

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508254

基于 FREKF 的随钻磁力计在线校准*

杨金显^{1,2} 杨潇健^{1,2} 张颖^{1,2} 蔺钰柯^{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:针对随钻磁力计测量误差引起的钻具方位角解算严重失真问题,提出基于联邦循环扩展卡尔曼滤波(FREKF)的随钻磁力计在线校准方法。首先建立钻具地磁信息的联邦融合框架,基于随钻磁力计误差校准模型构建非线性测量方程作为主滤波器,分别与加速度计观测地磁矢量模型组成子滤波器1,与陀螺仪递推地磁矢量模型组成子滤波器2。其次,在子滤波器测量更新过程中使用状态估计结果和状态估计协方差矩阵作为一步预测结果和一步预测协方差矩阵进行循环滤波,提高状态估计精度。然后对循环滤波的子系统进行联邦融合,实现随钻磁力计的高精度校准。最后设计模拟实验和实钻实验,实验结果表明,使用FREKF算法能够有效校准随钻磁力计误差,校准后解算的方位角平均误差可控制在 0.8° 以内。

关键词: 磁力计; FREKF; 在线校准; 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

On-line calibration of magnetometer while drilling based on FREKF

Yang Jinxian^{1,2} Yang Xiaojian^{1,2} Zhang Yin^{1,2} Lin Yuke^{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: Aiming the serious distortion problem caused by the measurement error of measurement while drilling (MWD) magnetometer, an online calibration method of MWD magnetometer based on federated recursion extended Kalman filter (FREKF) is proposed. Firstly, the federated fusion framework of drilling tool geomagnetic information is established. Based on the error calibration model of magnetometer while drilling, the nonlinear measurement equation is constructed as the main filter, and the sub-filter 1 is formed with the observed geomagnetic vector model of accelerometer and the sub-filter 2 is formed with the recurrent geomagnetic vector model of gyroscope. Secondly, during the sub-filter's measurement update, we use state estimation results and its covariance matrix as one-step prediction results and covariance matrix to improve state estimation accuracy. Then the subsystem of cyclic filtering is federated to realize the high precision calibration of magnetometer. Finally, the simulation experiment and real drilling experiment are designed. The experimental results show that the FREKF can effectively calibrate the magnetometer error while drilling. Following calibration, the azimuth mean error can be controlled within 0.8° .

Keywords: magnetometer; FREKF; online calibration; azimuth angle

0 引言

随着微机电系统(micro electronic mechanical system, MEMS)的发展, MEMS 磁力计因其成本低、尺寸小和功耗低等优点使其在随钻测量(measurement while drilling,

MWD)领域被广泛用于和 MEMS 加速度计组合解算钻具方位角信息^[1-2]。但低成本的磁力计由于器件本身制造工艺和安装等影响,以及在钻井过程中周围磁性物体的磁化和井下金属产生的磁干扰会使其测量值中含有较大误差^[3-4],使得随钻方位的解算参数失真。所以对磁力计进行校准,来提升方位测量准确性至关重要。

收稿日期:2025-03-23 Received Date: 2025-03-23

* 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

当钻具在地下进行工作时, MEMS 磁力计受到的磁干扰是动态变化的, 而基于非磁性转盘或转台等实验设备进行的静态离线校准方法无法更新误差模型^[5], 因此在 MWD 工程中只能利用采集的现场数据结合算法进行动态在线校准。目前, 对于研究人员提出 MEMS 磁力计在线校准方法主要分成两类。一类是仅使用磁力计收集的数据结合算法的磁误差参数自校准方法。Tahir 等^[6]将磁力计校准问题转化为优化问题, 并用改进的同步扰动随机逼近算法来估计校准, 但当初始磁场数据未充分覆盖误差空间时, 该算法极易陷入局部最优。刘宇等^[7]设计六西格玛约束扩展卡尔曼滤波(six Sigma constrained extended Kalman filter, SEKF)对磁力计误差进行在线校准, 但在随钻随机复杂变化的磁场环境中, 阈值和滑动窗口长度等参数设置比较困难。Yue 等^[8]采用基于最小二乘改进椭球拟合算法对亥姆霍兹线圈中的磁力计误差参数进行校准, 但此方法存在磁力计误差矩阵和椭球参数矩阵间的旋转矩阵不具有唯一性, 并需要大量数据支撑的问题。另一类是利用惯性传感器辅助, 并结合算法对磁力计进行校准。杨金显等^[9]基于加速度计和磁力计径向和切向测量数据是同频率周期信号的特性, 约束改进优化算法对磁力计误差模型进行校准, 提高了磁力计输出精度。Han 等^[10]提出了一种基于陀螺仪与磁力计输出之间的关系, 构建了一种扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)来校准磁误差参数, 大幅度提高了磁力计误差输出精度。Wu 等^[11]基于磁力计相对于陀螺仪的错位角模型设计了 EKF, 有效地估计了磁力计偏置的固有系数和交叉采样系数。蔡浩原等^[12]首先基于陀螺仪和磁力计建立 EKF 的动态磁场校准方法消除软磁干扰的影响, 之后基于加速度计和陀螺仪建立互补滤波消除畸变磁场对方位姿态角的影响。但随钻测量环境恶劣, 不仅含有复杂多变的磁干扰, 还有随机强振动和温度变化的干扰, 导致加速度计和陀螺仪测量数据含有误差, 使用单一的惯性传感器辅助校准方案无法满足随钻测量工程的要求。

综上所述, 针对仅使用磁力计自身数据的自校准算法无法适用于复杂磁干扰的随钻环境, 而基于单一的惯性传感器辅助校准算法易受随钻测量中其他干扰影响导致校准精度不高的问题进行研究。联邦卡尔曼滤波(federal Kalman filter, FKF)有较强的鲁棒性、灵活性和容错性能^[13], 但其仅适合用于多传感器线性系统; EKF 可将非线性系统进行线性化^[14]。因此, 本文首先基于磁惯性传感器的 3 种随钻地磁矢量测量模型建立联邦扩展卡尔曼滤波融合框架; 然后在框架下对两个子滤波器进行循环滤波, 解决 EKF 在随钻复杂多干扰源环境下因磁惯性传感器非线性误差累积和噪声敏感导致的估计精度不足的问题; 最后将循环滤波的子系统进行联邦融

合得到磁误差参数以及钻具地磁矢量的全局估计。实验结果表明, 本文设计的联邦循环扩展卡尔曼滤波(federated recursive extended Kalman filter, FREKF)能准确校准随钻磁力计误差, 进而解算得到准确的钻具方位信息。

1 随钻方位角测量原理

在 MWD 工程中, 安装在钻具上的磁惯性测量单元如图 1 所示。

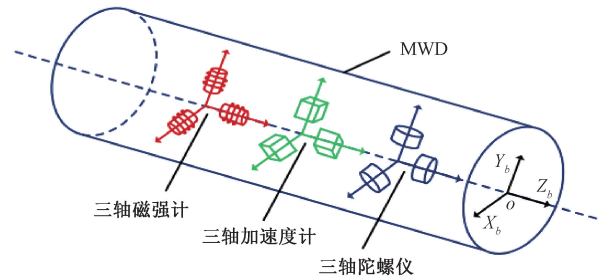


图 1 磁惯性随钻测量单元

Fig. 1 Magnetic inertial MWD unit

为便于描述钻具姿态, 导航坐标系(n 系)用 $o-x_n y_n z_n$ 表示, 分别指向东北天方向; 载体坐标系(b 系)用 $o-x_b y_b z_b$ 表示, x_b 与 y_b 在同一平面内垂直, z_b 指向钻具轴线且与 $o-x_b y_b$ 面垂直。其中, 方位角是从磁北方向开始按逆时针旋转到 z_b 投影到 $o-x_n y_n$ 面上的夹角, 由加速度计和磁力计组合解算^[15]:

$$\psi = \arctan \frac{\sqrt{g_{b,x}^2 + g_{b,y}^2 + g_{b,z}^2} \cdot (m_{b,z} g_{b,x} - m_{b,x} g_{b,z})}{m_{b,y} (g_{b,x}^2 + g_{b,z}^2) - g_{b,y} (m_{b,x} g_{b,x} + m_{b,z} g_{b,z})} \quad (1)$$

式中: $g_{b,i}$ 和 $m_{b,i}$ ($i = x, y, z$) 分别为钻具的真实三轴重力分量和地磁分量。

2 基于 FREKF 的随钻磁力计在线校准

由式(1)可知, 钻具方位姿态的解算精度由重力与地磁场信息的准确度决定。重力信息可在钻头停止钻进时由三轴加速度计直接测量或通过算法动态提取^[16]; 而地磁信息则需借助本文提出的 FREKF 对磁力计输出进行在线校准获得。

为综合提高 MWD 工程中磁力计的输出精度, 考虑到随钻磁惯性传感器有如下优缺点: 陀螺仪短时精度较高, 且抗振性能优于加速度计, 但会产生累计误差; 加速度计无累计误差, 但受随钻振动影响较大; 磁力计抗振性能优于陀螺仪和加速度计, 但会受到随机磁干扰影响。

因此,本文采用基于磁力计观测的地磁模型、加速度计观测的地磁模型和陀螺仪递推的地磁模型3种地磁测量系统建立联邦融合框架,如图2所示。首先基于磁力计误差校准模型构建非线性测量方程作为联邦滤波器的公共参考系统,并把磁力计的真实值和待校准的磁误差参数作为状态变量。之后与加速度计观测的地磁模型构造子滤波器1,与陀螺仪递推的地磁模型构造子滤波器2,对子滤波器进行EKF算法,同时把子滤波器的状态估计结果和状态估计协方差矩阵作为一步预测结果和一步预测协方差矩阵重新更新测量矩阵和卡尔曼增益,从而使子滤波器进行循环滤波。最后进行联邦融合,输出全局最优状态估计值对随钻磁力计进行校准。

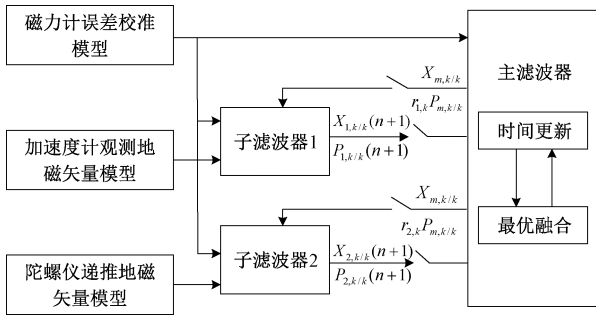


图2 联邦融合的磁力计校准框架

Fig.2 Federated fusion magnetometer calibration framework

2.1 磁力计非线性测量模型

随钻磁力计输出误差可根据误差源的不同,大致可分为确定性误差和随机误差。确定性误差包括零偏、非

$$H_k = \frac{\partial h(X_k)}{\partial X_k} \Big|_{X_k=X_{k/k-1}} = \begin{bmatrix} X_{k/k-1,1} & 0 & 0 & X_{k/k-1,1} & X_{k/k-1,1} & X_{k/k-1,1} & 0 \\ 0 & X_{k/k-1,1} & 0 & X_{k/k-1,1} & 0 & X_{k/k-1,1} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ 0 & 0 & X_{k/k-1,1} & 0 & X_{k/k-1,1} & X_{k/k-1,1} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \$\mathbf{L}_{k/k-1}\$ 是一步预测结果 \$X_{k/k-1}\$ 替换式(3)中元素之后的综合软磁干扰误差矩阵; \$X_{k/k-1,i}\$ 为一步预测结果中的第 \$i\$ 个元素, \$i=1,2,3\$。

从式(6)可以看出,通过把状态估计值作为一步预测结果可以实现对测量矩阵 \$\mathbf{H}_k\$ 进行循环更新,从而减小误差。

2.2 子滤波器1模型

在MWD系统中,三轴加速度计和三轴磁力计捷联固定安装,当钻具沿着某种方向进行旋转钻进时,加速度计 \$x\$ 轴、\$y\$ 轴测量的重力加速度分量和磁力计 \$x\$ 轴、\$y\$ 轴测量的地磁分量,都以正弦规律变化^[18]:

$$\frac{m_{b,x/y}(k)}{m_{b,x/y}(k-1)} = \frac{\sin\omega_{x/y}(t)}{\sin\omega_{x/y}(t-\Delta t)} = \frac{g_{b,x/y}(k)}{g_{b,x/y}(k-1)} \quad (7)$$

式中: \$\Delta t\$ 为采样间隔; \$\omega\$ 为钻具旋转的角速度。因此,可得加速度计观测地磁矢量模型:

正交、刻度因子和安装误差,随机误差包括硬磁和软磁误差。由此可得随钻磁力计误差模型^[17]:

$$m_s = C_{ic} C_{oe} (K_{se} (C_{se} m_b + B_{he}) + B_{ze}) + n_m \quad (2)$$

式中: \$m_s = [m_{s,x} \ m_{s,y} \ m_{s,z}]^T\$ 为磁力计的实际测量值; \$m_b = [m_{b,x} \ m_{b,y} \ m_{b,z}]^T\$ 为钻具坐标系下地磁向量真实值; \$C_{ic}\$ 为 \$3 \times 3\$ 的安装误差矩阵; \$C_{oe}\$ 为 \$3 \times 3\$ 的非正交误差矩阵; \$K_{se}\$ 为 \$3 \times 3\$ 的刻度因子误差矩阵; \$B_{ze}\$ 为 \$3 \times 1\$ 的零偏误差向量; \$B_{he}\$ 为 \$3 \times 1\$ 的硬磁误差向量; \$C_{se}\$ 为 \$3 \times 3\$ 的软磁误差矩阵; \$n_m\$ 为 \$3 \times 1\$ 的随机噪声向量。

令:

$$L = C_{ic} C_{oe} K_{se} C_{se} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{12} & l_{22} & l_{23} \\ l_{13} & l_{23} & l_{33} \end{bmatrix}$$

$$B = C_{ic} C_{oe} K_{se} B_{se} + C_{ic} C_{oe} B_{ze} = [b_1 \ b_2 \ b_3]^T \quad (3)$$

式中: \$L\$ 为综合软磁误差参数矩阵,是一个对称矩阵,元素 \$l_{11}, l_{22}, l_{33}\$ 为比例因子, \$l_{12}, l_{13}, l_{23}\$ 为磁力计软磁误差参数和确定性误差参数的耦合系数; \$B\$ 为综合硬磁误差参数向量,元素 \$b_1, b_2, b_3\$ 为磁力计硬磁误差参数和确定性误差参数的耦合系数。

因此,磁力计误差校准模型可简化为:

$$m_s = L m_b + B + n_m \quad (4)$$

将式(4)进行离散化,得时间 \$k\$ 的非线性测量方程:

$$m_{s,k} = L_k m_{b,k} + B_k + n_{m,k} = h(X_k) + n_{m,k} \quad (5)$$

式中: \$X_k = [m_{s,k}^T \ L_{parameter}^T \ B_k^T]^T\$ 为滤波器的状态变量; \$L_{parameter} = [l_{11} \ l_{22} \ l_{33} \ l_{12} \ l_{13} \ l_{23}]\$。求解式(5)的雅可比矩阵,可得测量矩阵为:

$$m_{b,k} = {}^a G_k m_{b,k-1} \quad (8)$$

式中: \${}^a G_k = \text{diag}[\frac{g_{b,x}(k)}{g_{b,x}(k-1)} \ \frac{g_{b,y}(k)}{g_{b,y}(k-1)} \ 1]\$,为基于加速度计数据的地磁矢量观测矩阵。

由此可得子滤波器1的状态方程和测量方程:

$$\begin{cases} X_{1,k} = F_{1,k/k-1} X_{1,k-1} \\ Z_{1,k} = h(X_{1,k}) + n_{m,k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: 状态转移矩阵 \$F_{1,k/k-1} = \begin{bmatrix} {}^a G_k & \mathbf{0}_{3 \times 9} \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{I}_{9 \times 9} \end{bmatrix}\$; 测量值

\$Z_{1,k} = m_{s,k}\$。

2.3 子滤波器2模型

鉴于地球磁场在小局部范围内几乎不发生变化,因此假设在钻具工作时,其地磁矢量大小和方向在导航坐标系下保持不变,可得在采样点 \$k-1\$ 和 \$k\$ 时刻下, \$n\$ 系

和 b 系之间地磁矢量的姿态变化关系^[19]:

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{b,k-1} = \mathbf{C}_{n,k-1}^{b,k-1} \mathbf{m}_{n,k-1} \\ \mathbf{m}_{b,k} = \mathbf{C}_{n,k}^{b,k} \mathbf{m}_{n,k} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{C}_n^b 为姿态变化矩阵; $\mathbf{m}_{n,k-1} = \mathbf{m}_{n,k}$ 为导航坐标系下的地磁矢量。

对于采样点 $k-1$ 和 k 有:

$$\mathbf{C}_{n,k-1}^{n,k} = \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad (11)$$

根据链式规则可得陀螺仪递推地磁矢量模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{b,k} &= \mathbf{C}_{n,k-1}^{b,k-1} \mathbf{m}_{n,k-1} = \mathbf{C}_{b,k-1}^{b,k} \mathbf{C}_{n,k-1}^{b,k-1} \mathbf{C}_{n,k}^{n,k-1} \mathbf{m}_{n,k} = \\ \mathbf{C}_{b,k-1}^{b,k} \mathbf{C}_{n,k}^{n,k} \mathbf{m}_{n,k} &= \mathbf{C}_{b,k-1}^{b,k} \mathbf{m}_{b,k-1} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{C}_{b,k-1}^{b,k}$ 为 3×3 的基于陀螺仪数据的地磁矢量递推矩阵, 可由旋转向量法求解^[20]。

由此可得子滤波器 2 的状态方程和测量方程:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{2,k} = \mathbf{F}_{2,k/k-1} \mathbf{X}_{2,k-1} \\ \mathbf{Z}_{2,k} = \mathbf{h}(\mathbf{X}_{2,k}) + \mathbf{n}_{m,k} \end{cases} \quad (13)$$

式中: 状态转移矩阵 $\mathbf{F}_{2,k/k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{b,k-1}^{b,k} & \mathbf{0}_{3 \times 9} \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{I}_{9 \times 9} \end{bmatrix}$; 测量值

$\mathbf{Z}_{2,k} = \mathbf{m}_{s,k}$ 。

2.4 子系统的循环 EKF 算法

循环 EKF 算法主要由 EKF 更新过程和循环过程组成。对子滤波器 $i(i=1,2)$ 进行 EKF 算法。

预测阶段:

$$\mathbf{X}_{i,k/k-1} = \mathbf{F}_{i,k/k-1} \mathbf{X}_{i,k-1/k-1} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{i,k/k-1} = \mathbf{F}_{i,k/k-1} \mathbf{P}_{i,k-1/k-1} \mathbf{F}_{i,k/k-1}^T + \mathbf{Q}_{i,k-1} \quad (15)$$

测量更新阶段:

$$\mathbf{K}_{i,k} = \mathbf{P}_{i,k/k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k/k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_{i,k/k} = \mathbf{X}_{i,k/k-1} + \mathbf{K}_{i,k} [\mathbf{Z}_{i,k} - \mathbf{h}(\mathbf{X}_{i,k/k-1})] \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{i,k/k} = (\mathbf{I}_{12 \times 12} - \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}) \mathbf{P}_{i,k/k-1} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{X}_{i,k/k-1}$ 、 $\mathbf{P}_{i,k/k-1}$ 分别为一步状态预测值和一步预测误差协方差矩阵; $\mathbf{X}_{i,k/k}$ 、 $\mathbf{P}_{i,k/k}$ 分别为状态估计值和相应的估计误差协方差矩阵; $\mathbf{K}_{i,k}$ 为卡尔曼增益; $\mathbf{Q}_{i,k-1}$ 为状态方程的方程矩阵, 可由式(19)计算。

$$\mathbf{Q}_{i,k-1} = \begin{bmatrix} \varphi^2 \sigma_i^2 \mathbf{H}_{i,k-1}^T \mathbf{H}_{i,k-1} \Delta t^2 & \mathbf{0}_{3 \times 9} \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 9} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: φ 为可控参数, 根据实际需求进行设置; σ_1 、 σ_2 分别为加速度计和陀螺仪的量测噪声标准差。

子滤波器的循环更新过程如下: 首先将式(17)和(18)的状态估计值和估计误差协方差作为循环更新阶段中一步状态预测值和一步预测误差协方差, 即将 $\mathbf{X}_{i,k/k}(1) = \mathbf{X}_{i,k/k}$ 、 $\mathbf{P}_{i,k/k}(1) = \mathbf{P}_{i,k/k}$ 代入到式(6)和(16)中更新测量矩阵和卡尔曼增益, 从而得到新的状态估计值和估计误差协方差。然后再将其作为新的一步状态预测值和一步预测误差协方差再次进行更新, 之后不断进行循环更新, 得到第 n 次的测量矩阵、卡尔曼增益和状态估

计值和估计误差协方差:

$$\mathbf{H}_{i,k}(n) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{X}_{i,k})}{\partial \mathbf{X}_{i,k}} \right|_{\mathbf{X}_{i,k} = \mathbf{X}_{i,k/k}(n)} \quad (20)$$

$$\mathbf{K}_{i,k}(n) = \mathbf{P}_{i,k/k}(n) \mathbf{H}_{i,k}^T(n) (\mathbf{H}_{i,k}(n) \mathbf{P}_{i,k/k}(n) \mathbf{H}_{i,k}^T(n) + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (21)$$

$$\mathbf{X}_{i,k/k}(n+1) = \mathbf{X}_{i,k/k}(n) + \mathbf{K}_{i,k}(n) [\mathbf{Z}_{i,k} - \mathbf{h}(\mathbf{X}_{i,k/k}(n))] \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_{i,k/k}(n+1) = (\mathbf{I}_{12 \times 12} - \mathbf{K}_{i,k}(n) \mathbf{H}_{i,k}(n)) \mathbf{P}_{i,k/k}(n) \quad (23)$$

2.5 联邦融合和重置

主滤波器不执行预测和更新, 只负责对子滤波器的信息融合和重置功能, 其融合过程如下:

$$\mathbf{P}_{m,k/k} = [\mathbf{P}_{1,k/k}^{-1}(n+1) + \mathbf{P}_{2,k/k}^{-1}(n+1)]^{-1} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{m,k/k} &= \mathbf{P}_{m,k/k} [\mathbf{P}_{1,k/k}^{-1}(n+1) \mathbf{X}_{1,k/k}(n+1) + \\ &\mathbf{P}_{2,k/k}^{-1}(n+1) \mathbf{X}_{2,k/k}(n+1)] \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{X}_{m,k/k}$ 和 $\mathbf{P}_{m,k/k}$ 分别为全局状态估计值和全局状态协方差矩阵。

在主滤波器完成 k 时刻的融合校准后, 系统进入 $k+1$ 时刻的磁力计联邦校准流程。为确保下一周期校准的进行, 需先由主滤波器依据预设的信息分配因子 $r_{i,k}$, 对两个子滤波器的 $\mathbf{X}_{i,k/k}$ 和 $\mathbf{P}_{i,k/k}$ 开展重置操作:

$$\mathbf{X}_{i,k/k} = \mathbf{X}_{m,k/k} \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_{i,k/k} = r_{i,k} \mathbf{P}_{m,k/k} \quad (27)$$

$$r_{i,k} = |\mathbf{P}_{i,k/k}(n+1)| / (|\mathbf{P}_{1,k/k}(n+1)| + |\mathbf{P}_{2,k/k}(n+1)|) \quad (28)$$

在完成对子滤波器的重置操作后, 进入 $k+1$ 时刻 FREKF 算法过程。持续重复上述流程, 即可完成对任一时刻的随钻磁力计的校准。

3 实验与分析

为验证本文提出的 FREKF 算法对随钻磁力计误差在线校准的有效性和实用性, 利用实验室自制的 MWD 短节进行模拟和实钻实验, 其测量传感器包括加速度计 (MS9010)、磁力计 (HMC1043) 和陀螺仪 (CRG20-02), 其中加速度计测量范围为 $\pm 10g$; 磁力计测量范围为 $\pm 6 \times 10^{-4} T$; 陀螺仪测量范围为 $\pm 300^\circ/s$ 。

3.1 模拟实验

首先进行模拟磁干扰实验验证 FREKF 的有效性。实验地点在北纬 35° , 东经 113° , 地磁强度 $52.65 \mu T$, 磁倾角 53.8° , 重力加速度为 $9.7966 m/s^2$ 。如图 3 所示, 首先测量短节固定在转盘上 (转盘已调平), 使其 X 轴、 Y 轴水平放置, Z 轴垂直放置, 同时在转盘上随机放置铁制螺钉模拟外界固定磁干扰。之后给定转盘 $6^\circ/s$ 顺时针旋转一周, 同时人为增加振动和摇晃一串钥匙以模拟

MWD 的随机振动和磁干扰。

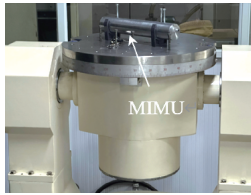


图3 模拟磁干扰实验

Fig. 3 Simulated magnetic interference experiment

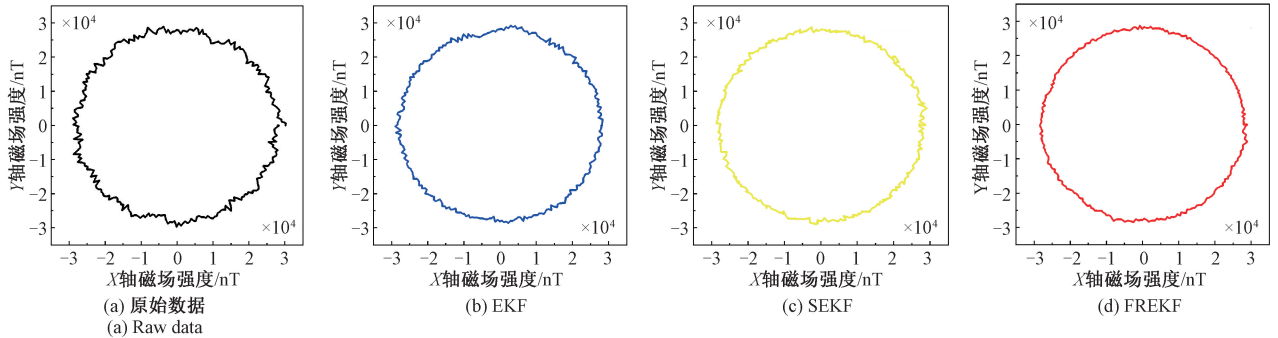


图4 模拟磁干扰算法校准前后水平圆对比

Fig. 4 Simulated magnetic interference algorithm before and after calibration horizontal circle comparison

接着进行模拟钻进实验进一步验证 FREKF 在 MWD 环境下可靠性。如图 5 所示,将 MWD 模块安装在小型钻机的钻杆根部位置,与钻杆实现同步旋转移动。开启钻机,在转速稳定至 30 r/min 后开始恒压垂直钻进实验,钻进持续 10 min,并人为施加随机磁干扰。一边以 30 Hz 的频率采集磁惯性现场数据,一边使用 EKF、SEKF 和 FREKF 进行校准。随机抽取钻进时长为 2 min 的原始地磁模值数据,以及经校准处理后的地磁模值数据加以对比,如图 6 所示。从图 6 能够看出,相较于 EKF 和 SEKF, FREKF 校准后的地磁场向量模值误差更小。这表明,在模拟钻进实验的条件下,经 FREKF 算法校准后的地磁数据依旧具备可靠性。

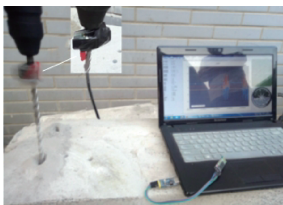


图5 模拟钻进实验

Fig. 5 Schematic diagram of simulated drilling

在转盘旋转过程中,一边采集磁惯性现场数据,一边使用 EKF、SEKF 和 FREKF 算法对随钻磁力计进行在线校准,结果如图 4 所示。在理想情况下,图 4 中三轴磁力计的 X 轴和 Y 轴的输出应该呈现水平圆,但由于有磁干扰的存在,导致图 4 中的原始信号磁场数据有较大波动,水平圆出现明显畸形;经过 EKF 和 SEKF 算法校准后,去除了部分干扰信号,水平圆基本呈现,但仍然有少量的尖峰和毛刺;经过 FREKF 算法校准后,有效去除了大量干扰信号,水平圆明显呈现。

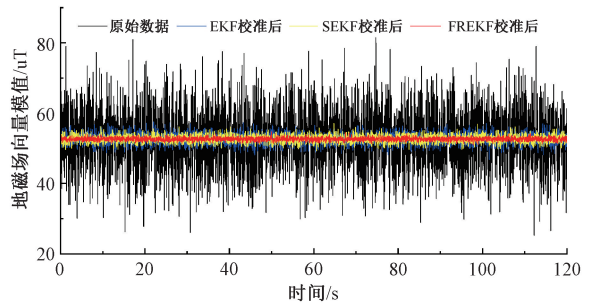


图6 算法校准前后地磁向量模值对比

Fig. 6 Comparison of geomagnetic vector modulus values before and after algorithm calibration

7 所示,将 MWD 短节固定在钻杆上,调节钻杆将方位角调整到 30° 开始钻进。在钻进过程中,设置采样间隔为 1 s,采集 4 000 组磁惯性现场数据,分别运用 EKF、SEKF 和 FREKF 算法对地磁数据进行校准,再依据式(1)将校准后数据与原数据用于计算钻具方位角,并进行对比分析,结果如图 8 所示。从图 8 能够发现,煤矿井下存在的磁干扰,使得基于原始数据解算出的方位角误差显著偏大,而经 EKF 和 SEKF 算法校准后,方位角的波动幅度有所减小,将方位角误差平均值分别降低到了 2.9° 和 2.6° 左右,而 FREKF 将方位角误差平均值降低到了 0.8° 左右,校准精度有了较大提升。为进一步直观验证 FREKF 的优势,以 3 种算法的方位角平均误差、均方根误差

3.2 实钻实验

为检验 FREKF 在真实 MWD 环境下对磁力计误差校准的实用性,选择焦作市某矿内进行实钻实验。如图

(RMSE)和平均运行时间为评价指标,对比如表 1 所示。结合表 1 的数据能够看出,本文所设计的 FREKF 在真实的 MWD 环境里,具备对磁力计误差进行校准的能力,并且可有效减小方位角解算过程中产生的误差。



图 7 实钻实验

Fig. 7 Actual drilling experiment

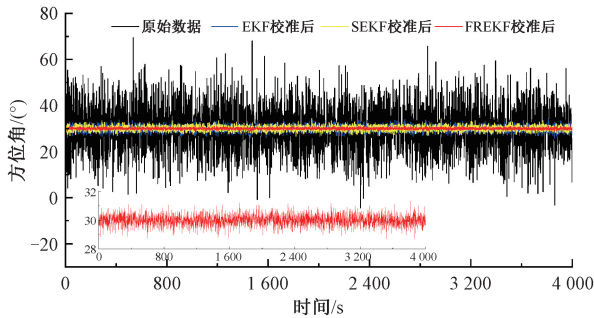


图 8 算法校准前后方位角对比

Fig. 8 Comparison of azimuth angle before and after algorithm calibration

表 1 两种算法评价指标对比

Table 1 Comparison of evaluation indexes of two algorithms

算法	SD/(°)	RMSE/(°)	平均运行时间/ms
EKF	2.84	3.25	5.786
SEKF	2.61	2.97	4.633
FREKF	0.78	0.96	8.264

4 结论

鉴于复杂 MWD 环境和磁力计自身器件特性,会严重干扰地磁测量精度,进而致使钻具方位角解算参数失真问题,本文提出一种基于 FREKF 的随钻磁力计在线校准方法,并通过实验得出如下结论。

1) FREKF 算法是通过加速度计和陀螺仪共同辅助磁力计进行校准,有效解决了在 MWD 复杂环境下,单一的惯性传感器辅助磁力计校准算法易受其他干扰影响导致校准精度不高的问题。

2) 模拟试验结果表明,在同样的环境下,相比于 EKF 和 SEKF 算法,本文所提算法在地磁模值校准方面展现

出更高的精度。真实钻井实验数据表明,经 FREKF 算法校准后的方位角,其误差均值能够稳定维持在 0.8° 以内,显著提升了 MEMS 磁力计在 MWD 中对钻具方位角的测量精度。

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] GUO T, CHENG W, ZHANG Y, et al. Azimuth calibration based on equal angle balance correction algorithm for measurement-while-drilling system [J]. Measurement, 2024, 224: 113891.
- [3] 赵广营,黄卫华,章政,等. 基于变结构 ESKF 的航姿参考系统噪声处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 112-121.
ZHAO G Y, HUANG W H, ZHANG ZH, et al. Noise processing method of attitude reference system based on variable structure ESKF [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 112-121.
- [4] YAN ZH, YU H, LENG Z, et al. Comprehensive interference estimation and correction methods based on unscented Kalman filter for magnetic anomaly detection[J]. Measurement, 2025, 248: 116858.
- [5] YU X Q, XIAO CH J, LIU S, et al. Calibration of AC vector magnetometer based on ellipsoid fitting[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-6.
- [6] TAHIR M, MOAZZAM A, ALI K. A stochastic optimization approach to magnetometer calibration with gradient estimates using simultaneous perturbations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(10): 4152-4161.
- [7] 刘宇,韩亮,冯涛,等. 六西格玛约束磁力计在线校准方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(6): 723-729.
LIU Y, HAN L, FENG T, et al. Six Sigma constrained online calibration method for magnetometers[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 30(6): 723-729.
- [8] YUE L, CHENG D, WANG Y, et al. Fast error calibration for three-axis SQUID magnetometers based on full-space rotational and frequency-controllable magnetic field [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 6706-6716.
- [9] 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.
- [10] HAN K, HAN H, WANG ZH, et al. Extended Kalman filter-based gyroscope-aided magnetometer calibration for consumer electronic devices[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(1): 63-71.
- [11] WU Y, ZOU D, LIU P, et al. Dynamic magnetometer calibration and alignment to inertial sensors by Kalman filtering [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 26(2): 716-723.
- [12] 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.
- [13] 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, YIN F SH, et al. Extraction method of gravity acceleration of drilling tool while measuring[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 145-152.
- [14] WATTANARUNGSAN S, KUWAHARA T, FUJITA S. Magnetometer-based attitude determination extended Kalman filter and optimization techniques [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(6): 7993-8004.
- [15] YANG J, CAI J, WANG S. Online compensation of geomagnetic measurement errors while drilling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-9.
- [16] WANG S, YANG J, DU H, et al. Magnetic inertia measurement while drilling gravity extraction [J]. Measurement, 2025, 244: 116285.
- [17] ZHANG ZH Q, YANG G ZH. Micromagnetometer calibration for accurate orientation estimation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 62(2): 553-560.
- [18] YANG H, RAO Y, LI L, et al. Dynamic measurement of well inclination based on UKF and correlation extraction[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(4): 4887-4899.
- [19] WANG J, DENG ZH, SHEN K, et al. Recurrent EKF-based inertial-aided magnetometer online calibration for complex interference environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 72(1): 1043-1053.
- [20] WANG J, DENG ZH, LIANG X, et al. Functional iteration in-flight alignment method for projectiles MSINS [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(5): 2887-2896.

作者简介



杨金显(通信作者), 分别在1999年、2006年和2008年于哈尔滨工程大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 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传感器信号处理。

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 in 1999, 2006 and 2008, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Henan Polytechnic University. His main research interest includes signal processing for magnetic inertial sensors.



杨潇健, 2022年于河南理工大学获得学士学位, 现为河南理工大学在读研究生, 主要研究方向为磁惯性传感器信号处理。

E-mail: 2930458299@qq.com

Yang Xiaojian received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. His main research interest includes signal processing for magnetic inertial sensors.