第47卷第1期
2007年1月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 47, No. 1
Jan. 2007

文章编号: 1000-8608(2007)01-0045-05

# 局域波法和高阶统计量在压缩机气阀状态监测中应用

任全民[1,2], 马孝江*[1], 苗 刚[1], 李宏坤[1], 王奉涛[1]

(1.大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2.宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 为解决传统信号处理方法分析非平稳时变信号的不足,提出了一种适用于往复式压缩机气阀状态特征提取的新方法. 首先使用局域波法将实测信号分解为多个基本模式分量,经过希尔伯特变换得到各分量的时频谱;然后计算归一化后幅值信号的高阶统计量,这些统计量很好地反映了气阀的劣化过程. 通过对现场工作的聚乙烯二次压缩机组合阀振动信号的分析,验证了该方法在往复压缩机状态监测中的有效性和实用性.

**关键词:** 状态监测; 局域波法; 高阶统计量; 往复式压缩机; 气阀
**中图分类号:** TH458 **文献标识码:** A

## 0 引 言

往复式压缩机是化工和炼油行业中的关键设备,而气阀是压缩机中重要的易损件之一,它的性能优劣直接影响到压缩机的工作效率和运行安全. 因此,开展往复式压缩机工作状态的实时监测具有重要的现实意义.

压缩机气阀的振动信号是典型的非平稳时变信号,传统的时域或频域分析法无法同时兼顾信号在时域和频域的全貌和局部变化特征,因而难以全面反映信号的特点. 局域波法是一种新的时频分析方法[1,2],它不仅具有多分辨率的优势,而且具有信号分解时的自适应性,加上瞬时频率的引入,可以从时频两方面同时对信号进行分析,增加了处理信号的灵活性和有效性.

本文在气阀振动信号局域波时频分析的基础上,利用高阶统计量的方法,从基本模式分量归一化的时频谱幅值中提取能够反映气阀工作状态的特征参数,并在现场工作的聚乙烯二次压缩机的状态监测中验证这种方法的有效性.

## 1 局域波分析的基本原理[3]

局域波分解建立在瞬时频率的基础上,把复杂的非平稳信号表示成有限多个基本模式分量. 利用筛选的方法,一个包含多个振荡模式的非平稳信号 $X(t)$ 可以表示如下:

$$X(t)=\sum_{i=1}^{n}C_i(t)+r_n(t) \tag{1}$$

式中: $C_i(t)$ 表示信号 $X(t)$ 的基本模式分量,其中 $i$ 表示第 $i$ 个基本模式分量 ($i=1,2,3,\cdots,n$); $r_n(t)$ 为剩余分量. 忽略剩余分量,对每个基本模式分量进行希尔伯特变换,把它们表示成解析信号形式,上式可变为

$$Z(t)=\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_i(t)t} \tag{2}$$

最后可以给出基于局域波分解的信号的时频谱(3)和边界谱(4)表达式:

$$H(k,t)=\sum_{i=1}^{n}ba_i(t)\exp\left(\int k_i(t)\,\mathrm{d}t\right) \tag{3}$$

式中 $n$ 为分量个数,当 $k_i(t)=k$ 时,变量 $b=1$,否则 $b=0$.

收稿日期: 2005-06-10; 修回日期: 2006-12-20.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475155).
作者简介: 任全民(1972-), 男, 博士生; 马孝江*(1945-), 男, 教授, 博士生导师.
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$H(\mathrm{k}) = \int_0^T H(\mathrm{k}, t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

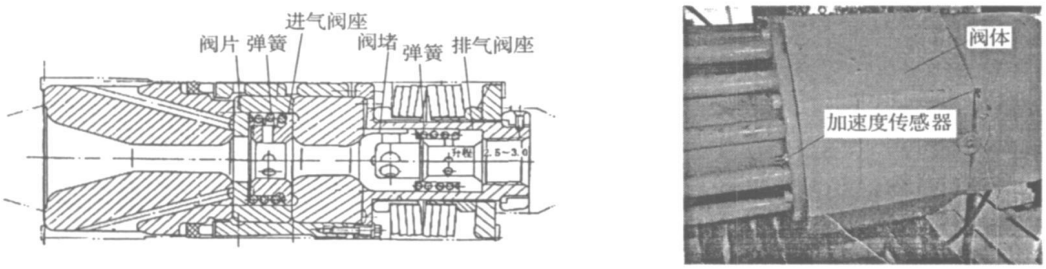
边界谱代表了各个频率在统计意义上全部数据的累加幅度.

局域波分解方法把局部时间内含有多个振荡模式非平稳时变信号分解成若干个彼此间影响甚微的基本模式分量,从而简化了系统间特征信息的干涉或耦合. 它的时频分析方法是一种广义的线性时频表示方法,避免了交叉干扰项的影响;由于它建立在瞬时频率基础上,时-频能同时局部化,具有很好的时频聚集性. 这些特性使它可以给出有效的时频表示,并且突出信号的时变信息.

## 2 压缩机组合阀振动信号分析

所监测的聚乙烯二次压缩机组合阀的结构如图 1(a) 所示,图 1(b) 则为现场测量时加速度传感器的布置图. 气阀工作时,气体从阀体外缘进入,利用内外压力差克服弹簧 2的作用力推开进气阀片 1进入气缸的工作腔;压缩后的气体经中心孔道克服弹簧 5的作用力后,通过接管排出. 因此,在压缩机曲轴的一个旋转周期内,组合阀上有 4个明显的冲击响应[4],它们分别对应气阀的 4个冲击运动: 进气阀打开 (SO)、进气阀关闭 (SC)、排气阀打开 (DO)、排气阀关闭 (DC),在它们之间则分别为进气和排气时气体对流道的冲击响应信号. 图 2显示了阀盖处组合阀 3种典型工作状态振动信号的时域波形,它们反映了不同工作状态下气阀引起的冲击响应信号. 其中,排气阀轻微泄漏常发生在气阀的使用初期,由于排气阀密封不好而致,这使进气阶段因狭缝喷流而激起持续的高频振动. 弹簧是最容易导致气阀故障的元件[5],在不可避免的强烈重复性冲击载荷和腐蚀的作用下,弹簧就会随着工作时间的增加而疲劳破坏. 这样改变了气阀的运动特性,使阀片和阀座、阀挡之间的冲击速度变大,检测到的振动响应信号的幅值也随之变大. 当弹簧失效时,气阀的工作性能已经严重劣化.

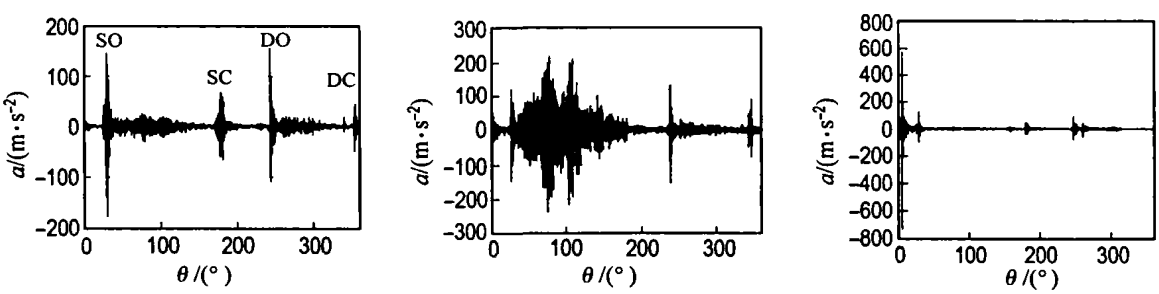
图 3为气阀三种典型工作状态下振动信号的局域波边界谱. 从图中可以看出,如果气阀的工作状态发生了变化,边界谱高频部分幅值的分布状况就变化很大,因此,可以从中提取能够反映气阀运行状况的特征参数.




(a) 组合阀结构 (b) 加速度传感器布置

图 1 压缩机组合阀结构及振动信号的拾取

Fig. 1 Structure of compressor combined suction-discharge valves and acquisition of vibration signals




(a) 正常状态 (b) 排气阀轻微泄漏 (c) 排气阀弹簧失效

图 2 阀盖处三种典型状态振动信号的时域波形

Fig. 2 Three typical time-domain waveforms of vibration signals from valve surface

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

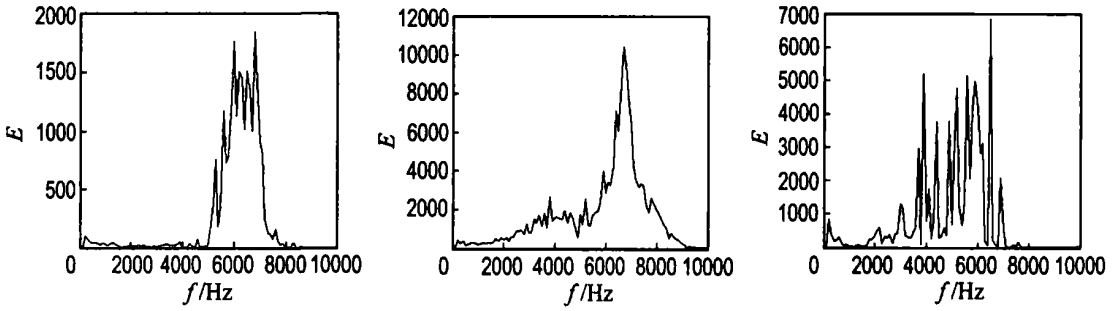



图 3　组合阀三种典型状态振动信号的局域波边界谱

Fig. 3　Three typical local wave marginal spectrum of valves vibration signals

## 3　状态特征的提取

高阶统计量是一种能够很好描述非高斯信号统计特性的方法,它不仅可以抑制高斯或非高斯的有色噪声,还可以提取不同于高斯信号的多种信号特征[6],可以作为特征提取的统计方法.

在实际的信号处理中,为了计算上的简便,常常使用零滞后量的高阶统计量. 对于一个随机信号 $x(k)$,它的前四阶矩定义为

$$m_n = E\{x(k)^n\} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x(k)^n;\ n = 1 \sim 4 \tag{5}$$

利用得到的前四阶矩,按照下面的公式计算前四阶零滞后量的累积量:

均值

$$C_1 = m_1 \tag{6}$$

方差

$$C_2 = m_2 - m_1^2 \tag{7}$$

偏斜度

$$C_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3 \tag{8}$$

峭度

$$C_4 = m_4 - 3m_2^2 - 4m_1m_3 + 12m_1^2m_2 - 6m_1^4 \tag{9}$$

往复式压缩机的组合阀是一个复杂的非线性系统,气阀的振动信号具有很强的时变性. 在相同的使用阶段,不同的气阀之间的振动幅值差别很大. 为了消除振动幅值差别对统计结果造成的影响,取得较统一的标准,采取了时频谱幅值信号归一化的处理. 即

$$a_i'(t) = \frac{a_i(t)}{\max[a_i(t)]} \tag{10}$$

然后对 $a_i'(t)$ 进行高阶统计量的计算.

综上所述,压缩机气阀故障特征提取的流程图见图 4.

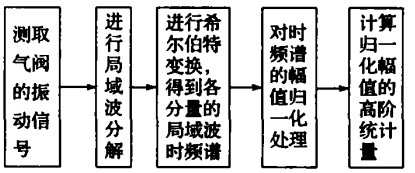



图 4　压缩机气阀故障特征指标提取流程图

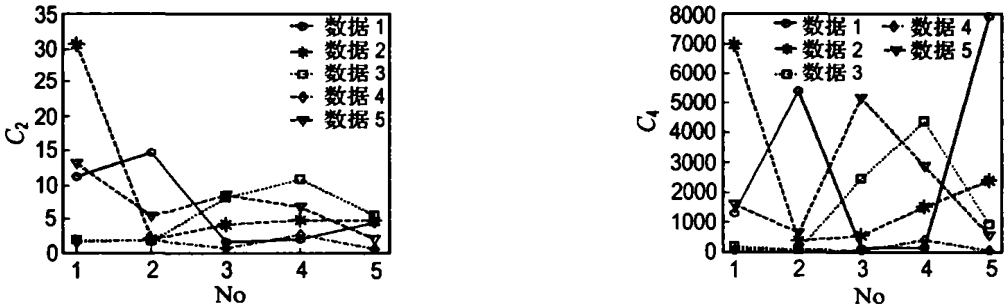
Fig. 4　Feature extraction flow chart of compressor valves

## 4　在实际状态监测中的应用

使用该方法,对某石油化工厂聚乙烯二次压缩机气阀的振动信号进行了分析. 这里选取 5个具有代表性的气阀作为分析对象,它们分别来自 3条不同的生产线. 作为对比,图 5给出了各气阀原始振动信号高阶统计量的变化趋势图. 由于工作现场的环境很复杂,影响气阀振动信号的因素很多,不同气阀之间的统计量数值差别很大,而各个气阀的统计量随着时间的变化很杂乱,找不到明显的规律,无法反映气阀的工作状态.

图 6则显示了基本模式分量 1按本文提出的方法计算的统计参数. 从图中可以看出,随着工作时间的增加,各个阀的统计参数基本上呈下降的趋势. 除了 $C_1$ 以外,当气阀功能严重劣化时,归一化频率幅值的 $C_3$、$C_3$、$C_4$ 都收敛到特定的范围内. 数据 1和数据 2在测序 1的 $C_2$和 $C_3$的值较大,这和气阀有轻微泄漏相一致. 因此,这些统计参数很好地反映了气阀的工作状态,是气阀故障诊断的有效参数. 表 1是各气阀在使用过程中各统计量的平均值,它们随着工作时间是递减的,基本上反映了气阀工作性能的劣化程度. 其中,测序 5是气阀性能严重劣化时这些统计参数的平均值,它们可以作为阈值用来判断气阀的工作状态,为压缩机的维修决策提供依据.

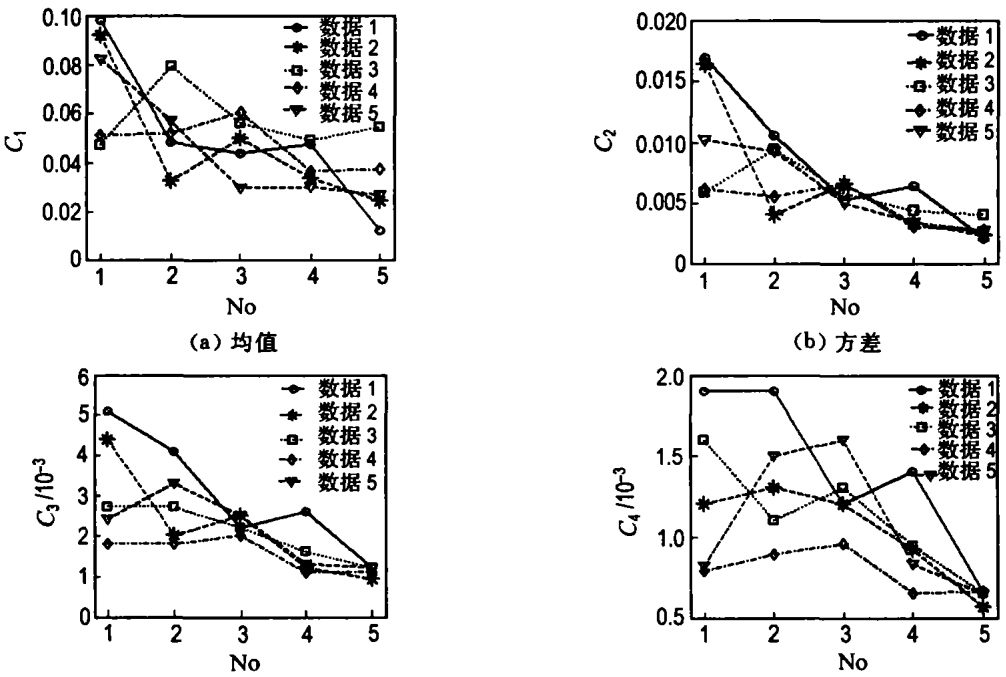
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net




(a) 方差 (b) 峭度

图 5 原始信号的统计量

Fig. 5 Statistics of original signals




(a) 均值 (b) 方差

(c) 偏斜度 (d) 峭度

图 6 归一化时频谱幅值的高阶统计量

Fig. 6 Statistics of normalized time-frequency amplitude

表 1 归一化时频谱幅值高阶统计量的平均值

Tab. 1 Average of higher-order statistics of normalized time-frequency amplitude

| 测序 | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.074 2 | 0.011 1 | 0.003 3 | 0.001 3 |
| 2 | 0.053 8 | 0.007 7 | 0.002 8 | 0.001 3 |
| 3 | 0.048 0 | 0.005 8 | 0.002 3 | 0.001 3 |
| 4 | 0.039 4 | 0.004 1 | 0.001 6 | 0.000 9 |
| 5 | 0.031 0 | 0.002 8 | 0.001 1 | 0.000 6 |

## 5 结 语

本文对聚乙烯二次压缩机组合阀的振动信号进行了研究,提出了一种用于气阀状态特征提取的新方法. 结果表明,如果压缩机气阀工作在不同的状态下,它的振动信号局域波时频谱的能量分布有明显的不同,归一化的时频谱幅值的高阶统计量可以作为识别气阀状态的特征量,并在现场工作的压缩机中得到了验证. 如果把这些统计参数作为智能诊断系统的输入特征量,则诊断的结果将具有更好的准确性和有效性.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 参考文献:

[1] 马孝江, 余　泊. 一种新的时频分析方法 —— 局域波法 [J]. 振动工程学报, 2000, **13**(S): 219-224

[2] HUANG N E, SHEN Zhen, LONG S R, *et al*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. **Proc Royal Soc London A**, 1998, **454**: 903-995

[3] 邹岩. 局域波分析的理论方法研究与应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 24-44

[4] HANLON P C. 压缩机手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2003

[5] WOOLLATT D. Reciprocating compressor valve design: optimizing valve life and reliability [EB/OL]. [2005-06-20]. http://www.dresser-rand.com/e-tech/recip.asp

[6] 张贤达. 时间序列分析 —— 高阶统计量方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996

# Application of local wave method and higher-order statistics to valve-condition monitoring of reciprocating compressors

REN Quan-min[1,2], MA Xiao-jiang*[1], MIAO Gang[1], LI Hong-kun[1], WANG Feng-tao[1]

(1. Key Lab. for Precis. and Non-tradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract** In order to avoid the deficiency in processing non-stationary and nonlinear signals by using traditional methods, a new method is presented for extracting condition features from reciprocating compressor valves. Firstly, tested signals are decomposed into number of intrinsic mode functions (IMFs) by using local wave method, and time-frequency spectrums of IMFs are acquired by means of Hilbert transformation. Then the higher-order statistics of normalized time-frequency amplitude are calculated. These statistics can reflect the degradation in the performance of the valves well. After used in condition monitoring for combined suction-discharge valves of the secondary ethylene compressor in site, it is testified that the method is effective and practical in reciprocating compressor condition monitoring.

**Key words** condition monitoring; local wave method; higher-order statistics; reciprocating compressor; valves

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net