

毛先进, 杨玲英, 段炜, 赵晋民, 庄儒新, 钱家栋. 2017. 地电阻率多极距观测反演初步研究. 地震学报, 39(4): 469-477. doi:10.11939/jass.2017.04.003.

Mao X J, Yang L Y, Duan W, Zhao J M, Zhuang R X, Qian J D. 2017. Inversion of geoelectrical resistivity observed with multi-separation of electrodes. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 469-477. doi:10.11939/jass.2017.04.003.

地电阻率多极距观测反演初步研究^{*}

毛先进^{1),*} 杨玲英¹⁾ 段 炜¹⁾ 赵晋民¹⁾ 庄儒新¹⁾ 钱家栋²⁾

1) 中国昆明 650224 云南省地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

摘要 地电阻率多极距观测的目的是借助对观测数据的反演获得地下介质中不同层位真电阻率的变化. 本文以3层结构为例, 对地电阻率多极距观测的一维反演的效果进行了初步地理理论研究. 首先研究了一维地电阻率结构下观测数据一维反演的模拟效果, 得到了各层电阻率值, 且与真电阻率值很接近, 说明在地下电性结构为一维的情况下, 电阻率多极距观测可以区分出不同地层的电阻率变化. 其次, 考虑到台址下电阻率结构的复杂性, 研究了上两层界面存在起伏的情况下, 多极距观测数据一维反演的效果, 结果显示: 当电阻率变化较小时, 各层反演得到的电阻率的变化与真电阻率十分符合; 当上两层介质的电阻率变化较大时, 各层反演得到的电阻率出现畸变, 与真实电阻率的变化情况存在一定差别, 表明浅层电阻率变化达到一定程度后将会影响对深部电阻率变化情况的正确判断. 一般情况下, 观测的时间间隔越短, 则连续两次观测时段内各层介质的电阻率变化越小, 因此缩短多极距观测的时间间隔可能是避免出现上述畸变现象的有效观测手段.

关键词 地电阻率 一维电阻率结构 二维电阻率结构 多极距观测 一维反演

doi:10.11939/jass.2017.04.003 中图分类号: P319.3⁺2 文献标志码: A

Inversion of geoelectrical resistivity observed with multi-separation of electrodes

Mao Xianjin^{1),*} Yang Lingying¹⁾ Duan Wei¹⁾ Zhao Jinmin¹⁾
Zhuang Ruxin¹⁾ Qian Jiadong²⁾

1) *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China*

2) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

Abstract: Preliminary theoretical studies were dealt with in this paper on the efficiency of one-dimensional inversion of apparent resistivity data observed with multi-separation array, for understanding the true resistivity variations with time inside the media. To this end a three-layer model has been taken as an example. Firstly, we did the inversion of the theoretical apparent resistivity data by forward modeling calculation for each layer in one-dimensional resistivity structure. The result shows a good consistency between the true resistivity

* 基金项目 地震科技星火计划(XH16034)资助.

收稿日期 2016-12-05 收到初稿, 2017-01-10 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: maoxj87@163.com



variations and that obtained with inversion of each layer, suggesting that one-dimensional inversion technology is adequate for recognizing the variations of resistivity in each layer. Secondly, more complex model was taken due to some interface fluctuation, which deviated from one-dimensional model to some extent. The same process of forward-inversion was conducted in the case of the fluctuation of interfaces of the three-layer model, the results showed that good fitting can be found only in the condition of non-large variations of resistivity of the first- and second- layers, otherwise the inverted resistivity of each layer will turn up distortion. Usually the shorter the time interval of observation, the smaller the medium resistivity change during the two consecutive observation. Therefore, to reduce the distortion, it could be available by taking short time interval of observation with multi-separation array.

Key words: earth resistivity; one-dimensional resistivity structure; two-dimensional resistivity structure; multi-separation array observation; one-dimensional inversion

引言

地电阻率前兆观测已在我国开展了 40 多年, 观测结果表明大震前在震源区及其附近区域通常会出现视电阻率的变化, 因此该方法成为普遍认同的地震前兆观测手段(张国民等, 2001; 杜学彬, 2010). 然而, 我国台站的地电阻率观测大部分采用对称四极装置在地表进行观测, 得到的视电阻率观测数据是观测范围内不同深度处各地层电阻率的综合反映. 因受降雨、地下潜水位变化和农业灌溉等因素的影响, 浅部地层(地下数米至数十米)的电阻率会发生周期性的变化, 这种变化显然与地震孕育无关. 而赵和云和钱家栋(1988)的研究表明, 当震源强度与震中距相同时, 不同力学结构下介质中的体应变差别明显, 这将导致浅部松软覆盖层的电阻率在地震孕育过程中变化最小, 而弹性模量较高的深部介质的电阻率变化较大, 从而使深部电阻率的变化具有了地震前兆意义.

为获得深部电阻率的变化, 前人根据直流电法中的电测深理论发展了地震地电阻率多极距观测方法(钱家栋等, 1985; 钱家栋, 赵和云, 1988; 薛顺章等, 1994), 其目的是通过观测不同极距的地电阻率变化, 反演地下介质中不同深度的真电阻率的变化过程, 为研究该变化与地震或非地震物理关联提供依据. 因该方法具有较为可靠的物理基础, 美国、前苏联和日本均已先后开展了地电阻率多极距观测的实验研究(Mazzella, Morrison, 1974), 我国亦开展了大量的理论与实验研究(赵和云, 钱家栋, 1987; 钱家栋, 赵和云, 1988; 薛顺章等, 1994; 冯锐等, 2001; 汪雪泉等, 2002; 李艳东等, 2004; Lu *et al*, 2004; 毛先进等, 2008; 王兰炜等, 2011).

以往的反演研究均视地下介质的电阻率为一维分布, 但由于地壳介质导电性的空间不均匀性, 台址下的电阻率结构可能与一维分布存在不同程度的差别, 因此往往需要考虑二维结构的情况. 本文先研究了一维结构的反演结果, 然后考虑更符合实际情况的二维结构, 即对二维结构的多极距观测结果进行正演, 模拟出多极距观测视电阻率的时间序列, 然后对模拟结果作一维反演, 再将反演结果与实际电阻率的变化进行对比研究, 以便正确地认识和使用地电阻率多极距观测的反演结果.

1 一维电性结构下地电阻率的反演

3 层结构的一维地电阻率模型中, 第 1, 2 层厚度分别为 7.5 m 和 20 m. 考虑到各层电阻率可能随时间发生周期性变化, 因此设定各层电阻率为

$$\rho_i = \rho_i^{(0)} \left[1 + \alpha_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中: ρ_i 和 $\rho_i^{(0)}$ 分别为各层介质的电阻率及其初始值; α_i 为各层介质电阻率的变化幅度; t 为观测时刻, $t=1, 2, \dots, 24$; T 为变化周期, $T=24$. 对称四极布置的多极距观测系统的布极参数见表 1.

研究思路为: 首先通过正演获得各测道多极距的模拟观测数据(真电阻率), 然后对模拟观测数据进行反演得到各层的电阻率, 最后分析各层反演得到的电阻率与

真电阻率之间的符合程度. 一维反演采用影响系数法(汪雪泉等, 2002), 该方法的特点是利用两次连续观测数据的差值进行反演. 一维地电阻率正演方法已很成熟, 这里不再赘述; 二维地电阻率正演方法, 目前主要有有限元法和积分方程法两类, 而本文则采用笔者提出的边界积分方程法(毛先进, 鲍光淑, 1998).

根据模型所设各层参数及表 1 中多极距观测系统的布极参数, 通过正演得到每个极距装置系统对应的地表视电阻率曲线, 然后利用影响系数法(汪雪泉等, 2002)反演得到各层的电阻率(图 1—4 中虚线), 再与各层的真电阻率(图 1—4 中实线)进行比较, 两者的误差反映了一维正、反演结果的准确程度. 本文主要分以下 4 种情况进行讨论.

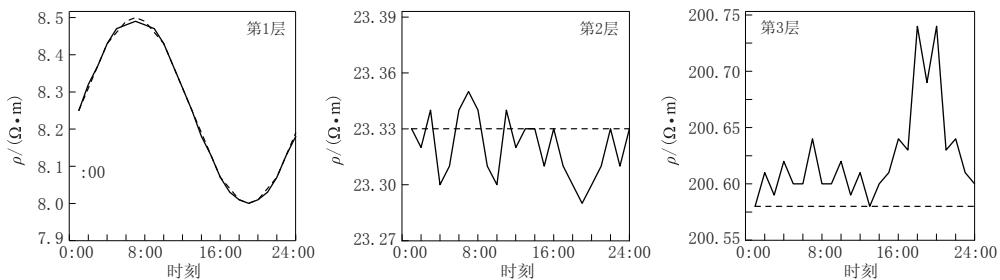


图 1 仅第 1 层电阻率 ρ_1 变化时各层的多极距电阻率一维反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较

Fig. 1 Comparison of the resistivity by inversion with multi-separation array (dashed line) and actual resistivity (solid line) for each layer only when resistivity of the first-layer ρ_1 varies with time

1) 设定 $\alpha_1=0.03$, $\alpha_2=0$, $\alpha_3=0$, $T=24$, 即 ρ_1 变化(变化幅度为 3%), ρ_2 和 ρ_3 不变. 图 1 给出了第 1—3 层电阻率的一维反演结果与真电阻率的时程曲线. 可以看出, 反演得到的第 1—3 层电阻率的变化幅度分别为 3.10%, 0.17% 和 0.08%, 与实际结果非常接近, 同时, 反演得到的各层电阻率与真电阻率的最大相对误差为 1.7/1000, 两者的符合度较高.

表 1 一维电性结构下多极距观测系统的布极参数

Table 1 The electrodes arrangement parameters of multi-separation array system in one-dimension

AB/m	MN/m
30	2
100	16
270	30
500	100
1000	300

2) 设定 $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0$, $\alpha_3=0.03$, $T=24$, 即 ρ_1 和 ρ_2 不变, ρ_3 变化(变化幅度为 3%). 图 2 给出了第 1—3 层电阻率的一维反演结果与真电阻率的时程曲线. 可以看出, 反演得到的第 1—3 层的电阻率变化幅度分别为 0, 0.13% 和 2.83%, 且各层反演得到的电阻率与真电阻率的最大相对误差为 2.9/1000, 两者的符合度亦较高.

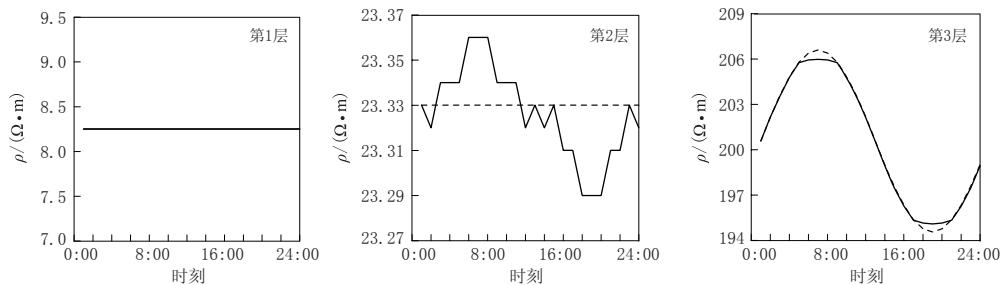


图 2 仅第 3 层电阻率 ρ_3 变化时各层的多极距电阻率一维反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较

Fig. 2 Comparison of the resistivity by inversion with multi-separation array (dashed line) and actual resistivity (solid line) for each layer only when resistivity of the third-layer ρ_3 varies with time

3) 设定 $\alpha_1=0.1$, $\alpha_2=0$, $\alpha_3=0.02$, $T=24$, 即 ρ_1 和 ρ_3 变化, 变化幅度分别为 10%, 2%, ρ_2 不变. 图 3 给出了第 1—3 层电阻率的一维反演结果与真电阻率的时程曲线. 可知, 反演得到的第 1—3 层的电阻率变化幅度分别为 9.99%, 0.25% 和 1.92%, 且各层反演得到的电阻率与真电阻率的最大相对误差为 5.4/1000, 两者符合程度高.

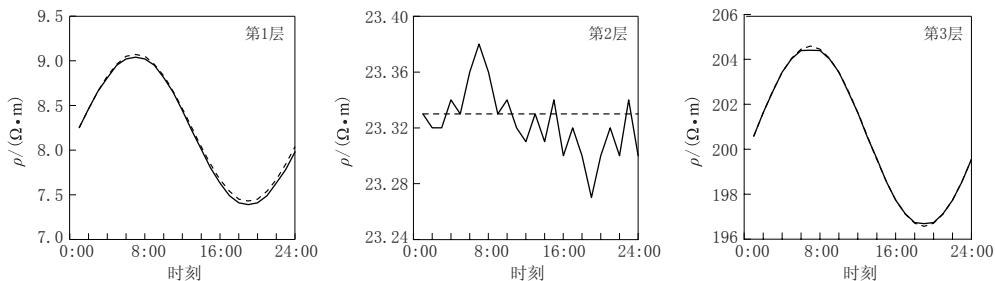


图 3 第 1, 3 层电阻率 ρ_1 和 ρ_3 变化, 第 2 层电阻率 ρ_2 不变时各层的多极距电阻率一维反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较

Fig. 3 Comparision of the resistivity by inversion with multi-separation array (dashed line) and the actual resistivity (solid line) for each layer when resistivity of the first- and third- layer ρ_1 and ρ_3 vary with time, but resistivity of the second-layer ρ_2 remains unchanged

4) 设定 $\alpha_1=0.3$, $\alpha_2=0.03$, $\alpha_3=0.02$, $T=24$, 即 ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 均变化, 变化幅度分别为 30%, 3%, 2%. 图 4 给出了第 1—3 层电阻率的一维反演结果与真电阻率的时程曲线. 可以看出, 反演得到的第 1—3 层的电阻率变化幅度分别为 31.90%, 2.92% 和 1.95%, 各层反演得到的电阻率与真电阻率的最大相对误差为 6.7/1000, 反演得到的电阻率与真电阻率的符合程度总体较好, 并且在第 1 层真电阻率变化幅度较大(30%), 而第 2, 3 层变化幅度较小(分别为 3%, 2%)的情况下, 反演所得结果能够准确地分辨第 2, 3 层电阻率的变化.

以上几种情况下对一维电性结构的地电阻率的正、反演模拟结果表明, 对于 3 层电阻率结构, 电阻率发生变化的地层为 1—3 层不等, 但各层反演得到的电阻率与真电阻率的符

合程度均较高, 这说明在地下一维电性结构下, 多极距地电阻率观测的确可以达到区分不同地层电阻率变化的目的。

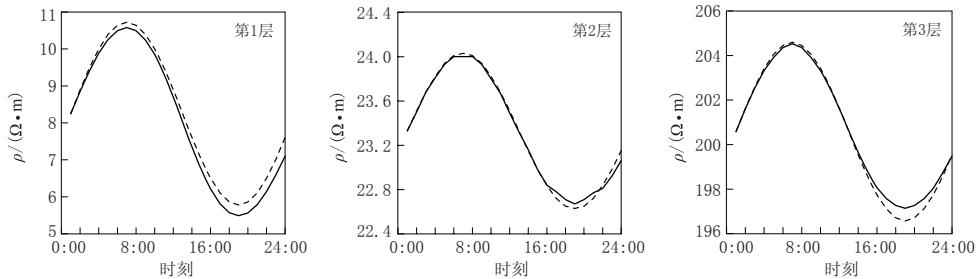


图 4 3 层电阻率 ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 均变化时各层的多极距电阻率的一维反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较

Fig. 4 Comparision of the resistivity by inversion with multi-separation array (dashed line) and the actual resistivity (solid line) for each layer when resistivity of the whole three layers ρ_1 , ρ_2 and ρ_3 all vary with time

2 二维电性结构下地电阻率的反演

目前通常采用一维反演的方法对地电阻率多极距观测视电阻率时间序列进行解释, 而多极距观测场地下的电阻率结构可能与一维结构有所差别, 换言之, 对地电阻率多极距观测结果进行反演解释的理论模型与实际的电性结构可能存在差别。因此, 本文考虑台址下更接近实际的二维电阻率结构, 先对二维结构进行多极距观测数据的正演, 得到模拟的多极距观测的视电阻率时间序列, 然后对模拟结果进行一维反演, 研究给定的二维电阻率结构与一维反演结果之间的关系。

2.1 二维正演方法的准确性检验

本文采用的二维正演数值模拟方法为作者提出的边界积分方程法(毛先进, 鲍光淑, 1998), 该方法应用于二维电性结构问题的准确性在理论和数值模拟两方面均已得到验证。本文中的准确性检验针对的是一维电阻率结构, 分别采用一维方法(解析)与二维边界积分方程法(数值模拟)计算视电阻率, 然后考察两者的一致性。图 5 给出了用于二维正演方法准确性检验的一维电阻率结构模型, 该模型共分为 3 层, 第 1, 2 层厚度分别为 50 m 和 100 m, 第 1—3 层的电阻率分别为 30, 60, 150 $\Omega \cdot \text{m}$ 。5 套多极距观测系统的电极以图 5 所示剖面的地表中心点对称布设, 布极参数及一维、二维正演方法得到的地电阻率计算结果列于表 2。

从表 2 可见, 对于同一模型, 二维边界积分方程法与一维正演方法计算得到的视电阻率的最大相对误差的绝对值为 0.68%, 表明二维边界积分方程法具有足够的精度。

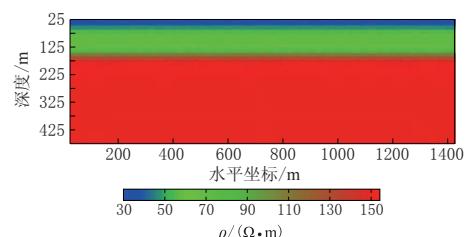


图 5 用于二维正演方法准确性检验的一维模型

Fig. 5 The one-dimensional model for the accuracy test of two-dimensional forward modeling method

表 2 二维电性结构下多极距观测系统布极参数和针对图 5 所示模型利用一维与二维正演方法计算得到的视电阻率结果对比

Table 2 The electrodes arrangement parameters of multi-separation array in two dimension and the comparision of apparent resistivities calculated from one-dimensional and two-dimensional forward modeling based on the model of Fig. 5

装置编号	AB/m	MN/m	一维视电阻率 $\rho_{1D}/(\Omega \cdot m)$	二维视电阻率 $\rho_{2D}/(\Omega \cdot m)$	相对误差
C_1	200	50	38.38	38.20	-0.47%
C_2	400	150	50.49	50.18	-0.61%
C_3	600	150	64.24	64.64	0.62%
C_4	800	250	73.58	74.08	0.68%
C_5	1000	350	81.46	81.02	-0.32%

注: 相对误差 = $(\rho_{2D} - \rho_{1D}) / \rho_{1D}$.

2.2 二维结构下一维反演算例与结果分析

针对不同的二维结构以及不同地层介质电阻率的变化情况, 给出几个典型二维电性结构下一维地电阻率反演的算例及其结果分析.

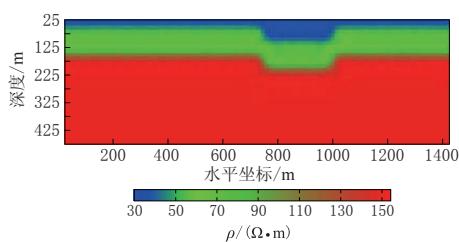


图 6 算例 1, 2 使用的由图 5 所示模型演化得到的二维电阻率模型

Fig. 6 The two-dimensional earth resistivity model which is derived from the model shown in Fig. 5 and used in examples one and two

为了模拟前兆观测中普遍存在的地电阻率年变现象, 设置浅层(第 1, 2 层)电阻率以不同的幅度作周期性变化, 即 $\rho_1^{(0)} = 30 \Omega \cdot m$, $\rho_2^{(0)} = 60 \Omega \cdot m$, $\alpha_1 = 0.03$, $\alpha_2 = 0.02$, 根据式(1)计算 ρ_1 和 ρ_2 . ρ_3 恒定为 $150 \Omega \cdot m$. 经二维正演得到不同时刻的多极距模拟观测数据, 之后对这些数据作一维反演.

从图 7a 中可以看出, 在第 1—3 层介质真电阻率的变化幅度分别为 3%, 2%, 0 时, 反演得到的第 1—3 层介质电阻率的变化幅度分别为 3.10%, 1.87%, 0.25%, 各层反演得到的电阻率与真电阻率的变化十分吻合.

2.2.2 算例 2

模型与算例 1 相同, 如图 6 所示, 但浅层电阻率随时间的变化幅度增大, 即设 $\rho_1^{(0)} = 30 \Omega \cdot m$, $\rho_2^{(0)} = 60 \Omega \cdot m$, $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.05$, 根据式(1)计算 ρ_1 和 ρ_2 , ρ_3 仍设为 $150 \Omega \cdot m$. 模型第 1—3 层电阻率的一维反演结果与真电阻率的时程曲线如图 7b 所示.

从图 7b 可以看出, 在第 1—3 层介质真电阻率的变化幅度分别为 10%, 5%, 0 时, 反演得到的第 1—3 层介质电阻率的变化幅度分别为 10.30%, 5.21%, 0.31%, 各层反演得到的电阻率与真电阻率的变化情况吻合得较好.

2.2.1 算例 1

图 6 为根据图 5 所示的一维结构模型演化得到的二维电阻率模型, 通过改变第 1, 2 层部分单元的电阻率形成层边界有起伏的二维结构. 第 1, 2 层厚度分别为 50, 100 m; 第 1 层下边界(非起伏区域, 厚度为 50 m, 而起伏区厚度为 100 m(部分单元伸入第 2 层), 宽度为 250 m; 第 2 层下边界的起伏和非起伏区域, 厚度均为 100 m, 起伏区的宽度为 250 m(部分单元伸入第 3 层).

为了模拟前兆观测中普遍存在的地电阻率

变化, 令 $\rho_1^{(0)} = 30 \Omega \cdot m$, $\rho_2^{(0)} = 60 \Omega \cdot m$,

$\alpha_1 = 0.03$, $\alpha_2 = 0.02$, 根据式(1)计算 ρ_1 和 ρ_2 .

ρ_3 恒定为 $150 \Omega \cdot m$. 经二维正演得到不同时刻的多极距模拟观测数据, 之后对这些数据作一维反演.

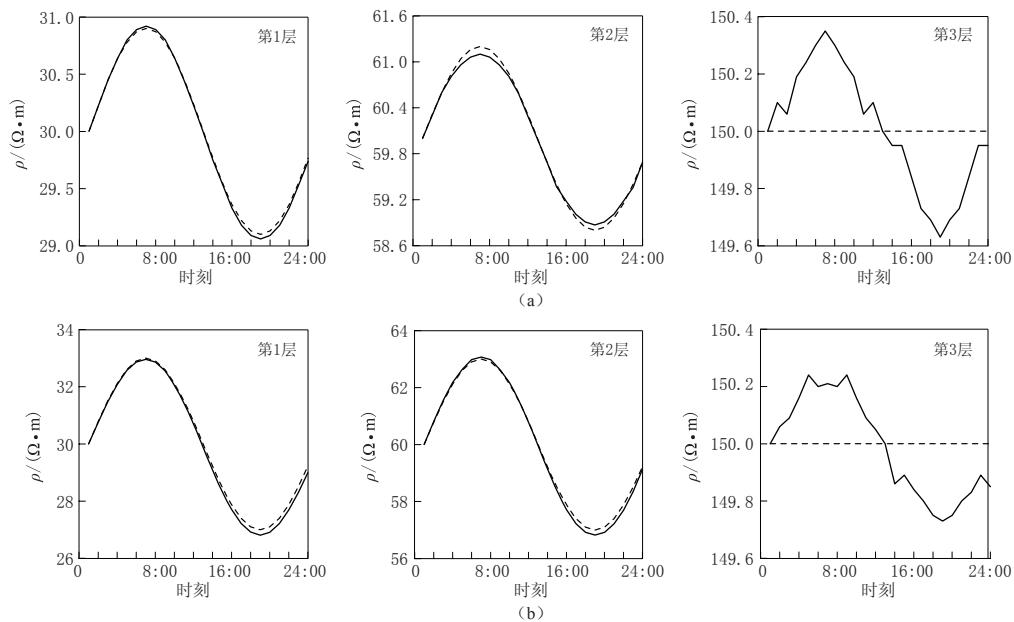


图 7 对图 6 所示模型各层的一维电阻率的反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较
(a) 算例 1; (b) 算例 2

Fig. 7 Comparision of the resistivity by inversion from one-dimensional model shown in Fig. 6 (dashed line) and the actual resistivity (solid line) for each layer
(a) Example one; (b) Example two

值得注意的是, 在算例 1 和算例 2 中, 第 3 层介质的真电阻率是不变的, 而反演结果中两个算例第 3 层介质电阻率的变化幅度分别为 0.25% 和 0.31%, 虽然与实际值的偏离均比较小, 但存在随浅层(第 1, 2 层)真电阻率变化幅度增大而增大的趋势. 因此推测, 第 1, 2 层介质的电阻率变化越大, 对第 3 层反演结果的影响也越大. 对一定的电阻率结构, 当这种变化达到一定程度时, 将会影响对第 3 层(即深部)介质电阻率变化情况的正确判断.

2.2.3 算例 3

地电阻率模型如图 8 所示, 浅层电阻率的参数设置为 $\rho_1^{(0)} = 30 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2^{(0)} = 60 \Omega \cdot \text{m}$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.1$, 根据式(1)计算 ρ_1 和 ρ_2 , ρ_3 仍设为 $150 \Omega \cdot \text{m}$.

与图 6 所示模型不同的是, 图 8 所示模型的边界起伏只发生在第 1, 2 层之间, 第 1, 2 层厚度分别为 50, 100 m; 第 1 层下边界的非起伏区域层厚为 50 m, 而起伏区层厚为 150 m, 达到了第 2, 3 层的界面上, 其宽度为 100 m.

图 9 为基于图 8 所示模型而得到的一维电阻率反演结果与真电阻率时程曲线. 可以看出:

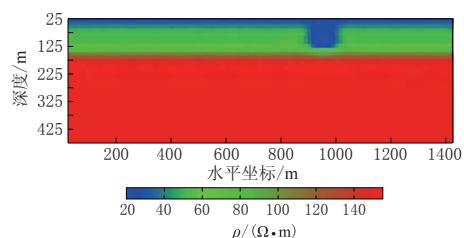


图 8 算例 3 使用的由图 5 所示模型演化
得到的二维电阻率模型

Fig. 8 The two-dimensional earth resistivity
model which is derived from the model
shown in Fig. 5 and used in example three

第1, 2层介质的真电阻率变化幅度与算例1, 2相比明显增大, 变化幅度分别为30%, 10%, 第3层介质的真电阻率不变; 反演得到的第1—3层电阻率的变化幅度分别为31.9%, 11.5%和0.52%, 反演得到的各层电阻率与真电阻率的变化情况吻合得较好, 但反演结果与各层真电阻率的差异均大于前述两个算例, 这可能与第1, 2层介质的真电阻率变化幅度较大有关, 也进一步表明, 第1, 2层介质的电阻率变化幅度越大, 对第3层反演结果的影响越大。

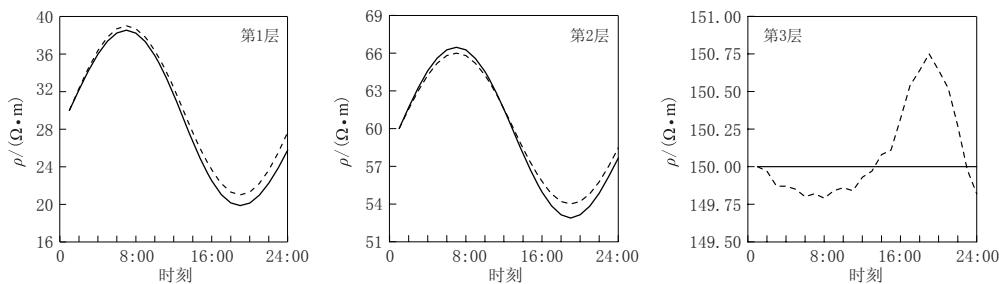


图9 对图8所示模型各层的一维电阻率的反演结果(虚线)与真电阻率(实线)的比较

Fig. 9 Comparision of the resistivity by inversion from one-dimensional model shown in Fig. 8 (dashed line) and the actual resistivity (solid line) for each layer

上述3个算例表明, 如果地下电性结构并非一维分布, 则用多极距观测数据作一维反演获得的不同地层的电阻率与实际电阻率存在差异, 且浅层介质电阻率的变化幅度越大, 这种差异也越大。

3 讨论与结论

地电阻率多极距观测的目的, 是借助对观测数据的反演获得地下介质中不同地层真电阻率的变化。数据反演是多极距观测方法中的一个重要环节, 其准确性和可靠性对地电阻率多极距观测数据的解释与应用十分重要。到目前为止研究人员主要采用一维反演方法对观测数据进行反演处理, 由于地下介质的横向不均性, 地电阻率观测区域内电阻率结构往往与一维结构存在不同程度的偏离, 因此实际地电结构与反演所用的理论模型并不相符, 本文初步分析了这种“偏离”或“不符合”对反演结果的影响, 得到如下认识:

1) 在一维地下电性结构下, 用多极距电阻率观测数据作一维反演可以达到区分不同地层电阻率变化的目的, 实践中应尽可能选择地下电阻率结构充分接近一维的场地开展地电阻率多极距观测;

2) 若地下电性结构不满足一维分布, 则用多极距观测数据进行一维反演所获得的深部介质的电阻率与实际的深部介质电阻率也会存在差异, 且浅层介质的电阻率变化幅度越大, 这种差异也越大, 反之亦然。

可以认为, 定点连续观测中两次连续观测之间的时间间隔越短, 则在这段时间内浅部介质的真电阻率变化就越小, 因此在观测区的电阻率分布与一维结构存在明显差异的情况下, 为了减小反演结果与实际的差异, 则应尽量减小两次观测之间的时间间隔。

需要指出的是, 本文只是在给定模型下讨论一维结构的多极距观测的一维反演问题, 只涉及浅层电阻率周期性变化对反演结果, 尤其是研究人员更为关注的深部电阻率反演结

果的影响, 但实际情况下浅部与深部电阻率的变化组合是十分复杂的, 这些复杂情况下的反演结果对深部电阻率变化判断的影响, 还有待更为详细地、深入地研究。

参 考 文 献

- 杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学: 地球科学, **40**(10): 1321–1330.
- Du X B. 2010. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J]. *Science China Earth Sciences*, **54**(1): 145–156.
- 冯锐, 郝锦绮, 周建国. 2001. 地震监测中的电阻率层析技术[J]. 地球物理学报, **44**(6): 833–842.
- Feng R, Hao J Q, Zhou J G. 2001. Resistivity tomography in earthquake monitoring[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **44**(6): 833–842 (in Chinese).
- 李艳东, 赵家骝, 庞丽娜. 2004. 地电阻率多极距观测中的最佳布极方式[J]. 地震, **24**(2): 17–24.
- Li Y D, Zhao J L, Pang L N. 2004. The optimal mode for arranging the electrodes for multi-spacing system in apparent resistivity observation[J]. *Earthquake*, **24**(2): 17–24 (in Chinese).
- 毛先进, 鲍光淑. 1998. 一种适于电阻率成像的正演新方法[J]. 地球物理学报, **41**(增刊): 385–393.
- Mao X J, Bao G S. 1998. A new modeling method for resistivity tomography[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **41**(S): 385–393 (in Chinese).
- 毛先进, 钱家栋, 杨玲英. 2008. 地电阻率多极距观测及研究进展[J]. 地震研究, **31**(4): 406–412.
- Mao X J, Qian J D, Yang L Y. 2008. Progress of multi-separation array observation and research for earth resistivity[J]. *Journal of Seismological Research*, **31**(4): 406–412 (in Chinese).
- 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社: 103–107.
- Qian J D, Chen Y F, Jin A Z. 1985. *Application of Geoelectrical Resistivity in Earthquake Prediction*[M]. Beijing: Seismological Press: 103–107 (in Chinese).
- 钱家栋, 赵和云. 1988. 地电阻率的数值模拟和多极距观测系统[J]. 地震学报, **10**(1): 77–89.
- Qian J D, Zhao H Y. 1988. Earth resistivity modeling and observational system with multi-separation of electrodes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **10**(1): 77–89 (in Chinese).
- 汪雪泉, 郑兆蕊, 薛维龙. 2002. 安徽嘉山台的多极距电阻率观测[J]. 地震学刊, **22**(1): 1–4.
- Wang X Q, Zheng Z B, Xue W L. 2002. Multiple polar distance resistivity observation at Jiashan, Anhui seismic station [J]. *Journal of Seismology*, **22**(1): 1–4 (in Chinese).
- 王兰炜, 朱旭, 朱涛, 张世中, 刘大鹏, 胡哲, 张宇. 2011. 地电阻率多极距观测系统及试验研究[J]. 地震, **31**(1): 20–31.
- Wang L W, Zhu X, Zhu T, Zhang S Z, Liu D P, Hu Z, Zhang Y. 2011. Multi-separation array geo-electrical resistivity observation system and its experimental observation[J]. *Earthquake*, **31**(1): 20–31 (in Chinese).
- 薛顺章, 温新民, 董永德, 梁子彬, 张庆渊, 赵和云. 1994. 地电阻率预报地震新方法的研究[J]. 地震学报, **16**(2): 227–234.
- Xue S Z, Wen X M, Dong Y D, Liang Z B, Zhang Q Y, Zhao H Y. 1994. A new method for earthquake prediction by earth resistivity measurements[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **16**(2): 227–234 (in Chinese).
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 214–270.
- Zhang G M, Fu Z X, Gui X T. 2001. *Introduction to Earthquake Prediction*[M]. Beijing: Science Press: 214–270 (in Chinese).
- 赵和云, 钱家栋. 1987. 郫县台多极距观测资料的反演和分析[J]. 中国地震, **3**(增刊): 73–78.
- Zhao H Y, Qian J D. 1987. Inversion and analysis of data of temporal change in apparent resistivity with multi-separations in Pixian station, Sichuan Province[J]. *Earthquake Research in China*, **3**(S): 73–78 (in Chinese).
- 赵和云, 钱家栋. 1988. 层状介质中膨胀球模拟力源的应力-应变场与视电阻率的关系[J]. 西北地震学报, **10**(2): 8–21.
- Zhao H Y, Qian J D. 1988. Relationship between apparent resistivity and stress-strain field in the layer media due to an expanding sphere as a modelling earthquake source[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **10**(2): 8–21 (in Chinese).
- Lu J, Xue S Z, Qian F Y, Zhao Y L, Guang H P, Mao X J, Ruan A G, Yu S R, Xiao W J. 2004. Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **145**(1/2/3/4): 87–97.
- Mazzella A, Morrison F H. 1974. Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault [J]. *Science*, **185**(4154): 855–857.