

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306666

随钻测量钻具重力加速度提取方法*

杨金显^{1,2} 蔡纪鹏^{1,2} 尹凤帅^{1,2} 王赛飞^{1,2} 袁旭瑶^{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:针对随钻测量(MWD)中钻具重力加速度受振动干扰大引起的井斜角解算严重失真问题,提出基于联邦自适应无迹卡尔曼滤波(FAUKF)的钻具重力加速度提取方法。首先,建立无重置结构的联邦重力信息融合提取框架,选取基于陀螺仪数据的递推重力值作为联邦滤波的公共参考值,分别与解耦的地磁数据观测的重力加速度组合作为子滤波器1,与加速度计数据观测的重力加速度组合作为子滤波器2。然后,对子滤波器的重力状态进行无迹卡尔曼滤波(UKF)算法,期间根据地磁数据观测重力值的抗振性优于加速计的特性,设计子滤波器2对应的抗振因子,再根据陀螺仪短时精度高的输出特性,找到基于陀螺仪数据解耦的地磁参考斜率值,来设计子滤波器1对应的抗磁因子,提升子滤波器性能,接着用自适应开窗因子来确定开窗估计法则中的开窗值,调节新息协方差,通过对新息协方差的估计实现子滤波器量测噪声协方差的实时估计,提高无迹卡尔曼滤波算法精度,进而得到可靠的重力信息局部自适应估计值。最后通过联邦信息融合,进一步得到重力信息的全局估计。通过模拟钻进和实钻实验结果表明,FAUKF算法和FKF算法相比,井斜角误差减小了 $\pm 1.9^\circ$,FAUKF算法下的井斜角误差可控制在 $\pm 1.2^\circ$ 以内。该方法可有效提取煤矿井下钻具重力加速度,提高井斜测量精度,是获得可靠钻具井斜角的有效方法。

关键词: 随钻测量;FAUKF;重力提取;抗磁因子;抗振因子;井斜角

中图分类号: TN713 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.80

Extraction method of gravity acceleration of drilling tool while measuring

Yang Jinxian^{1,2} Cai Jipeng^{1,2} Yin Fengshuai^{1,2} Wang Saifei^{1,2} Yuan Xuyao^{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: Aiming at the problem of serious distortion of inclination calculation caused by vibration interference of gravity acceleration of drilling tool in MWD, a method of gravity acceleration extraction of drilling tool based on federal adaptive unscented Kalman filter (FAUKF) is proposed. Firstly, a fusion extraction framework of federated gravity information without reset structure is established, and the recursive gravity value based on gyroscope data is selected as the common reference value of federated filtering. The combined gravity acceleration observed by decoupling geomagnetic data is used as sub-filter 1, and the combined gravity acceleration observed by accelerometer data is used as sub-filter 2. Then, the untracked Kalman filter (UKF) algorithm is carried out on the gravity state of the sub-filter. During this period, the vibration resistance of the gravity value observed according to the geomagnetic data is better than that of the accelerometer. The antivibration factor corresponding to the sub-filter 2 is designed. The antimagnetic factor corresponding to the sub-filter 1 is designed to improve the performance of the sub-filter, then the adaptive windowed factor is used to determine the windowed value in the windowed estimation rule and adjust the new information covariance. The real-time estimation of the sub-filter measurement noise covariance is achieved by estimating the new information covariance, and the accuracy of the untracked Kalman filter algorithm is improved. Then reliable local adaptive estimates of gravity information are obtained. Finally, the global estimation of gravity information is obtained by federal information fusion. The results of simulation drilling and real drilling experiments show that the inclination of FAUKF algorithm is reduced by $\pm 1.9^\circ$ compared with FKF algorithm, and the inclination of FAUKF algorithm can be controlled within

收稿日期: 2023-06-27 Received Date: 2023-06-27

* 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

$\pm 1.2^\circ$ 。This method can effectively extract the gravity acceleration of drilling tools in coal mine, improve the measurement accuracy of inclination, and is an effective method to obtain reliable inclination.

Keywords: measurement while drilling; federal adaptive unscented Kalman filter; extraction of gravity information; antimagnetic factor; antivibration factor; inclination

0 引言

煤矿井下随钻测量 (measurement while drilling, MWD) 技术是定向钻进施工领域一种先进的技术, 通过 MWD 仪器可以实时获取钻具钻进的井斜角、工具面角和方位角^[1]。在传统的 MWD 系统中, 旋转导向钻井工具的姿态测量系统通常采用惯性测量单元^[2], 且把惯性测量单元中的加速度计当作钻具井斜测量传感器, 由于井下工作环境十分复杂, 加速度计三轴测量信号中用于解算井斜角的有用重力加速度极易受到钻具振动加速度干扰^[3], 导致钻具井斜姿态角解算严重失真。于是, 出现了基于微机械 (micro electro mechanical system, MEMS) 加速计/陀螺仪/磁强计的不同组合来实现钻具动态姿态角的连续测量^[4], 而钻具井斜姿态角的测量精度离不开钻具重力信息的提取精度, 因此消除或削弱钻具钻进时振动加速度的不利影响, 对有效提取钻具重力信息提高钻具井斜姿态角解算精度至关重要。

目前, 基于上述磁/惯性传感器钻具重力信息提取, 有两类研究思路。第 1 类是基于卡尔曼滤波 (Kalman filter, KF) 技术的重力信息提取。其中, YANG H 等^[5]基于无迹卡尔曼滤波算法 (unscented Kalman filter, UKF) 建立加速度计振动误差抑制模型, 提取钻具重力加速度, 但是该方法对误差模型的准确性要求较高。Yang 等^[6]提出改进的自适应衰落平方根 UKF, 消除传感器中振动加速度干扰, 进而提取重力加速度信号, 但该方法对复杂噪声综合处理能力不强。Yang 等^[7]用 UKF 滤除由振动加速度引起的大部分有色噪声, 然后通过互相关检测的方法提取近钻头位置的重力信息分量, 但当磁干扰严重时, 重力信息提取会严重失真。Yang 等^[8]在 KF 提取信号的基础上, 借助陀螺仪数据从测量信号中解耦得到重力信息分量, 但在较长时间钻进环境中单一陀螺仪数据解耦提取的重力信息存在较大误差。Zhang 等^[9]通过调整过程噪声协方差, 采用两个并行自适应 KF 来消除扰动, 估计重力加速度, 但该方法忽略了观测噪声协方差的影响。上述方法, 都默认噪声统计特性是确定的, 未考虑钻进环境下噪声统计特性是时变的, 使得在钻具重力提取过程中滤波的精度不高。第 2 类是基于其他技术的重力信号提取, 其中, 汪跃龙等^[10]提出多传感器最小二乘加权融合方法, 得方差最小的重力信息融合结果。韩冬等^[11]利用陀螺仪和加速度计频率互补的特性, 在互

补滤波框架下融合得到钻具重力加速度。二者本质上都属于多传感器融合技术, 且在重力融合提取过程中可靠性不高。考虑到钻具重力提取时卡尔曼滤波的准确性和系统的可靠性, 采用分布式融合法中最常用的联邦卡尔曼滤波 (federal Kalman filter, FKF), 其较集中式融合结构有更高的鲁棒性、容错性和灵活性^[12]。然而, FKF 仅适用于多传感器线性系统^[13], 并且在有重置结构的 FKF 中, 当子滤波器发生故障时, 直接隔离故障子系统, 剩余无故障子系统进行重构实现容错处理, 对于系统软故障很难实时检测^[14], 这使得 FKF 的准确性和可靠性降低。

因此, 本文提出无重置结构的联邦自适应无迹卡尔曼滤波 (federal adaptive unscented Kalman filter, FAUKF) 钻具重力提取方法, 建立无重置结构的钻具重力信息联邦融合提取框架, 通过对子系统设计加速度计抗振因子、磁强计抗磁因子和开窗因子, 得到重力新息协方差的实时估计值, 进而得到观测噪声协方差的实时估计, 解决传统卡尔曼滤波类算法默认噪声统计特性是确定的缺陷以及观测异常带来的子滤波器异常问题; 对子滤波器重力加速度进行 UKF 算法, 得到重力信息局部自适应估计值, 最后通过联邦框架信息融合得到可靠钻具重力信息全局估计。

1 随钻井斜角测量

钻具钻进时钻杆振动源于钻机本身和其与岩层摩擦等多源振动的耦合^[15-16], 即捷联在钻杆上的加速度计测量信号包含额外的有害振动加速度^[17-18]。因此, 加速度计的测量模型可以表示为:

$${}^a\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_k + \mathbf{a}_k + {}^a\mathbf{v}_k \quad (1)$$

式中: ${}^a\mathbf{y}_k$ 为加速度计的测量值; \mathbf{a}_k 为有害振动加速度; $\mathbf{g}_k^2 = g_x^2 + g_y^2 + g_z^2$ 为期望的重力加速度, g_x 、 g_y 和 g_z 分别为沿着钻具坐标系 (b 系) x 轴、 y 轴和 z 轴重力加速度分量; ${}^a\mathbf{v}_k$ 为加速度计测量噪声。根据上述, 钻具井斜姿态角 θ 可由已知公式确定^[19]:

$$\theta = \arctan \frac{-g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}}, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

2 无重置结构的 FAUKF 重力提取

由第 1 章可知, 钻具井斜姿态角的解算精度离不开钻具重力信息的提取精度。显然, 单一的加速度计测量

值受有害振动加速度影响,并不能直接用于钻具井斜角解算,还需要与基于陀螺仪数据解耦的重力信息以及基于解耦的磁信息观测的重力信息融合。其中,陀螺仪和磁强计的测量模型可分别表示为:

$$\begin{cases} {}^s\mathbf{y}_k = \boldsymbol{\omega}_k + {}^s\mathbf{v}_k \\ {}^m\mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k + \mathbf{m}_k + {}^m\mathbf{v}_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: ${}^s\mathbf{y}_k$ 为角速度测量值; $\boldsymbol{\omega}_k$ 为真实角速度; ${}^s\mathbf{v}_k$ 为陀螺仪测量噪声; ${}^m\mathbf{y}_k$ 为磁强计测量值; $\mathbf{h}_k^2 = h_x^2 + h_y^2 + h_z^2$ 为期望的地球磁场矢量; \mathbf{m}_k 为磁干扰; ${}^m\mathbf{v}_k$ 为磁强计测量噪声。

由式(3)可知,陀螺仪和磁强计测量数据都存在误差,为提高钻具重力信息融合提取的可靠性,提出无重置结构 FAUKF 钻具重力信息融合提取方法,图 1 为无重置结构的重力信息联邦融合提取框架。将基于陀螺仪数据解耦的重力值作为联邦滤波器的公共参考状态值,与解耦地磁信息观测的重力组合作为子滤波器 1,与加速度计测量值组合作为子滤波器 2。图 1 中对子滤波器重力状态进行 UKF 算法,期间结合解耦地磁数据观测重力的抗振动性优于加速度计设计抗振因子、利用陀螺仪短时精度高的输出特性设计抗磁因子,以及设计自适应开窗因子确定开窗估计法则中的开窗大小,来自适应调节新息协方差,利用调节后的新息实现对随钻测量过程中量测噪声统计特性的实时跟踪,提高子滤波器在观测异常时相应的子系统故障期间的性能,得到重力状态局部自适应估计 $\hat{\mathbf{g}}_1^b, \hat{\mathbf{g}}_2^b$,再通过联邦信息融合得到重力信息的全局估计 $\hat{\mathbf{g}}_f^b$ 。

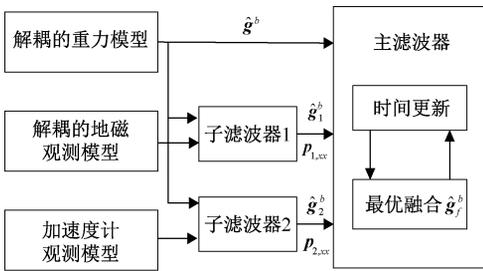


图 1 无重置结构的重力信息联邦融合提取框架

Fig. 1 Gravity information federal fusion extraction framework without reset structure

2.1 参考系统钻具重力递推

借助 MEMS 陀螺仪测量数据短时精度高的特点,结合哥氏方程得到重力加速度 \mathbf{g} 在导航坐标系 (n 系) 下的变化率可由在钻具坐标系 (b 系) 下的变化率表示^[20], 则有:

$$\mathbf{C}_n^b \dot{\mathbf{g}}^n = \dot{\mathbf{g}}^b + \boldsymbol{\omega}^b \times \mathbf{g}^b \quad (4)$$

式中: $\dot{\mathbf{g}}^b, \dot{\mathbf{g}}^n$ 和 $\dot{\mathbf{h}}^b, \dot{\mathbf{h}}^n$ 分别为 \mathbf{g} 和 \mathbf{h} 在 b 系和 n 系下的时间

变化率; $\boldsymbol{\omega}^b$ 为 b 系相对于 n 系的转动角速度; \mathbf{C}_n^b 为 n 系到 b 系的姿态旋转矩阵。短时间钻进时,易知 $\dot{\mathbf{g}}^n = 0$, 则有:

$$\dot{\mathbf{g}}^b = -\boldsymbol{\omega}^b \times \mathbf{g}^b = -[\boldsymbol{\omega}^b \times] \mathbf{g}^b \quad (5)$$

式中: $[\boldsymbol{\omega}^b \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z^b & \omega_y^b \\ \omega_z^b & 0 & -\omega_x^b \\ -\omega_y^b & \omega_x^b & 0 \end{bmatrix}$ 为 $\boldsymbol{\omega}^b$ 的反对称

矩阵。设采样时间为 T_s , 离散化得到:

$$\mathbf{g}_k^b = \exp(-[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^b \times] \cdot T_s) \mathbf{g}_{k-1}^b \quad (6)$$

由于陀螺仪存在测量噪声,取 $\boldsymbol{\omega}_k \approx {}^s\mathbf{y}_k$, 再根据式(6)得到重力递推误差为:

$$\Delta \mathbf{g}_k^b \approx -T_s [\mathbf{g}_{k-1}^b \times] {}^s\mathbf{w}_{k-1} \quad (7)$$

式中: $[\mathbf{g}_{k-1}^b \times]$ 为 \mathbf{g}_{k-1}^b 的反对称矩阵; ${}^s\mathbf{w}_{k-1}$ 为 \mathbf{g} 的系统误差。

上述分析可知,联邦滤波的公共参考系统离散非线性状态方程可以进一步表示为:

$$\mathbf{X}_m(k) = \mathbf{f}_m(\mathbf{X}_m(k-1)) + \mathbf{G}_m(k-1) \mathbf{W}_m(k-1) \quad (8)$$

式中: 选择状态变量 $\mathbf{X}_m = \mathbf{g}^b$; 随钻测量的噪声系数 $\mathbf{G}_m(k-1) = -T_s [\mathbf{g}_{k-1}^b \times] {}^s\mathbf{W}_m(k-1)$; \mathbf{W}_m 为陀螺仪数据解耦的重力模型误差,假设为零均值、协方差为 \mathbf{Q}_m 的白噪声; $\mathbf{f}_m(\cdot)$ 为系统状态的非线性函数。

2.2 子滤波器状态和观测方程

根据 2.1 节重力递推过程,同理可得 b 系下地磁为 $\mathbf{h}_k^b = \exp(-[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^b \times] \cdot T_s) \mathbf{h}_{k-1}^b$, 因此可得到地磁信息 \mathbf{h}_k^b 观测重力矢量,则有:

$${}^m\mathbf{g}_k^b = {}^m\mathbf{H}_k^b \mathbf{g}_{k-1}^b \quad (9)$$

式中: ${}^m\mathbf{H}_k^b = \text{diag}[\frac{h_x^b(k)}{h_x^b(k-1)}, \frac{h_y^b(k)}{h_y^b(k-1)}, 1]$ 为基于解

耦地磁信息重力矢量观测矩阵,其中 h_x^b 和 h_y^b 分别磁强计 x 轴和 y 轴解耦的地磁数据, m 在左上标表示与磁强计输出有关的量。再结合式(1)加速度计测量模型可以得到联邦框架下子滤波器 i ($i = 1, 2$) 的离散非线性状态方程和观测方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_i(k) = \mathbf{f}_i(\mathbf{X}_i(k-1)) + \mathbf{G}_i(k-1) \mathbf{W}_i(k-1) \\ \mathbf{Z}_i(k) = \mathbf{h}_i(\mathbf{X}_i(k)) + \mathbf{V}_i(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: 状态变量 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_m$; 噪声系数 $\mathbf{G}_1 = \mathbf{G}_2 = \mathbf{G}_m$; $\mathbf{Z}_1 = {}^m\mathbf{g}^b = [{}^m g_x^b, {}^m g_y^b, {}^m g_z^b]^T$ 为解耦地磁信息观测的重力加速度; $\mathbf{Z}_2 = {}^a\mathbf{y} = [{}^a y_x, {}^a y_y, {}^a y_z]^T$ 为加速度计测量值; $\mathbf{h}_1(\cdot)$ 为关于磁数据观测重力输出的非线性函数; $\mathbf{h}_2(\cdot)$ 为关于加速度计观测输出的非线性函数; $\mathbf{V}_1(k)$ 为解耦地磁数据观测重力模型误差, $\mathbf{V}_2(k)$ 为加速度计测量误差,先分别假设为零均值、协方差为 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 的白噪声,后续根据自适应调整。

2.3 FAUKF 重力信息融合

上述分析可知,若把陀螺仪数据解耦的重力 \mathbf{g}^b 选取作为联邦滤波公共参考系统的状态 \mathbf{X}_m ,则子系统的钻具重力状态 $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_m$ 和 $\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_m$ 可分别表示为 \mathbf{g}_1^b 和 \mathbf{g}_2^b 。以子滤波器 1 为例,计算重力状态向量采样点和所占权重,则有:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_j(k) = \hat{\mathbf{g}}_1^b(k), j = 0 \\ \mathbf{X}_j(k) = \hat{\mathbf{g}}_1^b(k) + \sqrt{\eta} \left| \sqrt{\mathbf{P}(k)} \right|_{,j}, j = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{X}_j(k) = \hat{\mathbf{g}}_1^b(k) - \sqrt{\eta} \left| \sqrt{\mathbf{P}(k)} \right|_{,j-n}, j = n + 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \omega_j = \frac{\tau}{\eta}, j = 0 \\ \omega_j = \frac{1}{2\eta}, j = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{P}(k)$ 为 k 时刻的误差协方差矩阵; $\eta = n + \tau$ 用于调整重力信息状态的采样点分布, n 为子系统重力状态向量的维数, τ 决定采样点离散程度,根据测量精度可取 0.1; ω_j 为重力状态向量采样点所占权重。得到子系统重力信息非线性状态和量测方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{j,k+11k} = \mathbf{f}_1(\mathbf{X}_{j,k}), (j = 0, 1, \dots, 2n) \\ \mathbf{g}_{k+11k}^b = \mathbf{h}_1(\mathbf{X}_{k+11k}) \end{cases} \quad (13)$$

时间更新,子系统重力状态向量一步预测均值和均方误差为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{g}}_1^b(k + 1 | k) = \sum_{j=0}^{2n} \omega_j \mathbf{X}_{j,k+11k} \\ \mathbf{P}_{1,xx}(k + 1 | k) = \\ \sum_{j=0}^{2n} \omega_j [(\mathbf{X}_{j,k+11k} - \hat{\mathbf{g}}_1^b(k + 1 | k)) \cdot \\ (\mathbf{X}_{j,k+11k} - \hat{\mathbf{g}}_1^b(k + 1 | k))^T] + \mathbf{Q}_1(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{Q}_1(k)$ 为系统噪声协方差。测量更新,令 ${}^m\mathbf{g}_{k+11k}^b - {}^m\hat{\mathbf{g}}_{k+11k}^b = \Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b$,则解耦磁数据观测的重力信息一步预测均值及方差分别为:

$$\begin{cases} {}^m\hat{\mathbf{g}}_{k+11k}^b = \sum_{j=0}^{2n} \omega_j {}^m\mathbf{g}_{j,k+11k}^b \\ \mathbf{P}_{1,zz}(k + 1 | k) = \\ \sum_{j=0}^{2n} \omega_j \{(\Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b)(\Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b)^T\} + \mathbf{R}_1(k) \\ \mathbf{P}_{1,xz}(k + 1 | k) = \\ \sum_{j=0}^{2n} \omega_j \{[\mathbf{X}_{j,k+11k} - \hat{\mathbf{g}}_1^b(k + 1 | k)][\Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b]^T\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{R}_1(k)$ 为量测噪声协方差。根据开窗估计法则易知新息实时估计协方差为:

$$\mathbf{P}_{v_1(k+1)} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{v}_1(k + 1 - m) \mathbf{v}_1^T(k + 1 - m) \quad (16)$$

式中: M 为开窗大小,即为历元新息的数量。 $\mathbf{v}_1(k + 1) = \sum_{j=0}^{2n} \omega_j \{(\Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b)(\Delta^m\mathbf{g}_{k+11k}^b)^T\} + \mathbf{R}_1(k)$ 为由式(15)定义的重力新息方差。在实际随钻测量中开窗大小 M 需要视情况而定,使得新息协方差 $\mathbf{P}_{v_i(k+1)}$ ($i = 1, 2$) 也具有不确定性。因此设计了抗振因子 ${}^a\delta$ 、抗磁因子 ${}^m\delta$ 和开窗因子 ζ 自适应调节开窗大小 M ,来确定新息协方差的实时估计值。其中,抗振因子 ${}^a\delta$ 是针对子滤波器 2 设计的,结合磁数据观测重力的抗振性优于加速度计,计算抗振因子 ${}^a\delta$:

$${}^a\delta = {}^m\hat{\mathbf{g}}_{k+11k}^b - {}^a\mathbf{y}_{k+11k} \quad (17)$$

式中: ${}^m\hat{\mathbf{g}}_{k+11k}^b$ 为解耦磁数据观测的重力信息一步预测均值; ${}^a\mathbf{y}_{k+11k}$ 为对应时刻加速度计的测量值。抗磁因子 ${}^m\delta$ 是针对子滤波器 1 设计的,设某时间序列段磁强计各轴输出的非线性函数为 ${}^m\mathbf{F}(\cdot) = [{}^mF_x(\cdot) \quad {}^mF_y(\cdot) \quad {}^mF_z(\cdot)]^T$,由式(3)可知, k 时刻磁强计各轴输出对应点数据上的斜率为 ${}^m\dot{\mathbf{F}}({}^m\mathbf{y}_k) = [{}^m\dot{F}_x({}^m\mathbf{y}_k) \quad {}^m\dot{F}_y({}^m\mathbf{y}_k) \quad {}^m\dot{F}_z({}^m\mathbf{y}_k)]^T$,再利用陀螺仪数据短时精度高的特点,即基于陀螺仪数据解耦的地磁数据在 k 时刻对应点数据上的斜率为 ${}^m\dot{\mathbf{F}}(\mathbf{h}_k^b) = [{}^m\dot{F}_x(\mathbf{h}_k^b) \quad {}^m\dot{F}_y(\mathbf{h}_k^b) \quad {}^m\dot{F}_z(\mathbf{h}_k^b)]^T$;由 3σ 准则可知,当磁强计输出数据足够多时,总体服从正态分布。因此,若任意轴满足式(18)条件,则,可计算抗磁因子 ${}^m\delta$,则有:

$$\begin{cases} {}^m\dot{F}_i({}^m\mathbf{y}_k) \neq {}^m\dot{F}_i(\mathbf{h}_k^b), i = x, y, z \\ {}^m\mathbf{y}_k \notin (\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma) \end{cases} \quad (18)$$

$${}^m\delta = {}^m\hat{\mathbf{g}}_{k+11k}^b - {}^m\mathbf{g}_{k+11k}^b \quad (19)$$

式中: μ 为对应磁强计输出点的平均值; σ 为对应磁强计输出点的方差; ${}^m\mathbf{g}_{k+11k}^b$ 为原始磁强计输出值观测的重力信息。否则,抗磁因子 ${}^m\delta = \mathbf{0}$ 。为使得 M 快速收敛得到当前观测的钻具重力新息方差估计,设计自适应开窗因子 ζ ,则有:

$$\zeta = {}^i\delta^T \mathbf{E}_{k+1}^{-1} {}^i\delta \quad (i = a, m) \quad (20)$$

式中: ζ 为定义的开窗因子; ${}^i\delta$ 为抗振因子或抗磁因子; $\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{E}_{k+1}({}^i\delta {}^i\delta^T)$ 为自协方差矩阵。

继续以子滤波器 1 为例,结合式(16)可知,可得到新的重力新息自适应实时估计协方差为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{v_1(k+1)}^o = \mathbf{v}_1(k + 1) \mathbf{v}_1^T(k + 1), M = 1, \zeta \geq \alpha_{\max} \\ \mathbf{P}_{v_1(k+1)}^o = \frac{1}{k + 1} \sum_{m=1}^{k+1} \mathbf{v}_1(k + 1 - m) \mathbf{v}_1^T(k + 1 - m), \\ M = k, \zeta \leq \alpha_{\min} \\ \mathbf{P}_{v_1(k+1)}^o = \frac{1}{M} \sum_{m=k-M+1}^{k+1} \mathbf{v}_1(k + 1 - m) \mathbf{v}_1^T(k + 1 - m), \\ M = k \times \lambda^\zeta, \alpha_{\min} < \zeta < \alpha_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{P}_{v_1}^o(k+1)$ 为新息协方差的实时估计; $\alpha_{\min} = 0$ 和 $\alpha_{\max} = 1$ 为开窗大小 M 的判定阈值; $\lambda < 1$ 为开窗 M 的收敛速度。同理,可以得到子滤波器 2 对应的重力新息协方差的实时估计。因此,量测噪声 $\mathbf{R}_1(k)$ 的自适应实时估计协方差可以表示为:

$$\mathbf{R}_1(k) = \mathbf{P}_{v_1}^o(k+1) - \sum_{j=0}^{2n} \omega_j \{ (\Delta^m \mathbf{g}_{k+1|k}^b) (\Delta^m \mathbf{g}_{k+1|k}^b)^T \} \quad (22)$$

同理,易得量测噪声 $\mathbf{R}_2(k)$ 的自适应实时估计协方差。

公共系统(主滤波器)钻具重力状态估计和协方差为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{g}}^b(k+1) = \hat{\mathbf{g}}^b(k+1|k) \\ \mathbf{P}_{m,xx}(k+1) = \mathbf{P}_{m,xx}(k+1|k) \end{cases} \quad (23)$$

子滤波器 1 增益和重力状态更新:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{1,k+1} = \mathbf{P}_{1,xx} \mathbf{P}_{1,zz}^{-1} \\ \hat{\mathbf{g}}_1^b(k+1) = \hat{\mathbf{g}}_1^b(k+1|k) + \mathbf{K}_{1,k+1} ({}^m \mathbf{g}_{k+1}^b - {}^m \hat{\mathbf{g}}_{k+1|k}^b) \\ \mathbf{P}_{1,xx}(k+1) = \mathbf{P}_{1,xx}(k+1|k) - \mathbf{K}_{1,k+1} ({}^m \mathbf{g}_{k+1}^b - {}^m \hat{\mathbf{g}}_{k+1|k}^b) \end{cases} \quad (24)$$

同理,也可得到子滤波器 2 增益和重力状态更新。

重力信息联邦融合:

$$\hat{\mathbf{g}}_f^b(k+1|k+1) =$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}_g(k+1|k+1) [\mathbf{P}_{1,xx}^{-1}(k+1|k+1) \hat{\mathbf{g}}_1^b(k+1|k+1) + \\ & \mathbf{P}_{2,xx}^{-1}(k+1|k+1) \hat{\mathbf{g}}_2^b(k+1|k+1) + \\ & \mathbf{P}_{m,xx}^{-1}(k+1|k+1) \hat{\mathbf{g}}^b(k+1|k+1)] \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{P}_g = [\mathbf{P}_{1,xx}^{-1} + \mathbf{P}_{2,xx}^{-1} + \mathbf{P}_{m,xx}^{-1}]^{-1}$ 为融合提取的重力的全局状态协方差; $\mathbf{P}_{m,xx}^{-1}(k+1|k+1)$ 、 $\mathbf{P}_{1,xx}^{-1}(k+1|k+1)$ 和 $\mathbf{P}_{2,xx}^{-1}(k+1|k+1)$ 分别为主滤波器、子滤波器 1 和子滤波器 2 重力状态方差阵; $\hat{\mathbf{g}}_f^b$ 为融合后的全局钻具重力估计值。

3 实验与分析

3.1 模拟钻进实验

为了验证提出的 FAUKF 算法对钻具动态下重力信息提取的有效性,设计了模拟钻进实验。由试验场地的地理条件易知地球的自转角速度为 $15^\circ/\text{h}$,地磁场强度和磁倾角分别为 $52.6 \mu\text{T}$ 、 53.8° ,地球重力加速度为 9.7966 m/s^2 。准备的实验设备有 MEMS 随钻测量核心模块(三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁强计)、模拟钻进地质层、某型工程勘探用小型钻机和数据收集的上位机。将随钻测量核心模块 x, y, z 三轴分别沿着载体横纵轴指向上、前、右安装在小型钻机的钻杆上,且安装误差已校准,钻进时随着钻杆一块转动,通过转动的钻杆与

地质层摩擦模拟外界激励产生振动如图 2 所示。钻进前,调整并固定钻杆位置,在静态条件下测量的井斜角初始值为 -10.5° 。钻进时,转速以 60 r/min 恒压钻进,采样间隔为 0.02 s ,动态采集加速度、角速度和磁场数据。随机选取其中的 12 000 组数据按照图 1 的流程进行重力提取。重力提取前,三轴加速计输出的原始信号如图 3 所示,可以看出钻具三轴加速度波动都很大,说明三轴加速度信号中都含有复杂的振动噪声。若对加速度计测量的原始数据直接按式(2)进行井斜角解算,结果如图 4 所示,原始测量的加速度数据解算的井斜角与真实井斜角相比最大差值为 42.1° ,这是由于加速度计测量信号中包含复杂的振动加速度,导致加速度计测量的原始数据解算的井斜角严重失真。



图 2 模拟钻进信号

Fig. 2 Simulated drilling signal

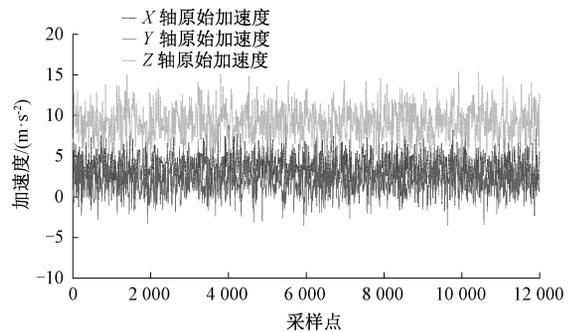


图 3 加速度计三轴原始测量信号

Fig. 3 Accelerometer three-axis original measurement signal

因此,需要通过提出的算法按照图 1 的流程对钻具重力加速度进行融合提取,以提高钻具井斜角解算时重力信息来源的可靠性,结果如图 5 所示,可以看出,相比加速计三轴测量的原始加速度信号,通过 FAUKF 算法后能够大幅度滤除复杂的振动加速度,得到波动小的钻具三轴重力加速度。

钻具各轴重力信息提取后,为验证算法对钻具重力信息提取的有效性,用提取的重力数据按照式(2)进行井斜角解算,结果如图 6 所示,井斜角解算的精度大幅度提高,且与真实的井斜角相比误差可控制在 $\pm 0.6^\circ$ 以内。

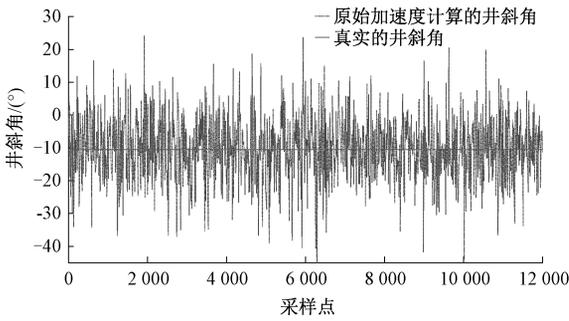


图 4 重力提取前解算的井斜角和真实井斜角对比
Fig. 4 Comparison of inclination and real inclination before gravity extraction

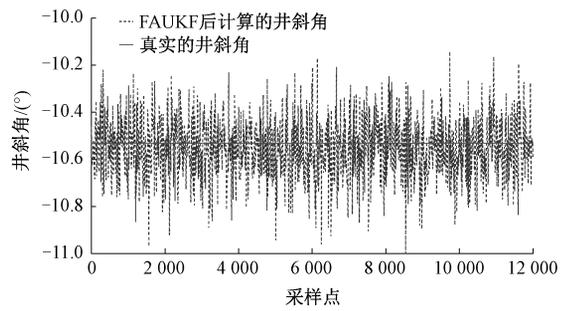
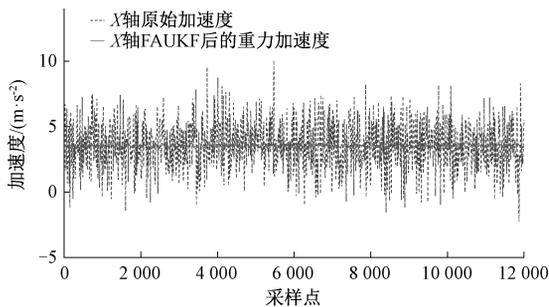
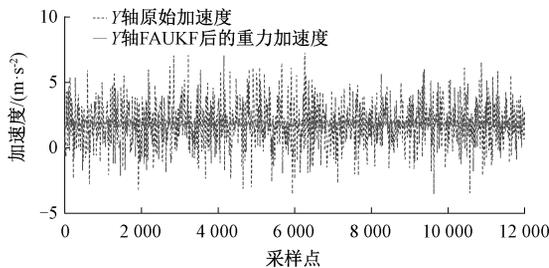


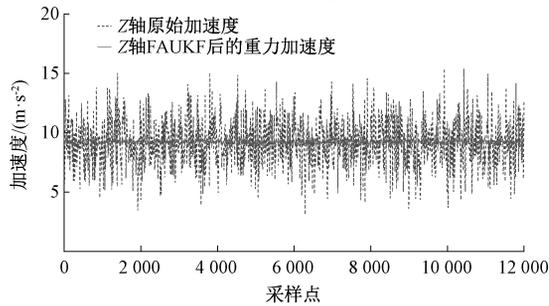
图 6 重力提取后计算的井斜角
Fig. 6 Inclination calculated after gravity extraction



(a) X轴重力提取前后
(a) Before and after X-axis gravity extraction



(b) Y轴重力提取前后
(b) Before and after Y-axis gravity extraction



(c) Z轴重力提取前后
(c) Before and after Z-axis gravity extraction

图 5 钻具各轴重力提取前后加速度比较
Fig. 5 Comparison of acceleration before and after gravity extraction of each axis of drilling tool

突增片段,如图 7 所示,并在测量模块周围进行人工磁干扰。钻进前,调整钻杆位置为垂直钻进。以同样的采样频率采集加速度、角速度和地磁数据,分别采用 FKF 算法和提出的 FAUKF 算法进行重力信息提取,然后进行井斜角解算对比,结果如图 8 所示,从井斜角解算的结果来看,与原始加速度解算的井斜角相比,两种算法都能够很有效的提取钻具重力信息,但是从两种算法提取的重力数据解算的井斜角局部放大图来看,通过 FKF 算法重力提取后解算的井斜角误差可保持在 $\pm 2.8^\circ$ 以内,与提出的 FAUKF 算法提取重力加速度解算的井斜角相比,后者解算的井斜角精度明显高于前者解算的井斜角精度,并且经过 FAUKF 算法重力提取后的井斜角误差可控制在 $\pm 0.9^\circ$ 以内。

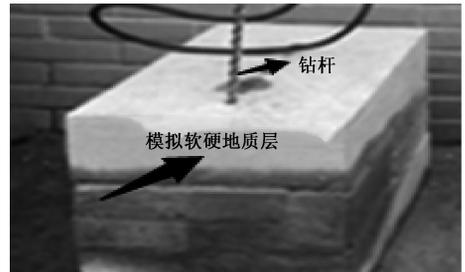


图 7 软硬交替的地质层
Fig. 7 Soft and hard alternating geological layer

3.2 实钻实验

选取焦作某矿开展了实钻进实验,实验前将随钻测量筒的测量短节固定在钻杆上如图 9 所示,在钻进过程中以采样间隔为 2 s 采集加速度、角速度和地磁数据,每间隔 300 s 停钻一次并作为静态测量点,静态测量点处加速度计测量的加速度解算的井斜角可作为参考井斜角。为验证实钻进条件下算法的有效性,特截取在钻进过程中含有铁磁干扰环境下对有振动加速度突增片段的 1 200 组数据进行处理,同样用提出的算法进行重力提取,接着进行井斜角解算,并与静态测量点处解算的参考井斜角对比,结果如图 10 所示,可以看出,重力提取前原

为了进一步验证算法的性能,在实验室中用准备的软硬交替的地质层模拟实际钻进过程中某处振动加速度

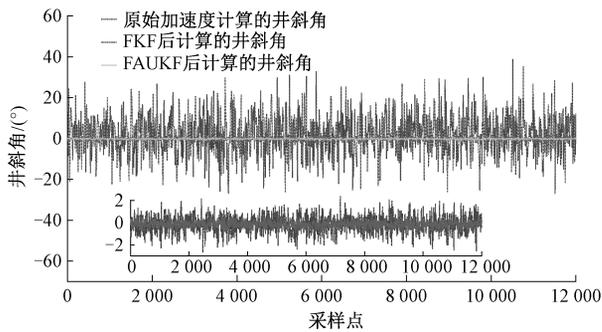


图 8 两种算法计算的井斜角比较

Fig. 8 Comparison of inclination calculated by two algorithms

始加速度计测量数据解算的井斜角误差很大,与 FAUKF 算法后提取重力解算的井斜角相比,最大差值可达 52° ,且从图 10 的 8 个静态测量点处解算的井斜角局部放大图来看,通过 FAUKF 算法后提取的重力数据解算的井斜角与 8 个静态测量点处计算的井斜角相比误差可保持在 $\pm 1.2^\circ$ 以内。



图 9 实钻测量

Fig. 9 Real drilling measurement

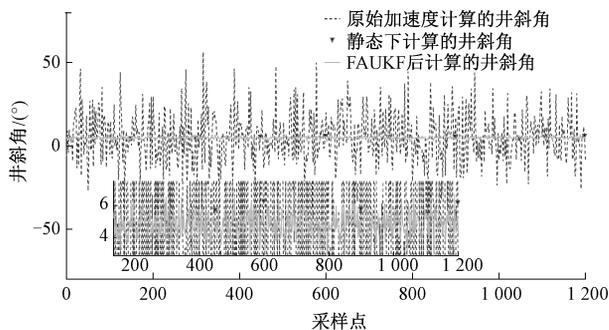


图 10 重力提取前后井斜角与静态测量点井斜角对比

Fig. 10 Comparison of inclination before and after gravity extraction and static measurement point inclination

4 结 论

本文针对煤矿井下钻具重力加速度易受多源有害振动加速度干扰,导致钻具井斜姿态角解算严重失真问题,提出了联邦自适应无迹卡尔曼滤波算法对钻具重力信息

进行提取。并通过模拟钻进和实钻进实验验证算法的有效性,主要结论如下:

1) 在 3 种不同工况下,即在两种模拟钻进工况和实钻进工况的实验下,实验结果表明所提算法都能够有效的提取钻具重力信息,且能够大幅度提高钻具钻进时井斜角的精度,具有一定的工程应用价值。

2) FAUKF 算法根据磁/惯性传感器输出误差特性通过设计加速度计抗振因子、磁强计抗磁因子和开窗因子,能够自适应更新观测噪声协方差矩阵,提高了 UKF 滤波精度,能够调节和修正联邦滤波框架下子系统异常,保证了子滤波器重力信息来源的可靠性,相比传统联邦卡尔曼滤波大幅度提高了井斜角的解算精度。

3) 提出的算法由于把基于陀螺仪数据解耦的重力递推值作为联邦滤波公共系统的参考状态值,长时间钻进会影响井斜角动态测量精度。下一步,在该算法的基础上对 MEMS 陀螺仪进行误差补偿研究,进一步提升 FAUKF 算法的性能。

参考文献

- [1] CAI Z, LAI X Z, WU M, et al. Observer-based trajectory control for directional drilling process [J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(1): 259-272.
- [2] 程为彬, 胡少兵, 张夷非, 等. 旋转导向钻井工具近垂直姿态校正矩阵误差的等角距均衡校正 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 19-28.
CHENG W B, HU SH B, ZHANG Y F, et al. Equiangular interval balance correction of correction matrix error for rotary steering drilling tool under near-vertical position [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 19-28.
- [3] VOLO L P, LOBO D M, RITTO T G. A stochastic analysis of the coupled lateral-torsional drill string vibration [J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 103(1): 49-62.
- [4] DAI M P, ZHANG C X, 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: 9500311.
- [5] YANG H, GAO S J, LIU S Q, et al. Research on identification and suppression of vibration error for MEMS inertial sensor in near-bit inclinometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20): 19645-19655.
- [6] 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.
- [7] YANG H, RAO Y, LI L, et al. Dynamic measurement of well inclination based on UKF and correlation

- extraction [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4887-4899.
- [8] YANG J X, CHAO L J. A novel orientation recursive algorithm aiming at catastrophe signals in MWD [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11):9683-9692.
- [9] ZHANG J H, LI P, JIN C C, et al. A novel adaptive Kalman filtering approach to human motion tracking with magnetic-inertial sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10):8659-8669.
- [10] 汪跃龙, 李凌云, 贺艳, 等. 近钻头钻具姿态测量的多传感器最小二乘原理加权融合方法 [J]. 石油学报, 2021, 42(4):500-507.
WANG Y L, LI L Y, HE Y, et al. A multi-sensor least squares weighted fusion method for attitude measurement of near-bit drilling tool [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4):500-507.
- [11] 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, CHEN L, et al. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2):17-25.
- [12] GAO B B, HU G G, ZHONG Y M, et al. Cubature rule-based distributed optimal fusion with identification and prediction of kinematic model error for integrated UAV navigation [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 109:106447.
- [13] GAO B B, HU G G, ZHONG Y M, et al. Distributed state fusion using sparse-grid quadrature filter with application to INS/CNS/GNSS integration [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4):3430-3441.
- [14] 张闯, 赵修斌, 庞春雷, 等. SINS/GNSS/CNS 组合导航自适应容错联邦滤波方法 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(9):1469-1476.
ZHANG CH, ZHAO X B, PANG CH L, et al. Adaptive fault tolerance federated filter method for SINS/GNSS/CNS integrated navigation [J]. Control Theory and Technology, 2019, 36(9):1469-1476.
- [15] 张幼振, 刘焱杰, 钟自成, 等. 煤矿全液压力头式钻机振动测试与分析 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2):271-279.
ZHANG Y ZH, LIU Y J, ZHONG Z CH, et al. Vibration measurement and analysis of full hydraulic power head drilling rig in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2):271-279.
- [16] DING Y A, WANG H W, YANG D Y. Determination of effective drag forces and torques for jam release during drilling and workover operations in directional wells [J]. Journal of Energy Resources Technology-transactions of The Asme, 2021, 144(1):013002.
- [17] LIANG D Y, GUAN Z C, WANG J C, et al. Simulation analysis of drilling process in horizontal wells with mechanical rotary percussion tool [J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2022, 58(1):114-121.
- [18] WU G, FANG X Q, SONG Y, et al. Study on the shearer attitude sensing error compensation method based on strapdown inertial navigation system [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(21):10848.
- [19] YANG H, ZHANG L Z, LUO T, et al. Research on improving accuracy of MWD based on support vector classifier and k-proximity method [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6):8078-8088.
- [20] 杨金显, 赵龙飞, 仝小森, 等. 随钻测量中井斜角测量误差的降噪方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12):101-107.
YANG J X, ZHAO L F, TONG X S, et al. Noise reduction method of angle of inclination measurement error in MWD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12):101-107.

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.



蔡纪鹏, 2021 年于河南科技大学获得学士学位, 现为河南理工大学硕士在读研究生, 主要研究方向为 MEMS 惯性测量在随钻中的应用研究。
E-mail: caijipengcjp@126.com

Cai Jipeng received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interest includes the application of MEMS inertial measurement in drilling.