

# 300 MW 火电机组自然循环锅炉模型的建立及动态特性分析

何 荣, 全兆裕, 杨慧超  
(湛江发电厂, 广东 湛江 524099)

**摘 要:** 利用 STAR-90 模块化建模仿真支撑系统建立了 300 MW 火电机组自然循环锅炉模型, 并应用于湛江发电厂 300 MW 火电机组全仿真机。仿真结果表明, 该模型能够比较准确地反映自然循环锅炉的动态特性和静态特性, 可以用于对运行人员的培训, 并可以用于优化锅炉的设计和预测变工况时锅炉的主要性能参数。

**关 键 词:** 自然循环锅炉; 仿真机; 动态特性; 静态特性

中图分类号: TK229 文献标识码: A

## 1 仿真对象简介

作者利用 STAR-90 模块化建模仿真支撑系统建立了一套 300 MW 火电机组自然循环锅炉模型。该模型的仿真对象为湛江发电厂 3 号机组锅炉, 为亚临界压力、中间再热、单炉膛、自然循环汽包炉, 制粉系统为中间储仓式热风送粉系统, 过热汽温的调温方式为三级喷水减温。主要设计参数为: 汽包压力 18.38 MPa; 主蒸汽压力 17.22 MPa; 主蒸汽流量 935 t/h; 主蒸汽温度 540 °C; 再热蒸汽流量 777.4 t/h; 再热蒸汽进口/出口压力 3.49/3.33 MPa; 再热蒸汽进口/出口温度 315.6/540 °C。

## 2 仿真动态数学模型的建立

建立的仿真模型采用工程模块化建模技术建立, 它包括模型算法库与锅炉仿真模型两部分。

### 2.1 模型算法库

模型算法库是以火电机组中的常规设备、部件或全局过程为基本单元, 以质量、能量、动量守恒为基础, 严格按照其物理机理而建立的面向火电机组的算法库。在算法库中对应火电机组所有的设备、部件及逻辑控制模块都有相应的算法, 本文仅以锅炉汽包算法(QB)为例进行说明。

汽包算法仿真了自然循环锅炉汽包的动态过程, 将汽包划分为汽相区和液相区进行分析。其主要数学模型有:

(1) 质量平衡方程式:

液相区:

$$\frac{d}{dt}(\rho_l V_l) = W_e + (1-x)W_{ww} - W_{down} -$$

$$W_{bl} - W_{evap}$$

式中:  $\rho_l$ —液相区工质密度;  $V_l$ —液相区工质容积;  $W_e$ —省煤器进入汽包的水流量;  $W_{ww}$ —水冷壁出口流量;  $W_{down}$ —下降管入口流量;  $W_{bl}$ —锅炉排污流量;  $W_{evap}$ —蒸发流量;  $x$ —水冷壁出口质量含汽率。

汽相区:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = xW_{ww} + W_{evap} - W_s - W_r$$

式中:  $\rho_s$ —汽相区工质密度;  $V_s$ —汽相区工质容积;  $W_s$ —汽包出口蒸汽流量;  $W_r$ —汽包放汽流量。

(2) 能量平衡方程式:

液相区:

$$\frac{d}{dt}(M_l H_l) = W_e H_e + (1-x)W_{ww} H_{ww} -$$

$$W_{down} H_l - W_{bl} H_l - W_{evap} H_l - Q_b$$

式中:  $M_l$ —液相区工质质量;  $H_l$ —液相区工质焓;  $H_e$ —省煤器进入汽包的工质焓;  $H_{ww}$ —水冷壁出口工质焓;  $Q_b$ —液相区工质传给金属热量。

汽相区:

$$\frac{d}{dt}(M_s H_s) = xW_{ww} H_{ww} + W_{evap} H_s - W_s H_s -$$

$$W_r H_s - Q_t$$

式中:  $M_s$ —汽相区工质质量;  $H_s$ —汽相区工质焓;  $Q_t$ —汽相区汽体传给金属热量。

(3) 传热方程:

$$Q_b = (k_1 + k_2(W_e + W_{ww})^{0.8})(T_1 - T_{mb})$$

$$Q_t = (k_1 + k_3(W_s + W_r)^{0.6})(T_s - T_{mt})$$

$$Q_{hl} = \alpha_1(T_{mb} - T_a), Q_{il} = \alpha_1(T_{mt} - T_a)$$

式中:

$k_1, k_2, k_3, \alpha_1$ — 换热系数;  $T_a$ — 环境温度;

$T_{mb}$ — 液相区的金属温度;  $T_{mt}$ — 汽相区的金属温度。

### 2.2 锅炉仿真模型

建立的锅炉模型包括制粉系统、汽水系统、风烟系统及锅炉本体。锅炉模型用到算法库中的主要算法包括: 汽包算法(QB)、下降管算法(XJG)、水冷壁算法(SSG), 用于仿真省煤器、过热器、再热器的单相介质换热器算法(SREHTR), 离心风机算法(SF-PUMP)、轴流风机算法(AXIFAN)、空气预热器算法(AIRHTR)、磨煤机算法(LSBPUL)、粗粉分离器算法(FIRSEPR)、细粉分离器算法(SECSEPR)、粉仓粉位算法(LEVEL)、炉膛燃烧算法(COMBUS)、炉膛换热算法(FURRAD1), 通过压力节点算法(SFPNODE)、流量算法(SFFLOW)、联箱算法(SFTANK)将各设备和管路连接起来。

## 3 仿真结果分析

将本模型应用于湛江发电厂 300 MW 火电机组仿真机, 选择机组负荷高于 80% 额定负荷的稳定工况, 分别做了燃料量、给水流量、主蒸汽流量、减温水流量等扰动试验, 求取锅炉的汽包水位、蒸汽压力、蒸汽温度、锅炉燃烧动态响应曲线(10 min 曲线), 见图 1 ~ 图 9。图中横坐标为仿真时间, 纵坐标为相关参数。

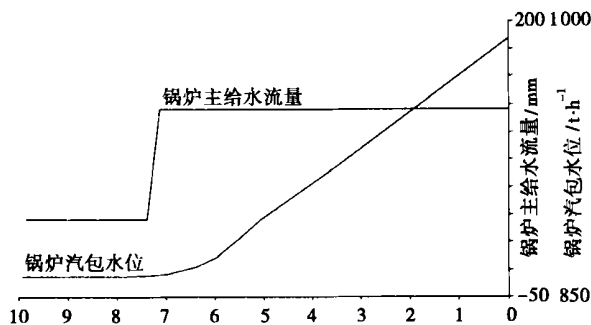


图 1 给水流量扰动水位动态特性

### 3.1 汽包水位阶跃响应

#### 3.1.1 给水流量扰动水位动态特性试验分析

保持汽机调门开度和锅炉燃料量不变, 通过调节给水泵转速使给水量阶跃增加。试验结果如图 1

所示, 汽包水位开始上升缓慢, 之后接近直线上升。这是因为温度较低的给水进入汽包后使汽包水容积中的气泡受冷收缩, 使得开始时水位上升缓慢, 之后因汽包的给水量大于蒸汽流量而呈直线上升。

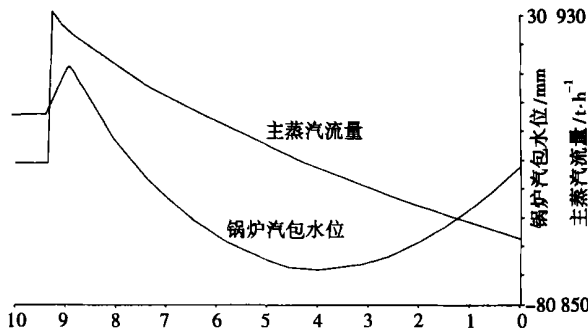


图 2 蒸汽流量扰动水位动态特性

#### 3.1.2 蒸汽流量扰动水位动态特性试验分析

保持锅炉燃料量和汽包给水量不变, 阶跃增大汽机调门开度以改变蒸汽流量。试验结果如图 2 所示, 汽包水位开始有一个较大幅度的瞬时上升, 之后回落, 最后水位呈直线上升。这是因为汽机调门突然开大使蒸汽流量瞬时急剧增加, 导致汽包压力瞬时降低, 汽包水容积中的气泡瞬时膨胀, 使得汽包水位瞬时有一个上升; 之后由于蒸汽流量大于给水量而使汽包水位回落; 最后因新稳态下的蒸汽流量小于给水流量而使汽包水位直线上升。

#### 3.1.3 燃料量扰动水位动态特性试验分析

保持锅炉给水量和汽机调门开度不变, 通过调节给粉机转速阶跃增加燃料量。试验结果如图 3 所示, 开始时汽包水位逐渐上升, 之后逐渐回落, 最后直线降低。这是因为燃料的突然增加使炉膛辐射热量增加, 水冷壁管和汽包水容积内的气泡进一步受热膨胀, 使得汽包水位逐渐上升, 当达到一个新的稳态时, 汽包压力升高、蒸汽流量大于给水流量而使汽包水位逐渐回落至直线下降。

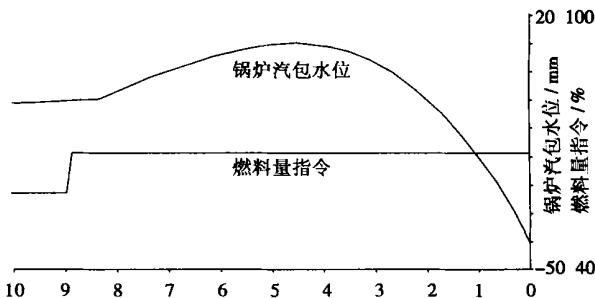


图 3 燃料量扰动水位动态特性

### 3.2 汽包和过热器出口蒸汽压力(主汽压力)阶跃响应

#### 3.2.1 蒸汽流量扰动主汽压力动态特性试验分析

保持燃料量不变,通过阶跃增大汽机调门开度改变蒸汽流量。试验结果如图 4 所示,汽包压力和过热器出口压力瞬时下降,之后缓慢降低至稳定值。系统具有自平衡能力。

#### 3.2.2 燃料量扰动主汽压力动态特性试验分析

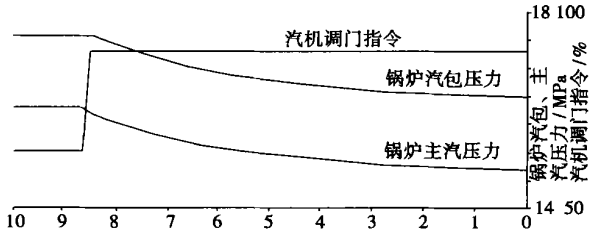


图 4 蒸汽流量扰动主汽压动态特性

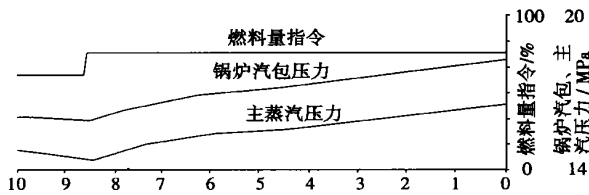


图 5 燃烧量扰动主汽压动态特性

保持汽机调门开度不变,通过调节给粉机转速阶跃增加燃料量。试验结果如图 5 所示,汽包压力和过热器出口压力均缓慢增加,二者压差亦逐渐增加。这是因为蒸汽流量增大,沿程阻力增加所致。

### 3.3 主汽温阶跃响应

#### 3.3.1 燃料量扰动主汽温动态特性试验分析

保持汽机调门和减温水量不变,通过调节给粉机转速阶跃增加燃料量。试验结果如图 6 所示,汽温开始时逐渐上升,之后逐渐下降。因为燃料的增加导致蒸发量的增加超过蒸汽吸热量的增加,使单位质量蒸汽吸热量减少,最后达到新的稳态,其值低于扰动前。

#### 3.3.2 蒸汽流量扰动主汽温动态特性试验分析

保持燃料量和减温水流量不变,阶跃增大汽机调门以改变蒸汽流量。试验结果如图 7 所示,汽温先迅速降低,其后逐渐回升,最后达到新稳态,其值高于扰动前。开始主汽温迅速降低是因为汽机调门突然开大,主汽流量急剧增大所致,之后随着主汽压力下降,主汽流量逐渐降低,致使单位质量蒸汽的吸热量有所增加,使汽温逐渐回升。

#### 3.3.3 减温水流量扰动主汽温动态特性试验分析

保持燃料量和汽机调门开度不变,通过调节一级减温水调门阶跃改变减温水流量。试验结果如图 8 所示,汽温逐渐下降,最后达到一个新稳态。

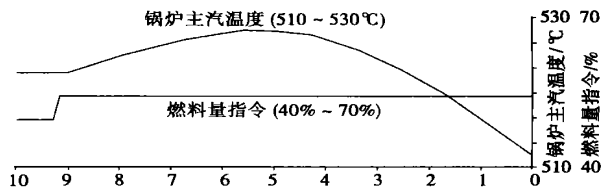


图 6 燃料量扰动主汽温动态特性

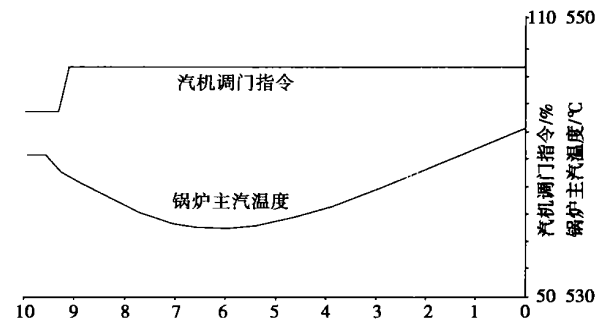


图 7 蒸汽流量扰动主汽温动态特性

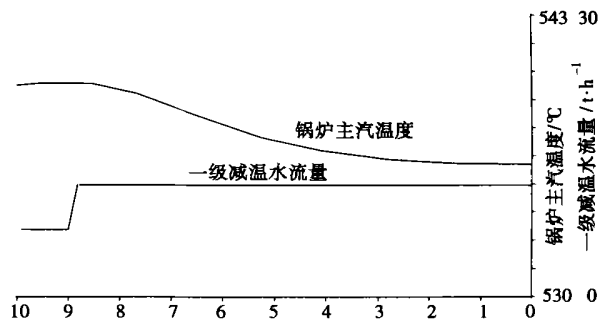


图 8 减温水流量扰动主汽温动态特性

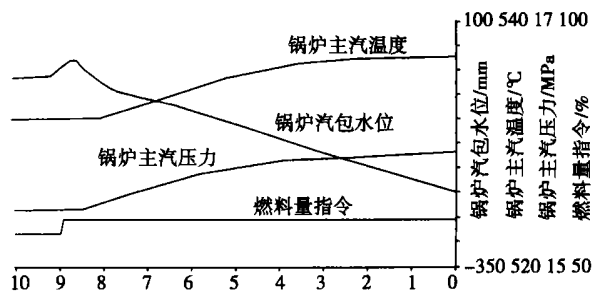


图 9 燃料量扰动水位、主汽压、主汽温动态特性

# 等离子体发生器内高温空气化学反应流场分析

李振宇<sup>1</sup>, 李智明<sup>1</sup>, 陈晓红<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 空气在高温环境下会发生离解、电离等化学反应使组分发生变化, 从而引起流场状态的改变。以一个低温等离子体发生器模型为例, 应用数值模拟的方法对七种组分, 七个化学反应的流场求解, 并与纯空气流场的求解结果进行比较, 分析化学反应流场流动和传热的特点。在数值模拟过程中采用了局部热力学平衡流体模型, 数值格式用 SIMPLEC 算法, 采用贴体坐标的网格模型。计算结果给出了温度场、速度场及组分变化分布图。

**关 键 词:** 等离子体; 数值模拟; 化学反应; 局部热力学平衡

中图分类号: O53.064 文献标识码: A

## 1 前 言

高温空气的化学反应流动是一个比较复杂物理化学变化过程, 它涉及流动、传热、传质和化学反应等一系列复杂问题, 有相当复杂的能量转换机制。同时高温空气在化学反应流动过程中组分的热力学性质也要发生变化, 还伴随着光、电等现象。目前为止还没有一个模型可以完整地描述高温空气化学反应流动的诸多特征, 但是人们对其局部的探索以揭示某一方面的过程机制一刻也没有停歇。

低温等离子体发生器由阴极、阳极和空气流道组

成。由于阴极温度很高, 电极烧蚀严重, 它将直接影响等离子发生器的寿命。为降低电极烧蚀速度, 必须采用合理组织流场的方法对阴极进行冷却。另外, 由于发生器尺寸空间小, 靠实验的方法寻求流场内的工作参数是极其困难的。要想知道等离子体发生器内部的热负荷情况, 合理设计发生器的结构只能采用数值计算的方法模拟等离子体发生器内的化学非平衡流动。

本文借鉴了燃烧学、流体力学和传热学的研究方法, 对等离子体发生器内的物理化学过程和能量添加机制做了简化处理, 得到了能够反映空气化学非平衡流动特征的计算结果。

## 2 数学模型

本文所模拟的低温等离子体发生器工作温度在 1 000~3 000 K 范围内。根据等离子体发生器的工作特点和气体在此工作温度范围的特性, 在模型的建立过程做了如下基本假设:

(1) 局部热力学平衡 (LTE), 认为电子、离子和中性粒子的温度在所考虑的温度、压力范围内是相等的。

收稿日期: 2003-02-18

作者简介: 李振宇(1968-), 男, 黑龙江双城人, 现任中国人民解放军海军装备部工程师。

### 3.4 燃烧动态特性

保持汽机调门开度不变, 送引风机自动调节, 阶跃增加燃料量。试验结果如图 9 所示, 开始时汽包水位逐渐上升, 之后逐渐回落, 最后直线降低, 延迟 40 s 后汽温、汽压缓慢上升, 最后达到新的稳态。

## 4 结 语

通过上述试验及分析可见, 所建立的自然循环锅炉动态模型是严格地按照实际机组的机理开发的, 能正确反映锅炉的动态特性和静态特性, 和文献

[2] 的论述基本是一致的。该仿真模型已应用于湛江发电厂 300 MW 火电机组仿真机, 用于对运行人员的操作培训, 并可以用于优化锅炉的设计和预测变工况时锅炉的主要性能参数。

### 参考文献:

- [1] 韩 璞, 刘长良, 李长青. 火电站仿真机原理及应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998.
- [2] 章臣樾. 锅炉动态特性及数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

(渠 源 编辑)

high-temperature corrosion reaction speed. Meanwhile, the protective structure of this dual porcelain tube can also lessen the “aberration” of temperature distribution at the tube inlet zone, resulting in a decrease in thermal stress-related failures of the tube material at the above-mentioned zone. **Key words:** heat recovery boiler, heat transfer numerical analysis, dual porcelain protective tube

蒸汽喷射式热泵变工况性能分析 = **Analysis of the Off-design Performance of Steam-jet Heat Pumps** [刊, 汉] / XU Hai-Tao, SANG Zhi-fu (School of Mechanical & Power Engineering under the Nanjing Polytechnic University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 395 ~ 398

By using a numerical simulation method the off-design operating performance of steam-jet pumps in a low-pressure steam utilization system was studied and calculated. In addition, an analysis was conducted of the impact of such parameters as the operating steam pressure and temperature, the pressure of jet flows and mixed fluids on the operating performance of the heat pumps. The results of the analysis indicate that when the pressure of the mixed fluids is lower than a certain value the ejection factor can be maintained at a definite value. The heat pumps are very sensitive to the change of ejection fluid pressure. A minor change in the ejection pressure can lead to a drastic reduction in the heat pump operating performance. An increase in the operating steam pressure will not necessarily improve the performance of the steam-jet pumps. This is because an increase in the operating steam pressure will lead to a greater steam flow. The ejection factor will slightly increase with a rise in steam temperature and this variation assumes an approximately linear character. **Key words:** steam-jet heat pump, numerical simulation, ejector, off-design performance, thermodynamic parameters

300 MW 火电机组自然循环锅炉模型的建立及动态特性分析 = **The Building of a Natural-circulation Boiler Model for a 300MW Thermal Power Plant and Analysis of the Boiler Dynamic Characteristics** [刊, 汉] / HE Rong, QUAN Zhao-yu, YANG Hui-chao (Zhanjiang Power Plant, Zhanjiang, Guangdong Province, China, Post Code: 524099) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 399 ~ 401

With the help of a STAR-90 modularized model-building simulation support system a natural-circulation boiler model was set up for a 300MW thermal power plant. The model was employed for a comprehensive simulation unit of 300MW thermal power plant installed at Zhanjiang Power Station. The results of the simulation indicate that the model under discussion can with a relatively high precision reflect the dynamic and static characteristics of a natural circulation boiler. The model can be used for the training of operating personnel, for the optimized design of boilers and the prediction of main performance parameters of a boiler during its operation under off-design conditions. **Key words:** natural circulation boiler, simulation machine, dynamic characteristics, static characteristics

等离子体发生器内高温空气化学反应流场分析 = **Flow Field Analysis of the Chemical Reaction of High-temperature Air in a Plasma Generator** [刊, 汉] / LI Zhen-yu, LI Zhi-ming (Institute of Power and Nuclear Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Xiao-hong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 402 ~ 405

Under high temperatures air will undergo such chemical reactions as dissociation and ionization, etc, which can lead to changes in constituent elements, resulting in a change in flow field status. With a low-temperature plasma generator model being taken as an example a numerical simulation method was employed to solve for a flow field involving seven kinds of constituent elements and seven chemical reactions. The result was compared with that of a solution for a pure-air flow field. The specific features of the flow and heat transfer of a chemical reaction flow field were analyzed. From the perspective of flow field organization a cooling method of generator electrodes is investigated. During a numerical simulation