

文章编号 1004-924X(2026)17-2722-11

基于磁惯性北极海鹦优化算法的 随钻磁力计误差在线补偿

杨金显^{1,2*}, 李家祥^{1,2}, 陈贺坤^{1,2}

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;
2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003)

摘要:针对随钻测量中磁力计易受井下复杂磁环境干扰,导致方位角计算精度下降的问题,提出一种基于磁惯性北极海鹦优化算法(Magnetic-Inertial Arctic Puffin Optimization, MIAPO)的随钻磁力计误差在线补偿方法。首先,分析复杂工况下的磁力计误差来源,根据其误差特性构建综合补偿模型。然后,基于重力矢量与地磁矢量之间稳定的空间几何关系,构建随钻磁力计误差参数辨识目标函数。最后,针对传统 APO 算法提出了三项改进:制定动态重心反向学习策略,从而增强全局寻优能力;设计基于适应度排名的注意力机制,通过对优质候选解分配差异化权重以提高制定算法的局部搜索速度和收敛精度;构建基于适应度离散性的自适应阈值机制,显著增强了算法跳出局部极值点的稳健性。仿真和实验结果表明,相较于 PSO 及 APO 算法, MIAPO 算法在补偿精度与收敛稳定性上均有显著提升。补偿后钻具方位角的平均绝对误差稳定在 0.61° 以内,验证了该方法在优化随钻 MEMS 磁测精度方面的有效性。

关键词: MEMS 磁力计; 随钻测量; 北极海鹦优化算法; 误差在线补偿

中图分类号: TE927; TH741 文献标识码: A

doi: 10. 3724/OPE. 20263417. 2722 CSTR: 32169. 14. OPE. 20263417. 2722

Online compensation of magnetometer for logging while drilling magnetometer based on magnetic-inertial arctic puffin optimization algorithm

YANG Jinxian^{1,2*}, LI Jiaxiang^{1,2}, CHEN Hekun^{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 Mine Equipment,
Jiaozuo 454003, China)

* Corresponding author, E-mail: 2930458299@qq.com

Abstract: To improve azimuth estimation accuracy in measurement while drilling (MWD), an online magnetic-error compensation method based on the Magnetic-Inertial Arctic Puffin Optimization (MIAPO) algorithm is proposed. Downhole magnetometers are susceptible to complex magnetic interference, which can substantially degrade azimuth estimation accuracy. Sources of magnetometer errors under complex

收稿日期: 2026-05-19; 修订日期: 2026-06-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41672363); 河南省自然科学基金资助项目 (No. 232300421152)

drilling conditions are analyzed, and a comprehensive compensation model is established according to their error characteristics. Based on the stable spatial geometric relationship between the gravity and geomagnetic vectors, an objective function is formulated for identifying magnetometer error parameters. To address the slow convergence and susceptibility of the conventional Arctic Puffin Optimization (APO) algorithm to local optima, three targeted enhancements are incorporated. A dynamic centroid opposition-based learning strategy is introduced to strengthen global search capability; a fitness-ranking-based attention mechanism is designed to assign differentiated weights to high-quality candidate solutions, thereby improving local search efficiency and convergence accuracy; and an adaptive threshold mechanism based on fitness dispersion is developed to facilitate escape from local optima. Simulation and field-drilling experiments demonstrate that MIAPO outperforms particle swarm optimization (PSO) and APO in both compensation accuracy and convergence stability. The mean absolute error of the compensated drill-bit azimuth remains within 0.61° . The proposed method effectively enhances the measurement accuracy of microelectromechanical-system (MEMS) magnetometers in MWD applications.

Key words: MEMS magnetometer; measurement-while-drilling; arctic puffin optimization algorithm; online error compensation

1 引 言

随钻测量技术是提升煤炭、石油等能源开采产量的关键核心技术^[1]。微机电系统(Micro-mechanical-electric System, MEMS)磁力计具备体积小、功耗低、成本低廉等显著优势^[2],已广泛应用于随钻测量系统中,用于获取井下钻具的方位角信息^[3]。然而,MEMS磁力计在恶劣的钻井环境中,不仅面临零偏、非正交及比例因子等器件和安装误差,还易受强振动和井下磁干扰的影响^[4]。这些因素严重导致磁场测量失真,使方位角解算精度下降。因此,为保证磁力计姿态解算的精度,需要对MEMS磁力计误差参数识别并进行补偿。

现阶段随钻磁力计的误差补偿主要采用算法对钻井现场实测数据进行误差参数辨识,从而提高磁场强度的精度。付鹏等^[5]针对导航信息缺失与姿态发散的问题,设计了自适应视觉惯性地磁紧耦合定位系统,进一步提升了系统定位精度。蔡浩原等^[6]提出一种基于动态磁场校准的九轴惯性融合方法,减小了方位角的漂移。近年来,随着智能优化算法的发展,研究人员已将其应用在磁力计误差参数识别上。杨金显等^[7]采用改进黏菌算法对磁力计误差参数进行解算,实时修正钻进过程中的方位角,但存在收敛效率低、易陷入局部最优值等问题。Jiang等^[8]提出一种

基于NMOR原子磁力计的三轴线圈原位校准方法,准确识别了线圈误差与环境磁场,有效提升了磁力计系统的测量与补偿精度。Li等^[9]采用改进白鲸优化算法来校正三轴磁力计误差,但忽略了外部软、硬磁场效应带来的影响。HUANG等^[10]提出用改进粒子群算法拟合磁力计误差椭圆参数并进行误差补偿,但只能用于磁力计离线校正优化。Du等^[11]采用改良的灰狼优化算法设计了原子磁力计的三轴线圈,大幅提升了磁场的均匀性,有效克服了传统亥姆霍兹线圈在传感器微型化应用中均匀性不足的局限。2024年,Wang等^[12]受北极海鹦空中飞行搜索和水下捕食开发行为的启发,提出了北极海鹦优化算法(Arctic Puffin Optimization, APO)。Lv等^[13]提出基于APO的参数识别方法,用于精确识别双馈感应发电机转子侧变流器的关键模型参数,结果显示APO在准确度、收敛速度和实际应用方面取得了明显的优化。

APO算法寻优分为两个阶段:一是空中飞行阶段,通过莱维飞行进行全局搜索,发现猎物即找到优质解后,算法利用快速俯冲机制迅速调节搜索步长与方向,以实现在线补偿软磁及随机干扰等动态剧变误差;二是水下开发阶段,通过模拟聚集捕食的小步长精细位置更新,在线补偿非正交、零偏及硬磁等变化缓慢的常值误差。同时,躲避捕食者通过引入基于莱维飞行的大范围

跳跃和随机扰动的小范围搜索机制,以避免陷入局部最优并提升算法寻优性能。但是 APO 在空中搜索策略位置更新过于随机,会降低算法全局搜索的速度和成功率,其次聚集捕食策略结合随机选取的候选解进行位置更新,使算法进行局部搜索的速度变慢,降低算法的收敛精度和搜索效率。

因此,本文提出了一种基于磁性北极海鹦优化算法(Magnetic-Inertial Arctic Puffin Optimisation, MIAPO)的随钻磁力计误差在线补偿方法。根据磁力计输出误差来源建立误差补偿模型,设计一种磁力计误差的目标函数。最后对传统 APO 算法进行了改进,引入一种动态重心反向学习策略,增强了算法的全局搜索能力;引入一种基于适应度排名的注意力机制,增强了算法在局部区域的搜索效率与求解精度;引入一种基于磁力计误差适应度离散性的自适应阈值,使算法可以及时跳出局部极值点,从而改善钻具磁场强度的补偿精度,在此基础上解算出稳定可靠的钻具方位角信息。

2 原 理

2.1 随钻磁力计误差模型

随钻磁力计的测量误差主要分为器件固有误差与磁效应误差两大类。器件误差主要包括零偏误差、标度因子误差和非正交误差;磁效应误差则可划分为软磁误差与硬磁误差两类。基于上述误差来源与分类,构建磁力计输出模型:

$$\mathbf{m} = \mathbf{H}_s \mathbf{H}_n \mathbf{T}_m \mathbf{H}_{\text{soft}} (\mathbf{m}^b + \mathbf{b}_{\text{hi}}) + \mathbf{b}_{\text{io}} + \boldsymbol{\xi}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{m} = [\mathbf{m}_x, \mathbf{m}_y, \mathbf{m}_z]^T$ 为磁力计实际测量值, $\mathbf{m}^b = [\mathbf{m}_x^b, \mathbf{m}_y^b, \mathbf{m}_z^b]^T$ 为真实磁力计数值, $\mathbf{H}_s$ 为 3×3 的标度因子误差矩阵, $\mathbf{H}_n$ 为 3×3 的非正交误差矩阵, $\mathbf{T}_m$ 为 3×3 的安装误差矩阵, $\mathbf{H}_{\text{soft}}$ 为 3×3 的软磁误差向量, $\mathbf{b}_{\text{hi}}$ 为 3×1 的硬磁误差向量, $\mathbf{b}_{\text{io}}$ 为 3×1 的零偏误差向量, $\boldsymbol{\xi}$ 为 3×1 的测量噪声。

为了降低由于识别精度导致各项误差的识别残余误差,令:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{H}_s \mathbf{H}_n \mathbf{T}_m \mathbf{H}_{\text{soft}} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:对角元素 k_{11} , k_{22} 和 k_{33} 主要反映三轴标度因子误差以及软磁效应引起的主轴方向增益变化,非对角元素 k_{12} , k_{13} , k_{21} , k_{23} , k_{31} 和 k_{32} 主要综合反映非正交误差、安装误差以及软磁效应引起的轴间交叉耦合误差,随环境变化而变化。在实际的随钻测量中,通常把硬磁干扰看作近似固定的加性偏置项,故定义 $\mathbf{b}_i = \mathbf{Q} \mathbf{b}_{\text{hi}} + \mathbf{b}_{\text{io}} = [\mathbf{b}_x, \mathbf{b}_y, \mathbf{b}_z]^T$, 为综合等效偏置向量, $\mathbf{b}_x$, $\mathbf{b}_y$ 和 $\mathbf{b}_z$ 主要用于表征硬磁误差和磁力计零偏误差。因此,公式(1)可化简为 $\mathbf{m} = \mathbf{Q} \mathbf{m}^b + \mathbf{b}_i + \boldsymbol{\xi}$, 并进一步得到补偿形式:

$$\mathbf{m}^b = \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{b}_i - \boldsymbol{\xi}). \quad (3)$$

可见磁力计误差补偿在于优化求解矩阵 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{b}_i$ 中包含的 12 个参数,将其组合为等效误差解向量 $\mathbf{M}_{\text{cc}} = [k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{31}, k_{32}, k_{33}, \mathbf{b}_x, \mathbf{b}_y, \mathbf{b}_z]^T$ 。然后,将经过 MIAPO 补偿后的地磁向量 $\mathbf{m}^b$ 和钻具停转时由 MEMS 加速度计测量或者通过算法在线提取得到重力向量 $\mathbf{g}^b$ 投影和组合,计算出钻具的方位角^[14]:

$$\psi = \arctan \frac{\|\mathbf{g}^b\| \cdot (\mathbf{m}_z^b \mathbf{g}_x^b - \mathbf{m}_x^b \mathbf{g}_z^b)}{\mathbf{m}_y^b ((\mathbf{g}_x^b)^2 + (\mathbf{g}_z^b)^2) - \mathbf{g}_y^b (\mathbf{m}_x^b \mathbf{g}_x^b + \mathbf{m}_z^b \mathbf{g}_z^b)}, \quad (4)$$

其中: $\mathbf{g}_x^b$, $\mathbf{g}_y^b$, $\mathbf{g}_z^b$ 为钻具的真实重力三轴向量, $\mathbf{m}_x^b$, $\mathbf{m}_y^b$, $\mathbf{m}_z^b$ 为真实地磁三轴向量。由公式(4)可知,方位角的精度取决于测量到的地磁数据,所以需要磁力计输出误差参数进行补偿。

2.2 目标函数

由于 MEMS 磁惯性测量单元采用捷联安装方式,磁力计、加速度计与陀螺仪均固定安装于钻具本体坐标系中,因此在钻具旋转过程中,各传感器输出均随钻具姿态变化而发生同步变化。其中,加速度计主要反映重力矢量信息,磁力计主要反映地磁场信息。在磁力计误差参数辨识过程中,采样时间窗口相对较短,因此可认为该时间段内重力场与地磁场保持稳定。重力矢量与地磁矢量在钻具坐标系下满足相对稳定的空间几何关系^[15],因此采用向量点乘建立几何一致性约束项:

$$J_{\text{geo}} = \sum_{i=1}^n (G_i^b \cdot \mathbf{m}_i^b - |G| |M^{\text{m}}| \cos \theta_0)^2, \quad (5)$$

其中: G_i^b 为加速度计提取的重力矢量, $\mathbf{m}_i^b$ 为经磁力计误差补偿后的地磁矢量, M^{m} 为测量点地磁

数据,是通过科里奥利传递方程将实测信号与地磁矢量进行解耦操作后求出, n 为测量个数, θ_0 为当地地磁场与重力方向之间的理论夹角。当磁力计候选参数能够改善补偿后地磁矢量与重力矢量之间的空间几何一致性时,公式(5)取得较小值。

另一方面,由于局部地磁场强度保持恒定,因此进一步建立地磁模值约束项:

$$J_{\text{norm}} = \sum_{i=1}^n \left(\|m_i^b\|^2 - \|M^s\|^2 \right)^2. \quad (6)$$

由上述分析可知,公式(5)能够约束重力矢量与地磁矢量之间的空间几何一致性,公式(6)能够约束补偿后地磁模值稳定性。因此,本文将几何一致性约束与地磁模值约束统一融合,构建联合目标函数如下:

$$f_{\min}(M_{cc}) = \lambda_1 J_{\text{geo}} + \lambda_2 J_{\text{norm}}, \quad (7)$$

其中: M_{cc} 为待辨识磁力计的误差参数向量, λ_1 与 λ_2 为权重系数,用于平衡不同误差项之间的量纲差异。为避免优化初期某一误差项占主导地位,本文采用误差归一化方法对权重系数进行初始化,即:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (G_i^b \cdot m_{\text{raw},i}^b - |G| \|M^s\| \cos \theta_0)^2} \\ \lambda_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\|m_{\text{raw},i}^b\|^2 - \|M^s\|^2 \right)^2} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $m_{\text{raw},i}^b$ 为未补偿的原始磁力计输出,其并不作为真实地磁值使用,而仅用于估计几何一致性约束项和地磁模值约束项在补偿前的初始残差量级。通过构建联合目标函数,将磁力计误差参数辨识转化为统一的最优化问题。该目标函数同时融合了重力矢量与地磁矢量的几何一致性以及地磁模值稳定性,能够较好地反映磁力计误差补偿效果。首先,需要使用 MIAPO 对目标函数进行求解,当目标函数取得最小值时,相应解向量可作为当前数据和目标函数条件下获得的最优综合等效补偿参数。在识别过程中,将磁力计 12 维误差因子解向量看作北极海鹦的位置,随后利用 APO 的多种更新策略不断调整这些位置,使目标函数逐步逼近其最小值。最终,当目标函数达到最优时,相应的解向量即可作为等效磁力计最优误差参数。

3 基于 MIAPO 的随钻磁力计误差参数识别

APO 算法受北极海鹦捕食行为的启发,将其辨识磁力计误差参数过程分为两个阶段:空中飞行阶段-误差参数的全局搜索;水下开发阶段-误差参数的局部搜索。基本北极海鹦算法^[12]限于篇幅,本文不再赘述。针对 APO 用于随钻磁力计误差识别中的局限性,本节则从算法机制角度进一步分析其不足,并给出相应改进。首先,针对空中搜索阶段随机引导导致全局搜索盲目的问题,引入动态重心反向学习策略;其次,针对聚集捕食阶段随机选择参考解拖慢局部搜索速度与收敛精度的问题,设计注意力机制;最后,针对躲避捕食者阶段采用固定阈值极易导致误判的问题,构建自适应阈值策略。

3.1 动态重心反向学习策略

在误差参数的全局搜索阶段,针对空中搜索中随机候选解引导导致收敛精度和效率下降问题,在该阶段引入动态重心反向学习策略,通过引入历史搜索信息的反馈机制,实时动态调整重心位置,能够在复杂、动态的误差参数空间中实现更具方向性的全局搜索;同时生成每个个体相反的解,增强了全局搜索能力,从而搜索到磁力计分布复杂的多类误差参数。首先计算每一次迭代中具有最佳适应度的前 K 个候选解的重心

位置 $\tau = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{K}$, 再将随机候选解替换为重心引导项 τ , 形成搜索更新公式:

$$\begin{cases} Y_{i,1}^{t+1} = X_i^t + (X_i^t - \tau) \times L(D) + R \\ R = \text{round}(0.5 \times (0.05 + \text{rand})) \times \alpha \end{cases}, \quad (9)$$

其中: rand 为 $[0, 1]$ 内的均匀随机数, α 为服从标准正态分布的随机数。根据取整函数可知,仅当 $\text{rand} \geq 0.95$ 时 $R = \alpha$, 因此随机扰动以 5% 的概率触发,其余 95% 的情况下 $R = 0$ 。该低频扰动能够保留算法对邻近新区域的随机探索能力,同时降低频繁扰动对收敛过程的影响。 τ 融合了前 K 个最佳解的位置信息,通过引入 τ 进行引导,使算法利用优质解的空间分布特征来代替随机方向,过滤了单一极端解的误导,使得搜索轨迹更稳定地逼近全局最优解,从而提升辨识精度。

在生成新的候选解后,利用反向学习机制进行二次探索,生成反向解:

$$Y_{i,2}^{t+1} = 2 \times \tau - Y_{i,1}^{t+1}. \quad (10)$$

当原候选解 $Y_{i,1}^{t+1}$ 陷入局部最优时,反向解 $Y_{i,2}^{t+1}$ 强制算法瞬间跳跃到重心 τ 的对称另一侧进行搜索,增强了算法跳出局部的全局搜索能力。

最后将反向解与原候选解合并,采用贪婪选择策略选择适应度最好的前 N 个候选解,形成下一代种群:

$$Y_i^{t+1} = Y_{i,2}^{t+1} \cup Y_{i,1}^{t+1}. \quad (11)$$

这种融合策略确保了算法能够快速且有目的地追踪和定位动态漂移的优质解区域,从而大幅提升了 APO 在复杂磁力计误差参数优化中全局搜索的收敛速度和求解精度。

定位到优质解区域后,APO 执行捕食俯冲策略,其表达式为:

$$\begin{cases} Z_i^{t+1} = Y_i^{t+1} \times S \\ S = \tan((rand - 0.5) \times \pi) \end{cases} \quad (12)$$

其中: S 为速度系数,通过利用正切函数在值域急剧增加的非线性特性,实现对搜索步长和方向的快速调节,这使得误差候选解能够迅速向优质解靠近,从而提升算法的收敛速度。

3.2 注意力机制

在磁力计误差参数优化过程中,需要精准识别磁力计的误差参数,因此注意力应聚焦于适应度较小的磁力计误差候选解。在误差参数的局部搜索阶段,为进一步提升聚集捕食的搜索精度与速度,引入注意力机制。通过为优质解分配差异化的关注权重,使得候选解在位置更新时不再随机选择参考解向量,而是选择适应度较小的优质解,从而实现由随机位置更新向目标导向更新的转变。

注意力机制具体实现如下:先基于磁力计误差参数解空间中每个候选解 X_i^t 的适应度值 $f(x_i^t)$ 与解空间适应度的平均值 f_{avg} 的比值计算个体得分 $s_i = \exp(-f(x_i^t)/f_{avg})$,用于衡量每个候选解 X_i^t 的质量,适应度值越小,得分 s_i 越高。然后,对所有候选解的得分 s_i 使用 soft max 函数进行归一化处理,得到每个候选解在构建参考向量时的最终贡献权重 $\alpha_i = s_i / \sum_{k=1}^N s_k$,确保所有权重

之和为 1。再将磁力计误差参数解空间中所有候选解 X_i^t 根据其计算出的权重 α_i 进行加权求和,生成注意力加权参考向量 $X_{att}^t = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot X_i^t$,该向量代表了质量越高的候选解越具引导力,改进后的数学模型为:

$$W_i^{t+1} = \begin{cases} X_{r1}^t + F \times L(D) \times (X_{best}^t - X_{att}^t), rand \geq 0.5 \\ X_{r1}^t + F \times (X_{best}^t - X_{att}^t), rand < 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

改进后的公式从随机点 X_{r1}^t 出发,从注意力加权参考向量 X_{att}^t 导向当前磁力计误差参数最优目标 X_{best}^t 的方向,引导候选解向最优解靠近。这种目标导向的确定性搜索大幅剔除了无效探索步长,显著减少了收敛所需的迭代次数,进而有效增强了算法的搜索速度。随着搜索逼近最优区域,加权中心 X_{att}^t 会不断贴近全局最优解 X_{best}^t ,实现了最优解附近微小步长的精细开采,从而进一步提高参数求解精度。

3.3 基于磁力计误差适应度离散性的自适应阈值

针对躲避捕食者阶段固定阈值导致收敛精度和寻优时间降低问题,在该阶段引入自适应阈值策略,通过计算磁力计误差参数第 t 次迭代的适应度值的离散系数 $CV_t = \sigma_t / (\mu_t + \epsilon)$ (其中 σ_t 为标准差, μ_t 为平均值, ϵ 为防止除零的小常数),并通过取过去 k 代的滑动平均 $\overline{CV}_t = \frac{1}{k} \sum_{m=t-k+1}^t CV_m$ 来平滑波动,在此基础上,构建非线性递减函数 $\lambda = 1 - 0.75 \cdot (1 - \overline{CV}_t)^2$,将躲避捕食者阶段的固定阈值 0.5 换成自适应阈值 λ :

$$Z_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + F \times L(D) \times (X_{r1}^t - X_{r2}^t), rand \geq \lambda \\ X_i^t + \beta \times (X_{r1}^t - X_{r2}^t), rand < \lambda \end{cases} \quad (14)$$

当 $\overline{CV}_t \rightarrow 0$ 时,离散系数较小,过去 k 代的磁力计误差参数适应度值几乎不变化,说明算法可能陷入局部最优, λ 趋近于 0.25, $P(rand \geq \lambda)$ 提高到 75%,即当算法可能陷入局部最优时,以 75% 的高概率以莱维飞行大步跳跃出局部最优。 $\overline{CV}_t$ 越大,算法陷入局部最优的概率越小, $P(rand \geq \lambda)$ 也越小,大步跳跃的概率也逐渐降低,算法更倾向于在当前优质区域进行局部开发。

4 实 验

为证明 MIAPO 算法在随钻测量条件下磁力计误差补偿的准确性,利用实验室制作的随钻测量装置开展实验研究,实验包括模拟钻进实验与实际钻进实验两部分。测量传感器分别为磁力计(HMC5883L)、加速度计(MS9010)和陀螺仪(CRG20-02)。

4.1 模拟钻进实验

重力加速度为 $9.796\ 6\ \text{m/s}^2$, 磁场强度为 $52.65\ \mu\text{T}$ 。首先设计模拟钻进实验,如图1所示。

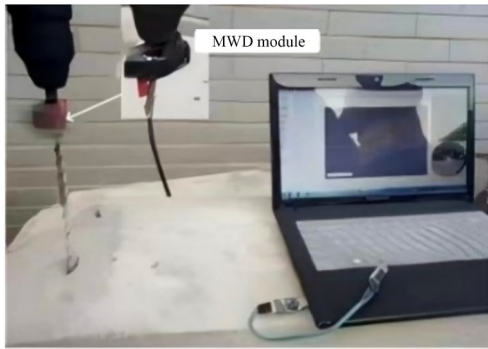


图1 模拟钻进实验
Fig. 1 Simulated drilling experiment

将 MEMS 测量装置固定在钻杆上,使钻机进行恒压垂直钻进,以 $50\ \text{Hz}$ 的频率采集钻头钻进不同地层的原始数据。在钻进过程中,采用小型铁氧体永磁体作为外部磁性干扰源,并在距钻杆外壁 $1\sim 30\ \text{cm}$ 内随机改变其方位和距离,以产生不同强度的磁干扰,模拟井下复杂的磁环境。本文采用传统补偿方法和智能优化算法进行对比。其中,传统补偿方法包括传统聚类+GPR 方法^[16]和滤波融合方法^[17];智能优化算法包括粒子群算法^[18](PSO)、APO、磁惯性黏菌算法(MISMA)、改进技能优化算法(ISO)和 MIAPO。5 种算法的初始参数及关键参数设置见表 1。为避免优化过程中产生不符合物理意义的误差参数,矩阵 Q 的主对角元素搜索范围设置为 $[0.8, 1.2]$,非对角元素搜索范围设置为 $[-0.1, 0.1]$,偏置向量 b_i 中各元素的搜索范围设置为 $[-80, 80]\ \mu\text{T}$ 。当候选解超出搜索边界时,采用边界截断方式进行处理,即小于下界时取下界,大于上界时取上界。

表 1 初始参数设置
Tab. 1 Initial parameter settings

算法	成员 个数	主要参数设置	迭代 次数
PSO	25	$c_1 = 2, c_2 = 1.5$	600
APO	25	采用原算法更新参数	600
MISMA	25	采用文献推荐参数	600
ISO	25	采用文献推荐参数	600
MIAPO	25	$K = 3, k = 5, \beta = 1.5, \eta = 0.01$	600

注: K 为动态重心反向学习中选取的优质候选解个数, k 为自适应阈值滑动窗口长度, β 为 Levy 飞行指数, η 为 Levy 步长缩放系数。

由表 1 可知,各智能优化算法均采用相同的成员个数和迭代次数,从而保证了不同算法补偿性能对比的公平性。由于智能优化算法受随机初始种群影响,为验证其稳定性,分别对各算法进行了 20 次独立运行,并统计 RMSE 均值、SD 均值、最优 RMSE 和最差 RMSE,结果如表 2 所示。传统聚类+GPR 和滤波融合不涉及随机种群初始化,因此仅给出其补偿误差结果。由表 2 可知,本文所提 MIAPO 算法取得了最小的 RMSE 均值和 SD 均值,说明其补偿后的地磁模值更加接近当地真实地磁场强度,磁力计输出精度更高。与传统聚类+GPR 方法相比, MIAPO 补偿后的 RMSE 均值降低了 70.48% , SD 均值降低了 65.35% ;与 PSO 相比,经 MIAPO 补偿后的 RMSE 均值降低了 86.59% , SD 均值降低了 86.19% ;而与 APO 相比,其 RMSE 与 SD 分别实现了 78.21% 和 76.29% 的显著降幅。因此, MIAPO 在复杂随钻磁测环境下具有更高的磁力计误差参数补偿精度和更好的补偿稳定性。

为进一步直观展示优化算法补偿前后地磁模值的变化趋势,本文在表 2 误差统计结果的基础上随机选取单次实验 $90\ \text{s}$ 的原始数据和 3 种算法补偿后的数据代入公式(3),计算出地磁模值进行对比。观察图 2 的对比曲线可知,经过 MIAPO 算法补偿后,地磁模值偏差出现了显著缩减,绝大多数采样点位于 $\pm 2\ \mu\text{T}$ 误差带边界内,并且 RMSE 为 $0.316\ 6\ \mu\text{T}$,而 PSO 和 APO 算法补偿后的地磁模值误差分别在 20 和 $7\ \mu\text{T}$ 以内,结果表明,本文算法补偿后的磁力计精度得到了大幅改善。

表 2 均方根误差和标准差

Tab. 2 Root mean square error and standard deviation (μT)

算 法	RMSE 均值	SD 均值	最优 RMSE	最差 RMSE
传统聚类+GPR	1.082 0	0.860 3	—	—
滤波融合	1.917 2	1.696 3	—	—
PSO	2.381 4	2.158 1	2.111 0	2.668 9
APO	1.465 6	1.257 3	1.320 9	1.641 8
MISMA	0.469 3	0.371 4	0.431 6	0.538 4
ISO	0.434 1	0.339 4	0.391 0	0.487 5
MIAPO	0.319 4	0.298 1	0.295 7	0.356 2

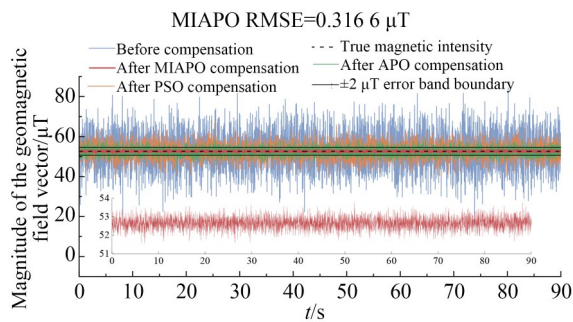


图 2 算法补偿前后地磁模值比较

Fig. 2 Comparison of geomagnetic modulus before and after algorithm compensation

在补偿结束时,记录模拟磁干扰实验中 MIAPO 得到的 Q 和 B 中的参数,如表 3 所示。由表 3 可以看出,MIAPO 在最终时刻能够输出完整的 12 维等效磁力计误差参数解向量。同时比较 3 种算法的收敛曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,MIAPO 相比于 PSO 和 APO,适应度值在迭代初期下降最快,并在较少迭代次数内趋近于最小值,表明 MIAPO 具有更快的收敛速度和更高的寻优精度。

表 3 等效磁力计误差参数

Tab. 3 Equivalent magnetometer error parameters

Q	B
$\begin{bmatrix} 0.935 & -0.021 & -0.032 \\ -0.019 & 0.950 & 0.017 \\ -0.036 & 0.015 & 0.893 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -52.706 \\ 10.226 \\ 22.739 \end{bmatrix}$

为验证稳定性,分别设置不同磁干扰强度和转速,采用亥姆霍兹线圈产生定量磁干扰,将磁场扰动幅值分别设置为 1.5,3.0 和 4.5 μT,对应

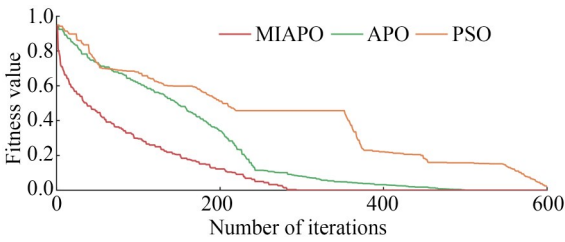


图 3 适应度收敛曲线

Fig. 3 Convergence curves of fitness

弱、中、强 3 种磁干扰条件;低、中、高钻进转速分别设置为 10,15 和 20 r/s,其他实验条件保持一致,在每种工况下重复进行 3 次独立实验,每次分别计算补偿后地磁模值的 RMSE 和 SD,表 4 所列结果为 3 次独立实验结果的平均值。

表 4 不同工况下 MIAPO 算法的稳定性验证结果

Tab. 4 MIAPO algorithm robustness test results under different conditions

影响因素	工况	RMSE 均值/μT	SD 均值/μT
磁干扰强度	弱(1.5 μT)	0.289 1	0.280 4
	中(3.0 μT)	0.302 9	0.291 3
	强(4.5 μT)	0.357 8	0.338 2
钻进转速	低(10 r/s)	0.290 4	0.272 2
	中(15 r/s)	0.311 3	0.290 3
	高(20 r/s)	0.377 5	0.350 2

由表 4 可知,随着磁干扰强度增大和钻进转速升高,MIAPO 补偿后的 RMSE 和 SD 均呈小幅上升趋势,说明复杂磁干扰和高速钻进会增加磁力计误差参数辨识难度。其中,在强磁干扰工况下,RMSE 和 SD 分别为 0.357 8 μT 和 0.338 2 μT;在高转速工况下,RMSE 和 SD 分别为

0.377 5 μT 和 0.350 2 μT , 仍保持在较低水平, 表明算法对磁干扰强度和钻进转速变化具有较好的稳定性。

4.2 实际钻进实验

本文以焦作市的某一矿井为测试背景, 开展了现场钻进试验, 将磁惯性测量短节固定在钻杆上, 如图 4 所示。实验开始前, 采用测量精度为 $\pm 0.5^\circ$ 的标准罗盘将钻具轴线调整至 20° 设定参考方位角。测量过程中, 钻机保持停机, 移除附近的铁磁性工具和电子设备, 在远离钻机主体的位置进行多次重复测量, 以减小现场磁干扰。钻机整体安置并固定于井下, 钻具轴线方向由钻机机架及推进导向机构约束。钻进过程中, 钻杆仅绕自身轴线旋转并沿固定导轨轴向进给, 钻机整体方位基本保持不变。钻井期间, 将传感器的采样频率设定为 1 Hz, 累计采集 3 000 组基础样本序列, 同时分别使用 PSO, APO 和 MIAPO 对采集到的数据进行补偿, 初始参数的详细设置见表 1。



图 4 实钻实验
Fig. 4 Actual drilling experiment

然后, 将 3 种算法补偿时得到的磁力计误差参数代入磁力计误差补偿模型公式(3)中, 得到磁力计的输出值 $m^b = [m_x^b, m_y^b, m_z^b]^T$, 再结合加速度计采集到的重力矢量, 将其代入公式(4)计算出方位角, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 在 3 000 s 的钻进中, 经 MIAPO 算法补偿后的方位角全局平均绝对误差稳定在 0.61° 以内。未补偿方位角受实际钻进过程中的磁干扰和动态扰动影响, 波动幅度较大, 最大偏差接近 30° ; PSO 和 APO 补偿后方位角波动有所

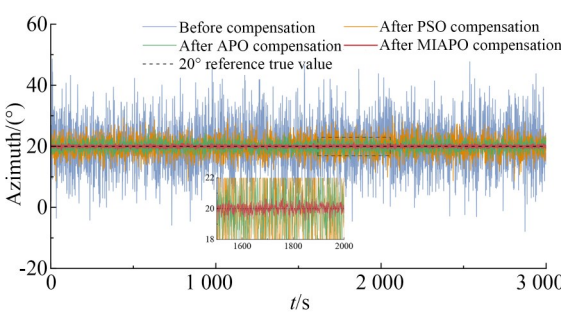


图 5 算法补偿前后方位角对比
Fig. 5 Azimuth comparison before and after algorithm compensation

减小, 但仍与 20° 参考方位角存在一定偏差。相比之下, 经 MIAPO 算法补偿后的方位角曲线更加接近 20° 参考方位角, 偏差最大不超过 2° , 整体波动幅度明显降低, 说明本文算法能够有效提高实际钻进过程中的方位角解算精度。

为评估算法在长期运行过程中的补偿稳定性, 本文将 3000 s 实际钻进数据划分为 0~1 000, 1 000~2 000 和 2 000~3 000 s 三个时间段, 并分别计算各时间段内方位角误差的 RMSE 和平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE), 结果如表 5 所示。由表 5 可知, MIAPO 在 3 个时间段内的 RMSE 和 MAE 均明显低于 PSO 和 APO。其中, MIAPO 的 MAE 分别为 0.52° , 0.60° 和 0.55° , 均保持在 0.61° 以内; RMSE 分别为 0.92° , 1.05° 和 0.98° , 仅在较小范围内波动。结果表明, 本文算法能够有效降低实际钻进过程中的方位角误差, 并在长时间运行条件下具有较好的补偿稳定性。

表 5 不同时间段方位角误差的 RMSE/MAE 对比
Tab. 5 RMSE/MAE comparison of azimuth errors in different time intervals (°)

方法	0~1 000 s	1 000~2 000 s	2 000~3 000 s
PSO	7.86/7.42	8.37/7.69	8.21/8.13
APO	3.31/3.01	3.74/3.28	3.89/3.55
MIAPO	0.92/0.52	1.05/0.60	0.98/0.55

为验证 MIAPO 算法的运行效率和性能, 在钻进过程中每隔 200 s 停钻一次, MIAPO 在静态测量点处完成一次误差参数辨识与更新, 3 种算

法均以 12 维误差补偿参数为搜索变量,在设定迭代次数内完成候选解更新,并输出对应的最优误差补偿参数。3 种算法完成一次目标函数评价、600 代候选解迭代搜索及最优 12 维误差参数输出所需的平均时间如表 6 所示。

表 6 算法平均运行时间

Tab. 6 Average runtime of algorithm (s)

算法	平均运行时间
PSO	12.299 8
APO	9.682
MIAPO	4.613

由表 6 可知,MIAPO,APO 和 PSO 的平均运行时间分别为 4.613,9.682 和 12.299 8 s。MIAPO 的平均运行时间明显小于其余两种算法,误差参数确定后,将磁力计采样数据代入式(3)进行补偿,该过程仅涉及矩阵与向量运算,不需要在每个采样点重新执行完整的 MIAPO 优化。结果表明,MIAPO 具有运行时间短、效率高的优点。同时计算静态工作点处未补偿的数据和 3 种算法补偿后的方位角,其结果如图 6 所示。经 MIAPO 补偿后的方位角曲线较为稳定,绝对误差平均值为 0.83° ,由此表明,本文提出的 MIAPO 可以在实际井下环境有效修正磁力计误差,并显著提升复杂井下环境方位角的解算精度。

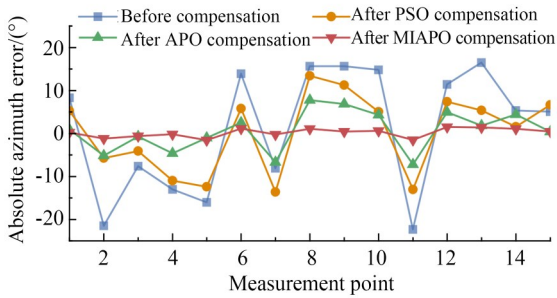


图 6 方位角绝对误差

Fig. 6 Azimuth absolute error

4.3 MIAPO 消融实验

为评估三项改进策略对 MIAPO 性能提升的贡献,设计了消融实验。以完整 MIAPO 为对照,构建三组消融变体:MIAPO-A 去除动态重心反向学习策略,MIAPO-B 去除注意力机制,MIAPO-C 去除自适应阈值机制。除去相应改进模块外,3 种消融变体的其余算法结构和参数设置均与完整 MIAPO 保持一致。各算法在相同实际钻进数据和参数设置下独立运行 30 次,表 7 列出了 30 次运行所得方位角误差的 RMSE,SD 和 MAE 的平均值。

表 7 消融实验结果对比

Tab. 7 Comparison of ablation experiment results ($^{\circ}$)

算法	平均 RMSE	平均 SD	平均 MAE
APO	3.54	1.76	3.19
MIAPO-A	1.61	0.77	1.35
MIAPO-B	1.75	0.83	1.54
MIAPO-C	1.38	0.69	1.14
MIAPO	0.96	0.60	0.57

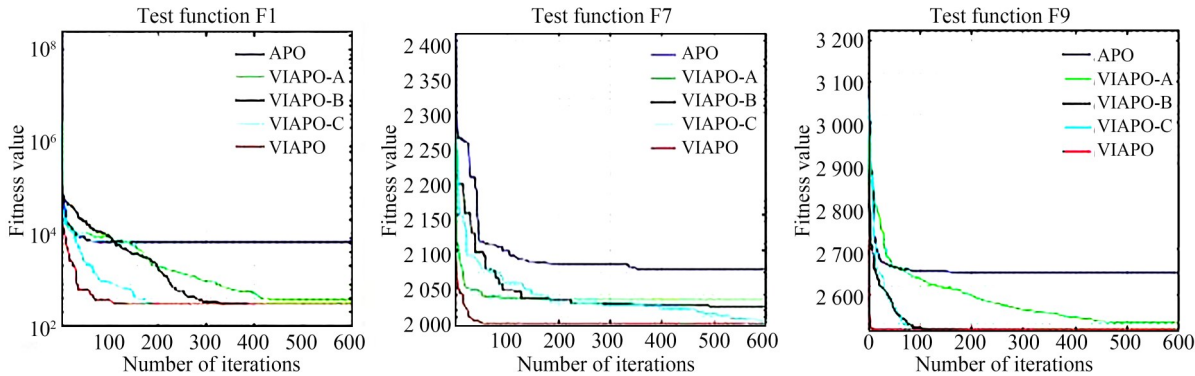


图 7 MIAPO 消融实验收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of MIAPO ablation experiment

选用 CEC2022 测试集作为实验基准,对 5 种算法进行比较。各算法的种群规模均设置为 25,最大迭代次数均设置为 600,并在每个基准测试函数上独立运行 30 次。图 7 展示了单峰函数 F1、复杂扰动函数 F7 和多峰复杂函数 F9 的平均收敛曲线。由图 7 可知,完整 MIAPO 的适应度值下降速度更快,最终适应度值更低,说明三种改进策略能够提升算法的收敛效率和寻优精度。进一步结合表 7 可知,完整 MIAPO 的平均 RMSE, SD 和 MAE 均取得最小值,分别为 0.96° , 0.60° 和 0.57° ,表明其平均补偿精度和稳定性均优于各消融变体。其中,动态重心反向学习策略主要增强全局搜索能力,注意力机制主要提高局部搜索精度,自适应阈值机制主要改善跳出局部最优和稳定收敛的能力。

5 结 论

为解决井下恶劣条件与 MEMS 磁力计固有缺陷(器件及安装偏差)对随钻测量精度的负面

影响,本文提出基于磁惯性北极海鹦优化算法的参数辨识方法,用于 MEMS 磁力计的误差在线补偿。通过引入动态重心反向学习策略、注意力机制和基于磁力计误差适应度离散性的自适应阈值对 APO 进行改进,改进后的算法有效克服了井下复杂工况的约束,大幅提升了对磁力计误差参数的识别精度。模拟钻进实验结果显示,在井下条件设定和参数初始化相同的前提下, MIAPO 在地磁模值的补偿效果方面显著优于 PSO 和 APO,其 20 次独立运行补偿后的 RMSE 均值为 $0.3194\ \mu\text{T}$ 。实钻实验结果表明,在 3 000 s 连续钻进过程中的全局方位角平均绝对误差稳定在 0.61° 以内,有效减小了方位角误差,体现出该方法在现场测量中的可靠性与应用价值。

作者贡献声明:

杨金显:方法提出,论文构思与撰写;

李家祥:实验设计及数据整理与分析,论文审核与编辑写作;

陈贺坤:实验数据分析。

参考文献:

- [1] 杨冬冬,张幼振,李泉新,等.我国煤矿区定向钻进轨迹控制关键技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2026,54(2):60-78.
YANG D D, ZHANG Y ZH, LI Q X, *et al.* Key technologies and development trends of borehole trajectory control in China's coal mining areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2026, 54(2): 60-78. (in Chinese)
- [2] SITARAMGUPTA V V S N, SAKORIKAR T, PANDYA H J. An MEMS-based force sensor: packaging and proprioceptive force recognition through vibro-haptic feedback for catheters [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 4001911.
- [3] 杨一,卢劲园,陈娇娜,等.钻具姿态动态测量信号的阵列三稳混沌系统检测[J].仪器仪表学报,2025,46(10):218-229.
YANG Y, LU J N, CHEN J N, *et al.* Detection of array tri-stable chaotic system for dynamic measurement signals of drilling tool attitude [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46 (10) : 218-229. (in Chinese)
- [4] LI Z Y, GENG Y F, YANG Y S, *et al.* Estima-
tion of geomagnetic components under unknown interferences for drilling tools [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5): 056310.
- [5] 付鹏,万振华,王琨锋,等.自适应视觉惯性地磁紧耦合定位系统[J].光学精密工程,2024,32(7):1023-1033.
FU P, WAN ZH H, WANG K F, *et al.* Adaptive visual inertial geomagnetic tightly coupled positioning system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(7): 1023-1033. (in Chinese)
- [6] 蔡浩原,赵晟霖,崔松叶,等.动态磁场校准的九轴惯性融合[J].光学精密工程,2020,28(9):2007-2016.
CAI H Y, ZHAO SH L, CUI S Y, *et al.* Nine-axis inertial fusion method based on dynamic magnetic field calibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 2007-2016. (in Chinese)
- [7] 杨金显,蔡纪鹏.基于磁-惯性黏菌算法的随钻地磁误差在线补偿[J].煤田地质与勘探,2023,51(11):169-178.
YANG J X, CAI J P. On-line compensation for geomagnetic error while drilling based on magnetic inertial slime mould algorithm [J]. *Coal Geology &*

- Exploration*, 2023, 51(11): 169-178. (in Chinese)
- [8] JIANG L W, CHEN J L, YANG J Q, *et al.* High-precision in-situ triaxial coils calibration using NMOR atomic magnetometer with genetic algorithm assistance [J]. *Measurement*, 2026, 263: 120150.
- [9] LI Z X, LI Y G, LUO M, *et al.* A triaxial magnetometer calibration method with improved beluga whale optimization algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(6): 9522-9530.
- [10] HUANG L, CHEN Z H, GUAN J, *et al.* Offline magnetometer calibration using enhanced particle swarm optimization [J]. *Mathematics*, 2025, 13 (15): 2349.
- [11] DU P C, CHENG P F, YANG F F, *et al.* Highly uniform field three-axis coils using modified grey-wolf optimizer for atomic magnetometers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25 (15) : 28252-28264.
- [12] WANG W C, TIAN W C, XU D M, *et al.* Arctic puffin optimization: a bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering design optimization [J]. *Advances in Engineering Software*, 2024, 195: 103694.
- [13] LV Y L, ZHAO X, MOU Z X. Parameter identification and verification of doubly fed induction generator controllers based on Arctic puffin optimization [J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 247: 111768.
- [14] 杨金显, 杨闯, 蒋志涛, 等. 磁/惯性组合的钻具重力信息自适应提取 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42 (12): 3331-3337.
- YANG J X, YANG CH, JIANG ZH T, *et al.* Adaptive extraction of gravity information for drilling tool with magnetic and inertial integrated system [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42 (12): 3331-3337. (in Chinese)
- [15] 杨金显, 蔺钰柯, 杨潇健. 随钻测量加速度计误差在线补偿方法 [J]. *光学精密工程*, 2025, 33 (16): 2565-2577.
- YANG J X, LIN Y K, YANG X J. Online compensation of accelerometer for measurement while drilling based on MIHBA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(16): 2565-2577. (in Chinese)
- [16] LIU J G, LIU X L, WEI L H, *et al.* A multi-stage data-driven process for magnetic azimuth error compensation in horizontal wells under complex magnetic environments [J]. *Processes*, 2025, 13 (11): 3591.
- [17] YANG Y, LI F, GAO Y, *et al.* Multi-sensor combined measurement while drilling based on the improved adaptive fading square root unscented Kalman filter [J]. *Sensors*, 2020, 20(7):1897.
- [18] PIOTROWSKI A P, NAPIORKOWSKI J J, PIOTROWSKA A E. Particle swarm optimization or differential evolution: a comparison [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 121: 106008.

作者简介:



杨金显(1980—),男,博士,教授,博士生导师,1999~2008年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事 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:2930458299@qq.com