

# 超临界直流锅炉变工况实时运行中间点温度控制研究

袁淑娟, 马立新, 戴曙光

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 以超临界直流锅炉为研究对象, 分析了给水量和燃料量与锅炉中间点温度的关系, 建立了中间点温度非线性离散模型, 并进行控制系统设计, 最后将该控制方法应用于某 600 MW 超临界直流机组, 通过实际数据仿真结果和分析, 证明了该控制系统在适应变工况运行的同时, 能够实现中间点温度稳定的控制目的, 能实时响应负荷变化, 保证电力系统安全经济运行。

**关 键 词:** 非线性控制; 超临界直流锅炉; 中间点温度; 负荷需求

中图分类号: TB114.2 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.024

## 引 言

超临界直流锅炉控制系统的设计原则是电网负荷改变时, 寻求一个最佳的策略, 同时调节燃料量和给水量, 保证能量平衡和物质平衡, 稳定汽温和汽压。超临界锅炉是被控特性复杂多变的非线性对象, 当工况变化时锅炉的特性参数亦随之大幅度变化, 而且锅炉控制存在不确定时滞, 控制性能受到影响。针对变负荷工况, 文献 [1] 提出了一种基于两阶段闭环在线辨识的 GPC - PID 控制方法, 辨识出一类变工况下锅炉中间点温度随给水量变化的参数模型。文献 [2] 针对超临界直流锅炉在变负荷运行过程中被控对象参数不断发生变化的特点, 将超临界直流锅炉看作具有不确定性的非线性系统, 对锅炉燃料量变化对水冷壁出口温度的影响进行动态机理分析并建立动态模型。本研究在此基础上, 基于实际设备数据, 分析了给水量和燃料量对中间点温度的影响, 建立非线性离散控制模型, 并进行控制系统设计, 在变工况运行时实现负荷跟踪的同时, 保持中间点温度的稳定。

## 1 直流锅炉的中间点温度控制

蒸汽温度是整个单元机组安全经济运行的重要

因素, 汽温过低会大大降低锅炉的效率, 超临界机组运行中汽温每降低 10 °C, 循环热效率降低约 0.5% [3], 同时会导致汽轮机末级的蒸汽由于湿度过大而对叶片造成损害, 而汽温过高不仅容易对汽机的进汽设备造成损坏, 还可能会烧坏单元机组的过热器, 因此为保证机组的工作效率和安全运行必须把主蒸汽温度控制在规定的范围内, 通常 600 MW 超临界机组变负荷运行时, 在 50% - 100% 负荷之间, 蒸汽温度的变化范围被控制在 -10—+5 °C [3]。

在直流锅炉的蒸汽温度调节中, 如果用出口汽温来调节煤水比, 显然调节过迟, 很难保持稳定的汽温, 通常采用中间点汽温即水冷壁出口蒸汽温度作为超前调节信号, 使调节更加稳定 [4-5]。在变工况运行时, 影响中间点温度的因素较多, 其中水煤比和机组负荷是两个关键因素 [6]。

### 1.1 中间点温度与输入量的关系

超临界机组是一个具有强耦合的三输入三输出多变量控制对象 [7], 输入变量为主汽阀门开度变化量  $\Delta\mu_T$ 、燃料调门开度变化量  $\Delta\mu_B$  和给水阀门开度变化量  $\Delta\mu_D$ , 输出变量为功率变化  $\Delta N$ 、主汽压力变化  $\Delta P_T$  和中间点温度变化  $\Delta T$ 。

在某一确定工况下, 超临界直流锅炉控制系统模型:

$$\begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta P_T \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\mu_T \\ \Delta\mu_B \\ \Delta\mu_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

文献 [6] 以部分分散控制方法对文献 [7] 中 600 MW 超临界直流锅炉简化模型进行分析, 式 (1) 中的传递函数矩阵  $G$  为:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用 Gramian 方法 [8] 进行能控能观性分析, 可

收稿日期: 2014 - 04 - 02; 修订日期: 2014 - 05 - 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61205076)

作者简介: 袁淑娟 (1977 -), 女, 江苏徐州人, 上海理工大学讲师, 博士研究生。

得到其判别阵为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1974 & 0.7549 & 0.0021 \\ 0.0604 & 0.0233 & 0.001 \\ 0.0001 & 0.0047 & 0.1650 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:  $\sum = \varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{21} + \varphi_{22} + \varphi_{32} + \varphi_{31} = 0.9978 > 0.99$

所以可以将超临界直流锅炉的三输入三输出的系统式变成如下形式

$$\begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta P_T \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & 0 \\ G_{21} & G_{22} & 0 \\ 0 & G_{32} & G_{31} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \mu_T \\ \Delta \mu_B \\ \Delta \mu_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

进而得到

$$\Delta T = G_{32} \Delta \mu_B + G_{33} \Delta \mu_D \quad (5)$$

即中间点温度可以用燃料量和给水量变化来控制。因此超临界直流锅炉的关键控制问题转变为如何保证直流锅炉燃料量和给水量动态匹配问题。

### 1.2 中间点温度与负荷之间的关系

图 1 给出了中间点温度与负荷之间的关系<sup>[7]</sup>, 由图可知: 在低负荷工况下, 中间点温度随负荷的变化率较低, 在一定范围内可以近似看作线性比例关系; 而在高负荷工况下, 中间点温度随负荷的变化率渐趋平稳。本研究对处于最佳功率区<sup>[9]</sup>的 80% - 95% THA(THA 为汽轮机热耗验收工况) 情况下进行研究, 此时水冷壁吸收热量反映出来的参数变化首先是压力变化, 而温度变化并不剧烈, 工质温度的变化特性与过热器类似<sup>[10]</sup>。

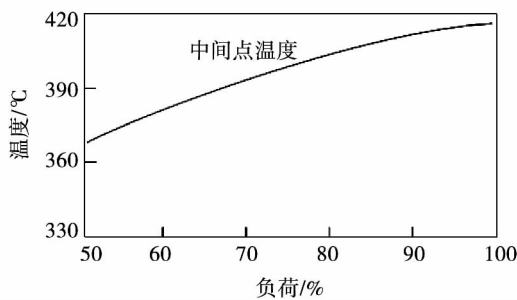


图 1 中间点温度与负荷之间的关系

Fig. 1 Relationship between the intermediate temperature and load

## 2 中间点温度非线性离散模型

某 600 MW 超临界直流锅炉水冷壁前、后下集箱螺旋管屏由 436 根外径 38 mm、壁厚 6.5 mm, 材料为 SA-213T12 的管带围绕而成, 螺旋管屏和垂直屏的转换比为 1:3。选取工况范围为 80% - 95% THA 时的中间点温度稳定问题作为研究对象。

### 2.1 基于实际设备数据的非线性模型

根据超临界直流锅炉水冷壁中的饱和水的汽化潜热为零, 以及运行在某确定工况范围时相变点不会发生较大变化等特点, 将水冷壁中的工质作为一个完整的控制体<sup>[11]</sup>, 根据能量守恒定律、质量守恒定律和金属热平衡等原理, 建立对象的机理模型, 并采用小偏差法进行线性化处理<sup>[12-13]</sup>。将燃料流量 FF 指令实际到达锅炉的延迟线性动态函数设为  $G_f(s)$ , 对于给水 FW 指令的给水延迟相对较小, 因此省略。把在水冷壁内由燃烧产生的热能通过锅炉管进行热交换的动态函数设为  $G_r(s)$ 。通过分析水冷壁模型可看作是一个非线性静态函数 F 和两个线性动态函数<sup>[14]</sup>。非线性静态函数 F 相当于增益, 是随负荷而变化的。由于负荷的增益是非线性的, 可以由实际设备的稳定状态求得。

通过对实际设备数据解析, 建立水冷壁出口蒸汽温度控制系统的非线性离散控制模型:

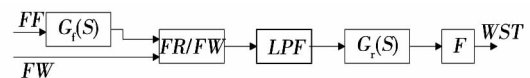


图 2 水冷壁非线性离散模型

Fig. 2 Nonlinear discrete model for water walls

FF/FW 称为水燃比, 就是给水流量和燃料流量的比值; LPF(低通滤波器)是去除高频分量的二次巴特沃兹(Butter worth)滤波器, 截止频率为 0.003 Hz; WST 是水冷壁出口蒸汽温度。

### 2.2 控制系统参数辨识

非线性离散控制的考虑方法是基于分别独立地处理非线性静态和线性动态而进行控制对象的特性解析和控制器的设计。将非线性离散控制方法应用于直流锅炉的水冷壁出口蒸汽温度控制, 达到保持出口蒸汽温度稳定的同时, 实现负荷目标跟踪的控制目的。

#### 2.2.1 非线性静态特性

非线性静态特性的分析是以实际的某一确定工

况下的线性分布模型为基础,将模型中的有关参数拟合成不同工况的函数,由于这种模型结合了实际运行的工况,因此建模结果适用于变工况运行。

由已知历史数据给水流量  $FW$  和燃料流量  $FF$  求解水燃比  $FF/FW$  (以下用  $R$  表示)。根据水燃比  $R$ 、水冷壁出口蒸汽温度的稳定状态的数据、输出负荷需求,建立函数关系。

$$WST = F(R, MWD) \quad (6)$$

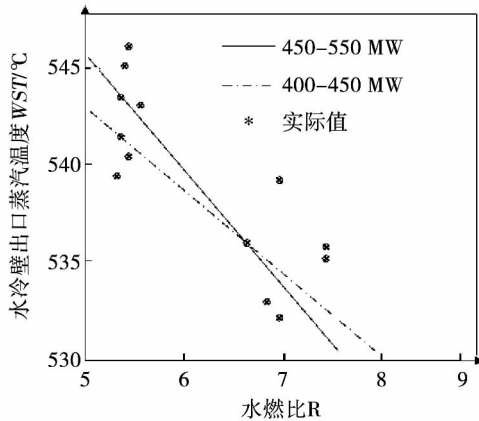


图 3 非线性静态图

Fig. 3 Nonlinear Static Diagram

由于选取工况范围为 80% - 95% THA, 在非线形静态时导出的数据是 400 MW 以及 550 MW 的稳定负荷, 图中的\* 表示在不同负荷情况下, 根据实际数据计算获得的水燃比和水冷壁出口蒸汽温度对应数值, 中间值用直线内插法得到。

### 2.2.2 线性动态特性

线性动态函数  $G_f(s)$  和  $G_r(s)$ , 由含时间常数

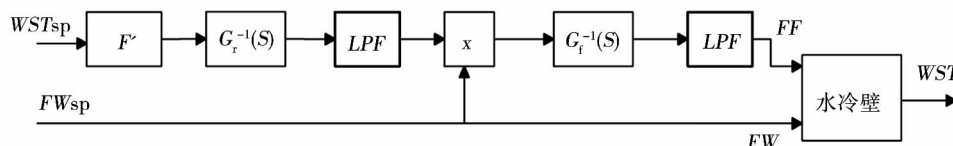


图 4 水冷壁出口蒸汽温度非线性离散控制器

Fig. 4 Nonlinear discrete controller for controlling the steam temperature at the outlet of the water-wall

非线性静态函数  $F$  的补偿, 取式 (6) 的非线性静态的逆函数  $F^{-1}$ , 由水冷壁出口蒸汽温度  $WST$  和输出负荷需求推导出的水燃比  $R$  为:

$$R = F^{-1}(WST, MWD) \quad (10)$$

线性动态函数  $G_f(s)$  和  $G_r(s)$ , 利用时间常数

$\tau_f, \tau_r$  的式 (7) 式 (8) 一次模型给出:

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + \tau_f s} \quad (7)$$

$$G_r(s) = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad (8)$$

为了使系统的输出参数变化尽可能小, 目标跟踪速度尽可能快, 寻求最佳的控制策略: 线性动态的时间常数是把非线性离散模型的输出量, 即水冷壁的出口蒸汽温度设定值  $WST_m$  作为控制目标, 水冷壁出口蒸汽温度的实际数据为  $WST$  时, 根据均方误差性能评价函数求取最小值的时间常数。

水冷壁出口蒸汽温度均方误差:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (WST - WST_m)^2 \quad (9)$$

式 (9) 即为均方误差性能评价函数, 其中  $N$  是数据的个数。在求解时间常数时, 首先固定  $\tau_f$  (负荷上升时  $\tau_f = 56$  s, 负荷下降时  $\tau_f = 160$  s), 由最小二乘法求解  $\tau_r$ , 再把求出的  $\tau_r$  固定, 由最小二乘法求解  $\tau_f$ , 其结果为: 负荷上升时  $\tau_f = 175$  s,  $\tau_r = 890$  s; 负荷下降时  $\tau_f = 290$  s,  $\tau_r = 900$  s。

### 3 基于实际设备数据的非线性离散控制器的组建

基于上一节组建的实际数据<sup>[15]</sup>, 由非线性离散模型组建了非线性控制器。

水冷壁出口蒸汽温度非线性离散控制器如图 4 所示, 由非线性离散模型和镜像目标而构成, 对非线性动态、线性静态分别进行独立的补偿。

$\tau_f, \tau_r$ , 一次延迟的动态式 (7) 和式 (8) 逆动态进行补偿。

$$G_f^{-1}(s) = 1 + \tau_f s \quad (11)$$

$$G_r^{-1}(s) = 1 + \tau_r s \quad (12)$$

在组建控制器时, 从  $WST_m$  到  $WST$  期望理想地跟踪输入目标值输出。

3.1 控制系统模型

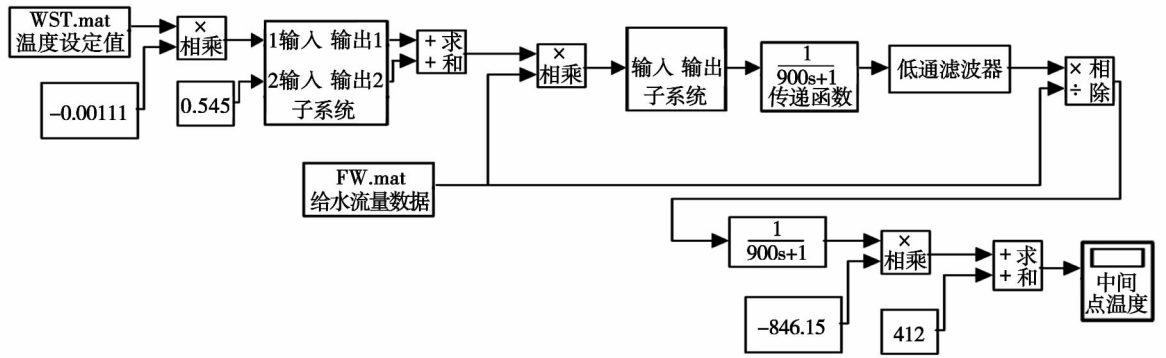


图5 控制系统仿真模型  
Fig. 5 Model for simulating control systems

3.2 控制过程的仿真及实际设备数据

对组建的式(6) - 式(9)的非线性离散模型进行仿真分析,实际的给水流量、燃料流量的数据,如图6 - 图7所示。

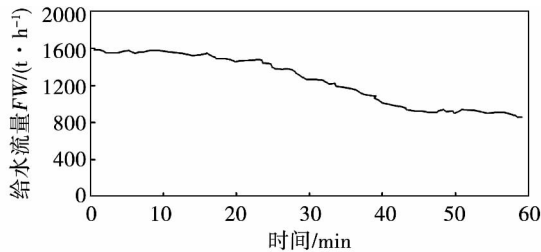


图6 给水流量  
Fig. 6 Feedwater flow rate

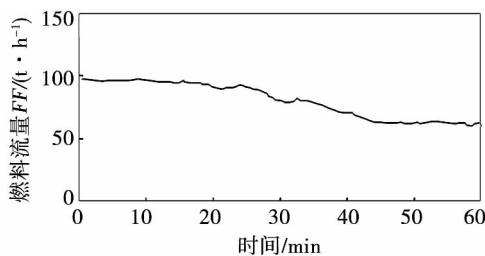


图7 燃料流量  
Fig. 7 Fuel flow rate

值作为水冷壁的温度控制是十分小的。此仿真结果和文献[2]中机组变负荷运行工况下中间点温度控制结论相似,该方法在超临界直流锅炉变工况运行时的中间点温度控制中具有快速、稳定、准确的特点。

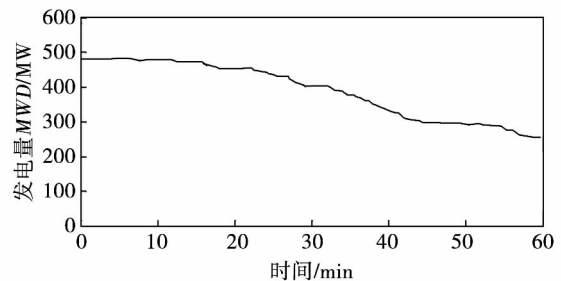


图8 实际负荷需求  
Fig. 8 Actual load demand

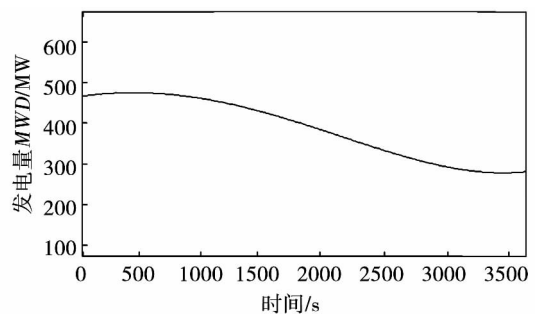


图9 负荷运行状况仿真图  
Fig. 9 Chart showing the simulation of the load operation conditons

3.3 仿真结果及分析

使用组建的非线性离散控制器,设置控制目标温度412℃时,进行控制仿真。仿真结果与实际数据的比较:由图8和图9相比较可知,负荷变化能够跟随实际的电网需求;从图10可见中间点温度的控制目标和实际仿真数据的误差最大2-3℃,这个数

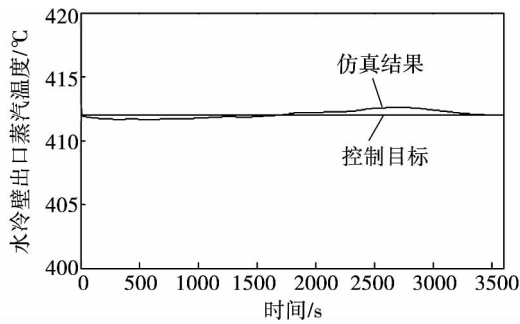


图10 中间点温度输出

Fig. 10 Intermediate-point temperature output

## 4 结论

从实际工程应用出发,由给水流量、燃料流量到水冷壁出口蒸汽温度的控制系统中,组建出基于超临界锅炉实际数据的非线性离散模型。该模型直接由实践采集数据出发,避免了热力学和传热学的复杂建模公式,所设计的控制系统能够在负荷波动的情况下,保持中间点温度的稳定,简化了控制设计,实现了控制目标,能够满足变工况运行的需要,提高了机组的调峰能力。

## 参考文献:

- [1] 王建国,苟晓卫.基于在线辨识的锅炉中间点温度 GPC-PID 控制[J].控制工程 2013 20(4):631-634.  
WANG Jian-guo, GOU Xiao-wei. GPC-PID control of the intermediate-point temperature in a boiler based on the online identification[J]. Control Engineering 2013 20(4): 631-634.
- [2] 谷俊杰,曹晓威.超临界直流锅炉煤水比控制系统机理建模及定量反馈控制[J].动力工程学报 2013 33(12):947-954.  
GU Jun-jie, CAO Xiao-wei. Mechanism modeling and quantitative feedback control of a coal-water ratio control system in a supercritical once-through boiler[J]. Journal of Power Engineering 2013 33(12): 947-954.
- [3] 古郁.660 MW 超超临界机组直流锅炉煤水比控制策略[J].安徽电力 2011 28(1):45-48.  
GU Yu. Strategies for controlling the coal-water ratio in a 660 MW ultra-supercritical once-through boiler[J]. Anhui Electric power, 2011 28(1): 45-48.
- [4] 俞成立.超(超)临界机组中间点温度过热度控制策略[J].中国电力 2008 41(7):60-64.  
YU Cheng-li. Strategies for controlling the intermediate-point temperature superheating degree in an ultra-supercritical unite [J]. China Electric Power 2008 41(7): 60-64.
- [5] 樊泉桂.1 000 MW 超超临界锅炉中间点温度和汽温控制[J].动力工程 2007 27(3):332-335.  
FAN Quan-gui. Intermediate-point temperature and steam temperature control of a 1000 MW ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Power Engineering 2007 27(3): 332-335.
- [6] 王恭良,沈炯,李益国,等.适用于控制的 600 MW 超临界机组的简化模型[J].江苏电机工程 2008 27(4):1-7.  
WANG Gong-liang, SHEN Jiong, LI Yi-guo, et al. A simplified model for controlling 600 MW supercritical units[J]. Jiangsu Electric Machinery Engineering 2008 27(4): 1-7.
- [7] 谷俊杰,冀乃良.超临界机组协调控制方法研究及模型分析[J].华北电力大学学报 2013 40(2):73-77.  
GU Jun-jie, JI Nai-liang. Research of methods for coordinating and controlling a supercritical unit and model analysis [J]. Journal of North China University of Electric Power 2013 40(2): 73-77.
- [8] Conley A, Salgado M E. Gramian Based Interaction Measure [C]. Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia 2000.
- [9] 刘家志.锅炉负荷变化对运行效率的影响及控制[J].科技信息 2011 4(1):12-15.  
LIU Jia-zhi. Influence and control of changes in the load of a boiler on its operation efficiency [J]. Science and Technology Information 2011 4(1): 12-15.
- [10] 叶向荣.600 MW 超临界锅炉中间点温度仿真与控制[J].电力科学与技术学报 2010 25(2):84-88.  
YE Xiang-rong. Simulation and control of the intermediate-point temperature of a 600 MW supercritical boiler [J]. Journal of Electric Power Science and Technology 2010 25(2): 84-88.
- [11] 方彦军,李鑫,胡文凯,等.基于动态机理分析的超超临界机组锅炉中间点温度控制模型研究[J].热力发电 2011 40(7):41-44.  
FANG Yan-jun, LI Xin, HU Wen-kai, et al. Study of the model for controlling the intermediate-point temperature of an ultra-supercritical boiler based on the dynamic mechanism analysis [J]. Thermal Power Generation 2011 40(7): 41-44.
- [12] 楼冠男,谭文.部分分散控制及其在单元机组协调控制中的应用[J].中国电机工程学报 2011 31(2):91-95.  
LOU Guan-nan, TAN Wen. Partial distributed control and its applications in the coordinated control of units [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2011 31(2): 91-95.
- [13] 刘红军,徐伟勇.直流锅炉最优控制的仿真研究[J].华北电力学院学报 1995 22(2):45-51.  
LIU Hong-jun, XU Wei-yong. Simulation study of the optimal control of an once-through boiler [J]. Journal of North China Inst. of Electric Power, 1995 22(2): 45-51.
- [14] 村司郎,平山开一郎,马立新.发电设备中的控制技术[M].北京:机械工业出版社 2012.  
Mura Shiro, Hirayama Kaiichiro, MA Li-xin. Control technology for power generation equipment items [M]. Beijing: China Machine Press 2012.
- [15] Kocaarslan E C am. Experimental Modeling and Simulation with Adaptive Control of a Power Plant [J]. Energy Conversion and Management 2007(48):787-796.

(丛敏编辑)

hibits the quasi-dispersed flow characteristics. The role of further increasing the air consumption rate played in improving the gas-liquid dilution-mixing effectiveness is limited. The data of the flow rate obtained during the numerical calculation is in relatively good agreement with the test data. The relative error of the liquid flow rate is less than 5% and that of the gas flow rate is less than 10%. **Key Words:** standard Y type nozzle, air consumption rate, flow characteristics, two-phase flow, numerical simulation

浮点型涡流发生器  $\text{CaSO}_4$  析晶污垢沉积的模拟研究 = **Simulation Study of the  $\text{CaSO}_4$  Crystallization Foul Deposition in a Floating Point Type Vortex Generator** [刊, 汉] ZHANG Yi-long, LIU Zuo-dong ( College of Energy Source, Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), XU Zhi-ming ( College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29( 6). - 693 - 697

By using the model for crystallization fouls, numerically simulated was the deposition of foul in a rectangular channel equipped with a floating point type vortex generator. It has been found that the amount of foul deposited in a unit area will decrease with an increase of the floating point dimensions and increase with an increase of the spacing between the floating points arranged. However, when the radius of the floating point is definite and the spacing between the floating points is less than two times of the diameter of the floating point, to decrease the spacing cannot decrease the amount of foul deposited. A comparison of the simulation results with the relevant test results verifies that the model adopted is correct. **Key Words:** vortex generator, crystallized foul,  $\text{CaSO}_4$ , numerical simulation

超临界直流锅炉变工况实时运行中间点温度控制研究 = **Study of the Real Time Operation Intermediate Point Temperature Control of a Supercritical Once-through Boiler Under the Off-design Operating Conditions** [刊, 汉] YUAN Shu-juan, MA Li-xin, DAI Shu-guang ( College of Photoelectric Information and Computer Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), YUAN Shu-juan ( College of Electrical Engineering, Shanghai College of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29( 6). - 698 - 702

To set up a dynamic load response system for power generation equipment items is regarded as an effective method for enhancing the power source control efficiency. The output power of a thermal power generation unit depends on the feedwater and fuel quantity fed into its boilers. With a supercritical once through boiler serving as the object of study, the authors analyzed the relationship of the feedwater and fuel quantity with the intermediate point temperature of the boilers and on this basis, established a nonlinear discrete model for intermediate temperatures and de-

signed a control system. Finally, the method above-mentioned was used in a 600 MW supercritical once-through unit. An analysis of the data actually measured proved that the control system can accomplish a stable control over the intermediate point temperature and real-time responded the change of the load at the same time of accommodating to the off-design operating conditions, thus guaranteeing a safe and economic operation of the electric power system.

**Key Words:** nonlinear control, supercritical once-through boiler, intermediate point temperature, load demand

中心供风气体扩散燃烧特性的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Air Diffusion Combustion Characteristics of a Central Air Supply Firing Device** [刊, 汉] ZHANG Liang, LIU Ming-zhu, HE Zhao-bin (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 703 - 709

By using the numerical simulation method, studied were the air diffusion combustion characteristics of a central air supply flue duct type firing device in a heat recovery steam generator. Under the operating condition of a fuel gas flow rate being  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , a contrast of the numerical simulation results of the axial temperature distribution and  $\text{NO}_x$  concentration distribution at the outlet with the test ones shows that they are in good agreement and proves that the calculation model is correct. The further calculation results indicate that with an increase of the excess air coefficient and the oxygen content of air or a decrease in air temperature, the maximum speed of the gas in the main stream will increase, however, the maximum speed area, speed attenuation characteristics of the main stream and the axial and radial distribution of  $\text{CH}_4$  component will change not big. When the air excess coefficient is low, the oxygen content is high and the air temperature is high, the flame will be of a “slender” type and to this contrary, the flame will be of a “stubby” type. When the air excess coefficient is low, the oxygen content is low and the air temperature is high, the temperature distribution of the flame will be more uniform. To increase the excess air coefficient and decrease the oxygen content and temperature of air can effectively reduce the  $\text{NO}_x$  emissions at the outlet. In addition, the  $\text{CO}$  concentration is only relevant to the excess air coefficient (i. e. the air flow rate) but irrelevant to the oxygen content and the temperature of air. **Key Words:** central air supply, diffusion combustion, flow characteristics, flame characteristics, emission characteristics

弯尾管亥姆霍茨型无阀自激脉动燃烧器传热特性 = **Heat Transfer Characteristics of a Bent Tail Tube Helmholtz Type Valveless Self-excited Pulsation Burner** [刊, 汉] XU Yan-ying (College of Safety Engineering, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang, China, Post Code: 110136), ZHAI Ming, DONG Peng (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 610 - 714