

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1586

何可, 郭明, 胡章荣, 等. 半航空瞬变电磁 L1 范数自适应正则化反演[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1338-1346. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1586>

He K, Guo M, Hu Z R, et al. Semi-airborne transient electromagnetic inversion based on L1-norm adaptive regularization[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1338-1346. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1586>

半航空瞬变电磁 L1 范数自适应正则化反演

何可^{1,2}, 郭明², 胡章荣¹, 易国财², 王仕兴²

(1. 西华师范大学教育信息技术中心, 四川南充 637002; 2. 成都理工大学地球物理学院, 四川成都 610059)

摘要: 长导线源半航空瞬变电磁正则化反演正则项通常采用 L2 范数, 其拟合结果较光滑, 不能有效刻画层界面信息。针对层状介质陡变模型实现正则项为 L1 范数的反演算法, 采用迭代重加权最小二乘法将原问题转化为 L2 正则化子问题求解, 解决 L1 范数存在不可导问题; 采用 OpenMP 技术对雅可比矩阵并行计算, 提高了反演速度; 对自适应正则化因子分段迭代法的调整策略进行分析并改进, 改进后的自适应正则化因子调整策略更适合半航空瞬变电磁 L1 正则反演算法。最后对电阻率进行反演并与 Occam 反演结果作比较, 结果表明 L1 正则反演充分迭代后能够突出符合真实模型的电性界面, 反演电阻率与模型真实值更接近。

关键词: L1 范数; 自适应正则化反演; 半航空瞬变电磁; 迭代重加权最小二乘; OpenMP 并行

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1338-09

0 引言

半航空瞬变电磁法(semi-airborne transient electromagnetic, SATEM)采用接地长导线源向地下供给阶跃电流,使用无人机搭载接收线圈进行空中观测,接收二次场^[1]。半航空瞬变电磁法与航空瞬变电磁法相比,具有信噪比高、勘探深度大等特点^[2];与地面瞬变电磁比较,具有快速、大面积在复杂地形进行探测的能力,对良导体探测效果较好^[3-5]。半航空瞬变电磁法数据量大,相较于航空瞬变电磁采用 CDI 快速成像,由于需考虑线源长度、偏移距等影响,实现难度大,而三维反演由于计算时间较长,目前也很难在实际中应用,所以实践中数据处理仍以一维反演为主。地面瞬变电磁反演研究主要以“烟圈”理论和最优化算法为主^[6-7]。“烟圈”算法快速、近似,适合作现场解释工作^[8],但由于不能提供层厚信息,所以只能作为定性研究。最优化算法主要以阻尼最小二乘^[9-11]和以 Occam 反演^[12-13]引入模型正则化^[14-16]的思想为主,阻尼最小二乘法通过改

变阻尼因子大小使算法向高斯-牛顿方向或最速下降方向靠近,改进了最小二乘法收敛不稳定的特性,该方法对初始模型仍然有较高要求,对复杂模型可能出现结果不收敛等现象;Occam 反演属于一种 L2 范数的正则化反演算法,最为稳定,但也主要有两个方面的不足,一是计算时间较长,每次迭代都需要通过多次正演搜索最佳的正则因子,二是反演结果过于光滑,对真实电性界面分辨不足。许多学者对正则化因子的选取作出改进并提出一些新方法,如:采用牛顿迭代法和二分法组合^[17]降低正则因子搜索的正演次数;陈小斌等^[18]提出 MD 和 CMD 两种正则化因子自适应调整方案,应用较为广泛。常规正则化反演算法正则项通常采用 L2 范数,利用 L2 范数对电阻率模型进行处理,其假定模型空间分布连续光滑,反演结果会弱化对突变电性界面的分辨能力。国外已有学者在重力、地震数据三维反演^[19-20]中采用 L1 正则项,国内在航空电磁数据反演^[21]、三维大地电磁反演^[22]中,有学者采用 L1 正则项来提高反演算法对层状电性介质层界面的分辨率。作为 L1 范数的一种特例,聚焦反演^[23-25]已成熟应用于大

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目“稳定条件突破 CFL 限制的显式有限差分法模拟地形模型的三维半航空瞬变电磁响应”(41974158)

第一作者: 何可(1988-),男,在读博士,从事半航空瞬变电磁法正反演研究工作。Email: hk812760098@163.com

地电磁^[26]、重力、磁测等^[27-28]研究方向,常规的聚焦反演采用 NLGC(非线性共轭梯度)直接求解目标函数,然而正则项求解不可靠,容易陷入奇异系数解“陷阱”^[22]。

本文正则项采用 L1 范数,分析了模型在解空间获得稀疏解的原因,采用迭代重加权最小二乘法将原问题转化为 L2 正则化子问题求解,解决 L1 范数存在不可导问题,并将两种算法与 Occam 反演算法结果进行比较;采用 OpenMP 并行策略对雅克比矩阵进行并行运算,提高反演效率;对分段迭代法自适应正则化因子调整策略进行分析并改进,改进后的自适应正则化因子调整策略更适合半航空瞬变电磁法,通过与 Occam 反演对比,L1 正则反演结果的模型分辨率要优于 Occam 反演结果。

1 半航空瞬变电磁一维正演

长导线源半航空瞬变电磁法以有限长接地导线作为发射端,不能用电偶极子近似表示,需要沿导线进行积分,对 X 、 Y 、 Z 三个分量均可观测,目前以垂直地面 Z 分量为主。假设线源中心为笛卡尔坐标系原点, x 轴为长导线方向, z 轴向上为正,水平层状介质频率域 H_z 分量公式为^[27]

$$H_z = \frac{I}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{y}{R} \int_0^{+\infty} (1 + \gamma_{TE}) e^{u_0 z} \frac{\lambda^2}{\mu_0} J_1(\lambda R) d\lambda dx', \quad (1)$$

式中: y 为偏移距(测点与导线垂直距离), I 为电流强度, L 为线源长度一半, $R = \sqrt{(x-x')^2 + y^2}$, γ_{TE} 为 TE 模式下反射系数^[28], Z 为线圈垂直地面高度, J_1 为 1 阶贝塞尔函数, λ 为积分变量。求解式(1)主要分为 3 步:① 内层积分采用 47 点汉克尔变换^[29]求解一阶贝塞尔函数;② 外层采用 12 点高斯积分,得到层状介质频率域响应值;③ 通过 G-S 逆拉式变换^[30-33]将频率域响应值转换到时间域。

2 L1 正则反演理论

2.1 L1 正则反演基本原理

常规 L2 正则化反演目标函数可表示为

$$\Phi(M)_{L2} = \| \mathbf{W}_d [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})] \|_2^2 + \lambda \| \mathbf{W}_m [\mathbf{M}^{\text{ref}} - \mathbf{M}] \|_2^2, \quad (2)$$

式中: $\Phi(M)_{L2}$ 为总目标函数;右边第一项为时间域数据拟合项, \mathbf{d}^{obs} 为观测数据向量, $\mathbf{F}(\mathbf{M})$ 为理论正演响应, \mathbf{M} 为模型参数向量,有 n 个元素,每个元素

均为电阻率自然对数; \mathbf{W}_d 为数据加权矩阵,一般为对角矩阵,其元素为观测数据噪声的倒数;第二项为 L2 正则模型约束项, \mathbf{M}^{ref} 为参考模型,可取 CDI 成像结果为参考模型或者以均匀半空间为参考模型,超参数 λ 为正则化因子,其控制反演更倾向于拟合数据或参考模型, \mathbf{W}_m 为数据加权矩阵,一般可取最小模型约束(单位算子)、最平缓模型约束(梯度算子)、最光滑模型约束(拉普拉斯算子),本文采用模型约束项为:

$$\mathbf{W}_m = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ$$

L1 正则反演目标函数为:

$$\Phi(M)_{L1} = \| \mathbf{W}_d [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})] \|_2^2 + \lambda \| \mathbf{W}_m [\mathbf{M}^{\text{ref}} - \mathbf{M}] \|_1. \quad (3)$$

对式(2)和式(3),可以用如下形式表示:

$$\Phi(M)_{L2} = [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})]^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \cdot [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})] + \lambda \sum_i^n x_i^2, \quad (4)$$

$$\Phi(M)_{L1} = [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})]^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \cdot [\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{M})] + \lambda \sum_i^n |x_i|. \quad (5)$$

L2 范数是向量各元素平方和开方,具有连续光滑的特点^[21],这也使得代表层状介质模型各分层电性结构的最终结果呈连续变化,不能明显刻画各层界面。L1 范数是指向量各元素 m_i 绝对值之和,也称为“稀疏规则算子”,其向量中部分元素与最终输出没有任何关系或不提供任何信息,可以允许电性介面发生陡变。最小化目标函数的时候考虑 m_i 这些额外特征虽然可以获得最小误差,但是也将部分无用信息考虑进去,使得对模型增量的判断有所偏差,稀疏算子可以去掉无用信息,将其权重置为零。

为进一步说明 L1 解的稀疏性,假设在二维平面内将 L1 范数正则项表示为 $|m_1| + |m_2| = C$,L2 范数正则项为 $m_1^2 + m_2^2 = C$,在 (m_1, m_2) 平面上画出数据拟合项等值线,正则模型约束项成为平面上半径为 C 的范数球(norm ball);数据拟合项与正则约束项在平面上首次相交的点则是最优解(图 1),目标函数由数据拟合项、正则模型约束项构成。最优解必定有且只有一个交点,除非目标函数具有特殊形状,否则与菱形的交点大概率出现在截距处(某一维度参数为 0),则具有稀疏性,而 L2 范数正则解空间为圆形,总存在一个切点,仅当某些特殊情况下,切点才会位于坐标轴上。可以看出在多维情况下,L1 范数

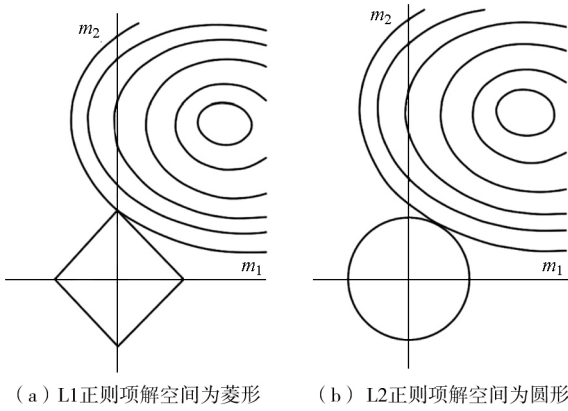


图1 数据拟合项与模型约束项等值线

Fig. 1 Contour plots of data fitting items and model constraints

正则约束项与数据拟合项的交点出现在坐标轴上的概率更大。

众所周知,L1范数取绝对值在存在不可导情况下会使迭代不稳定,L1范数正则项最速下降方向无法得到。可取一个小值ξ,将式(5)改写为

$$\Phi(M)_{L1} = [d^{obs} - F(M)]^T W_d^T W_d \cdot [d^{obs} - F(M)] + \lambda \sum_i^n \frac{x_i^2}{|x_i| + \xi} \quad (6)$$

针对正则项存在不可导问题,采用迭代重加权最小二乘法(IRLS),将正则项改写为

$$\sum_i^n \frac{x_i^2}{|x_i| + \xi} = X^T V X = (M^{ref} - M)^T W_m^T V W_m (M^{ref} - M) \quad (7)$$

式中:V为对角加权矩阵,主对角线上元素为:

$$V_{i,i} = \frac{1}{|x_i| + \xi} \quad (8)$$

对式(6)关于增量Δm_k(下降方向)求导:

$$[J_k^T W_d^T W_d J_k + \lambda W_m^T V_k W_m] \Delta m_k = J_k^T W_d^T W_d [d^{obs} - F(M_k)] + \lambda W_m^T V_k W_m [M^{ref} - M_k] \quad (9)$$

式(9)右边第一项为数据拟合梯度项,第二项为正则梯度项,J_k为雅可比矩阵(与正演贝塞尔函数无关)。

2.2 自适应正则因子策略

关于正则化因子的调整,陈小斌等^[18]提出了MD和CMD两种方案。

MD方案: $\lambda^1 = \lambda^0, \lambda^k = \frac{\phi_1^{k-1}}{\phi_2^{k-1}};$ (10)

CMD方案: $\lambda^k = \frac{\phi_1^{k-1}}{\phi_1^{k-1} + \phi_2^{k-1}} \circ$ (11)

式中:φ₁^{k-1}为数据拟合项,φ₂^{k-1}为模型约束项。将数据拟合项和正则约束项作比值来调节正则化因子,在大地电磁中取得了很好的效果。许多学者将CMD用到了航空瞬变电磁、大定源瞬变电磁、半航空瞬变电磁中^[2,13,15],在L2正则化反演中都得到了很好的效果。邓琰等^[34]提出采用数据拟合梯度与正则梯度项建立一种比值关系,在三维大地电磁反演中都有不错的效果。笔者在半航空瞬变电磁L1正则化反演中采用这两种比值法调节自适应调节正则化因子时发现,未迭代到最优时正则化因子无法继续减小,拟合差也无法继续下降。

另一种分段衰减法是将正则因子从较大的值迭代逐渐衰减^[35]。阮帅等^[22]提出一种正则因子分段衰减法,设置一个足够大的初始值,且衰减速度适当小,具体过程为:设正则化因子初始值为λ₀ = $\frac{\|g_0^d\|_2}{l}$,其中g₀^d = JJ₀^TW_d^TW_d[d^{obs} - F(M₀)]为数据拟合梯度项,l = n · ξ;k > 0时,若满足

$$\frac{\|W_d[d^{obs} - F(M_{k-1})]\|_2 - \|W_d[d^{obs} - F(M_k)]\|_2}{\|W_d[d^{obs} - F(M_k)]\|_2} > 5\% \quad (12)$$

则有λ_k = λ_{k-1},否则λ_k = λ_{k-1}/ω。这里引入了另一个超参数ω^[22],ω需取适当的值才能达到比较好的效果。由于在没有先验信息情况下设置参考模型,M^{ref}设为均匀半空间模型时正则因子初始值过大,模型增量较小,所以前几次迭代模型几乎不发生改变。随着迭代时间和次数增加,对其作一定改进,使初始正则化因子处于一个较小的值,再按照适当比例逐渐衰减,过程如下。

设正则化因子初始值为λ₀ = $\frac{\|g_0^d\|_2}{\|g_0^d\|_2 + \|g_0^m\|_2}$,

g₀^m = W_m^TV₀W_m[M^{ref} - M₀],为L1范数正则梯度项,k > 0时,条件同上。当满足条件时,对正则化因子作一个较小的衰减,则λ_k = α · λ_{k-1}(|α| ≤ 1),否则λ_k = λ_{k-1}/ω,这里取比例因子α = 0.85,ω = 2。根据先验信息给出参考模型接近真实模型时,初始正则因子对初始模型约束力减弱,从一个较小的值开始衰减,初始模型较快拟合到与真实模型接近;当参考模型与真实模型差距较大时,正则项因子约束力增强,从接近1开始衰减。这种分段衰减法的优点是反演稳定性高,拟合较快。

设定反演结束条件为:①达到最大迭代次数;②相邻两次拟合差小于给定拟合误差(Rms1 - Rms2 < Rms);③Rms2小于给定精度。拟合差为:

$$Rms_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [(\mathbf{d}_j^{\text{obs}} - \mathbf{F}_j(m)) / \mathbf{d}_j^{\text{obs}}]^2}{N}} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{d}_j^{\text{obs}}$ 为观测数据向量元素, $\mathbf{F}_j(m)$ 为理论正演响应值, N 为采样时间个数。

2.3 OpenMP 并行策略

OpenMP 是一种共享内存系统的多处理器多线程并行语言^[36], 采用 fork-join (分叉—合并) 并行执行模式。主线程作串行运算, 当遇到并行模块时, 调用其他从线程构成线程组, 同时访问共享内存区域, 执行命令, 执行完毕跳出并行区域, 继续执行串行命令。OpenMP 并行策略具有效率高、执行快的特点, 适合单机操作。

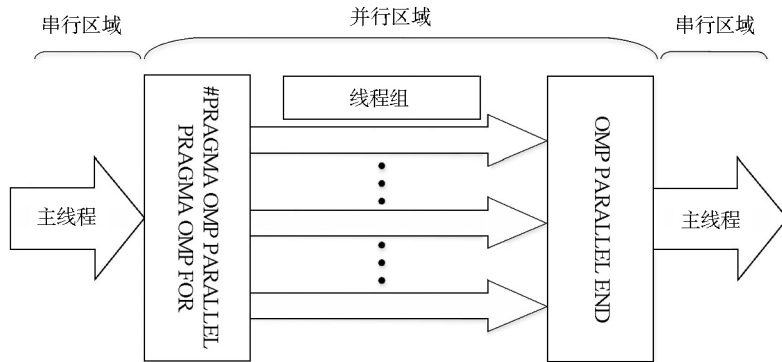


图 2 OpenMP 运算并行策略

Fig. 2 OpenMP computing parallel strategy

表 1 串并行计算时间对比

Table 1 Comparison of serial parallel computing time

	迭代次数			
	5	15	30	60
串行计算时间/s	69	203	407	807
并行计算时间/s	15	44	91	194

3 理论模型反演分析

设定半航空瞬变电磁参数如下: 线源长度 1 km, 电流 20 A, 线圈接收高度 20 m, 线圈面积为 1, 偏移距为 250 m, 即测点坐标为 (0, 250, 20); 设初始模型 30 层, 初始层厚为 2 m, 依次递增, 每层电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$, 对理论模型响应值均加入 3% 的高斯白噪声, 并与 Occam 反演结果相比较。

3.1 三层模型反演算例

3.1.1 H 型模型反演

H 型模型初始电阻率由浅至深分别为 100、10、100 $\Omega \cdot \text{m}$, 对应层厚分别为 50、50 m, 最后一层层厚设为无穷大。其不同方法反演结果见图 3。

半航空瞬变电磁反演耗时主要在于雅克比矩阵求解时需要多次调用正演, 采用二维数组存储雅可比矩阵, 形成二重循环, 主要运算时间也集中在内循环 (每一行) 参数的正演计算, 参数越多耗时越长。OpenMP 可以对嵌套循环体内多个循环进行并行运算, 本文采用如图 2 所示方案, 只对内循环进行并行运算策略, 对循环内变量作无关处理, 各线程对数据、函数的调用相对独立。本文用 3 层模型进行试算, 观测值 15 道, 初始模型为 30 层均匀半空间; 计算机处理器为 Intel (R) Core (MT) i5-8265U, 主频 1.6 GHz, 4 核 8 线程, 分别进行 5 次、15 次、30 次、60 次迭代, 计算时间对比如表 1 所示, 采用并行运算后, 运算时间约缩短 3/4, 效率显著提高。

由图 3a 可见, Occam 反演结果较为光滑, 对分界面刻画较弱, 第一、二层电阻率值与真实模型对比有所偏离。图 3b 中, L1 正则反演结果对分层界面刻画清晰, 电阻率值和层厚更接近真实模型。图 3c 显示了反演算法拟合差和正则化因子衰减过程, 迭代较为平稳。图 3d 为观测数据与反演拟合响应的对比, 数据拟合较好, 接近真实值。图 3e 中可以看出第 5 次迭代时趋向于 L2 范数反演结果, 随着迭代次数增加, 对角加权矩阵 \mathbf{V} 变得更复杂, 层界面刻画逐渐清晰。第 15 次迭代时电阻率值接近真实模型, 层界面刻画较为准确, 第 35 次迭代时达到拟合条件, 与真实模型接近。

3.1.2 K 型模型反演

对 K 型模型, 电阻率设为 10、100、10 $\Omega \cdot \text{m}$, 对应层厚分别为 50、100 m, 最后一层设为无穷大半空间。图 4a、图 4b 显示 Occam 和 L1 范数这两种算法都能有效反映出高阻部分, 但 Occam 反演在层厚较大时对层界面的刻画更为光滑, 第一层和第三层的电阻率值与真实模型比较出现较小偏差, 而 L1 范数

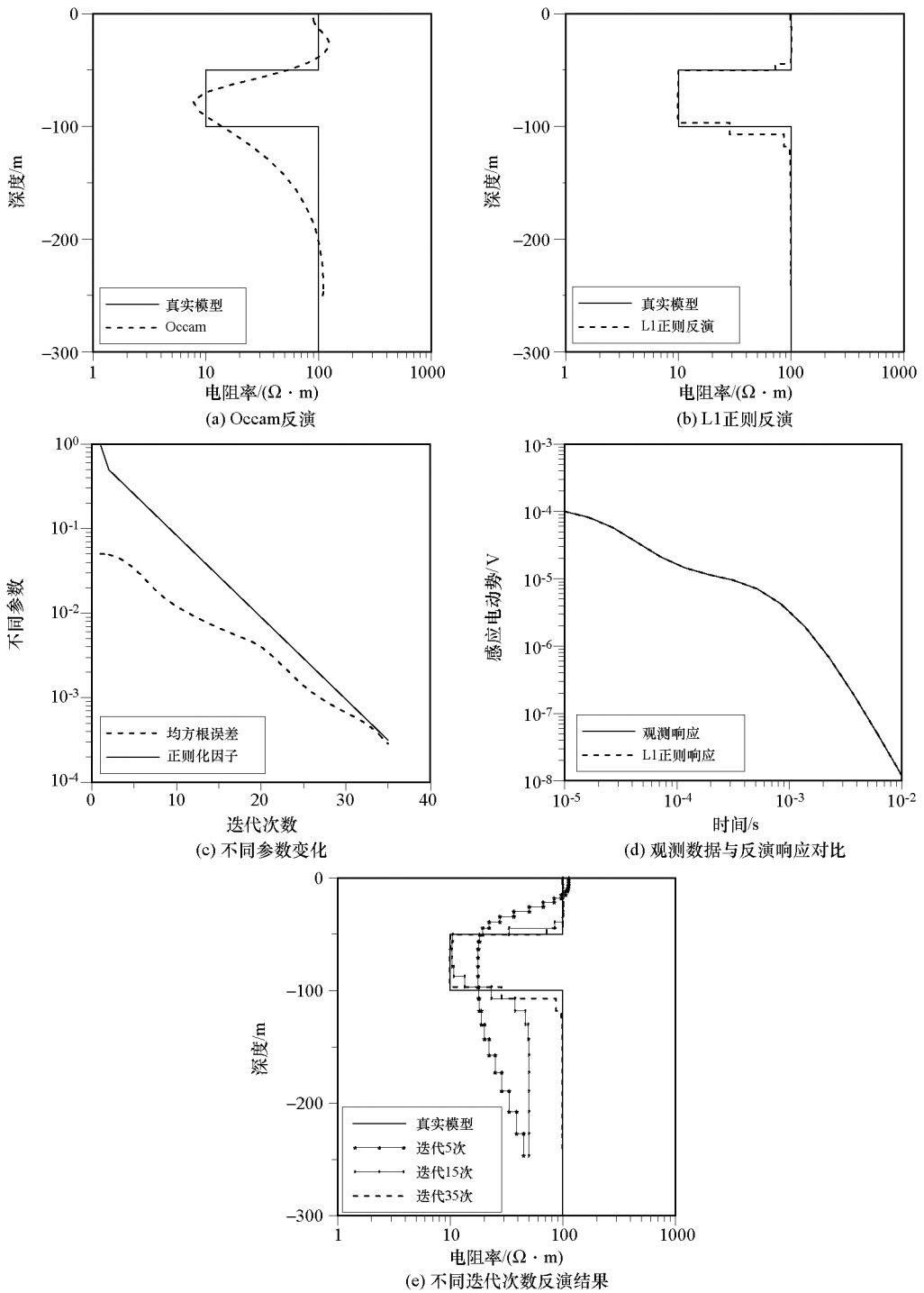


图3 H形模型反演结果

Fig. 3 Inversion results of H-shaped model

对层界面刻画清晰,电阻率值更接近真实模型。从图4e可以看出,第20次迭代时基本能反映出层状介质的基本模型;通过和H型反演迭代次数比较,可以看出对高阻的拟合相对困难,迭代次数增加。

3.2 四层HK型模型反演算例

四层层状模型电阻率设为100、10、100、10 Ω·m,对应层厚分别为50、50、50 m,最后一层设为无

穷。如图5所示,总体结果与图4结论相似,可以看出随模型的复杂程度增加,迭代次数也随之增加。本次拟合2种反演方法都迭代在60次左右,Occam反演低阻拟合较好,对第三层的高阻部分拟合较差;L1正则反演对层界面位置反应与真实模型吻合较好,同时电阻率值也接近真实模型,说明L1正则反演方法相对于Occam反演对高阻的反应相对灵敏。

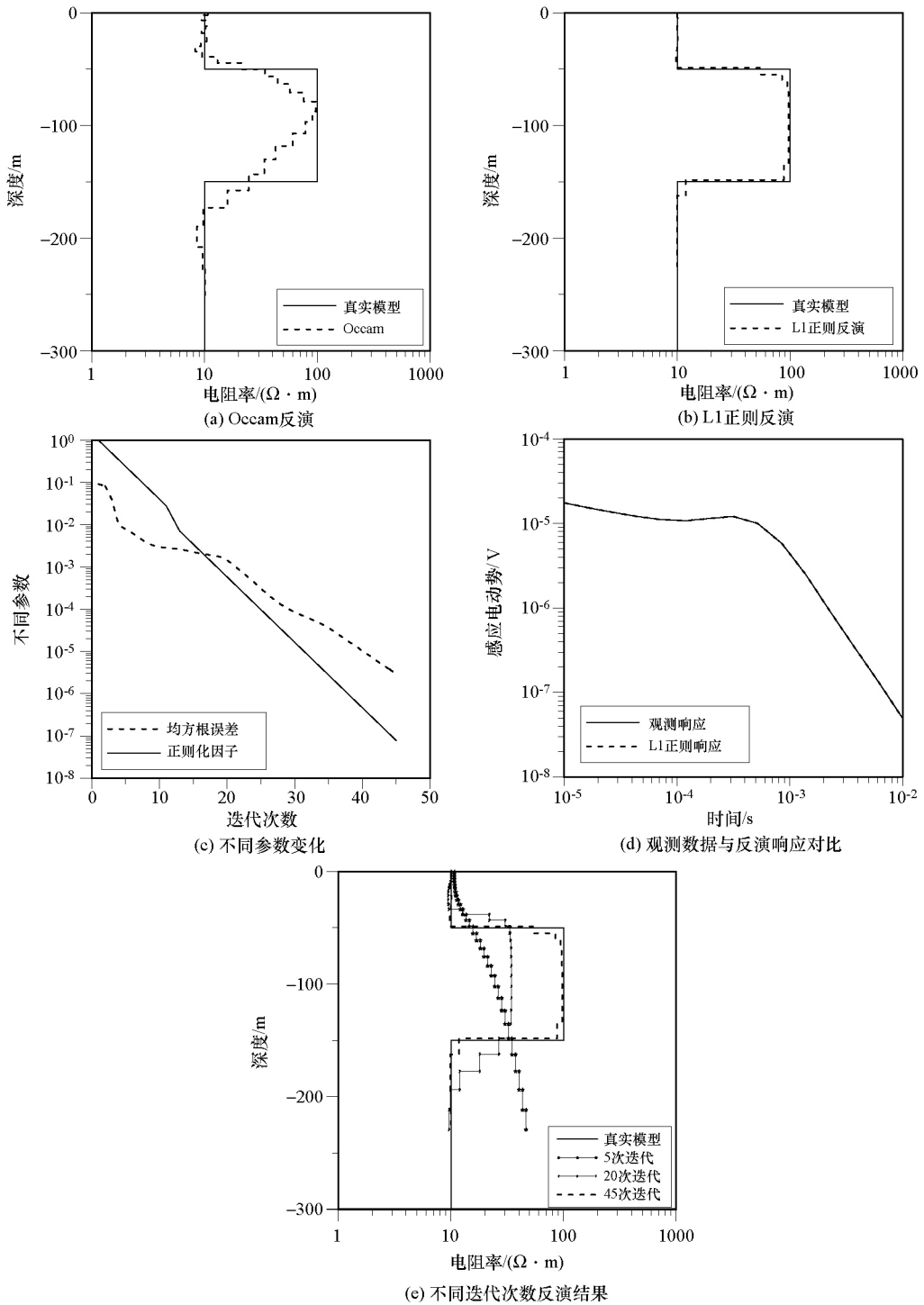


图 4 K 形模型反演结果

Fig. 4 Inversion results of K-shaped model

随着模型的复杂度变高,反演迭代次数也随之增加,正则化因子较小时约束减弱,拟合差也有波动现象。然而,实际工作过程中并不知道地下实际电性结构分布,但 L1 正则反演在一定迭代次数后可以反映出层状介质大致模型,所以可以根据实际地质情况调整反演约束条件。

4 总结

针对半航空瞬变电磁 L2 正则反演层界面刻画不够清晰的问题,提出了利用 L1 正则反演处理半航空瞬变电磁数据,对自适应正则化因子调整策略进行改进优化,并用三层的 H、K 地电模型和四层的

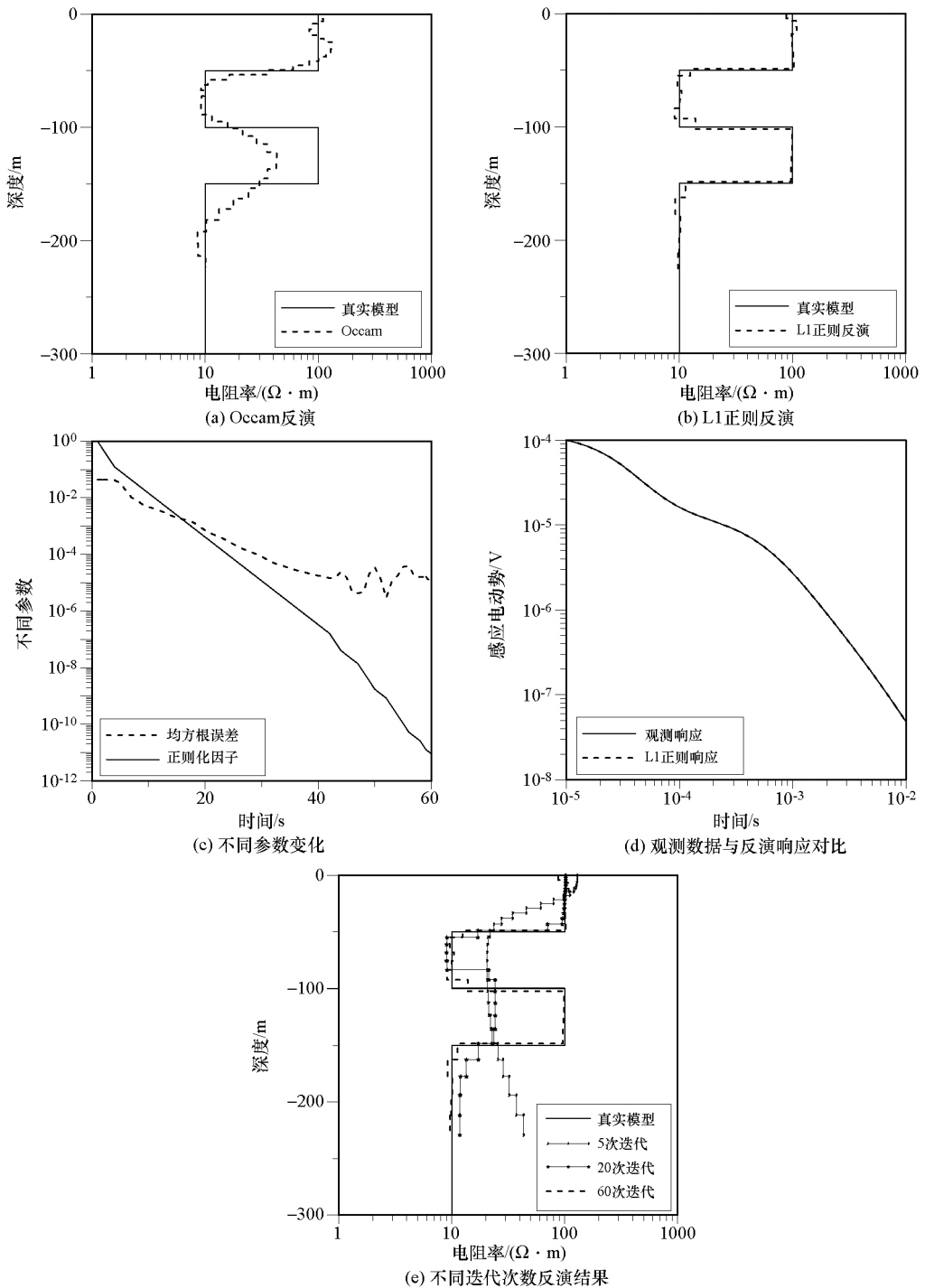


图5 HK形模型反演结果

Fig. 5 Inversion results of HK-shaped model

HK型地电模型对两种反演算法进行了试算与比较,通过分析得到以下结论:

1) 基于L1范数的正则化反演算法比L2更有利于得到稀疏解,允许模型电阻率在空间分布上存在尖锐;对层界面位置反映较好,相对复杂的层状介质模型也能得到较好的反演效果;对高阻的分辨率也较高。

2) L1范数正则项采用迭代重加权最小二乘法,

解决了不可导问题,反演结果早期趋向于L2范数反演结果,随着迭代次数增加,对层界面的分辨逐渐清晰;正则化因子分段迭代法中比例因子的选取会影响收敛速度,因子越大迭代越稳定,但收敛较慢。

3) 正则化因子采用分段迭带法,和OpenMP并行策略使得反演较快,然而相较于Occam通过搜索方式得到的正则化因子不是最优的,面对复杂模型的反演时可能会出现假异常。

参考文献 (References):

- [1] 王绪本,张赛民,高高,等. 无人机半航空瞬变电磁探测技术及其应用[C]// 2019 年中国地球科学联合学术年会,2019.
Wang X B,Zhang S M,Gao S,et al. Semi-airborne transient electromagnetic detection technology and its application [C]// 2019 Chinese Joint Annual Conference on Earth Sciences,2019.
- [2] 张澎,余小东,许洋,等. 半航空时间域电磁数据一维自适应正则化反演[J]. 物探化探计算技术,2017,39(1):1-8.
Zhang P,Yu X D,Xu Y,et al. An adaptive regularized inversion of 1D semi-airborne time-domain electromagnetic data [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical exploration, 2017,39(1):1-8.
- [3] Smith R S,Peter A A,McGowan P D. A comparison of data from airborne,semi-airborne, and ground [J]. Geophysics, 2001, 66(5):1379-1385.
- [4] 刘富波,李巨涛,刘丽华,等. 无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J]. 地球物理学进展,2017,32(5):2222-2229.
Liu F B,Li J T,Liu L H,et al. Development and application of a new semi-airborne transient electromagnetic system with UAV platform [J]. Progress in Geophysics,2017,32(5):2222-2229.
- [5] 杨聪,毛立峰,毛鑫鑫,等. 半航空瞬变电磁自适应正则化-阻尼最小二乘算法研究[J]. 地质与勘探,2020,56(1):137-146.
Yang C,Mao L F,Mao X X,et al. Study on semi-aerospace transient electromagnetic adaptive regularization-damped least squares algorithm [J]. Geology and Exploration,2020,56(1):137-146.
- [6] 李锋平,杨海燕,邓居智,等. TEM 正演响应计算的几种频-时域转换方法对比[J]. 物探与化探,2016,40(4):743-749.
Li F P,Yang H Y,Deng J Z,et al. Comparison of several frequency-time transformation methods for TEM forward modeling [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4):743-749.
- [7] 王鹏飞,王书明,安永宁. 不规则回线瞬变电磁法一维烟圈反演研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(3):1113-1120.
Wang P F,Wang S M,An Y N. One-dimensional smoke ring inversion of irregular loop source transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics,2019,34(3):1113-1120.
- [8] 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 algorithm of loop-line source transient electromagnetic method [J]. Coal Geology and Exploration,2017,45(5):161-166.
- [9] Huang H, Palacký G J. Damped least-squares inversion of time-domain airborne em data based on singular value decomposition [J]. Geophysical Prospecting,1991,39(6):827-844.
- [10] 杨云见,何展翔,赵晓明. 接地长导线源瞬变电磁法全区视电阻率定义探讨[J]. 物探装备,2010,20(2):117-120.
Yang Y J,He Z X,Zhao X M. Research on the defining all time apparent resistivity of the TEM method excited with grounding long line current source [J]. Equipment for Geophysical Prospecting,2010,20(2):117-120.
- [11] 唐荣江,王绪本,甘露. 一种利用特征值性质的 MT 阻尼最小二乘反演[J]. 石油物探,2017,56(6):898-904.
Tang R J,Wang X B,Gan L. A damped least square inversion for MT utilizing eigenvalue property [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(6):898-904.
- [12] Constable S C,Parker R L,Constable C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data [J]. Geophysics,1987,52(3):289-300.
- [13] 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.
- [14] 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 inversion and its application to transient electromagnetic method [J]. Geology and Exploration,2007,43(5):74-76.
- [15] 毛立峰,王绪本,李文杰. 飞行高度同时反演的固定翼航空瞬变电磁一维反演[J]. 地球物理学报,2011,54(8):2136-2147.
Mao L F,Wang X B,Li W J. Research on 1D inversion method of fix-wing airborne transient electromagnetic record with flight altitude inversion simultaneously [J]. Chinese Journal of Geophysics,2011,54(8):2136-2147.
- [16] 覃庆炎,王绪本,毛立峰. 导电导磁层状介质上的固定翼航空瞬变电磁响应[J]. 地球物理学进展,2011,26(5):1796-1801.
Qin Q Y,Wang X B,Mao L F. The fixed-wing airborne transient electromagnetic response of a magnetic conductive layered medium [J]. Progress in Geophysics,2011,26(5):1796-1801.
- [17] 刘俊峰,邓居智,陈辉,等. 一种用于 Occam 反演中搜索拉格朗日乘子的方法[J]. 工程地球物理学报,2013,10(3):344-350.
Liu J F,Deng J Z,Chen H,et al. A method used for searching Lagrange multiplier in Occam inversion [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2013,10(3):344-350.
- [18] 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 [J]. Chinese Journal of Geophysics,2005,48(4):937-946.
- [19] Gholami A,Gheymasi H M. Regularization of geophysical ill-posed problems by iteratively re-weighted and refined least squares [J]. Computational Geosciences,2016(20):19-33.
- [20] Vatanikhah S,Renaut R A,Ardestani V E. 3-D Projected L1 inversion of gravity data using truncated unbiased predictive risk estimator for regularization parameter estimation [J]. Geophysical Journal International,2017,210(3):1872-1887.
- [21] 苏扬,殷长春,刘云鹤,等. 基于广义模型约束的时间域航空电磁反演研究[J]. 地球物理学报,2019,62(2):743-751.
Su Y,Yin C C,Liu Y H,et al. Inversions of time-domain airborne EM based on generalized model constraints [J]. Chinese Journal of Geophysics,2019,62(2):743-751.
- [22] 阮帅,汤吉,陈小斌,等. 三维大地电磁自适应 L1 范数正则化反演[J]. 地球物理学报,2020,63(10):3896-3911.

- Ruan S, Tang J, Chen X B, et al. Three-dimensional magnetotelluric inversion base on adaptive L1-norm Regularization [J]. Chinese J. Geophys., 2020, 63(10): 3896–3911.
- [23] Last B J, Kubik K. Compact gravity inversion [J]. Geophysics, 1983, 48(6): 713–721.
- [24] Portniaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 874–887.
- [25] Zhdanov, Ellis M S, Mukherjee R, et al. Three-dimensional regularized focusing inversion of gravity gradient tensor component data [J]. Geophysics, 2004, 69(4): 925–937.
- [26] Zhang L L, Yu P, Wang J L, et al. A study on 2D magnetotelluric sharp boundary inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 631–637. doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 03. 017.
- [27] 陈闫, 李桐林, 范翠松, 等. 重力梯度全张量数据三维共轭梯度聚焦反演[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1133–1142.
- Chen Y, Li T L, Fan C S, et al. The 3D focusing inversion of full tensor gravity gradient data based on conjugate gradient [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1133–1142.
- [28] 秦朋波, 黄大年. 重力和重力梯度数据联合聚焦反演方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2203–2224.
- Qin P B, Huang D N. Integrated gravity and gravity gradient data focusing inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6): 2203–2224.
- [29] 米萨克·纳比吉安. 应用地球物理学中的电磁方法[M]. 赵经祥, 王彦军, 译. 北京: 地质出版社, 1992: 226–231.
- Misac N Nabighian. Electromagnetic methods in applied geophysics [M]. Translated by Zhao Jingxiang, Wang Yanjun. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 226–231.
- [30] Knight J H, Raich A P. Transient electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method [J]. Geophysics, 1982, 47(1): 47–50.
- [31] 张伟, 王绪本, 覃庆炎. 汉克尔变换的数值计算与精度的对比[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 753–755.
- Zhang W, Wang X B, Qin Q Y. Research and application on numerical integration of Hankel Transforms by digital filtering [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 753–755.
- [32] 朴化荣, 殷长春. 利用 G-S 逆拉氏变换法计算瞬变测深正演问题[J]. 物探化探计算技术, 1987, 9(4): 295–302.
- Piao H R, Yin C C. Calculation of transient E. M sounding using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 9(4): 295–302.
- [33] 罗延钟, 昌彦君. G-S 变换的快速算法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 684–690.
- Luo Y Z, Chang Y J. A rapid algorithm for G-S transform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 684–690.
- [34] 邓琰, 汤吉, 阮帅. 三维大地电磁自适应正则化有限内存拟牛顿反演[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3601–3614.
- Deng Y, Tang J, Ruan S. Adaptive regularized three-dimensional magnetotelluric inversion based on the LBFGS quasi-Newton method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(9): 3601–3614.
- [35] 吴小平, 徐果明. 大地电磁数据的 Occam 反演改进[J]. 地球物理学报, 1998, 41(4): 547–554.
- Wu X P, Xu G M. Improvement of Occam's inversion for MT data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(4): 547–554.
- [36] 徐凤洲, 张健飞. 基于 OpenMP 的近场动力学模拟并行实现[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2020, 39(5): 130–138.
- Xu F Z, Zhang J F. Parallel implementation of peridynamic simulation based on OpenMP [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2020, 39(5): 130–138.

Semi-airborne transient electromagnetic inversion based on L1-norm adaptive regularization

HE Ke^{1,2}, GUO Ming², HU Zhang-Rong¹, YI Guo-Cai², WANG Shi-Xing²

(1. Education Information Technology Center, West China Normal University, Nanchong 637002, China; 2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The regularization term for semi-airborne transient electromagnetic regularization of long-line source usually adopts L2 norm, and the fitting result is relatively smooth, which cannot effectively describe the layer interface information. Aiming at the stratified medium steep change model to realize the inversion algorithm whose regular term is the L1 norm, the authors transform the original problem into the L2 regularization sub-problem by the iterative re-weighted least squares method to solve the problem of non-differentiation in the L1 norm; OpenMP technology is used to solve the problem. The parallel calculation of the Jacobian matrix improves the inversion speed; the adjustment strategy of the adaptive regularization factor segmentation iteration method is analyzed and improved. The improved adaptive regularization factor adjustment strategy is more suitable for semi-airborne transient electromagnetic inversion algorithm of L1-norm regularization. Finally, the resistivity is inverted and compared with the Occam inversion results. The results show that the inversion of L1-norm regularization can highlight the electrical interface conforming to the real model after sufficient iterations, and the inversion resistivity is closer to the true value of the model.

Key words: L1-norm; adaptive regularization inversion; semi-airborne transient electromagnetic; iterative re-weighted least squares; OpenMP parallel

(本文编辑: 沈效群)