

2022春 过程控制系统

过程控制系统

授课教师：苗子博

要点回顾

被控参数的选择
控制参数的选用原则
绘制单回路系统原理图
绘制单回路系统方框图
过程对象的正反特性
阀门气开气关选择
控制器正反作用
PID参数工程整定

前情
回顾

6.4调节器参数的工程整定方法

在控制系统设计或安装完毕后，被控对象、测量变送器和执行器这三部分的特性就完全确定了，不能任意改变。只能通过控制器参数的工程整定，来调整控制系统的稳定性和控制质量。

控制器参数的整定，就是按照已定的控制方案，求取使控制质量最好的控制器参数值。具体来说，就是确定最合适的控制器比例度 P 、积分时间 T_I ，和微分时间 T_D 。

控制器参数整定的方法很多，主要有两大类，一类是理论计算的方法，另一类是工程整定法。

□ 理论计算的方法是根据已知的各环节特性及控制质量的要求，通过理论计算出控制器的最佳参数。这种方法由于比较繁琐、工作量大，计算结果有时与实际情况不甚符合，故在工程实践中长期没有得到推广和应用。

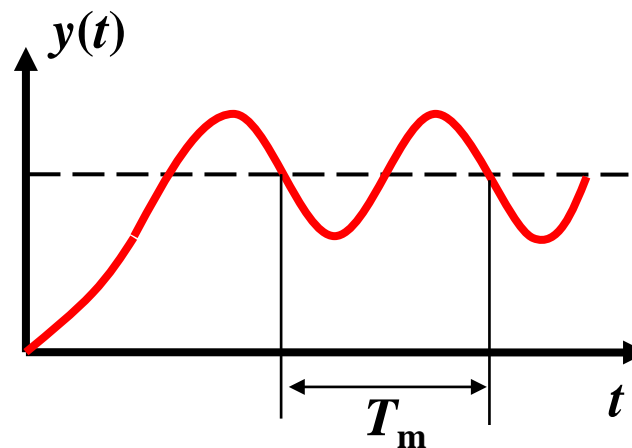
□ 工程整定法是在已经投运的实际控制系统中，通过试验或探索，来确定控制器的最佳参数。这种方法是工艺技术人员在现场经常使用的。

6.4.1 稳定边界法（临界比例度法）

属于闭环整定方法，根据纯比例控制系统临界振荡试验所得数据（临界比例度 P_m 和振荡周期 T_m ），按经验公式求出调节器的整定参数。

(1) 置调节器 $T_i \rightarrow \infty$, $T_d=0$, 比例度 P (δ) \rightarrow 较大值, 将系统投入运行。

(2) 逐渐减小 P , 加干扰观察, 直到出现等幅减振荡为止。记录此时的临界值 P_m 和 T_m 。



系统临界振荡曲线

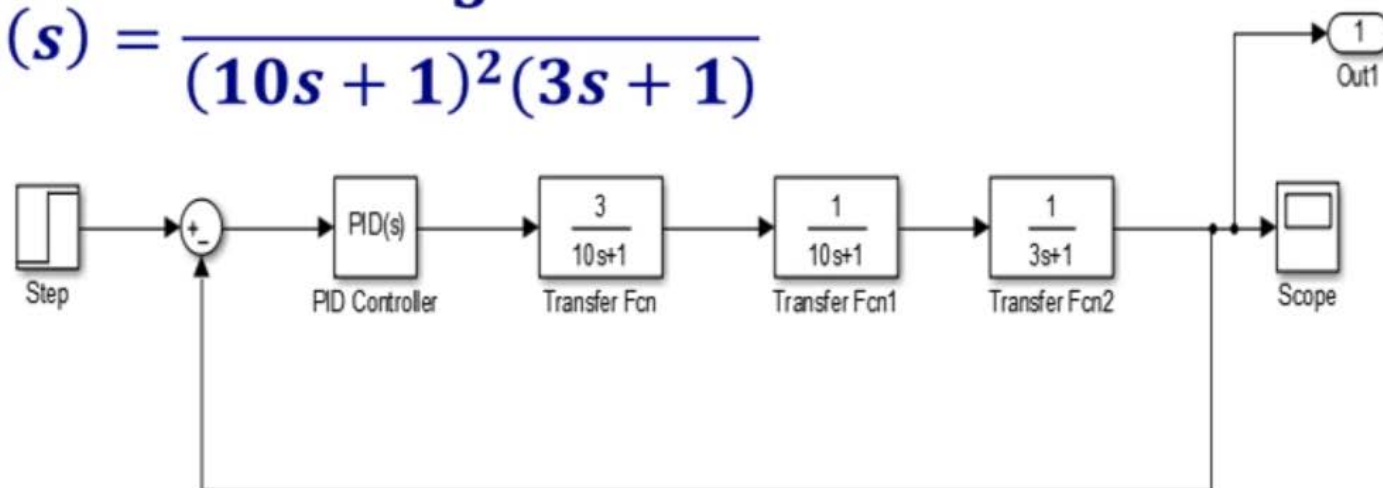
表6.1 稳定边界法整定参数计算表

根据 P_m 和 T_m ，
按经验公式计算出控制器的
参数整定值。

调节规律	整定参数		
	P (%)	T_i	T_d
P	$2P_m$	——	——
PI	$2.2P_m$	$0.85 T_m$	——
PID	$1.7P_m$	$0.50 T_m$	$0.125 T_m$

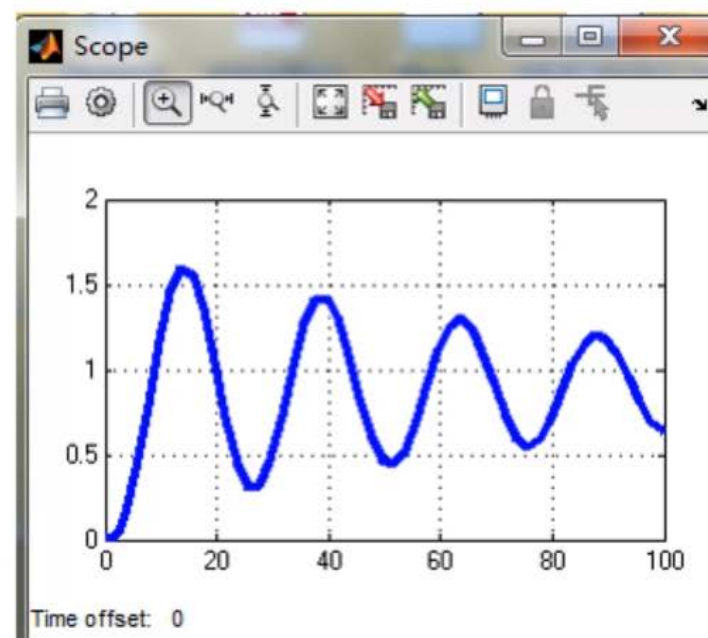
❖ 经验公式虽然是在实验基础上归纳出来的，但它有一定的理论依据。就以表中PI调节器整定数值为例，可以看出PI调节器的比例度较纯比例调节时增大，这是因为积分作用产生一滞后相位，降低了系统的稳定度的缘故。

$$W_0(s) = \frac{3}{(10s + 1)^2(3s + 1)}$$



先采用纯比例调节器

$$K_p = 3 \left(\delta = 1/3 \right), T_i = \infty, T_d = 0$$



$$K_p = 3.75 (\delta = 0.267), T_i = \infty, T_d = 0$$

出现等幅振荡，记录下此时的

$$\delta_K = 0.267$$

和振荡周期 $T_K = 23$

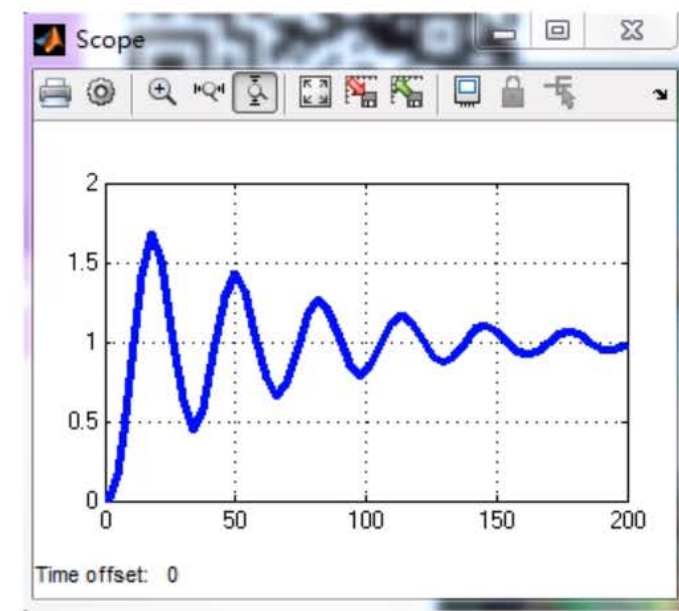
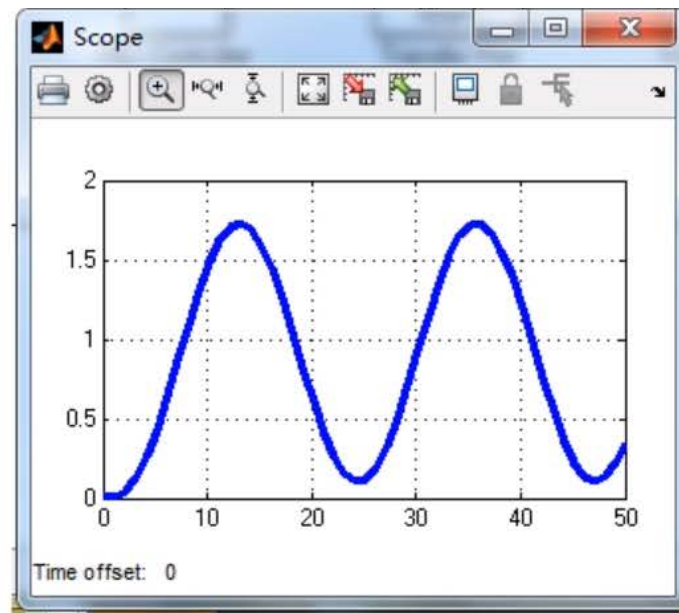
采用PI调节器

查表 $\delta = 2.2\delta_K = 0.5874$,

$$T_i = \frac{T_K}{1.2} = 19.17, T_d = 0$$

$$\sigma_p = 67.5\%, \frac{B}{B'} = 1.57$$

超调量太大，微调



$$\delta_1 = 2\delta_0 = 1.174,$$

$$T_i = T_{i0} = 19.17, T_d = 0$$

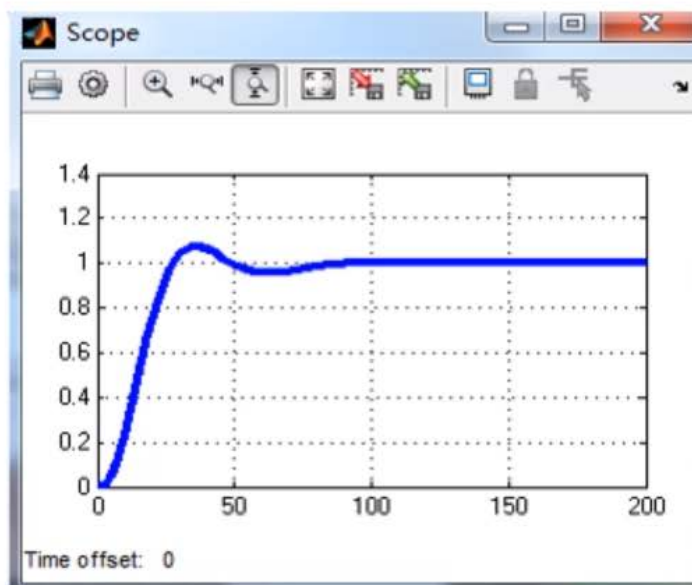
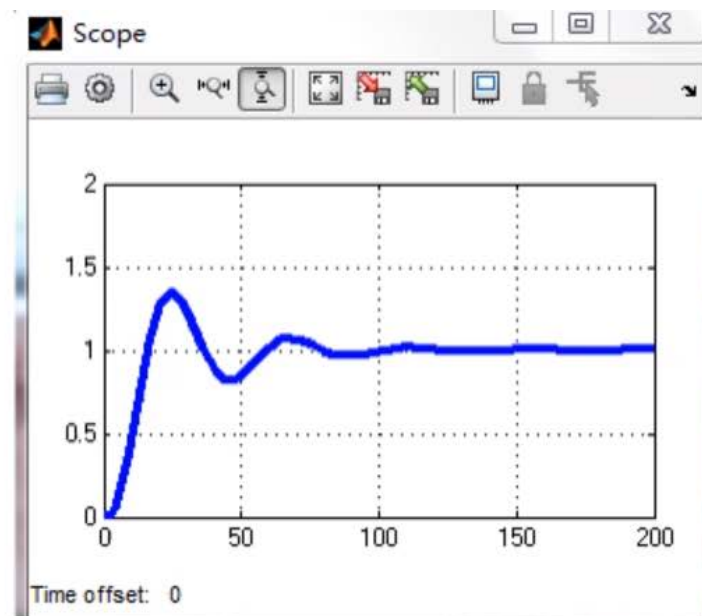
$$\sigma_p = 35\%, t_s = 96s \ (\Delta = 2\%)$$

要继续减小超调，减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 2.348,$$

$$T_i = T_{i0} = 19.17, T_d = 0$$

$$\sigma_p = 8\%, t_s = 77s$$



$$K_p = 3.75 (\delta = 0.267), T_i = \infty, T_d = 0$$

出现等幅振荡，记录下此时的

$$\delta_K = 0.267$$

和振荡周期 $T_K = 23$

采用PID调节器

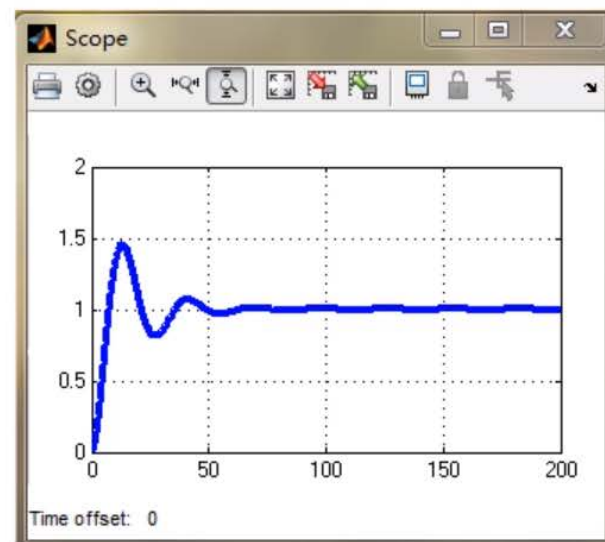
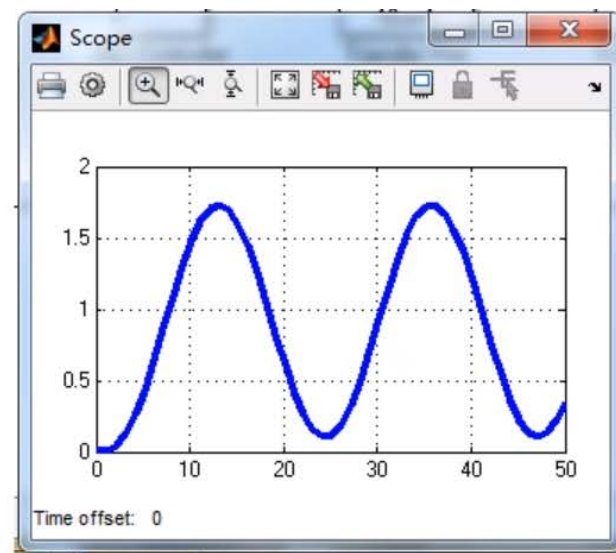
查表 $\delta_0 = 1.6\delta_K = 0.427$,

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

$$\sigma_p = 46\%, \frac{B}{B'} = 6.13 \quad t_s = 60s$$

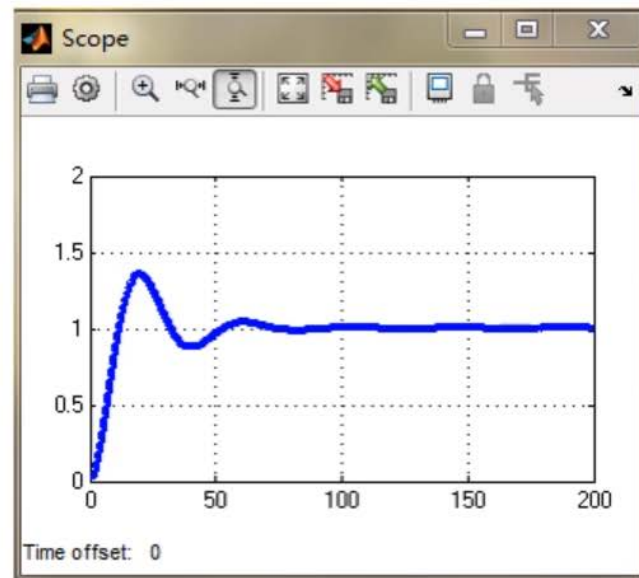
超调量太大，微调



查表 $\delta_0 = 1.6\delta_K = 0.427$, $T_{i0} = 0.5T_K = 11.5$,
 $W_c(s) = \frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_{i0}s} + T_{d0}s)$ $T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$

在调系数是保持这个比例不变。
 要想减小超调，减小 K_p 或增大 δ

$\delta_1 = 2\delta_0 = 0.854$,
 $T_{i0} = 0.5T_K = 11.5$,
 $T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$
 $\sigma_p = 35\%$, $t_s = 69.1s$



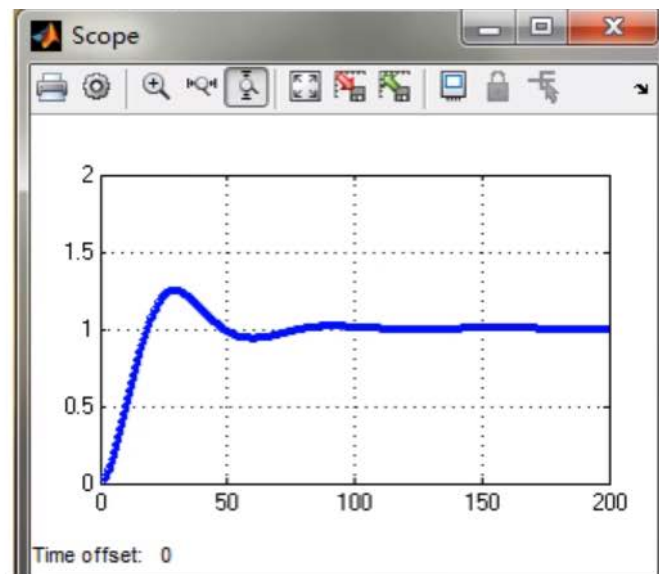
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

$$\sigma_p = 25\%, \quad t_s = 74.1s$$



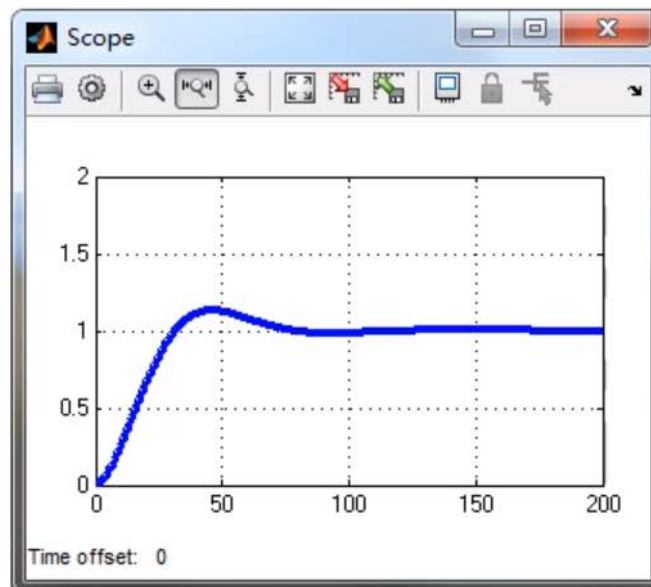
想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_3 = 8\delta_0 = 3.414,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

$$\sigma_p = 13\%, \quad t_s = 73s$$



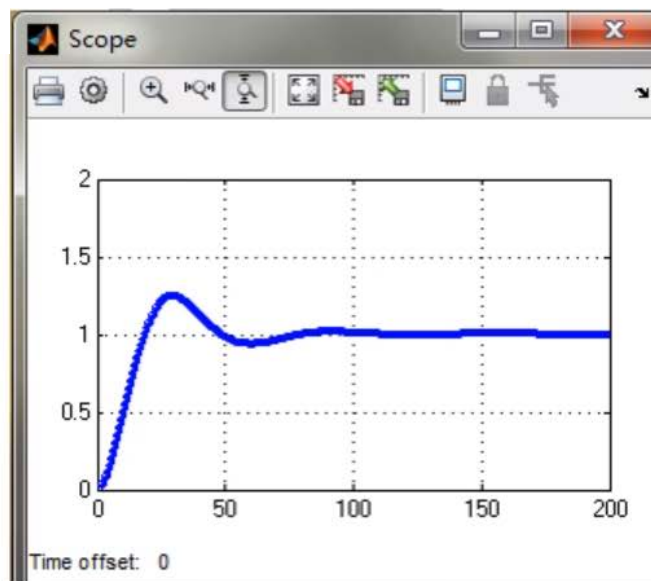
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

$$\sigma_p = 25\%, \quad t_s = 74.1s$$



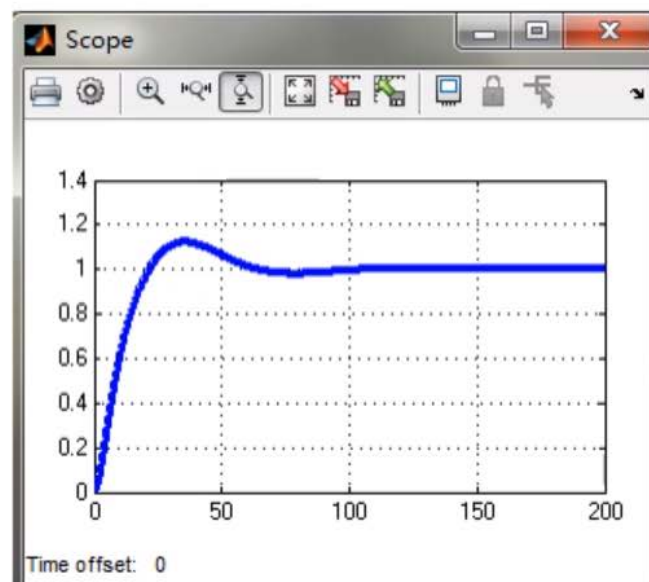
也可以改变比例，微分可以减小超调，把微分系数增加一点

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d02} = 0.25T_i * 2.375 = 6.83$$

$$\sigma_p = 12\%, \quad t_s = 59.6s$$



要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

$$\sigma_p = 25\%, \quad t_s = 74.1s$$

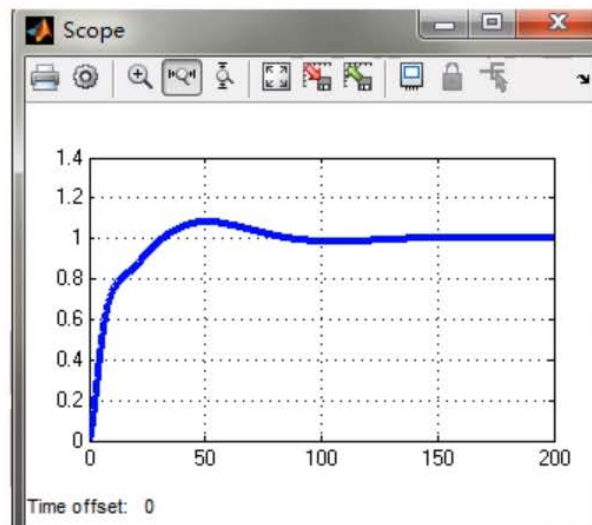
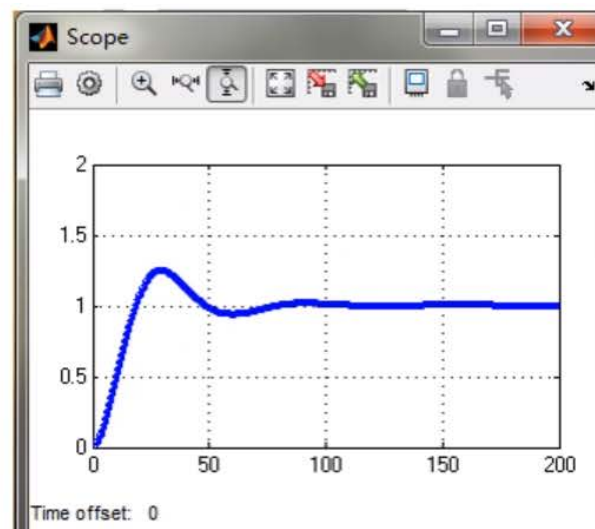
继续增加微分作用

$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

$$T_{i0} = 0.5T_K = 11.5,$$

$$T_{d02} = 0.25T_i^* 4.75 = 13.66$$

$$\sigma_p = 8\%, \quad t_s = 78.5s$$



- ❑ 稳定边界方法在下面两种情况下不宜采用：
 - 临界比例度过小时，调节阀容易游移于全开或全关位置，对生产工艺不利或不容许。例如，一个用燃料油加热的炉子，如果阀门发生全关状态就要熄火。
 - 工艺上的约束条件严格时，等幅振荡将影响生产的安全。

6.4.2 衰减曲线法

也属于闭环整定方法，但不需要寻找等幅振荡状态，只需寻找最佳衰减振荡状态即可。

方法:

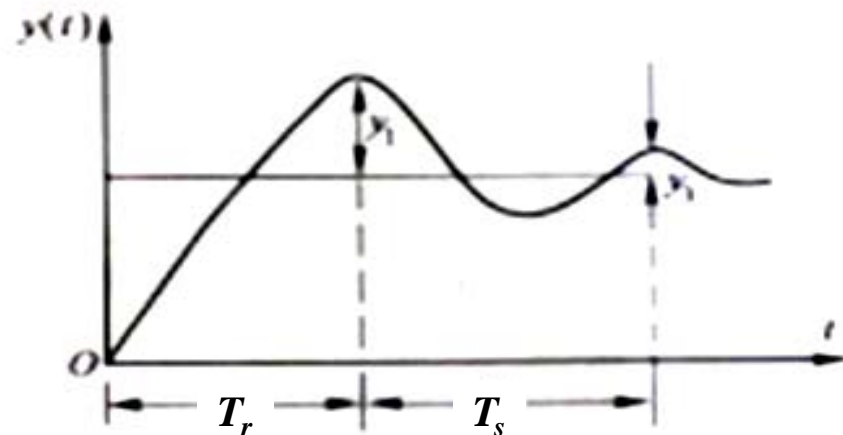
(1) 把调节器设成比例作用 ($T_i=\infty$, $T_d=0$) , 置于较大比例度, 投入自动运行。

(2) 在稳定状态下, 阶跃改变给定值 (通常以 5%左右为宜) , 观察调节过程曲线。

(3) 适当改变比例度, 重复上述实验, 到出现满意的衰减曲线为止。

n=4:1时, 记下此时的比例度 P_s 及周期 T_s 。

n=10:1时, 记为 P'_s 及 T_r 。



(4) 按表6-2 ($n=4:1$) 或按表6-3 ($n=10:1$) 求得各种调节规律时的整定参数。

表6.2
衰减比为4:1时,
整定参数计算表

<div>整定参数</div> <div>调节规律</div>	P (%)	T_i	T_d
P	P_s	——	——
PI	$1.2P_s$	$0.5 T_s$	——
PID	$0.8P_s$	$0.3 T_s$	$0.1T_s$

表6.3
衰减比为10:1时,
整定参数计算表

<div>整定参数</div> <div>调节规律</div>	P (%)	T_i	T_d
P	P'_s	——	——
PI	$1.2 P'_s$	$2T_r$	——
PID	$0.8 P'_s$	$1.2T_r$	$0.4T_s$

采用衰减曲线法进行参数整定必须注意以下两点：

- 1、设定值扰动幅值不能太大，一般为额定值的5%左右；
- 2、必须在工艺参数稳定情况下才能施加扰动，否则难以得到正确的 P_s 及周期 T_s 。

衰减曲线法优缺点：

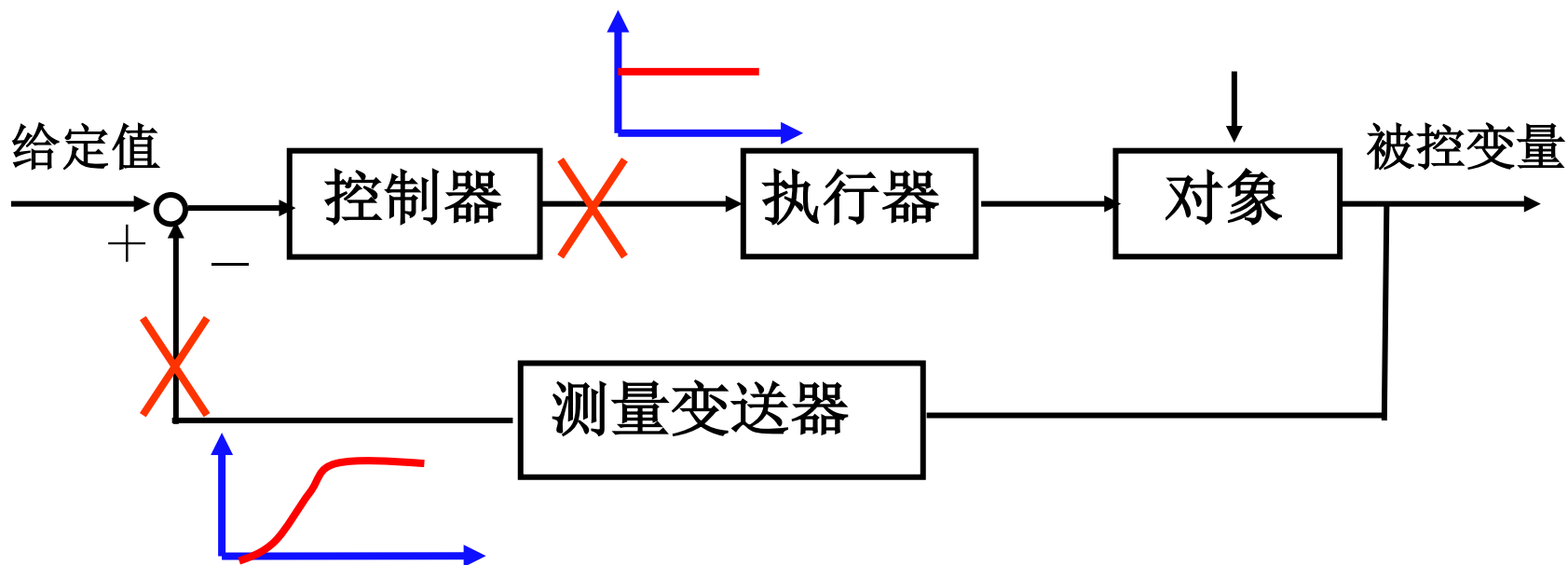
优点：比较简单，适用于各种控制系统的参数整定。

缺点：不易准确确定衰减程度（衰减比为4：1或10：1），从而较难得到准确的 P_s 及周期 T_s 。

6.4.3 响应曲线法

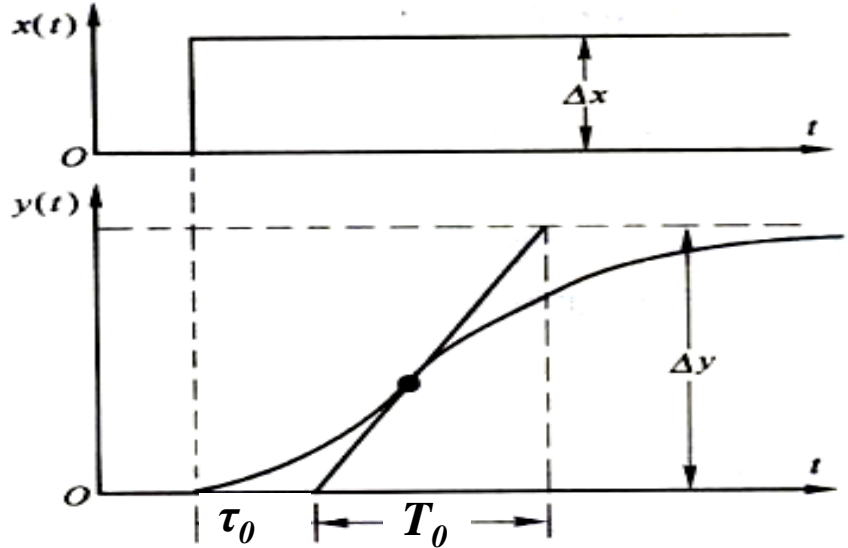
属于开环整定方法。以被控对象控制通道的阶跃响应为依据，通过经验公式求取调节器的最佳参数整定值。

方法：不加控制作用，作控制通道特性曲线。



根据实验所得响应曲线，找出广义对象的特性参数 K_0 、 T_0 、 τ_0 ，用表6-4的经验公式求整定参数。

表6.4 响应曲线法整定参数的公式



整定参数 调节规律	P (%)	T_i	T_d
P	$\frac{\tau_0}{T_0 P_0}$	—	—
PI	$1.1 \frac{\tau_0}{T_0 P_0}$	$3.3\tau_0$	—
PID	$0.85 \frac{\tau_0}{T_0 P_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

此方法在不加控制作用的状态下进行，对于不允许工艺失控的生产过程，不能使用。

响应曲线法经验公式的理论依据

设被控对象特性用如下传递函数表示：

$$G_0 = \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau_0 s}$$

当采用纯比例调节时，调节器传递函数为 $G_c = \frac{1}{P}$
系统出现临界振荡时调节器比例度为 P_m ，临界振荡角频率为 ω_m ，可求出：

$$G_0(s)G_c(s) = -1$$

将 $G_0(s)$ 、 $G_c(s)$ 代入上式

$$\frac{K_0 e^{-j\omega_m \tau_0}}{j\omega_m T_0 + 1} \frac{1}{P_m} = -1$$

在临界振荡角频率 ω_m 处, $|j\omega_m T_0| \gg 1$, 则

$$\frac{K_0}{\omega_m T_0} e^{-j\omega_m \tau_0 - j\frac{\pi}{2}} \frac{1}{P_m} = e^{-j\pi}$$

由相位条件 $\pi/2 + \omega_m \tau_0 = \pi$, 即 $\omega_m \tau_0 = \pi/2$,

所以

$$\omega_m = \pi / (2\tau_0)$$

$$\frac{K_0}{\omega_m T_0} \cdot \frac{1}{P_m} = 1$$

由幅值条件可得:

$$P_m = \frac{K_0}{\omega_m T_0} = \frac{2}{\pi} \frac{K_0 \tau_0}{T_0} = 0.63 \frac{K_0 \tau_0}{T_0}$$

例：一蒸汽加热的热交换温度控制系统，要求热水温度保持在**65°C**。当阀门输入电流增加**1.6mA DC**（阀门输入电流范围为**4~20mA DC**）时，热水温度上升为**67.8°C**，并达到新的稳态。温度变送器量程和调节器的刻度范围为**30~80°C**。从温度动态曲线上可以测出 $\tau_0 = 1.2 \text{ min}$, $T_0 = 2.5 \text{ min}$ 。如果采用**PI**或**PID**调节规律，按响应曲线法计算调节器整定参数。

解：首先计算出控制对象放大倍数 K_0 。（或比例度 P_0 ）值

$$\Delta x = 1.6 \text{ mA}$$

$$x_{\max} - x_{\min} = (20 - 4) \text{ mA}$$

$$\Delta y = 67.8 - 65.0 = 2.8^\circ \text{C}$$

$$y_{\max} - y_{\min} = 80 - 30 = 50^\circ \text{C}$$

可得

$$K_0 = \frac{2.8/50}{1.6/16} = 0.56$$

$$\frac{\tau_0}{T_0 P_0} = \frac{K_0 \tau_0}{T_0} = 0.56 \times \frac{1.2}{2.5} = 27\%$$

采用**PI**调节时

$$P = 1.1 \times 27\% = 29.7\% \approx 30\%$$

$$T_i = 3.3 \times 1.2 = 3.96 \approx 4 \text{ min}$$

采用**PID**调节时

$$P = 0.85 \times 27\% = 22.95\% \approx 23\%$$

$$T_i = 2 \times 1.2 = 2.4 \text{ min}$$

$$T_d = 0.5 \times 1.2 = 0.6 \text{ min}$$

6.4.4 经验法

凭经验凑试。其关键是“看曲线，调参数”。

在闭环的控制系统中，凭经验先将控制器参数放在一个数值上，通过改变给定值施加干扰，在记录仪上观察过渡过程曲线，根据 P 、 T_I 、 T_D 对过渡过程的影响为指导，对比例度 P 、积分时间 T_I 和微分时间 T_D 逐个整定，直到获得满意的曲线为止。

❖ 经验法的方法简单，但必须清楚控制器参数变化对过渡过程曲线的影响关系。在缺乏实际经验或过渡过程本身较慢时，往往较为费时。

经验法整定调节器参数的步骤有两种：

整定步骤1：比例调节是基本的控制作用，应首先把比例度整定好，待过渡过程基本稳定后，再加积分作用消除余差，最后加入微分作用进一步提高控制质量

1) 对于**P**调节器 ($T_i = \infty, T_d = 0$)，将比例度**P**放在较大经验数值上，然后逐步减小**P**，观察被控参数的过渡过程曲线，直到曲线满意为止。

2) 对于**PI**调节器 ($T_d = 0$)，先置 $T_i = \infty$ ，按比例调节整定比例度**P**，使过渡过程达到**4:1**衰减比；然后，将**P**放大**10%~20%**，将积分时间由大至小逐步减少，直到获得衰减比为**4:1**过渡过程。

3) 对于**PID**调节器，先置 $T_d = 0$ ，按**2)**整定好**PI**控制参数整定步骤整定好**P, T_i** 参数；然后将**P**减小**10%**

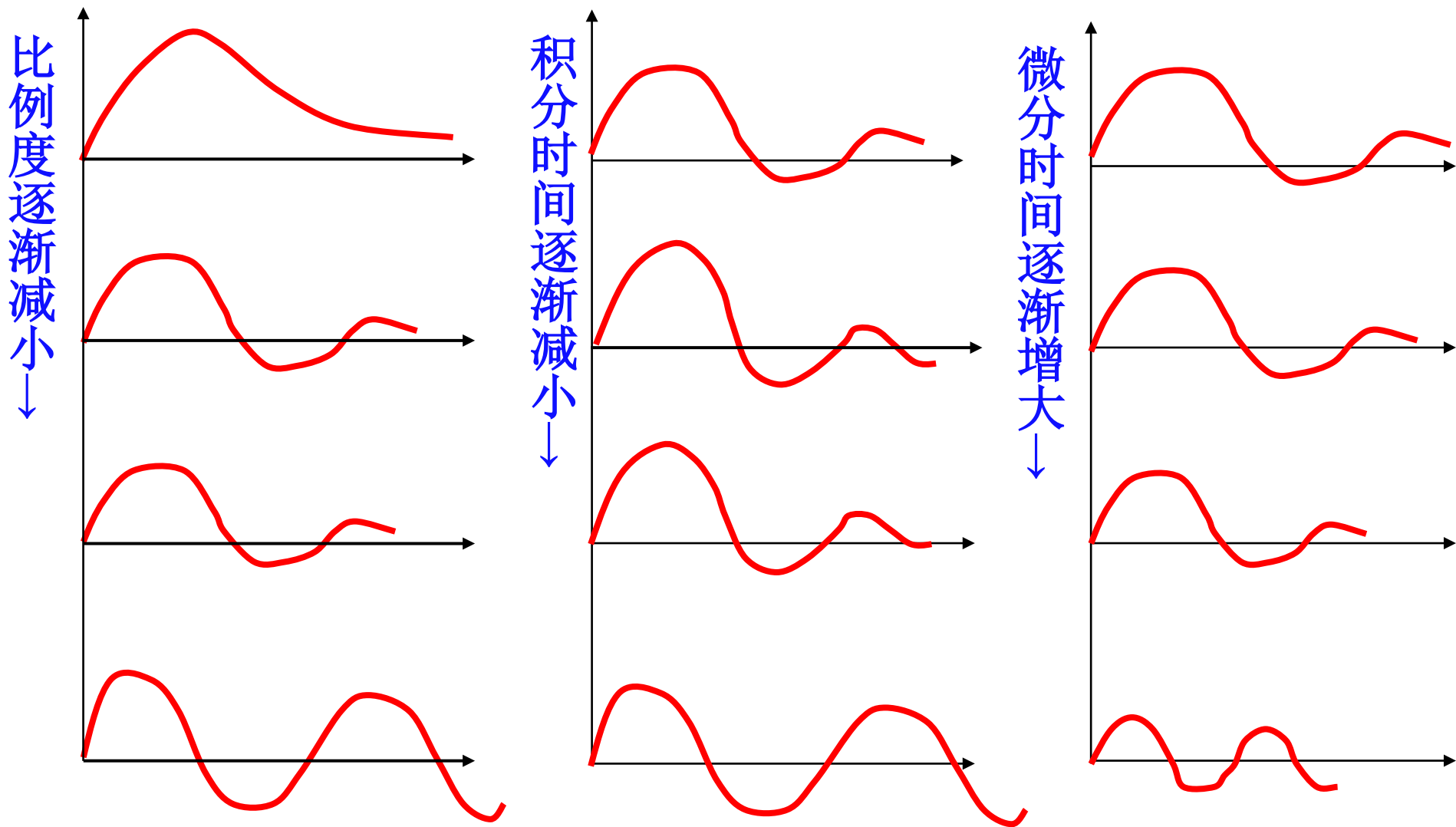
~20%, T_i 适当缩短后, 再把 T_d 由短至长逐步加入, 过渡过程曲线, 直到获得满意的过渡过程。

整定步骤2:

按表6-5给出的范围把 T_i 定下来; 如要引入微分作用, 可取 $T_d = (1/3 \sim 1/4)T_i$; 然后从大到小调整 P , 直到得到满意的结果。

一般说来, 这样可较快找到合适的整定参数值。但如果开始 T_i 和 T_d 设置得不合适, 则可能得不到希望的响应曲线。

控制器参数对控制过程的影响：



如果比例度 P 过小，积分时间 T_i 过短或微分时间 T_d 过长，都会产生周期性的激烈振荡。在用经验法整定过程中，要注意区分几种相似振荡产生的不同原因。一般情况下， T_i 过短引起的振荡周期较长； P 过小引起的振荡周期较短； T_d 过长引起的振荡周期最短。

如果比例度 P 过大或积分时间 T_i 过长，都会使过渡过程变化缓慢。

T_i

6.4.5 几种整定方法的比较

整定方法	优 点	缺 点
响应曲线法	方法简单	系统开环，被调量变化较大，影响生产
稳定边界法	系统闭环	会出现被调量等幅振荡
衰减曲线法	系统闭环，安全	实验费时
经验法	系统闭环，不需计算	需要经验

□ 注意：

同一个系统，最佳整定参数可能不是唯一的。
不同的**PID**参数组合，有时会得到极为相近的控制结果。

例如某蒸馏塔塔顶温度控制系统，控制器采用以下两组参数时：

$$P = 15\% \quad T_I = 7.5\text{min}$$

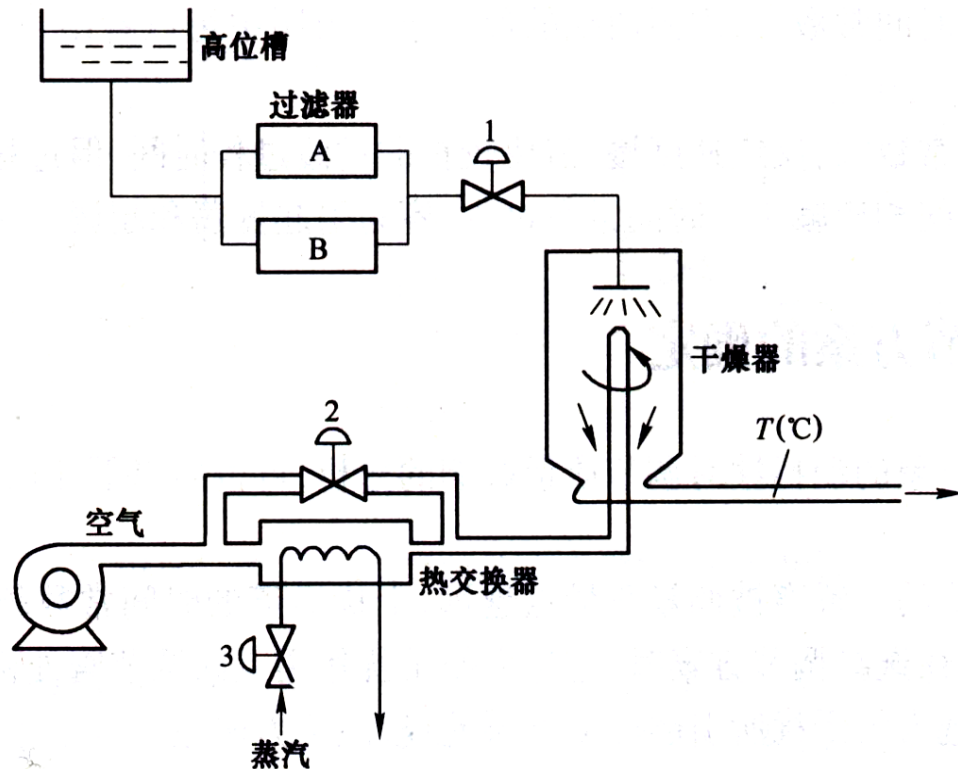
$$P = 35\% \quad T_I = 3 \text{ min}$$

系统都得到**10:1**的衰减曲线，超调量和过渡时间基本相同。

6.5 简单控制系统设计实例

如图是奶粉生产工艺中的喷雾式干燥设备。此工艺要求保证奶粉含水量在2%~2.5%。

6.5.1 生产过程概述



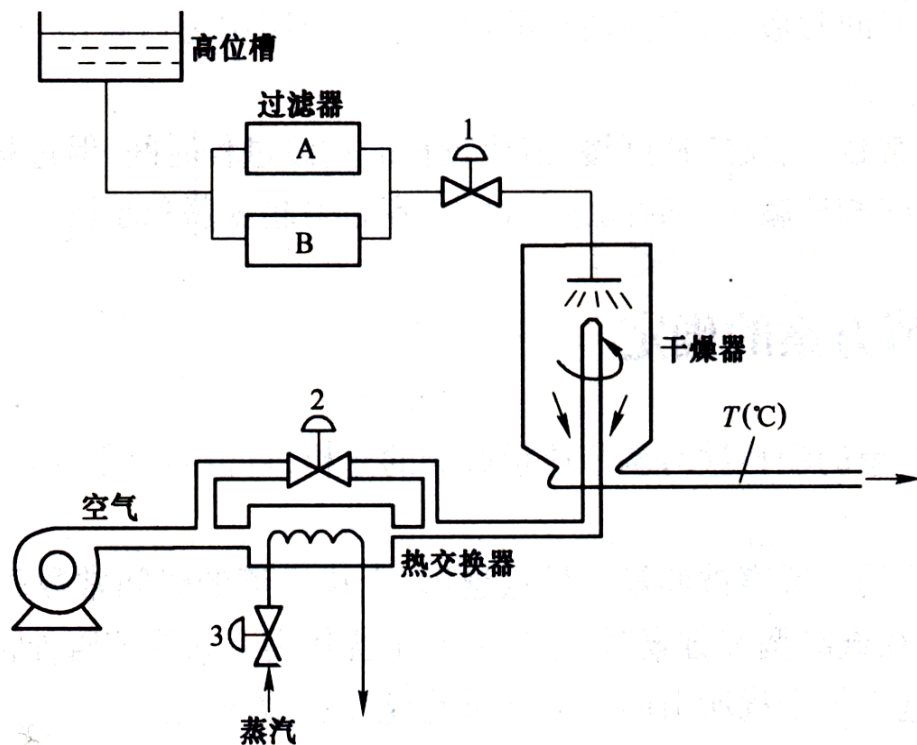
已浓缩的奶液从储槽流下，经过滤后从干燥器顶部喷出。干燥空气被加热后经风管吹入干燥器。滴状奶液在热风中干燥成奶粉，并被气流带出干燥器。

6.5.2 控制方案设计

6.5.2.1 被控参数选择

按工艺要求应首选奶粉含水量为被控变量，但此类在线测量仪表精度低、速度慢。

试验发现，奶粉含水量与干燥器出口温度之间存在单值关系。出口温度稳定在 $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，则奶粉含水量符合 $2\% \sim 2.5\%$ 。因此选干燥器出口流体温度为被控变量。



6.5.2.2 控制变量选择

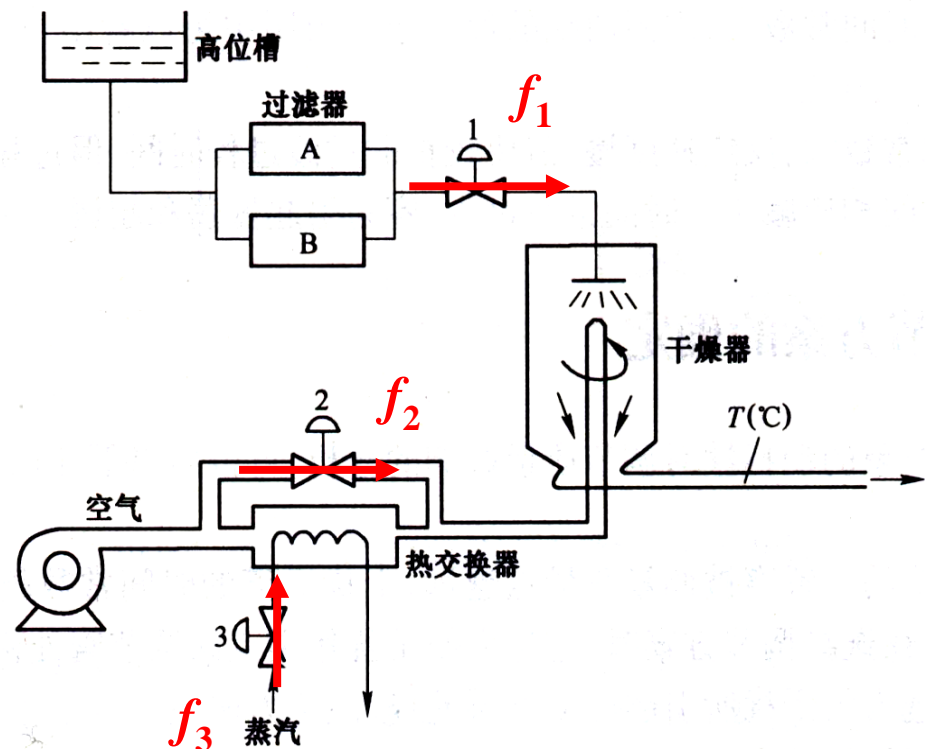
影响干燥器出口奶粉流体温度的主要可控因素有：

乳液流量变化 f_1

旁路空气流量变化 f_2

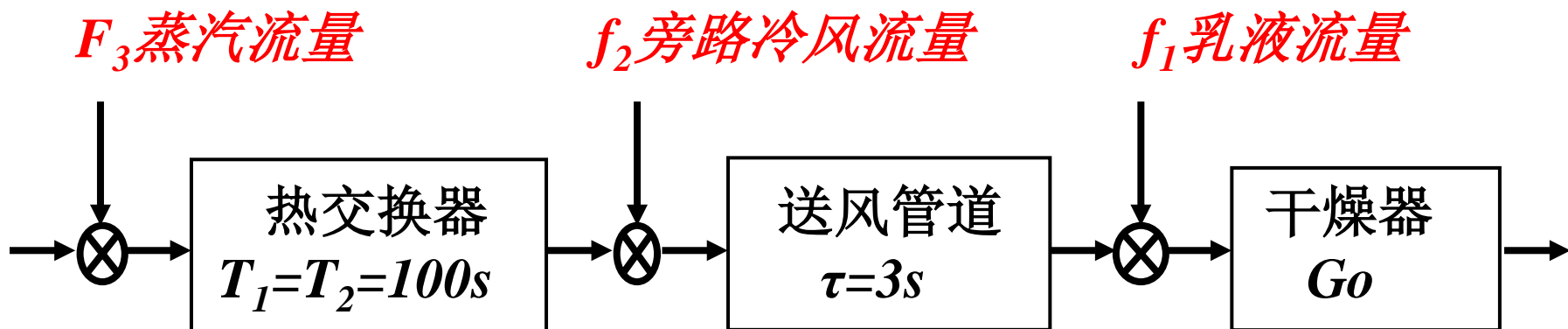
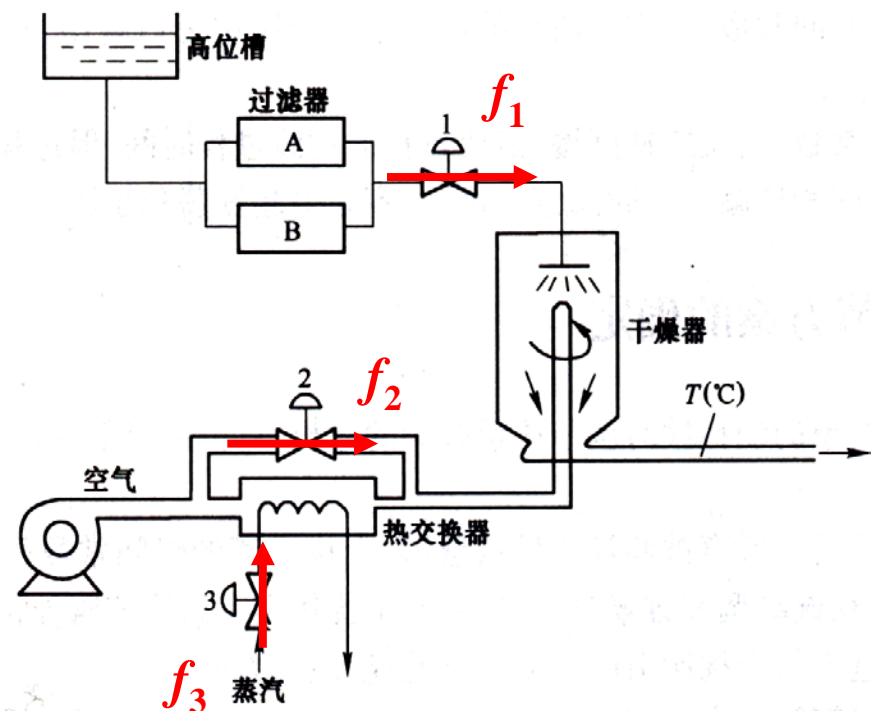
加热蒸汽流量变化 f_3

若分别以这三个变量为控制变量，可以得到三个不同的控制方案。



影响量作用的位置不同：

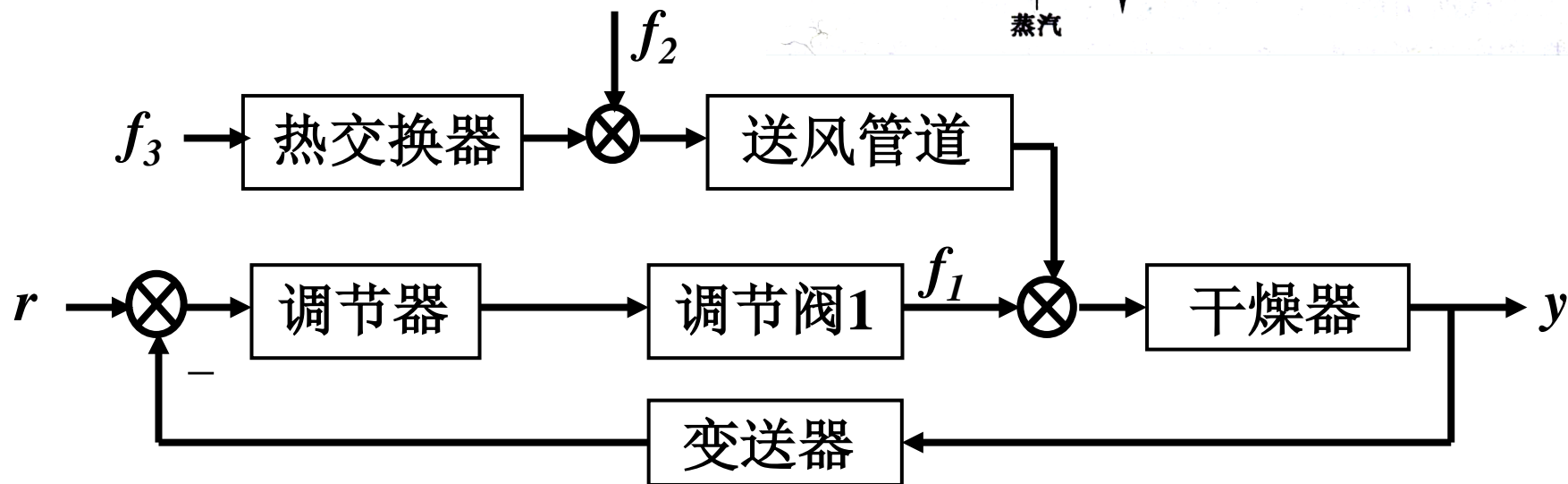
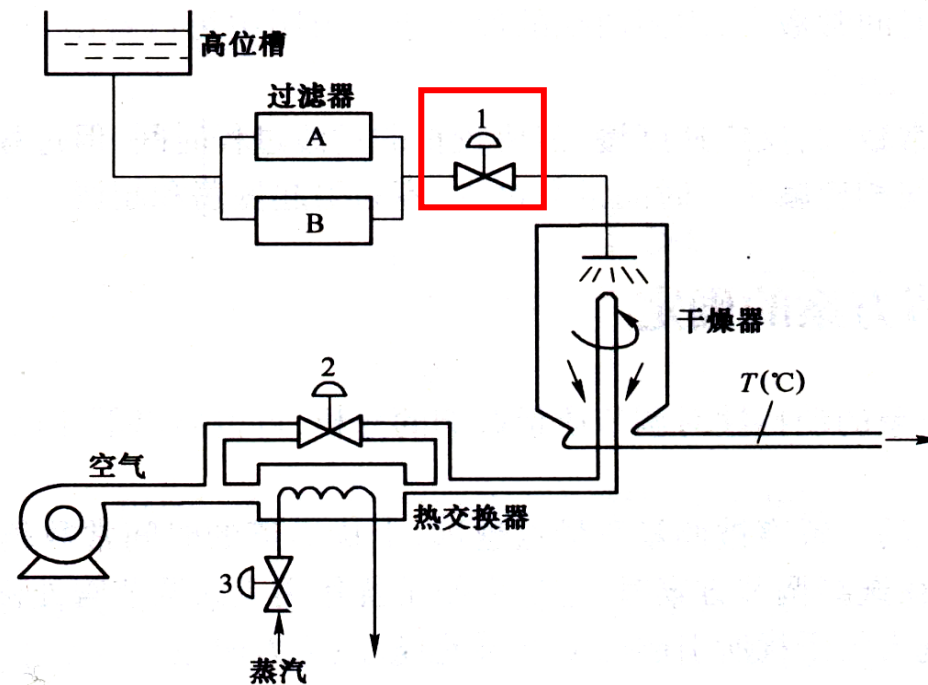
乳液流量变化 f_1 的作用通道最短；旁路空气流量变化 f_2 的作用通道增加了3秒的滞后；加热蒸汽流量变化 f_3 的作用通道又增加了两个100秒的双容滞后。



□ 调节方案:

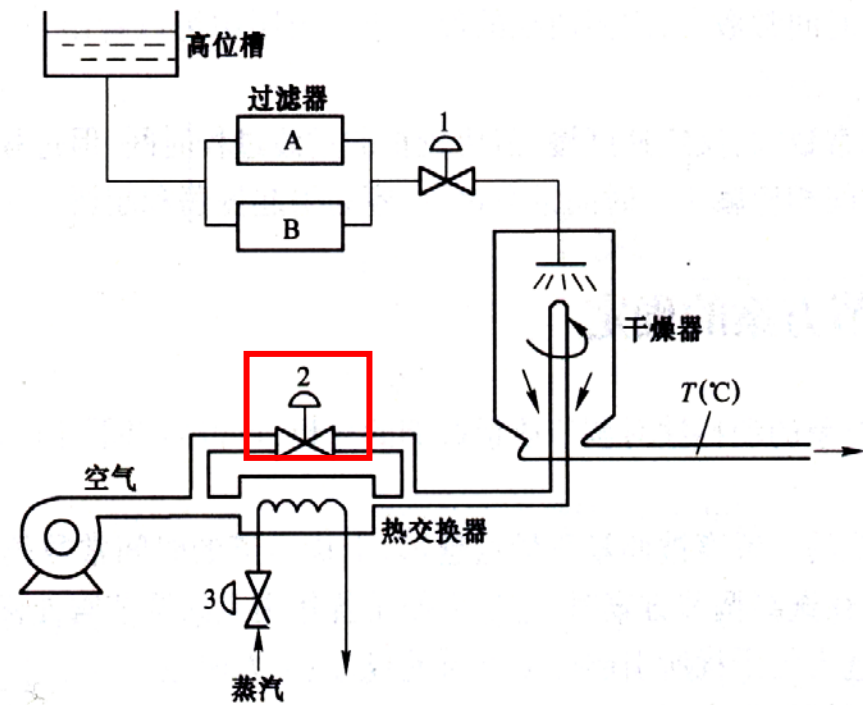
方案1: 取乳液流量
为控制变量 (调节阀1)

❖ 控制通道最短



方案2：取旁通冷风流量为控制变量（调节阀2）

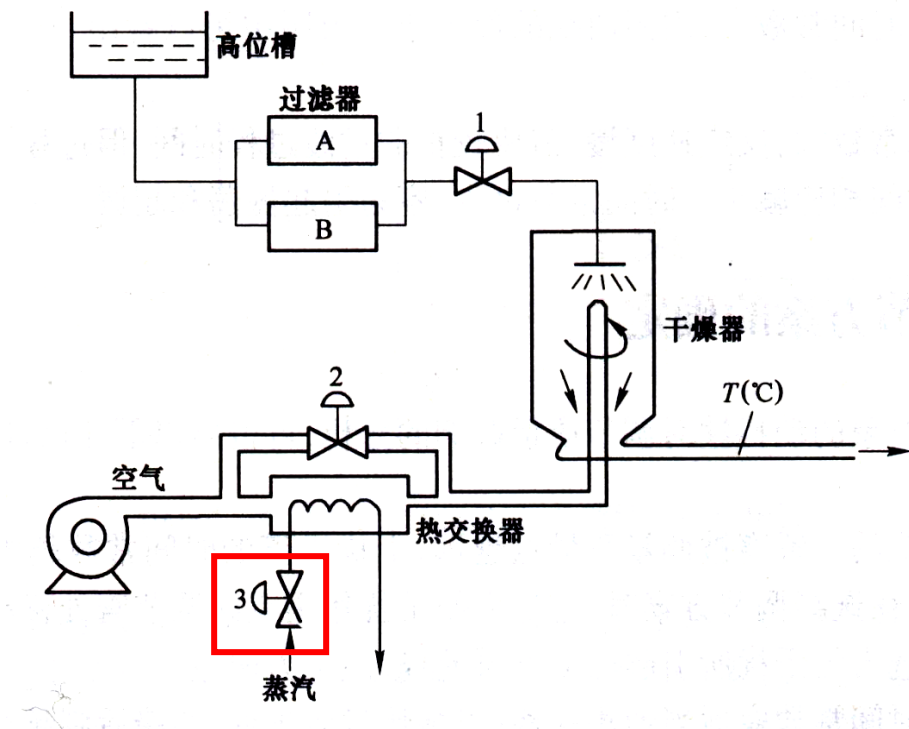
❖ 由于有送风管路的传递滞后存在，较方案1多一个纯滞后环节 $\tau=3s$ 。



原理方框图

方案3：取蒸汽流量
为控制变量（调节阀3）

❖ 热交换器为双容特性，因而调节通道又多了两个容量滞后，时间常数都是 $T = 100\text{s}$ 。



原理方框图

控制参数的选用原则

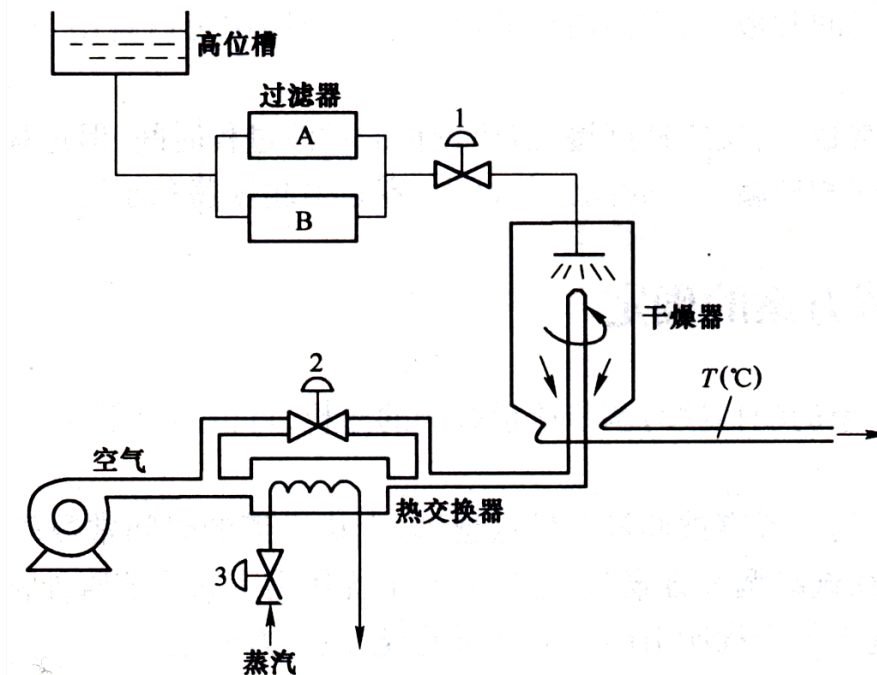
- 控制参数应具有可控性、工艺操作的合理性和经济性，
- 一般情况生产负荷不能作为控制参数
- 选择控制参数应使扰动通道的时间常数越大越好，而控制通道的时间常数应该适当的小一些，纯滞后时间越小越好。（从控制系统易控性角度考虑的）

当 $\tau_f > \tau_0 \quad T_f > T_0$

系统比较好控制。

□ 控制方案的判别:

从控制效果考虑，方案1的调节通道最短，控制性能最佳；方案2次之，方案3最差。但从工艺合理性考虑，方案1并不合适。



因为乳液量应按该装置的最大生产能力控制，且在浓缩乳液管道上装调节阀，容易使调节阀堵塞而影响控制效果。因此，选择方案2比较合适。即：将调节阀装在旁通冷风管道上。

6.5.2.3检测仪表、调节阀及调节器调节规律选择

①温度传感器及变送器

选用热电阻温度传感器。为了减少测量滞后，温度传感器应安装在干燥器出口附近。

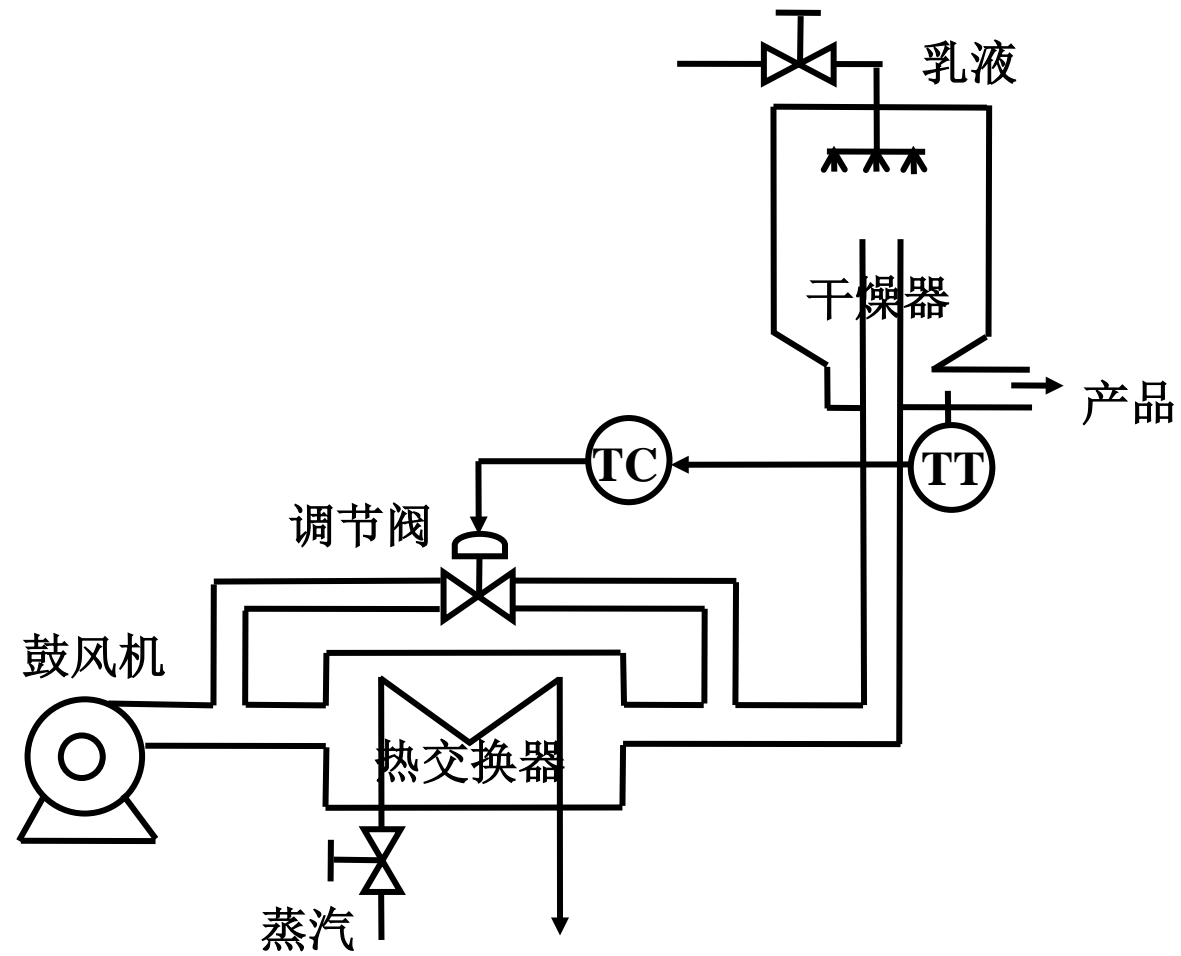
②调节阀

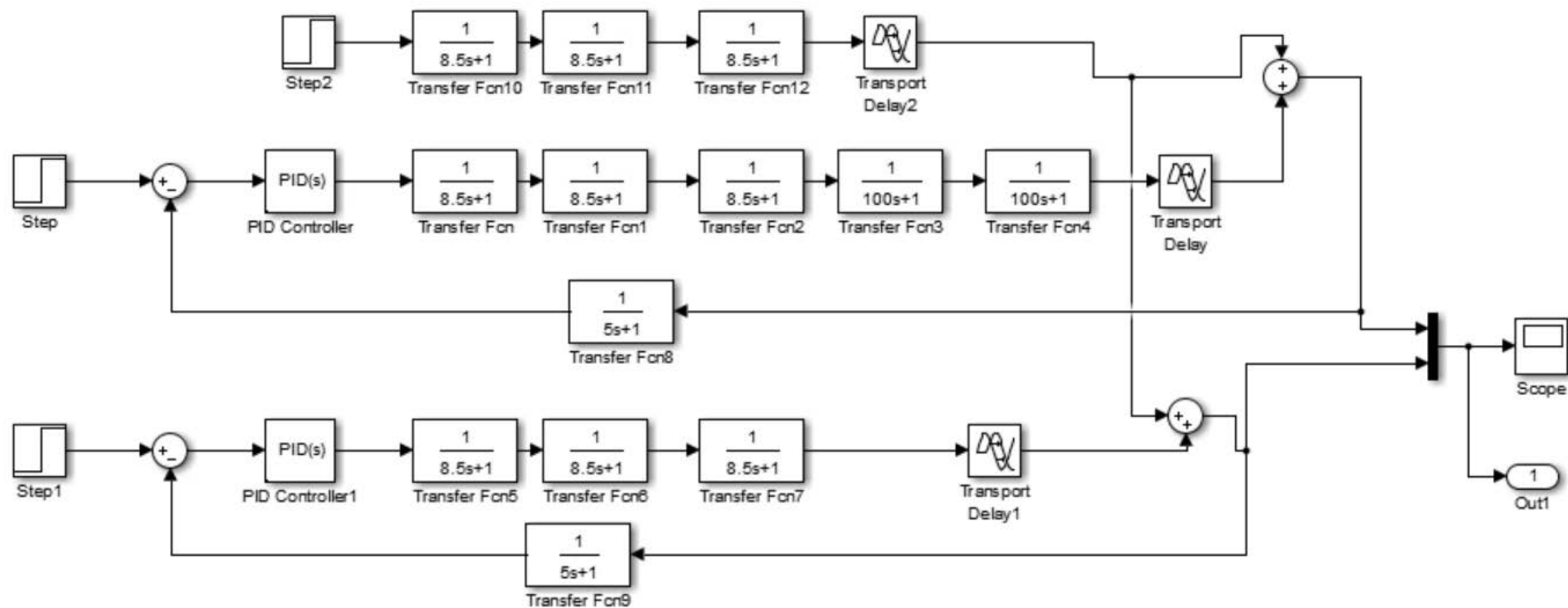
选择气关型调节风阀。其流量特性近似线性。

③调节器

可选模拟式或数字式调节器。根据控制精度要求（偏差 $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$ ），采用PI或PID调节规律；根据构成控制系统负反馈的原则，采用反作用？正作用？

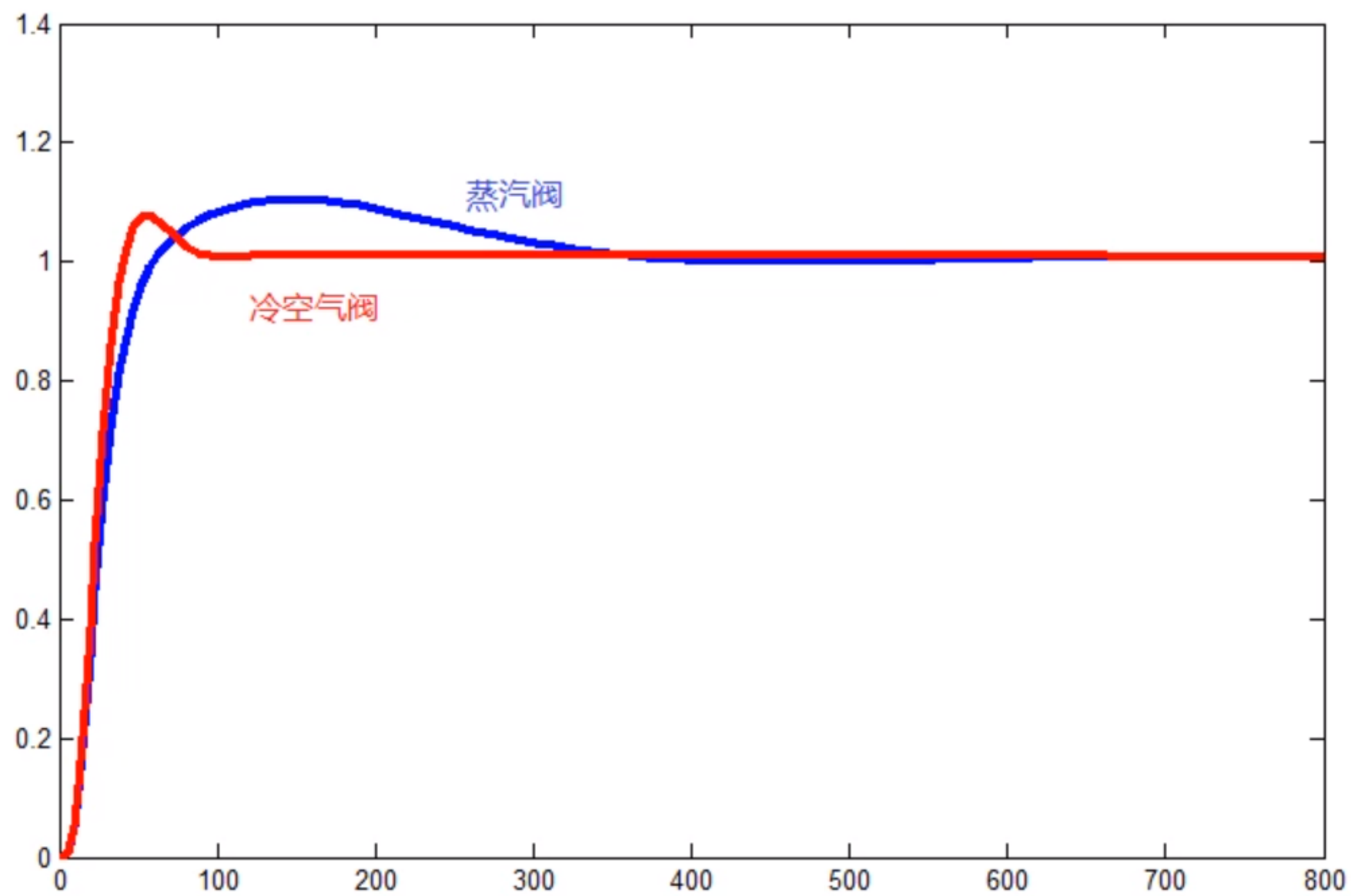
6.5.2.4 绘制带控制点的工艺流程图





上面回路蒸汽阀为控制参数： $P=0.9, I=0.00125$

下面冷空气阀为控制参数： $P=0.25, I=0.000625$



本章小结

简单控制系统
的结构



四个环节组成
闭环负反馈



简单控制系统
的设计



被控变量的选择

控制变量的选择

控制规律的选择

控制参数的整定



本章作业

6-12 6-13

第 7 章 复杂控制系统

简单控制系统是过程控制中最基本、应用最广的控制形式，约占全部控制系统的80%。但是：

- 随着生产过程的大型化和复杂化，操作条件更加严格，变量之间的关系更加复杂。
- 有些生产工艺和控制要求比较特殊。
- 随着技术发展，对工艺的控制目标多样化，如产量、质量、节能、环保、效率等。

为此，设计出各种复杂控制系统。

7.1 串级控制系统

当对象的滞后较大，干扰比较剧烈、频繁时，采用简单控制系统往往控制质量较差，满足不了工艺上的要求，这时，可考虑采用串级控制系统。

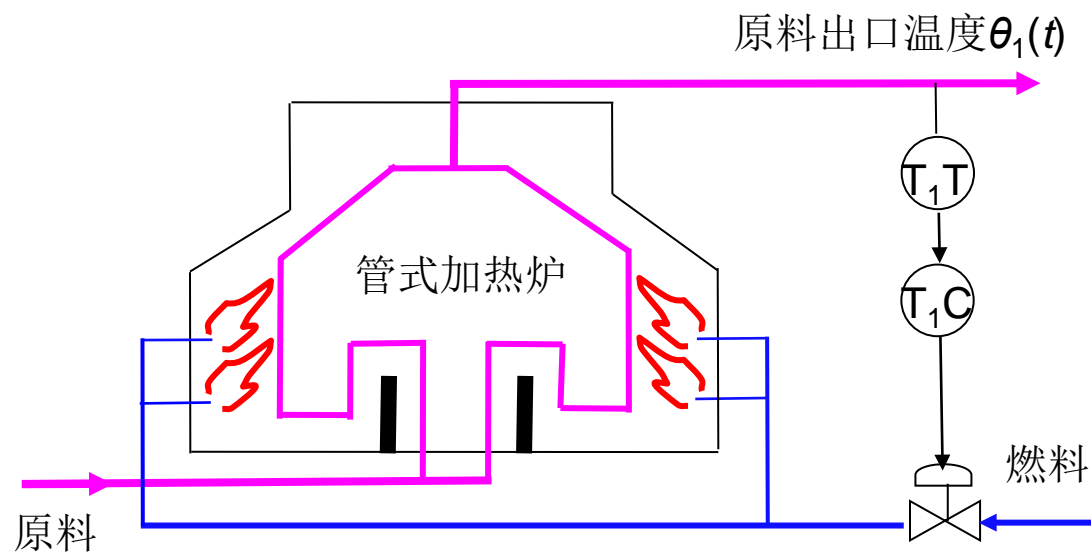
7.1.1 串级控制系统基本结构及工作过程

串级控制是在简单控制系统基础上的改进。

例 管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。

第 7 章 复杂控制系统

若用简单温控系统:



问题:

控制通道容量滞后
很大, 控制缓慢。

燃料压力或燃料的热值
变化

3min



影响炉膛温度



热传导给原料



影响出口温度

第 7 章 复杂控制系统

燃料压力
变化



炉膛温度
变化

⇒
3min

T_2T 、 T_2C 回路先改变燃料量

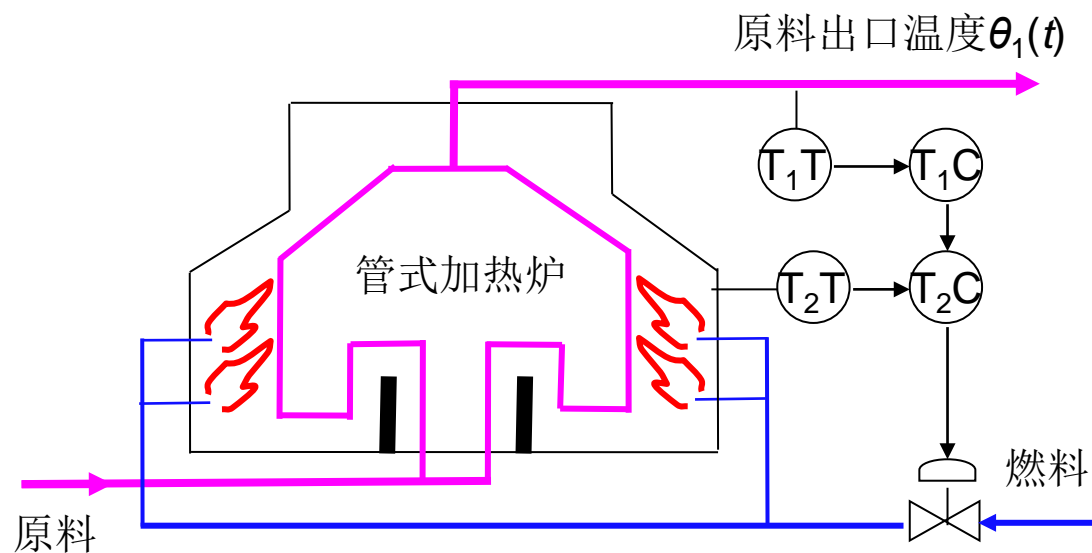


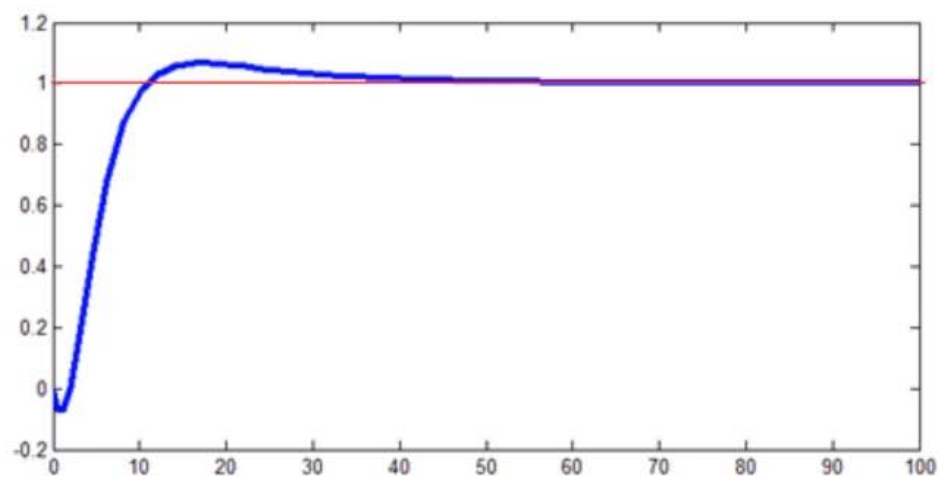
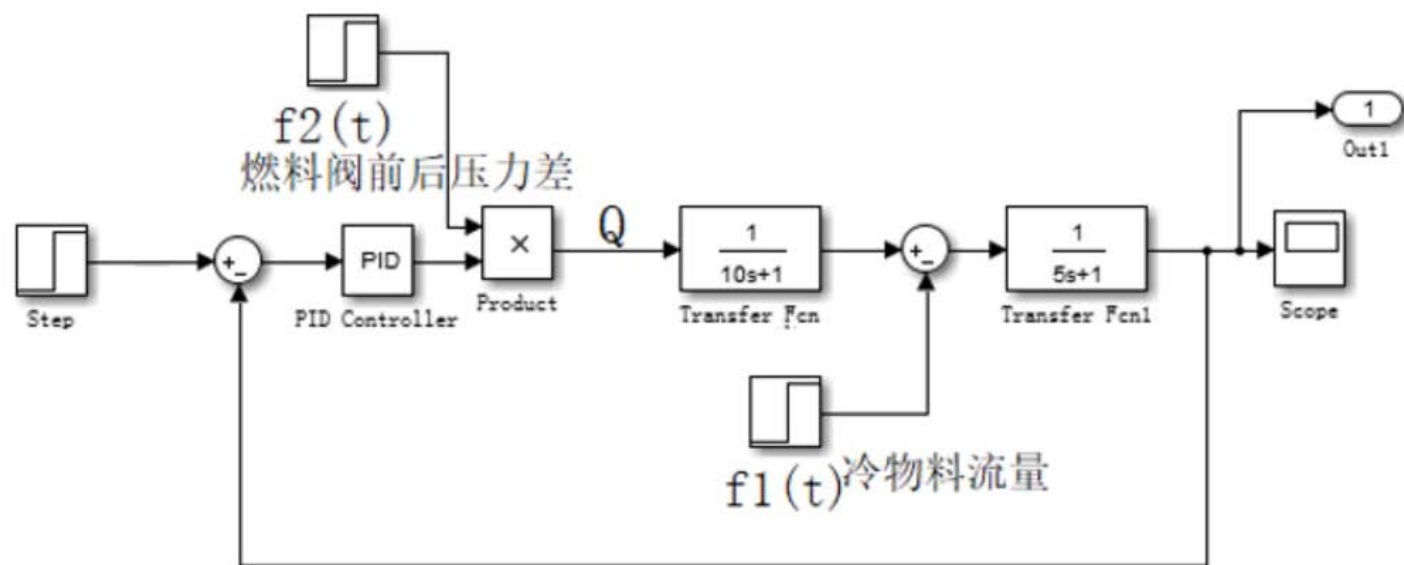
出料温度变化



T_1T 、 T_1C 回路再改
变燃料量

解决措施：在影响出口温度的通道中，加测炉膛温度的变化，提前控制。

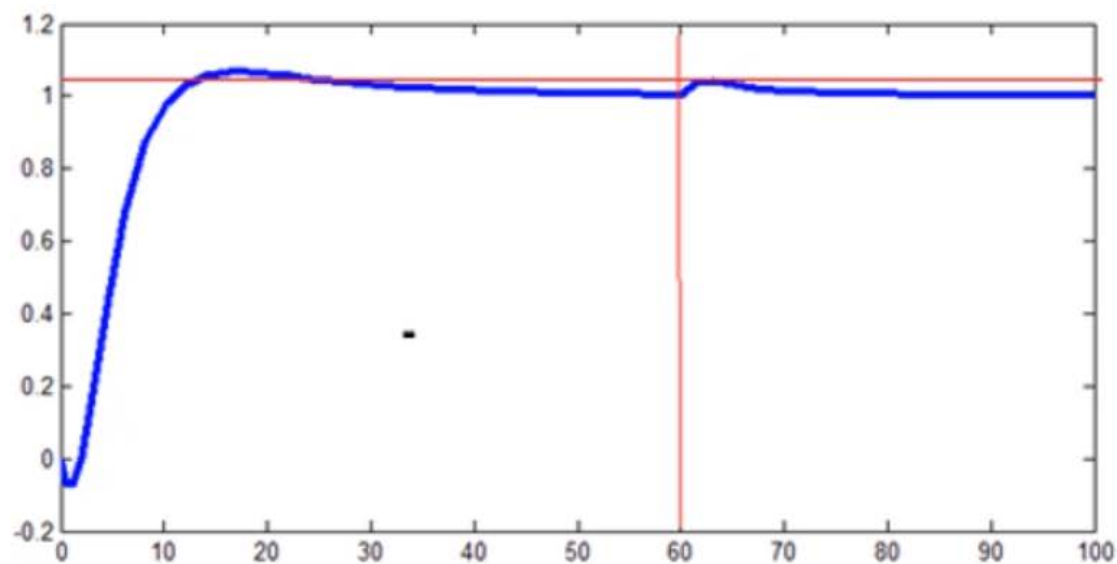
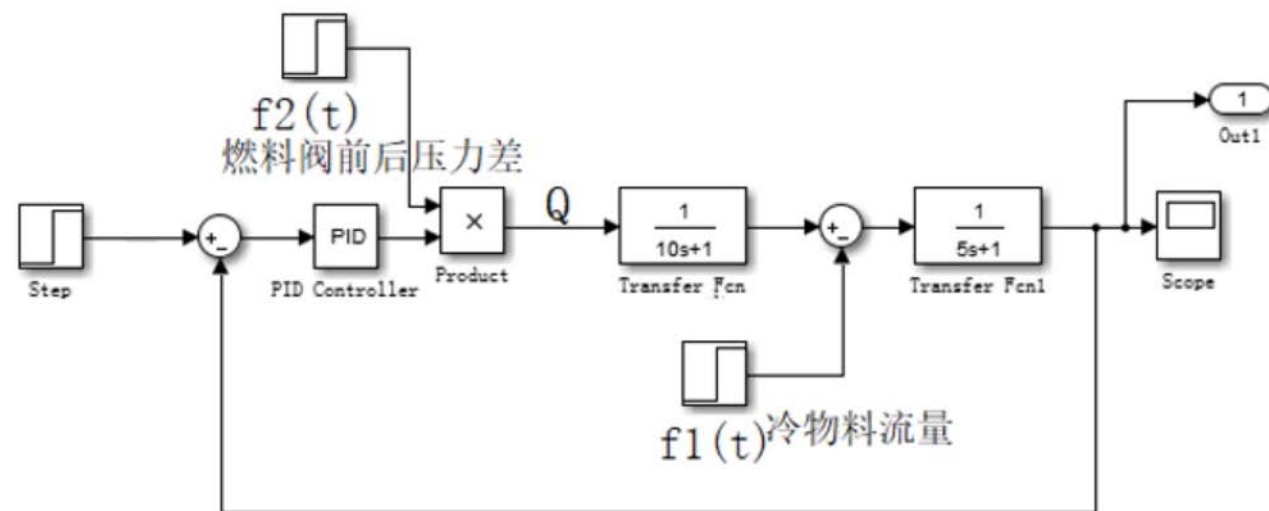




单回路参数整定是在额定压力和冷物料流量下

$$f_1(t) = 1, f_2(t) = 1$$

$$P = 8, I = 0.5, D = 21$$

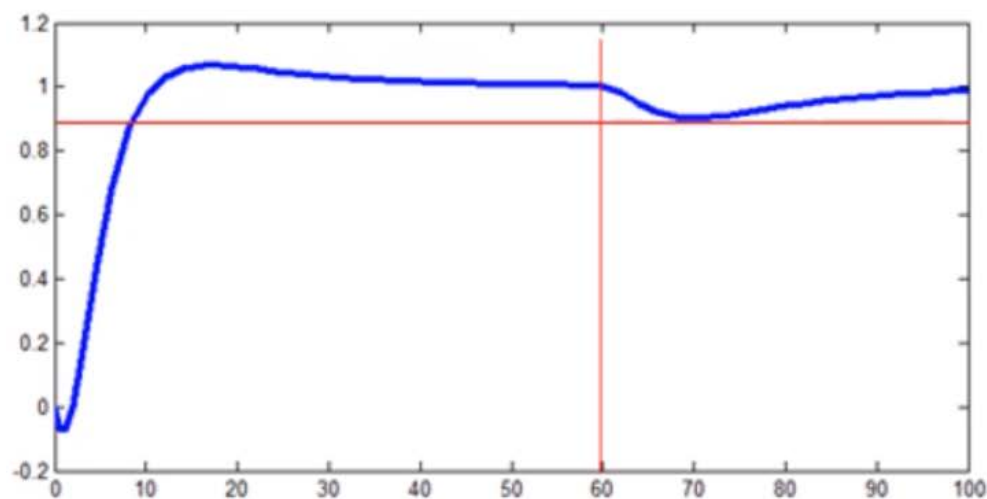
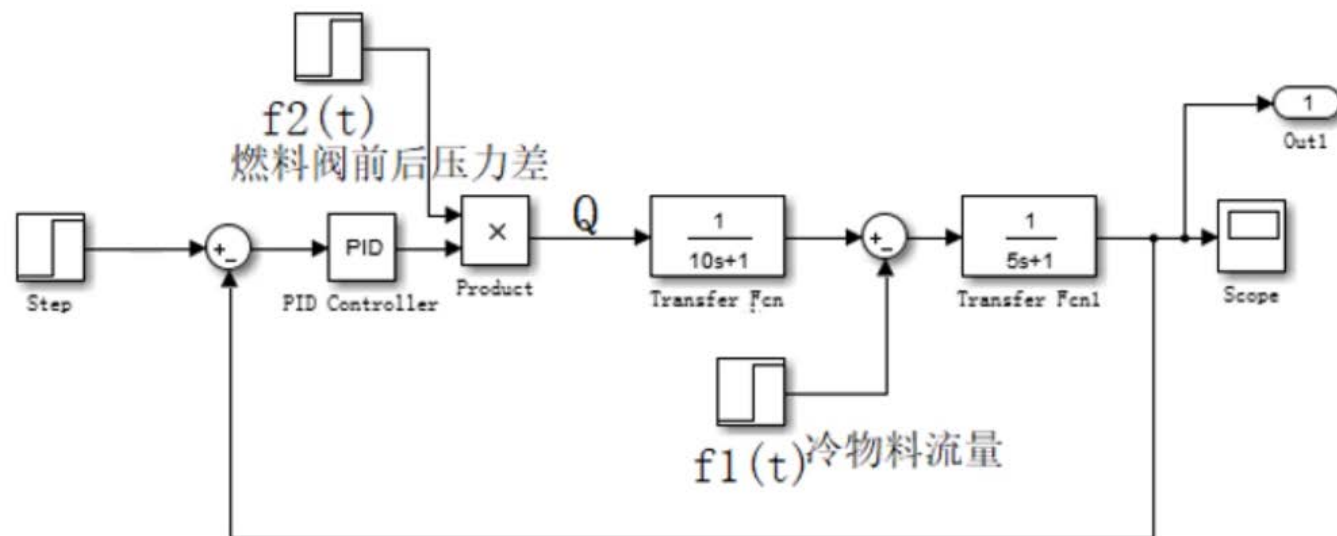


讨论在60分钟冷物料流量

下降到80%

$$f_1(t) = 0.8, f_2(t) = 1$$

$$t = 60$$

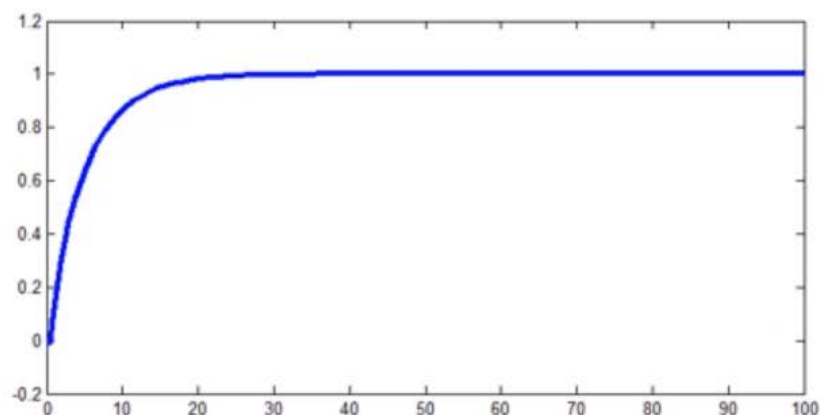
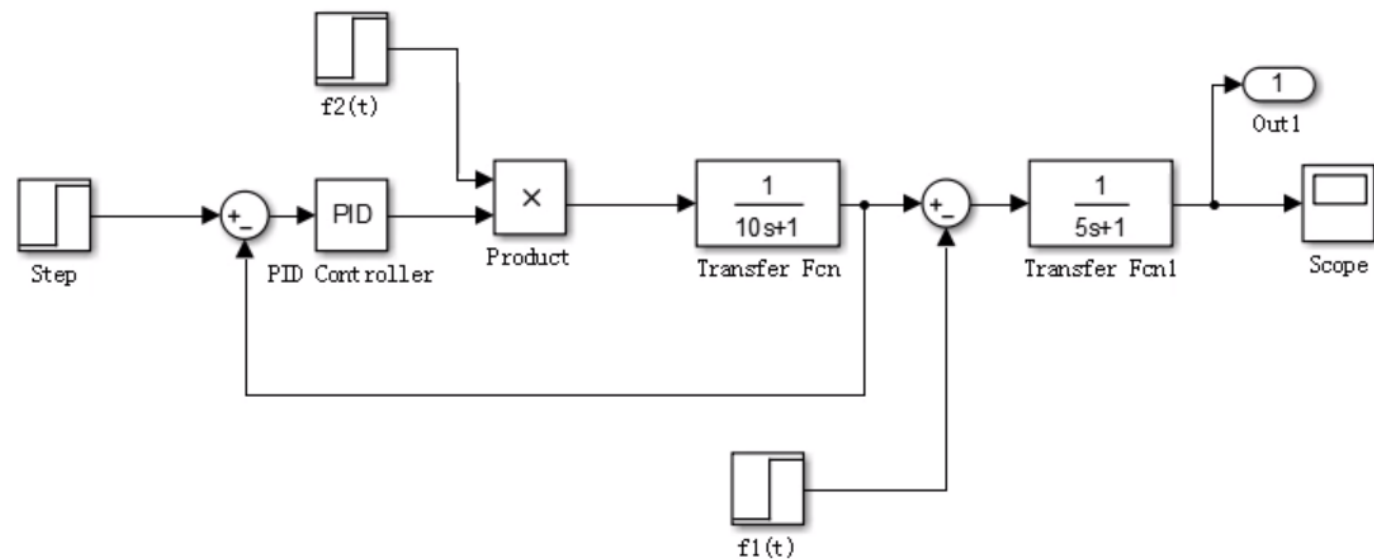


讨论在60分钟燃料压力
下降到64%

$$f_1(t) = 1, f_2(t) = 0.64$$

$$t = 60$$

扰动幅值越大，被控参数偏离给定值越大。

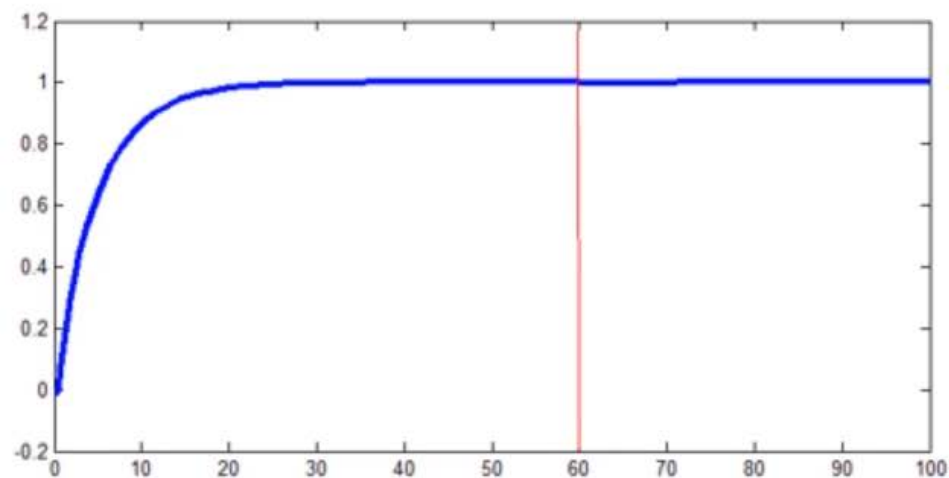


单回路参数整定是在额定压力
和冷物料流量下

$$f_1(t) = 1, f_2(t) = 1$$

$$P = 40, I = 40$$

这个方案PI参数都比前面一个方案参数大很多。

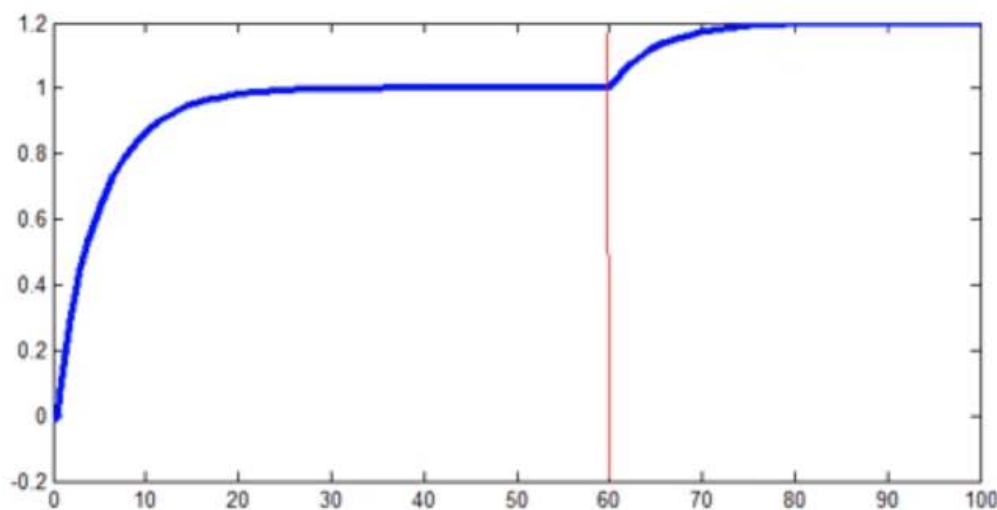


讨论在**60分钟**燃料压力
下降到**64%**

$$f_1(t) = 1, f_2(t) = 0.64$$

$$t = 60$$

方案B受扰动 Δp 的影响几乎没有。



讨论在**60分钟**冷物料下
降到**80%**

$$f_1(t) = 0.8, f_2(t) = 1$$

$$t = 60$$

第 7 章 复杂控制系统

燃料压力
变化



炉膛温度
变化

⇒
3min

T_2T 、 T_2C 回路先改变燃料量

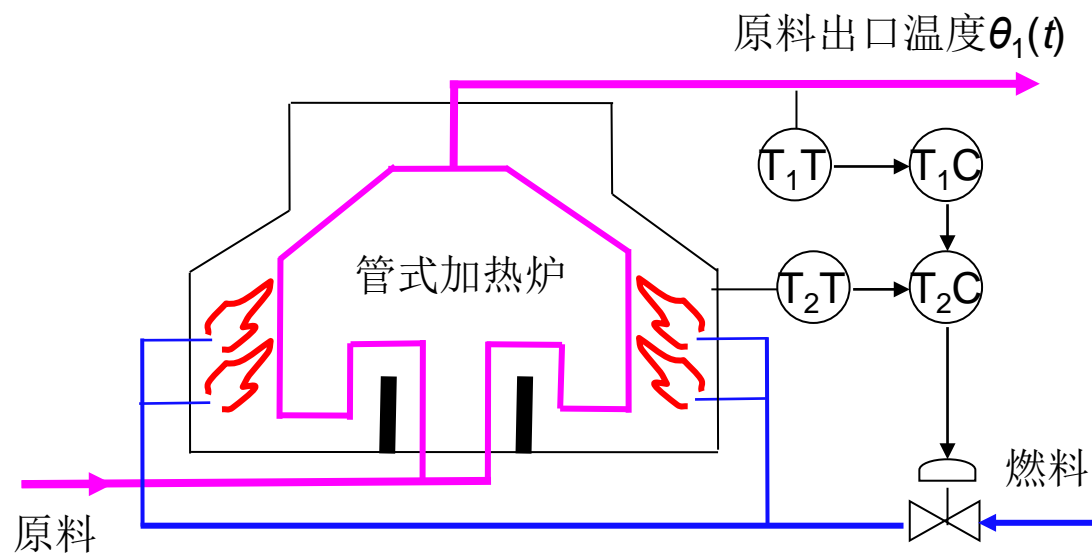


出料温度变化



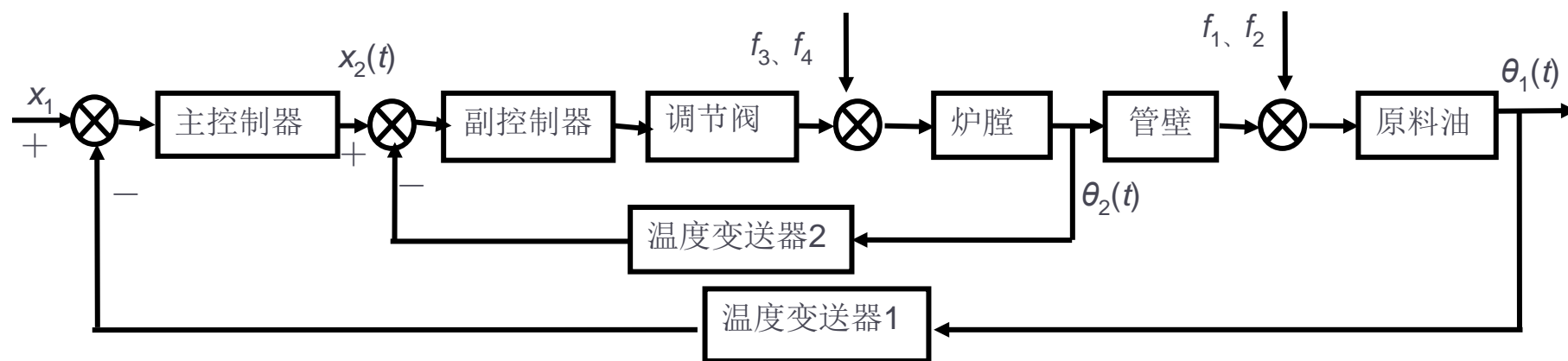
T_1T 、 T_1C 回路再改
变燃料量

解决措施：在影响出口温度的通道中，加测炉膛温度的变化，提前控制。

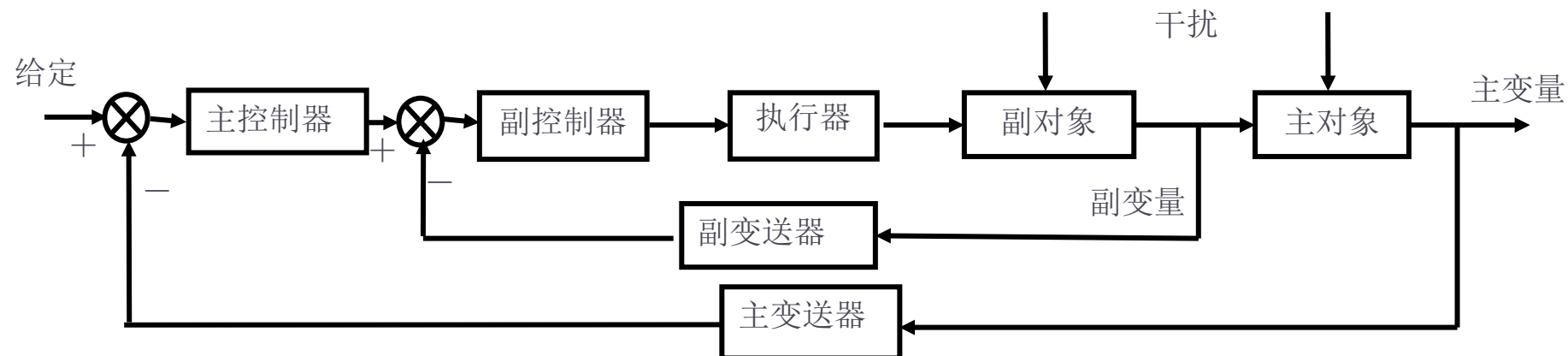


第 7 章 复杂控制系统

管式加热炉出口温度串级控制系统框图为：



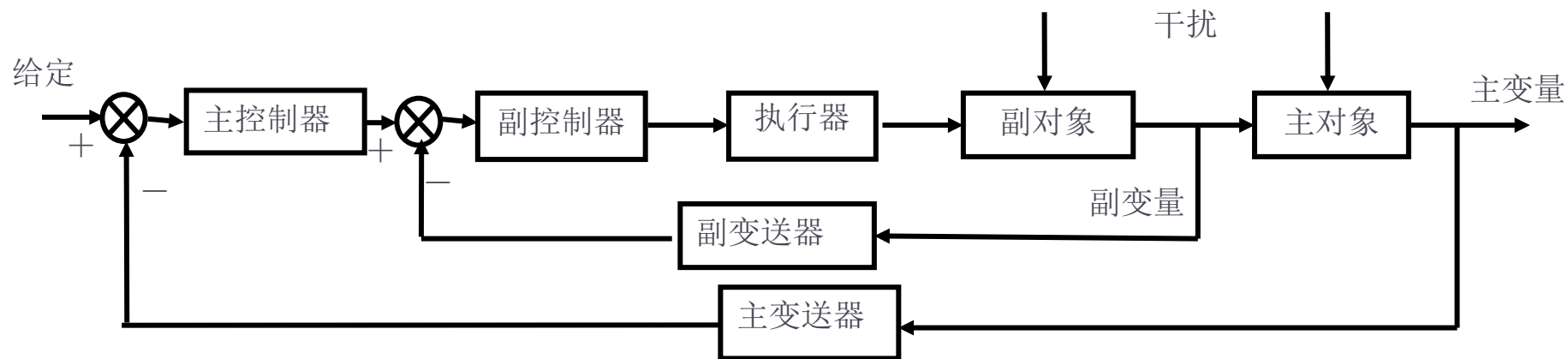
标准框图为：



第 7 章 复杂控制系统

结构特点:

- 系统有两个闭合回路，形成内外环。主变量是工艺要求控制的变量，副变量是为了更好地控制主变量而选用的辅助变量。
- 主、副调节器是串联工作的，主调节器的输出作为副调节器的给定值。

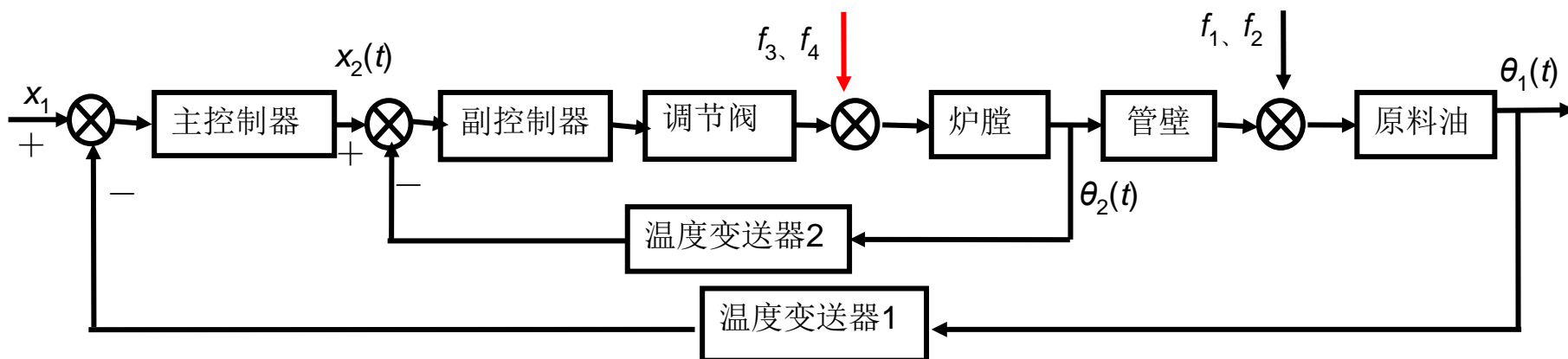


第 7 章 复杂控制系统

控制过程分析：

1. 燃料压力 $f_3(t)$ 、燃料热值 $f_4(t)$ 发生扰动——干扰进入副回路

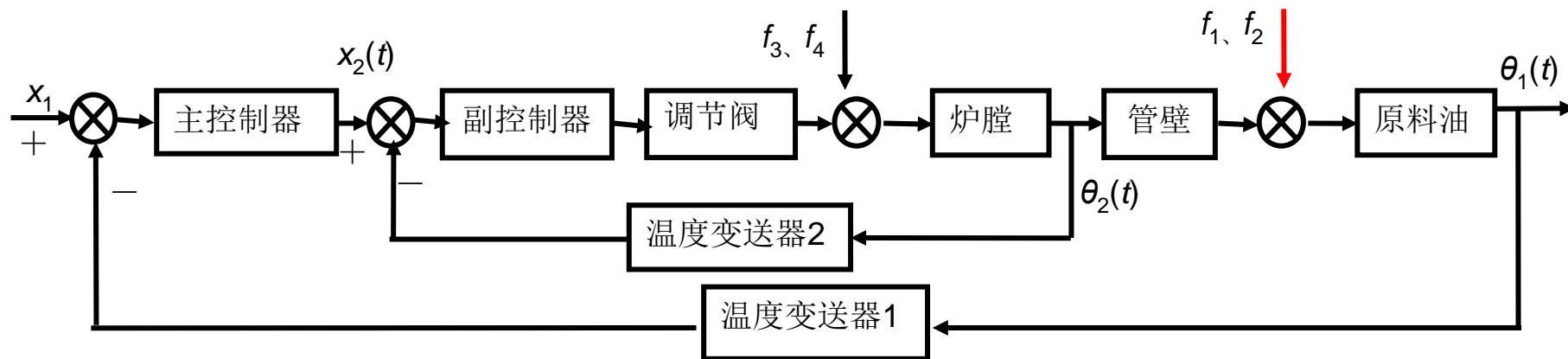
进入副回路的干扰首先影响炉膛温度，副变送器提前测出，副控制器立即开始控制，控制过程大为缩短。



第 7 章 复杂控制系统

2. 原油流量 $f_1(t)$ 、原油入口温度 $f_2(t)$ 发生扰动——干扰进入主回路

对进入主回路的干扰，虽然副变送器不能提前测出，但副回路的闭环负反馈，使对象炉膛部分特性的时间常数大为缩短，则主控制器的控制通道被缩短，控制效果也得到改善。



第 7 章 复杂控制系统

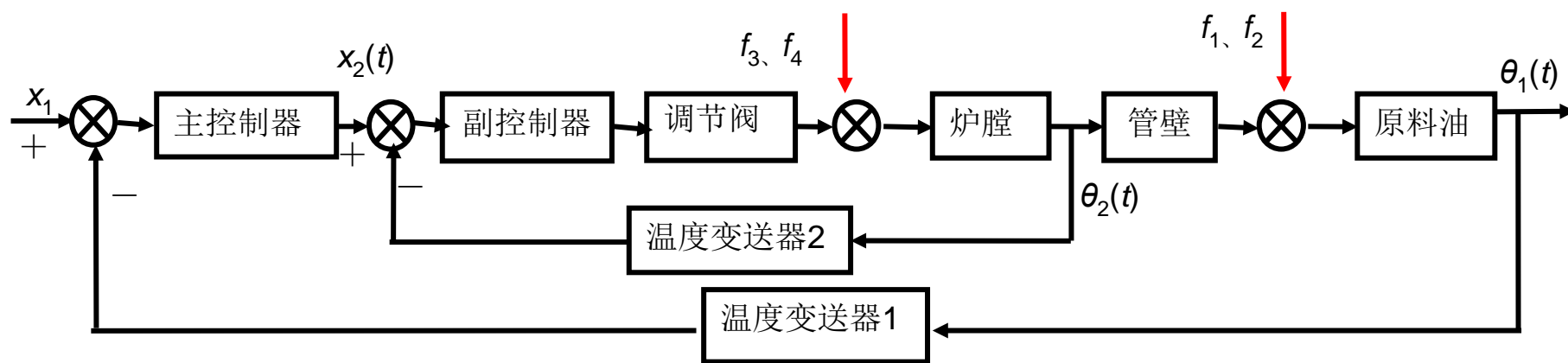
3. 干扰同时作用于副回路和主回路

主副回路干扰的综合影响有两种情况：

(1) 主副回路的干扰影响方向相同。如：

燃料压力 $f_3(t) \uparrow \rightarrow$ 炉膛温度 $\uparrow \rightarrow$ 出口温度 \uparrow
 \rightarrow 副控制器开始调节

原油流量 $f_1(t) \downarrow \rightarrow$ 出口温度 $\uparrow \rightarrow$ 主副控制器共同调节

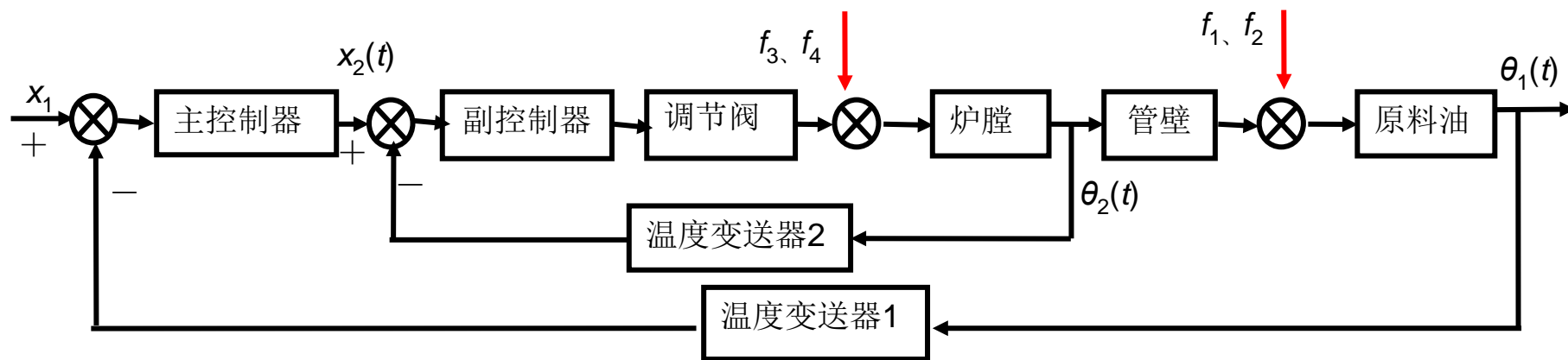


第 7 章 复杂控制系统

(2) 主副回路的干扰影响方向相反。如：

燃料压力 $f_3(t) \uparrow \rightarrow$ 炉膛温度 $\uparrow \rightarrow$ 出口温度 \uparrow
 \rightarrow 副控制器开始调节

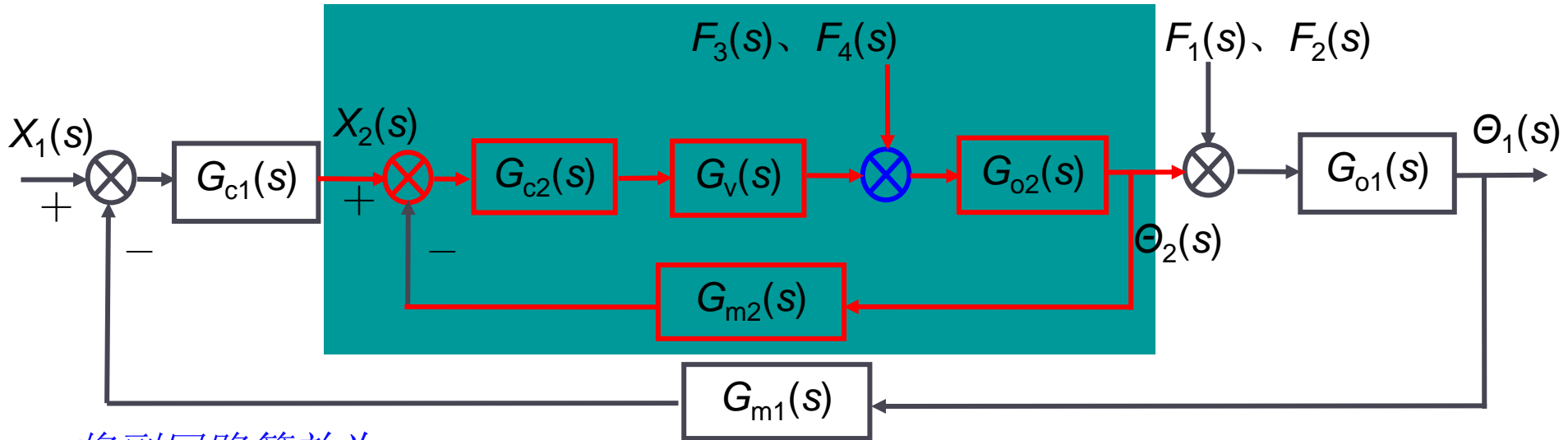
原油流量 $f_1(t) \uparrow \rightarrow$ 出口温度 $\downarrow \rightarrow$ 主控制器反向调节，
使副控制器调节量减小。



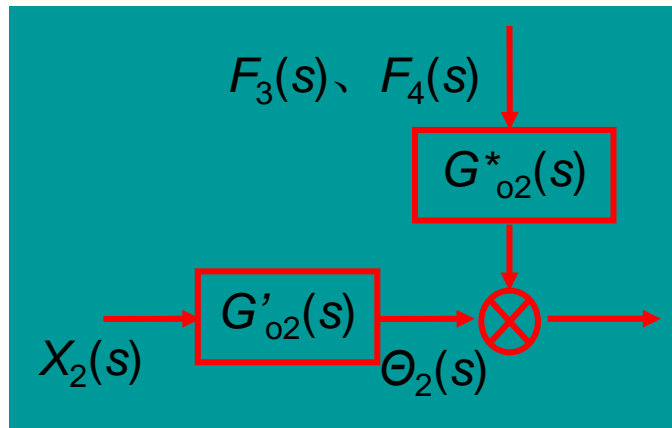
第 7 章 复杂控制系统

7.1.2 串级控制系统特点及其分析

将串级控制系统等效成单回路控制系统讨论。



将副回路等效为:



$$G_{02}'(s) = \frac{G_{c2}(s) \cdot G_v(s) \cdot G_{02}(s)}{1 + G_{c2}(s) \cdot G_v(s) \cdot G_{02}(s) \cdot G_{m2}(s)}$$

$$G_{02}^*(s) = \frac{G_{02}(s)}{1 + G_{c2}(s) \cdot G_v(s) \cdot G_{02}(s) \cdot G_{m2}(s)}$$

第 7 章 复杂控制系统

7.1.2.1 改善被控过程的动态特性

控制通道等效副对象的传函：

$$G_{02}'(s) = \frac{G_{C2}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{02}(s)}{1 + G_{C2}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{02}(s) \cdot G_{m2}(s)}$$

设：

$$G_{C2}(s) = K_{C2} \quad G_V(s) = K_V \quad G_{02}(s) = \frac{K_{02}}{T_2 s + 1}$$
$$G_{m2}(s) = K_{m2}$$

则：

$$G_{02}'(s) = \frac{\frac{K_{C2} K_V K_{02}}{1 + K_{C2} K_V K_{02} K_{m2}}}{1 + \frac{T_2}{1 + K_{C2} K_V K_{02} K_{m2}} s}$$

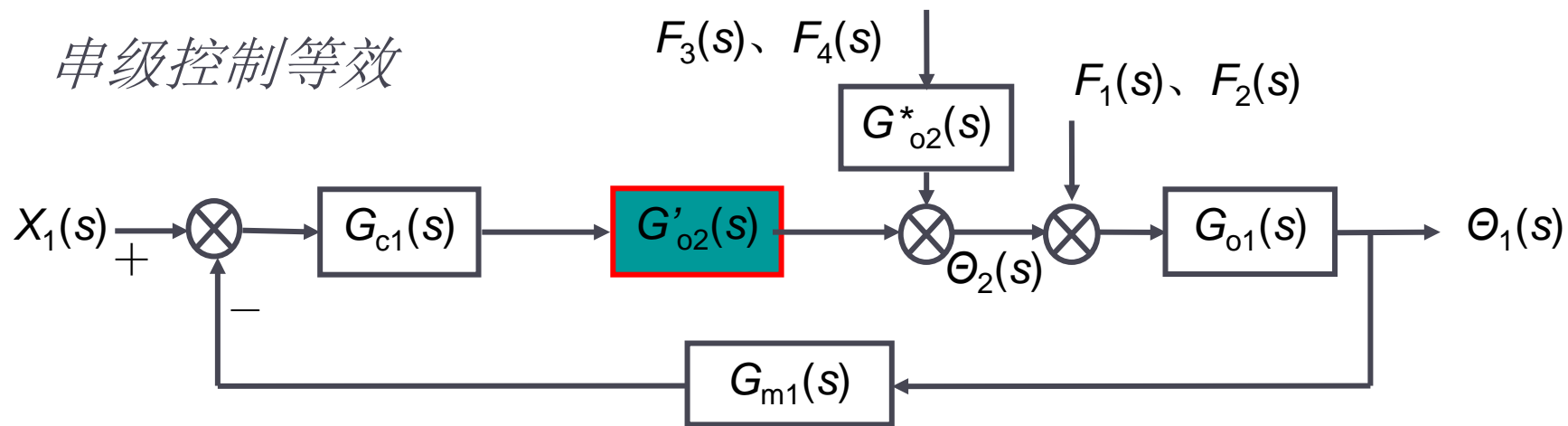
$K_{02}' \approx 1/K_{m2}$

$T_{02}' \ll T_{02}$

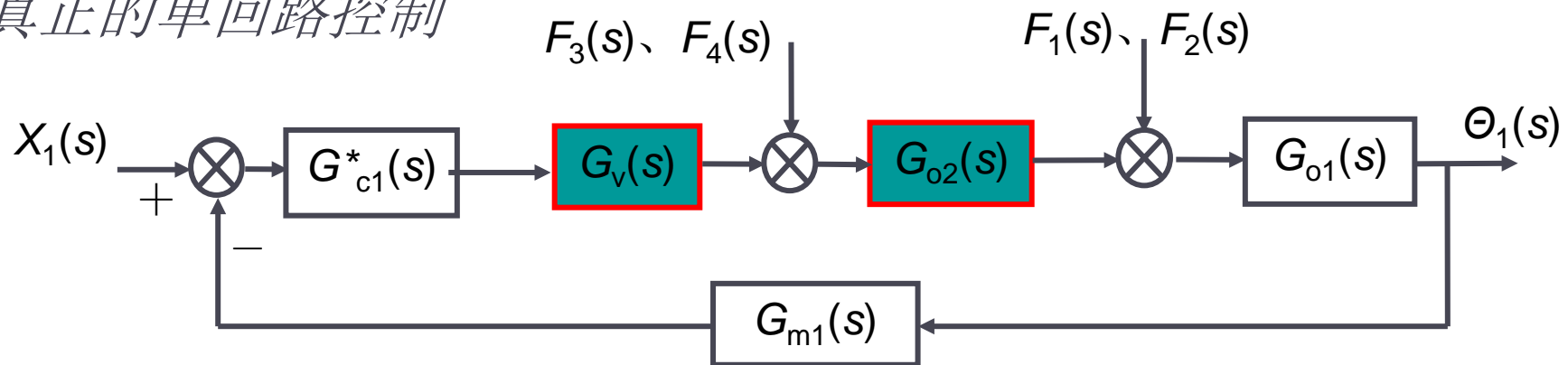
第 7 章 复杂控制系统

$T_{02}' \ll T_{02}$ ，说明主环控制通道时间常数缩短，改善了系统的动态性能。

串级控制等效



真正的单回路控制

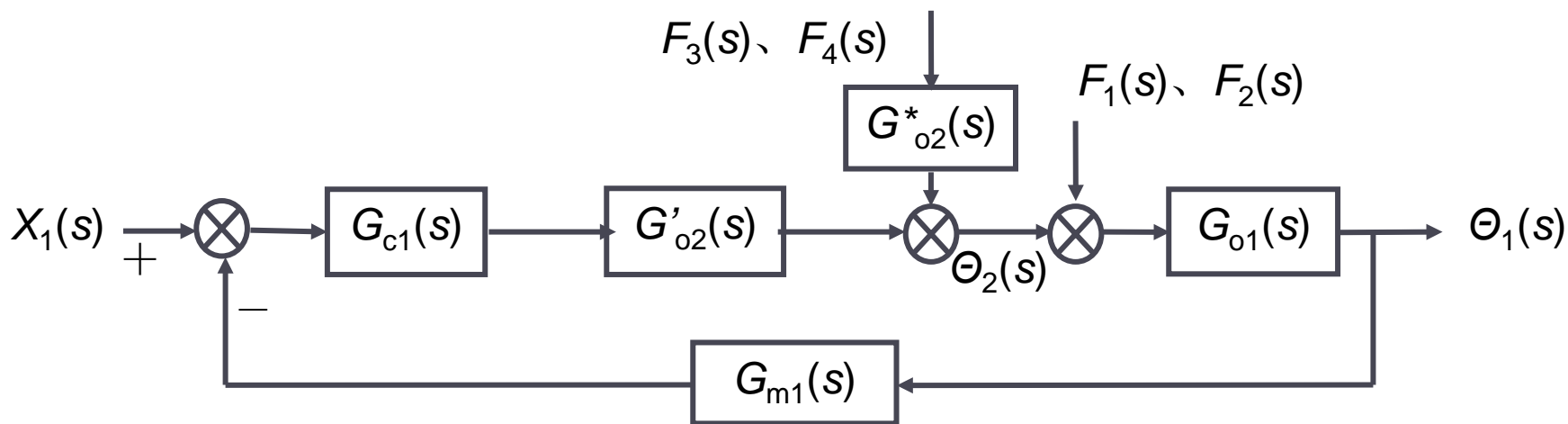


第 7 章 复杂控制系统

同理，通过对系统振荡频率的推导可知：

副回路的引入，提高了系统的工作频率，也改善了系统的动态性能。

从系统特征方程： $1 + G_{c1}(s)G'_{o2}(s)G_{o1}(s)G_{m1}(s) = 0$
可求出系统的工作频率 ω_c



第 7 章 复杂控制系统

假设 $G_{01} = \frac{K_{01}}{T_{01}s + 1}$ 、 $G_{c1}(s) = K_{c1}$ 、 $G_{m1}(s) = K_{m1}$ ，代入特征方程得

$$s^2 + \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01}T'_{02}}s + \frac{1 + K_{c1}K'_{02}K_{01}K_{m1}}{T_{01}T'_{02}} = 0$$

$$\text{令} \quad 2\xi\omega_0 = \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01}T'_{02}} \quad \omega_0 = \frac{1 + K_{c1}K'_{02}K_{01}K_{m1}}{T_{01}T'_{02}}$$

特征方程可写为： $s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2 = 0$

其特征根为：

$$s_{1,2} = \frac{-2\xi\omega_0 \pm \sqrt{4\xi^2\omega_0^2 - 4\omega_0^2}}{2} = -\xi\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}$$

第 7 章 复杂控制系统

当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时，系统出现振荡，振荡频率为

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{2\xi} \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01} T'_{02}}$$

若采用单回路控制系统，在系统特征方程为：

$$1 + G_{c1}^*(s)G_V(s)G_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s) = 0$$

假设 $G_{c1}^*(s) = K_{c1}^*$ ，其他环节与串级相同，将各环节传函代入上式可得 $s^2 + 2\xi_d \omega_{d0} s + \omega_{d0}^2 = 0$

$$\text{其中 } 2\xi_d \omega_{d0} = \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01} T_{02}} \quad \omega_{d0}^2 = \frac{1 + K_{c1}^* K_v K_{02} K_{01} K_{m1}}{T_{01} T_{02}}$$

同理可得单回路系统振荡频率为

$$\omega_d = \omega_{d0} \sqrt{1 - \xi_d^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi_d^2}}{2\xi_d} \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01} T_{02}}$$

第 7 章 复杂控制系统

如果通过调节器参数整定，使串级系统和单回路控制系统具有相同的衰减率，即 $\xi = \xi_d$ ，则

$$\frac{\omega_c}{\omega_d} = \frac{\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{2\xi} \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01}T'_{02}}}{\frac{\sqrt{1-\xi_d^2}}{2\xi_d} \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01}T_{02}}} = \frac{1 + \frac{T_{01}}{T'_{02}}}{1 + \frac{T_{01}}{T_{02}}}$$

由于 $T_{02} \gg T'_{02}$ ，则有 $1 + \frac{T_{01}}{T'_{02}} \gg 1 + \frac{T_{01}}{T_{02}}$ ，所以

$$\omega_c \gg \omega_d$$

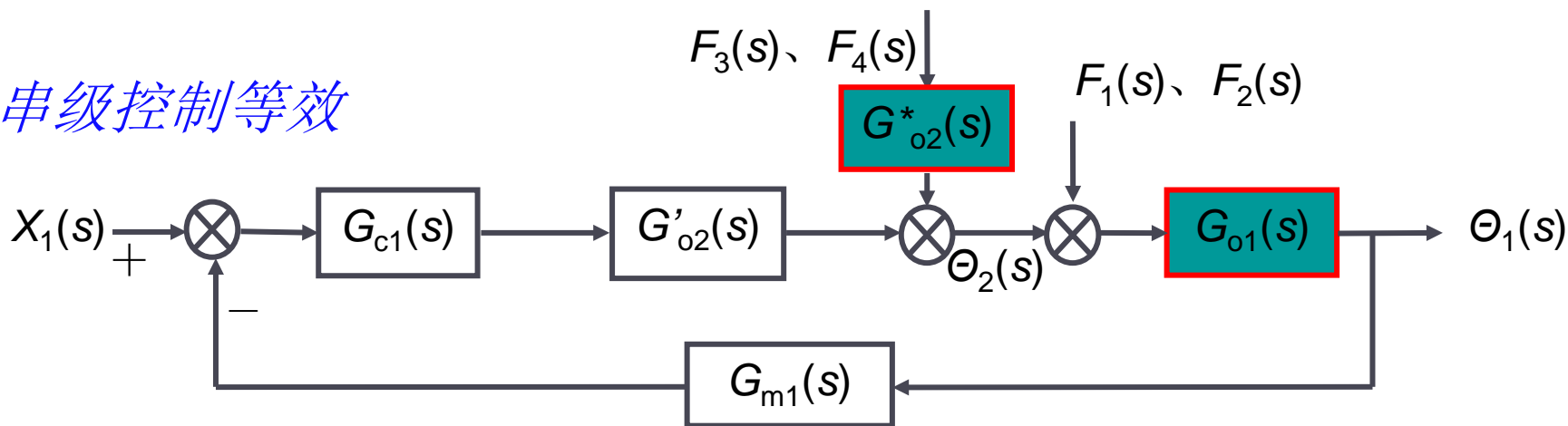
所以串级系统提高了系统的工作频率，改善了控制品质。

第 7 章 复杂控制系统

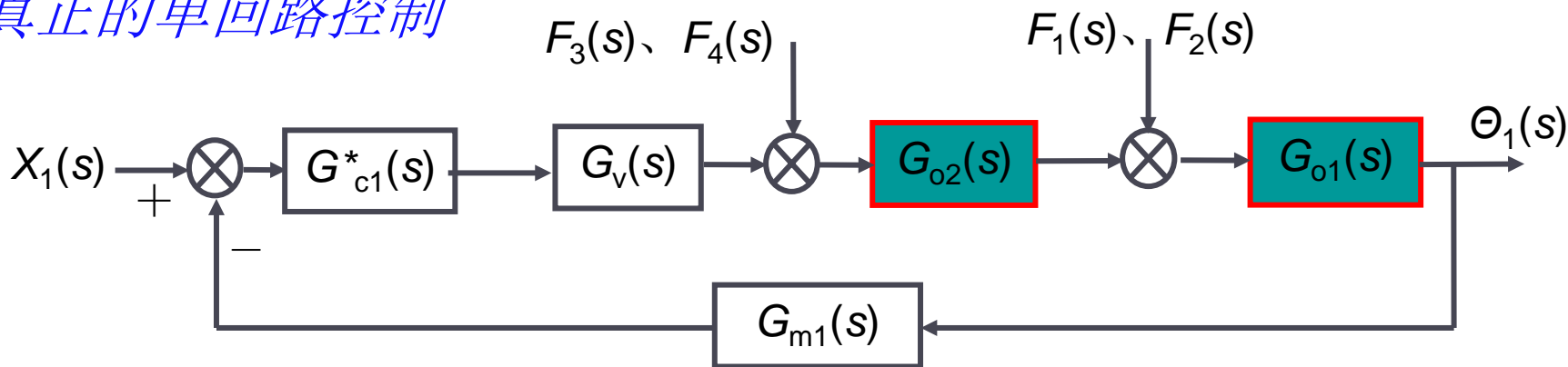
7.1.2.2 抗干扰能力增强

对于进入副回路的干扰，串级控制和单回路控制前向通道的区别：

串级控制等效



真正的单回路控制



第 7 章 复杂控制系统

干扰 $F_3(s)$ 与副回路输出之间的传函:

$$G_{02}^*(s) = \frac{G_{02}(s)}{1 + G_{C2}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{02}(s) \cdot G_{m2}(s)}$$

系统输入 $X_1(s)$ 与被控参数 $\Theta_1(s)$ 之间的传递函数:

$$\frac{\Theta_1(s)}{X_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G'_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G'_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

干扰 $F_3(s)$ 与被控参数 $\Theta_1(s)$ 之间的传函:

$$\frac{\Theta_1(s)}{F_3(s)} = \frac{G_{02}^*(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G'_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

第 7 章 复杂控制系统

串级系统对 $F_3(s)$ 抗干扰能力 J_{c3} 为:

$$\begin{aligned} J_{c3} &= \frac{\Theta_1(s)/X_1(s)}{\Theta_1(s)/F_3(s)} = \frac{G_{c1}(s)G'_{02}(s)G_{01}(s)}{G_{02}^*(s)G_{01}(s)} = \frac{G_{c1}(s)G'_{02}(s)}{G_{02}^*(s)} \\ &= G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s) \end{aligned}$$

为了同单回路控制系统相比较，用同样方法计算系统对 $F_3(s)$ 的抗干扰能力

系统输入 $X_1(s)$ 与被控参数 $\Theta_1(s)$ 之间的传递函数:

$$\frac{\Theta_1(s)}{X_1(s)} = \frac{G_{c1}^*(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}^*(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

第 7 章 复杂控制系统

干扰 $F_3(s)$ 与被控参数 $\Theta_1(s)$ 之间的传函：

$$\frac{\Theta_1(s)}{F_3(s)} = \frac{G_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}^*(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

单回路控制系统对 $F_3(s)$ 的抗干扰能力：

$$\begin{aligned} J_{k3} &= \frac{\Theta_1(s)/X_1(s)}{\Theta_1(s)/F_3(s)} = \frac{G_{c1}^*(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)}{G_{02}(s)G_{01}(s)} \\ &= G_{c1}^*(s)G_v(s) \end{aligned}$$

串级系统与单回路系统对进入副回路干扰 $F_3(s)$ 的抗干扰能力之比：

$$\frac{J_{c3}}{J_{k3}} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)}{G_{c1}^*(s)G_v(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)}{G_{c1}^*(s)}$$

第 7 章 复杂控制系统

设串级控制系统的主、副调节器均为比例调节：

$G_{c1}(s) = K_{c1}$, $G_{c2}(s) = K_{c2}$, 单回路控制系统调节器也为比例调节： $G_{c1}^*(s) = K_{c1}^*$, 所以有

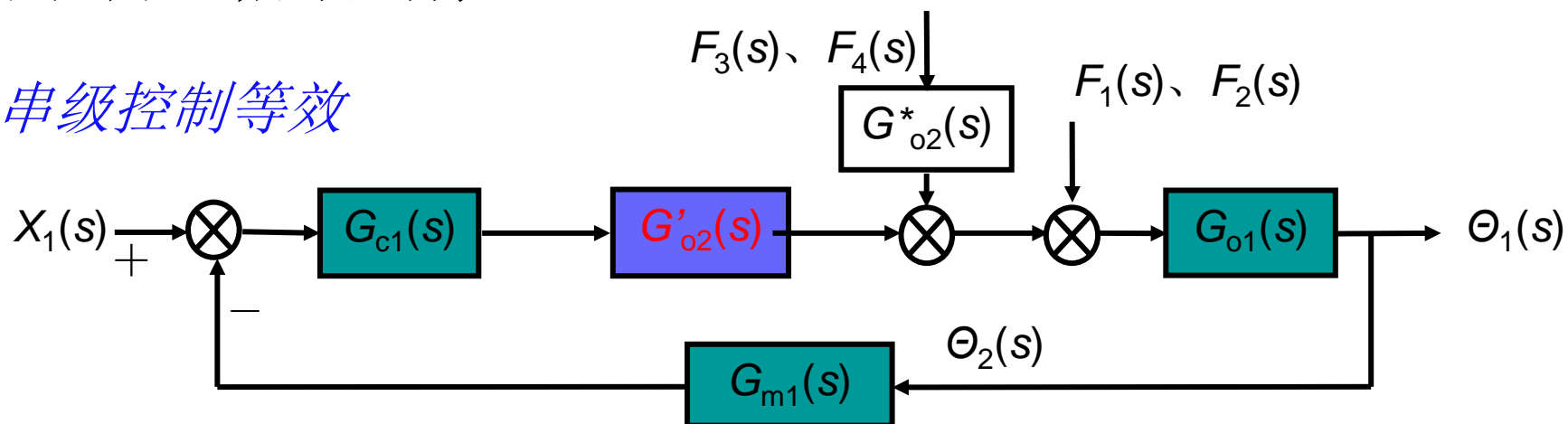
$$\frac{J_{c3}}{J_{k3}} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)}{G_{c1}^*(s)} = \frac{K_{c1}K_{c2}}{K_{c1}^*}$$

一般情况下，总有： $K_{c1}K_{c2} > K_{c1}^*$

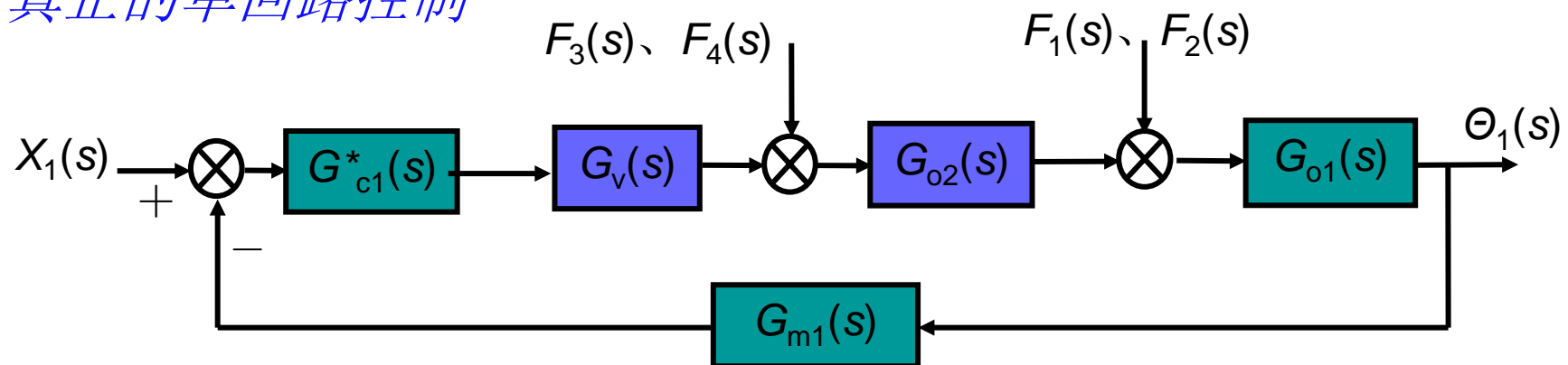
第 7 章 复杂控制系统

对于进入主回路的干扰，串级控制和单回路控制闭环回路的区别：

串级控制等效



真正的单回路控制



第 7 章 复杂控制系统

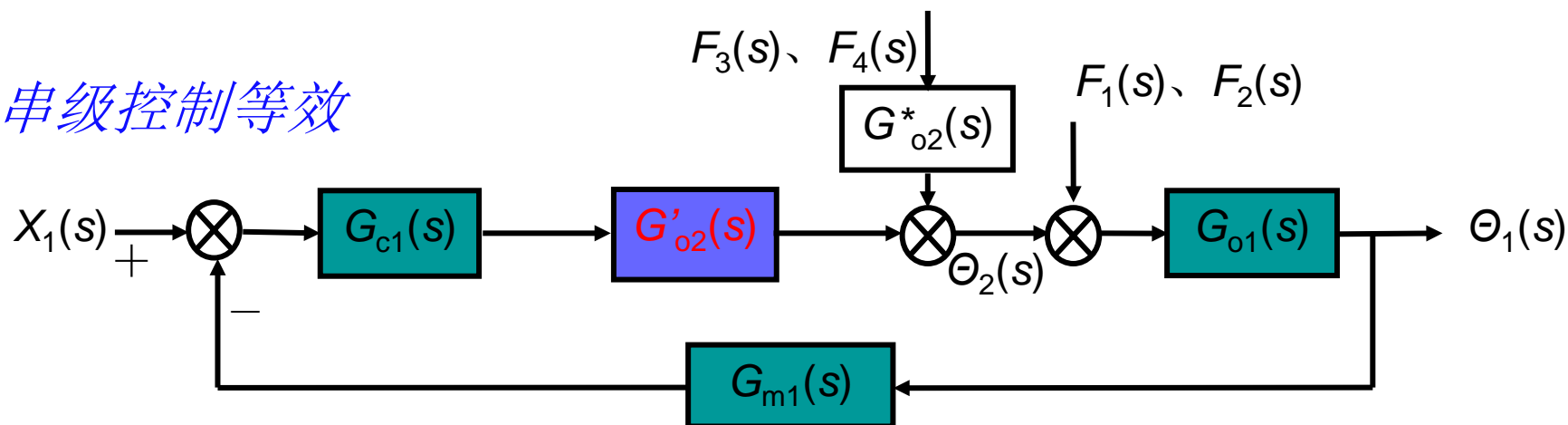
$$G_{02}'(s) = \frac{\frac{K_{C2}K_VK_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}}{1 + \frac{T_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}s}$$

K_{02}'

$T_{02}' \ll T_{02}$

$T_{02}' \ll T_{02}$ ，说明主环通道时间常数被缩短，加快了系统的控制速度。

串级控制等效



第 7 章 复杂控制系统

由上分析可知：

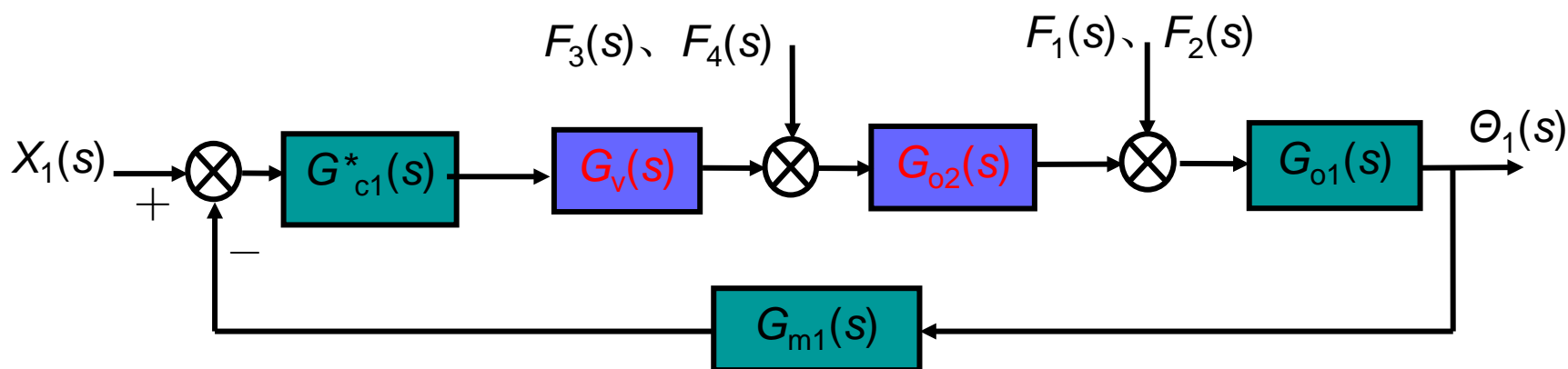
- 1、由于串级控制系统副回路的存在能克服进入副回路的干扰，大大减小了副回路干扰对主参数的影响；
- 2、副回路的存在提高了系统主调节器对进入主回路干扰控制的快速性；
- 3、副回路的存在，总的放大系数提高了，因而抗干扰能力和控制性能都比单回路控制系统有明显提高。

第 7 章 复杂控制系统

7.1.2.3 对负荷和操作条件变化的适应能力增强

有些生产过程的工艺条件经常变化。而在不同的工艺点，对象的放大倍数往往不同。如果是单回路控制，这会导致控制质量下降。

真正的单回路控制

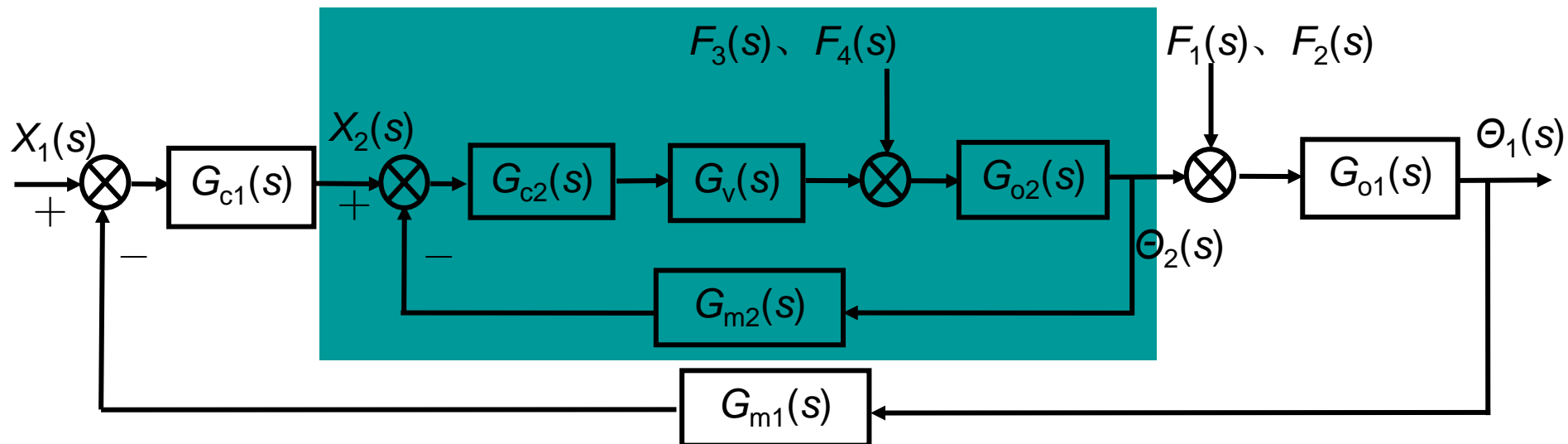


第 7 章 复杂控制系统

对于串级控制，部分对象被包含在副回路中，其放大倍数被负反馈压制。因而工艺负荷或操作条件变化时，调节系统仍然具有较好的控制质量。

$$G_{02}'(s) = \frac{\frac{K_{C2} K_V K_{02}}{1 + K_{C2} K_V K_{02} K_{m2}}}{1 + \frac{T_{02}}{1 + K_{C2} K_V K_{02} K_{m2}} s}$$

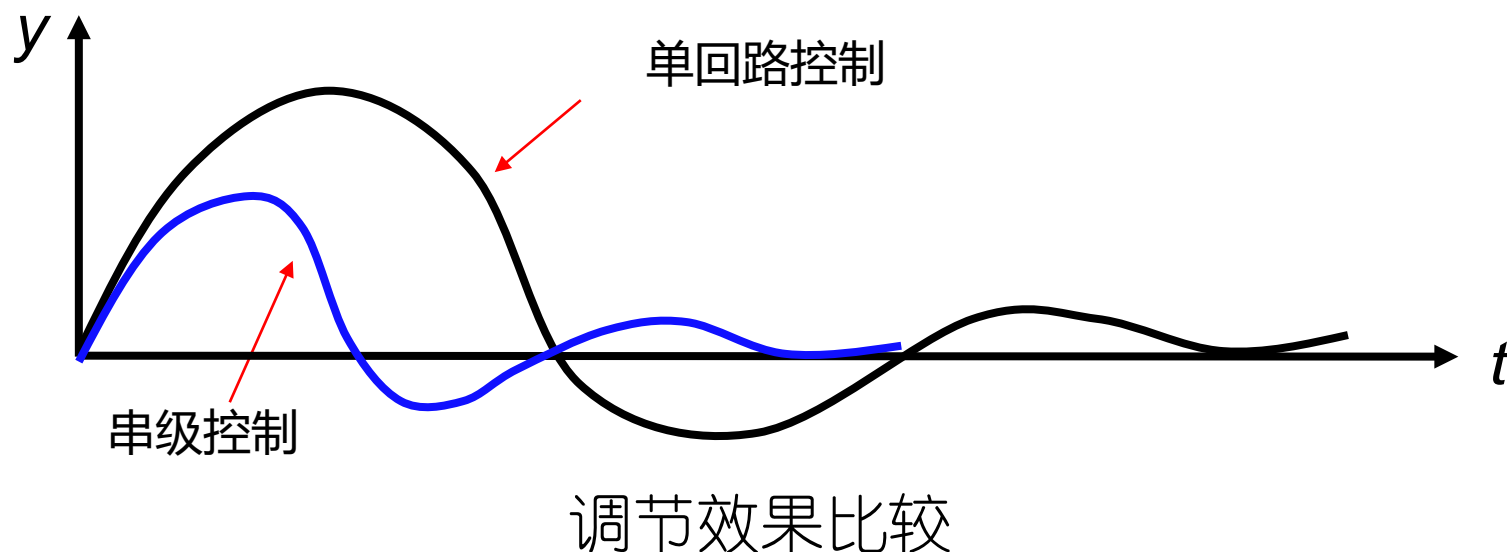
$K_{02} \approx 1/K_{m2}$



第 7 章 复杂控制系统

串级系统特点总结：

- ①对进入副回路的干扰有很强的克服能力；
- ②改善了被控过程的动态特性，提高了系统的工作频率；对进入主回路的干扰控制效果也有改善；
- ③对负荷或操作条件的变化有一定自适应能力。



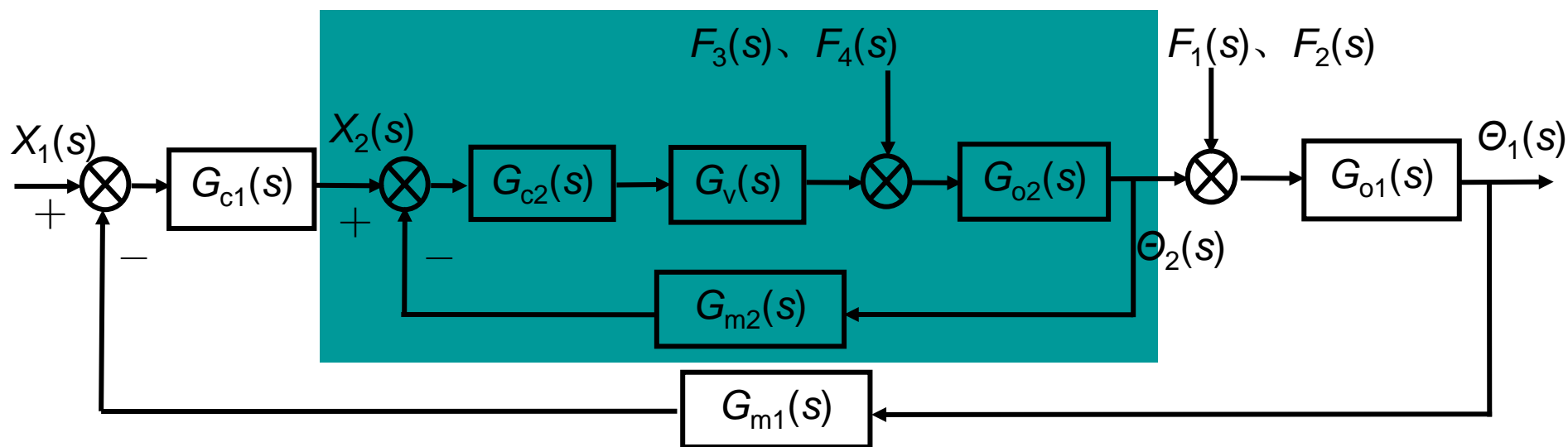
第 7 章 复杂控制系统

7.1.3 串级控制系统的设计与参数整定

7.1.3.1 串级控制系统的方案设计

1. 主回路设计

主回路设计与单回路控制系统一样。



第 7 章 复杂控制系统

2. 副回路的选择

副回路设计中，最重要的是选择副回路的被控变量（串级系统的副变量）。副变量的选择一般应遵循下面几个原则：

- ①主、副变量有对应关系
- ②副变量的选择必须使副回路包含变化剧烈的主要干扰，并尽可能多包含一些干扰
- ③副变量的选择应考虑主、副回路中控制过程的时间常数的匹配，以防“共振”的发生
- ④应注意工艺上的合理性和经济性

第 7 章 复杂控制系统

3. 主、副调节器调节规律的选择

在串级系统中，主变量是系统控制任务，副变量辅助变量。这是选择调节规律的基本出发点。

主变量是生产工艺的主要控制指标，工艺上要求比较严格。所以，主调节器通常选用**PI**调节，或**PID**调节。

控制副变量是为了提高主变量的控制质量，对副变量的要求一般不严格，允许有静差。因此，副调节器一般选**P**调节就可以了。

第 7 章 复杂控制系统

4. 主、副调节器正、反作用方式的确定

对串级控制系统来说，主、副调节器正、反作用方式的选择原则依然是使系统构成负反馈。

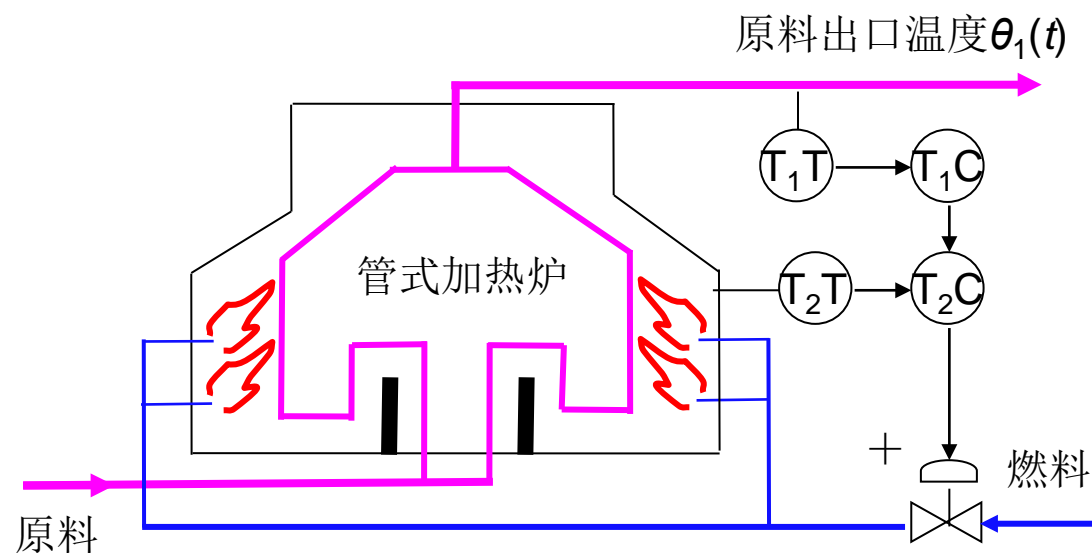
选择时的顺序是：

- 1、根据工艺安全或节能要求确定调节阀的正、反作用；
- 2、按照副回路构成负反馈的原则确定副调节器的正、反作用；
- 3、依据主回路构成负反馈的原则，确定主调节器的正、反作用。

第 7 章 复杂控制系统

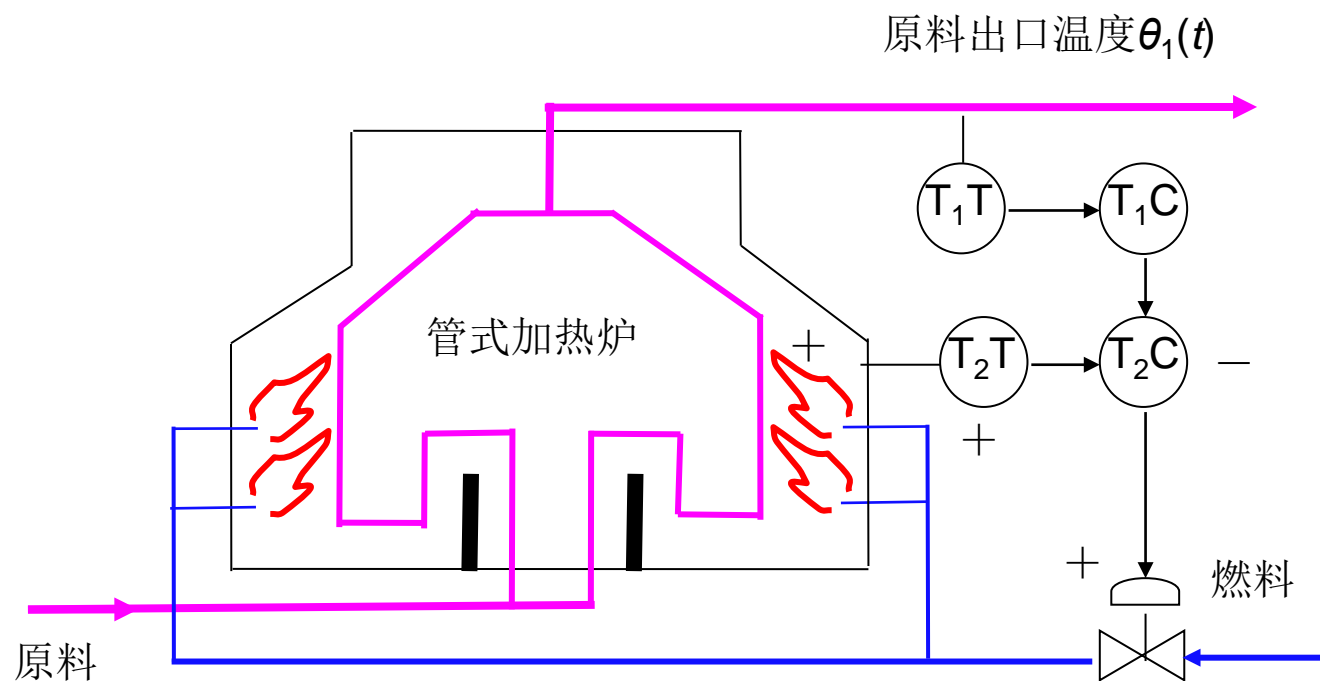
以管式加热炉为例，说明串级控制系统主、副调节器的正、反作用方式的确定方法。

1、从生产工艺安全出发，燃料油调节阀选用气开式（正作用）。一旦出现故障或气源断气，调节阀应关闭，切断燃料油进入加热炉，确保设备安全。



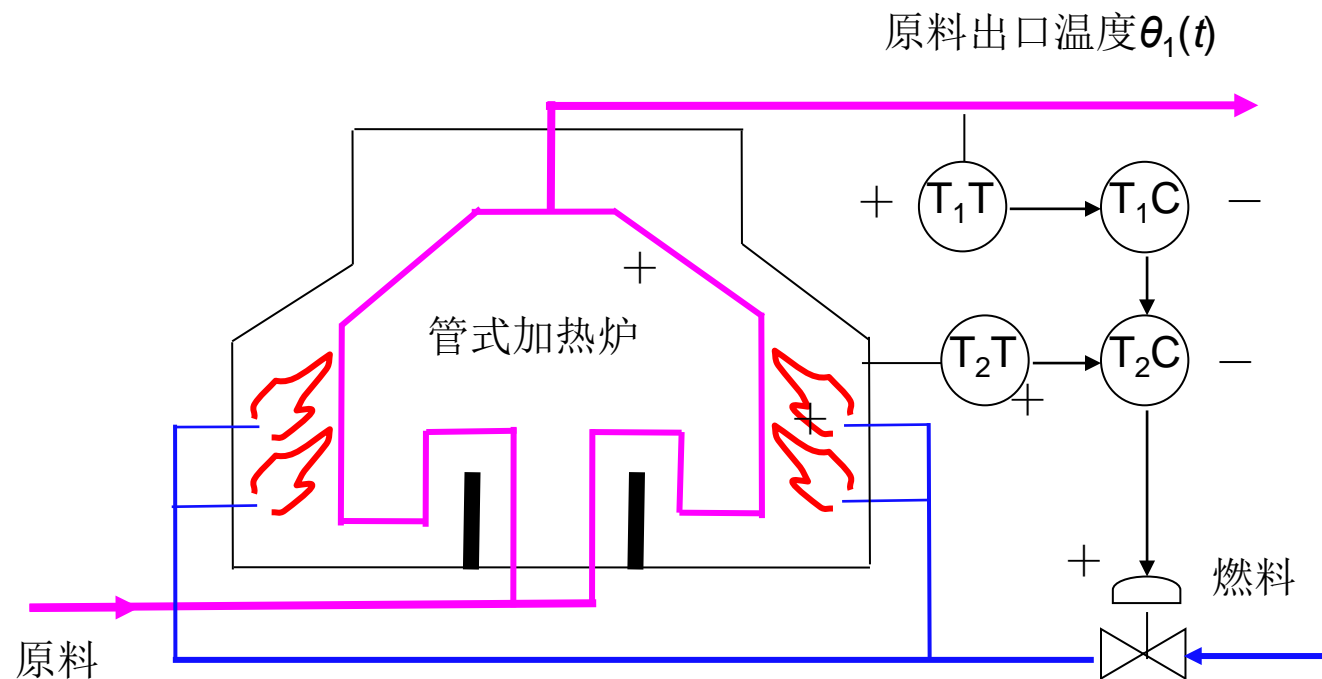
第 7 章 复杂控制系统

2、副回路中，调节阀开大，炉膛温度升高，测量信号增大，说明副对象和变送器都是正作用。为保证副回路为负反馈，副调节器应为反作用方式。



第 7 章 复杂控制系统

3、对于主调节器，调节阀开大，炉膛温度升高时，原料油出口温度也升高，说明主对象和主变送器也都是正作用。为保证主回路为负反馈，主调节器也应为反作用方式。



第 7 章 复杂控制系统

5. 串级系统的工业应用

当生产工艺要求高，采用简单控制系统满足不了工艺要求的情况下，可考虑采用串级控制系统。串级控制系统常用于下面一些生产过程。

- 1) 容量滞后较大的过程
- 2) 纯滞后较大的过程
- 3) 干扰幅度大的过程
- 4) 非线性严重的过程

第 7 章 复杂控制系统

7.1.3.2 串级控制系统的参数整定

有逐步逼近法、两步整定法和一步整定法。

1. 逐步逼近法

依次整定副回路、主回路。并循环进行，逐步接近主、副回路最佳控制状态。

2. 两步整定法

系统处于串级工作状态，第一步按单回路方法整定副调节器参数；第二步把已经整定好的副回路视为一个环节，仍按单回路对主调节器进行参数整定。

第 7 章 复杂控制系统

3. 一步整定法

所谓一步整定法，就是根据经验，先将副调节器参数一次调好，不再变动，然后按一般单回路控制系统的整定方法直接整定主调节器参数。

表7.1一步整定法副调节器参数选择范围

副参数类型 副调节器比例度 δ_2 (%) 副调节器比例增益 K_{c2}

温度	20~60	5.0~1.7
压力	30~70	3.0~1.4
流量	40~80	2.5~1.25
液位	20~80	5.0~1.25