

## ◎工程与应用◎

## 复累量切片在故障诊断中的应用

吴文兵<sup>1,2</sup>, 黄宜坚<sup>3</sup>WU Wenbing<sup>1,2</sup>, HUANG Yijian<sup>3</sup>

1.福州外语外贸学院,福州 350018

2.厦门大学 信息科技学院,福建 厦门 361000

3.华侨大学 机电工程学院,福建 泉州 362021

1.Fuzhou Technical College of Foreign Studies, Fuzhou 350018, China

2.School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361000, China

3.College of Mechanical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China

WU Wenbing, HUANG Yijian. Application of complex cumulants slices in mechanical fault diagnosis. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(15): 238-241.

**Abstract:** Complex third-order cumulant has different definition forms. Different forms have different coupling properties, and the generated complex cumulants slices contain different coupling information of signals. In experiments, using the different definitions, the same coupling method is applied to both specific fault signals and normal signals. Furthermore, complex third-order cumulant slices spectrum is defined, and it is used to analyse the coupling features of normal signals and fault signals. Experiments indicate, the detection accuracy rate on the same fault are not the same with the different coupling methods, thus, it provides an alternative method to diagnose the specific fault.

**Key words:** complex third-order cumulant slices; coupling; fault diagnosis; spectrum of slices

**摘要:**复数三阶累量具有不同的定义形式,定义形式不同,其耦合性质也不相同,则由其产生的复数累量切片也包含了信号间不同的耦合信息,实验中利用这些不同的定义方式,对特定的故障信号和正常信号同时采用相同的耦合方式进行故障判别。同时定义了复数三阶累量切片谱,通过切片谱对正常信号和故障信号的耦合特征进行了分析。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,从而为特定的故障判别提供了一种可供选择的方法。

**关键词:**复数三阶累量切片;耦合;故障诊断;切片谱

**文献标志码:**A **中图分类号:**TG156 **doi:**10.3778/j.issn.1002-8331.1112-0267

## 1 引言

利用高阶累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。一般而言,机械振动过程中工件的振动信号是非线性、非高斯的,环境中的噪声可以近似当做高斯噪声处理,因而用高阶累量分析振动信号更容易提取与工件有关的特征信息。因此,高阶累量已经在机械振动、故障诊断等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。M.R.Raughveer和国内学者王树勋等人对高阶累量的耦合性质进行了深入研究,明确指出了

各种复数高阶累量的不同定义形式的耦合特征<sup>[5-8]</sup>。本文在此基础上,利用复数三阶累量切片进行故障诊断,实验结果表明,由于定义形式的不同而导致的复数三阶累量切片中包含了不同的耦合信息,这些不同的耦合信息使得故障诊断的准确率不一样,说明了不同耦合方式的复数三阶累量在保持同类信号特征这一点上具有不同的特点。

## 2 高阶累量

设  $\{x(n)\}$  为零均值  $k$  阶平稳随机过程,则该过程的  $k$  阶累量  $c_{kk}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$  定义为随机变量  $\{x(n), x(n+\tau_1), \dots,$

**基金项目:**国家自然科学基金(No.50975098);福建省教育厅A类科技项目(No.JA11342)。

**作者简介:**吴文兵,男,在读博士,讲师,主要研究方向为信号检测、故障诊断。

**收稿日期:**2011-12-14 **修回日期:**2012-04-16 **文章编号:**1002-8331(2013)15-0238-04

**CNKI出版日期:**2012-05-31 <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120531.1542.003.html>

$x(n + \tau_{k-1})$  的  $k$  阶联合累积量,即

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = cum\{x(n), x(n + \tau_1), x(n + \tau_2), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} \quad (1)$$

而该过程的  $k$  阶矩  $m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$  则定义为随机变量  $\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\}$  的  $k$  阶联合矩,即

$$m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = mom\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} \quad (2)$$

这里,  $mom()$  表示联合矩,三阶累积量为<sup>[9]</sup>:

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

### 3 复数三阶累量切片

根据文献[7],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

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

其中  $x^*(n)$  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的发生了二次相位耦合的信号(如式(7),其中  $\phi_3 = \phi_2 + \phi_1$ ,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  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ )其三阶累量为 0,以定义 2 的方式其三阶累量如式(8)所示,以定义 3 的方式其三阶累量如式(9)所示。

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

$$A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)] + \exp[j(\omega_2 \tau_1 - \omega_1 \tau_2)]] \quad (8)$$

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

分别在式(8)和式(9)中令  $\tau_2 = 0$ ,则式(8)变为:

$$A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau_1)] + \exp[j(\omega_2 \tau_1)]] \quad (10)$$

式(9)变为:

$$A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_3 \tau_1)] + \exp[j(\omega_3 \tau_1)]] \quad (11)$$

从式(3)可以看出,当  $\tau_2 = 0$  时所求出的即为三阶累量切片,式(10)和式(11)分别表明,当信号可以由复数谐波形式表示时,按定义 2 和定义 3 方式得出的三阶累量切片,分别只包含参加耦合的信号和耦合后的信号。

### 4 数据采集

本实验研究的减压阀为先导式减压阀。当减压阀进出口有异物,压力偏高或偏低都会影响到减压阀的正常运行,为了获取减压阀在故障状态下的运行信号,本文进行的实验人为设置了如下故障:

故障一:在减压阀出口加  $\phi 3$  mm 的铁芯;

故障二:在减压阀进,出口都加了  $\phi 3$  mm 铁芯。

通过实验可以近似模拟减压阀工作故障状况。

本文利用 LabVIEW 软件及 PCI-6014 的数据采集卡和

一个加速度传感器,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 分五个压力等级。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两种故障状态各自采集了 18 组共 54 组数据。本文实验使用的数据个数为 1 536 个。

由于测试过程中系统外部和内部各种因素的影响必然在输出过程中夹杂着不需要的成分,本文采用中值法对采集的振动信号进行预处理剔除混杂在信号中的干扰噪声。滤波后的信号如图 1 所示。图中横坐标表示信号个数,单位为个,纵坐标表示信号振幅,无量纲。

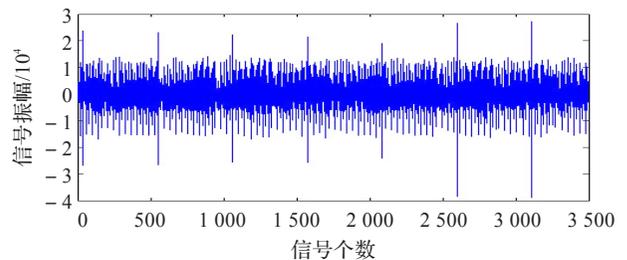


图 1 滤波后信号

### 5 三阶累量切片计算

本文为了进行故障识别,将实验中测得的正常状态和故障一状态的 36 组数据分别按式(4)~(6),并令  $\tau_2 = 0$ ,计算出复数三阶累量切片并取其模值,经过对比,在计算时令  $-8 \leq \tau_1 \leq 8$ ,并以此计算结果作为特征向量输入支持向量机进行故障判别,可以取得较为满意的结果。其中按定义 1 计算出的累量切片示于表 1。

表 1 正常状态和故障一状态三阶累量切片值

正常状态	1 891 222.118 0	2 055 712.580 7	1 950 438.903 3	...
	724 726.034 7	549 599.133 1	525 556.042 7	...
	448 594.348 7	537 601.538 7	579 072.049 9	...
...				
故障一状态	3 935 434.029 2	2 980 882.435 6	3 161 106.013 2	...
	7 032 668.342 8	6 825 709.365 9	5 024 387.558 4	...
	9 151 062.156 0	10 907 623.239 8	1 291 835.909 4	...
...				

### 6 实验结果

本文根据文献[10],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五种不同的油压下获得的,训练时分别在表 1 的正常数据和故障一数据中取出不同油压状态下相对应的 5 组数据共 10 组,对所建立的最小二乘支持向量机进行训练,训练结束后再利用该支持向量机进行故障识别,利用训练后的网络对所剩下的 26 组数据进行模拟识别,如图 2 所示,图中显示 26 组数据的模拟后的状态,其中空心圆圈表示训练数据预先设定的状态,比如前 13 组数据是测量的正常数据,应该处于图中上一条横线所表示的 1 状态,后 13 组故障数据应该处于下一条横线

所表示的 -1 状态,红色实心圆表示经过 LSSVM 模拟后对数据所进行的分类结果,如果某组数据的空心圆和红色实心圆重合,则表示这组数据的模拟结果正确,否则错误。模拟后的结果如图 2 所示,图中的横坐标表示信号的组数,单位为组,纵坐标表示信号模拟后的数值,无量纲。结果显示,按定义 1 的方式进行识别,只有 2 组识别错误,正确率达到了 90% 以上。为了便于对比,将按定义 2 和定义 3 的方式进行相同的实验,其识别错误数分别为 2 组和 4 组。同时将故障一的数据更换为故障二,也在三种不同的定义方式下进行了上述完全相同的实验,其识别错误数分别为 3 组、2 组和 5 组。

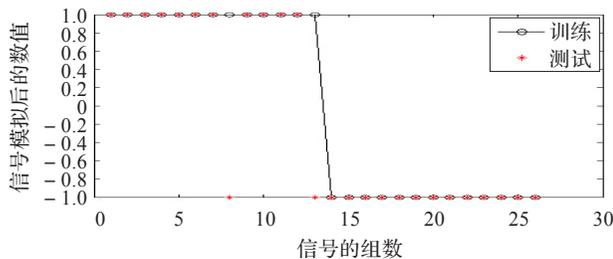


图2 按定义 1 方式正常状态和故障一状态模拟结果图

### 7 实验结果分析

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量为 0,按照定义 2,

三阶累量中只包含参加二次耦合的谐波分量,而按定义 3,则三阶累量中既包含参加耦合的分量,也包含耦合后的分量。由上述不同的定义方式而计算出的三阶累量切片,则同样具有不同的耦合性质,这种不同的耦合性质就必然包含了不一样的信号信息,在进行故障诊断时,由其得出的结果就可能呈现出不同的正确率。

### 8 谱图

为了对上述三种定义方式的三阶累量切片在故障诊断中的性质有一个直观上的认识,本文定义如下形式的三阶累量切片谱:

$$Diag(\omega) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, 0)e^{-j\omega\tau_1} \quad (12)$$

由于仅仅进行傅里叶变换,不会改变原信号中的频率信息,因此三阶累量切片谱有利于在直观上对各种定义方式下的三阶累量切片进行频率信息的分析。本实验首先将正常状态和故障一状态的 36 组数据,分别按前述的三种定义方式得出每组数据的三阶累量切片共 108 组数据,再按式(12)求出其复数三阶累量切片谱。本文在正常状态和故障一状态下,当油压分别为 1 MPa, 3 MPa, 5 MPa 时,将两种状态的三阶累量切片谱各选取 1 组示于图 3 至图 8。

图中横轴表示圆频率,单位为  $\pi$ ,纵轴表示归一化后的幅值大小,无量纲。由图 3 至图 8 可以看出,总体上来说,

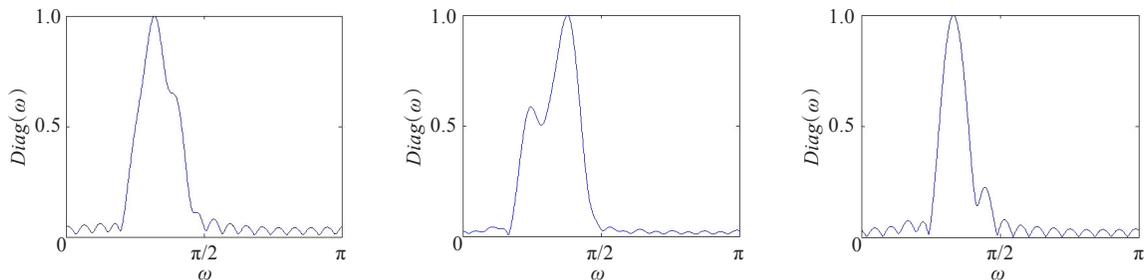


图3 定义 1 方式正常状态三阶累量切片谱图

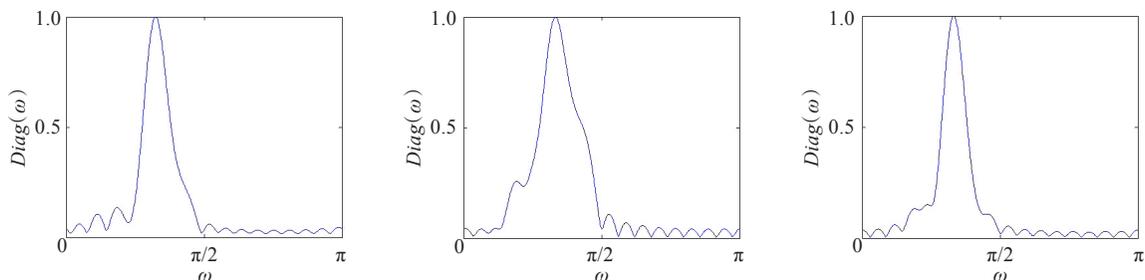


图4 定义 1 方式故障状态三阶累量切片谱图

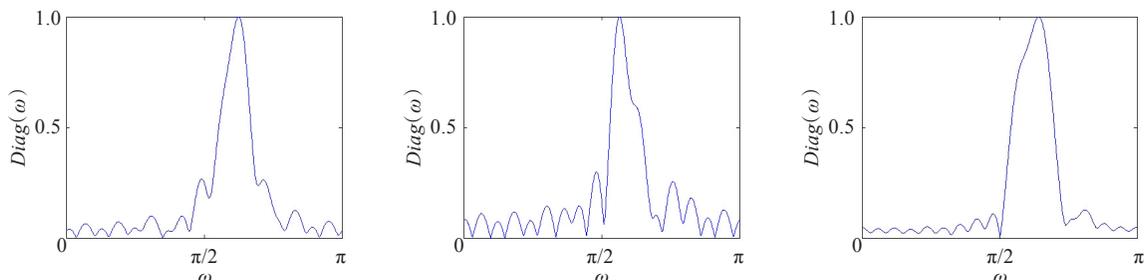


图5 定义 2 方式正常状态三阶累量切片谱图

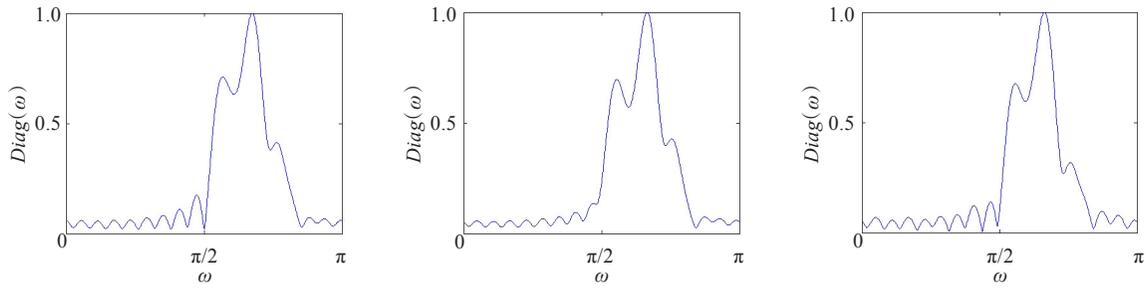


图6 定义2方式故障状态三阶累量切片谱图

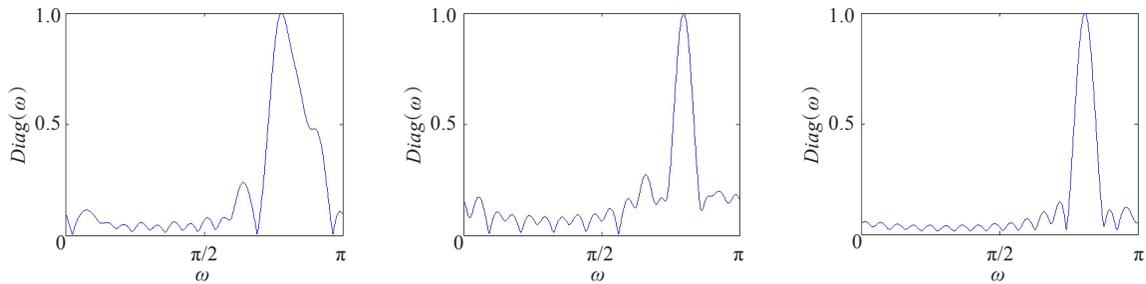


图7 定义3方式正常状态三阶累量切片谱图

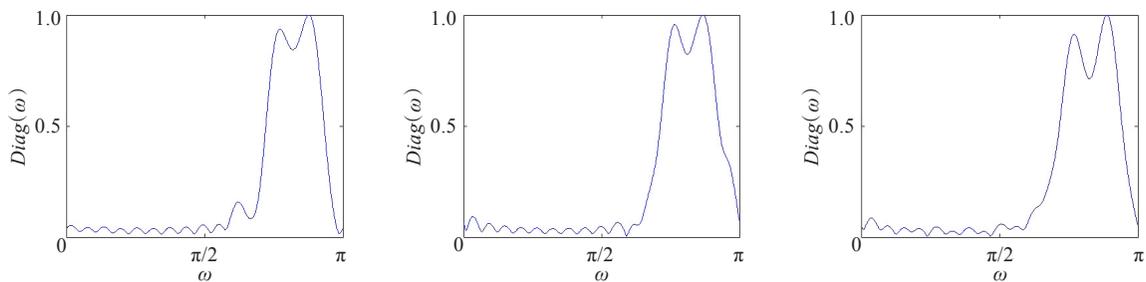


图8 定义3方式故障状态三阶累量切片谱图

在三种定义方式下,故障状态的三阶累量切片谱与正常状态相比,其谱峰的分布要更复杂一些,同时无论在正常状态还是故障状态,定义2和定义3方式下的三阶累量切片谱谱峰的分布都比定义1复杂些,这应该是由于前述的不同的定义方式包含了不同的耦合信息的原因。

### 9 结论与展望

复数三阶累量的不同定义形式决定了其包含了不同的耦合信息,这种不同的耦合信息必然反应到由其得出的复数三阶累量切片中。本文通过故障诊断实验对这种不同的耦合特征进行分析,得出了具有不同耦合性质的复数三阶累量切片其保持同类信号特征的能力是不一样的这一结论,也为故障诊断提供了一种可以选择的方法。本文提供的故障诊断方法可以通过单片机系统予以实现,在系统中可以先存储一定数量的数据,再根据实时采集到的数据进行故障诊断。

### 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] 曹精明,邵忍平,胡文涛.HOC与EMD结合的齿轮损伤检测研究[J].仪器仪表学报,2011,32(4):729-735.  
 [3] 邵忍平,黄欣娜.基于高阶累积量的齿轮系统故障检测与诊断[J].机械工程学报,2008,44(6).  
 [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).  
 [5] Hinich M J.Higher-order cumulants and cumulant spectra[J].Circuits Systems and Signal Processing,1994,13(4):391-420.  
 [6] Raghuvver M R.Time-domain approaches to quadratic phase coupling estimation[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1990,35(1).  
 [7] 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.  
 [8] 张严,王树勋,李生红.二次相位耦合的 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析[J].电子学报,1996,64(4):109-112.  
 [9] 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,2002:21-22.  
 [10] 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).