DOI: 10.19666/j.rlfd.202511056

660 MW 超超临界二次再热燃煤发电机组变负荷再热蒸汽温度控制优化

乔永强[1,2]，王朝阳[3]，严俊杰[3]，张一帆[1,2]，姚明宇[1,2]，赵永亮[3]，刘　明[3]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西　西安　710054；
2. 高效灵活煤电及碳捕集利用全国重点实验室，陕西　西安　710054；
3. 西安交通大学能源与动力工程学院，陕西　西安　710049）

［摘　　要］【目的】提高深度调峰与快速变负荷需求下的再热蒸汽温度（再热汽温）控制水平，是提升二次再热机组灵活性和安全性的关键。【方法】本文以某 660 MW 超超临界二次再热机组为研究对象，将二次再热燃煤锅炉汽温控制模型与锅炉本体仿真模型进行耦合，研究并优化了变负荷过程中再热汽温的控制策略。【结果】在三烟道挡板调节再热汽温的控制策略下，30%THA 至 100%THA 稳态工况下锅炉主蒸汽、一次再热蒸汽和二次再热蒸汽的温度偏差可控制在 5.00 ℃以内；但在变负荷过程中一、二次再热蒸汽温度的负荷跟随性较差，具体表现为升负荷时再热汽温偏低，降负荷时再热汽温偏高，影响机组安全运行。针对再热汽温负荷跟随性较差的问题，结合变负荷过程中锅炉自身蓄热变化的特点，即升负荷时锅炉蓄热累积、降负荷时蓄热释放，在原有的控制策略中引入主汽温偏差和再热汽温偏差修正的水煤比控制策略，可有效提升一、二次再热蒸汽温度在变负荷过程中的跟随性，显著降低最大超调量，提高控制精度。【结论】本文提出的再热汽温控制策略可为二次再热机组的运行控制提供参考。

［关　键　词］二次再热机组；变负荷；再热汽温控制；锅炉蓄热；水煤比

［引用本文格式］乔永强，王朝阳，严俊杰，等. 660 MW 超超临界二次再热燃煤发电机组变负荷再热蒸汽温度控制优化[J]. 热力发电, 2026, 55(8): 107.　Qiao Y Q, Wang C Y, Yan J J, et al. Variable load reheat steam temperature control optimization for 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation units[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(8): 107.

Variable load reheat steam temperature control optimization for 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation units

Qiao Yongqiang[1,2], Wang Chaoyang[3], Yan Junjie[3], Zhang Yifan[1,2], Yao Mingyu[1,2], Zhao Yongliang[3], Liu Ming[3]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. National Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Xi'an 710054, China;
3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: [Objective] Improving the control level of reheat steam temperature under deep peak shaving and rapidly varying load demands has become the key to enhancing the flexibility and safety of double-reheat coal-fired power generation units. [Methods] The control strategies of the primary and secondary reheat steam temperature during the load cycling process were studied and optimized based on a coupled model of steam temperature control and dynamic simulation for a 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation unit. [Results] The original control strategy for adjusting the primary and secondary reheat steam temperature by flue gas dampers in triple-rear passes was adopted. The temperature deviations of the main steam, primary reheat steam and secondary

收 稿 日 期：2025-11-17　修 回 日 期：2026-03-17　接 受 日 期：2026-03-27
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2023YFB4102400）；中国博士后科学基金项目（2024T170703）
Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFB4102400); China Postdoctoral Science Foundation Project (2024T170703)
第一作者简介：乔永强（1992），男，硕士，工程师，主要研究方向为二次再热机组再热汽温控制优化和超临界二氧化碳循环发电系统动态仿真，qiaoyongqiang@tpri.com.cn。

reheat steam at the boiler outlet under the steady-state conditions ranging from 30%THA to 100%THA can be controlled within 5.00 ℃. However, the load tracking capability of the primary and secondary reheat steam temperatures of the double-reheat coal-fired power generation unit is poor during the load cycling process. The primary and secondary reheat steam temperatures of the double-reheat coal-fired power generation unit are too low during the loading up process, and they are too high during the loading down process, which seriously affects the safe operation of the ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation unit. Regarding the problem of poor load tracking capability of the primary and secondary reheat steam temperatures for 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation units, the control logic of the water-coal ratio is redesigned. The revised water-coal ratio control strategy with the main steam temperature deviation, primary reheat steam temperature deviation and secondary reheat steam temperature deviation is adopted based on the original control strategy for the 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation unit, considering variation characteristics of heat storage in the coal-fired boiler during the load cycling process, namely the accumulation of heat storage in the coal-fired boiler during the loading up process and the release of heat storage in the coal-fired boiler during the loading down process. The results show that, the revised control strategies could enhance the load tracking capability of the primary and secondary reheat steam temperatures for 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired power generation units, significantly reduce the maximum overshoots during the load cycling process, and significantly improve the control accuracy of the primary and secondary reheat steam temperatures during the load cycling process. [Conclusion] The control strategy optimization of the reheat steam temperature in this paper can provide references for the operation of the double-reheat coal-fired power generation units.

Key words: double-reheat power generation unit; variable load; reheat steam temperature control; boiler heat storage; water-coal ratio

在“双碳”目标引领下，我国正加速推进新型电力系统建设[1]。为应对高比例、大规模新能源并网消纳带来的挑战，燃煤机组逐渐从主力电源向支撑性、调节性电源转型[2]。超超临界二次再热发电机组具有清洁和高效的技术优势[3]，在我国燃煤发电机组中的应用日益广泛。但是与一次再热机组相比，二次再热机组的锅炉增加了一级再热器，导致汽水流程延长、再热蒸汽吸热比例升高、主蒸汽吸热比例相对降低，受热面布置更加复杂。同时，二次再热机组蒸汽参数较高，导致金属材料的安全裕度降低，因而对蒸汽温度的控制精度提出了更高的要求[4]。此外，二次再热系统运行压力较低，蒸汽比容大、导热性差[5]，进一步增加了再热汽温的控制难度。

针对二次再热锅炉再热蒸汽温度（再热汽温）的控制难题，学者们展开了大量研究。张永波[6]借鉴国外二次再热机组汽温控制策略，结合二次再热塔式锅炉受热面的布置特点，验证了燃烧器摆角和烟气挡板调节再热汽温的控制策略。杨新民等[4]以华能安源 660 MW 二次再热机组为对象，通过热平衡计算分析烟气再循环、燃烧器摆角及烟气挡板调温方式对蒸汽温度影响的静态特性，提出了两级再热汽温的控制方案并开展了现场试验，试验表明该控制方案能满足机组在全负荷及 RB（快速减负荷）工况的运行要求。孙博烁[7]在 Panysimu 仿真平台上构建了 600 MW 二次再热机组的仿真模型，验证了烟气再循环和烟气挡板调温方式可以适用于二次再热机组。郭馨[8]基于 Fluent 和 Ebsilon 软件分别建立了二次再热机组的炉膛三维计算模型和锅炉系统仿真模型，模拟显示烟气再循环率是影响过热汽温和再热汽温的关键因素，并在此基础上优化了不同工况下的烟气再循环率，实现了二次再热锅炉变工况精确调温。殷亚宁等[9]通过热力校核计算，验证了烟气再循环、烟气挡板、燃烧器摆角、水煤比等多种调温方式的优化组合可以有效控制二次再热锅炉再热汽温。李永生等[10]针对某二次再热锅炉再热汽温偏低的问题，提出了烟气再循环改造方案，显著提高了低负荷工况下的一、二次再热汽温。Deng 等人[11]以 660 MW 超超临界二次再热塔式锅炉为对象，分析烟气再循环对炉膛传热的影响，发现随着烟气再循环比例增加，水冷壁在整个锅炉中的吸热占比下降，再热器和过热器的吸热占比上升。

近年来，随着新能源发电的迅猛发展，高参数大容量的二次再热机组面临深度调峰和频繁变负荷运行，加剧了二次再热锅炉再热汽温的控制难度。为了适应快速变负荷需求下的再热汽温控制要求，学者们开展了动态特性和控制策略优化研究。蔡宝玲等[12]基于 APROS 软件建立了华能莱芜 1 000 MW 二次再热机组工程分析模型，研究发现风、煤、水等扰动下机组主要参数变化趋势与一次再热机组基本一致，但二次再热加大了汽温的惯性；通过采用烟气再循环和烟气挡板调温方式，可在 2%变负

荷率以下有效控制两级再热汽温。耿林霄等[13]基于 APROS 二次再热全厂仿真平台，在烟气再循环、烟气挡板调节再热汽温的控制策略中引入监督预测算法，显著提高了再热汽温的控制品质。苏荣强等[14]采用差分进化算法和广义损失函数，对二次再热机组在 100%和 75%额定工况下的响应特性进行了辨识，获得了再热汽温传递函数模型。刘梦琼[15]针对二次再热机组汽温系统被控对象的强耦合特性，将汽温系统视作多输入多输出的耦合系统，并基于仿真数据辨识得到的汽温传递函数，利用 MATLAB/Simulink 软件采用 PID 神经网络方法进行解耦控制，取得了较好的汽温控制效果。Wang 等人[16]基于 GSE 软件建立了 660 MW 超超临界二次再热机组仿真模型，采用低温再热器出口汽温偏差作为前馈信号，修正烟气挡板调节再热汽温的控制策略，提升了机组的灵活性和热效率。Wang 等人[17]以 660 MW 超超临界二次再热塔式锅炉为研究对象，采用锅炉蓄热量变化作为前馈信号，修正烟气再循环调温策略，提升了变负荷过程汽温控制品质。Zhu 等人[18]以 1 000 MW 超超临界二次再热机组为研究对象，发现燃料热值的变动会引起机组蒸汽温度波动。邢钊恺[19]采用自适应模糊控制方法，设计了一套二次再热机组汽温控制系统，该系统能够适应快速深度变负荷下对再热汽温控制的需求。

综上所述，二次再热锅炉再热汽温具有大惯性、大延迟以及强烈的非线性特征，且受机组负荷、烟气参数、超高压缸及高压缸排汽参数、高加抽汽量等多因素耦合影响。在深度调峰与快速变负荷运行日益频繁的背景下，提高再热汽温的控制水平，已成为未来增强二次再热机组运行灵活性和安全性的关键。本文以某 660 MW 超超临界二次再热机组为研究对象，研究并优化变负荷过程中再热汽温的控制策略，旨在为二次再热机组的运行控制提供参考。

1 二次再热机组再热蒸汽调温方式

1.1 三烟道挡板汽温特性

本文基于 GSE 软件的 Jtopmeret 模块，建立了 660 MW 超超临界二次再热尾部三烟道燃煤锅炉的仿真模型[20]，如图 1 所示。通过对锅炉本体仿真模型调试，获得了不同负荷工况下二次再热锅炉尾部三烟道挡板开度的仿真值，如表 1 所示。

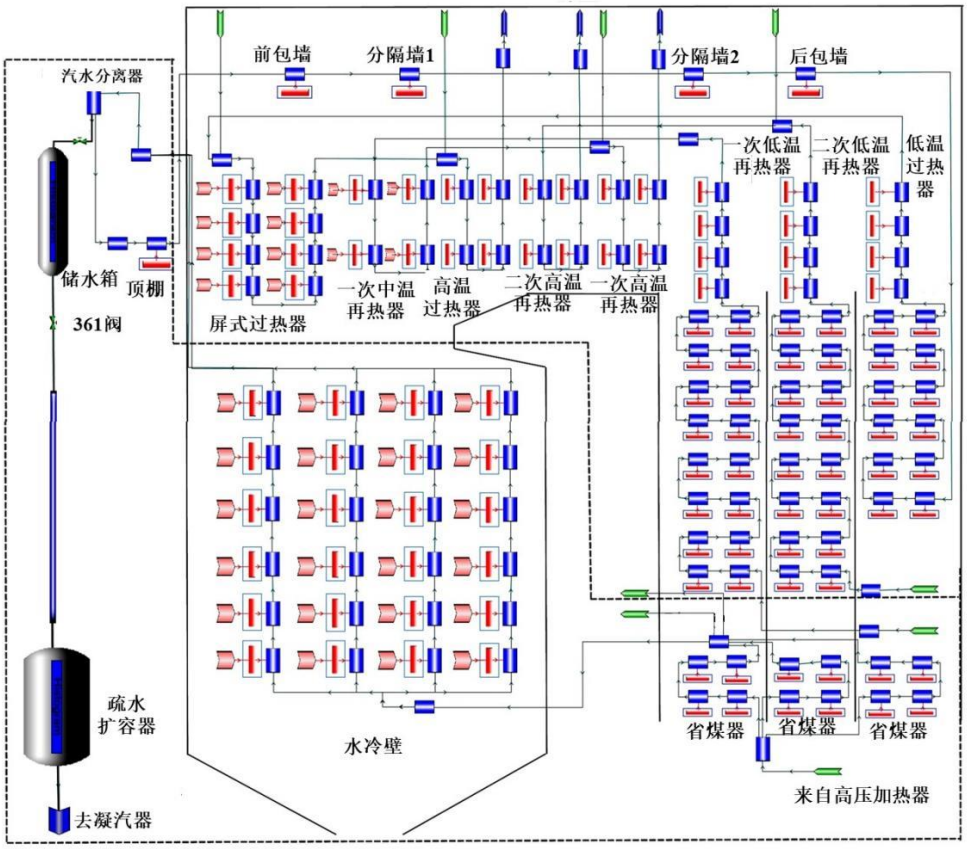


图 1 660 MW 超超临界二次再热燃煤锅炉仿真模型

Fig.1 Simulation model of the 660 MW ultra-supercritical double-reheat coal-fired boiler

表 1 不同工况下二次再热锅炉尾部三烟道挡板开度仿真值
Tab.1 Simulation values of flue gas dampers opening in the tail flue of double-reheat boiler under different working conditions

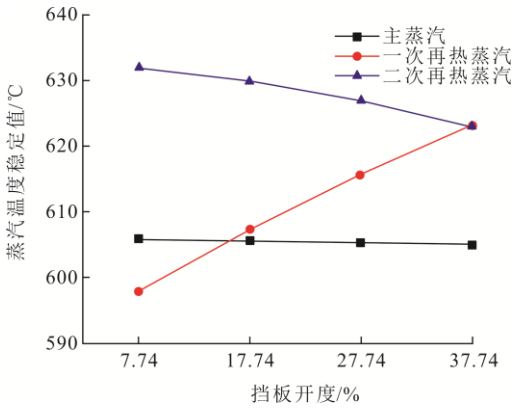
工况	100%THA	75%THA	50%THA	30%THA
一次再热侧挡板开度/%	37.74	33.22	27.57	20.96
二次再热侧挡板开度/%	42.18	42.16	42.12	45.33
过热侧挡板开度/%	34.08	26.04	22.61	31.50

该锅炉采用尾部三烟道烟气挡板调节再热蒸汽温度。为此，开展了烟道挡板开度阶跃扰动仿真试验，获得了烟道挡板变化时的汽温特性，以100%THA 工况为例进行说明。

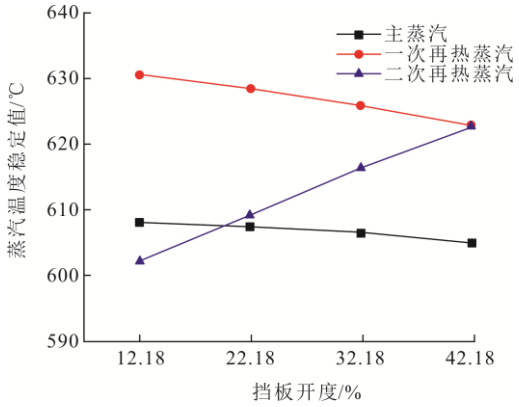
图 2 为 100%THA 工况下三烟道挡板开度减小时的汽温特性。由图 2a)可知，前烟道一次再热侧挡板开度阶跃变化对一次和二次再热蒸汽稳定温度影响较为显著。随着前烟道挡板开度的减小，一次再热蒸汽的稳定温度下降，而二次再热蒸汽的稳定温度上升，主蒸汽的稳定温度则基本保持不变。因此，前烟道一次再热侧挡板不宜作为平衡主蒸汽温度（主汽温）与再热汽温的选择，但可用于调节一次、二次再热蒸汽之间的温度偏差。

由图 2b)可知，中烟道二次再热侧挡板开度阶跃变化对主蒸汽和一次、二次再热蒸汽温度均具有显著影响。随着中烟道挡板开度减小，一次再热蒸汽的稳定温度上升，二次再热蒸汽的稳定温度下降，主蒸汽的稳定温度上升。中烟道二次再热侧挡板可用来调节一次与二次再热蒸汽的温度偏差，但会引起主汽温变化，也不宜作为平衡主汽温和再热汽温的选择。

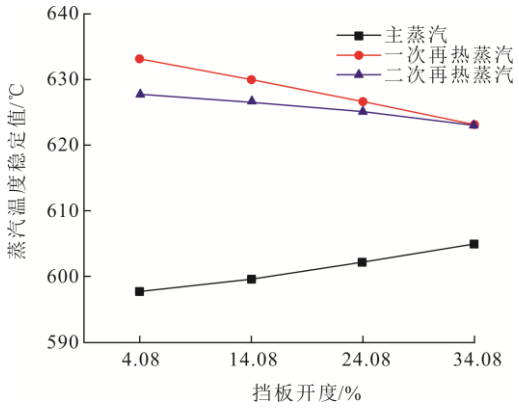
由图 2c)可知，随着后烟道过热侧挡板开度减小，一次和二次再热蒸汽的稳定温度均上升，主蒸汽的稳定温度下降。因此，后烟道过热侧挡板可作为平衡主汽温和再热汽温的选择。



a) 前烟道一次再热侧挡板开度变化



b) 中烟道二次再热侧挡板开度变化



c) 后烟道过热侧挡板开度变化

图 2 三烟道挡板不同开度下的汽温特性
Fig.2 Steam temperature characteristics under different opening degrees of the dampers in the triple-rear passes

基于上述三烟道挡板的汽温特性，本文选择前烟道一次再热侧挡板调节一次和二次再热蒸汽温度偏差，后烟道过热侧挡板控制一次和二次再热蒸汽温度平均值，中烟道二次再热侧挡板在机组运行中基本维持不动。

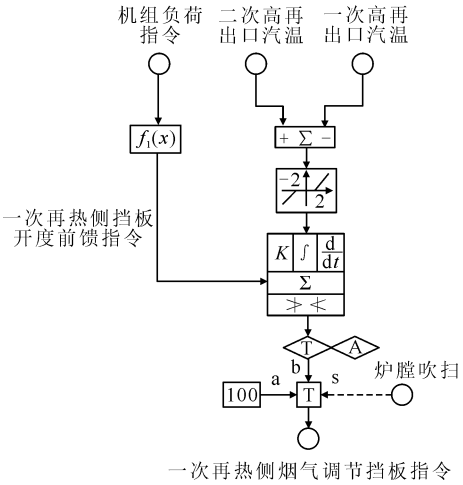
1.2 再热蒸汽调温方式

图 3 为根据烟道挡板汽温特性制定的该类型机组再热蒸汽温度的控制逻辑。由图 3a)可知，前烟道一次再热侧的烟气挡板调节一次高温再热器出口汽温与二次高温再热器出口汽温之间的偏差，两级再热汽温偏差经过 PID 控制器处理后，加上机组负荷指令生成的一次再热侧烟气挡板开度前馈信号，作为一次再热侧烟气挡板指令。当二次高温再热器出口汽温高于一次高温再热器出口汽温时，一次再热侧烟气挡板开度增大；反之，一次再热侧烟气挡板开度减小。

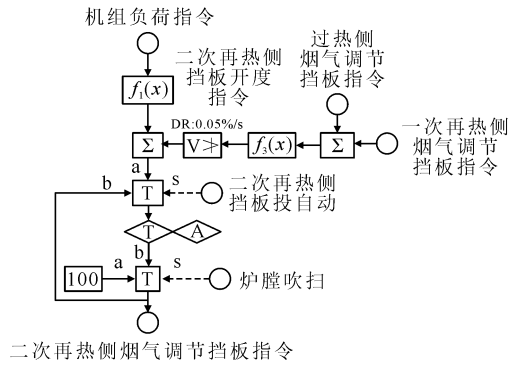
由图 3b)可知，中烟道二次再热侧烟气挡板指令是基于机组负荷指令的函数，在机组变工况运行过程中仅作微调；此外，根据一次再热侧和过热侧烟气挡板的开度指令之和，设定对二次再热侧烟气

挡板的补偿信号。

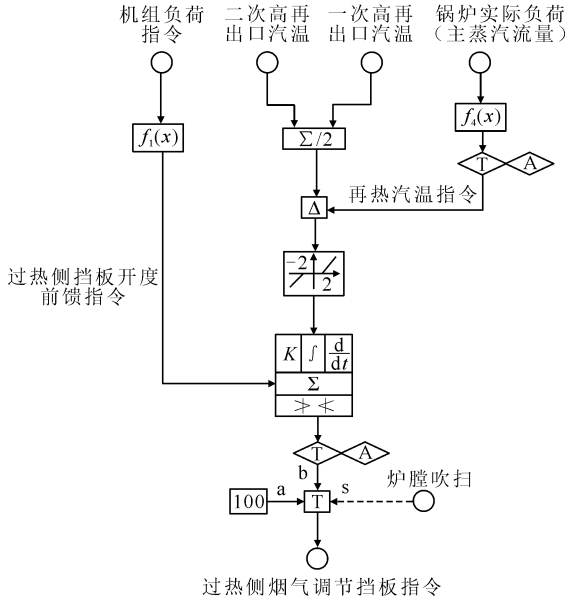
由图 3c)可知，后烟道过热侧的烟气挡板调节一次高温再热器出口汽温与二次高温再热器出口汽温的平均值。两级再热汽温的平均值与锅炉负荷生成的再热汽温指令作偏差，所得偏差经过 PID 控制器处理后，加上机组负荷指令生成的过热侧烟气挡板开度前馈信号，可作为过热侧烟气挡板指令。当一次高温再热器出口汽温与二次高温再热器出口汽温的平均值高于再热汽温指令时，过热侧烟气挡板开度增大；反之，过热侧挡板开度减小。



a) 前烟道一次再热侧挡板控制



b) 中烟道二次再热侧挡板控制



c) 后烟道过热侧挡板控制

图 3 三烟道烟气挡板调节再热汽温控制逻辑
Fig.3 Reheat steam temperature control logic of the dampers in the triple-rear passes

2 二次再热机组再热汽温控制效果

2.1 不同稳态负荷下的汽温控制效果

基于 GSE 软件的 Jcontrol 模块，结合锅炉蒸汽温度控制逻辑，搭建了二次再热锅炉的汽温控制模型。其中，主蒸汽温度控制策略采用水煤比控制和两级喷水减温，一次和二次再热蒸汽温度通过三烟道挡板调温方式实现，并辅以再热微喷水控制。

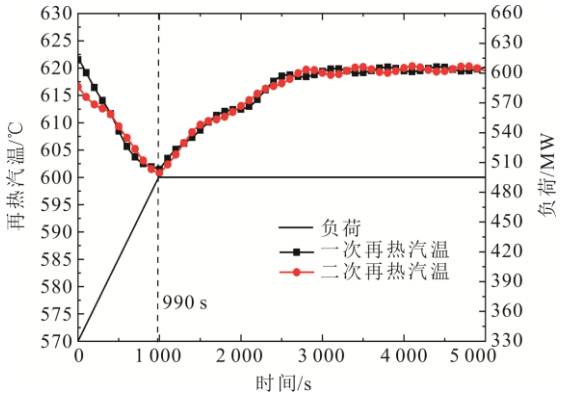
本文将汽温控制模型与锅炉本体模型相耦合，通过对控制系统参数整定和仿真系统的调试，得到了不同稳态负荷下汽温控制效果，具体结果见表 2。通过对比，在锅炉稳态工况下（30%THA—100%THA），主汽温、一次再热汽温和二次再热汽温与设计值相比，汽温偏差可控制在 5.00 ℃以内。

表 2 不同稳态负荷下汽温控制效果　　单位：℃
Tab.2 Steam temperature control effect at different steady-state loads

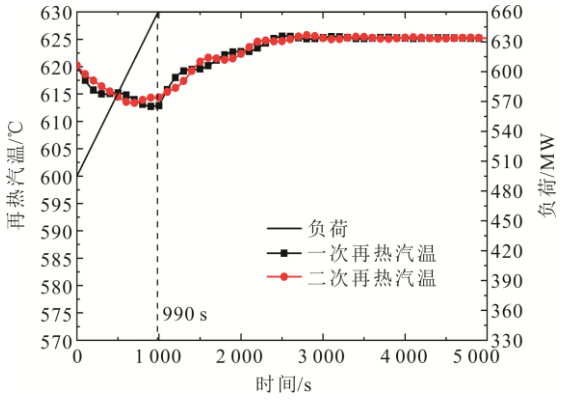
项目	THA 工况		75%THA 工况		50%THA 工况		30%THA 工况	
	设计值	仿真值	设计值	仿真值	设计值	仿真值	设计值	仿真值
主汽温	605.00	605.01	605.00	605.34	605.00	605.13	605.00	604.84
一次再热汽温	623.00	620.30	623.00	620.71	623.00	622.22	593.00	597.60
二次再热汽温	623.00	620.62	623.00	620.28	623.00	617.84	583.00	583.27

2.2 变负荷过程中再热汽温控制效果

加入汽温控制模型后，在锅炉干态工况下，以 10 MW/min 的变负荷速率，分别完成了 50%THA 至 75%THA 以及 75%THA 至 100%THA 2 个负荷阶段的升、降负荷过程，得到了变负荷过程中再热汽温的控制效果，如图 4 和图 5 所示。

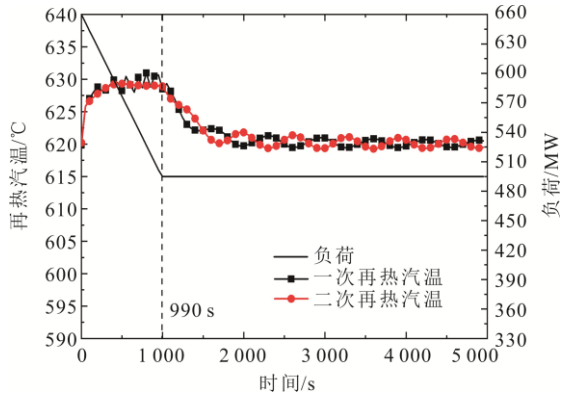


a) 50%THA—75%THA 升负荷过程

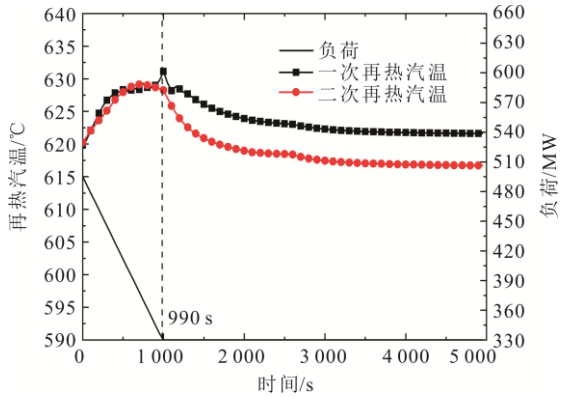


b) 75%THA—100%THA 升负荷过程

图 4 升负荷过程中再热汽温控制效果
Fig.4 Control effects of reheat steam temperatures during the loading up process



a) 100%THA—75%THA 降负荷过程



b) 75%THA—50%THA 降负荷过程

图 5 降负荷过程中再热汽温控制效果
Fig.5 Control effects of reheat steam temperatures during the loading down process

由图 4a)可知，在 50%THA 至 75%THA 升负荷过程中，持续时间约为 990 s，负荷由 330 MW 升至 495 MW。在此期间，一次再热汽温由 50%THA 工况下的 622.22 ℃持续下降至 601.00 ℃，经过 990 s 后，一次再热汽温开始回升，并在 2 800 s 后稳定在 620.00 ℃。同样地，二次再热汽温由 50%THA 工况下的 617.84 ℃持续下降至 600.00 ℃，在 990 s 后，二次再热汽温逐步回升，并在 2 800 s 后稳定在 620.00 ℃。

由图 4b)可知，在 75%THA 至 100%THA 升负荷过程中，持续时间约为 990 s，负荷从 495 MW 上升至 660 MW，一次再热汽温由 75%THA 工况下的 620.71 ℃下降至 613.00 ℃，经过 990 s 后，一次再热汽温开始回升，并在 2 800 s 后稳定在 625.00 ℃。二次再热汽温则由 75%THA 工况下的 620.28 ℃先下降至 613.50 ℃，随后回升至 614.00 ℃，990 s 后，二次再热汽温虽也出现轻微下降，但最终仍呈现回升趋势，并在 2 800 s 后稳定在 625.00 ℃。

由图 5a)可知，在 100%THA 至 75%THA 降负荷过程中，持续时间约为 990 s，负荷从 660 MW 降至 495 MW，一次再热汽温由 100%THA 工况下的 620.30 ℃迅速上升至 628.00 ℃，随后在 628.00 ℃附近波动，直到降负荷过程结束才开始下降。这是由于汽温控制逻辑中，当再热蒸汽温度高于设计值 623.00 ℃超过 5.00 ℃，达到 628.00 ℃以上时，会触发再热喷水减温动作。990 s 后，一次再热汽温逐渐回落，并在 1 500 s 后于 620.00 ℃附近波动。同样地，二次再热汽温由 100%THA 工况下的 620.62 ℃急速上升至 629.00 ℃，随后下降至 628.00 ℃，990 s 后开始回落，并于 1 500 s 后也在 620.00 ℃附近波动。

由图 5b)可知，在 75%THA 至 50%THA 降负荷过程中，时间持续约为 990 s，负荷从 495 MW 下降至 330 MW，一次再热汽温由 75%THA 工况下的 620.71 ℃上升至 628.00 ℃，990 s 后，一次再热汽温开始回落，并在 4 500 s 后稳定在 622.00 ℃。二

次再热汽温由 75%THA 工况下的 620.28 ℃升高至 628.00 ℃，990 s 后，二次再热汽温出现回落，在 4 500 s 后稳定在 617.00 ℃。

综上所述，在 50%THA 至 75%THA 以及 75%THA 至 100%THA 升负荷过程中，一次再热汽温与二次再热汽温均呈现偏低趋势。尤其在 75%THA 至 100%THA 的升负荷阶段，汽温最终稳定在 625.00 ℃，未能恢复至稳态 100%THA 工况下的 620.00 ℃，表明再热汽温的负荷跟随性较差。而在 100%THA 至 75%THA 以及 75%THA 至 50%THA 降负荷过程中，一次再热汽温与二次再热汽温则普遍偏高，严重影响机组的运行安全。

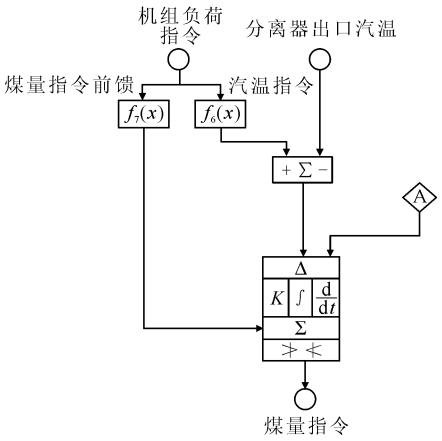
3 优化方案与再热汽温优化控制效果

3.1 优化分析与水煤比控制逻辑设计

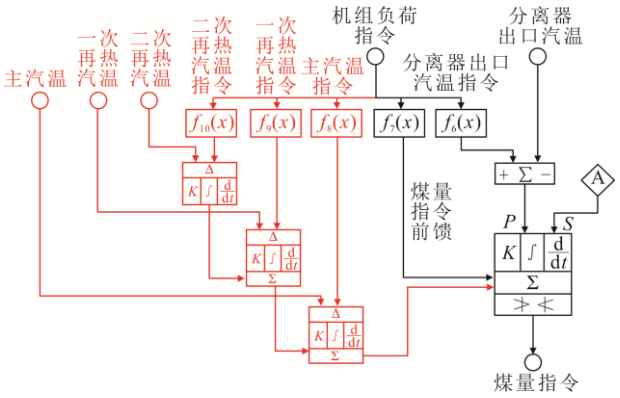
变负荷过程中再热汽温的控制效果表明，一次再热汽温与二次再热汽温的负荷跟随性较差。当变负荷速率较大且变负荷幅度较大时，单独依靠挡板调节来控制再热汽温的方案，不足以保证变负荷过程中再热汽温在设定值附近。在升负荷过程中，再热汽温偏低，达不到设计值；而在降负荷过程中，再热汽温偏高，超出设计值。造成这种现象的原因是：在升负荷过程中，给水量和燃料量随负荷指令同步增加，但由于锅炉的蓄热累积，再热蒸汽吸热不足，导致温度偏低；在降负荷过程中，给水量和燃料量随负荷指令同步减少，但锅炉的蓄热释放，再热蒸汽吸热过多，导致温度偏高。总之，变负荷过程中再热汽温的变化与锅炉蓄热的变化密切相关。因此，可考虑通过调整变负荷过程中的给煤量来匹配锅炉蓄热的变化规律，进而有效调节再热汽温。

给煤量的调节涉及机组的协调控制和锅炉主控，其中水煤比控制是其最主要的调节方式。因此，本文将优化重点放在水煤比控制上，图 6 为水煤比控制优化示意，图 6a)为在原始水煤比控制逻辑中，给煤量指令由机组负荷指令生成的煤量指令前馈和汽水分离器出口汽温偏差经过 PID 处理后的输出值相加得到。汽水分离器作为超（超）临界锅炉汽水流程的分界点，其出口汽温的波动一定程度上反映了锅炉蓄热的变化，但分离器后的过热器、一次再热器及二次再热器的蓄热变化最直接的体现则是主汽温、一次再热汽温及二次再热汽温。

在变负荷过程中，二次再热机组的烟气参数、超高压缸及高压缸排汽参数、高加抽汽量等因素容易引起过热器或者再热器的蓄热变化，从而导致主汽温和再热汽温的波动。因此，本文将主汽温偏差和两级再热汽温偏差引入到水煤比控制中，具体方案如图 6b)所示。通过对主汽温偏差、一次再热汽温偏差和二次再热汽温偏差进行 PID 控制器处理，将其输出值叠加到原水煤比 PID 控制器的输出上，建立了一种考虑主汽温偏差和再热汽温偏差修正的水煤比控制策略。



a) 原始水煤比控制逻辑



b) 重新设计的水煤比控制逻辑

图 6 水煤比控制优化

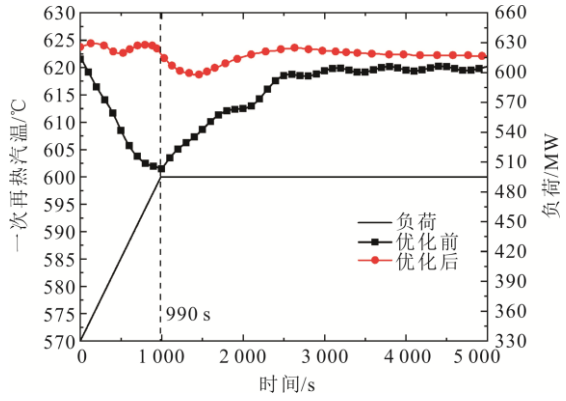
Fig.6 Control optimization of water-coal ratio

3.2 变负荷过程再热汽温控制效果对比

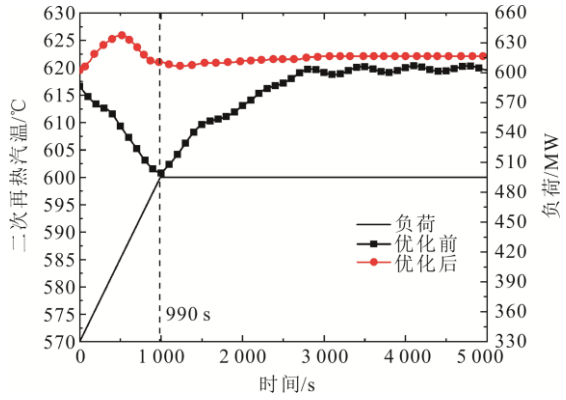
加入重新设计的水煤比控制模型后，在锅炉干态工况下，以 10 MW/min 的变负荷速率，分别完成了从 50%THA 至 75%THA 以及 75%THA 至 100%THA 两个负荷段的升、降负荷过程。由此得到了变负荷优化控制后的再热汽温变化规律，如图 7—图 10 所示。

由图 7a)可知，优化再热汽温控制后，在 50%THA 至 75%THA 升负荷过程中，一次再热汽温从 622.00 ℃缓慢波动，最低降至 618.00 ℃后持续回升，经过约 2 500 s 后稳定在 622.00 ℃。由图 7b)可知，优化再热汽温控制后，二次再热汽温从

617.00 ℃先上升，最高达到 626.00 ℃。这是因为：升负荷初始阶段，一次再热汽温与二次再热汽温均低于设定值，优化后的水煤比控制逻辑输出的给煤量指令高于原始给煤量，这既弥补了升负荷初期锅炉的蓄热需求，又促使再热汽温升高；同时，升负荷初期的二次再热汽温低于一次再热汽温，三烟道挡板调节再热汽温的控制逻辑使得前烟道一次再热侧挡板和后烟道过热侧挡板的开度减小，而中烟道二次再热侧挡板保持不变，这导致中烟道二次再热器的烟气量增加。上述两方面因素促使二次再热汽温在升负荷过程中出现超温现象，随着再热汽温控制逻辑的进一步调节，二次再热汽温逐渐下降，并在 1 000 s 后稳定在 622.00 ℃。由此可见，在 50%THA 至 75%THA 升负荷过程中，优化再热汽温控制逻辑后，两级再热汽温的负荷跟随性更好，整个过程更加平稳，最大超调量更小，达到稳定值的时间更短，其中一次再热汽温的稳定时间约为 2 500 s，二次再热汽温稳定时间约为 1 000 s。



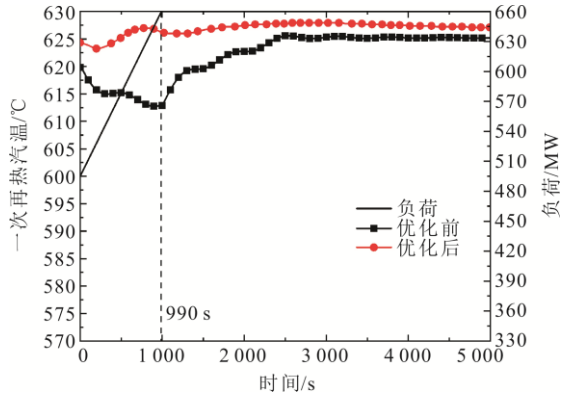
a) 一次再热汽温控制效果对比



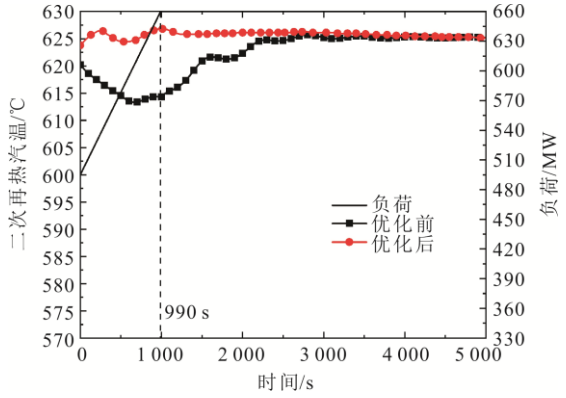
b) 二次再热汽温控制效果对比

图 7 50%THA—75%THA 升负荷过程控制优化效果对比

Fig.7 Comparison of control performance between the revised and original control logic during the loading up process (50%THA~75%THA)



a) 一次再热汽温控制效果对比



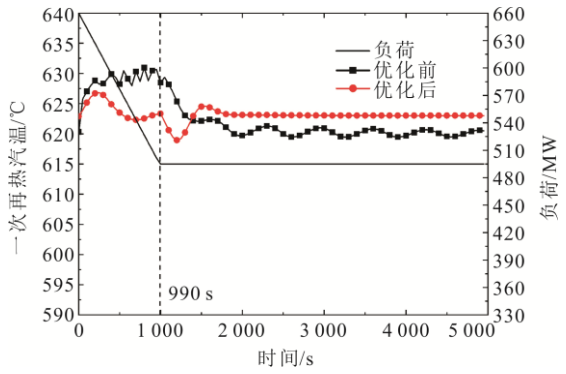
b) 二次再热汽温控制效果对比

图 8 75%THA—100%THA 升负荷过程控制优化效果对比

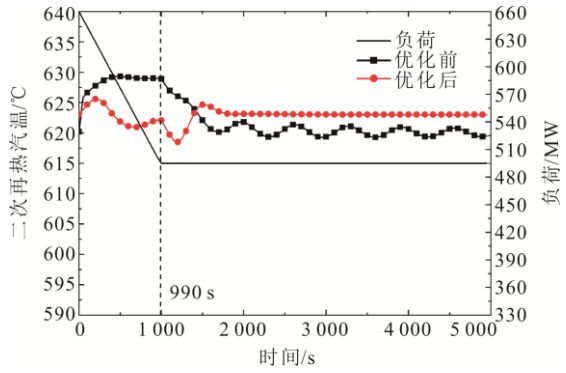
Fig.8 Comparison of control performance between the revised and original control logic during the loading up process (75%THA~100%THA)

由图 8a)可知，优化再热汽温控制策略后，在 75%THA 至 100%THA 升负荷过程中，一次再热汽温由 625.00 ℃轻微波动，并在 2 000 s 后稳定在 626.00 ℃。由图 8b)可知，二次再热汽温由 624.00 ℃轻微波动，在 1 500 s 后稳定在 626.00 ℃。

在 75%THA 至 100%THA 升负荷过程中，优化再热汽温控制逻辑后，两级再热汽温的负荷跟随性更好，整个过程更加平稳，最大超调量降低至 1～2 ℃，达到稳定值时间更短。其中一次再热汽温的稳定时间约为 2 000 s，二次再热汽温稳定时间约为 1 500 s。



a) 一次再热汽温控制效果对比

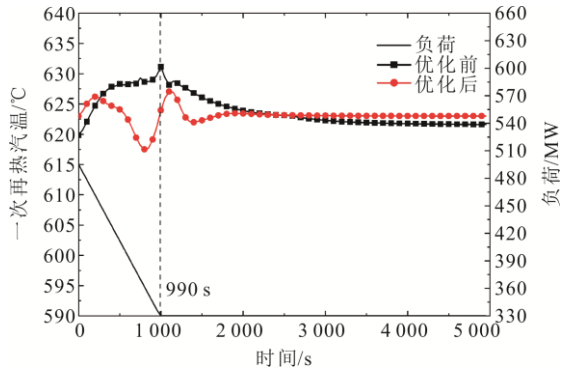


b) 二次再热汽温控制效果对比

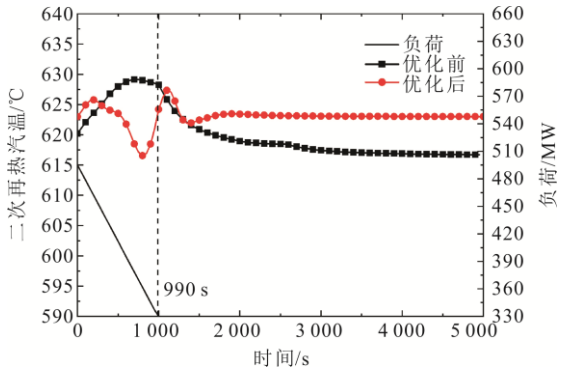
图 9 100%THA—75%THA 降负荷过程控制优化效果对比
Fig.9 Comparison of control performance between the revised and original control logic during the loading down process (100%THA—75%THA)

由图 9a)可知，优化再热汽温控制策略后，在 100%THA 至 75%THA 降负荷过程中，一次再热汽温从 622.90 ℃开始先升后降。其中，再热汽温上升是由降负荷初期锅炉蓄热释放导致，随着再热汽温超过设定值 623.00 ℃，优化的水煤比控制逻辑输出的给煤量指令较原始控制逻辑的给煤量减小，从而促使再热汽温回落下降。当降负荷过程中锅炉的蓄热释放量与给煤量减少引起的锅炉输入热减少量接近时，再热汽温趋于稳定。随着降负荷过程结束，由于锅炉蓄热释放过量，再热汽温出现超调下降，低于设定值 623.00 ℃，此时优化后的水煤比控制逻辑输出的给煤量指令增大，使得一次再热汽温在 1 250 s 后再次上升，并在 1 700 s 后稳定在 623.00 ℃。由图 9b)可知，二次再热汽温的变化趋势与一次再热汽温基本一致。

在 100%THA 至 75%THA 降负荷过程中，采用优化再热汽温控制逻辑后，无论是稳态工况还是瞬态过程，两级再热汽温都得到了较大程度的改善。在稳态工况下，再热汽温更加接近设定值 623.00 ℃；在瞬态过程中，再热汽温的超调量明显减小；完成变负荷指令后，再热汽温能够迅速稳定在设计值附近，再热汽温的负荷跟随性得到提升。



a) 一次再热汽温控制效果对比



b) 二次再热汽温控制效果对比

图 10 75%THA—50%THA 降负荷过程控制优化效果对比
Fig.10 Comparison of control performance between the revised and original control logic during the loading down process (75%THA—50%THA)

由图 10a)可知，优化再热汽温控制策略后，在 75%THA 至 50%THA 降负荷过程中，一次再热汽温由 623.00 ℃开始，呈现先上升、后下降、再上升的趋势，出现了超调现象。再热汽温出现上述变化的原因与 100%THA 至 75%THA 降负荷过程的原因一致，但由于低负荷下锅炉的热惯性更大，因此在 75%THA 至 50%THA 降负荷过程中，再热汽温波动更为剧烈，超调量更大。最终，在 1 600 s 后，一次再热汽温稳定在 623.00 ℃。由图 10b)可知，二次再热汽温的变化趋势与一次再热汽温相似。

在 75%THA 至 50%THA 降负荷过程中，经优化再热汽温控制逻辑后，两级再热汽温均得到了显著改善。在稳态工况下，再热汽温更接近设定值 623.00 ℃；在瞬态过程中，再热汽温的超调量明显减小；变负荷指令完成后，再热汽温能够迅速稳定在设计值附近，再热汽温的负荷跟随性得到提升。

4 结　论

1）本文将二次再热燃煤锅炉的汽温控制模型与锅炉本体仿真模型进行耦合，仿真研究了锅炉尾部三烟道挡板调节再热汽温的控制策略。研究结果表明：在锅炉稳态工况下（30%THA—100%THA），主汽温、一次再热汽温及二次再热汽温与设计值相比，汽温偏差可以控制在 5.00 ℃以内；但在变负荷过程中，一次再热汽温及二次再热汽温的负荷跟随性较差。

2）针对再热汽温负荷跟随性较差的问题，结合变负荷过程中锅炉自身蓄热变化的特点，在原有的烟气挡板控制策略的基础上，引入了主汽温偏差和再热汽温偏差对水煤比控制的修正策略，重新设计

了水煤比的控制逻辑，并将其应用于二次再热锅炉汽温控制模型中进行仿真。通过对比控制优化前后的仿真结果发现：优化后的控制策略能够有效提升一次再热汽温及二次再热汽温的负荷跟随性，显著降低最大超调量，并明显提高控制精度。

[参 考 文 献]

[1] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15) [2025-05-06] https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
Xinhua News Agency. Xi Jinping presided over the 9th meeting of the Central Financial and Economic Commission[EB/OL]. (2021-03-15) [2025-05-06] https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.

[2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知: 发改能源〔2022〕210 号[EB/OL]. (2022-01-29) [2025-05-06]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of the *14th Five-Year Plan for Modern Energy System*: FGNY〔2022〕No.210[EB/OL]. (2022-01-29) [2025-05-06]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.

[3] 王月明, 牟春华, 姚明宇, 等. 二次再热技术发展与应用现状[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 1.
Wang Y M, Mu C H, Yao M Y, et al. Review of the development and application of double-reheat power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 1.

[4] 杨新民, 吴恒运, 茅义军. 超超临界二次再热机组再热汽温的控制[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 19.
Yang X M, Wu H Y, Mao Y J. Reheat steam temperature control of an ultra-supercritical unit with double-reheat cycle[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 19.

[5] 张永, 尹朝强, 刘宇钢, 等. 风煤比对超超临界机组变负荷瞬态特性的影响[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 224.
Zhang Y, Yin C Q, Liu Y G, et al. The influence of the air-coal ratio on transient characteristics of the ultra-supercritical power unit during the load cycling processes[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 224.

[6] 张永波. 超超临界二次再热机组汽温控制策略研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014: 1.
Zhang Y B. Study on steam temperature control strategy of ultra-supercritical double-reheat units[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014: 1.

[7] 孙博烁. 660 MW 二次再热机组再热汽温控制策略的仿真研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016: 1.
Sun B S. Simulation research on reheat steam temperature control strategy of 660 MW double-reheat unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016: 1.

[8] 郭馨. 660 MW 超超临界二次再热锅炉调温策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 1.
Guo X. Research on temperature regulation strategy of 660 MW ultra-supercritical double-reheat boiler[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 1.

[9] 殷亚宁, 黄莺, 于景泽, 等. 二次再热机组多种汽温调节耦合控制策略研究及验证[J]. 锅炉制造, 2018(5): 5.
Yin Y N, Huang Y, Yu J Z, et al. Verification and research on control strategy of multiple steam temperature control coupling of ultra-supercritical unit with double-reheat cycles[J]. Boiler Manufacturing, 2018(5): 5.

[10] 李永生, 黄宣, 孙俊威, 等. 超超临界二次再热机组再热汽温低的分析与改进[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 184.
Li Y S, Huang X, Sun J W, et al. Analysis and improvement on the low reheat steam temperature of ultra-supercritical units with double-reheat cycle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 184.

[11] Deng L, Dong L X, Bai Y, et al. Effects of flue gas recirculation on combustion and heat flux distribution in 660 MW double-reheat tower-type boiler[J]. Fuel, 2022, 321: 123988.

[12] 蔡宝玲, 高海东, 王剑钊, 等. 二次再热超超临界机组动态特性分析及控制策略验证[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5288.
Cai B L, Gao H D, Wang J Z, et al. Dynamic process characteristic analysis and control strategy verification on double-reheat ultra-supercritical coal-fired power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5288.

[13] 耿林霄, 姜茵, 郭亦文, 等. 监督预测控制在二次再热机组再热蒸汽温度控制中的应用[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 86.
Geng L X, Jiang Y, Guo Y W, et al. Application of supervisory predictive control in reheat steam temperature control for double-reheat units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 86.

[14] 苏荣强, 吴恒运, 杨国田. 超超临界二次再热机组再热蒸汽温度模型辨识[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 62.
Su R Q, Wu H Y, Yang G T. Reheat steam temperature model identification of ultra-supercritical unit with double reheat cycles[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 62.

[15] 刘梦琼. 1 000 MW 二次再热超超临界机组汽温控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 1.
Liu M Q. Research on steam temperature control of 1 000 MW double-reheat ultra-supercritical units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 1.

[16] Wang C Y, Liu Z F, Fan M Y, et al. Enhancing the flexibility and efficiency of a double-reheat coal-fired power unit by optimizing the steam temperature control: From simulation to application[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 217: 119240.

[17] Wang Z, Liu M, Zhao Y L, et al. Flexibility and efficiency enhancement for double-reheat coal-fired power plants by control optimization considering boiler heat storage[J]. Energy, 2020, 201: 117594.

[18] Zhu H Y, Tan P, He Z Q, et al. Revealing steam temperature characteristics for a double-reheat unit under coal calorific value variation[J]. Energy, 2023, 283: 128530.

[19] 邢钊恺. 再热蒸汽温度的自适应模糊控制方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2025: 1.
Xing Z K. Adaptive fuzzy control method for reheater steam temperature[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2025: 1.

[20] Wang C Y, Qiao Y Q, Liu M, et al. Enhancing peak shaving capability by optimizing reheat-steam temperature control of a double-reheat boiler[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114341.

（责任编辑 杨乐）