

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.27

郭睿,武欣,肖攀,等.瞬变电磁法低阻薄层反演[J].物探与化探,2017,41(4):753-757.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.27

Guo R, Wu X, Xiao P, et al. Transient electromagnetic inversion for thin layer with low resistivity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 753-757. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.27

瞬变电磁法低阻薄层反演

郭睿^{1,2}, 武欣¹, 肖攀^{1,2}, 方广有¹

(1. 中国科学院电子学研究所 电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要: 瞬变电磁反演方法对瞬变电磁数据解释有极其重要的作用。在实际工程中, 由于地下低阻薄层响应较弱, 现有的反演方法很难将其分辨出来。文中基于正则化反演理论, 提出了一种新的模型约束加权方法, 对地层的光滑度施加了周期性大幅变化的权值, 通过两次迭代可自适应的反演出低阻薄层区。小权值使模型对电性参数的大尺度变化有较高的敏感性, 便于筛选出异常薄层; 同时, 与小权值交错分布的大权值能尽量保证反演曲线的连续性, 降低反演的多解性。通过仿真验证, 该方法对低阻薄层区的分辨能力比传统算法更高, 对较厚区域低阻区的分辨能力与传统方法类似。该方法迭代稳定, 不依赖地层先验信息, 具有很高的工程实践性。

关键词: 瞬变电磁; 反演; 正则化; 加权; 低阻薄层

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2017)04-0753-05

0 引言

瞬变电磁法 (TEM) 是地球物理勘察手段的重要组成部分^[1], 已被广泛应用于矿产资源勘探、水文调查、未爆物探测等领域^[2-4]。瞬变电磁系统使用长接地导线源或回线源发射脉冲电流, 根据电磁感应定律, 大地内部会激励形成涡旋电流并持续衰减, 进而感应出二次场。通过处理二次磁场数据, 实现对地下目标的探测^[5-6]。

薄层地质体的有效探测是地球物理探测中重要且困难的问题^[7]。由于电磁场在高阻中衰减很小, 瞬变电磁探测具有高阻屏蔽弱、垂向分辨率高的优点, 可以有效探测到地下低阻区。对于瞬变电磁法的低阻薄层探测, 许多学者已进行了有效的探索: 牛之琰^[8]讨论了瞬变电磁法对导电层的探测能力; 薛国强^[7]对有无薄层存在时的层状大地视电阻率曲线进行了对比, 通过二者的相对误差分析了瞬变电磁法对薄层结构体的分辨能力; 王战军^[9]给出不同层电阻率差异比时瞬变电磁对低阻薄层的探测极

限; 陈卫营^[10]探讨了电性源瞬变电磁对薄层的探测能力; Li Xiu^[11]在视电阻率成像的基础上引入自适应收缩性遗传算法, 提高了瞬变电磁法对地下薄层的分辨能力。以上研究基于层状大地的正演响应曲线或视电阻率曲线对低阻薄层的探测能力进行分析, 对指导瞬变电磁低阻薄层探测发挥了重要作用。

相较于视电阻率成像, 反演能对观测数据进行更严格的数学拟合, 得到的结果更真实可靠。目前反演技术采用的目标函数普遍基于正则化理论^[12], 其中 Occam 反演^[13-14]已被广泛应用于工程实践中^[15-17]。本文基于 Occam 反演理论, 提出了一种新的模型约束加权方法, 该算法对模型参数变化有更高的灵敏度, 能很好地凸显低阻薄层结构特征。

1 模型约束加权反演

1.1 反演目标函数

对于一维层状大地模型, 理论响应 d 可通过正演函数 $F(\cdot)$ 求得

$$d = F(m), \quad (1)$$

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”(ZDYZ2012-1)

作者简介: 郭睿(1993-), 男, 中国科学院电子学研究所电磁场与微波技术专业在读研究生(硕士), 研究方向为瞬变电磁法正反演研究。

式中 m 为待反演模型参数(包括各层的电阻率和深度)。若观测响应值为 d_{obs} , 则理论响应与观测值之间的不匹配程度可表示为

$$P_1 = \|W_d(d - d_{\text{obs}})\|_2^2, \quad (2)$$

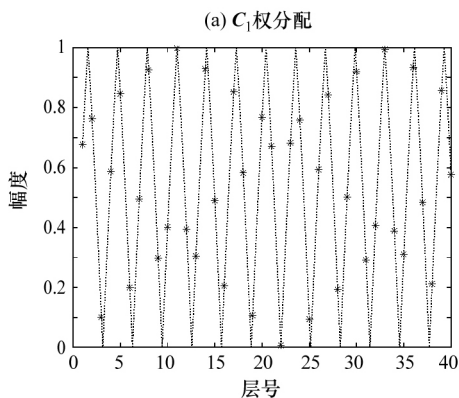
式中: W_d 为数据的权值矩阵, $\|\cdots\|_2^2$ 为定义在数据空间上的二范数。若共有 L 条时间测道, 各时间测道误差为 σ_i , 则 $d = [d_1, d_2, \cdots, d_L]^T$, $W_d = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_L)$ 。将大地纵向剖分 N 层, 第 i 层厚度为 h_i 且 $h_i/h_{i+1} < 1$, 电阻率为 ρ_i , 并假设各层电阻率变化尽量平缓, 可将各层电阻率约束用如下公式表达

$$P_2 = \|C\partial\rho\|^2, \quad (3)$$

式中 C 为修正各层间平滑约束强度的加权矩阵。

根据正则化理论, 将 P_1 、 P_2 构成无约束的反演目标函数, 并用参数 λ 描述模型约束强度, 可得

$$P = P_1 + \lambda P_2 \\ = \|W_d(d - d_{\text{obs}})\|_2^2 + \lambda \|C\partial\rho\|^2. \quad (4)$$



1.2 模型约束加权法

对于传统正则化反演, 普遍默认 C 为单位对角阵, 当存在较强先验信息时, 可修改 C 使其对特定深度的电阻率产生约束。然而, 在实际工程中先验信息较难获取, 不正确的先验信息会加剧反演结果的不准确性。

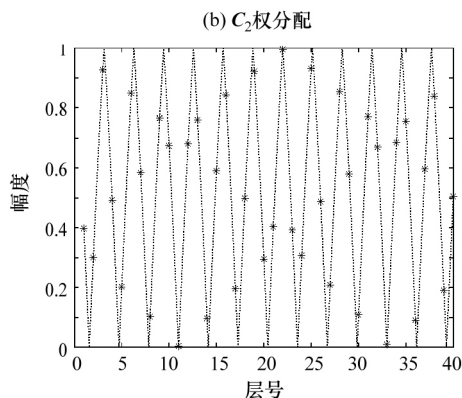
低阻薄层反演的本质是在较小的电阻率网格范围内使电阻率产生较大的变化, 即使该层的平滑约束权值较小。在无法提供低阻薄层先验深度的情况下, 可将平滑约束强度加权矩阵按照如下方法设置:

$$C_1(x) = \text{diag}(\sqrt{1 - \alpha |\cos(\beta x)|}) \quad (5)$$

$$C_2(x) = \text{diag}(\sqrt{1 - \alpha |\sin(\beta x)|}) \quad (6)$$

式中 α 、 β 为调节权值相对大小的系数, 且 $\alpha < 1$ 。

当反演低阻薄层时, 需采用较密的纵向网格剖分, 对上述函数在各层号处离散采样, 并选择较大的 α 、 β 值。图 1 为 C 的权值分配示意。



虚线表示函数 $C(x)$, * 表示各层在函数上的取样值

图 1 模型约束加权矩阵的权值分配示意

若低阻薄层深度落在 C 中权系数较大区间, 其电阻率光滑程度较强, 即无法反演出低阻薄层的特征。然而, 当分别取 C_1 、 C_2 进行反演时, 电阻率突变区间总可以被较小系数的权重覆盖(图 1), 若低阻薄层存在, 至少存在一个反演结果, 能够体现低阻薄层区域; 若低阻薄层不存在, 即使权重较小会导致反演电阻率出现微小震荡, 但不会改变电阻率变化整体趋势, 二者反演结果会近似吻合。参数 α 、 β 可将先验低阻薄层信息加入反演方程中, 加速收敛, 提高结果可靠性。

1.3 最优化迭代算法

将正演函数线性化, 可将模型 ρ_1 处的正演响应近似表示为

$$F(\rho_1) \approx F(\rho_0) + G_0(\rho_1 - \rho_0), \quad (7)$$

式中 G_0 为正演函数在模型 ρ_0 处的偏导数矩阵, 其元素为

$$G_{0ij} = \frac{\partial F_i(\rho_0)}{\partial \rho_j}. \quad (8)$$

将目标函数写为

$$P = \|W_d(F(\rho_0) + G_0\rho_1 - G_0\rho_0 - d_{\text{obs}})\|_2^2 + \lambda \|C\partial\rho\|^2 \quad (9)$$

其中

$$\partial = \begin{bmatrix} 0 & & & 0 \\ -1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & 0 \\ & & \cdots & \\ & & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (10)$$

令

$$\nabla_{\rho_1} P = 0 \tag{11}$$

得

$$\rho_1 = [(W_d G_0)^T (W_d G_0) + \alpha \partial^T C^T C \partial]^{-1} \cdot W_d [d_{obs} + G_0 \rho_0 - F(\rho_0)] \tag{12}$$

得到电阻率 ρ_1 之后,计算当前拟合差

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \left(\frac{F(\rho_1) - d_{obs}}{d_{obs}} \right)^2} \tag{13}$$

若拟合差小于期望值,计算终止;否则将新产生的 ρ_1 作为下次迭代的初始模型 ρ_0 重复上述步骤,直到 RMS 小于期望值或达到最大迭代次数,迭代终止。分别计算 C_1 、 C_2 的反演值,若二者结果相差不大,则说明无低阻薄层存在,二者之一可作为反演结果;

若其中之一反演曲线出现低阻薄层,选择此时结果作为最终反演结果。

2 仿真验证

为验证算法有效性,对大回线地面瞬变电磁系统的理论数据进行了反演测试。发射线框边长 100 m,共 4 匝,发射电流为 5 A,接收线圈放置在发射线框中心处。假设五层大地模型,厚度分别为 150、40、50、100 m,半空间,电阻率分别为 400、100、200、30、200 $\Omega \cdot m$ (模型 1)。本文提出的低阻薄层反演算法结果如图 2 所示。

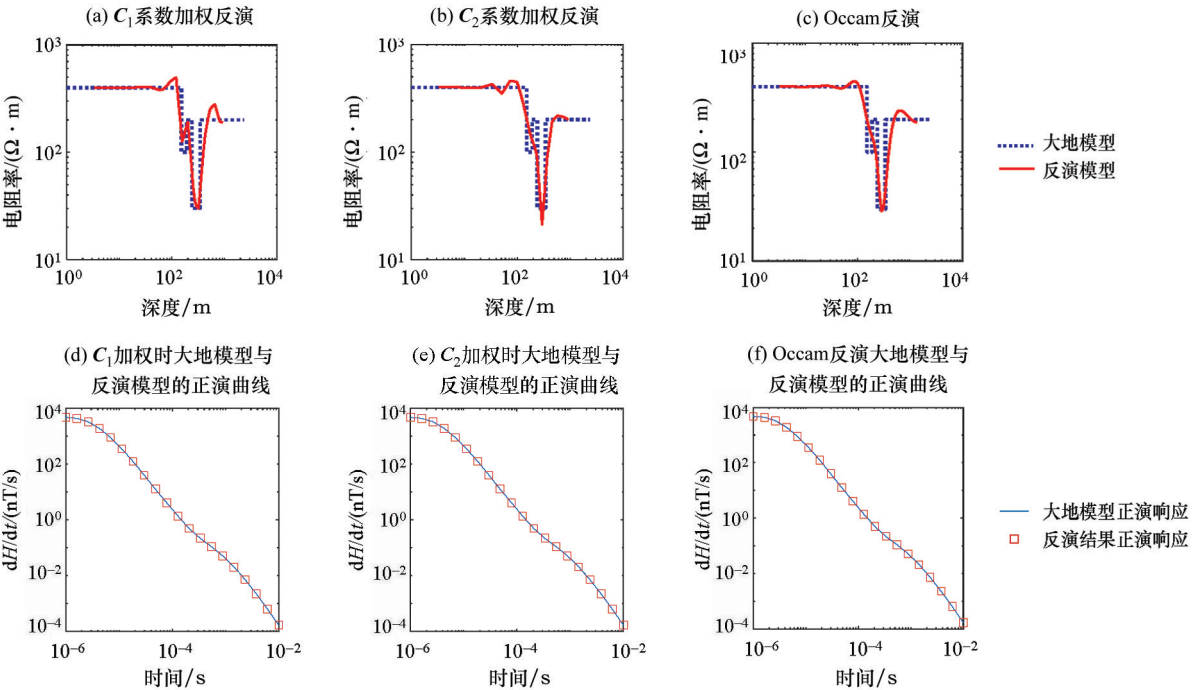


图 2 模型 1 不同反演方法的反演结果及其正演曲线

3 种反演模型均能产生相近的正演响应,但当不采用模型约束加权时,无法体现出深度 150 m、厚度为 40 m 的低阻薄层;采用 C_1 、 C_2 加权分别反演时, C_1 中低阻薄层深度处权值较小,可以实现电阻率较大变化, C_2 中低阻薄层深度处加权较大,无法体现电阻率突变特性,其在低阻薄层处的加权效果同 Occam 反演。综合 C_1 、 C_2 加权,选择前者作为反演结果。

若发射、接收条件不变,将大地模型设置为厚度分别为 180、60、60、100 m,半空间,每层电阻率不变 (模型 2),低阻薄层反演算法与 Occam 反演对比如图 3 所示。该大地模型使低阻薄层区落入 C_2 权值

较小处, C_1 、 C_2 反演结果反转,此时可选后者作为反演结果。

若发射、接收条件不变,假设地下有一较厚的低阻区,厚度为 100 m,半空间,电阻率为 400、100、400 $\Omega \cdot m$ (模型 3),低阻薄层反演算法与 Occam 反演对比如图 4 所示。可以看到 C_1 、 C_2 两种反演均能体现 100 m 低阻区,但形态稍有差异;从理论模型与反演模型的正演响应来看,二者的拟合程度都达到较高水平。图 4a 和 f 所示的 Occam 反演此时能反映出该低阻区。三者反演模型均可作为最终的反演结果。

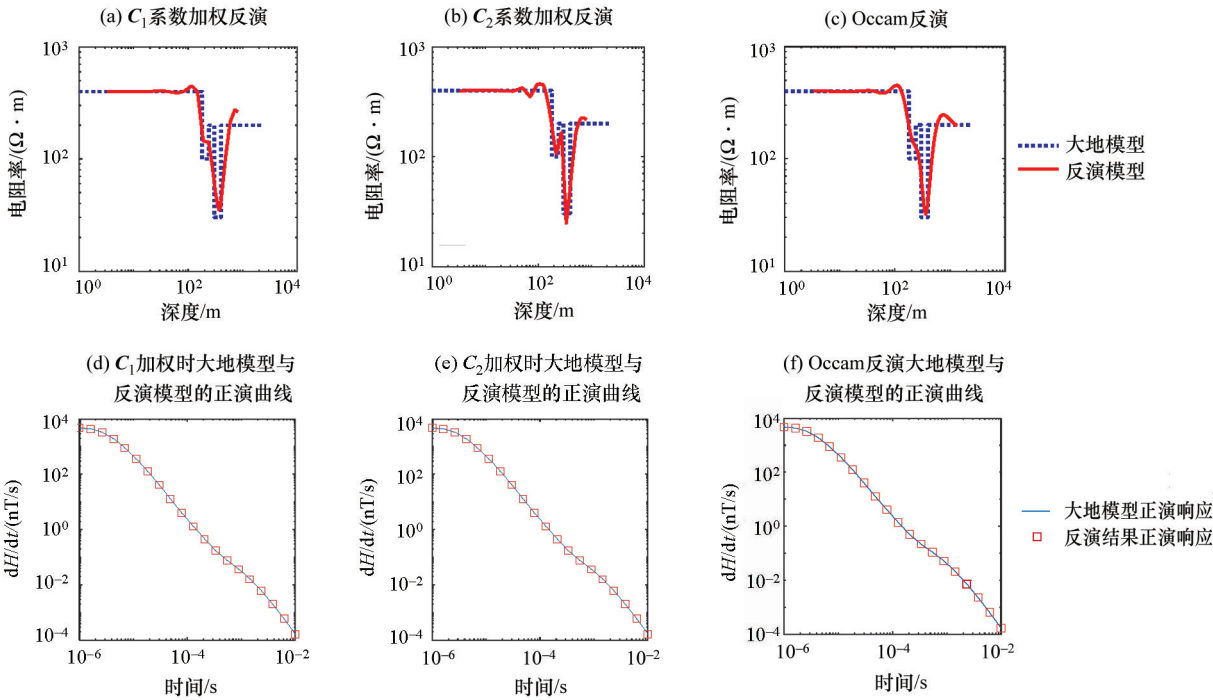


图 3 模型 2 不同反演方法的反演结果及其正演曲线

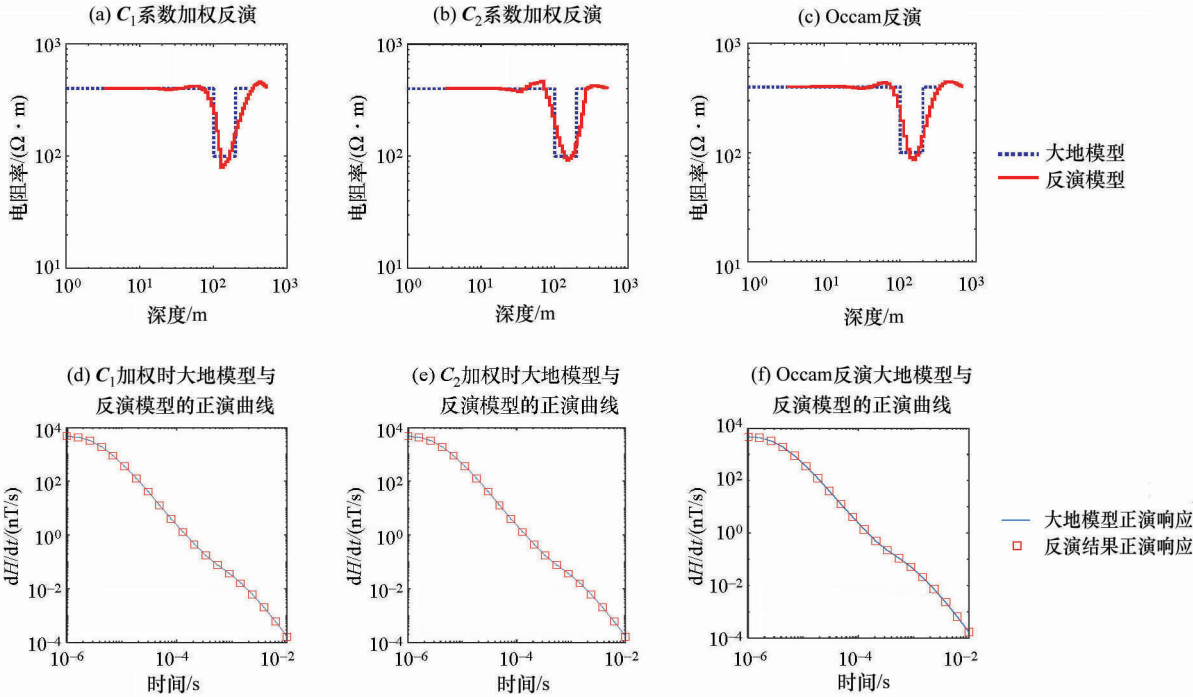


图 4 模型 3 不同反演方法的反演结果及其正演曲线

3 结论

本次研究的目标主要为提高瞬变电磁法低阻薄层反演的分辨率,使用的主要方法为对大地进行固定厚度的层状划分,并利用正则化方法进行电阻

率反演。
文中提出了一种模型约束加权方法:通过正余弦函数对模型约束方程进行修正,使反演曲线在保证连续性的前提下提高对电阻率变化的敏感性。本方法摆脱了采用固定权值加权矩阵对先验信息的依赖,通过 2 次一维反演即可自适应地完成有无低阻

薄层区及其深度和电阻率的判定。

参考文献:

[1] Nabighian M N.Electromagnetic methods in applied geophysics [M].Tulsa, USA:SEG Books,1988.

[2] Smith R,Fountain D,Allard M.The MEGATEM fixed-wing transient EM system applied to mineral exploration:A discovery case history[J].First Break,2003,21(7):73-77.

[3] He Z,Zhao Z,Liu H,et al.TFEM for oil detection:Case studies [J].Leading Edge,2012,31(5):518-521.

[4] Pasion L R,Oldenburg D W.A discrimination algorithm for UXO using time domain electromagnetics [J].Journal of Environmental and Engineering Geophysics,2001,6(2):91-102.

[5] 翁爱华,刘云鹤,陈玉玲,等.矩形大定源层状模型瞬变电磁响应计算[J].地球物理学报,2010,53(3):646-650.

[6] 武欣,薛国强,陈卫营,等.瞬变电磁探测系统 (CASTEM) 试验对比——安徽颖上大王庄铁矿[J].地球物理学报,2016,59(12):4448-4456.

[7] 薛国强,邓湘.瞬变电磁法对薄层的探测能力[J].石油地球物理勘探,2007,42(6):709-713.

[8] 牛之琰.瞬变电磁测深法对导电层的探测能力[J].地质与勘探,1992,28(1):42-47.

[9] 王战军,朱自强,李建慧,等.瞬变电磁法对低阻薄层的分辨能力研究[J].物探化探计算技术,2012,34(6):646-651.

[10] 陈卫营,薛国强.电性源瞬变电磁对薄层的探测能力[J].物探与化探,2015,39(4):775-779.

[11] Li X,Xue G Q,Song J P,et al.Application of the adaptive shrinkage genetic algorithm in the feasible region to TEM conductive thin layer inversion[J].Applied Geophysics,2005,2(4):204-210.

[12] Tihonov A N.On the regularization of ill-posed problems[J].European Economic Review,1996,41(6):1111-1146.

[13] 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.

[14] deGroot-Hedlin C,Constable S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J].Geophysics,1990,55(12):1613-1624.

[15] Vallée M A,Smith R S.Application of Occam's inversion to airborne time-domain electromagnetics [J].The leading edge,2009,28(3):284-287.

[16] 强建科,李永兴,龙剑波.航空瞬变电磁数据一维 Occam 反演[J].物探化探计算技术,2013,35(5):501-505.

[17] Guo R,Wu X,Rao L T,et al.Sharp boundary based transient electromagnetic inversion[C]//Proceedings of 7th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics & Summit Forum of Chinese Academy of Engineering on Engineering Science and Technology.Kuala Lumpur: Atlantis Press,2016.

Transient electromagnetic inversion for thin layer with low resistivity

GUO Rui^{1,2}, WU Xin¹, XIAO Pan^{1,2}, FANG Guang-You¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communicating Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Inversion is an important tool for transient electromagnetic data interpretation. This paper proposes a novel weighing scheme with periodic vibration for roughness restriction based on the regularized optimization theory. The small weights make the models sensitive to reflecting parameters' great changes and thus it is easy to show the thin layer with low resistivity. The large weights distributed near small weights can make sure the continuity of the inversion results, which reduces the variety of the solution. Synthetic models show that this method has higher resolution for low resistivity thin layer than traditional ones and keeps the same resolution with traditional ones when inverting low resistivity large areas. In addition, this method converges stably and does not rely on a prior information about the ground structure, thus making sure its application in practice.

Key words: transient electromagnetic method;inversion;regularization;weight;thin layer with low resistivity

(本文编辑:沈效群)