

陈向斌, 吕庆田, 张 昆. 大地电磁测深反演方法现状与评述. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1607~1619, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.05.013.

Chen X B, Lü Q T, Zhang K. Review of magnetotelluric data inversion methods. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(5): 1607~1619, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.05.013.

## 大地电磁测深反演方法现状与评述

陈向斌, 吕庆田, 张 昆

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘 要** 如何通过改进大地电磁测深(MT)反演方法来提高数据解释的精确度一直都是大地电磁测深研究领域的重要课题. 本文以作者所在研究组从事的科研项目为依托, 介绍了国内外主要的大地电磁反演方法. 通过总结将反演方法分为定性近似反演方法、基于目标函数的线性或非线性迭代反演方法和全局搜索最优反演方法三大类, 并从目标函数构建、灵敏度矩阵计算、收敛速度等方面对各种反演方法进行了对比与评述, 指出了大地电磁反演方法存在的问题. 最后, 对今后大地电磁反演方法研究的发展方向进行了展望.

**关键词** 大地电磁测深, 反演方法, 评述

doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.05.013

中图分类号 P631

文献标识码 A

## Review of magnetotelluric data inversion methods

CHEN Xiang-bin, LÜ Qing-tian, ZHANG Kun

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract** Improving the accuracy of data interpretation for magnetotelluric sounding (MT) inversion method has always been an important subject of the magnetotelluric sounding field. In this paper, with the main line of the magnetotelluric inversion method developing history, the home and abroad major inversion method, such as bostick, simulating seismic, occam, curve comparison, conjugate gradient, rapid relaxation, quasi-linear approximation, simulated annealing, multiscale genetic algorithm, conjugate gradient maximum likelihood, nonlinear conjugate gradient, bayesian, artificial neural network, quantum path integral algorithm and damping particle swarm optimization inversion method are reviewed mainly based on the work achieved in the authors' group. The magnetotelluric inversion method is classified into qualitative approximate inversion method, the linear or nonlinear iterative inversion method based on the objective function and the global optimization inversion method by summarizing and compared and reviewed various magnetotelluric inversion methods from the objective function construction, the sensitivity matrix calculation and the convergence speed, also pointed out the problems. The developing prospects of the magnetotelluric inversion method are also forecasted. In the future, the research would be focused on heterogeneous geoelectric structures electromagnetic field response with landform effect, the practical of nonlinear three-dimensional global optimization inversion and hybrid inversion method, detailed inversion method and how the parameter settings affect the inversion results and joint inversion of other geophysical data, or constrained inversion.

**Keywords** magnetotelluric sounding, inversion methods, review

收稿日期 2011-01-21; 修回日期 2011-04-20.

基金项目 国家科技专项“深部矿产资源立体探测技术与实验(SinoProbe—03)”、国家自然科学基金重点项目(40930418)和中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费专项资金项目(K0929)联合资助.

作者简介 陈向斌, 男, 1985年生, 甘肃陇西人, 在读博士研究生, 主要从事地球深部探测技术与深部地质构造研究.

(E-mail: chenxiangbin1985@163.com)

## 0 引言

大地电磁测深法(MT)已广泛应用于地球深部构造研究及矿产资源勘查中,而对数据反演方法的选择则直接影响到其应用效果。目前,大地电磁反演方法大都是基于均匀水平层状介质模型假设条件和  $L_2$  范数下提出来的,如博斯蒂克反演法(Bostick, 1977)、大地电磁拟地震反演法(王家映, 1985)、高斯-牛顿法、梯度法、马奎特法、奥克姆法(Constable, 1987)、曲线对比法(徐世浙、刘斌, 1995)、共轭梯度法(Mackie 等, 1989、1993、2001)、快速松弛反演法(Smith 等, 1991、2001)、拟线性近似反演法(Zhdanov, 1996)、聚焦反演法(Portniaguine, Zhdanov, 1999)等。上世纪 90 年代后期,随着非线性反演理论和三维正反演技术的发展,一些非线性反演方法随之兴起,如模拟退火法(师学明等, 1998)、多尺度反演法(徐义贤, 1998)、多尺度逼近遗传算法(师学明等, 2000)、共轭梯度极大似然反演法、非线性共轭梯度反演法(Rodi, Mackie, 2001)、贝叶斯统计反演法(Spichak 等, 1995)、人工神经网络反演法(Spichak, Popova, 2000)、量子路径积分算法(罗红明等, 2007)、阻尼粒子群优化反演法(师学明等, 2009)等。本文回顾了当前国内外主要的大地电磁反演方法并对其进行分类,并在目标函数构建、灵敏度矩阵计算、收敛速度等方面对各种方法进行了对比与评述。最后,讨论了大地电磁反演方法研究中存在的问题和发展方向。

## 1 大地电磁反演方法

大地电磁反演方法的研究始终围绕着如何构建目标函数(使用不同的稳定器,如模型参数的范数、最大平滑稳定泛函、最小支撑泛函、最小梯度支撑泛函等)和减少数据计算量(灵敏度矩阵计算等方面)来增强解的稳定性,以求得与实际情况最吻合的地电结构分布。回顾过去,大地电磁反演方法研究经历了从定性近似反演到数值反演、从一维、二维反演到三维反演及线性到非线性全局最优化反演方法的发展阶段。因此,可以将大地电磁反演方法分为三大类:定性近似反演方法、基于目标函数的线性或非线性迭代反演方法和全局搜索最优反演方法。

### 1.1 定性近似反演法

#### 1.1.1 博斯蒂克反演法

博斯蒂克反演法(Bostick)是由 F. X. Jr. Bostick<sup>[1]</sup>于 1977 年基于水平层状介质条件下提出的一种

一维近似反演方法。该方法以低频区视电阻率曲线尾支渐近线的特征为基础,利用渐近线的交点能反映交点以上底层平均电阻率而与底层电性无关的原理来做近似反演,又称为渐近线交点近似方法<sup>[2~4]</sup>。实际反演时利用相位曲线进行反演的公式如下:

$$\rho = \rho_a \left( \frac{\pi}{2\phi} - 1 \right), \quad (1)$$

$$H = \left( \frac{\rho_a}{\omega\mu} - 1 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中  $\rho$  为反演后的电阻率值;  $\phi$  为测深曲线的相位值,  $\rho_a$  为测深曲线的幅振值,即视电阻率值;  $H$  为深度值;  $\omega$  为圆频率;  $\mu$  为磁导率。

Bostick 反演法计算速度快、不需要初始模型,能够直接反映地电结构的特点,但是反演精度低,因为渐近线交点的确定受经验的影响较大,但仍不失为一种为其它反演方法提供初始模型的快捷方法。

#### 1.1.2 曲线对比法

大地电磁一维连续介质反演的曲线对比法是徐世浙和刘斌<sup>[5]</sup>针对 Bostick 反演法精度低、理论曲线和实测曲线拟合误差较大难以准确分辨地质体界面的缺点而提出来的。曲线对比法以低频电磁波在地下穿透深度大于高频电磁波的穿透深度为理论基础,通过连续的低频来确定深部电导率的分布状态。反演过程中,首先将 Bostick 反演(另外也可以用穿透深度法<sup>[5]</sup>或频率归一化阻抗因子方法<sup>[6]</sup>)得到的电阻率随深度变化的曲线作为初始模型,将视电阻率随周期变化的曲线转化为电阻率随深度变化的曲线,通过迭代逐步改善初始模型的电阻率值,直至获得满意的结果。另外,张大海和徐世浙<sup>[7]</sup>把相位信息加入曲线对比法反演过程,使得反演结果更加清晰地反映模型的电性分布。反演得到的拟二维断面图可作为多维反演的初始模型。该反演方法原理简单,具有计算速度快且不用计算偏导数矩阵的优点。

#### 1.1.3 拟地震解释方法

王家映等人<sup>[8]</sup>另辟蹊径,基于电磁波和弹性波在介质中传播的相似性提出大地电磁拟地震解释方法。假设把地层划分为电磁波的双程传播时间都相等的“微层”时,大地电磁场的复反射函数可表示为<sup>[9]</sup>

$$R_e(\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{2\pi H}{\lambda}} q_n^e e^{-\sqrt{1+n}t_0^e}, \quad (3)$$

其中  $R_e(\omega)$  为大地电场反射函数;  $q_n^e$  为大地电场反射系数函数;  $t_0^e = 2\sqrt{\mu/\rho_i \cdot h_i}$  为大地电场( $\omega=1$ )在第  $i$  层介质中的双程传播时间;  $j$  为虚数单位;  $\mu$  为磁导率;  $h_i$  为第  $i$  层介质的厚度。  $q_n^e$  反映的是电性

界面的反射系数,即:

$$K_{i,i+1}^e = \frac{\sqrt{\rho_{i+1}} - \sqrt{\rho_i}}{\sqrt{\rho_{i+1}} + \sqrt{\rho_i}}, \quad (4)$$

式中,  $\rho_i$  代表第  $i$  层的电阻率. 由于  $R_e(\omega)$  是复反射函数, 在电磁法中  $q_n^e$  则是不考虑吸收时不同时刻在地面记录到的反射函数. 如何计算  $q_n^e$  见文献[8]. 若以  $t$  为纵坐标,  $q_n^e$  为横坐标, 则可以画出“时间剖面”, 实现大地电磁拟地展解释. 通过对二层、三层和四层断面的理论模型计算, 说明此方法是可行的, 若要用于实际资料的高维反演则需做进一步的研究.

## 1.2 迭代反演方法

迭代反演方法的核心在于如何构建目标函数和选取迭代控制参数来求解线性或非线性方程组, 如早期的基于最小二乘原理的高斯-牛顿法<sup>[10]</sup>和梯度法<sup>[11]</sup>分别沿目标函数等位面切线方向和负梯度方向搜索模型参数的改正量来求目标函数极小点; 但两种方法均受初始模型的影响, 找到的只是局部极小值点. 另外, 反演问题中经常面对的是求解不适定问题的病态方程组, 因此在目标函数构建中引入了正则化的思想.

### 1.2.1 马奎特反演法

高斯-牛顿法中, 由于雅克比矩阵(偏导数矩阵)的秩常小于模型参数个数使得线性方程组显病态性, 即方程组的系数矩阵含有小特征值或线性相关的列向量, 从而导致迭代不能收敛. 因此, 可以考虑在系数矩阵的主对角元素上加上一个可调整的正系数来增大系数矩阵的特征值来解决这一问题, 使得线性方程组的解趋于稳定, 这就是马奎特法(Marquardt), 又叫阻尼最小二乘法. 这是正则化思想最简单的一种实现过程. 目标函数可写为

$$\Phi(\lambda) = \sum_{i=1}^m (\rho_{ai} - \rho_{ci})^2 + \alpha \sum_{j=1}^n \Delta \lambda_j^2. \quad (5)$$

实际应用中通常将视电阻率之差改成视电阻率对数之差, 参数的变量用相对变化量代替<sup>[4]</sup>. 马奎特法修正量的校正量方向介于梯度法和高斯-牛顿法之间, 即与目标函数等位面的夹角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间. 在迭代过程中, 阻尼系数作为控制步长和搜寻方向的参数, 通过选取适当的阻尼系数使目标函数逐次降低收敛到极小值点. 虽然计算速度比高斯-牛顿法快, 但还是有可能得到局部极小点, 甚至出现函数值发散的情况<sup>[12]</sup>, 对模型也不能进行评价, 因此还是需要提出新的反演方法, 以便在全局范围内搜索求得极小值.

### 1.2.2 广义反演法

马奎特法通过修正病态方程组系数矩阵使其变为良态来求解, 而广义反演法(GLI)则是基于广义逆矩阵直接求解病态或奇异性线性方程组. 广义反演法通过奇异值分解求取广义逆来确定参数改正量, 最大的优点是避免了对矩阵求逆, 而且可以提供信息密度矩阵、分辨率矩阵和解的方差等辅助信息对反演结果进行评价. 但是当出现小奇异值时会使参数改正量很大, 超出线性近似所允许的范围, 使模型参数沿着错误方向变化, 引起迭代发散. 为了避免上述问题, Jupp 和 Vozoff<sup>[13]</sup>于 1975 年提出了改进广义逆矩阵反演理论, 引入阻尼因子将改进的广义逆矩阵定义为<sup>[14]</sup>

$$B^+ = V_r T_r \sum_r^{-1} U_r^T, \quad (6)$$

其中  $V_r$  是参数特征向量,  $U_r$  为观测数据特征向量,  $\sum_r$  为奇异值组成的对角矩阵,  $T_r$  为对角矩阵, 对角元素为:  $t_i = \sigma_i^{2N} / (\sigma_i^{2N} + \alpha^{2N})$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ ,  $\alpha^2$  是一小正数, 称为阻尼系数. 只要阻尼系数选取合适, 都可以保证迭代稳定收敛. 特别指出, 当  $N=1$  时, 改进的广义逆矩阵方法与阻尼最小二乘法有相同的效果. 在国内, 柳建新等<sup>[15]</sup>则用截断奇异值分解正则化(TSVD)方法<sup>[16]</sup>对大地电磁一维不适定反演问题进行模拟计算, 分别采用交叉验证法(Generalized cross-validation, GCV)和 L 曲线法(L-Curve)确定正则化因子, 指出正则化参数的选取与初始模型的相关性不大.

### 1.2.3 奥克姆反演法

基于最小二乘原理的高斯-牛顿法和马奎特法等目标函数构建中没有考虑对非数据模型构造的压制. 为了使反演模型简单光滑, Constable 等人<sup>[17]</sup>在 1987 年提出奥克姆(OCCAM)法, 引入模型粗糙度来压制非数据的模型构造, 也即求模型的最光滑解. 文献[17]给出了一维层状模型和连续模型下目标函数的构建, 并讨论了收敛速度和迭代过程的稳定性等. Hedlin 和 Constable<sup>[18]</sup>在研究二维反演时, 指出模型的垂向光滑和横向光滑问题, 并将模型粗糙度定义为

$$R_1 = \|\partial_m m\|^2 + \|\partial_z m\|^2, \quad (7)$$

其中  $\partial_m m$  和  $\partial_z m$  分别表示横向相邻块的模型参量和垂向相邻块的模型参量的粗糙度矩阵, 用粗糙度矩阵代替模型范数便得到 OCCAM 法的目标函数和罚函数, 求解过程见参考文献[18]和[19]. Siripunvaraporn 等人把反演问题从模型空间转换到数据空间, 把解

表示为由模型协方差平滑过的灵敏度矩阵行的线性组合,挺高了反演速度。

对具有光滑参数性质的拉格朗日乘子  $\alpha$  的选取直接影响到迭代速度,一般可以通过算法改进和并行计算两个途径来提高速度。吴小平<sup>[20,21]</sup>、刘羽<sup>[22]</sup>、Ellis 和 Oldenberg<sup>[23]</sup>、Farquharson 和 Oldenburg<sup>[24]</sup>、陈小斌等<sup>[25]</sup>等分别进行了拉格朗日乘子  $\alpha$  的选取方法研究。实质上 OCCAM 法是一种带平滑约束的最小二乘法正则化反演方法,其优点在于反演不依赖于初始模型,具有较好的稳定性和模型分辨率,但不足在于每次迭代要多次求解反演方程和正演计算,所以在高维反演中的应用并不多。

#### 1.2.4 快速松弛反演法

为了避免 OCCAM 法直接线性搜索,Smith 和 Booker<sup>[26]</sup> 提出快速松弛反演方法(Rapid relaxation inversion, RRI),通过计算每个测量点位置下面的电阻率扰动,把二维反演问题转化为一维反演问题。RRI 法目标函数离散形式为<sup>[19,27]</sup>:

$$\Phi = (Rm - C)^T(Rm - C) + \beta e^T e, \quad (8)$$

其中  $R$  为粗度矩阵,  $C$  为与模型结点有关的向量,  $\beta$  为拉格朗日常数。数据残差  $e$  由下式确定:

$$d - d_0 = Fm - Fm_0 + e, \quad (9)$$

其中  $m, m_0$  为模型参数组成的向量,  $d_0$  是模型  $m_0$  对应的响应数据组成的向量,  $d$  是实测数据向量,  $F$  是 Frechet 偏导数矩阵。通过给定初始模型  $m_0$  计算出  $d_0$  和各测点下的积分核函数及数据残差  $e$ , 然后对目标函数求极小得到模型改正量及新模型  $m$ , 再以新模型为初始模型重复上述的过程逐次迭代直至结果满足精度要求。

RRI 法不直接求雅可比矩阵,而是对正演求得的电场值做积分运算获得视电阻率对模型参数的偏导数,每次迭代只要做一次反演,提高了计算速度;但在反演时若某些参数控制不好,便得不到理想结果,甚至不能收敛。随着计算速度的加快,二维 RRI 法才被推广到三维空间。谭捍东等<sup>[28]</sup>推导出三维快速松弛反演算法中快速计算灵敏度的表达式,实现了求最小构造的三维快速松弛反演算法,并成功对日本 Kayabe 地区实测资料 and 新疆土屋铜矿床 MT 资料进行了反演<sup>[29]</sup>。但是这种三维快速松弛反演算法只是三维正演加一维反演,并不是真正意义上的三维反演。林昌洪等<sup>[30]</sup>采用并行虚拟机(Message Passing Interface)计算加快了大地电磁数据三维快速松弛反演,通过模拟计算和实际测量数据反演证明该方法是有效的。

#### 1.2.5 共轭梯度反演法

牛顿法在对目标函数极小值搜索时要计算 Hessian 矩阵(目标函数的曲率,即二阶导数)并求其逆使得收敛速度很慢甚至不收敛。针对这一弊端, Hestenes 和 Stiefle<sup>[31]</sup>于 1952 年提出了共轭梯度法(Conjugate Gradient Method),在求目标函数的极小值时沿着共轭梯度方向进行一维搜索,迭代过程只需计算一阶导数。

Mackie 和 Madden<sup>[32]</sup>为了避免偏导数矩阵的计算把松弛法引入大地电磁三维共轭梯度反演计算。Mackie 等<sup>[33]</sup>把极大似然反演与共轭梯度法结合,通过极大似然反演公式极小化模型响应和观测数据之间不同的方差权重之和。极大似然反演公式表示为

$$(A_k^H R_{dd}^{-1} A_k + R_{mm}^{-1}) \Delta m_k = A_k^H R_{dd}^{-1} [d - g(m_k)] + R_{mm}^{-1} (m_0 - m_k), \quad (10)$$

其中  $A_k$  是灵敏度矩阵,  $d$  为观测数据向量,  $m_k$  为模型向量,  $R_{dd}$  是数据方差矩阵,  $R_{mm}$  是模型方差矩阵,  $m_0$  是初始模型,  $\Delta m_k$  为当前迭代的模型改变量。但是共轭梯度反演法计算量还是很大,计算速度不是很快。

根据 Fletcher 和 Reeves<sup>[34]</sup>利用共轭梯度法求解非线性问题(目标函数时高于二次的连续函数)的思想, Rodi 和 Mackie<sup>[35]</sup>将非线性共轭梯度反演法(NLCG)用于求解大地电磁二维反演问题,较高斯-牛顿法计算效率有很大提高。Newman 和 Alumbaugh<sup>[36]</sup>在串行机和并行机上对合成模型数据进行三维非线性共轭梯度反演,但还没见到实际应用资料。在国内,胡祖志等<sup>[37]</sup>提出非线性共轭梯度法大地电磁拟三维反演法,采用交错采样有限差分方法做正演计算,用一维灵敏度矩阵代替三维灵敏度矩阵,对非测点的灵敏度元素通过插值求得,并且在迭代反演过程中,采用拟牛顿法对拟灵敏度矩阵进行更新。通过 YX 模式、XY 模式的拟三维反演计算证明了算法的可行性与正确性。刘小军等<sup>[38]</sup>提出正则化共轭梯度反演算法(RCGA),在每次迭代过程中根据目标的收敛情况动态选取正则化因子,有效地解决了迭代时目标函数发散的问题。

#### 1.2.6 拟线性近似反演法

Zhdanov 等人<sup>[39]</sup>将拟线性近似的思想应用到电磁场反演问题中,对正演模拟算子拟线性近似得到关于修正的电导率张量的线性方程,然后用正则化共轭梯度法解线性方程,使用电性反射率张量去计算异常体电导率,用三个线性反演问题代替原来

的电磁散射的非线性反演问题,这便是拟线性近似反演方法.详细公式推导和计算过程参见参考文献<sup>[40~43]</sup>.

拟线性近似方法将一部分多次散射引进了积分方程的计算中,而且用最优化方法求反射张量,所以拟线性近似方法的解要比用二阶 Born 级数求得的解要精确. Zhdanov 等人给出了理论模型三维反演结果,并用于实际大地电磁测深资料和可控源大地电磁资料的反演,表明了该反演方法具有信息量大、精度和效率高等优点.

### 1.2.7 聚焦反演法

基于最大平滑稳定泛函构建目标函数进行反演的缺点在于对地质体分界面分辨率较低. Portniaguine 和 Zhdanov<sup>[44]</sup>在构建目标函数时引入最小支撑泛函的稳定器并与惩罚泛函相结合,对模型参数变化大和不连续的区域用一个新的稳定泛函来描述,使得目标泛函集中到最小的面积,更好的判断地质体界面的存在.刘小军等<sup>[45]</sup>在研究二维大地电磁数据反演问题时基于吉洪诺夫正则化思想将最小梯度支撑泛函作为模型目标函数,即:

$$s_{\beta MS}(m) = (\omega_{\beta}(m)(m - m_{\text{ref}})),$$

$$\omega_{\beta}(m)(m - m_{\text{ref}}) = \|m - m_{\text{ref}}\|_{\omega_{\beta}}^2, \quad (11)$$

其中:  $(\cdots, \cdots)$  表示内积;

$$\omega_{\beta}(m) = \frac{1}{[(m - m_{\text{ref}})^2 + \beta^2]^{1/2}}.$$

$m_{\text{ref}}$  为参考模型,  $\beta$  是一正小数;经过数据离散化后,可将反演目标函数表示成:

$$\Phi(\hat{m}) = (\hat{W}_d \hat{A}(\hat{m}) - \hat{W}_d \hat{d})^T (\hat{W}_d \hat{A}(\hat{m}) - \hat{W}_d \hat{d}) + \alpha (\hat{m} - \hat{m}_{\text{ref}})^T \hat{\omega}_{\beta}^2 \hat{W}_m^2 (\hat{m} - \hat{m}_{\text{ref}}), \quad (12)$$

其中:  $\hat{m}_{\text{ref}}$  为先验模型;  $\hat{W}_d$  和  $\hat{W}_m$  为模型权重系数;  $\alpha$  为正则化因子,那么反演问题即为求解上式的极小值最优化问题,而对于目标函数极小值的求法则有很多种,刘小军等人所用为共轭梯度法,详述见参考文献<sup>[45]</sup>. 张罗磊等<sup>[46]</sup>在利用聚焦反演法对大地电磁尖锐边界反演时在目标函数中引入对角梯度支撑函数改善倾斜电性分界面的反演效果.研究表明聚焦反演能稳定地快速收敛到真实模型附近,且具有较高的分辨率,地质体分界面反演效果突出.

## 1.3 全局搜索最优反演方法

### 1.3.1 二次函数逼近反演法

牛顿法、梯度法和共轭梯度法等大地电磁反演方法求得的目标函数极小值并不是全局意义下的极小值,很容易使反演陷入局部极小.为了解决这一问

题,可以用在一些点上与  $\Phi(m)$  等值的二次函数  $f(x)$  代替  $\Phi(m)$ ,以二次函数的极小值点作为  $\Phi(m)$  的近似极小值点,然后改变控制点找到  $\Phi(m)$  的更好的二次近似函数以改变极小点位置,从而建立起迭代过程,这就是二次函数逼近非线性全局最优化反演方法.当我们选用不同的二次函数时,便得到不同的二次逼近优化方法.该方法不依赖于初始模型、稳定性好、具有全局收敛的特点,且迭代搜索时不必用分辨率矩阵来确定搜索方向;不用计算梯度向量和二阶导数矩阵,具有很小的计算量.

翁爱华和刘国兴<sup>[47]</sup>采用缺项二次函数逼近  $\Phi(m)$ ,即超球逼近方法(SSAA)对大地电磁测深资料进行反演,具体操作过程见参考文献.严良俊和胡文宝<sup>[48]</sup>也将二次函数逼近非线性优化方法用于 K 型和 KQH 型地电模型反演计算和实测 MT 数据反演中,均取得了很好的效果.但是未见到关于二维和三维大地电磁资料的二次函数逼近非线性反演方法研究的相关内容.

### 1.3.2 多尺度反演法

多尺度反演基于小波变换理论中多尺度分析(MRA)将大规模的反演问题分解为小规模的反演问题,先求最大尺度时的反问题,将解作为下一次反演过程的初始值,直到求出对应于尺度为零的原反问题的解,其实现是通过把目标函数分解成不同尺度的分量,根据不同尺度上目标函数的特征逐步搜索全局最小值<sup>[11]</sup>.徐义贤等<sup>[49,50]</sup>将多尺度反演方法用于对一维和二维大地电磁数据的反演中.模型参数扰动量与观测数据残差之间的关系可表示为

$$A\delta m = \delta e, \quad (13)$$

其中

$$A_{jl} = \frac{\partial F_j(m_0)}{\partial m_l}, j = 1, 2, \cdots, 2N; l = 1, 2, \cdots,$$

$$\delta e = (\delta e_1, \delta e_2, \cdots, \delta e_{2N})^T \delta e_j = e_j - F_j(m_0);$$

对(22)两边同时做小波变换  $W$ ,有

$$WA\delta m = W\delta e, \quad (14)$$

做变换  $\hat{A} = WA, \delta \hat{e} = W\delta e$ , 则(23)变为

$$\hat{A}\delta m = \delta \hat{e}. \quad (15)$$

在实际反演时,从选定的某一尺度开始,其初始模型可根据 Bostick 转换曲线形状选取.多尺度反演法在大尺度上反演稳定,反演结果不受初始模型的影响,较好的避免了反演受局部极小值的困扰问题,加快了收敛速度.

### 1.3.3 模拟退火反演法

模拟退火算法思想是 Metropolis 等人<sup>[51]</sup>于

1953 年提出来的,之后 Kirkpatrick 等人<sup>[52]</sup>将其用于优化问题的求解.模拟退火法在地震资料处理和反演中应用的较早,90 年代师学明等<sup>[53]</sup>将其应用于一维层状大地电磁测深数据反演.

模拟退火反演算法将反演参数看作是熔化物体分子存在的某种状态,将目标函数视为熔化物体的能量函数,通过控制参数逐步降低温度进行迭代反演,使目标函数最终求得全局极值点<sup>[54]</sup>.从本质上来说,模拟退火法是一种启发式的蒙特卡罗洛法,不用求目标函数偏导数,不用解大型矩阵方程组,易于加入约束条件,不依赖于初始模型,易跳出局部极值,但大量的正演模拟和反演计算量限制了其在高维反演问题中的应用.针对这些缺点,姚姚<sup>[55]</sup>提出利用模糊先验信息确定最低温度和改造目标函数来增加计算的稳定性,提高计算效率;张霖斌等<sup>[56]</sup>以 Boltzmann-Gibbs 统计理论为基础,利用似 Cauchy 分布产生新扰动模型,提出新快速模拟退火算法(VFSA);杨辉等<sup>[57,58]</sup>则以 VFSA 为基础,实现了 MT 拟二维模拟退火约束反演和带地形的二维 MT 多参量快速模拟退火约束反演.另外,井西利等<sup>[59]</sup>从温度参数的选择入手提出了一种自适应模拟退火方法,使得退火过程和温度参数可以根据实际资料情况进行计算和自我调节;蒋龙聰等<sup>[60]</sup>将遗传算法中的非均匀变异思想引入传统的模拟退火算法,增强局部搜索功能,提高了算法的收敛速度.模拟退火算法在高维反演中的应用和与其它反演算法结合进行混合反演是模拟退火反演方法应该着重研究的方向.

#### 1.3.4 量子路径积分反演算法

量子退火与模拟退火过程都属于优化退火过程,只是退火机制不同.量子退火利用量子跃迁的隧道效应机制求得全局极小值.罗红明等<sup>[61]</sup>基于量子优化退火策略,以量子系统能量函数 Hamilton 量构建反演目标函数,并以 Feynman 传播子来构成退火的接收概率提出量子路径积分反演算法(Quantum Path Integral Algorithm,简称 QPIA),并将其用于一维大地电磁模型和实测数据试验取得了很好的效果.

我们把第  $k$  次迭代的模型参数  $m_i^{(k)}$  ( $i=1,2,\dots,Q$ ) 看作是量子体系中的粒子,实际观测数据记为  $d_j$  ( $j=1,2,\dots,M$ ),则记能量函数为

$$E(m^{(k)}) = \sum_{j=1}^M [d_j - d_j(m^{(k)})]^2, \quad (16)$$

修改模型参数,迭代后能量函数为  $E(m^{(k+1)})$ ,则能

量差函数为

$$\Delta E = E(m^{(k+1)}) - E(m^{(k)}), \quad (17)$$

Hamilton 量则表示为

$$H = \Delta E + C\Gamma(t), \quad (18)$$

其中  $\Gamma(t) = \Gamma_0\beta$  表示外界横向场引起的粒子扰动能量,其中  $\Gamma_0$  为初始能量,  $C$  为常量,  $0 < \beta < 1$  为衰减因子,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\Gamma(t) \rightarrow 0$ .

确定初始模型参数  $m^{(0)}$  以及模型参数修改的步长和参数的取值范围后进行迭代,如果  $\Delta E < 0$ ,则以第  $k+1$  次迭代的模型参数  $m^{(k+1)}$  来取代当前模型参数  $m^{(k)}$ ;如果  $\Delta E > 0$ ,则根据路径积分时空概率(见参考文献[62])来确定  $m^{(k+1)}$  是否取代  $m^{(k)}$  作为当前模型参数.对所有模型参数  $m_i$  ( $i=1,2,\dots,Q$ ) 依次进行迭代直到达到要求的精度.罗红明等通过试验与广义反演法、模拟退火法和多尺度遗传算法比较后指出,量子路径积分反演方法在收敛速度和反演结果的精度等方面都有较大的提高,是一种值得关注的新方法.

#### 1.3.5 遗传算法反演法

Holland<sup>[63]</sup>以遗传学中适者生存的理论为基础提出遗传算法,通过用二进制对模型参数编码形成染色体,在群体的繁殖、杂交和变异过程中,利用转移概率规则从模型群体集随机搜索<sup>[64,65]</sup>.

Stoffa 和 Sen<sup>[66]</sup>最先将遗传算法引入地球物理学领域中用来反演一维地震波模型.王兴泰等<sup>[67]</sup>首次尝试将其用于电测深曲线的反演,但是由于传统的遗传算法存在的早熟和计算效率较低等问题,使得应用受到限制,随之一些学者对其进行了改进.石琳珂<sup>[68]</sup>提出了真值邻域的概念,利用这个概念得到了缩小搜索范围的压缩公式以提高计算速度.张荣峰<sup>[69]</sup>则将遗传算法引入了大地电磁测深资料的反演研究中.为了改善传统 GA 算法存在的早熟的问题,刘云峰和曹春蕾<sup>[70]</sup>通过在早期对目标函数进行压缩,避免初期优越模型对搜索过程的控制;在后期拉伸防止模型在最佳值附近的振荡,但缺点是计算时间较长.蔚宝强和胡文宝<sup>[71]</sup>用十进制浮点数代替二进制位串,遗传操作直接针对十进制数串,避免了编码和解码的繁杂运算,在杂交或变异过程中,直接选取随机杂交变异点,实现相对位点的参数基因交换.Flores 和 Schultz<sup>[72]</sup>则在二维大地电磁数据反演中提出了具有高适应能力和适合于非线性假设检验的重组遗传模拟算法.柳建新等<sup>[73]</sup>和白俊雨<sup>[74]</sup>等则分别将实数编码技术和拟网格法与 GA 法相结合来反演大地电磁二维和一维数据.

而另外一些学者则是把遗传算法和其他反演算法相结合,形成混合遗传算法,如师学明等<sup>[75]</sup>采用多尺度逐次逼近反演思想把遗传算法反演问题分解为一系列依赖于尺度变量的反问题序列,将大尺度的解当作次一级尺度反问题的初始模型集,再进行遗传反演如此类推逐次逼近全局最优解.柳建新等<sup>[76]</sup>把单纯形搜索与遗传算法结合构成混合遗传算法(HGA),并采用最优群体保留策略,使得具有遗传算法的全局收敛性,也具有单纯形法的快速收敛性.谢维等<sup>[77]</sup>引入局部搜索效率高的共轭梯度法,使得混合算法加快全局寻优过程,一定程度上解决遗传算法的早熟问题;罗红明等<sup>[78]</sup>利用量子位编码代替二进制位编码,利用量子旋转门定向更新种群来代替传统方法中种群的选择、交叉和变异过程,使得算法具有并行运算能力和量子隧道效应,从而加快了搜索速度,改善了收敛速度.师学明等<sup>[79]</sup>将自适应思想引入到量子遗传算法中来,通过动态调整量子遗传算法的模型搜索空间,建立自适应量子遗传算法解决一维层状介质 MT 反演问题.在大地电磁测深中一般将目标函数定义为模型的大地电磁测深响应值与相应观测值之差的二范数拟合差,但至今为未见到遗传算法和一些局部线性反演方法结合的混和算法.

### 1.3.6 人工神经网络反演法

人工神经网络(ANN)在地球物理学中的应用越来越受到人们的青睐.Raiche<sup>[80]</sup>早在 1991 年就指出可使用神经元(NN)模式识别方法进行地球物理反演,对 NN 在不同地球物理问题中的应用作了介绍.Baan 和 Jutten<sup>[81]</sup>也对 ANN 在地球物理中的应用范畴做了概述,并指出 ANN 实质就是一种优化反演问题.在此之后,Spichak 和 Popova<sup>[82]</sup>基于三层神经元的回传理论(BP)调整 ANN 结构,并成功用于解决三维地电反演问题,同时指出 ANN 方法可以做并行计算.人工神经网络还可以用于大地电磁时间序列分析,避免信号被天然或人为噪音干扰带来的传递函数错以至于导致错误的资料解释<sup>[83,84]</sup>,如 Popova 和 Ogawa<sup>[85]</sup>通过数据结构消除噪音和扭曲以便对大地电磁响应函数做出正确估计,Shimelevich 等人<sup>[86]</sup>将快速神经网络反演算法用于二维大地电磁动态参数监测.人工神经网络反演法可以对一个模型类的数据进行多重反演,具有对不完整数据或含有噪音的数据进行去噪反演等特点,但其反演结果的好坏强烈依赖于初值的选取,难以解决多个参变量的优化问题,且 ANN 重构受到

教育水平限制<sup>[62]</sup>.

### 1.3.7 贝叶斯统计反演

贝叶斯统计反演则将模型参数视为随机变量,将反演结果表述为模型空间上的概率密度函数从而较好的解决了带噪反演的问题.

Tarits 等人<sup>[87]</sup>将贝叶斯算法用于解决一维大地电磁反演问题,使用条件概率密度函数和先验概率密度函数将反演结果包含在后验边缘概率密度函数中.Spichak 等人<sup>[88]</sup>在对三维模型做大地电磁数据反演过程中加入先验信息,把非唯一性问题转换为估计后验不确定性的实际问题.电导率后验概率密度函数表示为

$$P(\sigma = a/Y = y) = \frac{f(y/a)q(a)}{\sum_{b \in A} f(y/b)q(b)}, \quad (19)$$

其中  $q(a)$  是像  $a$  的先验概率,  $f(y/a)$  是变量  $y = (y_{ij}, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J)$  条件概率,它是一个关于  $a = (a_k, k = 1, \dots, K)$  的函数,可由下式直接计算:

$$f(y/a) = \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J p_{ij} \{y_{ij} - F[E(M_i, \omega_j, a), H(M_i, \omega_j, a)]\}, \quad (20)$$

$p_{ij}$  是噪声  $\epsilon_{ij}$  概率密度.如果概率密度  $p_{ij}$  是高斯零均差,协方差为  $(\zeta_{ij})^2$ ,则(30)式可以写为

$$f(y/a) = Z \exp \left\{ - \sum_{i,j} \frac{y_{ij} - F[E(M_i, \omega_j, a), H(M_i, \omega_j, a)]}{2(\zeta_{ij})^2} \right\}, \quad (21)$$

此处  $Z$  是归一化常数.如果  $A(k, c_j)$  是一组电导率为  $c_j$  的像,在  $D_k$  单元第  $k$  个边缘后验概率  $p_k$  为

$$p_k(c_j) = P[\sigma \in A(k, c_j)/Y = y] = \frac{\sum_{a \in A(k, c_j)} f(y/a)q(a)}{\sum_{b \in A} f(y/b)q(b)}, \quad (22)$$

像的序列  $[\sigma^{(n)}, n \geq 0]$  形成一个随机的过程,它在所有可能像中的有限空间里是一个马尔可夫链<sup>[89,90]</sup>.在第  $n$  次迭代的第  $k$  单元里的条件概率由下式计算:

$$p_k^n(c_j) = \frac{f[y/a(\sigma^{(k+n)}, k, c_j)]q[a(\sigma^{(k+n)}, k, c_j)]}{\sum_{j=1}^J f[y/a(\sigma^{(k+n)}, k, c_j)]q[a(\sigma^{(k+n)}, k, c_j)]}. \quad (23)$$

可以证明后验 PDF 是这个马尔可夫链的不变量,在搜索区域的每个单元里,平均条件概率序列收敛于相应的边缘概率:



$$p_k(c_j) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum p_k^n(c_j), \quad (24)$$

这提供了一个估计在每个搜索区域的均匀单元的平均后验电导率

$$\sigma_k = \sum_{j=1}^L c_j p_{0k}(c_j), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (25)$$

反演问题的解就简化为通过对一个均匀区域的初始值正演问题迭代解寻找一种后验的电导率分布. 在实际应用中, Spichak 等人<sup>[91]</sup>用贝叶斯反演音频大地电磁数据, 通过电磁映射图对地下水储层进行监测, 取得了比较好的效果, 但是还需要在算法设计上做一些改进以提高迭代速度.

### 1.3.8 粒子群优化反演算法

粒子群优化算法(PSO)是模仿鸟群寻找食物的社会行为的一种全局搜索最优化算法, 原理可见文献<sup>[89]</sup>. 从文献<sup>[92]</sup>中我们可以得知惯性权重  $\omega$  的选择影响着算法的应用效果, 较大的惯性权重  $\omega$  值有利于跳出局部极小点, 反之则有利于算法收敛. Ranjit 和 ShalivanhanS<sup>[93]</sup>首次将惯性权重  $\omega=1$  时的基本粒子群优化算法用于一维直流电测深和一维大地电磁测深的模型数据和实测数据反演, 但是搜索过程比较慢, 在反演后期比较难收敛. 为了选取合适的惯性权重值来提高算法性能, 一些学者先后提出了线性递减权值(LDIW)策略、模糊惯性权值(FIW)策略、随机惯性权值(RIW)策略和自适应调整策略等. 师学明等<sup>[94]</sup>则基于模拟退火反演思想, 提出惯性权重  $\omega$  的振荡递减策略:

$$\omega = 0.99^k \cdot rt/2 + \alpha, \quad (26)$$

式中  $\alpha$  为一常数, 取值范围为  $[0, 0.5]$ ;  $rt$  为均匀分布在  $(0, 1)$  之间的随机数;  $k$  为迭代次数,  $k=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为最大迭代次数. 该惯性权重  $\omega$  曲线呈现一种波动阻尼递减的现象, 类似于模拟退火法中的退火过程, 有利于在早期跳出局部极值, 晚期更快地收敛于全局极值. 阻尼粒子群优化算法用于大地电磁数据的一维反演可以较快逼近全局最优解, 优于传统的线性或近线性的局部最优化方法, 避免了选取初始模型、计算灵敏度矩阵、陷入局部极值等缺点, 又克服了蒙特卡洛、模拟退火反演模型搜索时间较长的弱点; 但是反演过程中要多次进行正演计算, 若要应用于二三维大地电磁反演计算还比较困难.

## 2 大地电磁反演方法存在的问题

从大地电磁反演方法的发展我们可以看到, 不管是定性近似反演方法, 或是基于目标函数的迭代

反演方法, 还是全局搜索最优反演方法, 都旨在利用电磁场方程或目标函数经过一系列相关运算来得到能拟合观测数据的最佳地电模型. 这里就存在四个问题:

(1)在现有假设条件下建立的电磁场方程能否准确表达实际地质体或深部隐伏矿体的电磁响应. 地球本身就是一个复杂的地质体, 从全球性的壳幔构造、岩石圈分布、区域大地构造到某一矿集区或矿床, 其物质组成的多样性和空间结构的复杂性必然导致电性结构的非均匀与各向异性. 但是目前大地电磁测深反演技术研究中大都是使用基于均匀水平层状介质的物理模型建立起来的电磁场方程和在  $L_2$  范数条件下构建的目标函数展开的, 这必然影响大地电磁正演计算的准确性, 进而影响到反演结果的精准度.

(2)采集到的数据精度如何, 噪声干扰对反演结果会产生怎样的影响. 由于大地电磁测深采集的是天然电磁场, 野外观测数据不可避免地受到各种噪声的污染. 目前, 大地电磁测深反演大都是带噪反演, 而含有噪声的有限地球物理数据进行反演时稳定性较差, 但我们又不知道数据和先验信息究竟如何影响反演结果, 缺乏对电磁干扰进行数学建模的研究.

(3)现有的各种反演方法在反演精度、速度、和数据拟合程度上利弊并存, 缺乏优点的集成统一. 如定性近似反演方法计算速度快但反演精度低, 反演过程受人为经验影响较大; 奥克姆反演法利用粗糙度压制了非数据的模型构造, 但计算量大, 计算速度不及快速松弛反演法.

(4)大地电磁测深高精度反演技术一直未有大的突破. 随着对深部构造研究和深部“第二空间”找矿的迫切需要, 对深部构造界面和控矿构造必须要有准确的判断. 如何提高大地电磁探测结果的反演精度直接影响大地电磁探测方法的应用效果.

## 3 大地电磁反演技术发展方向

面对以上提出的几个问题, 大地电磁反演技术还需在以下几个方面做进一步研究.

### 3.1 复杂地电结构条件下电磁理论研究

地下结构的复杂性已被人们所知晓. 当前的大地电磁测深反演方法大都以水平层状均匀介质作为物理模型, 以此建立起来的电磁响应方程当然与实际情况不符, 近而影响到反演结果的准确度. 因此, 应加强带地形的复杂地电结构下(块状和不规则状)



电磁场响应的理论研究,提高大地电磁正演计算的准确性,以满足实际反演的需求、提高反演精度。

### 3.2 提高反演方法速度的研究

从一维大地电磁数据反演到三维大地电磁数据反演,加之采集系统的完善,面对大量的数据和对高精度反演的要求,就必须研究新的反演方法和计算方法提高反演速度。大地电磁反演并行计算是今后重点研究的一个方向。

### 3.3 非线性反演理论研究

大地电磁线性反演方法已经比较成熟,但其依赖初始模型,易陷入局部极小甚至难以收敛。已发展起来的用于大地电磁反演的非线性反演方法诸如人工神经网络法、多尺度反演法、遗传算法、模拟退火反演法、粒子群优化反演算法和贝叶斯统计反演法等。全局最优化反演方法不依赖于初始解的好坏或依赖程度很低,但是由于要多次正演计算所以收敛速度较慢。可随着计算机技术的发展,由其是并行机的出现,为非线性随机全局最优化方法提供了发展的有利条件。

### 3.4 混合反演方法的研究

要想将各种反演方法的优点集于一体,混合反演是大地电磁反演方法突破的又一新途径。混合最优化算法是近年来发展起来的通过将两种(或两种以上的)最优化算法或最优化算法与迭代算法结合形成的一种数据优化方法。现今已见报道的用于大地电磁反演的混合算法有极大似然共轭梯度反演、多尺度逐次逼近遗传算法、量子遗传算法、单纯形-遗传算法混合方法、共轭梯度-遗传算法混合方法、阻尼粒子群优化反演法等。

### 3.5 与其它资料的联合反演研究

大地电磁测深作为一种间接的探测手段推断地下物质组成和地质构造,其反演结果的对与否则必须和其它地质或地球物理资料进行对比才能确定。因此,和地质资料、地震、重磁资料的联合反演或约束反演必将是大地电磁反演研究的一个重要发展方向。

## 4 结 论

大地电磁测深方法从最初作为地震预报的辅助手段发展为深部地质结构探测、固体矿产资源勘查和地质灾害防治等领域的常规方法,对其反演技术的发展也提出了新的要求。本文回顾并总结了国内外多种大地电磁反演方法,通过总结将反演方法分为定性近似反演方法、基于目标函数的线性或非线

性迭代反演方法和全局搜索最优反演方法三大类,并从目标函数构建、灵敏度矩阵计算、收敛速度等方面进行了对比与评述。面对复杂地质构造条件,基于均匀水平层状介质物理模型和数学模型建立起来的反演方法已不能满足地下深部构造与矿集区立体精细探测的要求。展望未来,不管是对已有大地电磁反演方法的改进还是提出新的反演技术,应围绕以下方面展开:

(1)加大带地形条件下的非均匀地电结构的电磁场响应计算研究,提高反演技术的准确性。目前大地电磁测深反演方法大都基于无地形起伏下以水平层状均匀介质作为物理模型。为了应用的方便,实际地形起伏往往被忽略;而由于电磁理论本身的复杂性,人们不得不将地电结构理想化、简单化。所以以此建立起来的电磁响应方程当然与实际情况不符,近而影响到反演结果的准确度。因此,应将地形带入大地电磁反演,并研究复杂地电结构下(块状和不规则状)电磁场响应的理论,从而提高大地电磁正演计算的准确性,以满足实际反演的需求、提高反演精度。

(2)通过算法设计提高反演运算速度,加快非线性三维全局优化反演技术和混合反演方法的实用化研究。重点进行极大似然共轭梯度反演、多尺度逐次逼近遗传算法、量子遗传算法、单纯形-遗传算法混合方法、共轭梯度-遗传算法混合方法、阻尼粒子群优化反演法等的研究。但是这些反演技术能否用于大量实际资料的处理,算法的设计至关重要。

(3)深入研究精细反演技术,加深反演参数的设置对反演结果影响的认识,加快与其它地球物理资料联合反演或约束反演的研究,尤其是大地电磁与地震数据的约束反演以及联合解释,这对于地球深部精细构造探测和矿集区立体可视化探测具有重要的意义。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Bostick F X Jr. A simple almost exact method of magnetotelluric analysis: Proc. workshop on electrical methods in geothermal exploration [J]. U. S. Geol. Surv., 1977; 174~183.
- [2] 周虬. 一种简易的一维大地电磁测深反演方法-博斯蒂克法反演及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(1): 80~88.  
Zhou Q. A simple inversion of 1D magnetotelluric sounding curve-Bostick inversion method and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1985, 20(1): 80~88.
- [3] 陈乐寿, 王光镔. 大地电磁测深法[M]. 北京: 地质出版社, 1990, 249~284.

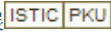
- Chen L S, Wang G E. The magnetotelluric sounding method (in Chinese) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990, 249~284.
- [4] 陈乐寿, 刘任, 王天生. 大地电磁测深资料处理与解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988, 80~108.  
Chen L S, Liu R, Wang T S. The processing and interpretation of magnetotelluric sounding data (in Chinese) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988, 80~108.
- [5] 徐世浙, 刘斌. 大地电磁一维连续介质反演的曲线对比法[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 676~682.  
Xu S Z, Liu B. The curve comparison method of MT inversion for one-dimensional continuous medium [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1995, 38(5): 676~682.
- [6] Basokur A T, Kaya C, Ulugergerli E U. Direct interpretation of magnetotelluric sounding data based on the frequency-normalized impedance function [J]. Geophysical Prospecting, 1997, 45(1): 21~37.
- [7] 张大海, 徐世浙. 带相位信息的一维大地电磁曲线对比反演法[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 227~231.  
Zhang D H, Xu S Z. One-dimensional magnetotelluric curve comparison inversion with phase information [J]. Seismology and Geology (in Chinese), 2001, 23(2): 227~231.
- [8] 王家映, Oldenburg D W, Levy S. 大地电磁测深的拟地震解释法[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(1): 66~79.  
Wang J Y, Oldenburg D, Levy S. The magnetotelluric interpretation simulating seismic method [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1985, 20(1): 66~79.
- [9] 韩自豪, 牛立军, 魏文博. 电磁方法的拟地震解释[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 834~836.  
Han Z H, Niu L J, Wei W B. On pseudo-seismic interpretation of electromagnetic method [J]. Journal of Liaoning Technical University (in Chinese), 2007, 26(6): 834~836.
- [10] 吴广跃, 王天生. 大地电磁测深曲线的病态反演[J]. 石油地球物理勘探, 1981, (4): 63~74.  
Wu G Y, Wang T S. Ill-conditioned inversion of magnetotelluric sounding curve [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1981, (4): 63~74.
- [11] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002, 1~182.  
Wang J Y. Inverse Theory in Geophysics (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002, 1~182.
- [12] 冯思臣, 王绪本, 阮帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 594~599.  
Feng S C, Wang X B, Ruan S. Comparison among several inversion algorithms of 1D MT [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2004, 39(5): 594~599.
- [13] Jupp D L B, Vozoff K. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data [J]. Geophys. J. R. Astr. Soc, 1975, 42(3): 957~976.
- [14] 陈明生, 陈乐寿, 王天生, 等. 用改进广义逆矩阵方法解释大地电磁测深及电测深资料[J]. 地球物理学报, 1983, 26(4): 390~400.  
Chen M S, Chen L S, Wang T S, *et al.* The interpretation of magnetotelluric and electrical sounding's data by modified generalized inverse matrix [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1983, 26(4): 390~400.
- [15] 柳建新, 孙娅, 郭荣文, 等. 基于 TSVD 求解大地电磁不适定反演问题[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2009, 2(21): 2284~2290.  
Liu J X, Sun Y, Guo R W, *et al.* Truncated SVD methods for MT discrete linear ill-posed problems [J]. Sciencepaper Online (in Chinese), 2009, 2(21): 2284~2290.
- [16] Hansen P C. The truncated SVD as a method for regularization [J]. BIT Numerical Mathematics, 1987, 27(4): 534~553.
- [17] 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.
- [18] deGroot-Hedlin C, Constable S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data [J]. Geophysics, 1990, 55(12): 1613~1624.
- [19] 胡祖志, 胡祥云, 吴文鹏, 等. 大地电磁二维反演方法对比研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 64~68.  
Hu Z Z, Hu X Y, Wu W P, *et al.* Compared study of two-dimensional magnetotelluric inversion methods [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 2005, 33(1): 64~68.
- [20] 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): 547~553.  
Wu X P, Xu G M. Improvement of occam's inversion for MT data [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1998, 41(4): 547~553.
- [21] 吴小平, 徐果明. 利用共轭梯度法的电阻率三维反演研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 420~427.  
Wu X P, Xu G M. Study on 3-D resistivity inversion using conjugate gradient method [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2000, 43(3): 420~427.
- [22] 刘羽. 大地电磁 Occam 反演中拉格朗日乘子搜索的并行计算[J]. 物探化探计算技术, 2005, 28(4): 342~345.  
Liu Y. The parallel computation of lagrange multiplier searching in magnetotelluric occam inversion [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 2005, 28(4): 342~345.
- [23] Ellis R G, Oldenburg D W. The pole-pole 3D Dc-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach [J]. Geophys. J. Int., 1994, 119(1): 187~194.
- [24] Farquharson C G, Oldenburg D W. A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems [J]. Geophys. J. Int. 2004, 156(3): 411~425.
- [25] 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 J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(4): 937~946.
- [26] Smith J T, Booker J R. Rapid inversion of two and three dimensional magnetotelluric data [J]. Geophys Res, 1996, 96(B3): 3905~3922.

- [27] 谭捍东, 陈乐寿, 魏文博, 等. 先进的大地电磁资料处理和反演方法在 INDEPTH-MT 中的应用研究[J]. 现代地质, 1997, 11(3): 393~400.
- Tan H D, Chen L S, Wei W B, *et al.* Data acquisition technology of super wide band MT signals [J]. Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences (in Chinese), 1997, 11(3): 393~400.
- [28] 谭捍东, 余钦范, Booker J, 等. 大地电磁法三维快速松弛反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 850~854.
- Tan H D, Yu Q F, Booker J, *et al.* Three-dimensional rapid relaxation inversion for the magnetotelluric method [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2003, 46(6): 850~854.
- [29] 谭捍东, 李聪媛, 王彩旗. 大地电磁三维反演在土屋铜矿床探测中的应用研究-三维反演和解释[J]. 地质与勘探, 2003, 39(增刊): 25~30.
- Tan H D, Li C P, Wang C Q. Application of three-dimensional magnetotelluric inversion to the exploration of Tuwu copper ore deposit-three-dimensional inversion and interpretation [J]. Geology and Prospecting (in Chinese), 2003, 39(Supplement): 25~30.
- [30] Lin C H, Tan H D, Tong T. Parallel rapid relaxation inversion of 3D magnetotelluric data [J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1): 77~83.
- [31] Hestenes M R, Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems [J]. Journal of Research of National Bureau of Standards, 1952, 49(6): 409~436.
- [32] Madden T R, Mackie R L. Three-dimensional magnetotelluric modeling and inversion [J]. Proc. IEEE, 1989, 77(2): 318~333.
- [33] Mackie R L, Madden T R. Conjugate direction relaxation solutions for 3-D magnetotelluric modeling [J]. Geophysics, 1993, 58(7): 1052~1057.
- [34] Fletcher R, Reeves C M. Function minimization by conjugate gradients [J]. Computer J., 1964, 7(2): 149~154.
- [35] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradient algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. Geophysics, 2001, 66(1): 174~187.
- [36] Newman G A, Alumbaugh D L. Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients [J]. Geophys. J. Int., 2000, 140(2): 410~424.
- [37] 胡祖志, 胡祥云, 何展翔. 大地电磁非线性共轭梯度拟三维反演[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1226~1234.
- Hu Z Z, Hu X Y, He, Z X. Pseudo-three-dimensional magnetotelluric inversion using nonlinear conjugate gradients [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4): 1226~1234.
- [38] 刘小军, 王家林, 吴健生. 二维大地电磁正则化共轭梯度法反演算法[J]. 上海地质, 2007, (1): 71~74.
- Liu X J, Wang J L, Wu J S. Inversion algorithm of 2-D magnetotelluric data using regularized conjugate gradient method [J]. Shanghai Geology (in Chinese), 2007, (1): 71~74.
- [39] Zhdanov M S, Fang S. Quasi-linear approximation in 3-D electromagnetic modeling [J]. Geophysics, 1996, 61(3): 64~665.
- [40] Zhdanov M S, Fang S. Three-dimensional quasi-linear electromagnetic inversion [J]. Radio Sci., 1996, 31(4): 741~754.
- [41] Zhdanov M S, Dmitriev V I, Fang S, *et al.* Quasi-analytical approximation and series in 3D electromagnetic modeling [J]. Geophysics, 2000, 65(5): 1746~1757.
- [42] Zhdanov M S, Fang S, Hursán G. Electromagnetic inversion using quasi-linear approximation [J]. Geophysics, 2000, 65(5): 1501~1513.
- [43] 陈丽虹, 孙建国, 吴燕冈, 等. 地球物理反演的拟线性近似方法综述[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 464~472.
- Chen L H, Sun J G, Wu Y G, *et al.* Review of quasi-Linear approximation in geophysical inversion [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2002, 17(3): 464~472.
- [44] Portnaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 874~887.
- [45] 刘小军, 王家林, 陈冰, 等. 二维大地电磁数据的聚焦反演算法探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 338~342.
- Liu X J, Wang J L, Chen B, *et al.* Discussion on focus inversion algorithm of 2-D MT data [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2007, 42(3): 338~342.
- [46] 张罗磊, 于鹏, 王家林, 等. 二维大地电磁尖锐边界反演研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 631~637.
- Zhang L L, Yu P, Wang J L, *et al.* A study on 2D magnetotelluric sharp boundary inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(3): 631~637.
- [47] 翁爱华, 刘国兴. 大地电磁测深资料的超球逼近反演[J]. 长春科技大学学报, 1998, 28(3): 330~334.
- Wen A H, Liu G X. The super-sphere approximation algorithm in magnetotellurics data inversion [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (in Chinese), 1998, 28(3): 330~334.
- [48] 严良俊, 胡文宝. 大地电磁测深资料的二次函数逼近非线性反演[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 935~940.
- Yan L J, Hu W B. Non-linear inversion with the quadratic function approaching method for magnetotelluric data [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2004, 47(5): 935~940.
- [49] 徐义贤, 王家映. 大地电磁的多尺度反演[J]. 地球物理学报, 1998, 41(5): 704~711.
- Xu Y X, Wang J Y. A multiresolution inversion of onedimensional magnetotelluric data [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1998, 41(5): 704~711.
- [50] 徐义贤, 王家映. 二维 MT 多尺度反演中的自适应网格算法[J]. 石油勘探, 1998, 37(4): 112~121.
- Xu Y X, Wang J Y. An adaptive-grid algorithm in 2-D magnetotelluric multiresolution inversion [J]. Geophysical Prospecting for Petrole (in Chinese), 1998, 37(4): 112~121.
- [51] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, *et al.* Equation of state calculations by fast computing machines [J]. J. Chem. Phys., 1953, 21(6): 1087~1092.
- [52] Kirkpatrick S, Gelatt C D Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing [J]. Sciences, 1983, 220(4598): 671~680.

- [53] 师学明, 王家映. 一维层状介质大地电磁模拟退火反演法[J]. 地球科学, 1998, 23(5): 542~545.  
Shi X M, Wang J Y. One dimensional magnetotelluric sounding inversion using simulated annealing [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences (in Chinese), 1998, 23(5): 542~545.
- [54] 师学明, 王家映. 地球物理资料非线性反演方法讲座(三)模拟退火法[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(3): 165~174.  
Shi X M, Wang J Y. Lecture on non-linear inverse methods in geophysics (3) Simulated annealing method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 2007, 4(3): 165~174.
- [55] 姚姚. 地球物理非线性反演模拟退火法的改进[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 643~650.  
Yao Y. Improvement on nonlinear geophysical inversion simulated annealing [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1995, 38(5): 643~650.
- [56] 张霖斌, 姚振兴, 纪展, 等. 快速模拟退火算法及应用. 石油地球物理勘探, 1997, 32(5): 654~660.  
Zhang L B, Yao Z X, Ji C, *et al.* Fast simulated annealing algorithm and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 1997, 32(5): 654~660.
- [57] 杨辉, 王永涛, 王家林, 等. 大地电磁测深拟二维模拟退火约束反演[J]. 海相油气地质, 2001, 6(1): 47~51.  
Yang H, Wang Y T, Wang J L, *et al.* Magnetotelluric sounding restriction inversion using 2-D simulated annealing method [J]. Marine Origin Petroleum Geology (in Chinese), 2001, 6(1): 47~51.
- [58] 杨辉, 王永涛, 戴世坤, 等. 带地形的 MT 多参量二维快速模拟退火约束反演[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 213~217.  
Yang H, Wang Y T, Dai S K, *et al.* 2-D inversion of magnetotelluric (MT) multi-parameters with topography using fast simulated annealing [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2003, 38(2): 213~217.
- [59] 井西利, 杨长春, 李丽. 地球物理问题的自适应模拟退火方法求解[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 327~330.  
Jing X L, Yang C C, Li L. Adapted simulated annealing algorithm for geophysical problems [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2003, 18(2): 327~330.
- [60] 蒋龙聪, 刘江平. 模拟退火算法及其改进[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(2): 135~140.  
Jiang L C, Liu J P. Revised simulated annealing algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 2007, 4(2): 135~140.
- [61] 罗红明, 王家映, 师学明, 等. 量子路径积分算法及其在大地电磁反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1268~1276.  
Luo H M, Wang J Y, Shi X M, *et al.* Quantum path integral algorithm and its application in magnetotelluric inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(4): 1268~1276.
- [62] 胡祖志, 胡祥云. 大地电磁三维反演方法综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 214~220.  
Hu Z Z, Hu X Y. Review of three dimensional magnetotelluric inversion methods [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(1): 214~220.
- [63] Holland J. Adaptation in Natural and Artificial System [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [64] 赵改善. 求解非线性最优化问题的遗传算法[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(1): 90~97.  
Zhao G S. Solving nonlinear optimization problems of genetic algorithm [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 1992, 7(1): 90~97.
- [65] 杨文采. 地球物理反演的遗传算法[J]. 石油物探, 1995, 34(1): 116~122.  
Yang W C. Genetic algorithm for geophysical inversion [J]. Geophysical Prospecting for Petrole (in Chinese), 1995, 34(1): 116~122.
- [66] Stoffa P L, Sen M K. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms inversion of plane-wave seismograms [J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1794~1840.
- [67] 王兴泰, 李晓芹, 孙仁国. 电测深曲线的遗传算法反演[J]. 地球物理学报, 1995, 10(4): 279~284.  
Wang X T, Li X Q, Sun R G. The inversion of resistivity sounding curve using genetic algorithms [J]. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1995, 10(4): 279~284.
- [68] 石琳珂. 逐步缩小搜索范围的遗传算法[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 67~79.  
Shi L K. The genetic algorithm that gradually reduces the searching ranges [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 1995, 10(4): 67~79.
- [69] 张荣峰. 采用生物遗传算法的大地电磁测深资料反演[J]. 物探化探计算技术, 1996, 18(1): 67~70.  
Zhang R F. Inversion of MT data by employing genetic algorithm [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 1996, 18(1): 67~70.
- [70] 刘云峰, 曹春蕾. 一维大地电磁测深的遗传算法反演[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1997, 31(3): 300~304.  
Liu Y F, Cao C L. Inversion of one dimensional MT data using genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science) (in Chinese), 1997, 31(3): 300~304.
- [71] 蔚宝强, 胡文宝. MT 资料的遗传法反演[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(3): 25~29.  
Wei B Q, Hu W B. Genetic inversion algorithm for MT data [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute (in Chinese), 1999, 21(3): 25~29.
- [72] Perez-Flores M A, Schultz A. Application of 2-D inversion with genetic algorithms to magnetotelluric data from geothermal areas [J]. Earth, Planets Space, 2002, 54(5): 607~616.
- [73] 柳建新, 童孝忠, 杨晓弘, 等. 实数编码遗传算法在大地电磁测深二维反演中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1936~1942.  
Liu J X, Tong X Z, Yang X H, *et al.* Application of real coded genetic algorithm in two-dimensional magnetotelluric inversion [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(6): 1936~1942.

- [74] 白俊雨,王绪本,周军.大地电磁实码广义遗传反演算法研究[J].物探化探计算技术,2009,31(4):314~318.  
Bai J Y, Wang X B, Zhou J. The real-coded generalized genetic algorithm in MT data inversion [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 2009, 31(4): 314~318.
- [75] 师学明,王家映,张胜业,等.多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料[J].地球物理学报,2000,42(1):122~129.  
Shi X M, Wang J Y, Zhang S Y, *et al.* Multiscale genetic algorithm and its application in magnetotelluric sounding data inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2000, 42(1): 122~129.
- [76] 柳建新,童孝忠,李爱勇,等.MT资料反演的一种实数编码混合遗传算法[J].中南大学学报(自然科学版),2007,38(1):160~163.  
Liu J X, Tong X Z, Li A Y, *et al.* A real coded hybrid genetic algorithm in magnetotelluric sounding data inversion [J]. J. Cent. South Univ. (Science and Technology) (in Chinese), 2007, 38(1): 160~163.
- [77] 谢维,柳建新,张东风,等.混合遗传算法在大地电磁一维反演中的应用[J].物探化探计算技术,2009,31(6):568~572.  
Xie W, Liu J X, Zhang D F, *et al.* Application of hybrid genetic algorithm in the magnetotelluric 1-D inversion method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 2009, 31(6): 568~572.
- [78] 罗红明,王家映,朱培民,等.量子遗传算法在大地电磁反演中的应用[J].地球物理学报,2009,52(1):260~267.  
Luo H M, Wang J Y, Zhu P M, *et al.* Quantum genetic algorithm and its application in magnetotelluric data inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(1): 260~267.
- [79] 师学明,范建柯,罗红明,等.层状介质大地电磁的自适应量子遗传反演法[J].地球科学-中国地质大学学报,2009,34(4):691~698.  
Shi X M, Fan J K, Luo H M, *et al.* Adaptive quantum genetic inversion algorithm for one-dimensional magnetotelluric inverse problem [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(4): 691~698.
- [80] Raiche A. A pattern recognition approach to geophysical inversion using neural nets [J]. Geophys. J. Int., 1991, 105(3): 629~648.
- [81] Van der Baan M, Jutten C. Neural networks in geophysical applications [J]. Geophysics, 2000, 65(4): 1032~1047.
- [82] Spichak V, Popova I. Artificial neural network inversion of magnetotelluric data in terms of three-dimensional earth macroparameters [J]. 2000, Geophys. J. Int., 2000, 142(1): 15~26.
- [83] Manoj C, Nagarajan N. The application of artificial neural networks to magnetotelluric time-series analysis [J]. Geophys. J. Int., 2003, 153(2): 409~423.
- [84] Moorkamp M, Jones A G, Rao C K. Processing magnetotelluric time series with adaptive filters and neural networks [A]. 18th EM Induction Workshop, El Vendrell, Spain, 2006.
- [85] Popova I V, Ogawa Y. Application of a modified Hopfield neural network to noisy magnetotelluric data [J]. Izvestiya Physics of the Solid Earth, 2007, 43(3): 217~224.
- [86] Shimelevich M I, Osborne M A, Gavryushov S. Rapid neuronet inversion of 2D magnetotelluric data for monitoring of geoelectrical section parameters [J]. Annals of Geophysics, 2007, 50(1): 105~109.
- [87] Tarits P, Jouanne V, Menvielle M, *et al.* Bayesian statistics of non-linear inverse problems: example of the magnetotelluric 1-D inverse problem [J]. Geophysical Journal International, 1994, 119(2): 353~368.
- [88] Spichak V V, Menvielle M, Roussignol M. Three-Dimensional Inversion of the Magnetotelluric Fields Using Bayesian Statistics [A]. In: Oristaglio M, Spies B, eds. 3D Electromagnetics. Tulsa: SEG Publ. (GD7), 1999c, 406~417.
- [89] Grandis H, Menvielle M, Roussignol M. Bayesian inversion with Markov chains-I. The magnetotelluric one-dimensional case [J]. Geophysical Journal International, 1999, 138(3): 757~768.
- [90] Cerv V, Menvielle M, Pek J. Stochastic interpretation of magnetotelluric data, comparison of methods [J]. Annals of Geophysics, 2007, 50(1): 7~19.
- [91] Spichak V V, Sizov Y P. Three-Dimensional Bayesian Inversion of Audiomagnetotelluric Data in the Salinity Zone of a Coastal Groundwater Reservoir [J]. Izvestiya Physics of the Solid Earth, 2006, 42(4): 330~333.
- [92] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. In: IEEE Int'l Conf on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, 1942~1948.
- [93] Shaw R, Srivastava S. Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data [J]. Geophysics, 2007, 72(2): 75~83.
- [94] 师学明,肖敏,范建柯,等.大地电磁阻尼粒子群优化反演法研究[J].地球物理学报,2009,52(4):1114~1120.  
Shi X M, Xiao M, Fan J K, *et al.* The damped PSO algorithm and its application for magnetotelluric sounding data inversion [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(4): 1114~1120.

# 大地电磁测深反演方法现状与评述

作者: [陈向斌](#), [吕庆田](#), [张昆](#), [CHEN Xiang-bin](#), [L\(U\) Qing-tian](#), [ZHANG Kun](#)  
作者单位: [中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037](#)  
刊名: [地球物理学进展](#)   
英文刊名: [Progress in Geophysics](#)  
年, 卷(期): 2011, 26(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_dqwlxjz201105013.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqwlxjz201105013.aspx)