

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306953

基于 MGMA 的随钻陀螺仪误差在线补偿*

杨金显^{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 454000; 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 MEMS 陀螺仪输出精度低的问题,提出一种基于磁-重力蜉蝣算法(MGMA)的陀螺误差在线补偿方法。首先,分析随钻陀螺误差来源并推导出误差补偿模型;其次,利用 MEMS 加速度计无累积误差的特点,根据重力向量叉乘得到向量夹角作为目标函数;此外,考虑到实际钻进时强振动和冲击对加速度计输出的不利影响,利用 MEMS 磁强计抗振的特点,设计磁模值相对误差约束条件。然后,在 MA 基础上,针对随钻恶劣环境影响下的陀螺误差参数不断变化问题,根据陀螺和磁强计输出之间的关系自适应确定搜索上下界;并利用重力模值相对误差设计惯性权重,平衡算法的全局探索和局部开发能力;最后,利用磁-重力模值相对误差在子代中引入变异扰动策略,减小陷入局部最优的可能。实验结果表明,经 MGMA 补偿后的陀螺输出误差明显减小,井斜角误差由 9.75°降低至 1.52°,且相比于 PSO 和 MA 算法具有速度快、精度高的优势。

关键词: 随钻测量;MEMS 陀螺仪;蜉蝣算法;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

Online error compensation of gyroscope while drilling based on MGMA

Yang Jinxian^{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: To solve the problem of low output accuracy of MEMS gyro in MWD, an online gyro error compensation method based on magnetic-gravity ephemera algorithm (MGMA) is proposed. Firstly, the error source of GYRO while drilling is analyzed and the error compensation model is derived. Secondly, the objective function of MEMS accelerometer is obtained by using the cross product of gravity vector. In addition, considering the adverse effects of strong vibration and impact on the accelerometer during drilling, the relative error constraint of the magnetic mode value is designed based on the strong anti-vibration ability of MEMS magnetometer. Then, on the basis of MA, the search upper and lower bounds are determined adaptively according to the relationship between the gyro and the magnetometer output, aiming at the constant change of gyro error parameters under the influence of harsh environment while drilling. The relative error of gravity mode value is used to design the inertia weight and balance the global exploration and local development ability of the algorithm. Finally, according to the relative error of the magnetic-gravity mode value, the variation perturbation strategy is introduced in the children to reduce the possibility of falling into the local optimal. The experimental results show that the gyro error after MGMA compensation is obviously reduced, and the well inclination error is reduced from 9.75° to 1.52°, and compared with PSO and MA algorithm, it has the advantages of fast speed and high precision.

Keywords: measurement with drilling; MEMS gyroscope; mayfly algorithm; error compensation

0 引言

近年来,随着微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)技术的发展, MEMS 传感器凭借其成本低、体积小、可集成化等优势,在随钻测量领域得到了应用^[1]。MEMS 陀螺仪可同时解算出方位角、井斜角和工具面角,而加速度计只能解算出井斜角和工具面角,磁强计只能解算出方位角,相比之下陀螺在随钻测量领域更具优势。但由于工作环境的限制,在实际的井下钻进过程中钻头和不同地质层相互作用产生的强振动,以及地温对陀螺材料性能参数的影响,导致陀螺输出中包含大量误差,且误差还会随着积分过程不断累积,严重影响了钻具姿态解算的精度^[2]。因此, MEMS 陀螺仪误差的在线补偿对提高姿态解算精度至关重要。

目前,国内外学者对于 MEMS 陀螺误差补偿进行了大量研究。杨金显等^[3]利用多传感器分布式信息融合,建立振动下陀螺漂移 PI 控制模型,但 PI 参数的辨识依赖于神经网络,实时性不强且没有考虑地温对陀螺的影响;Huang 等^[4]利用深度神经网络构建陀螺误差模型,但训练模型需要大量的历史数据,不适用于随钻测量中的陀螺误差的实时在线补偿;Ding 等^[5]利用 ARMA 对陀螺误差进行建模后使用自适应卡尔曼滤波补偿,但随钻测量环境恶劣,陀螺误差成分复杂多变,线性的 ARMA 模型阶数和参数难以确定。对于 MEMS 陀螺误差的在线补偿,重点在于误差模型参数的辨识。近些年来,智能优化算法凭借其参数寻优能力强的特点,已被成功运用于陀螺的误差补偿中。佟林等^[6]利用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)实时在线辨识模型的参数,陀螺零偏均值降低了一个数量级;Shen 等^[7]利用 Elman 神经网络建立陀螺的温度漂移模型,并用遗传算法(genetic algorithm, GA)辨识模型参数,结果表明 Allan 方差系数大幅度降低;Wang 等^[8]利用灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)和门控循环单元神经网络补偿陀螺比例因子误差,显著提高了陀螺精度。上述研究表明了群智能优化算法在陀螺误差参数辨识中的有效性和优势,但对于随钻测量中的 MEMS 陀螺误差参数辨识, PSO、GA 等优化算法容易陷入局部最优^[9],更无法应对钻进过程中复杂多变的情况,从而导致误差参数识别结果不准确。

2020 年希腊学者 Zervoudakis 等^[10]受雌雄蜉蝣生物群体聚集、吸引和交配等行为启发,提出一种新型群智能优化算法—蜉蝣算法(mayfly algorithm, MA),同时具备 PSO 和 GA 等算法优点,相比于其他算法具有收敛精度高、速度快^[11]的特点。此外,MA 在随钻陀螺误差参数辨识中具有一定优势:雄性蜉蝣的聚集行为使得搜索空间

快速收敛并求出误差参数结果,适合随钻陀螺误差参数的实时在线辨识;雌性蜉蝣的随机游走行为可识别在实际钻进中受环境影响而不断变化的误差参数;雌雄蜉蝣交配产生的子代继承了上代较优的解,可进一步得到精度较高的参数辨识结果。李林丰等^[12]将 MA 用于三轴磁力计的误差补偿,误差参数识别具有较快的收敛速度和较高的收敛精度;Zou 等^[13]将 Q 学习和 MA 用于机器人全局路径规划,结果表明 MA 在静态和复杂的动态环境下都有较强的寻优能力。因此,MA 凭借其收敛速度、精度高、寻优能力强以及环境适应性较强的优势,使其在陀螺误差参数辨识中具有较高的应用价值。但 MA 在随钻测量陀螺误差参数的辨识中仍存在问题:当个体距离历史最优解或全局最优解较远时,即当前误差参数辨识结果和真实值之间差异较大时,蜉蝣的飞行速度过快很容易飞出搜索空间,局部开发能力也不稳定,而随钻测量中陀螺的误差累积是一个较缓慢的过程,导致参数辨识的结果也不够精确;雌雄蜉蝣基于适应度匹配策略而交配产生的子代,虽继承了上代蜉蝣较好的适应度,但也增加了陷入局部最优的可能性。因此,针对 MA 在随钻测量中陀螺误差补偿的参数辨识问题,需要结合加速度计和磁强计输出特性进行优化。

根据以上讨论,提出一种基于 MGMA 的随钻 MEMS 陀螺误差在线补偿方法。首先,分析随钻陀螺误差来源,并由陀螺的测量模型推导出误差补偿模型。考虑到 MEMS 加速度计无累计误差,可测量得到钻具坐标系下的重力加速度向量,并通过陀螺输出推导出重力加速度向量作叉乘运算,得到两向量夹角作为算法的目标函数;考虑到钻进时振动、冲击对加速度计的影响,利用停钻时的加速度计输出建立重力向量模值约束条件;同时为进一步提升陀螺精度,利用 MEMS 磁强计和陀螺的输出关系,设计磁模值相对误差作为算法的约束条件。对于 MA 在随钻测量参数辨识中的问题:限制误差参数寻优个体飞行的最大速度并自适应的确定搜索空间上下界;在个体速度更新中设计惯性权重,平衡算法的全局探索和局部开发能力,提高陀螺误差参数辨识精度;最终在子代中引入变异扰动策略,进一步减少算法陷入局部最优的可能。

1 随钻陀螺误差补偿模型

随钻 MEMS 陀螺误差可大致分为比例因子误差、非正交误差、零偏误差以及测量噪声^[3],一般而言陀螺在使用之前直接通过实验室标定进行校正即可。但由于随钻陀螺工作的环境恶劣,陀螺误差参数并不是固定不变的,会因为环境变化、工作时长等因素呈现出时变、非线性^[14]的特点。例如由于 MEMS 陀螺材料性能受温度及

变化率影响较大,同时井下温度也会随着钻井深度而变化,这直接导致随钻陀螺的比例因子出现非线性、不对称^[15]等特点。除温度影响之外,由于 MEMS 陀螺仪基于科里奥利效应测量旋转角速度,因此在实际井下钻进过程中钻头和复杂地质层相互作用产生的线振动/角振动,导致陀螺输出中存在一定的偏置误差。在实际随钻测量中,若能实时地辨识陀螺的误差参数并进行在线补偿是极其重要的。

随钻 MEMS 陀螺仪的测量模型为:

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

其中, $\tilde{\omega} = [\tilde{\omega}_x \tilde{\omega}_y \tilde{\omega}_z]^T$ 为三轴陀螺的测量值; ω 为真实值; 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 MEMS 陀螺信号转换过程存在损失,同时受随钻地温影响会实时变化,最终呈现出非线性、不对称等特点; b 为陀螺的零偏误差; ε 为测量噪声,一般认为是高斯白噪声^[16],可通过数据预处理抑制。由式(1)可得陀螺的误差补偿模型为:

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

其中, $P = (I_3 + S)^{-1}$, I_3 为单位矩阵。为方便叙述,不妨设误差补偿矩阵为:

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

三轴陀螺仪零偏和非正交误差 $b = [b_x \ b_y \ b_z]^T$,最终得到随钻 MEMS 陀螺的 12 维误差因子向量:

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

2 误差补偿模型参数辨识

建立误差补偿模型后,需要对误差模型的参数进行辨识。MA 相对而言具有全局寻优能力强、环境适应性好以及收敛速度快等特点,但针对随钻陀螺误差参数辨识问题,仍需要结合加速度计和磁强计各自的优势,设计目标函数和约束条件。

2.1 目标函数

陀螺仪输出的敏感三轴角速度短期可信,但是由于经过积分才能得到角度信息,角速度信息中的误差也会随着时间积累,使得陀螺产生累积误差,影响后续的姿态解算精度。考虑到加速度计数据解算钻具姿态角无需积分不存在累积误差^[17],因此利用捷联安装的加速度计的输出特性建立目标函数。

导航坐标系(n-系)下重力加速度 g^n 通过旋转矩阵 C_n^b 变换到钻具坐标系(b-系),得到钻具坐标系下的推导

重力加速度为:

$$\hat{g}^b = C_n^b g^n \quad (5)$$

其中, C_n^b 由陀螺的输出通过姿态解算得到。如图 1 所示加速度计和陀螺仪捷联安装, b 系下的重力加速度 g^b 可通过敏感三轴加速度计测量获得,但在高动态下存在一些误差,需要在约束条件中给出模值约束。由向量叉乘定义可知,叉乘的模值和向量夹角正相关,即:

$$\|\hat{g}^b \times g^b\| = \|\hat{g}^b\| \|g^b\| \sin\theta \quad (6)$$

若陀螺产生误差,则会导致 C_n^b 产生偏差,进一步地通过 C_n^b 得到的推导重力加速度 $\hat{g}^b$,会和实际重力加速度 g^b 之间出现偏差,偏差大小和两向量夹角 θ 呈正相关,即陀螺误差和 θ 呈正相关, θ 越小表示陀螺误差越小。基于上述讨论,得到优化算法的目标函数为:

$$f_{\min} = \left| \arcsin \frac{\|\hat{g}^b \times g^b\|}{\|\hat{g}^b\| \|g^b\|} \right| \quad (7)$$

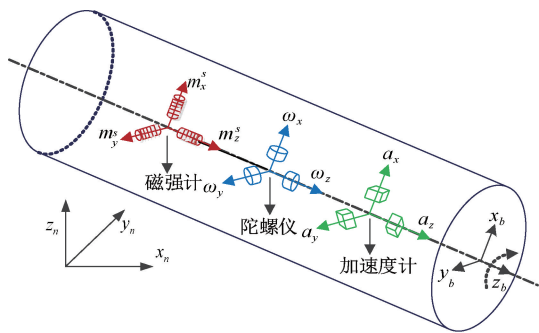


图 1 多传感器捷联安装

Fig. 1 Multi-sensor strapdown installation

2.2 约束条件

考虑到在实际井下钻进过程中钻具振动、冲击对加速度计的不利影响,建立重力向量模值约束条件:

$$g \approx \sqrt{(g_x^b)^2 + (g_y^b)^2 + (g_z^b)^2} \quad (8)$$

其中, $g_i^b (i = x, y, z)$ 为钻进时三轴加速度计输出,为钻具坐标系下的重力加速度模值,可在停钻时由加速度计测量得到。

此外,为进一步提升陀螺输出的精度,利用磁强计抗振的特点,建立陀螺输出约束条件。根据文献^[18]中陀螺和磁强计输出之间的关系:

$$h_k = (1 + [\omega_{k-1}] \times \Delta t) h_{k-1} \quad (9)$$

其中, h_k 和 h_{k-1} 分别表示 k 和 $k-1$ 时刻磁强计的测量值, Δt 为 k 和 $k-1$ 之间的时间间隔, $[\omega]_x = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$ 为陀螺测量的三轴角速度。可得磁模值相对误差:

$$e_h = \left| \frac{\|\hat{\mathbf{h}}_k\| - \|\mathbf{h}_k\|}{\|\mathbf{h}_k\|} \right| \quad (10)$$

其中, $\mathbf{h}_k$ 根据式(9)得到,即利用 $k-1$ 时刻陀螺和磁强计输出,对 k 时刻的磁强进行估计。 $\mathbf{h}_k$ 为 MEMS 磁强计测量得到的实际磁场强度,考虑到实际地层钻井时钻具铁磁材料对磁场的影响,将磁强计安装在非磁性钻链内^[19],尽可能地减小磁干扰对磁强计输出的影响。

e_h 越接近于 0 说明磁场强度的估计和实际值越接近,即陀螺的误差越小,输出也越准确。但是在实际钻井中往往难以满足误差为 0 的苛刻要求,文献[20]实验结果表明当磁场强度模值误差在 5% 内时,基本满足钻具姿态角解算的要求,同时为防止算法陷入死循环,设定磁模值误差约束条件为 $e_h \leq 0.05$ 。

2.3 基于 MGMA 的参数辨识

MA 受蜉蝣生物的婚配等行为启发,从其结构来看寻优过程可分为 3 个部分:雄性蜉蝣个体寻优和舞蹈吸引雌性;雌性蜉蝣个体寻优和随机游走;雌雄蜉蝣交配产生子代并替代较差个体。基本蜉蝣算法见文献[10],限于篇幅本文不再赘述。在引言中已经分析了 MA 算法用于随钻陀螺误差参数辨识中的可行性和优势,因此针对 MA 的不足,首先限制蜉蝣的最大飞行速度并设计自适应搜索空间上下界;再根据重力模值相对误差设计雌雄蜉蝣速度的惯性权重;最后根据磁-重力模值相对误差设计子代变异扰动策略。

考虑到在实际的随钻测量中陀螺误差累积是一个相对缓慢的过程,而在算法寻优初期当前个体距离历史最优或全局最优较远,即当前误差参数识别结果和真实值之间差异较大,蜉蝣的飞行速度过快极易飞出搜索空间,因此首先需要限制飞行的最大速度:

$$v_{ij}^{t+1} = \begin{cases} V_{\max}, & v_{ij}^{t+1} > V_{\max} \\ -V_{\max}, & v_{ij}^{t+1} < -V_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $V_{\max} = \text{rand} \times (x_{\max} - x_{\min})$, rand 为 $(0,1]$ 内的随机数, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为搜索空间的上界和下界,仍属于需要人工设定的超参数。随钻测量环境恶劣难以预测,若根据先验知识确定好唯一的上下界,并不能应对井下钻进时复杂多变的实际情况。因此为提升算法的自适应能力,首先通过相邻时刻磁强计输出并根据式(9)推导出 $[\omega]_x$,再结合式(2)利用最小二乘法得到 12 维误差因子向量的估计:

$$\tilde{\mathbf{Q}} = [\tilde{p}_{11}, \tilde{p}_{12}, \dots, \tilde{b}_y, \tilde{b}_z]^T \quad (12)$$

则搜索空间的上下界分别为:

$$\begin{aligned} x_{\max} &= \max\{|\tilde{p}_{11}|, |\tilde{p}_{12}|, \dots, |\tilde{b}_y|, |\tilde{b}_z|\} \\ x_{\min} &= -\max\{|\tilde{p}_{11}|, |\tilde{p}_{12}|, \dots, |\tilde{b}_y|, |\tilde{b}_z|\} \end{aligned} \quad (13)$$

限制蜉蝣最大速度可防止其飞出搜索空间,同时为了进一步提升陀螺误差参数寻优的精度和收敛速度,需要结合加速度计输出平衡算法的全局探索能力和局部开发能力。根据重力模值相对误差,设计雌雄蜉蝣速度更新的惯性权重:

$$e_g = \left| \frac{\|\hat{\mathbf{g}}^b\| - \|\mathbf{g}^b\|}{\|\mathbf{g}^b\|} \right| \quad (14)$$

雄性蜉蝣寻优设计:假设在 d 维的搜索空间中,雄性个体和雌性个体的数量均为 m ,在雄性个体的速度更新中根据重力模值相对误差设计惯性权重,则其速度更新和位置更新如式(15)和(16)所示:

$$\begin{aligned} v_{ij}^{t+1} &= e_g \times v_{ij}^t + a_1 e^{-\beta r_p^2} (pbest_{ij} - x_{ij}^t) + \\ &a_2 e^{-\beta r_g^2} (gbest_j - x_{ij}^t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (16)$$

其中, v_{ij}^t 为在第 t 次迭代中,第 i 个雄性蜉蝣个体在第 j 维上的速度; x_i^t 为第 i 个蜉蝣在第 t 次迭代时的位置; a_1 和 a_2 为正的吸引系数; $pbest$ 为个体的历史最优位置, $gbest$ 为群体全局最优位置; β 为蜉蝣的能见度系数; r_p 和 r_g 分别表示个体当前位置与历史最优位置、全局最优位置之间的距离,即个体当前辨识到的陀螺误差参数与历史最精确误差参数、全局最精确误差参数之间的差异,可用笛卡尔距离表述:

$$\|x_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - X_{ij})^2} \quad (17)$$

特别地,对于雄性蜉蝣群体中的最优个体,进行舞蹈以吸引雌性,并不断地改变自身速度:

$$v_{ij}^{t+1} = e_g \times v_{ij}^t + d \times r \quad (18)$$

其中, d 为舞蹈系数,用来吸引雌性蜉蝣; r 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。在最优个体速度更新中引入惯性权重,使得雄性最优个体速度跟随重力模值相对误差自适应变化,进一步提升陀螺误差参数识别的精度。

雌性蜉蝣靠近雄性蜉蝣完成交配并产生子代,其速度和位置更新为:

$$v_{ij}^{t+1} = \begin{cases} e_g \times v_{ij}^t + a_2 e^{-\beta r_m^2} (x_{ij}^t - y_j^t), & f(y_j) > f(x_i) \\ e_g \times v_{ij}^t + fl \times r, & f(y_j) \leq f(x_i) \end{cases} \quad (19)$$

$$y_i^{t+1} = y_i^t + v_i^{t+1} \quad (20)$$

其中, y_i^t 为第 t 次迭代时第 i 只雌性蜉蝣的位置, r_m 为雌雄蜉蝣之间的距离,可用式(17)来计算; fl 为随机游走系数,当雌性蜉蝣没有被吸引时进行随机游走。随机游走行为赋予个体不断变化的特点,这使得其能识别随环境不断变化的陀螺误差参数。进一步地在随机游走中设计惯性权重,使得随机游走个体可跟随当前误差参数识别结果的精准度自适应变化,提升误差参数识别的

环境适应性。

综上所述,在误差参数寻优的初期,推导重力加速度和实际的重力加速度的模值差异较大,亦即惯性权重较大,此时全局探索能力强,使得搜索空间能快速地收敛于某一区域;随着寻优的进行算法逐渐收敛,推导重力加速度和实际的重力加速度的模值差异变小,即惯性权重也随之逐渐减小,蜉蝣速度更新逐渐缓慢,此时局部开发能力不断变强以获得高精度的误差参数。

子代变异扰动策略设计:蜉蝣的交配可用交叉算子来表示,首先将雌雄蜉蝣按其适应度排序,最优雄性蜉蝣和最优雌性蜉蝣交配,次优雄性蜉蝣和次优雌性蜉蝣交配,以此类推,并分别产生两个子代:

$$\begin{aligned} \text{offspring1} &= L \times \text{male} + (1 - L) \times \text{female} \\ \text{offspring2} &= L \times \text{female} + (1 - L) \times \text{male} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, male 为雄性蜉蝣, female 为雌性蜉蝣; L 为特定范围内的随机值。最后将子代划分为雌性和雄性,替代适应度较差的个体。雌雄蜉蝣按照适应度相匹配并产生的子代,虽然继承了上代较好的适应度,但是若上代的位置在局部最优附近,子代陷入局部最优的可能性会大大增加。因此,结合随钻测量加速度计和磁强计的输出特性,引入子代变异扰动策略:

$$\text{offspring}'_n = \text{offspring}_n + \sigma N_n(0,1) \quad (22)$$

其中, σ 为正态分布的标准差; $N_n(0,1)$ 表示均值为0,方差为1的标准正态分布。子代总体中的变异比例为:

$$P = (e_h + e_g) / 2 \quad (23)$$

子代中变异的比例由磁模值和重力模值的相对误差共同决定,即子代中需要变异的比例与磁-重力模值相对误差呈正比,越小表示离全局最优越近,陀螺误差参数辨识的结果越精确。最终,基于 MGMA 的随钻陀螺误差补偿流程如图2所示。

3 实验与分析

为验证本文设计的随钻 MEMS 陀螺仪误差在线补偿方法的有效性和优势,利用实验室自制的微惯性测量单元(micro inertial measurement unit, MIMU)和处理器构成的测量短节进行模拟实验和实钻实验, MIMU 由 MEMS 磁强计(HMC1043)、MEMS 加速度计(MS9010)和 MEMS 陀螺仪(CRG20-02)集成得到,处理器采用 CPU 时钟为 84 MHz 的 Atmel SAM3X8E。

3.1 模拟钻进实验

模拟钻进实验场地所处北纬 35° , 东经 113° , 地球重力加速度为 9.7966 m/s^2 , 磁场强度为 $52.65 \mu\text{T}$ 。如图3所示,使用小型钻机将实验室自制的 MIMU 固定在钻杆底部,钻头在大理石、花岗岩等模拟地质层垂直钻进;由

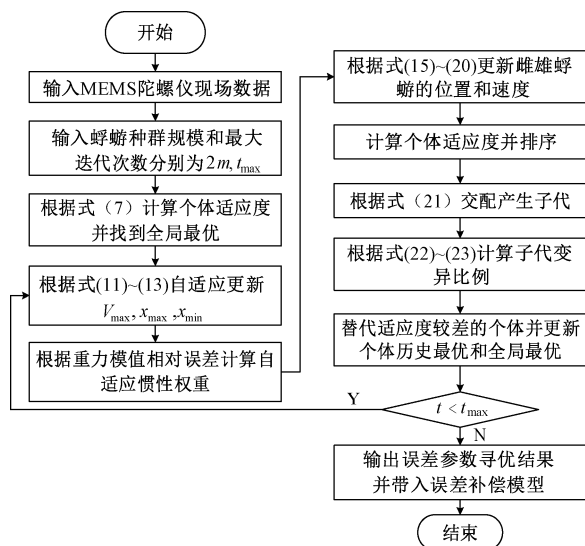


图2 基于 MGMA 的随钻陀螺仪误差补偿流程

Fig. 2 Error compensation flow of gyroscope while drilling based on MGMA

于钻进时钻具温度较高,将 MIMU 包裹在隔热材料内以模拟随钻测量中的地温。持续采集 20 min 模拟钻进 MIMU 数据,取钻速稳定时的 2 000 个采样点作为原始数据,并分别用 PSO、MA 以及本文提出的 MGMA 辨识陀螺误差参数。3 种算法的种群规模统一设置为 40,最大迭代次数设置为 1 000,并将式(7)设置为适应度函数。



图3 模拟钻进实验

Fig. 3 Simulated drilling experiment

3 种优化算法的陀螺误差参数辨识结果如表1所示,其中误差参数的真值由转台标定实验得到,如图4所示将 MIMU 装入测量短节中并固定,采用 12 位置转台连续自标定方法对陀螺进行标定。为更加直观地对比 3 种算法的补偿效果,验证 MGMA 算法的有效性和优势,陀螺原始信号和 3 种优化算法的补偿效果如图5所示。从图中可明显看出在钻进过程中陀螺原始输出中包含大量尖峰、毛刺等噪声,这将直接影响后续的钻具姿态解算精度。经 PSO 算法补偿过后,尖峰、毛刺等噪声虽得到一定程度的抑制,但补偿效果并不理想;MA 算法与 PSO 算法相比,补偿效果优于 PSO 算法,但仍不足以满足随钻

测量中对陀螺输出精度上的要求;而使用 MGMA 算法进行误差补偿之后, X 轴、 Y 轴和 Z 轴的陀螺输出误差明显较小,均保持在较为理想的范围之内,可辨识到较为准确的陀螺误差参数,精度明显高于 PSO 和 MA 算法。

表 1 3 种算法陀螺误差参数辨识结果

Table 1 Identification results of gyro error parameters by three algorithms				
误差参数	真值	PSO	MA	MGMA
p_{11}	1.001 1	1.076 0	1.023 0	1.001 5
p_{12}	-0.000 9	-0.003 6	-0.001 1	-0.000 9
p_{13}	-0.001 1	-0.007 0	-0.005 3	-0.001 9
p_{21}	-0.000 6	-0.050 9	-0.020 6	-0.003 3
p_{22}	0.999 6	0.886 2	0.922 6	0.997 0
p_{23}	0.001 1	0.006 3	0.017 7	0.010 8
p_{31}	0.002 5	0.009 3	0.006 9	0.005 0
p_{32}	-0.010 4	-0.090 3	-0.059 6	-0.010 4
p_{33}	1.001 1	1.026 1	1.009 2	1.001 1
b_x	-53.332 1	-40.631 4	-50.661 2	-53.331 3
b_y	-81.332 5	-50.336 4	-75.649 2	-80.622 0
b_z	22.990 0	18.833 1	20.799 1	22.961 1

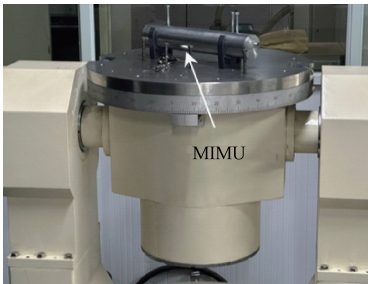


图 4 转台实验
Fig. 4 Turntable experiment

3 种优化算法的收敛曲线如图 6 所示,从图中可看出 PSO 算法迭代近 700 次后过早收敛并陷入局部最优,直到迭代结束也没有跳出,且最终的适应度值也较差;MA 算法与 PSO 算法相比,虽在收敛速度和收敛精度上皆一定程度的优于 PSO 算法,但最终的适应度值仍没有达到 0,说明陀螺误差参数辨识的结果不够准确,补偿后仍有一定的误差;MGMA 在 MA 基础上引入惯性权重,使得算法在迭代早期具有较强的全局搜索能力,快速收敛于某一区域,收敛速度明显快于 MA 算法;此外,与 MA 算法相比,MGMA 在 226 次迭代后适应度值便收敛到 0,参数寻优能力和收敛精度也明显高于 MA 算法。综合以上实验和分析可知,相比于 PSO 和 MA 算法,本文提出的 MGMA 收敛速度更快、收敛精度更高。

3.2 实钻井实验

为进一步验证 MGMA 算法在实际随钻环境下陀螺误差补偿的实用性和优势,选取焦作市某煤矿垂直段钻

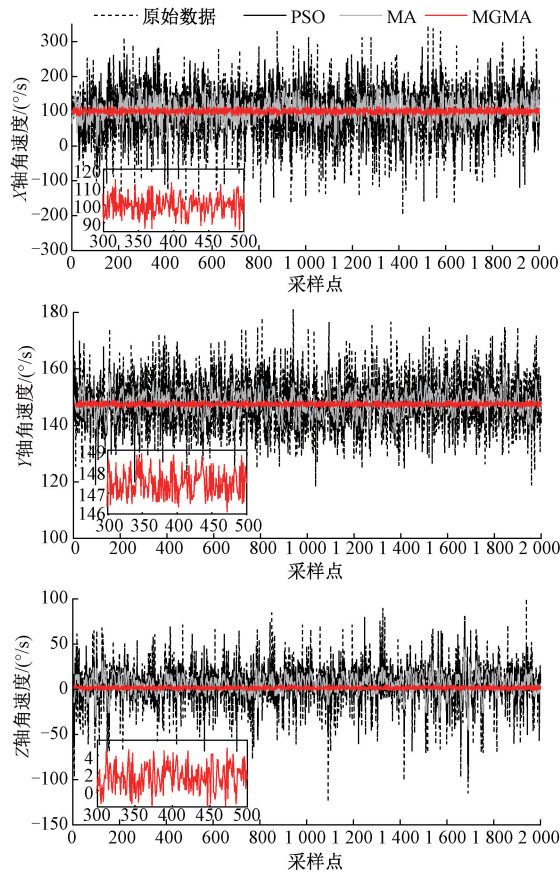


图 5 模拟钻进实验陀螺仪三轴输出补偿结果

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

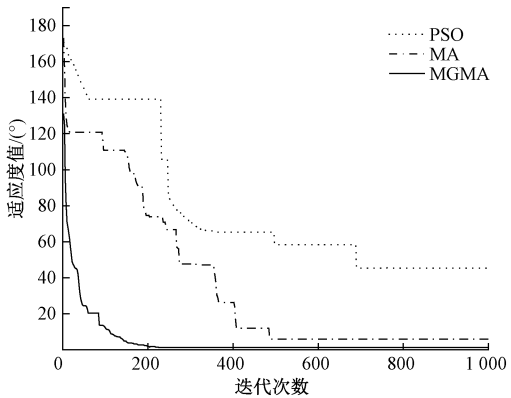


图 6 3 种优化算法的收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of three optimization algorithms

井工作进行实钻实验,转速稳定后(40 r/min)采集 1 800 s 钻进数据,如图 7 所示,分别利用 PSO、MA 和 MGMA 算法辨识陀螺误差参数。为便于比较 3 种优化算法误差参数辨识精度,以补偿后的陀螺输出解算出的井斜角为例进行对比分析。由于选取的是实钻井垂直钻进过程,因此理论上井斜角应为 0°,得到图 8 所示的 3 种优

化算法井斜角误差。

观察图 8 可知,由于实钻井过程中恶劣环境的干扰,陀螺输出中的误差通过积分过程不断累积,钻具姿态解算误差逐渐增大。PSO 和 MA 算法补偿后的井斜角误差由补偿前的 9.75° 降为 5.38° 和 2.95°,而 MGMA 可降低为 1.52°,陀螺补偿后的井斜角误差明显降低且小于前两种算法。以井斜角误差、均方根误差和算法运行时间为评价指标,进一步直观地验证 MGMA 的优势。结合表 2 可知在实际随钻测量陀螺误差补偿中,本文提出 MGMA 算法相比于 PSO 和 MA 算法具有精度高、速度快的优势。



图 7 实钻井测量
Fig. 7 Actual drilling experiment
MIMU

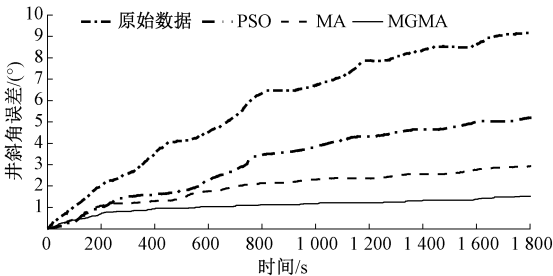


图 8 井斜角误差
Fig. 8 Well inclination error

表 2 3 种算法评价指标对比
Table 2 Comparison of evaluation
indexes of three algorithms

评价指标	PSO	MA	MGMA
井斜角误差/(°)	5.38	2.95	1.52
RMSE	3.68	2.15	0.53
运行时间/s	12.26	7.22	6.58

4 结 论

针对随钻测量 MEMS 陀螺仪输出中包含大量误差,严重影响后续姿态解算精度的问题,提出一种基于磁-重

力蠕变算法的随钻陀螺误差补偿方法。并设计模拟钻井实验和实钻井实验验证了算法的有效性和优势,得到如下结论:

MGMA 利用加速度计和磁强计输出特性在 MA 基础上设计惯性权重和子代变异策略,可提高随钻陀螺误差参数辨识的速度和精准度,有效抑制陀螺输出中的误差。

实钻井实验结果表明 MGMA 算法补偿后井斜角误差由未补偿的 9.75° 降低为 1.52°,且相比于 PSO 算法和 MA 算法收敛精度更高、速度更快,能够有效减小陀螺输出误差引起的姿态角失真,具有一定的工程应用价值。

但 MEMS 磁强计输出对算法补偿效果有重要影响,当出现较强的磁干扰时并不能通过非磁性钻铤完全屏蔽掉。因此,下一步的研究重点是在强磁干扰条件下消除或降低对磁强计输出的影响,并进一步验证 MGMA 在随钻测量陀螺误差补偿中的有效性。

参考文献

[1] YANG H, LI L, LUO T, et al. A fault-tolerant integrated borehole trajectory location method based on geomagnetism/IMU of MWD[J]. IEEE Access, 2019, 7: 156065-156076.

[2] 刘春,陈豪,戴雷,等. EWT 算法在姿态解算中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 220-227.

LIU CH, CHEN H, DAI L, et al. EWT algorithm in the application of attitude algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35(8): 220-227.

[3] 杨金显,仝小森,赵淳,等. 振动下惯性随钻测量的方位漂移闭环补偿[J]. 传感技术学报, 2021, 34(12): 1644-1650.

YANG J X, TONG X S, ZHAO CH, et al. Closed-loop compensation of azimuth drift in inertial measurement while drilling under vibration [J]. Chinese Journal of Sensing Technology, 2019, 34(12): 1644-1650.

[4] HUANG F, WANG Z, XING L, et al. A MEMS IMU gyroscope calibration method based on deep learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.

[5] DING M, SHI Z, DU B, et al. The method of MEMS gyroscope random error compensation based on ARMA[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 125109.

[6] 佟林,覃方君,冯卡力,等. 基于粒子群优化算法的光纤陀螺温度误差分段补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(4): 505-509.

TONG L, QIN F J, FENG K L, et al. Based on particle swarm optimization algorithm of fiber optic gyro temperature error compensation method for piecewise [J].

- Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27 (4): 505-509.
- [7] SHEN C, SONG R. Temperature drift modeling of MEMS gyroscope based on genetic-Elman neural network [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72: 897-905.
- [8] WANG F, ZHAO S, WANG L, et al. Study on FOG scale factor error calibration in start-up stage based on GWO-GRU [J]. Measurement, 2023, 206: 112214.
- [9] 杨金显, 王赛飞, 申刘阳, 等. 基于 IAO 的随钻 MEMS 加速度计误差参数识别方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31 (5): 516-522.
- YANG J X, WANG S F, SHEN L Y, et al. IAO based MEMS accelerometer error parameter identification method with drilling [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31 (5): 516-522.
- [10] ZERVOUDAKIS K, TSAFARAKIS S. A mayfly optimization algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 145: 106559.
- [11] LEI G, CHANG X, TIANHANG Y, et al. An improved mayfly optimization algorithm based on median position and its application in the optimization of PID parameters of hydro-turbine governor [J]. IEEE Access, 2022, 10: 36335-36349.
- [12] 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 Northwestern Polytechnical University, 2022, 40 (5): 1004-1011.
- [13] ZOU A, WANG L, LI W, et al. Mobile robot path planning using improved mayfly optimization algorithm and dynamic window approach [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79 (8): 8340-8367.
- [14] 邹泽兰, 徐同旭, 徐祥, 等. 基于两步修正法的 MEMS 三轴陀螺仪标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (4): 191-198.
- ZOU Z L, XU T X, XU X, et al. Based on two-step correction method of MEMS triaxial gyro calibration method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (4): 191-198.
- [15] JIA J, DING X, QIN Z, et al. In-Run scale factor compensation for MEMS gyroscope without calibration and fitting [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (6): 7316-7325.
- [16] SONMEZ T, ASLAN G. Development of a software testbed for integrated navigation systems [C]. 2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications. IEEE, 2007: 1-4.
- [17] JOUYBARI A, AMIRI 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] 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.
- [19] YANG J, YANG C, JIANG J. A robust mag/INS-based orientation estimation algorithm for measurement while drilling [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (23): 7971-7980.
- [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, 2022, 71: 1-11.

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 MEMS 惯性测量及在随钻、电网舞动和变形监测中的应用研究。

E-mail: yangjinxian@hpu.edu.cn

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



尹凤帅, 2021 年于河南理工大学获得学士学位, 现为河南理工大学硕士在读研究生, 主要研究方向为随钻测量 MEMS 传感器信号去噪。

E-mail: 895871272@qq.com

Yin Fengshuai received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interest includes denoising the output signal of MEMS sensor for measurement while drilling.