

Utilization of effective apparent resistivity in MT data processing and interpretation

Li Aiyong^{①②} Yang Sheng^③

① Team 814, East China Bureau of nonferrous metal Geological Exploration, Zhenjiang, China;

② Institute of Information Geophysical Engineering, Central South University, Changsha, China;

③ China Nonferrous Metal Resource Geological Survey Center, Beijing Zhongse geophysical exploration Ltd, Beijing, China

Abstract

Based on the system discussion of the effective apparent resistivity property, the effective apparent resistivity is a invariable under the coordinate rotation, which is correspondent to the modulus of magnetotelluric response impedance tensor matrix. Under the 1-D condition, it is equal to the normal apparent resistivity ρ_a when to 2-D condition, it is the average of the ρ_{TE} and ρ_{TM} , which has the dimensionality reduction property. The parallel moving algorithm was used to do static correction, as the static effect can not affect its curl shape. According to the actual characteristics of the geological structure is very complicated. It is very difficult that sometimes carries out TE and TM mode discrimination for actual data, which always appears the mistake, even if it is proved to be able to make a correct Judgement, but the electrical main axle often is a change curve along with the frequency, these factors can affect a merotype pattern (the TE mode, the TM mode or union mode) 2-D inversion result, but directly carries out inversion for effective apparent resistivity, it is irrelative to coordinate rotation, so the inverse deviation can be avoided in the effective apparent resistivity 2-D inversion. Because of the incorrect mode discrimination, sometimes MT prospecting line is impossible just vertical to the structure trend, both the ρ_{xy} and ρ_{yx} of the measuring line direction and the ρ_{TE} and ρ_{TM} of the principal axes direction are unequal. this problem also involved with impedance tensor rotate cycle, and that this problem can be avoided by fitting influence of the apparent resistivity. because effective apparent resistivity is in possession of dimensionality reduction characteristic, compared with the ρ_{TE} and ρ_{TM} 1-D inversion, the 1-D inversion result is closer the 2-D result. it can protect inversion from the inversion divergence while regarding it as the inversion 2-D initial model. So the utilization of effective apparent resistivity in processing and interpretation of the magnetotelluric sounding data was recommended.

Key words: magnetotelluric sounding, data processing and interpretation, effective apparent resistivity, rotation invariable, dimensionality reduction property.

MT 资料处理解释中有效视电阻率的利用

李爱勇^{①,②} 杨生^③

1 江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队, 江苏镇江;

2 中南大学信息物理工程学院, 湖南长沙

3 有色金属矿产地质调查中心北京中色物探有限公司, 北京

摘要:

对有效视电阻率的特征进行了系统的讨论,它与大地电磁响应阻抗张量矩阵的模相对应,是个坐标旋转不变量,在一维条件时有效视电阻率等于常规视电阻率 ρ_a ,在二维条件时等于 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 的几何平均,具有降维特征。因静态效应不影响它的曲线形态,所以可用平移法进行静校正,又因与旋转轴无关,对有效视电阻率进行二维反演可避免极化模式判别不准确带来的反演结果偏差。所以建议在大地电磁测深资料处理解释中充分利用有效视电阻率发挥作用。

关键词: 大地电磁测深; 资料处理解释; 有效视电阻率; 旋转不变量; 降维特征

1 引言

大地电磁测深法(简称 MT)野外数据采集随着仪器硬件系统性能的提高,设计思路的完善,特别是将 GPS 应用到采集信号的时间同步上,使远参考技术从设想变为现实,大大改善了野外数据的采集质量^[1]。在资料处理解释方面,Robust 统计方法^[2]的引入,一、二维反演方法的完善与成熟,三维正反方法的开发,使得资料解释精度不断提高^[3]。

但 MT 方法仍有诸多问题需要解决,如静态效应的改正问题、反演过程中的多解性问题等,特别是在实际的 MT 勘探中碰到的地质情况千差万别,相当复杂,并不像理论研究时假设的条件那样简单规范,这样理论假设条件(如一维条件、二维条件)与实际地质情况不完全相符,使解释结果产生偏差,甚至是错误。如实际勘探中最普遍碰到的一个问题是:野外布设的 MT 勘探线有时常常与地质构造走向不完全垂直,这时在二维反演时是用主轴方向的 ρ_{TM} 和 ρ_{TE} 进行反演,还是对平行测线和垂直测线方向上的 ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 进行反演,两种反演的结果是不同的。

对于 MT 方法中存在的问题,虽然国内外的 MT 工作者进行了大量的研究工作,有些问题仍然没有从根本上解决,但它们在实际的资料处理解释中是无法回避的,处理解释人员总要采取不同的措施解决这些问题,因不同解释人员采用的方法不同,这就出现对相同的原始数据采用相同的反演软件,可能得出不同的反演结果,更不要说进一步的地质推断。所以目前如何尽最大可能有效地减弱各种影响,显得十分有意义和实用。本文讨论的有效视电阻率方法则是在这方面的尝试。

2 有效视电阻率

在大地电磁测深勘探中,沿地面实测的两个正交方向的电磁场经时一频傅氏变换后,某一频率(f)的电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y)之间的关系为:

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \tag{1}$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y$$

写成矩阵形式有:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z}\mathbf{H} \tag{2}$$

其中:

$$\mathbf{E} = (E_x, E_y)^T$$

$$\mathbf{H} = (H_x, H_y)^T$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$$

Z 为阻抗张量，是实测点的大地电磁响应， Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx} 和 Z_{yy} 为阻抗要素，均为复数，野外实时处理给出的两条视电阻率曲线 ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 分别为：

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2$$

其中： f 为频率。

有效视电阻率(ρ_{eff})定义为^[4]：

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{1}{5f} |\mathbf{Z}| \quad (3)$$

$|\mathbf{Z}|$ 是阻抗张量矩阵 \mathbf{Z} 的模，有：

$$|\mathbf{Z}| = |Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}| \quad (4)$$

阻抗相位 (φ_{eff}) 为：

$$\varphi_{\text{eff}} = 0.5 \times \text{Arg} (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}) \quad (5)$$

由上式 (4) 和式 (5) 可知 4 个阻抗张量要素均参与了有效视电阻率的计算，是个三维参数。

由于阻抗要素与测量坐标方向有关，不同的测量坐标方向会得出不同的阻抗要素值，数据处理时根据不同的目的要对 \mathbf{Z} 进行旋转处理，旋转后的阻抗张量 \mathbf{Z}_θ 与 \mathbf{Z} 的关系为：

$$\mathbf{Z}_\theta = \mathbf{R}(\theta) \mathbf{Z} \mathbf{R}(\theta)^T$$

其中：

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$\mathbf{R}(\theta)^T$ 为 $\mathbf{R}(\theta)$ 的转置矩阵， θ 为旋转角。

阻抗张量旋转后虽然各阻抗要素发生了变化，但阻抗张量的模不变，有：

$$|\mathbf{Z}| = |\mathbf{Z}_\theta|$$

说明有效视电阻率是个旋转不变量。

对于一维情况, 因 $Z_{xx}=Z_{yy}=0$, $Z_{xy}=Z_{yx}=Z_{1D}$ 。有

$$\rho_{\text{eff}}=\rho_{1D} \quad (6)$$

所以一维条件时常规的视电阻率是有效视电阻率的一个特例。

当地下地质构造符合二维条件时, 将 Z 旋转到电性主轴上, $Z_{xx}(\theta)=Z_{yy}(\theta)=0$, 有:

$$Z_{2D}=\begin{pmatrix} 0 & Z_{TE} \\ -Z_{TM} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\rho_{\text{eff}}=(\rho_{TE}\times\rho_{TM})^{1/2} \quad (7)$$

二维条件时, 有效视电阻率 ρ_{eff} 是 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 的几何平均值。

3 利用有效视电阻率进行资料处理的优势

我们建议利用有效视电阻率进行大地电磁测深资料的处理解释, 是因为其具有下列优势。

3.1 在静态校正中的优势

静态效应一直是大地电磁测深法资料处理人员的一个棘手问题, 到目前为止, 可以说仍没有一个广泛实用、能完全消除静态效应的方法。虽然国内外大地电磁工作者曾先后提出了一系列的方法和技术^[5-7], 这些方法技术在一定条件下对静态效应起到了抑制作用。但有些方法由于条件的限制, 只能在特定情况下使用, 有些方法由于一些不确定因素较多, 处理后的结果可信度无法把握, 难以推广。相比之下, 视电阻率曲线的平移法, 因简单而可控制, 是目前主要采用的静态校正方法, 实际上其它一些校正方法最终也有个对视电阻率曲线平移的操作。平移法仅考虑了静态对视电阻率幅值的影响, 而没考虑对曲线形态的影响, 事实是静态效应会影响视电阻率 ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 、或 ρ_{xy} 、 ρ_{yx} 的曲线形态^[8], 而不影响有效视电阻率 ρ_{eff} 的形态。所以对 ρ_{eff} 的聚类静态校正^[9]、曲线类型定性分析更为合理。

由于静态效应是当地表存在有局部电性不均匀体(尺度小于高频的勘探尺度), 在电流流过不均匀体界面时, 界面电荷产生的一个与外电场成正比的附加电场形成的, 也就是说, 静态效应使电场发生了平移, 由 E 变为 E' 。

$$E'=CE \quad (8)$$

$$C=\begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{pmatrix}, \text{为与频率无关的实系数矩阵。}$$

这样式(2)变为:

$$E'=Z'H \quad (9)$$

Z' 是受静态影响的阻抗张量

$$\mathbf{Z}' = \begin{pmatrix} Z'_{xx} & Z'_{xy} \\ Z'_{yx} & Z'_{yy} \end{pmatrix}$$

将式(8)代入式(9)与式(2)联解,得:

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{CZ} \quad (10)$$

有:

$$|\mathbf{Z}'| = |\mathbf{C}||\mathbf{Z}| \quad (11)$$

由式(10)可知, \mathbf{Z} 的阻抗要素和相对应的 \mathbf{Z}' 中的阻抗要素之间不是简单的倍数关系, 所以由 \mathbf{Z} 和 \mathbf{Z}' 中阻抗要素计算的视电阻率之间也不是简单的倍数关系^[10], 说明静态会改变由阻抗要素计算的视电阻率 (ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 、或 ρ_{xy} 、 ρ_{yx}) 曲线的形态, 采用平移法的静态校正会带来问题。但由式(11)可知, 有效视电阻率 ρ_{eff}' 和 ρ_{eff} 仅差 $|\mathbf{C}|$ 倍, 说明静态没改变有效视电阻率的形态, 所以用平移法对有效视电阻率进行静态校正是合理的。图 1 给出一个实例, 为同一构造单元内连续 4 的测点 (点距 1km) 的 ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 和 ρ_{eff} 视电阻率曲线, 各点的 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 曲线高频首支分离很大 (相差一个数量级左右), 说明静态效应很严重, 虽然都在同一个构造单元内, 但它们的 ρ_{TE} 曲线或 ρ_{TM} 曲线形态各异, 相反, 4 个点的 ρ_{eff} 曲线形态具有很好的连续性, 说明静态没改变 ρ_{eff} 视电阻率曲线的形态, 仅仅影响其幅值。

3.2 在二维反演解释中对一些问题的回避

目前大地电磁测深法资料的二维反演技术可以说是日趋完善与成熟, 已达到实用程度, 但是实际的地质情况相当复杂, 将二维反演方法应用到实际的资料处理解释中, 有些现实问题不得不考虑。第一个问题是 TE 模式与 TM 模式判别困难, 二维反演是对 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 进行拟合的, 实测的视电阻率经电性主轴旋转后的 ρ_{xy} 、 ρ_{yx} 中哪个是 ρ_{TE} , 哪个是 ρ_{TM} , 因电性主轴和地质构造走向一致, 也可能和地质构造走向垂直, 判别起来有时很困难, 一旦判别错误, 必然会影响反演结果。第二个问题是实测资料的电性主轴几乎都是一条随频率的变化曲线, 更有甚者, 高、低频的电性主轴相差可达到近 90 度, 说明局部构造走向和区域构造走向是不一致的, 这是很正常的地质现象, 但对这样的资料进行二维反演自然又会带来偏差, 因为在高频是 TE 模式, 但到了低频可能就是 TM 模式了。第三个问题就是 MT 勘探线不可能完全和地质构造线正交, 这样二维反演过程中正演计算的是平行测线和垂直测线两个确定方向上的理论视电阻率和阻抗相位, 而拟合的对象是另一个方向 (电性主轴) 上的视电阻率和阻抗相位, 显然是不合理的。上述问题都是主轴的不确定性造成的, 前文也说到有效视电阻率是个旋转不变量, 所以直接对有效视电阻率进行二维反演可以回避上述问题。

图 2 是一个测线方向和构造走向不相互垂直时的模型正反演例, 测线方向与构造走向以 45 度相交。图 2 (a) 是地电断面在测线上的切断面, 正演计算出模型在测线上的理论响应, 尔后对其构成的不同视电阻率进行二维反演, ρ_{xy} 、 ρ_{yx} 分别是平行和垂直测线的视电阻率, ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 分别是电性主轴方向上的视电阻率, 图 2 (b) — (d) 分别是对 ρ_{xy} 、 ρ_{yx} , ρ_{TE} 、 ρ_{TM} , 和对 ρ_{eff} 的反演电阻率断面, 显然对 ρ_{eff} 的反演结果精度最高。

另一方面在二维反演中, 当存在上述问题时, 因二维条件的不满足, 同时拟合两支视电阻率曲线, 可能会顾此而失彼, 两者都拟合不好。

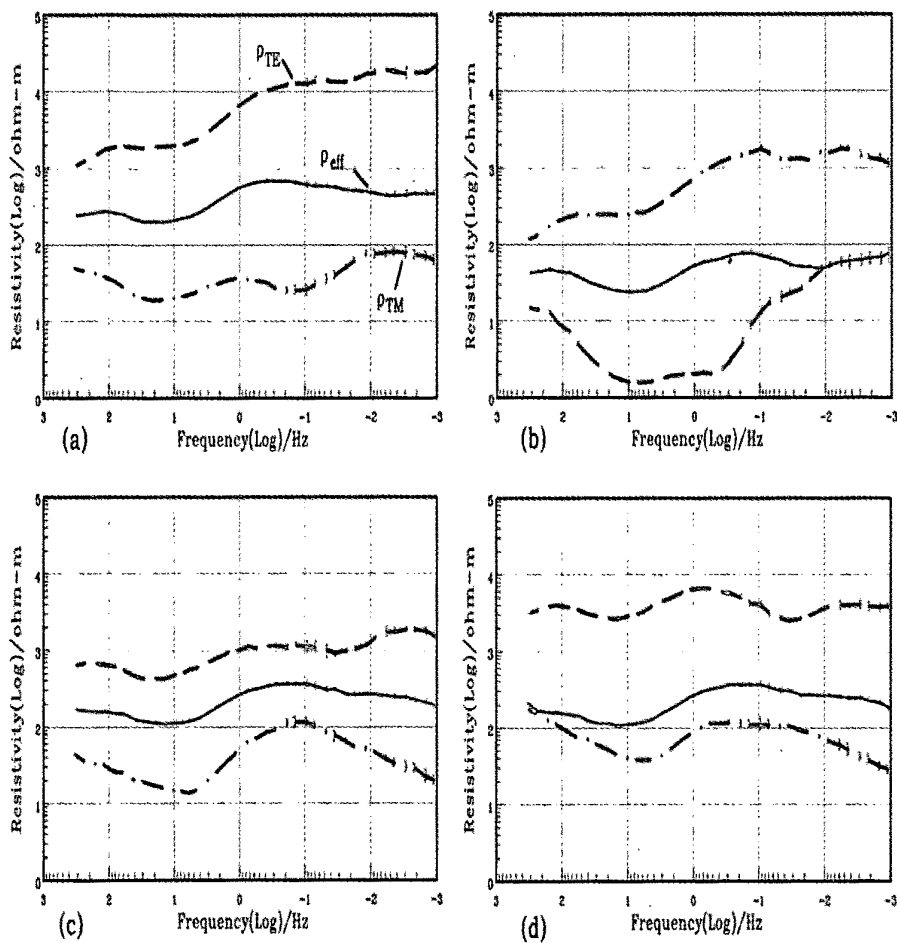


图 1 连续 4 个测点不同视电阻率曲线形态的变化特征

(点号分别为(a).206 号, (b).207 号, (c).208 号, (d).209 号)

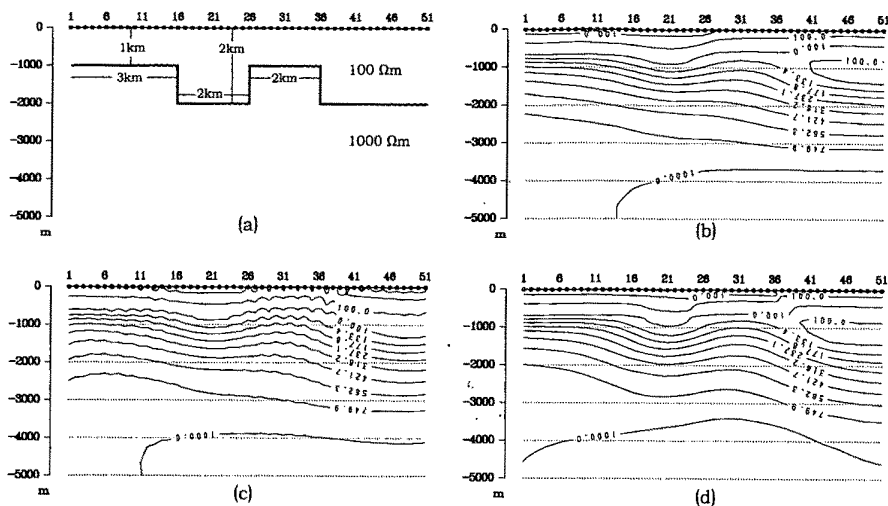


图 2 二维地电模型和不同视电阻率的反演结果

(a): 剖线上的二维地电断面; (b): ρ_{xy} 、 ρ_{yx} 联合反演结果; (c): ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 联合反演结果; (d): ρ_{eff} 反演结果

3.3 逐级反演成果联贯可比

对 MT 资料处理总是采用多种方法, 由半定量到定量, 由一维到二维进行解释, 步步深入, 各解释结果要相互佐证, 以避免反演的发散和多解。但在二维情况时, 对 TE 模式的视电阻率和对 TM 模式的视电阻率进行一维反演的结果相差很大, 和二维的反演结果也缺乏可比性。

在 MT 法中, 地电断面的二维性 (包括地形和静态) 对 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 的影响特征总是相反的, 即: 测点旁侧的二维性变化使一支视电阻率曲线抬高时, 必然会使另一支视电阻率曲线降低, 而由式 (7) 可知, 有效视电阻率 ρ_{eff} 是 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 的几何平均, 所以 ρ_{eff} 具有降维特征, 可部分地削弱旁侧影响, 对其进行一维反演, 其结果与二维反演结果具有可比性。图 3 是对同一测线对有效视电阻率采用不同反演方法的电阻率断面和同线的地震勘探时间断面, 3 种反演结果具有较好的对比性, 和地震断面 (图 3d) 也一致, bostick 反演结果、一维反演结果是对二维反演结果的佐证。

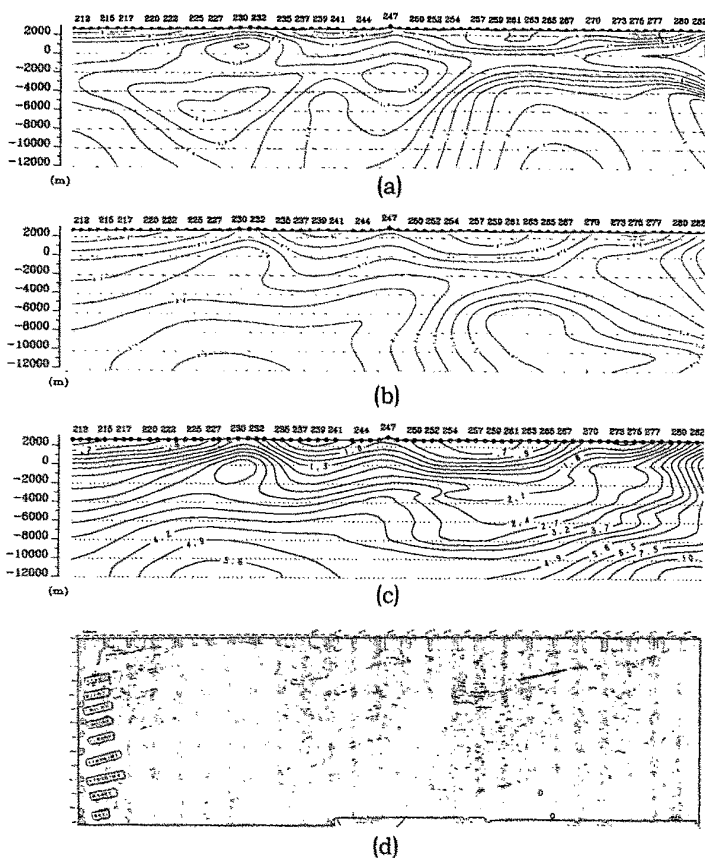


图 3 MT 资料不同反演方法电阻率断面及地震时间断面对比

(a):bostick 反演结果；(b) 一维反演结果；(c) 二维反演结果；(d) 地震勘探时间断面

4 结语

(1) 有效视电阻率就是大地电磁响应阻抗张量矩阵的模除以 $5f$, 是个坐标旋转不变量, 在一维条件时等于常规视电阻率 ρ_a , 在二维条件时, 有效视电阻率等于 ρ_{TE} 和 ρ_{TM} 的几何平均;

(2) 静态效应会影响阻抗要素视电阻率 (ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 、或 ρ_{xy} 、 ρ_{yx}) 的曲线形态, 但不影响有效视电阻率的曲线形态, 所以可直接对其进行平移法的静态校正。

(3) 因实际的地质构造特征相当复杂, 对实测资料进行 TE 模式和 TM 模式判别有时很困难, 常常发生差错, 即使能正确判别, 但电性主轴往往是一条随频率的变化曲线, 这些因素都会影响分模式 (TE 模式, TM 模式或联合模式) 的二维反演结果, 而直接对有效视电阻率进行反演, 不牵涉主轴的问题, 所以主轴判别的差错不影响反演结果。

(4) 因为有时 MT 勘探线不可能正好垂直于构造走向, 测线方向上的 ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 与主轴方向上的 ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 不相等, 那么, 二维反演的理论响应和谁拟合? 严格说对谁拟合都不合理, 这一问题又涉及的是阻抗张量旋转周的问题, 而对影响视电阻率的拟合可避开这一问题。

(5) 因有效视电阻率具有降维特征, 与对 ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 的一维反演相比, 对有效视电阻率的一维反演的结果更接近二维反演的结果, 所以由其作为二维反演的初始模型可防止反演的发

散。两者的可比性,达到相互佐证的目的,以减弱 MT 解释工作的多解性。

因此建议在大地电磁测深资料处理解释中充分利用有效视电阻率发挥作用。

参考文献

- [1] 杨 生, 鲍光淑, 张金胜. 远参考大地电磁测深法应用研究[J]. 物化与化探, 2002, 26 (1): 27-31.
- [2] Sutarno D, Vozoff K. Robust M-estimation of magnetotelluric impedance tensors[J]. Expl.Geophys., 1989,20:383-398
- [3] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及瞻望[J]. 地球物理学进展,2002,17(2):245-254
- [4] 陈乐寿,王光镗. 大地电磁测深法.北京:地质出版社,1990
- [5] 王家映. 关于大地电磁的静校正问题[J]. 地质科技情报,1992,11(1):69-76
- [6] Bostick F X. Electrmagnetic array profiling (EMAP)[J]. 56th Annual SEG Meeting,Houston, 1986,42-100
- [7] Groom R W, Bailay R C. Analytical investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatters on MT tensor decompositions[J].Geophysics, 1991,56:496-518,。
- [8] 杨 生, 鲍光淑, 李爱勇. MT法中静态效应及阻张量静态校正法[J].中南工业大学学报, 2002, 33 (1): 8-13.
- [9] 许建荣. 平面聚类静态校正法[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39 (6): 720—723.
- [10] 李爱勇, 唐冬春, 杨 生. 直接消除电场分量静态效应的静改方法. 石油地球物理勘探, 2004, 39 (增刊): 96—98.