

# 基于小波变换的离心风机弱失速特征分析

侯军虎, 王松岭, 王 强, 艾进聪

(华北电力大学 动力系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 结合实验室 4-73 No 8D 风机进行了旋转失速试验, 将谐波小波变换引入旋转失速的研究, 通过对弱失速阶段机壳压力信号的时频分析, 确定了弱失速阶段的失速能量间歇现象、频率特征以及在弱失速阶段对调节作用的敏感性, 从而说明离心风机的弱失速阶段是一个应该引起运行、维修人员足够重视的重要区域, 这也为离心风机旋转失速的深入开展研究奠定了基础。

**关 键 词:** 谐波小波; 离心风机; 旋转失速; 弱失速; 特征分析

中图分类号: TH432 文献标识码: A

## 1 引 言

旋转失速会引起叶轮机械内复杂的三维流动, 对于叶轮、导流叶片和管道产生非稳态空气动力激励, 同时对失速信号的测量和分析也带来了一定的难度。目前很多研究都集中在对于航空发动机的压缩机非稳态特性的理解和扩展稳态运行范围等方面, 而对于离心风机旋转失速的研究由于受产品投资规模等因素的影响, 较轴流压缩机而言, 受到很大限制, 而离心风机旋转失速表现与轴流压缩机有较大的区别<sup>[1]</sup>。随着电站机组容量的不断扩大, 越来越多锅炉的风机处于部分负荷运行, 在这些状态下极易出现旋转失速而引起风机振动, 造成事故隐患, 本文主要讨论离心风机的旋转失速。小波变换作为一种先进的信号分析方法, 具有时间和尺度(频率)的自适应能力, 十分适合于特征不明显的弱失速阶段特征的分析。以实验室的 4-73 No 8D 离心风机为例进行了旋转失速的试验研究, 借助于谐波小波对风机失速尤其是对弱失速进行了特征分析。

## 2 试验装置和分析方法

### 2.1 试验装置

图 1 为试验装置和测试系统, 试验风机采用变

频器调节转速, 试验针对 1 200, 1 300, 1 400 r/min 进行了旋转失速渐进过程参数测量, 采用安装在管网出口的节流锥调节管网阻力, 控制失速过程。风机壳周向等角度(60°)间隔布置了 1 号~5 号共 5 个动态压力传感器, 如图 1 所示, 测量机壳内壁气体的动态压力信号, 其他的静态性能参数测点的位置如图 1 中箭头所示。试验采用基于 UEI 的 PD2-MFS 高速同步采样板的测试系统, 对 5 路动态压力信号进行同步采样。

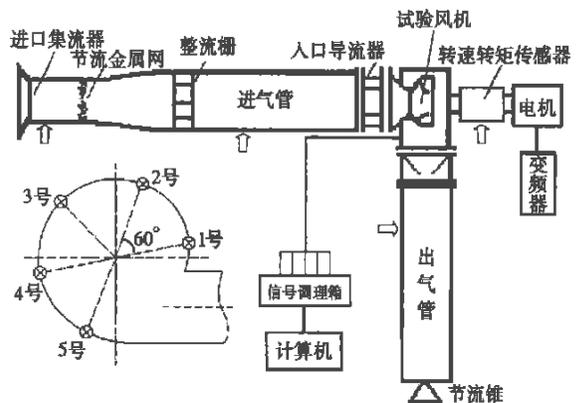


图 1 试验装置及测试系统

### 2.2 谐波小波分析方法

谐波小波是由剑桥大学 D. E. Newland 教授提出的, 具有准确的箱函数形式的谱图、简单的显式的解析表达式、正交性和对称性等特征<sup>[2]</sup>, 由于其在频域紧支, 且不同频带的小波在各自频带范围内的值为常数, 很适合分析回转机械。

谐波小波的定义是以频域的形式给出:

$$W(\omega) = \begin{cases} 1/2^j\pi & 2\pi 2^j \leq \omega \leq 2\pi 2^{j+1} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

尺度为 1 的谐波小波时域表达式为:

$$w(t) = (e^{i4\pi t} - e^{i2\pi t}) / (i2\pi t) \quad (2)$$

其实部和虚部如图 2 所示。

谐波小波的快速算法由信号的 FFT 和 IFFT 实现, 谐波小波分解结果可用时频图和时频等高线图表示, 详见参考文献[2~3]。谐波小波时频图是分解结果的直观表示, 其起伏对应着不同的谐波小波与信号相关结果的相对大小, 通过该图可实现对故障特征准确的时频定位。

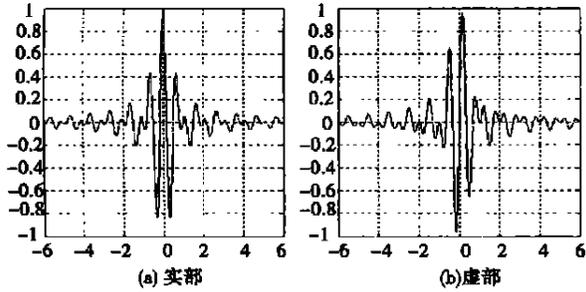


图 2 尺度 1 的谐波小波的实部与虚部

### 3 试验结果

#### 3.1 旋转失速渐进过程分析

采用试验设备对风机旋转失速的渐进过程进行了试验。现取 2 号测点的压力信号进行分析, 其中风机转速为 1 300 r/min, 导流器开度  $\beta=0^\circ$ , 鉴于谐

波小波时频等高线图分析特点以及将风机转速扰动成分与失速成分分离等考虑, 分析频率范围为 0 ~ 640 Hz。失速渐进过程的时域和谐波小波变换结果如图 3 所示, 其中, 尺度 8 对应着 10 ~ 20 Hz, 风机旋转失速频率约  $2/3f_s=14.4$  Hz, 位于尺度 8 的范围内, 风机转速对应频率 21.7 Hz, 位于尺度 9 范围内。图 3 中(a)~(c)分别对应未失速状态、稳定失速状态和渐进失速状态。

由图可以看出: 在未失速状态下, 压力信号在谐波小波的尺度 9 和 10 处分布着一些主要的能量成分, 分别对应着风机转速和其谐波成分。随着流量的逐步减小, 机壳内压力不断增大, 对应旋转失速频率的尺度 8 中逐步出现了一些分散的能量成分, 在强失速前约 2 s, 尺度 8 的扰动分量值明显增大, 并呈现间歇特征。在强失速前约 0.2 s 进入弱失速阶段, 间歇出现的扰动成分逐渐增强为连续的失速扰动成分, 但强度相对较弱。进入强失速阶段, 尺度 8 所对应的频率成分成为整个时频图中占绝对优势的成分, 并持续稳定, 随着流量的不断减小, 失速的强度先增强而后缓慢减弱, 时域波形可以看出, 此时的波形近乎正弦波。

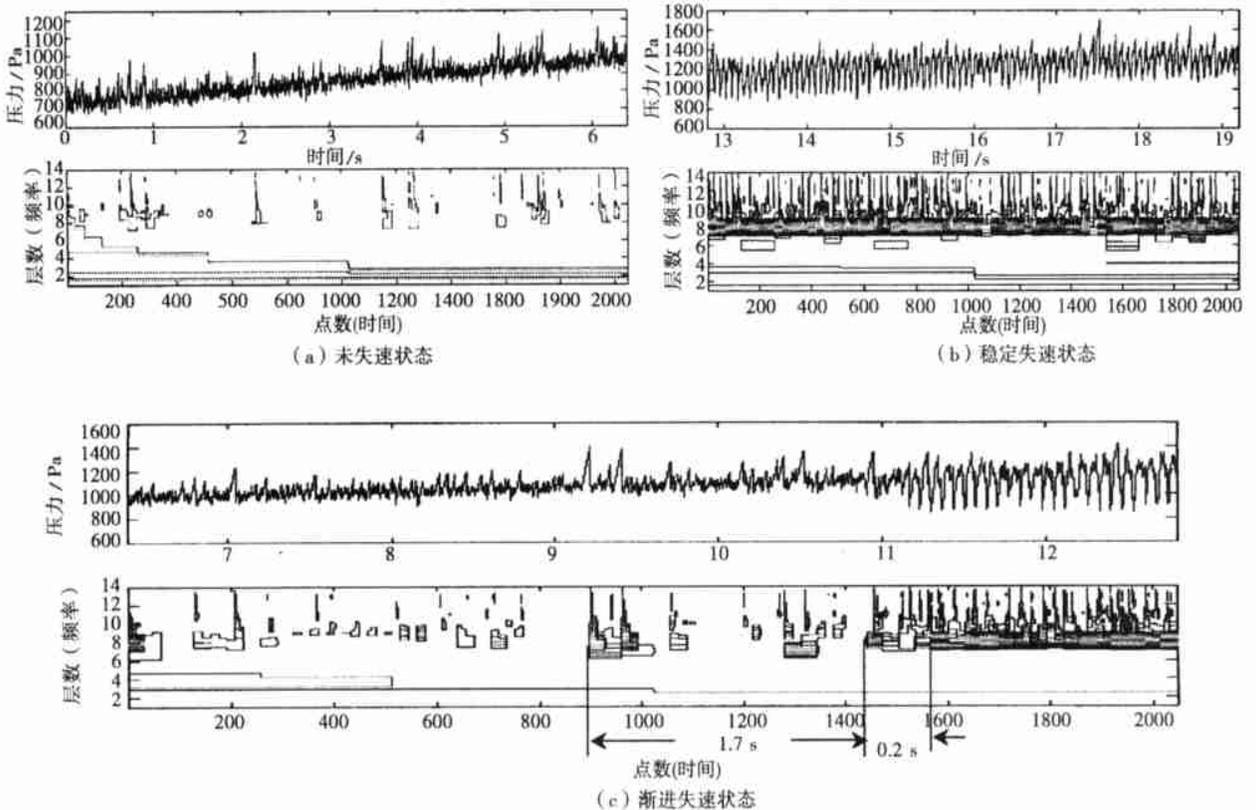


图 3 渐进失速过程中的原始信号及谐波小波时频等高线图

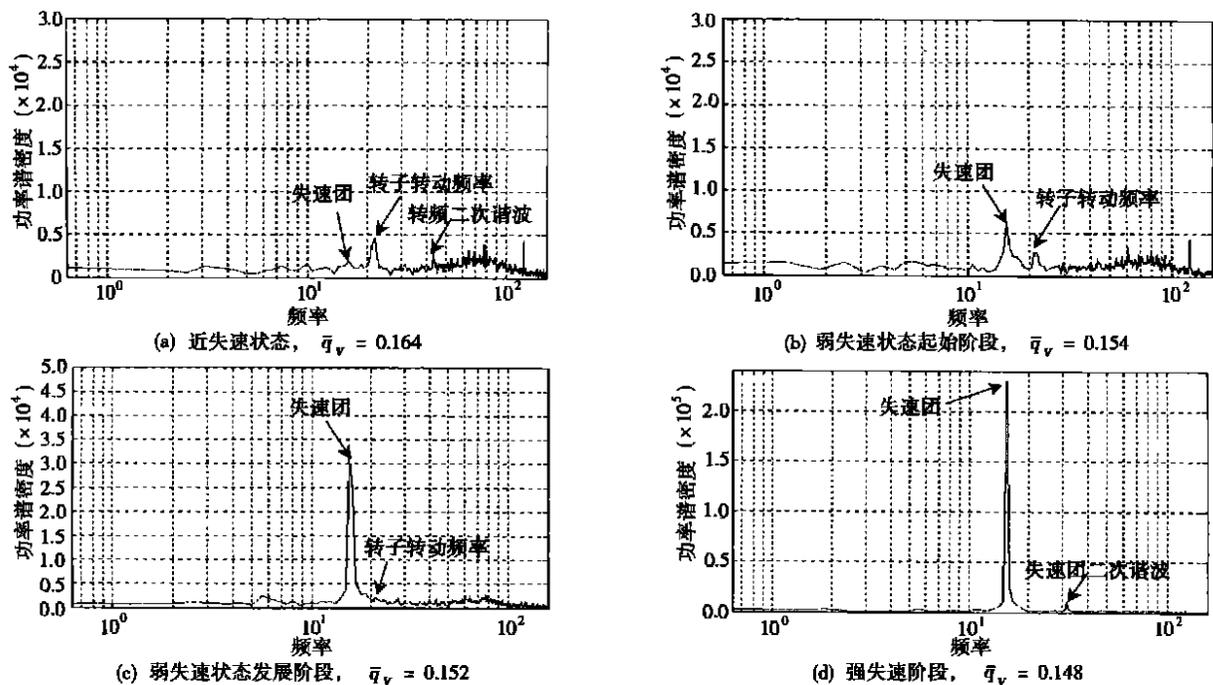


图 4 失速发展过程中压力信号的功率谱图,  $\beta = 15^\circ$

从以上分析可以看出:在未失速阶段和强失速阶段特征明显,在弱失速阶段的时频特性还需进一步分析。由小波时频图可以看出,在失速调整过程中,对应高频的大尺度成分能量分布杂乱,没有明显特征,因此在对弱失速特征的分析中将分析频率范围减小,以突出低频特征。

### 3.2 弱失速阶段的特征

弱失速阶段的发展过程可以通过对机壳内壁压力信号的频谱说明,为减小背噪干扰,频谱取 40 个样本的均值,分析频率范围为 0~160 Hz。图 4 给出导流器开度  $15^\circ$  的动态过程,为清楚再现低频特性,频率轴采用对数坐标。由图可以看出:在正常运行工况下,压力信号中主要包含转子转动频率及其谐波。随着流量的减小,在接近失速工况下,约 2/3 风机转频出现了微弱的扰动成分,量值较小。随着流量的进一步减小,进入弱失速区域,弱失速区域对应着很小的流量变化范围,但却会引起失速团对应频率能量的大幅度增长,同时也会因此引起压力信号整体脉动的增强。这种扰动延缓了性能曲线的变化梯度,但没有引起性能的突变。对 1 200、1 400 r/min 以及其它的导流器开度下也得到了相似的结果。

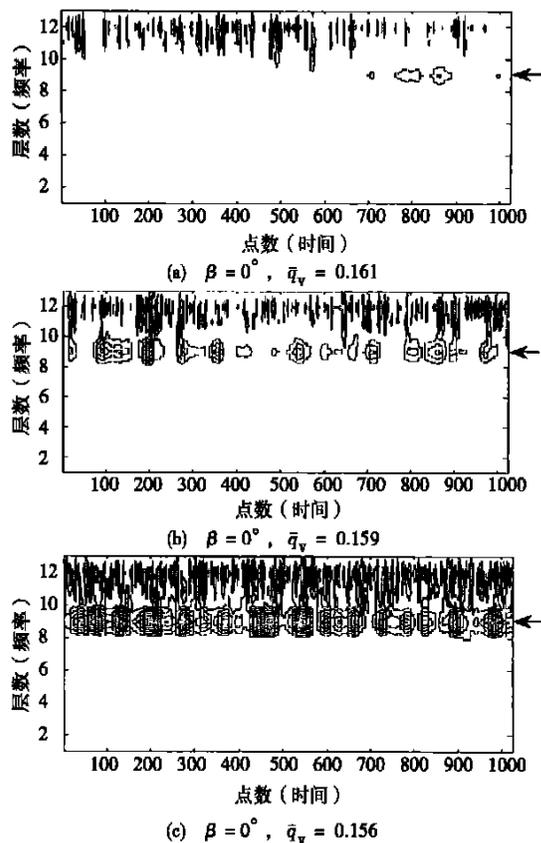


图 5 离心风机处于弱失速阶段的失速间歇现象

为进一步得到弱失速阶段的时频特性, 对弱失速阶段渐进发展的三个工况的信号进行谐波小波分析, 失速频率位于尺度 9 范围内(10~20 Hz), 如图 5 所示。

失速出现在图中箭头所指的尺度 9 所对应的频率成分范围内, 为清楚的再现随流量的减小失速发展的动态过程, 选择了弱失速区域内不断发展的三个阶段的压力信号进行时频特性分析。图 5(a)中的信号处于弱失速初始阶段, 失速团出现脉动的间隔比较大, 强度也比较低。图 5(b)中的信号较(a)的信号有所增强, 失速成分的间隔减小, 甚至出现了小范围的连续出现的现象。图 5(c)中的信号进一步增强, 且趋向于整体连续。进一步减小流量, 就会出现如图 3(b)所示的连续失速现象。这种现象也显著的区别于轴流压缩机。

### 3.3 失速阶段的频率分析

目前, 国外已有多位学者对于离心风机的旋转失速频率进行了研究, 得出了 2/3 倍转频为离心风机旋转失速对应频率。其中, Bolton 对此进行的研究更为细致, 最终得出在风机稳定转速下, 失速单元的旋转频率是接近于 2/3 倍转频且与流量有关<sup>[4]</sup>, 但文献中没有提及导流器开度变化对失速频率的影响。在本次试验中针对多转速多导流器开度进行了试验。其中 1 300 r/min 的结果如图 6 所示, 其它转速下也得到了相似的结果。由图可见, 导流器开度变化引起了风机入口流场预旋, 有延缓失速的作用, 正如图中失速起始对应流量:  $q_0 > q_{15} > q_{30} > q_{45}$ 。但在试验中出现了导流器开度减小的幅度较大时, 流场恶化, 导致旋转失速提前出现(如: 60°)。导流器开度变化对失速频率影响较小, 随着导流器开度的减小, 失速频率小幅度增长, 对应每个开度下, 失速频率与流量成正比。在流量较小的情况下, 会出现失速频率阶跃现象, 这是由于失速团变化造成的, 对于试验风机失速团由单个发展为两个。当流量进一步减小, 失速频率又回到原来的线性规律上, 此时两个失速团合并为一个。对于后弯式离心风机, 并不是每个开度都有类似的现象。对应于弱失速阶段, 由于流量变化范围较小, 因此可以忽略频率的变化。

### 3.4 导流器调节引起的弱失速向强失速转变

导流器调节产生的预旋有延缓失速的作用, 因此在动态调节过程中, 随着导流器开度的增大, 会有旋转失速突然出现的现象。由于弱失速阶段的敏感性, 处于这一区域运行的风机在导流器开度增大

时很容易进入强失速区。试验中在同样的管网阻力状态下, 由 45°调节到 0°, 处于弱失速阶段失速强度迅速增大, 并最终在 0°进入强失速阶段, 如图 7 所示。

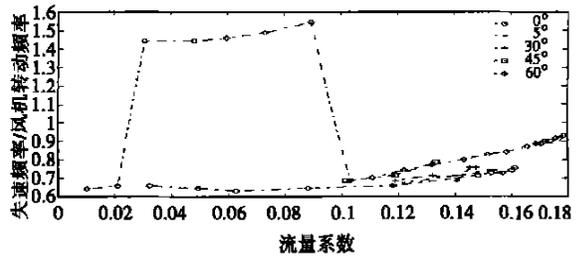


图 6 导流器开度变化情况下无因次失速频率随流量的变化关系

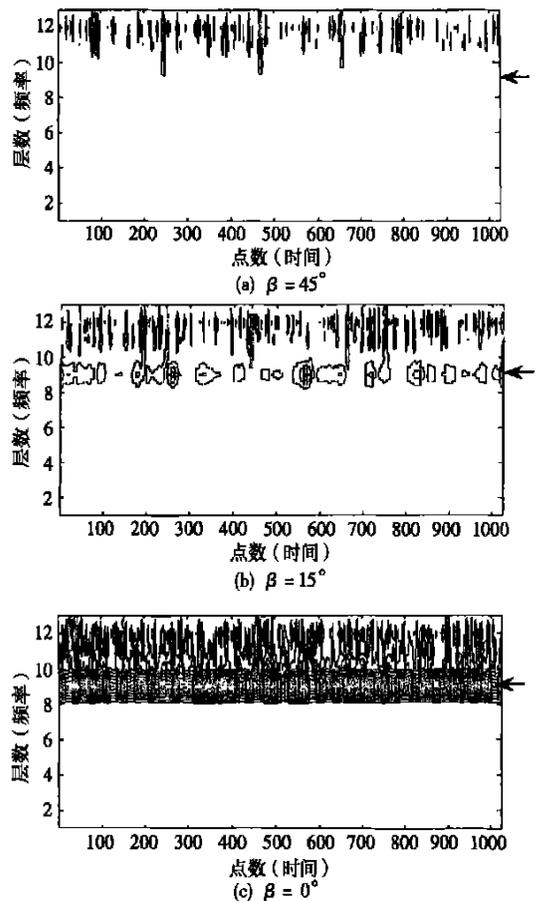


图 7 弱失速阶段导流器开度变化引起的强失速

## 4 结 论

通过对失速渐进过程和弱失速过程的试验研究, 采用谐波小波时频图进行分析, 得出以下结论:

(1) 谐波小波具有频域紧支特性, 不同频带的小波在各自频带范围内的值为常数, 采用这一工具分析离心风机旋转失速, 尤其在对弱失速阶段时特征的提取, 较传统的 Fourier 分析有很大的优越性。

(2) 对离心风机而言, 弱失速阶段对应的流量变化范围很小, 但失速发展很快, 在这一区域, 呈现失速频率能量的间歇现象, 并一直持续到强失速阶段, 在这一过程中, 失速频率对应的能量逐步由离散的发展成为小范围连续, 并最终发展成为整体连续。

(3) 导流器开度对失速频率存在着线性的小幅度的影响, 失速频率随流量也呈线性变化, 在小流量的情况下, 失速团的发展, 会使个别导流器开度下的失速频率出现阶跃现象。

(4) 在同样的管网阻力条件下, 在弱失速区域

内导流器开度变化会引起失速状态的突变, 因此, 在运行中应尽量避免这一区域。

参考文献:

[ 1 ] CHEN P. SOUNDRA-NAYAGAM M. Unstable flow in centrifugal fans [ J ] . ASME Journal of Fluids Engineering, 1996, 118 (3): 127-133.

[ 2 ] NEWLAND D E. Wavelet analysis of vibration, Part 1: Theory[ J ] . ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(4): 409-416.

[ 3 ] NEWLAND D E. Random vibrations: spectral and wavelet analysis [ A ] . 3rd Edition. Longman Scientific & Technical[ C ] . New York, 1993. 359-370.

[ 4 ] BOLTON A N. Pressure pulsations and rotating stall in centrifugal fans [ A ] . Proc of IMechE Conf on Vibration and Noise in Pump, Fan and Compressor Installations[ C ] . Southampton, 1975. 175-181.

(何静芳 编辑)

新信息

## Rolls-Royce 公司的新一代燃气轮机

据《Gas Turbine World》2002 年 3~4 月号报道, 在美国能源部 (DOE) 新燃气轮机研制计划的推动下, 英国 Rolls-Royce 公司正在开发新型燃气轮机, 它们将是 DOE 下一代燃气轮机计划最佳候选方案。

这两型燃机都是基于 52 MW Trent 的修改方案。一个方案是湿中间冷却和湿回热结构, 另一个是“超级”蒸汽回注设计。

Rolls-Royce 公司称, 新一代燃气轮机技术以简单循环燃机运行的灵活性提高联合循环的性能, 并由 NGGT (下一代燃气轮机) “湿 Trent” 设计表明, 效率比目前的简单循环燃机提高 25%, 投资费用比联合循环装置降低 30%。它的总承价格包括水回收装置的费用。湿中间冷却和湿回热 Trent 的比较如下:

	简单循环设计			湿循环设计		联合循环设计		
	LM6000	Trent	Fr6FA	LM6000	Trent	LM6000	Trent	Fr6FA
额定性能								
输出功率/MW	43.1	51.2	70.1	47.3	50-80	56.4	66.0	107.4
效率/%	41.4	41.6	34.2	41.4	>50	52.5	54.3	53.2
发电装置价格/美元·kW <sup>-1</sup>	366	303	385	不详	不详	不详	不详	不详
总承包价格/美元·kW <sup>-1</sup>	560	500	480	430	400-450	658	650	730
灵活性	高	高	高	高	高	中/低	中/低	低

(吉桂明 供稿)

Industry Co., Tangshan, Hebei Province, China, Post Code: 063502) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 272 ~ 275

After the injection of a gaseous mixture of steam and gas into a turbine a change in turbocharger operating condition will take place. In this connection the authors have performed a thermodynamic analysis of the turbocharger after steam injection. It is concluded that the increase in steam-gas ratio will lead to an increase in turbocharger speed, compressor airflow rate and pressure ratio. The impact of injected steam temperature on compressor pressure ratio is relatively small. During part-load operating conditions the injection of steam will result in an increase in turbine corrected flow rate and expansion ratio. During high-load operating conditions the range of increase in expansion ratio and corrected flow rate diminishes. Different steam-gas ratios have a relatively small influence on turbine efficiency characteristics. **Key words:** turbocharger, steam injection, steam-gas ratio

电站煤粉锅炉飞灰浓度模型 = **Fly-ash Concentration Model for a Utility Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / XUAN Yi-min, FENG Chang-qing, LI Qiang (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 276 ~ 279

On the basis of the basic theory of boiler thermal balance and combustion theory set up is an online monitored parameters-based fly-ash concentration calculation model. The model has a definite practical engineering value for the online measurement of fly-ash carbon content. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, fly-ash carbon content, fly-ash concentration, thermal efficiency

基于小波变换的离心风机弱失速特征分析 = **Analysis of Weak Rotating-stall Characteristics of a Centrifugal Fan Based on Wavelet Transformation** [刊, 汉] / HOU Jun-hu, WANG Song-ling, WANG Qiang, et al (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 280 ~ 284

A rotating-stall test was conducted of a lab 4-73 No. 8d fan with harmonic wavelet transformation being introduced into the study of rotating stall. Through a time-frequency analysis of fan-casing pressure signals during a weak rotating-stall stage determined were the rotating-stall energy intermittency, frequency characteristics and sensibility of regulation function at that stage. This indicates that the weak rotating-stall stage of the centrifugal fan is a major region worthy of close attention on the part of operational and maintenance personnel. In addition, the foregoing also has laid a firm basis for the further in-depth research of centrifugal fan rotating-stall. **Key words:** harmonic wavelet, centrifugal fan, rotating stall, weak rotating stall, analysis of characteristics

石门电厂 300 MW 机组引风机振动分析 = **An Investigation on Induced-draft Fan Vibrations in a 300MW Unit of Shimen Power Plant** [刊, 汉] / WANG Yun-min, XIAO Han-cai (Changsha Electric Power Institute, Changsha, Hunan Province, China, Post Code: 410077), ZHAO Shi-chang, et al (Hunan Shimen Power Plant, Shimen, Hunan Province, China, Post Code: 415300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 285 ~ 288

The vibrations of an induced-draft fan installed at Shimen Power Plant are analyzed and tested. The cause of the excessive vibrations has been identified and proper measures were taken to alleviate them. The results of operation thereafter indicate that the vibration performance of the induced-draft fan has significantly improved, fundamentally resolving the problem of safe and economical operation of the power plant caused by the excessive vibrations of the fan. **Key words:** power plant, induced-draft fan, vibration