

考虑激振峰值的三缸压裂泵振动频率控制算法

吴文秀, 李 杨

(长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘 要:三缸压裂泵工作中,其振动频率与固有模态频率重合时,产生的共振现象会加剧压裂泵的振动,引起振动位移幅值剧烈波动,从而导致三缸压裂泵运行的稳定性降低。因此,提出考虑激振峰值的三缸压裂泵振动频率控制算法。通过考虑固有模态频率,即曲柄滑块机构的惯性力、液力端的液压波动力和摩擦力的综合影响,确定三缸压裂泵的激振峰值。采用 FBLMS 控制算法,对三缸压裂泵激振峰值与其期望目标值之间的误差信号进行频域变换,得到振动频率的响应结果,之后采用 FFT 技术确定振动信号位置,根据信号位置更新振动加速度权重,从而降低振动位移幅值,实现三缸压裂泵振动频率控制。实验结果显示:该算法有效降低了三缸压裂泵的振动幅值至 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 左右,提高了三缸压裂泵运行的稳定性。

关键词:激振峰值;三缸压裂泵;振动频率;FBLMS 算法;FFT 技术

中图分类号:TH12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)02-0376-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241200

Vibration frequency control algorithm for three cylinder fracturing pump considering excitation peak value

WU Wen-xiu, LI Yang

(School of Mechanical Engineering Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: When the vibration frequency of the three cylinder fracturing pump coincides with the natural mode frequency during operation, the resonance phenomenon generated will intensify the vibration of the fracturing pump, causing severe fluctuations in the amplitude of the vibration displacement, thereby reducing the stability of the three cylinder fracturing pump operation. Therefore, a vibration frequency control algorithm for three cylinder fracturing pumps considering excitation peak values is proposed. By considering the combined effects of the natural modal frequency, namely the inertia force of the crank slider mechanism, the hydraulic wave force at the hydraulic end, and the frictional force, the excitation peak value of the three cylinder fracturing pump is determined. Using the FBLMS control algorithm, the error signal between the peak excitation value and the expected target value of the three cylinder fracturing pump is transformed in the frequency domain to obtain the response result of the vibration frequency. Then, FFT technology is used to determine the position of the vibration signal, and the vibration acceleration weight is updated based on the signal position to reduce the vibration displacement amplitude and achieve vibration

收稿日期:2024-11-07.

基金项目:中国石油科技创新基金项目(2020D-5007-0503);湖北省重点研发计划项目(2021BA053);国家页岩油气富集机理与有效开发重点实验室基金项目(2020014).

作者简介:吴文秀(1965-),男,教授.研究方向:机械测试与控制.E-mail:Wuwenxiu22@yangtzeu.edu.cn

frequency control of the three cylinder fracturing pump. The experimental results show that the algorithm effectively reduces the vibration amplitude of the three cylinder fracturing pump to about $0.1 \mu\text{m}$, and improves the stability of the three cylinder fracturing pump operation.

Key words: excitation peak value; three cylinder fracturing pump; vibration frequency; FBLMS algorithm; FFT technology

0 引言

长期暴露于高频振动环境中的三缸压裂泵,其构成部件极易因累积疲劳效应而受损。当三缸压裂泵振动频率与设备自身固有频率接近或重合时,会引发共振现象^[1],加大设备振动幅度,进而威胁设备结构完整性和性能表现。为有效规避共振风险,保护设备不受损害,对三缸压裂泵振动频率进行精确调控显得尤为重要。

杨波^[2]提出通过高精度传感器实时检测液缸柱塞位移,使两缸动作重叠,实现有序换向,有效抑制流量压力脉动,从而控制振动频率。但是该算法并未考虑固有频率与外部激励频率相近引发的共振问题,导致控制效果的稳定性不足。李永涛等^[3]研究利用 Matlab/Simulink 构建压裂泵及其脉动抑制回路数学模型,同时运用蓄能器与增压缸的组合技术,实施流体脉动抑制,以实现振动频率的有效控制。然而,该算法无法根据实际振动频率的变化实时调整增压缸的振动加速度权重,影响振动频率的控制效果。戚伟等^[4]提出结合传统模糊控制与 RBF 神经网络控制的跟踪控制器与同步控制器,实现对压裂泵阀控缸系统的高精度控制。然而,尽管 RBF 神经网络具备自适应特性,但缺乏对振动频率变化的适应性,无法及时调整振动加速度权重以保持有效的振动抑制。Yabui 等^[5]提出基于横摆率反馈的振动控制系统,通过采用陷波滤波器或低通滤波器降低振动频率区域的增益,从而实现振动的有效补偿。然而,该算法并未考虑激振峰值与其期望目标值之间的误差信号,会引发相位滞后与延迟,进而影响控制效果的稳定性。

本文提出考虑激振峰值的三缸压裂泵振动频率控制算法,通过分析振动激励源及其激振峰值,采用 FBLMS 自适应滤波算法实时响应振动信号,动态更新振动加速度权重,控制三缸压裂泵的振动频率,有效提高三缸压裂泵稳定性,减轻振动影响,提高生产效率。

1 三缸压裂泵振动频率控制算法

1.1 基于固有模态频率的激振峰值确定

三缸压裂泵结构可以视为 3 个单缸泵的组合,每个单缸泵之间的相位角相互错开 120° 。当三缸压裂泵的振动频率与设备的固有模态频率重合时,会引发共振现象,导致设备振动加剧,影响设备的稳定性。通过分析任一单缸泵的曲柄滑块机构的固有模态频率,即曲柄滑块机构所受的惯性力激励、液力端产生的压力波动激励以及摩擦力激励,根据其潜在的共振点,并结合 120° 的相位差异进行叠加处理^[6-8],从而确定三缸压裂泵整体的激振峰值。

1.1.1 曲柄滑块机构的惯性力

三缸压裂泵的单个气缸组件采用典型的曲柄滑块机制,其所受惯性力主要包含以下几部分:曲轴旋转时产生的惯性力、柱塞在往复运动过程中产生的惯性力、连杆旋转引发的惯性力及其相关的惯性力矩。

设定 AO 为曲柄, C 为其长度,并以恒定角速度 ω 进行旋转。另连杆长度为 L ,并与该曲柄相连接,连杆和柱塞的质量分别记为 m_2 、 m_3 ,连杆在某一瞬间的角速度和角加速度分别表示为 ω_2 、 ϵ_2 。通过连杆 AB 的角速度 ω_2 、角加速度 ϵ_2 以及柱塞的加速度 a ,可以计算出曲轴所受的惯性力、连杆自身惯性力、惯性力矩以及柱塞所受的惯性力。

曲轴的惯性力如式(1)所示:

$$H = C \times m \times \omega^2 \quad (1)$$

式中: m 为曲轴旋转惯性相关的等效质量; ω^2 为角速度的平方,是曲轴旋转时产生的离心加速度效应,与惯性力成正比。

连杆的惯性力及惯性力矩如下所示:

$$H_2 = m_2 \times \omega_2^2 \times r_2 \quad (2)$$

$$M = G \times \epsilon_2 \quad (3)$$

式中: G 为转动惯量; r_2 为连杆质心到旋转轴的距离。

曲柄滑块机构的惯性力如式(4)所示:

$$H_3 = H_2 \times a \times M \quad (4)$$

1.1.2 液力端的液压波动力

三缸压裂泵柱塞上的激励力如式(5)所示:

$$H_D = U \times S \quad (5)$$

式中: S 为柱塞端面积; U 为柱塞缸内压力。

在泵入液体过程中,由于液力端压力相对较小,因此,作用于柱塞端的液力激励随压力变化的分量可以忽略不计,而仅将注意力集中在泵出液体时所产生的压力上。

1.1.3 摩擦力激励

在往复式柱塞泵中,摩擦力主要源自以下几个运动副:柱塞与其缸体、十字头与滑道之间的接触、十字头与连杆的相互作用,以及曲轴与其支撑轴承的摩擦。这些摩擦力本质上都是由金属部件之间的相对运动所导致的。

在柱塞泵正常运行过程中,得益于良好的润滑条件,各相对运动部件间的摩擦力被控制在较小范围内,因此,由摩擦力引发的冲击并不会显著影响整机的稳定运行^[9]。然而,一旦遭遇机械故障导致润滑不良,原本金属部件间顺畅的流体摩擦便会转变为有害的干摩擦,进而导致摩擦力大幅增加。摩擦力 H_f 如式(6)(7)所示:

$$H_f = Q \times S(t) \quad (6)$$

$$Q = \eta \times P \quad (7)$$

式中: η 为滑动摩擦因数; $S(t)$ 为接触面积; Q 为金属表面的摩擦应力; P 为金属表面的法向正应力。

由式(6)(7)可知, H_f 与 P 之间存在正比例关系。当柱塞泵处于工作状态时,根据曲柄滑块机构的运动学原理推导,发现 P 是一个随时间周期性变化应力^[10]。因此, H_f 也随之呈现出周期性变化。这种周期性变化导致振动冲击也以相同周期发生,而这个周期恰好等于曲轴旋转一周所需时间。

若部件间发生相对运动的干摩擦现象,那么摩擦因数 η 以及接触面积 $S(t)$ 会显著增大。这一突变进而引发 H_f 的瞬间剧增,从而产生较大的冲击效应。

结合曲柄滑块机构的惯性力、液力端的液压波动力和摩擦力激励的计算结果,确定三缸压裂泵在工作状态下的激振峰值,如式(8)所示:

$$v_{\text{dis}} = \frac{H_3 \times H_D \times H_f}{\omega} \quad (8)$$

式中: ω 为三缸压裂泵振动的角速度。

激振峰值可以明确压裂泵在作业过程中产生振动的原因,减少压裂泵在作业过程中的能量损失。

1.2 激振峰值下的振动加速度权重更新算法

随着工作频率和波动排量的增加,压裂泵的能量损失较大,压力波动源的压力振幅会迅速增大,振幅变宽,影响最终的控制稳定性。而三缸压裂泵十字头的加速度变化,将其作为反馈信号,调整相关部件的参数,以减小不平衡力,进而控制振动频率。对此,本文采用FBLMS控制算法对三缸压裂泵激振峰值与其期望目标值之间的误差信号进行频域变换^[11,12],根据振动频率响应结果,采用FFT技术确定振动信号的位置,并根据信号位置实时更新振动加速度权重,从而降低振动位移幅值,实现三缸压裂泵振动频率控制。

将三缸压裂泵激振峰值信号分割成长度为 N 的数据块,相邻数据块之间重叠50%。FBLMS算法过程如下。

采用重叠存储法结合 $N-1$ 阶FIR滤波器可以显著提升滤波效率。 $N-1$ 阶FIR滤波器有 N 个抽头权值,这些权值组成三缸压裂泵激振峰值信号的时域权值向量 $E(i)$,为进行 $2N$ 点的FFT变换,需要将时域权值向量 $E(i)$ 进行零填充,如式(9)所示:

$$E_F^T(i) = \text{FFT} \left[E^T(i), \underbrace{0 \cdots 0}_N \right] \quad (9)$$

式中: $\text{FFT}[\]$ 为FFT变换; i 为第 i 个运算周期; $E_F^T(i)$ 为三缸压裂泵激振峰值信号频域的权值向量,是 $E(i)$ 补零后的FFT变换。

三缸压裂泵激振峰值连续数据流 $x(n)$ 需被分割成大小为 N 的数据块。在每个运算周期 i 中,处理第 k 块和第 $k-1$ 块数据,如式(9)所示。这两块数据在时域上相连,构造长度为 $2N$ 的新序列,并根据激振峰值,对该新序列执行 $2N$ 点的快速傅里叶变换(FFT),且组成 $2N \times 2N$ 的对角矩阵,如式(10)所示:

$$X_F(i) = \text{diag} \left(\text{FFT} \left[\begin{array}{c} \underbrace{x(iN-N), \dots, x(iN-1))}_{\text{第}(k-1)\text{块}} \\ \underbrace{x(iN), \dots, x(iN+N-1))}_{\text{第}(k)\text{块}} \end{array} \right] v_{\text{dis}} \right) \quad (10)$$

利用重叠存储法计算三缸压裂泵激振峰值信

号数据流 $X(i)$ 与连接后的数据块 $E(i)$ 之间的线性卷积,从而得到长度为 N 的一维向量,如式(11)所示:

$$F_c^*(i) = \text{FFT}^{-1}[X_F(i)E_F^T(i)] \quad (11)$$

式中: $\text{FFT}^{-1}[\]$ 为 FFT 逆变换。

对于式(11)得出的结果,仅保留后 N 个元素,因为前 N 个元素对应于循环卷积的部分,而这些部分并不包含在所需的线性卷积结果之内。

三缸压裂泵激振峰值与其期望目标值之间的误差信号 $v_{\text{dis}}(i)$ 也需要被分割成长度为 N 的三缸压裂泵激振峰值数据块。将第 i 块数据标记为 $Y_{\text{error}}(i) = (y_{\text{error}}(iN), \dots, y_{\text{error}}(iN + N - 1))^T$ 。由于在三缸压裂泵振动频率控制过程中,式(1)所计算的结果前 N 个元素被视为冗余并被丢弃^[13,14],因此,对三缸压裂泵激振峰值与其期望目标值之间的误差信号进行频域变换,得到振动频率的响应结果,如式(12)所示:

$$\beta(i) = \text{FFT} \left[\underbrace{0, \dots, 0, v_{\text{dis}}(iN), \dots, v_{\text{dis}}(iN + N - 1)}_{\text{第4个误差数据块}} \right]^T \quad (12)$$

通过 FFT 技术处理 $X(i)$ 与 $\beta(i)$ 的相位关系^[15],计算出梯度向量 $\nabla(i)$,定位振动信号,如式(13)所示:

$$\nabla(i) = -2\text{FFT}^{-1}[X_F^*(i)\beta(i)] \quad (13)$$

式中: $*$ 表示矩阵共轭。

根据振动信号的位置实时更新三缸压裂泵激振峰值信号频域中振动加速度权重,如式(14)所示:

$$E_F(i+1) = E_F(i) + \frac{1}{2}\mu_\delta \text{FFT} \begin{bmatrix} \nabla(i) \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: μ_δ 为步长参数。

根据振动加速度权重的更新结果,计算振动加速度均方根值,输出三缸压裂泵的振动频率和位移幅值的控制结果,振动加速度均方根值越小,控制效果越好,如式(15)所示:

$$\text{RMS} = E_F(i+1) \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{n=1}^V a^2(n)} \quad (15)$$

式中: $a(n)$, $(n=1, 2, \dots, V)$ 为振动加速度时间序列。

2 实验分析

利用 SolidWorks 创建三缸泵简化模型,并导入 ADAMS 软件后设定材料、约束、驱动及载荷,进行三缸压裂泵振动频率控制性能的验证。构建的三缸压裂泵简化模型如图 1 所示。三缸压裂泵主要性能参数如表 1 所示。

采用本文算法,对三缸压裂泵的泵壳体进行三向振幅及相位角的振动频率响应分析,并绘制相应的结果曲线。具体操作为:在 X、Y、Z 三个方向上分别施加 9.8 m/s^2 的加速度,同时在 $0 \sim 500 \text{ Hz}$ 的频率范围内进行频域变换。振动频率响应曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,三缸压裂泵 X 方向振幅在 $0 \sim 300 \text{ Hz}$ 区间内表现出较大的幅值,在 300 Hz 之后,其变化趋势趋于平稳。同时,X 方向相位角在 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 区间内有较大波动,而在其他频率范围内则相对平稳。对于 Y 方向在 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 区间内的振幅较大,而超过 200 Hz 后,振幅显著减小且趋势平稳。此外,Y 方向的相位角在 $0 \sim 150 \text{ Hz}$ 区间内波动较大,其他频段则相对稳定。Z 方向振

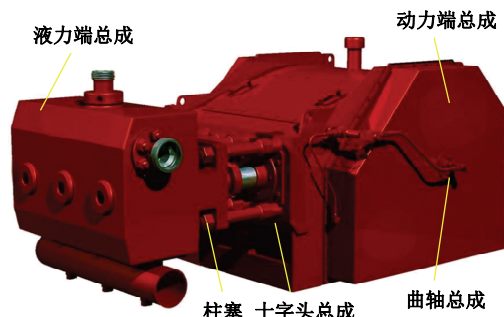


图 1 三缸压裂泵简化模型

Fig. 1 Simplified model of three cylinder fracturing pump

表 1 三缸压裂泵主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of three cylinder fracturing pump

名 称	数值
柱塞直径/mm	101.6
输出压力/MPa	130.9
输入转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	120
十字头最大线速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.96
十字头水平最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.88
最大输出扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	629.69
初始振动加速度权重	0.1

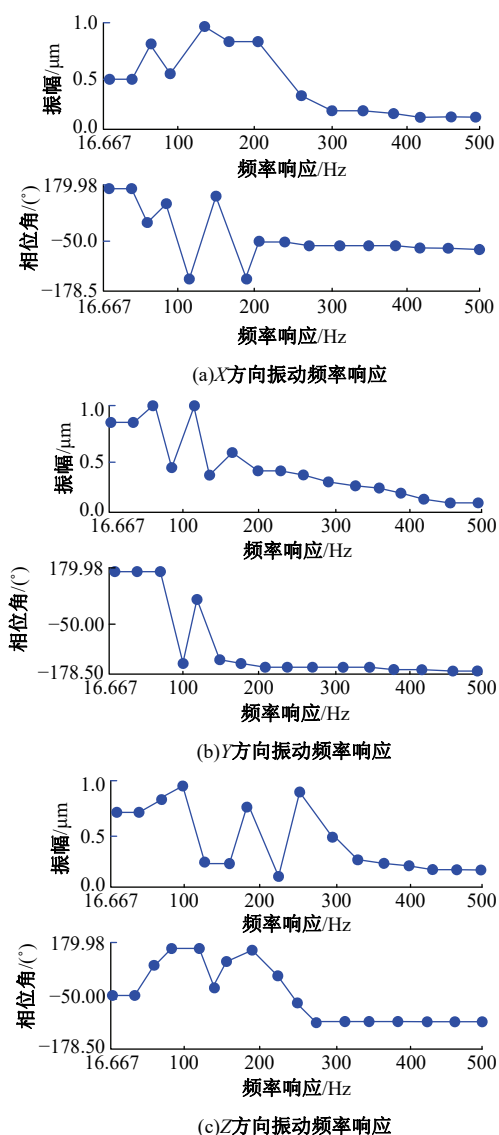


图2 振动频率响应曲线

Fig. 2 Vibration frequency response curve

幅在0~320 Hz范围内具有较大的幅值,但当频率超过320 Hz后,幅值显著降低且趋于平稳。Z方向相位角在0~280 Hz区间内有较大波动,而在此后的频率范围内则较为稳定。结果表明,压裂泵在0~320 Hz振动频率区间内更容易发生共振现象。因此,在三缸压裂泵振动频率控制过程中,应尽量避免振动频率接近这一激振峰值范围,以确保三缸压裂泵稳定运行。

考虑到三缸压裂泵的振动特性会在不同方向上存在差异,而X方向内部的动力传输和工作部件的布局使在X方向上的力的传递和振动响应更为直接和关键,更具代表性,因此,本文在2个共振周期内,在X方向振动频率中加入模拟干扰信号,验证本文算法对三缸压裂泵振动频率的控制

效果。在1个共振周期内加入10、30、50 Hz的干扰信号,在2个共振周期内加入10、20、30、40、50 Hz的干扰信号,所施加的干扰信号均具有10 N的幅值,并且初始相位均设为相等的0值。X方向三缸压裂泵振动位移曲线和振动位移频域分析如图3、图4所示。

由图3、图4可知,在图3(a)中,控制前三缸压裂泵振动位移幅值在0.5 μm 左右。根据其对应的FFT分析图,即图4(a)可以看出,该振动位移中包含10、30以及50 Hz的频率成分。而当采用本文算法对三缸压裂泵振动频率进行控制后,振动位移迅速减小,并且在稳定后,其振动幅值变得非常小,表明本文算法控制效果显著。另外,当加入20 Hz和40 Hz的模拟干扰信号后,从三缸压裂泵的振动位

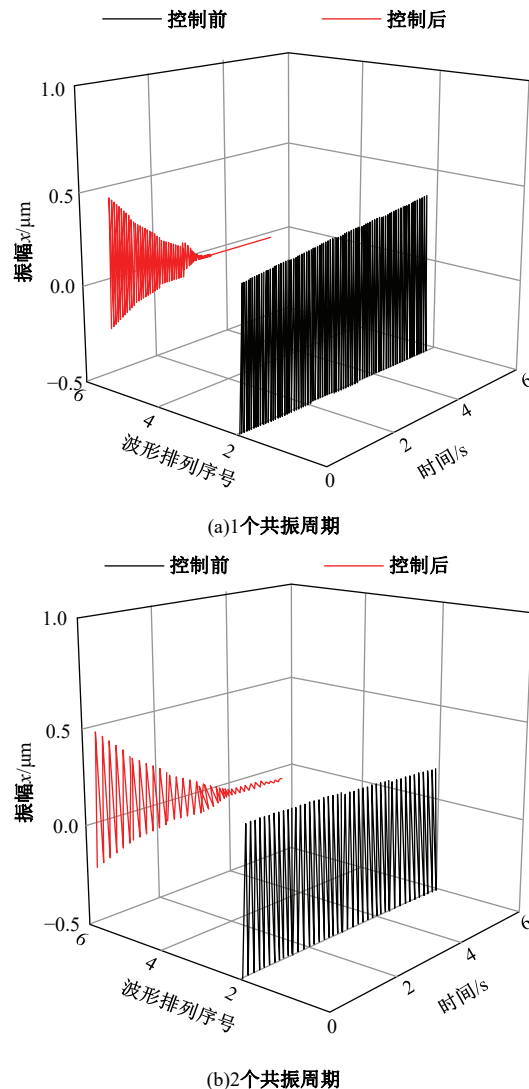


图3 三缸压裂泵X方向振幅

Fig. 3 Amplitude in the X direction of the three cylinder fracturing pump

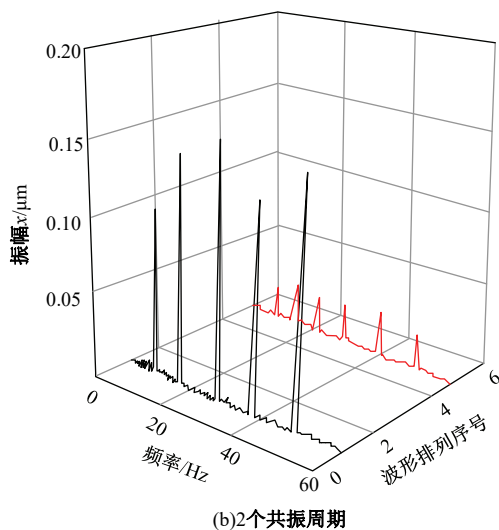
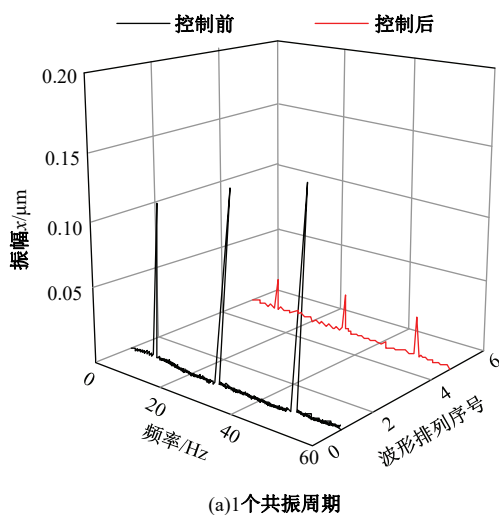


图4 振幅频域分析

Fig. 4 Amplitude Frequency Domain Analysis

移图3(b)和其对应的FFT分析图4(b)可以清晰地看到各频率成分,与所加入的模拟频率信号是完全一致的,且三缸压裂泵振动频率控制效果同样出色,成功地将振动幅值降到非常低的水平,可确保三缸压裂泵稳定运行。

为验证本文算法在降低三缸压裂泵振动频率方面的控制效果,采用文献[2]算法和文献[3]算法作为对比算法,以振动加速度均方根值为实验指标,比较3种算法的控制效果,实验结果如图5所示。

由图5可知,相比于两种文献算法,本文算法的振动加速度均方根值可以随着振动频率不断更新,说明本文算法的控制效果的适应性更佳,稳定性更高。这是因为本文算法综合考虑了泵体的固有模态频率、激振峰值以及结合FBLMS控制算法和FFT技术的优势,实现了对振动频率的精确

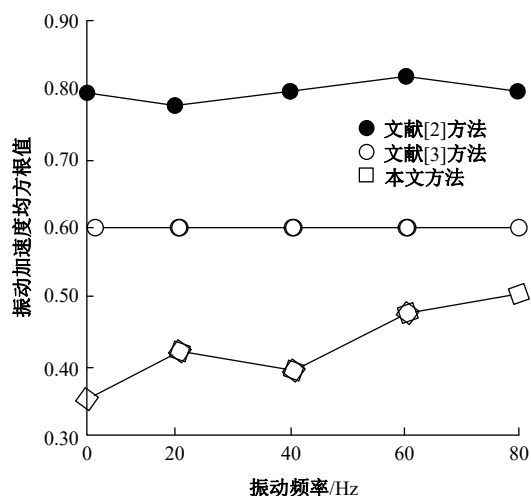


图5 3种算法的振动加速度均方根值对比结果

Fig. 5 Comparison results of root mean square values of vibration acceleration for three algorithms

控制,显著提高了三缸压裂泵的运行稳定性。

3 结束语

本文通过分析振动激励源确定激振峰值,并基于激振峰值和振动频率信号,采用FBLMS控制算法和FFT技术,实现了激振峰值在频域与时域之间的频域变换,并通过实时更新控制振动加速度权重,实现三缸压裂泵振动频率控制,有效确保控制的稳定性。但本文算法仍存在一定的局限性,如FBLMS控制算法和FFT技术的计算复杂度相对较高,会导致算法的运行效率降低,未来可以探索更高效的信号处理和算法,以降低计算复杂度,提高算法的运行效率。

参考文献:

- [1] 李然,孙晓冬,刘波,等. 煤矿井下智能压裂泵系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 264-269.
Li Ran, Sun Xiao-dong, Liu Bo, et al. Research on intelligent fracturing pump system in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 264-269.
- [2] 杨波. 基于位移协调控制的液压式压裂泵流体脉动抑制研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(10): 73-77.
Yang Bo. Research on fluid pulsation suppression of hydraulic fracturing pump based on displacement coordinated control[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(10): 73-77.
- [3] 李永涛,木合塔尔·克力木,杨波. 基于MATLAB/Simulink的压裂泵流量脉动抑制研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(2): 169-173.
Li Yong-tao, Muhetaer Kelimu, Yang Bo. Study on

- flow pulsation suppression of fracturing pump based on MATLAB/Simulink[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(2): 169-173.
- [4] 戚伟, 杨波, 晁宇. 基于模糊RBF的液压压裂泵同步研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(20): 44-50.
Qi Wei, Yang Bo, Chao Yu. Synchronous study of hydraulic fracturing pump based on fuzzy RBF[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(20): 44-50.
- [5] Yabui S, Suzuki M, Fukazawa T N K. Compensation for low-frequency vibration in lateral control of truck by adaptive feed-forward cancellation[J]. Journal of Vibration and Control, 2024, 30(9): 2083-2092.
- [6] 曹峰, 胡波, 王安伟, 等. 压裂泵的数值分析及仿真标定验证[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(6): 205-210.
Cao Feng, Hu Bo, Wang An-wei, et al. Numerical analysis and simulation calibration verification of fracturing pump[J]. Machine Design & Research, 2023, 39(6): 205-210.
- [7] 洪剑锋, 曹君慈, 刘亚静. 永磁电机电磁振动及变开关频率振动抑制技术试验探究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 52-61.
Hong Jian-feng, Cao Jun-ci, Liu Ya-jing. Experimental research on PWM technique for vibration reduction in PM motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(12): 52-61.
- [8] 胡锦程, 李蓉, 李登, 等. 压裂泵泵阀冲蚀磨损的数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 225-232.
Hu Jin-cheng, Li Rong, Li Deng, et al. Numerical simulation for erosive wear of the fracturing pump valve[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 225-232.
- [9] 赵继展. 煤矿井下水力加砂压裂泵关键参数研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(3): 151-155.
Zhao Ji-zhan. Key parameters of hydraulic sand fracturing pump in coal mine[J]. Coal Engineering, 2023, 55(3): 151-155.
- [10] 孙浩涵, 袁骊. 以频率误差控制为目标的自由振动问题自适应有限元分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 106-115.
Sun Hao-han, Yuan Si. Adaptive finite element analysis of free vibration problems with frequency error control alone as the objective[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(4): 106-115.
- [11] 蒋月静, 李海兵. 旋转机械不平衡振动自适应控制方法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 484-488.
Jiang Yue-jing, Li Hai-bing. Simulation of adaptive control method for unbalanced vibration of rotating machinery[J]. Computer Simulation, 2023, 40(1): 484-488.
- [12] 冯青松, 杨舟, 郭文杰. 基于振幅放大机制的周期钢弹簧浮置板轨道结构低频振动控制[J]. 机械工程学, 2024, 60(3): 155-169.
Feng Qing-song, Yang Zhou, Guo Wen-jie. Low frequency vibration control of periodic steel spring floating slab track based on amplitude amplification mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(3): 155-169.
- [13] 涂建维, 周欣茹, 廖田龙, 等. 基于最小控制合成自适应算法的曲板结构振动控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(8): 76-81.
Tu Jian-wei, Zhou Xin-ru, Liao Tian-long, et al. Vibration control of curved plate structure based on minimum control synthesis adaptive algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(8): 76-81.
- [14] 钟国强, 柳尚, 徐润, 等. 考虑异常监测数据影响的桥梁拉索振动频率识别方法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2023, 54(12): 4870-4881.
Zhong Guo-qiang, Liu Shang, Xu Run, et al. Vibration frequency identification method of bridge cable considering abnormal monitoring data[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(12): 4870-4881.
- [15] 王晓光, 党李涛, 马明. 基于振动频率的响应面模型修正稳健估计法[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 77-84.
Wang Xiao-guang, Dang Li-tao, Ma Ming. A robust estimation method for response surface model updating based on vibration frequency[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(2): 77-84.