

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404090

# 基于增设小粉仓的新型制粉系统 方案设计及控制策略研究

丁思变, 谭亲雄, 丁宏宇, 杨涛  
(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**[摘要]** 针对直吹式制粉系统存在制粉响应慢、控制精度差等问题, 研究设计了基于增设小粉仓的新型制粉系统, 并提出了相应的风粉控制策略。基于超超临界机组动态仿真模型, 对新型制粉系统运行及控制策略进行了仿真验证。仿真结果表明, 提出的控制策略能够实现风粉参数的快速准确响应, 且在75%~85%的额定负荷变化范围内进行的负荷响应仿真试验中, 在小粉仓投入运行后, 机组模型的负荷响应速率可以达到5%/min, 且能更快恢复稳定。所提出的新型制粉系统及其运行控制策略显著提升了机组灵活性, 为煤粉锅炉灵活性提升研究提供了可行的技术途径与指导性建议。

**[关键词]** 制粉系统; 小粉仓; 灵活性; 控制策略

**[引用本文格式]** 丁思变, 谭亲雄, 丁宏宇, 等. 基于增设小粉仓的新型制粉系统方案设计及控制策略研究[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 79-88. DING Sibian, TAN Qinxiong, DING Hongyu, et al. Scheme design and control strategy of a novel coal pulverizing system based on addition of small pulverized coal silos[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 79-88.

## Scheme design and control strategy of a novel coal pulverizing system based on addition of small pulverized coal silos

DING Sibian, TAN Qinxiong, DING Hongyu, YANG Tao

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To solve the problems of slow milling response and poor control precision occurred in direct-blow pulverizing systems, a novel pulverizing system adding small pulverized coal silos is designed, and the corresponding air-powder control strategy is proposed. Moreover, based on the dynamic simulation model of an ultra-supercritical unit, the operation and control strategy of the novel pulverizing system is simulated and validated. The results demonstrate that, the proposed control strategy enables precise and rapid response of air-powder parameters. In the load response simulation tests conducted within the load variation range of 75%~85% of rated load, after the small pulverized coal silos were put into operation, the load response rate of the unit's model can reach 5%/min and recover stability faster. Therefore, the novel pulverizing system and its operational control strategy significantly enhance the unit flexibility. The research provides a viable technical approach and guidance for improving the flexibility of coal-fired boilers.

**Key words:** pulverizing system; small pulverized coal silos; flexibility; control strategy

可再生能源具有间歇性、波动性等特点<sup>[1]</sup>, 其大规模的并网发电为电网带来了巨大的消纳难题。煤电作为发电主体, 需要提升运行灵活性以承担电网新能源消纳的主要任务<sup>[2-3]</sup>。煤粉锅炉存在对机组

负荷响应延迟大<sup>[4-5]</sup>、低负荷下燃烧不稳定<sup>[6-8]</sup>等问题, 提升燃煤机组灵活性的关键在煤粉锅炉侧<sup>[9]</sup>。目前超超临界机组基本都采用直吹式制粉系统, 其存在控制准确性差、响应时间长<sup>[10]</sup>、低负荷下煤粉浓度

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4100400)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4100400)

第一作者简介: 丁思变(1978), 男, 硕士, 主要研究方向为热工自动化、热力系统建模与仿真, dingsibian@163.com。

通信作者简介: 杨涛(1978), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为热能工程/发电设备自动控制、建模与仿真, hust\_yt@mail.hust.edu.cn。

难以保证<sup>[11]</sup>等问题。若不经系统改造优化,制粉系统设备的这些问题难以真正避免。在磨煤机与锅炉炉膛间增设粉仓,将磨煤机与锅炉解耦,能有效解决这些问题。

国外对于在直吹式制粉系统中增设粉仓的系统通常称为间接燃烧系统<sup>[12]</sup> (indirect firing systems, IFS), Buddenberg 等人<sup>[13]</sup>提出将直吹式制粉系统的磨煤机出口煤粉送入粉仓中而不是燃烧器,由粉仓经风粉分配后送入特定燃烧器中。Richter 等人<sup>[14]</sup>基于 Dymola 仿真软件对该方法进行了动态仿真,通过负荷阶跃响应曲线得到改造后机组的负荷响应速率是改造前 2 倍的初步结论。在褐煤预干燥领域, Bergins 等人<sup>[15]</sup>提出将干燥后的部分褐煤存储进粉仓中,当需要机组低负荷运行时,转用粉仓中的预干燥煤粉,可以进一步降低褐煤机组最低出力,同时还能部分代替点火用燃油,节约启动成本。此改造思想已在多个电厂中应用,如土耳其的 Elbistan 电厂<sup>[16]</sup>、希腊的 Megalopoli 电厂<sup>[17-18]</sup>等。国内许多学者也提出多种系统结构方案<sup>[19-22]</sup>,但目前并未有相关仿真或工程实践对提出的结构或运行控制策略进行验证。

可见在增设粉仓后,制粉系统从单一的直吹式或中储式运行结构向两者有机结合转变。然而目前对于增设粉仓的多数设计方案将粉仓作为长期存

储容器,在有需求的情况下投入运行以辅助供粉,其容量由机组煤粉需求量决定,而对于超超临界机组,这将导致通常需要高达数百吨的存储容量<sup>[23]</sup>,增加了改造或建造以及运维成本;另一方面,对增设粉仓这一新型系统,在结构上能实现磨煤机与锅炉的解耦及燃料量的快速响应,这一特性将十分有利于锅炉运行灵活性。

由于实现解耦特性控制策略的相关研究较少,为此,本文针对某超超临界 660 MW 机组提出一种新型制粉系统的整体结构方案,并设计关键风粉参数的运行控制策略,建立了机组动态仿真模型,开展了动态特性仿真分析,验证所提控制策略的有效性以及对机组灵活性的提升效果。

## 1 新型制粉系统结构及运行方案

### 1.1 系统结构设计

本文综合现有制粉系统结构以及前人的设计工作,将粉仓作为供粉缓冲环节而不是长期存储容器,粉仓向锅炉供粉的同时磨煤机也向粉仓输粉,其容量只由磨煤机制粉和锅炉需粉之间的不平衡量决定,因此可以实现“小粉仓”的应用。基于此想法,考虑了灵活性提升、运行安全以及对燃烧状态的影响下提出如图 1 所示整体结构设计方案。

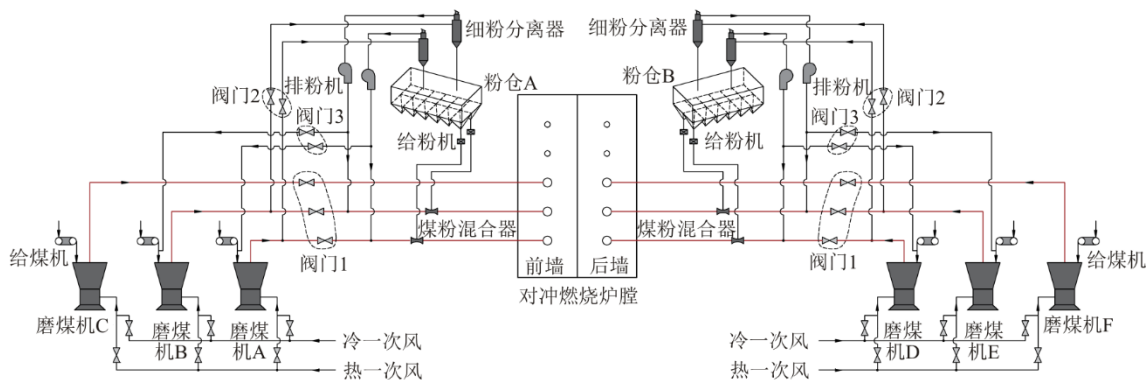


图 1 超超临界机组新型制粉系统整体结构

Fig.1 Overall structure of the novel pulverizing system for supercritical unit

图 1 中红实线表示磨煤机出口一次风粉管道,分别连接每层 6 支燃烧器,为简化示意,每台磨煤机仅展现一根管道。小粉仓设计为 2 台,分别位于前后墙布置,下 2 层磨煤机 (A、B 和 D、E) 采用乏气送粉结构分别连接小粉仓:每根一次风粉管可分成 2 路,一路经阀门 1 (磨煤机出口去燃烧器阀

门)、煤粉混合器连接燃烧器;另一路经阀门 2 (磨煤机出口去细分阀门) 连接细分分离器进口。排粉风机将细分分离器分离出来的乏气一部分送至磨煤机进口,此为煤粉再循环管,管道上的有调节阀 3 (再循环调阀);另一部分经分配后重新进入磨煤机出口一次风粉管中,并作为主要的送粉介质,

称为“送粉乏气”。小粉仓下端有 12 个煤斗，每个煤斗连接 1 台给粉机，共 12 台给粉机，分别与 12 根一次风粉管上的煤粉混合器连接。上面一层磨煤机 (C、F) 保留原直吹式供粉方式，采用原电厂风粉控制策略。此方案因为底层磨煤机 A、D 在不同负荷工况下都一直投入，当机组需要小粉仓投入时，能持续保持其内部煤粉流动的状态，降低燃爆风险<sup>[24]</sup>；而仅 2 台磨煤机连接小粉仓，能使小粉仓下方煤斗较少，在设计制造以及实际结构布置上都具备可行性。

此结构基于阀门 1 与阀门 2 的不同开关状态可以实现多种供粉方式：锅炉燃烧所需的燃料量既能单独由磨煤机煤粉直接经过一次风粉管后提供，即是直吹式供粉方式；也能单独由小粉仓煤粉经给粉机提供，磨煤机煤粉全部进入小粉仓中存储，即是中储式供粉方式，可以知道，由于粉仓的作用不同，本文新型制粉系统采用的中储式供粉方式与传统中储式制粉系统在系统结构、运行控制上具有明显区别；还能由磨煤机煤粉经一次风粉管道和小粉仓煤粉经给粉机共同提供。这里，本文提出“双源供粉”的运行方式：即由磨煤机出口经一次风粉管向某燃烧器供粉的同时给粉机也工作且向该燃烧器供粉，燃烧器中煤粉主要来源为 2 处。

## 1.2 “双源供粉”运行方式

“双源供粉”运行方式下小粉仓全程投入运行，磨煤机出力按一定比例一部分进入小粉仓中，另一部分直接输送进燃烧器中。在变工况下锅炉燃料需求量  $R$  (目标出力)、磨煤机出力  $R_1$ 、磨煤机出口直接去燃烧器的出力  $R_{11}$ 、小粉仓出力  $R_2$  之间关系如图 2 所示。

由于存在部分磨煤机出力直接进入燃烧器中，因此仍然存在磨煤机与锅炉的直接耦合关系，可以通过降低磨煤机组去燃烧器出力  $R_{11}$  占磨组出力  $R_1$  的比重，减少其耦合程度。这样，当  $R_{11}$  所占比重为 0 时，磨煤机出力全部进入小粉仓中，为中储式供粉方式；当  $R_{11}$  所占比重为 1 时，磨煤机出力全部直接进入主燃烧器中，则为直吹式供粉方式。因此，“双源供粉”运行方式是直吹式与中储式供粉方式的切换过程中的中间状态。研究“双源供粉”运行方式下的新型制粉系统控制策略，也将适用于直吹式和中储式供粉方式，从而可以找到此 3 种供粉方式的通用控制方案。

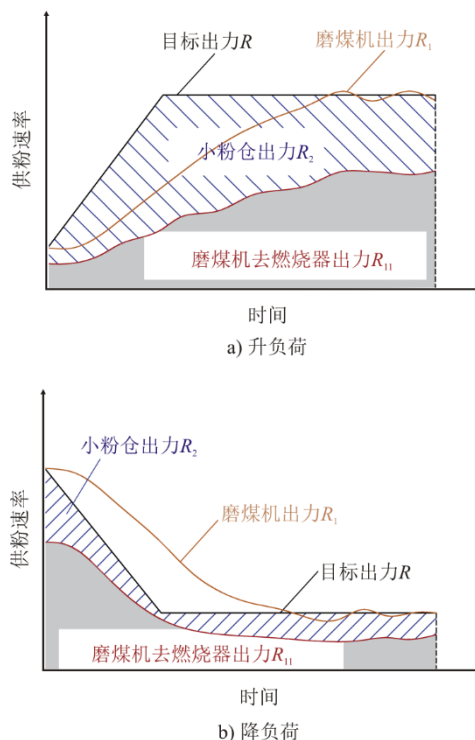


图 2 变工况下“双源供粉”运行示意

Fig.2 Schematic diagram of “dual-source pulverized coal supply” operation under variable conditions

因此，小粉仓的总容量可由式(1)和式(2)估计得到：

$$G = \frac{D_1(h_s - h_w) + D_2(h_1 - h_2)}{\eta Q_{ar,net}} \times 100 \quad (1)$$

$$B = \int_{t_1}^{t_2} (G - G_1) dt + B_0 \quad (2)$$

式中： $D_1$ 、 $D_2$  分别为主蒸汽和再热蒸汽流量，t/h； $h_s$ 、 $h_w$  分别为主蒸汽比焓和给水比焓，kJ/kg； $h_1$ 、 $h_2$  分别为高压缸排汽比焓和锅炉出口再热蒸汽比焓，kJ/kg； $Q_{ar,net}$  为燃煤收到基低位发热量，kJ/kg； $\eta$  为锅炉效率，%； $t_1$ 、 $t_2$  分别为小粉仓容量变化最大的连续过程的初始时刻和结束时刻，h； $G$  为锅炉燃料需求量，t/h； $G_1$  为磨煤机出力，t/h； $B_0$  为小粉仓安全裕度容量，t； $B$  为小粉仓总容量，t。

## 2 新型制粉系统控制策略

### 2.1 燃料量控制策略

不考虑锅炉燃油，系统燃料量的输入为给煤机给煤量，而实际进入锅炉炉膛燃烧的粉量由磨煤机出口直接去燃烧器粉量、“送粉乏气”夹带粉量以及给粉机给粉量 3 部分组成。为此需要设置 2 套燃料控制回路，燃料主控 1 通过控制给煤机煤量响应锅炉燃料量指令，确保系统煤量输入来源的足够响应；燃料主控 2 通过控制给粉机粉量从而保证实际

进入炉膛的粉量精确快速响应锅炉燃料量指令。

由于磨煤机响应惯性，导致小粉仓粉量进出不平衡，不平衡量由小粉仓自身容量补偿，因此还需设置粉仓粉位控制逻辑：当粉仓粉位低时，通过对给煤机煤量指令叠加给煤正增量指令，增加粉仓入口粉量、磨煤机出口去燃烧器粉量以及“送粉乏气”夹带粉量，燃料主控 2 给粉机给粉量指令减少，粉仓煤粉流量“进多出少”，实现粉仓粉位的回升。同样地，当粉仓粉位高时，粉仓粉位控制输出给煤机给煤负增量指令，使粉仓粉位回落。燃料量控制策略如图 3 所示。

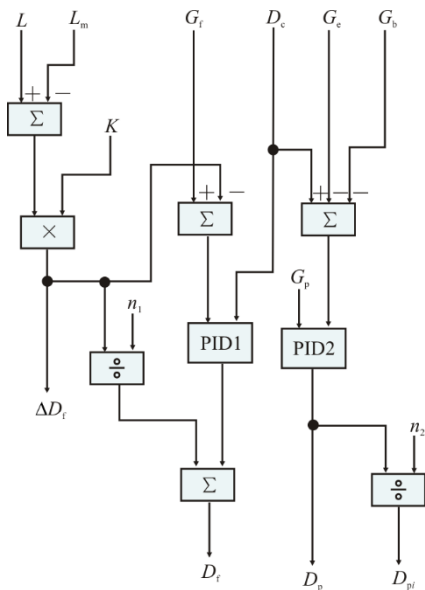


图 3 燃料量控制策略  
Fig.3 Control strategy of fuel flow

粉仓粉位控制得到的给煤机给煤量增量指令为：

$$\Delta D_f = K(L - L_m) \quad (3)$$

式中： $\Delta D_f$  为粉仓粉位控制得到的给煤机煤量增量指令，kg/s； $K$  为比例系数； $L$  为实际粉仓粉位，m； $L_m$  为粉仓中间粉位设定值，m。

对于燃料主控 1，其给煤机给煤量设定值为：

$$D_f = \frac{\Delta D_f}{n_1} + K_{P1}((G_f - \Delta D_f) - D_c) + \quad (4)$$

$$T_{i1} \int ((G_f - \Delta D_f) - D_c) dt$$

式中： $D_f$  为各给煤机给煤量指令，kg/s； $G_f$  为实际总给煤机煤量，kg/s； $D_c$  为总燃料量指令，kg/s； $n_1$  为给煤机运行数量； $K_{P1}$  为控制器 PID1 中的比例增益系数， $T_{i1}$  为控制器 PID1 中的积分时间常数。

对于燃料主控 2，每台磨煤机对应的给粉机给

粉量设定值为：

$$D_p = K_{P2}(G_p - (D_c - G_e - G_b)) + \quad (5)$$

$$T_{i2} \int (G_p - (D_c - G_e - G_b)) dt$$

式中： $D_p$  为每台磨对应的给粉机给粉量设定值，kg/s； $G_p$  为实际总给粉机给粉量，kg/s； $G_e$  为“送粉乏气”夹带粉量，kg/s； $G_b$  为磨出口直接去燃烧器粉量，kg/s； $K_{P2}$  为控制器 PID2 中的比例增益系数； $T_{i2}$  为控制器 PID2 中的积分时间常数。

则每台给粉机给粉量设定值为：

$$D_{pi} = \frac{D_p}{n_2} \quad (6)$$

式中： $D_{pi}$  为每台给粉机给粉量设定值，kg/s； $n_2$  为每台磨煤机对应的给粉机数量。

### 2.2 一次风量控制策略

系统一次风量输入为一次风机进口风量，热风 and 冷风进入磨煤机中，通过控制“磨煤机入口冷、热风门”可以调节磨煤机入口风量和磨煤机出口温度。进入主燃烧器中的实际一次风量由送粉乏气量和磨煤机出口直接去燃烧器风量 2 部分组成。对于直吹式制粉系统，一次风机入口风量一般由一次风热风母管压力确定。然而当增设粉仓系统后，系统阻力特性设备数量增加，导致一次风量减少。因此，需要通过控制粉仓系统中排粉机的转速，依据实际磨煤机入口风量调节粉仓系统阻力，从而保持新型制粉系统在各运行方式下阻力特性一致，保证磨煤机入口风量稳定。另外，对于超低负荷下风粉质量浓度偏低的问题，通过调节再循环调阀开度可以对实际进入一次风粉管内送粉风量进行控制，从而控制一次风粉质量浓度。此回路仅在超低负荷下投入，且设置有最小送粉风量保护逻辑。风量控制策略如图 4 所示。

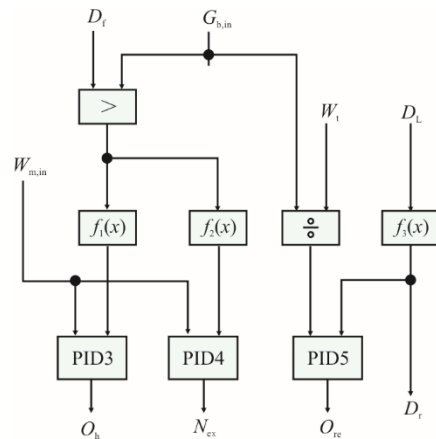


图 4 一次风量控制策略  
Fig.4 Control strategy of primary air flow

对于直吹式制粉系统，磨煤机入口风量通常由磨煤机入口热风门调节，其开度指令为：

$$O_h = K_{P3}(W_{m,in} - f_1(\max(D_f, G_{b,in}))) + T_{i3} \int (W_{m,in} - f_1(\max(D_f, G_{b,in}))) dt \quad (7)$$

式中： $O_h$ 为磨煤机入口热风门开度指令，%； $W_{m,in}$ 为实际磨煤机入口风量，kg/s； $G_{b,in}$ 为实际进入燃烧器中的粉量，kg/s； $f_1(\cdot)$ 为煤量与对于热风门的磨煤机入口风量设定值的对应关系； $K_{P3}$ 为控制器PID3中的比例增益系数； $T_{i3}$ 为控制器PID3中的积分时间常数。

当小粉仓投入后，整个制粉系统阻力特性变化，热风门调节能力有限，为此，磨煤机入口风量还需由粉仓系统中排粉风机控制，其转速指令为：

$$N_{ex} = K_{P4}(W_{m,in} - f_2(\max(D_f, G_{b,in}))) + T_{i4} \int (W_{m,in} - f_2(\max(D_f, G_{b,in}))) dt \quad (8)$$

式中： $N_{ex}$ 为排粉风机转速指令百分比，%； $f_2(\cdot)$ 为煤量与对于排粉风机的磨煤机入口风量设定值的对应函数； $K_{P4}$ 为PID4控制器中的比例增益系数； $T_{i4}$ 为控制器PID4中的积分时间常数。

一次风粉质量浓度通过再循环阀门调节，其开度指令为：

$$O_{re} = K_{P5} \left( \frac{G_{b,in}}{W_t} - f_3(D_L) \right) + T_{i5} \int \left( \frac{G_{b,in}}{W_t} - f_3(D_L) \right) dt \quad (9)$$

式中： $O_{re}$ 为再循环调阀开度指令，%； $W_t$ 为实际送粉一次风量，kg/s； $D_L$ 为机组负荷指令，MW； $f_3(\cdot)$ 为负荷指令与煤风比设定值 $D_r$ （燃烧器入口一次风粉管内粉量与送粉风量的比值，kg/kg）的对应关系； $K_{P5}$ 为控制器PID5中的比例增益系数； $T_{i5}$ 为控制器PID5中的积分时间常数。

### 3 系统运行及控制策略仿真验证

#### 3.1 机组动态仿真模型

本文基于博努力仿真公司的PowerBuilder过程建模软件对某超超临界660 MW机组进行动态仿真模型搭建。对于热力系统建模采用热工流体网络建模原理<sup>[25-27]</sup>，考虑了锅炉和热力系统的热惯性，建立了锅炉侧的完整模型，包括汽水系统、制粉和燃烧系统、风烟系统。其中，汽水系统仿真范围包括炉膛内水冷壁系统、过热、再热蒸汽系统、减温水系统；风烟系统仿真范围包括烟气系统、送风系统、一次风系统；简化了汽机侧汽水流程，仅保留高压缸实现锅炉主蒸汽和再热蒸汽的连续性，锅炉给水、高压缸抽汽及再热蒸汽出口设置为边界。给水控制得到的给水流量指令直接作为给水流量边界，给水温度、焓值参数则由机组实际负荷对应设计数据折算得到，即认为机组总能保证该负荷工况下的设计给水参数。

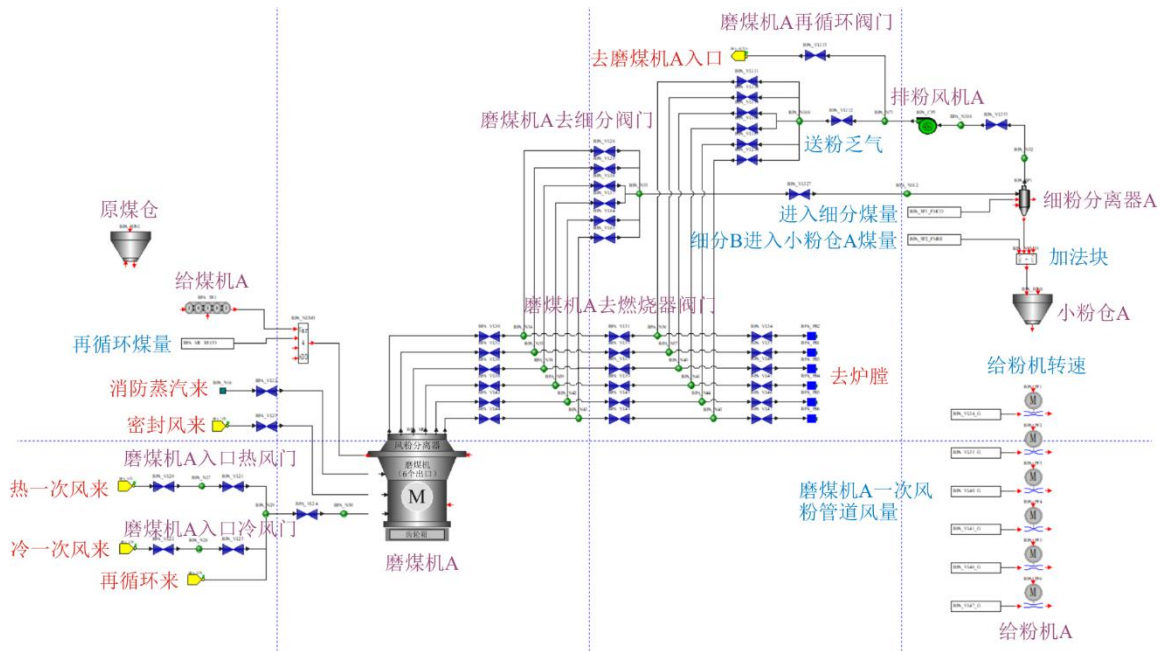


图 5 新型制粉系统热力模型（仅磨煤机 A）

Fig.5 Thermal model of the novel pulverizing system (A mill only)

对于机组控制系统则沿用某超超临界机组控制系统, 最终实现基于新型制粉系统的超超临界热力模型中磨煤机 A 及相关风粉设备的模型。经校验, 典型负荷工况下仿真结果与机组设计数据误差均在 5% 以内, 模型各参数的动态变化符合有关动态过程的分析结果, 符合实际运行规律。

经估计, 考虑到粉仓安全裕度容量、启停及切换过程, 小粉仓仅数十吨容量便可满足超超临界 660 MW 机组的正常运行需求, 相比现有研究的数百吨粉仓容量, 实现了在超超临界机组中应用“小粉仓”的设想。并基于此模型, 在负荷变化 50% 额定负荷、变负荷速率为 5%/min 的过程中, 小粉仓总煤粉量变化仅为 3 t, 小粉仓得到验证。下面对新型制粉系统运行及控制策略进行仿真验证。

### 3.2 关键风粉参数动态特性分析

#### 3.2.1 燃料量指令扰动下的动态特性

在稳定工况下, 保留下 2 层 (A、B 和 D、E) 磨煤机投入并采用中储式供粉方式运行。将给煤机 A 和给粉机 A 投入自动, 其余给煤机和给粉机切至手动, 将燃料量指令阶跃变化 20 t/h, 分析给煤机 A、磨煤机 A 及给粉机 A 三者的动态响应特性, 其过程曲线如图 6 所示。

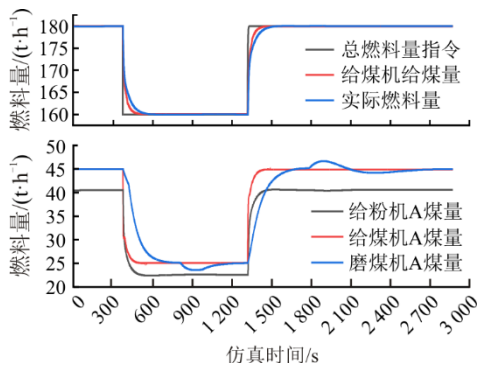


图 6 燃料量指令扰动下给煤参数响应

Fig.6 Response of coal parameters to fuel flow command disturbance

由图 6 可以看出, 给煤机对燃料量指令扰动的响应速率最快。在仿真时间 371.84 s 时, 当燃料量指令变化后, 给煤机 A 煤量在约 530 s 时达到燃料量指令, 给粉机 A 粉量在约 560 s 时达到燃料量指令, 而磨煤机 A 粉量则在约 800 s 时才达到, 且存在超调和长时间响应波动。此仿真试验验证了前文设计的燃料控制策略的有效性, 也反映出磨煤机的运行状态并不会直接影响实际燃料量供应, 基本实现了磨煤机与锅炉的解耦。

#### 3.2.2 给煤量扰动下的动态特性

分别对中储式供粉方式下给粉机粉量以及直吹式供粉方式下给煤机煤量扰动进行仿真试验, 扰动量均为 10 t/h, 分析相关参数的动态响应过程。

##### 1) 中储式供粉方式下给粉机粉量扰动试验

给粉机粉量变化直接影响去锅炉的燃料量变化, 因此中储式供粉方式下给粉机粉量扰动会对机组参数造成影响, 具体如图 7 所示。由图 7 可知, 给粉机粉量扰动后, 造成机组负荷约  $\pm 0.9$  MW、主蒸汽压力约  $\pm 0.05$  MPa、主给水流量约  $\pm 5$  t/h、高温过热器 (高过) 出口蒸汽温度约  $\pm 0.5$  °C、高温再热器 (高再) 出口蒸汽温度约  $\pm 1.2$  °C 的波动幅度, 在约 10 min 后系统恢复稳定。

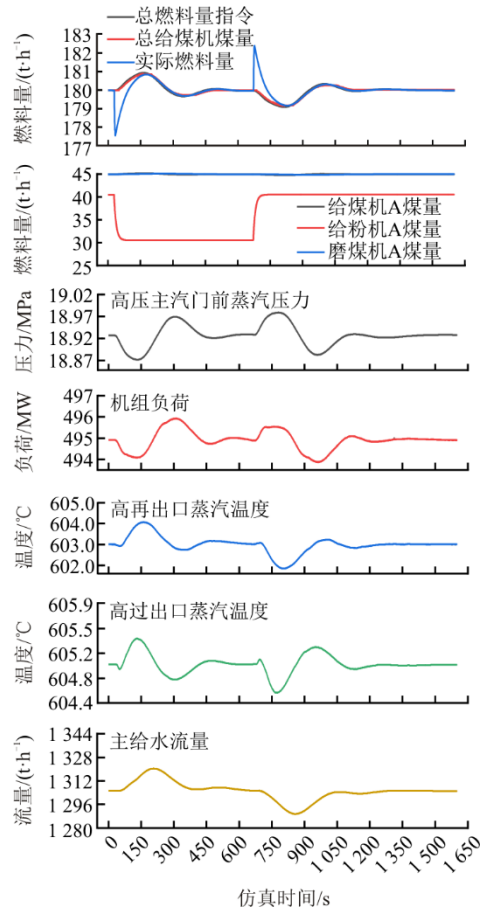


图 7 中储式供粉方式给粉机粉量扰动响应过程

Fig.7 Response to coal flow disturbance in pulverized coal feeder under "intermediate pulverized coal supply" method

##### 2) 直吹式供粉方式下给煤机煤量扰动试验

对于直吹式供粉方式, 给煤机煤量的扰动响应过程如图 8 所示。从图 8 可以看出, 给煤机煤量扰动后, 造成机组负荷约  $\pm 3.3$  MW、主蒸汽压力约  $\pm 0.4$  MPa、主给水流量约  $\pm 20$  t/h、高过出口蒸汽温

度约±0.5 °C、高再出口蒸汽温度约±0.75 °C 的扰动幅度,且给煤机扰动后系统完全恢复时间达 20 min。

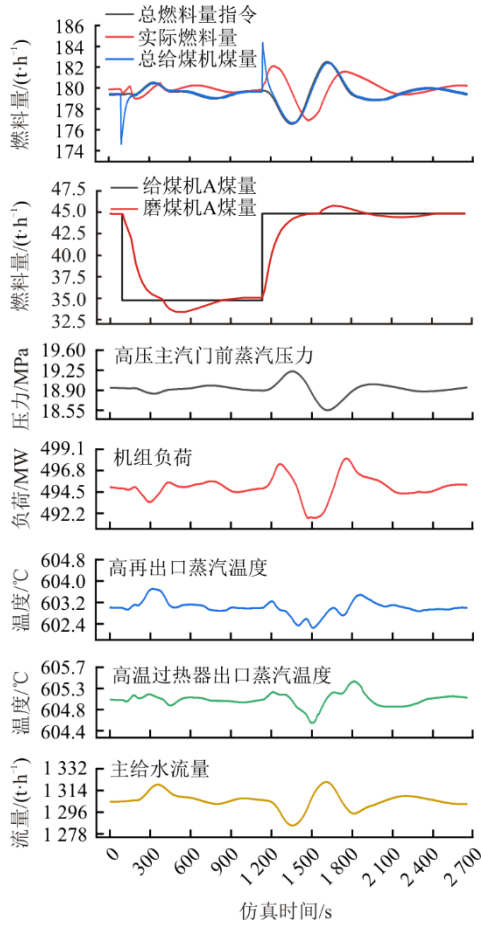


图 8 直吹式供粉方式给煤机煤量扰动响应过程  
Fig.8 Response to coal flow disturbance in pulverized coal feeder under “direct-blow pulverized coal supply” method

从仿真试验结果可以看出,直吹式供粉方式下给煤机煤量扰动对系统造成的波动是中储式给粉机以相同粉量扰动下的数倍,系统恢复稳定的时间是中储式给粉机相同煤量扰动的 2 倍,这主要是由实际燃料量与锅炉主控燃料量反馈的偏差造成。而直吹式供粉方式下蒸汽温度波动较中储式小,其原因在于给煤机煤量扰动后,磨煤机以相对较缓的速度增减粉量,给蒸汽温度调节提供了缓冲时间。

### 3.2.3 一次风量扰动下的动态特性

稳定工况下,小粉仓投入运行并采用中储式供粉方式,其中除磨煤机 A 外,所有磨煤机入口冷、热风门及对应排粉风机都切至手动。修改一次风母管压力设定值,使一次风机动叶开度变化,从而造成一次风量变化。分析磨煤机入口冷风门、热风门、排粉风机对此扰动的动态响应过程,具体如图 9—图 11 所示。

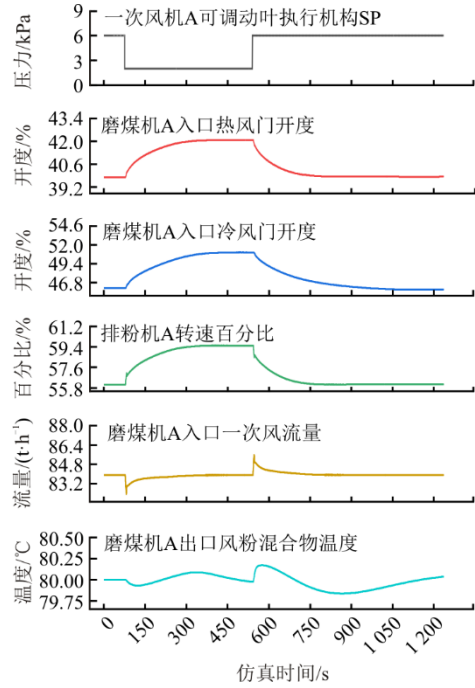


图 9 排粉风机和热风门都投入自动的一次风量扰动响应  
Fig.9 Response to primary air volume disturbance with both powder discharge fan and hot primary air valve in automatic mode

由图 9 可知,排粉风机和磨煤机入口热风门都投入自动,在一次风量扰动后,排粉风机转速百分比变化约 5%,冷风门开度变化不到 5%,热风门开度变化约 3%,系统约 4 min 完成风量调节并稳定。

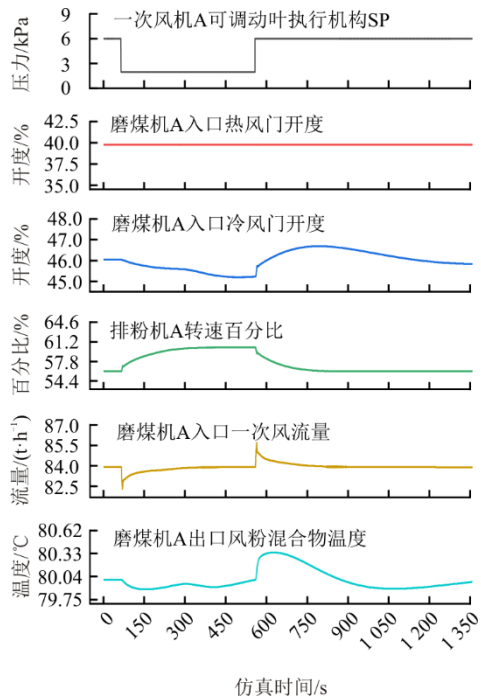


图 10 排粉风机自动、热风门手动的一次风量扰动响应  
Fig.10 Response to primary air volume disturbance with powder discharge fan in automatic and hot primary air valve in manual mode

由图 10 可知,排粉风机自动、磨煤机入口热风门手动,在一次风量扰动后,排粉风机转速百分比变化约 5%,冷风门的开度仅变化 1.5%,系统约 5 min 完成风量调节并稳定。

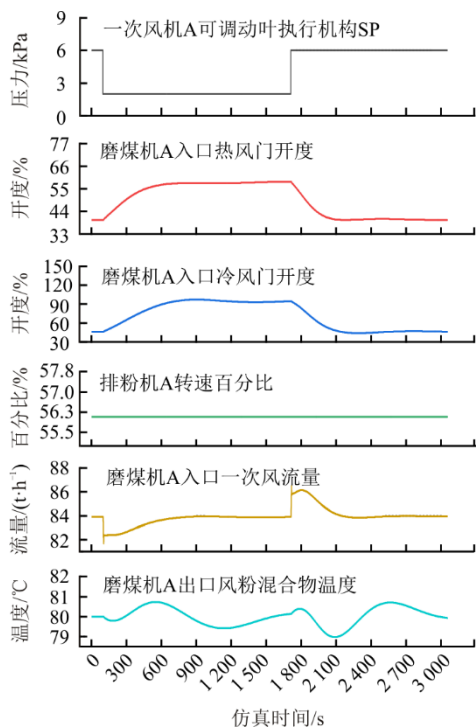


图 11 排粉风机手动、热风门自动的一次风量扰动响应  
Fig.11 Response to primary air volume disturbance with powder discharge fan in manual and hot primary air valve in automatic mode

由图 11 可知,排粉风机手动、磨煤机入口热风门自动,在一次风量扰动后,热风门开度变化约 27%,冷风门开度变化约 51%,系统约 12 min 完成风量调节。

对比分析可知,当一次风量出现扰动时,将排粉风机手动,由热风门对一次风量进行调节,该方式调节速度慢,冷、热风门调节幅度大;而当排粉风机也投入自动时,冷、热风门开度变化较小,约 4 min 便完成了风量调节。而当仅由排粉风机调节风量、热风门切手动时,冷风门因为管道流量变化,开度变化反而更小,且只用了 5 min 便完成风量调节。因此,本文提出的风量控制策略具备可行性并且对磨煤机运行进行了优化。然而由热风门与排粉风机共同控制磨入口一次风量会造成两者相互干扰而不能达到稳定,因此在排粉风机投入运行的情况下,优先采用排粉风机对风量进行调节,热风门可以在合适开度下切至手动。

### 3.3 变负荷过程分析

在 495 MW 负荷稳定工况下,保留 4 台磨煤机

(A、B 和 D、E)投入运行,相关控制回路投入且参数稳定。连续对机组模型进行升、降 10% 额定负荷的负荷响应试验。并设置  $\pm 0.5\%$  额定负荷的负荷区间作为机组负荷达到稳定的判断依据。

#### 3.3.1 直吹式供粉方式变负荷过程

图 12 为直吹式供粉方式下 13.2 MW/min 速率变负荷过程曲线。从负荷曲线可以知道:对于升负荷过程,负荷偏差最大值达到 16.7 MW,系统从负荷指令变化结束到实际负荷进入调节区间并达到稳定共耗时约 7.4 min;对降负荷过程,机组负荷偏差为 12.77 MW,系统实现稳定耗时约 7.6 min。

从主蒸汽压力曲线可以看出,锅炉难以跟随机组负荷响应,使得机组主蒸汽压力与压力设定值呈较大偏差,尤其在降负荷过程中,因为锅炉响应延迟,当汽机调门快速关小时,主蒸汽压力不降反而增加约 0.77 MPa,这导致在锅炉开始进行“压力拉回”时,其主蒸汽压力偏差已达 2.71 MPa,说明在 2%/min 的变负荷速率下,机组协调较差,锅炉侧已难以对机组负荷变化进行迅速响应。

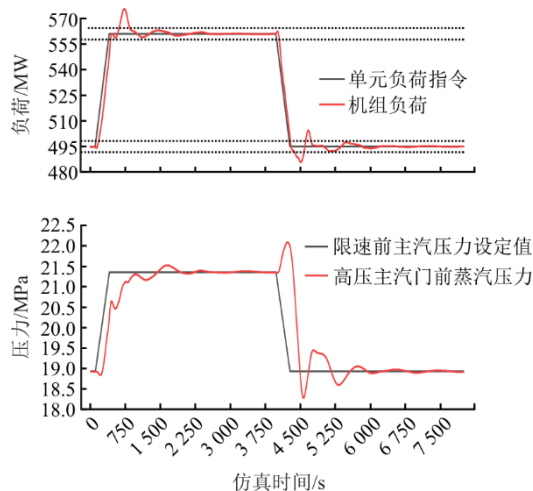


图 12 直吹式供粉方式下 13.2 MW/min 变负荷过程  
Fig.12 Variable load process at a rate of 13.2 MW/min in "direct-blow pulverizing supply" method

#### 3.3.2 中储式供粉方式变负荷过程

因为投入小粉仓后供粉响应能力有所提升,相应地修改了锅炉主控 PID 控制器的积分时间,由 300 s 减小为 75 s,其余控制参数与未投入时一致。

图 13 为采用中储式供粉方式,粉仓系统投入运行后进行 3%/min 速率变负荷过程曲线。由图 13 可以看出,在投入粉仓系统后,机组灵活性得到明显提升。具体而言,对于升负荷过程,机组实际负荷最大偏差为 12.1 MW,且超调量少于 3 MW;对于降负荷过程,机组负荷最大偏差为 12.2 MW,系

统实现调节稳定共用时约 4.0 min。可见，相较于直吹式供粉方式，投入小粉仓运行后，机组更能适应频繁多变的调峰调频指令。

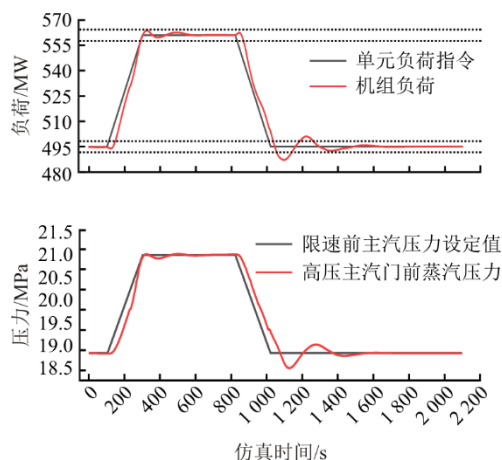


图 13 中储式供粉方式下 3%/min 速率变负荷过程  
Fig.13 Variable load process at a rate of 3%/min in "intermediate coal pulverizing supply" method

而在主蒸汽压力响应方面，与采用直吹式供粉方式不同，投入粉仓系统后，锅炉能快速响应汽机负荷的变化，在变负荷前期基本没有出现主蒸汽压力反向变化的现象，且在升、降负荷过程中，主蒸汽压力偏差最大约为 0.53 MPa。此结果说明在 3%/min 的变负荷速率下，锅炉能快速响应机组负荷指令变化。

进一步地，对采用中储式供粉方式下的机组进行 5%/min 速率变负荷，其结果如图 14 所示。

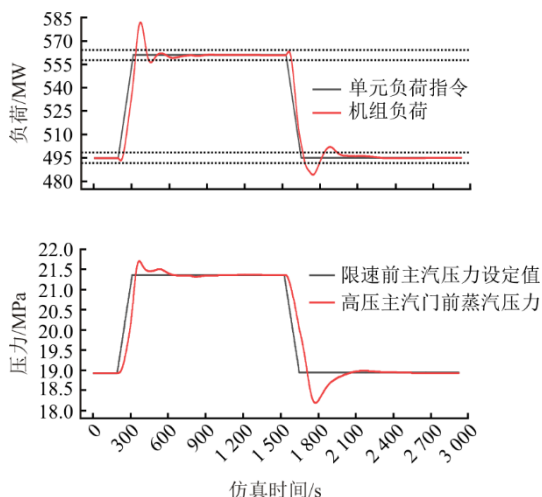


图 14 中储式供粉方式下 5%/min 速率变负荷过程  
Fig.14 Variable load process at a rate of 5%/min in "intermediate coal pulverizing supply" method

由图 14 可知：升负荷过程中机组负荷偏差最大为 21.32 MW，实现负荷稳定用时约 2.67 min，主蒸汽压力偏差最大为 0.96 MPa；而降负荷过程中机组负荷最大偏差约为 14 MW，主蒸汽压力最大偏差为

1.08 MPa，实现稳定用时约 4.8 min。从主蒸汽压力变化曲线可来看，即使在 5%/min 的高速率变负荷运行中，锅炉仍然迅速跟上机组负荷响应，并能在很短时间内恢复机组参数稳定，运行灵活性显著提升。

## 4 结 论

本文针对超超临界机组直吹式制粉系统存在制粉延迟、控制精度差等问题，提出了基于增设小粉仓的制粉系统结构及其控制策略。基于动态仿真模型对新型系统运行和控制策略进行了验证，仿真结果表明，本文提出的改造方法与控制策略可以实现锅炉一次风粉参数的快速精确控制，在一定程度上提升了机组运行灵活性，主要研究结论如下。

1) 将小粉仓作为直吹式制粉系统输粉通道中的缓冲环节，当机组变工况运行时，由粉仓容量补偿磨煤机制粉与锅炉需粉之间的不平衡，从而实现了“小粉仓”的应用，基于此理念设计的新型制粉系统整体结构，将底层 2 台磨煤机分别连接小粉仓，使得粉仓能在全负荷工况保持煤粉流动状态，保证了粉仓系统安全运行。

2) 基于新型制粉系统结构提出的“双源供粉”运行方式，是中储式与直吹式供粉方式的中间状态，针对其设计的风粉控制策略也同样适用于中储式与直吹式供粉方式，从而实现了不同供粉方式的通用控制策略。

3) 设计的制粉系统风粉控制策略，在燃料量控制上，设计 2 套燃料控制回路，通过控制给煤机以保证煤量来源；通过控制给粉机以调节实际燃料量，实现对燃料量指令的快速准确响应；在风量控制上，采用排粉风机控制磨入口风量，使小粉仓投入前后风量一致，风量响应速率也有所提升。

4) 机组负荷响应仿真试验表明，在 75%至 85%额定负荷范围内：本仿真模型在投入小粉仓前变负荷速率难以达到 2%/min，且稳定时间超过 7.6 min；投入小粉仓后机组变负荷速率为 5%/min 时锅炉仍能快速响应，并且在 4.8 min 内便基本恢复稳定。

## [参 考 文 献]

- [1] 刘吉臻, 李云鹭, 宋子秋, 等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 993-1004. LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 993-1004.
- [2] 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.
- [3] GU Y J, XU J, CHEN D C, et al. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 723-731.
- [4] ZENG D L, HU Y, GAO S, et al. Modelling and control of pulverizing system considering coal moisture[J]. Energy, 2015, 80: 55-63.
- [5] GAO Y K, ZENG D L, LIU J Z, et al. Optimization control of a pulverizing system on the basis of the estimation of the outlet coal powder flow of a coal mill[J]. Control Engineering Practice, 2017, 63: 69-80.
- [6] 鲁鹏飞, 薛宁. 超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 87-92.  
LU Pengfei, XUE Ning. Flame stability upgrading scheme of supercritical boilers for ultra low load peak regulation operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.
- [7] MA D F, ZHANG S Y, HE X, et al. Combustion stability and NO<sub>x</sub> emission characteristics of three combustion modes of pulverized coal boilers under low or ultra-low loads[J]. Applied Energy, 2024, 353: 121998.
- [8] AN Y Z, RAMAN V, TANG Q L, et al. Combustion stability study of partially premixed combustion with low-octane fuel at low engine load conditions[J]. Applied Energy, 2019, 235: 56-67.
- [9] 付昱, 何金起, 林锴翔. 基于先进检测的锅炉低负荷安全运行控制系统[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增刊 2): 94-99.  
FU Yu, HE Jinqi, LIN Kaixiang. Safety operation control system for boilers under low based on advanced detection[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(Suppl.2): 94-99.
- [10] 田丹, 田亮, 刘鑫屏, 等. 中速磨直吹式制粉系统的动态模型[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(9): 41-44.  
TIAN Dan, TIAN Liang, LIU Xinping, et al. Dynamic model of medium speed mill direct firing pulverizing system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24(9): 41-44.
- [11] 贾鸿祥. 制粉系统设计与运行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 129-131.  
JIA Hongxiang. Design and operation of pulverizing system[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1995: 129-131.
- [12] HENDERSON C. Increasing the flexibility of coal-fired power plants[J]. IEA Clean Coal Centre, 2014, 15: 15.
- [13] BUDDENBERG T, FURTH T, LEISSE A, et al. Indirect firing system to increase flexibility of existing steam cogeneration plants[J]. VGB Powertech, 2012, 92(11): 66-70.
- [14] RICHTER M, OELJEKLAUS G, GORNER K. Dynamic simulation of flexibility measures for coal-fired power plants[J]. VGB Powertech, 2020(4):53-60.
- [15] BERGINS C, LEISSE A, REHFELDT S. How to utilize low grade coals below 1 000 kcal/kg[C]//POWER-GEN Europe, 2014.
- [16] BERGINS C, AGRANIOTIS M, KAKARAS E, et al. Improving flexibility of lignite boilers through firing system optimisation and retrofit[C]//POWER-GEN Europe: Amsterdam, 2015.
- [17] DROSATOS P, NIKOLOPOULOS N, AGRANIOTIS M, et al. Numerical investigation of firing concepts for a flexible Greek lignite-fired power plant[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 142: 370-395.
- [18] DROSATOS P, NIKOLOPOULOS N, KARAMPINIS E, et al. Numerical comparative investigation of a flexible lignite-fired boiler using pre-dried lignite or biomass as supporting fuel[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1831-1848.
- [19] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报, 2019, 39(10): 784-791.  
MA Dafu, ZHANG Shouyu, HE Xiang, et al. Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(10): 784-791.
- [20] 杨辉, 杨珍, 党小建, 等. 一种适用于深度调峰的制粉系统及其送粉方法: CN202110744297.2[P]. 2021-08-20 [2024-04-15].  
YANG Hui, YANG Zhen, DANG Xiaojian, et al. A pulverizing system and its powder feeding method suitable for deep peak shaving: CN202110744297.2[P]. 2021-08-20[2024-04-15].
- [21] 张驰, 荆凯, 王永强, 等. 一种中速磨煤机直吹制粉系统的锅炉负荷快速响应系统: CN202221520661.3[P]. 2022-10-04[2024-04-15].  
ZHANG Chi, JING Kai, WANG Yongqiang, et al. A fast response system for boiler load in a medium speed pulverizer direct blowing pulverized coal system: CN202221520661.3[P]. 2022-10-04[2024-04-15].
- [22] 冉崇铭, 缪淼, 杨章宁, 等. 一种用于煤粉锅炉的燃烧系统及提升负荷的方法: CN202310624752.4[P]. 2023-09-15[2024-04-15].  
RAN Shenming, MIAO Miao, YANG Zhangning, et al. A method of combustion system and load increasing for pulverize coal boiler: CN202310624752.4[P]. 2023-09-15[2024-04-15].
- [23] ATSONIOS K, VIOLIDAKIS I, SFETSIORIS K, et al. Pre-dried lignite technology implementation in partial load/low demand cases for flexibility enhancement[J]. Energy, 2016, 96: 427-436.
- [24] 张清峰. 电站锅炉制粉系统防爆思路与方法[J]. 华北电力技术, 2014(12): 24-27.  
ZHANG Qingfeng. Explosion prevention ideas and methods for power plant boiler pulverizing system[J]. North China Electric Power, 2014(12): 24-27.
- [25] 倪何, 程刚, 孙丰瑞. 热工流体网络简易模块化建模方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3536-3541.  
NI He, CHENG Gang, SUN Fengrui. Simple modular modeling method of thermo-fluid network[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3536-3541.
- [26] 吕崇德, 任廷进, 姜学智. 大型火电机组系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 202-207.  
LYU Chongde, REN Tingjin, JIANG Xuezhi. System modeling and simulation for large-scale thermal power units[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 202-207.
- [27] 王威. 基于热工流体网络的模块化建模方法的研究与实现[D]. 北京: 清华大学, 1999: 26-71.  
WANG Wei. Research and implementation of modular modeling method based on thermal-fluid network[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999: 26-71.

(责任编辑 邓玲惠)