

# 局域波法在转子系统多故障监测中的应用研究

王凤利, 马孝江

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 局域波法是基于信号局部特征, 通过该方法可得到信号的瞬时频率和构成能量—时间—频率三维分布的 Hilbert 时频谱。用局域波法分析了转子系统出现裂纹和碰摩故障耦合时的振动特征, 结果表明局域波法特别适合分析非线性非平稳信号, 能清晰地描述振动信号的时频特征, 为工程实际中转子系统的故障监测和诊断提供依据。

**关键词:** 转子系统; 局域波法; Hilbert 时频谱; 故障诊断

中图分类号: O322 文献标识码: A

## 1 前言

对于机械设备系统的故障诊断, 由于系统的非线性和非平稳性, 时频分析方法受到了重视。近年来人们的研究主要集中在短时傅立叶变换、Wigner-Ville 分布、小波变换等方面。

短时傅立叶变换通过固定宽度的时窗在时频域中分析信号, 其时间分辨率和频率分辨率不可能同时达到最佳, 适于对分段平稳的数据近似的描述。Wigner-Ville 分布在分析时变信号时易产生虚假的交叉干扰项, 目前虽然提出了消除交叉干扰项的方法, 但却降低了分辨率。小波变换同时在时域和频域具有较高的局部性, 它的时频分辨率可以随尺度变化。然而小波变换不具有自适应的特点, 一旦基本小波被选定就必须用来分析全部数据, 限定了小波变换的分析精度。局域波法是一种新的具有自适应特性的时频分析方法<sup>[1]</sup>, 根据信号的局部时变特征进行自适应时频分解, 消除了人为的因素, 克服了传统方法用无意义的谐波分量来表示非平稳非线性信号的缺点, 并可得到极高的时频分辨率和良好的时频聚集性, 实现了对时变信号完整的、准确的分析。

转子系统是汽轮机的重要部件, 确保其安全运行具有重要的意义, 如在转子系统的故障还未达到

危险程度之前将其检测出来, 将会大大减少由此带来的事故损失。转子裂纹和动静件碰摩是转子系统中常见的两种非线性故障因素, 一直是人们研究的重点。文献[2~3]针对裂纹故障诊断方法进行了研究; 文献[4]研究了碰摩转子的混沌运动和分岔现象; 文献[5]用小波变换理论对动静件碰摩故障诊断进行了研究。在工程实际中, 诱发转子系统故障的非线性因素很多, 有时某一故障是由多个因素导致的结果。这类多非线性因素耦合是转子系统故障诊断的研究热点。

本文以 Jeffcott 裂纹和碰摩转子为研究对象, 建立了裂纹和碰摩转子耦合振动的分析模型, 应用局域波时频分析方法来分析裂纹和碰摩故障转子耦合振动信号的时频特征, 这对于多非线性故障转子系统的振动监测与故障诊断具有非常重要的意义。

## 2 局域波法的原理和 Hilbert 时频谱

局域波法是从 1998 年美国学者 Huang 提出基于经验的模式分解的基础上发展起来的<sup>[6]</sup>, 目的是达到对时变信号进行正确的描述。用局域波法对信号进行分解, 最终将信号分解成  $n$  个基本模式分量  $C_1, \dots, C_n$  和一个剩余分量  $r_n$ , 该剩余分量或者是一个平均趋势或者是一个常数, 即:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j + r_n \quad (1)$$

对每一分量  $C_j(t)$  进行 Hilbert 变换, 于是构成  $X(t)$  解析形式, 可以表示为:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (2)$$

于是定义 Hilbert 时频谱为:

$$H(\omega, t) = \sum_{j=1}^n b_j a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (3)$$

其中: 当  $\omega_j(t) = \omega$  时,  $b_j = 1$ , 否则  $b_j = 0$ 。

从式(3)可以看出, 每一个基本模式分量可以

是幅度或频率调制的, 可变幅度与瞬时频率不但改进了信号分解的效率, 且使这种分解方法可以处理非线性、非平稳数据。在该分解方法中, 基函数是由信号自适应得到的。在这种时频分析方法中, 重要的就是基于信号局部特征的分解方法的引入, 从而使得瞬时频率这一概念具有了实际的物理意义, 同时也使这一方法不同于用很多谐波分量来描述复杂的非线性信号的传统方法, 如傅立叶变换, 也不同于小波变换中尺度的频率定义方法, 而是与频率的经典定义方法(信号相位的一阶时间导数)相一致, 从而可以给出信号频率变化的精确表达。在傅立叶谱中, 某一频率  $\omega$  处能量的存在, 代表一个正弦或余弦在整个时间长度上都存在; 而在 Hilbert 时频谱中, 某一频率  $\omega$  处能量的存在仅代表在整个时间长度上, 很可能有一个频率为  $\omega$  波在局部出现过, 这个波动发生的时间在 Hilbert 时频谱中精确地表示出来。

### 3 数字仿真试验

仿真分析信号  $S(t)$  是由两个线性调频信号叠加而成的, 表示为:

$$S(t) = \sin(2\pi(5+2t)t) + \sin(2\pi(15+2t)t)$$

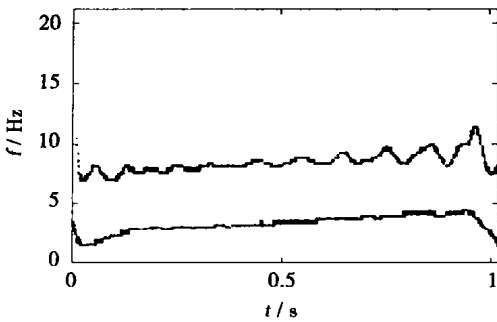


图 1 线性调频信号的 Hilbert 时频谱

图 1 给出了分析信号的 Hilbert 时频谱, 从图中可以明显看出分析信号是由两个线性调频信号组成, 反映出时变信号各时刻瞬时频率的变化过程, 其 Hilbert 时频谱具有良好的时频聚集性。由此可见, 应用局域波时频分析法来分析非线性非平稳信号能有效地反映出分析信号的时频特征。

### 4 数学模型

一个质量为  $m$  的 Jeffcott 单盘转子, 如图 2 所示, 在静止时动静件的间隙为  $\delta$  当盘中心的径向位移

大于动静件的间隙  $\delta$  时, 发生径向碰摩, 在碰摩处的法线方向上产生正向碰撞力  $F_n$  和切向摩擦力  $F_t$  可以表示为:

$$F_n = \begin{cases} 0 & (r < \delta) \\ (r - \delta)k_c & (r \geq \delta) \end{cases} \quad (4)$$

$$F_t = fF_n \quad (5)$$

式中:  $f$  为动静件间的摩擦系数,  $k_c$  为定子的径向刚度,  $r$  为盘中心的径向位移, 则  $F_x F_y$  表示为:

$$\begin{cases} F_x \\ F_y \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases} \quad (r < \delta) \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_x \\ F_y \end{cases} = -\frac{k_c(r - \delta)}{r} \begin{bmatrix} 1 & -f \\ f & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x \\ y \end{cases} \quad (r \geq \delta) \quad (7)$$

假设在转子圆盘根部具有横向弓形裂纹,  $o-xyz$  为固定的直角坐标系,  $o$  点为两支承中心的连线与圆盘所在平面的交点,  $z$  轴与两端轴承的中心线重合。  $o_1-\xi\eta$  为固结在圆盘上的旋转动直角坐标系,  $o_1$  为圆盘的形心, 裂纹轴的主刚度方向分别沿着坐标  $\xi$  和  $\eta$  方向, 如图 2 所示。在 Gasch 提出的裂纹开闭模型中<sup>[7]</sup>, 考虑转轴的位移及涡动影响, 刚度变化角  $\Psi = (\omega t + \varphi) - \arctg(y/x)$ , 描述裂纹开闭的周期函数为:  $f(\psi) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \psi - \frac{2}{3\pi} \cos 3\psi +$

$$\frac{2}{5\pi} \cos 5\psi \quad (8)$$

裂纹在固定坐标系中的刚度矩阵为:

$$K = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & k_0 \end{bmatrix} - \frac{f(\psi) \Delta k_\xi}{2} \times \begin{bmatrix} 1 + \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & 1 - \cos 2\omega t \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:  $k_0$  为转轴无裂纹时的刚度,  $\Delta k_\xi$  为沿裂纹方向转轴刚度的最大减小量,  $\omega$  为转子的工作转速。

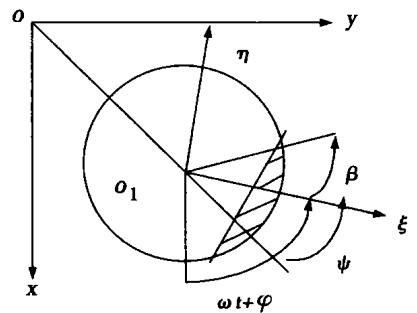
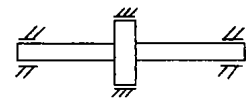


图 2 转子系统分析模型

于是裂纹和碰摩耦合转

子系统的运动微分方程为:

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + c \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} mg \\ 0 \end{Bmatrix} + me\omega^2 \begin{Bmatrix} \cos(\omega t + \theta) \\ \sin(\omega t + \theta) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

其中:  $c$  为转子的外阻尼,  $\theta$  为裂纹法向与不平衡量之间的夹角,  $e$  为偏心率。取如下的无量纲变换:

$x, y$  为无量纲盘心位移,  $x = x/\delta, y = y/\delta$  无量纲时间  $\tau = \omega t, D$  为外阻尼比,  $D = c/2m\omega, \Omega$  为转速比,  $\Omega = \omega/\omega_c, \omega$  为转子的工作转速,  $\omega_c$  为转子的一阶临界转速,  $\Delta k$  为裂纹轴的刚度变化比,  $\Delta k = \Delta k_s/k_0, \beta$  为定子与转子的刚度比,  $\beta = k_c/k_0, G$  为无量纲重力,  $G = g/\omega^2, U$  为无量纲不平衡参数,  $U = e/\delta$  可得裂纹和碰摩耦合转子系统的运动微分方程无量纲形式为:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \frac{2D}{\Omega} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \frac{1}{\Omega^2} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} - \frac{\Delta k f(\psi)}{2} \times \begin{Bmatrix} 1 + \cos 2\tau & \sin 2\tau \\ \sin 2\tau & 1 - \cos 2\tau \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \frac{\beta}{\Omega^2} (1 - \frac{\delta}{r}) \times \begin{Bmatrix} 1 & -f \\ 1 & f \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} G \\ 0 \end{Bmatrix} + U \begin{Bmatrix} \cos(\tau + \theta) \\ \sin(\tau + \theta) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

### 5 数值分析

选取转子系统的计算参数为:  $m = 453.6 \text{ kg}, \omega_c = 600.4 \text{ rad/s}, D = 0.1, f = 0.03, \delta = 0.12 \text{ mm}, e =$

$0.02 \text{ mm}, \Delta k = 0.4, \theta = 0, \beta = 8.$

图 3 所示为  $\Omega$  取不同值时转子的中心轨迹图和垂直方向振动的 Hilbert 时频谱图(无量纲谱)。当转子以亚临界转速运行时, 裂纹和碰摩转子耦合振动响应中出现  $1x, 2x, 3x \dots$  高阶分量; 当转子以超临界转速运行时, 裂纹和碰摩转子耦合振动响应中  $2x$  以上的高阶分量不明显, 几乎消失, 低次分量也未出现。当  $\Omega = 1/3$  时,  $1x$  分量的瞬时频率呈现周期性波动变化,  $3x$  分量瞬时频率跳动变化较大,  $2x$  分量不是持续存在, 能量较微弱, 这可以通过 Hilbert 时频谱的颜色深浅反映出来; 当  $\Omega = 1/2$  时,  $1x$  分量的瞬时频率波动较小,  $2x$  分量瞬时频率呈现周期性波动变化,  $2x$  分量的能量高于  $1x$  工频分量, 显示  $2x$  分量被共振放大的超谐共振现象; 当  $\Omega = 3/2$  时, 转子以超临界转速运行时, 裂纹和碰摩转子耦合振动响应中  $2x$  以上的高阶分量和低次分量都未出现,  $1x$  分量的瞬时频率波动较小, 对应的转子中心轨迹为一个圆, 大多学者认为可用  $2x$  分量来检测裂纹, 把  $2x$  分量作为裂纹故障的重要特征。然而当转子以超临界转速运行时, 反映裂纹故障特征的频率分量消失, 因此响应中包含  $2x$  分量只是转子在亚临界转速运行时诊断裂纹故障的特征信息。

从图 3 中可以看出,  $2x, 3x$  分量在转子系统故障诊断中能具有实用价值的信息, 系统振动的更高阶分量的能量随着阶次的升高而明显降低, 因此

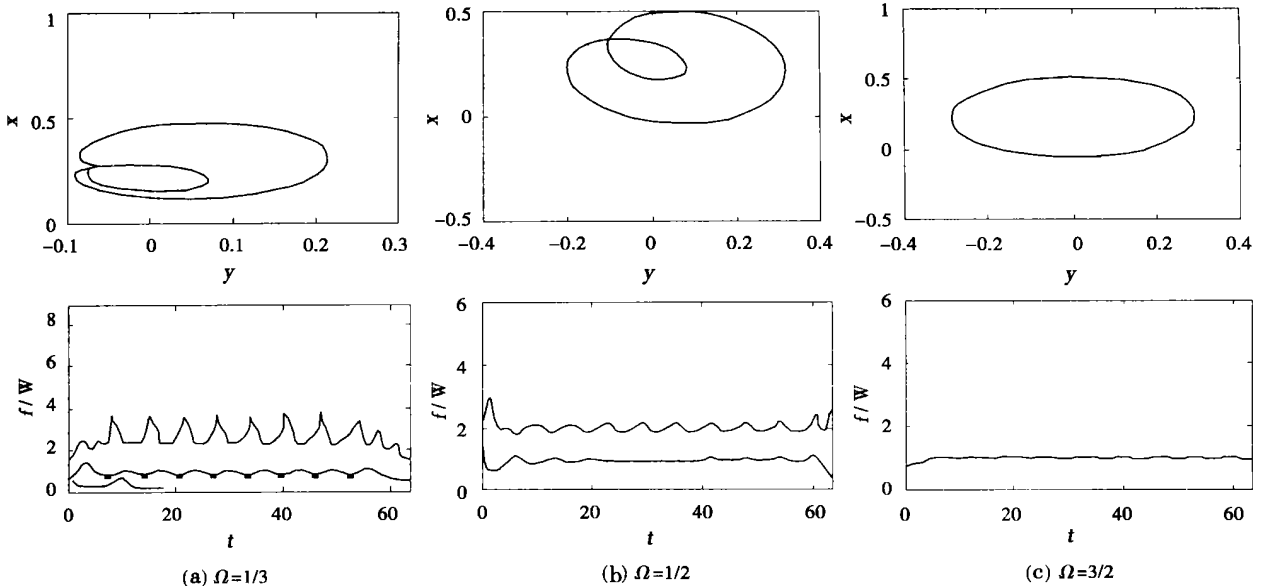
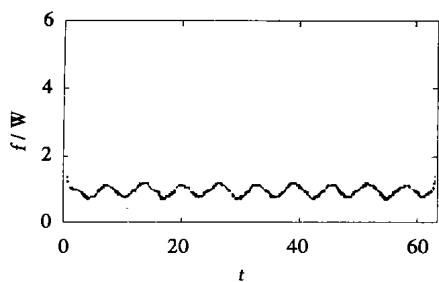


图 3 转子的中心轨迹和垂直方向振动的 Hilbert 时频谱



( $\Omega = 5/6, \theta = \pi/2$ )

图 4 转子垂直方向振动的 Hilbert 时频谱

难以提取准确的信息。

改变转速比  $\Omega = 5/6$ , 裂纹参数  $\theta = \pi/2$ , 其它参数不变, 转子垂直方向振动的 Hilbert 时频谱如图 4 所

示, 振动响应中  $2x$  以上的高阶分量消失。转子在亚临界转速运行时, 使裂纹法向与不平衡之间的夹角变化, 由于转子碰摩耦合振动的影响, 容易隐蔽裂纹和碰摩故障特征信息, 不利于及时地检测出该故障。

## 6 结 论

本文应用局域波时频分析方法对裂纹和碰摩转子耦合振动响应进行了分析, 结果表明 Hilbert 时频谱能够很好地反映多非线性转子响应的时频特征, 不仅清晰地显示出了响应的各个频率分量, 而且还准确地描述了各分量瞬时频率的时变性, 反映了各

分量的能量大小和随时间的分布, 因此它还可用于监测故障发展的早期特征, 为实际转子系统故障监测和诊断提供依据。

## 参考文献:

- [1] 马孝江. 一种新的时频分析方法—局域波法[J]. 振动工程学报, 2000, 13(5): 219—224.
- [2] DIMAROGONAS A D. Vibration of cracked structures: a state of the art review[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1996, 55(5): 831—875.
- [3] ZHENG G T. Vibration of a rotor system with a switching crack and detection of the crack[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 1998, 120(1): 149—154.
- [4] CHU F, ZHANG Z. Bifurcation and chaos in a rub-impact jeffcott rotor system[J]. **Journal of sound and vibration**, 1998, 210(1): 1—18.
- [5] 刘献栋, 李其汉. 小波变换在转子系统动静件早期碰摩故障诊断中的应用[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 220—223.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear nonstationary time series analysis[J]. **Proc Royal Society**, 1998, A 454: 903—995.
- [7] GASH R. A survey of the dynamic behavior of a simple rotating shaft with a transverse crack[J]. **Journal of sound and vibration**, 1993, 160(20): 313—332.

(渠 源 编辑)

## 高效的燃气轮发电机组

据《Gas Turbine World》2002年3—4月号报道, 荷兰 Schelde Heron BV 研制了 H—1 型燃气轮机。

简化的水对空气中间冷却器能够降低燃气轮机压气机各段之间工作流体温度, 并增加了通过压气机的质量流量和减少压气机耗功。

做成一体的回热器在基本负荷电力生产时提供 43% 热效率。

以两个独立的燃烧室部分运行, 在上游燃烧室内点燃的燃料驱动燃气发生器涡轮, 离开该涡轮的热燃气, 在进入动力涡轮前在第二个燃烧部分内再热, 联合的顺序燃烧驱动动力涡轮。

Heron H—1 型燃气轮机是一台两轴中间冷间回热式燃气轮机。它的燃气发生器特征是由单级轴流涡轮驱动的两级离心式压气机部分。在单轴上的径流自由动力涡轮通过减速齿轮箱驱动发电机。

H—1 型燃气轮发电机组输出功率为 1407 kW 热效率为 42.9%, 燃油消耗量为 0.086 kg/s, 转子进口温度为 861 °C, 压比为 8.78 : 1, 进口空气流量为 5.15 kg/s, 排气温度为 620 °C。

(思娟 供稿)

局域波法在转子系统多故障监测中的应用研究 = **Applied Research of a Local Wave Method Used for the Monitoring of Multiple Faults in a Rotor System** [刊, 汉] / WANG Feng-li, MA Xiao-jiang (Mechanical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 139—142

Based on the local characteristics of signals, a local wave method (LWM) can be employed to obtain the instantaneous frequency of signals and the Hilbert time-frequency spectrum composed of an energy-time-frequency three-dimensional distribution. The LWM was used to analyze the vibration characteristics, which emerge during the coupling of a crack and a rub-friction fault in a rotor system. It has been discovered that the LWM is especially suited for the analysis of nonlinear and non-steady signals, and capable of clearly describing the time-frequency characteristics of vibration signals. This can provide in engineering practice a helpful basis for the monitoring and diagnosis of faults in a rotor system. **Key words:** rotor system, local wave method, Hilbert time-frequency spectrum, fault diagnosis

CFB 锅炉内物料停留时间的模型研究 = **Modeling Research of Residence Time of Materials in a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, et al (Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) WIRSUM M (Thermal Energy Engineering Institute under the Siegen University, Siegen, Germany, D57076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 143—146

During a model study of bed material balance in a circulating fluidized bed (CFB) boiler the effect of attrition process on that balance should be taken into account. In this connection the authors have come up with a new concept of the residence time of materials by grading the latter according to their particle diameter and age. With the help of a model calculated was the residence time profile of material particles of various sizes. The residence time thus derived agrees conceptually with that obtained as a result of dividing a total bed inventory by material feed rate. However, this also profoundly reflects that materials of a same particle size may not have the same residence time in a fluidized bed. On the basis of this understanding a model calculation was conducted of the residence time profile of the materials in the CFB bed boiler. Furthermore, with the help of the model also studied was the influence of different operating parameters on the residence time of the particles. **Key words:** residence time, attrition, age

水煤膏冷态雾化试验装置和测量系统的研究 = **The Study of a Cold-state Atomization Test Rig and a Measurement System for Coal-water Paste** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), LU Yong, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology and Thermal Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 147—150

A vertical test rig for the atomization study of coal-water paste has been set up and a method proposed for measuring the particle average diameter and distribution of water-coal paste atomized particles with the use of a PIV (particle image velocimetry) technique and a newly developed image-processing software. All factors, which may have an impact on the measurement of the coal-water paste atomized particles, are analyzed, creating a solid basis for the further research of the nozzle atomization properties of the coal-water paste. **Key words:** coal-water paste, atomization, test rig, particle size measurement, particle image velocimetry

切向炉内多组小屏尾部分离涡的研究 = **An Experimental Study of Separated Vortices at the Tail Section of Multi-platenlets in a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / DIAO Yong-fa, HE Bo-shu (National Key Lab on Clean Coal Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XU Jin-yuan, et al (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 151—154