

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104311

随钻测量中井斜角测量误差的降噪方法*

杨金显 赵龙飞 仝小森 王小康

(河南理工大学 电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要:针对随钻测量中井斜角测量误差引起的姿态解算失真问题,提出基于卡尔曼滤波和互相关提取的联合估计方法。首先采用限幅滤波器对冲击噪声进行滤波,然后用卡尔曼滤波器去除大部分由振动引起的白化处理有色噪声,最后利用互相关检测的方法提取出准确的径切向重力加速度,并对轴向加速度进行平滑滤波,完成井斜角测量误差估计与补偿。经模拟实钻实验,结果表明井斜角测量误差在 0.1° 以内,该方法与传统方法相比,可以大大提高井斜角测量精度。

关键词:井斜角;卡尔曼滤波;互相关提取;限幅滤波;加速度

中图分类号: TN713

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.80

Noise reduction method of angle of inclination measurement error in MWD

Yang Jinxian Zhao Longfei Tong Xiaosen Wang Xiaokang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the problem of attitude resolution distortion caused by angle of inclination measurement errors in measurement while drilling, a joint estimation method based on Kalman filter and cross-correlation extraction was proposed. Firstly, a limiting filter is used to filter the impact noise, and then Kalman filter is used to remove most of the whitening noise caused by vibration. Finally, the cross-correlation detection method is used to extract the accurate radial tangential gravity acceleration, and the axial acceleration is smoothed, so as to complete the estimation and compensation of angle of inclination measurement error. Simulation experiments show that angle of inclination measurement error is less than 0.1° . Compared with traditional methods, this method can greatly improve the precision of deviation angle measurement.

Keywords: angle of inclination; Kalman filter; cross correlation extraction; amplitude limiting filtering; acceleration

0 引言

石油和天然气资源的深入开发,使得资源勘探和开发的难度逐步增大,因而对定向钻井轨迹测量精度的要求也越来越高。在钻井工程中,通常采用随钻测量(MWD)系统^[1]对井斜角、工具面角进行测量。为避免岩石破裂引起的振动干扰,通常在停钻下静态地测量钻具的姿态参数^[2]。这种测量方法能减小钻具振动所引起的噪声,然而却不能实现钻具姿态的实时连续动态测量^[3-4]。

针对传统的随钻测量系统在随钻测斜过程中数据延迟、信息不准确的缺点^[5-6],Kim等^[3]利用加速度计和磁

力计,结合局部重力场,提出了一种参考重力场修正重力加速度动态测量误差的方法。Wang等^[4]提出了一种结合轨迹预测模型的非线性滤波方法,利用轨迹预测模型^[8]对井斜角测量误差进行修正。薛启龙等提出的井斜角动态解算方法减少了钻柱振动对井斜方位解算结果的影响,但因只采用了滤波后的Z轴信号,信降低了解算精度^[9]。杨全进等^[10]采用改进无迹卡尔曼滤波方法对振动数据进行了处理,有效滤除姿态传感器中的干扰噪声,但因只考虑了轴向振动,该算法对复杂振动干扰依旧产生较大误差。王家进等^[11]提出的旋转姿态信号处理方法有效补偿了振动信号,但因增加的对置加速度计与测量加速度计安装的一致性和对称性难以做到完全补偿,进而降低了误差精度。钻井工作进行时,有效滤除传感

器输出信号中的振动噪声、冲击噪声和离心加速度噪声是提高测量精度的关键^[12-13]。为提高钻具测量精度,杨金显等提出了一种磁/惯性组合自适应地提取钻具重力信息的方法,该方法采用联合卡尔曼滤波来滤除振动噪声^[14],但由于未考虑钻具运动过程中冲击加速度和离心加速度引起的噪声干扰,因此钻具转速会对最终测量精度产生影响^[15]。Zhang 等^[16]提出了一种近钻头井斜动态测量重力加速度信号的提取方法,该方法虽然可以提取重力加速度并滤除一些干扰噪声,但是磁力计的输出信号作为参考信号时,会存在一定磁干扰噪声,使倾角测量的精度降低。

针对上述研究过程中存在的问题,提出了一种卡尔曼滤波^[17-18](KF)和互相关提取^[19-20]井斜角动态精确测量方法。首先,采用限幅滤波技术滤除冲击噪声;然后对加速度计、陀螺仪的有色噪声构建误差模型,通过 KF 滤波器过滤一部分干扰噪声,同时滤除磁干扰噪声。最后,以径向和切向磁性信号为参考信号,利用互相关原理提取精确的径向切向重力信号,并用平滑滤波过滤轴向重力分量,最终完成倾角的计算,来提高井斜角测量精度。

1 测斜原理影响因素

1.1 测斜原理

随钻测量单元由三轴加速度计、三轴磁力计和三轴陀螺仪构成,如图 1 所示,导航坐标系(N-系)常采用地理坐标系,即东北下坐标系(ONED 坐标系),用 $o-x_n y_n z_n$ 表示, $o x_n$ 指向东, $o y_n$ 指向北, $o z_n$ 垂直于水平面向下。钻具坐标系($o-x_b y_b z_b$),即载体坐标系 B 系,采用钻具轴线为 $o z_b$,加速度计、磁力计与陀螺仪的 X 轴、Y 轴、Z 轴分别沿着钻具坐标系的 X 轴、Y 轴、Z 轴安装。

井斜角是指钻具轴线与铅锤线之间的夹角,范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,利用三轴加速度的 X、Y、Z 轴分量 g_x 、 g_y 、 g_z ,可计算出井斜角 θ :

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{g_z} \quad (1)$$

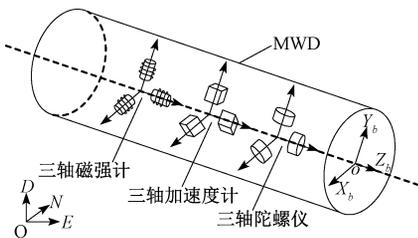


图 1 MEMS 安装图

Fig. 1 MEMS installation diagram

1.2 影响因素

当停止钻井时,测量数据不受振动、冲击、扭转等因素影响,数据准确,误差小。但是,当钻柱开始工作时,安装在钻头附近的测斜仪会受到很多因素的干扰,干扰信号为多个噪声的叠加。

钻具振动,钻头在钻进过程中,由于钻具与井壁、岩石的接触而产生的复杂振动。振动产生的信号为带宽很大的随机信号。

冲击加速度,由于钻头压力的不稳定,使得在切削岩石时产生很大的冲击性,冲击性信号通常呈现出峰值特征,而且是随机产生的。

因此,钻进过程中近钻头传感器动态测量的信号可表示为:

$$a_{dynamic} = a_c + a_v + a_s + a_g \quad (2)$$

式中: $a_{dynamic}$ 表示加速度测量数据; a_c 表示为离心噪声; a_v 表示振动噪声; a_s 表示冲击噪声, a_g 表示重力加速度。因此,可以通过滤除噪声的干扰来提高动态测量倾角的精度。

2 动态测量中重力加速度的提取

2.1 冲击信号的滤波

针对冲击信号可用滑窗法对三轴加速度计数据进行幅值限制。假设加速度在 n 时刻的增量为 Δa 则有:

$$\Delta a_n = a_{dynamic,n} - a_{dynamic,n-1} \quad (3)$$

r 是限幅滤波器的阈值:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^{n-1} \Delta a_{dynamic} \quad (4)$$

判断进行滤波:

$$\begin{cases} \Delta a = \Delta a_n, & |\Delta a| < |r| \\ \Delta a = r, & |\Delta a| \geq |r| \end{cases} \quad (5)$$

限制后,后续的信号数据输出到其他滤波器。

2.2 基于 KF 的有色噪声去除

三轴加速度计的动态测量存在着大量的噪声,然而陀螺仪具有短时精度高的特点,可以利用陀螺仪对加速度进行一步滤波。本文采用卡尔曼滤波来提取重力信号,然而由于非均匀旋转和复杂振动的影响,被测信号包含了大量的有色噪声,卡尔曼滤波只适用与白噪声的滤波器。为了从有色噪声中提取重力信号,本文将有色噪声白化后,再使用卡尔曼滤波来提取重力信号。

1) 建立卡尔曼滤波

首先将处于 B-系和 N-系中的向量 r 分别记为 r^a 和 r^b 。B-系相对于 N-系的转动角速度为 ω^b 。根据哥式方程, g 相对 N 系的变化率可以用其相对于 B-系的变化率表示出来:

$$\left. \frac{dg}{dt} \right|_n = \left. \frac{dg}{dt} \right|_b + \boldsymbol{\omega}^b \times \boldsymbol{g} \quad (6)$$

式中: $\left. \frac{dg}{dt} \right|_n$ 和 $\left. \frac{dg}{dt} \right|_b$ 分别为 \boldsymbol{g} 在 B-系和 N-系的时间变化率, \times 表示向量叉乘。

在短时钻进过程中, \boldsymbol{g}^n 几乎没有变化, 即 $\dot{\boldsymbol{g}}^n = 0$ 。所以可得到:

$$\boldsymbol{g}^b = -\boldsymbol{\omega}^b \times \boldsymbol{g}^b = -[\boldsymbol{\omega}^b \times] \boldsymbol{g}^b \quad (7)$$

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

设采样时间为 T_s , 将式(7)离散化得到:

$$\boldsymbol{g}_k^b = \exp(-[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^b \times] \times T_s) \boldsymbol{g}_{k-1}^b \quad (8)$$

由于陀螺仪测量时会存在误差干扰, 从而导致钻具钻进参数的预测值也不准确。三轴陀螺仪测量值记为 ${}^s y$:

$${}^s y = \boldsymbol{\omega} + {}^s \boldsymbol{w}^b \quad (9)$$

式中: ${}^s \boldsymbol{w}^b$ 为陀螺仪测量噪声, 根据公式(8)可得重力递推误差为:

$$\Delta \boldsymbol{g}_k^b \approx -T_s [\boldsymbol{g}_{k-1}^b \times] {}^s \boldsymbol{w}_{k-1} \quad (10)$$

其中, $[\boldsymbol{g}_{k-1}^b \times]$ 代表 \boldsymbol{g}_{k-1}^b 的反对称矩阵。

忽略传感器耦合误差, 加速度计在 k 时的输出可以建立式(11)所示模型。

$${}^a y = \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a} \quad (11)$$

式中: ${}^a y$ 三轴加速度计的输出数据; \boldsymbol{g} 重力加速度; \boldsymbol{a} 钻具误差加速度。当它们为白噪声时可建立如下方程:

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_k^1 = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^1 \boldsymbol{X}_{k-1}^1 + \boldsymbol{G}_k^1 \boldsymbol{W}_{k-1}^1 \\ \boldsymbol{Z}_k^1 = \boldsymbol{H}_k^1 \boldsymbol{X}_k^1 + \boldsymbol{V}_k^1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: \boldsymbol{X}_k^1 表示 KF 的状态向量; $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^1$ 表示 $k-1$ 时刻到 k 时刻钻具转动时的状态转移阵; \boldsymbol{G}_k^1 为随钻测量的噪声系数; \boldsymbol{Z}_k^1 代表观测向量; \boldsymbol{H}_k^1 代表测量矩阵; \boldsymbol{W}_{k-1}^1 和 \boldsymbol{V}_k^1 表示系统噪声和测量噪声。

当 ${}^s \boldsymbol{w}_{k-1}$ 和 \boldsymbol{a} 为有色噪声时, 建立如下所示的系统噪声模型和量测噪声模型, 对有色噪声进行白化处理, 建立误差模型:

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}_k^1 = \prod_{k,k-1} \boldsymbol{W}_{k-1}^1 + \boldsymbol{\xi}_k \\ \boldsymbol{V}_k^1 = \boldsymbol{\Psi}_{k,k-1} \boldsymbol{V}_{k-1}^1 + \boldsymbol{\delta}_k \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\xi}_k$ 和 $\boldsymbol{\delta}_k$ 被认为是零均值的高斯白噪声, 其方差分别为 Q_k^1 和 R_k^1 。

然后将噪声纳入状态量, 即:

$$\boldsymbol{X}_k^{1'} = [\boldsymbol{g}_k \quad \boldsymbol{a}_k]^T \quad (14)$$

此时转移矩阵为:

$$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} = \begin{bmatrix} \exp(-[\boldsymbol{\omega}_{k-1}^b \times] \times T_s) & -T_s [\boldsymbol{g}_{k-1}^b \times] \\ \boldsymbol{0} & \prod_{k,k-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

状态矩阵为:

$$\boldsymbol{X}_k^{1'} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} \boldsymbol{X}_{k-1}^{1'} + \boldsymbol{G}_k^{1'} \boldsymbol{\xi}_{k-1} \quad (16)$$

噪声系数为:

$$\boldsymbol{G}_k^{1'} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (17)$$

观测向量为:

$$\boldsymbol{Z}_k^{1'} = {}^a y_k \quad (18)$$

观测矩阵:

$$\boldsymbol{H}_k^{1*} = [I \quad 0] \quad (19)$$

将 $\boldsymbol{V}_k^1 = \boldsymbol{Z}_k^1 - \boldsymbol{H}_k^{1*} \boldsymbol{X}_k^{1'}$ 代入式(12)得:

$$\boldsymbol{Z}_k^1 - \boldsymbol{\Psi}_{k,k-1} \boldsymbol{Z}_{k-1}^1 = (\boldsymbol{H}_k^{1*} \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} - \boldsymbol{\Psi}_{k,k-1} \boldsymbol{H}_k^{1*}) \boldsymbol{X}_{k-1}^{1'} + \boldsymbol{H}_k^{1*} \boldsymbol{G}_k^{1'} \boldsymbol{\xi}_k + \boldsymbol{\delta}_k \quad (20)$$

为方便后续分析, 做如下定义:

$$\boldsymbol{Z}_k^{1'} = \boldsymbol{Z}_k^1 - \boldsymbol{\Psi}_{k,k-1} \boldsymbol{Z}_{k-1}^1 \quad (21)$$

$$\boldsymbol{H}_k^{1'} = \boldsymbol{H}_k^{1*} \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} - \boldsymbol{\Psi}_{k,k-1} \boldsymbol{H}_k^{1*} \quad (22)$$

$$\boldsymbol{V}_k^{1'} = \boldsymbol{H}_k^{1*} \boldsymbol{G}_k^{1'} \boldsymbol{\xi}_k + \boldsymbol{\delta}_k \quad (23)$$

量测方程可以写为:

$$\boldsymbol{Z}_k^{1'} = \boldsymbol{H}_k^{1'} \boldsymbol{X}_k^{1'} + \boldsymbol{V}_k^{1'} \quad (24)$$

其中, $\boldsymbol{V}_k^{1'}$ 与系统噪声 $\boldsymbol{\xi}_k$ 相关, 且相关系数矩阵为:

$$\boldsymbol{S}_k = \boldsymbol{Q}_k^1 (\boldsymbol{G}_k^{1'})^T (\boldsymbol{H}_k^{1*})^T \quad (25)$$

系统方程时间更新为:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}^{1'} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} \boldsymbol{X}_{k-1}^{1'} \\ \boldsymbol{P}_{k/k-1}^{1'} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} \boldsymbol{P}_{k-1}^{1'} (\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'})^T + \boldsymbol{G}_k^{1'} \boldsymbol{Q}_{k-1}^1 (\boldsymbol{G}_k^{1'})^T \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}^{1'}$ 代表一步状态预测矩阵; $\boldsymbol{P}_{k/k-1}^{1'}$ 代表一步预测均方误差阵; \boldsymbol{Q}_{k-1}^1 代表量测噪声方差。

系统方程的量测更新为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k^{1'} = [\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'} \boldsymbol{P}_{k-1}^{1'} (\boldsymbol{H}_k^{1'})^T + \boldsymbol{G}_k^{1'} \boldsymbol{S}_k] \\ \quad [\boldsymbol{H}_k^{1'} \boldsymbol{P}_{k-1}^{1'} (\boldsymbol{H}_k^{1'})^T + \boldsymbol{R}_k^1]^{-1} \\ \hat{\boldsymbol{X}}_k^{1'} = \hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}^{1'} + \boldsymbol{K}_k^{1'} \boldsymbol{e}_k^{1'} \\ \boldsymbol{P}_k^{1'} = \boldsymbol{P}_{k/k-1}^{1'} - \boldsymbol{K}_k^{1'} [\boldsymbol{H}_k^{1'} \boldsymbol{P}_{k-1}^{1'} (\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{1'})^T + \boldsymbol{S}_k^T (\boldsymbol{G}_k^{1'})^T] \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\boldsymbol{K}_k^{1'}$ 是卡尔曼滤波增益矩阵; $\hat{\boldsymbol{X}}_k^{1'}$ 是状态估计量; $\boldsymbol{e}_k^{1'}$ 是新息向量, $\boldsymbol{e}_k^{1'} = \boldsymbol{Z}_k^1 - \boldsymbol{H}_k^{1'} \boldsymbol{X}_{k-1}^{1'}$; $\boldsymbol{P}_k^{1'}$ 是后验估计误差协方差矩阵。

2.3 信号的互相关提取

加速度计传感器输出信号通过 KF 后仍存在一些难以去除的噪声信号。在加速度计安装固定后, 离心加速度信号的大小只随转速的变化而变化。鉴于重力加速度信号的径切向方向是周期信号, 本文采用了互相关提取

方法。

互相关提取可以测量两个时域信号的相似度,利用两个周期信号在不同时刻的相关关系,从随机产生的噪声信号中提取周期信号。设信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 是周期相同的信号, n_1 和 n_2 是随机信号,则有:

$$\begin{cases} S_1(t) = A\sin(\omega t + \varphi) \\ S_2(t) = B\sin(\omega t + \beta) \end{cases} \quad (28)$$

周期信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 叠加形成复合信号 M_1 和 M_2 :

$$\begin{cases} M_1 = S_1(t) + n_1 \\ M_2 = S_2(t) + n_2 \end{cases} \quad (29)$$

复合函数 M_1 和 M_2 是转速相同的周期函数,所以互相关函数 $R(\tau)$ 可以表示为:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_1(t-x)M_2(t) dt = \frac{AB\cos(\omega t + \varphi - \beta)}{2} \quad (30)$$

互相关运算能抑制随机信号 n_1, n_2 , 互相关函数 $R(\tau)$ 仅与周期信号的振幅和相位差有关。选取 KF 处理后的磁力计 X 轴输出信号 m_{x1} 作为加速度计 X 轴输出信号 g_x 的参考信号。将参考信号 m_{x1} 的振幅归一化, m_x 为振幅归一化后的信号, n_m 为 KF 处理后没有滤去的噪声, T_s 为采样周期, ω 为钻具转速。 m_{x1} 的信号为:

$$m_{x1}(k) = \cos(\omega k T_s) + n_m(k) = m_x(k) + n_m(k) \quad (31)$$

1) 重力的互相关提取

以 X 轴重力加速度为例,加速度计通过 KF 处理后沿 X 轴方向的输出的信号为:

$$g_{x1}(k) = A_x \cos(\omega k T_s + \varphi) + n_x(k) = g_x(k) + n_x(k) \quad (32)$$

式中: φ 是输出信号的初始相位; n_x 是没有过滤掉的噪声。结合式(31)与(32)进行互相关运算, X 轴的相关信号可计算为:

$$\bar{R}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g_{x1}(k + \tau) m_{x1}(k) = R_{g_x, m_x}(\tau) + R_{g_x, n_x}(\tau) + R_{m_x, n_m}(\tau) + R_{n_x, n_m}(\tau) \quad (33)$$

因为经 KF 处理后的 g_{x1} 与磁力计信号的噪声相关性很弱,滤波后的磁力计信号 m_x 与振动等引起噪声相关性也很弱,且磁力计误差与加速度计误差不相关,故 $R_{g_x, n_x}(\tau)$ 、 $R_{m_x, n_m}(\tau)$ 和 $R_{n_x, n_m}(\tau)$ 都近似为 0,因此:

$$\bar{R}_x(t) = R_{g_x, m_x}(\tau) = \frac{A_x \cos(\omega \tau + \varphi)}{2} \quad (34)$$

则:

$$g_x(t) = 2R_{g_x, m_x}(\tau) = A_x \cos(\omega \tau + \varphi) \quad (35)$$

同理,利用参考信号 m_y 提取 Y 轴重力加速度分量 g_y 。因为加速度计 Y 轴的输出信号和 X 轴的输出信号之

间的相位差异是 90° , 因此 Y 轴加速度分量互相关提取后为:

$$g_y(t) = 2R_{g_y, m_y}(\tau) = A_y \sin(\omega \tau + \varphi) \quad (36)$$

Z 轴方向的重力加速度是沿着钻杆的,故 Z 轴的输出信号不受钻柱旋转的影响。根据 Z 轴信号与振动冲击干扰的频带差以及电路噪声的随机性,采用平滑滤波器提取 Z 轴加速度分量信号。

基于上述近钻头动态重力加速度提取原理如图 2 所示。

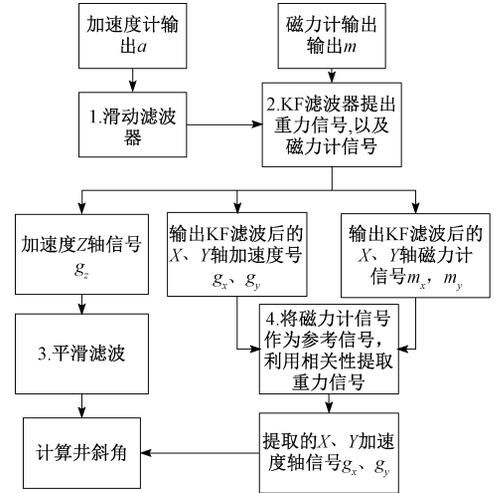


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 实验测试与分析

为了验证随钻重力信号提取算法的有效性,设计模拟钻进实验。实验所需设备有某型工程用小型钻机, MEMS 随钻测量模块和模拟地质层等。为模拟高温时的钻进,采用不注水冷却的方式,钻进时钻具温度很高,故将随钻测量核心模块隔热处理后固定在小型钻机钻杆上,随钻杆一起转动;另外,虽然井下存在压强较大,但对钻具振动影响较小,可以不考虑;改变不同的钻压和钻速模拟外界施加激励时产生的振动如图 3 所示;钻具在大理石、花岗岩、青石和混叠层等不同地质的情况下进行钻进采集数据,用不同介质表征钻具在不同层中的振动情况。

实验开始前调整钻杆的位置为井斜角 30° , 转速为 20 rad/s , 采样频率为 50 Hz , 采集一段时间的加速度、角速度及磁场数据。选取其中 20 s 数据进行处理。三轴加速度计输出的原始信号如图 4 所示,然后采用 KF 对加速度磁力计信号进行滤波,如图 5、6 所示,图 5 为 KF 滤波前后的对比,图 6 为磁力计信号 KF 滤波后 X、Y 轴单位化。从图 5 可以看出, KF 滤波后加速度仍存在一定噪声,然后采用互相关提取 X、Y 轴信号,对 Z 轴进行平滑



图 3 实钻信号

Fig. 3 Real drilling signal

滤波,如图 7 所示,从图 7 可以看出,消除大部分噪声。最后计算井斜角,如图 8 所示,从图 8 可以看出,仅用互相关提取法和仅用 KF 法提取重力加速度计算出的井斜精度明显低于 KF+互相关提取法计算出的井斜精度。本文方法计算的井斜角误差在 $\pm 0.1^\circ$ 内,明显优越其他两种方法。

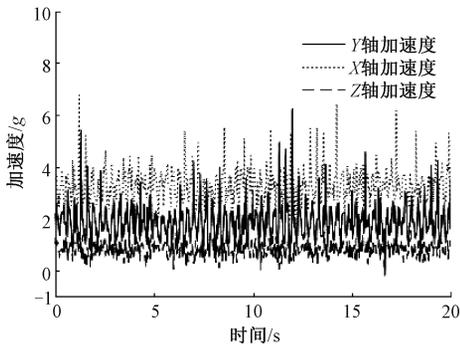
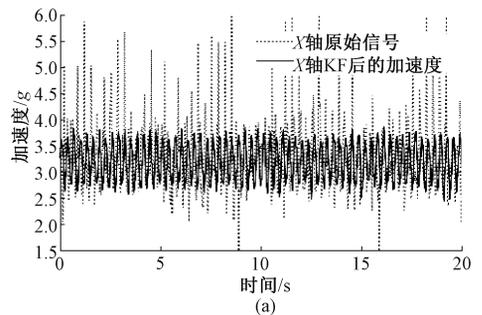


图 4 三轴加速度输出信号

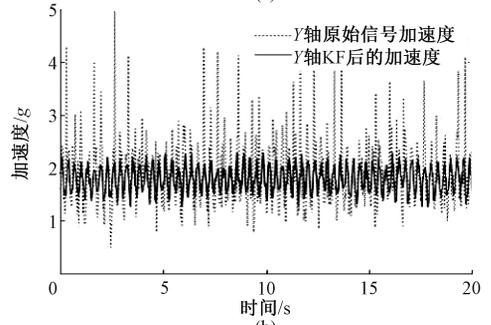
Fig. 4 Triaxial acceleration output signal

4 结论

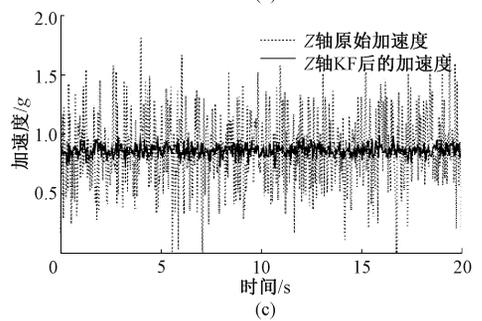
在近钻头动态测斜过程中,由离心加速度、振动加速度、冲击加速度这三个信号组成的噪声信号与重力加速度信号叠加,传统滤波方法难以滤除噪声信号。本文首先使用滑动窗口过滤冲击信号,然后用 KF 过滤由振动引起的加速度,用 KF 处理过的磁力计信号作为参考信号。采用互相关提取径向和轴向重力加速度,对于 Z 轴加速度采用平滑滤波进一步去噪。通过实钻模拟实验,在动态测试下,计算出的井斜角精度优于 0.1° 。现场数据测试结果表明,该方法能有效抑制干扰噪声,传统上仅使用 KF 或仅使用互相关提取法,动态测量井斜角的精度只能达到 0.4° ,与传统方法相比,该方法能大幅度提高井斜角的测量精度,具有一定的优点和工程应用价值。本文利用平滑滤波提取 Z 轴重力加速度信号,由于难以保证 Z 轴在安装时绝对平行于钻具旋转轴,这使得 Z 轴



(a)



(b)



(c)

图 5 KF 滤波后的对比

Fig. 5 Comparison diagram after KF filtering

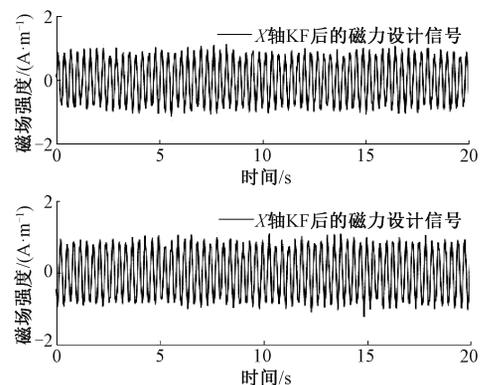


图 6 磁力计 KF 滤波后单位化的信号

Fig. 6 Unified signal of magnetometer after KF filtering

重力加速度信号会受到离心加速度分量的影响,最终影响井斜角动态测量的精度。另外,实验室振动和旋转测试条件与实际钻井仍有差别,下一步将通过开展实际钻井环境试验以验证本文方法对井斜角动态测量精度的实用性。

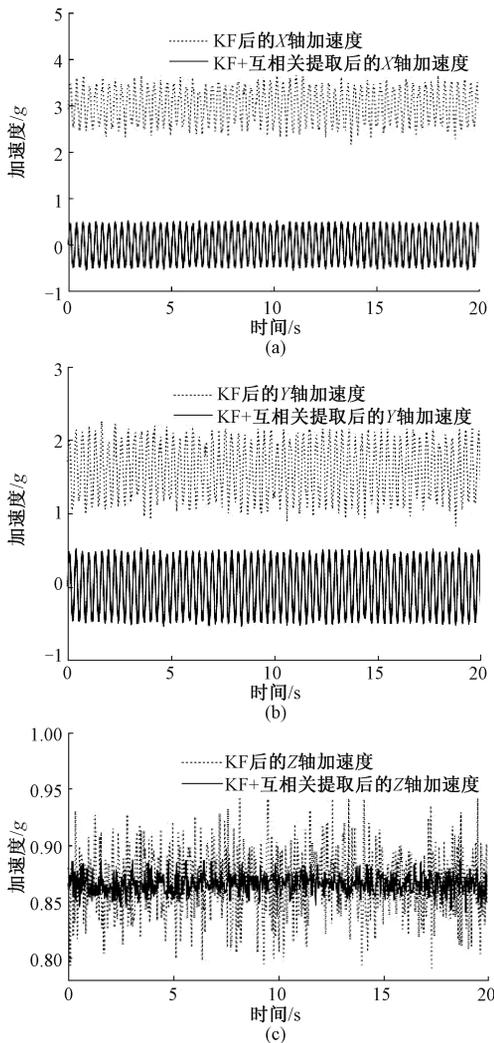


图 7 KF 滤波与本文方法的对比

Fig. 7 Comparison diagram of KF filtering and the method presented in this paper

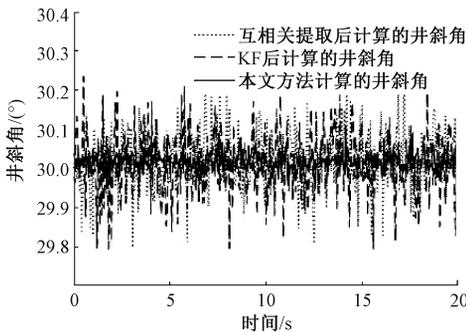


图 8 不同方法计算井斜角的比较

Fig. 8 Comparison of well inclination calculated by different methods

参考文献

[1] 冯其涛,耿艳峰,郑重,等. 基于钻井液的随钻声波数

据传输技术 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (3): 106-113.

FENG Q T, GENG Y F, ZHENG ZH, et al. Sonic data transmission technology while drilling based on drilling fluid [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3):106-113.

[2] 李璜,马文博,李璐. 互补滤波在低成本四旋翼姿态解算中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 157-162.

LI H CH, MA W B, LI L. Application of complementary filtering in low cost quadrotor attitude solution [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(11):157-162.

[3] KIM J W, VARCOE B E, PETROVIC J. System and method for determining a borehole azimuth using gravity in-field referencing: US, 20150143889 [P]. 2015-5-28.

[4] WANG L, LI P, WANG Y, et al. Drilling trajectory survey technology based on 3D RISS with a single fiber optic gyroscope [J]. Optik, 2019, 203(1): 1-14.

[5] 汤楠,霍爱清,汪跃龙,等. 旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究 [J]. 石油学报, 2008 (2): 284-287.

TANG N, CUI A Q, WANG Y L, et al. Experimental study on control function of rotary steerable drilling tool stabilization platform [J]. Journal of oil, 2008 (2): 284-287.

[6] 周春,刘白雁,龚勋. 井下实时测斜的理论分析与实验研究 [J]. 中国测试, 2009, 35(6):1-4.

ZHOU CH, LIU B Y, GONG X. Theoretical analysis and experimental study of downhole real-time inclinometry [J]. The Chinese Test, 2009, 35(6): 1-4.

[7] 孙峰,吕官云,马清明. 捷联式自动垂直钻井系统 [J]. 石油学报, 2011, 32(2):360-363.

SUN F, LV G Y, MA Q M. Strapdown automatic vertical drilling system [J]. Journal of Oil, 2011, 32 (2): 360-363.

[8] 邵佩,刘白雁,苏义脑,等. 垂直钻井工具测斜仪精确校正理论与实验 [J]. 石油学报, 2012, 33 (4): 692-696.

SHAO P, LIU B Y, SU Y N, et al. Accurate calibration theory and experiment of vertical drilling tool inclinometer [J]. Journal of Oil, 2012, 33(4):692-696.

[9] 薛启龙,王瑞和,孙峰,等. 捷联式旋转导向井斜方位动态解算方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(3):93-97, 107.

XUE Q L, WANG R H, SUN F, et al. Dynamic calculation method for the inclination of strap-down rotary steering shaft. [J]. Journal of China University of

- Petroleum (Natural Science Edition), 2012, 36(3):93-97,107.
- [10] 杨全进,徐宝昌,左信,等. 旋转导向钻具姿态的无迹卡尔曼滤波方法[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1168-1175.
YANG Q J, XU B C, ZUO X, et al. Unscented Kalman filter method for rotary steerable drilling tool attitude[J]. Journal of Oil, 2013, 34(6): 1168-1175.
- [11] 王家进. 测斜仪旋转姿态测量信号处理方法[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 110-115.
WANG J J. Signal processing method of inclinometer rotation attitude measurement [J]. Oil Drilling Technology, 2013, 41(4): 110-115.
- [12] 孙云涛,底青云,张文秀,等. 基于MEMS加速度计的近钻头动态井斜测量[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(12): 134-135.
SUN Y T, DI Q Y, ZHANG W X, et al. Dynamic borehole deviation measurement near bit based on MEMS accelerometer [J]. Chinese Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2017, 37(12): 134-135.
- [13] YANG Y, LI F, WANG Y L, et al. Research on the cooperative detection of stochastic resonance and chaos for weak SNR signals in measurement while drilling [J]. Sensors, 2021, 21(9): 3011-3019.
- [14] YANG J X, CHUANG Y, JIANG J B. A robust Mag/INS-based orientation estimation algorithm for measurement while drilling [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7971-7980.
- [15] XUE Q L, WANG R H, SUN F, et al. Continuous measurement-while-drilling utilizing strap-down multi-model surveying system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(3): 650-657.
- [16] ZHANG W X, CHEN W X, DI Q Y, et al. An investigation of the extraction method of gravitational acceleration signal for at-bit dynamic inclination measurement [J]. Acta Geophysica Sinica, 2017, 60(11): 4174-4183.
- [17] 刘春,卫吉祥,李维华,等. 改进的自适应卡尔曼滤波在北斗伪距单点定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 142-148.
LIU CH, WEI J X, LI W H, et al. Research on improved adaptive Kalman filter in Beidou pseudo-range single point positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 142-148.
- [18] 陈一鸣. 基于卡尔曼滤波的陀螺仪随机误差分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 97-100.
CHEN Y M. Random error analysis of gyroscope based on Kalman filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 97-100.
- [19] DUMITRIU M. Fault detection of damper in railway vehicle suspension based on the cross-correlation analysis of bogie accelerations [J]. Mechanics and Industry, 2019, 20(1): 102.
- [20] AMMAZZALORSO S, GRUEN D, REGIS M, et al. Detection of cross-correlation between gravitational lensing and γ rays [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(10): 101102.

作者简介



杨金显, 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、电网运动和变形监测中的应用研究。

E-mail: yangjinxian@hpu.edu.cn

Yang Jinxian 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 at Henan Polytechnic University. His main research interests include inertial measurement and its application in MWD, power grid movement and deformation monitoring.



赵龙飞, 2019年于河南工程学院获得学士学位, 现为河南理工大学硕在读研究生, 主要研究方向为随钻测量磁力计误差补偿研究。

E-mail: zlf1293672572@163.com

Zhao Longfei received B. Sc. From Henan University of Engineering in 2015. Now he is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. His main interest includes error compensation of magnetometer for measurement while drilling.