

李帝铨,王光杰,底青云等. 基于遗传算法的 CSAMT 最小构造反演. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1234~1245

Li D Q, Wang G J, Di Q Y, et al. The application of Genetic Algorithm to CSAMT inversion for minimum structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 1234~1245

基于遗传算法的 CSAMT 最小构造反演

李帝铨,王光杰,底青云,王妙月,王 若

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘 要 利用遗传算法进行不考虑近场校正的全场资料 CSAMT 反演研究. 遗传算法属于全局最优化方法, 具有对初始模型依赖小, 不易陷入局部极值的优点, 然而, 当未知数较多时, 多解性仍是该方法的瓶颈. 为了减小多层反演的多解性, 在反演中引入最小构造约束, 针对 CSAMT 的遗传算法反演问题定义了最小构造目标函数, 经过模型试验找到了其具体表达式, 并找到了适合 CSAMT 资料反演的拉格朗日乘子的最佳取值 $\mu=0.5$, 实现了基于遗传算法的 CSAMT 最小构造反演. 利用 H、A、K、Q 和 HKH、KHA 模型对方法进行了数值试验, 在无噪和加入 10% 噪声情况下, 反演结果与模型一致; 加入 20% 噪声后, 反演仍取得良好结果, 与理论模型基本吻合. 将该方法用于水平层状地层和横向变化地层的实测资料反演, 结果与地质资料吻合. 不同的计算实例表明了该方法的有效性.

关键词 可控源音频大地电磁法, 遗传算法, 最小构造反演, 拟合

文章编号 0001-5733(2008)04-1234-12

中图分类号 P631

收稿日期 2007-08-14, 2008-05-05 收修定稿

The application of Genetic Algorithm to CSAMT inversion for minimum structure

LI Di-Quan, WANG Guang-Jie, DI Qing-Yun, WANG Miao-Yue, WANG Ruo

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract We apply Genetic Algorithm to invert CSAMT data. Here, we invert both apparent resistivity and phase data which contain the near-field, transition zone field and the far-field without any correction. Genetic Algorithm is one kind of global optimization method with less dependence on initial model and more ability to find the best solution, but when the unknowns are too many then the non-uniqueness of solution is still a problem. When we use a multi-layer model in the inversion CSAMT does not yield a unique solution. In order to reduce the temptation to over interpret the data and to eliminate arbitrary discontinuities in simple layered models, we employ minimum structure to constrain the inversion result. We have defined minimum structure function for the CSAMT inversion based on genetic algorithm, and have found the optimal value of the Lagrange multiplier $\mu=0.5$. The designed models are H, A, K, Q and HKH, KHA. When the data is without noise or with 10% noise, the resulting resistivity models fit the true models well. When the data contains 20% noise, the inversion result is also good. The method has been used for field data processing, the result was good. Both synthetic and field data examples indicate that the method is effective.

Keywords CSAMT, Genetic Algorithm, Minimum structure inversion, Fitting

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(Kzcx2-yw-121), 国家“973”计划项目(2006CB2002206)资助.

作者简介 李帝铨,男,1982年生,现为中国科学院地质与地球物理研究所研究生,主要从事浅层地球物理工作.

E-mail: lidiquan@mail.iggcas.ac.cn.

1 引言

可控源音频大地电磁法^[1~4](CSAMT)为地球物理勘探方法中一种强有力的电磁法勘探手段,自从 20 世纪 80 年代引入我国,在勘探石油、天然气、地热、金属矿产、以及水文和环境工程中发挥了重要的作用^[5~12].

野外实测资料的反演解释是 CSAMT 方法的关键环节之一.近年来国内外一些地球物理研究者开始寻求不考虑近场校正的全场资料的数值模拟和反演方法^[13~16],但由于 CSAMT 法源的复杂特性,仍难以获得满意的反演结果.目前 1-D 反演仍是主要方法,通常的做法是对近场和过渡场作校正,然后采用 MT 的方法进行资料处理^[13~15].当电性结构复杂时,近场和过渡场校正正常带来较大误差,采用线性化或局部线性化的 Marquardt 方法和广义逆矩阵法等比较依赖于初始模型,容易陷入局部最优解.遗传算法属于全局最优化方法,具有对初始模型依赖小,不易陷入局部极值的优点,近年来引起一些学者的关注^[16~21].王光杰等^[16]实现了不做近场校正的 CSAMT 资料遗传算法反演,为 CSAMT 资料反演提供了一种新的方法.

当模型的层数较多时,遗传算法同样不能克服多解性问题.由于地球物理反演的多解性以及 CSAMT 野外数据误差的存在,过度拟合野外数据会产生虚假的多余构造. Smith 等^[22]以及 Constable 等^[23]认为应该求取具有最小构造同时又能对拟合不好的资料有一定的可容性的模型.因此,实践中应该进行求取最小构造模型反演^[22,23].

最小构造反演的实质是求取多层地球模型的最光滑解,即在一定的拟合误差标准下使模型的粗糙度最小.采用最小构造反演时,不会引入数据分辨不出的多余构造干扰,具有较好的稳定性,随着误差的减小,用适当的方法便能得到真实的结构^[22,23].

本文尝试将最小构造反演引进 CSAMT 1-D 遗传算法反演中,开展 CSAMT 的最小构造遗传算法反演研究,进行理论和野外数据处理.

2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)^[16~21]首先将求解问题的各参数用二进制(或者其他进制)进行编码,编码后的各参数连接在一起形成染色体.

随机产生一群染色体(或称为初始种群),通过“再生”、“交换”、“变异”产生新一代的种群,重复这一过程直到种群均一或者种群中的最优个体满足某种要求.

GA 算法并不能绝对保证收敛到全局最优解,但由于这种算法是平行的评价模型空间各部分的拟合度并对它们进行比较,所以只要模型群体的成员数大小、交换和变异的概率选择合适,这种算法一般不会陷入局部最优解中.

2.1 待求解的参数

假定地电剖面是均匀水平分层的,CSAMT 反演的参数就是各层的厚度和电阻率值($h_1\rho_1, h_2\rho_2, \dots, h_{n-1}\rho_{n-1}, h_n\rho_n$),其中 $h_n = \infty$,不参加参数反演.将这些参数值用二进制编码并顺序连接起来形成一条染色体.

2.2 交叉概率、变异概率和初始种群

交叉:再生后的种群通过随机配对形成 N^2 对染色体.每一对染色体按照一定的交换概率部分地交换这两个个体的某些位.交换可使得某些好的基因块组合在一起,产生新的个体.

变异:按一定的概率 p_m 将染色体中某位值进行逆变,即由 1 变为 0 或由 0 变为 1.

初始种群:研究表明,初始种群数在 10~100 时,求解精度提高很快,种群在 100 以上时,提高较慢^[23].综合考虑计算精度和计算成本,本文选择的初始种群数为 128.

3 一维 CSAMT 正演公式及目标函数选取

3.1 一维 CSAMT 正演公式

人工源一维电磁波正演是通过数值求解积分方程得到的^[24,25].对于沿 x 方向的电偶极源,电场 x 分量和磁场 y 分量的表达式分别为^[25,26]

$$E_x = \frac{P_E \mu_0 i \omega}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{P_E \mu_0 i \omega}{2\pi r} (1 - 2\cos^2\theta) \int_0^\infty \left[\frac{u_1}{k_1^2 R_1^*} - \frac{1}{\lambda + u_1/R_1} \right] \times J_1(\lambda r) d\lambda + \frac{P_E \mu_0 i \omega \cos^2\theta}{2\pi} \times \int_0^\infty \left[\frac{u_1}{k_1^2 R_1^*} - \frac{1}{\lambda + u_1/R_1} \right] \lambda J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

$$H_y = -\frac{P_E}{2\pi} \int_0^\infty u_1/R_1 \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{P_E}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\lambda + u_1/R_1} \left[\frac{\lambda J_1(\lambda r)}{r} \cos 2\theta - \lambda^2 J_0(\lambda r) \cos^2\theta \right] d\lambda, \quad (2)$$

其中: E_x 表示与源同向的电场水平分量; H_y 表示与源布设方向垂直的磁场水平分量; P_E 为偶极源的电偶极矩, $P_E = Idl$, I 为供电电流, dl 为电偶极源的长度; μ_0 为自由空间的导磁率, i 表示纯虚数; ω 为圆频率; λ 为积分变量; $u_j = \sqrt{\lambda^2 + k_j^2}$, $k_j^2 = -i\omega\mu_0\sigma_j$, k_j 为第 j 电性层的波数, σ_j 为第 j 层的电导率, θ 为电偶极源方向和源的中点到接收点矢径之间的夹角, r 为收发距, 即观测点距偶极子中心的距离; $j = 1, 2, \dots, N$, N 为电性层的层数; $J_1(\lambda r)$ 、 $J_0(\lambda r)$ 分别是以 λr 为变量的一阶、零阶贝塞尔函数. 对于 N 层分层地球介质, 即在半空间上覆盖 $N-1$ 层有限层厚的层状介质, R_1 和 R_1^* 为联系上半空间顶部的电导率和第一层顶部电导率之间的两个函数, 它们和 $N-1$ 层的电导率及层厚以及上半空间的电导率有关, 具体表达式如下

$$R_1 = \text{cth} \left[u_1 h_1 + \text{arcth} \frac{u_1}{u_2} \right. \\ \left. \times \text{cth} \left(u_2 h_2 + \dots + \text{arcth} \frac{u_{N-1}}{u_N} \right) \right], \\ R_1^* = \text{cth} \left[u_1 h_1 + \text{arcth} \frac{u_1 \rho_1}{u_2 \rho_2} \text{cth} \left(u_2 h_2 + \dots + \text{arcth} \frac{u_{N-1} \rho_{N-1}}{u_N \rho_N} \right) \right], \quad (3)$$

对于长度为 $2L$ 的发射电极, 若取坐标原点为发射极的中点, 公式(1)和(2)变为

$$E_x = \frac{I\mu_0 i\omega}{2\pi} \int_{-L}^L dx \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} J_0(\lambda r) d\lambda \\ + \frac{I\mu_0 i\omega}{2\pi} \frac{x' + L}{r_2} \int_0^\infty \left[\frac{u_1}{k_1^2 R_1^*} - \frac{1}{\lambda + u_1/R_1} \right] \\ \times J_1(\lambda r_2) d\lambda - \frac{I\mu_0 i\omega}{2\pi} \frac{x' - L}{r_1} \\ \times \int_0^\infty \left[\frac{u_1}{k_1^2 R_1^*} - \frac{1}{\lambda + u_1/R_1} \right] J_1(\lambda r_1) d\lambda, \quad (4)$$

$$H_y = -\frac{I}{2\pi} \int_{-L}^L dx \int_0^\infty u_1/R_1 \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} \\ \times J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{I}{2\pi} \frac{x' - L}{r_1} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} \\ \times J_1(\lambda r_1) d\lambda - \frac{I}{2\pi} \frac{x' + L}{r_2} \\ \times \int_0^\infty \left[\frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} \right] J_1(\lambda r_2) d\lambda, \quad (5)$$

其中, x' , y' 为观测点的坐标, $r_1 = \sqrt{(x' - L)^2 + y'^2}$, $r_2 = \sqrt{(x' + L)^2 + y'^2}$.

由(4)和(5)式可知, CSAMT 法源的复杂特性为数据反演解释带来了较大的困难.

3.2 目标函数及适应函数的选取

3.2.1 不考虑最小构造约束时的目标函数

染色体能否遗传给下一代, 要通过目标函数来判定. 根据 Caniard 视电阻率的计算公式, 并考虑到相位的作用, 我们选择不考虑最小构造约束时的目标函数为^[17]:

$$e(m) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\log(\rho_i^o) - \log(\rho_i^r))^2 + c(\phi_i^o - \phi_i^r)^2]}, \quad (6)$$

其中 ρ_o , ρ_r 分别表示观测和正演的视电阻率值, ϕ_o , ϕ_r 分别表示正演和观测的相位值, i 代表频点序号. c 为相位匹配系数, 表示相位在反演过程中所占的权重, n 表示在某点上观测的频率个数. c 的取值与相位数据的质量有很大关系, 本方法中, 相位数据质量好的时候, c 取 0.01, 比不用相位时收敛速度要快. 如果相位数据质量不高, c 取 0.

3.2.2 求最小构造的目标函数

非唯一性是地球物理反演的最大问题. 有限观测数据的 CSAMT 反演是非唯一的, 存在很多能拟合数据的模型. 如果仅寻求拟合实测数据的模型, 往往会产生过于复杂的模型, 或引入数据分辨不出的多余构造, 造成反演不稳定, 给解释带来麻烦. 但我们的目标是追求没有虚假构造的单一的模型. Constable 等^[23]认为这个模型应尽可能地简单或光滑. Smith 和 Booker^[22]也指出过拟合会引入伪结构, 应进行最小构造的反演. 有效途径是定义某种以模型参数为变量的目标函数, 要求目标函数取极小值来对模型参数的变化进行约束和惩罚.

我们定义最小构造目标函数为

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left[\frac{\partial m(z)}{\partial f(z)} \right]^2 df(z), \quad (7)$$

式中 $m(z)$ 为模型变量, $f(z)$ 是与深度有关的变量.

几种可能的模型变量是电导率 σ 、电阻率 ρ 、对数电导率 $\log\sigma$ 以及对数电阻率 $\log\rho$. Smith 和 Booker^[22]在进行大地电磁反演研究时指出, 从物理角度来看, 大地电磁法的实测曲线中, 导电体的贡献多, 高阻体的贡献少, 故采用电导率 σ 作为模型变量为佳. 由于 MT 和 CSAMT 同属电磁法, 故认为在 CSAMT 反演的时候采用电导率 σ 作为模型变量也是合适的.

CSAMT 的分辨率随深度的增大而降低, 为了补偿, 对 $f(z)$ 的选择如下

$$\frac{df(z)}{dz} = (z + z_0)^4, \quad (8)$$

当 $\lambda = 0, -1, -2$ 时分别对应 $f=(z+z_0)$, $f=\log(z+z_0)$, $f=-1/(z+z_0)$.

理论上分析,由于 CSAMT 的分辨率随深度的增大而降低,当选择 $f=(z+z_0)$ 时,对高频的补偿过大,会导致低频过拟合在深部引入伪构造.而选择 $f=-1/(z+z_0)$ 时,低频的补偿过大,会导致高频过拟合而在浅部引入伪构造.

图 1~3 是一个四层 HA 型理论曲线的反演结果,从图可以看出,在拉格朗日乘子取值相同的条件下,选择不同的最小构造目标函数对反演结果有很大影响.从图 1a 可见,当 m 取 ρ 时,无论 $f(z)$ 取什么形式,结果振荡都很严重,无法反映真实模型的电性结构.从图 1b 可见, $f(z)$ 取 $-1/(z+z_0)$ 时,对低频补偿过大,无论 m 取什么形式,高中频的振荡都很严重,无法反映真实模型的电性结构.从图 2 可见,当 m 取 $\log(\rho)$ 和 $\log(\sigma)$ 时,虽然总体能反映真实模型的电性结构,但灵敏度不够,结果还是有振荡现象,不能反映真实模型精细的电性结构.因此,我们排除了 m 取 $\rho, \log(\rho), \log(\sigma)$ 和 $f(z)$ 取 $-1/(z+z_0)$ 的最小构造目标函数.

又比较了当 m 取 $\sigma, f(z)$ 分别取 $(z+z_0), \log(z+z_0)$ 时的最小构造目标函数对反演结果的影响.

从图 3 可以看出,关于 $R(m, f) = \int_0^{z_{max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial (z+z_0)} \right]^2 d(z+z_0)$ 的最小构造模型,高频段的拟合较好,但是在低频段出现了振荡,导致在深部出现了真实模型中所没有的波动,虽然总体能反映真实模型的地电结构,但对深部的结构显示较差.

而当 $R(m, f) = \int_0^{z_{max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z+z_0)} \right]^2 d\log(z+z_0)$ 时的最小构造模型,其拟合相当稳定,结果精细,没有出现附加的振荡现象,清楚的显现了真实模型的电性结构.

为了验证所选最小构造目标函数的有效性和广泛性,进行了四层 KQ 模型反演.由图 4 可知,选取 $R(m, f) = \int_0^{z_{max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z+z_0)} \right]^2 d\log(z+z_0)$ 为最小构造目标函数时,反演得到的地电模型很好的反映了真实模型的电性结构.

上述实验结果证实了理论分析的正确性,也找到了最小构造目标函数的最佳表达式. CSAMT 资料反演时,我们最终选择的最小构造目标函数为 $R(m, f) = \int_0^{z_{max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z+z_0)} \right]^2 d\log(z+z_0)$. (9)

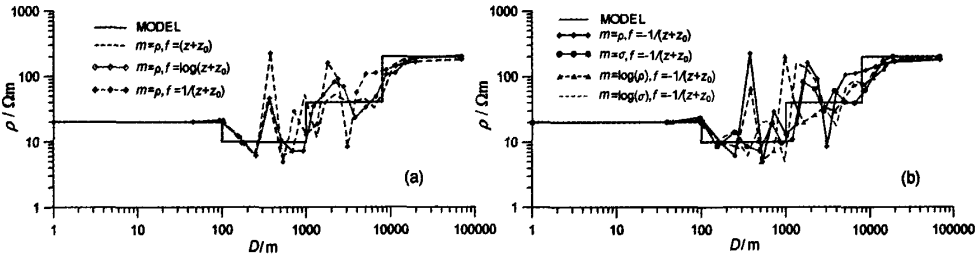


图 1 $m(z)$ 取 ρ 反演结果振荡性对比(a)和 $f(z)$ 取 $-1/(z+z_0)$ 反演结果振荡性对比(b)
Fig. 1 Inversion result when $m(z)=\rho$ (a) and $f(z)=-1/(z+z_0)$ (b)

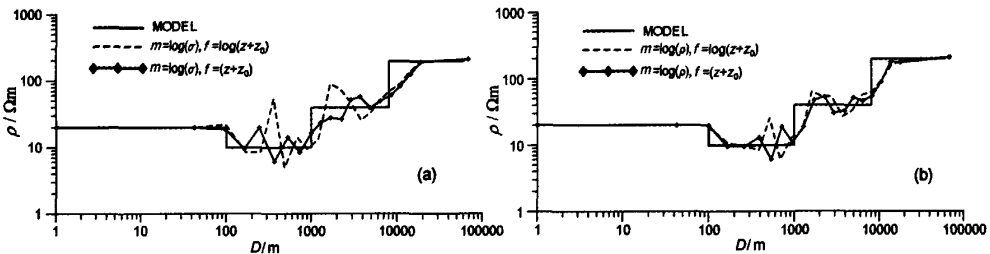


图 2 $m(z)$ 取 $\log(\sigma)$ 反演结果振荡性对比(a)和 $m(z)$ 取 $\log(\rho)$ 反演结果振荡性对比(b)
Fig. 2 Inversion result when $m(z)=\log(\sigma)$ (a) and $m(z)=\log(\rho)$ (b)

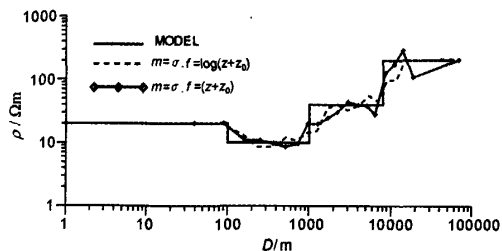


图3 最小构造目标函数分别取

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial (z + z_0)} \right]^2 d(z + z_0) \text{ 和}$$

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z + z_0)} \right]^2 d \log(z + z_0)$$

反演结果振荡性对比

Fig. 3 Inversion result when

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial (z + z_0)} \right]^2 d(z + z_0)$$

and $R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left[\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z + z_0)} \right]^2 d \log(z + z_0)$

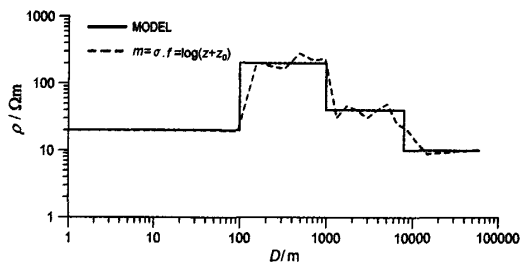


图4 最小构造目标函数取

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left(\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z + z_0)} \right)^2 d \log(z + z_0) \text{ 反演结果}$$

Fig. 4 Inversion result when

$$R(m, f) = \int_0^{z_{\max}} \left(\frac{\partial \sigma(z)}{\partial \log(z + z_0)} \right)^2 d \log(z + z_0)$$

3.2.3 求最小构造的遗传算法反演的目标函数

为减小解的多解性,把(6)和(9)式组合在一起,引入拉格朗日乘子 μ ,将条件极值变为无条件极值,即形成了求构造最小和数据拟合差最小双重约束的反演方法.具体的目标函数为

$$E(m) = e(m) + \mu R(m, f), \quad (10)$$

拉格朗日乘子 μ 是介于数据拟合误差和模型粗糙度之间的一个折衷参数. μ 取值太大,则反演要求模型粗糙度为最小,导致反演模型太光滑和数据拟合误差大,因而模型分辨率较差,难于反映真实模型的结构;相反, μ 取值太小,数据拟合能够达到相当的精度,但由于模型粗糙度大,易于引入多余的构造信息,即所谓伪构造,导致反演不稳定,给解释带来麻烦.因此, μ 的取值对反演结果有显著影响^[21,22].

吴小平等^[27]在利用共轭梯度法进行电阻率三

维反演研究时,曾进行 μ 取值对反演结果影响的研究,认为存在相对最佳的 μ 取值.

而本文所选用的方法和研究对象与文献[27]都不一样,我们进一步对 μ 取值进行了研究.

图5绘出了 μ 分别取 0.0、0.05、0.5、1.0 时的反演结果,对应不同的 μ ,曲线拟合都很好. $\mu=0.0$ 时,也就是无约束的遗传算法反演,在高频时的拟合比较接近真实模型,低频振荡严重,出现了虚假的多余构造. $\mu=0.05$ 时,与 $\mu=0.0$ 时的情况类似,但在高频时的拟合比 $\mu=0.0$ 时要好,低频振荡也很严重,出现了虚假的多余构造. $\mu=0.5$ 时,取得了良好的分辨效果,且没有出现虚假的多余构造,很好地重现了真实模型的电性结构. $\mu=1.0$ 时,也没有出现虚假的多余构造,但在分辨率上,特别是边界的分辨能力上,没有 $\mu=0.5$ 时好.

经过对比,本方法的 μ 取值为 0.5 时的效果相对较好.

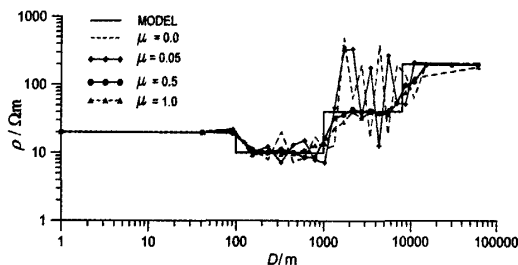


图5 μ 分别取 0.0、0.05、0.5、1.0 反演结果振荡性对比

Fig. 5 Inversion result when Lagrange multiplier μ is 0.0、0.05、0.5、1.0, respectively

3.2.4 适应函数

目标函数用来直接评定模型的优劣,本文采用另一函数即适应函数对模型的再生概率进行判断:

$$F(m) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E(i) - \bar{E})^2}}{\sum_{i=1}^n e^{\frac{[E(m) - E(i)]}{2}}}, \quad (11)$$

n 表示初始种群数, \bar{E} 为上一代种群中所有染色体目标函数的平均值, $E(i)$ 为初始种群中某个染色体的目标函数值. 染色体的适应函数值越大,它的再生概率就越大.

4 数值模拟计算实例

4.1 三层模型

设计了 H, A, K, Q 4 个模型. 正演时供电偶极

距 $AB=2000\text{ m}$, 收发距 $r=8000\text{ m}$, 所用频率为 $2^{13}\sim 2^1\text{ Hz}$. 我们进行了 $\mu=0.0$ (无约束的遗传算法反演) 和 $\mu=0.5$ (最小构造约束的遗传算法反演, 我们称为最小构造反演) 的反演.

在进行反演时, 分层遵守以下两点.

(1) 由于 CSAMT 方法的分辨率随深度增大而指数降低, 因此分层时采用对数等间隔的剖分方法. 这样, 反演中不容易引入数据分辨不出的多余构造, 具有较高的稳定性^[22].

(2) 由于实际的地质条件是复杂的, 因此每层的厚度应具有一定的弹性范围, 而且该弹性范围应随深度增大而增大.

用 13 层模型进行反演, 最大深度为 2000 m . 反演时遗传算法的参数为: 初始种群 128, 进化代数 50.

图 6A 是模型与反演结果的对比曲线, 图 6B 是模型的正演曲线和最小构造反演结果的响应曲线拟合图. 从图 6(a~d) 中可见, 曲线拟合都非常好, 但无约束反演与最小构造反演的结果相差很大. 无约束反演得到的地电模型虽能大概的反映真实模型的电性结构, 但振荡十分严重, 引入了虚假的多余构造, 结果不可用. 相比之下, 最小构造反演得到的地电模型很好地反映了真实模型的电性结构.

4.2 五层模型

为了验证方法的适应性, 进行了五层 HKH 和 KHA 模型反演, 反演结果见图 6e 和 6f. 图中的正演曲线和反演响应曲线几乎完全拟合, 但两种方法的反演结果差异很大. 无约束反演得到的地电模型振荡十分严重, 引入了虚假的多余构造, 结果不可用; KHA 模型的结果也显示振荡严重. 相比之下, 最小构造反演相当准确的重现了真实模型的电性结构.

4.3 加噪声后的模型反演

4.3.1 加 10% 随机噪声

野外采集的数据都含有一定的噪声, 为了检验该反演方法对野外数据处理的效果, 我们对上述的 4 个三层模型和两个五层模型分别加入 10% 的随机噪声后再反演, 反演结果如图 7 所示. 图 7(a~f) 分别对应 H、A、K、Q、HAH、KHA 型地层. 从 7(a~d) 可以看出, 加 10% 随机噪声后的反演结果除了 A 型的中间层分辨率不如不加噪声时外, 其他的都能很好地反映三层结构, 和真实模型基本吻合. 从 7e 可以看出, 加噪声后反演结果都能很好地反映五层结构, 和真实模型基本吻合. 从 7f 可以看出, 加噪声后反演结果除第四层的过渡不够明显外, 其他的还

是能较好地反映五层结构, 和真实模型基本吻合.

反演结果响应基本分布于模型正演曲线与加噪声后的曲线之间.

4.3.2 加 20% 随机噪声

在加入 10% 随机噪声取得良好效果后, 我们在模型数据里加入 20% 随机噪声. 反演结果如图 8 所示. 由图可见, 加入 20% 随机噪声后反演取得的效果也较好, 除了 A 型的中间层和 KHA 型的第四层不明显外, 反演结果和真实模型基本吻合.

5 野外数据反演

在野外数据反演时, 测试了本方法对水平层状地层和横向变化地层的分辨能力.

5.1 水平层状地层

北京市牛栏山水源八厂是北京市用水的水源地之一. 该地区已知地质资料如图 9a 所示, 该区表层大致分四层: 上覆层为含水半胶结砂砾石层, 第二层为砂黏互层的隔水层, 第三层为与第一层同性质的含水层, 第四层为侏罗纪安山岩.

为了试验 CSAMT 方法对水平地层的分层能力, 选择了一块用于物探仪器测试的标准试验场地. 在大胡营村北面北西 10° 方向布置了一条 1.1 km 的测试剖面, 8 号井 (ZK8) 位于剖面线东部约 185 m 处, 在剖面横坐标上的投影为 740 m 处. 剖面在已知地质剖面图上的投影为图 9a 上的 AB 段. 测量时收发距为 4 km , $AB=700\text{ m}$, 点距为 40 m , 工作频率 $2^{13}\sim 2^1\text{ Hz}$.

用本文介绍的反演方法对整个剖面进行反演. 将初始模型定为 13 层, 层厚按对数等间距划分, 每一层电阻率的搜索范围为 $10\sim 2000\ \Omega\text{m}$, 最终的数据拟合差小于 1%. 反演结果如图 9b 所示, 在图上根据电阻率值标出了三条解释线, 将电阻率剖面分为四层. 第一层和最后一层的电阻率较高, 第二层的电阻率最低, 第三层的电阻率值高于第二层的电阻率值但低于最后一层的电阻率值. 虽然第一层为含水层, 但地层的介质成分是由粗砂和卵石形成的, 这些介质的电阻率较高, 所以使得该层的电阻率较高, ZK8 下面第一层的深度约为 120 m . 第二层是由中等粒度的砂岩和泥岩组成, 泥岩的低电阻率导致第二层的电阻率最低, ZK8 下第二层的深度约为 280 m . 第三层是由中细砂和卵石组成, 它们的电阻率比泥岩高但比第一层低, 所以第三层的电阻率为中等, 第三层在 ZK8 下的深度约为 360 m .

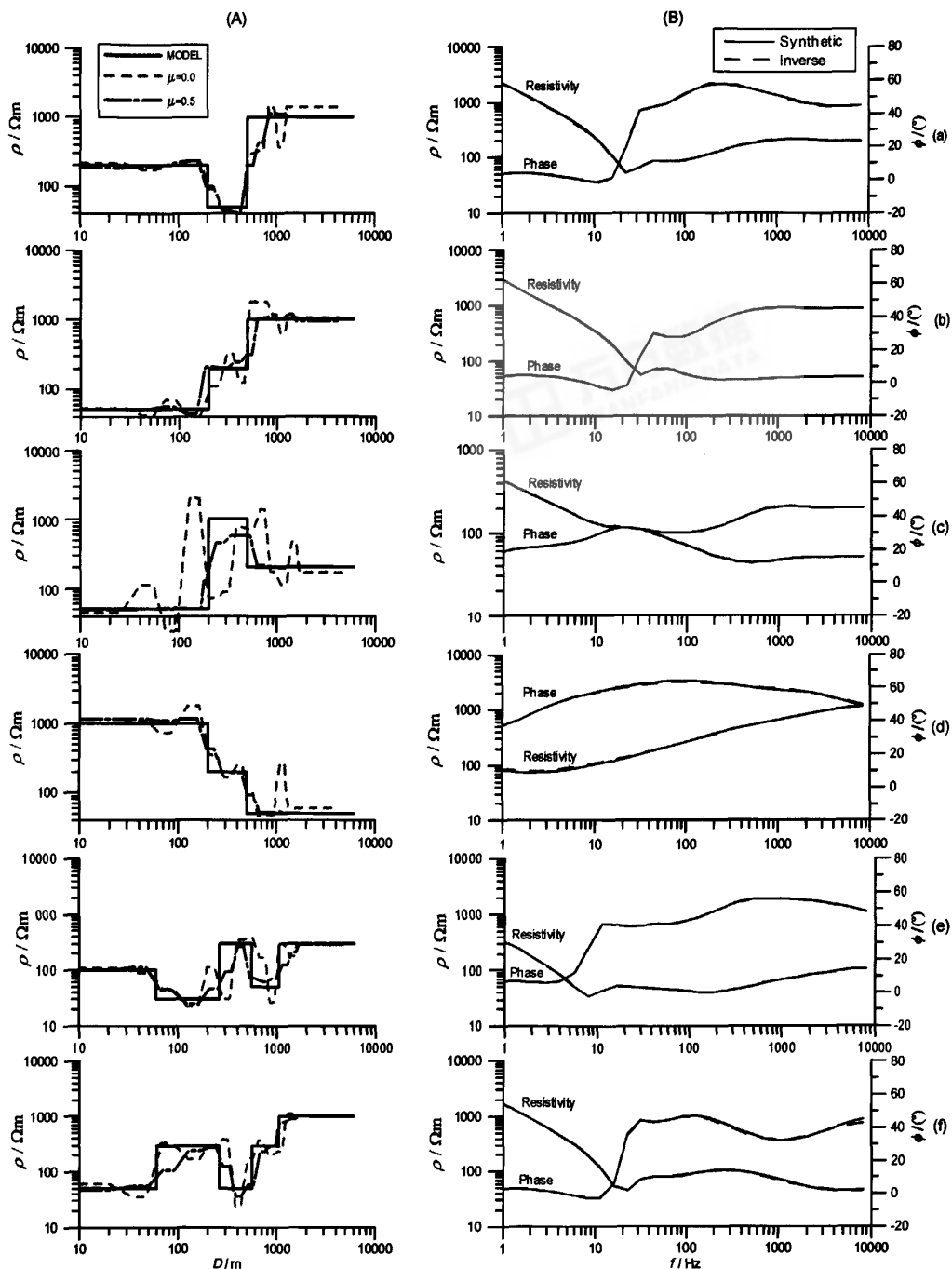


图 6 模型反演结果

(A)模型与反演结果对比图;(B)正演曲线与反演的响应曲线对比图($\mu=0.5$);
 (a) H 型;(b) A 型;(c) K 型;(d) Q 型;(e) HKH 型;(f) KHA 型.

Fig. 6 Inversion result of models

(A)Model and inverted result;(B)Forward and inversed curves($\mu=0.5$).

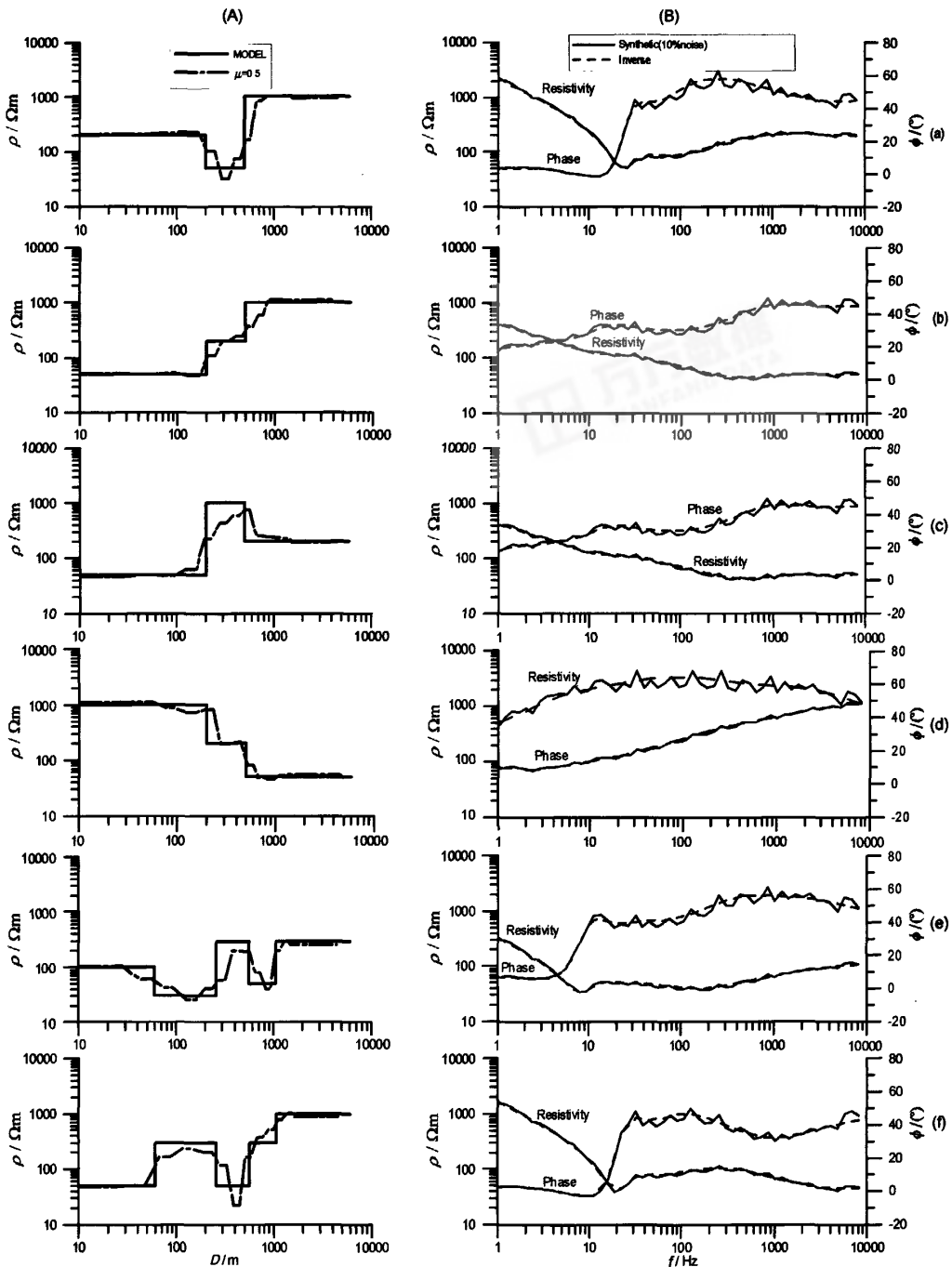


图 7 模型加入 10% 噪声后的反演结果

(A)模型与反演结果对比图;(B)正演曲线与反演的响应曲线对比图($\mu=0.5$);

(a) H 型;(b) A 型;(c) K 型;(d) Q 型;(e) HKH 型;(f) KHA 型.

Fig. 7 Inversed result of models (added 10% noise)

(A)Model and inversed result; (B)Forward and inversed curves($\mu=0.5$).

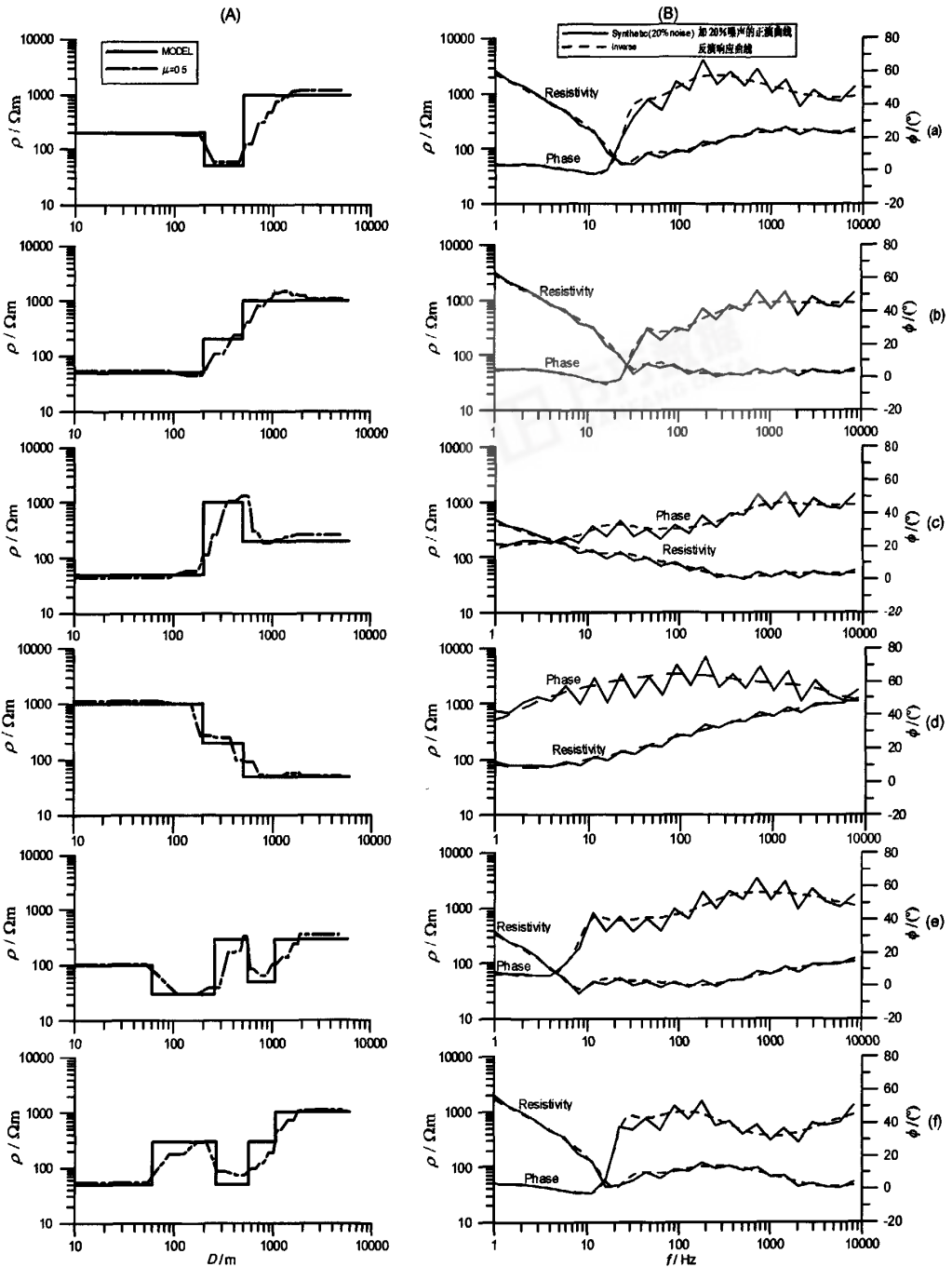


图 8 模型加入 20% 噪声后的反演结果

(A)模型与反演结果对比图;(B)正演曲线与反演的响应曲线对比图($\mu=0.5$);

(a) H 型;(b) A 型;(c) K 型;(d) Q 型;(e) HKH 型;(f) KHA 型.

Fig. 8 Inversed result of models (added 20% noise)

(A)Model and inversed result;(B)forward and inversed curves($\mu=0.5$).

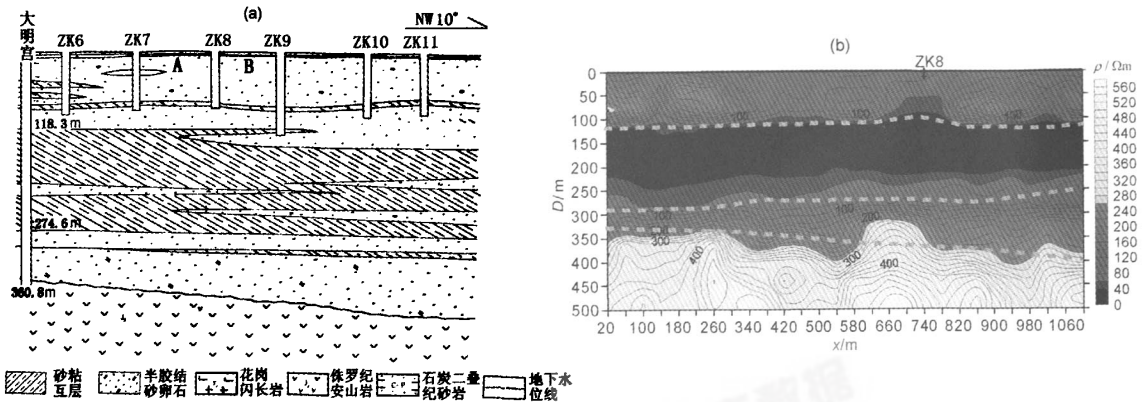


图 9 牛栏山水源八厂野外资料反演结果

(a)已知地质资料;(b)反演解释成果图。

Fig. 9 Inversion results of Niulanshan region

(a) Geology profile; (b) The inversion profile of the CSAMT method.

从图中可以看出,反演结果的分层与由钻孔控制的已知地质资料吻合,说明该方法可用于野外水平层状资料的处理。

5.2 横向变化地层

北京某地的地表水因水质原因,不能满足饮用水部分的需求,拟在区内或就近区域内建立基岩井水源,因该区所在地受南苑—通县断裂等地质条件限制,适合基岩井的范围较小,且区内地质情况不明.需勘查清楚南苑—通县断裂的位置、产状;基岩起伏、地下灰岩分布范围,以及可能存在的次级断裂位置及富水性。

根据具体情况,我们选用了 CSAMT 法,在该区布置了多条测线,测量时收发距为 6.4 km, AB=1000 m,点距为 40 m,工作频率 2¹⁰~2⁹ Hz. 以下举

其中的 1750E 线为例说明本方法的实用性.反演参数与 5.1 节一样,反演结果见图 10.

从图 10 上看,大致以 700 号点为界,两边无论在浅表覆盖层还是深部岩层的电阻率上都有很大的差异,左边从地表至 200 m 左右为低阻区,推断为黏土、沙质黏土、粗砂砾石等覆盖层.200m 以下为高阻区,推测为基岩灰岩层.700 号点以右至 1300 点 150 m 深度以下的电阻率很低,推测为第四系、第三系覆盖层黏土、沙质黏土、粗砂砾石以及泥质砂岩所引起的电性特征。

从整体上看,该方法清晰的辨别了断层的位置和产状(见图 10 中的白色实线)。

说明该方法可用于野外横向变化地层资料的处理。

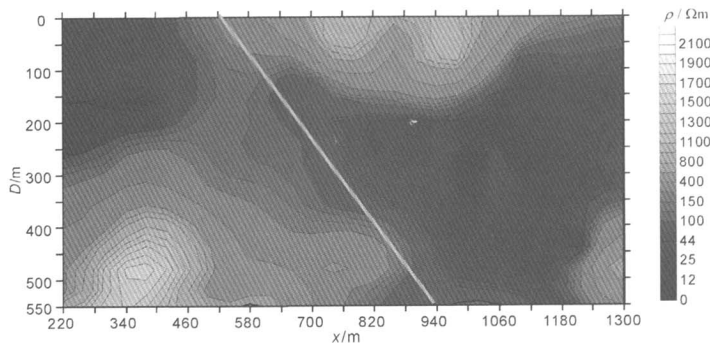


图 10 北京某地野外资料反演结果

Fig. 10 Inversion results in somewhere of Beijing

6 结 论

本文采用遗传算法对 CSAMT 数据进行反演研究,为了减小地球物理反演非惟一性的影响,引入了最小构造约束,经过模型试验找到了最小构造目标函数 $R(m, f)$ 的具体表达式(文中表达式(9)),以及无条件约束时目标函数中拉格朗日乘子的最佳取值 $\mu=0.5$,形成了基于遗传算法的 CSAMT 最小构造反演。

首先对三层 H、A、K、Q 和五层 HKH、KHA 等模型进行了数值试验,在不加噪声的情况下,反演取得良好效果,很好地反映了真实模型的电性结构;在加入 10% 噪声的情况下,除了 A 型的中间层和 KHA 型的第四层反映不如不加噪声时的反演结果外,其他的还是较好地反映了真实模型的电性结构;在加入 20% 噪声的情况下,除了 A 型的中间层和 KHA 型的第四层反映不明显外,反演结果和真实模型基本吻合。表明该方法具有较高的精度、较好的稳定性、较强的去虚假多余构造和抗噪能力。

数值试验过程中,各模型的分辨率随噪声强度的增大都有所降低,其中 A 和 KHA 型的分辨率降低得比较明显,A 型的中间层和 KHA 型的第四层的分辨率随着噪声的增强逐步降低。这是 A 型断面上视电阻率对中间层参数的变化不灵敏,具有等值现象造成的。也就是说,CSAMT 对电阻率具有连续上升趋势的断面的中间高阻层是不敏感的^[3]。

利用该反演方法,对北京水源八厂和北京某地的 CSAMT 实测数据进行了反演,北京水源八厂 CSAMT 数据的反演结果与由钻井资料控制的地质结构基本一致,表明本方法对水平分层地层的数据反演是有效的;北京某地 CSAMT 数据的反演结果很好地显示了南苑一通县断裂的位置、产状以及基岩的起伏,表明本方法对横向变化地层的数据反演也是有效的。

本文提出的方法属于非线性方法,但仍存在解的非惟一性问题。通过引入最小构造约束和实行对数等间隔分层,大大降低了解的非惟一性,提高了反演的稳定性、可靠性和精度,是一种值得推荐的非线性反演方法。

此外,利用本文方法,无论是进行数值实验还是野外数据处理,都取得了理想的结果。

致 谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所石昆法研究员提供的原始数据,同时感谢安志国、付长

民和岳安平博士给予的真诚帮助。

参考文献(References)

- [1] 何继善. 可控源音频大地电磁法. 长沙:中南工业大学出版社,1990
He J S. Control Source Audio-frequency Magnetotellurics (in Chinese). Changsha: Central South University of Technology Press, 1990
- [2] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用. 北京:科学出版社,1999
Shi K F. Theory and Application of CSAMT Method (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [3] 汤井田,何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用. 长沙:中南大学出版社,2005
Tang J T, He J S. Theory and Application of CSAMT Method (in Chinese). Changsha: Central South University Press, 2005
- [4] 朴化荣. 电磁测深法原理. 北京:地质出版社,1990
Piao H R. The Principle of Electromagnetic Sounding (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1990
- [5] 龚 飞,底青云. 某煤矿典型 CSAMT 法视电阻率曲线的一维模拟. 地球物理学进展,2004,19(3): 631~634
Gong F, Di Q Y. 1-D Simulation on model apparent resistivity curve of CSAMT method in certain mine. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004,19(3):631~634
- [6] 于昌明. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用. 地球物理学报,1998,41(1):133~138
Yu C M. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, 41(1):133~138
- [7] Cagniard L. Principle of the magnetotelluric method, a new method of geophysics prospecting. *Ann de Geophys*, 1953, 9:95~125
- [8] 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月. 复杂介质有限元 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟. 地球物理学报,2004,47(4):723~730
Di Q Y, Unsworth M, Wang M Y. 2.5D CSAMT modeling with the finite element method over 2D complex earth media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):723~730
- [9] 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月. 有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟. 地球物理学进展,2004,19(2):317~324
Di Qing-yun, Unsworth M, Wang Miao-yue. 2.5 D CSAMT modeling with finite element method. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004,19(2):317~324
- [10] 吴璐萍,石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究. 地球物理学报,1996,39(5):712~717
Wu L P, Shi K F. Application of CSAMT to the search for ground water. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, 39(5):712~717
- [11] 徐世浙,刘 斌. 电导率分层连续变化的水平层的大地电磁正演. 地球物理学报,1995,38(3):262~268
Xu S Z, Liu B. A numerical method for calculating MT field

- on a layered model with continuous change of conductivity in each layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, **38**(3): 262~268
- [12] 底青云,王妙月,石昆法等. 高分辨率 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 1~5
Di Q Y, Wang M Y, Shi K F, et al. An applied study on prevention of water bursting disaster in mines with the high resolution V6 system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 1~5
- [13] Routh P S, Oldenburg D W. Inversion of controlled source audio-frequency magnetotelluric data for a horizontal-layered earth. *Geophysics*, 1999, (6): 1689~1697
- [14] Xinyou Lu, Martyn Unsworth, John Booker. Rapid relaxation inversion of CSAMT data. *Geophys. J. Int.*, 1999, **138**: 381~392
- [15] 王 若,王妙月. 一维全资料 CSAMT 反演. *石油地球物理勘探*, 2007, **42**(1): 107~114
Wang R, Wang M Y. Inversion of 1-D full CSAMT data. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2007, **42**(1): 107~114
- [16] 王光杰,王 勇,李帝铨等. 基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究. *地球物理学进展*, 2006, **24**(4): 1285~1289
Wang G J, Wang Y, Li D Q, et al. The application of Genetic Algorithm to CSAMT inversion. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **24**(4): 1285~1289
- [17] 王兴泰,李晓芹,孙仁国. 电测深曲线的遗传算法反演. *地球物理学报*, 1996, **39**(2): 279~285
Wang X T, Li X Q, Sun R G. The inversion of resistivity sounding curve using genetic algorithms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2): 279~285
- [18] 张晓缙,戴冠中,徐乃平. 一种新的优化搜索算法—遗传算法. *控制理论与应用*, 1995, **12**(3): 265~273
Zhang X H, Dai G Z, Xu N P. Genetic Algorithms—A new optimization and search algorithms. *Control Theory and Applications* (in Chinese), 1995, **12**(3): 265~273
- [19] 刘云峰,曹春雷. 一维大地电磁测深的遗传算法反演. *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 algorithms. *Journal of Zhejiang University* (Natural Science) (in Chinese), 1997, **31**(3): 300~304
- [20] 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. *地球物理学报*, 2000, **43**(1): 122~130
Shi X M, Wang J Y, Zhang S Y, et al. Multiscale genetic algorithm and its application in magnetotelluric sounding data inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(1): 122~130
- [21] 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. *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. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, **39**(5): 594~599
- [22] Torquil Smith J, John R. Booker. Magnetotelluric inversion for minimum structure. *Geophysics*, 1988, **53**(12): 1565~1576
- [23] Steven C, Constable, et al. Occam's inversion— A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 1987, **52**(3): 289~300
- [24] 李 刚,薛惠锋,邢书宝等. 遗传算法求解精度与种群大小的函数关系. *计算机技术与发展*, 2006, **16**(7): 96~98
Li G, Xue H F, Xing S B. Function of genetic algorithms solution precision to population size. *Computer Technology and Development* (in Chinese), 2006, **16**(7): 96~98
- [25] 殷长春. 可控源音频大地电流法—维正演及精度评价. *长春地质学院学报*, 1994, **24**(4): 438~453
Yin C C. One dimensional modeling of CSAMT method and evaluation of calculation precision. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (in Chinese), 1994, **24**(4): 438~453
- [26] 万 乐,罗延钟等. CSAMT 一维正演的快速近似计算. *中国地球物理学会年刊*. 北京:地震出版社, 1993
Wan L, Luo Y Z. The fastly and approximately 1D forward of CSAMT. *Annual of Chinese Geophysical Society*. Beijing: Seismological Press, 1993
- [27] 吴小平. 利用共轭梯度方法的电阻率三维反演若干问题研究. *地震地质*, 2001, **23**(2): 321~327
Wu X P. Study on some problems for 3D resistivity inversion using conjugate gradient. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, **23**(2): 321~327

(本文编辑 汪海英)