

$E-E_x$ 广域电磁法横向约束反演

张继锋¹,周光裕¹,刘最亮²,孙乃泉¹,张富翔¹,王中圣¹

(1.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;2.华阳新材料科技集团有限公司,山西 阳泉 045000)

摘 要:针对 $E-E_x$ 广域电磁法反演剖面横向不连续性问题,在原有 Occam 反演的基础上添加了相邻测点约束项,使得在模型反演过程中不仅仅考虑到了反演模型的纵向光滑性,同时尽可能使横向相邻测点反演剖面具有连续性。当存在测井先验资料时,该约束项可实现对钻井附近测点的纵向约束,其余测点则通过上一测点进行约束,从而改善反演剖面的横向连续性。为了充分利用先验资料及减小剖面反演误差积累,采用测井附近的点或电场值较稳定的测点为剖面分割点,对整条剖面进行分段反演,可减小累积误差。采用一维横向约束反演目标函数,先后通过进退法和黄金分割法求取拉格朗日乘子。一维模型测试结果显示,采用参考点约束的反演收敛速度更快,反演电阻率在中间层更趋近于模型本征电阻率。二维模型测试结果表明:采用横向约束反演得到的剖面电阻率连续性好,电阻率剖面更光滑。基于横向约束的反演对于地层的精细分层和定量解释优于广域视电阻率解释断面。实际数据反演时,可首先对实测数据进行预处理和光滑,计算广域视电阻率,以此作为反演的初始模型,能够快速收敛到真实模型。最后,对山西某处广域电磁法野外实测资料进行了反演,结果表明:一维横向约束反演比广域视电阻率在横向上连续性更好,纵向分层能力强,该结果和实际出水点以及已知采空区吻合较好,与实际地质情况符合,表明该方法能够改善实测资料的反演效果,提高广域电磁法在煤矿水文地质方面的勘探精度。

关键词:广域电磁法;视电阻率;Occam 反演;横向约束;煤层富水区

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)07-2698-10

Lateral constrained inversion of $E-E_x$ wide field data

ZHANG Jifeng¹,ZHOU Guangyu¹,LIU Zuiliang²,SUN Naiquan¹,ZHANG Fuxiang¹,WANG Zhongsheng¹

(1.College of Geology Engineering and Geomatics,Chang'an University,Xi'an 710054,China; 2.Huayang New Material Technology Group Co.,Ltd.,Yangquan 045000,China)

Abstract:In order to solve the problem of lateral discontinuity of inversion profile for $E-E_x$ wide field electromagnetic method,the constraint term of adjacent points is added on the basis of the original Occam inversion,so that not only the longitudinal smoothness of inversion model is considered in the inversion process,but also the continuity of cross-section inversion by adjacent points is made as far as possible.When there is logging prior data,this item can realize the vertical direction constraint on the measured points near the drilling well,and the inversion results of the other survey points are considered to be the least different from the previous one,so as to improve the lateral continuity. In order to make full use of prior data and reduce the accumulation of inversion errors,we adopts the method that the adjacent survey points or the measured points with stable field value and wide field apparent resistivity

收稿日期:2021-09-10 修回日期:2021-12-29 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1427

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807806);国家自然科学基金资助项目(42174168);陕西自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JM-159)

作者简介:张继锋(1978—),男,陕西蒲城人,副教授,博士。E-mail:zjf0201@126.com

通讯作者:孙乃泉(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士。E-mail:nqsun@chd.edu.cn

引用格式:张继锋,周光裕,刘最亮,等. $E-E_x$ 广域电磁法横向约束反演[J]. 煤炭学报,2022,47(7):2698-2707.

ZHANG Jifeng,ZHOU Guangyu,LIU Zuiliang,et al.Lateral constrained inversion of $E-E_x$ wide field data[J].
Journal of China Coal Society,2022,47(7):2698-2707.



移动阅读

as the section segmentation points, and carries out piece-wise inversion of the whole profile to reduce accumulation error of profile inversion. The objective function of one-dimensional lateral constrained inversion is given, and the Lagrange multiplier is calculated by the combination of advance and backward method and golden section method. The one-dimensional model test results show that the inversion convergence rate with the reference point constraint is faster, and the inversion resistivity is closer to the model intrinsic resistivity in the middle layer, but it has little influence on the calculation error. The two-dimensional model test results show that the cross-section resistivity obtained by inversion with lateral constraints has better continuity and smoother profile. The inversion with lateral constraints is superior to the interpretation of the fine stratification and quantitative interpretation of wide filed apparent resistivity section. In the survey inversion, measured data can be preprocessed and smoothed first to calculate the wide filed apparent resistivity, which can be used to the initial model of the inversion and quickly converge to the real model. Finally, the inversion of the observed data of wide field electromagnetic field somewhere of Shanxi Province is performed, the results show that one dimensional lateral constraint inversion is better than wide field apparent resistivity in lateral continuity, the vertical stratification ability is better than that of the apparent resistivity section, the results, the actual outlet water point and known goaf area, are in good agreement with the actual geological conditions. It shows that this method can improve the inversion accuracy of measured data in coal mine hydrogeology.

Key words: wide field electromagnetic method; apparent resistivity; Occam inversion; lateral constrain; coal seam rich water area

传统的可控源音频大地电磁法(CSAMT)一般要求数据采集范围在远区,沿用大地电磁的卡尼亚视电阻率解释方法,在实际工作中低频信号常常达不到远区,这将导致数据处理和解释与地下介质的电性变化不一致。广域电磁法是在CSAMT基础上提出的,它采用大功率人工源以提高信噪比,摒弃了仅在远区进行观测的缺点,拓展了观测范围,加大了勘探深度,且可采用单分量进行数据采集和解释,提高了观测速度和野外效率^[1]。因此,广域电磁法自提出以后,就成为许多科研工作者研究的热点,各种不同装置形式和不同场分量的测量方法先后被研究,包括基于水平电流源的 $E-E_x$, $E-E_\varphi$, $E-E_r$ 和 $E-H_z$ 广域电磁方法^[2-6]。考虑到野外实际情况,采用水平电流源测量平行于源方向的电场分量 $E-E_x$ 方式应用最为广泛^[7]。

广域视电阻率是一种被广泛采用的、能够直观反映地下电性特征的参数,是目前广域电磁法的主要处理解释手段。地球物理反演是进行精细化勘探的主要手段,其作用是从有限的观测数据中尽可能地恢复原有的地下物性参数,这也是地球物理工作者的最终目标。因此,在电法勘探中,希望得到更接近于地下真实电阻率的成像结果。目前,2.5D反演和3D反演可以得到更为接近地下真实模型的结果,但计算量较大,效率较低,因此一维反演仍被广泛采用,特别是在近似层状地层构造中。

早期CSAMT一维反演多采用先将近区和过渡区数据校正到远区,再以MT的方法进行反演,或仅

采用远区数据进行反演。BARTEL和JACOBSON^[8]、石昆法^[9]采用了前一种方案;而SASAKI等^[10]利用阻尼最小二乘法实现了后一种方案。之后,ZONGE等^[11]亦利用最小二乘法完成了不做近场校正的一维CSAMT全资料反演;ROUTH^[12]在ZONGE的基础上考虑了反演参考模型和反演结果的光滑度;谭捍东^[13]基于Occam反演思想完成了水平电偶源电场的反演;王若和王妙月^[14]经过分析后认为全资料反演为今后发展方向,并结合网格参数法和剥层法完成了一维CSAMT反演工作,该方法不依赖初始模型,且对噪声有一定的抑制作用;尚通晓^[15]和朱威等^[16]详细比较了Occam反演和阻尼最小二乘反演在双极源全区反演中的应用效果,2种方法均可较好地拟合真实模型,但阻尼最小二乘反演对初始模型的要求更高;王堃鹏等^[17]将MT中自适应正则化反演方法引入到CSAMT全区反演中,一定程度上加快了反演速度;周军等^[18]将Levenberg-Marquardt反演方法引入到CSAMT全区数据反演中,改善了矩阵求逆的条件,使反演收敛更快速稳定;裴云等^[19]直接采用Cagniard视电阻率作为反演参数,得到了较理想的反演结果。

为了得到更接近地下介质真实电性的结果,一些学者开始研究反演目标函数中添加约束项的反演方法。KERRY Key^[20]给出了带约束的反演迭代公式,认为将地震解释中的构造约束整合到CSEM反演中具有重大意义,同时指出2个分量联合反演不会提高反演精度;张凯飞^[21]在传统的改进的共轭梯度

法(NLGG)基础上添加了电性约束项,得到了较一般反演方法更优的结果,但同时指出,加入约束项后计算速度降低,且在紧约束的条件下易陷入局部极值而反演失败;索光运等^[22]采用解析法计算雅克比矩阵及井震约束的方式实现了 $E - E_x$ 一维并行反演,有效提高反演速度;唐传章等^[23]实现了 CSAMT 的一维正演的并行化后,采用边界约束的有限内存拟牛顿算法完成了 CSAMT 一维反演,反演分层能力较好。

频率电磁法中由于地表不均匀体会导致严重的静态位移现象,这会导致视电阻率断面图出现所谓的“挂面条”现象,即使进行校正后,也不能完全消除静态位移。另一方面,采用一维反演,由于地下构造的变化和每个点受到干扰不一致,一维反演常常出现电阻率断面图的不连续现象,这与实际地层不符。2004 年, AUKEN 等^[24]提出剖面横向约束反演方法,其主要思想是利用横向约束稀疏矩阵将单点反演组合成一个集合,以保证每个单点迭代拟合观测数据的过程中,可以保证剖面上横向电阻率和厚度变化尽可能的小,从而达到反演后的剖面横向上呈现连续性;其后 2009 年, VALLEE 等^[25]对横向约束反演中的横向约束稀疏矩阵进行了改进,提出利用二阶差分代替一阶差分形成横向约束矩阵,以此表示让反演测点与左右两点间的差异尽可能的小;2014 年,蔡晶等^[26]对频率域航空电磁数据进行横向约束反演,并提出加权横向约束的方法,以保证剖面根据先验信息可以实现不同程度的横向连续性;2016 年,殷长春等^[27]把加权横向约束的思想应用于航空瞬变电磁反演中,并用该方法对实测资料进行处理,得到的反演结果比单点反演结果效果更好,证明了该方法的有效性。综上所述,横向约束反演方法相比于单点反演方法具有一定的优势,在电磁勘探中已经得到了验证。广域电磁法是一种新的电磁勘探方法,目前许多学者从该方法的理论、数值模拟以及应用效果等方面进行了分析,解释手段还主要以广域视电阻率和单点一维反演为主,没有考虑测点之间的连续性,在煤矿富水区勘探方面应用较少。

笔者基于横向约束的思想,采用相邻测点之间的约束或通过已知测井先验信息进行约束,最大程度的减少 $E - E_x$ 广域电磁电阻率断面的横向的不连续性,实现一维 $E - E_x$ 广域电磁法横向约束反演。对广域电磁法在山西某矿区的实际测量数据进行了反演,划分了富水区和采空区范围,把该方法拓展到煤炭电磁勘探领域,并取得了较好效果。

1 一维横向约束反演

1.1 目标函数的建立

地球物理反演是寻找一个最优模型,使得该模型计算出的理论值与实际观测值之差的平方和最小。根据加权最小二乘法的基本原理,定义实测值与模型参数 m 对应的理论值的拟合差^[28]为

$$\chi^2 = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{d_i - F_i[m]}{\delta_i} \right)^2 \quad (1)$$

式中, χ^2 为数据拟合差, χ^2 越大,则表示实测值和模型 m 的正演理论值相差越大,亦即愈不符合反演期望值; N_d 为观测数据个数; d_i 为第 i 个频点对应的实测数据; $F_i[m]$ 为对于模型参数 m 第 i 个频点对应的正演数据; δ_i 为第 i 个频点对应的实测数据的均方根误差。

反演的最终目标是找到一个模型 m 使得 χ^2 取得极小值。由于非线性问题必然存在误差,所以在实际计算中, χ^2 小到一定程度后,模型会趋向于更复杂的方向变化。为了防止这种现象的发生,给出一个误差阈值 χ_*^2 是合理的, χ_*^2 取值一般在 0.7~1.5。那么,构造如下目标函数

$$U_1 = \chi^2 - \chi_*^2 = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{d_i - F_i[m]}{\delta_i} \right)^2 - \chi_*^2 \quad (2)$$

为了方便计算,把式(2)可改写为矩阵形式

$$U_1 = (\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{F}[m])^T (\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{F}[m]) - \chi_*^2 \quad (3)$$

式中, $\mathbf{d}$ 为实测数据列向量; $\mathbf{F}$ 为正演函数, $\mathbf{F}[m]$ 为模型 m 对应的正演结果列向量; $\mathbf{W}$ 为 $N \times N$ 的加权矩阵; χ_*^2 为可接受的拟合差值。

1.2 横向约束

可控源电磁法中相邻点之间的反演结果应当较为接近,各层电阻率和厚度在横向上具有连续性,特别当工区位于沉积岩地层发育的地区,横向连续性更加明显。但在传统单点一维反演方法中,得到的电阻率和层厚度会出现不连续的现象,即使是相邻两点间反演结果都会出现电阻率突变的现象,这使得剖面成像结果,出现很多小的突变异常,而大的构造和层位显示不明显,给解释工作增加了难度。

因此,在反演过程中需要增加约束条件,在目标函数中横向约束项和模型粗糙度,以保证相邻点之间的反演结果差异不会过大,纵向上模型具有光滑性。模型粗糙度可采用模型参数相对深度的一阶导数平方的积分表示,写成矩阵形式为

$$R_1 = (\partial_1 m)^T \partial_1 m \quad (4)$$

其中, R_1 为模型粗糙度; ∂_1 为一阶差分算子。横向约

束项 C 可采用

$$C = \sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j - m_j^*}{m_j^*} \right)^2 \quad (5)$$

其中, M 为模型离散层数; m_j 为反演过程中第 j 层对应的电阻率对数; m_j^* 为参考点的第 j 层对应的电阻率对数。若测点附近无测井钻探等资料作为参考, 则可应用相邻测点的反演结果作为约束, 反之若测点附近存在测井钻探等资料, 则将其作为先验条件进行约束反演。

将式(5)改写为

$$C = [\mathbf{W}^*(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)]^T [\mathbf{W}^*(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)] \quad (6)$$

式中, $\mathbf{m}^*$ 为带先验条件的模型参数; $\mathbf{W}^*$ 为加权矩阵。

加权矩阵 $\mathbf{W}^*$ 的具体形式:

$$\mathbf{W}^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1^*} & \cdots & 0 \\ & \frac{1}{m_2^*} & \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{m_N^*} \end{bmatrix} = \text{diag}\left(\frac{1}{m_1^*}, \frac{1}{m_2^*}, \cdots, \frac{1}{m_N^*}\right) \quad (7)$$

同样的, 加权矩阵 $\mathbf{W}^*$ 亦为一个对角阵, 若某一层位不存在先验条件, 则加权矩阵 $\mathbf{W}^*$ 对应的对角线元素应直接给定为 0。

λ^* 为先验条件与模型粗糙度的相对权重参数, λ^* 的具体形式也是一个对角阵, 大小与加权矩阵 $\mathbf{W}^*$ 相同。若某一层位不存在先验条件, 则与之对应的 λ_i^* 亦应给定 0。简便起见, 将 λ^* 与加权矩阵 $\mathbf{W}^*$ 相乘, 得

$$\mathbf{P} = \lambda^* \mathbf{W}^* \quad (8)$$

那么, 先验条件的矩阵形式改写为

$$\mathbf{C}^* = [\lambda^* \mathbf{W}^*(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)]^T [\lambda^* \mathbf{W}^*(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)] = [\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)]^T [\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)] \quad (9)$$

采用拉格朗日乘子 λ 将粗糙度矩阵 $\mathbf{R}_1$ 和初始目标函数 U_1 连接起来, 此时目标函数 U_2 最终表达式为 $U_2 = (\partial_1 \mathbf{m})^T \partial_1 \mathbf{m} + [\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)]^T [\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^*)] + \lambda^{-1} \{ (\mathbf{Wd} - \mathbf{WF}[\mathbf{m}])^T (\mathbf{Wd} - \mathbf{WF}[\mathbf{m}]) - \chi_*^2 \}$

(10)

式(10)即为确定好的横向约束目标函数表达式, 式中 λ 将用作权衡数据拟合与模型光滑程度的相对权重参数。采用扰动法计算电磁场值对模型参

数的偏导数矩阵, 该方法通用性好, 适用范围广。

1.3 拉格朗日乘子的选取

拉格朗日乘子 λ 作为权衡数据拟合与模型光滑程度的相对权重参数, 直接影响着反演工作的进行。当 $\lambda \rightarrow 0$ 时, 目标函数可看做仅含数据拟合项, 粗糙度矩阵被忽略; 反之当 $\lambda \rightarrow \infty$ 时, 数据拟合项趋于 0, 此时目标函数中仅含反演模型的光滑程度及先验条件项。

Occam 反演原则: 在满足数据拟合的基础上, 使得反演模型尽可能的光滑。因此拉格朗日乘子 λ 的取值十分重要, 一般先采用进退法寻找到 1 个极值区间, 然后再将拟合差 χ^2 看做是拉格朗日乘子 λ 的函数, 采用一维线性搜索算法(黄金分割法)使得 χ^2 达到最小。一般情况下, 拉格朗日乘子 λ 取值区间一般为 $[10^{-1}, 10^4]$, 但在该区间内满足拟合差取极小的 λ 可能不止 1 个。出于使得反演模型尽可能光滑的考虑, 因此在实际计算中我们选取满足条件的 λ 中的最大值。为了进一步缩小搜索区间, 下面给出进退法的步骤流程:

(1) 考虑到粗糙度矩阵的权重, 可选取 $a = 3$ 作为 $\lg \lambda$ 的初值, 给定步长 h ($h > 0$), 并令 $b = a - h$, 计算当 $\lambda = 10^a$ 及 $\lambda = 10^b$ 时的数据拟合差, 分别记为 χ_a^2 和 χ_b^2 。这里采用对数值搜索方式是因为 λ 取值范围较大, 使用对数值的形式不会改变其实质, 但压缩了 λ 的尺度范围;

(2) 比较 χ_a^2 和 χ_b^2 ;

(3) 若 $\chi_a^2 > \chi_b^2$, 则令 $c = a - 2h$ 。若此时 $\chi_b^2 < \chi_c^2$, 则此时说明可以在区间 $[10^c, 10^a]$ 上选择合适的 λ 获得最小拟合差; 反之若 $\chi_b^2 > \chi_c^2$, 则令 $a = b, b = c$, $\chi_a^2 = \chi_b^2, \chi_b^2 = \chi_c^2$, 最后转至步骤(2), 直到找到一个闭合区间结束搜索;

(4) 若 $\chi_a^2 < \chi_b^2$, 则令 $c = a + h$ 。若此时 $\chi_a^2 < \chi_c^2$, 则此时说明可以在区间 $[10^b, 10^c]$ 上选择合适的 λ 获得最小拟合差; 反之若 $\chi_a^2 > \chi_c^2$, 则令 $b = a, a = c$, $\chi_b^2 = \chi_a^2, \chi_a^2 = \chi_c^2$, 最后转至步骤(2), 直到找到一个闭合区间结束搜索。

确定一个较小的搜索区间后, 可使用黄金分割法进一步加速搜索拉格朗日乘子 λ , 下面给出黄金分割法线性搜索的步骤流程:

(1) 假定此时用进退搜索法搜索到的对数区间为 (d, e) , 给定黄金分割数 $\alpha = 0.618$, 并令 $p = e - \alpha(e - d)$, $q = d + \alpha(e - d)$;

(2) 计算当 $\lambda = 10^p$ 及 $\lambda = 10^q$ 时的数据拟合差, 分别记为 χ_p^2 和 χ_q^2 ;

(3) 比较 χ_p^2 和 χ_q^2 ;

(4) 若 $\chi_p^2 > \chi_q^2$, 则说明取得拟合差最小的 $\lg \lambda$ 位于 (p, e) 区间上, 则令 $d = p, p = q, \chi_p^2 = \chi_q^2$, 计算 $q = d + \alpha(e - d)$ 及此时的 χ_q^2 , 最后转至步骤(3), 若最终达到 $|(e - d)/e| < \varepsilon_1$, 则采用较大的 10^e 作为本次迭代最佳 λ 值, 若最终达到 $|\chi_q^2 - \chi_p^2|/\chi_q^2 < \varepsilon_2$, 则采用较大的 10^q 作为本次迭代最佳 λ 值, 结束搜索;

(5) 若 $\chi_p^2 < \chi_q^2$, 则说明取得拟合差最小的 $\lg \lambda$ 位于 (d, q) 区间上, 则令 $e = q, q = p, \chi_q^2 = \chi_p^2$, 计算 $p = e - \alpha(e - d)$ 及此时的 χ_p^2 , 最后转至步骤(3), 若最终达到 $|(e - d)/e| < \varepsilon_1$, 则采用较大的 10^e 作为本次迭代最佳 λ 值, 若最终达到 $|\chi_q^2 - \chi_p^2|/\chi_q^2 < \varepsilon_2$, 则采用较大的 10^q 作为本次迭代最佳 λ 值, 结束搜索。

该方法虽然计算量较大, 但由于每次都采用最佳的拉格朗日乘子 λ 计算新的模型, 收敛稳定且其总的迭代次数不多。

1.4 分段反演策略

按照逐点反演的形式完成反演剖面工作的, 因此当该条剖面某点位附近存在测井等先验资料时, 可以以该点位为分界点分段反演, 并使用该资料作为目标函数中的先验条件项约束反演结果, 其余点位反演则使用前一个相邻的测点反演结果作为先验条件进行约束; 若不存在先验资料, 则可以在实测资料中寻找电(磁)场值或广域视电阻率较稳定的点位, 再以该点位为分界点分段反演, 因为其受到噪声干扰较小, 从而使得起始点位反演结果误差较小, 尽可能地避免了整条剖面反演结果出现误差积累的现象。综上分析, 当某条剖面存在多个先验资料或存在多个电(磁)场值或广域视电阻率较稳定的点位时, 可以把该剖面分为几段, 如图 1 所示。每段反演可认为是相互独立的, 且计算流程相同。

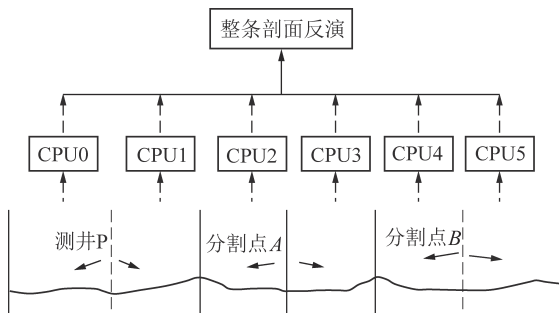


图 1 分段反演示意

Fig.1 Piecewise inversion diagram

针对每一小段剖面, 则应着重提高单点反演的效率。此外, 广域电磁法一维正演中各发射频率对应的电磁场响应计算之间同样没有逻辑关联的, 因此也具备很高的并行性^[29]。

2 模型试验

2.1 一维模型试验

本节将完成一维地电模型的反演计算, 并将计算结果与真实模型作对比。发射参数: 发射源长度 $d_s = 1\ 000\text{ m}$, 电流强度 $I = 30\text{ A}$, 电流方向与 x 轴正方向相同, 发射频率取 $[10^{-2}, 10^4]\text{ Hz}$ 上对数等间隔的 35 个频点, 接收点坐标为 $(4\text{ km}, 8\text{ km})$ 。反演参数: 层数 35 层, 采用平移算法计算出的广域视电阻率作为反演初始模型, 并在真实模型的基础上加上最大 5% 的随机扰动动作, 矩阵 $\mathbf{\Lambda}^*$ 中的对角线元素均取 2。

首先设计 H 型和 K 型地电模型进行反演测试(采用 E_x 单分量)。H 型模型参数: 自地表向下厚度依次为 $h_1 = 600\text{ m}$, $h_2 = 200\text{ m}$, 电阻率依次为 $\rho_1 = 100\ \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 10\ \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_3 = 200\ \Omega \cdot \text{m}$; K 型模型参数: 自地表向下厚度依次为 $h_1 = 100\text{ m}$, $h_2 = 500\text{ m}$, 电阻率依次为 $\rho_1 = 10\ \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 100\ \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_3 = 40\ \Omega \cdot \text{m}$ 。

图 2 和图 3(b) 中黑线表示给定的理论模型, 蓝线是在模型基础加了误差扰动项作为参考模型, 绿线为不加先验约束条件的反演结果, 红线为加先验约束条件的反演结果, 2 者均能较好地反映出中间层的电阻率, 反演曲线首端和尾端能分别趋近于第 1 层和最后一层真实电阻率, H 型地电模型中带约束反演结果(红线)在电阻率界面处较无约束反演结果(绿线)波动较小, 中间层反演厚度范围更接近于真实模型厚度, K 型地电模型约束反演结果在电阻率界面处较无约束反演结果波动稍大, 但中间层反演厚度和电阻率更接近于真实模型。图 2(c) 和图 3(c) 表示拉格朗日乘子 λ 随迭代次数的变化情况, 综合来看, λ 随迭代次数的增加而逐渐减小, 当 $\lambda \rightarrow 0$ 时, 目标函数可看做仅含数据拟合项, 粗糙度矩阵及先验条件项被忽略。图 2 和图 3(d), (e) 分别给出了 H 型和 K 型模型在有无先验条件下, 采用单分量反演方式各分量的相对误差, 各模型反演结果中各分量相对误差均小于 5%, 这表明原模型正演响应与反演结果拟合较好; 此外通过图 2 和图 3(d) 可以看出, 含先验条件的收敛速度较快, 在 H 型模型中尤为明显。

2.2 二维模型试验

采用基于模型降阶的三维矢量有限元正演程序^[30]

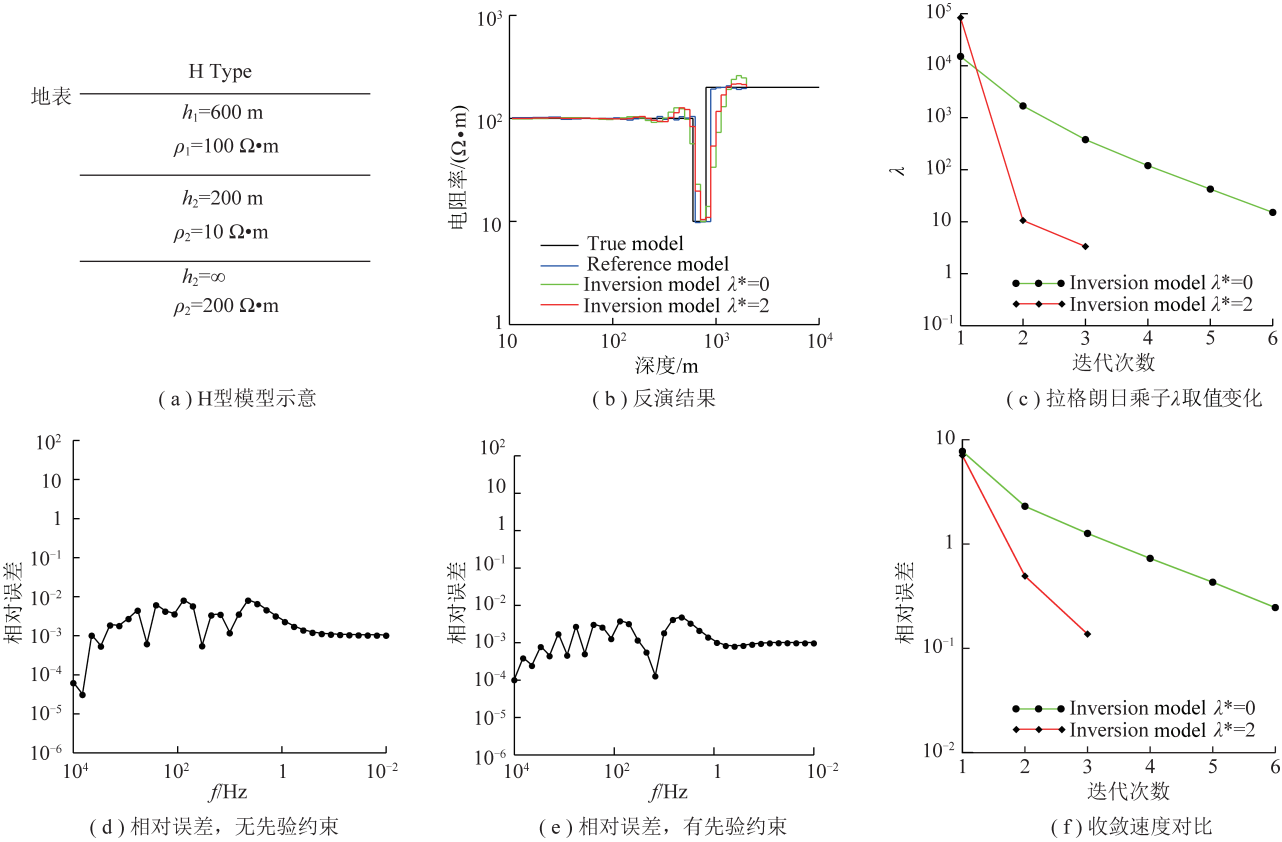


图 2 H 型模型反演结果

Fig.2 Inversion results of H-type model

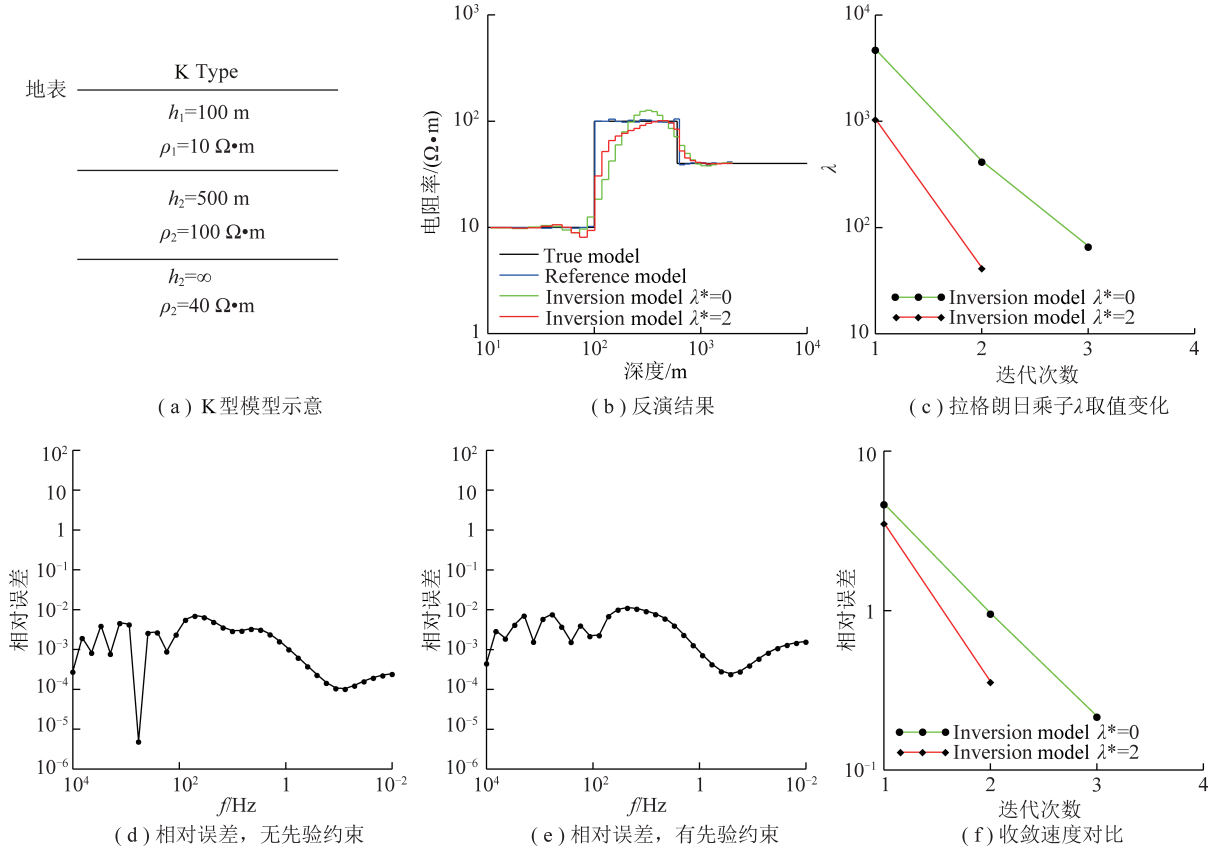


图 3 K 型模型反演结果

Fig.3 Inversion results of K-type model

对二维地质模型进行正演,该方法适合于多频电磁法的正演计算,由于采用模型降阶算法,正演的速度不再受频点制约,频率越多,加速比越明显,速度可提高至少一个数量级,本文二维地电模型是在三维模型的基础上令走向方向无限延伸得到的。在正演结果的基础上加入 5% 的高斯白噪声,然后利用上述反演方法进行计算,以分析其在二维模型中的应用效果。

如图 4(a) 所示,模型 A 为一个地堑模型,地堑左右两盘的顶界面和底界面埋深分别为 100 和 150 m,地堑顶界面和底界面埋深分别为 150 和 200 m,其水平宽度为 400 m,背景电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,地堑电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 。测线总长度为 2 km,点距为 50 m,共 41 个测点。发射源长度 $d_s = 1\ 000 \text{ m}$,电流强度 $I = 30 \text{ A}$,电流方向与 x 轴正方向相同, y 方向收发距为 5 km。图 4(b) 中矩阵 λ^* 中的对角线元素取为 2,即含横向约束的反演结果;图 4(c) 中矩阵 λ^* 中的对角线元素取为 0,即为仅含数据拟合项和粗糙度的反演

结果;图 4(d) 为 E_x 分量计算出的广域视电阻率剖面图结果;图 4(e) 则为卡尼亚视电阻率剖面图结果,视电阻率拟断面图中深度采用有效勘探深度公式,即 $d_e = 503 \sqrt{\rho_s / f} / \sqrt{2}$ 。

对比图 4(b)~(d) 可以看出, E_x 分量计算出的广域视电阻率结果对低阻体的显示最弱,卡尼亚视电阻率结果稍强,2 者对地堑的反映很很弱;不加横向约束的反演结果和加横向约束的反演结果均能较好的反映地下电性分布结构,且与地堑埋深对应较好,但是从图 4(c) 可以看出,不加横向约束的反演结果电阻率横向连续性较差,与实际地电模型界面差别比较大,如图 4 中红色矩形框标出的位置,采用横向约束反演后,地电分界面的连续性改善了很多,基本光滑连续,与实际模型相符合。

3 实测资料处理

笔者对山西某地区实测资料进行处理试验,以进一步研究一维约束反演的实用性和有效性。

该工区受井田构造影响,总体为一走向近 EW、倾向 S 的单斜构造,倾角为 $2^\circ \sim 6^\circ$,并在此基础上发育次一级的褶曲构造。在该区域大部分被新近系、第四系松散层所覆盖,仅在井田部分山坡及山梁零星出露有三叠系、二叠系地层。根据地表出露情况及钻孔资料,该工区地层从老至新依次为:奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、新近系和第四系。其中,石炭系上统太原组和二叠系下统山西组为主要可采煤层地层。太原组中 8 号煤层和 15 号下煤层及山西组中 6 号煤层稳定程度较差,属于局部可采类型,而太原组中 9 号煤层和 15 号煤层及山西组 3 号煤层稳定程度较好,属于大部可采类型。

该区域自下而上可划分为 6 个含水层,分别为奥陶系中统石灰岩岩溶裂隙含水层、石炭系上统太原组碎屑岩类夹石灰岩岩溶裂隙含水层、二叠系下统山西组砂岩裂隙含水层、二叠系上下石盒子组砂岩裂隙含水层、基岩风化带裂隙含水层和第四系砂砾石层孔隙含水层组;隔水层自下而上主要可划分 3 个,分别为中石炭统本溪组隔水层、石炭系和二叠系含水层间的泥岩隔水层及第四系和新近系松散层隔水层。

此外,该区域地貌形态属中低山地貌,由于长期的冲蚀作用,沟谷纵横、地形复杂,地势总体呈南高北低、西高东低的趋势,平均海拔在约 1 150 m,最大高差约 180 m,因此该勘探区浅、表层地电条件一般;但通过对该区测井及邻区瞬变电磁勘探资料分析,本勘探区中深部地层电性差异明显,煤系地层的平均电阻率值比非煤系地层电阻率高,煤系地层基底奥灰系灰

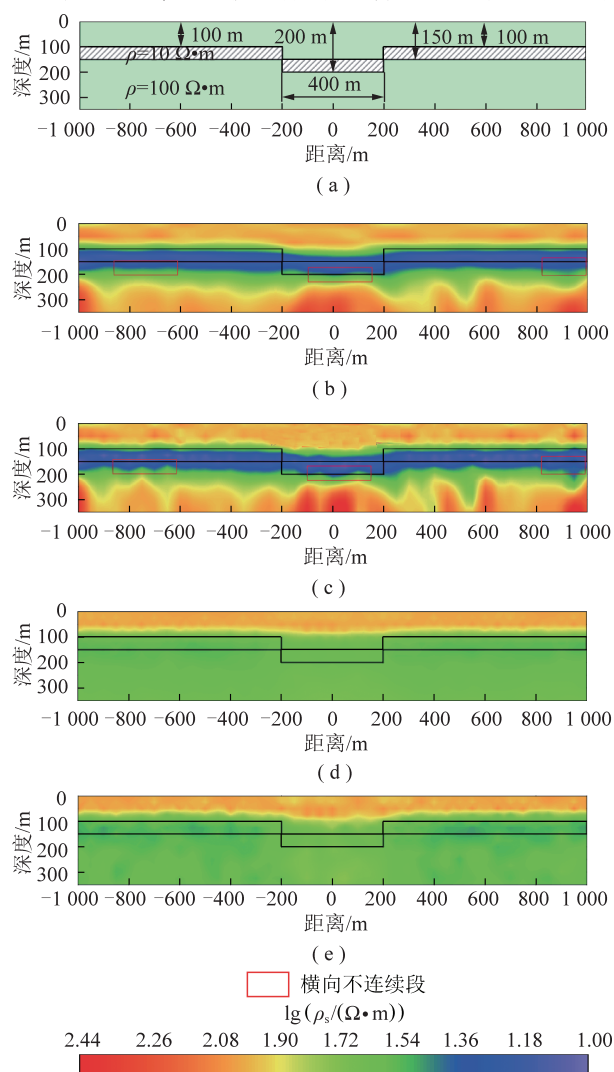


图 4 地堑模型反演结果对比

Fig.4 Comparison of inversion results of graben model

岩电阻率最高,这具有较好的电性标识作用,因此本区域具备了电法勘探的应用前提,地层结构和电阻率统计见表 1。

表 1 岩层电性参数

Table 1 Electrical parameters of rock formation		
地质时代	岩层	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$
第四系	黄土、砂质黏土等	10~40
二叠系上石盒子组	砂岩	>94.8
	泥岩	17.5
二叠系下石盒子组	砂岩	>82.4
	泥岩	20
二叠系山西组	砂岩	72
	泥岩	20
	煤层	340
石炭系太原组	石灰岩	>370
	煤层	>200
	砂岩	160
本溪组	铝质泥岩	75
奥陶系	泥灰岩	<100
	石灰岩	>960

本次勘探主要是对岩层的富水性和煤层采空区进行探究,野外数据采集工作由 JSGY-2 型广域电磁仪完成,发射频点采用 2,3,4 和 5 四个频组共计 28 个频点,发射源长度为 1 170 m, y 方向收发距约 9 km,测线共计 151 个测点,点距 20 m。

从图 5 可以看出,广域视电阻率断面图在纵向上基本能够定性的反映地层的电性变化,中间的低阻层是二叠系泥岩的反映,但其受地表地形起伏的影响大,浅部横向出现了不连续性,局部静态效应严重,异常区域也非常多。值得指出的是视电阻率深度计算采用经验公式,其反映的是地下电性层的整体变化,仅用于定性解释,其深度有一定的偏差。

根据实测采集装置设置反演相关参数,反演层数设置为 28 层,并利用相邻点的实测频率-电场曲线的相似程度实时调整横向约束大小,最后根据已知测井信息,将整个剖面分为几段完成反演工作。

图 6 中的测线,已知测点(距离为 1 410 ~ 1 870 m)为一岩层富水区,对应图 6 中 B 区域,可以看出存在较强的低阻显示;根据最新资料,出水点靠近辅助进风巷,最新的工作面出水点靠近辅助进风巷

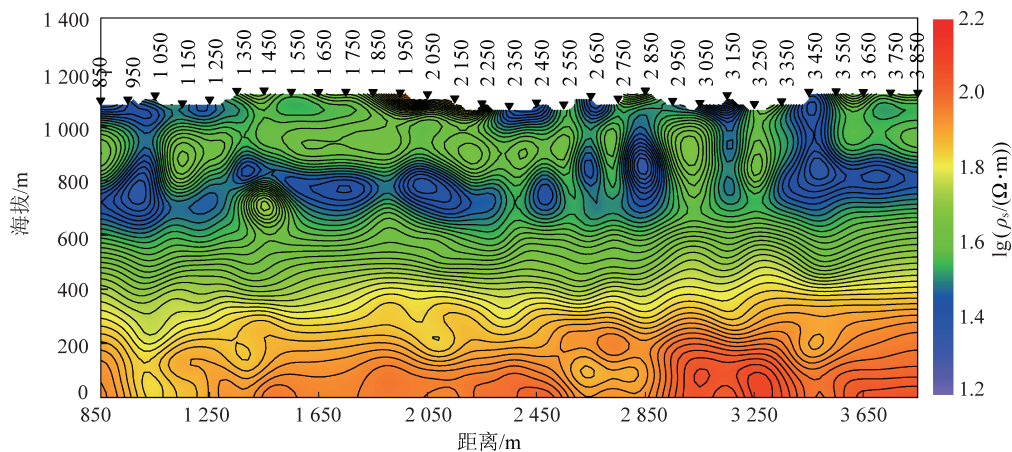


图 5 实测数据广域视电阻率断面

Fig.5 Wide field apparent resistivity of survey data

60 m,位于勘探测线 1 620 m,出水量为 25 m³,位置刚好位于反演电阻率低值区。测点(距离为 3 050 ~ 3 450 m)为一采空区,采空区右边界有大量充水,对应图中 D 区域,但深度稍向上偏移,C 区域的低阻显示推测是由于地表山脊地形和采空区富水共同引起的,因此推测该采空区已经部分充水。

此外,整个一维横向约束反演剖面的横向连续性较好,地层分层较为明显,低频段视电阻率最高,推测对应于奥陶系的灰岩;中频段频率从低至高视电阻率由高值变为低值,推测视电阻率高值区域对应石炭系地层,视电阻率低值对应二叠系

地层,存在不同厚度的泥岩,整体电阻率比较低,形成一个低阻层。由于煤层被大量开采,因此富水性较强,在横向表现出局部相对低阻异常,高频段整体呈现低-中电阻反映,对应于新近系和第四系地层。

经过钻孔验证,钻孔 1 和钻孔 2 施工过程中无出水情况,其对应深度处的电阻率相对较高,与钻孔情况基本吻合。钻孔 3 施工至 42.5 m 中粒砂岩涌水量 0.5 m³/h;施工至 93 m 中粒砂岩涌水量增大至 1.5 m³/h,压力 0.6 MPa,该钻孔对应深度处的电阻率相对较低,接近于 K2 砂岩富水边界。

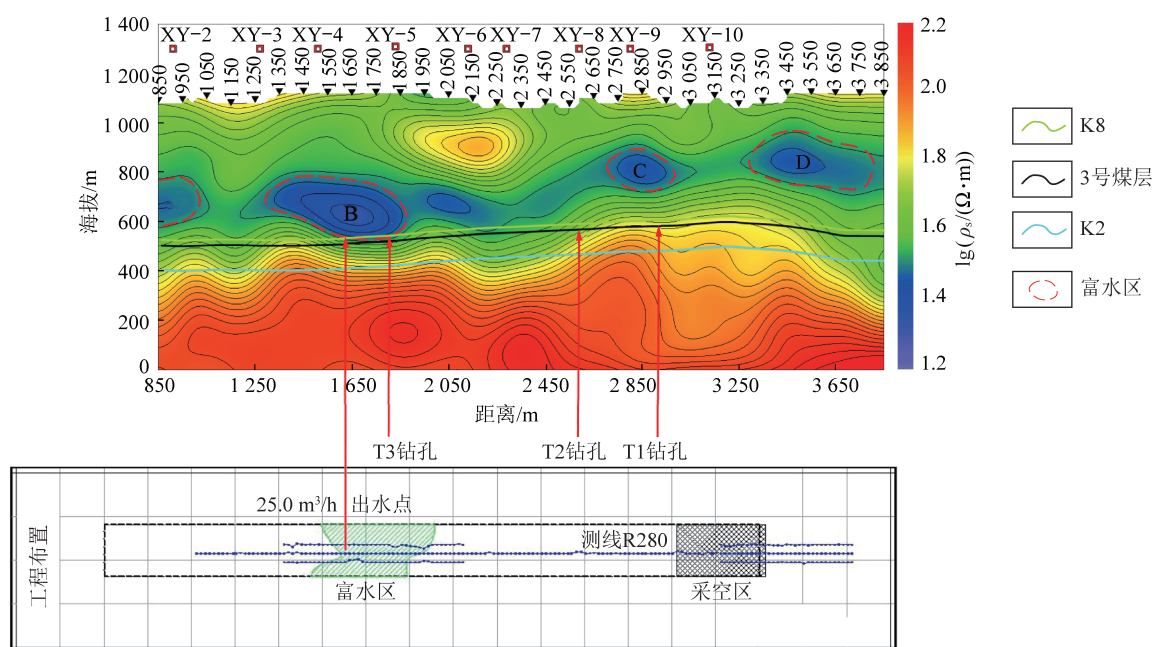


图6 实测数据反演剖面

Fig.6 Inversion profile of survey data

4 结 论

(1)把基于横向约束的反演算法引入到广域电磁法中,并应用于煤炭富水区和采空区探测,在反演结果剖面上表现出较好的连续性,与实际地层基本吻合,取得了一定效果。

(2)以广域视电阻率作为反演的初始模型的一维反演结果表明:带参考点约束反演收敛速度较无约束反演快,反演结果更趋近与真实电阻率,特别是在中间层电阻率部分。

(3)通过二维地堑模型反演,发现加横向约束的电阻率反演断面光滑连续性,与实际地电界面吻合的更好,而广域视电阻率只能反映出地电模型第一层顶界面,对下界面的分辨率不够。

(4)对二维长剖面可采用分段反演策略,分段的起点选在有已知测井先验信息附近或受干扰影响很小的测点附近,以保证起始测点的反演结果可靠,在反演过程中可采用并行算法提高计算效率。

(5)横向约束反演应用于 $E-E_x$ 广域电磁法中,但对于其他分量的广域电磁法反演同样适应。

参考文献 (References):

- [1] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1065-1072.
HE Jishan. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1065-1072.

- [2] 李帝铨, 谢维, 程党性. $E-E_x$ 广域电磁法三维数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2459-2470.
LI Diqian, XIE Wei, CHEGN Dangxing. Three-dimensional modeling for $E-E_x$ wide field electromagnetic methods[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2459-2470.
- [3] 李帝铨, 何继善. 基于差分广域电磁法的三元复合驱监测方法[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 595-602.
LI Diqian, HE Jishan. A differential wide field electromagnetic method and its application in ASP flooding monitoring[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 595-602.
- [4] 柳建新, 佟铁钢, 刘春明, 等. $E-E_\varphi$ 广域视电阻率定义的改进方法及场特性识别[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2359-2364.
LIU Jianxin, TONG Tiegang, LIU Chunming, et al. Recognition of electromagnetic field asymptotic properties and improved definition of wide field apparent resistivity on $E-E_\varphi$ array[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2359-2364.
- [5] 袁博. 广域电磁法 $E-E_r$ 数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
YUAN Bo. The numerical calculation of electrical field r -direction in wide field electromagnetic method[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [6] 佟铁钢. $E-H_z$ 广域电磁方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
TONG Tiegang. Study on $E-H_z$ Wide-field electromagnetic method[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [7] 李帝铨. $E-E_x$ 和 $E-E_\varphi$ 广域电磁法测量范围[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(6): 1315-1323.
LI Diqian. Measurement range of $E-E_x$ and $E-E_\varphi$ wide field electromagnetic methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(6): 1315-1323.
- [8] BARTEL L C, JACOBSON R D. Results of a controlled-source audiofrequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii[J]. Geophysics, 1987, 52(5): 665-

- 677.
- [9] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] SASAKI Y, YONEDA Y, MATSUO K. Resistivity imaging of controlled-source audio frequency magneto telluric data[J]. *Geophysics*, 1992, 57(7): 952–955.
- [11] ZONGE K L, HUGHES L J. Electromagnetic methods in applied geophysics [M]. Arizona: Society of Exploration Geophysicists, 1991: 713–810.
- [12] ROUTH P S. Electromagnetic coupling in frequency domain induced polarisation data [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1999.
- [13] 谭捍东, 舒晴, 郎静. 电偶源激发下水平层状介质电场的分布特征与反演研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(S1): 110–113.
- TAN Handong, SHU Qing, LANG Jing. Distribution characteristics and inversion of electric field in horizontal layered media excited by electric dipole sources [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(S1): 110–113.
- [14] 王若, 王妙月. 一维全资料 CSAMT 反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(1): 107–114.
- WANG Ruo, WANG Miaoyue. Inversion of 1-D full CSAMT data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(1): 107–114.
- [15] 尚通晓. 双极源 CSAMT 一维全区反演[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- SHANG Tongxiao. 1-D full-region inversion of CSAMT of bipolar source[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [16] 朱威, 李桐林, 尚通晓, 等. CSAMT 一维全区反演对比研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(S1): 12–14.
- ZHU Wei, LI Tonglin, SHANG Tongxiao, et al. Compared study of 1-D full-region inversion of CSAMT [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(S1): 12–14.
- [17] 王堃鹏, 曹辉, 高妍, 等. CSAMT 自适应正则化一维全资料反演[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(5): 530–533.
- WANG Kunpeng, CAO Hui, GAO Yan, et al. Adaptive regularized inversion of 1-D full CSAMT data [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(5): 530–533.
- [18] 周军, 袁伟, 连晨龙. 可控源音频大地电磁法(CSAMT)一维全区 Levenberg-Marquardt 反演方法[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(14): 129–134.
- ZHOU Jun, YUAN Wei, LIAN Chenlong. Levenberg-Marquardt inversion method for CSAMT one-dimensional region data [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(14): 129–134.
- [19] 裴云, 张艳辉, 翁爱华, 等. CSAMT 一维全频视电阻率反演[J]. *世界地质*, 2017, 36(3): 989–994.
- CHANG Yun, ZHANG Yanhui, WENG Aihua, et al. 1-D full frequency apparent resistivity inversion of CSAMT [J]. *Global Geology*, 2017, 36(3): 989–994.
- [20] KEY K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers[J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): F9–F20.
- [21] 张凯飞. 基于电性约束的 NLCG 反演在 CSAMT 资料中的应用[J]. *物探与化探*, 2016, 40(3): 629–634.
- ZHANG Kaifei. The Application of CSAMT data processed with NLCG inversion based on electrical constraints [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(3): 629–634.
- [22] 索光运, 李帝铨, 胡艳芳. 基于解析雅克比矩阵的 $E-E_x$ 广域电磁法一维并行约束反演[J]. *物探化探计算技术*, 2019, 41(1): 55–61.
- SUO Guangyun, LI Diquan, HU Yanfang. One-dimensional parallel constrained inversion of $E-E_x$ wide field electromagnetic method based on analytical Jacobian matrix [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(1): 55–61.
- [23] 唐传章, 程见中, 严良俊, 等. 基于边界约束有限内存的拟牛顿 CSAMT 一维反演及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 193–200.
- TANG Chuanshang, CHENG Jianzhong, YAN Liangjun, et al. LBFGS CSAMT 1D inversion of limited memory based on boundary constraint and its application [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 193–200.
- [24] AUKEN E, CHRISTIANSEN A V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data [J]. *Geophysics*, 2004, 69(3): 752–761.
- [25] VALLEE M A, SMITH R S. Inversion of airborne time-domain electromagnetic data to a 1D structure using lateral constraints [J]. *Near Surface Geophysics*, 2009, 7(1): 63–71.
- [26] 蔡晶, 齐彦福, 殷长春. 频率域航空电磁数据的加权横向约束反演[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 953–960.
- CAI Jing, QI Yanfu, YIN Changchun. Weighted laterally-constrained inversion frequency-domain airborne EM data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 953–960.
- [27] 殷长春, 邱长凯, 刘云鹤, 等. 时间域航空电磁数据加权横向约束反演[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(1): 254–261.
- YIN Changchun, QIU Changkai, LIU Yunhe, et al. Weighted laterally-constrained inversion of times-domain airborne electromagnetic data [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 254–261.
- [28] YU Xiaodong, WANG Xuben, LU Congde, et al. A combining regularization strategy for the inversion of airborne time-domain electromagnetic data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 155: 110–121.
- [29] 黄浩, 欧东新. 基于 OpenMP 一维 CSAMT 正演并行计算研究[J]. *矿产与地质*, 2017, 31(1): 138–142.
- HUANG Hao, OU Dongxin. A study on CSAMT 1D forward parallel computation based on OpenMP [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2017, 31(1): 138–142.
- [30] 张继锋, 刘寄仁, 冯兵, 等. 三维陆地可控源电磁法有限元模型降阶快速正演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(9): 3520–3533.
- ZHANG Jifeng, LIU Jiren, FENG Bing, et al. Fast forward modeling of the 3D land controlled source electromagnetic method based on model reduction [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3520–3533.