

500 MW 超临界压力直流锅炉机组实时仿真数学模型

(华北电力大学, 仿控所, 河北 保定 071003) 徐二树 马 岗¹⁾ 李恕康

摘 要: 在分析 500 MW 超临界压力直流锅炉机组结构和特性的基础上, 以质量、能量、动量守恒定律为依据, 建立了炉内传热算法和各锅内过程算法。并采用模块化的建模技术, 建立了苏制 500 MW 超临界压力直流锅炉的实时仿真数学模型。该模型能够准确地模拟实际机组的动态特性和静态特性。

关键词: 直流锅炉; 实时仿真; 模拟

中图分类号: TK229; 文献标识码: A

1 仿真对象介绍

苏制 IIII-1650-25-545 KT 型直流锅炉, 是单炉体结构, 受热面布置成 T 型, 在炉膛上部和烟道转弯处布置有屏式蒸汽过热器、对流式蒸汽过热器。在对流竖井布置两组单流程的对流式低温再热器和两组经济器, 32 只旋风喷燃器分 4 层布置在侧墙上。锅炉的汽水管路是相互平行的两个流道, 各有独立的调节系统。相对锅炉的纵向轴线而言, 一个流道在炉膛左侧和左侧对流竖井, 另一个流道在炉膛右侧和右侧对流竖井。每个流道又分为两个不可调的次级流道, 定期混合, 以便消除可能出现的温度差异。每个流道上装有给水调节阀, 给水调节阀后为两个不可调的次级流道。工质依次通过经济器、悬吊蛇形管, I 流程下部辐射受热面, 然后与次级流

道汇合。另一个在给水阀后, 绕过经济器, 悬吊蛇形管和下部辐射受热面有一旁通管道, 在下部辐射受热面后与主管线汇合。然后依次通过 II 流程下部辐射受热面、I 流程上部辐射受热面、II 流程上部辐射受热面、汽-汽热交换器、炉膛侧壁费斯顿管和与之平行的 I 流程水平烟道壁、I 流程对流井壁及炉顶过热器、II 流程对流井壁及对流井悬吊管组和与之平行的 II 流程水平烟道壁。然后与次级流道介质汇合, 通向锅炉点火分离器, 自点火分离器之后, 介质仍沿两个次级流道依次通过 I 级、II 级、III 级屏式过热器和对流过热器。然后与次级流道合并为一, 通向汽轮机。

2 主要过程的数学模型

2.1 炉内的传热模型

炉内传热模型是一维区域模型, 为建模的方便将炉膛沿高度分为七个区域, 在每个区域, 认为烟气的成分、温度等参数都一样, 并认为炉内压力处处相等。该模型是依据辐射传热网络法, 确定各区域的温度水平, 反映各种运行因素对炉内传热因素的影响, 计算出水冷壁、屏式过热器的吸热量, 依据辐射传热网络法对各个区域建立能量平衡关系式为:

烟气区域:

$$\sum_{i=1}^7 s_i g_i \left[\sigma T_{s_i}^4 + \frac{1 - \epsilon_{s_i}}{\epsilon_{s_i} \sigma A_{s_i}} (Q_{ns_i} - Q_{cs_i}) \right] + \sum_{i=1}^7 g_i g_j \left[\sigma T_{g_i}^4 - 4k_{g_j} \sigma v_{g_j} \cdot \sigma T_{g_j}^4 + Q_{jg} - Q_{cg} \right] = \Delta H_{g_j} + Q_{\lambda g_j} + \frac{\Delta(M_{g_j} C_{p_g} T_{g_j})}{\Delta \tau} \quad (j = 1, 2, \dots, 7)$$

壁面域:

$$\sum_{i=1}^7 s_i s_j \left[\sigma T_{s_i}^4 + \frac{1 - \epsilon_{s_i}}{\epsilon_{s_i} \sigma A_{s_i}} (Q_{ns_j} - Q_{cs_j}) + \sum_{i=1}^7 g_i s_j \cdot \sigma T_{g_i}^4 \right] - \left[\sigma T_{s_j}^4 + \frac{1 - \epsilon_{s_j}}{\epsilon_{s_j} \sigma A_{s_j}} (Q_{ns_j} - Q_{cs_j}) \right] \cdot \sigma A_{s_j} + Q_{ns_j} + \frac{\Delta(M_{s_j} C_{p_s} T_{s_j})}{\Delta \tau} \quad (j = 1, 2, \dots, 7)$$

以上为非线性方程组, 输入为各排燃烧器的燃料量 等参数, 输出为各个区域的温度:

其中:壁面 s_j 净吸热量为:

$$Q_{ns_j} = \delta_{s_j} \cdot (\lambda / \delta)_{s_j} \cdot (T_{s_j} - T_a)$$

壁面 s_j 与相邻气体域的对流换热为:

$$Q_{\alpha_j} = \alpha A_{s_j} \cdot (\alpha)_{s_j} \cdot (T_{g_j} - T_{s_j})$$

通过气体域 g_j 的烟气焓增为:

$$\Delta H_{g_j} = M'' \cdot C_p''_{g_j} \cdot T''_{g_i} - M' C_p'_{g_j} \cdot T'_{g_j}$$

式中: M'_{g_j} , $C_p'_{g_j}$, T'_{g_j} 分别为气体 g_j 入口烟气的质量流量, 比热及温度。

M''_{g_j} , $C_p''_{g_j}$, T''_{g_j} 为相应的出口值, δ_{s_j} 为壁面域 s_j 的表面积。

T_{s_j} , $(\lambda / \delta)_{s_j}$ 为壁面域 s_j 灰污层表面温度及灰污系数。

$\epsilon_{s_j} \cdot (\alpha)_{s_j}$ 为壁面域黑度及对流换热系数。

M_{s_j} , C_{s_j} 为壁面域灰污层质量及比热,

V_{g_j} 为气体域 g_j 的体积。

T_{g_j} , Q'_{g_j} , $Q\lambda_{g_j}$ 为该气体域的温度, 燃烧放热率及对流导热项。

K_{g_j} , $C_{p_{g_j}}$, M_{g_j} 为该气体域烟气辐射减弱系数, 定压比热, 烟气质量。

T_a 为水冷壁内工质饱和温度, Δt 为时间步长, σ 为绝对黑体辐射常数。

2.2 锅内过程数学模型

该锅内过程模型既考虑了超临界压力区介质的换热特性, 又考虑亚临界压力区以及亚临界压力区与超临界压力区之间的过渡区—拟临界温度区的介质换热特性。由于工质在管内有不同的流型, 不同的流型存在不同的换热机理, 故在模拟管内介质流动换热工况时采用不同的换热系数计算公式, 其中包括: 超临界压力下的单相流体强迫流动工况; 拟临界温度区单相流体强迫流动工况; 亚临界压力下两相工质强迫流动核态换热工况, 亚临界压力下两相工质流动干烧换热工况, 亚临界压力下单相工质强迫流动换热工况。

2.2.1 换热系数计算

2.2.1.1 超临界温度区换热计算:

$$\alpha_L = 0.023 \times \frac{ND}{d} \times Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} (1 - F)$$

2.2.1.2 拟临界温度区换热系数:

$$\alpha_L = A \cdot \alpha_{10}$$

其中 α_{10} —超临界压力下工质焓 h 为 840 kJ/kg

时管内放热系数。 A 为修正系数。

2.2.1.3 亚临界压力区单相介质的换热系数:

$$\alpha_L = 0.023 \frac{ND}{d} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} (1 - F)$$

2.2.1.4 亚临界压力核态换热系数计算:

$$\alpha_L = \alpha_{hf} + \alpha_{nk}$$

$$\alpha_{hf} = 0.001 \cdot 22 \left[\frac{0.79 \lambda' C_p'^{0.45} \cdot \rho'^{0.49}}{\rho^{0.5} \mu^{0.29} \cdot r^{0.24} \cdot \rho'^{0.24}} \right] \Delta t_{gr}^{0.24} \cdot \Delta p_{gr}^{0.75} \cdot s$$

$$s = [1 + 2.53 \times 10^{-6} (Re)_{Lx}^{1.17}]^{-1}$$

$$(Re)_{Lx} = \left[\frac{w_2 (1-x) d}{u'} \right] F^{1.25}$$

$$1/x_{tt} \leq 0.1 \quad F = 1.0; 1/x_{tt} > 0.1$$

$$F = 2.35 \left(\frac{1}{x_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736}$$

$$x_{tt} = \left[\frac{1-x}{x} \right]^{0.9} \cdot \left[\frac{\rho'}{\rho} \right]^{0.05} \cdot \left[\frac{u'}{u} \right]^{0.1}$$

$$\alpha_{nk} = 0.023 \frac{\lambda'}{d} \left[\frac{w_2 (1-x) d}{u'} \right]^{0.8} \cdot \left[\frac{u' C_p'}{\lambda} \right]^{0.4} \cdot F$$

2.2.1.5 两相流体烧干时换热系数:

$W_2 > 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时

$$y = 1 - 0.1 \left[\frac{\rho'}{\rho} - 1 \right]^{0.4} (1-x)^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 \left[\frac{\rho' w_0 d}{\rho' \nu} \right]^{0.8} Pr'^{0.4} \cdot \left[x + \frac{\rho'}{\rho} (1-x) \right]^{0.8} \cdot y$$

$$\alpha_L = \lambda'' / d \cdot Nu$$

$w_2 \leq 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时

$$\alpha_L = 1.16 \left[\frac{12.5 + 0.025 W_2}{(X + 0.001) - X_{eh}} - (4650 - 8.9 w_2)(X - X_{eh}) + 1240 \right]$$

以上公式中 Δt_{gr} 为壁面过热温度, Δp_{gr} 以壁面温度为饱和温度而确定的压力与饱和蒸汽压力之差。

S 抑制因子

$(Re)_{Lx}$ 两相雷诺数

X_{tt} 马丁勒里参数

X_{eh} 恶化点的质量含汽率

3 仿真模型及仿真结果

在研究分析 500 MW 超临界压力直流锅炉各主要过程的数学模型的基础上, 采用模块化的建模技术, 建立了 500 MW 超临界压力直流锅炉的数学模型。表 1 给出 100% 工况下锅炉设计参数与仿真模型的计算结果, 从表中可以看出各受热面出口温度的相对误差小于 0.5%, 出口压力的相对误差小于

0.15%，出口流量的相对误差小于 0.02%，主要受热面的出口烟温相对误差 0.05%。这说明，建立的

500 MW 超临界压力直流锅炉数学模型具有较好的静态特性。

表 1 100%工况设计值与仿真值比较

参 数	经济器	悬蛇管	下辐 I	下辐 II	上辐 I	上辐 II	汽-汽 热交换器	费 I 水平道	对流 I 号	对流 2 号 水平道 2	屏 I, II	屏 III	对流 过热器
	БЭ	Ш3	HPЧ-I	HPЧ-II	BPЧ-I	BPЧ-II	ПППО	ФБТ СТ-I	СКШ-I	СКШ-I СТ-II	ШПП-I ШПП-II	ШПП-III	КПП
出口 温度 t/°C	设计值 330	342	398	419	435	446	428	437	447	450	509	513	545
计 算 结 果	329.93	341.998	398.003	419.029	436.668	448.136	428.5	437.9	447.9	452	510.5	514.3	546.5
误 差/%	0.021	0.00058	0.00075	0.007	0.38	0.48	0.12	0.2	0.20	0.44	0.29	0.25	0.275
出口 压力 P/MPa	设计值 30.91056	30.8321	30.685	30.3516	29.802	29.312	29.145	28.7237	27.7332	27.0467	26.164	25.566	25.007
计 算 结 果	30.91	30.83	30.687	30.35	29.81	29.28	29.11	28.70	27.69	27.03	26.15	25.54	24.98
误 差/%	0.002	0.007	0.0065	0.0053	0.027	0.11	0.12	0.08	0.16	0.06	0.053	0.1	0.1
出口 流量 W/kg·h ⁻¹	设计值 1 204 500	1 204 500	1 204 500	1 551 000	977 000	1 551 000	1 551 000	1 551 000	1 551 000	1 551 000	1 303 500	1 650 000	1 650 000
计 算 结 果	1 204 314	1 204 314	1 204 314	1 550 758	977 090	1 550 758	1 550 758	1 550 758	1 550 758	1 550 758	1 303 560	1 650 090	1 650 090
误 差/%	0.015	0.015	0.015	0.0156	0.09	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	0.005	0.0055	0.0055
出口 烟气 温度 /°C	设计值 372	718						933		674	971	871	726
计 算 结 果	372.3	717.2						933.9		675	970	871	726.1
误 差/%	0.11	0.11						0.096		0.15	0.1	0.1	0.013

4 结 论

本文用理论分析方法建立的超临界参数直流锅炉的动态数学模型，已用于盘山发电厂 500 MW 超临界压力直流机组的仿真机上，该锅炉模型与汽机、电气和热工数学模型构成的电厂全过程数学模型，能够准确地模拟 500 MW 超临界直流机组的正常运

行、启/停过程和可能出现的故障工况。

参考文献:

- [1] 章臣木越. 锅炉动态特性及基数学模型[M]. 北京: 水力出版社, 1987.
- [2] 徐二树. 苏制 500 MW 机组超临界压力直流锅炉锅内过程数学模型[D]. 华北电力学院, 1994.

(何静芳 编辑)

简 讯

1000 MW 火力发电机组在日本投运

据“火力原子力发电”1999 年 4 月号报道，日本东北电力公司原町火力发电厂 2 号机组已于 1998 年 7 月投入商业运行。如同 1 号机组一样，该机组也是一台单机容量高达 1 000 MW 的超临界再热冷凝式汽轮机

组。日立公司生产的超临界再热式锅炉的连续蒸发量为 2 890 t/h，过热器出口压力为 25.4 MPa，过热器出口温度为 604 °C，再热器出口温度为 602 °C，燃料是煤。

日立公司生产的汽轮机是二轴四汽缸(一个高压缸，一个中压缸和二个中间进汽双排低压缸)四排汽超临界再热凝汽式机组。额定功率为 1 000 MW，主蒸汽压力为 24.52 MPa，主蒸汽温度为 600 °C，再热蒸汽温度为 600 °C，冷凝器压力为 -97.1 kPa。主蒸汽进汽管材料为 9Cr-1Mo 钢，高压缸材料为 Cr-Mo-V-B 铸钢，中压缸材料为 12Cr 铸钢，汽轮机轴为 12Cr 钢。

试运转结果表明，在额定功率下发电端效率高达 44.76%，扣除辅机消耗的 4.3%，净效率达 41.46%，NO_x 排放低于 180×10⁻⁶。

(思娟 供稿)

舰船中压锅筒式锅炉蒸发系统运动特性及仿真= **Operating Characteristics and Simulation of the Evaporating System of a Naval Medium-pressure Drum Boiler** [刊, 汉] / YAO Shou-guang, ZHU De-shu, ZHOU Jian-pin (Eastem China Marine Engineering Institute, Zhenjiang, Jiangsu, China, Post Code: 212003), ZHU Kuan-ren (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 399 ~ 402

Based on the mechanism features of the work process of a targeted object under investigation and its basic physical equations the authors have set up an analytical model for the start-up and off-design operating process of a naval medium-pressure drum boiler. A software has been developed, which can simulate the whole start-up process of the above-cited naval boiler, beginning from its ignition up to the steam parameters attaining a rated power, as well as the variation of the dynamic characteristics of its evaporating system. An analysis of the operation characteristics of the boiler evaporating system indicates that the established model and the software developed along with it can provide valuable reference data and materials for the design and operation of the naval boiler under discussion. **Key words:** boiler, operating characteristics, simulation

四角切圆燃烧炉内颗粒湍流扩散数值模拟= **Numerical Simulation of Particle Turbulent-flow Diffusion in a Tangentially Fired Boiler Furnace** [刊, 汉] / WANG Chun-gang, ZHU Qin-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 402 ~ 404

On the basis of a hypothesis that the turbulent flow in a tangentially fired boiler furnace assumes an isotropic character obtained is the eigenfrequency of various points within the furnace. Meanwhile, a numerical simulation has been conducted of the turbulent flow diffusion of the in-furnace particles with the use of the eigenfrequency - frequency spectrum stochastic trajectory model and a stochastic trajectory model. The calculation results indicate that as compared with experimental results the eigenfrequency-frequency spectrum stochastic trajectory model has been found to produce results reflecting better the effect of the in-furnace eddy on the particle turbulent-flow diffusion. **Key words:** boiler, gas-solid dual-phase flow, turbulent flow diffusion, numerical simulation

500 MW 超临界压力直流锅炉机组实时仿真数学模型= **Mathematical Model of Real-time Simulation for a 500 MW Supercritical-pressure Once-through Boiler** [刊, 汉] / XU Er-shu, LI Shu-kang (Northeast University of Electrical Power Engineering, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003), MA Gang (Baoding Electrical Power Bureau, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 405 ~ 407

The authors have set up an algorithm for in-furnace heat transfer and algorithms for various in-boiler processes. These algorithms have been prepared on the basis of an analysis of the structure and properties of a 500 MW supercritical-pressure once-through boiler and in compliance with the mass, energy and momentum conservation law. In addition, by the use of a modularized model building technique, set up is a mathematical model of real-time simulation for a Russian-made 500 Mw supercritical-pressure once-through boiler. With the help of the above-cited model it is possible to accurately simulate the static and dynamic characteristics of any specific boiler units. **Key words:** once-through boiler, real time simulation, simulation

变频调速装置在电站锅炉辅机上的应用= **The Application of a Frequency Conversion-based Speed Regulation Device in Utility Boiler Auxiliaries** [刊, 汉] / PIAO Yun-feng, SUN Xu-ping, ZHANG Yu-hui (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 408 ~ 409

Described in this paper are the working principles, specific features and prospects of development of frequency conver-