DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108587

随钻姿态测量重力加速度自适应提取算法*

韩 冬[1],孙 伟[1],陈 龙[2],连 杰[2]
(1. 西安电子科技大学 西安 710126; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司 西安 710077)

摘 要:为解决旋转导向钻井过程中由于钻具的高速旋转、剧烈振动和冲击给随钻姿态测量带来巨大干扰的问题,基于互补滤波框架提出了一种钻具重力加速度提取算法。首先通过余弦矩阵微分方程得到基于陀螺仪的重力加速度的递推方程,然后利用陀螺仪和加速度计在频率上互补的特性,在互补滤波框架下融合得到钻具重力加速度;同时,为了提高系统鲁棒性,利用非重力加速度和钻具旋转速度作为模糊算法输入,通过模糊算法动态调整互补滤波参数;最后设计了振动和旋转实验验证了算法的有效性。实验结果表明,使用本文算法提取重力加速度后姿态估计精度得到明显提升,本文算法相比于基于 Kalman 滤波框架的重力加速度提取算法在 PC 机测试环境下单次运算时间减少 31.9%。

关键词: 随钻测量;互补滤波;模糊算法;信号提取
中图分类号: TH712 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.8060

An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD

Han Dong[1], Sun Wei[1], Chen Long[2], Lian Jie[2]
(*1. Xidian University, Xi'an 710126, China; 2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China*)

Abstract: The high-speed rotation, severe vibration and impact of the drilling tool could cause huge interference to the attitude measurement while drilling in the process of rotary steerable drilling. To address these issues, a drilling tool gravity acceleration extraction algorithm is proposed, which is based on the complementary filtering framework. First, the recursive equation of the gravitational acceleration based on the gyroscope is obtained through the cosine matrix differential equation. Then, the gravitational acceleration of the drilling tool is obtained by fusion under the framework of complementary filtering by using the complementary characteristics of the gyroscope and the accelerometer. Meanwhile, to improve the system's robustness, the non-gravity acceleration and drilling tool rotation speed are utilized as the input of the fuzzy algorithm. The complementary filter parameters are dynamically adjusted through the fuzzy algorithm. Finally, vibration and rotation experiments are designed to evaluate the effectiveness of the algorithm. Experimental results show that the accuracy of attitude estimation is significantly improved after using the algorithm to extract the gravity acceleration. Compared with the gravity acceleration extraction algorithm based on the Kalman filter framework, the single operation time of the algorithm in the PC test environment is reduced by 31.9%.

Keywords: measurement while drilling; complementary filtering; fuzzy algorithm; signal extraction

0 引 言

在煤矿井下钻孔施工过程中,由于煤岩层赋存状况变化、施工工艺等原因,会导致实际钻孔偏离原设计方向,造成安全隐患[1]。随钻测量(measurement while drilling, MWD)通过在钻进过程中连续不断检测有关钻头的姿态信息,从而来指导钻头按照设计方向钻进,实现钻具轨迹的实时调整。目前常用的随钻姿态测量系统普遍采用磁力计和加速度计组合方案[2-4],这种方法测量原理简单,但钻具振动会带来巨大的测量误差[5],通常该方法测量前需要先让钻机停止运行。使用这种测量方法不

收稿日期:2021-09-16 Received Date: 2021-09-16
*基金项目:中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金(2020XAYDC01-4-2)项目资助

仅影响钻井效率,而且由于相邻测量点距离过大钻头调整周期变长从而导致井眼轨迹偏离设计轨迹,每个测量点之间的井眼轨迹也只能通过数学方法计算得出,因此无法获得精确的井眼轨迹[6-7]。

针对传统随钻测量工具不能克服底部钻具在工作中的振动和冲击等问题,目前主流的研究思路是先从加速度计中提取重力加速度信息,然后再进行姿态解算[8-9]。对于重力加速度信息的提取主要分成两类研究思路,一类是利用重力加速度信息和由振动、冲击等带来的非重力加速度信息在频域、时域上的特征差异将其区分。在这一类方法中,Alam 等[10]使用小波阈值法重构加速度计中的重力信息,提出一种可变带宽的加速度计自适应滤波方法,利用正弦基的重力加速度信息频带估计方法来不断调整滤波带宽,预先滤除信号频带外振动信号噪声。但该方法要求振动加速度频带和重力加速度频带分离,且小波基函数的选择也比较困难。Yang 等[11]在小波去噪的基础上提出先使用经验模态分解来滤除传感器高频分量,再用小波对其重构。张文秀等[12]利用重力加速度和振动信号在时域上互不相关的特点,提出了一种基于互相关检测的重力加速度信号提取方法,但是该方法需要假设振动和冲击加速度为随机信号,且参考信号选取比较困难,对工作环境适应性不强。

另一类是基于多传感器融合[13-14]的思路。Ligorio 等[15]以基于陀螺仪的重力加速度递推方程和非重力加速度的高斯马尔科夫模型作为预测方程,以加速度计信号作为观测量,在卡尔曼滤波框架中融合得到重力加速度信息。Yang 等[16]提出了一种自适应衰减平方根无迹卡尔曼滤波方法,在 UKF 中引入衰减因子,实时调整滤波器增益,有效将加速度计的振动信号解耦。但是该算法限制条件较多,需要钻具工作时噪声满足高斯分布。Yang 等[17]基于科里奥利方程建立了重力加速度的预测方程。杨金显等[18]为进一步提高系统的鲁棒性,选取基于陀螺仪重力加速度递推方程作为主滤波器,基于加速度计、磁力计观测的重力加速度作为子滤波器,在联邦卡尔曼融合框架中得到重力加速度信息。但由于重力加速度提取模块只是随钻测量系统中的一个数据预处理模块,而且由于井下对于电子设备功率的限制,单片机无法提供足够的计算能力,上述基于卡尔曼滤波框架的重力加速度提取算法计算量大,难以在嵌入式设备上运行。

综上所述,针对基于信号特征差异的信号处理算法无法有效提取重力加速度,而基于卡尔曼滤波的多传感器融合算法难以实时计算的问题,本文提出一种在互补滤波框架下的钻具重力加速度自适应提取算法。该算法利用加速度计和陀螺仪在频域上的互补特性[19-20],采用互补滤波器对二者数据进行融合以滤除近钻头的振动加速度干扰,同时为了提高对钻具不同运动状态的适应能力,引入模糊算法来动态调整互补滤波器参数。

1 随钻测量系统和坐标系介绍

随钻测量系统要想实现动态的、高精度的、实时的姿态测量通常需要包含加速度计、陀螺仪、磁力计 3 种传感器[21],由于本文研究重点在于钻具重力加速度信号提取,所以只使用了加速度计和陀螺仪,如图 1 所示。

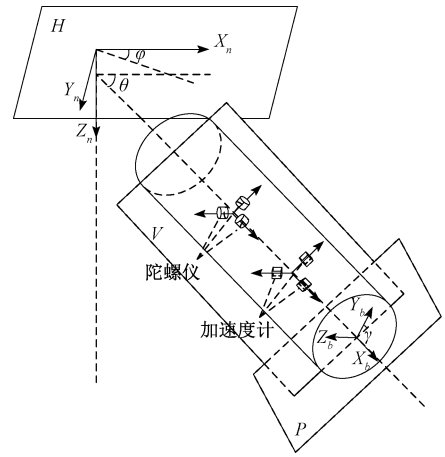


图 1 随钻测量系统传感器和坐标系

Fig. 1 Sensor and coordinate of the MWD system

图 1 中描述了本文用到的坐标系,选取地理坐标系以“北东地”为顺序构成的右手直角坐标系作为导航坐标系(n 系)用 $O\text{-}X_nY_nZ_n$ 表示,X_n 指向北,Y_n 指向东,Z_n 指向地心。以钻具的 3 个基本轴线建立钻具坐标系(b 系)用 $O\text{-}X_bY_bZ_b$ 表示,X_b 与钻具轴线重合,Y_b 和 Z_b 相互垂直且构成的平面与钻具轴线垂直。

随钻测量中 3 个基本参数量是井斜角、方位角、工具面角。井斜角 $\theta(\theta\in(-90°,90°))$ 为钻具钻进轴 X_b 与水平面的夹角,规定向下为正,反之为负。工具面向角 $\gamma(\gamma\in(-180°,180°))$ 为钻孔横截面内由钻孔高边到 Y_b 的夹角。方位角 $\varphi(\varphi\in(0°,360°))$ 为钻具在水平面投影与导航系 X_n 轴的夹角。由于重力加速度并不能直接解算出方位角,本文算法中只关注井斜角和工具面角。

2 重力加速度提取算法

2.1 重力加速度递推方程

在上述坐标系定义下,设从 n 系到 b 系的姿态旋转矩阵为 ${}^b_n\boldsymbol{C}$,旋转矩阵是随时间变化的,其变化规律用微分方程来描述。

旋转矩阵的微分方程为:

$$ {}^b_n\dot{\boldsymbol{C}} = -\left[{}^b\boldsymbol{\omega}\times\right]{}^b_n\boldsymbol{C} \tag{1}$$

其中,

$$ {}^{b}\boldsymbol{\omega}\times=\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z^b & \omega_y^b \\ \omega_z^b & 0 & -\omega_x^b \\ -\omega_y^b & \omega_x^b & 0 \end{bmatrix} \tag{2} $$

称 ${}^{b}\boldsymbol{\omega}\times$ 为钻具坐标系相对导航坐标系的角速度矢量 ${}^{b}\boldsymbol{\omega}=[\omega_x^b \quad \omega_y^b \quad \omega_z^b]^{\mathrm{T}}$ 构成的反对称矩阵。

设 $[t_{k-1},t_k]$ 时间段的陀螺输出角增量为 $\Delta\boldsymbol{\Theta}_k=\int_{t_{k-1}}^{t_k}[{}^{b}\boldsymbol{\omega}_k\times]\mathrm{d}t$, 式(1)微分方程的齐次线性解为:

$$ {}_{n}^{b}\boldsymbol{C}_k=-e^{\Delta\boldsymbol{\Theta}_k}\cdot{}_{n}^{b}\boldsymbol{C}_{k-1} \tag{3} $$

将式(3)两边同时乘以导航系(n 系)下的重力加速度 ${}^{n}\boldsymbol{g}=[0 \quad 0 \quad -g_0]^{\mathrm{T}}$, 得到载体系下的重力加速度递推方程。

$$ {}^{b}\boldsymbol{g}_k=-e^{\Delta\boldsymbol{\Theta}_k}\cdot{}^{b}\boldsymbol{g}_{k-1} \tag{4} $$

打钻过程中的旋转和振动会使得钻具处在高动态环境中,钻具不满足定轴转动的假设,若直接假设角增量 $\Delta\boldsymbol{\Theta}_k\approx\Delta T\cdot[{}^{b}\boldsymbol{\omega}_k\times]$, 然后对式(4)进行离散化,则会引入不可交换误差[22]降低重力加速度的解算精度。为此,本文引入单子样+前一周期的等效旋转矢量补偿不可交换误差[23]。于是重力加速度递推方程为:

$$ \begin{cases} {}^{b}\boldsymbol{g}_k=-e^{\boldsymbol{\Phi}_k}\cdot{}^{b}\boldsymbol{g}_{k-1} \\ \boldsymbol{\Phi}_k=\Delta\boldsymbol{\Theta}_k+\dfrac{1}{12}\Delta\boldsymbol{\Theta}_{k-1}\times\Delta\boldsymbol{\Theta}_k \end{cases} \tag{5} $$

其中,$\boldsymbol{\Phi}_k$ 为等效旋转矢量,角增量 $\Delta\boldsymbol{\Theta}_k=\Delta T\cdot[{}^{b}\boldsymbol{\omega}_k\times]$

2.2　Mahony 互补滤波

将陀螺仪测量值代入式(5)可以递推出钻具的重力加速度,这种方法动态响应特性良好,对外部干扰的适应性强,受振动影响小,但由于陀螺仪自身存在低频误差,在使用这种方法计算重力时,会产生累计误差。通过加速度计直接测量钻具重力加速度,这种方法在钻头在静止或者缓慢运动时,即无外部加速度干扰时,能准确测量重力加速度,且无累计误差,但是钻具在高动态环境下,即存在离心加速度、振动加速度等非重力加速度干扰时,加速度计测量误差较大。因此可以利用这两种测量方法在频率上互补的特性,通过设计互补滤波器融合这两种传感器的数据[24],提高重力加速度的测量精度和抗噪声能力。

首先对本文中涉及到的陀螺仪和加速度计进行建模。本文中所使用到的三轴 MEMS 陀螺仪的输出可建模为:

$$ {}^{b}\boldsymbol{y}_k={}^{b}\boldsymbol{\omega}_k+\boldsymbol{v}_g+{}^{b}\boldsymbol{b}_k \tag{6} $$

其中, ${}^{b}\boldsymbol{y}_k$ 为传感器输出值; ${}^{b}\boldsymbol{\omega}_k$ 为钻具的真实角速度; $\boldsymbol{v}_g$ 为陀螺仪的低频噪声; ${}^{b}\boldsymbol{b}_k$ 为陀螺仪的零偏。

三轴 MEMS 加速度计中测量信息包括钻具重力加速度、钻具振动加速度以及测量噪声,可建模为:

$$ {}^{b}\boldsymbol{f}_k={}^{b}\boldsymbol{g}_k+\boldsymbol{v}_a \tag{7} $$

其中, ${}^{b}\boldsymbol{g}_k$ 为钻具各轴的重力分量; $\boldsymbol{v}_a$ 为加速度计的高频噪声,这里主要是由钻具的振动和旋转引起的。

设计低通滤波器 $F_L(s)=\dfrac{C(s)}{s+C(s)}$, 高通滤波器 $F_H(s)=1-F_L(s)=\dfrac{s}{s+C(s)}$, $F_L(s)$ 和 $F_H(s)$ 就构成了互补滤波器。让加速度计信号通过 $F_L(s)$,让陀螺仪信号通过 $F_H(s)$, 最后再将通过互补滤波器的信号进行归一化处理得到互补滤波后的重力加速度为:

$$ {}^{b}\boldsymbol{g}(s)=\frac{|g_0|}{|{}^{b}\boldsymbol{g}|}\left(F_L(s){}^{b}\boldsymbol{f}_k+F_H(s)\frac{{}^{b}\boldsymbol{y}_k}{s}\right)= \frac{|g_0|}{|{}^{b}\boldsymbol{g}|}\left(\frac{C(s)}{s+C(s)}{}^{b}\boldsymbol{f}_k+\frac{s}{s+C(s)}\frac{{}^{b}\boldsymbol{y}_k}{s}\right)= \frac{|g_0|}{|{}^{b}\boldsymbol{g}|}\cdot\frac{C(s){}^{b}\boldsymbol{f}_k+{}^{b}\boldsymbol{y}_k}{s+C(s)} \tag{8} $$

由式(8)得到本文互补滤波器模型如图 2 所示。

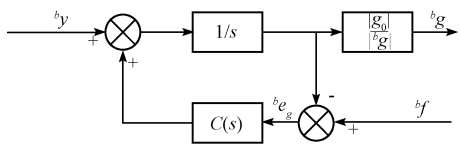


图 2　互补滤波器模型

Fig. 2　Complementary filter model

在此模型中,使用比例积分控制器对互补滤波器进行调节,取 $C(s)=k_p+\dfrac{k_i}{s}$, k_p 的大小决定互补滤波的截止频率,当 k_p 越小,陀螺仪起的作用越大;当 k_p 越大,加速度计起的作用越大; k_i 是积分环节的系数,积分环节的引入是为了消除陀螺中的零偏 ${}^{b}\boldsymbol{b}_{\mathrm{k}}$。

2.3　基于模糊算法的自适应系数

由于钻具的运动状态比较复杂,其运动状态的改变会影响传感器的噪声分布,式(7)中 $\boldsymbol{v}_a$ 包含振动和旋转带来的运动加速度,钻具的旋转速度变化会改变加速度计中噪声的频率分布。所以单一的预设参数无法使得滤波器的估计结果达到最优。

钻具的运动状态并不会对陀螺仪的零偏 ${}^{b}\boldsymbol{b}_k$ 造成太大影响,所以 k_i 预设为常数,通过 k_p 的动态调整实现对钻具运动状态的自适应。

钻具的旋转速度会影响非重力加速度的频率,一般来说旋转速度越快,非重力加速度频率越大,但当钻头空载时振动加速度影响较小,所以引入传感器检测到的非重力加速度的幅值综合判断钻具运动状态。基于此,为了提高本算法对钻具运动状态的适应性,通过模糊算法

不断检测非重力加速度幅值 vib 和钻具的旋转速度 rot，利用模糊规则表在线对互补滤波器的 k_p 参数进行调整，定义 Δk_p 为模糊算法的输出。

1)非重力加速度计算

使用加速度计测量值 ${}^b\boldsymbol{f}_k$ 减去陀螺仪测量值通过式(5)递推出的重力加速度 ${}^b\hat{\boldsymbol{g}}_k$ 得到非重力加速度为：

$$f_{\text{non_gravity,k}} = \frac{|{}^b\boldsymbol{f}_k - {}^b\hat{\boldsymbol{g}}_k|}{|g_0|} \tag{9}$$

定义一个长度为 n 的非重力加速度滑动窗口，取该滑动窗口的最大值作为非重力加速度的幅值：

$$vib_k = \max_{i\in[k,k-n-1]}(f_{\text{non_gravity},i}) \tag{10}$$

2)旋转速度计算

将旋转轴上的角速度经过低通滤波器后作为钻具的旋转角速度：

$$rot_k = \alpha\,{}^b y_{x(k)} + (1-\alpha)\,{}^b y_{x(k-1)} \tag{11}$$

3)模糊算法设计

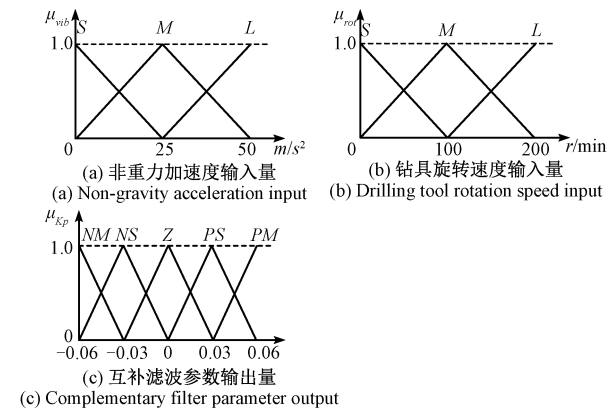
(1)输入量模糊化

设非重力加速度 vib 和旋转速度 rot 的模糊量的模糊子集都为{S,M,L}。S、M、L 分别代表小、中、大。将模糊算法的输出 Δk_p 的模糊子集设置为{NM,NS,Z,PS,PM}。NM、NS、Z、PS、PM 分别代表负大、负小、零、正小、正大。

通过实验确定 vib、rot、Δk_p 对应的模糊论域为：

$$\begin{cases} Vib = [0\ \text{m/s}^2 \quad 25\ \text{m/s}^2 \quad 50\ \text{m/s}^2] \\ Rot = [0\ r/\text{min} \quad 100\ r/\text{min} \quad 200\ r/\text{min}] \\ K_p = [-0.06 \quad -0.03 \quad 0 \quad 0.03 \quad 0.06] \end{cases} \tag{12}$$

选用图 3 所示的三角型函数作为隶属函数。使用图 3(a)和(b)的隶属函数将输入量模糊化，得到输入的模糊量和该模糊量所属的隶属度。



(a) 非重力加速度输入量
(a) Non-gravity acceleration input
(b) 钻具旋转速度输入量
(b) Drilling tool rotation speed input
(c) 互补滤波参数输出量
(c) Complementary filter parameter output

图 3 三角型模糊隶属函数

Fig. 3 Triangular fuzzy membership function

(2)建立模糊规则和模糊推理

规则表设置的基本原则为：

当 vib 较小时，增大 Δk_p 以增加对加速度计的信任；当 rot 和 vib 都比较大时，减小 Δk_p 以增加对陀螺仪的信任。

结合实验分析最终制定的模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

Table 1 Fuzzy rule table

互补滤波器参数 Δk_p		非重力加速度 vib		
		S	M	L
旋转速度 rot	S	PM	PS	NS
	M	Z	Z	NS
	L	Z	NS	NM

在模糊推理时认为模糊规则表中的每条规则的权重相等，And 计算选用隶属度最小的作为 Δkp_i 的隶属度，模糊推理的规则为：

If(vib is Vib) and (rot is Rot) then (Δk_p is Kp)

(3)反模糊化

最后，使用重心法解模糊器对模糊推理后的结果进行解模糊得到互补滤波器参数的补偿值 Δk_p。

$$\Delta k_p = \frac{\sum_{i=1}^{4}\Delta kp_i\mu_{Kp}(\Delta kp_i)}{\sum_{i=1}^{4}\mu_{Kp}(\Delta kp_i)} \tag{13}$$

其中，Δkp_i 是经过模糊推理得到的模糊量，$\Delta kp_i \in Kp$，μ_{Kp} 对应图 3(c)的隶属函数。

综上所述，本文提出的重力加速度提取算法总体框图如图 4 所示。图 3 中 ${}^b\hat{\boldsymbol{g}}_k$ 是陀螺仪测量值经过式(5)递推得到的，${}^b\hat{\boldsymbol{g}}_k$ 用来和 ${}^b\boldsymbol{f}_k$ 做叉乘计算误差向量 ${}^b\boldsymbol{e}_{g(k)}$，${}^b\boldsymbol{g}_k$ 是经过校正后的陀螺仪值再次经过式(5)递推得到的滤波后的重力加速度矢量。

3 实验及结果分析

本文实验基于 XSENS 公司的 MTI-3-8A7G6T 模块进行，实验过程中分别将传感器模块放置在旋转实验台和振动实验台上，记录传感器模块中加速度计和陀螺仪的原始信号，传感器模块采样频率为 100 Hz。之后再将传感器原始信号导入到 matlab 进行分析和实验。实验装置如图 5 和 6 所示。

3.1 旋转实验

旋转实验主要是为了检验算法的准确性。以传感器模块的 x 轴做为旋转轴，将传感器水平放置在旋转台上，即井斜角为 0°。调整旋转台的转速为 155 r/min，实验时间为 1 min 20 s。记录加速度计和陀螺仪的输出值，运

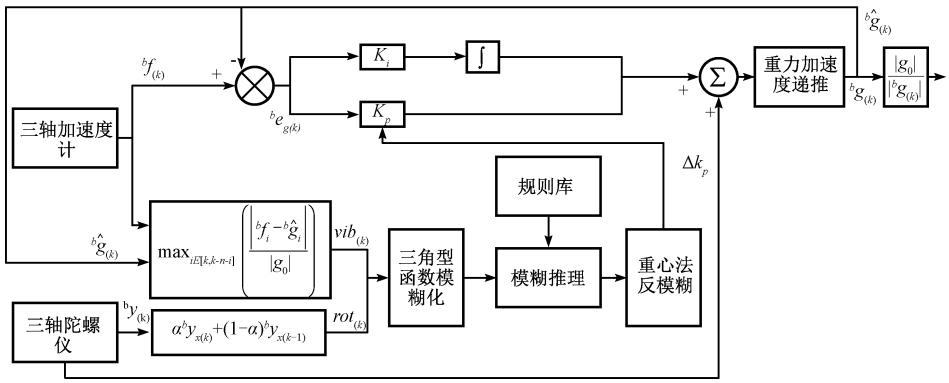


图 4　重力加速度提取算法总体框图

Fig. 4　General block diagram of the gravity acceleration extraction

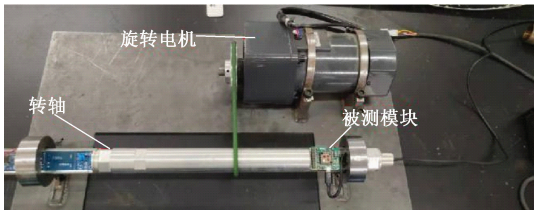


图 5　旋转实验台

Fig. 5　Rotating experimental device

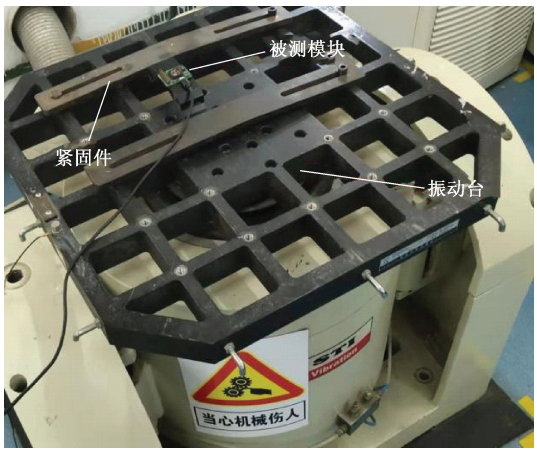


图 6　振动实验台

Fig. 6　Vibration experiment device

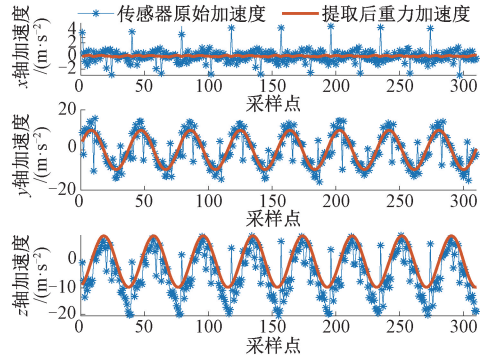


图 7　重力加速度提取算法运算结果

Fig. 7　The results of gravity acceleration extraction algorithm

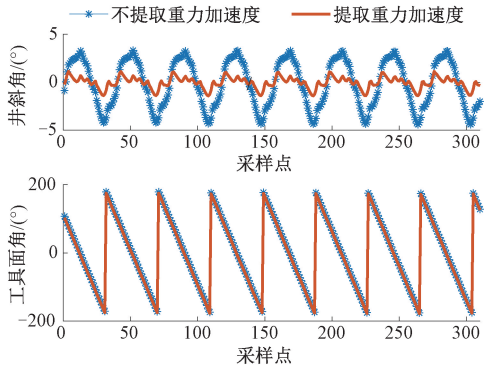


图 8　提取重力前后井斜角/工具面角对比

Fig. 8　Comparison of well deviation angle and tool face angle before and after gravity extraction

行本文算法提取重力加速度信号。将提取后的重力加速度和加速度计的原始加速度做对比,对比结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,本文算法可以克服旋转过程中的振动和离心加速度干扰,有效地将重力加速度信号提取出来。

为了进一步验证重力加速度提取的准确性,本文对比使用提取重力加速度和不提取重力加速度分别结合陀螺仪信号进行井斜角和工具面角的解算,姿态解算方法使用基于余弦矩阵的 EKF 算法[25],对比结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,经过本文算法提取重力加速度信号后计算出的井斜角相比于原始加速度信号解算的井斜角波动范围明显缩小,更接近于实际测试条件下的角度。以井斜角恒等于 0°为基准,不提取重力加速度的井斜角误差在 3.5°左右,提取重力加速度后的井斜角误差在 1.0°以内,误差明显减小。从工具面向角可以看到,提取

重力加速度前后解算出的工具面向角在相位上保持高度重合,并没有出现因为引入重力提取算法而使得数据计算滞后的情况发生。

3.2 振动实验

振动实验主要是为了检验算法的稳定性。实验中将传感器模块以 z 轴朝上,井斜角为-7.4°,工具面向角为0°的姿态放置在振动台上。调整振动台的振动幅度为50 m/s^2,将振动台的振动频率设置成从 10 Hz 上升到150 Hz,再从 150 Hz 下降到 10 Hz 的形式,振动时间为5 min 32 s。记录加速度计和陀螺仪的原始信号。

在振动台上,模块 3 个轴的重力分量都应该是一个常量,分别运行本文算法和基于 Kalman 框架的重力加速度提取算法[17],对比结果如图 9 所示。

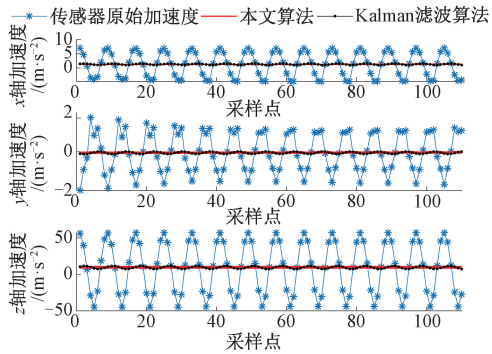


图 9 振动实验中不同重力提取算法对比

Fig. 9 Comparison of different gravity extraction algorithms in vibration experiment

此时振动台的振动频率为 13 Hz,从图 9 中可以看出,本文算法和基于 Kalman 的重力加速度提取算法都能有效从含有大量振动加速度的原始信号中提取出重力加速度信息。相比于基于 Kalman 的重力加速度提取算法本文算法提取出的重力加速度信号要更加的稳定。

为了进一步验证重力加速度提取的稳定性,继续保持传感器模块 z 轴朝上,井斜角为-7.4°,工具面向角为0°的姿态,分别利用加速度计原始信号、通过本文算法提取出的重力加速度信号、通过 Kalman 滤波提取出的重力加速度信号结合陀螺仪原始信号进行井斜角和工具面角的解算。计算出的姿态角对比结果如图 10 所示。

在振动过程中,模块的姿态是没有改变的,所以解算出的模块姿态应该要一直保持井斜角为-7.4°,工具面向角为 0°的姿态。从图 9 可以看出,在 100 个采样点(1 s)的周期内,使用加速度计原始信号解算出的井斜角漂移了 0.3°,使用经过 Kalman 滤波后的重力加速度解算出的井斜角漂移大于 0.05°,使用本文算法提取的重力加速度解算出的井斜角基本没有漂移,本文算法比 Kalman 算法解算的井斜角稳定。对于工具面向角,使用加速度计原始信号解算漂移了 0.5°,不能满足工程使用要求,而本文算法和 Kalman 算法表现接近,漂移均控制在 0.1°之内。

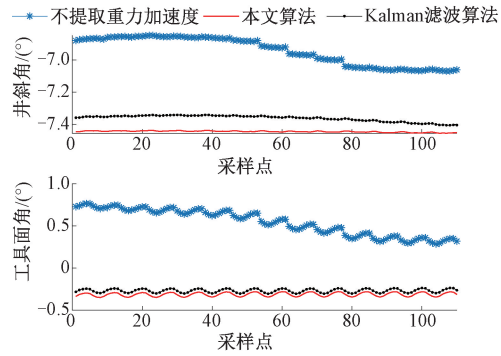


图 10 振动实验中不同算法的重力信号姿态解算

Fig. 10 Attitude calculation of gravity signal based on different algorithms in vibration experiment

为进一步量化 3 种方法解算出姿态角的稳定性,计算 5 min 32 s 内,共 31 954 个采样点,3 种方法在井斜角为-7.4°的误差均值和标准差。

从表 2 可以看出,使用本文算法和 Kalman 滤波算法提取出的重力加速度都能提高姿态角解算精度和稳定性。相比于 Kalman 滤波算法,本文算法计算出的井斜角的误差均值更小。

表 2 3 种方法对于井斜角的误差参数

Table 2 Error parameters of three methods for well deviation angle

方法	误差均值	误差标准差
不提取重力加速度	0.826 9	0.658 6
本文算法	0.006 8	0.037 9
Kalman 滤波算法	0.090 2	0.048 5

以 PC 机的 MATLAB 软件为测试平台,分别运行本文算法和基于 Kalman 框架的重力提取算法,在 MATLAB 中循环运行两种算法 1 000 次,计算两种方法的单次运行时间。以 stm32f103zet6 为测试平台,晶振的频率为 8 MHz,分别运行两种算法,计算两种方法的单次运行时间。运行时间对比如表 3 所示。

表 3 单次运行时间对比

Table 3 Comparison of single operation time

测试环境	方法	单次重力加速度提取耗费时间/ms
PC 机 MATLAB 软件	本文算法	0.038 3
	基于 Kalman 框架算法	0.056 3
stm32f103zet6 单片机	本文算法	0.849 6
	基于 Kalman 框架算法	4.337 1

从表 3 可以看出,在 PC 机的测试结果显示本文算法相比于基于 Kalman 滤波框架的重力加速度提取算法单次运算时间减少了 31.9%。在 stm32f103zet6 单片机的测试环境中本文算法相比于基于 Kalman 滤波框架的重力加速度提取算法单次运算时间减少了 80.4%。因为 Kalman 滤波中有矩阵乘法和矩阵求逆的过程,而 stm32f103zet6 单片机中没有浮点运算单元,所以在单片机的测试结果中基于 Kalman 框架的重力提取算法相比本文算法表现更差。

4　结　　论

本文算法解决了井下近钻头动态姿态测量过程中由于高速旋转、剧烈振动而导致加速度计不能测量出真实的钻具重力分量的问题。设计了一种基于互补滤波的重力加速度提取算法,并利用钻具旋转速度和非重力加速度幅值作为模糊算法输入,通过模糊算法综合判断钻具所处状态,动态调整互补滤波器的截止频率。实验结果表明,利用本文算法提取出的重力加速度信号进行姿态解算可以有效的提高姿态角的精度和稳定性。同时本文算法具有良好的实时性,在单片机上运行时间仅为 0.849 6 ms,有利于保证姿态解算的实时性,因此具有较好的工程应用价值。

参考文献

[1] 王岚. Φ63.5 mm 螺旋钻杆随钻定向测量系统[J]. 煤矿安全, 2019, 50(11): 128-131.
WANG L. Directional measurement system for Φ63.5 mm spiral drill pipe while drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(11): 128-131.

[2] XUE Q, LEUNG H, WANG R, et al. Continuous real-time measurement of drilling trajectory with new state-space models of Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 65(1): 144-154.

[3] 于浩. 基于 MEMS 的井眼轨迹随钻测量算法研究[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
YU H. Research on borehole trajectory measurement while drilling algorithm based on MEMS[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.

[4] 高怡, 汪跃龙, 程为彬. 抗差自适应滤波的导向钻具动态姿态测量方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(4): 437-442.
GAO Y, WANG Y L, CHENG W B. Dynamic attitude measurement method of guided drilling tool based on robust adaptive filtering[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2016, 24(4): 437-442.

[5] 周静, 赵毅, 李星, 等. 旋转导向钻井系统中振动加速度的消除方法[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 19-22.
ZHOU J, ZHAO Y, LI X, et al. Elimination method of vibration acceleration in rotary steering drilling system[J]. Petroleum Drilling & Production Technology, 2010, 32(2): 19-22.

[6] 王小龙, 张甲迪. 煤矿井下钻孔测斜原理及轨迹计算方法[J]. 煤炭技术, 2020, 39(1): 72-75.
WANG X L, ZHANG J D. Principle and trajectory calculation method of borehole inclination measurement incoal mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(1): 72-75.

[7] 张典荣, 李静, 张佳, 等. 新型多用钻孔测斜仪的研制及应用[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 224-229.
ZHANG D R, LI J, ZHANG J, et al. Development and application of a new multipurpose borehole inclinometer[J]. Journal of Xi′an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 224-229.

[8] 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. Multisensor least square principle weighted fusion method for near bit drilling tool attitude measurement[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 500-507.

[9] YANG J, CHAO L. A novel orientation recursive algorithm aiming at catastrophe signals in MWD[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(11): 9683-9692.

[10] ALAM M, ROHAC J. Adaptive data filtering of inertial sensors with variable bandwidth[J]. Sensors, 2015, 15(2): 3282-3298.

[11] YANG H, LUO T, LI L, et al. Research on drilling bit positioning strategy based on SINS MWD system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109398-109410.

[12] 张文秀, 陈文轩, 底青云, 等. 近钻头井斜动态测量重力加速度信号提取方法研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4174-4183.
ZHANG W X, CHEN W X, DI Q Y, et al. Research on the extraction method of gravity acceleration signal for near bit hole deviation dynamic measurement[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4174-4183.

[13] WANG M, TAYEBI A. Hybrid nonlinear observers for inertial navigation using landmark measurements[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(12): 5173-5188.

[14] BERKANE S, TAYEBI A. Attitude and gyro bias estimat-ion using GPS and IMU measurements[C]. 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2017: 2402-2407.

[15] LIGORIO G, SABATINI A M. A novel Kalman filter for human motion tracking with an inertial-based dynamic inclinometer[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 62(8): 2033-2043.

[16] 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.

[17] YANG J, YANG C, JIANG J. A robust Mag/INS-based orientation estimation algorithm for measurement while drilling[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7971-7980.

[18] 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 drill tool gravity information based on magnetic/inertial combination[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3331-3337.

[19] 卢艳军, 陈雨荻, 张晓东, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.
LU Y J, CHEN Y D, ZHANG X D, et al. Extending Kalman brook's information aggregation research based on method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 281-288.

[20] 陆欣, 刘忠, 谢宇, 等. 附加运动约束的 MEMS 惯性传感器融合定姿算法[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(1): 100-106.
LU X, LIU ZH, XIE Y, et al. MEMS inertial sensor fusion attitude determination algorithm with motion constraints[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(1): 100-106.

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

[22] 刘洪剑, 王耀南, 谭建豪, 等. 基于加速度变噪声 EKF 的无人机姿态融合算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 333-341.
LIU H J, WANG Y N, TAN J H, et al. UAV attitude fusion algorithm based on acceleration variable noise EKF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 333-341.

[23] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2020: 24-30.
YAN G M, WENG J. Jieli iortoction algorithm and combination navigation principles (third edition)[M]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University Press, 2020: 24-30.

[24] MAHONY R, HAMEL T, PFLIMLIN J M. Nonlinear comp-lementary filters on the special orthogonal group[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(5): 1203-1218.

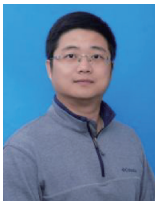
[25] HYYTI H, VISALA A. A DCM based attitude estimation algorithm for low-cost MEMS IMUs[J]. International Journal of Navigation & Observation, 2015, 2015: 1-18.

作者简介

韩冬,2019 年于内蒙古科技大学获得学士学位,现为西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为机器人状态估计。

E-mail: 752307975@ qq. com

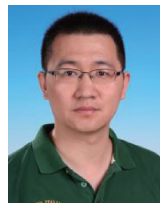
Han Dong received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Xidian University. His main research interest is robot state estimation.



孙伟(通信作者),2002 年于西安电子科技大学获得学士学位,2005 年于西安电子科技大学获得硕士学位,2009 年于西安电子科技大学获得博士学位,现为西安电子科技大学教授,主要研究方向为智能机器人及无人系统。

E-mail:wsun@ xidian. edu. cn

Sun Wei (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Xidian University in 2002, 2005, and 2009, respectively. He is currently a professor at Xidian University. His main research interests include intelligent robots and unmanned systems.



陈龙,2013 年于西安电子科技大学获得博士学位,现为中煤科工集团西安研究院有限公司副研究员,主要研究方向为随钻测量仪器研发。

E-mail: chenlong@ cctegxian. com

Chen Long received his Ph. D. degree from Xidian University in 2013. He is currently an associate researcher at Xi′ an Research Institute Co., Ltd. of China Coal Science and Industry Group. His main research interests include the research and development of MWD instruments.

连杰,2009 年于华东交通大学获得学士学位,2012 年于中煤科科工集团西安分院获得硕士学位,现为中煤科工集团西安研究院有限公司助理研究员,主要研究方向为钻探仪器研发。

E-mail:lianjie@ cctegxian. com

Lian Jie received his B. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2009 and received his M. Sc. degree from China Coal Science and Industry Group Xi′an Branch in 2012. He is currently an assistant researcher at China Coal Science and Industry Group Xi′an Research Institute Co., Ltd. His main research interests include drilling instrument research and development.