

基于分形谱和 EEMD 的鼓泡床压力脉动分析

周云龙¹, 王芳²

(1. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 长春市供热(集团)有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 在自行搭建冷态流化床试验台的基础上, 采集了不同静床高下风帽入口处的压力脉动信号, 并对流化床内压力脉动信号的多重分形谱进行了分析, 得出在空气流量不变的情况下, 随着静床高的增加, 流化床压力波动趋于稳定的结论。应用多重分形谱以及 EEMD(集合经验模态)分解相结合的方法, 对不同工况下压力脉动信号进行分析。结果表明: 对于相空间重构后的压力信号, 其本征模态函数的分形谱能够很好地表征流化床的压力脉动特性, 这对更深一步了解流化床的流动特性有重要意义。

关键词: 气固两相流; 相空间重构; 集合经验模态分解; 多重分形谱

中图分类号: O359+.2 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.018

引言

流化床由于其优异的传热、传质特性广泛应用于化工、石油、能源等领域, 而在气固两相流的研究当中, 两相流的流动状态又对传热、传质有着非常大的影响, 为能更好了解不同工况下流化床的流动规律, 许多研究者都对流化床的压力脉动信号进行了非线性时频分析。周云龙等人针对气固流化床内气泡的非线性运动^[1-3], 利用多重分形谱来对气固流化床压力脉动信号进行表征, 分析流化床内各流型。钟明寿等人为深入研究爆破地震波特性^[4], 采用分形盒维数和多重分形理论相结合的数学方法, 对地震波信号的分形特征进行了分析。胡爱军等人利用 EEMD 将振动信号分解, 结合峭度最大准则选取 EEMD 分解后的本征模函数, 来提取滚动轴承的故障特征信息, 从而实现滚动轴承故障的精确诊断^[5-6]。刘涛等人采用聚合经验模式分解(EEMD)和 Hilbert 变换(HT)的时频分析方法对轴流泵压力

脉动信号进行分析, 准确提取了其压力脉动信号中的特征信息^[7]。

本研究采用多重分形谱以及集合经验模态分解相结合的方法, 对鼓泡流化床中不同静床高下的压力脉动信号进行了分析研究。

1 实验装置及方法

在东北电力大学气固两相流冷态流化床试验台上^[8], 使用直径(d) 范围在 100 - 600 μm 的 Geldart B 类颗粒透明玻璃珠作为实验物料, 在空气流量不变的情况下(q_v), 增加流化床的静床高(h)。

当 $q_v = 50 \text{ m}^3/\text{h}$, 采集 h 分别为 180、190、200、210、220、230、240 和 250 mm 时风帽入口处的压力脉动信号^[9], 待压力信号稳定后, 利用数据采集器采集并储存, 期间流化床内颗粒的流化状态一直表现为鼓泡床, 实验装置如图 1 所示。

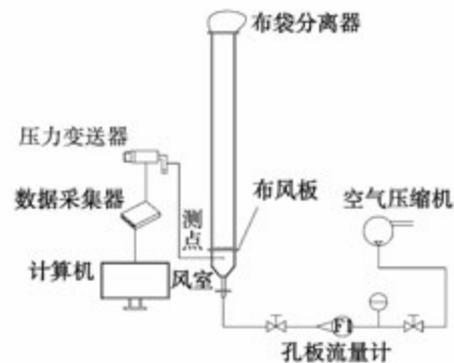


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device

收稿日期: 2014-05-14; 修订日期: 2014-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276033)

作者简介: 周云龙(1960-), 男, 吉林扶余人, 东北电力大学教授, 博士生导师。

2 分析方法

2.1 相空间重构

相空间重构主要目的是通过用单一的系统输出时间序列来构造一组表征原系统动力学特性的坐标分量,从而近似恢复系统的混沌吸引子。采用这种方法可以更多地保留系统信息,并消除重构相空间中各向量的相关性^[10]。

设一维时间序列 $x(n)$, 通过延迟时间 τ 来构造 m 维相空间矢量:

$$X(i) = \{x(i), x(i + \tau), \dots, x[i + (m - 1)\tau]\} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中: M —矢量总数, $M = N - (m - 1)\tau$; m —嵌入维; τ —时间延迟。 m 、 τ 是坐标延迟相空间重构技术的两个关键参数。适当的时间延迟可以消除时间序列的自相关,系统保持非线性结构;而对于嵌入维数 m , 当其满足 Takens 嵌入定理 $m \geq 2d + 1$ (d 为混沌吸引子的维数) 时^[11], 重构后的相空间能够体现原系统的特性,所以只需要确定反映结构的最小 m 值即可,太大的嵌入维数会造成数据的浪费,而太小的嵌入维数又不利于反映真实系统的结构^[12]。图 2 为相空间重构后的压力信号图。

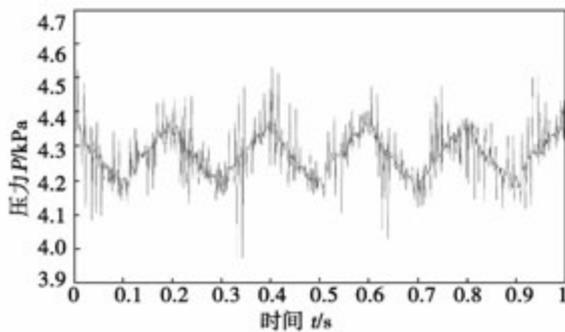


图 2 相空间重构后的信号

Fig. 2 Signal after phase space reconstructed

2.2 集合经验模态分解(EEMD)

传统经验模态分解 (EMD) 具有直观性和自适应性,能够很好地处理非平稳、非线性信号。但是 EMD 方法也具有较严重的模态混叠的缺陷,因此采用改进后的具有抗混叠性的集合经验模态分解 (EEMD) 方法来提取压力信号特征。文献 [13] 对 EEMD 方法的具体分解步骤及原理进行了详细讲述。图 3 为对相空间重构后信号的 EEMD 分解,

IMF1 – IMF8 为本征模态函数。

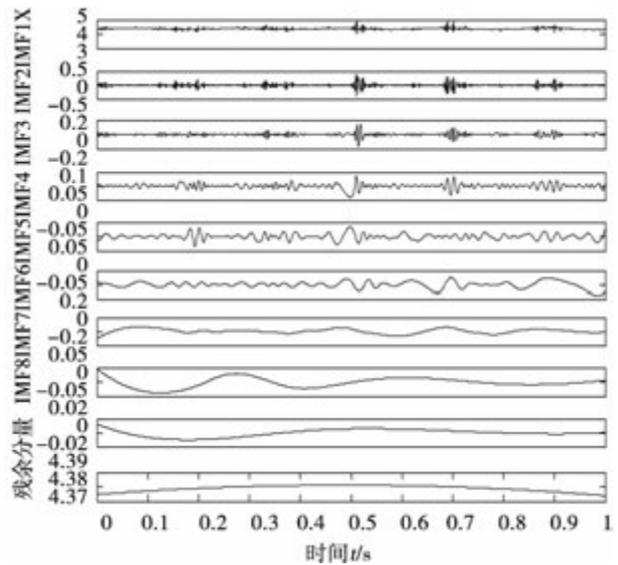


图 3 相空间重构后信号的 EEMD 分解

Fig. 3 EEMD decomposition of signal after phase space reconstructed

2.3 多重分形谱

多重分形是 Mandelbrot 在 1972 年研究湍流时首次提出的^[14],是定义在分形上的对分形结构不规则和不均匀程度的度量^[15]。由 Halsey 等人提出的多重分形谱通过刻画定义于分形集上的归一化测度 (分布) 的奇异特性^[16],来表现其标度性,即用谱函数来描述分形不同层次的特征。

多重分形谱计算:

首先,对数据进行归一化处理,用 P_i 表示,根据式 (2) 生成新的时间序列 $\{P_i, i = 1, 2, 3, \dots, M\}$, 其中 M 为时间序列的长度。

$$P_i = X(i) / \sum_{i=1}^M X(i) \quad (2)$$

用时间分辨率 λ 将归一化的时间序列 P_i 分成许多不重叠的时间间隔,各个时间间隔中所有归一化的信号幅值之和用 $(P_j(\lambda))$ 进行表征,选择适当的 q 值,通过 $P_j(\lambda)$ 计算 q 的配分函数 $\chi_q(\lambda)$ 为:

$$\chi_q(\lambda) = \sum_{j=1}^n P_j^q(\lambda) \quad (3)$$

式中: n —时间分辨率 λ 时所对应的时间间隔总数, $q \in (-\infty, +\infty)$ 且为实数。

研究的时间序列具有多重分形特征,在某无标度区间内满足:

$$\chi_q(\lambda) \propto \lambda^{\tau(q)} \quad (4)$$

式中: $\tau(q)$ —质量指数,可通过对 $\log(\chi_q(\lambda)) - \log(\lambda)$ 双对数曲线中线性区间的点进行最小二乘法回归拟合来估算,若 $\tau(q)$ 与 q 不呈直线关系,而为单峰函数关系,则此时间序列具有多重分形特征。

通过计算物理中的 Legendre 交换可得到 a , $f(a)$, $\tau(q)$ 之间的关系为:

$$a(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}$$

$$f(a(q)) = a(q)q - \tau(q) \tag{5}$$

即通过计算 P_i , 配分函数 $\chi_q(\lambda)$ 和质量指数 $\tau(q)$, 采用最小二乘法回归拟合就可得到 a 和谱函数 $f(a)$ 。式中 a 为奇异性指数,反映了归一化指数概率测度局部的奇异性强度。

多重分形谱的宽度 $\Delta a = a_{\max} - a_{\min}$, 其中 a_{\max} 、 a_{\min} 分别为某一时间分辨率下奇异指数的最大值和最小值。描述了整个分形结构上概率测度分布不均匀性的程度,同时可反映出压力脉动信号的波动程度, Δa 越大表示归一化的时间序列分布越不均匀,信号波动越激烈, $\Delta a = 0$ 则表示归一化时间序列分布完全均匀。

$\Delta f = f(a_{\max}) - f(a_{\min})$ 表示最大、最小概率子集分形维数的差,其中 $f(a_{\max})$ 、 $f(a_{\min})$ 分别表示归一化的波动信号最大概率和最小概率事件随时间 λ 减小而增大的程度。 Δf 则刻画了有关物理量所形成的子集中元素个数在最大、最小处的比例,若 $\Delta f < 0$, 表示归一化的脉动信号处于波谷;反之,表示更多的处于波峰, f_{\max} 是多重分形谱 $a - f(a)$ 中的最大高度,其值大小描述了具有相同概率的单元数随 λ 的变化速度,即可反映波动信号大、小峰值的变化速度^[2]。

3 结果分析

3.1 不同静床高对流化床的影响

通过观察不同静床高下的流化状态,很难直观发现其流动特性的变化,因此我们先简单地对采集到的压力信号进行处理,计算其方差。方差用来表现压力信号的稳定程度,方差越大越不稳定,反之越稳定。

图 4 为不同静床高下所采集到压力信号的方差曲线,结合表 1 来看,当 $h = 180 - 220$ mm 时,流化床内颗粒运动较为激烈,但随着床高的增加,流化状

态的不稳定程度并无太大变化,继续增加静床高度至 230 mm,发现压力信号的方差突然减小并且在 $h = 230 - 250$ mm 表现为较稳定的波动状态。

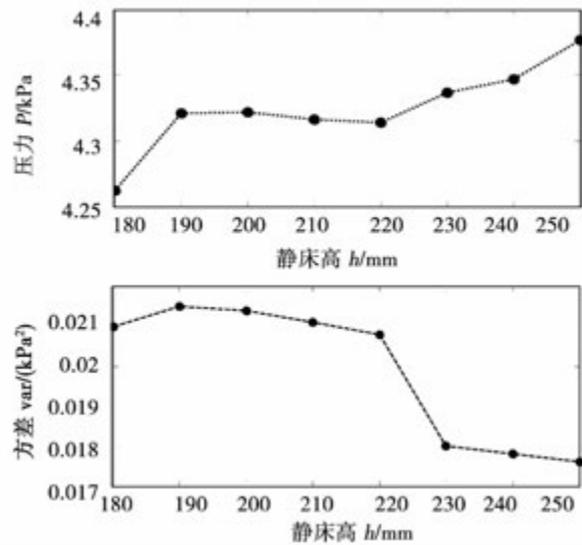


图 4 不同静床高下压力信号的方差曲线

Fig. 4 The variance curve of signals at different bed heights

表 1 不同静床高下压力信号的方差

Tab. 1 The variance of signals at different bed heights

静床高 h /mm	方差 var/kPa^2
180	0.021 0
190	0.021 5
200	0.021 4
210	0.021 1
220	0.020 8
230	0.018 0
240	0.017 8
250	0.017 6

3.2 不同静床高对多重分形谱的影响

图 5(a)、图 5(b) 分别为相空间重构前、后,不同静床高下的多重分形谱,表 2 为对应的分形谱的统计值。结合图表横向来看,重构前压力信号分形谱的 Δa 与 Δf 都是随着静床高的增加而单调递减,然而相空间重构后的 Δa 与 Δf 都是随着静床高的增加上下波动的,并且在 $h = 220$ mm 时分形谱的 Δa 与 Δf 分别达到最小值 0.020 9 和 0.050 5,这表明了重构相空间消除了信号的相关性后,此时的压力信号分布均匀,信号波动平稳,而不是在静床高 $h =$

250 mm 的时候。

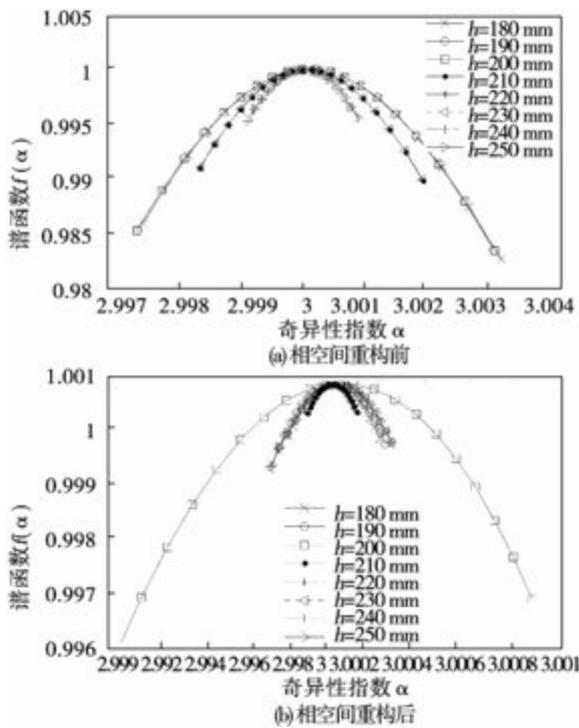


图 5 不同静床高下的多重分形谱

Fig. 5 The multi-fractal spectrum of signals at different bed heights

3.3 不同静床高下 EEMD 分解后的多重分形谱

图 6 为 EEMD 分解后各模态函数的分形谱。对比观察图 6 和图 5 (b) 的分形谱,发现第 3 个本征模态函数 IMF3 与分解前的分形谱最为相似,能够

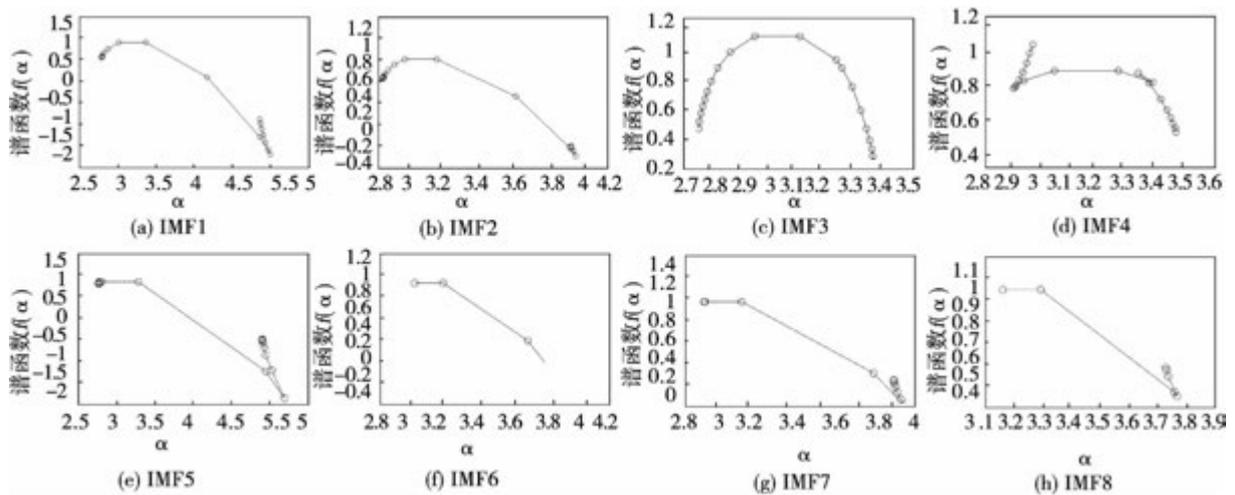


图 6 EEMD 分解后各模态函数的分形谱

Fig. 6 The multi-fractal spectrums of signal after EEMD decomposition

最大体现原信号的分布特征。表 3 为各模态函数的 $\Delta\alpha$ 与 Δf 值,其中第 4 个本征模态函数 IMF4 的 $\Delta\alpha$ 与 Δf 值最小,但却不能很好保留原信号的分布特征。由此看来,IMF3 相对于 IMF4 来说,不但能很好保留原信号的分布特征,且信号波动稳定,能够最大程度地排除其它信号的干扰。

表 2 多重分形谱的特征值

Tab. 2 Characteristic values of the multi-fractal spectrums

静床高 h/mm	重构前		重构后	
	$\Delta\alpha/\%$	$\Delta f/\%$	$\Delta\alpha/\%$	$\Delta f/\%$
180	0.590	1.743	0.040 4	0.098 8
190	0.590	1.661	0.046 7	0.113 5
200	0.588	1.656	0.183 3	0.488 3
210	0.369	1.021	0.021 8	0.052 5
220	0.366	1.014	0.020 9	0.050 5
230	0.366	1.014	0.053 2	0.149 6
240	0.184	0.476	0.052 9	0.148 9
250	0.181	0.469	0.052 2	0.146 7

表 3 EEMD 分解后各模态函数分形谱的特征值

Tab. 3 Characteristic values of the multi-fractal spectrums after EEMD decomposition

EEMD 分解	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
$\Delta\alpha$	2.469	1.283	0.724	0.563	2.332	1.245	0.970	0.820
Δf	2.896	1.370	.798	0.892	1.604	1.474	0.941	0.177

4 结 论

(1) 在鼓泡流化床当中,相空间重构前的压力信号分形谱特征值 Δa 、 Δf ,与压力信号的方差值传达了相同的信息,随着流化床静床高的增加变小,压力波动稳定,信号分布均匀。

(2) 通过对压力信号进行相空间重构,对比分析重构前后的多重分形谱特性,得到了压力信号的波动并不是随着静床高的增加一直变得越加稳定。

(3) 分析 EEMD 分解后的各本征模态函数的分形谱特性,确定最能表征压力信号的模态函数。

参考文献:

- [1] 周云龙,何强勇.气固流化床压力脉动信号的多重分形分析[J].自动化仪表,2010,31(7):5-7.
ZHOU Yun-long, HE Qiang-yong. Fractal pressure signals in gas-solid fluidized bed [J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(7): 5-7.
- [2] 周云龙,范振儒.气固流化床流型空间图像信息多重分形特征分析[J].化学工程,2010,38(4):25-28.
ZHOU Yun-long, FAN Zhen-ru. Flow regime of gas solid fluidized bed space image information multifractal analysis of [J]. Chemical Engineering, 2010, 38(4): 25-28.
- [3] 周云龙,李洪伟.气液两相流型图像信号多尺度分形特征分析[J].工程热物理学报,2011,32(增刊1):126-129.
ZHOU Yun-long, LI Hong-wei. Multi scale fractal feature of gas-liquid two-phase flow pattern image signal analysis [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(Supplement 1): 126-129.
- [4] 钟明寿,龙源,谢全民.基于分形盒维数和多重分形的爆破地震波信号分析[J].振动与冲击,2010,29(1):7-11.
ZHONG Ming-shou, LONG Yuan, XIE Quan-min. The blasting seismic wave signal box fractal dimension and multifractal analysis based on [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 7-11.
- [5] 胡爱军,马万里,唐贵基.基于集成经验模态分解和峭度准则的滚动轴承故障特征提取方法[J].中国电机工程学报,2012,32(11):106-111.
HU Ai-jun, MA Wan-li, TANG Gui-ji. Feature extraction of rolling bearing's fault based on ensemble empirical mode decomposition and kurtosis criterion [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 106-111.
- [6] 唐贵基,王晓龙.基于 EEMD 降噪和 1.5 维能量谱的滚动轴承

故障诊断研究[J].振动与冲击,2014,33(1):6-10.

TANG Gui-ji, WANG Xiao-long. Research on diagnosis of rolling bearing's fault based on EEMD noise reduction and 1.5 dimension energy spectrum [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1): 6-10.

- [7] 刘涛,黄其柏.基于 EEMD 和 HT 的轴流泵压力脉动特征信息提取[J].机电工程,2012,29(3):278-281.
LIU Tao, HUANG Qi-bai. Feature information extraction of pressure pulsation in axial flow pump based on EEMD and HT [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(3): 278-281.
- [8] Zhou Y L, Wang F. Envelope spectrum analysis of pressure fluctuation based on wavelet decomposition [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 448: 3392-3396.
- [9] 陈鸿伟,姜华伟,高建强.鼓泡流化床风帽压力波动特性分析[J].中国电机工程学报,2011,31(23):1-7.
CHEN Hong-wei, JIANG Hua-wei, GAO Jian-qiang. The bubbling fluidized bed air pressure fluctuation characteristics analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(23): 1-7.
- [10] 王妍,徐伟. Lorenz 系统中时间序列的相空间重构方法与特性[J].振动工程学报,2006,19(2):277-282.
WANG Yan, XU Wei. Methods and performance of phase space reconstruction of time series in Lorenz system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(2): 277-282.
- [11] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence [M]. Warwick, springer berlin heidelberg: Dynamical Systems and Turbulence, 1981: 366-381.
- [12] Kennel M B, Brown R, Abarbanel H D I. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction [J]. Physical Review A, 1992, 45(6): 3403.
- [13] Wang G, CHEN X Y A O, Qiao F L, et al. On intrinsic mode function [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(3): 277-293.
- [14] 石博强,申焱华.机械故障诊断的分形方法—理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2001.
SHI Bo-qiang, SHEN Yan-hua. Fractal method of the mechanical fault diagnosis—Theory and practice [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [15] 都国雄,宁宣熙.上海证券市场的多重分形特性分析[J].系统工程理论与实践,2007,27(10):40-47.
DU Guo-xiong, NING Xuan-xi. Multi fractal characteristic of Shanghai stock market [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2007, 27(10): 40-47.
- [16] Peters E E. Fractal market analysis: Applying chaos theory to investment and economics [M]. John Wiley & Sons, 1994.

(姜雪梅 编辑)

and premixed combustion. The performance of hybrid combustor has been studied in different conditions. The catalytic-premixed hybrid combustor model has been established with the detailed reaction mechanism and 2D distribution parameters flow model. The temperature distribution and NO_x emission at design and off-design conditions are studied using the model, and the model results are compared with the experiment results in reference^[11] at the design point. The results show that, at the design point, the performance of hybrid combustor is basic? agreement with the experimental result in the reference^[11]. There is no major fluctuations of the temperature distribution at different operation conditions, NO_x is mainly from the pre-combusotr. The NO_x emission is always lower than 15 mg/m^3 which achieves the ultra low emission standard. **Key words:** catalytic combustion, NO_x , mixed combustor

大型水氢氢汽轮发电机重复级轴流风扇加弯设计数值研究 = **Numerical Study on Increasing Bending Design of Repeat Multistage Axial Fan of Large Water-hydrogen-hydrogen Turbogenerator** [刊,汉] HU Lei, YUAN Yi-chao(School of Energy & Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), ZHANG Xiao-hu, CUI Yang-yang(Technology Department, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd Generator Plant, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -558 -563

The design to increase the blade loading factor of a repeat multistage axial flow fan from normal 0.42 to highly loaded 0.55 is described by using the large camber angle blade technology upon the designated camber line. A three-dimensional viscous solver is used to model the flows in the highly-loaded and normal loaded stages over its operation range. The results show that under the design condition the static pressure rise can be increased by 19.2 percent. Since the rotor hub flow stalls, and separation vortex extends over the rotor hub region. The backflow, which occurs along the stator hub-suction surface, changes the exit flow from the prescribed axial direction, efficiency of the highly loaded fan stage is decreased by 0.3 percent. **Key words:** Stage loading factor large camber angle blade technology, Numerical simulation, Corner separation stage efficiency

基于分形谱和 EEMD 的鼓泡床压力脉动分析 = **An Analysis on Pressure Fluctuation of Bubbling Fluidized Bed Based on Fractal Spectrum and EEMD** [刊,汉] ZHOU Yun-long(School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012), WANG Fang(Changchun City Heating(group) Co. Ltd, Jilin Changchun, Post Code: 130000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -564 -569

This paper, based on self-designed fluidized bed experimental platform, aiming to collect the pressure fluctuation signals at entrance of the hood, analyzes the multi-fractal spectrums of pressure fluctuation signals. It can be obtained that when the air mass flow is constant, with the increase of static bed height, the state of fluidized bed is more and more stable. Combine multi-fractal spectrum with the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), the pressure fluctuation signals under different conditions are analyzed. The results reveal that: after the reconstruction of phase space, the intrinsic mode functions of multi-fractal spectrum can well characterize the features of pressure fluctuation in fluidized bed, which is important for a deeper understanding of the flow characteristics in fluidized bed. **Key words:** gas-solid two-phase flow, the phase space reconstruction, ensemble empirical mode decomposition, multi-fractal spectrum

U-Beam 惯性分离器的三维数值模拟 = **3D Numerical Simulation of U-Beam Inertia Separator** [刊, 汉] CHEN Yang, LIU Bai-qian, TAN Pei-hai (School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, China, Post Code: 100083) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 570 - 574

3D Flow field and gas-solid separation performance of U-Beam inertia separator has been simulated with commercial software in order to decrease power consumption of CFB boiler induced-draft fan. Reynolds-Stress model is selected after comparing the results of 3D simulation, which shows as followings. There is a upwind effect at upper part of U-Beam; There is a bottom effect enhancing particle separation; There is a certain operation air speed in U-Beam gas-solid separator that gives the lowest pressure coefficient; Most of dust particle has been separated from the first 2 row U-Beam. These results reveal that the reason why U-Beam inertia separator has the lower separating efficiency is due to a stronger turbulent fluctuation within U-Beam. **Key words:** U-Beam inertia separator, separating efficiency, pressure coefficient, simulation

高温预混燃烧对湍流积分尺度影响的 PIV 研究 = **PIV Study on Effect of High Temperature Premixed Combustion on Turbulence Integral Scale** [刊, 汉] GONG Zhi-jun, CHEN Wei-peng, WU Wen-fei (Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, Post Code: 014010) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 575 - 581