



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

基于最高频相位法和空间滤波法的二维模型的大地电磁静态校正

郭为 唐新功 盛冠群

Magnetotelluric static correction of two-dimensional model based on the highest frequency phase method and spatial filtering method

Guo Wei, Tang Xingong, Sheng Guanqun

引用本文:

郭为, 唐新功, 盛冠群. 2022. 基于最高频相位法和空间滤波法的二维模型的大地电磁静态校正. *地震学报*[J], 44(2): 302–315. DOI: 10.11939/jass.20210139

Guo W, Tang X G, Sheng G Q. 2022. Magnetotelluric static correction of two-dimensional model based on the highest frequency phase method and spatial filtering method. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(2): 302–315. DOI: 10.11939/jass.20210139

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

伪二维弹性波联合反演近地表的速度和衰减

Pseudo 2D joint elastic waveform inversion for velocities and attenuation in the near surface
地震学报. 2018, 40(5): 595–608 <https://doi.org/10.11939/jass.20170196>

基于动力有限差分法的典型海域自由场二维地震反应分析

Two dimensional seismic responses of free field in typical seafloor site based on dynamic finite difference method
地震学报. 2020, 42(6): 769–780 <https://doi.org/10.11939/jass.20190191>

三维沉积盆地对地震动的放大效应间接边界元法模拟

Simulation on the amplification effect of a three-dimensional alluvial basin on the earthquake ground motion using the indirect boundary element method
地震学报. 2017, 39(1): 111–131 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.010>

平面SH波作用下部分充填圆弧形沉积谷的二维土层和地形放大效应

Two-dimensional soil and topographic amplification effects of a partially filled circular-arc alluvial valley under plane SH waves
地震学报. 2017, 39(5): 778–797 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.012>

二维平面内考虑横向不均匀体散射作用的水平竖向谱比模拟与应用

Study on 2D in-plane HVSR simulation and application with transverse inhomogeneous body scattering
地震学报. 2021, 43(6): 753–767 <https://doi.org/10.11939/jass.20200177>

地电场多测向日变波形相位关联特征

Phase correlation features of geoelectric field diurnal waveforms in multi-orientation
地震学报. 2017, 39(4): 604–614 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.04.014>

郭为, 唐新功, 盛冠群. 2022. 基于最高频相位法和空间滤波法的二维模型的大地电磁静态校正. 地震学报, 44(2): 302–315. doi: 10.11939/jass.20210139.

Guo W, Tang X G, Sheng G Q. 2022. Magnetotelluric static correction of two-dimensional model based on the highest frequency phase method and spatial filtering method. *Acta Seismologica Sinica*, 44(2): 302–315. doi: 10.11939/jass.20210139.

基于最高频相位法和空间滤波法的 二维模型的大地电磁静态校正*

郭 为¹⁾ 唐新功^{1),*} 盛冠群²⁾

1) 中国武汉 430100 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室

2) 中国湖北宜昌 443000 三峡大学计算机与信息学院

摘要 静态效应一直是影响大地电磁测深法精确性的主要原因之一. 在相位校正法的基础上提出了一种更适用于电性变化较为平缓的地质情况的静态校正方法——最高频相位法, 其核心是用需要校正测点两侧受静态效应影响较小测点的最高频视电阻率的算术平均值代替相位法递推公式中每个频点前一个频点的视电阻率值, 以消除相位法中的误差积累. 以二维模型的正反演为例, 通过对比空间滤波法、相位法和最高频相位法对不同模型静态校正前后的正反演结果, 证明了最高频相位法的有效性和优越性, 同时表明, 对于电阻率变化大并且静态位移严重的水平层状地层模型, 采用与空间滤波法相结合的联合校正效果更佳.

关键词 大地电磁静态校正 空间滤波法 相位法 最高频相位法 联合校正 二维正反演
doi: 10.11939/jass.20210139 中图分类号: P319.2 文献标识码: A

Magnetotelluric static correction of two-dimensional model based on the highest frequency phase method and spatial filtering method

Guo Wei¹⁾ Tang Xingong^{1),*} Sheng Guanqun²⁾

1) Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2) College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443000, China

Abstract: Static effect is one of the main reasons for affecting the accuracy of magnetotelluric sounding. In this paper, a static correction method, the highest frequency phase method, is proposed on the basis of the phase correction method, which is more suitable for geological conditions with smooth electrical changes. Its principle is to eliminate the error accumulation in the phase correction method by replacing the apparent resistivity value of the previous frequency

* 基金项目 国家自然科学基金(41874119, 41674107)、湖北省科技厅项目(2021CFB119)和湖北省教育厅青年人才基金(Q20211204)共同资助.

收稿日期 2021-08-25 收到初稿, 2021-12-13 决定采用修改稿.

作者简介 郭为, 硕士, 主要从事电磁法勘探研究, e-mail: 2723666284@qq.com;

*唐新功, 博士, 教授, 主要从事电磁法勘探与重磁勘探研究,
e-mail: tangxg@yangtzeu.edu.cn



point in the recurrence formula with the arithmetic mean of the highest frequency apparent resistivity of the measuring points on both sides of the measuring points that need to be corrected and are less affected by the static effect. Taking the forward and inversion of two-dimensional model as an example, the effectiveness and superiority of the highest frequency phase method are proved by comparing the forward and inversion results from spatial filtering method, phase correction method and highest frequency phase method before and after static correction for different models. It also shows that for the horizontal layered formation model with sharp resistivity difference and severe static shift, the static correction effect of joint correction which combines highest frequency phase method with spatial filtering method is much better.

Key words: magnetotelluric static correction; spatial filtering method; phase correction method; highest frequency phase method; joint correction; 2D forward and inversion

引言

大地电磁测深法(magnetotelluric sounding, 缩写为 MT)自二十世纪五十年代初由 Tikhonov (1950) 和 Cagniard (1953) 提出以来, 经过近七十年的探索与实践, 已经成为最成熟的电磁勘探方法之一, 被普遍应用于地层深部构造研究和资源勘探中, 并取得了显著的应用效果。但是 MT 方法仍存在一些不足之处, 其中静态效应是影响其精确性的主要因素之一。静态效应产生的原因主要是近地表局部电性不均匀体的存在导致电荷积累, 使视电阻率曲线产生畸变和位移, 因而在拟断面图中出现陡立条带(罗延钟等, 1991)。近地表异常体和复杂地形都会使电磁数据产生畸变, 横磁(transverse magnetic, 缩写为 TM)模式的视电阻率曲线在视电阻率-频率对数坐标系中由于受近地表局部高阻异常体或地垒地形影响表现为上移, 受近地表局部低阻异常体或地垒影响表现为下移(罗延钟等, 1991; 梁生贤等, 2010), 在很大程度上影响了后期的解释结果。因为大地电磁方法中空气为高阻, 所以将地垒地形近似为地表低阻异常, 将地堑近似为地表高阻异常, 把地形的影响同样归为静态效应, 利用静态校正方法对地形和近地表异常体的影响进行统一校正。静态效应导致反演解释的结果与实际地质情况相去甚远, 因此, 必须首先判断观测资料中是否存在静态效应, 如果存在, 只有对静态校正后的数据开展二维正反演才能获得准确的地下异常体信息, 得到真实的地电参数。

近地表局部不均匀体和地形引起的静态效应对二维模型的横电(transverse electric, 缩写为 TE)模式视电阻率、相位曲线和 TM 模式的相位曲线影响较小, 而对 TM 模式的视电阻率曲线影响较大, 所以本文仅讨论对于 TM 模式视电阻率的校正。

国内外研究人员提出并发展应用了一系列静态校正方法, 包括: 空间滤波法(Bostick, 1986; 罗志琼, 1990; 王家映, 1990; 汤井田, 何继善, 1993; 刘宏, 王家映, 1997; 杨森鑫等, 2012)、相位法(朱仁学, 1999; 杨生等, 2001; 刘建利, 2011; 仇根根等, 2012; 刘鸣等, 2015; 刘铁, 2015)、曲线平移法(陈清礼等, 1999a, b; 黄潜生等, 2004; 谷海亮, 李云鹏, 2013)、阻抗张量分解法(Groom, Bailey, 1989; 高红伟, 张胜业, 1998; 王书明, 1998; 杨生等, 2002; 尹曜田等, 2012; 谢成良等, 2013)、小波分析法(宋守根等, 1995; 张翔等, 2002)、联合反演法(Andrieux, Wightman, 1984; Sternberg *et al.*, 1988)等, 极大地压制了静态位移的响应, 提高了 MT 的解释水平和应用效果。但是这些方法都存在因使用条件或技术受限而无法

被普遍应用的问题,静态效应难题仍未得到很好的解决.考虑到目前静态位移压制方法大多是基于视电阻率参数,基于相位数据进行静态校正的文献不多,特别是成功的例子更不多见.理论上相位不受地表局部异常体产生的静态位移的影响,因此相位法是一种理想的静态校正方法,如今科研人员的研究也逐渐转为基于视电阻率和相位相结合的方式压制静态位移.鉴于此,笔者对相位校正法和空间滤波校正法进行了研究,发现空间滤波法和相位法对于存在严重静态位移的地质情况,静态校正效果不佳,并为此探索出了适合电性结构变化较为平缓的地电模型的校正方法——最高频相位法;对于电性变化剧烈且静态位移严重的地电模型,采用与空间滤波法联合校正的方法,效果较好.本文讨论了多种地电模型条件下的静态位移,通过对比空间滤波法、相位法、最高频相位法和联合校正法对均匀半空间模型和层状模型校正前后的正反演效果,研究了不同地电模型适用的静态校正方法,旨在验证最高频相位法和联合校正法的有效性,并同时研究不同地电条件下应该采取的静态校正方法.

1 静态效应的识别

进行静态校正之前,首先需要判断数据是否受到静态效应的影响(程少华, 2012). 本文的判别方法是首先观察测点在 TE 和 TM 模式下的视电阻率曲线是否发生分离,若发生分离,则将其电性相对稳定频段内所有频点的视电阻率与相邻测点对应频点的视电阻率或与根据已有资料获得的背景视电阻率值进行对比,来检查视电阻率曲线是否发生偏移.如果发生偏移,可使用相关系数法计算其与相邻测点的视电阻率的相关系数,判定是否为静态效应导致.相关系数范围为 $[-1, 1]$, 越接近 1, 表明正相关程度越大;越接近 -1, 表明负相关程度越大;越接近 0, 表明相关性越小,因此相关系数接近 1 时判定为静态位移.相关系数 r_{xy} 的计算公式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

式中, x_i 为需要判断的测点所选频点的视电阻率, y_i 为对比测点对应频点的视电阻率, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 x_i 和 y_i 的算术平均值.

2 静态校正方法原理

2.1 空间滤波法

浅层电荷积累对视电阻率的影响在波数域表现为高通,因此可以在空间域或者波数域进行低通滤波(王家映, 1992)来压制静态位移.空间滤波法校正的计算过程如下:

首先,挑选出受静态效应影响较大的测点,利用邻近测点对其进行校正.若还需选取电性结构相对稳定的频点数据,选取频段范围设为 $f_h - f_l$, 则共有 $l - h + 1$ 个频点,计算各测点选取频段内的视电阻率的几何平均值 ρ_{ai} , 即

$$\rho_{ai} = \sqrt[l-h+1]{\prod_{j=h}^l \rho_{si}(f_j)}, \quad (2)$$

式中, $\rho_{si}(f_j)$ 为第 i 个测点在第 j 个频点的视电阻率实测值, f 为频率.

求出 ρ_{ai} 后进行滤波窗口尺寸和滤波系数的选取, 二者的选择决定了空间滤波法校正的效果. 表层电性不均匀体的横向变化范围越大, 滤波器长度也越长(王家映, 1992). 国内外研究人员对空间滤波校正系数的选取已经开展过大量的研究工作, 探索出五点滤波系数和七点滤波系数两种是相对最合适的系数(罗延钟等, 1991). 假设选取的测点数为 $D=2L+1$ (D 也为窗口宽度), 当 $D=5$ 时, 滤波系数 F 取 0.12, 0.22, 0.32, 0.22, 0.12 通常可取得较好的校正效果; 当 $D=7$ 时, 滤波系数 F 取 0.08, 0.12, 0.175, 0.25, 0.175, 0.12, 0.08 通常可获得较好的校正效果. 因为本文地表异常体的横向范围相对较大, 所以选择七点滤波器来进行静态校正.

计算出视电阻率的几何平均值并且选定滤波系数之后, 将所选定的邻近测点的几何平均视电阻率 ρ_a 与滤波系数 F 进行数字滤波运算. 若测点在测线首尾两端, 采取镜像复制的方式先扩展再进行计算, 得到每一测点的平均视电阻率的滤波值 ρ_{Li} , 即

$$\rho_{Li} = \sum_{c=-L}^L [\rho_{a(i+c)} \cdot F]. \quad (3)$$

滤波值 ρ_{Li} 记录在滤波窗口中心测点 i 上. 然后, 用每个测点的视电阻率滤波值 ρ_{Li} 除以其几何平均值 ρ_{ai} , 得出各测点的静校正系数 k_i .

最后, 用各测点静校正系数 k_i 乘以其各频点的视电阻率实测值 $\rho_{si}(f_j)$, 得到经过静态校正的视电阻率值, 即

$$\bar{\rho}_{si}(f_j) = k_i \rho_{si}(f_j). \quad (4)$$

2.2 相位法

理论上近地表的局部电性异常体和地形对视电阻率存在影响, 对相位却无影响或影响甚微, 因此采用将相位数据转换成视电阻率的方式来压制静态位移(罗延钟等, 1991). 阻抗相位幅值与视电阻率之间的近似关系式为(梁生贤等, 2010)

$$\varphi(f) \approx \frac{\pi}{4} \left[1 + \frac{d \ln \rho_s(f)}{d \ln f} \right], \quad (5)$$

通过差分计算, 式(5)可近似转换为

$$\frac{\ln \rho_s(f_{j+1}) - \ln \rho_s(f_j)}{\ln f_{j+1} - \ln f_j} = \frac{4}{\pi} \varphi(f_j) - 1, \quad (6)$$

即

$$\ln \frac{\rho_s(f_{j+1})}{\rho_s(f_j)} = \ln \left(\frac{f_{j+1}}{f_j} \right)^{\frac{4}{\pi} \varphi(f_j) - 1}, \quad (7)$$

由此, 可以计算出由相位导出的视电阻率 ρ_φ , 获得无静态位移的视电阻率参数, 即

$$\rho_\varphi(f_j) = \begin{cases} \rho_\varphi(f_j)_{\text{first}} & j=m, \\ \rho_\varphi(f_{j-1}) \left(\frac{f_j}{f_{j-1}} \right)^{\frac{4}{\pi} \varphi(f_j) - 1} & j=m+1, m+2, \dots, N; f_j < f_{j-1}, \\ \rho_\varphi(f_{j+1}) \left(\frac{f_j}{f_{j+1}} \right)^{\frac{4}{\pi} \varphi(f_j) - 1} & j=m-1, m-2, \dots, 1; f_j > f_{j+1}, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\varphi(f_j)$ 为相位幅值, $\rho_\varphi(f_j)$ 为通过相位换算出来的视电阻率, $j=m$ 时视电阻率 $\rho_\varphi(f_j)_{\text{first}}$ 是由实测视电阻率筛选计算得来的初始视电阻率值, 它的选择决定了相位校正结果是否可靠. 本文以需要校正的测点周围受静态效应影响较小的六个邻近测点的最高频视电阻率的算术平均值 $\rho_\varphi(f_{ah})_{\text{first}}$ 作为初始视电阻率值, 由高频向低频逐步递推得到视电阻率. 式(8)的第二和第三行分别是由高频向低频以及由低频向高频递推视电阻率的计算方法.

2.3 最高频相位法

由相位数据递推视电阻率值的方法是一种近似算法, 会产生误差, 丢失一些细微的视电阻率变化特征. 同时又因为各频点视电阻率的递推关系, 会将前一个频点得到的视电阻率的误差叠加到后一频点得到的视电阻率上, 这就导致了近似算法产生的误差进一步累积, 当频点较多时, 会在较大程度上影响递推得到的视电阻率的精确性, 降低了相位法静态校正的效果. 而基于均匀半空间模型添加电性异常体后的模型的电性变化较为简单, 针对相位法校正中的误差积累, 本文提出以邻近测点的最高频视电阻率的算术平均值来代替式(8)中每个频点前一个频点的视电阻率, 即以初始视电阻率值 $\rho_\varphi(f_{ah})_{\text{first}}$ 替换 $\rho_\varphi(f_{j-1})$, 来消除算法中的误差积累. 为了方便与相位法进行区别, 将该方法简称为“最高频相位法”, 其计算公式为

$$\rho_\varphi(f_j) = \begin{cases} \rho_\varphi(f_{ah})_{\text{first}} & j=m, \\ \rho_\varphi(f_{ah})_{\text{first}} \left(\frac{f_j}{f_{j-1}} \right)^{\frac{4}{\pi}\varphi(f_j)-1} & j=m+1, m+2, \dots, N; f_j < f_{j-1}. \end{cases} \quad (9)$$

最高频相位法因为以邻近测点的最高频视电阻率的算术平均值代替计算过程中利用相位递推得到的视电阻率, 虽然消除了积累误差, 但是也因此使视电阻率的响应幅度略有减小, 在电性变化剧烈的地电模型中会存在校正不足或校正过度的问题. 为此, 我们选取空间滤波法和最高频相位法进行联合校正, 以弥补地电条件变化剧烈并且静态位移严重时的最高频相位法校正的不足.

首先, 将式(9)中的指数 $4\varphi(f_j)/\pi - 1$ 乘以一个系数, 来加强单纯最高频相位法的校正效果. 经过反复试算, 通常将以 2 为底数, 以静态位移测点与相邻测点的最高频视电阻率所跨数量级为指数计算所得的数值作为相乘系数即可获得较好的效果. 然后, 利用修改式(9)指数后的最高频相位法校正所得结果和空间滤波法校正结果求取几何平均值, 获得联合校正视电阻率.

3 模型验证

为了验证最高频相位校正法的有效性, 并同时研究不同地电条件下的最佳静态校正方法, 本文设计了一系列正演模型, 其中图 1 给出了在均匀半空间的近地表放置两个电性异常体的模型, 图 1a、1b 和 1c 分别为无地形、地垒、地堑, 地垒高 300 m, 地堑低 300 m. 测线包含 30 个间距为 100 m 的测点, 背景电阻率为 $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$. 在近地表放置两个埋深为 0 m, 长度为 200 m, 高 40 m, 电阻率分别为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 的电性异常体, 以模拟浅层低阻和高阻不均匀体产生的静态效应. 选取近地表低阻异常体正上方的 14 号测点和高阻异常体正上方的 17 号测点数据进行静态校正前后的正演, 以对比空间滤波法、相位法和最高频相位法的校正效果.

图 2 和图 3 分别给出了利用空间滤波法、相位法和最高频相位法对无地形、地垒、地堑

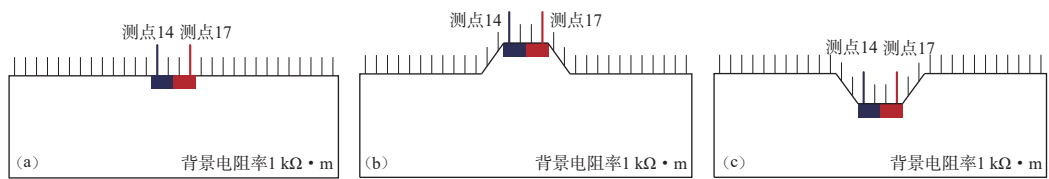


图 1 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的均匀半空间介质近地表存在低阻和高阻电性异常体的模型

测线长 3 km, 测点数为 30, 点距为 100 m; 左侧低阻异常体长 200 m, 高 40 m, 电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$; 右侧高阻异常体长 200 m, 高 40 m, 电阻率为 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$

Fig. 1 Schematic of the half space model with low and high resistivity anomaly near surface for the model of flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

The measuring line is 3 km long, and there are 30 measuring points, and the point spacing is 100 m; the left low resistivity anomaly body and the right high resistivity body are both 200 m in length and 40 m in height, while the electrical resistivity are $1 \Omega \cdot \text{m}$ and $10^5 \Omega \cdot \text{m}$, respectively; the horst is 300 m high and the graben is 300 m deep. The same below

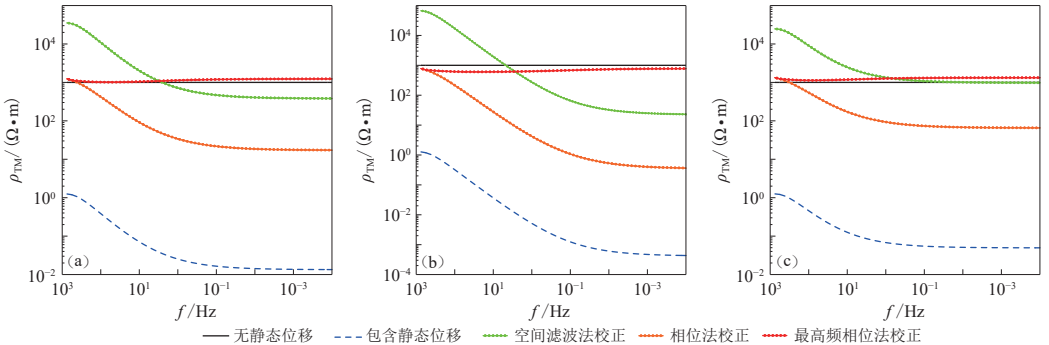


图 2 利用三种静态校正方法对无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的均匀半空间介质近地表低阻异常体正上方测点的静态校正效果对比

Fig. 2 Comparison of static correction effects of the measuring point above the near surface low resistivity anomaly body of homogeneous half-space with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

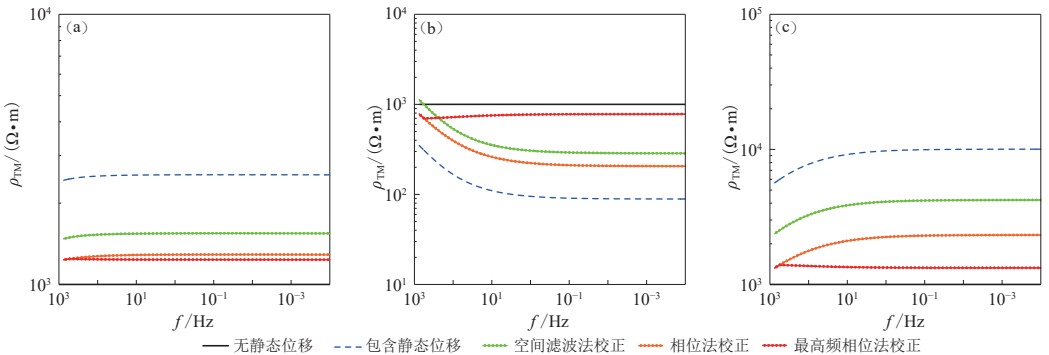


图 3 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的均匀半空间介质近地表高阻异常体正上方测点静态校正效果对比

Fig. 3 Comparison of static correction effects of the measuring point above near surface high resistivity anomaly of homogeneous half-space with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

的均匀半空间介质模型中低阻异常体正上方 14 号测点和高阻异常体上方 17 号测点静态位移的校正效果对比图, 通过对比图 2 与图 3 可见, 对于均匀半空间介质中加入近地表局部低阻、高阻电性异常体或者叠加地形产生的静态效应影响而言, 空间滤波校正法和相位校正法均有一定的压制效果, 但是只有最高频相位法能将异常下方的视电阻率值校正至最为接近背景电阻率 $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$, 校正效果最佳。

为了探索适合水平层状介质且电阻率对比差别较大的地电模型的静态校正方法, 我们对比了空间滤波法、相位法、最高频相位法和基于空间滤波法与最高频相位法的联合校正效果。设计的三层 H 型层状模型如图 4 所示: 第一层厚 1 km , 背景电阻率为 $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$; 第二层厚 1 km , 背景电阻率值为 $10 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$; 第三层电阻率为 $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$, 其余参数设置均与图 1 对应相同。在层状模型中嵌入两个埋深为 0 m 的 $200 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 、电阻率分别为 1 和 $10^5 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 的异常体, 层状模型的水平地表、地垒与地堑地形均与图 1 模型相同。

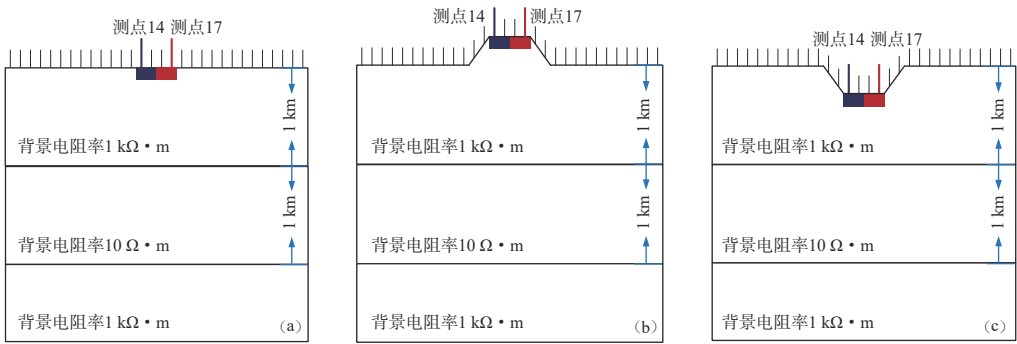


图 4 三层地层加近地表低阻和高阻异常体的模型

(a) 无地形; (b) 含地垒地形; (c) 含地堑地形

Fig. 4 Schematic model of three-layer strata with low and high resistivity anomaly near surface

(a) The flat surface; (b) With the horst terrain; (c) With the graben terrain

对不同地形的层状模型进行正演计算和静态校正效果比较时, 同样选取低阻异常体正上方的 14 号测点和高阻异常体正上方的 17 号测点, 分别对比四种方法的校正效果, 14 号测点的校正效果如图 5 所示。由图 5 可见: 使用空间滤波法、相位法和最高频相位法都存在校正不足或校正过度的情况, 采用联合校正法的效果更佳; 与相位法相比, 联合校正法对低频的校正效果更好; 与空间滤波法相比, 它又明显地改善了校正的过度或不足问题, 并保持了 H 型曲线的原始形态, 在很大程度上弥补了最高频相位法对校正电性剧烈变化的地电条件的不足。

为了更直观地对比空间滤波法、相位法和联合校正法的校正效果, 我们对比分析了 14 号测点的校正结果的误差。误差 e 定义为

$$e = \left| \frac{\lg \rho_c - \lg \rho_n}{\lg \rho_n} \right|, \quad (10)$$

式中, ρ_c 为校正后的视电阻率值, ρ_n 为无静态位移的视电阻率值。不同地形条件下三种静态校正方法校正结果的误差曲线如图 6 所示。由该图可知, 使用空间滤波法校正后的视电阻率仅在中频段少数频点处的误差较小, 使用相位法校正后的视电阻率在中低频位置的误差均

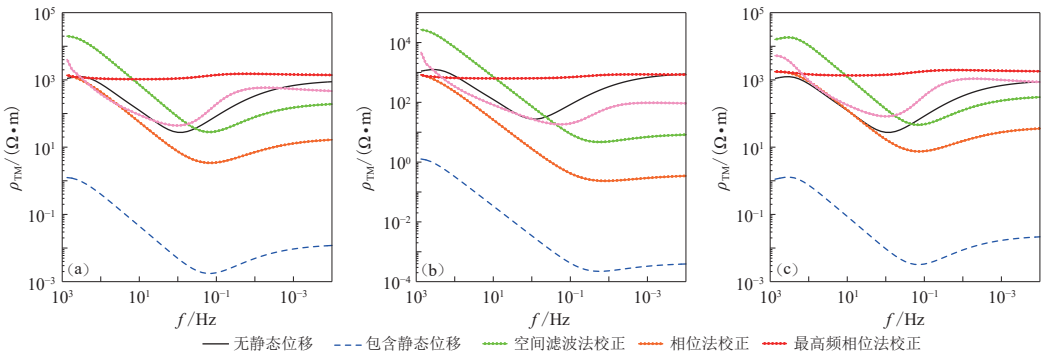


图 5 使用四种方法对无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的水平层状介质近地表低阻异常体正上方测点进行静态校正效果对比

Fig. 5 Comparison of static correction effects of measuring points above near surface low resistivity anomaly of the horizontal layered medium with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c) using four methods, respectively

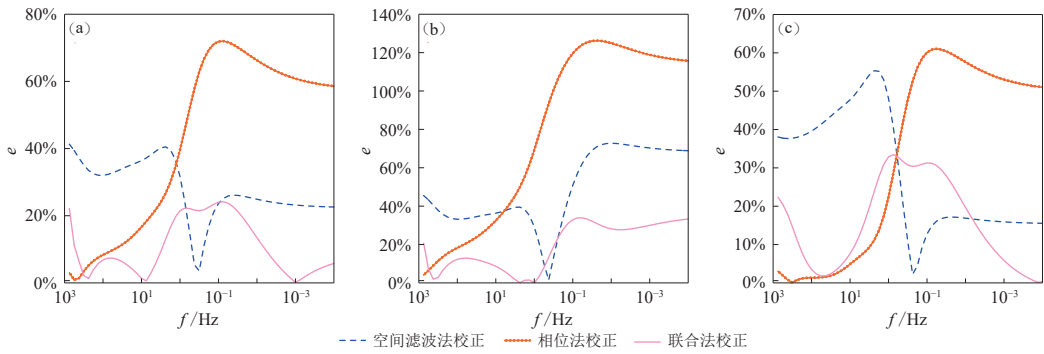


图 6 使用三种不同方法对无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的水平层状介质近地表低阻异常体正上方测点的静态校正误差 e 对比

Fig. 6 Comparison of static correction errors of measuring points above near surface low resistivity anomaly of the horizontal layered medium with flat surface (a), horst terrain (b), and graben terrain (c) using three methods, respectively

很大,而在不同地形条件下使用联合校正法得到的视电阻率误差在大部分频点处均低于前两者的误差,并且最大误差基本控制在 30% 之内,高频处的误差基本控制在 10% 以下。

图 7 为使用四种静态校正方法对不同地形条件下高阻异常体正上方 17 号测点的静态校正效果比较图,由该图可知,传统的空间滤波法和相位法校正效果相对较好,但是联合校正法仍可正确地显示出真实视电阻率的变化趋势,并保持曲线的原始形态。

综上,由图 5—7 可见:传统的空间滤波法和相位法对于电阻率差别较大但静态位移幅度较小的层状介质,其校正效果较联合校正法相对稳定;但是对于静态位移严重的层状介质,联合校正法的校正效果远远好于空间滤波法和相位法,因此当地电介质同时受到不同浅表异常体的影响而产生严重的静态位移时,显然采用联合校正法更合适。

由于测线上所有测点的视电阻率都或多或少地受到静态效应的影响,因此对所有测点进行静态校正,以达到更好地压制静态位移的目的。结合图 2, 3, 5, 7 的静态校正前后的结

果对比和图 6 的误差曲线分析结果, 本文采用最高频相位法校正电性变化较为平缓的地电模型, 而采用最高频相位法与空间滤波法相结合的联合校正法对电性变化剧烈的地电模型进

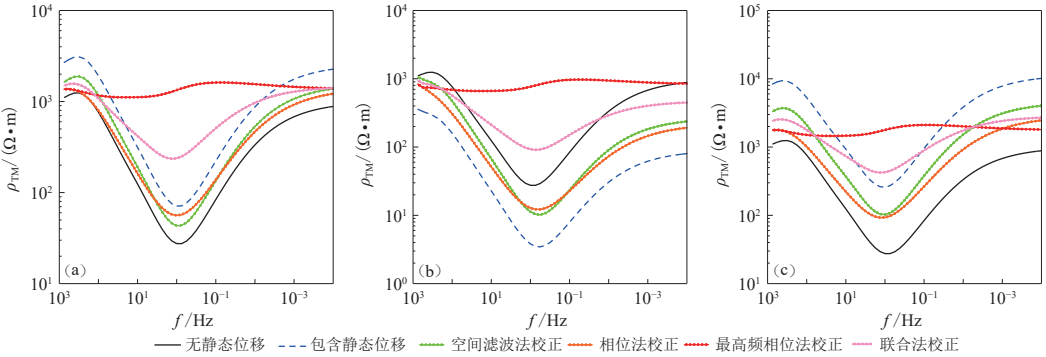


图 7 使用四种方法对无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的水平层状介质近地表高阻异常体正上方测点静态校正效果对比

Fig. 7 Comparison of static correction effects of the measuring points above near surface high resistivity anomaly of the horizontal layered medium with flat surface (a), horst terrain (b), and graben terrain (c) using four methods, respectively

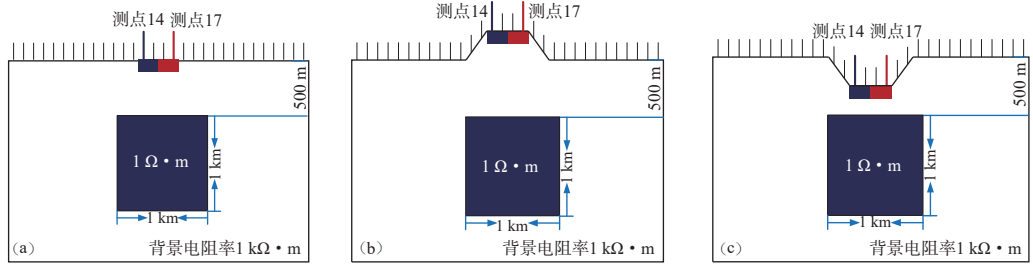


图 8 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的均匀半空间介质近地表存在低阻和高阻且深部存在低阻电性异常体的模型

Fig. 8 Schematic of the homogeneous half space model with near surface electrical anomaly bodies and deep embedding anomaly bodies with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

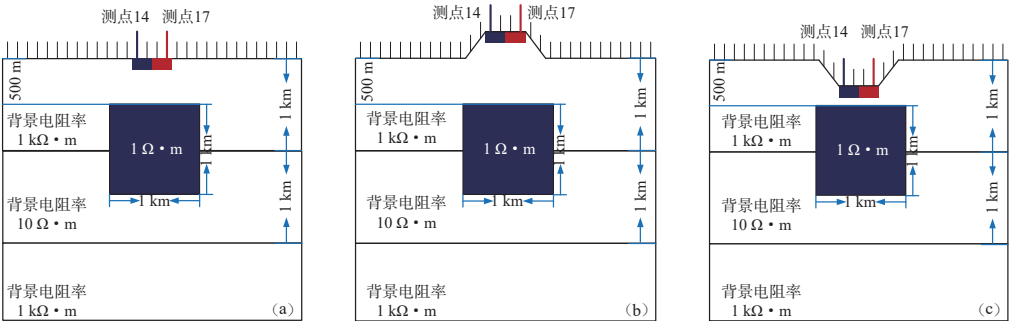


图 9 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的三层地层近地表和深部存在电性异常体的模型

Fig. 9 Schematic of three-layer strata model with near surface electrical anomalies and deep embedding anomaly with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

行校正. 为了进一步验证这两种方法的校正效果, 在模型中加入埋深 500 m、长和高皆为 1 km、电阻率为 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 的低阻异常体, 对比较校正前后的视电阻率拟断面和反演结果. 图 8 和图 9 分别为均匀半空间介质和层状介质近地表和深部存在电性异常体的模型, 即在图 1 和图 4 中分别放置一个深部异常体. 静态校正前后的视电阻率拟断面和二维反演结果分别如图 10 和图 11 所示, 其中左侧两图分别为校正前后的视电阻率拟断面, 右侧两图分别为校正前后的视电阻率二维反演结果. 由图 10 和图 11 可以看出, 静态校正后的正演结果更加平滑, 使用

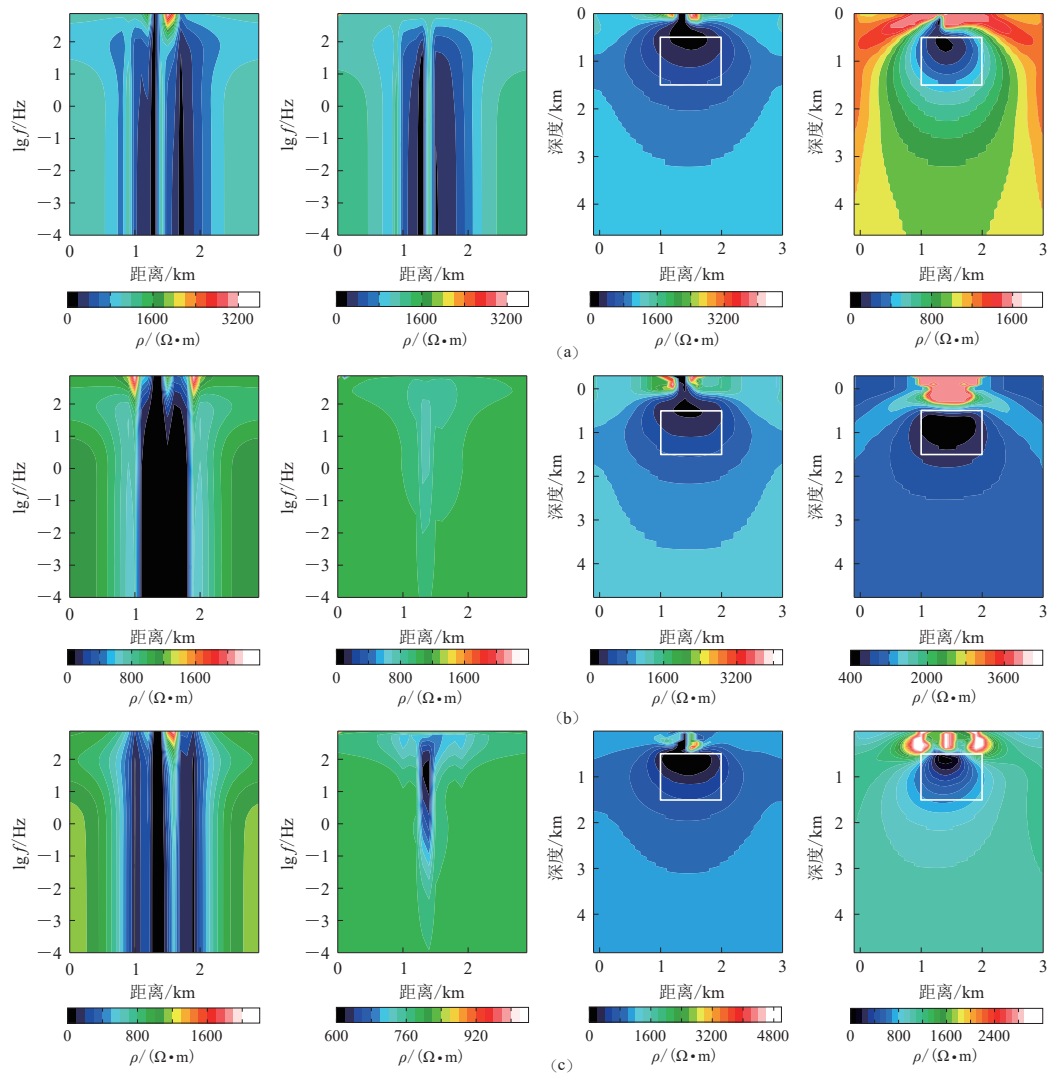


图 10 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)的均匀半空间介质中利用最高频相位法静态校正前后的正演(左侧两列)与反演(右侧两列)效果对比(白色矩形区域为模型中异常体的位置,下同)

Fig. 10 Comparison of correction effects of the forward (left two columns) and inversion (right two columns) results before and after correction by the highest frequency phase method for homogeneous half-space with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

(The white rectangle represents the anomalous body, the same below)

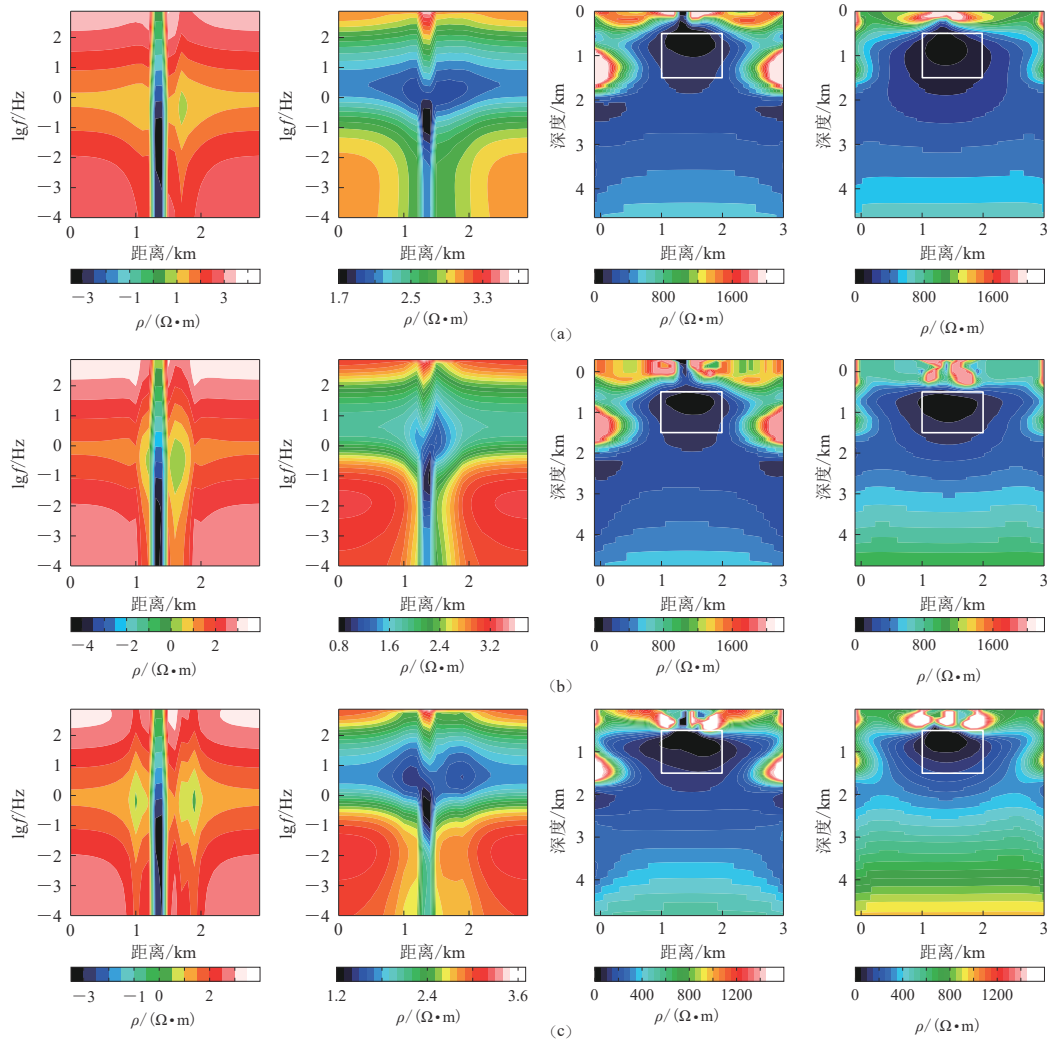


图 11 无地形(a)、含地垒(b)、含地堑(c)时水平均匀层状介质的联合校正法
校正前后的正演(左侧两列)与反演(右侧两列)效果对比

Fig. 11 Comparison of correction effects of the forward (left two columns) and inversion (right two columns) results before and after correction by the joint correction method for three-layer stratum model with flat surface (a), horst terrain (b) and graben terrain (c), respectively

校正后的数据进行反演,深部异常体位置比校正前更加准确,并且层状介质分层界限也更加清晰,这表明无论是否存在地形,这两种方法对静态位移的压制均有明显效果。

4 实测资料分析

本文以四川宜宾某地区的实测电磁资料为例来检验静态校正的效果,该测线共有 9 个测点,点间距为 100 m,测线中部分测点数据(如 4 号测点和 9 号测点)受静态效应影响严重,在视电阻率拟断面图上出现了陡立的“挂面条”条带,如图 12a 所示。由于除了受静态效应影响的测点视电阻率产生大幅畸变,其它测点下方视电阻率变化都较为平缓,故采用最高频相位

法对该地区 4 号和 9 号测点数据进行校正, 图 12b 为使用最高频相位法校正后的视电阻率拟断面图。因视电阻率数据跨越 12 个数量级, 因此对图 12 中的视电阻率都取了反对数。从该图可见, 利用最高频相位法校正之后的视电阻率拟断面图基本压制了静态位移的影响, 拟断面更加平滑, 呈现的信息量更丰富且更接近于真实视电阻率值。

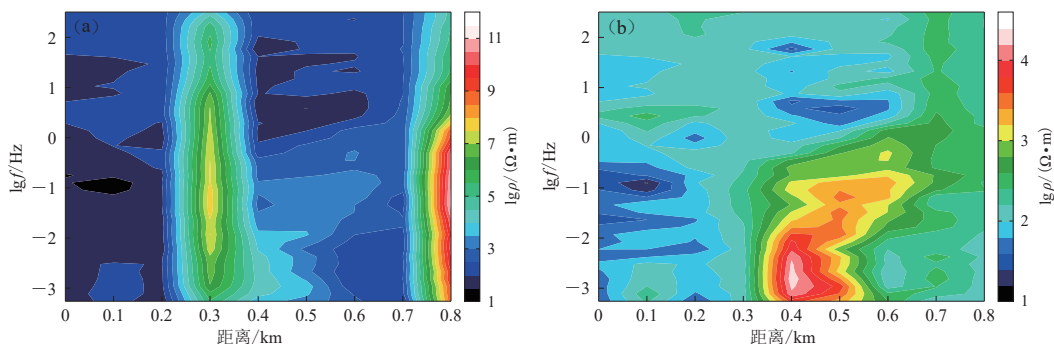


图 12 四川宜宾某地区静态校正前(a)、后(b)视电阻率拟断面图

Fig. 12 Pseudo section of apparent resistivity before (a) and after (b) static correction of an area in Yibin, Sichuan Province

5 讨论与结论

本文将地形近似为地表异常与近地表电性异常体, 使用静态校正方法开展了统一校正。通过对比理论模型与实测资料校正前后的二维正反演结果, 认为进行频率域电磁方法静态位移压制时, 可以根据地质模型的复杂程度合理地选择不同的校正方法: 在电性变化相对平缓的介质中, 相比于相位法和空间滤波法, 采用最高频相位法可以最大限度地消除相位法中的误差积累, 并且能够克服空间滤波法中校正过度的缺陷, 从而可以更加精确地反映出异常体的规模与位置; 对于电性变化较为急剧且静态位移严重的地质情况, 则采用最高频相位法和空间滤波法进行联合校正对静态位移的压制效果更好; 对于电性变化较为急剧但只存在小幅静态位移的地质情况, 可选用空间滤波法或相位法进行校正。对实测数据的处理结果表明, 对于实测数据, 可以根据测区电性变化是否平缓、静态位移是否严重来选择合适的校正方法, 从而获得更加准确的异常体规模与位置信息, 进一步提高 MT 方法的资料处理与解释精度。

参 考 文 献

- 陈清礼, 张翔, 胡文宝. 1999a. 南方碳酸盐岩区大地电磁测深曲线静态偏移校正[J]. 江汉石油学院学报, 21(3): 30–32.
- Chen Q L, Zhang X, Hu W B. 1999a. A correction method for static shift in magnetotellurics in carbonate area of southern China[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 21(3): 30–32 (in Chinese).
- 陈清礼, 胡文宝, 李金铭, 杨华. 1999b. 利用地表电阻率校正大地电磁静态偏移[J]. 物探与化探, 23(4): 289–295.
- Chen Q L, Hu W B, Li J M, Yang H. 1999b. The application of surface resistivity to the correction of magnetotelluric static migration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 23(4): 289–295 (in Chinese).
- 程少华. 2012. 大地电磁静态效应校正方法对比研究[D]. 西安: 长安大学: 9–12.
- Cheng S H. 2012. *Contrastive Analysis of Different Static Shift Correction Methods in Magnetotelluric (MT)* [D]. Xi'an: Chang'an University: 9–12 (in Chinese).
- 高红伟, 张胜业. 1998. 阻抗张量分解进行大地电磁静校正的研究[J]. 地质科技情报, 17(1): 91–96.

- Gao H W, Zhang S Y. 1998. Study of correction for static shift: The decomposition of magnetotelluric impedance tensors[J]. *Geological Science and Technology Information*, **17**(1): 91–96 (in Chinese).
- 谷海亮, 李云鹏. 2013. 大地电磁测深静校正方法在新疆彩华沟铜矿区的应用[J]. *西部探矿工程*, **25**(5): 91–93.
- Gu H L, Li Y P. 2013. The application of magnetotelluric sounding static correction method in Caihuagou copper deposits of Xinjiang[J]. *West-China Exploration Engineering*, **25**(5): 91–93 (in Chinese).
- 黄潜生, 王友胜, 汪卫毛. 2004. 大地电磁曲线校正技术在六盘山盆地研究中的应用[J]. *江汉石油学院学报*, **26**(3): 76–78.
- Huang Q S, Wang Y S, Wang W M. 2004. Application of magnetotelluric curve correction technology in the study of Liupanshan basin[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, **26**(3): 76–78 (in Chinese).
- 梁生贤, 张胜业, 祁晓雨, 石研斌. 2010. 基于空间滤波和相位换算的 MT 静校正方法比较[J]. *工程地球物理学报*, **7**(3): 300–306.
- Liang S X, Zhang S Y, Qi X Y, Shi Y B. 2010. Comparison of static correction methods in magnetotellurics based on spatial filtering and phase conversion technology[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, **7**(3): 300–306 (in Chinese).
- 刘宏, 王家映. 1997. 三维电磁阵列剖面法的基本原理及应用[J]. *地球物理学进展*, **12**(1): 61–73.
- Liu H, Wang J Y. 1997. The basic principle and applications the electromagnetic array profiling[J]. *Progress in Geophysics*, **12**(1): 61–73 (in Chinese).
- 刘建利. 2011. 大地电磁测深法阻抗相位的特性与应用[J]. *陕西地质*, **30**(2): 56–61.
- Liu J L. 2011. Characteristics and application of impedance phase by magnetotelluric sounding[J]. *Geology of Shaanxi*, **30**(2): 56–61 (in Chinese).
- 刘鸣, 李文尧, 马国强, 李攀峰, 王福国. 2015. EH4 静态校正相位法在云南某矿区圈定含煤层位的应用[J]. *河南科学*, **32**(2): 248–252.
- Liu M, Li W Y, Ma G Q, Li P F, Wang F G. 2015. The application of EH4 static corrective phase method in delineating the coal strata of an orefield in Yunnan[J]. *Henan Science*, **32**(2): 248–252 (in Chinese).
- 刘铁. 2015. 基于高频大地电磁法相位信息压制静态效应方法研究[J]. *铁道建筑技术*, (10): 34–37.
- Liu T. 2015. Study on the method of suppressing static effect based on the phase information of high-frequency magnetotelluric sounding[J]. *Railway Construction Technology*, (10): 34–37 (in Chinese).
- 罗延钟, 何展翔, 马瑞伍, 郭建华. 1991. 可控源音频大地电磁法的静态效应校正[J]. *物探与化探*, **15**(3): 196–202.
- Luo Y Z, He Z X, Ma R W, Guo J H. 1991. The correction of static effects in sonic frequency telluric electromagnetic method of controllable source[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **15**(3): 196–202 (in Chinese).
- 罗志琼. 1990. 用电磁阵列剖面法压制 MT 静态效应影响的研究[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, **15**(增刊): 13–22.
- Luo Z Q. 1990. The study of attenuating static effects with electromagnetic array profiling[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **15**(S1): 13–22 (in Chinese).
- 仇根根, 钟清, 刘君平, 白大为, 袁永真. 2012. 大地电磁测深视电阻率和相位曲线之间近似互算方法及程序实现[J]. *物探化探计算技术*, **34**(4): 402–405.
- Qiu G G, Zhong Q, Liu J P, Bai D W, Yuan Y Z. 2012. Approximately calculating method of bounding between magnetotelluric apparent resistivity curve and phase curve and its programming realization[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, **34**(4): 402–405 (in Chinese).
- 宋守根, 汤井田, 何继善. 1995. 小波分析与电磁测深中静态效应的识别、分离及压制[J]. *地球物理学报*, **38**(1): 120–128.
- Song S G, Tang J T, He J S. 1995. Wavelets analysis and the recognition, separation and removal of the static shift in electromagnetic soundings[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **38**(1): 120–128 (in Chinese).
- 汤井田, 何继善. 1993. 静效应校正的波数域滤波方法[J]. *物探与化探*, **17**(3): 209–216.
- Tang J T, He J S. 1993. The wavenumber domain filtering method for static effect correction[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **17**(3): 209–216 (in Chinese).
- 王家映. 1990. 电磁阵列剖面法的基本原理[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, **15**(增刊): 1–11.
- Wang J Y. 1990. The basic principle of the electromagnetic array profiling[J]. *Earth Science: Journal of China University of*

- Geosciences*, **15**(S1): 1–11 (in Chinese).
- 王家映. 1992. 关于大地电磁的静校正问题[J]. 地质科技情报, **11**(1): 69–76.
- Wang J Y. 1992. Problem about static correction in magnetotellurics[J]. *Geological Science and Technology Information*, **11**(1): 69–76 (in Chinese).
- 王书明. 1998. 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, **20**(4): 1–11.
- Wang S M. 1998. The correction of magnetotelluric curve distortion caused by surficial local three-dimension inhomogeneities: The impedance tensor decomposition technique for the correction of MT curves distortion[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **20**(4): 1–11 (in Chinese).
- 谢成良, 魏文博, 金胜, 叶高峰, 景建恩, 张乐天, 董浩, 张帆, 王辉, 姚硕. 2013. 相位张量分析约束下的大地电磁测深阻抗张量分解方法研究[J]. *地球物理学进展*, **28**(3): 1208–1218.
- Xie C L, Wei W B, Jin S, Ye G F, Jing J E, Zhang L T, Dong H, Zhang F, Wang H, Yao S. 2013. Study of magnetotelluric impedance tensor decomposition under the constraint of analysis of phase tensor[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(3): 1208–1218 (in Chinese).
- 杨森鑫, 李晓晨, 刘小畔. 2012. MT数据处理中静校正方法对比[J]. *物探化探计算技术*, **34**(3): 310–313.
- Yang M X, Li X C, Liu X P. 2012. Comparison of different static correction methods in MT data processing[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, **34**(3): 310–313 (in Chinese).
- 杨生, 鲍光淑, 张少云. 2001. MT法中利用阻抗相位资料对畸变视电阻率曲线的校正[J]. 地质与勘探, **37**(6): 42–45.
- Yang S, Bao G S, Zhang S Y. 2001. The correction to aberrant appearance resistivity curve by using impedance phase data in magnetotelluric method[J]. *Geology and Prospecting*, **37**(6): 42–45 (in Chinese).
- 杨生, 鲍光淑, 李爱勇. 2002. MT法中静态效应及阻抗张量静态校正法[J]. 中南工业大学学报, **33**(1): 8–13.
- Yang S, Bao G S, Li A Y. 2002. The static migration to MT data and the impedance tensor static correction method[J]. *Journal of Central South University of Technology*, **33**(1): 8–13 (in Chinese).
- 尹曜田, 魏文博, 叶高峰, 金胜, 董浩. 2012. 基于遗传算法的大地电磁阻抗张量分解方法研究[J]. 地球物理学报, **55**(2): 671–682.
- Yin Y T, Wei W B, Ye G F, Jin S, Dong H. 2012. An improved GB decomposition method based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(2): 671–682 (in Chinese).
- 张翔, 胡文宝, 严良俊, 张世忠. 2002. 小波变换在大地电磁测深静校正中的应用[J]. 江汉石油学院学报, **24**(2): 40–41.
- Zhang X, Hu W B, Yan L J, Zhang S Z. 2002. Application of wavelet transformation of static correction in magnetotelluric depth measurement[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, **24**(2): 40–41 (in Chinese).
- 朱仁学. 1999. 大地电磁测深中相位微分的研究[J]. 地球物理学报, **42**(增刊): 209–218.
- Zhu R X. 1999. A study of the phase-derivative in magnetotelluric method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **42**(S1): 209–218 (in Chinese).
- Andrieux P, Wightman W E. 1984. The so-called static corrections in magnetotelluric measurements[C]//*Proceedings of the 54th Annual International Meeting*. Atlanta: Society of Exploration Geophysicists: 270–270.
- Bostick F X. 1986. Electromagnetic array profiling (EMAP)[C]//*56th Annual SEG Meeting*. Houston: Society of Exploration Geophysicists: 60–61.
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, **18**(3): 605–635.
- Groom R W, Bailey R C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion[J]. *J Geophys Res*, **94**(B2): 1913–1925.
- Sternberg B K, Washburne J C, Pellerin L. 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings[J]. *Geophysics*, **53**(11): 1459–1468.
- Tikhonov A N. 1950. On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust[J]. *Doklady*, **73**(2): 295–297.