

基于粒子群优化的双频激电数据联合反演

崔益安^{1,2}, 李溪阳^{1,2}, 向恩明^{1,2}, 柳建新^{1,2}, 朱肖雄^{1,2}, 纪铜鑫^{1,2}, 佟铁钢^{1,2}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 双频激电法是一种非常有效的探测极化目标体的勘探方法, 可以同时观测获取视电阻率和极化率数据。为了提高双频激电观测数据解译的可靠性, 利用粒子群优化算法对电阻率数据和极化率进行联合反演。在对异常目标体采用旋转椭球体进行几何近似模拟的基础上, 基于 Core-Core 散射理论实现双频激电法的快速数值模拟计算, 为粒子群优化联合反演提供正演基础。在对粒子群优化算法参数进行分析设定的基础上设计了联合反演算法, 并采用加入不同程度噪声的模拟双频激电数据对算法进行了实验测试。测试结果表明: 粒子群优化联合反演算法能有效实现电阻率与极化率数据的联合反演, 具有很强的抗噪声能力, 且算法收敛快、稳定性好。进一步的实测数据联合反演测试还表明: 该算法具有较低的模型初始信息依赖性, 在给定较大搜索空间的条件下仍能反演出较为满意的结果模型, 具有较好的实用性。

关键词: 联合反演; 双频激电; 粒子群优化算法; 视电阻率; 极化率

中图分类号: P631

文献标志码: A

Joint inversion of dual frequency IP data using PSO

CUI Yi-an^{1,2}, LI Xi-yang^{1,2}, XIANG En-ming^{1,2}, LIU Jian-xin^{1,2}, ZHU Xiao-xiong^{1,2}, JI Tong-xin^{1,2}, TONG Tie-gang^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Dual frequency IP method is very effective to detect polarizable targets even in mountain terrains. Both resistivity and polarizability data can be observed during dual frequency IP measurement. In order to interpret dual frequency IP data quantitatively and more accurately, a joint inversion was proposed based on particle swarm optimization (PSO). Through simulating anomalies by ellipsoids, the forward of dual frequency IP can be given based on Core-Core theory, which provides the foundation to implement joint inversion by PSO. After selecting appropriate PSO algorithm parameters, the joint inversion is designed meticulously. Then synthetic data with noise in different degrees is used to test the joint inversion algorithm. The results of testing show that the joint inversion is effective to invert dual frequency IP data with high tolerance to noise and fast convergence. Further field data tests demonstrate that the PSO inversion is not sensitive to the initial model information. It can get a satisfactory result model even in a large given search space. That is very meaningful for interpreting field data in dual frequency IP observation.

Key words: joint inversion; dual frequency IP; particle swarm optimization; resistivity; polarizability

电阻率法和激发极化法是地球物理勘探中的重要方法。电阻率法在矿产勘探、地下水调查以及工程勘查等方面得到广泛应用^[1-2]。激发极化法在地下水以及

污染物的调查方面被认为是一种非常有效的方法^[3-4]。在许多场合, 特别是在环境和工程领域, 这两种方法经常被联合使用来提高勘探的准确度。MARTINHO

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103, 41274122, 41374119); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QNZT014); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAB04B08); 国家科技基础性工作专项(2013FY110800)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 向恩明, 博士; 电话: 0731-88877075; E-mail: csu-iag@csu.edu.cn

和 ALMEIDA^[5]采用电阻率法和激发极化法联合成像的方法来调查垃圾填埋场地周边的污染扩散情况。MARESCOT 等^[6]联合这两种方法来勘察评估瑞士阿尔卑斯山某滑坡体的稳定性。在双频激电法中,电阻率和极化率数据可以很方便地同时观测获得。实际勘探表明,联合使用这两种方法可以有效地减少数据解释的不确定性。何继善院士^[7]提出了双频激电这一新的勘探理论与方法并设计开发出相应的仪器。其主要特点是:通过发送包含高低两个频率成分的复合方波信号作为激励源,然后利用观测到的高低频率信号的压差来计算百分频效应(Percent frequency effect, PFE)以探查激发极化异常。同时,观测到的压差信号也可以用来计算出电阻率以探查视电阻率异常。双频激电最初主要针对有色金属矿产勘探提出,得到广泛应用,取得巨大成绩^[8-11]。近年来,由于其轻巧便利等特点在环境和工程领域也开始受到越来越多的关注^[12]。然而在实际观测中,电阻率数据和极化率数据虽然是同时观测获得的,但二者的反演解释却往往是分开进行的。

OLDENBURG 和 LI^[13]研究了通过观测存在极化效应和没有极化效应情况下的视电阻率来计算视充电率^[14]的方法,并采用迭代算法来反演极化率数据。强建科和何继善^[15]基于 Core-Core 散射理论提出双频激电极化率数据的反演方法,采用的最小二乘迭代算法属于局部方法,寻优计算过程中不可避免地需要计算灵敏度矩阵。由于群体的优势,粒子群智能优化算法提供了一种新的途径来处理复杂的地球物理反演问题。粒子群优化算法最早由 KENNEDY 和 EBERHART^[16]提出,是一种通过模仿生物群体觅食过程中的社会行为和个体行为来实现全局寻优的全局优化算法。粒子群优化算法需要调整的参数较少,易于实施,在许多领域得到广泛应用,最近粒子群优化算法开始应用在地球物理反演中。SHAW 和 SRIVASTAVA^[17]将粒子群优化算法的概念引入到地球物理数据反演中,取得成功。FERNÁNDEZ MARTÍNEZ 等^[3]采用粒子群优化算法反演自然电场数据来推断地下水位情况。SANTOS 和 EL-KALIOUBY^[18]研究了采用粒子群优化算法联合反演电磁数据和电阻率数据的方法。SANTOS^[19]还成功地将其应用到自然电场异常体目标的反演中。TRONICKE 等^[20]采用粒子群优化技术实现了电磁波跨孔层析成像。粒子群优化算法在这些地球物理反演研究中表现出许多优点。FERNÁNDEZ MARTÍNEZ 等^[21]发现其比快速模拟退火算法及遗传算法有更快的收敛速度。PEKSEN 等^[22]与 FERNÁNDEZ

MARTÍNEZ 等^[23]的研究均证明其鲁棒性较好,在一定程度上不易受数据噪声干扰影响。因此,本文作者采用粒子群优化算法来反演双频激电数据,实现电阻率与极化率的同步联合反演。

1 正演模型

如图 1 所示,地表水平的均匀介质中存在一倾斜角度为 α 的旋转椭球体,均匀介质和椭球体电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,椭球体的长、短轴半径分别为 a 和 c 。 xOy 为以椭球体长、短轴为坐标的直角坐标系, $x'Oy'$ 为地表水平面直角坐标系。

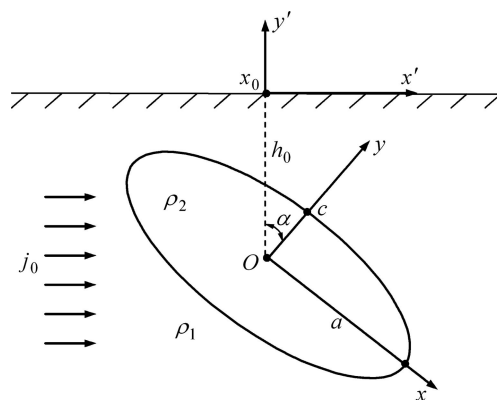


图1 椭球体与地表坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of ellipsoid and ground

地表任意观测点在两套坐标系统中的转换关系可表示为

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \alpha - (y' - h_0) \sin \alpha \\ y = (x' - x_0) \sin \alpha - (y' - h_0) \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

如在地表采用常用的中间梯度法观测,不考虑极化效应时的视电阻率异常 ρ_s 可表示为

$$\rho_s = \rho_1 \{1 - 2[V^x \cdot R \cdot \cos^2 \alpha + (V^x + V^y) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + V^y \cdot T \cdot \sin^2 \alpha]\} \quad (2)$$

式中: R 、 S 和 T 均为椭球体的几何参数, V^x 和 V^y 为椭球体的电性参数。

而当椭球体与围岩均被激发极化时,复视电阻率 ρ_j 可表示为

$$\rho_j = \rho_{j0} \left\{ 1 - m_j \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_j)^{c_j}} \right] \right\} = P_j + iQ_j \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} V^x = P_x - iQ_x \\ V^y = P_y - iQ_y \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2), 地表任意观测点的复视电阻率 ρ_j 可表示为

$$\rho_s(i\omega) = (P_1 - iQ_1) \{1 - 2[(P_x - iQ_x) \cdot R \cdot \cos^2 \alpha + (P_x + Q_x - i(Q_x + Q_y)) \cdot S \cdot \sin \alpha \cos \alpha + (P_y - iQ_y) \cdot T \cdot \sin^2 \alpha]\} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} P_x = \frac{(M-1)[4\pi + (M-1)L_0^x] + N^2 L_0^x}{[4\pi + (M-1)L_0^x]^2 + (N \cdot L_0^x)^2} \\ Q_x = \frac{4\pi N}{[4\pi + (M-1)L_0^x]^2 + (N \cdot L_0^x)^2} \\ P_y = \frac{(M-1)[4\pi + (M-1)L_0^y] + N^2 L_0^y}{[4\pi + (M-1)L_0^y]^2 + (N \cdot L_0^y)^2} \\ Q_y = \frac{4\pi N}{[4\pi + (M-1)L_0^y]^2 + (N \cdot L_0^y)^2} \\ M = \frac{P_1 P_2 + Q_1 Q_2}{P_2^2 + Q_2^2} \\ N = \frac{Q_1 P_2 + P_1 Q_2}{P_2^2 + Q_2^2} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 双频激电观测中高频信号的幅值 A_h 和低频信号的幅值 A_l 可以由下式计算得到:

$$\begin{cases} A_h = \sqrt{[\operatorname{Re}(\rho_s(i\omega_h))^2] + [\operatorname{Im}(\rho_s(i\omega_h))]^2} \\ A_l = \sqrt{[\operatorname{Re}(\rho_s(i\omega_l))^2] + [\operatorname{Im}(\rho_s(i\omega_l))]^2} \end{cases} \quad (7)$$

当存在多个椭球异常体时, 地表任意观测点观测到的信号幅值可由各个椭球体引起的异常值累加获得。根据式(2), 此时地表任意点的视电阻率异常表示为

$$\rho_s = \rho_1 \{1 - 2\sum [V^x \cdot R \cdot \cos^2 \alpha + (V^x + V^y) \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + V^y \cdot T \cdot \sin^2 \alpha]\} \quad (8)$$

最终, 根据双频激电理论, 以百分频效应表示的极化率可由下式计算获得:

$$F_s = \frac{\sum A_l - \sum A_h}{\sum A_h} \times 100\% \quad (9)$$

2 反演算法

反演就是通过一定的策略来估计符合要求的模型

参数:

$$m = (n_b, P_1^b, \dots, P_{n_b}^b) \quad (10)$$

式中: n_b 是椭球体的个数, P^b 是各椭球体的几何参数和电性参数,

$$P^b = (x_0, h_0, \alpha, a, c, \rho, m, \tau, c_f) \quad (11)$$

式中: x_0 和 h_0 是椭球体中心点的坐标, α 是倾斜角度, a 和 c 是椭球体的半轴长度, ρ 是椭球体的电阻率, m 是充电率, τ 是时间常数, c_f 是频率系数。

反演的模型参数需要满足观测数据 $R_{ob}(X)$ 、 $F_{sob}(X)$ 与计算预测数据 $R_{ca}(X)$ 、 $F_{sca}(X)$ 之间的偏差最小。最小偏差目标函数定义为

$$f = w_1 \|R_{ca}(X) - R_{ob}(X)\|_2 / \|R_{ca}(X)\|_2 + w_2 \|F_{sca}(X) - F_{sob}(X)\|_2 / \|F_{sca}(X)\|_2 \quad (12)$$

式中: w_1 和 w_2 分别为电阻率和极化率数据在参与数据偏差计算中的权重系数。

在粒子群优化算法中, 每个粒子被看成是多维空间中的一个没有质量与体积的点, 均代表相应优化问题的一个潜在的解, 其好坏由预设的适应度函数来评价。每个粒子根据其自身以及群体中其它同伴的经验在模型空间移动搜索, 每次移动的方向和距离由一个速度矢量来决定。通过不断迭代搜索, 粒子群追寻当前最佳粒子的轨迹从而最终搜索到全局最优解。

如果把定义的地球物理模型 m 看成一个粒子, 可以用一个多维矢量来描述, 其维数与待求解的反演问题的维数相同。解存在的搜索空间定义为

$$l_j \leq x_{ji} \leq u_j \quad (1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq N_{size}) \quad (13)$$

式中: l_j 和 u_j 分别为模型参数的搜索下限与上限, n 是待反演模型参数的个数, 而 N_{size} 为粒子群的规模, 即群体中粒子的数量。每个粒子在模型空间中均有自己的速度 $V_i(k)$ 与位置 $X_i(k)$ 。速度决定粒子在搜索最优解过程中位置的改变量, 每次迭代中各粒子的更新速度表示为

$$V_i(k+1) = \omega V_i(k) + r_1 a_g(g(k) - X_i(k)) + r_2 a_l(l_i(k) - X_i(k)) \quad (14)$$

式中的第1项为惯性项, 由粒子原来的速度乘以惯性系数 ω 来确定。第2项被称为社会学习项, 表示粒子当前位置与群体最优粒子位置 $g(k)$ 之间的距离, 系数 a_g 称为全局加速度。第3项被称为自我认知项, 表示粒子当前位置与其自身历史最优位置 $l_i(k)$ 之间的距离, 系数 a_l 称为局部加速度。 r_1 和 r_2 均为值在(0, 1)区间分布的随机单位矢量, 用来平衡粒子的全局与局

部加速度。

粒子的速度与位置通过每次迭代来更新:

$$\mathbf{X}_i(k+1)=\mathbf{X}_i(k)+\mathbf{V}_i(k+1) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{X}_i(k+1)$ 表示更新后的粒子位置, $\mathbf{X}_i(k)$ 为原来的位置。

采用粒子群优化算法来联合反演双频激电电阻率与极化率数据的流程图如图 2 所示。

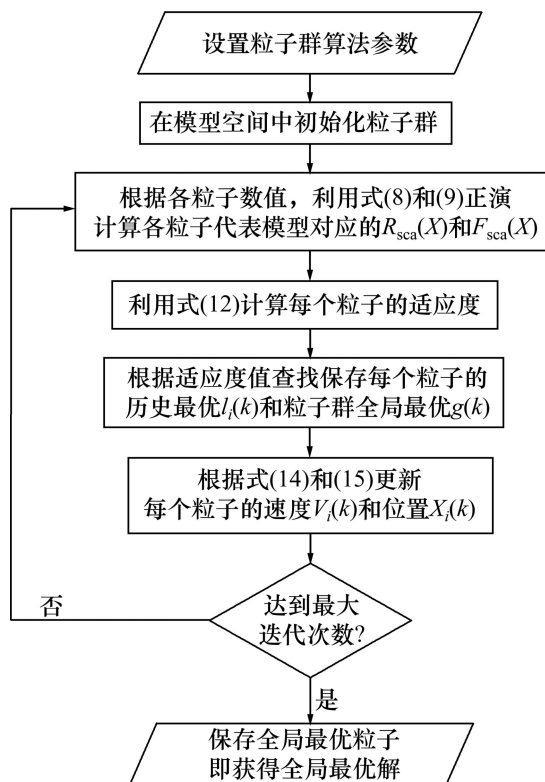


图 2 双频激电数据联合反演粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of PSO algorithm of joint inversion for dual frequency IP data

合理地设置算法参数是粒子群优化算法运行的基础, 这些参数包括粒子数量 N_{size} 、最大迭代次数 M 、惯性权重系数 ω 、全局加速度系数 a_g 以及局部加速度系数 a_l 。尽管 SHAW 和 SRIVASTAVA^[17]采用粒子数为 300 的粒子群对电测深数据反演并取得较好的效果, 但 ZHANG 等^[24]研究表明采用粒子数为 50 的粒子群就足够解决任何高维的反演问题。因此, 对于双频激电数据的联合反演算法的粒子数量 N_{size} 设置为 50, 而最大迭代次数 M 经过试验测试设置为 100, 在满足反演精度前提下尽量减少迭代计算量。

惯性权重系数 ω 、全局加速度系数 a_g 以及局部加速度系数 a_l 可以提供算法全局宽度搜索与局部深度搜索之间的平衡^[3]并控制收敛速度。很多文献资料提供

了一些效果比较好的系数搭配, 如 $(\omega, a_g, a_l)=(0.8, 2.0, 1.8)^{[25]}$ 和 $(\omega, a_g, a_l)=(0.6, 1.7, 1.7)^{[26]}$ 等。但具体的系数设置一般与具体的反演问题紧密相关, FERNÁNDEZ MARTÍNEZ 等^[21]证明了粒子群优化算法不存在通用的万能系数搭配。因此, 在经过试验测试后, 采用固定全局加速度系数与局部加速度系数, 线性递减惯性权重系数的策略来平衡算法的全局与局部搜索能力。全局加速度系数与局部加速度系数均设置为 2.0, 惯性权重系数从 0.9 开始线性递减到 0.4 结束:

$$\omega=0.9-(0.9-0.4)k/M \quad (16)$$

式中: k 为当前迭代次数。这样使算法开始具有较好的全局搜索寻优能力而结束时具备较好的局部搜索寻优能力^[27]。

3 实验测试

3.1 模拟数据测试

首先采用模拟合成的双频激电数据对联合反演算法进行了实验测试。数据模拟地表水平的均匀介质中存在 2 个椭球异常体引起的中梯装置双频激电观测电阻率与极化率异常。在正演计算中, 有许多参数影响极化率(PFE)结果。为简便起见, 均匀介质的电性参数设置为电阻率 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 、充电率 0.04、时间常数 1 s、频率系数 0.25。双频激电的低频频率和高频频率分别设定为 0.3 Hz 和 4 Hz。模拟地电模型中的 2 个椭球异常体参数见表 1。

为了模拟实测数据中各种误差与干扰, 在根据上述模型正演计算出的视电阻率和视极化率数据中人工加入不同程度的高斯噪声, 形成含噪声的模拟观测数据, 然后对其进行反演测试。

在实际双频观测中, 由于视极化率的绝对数值较小, 更容易产生观测误差, 因此, 在每次联合反演测试中, 视极化率数据中加入的噪声程度均大于视电阻率噪声程度, 目的是让模拟数据更加接近实测数据。共测试了若干组加入不同程度噪声的数据, 其中最具代表性的 3 组测试数据分别是: 测试数据 1, 在模拟数据的视电阻率数据中加入 10% 的高斯噪声, 视极化率数据则加入 20% 的高斯噪声; 测试数据 2, 在模拟数据的视电阻率数据中加入 20% 的高斯噪声, 视极化率数据则加入 40% 的高斯噪声; 测试数据 3, 在模拟数据的视电阻率数据中加入 40% 的高斯噪声, 视极化率数据则加入 80% 的高斯噪声。3 组典型数据的测试结果如图 3 所示。图 3 中虚线表示根据真实模型正演

表 1 模型椭球体参数

Table 1 Parameters of two ellipsoids

Ellipsoid	a/m	c/m	h_0/m	x_0/m	$\alpha/(^{\circ})$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	m	τ/s	c_f
1	6.0	4.0	7.0	-20.0	45.0	50.0	0.7	100	0.4
2	7.0	5.0	8.0	20.0	0.0	120.0	0.8	90	0.2

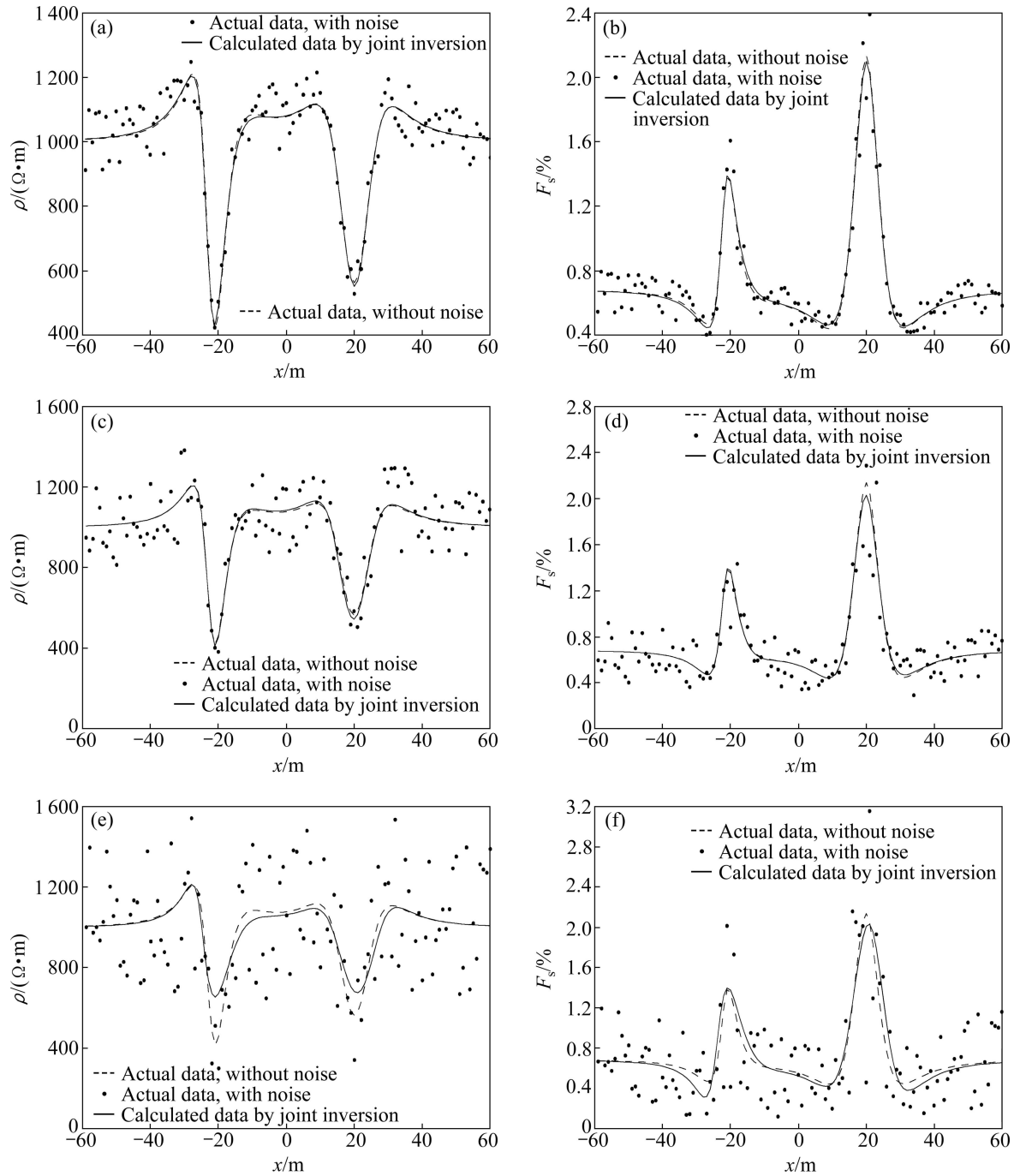


图 3 加入不同程度噪声的模拟数据与相应联合反演结果模型计算数据曲线对比: (a) 联合反演视电阻率(测试数据 1); (b) 联合反演视极化率(测试数据 1); (c) 联合反演视电阻率(测试数据 2); (d) 联合反演视极化率(测试数据 2); (e) 联合反演视电阻率(测试数据 3); (f) 联合反演视极化率(测试数据 3)

Fig. 3 Comparison between noisy data and predicted data from inverted model: (a) Apparent resistivity data (testing data 1); (b) PFE data (testing data 1); (c) Apparent resistivity data (testing data 2); (d) PFE data (testing data 2); (e) Apparent resistivity data (testing data 3); (f) PFE data (testing data 3)

计算未加任何噪声的数据, 离散点表示加入噪声数据, 实线表示对噪声数据反演获得最优结果模型计算出来的数据。对测试数据 1 进行反演计算, 获得的最优结果模型计算出来的视电阻率曲线与视极化率曲线如图 3(a)和(b)所示, 可以看出, 反演结果数据曲线与真实模型数据曲线基本吻合, 表明在这种噪声程度下, 粒子群优化反演算法完全不受噪声干扰的影响。对测试数据 2 进行反演计算时, 反演算法表现出很强的抗噪声能力, 同样获得不错的反演结果, 如图 3(c)和(d)所示。直至对加入了高达 40% 的视电阻率噪声和 80% 的视极化率噪声的测试数据 3 测试时, 如图 3(e)和(f)所示, 反演结果曲线与真实模型曲线的基本形态依然能大致吻合。

在对不同噪声程度的双频激电数据测试过程中, 记录的算法收敛曲线如图 4 所示, 强噪声情况下算法也具有较好的收敛性, 均在 20 次迭代前就达到稳定的收敛。

3.2 实测数据测试

然后利用联合反演算法对实测双频激电数据进行了计算测试。实测数据来自甘肃某矿区, 采用 SQ-3 型双频激电仪中间梯度扫面观测。测区地质资料表明该区覆盖较厚砂岩和灰岩, 含钼等多金属硫化矿脉以侵入体形式发育其中。标本测试表明: 地表覆盖层平

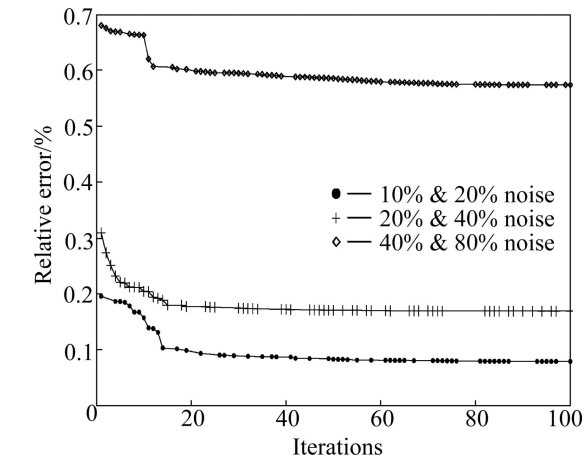


图 4 拟合差收敛曲线
Fig. 4 Variation of relative error with iterations

均电阻率为 1 500~2 000 $\Omega\cdot\text{m}$, 充电率为 0.03~0.06。某测线段观测视电阻率和视极化率数据如图 5 所示。

从观测视电阻率曲线可以看出: 可能存在 2 个异常体, 根据测区内的相关地质资料信息, 设定粒子群反演算法搜索空间如表 2 所列。

表 3 所列为异常体各参数的详细反演结果。根据反演解释结果, 分别在测点 1 125 和测点 1 435 附近布置了钻孔, 位于 1 125 处的钻孔在 28~53 m 深度出现钼镍多金属硫化矿, 而另一钻孔也在 50 m 深度处见到

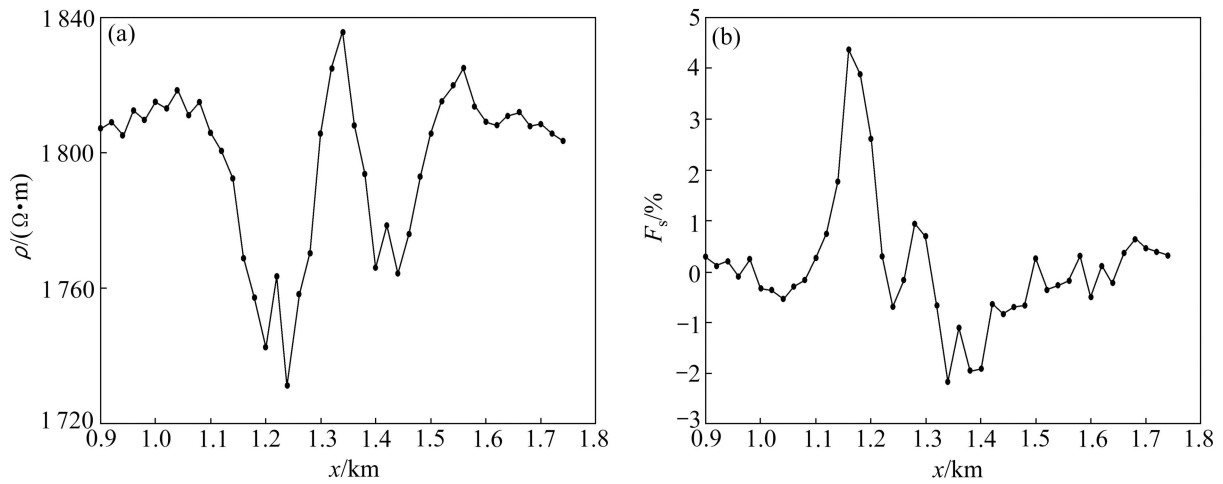


图 5 矿区实测双频激电数据: (a) 视电阻率; (b) 视极化率
Fig. 5 Observed dual frequency IP data from field: (a) Resistivity; (b) Polarizability

表 2 粒子群反演搜索空间

Anomaly	a/m	c/m	h_0/m	x_0/m	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	m	τ/s
1	20–200	5–100	20–150	1 050–1 350	–45–45	10–200	0.1–10	10–300
2	20–200	5–100	20–150	1 350–1 550	–45–45	10–200	0.1–10	10–300

表3 粒子群算法反演的异常体参数

Table 3 Predicted parameters from PSO inversion algorithm

Anomaly	a/m	c/m	h_0/m	x_0/m	$\alpha/^\circ$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	m	τ/s
1	80	26	61	1 125	-29	70	2.6	110
2	70	18	80	1 435	-30	75	2.0	46

辉钼矿化。两处钻孔验证均与反演推断情况基本相符，表明粒子群优化反演算法对实测双频激电数据也具有较好的反演效果。

4 结论

1) 利用粒子群优化算法能非常方便有效地实现对双频激电法观测的电阻率和极化率数据联合反演，联合反演有利于提高观测数据解释的可靠性。

2) 在对异常体进行旋转椭球体几何模拟的基础上，利用 Core-Core 散射理论可以实现对双频激电法观测到的多个目标异常体进行同时反演，提高数据解释的时效性。

3) 粒子群优化联合反演算法具有很强的抗噪声干扰能力，在强噪声情况下仍能搜索到符合数据拟合差要求的结果模型，并且算法收敛稳定较好。

4) 粒子群优化联合反演算法作为一种群体智能全局优化算法，跟局部优化方法相比，其初始条件要求非常低，在给定较大搜索空间的条件下仍可以搜索到满意的结果模型，这对实测数据反演非常有意义。

REFERENCES

[1] CHANDRA S, DEWANDEL B, DUTTA S, AHMED S. Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 71(4): 137-148.

[2] ZHU J, CURRENS J C, DINGER J S. Challenges of using electrical resistivity method to locate karsts conduits—A field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(3): 523-530.

[3] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ J L, GARCÍA-GONZALO E, NAUDET V. Particle swarm optimization applied to solving and appraising the streaming-potential inverse problem [J]. *Geophysics*, 2010, 75(4): WA3-WA15.

[4] Gallas José Domingos Faraco, Taioli Fabio, Filho Walter Malagutti. Induced polarization, resistivity, and self-potential: A case history of contamination evaluation due to landfill leakage

[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(2): 251-261.

[5] MARTINHO E, ALMEIDA F. 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: Case studies in Portugal [J]. *Environmental Geology*, 2006, 49(7): 1071-1078.

[6] MARESCOT L, MONNET R, CHAPPELLIER D. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps [J]. *Engineering Geology*, 2008, 98(1/2): 18-28.

[7] 何继善. 双频交流激发极化法初步研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1978, 2(1): 6-10.

HE Ji-shan. A preliminary study of dual frequency induced polarization method [J]. *Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy*, 1978, 2(1): 6-10.

[8] 柳建新, 刘春明, 佟铁钢, 刘海飞. 双频激电法在西藏某铜多金属矿带的应用[J]. 地质与勘探, 2004, 4(2): 59-61.

LIU Jian-xin, LIU Chun-ming, TONG Tie-gang, LIU Hai-fei. The application of the dual frequency induced polarization method in a copper and polymetallic ore deposit in Tibet [J]. *Geology and Prospecting*, 2004, 4(2): 59-61.

[9] 柳建新, 何继善, 张宗岭, 黄俭合, 贾培乾, 李彦国. 双频激电法及其在示范区的应用[J]. 中国地质, 2001, 28(3): 32-39.

LIU Jian-xin, HE Ji-shan, ZHANG Chong-ling, HUANG Jian-he, JIA Pei-qian, LI Yan-guo. The application of the dual frequency induced polarization method in demonstration area [J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(3): 32-39.

[10] 黄颖坚. 应用双频激电偶极剖面法追索隐伏构造带[J]. 中国有色金属学报, 1994, 4(2): 1-3.

HUANG Yi-jiang. Recoursing buried structural belt using dual frequency induced polarization profiling method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1994, 4(2): 1-3.

[11] 徐笑民. 双频激电法的找矿效果[J]. 中国有色金属学报, 1993, 3(4): 84-87.

XU xiao-ming. The prospecting effect of dual frequency IP method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1993, 3(4): 84-87.

[12] 戴前伟, 张彬, 冯德山, 陈德鹏, 余凯. 水库渗漏通道的伪随机流场法与双频激电法综合探查[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1453-1458.

DAI Qian-wei, ZHANG Bin, FENG De-shan, CHEN De-peng, YU Kai. Integrated detection of leakage paths in reserroids by the pseudorandom flow-field method and dual frequency induced polarization method [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1453-1458.

[13] OLDENBURG D W, LI Y. Estimating depth in dc resistivity and

- IP surveys [J]. *Geophysics*, 1999, 64(2): 403–416.
- [14] SEIGEL H O. Mathematical formulation and type curves for induced polarization [J]. *Geophysics*, 1959, 24(3): 547–565.
- [15] 强建科, 何继善. 椭球体上双频激电法的正演与反演算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1199–1205.
- QIANG Jian-ke, HE Ji-shan. Algorithm of forward and inversion of dual-frequency induced polarization method on elliptical sphere [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38(6): 1199–1205.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995: 1942–1948.
- [17] SHAW R, SRIVASTAVA S. Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data [J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): F75–F83.
- [18] SANTOS F A M, EL-KALIOUBY H M. Comparative study of local versus global methods for 1D joint inversion of direct current resistivity and time-domain electromagnetic data [J]. *Near Surface Geophysics*, 2010, 8(2): 135–143.
- [19] SANTOS F A M. Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization [J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(9): 1185–1190.
- [20] TRONICKE J, PAASCHE H, BÖNIGER U. Crosshole traveltimes tomography using particle swarm optimization: A near-surface field example [J]. *Geophysics*, 2012, 77(1): R19–R32.
- [21] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ J L, GARCÍA GONZALO E, FERNÁNDEZ ÁLVAREZ J P, KUZMA H A, MENÉNDEZ PÉREZ C O. PSO: A powerful algorithm to solve geophysical inverse problems application to a 1D-DC resistivity case [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 71(1): 13–25.
- [22] PEKSEN E, YAS T, KAYMAN A Y, OZKAN C. Application of particle swarm optimization on self-potential data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(2): 305–318.
- [23] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ J L, MUKERJI T, GARCÍA GONZALO E, SUMAN A. Reservoir characterization and inversion uncertainty via a family of particle swarm optimizers [J]. *Geophysics*, 2012, 77(1): M1–M16.
- [24] ZHANG L, YU H, HU S. Optimal choice of parameters for particle swarm optimization [J]. *Journal of Zhejiang University: Science*, 2005, 6(6A): 528–534.
- [25] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ J L, GARCÍA GONZALO E, FERNÁNDEZ MUÑIZ Z, MARIETHOZ G, MUKERJI T. Posterior sampling using particle swarm optimizers and model reduction techniques [J]. *International Journal of Applied Evolutionary Computation*, 2010, 1(3): 27–48.
- [26] TRELEA I C. The particle swarm optimization algorithm: Convergence analysis and parameter selection [J]. *Information Processing Letters*, 2003, 85: 317–325.
- [27] EBERHART R C, SHI Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*. ICEC, 2010: 84–88.

(编辑 彭超群)