

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412409

基于 MIBWO 的随钻磁力计误差参数识别*

杨金显^{1,2}, 桂书琦^{1,2}, 贺紫薇^{1,2}, 李龙玺^{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:针对随钻磁力计测量误差导致解算钻具方位角偏差的问题,提出一种基于磁惯性白鲸优化算法(MIBWO)的随钻磁力计误差参数识别方法。首先,建立磁力计输出误差模型,构造目标函数,利用磁力计数据与加速度和陀螺仪数据之间的联系建立约束条件。然后,针对白鲸优化算法(BWO)在随钻环境下寻优磁误差参数的不足,提出了逐维自适应小孔成像反向学习策略,设计3个自适应学习因子来调整个体搜索磁误差参数的步长和方向,引入了黄金正弦搜索策略,对BWO进行改进得到了MIBWO。最后,通过模拟和实钻实验进行验证,实验结果表明:MIBWO辨识出的磁力计误差参数对磁力计误差补偿效果显著,解算的方位角绝对误差平均值由 5.1° 降低至 0.9° ,该方法能够有效提升磁力计的测量精度。

关键词: 磁力计; 白鲸优化; 误差参数识别; 方位角

中图分类号: TH741 TE927 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Identification of magnetometer error parameters based on MIBWO

Yang Jinxian^{1,2}, Gui Shuqi^{1,2}, He Ziwei^{1,2}, Li Longxi^{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: To address the problem of deviation in calculating the azimuth angle of the drilling tool caused by the measurement error of the magnetic in-place magnetometer, a magnetic inertial beluga whale optimization (MIBWO) based error parameter identification method for the magnetic in-place magnetometer is proposed. Firstly, the output error model of the magnetometer is formulated, the objective function is constructed, and the constraint conditions are established by utilizing the connection between the magnetometer data and the acceleration and gyroscope data. Then, in view of the insufficiency of the beluga whale optimization (BWO) in optimizing the magnetic error parameters in the while-drilling environment, a dimensional adaptive small-hole imaging opposite learning strategy is proposed, three adaptive learning factors are designed to adjust the step size and direction of the individual in searching the magnetic error parameters, and the golden sine search strategy is introduced to improve BWO to obtain MIBWO. Finally, evaluation is carried out through simulation and actual drilling experiments. The results show that the error parameters of the magnetometer identified by the MIBWO algorithm have a significant effect on the error compensation of the magnetometer, and the average value of the absolute error of the calculated azimuth angle is reduced from 5.1° to 0.9° . This method can effectively improve the measurement accuracy of the magnetometer.

Keywords: magnetometer; beluga optimization; error parameter identification; azimuth angle

0 引言

随钻测量(measurement while drilling, MWD)可以连续不断地获取关于井斜角、方位角和工具面角的测量数

据。随钻测量环境恶劣,对测量器件提出了极高的要求,除了器件本身的误差外,随钻测量器件在钻井过程中还需要应对强振动、温度变化以及周围的铁磁物质和井下金属构件产生的磁干扰,这些因素都可能对微机电系统(microelectromechanical systems, MEMS)磁力计的测量结

果造成影响,使钻具方位角的解算失真,因此需要通过对磁力计误差进行在线补偿,来获取更准确的钻具方位角信息。

刘铁凡等^[1]提出一种结合牛顿迭代法和椭球拟合法的离线校准方法,磁力计、加速度计和陀螺仪的校准提供了一种可靠方案。蔡浩原等^[2]提出基于扩展卡尔曼滤波的磁场校准方法可实时对磁场干扰进行动态校准,校准速度快,精度高,但不适用于井下复杂的磁环境。Wu等^[3]利用姿态角对动态磁干扰进行实时估计并校准,但陀螺仪偏移会导致对动态磁干扰的错误估计,从而降低模型精度。Cao等^[4]使用最大似然估计法和最小二乘法对磁力计模型进行递推更新,但模型精度受到陀螺仪漂移的影响。磁力计测量误差的补偿参数种类较多,估计难度高,因此基于上述优化算法具有一定的挑战性。研究表明,元启发式算法对初始值不敏感,适合高维度的优化搜索问题,在补偿磁力计误差方面具有优越性。原雨佳^[5]采用双目标函数粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)对磁干扰进行校准,但是只能用于磁力计离线校正。李林丰等^[6]提出的改进的蜉蝣算法已经在水下磁性目标磁场特征的近距离测量中得到了应用,这种算法可以提高水下磁场信息的测量精度。Li等^[7]提出了分区甲虫触角优化算法来求解磁力计误差模型参数,但是没有考虑软磁误差和硬磁误差。Gao^[8]等基于固定翼无人机的干扰磁场特征建立了误差模型,使用布谷鸟算法进行磁误差参数寻优,实验证明布谷鸟算法的补偿效果优于卡尔曼滤波算法和遗传算法。

白鲸优化算法(beluga whale optimization, BWO)^[9]是2022年提出的一种元启发式优化算法。Hornig等^[10]提出了一种将白鲸优化与有序优化相结合的方法,用于求解随机约束下仿真优化问题。Hussien等^[11]提出了一种新的改进的BWO优化器,实验证明在解决大多数问题时,改进的BWO的效果都优于其他算法。BWO包括3个阶段:探索、开发和鲸落。探索阶段的合作搜索有助于发现的更好磁误差参数解从而提高整个群体的学习和适应能力。井下磁环境复杂、具有不确定性,地层中的磁性矿物含量和分布不均、钻井液的性质和流量、钻井过程中的机械振动和电磁波等因素都会对磁力计的测量精度产生影响,因此优化算法在对磁误差参数寻优时要具有一定的随机性。白鲸算法在开发阶段入了随机数因子和莱维飞行策略,增加了种群的多样性,同时能够提升算法跳出局部最优解的能力,使算法能够适用于复杂的磁环境。BWO可以通过自适应调整平衡因子和鲸落概率来控制探索和开发磁误差参数解的能力,鲸落行为不仅能够帮助算法跳出局部最优,还能在全局范围内更加高效地搜索磁误差参数解,从而进一步提高磁误差参数的质量。综上所述,将BWO算法用于磁力计误差参数寻优是可行的。

由于MEMS磁力计误差的补偿参数种类多、估计难度高,为了进一步提升BWO算法在解决磁力计误差参数寻优问题上的效率和精度,将BWO进行改进。白鲸在长途迁徙的过程中依靠天性、嗅觉和地球的磁场进行导航,白鲸的迁徙路线和目的地也可能会受到环境条件的影响。基于此特性,针对MEMS磁力计误差参数补偿的问题,提出一种磁惯性白鲸优化算法(magnetic inertial beluga whale optimization, MIBWO)。为了提升算法搜索效率,提出一种逐维自适应小孔成像反向学习策略,对当前种群中的领航鲸,即最优的磁惯性白鲸个体进行逐维反向学习;为了使算法更加适用于井下复杂的磁环境,根据当前寻优的磁误差参数信息与MEMS陀螺仪获取的数据信息设计自适应学习因子控制个体寻优磁误差参数的方向和步长;在算法迭代后期引入黄金正弦搜索策略,在优质解附近进行深度开发,帮助算法更快地收敛到全局最优解,模拟白鲸在发现食物源后对其周边进行充分搜索的行为;并利用重力矢量与磁场矢量之间的磁倾角为固定值和陀螺仪抗振性能优于加速度计且不受周围环境磁干扰的特性,设计MIBWO的约束条件,模拟白鲸对自然环境中的感知和判断。

1 随钻测量磁力计误差模型

1.1 方位角测量原理

磁惯性随钻测量单元主要由磁力计、加速度计和陀螺仪组成,沿钻具的三轴平行安装,如图1所示。

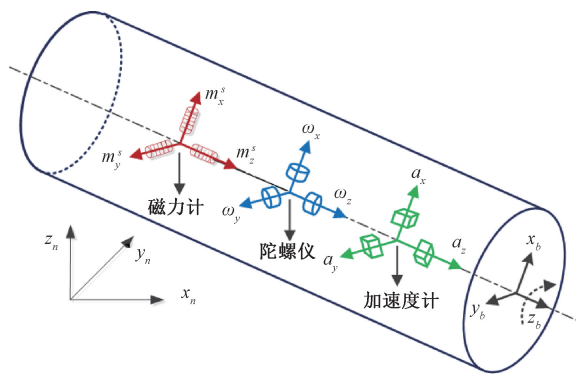


图1 磁惯性随钻测量单元

Fig.1 Magnetic inertial MWD unit

选取地理坐标系(n 系)作为导航坐标系, x_n 指向东, y_n 指向北, z_n 指向天。钻具坐标系(b 系)作为载体坐标系, x_b 与 y_b 在同一平面上并且互相垂直, z_b 与钻具轴线重合。钻具方位角是指磁北方向沿逆时针到钻具轴线的在水平面投影的夹角,在定向水平或垂直钻进时,磁力计的 x 、 y 轴的输出就是磁场的水平分量,方位角 ψ 计算公式为^[12]:

$$\psi = \arctan\left(\frac{B_x}{B_y}\right) \quad (1)$$

其中, B_x 、 B_y 是 x 、 y 轴向的真实的磁力计测量值。

1.2 磁力计误差模型

理想情况下, 三轴磁力计的输出即为载体坐标系下的地磁向量, 但是在随钻测量过程中地磁矢量的测量会受到多种误差的影响。根据误差源的不同, 可分为磁效应误差和器件误差。其中, 磁效应误差是指由载体和测量环境中的磁干扰源产生的误差, 包括软磁误差和硬磁误差; 器件误差是指来自传感器自身的误差, 即在器件制造和安装的过程中所产生的误差, 包括灵敏度误差、非正交误差 (也称为交叉轴误差或互感误差) 以及零偏误差^[13]。

综合以上多种误差, 磁力计输出误差模型可以表示为^[14]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 (\mathbf{C}_s \mathbf{C}_n^b \mathbf{h} + \mathbf{C}_h) + \mathbf{B}_0 + \mathbf{E}_s \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H}$ 为磁力计的输出值, $\mathbf{K}_1$ 为灵敏度误差, $\mathbf{K}_2$ 为非正交误差, $\mathbf{h}$ 为无误差干扰的地磁场真实值, 即理想输出值, $\mathbf{C}_s$ 为软磁干扰误差系数, $\mathbf{C}_h$ 为硬磁干扰误差系数, $\mathbf{C}_n^b$ 是从地理系到载体系的姿态矩阵, $\mathbf{B}_0$ 为零偏误差, $\mathbf{E}_s$ 为磁力计的测量噪声, 主要由传感器自身决定, 测量噪声 $\mathbf{E}_s$ 可以看作高斯白噪声, $\mathbf{E}_s \sim N(0, \delta_s^2)$ 。

式(2)的简化形式可重写为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} \mathbf{C}_n^b \mathbf{h} + \mathbf{B} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{C}_h + \mathbf{B}_0 + \mathbf{E}_s = [b_x \quad b_y \quad b_z]^T \quad (5)$$

其中, $\mathbf{K}$ 的主对角线元素为灵敏度误差, 非对角线元素为非正交误差, 在软磁效应的干扰下, 矩阵 $\mathbf{K}$ 满对角占优原则。

校正的目标就是估计出 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{B}$ 阵中的 12 个未知参数, 若 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{B}$ 阵已知, 则可以得到磁力计的误差补偿模型为:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{C}_n^b \mathbf{h} = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{H} - \mathbf{B}) \quad (6)$$

2 磁力计误差参数识别约束

2.1 非线性误差函数

在已知地磁场的情况下得到理想载体系下的磁场矢量模值, 此磁场矢量应与磁力计补偿后的磁场矢量模值相同。参考 Hamid 等^[15]设计的非线性误差函数, 构造新的非线性误差函数为目标函数:

$$F(\mathbf{X}_h) = \operatorname{argmin}_f(\mathbf{K}, \mathbf{B}) = \sum_{i=1}^l (\|\mathbf{h}\| - \|\hat{\mathbf{H}}\|)^2 \quad (7)$$

其中, $\mathbf{X}_h$ 为待识别参数, l 为磁力计数据个数。当非线性误差函数取得最优值时, 得到的参数即是磁力计的待识别参数。

2.2 约束条件

由于重力矢量与磁场矢量之间的磁倾角为固定值^[16], 因此两矢量的点积结果应为一个常量 c , 但是在随钻过程中振动对加速度的影响较大, 因此选择停钻时加速度计解算的钻具坐标系下的地球重力矢量 $\mathbf{G}$ 与 MIBWO 算法获得的最优解对应的钻具坐标系下的磁矢量 $\mathbf{M}^B$ 进行点积运算, 建立磁力计误差参数估计约束条件:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{M}^B = c \quad (8)$$

在钻具坐标系下, 如图 1, 钻杆旋转时由磁力计 x 轴和 y 轴敏感的地磁场分量的变化和钻杆在采样间隔 Δt 内旋转的角度 θ 的关系为:

$$\tan \theta = \frac{m_x^b(t) m_y^b(t+1) - m_x^b(t+1) m_y^b(t)}{m_x^b(t) m_x^b(t+1) + m_y^b(t) m_y^b(t+1)} \quad (9)$$

MEMS 陀螺仪抗振性能优于加速度计, 且不受周围环境磁干扰, 短时间内陀螺仪具有高精度的优点, 因此通过陀螺仪测得的钻杆旋转的角速度 ω 计算采样间隔 Δt 内钻杆的旋转角度为 $\theta^\omega = \omega \cdot \Delta t$ 。将磁力计与陀螺仪测量值解算出角度的正切比值大小作为约束条件, 角度正切比越接近 1, 说明此刻姿态误差越小, 通过优化算法求得的磁力计误差参数可信度越高。

理想情况下, MIBWO 算法获得的最优解对应的磁矢量 $\mathbf{M}^B$ 与陀螺仪数据解耦的地磁矢量 $\mathbf{M}^\omega$ 近似相等。两矢量越接近, 说明 MIBWO 算法解的质量越好。余弦距离可以衡量两个矢量夹角的大小, 利用矢量 $\mathbf{M}^B$ 和 $\mathbf{M}^\omega$ 的余弦距离与模长因子 MF 的乘积来衡量两个磁矢量的相似程度 MVS , 其表达式为:

$$MVS = \left(1 - \frac{\mathbf{M}^B \cdot \mathbf{M}^\omega}{\|\mathbf{M}^B\| \|\mathbf{M}^\omega\|}\right) \times MF \quad (10)$$

MVS 的取值范围为 $[0, 2]$, 其乘积越接近 2, 说明两个矢量相似度越高。由于在实际的随钻测量过程中磁强计的输出误差较大, 所以总有 $\|\mathbf{M}^B\| > \|\mathbf{M}^\omega\|$, 模长因子 MF 为 $\|\mathbf{M}^B\|$ 与 $\|\mathbf{M}^\omega\|$ 的比值。

3 基于 MIBWO 的 MEMS 磁力计误差参数识别

3.1 基于 BWO 的磁力计误差参数识别

利用白鲸优化算法对磁力计误差参数进行识别, 可以在一定程度上提高磁力计测量的准确性。BWO 算法可以根据平衡因子 B_f 从探索过渡到开发。

$$B_f = r_0(1 - T/2T_{\max}) \quad (11)$$

其中, T 为当前迭代次数, $T_{\max}$ 为最大迭代次数, 每次迭代 r_0 在 $(0, 1)$ 之间随机变化。当 $B_f > 0.5$ 时算法进入探索阶段, 这个阶段算法更加注重在全局范围内进行磁误差参数的寻优; 当 $B_f \leq 0.5$ 时进入开发阶段, 这个阶段算法更加注重在局部范围内搜寻优质磁误差参数。随着迭代次数 T 的增加, B_f 的波动范围从 $(0, 1)$ 逐渐减小到 $(0, 0.5)$ 。

但是 BWO 求解随钻测量地磁提取目标函数存在如下缺点: 1) 成对游动的白鲸通过相互之间的交流和合作可以提高找到潜在的磁误差参数解的机会。但是会导致算法前期在不理想的区域过度搜索, 收敛速度较慢。因此提出一种逐维自适应小孔成像反向学习策略, 选择当前种群中的领航鲸进行逐维自适应反向学习, 使算法更加注重在优质区域搜索, 同时也在一定程度上增强了算法全局探索的能力。2) BWO 在开发阶段引入了随机数因子和莱维飞行策略, 增加了算法的随机性, 避免算法陷入局部最优, 使得算法能够适用于随钻过程中复杂、不确定的环境。但是会导致算法在搜索空间中跳跃幅度较大, 搜索磁误差参数的方向和范围不够精准。因此根据利用磁力计和陀螺仪获取的信息设计 3 个自适应学习因子来调整个体搜索磁误差参数的步长和方向, 模拟白鲸种群中的信息交流, 提升算法的搜索效率。3) 由于磁力计的最优误差参数通常会分布在较优的区域, 而 BWO 在迭代后期不能针对性地搜索最优磁误差参数。因此在达到最大迭代次数的 9/10 时, 引入黄金正弦搜索策略, 模拟白鲸在食物源周边进行充分搜索的行为。在全局适应度最优、次优、较优的白鲸个体附近进行深度开发从而确保找到全局最优磁误差参数解。

3.2 逐维自适应小孔成像反向学习策略

在白鲸优化算法的探索阶段, 搜索代理的位置由白鲸的成对游动决定, 根据位置的奇偶数采用不同的位置更新, 其位置更新公式如下:

$$\begin{cases} X_{i,j}^{T+1} = X_{i,p_j}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1)\sin(2\pi r_2), & j \text{ 为偶数} \\ X_{i,j}^{T+1} = X_{i,p_j}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1)\cos(2\pi r_2), & j \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $X_{i,j}^{T+1}$ 为第 i 条白鲸在第 j 维上新的磁误差参数, $p_j (j = 1, 2, \dots, d)$ 是从 d 维中选择的随机数, X_{i,p_j}^T 是第 i 条白鲸在 p_j 维上的磁误差参数, X_{i,p_j}^T 和 X_{r,p_1}^T 分别是第 i 条和第 r 条白鲸的当前磁误差参数 (r 是随机选择的白鲸), r_1 是介于 $(0, 1)$ 之间的随机数 ($i = 1, 2, \dots, 5$), $\sin(2\pi r_2)$ 和 $\cos(2\pi r_2)$ 表示一对白鲸的鳍朝向水面。

根据奇数和偶数选择维度, 更新后的磁误差参数的位置反映了白鲸在游泳或潜水时的同步或镜像行为。

人为设定的奇偶数更新策略可以有效避免算法陷入局部最优解, 但是该更新的规则可能会导致算法寻优过程中花费过多的时间在探索阶段, 导致算法收敛速度降低。为了使算法着重探索优质区域, 本文提出一种逐维自适应小孔成像反向学习策略, 对优质磁误差参数解逐维自适应求反向解。根据小孔成像原理, 可得出:

$$X^j = \frac{(ub_j + lb_j)}{2} + \frac{(ub_j + lb_j)}{2n} - \frac{X^j}{n} \quad (13)$$

其中, X^j 为 X^j 第 j 维的反向解, ub_j 和 lb_j 分别为第 j 维磁误差参数搜索范围的上界和下界, 当 $n = 1$ 时, $X^j = (ub_j + lb_j) - X^j$, 就是普通的反向学习策略。通过改变自适应调节因子 n 的大小对优质磁误差参数自适应求反向解。 n 的表达式为:

$$n = \left((\cos(2 \times r_3) + 1) \times \left(1 - \frac{T}{T_{\max}} \right) \right) \times r_4 \quad (14)$$

调节因子 n 随迭代次数增加的变化曲线图如图 2 所示。随着迭代次数 T 的增加, n 的取值范围逐渐由 $[0, 2]$ 缩小到 0 的附近, 白鲸个体逐渐由大范围探索转为开发自身邻域的位置的磁误差参数。

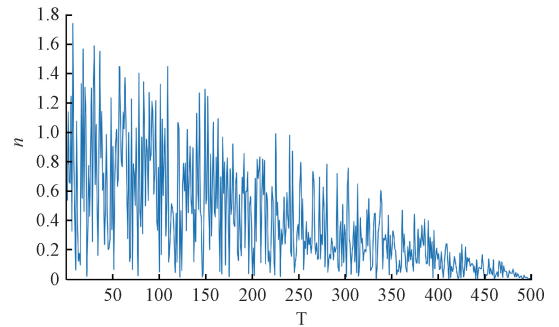


图2 调节因子 n 的变化曲线

Fig. 2 Change curve of regulatory factor n

3.3 自适应学习因子

在 MIBWO 算法迭代后期, 需要更注重局部搜索和精细化调整。受鲸落行为的启发, 根据最新位置的适应度值 $f(\mathbf{X}_i^{T+1})$ 和上一时刻位置的适应度值 $f(\mathbf{X}_i^T)$ 以及当前全局最优磁矢量相似度 MSV_{gbest} 确定位置更新的概率。若 $f(\mathbf{X}_i^{T+1})$ 小于 $f(\mathbf{X}_i^T)$, 则接受新解 $\mathbf{X}_i^{T+1}$, 替换 $\mathbf{X}_i^T$; 反之, 则根据 Metropolis 准则, 以概率为依据来判断是否接受新状态, 计算接受新解 $\mathbf{X}_i^{T+1}$ 的概率 p_i , 将 p_i 与一个在 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数进行比较, 若 p_i 小于随机数, 则舍弃新解, 利用位置更新式 (16) 计算最新位置, 跳出局部最优, 向全局最优的白鲸个体聚集, p_i 的计算公式如下:

$$p_i = \begin{cases} 1, & f(\mathbf{X}_i^{T+1}) < f(\mathbf{X}_i^T) \\ \exp\left(-\frac{f(\mathbf{X}_i^{T+1}) - f(\mathbf{X}_i^T)}{1 - MSV_{gbest}}\right), & \\ f(\mathbf{X}_i^{T+1}) > f(\mathbf{X}_i^T) \end{cases}, \quad (15)$$

改进位置更新公式,改进后的数学模型为:

$$\mathbf{X}_i^{T+1} = \omega_1 \mathbf{X}_{gbest}^T + \omega_2 \mathbf{X}_{mean}^T + \omega_3 \mathbf{X}_i^T + C_1 \cdot L_F \cdot (\mathbf{X}_r^T - \mathbf{X}_i^T) \quad (16)$$

其中, $\mathbf{X}_i^{T+1}$ 是第 i 条白鲸的新位置即第 i 条白鲸找到的新的磁误差参数解, $\mathbf{X}_{gbest}^T$ 是全局白鲸个体中最好的位置即全局最优磁误差参数解, $\mathbf{X}_{mean}^T$ 是当前白鲸个体的平均位置即当前全部磁误差参数解的平均值, $\mathbf{X}_i^T$ 和 $\mathbf{X}_r^T$ 是第 i 只白鲸和随机一只白鲸的当前位置即第 i 个和随机的一个磁误差参数解, $C_1 = 2r_5(1 - T/T_{max})$ 为约束莱维飞行步长的随机跳跃因子。 L_F 为 Levy 飞行函数, 计算公式如下:

$$L_F = 0.05 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{1/\beta}} \quad (17)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((1 + \beta)/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{1/\beta} \quad (18)$$

其中, u 和 v 是正态分布的随机数, β 是默认常数, 等于 1.5。

利用陀螺仪数据短时间内高精度的特点, 根据当前获得的当前最优磁误差参数解对应的磁矢量 $\mathbf{M}^b$ 与 MEMS 陀螺仪数据解耦的地磁矢量 $\mathbf{M}^w$ 的相似度 MVS 设计自适应学习因子, ω_1 为社会学习因子, ω_2 为全局学习因子, ω_3 为惯性学习因子。 MSV_{gbest} 为当前全局最优磁矢量相似度, MSV_{mean} 为当前所有磁误差参数解对应的平均磁矢量相似度, MSV_i 为当前白鲸个体对应的磁矢量相似度。

$$\begin{cases} \omega_1 = MSV_{gbest} \cdot rand(0, 2) \cdot (1 - T/T_{max}) \\ \omega_2 = MSV_{mean} \cdot rand(0, 2) \cdot (1 - T/T_{max}) \\ \omega_3 = MSV_i \cdot rand(0, 2) \cdot (1 - T/T_{max}) \end{cases} \quad (19)$$

3.4 黄金正弦搜索策略

磁力计的最优误差参数往往会分布在较优的区域。在迭代后期, 通过 MIBWO 已经找到了许多优质解, 此时需要更加专注于局部开发, 从而确保找到全局最优磁误差参数的位置。黄金正弦搜索策略将搜索空间分成两个部分, 然后计算每个部分的函数值, 根据正弦函数的值来确定下一次搜索磁误差参数的位置。在位置更新过程中引入了黄金分割数以缩小解决方案的空间, 可以加快收敛速度并提高搜索磁误差参数的效率, 这样能够更加聚焦于可能产生良好磁误差参数解的区域, 从而找到全局最优的磁误差参数解。因此引入黄金正弦搜索策略, 在全局适应度最优、次优、较优的白鲸个体附近进行深度开发。黄金正弦搜索策略的表达式为:

$$\mathbf{X}^{T+1} = \mathbf{X}^T \cdot |\sin(R_1)| + R_2 \cdot \sin(R_1) \cdot |x_1 \cdot \mathbf{X}_{gbest}^T - x_2 \cdot \mathbf{X}_{mean}^T| \quad (20)$$

其中, $\mathbf{X}^T$ 为第 T 次迭代时的磁误差参数解, $\mathbf{X}^{T+1}$ 为第 $T+1$ 次迭代时的磁误差参数解, $\mathbf{X}_{gbest}^T$ 为全局的最优磁误差参数解, $\mathbf{X}_{mean}^T$ 为全部磁误差参数解的平均值, R_1 是区间 $[0, 2\pi]$ 的随机数, 决定每次迭代的移动距离, R_2 是区间 $[0, \pi]$ 的随机数, 决定磁误差参数寻优的方向, $x_1 = -\pi + (1 - \tau) \times 2\pi$, $x_2 = -\pi + \tau \times 2\pi$ 是根据黄金分割数 τ 得到的系数, $\tau = (\sqrt{5} - 1)/2$, 这些系数引导个体趋近最优磁误差参数, 加快算法的收敛速度。

3.5 MIBWO 的磁力计误差补偿实现步骤

MIBWO 的具体实现步骤为:

1) 获取三轴磁力计、三轴加速度计和三轴陀螺仪的现场测量数据, 初始化白鲸种群数量、最大迭代次数、解空间的维数等。

2) 构建磁力计误差补偿模型, 构造非线性误差函数为目标函数, 设计约束条件。

3) 初始化种群中的地磁误差参数, 并根据目标函数获得对应的适应度值。

4) 根据迭代次数, 计算平衡因子 B_f 的值, 根据式(12)、(13)、(16)、(20), 更新算法中白鲸个体的位置。

5) 判断算法寻优磁力计误差参数是否满足终止条件, 当达到最大迭代次数时, 输出最优磁误差参数解, 反之则返回步骤4)。

4 实验与分析

4.1 模拟实验

为验证 MIBWO 算法的有效性, 设计模拟磁干扰实验。实验场地位于北纬 35° , 东经 113° , 地球重力加速度 9.7966 m/s^2 , 地磁强度为 $52.65 \mu\text{T}$, 磁倾角为 53.8° , 地球自转角速度为 $15^\circ/\text{h}$ 。将磁惯性测量短节水平放置在可旋转的无磁卡座上, 并在卡座周围放置铁螺栓以模拟井下磁干扰, 如图3所示。

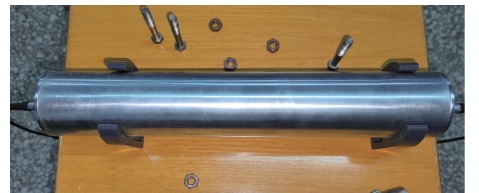


图3 模拟磁干扰实验

Fig. 3 Simulated magnetic interference experiment

磁惯性测量短节的转轴与正北方向保持一致, 参考方位角为 0° , 将磁力计测量短节进行旋转并采集信号,

取其中 30 s 数据,分别使用 PSO 算法、BWO 算法和 MIBWO 算法对数据进行处理,初始参数设置如表 1,求出参数 K^{-1} 和 B 的值。

表 1 初始参数设置				
Table 1 Initial parameter configuration				
优化算法	粒子数/成员个数	参数 c_1	参数 c_2	最大迭代次数 $T_{\max}$
粒子群	25	2	1.5	500
白鲸	25	-	-	500
磁惯性白鲸	25	-	-	500

通过优化算法在线对磁误差参数进行寻优,磁误差参数会随着时间不断变化,但是磁误差参数的值变化不会太大。为了便于分析,每隔 5 s 取模拟磁干扰钻进实验中 MIBWO 算法得到的 K^{-1} 和 B 的值进行对比,如表 2 所示。通过表 2 可以看出矩阵 K^{-1} 的非对角线元素逐渐趋于一个定值,且满足对角占优原则,由此可见磁力计的灵敏度误差比非正交误差更加显著,常值误差 B 逐渐趋于一个定值。

表 2 地磁误差参数				
Table 2 Geomagnetic error parameters				
时间/s	K^{-1}			B
5	1.012	0.004	-0.048	-50.557
	-0.002	0.939	0.066	12.149
	-0.008	-0.015	0.938	22.856
10	0.996	0.024	-0.053	-52.863
	-0.017	0.965	0.049	12.573
	-0.034	-0.018	0.985	24.161
15	0.928	0.026	-0.041	-52.865
	-0.021	0.988	0.045	12.537
	-0.047	-0.021	1.075	24.165
20	0.928	0.026	-0.041	-52.866
	-0.021	0.988	0.045	12.573
	-0.047	-0.021	1.075	24.165
25	0.930	0.025	-0.040	-52.866
	-0.022	0.976	0.058	12.573
	-0.045	-0.021	0.975	24.165
30	0.930	0.026	-0.040	-52.866
	-0.020	0.981	0.058	12.573
	-0.048	-0.023	0.975	24.165

通过 3 种算法寻优得到磁误差参数 K^{-1} 和 B 的值后根据式(6)分别计算出补偿后的地磁模值,并与补偿前

的地磁模值进行对比。如图 4 所示,通过 MIBWO 算法解算出的地磁模值更加接近真实值 52.65 μT ,磁力计的测量精度显著提高。

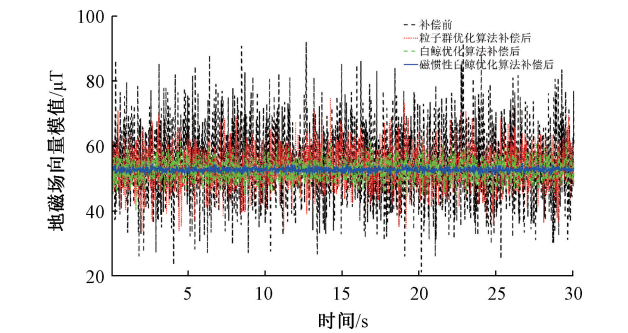


图 4 算法补偿前后地磁模值对比
Fig. 4 Comparison of geomagnetic modulus before and after compensation by algorithm

为了进一步验证 MIBWO 算法在随钻环境下的有效性,进行模拟钻进实验,如图 5 所示。

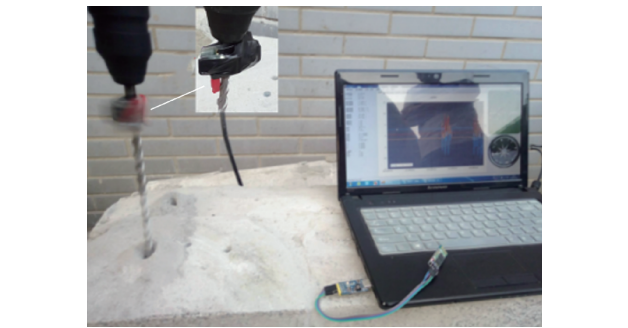


图 5 模拟钻进实验
Fig. 5 Schematic diagram of simulated drilling

用大理岩、花岗岩等模拟随钻测量真实地质环境,将 MEMS 随钻测量模块固定在钻杆上,钻进不同地层,并进行人工磁干扰模拟随钻下的磁环境。启动钻机并使其达到转速稳定的状态再开始测量,测量时通过蓝牙进行数据的传输和采集。取其中 30 s 的数据,分别使用 PSO 算法、BWO 算法和 MIBWO 算法对数据进行处理,将式(7)设置为适应度函数,寻优最佳磁误差参数。3 种算法的初始参数设置仍然一致(如表 1 所示),将 3 种算法补偿后的地磁模值与补偿前的地磁模值进行对比(如图 6 所示),MIBWO 算法补偿后的地磁场向量模值误差明显降低且小于前两种算法。

4.2 实钻实验

为了进一步验证 MIBWO 算法在真实随钻环境磁力计误差补偿的实用性,在焦作市某矿水平钻井内进行固定方位角钻进实验,参考方位角为 20.5°,磁惯性随钻测量短节固定在钻杆上,如图 7 所示。

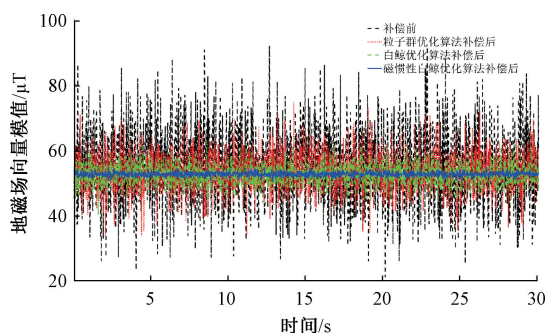


图6 模拟钻进算法补偿前后地磁模值对比

Fig. 6 Comparison of geomagnetic modulus values before and after compensation by simulated drilling algorithm



图7 实钻测量

Fig. 7 Actual drilling measurement

钻进过程中以1 s的采样间隔采集5 000组磁/惯数据,分别通过PSO、BWO和MIBWO 3种优化算法补偿后的地磁数据与未补偿的地磁数据根据式(1)计算出钻具方位角绝对误差,并进行对比,如图8所示。

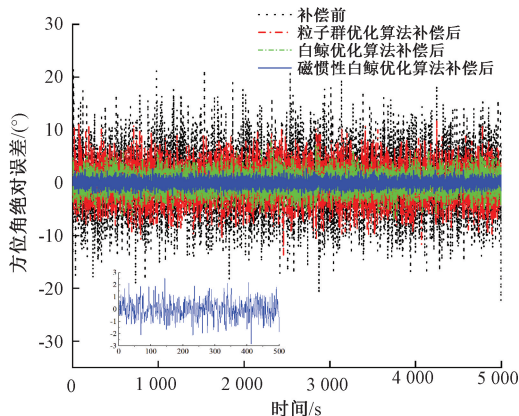


图8 方位角绝对误差

Fig. 8 Absolute error of azimuth angle

由图8可以看出未补偿的方位角绝对误差平均值为 5.1° ,通过PSO算法和BWO算法补偿后的方位角绝对误差平均值为 2.9° 和 2.3° ,本文提出的MIBWO算法将

方位角绝对误差平均值降低到了 0.9° ,说明本文提出的算法能够适用于真实随钻环境中对磁力计误差补偿,并且能有效降低解算方位角的误差。

5 结 论

针对复杂的随钻测量环境以及MEMS磁力计自身器件误差和安装误差等因素对磁力计的测量产生严重干扰的问题,提出一种基于磁惯性白鲸优化的随钻磁力计误差参数识别方法,通过实验验证得到以下结论:

1) 通过引入逐维自适应小孔成像反向学习策略、黄金正弦搜索策略以及设计自适应学习因子对BWO算法进行改进,使算法更加适用于随钻环境下的磁误差参数寻优,提高了算法对随钻磁力计误差参数辨识的精准度。

2) 模拟试验结果表明,在同样的环境、初始参数设置一致的条件下,相比于PSO算法和BWO算法,本文提出的算法对地磁模值的补偿效果更好。真实钻井实验结果表明MIBWO算法补偿后的方位角绝对误差均值由未补偿的 5.1° 降低为 0.9° ,大幅度提高了MEMS磁力计的随钻测量方位角的精度。

参考文献

- [1] 刘轶凡,肖文栋,吴健康,等. 基于牛顿迭代和椭球拟合的磁力和惯性传感器校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 142-149.
LIU Y F, XIAO W D, WU J K, et al. Calibration method of magnetic and inertial sensors based on Newton iteration and ellipsoid fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 142-149.
- [2] 蔡浩原,李文宽,赵晨霖,等. 陀螺仪补偿的实时EKF磁场校准[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2650-2658.
CAI H Y, LI W K, ZHAO S H, et al. Gyro-compensated real-time EKF magnetic field calibration method [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(12): 2650-2658.
- [3] WU J. Real-time magnetometer disturbance estimation via online nonlinear programming [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4405-4411.
- [4] CAO G C, XU X, XU D CH. Real-time calibration of magnetometers using the RLS/ML algorithm [J]. Sensors, 2020, 20(2): 535-549.
- [5] 原雨佳. MEMS磁力计补偿校正技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
YUAN Y J. Research on compensation and calibration technology of MEMS magnetometer [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [6] 李林丰,刘卫东,李乐. 基于改进蜉蝣算法的水下磁场

- 测量误差补偿[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(5): 1004-1011.
- LI L F, LIU W D, LI L. Error compensation of underwater magnetic field measurement based on improved ephemera algorithm [J]. Journal of North-western Polytechnical University, 2022, 40(5): 1004-1011.
- [7] LI X G, YAN SH G, LIU J G, et al. Partition beetles antennae search algorithm for magnetic sensor calibration optimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 5967-5974.
- [8] GAO Q M, ZHAO J, CHENG D F, et al. A compensation method for the carrier interference of a three-component magnetic measurement system using a Cuckoo search algorithm[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 085003.
- [9] ZHONG CH T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 251(5): 109215.
- [10] HORNG SH CH, LIN SH SH. Improved beluga whale optimization for solving the simulation optimization problems with stochastic constraints [J]. Mathematics, 2023, 11(8): 11081854.
- [11] HUSSEN A G., KHURMA R A, ALZAQEBAH A, et al. Novel memetic of beluga whale optimization with self-adaptive exploration-exploitation balance for global optimization and engineering problems [J]. Soft Computing, 2023, 27(19): 13951-13989.
- [12] 杨金显, 袁旭瑶, 王赛飞, 等. 基于 ISO 的随钻磁力计误差补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 196-203.
- YANG J X, YUAN X Y, WANG S F, et al. Error compensation of magnetometer while drilling based on ISO[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation. 2023, 37(12): 196-203.
- [13] CHEN X Y, ZHANG X T, ZHU M, et al. A novel calibration method for tri-axial magnetometers based on an expanded error model and a two-step total least square algorithm[J]. Mobile Networks & Applications, 2022, 27(2): 794-805.
- [14] 徐祥, 刘铭, 曹国灿, 等. 基于自适应参数估计的三轴磁传感器实时校正方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 384-389.
- XU X, LIU M, CAO G C, et al. Real-time calibration method for three-axis magnetometer based on adaptive parameter estimation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology. 2019, 27(3): 384-389.
- [15] SHOKRI-GHALEH H, ALFI A, EBADOLLAHI S, et al. Unequal limit cuckoo optimization algorithm applied for optimal design of nonlinear field calibration problem of a triaxial accelerometer [J]. Measurement, 2020, 164: 107963-107974.
- [16] DAI M P, ZHANG CH X, PAN X, et al. A novel attitude measurement while drilling system based on single-axis fiber optic gyroscope [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9500311.

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。

E-mail: yangjinxian@hpu.edu.cn

Yang Jinxian (Corresponding author)

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



桂书琦, 2022 年于河南农业大学获得学士学位, 现为河南理工大学在读研究生, 主要研究方向为惯性器件误差补偿研究。

E-mail: 1594838960@qq.com

Gui Shuqi received her B.Sc. degree from

Henan Agricultural University in 2022. She is currently a postgraduate student. Her main research interest is inertial device error compensation.