

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413635

基于 MIGJO 的随钻重力加速度在线提取*

杨金显^{1,2}, 杨潇健^{1,2}, 蔺钰柯^{1,2}, 张颖^{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:为获得随钻重力加速度,研究了用磁惯性金豺优化算法(MIGJO)在线提取重力加速度问题。首先对随钻振动信号特性进行分析,建立随钻重力提取模型,并把各种非重力加速度整理为解向量;其次,根据随钻磁惯性传感器的输出特性,给出理想重力加速度的输出目标函数,以及重力夹角和钻具径切向皮尔逊系数约束条件;然后,在金豺优化(GJO)的基础上,针对随钻中不同非重力加速度的变化特性,利用上一次解向量进行逐维动态尺度随机游走的种群初始化;并利用重力模值相对误差和三角函数设计重力因子平衡算法的全局搜索和局部开发;此外,根据当前解的信息交互因子和适应度值设计攻击防御系数协调磁惯性金豺的攻击防御行为,利用最优解和次优解位置的攻击搜索策略提高重力提取精度和速度,利用上下界和突变点位置的防御搜索策略避免陷入局部最优;然后利用当前重力解与当地重力设计相似度来动态更新解向量位置,进一步提高重力提取精度。最后,设计模拟钻进和实钻实验,结果表明:使用MIGJO提取的重力加速度精度得到明显提升,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,该方法可有效提高随钻重力加速度的提取精度。

关键词: 随钻测量;重力提取;金豺优化器;磁惯性数据

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

Online extraction of acceleration of gravity while drilling based on MIGJO

Yang Jinxian^{1,2}, Yang Xiaojian^{1,2}, Lin Yuke^{1,2}, Zhang Ying^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Min Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract:To extract gravitational acceleration during drilling, the Magnetic Inertia Golden Jackal Optimization (MIGJO) algorithm is employed. Initially, the vibration characteristics during drilling are analyzed, and a gravity extraction model is established by categorizing non-gravity accelerations into solution vectors. Then, based on the output characteristics of the magnetic inertial sensor during drilling, an objective function for the ideal gravitational acceleration is defined, along with constraint conditions such as the gravity angle and tangent Pearson coefficient of the drilling tool diameter. Utilizing the Golden Jackal Optimization (GJO) algorithm, the solution vector from the previous step initializes a dynamically scaled random walk population, reflecting the random variations of non-gravity accelerations during drilling. A gravity factor balance algorithm is developed to perform global search and local refinement using the relative error of gravity modulus and trigonometric functions. Additionally, an attack-defense coefficient is introduced to manage the magnetic inertia golden jackal's behavior, optimizing both attack and defense strategies to improve gravity extraction accuracy and speed. The attack strategy, based on the positions of the optimal and suboptimal solutions, enhances accuracy, while the defense strategy, utilizing upper and lower bounds and mutation points, helps the algorithm avoid local optima. The similarity between the current gravity solution and local gravity design is used to dynamically adjust the solution vector's position, further refining the accuracy of gravity extraction. Simulated and real-world drilling experiments demonstrate that MIGJO significantly improves the accuracy of gravitational acceleration extraction, with average absolute errors in inclination and tool face angle controlled within 0.63° and 0.8° , respectively.

收稿日期: 2024-12-29 Received Date: 2024-12-29

* 基金项目: 河南省自然科学基金(232300421152)、国家自然科学基金(41672363)项目资助

This method effectively enhances the precision of gravity acceleration extraction during drilling.

Keywords: measurement while drilling; gravity extraction; golden jackal optimizer; magnetic inertia data

0 引言

在随钻测量(measurement while drilling, MWD)工程中,机电系统加速度计可以实时测量钻具的重力加速度从而解算出钻具姿态信息^[1]。但在钻井过程中,加速度计不仅受到器件自身误差的影响,还受到强振动,强冲击等随钻环境的影响,导致测量的重力加速度信号严重失真。前者可以通过标定完成校准,后者由于其随机性和突变性,需要结合算法从测量值中提取出真实的重力加速度。

目前,国内外学者对加速度计在振动和冲击等复杂随钻环境下,提取真实重力加速度信息问题进行了一些研究。其中,有设计自适应联邦无迹卡尔曼滤波方法提取重力加速度,但计算量较大,无法在嵌入式装备上运行^[2]。有设计可变带宽的加速度计自适应滤波方法,但要求重力加速度频带和振动加速度频带分开^[3]。为提高钻具对复杂多变的随钻环境下不同运动状态的适应能力,韩冬等^[4]采用互补滤波器对加速度计和陀螺仪数据进行融合以滤除近钻头的振动加速度干扰,但陀螺仪的累计误差会影响到滤波器对重力提取的精度。上述算法要么利用加速度计测量值中的重力信息和非重力信息在时域和频域的特征不同将其分开,要么利用多传感器融合的方法来提取重力加速度,其重力提取模型并未发生改变。因此,有研究学者设计了一种基于Hammerstein的加速度计随机振动误差模型,并利用贝叶斯算法辨识误差向量,但该模型本身较为复杂,并且辨识精度依赖于初始参数的选择^[5]。近年来随着智能算法的发展,越来越多的基于动物种群特性和物理定律的元启发算法被用来对加速度计各种误差进行求解。Huang等^[6]和Qiao等^[7]分别使用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和改进北方苍鹰算法对三轴加速度计进行标定,提高了加速度计的测量精度。Mo等^[8]在振动试验台上使用粒子群算法对加速度计误差模型参数进行优化,结果表明输出精度明显提高。Alaeiyan等^[9]利用遗传算法对加速度计的动态和静态误差参数进行求解大幅度提高了输出精度。但上述优化算法对于随钻测量工程中的加速度计重力提取来说并不理想,极易陷入局部最优。为适用于复杂的随钻测量环境,Wang等^[10]使用改进沙猫算法对随钻加速度计随机误差参数进行求解,提高了随钻重力加速度精度,但该算法是在离线下进行的。

金豺优化算法(golden jackal optimization, GJO)^[11]是2022年提出的一种元启发式优化算法。GJO利用极限

逼近的思想,在设定的随钻重力提取约束条件下,通过对随钻重力提取目标函数进行求解完成重力提取。在求解全局最优非重力加速度过程中,GJO根据猎物的逃逸能量来选择搜索和攻击,可对应于根据当前非重力加速度的质量来平衡全局搜索和局部开发;此外,GJO通过金豺对的领导进行合作狩猎,即根据当前迭代中最优和次优非重力加速度引导的全局和局部的位置更新,使得非重力加速度解空间快速收敛并求出最优解,适用于随钻工程中对加速度计输出进行实时在线重力提取;并且在GJO全局搜索和局部开发中引入了莱维飞行来模拟振动、冲击加速度随机变化,在一定程度上防止算法在复杂振动的随钻环境下搜索非重力加速度解向量时陷入局部最优。史书杰等^[12]利用GJO优化核极限学习机用于轴承故障诊断;Rezaie等^[13]基于PSO对GJO进行改进,用于交换膜燃料电池的模型参数辨识;Houssein等^[14]使用基于对立的GJO对皮肤癌成像高效图像进行最优分割。在上述的工程问题中,GJO以及各种改进版本的GJO都表现出比其他优化算法更快的收敛速度以及更高的收敛精度。综上所述,将GJO用于在线提取真实重力加速度是可行的。但随钻复杂振动导致加速度中包含多种不同变化特性的非重力加速度,而GJO重力提取精度依赖于每次迭代中的最优解和次优解位置,对于强随机性和突变性的振动、冲击加速度,全局搜索阶段无法充分搜索广泛的解空间,局部搜索阶段容易陷入局部最优,并且线性收缩的逃逸能量会使搜索和攻击阶段不平衡,导致重力提取不准确。

因此,本研究设计了一种基于磁惯性金豺优化算法(magnetic inertial golden jackal optimization, MIGJO)的随钻重力加速度提取方法。首先建立随钻重力加速度提取模型,并结合加速度计、陀螺仪和磁力计数据设计目标函数和约束条件;其次通过提出的逐维动态尺度随机游走对非重力加速度解向量进行初始化,提高重力提取速度和精度;并根据重力因子的大小平衡算法的全局和局部搜索;然后,设计由攻击防御系数协调的攻击防御搜索策略进行重力提取的同时避免算法陷入局部最优;最后设计重力矢量相似度动态控制解向更新,进一步提高重力提取精度。

1 随钻重力加速度提取模型

MWD系统钻具在地下进行钻进工作时,会发生钻齿的切削、岩石与磨损平面的接触挤压等情况,导致安装在近钻头位置的加速度计受到钻具振动影响测量精度降

低。当钻具钻进软硬交替地层时,会产生大量冲击误差,导致加速度计的测量值中含有呈尖峰、强度大、时间短特性的冲击加速度误差。并且在钻进时钻具会时刻与地层之间相互作用产生大量强随机性的振动误差,导致加速度计的测量值中还有振动加速度误差。此外,钻具在旋转时,还会使加速度计产生离心加速度误差,具有周期性且与钻速和钻具的安装相关,当随钻加速度计安装后常视为固定值,同时加速度计受到钻头的振动、泥浆的流动、电磁干扰等其他因素的干扰也会产生其他测量噪声。因此,经上述分析可建立随钻重力加速度提取模型:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_g + \mathbf{a}_v + \mathbf{a}_e + \mathbf{a}_s + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ 为随钻加速度计测量值; $\mathbf{a}_g = [a_{gx} \ a_{gy} \ a_{gz}]^T$ 为真实重力加速度; $\mathbf{a}_v = [a_{vx} \ a_{vy} \ a_{vz}]^T$ 为振动加速度; $\mathbf{a}_e = [a_{ex} \ a_{ey} \ a_{ez}]^T$ 为冲击加速度; $\mathbf{a}_s = [a_{sx} \ a_{sy} \ a_{sz}]^T$ 为离心加速度; $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 为测量噪声。由重力提取模型可知随钻重力加速度精度的提高关键在于求解各种非重力加速度和测量噪声,整理后用非重力加速度解向量 $\mathbf{A}_{cc} = [a_{vx}, a_{vy}, a_{vz}, a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}, a_{sx}, a_{sy}, a_{sz}, n_x, n_y, n_z]$ 表示,并作为重力加速度提取时MIGJO的解向量。

2 随钻重力提取目标函数和约束条件

2.1 目标函数

理想情况下,在钻具钻进过程中,使用MIGJO准确辨识解向量后,提取的真实重力加速度模值应与当地重力加速度模值大小相等。因此,参考文献[15]设置的目标函数,构造随钻重力提取最小化目标函数:

$$f_{\min}(\mathbf{A}_{cc}) = \sum_{i=1}^n (\|\mathbf{a}_g\| - \|\mathbf{g}\|)^2 \quad (2)$$

其中, \mathbf{a}_g 值是通过MIGJO间接得到; \mathbf{g} 为当地的重力加速度; n 为测量数据个数。当目标函数取到最小值时,此时 \mathbf{A}_{cc} 即是全局最优重力提取模型参数解。

2.2 约束条件

利用陀螺仪短时精度高的特性建立重力夹角约束条件,具体设计为:将陀螺仪的输出进行姿态解算得到旋转矩阵 \mathbf{C}_n^b ,再将当地重力加速度 \mathbf{g} 经过 \mathbf{C}_n^b 得到钻具坐标系下的估计重力加速度 $\hat{\mathbf{g}}_b$,之后使用 $\hat{\mathbf{g}}_b$ 建立重力夹角对提取的重力加速度 \mathbf{a}_g 进行约束,即:

$$\hat{\mathbf{g}}_b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\|\mathbf{a}_g \times \hat{\mathbf{g}}_b\| = \|\mathbf{a}_g\| \|\hat{\mathbf{g}}_b\| \sin\theta \quad (4)$$

其中, θ 为 $\hat{\mathbf{g}}_b$ 和 \mathbf{a}_g 之间的夹角。在理想情况下,经MIGJO提取重力加速度 \mathbf{a}_g 应与 $\hat{\mathbf{g}}_b$ 矢量相同,即 θ 的值为0,因此,当 θ 的值越小,提取的重力加速度 \mathbf{a}_g 越准确。但陀螺仪长期解算的姿态矩阵会有累计误差,因此,为进一步

提升重力提取精度,利用磁力计抗振且无累计误差的特性建立钻具径切向皮尔逊系数约束条件。在MWD系统中,三轴加速度计和三轴磁力计捷联固定安装,因此当设备旋转时加速度计 x 、 y 轴敏感的重力加速度分量和磁力计 x 、 y 轴敏感的地磁分量,都以正弦规律变化^[16],存在的关系为:

$$\frac{\mathbf{g}_{x,y}^b(k)}{\mathbf{g}_{x,y}^b(k-1)} = \frac{m_{x,y}(k)}{m_{x,y}(k-1)} = \frac{\sin\omega_{x,y}t}{\sin\omega_{x,y}(t-\Delta t)} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{g}_{x,y}^b$ 为加速度计 x 轴和 y 轴敏感的真实重力加速度分量; $m_{x,y}$ 为磁力计 x 轴和 y 轴敏感的真实地磁分量; ω 为钻具旋转的角速度; k 表示采样时刻; Δt 为采样间隔。由式(5)可知,理论上钻具绕轴向旋转时加速度计 x 、 y 轴测量的重力加速度分量和磁力计 x 、 y 轴测量的地磁分量是同频率的周期信号,利用这一特性即根据MIGJO提取的 x 、 y 轴真实重力加速度分量和磁强计 x 、 y 轴测量的真实地磁分量的相关性,设计钻具径切向皮尔逊相关系数不等式约束,通过查相关系数与相关程度对照表可知,可设置钻具径切向皮尔逊系数约束阈值,即:

$$0.8 < |r_{a_g, m}| = \left| \frac{\text{cov}(a_{gx,y}, m_{x,y})}{\sigma_{a_{gx,y}} \sigma_{m_{x,y}}} \right| \leq 1 \quad (6)$$

其中, $r_{a_g, m}$ 为钻具径切向皮尔逊系数; cov 为 $a_{gx,y}$ 和 $m_{x,y}$ 归一化的协方差; $\sigma_{a_{gx,y}}$ 、 $\sigma_{m_{x,y}}$ 分别为 $a_{gx,y}$ 、 $m_{x,y}$ 的标准差。 $r_{a_g, m}$ 越接近于1说明 $a_{gx,y}$ 和 $m_{x,y}$ 相关程度越高,即MIGJO对非重力加速度解向量的搜索精度越高,提取的重力加速度越接近真实值。

3 基于MIGJO重力加速度提取模型参数辨识

3.1 逐维动态尺度随机游走初始化

由第1章对加速度计受到随钻复杂振动特性分析可知,在 \mathbf{A}_{cc} 中存在着变化特性各不相同的多种非重力加速度。如果通过GJO的随机化方法生成初始解会造成解向量各个非重力加速度之间优劣解差异过大,从而导致算法因为解向量某些维度陷入局部最优,削弱算法对重力提取的精度。考虑到MWD系统钻具在地下钻进过程中:1)振动和冲击加速度数据变化剧烈,离心加速度和噪声数据变化缓慢的特性;2)钻头系统可以认为是大惯性系统,钻进过程中钻具姿态一般不会发生突变,此外两个采样点的间隔以 s 为单位,钻具的位置以及姿态只能发生微小变动。因此在上一采样点MIGJO求解的最终解向量位置基础上,采用随机游走策略模拟非重力加速度的随机性,又通过提出逐维动态尺度来反映不同非重力加速度的变化程度。提出逐维动态尺度随机游走初始化方法,具体设计为:

$$\begin{cases} x_{i,j}^k = (x_{i,j}^{k-1} - lb_j) \frac{ub_j - lb_j}{Ub_j - Lb_j} + lb_j, & j \geq 7 \\ x_{i,j}^k = (x_{i,j}^{k-1} - Lb_j) \frac{Ub_j - Lb_j}{ub_j - lb_j} + Lb_j, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $x_{i,j}^k$ 为当前采样时刻第 j 个待识别非重力加速度的第 i 个初始解; $x_{i,j}^{k-1}$ 为上一采样时刻第 j 个非重力加速度的第 i 个最终解; $[Lb_j, Ub_j]$ 为解向量第 j 维的准区间边界, 由先验知识可得; $[lb_j, ub_j]$ 为解向量第 j 维动态区间边界, 由式(8)可得。

$$\begin{cases} lb_j = \min \{ \max \{ x_{i,j}^{k-1} : 1 \leq i \leq N \}, m_j \} \\ ub_j = \max \{ \min \{ x_{i,j}^{k-1} : 1 \leq i \leq N \}, m_j \} \end{cases} \quad (8)$$

其中, N 为候选解向量个数; $m_j = (Lb_j + Ub_j)/2$ 为中心点。

在式(7)中, 对于振动和冲击加速度采用动态大尺度随机游走初始化, 离心加速度和噪声采用动态小尺度随机游走初始化, 以此来提高解向量中各个非重力加速度初始解质量。与随机初始化相比, 逐维动态尺度随机游走初始化提高了初始解中各个非重力加速度在最优解附近的可能性, 从而提高了 MIGJO 重力提取的精度和速度。

3.2 重力因子

GJO 是通过当前线性递减因子 E_1 与猎物的随机初始能量 E_0 的乘积得到猎物躲避能量 E 来平衡算法勘探和开发。

$$E = E_0 \times E_1 \quad (9)$$

其中, $E_0 = 2r - 1$, r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $E_1 = 1.5(1 - t/T)$, t, T 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。当 $|E| \geq 1$ 时, GJO 对解向量进行全局搜索, $|E| < 1$ 时, 对解向量进行局部搜索。但由于线性递减因子 E_1 的下降速率固定, 在复杂恶劣的随钻环境下求解非线性随钻重力提取目标函数时, 会造成勘探和开发阶段不平衡, 并且躲避能量 E 线性收缩, 容易陷入局部最优, 极大限制了算法对非重力加速度的寻优性能。因此, 利用三角函数设计非线性因子以及用重力模值相对误差设计新的初始能量, 并由两者乘积得到重力因子 GF , 使其可以同时根据迭代次数和当前算法更新的解向量的质量来平衡 MIGJO 的勘探和开发, 以及动态自适应调整搜索步长, 提升对随钻重力非线性目标函数求解精度和速度。

首先, 基于三角函数的非线性和可控性设计非线性递减因子:

$$G_1 = \begin{cases} 1.5 \cos^2 \left(\frac{(t-1)\pi}{2(T-1)} \right), & 0 \leq t \leq 0.5T \\ 1.5 - 1.5 \sin^2 \left(\frac{(t-1)\pi}{2(T-1)} \right), & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

非线性递减因子 G_1 随迭代次数 t 的增加, 在搜索前期递减速率相对缓慢, 使收敛因子能够在较长时间内保持较大值, 提升 MIGJO 在非重力加速度解向量空间的全局寻优能力和搜索速率; 而在搜索中期递减因子快速下降, 实现算法由勘探到开发的快速转变; 在搜索后期 E_1 保持较小值的时间变长, 提升了 MIGJO 对非重力加速度解向量的局部寻优能力和搜索精度。

其次, 为进一步提升非重力加速度解向量求解的精度和收敛速度, 结合由当前算法更新的解向量解算出的重力加速度 \tilde{a}_g 和当地重力加速度 g 的模值相对误差重新设计猎物的初始能量:

$$G_0 = \frac{\|g\| - \|\tilde{a}_g\|}{\|g\|} \quad (11)$$

由当前解向量解算出的重力加速度越接近真实值, 初始能量 G_0 也就越小, 此时局部开发能力较强, 反之两者的模值差异越大, 说明解算出的重力加速度质量越差, 此时全局搜索能力较强。

3.3 攻击防御搜索策略

GJO 是通过成对雌雄金豺的引导进行全局搜索和局部开发的, 即根据当前迭代中最优非重力加速度和次优非重力加速度进行全局和局部的位置更新。

式(12)和(13)分别为 GJO 的全局搜索和局部开发的数学模型

$$\begin{cases} Y_1 = X_{os} - E \cdot |X_{os} - rl \cdot X_i(t)| \\ Y_2 = X_{ss} - E \cdot |X_{ss} - rl \cdot X_i(t)| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Y_1 = X_{os} - E \cdot |rl \cdot X_{os} - X_i(t)| \\ Y_2 = X_{ss} - E \cdot |rl \cdot X_{ss} - X_i(t)| \end{cases} \quad (13)$$

其中, X_{os}, X_{ss} 分别为雌雄金豺, 即当前迭代中最优和次优非重力加速度解向量; $X_i(t)$ 为当前迭代中的第 i 个候选解向量; $rl = 0.05 \times LF(x)$, LF 为莱维飞行 (levy flight), 用于模拟各种非重力加速度的随机变化; Y_1, Y_2 分别为基于最优和次优解更新的解向量。

通过对 GJO 搜索方式的数学模型分析可知, 基于最优和次优非重力加速度候选解位置的更新方式可以使非重力加速度解空间快速收敛于每次迭代中的最优解和次优解, 加快解向量的辨识效率从而提高重力提取速度, 并且莱维飞行在一定程度上避免了算法求解随钻重力提取目标函数值时陷入局部最优。但在全局搜索阶段, 由于优质解位置并不确定, 在这一阶段需要对整个解向量空间进行搜索, 虽然 GJO 的全局搜索方式能够实现算法的快速收敛, 但不可避免的会遗漏搜索空间的某些区域和造成已经搜索过的区域再次进行搜索, 无法有效搜索较为广泛的各种加速度的解空间和跳出局部最优; 在局部搜索阶段, 当随钻环境出现异常振动时, 会引起加速度出现突变, 此时算法在多个约束条件下求解随钻重力提取

目标函数时易陷入局部最优,一旦陷入局部最优,GJO的局部搜索方式即使经过多次迭代也很难跳出达到全局最优,求出准确的振动、冲击加速度。因此利用当前解的信息交互因子和适应度值设计攻击防御系数来协调攻击防御搜索策略进行重力提取:用最优解和次优解进行攻击提高重力提取精度和速度,用上下界和突变点分别进行全局防御和局部防御扩大搜索范围和跳出局部最优:

$$\begin{cases} Y_1 = X_{os} - GF \cdot |\Theta_i| X_{os} - rl \cdot X_i | + \\ \quad \Phi_i | Ub - rl \cdot X_i | | \\ Y_2 = X_{ss} - GF \cdot |\Theta_i| X_{ss} - rl \cdot X_i | + \\ \quad \Phi_i | rl \cdot X_i - Lb | | \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} Y_1 = X_{os} - GF \cdot |\Theta_i| rl \cdot X_{os} - X_i | + \\ \quad \Phi_i | rl \cdot X1 - X_i | | \\ Y_2 = X_{ss} - GF \cdot |\Theta_i| rl \cdot X_{ss} - X_i | + \\ \quad \Phi_i | rl \cdot X2 - X_i | | \end{cases} \quad (15)$$

式(14)和(15)分别为MIGJO的全局搜索和局部开发的数学模型。其中, Θ_i 、 Φ_i 分别为当前迭代中候选解 X_i 的攻击和防御系数; $X1$ 、 $X2$ 为两个突变点,由历史最优位置 X_{pbest} 和当前迭代中的随机位置 X_a 、 X_b 之间随机交互产生:

$$\begin{cases} X1 = r_1 \cdot X_{pbest} + (1 - r_1) X_a \\ X2 = r_2 \cdot X_b + (1 - r_2) X_{pbest} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Theta_i = \left[1 - \log \left(\frac{F_i - F_b}{F_w - F_b} + 1 \right) \right] \times \sum_{q=1}^N \frac{|X_q - X_i|}{N |X_{pbest} - X_i|} \\ \Phi_i = \log \left(\frac{F_i - F_b}{F_w - F_b} + 1 \right) \times \sum_{q=1}^N \frac{|X_q - X_i|}{N |X_{pbest} - X_i|} \end{cases} \quad (17)$$

其中, r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; F_i 为当前候选解 X_i 的适应度值; F_b 为历史最优位置 X_{pbest} 的适应度值; F_w 为当前迭代中最差解向量的适应度值; $|X_q - X_i|$ 、 $|X_{pbest} - X_i|$ 分别为当前迭代中候选解与其他候选解和历史最优位置之间的交互信息,由两者之间的比值得到当前解向量的信息交互因子。

在攻击防御搜索策略中,磁惯性金豺通过判断交互信息和适应度值来协调自己的攻击和防御行为,如果当前解的质量较好,那么基于最优和次优的攻击行为就会占据主导,令自身一直朝向全局最优移动,提高求解随钻重力提取目标函数值的精度。反之,基于上下界和突变点的防御行为占据主导,逃离目前陷入局部最优的区域。在全局搜索阶段扩大各种非重力加速度的搜索范围,进一步搜索非重力解空间潜在的新区域;在局部搜索阶段提高种群多样性,有助于当随钻环境出现异常振动时,帮助目标函数值跳出局部最优,避免搜索停滞。

3.4 重力矢量相似度

GJO通过取 Y_1 、 Y_2 的平均位置来更新下一次迭代的候选解位置。但在磁惯性金豺种群中,磁惯性金豺个体的地位是不平等的,即每个候选解向量的质量有好有坏,因此采用平均策略限制了MIGJO对解向量的求解精度。为了区分不同候选解的贡献率,基于当前解对应的重力矢量与当地重力矢量设计重力矢量相似度GVS来控制解向量位置更新,进一步提高MIGJO求解非重力加速度解向量的精度。具体为:

$$GVS = \left| 1 - \frac{\mathbf{a}_g \times \mathbf{g}}{\|\mathbf{a}_g\| \|\mathbf{g}\|} \right| \times \left| 1 - \frac{\|\mathbf{g}\| - \|\mathbf{a}_g\|}{\|\mathbf{g}\|} \right| \quad (18)$$

$$X_i(t+1) = \frac{GVS_{Y_1}}{GVS_{Y_1} + GVS_{Y_2}} Y_1 + \frac{GVS_{Y_2}}{GVS_{Y_1} + GVS_{Y_2}} Y_2 \quad (19)$$

其中, GVS_{Y_1} 、 GVS_{Y_2} 分别候选解 Y_1 和 Y_2 所对应的重力矢量相似度。由式(18)可以看出GVS的范围为 $[0,1]$,当MIGJO求解得到的非重力加速度解向量越准确,GVS也就越大,即带入到式(19)中,其所占的比例也就越大。

3.5 MIGJO在线提取重力加速度步骤

MIGJO的具体实现步骤为:

- 1) 获取磁惯性测量单元现场数据,输入种群规模、解空间维数、最大迭代次数、搜索上界和下界;之后通过式(7)初始化非重力加速度解向量。
- 2) 通过式(3)计算适应度值,选出当前最优解和次优解;之后通过式(10)~(11)计算出重力因子GF。
- 3) 判断GF的大小,若 $GF \geq 1$,通过式(14)进行全局搜索,若 $GF < 1$,通过式(15)进行局部搜索;之后通过式(19)进行解向量位置更新。
- 4) 判断MIGJO是否满足终止条件,当达到最大迭代次数时,输出最优非重力加速度解向量,并代入式(1)进行重力提取,反之则返回2)。

4 实验与分析

为验证MIGJO对随钻重力加速度在线提取的有效性和实用性,使用实验室自制的MWD短节进行模拟钻进实验和实钻实验,实验地点位于北纬 35° ,东经 113° ,地球重力加速度为 9.7966 m/s^2 ,地球自转角速度 $15^\circ/\text{h}$,地磁场强度为 $52.65 \mu\text{T}$ 。MWD传感器包括加速度计(MS9010)、磁力计(HMC1043)和陀螺仪(CRG20-02)。

4.1 模拟钻进实验

为验证MIGJO的有效性和优势,设计模拟钻进实验。如图1所示,将器件误差已校准过的MWD模块固定在小型钻机的钻杆底部,使其 X 、 Y 轴与钻杆垂直安

装,Z轴沿着钻杆方向指向上安装,通过钻头在大理石和花岗岩等模拟地质层钻进摩擦模拟随钻振动环境。钻进前,为方便实验人员进行钻进操作,将井斜角和工具面角初始值调整到 0° 进行垂直钻进。



图1 模拟钻进实验

Fig. 1 Simulated drilling experiment

钻进时,以 60 r/min 的转速进行恒压垂直钻进,以 30 Hz 的采样频率一边持续采集模拟钻进磁惯性现场数据,一边分别使用 PSO、GJO 和 MIGJO 算法进行重力提取。3种算法的种群规模统一设置为40,最大迭代次数设置为800。随机选择其中 2 min 的三轴加速度计的原始数据以及经3种算法进行重力提取之后的数据进行分析。重力提取前,三轴加速度计输出的原始信号如图2所示,可以看出X、Y、Z三轴加速度波动范围很大,说明原始信号中含有大量的由振动干扰产生的非重力加速度噪声。

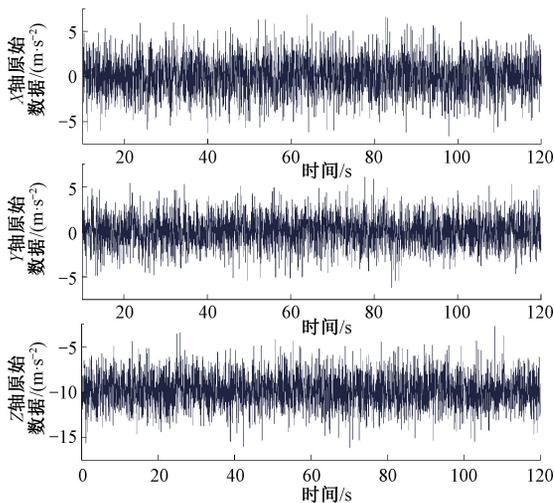


图2 模拟钻进实验中加速度计测量的原始信号

Fig. 2 Original signal measured by the accelerometer during the simulate drilling experiment

之后使用原始的三轴加速度数据解算出井斜角和工具面角,结果如图3所示,原始数据解算的井斜角和工具面角与参考值相比最大差值为 41° 和 60° 。由此可见模拟钻进过程中产生的复杂振动导致MWD模块中的加速度计测量信号严重失真。

3种算法进行重力提取后的三轴加速度信号如图4所示,可以看出经 PSO 进行重力提取后,三轴加速度信

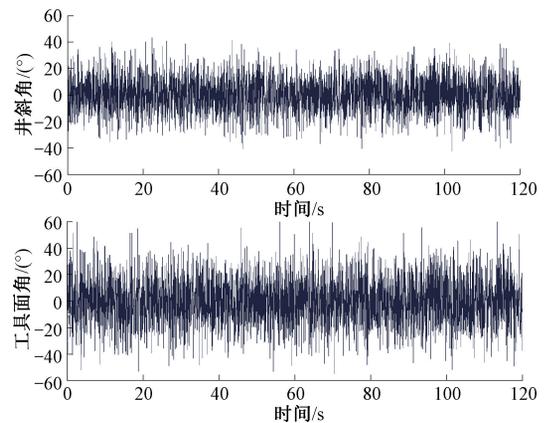


图3 原始加速度信号解算的井斜角和工具面角

Fig. 3 Borehole inclination angle and tool face angle calculated by the original acceleration signal

号的波动范围变小,但仍然有大量的尖峰、毛刺,提取出的重力加速度精度并不理想;GJO 与 PSO 相比,重力提取精度优于 PSO,但仍不满足 MWD 工程中加速度计输出精度上的要求;而使用 MIGJO 进行重力提取之后,其 X、Y、Z 三轴的重力加速度输出误差明显较小,均保持在较为理想的范围之内。

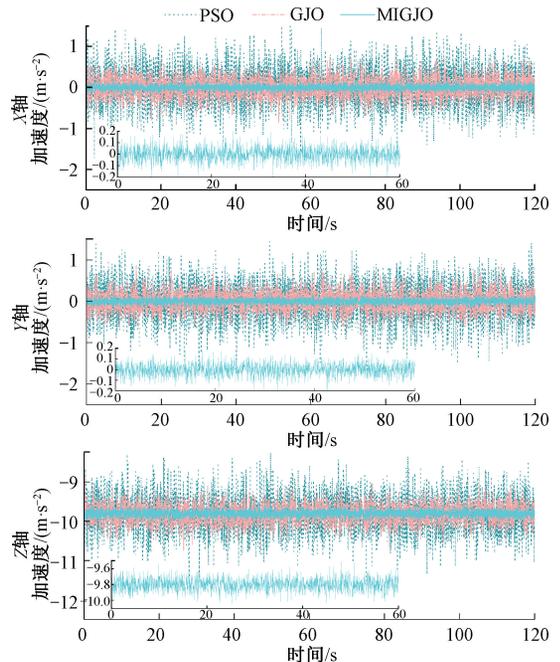


图4 模拟钻进实验中不同重力提取算法对比

Fig. 4 Comparison of different gravity extraction algorithms in simulated drilling experiment

之后将不同算法提取出的重力加速度分别进行井斜角和工具面角的解算,结果如图5所示,可以看出 PSO 处理后解算的井斜角和工具面角误差分别控制在 5.7° 和

6.3°左右,GJO 处理后解算的井斜角和工具面角误差分别控制在 3.5°和 4.1°左右,GJO 处理后解算的井斜角和工具面角误差控制在 0.6°和 0.8°左右,通过对比可以发现,利用 MIGJO 提取后的重力加速度信号解算出来的井斜角和工具面角更加接近真实值,验证了 MIGJO 的有效性。

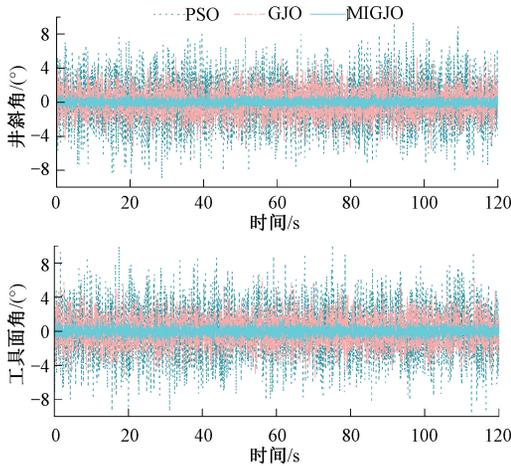


图 5 不同算法的重力信号姿态解算

Fig. 5 Gravity signal attitude solution using different algorithms

为进一步直观验证 MIGJO 的有效性和优势,随机抽取 5 000 组原始加速度数据以及 3 种算法提取之后的加速度数据进行井斜角解算,选择标准差 (standard deviation, SD)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和算法运行时间作为评价指标。结合表 1 可以看出 MIGJO 在模拟的随钻振动环境下相比于 PSO 和 GJO 算法具有速度快、精度高的优势。

表 1 模拟钻进实验 3 种算法评价指标对比

Table 1 Comparison of evaluation indexes of three algorithms in simulated drilling experiment

评价指标	PSO	GJO	MIGJO
SD/(°)	5.787 5	3.086 1	0.626 7
RMSE/(°)	6.931 6	4.158 4	0.876 4
运行时间/s	12.53	8.72	6.38

4.2 实钻实验

为验证 MIGJO 在真实随钻振动环境下在线重力提取的实用性与优势,选取焦作某煤矿进行实钻实验,如图 6 所示,将 MWD 短节 X、Y、Z 三轴分别沿着钻杆横纵轴指向向上右前固定在钻杆上。

钻进时,以 1 s 的采样间隔一边采集磁惯性现场数据,一边使用 PSO、GJO 和 MIGJO 进行重力提取,同时每间隔 300 s 停转一次,把静态测量点处的井斜角和工具面角作为参考值,与 3 种算法重力提取之后解算的进行对

比。由图 7 可知,由于振动、冲击干扰导致加速度计输出的原始数据解算出的井斜角和工具面角严重失真,与参考值相比,绝对误差平均值为 19.87°和 26.19°。PSO 和 GJO 算法进行重力提取之后解算的与参考值之间的绝对误差平均值分别为 5.41°、6.73°和 3.06°、3.98°,而经 MIGJO 重力提取解算之后的绝对误差平均值为 0.61°和 0.79°,说明 MIGJO 能够适用于真实随钻振动、冲击环境中进行重力提取,并且能有效降低解算井斜角和工具面角的误差。



图 6 实钻实验

Fig. 6 Real drilling experiment

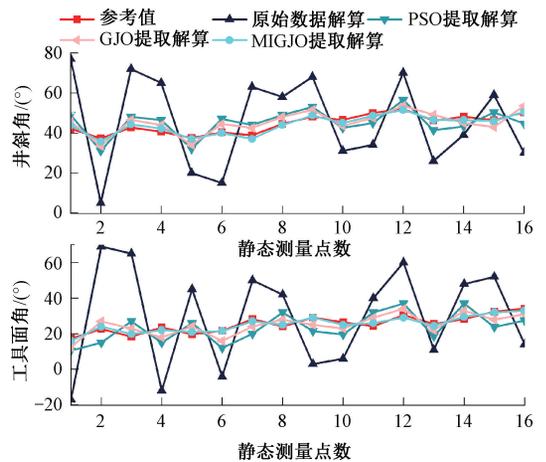


图 7 静态测量点处井斜角和工具面角计算

Fig. 7 Calculation of well inclination angle and tool face angle at static measuring point

5 结 论

为解决随钻测量工程中由于钻具产生的复杂振动导致加速度计无法测量出真实重力加速度问题,设计了一种基于磁惯性金豺优化的随钻重力加速度在线提取方法,并通过实验进行了验证。

1) 结合随钻测量环境下磁惯性传感器的输出特性设计了 MIGJO,该方法克服了标准 GJO 在复杂恶劣的随钻测量环境下没有考虑到不同的非重力加速度的变化特性、全局搜索阶段不够充分、局部搜索阶段易陷入局部最优以及更新的解向量质量不高的缺点。

2) 模拟钻进实验结果表明,MIGJO 比 PSO 和 GJO

在线提取重力加速度精度更高、速度更快。实钻实验结果表明,经 MIGJO 提取出的重力加速度解算出的井斜角和工具面角的绝对误差平均值可控制在 0.63° 和 0.8° 以内,大幅度提高了随钻加速度计的输出精度。

参考文献

- [1] 张夷非,程为彬,郭涛,等. 井下工具倾斜姿态误差的非线性融合补偿[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 335-343.
ZHANG Y F, CHENG W B, GUO T, et al. Fusion-based compensation for tilt error nonlinearity of downhole tool[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 335-343.
- [2] 杨金显,蔡纪鹏,尹凤帅,等. 随钻测量钻具重力加速度提取方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 145-152.
YANG J X, CAI J P, YI F SH, et al. Extraction method of gravity acceleration of drilling tool while measuring[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37(10): 145-152.
- [3] ALAM M, ROHAC J. Adaptive data filtering of inertial sensors with variable bandwidth [J]. Sensors, 2015, 15(2): 3282-3298.
- [4] 韩冬,孙伟,陈龙,等. 随钻姿态测量重力加速度自适应提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 17-25.
HAN D, SUN W, CHENG L, et al. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 17-25.
- [5] 杨金显,赵淳. 基于 H 模型的随钻振动误差建模[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 56-62.
YANG J X, ZHAO CH. Vibration error modeling while drilling based on H model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 56-62.
- [6] 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.
- [7] QIAO M Y, YAO W H, GAO K F, et al. In-field calibration of triaxial accelerometer based on PE-ANGO[J]. TM-Technisches Messen, 2024, 91(2): 86-101.
- [8] MO W Q, HE ZH T, XING CH J, et al. A flexible hinge FBG accelerometer based on PSO algorithm[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 87: 103905.
- [9] ALAEIYAN H, MOSAVI M R, AYATOLLAHI A. Hybrid noise removal to improve the accuracy of inertial sensors using lifting wavelet transform optimized by

genetic algorithm [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 80: 326-341.

- [10] WANG S F, YANG J X, DU H X, et al. Magnetic inertia measurement while drilling gravity extraction[J]. Measurement, 2025, 244: 116285.
- [11] CHOPRA N, ANSARI M M. Golden jackal optimization: A novel nature-inspired optimizer for engineering applications [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 198: 116924.
- [12] 史书杰,赵凤强,王波,等. 基于 EEMD 能量熵和 GJO-KELM 的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 116-122.
SHI SH J, ZHAO F Q, WANG B, et al. Fault diagnosis of rolling bearings based on EEMD energy entropy and GJO-KELM [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 116-122.
- [13] REZAIE M, KARAMNEJADI AZAR K, KARDAN SANI A, et al. Model parameters estimation of the proton exchange membrane fuel cell by a modified golden jackal optimization [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102657.
- [14] HOUSSEIN E H, ABDELKAREEM D A, EMAM M M, et al. An efficient image segmentation method for skin cancer imaging using improved golden jackal optimization algorithm [J]. Computers in Biology and Medicine, 2022, 149: 106075.
- [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.
- [16] YANG J X, CAI J P, WANG S F. Online compensation of geomagnetic measurement errors while drilling [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-9.

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 received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees 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.