

## 基于高阶谱的溢流阀故障分析

吴文兵<sup>1,2</sup> 吴为民<sup>3</sup>

(1. 福州外语外贸学院 福建 福州 350018; 2. 厦门大学 信息科技学院 福建 厦门 361000;  
3. 福建交通职业技术学院 信息技术和工程系 福建 福州 350007)

**摘要:** 提出了一种利用三谱对角切片分析溢流阀故障信号的方法。高阶谱理论上能完全消除高斯噪声的影响, 本文由经过预处理的信号经过高阶谱分析后, 可以得到三谱对角切片图, 由图中可以获得正常信号与故障信号在切片图上的差异。试验结果表明利用高阶谱理论进行故障检测是可行的。

**关键词:** 故障分析; 溢流阀; 高阶谱; 对角切片

中图分类号: TH161 文献标识码: A 文章编号: 1673-8772(2011)04-0016-04

## Fault Analysis of Overflow Valve Based on High Order Spectrum

WU Wen-bing<sup>1,2</sup>, WU Wei-min<sup>3</sup>

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

2. School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

3. Dept. of Information Technology, Fujian Communication Technology College, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A method of overflow valve fault analysis based on high order spectrum was proposed in this thesis. High order spectrum can fully eliminate Gaussian noise theoretically. Via the high order spectrum analysis of pre-processed signal, the trispectrum diagonal slices can be obtained, through which the difference between normal and abnormal signals can be found. The experiment results indicate it is feasible to carry out fault analysis using high order spectrum.

**Key words:** Fault analysis; Overflow Valve; High Order Spectrum; Diagonal Slices

液压系统中的溢流阀是液压系统中的重要元件之一,也比较容易发生故障,如何对这种发生故障的元件进行分析诊断,对液压系统的维护有着重要意义。高阶统计量是二阶统计量的推广,包含了相关函数及其傅立叶变换结果不能反映的信息。对于非高斯信号,高阶统计量反映了信号偏离高斯分布的程度。任何高斯过程的高阶累积量均为零使得高阶累积量在理论上可以完全抑制高斯有色噪声的影响。因此,在实际的工程应用中,通常使用高阶累积量和高阶累积量谱(简称高阶谱)作为分析非高斯随机过程的主要分析工具。三谱及其切片从更高的概率结构上表征随机信号,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,高斯与非高斯性能,而且还能大为提高机械故障诊断的准确性,对处理机械振动信号很适用。

收稿日期: 2011-03-16

基金项目: 2008 福建省重大专项课题(2008HZ0201)。

作者简介: 吴文兵(1968-),男,江西省临川市人,在读博士生,讲师,主要从事信号处理、嵌入式系统等研究。

## 1 实验过程

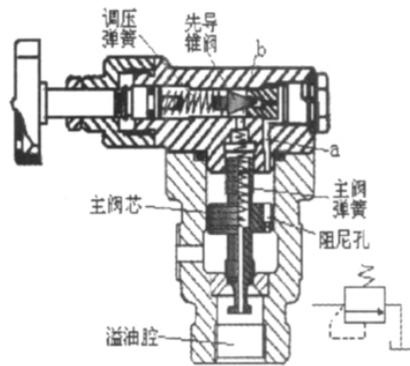


图 1 溢流阀结构

Fig.1 The structure of overflow valve

溢流阀由主阀和导阀两部分构成。主阀用来控制溢流流量;导阀用来调定主阀部分的溢流压力。如图 1 所示,压力油由进油口进入,经阻尼孔流入主阀上腔,再流经通道 a,当系统压力大于等于调压弹簧预调压力时,锥阀左移,先导阀打开,部分压力油经通道 b 流入中间的通道,再经溢流口流回油箱。油液流经阻尼孔时会在阻尼孔两端产生压力差  $P$ 。当压力差  $P$  大于等于主阀弹簧力时,主阀芯向上提升,阀口被打开,将多余的油从溢油腔溢回油箱。阻尼孔两端的油液压力差决定主阀溢流量的多少。当内部主阀弹簧损坏,阻尼孔受阻,先导阀弹簧损坏等情况出现时,都会使得溢流阀产生故障,针对这些情况,本文的测试试验设置了 2 组故障如下:

- ① 使主阀弹簧变形;
- ② 使先导阀弹簧变形。

本文利用 NI 的软件 LabVIEW 及 PCI-6014 的数据采集卡和一个加速度传感器,依次采集调速阀在正常和故障状态下的振动信号。实验中设置了两种故障。在测试过程中,采样频率设为 1024Hz,读取频率为 512 Hz。

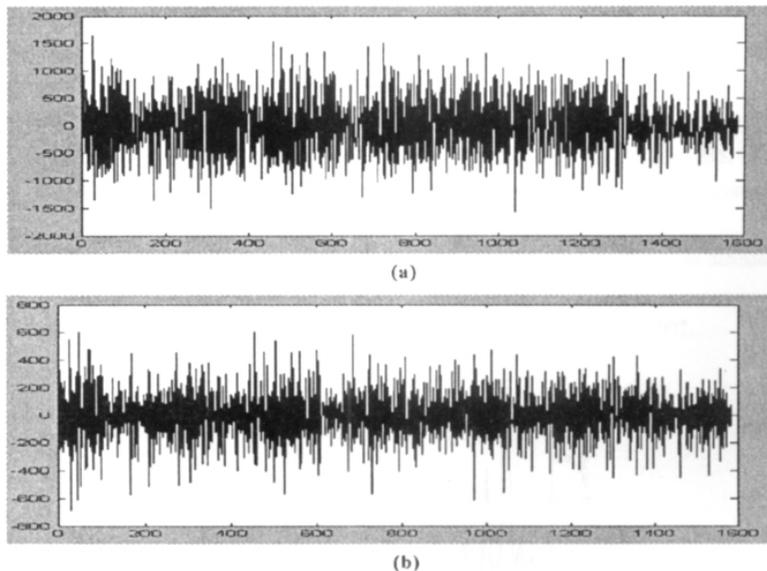


图 2 数据图

Fig. 2 Data sampling diagram

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许多不需要的成分,这样

就需要对所获得的数据进行预处理,剔除混杂在信号中的干扰噪声。本文采用中值法对采集的振动信号进行了预处理<sup>[1]</sup>。采集后的原始数据以及中值滤波后的数据分别如图 2 中的 a 和 b 所示。

### 2 三谱及其切片

设高阶累积量  $C_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})$  是绝对可和的:

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} |c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})| < \infty$$

则  $k$  阶累积量谱定义为  $k$  阶累积量的  $k-1$  维 Fourier 变换,即<sup>[1-3]</sup>

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \exp[-j \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i]$$
 四阶谱(又称三谱)

$$T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_3=-\infty}^{\infty} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2 + \omega_3 \tau_3)}$$

建立 AR 模型后,三谱还可用频率特性函数的形式来表达:

$$T(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \gamma_{4\alpha} H(\omega_1) H(\omega_2) H(\omega_3) H^*(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \text{ 其中 } H(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p \phi_i e^{-j\omega}}$$
 为频率特性

函数  $\gamma_{4\alpha} = E\{a^4(n)\} - 3[E\{x^2(n)\}]^2$  为峰度,  $a(n)$  是一独立同分布的非高斯随机过程,  $p$  为 AR 模型的阶数。

由于三谱需要在四维空间表示,在实际操作上很困难,因此常用切片来表示三谱<sup>[4,5]</sup>。通过固定三谱三频率  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  坐标下的频率,令  $\omega_3 = \omega_0$  和  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  可得到三谱的对角切片

$$TS_{1.5D}(\omega, \omega, \omega_0) = \gamma_{4\alpha} H^2(\omega) H(\omega_0) H^*(2\omega + \omega_0)$$

归一化三谱对角切片为<sup>[6-8]</sup>:

$$T_c S_{1.5D}(\omega, \omega, \omega_0) = \frac{TS_{1.5D}(\omega, \omega, \omega_0)}{\sqrt{|P^2(\omega) P(\omega_0) P(2\omega + \omega_0)|}}$$

### 3 实验结果分析

根据上述方法,分别对正常情况、将溢流阀内使主阀弹簧变形(故障一)、使先导阀弹簧变形(故障二)三种情况进行采样,得到三种状态振动信号的代表性归一化以后的三谱对角切片如图 3、4、5 所示。

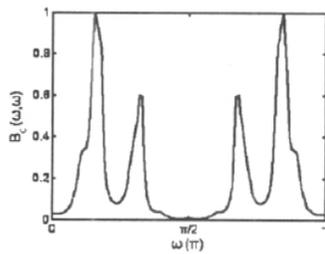


图 3 正常信号

Fig. 3 Normal Signal Analysis

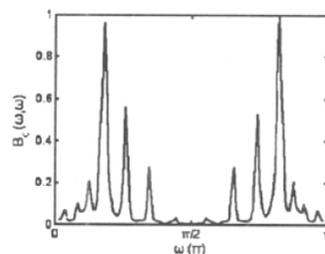


图 4 故障一

Fig. 4 Abnormal Signal(1) Analysis

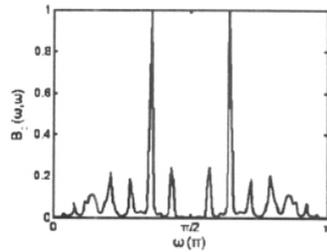


图 5 故障二

Fig. 5 Abnormal Signal(2) Analysis

首先,三种切片都是对称的,这与前述的高阶谱的对称性相符。从图中可以看出,溢流阀正常状态时,在  $0 \sim \pi/2$  范围内,只在大约  $\omega = \pi/6$ 、 $\omega = \pi/3$  处出现了明显的峰值;溢流阀处于故障①与故障②状态,在  $0 \sim \pi/2$  范围内,在  $\omega = \pi/15$ 、 $\omega = 2\pi/15$ 、 $\omega = 3\pi/15$  等处都出现了数值不同的峰值。综合分析,故障不同,谱峰个数不同,出现谱峰的频率位置也不同。无论溢流阀处于何种工作状态,在主频倍数频的地方都有谱峰出现,这是由于发生了非线性二次相位耦合。这种现象也与前述的高阶谱中包含相位耦合的性质相符合,只是这种耦合现象在故障状态下表现得更为复杂。另外从图中还可以看出,正常状态下的底部更为粗大,峰值也不如故障状态下尖锐,这些特性都表现出了信号在不同的状态下具有不同的相位耦合特性。

#### 4 总结与展望

本文使用高阶谱作为分析溢流阀振动信号的分析工具,从分析过程可以看出,正常信号和故障信号在三谱对角切片上呈现出了不同的波形特征,这使得在此基础上进行进一步的故障诊断成为可能。比如可以在此基础上,利用小波包对正常信号和故障信号在三谱对角切片进行特征提取,再将提取的特征值输入支持向量机等分类工具进行分类,由此可以对机械故障进行判别诊断。由于高阶谱在理论上可以完全抑制高斯有色噪声的影响,这使得利用高阶谱作为故障诊断的工具相比于其他的故障诊断方法具有一定的优势。

#### 参考文献:

- [1]张贤达. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社,1996: 138 - 208.
- [2]蒋雨燕,黄宜坚. 调速阀故障诊断的 AR 双谱定阶方法比较[J]. 华侨大学学报(自然科学版) 2008, 30(2): 123 - 126.
- [3]李中原. 旋转机械双谱分析及故障诊断应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
- [4]张严,王树勋,李生红. 二次相位耦合的  $1(1/2)$  维谱分析[J]. 电子学报,1996, 24(4): 109 - 112.
- [5]奚慧晶. 二维二次非线性相位耦合的切片谱分析[J]. 吉林大学学报, 2003, 21(3): 231 - 235.
- [6]Chen Bingsan, Huang Yijian. Study on autoregressive trispectrum and its slices[C]. Chinese Control and Decision Conference, 2008, 124 - 5129.
- [7]Huang Yijian, Liu Xiaomei, Tian Tiancheng. AR trispectral Characteristics of electrological actuator[C]. Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006: 5782 - 5786.
- [8]桂才. 基于高阶统计分析的机械故障特征提取技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.

(责任编辑:李孟良)