

刘怀湜,赵雪娇,刘雨新,等. 基于改进粒子群优化的超顺磁效应多参数提取. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3): 993-1002. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230069.

Liu Huaishi, Zhao Xuejiao, Liu Yuxin, et al. Multi-Parameter Extraction of Superparamagnetic Effect Based on Improved Particle Swarm Optimization. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (3): 993-1002. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230069.

基于改进粒子群优化的超顺磁效应多参数提取

刘怀湜,赵雪娇,刘雨新,房庭瑞,张静,嵇艳鞠

吉林大学仪器科学与电气工程学院,长春 130026

摘要:时域电磁法中的超顺磁效应一般由磁异常体或磁化层引起,并在响应中后期出现呈近似-1次幂律衰减的慢扩散现象,同时也是地下磁性介质信息的重要表征。传统参数提取方法在对磁性环境的实测数据进行处理时,会由于忽略这种效应导致数据的错误解释。为了实现含有超顺磁效应数据的准确解释,本文基于改进粒子群优化算法进行了超顺磁效应的多参数提取研究,通过引入 Cole-Cole 磁化率模型实现了层状超顺磁效应的数值模拟,证明了磁化率、电导率可以影响超顺磁响应的幅值与衰减斜率,并结合改进粒子速度和位置更新策略的粒子群优化算法实现了对磁化率、电导率等参数的提取。结果表明,本文的方法在对超顺磁效应多参数进行提取时最大相对误差不超过2%,验证了方法的有效性。

关键词:超顺磁效应;数值模拟;粒子群优化;参数提取

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230069

中图分类号:P631.2

文献标志码:A

Multi-Parameter Extraction of Superparamagnetic Effect Based on Improved Particle Swarm Optimization

Liu Huaishi, Zhao Xuejiao, Liu Yuxin, Fang Tingrui, Zhang Jing, Ji Yanju

College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Superparamagnetic (SPM) effects in time-domain electromagnetic method is generally caused by magnetic anomalies or magnetic layers, and cause the slow diffusion phenomenon of approximately -1 power law decay in the middle and late stages of the response. Meanwhile, it is also an important representation of the underground magnetic media information. However, ignoring the SPM effects will lead to an incorrect data interpretation using traditional parameter extraction method to

收稿日期:2023-03-27

作者简介:刘怀湜(1998—),男,博士研究生,主要从事超顺磁效应方面的研究,E-mail:liuhs20@mails.jlu.edu.cn

通信作者:嵇艳鞠(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事时域电磁探测方法研究,E-mail:jjyj@jlu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42104140,42030104);吉林省自然科学基金项目(20210101475JC, YDZJ202101ZYTS023);吉林大学大学生创新创业训练计划项目(202110183274)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42104140,42030104), the Natural Science Foundation of Jilin Province (20210101475JC, YDZJ202101ZYTS023) and the Innovation and Entrepreneurship Training Program of Jilin University (202110183274)

process the magnetic environment data. In order to interpret the SPM response accurately, this paper proposes a multi-parameter extraction of SPM effects based on the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm. The numerical simulation of the layered SPM effect is realized based on the Cole-Cole susceptibility model, and magnetic susceptibility and conductivity can affect the amplitude and attenuation slope of SPM responses. We improve the PSO algorithm with the particle velocity and position update strategy to realize the extraction of magnetic susceptibility, conductivity and other parameters. The results show that the maximum relative error of the proposed method is less than 2 % when extracting multiple parameters of SPM effect, which verifies the effectiveness of this method.

Key words: superparamagnetic effect; numerical simulation; particle swarm optimization; parameter extraction

0 引言

在时域电磁法探测过程中,发射电流的平顶阶段会让地下的磁性粒子改变方向,获得磁化;在电流关断后,磁性粒子会失去磁化强度,接收系统会观测到近似 -1 次幂率的衰减信号,这一过程被称为超顺磁效应^[1-2]。国内外实验结果表明,超顺磁效应不仅存在于多种岩石及矿物中^[3],在 $0.1\sim 15\ \mu\text{m}$ 半径范围内的磁铁矿和赤铁矿颗粒中也可产生感应-磁化效应^[4-5]。因此,浅层的超顺磁效应会对深层目标体的响应造成干扰,同时,超顺磁效应也可作为铁磁性矿物的一种重要表征方式。

针对超顺磁效应的数值模拟及数据处理,国内外学者进行了大量研究。Chikazumi等^[6]根据观测到的基本衰减规律,推导出了被广泛应用的Chikazumi磁化率模型。Lee^[2]利用Chikazumi模型进行理论计算,验证了基于Chikazumi磁化率模型模拟出的电磁响应呈 -1 次幂率衰减,贴合实际观测到的情况。Kamnev等^[7]通过观测磁性岩石样品,确定超顺磁响应晚期呈 $-1.07\sim -1.13$ 幂率衰减。Antonov等^[8-11]针对地面长导线源激发的地下均匀磁化介质与地面回线源激发的层状磁化介质的数值模拟进行了研究,分析了零频磁化率等性质对于感应-磁化效应的影响。Cowan等^[12]推导了地面大回线源下感应-磁化效应垂直和径向分量的解析式,研究有关感应响应与磁化响应交叉时间的估计方法。Zhang等^[13]研究了长导线源下的感应-磁化效应,进行了层状模型下的一维以及二维数值模拟,并研究了岩、矿石样品的磁化率,验证了磁化效应对于铁磁性矿物探测的有效性。Ji等^[14]基于频域有限差分方法以及频域转换方法实现了超顺磁效应的

时域三维数值模拟,并对三维复杂磁化模型进行了分析。Zhao等^[15]提出了磁化率Cole-Cole模型,并通过有理函数逼近方法和递归卷积方法实现了超顺磁效应的时域分数阶三维数值模拟。Macnae等^[16-17]提出了加权非负最小二乘拟合的超顺磁响应分离方法,可将感应响应和超顺磁响应分离后进行反演,同时结合极化响应,利用多组实测数据验证了方法的有效性并分析了超顺磁效应的重要性。而目前对于超顺磁效应参数提取的研究还没有完整准确的理论。

本文基于改进粒子群优化算法^[18-19]实现了超顺磁效应的多参数提取。通过引入Cole-Cole磁化率模型,实现了层状超顺磁模型的数值模拟;并在此基础上,将磁化率模型参数作为磁性物质的重要标识,结合电导率实现了超顺磁效应的多参数提取;最后结合正演数据验证了方法的准确性。

1 基于 Cole-Cole 磁化率模型的层状超顺磁响应模拟

为了实现超顺磁效应的模拟及分析,本文引入磁性粒子弛豫时间呈对数正态分布的Cole-Cole磁化率模型^[15]。超顺磁介质的磁化率 $\chi(\omega)$ 可用分数阶Cole-Cole磁化率模型进行表征:

$$\chi(\omega) = \chi_{\infty} + \frac{\chi_0 - \chi_{\infty}}{1 + (i\omega\tau_c)^{1-\alpha}} \quad (1)$$

式中: χ_{∞} 为无穷频率下的磁化率; χ_0 为物质的零频磁化率; $i\omega$ 为复频率变量; τ_c 为磁化率时间常数; α 为分数阶模型阶数,用于控制弛豫时间分布。

在此基础上,对层状空间磁化介质产生的超顺磁响应进行计算。建立一个层状磁化模型,如图1所示,每一层都有对应的电导率 σ_i 、零频磁化率

χ_{0i} 、厚度 d_i 等参数,将空气中的磁导率设置为真空磁导率 μ_0 。在空中高度为 h 处设置圆形线圈 Tx 作为激励源,并在发射线圈中心设置接收线圈 Rx 进行接收。

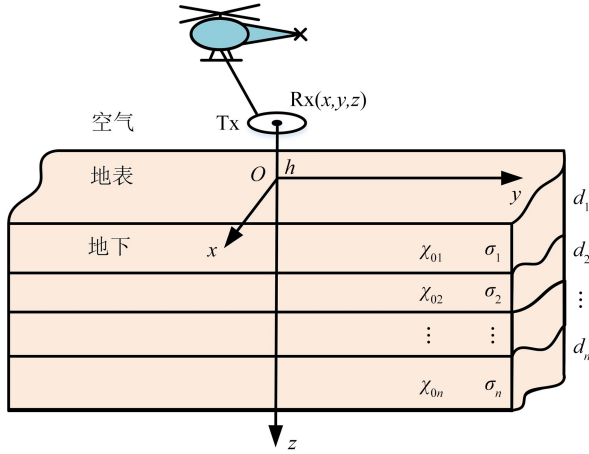


图1 层状磁化模型

Fig.1 Layered magnetization model

利用频率域麦克斯韦方程推导出层状磁化介质产生的感应-磁化响应公式。根据频率域波动方程,并用磁矢位 \mathbf{A} 将电场强度 \mathbf{E} 和磁场强度 \mathbf{H} 分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = i\omega\mu \nabla \times \mathbf{A}; \\ \mathbf{H} = k^2 \mathbf{A} + \nabla \nabla \cdot \mathbf{A}. \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 为波数,可写为 $k = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega}$ (μ 为磁导率; ϵ 为介电常数; σ 为电导率)。当频率小于 10^5 Hz时,位移电流可被忽略,此时 $k^2 = i\mu\sigma\omega$ 。可求出每层相应的磁矢位,并用下标 i 表示层位:

$$\nabla^2 \mathbf{A}_i + k_i^2 \mathbf{A}_i = 0. \quad (3)$$

利用汉克尔积分的正交性对式(3)进行求解,可得到地面上空 $z = -h$ ($z \leq 0$) 处 z 方向的矢量位表达式为

$$\mathbf{A}_z = \frac{Ii\omega\mu_0}{4\pi} \int_0^\infty \left[e^{-m(z+h)} + \frac{mR_n - m_1}{mR_n + m_1} e^{m(z-h)} \right] J_0(mr) dm. \quad (4)$$

其中,

$$R_n = \coth\{m_1 \mathbf{H}_1 + \coth^{-1}[(m_1/m_2) \cdot R_{n-1}]\}. \quad (5)$$

式中: I 为发射电流; \mathbf{m} 为 $z = -h$ ($z \leq 0$) 处的磁矩; $m_i = \sqrt{m^2 - k_i^2}$ (k_i 为第 i 层的波数),为第 i 层的磁矩; J_0 为贝塞尔函数; r 为位置坐标; \mathbf{H}_1 为第

一层的磁场强度。第 i 层的磁导率 $\mu_i(\omega)$ 可表示为

$$\mu_i(\omega) = \mu_0(1 + \chi_i(\omega)) = \mu_0 \left(1 + \chi_{\infty i} + \frac{\chi_{0i} - \chi_{\infty i}}{1 + (i\omega\tau_c)^{1-\alpha}} \right). \quad (6)$$

式中: $\chi_i(\omega)$ 为第 i 层的磁化率; $\chi_{\infty i}$ 为第 i 层的无穷频磁化率。

利用每一层的磁矢位表达式进行迭代,可以计算出空中接收点处 z 方向的磁场强度为

$$H_z = \frac{Ii\omega\mu_0}{4\pi} \int_0^\infty m^2 \left[e^{-m(z+h)} + \frac{mR_n - m_1}{mR_n + m_1} e^{m(z-h)} \right] J_0(mr) dm. \quad (7)$$

在假设感应效应相对于磁化效应可以忽略不计的情况下,对于 n 层超顺磁介质地面上半径为 R 的圆形发射线圈,接收点处的零频磁化率 χ_{0a} 可近似为^[20]

$$\chi_{0a} = \chi_{01} \left\{ 1 + \left(\frac{R}{h} \right)^3 \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\chi_{0i+1}}{\chi_{01}} - \frac{\chi_{0i}}{\chi_{01}} \right) \left[\left(\frac{R}{h} \right)^2 + 4 \left(\frac{z_i}{h} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (8)$$

式中, $z_i = h + d_1 + d_2 + \dots + d_i$ 。从而可以计算出层状模型下超顺磁效应所产生地面上空 $z = -h$ ($z \leq 0$) 处 z 方向的磁感应强度为

$$B_z = \mu(\omega) \frac{Ii\omega\mu_0}{4\pi} \int_0^\infty m^2 \left[e^{-m(z+h)} + \frac{mR_n - m_1}{mR_n + m_1} e^{m(z-h)} \right] J_0(mr) dm. \quad (9)$$

通过正余弦变换数值滤波算法将信号从频率域变换到时间域进行分析^[21-22]。

2 基于改进粒子群优化的超顺磁效应参数提取

基于改进粒子群优化算法,在前文的正演算法基础上,实现对感应-磁化响应的多参数提取。结合实际感应-磁化效应参数提取需求,在粒子位置和速度自适应更新策略上进行了调整,并且引用了基于 Logistic 混沌映射的非线性变化惯性权重,从而保证更大的粒子搜索空间^[23-25],同时保证了磁化参数提取的准确性,提高了参数提取算法的性能,改善了搜索过程中出现的未成熟收敛或局部最小值等现象。

设置粒子群的空间维度为 d ,输入种群规模 M 、迭代次数 K 等相关参数。初始化各粒子的位置 x 、速度 v 、个体最优值 p_{best} 、种群最优值 g_{best} 。其中,第 i 个粒子 ($i = 1, 2, \dots, M$) 的相应参数可表示

为:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}); \quad (10)$$

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}); \quad (11)$$

$$p_{\text{best}, i} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}); \quad (12)$$

$$g_{\text{best}, i} = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{id}). \quad (13)$$

构建目标函数,即配置改进粒子群优化算法的适应度函数 $Y(x)$:

$$Y(x) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j |B_m(i) - B_t(i)|. \quad (14)$$

式中: j 为时间点数; B_m 为实际测量的电磁响应结果; B_t 为通过正演算法计算的超顺磁响应结果。将磁化参数提取问题转化为最小值优化问题,并且适应度函数可构建为多参数函数来实现同时提取:

$$Y_{\min}(\chi, \sigma, \tau_c, \alpha) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j |B_m(i) - B_t(i)|. \quad (15)$$

根据当前迭代次数生成粒子群并更新惯性权重。引用基于 Logistic 混沌映射的非线性变化惯性权重,可有效解决粒子群优化算法在面对复杂多参数提取的问题时容易陷入局部最优解的问题。惯性权重定义如下:

$$\omega(k) = r(k)\omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})k}{K}. \quad (16)$$

式中: $\omega_{\min} = 0.4$; $\omega_{\max} = 0.9$; $r(k)$ 为迭代生成的随机数,具体计算为

$$r(k+1) = 4r(k)(1-r(k)), \quad r(0) = \text{rand}. \quad (17)$$

式中, $r(0) \neq \{0, 0.25, 0.75, 1.00\}$ 。

图 2 为惯性权重随迭代次数的变化关系,可以看到,基于 Logistic 混沌映射产生的惯性权重具有

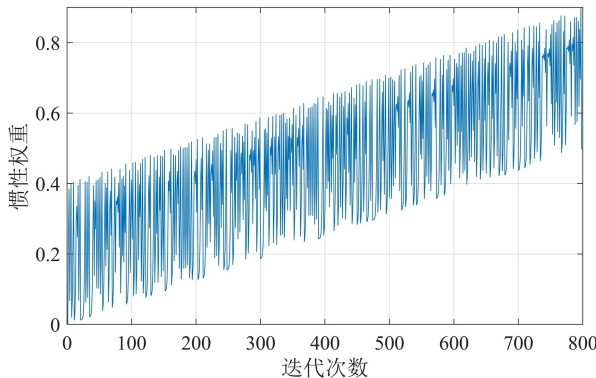


图 2 惯性权重随迭代次数变化

Fig.2 Inertia weight changes with the number of iterations

良好的随机性以及空间遍历性,从而增强了粒子群优化算法的全局开发能力与局部勘探能力。

通过计算当前种群的粒子平均适应度以及每个粒子的自适应判定条件并进行比较,可更好地选择粒子的位置与速度更新策略,从而提高粒子群优化算法的全局开发能力。粒子的自适应判定条件定义如下:

$$p_i = e^{Y(x_i(k)) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y(x_i(k))}. \quad (18)$$

式中, $Y(x_i(k))$ 为当前粒子的适应度。

采用个体最优解和群体最优解的线性组合对相应最优解进行替换,可以让算法在迭代过程中有更广泛的搜索范围,提高搜索最优解的概率。自适应粒子的速度与位置更新策略定义如下。

$$p_i > \delta:$$

$$\begin{cases} v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 \left[\frac{p_{id} + g_{id}}{2} - x_{id}(k) \right] + \\ c_2 r_2 \left[\frac{p_{id} + g_{id}}{2} - x_{id}(k) \right]; \\ x_{id}(k+1) = \omega x_{id}(k) + (1-\omega)v_{id}(k+1). \end{cases} \quad (19)$$

$$p_i \leq \delta:$$

$$\begin{cases} v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 [p_{id} - x_{id}(k)] + \\ c_2 r_2 [g_{id} - x_{id}(k)]; \\ x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1). \end{cases} \quad (20)$$

式中: $c_1 = c_2 = 2$, 为学习因子; r_1, r_2 为随机数; $\delta = 1$, 为阈值参数。当 $p_i > \delta$ 时,粒子的适应度远大于种群的粒子平均适应度,粒子较为分散,处于搜索初期,所以采用速度与位置更新式(19);当 $p_i \leq \delta$ 时,粒子与种群粒子平均适应度相差不大,粒子较为集中,处于搜索后期,使用速度与位置更新式(20)。式(19)通过引入个体最优解和群体最优解的线性组合,增大了粒子的搜索空间,更适用于参数复杂、搜索范围广的情况;式(20)则更注重算法的局部勘探能力,可以有效防止算法陷入局部最优,从而特高了算法的收敛速度。通过多次迭代求解式(15)可以实现对超顺磁响应的多参数提取。

3 参数提取验证

3.1 磁化参数分析

设置发射线圈的半径为 10 m,发射电流为 300 A,将磁化层设置在第一层,厚度为 60 m,设置

无穷频率下的磁化率为 0。其他两层的磁化率均为 0,电导率 σ 均为 0.01 S/m,发射线圈高度为 30 m。分别改变磁化层零频磁化率、分数阶以及磁化层电导率,分析这三种参数对超顺磁效应的影响,结果如图 3 所示。

超顺磁效应的衰减规律,说明早期的慢衰减是由电导率的增大而引起的。电导率影响出现的时间早于超顺磁效应,决定了超顺磁效应的出现时间。综上所述可知,通过对这三种参数的同时提取,可以有效反馈超顺磁层的所处位置及相关信息。

3.2 单一磁化参数提取

在此基础上,建立相应的理论模型,利用改进粒子群优化算法对 Cole-Cole 磁化率模型中的单一零频磁化率参数进行提取,从而验证方法的有效性。

将磁化层设置在第二层,层状磁化模型参数如表 1 所示。Cole-Cole 磁化率模型的时间常数为 1,选择迭代次数为 200 次,种群规模设置为 30,这样既保证了运算的速度,也保证了计算的准确性。同时,由于是对零频磁化率做参数提取,所以我们将粒子的速度范围设置为 $[-0.000\ 1, 0.000\ 1]$,位置范围设置为 $[0.01, 0.10]$,以便有效加快收敛速度,提高计算速度。

表 1 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率提取参数设置
Table 1 Zero frequency magnetic susceptibility extraction parameter setting of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	χ_0	d_1/m	d_2/m	K	M
1	0.04	5	20	200	30
2	0.05	20	25	200	30
3	0.06	25	30	200	30
4	0.08	30	20	200	30

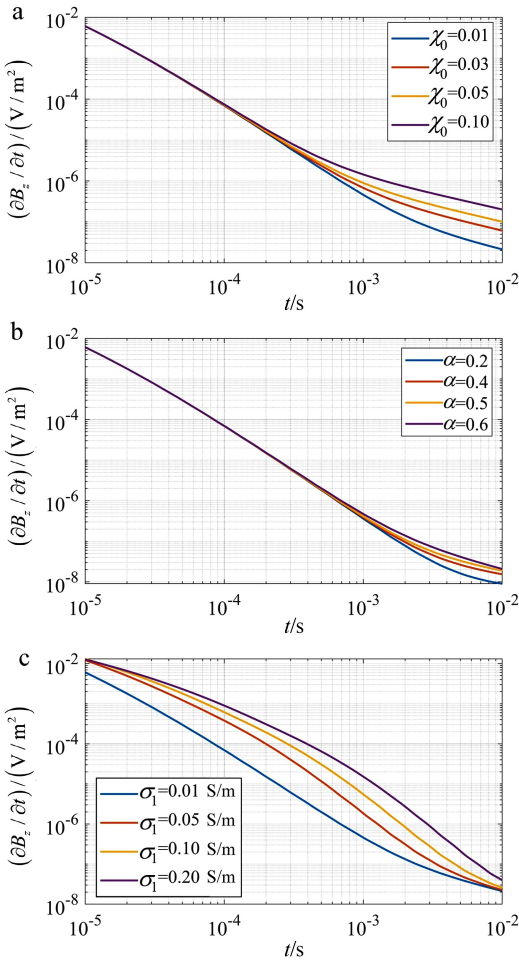
注: d_1 . 磁化层深度; d_2 . 磁化层厚度。

对 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率进行参数提取的结果如表 2 所示,适应度曲线如图 4 所示。经验证可知:利用改进粒子群优化算法对 Cole-Cole 磁化率模型进行单一零频磁化率提取具有较高的

表 2 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率提取结果

Table 2 Zero frequency magnetic susceptibility extraction results of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	χ_0	相对误差/%
1	0.040 050	0.013 1
2	0.049 980	0.034 8
3	0.059 998	0.003 8
4	0.079 998	0.002 6

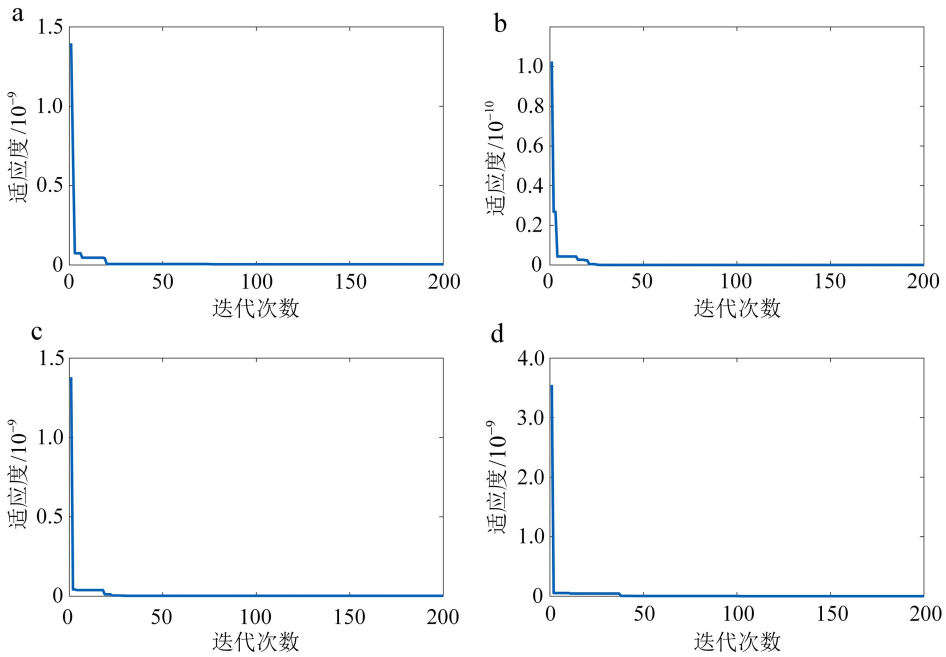


a. 零频磁化率;b. 分数阶;c. 电导率。

图 3 不同参数对于超顺磁效应的影响

Fig.3 Effect of different parameters on superparamagnetic effect

由图 3a 可以看出,不同的零频磁化率决定了超顺磁效应的强弱,随着零频磁化率的增大,磁化响应也逐渐增强。图 3b 显示了不同分数阶对晚期超顺磁效应衰减斜率的影响,可以看到,随着分数阶的增大,磁化响应出现的时间变晚,幅值变小。从图 3c 中可以看出:随着电导率的增大,超顺磁效应出现的时间也逐渐变晚,并在晚期趋于重合;而且,在衰减曲线早期也出现了明显的慢衰减现象,但并不符合



a. 模型 1; b. 模型 2; c. 模型 3; d. 模型 4。

图 4 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率提取适应度曲线

Fig.4 Zero frequency magnetic susceptibility extraction fitness curve of Cole-Cole susceptibility model

精度,最大相对误差小于 0.04%(表 2),保证了方法的准确性;迭代 50 次后,各模型均会收敛(图 4),方法具有较快的收敛速度,满足参数提取的基本要求。因此,可以实现对单一磁化参数的准确提取。

3.3 多个磁化参数提取

在此基础上,我们对 Cole-Cole 磁化率模型中的零频磁化率和分数阶同时进行提取。仍将磁化层设置在第二层,层状磁化模型参数如表 3 所示。Cole-Cole 磁化率模型的时间常数为 1。由于多参数提取的可能性变多,并且可能存在多解性问题,为保证参数提取的准确性,我们将迭代次数扩大到

500,种群规模保持为 30。以磁化层的一般特性为例,将粒子的速度范围设置为 $[-0.000\ 1, 0.000\ 1; -0.001\ 0, 0.001\ 0]$,位置范围设置为 $[0.01, 0.10; 0.10, 1.00]$ 。

对 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率和分数阶同时进行提取的结果如表 4 所示,适应度曲线如图 5 所示。可以看出,采用改进粒子群优化算法对 Cole-Cole 磁化率模型中的零频磁化率和分数阶同时进行提取,最大相对误差小于 0.6%(表 4);迭代 100 次后,各模型均会收敛(图 5),并实现对最优解的求解,满足参数提取的基本要求。

表 3 Cole-Cole 磁化率模型双参数(χ_0, α)提取参数设置

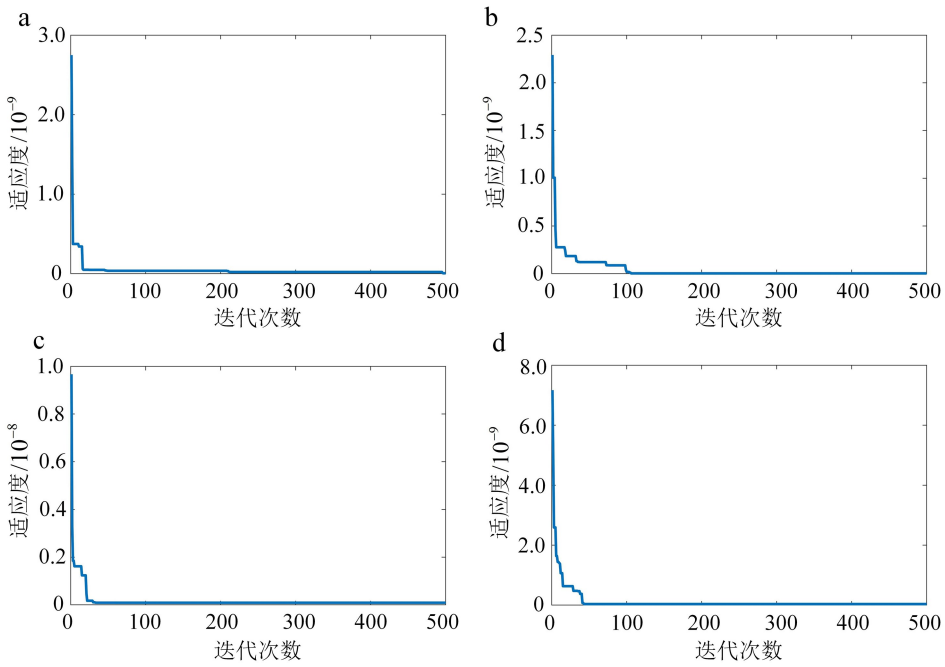
Table 3 Two-parameter (χ_0, α) extraction parameter setting of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	χ_0	α	d_1/m	d_2/m	K	M
1	0.020	0.43	10	20	500	30
2	0.055	0.38	20	15	500	30
3	0.060	0.65	15	25	500	30
4	0.072	0.54	25	35	500	30

表 4 Cole-Cole 磁化率模型双参数(χ_0, α)提取结果

Table 4 Two-parameter (χ_0, α) extraction results of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	提取值		相对误差/%	
	χ_0	α	χ_0	α
1	0.019 98	0.432 5	0.123 0	0.586 0
2	0.054 99	0.380 0	0.017 0	0.002 0
3	0.059 92	0.650 6	0.128 0	0.095 0
4	0.071 93	0.540 2	0.096 4	0.028 0



a. 模型 1; b. 模型 2; c. 模型 3; d. 模型 4。

图 5 Cole-Cole 磁化率模型双参数 (χ_0, α) 提取适应度曲线

Fig.5 Two-parameter (χ_0, α) extraction fitness curve of Cole-Cole susceptibility model

进一步,对零频磁化率、分数阶、电导率进行同时提取,模型参数如表 5 所示。将粒子的速度范围设置为 $[-0.000\ 1, 0.000\ 1; -0.001\ 0, 0.001\ 0; -0.000\ 1, 0.000\ 1]$,位置范围设置为 $[0.010, 0.100; 0.100, 1.000; 0.001, 0.100]$ 。

表 5 Cole-Cole 磁化率模型多参数 (χ_0, α, σ) 提取参数设置
 Table 5 Multi-parameter (χ_0, α, σ) extraction parameter setting of Cole-Cole susceptibility model

模型 序号	χ_0	α	$\sigma/$ (S/m)	$d_1/$ m	$d_2/$ m	K	M
1	0.030	0.23	0.01	10	20	1 000	30
2	0.050	0.45	0.03	5	30	1 000	30
3	0.067	0.52	0.05	30	25	1 000	30
4	0.083	0.67	0.08	20	15	1 000	30

对 Cole-Cole 磁化率模型零频磁化率、分数阶、电导率同时进行提取的结果如表 6 所示,适应度曲线如图 6 所示。可以看出,随着参数提取数量的增多,需要的迭代次数也随之增加,并且误差也相应增大,在对超顺磁效应进行多参数提取时,最大相对误差超过 2%(表 6),并且在 1 000 次迭代以内,各

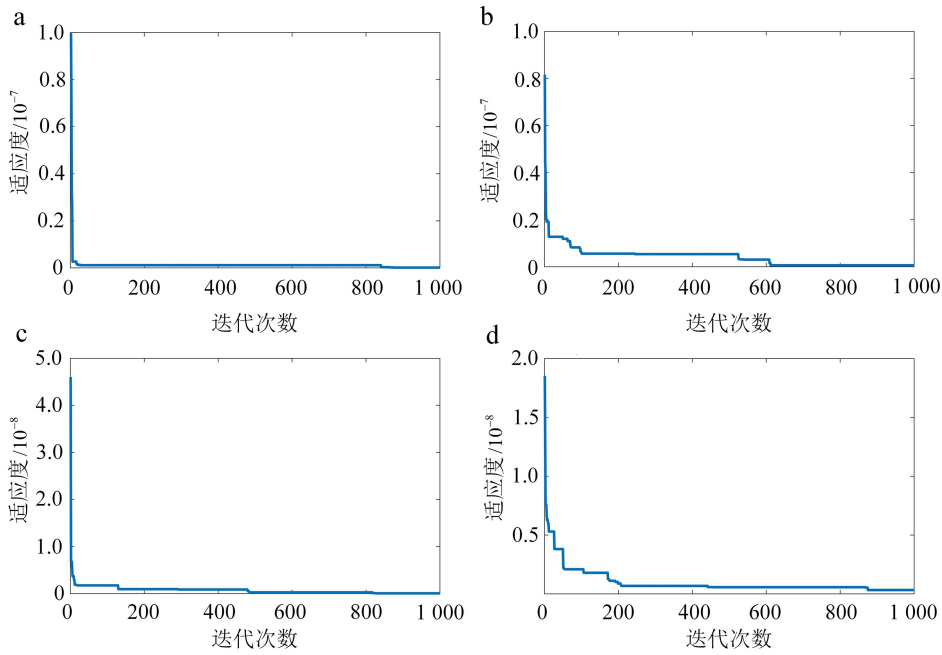
模型均能收敛(图 6)。以上研究验证了改进粒子群优化算法对磁化多参数提取的有效性。

表 6 Cole-Cole 磁化率模型多参数 (χ_0, α, σ) 提取结果
 Table 6 Multi-parameter (χ_0, α, σ) extraction results of Cole-Cole susceptibility model

模型 序号	提取值			相对误差/%		
	χ_0	α	$\sigma/$ (S/m)	χ_0	α	σ
1	0.029 9	0.227 4	0.010 0	0.30	1.130	0.100
2	0.050 7	0.445 1	0.030 1	1.40	1.091	0.330
3	0.067 1	0.519 4	0.050 1	0.15	0.120	0.200
4	0.083 1	0.666 6	0.080 1	0.12	0.507	0.125

3.4 种群规模的影响

为进一步提高改进粒子群算法的运行效率,我们分析了不同种群规模对超顺磁参数提取的影响。相应模型参数如表 7 所示。将粒子的速度范围设置为 $[-0.000\ 1, 0.000\ 1; -0.001\ 0, 0.001\ 0; -0.000\ 1, 0.000\ 1]$,位置范围设置为 $[0.010, 0.100; 0.100, 1.000; 0.001, 0.100]$ 。



a. 模型 1; b. 模型 2; c. 模型 3; d. 模型 4。

图 6 Cole-Cole 磁化率模型多参数 (χ_0, α, σ) 提取适应度曲线

Fig.6 Multi-parameter (χ_0, α, σ) extraction fitness curve of Cole-Cole susceptibility model

表 7 Cole-Cole 磁化率模型不同种群规模参数设置

Table 7 Different population sizes parameter setting of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	χ_0	α	$\sigma/(S/m)$	d_1/m	d_2/m	K	M
1	0.05	0.45	0.02	10	20	1 000	20
2	0.05	0.45	0.02	10	20	1 000	30
3	0.05	0.45	0.02	10	20	1 000	40

对 Cole-Cole 磁化率模型不同种群规模的参数提取结果如表 8 所示, 适应度曲线如图 7 所示。可以看出, 种群规模对于参数提取的结果有很大影响,

表 8 Cole-Cole 磁化率模型不同种群规模参数提取结果

Table 8 Different population sizes extraction results of Cole-Cole susceptibility model

模型序号	提取值			相对误差/%		
	χ_0	α	$\sigma/(S/m)$	χ_0	α	σ
1	0.060 3	0.406 1	0.021 0	20.60	9.76	5.00
2	0.052 0	0.434 6	0.021 0	4.00	3.42	5.00
3	0.051 8	0.438 6	0.020 0	3.60	2.53	0.10

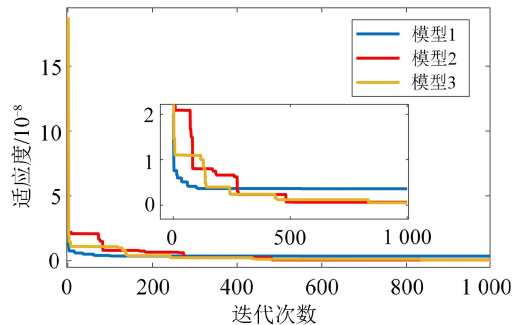


图 7 种群规模对于 Cole-Cole 磁化率模型参数提取的影响
Fig.7 Effect of population size on parameter extraction of Cole-Cole susceptibility model

在相同的迭代次数中, 随着种群规模的增大, 最小适应度及相对误差逐渐减小, 参数提取结果越来越准确, 提取到最优值的可能性逐渐变大, 但是随之而来的是更高的运行成本。所以, 对于超顺磁参数提取问题, 可以先选择较小的种群规模来缩小参数提取范围, 再选择更大的种群规模来进行高精度参数提取, 从而在保证提取结果准确的同时, 提高参数提取的效率。

4 结论

本文基于改进粒子群优化算法提出了一种针对

超顺磁效应的多参数提取方法。

1)通过引入 Cole-Cole 磁化率模型实现了层状超顺磁效应的数值模拟,进而对不同参数对于磁化响应的影响进行分析。结果表明,零频磁化率会影响超顺磁响应的幅值,分数阶与电导率会影响慢衰减现象的出现时间。

2)建立层状磁化模型,实现了对超顺磁体的零频磁化率、分数阶、电导率的多参数同时提取,验证了方法的有效性。

3)进一步对改进粒子群优化算法种群规模的影响进行分析,通过先选择较小的种群规模来缩小参数提取范围,再选择更大的种群规模来进行高精度参数提取,可以在保证提取参数准确的同时提高计算效率。

然而,随着参数的增多,多解性以及计算时间变长的问题愈发明显,如何解决这些问题将成为后续研究的重点。

参考文献 (References):

- [1] Aitken M J, Colani C. Utilization of Magnetic Viscosity Effects in Soils for Archaeological Prospection[J]. *Nature*, 1966, 212: 1446 - 1447.
- [2] Lee T. The Transient Electromagnetic Response of a Magnetic or Superparamagnetic Ground [J]. *Geophysics*, 1984, 49: 854 - 860.
- [3] Buselli G. The Effect of Near-Surface Superparamagnetic Material on Electromagnetic Transients[J]. *Geophysics*, 1982, 47(9): 1315 - 1324.
- [4] Bournas N, Taylor S, Prikhodko A, et al. Superparamagnetic Effects Discrimination in VTEM™ Data of Greenland Using Multiple Criteria and Predictive Approaches [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 145: 59 - 73.
- [5] Dabas M J, Skinner R. Time-Domain Magnetization of Soils (VRM), Experimental Relationship to Quadrature Susceptibility [J]. *Geophysics*, 2002, 58(3): 326 - 333.
- [6] Chikazumi S, Charap S. *Physics of Magnetism*[M]. New York: Krieger Publishing Company, 1978.
- [7] Kamnev Y K, Kozhevnikov N O, Kazansky A Y, et al. Impulse Response of Viscous Remanent Magnetization: Laboratory Measurements by a Pulse Induction System [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, 56(11): 1642 - 1651.
- [8] Antonov E Y, Kozhevnikov N O. Transient Electric

- Field Response to a Uniform, Magnetically Viscous Earth Excited by a Grounded Line Source[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, 58(7): 855 - 863.
- [9] Kozhevnikov N O, Antonov E Y. Magnetic Viscosity Effect on TEM Data of an Array with a Fixed Transmitter Loop [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, 59(6): 690 - 696.
- [10] Kozhevnikov N O, Antonov E Y. Magnetic Relaxation of a Horizontal Layer; Effect on TEM Data[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, 52(4): 398 - 404.
- [11] Kozhevnikov N O, Antonov E Y. The Magnetic Relaxation Effect on TEM Responses of a Uniform Earth[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, 49(3): 197 - 205.
- [12] Cowan D C, Song L, Oldenburg D W. Transient VRM Response from a Large Circular Loop over a Conductive and Magnetically Viscous Half-Space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3669 - 3678.
- [13] Zhang L B, Li H, Xue G Q, et al. Magnetic Viscosity Effect on Grounded-Wire TEM Responses and Its Physical Mechanism[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 6140 - 6152.
- [14] Ji Y J, Liu H S, Yu Y B, et al. 3 - D Modelling and Analysis of Superparamagnetic Effects in ATEM Based on the FDFD [J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 231(2): 1252 - 1267.
- [15] Zhao X J, Liu H S, Wu Y Q, et al. Magnetic Viscosity Effect in Magnetic-Source Time-Domain Electromagnetic Surveys[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1 - 11.
- [16] Macnae J. Quantitative Estimation of Intrinsic Induced Polarization and Superparamagnetic Parameters from Airborne Electromagnetic Data[J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): 433 - 446.
- [17] Macnae J, Munday T, Soerensen C. Estimation and Geologic Interpretation of Regolith Chargeability and Superparamagnetic Susceptibility in Airborne Electromagnetic Data [J]. *Geophysics*, 2020, 85: 153 - 162.
- [18] 陈雪,王贵君. 混合模糊系统的权值参数优化算法 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2022, 54(2): 5 - 10.
- Chen Xue, Wang Guijun. Optimization Algorithm of Weight Parameters of the Hybrid Fuzzy System[J]. *Journal of Northeast University (Natural Science*

- Edition), 2022, 54(2): 5-10.
- [19] 王彦琦, 张强, 朱刘涛, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的GBDT回归预测模型[J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(2): 401-408.
- Wang Yanqi, Zhang Qiang, Zhu Liutao, et al. GBDT Regression Prediction Model Based on Improved Whale Optimization Algorithm[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2022, 60(2): 401-408.
- [20] Kozhevnikov N O, Antonov E Y. The Magnetic Relaxation Effect on TEM Responses of a Two-Layer Earth[J]. Russian Geology and Geophysics, 2009, 50: 895-904.
- [21] Kong F N. Evaluation of Fourier Cosine/Sine Transforms Using Exponentially Positioned Samples[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 79: 46-54.
- [22] 李建华, 林品荣, 张强, 等. 可控源电磁法中关键技术研究与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 713-724.
- Li Jianhua, Lin Pinrong, Zhang Qiang, et al. Research and Application of Key Technology of Controlled Source Electromagnetic Method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 713-724.
- [23] Liu H, Zhang X W, Tu L P. A Modified Particle Swarm Optimization Using Adaptive Strategy[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152: 113353.
- [24] Liu H R, Cui J C, Lu Z D, et al. A Hierarchical Simple Particle Swarm Optimization with Mean Dimensional Information [J]. Applied Soft Computing, 2019, 76: 712-725.
- [25] 李广, 丁迪, 石福升, 等. 基于支持向量机的可控源电磁数据智能识别方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 725-736.
- Li Guang, Ding Di, Shi Fusheng, et al. Intelligent Recognition of Controlled-Source Electromagnetic Data by Support Vector Machine[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 725-736.