

一种非平稳转速下不平衡信号提取方法^{*}

李传江¹, 费敏锐², 张自强¹

(1. 上海师范大学信息与机电工程学院 上海, 201418) (2. 上海大学机电工程与自动化学院 上海, 200072)

摘要 针对动平衡测量中实际存在的转速波动问题, 提出一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)和瞬时频率估计的不平衡信号提取方法。与传统的平稳信号分析方法不同, 该方法采用 3 次样条插值法从键相信号中获取转子的瞬时频率, 由瞬时频率构造不平衡信号, 进而采用最小二乘法(least square method, 简称 LSM)辨识出不平衡信号的幅值和相位。为提高幅值和相位估计的精度, 采用 EMD 算法对振动信号进行滤波处理后, 再从中抽取数据样本。仿真和实验结果表明, 该方法能够有效克服转速波动和干扰信号对不平衡信号提取精度的不利影响, 提高不平衡量测量精度和稳定性, 非常适合于工程应用。

关键词 不平衡信号; 非平稳转速; 动平衡; 经验模态分解

中图分类号 TH825; TH113.1

引言

不管是离线平衡、现场平衡, 还是自动平衡技术, 不平衡量引起的振动信号的准确提取都是提高平衡精度的关键环节。而不平衡量的测量通常是在假定转速恒定的情况下进行的, 此时的振动信号为平稳信号, 采用傅里叶变换或相关滤波等方法就可以得到不平衡信号的幅值和相位。但在工程实践中, 转速波动或变速转子是客观存在的, 当转子加速度较低、阻尼较大且转速不在共振区时, 由切线加速度引起的响应与由不平衡量引起的振动响应相比要小得多, 转子的不平衡响应占主导地位, 仍可通过同频振动信号获取不平衡量。胡兵等^[1]也给出了变速转子准稳态的条件为较小角加速度、适当的阻尼系数和小时间步长。只是非平稳转速下, 同频振动信号的瞬时频率和瞬时幅值都为时变量, 若采用传统的傅里叶变换等平稳信号处理方法来获取不平衡信号的幅值和相位会有较大误差, 严格说是错误的^[2]。而非平稳信号分析法解决上述问题具有明显优势。

瞬时频率是非平稳信号分析的一个重要物理量, 旋转机械振动信号中包含有瞬时频率信息, 基于振动信号的瞬时频率估计是旋转机械振动信号处理

中的一个热点问题, Hillbert 变换、时间尺度变换、经验模态分解、小波变换等方法^[3-4]已经获得了较好的应用。但根据短时振动信号识别瞬时频率的实时性和精度不能很好地满足动平衡测量的需求。考虑到动平衡测量系统中的键相信号为转子每旋转一周产生的一个脉冲, 可以用于测量转子每周内的平均转速, 以此转速为基础, 采用插值技术可以快速得到转子的瞬时转速。

笔者针对动平衡测量系统中的转速波动情况, 以测量的实时性和可靠性为出发点, 利用每周的平均转速结合 3 次样条插值法实现瞬时频率的估计, 提出一种适用于转速波动的不平衡信号快速、准确提取方法, 提高了动平衡测量精度。

1 非平稳转速时不平衡信号提取方法流程

如图 1 所示, 非平稳转速时不平衡信号提取方法主要包括 4 个模块: 瞬时频率估计; 振动信号滤波和样本截取; 构造不平衡信号; 不平衡信号的幅值和相位识别。

瞬时频率估计采用基于离散点处频率值的插值方法得到, 即根据键相脉冲得到每个脉冲内(转子每转一周)的平均频率, 然后由插值法得到转子旋转一

^{*} 国家重大科学仪器设备开发专项课题资助项目(2012YQ15008703); 上海市科委基础重点资助项目(11JC1404000); 上海师范大学创新团队资助项目(A-7001-15-001005)
收稿日期: 2014-03-28; 修回日期: 2014-05-27

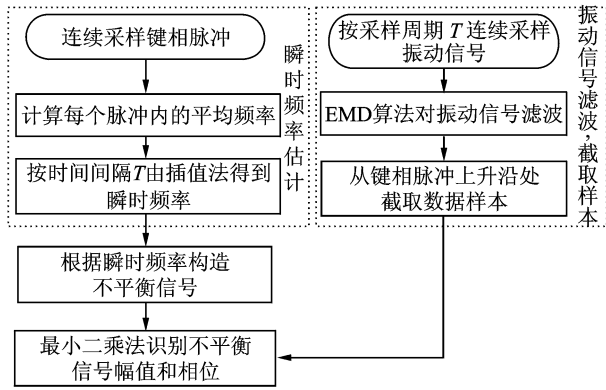


图 1 不平衡信号提取方法流程

Fig. 1 Scheme of unbalanced signal extraction

周内多点处的瞬时频率。

振动信号的采集频率远高于键相脉冲的频率,先对振动信号进行 EMD 滤波,然后从滤波后的信号中根据键相脉冲的上升沿截取数据样本,从而保证从该样本中识别出的不平衡信号相位不发生改变。

不平衡信号的构造是根据瞬时频率值,构造出幅值和相位待定的余弦信号。然后采用最小二乘法,由抽取好的振动信号样本数据识别出不平衡信号的幅值和相位。

2 不平衡信号提取算法

2.1 振动信号 EMD 滤波算法

EMD 方法是由美国 NASA 的 Huang^[5]首次提出的,是一种数据驱动的自适应非线性时变信号分解方法。主要思想是把一个时间序列的信号通过经验模态分解,表示为不同时间尺度的本征模函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)。IMF 必须满足以下 2 个条件:a. 该函数的极值点和过零点数目必需相等或者至多相差一个;b. 由局部极大点构成的包络线和局部极小点构成的包络线在任意点的平均值均等于零。该算法流程图^[6]如图 2 所示,整个处理过程就像一个“筛子”,逐步把信号所包含的最精细的模式分量从高频到低频分离出来,为了保证筛分出来的 IMF 在幅值和频率上都具有完整的物理意义,对筛分过程的次数必须加以限制。原始信号可以表示为: $x[n] = \sum_{j=1}^N \text{IMF}_j[n] + r[n]$ 。

上述分解过程需要采用三次样条插值分别对信号极大值点和极小值点作包络线,然而采样序列的

两个端点不一定是极值点,可能造成样条曲线在端点处的插值精度很差,信号两端边界效应引起的误差会向内传播,进而污染整个数据序列,使最后的分解结果严重失真。很多学者对端点效应进行了改进研究,主要方法有 3 类^[7]:极值延拓、数据预测和波形延拓。极值延拓算法简单,但效果不理想;数据预测方法有最大 Lyapunov 指数边界延拓法、ARIMA 法、神经网络法及 SVM 法等,这些方法的算法复杂,效率低,不适合动平衡测量的实时性要求。文献[8]给出一种基于均生函数周期叠加外推法的算法兼顾了实时性和精度。在本研究方案中,对于低速转子,数据采集所需时间较长,这时采用基于均生函数周期叠加外推法解决边界效应引起的失真;对于高速转子,数据采集所需时间较短,根据极值点情况抛弃两端数据使失真达到最小^[7],避免端点延拓算法带来的开销,提高测量的快速性。

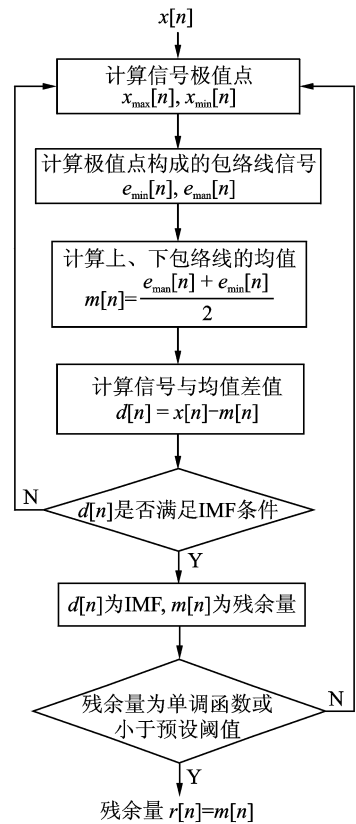


图 2 EMD 算法流程

Fig. 2 Scheme of EMD algorithm

实际信号中都含有噪声,影响 EMD 的分解效果,增加了额外的频率分量,噪声在分解过程中带来的累积误差也容易污染固有模态函数。采用集合经验模态分解^[9]可以克服传统 EMD 方法易受噪声影响而出现模态混叠的缺点,但计算量大增,不适用于笔者研究的情况。在进行 EMD 分解前先对信号

进行滤波处理,滤除信号中的野值和高频噪声,可以提高 EMD 分解的效率和精度^[10]。本研究的不平衡信号提取算法要求不能改变信号的相位,为此,这里采用零相位滤波器,具体算法见文献[11]。

2.2 瞬时频率估计算法

设通过键相脉冲测得的转子每转内的平均频率为 f_0, f_1, \dots, f_{k-1} , 其中 k 为转子转过的转数,对应的时间为 T 。振动信号采样频率为 f_s ($f_s = 1/T_s$), 在 T 内的采样点数为 M , 由于转速是时变的, 每个采样点对应的瞬时频率是不同的, 可通过 3 次样条插值的方式得到, 记作 $if_0, if_1, \dots, if_{M-1}$ 。具体步骤如下:

1) 在按照采样频率 f_s 对振动信号进行等时间间隔采样, 每个采样时刻分别为 t_0, t_1, \dots, t_{M-1} ;

2) 根据几个连续键相脉冲计算每转的转子旋转频率 f_0, f_1, \dots, f_{k-1} , 并确定每转频率对应的时刻, 记作 $tt_0, tt_1, \dots, tt_{k-1}$, 这里将相邻两个脉冲上升沿中间位置对应的采样时刻作为 f_0, f_1, \dots, f_{k-1} 的对应时刻;

3) 以 $(tt_0, f_0), (tt_1, f_1), \dots, (tt_{k-1}, f_{k-1})$ 为基础, 采用三次样条插值方法得到 M 个采样点对应的瞬时频率 $(t_0, if_0), (t_1, if_1), \dots, (t_{M-1}, if_{M-1})$ 。

三次样条插值避免了欠光滑性与剧烈振荡, 具有精度高、平滑性好等优点, 且计算量小, 易于实现^[12]。

2.3 不平衡信号幅值和相位的提取

根据瞬时转速对振动信号进行转速无关化处理, 假设通过 EMD 滤波后的振动信号为 $x(t_i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, M-1$), 每个采样点对应的瞬时频率为 $if_0, if_1, \dots, if_{M-1}$, 为克服转速对振动幅值的影响而做转速无关化处理后的振动信号为

$$x'(t_i) = \frac{x(t_i)}{(2\pi if_i)^2} \quad (i = 0, 1, \dots, M-1) \quad (1)$$

根据键相脉冲估计出每个采样点对应的瞬时频率 $if_0, if_1, \dots, if_{M-1}$ 后, 可以构造出频率已知的不平衡信号如下:

$$x_i = A \cos(2\pi if_i t_i + \varphi) \quad (i = 0, 1, \dots, M-1) \quad (2)$$

其中: A 为不平衡信号幅值; φ 为不平衡信号相位。

式(2)可变换为

$$x_i = A \cos(2\pi if_i t_i) \cos(\varphi) - A \sin(2\pi if_i t_i) \sin(\varphi) = \cos(2\pi if_i t_i) y_1 - \sin(2\pi if_i t_i) y_2 \quad (3)$$

其中: $y_1 = A \cos(\varphi)$, $y_2 = A \sin(\varphi)$, 二者为待估计

参数。

将上述 EMD 滤波和转速无关化处理过的振动信号作为观测值 $x'(t_i)$, $i = 0, 1, \dots, M-1$, 可得出线性方程组

$$\begin{bmatrix} \cos(2\pi if_1 t_1) & -\sin(2\pi if_1 t_1) \\ \cos(2\pi if_2 t_2) & -\sin(2\pi if_2 t_2) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(2\pi if_{M-1} t_{M-1}) & -\sin(2\pi if_{M-1} t_{M-1}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'(t_0) \\ x'(t_1) \\ \vdots \\ x'(t_{M-1}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

求其最小二乘解, 即可辨识出参数。则幅值和相位的估计值为

$$\begin{cases} A = \sqrt{y_1^2 + y_2^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

3 仿真和实验分析

3.1 仿真及结果分析

为验证本研究提出方法的性能, 构造仿真信号由频率慢变和噪声信号组成, 即

$$x(t) = \sin(2\pi ft + \varphi) + n(t)$$

其中: $n(t)$ 为噪声信号; 频率 $f = 5 + 0.5t^2$ 。

取 φ 为 90° , 采样频率 $f_s = 1\ 000$ Hz 时, 分别采用 3 种方法提取信号的幅值和相位: a. 传统快速傅里叶变换法 (fast Fourier transform, 简称 FFT), 即假定每个周期内转速不变, 采用 FFT 方法提取信号的幅值和相位; b. 采用等相位重采样的方法^[13], 即根据瞬时频率对振动信号进行等相位重采样后再采用 FFT 提取不平衡信号的幅值和相位; c. 根据瞬时频率估计值构造幅值和相位待定的不平衡信号, 然后抽取 EMD 滤波后的振动信号为样本, 采用 LSM 识别不平衡信号的幅值和相位。在信噪比 (signal-noise ratio, 简称 SNR) 分别取 30 和 10 时, 3 种方法提取不平衡信号的幅值和相位误差如图 3 和 4 所示。3 种方法提取幅值和相位的绝对平均误差 (mean absolute error, 简称 MAE) 和标准差 (standard deviation, 简称 STD) 如表 1 所示。

可见, 当信噪比较高时, 等相位重采样 FFT 法和本研究方法提取的不平衡信号的相位精度高、稳定性好; 而传统的 FFT 方法提取的不平衡相位波动

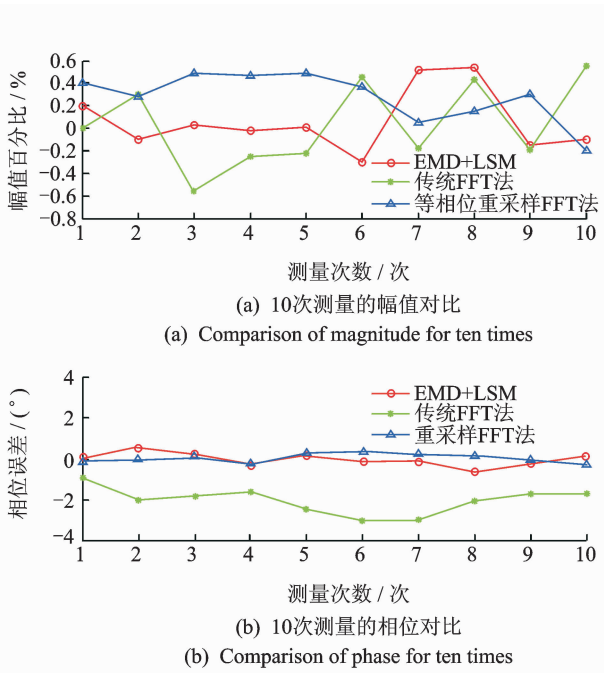


图 3 3 种方法提取不平衡信号的幅值和相位对比 (SNR=30)

Fig. 3 Comparison of three methods on unbalanced signal extraction (SNR=30)

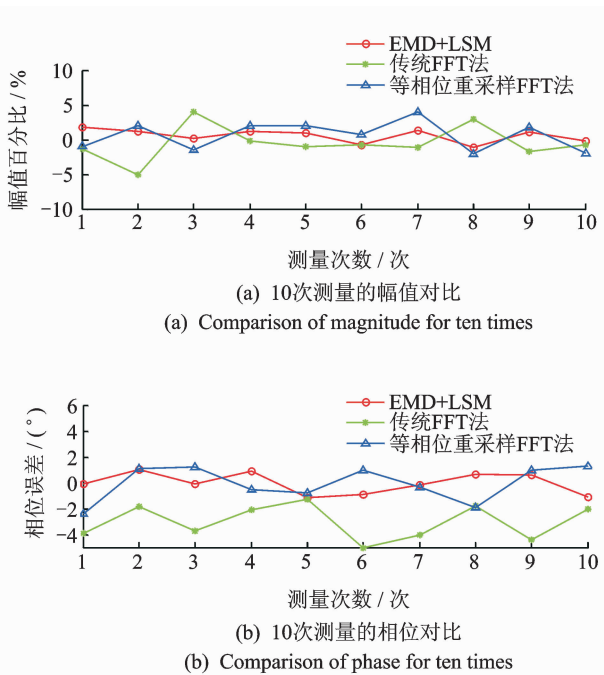


图 4 3 种方法提取不平衡信号的幅值和相位对比 (SNR=10)

Fig. 4 Comparison of three methods on unbalanced signal extraction (SNR=10)

平衡测量系统的要求;等相位重采样 FFT 法提取的不平衡信号相位波动加大,但波动范围基本在 $\pm 2^\circ$ 内;本研究方法的相位提取精度和稳定性仍较高,平均误差和标准差都优于传统 FFT 和等相位重采样 FFT 法。在幅值提取方面,信噪比较大时 3 种方法提取精度基本相当,而当信噪比较小时,本研究的 EMD+LSM 方法的精度和稳定性明显优于传统的 FFT 法,且略优于等相位重采样 FFT 法。

表 1 3 种方法提取不平衡信号的 MAE 和 STD 对比

Tab. 1 Comparison of MAE and STD for three methods on unbalanced signal extraction

不平衡信号提取方法	信噪比/dB	MAE		STD	
		相位/(°)	幅值/g	相位/(°)	幅值/g
传统 FFT	30	2.052	0.003	0.635	0.004
传统 FFT	10	3.005	0.019	1.322	0.025
重采样 FFT	30	0.271	0.003	0.213	0.002
重采样 FFT	10	1.154	0.019	1.362	0.021
EMD+LSM	30	0.270	0.002	0.206	0.002
EMD+LSM	10	0.676	0.009	0.825	0.009

3.2 实验及结果分析

实验采用如图 5 所示的 6 t 动平衡机架,交流变频驱动,转子长度为 7 m,半径为 0.18 m。通过调节变频器的设定频率来改变转子转速,将转速给定值从 250 调至 300 r/min,在转速上升过程中分别采用传统 FFT 方法、等相位重采样 FFT 与笔者提出的 EMD+LSM 三种方法同时连续测量不平衡量 5 次,再将转速给定值从 300 调至 250 r/min,分别连续测量 5 次。采用泰克示波器观测的键相脉冲和左侧振动信号波形如图 6 所示。可见,振动信号中含有明显的噪声信号;键相信号为每旋转一周产生一个脉冲,由此可测量出每转一周的平均转速。由于转子较大,加速和减速过程较慢,所以,图 6 曲线中的振动信号频率变化不明显。



图 5 动平衡机架

Fig. 5 Balancing machine frame

较大,平均误差超过 2° ,不能满足高精度动平衡测量系统的要求。当信噪比较小时,传统 FFT 法的相位误差均值超过 3° ,波动范围也较大,无法满足动

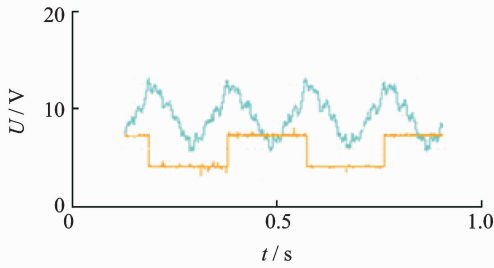
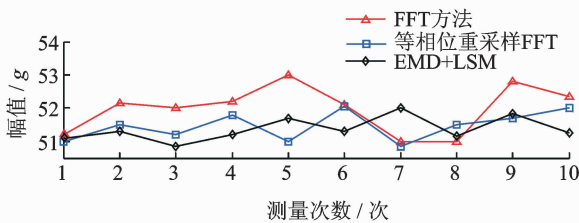


图6 键相和振动信号变化曲线

Fig. 6 Curves of speed pulse and vibration signal

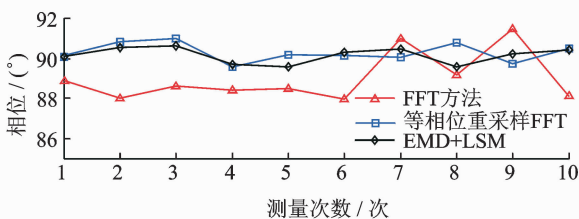
振动信号和键相脉冲均以 2.5 K 的速率同步采样,根据连续两个脉冲上升沿可以测出每个旋转周期内的平均频率,进而由插值法得到每个采样时刻对应的瞬时频率。3种不平衡信号提取方法的数据处理分别为:a.取连续4个周期内的振动信号进行重采样,得到每周期内64个数据,共256个整周期数据,用于FFT法提取不平衡信号;b.将振动信号进行EMD滤波处理后,经等相位重采样得到每个周期64个数据,然后采用FFT法提取不平衡信号;c.将振动信号进行EMD滤波后,经等时间间隔重采样,将采样频率降为500 Hz,然后从键相脉冲上升沿开始提取200个数据作为样本,采用最小二乘法辨识出不平衡信号的幅值和相位。

当在 90° 位置放置50 g试重时,按照上述转速变化时,分别按上述3种方法经过10次测量得到的幅值和相位曲线如图7所示。10次测量幅值和相位的MAE和STD对比如表2所示。



(a) 10次测量的幅值对比

(a) Comparison of magnitude for ten times



(b) 10次测量的相位对比

(b) Comparison of phase for ten times

图7 3种方法测量不平衡量结果对比

Fig. 7 Comparison of three methods on unbalance measurement

表2 3种方法测量不平衡量的MAE和STD对比

Tab. 2 Comparison of MAE and STD for three methods on unbalance measurement

信号提取方法	MAE		STD	
	相位/ $^\circ$	幅值/g	相位/ $^\circ$	幅值/g
传统FFT	1.484	1.980	1.245	0.705
重采样FFT	0.435	1.462	0.471	0.431
EMD+LSM	0.381	1.373	0.397	0.361

从实验结果看出,笔者提出的基于EMD和瞬时频率估计的不平衡信号提取方法可以有效提高幅值和相位的提取精度及稳定性,与仿真结果吻合。

4 结束语

在转速变化的动平衡测量系统中,采用基于瞬时转速的非平稳信号分析方法代替传统的将其近似看作平稳信号处理的方法,可以获得更高的精度;当转速波动并有较强干扰信号时,采用EMD算法对振动信号进行滤波,有利于提高不平衡信号的提取精度;采用3次样条插值的方法估计瞬时转速,然后根据瞬时转速构造不平衡信号,最后以滤波后振动数据作为样本,采用LSM提取不平衡信号的幅值和相位,具有较高精度和稳定性,比较适合于动平衡测量系统的工程应用。

参 考 文 献

- [1] 胡兵,方之楚. 变速 Jeffcott 转子系统瞬态不平衡响应的准稳态条件[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(9): 1404-1408.
Hu Bing, Fang Zhichu. Quasi steady-state condition for the transient unbalanced response of a speed-varying Jeffcott rotor system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(9): 1404-1408. (in Chinese)
- [2] 纪跃波. 弱非平稳转速下转子动平衡方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 596-601.
Ji Yuebo. Dynamic balancing of the rotor with weakly non-stationary rotational speed [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 596-601. (in Chinese)
- [3] Combet F, Zimroz R. A new method for the estimation of the instantaneous speed relative fluctuation in a vibration signal based on the short time scale transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1382-1397.

- [4] Jacek U, Tomasz B, Jerome A. A two-step procedure for estimation of instantaneous rotational speed with large fluctuations[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013,38(1):96-102.
- [5] Huang Norden E, Shen Zheng, Long Steven R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Royal Society of London Proceedings*, 1998,454:903-995.
- [6] Navin C, John J S. EMD-Based filtering (EMDF) of low-frequency noise for speech enhancement[J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2012,20(4):1158-1166.
- [7] 邵晨曦,王剑,范金锋,等.一种自适应的 EMD 端点延拓方法[J]. *电子学报*,2007,35(10):1944-1948.
Shao Chenxi, Wang Jian, Fan Jinfeng, et al. A self-adaptive method dealing with the end issue of EMD[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(10):1944-1948. (in Chinese)
- [8] 李钊,周晓军,徐云.基于均生函数周期叠加外推法的 EMD 端点问题的研究[J]. *振动与冲击*,2013,32(15):138-143.
Li Zhao, Zhou Xiaojun, Xu Yun. End effect treatment for EMD based on the period superposition extrapolation of mean generating function[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(15):138-143. (in Chinese)
- [9] Wu Zhaohua, Huang Norden E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009,1(1):1-41.
- [10] 温广瑞,臧廷朋,廖与禾.基于非平稳信息的转子瞬态动平衡方法[J]. *振动、测试与诊断*,2013,33(4):614-619.
Wen Guangrui, Zang Tingpeng, Liao Yuhe. Transient balancing of rotor based on non-stationary information [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013,33(4):614-619. (in Chinese)
- [11] 常广,鄢素云,王毅.零相位数字滤波器在非平稳信号处理中的应用[J]. *北京交通大学学报*,2011,35(6):49-56.
Chang Guang, Yan Suyun, Wang Yi. Application of zero-phase digital filter on non-stationary signal processing[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011,35(6):49-56. (in Chinese)
- [12] 莫正军,涂亚庆,肖玮.基于 FRFT 和三次样条插值的瞬时频率估计方法[J]. *电子测量与仪器学报*,2011,25(4):343-347.
Mo Zhengjun, Tu Yaqing, Xiao Wei. Instantaneous frequency estimating method based on FRFT and cubic spline interpolation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011,25(4):343-347. (in Chinese)
- [13] 张西宁,吴婷婷,徐进杰,等.变转速齿轮箱振动信号监测的无键相时域同步平均方法[J]. *西安交通大学学报*,2012,46(6):111-114.
Zhang Xinling, Wu Tingting, Xu Jinjie, et al. Time-domain synchronous average method without key-phase signal for vibration monitoring of variable speed gearbox[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012,46(6):111-114. (in Chinese)



第一作者简介:李传江,男,1978年10月生,博士、副教授。主要研究方向为振动信号处理、智能机器人控制。曾发表《基于谐波小波和 Prony 算法的转子不平衡信号提取》(《仪器仪表学报》2012年第33卷第11期)等论文。
E-mail: licj@shnu.edu.cn

