DOI: 10.13382/j.jemi.B2306817

基于 ISO 的随钻磁力计误差补偿*

杨金显[1,2] 袁旭瑶[1,2] 王赛飞[1,2] 蔡纪鹏[1,2] 尹凤帅[1,2]
(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:针对随钻测量(MWD)中,微机电系统(MEMS)磁力计测量地磁数据误差大,导致磁方位角解算精确度低的问题,提出改进技能优化(improved skill optimization,ISO)的磁力计误差参数估计方法。首先根据磁力计输出特性建立多参数误差模型,根据当地地磁矢量与磁力计输出矢量的模值关系,通过最小化原则构造非线性误差目标函数,重力矢量和磁场矢量之间的点积值为固定值作为约束函数,采用 SO 算法进行寻优。由于磁误差源多估计难度大,在 SO 基础上提出 ISO 算法,采用 Tent 混沌反向学习初始化策略改善初始种群的随机性,保留最优解的同时增加磁误差参数解空间的多样性。引入自适应技能强度因子,并增加成员间技能交叉规避局部最优,改善 ISO 磁误差参数寻优技能步长,减小算法运行时间,优化全局搜索能力,提高磁力计误差补偿精度。最后通过转台实验和模拟钻进实验验证 ISO 方法补偿性能,通过与 SO 算法和 PSO 算法对比,实验结果表明该算法对磁力计误差参数优化效果显著,计算出的地磁模值误差范围减小至±0.2 μT,方位角绝对误差均值降至 2.1°,说明了参数优化后磁力计输出误差明显减小,该方法可以有效提高 MEMS 磁力计量测精度,可以获得可靠的方位角,验证了 ISO 的有效性。

关键词:磁力计;ISO 算法;Tent 混沌反向学习;自适应技能强度因子;技能交叉;方位角
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 magnetometer while drilling based on ISO

Yang Jinxian[1,2] Yuan Xuyao[1,2] Wang Saifei[1,2] Cai Jipeng [1,2] Yin Fengshuai[1,2]
(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: In the context of measurement while drilling (MWD), there is a significant issue related to the accuracy of magnetic azimuth calculations due to substantial errors in the measurement of geomagnetic data using micro-electro-mechanical systems (MEMS) magnetometers, improved skill optimization (ISO) error parameter estimation method for magnetometer was proposed. Firstly, a multi-parameter error model is established according to the output characteristics of the magnetometer, and according to the modulus relationship between the local geomagnetic vector and the real output vector of the magnetometer, the nonlinear error objective function is constructed by the principle of minimization, and the dot product value between the gravity vector and the magnetic field vector is a fixed value as the constraint function, and the SO algorithm is used for optimization. Due to the difficulty of estimating the magnetic error sources, the ISO algorithm is proposed on the basis of SO, and the Tent chaotic inverse learning initialization strategy is used to improve the randomness of the initial population, retain the optimal solution and increase the diversity of the solution space of the magnetic error parameters. The adaptive skill intensity factor is introduced, and the skill cross-avoidance local optimal between members is increased, the skill step size of the ISO magnetic error parameter optimization is improved, the algorithm running time is reduced, the global search ability is optimized, and the error compensation accuracy of the magnetometer is improved. Finally, the compensation performance of the ISO method is verified by turntable experiments and simulated drilling experiments, and the experimental results show that the proposed algorithm has a significant optimization effect on the error parameters of the magnetometer, and the error range of the calculated

收稿日期:2023-08-11 Received Date:2023-08-11
*基金项目:国家自然科学基金(41672363)、河南省自然科学基金(232300421152)项目资助

geomagnetic modulus is reduced to ±0. 2 μT, and the mean absolute error of azimuth is reduced to 2. 1°. It is shown that the output error of the magnetometer is significantly reduced after parameter optimization, and the method can effectively improve the accuracy of MEMS magnetometer measurement, obtain reliable azimuth angles, and verify the effectiveness of ISO.

Keywords: magnetometer; improved skill optimization algorithm; Tent chaos reverse learning; adaptive skill strength facto; skill crossover; azimuth angle

0　引　言

随钻测量(measurement while drilling, MWD)是矿产资源钻采的核心技术,随钻测量技术离不开微机电系统(micro electro mechanical systems,MEMS)的发展[1],该系统因低功耗、大输出量、高性能等优点被广泛运用于随钻领域[2]。MEMS 磁力计在随钻测量系统中通过测量磁感应强度,可计算得到方位角。由于材质、制造的影响和捷联式安装会使磁力计存在零偏误差、三轴非正交误差和比例因子等不可避免的器件误差和安装误差[3],随钻环境下周围磁性物体的磁化也会带来硬软磁的环境干扰误差,导致磁方位的解算精度不高,因此对磁力计误差进行补偿是非常必要的。

磁力计误差补偿常用方法是将磁力计校准问题转化椭球拟合问题,然后估计椭球系数,如 Zhang 等[4]先建立磁力计校准模型,把磁力计模型参数与椭球系数一一对应并映射到椭球体上并结合线性最小二乘参数估计,Kim 等[5]对椭球拟合模型中考虑了传感器件间的未对准误差。但都存在椭球参数矩阵与磁力计校准矩阵之间的旋转矩阵不唯一,并需要足够多的测量数据的问题;Li 等[6]通过磁矢量和重力矢量的夹角为固定值的点积不变法解决了椭球拟合法分解不唯一的问题,但需要一定的初始数据导致计算效率低。为了解决传统算法磁力计误差补偿中采样点多和初值条件限制问题,武元新等将粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)用于磁力计误差校正中,建立了磁力计非线性误差模型通过位置和速度更新粒子群寻求模型参数最优解[7]。原雨佳等[8]运用陀螺仪进行辅助,提出随机漂移改进粒子群优化校正方法。Li 等[9]运用分区甲虫触角优化算法(partition beetles antennae search algorithm, PBAS)将群体概念和分区搜索概念融合,但磁力计误差补偿模型未考虑硬/软磁干扰。Li 等[10]针对光泵磁力仪的磁干扰问题提出改进蜉蝣算法(improved mayfly optimization, IMO),引入 Levy 变异策略改进全局搜索性能。上述研究中,文献[4] 实验结果方位角均方根误差小于 3°,文献[5] 方法处理后的方位角绝对误差小于 2. 82°。说明了所提出的传感器校准方法在实际应用中的有效性。文献[10] 使用 IMO 补偿后,实验结果显示磁场的最大绝对误差下降到真时磁场的 0. 55%。但是其所建立的磁误差补偿模型要么没有综合考虑对磁力计产生的各种误差干扰源,要么只针对参数估计的群智能优化算法性不能兼顾计算效率、收敛速度和精度。Givi 等[11]源自于人类努力学习技能并实践的灵感,提出一种新的元启发式算法-技能优化(skill optimization, SO)算法,Ahmed 等[12]运用 SO 优化计互联系统的分数阶负荷频率,展现出该算法的计算效率高、快速寻优的性能。将 SO 运用于 MEMS 磁力计误差补偿中,通过转台实验模拟钻进实验结果显示,SO 比传统优化算法有较快的收敛速度和较高的补偿精度,验证了 SO 用于 MEMS 磁误差补偿的高契合性。

综合以上分析,采用 SO 优化对磁力计进行误差补偿时,相对于其他优化算法存在具有较强的全局搜索能力,参数估计更准确的优点。本文首先针对磁力计的器件误差、环境干扰误差和捷联式的安装误差建立综合误差补偿模型;根据磁力计测量值与当地磁场真值的差值最小化原则,得到随钻磁力计误差目标函数,根据加速度与磁力计点积为固定值建立约束条件,运用 SO 进行误差参数寻优;由于所建立的误差补偿参数矩阵有多个误差来源,参数估计具有一定复杂性,SO 在随钻磁力计误差补偿存在初始化随机、全局搜索效率较低的问题,因此提出采用 Tent 混沌反向学习初始化种群策略、增加技能强度因子、增加技能交叉实施磁误差参数技能交互改善 SO 的搜算效率[13];最后通过实验验证,与 PSO、SO 进行磁力计误差补偿的对比,实验结果表明,ISO 方法可以显著提高磁力计误差参数补偿精度,验证了本文方法的有效性。

1　磁力计误差输出模型

MEMS 三轴磁力计可以测得磁场的垂直和水平分量,通过测量信息确定钻具相对于地球磁场的方位,然后计算得出方位角[14]。

如图 1 所示,钻具坐标系 b 系由 $o-x_by_bz_b$ 表示,方位角 ψ 为磁北方向沿逆时针到轴线平面投影间的夹角。在定向水平或垂直钻进时,磁力计的 x、y 的输出就是磁场的水平分量,由式(1)可计算得到方位角。

$$\psi = \arctan\left(\frac{\boldsymbol{B}_x}{\boldsymbol{B}_y}\right) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{B}_x$、$\boldsymbol{B}_y$ 是 x、y 轴向的真实的磁力计测量值。

由于磁力计测量值 $\boldsymbol{m}$ 存在误差,不能直接得出 $\boldsymbol{B}_x$、$\boldsymbol{B}_y$,需要测量值 $\boldsymbol{m}$ 进行误差补偿,再进行计算磁方位角。

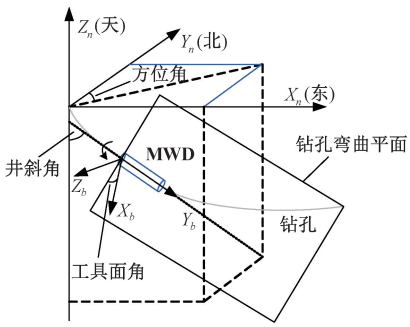


图 1　磁力计方位角描述

Fig. 1　Magnetometer azimuth description

磁力计器件误差包括非正交误差、零偏误差和标度因子误差,环境误差包括硬磁干扰误差和软磁干扰误差,磁力计的误差输出模型可表示为[15]:

$$\boldsymbol{m} = \boldsymbol{H}_{sc}\boldsymbol{H}_{no}\boldsymbol{H}_{m}\boldsymbol{H}_{so}(\boldsymbol{B} + \boldsymbol{b}_{hi}) + \boldsymbol{b}_{io} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{m} = [\boldsymbol{m}_x \quad \boldsymbol{m}_y \quad \boldsymbol{m}_z]^{\mathrm{T}}$ 为磁力计三轴输出信号;$\boldsymbol{B}$ 为钻具坐标系下地磁向量的真实值;$\boldsymbol{H}_{sc}$、$\boldsymbol{H}_{no}$、$\boldsymbol{H}_{m}$、$\boldsymbol{H}_{so}$、$\boldsymbol{b}_{hi}$、$\boldsymbol{b}_{io}$、$\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别为标度因子误差,非正交误差、未对准误差、软磁误差、硬磁误差、零偏误差和三轴磁强计的测量噪声[16]。

在实际的随钻测量中,通常把硬磁干扰看作为固定不变的零偏误差,把软磁干扰认为是标度因子(灵敏度系数)、非正交和未对准误差的综合体现,因此式(2)可以重新改写为:

$$\boldsymbol{m} = \boldsymbol{L}\boldsymbol{B} + \boldsymbol{b} \Rightarrow \boldsymbol{B} = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{m} - \boldsymbol{b}) \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}$,其主对角线元素表示为灵敏度误差,非对角线元素反映了非正交和未对准误差,在软磁效应下,该矩阵满足对角占优原则;$\boldsymbol{b}$ 为综合零偏误差的 3×1 矩阵。$\boldsymbol{K}$ 为 $\boldsymbol{L}$ 的逆矩阵,可以看作为 3 × 3 的磁综合误差参数矩阵,可知补偿随钻磁力计的测量精度误差,即是得出 $\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{b}$。然而磁误差参数误差源多,直接求解非常复杂,因此本文通过将参数求解问题转换成最小化目标函数问题,采用 ISO 进行目标优化求解误磁差参数。

2　目标函数和约束条件

2.1　目标函数

当磁力计误差补偿完全时,即磁力计的真实输出与当地磁场磁场强度的模值相等,构建随钻磁力计误差补偿目标函数:

$$\min f_k(\boldsymbol{\varsigma}) = \sum_{k=1}^{P} \sqrt{(\| \boldsymbol{m} \|^2 - \| \boldsymbol{B}_o \|^2)^2} \tag{4}$$

式中:P 为磁数据个数,$\boldsymbol{B}_o$ 为当地地磁矢量,$\boldsymbol{\varsigma} = [\boldsymbol{K}, \boldsymbol{b}]^{\mathrm{T}}$ 为磁综合误差参数和零偏误差矩阵,当随钻测量磁力计误差目标函数 f_k 取得最小值时,即实现了误差补偿。

2.2　约束条件

钻杆旋转时磁力计 x 轴、y 轴敏感的磁数据和加速度计 x、y 敏感的加速度,具有相同的规律变化[17]:

$$\frac{\boldsymbol{m}_{x,y}(k)}{\boldsymbol{m}_{x,y}(k-1)} = \frac{\boldsymbol{a}_{x,y}(k)}{\boldsymbol{a}_{x,y}(k-1)} = \frac{\sin\boldsymbol{\omega}_{x,y}t}{\sin\boldsymbol{\omega}_{x,y} \cdot (t - \Delta t)} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{a}_{x,y}$ 为加速度计 x 轴和 y 轴敏感的重加速度;$\boldsymbol{m}_{x,y}$ 为算法寻优过程中磁强计 x 轴和 y 轴敏感的地磁分量;$\boldsymbol{\omega}$ 为钻具旋转的角速度;k 表示时刻;Δt 为采样间隔。并且此时磁力计的测量值等于当地地磁 $\boldsymbol{B}_o$,则有:

$$\| \boldsymbol{m} \| = \sqrt{\boldsymbol{m}_x^2 + \boldsymbol{m}_y^2 + \boldsymbol{m}_z^2} = \| \boldsymbol{B}_o \| \tag{6}$$

考虑重力矢量与磁场矢量之间的磁倾角为固定值,那么加速度和磁场强度之间点积值应近似为固定值,以此构建随钻测量磁力计参数估计约束条件:

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{m} = c \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{a} = [\boldsymbol{a}_x \quad \boldsymbol{a}_y \quad \boldsymbol{a}_z]^{\mathrm{T}}$ 为三轴加速度,加速度误差补偿已非常成熟,$\boldsymbol{a}$ 为补偿后的输出;c 为恒值。

3　技能优化(SO)分析与改进

3.1　SO 分析

SO 是 Givi 等[11]提出的一种基于人群的元启发优化算法,通过专家引导 SO 成员学习技能和实践提升技能进行寻优,人类成员 N 可以看作随钻磁力计误差参数矩阵,成员学习技能的步长可看作随钻磁力计解空间中磁误差参数当前解与最优解之间的距离,实践中人类提升技能的过程代表磁误差参数到达最优过程,当实践提升技能强度低,即磁误差参数不是最优解时,专家将其引到技能强度高的局部区域,搜索磁力计误差参数的高质量解。

探索阶段即学习技能,随机选取专家 E_i,将磁误差参数 x_i 引导到不同解空间位置学习技能。

$$X_{i,d}^{P1} = X_{i,d} + r \times (E_{i,d} - I \times X_{i,d}), E_i = X_k \tag{8}$$

其中,$r \in \mathrm{Random}[0,1]$ 是技能步长系数,技能步长表示磁误差参数搜索空间中当前最优误差参数与专家的距离,当新位置所对应目标函数值 F_i 优于 E_i 对应的目标函数值 F_k,得到当前最优误差参数矩阵。

开发阶段即实践使技能提升,SO 成员即当前磁误差参数最优解通过在其附近实践在进行技能提升,向误差参数全局最优解逼近。

$$X_{i,d}^{P2} = \begin{cases} X_{i,d} + \dfrac{1-2r}{t} \times X_{i,d}, & r < 0.5 \\ X_{i,d} + \dfrac{lb_j + r(ub_j - lb_j)}{t}, & \text{其他} \end{cases} \tag{9}$$

式中:t 表示迭代次数,lb_j 和 ub_j 分别表示第 j 个误差参

数的下界和上界,每个成员在其位置附近寻求更好的条件使对应的目标函数值更优,从而得到全局优解。

而在随钻强磁干扰环境下,SO 搜寻优质磁误差参数过程中由于多误差源干扰,存在如下缺点:1)由于随钻磁力计初始磁参数矩阵分布不均匀,解空间中参数优劣解差距大;而 SO 成员初始化、专家的获取的随机性,不能保证初始 SO 的质量,一定程度上使算法运行时间长,磁误差参数的寻优效率低,削弱了对磁力计的误差补偿精度。2)SO 算法中技能步长跨度在随钻强磁干扰下不能有效的在学习技能和技能提升之间实现平衡寻优,出现随钻磁误差参数计算速度慢、易陷入局部最优的普遍问题,因此需要根据解空间中磁误差参数之间的位置距离控制技能步长,使随钻目标函数值快速有效向最优收敛。

综合以上分析,对 SO 算法进行以下改进,1)提出 Tent 混沌反向学习改进磁误差参数种群初始化;2)增加自适应技能因子控制磁误差参数学习技能步长,平衡求解磁误差参数;3)增加技能交叉共享,实现信息交互,在 2)的基础上增加磁误差参数多样性,产生更多的磁误差参数优质解。通过 ISO 对随钻磁力计误差目标函数优化进行快速寻优、避免陷入局部最优,进而得到准确的磁误差参数。

3.2　Tent 混沌反向学习初始化

Tent 映射可以产生良性的参数初始个体,对误差参数初始化具有良好效果[18],反向学习是通过最新解寻到所对应的反向解,能引导磁误差参数候选解更好的达到全局最优[19]。因此采用 Tent 混沌反向学习初始化策略进行改进,提高 SO 进行磁误差参数寻优效率,能快速、高效地进行全局搜索得到较为准确的磁误差参数。Tent 混沌序列通过式(10)生成:

$$X_{i+1}=\begin{cases}X_i/\alpha, X_i<\alpha\\(1-X_i)/(1-a), X_i\geqslant\alpha\end{cases}\tag{10}$$

其中,α 为随机设置的值,$\alpha\in[0,1]$,$X\neq\alpha$,得到混沌序列 $X_i(i=1,2,\cdots,N)$。则反向种群 X^* 的个体:

$$X_{ij}^{*}=X_{ub\,j}+X_{lb\,j}-X_{ij}\tag{11}$$

$X_{ub\,j}$ 和 $X_{lb\,j}$ 是误差参数搜索空间边界,由此组成新种群 $\{X\cup X^*\}$ 并按照目标函数值进行排序,取前 N 个最优初始误差参数组成初始种群 X。

$$\begin{aligned}&X_{\min}\leqslant X_{i,j}\leqslant X_{\max}, j\in[1,9]\\&25X_{\min}\leqslant X_{i,j}\leqslant 25X_{\max}, j\in[10,12]\end{aligned}\tag{12}$$

式中:$X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别表示磁误差参数搜索边界的最小值和最大值范围,其取值分别为-2、2。

3.3　自适应技能强度因子

SO 算法求解随钻磁力计目标函数,受技能步长限制,不能有效平衡磁误差参数从探索到开发的平稳过渡,容易陷入局部最优问题,引入自适应技能强度因子灵活调控技能步长,当靠近随钻磁力计最优目标函数值时,技能提升加快。

$$\begin{aligned}&I_i=r\times\frac{S}{4\pi D_i^2}\\&S=(X_{i+1}-X_i)^2\\&D_i=(E_{prey}-X_i)\end{aligned}\tag{13}$$

式中:I_i 为技能强度因子,与磁误差参数候选解的集中程度 S 和与候选解之间的距离 D 有关,由平方反比定律得出[20];选择当前最优候选解为专家 E_{prey},剔除磁误差参数初始矩阵的劣质解。I_i 强度高时磁误差参数向最优解加快收敛速度,反之亦然,使其探索和开发的均衡性更加稳定。成员进行全局探索时,式(8)可改写为:

$$X_{new}=E_i+V\times I_i\times E_{prey}, E_{prey}=X_i, F_{prey}<F_i\tag{14}$$

X_{new} 是当前磁误差参数候选解,V 是探索最优的方向,如式(15)所示。

$$V=\begin{cases}-1, r<0.5\\1,\text{其他}\end{cases}\tag{15}$$

3.4　技能交叉(SC)

为进一步使 ISO 算法能充分搜索误差参数解空间,不限于部分区域内进行全局探索和局部寻优,进而对磁误差参数估计准确度的再一步提高,为此,技能交叉(skill crosses,SC)通过磁误差参数候选解的技能水平交叉和垂直交叉,增加优质随钻测量磁力计目标函数局部最优值的多样性,生成更多磁误差参数的高质量解。

磁误差参数 X_i 和 X_j 的第 d 列维度执行技能水平交叉:

$$X'_{i,d}=\varepsilon_1X_{i,d}+(1-\varepsilon_1)X_{j,d}+I_1(X_{i,d}-X_{j,d})\tag{16}$$

其中,$\varepsilon_i(\varepsilon_i\in\text{Random}[0,1], i=1,2)$ 是磁误差磁参数候选解进行技能交互的交叉系数,I_1 和 I_2 是(-1,1)间的随机数,表示进行技能交叉的磁误差参数之间距离的系数。

$X_{i,m}$ 执行 SC 的第 m 和 n 列维度垂直交叉:

$$X'_{i,m}=\varepsilon_2X_{i,m}+(I_2-\varepsilon_2)X_{i,n}\tag{17}$$

其中,$X'_{i,d}$ 和 $X'_{i,m}$ 根据 SC 得到新的优质解 $X_{i,d}$ 和 $X_{i,m}$,增加了最优解的多样性,为快速、准确寻到最优随钻磁力计目标函数值提供了可能。最后续进行模拟钻进实验验证,通过计算出的地磁模值和方位角绝对误差来验证该方法的有效性。

3.5　ISO 的磁误差参数寻优步骤

磁力计误差参数寻优的 ISO 步骤:

步骤 1)读取磁力计数据,输入 ISO 算法。初始化种群成员、最大迭代次数。

步骤 2)检查边界,$r>0.5$ 时,通过式(14)进行全局探索学习技能,通过式(16)~(17)实现技能交叉,计算 X_{new},更新磁误差参数矩阵 $\boldsymbol{x}_i$。

步骤3)当 $r < 0.5$,局部开发,磁误差参数在附近实践技能提升,当其所对应的随钻磁力计误差目标函数值最优时,更新磁误差矩阵;达到最大迭代次数时,保存最优结果。

4　实　验

4.1　转台实验

为验证ISO算法对磁力计误差参数补偿的有效性,设计转台实验。实验场地真实磁场强度为52.65 μT。如图2所示,将MWD测量短节固定于双轴转台上,给定转台6(°)/s绕方位轴旋转一周,在转台旋转过程中放置磁铁并不断调整磁铁位置模拟随钻环境下的磁干扰信号,采集原始磁数据。

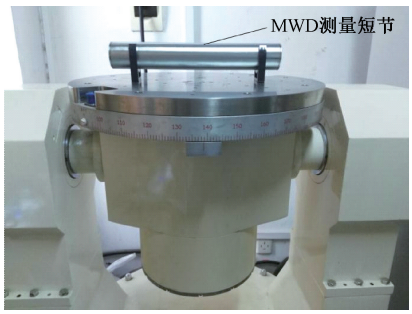


图2　转台实验

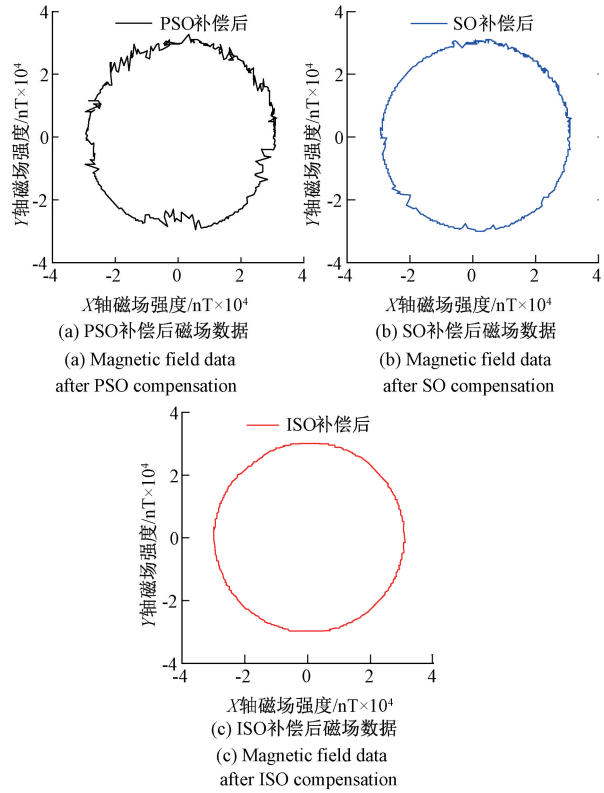
Fig. 2　Turntable experiment

引入PSO和SO作为对比,初始值如表1所示;在同一条件下对磁力计误差参数寻优后分别得到3种算法下MEMS磁力计 X、Y 轴量测值如图3所示。没有任何干扰下,图3中应该呈现完美的水平圆,从图3(a)可以看出,尽管经过PSO算法参数优化处理,但仍有大量干扰存在,会导致磁方位角解算精度大大降低。从图3(b)可知水平圆基本呈现,说明了SO方法对磁参数优化的有效性,磁力计输出误差明显降低,但仍需进一步提高。图3(c)看出,水平圆明显呈现,有效去除了大量干扰,充分说明了本文提出的ISO算法对磁误差参数补偿的优越性。为进一步验证本文方法对磁误差的补偿性能,设计模拟钻进实验进行验证。

表1　初始参数设置

Table 1　Initial parameter configuration

算法	粒子数/成员个数	参数 c_1	参数 c_2	最大迭代次数 T_{max}
PSO	20	2	1.5	600
SO	20	–	–	600
ISO	20	–	–	600



(a) PSO补偿后磁场数据
(a) Magnetic field data after PSO compensation
(b) SO补偿后磁场数据
(b) Magnetic field data after SO compensation
(c) ISO补偿后磁场数据
(c) Magnetic field data after ISO compensation

图3　3种方法补偿后水平圆对比

Fig. 3　Three methods compensate for horizontal circle comparison.

4.2　模拟钻进实验

为对本文设计的磁力计误差补偿方法进一步实验验证,进行模拟钻进实验,实验室场地在北纬35°,东经113°。

如图4所示,将MEMS测量模块固定于钻机钻杆上,在钻铤根处嵌贴磁铁模拟随钻磁干扰环境,进行垂直钻进,钻杆转速为20 rad/s,采样频率为20Hz,选取稳定钻进中60 s数据作为原始数据,使用PSO、SO和ISO估计误差参数,初始值同表1,补偿后的误差参数和算法的平均运行时间如表2所示。

图4　模拟钻进实验

Fig. 4　Schematic diagram of simulated drilling

表 2　磁力计误差参数及算法平均运行时间

Table 2　Magnetometer error parameters and the average run time of the algorithm

参数	PSO	SO	ISO
k_1	1.152 1	1.078 8	0.900 3
k_2	0.557 3	0.438 5	0.304 2
k_3	−0.189 9	−0.256 1	−0.300 3
k_4	−0.269 6	−0.696 3	−0.500 1
k_5	0.652 2	0.803 8	0.900 6
k_6	0.165 1	0.391 2	0.600 0
k_7	−0.127 6	−0.169 0	−0.301 1
k_8	0.824 9	0.683 3	0.400 6
k_9	1.937 2	1.263 6	1.600 0
k_{10}	−40.459 0	−45.300 4	−49.997 9
k_{11}	7.631 5	14.239 4	12.003 6
k_{12}	18.452 8	20.084 6	24.000 0
平均运行时间/s	12.980 0	8.470 0	6.830 0

为验证 ISO 算法的运行效率和性能，在相同实验条件下多次记录 PSO、SO 和 ISO 的每次运行时间然后求取平均运行时间，如表 2 所示。PSO 进行参数寻优时，易陷入局部最优，在局部最优磁误差参数解空间徘徊搜索，运行时间较长，为 12.98 s。SO 有较快的收敛速度，搜索效率较高，但由于磁误差参数矩阵误差干扰源多，初始解空间分布随机，优劣解跨步大，一定程度上影响了 SO 在磁误差参数解空间探索的计算效率，平均运行时间为 8.47 s。而改进的 ISO 算法，磁误差参数解空间初始化，剔除跨度大的劣质解的同时，保留了在全局搜索中磁误差参数解空间的多样性，使其达到了算法的收敛速度和全局搜索能力之间的平衡，适应性强，有一定的实用性。平均运行时间 6.83 s，具有运行时间少、强稳定的优点。通过表 2 可解算出磁模值，与实验室场地真实磁模值 52.65 μT 对比分析参数估计的准确度。

根据表 2 参数通过 PSO、SO 和 ISO 解算磁模值如图 5 所示。PSO 方法处理后的地磁模值在 52.65 μT 上下波动较大，经 PSO 和 SO 算法处理后波动幅度缩小，磁模值误差分别在±2 μT 和±1.2 μT 左右，而经过本文算法处理后磁模值误差在±0.2 μT 上下摆动，稳定收敛于 52.65 μT，明显优于上述两种算法，验证了该方法的性能。

使用本文方法补偿后的地磁向量和 PSO、SO 补偿后的地磁向量计算方位角与参考方位角(0°) 作差，通过方位角绝对误差对比验证本文算法的有效性。如图 6 所示，通过方位角的绝对误差对比，从图中可以看出前两者的补偿后的方位角绝对误差均值为 5.4°和 4.6°，本文算法将方位角绝对误差均值降低至 2.1°，表明了 ISO 算法能够对磁力计误差有效补偿。

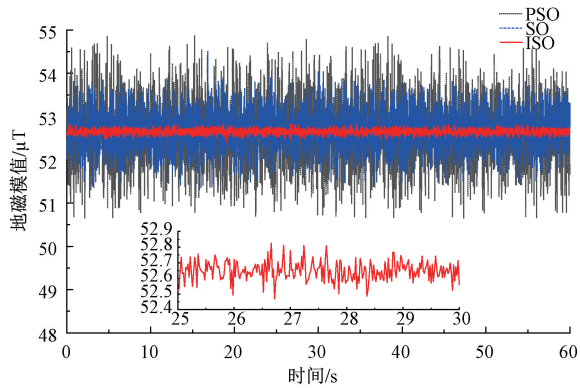


图 5　地磁模值误差对比

Fig. 5　Geomagnetic modulus error comparison

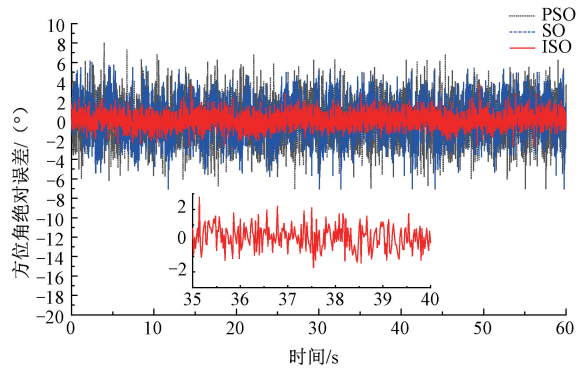


图 6　磁力计方位角绝对误差

Fig. 6　Magnetometer azimuth absolute error

5　结　论

MEMS 磁力计由于器件、安装、磁环境误差干扰，导致测量精度不精确，本文提出的 ISO 算法用于对于 MEMS 磁力计误差参数估计寻优，从而补偿 MEMS 磁力计的量测精度。通过转台实验和模拟钻进实验进行实验验证，结果表明，在同一环境下，采用 ISO 算法时的磁误差参数估计效果明显最优，计算出的地磁模值精确度摆动范围明显提高至 0.2 μT，得到的方位角绝对误差波动与后两者方法相比大幅度减小，具有一定的优点和工程应用价值。模拟钻进实验条件和实际钻进环境仍然有差别，下一步将通过实际钻进实验验证本文方法对磁力计补偿精度的实用性。另外，温度对三轴 MEMS 磁力计的量测也存在一定影响，本文未将温度干扰包含在内，因此在后续的研究中，使用 MEMS 磁力计进行量测时有必要考虑温度的影响，进而更加准确的估计磁力计误差参数，提高方位角的解算精度。

参考文献

[1]　CHEN H, ZHONG Y Q, MENG Z. A practical pll-based

drive circuit with ultra-low-noise tia for mems gyroscope[J]. Instrumentation,2017,4(3):7-13.

[2] 张佳宁,李平华,庄须叶. 基于改进的 Sage-Husa 滤波 MEMS 陀螺阵列降噪技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(4):54-60.
ZHANG J N, LI P H, ZHANG X Y. Research on noise reduction technology based on improved Sage-Husa filtered MEMS gyroscope arrays[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(4):54-60.

[3] 朱挺,王丽芬,王永让,等. 双轴旋转惯导载体角运动隔离调制方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):66-75.
ZHU T, WANG L F,WANG Y R, et al. Study on angle motion isolation modulation method of dual-axis rotational inertial navigation carrier[J] Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(12):66-75.

[4] ZHANG Z Q, YANG G Z. Micro magnetometer calibration for accurate orientation estimation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015,62(2):553-560.

[5] KIM H J, KWON K C, SHIM D S. Fast algebraic calibration of MEMS tri-axis magnetometer for initial alignment using least square method[J]. IEEE Journal of Electrical Engineering and Technology, 2020, 15(10):2361-2372.

[6] LI X, SONG B Q. Calibration and alignment of tri-axial magnetometers for attitude determination [J]. IEEE Sensors Journal, 2018,18(15):7399-7406.

[7] WU Y X, WU Y, HU X. Calibration of three-axis strapdown magnetometers using particle swarm optimization algorithm [C]. IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE),2011:160-165.

[8] 原雨佳,王伟,陈兴邦. 基于 MEMS 陀螺仪辅助的粒子群优化磁力计校正[J]. 导航定位与授时,2018,5(6):92-98.
YUAN Y J, WANG W, CHEN X B. MEMS-based gyroscope-assisted particle swarm optimization magnetometer correction[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018,5(6):92-98.

[9] LI X G, YAN S, Partition beetles antennae search algorithm for magnetic sensor calibration optimization [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5):5967-5974.

[10] LI L, LIU W, LI L. Compensation of optical pump magnetometer using the improved mayfly optimization algorithm [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,10(12):1982.

[11] GIVI H, HUBALOVSKA M. Skill optimization algorithm: A new human-based metaheuristic technique[J]. IEEE Computers, Materials and Continua, 2023, 74(1):179-202.

[12] AHMED F, HEGAZY R M. A new fractional-order load frequency control for multi-renewable energy interconnected plants using skill optimization algorithm [J]. IEEE Sustainability, 2022,14(22):14999.

[13] LIU H Y, LIU Z Y, YAN M H. MC/DC test data generation algorithm based on whale genetic algorithm[J]. Instrumentation,2022,9(2):1-12.

[14] 陈一鸣. 基于卡尔曼滤波的陀螺仪随机误差分析[J]. 电子测量技术,2020,43(17):97-100.
CHEN Y M. Gyroscope random error analysis based on Kalman filtering [J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(17):97-100.

[15] SHI L, LIU Y. Three-Step autonomous calibration method for low-cost MEMS inertial/magnetic sensors[J]. IEEE Transactions On Magnetics, 2022, 58(5):680-692.

[16] 程为彬,胡少兵,张夷非,等. 旋转导向钻井工具近垂直姿态校正矩阵误差的等角距均衡校正[J]. 仪器仪表学报,2022,43(6):19-28.
CHENG W B, HU SH B, ZHANG Y F, et al. Equiangular interval balance correction of correction matrix error for rotary steering drilling tool under near-vertical position [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2022,43(6):19-28.

[17] 汪坤,张国良,张自杰. 基于 IMU 的机械臂末端执行器姿态优化[J]. 电子测量技术,2023,46(1):72-77.
WANG K, ZHANG G L, ZHANG Z J. IMU-based attitude optimization of the robotic arm end effector[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1):72-77.

[18] 陈如清,于志恒. 基于 TentFWA-GD 的 RBF 神经网络 COD 在线软测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(3):53-60.
CHEN R Q, YU ZH H. COD on-line soft measurement based on TentFWA-GD RBF neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3):53-60.

[19] 朱学敏,刘升,朱学林,等. 多策略混合改进的海洋捕食者算法及其工程应用[J]. 国外电子测量技术,2023,42(5):125-134.
ZHU X M, LIU SH, ZHU X L, et al. Multi-strategy hybrid improved marine predator algorithm and its engineering application [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2023,42(5):125-134.

[20] JINMYONG A, ROESONG J, JINMYONG K. Global

existence and blow-up for the focusing inhomogeneous nonlinear Schrodinger equation with inverse-square potential [J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems B, 2023, 28(2):1046-1067.

作者简介

杨金显(通信作者),1999~2008 年于哈尔滨工程大学获得学士、硕士和博士学位,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。

Email: yangjinxian@ hpu. edu. cn

Yang Jinxian (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree from Harbin Engineering University from 1999 to 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.

袁旭瑶,2021 年于新乡工程学院获得学士学位,现为河南理工大学在读研究生,主要研究方向为随钻测量磁力计误差补偿研究。

E-mail: 1160665238@ qq. com

Yuan Xuyao received B. Sc. degree from Xinxiang Institute of Engineering in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. His main research interest includes error compensation of magnetometer for measurement while drilling.