

克劳斯硫磺回收余热锅炉水温控制系统优化

陈 玉¹, 陈 星², 向腾龙¹, 张履胜¹, 王治红^{1*}

(1. 西南石油大学 化学化工学院, 四川 成都 610500;

2. 长庆油田分公司 第一天然气净化厂, 陕西 靖边 718500)

摘要:在化工生产过程中, 为了减少危险的高温设备操作和事故的发生, 针对余热锅炉水温控制系统的时变性、滞后性等特点, 进行了控制系统优化研究。在 MATLAB/Simulink 平台建模仿真, 比较了常规 PID 控制、模糊自适应 PID 控制、串级控制效果, 发现各控制方案都存在各自的优缺点。为了利用各控制方案的优点同时减弱其缺陷, 提出了复合控制方案对系统进行控制, 通过调节各控制器权重系数的方法将选中的控制器复合为一个控制器。PID 控制、串级控制、模糊控制、复合控制和 S-函数复合控制系统的响应曲线在 230 s、300 s、180 s、130 s 和 106 s 达到稳定。S-函数复合控制响应快、无超调、控制精度较高, 达到了使控制系统安全稳定的目的, 有效提高了克劳斯硫磺回收燃烧炉余热回收效率。

关键词:克劳斯硫磺回收; Simulink; 余热锅炉水温; 权重系数; S-函数复合控制器

中图分类号: TP273

文章编号: 1000-0682(2024)03-0015-07

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.003

Optimization of heat recovery steam generator water temperature control system for Claus sulfur recovery

CHEN Yu¹, CHEN Xing², XIANG Tenglong¹, ZHANG Lüsheng¹, WANG Zhihong^{1*}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China;

2. The First Natural Gas Plant of Changqing Oil-field Constituent Company, Shaanxi Jingbian 718500, China)

Abstract: In the process of chemical production, in order to reduce the occurrence of hazardous high-temperature equipment operations and safety accidents, a study on the optimization of the control system for the water temperature of the waste heat boiler is conducted, targeting its characteristics such as time-varying and hysteresis. The effects of conventional PID control, fuzzy adaptive PID control and cascade control are compared by modeling and simulation on MATLAB/Simulink platform. It is found that each control scheme has its own advantages and disadvantages. In order to make use of the advantages of each control scheme and reduce its defects at the same time, a compound control scheme is proposed to control the system, and the selected controller is combined into a controller by adjusting the weight coefficient of each controller. The response curves of PID control, cascade control, fuzzy control, compound control and S-function compound control system were stable at 230s, 300 s, 180 s, 130 s and 106 s. The S-function compound control has the advantages of fast response, no overshoot and high control precision, which makes the control system safe and stable and effectively improves the waste heat recovery efficiency of Claus sulfur recovery combustion furnace.

Keywords: Claus sulfur recovery; Simulink; waste heat boiler water temperature; weight coefficient; S-function composite controller

0 引言

收稿日期: 2024-01-08

第一作者: 陈玉(1998—), 男, 四川乐山人, 硕士研究生在读, 研究方向为过程控制方面。

随着工业化的发展, 能源消耗也在不断增加。化石能源是目前世界上的主要能源, 主要包括煤、石

油和天然气。根据国际能源署 (IEA) 的数据,2019 年,煤炭、石油和天然气分别占全球能源消费的 27%、32% 和 24%。为了提高能源的利用效率,优化控制系统以实现工业生产中的能源回收和利用已成为一个热门课题。在克劳斯硫磺回收工艺中,余热锅炉就是一个例子,它在能量回收利用的同时促进了工业生产的顺利进行,并通过控制给水流量和水位来控制水温。目前工业上采用的控制方法主要有 PID 控制、模糊控制、串级控制、预测控制、神经网络控制等。在温度控制方面,沈雅斐^[1]考虑酸气流量受到供气压力负荷变化、外界环境干扰等因素影响,针对主燃烧温度控制系统的时变性、时滞性,设计了模糊控制器为主燃烧室温度控制器。赵景波^[2]等人,针对设备蒸汽温度控制,提出了将粒子群算法优化模糊 PID 算法应用在其温度控制上。Jafar Tavvosi^[3]针对参数不确定性问题,在建立了锅炉系统的动力学方程的基础上,提出了一种基于智能模型预测控制的锅炉温度控制新方法。

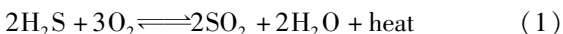
近年来,许多专家学者针对温度控制中存在的大惯性、时滞、非线性、时变性等问题,提出了各种温度控制方案,不同程度地提高了系统的控制品质。然而,实际过程相对复杂。为了简化控制器的设计,提取各控制器的优点,该文分别对传统 PID 控制器、模糊自适应 PID 控制器和串级控制器进行了研究,提出了一种通过调整权系数来控制锅炉内胆水温的复合控制方案。

1 余热锅炉内胆水温模型分析

1.1 工艺流程

在燃烧炉中按一定比例加入空气,来自燃烧炉的高温气流先被余热锅炉冷却,然后被热段的冷凝冷却器冷却。余热锅炉从底部充水,产生的饱和蒸汽从顶部排出,经蒸汽除杂加热器降压,与气/气换热器产生的饱和蒸汽混合,进入系统管网。

在燃烧炉中,主要的化学反应如下:



上述反应式(1)和(2)是克劳斯反应。余热锅炉采用火管式余热锅炉,余热锅炉内胆的水温受燃烧反应进行程度、酸性气体流量、进水流量的影响。

1.2 数学模型分析

克劳斯硫磺回收的重要工艺设备之一是由反应室和换热器组成,通常称为燃烧炉和余热锅炉。其功能:1/3 的 H_2S 在空气中燃烧生成 SO_2 , 剩余 2/3 的

H_2S 继续与生成的 SO_2 反应;一些 H_2S 被氧化生成元素硫。燃烧炉和余热锅炉的示意图如图 1 所示。

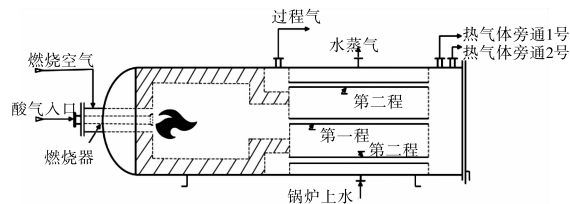


图1 燃烧炉和余热锅炉工艺图

火管式余热锅炉主要由内胆、两个回程的烟管、给水泵、液位计、控制器和前后烟箱组成;水在管外流动,烟气在管内流动,利用高温烟气将水加热成蒸汽用于发电或其他用途。该余热锅炉的水温模型引用了韦晓儒基于多容量惯性标准传递函数的锅炉内胆水温控制研究^[4]:

$$G(s) = \frac{61.1}{1383.9s + 1} e^{-23.6524s} \quad (3)$$

观察到传递函数(3)是一阶惯性加滞后的,当加入阶跃输入时,瞬态输出响应曲线将呈指数变化,稳定性差,存在时滞。如果控制方案选择不当,会导致超调量大,难以稳定。

1.3 控制方案选择

根据余热锅炉内胆水温的传递函数,并考虑到负荷不足、外界干扰等因素的影响,先后选择了简单 PID 控制、模糊 PID 控制和串级控制方案作为研究对象,并提出了复合控制方案。

2 控制器设计

2.1 常规 PID 控制器设计

PID 控制是使用输入值与采样值之间的偏差分别进行比例、微分、积分运算,并将三种运算的结果线性组合得到控制输出^[5-7]。

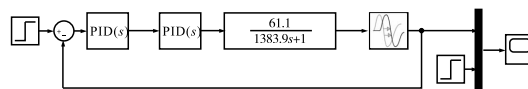


图2 锅炉内胆水温 PID 控制仿真模型

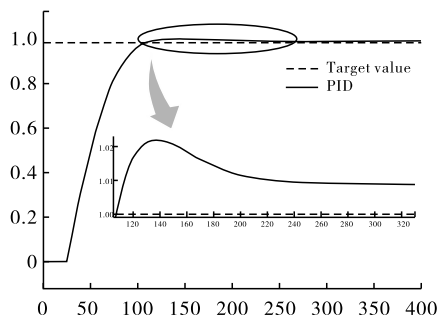


图3 锅炉内胆水温 PID 控制仿真结果

通过经验法调整比例、积分、微分环节的参数,最终得到如图 2 所示的 PID 控制仿真模型和图 3 所示的仿真响应曲线。

从图 3 的仿真响应曲线可以看出:常规 PID 锅炉内胆水温控制系统响应曲线超调量约为 2.2%, 上升时间 $t_r = 108$ s, 稳定时间 $t_s = 230$ s, 其控制精度不高。

2.2 模糊 PID 控制器的设计

2.2.1 输入和输出变量确立

模糊 PID 控制系统包括模糊化处理模块、模糊推理模块、PID 控制器和被控对象。模糊控制器在整个系统设计中是最关键的部分,它的性能对控制效果有着直接影响^[8-15]。

锅炉水温模糊控制器设计为两输入三输出,偏差 e 和偏差变化率 e_c 做为控制器的输入 K_p, K_i, K_d 为输出。将输入变量 e 和 e_c 的语言值的模糊子集设置为{负大,负中,负小,零,正小,中,正大},记为{SB, SM, SS, Z, BS, BM, BB}。类似地,输出变量的模糊子集也设置为{SB, SM, SS, Z, BS, BM, BB}。

2.2.2 控制器规则设计

根据理论分析和总结工程设计人员的技术知识和实践经验,设计出合适的模糊规则表,如表 1 所示。

利用 MATLAB R2019a 软件中的 FIS Edition 设计锅炉内胆水温控制的模糊控制器规则,选择稳定性好的高斯隶属函数作为输入变量 e 和 e_c 的隶属函数,选择灵敏度高的三角函数作为输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的隶属函数^[16-17]。

将 $e(e_c)$ 模糊论域选为 $E(E_c) = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 量化因子分别为 $K_e = 3, K_{e_c} = 15$ 。分别对输入和输出进行命名,输入模糊论域,选择隶属函数,输入模糊子集的个数,并对子集进行命名,可得到如图 4 所示的隶属函数图。将建立的模糊规则表中的规则逐一添加到控制器中,模糊规则视图如图 5 所示,模糊控制面如图 6 所示。在设计模糊控制器时,由于模糊控制器的规则和所选隶属函数的共同作用,不同的模糊规则得到的控制面形状不同,闭环控制系统的控制性能也会不同。

表 1 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊规则表

e	e_c						
	SB	SM	SS	Z	BS	BM	BB
SB	BB/BB/BS	BB/BB/BS	BM/BM/SS	BM/BM/SM	BS/BS/SM	Z/Z/SM	Z/Z/SS
SM	BB/BB/BS	BM/BM/SS	BM/BM/SS	BS/BM/SM	BS/BS/SM	Z/Z/SS	SS/Z/Z
SS	BM/BM/BS	BM/BM/SS	BS/BS/SS	BS/BS/SM	Z/Z/SS	SS/SS/SS	SS/SS/Z
Z	BM/BM/Z	BM/BM/SS	BS/BS/SS	Z/Z/SS	SS/SS/SS	SS/SM/Z	SM/SM/BS
BS	BS/BS/Z	BS/BS/SS	Z/Z/Z	SS/SS/Z	SS/SS/Z	SM/SM/BS	SM/SM/BM
BM	BS/Z/BM	Z/Z/BM	SS/SS/BS	SM/SS/BS	SM/SM/BS	SM/SM/BS	SB/SB/BB
BB	Z/Z/BB	SS/SS/BM	SS/SM/BM	SM/SM/BS	SM/SM/BS	SB/SB/BM	SB/SB/BB

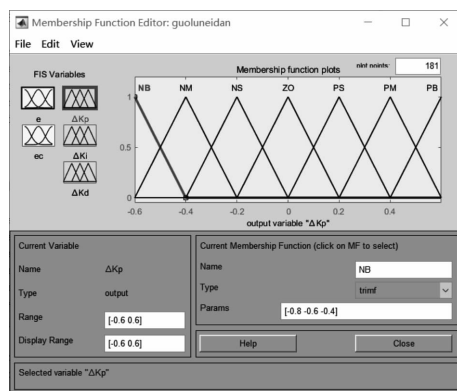
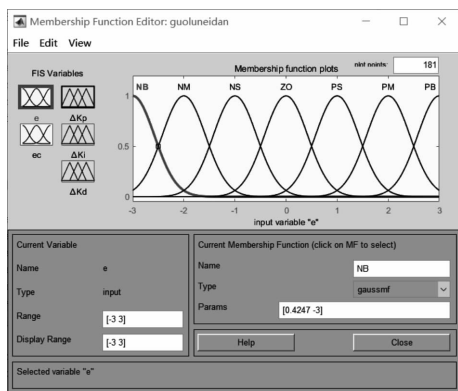


图 4 隶属函数图

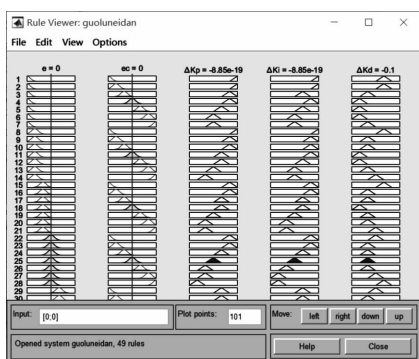


图 5 控制规则观察器

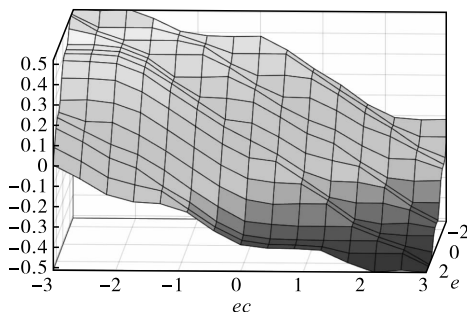


图 6 模糊控制器的控制面

2.2.3 模拟仿真

在 MATLAB/Simulink 中建立模糊 PID 控制仿真模型,如图 7 所示。

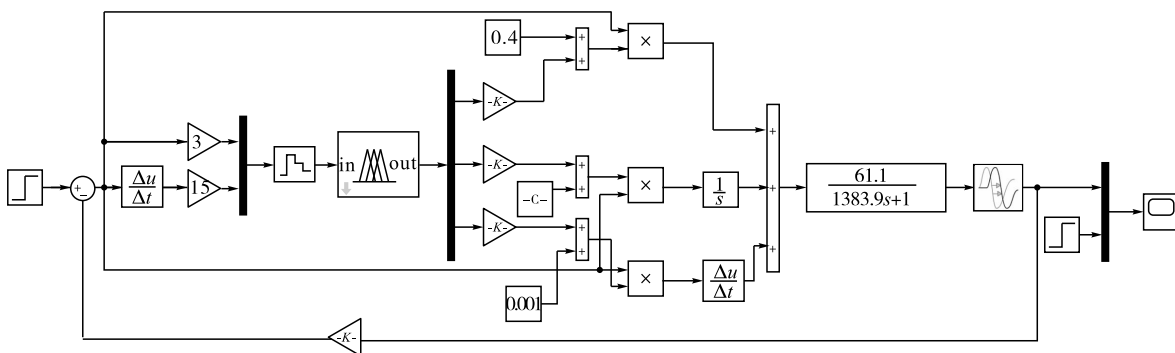


图 7 内胆水温模糊控制仿真模型

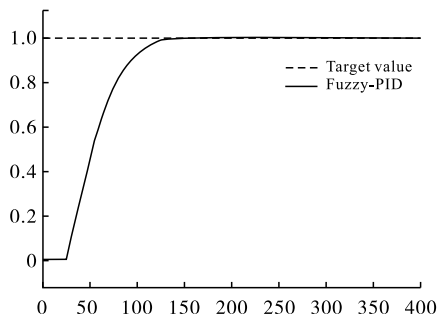


图 8 内胆水温模糊控制仿真结果

从图 8 的仿真结果可以看出,响应曲线几乎没有超调,系统在 $t = 180 \text{ s}$ 达到稳定;与常规 PID 控制器相比,模糊控制器具有更短的调节时间和更高的控制精度。结果表明,模糊控制器所采用的模糊规则是合理且有效的。

2.3 串级控制器的设计

串级控制系统由主回路和副回路构成,它们相互协调工作,使被控量精确地保持在设定值。副回路的主要功能是快速抑制扰动,主回路的输出可以用来改变副回路的设定值,也可以抑制和消除副回路外的扰动^[18-23]。对于串级 PID 控制的副控制器,如果对副控制对象的输出范围没有严格要求,则可以只采用 PI 控制。由于积分控制会降低副回路的

响应速度,因此此次使用 PD 控制。

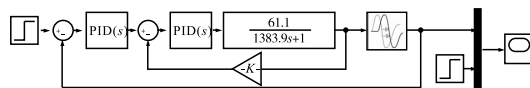


图 9 内胆水温串级控制模型

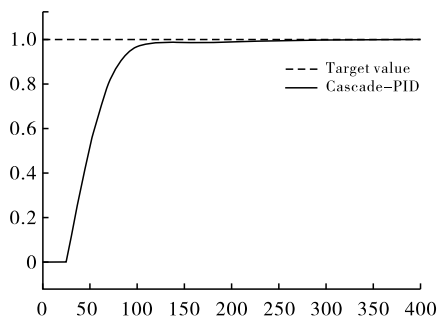


图 10 内胆水温串级控制仿真结果

将系统拆分为惯性环节和纯滞后环节,先将一阶惯性环节加入控制系统进行 PID 参数调节,再将延迟环节加入系统,调节第二个 PID 参数,便构成了一个以惯性环节为副控制对象,以延迟环节为主控制对象的控制器,Simulink 仿真模型如图 9 所示。从图 10 所示的仿真结果来看,虽然响应速度快、无超调,但上升时间比较长,控制效果不如模糊控制。

通过对上述三种控制方案单独作用于余热锅炉

内胆水温系统的研究,发现对于锅炉内胆水温控制系统:常规 PID 控制能很快达到目标值,但存在超调量,控制精度不高。串级控制的响应速度稍快,但达到目标值的时间较长。模糊 PID 控制响应速度相对较慢,但达到目标值和稳定性相对较快。每种控制方案都有其优缺点。

2.4 复合控制器设计

2.4.1 复合控制器工作原理

复合控制是将三种控制器复合为一个控制器,并在权重系数之和保持为 1 的前提下,通过调整权重系数对系统进行控制的方案,对于不同的控制对象需要根据其特性进行权重系数调节。复合控制原理图如图 11 所示。

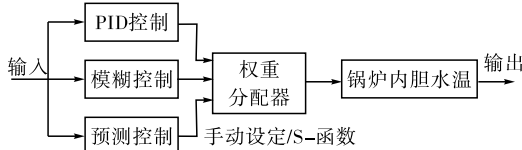


图 11 复合控制结构图

假设 PID 控制和串级控制权重系数分别为 α 和 β ,则复合控制输出算式为:

$$\begin{aligned}
 U(t) = & \alpha \left[K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] + \\
 & \beta \left[K_{p1} e_1(t) + K_{i1} \int_0^t e_1(t) dt + K_{d1} \frac{de_1(t)}{dt} + K_{p2} e_2(t) \right. \\
 & \quad \left. + K_{i2} \int_0^t e_2(t) dt + K_{d2} \frac{de_2(t)}{dt} \right] + \\
 & (1 - \alpha - \beta) \left[K_{pf} e_f(t) + K_{if} \int_0^t e_f(t) dt + K_{df} \frac{de_f(t)}{dt} \right] \\
 = & \alpha K_p e(t) + \beta [K_{p1} e_1(t) + K_{p2} e_2(t)] + (1 - \alpha - \beta) \\
 & K_{pf} e_f(t) + \alpha K_i \int_0^t e(t) dt + \\
 & \beta [K_{i1} \int_0^t e_1(t) dt + K_{i2} \int_0^t e_2(t) dt] + \\
 & (1 - \alpha - \beta) K_{if} \int_0^t e_f(t) dt + \alpha K_d \frac{de(t)}{dt} + \\
 & \beta \left[K_{d1} \frac{de_1(t)}{dt} + K_{d2} \frac{de_2(t)}{dt} \right] + (1 - \alpha - \beta) K_{df} \frac{de_f(t)}{dt}
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$$K_{pf} = K_{p0} + \Delta K_p \quad (5)$$

$$K_{if} = K_{i0} + \Delta K_i \quad (6)$$

$$K_{df} = K_{d0} + \Delta K_d \quad (7)$$

其中, K_p, K_i, K_d 为 PID 控制比例、积分、微分系数; $K_{p1}, K_{p2}, K_{i1}, K_{i2}, K_{d1}, K_{d2}$ 为串级控制主、副回路比例、积分、微分系数; K_{pf}, K_{if}, K_{df} 为模糊控制比例、

积分、微分系数; $e(t)$ 为 PID 控制变量误差; $e(t), e_1(t), e_2(t)$ 为串级控制主、副变量误差; $e_f(t)$ 为模糊控制变量误差; K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为模糊控制初始比例、积分、微分系数; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为模糊控制初始比例、积分、微分系数变化量。

复合控制权值的调整是以利用各单独控制器的优势来最大程度提升控制器性能为目的,根据各控制器单独作用于系统所得出的控制效果参数来进行调整,如:上升时间、超调量、稳态误差等。锅炉水温复合控制器权重系数调节规则为:适当增大 PID 控制权重可加快响应速度,适当增加模糊控制权重可减少调节时间,适当增加串级控制权重可减小超调量,最终权值应综合考虑复合控制所得到的超调量、调节时间和稳态误差情况。

由于手动调节权重系数无法实现实时在线调整,为了进一步提高系统的控制性能,提出了调用 S 函数程序自动调整权重系数的方法。

2.4.2 模拟仿真

将调节好参数的各控制器复合,权重分配可以采用手动调节也可调用 S-函数自动调节。得到如图 12 所示的 Simulink 模型。S-函数程序如下:

```

function [sys,x0,str,ts] = Weight(t,~,~,flag)
% 初始化 S 函数运算所需变量。
switch flag
case 0
% 系统会在仿真前自动调用此处程序段。
% 定义系统尺寸,无初值,无状态导数,2 个输出,1 输入。
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 3;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [1 0];
case 3
if t <= 107
sys(1) = 1;
sys(2) = 0;
sys(3) = 0;

```

```

else if t > 107 && t <= 109
    sys(1) = 0.85;
    sys(2) = 0;
    sys(3) = 0.15;
else if t > 109 && t <= 112
    sys(1) = 0.7;
    sys(2) = 0;
    sys(3) = 0.3;
elseif t > 112 && t <= 115
    sys(1) = 0.55;
    sys(2) = 0;
    sys(3) = 0.45;
    else if t > 115 && t <= 119
        sys(1) = 0.45;
        sys(2) = 0;
        sys(3) = 0.55;
    else if t > 119 && t <= 217
        sys(1) = 0.4;
        sys(2) = 0;
        sys(3) = 0.6;
    else if t > 217 && t <= 284
        sys(1) = 0;
        sys(2) = 1;
        sys(3) = 0;
    else
        sys(1) = 0;
        sys(2) = 0;
        sys(3) = 1;
    end
otherwise
    sys = [ ];
end
end
    
```

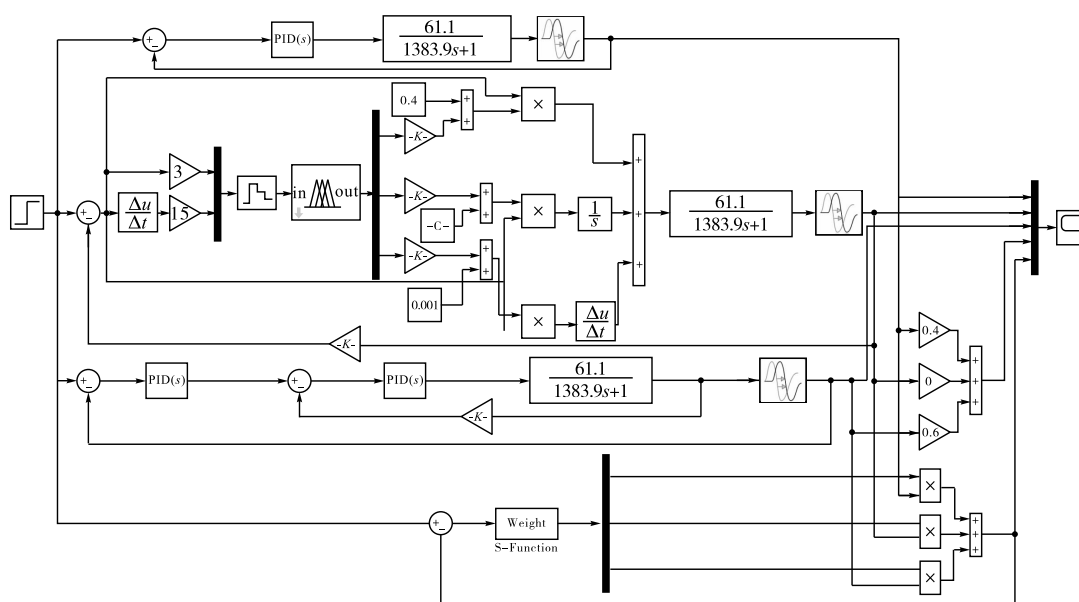


图 12 内胆水温复合控制模型

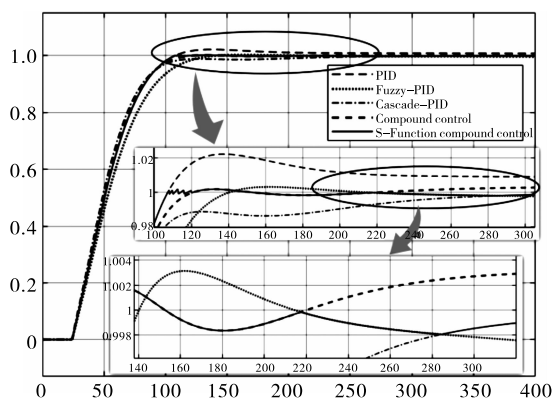


图 13 内胆水温复合控制仿真结果

通过观察图 13 可得到表 2 所示数据。与模糊

PID 控制相比,复合控制能更快地达到且稳定在目标值,表明所设计的复合控制器具有一定的效果。与人工调整权重系数相比,采用 S - 函数自动调整权重系数的响应速度更快,调整时间更短。从理论层面出发,将其应用于化工生产中可使经济性和安全性得到提高。

表 2 各控制方案的仿真结果

仿真结果	PID	串级	模糊	复合	S - 函数
上升时间/s	108	300	147	130	106
调节时间/s	230	300	180	130	106
超调量	0.022	0	0.002	0	0
稳态误差	0.008	0.002	0.003	0.002	0.002

3 结论

该文以温度控制的基础控制方案为背景,设计并实现了 MATLAB R2019 a 高精度余热锅炉水温复合控制系统。复合控制简化了设计过程,只需要设计好各独立的控制器后进行复合,再调节权重系数便可作用于系统。仿真结果表明,与常规 PID 控制、串级控制、模糊 PID 控制以及人工设定权值比较的复合控制相比,S-函数复合控制系统具有调节时间短、超调量小、控制性能好等优点。该燃烧控制系统的优化对于高效回收炉膛燃烧反应中产生的余热具有重要的意义,使锅炉水温控制系统具有了更高的精度和稳定性。

在化工生产中,对温度的精确控制,一方面可以节约成本、减少浪费,另一方面可以使生产过程的安全性更有保障,对经济性和安全性都有影响。因此,在余热锅炉水温控制系统中,选择 S-函数复合控制方案更具有实用意义。

参考文献:

- [1] 沈雅斐. 克劳斯硫磺回收控制系统研究与设计[D]. 西安:陕西科技大学,2018.
- [2] 赵景波,王众,廖鹏浩. 基于粒子群优化算法的蒸汽温度控制研究[J]. 制造业自动化,2020,42(06):107-111.
- [3] TAVOOSI Jafar. Intelligent Model Predictive Control for Boiler Temperature[J]. Automatic Control and Computer Sciences,2021,55:16-25.
- [4] 韦晓儒,王志萍. 基于多容惯性标准传递函数的锅炉内胆水温 PID 控制[J]. 上海电力学院学报,2015,31(3):288-292.
- [5] LIM Sanghun, YOON Youngjin, HEO Jea Pil, et al. A new PID controller design using differential operator for the integrating process[J]. Computers & Chemical Engineering, 2023, 170: 108105.
- [6] 任有志,杨亚威,曾谦,等. BP 神经网络 PID 控制器在聚合釜温控中的应用[J]. 现代化工,2016,36(02):165-167+169.
- [7] 曾喆昭,刘文珏. 自耦 PID 控制器[J]. 自动化学报,2021,47(2):404-422.
- [8] 王泽教,王恒升,江亮亮,等. 基于模糊 PID 的挂面烘房温度控制[J]. 制造业自动化,2022,44(3):76-80.
- [9] 闫磊,王萌,朱烨繁. 双目视觉云台模糊自适应 PID 跟踪控制[J]. 控制工程,2022,29(11):2003-2009.
- [10] Cheung - Chieh Ku, Chein - Chung Sun, Shao - Hao Jian, et al. Passive Fuzzy Controller Design for the Parameter - Dependent Polynomial Fuzzy Model [J]. Mathematics, 2023,11(2482):2482.
- [11] 骆东松,孙冠琼. 基于模糊控制的真空退火炉温度控制系统[J]. 控制工程,2019,26(04):625-630.
- [12] VOSKOGLOU Michael Gr. Fuzzy Logic in Control Theory[J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, 224:217-228.
- [13] 宋英杰,王刚,唐武生,等. 基于模糊自适应串级 PID 控制器的仿生机器鱼位姿控制[J]. 控制工程,2023,30(10):1870-1880.
- [14] 孙雪婷,王晓霖,陈钢. 炼油化工的先进控制技术应用进展[J]. 现代化工,2022,42(01):40-45.
- [15] QI Ruomei, LI Jiarong, LIN Jin, et al. Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2023,48(50):19008-19021.
- [16] 王懋譞,王永富,柴天佑,等. 基于权重因子自校正的主蒸汽温度外挂广义预测串级控制[J]. 自动化学报,2022,48(2):418-433.
- [17] 李会岳. 基于粒计算的模糊控制器设计及仿真应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
- [18] 曹振乾,印江,张津华,等. 基于改进粒子群优化的主蒸汽温度模糊串级控制[J]. 控制工程,2022,29(4):699-706.
- [19] 毕涛,刘迪,杨莉莉. 基于串级控制系统控制液位的设计与分析[J]. 船电技术,2022,42(1):1-4.
- [20] 林巍,王亚刚. 串级控制系统闭环辨识及 PID 参数整定[J]. 控制工程,2018,25(1):11-18.
- [21] 贾默伊,刘钊. 人群搜索算法溶剂回收塔温控系统设计[J]. 化学工程,2018,46(03):74-78.
- [22] 荆中亚,陈为. 基于 STM32 的密炼机自整定 PID 温控系统设计[J]. 电子设计工程,2024,32(5):51-55.
- [23] 姚立平,刘伟章,吴文明,等. 一种引入微分先行的 PID 算法在温控系统中的应用[J]. 电子设计工程,2023,31(7):16-20.