

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405091

# 600 MW 等级超超临界燃煤发电机组动态建模与变负荷控制优化

刘茜<sup>1,2</sup>, 刘泽锋<sup>1</sup>, 王朝阳<sup>1</sup>, 刘明<sup>1</sup>, 严俊杰<sup>1</sup>  
(1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;  
2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 为提升超超临界燃煤发电机组变负荷过程关键参数控制效果及能效, 以某600 MW等级超超临界燃煤发电机组为研究对象进行建模仿真, 其关键热力参数偏差满足火电仿真标准规定, 建立了燃煤发电机组热力系统内部蓄热分布模型, 提出了前馈机组内部蓄热状态的水燃比和烟气挡板开度控制逻辑, 将机组变负荷过程实时的蓄热状态前馈到给水、给煤流量和烟气挡板调控中。仿真结果表明: 机组在40%THA~70%THA负荷段以1.0%Pe/min~3.0%Pe/min速率变负荷时, 累计主蒸汽温度偏差率绝对值下降27%~31%, 机组瞬态过程平均发电标准煤耗率下降0.37~0.65 g/(kW·h)。证明所提出的控制策略提升了超超临界燃煤发电机组变负荷瞬态过程关键热力参数控制精度和能量转化效率。

**[关键词]** 燃煤发电; 变负荷; 汽温控制; 瞬态节能

[引用本文格式] 刘茜, 刘泽锋, 王朝阳, 等. 600 MW 等级超超临界燃煤发电机组动态建模与变负荷控制优化[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 97-105. LIU Xi, LIU Zefeng, WANG Chaoyang, et al. Dynamic modeling and variable load control optimization for 600 MW class ultra-supercritical coal-fired power generation units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 97-105.

## Dynamic modeling and variable load control optimization for 600 MW class ultra-supercritical coal-fired power generation units

LIU Xi<sup>1,2</sup>, LIU Zefeng<sup>1</sup>, WANG Chaoyang<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>, YAN Junjie<sup>1</sup>  
(1.State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To improve the control effect of key parameters and energy conversion efficiency of ultra-supercritical coal-fired power generation units during load cycling process, 600 MW class ultra-supercritical coal-fired power generation units are taken as the research objects to carry out modeling and verification. The deviation of key thermal parameters meets the specified range of thermal power simulation standard. The spatiotemporal distribution model of internal heat storage in thermal system of coal-fired power generation units is established, and the water-fuel ratio and flue gas damper opening control logic of the feedforward internal heat storage state of the unit are proposed. The real-time heat storage state of the unit during the load cycling process is fed forward to the flow rate of feed water, coal, and flue gas damper control. The simulation results show that, when the unit load cycling rate varies from 1.0% Pe/min to 3.0%Pe/min within 40%~70% THA load range, the absolute value of the cumulative main steam temperature deviation rate decreases by 27%~31%. The average power generation standard coal consumption rate of the unit decreases by 0.37~0.65 g/(kW·h) during the transient process. The proposed control strategies improve the control accuracy of key thermal parameters and the energy conversion efficiencies of the ultra-supercritical coal-fired power generation units during load cycling transient processes.

收稿日期: 2024-05-10 网络首发日期: 2024-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4100402)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2022YFB4100402)

第一作者简介: 刘茜(1988), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为核能、节能降耗及自动控制等, liuxisissi@hotmail.com。

通信作者简介: 王朝阳(1991), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为燃煤发电灵活高效运行理论与技术等, chaoyang.wang@xjtu.edu.cn。

**Key words:** coal-fired power generation; variable load; steam temperature control; transient energy saving

在“双碳”目标的引领下,我国正在建设以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1-3]</sup>。燃煤发电正从主体性电源向基础保障性和系统调节性电源转型<sup>[4]</sup>,长期频繁处于深度快速调峰调频等瞬态过程<sup>[5]</sup>。超临界机组是燃煤发电技术的发展趋势,装机约占煤电总装机的60%<sup>[6]</sup>,是我国燃煤发电的中流砥柱。提高超临界机组调峰调频性能是煤电面临的最为迫切的技术需求。但是燃煤机组自身大延迟、大惯性特点制约了其快速变负荷能力,亟需开展燃煤发电热力系统变负荷瞬态特性研究<sup>[7-8]</sup>,以挖掘机组自身的变负荷潜力并提高机组的负荷调节能力。

国内外学者针对燃煤发电灵活性提升展开了大量研究,建立热力系统动态模型是实现机组灵活性提升研究的理论基础。王超等<sup>[9]</sup>针对超临界直流锅炉开展了仿真建模,研究了给水温度和流量阶跃增加5%、燃料量阶跃增加5%时,机组关键热力参数的动态特性。赵征等<sup>[10]</sup>提出了综合利用凝结水节流调节和冷却工质节流调节2种快速变负荷方式以改善煤电机组变负荷性能。苏志刚等<sup>[11]</sup>建立了超临界机组动态模型,并研究了系统的动态特性。严国栋等<sup>[12]</sup>从机理分析出发建立了超临界循环流化床机组动态模型,研究了给煤系统、炉膛热量释放、汽水加热系统和汽轮机系统的动态过程。卿浩等<sup>[13]</sup>对超临界循环流化床锅炉深度调峰跨临界过程中水冷壁动态特性开展了试验研究。弓林娟<sup>[14]</sup>建立了燃煤机组动态模型,并研究了预测控制在灵活性提升中的应用。

热力系统中具有大量的蓄热,变负荷过程中蓄热量将发生变化,同时也可对内部蓄热进行利用,提升机组的变负荷能力。王伟等<sup>[15-16]</sup>研究了凝结水节流参与机组快速变负荷调节的性能,通过辨识凝结水节流通道传递函数,并融入机组变负荷过程,证明了凝结水节流的快速性和有效性。马良玉等<sup>[17-18]</sup>建立了超临界锅炉控制系统的智能控制策略,研究了凝结水节流参与的机组智能优化运行。赵永亮等<sup>[19-21]</sup>建立了超临界机组热力系统动态模型,并研究了主汽调节阀调节、给水节流、凝结水节流、高加抽汽节流、低加抽汽节流等热力系统构型调整方案下机组灵活性的提升效果。

变负荷过程中,机组的关键热力参数稳定是运行的保障。蒸汽温度控制是热工控制中的重要内容,机组在快速变负荷过程中蒸汽温度已发生大幅度波动,威胁运行安全性和经济性<sup>[22]</sup>。孙立等<sup>[23-24]</sup>研究了多目标优化及直接能量平衡法对蒸汽温度的控制效果。李东海等<sup>[25]</sup>研究了过热蒸汽温度控制系统并提出了将自抗扰控制应用于燃煤发电的过热蒸汽温度控制中。马平等<sup>[26]</sup>提出了在锅炉过热蒸汽温度控制中,应用动态预测PID算法,结果表明控制效果优于传统串级PID控制,超调量小,调节过程快。超临界机组的主蒸汽温度控制是水燃比粗略调整+喷水减温精细调整,并配合烟气挡板控制,再热蒸汽温度主要依靠烟气挡板调温控制。水燃比是指进入锅炉的给水和给煤之比,主要用来控制汽水分离器出口的温度,进而为锅炉主汽参数的稳定提供保障。机组变负荷瞬态过程与其在某个负荷点稳定运行的本质差异在于其自身的蓄热状态在实时变化。传统的水燃比控制系统未充分考虑机组在变负荷过程中蓄热差异对控制参数的影响。因此,研究考虑热力系统内部蓄热状态演变规律的燃煤发电变负荷控制计算尤为重要。

为此,本文针对超超临界600 MW等级一次再热燃煤机组开展了热力系统建模与验证,研究了考虑蓄热状态演变规律的水燃比控制及烟气挡板控制,为超超临界燃煤机组调峰调频等瞬态运行的蒸汽温度控制及瞬态节能理论奠定基础。

## 1 超超临界燃煤机组系统建模与验证

### 1.1 机组参数

本文研究对象为华能威海发电有限责任公司超超临界 680 MW 一次再热机组,热力系统主机分别为哈尔滨锅炉厂设计制造的 HG-2001/26.15-YM3 型变压运行直流锅炉和上海汽轮机厂采用西门子技术生产制造的 N660-25/600/600 型纯凝汽式汽轮机,图 1 为超超临界 680 MW 燃煤发电机组热力系统示意,该机组主要热力参数见表 1。主蒸汽和再热蒸汽参数分别为 605 °C/26.15 MPa 和 603 °C/5.87 MPa。此锅炉设计煤种的煤质分析见表 2,煤的低位发热量是 23 570 kJ/kg。

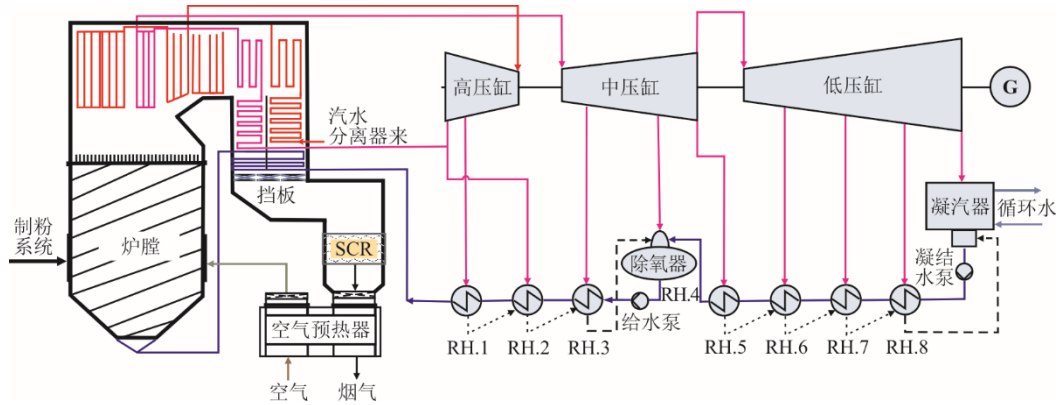


图 1 超超临界 680 MW 燃煤发电机组热力系统示意

Fig.1 Schematic diagram of thermodynamic system of the 680 MW ultra-supercritical coal-fired power generation unit

表 1 超超临界 680 MW 燃煤发电机组主要热力参数

Tab.1 Main thermal parameters of the 680MW ultra-supercritical coal-fired power generation unit

项目	主蒸汽温度/°C	主蒸汽压力/MPa	主蒸汽流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	再热蒸汽温度/°C	再热蒸汽压力/MPa	再热蒸汽流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	给水温度/°C	给水压力/MPa
BMCR	605	26.15	555.9	603	5.87	468.6	298	29.75
75%THA	605	19.09	360.5	603	3.91	312.6	271	21.25
50%THA	605	12.62	234.8	590	2.59	208.1	246	14.69

表 2 煤的工业分析和元素分析 单位: w/%  
Tab.2 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析				元素分析				
M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	FC <sub>ar</sub>	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>
16.40	6.79	24.93	51.88	62.88	3.49	9.41	0.70	0.33

1.2 机组模型

本文基于 GSE 仿真平台建立了燃煤发电热力系

统动态模型。建模思路是利用节点表征各受热面的容积，利用流线将各受热面连接形成流动网络，冷热流体流过节点并通过节点间的换热板完成换热。按照热力系统拓扑结构，完成锅炉及汽轮机模型的搭建，所搭建锅炉及汽轮机仿真模型分别如图 2 和图 3 所示。

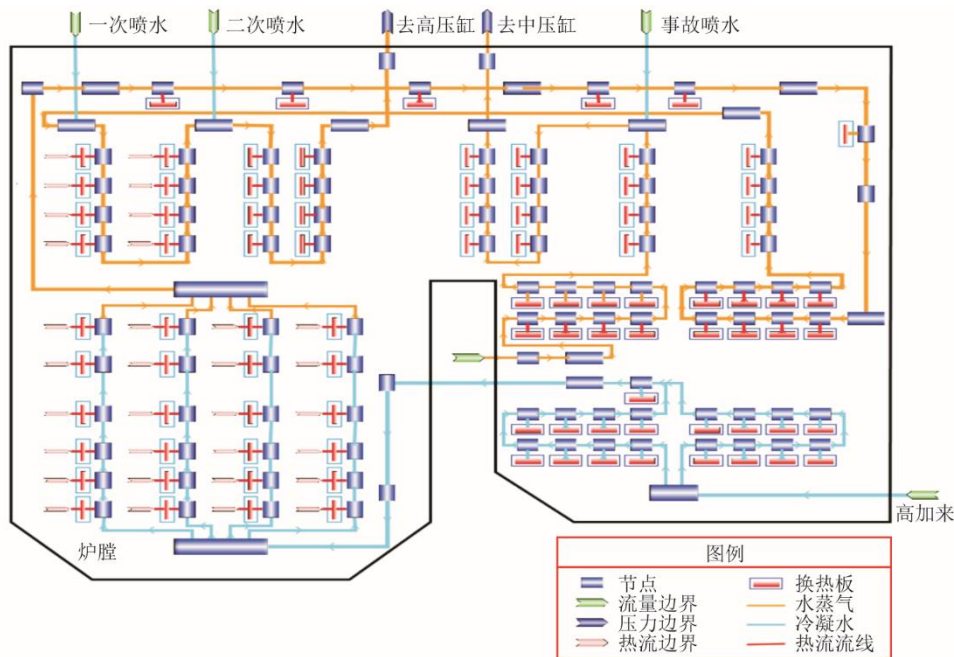


图 2 超超临界锅炉仿真模型

Fig.2 Simulation model of the ultra-supercritical boiler

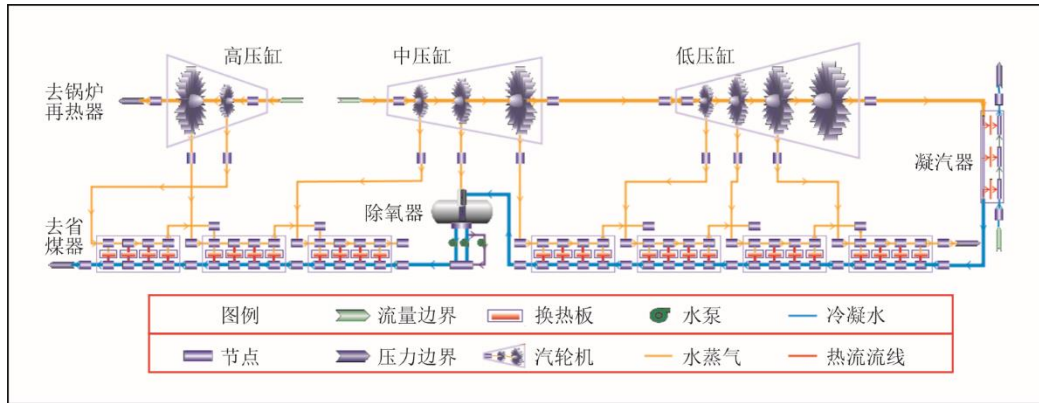


图3 超超临界汽轮机仿真模型

Fig.3 Simulation model of the ultra-supercritical steam turbine

### 1.3 关键参数验证

本文从稳态与瞬态 2 个方面验证所建模型准确性和可靠性。表 3 为热力系统主要热力参数稳态验证结果，本文对 40%Pe~100%Pe 稳态工况关键参数精度进行了验证，最大相对误差为 1.96%，满足 ANSI/ISA 77.20.01—2012<sup>[27]</sup>标准中规定的关键热力参数稳态误差控制在 2% 以内的要求。

对于瞬态过程模型可靠性与精度验证，选取负

荷区段为 40%Pe~70%Pe，对比机组主要参数仿真值与现场测量值，分别将机组有功功率以及主蒸汽压力无量纲化后观察其变化，结果如图 4 所示。由图 4 可见，有功功率及主蒸汽压力测量值与仿真值变化趋势一致，相对误差较小，满足 ANSI/ISA 77.20.01—2012<sup>[27]</sup>标准中关键热力参数瞬态过程最大偏差控制规定。综上，本文建立燃煤发电机组热力系统动态模型具备较高仿真精度。

表 3 热力系统主要热力参数稳态验证结果

Tab.3 Verification results of main thermal parameters of thermal system under stationary work conditions

负荷	参数	设计值	仿真值	误差/%
100%THA	主蒸汽温度/℃	605.0	605.9	0.15
	主蒸汽压力/MPa	26.04	25.80	0.84
	再热蒸汽温度/℃	603.0	603.4	0.07
	再热蒸汽压力/MPa	5.13	5.17	0.77
	给水温度/℃	290.0	290.2	0.05
	给水压力/MPa	29.39	29.38	0.03
	排烟温度/℃	121.0	122.1	0.91
	75%THA	主蒸汽温度/℃	605.0	605.2
主蒸汽压力/MPa		19.09	19.10	0.05
再热蒸汽温度/℃		603.0	603.1	0.01
再热蒸汽压力/MPa		3.91	3.93	0.51
给水温度/℃		270.6	272.0	0.52
给水压力/MPa		21.25	21.43	0.84
排烟温度/℃		108.0	108.7	0.69
40%THA	主蒸汽温度/℃	605.0	605.9	0.14
	主蒸汽压力/MPa	10.29	10.46	1.65
	再热蒸汽温度/℃	580.0	585.1	0.86
	再热蒸汽压力/MPa	2.07	2.10	1.35
	给水温度/℃	234.2	238.8	1.96
	给水压力/MPa	12.17	12.02	1.23
	排烟温度/℃	93.0	94.2	1.30

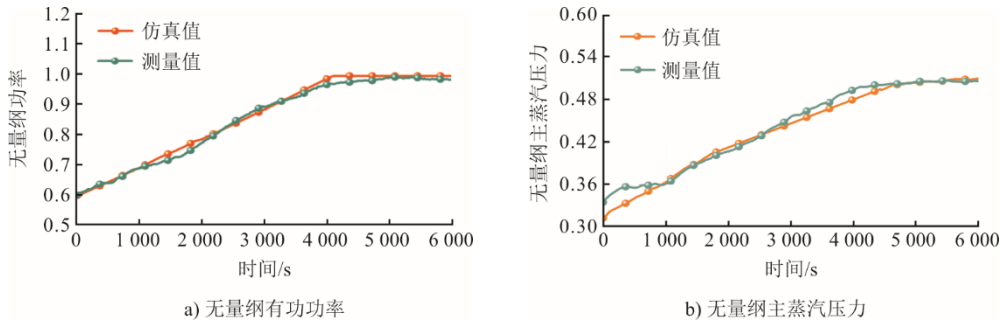


图 4 关键热力参数瞬态验证结果  
Fig.4 Validation results of key thermal parameters during transient processes

## 2 机组控制策略优化

### 2.1 机组蓄热状态

燃煤发电机组热力系统内部具有大量的蓄热，机组在变负荷过程中蓄热将发生变化。本文提出在机组变负荷过程中，根据热力系统各部件的温度、压力等热力参数和各受热面蓄存工质的流量评估机组实时的蓄热状态。燃煤机组热力系统蓄热包括工质蓄热和金属蓄热，其计算公式为：

$$Q_{g,i} = M_{g,i} (h_{g,i} - h_0) \quad (1)$$

$$Q_{m,i} = M_{m,i} c_{p,m} (T_{m,i} - T_0) \quad (2)$$

式中： $Q_{g,i}$  为第  $i$  个换热器内工质的蓄热值，kJ； $M_{g,i}$  为第  $i$  个换热器内蓄存工质的质量，kg； $h_{g,i}$  为第  $i$  个换热器内工质的焓，kJ/kg； $h_0$  为环境温度下工质的焓，kJ/kg； $c_{p,m}$  为金属的定压比热容，kJ/(kg·°C)； $Q_{m,i}$  为第  $i$  个换热器内金属的蓄热值，kJ； $M_{m,i}$  为第  $i$  个换热器内金属的质量，kg； $T_{m,i}$  为第  $i$  个换热器内金属的壁温，°C； $T_0$  为环境温度，°C。

整个热力系统各受热面的总蓄热为：

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{g,i} + \sum_{i=1}^n Q_{m,i} \quad (3)$$

式中： $Q_t$  为热力系统中全部换热器的蓄热值，kJ。

### 2.2 前馈蓄热状态的水燃比控制

为提升机组变负荷过程中关键参数控制效果，本文提出了基于考虑蓄能演变的水燃比动态调控策略。图 5 为水燃比控制策略优化示意，在机组原有控制策略（黑色部分）的基础上，增加了主蒸汽系统蓄热状态修正量（红色部分）。依据 2.1 节提出的热力系统蓄热状态计算方法，计算出不同工况下主蒸汽系统（一次蒸汽）蓄热状态，并以各稳态工

况下的数据作为基础数据，进行分段线性插值，来获得研究范围的任意负荷下对应的蓄热基准值，分段线性插值函数为  $f_5$ 。根据现场实时测量数据，代入蓄热状态计算模型，获得实时的蓄热状态，将基准值与实时值作差，通过求导函数  $f_6$  换算出蓄热状态前馈量，并与原水燃比计算量相加，得到水燃比新值。

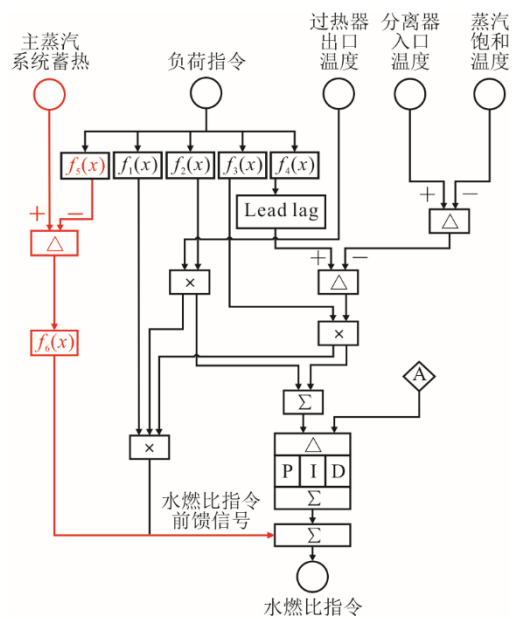


图 5 水燃比控制策略优化示意  
Fig.5 Schematic diagram of the control strategy optimization of water fuel ratio

### 2.3 前馈蓄热状态的烟气挡板控制

本文提出了前馈蓄热状态的烟气挡板调控策略，将低再侧烟气挡板的调控策略融入再热系统的蓄热分布特性，图 6 为低再侧烟气挡板控制策略。在变负荷过程中，将再热系统蓄热状态前馈到蒸汽温度控制中，可更准确地调控挡板开度。

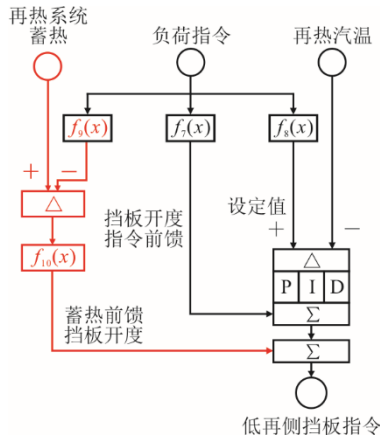


图 6 低再侧烟气挡板控制策略

Fig.6 Schematic diagram of the control strategy of flue gas damper in the low temperature reheater

### 3 结果分析

基于建立的热力系统动态仿真模型, 本文对比分析了优化前后的控制效果。在 40%THA~70%THA 负荷区段内, 分别采用原有水燃比策略及蓄热修正的水燃比策略。选取变负荷速率 1.0%Pe/min 为例, 图 7 和图 8 分别为优化前后的主蒸汽温度和再热蒸汽温度控制效果对比。

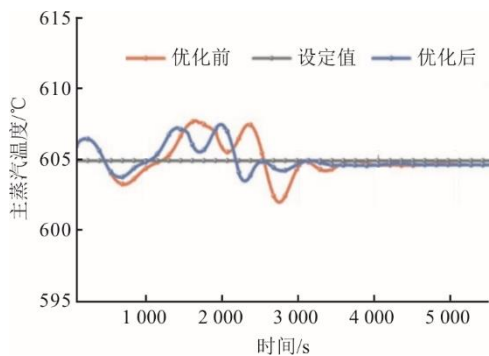


图 7 优化前后的主蒸汽温度控制效果对比

Fig.7 Comparison of main steam temperature control effects before and after optimization

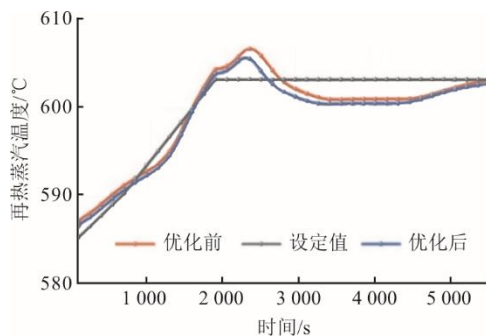


图 8 优化前后的再热蒸汽温度控制效果对比

Fig.8 Comparison of reheat steam temperature control effects before and after optimization

由图 7 可见, 优化后主蒸汽温度的控制效果得到了改善, 优化后的主蒸汽温度最大偏差下降 1.8℃, 且更快地达到新稳态。由图 8 可见, 再热蒸汽温度的控制效果一定程度上得到了改善。

蓄热状态直接体现燃煤发电机组各受热面的热力状态。以机组在额定负荷工况的蓄热值为基准, 记变负荷过程蓄热实时值与基准值的商为无量纲蓄热值。机组在不同工况下的无量纲蓄热有对应准稳态值。图 9 为变负荷瞬态过程中机组无量纲蓄热变化。由图 9 可见, 升负荷过程中, 各设备总蓄热值低于准稳态下的对应值, 关键受热面的传热温差增大, 变负荷瞬态过程不可逆性增加。当采用优化的控制策略后, 蓄热变化与设定值更加接近, 瞬态蓄热偏差得到了减小, 这有利于实现瞬态节能。

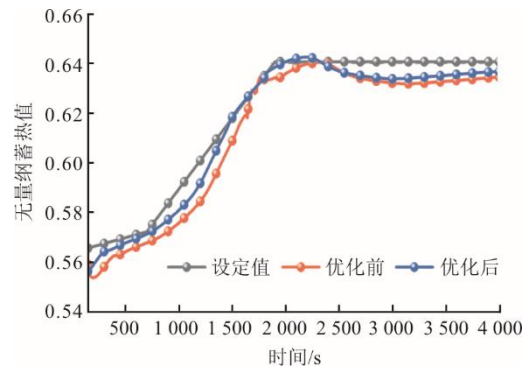


图 9 变负荷瞬态过程中机组的无量纲蓄热变化

Fig.9 Changes of the dimensionless heat storage of the power unit during load cycling transient processes

为展现优化后控制策略对机组变负荷过程关键参数控制效果的提升作用, 本文研究了不同调节速率时机组变负荷瞬态过程中蒸汽温度控制和运行能效等的变化。为此, 本文提出了利用无量纲蒸汽温度偏差累积量表征变负荷瞬态过程中蒸汽温度的控制效果, 利用平均供电煤耗量表征运行能效改善效果。

瞬态过程的无量纲蒸汽温度累积偏差计算公式为:

$$X_1 = \int_0^{\tau_0} \left| \frac{T(\tau) - T_{sp}(\tau)}{T_{sp}(\tau)} \right| d\tau \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为时间, s;  $\tau_0$  为瞬态过程总时间, s;  $X_1$  为无量纲蒸汽温度累积偏差;  $T$  为主蒸汽温度或再热蒸汽温度, °C; 下标 sp 代表设定值。

瞬态过程的平均标准煤耗率计算公式为:

$$b_{s,avg} = 3600 \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{B} d\tau}{\int_0^{\tau_0} \dot{P} d\tau} \frac{Q_{ar,net}}{Q_0} \quad (5)$$

式中： $b_{s,avg}$  为机组瞬态过程的平均发电煤耗率， $g/(kW \cdot h)$ ； $\dot{P}$  为机组发电功率， $MW$ ； $\dot{B}$  为入炉煤速率， $kg/s$ ； $Q_{ar,net}$  为燃煤种的低位发热量， $kJ/kg$ ； $Q_0$  为标准煤的低位发热量， $kJ/kg$ 。

图 10 为不同变负荷过程中无量纲主蒸汽温度偏差。由图 10 可见，随着变负荷速率增加，无量纲主蒸汽温度偏差  $X_{ms}$  呈逐渐增大的趋势。采用优化控制策略后， $X_{ms}$  明显降低。机组变负荷速率为 1.0%Pe/min、2.0%Pe/min 和 3.0%Pe/min 时，无量纲主蒸汽温度偏差值分别下降了 31%、27% 和 28%。

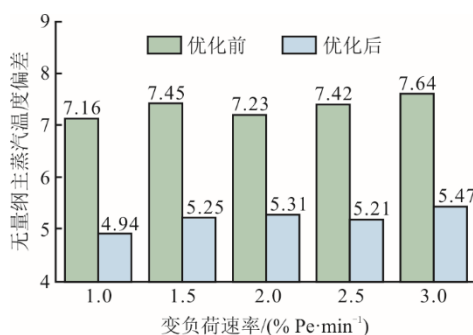


图 10 优化前后的无量纲主蒸汽温度偏差累积量对比  
Fig.10 Comparison of dimensionless main steam temperature deviation accumulation before and after optimization

图 11 为不同变负荷过程中的无量纲再热蒸汽温度偏差。

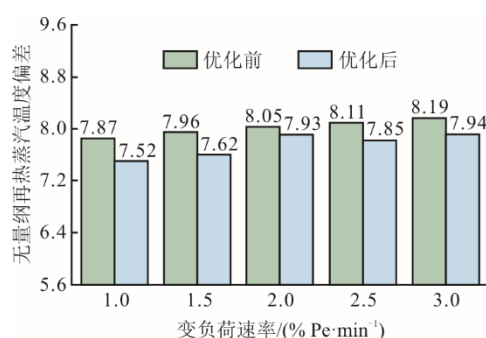


图 11 优化前后的无量纲再热蒸汽温度偏差累积量对比  
Fig.11 Comparison of dimensionless reheat steam temperature deviation accumulation before and after optimization

由图 11 可见，随着变负荷速率的增加，无量纲再热蒸汽温度偏差  $X_{rh}$  呈逐渐增大的趋势。当采

用本文提出的前馈蓄热状态优化的控制策略后， $X_{rh}$  明显降低。当机组变负荷速率为 1.0%Pe/min、2.0%Pe/min、3.0%Pe/min 时， $X_{rh}$  分别下降了 4%、1% 和 3%。

图 12 为不同变负荷速率下机组瞬态过程的节能量。由图 12 可见，在 40%THA~70%THA 负荷区段内，以 1.0%Pe/min~3.0%Pe/min 速率进行变负荷时，采用本文提出的优化控制策略后机组变负荷瞬态过程节能量达 0.37~0.65  $g/(kW \cdot h)$ 。

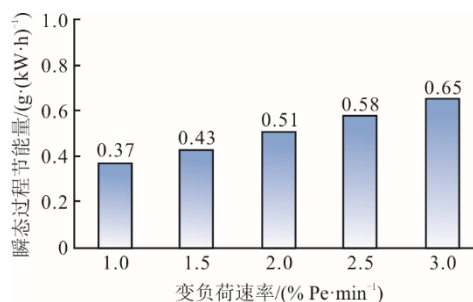


图 12 不同变负荷速率下机组瞬态过程的节能量  
Fig.12 Energy saving of the power unit during the transient process with different load cycling rates

## 4 结 论

本文以华能威海发电有限责任公司 6 号机组为研究对象，建立了超超临界 600 MW 等级燃煤发电机组动态模型，并完成了关键热力参数可靠性校验，提出了前馈机组内部蓄热状态的水燃比和烟气挡板控制逻辑，提升了机组变负荷瞬态过程关键热力参数的控制精度，实现了变负荷过程能效提升，主要结论如下。

1) 基于 GSE 仿真平台，建立了燃煤发电热力系统动态模型，开展了变负荷瞬态过程仿真模拟，发电功率和主蒸汽压力等关键参数计算值与测量值的偏差满足 ANSI/ISA 77.20.01—2012 标准规定范围，为本文变负荷性能研究奠定了模型基础。

2) 建立了燃煤发电热力系统内部蓄热分布模型，获得了变负荷瞬态过程蓄能演变规律，发现升负荷过程中，各设备总蓄热值低于准稳态下对应值，关键受热面传热温差增大，变负荷瞬态过程不可逆性增加，进而引起变负荷过程瞬态能耗上升。

3) 提出了前馈内部蓄热分布的水燃比和烟气挡板控制策略，将机组变负荷过程实时的蓄热状态分别前馈到给水和给煤的物质流调控和烟气挡板调控中，机组以 1.0%Pe/min~3.0%Pe/min 速率变负荷时，累计主蒸汽温度偏差率绝对值下降 27%~31%，累计

再热蒸汽温度偏差率绝对值下降 1%~4%，变负荷过程的瞬态能耗下降 0.37~0.65 g/(kW·h)。

### [参考文献]

- [1] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.  
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [2] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.  
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [3] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8790.  
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8772-8790.
- [4] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. (2022-01-29) [2024-05-06]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c\\_1310524241.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm).  
National Energy Administration. 14th Five-Year Plan for modern energy system[R/OL]. (2022-01-29) [2024-05-06]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c\\_1310524241.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm).
- [5] 严俊杰, 刘明, 王朝阳, 等. 燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配技术及应用[J/OL]. 西安交通大学学报, 2023:1-8. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230705.0927.004.html>.  
YAN Junjie, LIU Ming, WANG Chaoyang, et al. Energy-potential dynamic matching technology for the synergy of high-efficiency, flexibility and clean for coal-fired power generation units during the transient processes and its application[J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023: 1-8. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230705.0927.004.html>.
- [6] 王克, 刘俊伶, 王艳华. 中国煤电低碳转型发展路径研究[R]. 北京: 中国人民大学, 2023: 12-13.  
WANG Ke, LIU Junling, WANG Yanhua. Low carbon transition pathway of coal power in China[R]. Beijing: Renmin University of China, 2023: 12-13.
- [7] 赵永亮, 许朋江, 居文平, 等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2099.  
ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2099.
- [8] 弓林娟, 王文毓, 高耀岩, 等. 面向大规模新能源消纳的火电机组平行控制[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 136-142.  
GONG Linjuan, WANG Wenyu, GAO Yaokui, et al. Parallel control of thermal power unit for large-scale renewable energy accommodation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 136-142.
- [9] 王超, 张宝瑞, 刘铠瑞, 等. 超临界 660 MW 机组直流锅炉动态特性仿真研究[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 124-133.  
WANG Chao, ZHANG Baorui, LIU Kairui, et al. Simulation on dynamic characteristics of a supercritical 660 MW once-through boiler[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 124-133.
- [10] 赵征, 孙赫宇, 陈江丽. 基于 AGC 负荷指令优化分解的火电机组蓄能综合利用[J]. 动力工程学报, 2023, 43(5): 575-581.  
ZHAO Zheng, SUN Heyu, CHEN Jiangli. Optimized decomposition of AGC load command for comprehensive utilization of energy storage in the thermal power unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(5): 575-581.
- [11] FAN H, ZHANG Y F, SU Z 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.
- [12] 严国栋, 洪烽, 高明明, 等. 350 MW 超临界 CFB 机组负荷控制系统建模[J]. 动力工程学报, 2019, 39(1): 17-24.  
YAN Guodong, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Modeling of a load control system for 350 MW supercritical CFB unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(1): 17-24.
- [13] 卿浩, 周妍君, 宋园园, 等. 超临界 CFB 锅炉深度调峰跨临界过程中水冷壁动态特性的试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 29-38.  
QING Hao, ZHOU Yanjun, SONG Yuanyuan, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of water wall during transcritical process of deep peak regulation for supercritical CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 29-38.
- [14] 弓林娟. 面向灵活性运行的火电机组建模及其预测控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 1-4.  
GONG Linjuan. Research on the modeling and predictive control of thermal power units for flexible operation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 1-4.
- [15] 龙东腾, 王玮, 刘吉臻. 凝结水节流参与的 1 000 MW 火电机组快速变负荷调节[J]. 动力工程学报, 2017, 37(3): 249-256.  
LONG Dongteng, WANG Wei, LIU Jizhen. Fast load regulation of 1 000 MW thermal power unit by condensate throttling[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(3): 249-256.
- [16] WANG W, LIU J Z, ZENG D L, et al. Improved boiler-turbine coordinated control of 1 000 MW power units by introducing condensate throttling[J]. Journal of Process Control, 2017, 50: 11-18.
- [17] MA L Y, LEE K Y, WANG Z Y. Intelligent coordinated controller design for a 600 MW supercritical boiler unit based on expanded-structure neural network inverse models[J]. Control Engineering Practice, 2016, 53: 194-201.
- [18] 马良玉, 成蕾, 彭钢, 等. 基于神经网络预测模型和凝结水节流的超超临界机组协调系统智能优化控制[J]. 动力工程学报, 2017, 37(8): 640-648.  
MA Liangyu, CHENG Lei, PENG Gang, et al. Intelligent control optimization for the coordinated system of an ultra-supercritical power unit based on neural network prediction models and condensate throttling[J]. Journal

- of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(8): 640-648.
- [19] ZHAO Y L, LIU M, WANG C Y. Exergy analysis of the regulating measures of operational flexibility in supercritical coal-fired power plants during transient processes[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113487.
- [20] ZHAO Y L, WANG C Y, LIU M, et al. Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: a dynamic simulation[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1295-1309.
- [21] ZHAO Y L, LIU M, WANG C Y, et al. Increasing operational flexibility of supercritical coal-fired power plants by regulating thermal system configuration during transient processes[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2375-2386.
- [22] 魏小兵, 崔智鹏, 徐婧, 等. 基于数据驱动的超临界锅炉受热面壁温预测方法[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 106-112.  
WEI Xiaobing, CUI Zhipeng, XU Jing, et al. Data-driven method for predicting the wall temperature of heating surface of supercritical boilers[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 106-112.
- [23] SUN L, LI D H, LEE K Y, et al. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit[J]. Control Engineering Practice, 2016, 55: 38-55.
- [24] SUN L, HUAN Q S, SHEN J, et al. Multi-objective optimization for advanced superheater steam temperature control in a 300 MW power plant[J]. Applied Energy, 2017, 208: 592-606.
- [25] WU Z L, HE T, LI D H, et al. Superheated steam temperature control based on modified active disturbance rejection control[J]. Control Engineering Practice, 2019, 83: 83-97.
- [26] 马平, 赵倩. 锅炉过热蒸汽温度动态预测 PID 控制算法[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 104-108.  
MA Ping, ZHAO Qian. Application of dynamic predictive PID control algorithm in boiler superheated steam temperature prediction[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 104-108.
- [27] Fossil fuel power plant simulators: functional requirements: ANSI/ISA 77.20.01-2012[S]. North Carolina: Research Triangle Park, 2012: 15-16.

(责任编辑 杜亚勤)