

# 电站锅炉燃烧系统仿真模型的建立

陈立甲, 王子才, 朱群益

(哈尔滨工业大学 仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在电站锅炉实时仿真系统中, 人们多采用传统的零维模型对燃烧系统建模。因为仿真的目的就是要模拟实际系统在整个工作范围内的动态行为, 但是零维模型对燃烧系统这一复杂过程进行了过分的简化, 因此当系统运行的负荷在较大范围内波动时, 零维模型与实际系统之间将会产生很大的误差。本文在适当的假设条件下建立了能反映燃烧系统内部状态的一维模型, 并对模型进行了仿真, 仿真结果说明了本模型具有很高的精度。该模型已应用于一台 210 MW 火电机组的仿真中, 说明了它的适用性。

**关键词:** 电站锅炉; 燃烧系统仿真; 燃烧模型; 实时仿真

中图分类号: TK224.1<sup>+</sup>1; TP391.9

文献标识码: A

## 1 引言

电站锅炉的仿真已广泛应用于各种研究与工程项目中, 由于燃烧过程是十分复杂的非线性过程, 且锅炉实际运行时所能监测的数据又很少, 因此在锅炉系统的仿真中很多人采用零维模型。在当代电站仿真的高精度要求下, 零维模型已不能满足需要。如文献[1]认为零维模型误差太大, 为了提高模型的精度, 在零维模型的基础上加入了水冷壁在高度方向上受热不均的经验修正。但很明显经验修正法不能解决模型本身问题。

炉膛燃烧的三维数值模拟方法能够反应流动、燃烧、传热的复杂耦合关系<sup>[2]</sup>。但是三维数值模拟方法得到的是稳态的结果, 且计算过程十分复杂, 因此满足不了实时性需要, 不能直接用于电站锅炉的仿真之中。文献[3]尝试了应用数值模拟方法求出一系列稳态下的锅炉特征参数, 作为实时仿真的边界条件。

多年来, 科研人员在研究简单的燃烧模型方面进行了大量探索<sup>[4~6]</sup>。但由于不是用于实时仿真的目的, 因此模型不一定满足实时仿真的需要。

本文从电站实时仿真的目的出发, 建立一种能

够较为准确反映炉膛烟气的流动、燃烧、传热特性的一维稳态模型。通过在不同负荷时的仿真计算, 说明了该模型能够反映不同负荷下炉膛内的热流密度分布的不同, 从而弥补了零维模型和零维模型的修正模型<sup>[1]</sup>的不足。该模型已成功应用于 210 MW 机组的仿真中, 进一步说明了一维模型的适用性。

## 2 电站锅炉炉膛燃烧系统模型的建立

建模原则是以模型仿真的实时性为前提, 建立能反映燃烧系统内部状态的模型, 以提供更完善更准确的炉膛内部参数。电站锅炉的炉膛内过程由烟气的流动、燃烧、换热三个方面来反映, 因此仿真模型应为包含三者的数学模型。但是这三者各自都非常复杂, 并且它们之间存在着强烈的耦合关系, 所以要想建立满足实时仿真要求的模型, 必须依据适当的假设条件对燃烧系统进行合理的简化。因为要满足实时性, 必须减小仿真的计算量, 要求通过一步或很少的几步就能对模型求解。另外动态仿真就是要反应对象的动态特性, 但是锅炉仿真的目的主要在于准确反映汽水系统的动态特性, 汽水系统动态过程比烟气侧的动态过程慢得多, 因此可将燃烧、传热、流动以稳态处理。由于炉膛参数的监测和控制点很少, 而且炉膛气体的参数有很大的脉动性, 所以对燃烧系统的仿真不需要十分精确反应过程的方方面面, 这也给模型的简化提供了前提条件。假设:

- (1) 炉膛内的介质和水冷壁为灰体;
- (2) 水冷壁金属温度的变化对烟气的放热影响不大, 可忽略不计;
- (3) 忽略烟气对水冷壁的对流换热, 只计算辐射换热热量。

### 2.1 炉内流动模型的建立

采用文献[4]所应用的均匀混合反应器模拟燃烧器区域, 简化的柱塞流反应器模拟炉膛上部区域

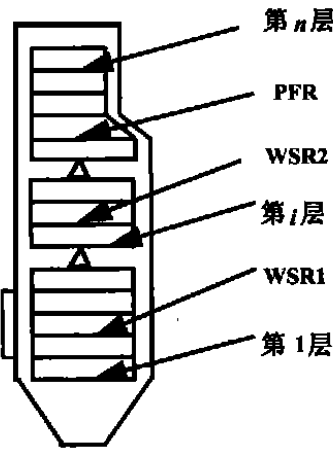


图 1 炉内理想反应器分布示意图

第  $n$  层的宏观流动过程。将炉膛分成三个区域; 下混合反应区域 WSR1、上混合反应区域 WSR2、柱塞流反应区域 PFR。燃料与空气的混合物由燃烧器喷口直接进入下混合反应区, WSR1 的燃烧产物再按均布的原则进入与之相串联的上混合反应区, 在 WSR2 进一步反应

后进入柱塞流反应区。本文认为柱塞流反应区在炉膛的出口处烟气的流动在流道的横截面上是均匀分布的。炉内理想反应器的空间分布见图 1。

### 2.2 煤粉燃烧模型

煤粉的燃烧过程可分为煤粉热解后的气相燃烧及颗粒中碳的燃烧。其中气相燃烧是瞬间完成的, 碳的燃烧是一个持续的过程。

### 2.3 辐射传热模型

将三个理想的反应器区的每一区域划分成若干层, 认为每一层内烟气的成分、温度等参数是均一的。将炉膛内烟气的辐射等效成沿炉膛径向和轴向的辐射。烟气热平衡沿各层进行计算, 各层间的辐射换热为层间的轴向辐射的释放和吸收, 各层对炉膛水冷壁的辐射热为该层的横向辐射。

第  $i$  层烟气向水冷壁的辐射放热

$$Q_{Si} = \sigma_0 \alpha_L (\sum \psi F_{bi}) T_i^4 \quad (1)$$

其中:  $\sigma_0$  为波耳兹曼常数;  $\alpha_L$  为炉膛黑度;  $F_{bi}$  为第  $i$  层受热面的面积;  $\psi$  为对应受热面的有效系数;  $T_i$  为第  $i$  层烟气的温度。

对第  $i$  层来说, 式(1)中的  $\sigma_0 \alpha_L (\sum \psi F_{bi})$  项为常量, 用  $S_i$  表示。

第  $i$  层的轴向辐射放热

$$E_i = \sigma_0 \alpha_h T_i^4 \quad (2)$$

其中:  $\alpha_h$  为火焰黑度。式(2)中,  $\alpha_h$  的变化很小, 可近似看作常量, 因此式(2)可表示为

$$E_i = \beta T_i^4 \quad (3)$$

其中:  $\beta = \sigma_0 \alpha_h$  为常数。

则第  $i$  层向其两侧烟气释放的辐射热为

$$Q_{xi} = E_i (F_i + F_{i-1}) = x_i \beta T_i^4 \quad (4)$$

其中:  $x_i = f_i + F_{i-1}$

假设每一层的烟气为均匀介质, 则第  $i$  层从  $i-1$  层吸收的辐射热为

$$Q_{i,i-1} = F_{i-1} E_{i-1} (1 - \exp(-kl)) \quad (5)$$

其中:  $k$  为吸收系数,  $l$  为第  $i$  层烟气厚度。

第  $i$  层从  $i-2$  层吸收的辐射热为

$$Q_{i,i-2} = F_{i-2} E_{i-2} \exp(-kl) (1 - \exp(-kl)) \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可以看出, 距第  $i$  层越远的层, 第  $i$  层从它吸收的热量越少, 因此可以忽略较远层辐射热的影响。如果每层划分足够厚, 则可仅考虑相邻两层间的相互辐射影响。

则第  $i$  层总的吸热量为

$$Q_{ai} = \sum_{j=1, j \neq i}^n Q_{i,j} \approx Q_{i,i-1} + Q_{i,i+1} = \beta (F_{i-1} T_{i-1}^4 + F_i T_{i+1}^4) \quad (7)$$

有关文献表明, 烟气和煤粉颗粒在炉膛中大约只有 2 s 的停留, 因此炉膛烟气在十分短的时间内达到平衡, 则第  $i$  层烟气的能量平衡方程为

$$Q_{Li} + Q_{wL} - Q_{Si} - Q_{xi} + Q_{ai} + Q_{ri} = \rho_i V_i C_y T_i \quad (8)$$

其中:  $Q_{ri}$  为第  $i$  层燃烧放热量,  $V_i$  为第  $i$  层体积,  $C_y$  为烟气的比热,  $\rho_i$  为第  $i$  层烟气密度,  $Q_{Li}$  为由于烟气流动而对第  $i$  层烟气热量的贡献,  $Q_{wL}$  燃料和空气的物理显热。

$Q_{Li}$  由下式求出

$$Q_{Li} = W_{y(i-1)} C_y F_{i-1} T_{i-1} - W_{yi} C_y F_i T_i \approx W_{yi} F_i C_y (T_{i-1} - T_i) \quad (9)$$

$Q_{wL}$  的求解, 对 WSR1 区有

$$Q_{wL} = W_k C_k i T_k + W_{mi} C_{mi} T_{mi} \quad (10)$$

对其它两个区有

$$Q_{wL} = 0 \quad (11)$$

## 3 实例

### 3.1 对象描述

对某台 210 MW 火电机组的燃煤锅炉进行仿真, 该锅炉为单锅筒、自然循环、抽吸力平衡送风、固态排渣煤粉炉, 其过热蒸汽系统设有三级喷水减温器。锅炉系统主要参数见表 1。

表 1 电厂燃用煤种成分分析

| 工业分析 | W / % | V / % | A / % | Q / kJ · kg <sup>-1</sup> |       |
|------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|
|      | 13.18 | 43.70 | 16.40 | 21 151.7                  |       |
| 元素分析 | C / % | H / % | O / % | N / %                     | S / % |
|      | 55.36 | 4.12  | 10.12 | 0.63                      | 0.19  |

仿真计算基本参数:

额定蒸发量  $D/t \cdot h^{-1}$ , 数值为 670;

锅筒工作压力  $P_d/MPa$ , 数值为 15.80;

给水温度  $T/^\circ C$ , 数值为 242.

### 3.2 不同运行工况下的仿真

图2给出了在锅炉负荷为100%、50%时, 炉膛沿高度方向上的相对温度分布曲线, 以各点温度与同工况下炉膛内的最高温度的比值给出。很容易看出在两种工况下的曲线是不同的。(沿炉膛高度上的气体单元层数根据需要任意选取, 本文选取比较密集)。

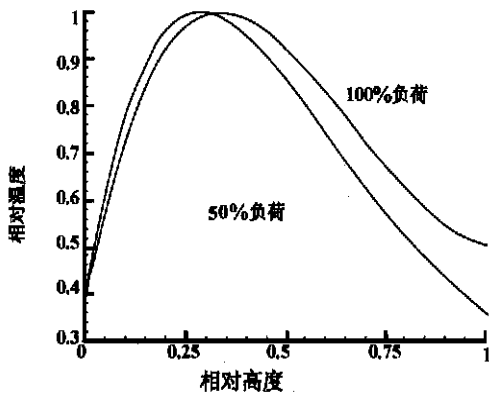


图2 50%及100%时炉膛温度沿高度上的分布(相对值)

## 4 结论

(上接第286页)

传热和传质熵产是由于水滴与空气间存在传热传质势而产生的, 其熵产率分别与传热驱动力、传热面积和传质驱动力、传质面积等有关。过程开始时, 传热、传质势都较小, 熵产率也较小; 过程快结束时, 虽然传热、传质势较大, 但传热传质面积很小, 熵产率亦随之减小, 最终为0(图5、图8a)。

与干压缩过程相比, 湿压缩过程多了传热和传质熵产, 也就多了相应的能量损失, 这是为降低压气机工质温度、减少压缩而付出的代价。

## 3 结论

本文从热力学和传热传质学基本原理出发, 研究了燃气轮机装置中湿压缩过程的一般规律和性

本文建立了锅炉燃烧系统的一维稳态模型, 由于该模型为沿炉膛高度上的分布参数模型, 并且能够部分地反映炉膛内气体的流动、燃烧、传热特性, 因此具有较好的仿真精度, 弥补了传统的零维模型及其经验修正模型的不足。该模型已经应用于某210MW的电站锅炉的实时仿真中, 仿真结果说明了模型能够满足实时仿真的要求, 并且具有的良好精度, 从而证明了模型的适用性。

### 参考文献:

- [1] LU S, HOGG BW. Power plant analyzer—A computer code for power plant operation studies[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1997, 10(3): 335—341.
- [2] 李文艳. 锅炉燃烧室湍流流动、燃烧和传热过程的三维全模拟[J]. *中国电机工程学报*, 1994, 14(2): 1—6.
- [3] 陈晓东. 电站仿真器锅炉汽水系统建模方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.
- [4] 韩小海. 切圆燃烧锅炉炉膛传热过程综合模型及模拟计算[J]. *燃烧科学与技术*, 1996, 2(3): 292—299.
- [5] 周怀春, 韩才元. 四角切圆燃烧过程稳定性动态分析模拟研究—I模型的建立[J]. *中国电机工程学报*, 1991, 14(2): 20—24.
- [6] 章明川. 煤粉着火及切圆燃烧火焰稳定性分析[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- [7] PETERM Walsh. Unburned carbon loss from pulverized coal combustors[J]. *Fuel*, 1994, 71(7): 1074—1080.

(显辉 编辑)

能, 包括各种因素对湿压缩性能的影响分析、湿压缩过程传热传质分析及熵产分析, 指出研制高效雾化喷嘴是有效实现湿压缩技术的关键; 压比低、压缩时间短的压气机不宜采用湿压缩技术; 将喷嘴安装在距压气机入口不远的级间对湿压缩性能影响不大。

### 参考文献:

- [1] 王永青, 刘铭, 严家骥, 等. 燃气轮机装置中湿压缩过程的数学模型[J]. *热能动力工程*, 2001, 16(2): 129—132.
- [2] 王补宣. 工程传热传质学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 曾丹苓. 工程非平衡热力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [4] 林枫. GT25000燃气轮机喷水冷性能分析[R]. 北京: 中国工程热物理学会, 1999.
- [5] 化学工程手册编辑委员会. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.

(渠源 编辑)

**cerning Faults and Malfunctions of a Dual-channel Steam Condenser on the Basis of a Simulation Model** [刊, 汉] / MA Liang-yu, WANG Bing-shu, GAO Jian-qiang, MA Yong-guang, TONG Zhen-sheng (Research Institute of Simulation and Control Technology under the North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 298 ~ 302

In performing a fault diagnosis of thermal equipment it is usually difficult to create accurately and adequately a fault diagnosis knowledge base for the concerned equipment. This comes about because of two reasons: 1. Complexity of equipment, system and faults themselves; 2. Improper method of extracting the sample knowledge of frequently encountered faults. To cope with this problem, a new method for extracting fault sample knowledge of thermal equipment has been proposed by taking advantage of the technical edge enjoyed by simulation technology in the modeling of power station equipment and systems. By the use of the proposed method and through the creation of a dynamic mathematical model for a double-channel condenser a detailed simulation test of the equipment faults was conducted. On the basis of summing up on-site operating experience and performing a related theoretical analysis a typical fault knowledge base has been finally consummated for the dual-channel steam condenser. **Key words:** dual-channel steam condenser, failure and fault, sample knowledge extraction, simulation model

**机械驱动用单轴燃气轮机动态模型研究 = Dynamic Model Research of a Single-shaft Gas Turbine in Mechanical Drive Applications** [刊, 汉] / WEI Si-liang, LIU Shang-ming, NI Wei-dou (Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 303 ~ 307

With the continuous improvement in gas turbine performance its scope of applications is widening dramatically. Apart from its use in power generating units and combined cycle power plants there emerged ever more cases of its application as a variable-speed mechanical drive unit. Presented in this paper is a model of single-shaft gas turbine in mechanical drive service including its control system. The model has been simplified in light of specific conditions. Under a Matlab/Simulink environment a simulation was conducted of the process of load and speed increase-decrease as well as load rejection. The results of simulation agree quite well with actual physical processes. Hence, the proposed model can be employed for the study of a single-shaft gas turbine and its control system. **Key words:** gas turbine, simulation, dynamic model.

**电站锅炉燃烧系统仿真模型的建立 = The Building of a Simulation Model for a Utility Boiler Combustion System** [刊, 汉] / CHEN Li-jia, WANG Zi-cai, ZHU Qun-yi (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 308 ~ 310

In a real-time simulation system for a utility boiler it is common practice to adopt a zero-dimensional model for building a model of combustion system. This is understandable, because the aim of a simulation consists in simulating the dynamic behavior of an actual system in its full range of operation. However, the zero-dimensional model has oversimplified the complicated process of a combustion system. In view of this, when the operating load of a system fluctuates over a relatively large range, there will emerge a very large error or difference between a zero-dimensional model and an actual system. Under proper hypothetical conditions the authors have set up a one-dimensional model capable of reflecting the interior conditions of a combustion system and performed a simulation of the model. The results of simulation indicate that the recommended model features a very high precision. It has already been employed on the simulation of a 210 MW thermal power plant with its suitability for the intended purpose being verified. **Key words:** utility boiler, combustion system simulation, combustion model, real-time simulation

**非线性时间序列的RBF神经网络预测方法及其应用 = A Method for Predicting Nonlinear Time Series Using RBF (Radial Base Function) Neural Network and Its Application** [刊, 汉] / ZHANG Chuan-bin, DENG Zheng-long (Astronautics Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 311 ~ 312, 342

An innovative method involving the use of RBF (radial base function) neural network based on a training algorithm of au-