

8-25-2019

Constrained inversion method and application effect of TEM data of fixed source loop device

HOU Yanwei

Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China

YAO Weihua

Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

H Y. (2019) "Constrained inversion method and application effect of TEM data of fixed source loop device," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 27.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.026

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/27>

This Coal Geophysical Exploration, Mine Geophysical Exploration is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

文章编号: 1001-1986(2019)04-0172-06

定源回线 TEM 数据的约束反演方法及应用效果

侯彦威, 姚伟华

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为消除 TEM 定源回线装置增大接收区域后明显的边框效应, 且提高 TEM 的分层能力, 达到提高对不同电性地层精细分辨的目的, 采用带约束的正则化反演方法。在反演算法中, 拉格朗日因子采用 CMD 正则化因子的自适应调节方案, 自主调整。为保证反演过程的高效、稳定且结果收敛性, 使反演模型每一层的厚度按照等对数间隔进行离散, 减少矩阵方程的病态性; 同时对反演电阻率值采用可行的上下限约束, 使迭代的结果不至于出现极值或错值, 降低反演的多解性。通过对多层理论模型的计算, 证明了约束反演算法的正确性和可靠性, 将其用于实测瞬变电磁法勘探数据的反演计算中, 反演电阻率纵向分布规律与已知地层电性资料吻合, 解释的异常区得到了钻探验证, 结果可靠。

关键词: 定源回线装置; 瞬变电磁法(TEM); 约束反演方法; 应用效果

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.026



Constrained inversion method and application effect of TEM data of fixed source loop device

HOU Yanwei, YAO Weihua

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to eliminate the obvious framing effect after the TEM fixed source loop device increases the receiving area, to improve the delamination ability of TEM to enhance the fine resolution for different electrical strata, the regularization inversion method with constraint is adopted. In the inversion algorithm, the Lagrange factor is adjusted adaptively by CMD regularization factor. In order to ensure the efficiency, stability and convergence of the results of the inversion process, the thickness of each layer of the inversion model is discretized according to the equal logarithmic interval, and the ill conditioned property of the matrix equation is reduced. At the same time, a feasible upper and lower limit is used for the inversion of the resistivity value, so that the extreme value or the error value can not appear in the results of the iteration, and the multi solution of the inversion is reduced. Through the calculation of the multi-layer theoretical model, the correctness and reliability of the constrained inversion algorithm are proved. It is used in the inversion calculation of the measured data of the transient electromagnetic method. The vertical distribution of the inversion resistivity is consistent with the data of the known stratum, and the abnormal area is verified by drilling, and the result is reliable.

Keywords: fixed source loop device; transient electromagnetic method(TEM); constrained inversion method; application effect

地面瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, 简称 TEM)也称时间域电磁方法, 在地面建立人工场源并接收二次场信号, 根据电磁感应原理研究电

磁场的空间和时间分布规律, 达到探测地下良导体地质体或解决地质问题的目的^[1]。其工作装置形式主要有重叠回线、中心回线、偶极、定源回线等,

收稿日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374150); 国家重点研发计划项目(2017YFC0804105); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2016XAYMS26)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(41374150); National Key R&D Program of China(2017YFC0804105); Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2016XAYMS26)

第一作者简介: 侯彦威, 1983 年生, 男, 河南商丘人, 副研究员, 从事煤炭电法勘探方面工作. E-mail: 83645722@qq.com

引用格式: 侯彦威, 姚伟华. 定源回线 TEM 数据的约束反演方法及应用效果[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 172-177.

HOU Yanwei, YAO Weihua. Constrained inversion method and application effect of TEM data of fixed source loop device[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 172-177.

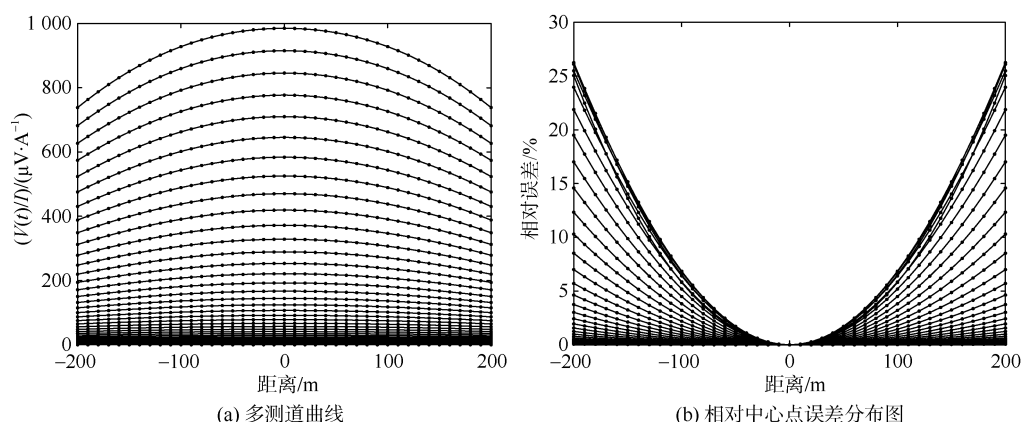


图 2 发射回线边长为 600 m 的均匀半空间响应曲线图

Fig.2 The uniform half space response curve of the transmission line length 600 m

$$U = R + \mu^{-1} \left\{ \|Wd - WF[m]\|^2 - X_\infty^2 \right\} \quad (3)$$

式中 μ 为正则化因子； d 是观测数据向量； F 是正演算子； m 为反演模型参数向量； X_∞^2 是反演所要求达到的拟合差； $W = \text{diag}\{1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_M\}$ 为权重系数 σ_j 是第 j 个数据的标准差； R 是模型粗糙度函数： $R = \int \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 dz$ 。

上述模型粗糙度函数式中 z 为深度，选取 z_i/z_{i-1} 为某个小于 1 的常数，可以将其改写成矩阵的形式为：

$$R = \|Am\|^2 \quad (4)$$

其中， A 设为粗糙度矩阵，表示为：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & & & 0 \\ -1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & \\ & & \dots & \dots \\ 0 & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

针对式(3)多元函数求极值问题，首先对反演目标函数求偏导数，并取 $\nabla U_m = 0$ 。由此可得：

$$\left((WJ_1)^T WJ_1 + \mu A^T A \right) \Delta m_k = (WJ_1)^T W \Delta d_k \quad (6)$$

式中 Δm_k 是第 k 次反演的模型修改量； Δd_k 是第 k 次模型响应与观测数据的残差； J_1 是雅可比矩阵，其元素可表示为 $J_{ij} = \partial F_i[m] / \partial m_j$ 。

在反演过程中首先给定均匀半空间初始模型 m_0 ，然后根据式(6)依次迭代，直到反演拟合差 X_∞^2 达到极小，此时反演模型 m_k 就是要求的解。

2.2 反演模型的可信域约束

定源 TEM 一维反演中，正则化因子直接影响反演结果的稳定性和收敛性，本文在处理瞬变电磁法数据时采用大地电磁法的反演算法中 CMD 正则化

因子调节方案^[13]，在反演过程中正则化因子自适应调整，它能保证拟合差达到极小的同时模型光滑度函数也达到极小。第 k 次反演的正则化因子 μ_k 为

$$\mu_k = \frac{\|A^T A m_k\|^2}{\|A^T A m_k\|^2 + \|W^T W \Delta d_k\|^2} \quad (7)$$

在采用上述方案调整正则化因子的同时，在每次反演迭代过程中，还需要计算反演矩阵的条件数和拟合差，如果反演矩阵的条件数特别大，那么相应的增大正则化因子，使求解的雅可比矩阵的逆矩阵稳定。如果实测数据的拟合差大于上次反演的拟合差，那么相应的减小正则化因子，使反演梯度向量更接近真实的梯度方向。

在反演过程中还要保证反演的结果是否满足自然规律，以至于不会出现极值或者负数。所以本文还采用了可信域概念对反演模型进行约束。在反演过程中只反演每一层的电阻率，层厚按照等对数间隔进行离散，这样能减小反演过程的病态性，同时对每一层电阻率进行约束，如果超过给定的上下限，那么就减小反演模型的步长，直到满足阈值。本文中阈值分别为 $0.1 \Omega \cdot m$ 和 $1000 \Omega \cdot m$ 。为了使反演结果不易陷入局部极小值，对每次的反演模型修正量的上限也进行约束，让反演模型的一范数不能超过一个上限。考虑到反演程序的效率，给定的反演模型修正量上限不能太小，如果太小，反演速度较慢，本文给定为 $50 \Omega \cdot m$ 。

3 模拟验证

以实际生产中比较典型的 H 型和 K 型模型为例，采用上述约束反演方法试算。H 型模型各层的电阻率分别为 $300 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$ 、 $300 \Omega \cdot m$ ，厚度分别为 $200 m$ 、 $50 m$ ；K 型模型各层的电阻率分

别为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ，各层的厚度分别为 $200\ \text{m}$ 、 $200\ \text{m}$ 。在反演过程中，回线边长采用 $600\ \text{m}$ ，初始模型设置为均匀半空间，电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ，最大反演深度设置为 $600\ \text{m}$ ，将地下

电性介质划分为 50 层，每一层的厚度按照等对数间隔进行离散。H 型模型的正演响应与反演结果如图 3 所示，K 型模型的正演响应与反演结果如图 4 所示。

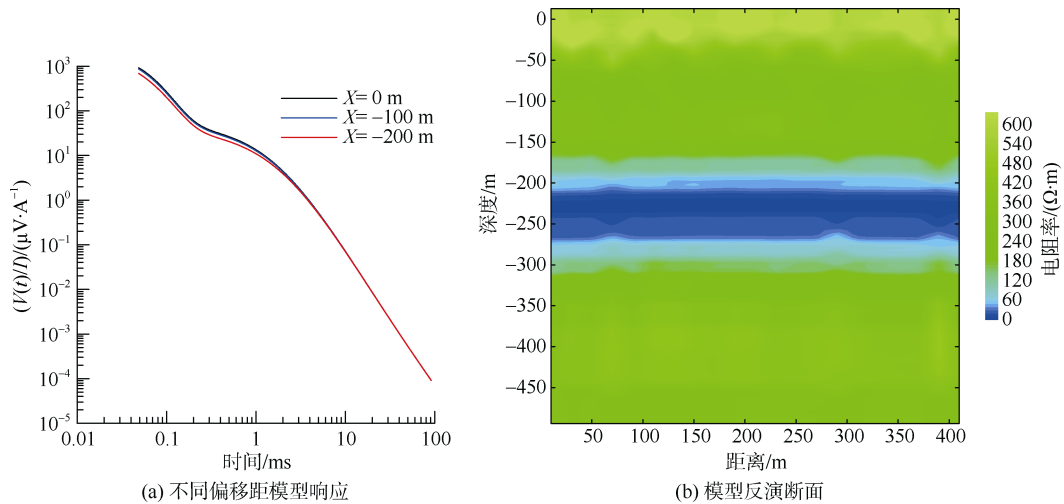


图 3 H 型模型正演响应与反演断面图

Fig.3 Forward response and inversion section of H model

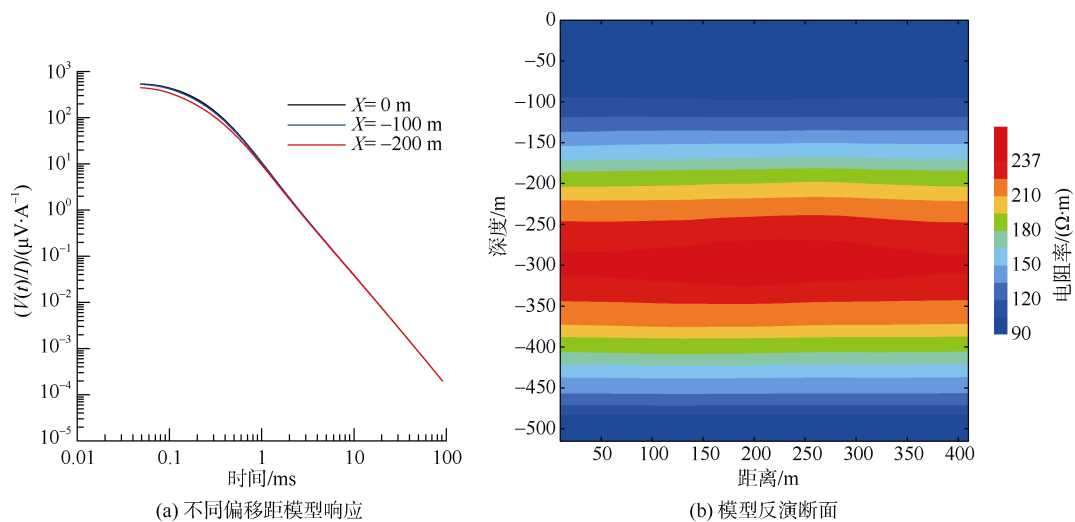


图 4 K 型模型正演响应与反演断面图

Fig.4 Forward response and inversion section of K model

分析图 3a 和图 4a，不论是 H 型模型还是 K 型模型，定源 TEM 的衰减曲线形态与其在框内的相对位置有关，离框中心越远早期差异越大。对比图 3b 和图 4b 可见定源 TEM 约束反演结果与模型一致，中间层深度与实际吻合，表明该约束反演方法可以用于实测数据。

4 实测数据反演

实例一：山西石炭—二叠系煤田蛤蟆沟煤矿地面 TEM 采空区积水探测。根据地质资料可知钻孔揭露的地层电性由浅至深呈“低阻—高阻”的变化趋势。野外施工发射回线边长为 $480\ \text{m}$ ，在其内部 $4/9$ 面积

范围内进行数据采集，采用式(2)进行计算，结果如图 5a 所示，由其等值线形变特征可以直观看出此断面图数据由两个发射回线施工完成，早期视电阻率发生了畸变，同一发射回线内中早期视电阻率中间低，向两侧逐渐增大，呈弧形畸变，与图 2 模拟结果吻合。采用约束反演计算结果如图 5b(图中显示为反演电阻率取对数后数值)，浅部第四系黄土覆盖层或新近系风化岩层呈较低阻反映，向下至含煤地层呈均匀增大的高阻反映，再向下至奥陶系灰岩地层强高阻特征比较明显，符合本区地层由浅至深呈“低阻—高阻”的电性变化趋势，另外断面图右侧椭圆虚线所圈区域为已知采空积水区，反映明显。

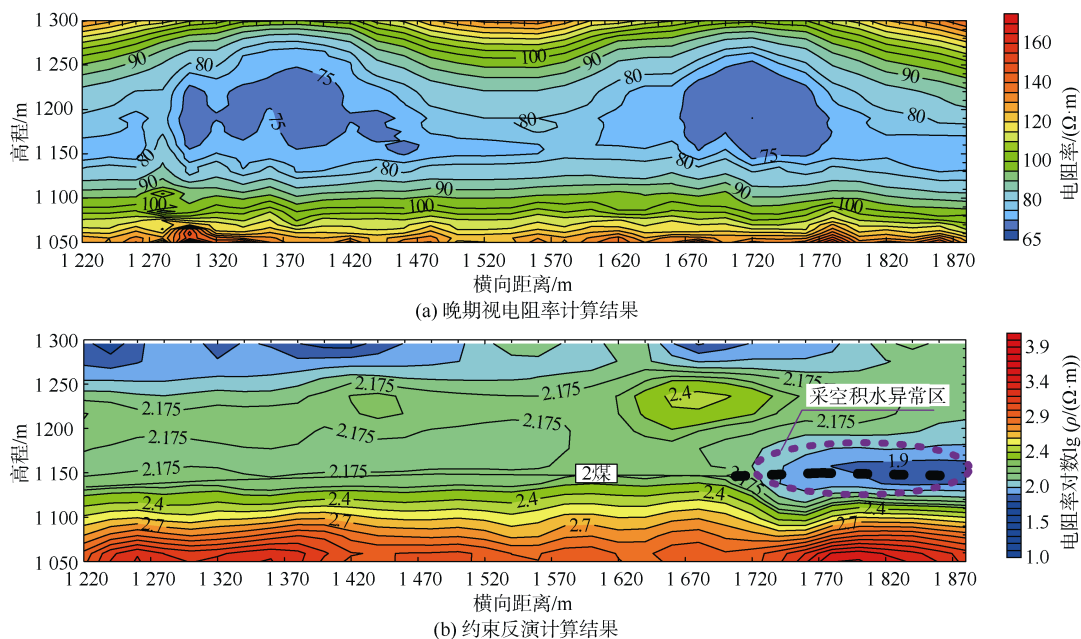


图 5 发射回线约束反演前后对比图

Fig.5 Comparison before and after constrained inversion of the exciting loop

实例二：宁夏侏罗系含煤地层某矿地面 TEM 采空区积水探测。本区浅部风积砂和沙土层呈高阻电性特征；下部为富水性强的砂砾石层及局部富水性强的风化带呈低阻电性特征；向下由侏罗系直罗组至延安组含煤地层，岩性以泥岩、粉砂岩、细粒砂岩、中粒砂岩、粗粒砂岩及煤等互层，电性总体上较上层偏高；再向下至三叠系上田组岩性以细粒砂岩成分居多，电性相比侏罗系中上部地层明显降低。因此其地层电性由浅至深基本呈“高阻—低阻—高阻—低阻”的变化趋势。野外施工发射回线边长为 240 m，

在其内部 4/9 面积范围内进行数据采集，采用式(2)进行计算，结果如图 6a，现象同图 5a，即每一弧形等值线变化处就是一个发射回线内的数据。反演计算结果如图 6b(图中显示为反演电阻率取对数值)，由浅至深基本呈“高阻—低阻—高阻—低阻”的变化趋势，符合地层电性变化规律。图中黑色虚线表示被采动的煤层，黑色实线为未采动煤层，椭圆虚线所圈区域为低阻异常区——由 3 处强低阻闭合圈组成，经在中部低阻闭合圈处打钻，揭露积水采空区，表明约束反演对层状地层电性和异常区的分辨能力较高。

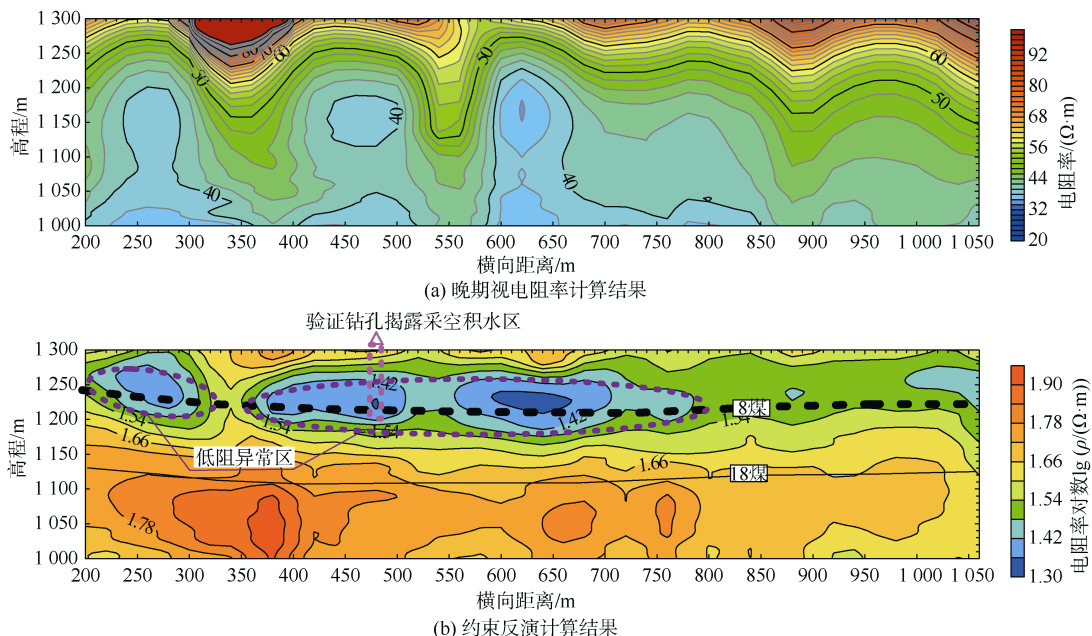


图 6 小发射回线约束反演前后对比图

Fig.6 Comparison before and after constrained inversion of small exciting loop

5 结 论

a. 在反演过程中对不断变化的拉格朗日因子采用 CMD 正则化因子的自适应调节方案进行自适应调节, 同时考虑反演矩阵的病态性和反演结果的收敛性, 可以实现拉格朗日因子的自适应调整。

b. 引入粗糙度矩阵和可信域概念对反演模型进行约束, 使反演结果不易陷入局部极小, 既降低了反演过程的多解性, 又提高了效率, 使反演过程也变得稳定。

c. 通过对典型多层地电模型的模拟反演计算, 表明该算法可以获得比较理想的反演结果, 且能够消除大定源回线装置的边框效应, 同时提高了对目标层位或异常体的定位精度, 经在两实例中的应用效果可见, 本文约束反演方法可以直接用于对实测数据的反演计算。

参考文献

- [1] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319–326.
XUE Guoqiang, YU Jingcun. New development of TEM research and application in coal mine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319–326.
- [2] XUE Guoqiang, BAI Chaoying, YAN Shu, et al. Deep sounding TEM investigation method based on a modified fixed central-loop system[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 76(1): 23–32.
- [3] 张成范, 翁爱华, 孙世栋, 等. 计算矩形大定源回线瞬变电磁测深全区视电阻率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 755–758.
ZHANG Chengfan, WONG Aihua, SUN Shidong, et al. Computation of whole-time apparent resistivity of large rectangular loop[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2009, 39(4): 755–758.
- [4] 李建慧, 朱自强, 刘树才, 等. 模拟退火法计算大定源瞬变电磁法的视电阻率[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 138–142.
LI Jianhui, ZHU Ziqiang, LIU Shucui, et al. Calculation of apparent resistivity of large fixed source transient electromagnetic method by simulated annealing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(1): 138–142.
- [5] 丁艳飞, 白登海, 许诚. 均匀半空间表面大定源瞬变电磁响应的快速算法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2087–2096.
DING Yanfei, BAI Denghai, XU Cheng. A rapid algorithm for calculating time domain transient electromagnetic responses of a large fixed rectangular loop on the half-space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2087–2096.
- [6] 刘最亮, 王鹤宇. 大定源瞬变电磁法在含水断层构造探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 67–70.
LIU Zuiliang, WANG Heyu. Application of transient electromagnetic method in the detection of water-bearing fault structure[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5): 67–70.
- [7] 张维. 大定源瞬变电磁法—维正反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [8] 包乃利, 刘鸿福, 余传涛. 大定源瞬变电磁法激励场及边框效应研究[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(2): 80–84.
BAO Naili, LIU Hongfu, YU Chuantao. The research on the primary field and rim effect of transient electromagnetic method with large fixed loop[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2): 80–84.
- [9] 戚志鹏, 智庆全, 李琳, 等. 大定源瞬变电磁三分量全域视电阻率定义与三分量联合反演[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 742–749.
QI Zhipeng, ZHI Qingquan, LI Xiu, et al. The definition of the full-zone apparent resistivity and the constrained inversion of the three components of fixed source TEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 742–749.
- [10] 赵越, 李琳, 王祎鹏. 大回线源瞬变电磁全域视电阻率定义[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1856–1863.
ZHAO Yue, LI Xiu, WANG Yipeng. Full-domain apparent resistivity definition for large loop TEM[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1856–1863.
- [11] 戴锐, 张达, 龔虎. 大定源瞬变电磁法反演效果分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(3): 1–4.
DAI Rui, ZHANG Da, GONG Hu. Analysis of inverse effect of large fixed source transient electromagnetic method[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2017, 69(3): 1–4.
- [12] 石显新, 闫述, 傅君眉, 等. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1931–1936.
SHI Xianxin, YAN Shu, FU Junmei, et al. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1931–1936.
- [13] 陈小斌, 赵国泽, 汤吉, 等. 大地电磁自适应正则化反演算法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 937–946.
CHEN Xiaobin, ZHAO Guoze, TANG Ji, et al. An adaptive regularized inversion algorithm for magnetotelluric data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(4): 937–946.

(责任编辑 聂爱兰)