

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902638

VMD 滤波重构的时间序列自回归建模研究*

陈庆堂¹ 黄宜坚²

(1.莆田学院 机电工程学院 莆田 351100; 2.华侨大学 机电及自动化学院 厦门 361021)

摘要:为了获取反映磁流变减振系统自身特征的分析信号,选取适合系统的时间序列自回归模型,提出了谐波系数搜索最优惩罚因子和分解模数的变分模态分解(VMD)滤波重构方法,通过建立与系统的动力学模型同阶的重构分析信号时间序列 ARMA 和 AR 模型,对比基于快速傅里叶变换(FFT)、经验模态分解(EMD)信号滤波重构算法,分析了各模型模拟精度。研究表明,3种滤波重构方法中,未简化的高阶模型均比简化的低阶模型拟合精度高,同阶 ARMA 模型模拟精度均比 AR 模型高,采用谐波系数搜索最优惩罚因子和分解模数的 VMD 滤波重构方法的自回归模型模拟精度最高,其中基于 VMD 重构信号的 ARMA(4,1)模型建模精度最高,最适合用于系统的建模与分析。

关键词: VMD; 自回归模型; 磁流变**中图分类号:** TB381; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Research of time series autoregressive modeling based on VMD filtering reconstruction

Chen Qingtang¹ Huang Yijian²

(1.College of Mechanical Engineering and Electrical, Putian University, Putian 351100, China;

2.College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to obtain the analysis signals reflecting the characteristics of the system, find the signal reconstruction method and autoregressive model that suitable for time series of the system. VMD filtering reconstruction method using harmonic coefficients to search the optimal penalty factor and decompose modulus is proposed to filter and reconstruct analysis signals of MR damper system, then ARMA and AR models of the analysis signals of the same order as the dynamic model of the system are established, compared with the reconstruction algorithm based on FFT and EMD signal filtering, the simulation accuracy of these models are analyzed. The results show that, among the three filtering reconstruction methods, the fitting accuracy of the simplified low-order model is lower than that of the non-simplified high-order model, the simulation accuracy of the same-order ARMA model is higher than that of the AR model, VMD filtering reconstruction method using harmonic coefficients to search the optimal penalty factor and decompose modulus has the highest simulation accuracy of the autoregressive model. Among them, ARMA (4,1) model based on VMD reconstructed signal has the highest modeling accuracy and is most suitable for system modeling and analysis.

Keywords: variational mode decomposition; autoregressive model; magnetorheological

0 引言

磁流变液(MRF)是一种可控的粘性液体,在磁场作用下能改变其阻尼或减振效应,外界通过改变作用其磁场强度大小来改变其性能,根据这一特性,磁流变液被广泛应用于汽车、振动装备的阻尼器或减振器^[1-4]。研究它们的性能对于实际应用有着重要的意义,通常将其安装

在振动测试装备上,通过外界施加谐振激励,并改变磁场强度大小,检测其不同工作状态下的振动信号,从信号特征分析其性能变化^[1-3]。文献[1-3]通过对砌块成型机上使用的磁流变减振器,模拟砌块机工作原理设计一个振动测试工作台,建立了减振系统的动力学模型,设置了砌块机不同工况条件,检测不同工况条件下的振动位移信号,获得时间序列信号,建立了系统的动力学模型,通过离散系统的 ARMA(autoregressive moving average)模型或

收稿日期: 2019-09-29 Received Date: 2019-09-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(50975098)、福建省科技引导性配套(2018H0031P)资助项目

AR (autoregressive) 模型与其动力学方程系数对应关系求解系统的动态特性参数, 研究动态特性参数随工况条件变化的趋势。然而, 外界激振成分是振动的主要能量, 以主要信号特征体现出来, 导致不同状态间的信号区分度不高, 无法很好地体现系统的本质特征, 进一步研究有效滤去外界激振信号成分, 提取体现系统本身特性的分析信号, 提高状态间的信号分辨率是很有必要的。快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 是离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 的高效算法, 通常通过频谱滤去确定性频率成分, 结合逆变换获得滤波后重构信号, 在信号的滤波与分析处理中得到应用, 但该方法往往会使得信号的部分细节在变换过程中丢失和受到抑制^[2]。经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 是一种无须预先设定任何基函数, 可根据数据本身的时间尺度特征进行信号分解的方法。该方法用于非平稳及非线性时间序列的处理, 具有很高的信噪比, 具有非常明显的信号处理优势, 适合于非线性及非平稳信号序列的处理与分析, 因此被应用在机械故障诊断、天体观测资料与地震记录分析、密频动力系统的阻尼特性识别等, 但经验模态分解时易出现模态混叠现象, 不利于获得理想的确定成分固定模态分量^[5-7]。2014 年, 变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 在参考 EMD 的基础上提出了在变分框架内求解最优变分模型来获取模态分量的方法, 目前该方法已应用于电压信号识别、医学心电图、传动轴系、滚动轴承的故障诊断、声目标识别、流量预测、齿轮箱的故障诊断、电路损坏诊断分析等方面的研究, 其分解的模态可通过参数的调整获得理想的分解模数和模态分量^[8-9]。

基于磁流变减振系统的动力学模型, 本研究提出基于 FFT、EMD 和 VMD 滤波重构分析信号的算法, 用于提取并滤去低频成分和确定激振频率成分, 建立与系统动力学方程同阶的 ARMA 模型、AR 模型, 通过计算拟合残差的平方和来衡量拟合精度, 研究对比分析建模精度, 从中寻找系统合适的信号重构方法与自回归模型, 为进一步分析研究打下基础。其中, 振动信号中的低频成分和确定性激振频率成分的提取是算法的核心, 是决定信号重构与建模精度高低的重要因素, 尤其是 VMD 重构法中需要研究以提取低频成分和确定激振频率成分为目标搜索最优惩罚因子和分解模数, 并在最优惩罚因子和分解模数下进行滤波重构分析信号。

1 EMD 与 VMD 原理

EMD 方法是利用信号上下包络的均值来确定“瞬时平衡”位置, 将信号 $s(t)$ 自适应分解成若干固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量^[6,10]。

$$s(t) = \sum_{k=1}^K C^{(k)}(t) + r^{(k)}(t) \quad (1)$$

式中: $C^{(k)}(t)$ 表示第 k 个 IMF; $r^{(k)}(t)$ 表示余量信号^[5-7]。

VMD 方法是将信号的分解引入到变分模型, 以最优解的过程寻找约束变分模型, 通过每个模态分量的中心频率和带宽不断地相互交替迭代更新, 最后自适应地分解信号的频带, 得到给定尺度的 K 个窄带的模态分量。VMD 方法中估计模态带宽的约束变分问题可表示为^[8,11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t) e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: u_k 为分解获得的 K 个模态分量; ω_k 为每个模态分量的中心频率; $f(t)$ 为原始信号; $\delta(t)$ 为脉冲单位函数^[8-11]。可以通过二次惩罚因子 M 和拉格朗日乘子 $\lambda(t)$ 将目标函数的约束优化问题转换为无约束优化问题, 其中二次惩罚因子 M 是确保信号在 Gaussian 噪声存在的情况下获得重构精度的重要参数^[8,12-14]。

2 系统的动力学建模与振动信号检测

2.1 振动系统的动力学建模

为了衡量磁流变减振器在砌块成型机中的阻尼效果, 根据砌块成型机的工作原理, 设计研制了磁流变减振系统 (图 1), 系统由磁流变减振器、下支架、上支架、两铸铁块和偏心激振装置等组成, 上下支架间通过磁流变减振器、弹性元件、滑动杆连接起来; 系统由偏心激振装置在不同频率下激励振动。若连接磁流变减振器的两铸铁块质量分别为 m_1 、 m_2 , 连接上下支架的弹性元件弹性系数为 k_2 、 k_3 ; 根据系统的结构组成, 将磁流变减振器视为一个阻尼元件 c 和弹性元件 k_1 的结合体, 检测位移信号为 y , 可列出系统的动力学微分方程组如下^[1-3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 D^2 x(t) + k_1 (x(t) - y(t)) + c_1 D(x(t) - y(t)) + k_3 x(t) = f(t) \\ m_2 D^2 y(t) + k_2 y(t) = k_1 (x(t) - y(t)) + c_1 D(x(t) - y(t)) \end{array} \right. \quad (3)$$

式(3)经 Laplace 变换并简化整理后获得系统的状态方程为^[2]:

$$Y(s) [m_1 m_2 s^4 + m_1 c_1 s^3 + m_1 (k_1 + k_2 + k_3 s^2 + m_2 c_1 s^2 + m_2 (k_2 + k_3) s^2 + k_2 c_1 s + k_2 (k_1 + k_3))] = (c_1 s + k_1 + k_3) F(s) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 系统模型为四阶系统, $y(t)$ 为四阶系统输出的谐振响应, 其模型的状态方程可用通式表示为^[2]:

$$(A_4S^4 + A_3S^3 + A_2S^2 + A_1S + A_0)Y(S) = (B_1S + B_0)F(S) \quad (5)$$

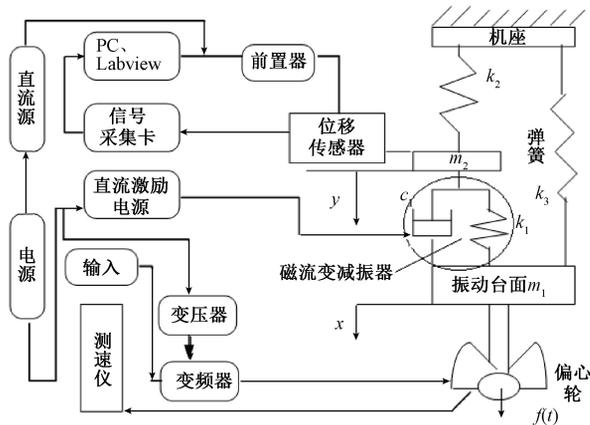
对应的微分方程可用通式表示为:

$$A_4D^4y(t) + A_3D^3y(t) + A_2D^2y(t) + A_1Dy(t) + A_0y(t) = B_1Df(t) + B_0f(t) \quad (6)$$

以上四阶系统对应离散系统的时间序列 ARMA(4,1) 模型,根据系统部分结构特点,可忽略部分结构以简化系统模型:1)简化 MA 模型,即从 ARMA 简化成同阶 AR 模型部分;2)降低模型阶次,即从高阶简化成低阶。故可建立对应的时间序列离散系统的 ARMA(4,1)、AR(4)、ARMA(3,1)、AR(3)、ARMA(2,1)、AR(2) 等 6 个自回归模型来拟合位移信号,以便对系统作进一步的分析与研究。



(a) 测试现场
(a) Test site



(b) 测试系统简图
(b) Test structural

图 1 磁流变减振系统测试现场及结构^[3,15]

Fig.1 Test site and its structural diagram of MR vibration absorption system

2.2 振动信号实验检测

为了获取系统的振动测试信号,建立了振动测试系统,如图 1 所示。系统主要由变频控制器、传感器、基于 NI 的实验检测与显示系统、电流控制器等组成^[1-3]。振

动信号检测在激振频率分别为 $f=20+5j$ Hz ($j=0,1,2,3,4$), 每个激振频率下控制电流 $I=0+0.5k$ A ($k=0,1,2,3,4,5$) 检测获得 30 组位移信号^[2]。每组信号选取较为稳定的时间序列数据段的 500 个数据用于处理与分析。

3 信号重构与自回归建模分析

振动测试是在特定的外界谐振频率下进行的,为了滤去外界谐振频率成分和低频成分,重构体现系统固有特性的信号作为分析研究对象,本研究提出了 3 种基于 FFT、EMD、VMD 重构分析信号算法。

3.1 基于 FFT 法信号重构自回归建模分析

将振动信号 FFT 后波谱的低频值和激振频率附近值置零,滤去低频成分和激振频率成分,再进行逆变换作为分析信号,建立的时间序列 AR 模型和 ARMA 模型拟合分析信号,计算拟合残差的平方和作为拟合误差,分析模型拟合的精度,其算法如下。

- 1) 将振动位移信号 $x_i (i=1,2,\dots,500)$ 进行 FFT,求波谱 $Y = \text{abs}(\text{fft}(x_i))$;
- 2) 将低频成分置 0, $\text{set}(Y(1), Y(2)) = 0$, 获得 Y_1 ;
- 3) 再将激振频率 f 附近置 0, $\text{set}(Y(f-1), Y(f), Y(f+1)) = 0$, 获得 Y_2 ;
- 4) 求 Y_2 逆变换, 获得分析信号 $y = \text{ifft}(Y_2)$;
- 5) 分别建立 y 的 ARMA、AR 模型, 即 ARMA($y, (4, 1)$), ARMA($y, (3, 1)$), ARMA($y, (2, 1)$) 以及 AR($y, 4$), AR($y, 3$), AR($y, 2$);

$$6) \text{ 求拟合残差平方和 } e = \sum_{i=1}^{500} (y_i' - y_i)^2,$$

其中, y_i' 为自回归模型拟合值。

通过对不同工况条件下的 30 个时间序列分别采用以上算法,得出 6 种模型的拟合误差如图 2 所示。从图 2 可以看出,FFT 滤波重构的分析信号采用四阶自回归模型模拟误差最小,三阶次之,二阶模拟误差最大,精度最低;同阶模型模拟中,采用 ARMA 模型模拟比 AR 模型模拟的精度高,故 6 种模型中,ARMA(4,1) 模型模拟精度最高,AR(2) 模型模拟精度最低,这表明自回归模型的简化对模拟精度产生一定的影响,从 ARMA 模型简化成同阶 AR 模型对模拟精度的影响小于因降低模型阶次带来的影响,降低阶次的简化比动力学方程等式右边的 MA 模型简化敏感性更大。

3.2 基于 EMD 法信号重构自回归建模分析

振动信号通过 EMD 获得各阶固有的分解模态,再通过对各分解模态进行 FFT 可以获得频谱,从中提取激振频率及低频成分对应的模态。图 3 所示为 $f=20$ Hz、 $I=0$ A 状态下的原始信号、经验模态分解信号及其对应的频谱,从图 3 可以看出,原信号分解获得 7 阶模态,其

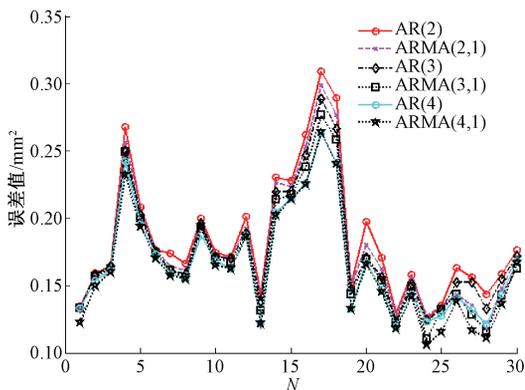


图 2 FFT 滤波重构信号的 6 种自回归模型模拟精度
Fig.2 Simulating accuracy of six autoregressive models for FFT filtering reconstructed signals

中激振频率 $f=20$ Hz 模态为第 3 阶模态,第 7 阶模态为低频成分模态,通过 EMD 可以从原信号中分解并滤去低频和激振频率的模态,获得体现系统特性的重构信号。

建立重构信号的时间序列 AR 模型和 ARMA 模型拟合分析信号,计算拟合残差的平方和作为拟合误差,分析模型拟合的精度,其算法如下。

- 1) 将振动位移信号 $x_i (i = 1, 2, \dots, 500)$ 进行经验模态分解,得到各阶模态向量 $X_n = \text{EMD}(x_i)$;
- 2) 对各阶模态进行 FFT,获得各模态频谱 $Y_i = \text{abs}(\text{fft}(X_i))$;
- 3) 找出并滤去频谱为低频成分和激振频率附近成分的模态 X_a 和 X_b ,获得重构分析信号 $y = x_i - X_a - X_b$;
- 4) 分别建立 y 的 ARMA、AR 模型,即 ARMA(y ,

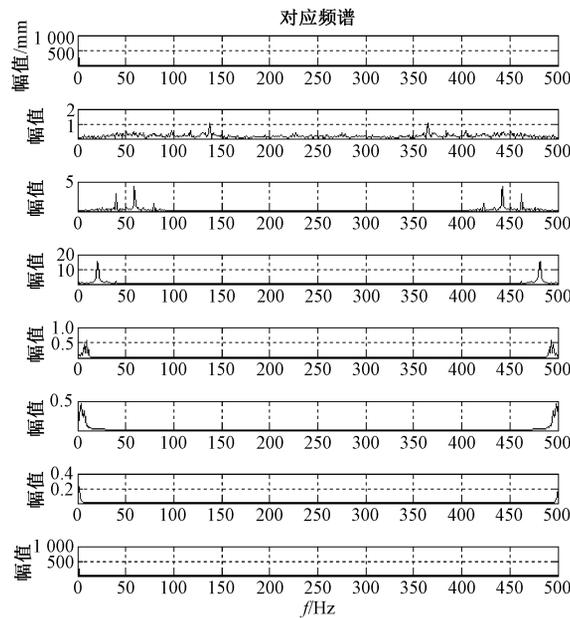
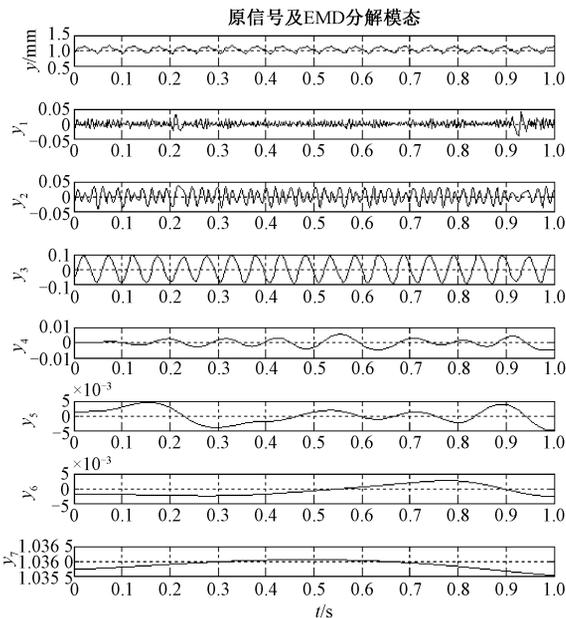


图 3 基于 EMD 的各分解模态信号及频谱图

Fig.3 Decomposed modal signals and its spectrograms based on EMD

(4,1), ARMA($y, (3, 1)$), ARMA($y, (2, 1)$) 以及 AR($y, 4$), AR($y, 3$), AR($y, 2$);

5) 求拟合残差平方和 $e = \sum_{i=1}^{500} (y_i' - y_i)^2$, 其中, y_i' 为自回归模型拟合值。

通过对不同工况条件下的 30 个时间序列分别采用以上算法,获得各状态下 6 个模模型的位移拟合误差如图 4 所示。从图 4 可以看出,同一工况条件下,EMD 滤波重构的分析信号用 6 种不同模型拟合误差较为接近;采用四阶自回归模型模拟误差最小,三阶次之,二阶模拟误差最大;同阶模型模拟中,采用 ARMA 模型模拟比 AR 模型模拟的精度高,故 ARMA(4,1)模型在 6 种模型中模拟精度最高,AR(2)模型模拟精度最低,这表明模型自回

归模型的简化对模拟精度产生一定的影响;EMD 滤波重构的分析信号用自回归模型模拟时,从 ARMA 模型简化成 AR 模型的模拟精度的影响小于因降低模型阶次带来的影响,降低阶次的简化比动力学方程式右边的 MA 模型简化敏感性更强。对比 FFT 滤波重构和 EMD 滤波重构,两者对分析信号的模拟精度高低的差异与工况条件有关,同一模型拟合时, $f=20$ Hz $f=30$ Hz 和 $f=35$ Hz 时的振动信号用 EMD 滤波重构模拟精度比 FFT 滤波重构模拟精度高,而 $f=25$ Hz 和 $f=40$ Hz 时的振动信号用 EMD 滤波重构模拟精度比 FFT 滤波重构模拟精度低,这是由于部分工况条件下振动信号用 EMD 分解的模态存在频率混叠,部分系统动力学特征丢失,导致模拟精度偏低。

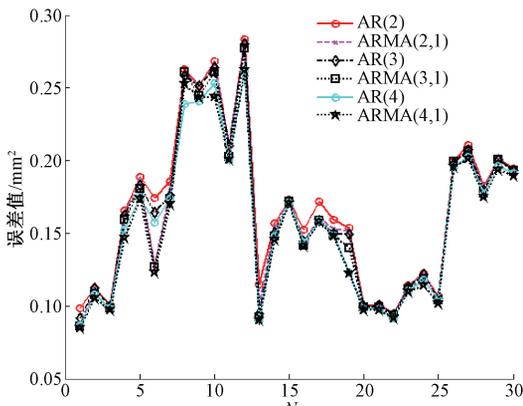


图4 EMD 滤波重构信号的6种自回归模型模拟精度

Fig.4 Simulating accuracy of six autoregressive models for EMD filtering reconstructed signals

3.3 基于 VMD 法信号重构自回归建模分析

1) VMD 参数选择

为了衡量提取谐波信号的效果,引入谐波系数 α ,即 VMD 分解信号 FFT 波谱在激振频率值附近(取 3 个)能量占总能量的比值,以衡量 VMD 分解信号与谐波信号的近似度,其表达式如下:

$$\alpha = \frac{I_{f-1}^2 + I_f^2 + I_{f+1}^2}{\sum_{i=1}^n I_i^2} \quad (7)$$

式中: I 为频谱幅值; f 为激振频率。 α 越大,表明信号越接近谐波信号特征,当 $\alpha = 1$ 时,该信号为谐波信号,在 VMD 分解的模式中, α 最大时的模式最接近谐波信号。

在惩罚系数 M 一定的情况下,通过在一定范围内改变模态数,计算不同模态数下 VMD 分解模态的最大谐波系数 α_{\max} 。图 5(a) 所示为 $f=20$ Hz、 $I=0$ A、惩罚系数 $M=20$ 时,模数 K 从 2~15 范围内的对应各模态最大谐波系数 α_{\max} 变化曲线。

从图 5(a)可以看出,惩罚因子 $M=20$ 时,分解模数变化对 $f=20$ Hz 处的最大谐波系数 α_{\max} 影响较大,分解模数 $K=7$ 时,最大谐波系数 α_{\max} 最大,即分解出的模式中出现最接近谐波的信号。进一步从各模态频谱图(图 6)可以看出,最大谐波系数出现在第 2 模态,低频信号出现在第 1 模态。

在模态数 K 一定的情况下,通过在一定范围内改变惩罚因子 M ,计算不同惩罚因子下 VMD 各分解模态的最大谐波系数 α_{\max} 。图 5(b)所示为在 $f=20$ Hz、 $I=0$ A、模数 $K=7$ 时,惩罚因子从 1~200 范围内的最大谐波系数 α_{\max} 变化曲线。

从图 5(b)可以看出,分解模数 $K=7$ 时,惩罚因子 M 变化对 $f=20$ Hz 处的最大谐波系数 α_{\max} 影响较大,惩罚

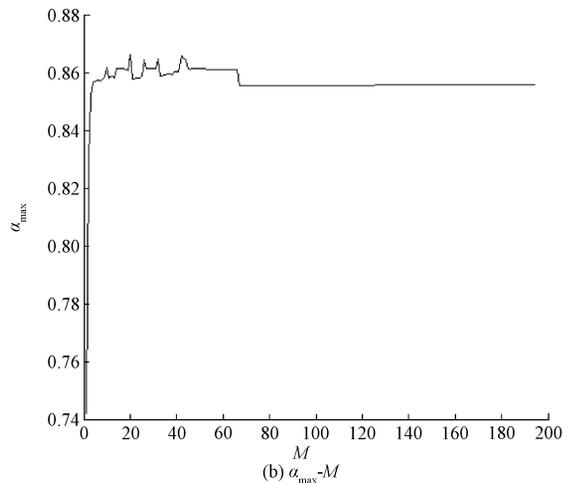
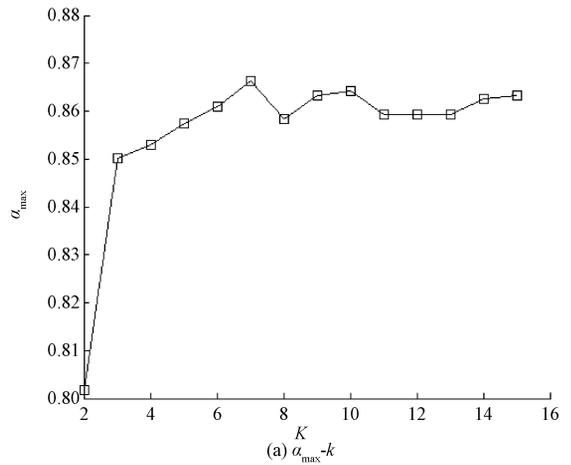


图5 最大谐波系数随模数、惩罚因子变化
Fig.5 Change of maximum harmonic coefficient with modulus and punishment factor

因子 $M=39$ 时,最大谐波系数 α_{\max} 最大,即分解出的模式中出现最接近谐波的信号。

以上分析可以得出,VMD 的模式分解结果取决于给定的模态数 K 和惩罚因子 M ,其中模态数 K 的选取对分解信号的影响较大,分解的模态数太大或太小都不易获得理想的谐振信号;惩罚因子的选取也会影响分解模式的频率和特征,但与模态数 K 变化的影响相比,其影响相对较小。

2) 基于 VMD 滤波重构算法

分别设置模数和惩罚系数在一定范围内,在不同的模数和惩罚系数下对检测信号进行 VMD,再对各分解信号进行 FFT 并求其频谱,计算频谱在激振频率值附近能量占比(波形畸变系数),搜索最大谐波系数的模态,获取对应的模数和惩罚因子,滤去该 VMD 参数下分解的谐波以及低频模态,余下的信号作为重构分析信号。基于减振系统的滤波需要,分解的模数 K 选择在 2~10,惩罚因子 M 选择在 1~200,以 1 为间隔进行搜索各种不同工

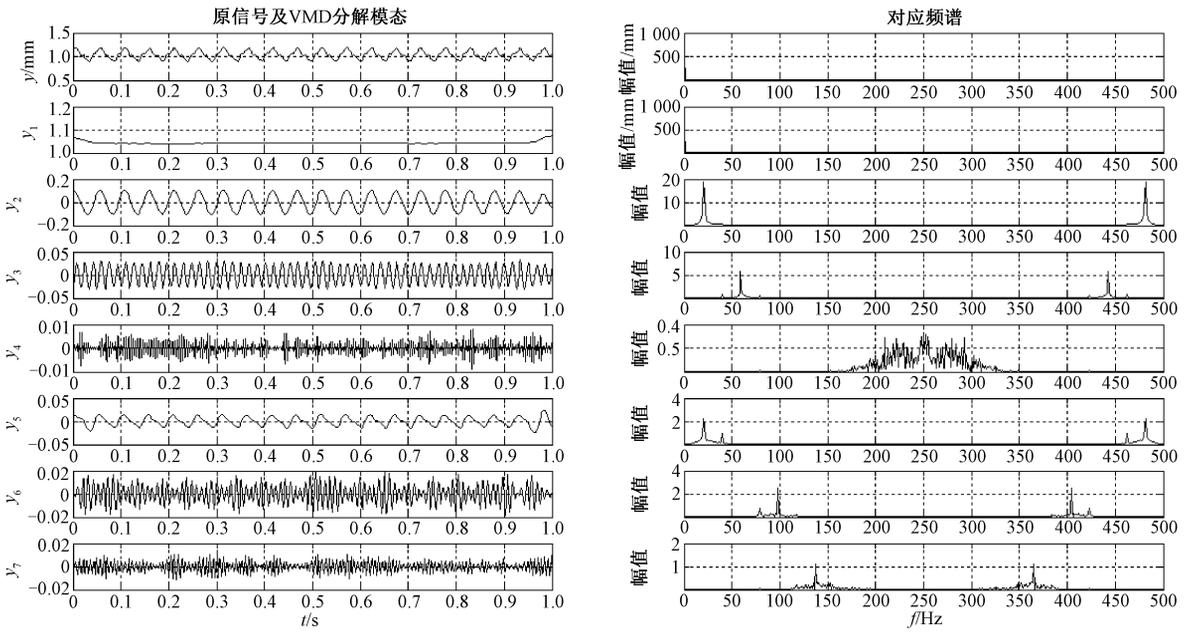


图 6 基于 VMD 的各分解模态信号及频谱图

Fig.6 Decomposed modal signals and its spectrograms based on VMD

况下振动信号进行 VMD,所分解信号的最大谐波系数对应的模数和惩罚因子。将重构的时间序列建立 AR 模型和 ARMA 模型拟合分析信号,计算六种模型下的拟合残差平方和作为拟合误差,分析模型拟合的精度,其算法如下。

- (1) 确定分解的模态数 $K=2,3,\dots,10$,惩罚因子 $M=1,2,3,\dots,200$;
- (2) 给定初值 $K=2, M=1$,将振动位移信号 $x_i (i=1, 2,\dots,500)$ 变分模态分解,得到对应的各模态向量 $X_n = \text{VMD}(x_i, K, M), n=1\cdots K$;
- (3) 求 X_n 的频谱, $Y_n = \text{abs}[\text{fft}(X_{1-K})], n=1\cdots K$;
- (4) 求 Y_n 在激振频率 f 附近的谐波系数,在 $1-K$ 个模态中取 $\alpha(2,1)$ 的最大值;
- (5) $K=K+1, M=M+1$,重复步骤(2~4)运算,获得各 $\alpha(K, M)_{\max}$;
- (6) 取所有 (K, M) 对应 $\alpha(K, M)_{\max}$ 的最大值,并记录最大值时对应的 K_0, M_0 值及其所在模态序号 n ;
- (7) 将原信号以 K_0, M_0 为参数进行模态分解,并滤去第 1 模态和第 n 模态,获得重构分析信号 $y = x_i - X_1 - X_n$;
- (8) 分别建立重构分析信号 y 的 ARMA、AR 模型,即 $\text{ARMA}(y, (4,1)), \text{ARMA}(y, (3,1)), \text{ARMA}(y, (2,1))$ 以及 $\text{AR}(y, 4), \text{AR}(y, 3), \text{AR}(y, 2)$,获得各模型拟合位移向量 y' ;

- (9) 求拟合残差平方和 $e = \sum_{i=1}^{500} (y_i' - y_i)^2$, 其中, y_i'

为自回归模型拟合值。
根据以上的算法,获得不同工况条件下振动信号 VMD 重构后各自回归模型拟合误差,对比 FFT、EMD 滤波重构的模拟误差曲线绘制如图 8 所示,重构信号用 ARMA(4,1) 拟合前后对比如图 9 所示。

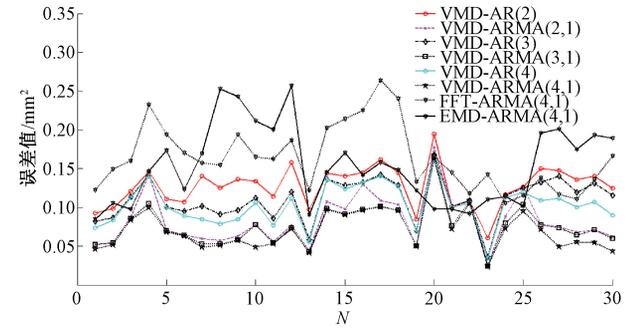


图 8 VMD 滤波重构信号的 6 种自回归模型模拟精度
Fig.8 Simulating accuracy of six autoregressive models for VMD filtering reconstructed signals

从图 8 可以看出,VMD 滤波重构的分析信号采用自回归各模型模拟的误差均比 FFT 和 EMD 滤波法重构信号 ARMA(4,1) 模型模拟误差小,VMD 滤波重构自回归建模的优势明显,表明 VMD 滤波重构信号更能反映系统的特性,更适合进行自回归建模分析;不同模型拟合误差区分度较大,表明模型的简化整体上对模拟影响较大,采用 ARMA(4,1)、(3,1)、(2,1) 模型的模拟误差比 AR(4)、(3)、(2) 模型模拟的误差小,这是因为同阶 AR 模型因简化而导致模拟精度降低,也表明采用 VMD 滤波方

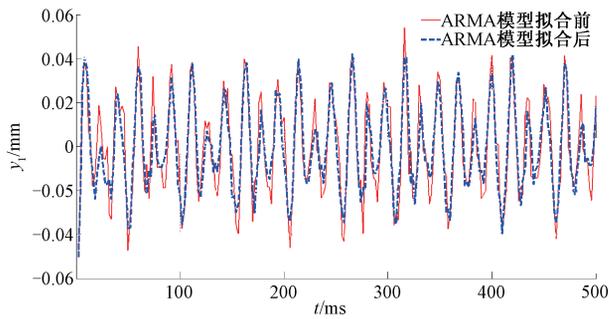


图9 VMD 滤波重构分析信号 ARMA 模型拟合前后对比
Fig.9 Comparison chart of VMD filter reconstruction analysis signal fit before and after by ARMA model

法时 ARMA 模型比 AR 模型更适合用于建模, ARMA(4, 1) 模型建模精度最高, ARMA(3, 1) 次之, 从 ARMA 模型简化成 AR 模型的模拟精度的影响大于因降低模型阶次简化带来的影响, 动力学方程等式右边的 MA 模型简化比降低阶次的简化敏感性更大。从图 9 的重构位移信号 ARMA 模型拟合前后对比可以看出, 曲线重合度高, 模拟效果好。

4 结 论

通过基于 FFT 法、EMD 法和 VMD 法对磁流变减振系统的振动测试信号进行滤波重构, 建立与系统的动力学模型同阶的时间序列 ARMA 和 AR 模型, 分析了重构信号的拟合误差, 得出如下结论。

1) 简化的模型总体上比未简化的模型拟合精度低。基于 FFT、EMD 滤波重构的分析信号采用四阶自回归模型模拟精度最高, 三阶次之, 二阶模拟精度最低; VMD 滤波重构的分析信号采用四阶自回归的 ARMA 或 AR 模型模拟精度最高, 三阶次之, 二阶模拟精度最低。

2) 同阶模型模拟中, 3 种滤波方法下采用 ARMA 模型模拟均比 AR 模型模拟的精度高。其中基于 VMD 滤波重构的分析信号采用 ARMA 模型的模拟精度均比 AR 模型的高, 采用基于 VMD 滤波重构信号的 ARMA 模型优势明显。

3) 采用基于 VMD 滤波重构方法与基于 FFT、EMD 滤波重构信号方法相比, 其自回归模型模拟精度较高, 这表明通过谐波系数搜索, VMD 的最优惩罚因子和分解模数进行固定频率成分滤波效果好, 在模拟磁流变减振系统方面优势更明显。

4) 综合衡量各模型拟合精度, 基于 VMD 滤波重构的分析信号采用四阶自回归的 ARMA(4, 1) 模型模拟的效果最好, 最适合用来描述系统的动力学特征。

参考文献

- [1] 陈庆堂, 宋一然, 黄宜坚. 基于 AR 模型-分形维的磁流变减振器性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2016(12): 2774-2780.
CHEN Q T, SONG Y R, HUANG Y J. Characteristics research of MR damper based on ar model-fractal dimension [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016(12): 2774-2780.
- [2] 陈庆堂, 宋一然, 黄宜坚. 基于 ARMA 模型的磁流变振动系统精确建模与性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1014-1022.
CHEN Q T, SONG Y R, HUANG YJ. Accurate modeling and performance study of MR vibration system based on ARMA model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1014-1022.
- [3] 陈庆堂, 黄宜坚. 基于 AR 模型的磁流变减振系统动态性能研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 324-329.
CHEN Q T, HUANG Y J. Dynamic performance study of MR damping system based on AR model [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3): 324-329.
- [4] 李津宁, 刘凤祥, 李琪, 等. 盘式磁流变液制动特性演示仪的设计[J]. 物理通报, 2016(12): 85-87.
LI J N, LIU F X, LI Q, et al. Design on the demonstration characteristic of the disc type instrument for braking magnetorheological fluid [J]. Physics Bulletin, 2016(12): 85-87.
- [5] 李康强, 冯志鹏. 基于 EMD 和能量算子的模态参数识别在行星齿轮箱中的应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 1-8
LI K Q, FENG ZH P. Modal parameter identification based on empirical mode decomposition and energy operator for planetary gearboxes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 1-8
- [6] 陈晓东, 孙金华. 大气电场仪场地因子修订及 EMD 分解分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(12): 93-97, 108.
CHEN X D, SUN J H. Atmospheric electric field meter space factor amendment and EMD decomposition analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(12): 93-97, 108
- [7] 栾策, 陈涛涛, 段亚飞, 等. 基于 EMD 方法的参考作物腾发量振荡模态分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(3): 315-320.
LUAN C, CHEN T T, DUAN Y F, et al. Vacillations analysis of monthly reference crop evapotranspiration based on EMD method [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(3): 315-320.
- [8] 周进群, 刘义亚. 基于 VMD-SWT 滚动轴承故障诊断方

- 法研究[J].汽车实用技术,2019(6):146-152.
- ZHOU J Q, LIU Y Y. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on VMD-SWT [J]. Automobile Applied Technology, 2019(6):146-152.
- [9] 张俊甲,马增强,王梦奇,等.基于 VMD 与自相关分析的滚动轴承故障特征提取[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9):1372-1378.
- ZHANG J J, MA Z Q, WANG M Q, et al. Rolling bearing fault feature extraction based on VMD and autocorrelation analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation. 2017, 31 (9) : 1372-1378.
- [10] 付宇,郭志辉,杨甫江,等.基于经验模态分解的燃烧不稳定性分析[J].航空动力学报,2016,31(3):623-630
- FU Y, GUO Z H, YANG F J, et al. Analysis on combustion instability based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3):623-630.
- [11] 张锁峰,王衍学,何水龙,等.基于 VMD 的调制谱强度分布在齿轮故障诊断中的应用研究[J].机械强度,2019,41(2):267-274.
- ZHANG S F, WANG Y X, HE SH L, et al. Gear fault diagnosis based on the vmd and modulation spectrum intensity distribution [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019,41(2):267-274.
- [12] YANG C H, PENG X, ZHAO Y J, et al. Experimental study on VMD and its performance comparison with AGMD for treating copper-containing solution [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 207(2):876-891.
- [13] ZHAO Y, ZHANG B F, HAN L F. Laser self-mixing interference displacement measurement based on VMD and phase unwrapping [J]. Optics Communications, 2019, DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124588.
- [14] 隆勇,郭瑜.基于加窗振动分离和变分模态分解的行星轮故障特征提取[J].电子测量与仪器学报,2019,33(2):18-24.
- LONG Y, GUO Y. Fault feature extraction of the planet gear based on windowed vibration separation and variational mode decomposition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(2):18-24.
- [15] 陈庆堂,黄宜坚,宋一然.基于分数阶的高阶磁流变振动系统建模与分析[J].仪器仪表学报,2014,35(12):2762-2771.
- CHEN Q T, HUANG Y J, SONG Y R. The modeling research and performance analysis of high order MR vibrating system based on fractional order [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (12) : 2762-2771.

作者简介



陈庆堂,1997年于福州大学获得学士学位,2005年于东南大学获得硕士学位,现为莆田学院教授,主要研究方向为机械振动、高阶谱分析和磁流变技术。

E-mail: chenqingt@126.com

Chen Qingtang received his B.Sc. degree from Fuzhou University in 1997, M.Sc. degree from Southeast University in 2005. Now he is a professor at Putian University. His main research interests include mechanical vibration, high order spectrum analysis and magnetorheological technology.



黄宜坚,1982年于浙江大学获得硕士学位,现为华侨大学教授、博士生导师,主要研究方向机械设计与谱分析。

E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn

Huang Yijian received his M.Sc. degree from Zhejiang University in 1982. Now he is a professor and Ph.D. supervisor at Huaqiao University. His main research interests include mechanical design and spectrum analysis.