

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407833

MEMS 加速度计在采煤机摇臂上的倾角检测研究*

陈子千¹ 庄德玉²

(1. 煤炭科学研究总院 北京 100020; 2. 天地上海采掘装备科技有限公司 上海 201401)

摘要: 为满足采煤机在井下开采工况的安全采高控制需求,解决传统摇臂倾角检测方法如油缸行程位移法和编码电位器旋转测距法,存在因摇臂铰接轴长期磨损导致精度和可靠性下降,且维修困难的问题。因此,提出了基于微机电系统(MEMS)加速度计的采煤机摇臂倾角检测方法。首先,为抑制强振动工况下的高频高幅值振动噪声,提高倾角测量精度,采用临界阻尼法和组合积分法对加速度计三轴原始数据进行滤波处理,成功分离并提取出有效的重力加速度数据并得到角度;其次,通过搭建摇臂振动模拟实验台获取滤波处理后的数据,实现了振动环境下的动态倾角辨识,有效地提高了角度测量精度。实验结果表明,在 5g 振动环境下,两种滤波器设计具备较快的响应速度,能够迅速跟踪输入信号变化,经过组合积分滤波器后角度误差小于 0.3°,经过临界阻尼滤波器后角度误差小于 0.1°,测量精度能够满足实际摇臂采高需求,为实现摇臂倾角检测提供一种可行的方法。

关键词: 采煤机摇臂; MEMS 加速度计; 组合积分滤波; 临界阻尼滤波; 倾角检测

中图分类号: TN98; TD63 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on inclination angle detection of MEMS accelerometer on shearer rocker arm

Chen Ziqian¹ Zhuang Deyu²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100020, China; 2. Tiandi Shanghai Mining Equipment Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China)

Abstract: To address the challenge of maintaining accurate and reliable height control of shearers' rocker arms under underground mining conditions, this study proposes an improved method for detecting inclination angles using a MEMS accelerometer. Traditional detection methods, such as the cylinder stroke displacement and coded potentiometer rotation ranging techniques, are prone to decreased accuracy and reliability due to long-term wear on the rocker hinge shafts and difficult maintenance. In this work, we introduce filtering strategies designed to mitigate high-frequency and high-amplitude vibration noise encountered in harsh vibration environments, thereby enhancing measurement accuracy. Specifically, the critical damping method and combined integration approach are employed to process the raw triaxial data from the accelerometer, effectively isolating and extracting useful gravitational acceleration data to determine the angle. A simulation experiment platform was constructed to replicate the vibration conditions experienced by the rocker arm. Through this platform, dynamic inclination angle identification within a vibrating environment is achieved, significantly improving angle measurement accuracy. The experimental results indicate that in a 5g vibration environment, both filter designs exhibit faster response speeds and can rapidly track changes in the input signal. After applying the combined integral filter, the angle error is less than 0.3°, and after the critical damping filter application, the angle error is reduced to less than 0.1°. This level of precision satisfies the actual demand for controlling the mining height of the rocker arm. The proposed method provides a feasible solution for detecting the inclination angle of the shearer's rocker arm, offering enhanced accuracy and reliability without being affected by mechanical wear or maintenance challenges, thus contributing to safer and more efficient mining operations.

Keywords: shearer rocker arm; MEMS accelerometer; combined integral filter; critical damped filter; inclination detection

收稿日期: 2024-09-18 Received Date: 2024-09-18

* 基金项目: 国家发展和改革委员会项目(0732118)、中国煤炭科工集团总公司青年创新创业项目(2022-2-TD-QN005)资助

0 引言

采煤机采高智能控制是近些年煤矿机械实现智能化的研究方向之一^[1-2]。高精度的滚筒高度值获取是采煤机智能采高和自动记忆截割的关键。滚筒高度的精确控制直接决定了开采效率和资源利用率,同时也关乎到设备的安全性和可靠性。若滚筒的位置高度调整得过于保守会造成切割过少,导致煤层开采不充分,造成资源的浪费;若滚筒高度过大则会切割顶底板,加剧截齿的磨损,也会造成采煤机机械、液压及电气系统零部件的损坏,进而影响整机的可靠性。对于高瓦斯矿井,切割顶底板岩石产生的火花,极易引起瓦斯爆炸,造成煤矿事故。

加速度计是一种能够测量全范围倾斜角的工具,被称为倾角计或倾斜仪。加速度计利用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术以三轴 MEMS 加速度传感器为核心测量器件,获取三轴加速度大小。加速度计分为动态和静态两类。静态加速度计用于测量静态条件下的倾角,主要关注高精度和稳定性两项指标。动态加速度计用于动态角度的测量,保证角度测量的实时性和可靠性,主要应用于倾斜监测、各种工程机械角度控制等场景,在建筑工程、机械工业、航空航天和地质勘测等领域发挥着重要的作用。苑博^[3]为提高基于 MEMS 加速度计的柔性测斜仪在岩土工程监测中的测量精度和稳定性,开展了加速度传感器零偏误差、刻度因子误差、非正交误差、温度漂移误差和系统安装误差校准技术的研究。许祥等^[4]提出了基于 MEMS 的振动与倾角监测系统方案,满足了岩质边坡振动与倾角在线监测的实际需求。修睿等^[5]针对加速度计受线加速度影响不适合跟踪动态角运动、陀螺仪受漂移影响存在误差累计的问题,设计了一种融合滤波算法,得到高精度载体水平姿态信息。闫琦等^[6]针对以 MEMS 加速度计制成的倾角传感器在倾角测量中易受到载体振动噪声干扰的问题,提出了基于自适应噪声完全集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)和奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)结合的 MEMS 加速度计信号降噪方法。

加速度计测倾角在国内煤矿机械设备上应用起步较晚,尽管已有原理类的倾角计初步应用于采煤机姿态检测领域^[7-9],但是将加速度计应用于采煤机摇臂采高检测仍存在下列问题。

1) 影响加速度计测量精度校准的因素多,校准困难。加速度计测量存在系统安装误差、零偏误差等^[10],都会影响测量精度和可靠性,导致井下人员难以判断滚筒的实际高度情况。

2) 井下使用环境复杂,加速度计的精度及稳定性易

受温度影响^[11-12]。MEMS 加速度传感器材料及测量电路元件的性能易受温度变化影响,所以对加速度计必须进行温度补偿,这对于提高温度变化条件下加速度计的测量精度和长期稳定性有重大意义。

3) 缺乏对加速度计测量精度校准和温度补偿的实验测试。加速度计在井下工作周期较长,而且目标倾角的角度变化具有随机性,必须在实验室进行充分验证分析方可投入工程实际应用。由于加速度计结构特殊且测量方式固定,现阶段对加速度计测量精度的验证方法匮乏,验证装置的精度较低,无法充分满足加速度计测量精度的验证需要^[13]。

目前,常用的测量滚筒高度的方法按传感器种类可分为位移传感器和角度传感器。其中位移传感器主要安装于调高油缸内部,根据不同型号的采煤机机械结构建立数学模型,依靠连接件的位移距离计算得到位移距离和滚筒高度的关系曲线。但是,该方法获取滚筒高度的计算过程重复繁琐,效率低。角度传感器主要安装在采煤机摇臂销处,用其直接获取采煤机摇臂摆角值得到滚筒高度值,但该方法受井下环境条件影响,故障率较高。同时,摇臂销处连杆机构容易磨损,会导致获取的滚筒高度值可靠性会降低,出现测量死区^[14]。

本文聚焦于 MEMS 加速度计在采煤机采高检测中的应用,旨在通过这一新型的测量手段,解决传统方法存在的弊端。加速度计以其安装简便、成本低廉、实时性强等优势,在多种工程领域已展现出良好的应用前景。在采煤机采高检测中,通过加速度计精确测量摇臂倾角,并据此计算滚筒高度,不仅能够有效提升检测精度和可靠性,还能为采煤机的自主调高和智能截割提供有力的数据支持。

此外,鉴于井下作业环境的复杂性和强振动工况对测量精度的影响,本研究特别设计了一种高效的低通滤波算法,用于抑制高频高幅值的振动噪声,以确保加速度计数据的准确性和可靠性。通过这一系列创新性的研究与设计,为采煤机采高检测提供一种更加精准、可靠且智能的解决方案,推动煤矿开采向更高水平的自动化和智能化迈进。

1 采煤机滚筒切高高度测量

1.1 采煤机摇臂倾角检测系统模型

常见的采煤机由左右两个摇臂及滚筒构成,其左右摇臂角度测量原理大致相同,如图 1 所示。

对左摇臂进行分析,采用一摇臂两加速度计的方法分别测量得到摆动轴与水平线之间的夹角 θ_1' 和采煤机机身倾角 θ (采煤机左摇臂低时为正)。这样,采煤机摇臂摆动轴与机身的夹角 θ_1 可由式(1)计算得出。

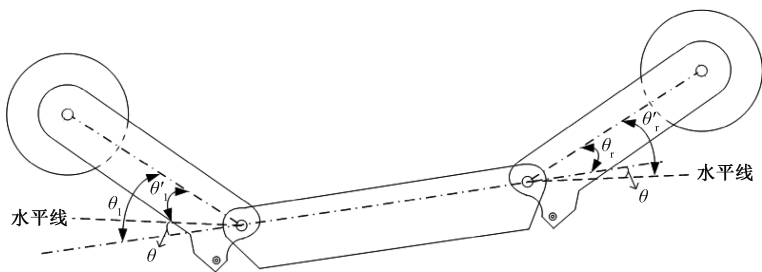


图 1 采煤机摇臂结构

Fig. 1 Shearer rocker arm structure diagram

$$\theta_1 = \theta_1' + \theta, 0^\circ < \theta_1 < 90^\circ \quad (1)$$

为了提高实时测量的采高数据的可靠性,在滚筒截煤过程中,此时摇臂会发生剧烈振动,会使加速度计测量受到干扰,导致数据失真,需要对加速度计原始信号数据进行滤波得到倾角。为保证结果的准确度,摇臂倾角计算公式改为:

$$\theta_1 = f(\theta_1') + f(\theta) \quad (2)$$

其中, $f(\theta)$ 是滤波作用后的结果,本文分别使用临界阻尼低通滤波器和组合积分低通滤波器完成加速度计原始信号数据滤波。

在采煤机运行的过程中,需要计算并记录好最终的摇臂倾角,利用滤波后的倾角 θ 得到采煤机的滚筒上切高高度 h ,如式(3)所示。

$$h = R + l \sin \theta_1 \quad (3)$$

其中, R 为采煤机滚筒半径。图 1 中可以近似将滚筒中心 A 到摇臂回转中心 B 的直线距离 l 看作摇臂摆动轴的长度。摇臂摆动轴的长度通常为 $3.5 \sim 7$ m,大采高采煤机的摇臂摆动轴长度可达到 8 m。

由于外部干扰的真实存在,滤波后加速度计测量的倾角值会与真实倾角值存在误差。因此将摇臂倾角 θ_1 的测量误差记为 θ_e ,由式(3)可推出滚筒上切高高度误差变化量 Δh 为:

$$\Delta h = l | \sin(\theta_1 + \theta_e) - \sin(\theta_1) |, \theta_e > 0 \quad (4)$$

可以看出,当 l 不变时, θ_e 越大, Δh 就越大。因此,提高摇臂倾角的测量精度,减小测量误差,可以防止滚筒高度 h 出现较大误差而造成不必要的后果。

2 井下加速度计倾角测量

在井下全球定位系统(global positioning system, GPS)信号失效的环境下进行采煤作业时^[15],采煤机会根据不同的煤层厚度对摇臂倾角进行调节,从而进行不同的采煤作业。通过在采煤机机械摇臂上安装加速度计,能够及时准确检测摇臂角度动作信号,并通过数字方式,将监测到的摇臂倾角数据传送到操作系统,方便操作人员及时调整设备姿态。通常情况下,加速度计的测量

误差每增加 1° ,就会导致采煤机的最大采高误差增加 0.175 m^[16]。由于井下作业对采高误差敏感,提高加速度计测量精度对于减小采高误差、保障安全至关重要。

2.1 测量原理

加速度计主要测量重力加速度值,当发生偏移时,重力加速度在 X 轴与 Y 轴上产生分量。在相对静止情况下 X 轴、 Y 轴相对水平面的偏移角度与加速度之间的关系为:

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (6)$$

加速度计对高频高幅值振动噪声十分敏感,由于重力方向保持不变,在静止状态下角度值是通过加速度计得到的重力加速度作为参考量进行计算的。加速度计数据只能在模数接近重力 G 时直接使用:

$$|G| = G_x^2 + G_y^2 + G_z^2 = 1 \quad (7)$$

当被测物处在强振动环境时,会使加速度计引入大量振动干扰噪声,导致测量精度下降。此时,加速度计会检测到包含干扰噪声和重力加速度的复合信号,需要滤波提取出复合信号中有效的重力加速度特征参数,进而计算得到角度。

为了解决这个问题,本文结合实际井下工况环境,为加速度计配置了两种不同的低通滤波,消除井下振动环境带来的干扰噪声源,保证在强振动、运动环境下采煤机摇臂倾角测量值的稳定性与可靠性。

3 加速度计的滤波算法

在采煤机开采过程中,摇臂在进行升降动作及割煤动作中会伴有振动,图 2 所示是某型号采煤机摇臂在井下空转 1 min 的振动信号。其中图 2(a)为摇臂在 X 轴的振动信号;图 2(b)为摇臂在 Y 轴的振动信号;图 2(c)为摇臂在 Z 轴的振动信号。

可以看出在采煤机空转状态下,摇臂臂身的振动

强度一般在 10 g 左右,最高可以达到 20 g 以上。臂身会向加速度计传递剧烈的振动,若经过有效处理加速度计输出的角度值明显波动,无法用于采煤机摇臂倾角测量。

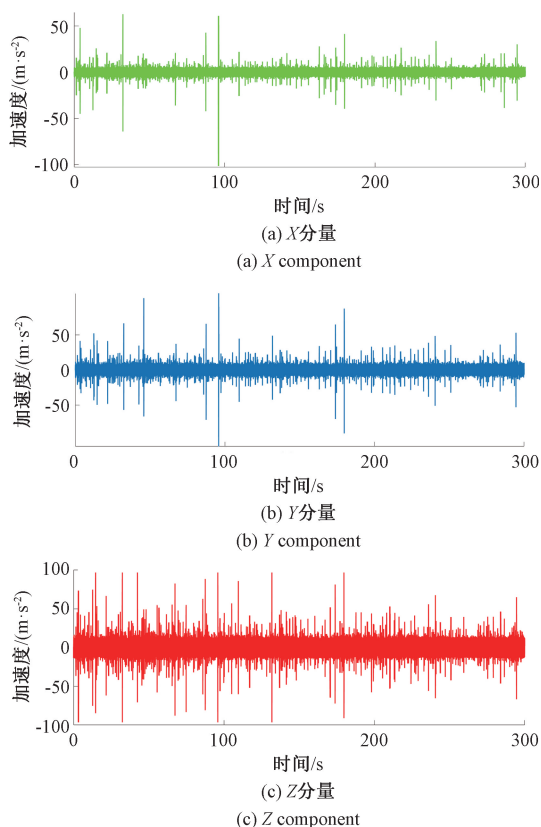


图2 采煤机空转时摇臂振动信号

Fig. 2 Vibration signal of rocker arm when shearer idles

进一步分析空转时摇臂振动信号(Z 分量)的频率域特征,得出归一化频谱曲线,如图3所示。可以看出,摇臂振动信号的主频为 $1\,198.35\text{ Hz}$,通过计算频率概率密度,得到摇臂振动信号频率成分主要集中在 $2\,000 \sim 3\,000\text{ Hz}$,其中低于 5 Hz 的比例为 0.005% , $5 \sim 100\text{ Hz}$ 的比例为 0.4% , $100 \sim 1\,000\text{ Hz}$ 的比例为 10.8% , $1\,000 \sim 2\,000\text{ Hz}$ 的比例为 20.7% , $2\,000 \sim 3\,000\text{ Hz}$ 的比例为 47.9% 。进而发现摇臂振动信号主频范围比较高,即干扰信号主要为高频噪声信号。

实际上,摇臂运动过程中倾角的变化是连续且缓慢的,一般采煤机摇臂从最低处摆至最高处,空载时最快要十几秒,摆动频率在 0.1 Hz 以下,属于低频信号。为了获取实际反映摇臂倾角变化的真实数据,提高加速度计的数据精度,对于输出信号频率高于 0.1 Hz 的可以认为是干扰信号,需要进行低通滤波,因此本研究分别结合临界阻尼法和组合积分法来实现对信号的低通滤波。

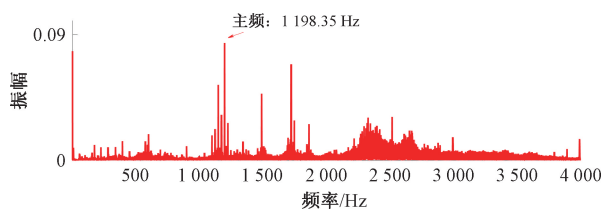


图3 采煤机摇臂信号归一化频谱曲线

Fig. 3 Shearer rocker arm signal normalized spectrum curve

3.1 临界阻尼法

临界阻尼是控制系统中十分特殊的一种阻尼情况,它能使系统在遇到干扰或者振动的情况下快速恢复到平衡状态,其具有脉冲响应和阶跃响应均不振荡,且不含过度振荡的特点,因此被广泛运用在很多领域,例如电子通信、生物医学、音频处理。临界阻尼低通滤波器在抑制系统中的振荡和噪声表现良好,非常适合应用于移动机械在恶劣环境条件下需要对参数信号进行滤波,消除高频噪声干扰的场景。其幅值平方函数表达式为:

$$|H(j\Omega)|^2 = \left(\frac{1}{1 + \eta^2 \Omega^2} \right)^n \quad (8)$$

其中, n 为阶数, $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$, ω_c 为低通滤波器截止频率。

η 是实正常数。当 $n = 1, \Omega = 1$, 即 $\omega = \omega_c$ 时,其振幅响应平方值应为 $\frac{1}{\sqrt{2}}$,此时:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

当 $\eta = 1$, 由上式可以看出该一阶低通滤波器实质是一阶惯性环节,只在负实轴上具有极点。这样,可以推出高阶临界阻尼低通滤波器是通过完全相同的多个一阶低通滤波器级联并去耦后获得,或者等效是由多个实数双极点的二阶低通滤波器组成的一个级联电路。信号经过滤波器作用后,会产生群时延,时延的长短会决定返回接收器终端的时间。临界阻尼系统的幅频特性图和阶跃响应图如图4和5所示。

对于该类型临界阻尼低通滤波器来说,响应速度相对较快,滤波器响应时间随截止频率的增高而减小。在满足奈奎斯特采样定理条件下,得到:

$$t_R = \frac{1}{f_c} \quad (10)$$

式中: t_R 是滤波器响应时间; f_c 为截止频率。

3.2 组合积分法

1) 组合积分过程

在过程控制领域,为了使具有大滞后特性的被控对象有良好的鲁棒性和抗干扰性,通常会使用组合积分控制器进行过程控制。组合积分过程指的是在工业过程中

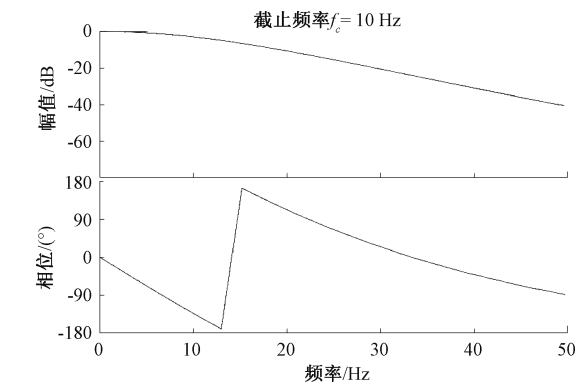


图 4 临界阻尼滤波器幅频特性图 $f_c = 10\text{ Hz}$

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic diagram of critical damping filter $f_c = 10\text{ Hz}$

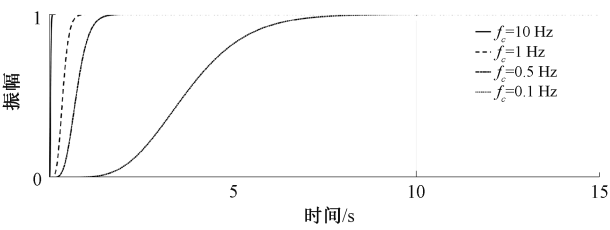


图 5 不同截止频率下滤波器的阶跃响应

Fig. 5 The step response diagram of the filter at different cut-off frequencies

可以近似为多个积分时滞过程组合,且本质上稳定的一类过程^[17]。例如在烟草行业中,烟丝的含水量是有严格要求的。在烘丝过程中,烟丝出口水分的过程控制就是组合积分过程。

2) 组合积分低通滤波

组合积分过程在实际过程控制中具有较好的响应性能,输出响应曲线稳定,没有超调,本身具有一定的抗干扰能力,对信号有滤波作用。因此假设指数有界信号 $f(t)$, 其 Laplace 变换为 $F(s)$, 将其乘以组合积分环节 $g(s)$ ^[18]:

$$g(s) = \frac{1}{\tau s}(1 - e^{-\tau s}) \tag{11}$$

得到传递函数:

$$G(s) = F(s) \cdot \frac{1}{\tau s}(1 - e^{-\tau s}) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{F(s)}{s} - \frac{F(s)e^{-\tau s}}{s} \right) \tag{12}$$

对式(12)求 Laplace 反变换可得:

$$G(t) = L^{-1}(G(s)) = \frac{1}{\tau} \left[\int_0^t f(u) du - \int_0^{t-\tau} f(u) du \right] = \frac{\int_{t-\tau}^t f(u) du}{\tau} \tag{13}$$

式(13)右部可解释为对信号 $f(t)$ 在长度为 τ 时间

段 $[t - \tau, t]$ 上进行的均值滤波算法,将滤波器的截止频率记为 $\frac{1}{\tau}$,可以得到滤波器响应时间快慢取决于 τ 的大小。故式(11)所定义的组合积分环节等同于均值滤波器。均值滤波器是低通滤波器的特例,由此推出此组合积分环节为一个低通滤波器。该方法参数少易实现,可以轻松调节滤波器的截止频率,同时能有效抑制高频噪声和一些带有特定周期的周期性信号^[19]。

3.3 两种滤波器性能对比

根据两种滤波算法的不同特征,表 1 给出了组合积分滤波器与临界阻尼滤波器的性能对比。

表 1 两种滤波器性能对比

Table 1 Performance comparison of two filters			
滤波器类型	响应时间	特点	滤波后效果
组合积分	τ	参数简单,便于操作;适合在控制环节中进行滤波	抑制周期信号效果显著,信号平稳
临界阻尼	$\frac{1}{f_c}$	具有平滑频率响应,高阻带抑制能力,抗干扰能力强	响应速度快,阻尼效果好;静态精度高,有效抑制振动噪声

4 仿真计算和验证

4.1 MATLAB 仿真

为了验证滤波算法对信号的滤波效果,分别搭建临界阻尼低通滤波器和组合积分低通滤波器系统模型。设置模型中的参数,3 种正弦信号频率为 500、50 和 5 Hz,低通滤波器的截止频率 $f_c = 10\text{ Hz}$,采样时间设置为 3 s,分析滤波前后信号效果。

1) 八阶临界阻尼低通滤波

八阶临界阻尼低通滤波器模型如图 6 所示,运行仿真模型,输出原始波形信号和滤波后信号的时域响应。

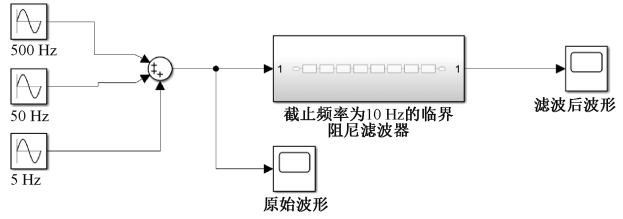


图 6 8 阶临界阻尼低通滤波器模型

Fig. 6 8th order critical damped low-pass filter model

由图 7 可以看出,3 种正弦信号在经过叠加之后信号变得更加复杂,无法判断信号频率。图 8 表明,在经过八阶临界阻尼低通滤波器之后,信号变为单一信号,频率为 5 Hz,总体上看滤波效果非常好。

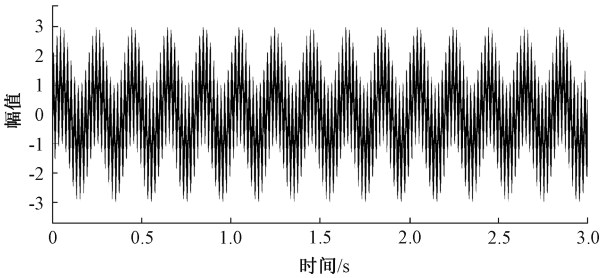


图 7 复合信号滤波前时域响应
Fig. 7 Time domain response of composite signal before filtering

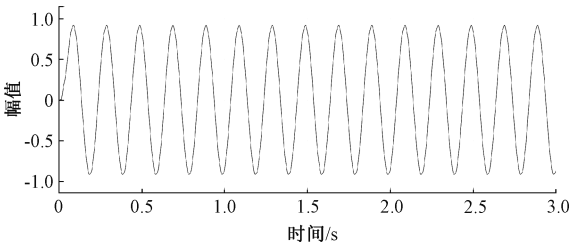


图 8 临界阻尼滤波器后时域响应
Fig. 8 Post-time domain response of critical damping filter

2) 组合积分低通滤波算法

组合积分低通滤波算法模型如图 9 所示,设置模型中的参数,延时环节设定延时时间为 0.1 s,使用相同的复合信号进行滤波,运行仿真模型。

得到滤波后的信号时域响应如图 10 所示,可以看出,复合信号经过组合积分低通滤波后,可以将相对高频

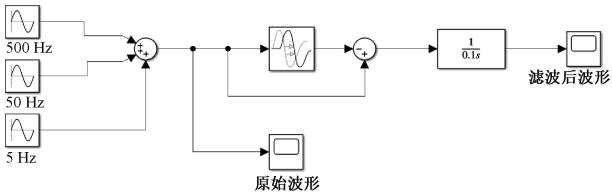


图 9 组合积分低通滤波仿真模型
Fig. 9 Simulation model diagram of combined integral low-pass filtering

的信号滤除,且信号圆滑,滤波效果非常出色。

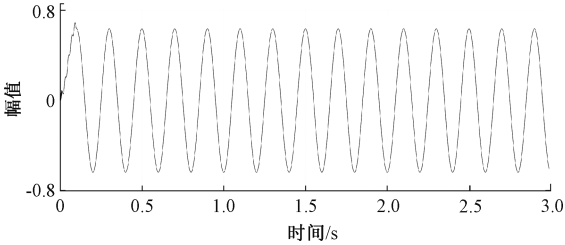


图 10 组合系统滤波器后时域响应
Fig. 10 Post time domain response of combined system filter

3) 基于模拟井下振动环境的滤波算法仿真分析

为了验证提出的算法在振动环境下的有效性,依据采煤机设备的产品规定标准,进行了振动模拟并设定了振动参数,持续时间为 6 min,且在强振动过程中模拟采煤机摇臂在截割作业中的升降过程,角度范围为 $90^{\circ} \sim 0^{\circ}$,速度为 $0.58^{\circ}/s$,测量仿真步骤如图 11 所示。

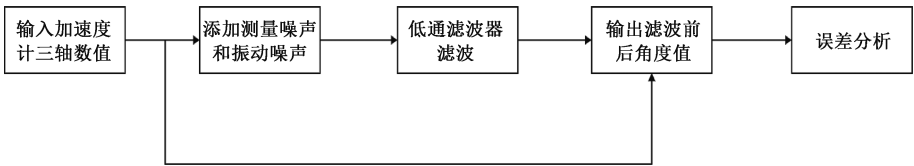


图 11 测量仿真流程
Fig. 11 Measurement simulation flow chart

通过模拟在三轴仿真值上添加测量噪声和振动噪声生成加速度计仿真数据。测量噪声为方差 0.035 的随机噪声,振动噪声通过给加速度计添加方差为 20 的随机噪声,采样频率 1 kHz,采样时间 150 s,含干扰噪声的角度仿真数据如图 12 所示。

经过多种低通滤波后数据波动范围远小于直接从加速度计直接得到的测量角度值。从表 2 可知,对比 4 组实验结果的误差最大值、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 及均方根误差 (root mean square error, RMSE) 发现^[20],组合积分低通滤波和八阶临界阻尼低通滤波相较于经典的八阶巴特沃斯低通滤波来说整体误差范围在

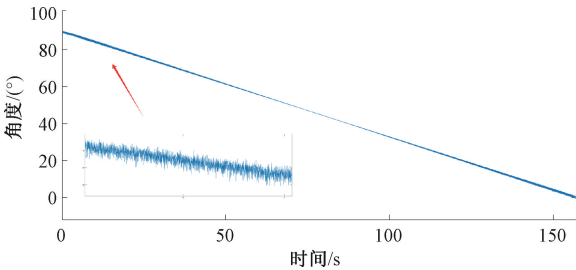


图 12 角度仿真曲线
Fig. 12 Angle simulation curve

0.02°以内,同时数据更加稳定,离散程度更低,从而证明了两种滤波算法在强振动环境下具有较好滤波效果,可以作为滤波器解决加速度计在振动环境下的抗振抗干扰问题。

表 2 角度误差测量
Table 2 Angle error measurement

统计类型	最大值/(°)	MAE/(°)	RMSE/(°)
无滤波	1.156	0.103	1.48×10^{-1}
组合积分滤波	0.016	0.002	3.05×10^{-4}
临界阻尼滤波	0.019	0.003	4.60×10^{-3}
巴特沃斯滤波	0.109	0.004	1.08×10^{-2}

4.2 模拟实验及分析

为了验证本文提出的两种低通滤波对加速度计输出数据处理的实际滤波效果,搭建了振动实验平台^[21]如图 13 所示,该平台主要由加速度计、转台、振动试验台及支架等固定零部件组成。加速度计是基于 IIS3DWB 芯片采集三轴加速度数据,其量程为±16 g,根据加速度数据计算输出单轴角度,通过螺钉固定在转台上。整个平台利用步进电机驱动转台获得旋转量,并由电磁驱动振动台模拟采煤机摇臂采高的现场工况。

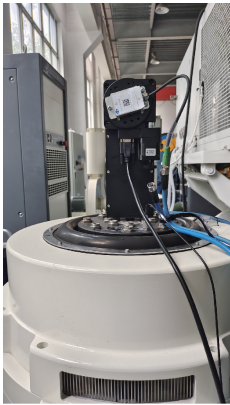


图 13 振动试验台实物
Fig. 13 Vibration test bench photo

实验分为两个部分。加速度计被以约 2.7°的角度固定在振动实验台上,在传感器及控制台通电并完成通信确认后,开始振动实验。其中振动强度由振动控制器设定,振动方向为垂直于振动台的 Z 轴方向。在实验期间采集了加速度计的原始信号,采样频率为 26.667 kHz。各实验设备相关参数如表 3 所示。各实验设备检测误差均符合测量需求,不会对实验结果造成影响。

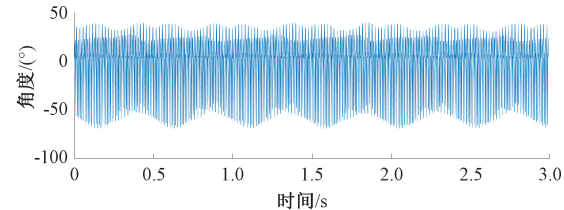
1) 定频振动实验

保持转台静止,在振动强度为 5 g 下进行振动。每一组数据共 40 万余条。针对摇臂调高工况和现场的不断试验,保证滤波延迟时间低和精度高的要求,选择截止频率为 0.5 Hz 的八阶临界阻尼低通滤波器和组合积分

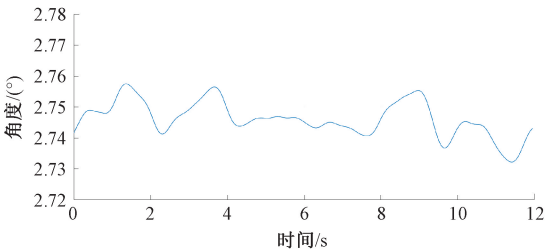
表 3 实验设备的相关参数说明
Table 3 The relevant parameters of the experimental equipment description

设备名称	参数	测量值
加速度计	范围	±16/g
	随机噪声	110 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
	带宽	6.3 kHz
振动台	最大载荷	140 kg
	频率范围	1~4 000 Hz
	最大加速度	981 m/s^2
	最大位移	51 mm
电动旋转台	重复定位精度	0.005°
	分辨率	0.01°
	载重	45 kg

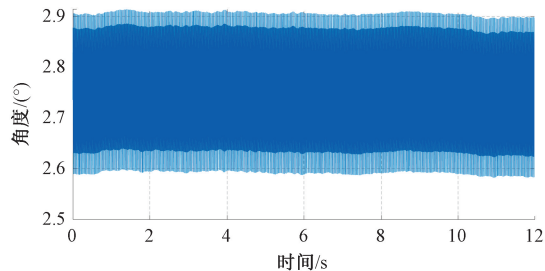
低通滤波器,对该加速度信号进行滤波。滤波前后加速度计角度输出信号处理结果如图 14 所示。图 14(a)为滤波前角度数据曲线;图 14(b)为临界阻尼滤波后角度数据曲线;图 14(c)为组合积分滤波后角度数据曲线。



(a) 5 g滤波前角度数据曲线
(a) 5 g angle data curve before filtering



(b) 临界阻尼滤波后角度
(b) Angle after critical damping filtering



(c) 5 g振动强度组合积分滤波后角度
(c) 5 g angle curve after the combination integral filtering

图 14 5 g 振动强度滤波前后传感器输出信号对比
Fig. 14 Comparison of sensor output signals before and after filtering with vibration intensity of 5 g

考虑到实验过程中无法精确标定角度真值,因此将

传感器紧固在旋转台上后,保证测试角度不变的情况下,采用多次反复实验验证重复精度好坏,作为衡量滤波效果好坏的标准。均值可以反映一组数据的一般情况,极差是体现一组数据变化范围的指标,而标准差可以反映一组数据中个体间的离散程度。因此,在本实验中,将3种结合起来进行衡量不同滤波方法的测量精度。理想状态下,在经过低通滤波后,得到的角度是不变的,但实际上,由于存在各种噪声和误差,故最终得到的角度会有一定的误差存在。

表4和5为5g加速度下经过临界阻尼滤波和组合积分滤波后的角度误差表。在均值方面,两种方法得到的结果比较相近,角度误差均小于0.1°。但是由图14(a)可以得到,直接用原始数据来计算角度的方法所得到的角度波动范围较大。通过两种滤波方式所得到的极差和标准差来判断,标准偏差相差0.1°左右,极差值相差0.3°~0.4°,而均值相近是由于角度的值有正有负。由此可以看出,在振动环境下,经过临界阻尼滤波后的测量精度相对较高。

表4 临界阻尼滤波后角度误差

统计次数	均值/(°)	极差/(°)	标准差/(°)
第1次	2.735 8	0.038 7	0.009 8
第2次	2.730 6	0.054 8	0.013 4
第3次	2.744 5	0.035 3	0.007 5
第4次	2.734 4	0.035 4	0.008 4
第5次	2.738 3	0.044 5	0.011 0
平均值	2.736 7	0.041 7	0.010 0

表5 组合积分滤波后角度误差

统计次数	均值/(°)	极差/(°)	标准差/(°)
第1次	2.736 3	0.402 5	0.111 1
第2次	2.730 3	0.377 2	0.102 0
第3次	2.744 8	0.338 2	0.095 1
第4次	2.735 1	0.410 2	0.115 6
第5次	2.738 6	0.418 0	0.114 2
平均值	2.737 0	0.389 2	0.107 6

2) 基于振动平台的摇臂转动模拟实验

由于加速度计的安装方向不能保证与转台台面方向完全一致,存在安装误差会导致加速度计输出角度与真实角度出现较大误差^[22]。设加速度计输出的角度值为 α ,转台转动的角度为 β ,通过几何关系可知, α 与 β 之间满足式(14)。

$$\sin\alpha = k\sin\beta$$

(14)

式中: k 在加速度计安装固定后为常量。

通过转台旋转带动加速度计转动,经过多次实验,利

用最小二乘法拟合系数 k ,得到 $k \approx 0.94$,将其代入式(14)对角度进行补偿。保持条件不变,开启转台,模拟采煤机摇臂实际上升角速度,选择以1°/s的角速度旋转上升10°。记录在5g的振动强度下的原始数据。如图15所示,黑色实线和灰色虚线分别为临界阻尼和组合积分两种低通滤波经过安装误差补偿后的角度值。

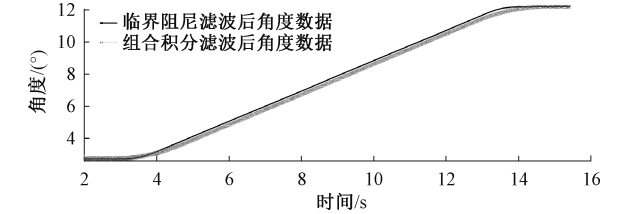


图15 低通滤波经过安装误差补偿后的角度值

Fig. 15 The angle value of low-pass filter after installation error compensation

从图15可以看出,在5g振动强度下经过两种方法处理后的角度输出平滑,没有过多的噪声干扰。表6对两条曲线上升部分进行一次函数拟合验证测量精度。

表6 角度拟合参数

统计类型	拟合系数(曲线斜率)	拟合优度	
		R-square	RMSE
组合积分滤波	1.003	0.998 7	9.3×10^{-2}
临界阻尼滤波	1.005	1	5.5×10^{-3}

结合表6可以观察到,两种滤波器响应速度快且没有超调,均可以较好的反映出实际转台转动角度和转动速度。实验表明两种滤波方法能够改善加速度计在强振动强度的环境下测量角度的精度,实现加速度计测量采煤机摇臂角度的工程要求。

5 结 论

本文通过建立采煤机摇臂倾角检测系统模型,提出了一种基于MEMS加速度计的倾角检测方案。针对采煤机摇臂在截煤过程中产生的剧烈振动,设计了临界阻尼低通滤波算法和组合积分低通滤波算法,这两种算法旨在有效分离重力加速度与振动噪声,确保在复杂工况下仍能获得可靠的倾角测量值。为克服井下复杂振动环境对加速度计的影响,本研究搭建了振动模拟实验平台,并进行了大量的仿真和实测试验,确保所设计的滤波算法能够在真实工况中稳定工作。实验结果表明,在强振动的环境下,两种滤波算法可以有效地提高加速度计测量精度的可靠性和精确度,最终获得误差更小的采煤机摇臂倾角测量值,对采煤机采高检测有积极的影响且富有

创新性。同时,这些改进为后续滚筒调高控制提供了可靠的数据参考,对提升采煤机智能化开采的安全性和经济效益有着重要的贡献。

目前基于 MEMS 加速度计的摇臂角度测量技术尚未成熟,常见的各种测量倾角方法均存在一定的缺陷,为得到更准确可靠的倾角测量值需要多种检测手段协同检测。未来将针对实际井下采煤机采高控制应用场景,不断优化现有的加速度计采高检测系统模型和滤波算法,进一步提高采煤机摇臂测量的可靠性和稳定性,实现对采煤机采高的闭环控制,为采煤机摇臂智能化检测提供一种可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146-156.
GE SH R, ZHANG X, XUE G H, et al. Research on the development of intelligent technology and equipment of coal mine in China [J]. China Engineering Science, 2023, 25(5): 146-156.
- [2] 王冲, 孙传猛, 靳鸿, 等. 基于混合算法改进的采煤机采高仿人智能控制模型设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 35-42.
WANG CH, SUN CH M, JIN H, et al. Design of human-simulated intelligent control model of shearer mining height based on improved hybrid algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1): 35-42.
- [3] 苑博. 基于 MEMS 加速度传感器的柔性测斜仪校准方法及实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
YUAN B. Calibration method and experimental study of flexible inclinometer based on MEMS acceleration sensor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [4] 许祥. 基于 MEMS 的边坡振动与倾角监测技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
XU X. Research on MEMS-based slope vibration and inclination monitoring technology [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.
- [5] 修睿, 孙丽艳, 郭思诺. 基于融合滤波的 MEMS 动态倾角仪算法设计[J]. 导航与控制, 2023, 22(4): 81-90.
XIU R, SUN L Y, GUO S N. Algorithm design of MEMS dynamic inclinometer based on fusion filtering [J]. Navigation and Control, 2023, 22(4): 81-90.
- [6] 闫琦, 杨冬梅, 张凤云, 等. 基于 CEEMDAN-SSA 的 MEMS 加速度计振动噪声抑制方法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(8): 168-171, 176.
YAN Q, YANG D M, ZHANG F Y, et al. Vibration and noise suppression method of MEMS accelerometer based on CEEMDAN-SSA [J]. Fire and Command Control, 2019, 44(8): 168-171, 176.
- [7] 曹波, 王世博, 鲁程. 基于 UWB 系统的采煤工作面端头采煤机自主定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 108-117.
CAO B, WANG SH B, LU CH. Research on autonomous positioning method of end shearer in coal mining face based on UWB system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 108-117.
- [8] 索艳春. 基于 PID 控制算法的矿用巡检机器人设计[J]. 煤矿机械, 2023, 44(8): 25-28.
SUO Y CH. Design of mine inspection robot based on PID control algorithm [J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(8): 25-28.
- [9] 赵亚东, 马腾飞, 思旺斗, 等. 煤矿井下移动机器人同步定位关键技术研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(2): 48-51.
ZHAO Y D, MA T F, SI W D, et al. Research on key technology of synchronous positioning of mobile robot in coal mine [J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(2): 48-51.
- [10] 王森, 常颖, 崔尧尧, 等. 双轴倾角传感器离轴倾斜测量的误差校正[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 178-187.
WANG S, CHANG Y, CUI Y Y, et al. Error correction of off-axis tilt measurement of biaxial tilt sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 178-187.
- [11] 蒋金玲, 张晶, 朱欣华, 等. 硅微谐振式加速度计温度补偿方法研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 1-15.
JIANG J L, ZHANG J, ZHU X H, et al. Research on temperature compensation method of silicon micro-resonant accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 1-15.
- [12] 孙海滨, 赵清武, 刘海威. 改进 IGABP 模型补偿倾角传感器温度漂移研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 246-255.
SUN H B, ZHAO Q W, LIU H W. Research on temperature drift compensation of tilt sensor based on improved IGABP model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 246-255.
- [13] 鹿珂珂, 刘陵顺, 寇昆湖, 等. 不依赖精密转台的 MEMS-IMU 误差标定补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 129-136.
LU K K, LIU L SH, KOU K H, et al. MEMS-IMU error

- calibration compensation method independent of precision turntable[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4): 129-136.
- [14] 李重重, 刘清. 基于截割顶底板高度预测模型的采煤机自动调高技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 9-16.
LI CH ZH, LIU Q. Automatic height adjustment technology of shearer based on cutting roof and floor height prediction model [J]. Industrial and Mining Automation, 2024, 50(1): 9-16.
- [15] 葛世荣, 王世佳, 曹波, 等. 智能采运机组自主定位原理与技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 75-86.
GE SH R, WANG SH J, CAO B, et al. Autonomous positioning principle and technology of intelligent mining and transportation unit[J]. Coal Journal, 2022, 47(1): 75-86.
- [16] 刘送永, 程诚, 吴洪状, 等. 基于煤岩界面识别的采煤机智能调高控制方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-0004.
LIU S Y, CHENG CH, WU H ZH, et al. Research on intelligent height adjustment control method of shearer based on coal-rock interface recognition[J]. Coal Science and Technology, 2022, DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0004.
- [17] CHEN AN G, REN ZH Y, FAN ZH P, et al. Combined integrating control based on dynamic optimization estimation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(8): 1-14.
- [18] FAN ZH P, REN ZH Y, CHEN AN G, et al. A method for parameter identification of combined integrating systems [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 4097429.
- [19] HONG J CH, FENG X, REN ZH Y. Application of modified control strategies for temperature control process of conditioning cylinder with large delay-time[C]. 2021 China Automation Congress (CAC), 2021.
- [20] 刘泽朝, 李敬兆, 郑昌陆, 等. 基于 DFFRLS-AUKF 的单轨吊车动态倾角辨识方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 101-111.
LIU Z CH, LI J ZH, ZHENG CH L, et al. Research on dynamic inclination angle identification method of monorail crane based on DFFRLS-AUKF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 101-111.
- [21] 杨金显, 王赛飞, 申刘阳, 等. 基于 IAO 的随钻 MEMS 加速度计误差参数识别方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(5): 516-522, 530.
YANG J X, WANG S F, SHEN L Y, et al. An IAO-based error parameter identification method for MEMS accelerometers while drilling [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2023, 31(5): 516-522, 530.
- [22] WANG X, ZHAO X, ZHOU B, et al. Installation error calibration for MEMS angular measurement system in hypersonic wind tunnel [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(5): 175-186.

作者简介



陈子千, 2022 年于东华大学获得学士学位, 现为煤炭科学研究总院硕士研究生, 主要研究方向为矿用无线传感器自组网研究。

E-mail: 229632582@qq.com

Chen Ziqian received his B. Sc. degree from Donghua University in 2022. He is now a M. Sc. candidate at China Coal Research Institute. His main research interests include mine wireless sensor Ad Hoc network.



庄德玉(通信作者), 2006 年于中国矿业大学(北京)获得学士学位, 2009 年于中国矿业大学(北京)获得硕士学位, 现为煤炭科学研究总院硕士研究生导师, 主要研究方向为矿用无线传感器自组网研究。

E-mail: zhuangdeyu@tdsh.com.cn

Zhuang Deyu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology Beijing in 2006 and M. Sc. degree from China University of Mining and Technology-Beijing in 2009. He is now a M. Sc. supervisor at China Coal Research Institute. His main research interests include mine wireless sensor Ad Hoc network.