

双谱耦合性质对故障诊断的影响

吴文兵¹, 黄宜坚², 陈文芑¹

(1. 厦门大学 信息科技学院 福建 厦门 361000 2. 华侨大学 机电及自动化学院 福建 泉州 362021)

摘要: 为了对双谱的耦合性质进行分析, 同时利用三阶累积量和双谱对溢流阀进行故障诊断。由于双谱与三阶累积量相比, 可以用来描述二次相位耦合, 对比实验结果表明, 故障的种类不同, 其耦合信息对于这些故障判断的影响也不一样。实验中还通过二维小波在不同的方向上对故障信号和正常信号进行特征提取, 然后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, 无论考虑耦合因素与否, 这些故障信号在不同的频率部分与其正常状态的区分程度都不一样。

关键词: 三阶累积量 耦合; 二维小波 故障诊断

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2013)11-0082-03

The Effect of Bispectrum Coupling Property on Fault Diagnosis

WU Wen-bing¹, HUANG Yi-jian², CHEN Wen-xiang¹

(2. College of Information Science and Technology, Xiamen University, Fujian Xiamen 361000, China;

3. Institute of Electrical and Automation, Huaqiao University, Fujian Quanzhou 362021, China)

Abstract In order to analyze the coupling properties of bispectrum, both bispectrum and three order cumulants were used to diagnose faults. Compared with three order cumulants, bispectrum concludes the quadratic phase coupling information. The comparative experimental results indicate that, when the kinds of faults were different, the impact of coupling information on the results of fault diagnosis became different too. Furthermore, the features of fault signals and normal signals were extracted by 2-D wavelet in different directions, then these features were input into support vector machine to diagnose the faults, and the results show, whether coupling information were included or not, the corrects of diagnosis were different when all these faults were in different frequencies parts.

Key Words: Three-Order Cumulants; Coupling; 2-D Wavelet; Fault Diagnosis

1 引言

高阶累积量可以自动地抑制高斯背景噪声的影响, 提取高斯噪声中的非高斯信号^[1]。正因为这样, 高阶累积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, 已经在故障诊断中得到了广泛应用^[2-8]。小波分析以其良好的时-频特性, 成为信号分析的有力工具, 特别对于非线性、非平稳信号的分析时优点更为明显。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)不追求样本数目趋于无穷大, 而是在有限样本数下也能取得最优解, 是一种兼顾经验风险和置信范围的新方法。

由于实际的机械振动信号具有非线性、非平稳的特点, 而小波变换能有效地处理这类信号, 因此根据溢流阀振动信号的不同耦合特性, 在双谱和三阶累积量两种情况下, 利用二维小波进行特征提取, 再将提取的特征值输入最小二乘支持向量机(Least

Square Support Vector Machine, LS-SVM)进行故障诊断, 然后对两种情况下得到的结果进行分析。

2 三阶累积量与双谱

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 $\hat{c}_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\}$ (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 AR 模型后, 双谱的频域表达式表达式为^[11-12]:

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

式中 $H(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p \phi_i e^{-j\omega}}$ —频率特性函数; $\gamma_{3a} = E\{a^3(n)\}$ —斜度;

$a(n)$ —独立同分布的非高斯随机过程; ϕ_1, \dots, ϕ_p —AR 模型的系数和阶数; $H^*(\omega) = H(\omega)$ 的共轭函数。

来稿日期 2013-01-05

基金项目 国家自然科学基金(50975098) 厦门市科技计划项目(3502Z20123013)

作者简介 吴文兵(1968-) 男 江西抚州人 副教授 博士 主要研究方向 信号处理、故障检测

3 数据采集

溢流阀在每个液压系统中几乎都要用到,其性能的好坏对整个系统的正常工作有很大影响。当内部主阀弹簧损坏、阻尼孔受阻、先导阀弹簧损坏、或进油口有异物、出现漏油现象,都会使得溢流阀产生故障,无法正常起作用。针对这些情况,本次动态测试实验共设置了 2 组故障如下:

- (1)使主阀弹簧变形;
- (2)使先导阀弹簧变形;

通过实验可以近似模拟溢流阀工作故障状况。

利用 LabVIEW 软件及 PCI-6014 的数据采集卡和一个加速度传感器,依次采集溢流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 250Hz,读取频率 125Hz,采样过程时间约 2min。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。实验使用的数据个数为 1536 个。

4 双谱与三阶累积量图

本实验首先将正常状态和故障状态的 36 组数据,按照三种状态,即正常、故障一和故障二状态分别得出每组数据的双谱和三阶累积量。在每种状态分别选取三组数据,油压分别为 1MPa, 3MPa, 5MPa 时的双谱和三阶累积量进行图示,如图 1~图 6 所示。其中双谱绘制的点数是 255 个,为了进行对比,在绘制三阶累积量时,令 $-127 \leq \tau_1, \tau_2 \leq 127$,这样绘制的点数同样是 255 个。图中 x, y 轴表示数据个数,单位为个,纵轴表示归一化后的幅值大小,无量纲。对比图 1 和图 2、图 4 和图 5,可以看出,正常状态和故障一状态的双谱图在谱峰的分布形状和密度方面区别较大,而从三阶累积量的分布来看则区别较小些;再对比图 1 和图 3、图 4 和图 6,则可以看出,在故障二状态,无论是双谱还是三阶累积量,正常状态和故障二状态的区别都比较大。

5 特征提取

在故障识别时,如果直接采用将所获得的三阶累积量数据输入神经网络,一是运算量太大,二是通过实验所获得的诊断结果也不理想。由于原始信号中所包含的各种频率信息必然反应到其双谱和三阶累积量中,而小波分解又能有效提取这些频率信息,故采用二维小波分解对测量到的每组数据的双谱和三阶累积量进行特征提取,使用的是 db1 小波^[8-9]。按照文献^[12],二维小波函数分解是把尺度 j 的低频部分分解成四部分:尺度 $j+1$ 的低频部分 a_j 和三个方向(水平、垂直、斜线) d_j^1, d_j^2, d_j^3 的高频部分。通过实验对比分析,在对原始数据进行二维小波函数分解后,并提取尺度为 6 时的 6 级压缩系数作为 LSSVM 输入向量的时候取得了最佳识别效果,压缩后的系数为(4x4)的二维数组。在低频部分和三个方向(水平、垂直、斜线)的高频部分分别进行了特征提取,表一示出了在故障一状态下,正常状态和故障一状态数据的双谱按照高频斜线方向进行压缩后所获得的特征向量。

6 实验结果

机械故障诊断包括信号获取、信号处理和故障诊断 3 个环节。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)不追求样本数目

趋于无穷大,而是在有限样本数下也能取得最优解,是一种兼顾经验风险和置信范围的新方法。LSSVM 是基于 SVM 方法的一种改进算法。LSSVM 方法采用最小二乘线性系统作为损失函数,与经典 SVM 不同的是:它只有等式约束,而无不等式约束,加快了计算的速度。在上文通过二维小波提取了特征值的基础上,根据文献^[10],建立了相同的 LSSVM 进行故障诊断。在训练 LSSVM 时,采用文献^[10]相同的方法,即在训练时分别在表一中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 LSSVM 进行训练,训练结束后再利用该支持向量机对剩下的 26 组数据进行模拟识别,图中各部分的含义也与文献^[10]的相应图例相同。当按照双谱方式,对于故障一进行诊断时,按照高频的斜线部分所获得的诊断结果,正常状态只有 2 组、故障状态有 1 组共 3 组识别错误,正确率达到 85%以上。为了便于对比,将按 4 个不同方向进行特征提取后所得到的模拟结果,如表 2 所示。表中的数字表示模拟识别时的错误数。为了进行进一步的分析,将正常状态和故障一在计算三阶累积量的基础上也进行了上述相同的实验。然后再将故障二替换故障一,在双谱和三阶累积量两种情况下,进行了与故障一相同的实验步骤,结果如图 2 所示。

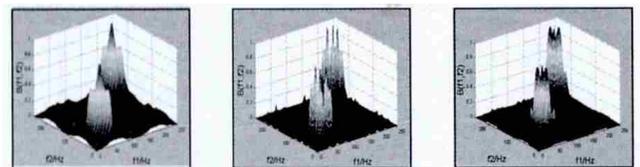


图 1 正常状态双谱图

Fig.1 Double spectra in Normal State

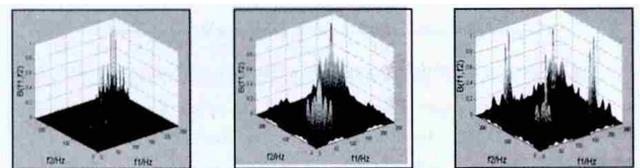


图 2 故障一状态双谱图

Fig.2 Double Spectra in Failure 1 State

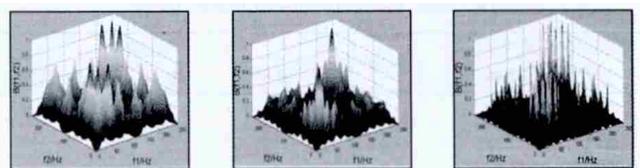


图 3 故障二状态双谱图

Fig.3 Double Spectra in Failure 2 State

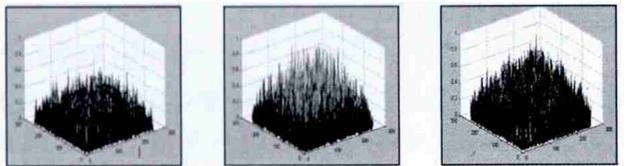


图 4 正常状态三阶累积量图

Fig.4 Third-Order Cumulants Figure in Normal State

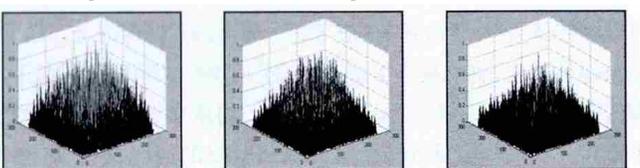


图 5 故障一状态三阶累积量图

Fig.5 Third-Order Cumulants Figure in Failure 1 State

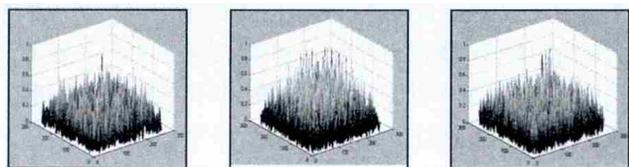


图6 故障二状态三阶累积量图

Fig.6 Third-Order Cumulants Figure in Failure 2 State

表1 定义三方式复数三阶累积量按斜线方向提取的特征值
Tab.1 The Defined Three Ways The Plural Third-Order Cumulants Eigenvalue According to Slash Direction

| | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 正常 | 0.2303 | 0.3309 | 0.0777 | 0.6620 | 0.4379 | 0.5280 | 0.0139 | 0.3194 |
| | 0.3131 | 0.3222 | 0.3725 | 0.3740 | 0.3357 | 0.0323 | 0.3156 | 0.0246 |
| | 0.2426 | 0.4528 | 0.2681 | 0.4695 | 0.5328 | 0.2329 | 0.5135 | 0.5177 |
| 状态 | | | | | | | | |
| 故障 | 0.3236 | 0.3258 | 0.3728 | 0.6658 | 0.4346 | 0.0298 | 0.3191 | 0.6284 |
| | 0.1832 | 0.4721 | 0.5733 | 0.5671 | 0.0350 | 0.5306 | 0.0156 | 0.5230 |
| | 0.3644 | 0.3464 | 0.2572 | 0.0669 | 0.5265 | 0.4311 | 0.3144 | 0.3231 |
| 状态 | | | | | | | | |

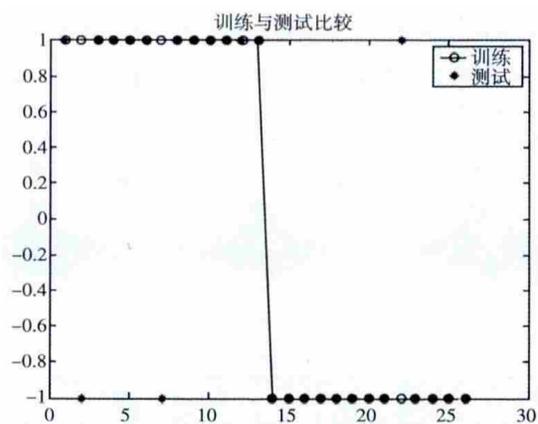


图7 定义三方式按斜线方向特征提取故障诊断模拟结果图
Fig.7 Defines Three Ways Feature Extraction Fault Diagnosis Simulation Result According to Slash Direction

表2 各种定义方式模拟结果错误数
Tab.2 Simulation Results Error Number of The Various Definitions Way

| 特征值提取方向 累积量的种类 | 低频 | | 高频 | |
|-------------------|----|----|----|----|
| | 水平 | 垂直 | 水平 | 垂直 |
| 故障一(双谱) | 5 | 4 | 4 | 3 |
| 故障二(双谱) | 3 | 5 | 5 | 2 |
| 故障一(三阶累积量) | 7 | 8 | 8 | 7 |
| 故障二(三阶累积量) | 1 | 3 | 3 | 5 |

7 实验结果分析

由表2可以看出,对于故障一,当采用双谱进行诊断时,在高频斜线方向取得了最佳诊断结果,其诊断错误数只有3组;对于故障二,则是在采用三阶累积量并在低频方向上取得了最佳诊断结果,其错误数为1组。对比式(3)和式(1),可以看出,双谱相对于三阶累积量来说,能描述出二次相位耦合信息,则对于上述实验结果,可以这样认为:对于故障一,在考虑了耦合因素的情况下,其诊断结果获得了最佳,也就是当考虑了耦合因素时,故障一状态和正常状态区别更为明显一些。而对于故障二,则是在三阶累积量的情况下取得了最好的诊断效果,但与双谱时候的情况相比,区别不明显,因为利用双谱诊断的最佳结果是2组错误,即对于故障二来说,无论考虑耦合情况与否,对于诊断结果都影响不大。

再对表2进行观察,无论是故障一还是故障二,也无论是按照双谱方式还是三阶累积量方式,在不同的方向上提取特征值时所获得的结果都不相同,由此可以认为,无论何种故障,也无论是是否考虑耦合因素,在不同的频率部分,与正常状态的区分程度都是不一样的。

8 结论

通过不同种类的故障,分别通过双谱和三阶累积量进行诊断,所得结果可以得出如下结论:对于不同种类的故障,其耦合信息对于这些故障判断的影响是不一样的;无论考虑耦合因素与否,这些故障信号在不同的频率部分与其正常状态的区分程度也是不一样的。在得出这些结论的同时,也为对于某一具体故障寻找最佳诊断效果提供了一种可以选择的方法。

参考文献

- [1] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 263-281.
(Zhang Xian-da. Modern Signal Process [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 263-281.)
- [2] M.R.Raughveer. Time-domain approaches to quadratic phase coupling estimation[J]. IEEE Trans. Automatic Control. 1990. AC 35: 48-56
- [3] 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. Slice spectrum analysis method of nonlinear phase coupling [J]. Journal of Electronics, 1998, 26(10): 104-109.)
- [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. Three autoregressive spectral slicing study [J]. Journal of Instruments and Meters, 2009, 30(02): 345-350.)
- [5] 邵忍平, 黄欣娜, 刘宏昱. 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): 161-168.
(Shao Ren-ping, Huang Xin-na, Liu Hong-li. The fault detection and diagnosis of gear system based on higher order cumulants [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 161-168.)
- [6] 张琳, 黄敏. 基于EMD与切片双谱的轴承故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010(3).
(Zhang Lin, Huang Min. Bearing fault diagnosis methods based on EMD and slice bispectrum [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010(3).)
- [7] 蒋宇, 李志雄. 齿轮箱振动源信号分离与故障诊断研究[J]. 湖北工业大学学报, 2011(4).
(Jiang Yu, Li Zhi-xiong. Gearbox vibration source signal separation and fault diagnosis research [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2011(4).)
- [8] 魏明果. 实用小波分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 116-160.
(Wei Ming-guo. Practical Wavelet Analysis [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2005: 116-160.)
- [9] 宫伟力, 李晨. 煤岩结构多尺度各向异性特征的SEM图像分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, 29(A01): 2681-2689.
(Gong Wei-li, Li Chen. Multi-scale anisotropic characteristics of the coal and rock structure SEM image analysis [J]. Geotechnical Mechanics and Engineering Journal, 2010, 29(A01): 2681-2689)
- [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): 2413-2416.
(Wu Wen-bing, Huang Yi-jian. Pressure reducing valve fault diagnosis based on double correlation spectrum [J]. Computer Measurement and Control, 2011(10): 2413-2416.)