

doi: 10.11720/wtyht.2015.6.09
胡瑞华,林君,孙彩堂,等.均匀大地 CSAMT 静态效应模拟及其特征研究[J].物探与化探,2015,39(6):1150–1155.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.09>
Hu R H, Lin J, Sun C T, et al. Simulation of CSAMT static effect and research on its characteristics in homogeneous earth[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1150–1155. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.09>

均匀大地 CSAMT 静态效应模拟及其特征研究

胡瑞华, 林君, 孙彩堂, 刘长胜, 周逢道
(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 静态效应是深部探测噪声之一。为深入认识静态效应,以均匀大地为背景,卡尼亚视电阻率为解释参数,分别模拟旁侧和轴侧两种观测方式中含有静态效应的地表响应,得到以下结论:(1)两种观测方式中的静态效应特征表现一致。(2)异常体正上方的测点受干扰程度最大,测点离异常体越远,受干扰程度越小。(3)低阻异常体引起干扰区域的等值线下凹,电阻率越低下凹越明显,高阻异常体引起干扰区域的等值线上凸,但增大异常体的电阻率,等值线上凸的变化并不明显;无论是低阻异常还是高阻异常都会引起干扰区域的中高频段等值线近乎直立。(4)低阻体的静态效应使低频段的标准曲线平行下移,但在中高频段标准曲线平行下移程度与低阻体的电阻率有关,电阻率越低,标准曲线平行下移程度越差,这是由于电阻率较低的异常体在中高频段有较强的电磁感应异常,这种异常被叠加到了静态效应中;而高阻体的静态效应使标准曲线在整个频段上平行上移。研究结果可为静态效应的识别及校正算法的改进提供参考,具有一定的理论和应用价值。

关键词: CSAMT;静态效应;三维异常体;数值模拟;卡尼亚视电阻率

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)06-1150-06

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是在大地电磁法(MT)基础上,为克服 MT 信号弱而采用人工源并通过改变信号频率进行垂直测深的一种地球物理方法^[1-2]。MT 法和 CSAMT 法是深部(>500 m)电磁探测的主要方法,广泛应用于矿产、地热、水资源和油气等领域^[3-4]。由于地下介质的复杂性,大地中近地表电性不均匀体会影响电流密度的分布,从而干扰目标场的观测,这种干扰称为静态效应(或静态位移)^[5],它是深部探测的噪声之一。为了认识静态效应,通常的做法是在一维(层状)大地中构建地表附近的二维或三维电性异常体,分别计算包含异常体的大地响应和不包含异常体(即背景)的大地响应,并对比两者间的差异^[6-8];通过改变异常体的埋深、规模、与测点间的相对位置、观测方式(指旁测或轴向测量)等参数,总结静态效应的特征规律,为实际测量中静态效应的识别提供理论依据。为了消除或压制静态效应,出现了多种校正静态效应的方法,并应用于实测数据处理^[9-16]。

研究静态效应的文献中常给出“静态效应使视

电阻率曲线向上或向下移动一个数值,这个数值与频率无关”的曲线特征^[5,15-16]。由于 CSAMT 中还存在不均匀体的电磁感应异常,研究发现低阻异常体会使中高频段的静态效应曲线有下凹现象。为了深入认识 CSAMT 中的静态效应,以均匀大地为背景,模拟计算含有静态效应的地表响应。

1 CSAMT 测量原理及解释参数的曲线特征

CSAMT 法常使用长导线向地下供一定强度的谐变电流(频率为 $10^{-2} \sim 10^4$ Hz)激励大地,在相距激励源一定距离的区域同步观测电磁场^[4]。对于放置于层状大地表面处的水平电偶极子,其地下任一点的响应场有相应的表达式,采用数字滤波法或高斯求积法可以对场进行求解^[17-18],但在实际应用中需要考虑地形地貌、接收信号的信噪比等因素,导致长导线源并不满足电偶极子的条件。为了仍可使用偶极子场的公式,需要将长导源切分成若干个偶极子源,然后将所有偶极子场进行叠加,从而解决了长导线源响应场的计算问题^[19-20]。

实际工作中,除了井中需要测量垂直地表的电场外,CSAMT 法常需要在大地表面上测量水平方向上的电磁场^[4]。以平行于源的方向为 x 轴,垂直于大地的方向为 z 轴(z 轴正向指向地心),建立右手笛卡尔坐标系(见图 1, AB 为发射源,“ ∇ ”符号为轴向测线和旁侧测线上的观察点, MN 为两相邻观察点的距离),则 CSAMT 法测量的参数通常为 x 方向上的电场分量 E_x 和 y 方向上的磁场分量 H_y 。

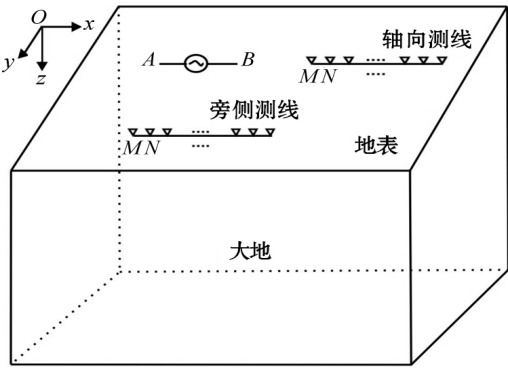


图 1 CSAMT 测量示意

由于电场和磁场为复数,因此可以观测场的幅值和相位。本文中只使用场的幅值参数。为了能够通过大地表面的电磁场反映地下介质的导电性,使用卡尼亚视电阻率^[3]

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

作为解释参数。式中: ρ_s 为视电阻率; $\omega = 2\pi f$,为源信号的角频率, f 为频率; E_x 为 x 方向上的电场分量; H_y 为 y 方向上的磁场分量;真空导磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。由于视电阻率 ρ_s 是有效探测深度范围内地质体电性体积效应的平均反映,因此与地下介质真实电阻率不完全等价,但它仍能间接反映地质构造的特点,这也是选择视电阻率作为解释参数的原因之一。

为了解用式(1)定义的视电阻率曲线特征,给出一组大地模型参数和收发装置参数,分别计算地表处的 E_x 和 H_y ,然后用式(1)计算 ρ_s 。给定的模型参数为:均匀大地电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,发射源长度 $AB = 1\,200 \text{ m}$, AB 中点为源位置,源坐标为 $(-10\,000, 0, 0)$,发射电流为 10 A ,信号频率为 $0.01, 0.1, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1\,024, 2\,048, 4\,096, 8\,192, 9\,600 \text{ Hz}$ 共 17 个频率;两个地表接收点,分别为轴向测线点 $S1(0, 0, 0)$ 和旁侧测线点 $S2(-10\,000, 10\,000, 0)$ 。测点 $S1, S2$ 及大地的频率—视电阻率曲线见图 2。

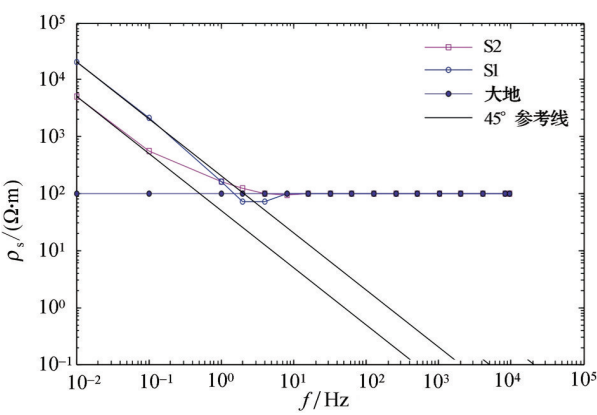


图 2 S1 和 S2 测点视电阻率曲线

从图 2 可以看出:在 $f-\rho_s$ 双对数坐标中,无论是轴向测量($S1$ 点)还是旁侧测量($S2$ 点),在中高频部分,CSAMT 卡尼亚视电阻率与大地真实电阻率 ($100 \Omega \cdot \text{m}$) 基本吻合,符合这一规律的频段称为 CSAMT 的远区频段(如 $S1$ 点远区频段为 16 Hz 以上; $S2$ 点远区频段为 8 Hz 以上;但在低频段随频率的降低,视电阻率逐渐增大,且其曲线以 45° 角上升,符合这一规律的频段称为 CSAMT 的近区频段(如 $S1$ 点的近区频段为 $f \leq 0.1 \text{ Hz}$, $S2$ 点的近区频段为 $f \leq 0.1 \text{ Hz}$);介于远区频段和近区频段的中间频段是 CSAMT 的过渡区频段(如 $S1$ 点的过渡区频段为从 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$, $S2$ 点的过渡区频段为 $0.1 \sim 8 \text{ Hz}$)。显然,过渡区频段和近区频段的卡尼亚视电阻率并不能形象反映大地的真实电性,而“近区频段视电阻率曲线以 45° 上升”的特征是 CSAMT 卡尼亚视电阻率曲线最典型的特征。

2 均匀大地 CSAMT 静态效应模拟

静态效应是由大地中近地表的二维或三维电性不均匀体(即二维或三维异常体)产生。为直观了解异常体对测线的视电阻率拟断面影响及对观测点的干扰,以均匀半空间为背景,并在大地半空间中地表附近放置一个三维异常体,模拟计算它产生的静态效应。解释参数 ρ_s 仍使用公式(1)计算。

为了方便计算,假定三维异常体是电性均匀的长方体异常体,电阻率为 ρ_0 ,尺寸为 $L \times W \times H$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),顶面埋深 d ,中心坐标 (x_0, y_0, z_0) ;均匀半空间电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$;发射源 $AB = 1\,200 \text{ m}$,发射电流为 10 A ,信号频率共 17 个(与前文中给定的频率相同);测量方式分别采用旁测和轴向测量两种^[4]。模拟过程中,采用数字滤波法计算一次电磁场^[17];采用三维交错网格有限差分方程求解二次电场,然后通过二次电场的旋度求解二次磁场^[21]。

2.1 旁测方式下静态效应模拟

旁侧测量(简称为旁测)指测线不在 AB 延长线上,而是在其两侧(见图 1)。为模拟旁测方式中的静态效应,测线布局及异常体位置如图 3 所示。

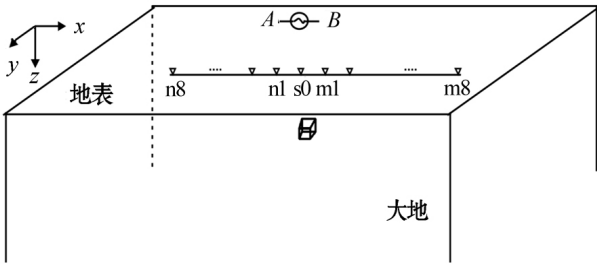
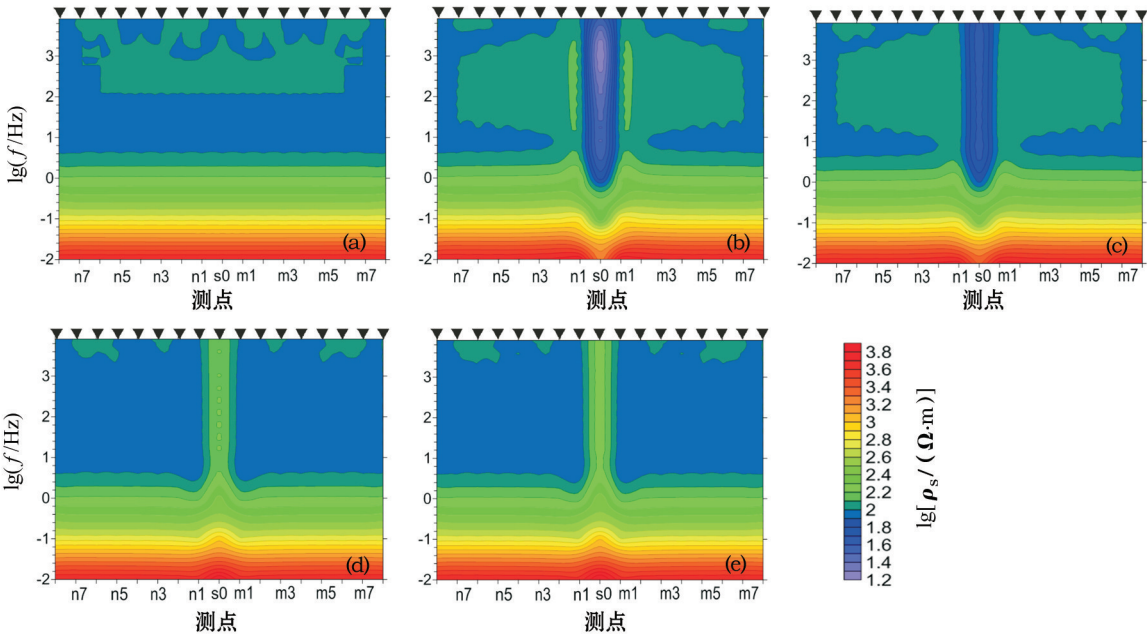


图 3 旁测方式测量示意

图 3 中 AB 中点(即源位置)坐标为 $(0,-10000,0)$;测线上有 17 个测点,点距为 50 m,其中 $n8(-400,0,0)$, $s0(0,0,0)$, $m8(400,0,0)$ 。在 $s0$ 正下方放置一个规模为 $16\text{ m}\times 16\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的异常体,其中心点坐标 $(0,0,18)$,顶面埋深为 $d=8\text{ m}$ 。图 4 给出了异常体电阻率不同时的 ρ_s 拟断面。

图 4 显示,采用旁侧方式测量时,与不含异常体的拟断面(图 4a)相比,离地表 8 m 深的三维异常体对正上方的测点(如 $s0$ 点)和附近测点(如 $n1$ 和 $m1$ 点)拟断面形态都有影响;对 $s0$ 点的影响最明显,对 $n1$ 和 $m1$ 点的影响要比对 $s0$ 的影响小,对远离异常体的测点的影响很小甚至没有影响(如对 $n8$ 和 $m8$ 点几乎没有干扰)。比较图 4b、c 可以看出:异常体



a—不含异常体;b— $\rho_0=1\text{ }\Omega\cdot\text{m}$;c— $\rho_0=10\text{ }\Omega\cdot\text{m}$;d— $\rho_0=1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$;e— $\rho_0=10\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$

图 4 旁测方式测量的 $100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 均匀半空间含三维异常体的电阻率拟断面

为低阻时,受影响区域的拟断面下凹;异常体电阻率越小,受影响区域的拟断面下凹的程度越明显,视电阻率等值线下凹越陡。比较图 4d、e 可以看出:异常体为高阻时,受影响区域的拟断面向上凸;随着异常体电阻率的增大(如 ρ_0 从 $1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 增加至 $10\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$),受影响的拟断面区域上凸的程度变化并不明显,是因为高阻异常体引起的异常存在“饱和效应”(即超过某一临界电阻率值后,即使再增大电阻率值,其异常增加也不明显),故图 4d、e 差异不明显。另外,对比图 4b~图 4e 还可以看出,由于“感应电流”引起的电磁效应异常使得中高频的视电阻率等值线近乎直立,低阻三维体比高阻三维体产生的

静态效应更明显,是因为低阻体引起的电磁异常强于(同样电阻率差比的)高阻体电磁异常。

为了观察旁测方式中三维异常体对测点曲线的干扰,选择异常体正上方的测点 $s0$ 为研究对象。图 5 给出了在 $100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 均匀半空间中三维异常体分别为低阻、高阻时与无异常体时的频率—视电阻率曲线对比。

从图 5 可以看出,异常体的存在使标准曲线(指无异常体时对应的曲线)向下(异常体为低阻时)或向上(异常体为高阻时)移动。低阻体的干扰使标准曲线在低频段是平行移动,但在中高频段是否也平行移动则与低阻体的电阻率有关,电阻率越

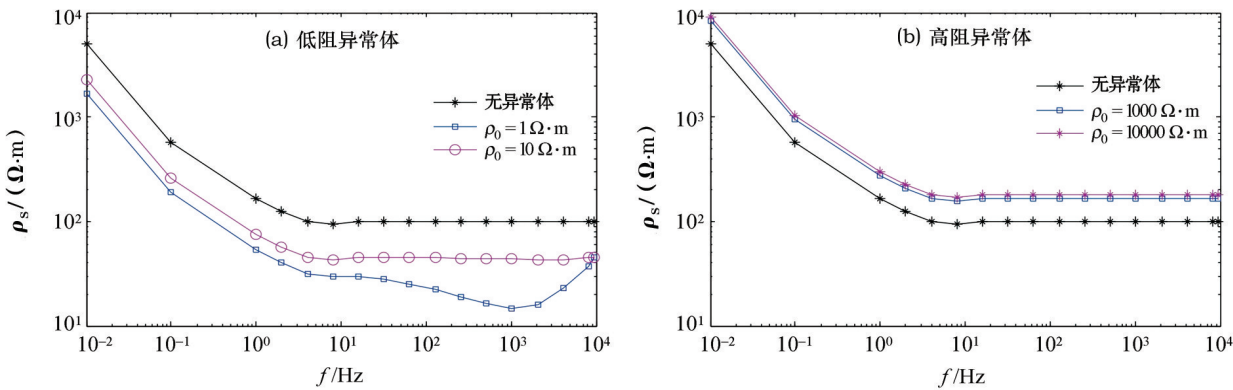


图 5 旁测方式测量下 s0 点的视电阻率曲线

低,平移程度越差,如: $\rho_0 = 1 \Omega \cdot \text{m}$ 时,对应曲线中高于 32 Hz 的曲线段就不符合标准曲线平行移动的规律,这是因为叠加了中高频段低阻体的电磁感应异常而且电阻率越低电磁感应越强;高阻体的干扰使标准曲线在 CSAMT 全频段内平行移动,这是因为高阻体的电磁感应即使在高频段也很弱。另外,从图 5a 中还可以看出:低阻异常体的电阻率越低,其静态效应曲线背离标准曲线的程度越大,如: $\rho_0 = 1 \Omega \cdot \text{m}$ 对应的曲线处于 $\rho_0 = 10 \Omega \cdot \text{m}$ 对应的曲线的下方;这也正是图 4b 中在 s0 点拟断面下凹比较明显的原因。从图 5b 中可以看出,增加高阻异常体的电阻率(如 ρ_0 从 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 增加至 $10000 \Omega \cdot \text{m}$),静态效应曲线的分离程度并不明显,这是因为高阻异常体引起的异常存在“饱和效应”。

2.2 轴向测量方式中的静态效应模拟

轴向测量指测线在 AB 延长线上(见图 1)。为模拟轴向测量方式中的静态效应,测线布局及异常体位置如图 6 所示,AB 坐标为 $(-10000, 0, 0)$,测线上的 17 个测点、异常体及大地模型参数都与 2.1 节中所给参数相同。测量结果(图 7)表明,轴向测

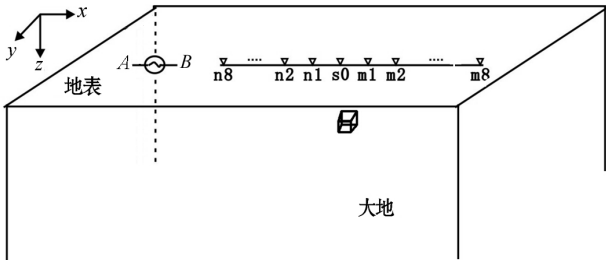
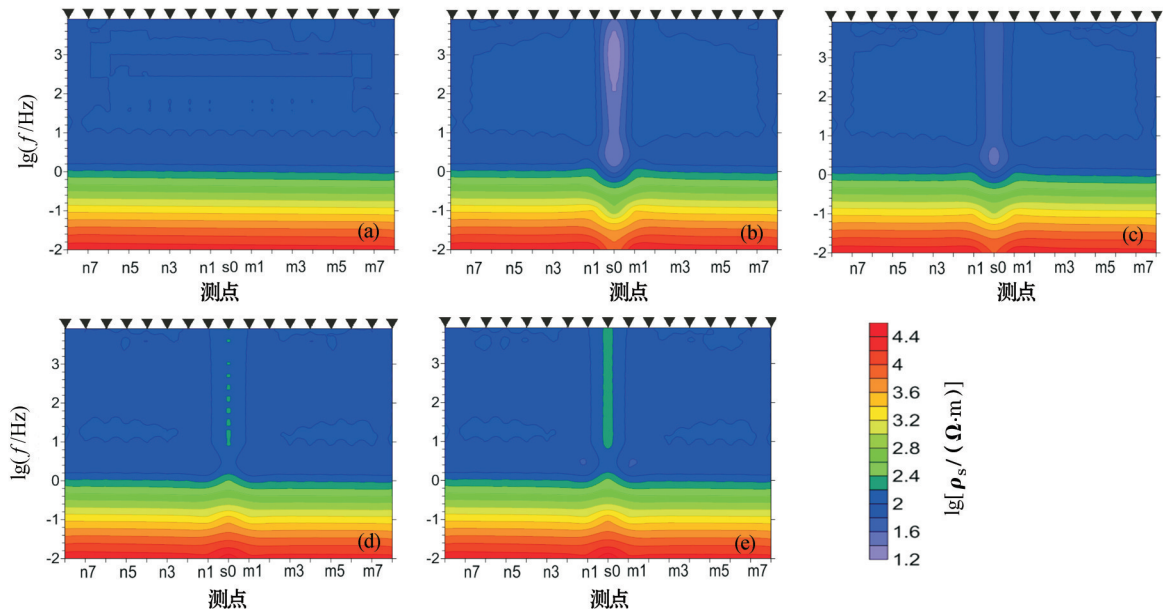


图 6 轴向测量示意

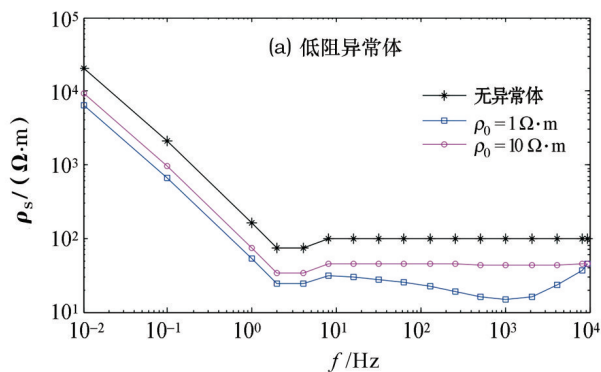


a—不含异常体;b— $\rho_0 = 1 \Omega \cdot \text{m}$;c— $\rho_0 = 10 \Omega \cdot \text{m}$;d— $\rho_0 = 1000 \Omega \cdot \text{m}$;e— $\rho_0 = 10000 \Omega \cdot \text{m}$

图 7 轴测方式测量的 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 均匀半空间含三维异常体的电阻率拟断面

量中拟断面的静态效应规律与 2.1 节旁测中拟断面的静态效应特征一致。

同理,为了观察轴向测量方式中的三维异常体对测点曲线的干扰,仍选择异常体正上方的测点 s_0



为研究对象,结果见图 8。可以看出,轴向测量方式中异常体对标准曲线的影响规律与 2.1 节旁测中异常体对标准曲线的影响特征一致。

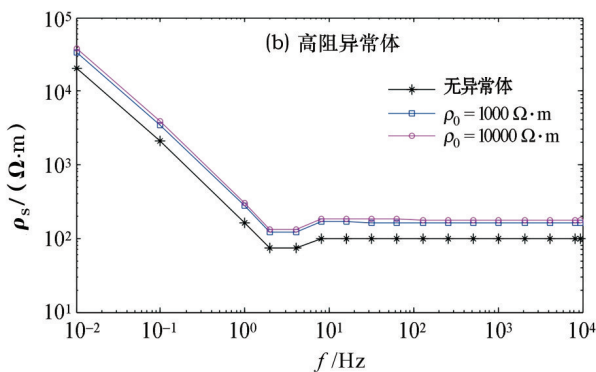


图 8 轴测方式测量下 s_0 点的视电阻率曲线

3 结论与讨论

1) 均匀大地中三维异常体旁测和轴测方式中的静态效应特征表现一致。

2) 异常体会干扰其附近测点的视电阻率值。异常体正上方的测点受干扰程度最大,测点离异常体越远,受干扰程度越小。

3) 低阻异常体引起干扰区域的等值线下凹近乎直立,其电阻率越低,下凹越明显;高阻异常体干扰区域的等值线上凸,但增大异常体的电阻率,等值线上凸的变化并不明显。无论是低阻异常还是高阻异常都会引起干扰区域的中高频段的等值线近乎直立。另外,低阻三维体比高阻三维体有更明显的静态效应。

4) 低阻异常体的静态效应引起中低频段的标准曲线平行下移,但在高频段引起标准曲线平行下移的程度与低阻体的电阻率有关,电阻率越低,标准曲线平行下移程度越差;而高阻体的静态效应均引起标准曲线在 CSAMT 整个频段上平行上移;低阻异常体的电阻率越低,静态效应曲线背离标准曲线的程度越大,但增大高阻异常体的电阻率,静态效应曲线分离程度并不明显。

参考文献:

- [1] Nabighian M N. Electromagnetic method in applied geophysics (1): Theory [C]//Society of Exploration Geophysicists. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [2] 朴化荣.电磁测深原理[M].北京:地质出版社,1990.
- [3] Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric methods of geophysical prospecting [J]. Geophysics, 1953, 18: 605 - 635.

- [4] 汤井田,何继善.可控源音频大地电磁法及其应用[M].长沙:中南大学出版社,2005.
- [5] 陈明生.对频率电磁测深静态效应问题的再探讨[J].煤田地质与勘探, 2013, 41(6): 74 - 77.
- [6] Zhdanov M S, Golubev N G, Spiehak V V. The construction of effective methods for electromagnetic modeling [J]. Geophysics, 1982, 68: 623 - 638.
- [7] 屈有恒,张贵宾,晋凤明.倾斜线源的三维电场数值模拟研究[J].物探化探计算技术, 2007, 29(5): 431 - 435.
- [8] 孙娅,何展翔,柳建新,等.长导线源频率域电磁测深场源静态位移的模拟研究[J].石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 149 - 154.
- [9] Sternberg B K, Wshburne J C. Correction for the static shift in Magnetotelluric using transient electromagnetic soundings [J]. Geophysics, 1988, 53(11): 1459 - 1468.
- [10] De Groot-Hedlin C. Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion [J]. Geophysics, 1991, 56: 2102 - 2106.
- [11] 杨妮妮,王志宏. CSAMT 测量的静态效应研究[J].河南科学, 2009, 27(4): 433 - 436.
- [12] 陈辉,王春庆,雷达,等. CSAMT 法静态效应模拟及其校正方法对比[J].物探化探计算技术, 2007, 29(S1): 64 - 67.
- [13] 黄兆辉,底青云,候胜利. CSAMT 的静态效应校正及应用[J].地球物理学进展, 2006, 21(4): 1290 - 1295.
- [14] 谢海军,陈明生,闫述.利用小波分析压制静态效应[J].煤田地质与勘探, 1998, 26(4): 61 - 65.
- [15] 闫述,陈明生.频率域电磁测深的静态偏移及校正方法[J].石油地球物理勘探, 1996, 31(2): 238 - 247.
- [16] 罗延钟,何展翔,马瑞伍,等.可控源音频大地电磁法的静态效应校正[J].物探与化探, 1991, 15(3): 196 - 202.
- [17] Johansen H K, Sorensen K I. Fast Hankel transforms [J]. Geophysical Prospecting, 1979, 27: 876 - 901.
- [18] Chave A D. Numerical integration of related Hankel transforms by quadrature and continued fraction expansion [J]. Geophysics, 1983, 48: 1671 - 1686.
- [19] 赵广茂,李志华,朱旭东,等.长导线源 CSAMT 一维正演研究

[J].铁道工程学报,2010,143(8):21-24.

[21] 沈金松.用交错网格有限差分计算三维频率域电磁响应[J].地球物理学报,2003,(2):281-288.

[20] 胡瑞华,林君,孙彩堂,等.电偶极子切分算法研究[J].物探化探计算技术,2014,36(4):389-393.

Simulation of CSAMT static effect and research on its characteristics
in homogeneous earth

HU Rui-Hua, LIN Jun, SUN Cai-Tang, LIU Chang-Sheng, ZHOU Feng-Dao
(College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Uneven electric body near the ground surface interferes the target field, which is called static effect that is regarded as one of the noises of deep exploration. In order to deeply understand the static effect, the authors simulated respectively the ground surface responses of axial and asides observation methods on the conditions of taking homogeneous earth as model background and Cagniard apparent resistivity as explanation parameter. Some conclusions have been reached: (1) The effects of static characteristics of the two observation methods are consistent. (2) The interference is maximum for measuring points above the anomaly body. On the contrary, the interference is minimum for the points which stay away from the anomaly body. (3) Low resistivity abnormal body causes the contours of the interference area to become concave. The resistivity is lower. High resistivity abnormal body causes the contours of the interference area to become convex. However, changes of contours into convexity are not obvious although the resistivity of anomaly body is enlarged. Both low resistivity abnormal body and high one cause the mid-low frequency contours to become nearly erect in the interference area; (4) The static effect of low resistivity causes the standard curve to be parallel downward in mid-low frequency, but in high frequency the extent of the standard curve paralleling downward depends on low resistivity value, the lower the resistivity is, the less parallel the standard curve downward is, because of stronger electromagnetic induction for lower abnormal body which is superimposed upon the static effect. However, the static effect of high resistivity causes the standard curve parallel upward in full frequency, which is consistent with previous conclusions. The results can provide a reference for the identification and improvement of static effect correction algorithm and hence has a certain theoretical and practical value.

Key words: CSAMT; static effect; three-dimensional abnormal body; numerical simulation; Cagniard apparent resistivity

作者简介: 胡瑞华(1974-),男,博士,主要从事电磁法正反演与应用研究。E-mail: hurh@jlu.edu.cn