

文章编号: 1001-1749(2023)03-0360-08

# 遗传算法与鲍尔方向法相结合的 频谱参数混合反演方法

李昶萱<sup>1,2</sup>, 刘海飞<sup>1,2</sup>, 柳建新<sup>1,2</sup>, 郭鹏<sup>1,2</sup>, 张一凡<sup>1,2</sup>, 刘昕<sup>1,2</sup>

(1. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘要:** 为准确获取地下极化体或岩矿石标本的频谱参数信息, 结合遗传算法与鲍尔方向法实现了频谱参数的混合反演。该方法首先通过遗传算法搜索 Cole-Cole 模型参数的近似极优解, 而后将其作为鲍尔方向法局部寻优的初始解, 再经过多次迭代可准确获取频谱参数。遗传算法与鲍尔方向法的有机结合, 既能改善遗传算法局部搜索能力差的不足, 又能压制鲍尔方向法易陷入局部极值的缺陷。数值实验表明, 两者结合的频谱参数混合反演方法, 具有收敛速度快, 反演结果准确的特点。

**关键词:** 频谱激电法; Cole-Cole 模型; 鲍尔方向法; 遗传算法; 混合反演

**中图分类号:** P 631 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.10

## 0 引言

频谱激电法具有抗干扰能力强、观测参数多等优点, 在有色金属矿产勘查中应用广泛。该方法以岩石、矿石电阻率的频谱特性差异为基础, 通过测量大地视复电阻率谱来寻找电性异常体。作为电法的重要分支, 频谱激电法因具有观测成本低、灵活性强、观测空间广、对岩石和土壤的低频电容特性非常敏感、能适应复杂勘查环境等特点, 被广泛应用于矿产勘查、水文环境调查等领域<sup>[1-3]</sup>。为正确描述激电效应, 大量学者从等效电路出发建立了许多导电解释模型, 其中 Cole-Cole 模型应用最为广泛<sup>[4]</sup>。通过获取 Cole-Cole 模型参数可以达到研究和分析地下地质结构的目的, 目前国内、外对 Cole-Cole 模型参数反演方法的研究较多。曹中林等<sup>[5]</sup>引入郭涛算法对多个 Cole-Cole 模型的参数进行反演;

Ghorbani 等<sup>[6]</sup>基于贝叶斯方法对 Cole-Cole 模型参数进行了反演和不确定性分析; 章飞亮<sup>[7]</sup>从视充电率数据出发推导并实现了 Cole-Cole 模型参数反演; Fiandaca 等<sup>[8]</sup>开发了一种基于激发极化响应的全时域衰减以及发射波形和接收传递函数的精确描述的新算法来反演 Cole-Cole 模型参数; Xu 等<sup>[9]</sup>基于正则化共轭梯度法对地面激电数据进行反演以确定 Cole-Cole 模型四个参数的三维分布; 李鹏飞等<sup>[10]</sup>讨论了初始值选取对岩石频谱参数最小二乘反演初始值选取的影响; Madsen 等<sup>[11]</sup>基于马尔科夫链蒙特卡罗法对 Cole-Cole 模型参数进行了反演估计。根据寻优原理不同, 这些反演算法可归为两类: 基于偏导数信息的经典局部线性迭代法和基于随机搜索的非线性全局搜索方法。相比于局部优化算法, 全局优化算法具有搜索能力强、不依赖初始解选取等优势。而遗传算法作为全局优化算法的典型代表, 是一种模拟自然环境中生物遗传和进

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130810, 41774149); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4694)

第一作者: 李昶萱(1997-), 男, 硕士, 主要从事频谱激电数值模拟与非线性反演研究, E-mail: 810885119@qq.com。

通信作者: 刘海飞(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电磁法数值模拟与反演成像, E-mail: liuhaifei@126.com。

化过程的自适应全局概率搜索方法。该算法能够进行指导性随机搜索,是解决复杂、大尺度、多变量非线性问题的有效手段,且目前已有用于频谱参数反演的先例<sup>[12-14]</sup>。然而遗传算法在实际应用中也表现出对参数选择敏感、进化过程后期收敛速度慢、易早熟收敛、易陷入局部极值等缺陷,导致反演结果可靠性尚不足。为解决该问题,许多学者将遗传算法与一些局部搜索能力较强的优化方法有机结合,如单纯形法、高斯牛顿法和鲍尔方向法等<sup>[15-18]</sup>。鲍尔方向法是 Powell<sup>[19]</sup>于 1964 年提出的一种解无约束最优化问题的直接搜索方法,该方法只要求函数值连续而无需计算导数,能够在合理初始解下快速搜索最优解;印海燕等<sup>[20]</sup>通过改进鲍尔方向法,有效防止了搜索方向集的线性相关性,提高了全局收敛性,并将其应用于 AVO 反演中;刘国志等<sup>[21]</sup>提出了鲍尔方向法和惯性权重非线性调整局部收缩微粒群算法的混合算法,通过在求解质量与收敛速率上与其他反演方法相比,发现该算法在解的搜索质量、效率和初始点的鲁棒性方面都优于其他算法;段如泰等<sup>[22]</sup>通过鲍尔方向法优化地震波传播速度求取过程,将其应用于检波器观测系统数据处理且取得了良好效果。基于此,笔者提出将基于遗传算法与鲍尔方向法结合的混合反演算法应用于 Cole-Cole 模型参数反演,以遗传算法的搜索结果作为初始解引入鲍尔方向法,再以鲍尔方向法的迭代结果作为最终反演结果。

## 1 Cole-Cole 模型

在频谱激电法中,复电阻率常以 Cole-Cole 模型进行描述:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\rho(\omega)$ 表示角频率为 $\omega$ 时的复电阻率; $\rho_0$ 为直流电阻率; $\tau$ 为时间常数; $m$ 为极化率; $c$ 为频率相关系数。

## 2 遗传算法

### 2.1 遗传算法的基本思想

遗传算法是基于 Darwin 进化论和 Mendel 遗传学说演化而来的一种随机搜索优化算法。Darwin 进化论认为适者生存,即物种中个体的基本特征由后代所继承,且后代在继承过程中又会出现一

些异于父代的新变化。但无论继承还是变异,只有那些能适应环境的个体特征能被保留。Mendel 遗传学说则认为遗传信息以基因形式包含在染色体内。通过基因交换和基因突变可产生不同性状的基因结构。经过自然淘汰,适应性高的基因结构会被最终保留。

### 2.2 遗传算法的实现技术

遗传算法模拟了生物遗传和进化的过程,通过选择、交叉和变异来探索反问题的解,其具体实现过程如下。

#### 2.2.1 编码方案

遗传算法通过编码建立从参数空间到遗传空间非线性映射的桥梁。编码的形式决定搜索空间的大小,直接影响算法的运行效率。由于地球物理反问题涉及的参数往往比较多,为简明起见,笔者采用浮点数编码,即把每个变量直接当作基因处理。相较于二进制编码,该编码方式无需繁琐的编码和解码过程,且有效减小了基因序列长度。

#### 2.2.2 适应度函数

在遗传算法中,适应度函数是评判群体中个体优劣的唯一依据,适应度函数的选取会直接影响遗传算法的收敛速度以及能否最终搜索到最优解。一般而言,适应度函数是由目标函数变换而来。本文所采用的目标函数和适应度函数分别为式(2)和式(3)。

$$f(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \ln \left( \frac{|\rho(\omega)_{\text{app}}|}{|\rho(\omega)_{\text{sim}}|} \right) \right)^2}{N}} \quad (2)$$

$$F(m) = \begin{cases} f_{\max} - f(m) & \text{如果 } f(m) < f_{\max} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $N$ 为频率个数; $\rho(\omega)_{\text{app}}$ 为实测复电阻率; $\rho(\omega)_{\text{sim}}$ 为模型正演的复电阻率; $f_{\max}$ 为目标函数 $f(m)$ 的最大值估计。

遗传算法的早期群体常容易出现某一个体适应度远优于群体平均适应度而导致算法早熟的情况,而后期群体则由于个体适应度差异较小而容易导致算法继续优化的潜能降低甚至优化停滞。为使适应度函数分布尽量均匀,这里在适应度函数中引入了指数变换

$$F' = \exp(-\mu F) \quad (4)$$

其中: $F$ 和 $F'$ 分别为变换前后的适应度函数; $\mu=1/\sqrt{g_n}$ 为修正系数; $g_n$ 为进化的世代序号。该变换依据迭代进程对个体适应度函数值进行缩放,能够有

效改善遗传算法易于早熟和优化潜能降低的风险。

### 2.2.3 遗传操作

遗传操作包括三个基本操作算子:①选择算子;②交叉算子;③变异算子。

1)选择算子。采用比例选择算子,其基本思想是每个个体被选中的概率与其适应度大小成正比,即个体被选中的概率为:

$$P_i = F_i / \sum_j^n F_j \quad (5)$$

式中: $F_i$ 和 $F_j$ 分别为个体 $i$ 和 $j$ 的适应度; $n$ 为种群规模。

2)交叉算子。对于浮点数编码,常采用算术交叉进行基因交换,即通过母体 $s_1 = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 和 $s_2 = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 的线性组合产生新的个体:

$$\begin{cases} u'_i = r_i u_i + (1 - r_i) v_i = v_i + r_i (u_i - v_i) \\ v'_i = r_i v_i + (1 - r_i) u_i = u_i + r_i (v_i - u_i) \end{cases} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

其中: $r_1, r_2, \dots, r_n$ 为 $n$ 个 $[0, 1]$ 区间的随机数。显然,通过算术交叉后产生的两个子代 $s'_1 = (u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ 和 $s'_2 = (v'_1, v'_2, \dots, v'_n)$ ,其分量仍在限定的区域内。

3)变异算子。常见的变异包括基本位变异,均匀变异,边界变异,高斯近似变异等。笔者采用均匀变异算子进行计算,其基本思想是采用某一范围内均匀分布的随机数,以某一较小的概率来替换个体编码串中各个基因座上的原有基因值。假设某染色体 $s = (u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n)$ 的元素 $u_i$ 被选择变异,且 $u_i \in [u_i^l, u_i^u]$ 。则 $u_i$ 的变异过程可表示为式(7)。

$$u'_i = u_i^l + r(u_i^u - u_i^l), i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中: $r$ 为 $[0, 1]$ 区间的随机数。变异后的结果为 $s' = (u_1, u_2, \dots, u'_1, \dots, u_n)$ 。

### 2.2.4 遗传参数设置

遗传算法的控制参数主要有初始种群、种群规模、交叉概率、变异概率和迭代终止准则等。

1)初始种群。本文初始种群 $P(t)$ 是借助随机数生成器在模型空间(每个模型参数的上下界)中随机生成。

2)种群规模。通过染色体长度来控制种群规模,假设染色体长度为 $LChrom$ ,则种群规模 $PopSize$ 为式(8)。

$$PopSize = LChrom * (LChrom + 1) * 10 \quad (8)$$

3)交叉概率和变异概率。交叉概率 $P_c$ 和变异概率 $P_m$ 是遗传算法中最重要的控制参数,二者分别控制着交叉操作和变异操作被使用的频度。 $P_c$ 和 $P_m$ 越大则算法勘探性越好,有利于算法进行全

局搜索,但容易产生较大的代沟。 $P_c$ 和 $P_m$ 越小则算法开发性越好,有利于算法开展精细搜索,但有可能导致算法陷入停滞状态。笔者采用Srinivas等<sup>[23]</sup>于1994年提出的一种自适应方法来更新 $P_c$ 和 $P_m$ ,其具体计算公式为式(9)和式(10)。

$$P_c = \begin{cases} k_1 (F_{\max} - F) / (F_{\max} - \bar{F}) & F \geq \bar{F} \\ k_2 & F < \bar{F} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 (F_{\max} - F) / (F_{\max} - \bar{F}) & F \geq \bar{F} \\ k_4 & F < \bar{F} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $k_1, k_2, k_3, k_4$ 均为控制参数,在计算过程中分别设置 $k_1 = k_2 = 0.9, k_3 = k_4 = 0.1$ ;  $F_{\max}$ 为群体中的最大适应度值; $\bar{F}$ 为平均适应度值; $F$ 为两个待交叉个体中较大的适应度值。

4)迭代终止准则。遗传算法中常用的迭代终止准则包括:反演结果达到预设精度;算法迭代达到预设最大世代数;算法最优个体连续若干代不再更新;最适应个体占群体的比例达到预设值;在预设世代数内种群平均适应度无改进或变化量小于某一阈值。为了操作简便,本文选取预设最大世代数作为迭代终止条件,且该最大世代数 $MaxGen$ 与染色体条数 $LChrom$ 有关:

$$MaxGen = LChrom * (LChrom + 1) * 10 \quad (11)$$

## 3 鲍尔方向法

鲍尔方向法被公认为是目前解无约束最优化问题非常有效的最速下降法,该方法只要求函数连续,无需复杂的导数计算,对凸二次函数可在有限步收敛到最优解。鲍尔方向法的具体实现过程表述如下。

给定初始向量 $m^{(0)}$ 及 $n$ 个搜索方向 $e_1, e_2, \dots, e_n$ ,其中 $n$ 为参数个数, $e$ 为单位向量,再给定控制误差 $\epsilon$ 和一个较大的正数,则搜索过程为:

$$\textcircled{1} 0 \Rightarrow k, e_j \Rightarrow P_j, j = 1, 2, \dots, n.$$

$$\textcircled{2} 0 \Rightarrow j, m^k \Rightarrow m^{(k,j)}, -M \Rightarrow \Delta.$$

$$\textcircled{3} m^{(k,j+1)} = m^{(k,j)} + \lambda_{j+1} P_{j+1} \text{ 其中 } f(m^{(k,j)} + \lambda_{j+1} P_{j+1}) = \min f(m^{(k,j)} + \lambda \cdot P_{j+1}).$$

$$\textcircled{4} \text{ 若 } f(m^{(k,j)}) - j(m^{(k,j+1)}) > \Delta, \text{ 则 } f(m^{(k,j)}) - f(m^{(k,j+1)}) > \Delta, j+1 \Rightarrow j; \text{ 若 } f(m^{(k,j)}) - f(m^{(k,j+1)}) \leq \Delta, \text{ 则 } \Delta, j \text{ 保持不变, 转到 } \textcircled{5}.$$

$$\textcircled{5} j+1 \Rightarrow j, \text{ 如果 } j < n, \text{ 转到 } \textcircled{3}, \text{ 否则, 转到 } \textcircled{6}.$$

⑥若  $\|m^{(k,n)} - m^{(k,0)}\| \leq \varepsilon$ , 则最优解  $m^* = m^{(k,n)}$ , 终止计算。否则, 转到⑦。

⑦计算  $f_1 = f(m^{(k,0)}), f_2 = f(m^{(k,n)}), f_3 = f(2m^{(kn)} - m^{(k,n)})$ 。若  $f_3 \geq f_1$ , 转到⑨。否则, 转到⑧。

⑧若  $(f_1 - 2f_2 + f_3) \cdot (f_1 - f_2 - \Delta)^2 \geq \Delta \cdot (f_1 - f_2)^2 / 2$ , 转到⑨。否则, 转到⑩。

⑨  $m^{(k,n)} \Rightarrow m^{(k+1)}, k+1 \Rightarrow k$  转到②。

⑩令  $P = m^{(k,n)} - m^{(k,0)}, m^{(k+1)} = m^{(k,n)} + \lambda^* P_{j+1}$ , 其中  $f(m^{(k,n)} + \lambda^* \cdot P) = \min f(m^{(k,n)} + \lambda \cdot P)$ 。  $P_{j+1} \Rightarrow P_j, j=1, 2, \dots, n-1, P/\|P\| \Rightarrow P_n, k+1 \Rightarrow k$ , 转到②。

式中  $\lambda$  是解向量在共轭方向  $P$  上的一维搜索步长。

## 4 全局混合反演算法

将遗传算法与鲍尔方向法有机结合是优化算法性能、提高反演准确性的一种有效手段。以遗传算法的寻优结果作为鲍尔方向法的初始解, 以鲍尔方向法的迭代结果作为最终反演结果, 其算法过程描述为:

1) 设置遗传算法迭代参数。

2) 随机产生初始群体  $P(t)$ , 并计算  $P(t)$  的适应度函数值。

3) 统计初始种群的最小、最大、平均适应度以及种群适应度的和。

4) 遗传操作。通过式(5)进行选择操作, 通过式(6)和式(9)进行交叉操作, 通过式(7)和式(10)进行变异操作, 并计算新个体的适应度值。对种群中每个个体均进行此项操作。

5) 世代更新。新一代种群代替上一代种群。

6) 统计新一代种群的最小、最大、平均适应度以及种群适应度的和, 并判断是否更新种群的最优个体。

7) 判断是否满足遗传算法终止条件。如满足则退出迭代, 得出遗传算法寻优结果, 否则转到第④步, 继续进化。

8) 将遗传算法寻优结果作为鲍尔方向法的初始解, 开始鲍尔方向法的迭代过程, 直至满足迭代终止条件, 输出最优解。

## 5 模型算例分析

### 5.1 反演收敛性分析

为验证本文反演方法的有效性及其收敛速率, 选取 Cole-Cole 模型参数为  $\rho_0 = 10 \Omega \cdot \text{m}, m = 0.5, \tau = 5 \text{ s}, c = 0.5$ , 并在 8 个频率 (0.125 Hz, 0.25 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz) 下计算复电阻率, 如表 1 所示。根据表 1 不同频率下的复电阻率反演频谱参数, 反演结果如表 2 所示。由表 2 可知, 遗传算法反演结果已非常接近理论值, 而鲍尔方向法反演结果与理论值完全一致, 表明了混合算法的优越性。此外为进一步分析反演过程中遗传算法和鲍尔方向法的寻优过程, 绘制了如图 1 所示遗传算法适应度变化曲线和如图 2 所示鲍尔方向法均方误差收敛曲线。遗传算法在整个迭代过程中, 其最大适应度和平均适应度总体平稳, 最小适应度在小范围内波动, 表明自适应遗传参数在算法迭代过程中起到了较好的控制效果, 算法整体稳定性良好。而鲍尔方向法收敛迅速, 经 32 次迭代平均均方误差降至  $10^{-16}$ , 且最终反演结果与理论模型参数完全一致。该数值实验表明混合反演算法稳定性好, 收敛迅速, 反演结果精度高。

表 1 该模型不同频率对应的复电阻率

Tab. 1 The complex resistivity obtained by forward modeling at different frequency

Frequency /Hz	0.125	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00
Real Part / $\Omega \cdot \text{m}$	8.96599	8.89418	8.75562	8.68454	8.63203	8.59395	8.56666	8.54722
imaginary part / $\Omega \cdot \text{m}$	-0.27193	-0.23191	-0.18840	-0.14736	-0.11204	-0.08343	-0.06120	-0.04442

表 2 混合反演算法反演结果

Tab. 2 Inversion results of the hybrid inversion method

parameter	$\rho_0/\Omega \cdot m$	$m$	$\tau/s$	$c$
Theoretical Value	10	0.5	5	0.5
GA Inversion Results	10.040900	0.504819	5.016550	0.492356
Powell Inversion Results	10.000000	0.500000	5.000000	0.500000

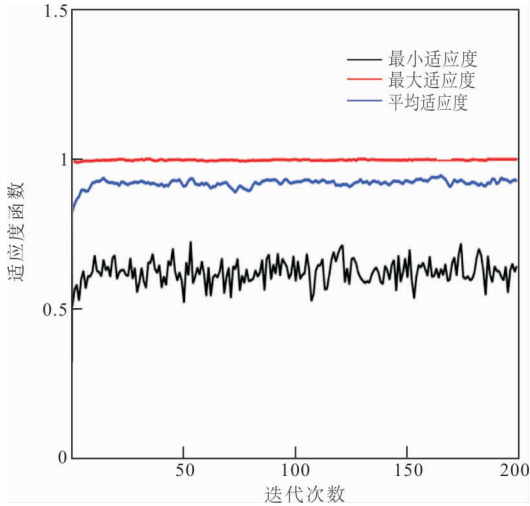


图 1 遗传算法的误差收敛曲线

Fig. 1 Error convergence curve of genetic algorithm

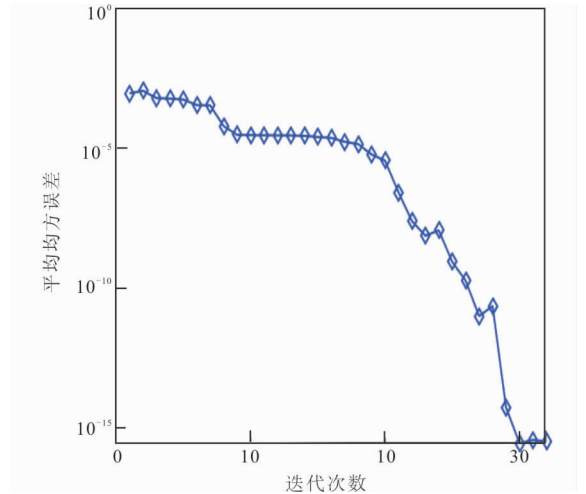


图 2 鲍尔方向法的误差收敛曲线

Fig. 2 Error convergence curve of Powell direction method

表 3 混合反演所用频率组合

Tab. 3 Frequencies used in the hybrid inversion

number	$f_1/Hz$	$f_2/Hz$	$f_3/Hz$	$f_4/Hz$
1	0.125	0.25	0.5	1
2	0.25	0.5	1	2
3	0.5	1	2	4
4	1	2	4	8
5	2	4	8	16
6	4	8	16	32
7	8	16	32	64

## 5.2 反演效果对比分析

为进一步验证混合反演算法的有效性,对文献[24]的实验模型进行了反演试算。该模型的 Cole-Cole 模型参数为  $\rho_0 = 25 \Omega \cdot m$ ,  $\tau = 1 s$ ,  $m = 0.5$ ,  $c = 0.5$ 。选取表 3 中 7 组频率分别计算复电阻率值,结果如表 4 所示。随后将各组复电阻率结果代

入混合反演算法进行反演计算,并与文献[24]所得反演结果进行对比,对比结果如表 5 所示。从对比结果来看,混合算法反演结果与真实模型参数完全一致,反演精度远高于文献[24],进一步表明了混合反演算法在 Cole-Cole 模型参数反演中的优越性。

## 6 结论

通过对遗传算法与鲍尔方向法的混合反演方法的研究,得到以下几点认识:

1) 将具有全局寻优的遗传算法与局部寻优的鲍尔方向法相结合,形成了一种反演 Cole-Cole 模型参数的混合反演方法,该方法收敛速度较快,反演模型精度高。

2) 对于 Cole-Cole 模型参数反演,参与反演的频率需要大于或等于 4 个,频率个数越多,反演迭代次数越少,反演结果精度越高。

3) 该反演方法同样适合于正演计算量较小的反演问题。

表 4 各组频率所得复电阻率(实部,虚部)

Tab. 4 The complex resistivity of different frequencies(real part, imaginary part)

number	$\rho_1/\Omega \cdot m$	$\rho_2/\Omega \cdot m$	$\rho_3/\Omega \cdot m$	$\rho_4/\Omega \cdot m$
1	(15.51145, -0.92693)	(15.15929, -0.84359)	(14.80608, -0.75985)	(14.49106, -0.67812)
2	(15.15929, -0.84359)	(14.80608, -0.75985)	(14.49106, -0.67812)	(14.21250, -0.60022)
3	(14.80608, -0.75985)	(14.49106, -0.67812)	(14.21250, -0.60022)	(13.96800, -0.52744)
4	(14.49106, -0.67812)	(14.21250, -0.60022)	(13.96800, -0.52744)	(13.75479, -0.46055)
5	(14.21250, -0.60022)	(13.96800, -0.52744)	(13.75479, -0.46055)	(13.56989, -0.39993)
6	(13.96800, -0.52744)	(13.75479, -0.46055)	(13.56989, -0.39993)	(11.41031, -0.34564)
7	(13.75479, -0.46055)	(13.56989, -0.39993)	(11.41031, -0.34564)	(13.27312, -0.29749)

表 5 各组频率对应的反演结果

Tab. 5 Inversion results of different frequencies

number	$\rho_0/\Omega \cdot m$		$m$		$\tau/s$		$c$	
	this text	literature[24]	this text	literature[24]	this text	literature[24]	this text	literature[24]
1	25	25.01500032	0.5	0.50030001	100	100.8382208	0.25	0.24980002
2	25	25.021	0.5	0.5004	100	101.1750057	0.25	0.24970002
3	25	25.02600002	0.5	0.5005	100	101.4340248	0.25	0.24970002
4	25	25.01000392	0.5	0.50010009	100	100.5254266	0.25	0.25000002
5	25	25.04300098	0.5	0.50080001	100	100.2473636	0.25	0.24970002
6	25	25.12408669	0.5	0.502601433	100	106.7218296	0.25	0.24900002
7	25	24.98211867	0.5	0.499502252	100	98.83363732	0.25	0.25030018

## 参考文献:

- [1] 杨振威, 严加永, 陈向斌. 频谱激电法在安徽沙溪斑岩铜矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 2014-2023.
- YANG Z W, YAN J Y, CHEN X B. Application of spectral IP method in Shaxi Porphyry Copper Mine, Anhui province[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 2014-2023. (In Chinese)
- [2] 宋豪, 郭佳, 张风祥, 等. 频谱激电法在豫西某铅锌银矿区中的应用[J]. 物探与化探, 2015(3): 506-511.
- SONG H, GUO J, ZHANG F X, et al. Application of spectral IP Method in a Pb-Zn-Ag Mine in Western Henan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015(3): 506-511. (In Chinese)
- [3] 韩姚飞, 杨炳南, 张德全, 等. 音频大地电磁法和频谱激电法在黔西北某铅锌矿探测中的应用研究[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(12): 89-94.
- HAN Y F, YANG B N, ZHANG D Q, et al. Application of audio magnetotelluric method and spectral IP method in the detection of a lead-zinc mine in north-western Guizhou[J]. West-china Exploration Engineering, 2020, 32(12): 89-94. (In Chinese)
- [4] Cole K S, Cole R H. Dispersion and absorption in dielectrics[J]. Journal of Chemical Physics, 1941(9): 341-351.
- [5] 曹中林, 昌彦君, 何展翔. 基于演化算法的复电阻率频谱参数反演[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(1): 33-38.
- CAO Z L, CHANG Y J, HE Z X. Inversion of complex resistivity spectral parameters based on evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(1): 33-38. (In Chinese)
- [6] GHORBANI A, CAMERLYNCK C, FLORSCH N, et al. Bayesian inference of the Cole-Cole parameters from time- and frequency-domain induced polarization

- tion[J]. *Geophysical Prospecting*, 2010, 55(4): 589-605.
- [7] 章飞亮. 基于激电数据的 Cole-Cole 模型频谱参数反演[J]. *工程地球物理学报*, 2011, 8(5): 525-529.  
ZHANG F L. Spectral parameter inversion of Cole-Cole model based on IP data[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2011, 8(5): 525-529. (In Chinese)
- [8] FIANDACA G, AUKEN E, CHRISTIANSEN A V, et al. Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters [J]. *Geophysics*, 2012, 77(3): 213-225.
- [9] XU Z, ZHDANOV M S. Three-Dimensional Cole-Cole model inversion of induced polarization data based on regularized conjugate Gradient method[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2017, 12(6): 1180-1184.
- [10] 李鹏飞, 严良俊, 谢兴兵, 等. 基于最小二乘的岩石频谱参数反演初始值选取的讨论[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(003): 569-574.  
LI P F, YAN J L, XIE X B, et al. Discussion on selection of initial values of rock spectral parameters inversion based on least squares[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(003): 569-574. (In Chinese)
- [11] MADSEN L M, FIANDACA G, AUKEN E, et al. Time-domain induced polarization - an analysis of Cole-Cole parameter resolution and correlation using Markov Chain Monte Carlo inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(3): 1341-1353.
- [12] 刘小军, 苏朱刘, 胡文宝. 用遗传算法提取频谱激电法谱参数[J]. *石油天然气学报*, 2004, 26(2): 74-75.  
LIU X J, SU Z L, HU W B. Extracting spectral IP method spectral parameters using genetic algorithm [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2004, 26(2): 74-75. (In Chinese)
- [13] 童茂松. 基于遗传算法的岩石复电阻率频谱模型参数反演[J]. *勘探地球物理进展*, 2007, 30(4): 271-274.  
TONG M S. Parameter inversion of rock complex resistivity spectrum model based on genetic algorithm[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2007, 30(4): 271-274. (In Chinese)
- [14] 林小稳, 柯式镇, 贺秋丽, 等. 岩石复电阻率频谱反演研究[J]. *测井技术*, 2016, 40(2): 142-146.  
LIN X W, KE S Z, HE Q L, et al. Research on spectrum inversion of rock complex resistivity [J]. *Well Logging Technology*, 2016, 40(2): 142-146. (In Chinese)
- [15] 刘海飞. 直流激电反演中的线性与非线性方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.  
LIU H F. Research on linear and nonlinear methods in DC IP inversion[D]. Changsha: Central South University, 2007. (In Chinese)
- [16] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.  
CHEN G L, WANG X F, ZHUANG Z Q, et al. Genetic algorithm and its application[M]. Beijing: People Post Press, 1999. (In Chinese)
- [17] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
LIU Y, KANG L S, CHEN Y P. Non-Numerical parallel algorithms[M]. Beijing: Science Press, 1995. (In Chinese)
- [18] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
WANG X P, CAO L M. Genetic Algorithms—theory, applications and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (In Chinese)
- [19] POWELL M J D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [J]. *Computer Journal*, 1964, 7(7): 155-162.
- [20] 印海燕, 印兴耀, 张繁昌. Powell 法叠前 AVO 同步反演方法研究 [C]// 中国地球物理学会第二十三届年会, 2007: 271.  
YIN H Y, YIN X Y, ZHANG F C. Research on Pre-stack AVO synchronous inversion method by powell method [C]// The 23rd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2007: 271. (In Chinese)
- [21] 刘国志, 苗臣. Powell 搜索法和局部收缩微粒群算法的混合算法[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2008, 28(3): 70-74.  
LIU G Z, MIAO C. Hybrid algorithm of powell and local shrinking particle swarm optimization[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2008, 28(3): 70-74. (In Chinese)
- [22] 段如泰, 金振奎, 索重辉, 等. 用地震定位方法研究矿山爆破中的地震波传播速度[J]. *科学技术与工程*, 2011(36): 8967-8969.  
DUAN R T, JIN Z K, SUO C H, et al. Study on the propagation velocity of seismic wave in mine blasting with seismic positioning method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011(36): 8967-8969. (In Chinese)
- [23] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities

of crossover and mutation in genetic algorithms [J].  
IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics,  
2002, 24(4): 656—667.

[24] 阮百尧, 罗润林. 一种新的复电阻率频谱参数的递推反演方法[J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(4): 298—

301.

RUAN B Y, LUO R L. A new recursive inversion method for complex resistivity spectral parameters[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 25(4): 298—301. (In Chinese)

## A hybrid inversion method of spectral parameters combined with genetic algorithm and Powell direction method

LI Changxuan<sup>1,2</sup>, LIU Haifei<sup>1,2</sup>, LIU Jianxin<sup>1,2</sup>, GUO Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yifan<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Key Laboratory of Nonferrous Resources and Geological Hazards Exploration, Changsha 410083, China;  
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to accurately obtain the true spectrum parameter information of an underground polarized body, this paper proposes a hybrid inversion algorithm of spectral parameters combining the genetic algorithm and the good direction method. Firstly, the approximate optimal solution of the parameters of the Cole—Cole model is searched by the Genetic algorithm, and then it is used as the initial solution of the local optimization of the Powell direction method, and the spectral parameters can be accurately obtained after several iterations. The organic combination of the genetic algorithm and the Powell direction method can not only improve the poor local search ability of the genetic algorithm but also suppress the defect that the Powell direction method is easy to fall into the local extreme value. Numerical experiments show that the spectral parameter hybrid inversion method combining the two has the characteristics of fast convergence and accurate inversion results.

**Keywords:** spectrum induced polarization method; Cole—Cole parameters; Powell direction method genetic algorithm; hybrid inversion