常会使区域阻抗的振幅和相位都发生变化。磁场畸变项 $\overrightarrow{D(r)Z_2(r)}$ 随着频率的降低而衰减, 因此在低频段其影响可忽略不计。

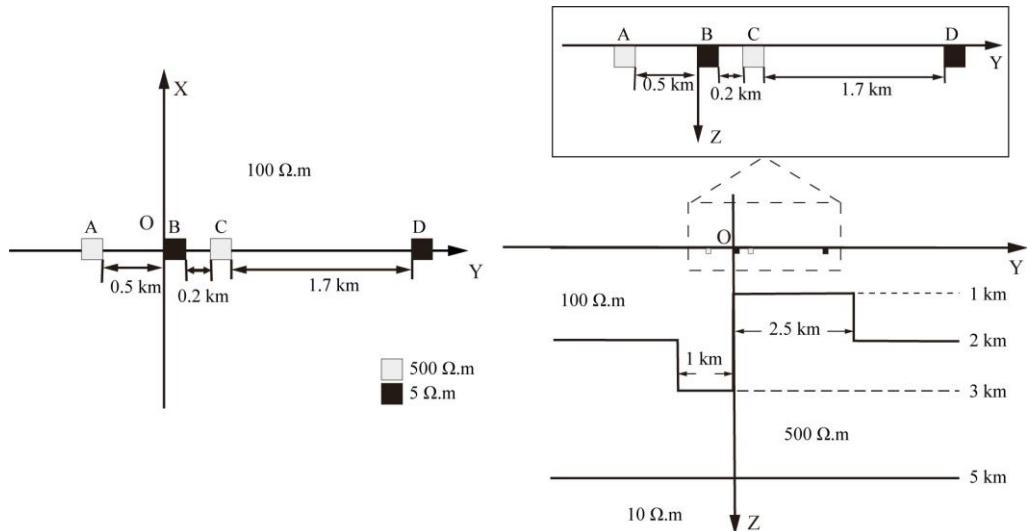


图 1 局部畸变模型 1 示意图

Fig. 1 The diagram of local distortion model 1

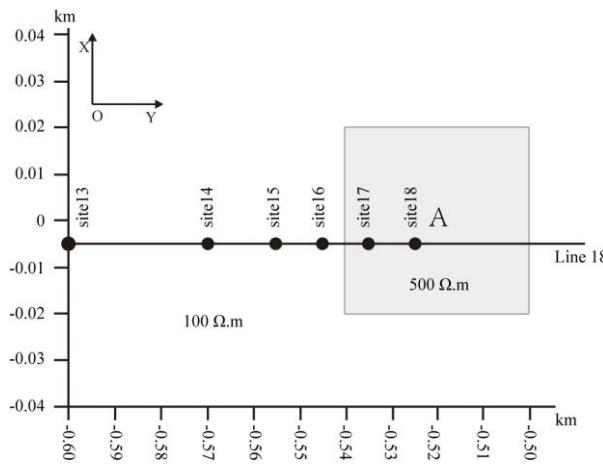


图 2 高阻小异常体 A 附近测线和测点位置图

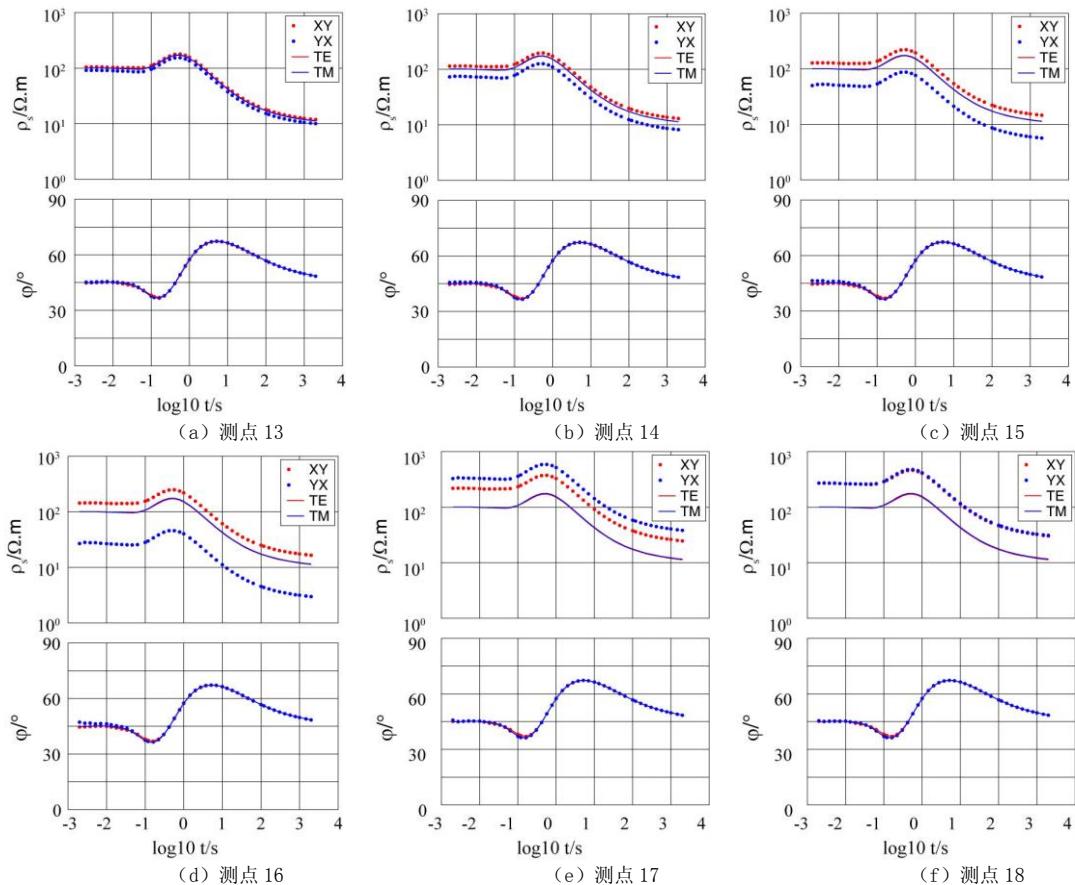
Fig. 2 Profile across high resistivity anomaly A and sites location

2 局部畸变特征分析与讨论

基于上节论述的局部畸变模型理论, 根据野外常见的区域地质构造, 本文设计了两个较典型局部畸变模型, 采用三维数值模拟成像算法计算模型的三维畸变响应, 三维模型响应数据管理和分析在 MT-Pioneer 软件中进行^[22]。以下分别分析讨论两个模型的畸变影响特征。

2.1 三维局部畸变模型 1

模型 1 如图 1 所示, 区域二维构造为野外经常遇到的地垒和地堑组合, 在地表放置 4 个小异常体 (2 个高阻体和 2 个低阻体), 异常体为 40 m 的立方体, 高阻和低阻异常体的电阻率分表为 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $5 \Omega \cdot \text{m}$ 。三维模型采用的计算网格为 X 方向 (走向方向) 36 个网格, Y 方向 (倾向方向) 83 个网格, Z 方向 54 个网格。计算频率范围 $500 \text{ Hz} \sim 2000 \text{ s}$, 频点数 45 个。为了比较与二维区域响应的差异, 同时计算不含地表小异常体的区域二维响应。



注: 图中红色实线表示不含小异常体的二维 TE 模式数据, 蓝色实线表示不含小异常体二维 TM 模式数据; 红色圆圈表示三维 XY 模式数据, 蓝色圆圈表示三维 YX 模式数据

图 3 高阻小异常体 A 附近 Line18 测线的部分测点曲线

Fig. 3 Apparent resistivity and phase along profile Line18 across high resistivity anomaly A

图 2 和图 3 分别是位于高阻小异常体 A 附近的测线展布和部分测点曲线图。从测点曲线图中可以看到 (图 3), 在距离高阻异常体左边界较远的位置 (测点 13) 三维响应和对应二维区域响应基本相同 (此时三维 XY 模式对应二维 TE 模式数据, 三维 YX 模式对应二维 TM 模式数据)。随着观测点靠近高阻异常体左边界 (测点 14), YX 模式相位曲线相比二维区域响应的 TM 模式曲线没有变化, 而视电阻率曲线开始向下平移。当观测点距离异常体左边界最近时 (测点 16, 位于异常体外侧), YX 模式视电阻率值曲线减小的幅度最大。在小异常体内部的第一个观测点 (测点 17), YX 模式视电阻率值会增加。更加靠近异常体中心的观

测点(测点 18)其视电阻率值会稍微减小,但还是会大于对应的二维区域响应 TM 模式视电阻率值。与 YX 模式视电阻率曲线的较大差异变化相比,XY 模式的视电阻率曲线与相对应二维 TE 模式视电阻率曲线的差异要小一些,只是在位于异常体中心观测点(测点 18)增加幅度较大。从图中可以清楚地看到,高阻小异常体对相位的畸变要小于视电阻率,只是在部分测点(测点 15 和 16)YX 模式相位曲线的高频段发生较轻微的畸变。从分析可以看到高阻小异常体对二维区域响应造成的畸变比较小,而且 TE 模式数据受到的高阻异常体的畸变作用要比 TM 模式数据稍小一些。

图 4 和图 5 分别是位于低阻小异常体 D 附近的测线展布和部分测点曲线图。在低阻异常体左边界附近的 61 号测点(图 5a),YX 模式和 XY 模式视电阻率曲线开始受到地表小异常体的畸变影响,相对其对应二维响应视电阻率曲线分别上移和下移。在距离异常体左边界最近的位置(测点 64),YX 模式视电阻率值增加幅度最大。进入小异常体内部后,YX 模式视电阻率值会减小,并在测点 65 达到最小值,此后视电阻率值又会稍微增加。与 YX 模式视电阻率曲线变化规律不同,XY 模式的视电阻率值一直减小,在异常体中心位置(测点 66)达到最小值。在异常体边界外侧的观测点(测点 61~64),XY 模式视电阻率数据与对应二维区域响应视电阻率数据差异幅度要大于 YX 模式数据,在存在局部畸变的高频段,XY 模式相位曲线与对应二维区域响应相位数据的差异也要大于 YX 模式相位数据。

XY 和 YX 模式数据与二维区域响应的差异在位于低阻异常体 D 内部(测点 65 和 66)最大,尤其是相位数据的高频段部分。测点 65 和 66 的三维相位曲线基本相似,两种模式的相位曲线在高频部分是合拢的。测点 66 的视电阻率曲线形态和二维区域响应的视电阻率曲线几乎完全类似,而测点 65 三维视电阻率曲线和二维区域响应曲线形态的差异主要是静位移造成的。在不知道真实电性结构的情况下,如果单纯看测点 65 和 66 的三维视电阻率和相位曲线,我们很可能会认为是某个二维模型的响应,这种由局部畸变造成的假二维响应在实际野外数据的解释中需要注意。

在测线沿着 Y 方向(东西方向)布设时,为何三维 YX 模式曲线(对应二维情况下的 TM 模式)在跨过高阻小异常体边界时会先向下平移,然后再向上平移,而在跨过低阻小异常体边界时,会先向上平移再向下平移?以下从其产生的物理机制上进行简单的分析:将一个高阻或低阻异常体放置在背景电导率为 σ_0 的均匀介质中,在准静态条件下(忽略位移电流),根据高斯定理和电流连续方程,在电导率突变界面处积累面电荷密度 ρ_s 为^[23]

$$\rho_s = -\epsilon_0 \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_1} \bar{E}_0 \quad (5)$$

其中 \bar{E}_0 为一次电场, σ_0 为区域背景电导率, σ_1 为异常体电导率。当区域介质中的异常体为高阻时($\sigma_1 < \sigma_0$),则有 $\rho_s > 0$,因此在高阻异常体的右边界会产生负电荷,而在高阻异常体的左边界将产生正电荷(图 6(a))。当区域介质中的异常体为低阻时,与高阻时相反,正电荷将会积累在异常体的右边界附近,而负电荷则会在左边界附近积累(图 6(b))。积累面电荷产生的二次电场 \bar{E}_a 为^[24]:

$$\bar{E}_a = -\frac{\partial A_s}{\partial t} - \nabla \phi \quad (6)$$

式中 A_s 表示积累面电荷产生的二次磁矢量位, ϕ 为积累面电荷产生的静电位。当异常体的尺度远远小于电磁场趋肤深度时,二次电场表达式(式 6)中的第一项可以忽略,则二次电

场变成与频率无关的量。根据库仑定律, 这种情况下由静电荷产生的二次电场与电荷成正比, 所以二次电场与一次电场成正比关系, 并具有相同的相位。这就造成视电阻率曲线在双对数坐标中发生上下平移, 而相位则不变。当异常体的几何尺度与电磁场趋肤深度差不多时, 二次电场公式中的二次磁矢量位不能被忽略, 此时相位曲线也会发生变化。

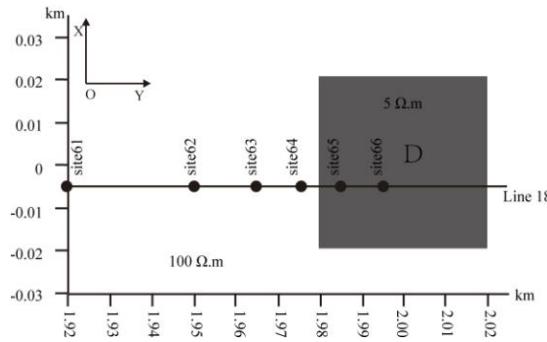
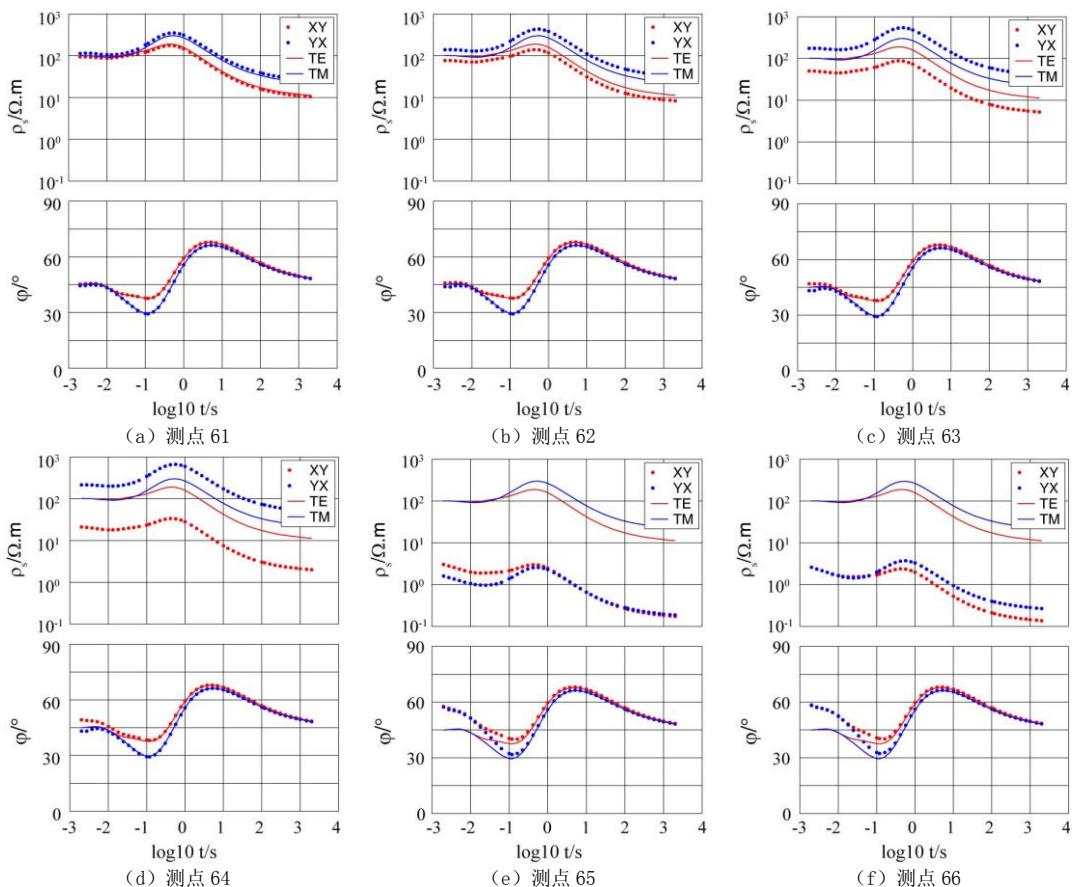


图 4 低阻小异常体 D 附近测线和测点位置图

Fig. 4 Profile across low resistivity anomaly D and sites location



注: 图中红色实线表示不含小异常体的二维 TE 模式数据, 蓝色实线表示不含小异常体二维 TM 模式数据; 红色圆圈表示三维 XY 模式数据, 蓝色圆圈表示三维 YX 模式数据。

图 5 低阻小异常体 D 附近 Line18 测线的部分测点曲线

Fig. 5 Apparent resistivity and phase along profile Line18 across low resistivity anomaly D

大地电磁野外观测的电场通常是一次电场和二次电场的矢量叠加场。在高阻异常体表面积累的面电荷产生的二次电场, 在异常体上方其与一次电场方向相同, 造成观测总场增大; 而在异常体的两端边界, 一次电场与二次电场的方向是相反的, 造成观测总场减小(图 6 (a)); 当异常体为良导时(图 6 (b)), 与高阻时相反, 积累面电荷在异常体上方产生的二次电场与一次电场是反向的, 造成观测总场减小。在异常体的两端边界, 积累面电荷产生的二次电场与一次电场是同向的, 造成观测总场增大。

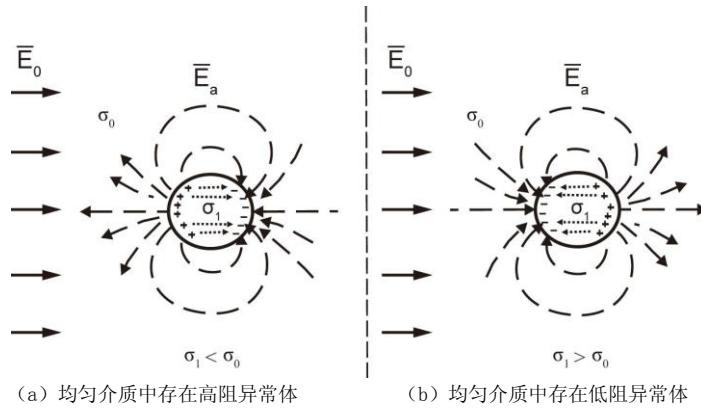


图 6 局部电性异常体引起的畸变效应

Fig. 6 Local distortion induced by local electrical anomalies

在三维情况下, 任何一种极化模式数据其电场都可能会穿越电性界面, 因此不管哪种极化模式曲线, 只要电场垂向穿越电性界面, 视电阻率曲线就会按上述规律变化。模型 1 视电阻率沿 X 方向垂直切片图结果也显示了这种变化规律(图 7), 此时 XY 模式的电场垂直跨过低阻异常体界面, 其视电阻率变化情况是: 在异常体边界附近先增大, 进入异常体内部后迅速减小, 然后稍微增大。而对于高阻体异常体情况, YX 模式视电阻率曲线的变化规律则是相反的。以上分析的是三维情况下的数据, 对于二维构造, 此时 TM 模式下的电场是垂直穿越电性界面的, 因此在电性异常体附近 TM 模式视电阻率曲线是按上述规律变化。

对畸变模型 1 的分析表明: 低阻小异常体对区域构造响应的畸变影响比高阻小异常体要严重得多。低阻小异常体对二维区域响应的两种极化模式视电阻率和相位都有非常明显的畸变影响, 相比较而言对 TE 模式的畸变要大于 TM 模式。这可能是由于在低阻体内部电磁波的趋肤深度变小, 造成电磁波的趋肤深度与小异常体的几何尺度接近, 此时就可能会产生感应型畸变, 位于低阻小异常体附近测点相位曲线高频段的变化验证了这种可能性。

2.2 三维局部畸变模型 2

局部畸变模型 2 示意图见图 8, 区域二维结构为直立断层, 断层位于 $y=0$ 处, 断层右侧是电阻率为 $1\Omega\cdot\text{m}$ 的均匀半空间; 断层左侧为三层结构, 顶层是电阻率为 $10\Omega\cdot\text{m}$ 的覆盖层, 厚度为 5 km, 中间层电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$, 厚度 45 km, 底部为 $1\Omega\cdot\text{m}$ 的均匀半空间。小异常体为边长 1 km 的立方体, 电阻率为 $0.5\Omega\cdot\text{m}$, 位于断层左侧表层, 埋深为 50 m, 异常体的右边界距离直立断层 10 km。三维正演模拟成像采用的计算网格为 X 方向 36 个网格, Y 方向 56 个网格, Z 方向 68 个网格。计算频率范围 $1\sim 1000$ s, 频点数 30 个。

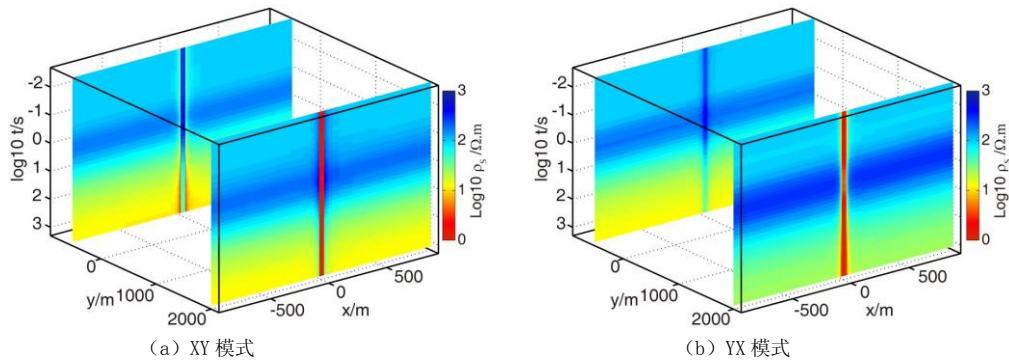
注: 图中切片的位置分别为 $y = -520$ m 和 $y = 2000$ m

图 7 模型 1 视电阻率响应 X 方向切片图

Fig. 7 Cross-section of apparent resistivity for model 1 along X direction

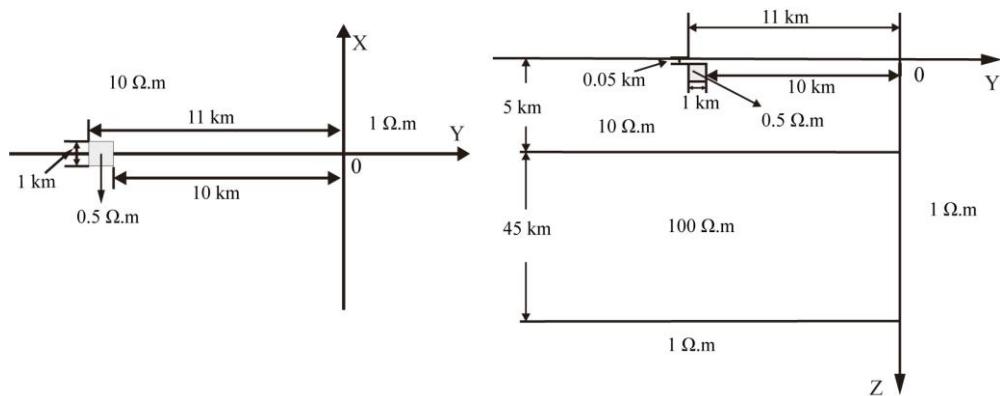
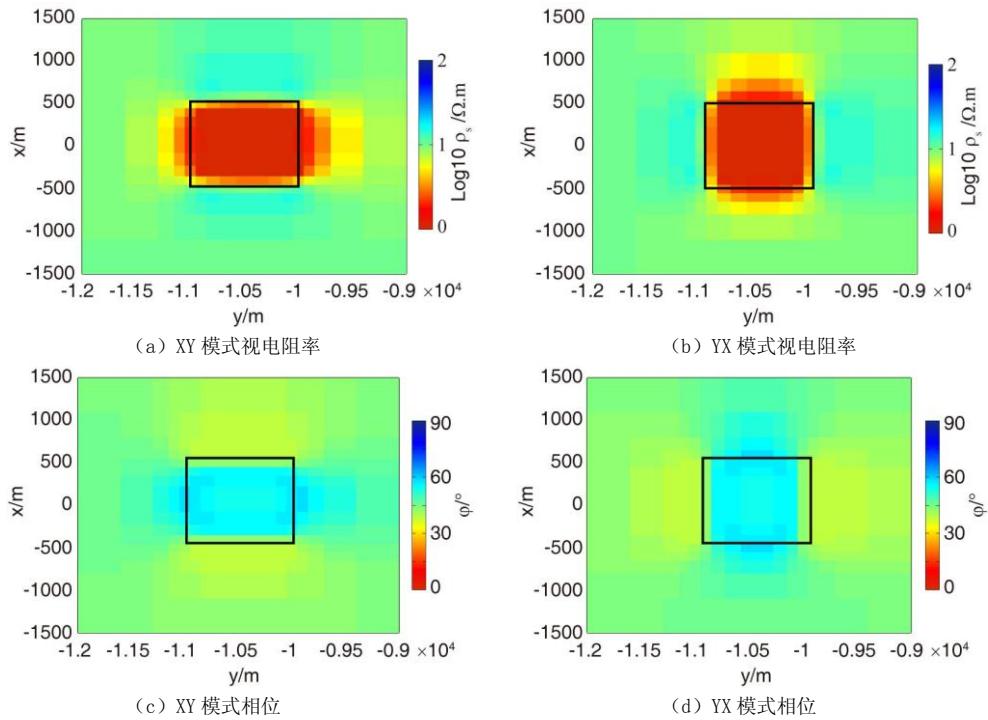
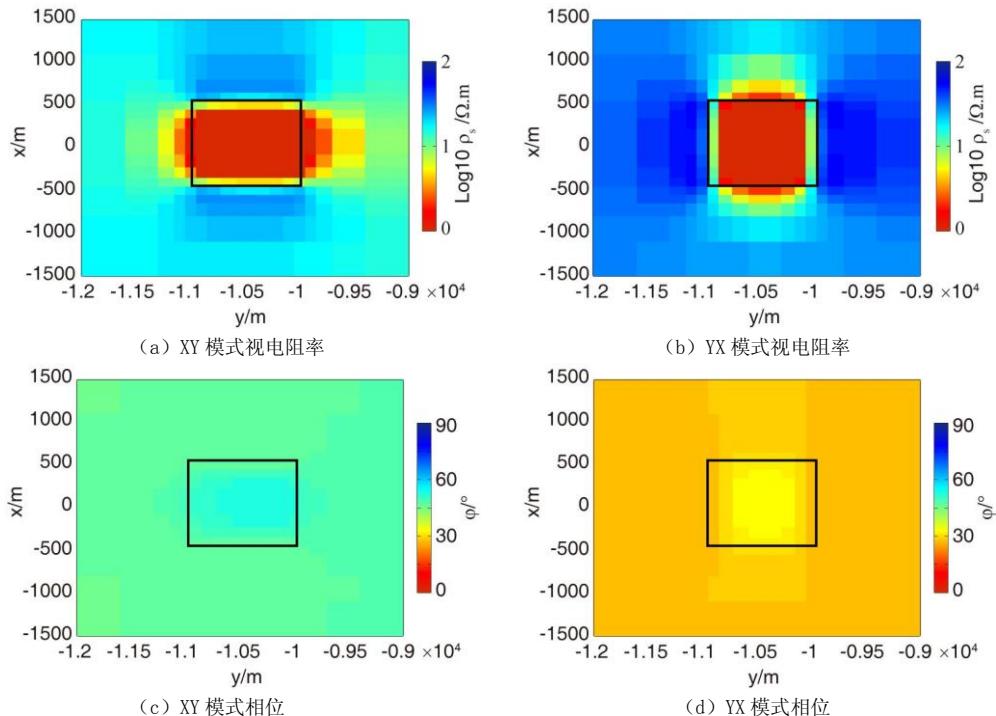


图 8 局部畸变模型 2 示意图

Fig. 8 The diagram of local distortion model 2

图 9 和图 10 分别是周期 $t = 1$ s 和 100 s 的 XY 和 YX 模式视电阻率和相位水平切片图, 图中黑框表示实际异常体的范围。XY 模式视电阻率平面图中 (图 9 (a) ~ 图 9 (b) 和图 10 (a) ~ 图 10 (b)), 在东西方向 (Y 方向) 低阻异常范围扩大, 在南北边界处出现视电阻率增大区域; 在 YX 模式视电阻率平面图中, 在 X 方向 (南北方向) 低阻异常范围扩大, 在东西边界处出现视电阻率值增大的区域, 该现象与前面总结的电场垂直跨越电性界面时视电阻率的变化规律是吻合的。因为二维 TM 模式就是对应于电场垂直于构造走向方向, 对于文中的三维模型, 当二维测线沿着 Y 方向展布时, 电场的 E_y 分量垂直于异常体边界, 此时三维情况下的 YX 模式响应对应于二维情况下的 TM 模式响应, 而当二维测线沿着 X 方向展布时, 电场的 E_x 分量垂直于异常体边界, 此时三维情况下的 XY 模式响应对应于二维情况下的 TM 模式响应。

在相位平面图中 (图 9 (c) ~ 图 9 (d) 和图 10 (c) ~ 图 10 (d)), XY 模式数据在东西方向相位高值异常范围扩大, 在南北边界处存在相位值减小区; YX 模式数据在南北方向相位高值异常范围扩大, 在东西边界处存在相位值减小区。相比视电阻率异常变化存在于较广泛的频段范围, 相位受到的畸变只是在高频段比较明显, 当周期为 100 s 时, 相位畸变影响已经非常微弱了。

图 9 周期 $t=1$ s 水平切片图Fig. 9 Horizontal slice at period $t=1$ s图 10 周期 $t=100$ s 水平切片图Fig. 10 Horizontal slice at period $t=100$ s

3 结论

本文依据局部畸变理论, 根据野外常见的区域地质构造, 设计了两个较典型局部畸变模型, 采用三维数值模拟成像算法对局部畸变模型进行模拟和剖析, 研究发现:

电场分量垂直电性分界面的极化模式视电阻率曲线(对应二维情况下 TM 模式)在穿越低阻异常体界面时, 曲线会先上移后下移, 而在穿越高阻异常体界面时, 曲线会先下移后上移, 这与电性分界面处积累面电荷产生的二次电场有关。在高阻异常体表面积累的面电荷产生的二次电场, 在异常体上方其与一次电场方向相同, 造成观测总电场增大。而在高阻异常体的两端边界, 一次电场与二次电场的方向是相反的, 造成观测总电场减小; 当异常体为良导时, 积累面电荷在异常体上方产生的二次电场与一次电场是反向的, 造成观测总电场减小。在良导异常体的两端边界, 积累面电荷产生的二次电场与一次电场是同向的, 造成观测总电场增大。

在三维视电阻率平面图中, XY 模式数据在东西方向(Y 方向)低阻异常范围扩大, 在南北边界处出现视电阻率增大区域; YX 模式数据在南北方向(X 方向)低阻异常范围扩大, 在东西边界处出现视电阻率值增大的区域。在三维相位平面图中, XY 模式数据在东西方向相位高值异常范围扩大, 在南北边界处存在相位值减小区; YX 模式数据在南北方向相位高值异常范围扩大, 在东西边界处存在相位值减小区。两种极化模式的视电阻率和相位水平变化呈现垂向对称。该现象与电场垂直跨越电性界面时视电阻率的变化规律是吻合的, 当测线分别沿 X 方向和 Y 方向展布时, 三维情况下的 XY 和 YX 模式分别对应二维情况下的 TM 模式。

低阻小异常体对区域构造响应的畸变影响比高阻小异常体要严重的多。低阻小异常体对二维区域响应的两种极化模式视电阻率和相位都有非常明显的畸变影响, 相比较而言对 TE 模式的畸变要大于 TM 模式, 因此我们在做二维反演解释时, 可优先考虑拟合 TM 模式数据。

位于小异常体中心上方测点的三维畸变响应与对应二维区域响应的差异比较大, 但可以等效于某种二维模型响应, 这种由局部畸变造成的假二维响应在实际野外数据的解释中需要注意。局部畸变所具有的特点, 对于其他电磁方法资料的解释也具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 赵国泽, 詹艳, 王立凤, 等. 鄂尔多斯断块地壳电性结构[J]. 地震地质, 2010, 32(3): 345-359. Zhao GZ, Zhan Y, Wang LF, et al. Electric structure of the crust beneath the Ordos fault block[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(3): 345-359. (in Chinese).
- [2] 汤吉, 邓前辉, 赵国泽, 等. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 191-200. Tang J, Deng QH, Zhao GZ, et al. Electric conductivity and magma chamber at the Tianshi volcano area in Changbaishan mountain[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(2): 191-200. (in Chinese).
- [3] Xu YX, Yang B, Zhang S, et al. Magnetotelluric imaging of a fossil paleozoic intraoceanic subduction zone in western Junggar, NW China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(6): 4103-4117.
- [4] Zhao GZ, Unsworth MJ, Zhan Y, et al. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data[J]. Geology, 2012, doi:10.1130/G33703.1
- [5] Zhan Y, Zhao GZ, Unsworth M, et al. Deep structure beneath the southwestern section of the

- Longmenshan fault zone and seimogenetic context of the 4.20 Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(28): 3467-3474.
- [6] Bai DH, Unsworth MJ, Meju MA, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 358-362.
- [7] Key K, Constable S, Liu L, et al. Electrical image of passive mantle upwelling beneath the northern East Pacific Rise[J]. Nature, 2013, 495(7442): 499-502.
- [8] Ichihara H, Uyeshima M, Sakanaka S, et al. A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(9): L9301.
- [9] Gürer A, Bayrak M. Relation between electrical resistivity and earthquake generation in the crust of West Anatolia, Turkey[J]. Tectonophysics, 2007, 445(1): 49-65.
- [10] Ogawa Y, Mishina M, Goto T, et al. Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(19): 3741-3744.
- [11] Becken M, Ritter O, Bedrosian PA, et al. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault[J]. Nature, 2011, 480(7375): 87-90.
- [12] Türkoglu E, Unsworth M, Bulut F, et al. Crustal structure of the North Anatolian and East Anatolian fault systems from magnetotelluric data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2015, 241: 1-14.
- [13] Jiracek GR. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction[J]. Surveys in Geophysics, 1990, 11(2): 163-203.
- [14] 赵国泽, 汤吉, 刘铁胜, 等. 山西阳高-河北容城剖面大地电磁资料的初步解释——阻抗张量分解技术及其应用[J]. 地震地质, 1996, 18(1): 66-74.
- Zhao GZ, Tang J, Liu TS, et al. Preliminary interpretation of MT data along profile from Yanggao to Rongcheng: Application of decomposition of MT impedance tensor[J]. Seismology and Geology, 1996, 18(1): 66-74. (in Chinese).
- [15] Groom RW, Bailey RC. Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decompositions[J]. Geophysics, 1991, 56(4): 496-518.
- [16] Kruglyakov M, Geraskin A, Kuvshinov A. Novel accurate and scalable 3-D MT forward solver based on a contracting integral equation method[J]. Computers and Geosciences, 2016, 96: 208-217.
- [17] Farquharson CG, Mienopust MP. Three-dimensional finite-element modelling of magnetotelluric data with a divergence correction[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(4): 699-710.
- [18] Avdeev DB. Three-dimensional electromagnetic modeling and inversion from theory to application[J]. Surveys in Geophysics, 2005, 26(6): 767-799.
- [19] Mackie RL, Madden TR. Conjugate direction relaxation solutions for 3-D magnetotelluric modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(7): 1052-1057.
- [20] Mackie RL, Madden TR, Wannamaker PE. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations—Theory and comparisons to integral equation solutions[J]. Geophysics, 1993, 58(2): 215-226.
- [21] 晋光文, 孔祥儒. 大地电磁阻抗张量的畸变与分解[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- Jin GW, Kong XR. The distortion and decomposition of magnetotelluric impedance tensor[M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese).
- [22] 陈小斌, 赵国泽, 詹艳. MT 资料处理与解释的 Windows 可视化集成系统[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(Suppl.): 11-16.
- Chen XB, Zhao GZ, Zhan Y. A visual integrated windows system for MT data process and interpretation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(S1): 11-16. (in Chinese).
- [23] Wannamaker PE, Hohmann GW. Electromagnetic induction studies[J]. Reviews of Geophysics, 1991, 29(5): 405-415.
- [24] Kaufman AA. Tutorial: Distribution of alternating electrical charges in a conducting medium[J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33(2): 171-184.

The Study of Local Distortion in Magnetotelluric Using Three-dimensional Modeling

CAI Jun-tao^{1,2}✉, ZHAO Guo-ze³, XU Xi-wei¹

1.Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China, 100029

2.Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029

3.State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China, 100029

Abstract: Local distortion by small-scale structures has impeded the interpretations of the magnetotelluric method (MT) for several years. The developing of three-dimensional (3D) MT modeling makes it is possible for the study of the local distortion and reliable imaging of the subsurface electrical conductivity structure. In this paper, several general 3D local distortion models are designed and model responses are computed by 3D modeling. The apparent resistivity curve of polarization mode with electric field perpendicular to the electrical interface, which is corresponding to TM mode in three-dimensional (2D), will upward shift at first and then downward shift when it across small conductive surface body. While crossing resistive body, the curve will downward shift at first and then upward shift. This phenomenon is associated with secondary electric field caused by the accumulative surface electric charges at the boundaries of the anomaly. In 3D model, the variation in horizontal slice of apparent resistivity and phase for YX mode and XY mode are approximate vertically symmetrical, which is consistent with the case that curves of polarization mode with electric field perpendicular to the electrical interface. When the survey line along the east-west direction, the YX mode of the 3D response corresponds to the TM mode in the 2D case. While the survey line along the south-north direction, the XY mode of the 3D response corresponds to the TM mode in the 2D case. The distortion on regional response caused by small conductive inhomogeneous are more severe than that of resistive inhomogeneous. The apparent resistivity and phase of both two polarization modes are obviously affected by local distortion of small conductive anomaly, while the distortion on TM mode response is slightly lesser than that on TE mode caused by electrical anomaly. Therefore, when two-dimensional inversion is used for MT data, it is preferable to fit the TM model data. At the position located directly over the small inhomogeneous, the difference between 3D distortion response and 2D corresponding regional response is much large. But this 3D distortion response can be equivalent to a 2D response. It is more important to pay more attention to this false 2D response caused by local distortion in MT interpretation.

Keywords: magnetotelluric; three-dimensional; local distortion; numerical modeling



作者简介: 蔡军涛✉ (1977—), 男, 中国地震局地质研究所博士后, 主要从事电磁测深方法与应用研究, Tel: 13691398308, 010-62009416, E-mail: cjuntao@126. com。