

2022春 过程控制系统

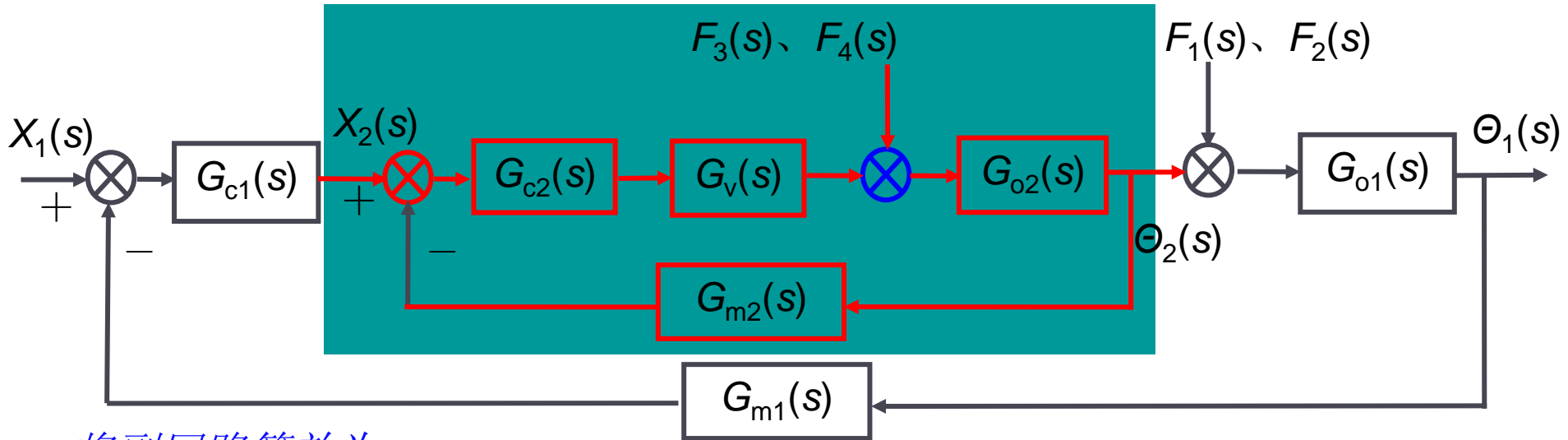
过程控制系统

授课教师：苗子博

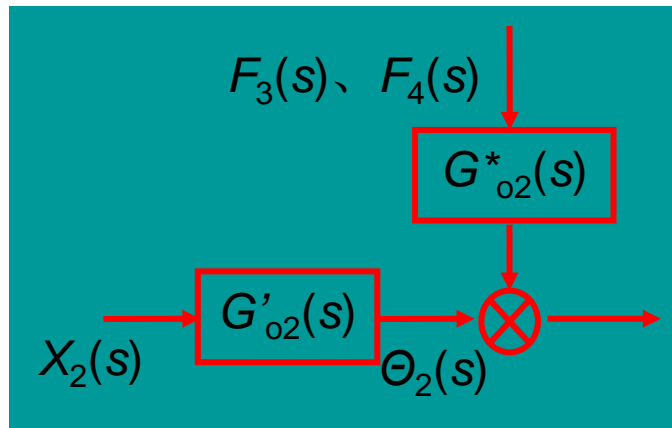
# 第 7 章 复杂控制系统

## 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：

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

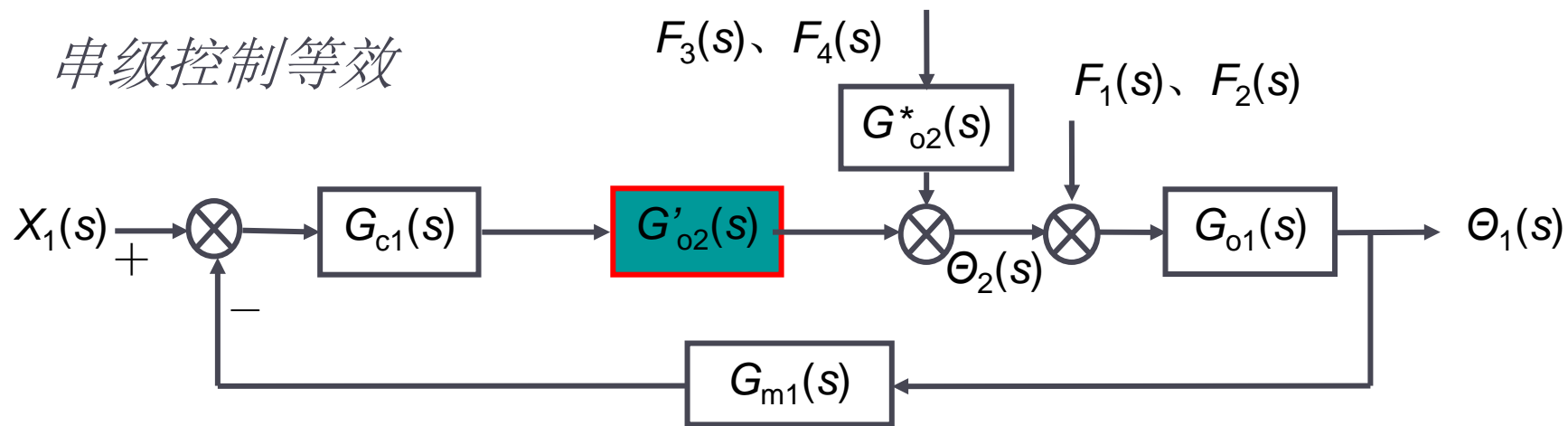
$K_{02}' \approx 1/K_{m2}$

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

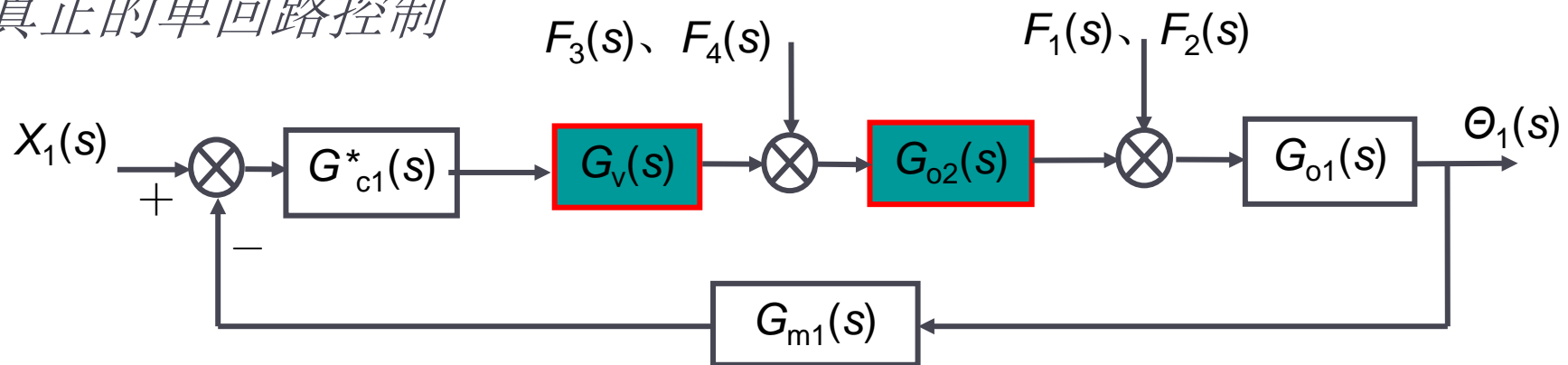
# 第 7 章 复杂控制系统

$T_{02}' \ll T_{02}$ ，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

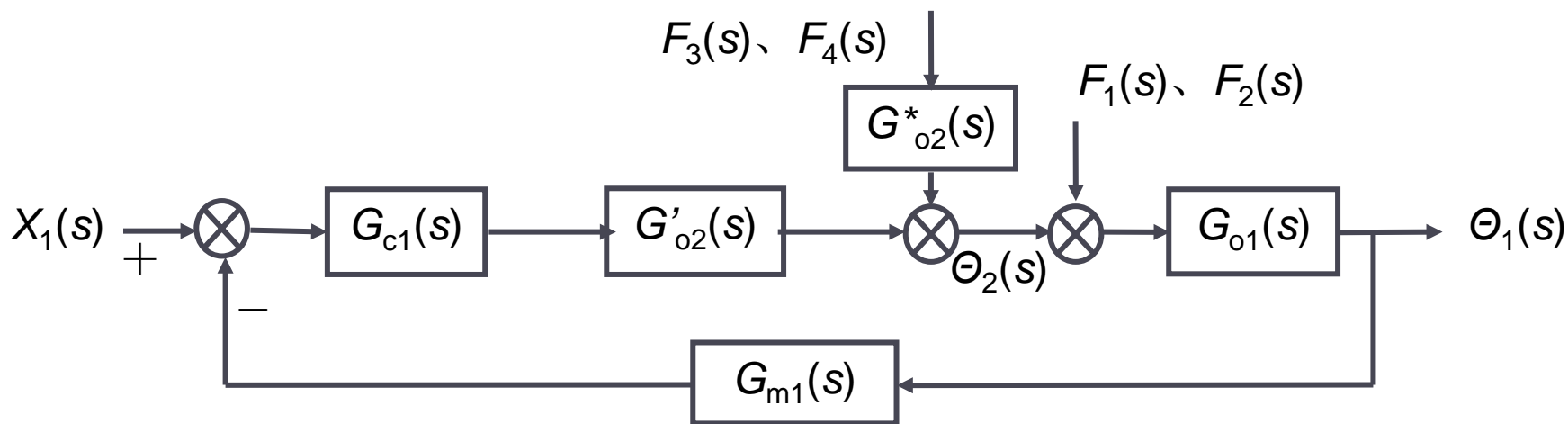


# 第 7 章 复杂控制系统

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 $\omega_c$



## 第 7 章 复杂控制系统

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

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

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

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。

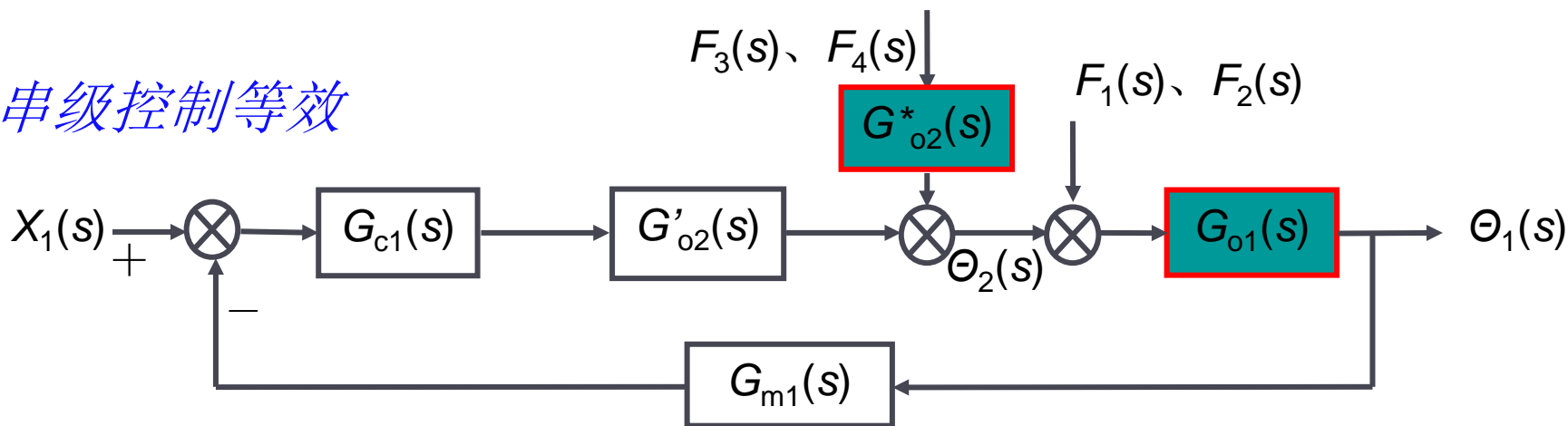


# 第 7 章 复杂控制系统

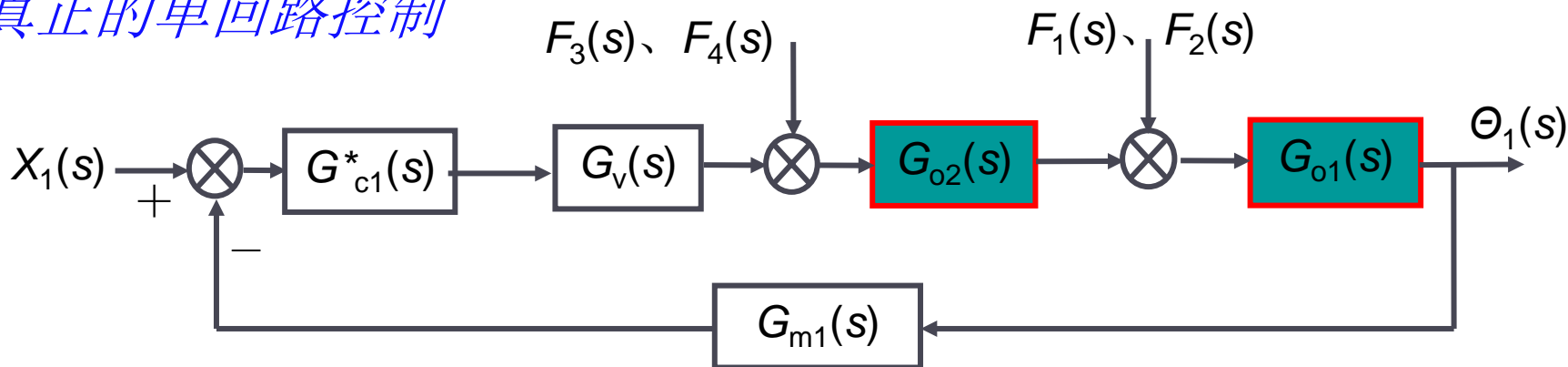
## 7.1.2.2 抗干扰能力增强

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

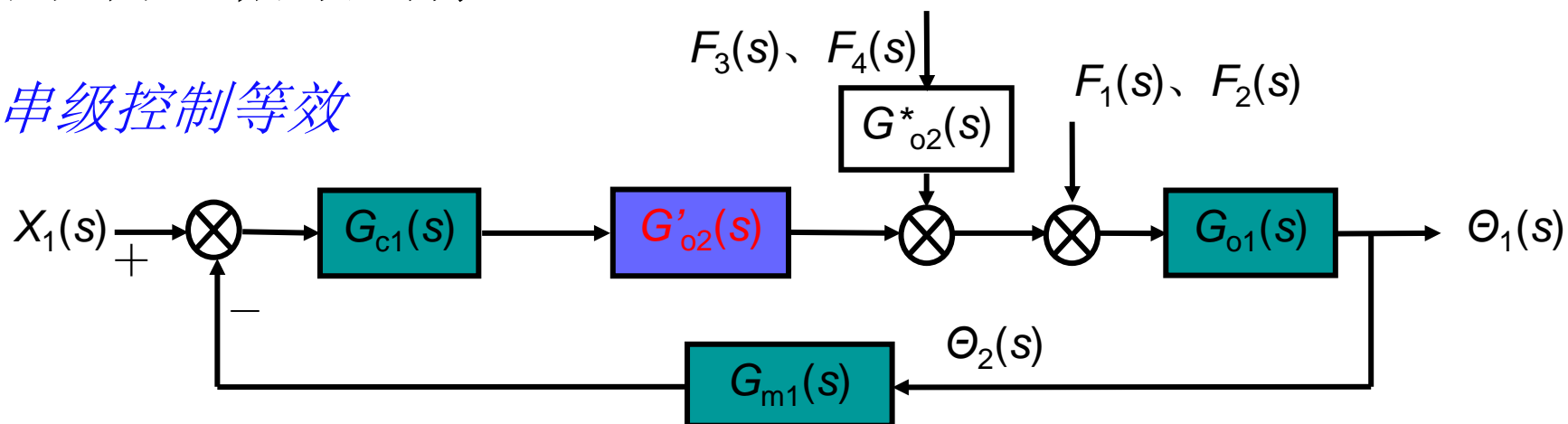
$$\frac{J_{c3}}{J_{k3}} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)}{G_{c1}^*(s)} = \frac{K_{c1}K_{c2}}{K_{c1}^*}$$

一般情况下，总有：  $K_{c1}K_{c2} > K_{c1}^*$

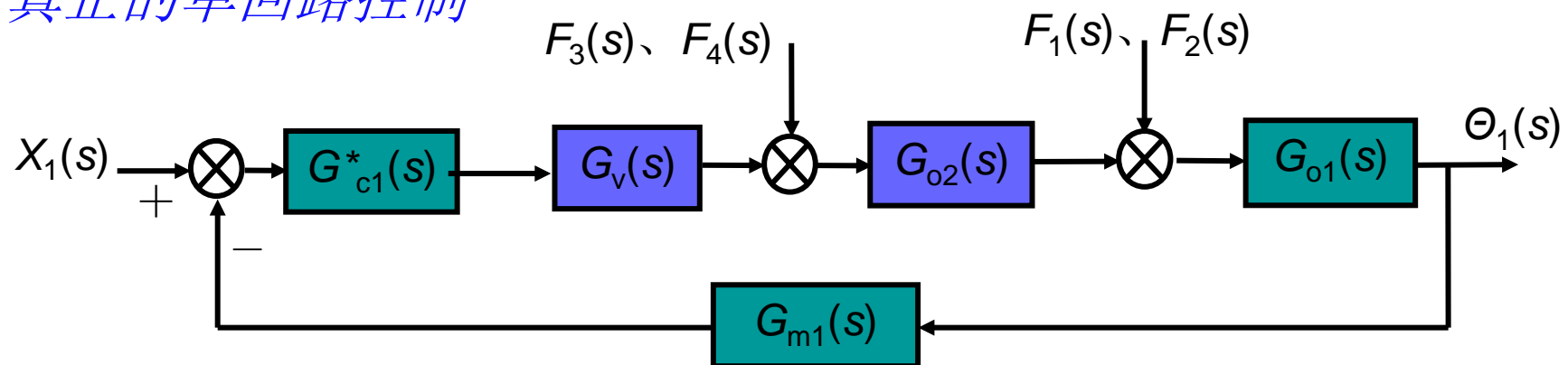
# 第 7 章 复杂控制系统

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

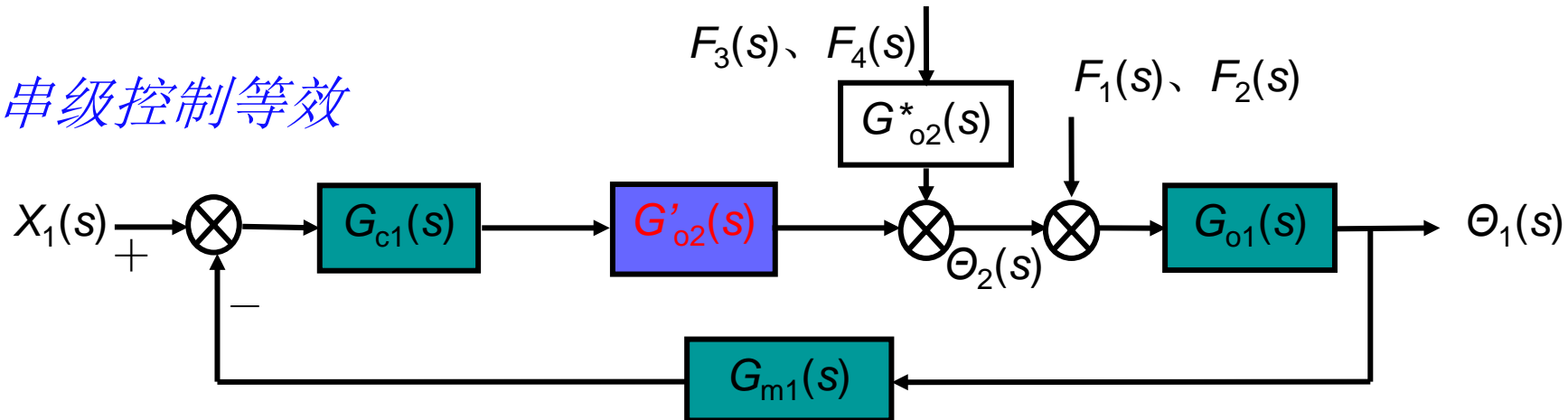
$$G_{02}'(s) = \frac{\frac{K_{C2}K_VK_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}}{1 + \frac{T_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}s}$$

$K_{02}'$

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

$T_{02}' \ll T_{02}$ ，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。

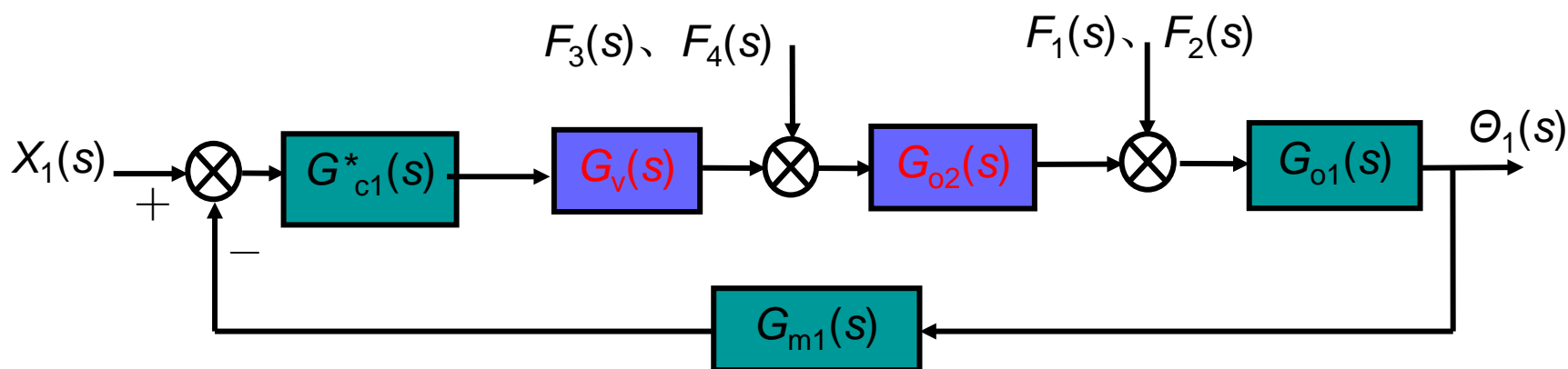


# 第 7 章 复杂控制系统

## 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。

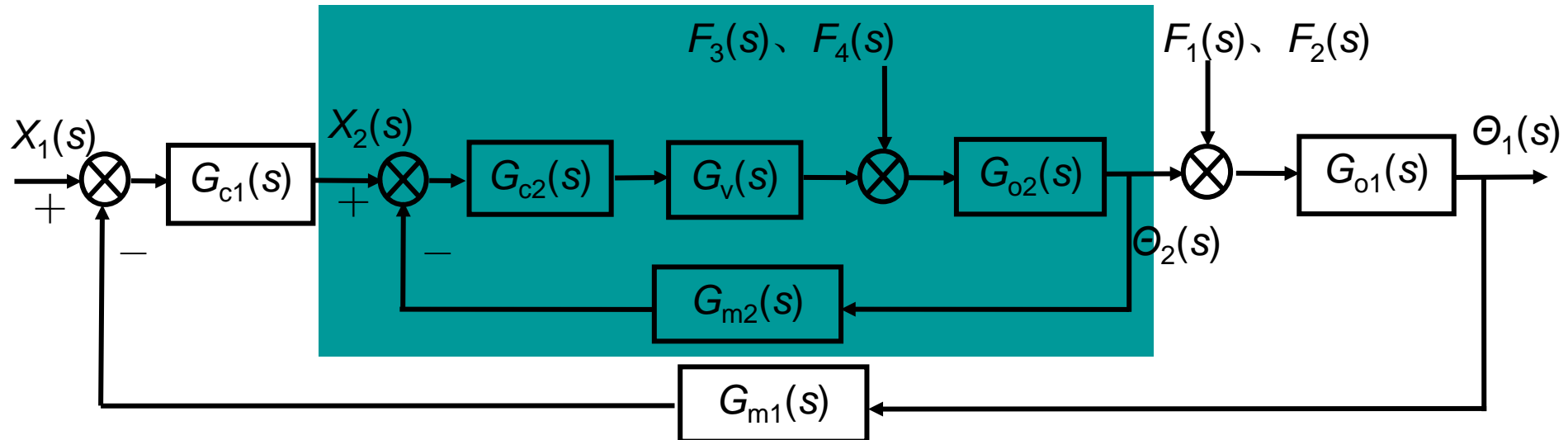
真正的单回路控制



# 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。

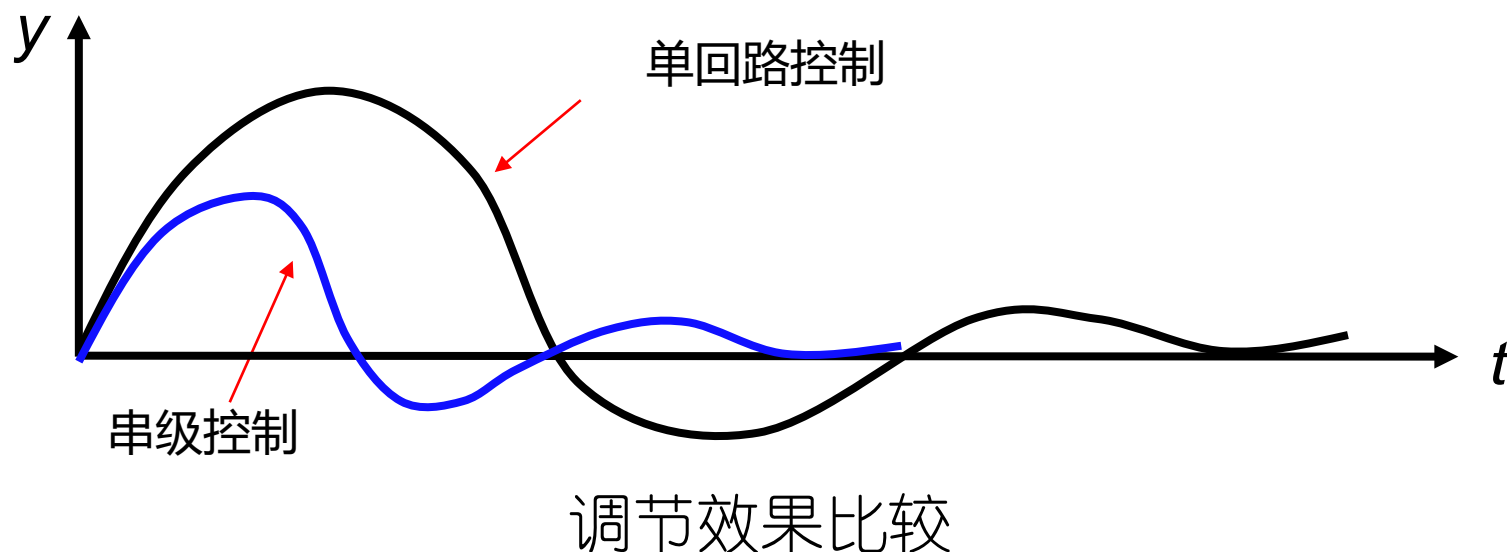
$$G_{02}'(s) = \frac{\frac{K_{C2}K_VK_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}}{1 + \frac{T_{02}}{1 + K_{C2}K_VK_{02}K_{m2}}s} \quad K_{02}'$$



# 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。



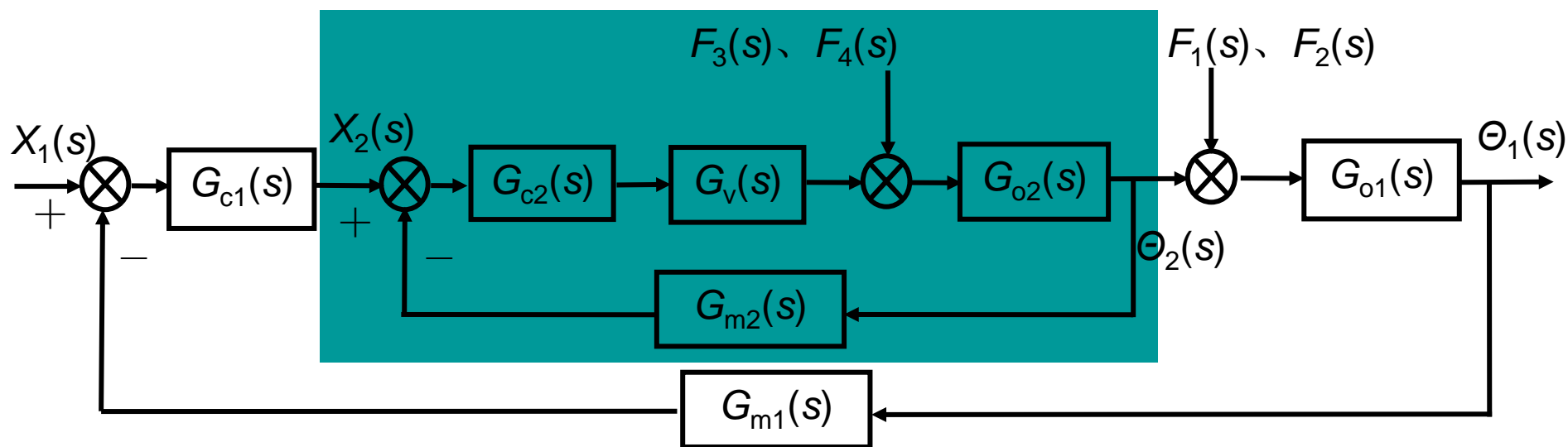
# 第 7 章 复杂控制系统

## 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。

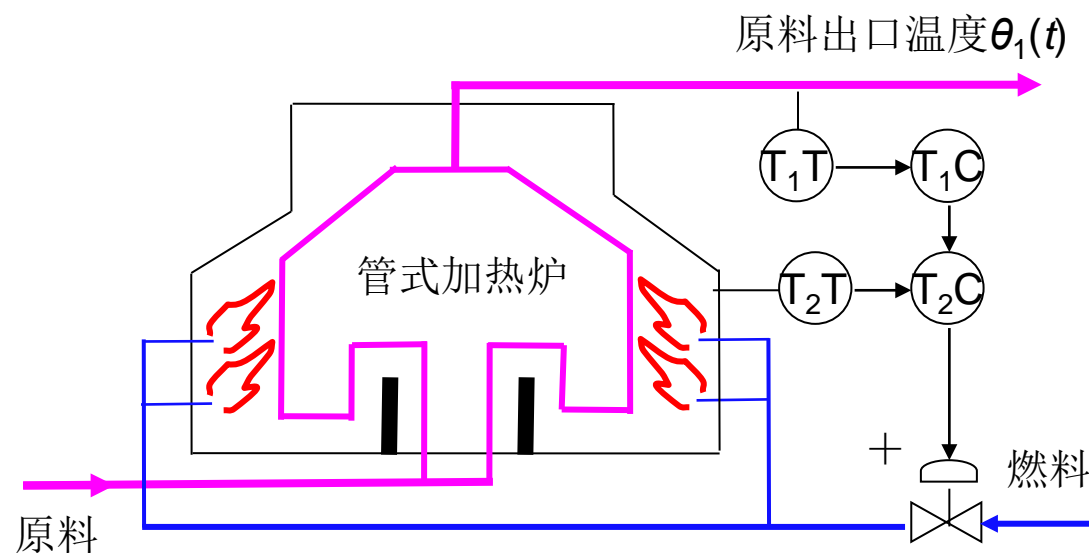
选择时的顺序是：

- 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。

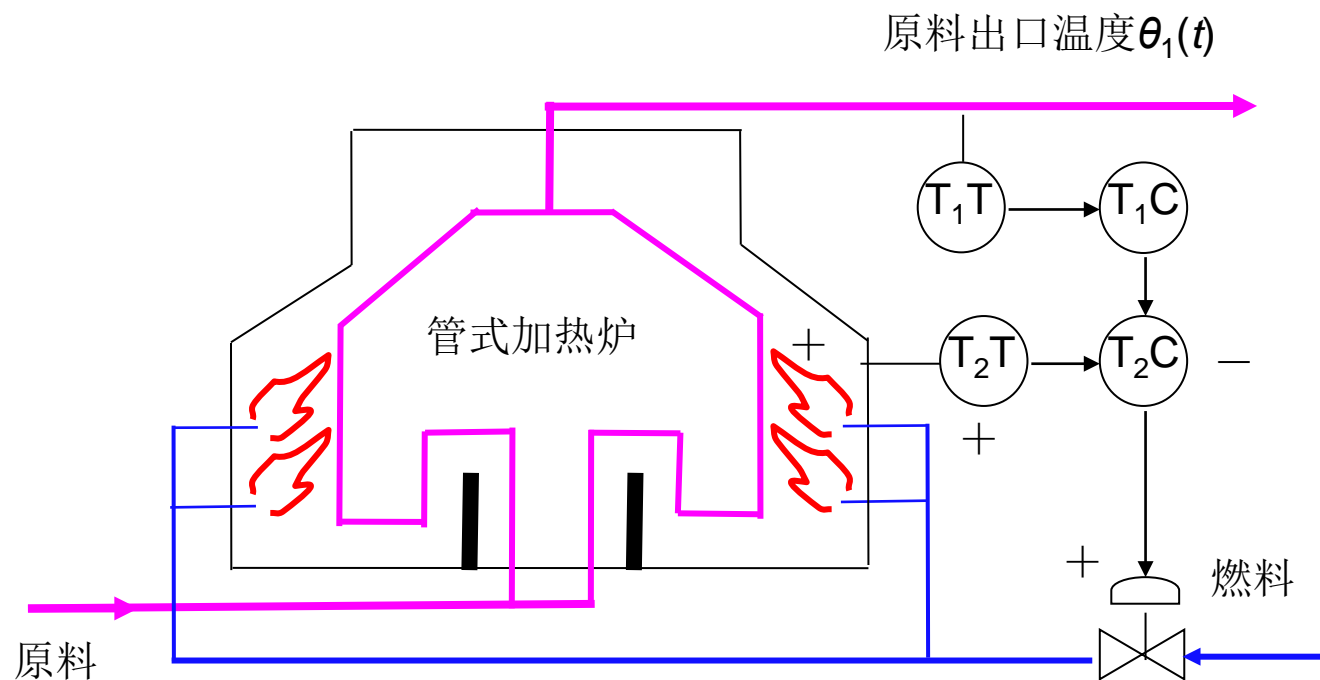
1、从生产工艺安全出发，燃料油调节阀选用气开式（正作用）。一旦出现故障或气源断气，调节阀应关闭，切断燃料油进入加热炉，确保设备安全。





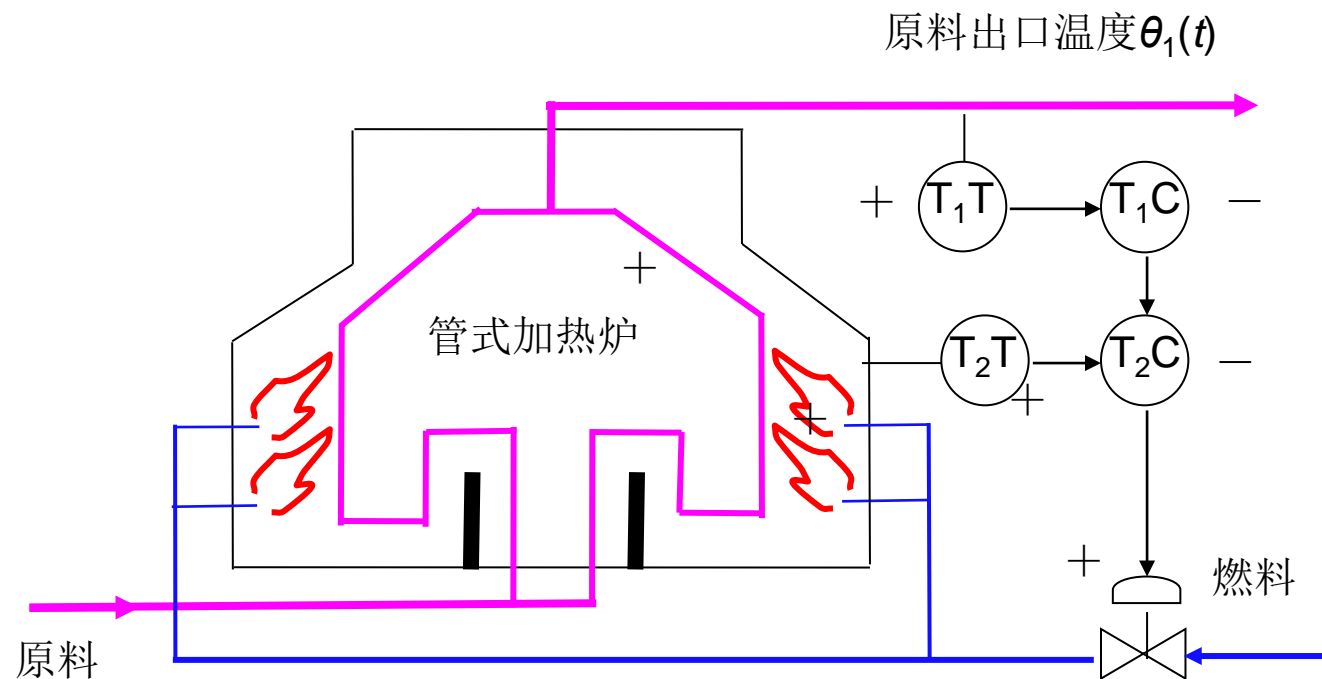
# 第 7 章 复杂控制系统

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。



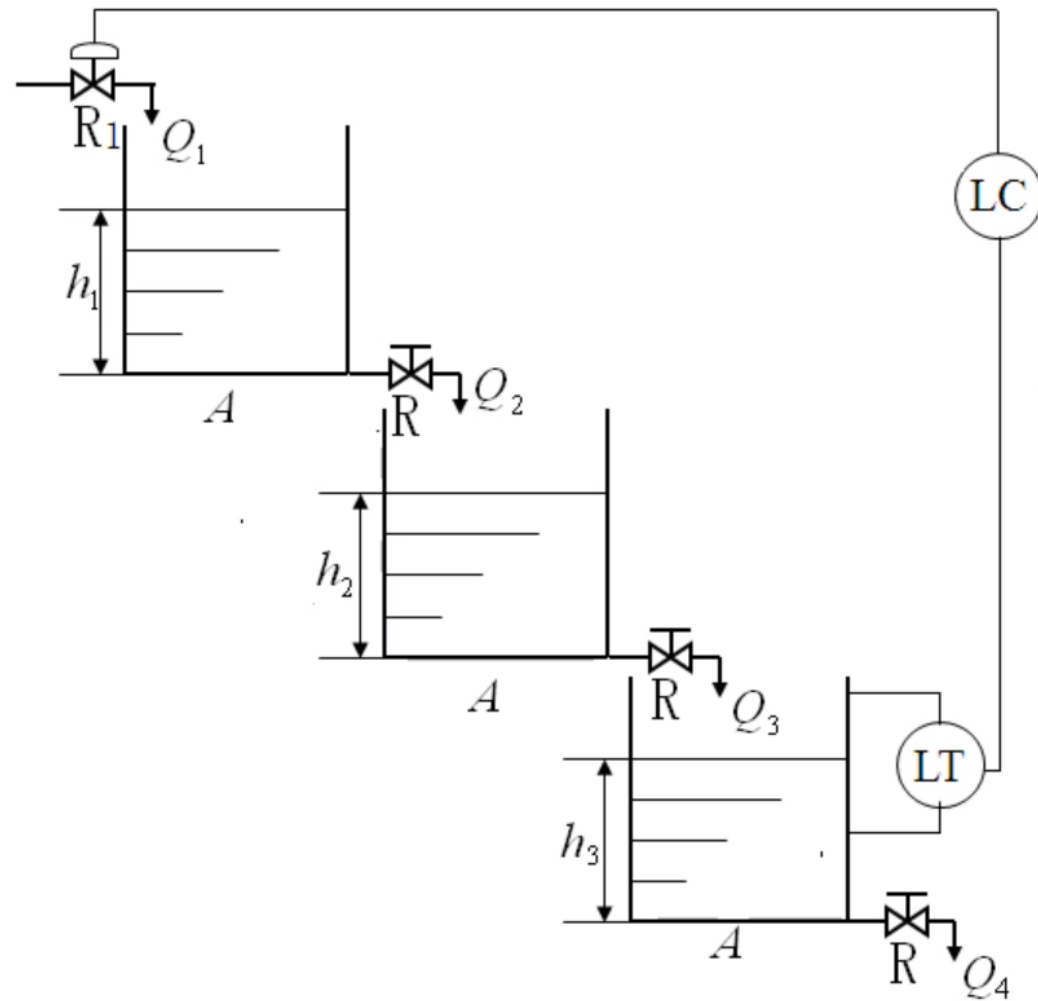
# 第 7 章 复杂控制系统

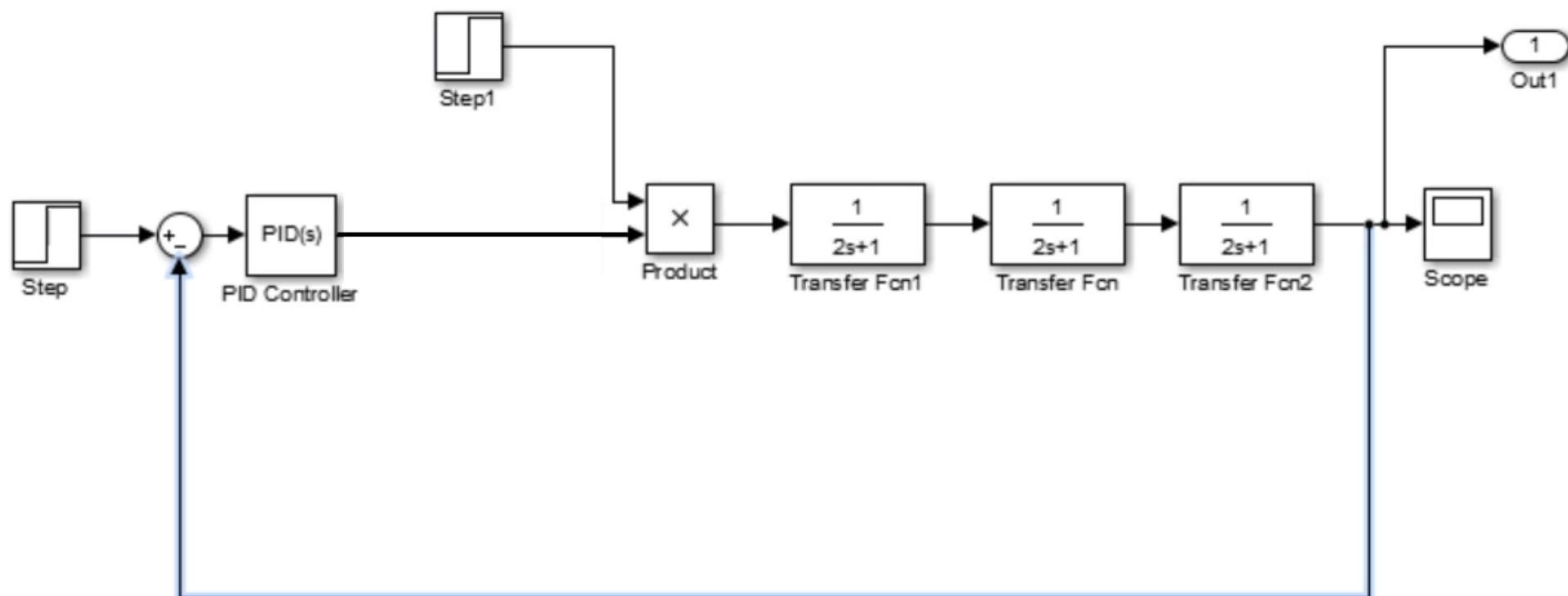
## 5. 串级系统的工业应用

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

# 三容水箱液位控制系统





Function Block Parameters: PID Controller

Main PID Advanced Data Types State Attributes

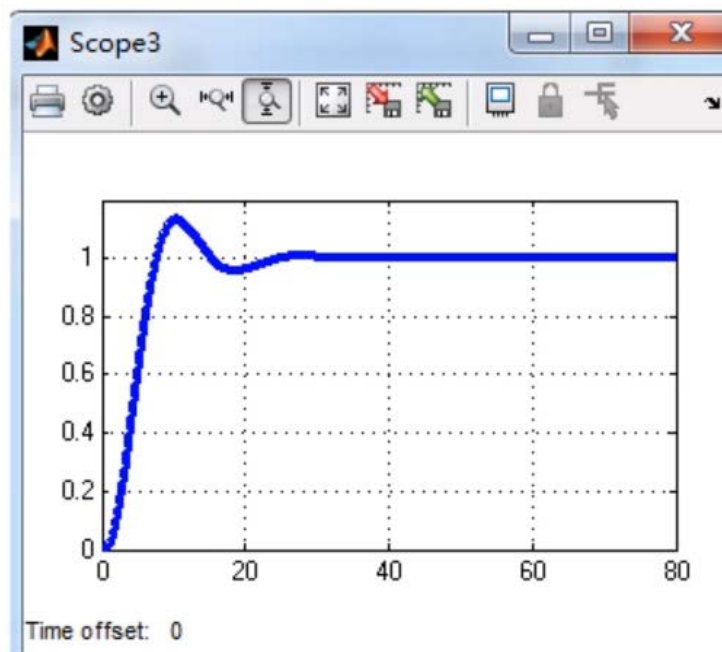
Controller parameters

Proportional (P): 1

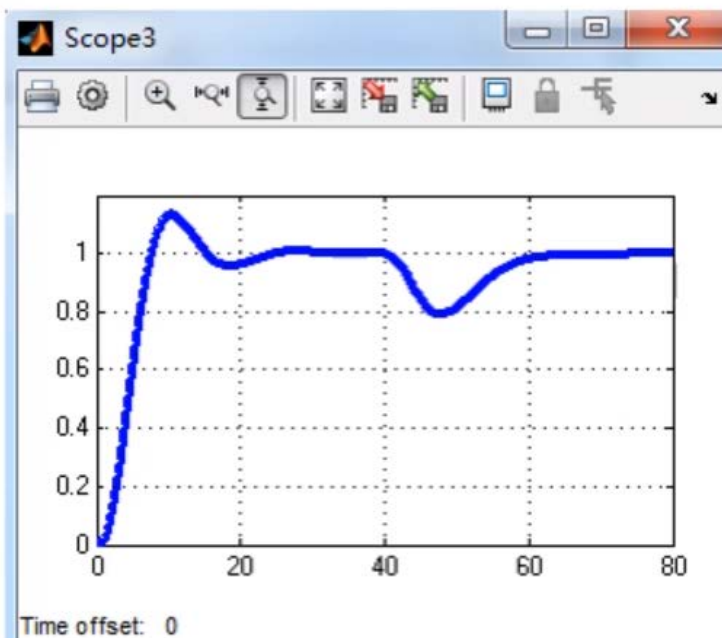
Integral (I): 0.25

Derivative (D): 0

OK Cancel Help Apply



$P=1, I=0.25$



$P=1, I=0.25$

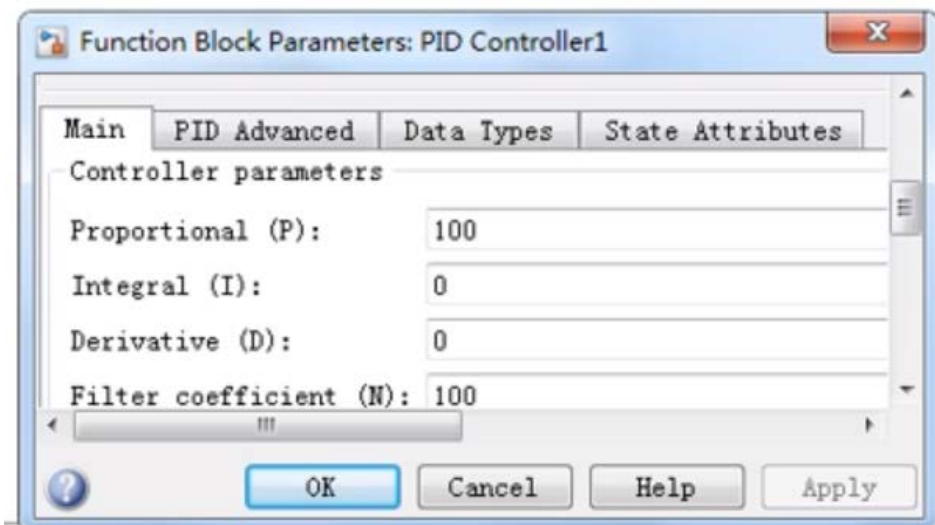
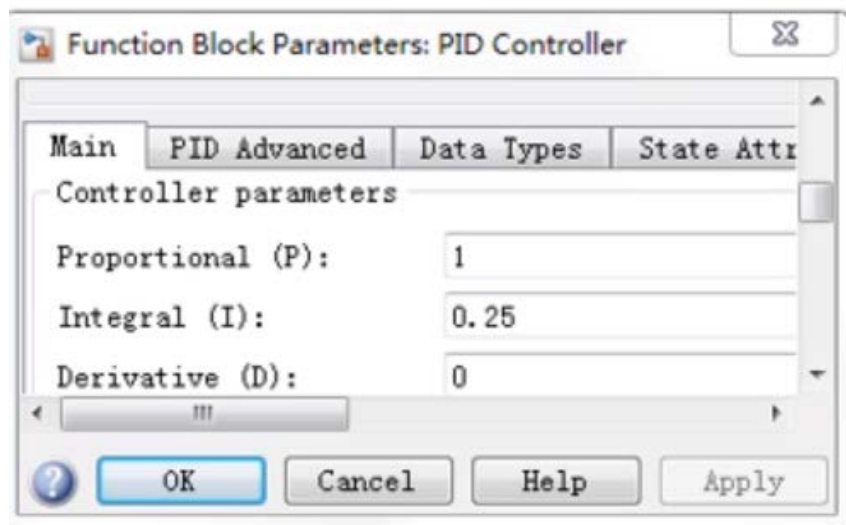
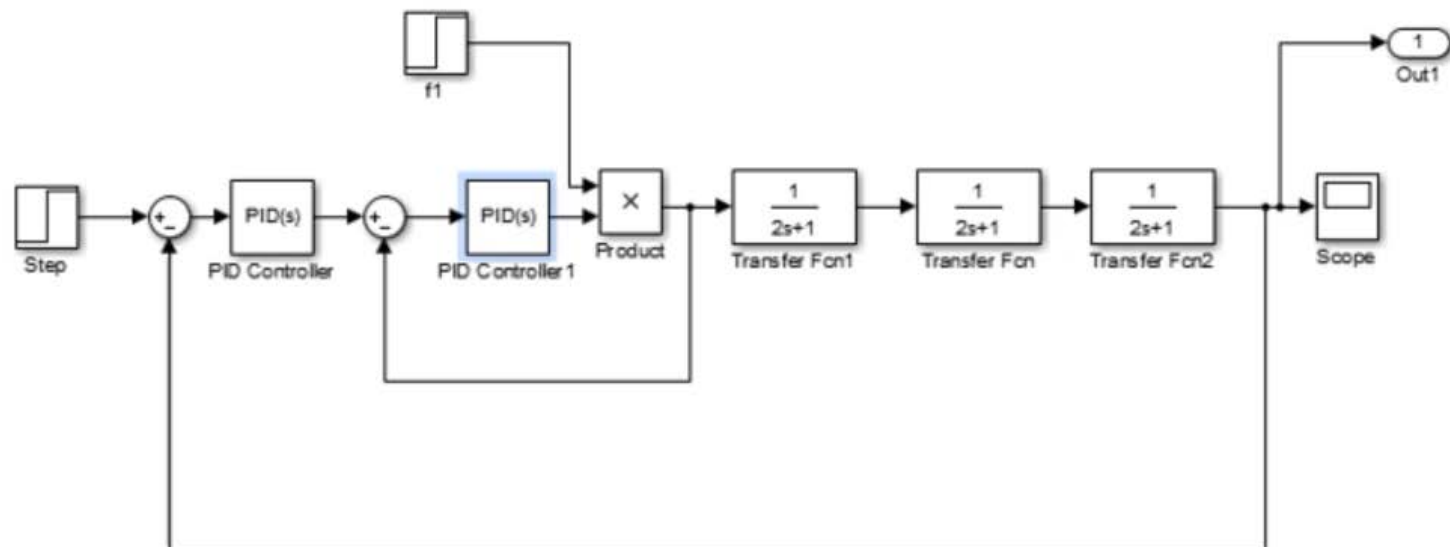
在 $t=40$ 加一扰动

进水压力有由1变为0.64

串级，以进水流量为副参数

$P=1, I=0.25$ ,  $P2=100$  (副调节器) ( $P \cdot P2=100$ )

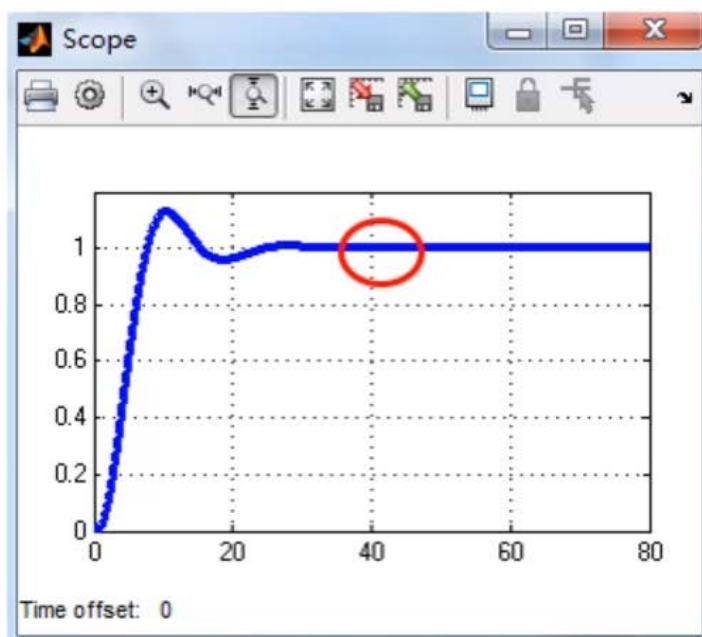
在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64



串级，以进水流量为副参数

$P=1, I=0.25, P2=100$  ( $P \cdot P2=100$ )

在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64



扰动的影响几乎没有

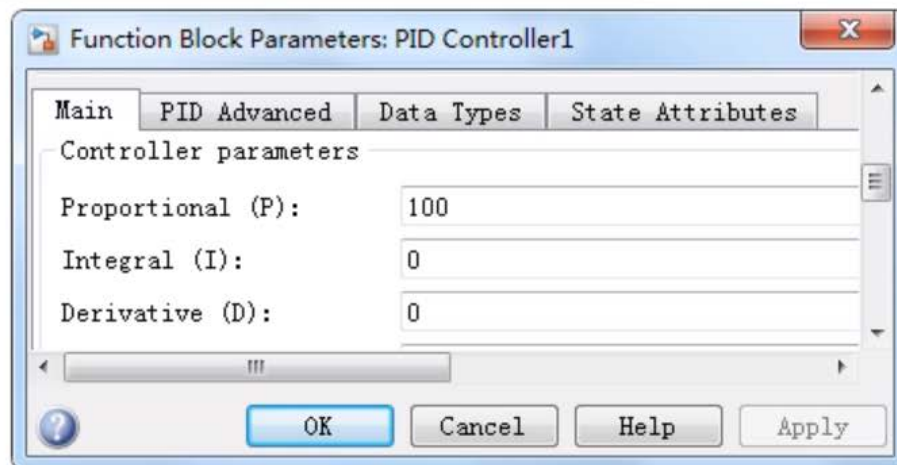
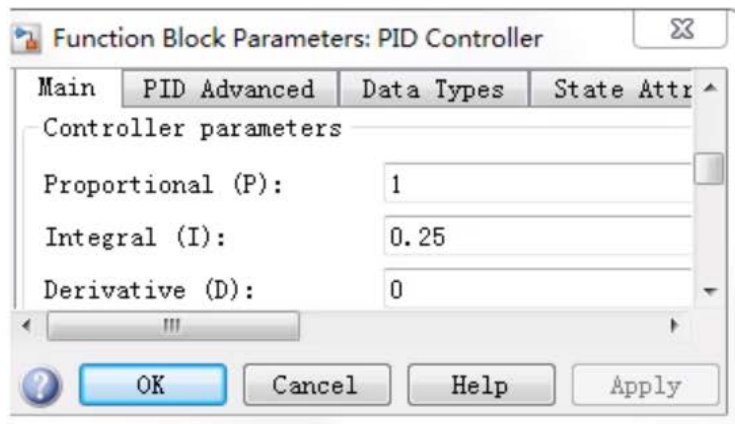
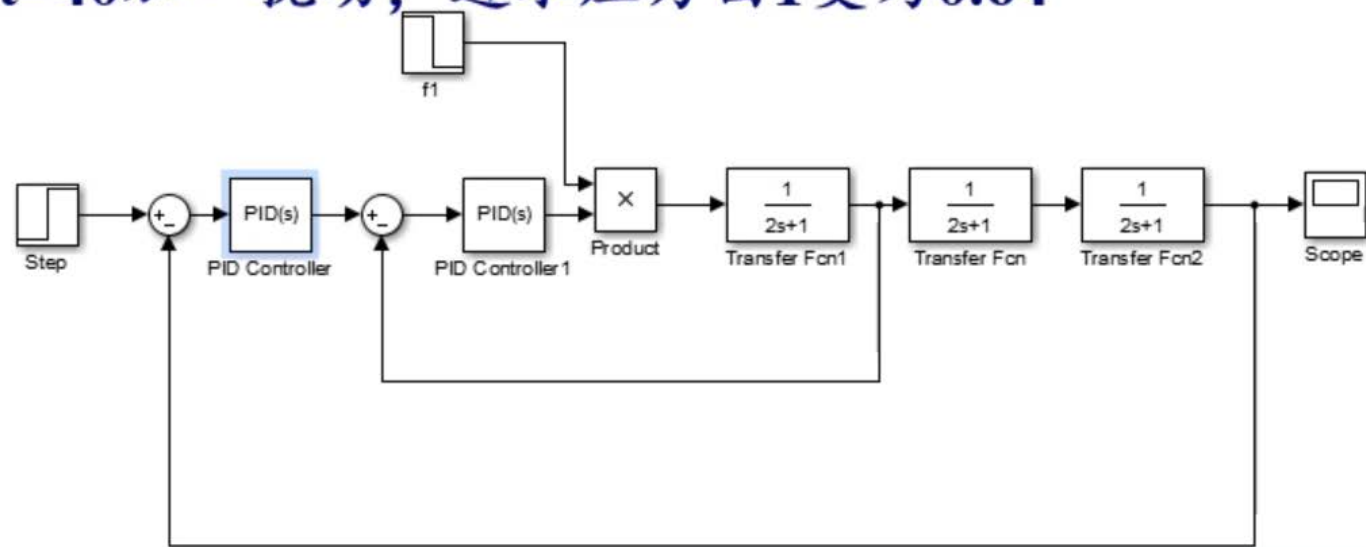
但参数没有变化，动态  
过程差不多



串级，以第一个容器的液位为副参数

$P=1, I=0.25, P2=100$  ( $P \cdot P2=100$ )

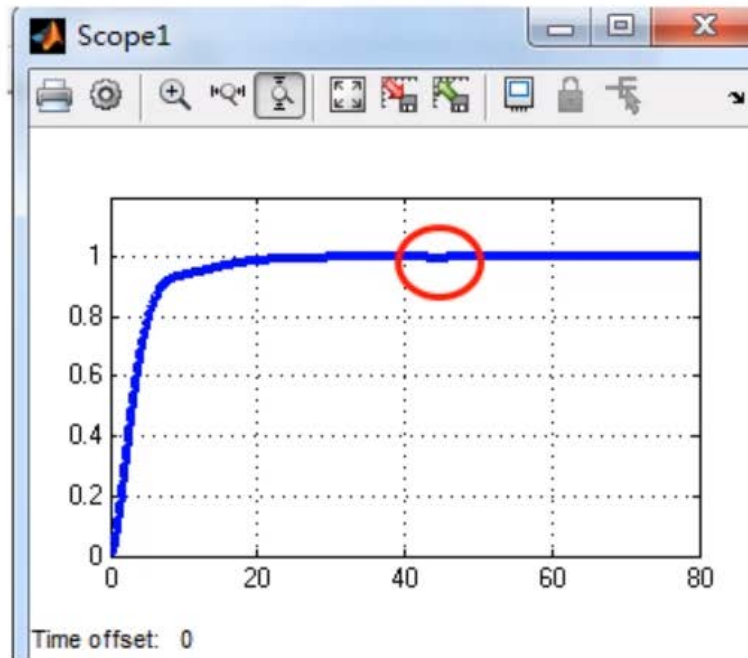
在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64



串级，以第一个容器的液位为副参数

$P=1, I=0.25, P2=100$  ( $P \cdot P2=100$ )

在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64



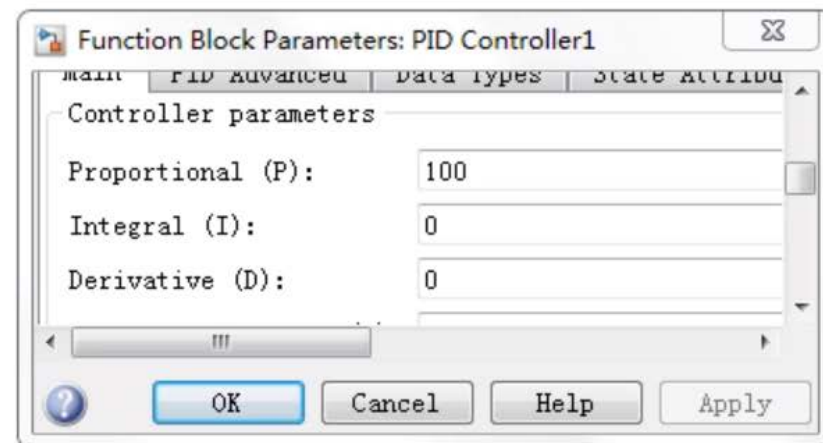
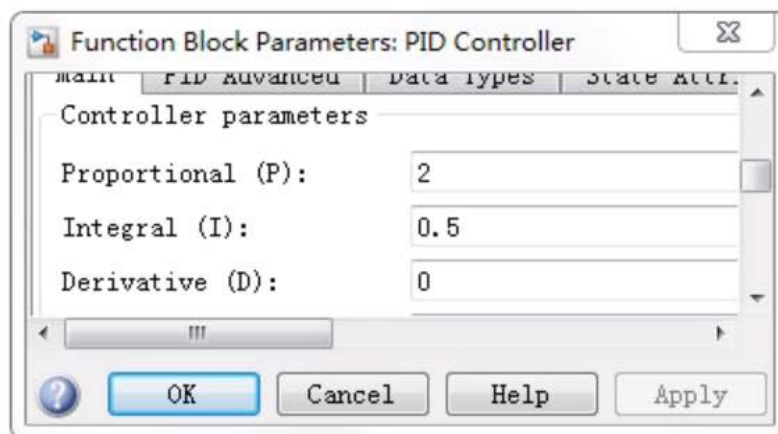
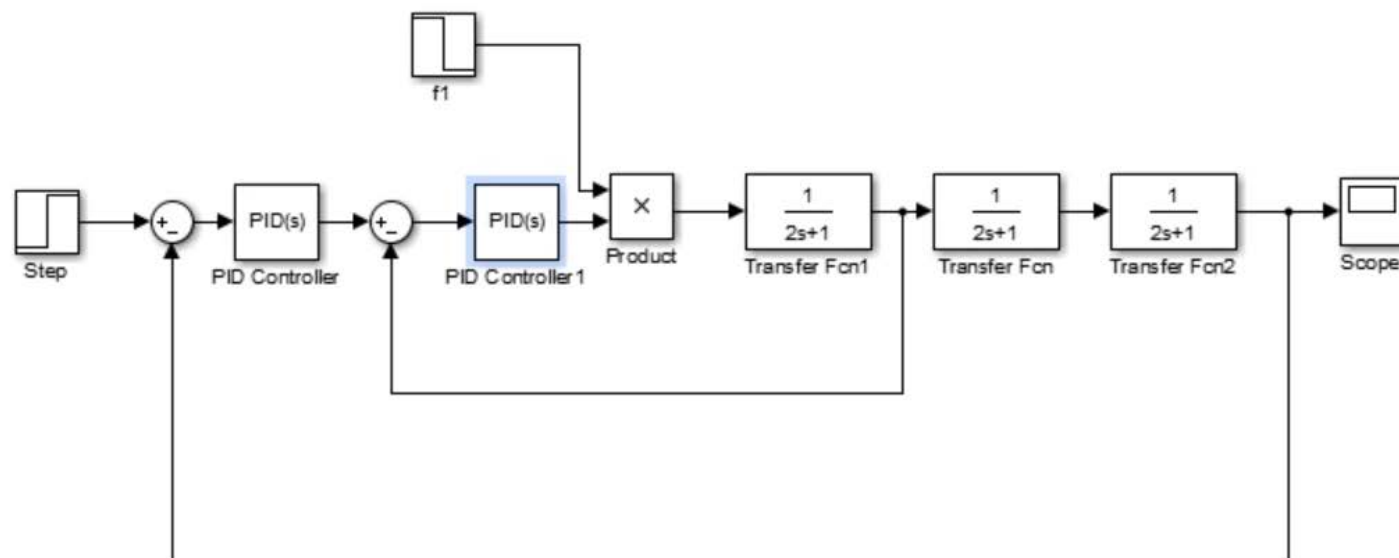
扰动的影响几乎没有，

超调也没有了，

可以考虑增大主PID调节器的P值。

串级，以第一个容器的液位为副参数

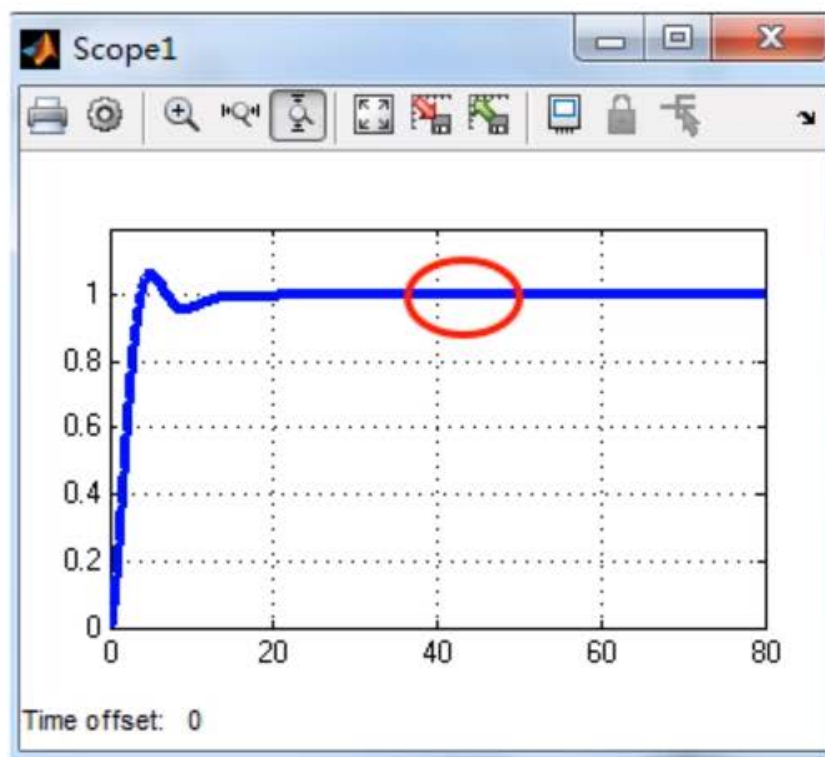
$P=2, I=0.5$  ,  $P2=100$  ( $P \cdot P2=200$ )



串级，以第一个容器的液位为副参数

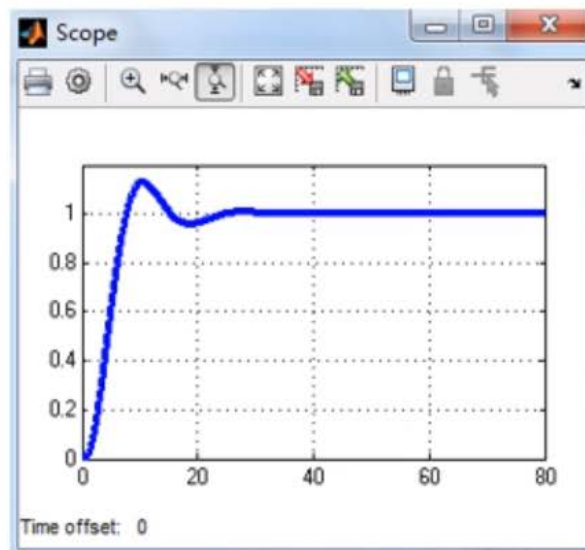
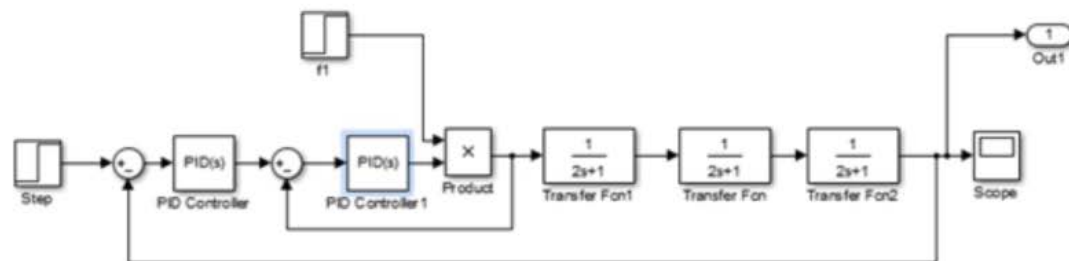
$P=2, I=0.5$ ,  $P2=100$  ( $P \cdot P2=200$ )

在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64

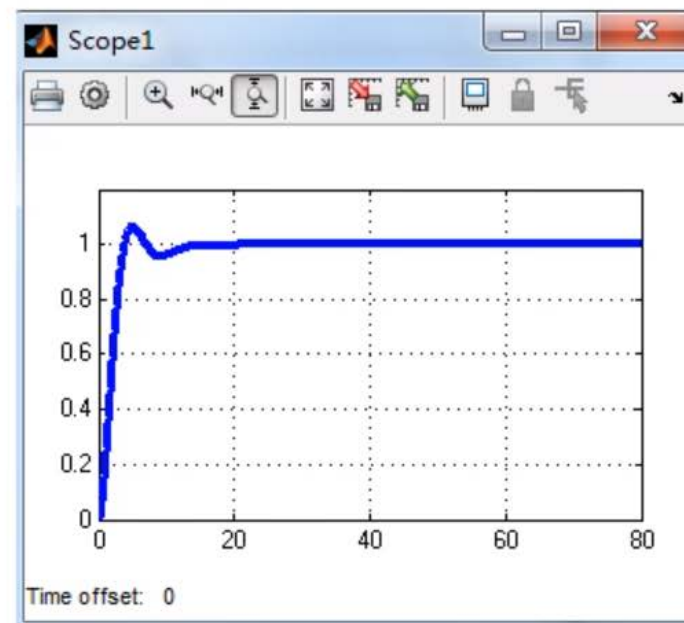
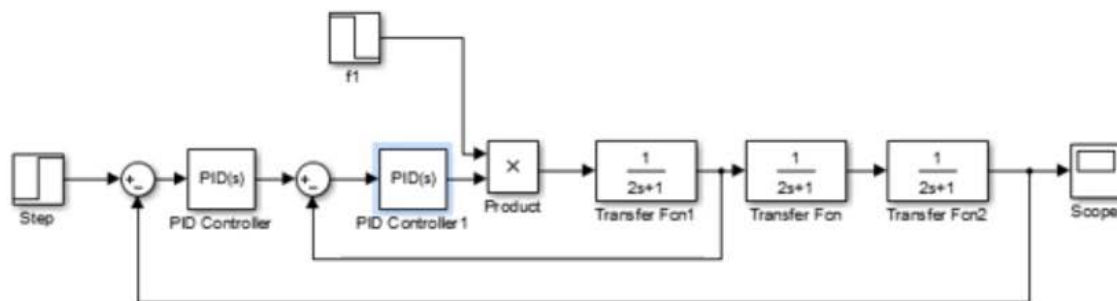


扰动的影响几乎没有  
动态变快

## 串级，以进水流量为副参数



## 串级，以第一个容器的液位为副参数

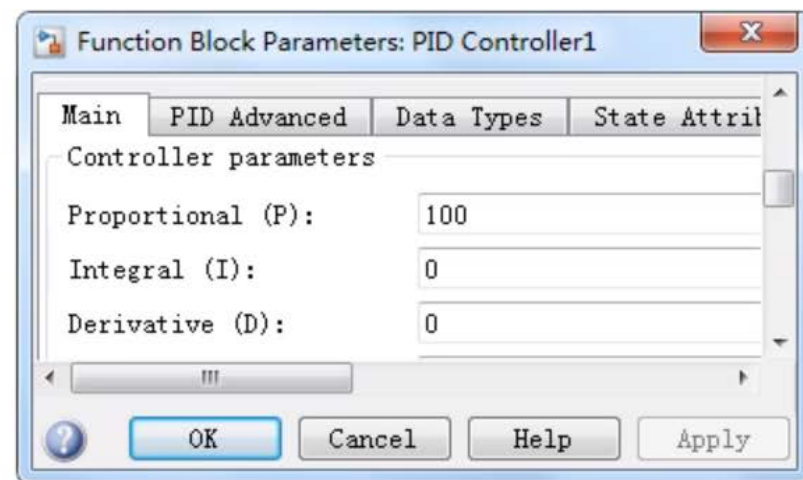
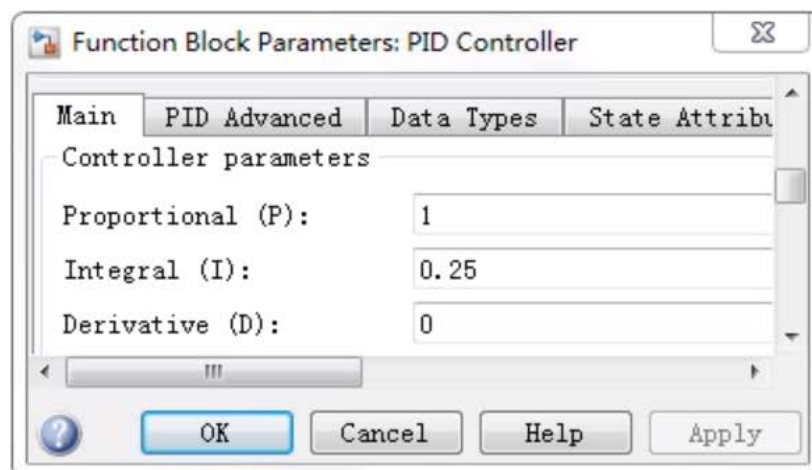
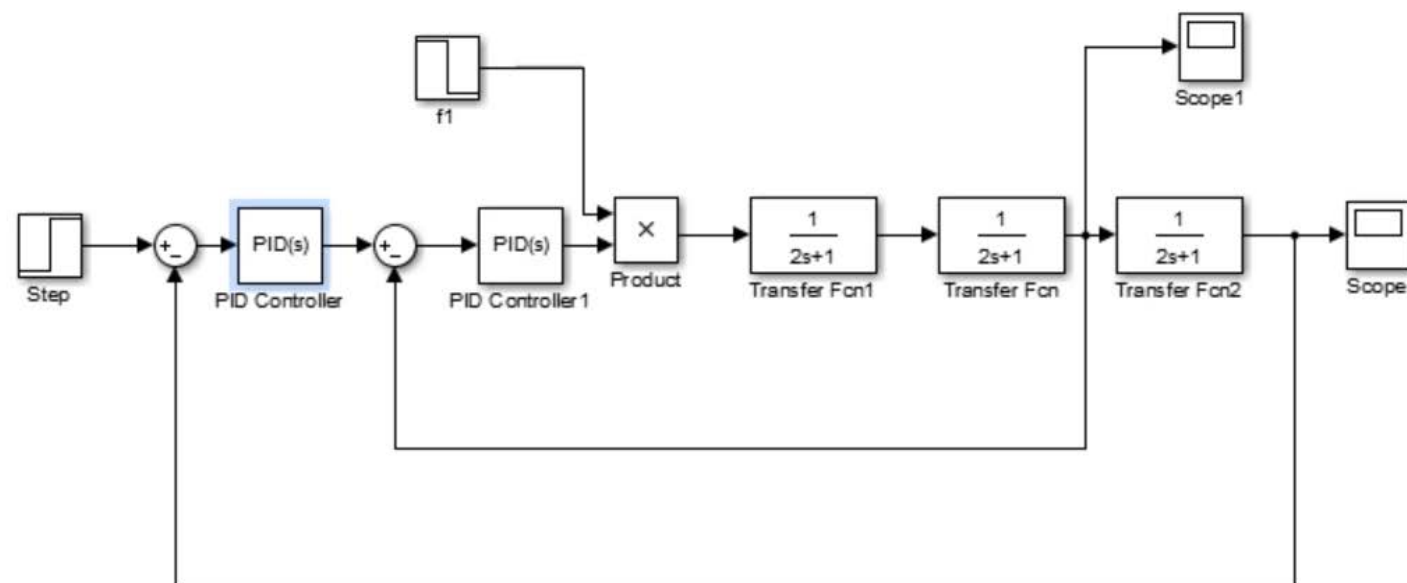




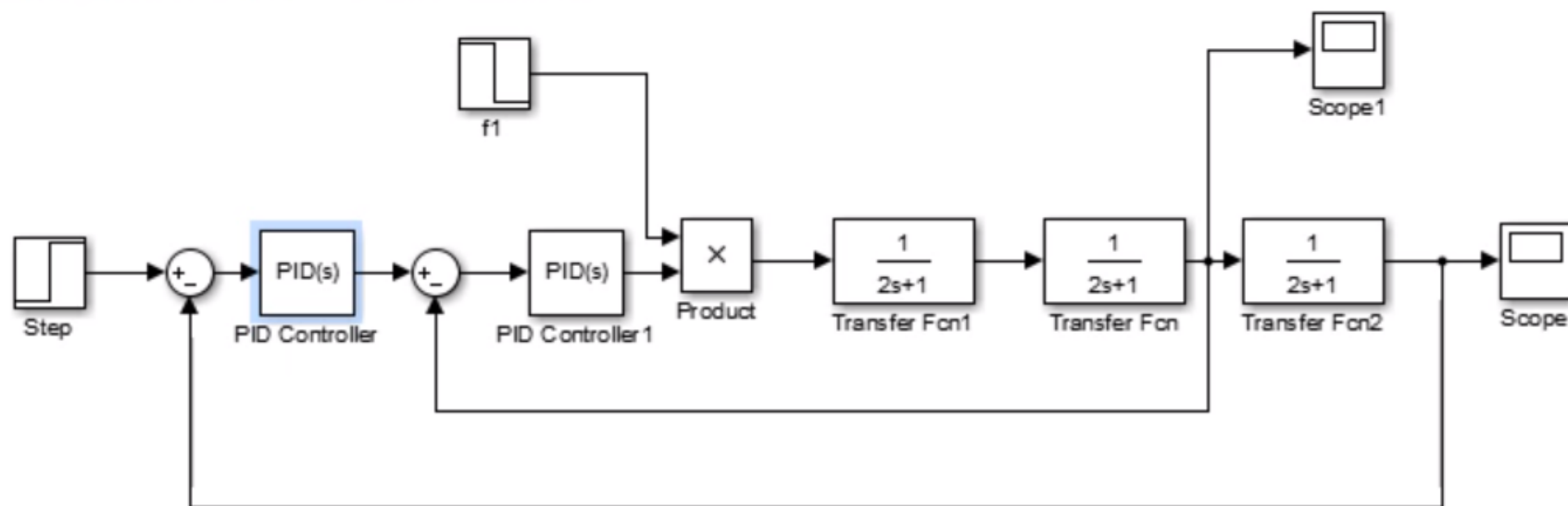
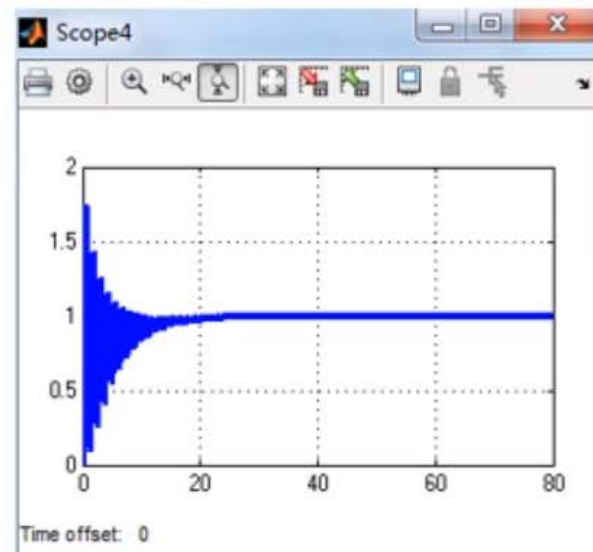
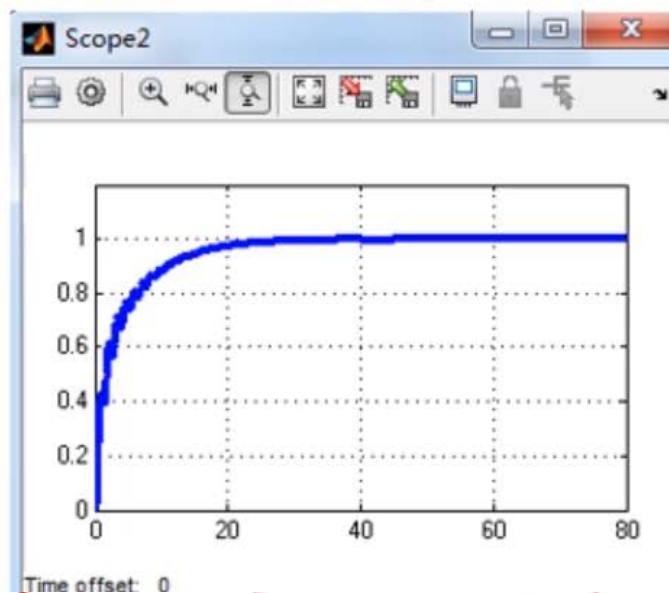
串级，以第二个容器的液位为副参数

$P=1, I=0.25, P2=100$  ( $P \cdot P2=100$ )

在 $t=40$ 加一扰动，进水压力有由1变为0.64



串级，以第二个容器的液位为副参数，  
 $P=1, I=0.25$ ,  $P_2=100$ , ( $P \cdot P_2=100$ )  
在 $t=40$ 加一扰动，进水压力由1变为0.64







# 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 $\delta_2$ (%)	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

# 第 7 章 复杂控制系统

## 7.2 前馈控制系统

前馈控制的原理是：当系统出现扰动时，立即将其测量出来，通过前馈控制器，根据扰动量的大小改变控制变量，以抵消扰动对被控变量的影响。

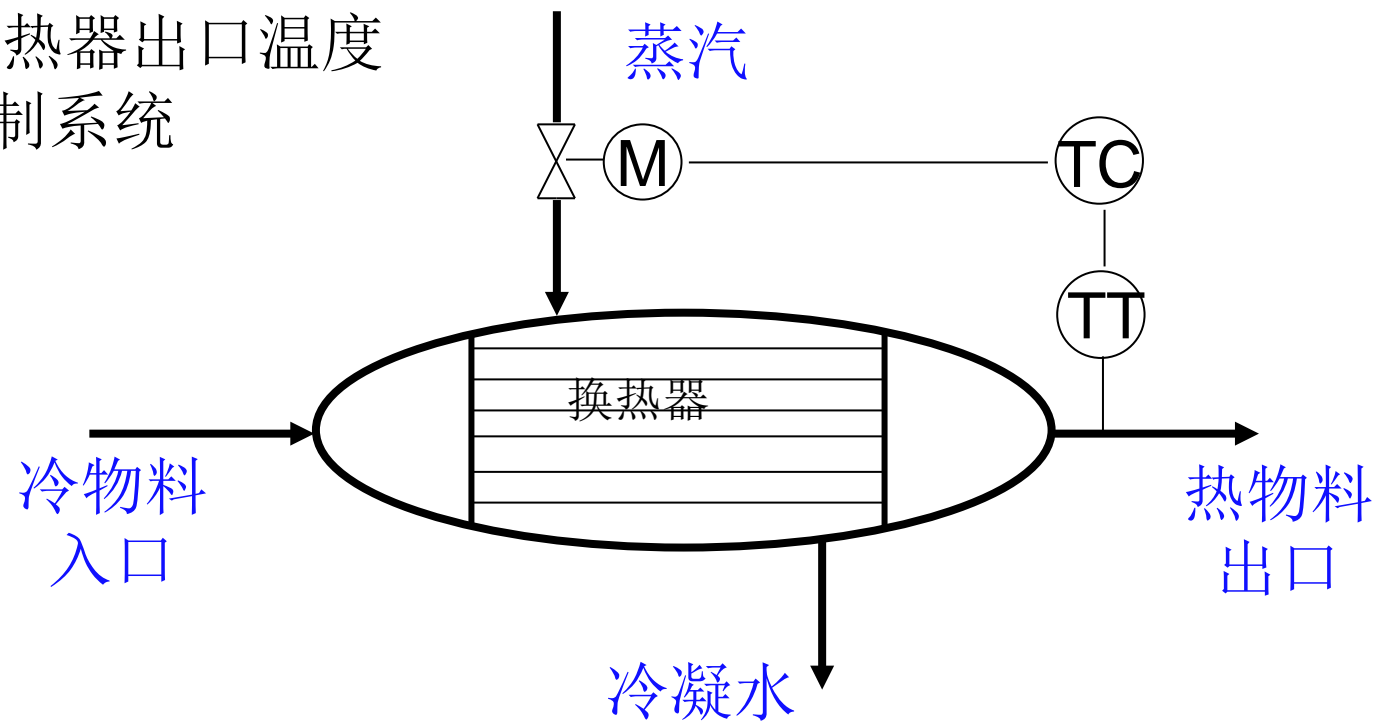
### 7.2.1 前馈控制的工作原理及其特点

#### 1、反馈控制的特点：

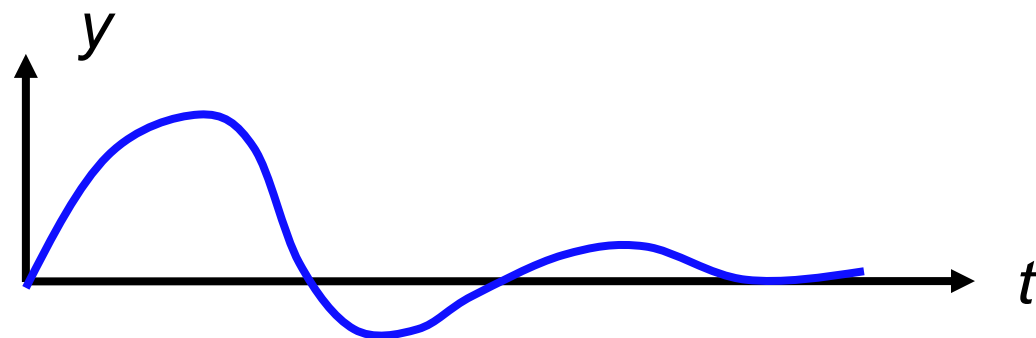
不论是什么干扰，只要引起被调变量的变化，调节器均可根据偏差进行调节。但必须被调变量变化后才进行调节，调节速度难以进一步提高。

# 第 7 章 复杂控制系统

例 换热器出口温度  
反馈控制系统



针对冷物料流量变化的  
最佳调节效果:



# 第 7 章 复杂控制系统

通过分析可发现反馈控制的特点：

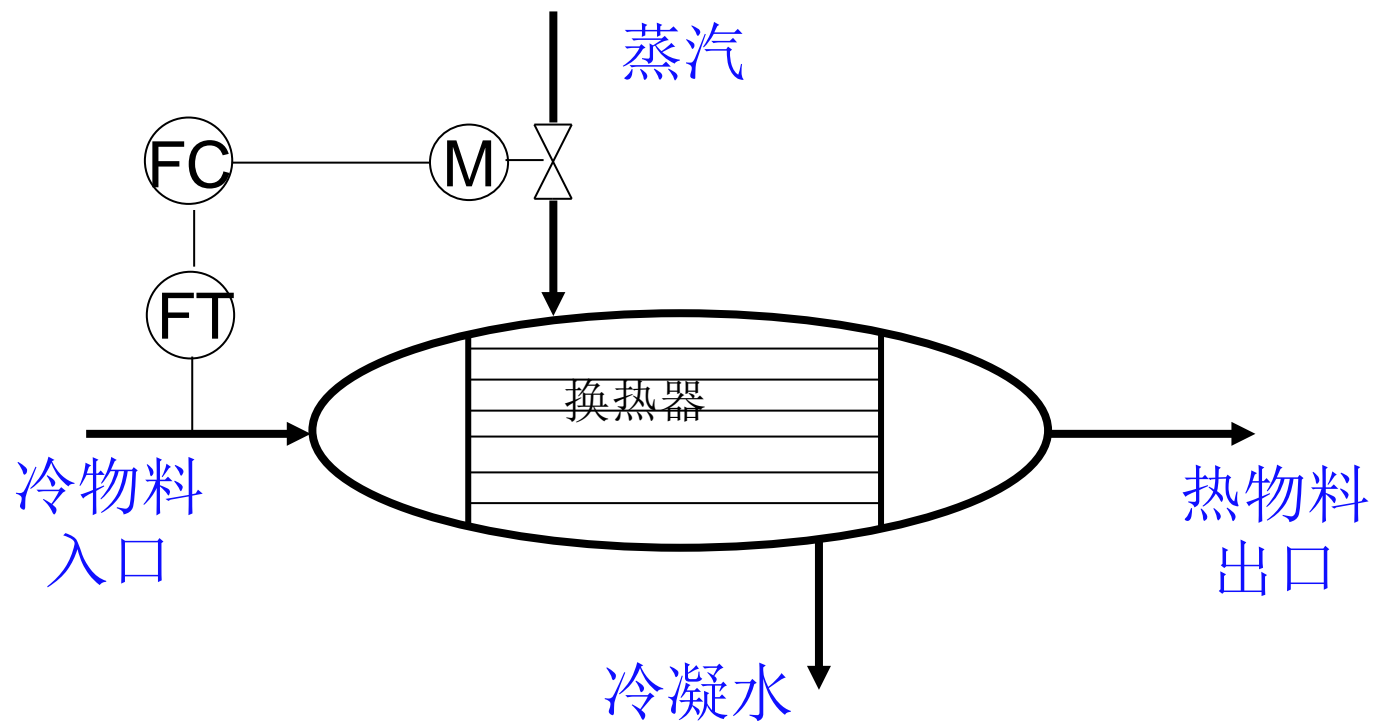
- 1、反馈控制是按偏差进行控制来消除偏差的。没有偏差出现时，调节器的输出信号不变。调节器随着偏差的出现才开始动作，控制不及时。
- 2、由于反馈系统构成闭环，存在系统是否稳定的问题。为保证系统正常工作，必须确保系统的稳定性。
- 3、只要干扰位于反馈环之内，反馈控制总能消除其对被控变量的影响，即反馈控制可以消除反馈环之内各种扰动的影响。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 2、前馈控制的原理与特点

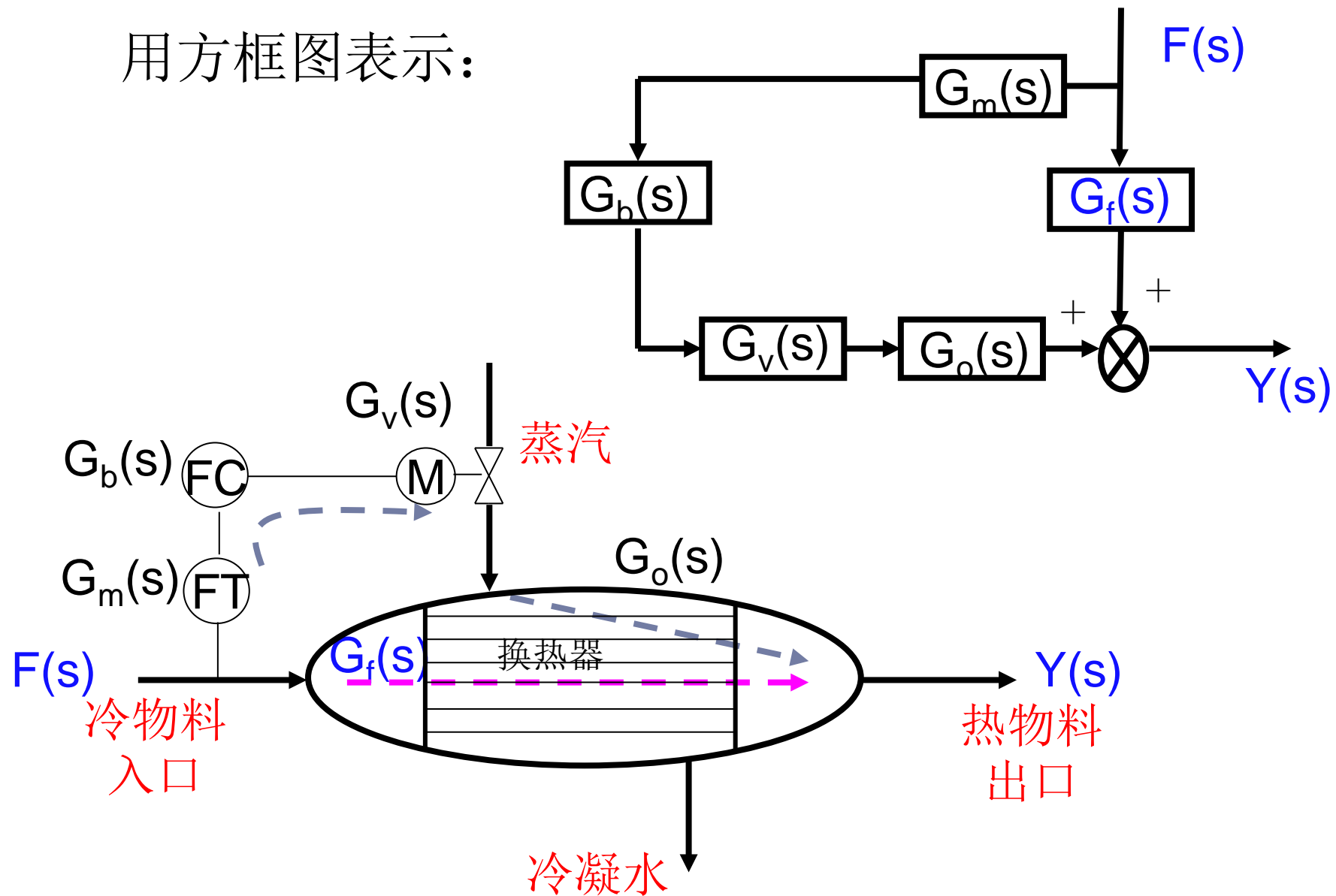
为了改变事后调节的状况，提出前馈控制的思路：根据冷物料流量 $Q$ 的大小，调节阀门开度。

**例** 针对换热器入口流量干扰的前馈控制系统



# 第 7 章 复杂控制系统

用方框图表示：

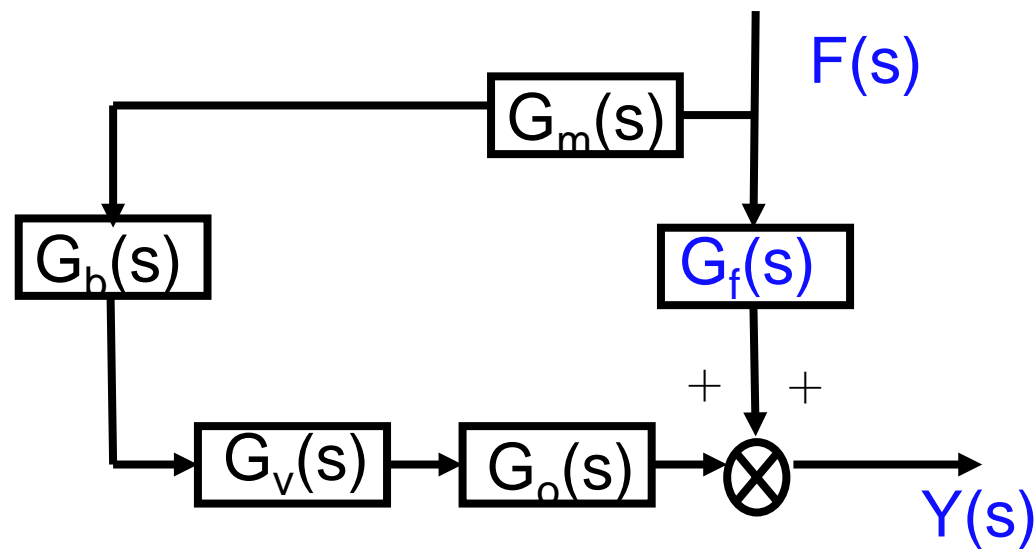


# 第 7 章 复杂控制系统

## 补偿原理（不变性原理）

如果补偿量和干扰量以同样的大小和速度作用于被控变量，且作用方向相反的话，被控变量不变。

$$Y(S) = F(S)G_f(s) + F(S)G_m(s)G_b(s)G_v(s)G_o(s) = 0$$





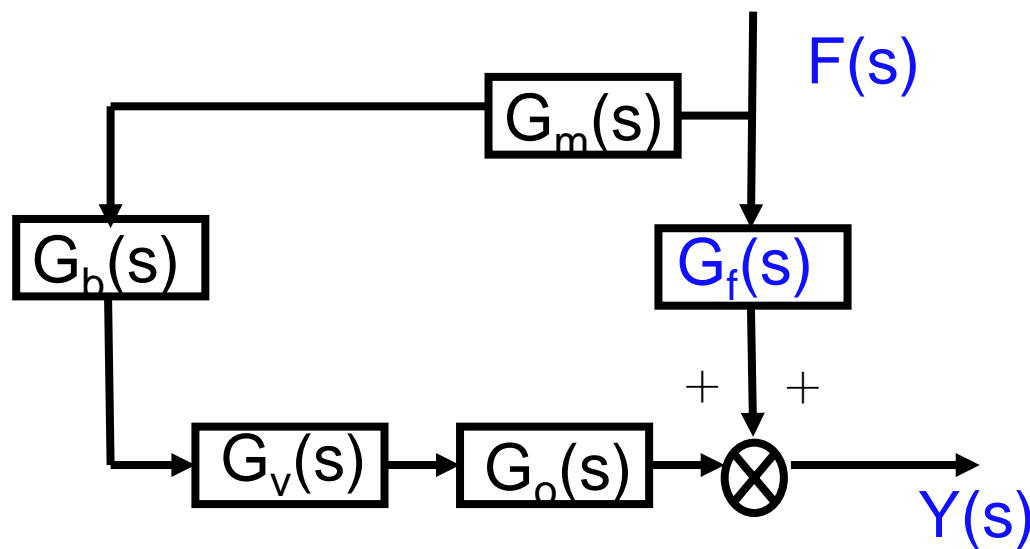
# 第 7 章 复杂控制系统

前馈补偿规律的推导：

$$Y(S) = F(S)G_f(s) + F(S)G_m(s)G_b(s)G_v(s)G_o(s) = 0$$

可以得到：

$$G_b(s) = - \frac{G_f(s)}{G_o(s) G_m(s) G_v(s)}$$

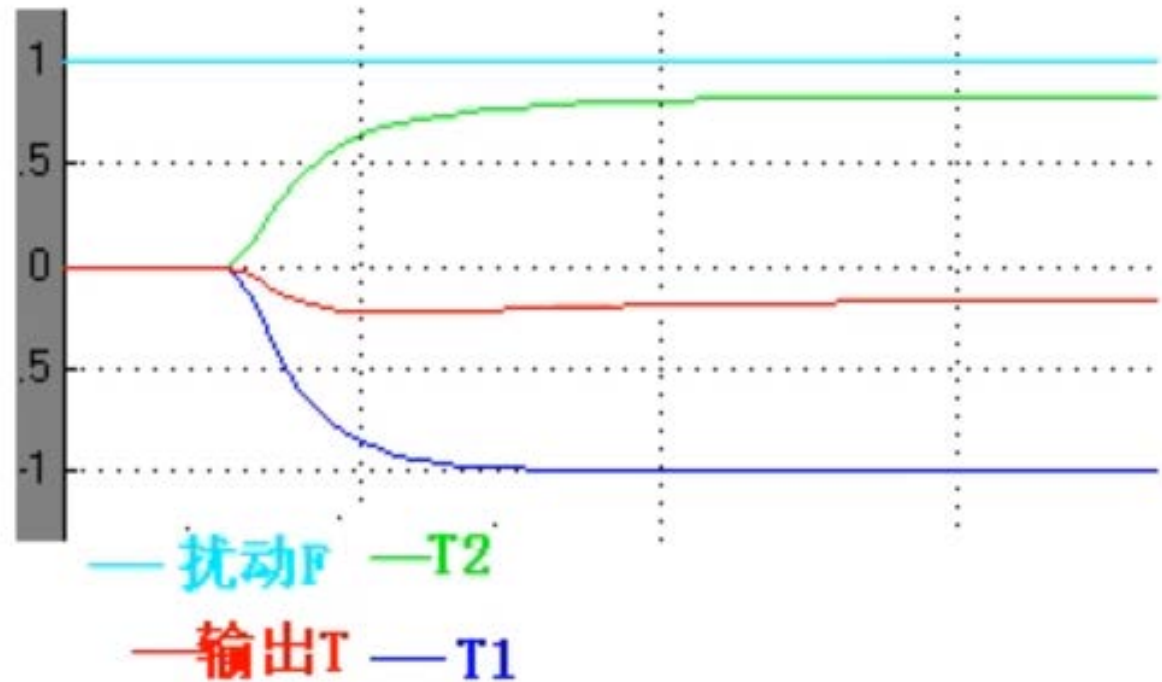


# 第 7 章 复杂控制系统

模型不准确时

$$T_1 = \frac{-e^{-3s}}{s+1}F(s)$$

$$T_2 = \frac{2.5s+1}{1.2(s+1)} \frac{e^{-3s}}{3s+1}F(s)$$



# 第 7 章 复杂控制系统

## □ 前馈控制的特点：

①前馈控制器是按是按照干扰的大小进行控制的，称为“扰动补偿”。如果补偿精确，被调变量不会变化，能实现“不变性”控制。

②前馈控制是开环控制，控制作用几乎与干扰同步产生，是事先调节，速度快。

③前馈控制器的控制规律不是PID控制，是由对象特性决定的。

④前馈控制只对特定的干扰有控制作用，对它其它干扰无效。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 前馈控制与反馈控制的区别：

### 1、产生控制作用的依据不同

前馈控制系统检测的信号是干扰，按干扰的大小和方向产生相应的控制作用。反馈控制检测的信号是被控变量，按被控量与设定值的偏差产生相应的控制作用。

### 2、控制效果不同

前馈控制作用及时，理论上可实现对干扰的完全补偿。  
反馈控制作用不及时，在整个系统中要做到无差必须首先有差。

### 3、实现的经济性和可能性不同

前馈控制需要对每一个干扰单独构成一个控制系统，因此不经济，也不完全可能。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 3. 前馈控制的局限性

①实际工业过程中的干扰很多，不可能对每个干扰设计一套控制系统，况且有的干扰的在线检测非常困难。

②前馈控制器的补偿控制规律很难精确计算，即使前馈控制器设计的非常精确，实现时也会存在误差，而开环系统对误差无法自我纠正。

因此，一般将前馈控制与反馈控制结合使用。前馈控制针对主要干扰，反馈控制针对所有干扰。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 7.2.2 前馈控制系统的结构

前馈控制的结构有静态补偿和动态补偿。

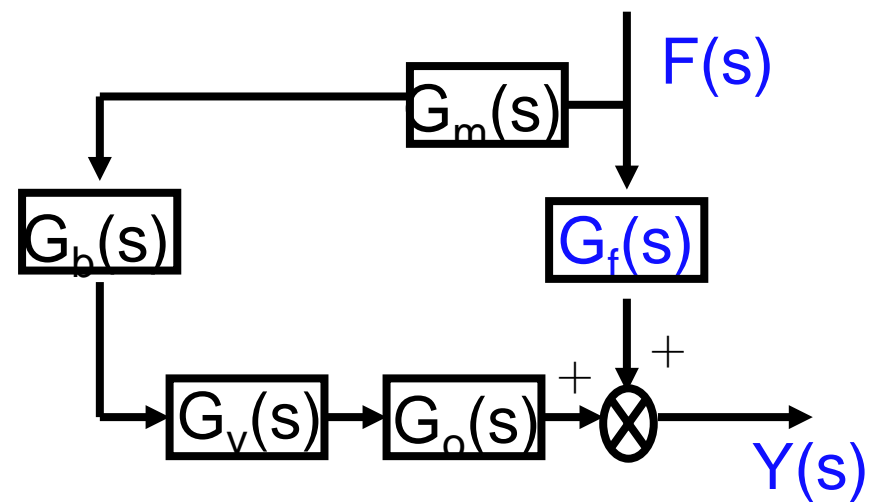
### 1. 静态前馈控制系统

所谓静态前馈控制，是前馈控制器的补偿控制规律，只考虑静态增益补偿，不考虑速度补偿。

$$G_b(s) = -\frac{G_f(s)}{G_o(s) \cdot G_m(s) \cdot G_v(s)}$$

$$G_b(0) = -\frac{K_f}{K_o \cdot K_m \cdot K_v} = -K_b$$

( $S=0$ 时)



# 第 7 章 复杂控制系统

静态前馈系统结构简单、易于实现，前馈控制器就是一个比例放大器。但控制过程中，动态偏差依然存在。

## 2. 动态前馈控制系统

完全按照补偿控制规律制作控制器。

$$G_b(s) = -\frac{G_f(s)}{G_o(s) \cdot G_m(s) \cdot G_v(s)}$$

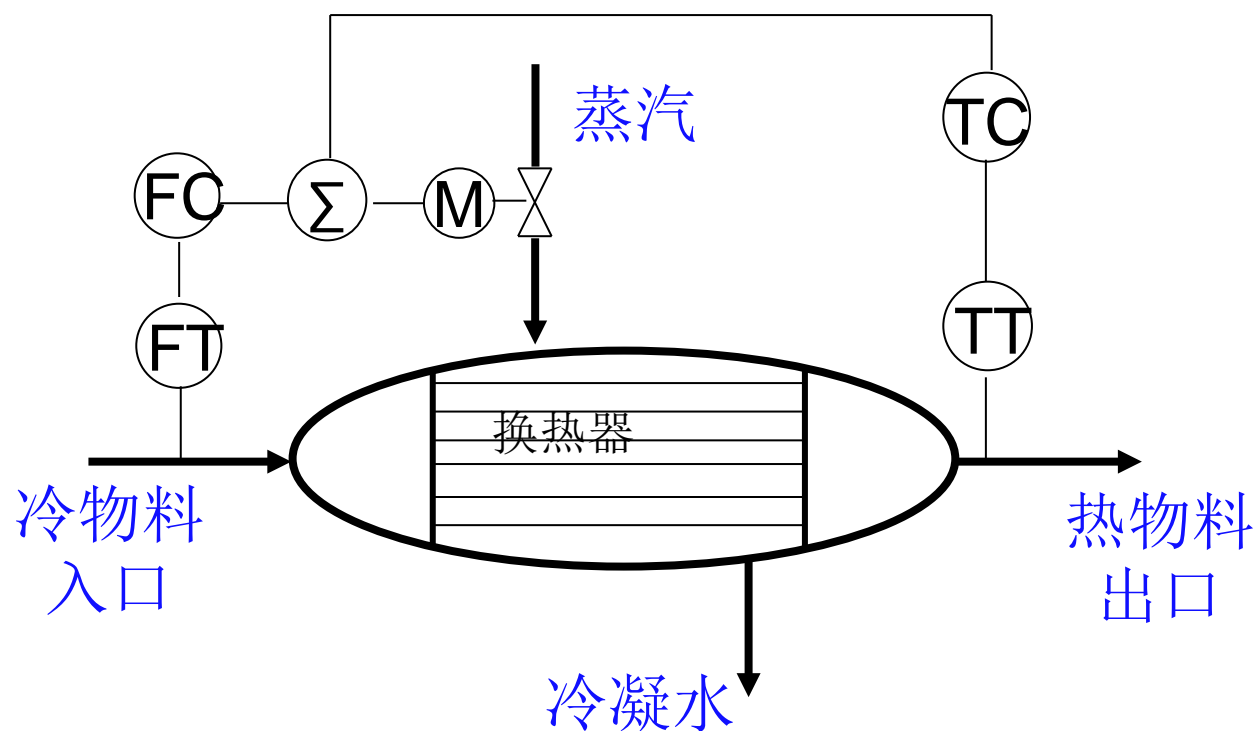
理论上，动态前馈控制能在每个时刻都完全补偿扰动对被控参数的影响。但补偿控制规律比较复杂，常常无法获得精确表达式，也难以精确实现。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 3. 前馈—反馈复合控制系统

为了克服前馈控制的局限性，将前馈控制和反馈控制结合起来，组成前馈—反馈复合控制系统。

❖ 如换热器出口温度前馈—反馈复合控制系统。

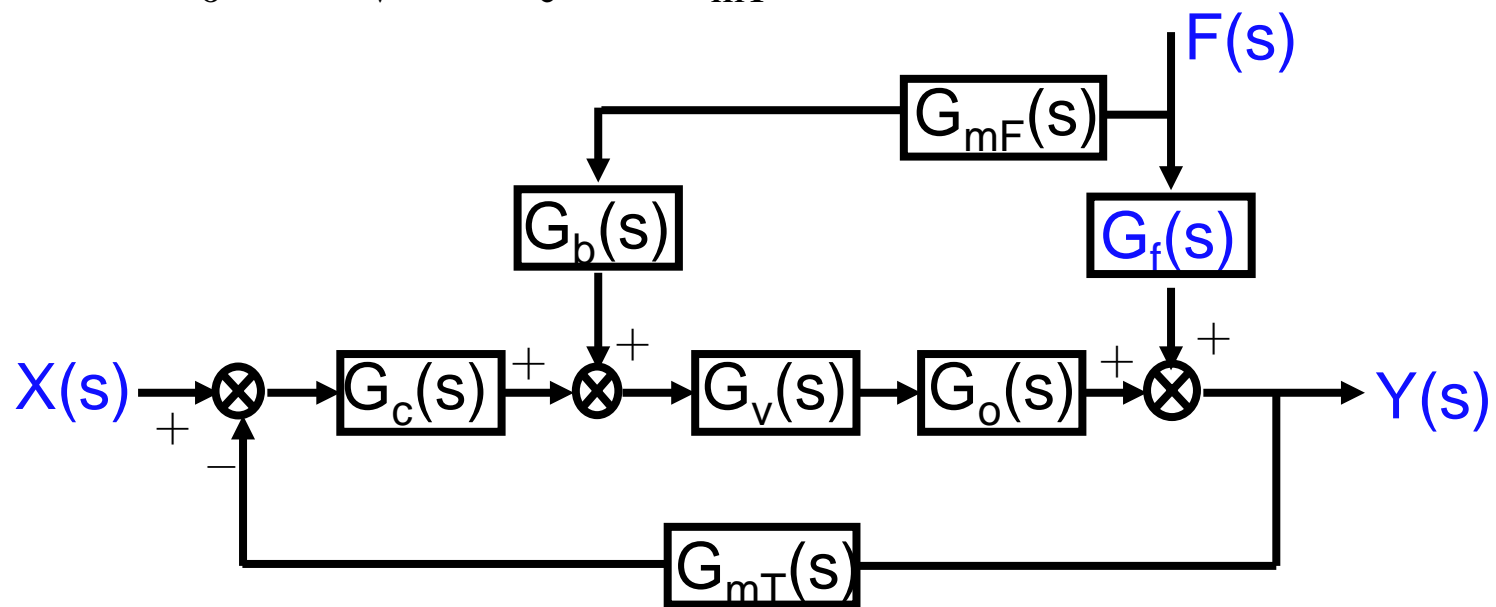




# 第 7 章 复杂控制系统

在前馈——反馈复合控制系统中，设定值 $X(s)$ 、干扰 $F(s)$ 对输出 $Y(s)$ 的共同影响为：

$$Y(s) = \frac{G_o(s)G_v(s)G_c(s)}{1 + G_o(s)G_v(s)G_c(s)G_{mT}(s)} X(s) + \frac{G_f(s) + G_o(s)G_v(s)G_b(s)G_{mF}(s)}{1 + G_o(s)G_v(s)G_c(s)G_{mT}(s)} F(s)$$



# 第 7 章 复杂控制系统

干扰通道的传递函数为：

$$Y_f(s) = \frac{G_f(s) + G_o(s)G_v(s)G_b(s)G_{mF}(s)}{1 + G_o(s)G_v(s)G_c(s)G_{mT}(s)} F(s)$$

1、传函分子即是前馈控制系统的补偿条件。表明复合控制系统与开环前馈控制系统的补偿条件完全相同，并不因为引进反馈控制而有所改变。

2、传函分母即是反馈控制系统的闭环传递函数。表明反馈控制系统的稳定性并不因为引进前馈控制而有所改变；且由于反馈控制回路的存在，使前馈控制的精度比开环前馈控制高。

# 第 7 章 复杂控制系统

复合控制系统具有以下**优点**：

①由于在前馈系统中增加了反馈控制回路，这就大大简化了原有的前馈控制系统（对每一个干扰要设计一个前馈控制），只需要对主要的且反馈控制不易克服的干扰进行前馈补偿，而其他干扰均可由反馈控制予以校正。既提高了控制速度，又保证了控制精度。

主要干扰是指“**可测不可控**”的主要扰动。

所谓“**可测**”是指可通过测量变送器，在线将扰动量转换为前馈补偿器所能接收的信号。“**不可控**”是指这些扰动不易通过控制回路予以控制。

# 第 7 章 复杂控制系统

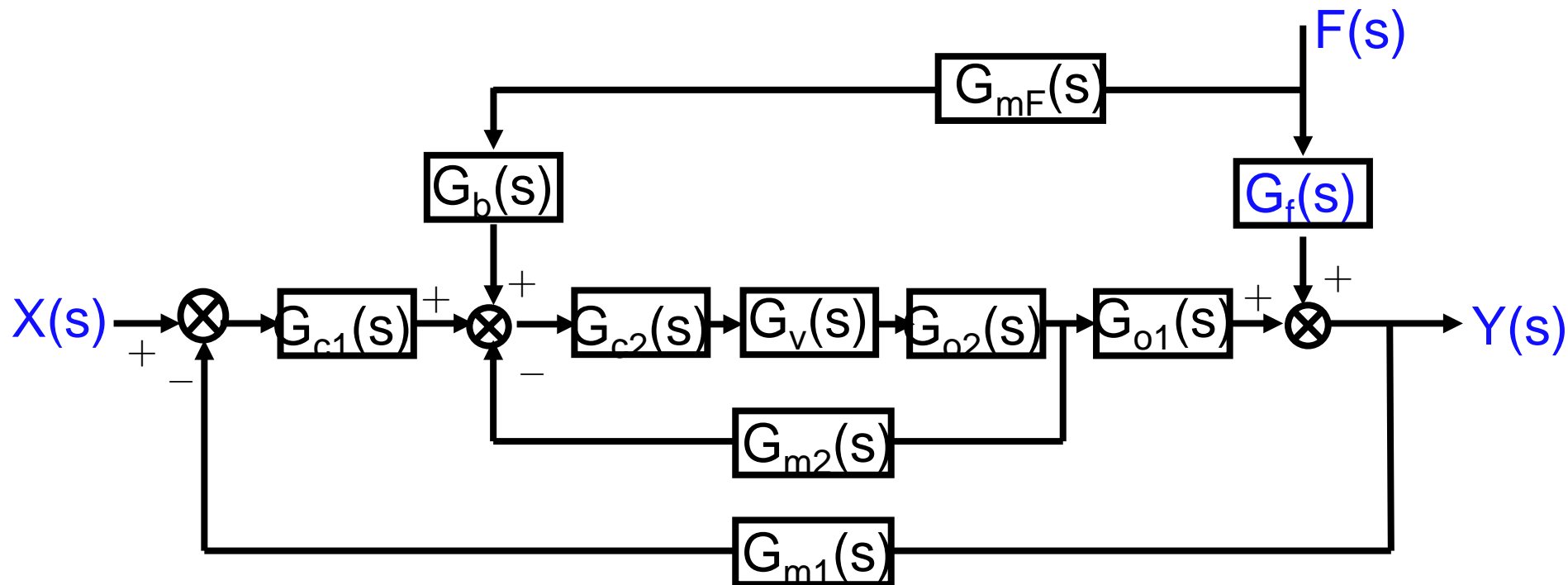
②反馈控制回路的存在，降低了对前馈控制器的精度要求，有利于简化前馈控制器的设计和实现。

③在单纯的反馈控制系统中，提高控制精度与系统稳定性是一对矛盾。往往为保证系统的稳定性而无法实现高精度的控制。而前馈——反馈控制系统既可实现高精度控制，又能保证系统稳定运行。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 4. 前馈——串级复合控制系统

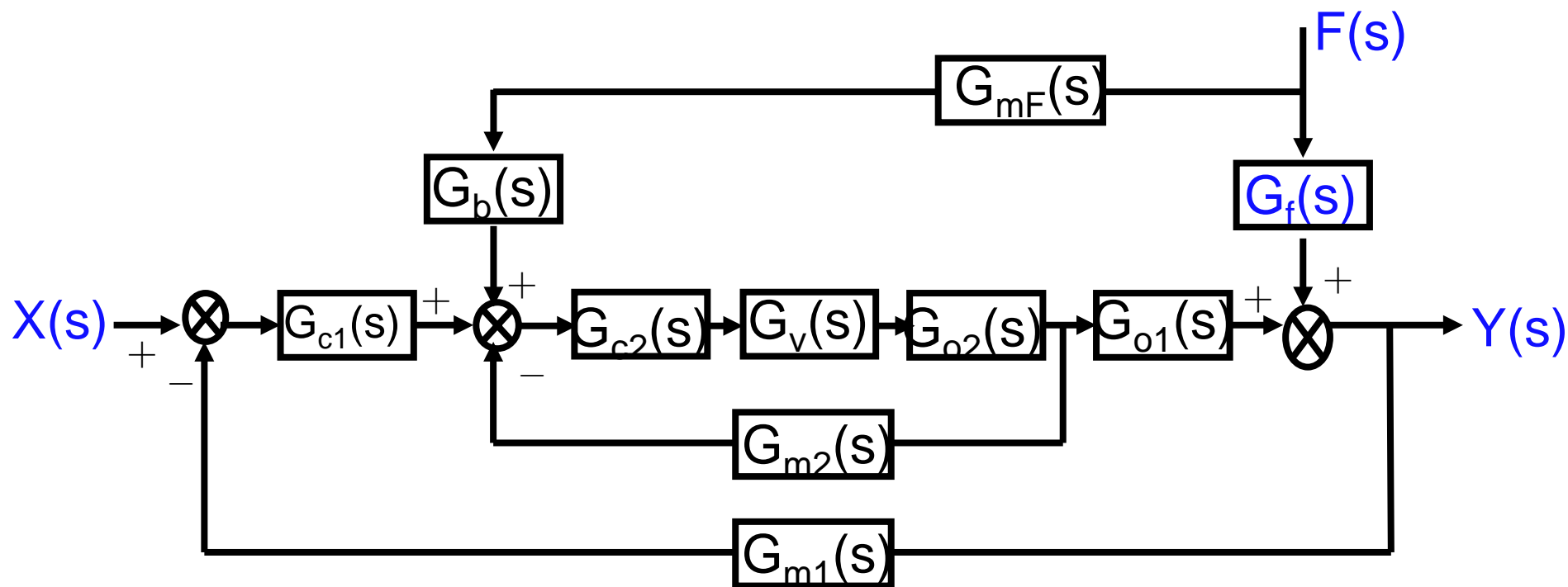
对于慢过程的控制，如果生产过程中的主要干扰频繁而又剧烈，而工艺对被控变量的控制精度要求又很高，可以考虑采用前馈——串级复合控制方案。



# 第 7 章 复杂控制系统

从前馈—串级复合控制系统的传递函数可知：

- 1、串级控制回路的传函和单纯的串级控制系统一样
- 2、前馈控制器的传函主要由扰动通道和主对象特性决定



# 第 7 章 复杂控制系统

## 7.2.2 前馈控制系统的设计

### 一、采用前馈控制系统的条件

采用前馈控制的条件必然与干扰对象特性有关。  
一般来说，在系统中引入前馈控制的**原则**：

#### 1、系统中存在下列情况的干扰

1)系统中的干扰是**可测不可控**的，假若干扰可控，则可设置独立的控制系统予以克服，无须设计一个比较复杂的系统进行前馈控制了；干扰不可测，就得不到干扰信号的数值大小，前馈控制无法实现。

2) 干扰的变化幅值大，频率高

# 第 7 章 复杂控制系统

干扰变化幅值越大，对被控变量的影响越大，偏差也越大，这时用基于干扰的前馈控制显然比反馈控制有利。

高频干扰对被控量的影响十分显著，尤其是对滞后比较小的流量对象，会使系统产生持续振荡现象，若采用前馈控制，在该干扰可得到同步前馈补偿。

3) 在系统中存在着对被控量影响显著，工艺对控制质量要求又高，单纯的反馈控制系统难于满足要求时，可通过前馈控制改善控制品质。

2、控制通道的滞后大或干扰通道的时间常数小

如加热炉的温度控制、化学反应器的产品质量控制



# 第 7 章 复杂控制系统

因此可以得到前馈控制器输入变量的选择依据，也即是扰动变量的选择依据：

- 1、扰动变量可测量但不可控，例如精馏塔进料、加热炉的原料等。
- 2、扰动变量应是主要扰动，扰动变化频繁，幅度变化大。
- 3、扰动变量对被控变量影响大，用常规的反馈控制较难实现所需控制要求；用前馈控制（通常用静态前馈）可以解决。
- 4、虽然扰动变量可控，但工艺需要经常改变其数值，进而影响被控变量。

# 第 7 章 复杂控制系统

## 二、前馈控制器的通用模型

前面按照不变性条件，求得前馈控制器的传递函数表达式

$$G_b(s) = -\frac{G_f(s)}{G_o(s) G_m(s) G_v(s)}$$

实际上，要得到上式的精确数学模型比较困难，准确实现也比较困难，还不如用简约化模型。

将 $G_o(s)$ 、 $G_f(s)$ 用带滞后的一阶模型近似，将 $G_v(s)$ 、 $G_m(s)$ 用比例模型近似，代入上式整理得：

# 第 7 章 复杂控制系统

前馈控制器的通用模型：

$$G_b(s) = K_b \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$$

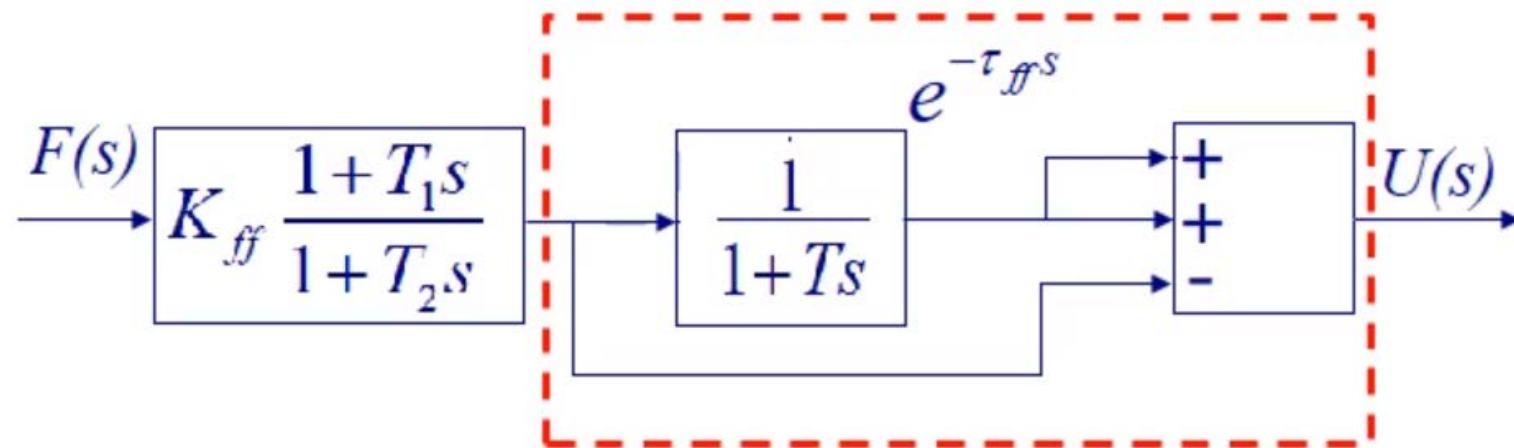
各系数物理意义：

$K_b$  — 静态放大系数；       $T_1$  — 加速系数；

$T_2$  — 减速系数；       $\tau$  — 纯滞后时间。

因此，可以事先做好各系数可调的通用前馈控制器。使用时根据补偿要求，调整各个系数值，就可获得不同特性的前馈控制功能。

# 第 7 章 复杂控制系统



# 第 7 章 复杂控制系统

## 三、前馈控制系统设计中的几个问题

### 1、流量副回路的引入

依据干扰得出的前馈控制作用，在与反馈作用叠加后是送往执行器直接控制阀门的开度呢？或是另设一个流量副回路，用以作为副回路的设定值？也就是说采用前馈—反馈控制方案或是采用前馈—串级控制方案呢？这要根据实际情况而定。

若阀门压力存在干扰，又希望引入前馈控制使系统有优良品质，那么还是引入流量副回路，即采用前馈—串级控制方案。

# 第 7 章 复杂控制系统

2、开方器的引入

3、偏置值的设置

根据已确定的静态前馈增益，在正常工况下，扰动变量经检测变送和前馈控制器后输出信号的负值作为偏置值。

4、前馈输出的限幅

5、前馈输入量噪声的消除

# 第 7 章 复杂控制系统

## 前馈控制的应用场合

(1) 某个干扰幅值大而频繁，对被控变量影响剧烈，而对象的控制通道滞后大。

(2) 采用单纯的反馈控制，控制速度慢、质量差。

(3) 用串级控制，效果改善不明显。

目前，比较高档的控制仪表中都配备通用前馈控制模块，供用户选用。