

设计题目：冷焦溢流水温度控制系统的设计

1) 设计任务

工艺背景：在石油炼制过程中，延迟焦化单元产生高温冷焦溢流水，其温度可达 170°C ，且流量不稳定。为防止后续工艺受阻，需将此水与冷焦冷水混合并通过换热器降温至 85°C 左右，以确保油水能在储罐中有效分层，同时避免蜡油凝结影响管道流通。

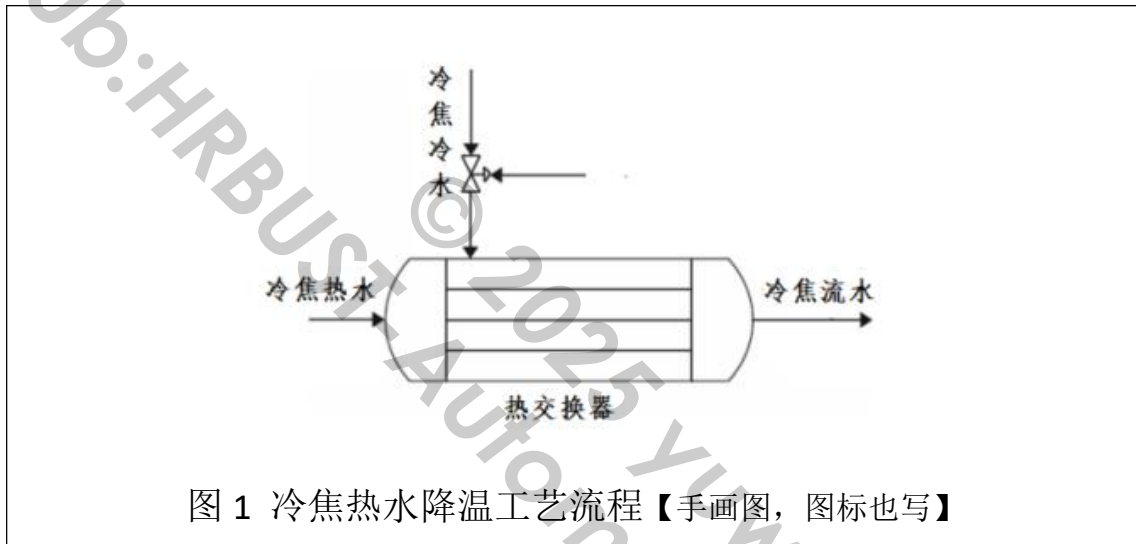


图 1 冷焦热水降温工艺流程【手画图，图标也写】

工业要求：混合后的冷焦流水温度需稳定控制在 85°C ，上下波动不超过 4°C 。

2) 具体要求

- ①对工艺原理和流程进行分析，根据被控对象、调节阀的工艺流程与具体结构，给出其近似的数学模型；
- ②试分别采用单回路、串级、前馈-反馈三种控制方案来设计系统，并画出相应自动化仪表及被控对象的动态特性，采用工程整定的方法确定调节器的参数，并通过 **matlab** 仿真对比分析三种控制方案的跟踪性能和抗干扰性能；
- ④对于前馈-反馈控制方案，可以进一步探讨不同形式的前馈控制器对系统性能的影响。
- ⑤总结不同控制方案对系统性能的影响。

一、建立被控过程的数学模型

1.1 任务分析

冷焦溢流水温度控制系统是石油化工延迟焦化单元中的关键部分，其任务是对冷焦热水进行有效的温度调控，确保处理后的水温稳定在 85°C 左右，以满足后续工艺的需求。系统的主要输入变量涵盖冷焦热水的流量与温度，以及用于冷却的循环水流量。输出变量则集中于混合后冷焦溢流水的实际温度。鉴于冷焦热水流量与温度的不稳定性，控制系统必须具备应对大惯性、纯滞后和时变参数的能力。

鉴于系统具备如上的特点和要求，我们小组计划设计三种控制方案，来探究何种控制策略更适合本系统，并采用 matlab 仿真对比分析，最后得出最优控制方案。旨在确保温度控制的精准与稳定，从而优化整个冷焦溢流水处理工艺的效率 and 可靠性。

1.2 对象特性分析

我们假设采用管壳式换热器冷却过热的冷焦热水，循环冷却水 (50°C) 的来水量是稳定的，冷焦热水 (100°C 左右) 的来水量是随机的。在冷水来水管道上安装电动调节阀，经过换热器混合换热后的水温应该在 85°C 左右。

● 电动调节阀建模

这部分包括电动执行机构和阀体 2 个部分。温度控制器输出提供 $4 \sim 20\text{mA}$ 的电流信号，电动调节阀接收此信号之后将其转化为相应的阀门开度，从而控制阀门截流面积，调节流量。

调节阀静态特性: $K = dq/di$ 。其中， q 是被控介质流过阀门的相对流量。调节阀动态特性: $G(S) = \frac{Ke^{-\tau s}}{TS+1}$ 。

我们查阅相关文献，得到了在单回路反馈控制模型下的实验数据：

当阀门开度为 40% 时，调节阀的操作时间 t_1 为 14.6s，冷水流量为 36.7 mL，控制器输出电流为 10.1 mA；当阀门开度为 55% 时，调节阀的操作时间 t_2 为 25.4s，冷水流量为 51.1mL，控制器输出电流为 11.9 mA。代入 τ 、 T 、 K 的计算公式，计算过程如下：

$$\tau = 2t_1 - t_2 = 2 \times 14.6 - 25.4 = 3.8 \rightarrow 4$$

$$T_1 = t_1, T_2 = t_2, T = (T_1 + T_2)/2 = (14.6 + 25.4)/2 = 20$$

$$K = \frac{\Delta q}{\Delta i} = \frac{(51.1 - 36.7)}{(11.9 - 10.1)} = 8$$

可得到调节阀的数学模型 $G(S) = \frac{8e^{-4s}}{20S+1}$ 。

● 被控对象建模

管路中混合水温度的动态变化，即与循环冷却水混合后的冷焦热水出口温度，

可用一阶惯性环节加上一个纯滞后来描述其特性，即 $W(S) = \frac{K_1 e^{-\tau_1 S}}{T_1 S + 1}$ 。已知相关的实验数据：

任意时间 t_0 为 14.6 s，冷焦冷却水输入流量为 36.7 mL，其温度为 47.4 °C；任意时间 t_1 为 17.4 s，冷焦冷却水输入流量为 38.3 mL，其温度为 48.2 °C。计算得：

$$\tau_1 = 2t_1 - t_2 = 2 \times 14.6 - 17.4 = 11.8 \rightarrow 12$$

$$T_1' = t_1, T_2' = t_2, T_1 = (T_1' + T_2')/2 = (14.6 + 17.4)/2 = 16$$

$$K_1 = \frac{\Delta q}{\Delta i} = \frac{(38.3 - 36.7)}{(48.2 - 47.4)} = 2$$

可得到混合水的温度特性为 $G(S) = \frac{2e^{-12s}}{16S+1}$ 。

● 扰动通道建模

系统的扰动因素主要是冷焦热水的流量，由于过程特性的测量精度不高，所以无法准确地得到扰动通道的特性传函 $G_f(S)$ ，故这里只能根据参考文献给出一个粗略的扰动通道传函： $G_f(S) = \frac{18e^{-12s}}{9S+1}$ 。

二、单回路控制方案的设计

(1) 控制参数与被控参数的选择

- 被控参数选择: 冷焦热水出口温度直接关系到后续工艺的顺利进行和产品质量, 过高或过低的温度都会影响油水分离效率和管道流通性, 因此选择与循环冷却水混合后的冷焦热水出口温度作为被控参数, 以确保温度稳定在设计 的 85°C 左右, 优化生产流程。
- 控制参数选择: 通过调节循环冷却水的流量, 可以在冷焦热水流量和温度波动时, 及时调整混合水温至目标值, 实现温度的有效控制, 同时它可以直接影响混合后冷焦热水的温度。故选择循环冷却水输入流量作为控制参数。

(2) 检测仪表的选择

在选择检测仪表时, 要注重其与工艺条件的匹配性, 兼顾精度、响应速度和系统兼容性, 以实现高效准确的温度控制。

综合考量工艺特性与控制需求, 我们了解到冷焦溢流水温度范围通常不超过 200°C , 宜选用热电阻温度计, 如铂电阻 PT100, 因为其在低温段有良好的线性和稳定性。为了减少引线电阻带来的误差, 采用四线制接法, 确保测量精度。

此外, 还应配备温度变送器, 将热电阻的电阻变化转换为标准的 $4-20\text{mA}$ 电信号, 便于远距离传输和控制系统接收。故选用 DDZ-III 型温度变送器, 考虑到冷焦溢流水温度的快速变化, 所选变送器应具备快速响应特性, 且时间常数应小于控制通道时间常数的 $1/10$, 以减小测量滞后, 提高系统整体控制性能。

同时, 在具体的工艺安装时, 需注意检测点的合理布局, 以最小化安装引起的测量滞后。

(3) 调节阀的选择

① 选择调节阀的口径大小

调节阀的口径大小直接影响到系统的控制性能和稳定性, 需根据实际工况设定, 一般考虑工作开度范围、流通能力、系统动态响应等因素。

调节阀的开度应保持在 15% 到 85% 之间; 调节阀的流通能力 (C 值) 需根据其所在管线的最大流量以及调节阀两端的压降来计算; 在冷焦溢流水系统中, 来水量和温度具有显著的波动性, 因此选择的调节阀口径还应考虑到系统的动态响应需求, 确保调节阀能够快速响应流量和温度的变化。

基于以上考虑, 调节阀口径的选择范围可以根据系统的最大预期流量和所需压降来确定。比如, 如果系统的最大预期流量为 x 立方米/小时, 调节阀两端的最大压降为 y 帕斯卡, 那么可以通过查阅调节阀制造商的数据表或使用行业标准公式 (如 C_v 值计算) 来估算所需的调节阀口径。

最终, 选择的调节阀口径应确保在正常操作条件下, 调节阀的开度处于 15% 到 85% 之间, 同时能够处理系统可能出现的最大流量, 并留有一定的安全裕量。这有助于维持系统的稳定性和效率, 同时减少维护和运营成本。

② 选择合适的流量特性

在冷焦溢流水温度控制系统中, 由于冷焦热水的温度和流量变化是非线性的, 而对数流量特性可以更好地适应这种非线性。

并且对数流量特性有助于维持系统的稳定性，因为它减少了因过程非线性造成的控制波动，使控制系统的响应更加平滑。在具有非线性特性的系统中，对数流量特性可以使控制系统的开环放大系数保持相对恒定，这对于保持良好的控制性能至关重要。

虽然抛物线流量特性在某些非线性系统中也有应用，但它不如对数流量特性通用和适应性强。对数流量特性在广泛的应用场景中表现出更好的控制性能。

所以最后选择对数流量特性的调节阀，这种选择是基于系统特性的深入理解和对各种流量特性优势的综合考量。

③选择合适的调节阀气开和气关形式

在冷焦溢流水温度控制系统中，考虑当气源中断发生时的情况，此时调节阀应该要关闭，这样可以防止过多的冷却水进入系统，避免冷焦热水温度过低，影响油水分离效率和管道流通性。因此应该选择气开式调节阀。

④选择合适的调节阀结构形式

冷焦溢流水是一种含焦炭粉末、重油和挥发性酚类杂质的混合液体，具有较高的温度（最高可达 170°C ）和复杂的成分。因此，应选择能够承受高温、高粘度和耐磨蚀的调节阀结构。

而角阀适用于高压降、高粘度、含悬浮物或颗粒状物质的场合。它的特殊结构有助于防止固体颗粒在阀体内沉积，减少磨损和堵塞风险，适合冷焦溢流水的特性。

（4）调节器正反作用的选择

由于冷焦溢流水温度控制系统存在非线性、滞后和负载变化，同时冷焦热水进口流量的变化将直接影响其出口温度。所以引入 PI 反馈调节，以实现系统无干扰稳定运行。再根据系统构成负反馈的原则，确定调节器正/反作用方向：

调节阀：气开式 $\rightarrow K_v > 0$

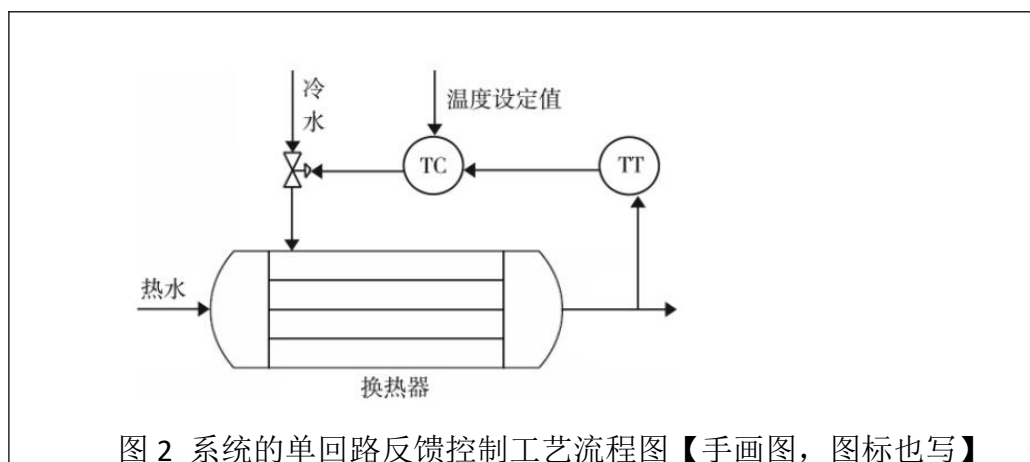
测量变送器：一般 $K_m > 0$

被控过程：当通过调节阀输入的冷焦冷水流量增加时，冷焦流水的温度降低，故静态放大系数 $K_0 < 0$

因此，为保证负反馈即 $K_0 K_m K_v K_c > 0$ ，故要求调节器 $K_c < 0$ ，即正作用。

（5）工艺流程图和控制方框图

根据以上设计过程，可以得到系统的工艺流程图如下：



进一步可以得到系统的结构框图：

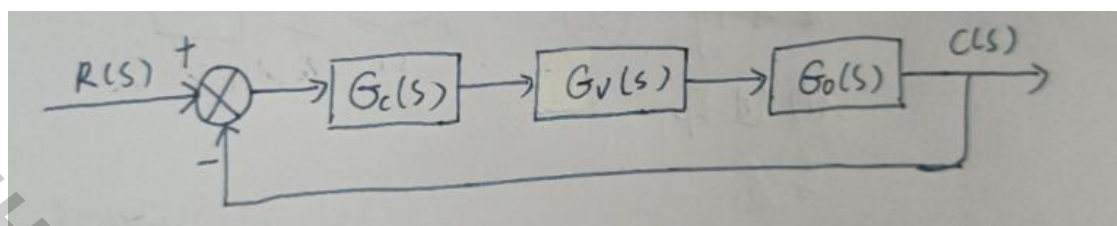


图 3 系统的单回路反馈控制结构框图【手画图，图标也写】

同时，结合上述控制方案的设计分析，可以得到各部分的选择结果，我们小组以表格的形式呈现了出来，如下表所示。

单回路控制系统的设计选择			
控制参数	与循环冷却水混合后的冷焦热水出口温度	被控参数	循环冷却水输入流量
检测装置	铂热电阻温度计	变送器	DDZ-III型温度变送器
调节阀	气开式角阀	调节器	正作用，PID控制

三、串级控制方案的设计

(1) 主、副参数的选择

冷焦溢流水温度控制系统具备典型的非线性、滞后和负载变化大的特点，这些特性使得单回路控制难以达到理想的控制效果。具体表现为：

非线性：冷焦溢流水的温度控制受多种因素影响，如水的初始温度、冷却介质的温度和流量、环境温度等，这些因素的非线性变化会导致控制过程复杂。

滞后：热交换过程存在时间滞后，从控制动作到观察到温度变化有一定延迟。

负载变化大：冷焦溢流水的流量和温度可能因生产条件的变化而大幅波动，增加了控制难度。

为应对上述挑战，采用串级控制系统是一个有效策略。串级控制通过设置一个快速响应的副回路来改善主回路的控制性能。

选择冷焦溢流水的出口温度作为主被控参数，这是直接反映工艺要求的关键参数，必须严格控制在目标范围。选择冷焦热水进口流量作为副被控参数，选择这一参数是因为它对主参数（冷焦流水温度）有直接影响，且相对于主参数来说，其响应速度快，滞后时间短。此时冷焦热水进口流量对出口温度的影响主要由副调节器构成的副回路来克服。

(2) 主、副调节器控制规律的选择

主调节器控制规律选择

目标：主调节器的目标是维持冷焦溢流水的出口温度稳定在一个设定值附近，这是工艺操作的主要指标，对控制质量的要求很高。

选择：选择 PI 控制规律，主要是为了确保冷焦溢流水的出口温度能够准确地维持在设定值，实现无静差控制，并能够克服容量滞后带来的影响。

副调节器控制规律选择

目标：副调节器的作用是通过快速调整冷焦热水进口流量，以保证主参数的控制质量。副参数的控制要求可能没有主参数那么严格，允许在一定范围内有余差。

选择：选择 P 控制规律，是因为副调节器需要快速响应主调节器的输出变化，通过快速调整冷焦热水进口流量来影响主参数，从而帮助主调节器更快地达到设定温度值。

(3) 主、副调节器正/反作用方式的选择

对于串级系统来说，主、副调节器中正、反作用方式的选择原则是使整个控制系统构成负反馈系统，即其主通道各环节放大系数的极性乘积必须为正值。其中各环节放大系数极性的规定与单回路系统相同。

首先确定副调节器的正/反作用方式。

在冷焦溢流水温度控制系统中，考虑当气源中断发生时的情况，此时调节阀应该要关闭，这样可以防止过多的冷却水进入系统，避免冷焦热水温度过低，影响油水分离效率和管道流通性。因此应该选择气开式调节阀。

①调节阀：从生产工艺安全出发，冷却水调节阀选用气开式，即一旦调节器损坏调节阀处于全关状态，以切断冷却水进入系统，避免冷焦热水温度过低，确保其设备安全，故调节阀的 K_v 为正。

②副过程的特性：当冷却水流量增加，这会冷焦热水进口流量减少，即副过程的放大系数 K_{01} 为负。

③副测量变送器：副测量变送器的极性通常为负，因为它反映了副参数的真实变化，即副测量变送器的放大倍数 K_{m1} 为正。

④副调节器：为了保证副回路构成负反馈，副调节器的放大系数 K_{c1} 也应为负，这意味着副调节器应选择正作用方式。

⑤主过程的特性：当冷焦热水进口流量减少，即副参数减少时，预期的主参数（冷焦溢流水出口温度）应该降低。故主过程的 K_{02} 为正。

⑥主测量变送器：主测量变送器的放大倍数 K_{m2} 一般为正。

⑦主调节器：为保证整个回路为负反馈，则主调节器放大系数 K_{c2} 应为负，即为正作用调节器。

主、副调节器的正/反作用方式正确性的检验：当冷焦热水出口温度升高时，主调节器输出应增大，即副调节器的给定值增大，所以副调节器的输出也增大，使调节阀开度变大。这样，进入换热器的冷却水会增加，从而使冷焦热水出口温度降低。

（4）工艺流程图和控制方框图

因此可以设计串级控制系统的工艺流程，如下图所示：

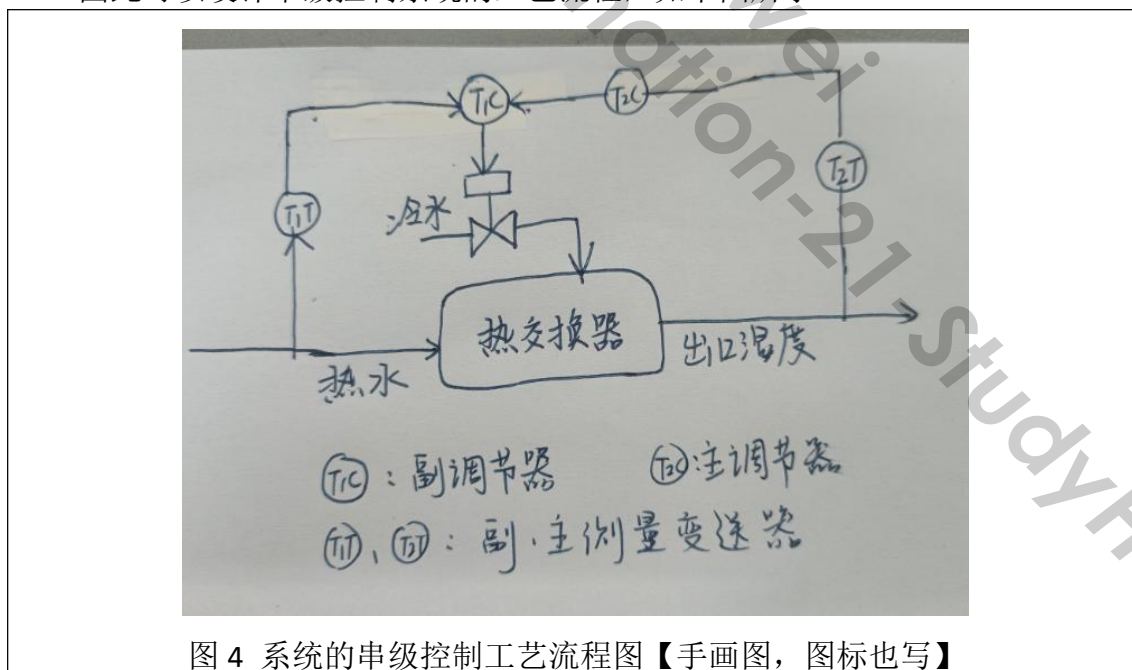


图 4 系统的串级控制工艺流程图【手画图，图标也写】

进一步可以得到系统的结构框图：

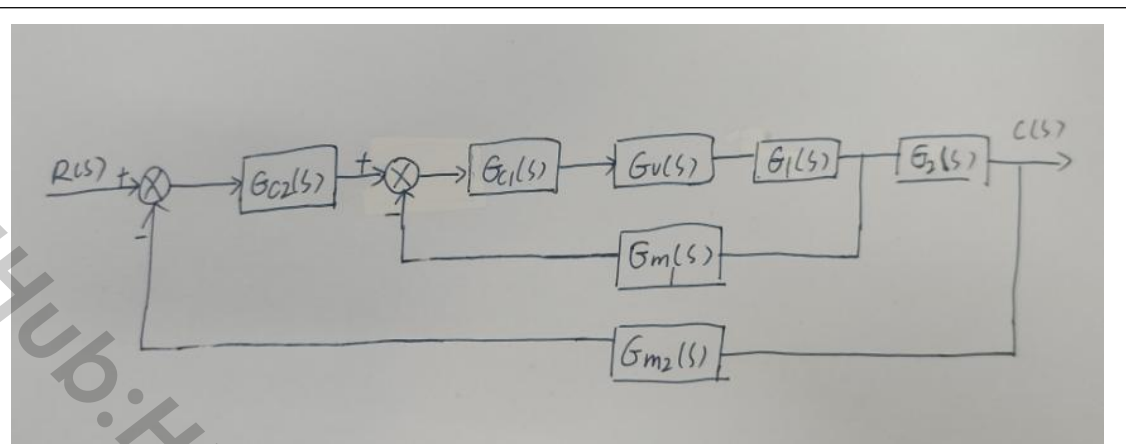


图 5 系统的串级控制结构框图【手画图，图标也写】

四、前馈-反馈控制方案的设计

（1）设计思路

在冷焦溢流水温度控制系统中，采用前馈-反馈复合控制方案，目的是为了改善控制质量，特别是应对冷焦热水来水量及其温度的不确定性。反馈控制确保系统在面对未知扰动时能够自我纠正，而前馈控制则提前对已知扰动做出反应，减少扰动对被控变量的影响。

（2）反馈控制通道设计

反馈控制是系统的基本组成部分，它基于被控参数（冷焦溢流水出口温度）与设定值之间的偏差进行控制。反馈控制通道由以下几个关键部分构成：

- ①温度检测点：位于换热器出口，用于实时测量冷焦溢流水的温度。
 - ②温度控制器 TC：接收温度检测点的信号，与设定温度值进行比较，生成控制信号。
 - ③调节阀：接收温度控制器 TC 的输出信号，调整开度，控制冷却水流量，进而影响冷焦溢流水的温度。
 - ④加法器：在复合控制系统中，用于将反馈控制信号与前馈控制信号相结合。
- 反馈控制通道的设计思路是，通过持续监控出口温度并与设定值比较，根据偏差调整冷却水流量，以维持温度稳定。这种闭环控制机制能够有效应对未预期的扰动，如冷却水温度的波动或冷却器效率的变化。

（3）前馈控制通道设计

前馈控制通道的目的是预先补偿已知扰动，减少其对被控参数的影响。在冷焦溢流水温度控制系统中，前馈控制主要针对冷焦热水的流量和温度变化。前馈控制通道由以下几个关键部分构成：

- ①流量检测：通过流量变送器 FT 实时监测冷焦热水的流量，作为前馈信号的一部分。
- ②前馈控制器：基于流量和温度的实时数据，前馈控制器计算出适当的补偿信号，以预估对冷却水流量的需求。
- ③加法器：将前馈控制器的输出与反馈控制器的输出合并，形成最终的控制信号，发送给调节阀。

前馈控制通道的设计思路是，利用对扰动的预测，提前调整冷却水流量，减少因冷焦热水流量和温度变化对出口温度造成的波动。这种开环控制机制能够快速响应已知扰动，减少系统响应时间。

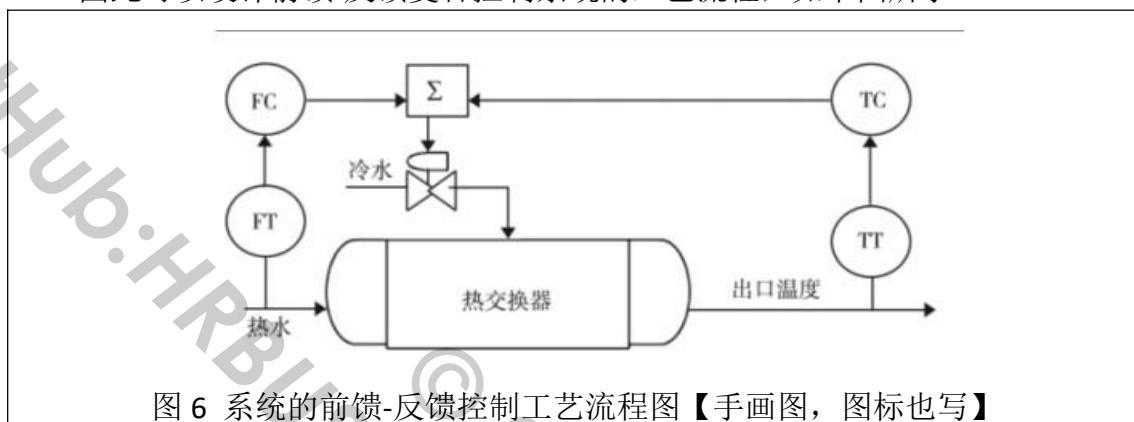
（4）实现与构成

在实际系统中，前馈-反馈复合控制方案由以下组件构成：

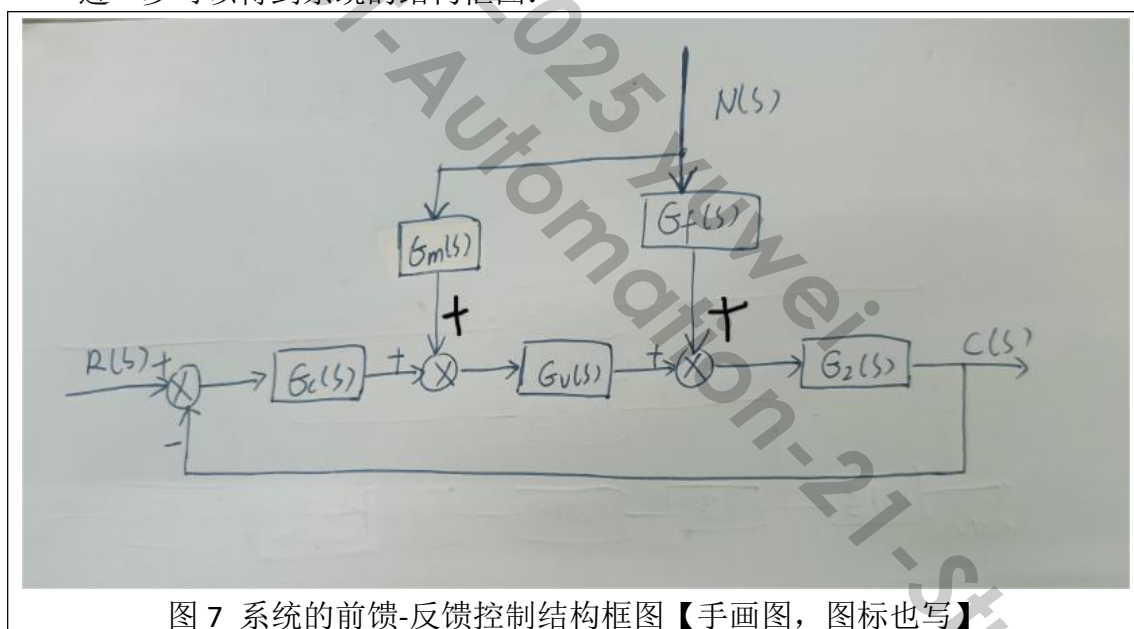
- ①温度传感器 TT：用于检测冷焦溢流水的温度。
- ②流量传感器 FT：用于检测冷焦热水的流量。
- ③温度控制器 TC：负责反馈控制逻辑，生成基于温度偏差的控制信号。
- ④前馈控制器 FC：根据流量和温度的前馈信号生成补偿信号。
- ⑤调节阀：接收整合后的控制信号，调整开度，控制冷却水流量。
- ⑥加法器：将反馈和前馈控制信号结合，形成最终的控制指令。

通过上述设计,前馈-反馈复合控制系统能够有效应对冷焦溢流水温度控制中常见的大惯性、纯滞后和多变量等问题,提升控制系统的鲁棒性和稳定性,确保冷焦溢流水出口温度稳定在设计 85°C左右,满足生产工艺的高标准要求。

因此可以设计前馈-反馈复合控制系统的工艺流程,如下图所示:



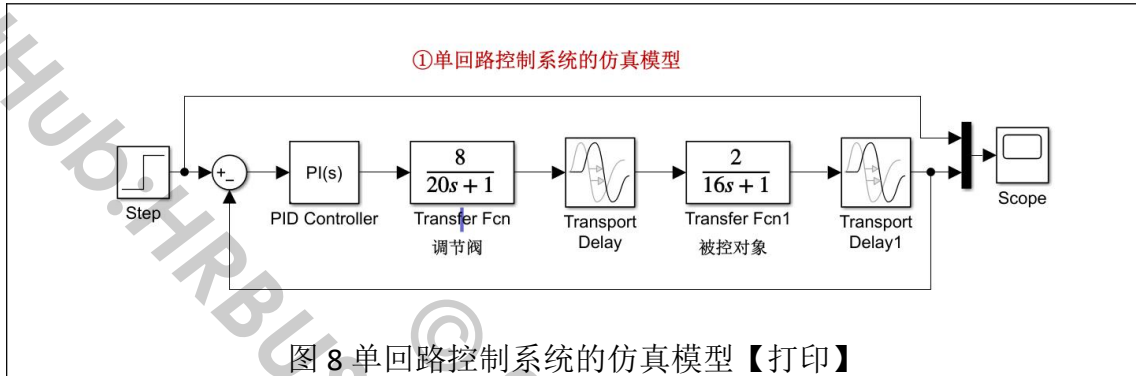
进一步可以得到系统的结构框图:



五、仿真分析

5.1 单回路控制的设计与仿真

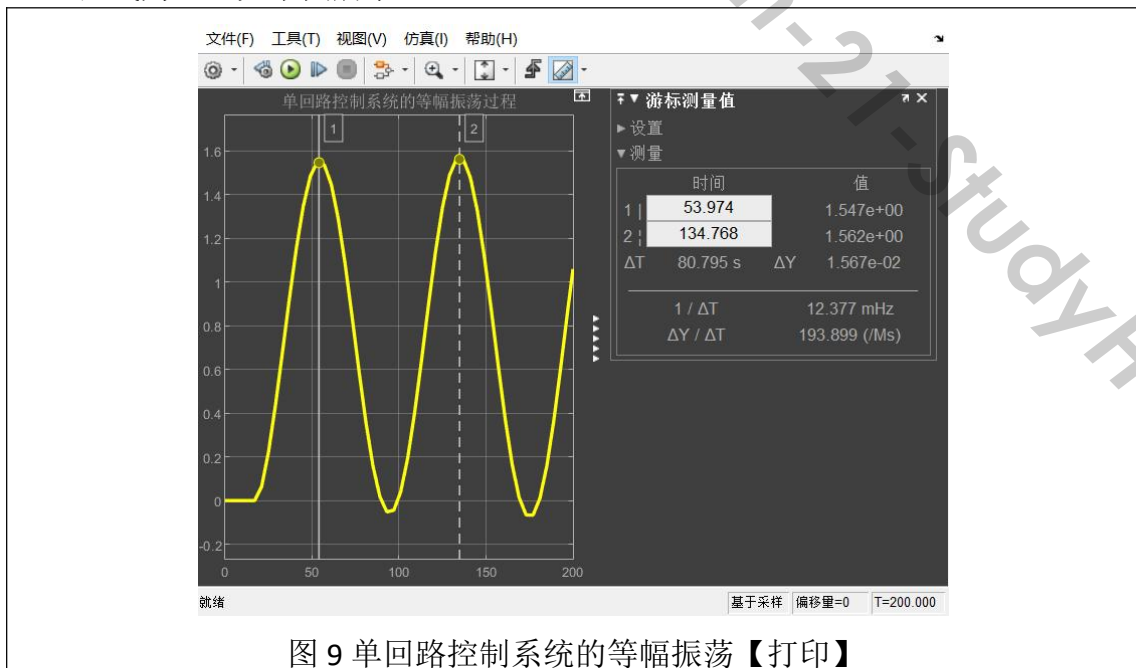
采用 Simulink 仿真,其界面设置如图所示。



(1) 调节器的参数整定

我们采用临界比例度法对单回路控制系统进行 PID 参数的整定,先通过试验得到临界振荡的曲线,记录下临界比例度 δ_k 和临界周期 T_k ,然后根据经验总结出来的关系求出控制器各参数值。

具体作法如下:在闭环的控制系统中,先将控制器变为纯比例作用,在阶跃输入下,逐渐改变控制器的比例度,直至系统产生等幅振荡(即临界振荡):此时可以得到临界比例度 δ_k 以及临界周期 T_k ,即当阶跃响应为等幅振荡时的两个波峰之间的距离。调整比例系数 K_p 从小到大,直至得到临界振荡的响应曲线为止,如下图所示。



其中,临界比例度 $\delta_k = 5.263$, $T_k = 80.795s$ 。利用经验公式计算调节器的参数:

①当采用 P 控制时

P: $2\delta_k = 10.526$, $K_p = \frac{1}{2\delta_k} = 0.095$, 对应于 simulink 中 PID Controller 模块参数设置是: P=0.095, I=0, D=0。得到整定后的系统单位阶跃响应曲线。

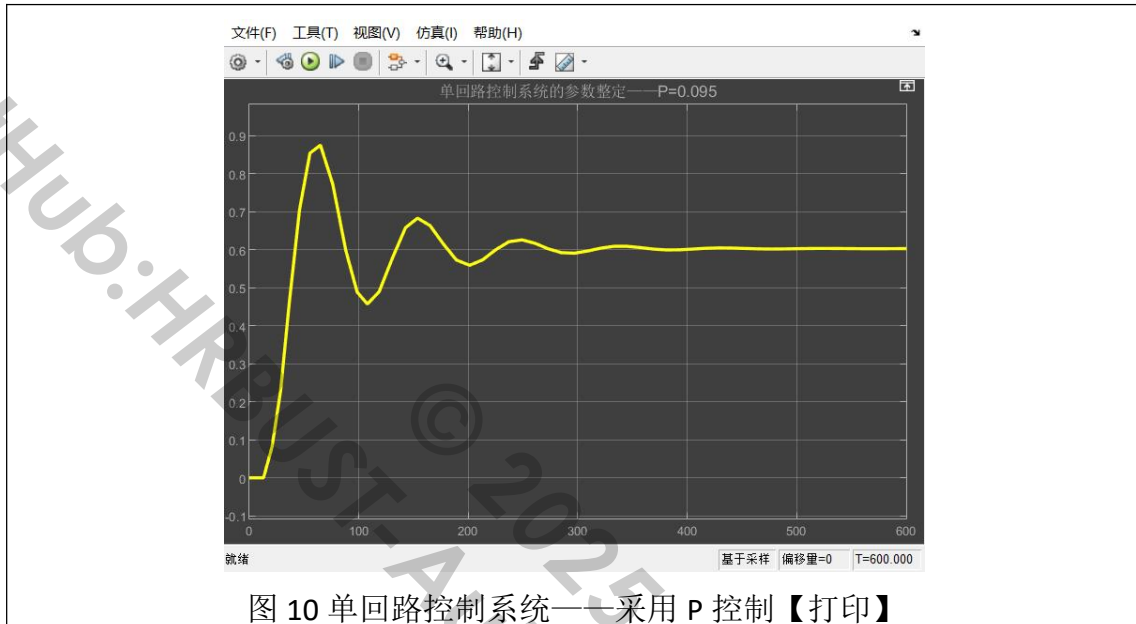


图 10 单回路控制系统——采用 P 控制【打印】

可以看出, 系统响应速度较快, 且无稳态误差; 但系统的超调量较大, 且调节时间稍长, 存在较大的余差。

②当采用 PI 控制时

PI: $2.2\delta_k = 11.5786$, $K_p = \frac{1}{2.2\delta_k} = 0.086$, $T_i = \frac{T_k}{1.2} = 67.329$, $I = \frac{K_p}{T_i} = 0.0012$,

对应于 simulink 中 PID Controller 模块参数设置是: P=0.086, I=0.0012, D=0。得到整定后的系统单位阶跃响应曲线。

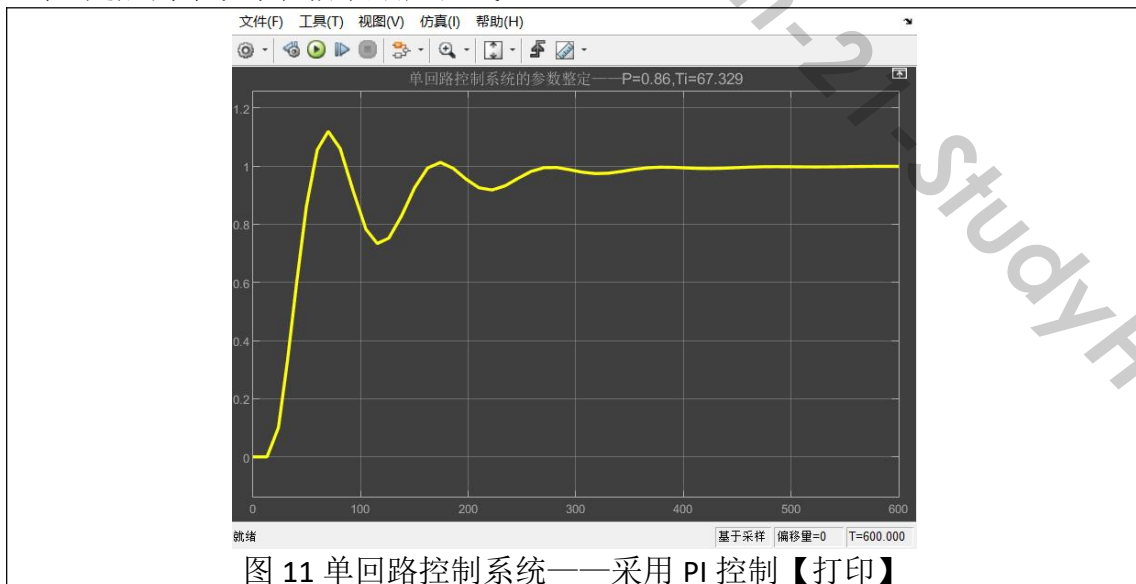


图 11 单回路控制系统——采用 PI 控制【打印】

可以看出, 系统响应曲线超调量较小, 响应速度快, 无稳态误差, 调节时间短, 仅经过两次振荡就趋于稳定, 且由于积分的作用消除了余差, 确保系统可以到达目标值。

③当采用 PID 控制时

PID: $1.6\delta_k = 8.4208$, $K_p = \frac{1}{1.6\delta_k} = 0.11875$, $T_i = \frac{T_k}{2} = 40.3975$, $T_d = 0.25T_i = 10.0993$, $I = \frac{K_p}{T_i} = 0.0029$, $D = K_p * T_d = 1.1992$, 对应于 simulink 中 PID Controller 模块参数设置是: P=0.11875, I=0.0029, D=1.1992。得到整定后的系统单位阶跃响应曲线。

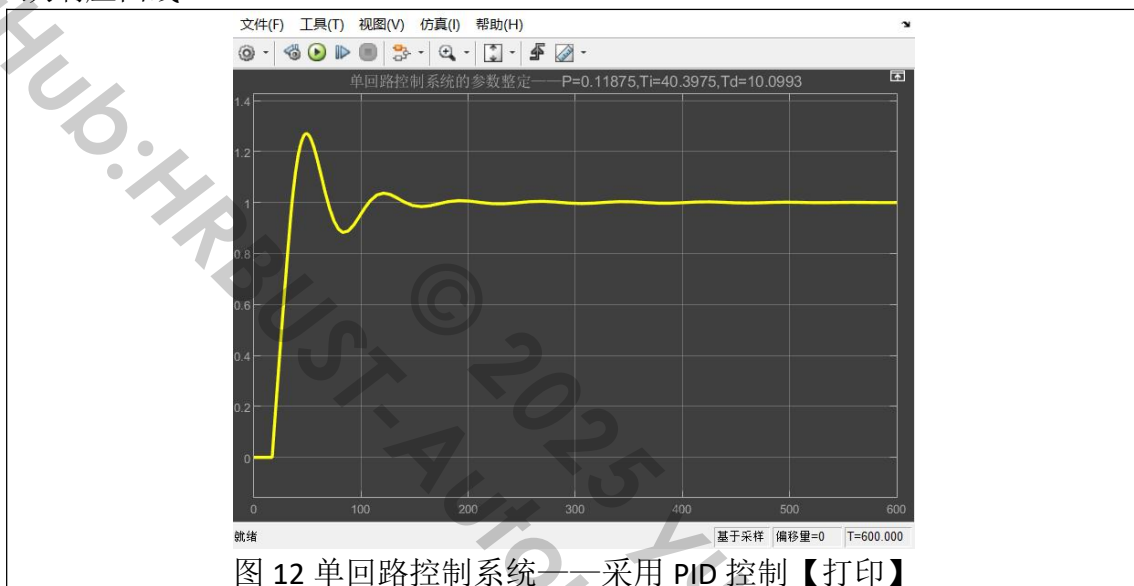


图 12 单回路控制系统——采用 PID 控制【打印】

可以看出,在采用 PID 控制时,仍然具有响应速度快和无稳态误差的优点。同时,通过适当的 PID 参数整定,系统的超调量显著减小,调节时间也大大缩短,整体系统性能得到显著提升。

同时由被控过程的 $\frac{\tau_0}{T_0}$ 的比值来选择控制规律,本系统的 $\frac{\tau_0}{T_0} = \frac{12}{16} = 0.75 > 0.2$, 说明系统更适合采用 PI 或者 PID 控制规律。

综上所述,PI 调节的效果最优;纯 P 调节往往能在超调量上表现较好,但其余动态性能不如 PI 联合控制;PI 控制可以提高系统型别,消除稳态误差,且超调量较小。PID 控制效果在本系统中不如 PI 控制,所以优势并不明显,且往往会加大系统复杂度。

在 PI 控制的基础上,进一步调整整定的参数值,当 $K_p = 0.035$, $T_i = 20.588$, 控制效果达到能调整的最优,此时超调量 $\sigma = 24.6\%$, 调整时间 $t_s = 289.744S$ 。



图 13 单回路控制系统——整定完毕

5.2 串级控制的设计与仿真

采用 Simulink 仿真,其界面设置如图所示。

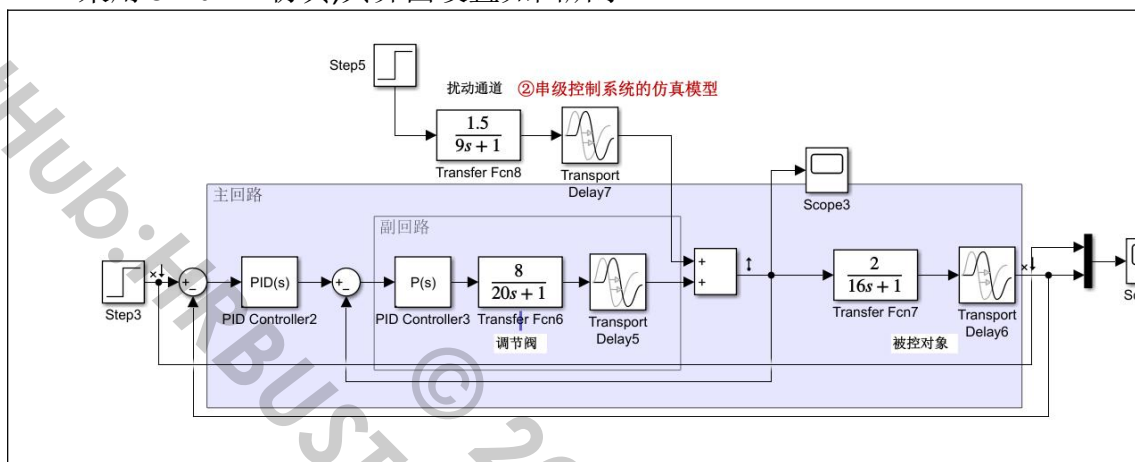


图 14 串级控制系统的仿真模型【打印】

(1) 调节器的参数整定

主参数起定值控制作用,同时为了克服容量滞后,则采用 PID 规律;副参数一般采用 P 规律。所以可以设定控制系统所用主、副控制器的传递函数分别为:

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \left[1 + \frac{1}{T_i s + 1} + T_{cd1} s \right], \quad G_{c2}(s) = K_{c2}$$

在工程实践中,串级控制常用两步整定法、逐步逼近法等方法进行校正。而本系统的主、副过程的时间常数相差不大,动态联系比较密切,故采用逐步逼近法进行参数整定。

具体步骤如下:①断开主回路,先求取副调节器的整定参数。仿真模型如下。

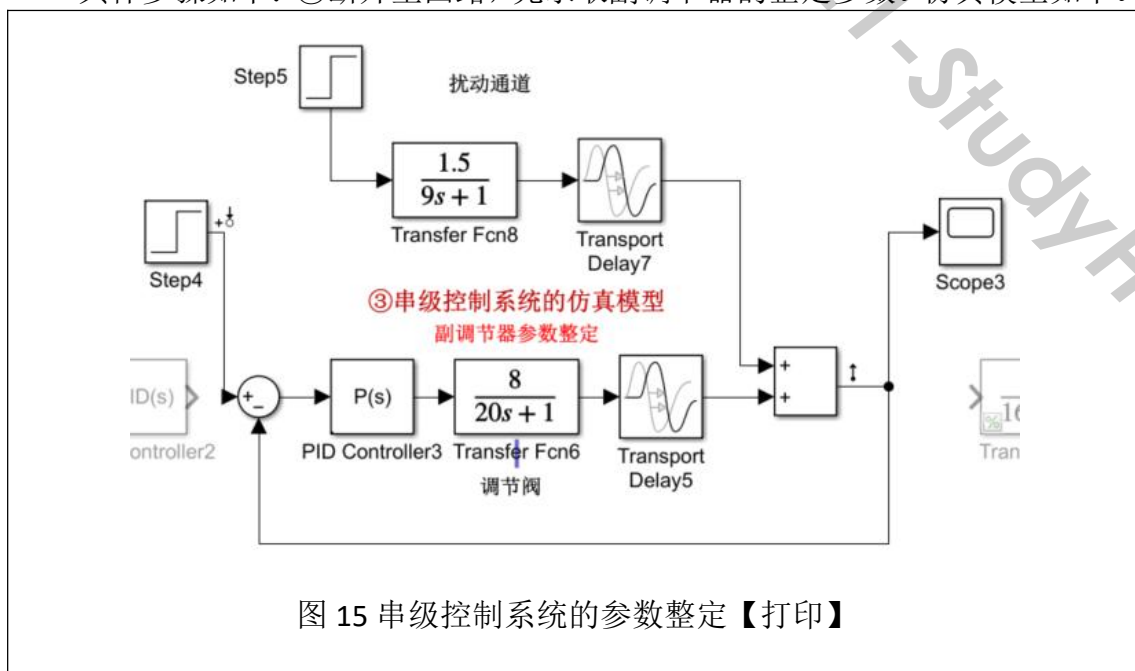
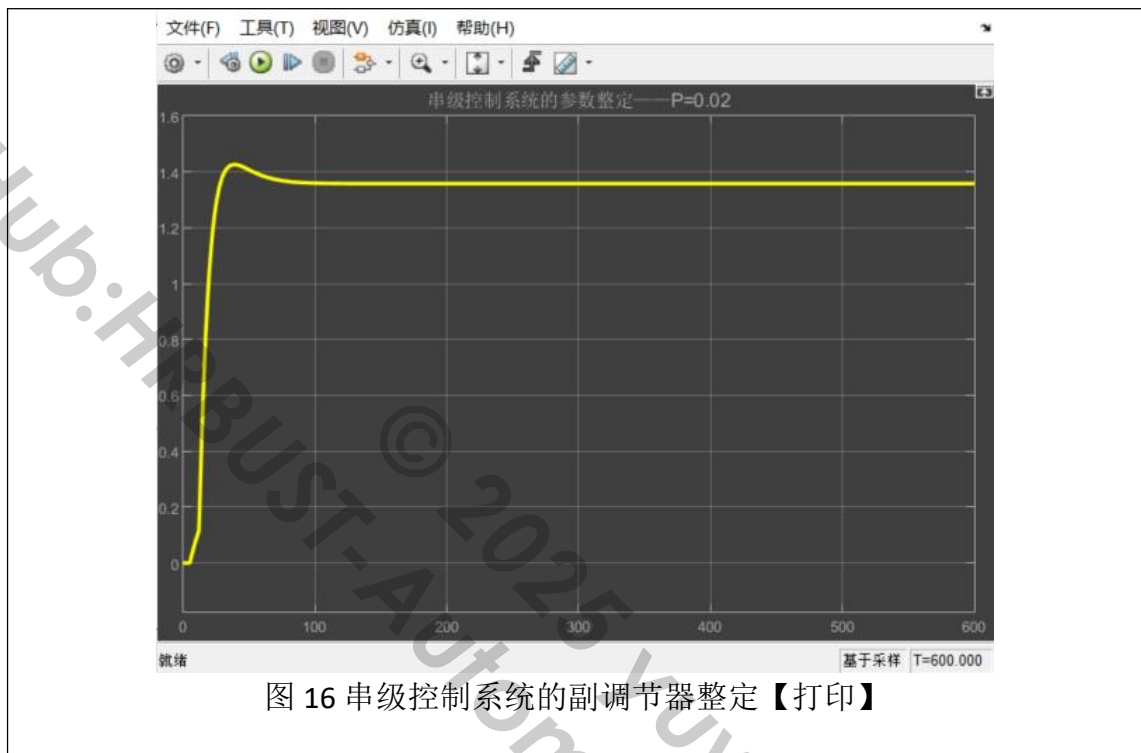
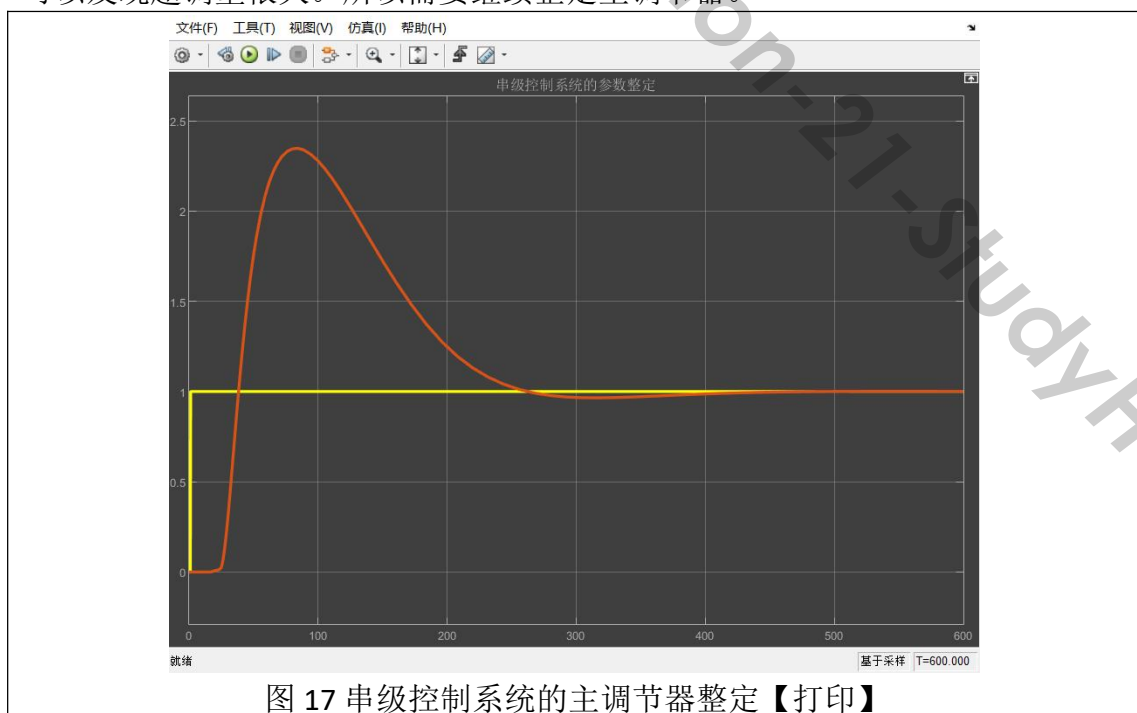


图 15 串级控制系统的参数整定【打印】

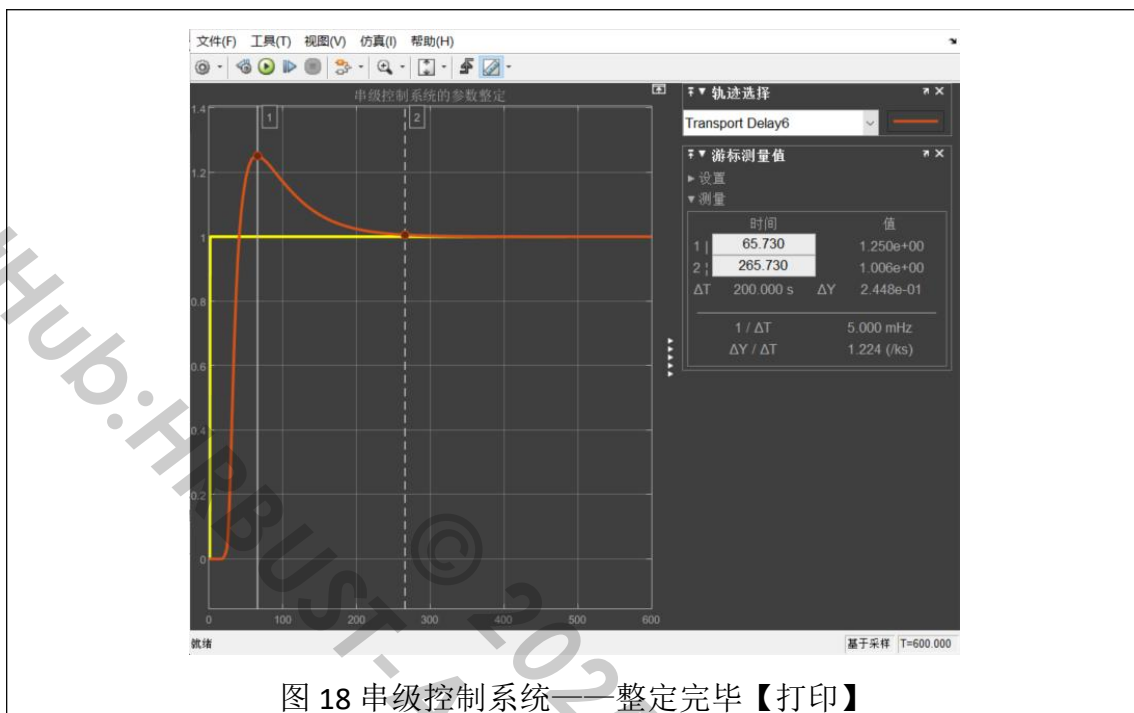
将 P 比例系数从小到大调整，发现当 $K_p = 0.02$ 时，效果比较好。



②将副调节器的参数设置为 $K_p = 0.02$ ，将主回路闭合，此时的响应曲线如下，可以发现超调量很大。所以需要继续整定主调节器。



当主调节器 $P=0.01$ ， $I=0.018$ ， $D=1$ 时，效果比较好，记录下此时整定后系统的单位阶跃响应曲线。此时超调量 $\sigma = 25.0\%$ ，调整时间 $t_s = 265.730S$ 。

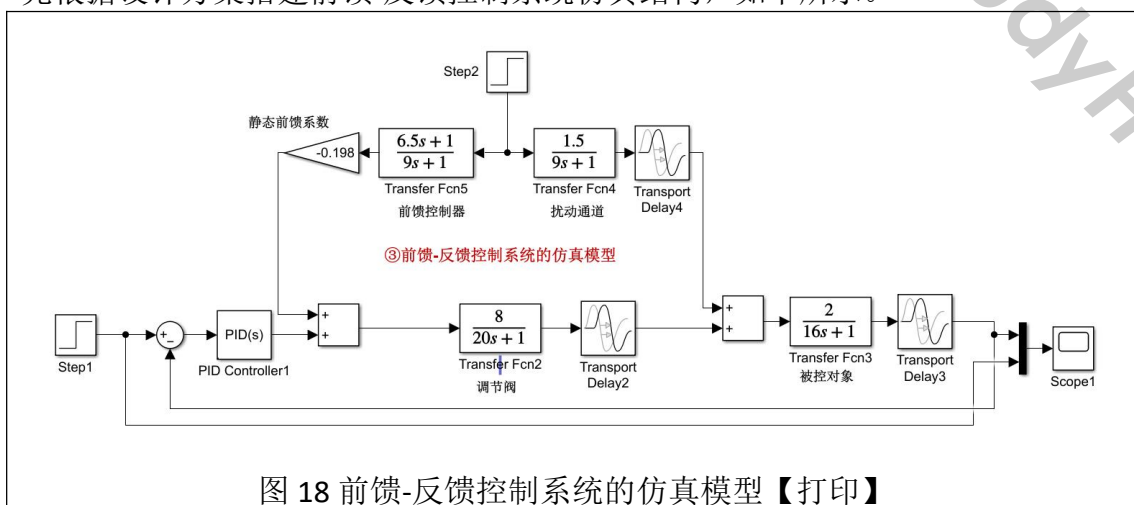


5.3 前馈-反馈控制的设计与仿真

(1) 前馈通道的参数整定

由扰动通道的特性 $G_f(s) = \frac{18e^{-12s}}{9s+1}$ 和被控过程的控制通道 $G(s) = \frac{2e^{-12s}}{16s+1}$, 可以求得实现完全补偿的条件即前馈控制模型 $G_m(s) = \frac{-G_f(s)}{G(s)} = -K_M \frac{T_0s+1}{T_f s+1} e^{-\tau s}$ 。其中, 静态前馈系数 $K_M = \frac{K_f}{K_0}$, 扰动通道与控制通道纯滞后时间之差: $\tau = \tau_f - \tau_0$ 。

因此前馈通道的参数整定需要确定静态前馈系数 K_M 、动态参数 T_0 、 T_f 。首先根据设计方案搭建前馈-反馈控制系统仿真结构, 如下所示。



①静态前馈系数 K_M 的确定

对于静态的 FFC-FBC 系统，先整定好闭环的 PID 控制系统，整定好的 PID 参数为： $P=0.010$ ， $T_i=10$ ， $D=0$ ，此时没有前馈补偿，系统响应如下。

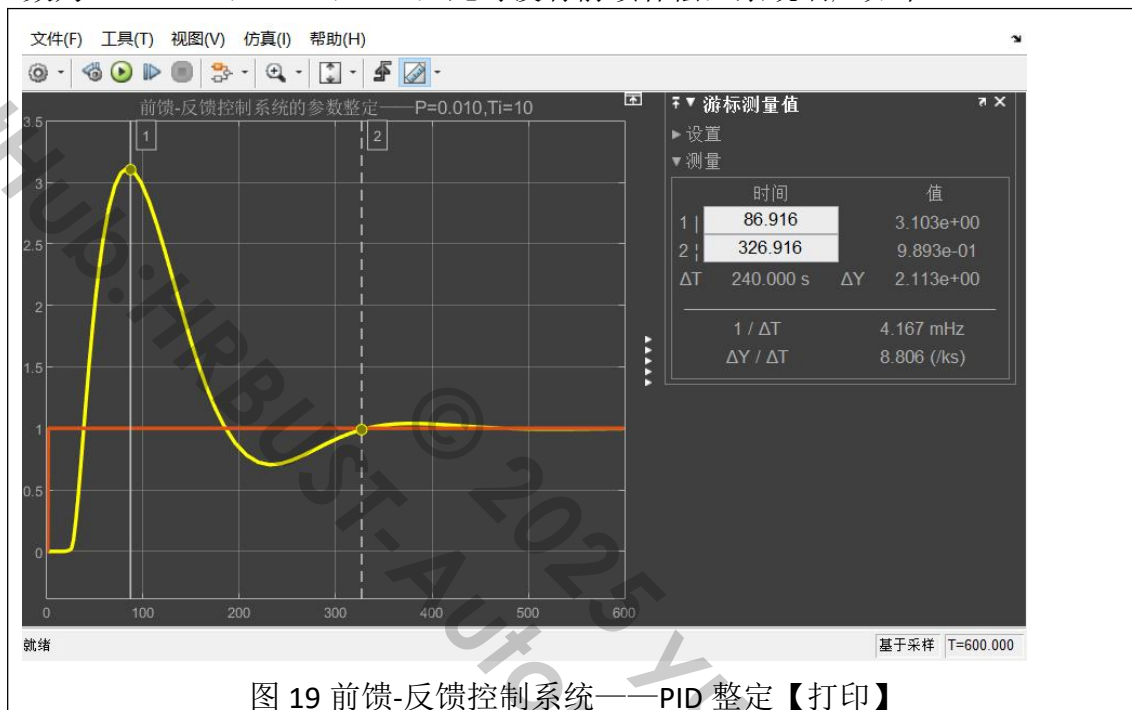


图 19 前馈-反馈控制系统——PID 整定【打印】

接着在此基础上，调整静态前馈系数，分别取 $K_M=0.04$ 、 0.198 、 5 ，可以得到三种状态的结果。当 $K_M=0.04$ 过小，属于欠补偿，系统的超调量下降了一些，但超调仍然很严重，不能显著改善系统的品质。

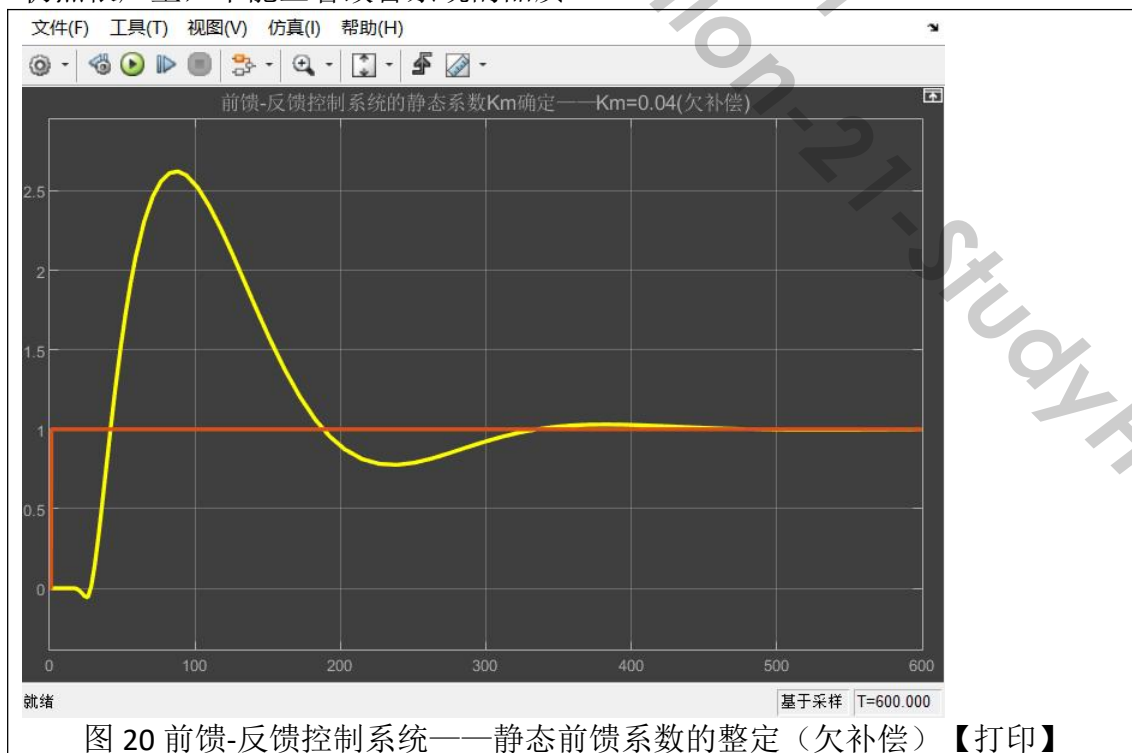


图 20 前馈-反馈控制系统——静态前馈系数的整定（欠补偿）【打印】

而当 $K_M=5$ 时，系统严重过补偿，虽然可以明显地降低第一个峰值，但是也使静态前馈的输出过大，相当于对反馈控制系统又施加了一个不小扰动，因而造成控制量下半周期严重过调，导致过渡过程长时间不能恢复。

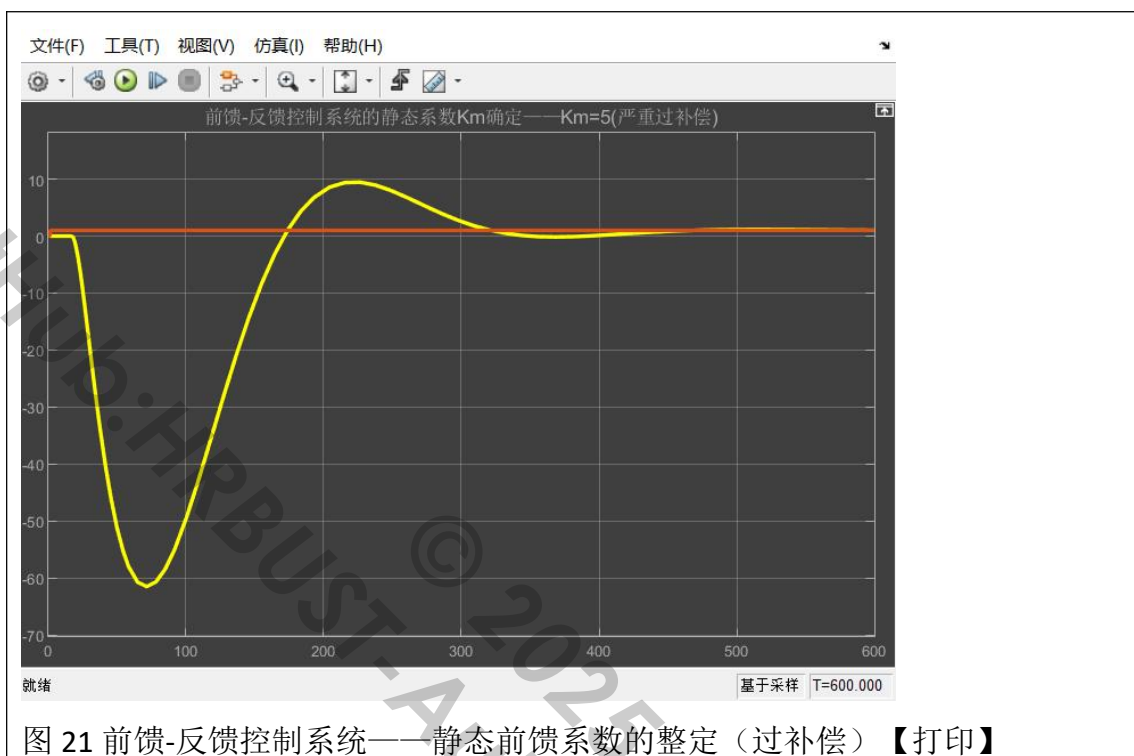


图 21 前馈-反馈控制系统——静态前馈系数的整定（过补偿）【打印】

继续调整，发现当 $K_M=0.198$ 时，系统响应较好，说明此时属于合理补偿，为整定值。

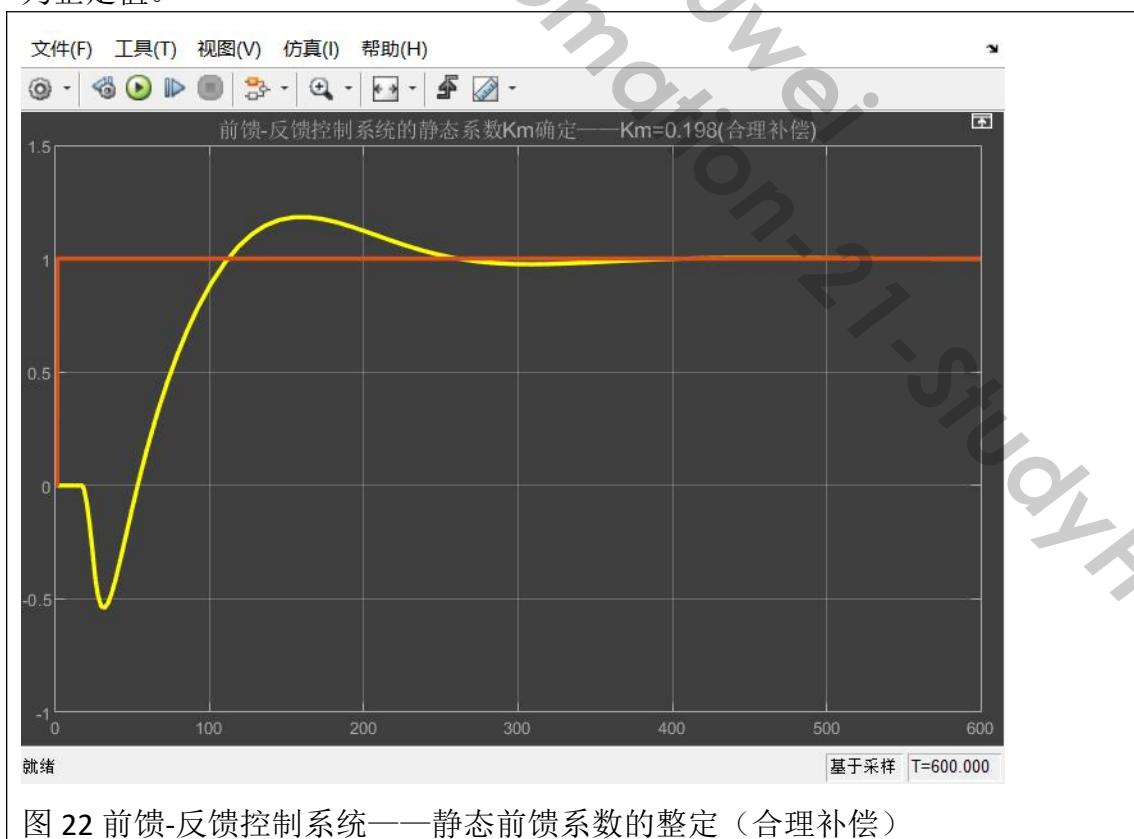


图 22 前馈-反馈控制系统——静态前馈系数的整定（合理补偿）

②动态参数 T_0 、 T_f 的确定

在整定好反馈控制下的 PID 参数和静态前馈参数的基础上，继续整定两个动态参数。首先使 $T_0 = T_f$ ，在阶跃扰动的作用下，根据被控量的变化形状来判断 T_0

、 T_f 的调整方向。

当 $T_0 = 3.5$ 时，此时处于欠补偿状态，应该要继续加强前馈补偿的作用。

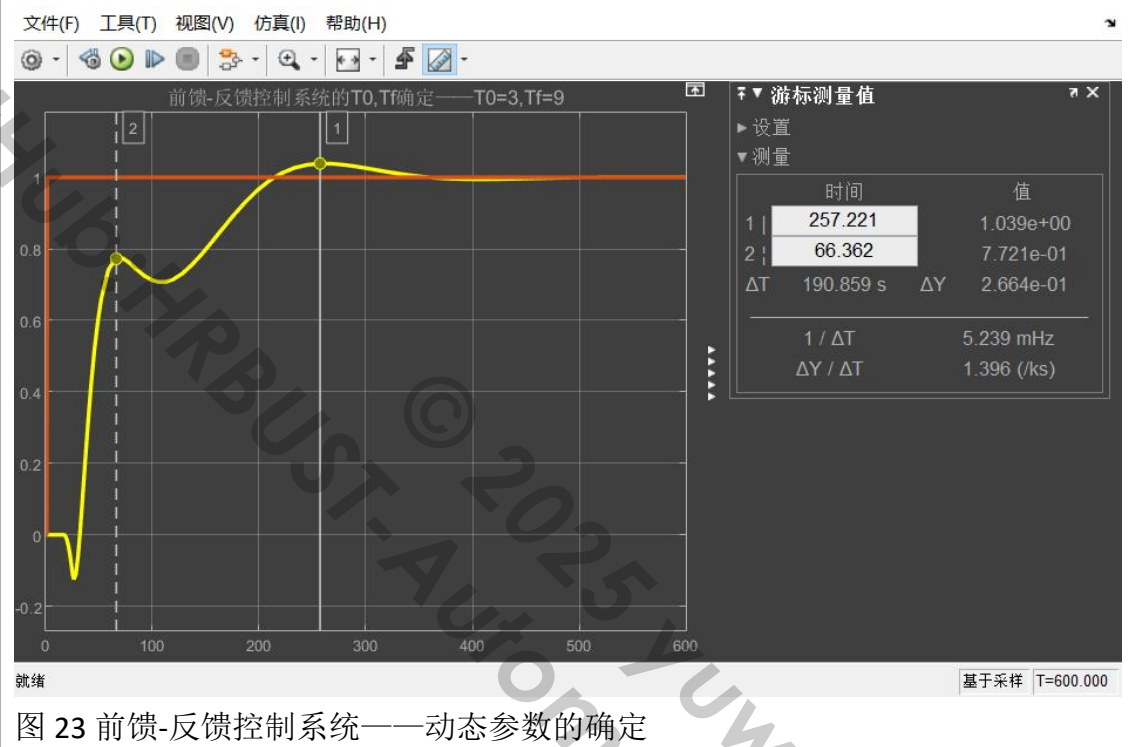


图 23 前馈-反馈控制系统——动态参数的确定

当 $T_0 = 26$ 时，此时处于过补偿状态，需要减弱前馈补偿的作用，以免使得过渡过程的反向超调进一步扩大。

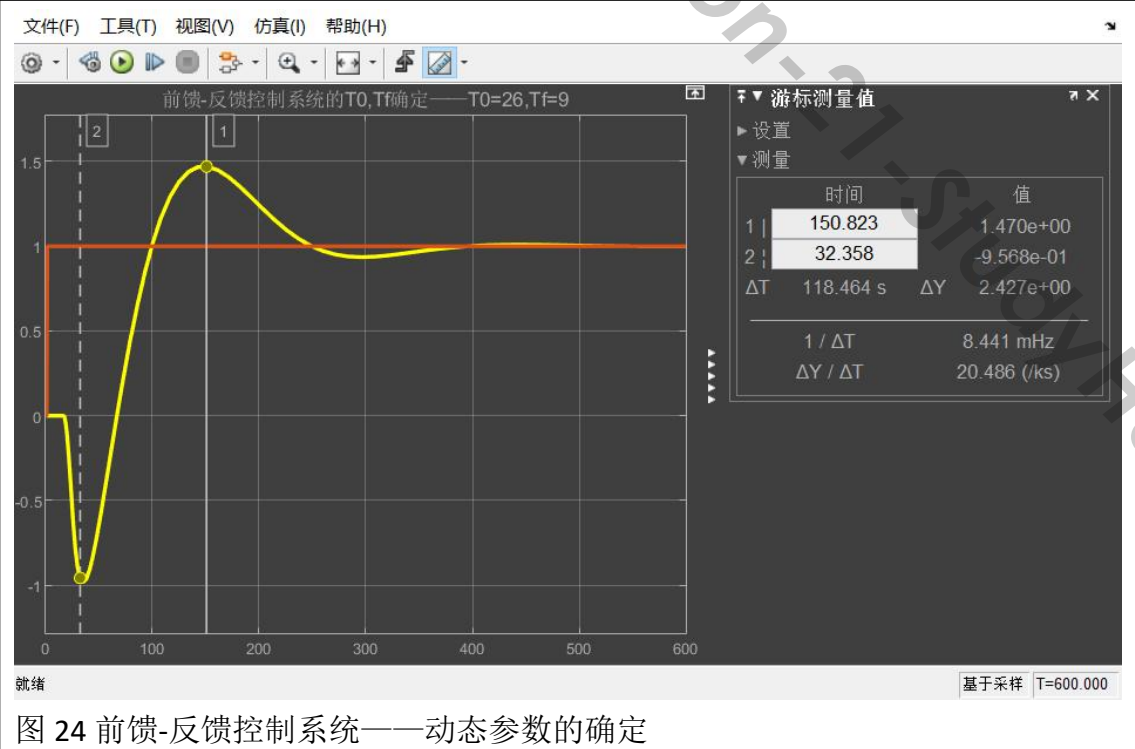


图 24 前馈-反馈控制系统——动态参数的确定

在欠补偿和过补偿范围内调整，发现当 $T_0 = 6.5$ 时，效果比较理想。此时超调量 $\sigma = 2.113\%$ ，调整时间 $t_s = 245.237S$ 。

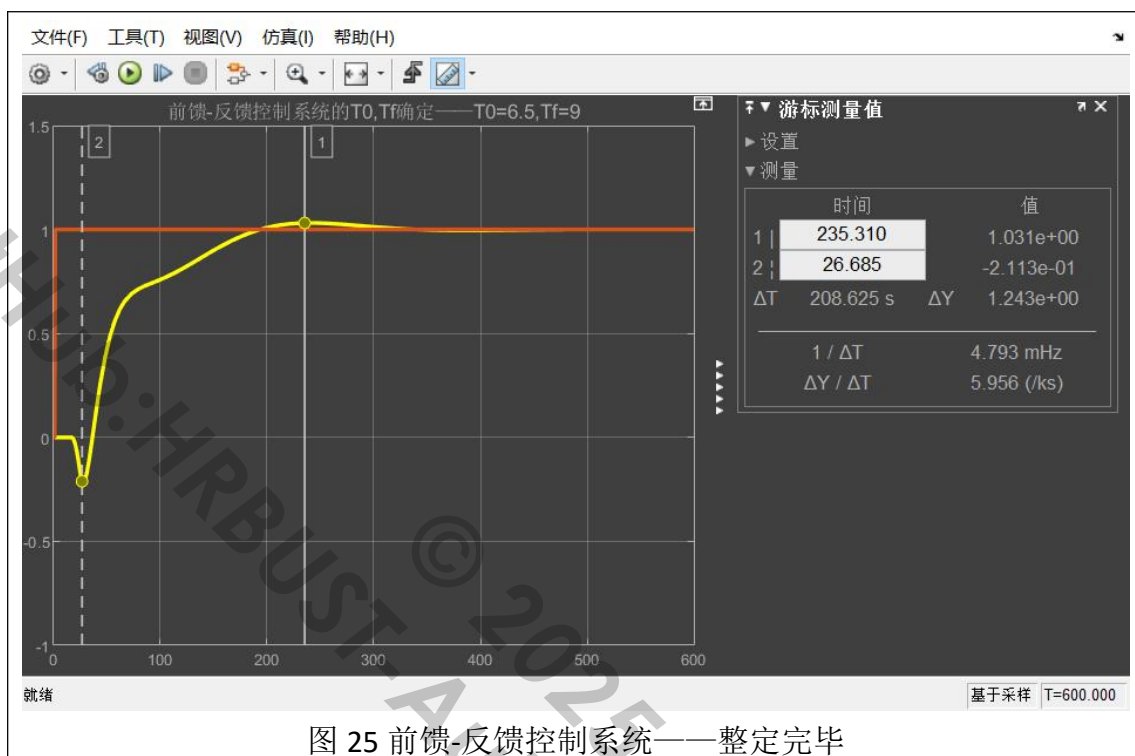


图 25 前馈-反馈控制系统——整定完毕

5.4 对比分析

	超调量	调整时间
单回路控制	24.6%	289.744S
串级控制	25.0%	265.730S
前馈-反馈控制	2.113%	245.237S

系统工艺要求为上下波动不超过 4°C ，即超调量 $<4.07\%$ ，结合三种控制方案的表现，可总结出它们各自的特点及对系统性能的影响。

单回路控制结构简单，易于理解和实现。但是对扰动响应慢，超调量大，调整时间长，难以满足系统工艺要求的温度波动限制。它适用于系统动态响应要求不高，扰动相对较小的场合。

相比于单回路控制，串级控制提高了系统对扰动的响应速度，缩短了调整时间。虽然调整时间有所减少，但超调量并未明显改善，同样超出工艺要求。它比较适合于被控对象有较大纯滞后或时间常数的系统，且需要快速响应外部扰动的情况。

前馈-反馈控制结合了前馈控制的快速响应和反馈控制的稳定性，能够显著减小超调量，缩短调整时间，且超调量远低于工艺要求，能够很好地满足温度波动限制。不过设计和整定相对复杂，需要对系统扰动有深入理解，以建立有效的前馈模型。它适用于存在可预测扰动，且对系统动态性能有高要求的场合。

结合上述分析可知，前馈-反馈控制是最适合本温度控制系统的方案。理由如下：

①超调量小：2.113%的超调量远低于工艺要求的 4.07%，表明系统能够非常精确地控制温度，避免了温度的大幅波动。

②调整时间短：245.237 秒的调整时间相比其他两种方案更短，这意味着系统能够更快地响应扰动，恢复到设定值。

③鲁棒性：前馈-反馈控制结合了前馈控制的快速补偿能力和反馈控制的稳定性，使系统在面对扰动时能够快速反应并保持稳定。

④适应性：前馈控制可以处理已知扰动，如冷焦热水的流量和温度变化，而反馈控制可以处理未知扰动，确保系统整体的稳定性。

综上所述，前馈-反馈控制方案因其优秀的动态性能和稳定性，最能满足冷焦溢流水温度控制系统的工艺要求。

GitHub:HRBUST-© 2025 yuwei
Automation-21-StudyHub