

电站煤粉锅炉炉内压力波动的非线性特性分析

牛蔚然¹, 邱 燕¹, 田茂诚¹, 刘志超²

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院 热能研究所, 山东 济南 250021)

摘 要: 电站燃煤锅炉炉内过程是一个复杂的非线性时变过程, 因此在传统的线性分析技术基础上引入非线性分析方法具有一定的现实意义。通过对可反映炉内瞬态过程的炉内压力信号的统计检验分析, 确定炉内压力波动序列分布不服从正态分布, 而是服从具有尖峰胖尾特性的分形分布; 多变量影响造成的不可预测的压力间断性跳跃, 是炉内压力波动服从分形分布特征的根本原因。利用最大似然估计方法对压力波动的分形分布参数进行了估算, 计算表明炉内压力波动信号的方差无统计意义。利用经典的 R/S 统计分析工具, 计算得到炉内压力波动序列的 Hurst 指数, 分析了炉内压力波动情况与其 Hurst 指数间的关系, 这可为锅炉燃烧优化调整提供有益的指导。

关 键 词: 煤粉锅炉; 压力波动; 分形分布; Hurst 指数

中图分类号: TM623.94 文献标识码: A

引 言

非线性科学是 20 世纪下半叶发展形成的一门新兴学科, 其中的分形、混沌及耗散结构理论为研究各类非线性系统提供了深厚的理论基础和有效的分析工具。在电站煤粉锅炉运行中, 其炉内过程由于受到诸如炉型、煤质、燃烧装置和制粉装置以及运行方式等大量可变因素及其交互作用的影响, 使得电站煤粉锅炉炉内过程实质是一个复杂的非线性时变过程。将非线性科学引入炉内过程研究可进一步加深对炉内过程规律性的认识, 对指导电站锅炉优化调整, 优化锅炉设计具有一定的现实意义。

1 炉内过程非线性特征量的选取

对于实际运行中的一台锅炉, 炉型、燃烧装置和制粉装置等均已固定, 影响炉内过程的运行参数主要有: 锅炉出力, 煤质变化, 投粉方式, 配风方式, 风量均匀性等, 但这些参数均无法用来反映炉内的瞬态工况。

火检强度, 炉内温度, 炉内压力是实际中常用的监测炉内瞬态过程的参数。火检强度, 根据火检探头安装位置的不同, 可反映出探头监测区域的局部火焰强度。实炉的火检一般安装在煤粉喷口附近, 受煤粉气流的影响较大, 如果用来反映瞬态炉内过程会有较大的噪声干扰; 另外受实际灵敏度设定的限制, 一般在负荷较低、炉内温度低时, 其参数变化较为显著, 而当燃烧稳定、炉内温度较高后, 参数的变化就不再显著; 炉内温度, 理论上可以很好地反映炉内燃烧状况, 但由于炉内温度可达 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 以上, 测点的设计及安装要求均较高, 因此实炉燃烧区域均不设温度测点。对于距燃烧区域较远的温度测点, 由于受到锅炉汽水侧换热的作用, 其变化已无法精确反映炉内瞬态过程; 炉内压力信号作为锅炉运行过程中重要的监视信号, 测点安装方便, 瞬态反应灵敏, 实炉中有大量测点布置, 是研究炉内过程的理想参量。因此本文选择炉内压力信号作为研究炉内过程非线性特性的特征量。

2 炉内压力信号的正态性检验

2.1 正态性检验方法

一般正态性检验有三种方法:

(1) 直方图检验。直方图可显示数据的频率分布, 是正态性检验的一种直观方法。如果压力信号的直方图与正态分布的概率密度函数相差较大, 就可直观判断压力波动序列不服从正态分布。

(2) Jarque-Bera 检验(下称 JB 检验)。Jarque-Bera 检验是对样本偏度和峰度的联合检验。对于正态分布数据, 偏度接近于零, 峰度接近于 3。在被检序列服从正态分布假设成立的情况下, JB 统计量服从自由度为 2 的 χ^2 分布。

(3) Kolmogorov-Smirnov 检验(下称 KS 检验)。该检验为拟合优度型检验, 它可检验来自总体的样

本分布函数是否为正态分布函数。若检验统计量大于临界值,则可确认所检验的样本不服从正态分布。

2.2 实炉压力波动信号的取样及正态性检验

对某 300 MW 锅炉满负荷稳定运行期间的炉内压力进行取样, 采样间隔 1 s, 每次采样时间为 10

min, 共采集 13 个样本。各样本的基本统计量以及正态性检验结果如表 1 所示。样本 1、2、3 炉内压力波动曲线如图 1 所示; 样本 1 直方图如图 2 所示, 其中图 2 中的曲线为相应的正态分布曲线。

表 1 炉内压力序列的基本统计量及 JB 检验、KS 检验结果

样本号	样本总数	均值	标准差	偏度	峰度	JB 统计量	KS 统计量
样本 1	600	-62.55	69.62	0.94	8.96	974.75	3.41
样本 2	600	-71.99	48.58	-0.92	13.38	2 770.63	3.00
样本 3	600	-21.15	49.84	-0.34	3.09	11.47	1.81
样本 4	600	56.55	61.00	0.63	7.93	645.54	2.05
样本 5	600	-36.12	69.53	0.75	3.11	56.34	3.03
样本 6	600	-81.79	62.86	-0.11	10.02	1 229.74	4.38
样本 7	600	-78.48	72.27	-0.40	7.78	586.92	4.03
样本 8	600	-78.12	82.46	0.80	10.86	1 605.22	3.63
样本 9	600	-85.32	52.59	-0.50	10.63	1 478.47	3.02
样本 10	600	-77.32	51.14	-0.13	9.96	1 210.93	3.05
样本 11	600	-78.49	38.98	0.95	11.28	1 803.22	2.27
样本 12	600	-80.92	35.25	0.58	13.09	2 572.45	2.90
样本 13	600	-86.42	30.39	-0.78	9.14	1 000.44	2.40

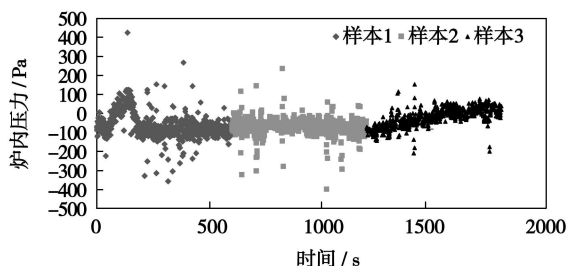


图 1 样本 1、2、3 炉内压力波动曲线

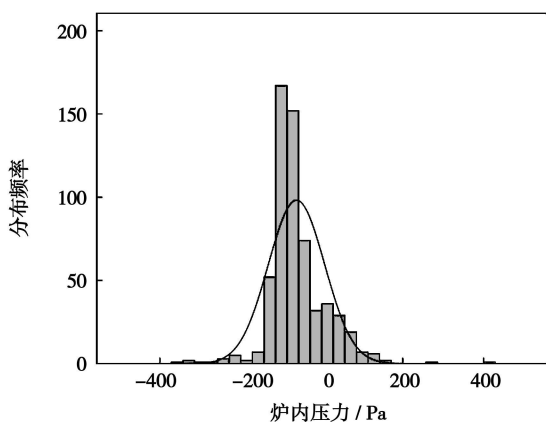


图 2 样本 1 压力分布直方图

综合表 1 可知, 各炉内压力样本的峰度值均远大于 3, 样本分布出现显著的尖峰。各炉内压力样

本的偏度分布在零值附近, 略有左偏或右偏趋势; 根据 χ^2 分布及正态分布特性可知, JB 统计量在显著性水平 1% 时对应的检验临界值是 9.210 3; KS 统计量在显著性水平 1% 时对应的临界值是 0.029 2。表中可见各炉内压力样本的 JB 检验和 KS 检验统计量均远大于临界值, 因此可知各样本均不服从正态分布。这与图 2 中直方图的直观判断结果相同。

2.3 炉内压力波动的分形分布分析

观察炉内压力分布直方图可知, 炉内压力分布服从一个比正态分布在均值处有更高的尖峰和较胖的尾部的分布形式, 这正符合分形分布特征。

2.3.1 分形分布及其特点

对于一般的统计问题, 均值和方差是最为常用的描述性统计量。然而, 分形分布的尖峰胖尾特性, 会导致分形分布的有些均值和方差不存在, 这是分形分布与其它分布形式间最大的区别。

为了描述分形分布的特征函数, 通常需确定 4 个参数, 即 α 、 β 、 γ 、 δ 。 α 是特征指数, 取值范围为 $[0, 2]$ 。它表明分形分布的特征, 决定分布的尖峰和胖尾程度。 α 值越小, 尾部越胖; β 是偏斜指数, 取值范围为 $[-1, 1]$ 。它决定分形分布的不对称程度。 β 的绝对值越大, 分布的偏斜程度就越大; γ 是规模变化指数, 取值范围为 $(0, +\infty)$ 。它控制分形分布曲线的宽度; δ 是位置指数, 取值范围为 $(-\infty, +$

∞)。它表示分形分布对称的位置。

$\alpha=2$ 时分形分布为正态分布, 均值和方差都存在; $1 < \alpha < 2$ 时, 均值存在, 方差不存在; 当 $0 < \alpha \leq 1$ 时, 均值和方差均不存在。

分形分布中均值或方差不存在的特性是由于对应样本序列中不连续性跳跃引起的, 这种跳跃直接导致样本均值或样本方差出现跳跃, 即使在采样样本数目趋于极限的情况下, 也会使样本均值或方差不收敛。与正态分布描述大量连续的小变化不同的是, 分形分布注重的是小量不连续的大变化。

2.3.2 炉内压力的分形分布

对炉内压力而言, 任何运行工况的变化, 如送、引风机、制粉系统、燃烧配风的调整、燃煤煤质的改变, 均会对其造成影响, 进而导致压力时间序列的不连续性跳跃。在锅炉正常运行过程中, 对炉内压力的要求是尽可能稳定在允许范围内, 并不期望其稳定于某个值。多变量影响造成的不可预测的间断性跳跃是炉内压力服从分形分布的直接原因。

为考察炉内压力波动的分形分布特征, 利用最大拟然估计方法对压力波动的分形分布参数进行了估算, 结果如表 2 所示。

表 2 炉内压力序列的分形分布参数计算结果

样本号	α	β	γ	δ
样本 1	1.44	1.00	31.14	-78.14
样本 2	1.65	-0.14	21.50	-70.22
样本 3	2.00	0	39.04	-14.65
样本 4	1.98	1	34.80	56.16
样本 5	2.00	0	53.12	-56.17
样本 6	1.21	0.23	18.34	-84.51
样本 7	1.04	-0.02	22.03	-77.96
样本 8	1.25	-0.01	29.92	-80.52
样本 9	1.53	-0.02	21.44	-82.91
样本 10	1.39	0.06	20.06	-78.50
样本 11	1.70	0.10	19.02	-80.91
样本 12	1.62	0.04	16.44	-80.72
样本 13	1.68	-0.21	16.45	-84.84

除样本 3、5 外, 其余各样本的 α 均在 (1, 2) 区间内, 并可知, 炉内压力波动序列的均值基本具有统计意义, 而其方差无统计意义, 这是进行炉内压力信号统计处理时需要注意的重要信息。尽管样本 3、5 的 α 为 2, 但考虑到表 1 中样本 3 和样本 5 的检验值, 认为样本 3 和样本 5 应属于较接近正态分布的分形分布。

3 炉内压力的 R/S 分析

为了深入探索炉内压力信号中的非线性特性, 引入经典 R/S 分析方法 (Classical Rescaled Range, 或称重标极差法), 以期揭示其内在的统计规律。

经典 R/S 分析方法是一种适用广泛的非参数统计方法, 它的最大优势就是不必假定时间序列的分布特征, 无论是正态的还是非正态的, 其分析结果的稳健性均不受影响。

3.1 R/S 分析的计算方法

将长度为 N 的时间序列 $\{R_t\}$ 等分成长度为 n ($n \geq 3$) 的 A (取 N/n 的整数部分) 个连续的子序列, 首先计算每个长度为 n 的子序列的均值, 偏离子序列均值的累积离差, 累积离差的极差 R_n , 累积离差的标准差 S_n , 其次计算重标极差 $(R/S)_n = R_n/S_n$, 然后求对所有子序重标极差序列的均值 $(R/S)_n$ 。最后变化子序列的长度 n , 重复以上计算, 得到对应 n 的序列 $(R/S)_n$ 。以 $\log(n)$ 为自变量, $\log(R/S)_n$ 为因变量, 采用最小二乘法进行拟合估计, 所得自变量的系数 H 即为所求的 Hurst 指数。

3.2 炉内压力序列的 Hurst 指数

对实炉的 13 个压力序列计算 Hurst 指数, 计算结果汇总如表 3 所示。

表 3 压力序列的 Hurst 指数

试验工况	Hurst 指数	样本直观形态
样本 1	0.673	整体有波动
样本 2	0.387	整体基本稳定
样本 3	0.623	整体有增加趋势
样本 4	0.616	整体有增加趋势
样本 5	0.631	整体有降低趋势
样本 6	0.269	整体基本稳定
样本 7	0.326	整体基本稳定
样本 8	0.395	整体基本稳定
样本 9	0.319	整体基本稳定
样本 10	0.393	整体基本稳定
样本 11	0.327	整体基本稳定
样本 12	0.275	整体基本稳定
样本 13	0.280	整体基本稳定
样本 1+2	0.626	整体有波动
样本 2+3	0.592	整体有增加趋势
样本 1+2+3	0.626	整体有增加趋势
Half 样本 1+2+3	0.598	整体有增加趋势
Half * Half 样本 1+2+3	0.546	整体有增加趋势

注: 样本 1+2 表示样本 1 和样本 2 的合成序列。样本 2+3 样本 1+2+3 分别代表各子样本的合成样本。Half 代表原样本的采样频率减半后获得的样本。

3.3 炉内压力序列 Hurst 指数分析

参考 Hurst 指数的性质, 对比表 3 中 Hurst 指数和样本直观形态, 可知在样本范围内:

(1) 所有炉内压力序列的 H 均不等于 0.5, 表明所有序列均属于非随机序列。

(2) 部分炉内压力序列的 H 大于 0.5, 其变化范围为 0.616 ~ 0.673, 表明该炉内压力样本存在持续性变化, 即该炉内压力样本在较长时间上存在增加或降低的趋势。 H 值较大表明压力波动的持续性较强, 在相同采样周期内, 压力波动较大。

(3) 部分炉内压力序列的 H 小于 0.5, 其变化范围为 0.268 ~ 0.387, 表明该炉内压力样本存在反持续性变化, 即在当前的下降趋势意味着将来的上升趋势。 H 值越小, 说明炉内压力的反持续行为强度越大, 炉内压力序列的均值回复性越强, 炉内压力运行越稳定。

3.4 炉内压力序列的多重 Hurst 指数分析

综合考察连续采样的样本 1、2、3, 对比样本散点趋势图 1 和计算的 Hurst 指数可知:

(1) Hurst 指数可以较为精确地描述系统在采样周期内的压力波动情况。对比样本 1 和 3, 样本 1 为在采样周期内发生了一次压力上升和下降的全过程, 样本 3 为在采样周期内压力一直上升过程。Hurst 指数显示样本 1 的压力波动大于样本 3, 这为我们判断对比不同时期压力波动情况提供了科学依据。改变采样周期, 对比样本 1+2 与样本 2+3, 可以获得相同的结论。

(2) 局部 Hurst 指数和整体 Hurst 指数, 由于考察的采样时间不同, Hurst 指数也不尽相同, 但整体 Hurst 指数是局部 Hurst 指数的综合显示, 可综合反映整体的变动趋势及程度。局部 Hurst 指数作为局部变动的特征量, 表征的是局部的变动情况。对比分析样本 1、2、3 及样本 1+2、2+3、1+2+3 的 Hurst 指数, 可知炉内压力波动是一个局部稳定, 整体波动的综合过程。

(3) 对比原始及降频后的炉内压力样本的 Hurst 指数可以发现, 降低采样频率, 压力波动的 Hurst 指数也随之降低。这表明不同采样频率下, 能够描述的系统波动信息量是不同的, 在进行具体问题分析时, 需要注意对比的样本应具有相同的采样频率。

4 结 论

通过对炉内压力序列的正态性检验和分形特性的分析及计算可知:

(1) 炉内压力波动序列作为一种非线性信号, 不服从于正态分布, 而是服从于具有尖峰胖尾特性的分形分布。

(2) 炉内压力时间序列的 Hurst 指数作为压力波动的一种稳健统计量, 可以反映炉内压力变动的趋势和大小, 具有明确的物理意义。完全可以将其作为一个监视参数应用到实际锅炉燃烧优化调整中, 指导电站锅炉优化运行操作。

(3) 通过多重 Hurst 指数分析, 可知整体 Hurst 指数是局部 Hurst 指数的综合描述, 不同采样频率对应的 Hurst 指数所表述的整体趋势一致, 但由于不同采样频率表现系统局部波动能力的不同, 低频采样对应的 Hurst 指数偏低。

参考文献:

- [1] 马少华, 华莹, 李少白. 基于相空间重构的锅炉炉膛火焰信号分析[J]. 热能动力工程, 2007, 22(4): 440-442
- [2] 唐晓军, 刘勇, 杨宏顺. 等. 燃煤流化床燃烧声波混沌特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(1): 63-69.
- [3] 周臻, 张韵辉. 锅炉再热汽温时间序列的混沌分析[J]. 华中电力, 2006, 6: 21-24
- [4] NOLAN J P, PANORSKI A K. Data analysis for heavy tailed multivariate samples[J]. Commun Statist—Stochastic Models, 1997, 13(4): 687-702.

· 书 讯 ·

《能源工程管理》

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分九章, 主要内容包括能源技术知识(能源知识概述、能源的转换与利用以及节能技术), 一般工业企业知识, 技术经济分析基础, 工程项目经济效益的评价原则, 固定资产的折旧及重置决策, 工程项目不确定性分析及项目可行性分析。本书可作为高等院校能源动力类专业本科生相关课程的教材, 也可作为同类专业专科学士、成人教育、函授大学生的教材, 还可作为从事能源管理、能源经济技术分析工作的技术人员的参考用书。该书由中国电力出版社于 2007 年 11 月出版。

of the corrugated tube bundles. **Key words:** flow externally sweeping across corrugated tube bundles, forced convection, numerical simulation, intensified heat transfer

电站煤粉锅炉炉内压力波动的非线性特性分析= **Analysis of the Non-linear Characteristics of In-furnace Pressure Fluctuations of a Pulverized-coal-fired Utility Boiler**[刊, 汉] / NIU Wei-ran, QIU Yan, TIAN Mao-cheng (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), LIU Zhi-chao (Thermal Energy Research Institute, Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250021)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 457 ~ 460

The in-furnace process of pulverized-coal-fired utility boilers is a complex non-linear time-dependent one. As a result, to introduce a non-linear analytic method on the basis of the traditional linear analytic technologies is of definite realistic significance. Through a statistical inspection and analysis of the in-furnace pressure signals which are capable of reflecting the in-furnace transient process, it has been determined that the in-furnace pressure fluctuation sequence distribution assumes a fractal one featuring a pointed peak and a wide tail instead of a normal distribution. The unpredictable intermittent leap of pressure caused by the influence of multiple variables constitutes the root cause of the in-furnace pressure fluctuations complying with fractal distribution characteristics. By utilizing the maximal likelihood estimation method, estimated were the fractal distribution parameters of the pressure fluctuation. The calculation results show that the variance of the in-furnace pressure fluctuation signals is of no statistical significance. By using the classic R/S statistical tool, the Hurst exponent of the in-furnace pressure fluctuation sequence was calculated and the relationship between the in-furnace pressure fluctuation condition and the Hurst exponent, analyzed. The foregoing can provide useful guidance for the optimization and adjustment of combustion in boilers. **Key words:** pulverized coal boiler, pressure fluctuation, fractal distribution, Hurst exponent

超临界机组燃烧系统的自抗扰控制= **Active Disturbance-resistant Control of a Combustion System for Supercritical Units**[刊, 汉] / GUAN Zhi-min, LIN Yong-jun, WANG Bing-shu (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), WEI Wen-chao (Baoding Sino Simu Technology Co. Ltd., Baoding, China, Post Code: 071051)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 461 ~ 465

Mainly studied was the application of novel and practical non-linear active disturbance-resistant control (ADRC) technologies in combustion control systems of thermal power plants. In the light of such specific features of combustion control systems of thermal power plants as a big hysteresis, large inertia and uncertainty of dynamic characteristics changing with operating conditions, an active disturbance-resistant control scheme was presented. With the combustion control system of a 600 MW supercritical coal-fired unit serving as a controlled object, a modular controller was established on a real-time simulation platform STAR-90 for the thermodynamic process control of power plants, and a load reduction, addition of 10% disturbance and RB (Run Back) test were performed respectively. The test results indicate that compared with a PID (Proportional, Integral and Differential) control system, a fuel quantity control system based on ADRC technologies boasts a better control quality and disturbance-resistant ability. **Key words:** supercritical unit, combustion system, self disturbance-resistant control, STAR-90 simulation platform

基于极值搜索控制的电站锅炉在线燃烧优化= **On-line Combustion Optimization of a Utility Boiler Based on an Extremum-search Control**[刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Jiong (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 466 ~ 469

An on-line combustion optimization method was presented for utility boilers based on an extremum-search control. First, the authors has analyzed the fundamental principle of the extremum-search control and pointed out that its essence lies in