

基于复调制细化谱分析的轧辊偏心谐波参数估计

徐翔宇¹, 李海龙²

(1. 内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古包头 014010; 2. 太原理工大学信息工程学院, 山西太原 030000)

摘 要: 针对轧辊的上、下支撑辊偏心信号是密集型频谱的特点, 提出了一种基于复调制细化谱分析方法的轧辊偏心谐波参数估计新方法. 利用复调制细化谱分析方法准确估计出偏心谐波的频率及幅值; 同时, 结合快速傅里叶变换算法估计出偏心谐波的相角参数. 仿真实验结果验证了该方法在偏心谐波参数估计上的有效性和可行性.

关键词: 轧辊偏心谐波; 复解析带通滤波器; 频谱细化分析; 参数估计

中图分类号: TP273; TG333.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)10-2398-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.10.017

Parameter Estimation Based on Multiple Modulation Zoom Spectrum Analysis Applied to Roller Eccentric Harmonic

XU Xiang-yu¹, LI Hai-long²

(1. Information Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

2. Information Engineering School, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: For the roller eccentric signal of upper and lower support rolls is intensive spectrum. In this paper, a new roller eccentric harmonic parameter estimation method is presented, which is the harmonic parameter estimation based on multiple modulation zoom spectrum analysis. Using multiple modulation zoom spectrum analysis algorithm to accurately estimate the frequency and amplitude of eccentricity harmonics; At the same time, combined with the FFT (Fast Fourier Transform) algorithm to estimate phase parameters of the eccentric harmonic. The simulation results show that this method is effective and feasible for eccentric harmonic parameter estimation.

Key words: roll eccentric harmonic; multiple analytical band-pass filter; zoom spectrum analysis; parameter estimation

1 引言

轧辊偏心是轧制过程自动化中不可忽视的问题. 轧辊偏心以上、下支撑辊偏心为主, 并间接反映于可检测的轧制力信号中. 通过轧制力信号的分析, 提取出偏心信号参数是实施偏心主动补偿控制的前提. 根据轧机上、下支撑辊的机械结构及运动特点^[1], 可知轧辊偏心信号属于密集型频谱的信号, 即上、下支撑辊的偏心频率间隔很窄, 而各次谐波之间的频带分布较宽. 只考虑一个支撑辊的偏心时, 快速傅里叶变换是一种较为有效的偏心信号分析方法^[2,3], 但因快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 算法自身的局限性, 不能准确地估计出偏心信号的参数^[4]. 同时, 对于上、下支撑辊这种频谱密集的谐波, FFT 算法还会因频谱干涉现

象^[5], 导致参数估计精度进一步下降. 降低采样频率或增加采样点数可在一定程度上提高 FFT 算法的精度, 但是会产生频率分析范围变小及计算量增大等问题.

在工程信号分析中, 对于具有密集型频谱的信号, 通常采用频谱细化技术^[6,7]进行分析. 其中, 复调制细化谱分析方法是最为有效的方法^[8], 但是存在细化倍数较低、计算量较大等缺点, 采用基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析方法可以大大地提高细化倍数和运算速度. 本文针对轧辊的上、下支撑辊偏心信号密集频谱特点, 采用复解析带通滤波器的复调制细化频谱分析算法进行轧辊偏心信号参数估计, 其分析精度、运行速度都远优于传统 FFT 算法.

2 偏心对厚度的影响及偏心参数模型

轧辊和轧辊轴承形状的不规则变化引起的周期性

辊缝变化称为轧辊偏心,偏心包括工作辊偏心和支撑辊偏心.在一个机架中,每个轧辊的偏心量对合成轧辊偏心量 e 都有影响.因此,辊缝会随着轧辊旋转而发生变化.在有轧制力的情况下,由于轧辊偏心的存在而使辊缝减小时,将产生附加轧制力 ΔP_e ,这个力将使轧机机架发生弹性形变 ΔS_e .液压机构刚度设为 K_H ,可得偏心作用的物理模型,如图 1 所示.

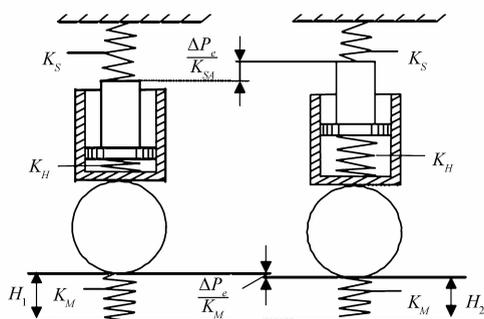


图 1 偏心作用物理模型

图 1 中, K_S 为轧机刚度、 K_M 为轧件塑性系数、 K_{SA} 为轧机有效刚度、 H_1 、 H_2 分别为轧辊偏心影响前、后的轧出厚度.轧辊偏心量 e 等于:

$$e = \frac{\Delta P_e}{K_M} + \frac{\Delta P_e}{K_{SA}} \quad (1)$$

轧辊偏心、轧制力和轧件厚度的关系如图 2 所示,图中曲线 1 为理想轧辊偏心曲线,曲线 2 为轧机弹跳曲线,曲线 3 为轧件塑性曲线.

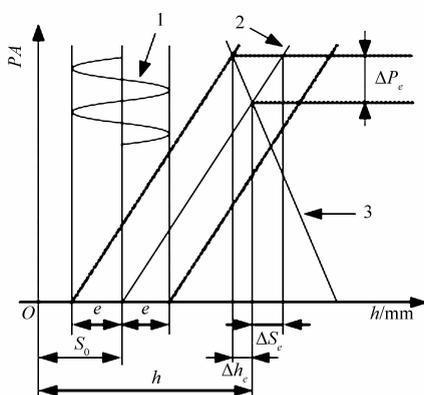


图 2 轧辊偏心、轧制力和轧件厚度的关系

由图 2 可以看出,当有偏心 e 存在使原空载辊缝 S_0 减小时,实际板厚减少了 Δh_e ,但由于同时轧制力增大,压力 AGC 控制系统会认为此时带材入口厚度增大了 ΔS_e ,因而在控制器的作用下系统朝着使板厚减少的方向调整压下,其结果是使带材厚差加大,调节质量恶化.

由于支撑辊的辊径较工作辊的辊径大,且换辊周期也较长,因此在线工作时,支撑辊偏心比工作辊偏心严重.由于上、下支撑辊辊径不同,且存在一定的转速

差,此时的轧辊偏心信号模型必然包含两个支撑辊的偏心,由于偏心信号基波和二次谐波的幅值较大,因此偏心信号模型可以表示为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 A_i \sin(2\pi f_{Ai} t + \varphi_{Ai}) + \sum_{i=1}^2 B_i \sin(2\pi f_{Bi} t + \varphi_{Bi}) + \eta(n) \quad (2)$$

式中: $y(t)$ 为偏心信号; f_{Ai} 、 f_{Bi} 分别为上、下支撑辊偏心的第 i 次谐波频率值; A_i 、 B_i 分别为上、下支撑辊偏心的第 i 次谐波分量的幅值; φ_{Ai} 、 φ_{Bi} 分别为对应的初相角; $\eta(n)$ 为随机噪声项.

因此,对测量得到的轧制力信号进行分析,提取得到轧辊偏心信号的上述三个参数,就可以建立精确的偏心补偿模型.

3 基于复调制细化谱分析的轧辊偏心参数估计

3.1 复解析带通滤波器

根据复解析带通滤波器的理想幅频特性如图 3 所示,其中 π 对应采样频率 f_s 的一半,通带宽为 $\omega_2 - \omega_1$, ω_c 为带通的中心频率.为了得到图 3 的解析带通滤波器,先作一个实低通滤波器,其幅频特性如图 4 所示,其中低通滤波器截止频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1) \quad (3)$$

其冲激响应函数为

$$h_l(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} 2e^{-jk\omega} d\omega = \frac{2\sin(k\omega_0)}{k\pi} \quad (4)$$

再对低通滤波器进行复移频,将其通带的中心由 0 移至 ω_c ,即可得到图 3 所示的复解析滤波器,其冲激响应为复指数序列:

$$h(k) = h_l(k) e^{jk\omega_c} = h_l(k) [\cos(k\omega_c) + j\sin(k\omega_c)] \quad (5)$$

式中,实部为: $h_r(k) = \frac{2}{k\pi} \sin(k\omega_0) \cos(k\omega_c) \quad (6)$

虚部为: $h_i(k) = \frac{2}{k\pi} \sin(k\omega_0) \sin(k\omega_c) \quad (7)$

复移频量 ω_c 为: $\omega_c = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \quad (8)$

将式(3)和式(8)代入式(6)和式(7)得

$$h_r(k) = \frac{1}{k\pi} [\sin(k\omega_2) - \sin(k\omega_1)] \quad (9)$$

$$h_i(k) = \frac{1}{k\pi} [\cos(k\omega_1) - \cos(k\omega_2)] \quad (10)$$

3.2 复解析带通滤波器的复调制细化谱分析轧辊偏心参数估计

设采样频率为 f_s ,对轧制力信号 $x(t)$ 进行 $DN + 2M$

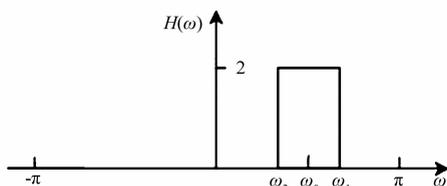


图3 复解析带通滤波器理想幅频特性

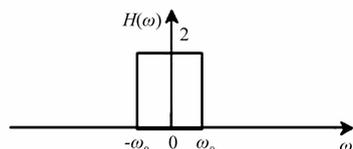


图4 移频前滤波器幅频特性

点采样,得时间序列 $x_0(n)$ ($n=0,1,\dots,DN+2M$),其中 D 为选抽比, M 为滤波器半阶数, N 为 FFT 分析点数. $x_0(n)$ 的周期频谱为 $X_0(k)$, 频率间隔为 Δf , 如图 5(a) 所示. 采用复解析带通滤波器的宽度为 f_s/D , 隔 D 点选抽一点, 然后移频并做 N 点谱分析, 频带 f_1-f_2 用 N 条独立的谱线来表示. 具体步骤如下^[9]:

(1) 确定分析频带的中心频率 f_c 和选抽比 D . 设所分析的频带起始和截止频率为 f_1 和 f_2 , 则中心频率为:

$$f_c = (f_1 + f_2)/2 \quad (11)$$

由于复解析带通滤波器的带宽为 f_s/D , 而分析频带的宽度为 f_1-f_2 , 所以有 $f_s/D = f_1-f_2$, 即

$$D = f_s / (f_1 - f_2) \quad (12)$$

(2) 构造截止频率为 $f_s/2D$ 的实低通滤波器 $h_L(n)$, 并将 $h_L(n)$ 进行 $\omega_c = 2f_c$ 的复调制移频得到复解析带通滤波器 $h(n)$, 带宽为 f_s/D , 其频谱特性如图 5(b) 所示. 所构造带通滤波器的实部和虚部的具体表达式见式 (9) 和式 (10) 所示. 图 5(a) 所示的信号频谱经复解析带通滤波器滤波后其频谱特性如图 5(c) 所示.

(3) 选抽滤波. 用复解析带通滤波器对样本信号 $x_0(n)$ 进行选抽滤波, 其选抽比为 D , 选抽出 N 点, 选抽后的频谱图如图 5(d) 所示. 选抽滤波一定要先确定选抽点, 只对选抽点进行复解析带通滤波. 实信号经过复滤波器以后, 就成为频率在 $f_1 \sim f_2$ 范围内的复解析信号了, 设选抽后的复信号为 $\bar{x}(n)$.

(4) 复调制移频. 对选抽后的复信号为 $\bar{x}(n)$ 进行复调制移频, 将细化的起始频率移到零频点. 首先计算移频量 $\bar{\omega}_1$, 采样后的频谱周期频率为 f_s , 归一化周期为 2π , 设 ω_1 为对应于起始频率 f_1 的归一化角频率, 则 $\omega_1 = 2\pi f_1/f_s$. 因解析滤波器是隔 D 点抽取一点, 采样频率放慢了 D 倍, 所以选抽之后的移频量为 $\bar{\omega}_1 = D\omega_1$, 即

$$\bar{\omega}_1 = D\omega_1 = 2\pi Df_1/f_s \quad (13)$$

对选抽后的复信号 $\bar{x}(n)$ 移频 $\bar{\omega}_1$ 得到复调制信号 $g(n)$, 即

$$g(n) = \bar{x}(n) e^{-j\bar{\omega}_1 n} \quad (n=0,1,2,\dots,N-1) \quad (14)$$

根据离散傅里叶变换的移频性质, 其频谱函数可表示为 $G(k) = \bar{X}(k + \bar{\omega}_1)$, 如图 5(e) 所示.

(5) FFT 分析. 对 $g(n)$ 做 N 点 FFT 变换和谱分析, 不需要进行频率调整就可以得到具有 N 条独立谱线的细化频谱, 从中提取出偏心频率, 其频谱如图 5(f) 所示.

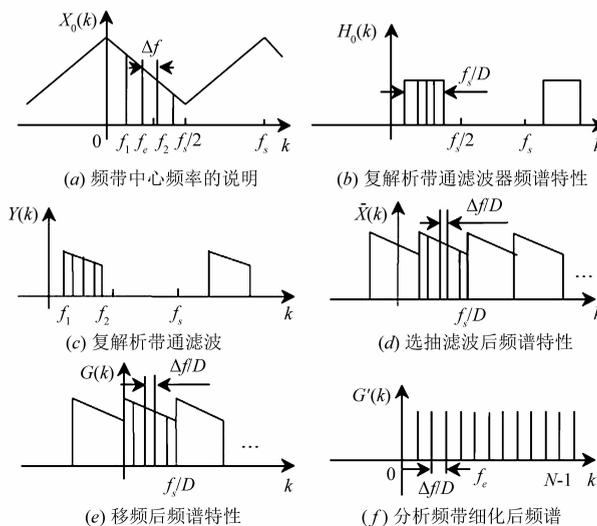


图5 细化过程频谱图分析

4 复调制细化频谱分析的轧辊偏心参数估计

设轧机上、下支撑辊偏心信号的基波角频率分别为 1Hz 和 1.03Hz^[10], 考虑二次谐波及测量噪声, 建立如下理论偏心模型:

$$\begin{aligned} x(t) = & 0.1 \sin(2\pi t + 0.2) \\ & + 0.08 \sin(2\pi t \times 1.03 + 1.1) \\ & + 0.05 \sin(2\pi t \times 2 + 0.8) \\ & + 0.04 \sin(2\pi t \times 2.06 + 1.6) \\ & + n(t) \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $n(t)$ 为噪声信号.

首先对偏心信号进行频率和幅值估计. 分别采用 FFT 算法和复调制细化频谱分析算法对采样信号进行分析. 图 6 为含有噪声的偏心信号.

由于偏心模型中的 1Hz、1.03Hz 与 2Hz、2.06Hz 间隔较大由 FFT 法可以容易地分辨. 但是 1Hz 和 1.03Hz 之间, 2Hz 和 2.06Hz 之间间隔较小需要使用本文方法分别细化. 对 1Hz 和 1.03Hz 进行细化: 设频带起始和截止频率分别 $f_1 = 0.5\text{Hz}$ 和 $f_2 = 1.5\text{Hz}$, 采样频率 $f_s = 100\text{Hz}$, 采样点数 $N = 1024$, 则由 3.2 小节中式 (11)、(12) 得中心频率 $f_c = 1\text{Hz}$ 、选抽比 $D = 100$, 由 FFT 法得到的频谱特性如图 7. 对 2Hz 和 2.06Hz 进行细化: 设频带起始和截止频率分别为 $f_1 = 1.5\text{Hz}$ 和 $f_2 = 3.5\text{Hz}$, 采

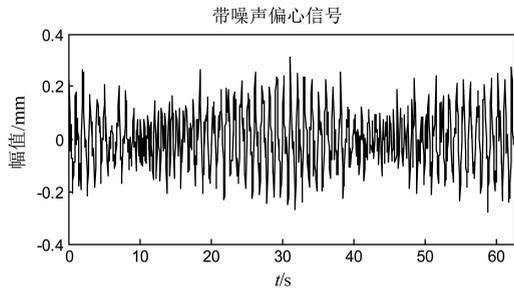


图6 原始信号

样频率 $f_s = 200\text{Hz}$, 采样点数 $N = 1024$, 得中心频率 $f_c = 2\text{Hz}$ 、选抽比 $D = 100$, 图 8 是复调制细化频谱分析算法的细化频谱特性图. 由图 7 可以看出, FFT 算法的分析结果因干涉效应和栅栏效应具有较大的幅值误差; 由

图 8 可以看出, 复调制细化频谱分析算法对于具有密集频谱特点的支撑辊偏心信号有较高分辨率和幅值精度.

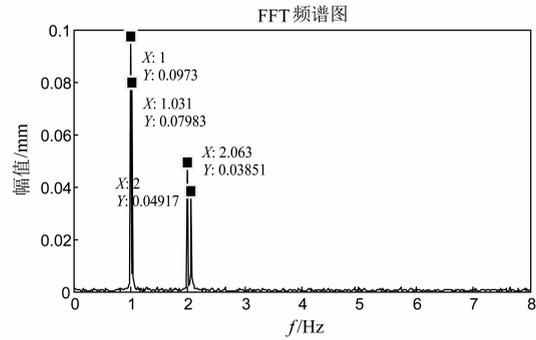
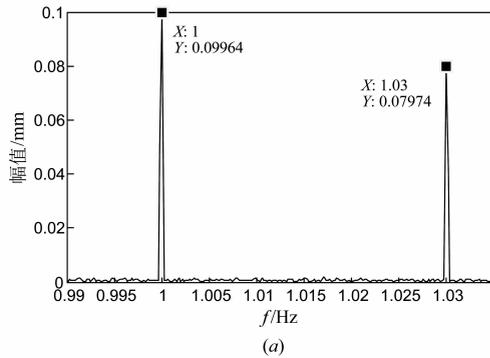
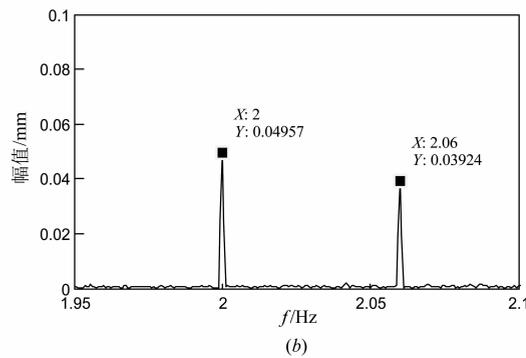


图7 FFT算法的偏心参数估计



(a)



(b)

图8 复调制细化频谱分析算法的偏心参数估计

得到偏心信号的频率和幅值参数后, 对上述偏心模型进行仿真得到偏心信号的相角估计值. 这里采用 FFT 算法进行估计, 结果如表 1 所示.

表 1 偏心相角估计

| 偏心参数 | 实际值 | 估计值 | 相对误差 |
|----------|--------|--------|--------|
| 相角 1/rad | 0.2000 | 0.1535 | 0.0465 |
| 相角 2/rad | 1.1000 | 0.9868 | 0.1132 |
| 相角 3/rad | 0.8000 | 0.7925 | 0.0075 |
| 相角 4/rad | 1.6000 | 1.5505 | 0.0495 |

5 实验验证

将上一小节复调制细化频谱分析算法的偏心信号参数辨识方法和 FFT 算法的参数辨识分别应用于压力 AGC, 进行偏心补偿控制研究.

对实验室的二辊冷轧机进行实验. 设备编号: 20080834; 设备型号: $\phi 150/350 * 300$; 工作辊辊身最大直径为 150mm, 最小直径为 105mm; 支撑辊直径为 350mm; 工作辊身长: 300mm; 最大轧制速度: 0 ~ 0.3 m/s; 最大轧制力: 1200kN; 传动比 180: 1; 主电机功率: 18.5kW; 投入基于 FFT 算法的轧辊偏心补偿装置前、后

的出口带材厚度波动控制结果如图 9 所示, 偏心引起的厚度波动减少了 79%; 对于基于复调制细化频谱分析算法的轧辊偏心补偿装置, 其投入前、后的出口带材厚度波动控制结果如图 10 所示, 偏心引起的厚度波动减少了 87%. 结果表明, 本文提出的偏心信号参数估计方法精度相对较高, 补偿效果优于 FFT 法.

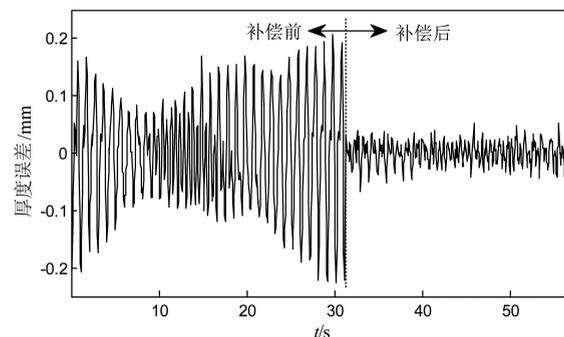


图9 FFT方法的偏心补偿结果

6 结论

针对轧辊上、下支撑辊偏心信号密集频谱的特点, 以及 FFT 对轧辊偏心信号分析的局限性, 本文提出了

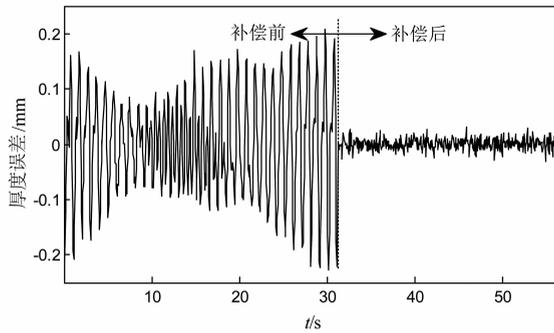


图10 复调制细化频谱分析算法的偏心补偿结果

基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析方法的轧辊偏心参数谐波估计新方法. 该方法非常适用于具有上、下支撑辊偏心这种密集频谱偏心信号参数的提取, 仿真结果也验证方法的可行性和有效性, 为轧辊偏心参数的准确提取提供了一个有效方法.

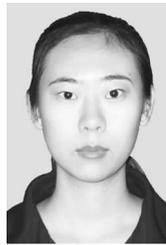
参考文献

- [1] 李勇. 板带轧机轧辊偏心控制的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
Li Yong. Study on Roll Eccentricity Control for Flat Rolling Mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- [2] 李勇, 等. 轧辊偏心先进控制算法和实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1440-1444.
Li Yong, et al. Advanced algorithm and experiment of roll eccentricity [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(10): 1440-1444. (in Chinese)
- [3] 龚超, 等. 基于 FFT 的快速高精度载波参数联合估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 766-770.
Gong Chao, et al. Rapid precision carrier parameter joint estimation algorithm based on FFT [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 766-770. (in Chinese)
- [4] 牛满科, 等. 基于循环统计量的轧机偏心线性预测及补偿控制[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 1605-1610.
Niu Man-ke, et al. Linear prediction and compensation control of roll eccentricity based on cyclic statistics [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(12): 1605-1610. (in Chinese)
- [5] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 100-111.
Ding Kang, Xie Ming, Yang Zhi-jian. The Theory and Technology of Discrete Spectrum Correction [M]. Beijing: Science Press, 2008. 100-111. (in Chinese)
- [6] 丁康, 朱小勇. 适用于加各种窗的一种离散频谱相位差校正法[J]. 电子学报, 2001, 39(7): 987-989.
Ding Kang, Zhu Xiao-yong. A discrete spectrum are appli-

cable to all Windows and phase difference correction method [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 39(7): 987-989. (in Chinese)

- [7] 郝重阳, 唐文彬, 等. 一种快速局部细化频谱分析新方法——SSA[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 106-108.
Hao Chong-yang, Tang Wen-bin, et al. A new method of rapid local refinement spectrum analysis-SSA [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 106-108. (in Chinese)
- [8] 谢明, 丁康. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析的算法研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(4): 479-483.
Xie M, Ding K. Algorithm of multiple modulation zoom spectrum analysis based on complex analytic band pass filter [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(4): 479-483. (in Chinese)
- [9] 丁康, 谢明, 等. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析原理和方法[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 29-35.
Ding Kang, Xie Ming, et al. Principle and method of multiple modulation zoom spectrum analysis based on multiple analytical band-pass filter [J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 29-35. (in Chinese)
- [10] 王洪希, 杨卫东, 田伟. 基于高阶累积量 Root-MUSIC 法和 Prony 法的轧辊偏心谐波参数估计[J]. 电子学报, 2014, 42(11): 2213-2218.
Wang Hong-xi, Yang Wei-dong, Tian Wei. Roll eccentricity harmonic parameter estimation based on root-music of HOC and Prony method [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(11): 2213-2218. (in Chinese)

作者简介



徐翔宇 女, 1991 年 11 月出生, 内蒙古呼和浩特人. 2013 年进入内蒙古科技大学攻读硕士研究生, 研究领域为控制理论与计算机控制、信号处理.
E-mail: 291957826@qq.com



李海龙 男, 1988 年 8 月出生, 内蒙古赤峰人. 2013 年进入太原理工大学攻读硕士, 现为在读硕士生, 研究领域是信号处理, 检测技术与智能仪表.
E-mail: lihailong4855@163.com