

DOI: 10.7652/xjtuxb201810021

一种转子启停车过程的基频振动分量提取方法

吴吉利, 张西宁

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统信号处理算法在分离转子启停车过程中包含复杂非平稳谐波分量的振动响应信号时存在计算量大、对宽频信号提取能力差等问题,基于零相移滤波和相位解调原理,提出了一种转子启停车过程中的基频振动分量提取方法。该方法通过一次非线性相位解调计算,把启停车信号各分量在频带上进行重新分布,这样宽频的基频分量被解调到可见的窄带上,仅在频域即可实现基频分量与其他高次谐波分量的分离,再通过零相移滤波即可提取这个窄带分量。仿真计算和实验数据分析结果表明:与传统的信号处理算法在处理转子启停车信号上相比,提出的方法具有原理简单易实现、计算速度快、受相邻分量带宽限制小、滤波器参数能够从频谱上直接选取等优势,同时该方法提取出的基频振动分量波形平整,无相位偏移,满足进一步的分析计算,为转子启停车信号的快速提取提供了一种新的方式。

关键词: 转子启停车;谐波分量;滤波;相位解调

中图分类号: O329 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)10-0153-06

New Signal Processing for Extracting Fundamental Vibration Component of Rotor in Startup or Shut Down Process

WU Jili, ZHANG Xining

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the traditional signal processing algorithms, it is difficult to process the complicated vibration signals of rotor in startup or shut down process due to the huge calculation task and poor ability to extract wide-band signals. Following zero-phase filter and phase demodulation principle, a novel method for extracting the fundamental vibration component of rotor is proposed. The wide-band fundamental vibration component can be demodulated into a narrow-band interval via once nonlinear phase demodulation, which is segregated with the band of other higher-order harmonics in frequency domain, then the fundamental component is extracted by a zero-phase filter. The simulation calculation and experimental validation demonstrate that the proposed method outperforms the traditional signal processing algorithms by its simple mechanism, quick calculation and little limit to the band between adjacent components. The visual selection of filtering parameters can be directly realized in frequency domain and the extracted amplitude and phase of the fundamental components are accurate for the further calculation and analysis.

Keywords: rotor startup/shut down; harmonic component; filter; phase demodulation

旋转机械(转子)是石油化工、电力、能源动力等行业中的关键设备。转子质量分布不平衡是造成旋转机械振动过大及产生噪声的主要原因^[1],为保证转子平稳运行,必须对其进行平衡。在柔性转子的动平衡中,转子失衡信息主要是从转子的稳态振动信号中获取的,信号简单易处理,但是信号承载的失衡信息少。理论上,平衡某转速下的不平衡量需要起停车数次,工作费时且复杂,在很多场合下是难以接受的。如何减少起停车次数及快速对不平衡量的大小及方位进行识别成为研究热点^[1-2]。

转子启停车信号包含转子从盘车到工作转速经历的所有振动频率,比稳态振动中包含更加丰富的信息,因此越来越受到关注^[3]。启停车信号主要由基频分量及相应的倍频分量和分倍频分量、低频分量和背景噪声等组成,各振动分量都是典型的调幅又调频的非平稳信号。其中,基频分量与动平衡信息是直接相关的^[4],是由一个宽频不平衡量激发的,包含每转的振动幅值和滞后相位。因此,动平衡计算前的首要任务就是提取基频分量振动信号,消除无关的谐波分量和噪声。

经验模式分解(EMD)存在模式混淆和端点效应^[5],分解结果在时域是连续的,但是无法保证在频域也是连续的,因此 EMD 在处理长时间序列且具有连续频率的振动信号时存在困难^[6-7]。文献[3]截取了共振区域附近的转子启车振动信号作为待分析信号,是一段较短的时间序列信号,这样 EMD 才取得了一定的效果。在实际中,转子通常工作在一临界和二临界转速之间或者更高的转速下,短时间序列无法包含足够的振动信息,尤其是在绘制振动伯德图时,为了保证完整性和平整性,需要更长的时间序列^[8],但是 EMD 对长时间序列的提取无能为力。

阶比分析包含了硬件阶比分析和计算阶比分析,在提取转子各阶振动信号时具有一定的优势的。通常硬件阶比分析需要更多的硬件支持,效费比较低,且对非平稳瞬态信号计算精度低^[9]。计算阶比分析是目前应用较多的方法,分为有键相和无键相的两种。无键相的阶比分析需要时频分析来估计瞬时频率,但由于时频分辨率和噪声限制,只能得到粗略的和不准确的瞬时频率曲线,在动平衡中会使计算精度下降,影响动平衡的效果。有键相的阶比分析需要一组传感器来追踪转速,对瞬时频率的估计相对精确,在动平衡现场应用最为广泛,如 Vold-Kalman 滤波(VKF),但是它存在滤波阶数和带宽的选择问题^[10-11]。

时频分析方法如代表性的短时傅里叶变换法,窗函数固定,难以适应时变信号的局部非平稳性,且计算效应低^[12];Wigner 分布对单分量信号时频聚集性能最好,但是由于存在交叉项,对多分量信号在时频平面有严重的干扰现象。这些问题都限制了时频分析在转子启停车信号中的应用^[13-14]。

分数阶傅里叶变换(FRFT)易于处理线调频信号^[4],但对转速波动剧烈的转子振动信号在分数阶域的聚焦性能一般,导致旋转平面内谱线过多,因此滤波效果会变差。

因此,本文基于零相移滤波和相位解调原理,提出了一种简单有效的基频振动分量提取方法,并对该方法的有效性进行了验证,为转子启停车信号的快速提取提供了一种新的方式。因为转子启车和停车振动处理过程是相似的,所以本文只选择了启车信号作为处理对象。

1 信号特性分析及仿真

1.1 转子振动响应信号的特性分析

实际中的转子系统通常带有两个或者更多轮盘,振型相对复杂,难以建立各振动分量的解析表达式,数值计算方法如基于第二类拉格朗日方程计算得到的只是振动响应信号^[15-16],难以获得各阶振动信号的特性。单盘的 Jeffcott 转子系统(见图 1)具有清晰的动力学方程及解析解,更适用于分析不平衡响应的各阶振动特性^[17]。Jeffcott 转子的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= me\omega^2 \sin\omega t \\ x(0) &= x_0; \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

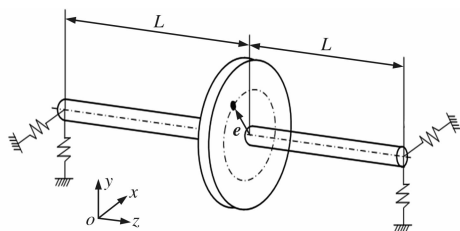


图1 Jeffcott 转子系统示意图

初始条件响应在转子启动后会快速衰减,因此假设初始条件为零,那么

$$x(t) = a(t) \sin(\omega t - \psi) + b(t) \sin(\omega_d t - \phi) \quad (2)$$

式中:第1项为强迫振动, $a(t)$ 为幅值, ψ 为滞后相位;第2项为伴随振动, $b(t)$ 为其幅值, ϕ 为滞后相位; ω 为角速度; ω_d 为固有频率。本文忽略伴随振动对强迫振动的影响,只考虑强迫振动。实际上,在

转子系统的启停车过程中,由于轴承的强非线性及转子故障(如碰摩、裂纹和不对中)等因素,都会导致启停车响应信号存在转频的高次谐波分量,那么一个转子的启停车振动响应可以表示为

$$x(t) = \sum_k^n a_k(t) \sin(\int_{t_1}^{t_2} k\omega(t)dt - \phi_k) \quad (3)$$

式中: $k=1,2,3,\cdots,n$, n 表示谐波个数;这里假设 $a_k(t)$ 、 $\omega(t)$ 都是缓变平滑函数。

从式(3)可以看出,每个振动分量的相位都由两部分组成,前面的是由转轴转动引起的累积相位,后面的是每个振动分量滞后于不平衡量方位的滞后相位。该滞后相位的特点是在各阶临界处,相位前后翻转 180° ,是判断不平衡量方位的关键信息。

1.2 含裂纹的转子不平衡响应

本节中,我们用带横向裂纹的 Jeffcott 转子(见图 1)在不平衡量激励下的振动模型来计算振动响应。图 2 所示的转子截面位于转轴中间裂纹处,裂纹模型采用张开与闭合程度随着重力和不平衡力合力的周期变化而变化的开闭裂纹。理论上,不平衡量激励出基频分量,同时开闭裂纹会导致转轴刚度发生变化,激发出基频的高次谐波分量^[18],因此得到的振动响应信号应包含基频及其高次谐波分量。该模型仅用于下文提出算法的验证计算。

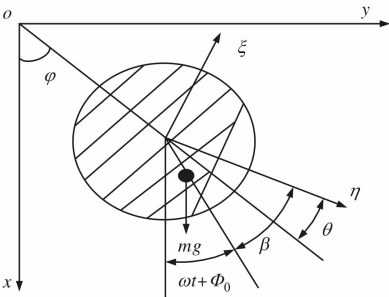


图 2 横向裂纹转子截面

对图 1 所示的 Jeffcott 转子,取轴中点为坐标原点,建立静止坐标系下(见图 2)的裂纹转子弯曲振动微分方程为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{xy} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} me\omega^2 \cos(\omega t + \theta_0) + mg \\ me\omega^2 \sin(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: m 表示圆盘质量; c 表示圆盘阻尼系数; e 表示圆盘偏心量; ω 表示转轴转速。裂纹处于呼吸状态,因此固定坐标系 oxy 下的刚度矩阵为

式中: k 为转轴刚度; $\Delta k = \Delta k_\xi = \Delta k_\eta$ 为有裂纹的转

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} - f(\phi) \cdot \begin{bmatrix} \Delta k_\xi \cos^2 \Omega t + \Delta k_\eta \sin^2 \Omega t & (\Delta k_\xi - \Delta k_\eta) \sin \Omega t \cos \Omega t \\ (\Delta k_\xi - \Delta k_\eta) \sin \Omega t \cos \Omega t & \Delta k_\xi \sin^2 \Omega t + \Delta k_\eta \cos^2 \Omega t \end{bmatrix} \quad (5)$$

轴刚度变化量; $f(\phi)$ 为呼吸裂纹的开闭函数,采用余弦模型来计算,可表示为

$$f(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \theta - \frac{2}{3\pi} \cos(3\theta) + \frac{2}{5\pi} \cos(5\theta) - \frac{2}{7\pi} \cos(7\theta) + \cdots \quad (6)$$

使用四阶龙格库塔算法求解式(4),计算使用到的部分参数为 $m=51 \text{ kg}$, $k=9.99 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$, $\Delta k=0.3 \text{ k}$, $c=1\,430 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,那么可得到所有方向上的振动响应,其某一个方向上的振动响应结果如图 3 所示。从图 3a 可以看出,裂纹导致的刚度变化激发出的高次谐波和不平衡激发的基频分量叠加在该振动响应信号上,并出现了 3 个共振峰,分别对应 3 次谐波分量、2 次谐波分量和基频分量(矩形框标识的 1、2、3);从图 3b 可以看出,原始信号各分量在频域产生了严重的耦合,难以进行分离。

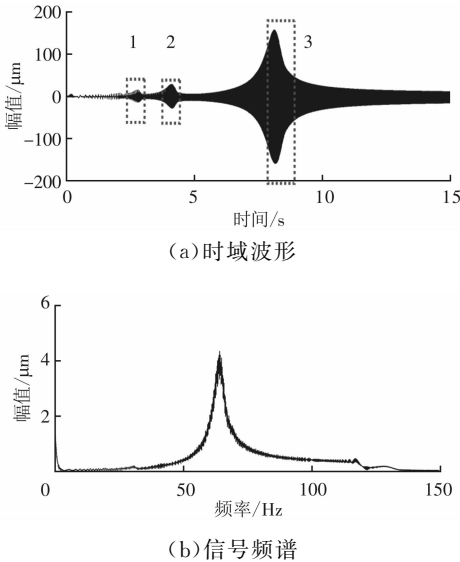


图 3 某方向的振动原始信号

2 基本原理

2.1 零相移低通滤波

用于动平衡计算的转子启停车信号,相位信息是关键,低通滤波算法经常存在相位偏移,影响动平衡计算精度,因此考虑采用零相移的低通滤波器^[19],计算原理如图 4 所示。

零相移滤波器的输出为

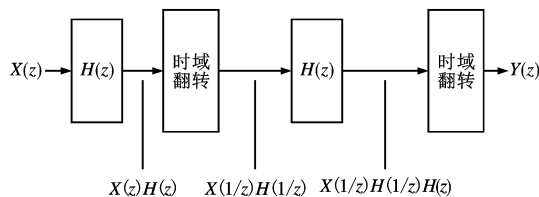


图4 零相移滤波器原理

$$Y(z) = X(z)H(1/z)H(z) \quad (7)$$

输入信号经过零相移低通滤波器后,高频分量被滤除,而且信号的相位不会发生偏移,不会对后续的瞬态信号的滞后相位计算产生影响。

2.2 相位解调

一个复线性调频信号表示为

$$x(t) = B \exp(j(a_0 + a_1 t + a_2 t^2)) \quad (8)$$

解线性调频技术是在雷达信号处理中常用的算法,主要用于处理 chirp 类信号,信号的调频率一般是固定的^[20]。由于二次相位项(式(8)中的 $a_2 t^2$ 项)的存在,信号能量分布在复杂的宽频谱线上,如果对二次相位进行补偿,原始信号变成单频信号,信号能量聚集在单一谱线上,更方便观察和处理。解调计算如下

$$y(t) = B \exp(j(a_0 + a_1 t + a_2 t^2)) \exp(-j a_2 t^2) = B \exp(j(a_0 + a_1 t)) \quad (9)$$

在转子启停车过程中,启动加速度并不一定保持恒定,导致各个时刻下的转速是非线性的,解线性调频技术需要的参数无法通过调频率来估计的。但是,由于键相信号的存在,总是可以估计出启动过程的准确瞬时转速曲线,这样通过累加运算就可以估计出与原信号中匹配的二次或者更高次的相位项,再运用解线性调频技术的思想解调高次相位项,那么残余相位项只剩滞后相位项与初始相位的和。因此,式(3)中高次项相位计算如下

$$k\omega t = 2\pi \int_{t_0}^{t_1} k f dt \quad (10)$$

式中:瞬时频率 f 由键相信号计算得来。

这里用图5来对解调原理进行说明,振动信号中包含基频及其2次、…、 n 次谐波分量, f_1 、…、 f_n 是各次谐波分量的中心频率。估计 f_1 后对原始振动信号进行解调计算,那么宽带基频 f_1 被压缩到0处很窄的带宽范围内,约等于基频分量的包络带宽;同时高次谐波分量的中心频率 f_2 、…、 f_n 依次被解调为 $f_2 - f_1$ 、…、 $f_n - f_1$ 。这样基频分量经解调后就与高次谐波分量在频域上进行了分离,通过零相移低通滤波后就把基频分量从原始信号中解调出来。低通滤波的截止频率可以从频谱图上直接选

定,且受到 Δf 的限制小。相对应的,VKF通过一个两极点带通滤波器沿着瞬时频率曲线按照一定的带宽来提取各个分量,这个带宽取决于相邻谐波分量的频带距离 Δf ,相邻分量接近时滤波效果很差,带宽通常是依据经验设定,存在盲目性。

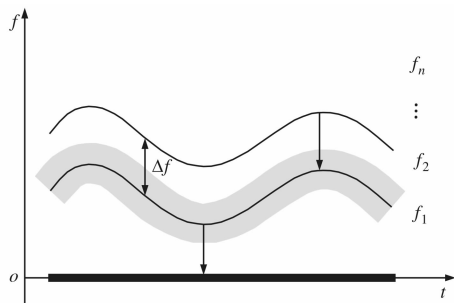


图5 相位解调原理

因此,本文把零相移低通滤波和相位解调算法用于转子启停车信号中的基频分量提取,主要的计算过程如下:

- (1)采样各方向的振动信号和键相信号;
- (2)对键相信号进行处理,得到瞬时转速信号;
- (3)计算各个时刻的相位,并进行相位解调计算;
- (4)对解调后的信号进行零相移低通滤波,去除高次谐波;
- (5)执行步骤(3)的逆运算,重构基频振动分量。

这样本文算法主要涉及的计算就是零相移低通滤波和相位解调计算,这些计算都非常快捷并且原理清晰的。

3 仿真计算及实验验证

3.1 仿真分析

仿真信号如图3所示,图6是解调计算前后原始信号的频谱图。从图中可以看出,原始信号频谱各频率成分完全叠加在一起,高次谐波完全被基频分量淹没,因此在频域上难以进行分离。解调后,基频分量被解调为窄带分量,频率分布在0~5 Hz之间,同时高次谐波2次和3次在频谱上也被展开,基

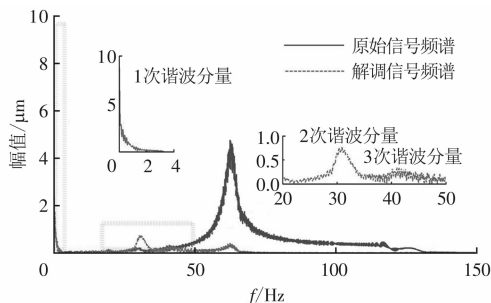


图6 相位解调后频谱成分对比

频分量与高次谐波在频带上不干扰,这样就可以通过零相移低通滤波去除掉高次谐波。图 7 是提取到的基频分量,对比图 3a 可以看到,原先位于矩形框 1、2 标识处的 3 次和 2 次谐波共振峰被明显削弱,只保留了 1 倍的基频分量(矩形框 3)。

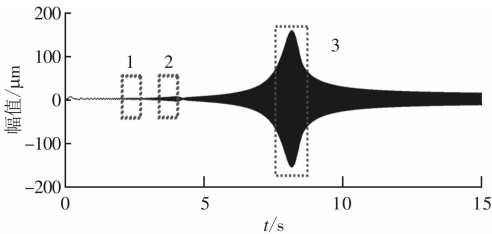


图 7 提取到的基频分量信号

3.2 实验分析

本文使用本特利 RK4 转子实验台,如图 8 所示。该实验台由直流电机驱动,电机由一个调速器实现调速。在转子上安装了 2 个圆盘,通过调整圆盘的位置可以实现转子的对称或者非对称安装,进行复杂的动平衡实验。在直流电机的输出轴端安装一个键相传感器,分别在两个圆盘外侧靠近两端轴承处垂直安装 2 组电涡流传感器,测量垂直方向的振动响应信号,经信号调理后,送入计算机后续处理。采样频率为 2 000 s,转子转速为 200~8 000 r/min。因为各方向振动相似,本文只取 y_1 方向的振动信号进行处理。

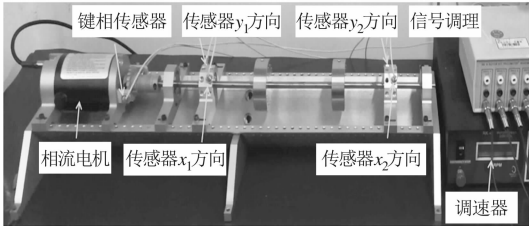


图 8 本特利转子实验台结构图

图 9 是键相信号计算得到的瞬时频率曲线,用于计算式(10)中各个时刻的相位 ωt 。图 10 是 y_1 方向采集到的振动信号,从该信号中可以明显地看到高次谐波的存在。

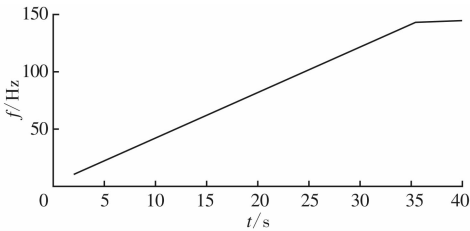


图 9 键相信号计算得到的瞬时频率

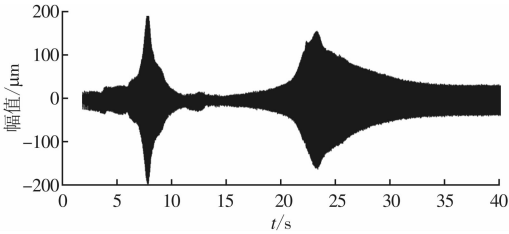
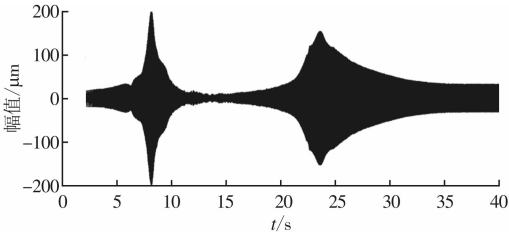
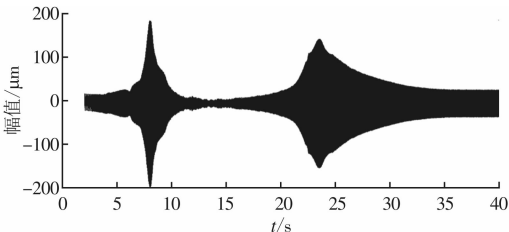


图 10 y_1 方向的振动响应

使用本文提出的算法对图 10 中的原始振动信号进行处理,结果见图 11a。为了对比,该信号同样被 VKF 算法处理,结果见图 11b。由于信号长度较长,难以看到处理后的效果,这里截取了存在二次谐波干扰的局部时域图,并在图 12 中给出。从图 12a

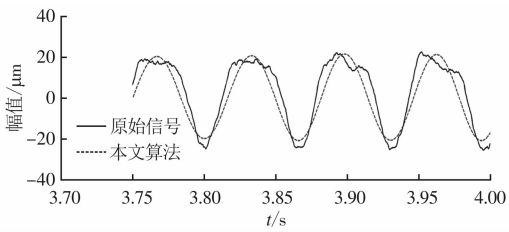


(a) 本文算法

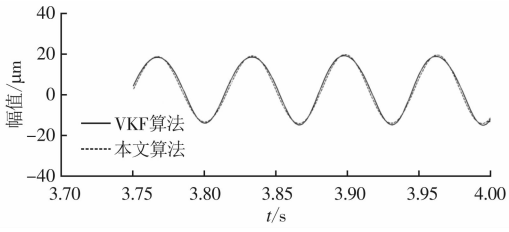


(b) VKF 算法

图 11 不同方法处理图 10 信号结果的对比



(a) 本文算法与原始信号



(b) 本文算法与 VKF 算法

图 12 不同方法处理结果的局部时域图对比

中可以看出,存在的高次谐波被本文算法明显地滤除掉,提取到了一个幅值连续平整的波形;从图 12b 中可以看出,本文算法在计算精度上与经过准确滤波参数选择的 VKF 算法相当,再一次验证了本文算法的有效性。

4 结 论

本文基于零相移低通滤波和相位解调原理,提出了一种快速高效提取转子启停车信号中的基频分量的方法。通过分析仿真信号可以看出,相位解调原理可以把启停车信号各分量在频域进行重新分布,其中基频分量被挤压到零频率处,与高次谐波分布的频带没有大的干扰,因此可以通过零相移低通滤波进行有效分离。通过在本特利转子实验台上采集到的启车信号对本文算法进行了验证,提取到了波形平整的基频振动分量,与经典算法相比计算精度达到要求。本文提出的算法具有快速计算的特性,且避免了 VKF 算法存在的阶次和滤波带宽选择困难的问题。

参考文献:

- [1] XU B, QU L, SUN R. The optimization technique-based balancing of flexible rotors without test runs [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2000, 238(5): 877-892.
- [2] 熊万里, 闻邦椿, 段志善. 转子系统瞬态过程的减幅特性及共振区迟滞特性 [J]. *振动与冲击*, 1999(4): 12-15.
XIONG Wanli, WEN Bangchun, DUAN Zhishan. Characteristics of amplitude decreasing and resonance band delaying in transient processes of rotor systems [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1999(4): 12-15.
- [3] GAI Guanghong. The processing of rotor startup signals based on empirical mode decomposition [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2006, 20(1): 222-235.
- [4] 张西宁, 郭金良, 吴吉利. 分数阶域滤波在启停车过程转频振动分量提取中的应用 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(11): 92-96.
ZHANG Xining, GUO Jinliang, WU Jili. Extracting fundamental frequency during rotating machine start-up or shut-down via fractional domain filtering [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(11): 92-96.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum

- for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [6] RILLING G, FLANDRIN P. One or two frequencies? the empirical mode decomposition answers [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 56(1): 85-95.
 - [7] FELDMAN M. Analytical basics of the EMD: two harmonics decomposition [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2009, 23(7): 2059-2071.
 - [8] ZHANG X, WU J, GUO J, et al. A new calculation method for Bode and Nyquist diagrams of rotor startup or shutdown and its application [C] // *IEEE International Conference on Control & Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 377-382.
 - [9] 杨炯明, 秦树人, 季忠. 旋转机械阶比分析技术中阶比采样实现方式的研究 [J]. *中国机械工程*, 2005, 16(3): 249-253.
YANG Jiongming, QIN Shuren, JI Zhong. Research on the methods to implement order sampling in rotating machinery order analysis technique [J]. *China Mechanicals Engineering*, 2005, 16(3): 249-253.
 - [10] PAN M C, CHU W C, LE D D. Adaptive angular-velocity Vold-Kalman filter order tracking: theoretical basis, numerical implementation and parameter investigation [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, 81: 148-161.
 - [11] PAN M C, WU C X. Adaptive Vold-Kalman filtering order tracking [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2007, 21(8): 2957-2969.
 - [12] KWOK H K, JONES D L. Improved instantaneous frequency estimation using an adaptive short-time Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 48(10): 2964-2972.
 - [13] MARTIN W, FLANDRIN P. Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 2003, 33(6): 1461-1470.
 - [14] BARBAROSSA S. Analysis of multicomponent IFM signals by a combined Wigner-Hough transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(6): 1511-1515.
 - [15] 袁惠群. 转子动力学基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 178-197.
 - [16] 邹亚军. 基于转子动力学的车削颤振模型建立及其动态特性分析 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2009: 20-21.

(下转第 166 页)