

超临界 CO₂ 燃煤发电机组锅炉出口 CO₂ 温度 鲁棒分数阶 PI^λ D^μ 控制

王富强¹, 牛海明², 刘 千¹, 马增辉³

(1. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102200; 2. 国能智深控制技术有限公司, 北京 102200;
3. 海南热带海洋学院, 海南 三亚 572022)

摘要:超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环发电是比蒸汽朗肯循环更高效的发电技术。锅炉出口主介质 CO₂ 温度是 S-CO₂ 燃煤发电机组的关键参数。燃介比仍然是 S-CO₂ 燃煤锅炉控制的核心任务,以燃介比的调整为主要调节手段和以低温 CO₂ 喷射减温为辅助细调手段的主介质 CO₂ 温度控制系统的动态特性可以拟合为一阶惯性加纯滞后(FOPDT)模型。采用分数阶 PI^λ D^μ 实现主介质温度的控制,基于混合灵敏度函数设计 PI^λ D^μ 控制器参数以适应机组负荷变化所引起的对象模型参数变化。实例仿真表明,利用分数阶 PI^λ D^μ 控制器可以获得更好的控制系统闭环特性,具备较强的抗扰性,提高了系统的稳定性和鲁棒性,其控制品质优于常规 PID 控制以及线性自抗扰控制(LADRC)。

关键词:超临界二氧化碳;布雷顿循环;主介质温度;分数阶 PI^λ D^μ;鲁棒控制

中图分类号:TM621.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndjgc.2022.11.002

[引用本文格式]王富强,牛海明,刘 千,等.超临界 CO₂ 燃煤发电机组锅炉出口 CO₂ 温度鲁棒分数阶 PI^λ D^μ 控制[J].热能动力工程,2022,37(11):7-14. WANG Fu-qiang, NIU Hai-ming, LIU Qian, et al. Robust fractional-order PI^λ D^μ control of boiler outlet CO₂ temperature for supercritical carbon dioxide coal-fired generating plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11):7-14.

Robust Fractional-order PI^λ D^μ Control of Boiler Outlet CO₂ Temperature for Supercritical Carbon Dioxide Coal-fired Generating Plant

WANG Fu-qiang¹, NIU Hai-ming², LIU Qian¹, MA Zeng-hui³

(1. CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 102200; 2. Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation, GuoNeng ZhiShen Control Technology Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 102200;
3. Hainan Tropical Ocean University, Sanya, China, Post Code: 572022)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (S-CO₂) Brayton cycle power generation is more efficient than steam Rankine cycle. The temperature of main medium CO₂ at boiler outlet is the key parameter of supercritical carbon dioxide coal-fired power plant. The ratio of boiler fuel to carbon dioxide working medium (fuel medium ratio) is still the core task of supercritical carbon dioxide coal-fired boiler control. The fuel medium ratio is the main means to control the temperature of the main medium CO₂ at the boiler outlet. Low-temperature CO₂ injection is an auxiliary refinement means to control the temperature of the main medium CO₂ at the boiler outlet. The dynamic characteristics of the main medium CO₂ temperature control system by means of fuel and low-temperature CO₂ injection desuperheating can be fitted to the first-order

收稿日期:2021-10-09; 修订日期:2021-11-04

基金项目:海南热带海洋学院科研项目(RHDC202004)

Fund-supported Project: Initial Scientific Research Fund of Hainan Tropical Ocean University(RHDC202004)

作者简介:王富强(1983-),男,河北衡水人,国家能源集团新能源技术研究院有限公司高级工程师。

通讯作者:马增辉(1977-),男,陕西绥德人,海南热带海洋学院高级工程师。

plus dead-time (FOPDT) model. In this paper, fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ is used to control the main medium CO_2 temperature. In order to adapt to the changes of plant model parameters caused by generator load changes, $PI^\lambda D^\mu$ controller parameters are designed based on hybrid sensitivity function. The simulation example proves that the fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ controller can improve the closed-loop characteristics of the control system, has stronger disturbance rejection performance, and enhance the stability and robustness of the system. The control performance of fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ is better than that of general integer-order PID control and linear active disturbance rejection control (LADRC).

Key words: S - CO_2 , Brayton cycle, temperature of main CO_2 medium, fractional-order $PI^\lambda D^\mu$, robust control

引 言

能源的高效利用是能源转型的主要目标之一。传统的火力发电机组都是以水蒸气为介质,采用蒸汽朗肯循环发电技术。超超临界一次再热燃煤发电主蒸汽温度可达 $600\text{ }^\circ\text{C}$,效率可达 44.5% ,超超临界二次再热燃煤发电机组效率达 47% ,这已是目前火力发电机组所能达到的最高水平^[1]。由于受金属材料等方面的限制,通过提高主蒸汽参数来进一步提高循环效率变得非常困难^[2]。

超临界二氧化碳(S - CO_2)布雷顿循环较蒸汽朗肯循环在高参数下可以达到更高的效率^[3],是未来高效发电技术的重点方向之一^[4-5]。超临界二氧化碳(S - CO_2)布雷顿循环发电技术的主要优势有^[6-7]:腐蚀性低,可降低对高温材料的要求,提高工作温度,达到更高效率; CO_2 临界参数低($31\text{ }^\circ\text{C}$, 7.377 MPa),超临界状态下, CO_2 的密度大,所需压缩功小,可提高循环效率;在温度高于 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 的工况下,S - CO_2 布雷顿循环的效率更高^[8];S - CO_2 循环系统更紧凑,占用空间更小,材料成本更低;结构紧凑,参数调整更迅速,适合电网深度调峰。

锅炉出口 CO_2 温度,即系统 CO_2 主介质温度,是 S - CO_2 循环燃煤发电机组的关键参数之一。其主要是通过调整锅炉燃煤与 CO_2 循环介质比例的方式,即燃介比的方式,来达到控制系统主介质温度的目的。同时,以低温 CO_2 喷射作为细调,来修正主介质温度使其稳定在设定值。虽然 S - CO_2 循环系统结构紧凑,但在锅炉侧仍然存在较大的迟延。因此,S - CO_2 循环燃煤机组主介质温度控制系统的动态特性同样呈现一定的大滞后和非线性,仍是整个机组最难控制的关键参数。

分数阶微积分是指积分、微分的阶次是任意的,它拓展了整数阶微积分对动态系统的描述能力。分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ ^[9-10]增加了积分阶次 λ 和微分阶次 μ 两个调整参数,尤其发挥了微分环节的性能,提升了系统对对象动态过程的预测能力,提高了响应速度。文献[11]提出了分数阶 PID 控制器,即 $PI^\lambda D^\mu$,分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 较常规整数阶 PID 控制器多了两个可调参数 λ 和 μ 。因此,它的控制灵活性更高、可调整能力更强,具有更好的闭环性能^[12-13]。分数阶 PID 控制是分数阶控制理论的基础,它增强了常规整数阶 PID 的灵活性,可以得到更具鲁棒性的控制效果^[14]。

本文介绍了 S - CO_2 循环燃煤发电机组的运行方式,分析了主介质 CO_2 温度控制系统的动态特性,采用分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制实现主介质温度的调整,并基于灵敏度函数的方法设计分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器参数。仿真实验证明,分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制可以克服系统的大滞后,能够适应机组负荷波动引起的对象模型参数的变化,可以实现 S - CO_2 循环燃煤发电机组主介质 CO_2 温度的及时调整,具备较强的抗扰性,提高了系统的稳定性和鲁棒性。分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制系统结构简单,易于组态实现,有良好的工程应用前景。

1 S - CO_2 循环燃煤发电系统介绍

1.1 S - CO_2 燃煤发电机组及其运行方式

某再压缩循环 S - CO_2 循环燃煤发电机组及其主要参数如图 1 所示^[15]。达到临界点的 CO_2 气体被注入系统,储存在稳压罐中,经过主压缩机升温升压,流经低、高温回热器加热升温后进入锅炉再次加热。过热器出口的 CO_2 气体直接进入高压透平做功,做完功的气体返回锅炉再热器,加热升温后进入

低压透平做功。低压透平做功结束的 CO₂ 气体作为热端工质进入高、低温回热器,然后分为两路,一路经过预冷器进入稳压罐,经主压缩机进入下一轮循环;另一路经过再压缩机直接进入锅炉省煤器,由省煤器加热升温后直接汇入高温回热器出口,与主压缩机来的工质一起经过热器加热升温后进行下一轮做功。

系统暖机结束后,系统开始滑压运行,主压缩机进入变速运行模式,系统内 CO₂ 工质的流量、压力逐步升高,直至达到设计的额定工况,系统开始进入定

压运行。在此过程中,为了提高效率,再压缩机也可采用变频模式,逐步提高再压缩循环 CO₂ 工质的流量。在定压运行阶段,系统主要由高压透平进气调门(主工质调门)来迅速响应外界负荷的变化。

整个系统控制的核心是燃介比的控制,即锅炉燃煤与 CO₂ 循环介质的比例控制。精确的燃介比可以维持主介质温度的稳定,是主介质温度调整的主要手段。低温 CO₂ 气体的少量喷射作为细调手段,来修正过热器出口的主介质温度,使其稳定在设计值。

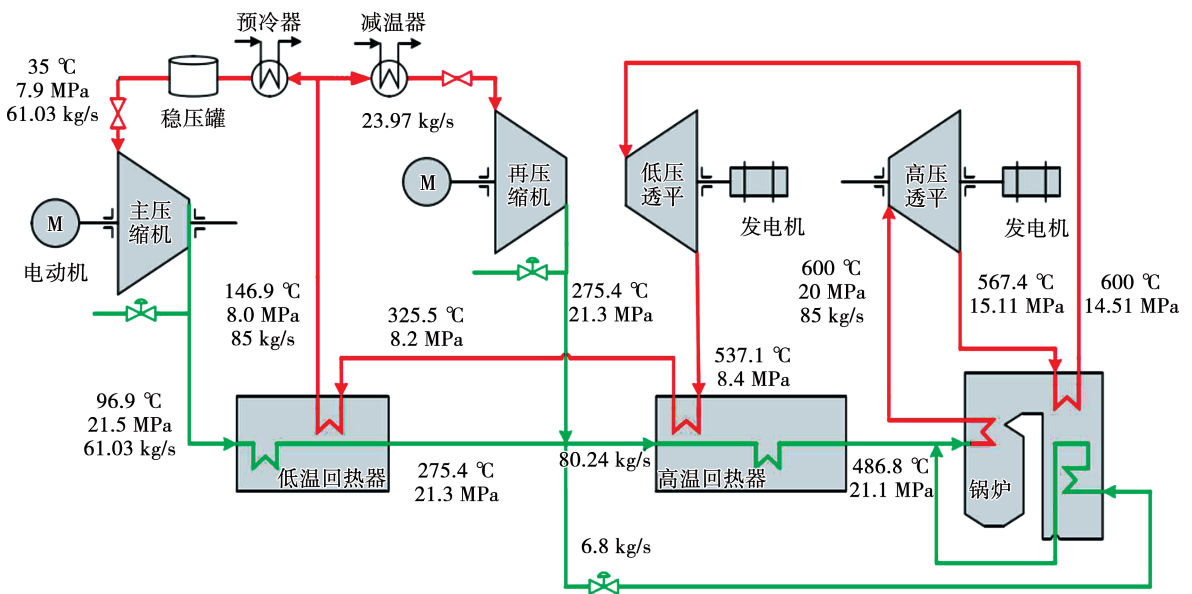


图 1 S - CO₂ 燃煤发电机组系统

Fig. 1 System and parameter diagram of S - CO₂ coal-fired power plant

1.2 主介质 CO₂ 温度系统动态特性

直流炉低温 CO₂ 喷射减温系统如图 2 所示。低温 CO₂ 可以取自主压缩机出口或再压缩机出口。锅炉燃料量、透平进气调门(主工质调门)以及低温 CO₂ 喷射量都会引起主介质 CO₂ 温度的变化。

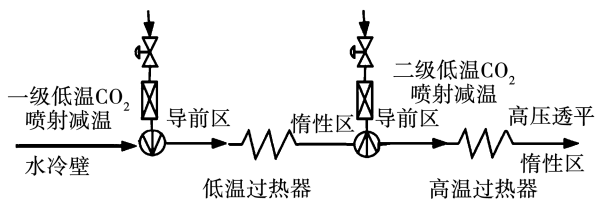


图 2 低温 CO₂ 喷射减温系统

Fig. 2 Low temperature CO₂ injection desuperheating system

图 3 是当锅炉燃料 B 发生阶跃扰动时,CO₂ 主介质温度系统的动态特性。其中, ΔB 为燃料变化量, T 是惯性时间, τ 是纯迟延时间。由于燃料量发生改变,打破了原有的燃介比,锅炉过热器前的温度开始缓慢上升,因此经过一段迟延后,CO₂ 主介质温度也开始逐渐上升并最终稳定在新的状态点。

图 4 是高压透平进气调门(主工质调门)开度 μ 。发生阶跃扰动时,CO₂ 主介质温度系统的动态特性,其中 $\Delta \mu$ 为主工质调门开度变化量。高压透平进气调门开度增大时,主介质压力迅速下降,高压透平进气量增加,机组功率增大。由于主压缩机转速不变,随着高压透平进气调门前压力的降低,CO₂ 介质流量会小幅度增加,燃介比也会随之降低,所以

CO₂主介质温度会小幅降低。

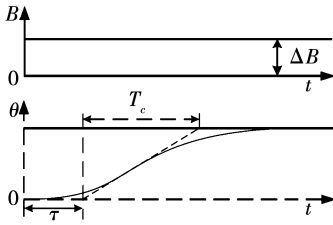


图 3 燃料量扰动系统动态特性

Fig. 3 Dynamic characteristics of fuel disturbance

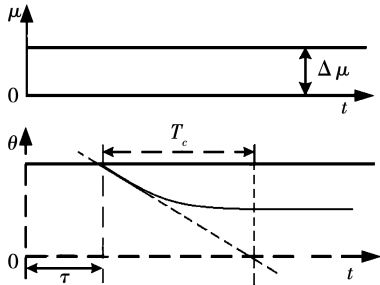


图 4 主工质调门扰动系统动态特性

Fig. 4 Dynamic characteristics of high pressure turbine inlet regulating valve disturbance

图 5 是低温 CO₂ 喷射量 W 发生阶跃变化时, CO₂ 主介质温度控制系统的动态特性。其中, ΔW 为低温 CO₂ 喷射变化量。CO₂ 主介质温度主要取决于锅炉燃介比, 低温 CO₂ 喷射减温只作微调, 不宜大量喷射, 如果喷射量过大反而增加了主介质温度的调整幅度, 可导致中间点温度和各级过热器的介质温度受到影响, 继而改变主介质温度的动态特性。过热器可以看作是多个单容对象串联而成的具有分布式参数的一个多容对象。由于管道和减温器的分段布置, 当低温 CO₂ 喷射量发生改变时, 各段过热器对象的温度相应发生改变, 引起主介质温度的变化。因此, 低温 CO₂ 喷射量扰动下的主介质温度虽然迟延很小, 但惯性较大^[16]。

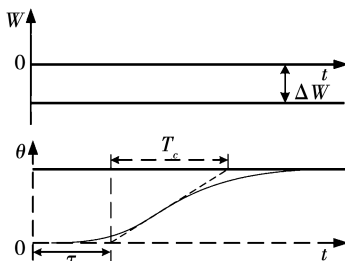


图 5 低温 CO₂ 流量扰动系统动态特性

Fig. 5 Dynamic characteristics of low temperature CO₂ injection disturbance

1.3 主介质 CO₂ 温度的控制

通过燃料量调整锅炉出口主介质 CO₂ 温度存在较大的迟延, 因此以燃料量作为控制量, 超临界 CO₂ 燃煤锅炉主介质 CO₂ 温度对象的传递函数可以拟合为一阶惯性加纯滞后环节 (first-order plus dead-time, FOPDT), 即:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: K —比例系数; T —时间常数; τ —纯迟延时间。

以低温 CO₂ 介质喷射为辅助细调手段, 在微调锅炉出口 CO₂ 温度的同时, 也可以保护事故状态下过热器不超温。当以低温 CO₂ 喷射为控制量调整锅炉出口 CO₂ 温度时, 尽管锅炉出口 CO₂ 温度反应的迟延大大降低, 但是由于过热管道长度及布置的影响, 锅炉出口主介质温度仍然存在较大的惯性, 其传递函数仍可拟合为一阶惯性加纯滞后环节。

锅炉出口主介质 CO₂ 温度控制系统如图 6 所示。其中, $C(s)$ 为控制器, $G(s)$ 是被控对象。在以低温 CO₂ 介质喷射为细调手段的系统中, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 分别表示导前区和惰性区传递函数, $G(s)$ 为广义受控对象, P 为比例环节。被控对象的参数 K, T, τ 随着机组负荷的变化而产生变化, 因此主介质温度控制系统的主要任务除了跟踪设定值之外, 还要克服模型参数变化带来的不确定性和低温 CO₂ 喷射量发生变化等引起的干扰 d 。

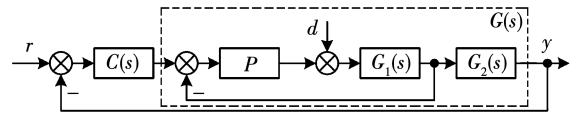


图 6 控制系统图

Fig. 6 Control system diagram

2 分数阶 PI^λD^μ

2.1 分数阶 PI^λD^μ 控制器

分数阶 PID 控制器 PI^λD^μ 的传递函数为:

$$C_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (2)$$

式中: K_p —比例增益; K_i —积分增益; K_d —微分增益; λ —积分阶次, $\lambda > 0$; μ —微分阶次, $\mu > 0$ 。

其相应的整数阶传递函数为:

$$C_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

工业应用中实际 PID 传递函数为:

$$C_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{(K_d/N)s + 1} \quad (4)$$

式中: K_d/N —微分滤波时间常数,取较小的正数。

采用 Oustaloup 滤波器对式(2)的微积分算子近似。Oustaloup 滤波器的标准形式为:

$$F_o(s) = K \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega_k'}{s + \omega_k} \quad (5)$$

式中: N —滤波器阶次。

在所需频段 (ω_b, ω_h) 内:

$$\omega_k' = \omega_b \left(\sqrt{\omega_h/\omega_b} \right)^{\frac{2k-\gamma-1}{N}} \quad (6)$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\sqrt{\omega_h/\omega_b} \right)^{\frac{2k+\gamma-1}{N}} \quad (7)$$

$$K = \omega_h^\gamma \quad (8)$$

式中: γ —分数阶算子的阶次。

在频段 (ω_b, ω_h) 内分数阶微分算子可用零极点形式的传递函数近似^[17]:

$$K(s) = \left[\left(1 + \frac{s}{d\omega_b/b}\right) / \left(1 + \frac{s}{b\omega_h/d}\right) \right]^\gamma \quad (9)$$

式中: $0 < \gamma < 1$, $s = j\omega$, $b > 0$, $d > 0$ 。

式(9)可转化为:

$$K(s) = \left(\frac{bs}{d\omega_b} \right)^\gamma \left(1 + \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + b\omega_h s} \right)^\gamma \quad (10)$$

将上式用泰勒级数展开,取一阶近似可得,

$$s^\gamma \approx \left(\frac{d\omega_b}{b} \right)^\gamma \left(\frac{ds^2 + bs\omega_h}{d(1-\gamma)s^2 + b\omega_h s + d\gamma} \right) \times$$

$$\left(\frac{1 + \frac{s}{d\omega_b/b}}{1 + \frac{s}{b\omega_h/d}} \right)^\gamma \quad (11)$$

则改进的 Oustaloup 滤波器为:

$$s^\gamma \approx \left(\frac{d\omega_b}{b} \right)^\gamma \left(\frac{ds^2 + bs\omega_h}{d(1-\gamma)s^2 + b\omega_h s + d\gamma} \right) \prod_{k=-N}^N$$

$$\frac{s + \omega_k'}{s + \omega_k} \quad (12)$$

其中, $\omega_k' = (d\omega_b/b)^{\frac{\gamma-2k}{2N+1}}$, $\omega_k = (b\omega_h/d)^{\frac{\gamma+2k}{2N+1}}$, $b = 10$, $d = 9$, 为了确保近似的精确性, $N \geq 3$, 一般取 $N = 5$ 。

由于 $\lambda < 1$ 不能消除系统的稳态误差,所以采用以下实际分数阶 PID 控制器^[17]:

$$C_r(s) = K_p + \frac{K_i s^{1-\lambda}}{s} + K_d s^\mu \quad (13)$$

2.2 PI^λD^μ鲁棒设计

为了抑制对象参数变化带来的不确定性,采用混合灵敏度来设计控制器参数以提高系统的鲁棒性。对于标准的 H_∞ 控制问题,控制器应该满足:

$$\left\| \begin{array}{l} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)C(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\|_\infty < 1 \quad (14)$$

式中: $W_1(s), W_2(s), W_3(s)$ —加权函数; $C(s)$ —控制器模型; $S(s)$ —灵敏度函数,则补灵敏度函数为 $T(s) = 1 - S(s)$ 。

对于式(1)的一阶惯性加纯滞后环节对象,灵敏度函数 $S(s)$ 和补灵敏度函数 $T(s)$ 可以定义为:

$$S(s) = \frac{1}{1 + C(s)G(s)} \quad (15)$$

$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (16)$$

在鲁棒控制器设计中,灵敏度主要是用来评价系统设定值跟踪能力的指标,补灵敏度是评价系统鲁棒稳定性的指标,可以通过加权函数 $W_3(s)$ 来调整, $W_3(s)$ 越大系统的鲁棒性越强。

对于式(1)的 FOPDT 模型,由于含有 $e^{-\tau s}$ 环节,加权函数可以设计为超前环节:

$$W_i(s) = \frac{k_i(m_i s + 1)}{n_i s + 1}, m_i > n_i, i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

定义系统所期望的闭环动态特性为 $H(s)$, 依据 $H(s)$ 可以获得闭环系统所期望的性能指标,如阶跃响应指标衰减率 $\varphi(x)$ 、超调量 M_p 和上升时间 t_r 等等。若令 $T(s) = H(s)$, 那么就可以选择合适的性能指标作为目标函数,对控制器 $C(s)$ 参数进行优化设计。为了减小系统的过渡过程时间,可以选取时间与绝对误差乘积积分指标 ITAE 做为系统的性能指标,采用遗传算法等求解。

$$\text{ITAE} = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (18)$$

式中: $e(t)$ —闭环系统输出与设定值之间的误差。

3 仿真实例

3.1 燃介比控制锅炉出口 CO₂ 温度

由机理建模辨识得到的锅炉燃料量扰动下的锅炉出口 CO₂ 主介质温度 FOPDT 模型如式(19),设计分数阶 PI^λD^μ 控制器,并与其相应的整数阶 PID 控制以及文献[18]中的线性自抗扰 LADRC 控制方法进行对比,3 种控制方法的参数整定结果如表 1 所示。

$$G(s) = \frac{2.46}{31.2s + 1} e^{-37s} \quad (19)$$

表 1 3 种控制方式参数整定结果

Tab.1 Tuning parameters of the three control modes

控制方法	设计参数
PI ^λ D ^μ	$K_p = 0.22, K_i = 0.005\ 32, \lambda = 1.019, K_d = 0.32, \mu = 0.82$
PID	$K_p = 0.14, K_i = 0.006\ 2, K_d = 1.61 (K_d/N) = 0.001$
LADRC	$b_0 = 0.049, \omega_c = 0.106\ 8, \omega_0 = 0.217\ 6, \xi = 1.257\ 6$

图 7 为 3 种控制方式设定值跟踪的仿真结果。由图 7 可知,分数阶 PI^λD^μ 的控制品质要优于常规 PID 和线性自抗扰控制。图 8 是 3 种控制方式抗扰性测试结果。仿真时间 1 000 s 处,在扰动输入端加入阶跃干扰,3 种控制方式都可以在短时间内克服扰动,恢复到设定值,较其它两种方式,分数阶 PI^λD^μ 无波动,控制品质略优。

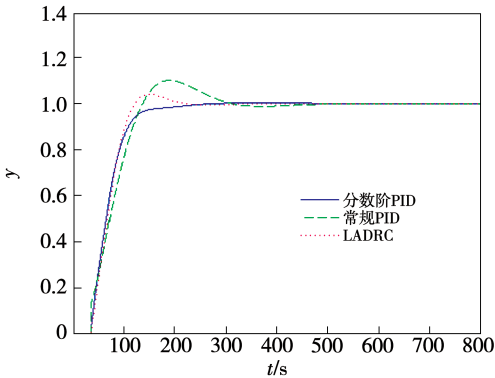


图 7 设定值跟踪仿真结果

Fig.7 Set point tracking simulation results

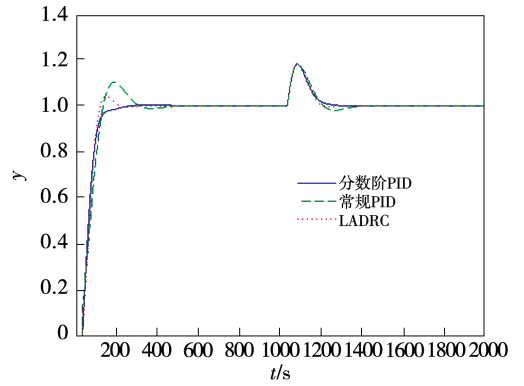


图 8 扰动测试仿真结果

Fig.8 Disturbance test results

为了验证机组负荷波动模型参数发生变化时系统的鲁棒性。采用蒙特卡洛方法,构造系统参数变化概率模型,以模拟系统的随机特性达到验证系统鲁棒性的目的。令控制对象 $G(s)$ 的各项参数,包括比例增益 K 、时间常数 T 、滞后时间 τ ,在 $\pm 20\%$ 的范围内随机摄动,其中包含参数变化 $\pm 20\%$ 的情况。图 9 是 20 组随机模型的仿真结果。可以看出,当对象参数发生变化时,分数阶 PI^λD^μ 控制具有较好的鲁棒性。

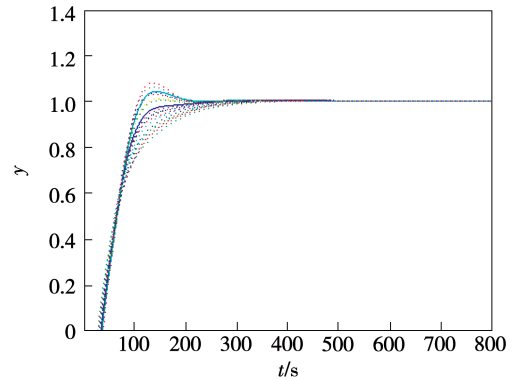


图 9 鲁棒性测试

Fig.9 Robustness test

3.2 低温工质混合控制锅炉出口 CO₂ 温度

由机理建模辨识得到低温 CO₂ 喷射量扰动下锅炉出口主介质 CO₂ 温度的 FOPDT 模型如式(20),设计分数阶 PI^λD^μ 控制器,同样与其相应的整数阶 PID 控制以及文献[18]中的线性自抗扰 LADRC 控制方法进行对比,3 种控制方法的参数整定结果如表 2 所示。

$$G(s) = \frac{1}{128s + 1} e^{-5s} \quad (20)$$

表 2 3 种控制方式参数整定结果

Tab.2 Tuning parameters of three control modes

控制方法	设计参数
PI ^λ D ^μ	$K_p = 10.02, K_i = 0.0803, \lambda = 1, K_d = 1.202,$ $\mu = 1.501$
PID	$K_p = 9.4977, K_i = 0.1014,$ $K_d = 33.8437 (K_d/N) = 0.001$
LADRC	$b_0 = 0.0357, \omega_c = 0.2592, \omega_0 = 1.5389, \xi = 5.5439$

图 10 为 3 种控制方式设定值跟踪的仿真结果。分数阶 PI^λD^μ 控制虽然上升时间较线性自抗扰控制 LADRC 慢,但是系统无超调和波动。可见 PI^λD^μ 的控制品质要优于常规 PID 和线性自抗扰控制。

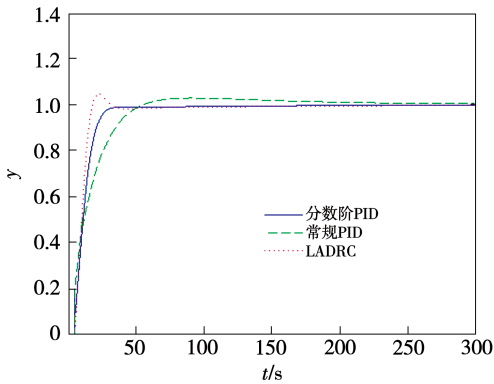


图 10 设定值跟踪仿真结果

Fig. 10 Set point tracking simulation results

图 11 为 3 种控制方式抗扰性测试结果。仿真时间 500 s 处,在扰动输入端加入阶跃干扰。可以看出,分数阶 PI^λD^μ 控制和线性自抗扰控制 LADRC 一样,都可以很快抑制扰动,恢复至设定值。

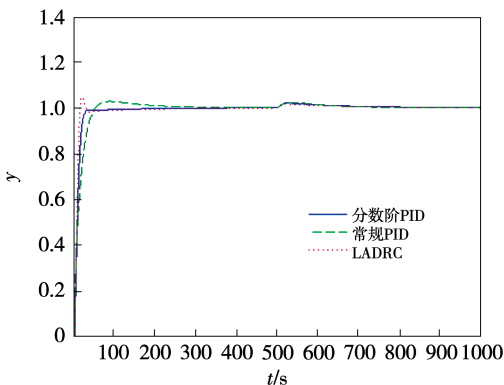


图 11 扰动测试仿真结果

Fig. 11 Disturbance test results

同样,令控制对象 $G(s)$ 的各项参数,包括比例增益 K 、时间常数 T 、滞后时间 τ ,在 $\pm 20\%$ 的范围内随机摄动,其中包含参数变化 $\pm 20\%$ 的情况。图 12 是 20 组随机模型的仿真结果,可以看出,当对象参数发生变化时,分数阶 PI^λD^μ 控制同样具有较好的鲁棒性。

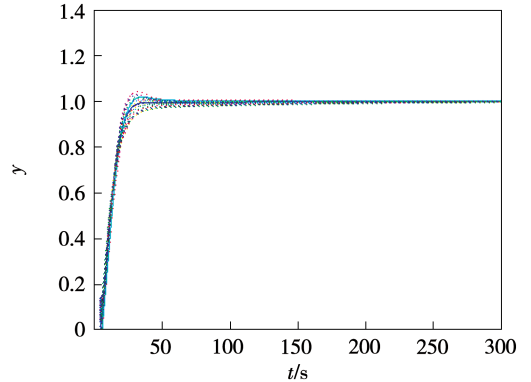


图 12 鲁棒性测试

Fig. 12 Robustness test

4 结论

主介质 CO₂ 温度是超临界 CO₂ 循环燃煤机组的关键参数之一。本文分析了超临界 CO₂ 燃煤发电机组的运行方式及主介质温度控制系统的动态特性。

(1) 燃介比仍然是超临界 CO₂ 燃煤机组的控制核心,也是主介质 CO₂ 温度的主要调节手段,低温 CO₂ 喷射减温作为主介质温度的细调手段。以锅炉燃料量为控制量,锅炉出口主介质 CO₂ 温度的变化呈现一定的大滞后;当以低温 CO₂ 喷射作为控制量时,主介质 CO₂ 温度的变化惯性较大,其传递函数都可以拟合为一阶惯性加纯滞后模型(FOPDT)。

(2) 本文采用分数阶 PI^λD^μ 实现 S-CO₂ 燃煤机组主介质 CO₂ 温度的控制,并基于鲁棒控制的方法设计分数阶 PI^λD^μ 控制器参数。仿真结果表明,分数阶 PI^λD^μ 控制具有更强的灵活性和动态调整能力,能够适应机组负荷波动所引起的对象模型参数的变化,具有较强的抗扰性,可以更好地提高系统的稳定性和鲁棒性,其控制品质优于常规 PID 和线性自抗扰控制 LADRC。

参考文献:

- 系统热力学性能分析[J]. 热力发电, 2020, 49(12): 9-16.
- ZHAO Shi-fei, WANG Wei-shu, LIU Jun, et al. Thermodynamic performance analysis for a 1 000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 9-16.
- [2] 邓成刚, 陈宇明, 陈 坤, 等. 50 MW 超临界二氧化碳燃煤电厂热经济性分析[J/OL]. 热力发电, 2021(9): 1-9.
- DENG Cheng-gang, CHEN Yu-ming, CHEN Kun, et al. Thermoeconomic analysis for 50 MW supercritical carbon dioxide coal-fired power plant[J/OL]. Thermal Power Generation, 2021(9): 1-9.
- [3] 陈渝楠, 张 纯, 蒋世希, 等. 超临界二氧化碳火力发电系统比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2071-2080.
- CHEN Yu-nan, ZHANG Chun, JIANG Shi-xi, et al. Comparative study of supercritical carbon dioxide thermal power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2071-2080.
- [4] BAI W G, ZHANG Y F, YANG Y, et al. 300 MW boiler design study for coal-fired supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 66-73.
- [5] 徐进良, 刘 超, 孙恩慧, 等. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 1-10.
- XU Jin-liang, LIU Chao, SUN En-hui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10.
- [6] XU J L, LIU C, SUN E H, et al. Perspective of S-CO₂ power cycles[J]. Energy, 2019(186): 115831.
- [7] HOLCOMB G R, CARNEY C, DOGAN O N. Oxidation of alloys for energy applications in supercritical CO₂ and H₂O[J]. Corrosion Science, 2016(109): 22-35.
- [8] DOSTAL V, HEIZLAR P, DRISCOLL M J. The supercritical carbon dioxide power cycle; comparison to other advanced power cycles[J]. Nuclear Technology, 2017, 154(3): 283-301.
- [9] KAPOULEA S, PSYCHALINOS C, ELWAKIL A S, et al. Realizations of fractional-order PID loop-shaping controller for mechatronic applications[J]. Integration, 2021(80): 5-12.
- [10] SAEEDIAN A, MERRIKH-BAYAT F, JALILVAND A. Multivariable fractional-order PID tuning by iterative non-smooth static-dynamic H_∞ synthesis[J]. Fractional Calculus and Applied Analysis, 2021, 24(4): 1094-1111.
- [11] PODLUBNY I. Fractional-order systems and PI^λD^μ-controllers[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [12] 项雷军, 陈 昊, 郭新华, 等. 基于模糊分数阶 PID 的含电动汽车的多能源微电网二次频率控制[J/OL]. 电力自动化设备, 2021(9): 1-7.
- XIANG Lei-jun, CHEN Hao, GUO Xin-hua, et al. Secondary frequency control of multi-energy microgrid with electric vehicles based on fuzzy fractional-order PID[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2021(9): 1-7.
- [13] 刘勇智, 李 杰, 戴 聪, 等. 基于改进 Oustaloup 滤波器的分数阶 PID 控制器简化设计[J]. 信息与控制, 2019, 48(6): 723-728, 737.
- LIU Yong-zhi, LI Jie, DAI Cong, et al. Design of simplified fractional-order PID controller based on improved Oustaloup filter[J]. Information and Control, 2019, 48(6): 723-728, 737.
- [14] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2007(5): 771-776.
- XUE Ding-yu, ZHAO Chun-na. Fractional order PID controller design for fractional order system[J]. Control Theory & Applications, 2007(5): 771-776.
- [15] 孙 嘉. 超临界二氧化碳循环发电系统动态特性及控制应用分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- SUN Jia. Characteristic simulation and control of supercritical carbon dioxide cycle power generation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [16] 吴 闯, 王顺森, 王兵兵, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环燃煤发电系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6360-6366, 6498.
- WU Chuang, WANG Shun-sen, WANG Bing-bing, et al. Simulation research on coal-fired power generation system using a supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6360-6366, 6498.
- [17] 薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- XUE Ding-yu. Fractional calculus and fractional-order control[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [18] 韩文杰, 谭 文. 基于 PID 参数整定的线性自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1592-1600.
- HAN Wen-jie, TAN Wen. Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules[J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1592-1600.

(姜雪梅 编辑)