

程久龙, 李明星, 肖艳丽等. 2014. 全空间条件下矿井瞬变电磁法粒子群优化反演研究. 地球物理学报, 57(10):3478-3484, doi:10.6038/cjg20141033.

Cheng J L, Li M X, Xiao Y L, et al. 2014. Study on particle swarm optimization inversion of mine transient electromagnetic method in whole-space. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10):3478-3484, doi:10.6038/cjg20141033.

全空间条件下矿井瞬变电磁法粒子群优化反演研究

程久龙¹, 李明星², 肖艳丽³, 孙晓云¹, 陈丁¹

1 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

2 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077

3 中国航天科技集团航天天绘科技有限公司西安分公司, 西安 710000

摘要 煤矿井下矿井瞬变电磁法(MTEM)探测中, 电磁场呈全空间分布, 全空间瞬变电磁反演是复杂的非线性问题, 目前反演计算中全空间响应主要由半空间响应乘以全空间响应系数来得到, 导致反演结果中顶板和底板异常(或前方和后方异常)叠加在一起难以分离, 造成分辨率下降. 论文提出采用粒子群优化算法(PSO)进行全空间 MTEM 反演, 通过理论分析, 在常规的粒子群算法基础上提出了一种新的进化公式改进策略, 提高了粒子群算法的寻优能力. 基于全空间瞬变电磁场理论, 编写了粒子群算法反演程序, 进行全空间条件下五层含巷道的复杂模型的反演计算. 结合某矿井巷道顶板、底板岩层及断层含水性的探测实例, 对实测数据进行反演计算和解释, 探测结果得到钻探证实. 研究表明, 改进的粒子群优化算法对理论模型和实际资料的反演拟合程度较高, 实现了矿井顶板、底板视电阻率异常的分离, 提高了全空间瞬变电磁勘探资料的解释精度和分辨率.

关键词 矿井瞬变电磁法; 全空间; 改进型粒子群优化算法; 非线性反演

doi:10.6038/cjg20141033

中图分类号 P631

收稿日期 2013-12-06, 2014-09-09 收修定稿

Study on particle swarm optimization inversion of mine transient electromagnetic method in whole-space

CHENG Jiu-Long¹, LI Ming-Xing², XIAO Yan-Li³, SUN Xiao-Yun¹, CHEN Ding¹

1 State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2 Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China

3 Aerors Inc Xi'an Branch of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710000, China

Abstract In underground mining detecting using the mine transient electromagnetic method (MTEM), electromagnetic field is of whole-space distribution. Mine transient electromagnetic inversion in whole-space is nonlinear and complicated. At present, whole-space response is mainly obtained by the product of half-space response and the whole-space response coefficient in conventional inversion, which makes the anomalies of roof and floor (or front and rear) overlap together and difficult to separate, thus the resolution decreases. In this paper, particle swarm optimization (PSO) was adopted for whole-space inversion of MTEM. Based on theoretical analysis and standard particle swarm optimization algorithm, a new evolution formulation was proposed to improve the optimization ability. Particle swarm optimization inversion program was compiled based on whole-space transient electromagnetic field theory, and then the inversions of a

基金项目 国家自然科学基金项目(51034003, 51174210, 51274144); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120023110014); 中国博士后科学基金项目(2013T60197) 资助.

作者简介 程久龙, 男, 1965 生, 教授, 博士生导师, 主要从事应用地球物理的理论与方法研究. E-mail: jlcheng@126.com

complex five-layer model in whole-space were made respectively. Combined with a case of detecting water-bearing zone of mine roadway roof and floor rock mass and fault, the results of inversion calculation and interpretation for the surveyed data were confirmed by drilling. The research showed that the inversion fitted well for theoretical model and the surveyed data respectively by the improved particle swarm algorithm, the separation of the mine roof and floor apparent resistivity anomalies was realized, and the accuracy and resolution of whole-space transient electromagnetic detection were improved.

Keywords Mine transient electromagnetic method (MTEM); Whole-space; Improved PSO algorithm; Nonlinear inversion

1 引言

瞬变电磁法在矿井水文地质调查中具有广泛的应用,取得了很好的地质效果.近些年来,矿井全空间瞬变电磁法主要用于巷道及工作面顶板、底板含水探测、巷道迎头含水构造超前探测等(于景邨, 2007).在数据处理方面,常规计算处理还是按照半空间理论进行(牛之琏, 2007).在瞬变电磁反演方面,目前实际勘探中主要是一维线性反演,由于瞬变电磁反演是复杂的非线性问题,线性化处理的方法越来越难以满足反演工作的需要.近年来,许多地球物理工作者进行了非线性反演研究,提出了多种非线性反演方法,如:模拟退火法、人工神经网络法、遗传算法等,取得了一些研究成果(Somanath M, 2008).

粒子群优化算法是一种比较新的算法,进化公式相对简单,寻优效果较好,但其应用于地球物理反演的研究比较少,且多以研究地震波阻抗反演和大地电磁反演为主.易远元等(2007)利用粒子群算法实现了地震波阻抗反演,李刚毅等(2008)同样实现了波阻抗的粒子群算法反演,韩瑞通等(2009)利用交叉粒子群算法实现了大地电磁反演,师学明等(2009)研究了一种新的惯性因子递减策略,并将其应用于大地电磁反演取得了较好效果,张进(2009)对粒子群算法进行研究并实现了地震叠前数据的弹性阻抗非线性反演.

相比于以往的半空间反演,全空间反演问题更加复杂.全空间瞬变电磁正演计算及相应算法计算过程更加繁琐;正反演所建模型为全空间模型,建模时不仅考虑到正常地层的电性差异,而且需要考虑巷道空间的存在;反演结果需实现顶底板异常的分离.针对全空间瞬变电磁反演是非线性问题,且在实际中顶板和底板异常叠加在一起难以分离的现状,对粒子群优化算法进行深入研究,提出一种新的改

进策略,利用改进型粒子群优化算法编写全空间瞬变电磁法非线性反演程序,将其应用于理论模型及现场实测资料反演.

2 全空间瞬变电磁正反演算法及改进

2.1 正演算法

一些学者研究了全空间介质中回线源产生电磁场的传播规律,分析讨论了相应的瞬变电磁响应计算公式.对全空间介质,Stefi Krivochieva 等(2002)提出有限大小回线源产生电磁场中任意深度点电磁场分量计算方法.假设一全空间层状模型,则在第 i 层深度为 z 的点 $P(i, z)$ 处对应的电场分量 E_ϕ 和磁场分量 H_r 可用下式表示:

$$E_\phi(i, z) = \frac{i\omega\mu}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^2 \tilde{E}_\phi(i, z) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

$$H_r(i, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^2 \tilde{H}_r(i, z) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

式中, J_1 为一阶贝塞尔函数, λ 为汉克尔变换积分变量, r 为收发距, $\tilde{E}_\phi(i, z)$ 和 $\tilde{H}_r(i, z)$ 为输入函数.

对式(1)和式(2)汉克尔变换式, Guptasarma 等(1997)提出了一种数值滤波计算方法,具有较快的计算速度和较高的计算精度.

2.2 粒子群算法原理

James Kennedy 等(1995)在 Craig W. Reynolds 提出的描述鸟寻找食物的 Boid 模型基础上提出了粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO).算法中,将鸟简化为粒子(Particle),粒子的位置代表最优化问题中的可能解,食物的位置代表最优解,所有粒子在一定的规则下,向着最优解位置运动.对于地球物理反演,粒子与最优解间的距离即是地球物理反演问题中目标函数的适应度.

假设群体有 m 个粒子组成,最优解搜索空间为 n 维,则第 k 次迭代中,第 i 个粒子在 n 维搜索空间

中的速度:

$$V_i^k = (v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, \dots, v_{i,j}^k, \dots, v_{i,n}^k), \quad (3)$$

第 i 个粒子在 n 维搜索空间中的位置:

$$X_i^k = (x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, \dots, x_{i,j}^k, \dots, x_{i,n}^k), \quad (4)$$

第 i 个粒子个体最优位置:

$$PbestX_i^k =$$

$$(pbestx_{i,1}^k, pbestx_{i,2}^k, \dots, pbestx_{i,j}^k, \dots, pbestx_{i,n}^k), \quad (5)$$

群体最优位置:

$$GbestX^k =$$

$$(Gbestx_1^k, gbestx_2^k, \dots, gbestx_j^k, \dots, gbestx_n^k), \quad (6)$$

(6)式中,粒子序号 $i = 1, 2, \dots, m$, 迭代次数 $k = 1, 2, \dots, \text{iter max}$, iter max 是粒子群寻优过程允许的最大迭代次数。

寻优开始时,粒子群算法首先在搜索区域范围内随机初始化 m 个粒子,作为迭代初始值.之后粒子根据下面公式实时更新自己的速度及位置:

$$v_{i,j}^{k+1} = v_{i,j}^k + c_1 r_1 (pbestx_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (gbestx_j^k - x_{i,j}^k), \quad (7)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}, \quad (8)$$

式(7)和式(8)即为粒子群算法基本公式,其中, j 为搜索空间的维度, i, k 及 $v_{i,j}^k, x_{i,j}^k, pbestx_{i,j}^k, gbestx_j^k$ 与上面定义相同. c_1 和 c_2 为学习因子,通常取 $c_1 = c_2 = 2$, r_1, r_2 为 $(0, 1)$ 之间均匀分布的两个随机数。

2.3 粒子群算法改进

粒子群算法提出以后,在许多领域显示了优异的寻优能力,引起了众多学者的关注.一些研究人员系统地讨论了粒子群算法的寻优原理,针对基本粒子群算法在某些寻优问题中表现欠佳的问题,提出了相应的改进策略(Shi and Russell, 1998; Clerc and Kennedy, 2002; Yen et al., 2008; Chen and Zhang, 2010; 赵玉静, 2011; 林卫星和陈炎海, 2011; Roy et al., 2012)。

Shi and Russell(1998)对基本粒子群算法进行了优化,重点分析了速度更新公式中各个参数对搜索效率的影响,对速度更新公式进行了改进,首次提出了惯性因子 ω 的概念, ω 随迭代次数线性递减,并以相关实验证明了加入惯性因子后大大加强了粒子群算法的寻优能力.修改后的速度更新公式如下:

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + c_1 r_1 (pbestx_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (gbestx_j^k - x_{i,j}^k), \quad (9)$$

式中, ω 为惯性因子,取值如下:

$$\omega(k) = \frac{\text{iter max} - k}{\text{iter max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) + \omega_{\min}, \quad (10)$$

式中, ω_{\max} 为惯性因子最大值,一般取 0.9, ω_{\min} 为

惯性因子最小值,一般取 0.4。

林卫星等(2011)在二阶系统理论前提下,根据最佳阻尼比原理提出了一种新的速度公式:

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + \varphi_1 (pbestx_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \varphi_2 (gbestx_j^k - x_{i,j}^k), \quad (11)$$

其中, $\omega = 1 + \varphi_1 + \varphi_2 - \sqrt{(\varphi_1 + \varphi_2)(2 + \varphi_1 + \varphi_2)}$, $\varphi_1 = c_1 \text{rand}()$, $\varphi_2 = c_2 \text{rand}()$, $\text{rand}()$ 是取值范围 $(0, 1)$ 的随机数。

赵玉静(2011)将速度更新公式中,从粒子当前位置指向群体最优粒子位置的位移向量用从粒子个体最优位置指向群体最优位置的位移向量来代替,则有新的粒子速度更新公式:

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + c_1 r_1 (pbestx_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (gbestx_j^k - pbestx_{i,j}^k), \quad (12)$$

式(12)中惯性因子 ω 与式(10)一致。

为了进一步提高粒子群算法的寻优能力,结合全空间瞬变电磁反演计算实际,借鉴林卫星等(2011)和赵玉静(2011)研究结果提出了以下改进策略:

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + \varphi_1 (pbestx_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \varphi_2 (gbestx_j^k - pbestx_{i,j}^k), \quad (13)$$

此时惯性因子 ω 随迭代次数取值满足二阶系统阻尼比原理,在系统收敛的前提下保证瞬变电磁反演计算中算法有较高的收敛速度(林卫星, 2011);在速度公式最后一项中引入群体最优位置与个体最优位置的位移矢量,使得粒子能更好的利用全局最优位置与个体最优位置信息,向着全局最优位置和个体最优位置搜索,加快算法的收敛速度。

为了确定上面提出的改进方法的收敛速度和寻优能力,对其效果进行对比测试. Shi and Russell (1998)提出的改进公式简记为 SPSO, 林卫星等(2011)提出的改进公式简记为 MPSO, 赵玉静(2011)提出的改进公式简记为 MSPSO, 本文提出的改进策略式(13)简记为 NPSO, 选用 Rosenbrock 函数和 Griewank 函数两组常用的测试函数对改进效果进行测试,计算维数为 10。

(1) Rosenbrock 函数:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2], \quad (14)$$

(2) Griewank 函数:

$$f_2 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1, \quad (15)$$

得到的粒子群改进算法寻优适应度与迭代次数关系如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在 Rosenbrock 函数和 Griewank

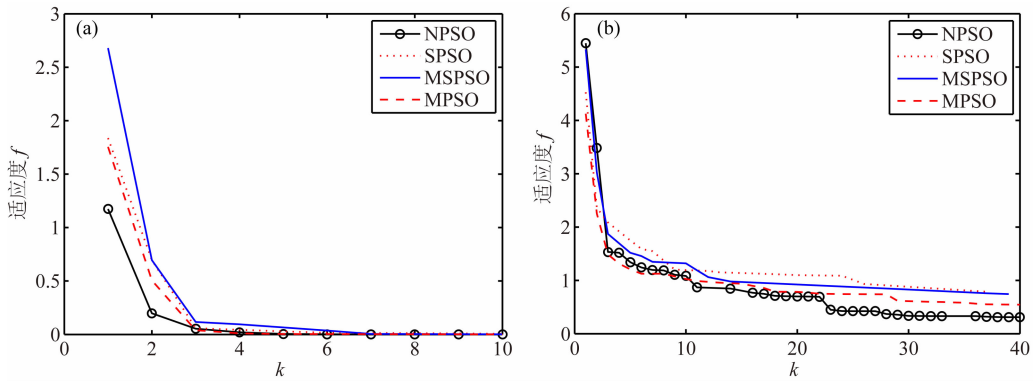


图1 不同改进策略测试函数适应度变化曲线

(a) Rosenbrock 函数; (b) Griewank 函数.

Fig. 1 The fitness change curves of testing functions of different improving methods

函数测试中,相同迭代次数时,本文提出的改进方法计算的测试函数适应度在四种方法中是最小的,说明相比其他三种方法,本文提出的改进方法提高了粒子群算法的寻优能力.

3 模型反演试算

基于上述改进的粒子群优化算法,编写了全空间条件下瞬变电磁法粒子群算法反演程序,进行反演计算和结果分析,并对反演效果进行检验.

建立与矿井巷道探测接近的全空间 5 层地电模型,模型参数设定如下:第 1 层到第 5 层电阻率分别为 60、10、10000、70、30 Ωm ;第 2 层到第 4 层厚度分别为 40、5、30 m,第 1 层及第 5 层厚度默认为无穷.第 3 层代表巷道空间,电阻率设为 10000 Ωm ,发射及接收位于巷道中间位置.

取场值的相对误差为目标函数:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{\text{obs}}(i) - H_{\text{cal}}(i)}{H_{\text{obs}}(i)} \right]^2,$$

其中, $H_{\text{obs}}(i)$ 为第 i 个采样道磁场的实测值,在理论模型反演计算中,此实测值用理论模型正值代替; $H_{\text{cal}}(i)$ 为反演模型计算的第 i 个采样道磁场的计算值.计算过程中,反演模型参数的取值范围按不小于理论模型参数的 $\pm 50\%$ 给定上下区间.表 1 是 5 层模型反演参数的取值范围及反演结果,图 2 是 5 层模型全空间条件下由理论模型参数计算的垂直磁场分量和由粒子群优化算法反演结果参数计算的垂直磁场分量对比以及反演计算过程拟合误差.从表 1 及图 2 中可以看出,粒子群优化算法反演结果较好地反映了理论模型的物性特征.参数反演结果中除第 3 层即巷道所在层位电阻率相对误差稍大外,其余各参数反演结果相对误差均较小,说明提出的改进型粒子群算法反演技术在理论模型反演中具有较好的反演效果.

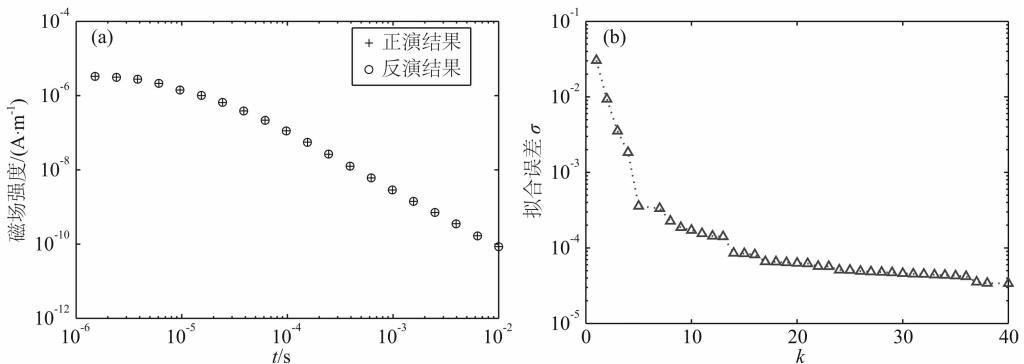


图2 全空间 5 层模型粒子群优化算法正反演对比

(a) 反演结果与理论模型正演结果对比; (b) 反演计算过程拟合误差.

Fig. 2 The contrast of PSO forward and inversion of five-layer model in whole-space

(a) The contrast of inversion results and forward results of theoretical model; (b) Fitting error of inversion.

表 1 全空间五层模型粒子群算法反演参数

Table 1 PSO inversion parameters of five-layer model in whole-space

模型参数	理论模型参数	取值范围	反演模型参数
$\rho_1/\Omega\text{m}$	60	[30,90]	59.6739
$\rho_2/\Omega\text{m}$	10	[5,20]	9.9238
$\rho_3/\Omega\text{m}$	10000	[5000,15000]	11862
$\rho_4/\Omega\text{m}$	70	[30,110]	78.4085
$\rho_5/\Omega\text{m}$	30	[15,45]	30.0125
h_2/m	40	[20,60]	40.2117
h_3/m	5	[2,10]	4.9669
h_4/m	30	[15,45]	30.7651

反演迭代次数为 60 次,反演拟合误差为 2.6826×10^{-7}

4 现场试验

为了检验粒子群优化算法在全空间瞬变电磁法探测资料处理中的反演效果,结合淮南煤田某矿井-700 m 中央行人下山巷道的顶板岩层及断层破碎带含水性矿井瞬变电磁法探测进行试验。

4.1 地质概况

-700 m 中央行人下山巷道自-430 m 回风石门拨门开始以 0° 方位向北施工,下山掘进至-700 m 水平,总长 1060 m. 受区域构造影响,巷道上下方总体构造形态为一推覆构造,原地系统由石炭二叠系煤系地层及其下伏地层组成. 地层走向近东西至北西西,倾向北,倾角 $4 \sim 30^\circ$,总体为一单斜构造. -700 m 中央行人下山巷道中间段要穿过 F10 断层, F10 断层是井田内区域性大断层,倾向 SW, 断层倾角上陡下缓,为 $70 \sim 25^\circ$,落差约 130 m,为正断层,该断层上与推覆体相接,下与太原组灰岩、奥陶系灰岩相交,切割深度较大. 根据巷道邻近位置巷道揭露地质资料分析: F10 断层影响带范围较大,断层附近小构造极为发育,岩石破碎,工程地质条件较差,同时在 F10 断层北部附近发育有一宽缓的小背斜,次一级的褶曲比较发育. -700 m 中央行人下山巷道掘进过 F10 断层中,在断层附近顶板出现淋水,为查明该位置顶板岩层及断层的富水特征,进行矿井瞬变电磁法探测。

4.2 数据采集与预处理

现场数据采集使用矿井瞬变电磁仪,采用偶极-偶极装置,发射线框为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的 64 匝矩形线圈,收发距为 8 m,接收装置为有效面积为 31.4 m^2 的高频接收线圈,巷道内没有其他明显电磁噪声干

扰. 数据采集从 0 号点开始,测点距为 10 m,共 11 个测点,测线长度 100 m. 供电电流 2.2 A,测道时间为 $6.8 \times 10^{-6} \sim 6.978 \times 10^{-3}\text{ s}$,磁场的多测道实测值如图 3 所示. 利用相关软件对原始数据进行预处理,插值加密后得到垂直磁场分量数据。

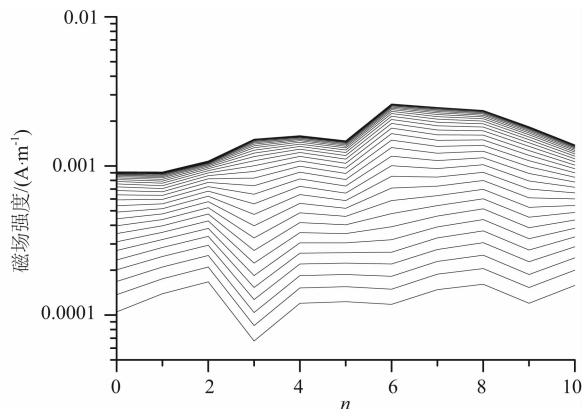


图 3 多测道实测曲线

Fig. 3 The multi-path survey data curves

4.3 初始模型与反演计算

根据探测区内 L5 钻孔柱状、电测井资料及巷道揭露岩层地质资料,对每个测点不同层厚度和视电阻率取值范围进行设定. 将 11 个测点的垂直磁场分量数据依次导入编制的全空间粒子群优化算法反演程序中,进行反演计算. 反演过程粒子群算法粒子个数设置为 40 个,最大迭代次数为 40 次,反演计算采用 15 层模型. 以 10 号测点为例,其反演拟合响应及拟合误差如图 4 所示,可以看出反演拟合效果较好. 对所有 11 个测点数据反演计算完成后,将计算结果成图,得到-700 m 中央行人下山巷道探测段视电阻率断面色谱图,并叠加到实际地层剖面上,如图 5 所示,图中纵坐标为地层标高,横坐标为地理坐标。

4.4 资料解释

从图 5 可以看出,瞬变电磁法全空间条件下非线性反演成功的将巷道顶板岩层视电阻率异常和底板岩层视电阻率异常分离开来. 巷道所在位置为一高阻区域,高阻区沿巷道成条带状分布,并向顶底板延伸一定的深度,由于瞬变电磁勘探存在一定深度的盲区,分析此高阻区为巷道空间及周围围岩的综合反映,且主要反映围岩电阻率特性. 顶板以上距巷道 $20 \sim 50\text{ m}$ 存在一条带状低阻区域,对应为砂岩地层,推测为砂岩局部弱含水区域,且在测线 $30 \sim 70\text{ m}$ 位置向上延伸至顶板以上 70 m 范围. 具体说来,在测线 $0 \sim 30\text{ m}$ 顶板以上距巷道 30 m 位置附

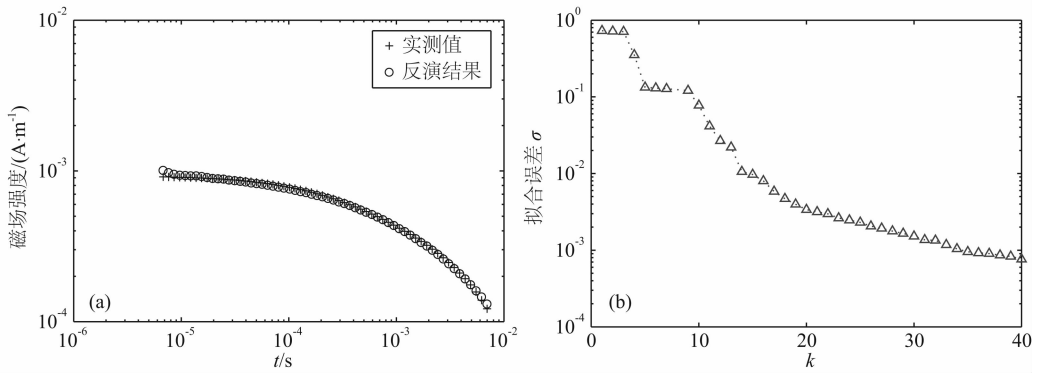


图 4 10 号测点实测数据粒子群算法反演

(a)反演拟合响应;(b)反演拟合误差.

Fig. 4 PSO inversion results of survey point No. 10

(a) Fitting response of inversion; (b) Fitting error of inversion.

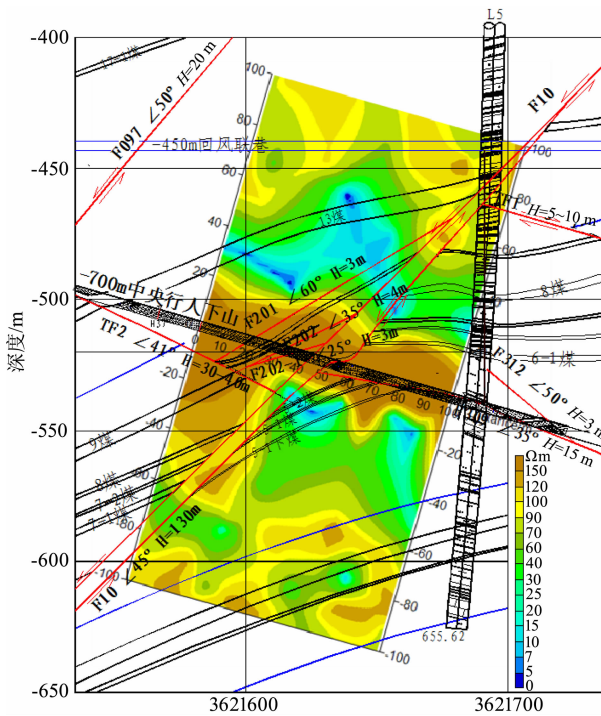


图 5 实测资料粒子群优化算法反演视电阻率断面图

Fig. 5 Apparent resistivity section of PSO inversion of survey data

近、测线 40~60 m 顶板以上距巷道 40~60 m 位置电阻率值相对较低,且对应岩层以砂岩地层为主,因视电阻率降低不大,推测为相对弱含水地层.与顶板岩层相比,底板岩层视电阻率值相对较高,仅在测线 40~60 m 及 80~90 m 两段,距巷道 10~30 m 位置存在两处相对低阻区,推测为可能的弱含水区域,该两处低阻区随深度增加视电阻率逐渐升高,接近正常岩层的视电阻率. F10 断层破碎带范围内视电阻率较高,说明 F10 断层在此断面上不含水,仅局部

视电阻率略低,是断层上下盘局部砂岩弱含水的反映, F10 断层对-700 m 中央行人下山巷道掘进不构成水害威胁.为了验证矿井瞬变电磁法对巷道顶板及 F10 断层含水性的探测结果,在巷道布置钻孔一个,对测线 70 m 距巷道 30 m 的顶板位置对应的低阻异常进行钻探验证,该钻孔穿过 F10 断层破碎带,仅出现淋水.矿井瞬变电磁法全空间反演结果与巷道顶板岩层实际水文地质状况吻合,瞬变电磁法探测成果得到验证.

5 结论

粒子群优化算法是一种较新的非线性算法,将其应用于瞬变电磁探测的理论模型反演计算结果表明:粒子群算法寻优效果较好,应用于全空间条件下瞬变电磁法反演具有较快的收敛速度及较高的计算精度.结合矿井巷道全空间瞬变电磁实测资料的反演计算,计算结果较真实地反映了实际地层含水情况,初步证实本文开发的改进型粒子群优化算法反演程序计算效果较好,对实测资料的反演拟合程度较高.文中提出的全空间瞬变电磁法粒子群优化算法反演实现了巷道顶板异常和底板异常的分离,提高了全空间瞬变电磁勘探资料的解释精度和分辨率.

References

Chen W N, Zhang J, Chung H S H, et al. 2010. A novel set-based particle swarm optimization method for discrete optimization problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 14(2): 278-300.

- Clerc M, Kennedy J. 2002. The particle swarm-Explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1): 58-73.
- Guptasarma D, Singh B. 1997. New digital linear filters for Hankel J_0 and J_1 transforms. *Geophysical Prospecting*, 45(5): 745-762.
- Han R T, Wang S M, Huang L S, et al. 2009. A modified particle swarm algorithm with crossover operator and its application in magnetotelluric data inversion. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 23(5): 223-228.
- Kennedy J, Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA: IEEE, 1942-1948.
- Krivochieva S, Chouteau M. 2002. Whole-space modeling of a layered earth in time-domain electromagnetic measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50(4): 375-391.
- Li G Y, Cai H P. 2008. Wave impedance inversion based on particle swarm optimization. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 31(3): 187-191.
- Lin W X, Chen Y H. 2011. Modified particle swarm optimization algorithm with fast convergence. *Journal of System Simulation* (in Chinese), 23(11): 2406-2411.
- Niu Z L. 2007. The Principle of Transient Electromagnetic Method (in Chinese). Changsha: Central South University Press.
- Roy R, Dehuri S, Cho S B. 2012. A novel particle swarm optimization algorithm for multi-objective combinatorial optimization problem. *International Journal of Applied Metaheuristic Computing* (IJAMC), 2(4): 41-57.
- Shi X M, Xiao M, Fan J K, et al. 2009. The damped PSO algorithm and its application for magnetotelluric sounding data inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(4): 1114-1120.
- Shi Y H, Eberhart R. 1998. A modified particle swarm optimizer. // IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK: IEEE, 69-73.
- Somanath M. 2008. Global optimization with application to geophysics. Edmonton: University of Alberta.
- Yen G G, Daneshyari M. 2008. Diversity-based information exchange among multiple swarms in particle swarm optimization. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 7(1): 57-75.
- Yi Y Y, Yuan S Y, Huang K, et al. 2007. Implementation of particle swarm algorithm in seismic wave impedance inversion. *Journal of Oil and Gas Technology* (in Chinese), 29(3): 79-81.
- Yu J C. 2007. Mine Transient Electromagnetic Prospecting (in Chinese). Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- Zhang J. 2009. Study on nonlinear inversion methods for elastic impedance of seismic prestack data [Ph. D. thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China.
- Zhao Y J. 2011. A modified particle swarm optimization algorithm and its application [M. S. thesis] (in Chinese). Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

附中中文参考文献

- 韩瑞通, 王书明, 黄理善等. 2009. 交叉粒子群算法在大地电磁反演中的应用. *工程地球物理学报*, 6(2): 223-228.
- 李刚毅, 蔡涵鹏. 2008. 基于粒子群优化算法的波阻抗反演研究. *勘探地球物理进展*, 31(3): 187-191.
- 林卫星, 陈炎海. 2011. 一种快速收敛的改进粒子群优化算法. *系统仿真学报*, 23(11): 2406-2411.
- 牛之琰. 2007. 时间域电磁法原理. 长沙: 中南大学出版社.
- 师学明, 肖敏, 范建柯等. 2009. 大地电磁阻尼粒子群优化反演法研究. *地球物理学报*, 52(4): 1114-1120.
- 易远元, 袁三一, 黄凯等. 2007. 地震波阻抗反演的粒子群算法实现. *石油天然气学报*, 29(3): 79-81.
- 于景邨. 2007. 矿井瞬变电磁法勘探. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 张进. 2009. 地震叠前数据的弹性阻抗非线性反演方法研究. 青岛: 中国海洋大学.
- 赵玉静. 2011. 改进的粒子群优化算法及应用. 广州: 华南理工大学.

(本文编辑 汪海英)