

# 基于角域四阶累积量切片谱的柴油机连杆轴承故障特征提取

沈虹<sup>1,2</sup>, 赵红东<sup>1</sup>, 梅检民<sup>2</sup>, 赵慧敏<sup>2</sup>, 张大鹏<sup>2</sup>, 任金成<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 信息工程学院, 天津 300401; 2. 军事交通学院 军用车辆系, 天津 300161)

**摘要:** 提出了一种角域四阶累积量切片谱方法, 应用于提取连杆轴承微弱故障特征。首先, 对升速过程振动信号进行阶比重采样得到角域平稳信号, 再计算其四阶累积量对角切片谱, 构成角域四阶累积量切片谱, 用于分析不同转速区间、不同测试位置下的非稳态信号, 提取连杆轴承微弱故障特征。试验结果表明: 角域重采样与四阶累积量对角切片谱相结合, 既能分析非稳态信号, 又能抑制噪声干扰; 特定阶比带内的角域四阶累积量对角切片谱的能量和峰值, 能有效识别连杆轴承各种技术状态, 可以作为连杆轴承磨损故障的特征参数; 并得出了敏感测试位置、敏感转速区间和特征阶比带。

**关键词:** 角域重采样; 四阶累积量切片谱; 连杆轴承; 特征提取

中图分类号: TK428

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.017

## Fault feature extraction of connecting rod bearings of a diesel engine based on angle domain fourth-order cumulant slice spectrum

SHEN Hong<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong-dong<sup>1</sup>, MEI Jian-min<sup>2</sup>, ZHAO Hui-min<sup>2</sup>, ZHANG Da-peng<sup>2</sup>, REN Jin-cheng<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Military Vehicle Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** A method based on angle domain fourth-order cumulant slice spectrum was proposed to extract weak fault features of connecting rod bearings. Firstly, the unsteady vibration signals in accelerating process were order-re-sampled and the steady signals were obtained in angle domain, then the fourth-order cumulant diagonal slice spectrum was calculated to constitute the angle domain fourth-order cumulant slice spectrum, it was used to analyze unsteady signals in different rotating speed intervals and at different measure positions to extract weak fault features of connecting rod bearings. The test results showed that the combination of angle domain re-sampling and the fourth-order cumulant diagonal slice spectrum can be used not only to analyze unsteady signals, but also to suppress noise interference; the energy and the peaks of the angle domain fourth-order cumulant slice spectrum in a certain order band can be used to distinguish different technical states of connecting rod bearings effectively, it can be taken as the feature parameter of connecting rod bearing faults; the sensitive measuring positions, rotating speed intervals and feature order bands can be obtained.

**Key words:** order re-sample; fourth-order cumulant slice spectrum; connecting rod bearing; feature extraction

连杆轴承是发动机的重要部件, 其技术状态的好坏直接影响发动机的工况和寿命。连杆轴承磨损故障特征微弱, 容易被发动机复杂的其他分量和强噪声淹没, 难以提取。发动机变转速过程更容易暴露微弱故障特征<sup>[1]</sup>, 但变转速过程信号是多分量非平稳信号, 常用的频谱分析方法并不能取得较好的效果, 需要有效的非平稳信号分析方法。文献[1]用小波包-AR谱提取连杆轴承故障特征, 但特征提取结果往往依赖于小

波基函数的选择, 文献[2]将循环平稳理论应用于连杆轴承故障的特征提取, 而循环平稳理论对于信号周期性、平稳性要求太高且计算量大。

阶比分析是分析变转速过程非稳态信号的有效方法, 已经在发动机变转速过程信号分析中取得了较好效果<sup>[3-5]</sup>, 但阶比分析没有抑制噪声能力, 因此在微弱故障特征提取上有一定的局限性。高阶谱具有较强的高斯噪声抑制能力, 但只能分析平稳信号<sup>[6-7]</sup>, 而且计算量较大, 在分析变转速过程非稳态信号时受限。

为了从变转速过程非稳态信号中有效提取出连杆轴承微弱故障特征, 本文提出了一种基于角域四阶累积量切片谱的柴油机连杆轴承特征提取方法。采用阶

基金项目: 总装备部预研项目(40407030302); 河北省自然科学基金资助(2013202256)

收稿日期: 2013-05-03 修改稿收到日期: 2013-07-09

第一作者 沈虹 女, 博士生, 1982年生

比方法将变转速过程非平稳信号重采样成角域平稳信号,再计算四阶累积量切片谱,并应用于提取连杆轴承故障特征,取得了较好的效果。

## 1 角域四阶累积量切片谱分析原理

### 1.1 角域重采样

阶比分析将时域的非平稳信号等角度重采样成角域平稳信号,其具体分析原理为:

假设机器做匀变速运动,转角与时间满足二次多项式关系:

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (1)$$

式中, $\theta(t)$ 是轴的转角, $b_0, b_1, b_2$ 为待定系数, $t$ 为时间。

将 3 个依次到达的脉冲时间点  $t_1, t_2, t_3$  代入式(1),因为转速脉冲的角度间隔  $\Delta\phi$  是固定的,即

$$\left. \begin{aligned} \theta(t_1) &= 0 \\ \theta(t_2) &= \Delta\phi \\ \theta(t_3) &= 2\Delta\phi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)求解可以得到对应转角变化的时间:

$$t_k = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{4b_2(k\Delta\theta - b_0) + b_1^2} - b_1] \quad (3)$$

式中, $\Delta\theta$ 为等角度采样的角度间隔, $k$ 为插值系数,由式(4)决定

$$\Delta\phi = k\Delta\theta \quad (4)$$

根据式(3)所求得的  $t$  值,通过插值对振动信号进行重采样,得到等角度采样信号。

### 1.2 四阶累积量及其切片谱

零均值的高斯随机过程的 3 阶以上高阶累积量恒等于零。因此,如果一个测量信号中含加性高斯噪声,高阶累积量理论上可以完全抑制高斯噪声的影响,提取出有用的信号。

离散零均值平稳随机过程  $x(n)$  的四阶累积量为:

$$\begin{aligned} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= \\ cum[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)x(n+\tau_3)] &= \\ E[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)x(n+\tau_3)] &- \\ R_x(\tau_1)R_x(\tau_2-\tau_3) - R_x(\tau_2)R_x(\tau_3-\tau_1) &- \\ R_x(\tau_3)R_x(\tau_1-\tau_2) & \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $E[\cdot]$ 为数学期望, $R_x(\tau)$ 是  $\{x(n)\}$  的二阶矩, $R_x(\tau) = E[x(n)x(n+\tau)]$ 。 $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  为滞后量,无量纲。

根据  $\tau_1, \tau_2$  和  $\tau_3$  取值的不同, $x(n)$  的四阶累积量的一维切片共有 3 种:

(1) 当  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$  时,

$$c_{4x}^1(\tau) = E[x(n)x^3(n+\tau)] - 3R_x(\tau)\sigma_x^2 \quad (6)$$

(2) 当  $\tau_1 = \tau_2 = \tau, \tau_3 = 0$  或  $\tau_1 = \tau_3 = \tau, \tau_2 = 0$  或  $\tau_2 = \tau_3 = \tau, \tau_1 = 0$  时,

$$c_{4x}^2(\tau) = E[x^2(n)x^2(n+\tau)] - 2R_x^2(\tau) - 6x^4\sigma_x^2 \quad (7)$$

(3) 当  $\tau_1 = \tau, \tau_2 = \tau_3 = 0$  或  $\tau_2 = \tau, \tau_1 = \tau_3 = 0$  或  $\tau_3 = \tau, \tau_1 = \tau_2 = 0$  时,

$$c_{4x}^3(\tau) = E[x^3(n)x(n+\tau)] - 3R_x(\tau)\sigma_x^2 \quad (8)$$

其中: $c_{4x}^1$ 称为对角切片; $c_{4x}^2$ 和  $c_{4x}^3$ 称为非对角切片。

对四阶累积量的一维切片进行傅里叶变换,得到四阶累积量切片谱:

$$S_x^i(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{4x}^i(\tau) e^{-j2\pi\omega\tau}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

这些谱都是三谱在不同方向的一维投影。对于受高斯噪声污染的平稳随机信号而言,其一维高阶累积量对角切片与非对角切片是相等的<sup>[8]</sup>。当信号为非平稳随机信号时,信号的一维高阶累积量对角切片与非对角切片一般是不相等的,它们抑制高斯噪声的效果是不同的,且与信号有关。相比于高阶谱的定义:

$$\begin{aligned} S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) &= \\ \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) &\exp(-j2\pi \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i) \quad (10) \end{aligned}$$

式中, $c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = cum\{x(n), x(n+\tau_1), \dots, x(n+\tau_{k-1})\}$ 表示零均值的  $k$  阶平稳随机过程  $\{x(n)\}$  的  $k$  阶联合累积量。

可以看出,高阶谱是由高阶累积量经过多维傅氏变换得到的,计算量大且耗时长,四阶累积量切片谱比三谱明显简化了计算的复杂度,但保留了其抑制高斯噪声的优点。

### 1.3 角域四阶累积量切片谱

为了有效分析变转速过程非平稳信号,抑制噪声干扰,提取连杆轴承故障特征,本文提出了角域四阶累积量切片谱,既能分析变转速过程非平稳信号,又能抑制高斯噪声干扰。具体实现步骤:

(1) 采用阶比分析将变转速过程非平稳信号等角度重采样成角域平稳信号;

(2) 计算角域平稳信号的四阶累积量对角切片;

(3) 对四阶累积量的一维对角切片进行离散傅里叶变换,得到四阶累积量切片谱:

$$S_x^1(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{4x}^1(\tau) e^{-j2\pi\omega\tau} \quad (11)$$

## 2 基于角域四阶累积量切片谱的柴油机连杆轴承故障特征提取

### 2.1 连杆轴承变转速过程振动信号采集

以实车 WD615 型柴油发动机作为试验对象,设置第 2 缸连杆轴承为故障轴承,试验时尽量不改变其它条件,仅改变连杆轴承的配合间隙。WD615 型柴油发

动机连杆轴承配合间隙正常极限为 0.17 mm, 本试验中连杆轴承正常和故障的配合间隙参数如表 1 所示。

表 1 连杆轴承故障参数设置

Tab. 1 Parameters of connecting rod bearing fault

	正常	轻微故障	严重故障
配合间隙/mm	0.08	0.20	0.35

为了比较不同的测点位置对信号特征提取的影响, 试验中设置了多个测试点, 如图 1 所示。将加速度传感器分别放在第 2 缸对应的缸盖顶部(A 位置), 缸体上部右侧(B 位置), 左侧(C 位置), 油底壳与缸体结合处右侧(D 位置), 左侧(E 位置), 和油底壳下部(F 位置)6 个测点。

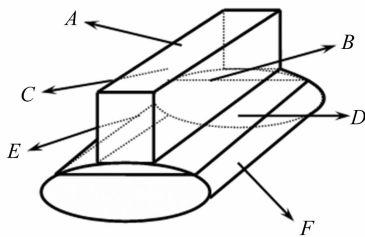


图 1 测点位置图

Fig. 1 The fitting position of vibrant sensors

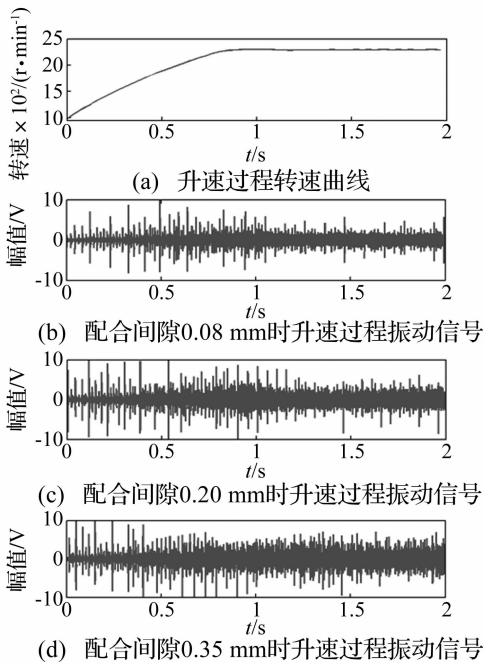


图 2 发动机升速过程转速曲线与振动信号  
Fig. 2 Rotate speed curve and vibration signal  
of acceleration process from diesel engine

发动机变转速过程中, 故障特征暴露更加明显, 但变转速过程采集的重复性很难控制, 为了保证各次数采集的重复性, 采用定转速触发方式采集发动机加速振动信号。所谓定转速触发采集, 就是设定一个转

速值, 一旦发动机达到这个转速值, 采集器开始采集信号。设定采集器触发转速分别为 1 000 r/min, 1 400 r/min, 1 800 r/min, 采样频率为 20 kHz, 采样点数为 40 000, 采集了前述三种技术状况下的发动机振动信号。图 2 为触发转速 1 000 r/min 采集到的发动机三种技术状态下, 位置 B 处的升速过程振动信号与对应的转速曲线。可以看出, 升速过程很快, 1 秒钟后信号已基本处于稳态。

## 2.2 基于角域四阶累积量切片谱的连杆轴承故障特征提取

实车最高转速在 2 300 r/min 左右, 对应于三种触发转速分别截取转速区间 1 000 - 1 400 r/min, 1 400 - 1 800 r/min, 1 800 - 2 200 r/min 的时域振动信号进行分析, 为了分析不同转速区间、不同测试位置对不同程度故障特征提取的影响, 对三种触发转速、6 个测试点的数据分别进行角域四阶累积量切片谱分析, 并进行对比, 确定连杆轴承故障特征提取的敏感测试位置、敏感触发转速和有效特征参数。

### 2.2.1 角域四阶累积量切片谱有效性检验

为了检验角域四阶累积量切片谱的有效性, 先对位置 B 处转速区间为 1 800 - 2 200 r/min 的发动机升速过程振动信号进行阶比分析, 再对该信号进行角域四阶累积量切片谱分析。位置 B 处正常、轻微和严重故障的阶比谱如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 正常、轻微和严重故障信号的阶比谱中, 峰值众多并且杂乱, 随着故障程度增大, 阶比谱能量并没有明显增强, 很难提取连杆轴承的故障特征。

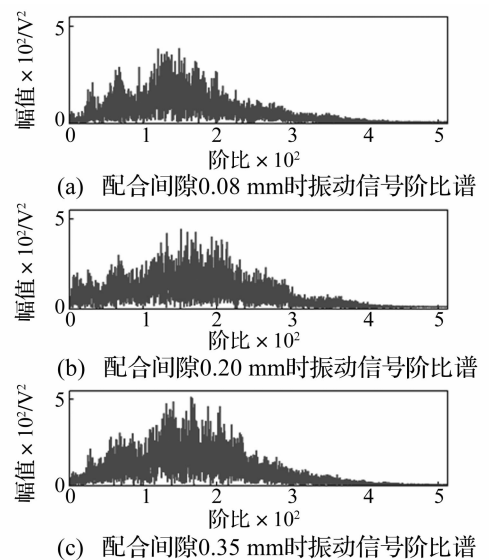


图 3 振动信号阶比谱

Fig. 3 Order spectrum of vibration signal

对上述位置 B 处升速过程振动信号进行角域四阶累积量切片谱分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以清

楚看出,正常、轻微和严重故障信号的切片谱能量主要都集中在 100 - 200 阶比带内,随着故障程度增大,该阶比带的切片谱能量相应增加,能清楚分辨正常、轻微和严重故障技术状态,说明角域四阶累积量切片谱有效提取出了连杆轴承故障特征,证明了角域四阶累积量切片谱的有效性。

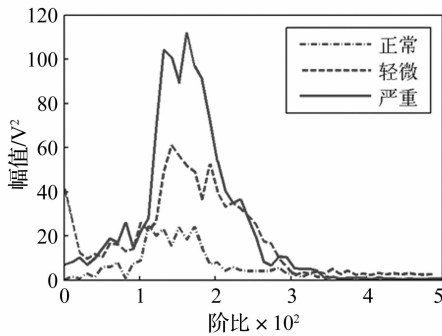


图 4 连杆轴承三种技术状态下的角域四阶累积量对角切片谱

Fig. 4 Angle area fourth-order cumulant diagonal slice spectrum with 3 different bearing status

### 2.2.2 不同变转速过程的角域四阶累积量切片谱分析

为了检验不同触发转速对连杆轴承特征提取的影响,对位置 B 处三种触发转速下截取的不同转速区间的振动信号,分别进行角域四阶累积量切片谱分析,并统计 0 - 100、100 - 200、200 - 300 阶比带的切片谱能量和峰值,结果如表 2 所示。

表 2 连杆轴承不同技术状态下阶比带能量和峰值比较

Tab. 2 Contrast of order band energy and peak value with different bearing status

转速 区间/ (r · min <sup>-1</sup> )	连杆轴 承间隙/ mm	不同阶比带累加能量/V <sup>2</sup>			峰值 /V
		阶比带 0 - 100	阶比带 100 - 200	阶比带 200 - 300	
1 000 - 1 400	0.10	8.893 4	22.427 1	124.744 0	23.342 3
	0.20	177.132 0	83.382 0	430.538 2	69.689 9
	0.35	46.926 8	101.913 8	387.075 8	53.832 9
1 400 - 1 800	0.10	24.747 9	163.537 5	143.520 3	45.828 6
	0.20	232.742 4	257.073 0	488.650 4	106.244 2
	0.35	179.179 0	331.193 5	899.113 0	201.399 5
1 800 - 2 200	0.10	34.919 9	180.052 5	47.666 5	24.377 5
	0.20	236.179 1	368.489 9	317.528 2	60.995 7
	0.35	131.822 2	784.724 1	248.429 1	112.024 1

从表 2 中可以看出,三种转速区间,100 - 200 阶比带内角域四阶累积量切片谱累加能量都能正确识别连杆轴承技术状态,因此可以以 100 - 200 阶比带内的累加能量作为提取连杆轴承故障特征的参数;1 400 - 1 800 r/min 转速区间内,仅 200 - 300 阶比带内的切片

谱能量能正确识别连杆轴承技术状态,可以以此作为提取连杆轴承故障特征的参数,其他转速区间和阶比带内的切片谱都没能正确反应反映连杆轴承技术状态。同时,可以看出转速区间 1 400 - 1 800 r/min, 1 800 - 2 200 r/min 的角域四阶累积量切片谱峰值随配合间隙的增大而增大且增幅明显,也可以以此作为提取连杆轴承故障特征的参数。

### 2.2.3 不同变转速过程、不同测试位置的角域四阶累积量切片谱分析

为了检验不同测试位置对连杆轴承特征提取的影响,采用角域四阶累积量切片谱对 3 个转速区间、6 个测试位置的振动信号进行分析,能正确识别连杆轴承技术状态的特征参数结果如表 3 所示。

表 3 可选为特征参数的阶比带能量和峰值

Tab. 3 Order band energy and peak value which could be selected as feature parameters

转速 区间/ (r · min <sup>-1</sup> )	测点 位置	不同阶比带累加能量/V <sup>2</sup>			峰值 /V
		阶比带 0 - 100	阶比带 100 - 200	阶比带 200 - 300	
1 000 - 1 400	A	○	○	✓	✓
	B	○	✓	○	○
	C	✓	○	✓	✓
	D	○	○	○	○
	E	○	○	○	○
	F	○	○	○	○
1 400 - 1 800	A	○	✓	○	✓
	B	○	✓	✓	✓
	C	✓	✓	✓	✓
	D	○	○	○	○
	E	○	○	○	○
	F	○	○	○	○
1 800 - 2 200	A	○	○	○	○
	B	○	✓	○	✓
	C	○	○	○	○
	D	○	○	○	○
	E	○	○	○	○
	F	○	○	○	○

说明 ✓:表示能正确识别连杆轴承技术状态;○:表示不能正确识别。

从表 3 可以看出,不同的转速区间下,不同测试位置的角域四阶累积量切片谱,在不同的阶比带内对连杆轴承故障敏感。其中位置 B 在三个转速区间的 100 - 200 阶比带内对故障都敏感,因为沿车辆前进方向观察发动机运转时,连杆带动曲轴做顺时针旋转运动,当被测轴承对应的气缸开始做功时,连杆带动曲轴对轴承右侧形成瞬态强烈冲击,因此位置 B 对故障更加敏感。D、E、F 位置几乎没有可选的特征,这是由于位于

缸体下部的三个位置距离激励源较远,信号的故障特征淹没在大量噪声干扰中不能很好的显现。同时不同转速对特征提取影响较大,其中1 400 – 1 800 r/min的转速区间反映连杆轴承磨损故障的特征最多。综合上述分析,可以确定柴油发动机连杆轴承故障时的敏感测试位置为缸体上部右侧,敏感转速区间为1 400 – 1 800 r/min,特征阶比带为100 – 200阶次,可以以缸体上部右侧,转速区间1 400 – 1 800 r/min,100 – 200阶比带内的累加能量和峰值作为提取连杆轴承故障特征的参数。

### 3 结论

(1) 角域重采样与四阶累积量对角切片谱相结合,既能分析非稳态信号,又能有效抑制噪声干扰,且计算量小。

(2) 与传统阶比谱相比,特定阶比带内的角域四阶累积量切片谱的能量和峰值,能有效识别连杆轴承各种技术状态,是提取连杆轴承故障特征的有效方法。

(3) 连杆轴承故障诊断的最佳转速区间为1 400 – 1 800 r/min,最佳位置为缸体上部右侧,特征阶比带为100 – 200阶次。

#### 参考文献

[1] 肖云魁. 军用车辆视情维修分析系统的研究[D]. 北京:北京理工大学,2004.

[2] 夏天. 基于循环平稳理论的柴油发动机振动信号分析及故

障诊断研究[D]. 南京:解放军理工大学,2010.

[3] 程利军. 基于阶比跟踪的发动机在线监测及故障诊断研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2012,6.

[4] 梅检民,肖云魁,贾继德,等. 基于改进阶比的变速器微弱故障特征提取[J]. 振动工程学报,2012,25(3):317 – 322.

MEI Jian-min, XIAO Yun-kui, JIA Ji-de, et al. Weak fault characteristics extraction of automobile transmission based on improved order analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3): 317 – 322.

[5] 赵晓平,张令弥,郭勤涛. 旋转机械阶比跟踪技术研究进展综述[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(6):213 – 219.

ZHAO Xiao-ping, ZHANG Ling-mi, GUO Qin-tao. Advances and trends in rotational machine order tracking methodology [J]. Journal of Earthquake Engineer and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 213 – 219.

[6] Lai W X, Peter W T, Zhang G C, et al. Classification of gear faults using cumulants and the radial basis function network [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18 (23): 381 – 389.

[7] 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. Study on autoregressive trispectrum slices [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 345 – 350.

[8] 郭业才,赵俊渭,陈华伟,等. 非平稳随机过程四阶累积量的递推估计与应用[J]. 声学及电子工程,2002,4:13 – 18.

GUO Ye-cai, ZHAO Jun-wei, CHEN Hua-wei, et al. Fourth-order cumulant of the non-stationary random process recursive estimation and application [J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2002, 4: 13 – 18.

#### (上接第64页)

[6] 纪峰,袁小阳,张宏涛,等. 可倾瓦轴承动态特性计算模型及方法研究[J]. 汽轮机技术,2012,54(2):105 – 108.

Ji Feng, YUAN Xiao-yang, ZHANG Hong-tao, et al. The method and calculation model of dynamic performances of oil film of tilting pad bearing[J]. Turbine Technology, 2012, 54 (2):105 – 108.

[7] Zeidan F Y, Herbage B S. Fluid film bearing fundamentals and failure analysis [C]. Proceedings of the Twentieth Turbomachinery Symposium, Texas, 1991: 161 – 190.

[8] Adams M L, Payandeh S. Self-excited vibration of statically unloaded pads in tilting-pad journal bearings[J]. Journal of Lubrication Technology, 1983, 105(3):377 – 383.

[9] Hargreaves D J, Fillon M. Analysis of a tilting pad journal bearing to avoid pad fluttering[J]. Tribology International, 2007, 40(4):607 – 612.

[10] Yang S, Kim C, Lee W. Prevention of fluttering fatigue damage in a tilting pad journal bearing [J]. Tribology International, 2009, 42(6):816 – 822.

[11] Yang S H, Kim C, Lee Y B. Experimental study on the characteristics of pad fluttering in a tilting pad journal bearing

[J]. Tribology International, 2006, 39(7): 686 – 694.

[12] 王晓伟,刘占生,张广辉,等. 基于声发射的可倾瓦径向滑动轴承碰摩故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2009,29(8):64 – 69.

WANG Xiao-wei, LIU Zhan-sheng, ZHANG Guan-hui, et al. Rubbing fault diagnosis of tilting pad journal bearing by acoustic emission [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (8):64 – 69.

[13] 周大元,曲景和,金祖尧. 可倾瓦轴颈轴承瓦块摆动规律的探讨[J]. 热能动力工程,1991,6(3):163 – 167.

ZHOU Da-yuan, QU Jin-he, JIN Zu-yao. An exploratory study of the swing relationship of tilting pad journal bearing pads [J]. Thermal Power Engineering, 1991, 6 (3): 163 – 167.

[14] 王永亮,刘占生,钱大帅. 可倾瓦轴承瓦块摆动特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(9):62 – 66.

WANG Yong-liang, LIU Zhan-sheng, QIAN Da-shuai. Swing characteristic of pads in tilting pad bearing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(9): 62 – 66.