

文章编号: 1000-5013(2009)01-0016-06

# 三谱切片在调速阀故障诊断中的应用

蔡奇志, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 为了解决液压元件调速阀故障诊断难的问题,采用三谱及其切片分析的方法,针对调速阀阀体正常和故障时的振动信号,分别绘制出其双谱切片和三谱切片图.比较和分析结果表明,正常时,三谱二维切片的幅值在以2个频率构建的平面中心处为零,而故障时不等于零;从对角切片分析发现,三谱对角切片能表现出比对应的双谱更多的幅值信息.三谱能更有效地提取非线性信息,为获得故障特征提供有效的依据.

**关键词:** 液压调速阀;三谱;故障诊断;自回归模型;对角切片;二维切片

**中图分类号:** TH 137.52<sup>+</sup>2; TH 165<sup>+</sup>.3

**文献标识码:** A

调速阀由一个定差减压阀和节流阀组成,它是液压元件中结构较为复杂,容易发生故障的一类典型的元件.调速阀的故障诊断对液压系统的维护,有着重要的价值和普遍的指导意义.借助现代信号处理理论所取得的成果,探索故障特征信息提取的新途径,提出故障诊断的新方法是当前的重要课题.故障诊断的难点是特征信息的提取,由于故障与征兆之间往往不存在简单的一一对应关系,或者有用的征兆信息往往被淹没在较强的背景噪声中.因此,如何从传感器信号中提取与机械运转状况相对应的特征信息,是故障诊断中关键的一步.目前,国内外将三谱研究应用到机械故障诊断中的资料很少.文[1]研究了三谱在柴油机故障诊断中的应用,Mc Cormick等<sup>[2]</sup>研究了三谱在机械状态检测中的所体现出的优良特性,Cooray等<sup>[3]</sup>研究了如何利用三谱特性提取宇宙微波背景(CMB)中的微弱信号,Collis等<sup>[4]</sup>研究了三谱在提取故障特征信息中所具有的优势,Lutes等<sup>[5]</sup>研究了三谱在非线性振荡器中的响应特性.本文研究采用三谱及其切片分析的方法,解决液压元件调速阀故障诊断难的问题.

## 1 高阶累积量与高阶谱

### 1.1 高阶累积量

如图1所示,设系统输入信号 $a(t)$ 为一组均值为零的平稳随机信号, $h(t)$ 为调速阀的单位脉冲响应函数,而且系统输入信号 $a(t)$ 和调速阀的单位脉冲响应函数 $h(t)$ 满足

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \sum_{i=0}^{k-1} h(t-i) \cdot a(t-i), \\ y(t) &= \sum_{i=0}^{k-1} h(t-i) \cdot a(t-i) + u(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $1, 2, \dots, k-1$ 为滞后量.根据高阶累积量的性质<sup>[6-7]</sup>并考

虑系统输出信号 $y(t)$ 为线性过程,有 $c_{y,k}(1, 2, \dots, k-1) = \sum_{i_0=-\infty}^{\infty} \sum_{i_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{i_{k-1}=-\infty}^{\infty} h(i_0) h(i_1) \dots h(i_{k-1}) \cdot \text{cum}[a(t-i_0) a(t-i_1-1), \dots, a(t-i_{k-1}-i_{k-1})]$ .当 $a(t)$ 是服从独立同分布的非高斯白噪声时,其高阶累积量可以用来表示 $a_{k,k} = \text{cum}[a(1), a(2), \dots, a(k-1)]$ .假设滞后量 $1=2, \dots, k-1=0$ ,则 $a_{2,2} = c_{a,2}(0)$ ,  $a_{3,3} = c_{a,3}(0,0)$ ,  $a_{4,4} = c_{a,4}(0,0,0)$ .定义 $a_{2,2}, S = a_{3,3}/(a_{2,2})^{3/2}$ ,  $K = a_{4,4}/(a_{2,2})^2$ 分别为方差、偏

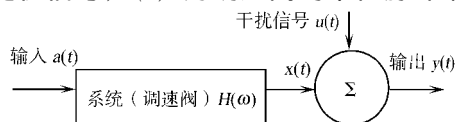


图1 调速阀的振动信号采集过程  
Fig. 1 The vibration signal of the speed control valve

收稿日期: 2008-02-16

通信作者: 黄宜坚(1945-),男,教授,主要从事现代谱分析与故障诊断的研究. E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划项目(2005 H035)

度和峰度<sup>[4]</sup>. 如果  $y(t)$  是对称分布, 偏度一定为零(反之, 则不一定成立); 如果  $y(t)$  服从高斯分布, 峰度一定为 3(反之, 则不一定成立). 假定滞后量  $i_0 = i_1 - 1 = i_2 - 2 = \dots = i_{k-1} - k - 1 = i$ , 则系统输出  $y(t)$  的高阶累积量为

$$c_{y,k}(1, 2, \dots, k-1) = a_{i,k} h(i) h(i+1) \dots h(i+k-1). \quad (2)$$

## 1.2 高阶谱

高阶谱分析是一种新的信号处理的有效技术, 它可以定量描写信号间的非线性耦合, 可以抑制噪声、保留信号的相位信息, 是处理非线性、非高斯信号的有力工具. 对调速阀故障特征信息的提取模型如图 1 所示. 在图 1 中, 应用白箱理论来建立调速阀的模型很难. 这里采用黑箱方法, 从调速阀阀体的振动信号来提取系统的动力学特性.

设系统的传递函数为  $H(\omega)$ , 而  $a(t)$  为零均值的非高斯白噪声, 由于采样信号常受到加性高斯噪声  $u(t)$  的干扰, 用传统的时间序列建模无法排除加性的高斯噪声的干扰. 设  $y_1(t)$  为  $y(t)$  中去掉确定性信号的零均值的有色随机信号, 利用  $y_1(t)$  的高阶累积量进行建模就可以抑制  $u(t)$  的干扰. 对式(2)中的高阶累积量  $c_{y,k}(1, 2, \dots, k-1)$  进行  $k-1$  维的离散 Fourier 变换, 得到高阶谱的一般定义为

$$S_{y_1,k}(1, 2, \dots, k-1) = \dots c_k(1, 2, \dots, k-1) \cdot \exp[-j(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{k-1})] = a_{i,k} H(\omega_1) H(\omega_2) \dots H(\omega_{k-1}) H^*[\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{k-1}]. \quad (3)$$

式(3)中,  $\omega$  为频率,  $H(\omega)$  为调速阀的传递函数,  $H^*(\omega)$  为  $H(\omega)$  的共轭函数,  $S_{y,k}(1, 2, \dots, k-1)$  为高阶谱, 也被称为高阶累积量谱. 当  $k=2, 3, 4$  时, 它分别表示功率谱  $P(\omega)$ 、双谱  $B(\omega_1, \omega_2)$  和三谱  $T(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ .

## 2 AR 三谱

### 2.1 AR 三谱的时间序列模型

调速阀阀体输出的随机振动信号是, 调速阀工作时受到的均值等于零的非高斯的白噪声  $a(t)$  的干扰. 所以, 输出的随机信号中含有丰富的动态信息, 建立自回归(AR)模型, 有

$$y_1(t) + \sum_{i=1}^p a_i y_1(t-i) = a(t), \quad t = 1, 2, \dots, N.$$

式中,  $a_i (i=1, 2, \dots, p)$  为自回归系数,  $p$  为自回归模型的阶数. 对于稳定的线性物理过程  $h(t)$ , 考虑到系统为最小相位系统, 根据式(3)得到基于 AR 模型的双谱和三谱表达式分别为

$$B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2) = a_{i,3} H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2), \quad (4)$$

$$T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = a_{i,4} H(\omega_1) H(\omega_2) H(\omega_3) H^*(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3). \quad (5)$$

式(4), (5)中,  $|\omega_1| < \pi$ ,  $|\omega_2| < \pi$ ,  $|\omega_3| < \pi$ ,  $H(\omega)$  为式(6)中描写的传递函数, 即

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a_i e^{-ji\omega}}. \quad (6)$$

对  $y_1(t)$  运用 AR 模型的参数法估计出模型系数  $a$ , 结合式(6)将系数  $a$  代入式(4), (5), 得到 AR 双谱和三谱幅值为

$$|B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2)| = \frac{|a_{i,3}|}{|1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp[-ji(\omega_1 + \omega_2)]|} \frac{|a_{i,3}|}{|1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp[-ji\omega_k]|},$$

$$|T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)| = \frac{|a_{i,4}|}{|1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp[-ji(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)]|} \frac{|a_{i,4}|}{|1 + \sum_{i=1}^p a_i \exp[-ji\omega_k]|}.$$

复角分别为  $B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2) = \arctan[B_i^{\text{AR}}/B_r^{\text{AR}}]$ ,  $T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \arctan[T_i^{\text{AR}}/T_r^{\text{AR}}]$ . 其中,  $B_i^{\text{AR}}$ ,  $T_i^{\text{AR}}$  和  $B_r^{\text{AR}}$ ,  $T_r^{\text{AR}}$  分别代表  $B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2)$ ,  $T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  的虚部和实部.

### 2.2 切片谱的算法

二次相位耦合就是常见的一种现象. 对于这种非线性耦合现象, 仅用功率谱很难从根本上解决问

题,而高阶谱就可以定量地描述二次相位耦合程度.当冻结三谱  $T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  中的一个频率  $\omega_3$ , 即当  $\omega_3 = C(\text{const})$  时,三谱切片就变成了双谱.定义三谱二维切片为

$$T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, C) = a_{4,4} H(\omega_1) H(\omega_2) H(C) H^*(\omega_1 + \omega_2 + C),$$

其归一化后的幅值为

$$|T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, C)| = |K| / \{ |1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji(\omega_1 + \omega_2 + C)]| \times \sum_{k=1}^2 |1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji\omega_k]| / \sqrt{1 + \sum_{i=1}^p \exp[-jiC]} \}. \quad (7)$$

用三谱切片谱函数计算二次相位耦合,存在计算量大、三维图形不够直观等缺点.为了改善图形显示不够直观的缺点,采用二维的对角切片谱函数表征系统的二次相位耦合程度.当  $\omega_1 = \omega_2$  时,定义双谱的  $1\frac{1}{2}$  维(对角)切片谱函数为

$$B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2) = a_{3,3} H^2(\omega_1) H^*(2\omega_1),$$

双谱  $1\frac{1}{2}$  维切片归一化后的幅值为

$$|B^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2)| = |S| / \{ |1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji(2\omega_1)]| / \sqrt{1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji\omega_1]} \}^2.$$

三谱的  $1\frac{1}{2}$  维(对角)切片谱函数为

$$T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, C) = a_{4,4} H^2(\omega_1) H(C) H^*(2\omega_1 + C),$$

其归一化后的幅值为

$$|T^{\text{AR}}(\omega_1, \omega_2, C)| = |K| / \{ |1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji(\omega_1 + C)]| \times |1 + \sum_{i=1}^p \exp[-ji\omega_1]|^2 / \sqrt{1 + \sum_{i=1}^p \exp[-jiC]} \}.$$

### 2.3 AR 三谱的几何表示

双谱可以用两个频率与对应的幅值构成的三维空间表示,但是,三谱需要用 3 个频率及对应的幅值构成的四维空间表示.目前,常用方法是利用切片表示三谱.为了获得其三谱图形,采用了 1 个可移动的球来显示三谱在四维空间中每一点的幅值.球的尺寸和阴影面积的大小表征那一点的幅值大小.除此之外,还可以用 1 个可移动的面去切这个空间,面上不同的色差代表不同的幅值,如图 2 所示.

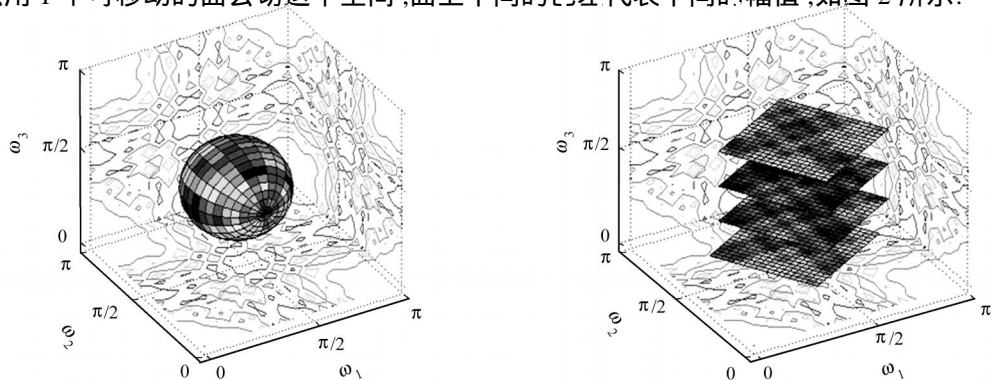


图 2 三谱在四维空间的几何表示

Fig. 2 The trispectra plotted in trispectral space

## 3 实验数据处理与分析

### 3.1 实验原理及测试装置

实验分为正常和故障两种状态,在不同工作状态下测量调速阀阀体的振动信号.对获得的数据进行分析和处理,诊断出调速阀工作在正常状态和故障状态下的不同点.在实验过程中,利用 NI 的软件 LabVIEW 及 PCI-6014 的数据采集卡、PS-3030D 型直流驱动电源、分辨率为  $0.1 \mu$  的 ST-1-03 型电涡

流位移传感器来进行振动信号的数据采集,依次采集正常状态和故障状态下的阀体的振动信号. 实验中设置了 5 种故障. 在测试过程中,将油压(1~6 MPa)分为 5 组,采样频率设为 1 024 Hz,读取频率为 512 Hz. 实验数据采集程序如图 3 所示.

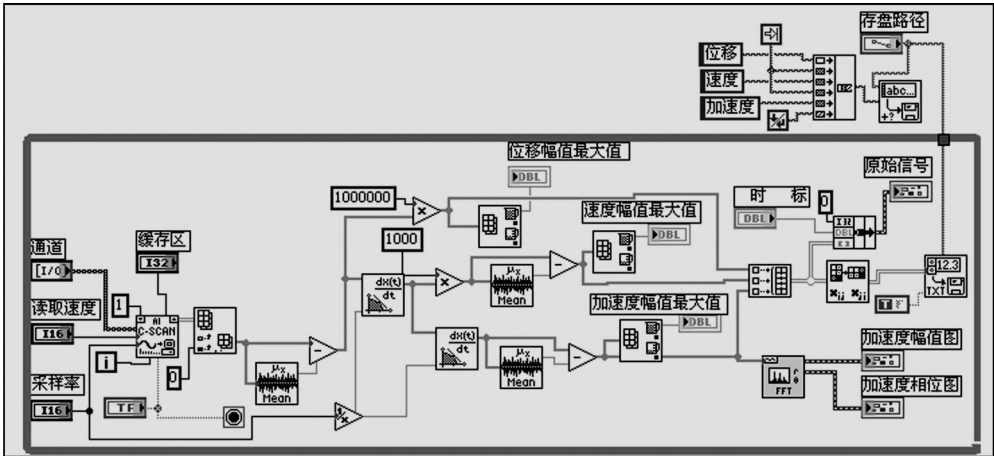


图 3 数据采集程序图

Fig. 3 The block diagram of the data-acquiring program

3.2 实验数据预处理

实验所得到的数据,往往是由真实信号和各种各样的干扰或噪声组成的. 为了消除混杂在信号中的噪声的干扰和影响,用中数法对实验数据进行预处理. 图 4 为数据处理前后的情况, $n$  为数据量.

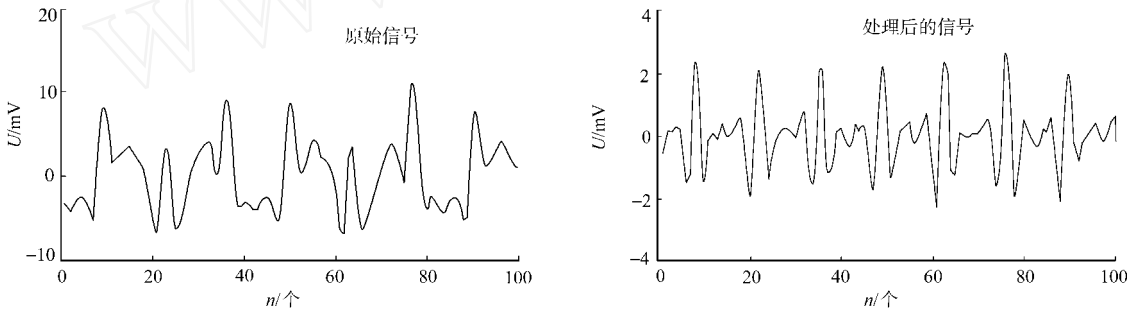


图 4 预处理前后数据

Fig. 4 The data before and after preprocessing

3.3 调速阀故障的三谱二维切片分析

对液压设备中的调速阀设置故障并进行实验,选用一个调速阀为正常工作状态,另一个调速阀为故障状态,故障状态如表 1 所示. 表 1 中, $S$  为偏度,  $K$  为峰度, 阀芯和弹簧均为调速阀中节流阀部分的阀芯和弹簧.

当式(7)中的常数  $C=0$  时,得到不同工作状态下调速阀阀体的振动信号的 6 种归一化 ( $I$ ) 三谱二维切片图,如图 5 所示. 从图 5 中可看出,调速阀工作状态的变化导致阀体振动信号的三谱切片幅值的变化. 在图 5(a) 中,三谱二维切片  $T^{AR}(\cdot, \cdot, 0)$  幅值不为零,说明液压调速阀阀体的振动信号是非线性、非高斯的. 在正常状态下,当  $\omega_1 = \omega_2 = \omega/2$  时,幅值为零,而有故障时这点幅值不等于零. 这是因为在故障时两个频率之间存在二次相位耦合;在  $\omega_1 = \omega_2 = \omega/2$  处,能量集中的程度反映了二次相位耦合的程度. 能量越集中则耦合强度越大,也说明其非线性程度越大. 其中,故障 1 表现出的非线性程度最大,故障 4 最小,如图 5(b), (e) 所示. 这说明弹簧体对阀体振动信号的影响比阀芯大. 如图 5(b), (c), (f), 在  $\omega_1 = \omega_2 = \omega/2$  处,峰值和能量集中度明显大于其他几种故障状态,而在图 5(b) 处的振动强度又明显大于图 5(c), (f).

表 1 各种不同工作状态下的偏度和峰度

Tab. 1 The value of skewness and kurtosis under different conditions of the speed control valve		
状态	$S$	$K$
正常	- 0.000 1	1. 658 9
故障 1 弹簧被拉伸	- 0.003 8	1. 833 8
故障 2 弹簧里缠绕硬纸片	- 0.004 5	1. 973 2
故障 3 将阀内的阀芯取出	- 0.001 5	1. 922 1
故障 4 将阀芯换为弹簧	- 0.001 3	1. 879 5
故障 5, 2 和故障 4 的结合	0.001 9	2. 226 5

可以看出,调速阀内弹簧体的变形直接影响其耦合处振幅的大小,变形越大,则耦合处的振幅越大.

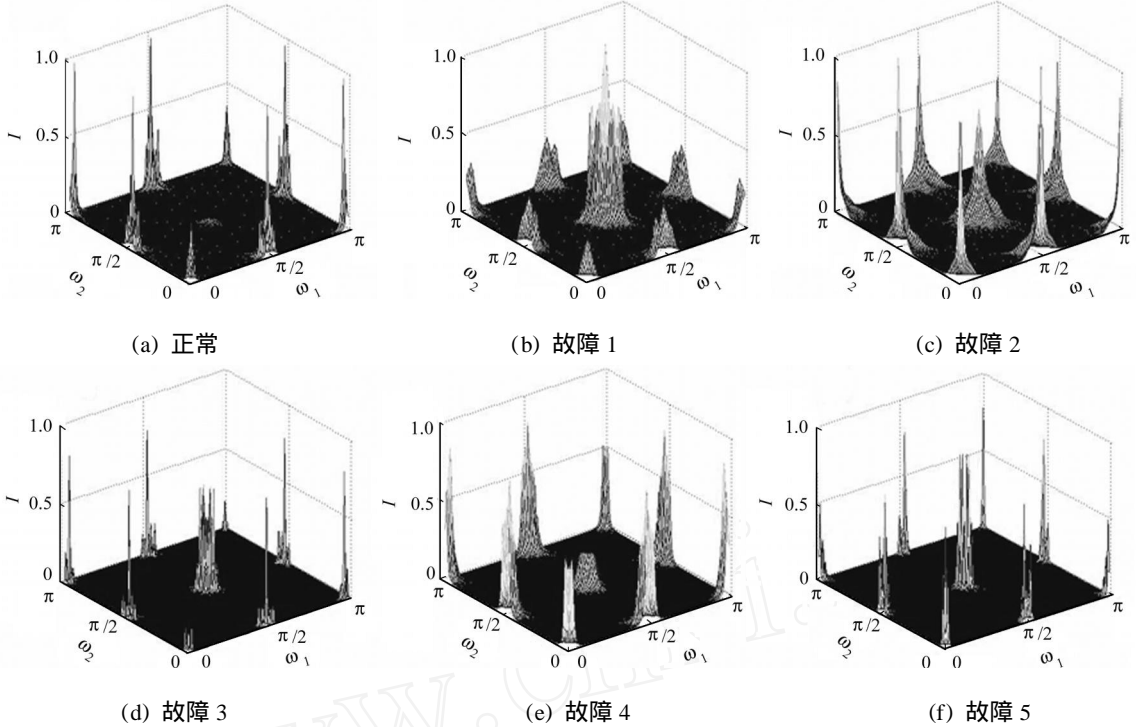


图 5 不同状态下的三谱切片图

Fig. 5 The slices of trispectra under different states

### 3.4 调速阀故障的三谱 $1\frac{1}{2}$ 维(对角)切片谱分析

对归一化的三谱二维切片  $T^{AR}(\omega_1, \omega_2, 0)$  和双谱  $B^{AR}(\omega_1, \omega_2)$  进行对角切片,如图 6 所示. 图 6(a) ~ (c) 是双谱  $B^{AR}(\omega_1, \omega_2)$  的对角切片  $B^{AR}(\omega_1, \omega_1)$ , 图 6(d) ~ (f) 是三谱切片  $T^{AR}(\omega_1, \omega_2, 0)$  的对角切片  $T^{AR}(\omega_1, \omega_1, 0)$ . 从图 6 可以看出,在故障状态下,阀体在  $\omega_1 = \omega_2 = \pi/2$  处的二次相位耦合表现得明显.

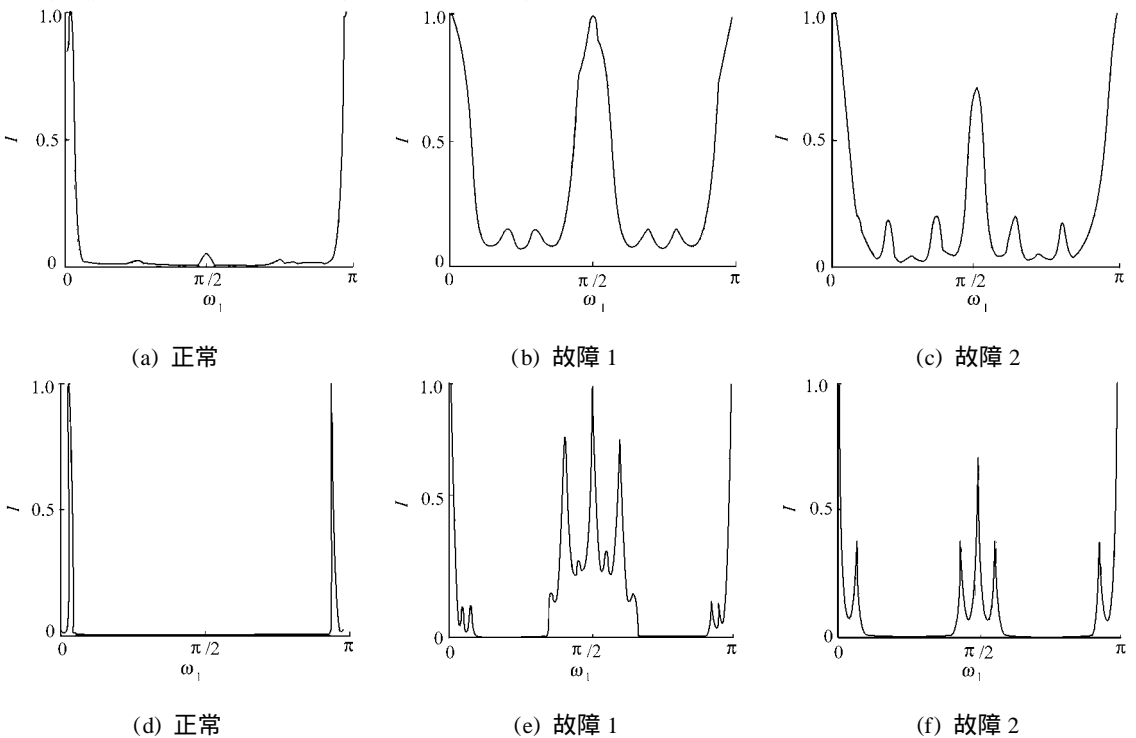


图 6 不同状态下的双谱和三谱切片

Fig. 6 The diagonal slices of bispectra and trispectra under different states

其中,双谱对角切片  $B^{AR}(\omega_1, \omega_1)$  表现出的幅值与频率之间的关系比较粗糙,这对真实信号特征的提取带来了不便;而三谱对角切片  $T^{AR}(\omega_1, \omega_1, 0)$  不仅能够揭示出更多的二次相位耦合情况,而且还能表现出更细腻的幅值变化,进一步提高调速阀故障诊断的准确性.出现上述现象的原因是因为三谱表征的是 3 个频率与幅值之间的关系,能够折射出比双谱更多的频率与幅值的关系.

## 4 结束语

在机械设备故障诊断中,为了更有效地提取信号特征,不能总设定信号是具有线性、高斯性的,而应从实际的角度去观察和分析信号.这样就可以获得更多的信息,从中更容易捕捉故障特征.三谱从更高的概率结构上表征随机信号,为分析非高斯、非线性信号提供了有效的工具.它不仅能定性地描述与机械故障密切相关的振动信号的线性与非线性程度,高斯与非高斯,而且还能大大地提高机械故障诊断的准确性,且对机械工况变化很敏感,适合于处理机械振动信号.

### 参考文献:

- [1] SHI Xiao-chun, HU Hong-ying. Diesel engine fault diagnosis and classification[J]. International Conference on Signal Processing Proceedings, 2007, 1(8): 16-20.
- [2] MCCORMICK A C, NANDI A K. Bispectral and trispectral features for machine condition diagnosis[J]. IEE Proceedings: Vision, Image and Signal Processing, 1999, 146(5): 229-234.
- [3] ASANTHA C, MICHAEL K. Weak lensing of the CMB: Extraction of lensing information from the trispectrum[J]. New Astronomy, 2003, 8(3): 231-253.
- [4] 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.
- [5] LUTES L D, CHEN D C K. Trispectrum for the response of a non-linear oscillator[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1991, 6(26): 893-909.
- [6] HINICH M J. Higher-order cumulants and cumulants spectra[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 1994, 13(4): 391-420.
- [7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1995: 90-93, 274-280.

## Fault Diagnosis of the Speed Control Valve Using the Slices of Trispectrum

CAI Qi-zhi, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The slices of the bispectrum and trispectrum are plotted for the vibration signals of the speed control valve when it works both under normal condition and under fault condition. The experimental results show that there are different magnitudes in the center of the two-dimensional slices of trispectral space with zero under normal condition and a distinct value under fault condition, and that the diagonal slices of trispectra can reveal more information about the magnitude than those of bispectrum because trispectrum can extract more nonlinear information which will provide effective criteria for fault characteristics.

**Keywords:** the speed control valve; trispectrum; fault diagnosis; autoregressive model; diagonal slice; two-dimensional slice

(责任编辑: 钱 筠 英文审校: 郑亚青)