

基于现场数据的中速磨煤机动态建模研究

张小桃, 倪维斗, 李 政, 郑 松

(清华大学 热能系, 北京 100084)

摘 要: 基于现场数据, 结合电厂磨煤机系统的工作原理, 通过对其控制系统分析, 建立了磨煤机出口温度和磨煤机入口空气流量的状态空间动态数学模型。在不同的变工况过程中, 以磨煤机冷风门和热风门开度为输入, 所建立的磨煤机出口温度和入口空气流量的动态模型精确度较高, 比较真实地反映了磨煤机的实际运行状况。由于系统本身具有强耦合性, 所建立的磨煤机模型可以为控制系统的优化配置和改善控制品质打下良好的基础。

关 键 词: 磨煤机; 出口温度; 入口空气流量; 动态建模

中图分类号: TK223.25; TP273 文献标识码: A

1 引 言

现代化的电厂装配着庞大的 DCS 系统, 日积月累采集了大量的运行数据, 利用采集的历史数据建立电站主要设备或过程的动态数学模型是有待开发的比较新颖的研究课题。华能福州电厂配备的是直吹式制粉系统。直吹式制粉系统的运行工况直接影响着锅炉的运行, 其特性与锅炉的特性有着很大的关系。虽然文献[1]与文献[2]中建立了磨煤机出口温度的机理模型, 但对于实际的运行机组还需要确定大量的系数, 真正应用起来并不方便; 并且所建立的模型只是从机理出发, 考虑磨煤机的输入量的变化, 并没有从控制角度去考虑建立模型, 因此, 所建立的磨煤机出口温度机理模型也不适用于磨煤机的控制系统设计。文献[3]建立了中间储仓式制粉系统钢球磨煤机的动态数学模型。但真正建立直吹式磨煤机动态模型的文献并不多。

对于中速直吹式制粉系统, 其工作过程是随着机组负荷的变化而改变磨煤机的给煤量, 磨煤机运行状况的好坏直接影响着机组运行的安全性和经济性。磨煤机出口温度是磨煤机运行中主要的监控变量, 温度过高易引起爆炸, 温度过低则煤粉湿度大,

影响燃烧效率。磨煤机入口空气流量与磨煤机给煤量保持一定的比例, 在负荷变化过程中, 由于给煤流量的变化而引起磨煤机入口空气流量的改变。建立其有效的动态数学模型并用于控制系统的设计将有利于整个机组的运行和安全。

2 磨煤机工作原理及其控制系统图

华能福州电厂锅炉制粉系统采用正压直吹式, 配碗式中速磨煤机, 其结构图如图 1 所示。

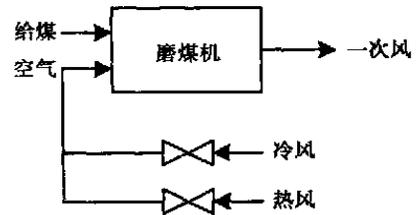


图 1 中速磨煤机系统

磨煤机控制系统工作原理: 当磨煤机处于正常运行阶段时, 磨煤机出口温度控制系统的任务是保证磨煤机出口的风和煤粉混合物温度稳定在设计值, 通过调节冷风门而得以控制的。而磨煤机入口空气流量是保持与磨煤机给煤量成一定的比例, 通过调节热风门而改变的。其控制系统可以分为:

(1) 磨煤机出口温度控制系统

磨煤机出口风温 θ_2 为输出量, 以其输出信号作为反馈信号与磨煤机出口风温的给定值 θ_{2g} 进行比较后, 作为磨煤机冷风挡板控制器的输入信号用于调节冷风量(见图 2)。

(2) 磨煤机入口空气流量控制系统

由于在锅炉机炉燃烧控制系统中要保持给煤量 B 和磨煤机入口空气流量 V_1 为一定的比值, 当给煤

收稿日期: 2004-03-01; 修订日期: 2004-09-24

作者简介: 张小桃(1967-), 女, 河南焦作人, 清华大学博士研究生。

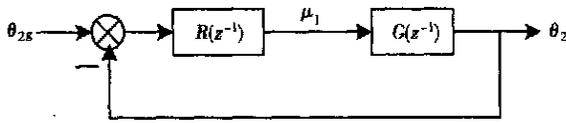


图 2 磨煤机出口温度控制系统图

量变化时, 对应的空气流量也要做相应的变化, 因此取给煤量的函数值作为磨煤机热风挡板控制器的给定值输入信号, 其与实际的磨入口空气流量相比较后, 进入热风调节器来调节进入磨煤机的热风量, 从而来控制进入磨煤机的空气总量(见图 3)。

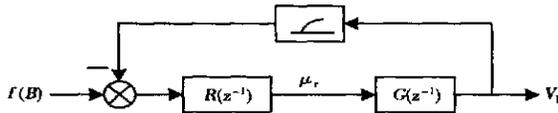


图 3 磨煤机入口空气流量控制系统图

(3) 具有强耦合性的多变量系统

由于被控对象的输入信号冷风 μ_1 和热风挡板开度 μ_r 与其输出信号磨煤机出口风温和入口空气流量有着强耦合关系, 实际的控制系统如图 4 所示。

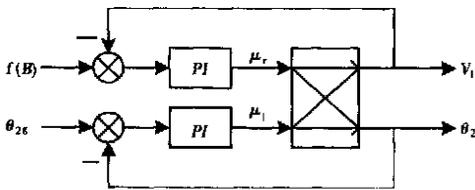


图 4 磨煤机控制系统图

这是一个很明显的双输入双输出系统。其中的输入输出为:

$$u(t) = \begin{Bmatrix} \mu_r \\ \mu_1 \end{Bmatrix}, y(t) = \begin{Bmatrix} V_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}$$

对于多变量的建模问题, 首先要看输入变量的相关性。从磨煤机运行机理来分析, 冷风挡板开度 μ_1 是由磨煤机出口温度信号决定的; 而热风挡板开度 μ_r 是由给煤流量和磨煤机入口空气流量决定的, 它们的开启基本上互不影响。根据采集的数据进行定量分析, 发现其相关系数很小。因此, 磨煤机动态数学模型可以由其输入输出数据基于多变量系统的建模方法而建立。

3 模型建立过程

3.1 数据的选取

基于现场数据建模选择的是负荷变化过程中, 各输入输出数据都处于动态变化过程中, 并且数据的变化过程比较光滑, 有较明显变化。利用此时的动态数据, 对磨煤机动态过程进行建模研究。

从电厂历史数据库中选取了机组在十几种变工况过程中磨煤机控制系统的输入输出数据, 以 10 s 为一个采样周期, 每个变工况过程大约经历了 30 ~ 40 min。

3.2 模型的建立

建模方法采用的是 Matlab 应用程序中的模型辨识工具。

模型的结构采用的是离散状态空间表达式, 其描述线性离散系统的时域模型, 主要用于多输入多输出(MIMO)系统。

离散状态空间表达式由状态方程和输出方程组成:

$$x(t + Ts) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{2}$$

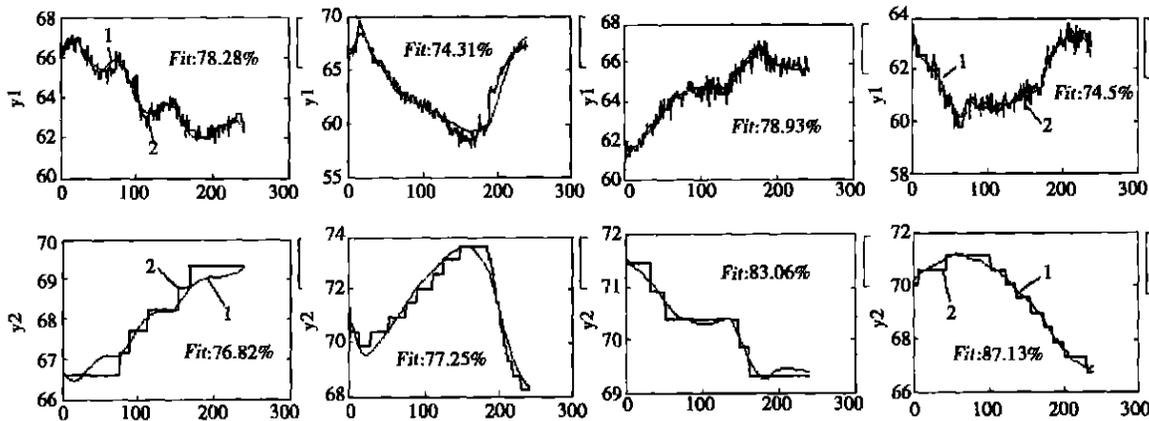
状态向量 $x(t)$, 输入向量 $u(t)$ 和输出向量 $y(t)$ 中的元素均为时间序列; 矩阵 A, B, C, D 均为常数矩阵; T_s 为数据采集周期。

通过分析和比较, 把辨识结果较好的几种工况的模型显示如下:

变工况过程(负荷变化范围)分别为: 1—100% ~ 75%; 2—75% ~ 50%; 3—80% ~ 100%; 4—75% ~ 60% ~ 70%。辨识结果如下: 其中 $C=[10; 0\ 1]$; $D=[0\ 0; 0\ 0]$; A, B 的结果如表 1 所示。

表 1 计算结果

变工况	A	B
1	0.90392 0.077795	0.013035 0.074644
	0.021747 0.97854	0.0036257 - 0.025311
2	0.94791 0.026091	0.032188 0.015029
	0.01085 0.99141	0.0013399 - 0.013788
3	0.93157 0.040863	0.030173 0.026953
	0.026307 0.98421	-0.010967 - 0.014903
4	0.86279 0.054036	0.078077 0.11719
	0.03003 0.98811	-0.014576 - 0.029945



(图中曲线 1 为模型计算输出, 曲线 2 为实际输出, *Fit* 为其适应度大小, y_1 为磨煤机入口空气流量, y_2 为磨煤机出口温度)

图 5 模型计算输出与实际输出结果比较

3.3 模型的检验

辨识结果以实际输出和模型仿真输出的适应度的大小来衡量。适应度大, 说明模型输出更好地反映了实际输出, 建立的模型更精确。适应度的大小以 *Fit* 来计算, 其公式如下:

$$Fit = \frac{\|yh - y\|}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

式中: yh 为模型输出向量或矩阵; y 为模型实际输出; N 为输出数据的长度。

以上 4 种变工况 1, 2, 3, 4 的计算模型输出和实际输出相比较及其适应度, 如图 5 所示。

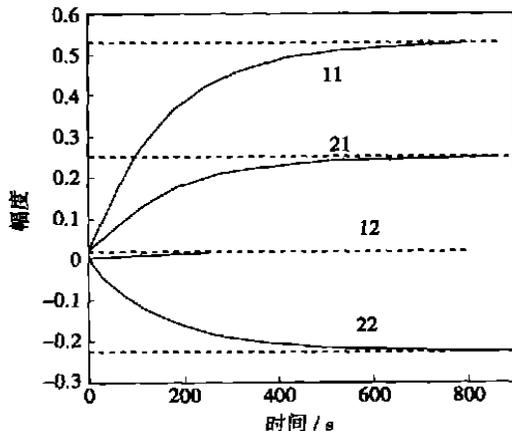
3.4 结果分析

由于所建立的磨煤机状态空间模型适应度较高, 比较真实地反映了磨煤机在不同工况下的运行状况, 已经可以为控制系统的设计提供重要的参考。但为了与磨煤机的运行机理进行比较分析, 可以进一步将其转变为传递函数形式, 进行深入地研究。

通过对以上 4 种变工况模型分析, 并进行仿真研究, 其中变工况 2 的阶跃相应曲线如图 6 所示。

从磨煤机出口温度和入口空气流量的响应曲线可以看出, 所建立的磨煤机动态模型是与磨煤机的运行机理相一致的。热风门和冷风门开度的加大会使磨煤机入口空气流量增大, 而冷风门开度加大却会使磨煤机出口温度降低, 这都很好地反映了磨煤机的运行状况。但热风门开度的加大, 在不同的工况下对磨煤机出口温度的影响是不同的。对以上 4 种变工况模型的研究发现, 当热风门开度增大时, 磨煤机出口温度增加得很少或者还略有下降, 这主要是由于当热风门开度加大, 进入磨煤机的热量增加,

但增加的热量被更多地进入磨煤机的煤所吸收。所建立的模型比较真实地反映了这种运行状况。



11、12— V_1, θ_2 对 μ_1 的阶跃响应, 21、22— V_1, θ_2 对 μ_1 的阶跃响应

图 6 磨煤机出口温度和入口空气流量的阶跃响应

4 结论

通过对电厂所采集的大量运行数据的分析, 采集了几个变工况下磨煤机系统的 4 个变量的输入输出数据, 并根据系统辨识方法, 建立了磨煤机出口温度和磨煤机入口空气流量的状态空间动态数学模型, 并且对所建立模型进行了检验, 模型的适应度较高, 达到了一定的精确度, 比较真实地反映了磨煤机的运行状况。由于磨煤机出口温度和磨煤机入口空气流量在变工况过程中, 其波动还是比较大的, 因此所建立的具有强耦合性的磨煤机控制系统模型, 为控制系统的优化配置和改善控制品质打下了良好的基础。 (下转第 633 页)

由煤粉炉飞灰颗粒的电镜扫描图(见图2)可见,颗粒表面没有明显的太空穴和爆裂现象^[4]。

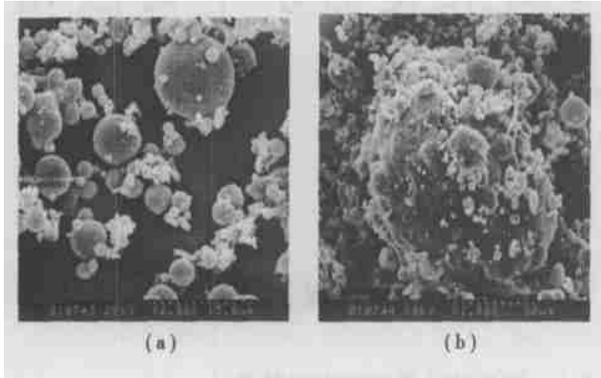


图2 煤粉炉飞灰颗粒电镜扫描图

飞灰颗粒的电镜扫描图所示与氮吸附法试验所得比表面积、比孔容积和孔径大小数据完全一致。由于爆裂使CWS焦炭颗粒表面形成许多空穴和裂缝,同时内部形成中空与多孔结构,使CWS比孔容积和比表面积增大,而且还减小了颗粒内部反应的阻力,这促进了CWS颗粒的着火并加快了挥发分和焦炭的反应速度,所以其后期燃烧速度高于煤粉后期燃烧速度。

众所周知,焦炭燃烧反应生成产物有CO和CO₂,生成的CO很不稳定,在炭表面附近和氧接触即被氧化成CO₂。因此,焦炭燃烧速度主要受氧气向焦炭表面以及氧气在灰壳中扩散速度的影响。CWS焦炭颗粒由于反应比表面积和比孔容积增加,从而更利氧气向焦炭表面以及氧气在灰壳中扩散,加

快反应速度。此外,在高温下水蒸气和碳的气化反应,使碳的两相反应转换为气相反应,水蒸气在焦炭的反应中起催化的作用^[3]。所以CWS焦炭颗粒燃烧速度比煤粉焦炭颗粒燃烧速度快。总的来说,CWS前期燃烧速度低于煤粉,后期燃烧速度高于煤粉。从表2数据看,茂名热电厂220 t/h燃水煤浆炉的热效率为90.70%,燃烧效率为99.76%,飞灰和灰渣含碳量分别为2.55%和1.38%;半山电厂420 t/h煤粉炉的热效率为91.38%,燃烧效率为98.78%,飞灰和灰渣含炭量分别为2.38%和1.55%。可以认为CWS总体燃烧速度、燃烧效率和燃尽程度接近于烟煤。

6 结 论

(1) CWS焦炭颗粒燃烧速度比煤粉焦炭颗粒燃烧速度快。

(2) 总体来说,CWS前期燃烧速度低于煤粉,后期燃烧速度高于煤粉,总体燃烧速度、燃烧效率和燃尽程度接近于烟煤。

参考文献:

(上接第616页)

参考文献:

- [1] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1986.
- [2] 刘长良. 大机组热工过程动态模型的研究及应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2002.
- [3] 王东风, 于希宁, 宋之平. 制粉系统球磨机的动态数学模型及分布式神经网络逆系统控制[J]. 中国电机工程学报, 2002(1): 97-99.
- [4] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 张玉铎. 系统辨识与建模[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [6] 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] 陈在平, 杜太行. 控制系统计算机仿真与CAD[M]. 天津: 天津

- [1] 赵翔. 茂名热电厂2号炉改烧水煤浆工程[D]. 杭州: 浙江大学热能所, 2001.
- [2] 徐万仁, 杜鹤桂. 煤粉性状对残炭颗粒形态及燃尽特性的影响[J]. 动力工程, 1994, 14(3): 31-33.
- [3] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [4] 大学出版社, 2001.
- [8] 倪维斗. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] PETER ESERIN. Application of canonical variate analysis to the dynamical modeling and control of drum level in an industrial boiler[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 1999. 1163-1166.
- [10] ADLER T, KULESSKY R. Power unit simplified dynamics models development, identification, accuracy estimation[A]. Proceedings of the American Control Conference[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 2001. 1636-1641.
- [11] CHENG XU, RICHARD W KEPHART, CHARLES H MENTEN. Model-based Once-through Boiler Start-up Water Wall Steam Temperature Control[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Application[C]. Beijing: Tsinghua University Library, 2000. 778-783.

CPL系统的非稳态数值模拟= **Unsteady-state Numerical Simulation of a CPL (Capillary Pumped Loops) System** [刊, 汉] / QIAN Ji-yu, LI Qiang, CHEN Xiao-bo, XUAN Yi-min (Power Engineering College under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 605 ~ 609.

A one-dimensional dynamic model was set up for a CPL (capillary pumped loops) system. The model can describe a whole variety of physical quantities, such as the system temperature, pressure and flow rate, etc. In an evaporator capillary core a non-thermal equilibrium temperature model is adopted. The model has taken into account the impact of capillary force on the evaporation temperature and speed, as well as the impact of temperature fluctuations in a liquid-storage tube on the system operation. The model was employed to undertake a focus-point analysis of the CPL system start-up process, analyzing several key factors believed to have an impact on the performance of a successful start-up. Numerical calculation results have been found to be in very good agreement with experimental ones. **Key words:** capillary pumped loop, unsteady state model, temperature fluctuation in a liquid storage tank, pressure fluctuation, start-up characteristics

火电厂热力系统并联算法通用逻辑—矩阵模型= **General Logic-matrix Model of a Parallel Algorithm Used for the Thermodynamic System of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong (College of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), GAO Yu-chuan (Thermal Power Plant of Qixing Group Co., Zouping, China, Post Code: 256200) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 610 ~ 613, 630.

By using logic variables to express the structural characteristics of a thermodynamic system and a regenerative heater and on the basis of matrix theory an analysis is performed of the material balance and energy balance of the regenerative heater. As a result, set up was a general logic-matrix model of parallel algorithm for the thermodynamic system of the thermal power plant. The model has comprehensively taken into account the thermal efficiency of the regenerative heater and the various factors relating to auxiliary steam and water services, etc. The logic-matrix model features clarity of conception, ease of construction and suitability for universal applications, thus providing a basis for the preparation of computation programs for a general thermodynamic system. Moreover, the model can also serve as a convenient tool for real-time measurement and test, control and optimization. **Key words:** thermodynamic system, logic variable, general logic-matrix model

基于现场数据的中速磨煤机动态建模研究= **A Study of the Dynamic Modeling of a Medium Speed Pulverizer Based on On-site Data** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-tao, NI Wei-dou, LI Zheng, ZHENG Song (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 614 ~ 616, 633.

On the basis of on-site data and in conjunction with the working principle of a power plant coal-pulverizer system a state-space dynamic mathematical model has been set up of the coal pulverizer outlet temperature and pulverizer inlet-air flow rate through an analysis of the coal pulverizer control system. During the process of various off-design operating conditions with the coal-pulverizer cold air port and hot air port opening degree serving as an input a dynamic model was built for the coal-pulverizer outlet temperature and inlet air flow rate. This dynamic model features relatively high precision and can quite truly reflect the actual operating condition of the coal pulverizer. Due to a strong coupling effect of the system itself the created coal pulverizer model can lay a good foundation for the optimized configuration of the control system and for enhancing the quality of control. **Key words:** coal pulverizer, outlet temperature, inlet air flow rate, dynamic modeling

联合循环电站在线性能计算及分析诊断= **On-line Performance Calculation and Fault Diagnosis of a Combined Cycle Power Plant** [刊, 汉] / XIAO Rui, TANG Sheng-li (College of Power Engineering under the Chongqing University