

## 75 t/h 树皮—煤粉复合燃烧系统的建模与仿真

包钢, 邓素碧, 王祖温

(哈尔滨工业大学 气动技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 75 t/h 树皮—煤粉复合燃烧锅炉是以树皮和煤粉为燃料的锅炉。针对其燃烧系统进行了建模, 得到了它的燃烧系统的对象模型, 同时对其控制系统进行了仿真。

**关键词:** 流化床锅炉; 树皮—煤粉; 复合燃烧; 数学模型; 控制系统仿真

中图分类号: O242.1; TK229.91 文献标识码: A

## 1 引言

树皮—煤粉复合燃烧锅炉的下部是流化床, 在流化床中燃烧树皮; 上炉膛燃烧煤粉。该锅炉燃烧系统的特点是: 干扰量多, 控制较困难。文中针对该锅炉燃烧控制系统进行了建模和仿真。

## 2 树皮—煤粉复合燃烧系统数学模型的建立

对燃烧系统进行控制的困难之一在于燃烧系统的数学模型较复杂, 因此建立一个合适的燃烧系统的数学模型对燃烧系统的控制是非常重要的。

树皮流化床加煤粉复合燃烧锅炉的炉膛由树皮流化床和煤粉上炉膛组成。由于树皮在流化床中未燃尽的燃料在上炉膛继续燃烧, 使上炉膛温度远高于一般流化床的悬浮室, 在上炉膛与流化床之间必然存在着热交换, 因此, 整个炉膛需合在一起计算<sup>[1]</sup>。

结合该锅炉, 采用复合燃烧的零维传热模型的方法, 得到综合考虑流化床、火焰和受热面之间换热的炉膛传热计算基本方程。传热模型中的热量影响蒸汽压力, 传热模型中的温度影响炉膛负压。锅炉燃烧系统的数学模型包括炉膛负压、蒸气压力、烟气含氧量三个量与引风量、煤粉量及给风量之间的关系。

## 2.1 水冷壁吸热量

利用上炉膛和流化床的热量平衡建立传热部分

的模型, 整理后如下式:

$$\Phi_f = \alpha_{hb} A_b (T_h^4 - T_b^4) + \alpha_{jb} A_b (T_s^4 - T_b^4) \quad (1)$$

式中:

$$\alpha_{hb} = \frac{a_h a_b}{1 - (1 - a_h)(1 - a_b x)(1 - A_b/A_j)} \quad (2)$$

$$\alpha_{jb} = \frac{a_b(1 - a_h) \frac{A_b}{A_j}}{1 - (1 - a_h)(1 - a_b x)(1 - A_b/A_j)} \quad (3)$$

$\Phi_f$ —水冷壁吸收的热量;  $\sigma$ —辐射常数;  $T_h$ —火焰温度;  $T_s$ —流化床温度;  $T_b$ —水冷壁表面温度;  $A_b$ —水冷壁面积;  $A_j$ —分界面面积;  $x$ —水冷系数;  $a_h$ —火焰吸收率;  $a_b$ —水冷壁吸收率。

## 2.2 烟气含氧量

利用炉膛内的物质平衡建立烟气含氧量的模型, 经整理得:

$$O_2 = \frac{0.21[V_m^k + V_s^k - (5.08B_m + 1.79B_s)]}{(4.96B_m + 1.77B_s) + [V_m^k + V_s^k - (5.08B_m + 1.79B_s)]} \quad (4)$$

式中:  $O_2$ —烟气含氧量;  $V_m^k$ —煤粉给风量;  $V_s^k$ —树皮给风量;  $B_m$ —煤粉量;  $B_s$ —树皮量。

## 2.3 炉膛负压

利用烟气体力学建立炉膛负压模型, 整理得:

$$\Delta H_1 = 3247 - k[(1 + \mu)V_{y0}^2 + V_{yf}^2] \frac{\rho_0}{1.293} \quad (5)$$

式中:  $k = \frac{3227 \times 1.293}{[(1 + \mu)V_{y0}^2 + V_{yf}^2] \rho_0}$ ;  $\Delta H_1$ —炉膛负压;  $V_{y0}$ —炉膛出口烟气流量, 下标 0 表示额定流量;  $V_{yf}$ —引风机流量, 下标 0 表示额定流量;  $\mu$ —烟气中飞灰的重量浓度;  $\rho_0$ —烟气在标准状态下的密度。

## 3 树皮—煤粉复合燃烧系统的控制方案的确定

锅炉的现代控制方法大约有以下几种: 模糊控制<sup>[2]</sup>; 加权广义预测自校正控制<sup>[3]</sup>; 自适应控制; 智

能控制<sup>[4~5]</sup>; Smith 预估补偿自整定控制。而各种控制方案都有各自的优缺点。

该锅炉燃烧树皮和煤粉, 干扰量多, 燃料量扰动较大, 控制较困难, 本文中采用串级 PID 控制, 利用内环来及时反应并消除燃料量的扰动。

### 4 树皮—煤粉复合燃烧系统控制系统及其仿真

该锅炉采用树皮和煤粉两种燃料, 为简化起见, 假定树皮燃烧产生的热量固定, 调节煤粉量来适应负荷的变化。由于树皮热值会在一定范围内发生变化, 因此把树皮热值的变化等效为煤粉量的扰动。采用串级控制系统来对煤粉量进行控制。在此控制系统中, 用汽包压力的微分信号和蒸汽流量信号作为内环反馈信号, 及时反映煤粉量的扰动, 并通过内环控制迅速地加以消除, 削弱其对母管压力的影响, 从而实现其控制功能。控制框图如图 1 所示。

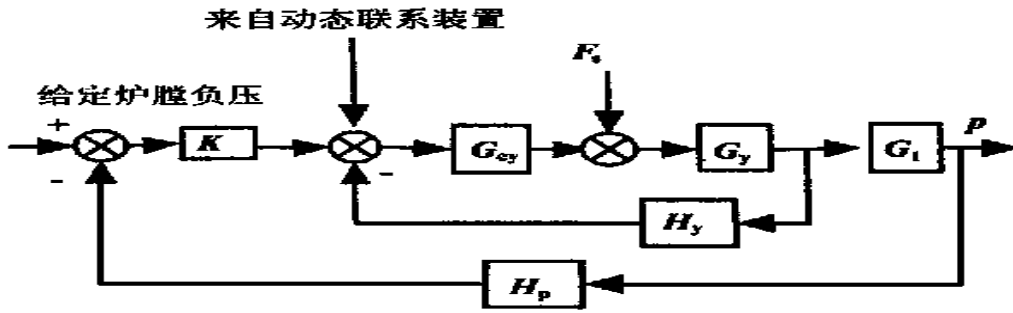


图 1 燃料量控制系统  
 $G_{cp1}$ —母管压力调节器;  $G_{cp2}$ —煤粉量调节器;  $u_b$ —燃料量的当量扰动;  $G_m$ —煤粉传送过程传递;  
 $k_2$ —单位的煤粉量所对应的蒸汽量;  $R_D$ —负荷设备的阻力;  $R_n$ —过热器的阻力;  $C$ —整个锅炉的蓄热系数;  
 $C_k$ —压力对象的蓄热系数。

图 1 燃料量控制系统

同样, 得到氧量校正控制系统框图如图 2 所示。

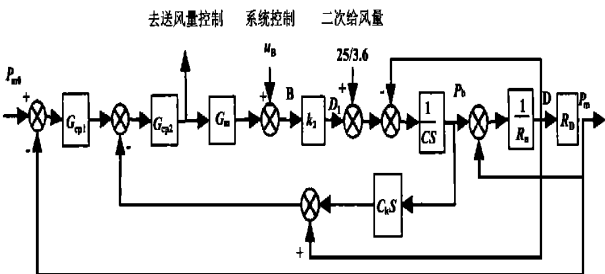


图 2 氧量校正控制系统  
 $C_{cp1}$ —氧量调节器的传递函数;  $C_{cp2}$ —给风调节器的传递函数;  
 $C_f$ —给风执行器的传递函数;  $C_o$ —氧量对象的传递函数;  $H_f$ —送风量变送器;  $H_o$ —氧量流量的传递函数。

图 2 氧量校正控制系统

引风量控制系统如图 3 所示。

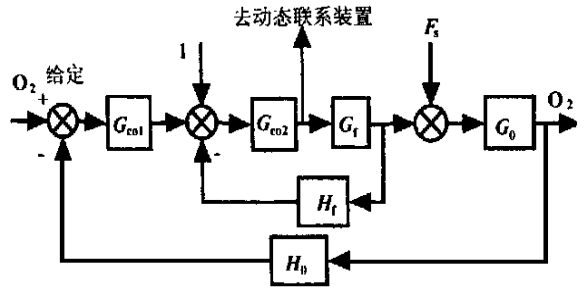


图 3 引风量控制系统  
 $C_{cp1}$ —引风调节器传递函数;  $C_f$ —引风执行器及挡板的传递函数;  
 $H_f$ —风量传感器的传递函数;  $G_{cp2}$ —炉膛负压调节对象的传递函数;  
 $H_p$ —压力传感器的传递函数;  $K$ —比例系数。

图 3 引风量控制系统

把该系统的整定参数带入, 做煤粉量及压力扰动的仿真实验, 仿真曲线如图 4。

从仿真曲线上可以看到, 煤粉量扰动能在 100 s 的时间以内迅速地消除掉, 母管压力的最高值为

3.915, 增高 0.38%, 即当燃料量的扰动为 10% 时, 带给母管压力变化后的最大扰动为 0.38%, 并且没有震荡, 能达到衰减比为 1 的要求。通常由于煤发热值的不稳定使燃料量发生扰动的最大值是 5%, 本锅炉采用复合燃烧, 燃料量的扰动除了煤质的不稳定外, 还有可能是

树皮发热量的变化引起的, 因此假设其扰动量为燃煤锅炉的 2 倍, 即 10%。因此, 上述假定燃料量的扰动为 10% 是可以反映锅炉的实际燃烧情况的。而当燃料量的扰动为 10% 时, 系统能达到设定的要求。

### 5 结论

本文依据炉膛内的热量平衡、物质平衡及烟道动力确定了该锅炉燃料的数学模型, 同时对其控制系统进行了抑制扰动的仿真研究, 仿真表明, 该锅炉

(下转第 649 页)

$$q = \frac{3\ 600}{0.344\ 592 \times 0.987\ 7} = 10\ 577.237\ 5 \text{ kJ}/(\text{kWh})$$

为了验证理论和算法的正确性, 仍以引进 984.3 MW 压水堆核电机组二回路为例, 应用矩阵分析法进行二回路热力系统的常规计算, 所得的抽汽份额及各项热经济性指标见表 2。

表 2 二回路抽汽份额及主要热经济性指标的常规计算结果

加热器号	抽汽份额	指标名称	计算结果
1	0.032 15	循环功	620.24
2	0.029 69	/kJ·kg <sup>-1</sup>	
3	0.024 73	循环吸热量	1 799.92
4	0.025 43	/kJ·kg <sup>-1</sup>	
5	0.039 75	循环放热量	1 179.678
6	0.068 03	/kJ·kg <sup>-1</sup>	
7	0.046 69	循环效率	34.459 2
8	0.044 69	/%	
9	0.048 58	热耗率	10 577.237 5
		/kJ°(kWh) <sup>-1</sup>	

两种方法所得的计算结果完全一致, 而反平衡单元分析法的分析过程大为简化, 充分体现了应用反平衡单元分析法进行核电机组二回路分析计算的正确性、可行性和简捷性。

### 5 小结

应用反平衡单元分析法进行二回路的分析计算, 只需按本文提供的算法求出各回热单元的进水系数和凝汽单元的放热系数就可以进一步根据二回路的反平衡数学模型求得循环热效率等热经济性指标, 必要时还可以根据进水系数求解二回路任一加热器的抽汽流量。反平衡单元分析法具有计算简单、结果准确、手算电算都很方便等诸多优点, 是压水堆核电机组二回路的分析计算有力工具之一。

### 参考文献:

- [1] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [2] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理—电厂蒸汽循环的函数与方程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 严俊杰. 汽轮发电机组经济性诊断理论研究及应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [4] STERMAN S, TERLIN S A, SHARKOW A T. Thermal and Nuclear Power Stations[M]. Moscow: Mir Publisher, 1986.
- [5] 李运泽. 压水堆核电机组二回路的线性单元分析法[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 544—547.

( 挥 编辑 )

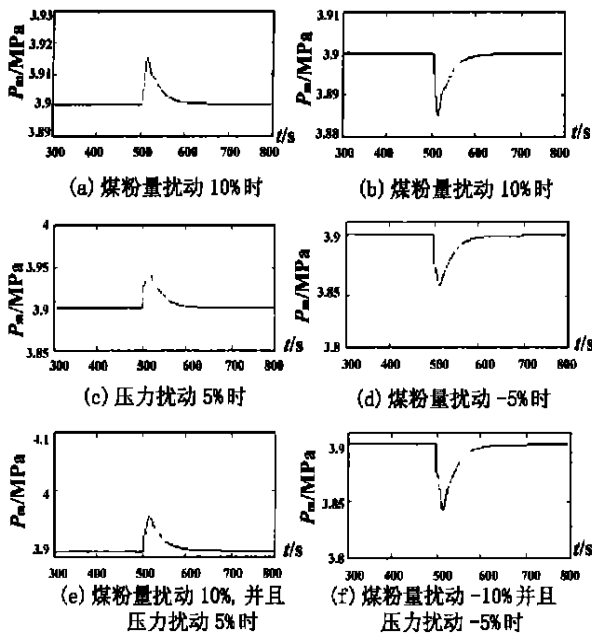


图 4 蒸汽压力仿真曲线

(上接第 645 页)

燃烧控制系统能满足运行的要求。

### 参考文献:

- [1] 赵广播. 树皮流化床、链条炉排加煤粉复合燃烧的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [2] 王德文, 李文田. 模糊控制在循环流化床锅炉控制系统中的应用[J]. 电力情报, 1997(4): 47—50.
- [3] 赵景波, 马林立. 工业锅炉燃烧系统——加权广义预测自校正控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 1997(5): 34—36.
- [4] 牛陪峰, 孙建. 国产 75 t/h 循环流化床锅炉燃烧智能控制系统[J]. 发电设备, 1997(7): 22—26.
- [5] 曾德良, 刘吉臻. 单元机组智能协调控制系统的发展和应 [J]. 电力情报, 1998(3): 6—10.
- [6] 赵广播, 黄怡琨, 高志宏, 等. 树皮在流化床锅炉中干燥时间的计算[J]. 热能动力工程, 1999, 14(3): 212—214, 222.

(李乡复 编辑)

tute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—637~640

The use of an advanced combustion diagnostic system can be conducive to an effective enhancement of utility boiler operation economy and safety. Through the collection of furnace flame images and by utilizing computer-based digital image processing techniques as well as the analysis method of an artificial neural network model a combustion diagnostic system of flame images has been developed for boiler No. 5 of Yongan Thermal Power Plant in Fujian Province. This system has provided meaningful quantified characteristics parameters, performing a highly effective probing of the combustion condition identification mechanism. As a result, a new method and approach for combustion diagnosis and optimized control is provided for utility boilers. **Key words:** utility boiler, combustion diagnosis, digital image, artificial neural network

火电机组锅炉过热汽温的约束模型预测控制研究 = **A Study of the Constrained Model Predictive Control for the Boiler Superheated Steam of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / JU Gang, CHEN Shao-bing, XU Zhi-gao (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—641~643

Presented is a model predictive control algorithm with an input of hard constraints. With no need for on-line iteration solution or on-line matrix inversion the recommended algorithm features a simplified calculation method with a low on-line computation load. It has been employed for the simulation study of boiler superheated steam control of thermal power plants and proved to be highly effective. **Key words:** predictive control, constraint, boiler, superheated steam temperature

75 t/h 树皮—煤粉复合燃烧系统的建模与仿真 = **Model Building and Simulation of a 75 t/h Bark and Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / BAO Gang, DENG Su-bi, WANG Zu-wen (Pneumatics Technology Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—644~645, 649

A 75 t/h boiler with a composite firing system operates on bark and pulverized coal. A model of the firing system has been set up with the combustion system serving as an object model. Meanwhile, a simulation of its control system was also conducted. **Key words:** fluidized bed boiler, simultaneous burning of bark and pulverized coal, mathematical model, control system simulation

压水堆核电站二回路的反平衡单元分析法 = **Inverse-balance Element Analysis for the Secondary Circuit of a Pressurized Water Reactor-based Nuclear Power Plant** [刊, 汉] / LI Yun-ze, YAN Jun-jie, LIN Wan-chao (Power System Engineering Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), DENG Shi-min (Thermal Engineering Research Institute of National Electric Power Co., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—646~649

On the basis of analyzing the effect of additional components on the incoming water factor of a heating unit derived is a general expression for the incoming water factor of the high-pressure heating unit of a secondary circuit. Through a detailed theoretical analysis and mathematical deduction an inverse-balance mathematical model was set up for the secondary circuit of a pressurized water reactor-based nuclear power plant. The foregoing has laid a theoretical basis for the inverse-balance element analytical method of the above-mentioned secondary circuit. Such an analytical method features a simplified calculation and an accuracy of the calculated results. Being convenient for manual calculations and programming-based electronic calculations, it represents one of the effective tools for the secondary circuit system design and energy-saving diagnosis. **Key words:** pressurized water reactor-based nuclear power plant, secondary circuit, heating unit, incoming water factor, heat release factor, inverse-balance element analytical method

利用 Monte Carlo 方法对循环流化床锅炉炉膛传热的数值计算 = **Numerical Calculation of Heat Transfer in a**