

doi: 10.11720/wtyht.2019.1312

姚伟华.大回线源瞬变电磁一维自适应反演方法及应用[J].物探与化探,2019,43(3):584-588.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1312

Yao W H.The one-dimensional adaptive inversion method for large loop source TEM and its application [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019,43(3):584-588.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1312

# 大回线源瞬变电磁一维自适应反演方法及应用

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:**提出了一种适用于大回线源瞬变电磁法框内任意测点垂直  $Z$  分量的一维反演方法。该算法采用 CMD 正则化因子优化方案、光滑度函数和自然边界条件对反演过程进行了约束,减小了初值的依赖度,保证了反演过程的自主性和反演结果的稳定性;在反演过程中,在保证模型残差沿梯度下降的同时,对模型修正量的最大值进行了限制,使反演模型不易陷入局部极小,保证了反演结果全局的收敛性;同时反演的灵敏度矩阵采用牛顿法进行更新,减少了整个反演计算的工作量。最后通过五层的双低阻层模型、双高阻层模型和实测资料证明了该算法可靠。

**关键词:**瞬变电磁法;自适应;一维约束反演

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2019)03-0584-05

## 0 前言

瞬变电磁测深是一种应用较广泛的时间域电磁探测方法,具有灵敏度高、分辨率强、探测深度大、施工效率高等诸多优点,近年来被广泛应用在金属矿产勘探、煤矿地质灾害调查、隧道超前预报、工程地质勘察等领域<sup>[1-3]</sup>。随着计算机技术与仪器硬件水平的发展,该方法得到了快速发展,但是由于瞬变电磁数值模拟理论的复杂性,二、三维的反演方法还未达到应用程度<sup>[2]</sup>。大回线源是实际生产中应用最多的瞬变电磁工作装置之一,目前主要的数据处理技术是基于视电阻率的定性解释和一维反演的半定量解释<sup>[4-5]</sup>。一维反演技术方法较多,在实际生产中应用较广泛的有:共轭梯度法(ICCG)、高斯-牛顿法、阻尼最小二乘法、OCCAM 反演法等<sup>[6-14]</sup>,它们均为线性化反演方法,优点是收敛速度快、计算量相对较小,但也存在反演过程对初值依赖度高、反演结果容易陷入局部极小、灵敏度矩阵计算量大等问题<sup>[9]</sup>。针对上述问题,广大地球物理学者开展了大量的研究工作:翁爱华<sup>[10]</sup>将 Occam 反演方法应用到

中心回线观测装置瞬变电磁测深中,该方法在反演过程中考虑到了实际地层电性纵向上的连续性,减弱了反演结果对初始模型的依赖度,缺点是拉格朗日因子计算量大;张维<sup>[8]</sup>采用阻尼最小二乘法实现了大定源回线瞬变电磁一维反演,并引入迭代控制上界、下界以及阻尼因子调节的衡量因子实现了阻尼因子的自动调节,提升了反演迭代的速度,缺点是迭代控制上下界人为性强,在实际中不易取舍;徐玉聪、赵宁、秦策等<sup>[9]</sup>等采用自适应正则化反演法实现了大定源瞬变电磁一维反演,反演过程中正则化因子通过数据目标函数和模型目标函数自适应得到,并采用模型对深度的二阶导数极小的模型约束,使反演收敛速度快、稳定性好,但是计算雅克比矩阵需要花费大量的时间,反演效率不高;戴锐、张达、冀虎<sup>[7]</sup>采用高斯-牛顿法实现了大定源瞬变电磁法一维反演,也取得了良好的效果,但是该算法对反演初始值依赖度高,需要人为不断的尝试。针对瞬变电磁法反演技术现状,本文根据大回线源瞬变电磁场特点,采用 CMD 正则化因子优化方案<sup>[15]</sup>、光滑度函数、自然边界条件和模型修正量的最大值对大回线源瞬变电磁梯度反演过程进行了优化,灵敏度矩阵

**收稿日期:** 2018-09-03; **修回日期:** 2018-11-08

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2017YFC0804100);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项(2018MS006)

**作者简介:**姚伟华(1989-),男,陕西西安人,2015 年毕业于长安大学,硕士,工程师,现工作于中煤科工集团西安研究院有限公司,主要从事煤矿瞬变电磁法勘探研究工作。Email:yaoweihua@cctegxian.com

采用牛顿法<sup>[16]</sup>进行更新,减少了反演计算的工作量,最后理论模型和实测资料结果表明该方法有效。

1 大回线源瞬变电磁一维反演方法

1.1 一维正演方法

在求解大回线源瞬变电磁响应时,先求解频率域响应,再通过傅里叶变换求解时间域响应。首先采用剖分思想,把回线源分成若干个电偶极子,然后对所剖分的各个电偶极子产生的频率域响应进行矢量叠加、求和,就可得层状大地大回线源在地表产生的频率域响应,表达式为

$$B_z(x,y,\omega) = \sum_{j=1}^m \frac{P_{E_j}}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_j \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} J_1(\lambda r_j) d\lambda$$

(1)

$$R_1 = \operatorname{cth} \left[ u_1 h_1 + \operatorname{arch} \frac{u_1}{u_2} \operatorname{cth} \left( u_2 h_2 + \cdots + \operatorname{arch} \frac{u_{n-1}}{u_n} \right) \right],$$

其中: $u_i = \sqrt{\lambda^2 + k_i^2}$ , $k_i^2 = -i\omega\mu\sigma_i$ , $\sigma_i$ 是第*i*层地层的电导率, $h_i$ 为第*i*层地层的厚度, $\varphi_j$ 为第*j*个电偶极子与测点的夹角, $r_j$ 为测点与第*j*个电偶极子的距离, $P_{E_j}$ 为第*j*个电偶极子的磁距。最后对式(1)进行余旋变换就可求得大回线源地表任意测点的时间域响应。

1.2 一维反演方法

在进行大回线源瞬变电磁法一维反演时,在使观测数据与模型数据的拟合误差达到极小的条件下,同时也要使反演模型的粗糙度达到极小,反演的目标函数为:

$$U = R + \mu^{-1} \{ \| \mathbf{W} \cdot \mathbf{d} - \mathbf{W} \cdot F[\mathbf{m}] \|^2 - X_\infty^2 \}。$$

(2)

式中: $\mu$ 是正则化因子, $\mathbf{d}$ 是大回线源瞬变电磁框内任意测点的实测数据, $F$ 是大回线源瞬变电磁一维正演算子, $\mathbf{m}$ 为反演模型参数向量, $X_\infty^2$ 是反演所要求达到的拟合差, $\mathbf{W} = \operatorname{diag} \{ 1/\varepsilon_1, 1/\varepsilon_2, \cdots, 1/\varepsilon_j, \cdots, 1/\varepsilon_M \}$ , $\varepsilon_j$ 是第*j*个数据的标准差,是反演模型的粗糙度函数,将其写成矩阵的形式为

$$R = \| \mathbf{P} \cdot \mathbf{m} \|^2$$

(3)

其中 $\mathbf{P}$ 为粗糙度矩阵,表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & & & & 0 \\ -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \cdots & \cdots & \\ & 0 & -1 & 1 & \end{bmatrix}$$

对公式(2)中的模型 $\mathbf{m}$ 求偏导数,并取 $\nabla U_m = 0$ ,就

可以求得 $U_m$ 在极小值情况下对应的模型参数修正量 $\Delta \mathbf{m}$ 的迭代方程

$$[ ((\mathbf{WJ})^T \mathbf{WJ} + \mu \mathbf{P}^T \mathbf{P}) \Delta \mathbf{m}_k = (\mathbf{WJ})^T \mathbf{W} \Delta \mathbf{d}_k。$$

(4)

式中 $\Delta \mathbf{m}_k$ 是第*k*次反演迭代的模型修改量, $\Delta \mathbf{d}_k$ 是第*k*次迭代模型响应与实测数据的残差, $\mathbf{J}$ 是雅可比矩阵,其元素就为 $J_{ij} = \partial F_i[\mathbf{m}] / \partial m_j$ 。

对于公式(4)中的正则化因子选取文献<sup>[10]</sup>提出的CMD自适应调节方案,其第*k*次迭代的公式为:

$$\mu_k = \frac{\| \mathbf{P}^T \mathbf{P} \mathbf{m}_k \|^2}{\| \mathbf{P}^T \mathbf{P} \mathbf{m}_k \|^2 + \| \mathbf{W}^T \mathbf{W} \Delta \mathbf{d}_k \|^2}。$$

(5)

在瞬变电磁一维反演过程中,对地层厚度按照等对数间隔进行离散,来反演每一层的电阻率。为了保证反演的电阻率符合自然规律,将每一层的电阻率限制在 $[0.01, 10\,000] \Omega \cdot \text{m}$ 之间,为了不使反演结果快速的陷入局部极小,对模型修正量的最大值限制在 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 以内。

在反演迭代中每次都必须更新雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ ,其计算量是巨大的,在此采用牛顿法进行灵敏度矩阵的更新:

$$\mathbf{J}_{k+1} = \mathbf{J}_k + (\Delta \mathbf{d}_k - \mathbf{J}_k \Delta \mathbf{m}_k) \frac{\Delta \mathbf{m}_k^T}{\Delta \mathbf{m}_k^T \Delta \mathbf{m}_k}。$$

(6)

在反演过程中还要对矩阵方程的条件数进行考虑,如果反演系数矩阵的条件数较大,那么就必須增大正则化因子,以改善其病态性。

2 理论模型计算

为了验证大回线源瞬变电磁一维反演算法的有效性,选取五层的双低阻层和双高阻层模型进行理论模型计算。正演模型的发射外框设置为 $360 \text{ m} \times 360 \text{ m}$ ,采样时间为 $0.1 \sim 10 \text{ ms}$ ,等对数间隔40道。反演过程中最小反演深度设置为 $50 \text{ m}$ ,最大反演深度设置为 $600 \text{ m}$ ,将地层等对数剖分为30层,反演计算这30层大地的电阻率。反演最大迭代次数设置为20次。

双低阻层模型从浅至深各层的电阻率设置为 $100、10、150、10、100 \Omega \cdot \text{m}$ ,各层厚度分别为 $100、30、100、60 \text{ m}$ ;双高阻层模型从浅至深各层电阻率分别为 $100、300、80、500、100 \Omega \cdot \text{m}$ ,厚度为 $80、100、100、150 \text{ m}$ 。反演初始模型均设置为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀半空间。双低阻层模型不同反演次数的反演结果及反演模型和理论模型响应的晚期视电阻率拟合结果见图1,双高阻层模型的计算、拟合结果见图2。

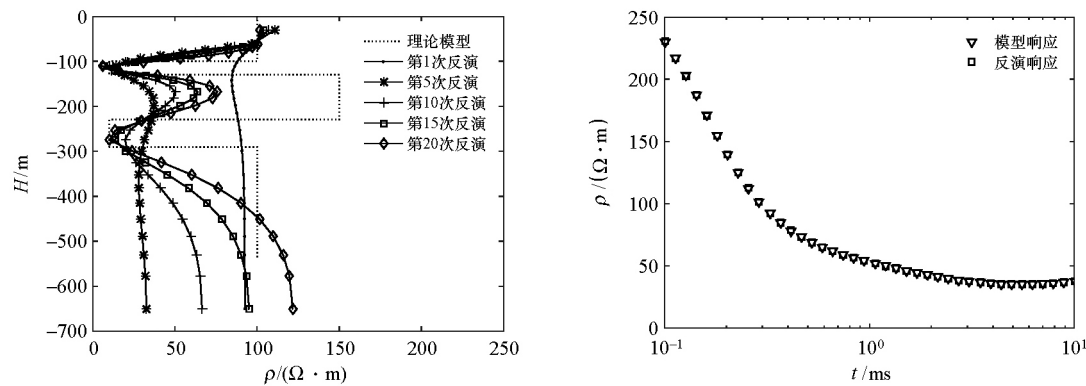


图 1 双低阻层模型反演结果 (a) 及晚期视电阻率拟合结果 (b)

Fig.1 Inversion results (a) and fitting diagram of late apparent resistivity (b) of double low resistance layer model

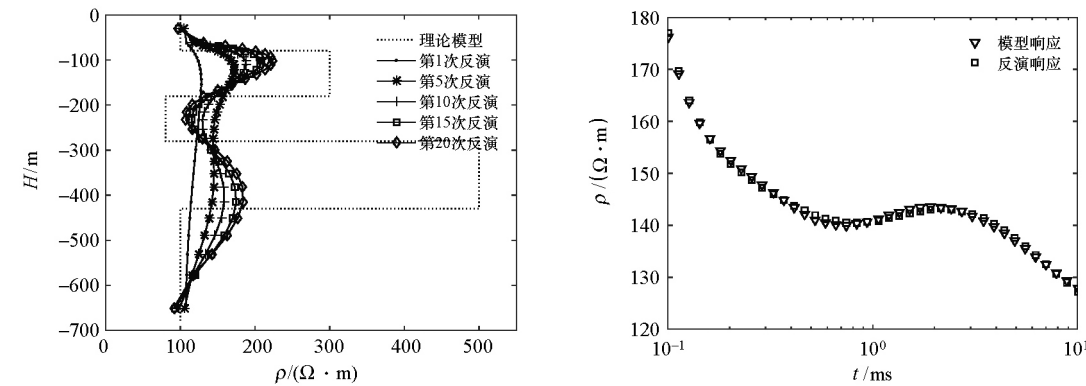


图 2 双高阻层模型反演结果 (a) 及晚期视电阻率拟合结果 (b)

Fig.2 Inversion results (a) and fitting diagram of late apparent resistivity (b) of double high resistance layer model

分析图 1、图 2 可见,不管是双低阻层模型还是双高阻层模型,随着反演迭代次数的增加,反演模型结果快速趋近于理论模型;反演模型响应的晚期视电阻率和理论模型响应的晚期视电阻率拟合较好,第 20 次反演模型结果与理论模型电性变化规律一致,高阻极值与低阻极值的深度与理论模型深度基本一致。但是,综合分析两种模型的反演结果发现:对于低阻层,大回线瞬变电磁一维反演的结果更贴合理论模型;对于高阻层反演电阻率相对于理论模型偏小,这主要是因为瞬变电磁场对低阻体敏感、对高阻体不敏感造成的。总体来说,两种模型的反演结果均能反映低阻层和高阻层的相对电性差异,证明本文提出的大回线瞬变电磁一维反演方法对多层地电模型的反演结果是可靠的。

3 实测数据反演

测区位于山西北部的宁武煤田,地形复杂,地表有基岩裸露,大部分被新生界黄土层覆盖,同时沟谷发育,局部冲沟两侧偶有分支沟谷,沟谷底大部分比较开阔。

浅部第四系以亚黏土、亚砂土为主,向下至二叠系上石盒子组及下石盒子组上部,岩性以砂岩、砂泥岩互层为主,呈低阻电性特征;至下石盒子组下部,以粗粒厚层状砂岩、砂质泥岩、砂岩互层为主,呈相对高阻电性特征;再向下至二叠系山西组,岩性为泥岩、粉砂岩,电性相对偏低;继续向下至本区主采煤层石炭系太原组,岩性为灰岩、砂岩、砂泥岩及本区主采煤层,与上述地层电阻率相比,其整体表现为较高阻特征。总体来说,测区地层电性整体呈现为“低阻—高阻—低阻—高阻—低阻”的变化特征。区内小煤窑分布较多,主要采用房柱式开采 2 号煤层,原生煤层被采动破坏范围较大,且局部位置可能积水,为矿方安全生产埋下了安全隐患,因此,采用地面瞬变电磁法对测区进行了采空区范围勘查。本次施工区域控制面积约 0.49 km<sup>2</sup>,采用发射线框边长为 240 m×240 m、发射频率为 25 Hz、点距 20 m、线距 40 m,共布设测线 32 条。

笔者以 28 线为例来验证反演算法的有效性。28 线工作布置如图 3 所示,测线长度 1 500 m,地形大体呈东北高、西南低趋势,在水平距离 600~700 m 间分布有相对较深的沟谷,煤层亦表现为东北高、西



南低的变化特征。28 线反演电阻率断面如图 4 所示。在反演过程中反演层数剖分为 40 层,初始电阻

率模型均为  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,在联想 T440P PC 机上,76 个测点的反演计算时间约为 20 min,计算速度较快。

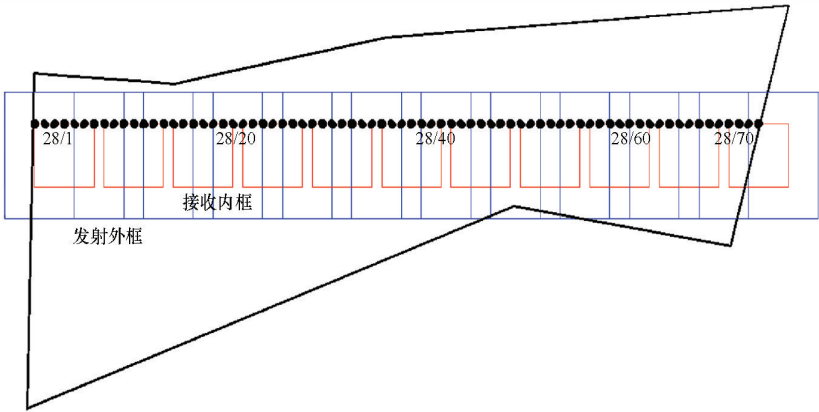


图 3 大回线源瞬变电磁 28 线工作布置

Fig.3 Large loop source transient electromagnetic 28 line work layout

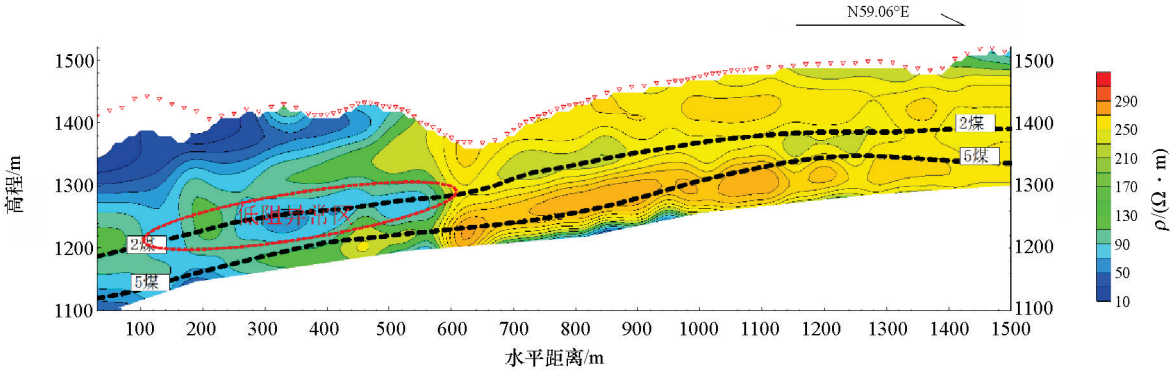


图 4 大回线瞬变电磁 28 线反演电阻率断面

Fig.4 Large loop transient electromagnetic 28 line inversion section

由图 4 可见,在探测深度范围内,地层电阻率由浅到深总体上呈“低—高—低—高”的变化特征,与实际地层的电性变化规律一致;横向上反演电阻率等值线走向与含煤地层基本一致,较好地反映了沉积地层的电性分布特征。在 2 号煤层附近发现 1 处低阻异常区,其中低阻异常区位于水平距离 100~600 m 之间,电阻率等值线扭曲,变形明显,呈低阻异常特征,且异常中间有阻断或不连续,推断该低阻异常可能与 2 号煤层采空破坏区积水有关。后期通过收集该矿的地质资料,发现该区域以前为小煤窑主采区,且采煤历时较长,主要采用房柱式开采 2 号煤层,采动破坏范围较大;由于该采空区埋深较浅,易于受大气降水和上部含水层中水的补给,所以形成了充水采空区。该反演结果较好地反映了地下采空区的实际位置,证明了该反演算法的有效性。

4 结论

本文实现了大回线源瞬变电磁法一维自适应

反演,通过理论模型和实测资料验证,得出如下结论:

- 1) 该算法考虑到沉积地层电性纵向的连续性,采用 CMD 方案、光滑度函数、自然边界条件和模型修正量的最大值对大回线源瞬变电磁的梯度反演过程进行了优化和约束,在保证反演过程自主和稳定的前提下,使反演结果对初值要求不高,同时使反演结果不易陷入局部极小,最后采用牛顿法更新灵敏度矩阵提高了反演效率。
  - 2) 在两层低阻层或者高阻层的反演中,大回线瞬变电磁一维反演算法反演的低阻层结果更贴合实际模型,而对于高阻层反演电阻率相对于实际模型偏小,这主要是由瞬变电磁场对低阻敏感、对高阻不敏感的特性造成的,是瞬变电磁场反演的固有特点。
- 总体来说,理论模型与实测数据的反演结果均能客观反映地层的相对电性差异,说明该算法对于复杂地电结构具有较好的有效性和适应性,证明本文提出的大回线瞬变电磁一维反演方法是可靠的。

## 参考文献 (References):

- [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 G Q, Yu J C. New development of TEM research and application in coal mine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 0319-0326.
- [2] 程建远,石显新.中国煤炭物探技术的现状与发展[J].地球物理学进展,2013,28(4):2024-2032.  
Chen J Y, Shi X X. Current status and development of coal geophysical technology in China[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(4): 2024-2032.
- [3] 陈卫营,薛国强.瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用[J].地球物理学进展,2013,28(5):2709-2717.  
Chen W Y, Xue G Q. Application on coal-mine voids detection with multi-device TEM technology[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(5): 2709-2717.
- [4] 赵越,李貅,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 Y, Li X, Wang Y P. Full-domain apparent resistivity definition for large-loop TEM[J]. Progress in Geophys, 2015, 30(4): 1856-1863.
- [5] 薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法正反演问题研究进展[J].地球物理学进展,2008,23(4):1165-1172.  
Xue G Q, Li X, Di Q Y. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation[J]. Progress in Geophys, 2008, 23(4): 1165-1172.
- [6] 刘晓.瞬变电磁法三维正演及非线性共轭梯度反演研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.  
Li X. Study of Three-dimensional TEM Forward Modeling and Non-linear Conjugate Gradients Inversion[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [7] 戴锐,张达,冀虎.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 R, Zhang D, Ji H. Analysis of Large loop transient electromagnetic method inversion effect[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2017, 69(3): 1-4.
- [8] 张维.大定源瞬变电磁法一维正反演研究[D].长沙:中南大学,2013.  
Zhang W. The Study about 1D Forward and Inversion of large loop TEM[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [9] 徐玉聪,赵宁,秦策,等.大定源瞬变电磁一维自适应正则化反演[J].地质与勘探,2015,51(2):360-365.  
Xu Y C, Zhao N, Qin C, et al. One-dimensional adaptive regularization inversion of transient electromagnetic sounding with a large fixed source[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(2): 360-365.
- [10] 翁爱华. Occam 反演及其在瞬变电磁测深中的应用[J].地质与勘探,2007,43(5):74-76.  
Weng A H. OCCAM's inversion and its application to transient electromagnetic method[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(5): 74-76.
- [11] 周道卿,谭捍东,王卫平.频率域航空电磁资料 Occam 反演研究[J].物探与化探,2006,30(2):71-74.  
Zhou D Q, Tan H D, Wang W P. The OCCAM inversion in faem data processing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(2): 71-74.
- [12] 李明星,肖林通,张倚瑞,等.瞬变电磁粒子群优化反演研究[J].煤炭技术,2014,33(9):302-304.  
Li M X, Xiao L T, Zhang Y R, et al. Research on particle swarm optimization inversion of transient electromagnetic method[J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 302-304.
- [13] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth model from electromagnetic sounding data[J]. Geophysics, 1987, 52(2): 289.
- [14] 毛立峰,王绪本,陈斌.直升机航空瞬变电磁自适应正则化一维反演方法研究[J].地球物理学进展,2011,26(1):300-305.  
Mao L F, Wang X B, Chen B. Study on an adaptive regularized 1D inversion method of helicopter TEM data[J]. Progress in geophys., 2011, 26(1): 300-305.
- [15] 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 X B, Zhao G Z, Tang J, et al. An adaptive regularized inversion algorithm for magnetotelluric data. Chinese J. Geophys., 2005, 48(4): 937-946.
- [16] 李刚,潘和平,王智,等.回线源瞬变电磁法一维反演算法[J].煤田地质与勘探,2017,45(5):161-166.  
Li G, Pan H P, Wang Z, et al. One-dimensional inversion for loop source transient electromagnetic method[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 161-166.

## The one-dimensional adaptive inversion method for large loop source TEM and its application

YAO Wei-Hua

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology &amp; Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A one-dimensional inversion method for the vertical Z component of any measuring point in the frame of the large loop source transient electromagnetic method is proposed in this paper. The algorithm uses the CMD regularization factor optimization scheme, smoothness function and natural boundary conditions to constrain the inversion process, reduce the initial value dependence, and ensure the autonomy of the inversion process and the stability of the inversion results. In the inversion process, while ensuring that the model residual decreases along the gradient, the maximum value of the model correction is limited, so that the inversion model is not easy to fall into the local minimum, which ensures the global convergence of the inversion results. The sensitivity matrix is updated by Newton's method, thus reducing the workload of the entire inversion calculation. Finally, the reliability of the algorithm is guaranteed by five-layer double low-resistance layer model, double high-resistance layer model and measured data.

**Key words:** TEM; adaptive; one-dimensional constraint inversion

(本文编辑:沈效群)