

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0073-05

# 超临界燃煤机组干湿态的智能切换控制方法

柯 炎, 王胜虎

(国能陈家港发电有限公司, 江苏 响水 224600)

**摘 要:**针对现有的超临界燃煤机组在干湿态转换过程中多采用人工操作等方式实现干湿态切换,容易出现机组干湿态转换频繁,转换时间过长以及超温等问题,严重影响机组运行的经济性与安全性。为应对上述挑战,更好地实现机组的稳定运行,在分析超临界燃煤机组干湿态运行过程的基础上,明确干湿态转换过程中的关键参数变化,然后采用 PID 控制策略来设计干湿态智能切换的控制方法。通过分析转换过程中的温度、压力以及给水流量等关键参数来实现干湿态的智能切换。试验结果显示,采用 PID 控制策略后,机组干湿态转换中的超调量为 4.02%,调节时间为 61 s,显著优于传统人工控制方法。由此说明,设计的超临界燃煤机组干湿态智能控制方法可以有效实现干湿态的智能切换,提升转换过程中的自动化水平,保证机组的稳定运行,具有较高的应用价值。

**关键词:**超临界燃煤机组;干湿态;智能切换;PID;控制方法;直流锅炉

**中图分类号:** TP273; TN62

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-7241(2026)10-0073-05

## Intelligent switching control method for dry and wet state of supercritical coal-fired units

Ke Yan, Wang Shenghu

(CHN Energy Chenjiagang Power Co., Ltd., Xiangshui 224600, Jiangsu, China)

**Abstract:** Existing supercritical coal-fired units mostly use manual operation and other methods to achieve dry-wet state switching during the dry-wet state conversion process. Problems such as frequent dry-wet state conversion, long conversion time, and over-temperature of the unit are prone to occur, which seriously affect the economics and safety of the unit operation. To cope with the above challenges and better achieve the stable operation of the unit, based on the dry and wet state operation process of the supercritical coal-fired unit, the key parameter changes during the dry and wet state conversion process are clarified. The PID control strategy is used to design the control method for intelligent switching between dry and wet states. Intelligent switching between dry and wet states is achieved by analyzing key parameters such as temperature, pressure and water supply flow during the conversion process. The test results show that after adopting the PID control strategy, the overshoot during the dry and wet state conversion of the unit is 4.02%, and the adjustment time is 61 seconds, which is significantly better than the traditional manual control method. This shows that the designed intelligent control method for dry and wet states of supercritical coal-fired units can effectively realize intelligent switching between dry and wet states, improve the automation level during the conversion process, ensure the stable operation of the unit, and has high application value.

**Keywords:** supercritical coal-fired units; dry and wet state; intelligent switching; PID; control methods; once-through boiler

随着电力技术的发展,超临界燃煤机组成为大容量发电机组的主要机型。相比于传统的亚临界发电机组,超临界发电机组有更高的蒸汽参数,同时具备低能耗和高效率的特点,可以较好地满足中国所采取的各类节能减排措施<sup>[1-2]</sup>。此外,超临界燃煤机组还有经济性好、可靠性高、启动速度快以及适应性强等优势,在各类应用中得到广泛认可。超临界燃煤机组采用直流锅炉。直流锅炉中有湿态和干态两种运行方式,保证干湿态的智能高效转化是超临界燃煤机组直流锅炉控制中的关键<sup>[3-4]</sup>。现有的直流锅炉的干湿态转换过程控制为顺序控制结合模拟量控制,自动控制程度较低,多数时候依靠经验丰富的工作人员进行操作。因此,为提供超临界燃煤机组干湿态转换的智能

控制,在基础干湿态转换过程之上,引入 PID 控制策略作为干湿态智能转换控制的判断条件,提高超临界燃煤机组的智能控制,保证机组系统运行的稳定性和灵活性。

## 1 干湿态智能切换控制方法设计

### 1.1 超临界燃煤机组干湿态的转换

在节能减排的新形势下,已设计的和在建的电厂多是以超临界发电机组来要求的,而超临界燃煤机组采用直流锅炉。锅炉启动分为外置分离式和内置分离式。锅炉负荷在升高和降低的过程中,干湿态转换是一个必然过程,即将储水箱中的水位控制与最小流量控制与温度和给水控制之间进行切换<sup>[5]</sup>。干湿态的基本转换过程如图 1 所示。

收稿日期:2025-10-25;录用日期:2025-11-30

作者简介:柯 炎(1980—),男,高级工程师,研究方向为火电厂自动控制。

引用本文:柯炎,王胜虎.超临界燃煤机组干湿态的智能切换控制方法[J].自动化技术与应用,2026,45(10):73-77.(Ke Yan, Wang Shenghu. Intelligent switching control method for dry and wet state of supercritical coal-fired units[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10): 73-77.)

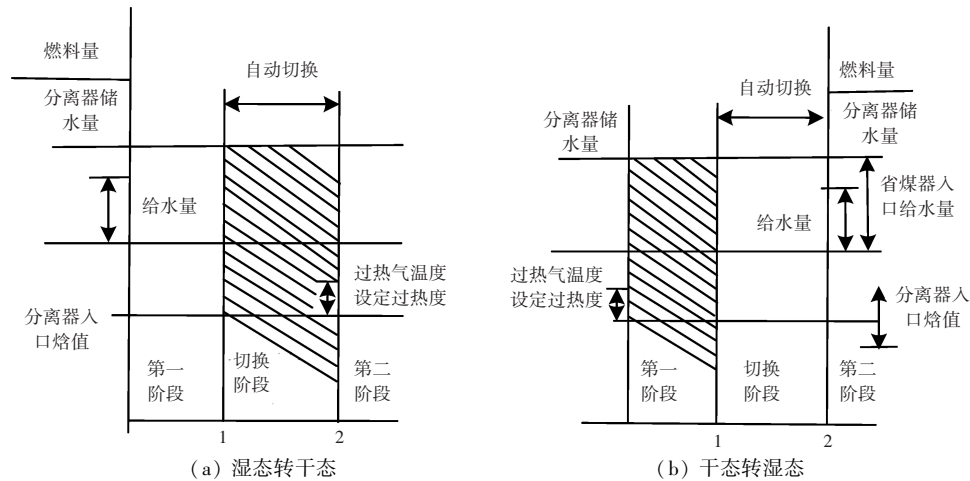


图1 干湿态转换过程

Fig. 1 Dry wet transition process

图1(a)中,在湿态转换为干态的过程中,具备干态的转换条件后,锅炉升温补充热量,给水流量和循环流量之和维持在水冷壁的最小流量处。图中1位置处分离器入口工质的干度为1时,即工质全部蒸发为饱和蒸汽。当温度持续增高,而过热器入口温度还没有达到既定值时,温度控制则暂时不需要启动,到2位置时,温度高于既定值,进入第二阶段。图1(b)中,机组负荷降低使得燃煤量和水泵的给水量减少,温度处于设定值处,直至蒸汽进一步减少,温度降低,锅炉状态切换。然后进入干湿态的切换过程。系统运行至位置2处,分离器出口处的过热度为零,工质为饱和蒸汽。最后锅炉进入第二个阶段,给煤量继续减少,给水量保持不变,使得中间点的温度继续降低,锅炉处于湿态运转过程<sup>[6-7]</sup>。在常规控制中,系统中的给水系统完成了主路的切换,气泵处于给水状态。在系统主路供水的情况下,自动调节得到的流量仅仅利用电泵调节锅炉这种唯一的方式,而气泵通过手动控制完成。在干湿态相互转换的过程中,给水流量的动态变化贯穿其中,一般策略自然难以实现干湿转换。

## 1.2 基于PID的干湿态智能控制

PID控制器(比例-积分-微分控制器)是一个在工业控制应用中常见的反馈回路部件,由比例单元P、积分单元I和微分单元D组成。根据上述干湿态转换过程,研究在PID控制技术的全面指导下,提出了干湿态自动转换方法。在现代工业创新和发展中,PID技术是其重要支撑,与工业自动控制过程中的应用过程和应用形式相匹配,在工业控制领域具有较好的应用效果<sup>[8-9]</sup>。因此,研究采用具有PID控制算法的PID控制器,PID控制算法根据设定值与控制器输出值之间的误差来确定输出结果,而PID控制的目的在于消除这一偏差,使得输出值达到预期设定值。对PID控制参数进行优化可以有效控制PID控制器的性能,在计算中,构建PID数学模型来模拟超临界燃煤机组的温度和给水量变化过程。在初始比例系数 $K_p$ ,积分系数 $K_i$ 和微分系数 $K_d$ 的基础上,进行适当调整,使整个燃煤机组系统可以更好地适应实际需求变化,首先

PID控制器中输入为超临界燃煤机组给水量变化的目标值 $M_t$ 与实际值 $W_t$ 之间的误差 $E_t$ ,如式(1)所示。

$$E_t = M_t - W_t \quad (1)$$

在确定该值时,研究采用 $E_t$ 来表示误差的变化率,将 $M_t$ 和 $W_t$ 之间的误差根据时间而发生变化的函数做比例-积分-微分控制,再将比例系数 $K_p$ 与二者的差值相乘,由此就能得到PID控制的调节值。通过该输入差值来调节燃煤机组的进出水量,得到的PID控制器的控制量输出是 $R_t$ ,如式(2)所示。

$$R_t = K_p [E_t + \frac{1}{T_i} \int_0^t E_t dt + T_d \frac{dE_t}{dt}] \quad (2)$$

式中, $T_i$ 表示控制器积分时间, $T_d$ 为控制器微分时间, $t$ 表示时间。一般而言,积分系数 $K_i$ 和微分系数 $K_d$ 表示为式(3)。

$$\begin{cases} K_i = \frac{K_p}{T_i} \\ K_d = K_p \cdot T_d \end{cases} \quad (3)$$

在超临界燃煤机组的干湿切换过程中,该被控设备不需要输出值的绝对值,而只需要输出值的增量即可。在 $t$ 时刻的控制量如式(4)所示。

$$R(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=0}^t e(j) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (4)$$

式中, $e(t)$ 表示 $t$ 时刻PID控制输出偏差, $e(j)$ 表示 $j$ 时刻PID控制输出偏差。在 $t-1$ 时刻的控制量如式(5)所示。

$$R(t-1) = K_p e(t-1) + K_i \sum_{j=0}^{t-1} e(j) + K_d [e(t-1) - e(t-2)] \quad (5)$$

式(4)与式(5)相减后得到PID控制的输出误差和最终控制量,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta E(t) = e(t) - e(t-1) \\ \Delta R(t) = u(t) - u(t-1) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $u(t)$ 表示PID控制输出的离散值。

通过上述过程,对给水量偏差进行调整后,输出最优数值。在给水量偏差调节的基础上,干湿态判断逻辑如图2所示。

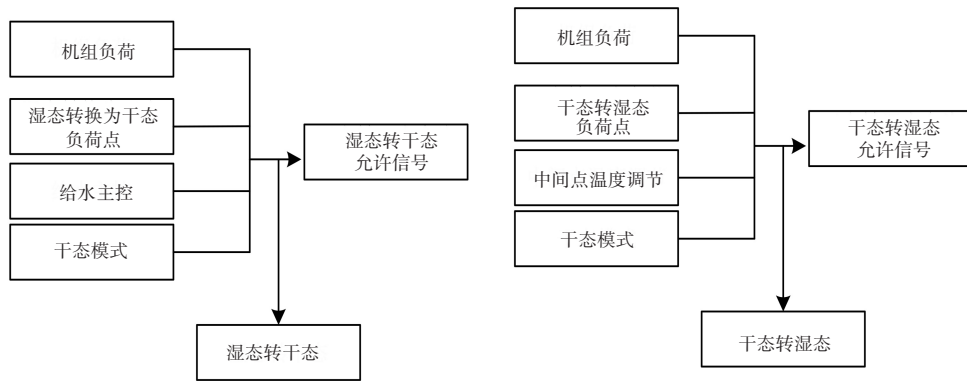


图 2 干湿态判断逻辑

Fig. 2 Logic for determining wet and dry states

在对给水策略进行优化后,超临界燃煤机组可以自动完成干湿态相互转换的自动控制<sup>[10]</sup>。而在湿态模式下,锅炉流量受限于给水控制,通常被人为设定,其给水控制被调量如式(7)所示。

$$F_v = F_{total} \quad (7)$$

式中,  $F_v$  表示温度控制中 PID 被调量,  $F_{total}$  表示省煤器入口处的总给水量<sup>[11]</sup>。

当负荷达到转换条件时,主要利用自动判断转换为干态。在此过程中,转换系数实际上是比例和积分系数。有鉴于此,得到给水控制的设定值计算如式(8)所示。

$$F_s = F_{sb} + F_{sc} \quad (8)$$

式中,  $F_s$  表示湿转干时给水控制 PID 设定值,  $F_{sb}$  表示该状态下锅炉指令对应给水控制 PID 的流量命令,  $F_{sc}$  表示该状态下中间点温度控制给水指令矫正量。

然后,对相应的参数进行寻优,根据已有经验,采用式(9)所示传递函数计算调节后的参数<sup>[12]</sup>。

$$f = \frac{1}{\delta} \left( 1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (9)$$

式中,  $s$  表示普拉斯变换中的复变量,  $\delta$  为常数。

基于得到的最优控制参数来实现燃煤机组的控制。

超临界燃煤机组负荷降低至干态转为湿态的临界点时,锅炉水循环操作停止,给水控制调节总的给水量,直至转为湿态后,锅炉水循环操作继续工作<sup>[13-14]</sup>。给水控制设定为锅炉循环操作的给水流量与中间点温度控制给水量之和,得到给水控制如式(10)所示。

$$F_D = F_{DB} + F_{DC} \quad (10)$$

式中,  $F_D$  表示干转湿时给水控制 PID 设定值,  $F_{DB}$  表示干转湿状态下锅炉指令对应给水控制 PID 的流量命令,  $F_{DC}$  表示干转湿状态下中间点温度控制给水指令矫正量。

在此基础上,加入 PID 控制策略,可以构建有效的超临界燃煤机组干湿态智能转换。其基本实现过程如图 3 所示。在图 3 所示的干湿态智能切换控制过程中,在系统中设置干湿态相互转换为判断条件,当燃煤机组的湿态转换为干态的条件满足时,给水控制自动切换,机组处于湿态运行状态。同理,加入干态转换为湿态的逻辑判断条件时,燃煤机组的负荷达到干态运行标准时,给水控制自动切换为干态运行,其中间点的温度处于自动控制状态。通过多次分析计算后,得到的 PID 控制系统取值如下,  $K_p = 0.35$ ,  $K_i = 0.001$ ,  $K_d = 0$ 。

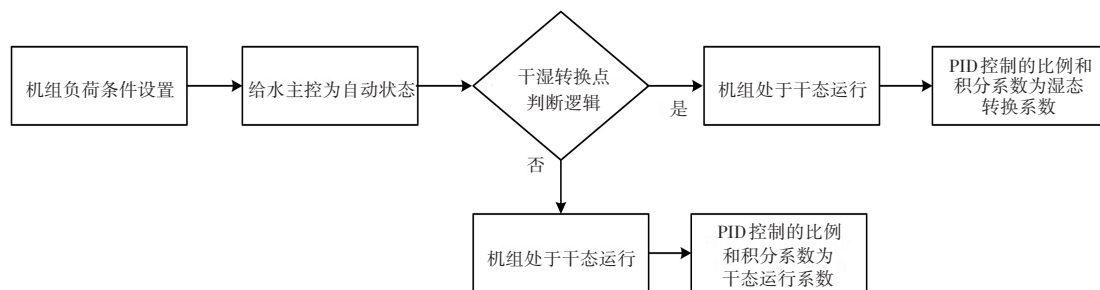


图 3 干湿态智能切换过程

Fig. 3 Intelligent switching process between dry and wet states

## 2 性能分析

### 2.1 PID 控制策略性能分析

为验证研究提出的 PID 控制策略的性能,研究设计相应的干扰试验对其性能进行分析。同时,采用常用的控制策略进行对比,包括模糊控制 (fuzzy control, FC) 和自适

应控制 (adaptive control, AC)<sup>[15-17]</sup>。在 500 s 处,对系统额外施加一个幅值为 0.01,时长为 1 s 的阶跃信号干扰。对 3 种控制策略的间隙干扰响应进行分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,3 种方法在加入干扰信号后均产生了超调,但系统均可以在一段时间之后恢复稳定。通过图中对比可知,FC 产生的超调量为 6.38%,AC 产生的超调量为

5.67%,研究采用的PID控制策略的超调量为4.02%,即该策略在受到干扰后产生的振荡更小。此外,3种方法的调节时间分别为71、64、61 s,即研究采用的方法所需的调

节时间更短,系统可以更快恢复稳定状态。研究采用的控制策略具有更好的控制性能和抗干扰性能,可以提高系统的稳定性。

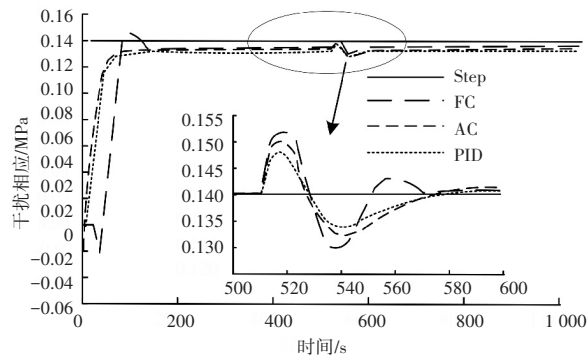


图4 3种控制方法的间隙干扰响应比较

Fig. 4 Comparison of gap interference response among three control methods

## 2.2 干湿态智能切换控制应用分析

在DCS系统中对提出的干湿态智能控制方法的性能进行设计,在该试验系统中,机组负荷设置为385 MW,主蒸汽压力为11.58 MPa,储水箱中的水位是18 m,省煤器入口处的流量为1 103 J/kg。该试验在1 000 MW的超临界机组模拟仿真平台上开展。湿态转干态过程中的变化

如图5所示。由图5可知,整个湿态转换为干态的过程大约持续了10 min,在这个过程中,给煤量增加了15 t/h,水位整体呈现下降趋势,在转换为干态前,水位基本保持稳定,转换后水位持续下降并维持在1 m左右。基本的参数变化符合超临界燃煤机组的运行要求。

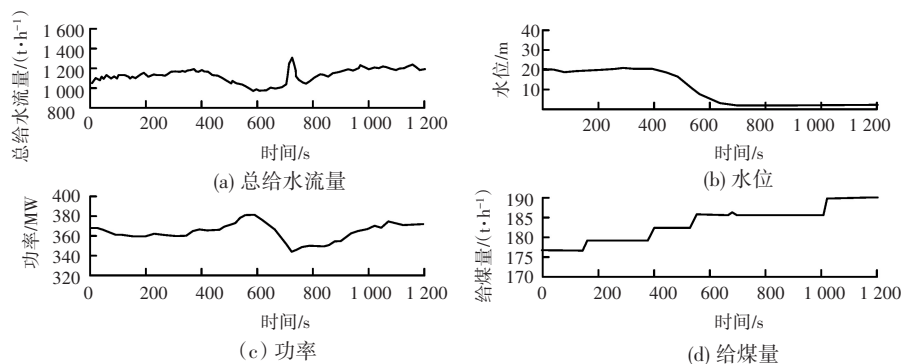


图5 湿态转换为干态的过程

Fig. 5 Process of wet to dry state conversion

干态智能切换为湿态过程的(性能)变化如图6所示。在干态转换为湿态的过程中,燃煤机组负荷降低,当机组功率为350 MW时,主汽压力为9.5 MPa,省煤器入口的流量为1 084 t/h,给煤量为125 t/h。转换为湿态时,给煤量开始减少,水位逐渐增加,当机组水位到达既定值

时,过热器入口焓值低于设定值,锅炉转换为湿态模式,通过水位控制系统来调节进水流量和循环流量。整个过程的持续时间为10 min左右。干态转湿态实现后,给煤量为103 t/h,减少了22 t/h,机组功率为297 MW,减少了53 MW,符合超临界燃煤机组的运行要求。

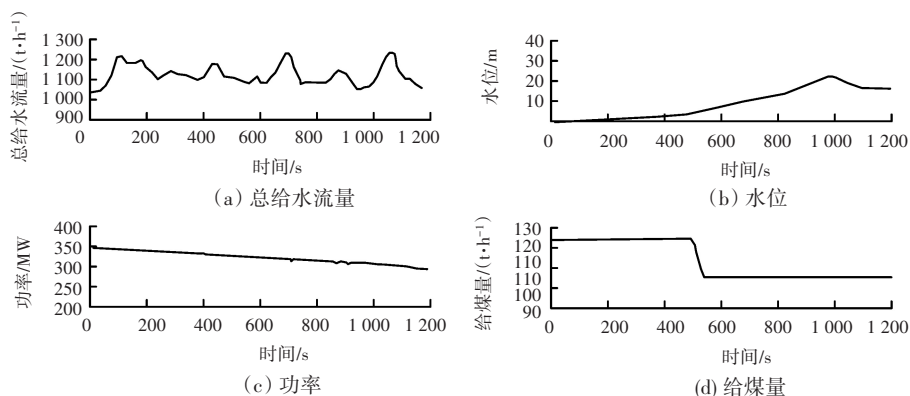


图6 干态转换为湿态的过程

Fig. 6 Process of dry to wet state conversion

为验证研究提出的方法的实际应用效果,利用某型号为HG1950/25.4-HM15超临界直流锅炉进行应用效果分析,结果如图7所示,该锅炉采用平衡通风、干排渣、全钢架结构等结构布置,在应用过程中,选取机组负荷和储水箱水位的变化趋势为例进行分析,在干态转湿态的过程中,整个完成时间在15 min内,机组负荷出现轻微下降趋势,下降约20 MW,但整体来看,在转换期间变化比较平稳,机组系统相对稳定,储水箱水位整体增加,出现多个峰值。在湿态转干态过程中,完成时间在14 min以内,负荷增加约25 MW,但机组负荷整体呈现稳定状态,储水箱水位下降约4 m。通过该应用可以发现,燃煤机组的所有参数变化均无显著振荡,符合智能干湿态转换的调度需求。

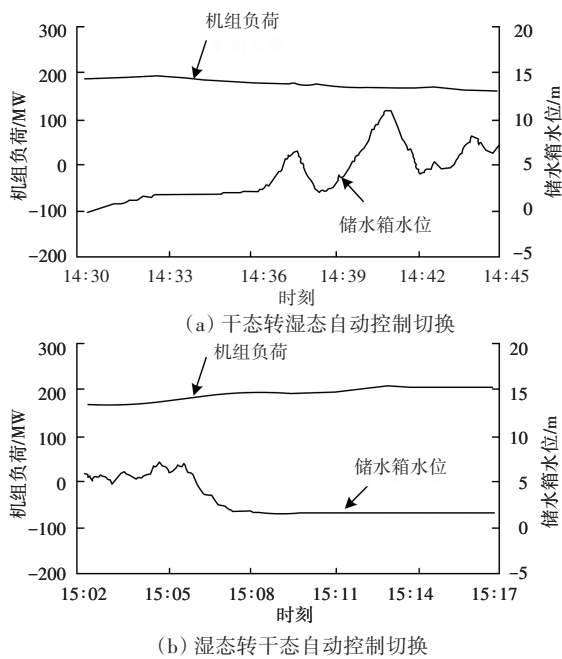


图7 干湿态转换应用过程

Fig. 7 Application process of wet dry transition

### 3 结论

超临界燃煤机组干湿态转换是其开停机过程中的重要阶段,机组中涉及的参数变化较多,因此,研究引入PID控制策略来设计燃煤机组干湿态的智能控制策略。结果显示,改进后的超临界燃煤机组智能控制策略在湿态转换为干态的过程中,整个湿态转换为干态的过程大约持续10 min,给煤量增加了15 t/h,水位整体呈现下降趋势,基本的参数条件变化符合超临界燃煤机组的运行要求。在

干态转湿态实现后,给煤量为103 t/h,减少了22 t/h,机组功率为297 MW,减少了53 MW,符合超临界燃煤机组的运行要求。研究表明,本文提出的基于PID的智能控制策略可以降低给煤需求量和机组功率消耗,在更好地实现超临界燃煤机组干湿态智能控制的同时兼顾了节能性与经济性,有效改善机组的智能控制水平和干湿态转换效率。但是,研究设计的干湿态智能控制策略忽略了锅炉系统特性,后续可以考虑循环泵的运行特性对控制方法准确性的影响,以进一步提升控制效果。

### 参考文献

- [1] 沈乾坤,吴恒运,杨涛,等.超临界350 MW循环流化床机组模拟量控制系统及AGC优化[J].热力发电,2020,49(5):126-131.
- [2] 张伟江,李宁,李晖,等.高位布置汽轮发电机组基础板动力学特性研究[J].中国测试,2023,49(4):140-145.
- [3] 周凌宇,王一坤,陈钢,等.燃煤机组耦合污泥发电对锅炉运行影响分析[J].热力发电,2020,49(7):77-83.
- [4] 孙宇贞,唐毅伟,李帅.基于改进粒子群算法的超超临界燃煤机组负荷系统建模[J].系统仿真学报,2021,33(4):875-882.
- [5] 王树民,张翼,徐陆,等.先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置技术及工程应用[J].中国工程科学,2023,25(2):147-159.
- [6] 闫靖文,刘欣,黄书益,等.超临界锅炉水冷壁壁温预测耦合模型[J].热力发电,2022,51(1):100-108.
- [7] Sun J, Feng H, Xu J, et al. Investigation of the conversion mechanism for hydrogen production by coal gasification in supercritical water[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(17): 10205-10215.
- [8] 沈少君,闫九福,卢雨,等.基于CS-BP-PID算法的烟叶密集烤房温度控制系统[J].农机化研究,2026,48(4):95-102.
- [9] 左志宇,牟晋东,毛罕平,等.基于深度强化学习的温室环境协调控制系统设计[J].农机化研究,2025,47(5):22-27.
- [10] 王明武,王楠.基于单片机的高压调节阀智能控制器设计[J].现代电子技术,2020,43(11):148-151,157.
- [11] 盛锴,邱靖,周刚,等.基于IMC-PID的超临界火电机组AGC性能优化[J].控制工程,2022,29(8):1443-1449.
- [12] Liu H, Yano H, Abe K. Reinforcement of dry and wet papersheets by cellulose nanofibers[J]. Cellulose, 2023, 30(1): 211-222.
- [13] 马良玉,燕梦. PID补偿神经网络逆控制在超临界机组过热汽温控制中的应用[J].热能动力工程,2020,35(1):178-184.
- [14] 李康,孙宇贞,张婷,等.超超临界机组协调控制系统解耦及控制研究[J].计算机仿真,2020,37(9):68-76.
- [15] 石磊,夏召丹,王志南等.基于模糊PID的船模航向控制研究[J].微型电脑应用,2022,38(12):89-92.
- [16] 王少坤,李伟,童俊.基于模糊PID的温度控制系统研究进展[J].自动化技术与应用,2025,44(1):1-4.
- [17] 任明,汪志锋,徐洁,等.基于遗传算法在反应釜模糊PID控制中的优化[J].自动化技术与应用,2025,44(6):22-27.