

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410214

考虑直流锅炉动态换热的超临界机组 电力系统仿真建模

徐达睿¹, 郝玲^{1,2}, 陈磊^{1,2}, 祁鑫³, 刘一峰³,
李江鹏³, 黄怡涵¹, 徐飞^{1,2}

(1.清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2.清华大学新型电力系统运行与控制全国重点实验室, 北京 100084;

3.国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750010)

[摘要] 随着新能源并网比例的增加, 电力系统频率安全问题凸显, 掌握机组调节能力的重要性日益突出。目前电力系统仿真中, 适用于机电暂态和中长期动态的火电机组模型主要采用 IEEE 推荐的汽包锅炉简化模型和单再热器汽轮机模型。如果对直流锅炉机组也采用该模型, 则会因为蓄热系数的动态和控制系统的偏差, 机组主蒸汽压力的仿真结果大幅偏离实际, 进而错估机组调节能力。基于此, 采用热力学的建模方法, 建立了一种适用于多时间尺度动态仿真的超临界直流锅炉火电机组模型。通过建立水冷壁的移动边界模型和过热器的动态热量流模型, 更准确地反映直流锅炉的蓄热能力; 通过加入给水控制和过热度控制, 使得控制系统更符合实际机组。利用电厂运行数据验证了该模型具有较高的仿真精度。相较于现有电力仿真模型, 该模型对主蒸汽压力的仿真精度大幅提升。所提出的模型能够更准确地描述超临界直流锅炉机组在一、二次调频及调峰中的动态过程, 有助于电力系统频率过程仿真。

[关键词] 超临界机组; 直流锅炉; 一次调频; AGC; 锅炉主控

[引用本文格式] 徐达睿, 郝玲, 陈磊, 等. 考虑直流锅炉动态换热的超临界机组电力系统仿真建模[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 91-100. XU Darui, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Simulation modelling of power system for supercritical units considering dynamic heat exchange of once-through boiler[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 91-100.

Simulation modelling of power system for supercritical units considering dynamic heat exchange of once-through boiler

XU Darui¹, HAO Ling^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, QI Xin³, LIU Yifeng³,
LI Jiangpeng³, HUANG Yihan¹, XU Fei^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750010, China)

Abstract: With the increasing proportion of new energy connected to the grid, the issue of frequency safety in the power system and mastering the regulation ability of the units have become more important. At present, in power system simulation, thermal power unit models suitable for electromechanical transient and medium-long term dynamics mainly adopt the simplified model of drum boilers and the single reheater turbine model recommended by IEEE. If a similar model is also used for the once-through boiler unit, the simulation results of the main steam pressure will deviate significantly from the actual situation due to the dynamic of thermal storage coefficient and the deviation of control system, which leads to a misjudgement of the unit's regulation ability. By using

修回日期: 2024-12-21 网络首发日期: 2025-04-18

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (SGNX0000DKJS2200808)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGNX0000DKJS2200808)

第一作者简介: 徐达睿 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电机组 AGC 和一次调频, xdr22@mails.tsinghua.edu.cn.

通信作者简介: 陈磊 (1982), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新能源电力系统动态分析与控制, chenlei08@tsinghua.edu.cn.

thermodynamic modeling methods, a supercritical once-through boiler unit model suitable for multi-time scale dynamic simulation is proposed. By establishing a moving boundary model of the water wall and a dynamic heat flow model of the superheater, the heat storage capacity of the once-through boiler can be reflected more accurately. By incorporating feedwater control and superheat control, the control system is more in line with the actual unit. The high simulation accuracy of the model is verified using power plant operation data. Compared with the existing power simulation models, the simulation accuracy of the main steam pressure has been improved significantly. Therefore, the model can describe the dynamics of supercritical once-through boiler units more accurately in primary and secondary frequency regulation and peak shaving, which is helpful for simulating the frequency process of power systems.

Key words: supercritical units; once-through boiler; primary frequency regulation; AGC; boiler master control

为了实现“双碳”目标,我国电力系统中风电、光伏等新能源机组的发电占比日益增加,相应的火电机组的发电占比不断减少。这在推进电力系统清洁低碳的同时,也带来了系统调节能力不足的问题。一方面,由于风电、光伏的不确定性,大量风电和光伏机组并网对系统的调节能力提出更高的要求;另一方面,由于火电机组的减少,电力系统的惯量和传统调节资源减少^[1]。2个因素叠加,系统频率安全风险增大。随着我国“9·19”锦苏直流双极闭锁^[2]等频率安全事件的发生,人们越来越关注系统的频率安全以及频率调节问题。一方面,针对新能源机组参与调频的研究相继开展^[3],另一方面,传统调节资源的作用也被更加重视,除了进一步提升调节能力以外^[4],还希望能更准确地掌握火电等传统机组的调节能力^[5]。

火电机组的调节能力,按时间尺度可以分为秒级的机电暂态和分钟级的中长期动态,其中机电暂态主要为机组的一次调频能力,而中长期动态则包括二次调频和调峰能力。基于文献[6-7]推荐的汽包锅炉简化模型和单再热器汽轮机模型,文献[8]给出了一种适用于全动态过程的火电机组模型,该模型基本代表了现有电力仿真所采用的火电机组模型。文献[9]就采用类似结构的火电模型,利用遗传算法,辨识得到了模型参数。但是,这种结构的火电机组模型,在应用于超临界直流锅炉火电机组时,会遇到以下问题。

1) 文献[6]的锅炉模型是基于汽包锅炉搭建的,并不完全符合直流锅炉的特点,且该模型的仿真结果十分依赖蓄热系数的拟合精度。文献[10]指出即便在一次调频过程中,假设锅炉蓄热系数保持不变也不符合实际。而在中长期动态中,锅炉的蓄热系数随机组工况的变化,对于蓄热能力较弱的直流锅炉而言,影响更大。

2) 汽包锅炉和直流锅炉的控制系统存在一定差异,用汽包锅炉的控制系统无法直接代替直流锅

炉。文献[11]指出在汽水动态和汽温控制方面,直流锅炉与汽包锅炉存在明显不同;文献[12]详细对比了直流锅炉和汽包锅炉在给水控制系统上的差异;文献[13]指出在火电机组一次调频仿真时依然需要考虑锅炉主控和锅炉模型。锅炉控制系统对于中长期的主蒸汽压力稳定有至关重要的影响。

以上问题最直接的影响是机组主蒸汽压力的仿真结果出现较大偏差,进而使得机组的功率结果存在偏离风险,尤其是在触及一次调频限幅时。文献[2]指出锅炉主蒸汽压力模型对系统频率响应有较大影响。如果不保证主蒸汽压力的仿真精度,会使得对机组调节能力的估计偏离实际。因此,需要结合热力学原理,重新搭建超临界直流锅炉火电机组模型。

目前,在热力研究方面,火电机组模型可大致分为机理模型、数据驱动模型和 GSE、Dymola 等仿真软件模型,其中机理模型分为集总参数模型和分布式参数模型。在集总参数的机理模型方面,文献[14]建立了适用于电力系统分析的超超临界火电机组动态模型;文献[15]提出了补偿环节惯性时间常数的参数动态优化方法;文献[16]给出了直流锅炉的动态数学模型;文献[17]采用三段式的移动边界法,搭建了超临界 600 MW 直流锅炉机组的蒸汽发生器模型。在分布式参数的机理模型方面,文献[18]建立了水冷壁的一维分段移动边界模型;文献[19]采用动态热量流法,搭建了汽包锅炉的数学模型。一般而言,集总参数模型,相较于分布式参数模型牺牲了仿真精度,提升了仿真速度。文献[20]为满足热工控制的研究需要,采用两输入两输出的传递函数模型,辨识得到不同工况下的模型参数;文献[21]搭建了灵活性改造后的超超临界 1 000 MW 直流锅炉机组传递函数模型;文献[22]给出了基于神经网络训练的火电机组模型。这类数据驱动模型的内部动态往往过于模糊,不利于分析影响机组调节能力的关键因素。文献[23]在

GSE 软件中搭建了火电机组动态模型,用以分析燃料偏差对机组循环效率的影响。热力软件是基于封装部件的建模工具,而一个火电机组模型往往包含 20 个以上的物理模块。热力软件虽然具有较高仿真精度,但也有着大量模型参数需要拟定,这使得电力仿真的复杂度随着机组数量的增加而显著增大,相应的仿真耗时也会增加。因此,热力软件更适合用于机组特性研究。

综上所述,现有用于电力仿真的火电机组模型,对于超临界直流锅炉机组的适用性较差,无法准确反映其主蒸汽压力动态,不利于对其调节能力的掌握;同时,热力学方面提供了更详细的火电机组模型,但是需要综合模型复杂度、模型适配环境等多方面因素,才能得到最为合适的建模方法。

为解决上述问题,本文建立了适用于多时间尺度仿真的超临界直流锅炉火电机组模型。为了提升机组主蒸汽压力的仿真精度,在直流锅炉模型方面,采用移动边界和动态热量流的建模方法,准确反映锅炉蓄热能力;在锅炉控制模型方面,加入给水控制和过热度控制,更加符合直流锅炉的控制动态。基于某实际机组的运行数据,本文验证了所搭建模型的准确性,并与现有的电力仿真模型^[8]进行了对比。本文所搭建的火电机组模型,可以为超临界直流锅炉机组的一、二次调频能力及调峰能力的评估提供参考。

1 超临界直流锅炉火电机组动态建模

1.1 模型框架

一个完整的火电机组模型由控制系统、执行部件和锅炉-汽轮机动态响应系统构成,如图 1 所示。其中,控制系统根据输入的电网频率、AGC(auto-automatic generation control)指令,以及反馈的主蒸汽温度、主蒸汽压力、机组功率,得到不同变量的控制指令。不同的控制指令需要相应的执行部件响应,如给煤指令需要转换为对不同磨煤机的控制才可以实现给煤量的变化。执行部件的动作会导致燃料量、二次风量、给水流量和主蒸汽阀阀位的实际变化,进而通过锅炉-汽轮机系统的物理响应,转化为主蒸汽温度、主蒸汽压力和机组功率的变化。

为了搭建模型,本文做如下简化:

1) 采用一阶惯性环节作为各控制指令执行部件的模型。这是因为执行部件也有其配套的控制系,其核心目标是快速、准确地达成控制指令。简化执行部件不会对整体模型带来较大误差,但是可

以降低模型复杂度。

2) 假设二次风量可以匹配燃料量,燃料释放热量仅与燃料量相关,不考虑具体的燃烧动态。

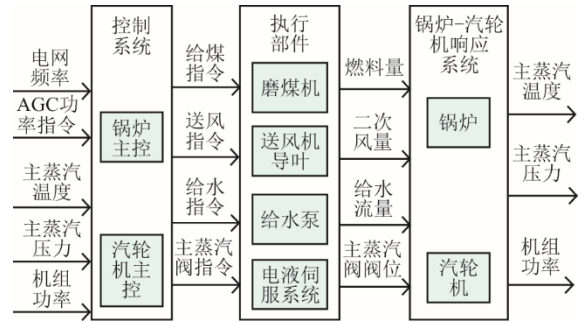
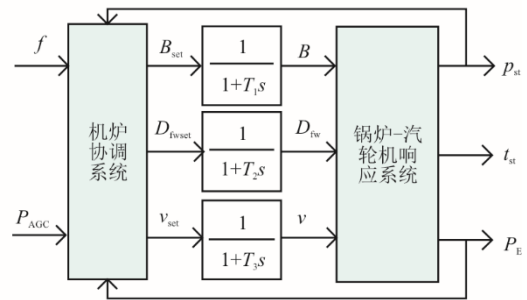


图 1 火电机组结构

Fig.1 Structure of thermal power units

本文火电机组简化结构模型如图 2 所示。



f —电网频率; P_{AGC} —AGC指令; B_{set} —给煤指令;
 v_{set} —阀位指令; B —给煤量; v —主蒸汽阀阀位;
 p_{st} —主蒸汽压力; P_E —机组功率; D_{fwset} —给水指令;
 D_{fw} —给水流量; t_{st} —主蒸汽温度。

图 2 火电机组简化结构

Fig.2 Simplified structure of thermal power units

1.2 锅炉模型

1.2.1 水冷壁

直流锅炉在亚临界状态运行时,存在相变过程。因此,采用移动边界法^[24]建立水冷壁方程。本文忽略水冷壁壁面的换热过程和汽水工质的势能变化,假设流动阻力集总在进口处,将水冷壁模型(图 3)分为过冷段、相变段和过热段,给出每一段的方程如下。

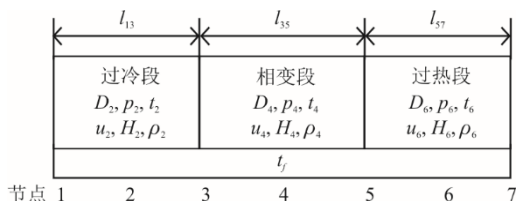


图 3 水冷壁模型

Fig.3 Water wall model

1) 过冷段

$$\left\{ \begin{aligned} S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{13} \rho_2) &= D_1 - D_3 + S_{ww} \rho_3 \frac{dl_{13}}{d\tau} \\ S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{13} \rho_2 u_2) &= D_1 H_1 - D_3 H_3 + Q_2 + \\ & S_{ww} \rho_3 H_3 \frac{dl_{13}}{d\tau} \\ p_1 - p_3 &= \zeta_{13} l_{13} \frac{D_2^2}{\rho_2} \\ u_2 &= \frac{u_1 + u_3}{2} \\ Q_2 &= k_2 l_{13} (t_2 - t_f) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

2) 相变段

$$\left\{ \begin{aligned} S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{35} \rho_4) &= D_3 - D_5 - S_{ww} \rho_3 \frac{dl_{13}}{d\tau} + F_{ww} \rho_5 \frac{dl_{15}}{d\tau} \\ S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{35} \rho_4 u_4) &= D_3 H_3 - D_5 H_5 + Q_4 - \\ & S_{ww} \rho_3 H_3 \frac{dl_{13}}{d\tau} + S_{ww} \rho_5 H_5 \frac{dl_{15}}{d\tau} \\ p_3 &= p_5 \\ u_4 &= \frac{u_3 + u_5}{2} \\ Q_4 &= k_4 l_{35} (t_4 - t_f) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

3) 过热段

$$\left\{ \begin{aligned} S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{57} \rho_6) &= D_5 - D_7 + S_{ww} \rho_5 \frac{dl_{57}}{d\tau} \\ S_{ww} \frac{d}{d\tau} (l_{57} \rho_6 u_6) &= D_5 H_5 - D_7 H_7 + Q_6 + \\ & S_{ww} \rho_5 H_5 \frac{dl_{57}}{d\tau} \\ p_5 - p_7 &= \zeta_{57} l_{57} \frac{D_6^2}{\rho_6} \\ u_6 &= \frac{u_5 + u_7}{2} \\ Q_6 &= k_6 l_{57} (t_6 - t_f) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中： D 为汽水工质的质量流量； p 为汽水工质的压力； t 为汽水工质的温度； u 为汽水工质的内能； H 为汽水工质的比焓； ρ 为汽水工质的密度； l 为水冷壁等效管道长度； ζ 为阻力系数； Q 为汽水工质和烟气的换热量； k 为汽水工质和烟气间换热系数，数字下标为节点（如 D_1 表示节点 1 的汽水工质的质量流量，节点划分见）； S_{ww} 为水冷壁等效管道内横截面积； t_f 为烟气温度； τ 为时间。

为了减少需要辨识的参数，结合汽水工质的物理特性，给出其他方程：

$$\left\{ \begin{aligned} l_{17} &= l_{13} + l_{35} + l_{57} \\ k_2 : k_4 : k_6 &= 4 : 10 : 1 \\ \zeta_{13} : \zeta_{57} &= 3 : 1 \\ k_6 &= f_{ww}(B) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中：函数 f_{ww} 表示换热系数与给煤量间的折算关系，采用分段线性函数的形式，类似于式(16)。

式(1)一式(4)及汽水工质的物性方程，共同构成了水冷壁模型。由于汽水工质的物性方程较多且采用查表的形式，本文在此不再详细列写。

1.2.2 过热器

将过热器等效为一维分段换热器（图 4），并定义其中每一段换热器为一个“换热单元”，给出一个“换热单元”内的方程如下。

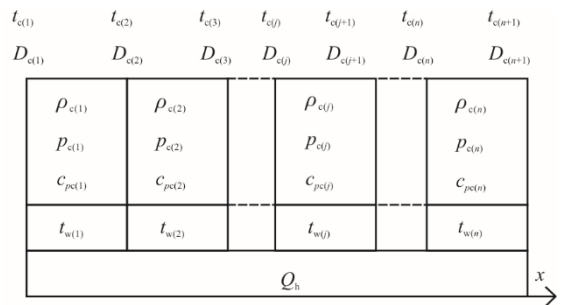


图 4 一维分段换热器
Fig.4 One-dimensional segmented heat exchanger

1) 能量守恒

金属壁截面的能量守恒方程：

$$-Q_h - \frac{k_c}{l} (t_w - t_c) = m_w c_w \frac{\partial t_w}{\partial \tau} \quad (5)$$

式中： Q_h 为金属壁-烟气间单位长度的换热量； k_c 为金属壁-汽水工质间的换热系数； l 为换热单元的金属管长度； c_w 为金属比热； m_w 为单位长度金属管的质量；下标 c 、 w 分别表示汽水工质和金属壁。

汽水工质截面的能量守恒方程：

$$\frac{k_c}{l} (t_w - t_c) = D_c \frac{\partial H_c}{\partial x} + S_{sh} \rho_c \frac{\partial H_c}{\partial \tau} - S_{sh} \frac{\partial p_c}{\partial \tau} \quad (6)$$

式中： S_{sh} 为过热器等效管道内横截面积； x 为长度。

参照文献[25]的动态热量法，将式(5)和式(6)分别改写为式(7)和式(8)：

$$t_{co(\tau+\Delta\tau)} = t_{w(\tau)} + \left(t_{ci(\tau)} - t_{w(\tau)} \right) \exp \left(\frac{k_c}{G_c} \right) \quad (7)$$

$$t_{w(\tau+\Delta\tau)} = (t_{w(\tau)} - t_{ci(\tau)} - Q_h R_c) \times \exp\left(-\frac{\Delta\tau}{M_w c_w R_c}\right) + t_{ci(\tau)} + Q_h R_c \quad (8)$$

式中： $t_{co(\tau+\Delta\tau)}$ 为 $\tau+\Delta\tau$ 时刻换热单元出口的汽水工质温度； G_c 为换热器内全部汽水工质的质量和定压比热容的乘积； R_c 为汽水工质和金属壁间的传热热阻； M_w 为换热单元的金属管质量； $\Delta\tau$ 为汽水工质流动的时间延迟。

G_c 和 R_c 的表达式为：

$$\begin{cases} G_c = D_c c_{pc} \\ R_c = \frac{1}{G_c \left[\exp\left(\frac{k_c}{G_c}\right) - 1 \right]} \end{cases} \quad (9)$$

式中： c_{pc} 为汽水工质的定压比热容。

2) 质量守恒

汽水工质截面的质量守恒方程为：

$$\frac{\partial D_c}{\partial x} + S_{sh} \frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = 0 \quad (10)$$

对于换热单元而言，可以将式(10)改写为：

$$D_{co} - D_{ci} + S_{sh} l \frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = 0 \quad (11)$$

式中： D_{co} 为换热单元出口的汽水工质流量； D_{ci} 为换热单元入口的汽水工质流量。

3) 动量守恒

汽水工质截面的动量守恒方程为：

$$\frac{\partial p_c}{\partial x} + \zeta_\sigma \frac{D_c^2}{\rho_c} = 0 \quad (12)$$

式中： ζ_σ 为阻力系数。

假设汽水工质受到的流动阻力集中在换热单元之间，则式(12)可以改写为：

$$p_{c(j+1)} - p_{c(j)} + \zeta_\sigma l \frac{D_{co(j)}^2}{\rho_c} = 0 \quad (13)$$

4) 燃烧换热

将锅炉炉膛视作一个开口系统，忽略炉膛内换热设备的能量变化，则有：

$$\begin{cases} q_d B \eta_r + c_k D_k t_k = c_y D_y t_y + Q_h \\ B + D_k = D_y \end{cases} \quad (14)$$

式中： q_d 为燃料的低位热值； η_r 为炉膛燃烧效率； c_k 为进入炉膛空气的比热容； D_k 为进入炉膛空气的质量流量； t_k 为进入炉膛空气的温度； c_y 为炉膛出口烟气的比热容； D_y 为炉膛出口烟气的质量流量； t_y 为炉膛出口烟气的温度。

化简得到：

$$B(q_d \eta_r - c_y t_y) + D_k(c_k t_k - c_y t_y) = Q_h \quad (15)$$

当火电机组出力变化不大时，可认为式(15)中仅送风量 D_k 会随给煤量 B 成正比变化，其余参数均维持恒定。当火电机组工况变化较大时，除 D_k 以外的其他参数也会发生明显变化。因此，在火电机组大范围工况内，采用分段线性函数表示，得到金属壁-烟气之间的换热量和锅炉给煤量之间的关系：

$$Q_h = \begin{cases} K_1 B + b_1, B \in (B_0, B_1) \\ K_2 B + b_2, B \in (B_1, B_2) \\ \dots \\ K_j B + b_j, B \in (B_{j-1}, B_j) \end{cases} \quad (16)$$

式中： K_j 为不同工况区间内燃料量变化对换热量的传递系数； B_j 为不同工况的给煤量； b_j 为偏置矫正。

5) 换热单元边界条件

基于图4的一维分段换热器，可以得到如下边界条件：

$$\begin{cases} t_{co(j)} = t_{ci(j+1)} = t_{c(j+1)} \\ D_{co(j)} = D_{ci(j+1)} = D_{c(j+1)} \end{cases} \quad (17)$$

6) 物性方程

对于工质的物性方程，主要考虑水的压强和定压比热容，随温度和密度的变化。取换热单元进出口工质温度的平均值作为定性温度，则工质的物性方程为：

$$\begin{cases} p_{c(j)} = f_p \left(\frac{t_{c(j+1)} + t_{c(j)}}{2}, \rho_{c(j)} \right) \\ c_{pc(j)} = f_c \left(\frac{t_{c(j+1)} + t_{c(j)}}{2}, \rho_{c(j)} \right) \end{cases} \quad (18)$$

式中： $p_{c(j)}$ 为 j 段换热单元汽水工质的定性压力； $c_{pc(j)}$ 为 j 段换热单元汽水工质的定压比热容； $\rho_{c(j)}$ 为 j 段换热单元汽水工质的平均密度。

综上所述，式(7)一式(8)、式(11)、式(13)、式(16)一式(18)构成了过热器的一维分段换热器模型。

1.2.3 主蒸汽阀

阀门的理想流量特性指阀门前后压差恒定时，阀门开度和阀门的流量之间的关系。而实际系统中，阀门前后压差会随流量和管道阻力变化，导致理想特性发生偏离，此时就需要考虑阀门流量系数。对于由多个调节阀共同组成的调节阀组，如主蒸汽阀，其流量特性可以认为是阀门流量和综合开度、阀门压力之间的关系。本文忽略主蒸汽阀流量特性的非线性，认为主蒸汽阀流量和综合阀门开度、主蒸汽压力成正比，即：

$$D_{st} = k_v \times v \times p_{st} \quad (19)$$

式中： D_{st} 为主蒸汽流量； k_v 为阀门流量系数。

1.2.4 减温水

为简化模型，将多个减温水环节合并为 1 个减温水环节，置于过热器和主蒸汽阀之间。假设减温水的注入不影响汽水工质的压力变化，则有：

$$\begin{cases} D_{si} + D_s = D_{so} \\ D_{si}H_{si} + D_sH_s = D_{so}H_{so} \end{cases} \quad (20)$$

式中： D_{si} 为减温水前汽水工质质量流量； D_s 为减温水质量流量； D_{so} 为减温水后汽水工质质量流量； H_{si} 为减温水前汽水工质的比焓； H_s 为减温水的比焓； H_{so} 为减温水后汽水工质的比焓。

1.3 汽轮机模型

对于汽轮机模型，本文采用 IEEE 推荐的单再热器汽轮机标准模型^[7]，如图 5 所示。其中 P_m 为汽轮机输出功率，在不考虑发电机转换效率情况下，近似认为汽轮机输出功率等于发电机输出功率 P_E 。

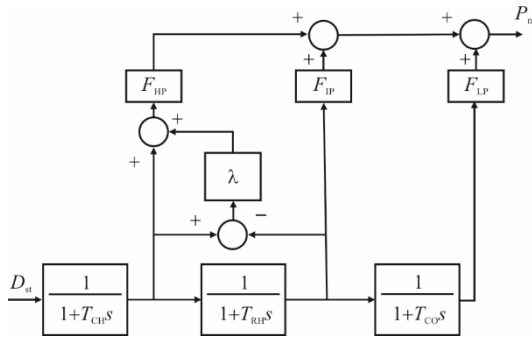


图 5 IEEE 单再热器汽轮机模型
Fig.5 IEEE single reheater turbine model

1.4 控制系统模型

1.4.1 汽轮机主控

汽轮机主控的输入为 AGC 指令 P_{AGC} 、频率偏差 Δf 和机组实际功率 P_E ，输出为主蒸汽阀综合阀位指令 cv ，汽轮机主控逻辑如图 6 所示。

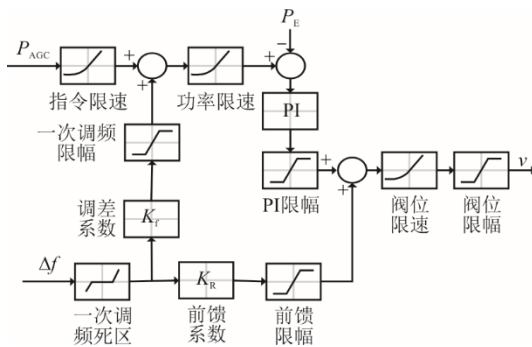


图 6 汽轮机主控
Fig.6 Master control of the turbine

1.4.2 锅炉主控

锅炉主控的输入为 AGC 功率指令 P_{AGC} 和锅炉测量主蒸汽压力 p_{st} ，输出为给煤指令 B 、给水指令 D_{fw} ，其框图如图 7 所示，其中过热度 PI 控制对象为过热器入口工质温度。

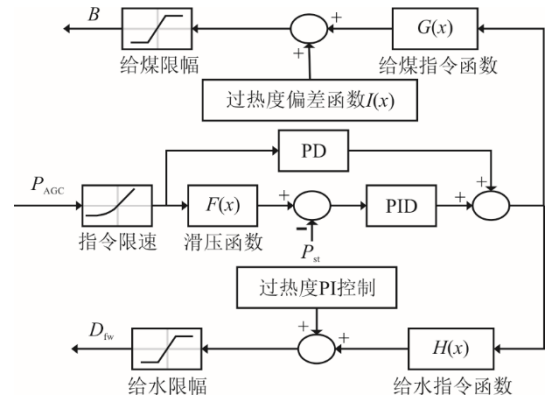


图 7 锅炉主控
Fig.7 Master control of the boiler

1.5 完整模型及讨论

将上述锅炉、汽轮机、控制系统模型进行连接，即可得到超临界直流锅炉火电机组完整动态模型，如图 8 所示。图 8 中： t_{ci} 为过热器入口的汽水工质温度； p_{ci} 为过热器入口的汽水工质压力； t_{co} 为过热器出口的汽水工质温度； t_{wi} 为给水温度。

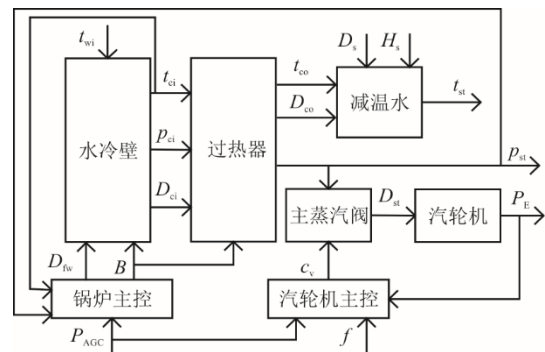


图 8 火电机组完整动态模型
Fig.8 Complete dynamic model of a thermal power unit

相较于现有的电力系统仿真模型^[8]，本文模型更准确地描述了水冷壁和过热器的换热动态以及锅炉主控动态。因此，本文模型具有主蒸汽压力的仿真精度优势，有助于大扰动下的一次调频仿真和中长期仿真。在热力研究方面，本文模型属于一维空间的机理模型。相较于其他机理模型^[14]，本文模型结合了移动边界法和动态热量流法，既可以描述直流锅炉亚临界运行时的热力动态，增大了模型的适用范围，又保留了过热器的空间分布特性，提高

了模型的仿真精度。

2 模型验证

2.1 与测量数据对比

为了验证所搭建模型的准确性，对某超临界 600 MW 直流锅炉机组进行了仿真结果和实际结果的比较。本文锅炉模型的参数辨识方法参考文献[26]，用于对比的现有模型采用文献[6]提出的锅炉模型。图 9 为案例输入的系统频率和 AGC 指令，模型控制参数取自机组实际控制器，模型变量初值取自电厂分散控制系统 (distributed control system, DCS)，得到的仿真结果如图 10 所示。表 1 为模型误差计算结果，其中绝对误差的计算公式为仿真值和测量值的平均绝对偏差。由于不同模型、同一变量的相对误差基值相同，因此采用相对误差计算也可以得到相同结果。

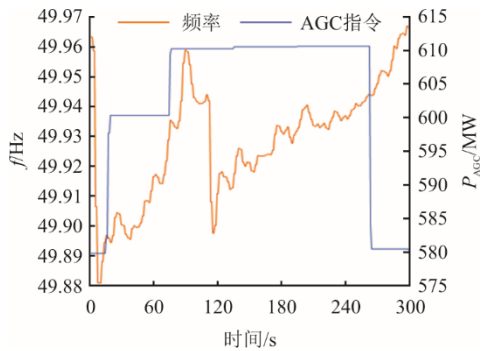
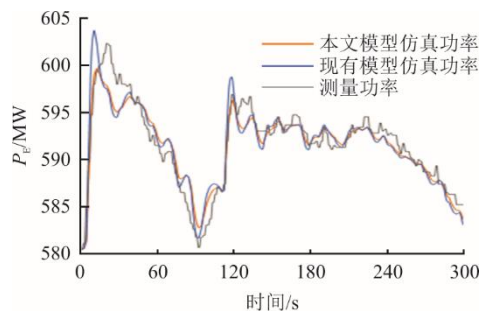
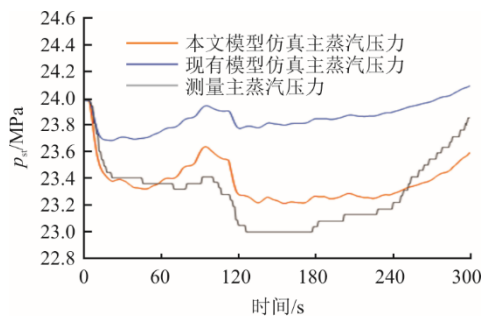


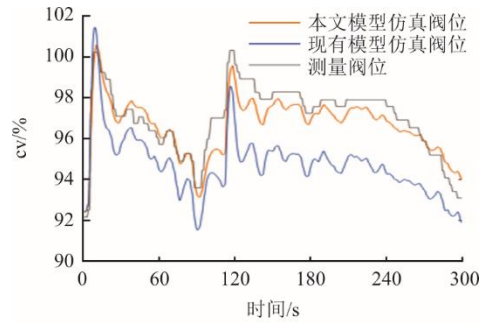
图 9 输入指令
Fig.9 Input command



a) 机组功率



b) 主蒸汽压力



c) 主蒸汽阀综合阀位

图 10 仿真结果
Fig.10 Simulation results

本文模型功率的误差计算公式如下：

$$E_{a_PE_paper} = \frac{\int_0^{\tau_{max}} |P_{E_paper} - P_{E_real}| d\tau}{\tau_{max}} \quad (21)$$

式中： $E_{a_PE_paper}$ 为本文模型功率的绝对误差； P_{E_paper} 为本文模型仿真功率； P_{E_real} 为测量功率； τ_{max} 为最大时刻时间。

相对误差的计算公式为绝对误差除以测量值最大偏差，计算公式为：

$$E_{r_PE_paper} = \frac{E_{a_PE_paper}}{\max(P_{E_real}) - \min(P_{E_real})} \quad (22)$$

式中： $E_{r_PE_paper}$ 为本文模型功率的相对误差。

本文模型提升程度的计算公式为现有模型和本文模型的绝对误差之差除以现有模型绝对误差，其计算公式为：

$$\Delta E_{a_PE} = \frac{E_{a_PE_reference} - E_{a_PE_paper}}{E_{a_PE_reference}} \times 100\% \quad (23)$$

式中： ΔE_{a_PE} 为本文模型功率的提升程度； $E_{a_PE_reference}$ 为现有模型功率的绝对误差。

表 1 模型误差计算结果
Tab.1 Model error calculation results

变量	误差	本文模型	现有模型	本文模型提升程度/%
功率	绝对误差/MW	1.097	1.272	13.76
	相对误差/%	5.02	5.85	
主蒸汽压力	绝对误差/MPa	0.145	0.551	73.68
	相对误差/%	14.80	56.06	
主蒸汽阀综合阀位	绝对误差/%	0.613	2.345	73.86
	相对误差/%	7.51	28.71	

由图 10 和表 1 可以看出，虽然机组功率的仿真结果二者相差不大，但是在主蒸汽压力和主蒸汽阀综合阀位的仿真精度上，本文模型明显优于现有模型。这是因为现有模型存在以下问题：1) 锅

炉模型的蓄热系数为零时刻线性化参数, 缺少动态过程; 2) 锅炉主控的输出没有细分给水指令和给煤指令。上述问题导致现有模型在主蒸汽压力的仿真上失准严重。现有模型依靠汽轮机主控的负反馈调节减弱了主蒸汽压力对机组功率的影响, 但是这本质上是在消耗机组的调节裕量。当机组蓄热耗尽 (主蒸汽阀全开) 时, 主蒸汽压力的动态就会严重影响机组功率。因此, 为了正确评估机组的调节能力, 需要保证内部压力的仿真精度。

需要注意的是, 本文模型和现有模型采用相同的汽轮机主控, 因此在阀位均未触及限幅的情况下, 二者功率的控制性能相近, 主要区别为本文模型由于主蒸汽压力对功率的反调作用 (阀门增大, 主蒸汽压力减小, 抑制功率增长), 功率曲线波动更小。同时, 由式(19)和图 5 可知, 机组功率受主蒸汽压力和主蒸汽阀综合阀位共同影响。在汽轮机主控负反馈作用下, 现有模型为了维持功率准确性, 必然通过调节阀位来弥补主蒸汽压力的偏差。换言之, 在控制系统作用下, 现有模型的功率误差转嫁到了阀位上, 并且阀位误差和主蒸汽压力误差呈现反向, 即主蒸汽压力偏高导致阀位偏低。

2.2 一次调频和升负荷仿真

查阅该机组的设计手册, 获取不同工况下的机组参数, 分别进行一次调频试验^[27]和升负荷场景下的模型仿真, 结果如图 11、图 12 所示。

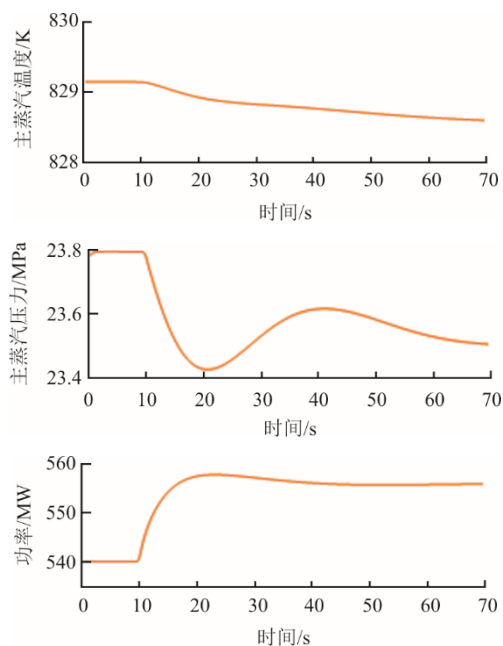
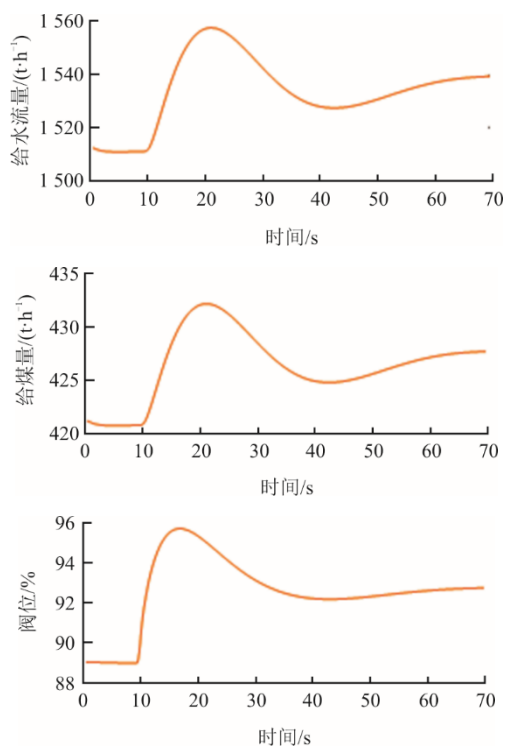
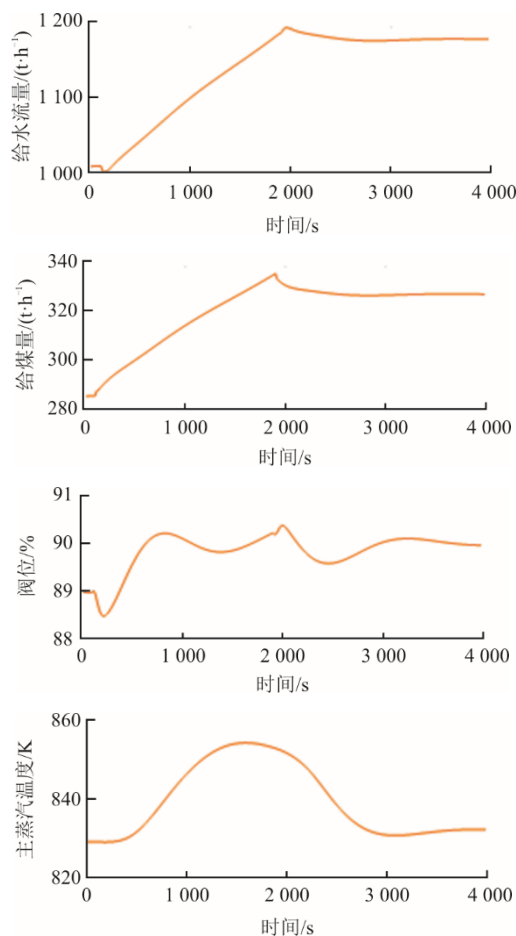


图 11 90% 工况 10 s 发生 -0.1 Hz 的频率阶跃仿真结果
Fig.11 Simulation results for a frequency step change of -0.1 Hz occurring at 10 s under 90% operating condition

由图 11 可知, 一次调频时, 主蒸汽阀综合阀位增大 5% 左右, 机组功率上升 16 MW, 主蒸汽压力下降约 0.4 MPa。



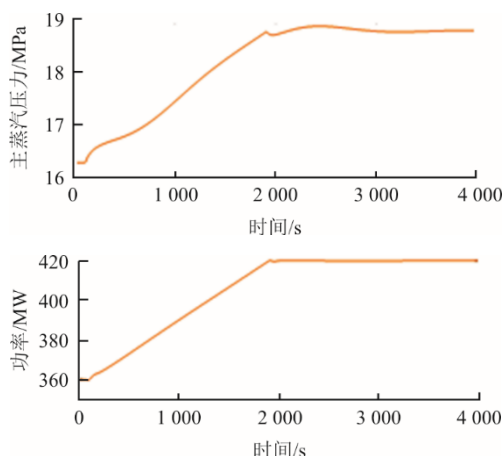


图 12 60% 工况 100 s 后以 2 MW/min 的速率增至 70% 工况仿真结果

Fig.12 Simulation results of condition increasing from 60% load to 70% load at a rate of 2 MW/min after 100 s

由图 12 可知, 升负荷时, 给水流量和给煤量按一定速率增长, 主蒸汽压力按滑压曲线由 16.3 MPa 增长至 18.8 MPa, 机组功率以 2 MW/min 由 360 MW 增长至 420 MW。模型仿真结果符合预期。

3 结 论

新型电力系统的建设, 对火电机组的调节能力提出了更高的要求。而现有电力仿真主要采用的汽包锅炉火电机组模型, 对直流锅炉机组的适用性较差, 不能准确体现直流锅炉机组的调节能力。因此, 本文针对滑压运行的超临界直流锅炉火电机组, 采用热力学的建模方法, 建立了适用于多时间尺度仿真的动态模型。

具体工作包括: 1) 构建了火电机组动态模型的框架, 将火电机组模型划分为控制系统、执行部件和锅炉-汽轮机动态响应系统; 2) 分别采用移动边界法和动态热量流法, 建立了水冷壁和过热器的换热器模型, 结合主蒸汽阀和减温水模型, 共同构成了直流锅炉的动态模型; 3) 提出了适用于直流锅炉的锅炉主控模型, 区别于汽包锅炉, 额外考虑了给水控制和过热度控制, 并给出本文物理-控制模型的完整框图; 4) 利用电厂 DCS 的运行数据, 对某实际机组, 验证了所搭建模型的准确性, 并比较了本文模型相较于现有模型的优势。

本文提出的超临界直流锅炉火电机组模型, 显著提高了机组主蒸汽压力的仿真精度。这无论是对掌握机组的一次调频能力极限, 还是反映机组中长期内调节能力随工况的变动都至关重要。同时, 本文模型对机组试验的依赖性较弱, 可以在事前的频

率安全估计中提供较为精确的参考。但是, 本文模型仍存在部分问题, 包括直流锅炉超临界和亚临界转换导致的动态过程求解问题, 以及煤质变化导致的换热量非线性问题。后续, 本研究将在进一步解决以上模型问题的同时, 将本文模型代入多机系统, 进行系统频率安全的相关研究。

[参 考 文 献]

- [1] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospects of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15.
- [2] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east china grid after bipolar locking of “9.19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [3] 吴斌, 米增强, 张勋奎, 等. 系统友好型“无火电”能源大基地构建研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1706-1719.
WU Jian, MI Zengqiang, ZHANG Xunkui, et al. Research on the construction of a system-friendly “no thermal power” energy base[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1706-1719.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于开展全国煤电机组改造升级的通知: 发改运行(2021)1519号[Z]. (2021-10-29)[2024-10-21]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18322>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on carrying out the reconstruction and upgrading of coal-fired power units nationwide: FGYX[2021]No.1519[Z]. (2021-10-29)[2024-10-21]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18322>.
- [5] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[EB/OL]. (2019-09-30) [2024-6-18]. http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/i.nitUploadedFile.do?uniqueURL=20190930/31921569775323114_12a8ac39-2473-404f-865d-c7fbc66b960b.pdf.
National Energy Administration. North China Regulatory Bureau. Notice of the North China Energy Regulatory Bureau of the national energy administration on issuing the “two detailed rules” (2019 revision) for grid-connected power plants in north China[EB/OL]. (2019-09-30) [2024-6-18]. http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/i.nitUploadedFile.do?uniqueURL=20190930/31921569775323114_12a8ac39-2473-404f-865d-c7fbc66b960b.pdf.
- [6] MELLO F P. Boiler models for system dynamic performance studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 66-74.
- [7] FORLI A, CORCELLA D, SEMERE A, et al. Dynamic models for fossil fueled steam units in power system

- studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 753-761.
- [8] 宋新立. 电力系统全过程动态仿真算法与模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 1.
SONG Xinli. Research on the algorithm and models for power system unified dynamic simulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 1.
- [9] RABIEYAN H, ARASTOU A, KARRARI H, et al. Mathematical modeling and parameter estimation of a coordinated turbine-boiler controlled steam power plant[C]. 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 2021.
- [10] 郭越, 徐飞, 陈磊, 等. 适用于一次调频能力在线监测的锅炉蓄热系数计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1872-1881.
GUO Yue, XU Fei, CHEN Lei, et al. Identification of boiler heat storage coefficient for online monitoring of primary frequency regulation capability of steam unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1872-1881.
- [11] 樊泉桂. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 282-302.
FAN Quanguai. Principles of boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 282-302.
- [12] 潘维加, 鲁峰, 袁钢, 等. 超临界直流锅炉与汽包锅炉给水控制系统的对比分析[J]. 锅炉技术, 2008, 39(3): 25-28.
PAN Weijia, LU Feng, YUAN Gang, et al. Analysis of feed-water control system of supercritical once-through boiler as contrasted with drum boiler[J]. Boiler Technology, 2008, 39(3): 25-28.
- [13] GAO L, DAI Y P. Modeling large modern fossil-fueled steam-electric power plant and its coordinated control system for power system dynamic analysis[C]. 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, China, 2010.
- [14] 陈顺青. 660 MW 超超临界火电机组负荷频率控制与优化研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014: 1.
CHEN Shunqing. Load frequency control and optimization research of 660 MW ultra supercritical thermal power unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014: 1.
- [15] DENG T Y, TIAN L, ZHOU C X, et al. Compensation design of coordinated control system for supercritical once-through CHP plants based on energy analysis[J]. IEEE Access, 2021, 9: 76965-76975.
- [16] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 9-52, 88-94.
ZHANG Chenyue. Dynamic characteristics and mathematical models of boilers[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Publishing House, 1987: 9-52, 8-94.
- [17] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 超临界直流锅炉蒸汽发生器的建模与仿真研究(一)[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 246-253.
FAN Yongsheng, XU Zhigao, CHEN Laijiu. Modelling and simulation study on a supercritical once-through boiler steam generator(1)[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 246-253.
- [18] 刘远鹏. 超临界压力锅炉汽水系统分布参数动态数学模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 1.
LIU Yuanpeng. Dynamic mathematical model of distributed parameter for steam-water system of supercritical pressure boiler[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 1.
- [19] 黄怡涵, 徐飞, 郝玲, 等. 用于一次调频分析的汽包锅炉模型及参数在线确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8332-8344.
HUANG Yihan, XU Fei, HAO Ling, et al. Drum boiler modeling and online parameter identification for analysis of primary frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8332-8344.
- [20] LI S Y, LIU H B, CAI W J, et al. A new coordinated control strategy for boiler-turbine system of coal-fired power plant[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(6): 943-954.
- [21] HE F, ZHANG Y F, SU Z G G, et al. A dynamic mathematical model of an ultra-supercritical coal fired once-through boiler-turbine unit[J]. Applied Energy, 2017, 189: 654-666.
- [22] LU S, HOGG B W. Dynamic nonlinear modelling of power plant by physical principles and neural networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(1): 67-78.
- [23] YIN J J, LIU M, YAN J J. Effect of fuel side deviations on the load-cycling performance of thermal power plants: a dynamic simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 206: 118041.
- [24] 马小峰, 姜培学, 祝银海. 基于移动边界法的超临界流体换热器动态模型[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(10): 2603-2611.
MA Xiaofeng, JIANG Peixue, ZHU Yin Hai. Dynamic model of supercritical fluid heat exchanger based on moving boundary method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(10): 2603-2611.
- [25] 邵卫, 陈群, 贺克伦, 等. 换热器动态特性分析的热量流模型[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(11): 2828-2833.
SHAO Wei, CHEN Qun, HE Kelun, et al. Heat current model for analyzing the dynamic characteristic of heat exchangers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(11): 2828-2833.
- [26] 郭越, 徐飞, 郝玲, 等. 一次调频中的锅炉建模与参数在线确定[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6551-6562.
GUO Yue, XU Fei, HAO Ling, et al. Boiler modeling and online parameters identification for primary frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6551-6562.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 火力发电机组一次调频试验及性能验收导则: GB/T 30370—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Guide of primary frequency control test and performance acceptance for thermal power generating units: GB/T 30370—2022[S]. Beijing: China Standards Press, 2022: 1.

(责任编辑 杜亚勤)