

文章编号: 1004-4353(2023)04-0358-08

# 一种 PID-PID 串级控制系统的设计及其性能分析

刘悦婷<sup>1</sup>, 孟维华<sup>2</sup>, 丁建中<sup>2</sup>

(1. 兰州文理学院 传媒工程学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省建筑设计研究院有限公司, 兰州 730030)

**摘要:** 针对工业用锅炉存在的物料出口温度具有大滞后的特点, 设计了一种 PID-PID 串级锅炉炉温控制系统. 该系统以原料的出口温度和炉膛温度作为反馈量, 并采用一步法整定主、副 PID 控制器的参数. 定量计算和 Simulink 仿真表明, PID-PID 串级控制系统的抗干扰性能、响应速度、稳定性、工作频率等显著优于单回路 PID 控制系统(分别提高了 24%、32%、37%、41%), 由此说明该 PID-PID 串级控制系统在控制锅炉炉温方面具有良好的应用价值.

**关键词:** 锅炉炉温控制系统; PID-PID 串级控制系统; 单回路 PID 控制系统; 仿真分析

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Design and performance analysis of a PID-PID cascade control system

LIU Yueting<sup>1</sup>, MENG Weihua<sup>2</sup>, DING Jianzhong<sup>2</sup>

(1. School of Media Engineering, Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou 730000, China;

2. Gansu Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** In view of the large lag characteristics of the boiler material outlet temperature in industrial production, a PID-PID cascade boiler temperature control system is designed. The system takes the outlet temperature of raw materials and furnace temperature as feedback variables, and uses a one-step method to adjust the parameters of the main PID controller and the auxiliary PID controller. Quantitative calculation and Simulink simulation show that the anti-interference performance, response speed, stability, working frequency of the PID-PID cascade control system are better than those of the single loop PID control system (increased by 24%, 32%, 37%, and 41% respectively). This shows the PID-PID cascade control has good a application value in the boiler temperature control system.

**Keywords:** boiler temperature control system; PID-PID cascade control system; single loop PID control system; simulation analysis

## 0 引言

锅炉炉温控制系统是一个复杂的大滞后系统. 近年来, 随着对炉温控制系统的安全性和可靠性要求的不断提高, 常规 PID(proportional integral derivative)控制方法已无法达到预期的控制目标. 为此, 一

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21YF5GA072)

作者简介: 刘悦婷(1979—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为智能控制和电子电路设计.

些学者通过引入PID串级控制策略来提高了锅炉炉温控制系统的性能。例如:文献[1]的作者采用串级控制方式(其中主控制器采用模糊控制,副控制器采用PID控制)对锅炉炉温控制过程进行了研究,结果显示该方法可有效改善炉温系统的工作频率和输出温度。文献[2]的作者采用二自由度的GDC控制器对锅炉炉温的控制过程进行了研究,结果显示该方法可有效提高锅炉系统的响应速度和抗干扰能力。文献[3]的作者采用模糊内模PID控制方法对锅炉炉温的控制过程进行了研究,结果显示该方法可有效改善锅炉系统的动态特性和静态特性。文献[4]的作者采用增量式PID矫正控制方法对锅炉的控制过程进行了研究,结果显示该方法可有效提高锅炉系统的抗干扰能力和稳定性。文献[5]的作者将BP神经网络PID控制器应用于锅炉温控中,结果显示该方法可有效提高锅炉系统的动态性能和安全性。目前,对PID串级控制系统的参数进行定量计算和研究的较少<sup>[2]</sup>;为此,本文针对工业用锅炉的物料出口温度具有大滞后的特点,设计了一种PID-PID串级控制系统,并通过定量计算和仿真实验验证了该控制系统的有效性。

## 1 PID-PID串级控制系统的设计及其性能分析

### 1.1 PID-PID串级控制系统的设计

本文设计的PID-PID串级控制系统的结构如图1所示。该控制器的主对象是管壁和原料;主被控量是原料的出口温度,用 $c_1$ 表示;副对象是炉膛;副被控量是炉膛温度,用 $c_2$ 表示;炉温控制系统的一次扰动包括原料的流量(负荷)、入口温度等,用 $q_1$ 表示;二次扰动包括燃油的阀前压力、燃油的热值和炉膛送风等,用 $q_2$ 表示。由于主被控量的给定值 $r_1$ 和主被控量的输出值 $c_1$ 是固定值,因此可将该串级控制系统的外环看作是一个恒值控制系统;由于该串级控制系统的内环副被控量的给定值 $r_2$ 和副被控量的输出值 $c_2$ 都是由主控制器实时控制的,因此可将内环看作是一个随动系统。

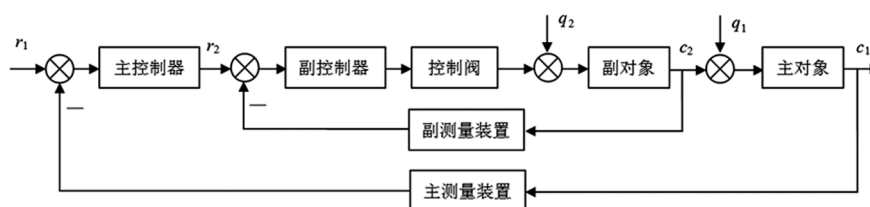


图1 PID-PID串级控制系统的结构

### 1.2 PID-PID串级控制系统的抗干扰性能分析

为了分析PID-PID串级控制系统的性能,本文假设:主控制器、副控制器的传递函数分别为 $G_{c1}(s) = K_{p1}(1 + \frac{1}{T_{p1}s} + T_{p2}s) = N_{p1}$ 和 $G_{c2}(s) = K_{p2}(1 + \frac{1}{T_{p3}s} + T_{p4}s) = N_{p2}$ ;主对象、副对象均为二阶滞后环节,其传递函数分别为 $G_{o1}(s) = \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}e^{-\tau_1 s}$ 和 $G_{o2}(s) = \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s + 1)(T_{o4}s + 1)}e^{-\tau_2 s}$ ;主测量装置、副测量装置的传递函数分别为 $G_{m1}(s) = K_{m1}$ 和 $G_{m2}(s) = K_{m2}$ ;控制阀的传递函数为 $G_v(s) = K_v$ 。

锅炉炉温控制系统的单回路PID控制系统的结构如图2所示。本文假设:单回路PID控制器的传递函数为 $G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_{p5}s} + T_{p6}s) = N_p$ ;主对象、副对象均为二阶滞后环节,其传递函数分别为 $G_{o1}(s) = \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}e^{-\tau_1 s}$ 和 $G_{o2}(s) = \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s + 1)(T_{o4}s + 1)}e^{-\tau_2 s}$ ;测量装置的传递函数为 $G_m(s) = K_m = K_{m1}$ ;控制阀的传递函数为 $G_v(s) = K_v$ 。

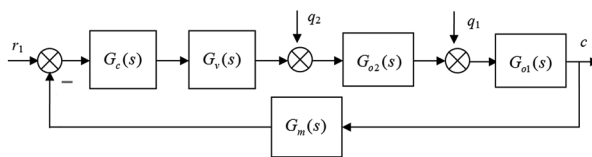


图 2 单回路 PID 控制系统的结构

对单回路 PID 控制系统(图 2 所示)进行静态分析可得,  $c_1$  对一次扰动  $q_1$  和  $c_1$  对二次扰动  $q_2$  的闭环传递函数分别为:

$$\frac{c_1}{q_1} = \frac{G_{o1}(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_{o1}(s)G_{o2}(s)G_m(s)}, \quad (1)$$

$$\frac{c_1}{q_2} = \frac{G_{o1}(s)G_{o2}(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_{o1}(s)G_{o2}(s)G_m(s)}. \quad (2)$$

将  $G_c(s)$ 、 $G_{o1}(s)$ 、 $G_{o2}(s)$ 、 $G_m(s)$  和  $G_v(s)$  的传递函数分别代入式(1)和式(2)可得:

$$\frac{c_1}{q_1} = \frac{\frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)}e^{-\tau_1 s}}{1 + N_p K_v K_m \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s}}, \quad (3)$$

$$\frac{c_1}{q_2} = \frac{\frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s}}{1 + N_p K_v K_m + \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s}}. \quad (4)$$

对 PID-PID 串级控制系统(图 1 所示)进行静态分析可得,  $c_1$  对一次扰动  $q_1$  和  $c_1$  对二次扰动  $q_2$  的闭环传递函数分别为:

$$\frac{c_1}{q_1} = \frac{G_{o1}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{o2}(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{o1}(s)G_{o2}(s)G_{m1}(s)}, \quad (5)$$

$$\frac{c_1}{q_2} = \frac{G_{o1}(s)G_{o2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{o2}(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{o1}(s)G_{o2}(s)G_{m1}(s)}. \quad (6)$$

将  $G_{c1}(s)$ 、 $G_{c2}(s)$ 、 $G_{o1}(s)$ 、 $G_{o2}(s)$ 、 $G_{m1}(s)$ 、 $G_{m2}(s)$  和  $G_v(s)$  的传递函数表达式分别代入式(5)和(6)可得:

$$\frac{c_1}{q_1} = \left( \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} e^{-\tau_1 s} \right) / \left( 1 + N_{p2} K_v K_{m2} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-\tau_2 s} + N_{p1} N_{p2} K_v K_{m1} \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s} \right), \quad (7)$$

$$\frac{c_1}{q_2} = \left( \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s} \right) / \left( 1 + N_{p2} K_v K_{m2} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-\tau_2 s} + N_{p1} N_{p2} K_v K_{m1} + \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)} \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)(T_{o4}s+1)} e^{-(\tau_1+\tau_2)s} \right). \quad (8)$$

对比式(3)和式(7)的分母以及式(4)和式(8)的分母可知, PID-PID 串级控制系统抗一次扰动和二次扰动的能力显著优于单回路 PID 控制系统. 再对比式(8)和式(7)的值(式(8)的值小于式(7)的值)可知, PID-PID 串级控制系统抗二次扰动的能力显著优于抗一次扰动的能力.

### 1.3 PID-PID 串级控制系统的响应速度分析

为便于分析 PID-PID 串级控制系统的响应速度, 本文用时间常数较大的惯性环节分别代替  $G_{o1}(s)$  和  $G_{o2}(s)$ , 于是有: 当  $T_{o1} > T_{o2}$  时,  $G_{o1}(s) \approx \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s+1)}$ ; 当  $T_{o3} > T_{o4}$  时,  $G_{o2}(s) \approx \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s+1)}$ . 由

此再根据图1计算可得,副回路的闭环传递函数为:

$$\frac{c_2}{r_2} = \left( \frac{N_{p2} K_v K_{o2}}{T_{o3}s + 1} \right) / \left( 1 + \frac{N_{p2} K_v K_{o2} K_{m2}}{T_{o3}s + 1} \right) = \frac{N_{p2} K_v K_{o2}}{1 + T_{o3}s + N_{p2} K_v K_{o2} K_{m2}} = \frac{K_1}{T_1 s + 1}. \quad (9)$$

其中  $K_1 = \frac{N_{p2} K_v K_{o2}}{1 + N_{p2} K_v K_{o2} K_{m2}}$ ,  $T_1 = \frac{T_{o3}}{1 + N_{p2} K_v K_{o2} K_{m2}}$ . 在式(9)中,因  $K_{m2} \geq 1$ ,  $1 + N_{p2} K_v K_{o2} K_{m2} > 1$ ,

所以有  $K_1 < K_{o2}$ ,  $T_1 < T_{o3}$ . 由于副对象(传递函数为  $G_{o2}(s) \approx \frac{K_{o2}}{T_{o3}s + 1}$ )的等效时间常数为  $T_{o3}$ ,而式(9)

副回路的等效时间常数为  $T_1$  ( $T_1 < T_{o3}$ ), 因此可知PID-PID串级控制系统的响应速度得到了提高.

#### 1.4 PID-PID串级控制系统的稳定性分析

假设PID-PID串级控制系统的副回路测量装置的传递函数为  $G_{m2} = K_{m2} = 1$ , 副回路的开环传递函数为  $G_{2o}(s) = G_{c2}(s)G_v(s)G_{o2}(s)$ , 闭环传递函数为  $G_{2c}(s) = \frac{G_{2o}(s)}{1 + G_{2o}(s)}$ ,  $G_{2c}(s)$  的频率特性为

$$G_{2c}(j\omega) = \frac{G_{2o}(j\omega)}{1 + G_{2o}(j\omega)}, \arctan[G_{2c}(j\omega)] = \varphi_{2c}, \arctan[G_{2o}(j\omega)] = \varphi_{2o}, \arctan[1 + G_{2o}(j\omega)] = \varphi_2.$$

由此根据复数运算法则(两个复数相除、辐角相减)可知,  $\varphi_{2c} = \varphi_{2o} - \varphi_2$ . 由于  $\varphi_{2o}$  和  $\varphi_2$  均为负值, 因此  $\varphi_{2c} > \varphi_{2o}$ , 即  $|\varphi_{2c}| < |\varphi_{2o}|$ . 由此可知, 与单回路控制系统相比, 串级控制系统可以更好地改善闭环系统的相位滞后问题, 即与单回路控制系统相比, 串级控制系统能更好地提高系统的稳定性.

#### 1.5 工作频率的分析

假设单回路PID控制系统各部分的传递函数取值和PID-PID串级控制系统各部分的传递函数取值与1.2中的取值相同. 为便于分析, 本文用时间常数较大的惯性环节分别代替  $G_{o1}(s)$  和  $G_{o2}(s)$ , 于是有:

当  $T_{o1} > T_{o2}$  时,  $G_{o1}(s) \approx \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s + 1)}$ ; 当  $T_{o3} > T_{o4}$  时,  $G_{o2}(s) \approx \frac{K_{o2}}{(T_{o3}s + 1)}$ ,  $G_m(s) = 1$ ,  $G_{m2}(s) = 1$ .

由此根据单回路PID控制系统(见图2)计算得到的系统的闭环传递函数为:

$$\frac{c_1}{r_1} = \left( \frac{K_{o1} K_{o2} K_v N_p}{(T_{o1}s + 1)(T_{o3}s + 1)} \right) / \left( 1 + \frac{K_{o1} K_{o2} K_v N_p}{(T_{o1}s + 1)(T_{o3}s + 1)} \right) = \frac{K_{o1} K_{o2} K_v N_p}{T_{o1} T_{o3} s^2 + (T_{o1} + T_{o3})s + K_{o1} K_{o2} K_v N_p + 1}. \quad (10)$$

典型二阶系统的闭环传递函数<sup>[6]</sup>为:

$$\Phi(s) = \frac{K_1}{s^2 + 2\xi_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2}. \quad (11)$$

对比式(10)与式(11)可知, 单回路PID控制系统的闭环传递函数分母中  $s$  项的系数为  $2\xi_1 \omega_{n1} = \frac{T_{o1} + T_{o3}}{T_{o1} T_{o3}}$ . 式中  $\xi_1$  是阻尼比,  $\omega_{n1}$  是固有角频率,  $\omega_1$  是工作频率 ( $\omega_1 = \sqrt{1 - \xi_1^2} \omega_{n1}$ ). 由图1计算得到的

单回路PID控制系统的闭环传递函数为:

$$\frac{c_1}{r_1} = \left( \frac{K_{o1} K_2 N_{p1}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o3}s + 1)} \right) / \left( 1 + \frac{K_{o1} K_2 N_{p1}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o3}s + 1)} \right) = \frac{K_{o1} K_2 N_{p1}}{T_{o1} T_2 s^2 + (T_{o1} + T_2)s + K_{o1} K_2 N_{p1} + 1}. \quad (12)$$

其中  $T_2 = \frac{T_{o3}}{1 + K_{o2} K_v N_{p2}}$ ,  $K_2 = \frac{K_{o2} K_v N_{p2}}{1 + K_{o2} K_v N_{p2}}$ . 对比式(12)与式(11)可知, PID-PID串级控制系统的

闭环传递函数分母中  $s$  项的系数为  $2\xi_{1c} \omega_{n1c} = \frac{T_{o1} + T_2}{T_{o1} T_2}$ . 式中  $\xi_{1c}$  是阻尼比,  $\omega_{n1c}$  是固有角频率,  $\omega_c$  是工

作频率 ( $\omega_c = \sqrt{1 - \xi_{1c}^2} \omega_{n1c}$ ). 假设单回路PID控制系统与PID-PID串级控制系统的阻尼比相同, 即二者

的稳定性相同,则有:

$$\frac{\omega_c}{\omega_1} = \left( \frac{T_{o1} + T_2}{T_{o1} T_2} \right) / \left( \frac{T_{o1} + T_{o3}}{T_{o1} T_{o3}} \right) = \left( 1 + \frac{T_{o1}}{T_2} \right) / \left( 1 + \frac{T_{o1}}{T_{o3}} \right). \quad (13)$$

由于  $T_2 < T_{o3}$ , 所以有  $\omega_c > \omega_1$ . 该结果说明 PID-PID 串级控制系统的工作频率高于单回路 PID 控制系统, 且当 PID-PID 串级控制系统中的主、副对象的特性保持一定时, 副控制器的增益越大系统的工作频率提高得越明显.

## 2 锅炉系统运行的温度数据采集和锅炉炉温控制系统的建模

### 2.1 温度数据采集

为了不干扰系统的正常运行, 本文采用较大幅度的矩形脉冲作为输入信号以求得阶跃响应<sup>[7]</sup>, 如图 3(a) 所示. 矩形脉冲信号由两个阶跃信号叠加而成<sup>[8]</sup>, 如图 3(b) 所示. 当施加两个阶跃信号(在  $t=0$  处输入阶跃信号  $x_1(t)$ , 在  $t=t_0$  处输入与  $x_1(t)$  大小相同、方向相反的信号  $x_2(t)$  ( $x_2(t) = -x_1(t-t_0)$ )) 时, 矩形脉冲信号可以表示为  $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ . 其中  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的阶跃响应分别为  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$ . 于是根据延迟定理可得,  $y_2(t) = -y_1(t-t_0)$ . 再根据叠加原理可知, 矩形脉冲响应  $y(t)$  可表示为  $y_1(t)$  与  $y_2(t)$  之和, 即  $y(t) = y_1(t) + y_2(t) = y_1(t) - y_1(t-t_0)$ . 对该式进行移项可得矩形脉冲的阶跃响应为  $y_1(t) = y(t) + y_1(t-t_0)$ .

为求解阶跃响应  $y_1(t)$ , 本文将响应曲线按时间间隔  $t_0$  进行了等分, 第 1 区间为  $t \leq t_0$ , 即  $y_1(t) = y(t)$ ,  $y_1(t_0) = y(t_0)$ ; 第 2 区间为  $y_1(t) = y(t) + y_1(t-t_0)$ , 即  $y_1(2t_0) = y(2t_0) + y_1(t_0)$ ; 第 3 区间为  $y_1(3t_0) = y(3t_0) + y_1(2t_0)$ . 按上述类推, 即可得上述计算区间的阶跃响应曲线(由上述区间的脉冲响应曲线与前一区间的阶跃响应曲线叠加而成), 如图 3(c) 所示.

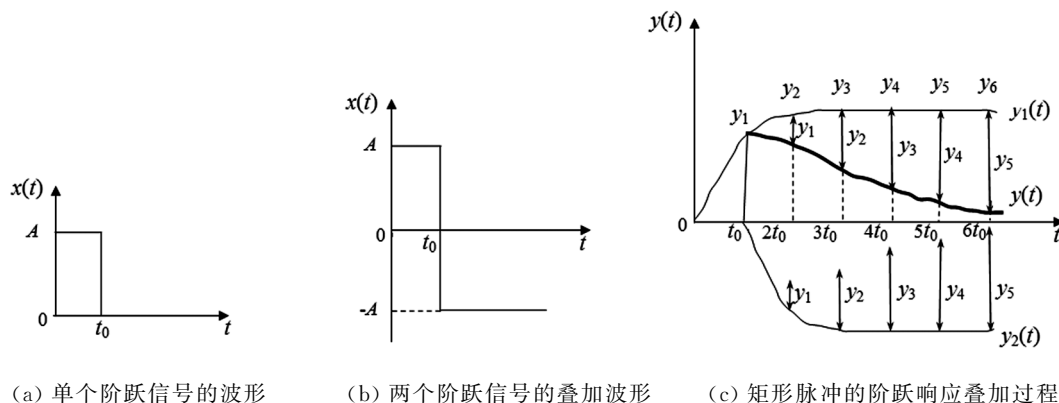


图 3 采集温度数据时阶跃响应的原理示意图

### 2.2 锅炉炉温控制系统的建模

由文献[9-11]可知, 锅炉炉温控制系统可等效为广义被控对象. 本文采用 Matlab 建模. 建模时, 选取 CWNS0.7-95/70-Y、Q 锅炉炉温控制系统, 采集温度时间为 2022-04-09 上午 9:00—9:30, 采集时间、温度的方法按 2.1 中的方法进行. 当输入的幅值  $A$  为 50%, 矩形脉冲宽度 ( $\Delta t = t_0$ ) 为 10 min 时, 锅炉的初始温度为  $0^\circ\text{C}$ ; 80 min 后, 锅炉温度上升至  $72.4^\circ\text{C}$ . 当  $y < 0.01$  时, 输出值近似为 0, 延迟时间常数  $\tau_1$  为 62 s. 由此可得锅炉炉温控制系统的增益为  $K_{o1} = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta x(t)} = \frac{72.4 - 0}{50\%} = 144.8$ .

由于考虑延迟部分会使系统相位产生延迟, 因此本文只计算了系统响应中除延迟部分以外的传递函数, 即只将系统响应转化为了无量纲形式; 同时在输出中任意选取了 2 个点(分别为  $y_1(t) = 0.4$ 、 $y_2(t) = 0.8$ ), 这 2 个点对应的采集时刻分别为  $t_1 = 137.4$  s、 $t_2 = 298.6$  s. 计算得  $t_1/t_2 = 0.46$ . 由于锅炉

炉温控制系统的主对象可等效为二阶环节和延迟环节,因此此时的传递函数可表示为  $G_{o1}(s) = \frac{K_{o1}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)} e^{-\tau_1 s}$ , 其中  $T_{o1}$  和  $T_{o2}$  分别是惯性环节的时间常数 ( $T_{o1} = T_{o2} = (t_1 + t_2)/4.36 \approx 100$ ). 将该结果代入上式可得锅炉炉温控制系统主对象的广义传递函数为:

$$G_{o1}(s) = \frac{144.8}{(100s + 1)^2} e^{-62s}. \quad (14)$$

同理,可得锅炉炉温控制系统副对象的传递函数为:

$$G_{o2}(s) = \frac{94.2}{(84s + 1)^2} e^{-46s}. \quad (15)$$

### 3 实验结果与分析

某锅炉系统如图4所示.系统中主被控量是原料的出口温度,副被控量是炉膛温度.应用PID-PID串级控制系统时,主、副对象的传递函数分别采用如式(14)和式(15)所示的函数,主、副控制器的传递函数分别为:

$$G_{c1}(s) = K_{p1} \left( 1 + \frac{1}{T_{p1}s} + T_{p2}s \right), \quad (16)$$

$$G_{c2}(s) = K_{p2} \left( 1 + \frac{1}{T_{p3}s} + T_{p4}s \right). \quad (17)$$

实验以CX-Programmer、Windows为平台.单回路控制系统的Simulink模型如图5所示.本文采用Ziegler-Nichols方法<sup>[12]</sup>整定单回路控制系统的PID参数.经整定,得单回路PID控制器的比例系数、积分系数、微分系数分别为0.000044、0.0000002、0.003.由所得参数得到的系统的阶跃响应输出如图6所示,系统在二次扰动作用下的误差输出如图7所示,系统在二次扰动作用下的误差输出如图8所示.



图4 锅炉系统现场运行图

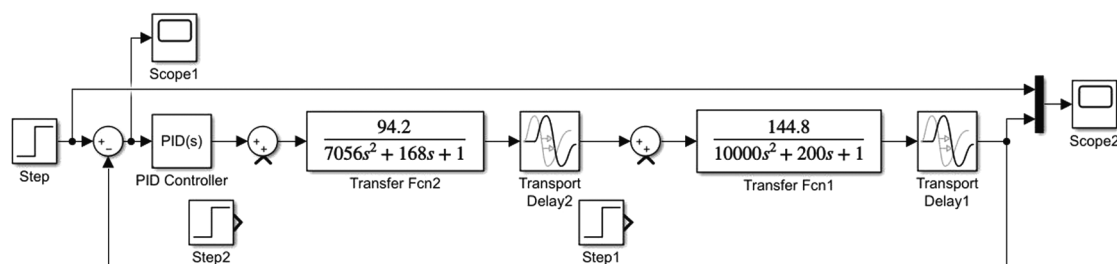


图5 单回路PID控制系统的Simulink模型

PID-PID串级控制系统的Simulink模型如图9所示.本文采用一步法整定PID-PID串级控制器的PID参数.经整定,得主PID控制器的比例系数、积分系数、微分系数分别为0.0065、0.00004、0.22,副PID控制器的比例系数、积分系数、微分系数分别为0.05、0.0007、2.5.由所得参数得到的PID-PID串级控制系统的阶跃响应输出如图10所示,系统在二次扰动作用下的误差输出如图11所示,系统在二次扰动作用下的误差输出如图12所示.

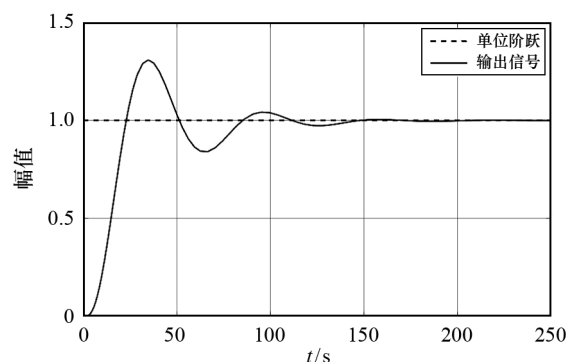


图6 单回路PID控制系统的阶跃响应输出



单回路 PID 控制系统和 PID-PID 串级控制系统的衰减率、调节时间、残偏差、二次阶跃扰动下的系统短期最大偏差、一次阶跃扰动下的系统短期最大偏差如表 1 所示。

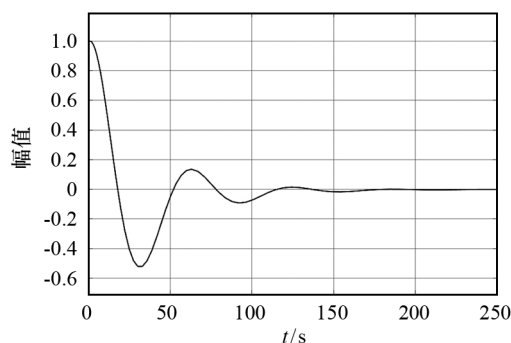


图 7 单回路 PID 控制系统在一次扰动作用下的误差输出

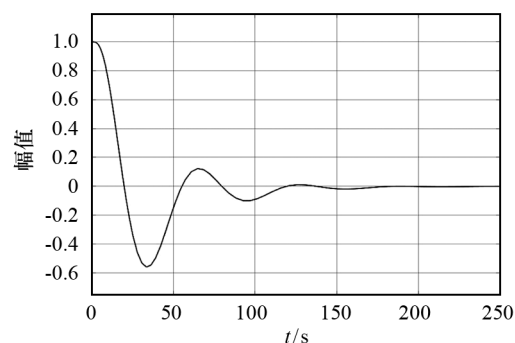


图 8 单回路 PID 控制系统在二次扰动作用下的误差输出

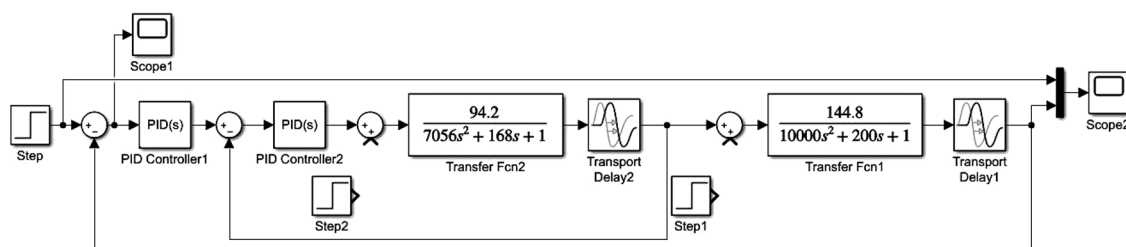


图 9 PID-PID 串级控制系统的 Simulink 模型

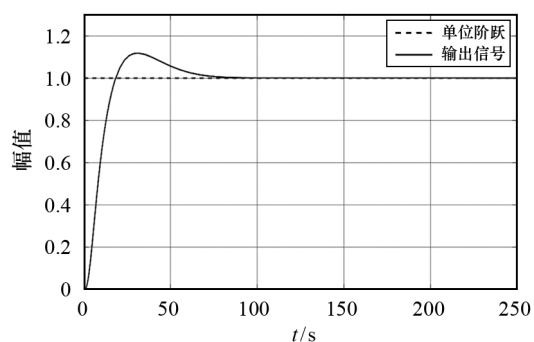


图 10 PID-PID 串级控制系统的阶跃响应输出

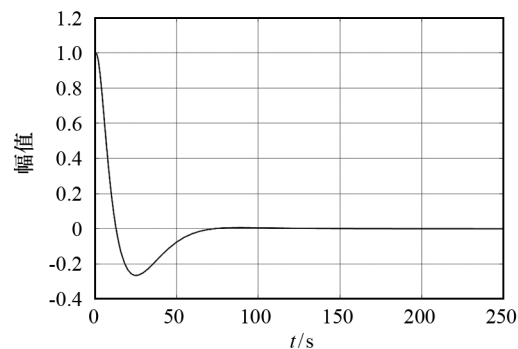


图 11 PID-PID 串级控制系统在一次扰动作用下的误差输出

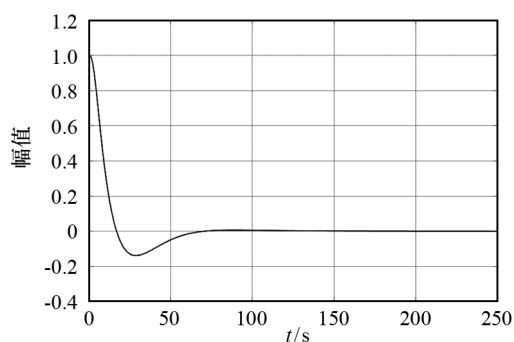


图 12 PID-PID 串级控制系统在二次扰动作用下的误差输出

表 1 单回路 PID 控制和 PID-PID 串级控制时系统的输出指标

输出指标	单回路 PID 控制	PID-PID 串级控制
衰减率	0.75	0.75
调节时间/s	210	90
残偏差	0.21	0.03
二次阶跃扰动下的系统短期最大偏差	0.35	0.09
一次阶跃扰动下的系统短期最大偏差	0.58	0.13

对比图6和图10可知,PID-PID串级控制响应速度(调节时间为90 s,超调量为9%)显著优于单回路PID控制响应速度(调节时间为210 s,超调量为38%),由此表明PID-PID串级控制系统的动态性能显著优于单回路PID控制系统。

对比图7和图11可知,PID-PID串级控制系统在一次扰动作用下其误差输出达到0的时间(70 s)显著低于单回路PID控制系统(170 s),且达到0之前无振荡,而单回路PID控制系统则出现多次振荡。对比图6和图10可知,PID-PID串级控制系统在二次扰动作用下其误差输出达到0的时间(60 s)显著低于单回路PID控制系统(170 s),且达到0之前无振荡,而单回路PID控制系统则出现多次振荡。这表明,PID-PID串级控制系统具有更好的抗干扰性和稳定性。

由表1中的数据也可以看出,PID-PID串级控制系统的动态性能显著优于单回路PID控制系统,且其系统的抗二次扰动能力也显著优于其抗一次扰动能力。该结果进一步说明,PID-PID串级控制系统的性能显著优于单回路PID控制系统。

## 4 结论

实验表明,本文提出的PID-PID串级控制系统的抗干扰性能、响应速度、稳定性和工作频率比单回路PID控制系统分别提高了24%、32%、37%、41%,同时PID-PID串级控制系统的抗二次扰动能力也显著优于其抗一次扰动能力。此外,本文提出的控制方法还具有简单和易于实现的优点,因此本文的研究结果可为锅炉炉温控制系统的设计提供参考。在今后的研究中,我们将探讨智能优化算法在PID参数整定中的应用,以此进一步提高锅炉炉温的控制效果。

## 参考文献:

- [1] 张永轶. 基于模糊PID原理的时效炉温控系统研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [2] 徐峥. 电加热炉温度系统的控制方法研究与应用[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2020.
- [3] 井海明. 回转炉炉温控制算法的研究[D]. 天津:天津工业大学,2017.
- [4] 宋安然,周德廉,刘艳梨. 基于增量式PID控制的锅炉温系统设计[J]. 电子测量技术,2021,44(6):11-16.
- [5] 任有志,乔松,孙继春,等. BP神经网络PID控制器在热油锅炉温控中的应用[J]. 电气传动,2020,50(4):81-84.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 7版. 北京:科学出版社,2019:156-167.
- [7] 张燕红. 计算机控制技术[M]. 3版. 南京:东南大学出版社,2020:68-75.
- [8] 薄翠梅. 过程控制[M]. 北京:机械工业出版社,2021:102-124.
- [9] 刘金琨. 智能控制[M]. 5版. 北京:电子工业出版社,2021:95-105.
- [10] 边志坚. 模糊PID在铸锭炉温控系统中的应用研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2015.
- [11] 张保龙,王清珍. 一种大型电阻炉温度智能控制系统设计[J]. 铸造技术,2016,37(6):1280-1282.
- [12] 郭伟,乔东东,李涛,等. CFB锅炉床温Laguerre函数模型分数阶PID预测控制[J]. 热力发电,2018,47(6):121-126.