

文章编号:1000-6761(2007)04-482-05

## 转子碰摩故障振动时频特征的实验研究

胡爱军<sup>1</sup>, 安连锁<sup>2</sup>, 唐贵基<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 机械工程系, 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 保定 071003;  
2. 华北电力大学 动力工程系, 保定 071003)

**摘 要:** 通过转子实验台模拟了转子局部碰摩、全周碰摩故障, 基于 Hilbert-Huang 变换(HHT)给出了不同条件下碰摩故障振动信号时频分布特征。结果表明, 基于 HHT 的时频分析方法能在局部碰摩故障发生的早期作出准确诊断; 时频图上高频成分的频率调制现象是区分全周碰摩与局部碰摩的重要特征; 基于 HHT 的时频分析方法比传统的频谱分析更准确地反映出碰摩故障的特征, 为此类故障的预报与诊断提供了依据。

**关键词:** 能源与动力工程; 旋转机械; 碰摩故障; Hilbert-Huang 变换; 时频分析

**中图分类号:** TP206      **文献标识码:** A

## Experimental Study on Time-Frequency Characteristics of Rubbing Initiated Vibration of Rotor

HU Ai-jun<sup>1</sup>, AN Lian-suo<sup>2</sup>, TANG Gui-ji<sup>1</sup>

(1. MOE's Key Lab of Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, Department of Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding 071003, China; 2. Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Local and all-circumferential rubbing fault occurrences of rotors were simulated on a rotor test rig and the time-frequency characteristics of the fault-signals, issued under different conditions, obtained by Hilbert-Huang transformation (HHT). Local rubbing faults can be accurately diagnosed in good time by applying HHT transformation. All-circumferential and local rubbing can be distinguished from one-another by identifying the frequency modulated high frequency components on the time-frequency record. By using the HHT based time-frequency analyzing method, particularities of rubbing faults can be more accurately reflected, as compared to the conventional frequency spectrum method, and serve much better the purpose of predicting and analyzing such kinds of faults.

**Key words:** energy and power engineering; rotating machinery; rubbing faults; Hilbert-Huang transformation; time-frequency analysis

转子动静碰摩是大型旋转机械, 如汽轮发电机、泵等运行中常见的故障之一, 一般发生在转子与静止部件之间间隙较小的部位。转子动静碰摩分为

局部碰摩和全周碰摩。局部碰摩的逐步演化会导致全周碰摩, 即转子在转动中始终与定子接触。在工程实际中, 引起碰摩的原因多种多样, 如不平衡, 不对中, 转子与定子之间的相对运动等等<sup>[1]</sup>。由于碰摩会引起转子系统一系列不良的后果, 甚至引发严重的机器损伤事故。因此, 探究转子碰摩发生的振动特征, 特别是早期碰摩特征, 并检测出这些特征, 对于转子避免碰摩故障及继发性故障的发生,

收稿日期: 2006-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677017)

作者简介: 胡爱军(1971-), 男, 博士研究生, 从事信号分析、机械故障诊断技术研究。

具有重要的现实意义。

旋转机械出现碰摩故障时,由于碰摩过程中的冲击和摩擦造成转子的阻尼、刚度、弹性力等发生变化,呈现非线性,振动信号具有非平稳性。传统上,一般以频谱图中出现高次谐波成分作为碰摩的诊断特征。也有研究指出,1/2X和1/3X分量可以作为碰摩故障早期诊断的依据<sup>[2]</sup>。由于傅立叶变换是针对平稳信号的分解方法,用于碰摩等故障分析必然会掩盖信号非平稳性,因此,近年来,非平稳信号处理方法在碰摩故障特征提取中得到了广泛应用,并取得了一定成果,如:小波分析<sup>[3]</sup>、奇异值分解<sup>[4]</sup>等。Hilbert-Huang变换<sup>[5][6]</sup>(HHT)是近些年发展起来的处理非平稳信号的时频分析方法,它通过经验模态分解(EMD)把1个信号进行平稳化处理,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列——本征模函数(IMF),再通过对每一个IMF的Hilbert变换求得的瞬时频率及幅值,得到振幅-瞬时频率-时间的分布,准确反映系统的固有特性。该方法已经被广泛应用于地球物理、电力、机械等领域,在碰摩<sup>[7]</sup>、齿轮故障<sup>[8]</sup>、裂纹诊断<sup>[9]</sup>等方面取得了一定成果。

除信号处理方法外,在碰摩故障动力学分析<sup>[10][11]</sup>及模拟故障实验研究<sup>[12]</sup>方面已有许多研究成果。笔者在试验室条件下进行了转子局部碰摩、全周碰摩的实验研究,通过对故障信号的HHT处理,分析其时间-瞬时频率分布特征,可望对这一重要的转子故障有更深入的了解,同时,也可以对故障的准确诊断提供一定依据。

## 1 HHT方法概述

HHT由EMD及Hilbert变换两部分组成。对于给定的信号 $x(t)$ ,EMD基本步骤如下:

- (1) 确定信号 $x(t)$ 所有的局部极值点;
- (2) 然后用三次样条曲线构造 $x(t)$ 的上(极大值点)、下(极小值点)包络线 $u(t)$ 和 $v(t)$ ;
- (3) 计算上、下包络线的均值 $m(t) = (u(t) + v(t))/2$ ;
- (4) 求 $x(t)$ 与 $m(t)$ 的差 $h(x)$ ;
- (5) 重复以上步骤,直到满足IMF条件;
- (6) 继续重复以上过程,直到分离出全部IMF,得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

即,原始信号 $x(t)$ 被分解为 $n$ 个本征模函数和一个残余分量之和,分量 $c_i(t)$ 分别包含了信号从高到低的不同频率成分。

对每个IMF作Hilbert变换,令 $x_i(t) = c_i(t)$

$$y_i(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

式中, $P$ 是柯西主分量。

构造解析信号 $z_i(t)$

$$z_i(t) = x_i(t) + iy_i(t) = a_i e^{i\theta_i(t)} \quad (3)$$

其中

$$a_i(t) = \sqrt{x_i(t)^2 + y_i(t)^2} \quad (4)$$

$$\theta_i(t) = \arctan(y_i(t)/x_i(t)) \quad (5)$$

定义瞬时频率为

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

忽略残余分量,则 $x(t)$ 可表示为下式

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i\theta_i(t)} = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{\int \omega_i(t) dt} \quad (7)$$

上式的频率 $\omega_i(t)$ 和幅值 $a_i(t)$ 是时间的变量,可构成时间、瞬时频率、幅值的三维时频谱图 $H(\omega, t)$ ,称为Hilbert幅值谱,简称Hilbert谱。

进一步可以定义边际谱:

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega, t) dt \quad (8)$$

以上的EMD和与之相应的Hilbert谱信号分析方法统称为Hilbert-Huang变换,简称HHT。

## 2 转子碰摩故障实验分析

笔者在Bently RK-4转子实验台进行了不平衡状态下碰摩故障模拟试验。在单盘转子两侧安装电涡流传感器测量轴径向位移振动信号,在圆盘上安装配重,使轴产生不平衡振动,并进行局部及全周碰摩实验。

### 2.1 转子局部碰摩故障实验

首先模拟了转子升速过程的局部碰摩情况。距离轴一定间隙固定铜质碰摩顶针,碰摩顶针不与轴接触。启动转子台,以3000 r/min升速速率进行转子升速实验。在初始状态,转子只有不平衡振动,随着转速升高,轴振幅逐渐加大,与碰摩顶针间距离逐渐减小,产生局部碰摩,并随转速增加,碰摩程度逐渐加重。转子台实测临界转速为1900 r/min,为设备安全,转子台升速至1840 r/min,并稳定后停止,记录全部实验数据。实验中采样频率均为1280 HZ。为便于分析,根据碰摩故障发生的先后及实验结果,将局部碰摩故障分为轻微、早期、故障3种状态。

轻微局部碰摩故障信号分析结果示于图1。为清晰起见,图中均给出能反映信号全貌的部分点

(下同)。从图 1 中可以看出,时域波形为正弦波,幅值谱图上以基频为主,出现了很小的 2X 分量,可见,仅通过传统的分析方法无法判断碰摩是否发生。在 Hilbert 时频图上,沿基频成分,瞬时频率出现了规律的波动及突变现象,边际谱上表现为基频成分频带变宽。

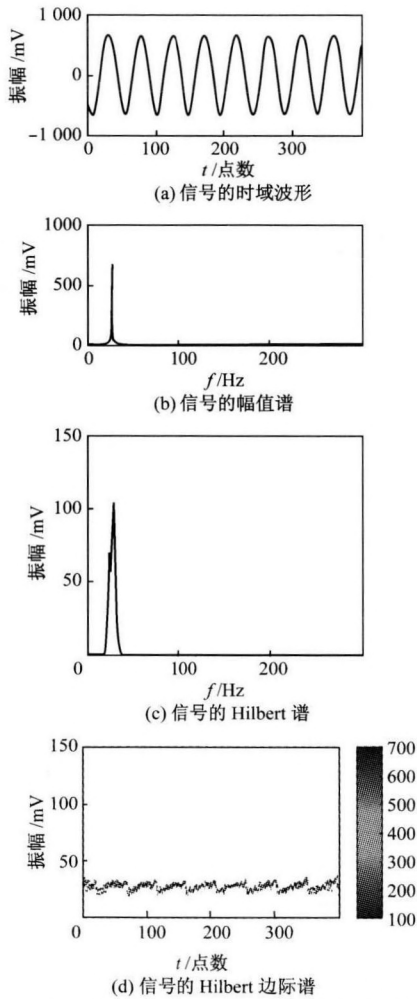


图 1 轻微局部碰摩故障信号的分析结果

Fig 1 Analysis results of slight local rubbing fault signals

图 2 为早期局部碰摩故障信号的分析结果。从中可以看出,时域波形上出现了每个周期内出现了一次微小变形,幅值谱中主要成分为不平衡引起的基频分量,同时出现了 2X、3X、4X 等高频分量,但幅值很小。结合实验过程可以判断出转子发生了局部碰摩故障,但其故障特征不明显,处于故障的早期。Hilbert 谱上沿基频成分瞬时频率出现了明显的规律波动及突变,边际谱上基频成分频带变宽,并向高、低频的延伸;并且,瞬时频率突变的时刻与时域波形的变形点位置相对应,此处应为发生局部碰摩的时刻,反映了局部碰摩的冲击过程。在瞬时频率突变点附近,轴转速发生了波动,这是由于局部碰摩发生时的反向摩擦力造成的。结合实验方法,说明系统

发生了单点局部碰摩,图 1、图 2 分别对应了轻微及早期单点局部碰摩故障状态。

### 2.2 转子全周碰摩故障实验

采用转子台配套的摩擦棒进行了全周碰摩实验,该摩擦棒头部为与转轴直径配合的半凹圆形,可以保证与轴的紧密接触。手持摩擦棒在不同转速下全周碰摩实验结果示于图 3-6。3 种不同转速对应了临界转速以下、以上及 2 倍以上的不同状态。

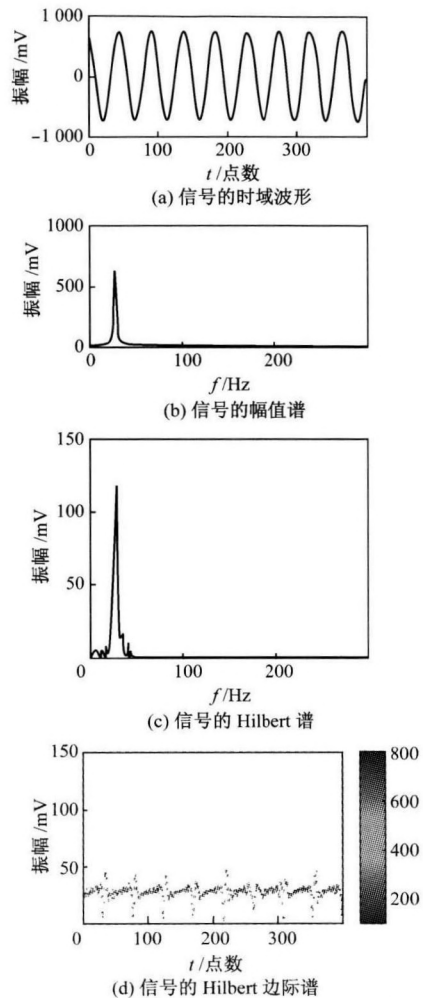


图 2 早期局部碰摩故障信号的分析结果

Fig 2 Analysis results of early local rubbing fault signals

图 3 为升速过程碰摩实验末端数据的分析结果,可以看出幅值谱上谐波分量明显增加,2X、3X、4X 等谐波成分幅值加大。时频谱上瞬时频率波动量加大了很多,突变现象仍然存在,但有明显的高频成分出现,边际谱上基频向高频部分延伸,与幅值谱相比,低频分量更明显。此时,碰摩接触点已由单点发展到局部。

从 3 种不同转速下的全周碰摩实验结果可以看出,时域波形均出现了明显的畸变,幅值谱上均出现了高次谐波成分,谐波的幅值表示了碰摩程度;在时频图上基频波动仍然存在,说明在全周碰摩过程中,

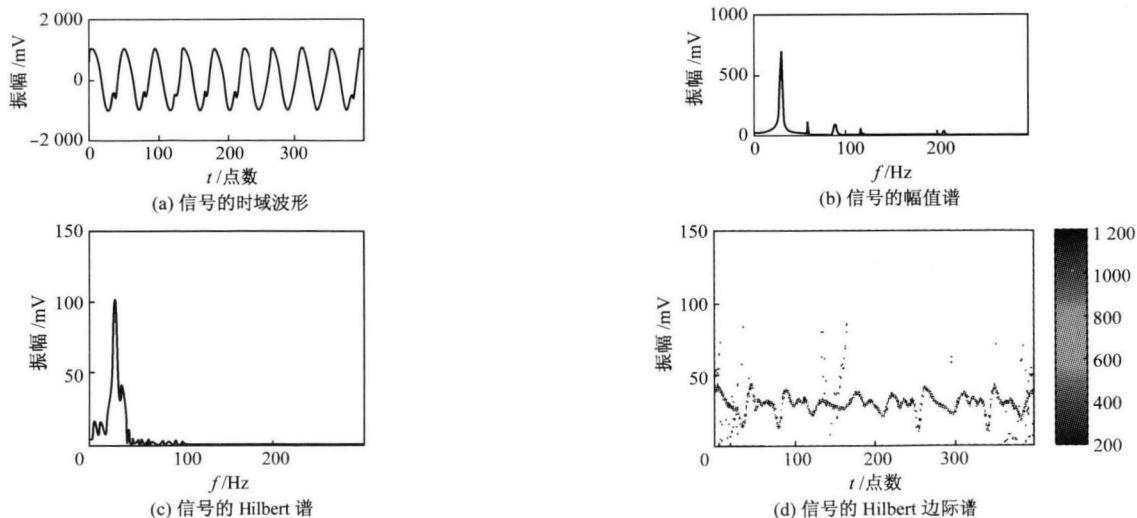


图 3 局部碰摩故障信号的分析结果

Fig 3 Analysis results of local rubbing fault signals

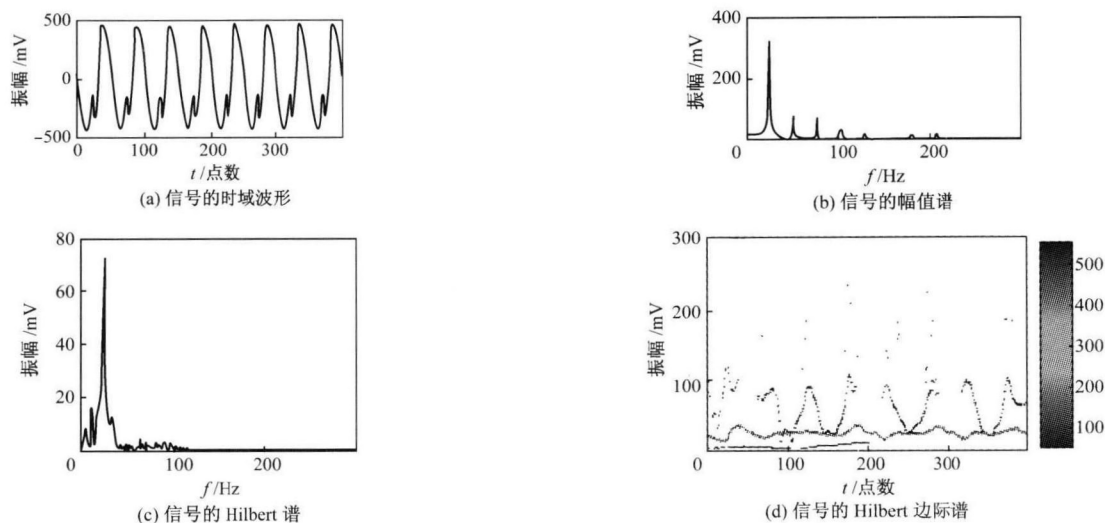


图 4 转速 1540 r/min 下全周碰摩信号的分析结果

Fig 4 Analysis result of all-circumferential rubbing fault signals at 1540 r/min

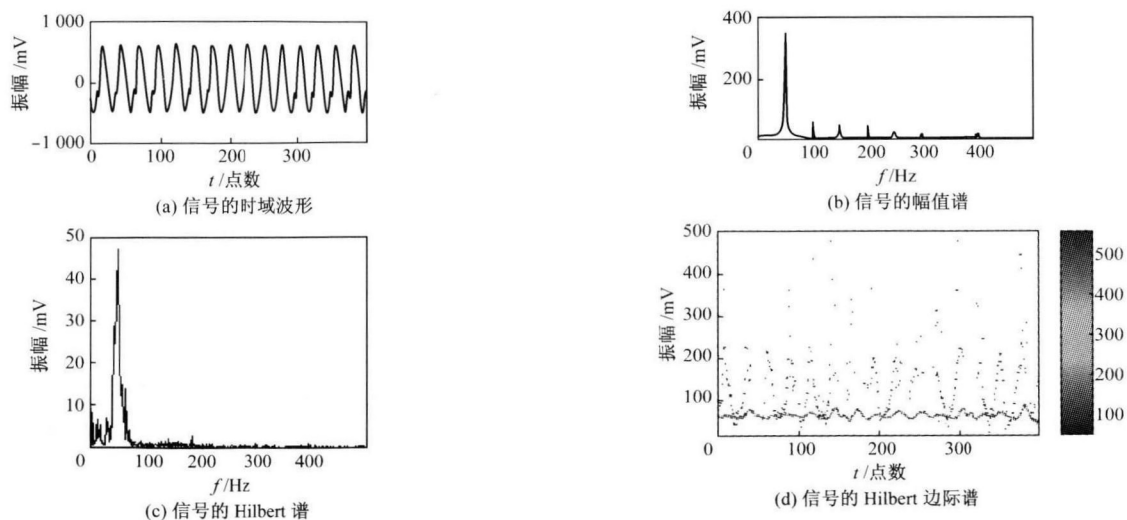


图 5 转速 2980 r/min 下全周碰摩信号的分析结果

Fig 5 Analysis result of all-circumferential rubbing signals at 2980 r/min

摩擦力是不均匀的,与局部碰摩相比,基频波动剧烈程度下降,说明摩擦力变化量相比局部碰摩要小;沿基频的瞬时频率突变现象消失,但出现了规律波动的高频成分,能量集中在某个高频频带内,即出现了

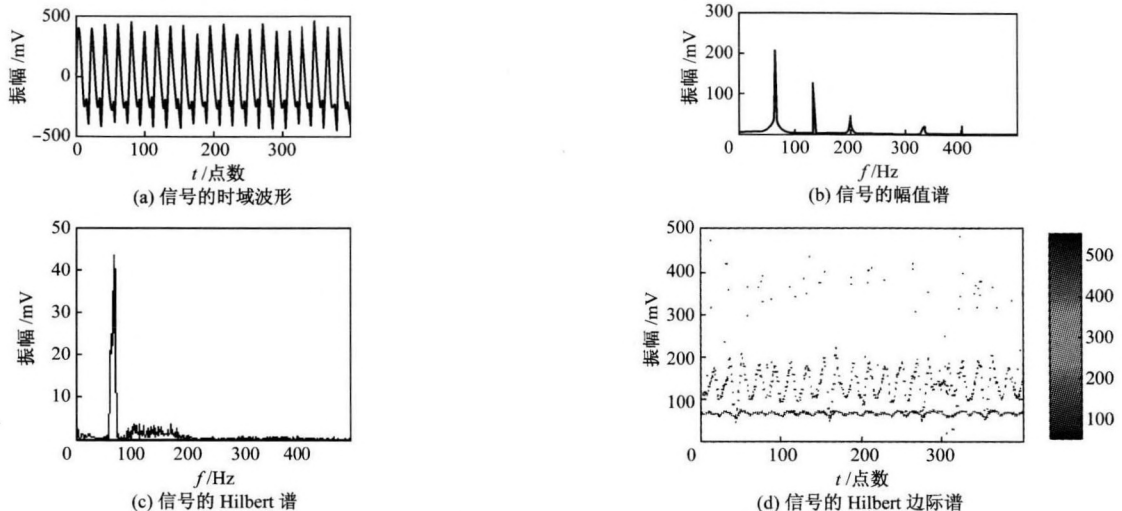


图 6 转速 4030 r/min 下周全碰摩信号的分析结果

Fig 6 Analysis results of all-circumferential rubbing fault signals at 4030 r/min

### 3 结 论

通过转子台实验模拟了不同状态下的碰摩故障,基于 HHT 分析给出了不同条件下碰摩故障的时频分布特征,对比分析结果,可以得出以下结论:① 转子局部碰摩的时频分布特征表现为瞬时频率沿基频的规律性的突变与波动,突变与波动强度与碰摩程度有关,表征了局部碰摩的冲击与摩擦过程;② 局部碰摩接触面积的增大在时频图上表现为沿基频成分的波动变化加剧及高频成分的增加;③ 高频成分的频率调制现象是区分全周碰摩与局部碰摩的重要特征;④ 基于 HHT 的时频分析方法比传统的频谱分析更准确的反映出碰摩故障的特征,能够在碰摩故障的早期作出准确诊断。

应该指出,本文结论是在单盘挠性转子实验台实验基础上完成的,由于现场设备的复杂性,对于大型旋转机械不同状态下的碰摩故障及多故障耦合的时频分布特征研究,还有待进一步深入。

#### 参考文献:

- [1] 闻邦椿,顾家柳,夏松波,等. 高等转子动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] Russell P C, Cosgrave J, Tomtsis, et al. Extraction of information from acoustic vibration signals using gabor transform type devices [J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, 9(8): 1282 - 1290.
- [3] 王善永,陆颂元,马元奎,等. 汽轮发电机组转子动静

高频成分的频率调制现象,这一点与一定面积接触的局部碰摩频带变宽的特征明显不同。同时注意到,在碰摩最严重的图 6 中,出现了两个明显的能量集中的频带。

碰摩故障检测的小波分析方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19(3): 1 - 5.

- [4] 刘献栋,杨绍普,申永军,等. 基于奇异值分解的突变信息检测新方法及其应用[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(6): 102 - 105.
- [5] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non linear non-stationary time series analysis [J]. *Proc. R. Soc. London*, 1998, A 454: 903 - 995.
- [6] Huang N E. A new view of nonlinear waves: The Hilbert spectrum [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999 (31): 417 - 457.
- [7] 于德介,陈森峰,程军圣,等. 基于 EMD 的奇异值熵在转子系统故障诊断中的应用[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(2): 24 - 26.
- [8] Loutridis S J. Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition [J]. *Engineering Structures*, 2004(26): 1833 - 1841.
- [9] Baozhong Yang, C. Steve Suh. Interpretation of crack-induced rotor non-linear response using instantaneous frequency [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004(18): 491 - 513.
- [10] Zhang Y M, Wen B C, Liu Q L. Uncertain responses of rotor/stator systems with rubbing [J]. *JSME International Journal, Series C, Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, 2003, 46 (1): 150 - 154.
- [11] 戈志华,高金吉,王文永. 旋转机械动静碰摩机理研究[J]. *振动工程学报*, 2003, 16(4): 426 - 429.
- [12] 卢文秀,褚福磊. 转子系统碰摩故障的实验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(5): 614 - 617.