文章编号:1674-7607(2026)01-0019-13 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240791

混烧煤粉对循环流化床机组爬坡性能的影响

赵宸宇[1]， 王朝阳[1]， 刘双白[2]， 胡娱欧[3]， 崔福博[3]， 刘 明[1]， 严俊杰[1]
(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. 华北电力科学研究院有限责任公司，北京 100045；3. 国家电网有限公司华北分部，北京 100053)

摘 要：为突破循环流化床(CFB)机组因锅炉燃料侧存在大量惰性床料而导致负荷响应慢等技术难题，选取以煤矸石为燃料主要成分的CFB机组为研究对象，建立并验证了机组热力系统动态仿真模型，获得了机组爬坡过程中输出功率、主蒸汽温度、主蒸汽压力、床温、锅炉蒸发量及循环效率等关键热力参数性能。为提升机组爬坡性能，提出了在CFB机组炉膛上部动态混烧煤粉以削弱煤矸石燃烧惯性影响的优化方案。结果表明：在3%/min爬坡速率下，优化方案使输出功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度和床温的最大偏差分别降低到1.31%、0.81%、2.3 K、3.5 K和27.8 K，均被控制在DL/T 657—2015《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》标准中相应偏差的规定范围内；采用优化方案后，CFB机组的最大允许爬坡速率从2%/min提升至3%/min，且机组热经济性略有提升。

关键词：循环流化床机组；爬坡性能；煤粉；动态混烧
中图分类号：TK227 **文献标志码**：A **学科分类号**：470.30

Effect of Dynamic Co-firing of Pulverized Coal on Load Ramp-up Capability of Circulating Fluidized Bed Power Unit

ZHAO Chenyu[1], *WANG Chaoyang*[1], *LIU Shuangbai*[2], *HU Yuou*[3], *CUI Fubo*[3], *LIU Ming*[1], *YAN Junjie*[1]
(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. North China Electric Power Research Institution Co., Ltd., Beijing 100045, China; 3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: To address the technical difficulties of slow load response in circulating fluidized bed (CFB) power units due to the presence of large amounts of inert bed material on the fuel side of the boiler, a CFB power unit primarily fueled by coal gangue was focused on. A dynamic simulation model of the power unit's thermal system was established and validated, obtaining performance of key thermodynamic parameters such as output power, main steam temperature, main steam pressure, bed temperature, boiler evaporation rate and cycle efficiency during the load ramp-up process. To improve the power unit's load ramp-up capability, an optimization scheme involving dynamic co-firing of pulverized coal in the upper part of the CFB furnace was proposed to mitigate the inertial effects of coal gangue combustion. Results show that at

收稿日期：2024-12-20 **修订日期**：2025-01-22
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100400)；中国博士后科学基金资助项目(2024T170703)
作者简介：赵宸宇(1995—)，男，山西吕梁人，博士研究生，研究方向为循环流化床机组灵活高效运行。
王朝阳(通信作者)，男，副教授，博士，E-mail：chaoyang.wang@xjtu.edu.cn。

the load ramp-up rate of 3%/min, the optimization scheme reduces the maximum deviations of output power, main steam pressure, main steam temperature, reheat steam temperature and bed temperature to 1.31%, 0.81%, 2.3 K, 3.5 K and 27.8 K respectively, all within the specified range of the DL/T 657—2015 *Code for Acceptance Test of Modulating Control System in Fossil Fuel Power Plant* standard. With the optimization scheme, the maximum allowable load ramp-up rate of the CFB power unit increases from 2%/min to 3%/min, while slightly improving the power unit's thermal economy.

Key words: CFB power unit; load ramp-up capability; pulverized coal; dynamic co-firing

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和目标的重要举措[1-2]。截至 2024 年 9 月底,我国新能源发电装机容量达到 16.83 亿 kW,占总装机容量的 53.3%[3],但风能、太阳能等可再生能源发电的波动性、周期性为电力系统带来了严峻的挑战[4]。为保障电力系统运行安全,燃煤发电正在由主体性电源向基础保障性和系统调节性电源转型[5]。燃煤发电中的循环流化床(CFB)机组具有独特的流态化燃烧方式,相比于煤粉锅炉机组具有更好的低负荷稳燃特性[6-7]。然而,CFB 锅炉循环回路内存在大量的床料和耐火材料,会延缓变负荷时热传递的变化速率,限制了机组参与电网调峰调频时的负荷响应速度[8-9]。

CFB 机组变负荷速率主要受炉膛中各受热面传热速率和燃料燃烧放热速率的影响[10]。提升受热面传热速率的主要手段是优化变负荷过程中的供风策略或调控循环物料量,有序利用床料及受热面的内部蓄能,在提升变负荷速率的同时保证床温与受热面的稳定性[11-13]。Gao 等[14]提出了“即燃碳”理论,可以用于优化机组主要输入变量的控制策略中[15-16],提升了 CFB 机组的运行灵活性。杜晓成等[17]对垂直上升光管内低质量流速汽水工质的流动传热及动态特性进行了实验研究,为超临界 350 MW CFB 锅炉的灵活运行提供了指导。Stefanitsis 等[18]将鼓泡流化床作为外部储能设备,负荷下降时把一部分床料储存起来,机组负荷爬坡时再将这部分床料返回炉膛,提升了 CFB 机组在 60%～100%负荷区段的调节速率。提升燃料燃烧放热速率的主要手段是投入更高热值、更小粒度的燃料,加快燃料的化学反应速率,增大燃料颗粒的总反应表面积,提升燃料的燃尽速度,从而提高燃料燃烧放热对负荷指令变化的响应速率[19-21]。Peters 等[22]通过在燃料中掺烧生物质提升了 CFB 机组的变负荷速率,并研究了不同掺烧比例对 CFB 机组变负荷性能的影响。吕俊复等[23-24]提出了粉煤循环流化床(PC-CFB)燃烧技术,将燃料粒度由 0～10 mm 缩减为0～1 mm,改善了燃料燃烧效率,降低了固体不完全燃烧热损失,增强了锅炉的运行灵活性。

本文提出了一种在机组负荷爬坡过程中动态混烧煤粉以增大 CFB 机组变负荷速率的优化方案,并对其效果进行了分析。基于 GSE 系统仿真平台,建立并验证了以煤矸石为燃料主要成分的 CFB 机组动态仿真模型,提出了以汽温汽压为受控参数,在负荷爬坡期间将高热值、低粒度的煤粉从炉膛上部动态投入炉内进行混烧以提升燃烧速率的优化方案。通过对比优化前后机组关键运行参数(输出功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、床温)的瞬态特性与循环效率,验证了优化方案的有效性与可行性。

1 动态建模及验证

本文基于 GSE 软件和 Fortran 编程语言建立了 300 MW 亚临界 CFB 机组热力系统的机理模型,并耦合热工控制模型,实现了对整个机组热力学性能的动态仿真。通过对主要输入参数、关键运行参数的稳态和动态验证,保证了本文所建立模型的准确性与可靠性。

机组关键热力参数如表 1 所示,设计煤种的元素分析和工业分析结果如表 2 所示。设计煤种以煤矸石为主要成分,颗粒度较大,灰分和挥发分含量较高,低位发热量较低。

表 1 亚临界 CFB 机组设计参数

Tab. 1 Design parameters of the subcritical CFB power unit

额定参数	额定值
输出功率/MW	300
主蒸汽压力/MPa	16.67
主蒸汽温度/℃	538.0
再热蒸汽温度/℃	538.0
燃料量/(t·h^{-1})	229.2
风量/(km^3·h^{-1})	906.5
凝结水量/(t·h^{-1})	730.1

表 2　设计煤种成分（收到基）

Tab. 2　Composition of the design coal (received)

w(C)/%	w(H)/%	w(O)/%	w(N)/%	w(S)/%
32.90	2.68	9.60	0.54	0.21

w(水分)/%	w(灰分)/%	w(挥发分)/%	低位发热量/(MJ·kg^{-1})
9.30	44.80	44.70	11.76

1.1　机理模型

建模时，将机组热力系统分为锅炉子系统和汽轮机子系统，其中锅炉子系统的主要受热面包括过热器、再热器、省煤器等，汽轮机子系统的主要设备包括汽轮机本体、回热加热器、给水泵等。以上各类设备按照工作原理分为换热设备、做功设备、流体压缩输运设备，均可通过 GSE 仿真平台建模实现精确仿真[25]。如图 1 所示，GSE 仿真平台以节点、流线、换热板等为基础搭建各类模型，以流量边界、压力边界、热流边界作为系统的边界参数输入接口。机组的一些关键子系统需通过自编程来建模，并与 GSE 模型耦合。本文对锅炉蒸发系统（包括汽包、上升管、下降管等）、物料循环分离系统（包括分离器及物料循环回路）、炉膛大惯性燃烧放热系统进行自编程机理建模，与 GSE 模型耦合后实现整个机组动态仿真模型的搭建[13]。

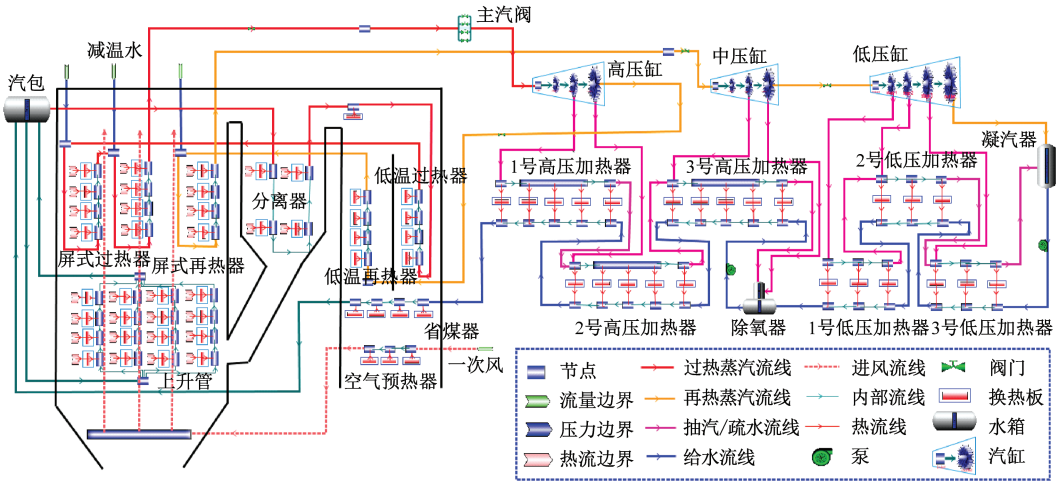


图 1　亚临界 CFB 机组动态仿真模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the dynamic simulation model of the subcritical CFB power unit

1.2　控制逻辑

依托 GSE 仿真平台，可在动态模型中嵌入机组运行控制逻辑，以实现变负荷过程的精确仿真。如图 2 所示，并网运行的发电机组接收电网实时发电指令信号，形成自动发电控制（AGC）指令，AGC 通过转换函数 $F_1(x)$ 生成机组的负荷需求（ULD）指令。图 2 中：$F(x)$ 为函数；SP 为设定值；t 为时间；DOB 为锅炉主控信号。为保障 CFB 机组变负荷过程的安全运行，需要通过汽轮机主控指令（DOT）来控制机组总输出功率（PE）与 ULD 的偏差、机前压力（TP）与机前压力的设定值（TP-SP）的偏差，通过锅炉主控指令来协调 TP、一级透平压力（FSP）、汽包饱和压力（DP），得到直接能量平衡信号（DEB）和传热速率信号（HTR）。机组运行时，通过调节主汽阀（LSV）、燃料供给速率（FR）、进风速率（AR）、给水速率（WR）和排渣速率（SDR），实现对汽包液位（DL）、进入汽包给水流量（D-In）、汽包输出蒸汽流量（D-Out）、床温（BT）、床压（BP）等关键运行参数的精准控制。

1.3　模型验证

表 3 为稳态工况下机组主要输入参数和关键运行参数的设计值、仿真值及二者间的偏差，所有参数的偏差均在 DL/T 657—2015《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》[26] 规定的范围内，保障了本文所建立模型的可靠性。

为了验证模型的动态精度，以 CFB 机组在 51%～81% 负荷范围内以 1.0%/min 进行负荷爬坡的实际运行数据为参考，验证了所建立模型的准确性和可靠性。图 3 对比了机组爬坡过程中燃料供给速率、空气供给速率、功率、主蒸汽压力、床温、床压的仿真值与实测值。经过对比，爬坡过程中仿真值与机组实测值吻合良好，满足 DL/T 657—2015 标准[26] 规定的动态偏差范围，证明了本文所建立动态仿真模型的准确性和可靠性。

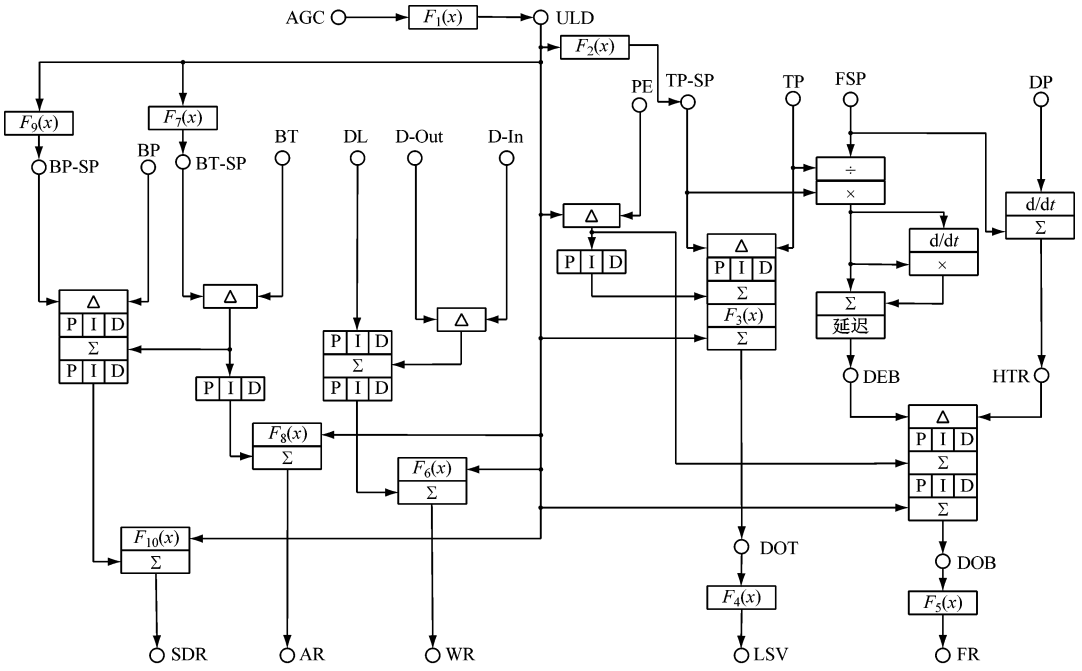


图 2 CFB 机组变负荷控制逻辑示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the control logics for load regulation of the subcritical CFB power unit

表 3 机组稳态工况验证结果

Tab. 3 Validation results of the power unit under the steady working conditions

工况		燃料量	石灰石量	风量	凝结水量	输出功率	主蒸汽压力	主蒸汽温度	再热蒸汽温度	床温
100%负荷	设计值	229.2 t/h	3.36 t/h	906.5 km³/h	730.1 t/h	300.00 MW	16.67 MPa	538.0 ℃	538.0 ℃	905.0 ℃
	仿真值	229.2 t/h	3.36 t/h	904.8 km³/h	728.6 t/h	299.96 MW	16.68 MPa	538.3 ℃	538.5 ℃	902.5 ℃
	误差	0	0	0.19%	0.21%	0.01%	0.05%	0.30 K	0.50 K	2.50 K
75%负荷	设计值	176.2 t/h	2.58 t/h	696.3 km³/h	545.0 t/h	225.00 MW	16.21 MPa	538.0 ℃	538.0 ℃	880.0 ℃
	仿真值	176.2 t/h	2.58 t/h	697.1 km³/h	544.7 t/h	224.92 MW	16.20 MPa	538.3 ℃	538.3 ℃	882.3 ℃
	误差	0	0	0.12%	0.06%	0.04%	0.04%	0.30 K	0.30 K	2.30 K
50%负荷	设计值	123.2 t/h	1.80 t/h	487.0 km³/h	376.2 t/h	150.00 MW	11.08 MPa	538.0 ℃	538.0 ℃	830.0 ℃
	仿真值	123.2 t/h	1.80 t/h	488.3 km³/h	375.1 t/h	150.11 MW	11.10 MPa	537.6 ℃	537.5 ℃	833.9 ℃
	误差	0	0	0.27%	0.29%	0.07%	0.10%	0.40 K	0.50 K	3.90 K

2 机组负荷爬坡性能评估与优化方法

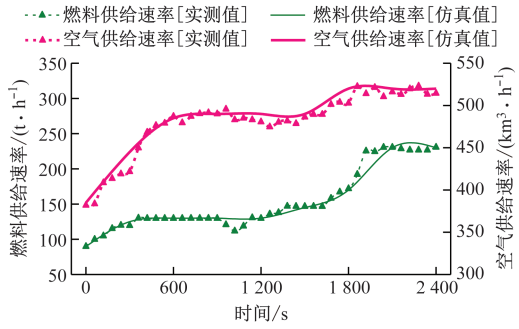
2.1 爬坡性能评估

变负荷瞬态过程中关键热力参数的动态偏差越小、稳定性越强，表明机组快速负荷爬坡的灵活性潜力越大。本节通过研究 CFB 机组输出功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、床温等关键参数在(1～3)%/min 机组爬坡速率下的瞬态表现来评估机组在当前运行条件下的爬坡性能。

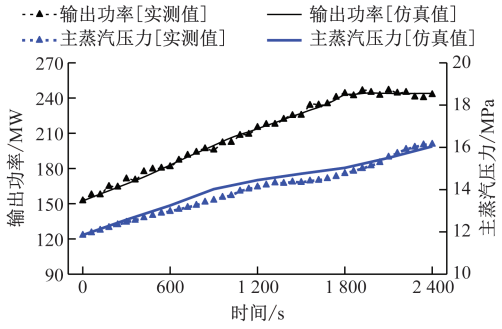
如图 4(a)和图 4(b)所示，机组负荷爬坡后输出功率与主蒸汽压力均存在较长时间的波动，且负荷爬坡速率越高，波动的幅度越大。图 4(c)和图 4(d)表明蒸汽温度在变负荷瞬态过程中发生了波动，且波动幅度随着变负荷速率的升高而增大。图 4(e)表明负荷指令爬坡过程中床温下降，在负荷指令接近目标负荷后床温上升，最大相对偏差随着变负荷速率的增加而增大。如图 4(f)所示，机组负荷爬坡期间锅炉蒸发量的变化趋势与输出功率相似，在斜坡上升后存在较长时间的波动，且波动幅度随负荷爬坡速率的升高而增大。

机组以 3%/min 速率爬坡时，输出功率的最大相对偏差为 2.16%，主蒸汽压力的最大相对偏差为 3.26%，主蒸汽温度的最大偏差量为 8.8 K，床温的最大偏差量为 34.3 K，均超出 DL/T 657—2015 标准[26]规定的允许范围。因此，在未优化的情况下，CFB 机组的安全爬坡速率被限制在 3%/min 以下。

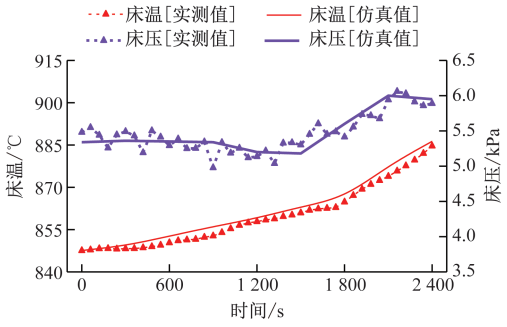
机组设计煤种的主要成分为煤矸石，以较大的粒径(d_{50}=1.5 mm)被直接送入炉膛，其灰分含量



(a) 输入参数



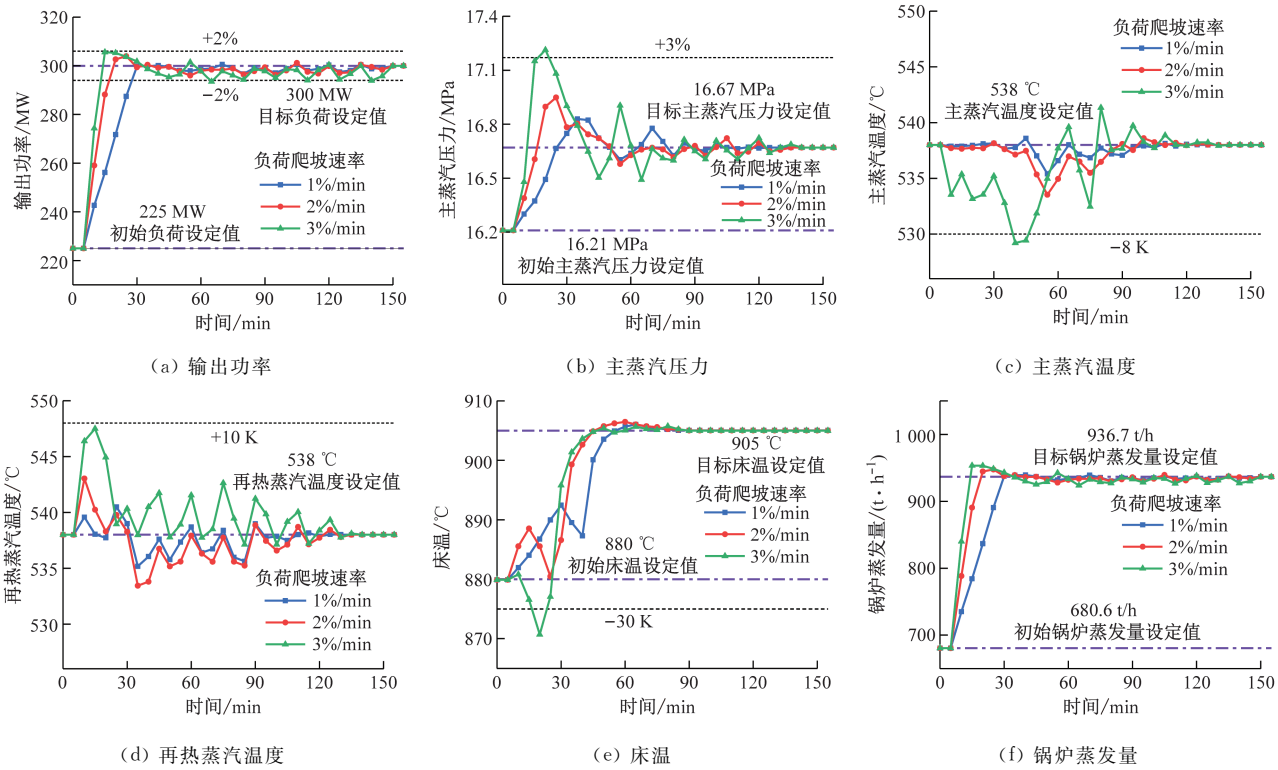
(b) 汽水侧运行参数



(c) 燃料侧运行参数

图 3　机组爬坡过程动态验证结果[13]

Fig. 3　Dynamic validation results of the power unit during the load ramp-up process[13]



(a) 输出功率　(b) 主蒸汽压力　(c) 主蒸汽温度

(d) 再热蒸汽温度　(e) 床温　(f) 锅炉蒸发量

图 4　机组爬坡过程中关键运行参数瞬态性能

Fig. 4　Transient performance of key operating parameters during the load ramp-up process

较高，发热量较低(见表 2)。煤矸石颗粒需经过 10 s 才能破裂，破裂后大部分可燃碳被混入惰性循环床料之中，仅有少部分可燃碳和挥发分可以直接燃烧。因此，在升负荷指令发出后，燃料供给量的变动与炉膛内的燃烧放热量之间存在较大的延迟，床料和汽水侧蓄能被调用以填补负荷缺口。床料蓄能被调用导致床温出现较大偏差；汽水侧蓄能被调用使各个换热面的传热量出现波动，导致汽水侧热力参数难

以精准调控。综上所述，CFB 炉膛内大延迟、大惯性的热量传输模式是汽水侧参数长时间波动及床温偏差的主要原因。

2.2 负荷爬坡性能量化方法

为了直观对比采用优化方案前后 CFB 机组的负荷爬坡性能，给出了各参数实时偏差值、累积偏差值以及整个机组发电能效的量化方法。

$$S_i(\tau)=|A_{i,\mathrm{sp}}(\tau)-A_i(\tau)| \tag{1}$$

式中：A_i 和 $A_{i,\mathrm{sp}}$ 为关键运行参数（输出功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度和床温）的实时值和设定值；S_i 为关键运行参数的偏差量，其在整个瞬态过程中的最大值为最大偏差量；τ 为时间，s。

$$X_i=\int_0^{\tau_0}\frac{S_i(\tau)}{A_{i,\mathrm{sp}}(\tau)}\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

式中：X_i 为整个瞬态过程中关键运行参数的无量纲累积偏差；τ_0 为总瞬态时间，s。

$$\eta_{\mathrm{en}}=\frac{\int_0^{\tau_0}W_{\mathrm{tu}}\mathrm{d}\tau+\Delta E_{\mathrm{s,ts}}}{\int_0^{\tau_0}\left(\sum Q_{\mathrm{net},i}D_{\mathrm{fu},i}+Q_{\mathrm{air}}+W_{\mathrm{pump}}\right)\mathrm{d}\tau}\times 100\% \tag{3}$$

式中：η_{en} 为机组发电能效；$Q_{\mathrm{net},i}$ 为各类燃料的低位发热量，kJ/kg；$D_{\mathrm{fu},i}$ 为各类燃料的供给速率，kg/s；Q_{air} 为空气带入的热量，kJ/s；W_{pump} 为泵功，MW；W_{tu} 为汽轮机输出的功率，MW；$\Delta E_{\mathrm{s,ts}}$ 为机组内部蓄能的总变化量，kJ。

2.3 机组爬坡性能优化方法

通过削弱燃料供给与炉内燃烧放热之间的大延迟现象，可以减少床料与汽水侧蓄能的变化量，从而削弱机组运行参数在变负荷瞬态过程中的波动幅度。选用某种煤粉机组所用的烟煤（见表 4）与 CFB 机组的设计煤种（见表 2）进行动态混烧，以增强 CFB 锅炉在机组爬坡过程中的灵活性。掺烧的烟煤碳含量和低位发热量高于设计煤种，灰分含量低于设计煤种。

表 4 煤粉成分（收到基）

Tab. 4 Composition of the pulverized coal (received)

w(C)/%	w(H)/%	w(O)/%	w(N)/%	w(S)/%
52.50	3.03	9.96	0.54	0.64
w(水分)/%	**w(灰分)/%**	**w(挥发分)/%**	**低位发热量/(MJ·kg^{-1})**	
17.32	16.00	37.70	19.65	

为了使炉膛放热量对汽水侧热量需求的响应更迅速，在炉膛中上部增加煤粉混烧入口，在升负荷过程中将煤粉送入炉膛。如图 5（其中 K 为增益系数）所示，机组爬坡过程中煤粉添加量受到汽水侧的关键运行参数（主蒸汽压力（TP）、主蒸汽温度（LT）和再热蒸汽温度（RT））的协同控制。TP 与其设定值（TP-SP）的偏差和 LT 与其设定值（LT-SP）的偏差以一定增益进行叠加，将其作为主控 PID 的输入量；RT 与其设定值（RT-SP）的偏差经过单独的 PID 控制器，将其作为主控 PID 的前馈。煤粉添加量以燃料总热量为基准，将煤粉添加量等效的设计煤种量（PCFR-EQ），与以设计煤种热值为标准的总燃料量（FFR）做差值得到优化逻辑下的实时设计煤种供给量（CGFR），同时经过等效换算（$F_{11}(x)$）得到实际的煤粉添加量（PCFR）。添加煤粉的作用是替代优化前控制逻辑中 FFR 的正偏差部分，以减小蒸汽压力和温度的偏差幅度及时间，因此优化方案的控制逻辑中 FFR 的正偏差和 PCFR-EQ 的负偏差被设置为 0。

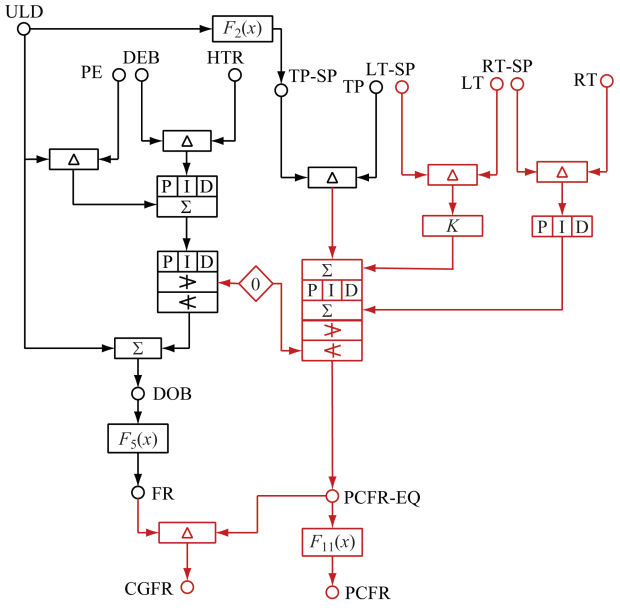


图 5 优化策略下控制逻辑示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the control logics under the optimized strategy

2.4 煤粉动态混烧表现

如图 6 所示，煤粉添加速率的最大值限制为 15 t/h，煤粉添加速率在整个升负荷过程中呈现不断波动的特征。在 1%/min 升负荷过程中 45～75 min 煤粉添加量较大；2%/min 升负荷过程中 45～115 min 煤粉添加量较大；3%/min 升负荷过程中 30～120 min 煤粉添加量较大。受到汽温汽压波动幅度的影响，负荷爬坡速率越大，煤粉总添加量越多。

3 结果与分析

利用建立的300MWCFB机组动态模型，对比

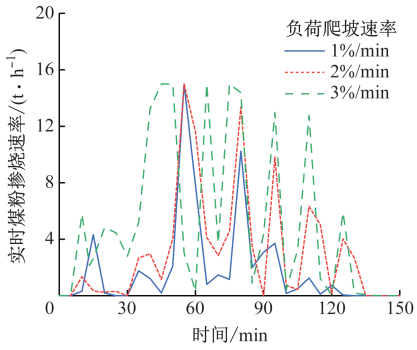


图 6　升负荷过程中煤粉动态添加速率

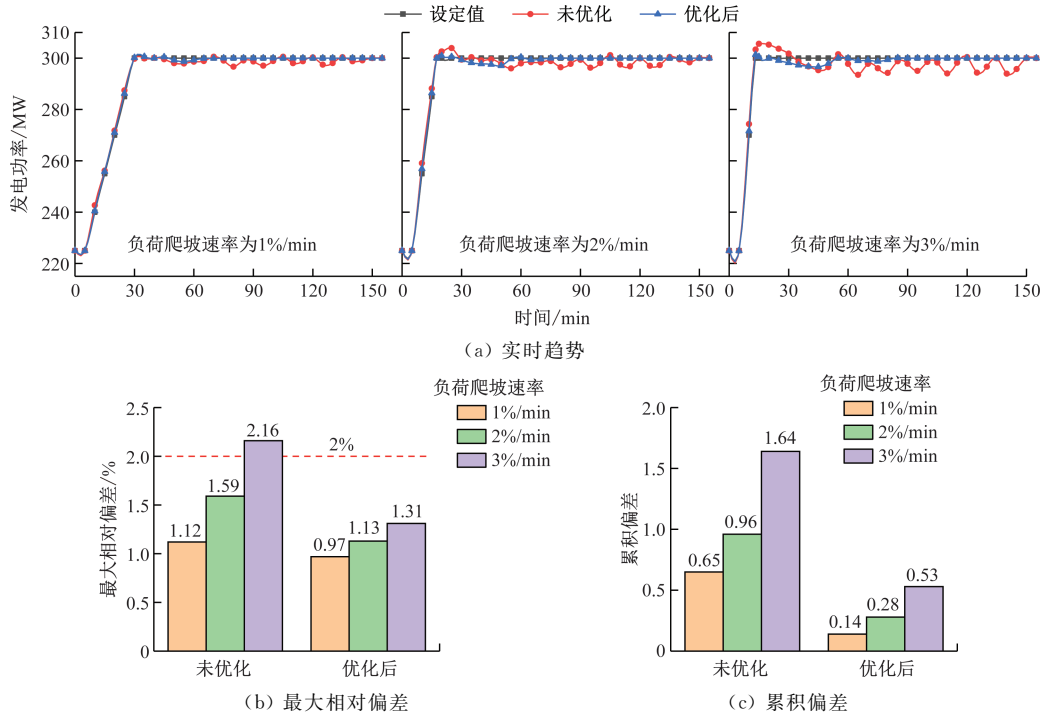
Fig. 6　Dynamic addition rate of the pulverized coal during the load ramp-up process

了采用优化逻辑前后机组关键运行参数的瞬态特性，具体通过分析机组在负荷爬坡过程中的实时趋势、最大相对偏差和累积偏差，以验证优化方案的可行性和先进性。以下研究了机组在 75%～100%额定负荷区段，分别以 1%/min、2%/min、3%/min 速率进行爬坡的瞬态过程中机组各关键运行参数的变化趋势。

3.1　输出功率及锅炉蒸发量瞬态性能

机组输出功率是整个系统中最重要的参数，其控制水平直接表征了机组的灵活性。为清楚表达机组关键运行参数的瞬态性能，可将整个变负荷过程分为爬坡过程和参数逐渐稳定过程 2 个阶段。

如图 7(a)所示，优化前后的控制逻辑对机组爬坡阶段的功率趋势影响较小，均与设定值曲线贴合度较好；但在参数逐渐稳定过程中，优化后的控制策略可显著缓解输出功率的波动问题。由图 7(b)可知，整个爬坡过程中输出功率与设定值之间的最大相对偏差明显降低，机组以 3%/min 速率进行变负荷时，输出功率最大相对偏差从 2.16%减小到 1.31%。即在此负荷区段，满足机组功率变化需求的最大爬坡速率可由原有的 2%/min 提升至 3%/min。由图 7(c)可知，优化方案可以大幅度缩小输出功率的偏差程度，在 1%/min、2%/min、3%/min 机组爬坡速率下，累积偏差分别降低了 79.0%、70.3%、67.8%。



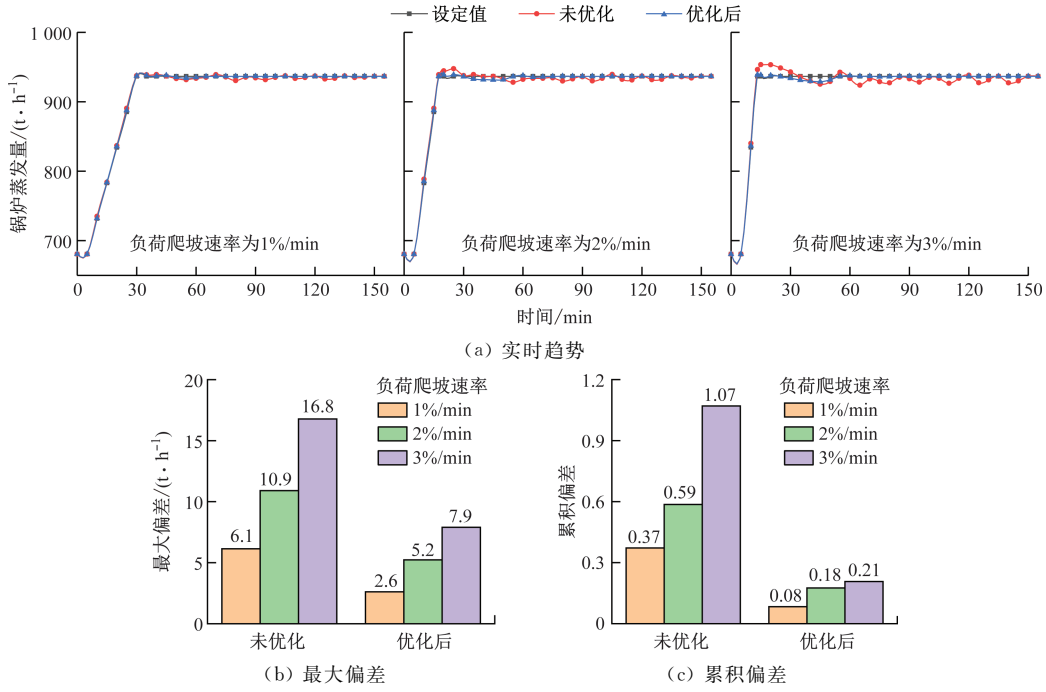
(a) 实时趋势　(b) 最大相对偏差　(c) 累积偏差

图 7　优化前后机组爬坡过程中输出功率瞬态性能

Fig. 7　Transient performance of output power during the load ramp-up process before and after optimization

锅炉蒸发量是直接决定机组输出功率的重要参数。如图 8(a)所示，优化前后的控制逻辑对机组爬坡阶段的锅炉蒸发量影响较小；在负荷逐渐稳定阶段，蒸发量的波动明显减小。图 8(b)和图 8(c)显示整个机组爬坡阶段锅炉蒸发量的最大偏差和累积偏差明显减小，这充分说明了优化策略对 CFB 机组汽水侧的瞬态稳定性有较大的提升作用。

优化策略提升输出功率控制水平的机制如下：机组爬坡过程中，输出功率主要受到主汽调节阀控制，即使燃料燃烧传热等热惯性会影响锅炉响应速率，但功率可通过调节蒸汽流量得到准确控制；但是当负荷指令达到目标值后，影响输出功率的主要因素是蒸汽参数。煤矸石燃料在炉膛中的破裂过程导致通过燃料量调节燃烧热量存在延迟，使输出功率



(a) 实时趋势　(b) 最大偏差　(c) 累积偏差

图 8　优化前后机组爬坡过程中锅炉蒸发量瞬态性能

Fig. 8　Transient performance of boiler evaporation rate during the load ramp-up process before and after optimization

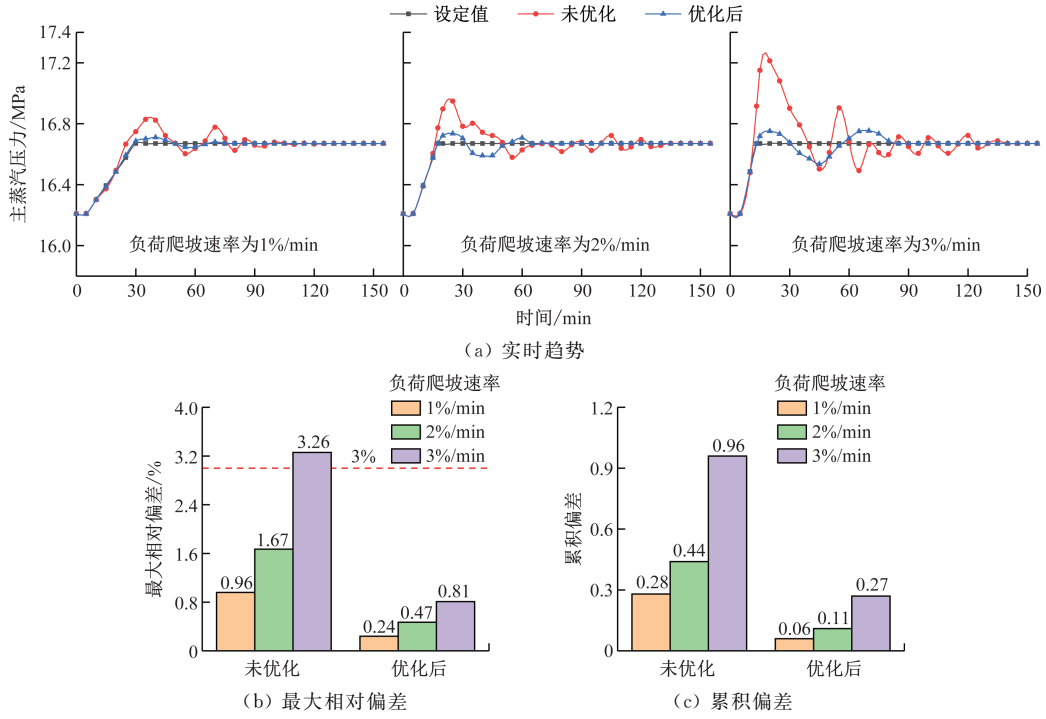
的波动较大。优化策略根据负荷偏差动态地在炉膛上部位置掺烧煤粉，利用更高燃尽速率的燃料，有效减小煤矸石燃烧惯性的影响。在炉侧延迟响应被削弱后，机组爬坡时主汽阀被调节的幅度减小，进而减少了锅炉蒸发量的波动，减少了工质蓄热的利用，最终提高输出功率控制精度。

3.2　汽温汽压瞬态性能

蒸汽温度和压力是影响机组运行稳定性和能效的关键参数。但 CFB 机组燃料侧具有较大的热惯性，变负荷过程易导致蒸汽温度和压力发生波动。相对于机组的设计煤种，优化策略选取的煤粉具有更快的燃烧速率，因此优化策略可以加快燃料侧对蒸汽温度和压力在瞬态过程中出现偏差的响应。

如图 9(a)所示，在机组爬坡阶段，主蒸汽压力与设定值曲线基本贴合，但当负荷指令达到目标值时，主蒸汽压力易发生超调，且超调量随着变负荷速率的增加而增大，随后主蒸汽压力逐渐收敛于设定值。由图 9(b)可知，采用原始控制逻辑时，主蒸汽压力的超调量较高，当变负荷速率为 3%/min 时，主蒸汽压力最大相对偏差达到 3.26%，已经超出了 DL/T 657—2015 标准[26]对机组变负荷过程中主蒸汽压力偏差的规定范围。如图 9(b)和图 9(c)所示，采用本文提出的优化方案后，主蒸汽压力的最大相对偏差和累积偏差均大幅度降低，当机组爬坡速率分别为 1%/min、2%/min、3%/min 时，机组爬坡过程的累积偏差分别降低了 82.6%、73.9%、72.4%。控制逻辑中，主蒸汽压力主要受到给水、蒸汽流量以及燃料供给量的影响，当功率在小范围内变化时，蒸汽流量相对稳定，此时主蒸汽压力主要受燃料量影响，采用响应迅速的煤粉有利于精准调节主蒸汽压力，从而提升主蒸汽压力的控制水平。

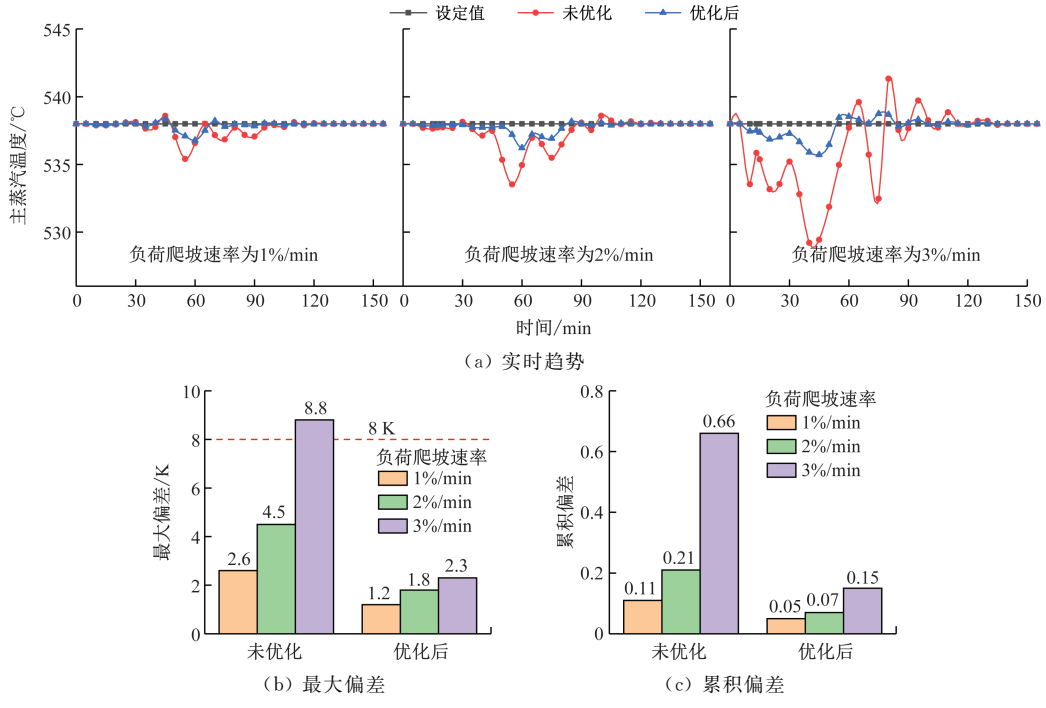
如图 10(a)所示，主蒸汽温度的波动程度随着变负荷速率的增加而增大，采用优化策略后控制逻辑可以明显遏制主蒸汽温度的波动。未优化的控制逻辑中，主蒸汽温度受到给水、蒸汽流量以及燃料供给量的影响，主要依靠减温水来调节。随着压力的上升，汽包中工质的汽化潜热下降，升负荷过程中当给水及燃料的供给速率平稳增加时，汽包产汽量的增加速率将更高，即过热蒸汽流量的增加速率比给水流量的增加速率快；过热系统中蒸汽的吸热量迅速增加，但烟风侧加热能力受限于 CFB 锅炉燃料供给延迟与惯性的限制，无法及时满足过热系统的吸热量需求，导致主蒸汽温度无法达到设定值。随着变负荷速率的增加，主蒸汽温度偏离设定值的幅度越大。如图 10(b)所示，采用原始控制逻辑时，3%/min 变负荷速率下主蒸汽温度的最大偏差为 8.8 K，超出规定范围；采用优化方案后，在 1%/min、2%/min、3%/min 爬坡速率下，主蒸汽温度的最大偏差分别降低了 1.4、2.7、6.5 K，距离安全边界较远，且速率越大优化效果越强。如图 10(c)所示，主蒸汽温度的累积偏差降低了 58.3%～77.7%。本文提出的优化控制策略是在炉膛上部混烧响应迅速



（a）实时趋势　（b）最大相对偏差　（c）累积偏差

图 9　优化前后机组爬坡过程中主蒸汽压力瞬态性能

Fig. 9　Transient performance of main steam pressure during the load ramp-up process before and after optimization



（a）实时趋势　（b）最大偏差　（c）累积偏差

图 10　优化前后机组爬坡过程中主蒸汽温度瞬态性能

Fig. 10　Transient performance of main steam temperature during the load ramp-up process before and after optimization

的煤粉，以削弱 CFB 锅炉燃料输入的迟滞特性，增强主蒸汽压力在机组爬坡过程中的稳定性，从而减少主蒸汽温度的波动。

如图 11(a)所示，再热蒸汽温度的波动程度随着变负荷速率的增加而增大，优化方案可以明显降低再热蒸汽温度的偏差。如图 11(b)和图 11(c)所示，采用优化方案后，再热蒸汽温度的最大偏差和累积偏差均明显降低，当机组爬坡速率分别为 1%/min、2%/min、3%/min 时，再热蒸汽温度的最大偏差分别降低 1.5、3.0、6.0 K，累积偏差分别降低了 66.1%、67.6%、68.2%。控制逻辑中，再热蒸汽温度的控制主要通过调节烟气挡板位置，CFB 锅炉燃

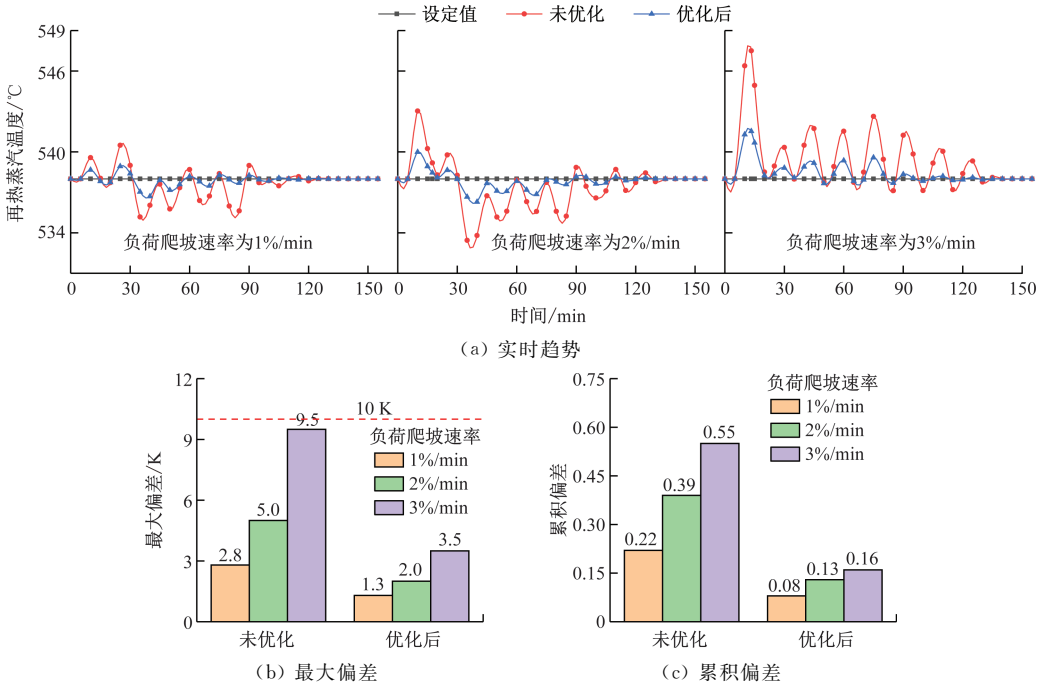


图 11 优化前后机组爬坡过程中再热蒸汽温度瞬态性能

Fig. 11 Transient performance of reheat steam temperature during the load ramp-up process before and after optimization

料侧的大惯性使烟气挡板易出现超调，难以精确控制再热蒸汽温度。优化方案削弱了燃料侧惯性，增强了再热蒸汽温度的控制水平。

优化策略提升汽温汽压控制水平的机制如下：原始策略下，由于煤矸石的燃烧惯性，机组负荷存在一定偏差，为了弥补这一缺口，汽水侧工质及受热面的蓄热出现被动调用的情况，导致汽温汽压长时间波动，难以快速达到稳定。优化策略直接以汽温汽压为受控参数在炉膛上部混烧煤粉，提升了输出功率跟随负荷指令的贴合度，同时也减小了汽水侧蓄热的被动调用程度，从而减小了汽温汽压的波动。

3.3 床温瞬态性能

床温体现了 CFB 炉膛内整体的热力学状态，将床温控制在安全、合理的范围内是保证 CFB 锅炉在变负荷过程中安全运行的必要条件。优化方案的控制逻辑(见图 5)并未直接对床温加以控制，但混烧煤粉势必会对炉膛内热力学状态造成一定影响，因此研究床温在优化策略下的表现十分必要。

由图 12(a)可知，优化后的控制逻辑推迟了床温最大负偏差出现的时间，缩小了偏差的极限值，但加大了床温波动的时长。如图 12(b)所示，优化后床温在机组爬坡过程中的最大偏差降低，在 3%/min 速率下床温仍在安全范围内。如图 12(c)所示，是否采用优化方案对床温累积偏差的影响较小。优化方案减小了床温波动的峰值，小幅度拉长了床温波动的时长，整体上对床温影响较小的优化方案通过动态混烧更高燃烧速率的煤粉来加快机组负荷爬坡过程中燃料输入与汽水侧接收能量之间的响应，从而提升了机组负荷爬坡性能。由于 CFB 循环回路中惰性物料量极大(100% 负荷时床料量约为 500 t)，床料对温度变化的容忍度大于蒸汽侧的受热面。

综上所述，在床温波动程度变化不大的情况下，优化后的控制逻辑缩小了负荷爬坡过程中输出功率的偏差，并明显减少了主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度的波动程度，从而明显增强了 CFB 机组的爬坡性能。采用优化控制逻辑后，在 3%/min 机组爬坡速率下，输出功率、主蒸汽压力、主蒸汽温度和再热蒸汽温度最大偏差分别为 1.31%、0.81%、2.3 K 和 3.5 K，距离安全范围仍有较大距离，证明优化方案在 CFB 机组爬坡性能上仍有提升的潜力。

3.4 机组热经济性

基于动态仿真模型可算出机组爬坡过程中由燃料、空气和泵输入热力系统的能量总和，汽轮机输出的能量总和以及机组蓄能的累积变化量，从而得到爬坡过程中整个机组的发电能效(式(3))。

如表 5 所示，在 1%/min、2%/min、3%/min 机组爬坡速率下，整个爬坡过程的机组能效分别提升了 0.02 百分点、0.04 百分点、0.07 百分点。可见优化方案不仅可以增强 CFB 机组关键运行参数的稳定性，还可以小幅度提升机组在爬坡过程中的热经济性。出现这种正向效应的原因一方面是相比设计

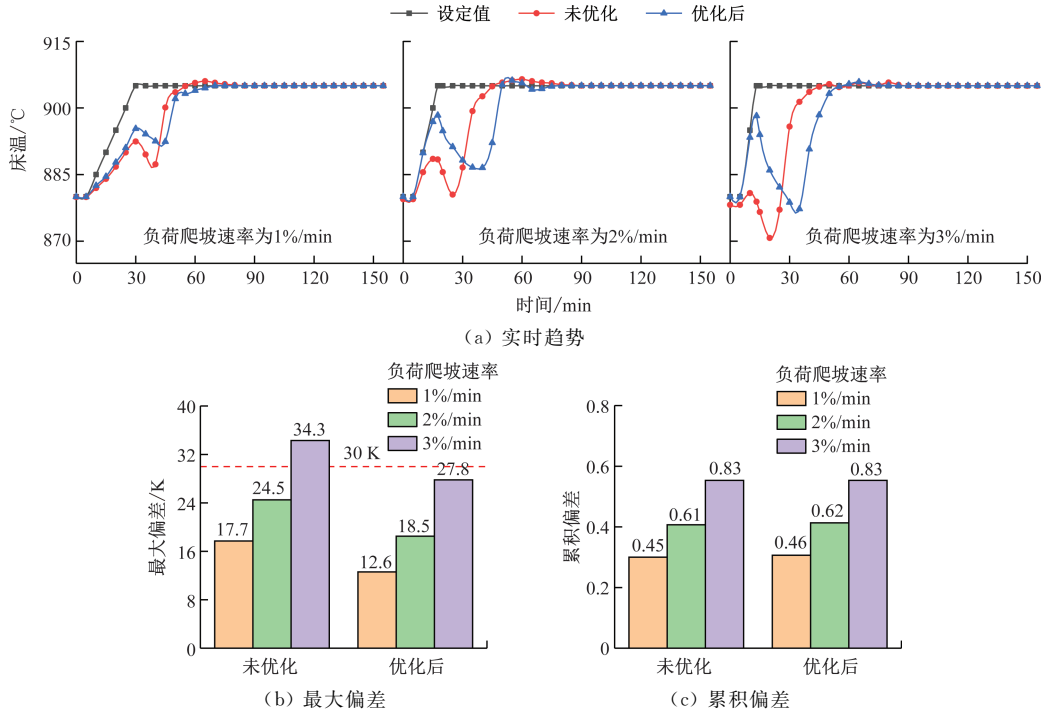


图 12　优化前后机组爬坡过程中床温瞬态性能

Fig. 12　Transient performance of bed temperature during the load ramp-up process before and after optimization

表 5　优化前后机组爬坡过程的发电能效

Tab. 5　Energy efficiency of the entire power unit during the load ramp-up process before and after optimization

爬坡速率/(%·min^{-1})	未优化 η_{en}/%	优化后 η_{en}/%
1	40.17	40.19
2	40.06	40.10
3	39.91	39.98

煤种，优化方案所添加的煤粉低位发热量高、燃烧速率快；另一方面是机组蒸汽侧受热面所承受的温度变化量减少，相应的蒸汽温度控制所需的泵功减少。

本文基于机组爬坡过程汽水侧运行参数的瞬态表现提出了优化方案，并重点研究了优化方案对机组爬坡灵活性的提升效果。而实施爬坡灵活性优化方案中需要增加燃料种类和燃料入口，且燃料成分的频繁变化势必会对炉内污染物的生成特性造成一定的影响。因此，上述问题仍需进一步研究，以丰富优化方案的细节，强化其理论完整度和现场可行性。

4　结论

为了增强 CFB 机组的负荷爬坡性能，提出了在 CFB 机组爬坡过程中动态混烧煤粉的优化方案，通过在炉膛上部混烧更高燃尽速率的煤粉，削弱煤矸石燃烧惯性的影响，从而减少逐渐稳定阶段输出功率的波动；以汽温汽压为受控参数在炉膛上部动态混烧煤粉，削弱负荷爬坡过程中汽水侧蓄热的被动调用程度，减少汽温汽压的波动。本文的主要结论如下：

(1) 优化方案可以提升 CFB 机组的负荷爬坡速率。在未优化的控制逻辑下，机组最高的安全爬坡速率为 2%/min，采用优化方案后，机组可以以 3%/min 变负荷速率安全爬坡。

(2) 优化方案可以提升 CFB 机组爬坡过程中关键运行参数的稳定性，大幅度减少变负荷过程中输出功率、汽温汽压、锅炉蒸发量的波动程度，对床温的波动影响较小。在 1%/min、2%/min、3%/min 变负荷速率下，优化方案可以将机组爬坡过程中输出功率的最大相对偏差从 2.16% 降低到 1.31%，主蒸汽压力的最大相对偏差从 3.26% 降低到 0.81%，主蒸汽温度的最大偏差从 8.8 K 降低到 2.3 K，再热蒸汽温度的最大偏差从 9.5 K 降低到 3.5 K，床温的最大偏差从 34.3 K 降低到 27.8 K。

(3) 优化方案可以小幅度提升 CFB 机组爬坡过程中的热经济性。在 1%/min、2%/min、3%/min 机组爬坡速率下，瞬态过程中整个机组的发电能效分别提升了 0.02 百分点、0.04 百分点、0.07 百分点。

参考文献：

[1] 杨华磊，杨敏. 碳达峰碳中和：中国式现代化的能源转型之路[J]. 经济问题，2024(3)：1-7.
YANG Hualei，YANG Min. Peak carbon emission

and carbon neutrality: China's path to energy transition in modernization[J]. On Economic Problems, 2024(3): 1-7.

[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] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年 1-9 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-10-21)[2024-11-19]. http://www.nea.gov.cn/2024-10/21/c_1212405574.htm.

[4] 赵攀，苟非非，许文盼，等. 风-火-储耦合系统储能容量配置优化对比[J]. 西安交通大学学报，2024，58(8)：38-48.
ZHAO Pan, GOU Feifei, XU Wenpan, et al. Comparison of storage capacity configuration optimization in wind-thermal power-storage coupling system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(8): 38-48.

[5] 吕俊复，蒋苓，柯希玮，等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术，2023，51(1)：514-522.
LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514-522.

[6] 张思海，张双铭，张俊杰，等. 330 MW 亚临界 CFB 锅炉烟气再循环深度调 峰运行性能研究[J]. 洁净煤技术，2021，27(1)：291-298.
ZHANG Sihai, ZHANG Shuangming, ZHANG Junjie, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW subcritical CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 291-298.

[7] 吕俊复，杨海瑞，杨方亮，等. 低热值煤资源现状与循环流化床发电应用分析[J]. 中国煤炭，2021，47(3)：101-108.
LV Junfu, YANG Hairui, YANG Fangliang, et al. Analysis on current situation of low calorific value coal resources and application of circulating fluidized bed power generation[J]. China Coal, 2021, 47(3): 101-108.

[8] 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.

[9] DENG Boyu, ZHANG Man, SHAN Lu, et al. Modeling study on the dynamic characteristics in the full-loop of a 350 MW supercritical CFB boiler under load regulation[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 97: 117-130.

[10] 吕俊复，周托，张扬，等. 碳中和目标下循环流化床锅炉技术的展望[J]. 动力工程学报，2022，42(11)：1005-1012.
LÜ Junfu, ZHOU Tuo, ZHANG Yang, et al. Prospect of the circulating fluidized bed boiler technology for the goal of carbon neutralization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1005-1012.

[11] 张瑞卿，杨海瑞，吕俊复，等. 应用于循环流化床锅炉气固流动和燃烧的 CPFD 数值模拟[C]// 全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网第十一届年会暨第三届中国循环流化机床燃烧理论与技术学术会议论文集. 鄂尔多斯：中国电力企业联合会，2012：127-139.

[12] 洪烽. 基于蓄能深度利用的循环流化床机组动态优化控制[D]. 北京：华北电力大学，2019.

[13] ZHAO Chenyu, WANG Chaoyang, FAN Jianlin, et al. Enhancing the load ramp-up capability of the subcritical CFB power unit by considering the evolution of internal stored energy[J]. Energy, 2024, 307: 132571.

[14] GAO Mingming, HONG Feng, YAN Guodong, et al. Mechanism modelling on the coordinated control system of a coal-fired subcritical circulating fluidized bed unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 548-555.

[15] 张洪福，高明明，于浩洋，等. 300 MW 深度调峰循环流化床机组负荷响应特性研究[J]. 动力工程学报，2023，43(9)：1116-1122.
ZHANG Hongfu, GAO Mingming, YU Haoyang, et al. Study on load response characteristics of a 300 MW circulating fluidized bed unit with deep peak regulation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(9): 1116-1122.

[16] GAO Mingming, HONG Feng, LIU Jizhen. Investigation on energy storage and quick load change control of subcritical circulating fluidized bed boiler units[J]. Applied Energy, 2017, 185: 463-471.

[17] 杜晓成，王奥宇，项昱轩，等. 超临界 CFB 锅炉灵活运行方式下的流动传热及动态特性试验研究[J]. 热力发电，2023，52(9)：76-86.

DU Xiaocheng, WANG Aoyu, XIANG Yuxuan, et al. Experimental investigation on flow heat transfer and dynamic characteristics of supercritical CFB boiler under flexible operation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 76-86.

[18] STEFANITSIS D, NESIADIS A, NIKOLOPOULOS A, et al. Simulation of a circulating fluidized bed power plant integrated with a thermal energy storage system during transient operation[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103239.

[19] 李国胜，潘燕龙，刘众元，等. 循环流化床锅炉物料浓度分布的影响因素分析[J]. 热能动力工程，2018，33(3)：133-137.
LI Guosheng, PAN Yanlong, LIU Zhongyuan, et al. Analysis of influencing factors of the solid concentration distribution in circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(3): 133-137.

[20] LIU Xuemin, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. Optimization of fluidization state of a circulating fluidized bed boiler for economical operation[J]. Energies, 2020, 13(2): 376.

[21] 高明明，刘博通，张开萍，等. 生物质循环流化床锅炉床温动态模型研究[J]. 热力发电，2023，52(4)：72-81.
GAO Mingming, LIU Botong, ZHANG Kaiping, et al. Study on dynamic bed temperature model of biomass circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 72-81.

[22] PETERS J, LANGNER E, STRÖHLE J, et al. Acceleration of load changes by controlling the operating parameters in CFB co-combustion[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 677950.

[23] 吕俊复，尚曼霞，柯希玮，等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报，2023，48(1)：430-437.
LÜ Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 430-437.

[24] 太原锅炉集团有限公司，清华大学. 一种粉煤颗粒循环流化床燃烧系统及其燃烧方法：201711378215.7[P]. 2018-04-20.

[25] WANG Chaoyang, LIU Ming, LI Bingxin, et al. Thermodynamic analysis on the transient cycling of coal-fired power plants: simulation study of a 660 MW supercritical unit[J]. Energy, 2017, 122: 505-527.

[26] 国家能源局. 火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程：DL/T 657—2015[S]. 北京：中国电力出版社，2015.