

# 复双谱耦合性质在故障诊断中的应用

吴文兵<sup>1</sup>, 黄宜坚<sup>2</sup>, 陈文芑<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 信息科学与技术学院, 厦门 361005; 2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 为了提高故障诊断正确率, 提出了一种基于复双谱的机械故障诊断方法. 这种方法根据复双谱的不同耦合方式进行故障判别. 由于耦合方式不同, 复双谱包含的信号间的耦合信息也不相同, 这些信息可以用来进行故障诊断. 在减压阀故障诊断实验中, 对特定的故障信号和正常信号同时采用相同的耦合方式, 根据二维小波可以有效提取信号中频率信息的特点, 利用二维小波提取复双谱中的这些耦合信息的特征值, 并将这些特征值输入支持向量机进行故障判别. 实验结果表明, 随着耦合方式的不同, 同一故障的诊断正确率也不相同.

**关键词:** 减压阀; 复双谱; 耦合; 故障诊断

中图分类号: TG 156

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)09-1287-06

## Application of Complex Bispectral Coupling Properties in Fault Diagnosis

WU Wen-bing<sup>1</sup>, HUANG Yi-jian<sup>2</sup>, CHEN Wen-xiang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Electro-Mechanical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China)

**Abstract:** To improve the correct rate of fault diagnosis, a method of mechanical fault diagnosis based on complex bispectrum was proposed. This method diagnosed fault according to the different coupling modes of complex bispectrum. Because of different coupling modes, the complex bispectrum contained different coupling information of signals, and the information could be used to diagnose fault. In the fault diagnosis experiment of pressure reducing valve, the same coupling mode was applied to both fault signals and normal signals. Because two dimensional wavelet could effectively extract frequencies information from signals, the features of coupling information in complex bispectrum were extracted by 2-D wavelet, then the features were input into support vector machine to diagnose fault. Experiment results show that the correct rates of the same fault are also different with the different coupling modes.

**Key words:** pressure reducing valve; complex bispectrum; coupling; fault diagnosis

利用高阶累积量可以自动地抑制高斯背景噪声(有色或白色)的影响, 正因为这样, 高阶累积量这一统计量已日益受到人们的重视, 并已成为信号处理中一种非常有用的工具. 由三阶累积量得出的双谱包含了信号的非对称、非线性信息, 可以用来描述

非线性相位耦合, 尤其是二次相位耦合, 已经在电子信息、生物医学等领域得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>. 文献[6-10]中对高阶累积量的耦合性质进行了深入研究, 明确指出了各种复数高阶累积量的不同定义形式的耦合特征; 文献[11]将复数双谱在各种实际场

收稿日期: 2011-12-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098).

作者简介: 吴文兵(1968—), 男, 博士研究生, 主要从事故障诊断方面的研究, E-mail: wwbyssq@fjnu.edu.cn.

通信作者: 陈文芑(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子技术方面的研究, E-mail: wxchen@163.com.

合进行了应用且取得了良好效果. 本文在此基础上, 利用由复三阶累积量而得出的复双谱进行故障诊断.

### 1 高阶累积量

设  $\{x(n)\}$  为零均值  $k$  阶平稳随机过程, 则该过程的三阶累积量为

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (1)$$

三阶谱(又称双谱)为

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (2)$$

建立自回归(AR)模型后, 双谱表达式为<sup>[12]</sup>

$$B_{AR}(\omega_1, \omega_2) = \gamma_{3a} H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2) \quad (3)$$

式中:  $\gamma_{3a} = E\{a^3(n)\}$  为斜度;  $a(n)$  为一独立同分布的非高斯随机过程;  $\phi(i)$  和  $p$  分别为 AR 模型的系数和阶数;  $H^*(\omega)$  为  $H(\omega)$  的共轭函数;  $H(\omega)$  为频率特性函数, 即

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p \phi_i e^{-ji\omega}}$$

### 2 复数三阶累积量

根据文献[6], 在式(3)中, 令  $x(n)$  为复数信号, 并进行如下定义.

定义 1:

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (4)$$

定义 2:

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x^*(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (5)$$

定义 3:

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x^*(n)x(n+\tau_1)x^*(n+\tau_2)\} \quad (6)$$

式中  $x^*(n)$  是  $x(n)$  的共轭复数, 本文的复数信号由采集的原始信号进行 Hilbert 变换得到. 文献[6]指出, 按定义 1 的方式, 可以用复数谐波形式表示发生了二次相位耦合的信号

$$x(n) = \sum_{i=1}^3 A_i \exp(j\omega_i n) + \phi_i \quad (7)$$

式中:  $\phi_3 = \phi_2 + \phi_1$ ; 谐波分量  $\omega_3$  是由谐波分量  $\omega_1$  和  $\omega_2$  通过二次相位耦合而成的, 且  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ . 其三阶累积量  $C_1$  为 0; 以定义 2 的方式其三阶累积量为

$$C_2 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)]] +$$

$$\exp[j(\omega_2\tau_1 - \omega_1\tau_2)]] \quad (8)$$

而定义 3 的方式则为

$$C_3 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_3\tau_1 - \omega_1\tau_2)]] + \exp[j(\omega_3\tau_1 - \omega_2\tau_2)]] \quad (9)$$

对比式(8)和式(9)可以看出, 式(8)中只包含  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 而式(9)则  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  都包括. 这表明, 按照定义 2, 三阶累积量  $C_2$  中只包含参加二次耦合的谐波分量, 而按照定义 3, 则三阶累积量  $C_3$  中既包含参加耦合的分量, 也包含耦合后的分量.

### 3 数据采集

本实验研究的减压阀为先导式减压阀. 为了获取减压阀在故障状态下的运行信号, 本文进行的实验中人为设置了故障: 在减压阀出口口加  $\phi 3$  mm 的铁芯. 通过实验可以模拟减压阀工作故障状况.

本文利用 LabVIEW 软件依次采集减压阀在正常和故障状态下的振动信号. 在每种测量中, 将油路压力从 1~5 MPa 分 5 个压力等级. 采样频率 250 Hz, 读取频率 125 Hz, 采样过程时间约 2 min. 本次实验分别在减压阀正常工作状态和故障状态各自采集了 18 组(共 36 组)数据. 本文采用的是正常状态和故障状态的实验数据, 实验中使用的数据为 1536 个.

由于测试过程中各种因素的影响, 必然在采集到的信号中夹杂着其他干扰成分, 本文采用中值法对采集的信号进行了滤波处理. 滤波后的信号如图 1 所示. 图中的横坐标表示信号个数, 纵坐标表示信号振幅, 无量纲.

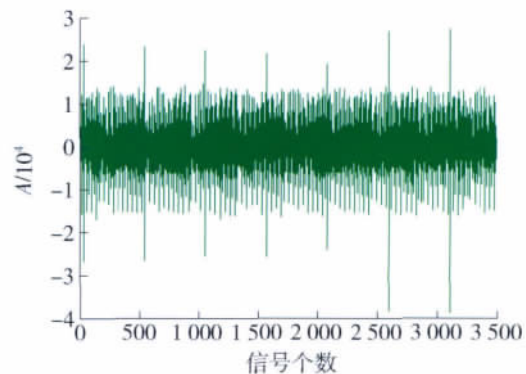


图 1 滤波后的信号

Fig. 1 Signals after filtered

### 4 谱图

本实验首先按前述的 3 种定义方式得出正常状态和故障状态的 36 组数据的三阶累积量, 再按式

(3) 求出其复双谱,复双谱的 AR 定阶和复系数求取仍然采取奇异值分解(SVD)算法,该算法的鲁棒性较好. 本文按定义 3 方式求出的正常状态和故障状态数据的复双谱,在油压分别为 1、3、5 MPa 时,各选取 1 组进行图示(见图 2 和图 3). 可以看出,在定义 3 方式下,故障状态的复双谱与正常状态相比,其谱峰分布更广,也更多一些. 为了进行对比,将按定义 1 和定义 2 得出的故障状态下相同数据的复双谱

一同示于图 4 和图 5. 对比图 3、图 4 和图 5,总体来看,复双谱的复杂程度在定义 3 方式下要大于定义 2 的方式,而定义 2 的方式又比定义 1 要大,这与前面的“按定义 3 的方式得出的三阶累积量中既包含参加耦合的分量,也包含耦合后的分量,而定义 2 只包含参加二次耦合的谐波分量,定义 1 则对于发生了二次相位耦合的信号其三阶累积量为 0”的理论分析结果相一致.

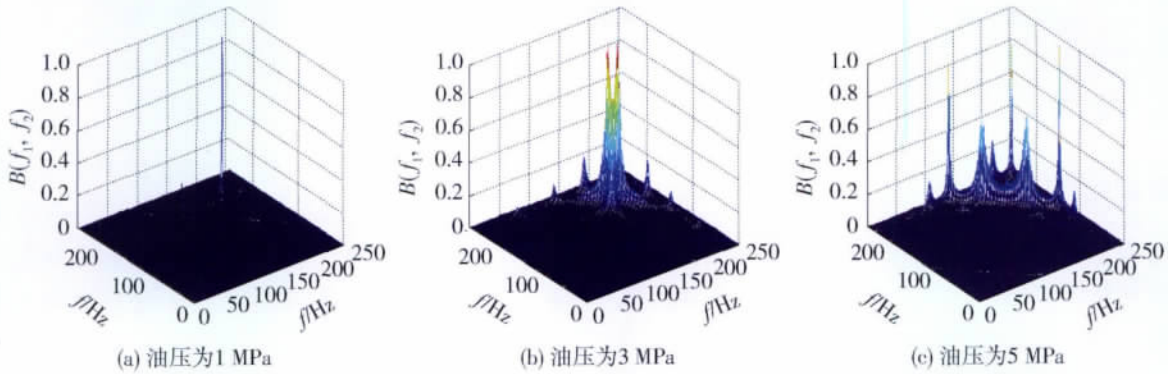


图 2 定义 3 方式正常状态复双谱图

Fig. 2 Complex bispectrum of definition 3 in normal state

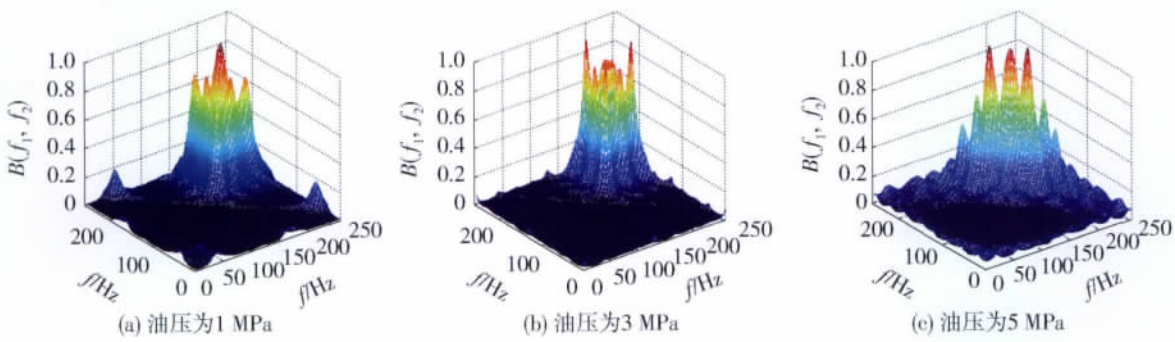


图 3 定义 3 方式故障状态复双谱图

Fig. 3 Complex bispectrum of definition 3 in fault state

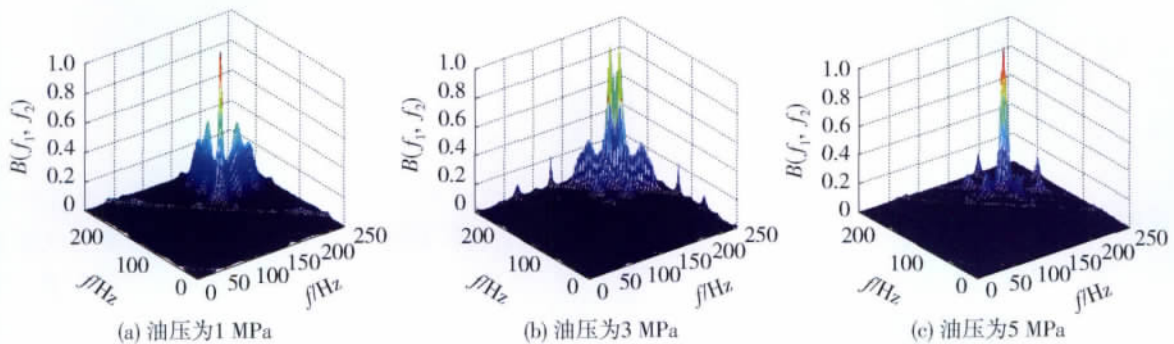


图 4 定义 1 方式故障状态复双谱图

Fig. 4 Complex bispectrum of definition 1 in fault state



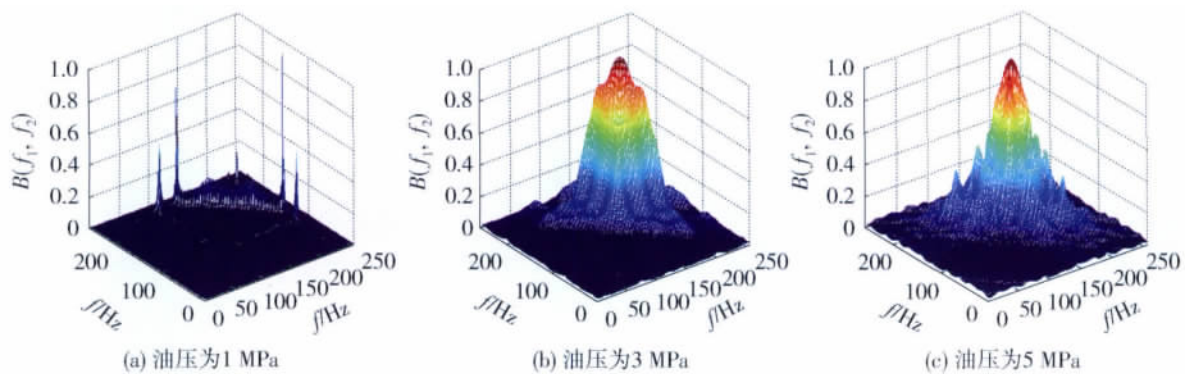


图5 定义2方式故障状态复双谱图

Fig. 5 Complex bispectrum of definition 2 in fault state

## 5 特征提取

与傅里叶变换相比,小波变换由于其在高频时具有时间精度和低频时具有频率精度,能自动适应时频信号分析的要求,可以聚焦到信号的任意细节等显著特点而越来越受到广泛的重视.二维小波函数分解是把尺度 $j$ 的低频部分分解成4部分:尺度 $j+1$ 的低频部分和3个方向(水平、垂直、斜线)的高频部分<sup>[13-14]</sup>.本文在故障识别时,如果直接采用将所获得的复双谱数据输入最小二乘支持向量机(LSSVM),一是运算量太大,二是所获得的故障识别结果也不是太好.故本文采用二维小波分解对每

组数据的复数双谱进行特征提取,鉴于复双谱的非对称特性,本文使用的是 Haar 小波.实验结果表明,在对复双谱进行二维小波函数分解后,提取尺度为6时的6级低频压缩系数作为LSSVM输入向量时取得了最佳识别效果.压缩后的低频系数为 $4 \times 4$ 的二维数组,对低频系数归一化后将其图形示于相应数据的复双谱图的下方,正常状态下特征值如图6所示.图6中: $x, y$ 轴分别表示压缩后的二维矩阵的维数; $z$ 轴表示提取的特征值,均无量纲.表1示出了按照上述方法在定义3方式下所获得的特征向量,表中的每一行都是16维数组,正常状态和故障状态的每组数据各占1行.

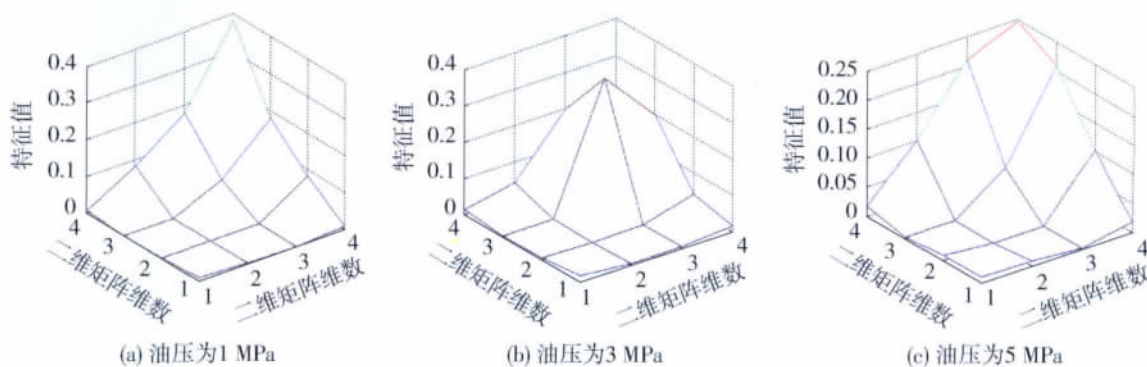


图6 定义3方式正常状态小波系数

Fig. 6 Wavelet coefficients of definition 3 in normal state

## 6 实验结果与分析

本文根据文献[15]建立了相同的LSSVM.在训练LSSVM时,分别将正常状态和故障状态编码为1和-1,由于正常数据和故障数据分别是在5种不同的油压下获得的,训练时分别在表1的正常数据和故障数据中取出相对应的5组数据(共10组),对所建立的LSSVM进行训练,结束后再利

用训练后的网络对所剩下的26组数据进行故障识别.模拟后的结果如图7所示.图中的纵坐标表示模拟后的状态值,横坐标表示信号的组数.结果显示,按定义3的方式进行识别,只有5组识别错误,正确率达到了80%以上.为了便于对比,按定义1和定义2的方式进行了相同的实验,其识别错误数分别为8组和9组,定义1的模拟结果如图8所示.

表 1 二维小波提取的特征值向量  
Table 1 Features extracted by 2-D wavelet

	0.009 7	0.003 1	0.000 9	0.007 6	0.003 1	0.000 0	0.000 8	...
正常状态	0.019 4	0.003 4	0.020 4	0.026 7	0.004 3	0.001 5	0.015 5	...
	0.018 6	0.015 0	0.004 3	0.016 0	0.005 1	0.000 1	0.003 2	...
	⋮							
故障状态	0.020 2	0.007 4	0.010 4	0.034 5	0.007 4	0.000 8	0.015 4	...
	0.005 0	0.002 0	0.002 0	0.007 5	0.002 0	0.000 0	0.011 0	...
	0.011 0	0.004 7	0.003 9	0.008 0	0.004 7	0.000 0	0.003 4	...
	⋮							

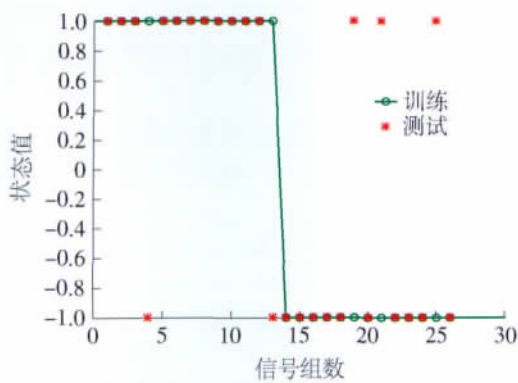


图 7 定义 3 故障诊断模拟结果  
Fig. 7 Simulating result in definition 3

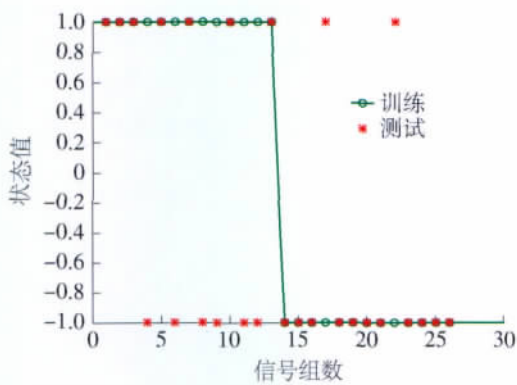


图 8 定义 1 故障诊断模拟结果  
Fig. 8 Simulating result in definition 1

如前所述,按定义 1 的方式,可以用复数谐波形式表示的发生了二次相位耦合的信号其三阶累积量为 0;按照定义 2,三阶累积量中只包含参加二次耦合的谐波分量;而按定义 3,则三阶累积量中既包含参加耦合的分量,也包含耦合后的分量.由式(5)可知,双谱由三阶累积量进行二次傅里叶变换而得到,则由上述不同的定义方式得到的复数三阶累积量的不同耦合性质必然反应到相应的复双谱中.本文采用二维小波的方法,同时对正常信号和故障信号在

相同的耦合方式下的复双谱中的频率信息进行了提取,并利用提取的这些信息进行故障诊断.结果表明,由于三阶累积量耦合性质的不同,由其得出的复双谱便有不同的频率信息,使用这些不同的频率信息进行故障诊断时,便得出了不同的正确率.

### 7 结论

复数三阶累积量的不同定义形式决定其包含不同的耦合信息,这种不同的耦合信息必然反应到由其得出的复双谱中.本文通过故障诊断实验对这种不同的耦合特征进行分析,得出了耦合方式不同、其故障诊断正确率也不同的这一结论.在同一故障中,这些不同的频率信息对于保留同类型信号的特征的能力是不一样的,而这种性质也为特定的机械故障诊断提供了一种方法.

### 参考文献:

[1] KOCUR D, STANKO R. Order bispectrum: a new tool for reciprocated machine condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(6): 871-890.

[2] 杜秋华,李超,王飞. 1<sub>1/2</sub>谱分析及其在球轴承缺陷诊断中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3): 315-317.

DU Qiu-hua, LI Chao, WANG Fei. 1<sub>1/2</sub> dimensional spectrum analysis and its application to diagnosis of ball bearing defect [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 315-317. (in Chinese)

[3] 段向阳,王永生,苏永生. 切片双谱分析在离心泵故障诊断中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 581-584.

DUAN Xiang-yang, WANG Yong-sheng, SU Yong-sheng. Application of slice bispectrum analysis to fault diagnosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5): 581-584. (in Chinese)

[4] 蔡奇志,黄宜坚. 自回归三谱切片研究 [J]. 仪器仪表

- 学报, 2009, 30(2): 345-350.  
CAI Qi-zhi, HUANG Yi-jian. Study on autoregressive trispectrum slices [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 345-350. (in Chinese)
- [5] 郑海波, 陈心昭, 李志远. 基于双谱的齿轮故障特征提取与识别[J]. 振动工程学报, 2002, 15(4): 354-358.  
ZHENG Hai-bo, CHEN Xin-zhao, LI Zhi-yuan. Bispectrum based gear fault feature extraction and diagnosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(4): 354-358. (in Chinese)
- [6] MELVIN J H. Higher-order cumulants and cumulants spectra [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 1994, 13(4): 391-420.
- [7] 傅予力, 沈轶, 谢胜利. 基于规范高阶累积量的盲分离算法[J]. 应用数学, 2006, 19(4): 869-876.  
FU Yu-li, SHEN Yi, XIE Sheng-li. Normalized cumulant of signal and higher order cumulant algorithm of blind source separation [J]. Mathematica Applicata, 2006, 19(4): 869-876. (in Chinese)
- [8] RAUGHVEER M R. Time-domain approaches to quadratic phase coupling estimation [J]. IEEE Trans Automatic Control, 1990, AC 35: 48-56.
- [9] COLLIS W B, WHITE P R, HAMMOND J K. Higher-order spectra: the bispectrum and trispectrum [J]. Mechanical Systems and Signals Processing, 1998, 12(3): 375-394.
- [10] 张严, 王树勋. 非线性相位耦合的切片谱分析方法[J]. 电子学报, 1998, 26(10): 104-109.  
ZHANG Yan, WANG Shu-xun. The slice spectra approach to nonlinear phase coupling analysis [J]. Acta Electronic Sinica, 1998, 26(10): 104-109. (in Chinese)
- [11] 李允公, 刘杰, 朱启兵. 基于复值过程高阶累积量谱的轴心轨迹分析的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 157-161.  
LI Yun-gong, LIU Jie, ZHU Qi-bing. Study of orbit analysis based on complex process high order cumulant spectrum [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 157-161. (in Chinese)
- [12] 吴正国, 夏立, 尹为民. 现代信号处理技术: 高阶谱、时频分析与小波变换[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 21-122.
- [13] 胡昌华, 张军波, 聂军. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 53-125.
- [14] 郭迎春, 侯正信. 纯二维小波滤波器组及其在图像压缩中的应用[J]. 光电子·激光, 2005, 16(8): 982-988.  
GUO Ying-chun, HOU Zheng-xin. True 2-D wavelet filter bank and its application for image compression [J]. Journal of Opto Electronics·Laser, 2005, 16(8): 982-988. (in Chinese)
- [15] 吴文兵, 黄宜坚. 基于双相干谱的减压阀故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2011(10): 2413-2416.  
WU Wen-bing, HUANG Yi-jian. Fault diagnosis of reducing valve based on bispectra slices [J]. Computer Measurement & Control, 2011(10): 2413-2416. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)