

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508086

# 基于 IMOA 的随钻陀螺仪误差补偿\*

杨金显<sup>1,2</sup> 李龙玺<sup>1,2</sup> 张 颖<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室 焦作 454003)

**摘 要:**针对陀螺仪误差参数受随钻测量环境影响难以辨识的问题,提出一种改进海猫算法(IMOA)对陀螺仪误差进行补偿。首先推导出陀螺仪误差模型并确定需要辨识的误差参数,利用加速度计输出特性建立目标函数并根据内积特性与磁模值相对误差设置约束条件。采用海猫算法(MOA)算法求解误差向量的最优值。在 MOA 算法的基础上,以加速计相对模值误差重新设置步长,自适应地追踪随钻环境引起的陀螺仪信号改变;设计引导式螺旋全局更新方式,在更新中设置引导因子判断当前搜索方向的优劣并利用逐维奖励机制使得不同参数在信息交流时,较大程度保留了最优解,防止陷入局部最优。设置局部迁移路线,重新定义偏差为当前个体辨识的误差参数与历史最优误差参数的笛卡尔距离;同时加入逐维扰动策略,保留各维误差参数的最优解。最后将 IMOA 算法应用于识别陀螺仪误差参数,结果表明,IMOA 算法补偿后的陀螺输出误差明显减小,井斜角误差由 9.54°降低至 2.53°,相对于 PSO 算法和 MOA 算法具有更高的识别精度。

**关键词:** 随钻测量;MEMS 陀螺仪;海猫算法;误差补偿

**中图分类号:** TN713      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Error compensation of gyroscope while drilling based on IMOA

Yang Jinxian<sup>1,2</sup> Li Longxi<sup>1,2</sup> Zhang Ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;  
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Min Equipment, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the error parameters of the gyroscope are difficult to identify due to the influence of the measurement environment while drilling, an improved meerkat optimization algorithm (IMOA) is proposed to compensate for the gyroscope error. Firstly, the gyroscope error model is derived and the error parameters that need to be identified are determined. The objective function is established by using the output characteristics of the accelerometer, and the constraint conditions are set according to the inner product characteristics and the relative error of the magnetic modulus value. The meerkat optimization algorithm (MOA) is adopted to solve the optimal value of the error vector. Based on the MOA algorithm, the step size is reset with the relative modulus error of the accelerometer to adaptively track the changes in the gyroscope signal caused by the drilling environment. A guided spiral global update method is designed. During the update, a guiding factor is set to judge the superiority or inferiority of the current search direction, and a per-dimensional reward mechanism is utilized to ensure that different parameters retain the optimal solution to a large extent when exchanging information, preventing falling into local optimum. Set the local migration route and redefine the deviation as the cartesian distance between the error parameter of the current individual identification and the historical optimal error parameter; Meanwhile, the per-dimensional perturbation strategy is added to retain the optimal solutions of the error parameters in each dimension. Finally, the IMOA algorithm was applied to identify the error parameters of the gyroscope. The results show that the output error of the gyroscope after compensation by the IMOA algorithm is significantly reduced, and the well slope angle error is reduced from 9.54° to 2.53°. Compared with the PSO algorithm and the MOA algorithm, it has higher recognition accuracy.

**Keywords:** measurement while drilling; MEMS gyroscope; meerkat optimization algorithm; error compensation

## 0 引言

微机电系统 (MEMS) 陀螺仪因其小体积、低重量、低功耗等特点被广泛应用于随钻测量领域<sup>[1]</sup>。MEMS 陀螺仪是随钻测量的核心器件,能为测量提供方向和倾角数据,但是与其余传感器一样,MEMS 陀螺仪在测量角速率时由于外部环境或内部结构发生改变,不可避免地产生误差。MEMS 陀螺仪的误差按照其特性大致可以分为恒定漂移与随机漂移误差。其中恒定漂移包含零偏误差,非正交误差与刻度误差;随机漂移误差包括了温度漂移误差,量化噪声,角度随机游走等<sup>[2]</sup>。在钻进时,由于钻头与不同地质层的相互作用产生大量振动甚至是冲击,陀螺输出会包含较大误差,且误差会随积分过程不断累积,严重影响了姿态解算,因此精准的识别陀螺仪误差参数在随钻测量时显得尤为重要<sup>[3]</sup>。

在传统的陀螺仪数据方法中,如有限脉冲响应滤波,最小均方滤波等均具有计算量大、结构复杂的且难以适用随钻环境的特点<sup>[4-5]</sup>。Zeng 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于区间经验模态分解和自回归移动平均 (ARMA) 模型的方法处理陀螺仪信号,在静态条件下,与传统的经验模态分解和自回归滑动平均方法相比,所提方法能够分别减少 52.6% 和 33.3% 的均方根误差 (root mean square error, RMSE),但是经验模态分解方法依赖于信号的局部特性和时间频率分布,随着环境变化,这些特性可能会发生变化,导致分解结果不稳定。Liang 等<sup>[7]</sup>提出了一种小波阈值反向传播神经网络方法对 MEMS 陀螺仪进行误差补偿,陀螺仪的零偏不稳定性、角随机游走和角速度随机游走分别提高了约 12、10 和 7 dB,但是该方法计算复杂度,在实时随钻测量过程中可能导致较高的计算负担。杨金显等<sup>[8]</sup>提出了一种磁惯性金豺优化算法提取重力加速度,解算的井斜角和工具面角绝对误差平均值分别控制在 0.63° 和 0.8° 以内,但是该算法考虑重力加速度误差仍然有限。上述算法依赖大量的实验数据并且难以有效的在复杂、无法预测的随钻环境中对陀螺误差进行补偿。近年来提出的元启发式优化算法在参数辨识方面具有良好表现,其通过较少的数据解决足够复杂的优化问题,在随钻测量中逐渐得到应用<sup>[9]</sup>。Wei 等<sup>[10]</sup>提出基于遗传粒子群变分模态分解和改进神经网络算法的陀螺混合补偿模型,克服了陷入局部最优的问题,但是该方法对其他来源的漂移项处理不完全,导致误差消除效果有限。杨金显等<sup>[11]</sup>提出了一种基于磁重力浮游算法的陀螺仪误差参数辨识方法对陀螺仪输出误差进行补偿后,井斜角误差由 9.75° 降低至 1.52°,但是该算法受磁强干扰影响较大。

海猫优化算法 (meerkat optimization algorithm, MOA)

是 Xian 等<sup>[12]</sup>提出的一种模拟自然界海猫行为模式的元启发式优化算法,其群体协作、信息传递、适应性调整等特征在随钻陀螺误差参数辨识中具有一定优势。当处于全局搜索状态时,海猫以相同概率追捕猎物能够快速寻找到全局最优误差参数,同时每次迭代所得到的不同误差参数间的信息交流使得辨识的参数不断地自我调整提高了精度,有助于补偿陀螺仪的恒定漂移误差;在局部搜索时,海猫面对不同的威胁快速转换的搜索方式,对在辨识受环境影响不断随机变化的误差参数时有很好的自适应性,且能及时有效的处理无法预测的随机误差。综上所述,将 MOA 用于解决在振动和冲击等复杂随钻环境中补偿陀螺仪误差具有一定优势,但是 MOA 算法因为其固定的参数值以及步长可能无法准确追踪到陀螺仪误差参数的变化;算法在两种状态下的搜索路径均采用随机方向并不符合真实的钻进过程,当历史最优误差参数发生改变时加入的随机偏差与方向更新并不符合钻进过程中陀螺仪围绕原最优参数上下波动的变化规律,另外某些维度的陀螺误差参数最优解可能在迭代过程中丢失,如何保持各维误差参数的最优解也应考虑。

针对上述问题,提出了一种改进海猫算法 (improved MOA, IMOA) 对随钻陀螺仪误差进行补偿。首先通过误差分析建立陀螺仪的误差补偿模型,针对固定步长无法追跟随钻环境变换,在原算法的基础上引入加速度计相对模值误差以自适应的改变步长;在全局搜索状态下分别通过引导式螺旋更新控制全局更新方向并设置逐维奖励机制进行误差向量信息交流,确保各维误差参数的较优解;在局部更新中,当前最优误差向量发生改变时,重新定义偏差并加入整体迁移路线,模拟误差参数改变方向,使误差参数快速收敛至最优;在算法更新中随着种群不断靠近最优误差参数加入逐维扰动,以误差向量搜索空间为依据设立扰动概率,以保证所得陀螺误差向量每一维的最优解信息都被保留。最后,将 IMOA 算法应用于陀螺仪误差参数的识别,通过转台实验与实际钻进实验的对比分析验证了 IMOA 算法的性能。

## 1 MEMS 陀螺仪的输出模型

MEMS 陀螺仪的确定性误差主要由零位偏置,标度因数以及非正交误差组成,根据 MEMS 陀螺仪的误差来源建立误差模型<sup>[13]</sup>:

$$\tilde{\omega} = \omega + S\omega + b + \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  为陀螺仪各轴向输出的测量值;  $\tilde{\omega} = [\tilde{\omega}_x \ \tilde{\omega}_y \ \tilde{\omega}_z]^T$  为 MEMS 陀螺仪真实角速度;  $S$  为比例因子误差和非正交误差矩阵,比例因子为陀螺输入角速度和量测输出角速度的比值,理想情况下其值为

1, 但受随钻环境影响会呈现出非线性、不对称<sup>[14]</sup>等特点;  $\mathbf{b} = [b_x \ b_y \ b_z]^T$  为陀螺的零偏误差;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为随机误差, 一般认为是高斯白噪声, 可通过数据预处理抑制<sup>[15]</sup>。

由式(1)可得误差的补偿模型为:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{P}(\tilde{\boldsymbol{\omega}} - \mathbf{b}) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{P} = (\mathbf{I}_3 + \mathbf{S})^{-1}$ ,  $\mathbf{I}_3$  为单位矩阵。

设误差补偿矩阵为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

最终得到随钻 MEMS 陀螺的 12 维误差因子向量:

$$\mathbf{Q} = [p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ \cdots \ b_x \ b_y \ b_z]^T \quad (4)$$

## 2 基于 MOA 算法的陀螺仪误差参数识别

### 2.1 目标函数

MEMS 陀螺仪输出角速度中的误差会随积分累积, 使得陀螺产生累积误差并影响测量精度<sup>[16]</sup>。而随钻测量系统的加速度计进行姿态解算不存在累计误差<sup>[17]</sup>, 若陀螺解算出现偏差时, 由导航坐标系( $n$ -系)到钻具坐标系( $b$ -系)的旋转矩阵  $C_n^b$  相应出现偏差, 此时加速度计通过旋转矩阵  $C_n^b$  解算的重力加速度  $\hat{\mathbf{g}}_b$  与实际重力加速度  $\mathbf{g}_b$  也存在偏差, 由  $\|\hat{\mathbf{g}}_b \times \mathbf{g}_b\| = \|\hat{\mathbf{g}}_b\| \|\mathbf{g}_b\| \sin\theta$  可知, 该偏差的大小与两向量的夹角呈正相关, 因此利用加速度计的输出特性建立目标函数。

$$f_{\min} = \left| \arcsin \frac{\|\hat{\mathbf{g}}_b \times \mathbf{g}_b\|}{\|\hat{\mathbf{g}}_b\| \|\mathbf{g}_b\|} \right| \quad (5)$$

### 2.2 约束条件

陀螺仪由于本身精度因素, 测量的角速度值会参在误差  $e$ 。Mahony 算法<sup>[18]</sup>假设当载体静止时加速度计在  $n$ -系的输出值为  $[0 \ 0 \ g]^T$ , 即在理想状况下应该有  $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ 。但是由于加速度计受随钻测量时强振动、冲击影响, 其本身可能存在偏角  $\varphi$ , 根据上述分析中采用向量叉乘  $\mathbf{e} = \mathbf{a} \times \mathbf{g} = |\mathbf{a}| |\mathbf{g}| \sin\varphi$  表示误差, 为约束该偏角, 采用陀螺仪旋转角度进行约束, 在采样间隔  $\Delta t$  内, 陀螺仪测得的旋转角度解算为  $\theta^o = \boldsymbol{\omega} \cdot \Delta t$ 。则可以使用角度比值作为约束条件, 当两个角度越相近, 则比值越接近 1, 有:

$$Y_s = \frac{\boldsymbol{\omega} \cdot \Delta t}{\arcsin(\mathbf{a} \times \mathbf{g}) / |\mathbf{a}| |\mathbf{g}|} \quad (6)$$

式中:  $Y_s$  为常数, 越接近 1 算法求得的误差参数可信度越高。

同时, 利用磁强计抗震能强的优势建立陀螺仪的输出模型以进一步提升陀螺的输出精度。参考文献[19]中陀螺和磁强计输出之间的关系:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = (1 + [\boldsymbol{\omega}_{k-1}]_x \Delta t) \mathbf{h}_{k-1} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{h}_{k-1}$  表示  $k-1$  时刻磁强计的测量值;  $\hat{\mathbf{h}}_k$  为对  $k$  时刻磁强的估计;  $\Delta t$  为  $k$  和  $k-1$  之间的时间间隔;  $[\boldsymbol{\omega}]_x =$

$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$  为陀螺测量的三轴角速度。可得

到磁模值相对误差为:

$$e_h = \left| \frac{\|\hat{\mathbf{h}}_k\| - \|\mathbf{h}_k\|}{\|\mathbf{h}_k\|} \right| \quad (8)$$

$e_h$  越接近 0 说明磁场的估计值与实际值越接近, 此时陀螺的输出也更为准确。由参考文献[20]可知当设定  $e_h \leq 0.5$  时, 基本满足钻具姿态角结算要求。

### 2.3 MOA 算法辨识陀螺仪误差参数

基于 MOA 算法的随钻陀螺仪误差补偿的原理就是通过不断迭代更新辨识陀螺仪误差补偿模型中的误差参数向量, 进而得到较为准确的三轴角速度输出。

首先进行种群初始化:

$$\mathbf{X}_i^t = \text{random}_{\text{normal}}(\text{loc} = 0.5, \text{scale} = 0.3) \cdot (ub - lb) + lb \quad (9)$$

其中, 每个个体  $\mathbf{X}_i^t$  可以认为是陀螺仪误差参数的一个可行解,  $\text{random}_{\text{normal}}$  为标准差为 0.3 的正态随机分布数,  $ub$ 、 $lb$  分别为误差参数解空间的上下边界。

在进行全局搜索时, 算法以相同的概率搜索陀螺误差参数:

$$\begin{aligned} \text{direct} &= \mathbf{X}_i^0 \\ \text{step} &= (1 - t/T) \cdot r \\ \mathbf{X}_i^{t+1} &= \mathbf{X}_i^t + \text{step} \cdot \text{direct} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\text{step}$  为根据误差向量搜索空间随机设置的步长;  $t$  为当前迭代次数;  $T$  为最大迭代次数;  $r$  为根据环境设置的随机数。

在每次全局更新时, 会对临近误差参数进行信息交流, 以获取更为精准的陀螺误差参数:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_i^t + \text{step} \cdot (\mathbf{X}_j^t - (\text{rand} + 0.5) \cdot \mathbf{X}_i^t) \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{X}_j^t$  是一个随机选择的本次迭代中的一个陀螺误差向量。两种全局搜索方式能够确保在误差参数调整过程中充分考虑全局信息又可以根据相邻误差参数的表现进行自我修正, 使得算法能够更快的收敛至最优误差参数且有效补偿 MEMS 陀螺仪的恒定漂移。但是由于无法判别随机选取的两个误差向量每个参数的质量, 仅依靠随机权重进行信息交流, 可能会引入某维参数的劣质解作为参考, 使得算法陷入局部最优。

当算法进行局部搜索时, 对应于陀螺在随钻过程中受外界环境影响产生不平稳信号, 陀螺输出信号会随环境变化呈现出时变、非线性的特点。此时计算适应度函



数,若  $F(\mathbf{X}_{em}^t) < F(\mathbf{X}_i^t)$ ,则表示当前外界影响因素没有使得所计算最优误差向量位置发生改变,历史最优误差参数向量依旧为当前全局最优误差参数,此时将朝向此位置进行收敛:

$$div = rand + 0.1$$

$$\mathbf{X}_{em}^t = \mathbf{X}_i^t + (2 \cdot rand \cdot \mathbf{X}_{gb}^t - \mathbf{X}_i^t) \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_{em}^t$$

$\mathbf{X}_{em}^t$  为下次更新后的误差向量位置,由随钻过程发生不稳定信号时所得的历史最优位置  $\mathbf{X}_{gb}^t$  及当前个体位置求得。

反之,原历史最优误差向量的适用度不再为最好时,算法中个体将会朝向别的方向搜索新的误差向量:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = div \cdot \mathbf{X}_i^t - (2 \cdot rand \cdot \mathbf{X}_{gb}^t - \mathbf{X}_i^t) \quad (13)$$

式中:  $div$  是一个用于增加个体随机搜索范围的偏差。局部搜索能够有效补偿陀螺仪在钻进过程中产生的随机误差。但是随机的局部搜索偏差并未符合井下环境变化时随机误差的振荡变化特性,依旧容易使得算法陷入局部最优。

为了尽可能的增加搜索误差参数的精度,防止陷入局部最优,原算法在每次迭代时将有一定的机会在随机方向上随即探索:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_i^t + (2 \cdot rand - 1) \cdot (\mathbf{X}_i^t + rand \cdot s) \cdot step \quad (14)$$

式中:  $s$  为  $levy$  飞行。

## 2.4 MOA 算法改进-IMO A

### 1) 自适应步长

复杂的随钻测量环境将导致陀螺仪信号的非线性变化,这意味着线性减小的步长将无法及时识别当前钻进环境变化,可利用加速度模值相对误差重新设计步长,以自适应追踪当前随钻环境来调整搜索步长。

首先计算当前迭代加速度估计:

$$\hat{\mathbf{a}}_t = (1 + [\omega_{t-1}]_x \Delta t) \mathbf{a}_{t-1} \quad (15)$$

式中:  $\hat{\mathbf{a}}_t$  是由  $t-1$  次迭代时所得加速度计输出  $\mathbf{a}_{t-1}$  与陀螺输出  $\omega_{t-1}$  所得的  $t$  时刻的加速度计输出估计值。

据此设置加速度模值相对误差:

$$a_h = \left| \frac{\|\hat{\mathbf{a}}_t\| - \|\mathbf{a}_t\|}{\|\mathbf{a}_t\|} \right| \quad (16)$$

当  $a_h$  越小,此时由 MEMS 陀螺仪估计所得加速度值越准确,则陀螺仪输出数据越准确,适当减少步长,反之则增加步长,同时将原算法固定参数  $r$  定义为当前迭代中所得最差误差向量与最优误差向量的欧氏距离:

$$r = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\mathbf{X}_{bk}^t - \mathbf{X}_{gk}^t)^2} \quad (17)$$

$r$  的重新设置,使得算法在辨识陀螺仪误差参数时能

够有效避免随机步长跳出搜索空间或者陷入局部最优。综上所述,IMO A 步长定义如下:

$$step = a_h \cdot r \quad (18)$$

随着向最优误差参数收敛的过程中,步长将会自适应的根据当前状态发生改变,相较于原算法具有更好的环境适应性。

### 2) 全局引导式螺旋更新及逐维奖励机制

原算法仅依靠随机的方向进行快速收敛而未加引导,在辨识误差参数时容易找的错误更新路径。因此重新设置全局状态下的更新方式如下:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_i^t + step \cdot [(1 - \beta)_2 e^{\beta} \cos 2\pi \alpha_1 + \beta \mathbf{X}_{gk}^t] \quad (19)$$

式中:  $\beta = \|\mathbf{g}_b\| / \|\hat{\mathbf{g}}_b\|$  为引导因子,取值范围为  $[0, 1]$ 。垂直钻进时实际重力加速度与通过旋转矩阵解算的重力加速度模值理论相等,当  $\beta$  较小时,此时所得误差参数较差,为在打破单一的搜索方向的同时对已得最优误差参数附近进行细化搜索,引入螺旋式更新;当  $\beta$  较大时,所得误差参数具有较好精度,此时加快收敛并在朝向当前最优误差参数收敛的过程中使用较小的螺旋遍历防止算法陷入局部最优。通过引导式螺旋更新,控制了误差参数辨识方向以及搜索空间的大小,提升了算法效率与误差参数精度。

由于 MEMS 陀螺仪误差向量每一维参数变化受环境影响会有不同的变化幅度,而原算法在信息交流时无法保证每个维度更新的正确方向,因此重新设置逐维奖励机制进行不同误差参数间的信息交流:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \mathbf{X}_i^t + step \cdot \left( \frac{T_m(\mathbf{X}_j^t)}{D_m} \cdot \mathbf{X}_j^t - \frac{T_m(\mathbf{X}_i^t)}{D_m} \cdot \mathbf{X}_i^t \right) \quad (20)$$

$$D_m = T_m(\mathbf{X}_j^t) + T_m(\mathbf{X}_i^t)$$

式中:  $T_m(\mathbf{X}_i^t)$  为当前迭代状态下随机选择两个误差向量进行信息交流时误差向量  $\mathbf{X}_i^t$  所得信息奖励。

结合陀螺误差模型利用最小二乘法得到 MEMS 陀螺仪的 12 维误差向量估计值:

$$\tilde{\mathbf{Q}} = [\tilde{p}_{11} \tilde{p}_{12} \tilde{p}_{13} \cdots \tilde{b}_x \tilde{b}_y \tilde{b}_z]^T \quad (21)$$

将  $\mathbf{X}_i^t$  与  $\mathbf{X}_j^t$  所需要比较的某一维误差参数代入估计误差参数中进行比较,目标函数低者得一分,反之不得分,所得总分即为逐维信息奖励分:

$$T_m(\mathbf{X}_i^t) = \sum_{k=1}^n \tau_{ik} \quad (22)$$

式中:  $\tau_{ik}$  为误差向量  $\mathbf{X}_i^t$  第  $k$  维误差参数所得分值。

$$\tau_{ik} = \begin{cases} 0, & F(\mathbf{X}_{ik}) > F(\mathbf{X}_{jk}) \\ 1, & F(\mathbf{X}_{ik}) \leq F(\mathbf{X}_{jk}) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $F(\mathbf{X}_{ik})$  为将误差向量  $\mathbf{X}$  的第  $j$  维代入误差向量估计值后所得目标函数的值,通过逐维奖励机制使得误差向量在信息交流时,较大程度保留了最优解,防止陷入局

部最优。

### 3) 迁移式局部更新

当历史最优误差参数发生改变时,将会进行随机方向的局部更新,这使得原算法产生较多工作量且存在陷入局部最优的风险。在间歇扰动的随钻环境下,陀螺仪误差参数会绕历史最优值附近上下波动,因此提出一种迁移式局部更新的方式进行误差参数辨识:

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = [1 - \sin(2t/T)] \cdot \text{div} \cdot \mathbf{X}_i^t - (2 \cdot \text{rand} \cdot \mathbf{X}_{gb}^t - \mathbf{X}_i^t) \quad (24)$$

将原算法中的随机偏差  $\text{div}$  定义为当前个体辨识的误差参数与历史最优误差参数的笛卡尔距离:

$$\text{div} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\mathbf{X}_{ik}^t - \mathbf{X}_{gb}^t)^2} \quad (25)$$

此时当误差参数发生改变时引入正弦遍布式迁移更新符合其改变规律且使得误差参数能快速迁移至新的最优解。

### 4) 逐维折射扰动

在钻进中陀螺仪误差参数呈现非线性变化,不同参数变化幅度也将不同,尤其是随机误差受环境影响明显,虽然算法本身设计在每次迭代时加入随机方向上搜索,但是该方式将误差向量视为一个整体进行改变,没有考虑误差参数的不同维度,某些维度的陀螺误差参数最优解可能在迭代过程中丢失,且在误差参数更新过程中的引导式更新以及迁移式更新划定了搜索方向,可能遗失某一方向的优势解,为了避免算法过度依赖当前解,增加各维度误差参数的随机性,对误差参数各维加入扰动,并随着粒子愈发靠近最优个体,扰动的几率增加。

$$P_{rd} = 1 - \frac{1}{2} e^{-[t/X_{worst}(j) - X_{best}(j)]^2} \quad (26)$$

式中:  $t$  为迭代次数。由式(26)可知,迭代开始时,扰动的概率接近零,此时算法快速寻找最优误差参数,并随着迭代次数的增加,扰动概率  $P_{rd}$  逐渐增加,此时算法更有可能采取扰动,防止陷入局部最优。

随着时间的增加误差参数向量的逐维扰动概率增加。每次迭代后对当前解以及相应的折射解进行评估,保留质量更好的误差参数,折射定义如下:

$$X'_{1(i,k)} = \frac{(\mathbf{UB}_{\max} + \mathbf{LB}_{\min})}{2} + \frac{(\mathbf{UB}_{\max} + \mathbf{LB}_{\min})}{2\eta} - \frac{X_{1(i,k)}}{\eta} \quad (27)$$

式中:  $i$  代表种群中第  $i$  个个体;  $k$  为维度;  $\eta$  为折射率。

$$\eta = \frac{(\mathbf{UB}_{\max} + \mathbf{LB}_{\min})/2 - X_1}{X'_1 - (\mathbf{UB}_{\max} + \mathbf{LB}_{\min})/2} \quad (28)$$

式中:  $\mathbf{UB}_{\max}$  与  $\mathbf{LB}_{\min}$  为陀螺误差参数空间的最大上界与最小下界,由相邻时刻磁强计的输出及式(7)推导出

$[\omega]_x$ , 并结合 MEMS 陀螺仪的 12 维误差向量估计值  $\tilde{\mathbf{Q}}$ :

$$\begin{cases} \mathbf{UB}_{\max} = \max[\tilde{p}_{11} \tilde{p}_{12} \tilde{p}_{13} \cdots \tilde{b}_x \tilde{b}_y \tilde{b}_z]^T \\ \mathbf{UB}_{\min} = \min[\tilde{p}_{11} \tilde{p}_{12} \tilde{p}_{13} \cdots \tilde{b}_x \tilde{b}_y \tilde{b}_z]^T \end{cases} \quad (29)$$

根据估计的陀螺仪误差参数上下界确定折射率及折射后误差参数的位置能够有效防止发生折射时误差参数超出边界,且扩大了更新的随机性,防止有引导式的更新过程中误差参数陷入局部最优,使得算法具有更好的自适应性,有效提高了误差参数的识别精度。

### 5) 算法流程

综上所述改进后的 IMOA 算法流程图如下:

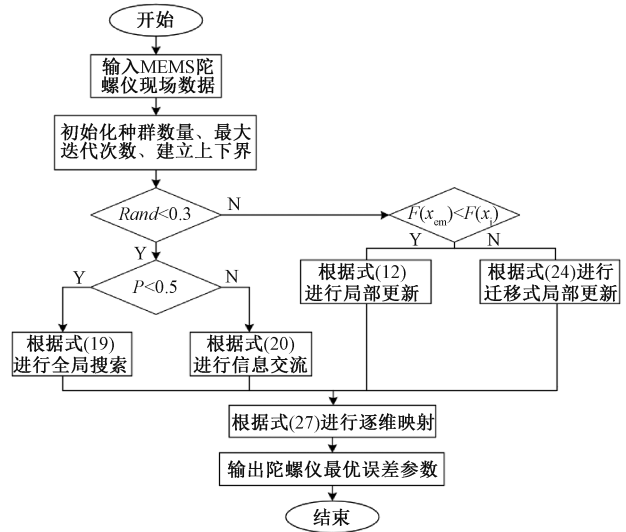


图 1 基于 IMOA 的随钻陀螺仪误差补偿流程

Fig. 1 Error compensation flow of gyroscope while drilling based on IMOA

## 3 实验验证

### 3.1 转台实验

为验证 IMOA 算法在随钻测量环境下陀螺仪误差参数识别,分别使用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、MOA 算法以及 IMOA 算法对陀螺仪误差参数进行辨识。将由陀螺仪、加速度计、磁强计组成的随钻惯性测量单元固定在转台上,如图 2 所示。

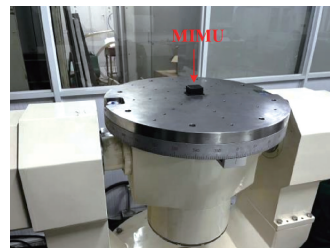


图 2 转台实验

Fig. 2 Turntable experiment

此时  $X$  轴、 $Y$  轴保持水平放置、 $Z$  轴垂直放置,设置转台沿  $Z$  轴旋转,转速为  $180^{\circ}/\text{s}$ ,陀螺采样频率  $30\text{ Hz}$ 。将种群数量设置为  $50$ ,最大迭代次数设置为  $500$  次,适应度函数均为式所建立的目标函数。对  $5\,000$  个数据点进行误差补偿,得到 3 种算法的收敛曲线如图 3 所示。

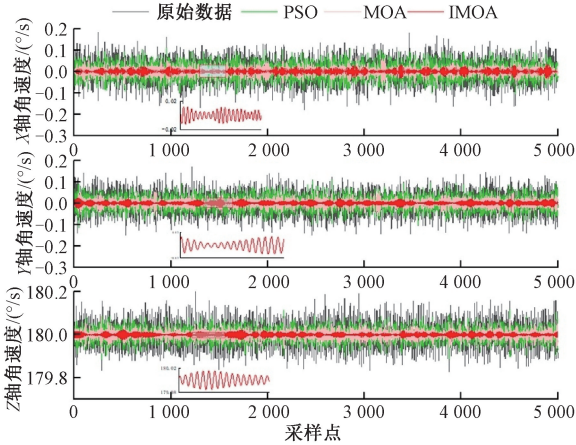


图 3 转台实验陀螺仪三轴输出补偿结果

Fig. 3 The compensation results of three axis output of gyroscope in Turntable experiment

由图 3 可以看出,相较于 PSO、MOA 算法,IMOA 算法进行补偿后误差明显更小,说明了该算法具有更高的精度。

3.2 模拟钻进实验

如图 4 所示,使用由大理石、花岗岩和青石组成的混叠地质层模拟地质层进行模拟钻进实验,模拟钻具垂直钻进。测量时,持续采集  $30\text{ min}$  钻具数据,并选取钻速稳定时的  $5\,000$  个数据作为原始数据,继续采用 PSO、MOA 以及本文提出的 IMOA 算法辨识陀螺仪误差参数。其迭代次数、初始化种群数量与转台实验一致。



图 4 模拟钻进实验

Fig. 4 Simulation drilling experiment

3 种优化算法的陀螺误差参数补偿效果如图 5 所示,从图 5 可明显看出在钻进过程中由于强振动、强冲击和温度等因素干扰,PSO 算法无法有效处理尖峰、毛刺等噪声,虽然相对于 PSO 算法,MOA 算法有更好的补偿效果,但是依旧没法达到随钻测量的要求精度。IMOA 算

法补偿后输出的三轴信号均满足陀螺输出精度的要求,可辨识较为准确的陀螺误差参数。

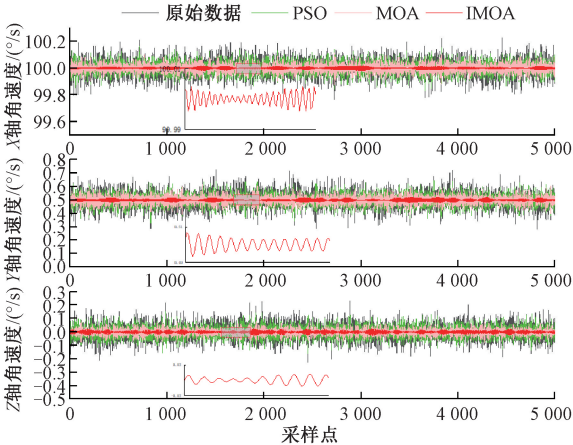


图 5 模拟钻进实验陀螺仪三轴输出补偿结果

Fig. 5 The compensation results of three axis output of gyroscope in simulation drilling experiment

为更直观的验证 IMOA 算法的优越性,设计转台实验以及模拟钻进实验 4 种方案的性能比较,以陀螺仪信号的信噪比(signal noise ratio, SNR)和 RMSE 为指标,如表 1 所示。

表 1 不同算法性能指标

| Table 1 Performance indicators of different algorithms |                |                             |                |                             |
|--|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|
| 算法   | 转台实验<br>SNR/dB | 转台实验<br>RMSE/( $^{\circ}$ ) | 模拟钻进<br>SNR/dB | 模拟钻进<br>RMSE/( $^{\circ}$ ) |
| 原始数据   | 41.2           | 4.6                         | 37.4           | 4.9                         |
| PSO  | 49.1           | 2.9                         | 42.6           | 3.1                         |
| MOA  | 57.3           | 1.4                         | 50.3           | 1.5                         |
| IMOA   | 69.3           | 0.8                         | 58.5           | 1.1                         |

从表 1 可以看出,无论是在转台实验和模拟钻进实验下,所提算法 IMOA 对陀螺仪信号的误差补偿都取得较好效果。相比于原始信号以及使用 PSO 处理之后,MOA 在两次实验中的信噪比都比较高,均方根误差要更小,这说明 MOA 算法在对陀螺仪信号进行误差补偿时有较好的表现,但由于随钻环境振动、冲击、突变等导致信号更随机更复杂,IMOA 在复杂环境中性能更好,误差补偿之后,信号 SNR 值提高了  $68\%$  左右, RMSE 降低了  $78\%$  左右。

3.3 实钻进实验

为进一步验证 IMOA 算法在实际钻进过程中的精度,选取焦作某煤矿垂直段进行钻进实验,如图 6 所示,选取  $6\text{ min}$  数据作为样本,每隔  $30\text{ s}$  解算一次井斜角。因为选取的为垂直段钻进,因此理论上井斜角输出为  $0$ 。但是由于陀螺误差通过积分不断累积,使得姿态角结算误差逐渐增大,井斜角误差如图 7 所示。由图 7 可知,在



实际钻进过程中,相对于 PSO、MOA 算法,IMOA 算法具有更好的补偿效果,经 IMOA 算法补偿后井斜角误差控制在 $[-2.5,2.5]$ ,比原始井斜角降低了约 75%。如表 2 所示,IMOA 补偿之后的井斜角均方根误差下降到 1.2,相对于前两种误差明显减小,且运行时间为 6.67 s 满足钻进要求。



图 6 实钻测量  
Fig. 6 Actual drilling experiment

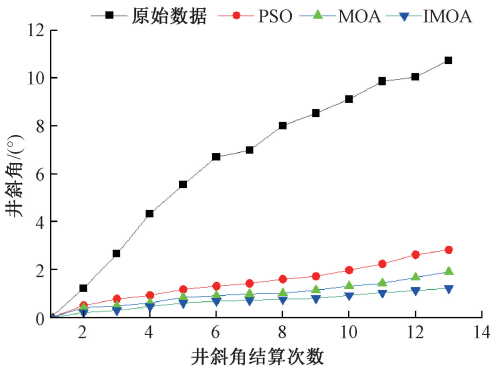


图 7 井斜角误差  
Fig. 7 Well inclination error

表 2 均方根误差

Table 2 Root mean square error

| 算法        | 原井斜角 | PSO   | MOA  | IMOA |
|-----------|------|-------|------|------|
| 均方根误差/(°) | 5.3  | 4.6   | 3.3  | 1.2  |
| 运行时间/s    | —    | 12.31 | 7.65 | 6.67 |

为了更直观的表现出所提算法在随钻陀螺仪信号误差补偿上的优势,选取实际钻井中 1 500 个连续数据作为样本数据进行处理,在实际钻井中,3 种算法对陀螺输出信号误差补偿后效果如图 8 所示。

从图 8 可以看出 PSO 算法几乎无法有效补偿陀螺误差。MOA 算法可以识别陀螺真实值,但是相较于 MOA 算法,IMOA 补偿过后的陀螺角速度输出更为准确。

为了进一步验证在不同工况下 IMOA 算法有效性,分别设置不同角度(30°、45°、60°)钻井实验进行对比。如表 3 所示,分别设置均方根、标准差(standard deviation, SD)为性能指标对比,可看出当处于不同工况

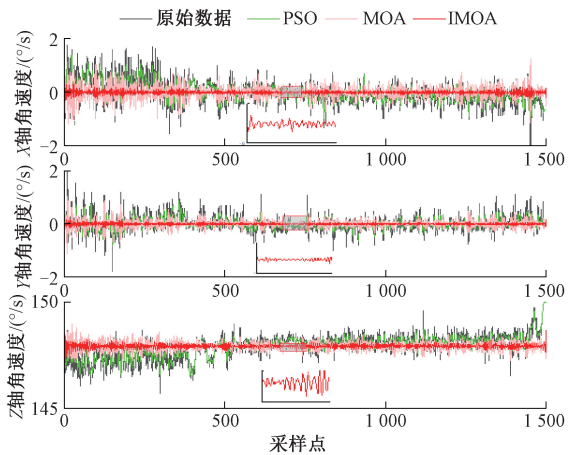


图 8 实际钻井实验陀螺仪三轴输出补偿结果  
Fig. 8 The compensation results of three axis output of gyroscope in actual drilling experiment

时,IMOA 算法均能将解算后的井斜角均方根误差以及标准差控制在 1°左右,从而得到较为真实的三轴角速度。

表 3 不同钻进角度下性能指标

Table 3 Performance indicators under different drilling angles

| 钻进角度 | 评价指标     | 原始井斜 | PSO | MOA | IMOA |
|------|----------|------|-----|-----|------|
| 30°  | RMSE/(°) | 4.8  | 3.2 | 2.3 | 1.1  |
|      | SD/(°)   | 4.2  | 3.1 | 1.7 | 0.9  |
| 45°  | RMSE/(°) | 5.2  | 4.1 | 2.4 | 1.2  |
|      | SD/(°)   | 4.4  | 3.2 | 1.9 | 1.0  |
| 60°  | RMSE/(°) | 3.9  | 2.8 | 1.4 | 0.6  |
|      | SD/(°)   | 3.4  | 2.1 | 0.9 | 0.4  |

4 结 论

本文针对 MEMS 陀螺仪输出信号中包含大量误差难以补偿的问题,提出了一种改进海猫算法的误差补偿方法。在算法全局搜索中设计引导式螺旋更新的方式,并利用逐维奖励机制使得不同参数在信息交流时,较大程度保留了最优解,防止陷入局部最优。同时设置局部迁移路线,重新定义偏差使其更符合钻井过程中的陀螺仪输出数据;最后加入逐维扰动策略,保留各维误差参数的最优解。

通过振动台实验、模拟钻进实验以及实际钻井实验验证了所提算法的有效性以及精度。实验证明,IMOA 算法相较于 PSO 以及 MOA 算法更适合随钻测量环境下对 MEMS 陀螺仪的补偿,经 IMOA 算法补偿后井斜角均方根误差降至 1.2°,且算法运行时间为 6.67 s,具有一定的工程价值。

## 参考文献

- [ 1 ] SHAEFFER D K. MEMS inertial sensors: A tutorial overview [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(4):100-109.
- [ 2 ] HUANG CH F, LI AN, QIN F J, et al. A vibration correction method for shipborne atomic gravimeter based on second-order coupling acceleration transfer model [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(20): 32368-32377.
- [ 3 ] NIE Z, LIU Z, SUN X. A multirelay cooperation method for wireless transmission of MWD and LWD signals [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(3): 1229-1237.
- [ 4 ] ALAM M, ROHAC J. Adaptive data filtering of inertial sensors with variable bandwidth [ J ]. Sensors, 2014, 15(2): 3282-3298.
- [ 5 ] YANG J, WANG S. MWD gyroscope error compensation based on equivalent reverse rotation [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 9(1):15588-15597.
- [ 6 ] ZENG X, XIAN S, LIU K, et al. A method for compensating random errors in MEMS gyroscopes based on interval empirical mode decomposition and ARMA [ J ]. Measurement Science and Technology, 2023, 35(1): 015020.
- [ 7 ] LIANG S, GUO T, CHEN R, et al. Hybrid filtering compensation algorithm for suppressing random errors in MEMS arrays [ J ]. Micromachines, 2024, 15(5): 558.
- [ 8 ] 杨金显, 杨潇健, 蔺钰柯, 等. 基于 MIGJO 的随钻重力加速度在线提取 [ J ]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 337-344.  
YANG J X, YANG X J, LIN Y K, et al. Online extraction of acceleration of gravity while drilling based on MIGJO [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 337-344.
- [ 9 ] WANG S F, YANG J X, DU H X, et al. Magnetic inertia measurement while drilling gravity extraction [ J ]. Measurement, 2025, 244: 116285.
- [ 10 ] WEI J, ZHANG Z, CAO H, et al. Hybrid temperature compensation model of MEMS gyroscope based on genetic particle swarm optimization variational modal decomposition and improved backpropagation [ J ]. Sensors & Materials, 2021, 33(8): 2835.
- [ 11 ] 杨金显, 尹凤帅. 基于 MGMA 的随钻陀螺仪误差在线补偿 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 211-218.  
YANG J X, YIN F SH. Online error compensation of gyroscope while drilling based on MGMA [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 211-218.
- [ 12 ] XIAN S, FENG X. Meerkat optimization algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving constrained engineering problems [ J ]. Expert Systems with Applications, 2023, 231(16): 120482.
- [ 13 ] YANG J, WANG S. MWD gyroscope error compensation based on equivalent reverse rotation [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9): 15588-15597.
- [ 14 ] JOKAR H, NIKNAM T, DEGHANI M, et al. Efficient microgrid management with meerkat optimization for energy storage, renewables, hydrogen Storage, demand Response, and EV charging [ J ]. Energies, 2023, 17(1): 25.
- [ 15 ] YANG J, CAI J, WANG S. Online compensation of geomagnetic measurement errors while drilling [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9507109.
- [ 16 ] YANG J, YIN F. On-line error compensation of gyroscope in MWD based on MGMA [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 25(2): 2392-2399.
- [ 17 ] JOUYBARI A, A H, ARDALAN A A, et al. Methods comparison for attitude determination of a lightweight buoy by raw data of IMU [ J ]. Measurement, 2019, 135: 348-354.
- [ 18 ] 朱鹏, 陈威平, 石颖, 等. 基于 Mahony 滤波和 EKF 融合的姿态解算方法 [ J ]. 传感器与微系统, 2023, 42(12): 160-163.  
ZHU P, CHEN W P, SHI Y, et al. Attitude solution method based on mahony filtering and EKF fusion [ J ]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(12): 160-163.
- [ 19 ] HAN K, HAN H, WANG Z, et al. Extended Kalman filter-based gyroscope-aided magnetometer calibration for consumer electronic devices [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(1): 63-71.
- [ 20 ] DAI M, ZHANG C, PAN X, et al. A novel attitude measurement while drilling system based on single-axis fiber optic gyroscope [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 1-11.

## 作者简介



杨金显 (通信作者), 分别在 1999 年和 2008 年于哈尔滨工程大学获得学士学位和博士学位, 现为河南理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为磁惯性随钻测量。  
E-mail: yangjinxian@hpu.edu.cn

Yang Jinxian (Corresponding author)

received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 1999 and 2008. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Henan Polytechnic University. His main research interests include inertial measurement and its application in MWD, power grid movement and deformation monitoring.