

过程控制原理应用I

(检测技术与过程控制原理)

主讲人：安剑奇 教授

中国地质大学（武汉） 自动化学院

2020年10月

第7章 复杂过程控制系统



复杂过程控制系统

- 简单反馈控制回路中，增加**计算环节，控制环节或其他环节**的控制系统，称为复杂过程控制系统
- 从输入输出关系看，该类系统仍属于单输入单输出系统
- 在大多数情况下，**单回路系统能够满足工艺生产的基本要求**
- **串级控制，前馈控制，大滞后过程控制等复杂的控制系统是为**适应对系统控制品质高要求而提出的

第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

7.1.1 串级控制系统的基本原理

➤ 连续反应釜温度控制系统

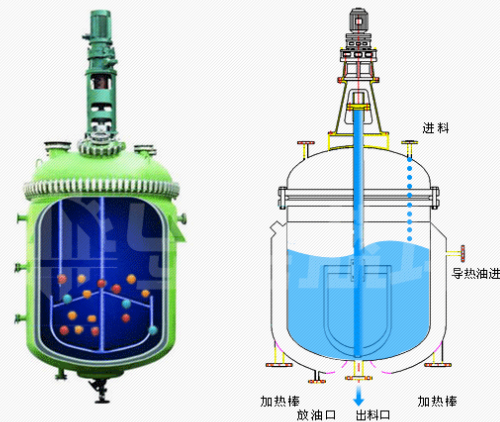
■ 工艺过程

- 物料自顶部连续进入釜中
- 反应产生的热量由夹套中冷却水带走
- 工艺要求对反应温度进行严格控制

■ 被控过程有三个热容器

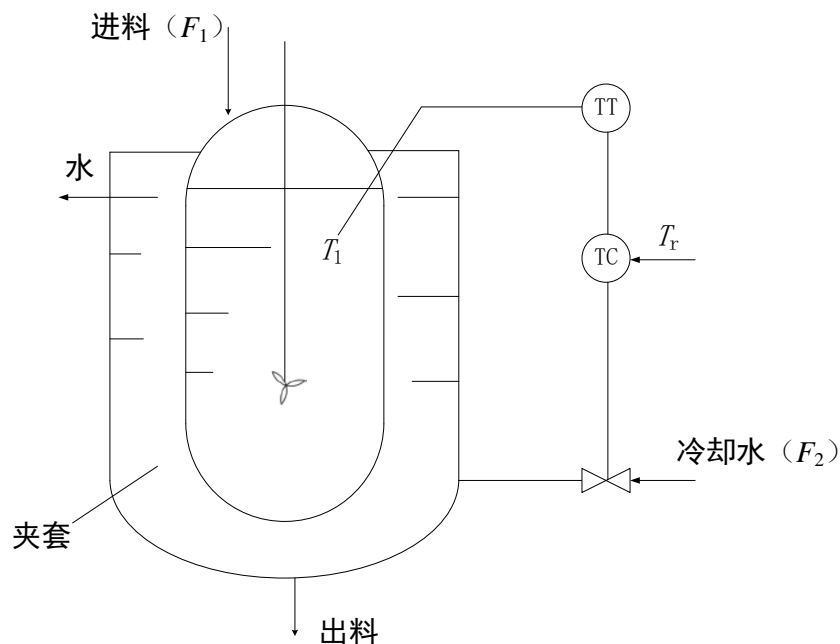
- 夹套中的冷却水（油）
- 釜壁
- 釜中物料

反应釜运转
设备主要由罐体、夹套、搅拌系统三大部分组成



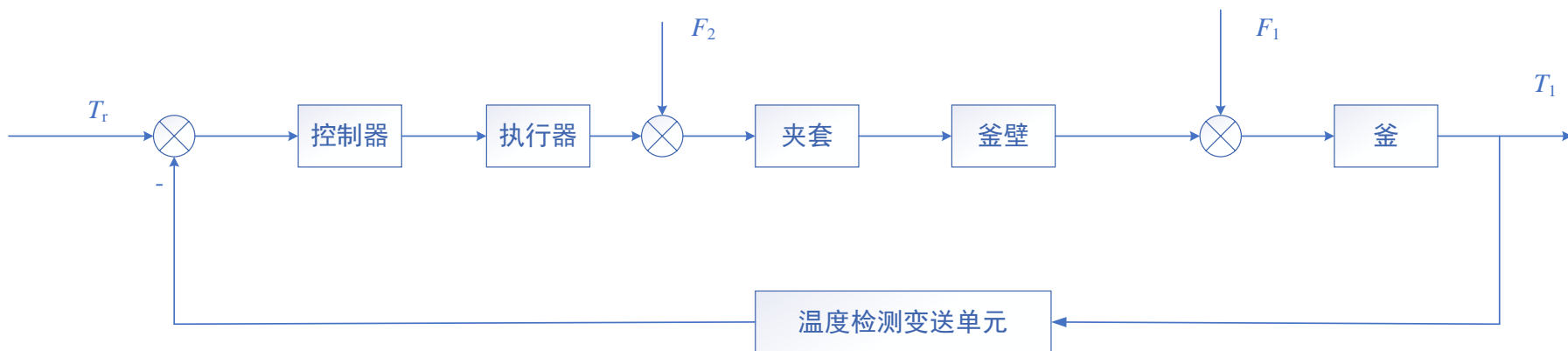
7.1.1 串级控制系统的基本原理

- 被控量：反应温度
- 控制量：冷却水流量
- 执行机构：调节阀
- 反应温度 T_1 干扰因素
 - 进料流量、进料温度及成分(F_1)
 - 冷却水的入口温度和阀前压力(F_2)



7.1.1 串级控制系统的基本原理

➤ 连续反应釜单回路温度控制系统框图



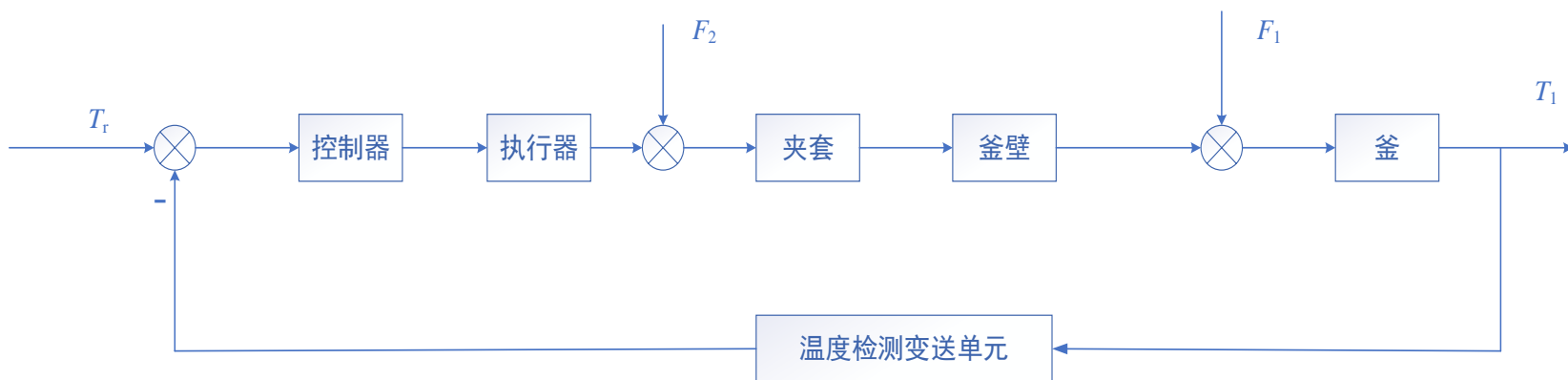
➤ 单回路温度控制系统的缺点

- ❑ 从干扰引起温度 T_1 下降到调节阀动作使温度升高需要经过三个热容过程
- ❑ 控制通道的时间常数和容量滞后较大
- ❑ 最终会使 T_1 因调解不及时而出现较大的偏差

7.1.1 串级控制系统的基本原理

➤ 解决的关键

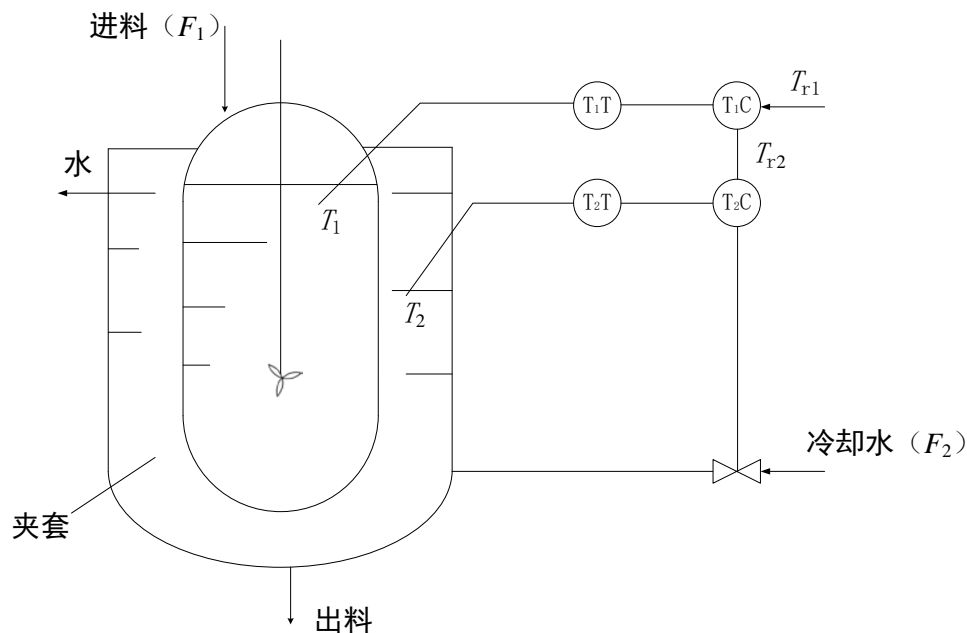
- ❑ 如何在干扰出现后及时产生控制作用，如图可见，来自冷却水的干扰 F_2 会使夹套温度很快发生变化，如何抑制 F_2 对反应温度 T_1 的干扰？
- ❑ 如果能及时检测夹套 T_2 的变化并加以控制，就可以使调节阀尽早动作



7.1.1 串级控制系统的基本原理

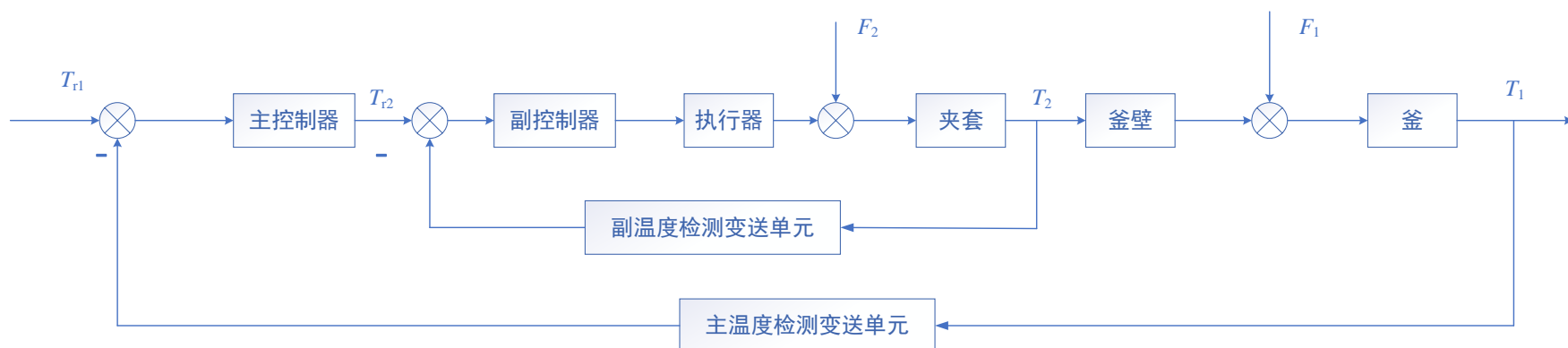
➤ 连续反应釜串级控制系统

- ❑ 控制器 T_2C 通过稳定夹套温度来及时抑制 F_2 对反应温度 T_1 影响
- ❑ 但控制器 T_2C 不能克服 F_1 对反应温度 T_1 影响
- ❑ 适当改变 T_2C 设定值 T_{2r} ，确保夹套温度使 T_1 稳定在工艺所要求的数值上



7.1.2 串级控制系统特点与分析

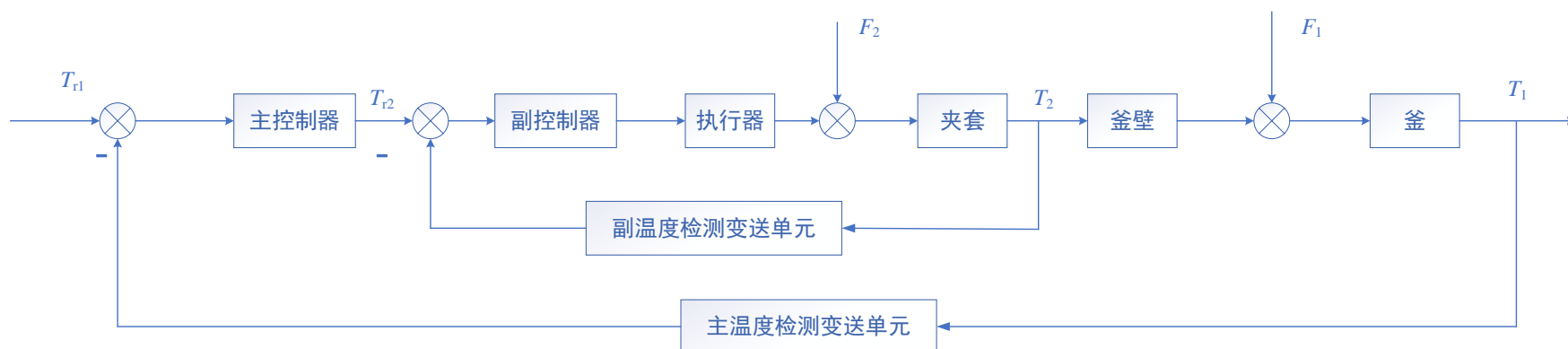
➤ 串级控制系统的框图



将两个（或多个）控制器串联在一起，一个控制器的输出作为另一个控制器的设定值，各自完成不同任务的系统结构，称为串级控制系统

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 串级控制系统的框图

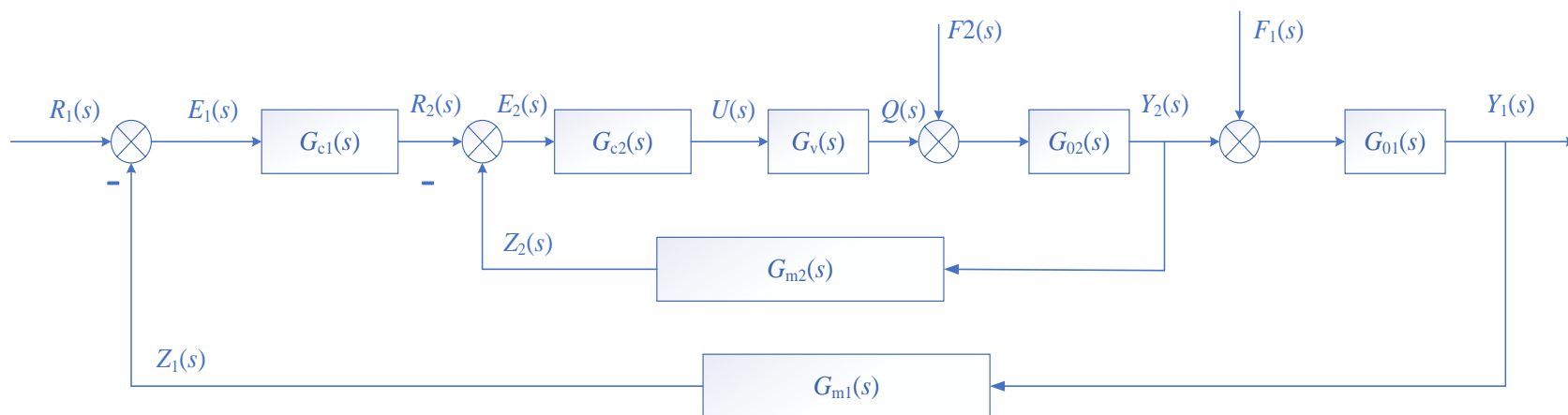


➤ 分析:

- ❑ 反应温度与夹套温度构成串级控制系统，反应温度为主被控量，夹套温度为副被控量
- ❑ 反应温度控制的输出作为夹套温度控制的设定值
- ❑ 干扰 F_2 由副控制器克服、干扰 F_1 由主控制器克服

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 串级控制系统的一般框图



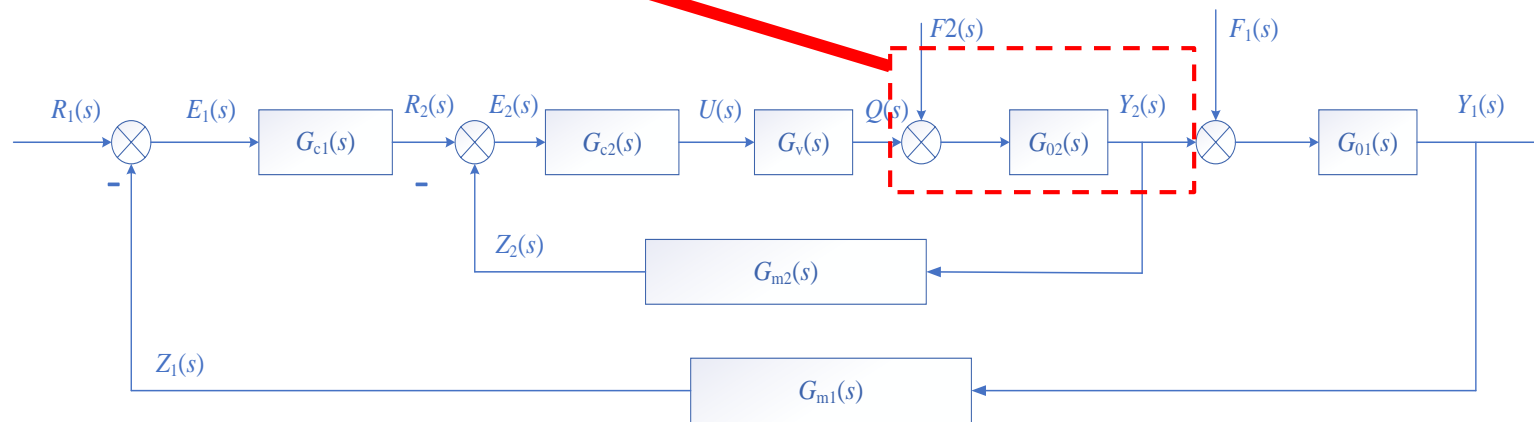
➤ 特点：

- 串级控制系统增加一个检测变送单元和一个控制器，形成两个闭环
 - 里面的闭环称为副环（或副回路），它是一个随动系统
 - 外面的闭环称为主环（或主回路），它是一个定值控制系统

7.1.2 串级控制系统特点与分析

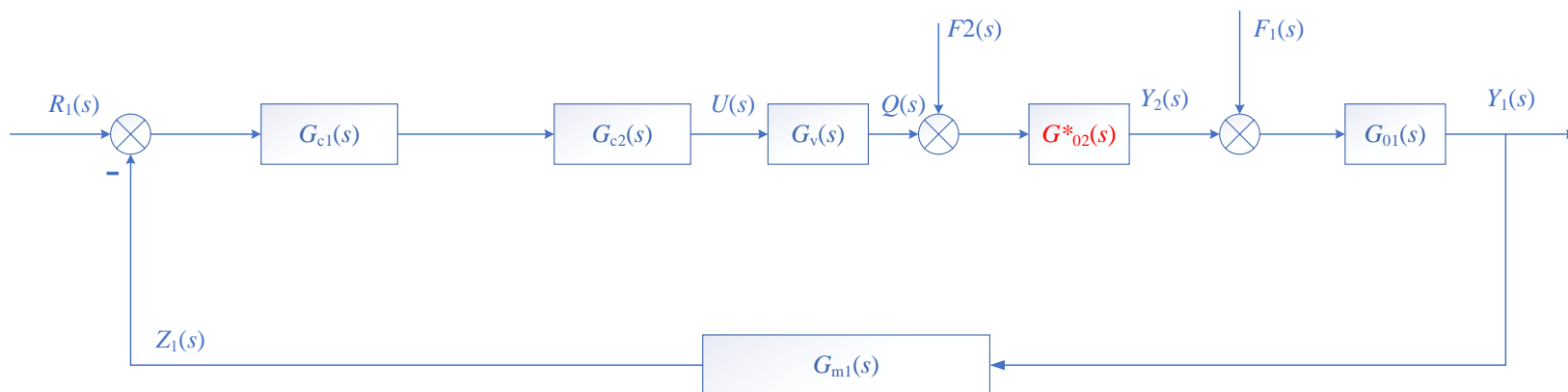
- 串级控制系统的优势1: 能迅速克服进入副回路的干扰
- 以干扰作为输入, 副回路传递函数

$$G_{02}^*(s) = \frac{Y_2(s)}{F_2(s)} = \frac{G_{02}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{m2}(s)}$$



7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 为了便于分析，我们将一般框图等效为下图所示



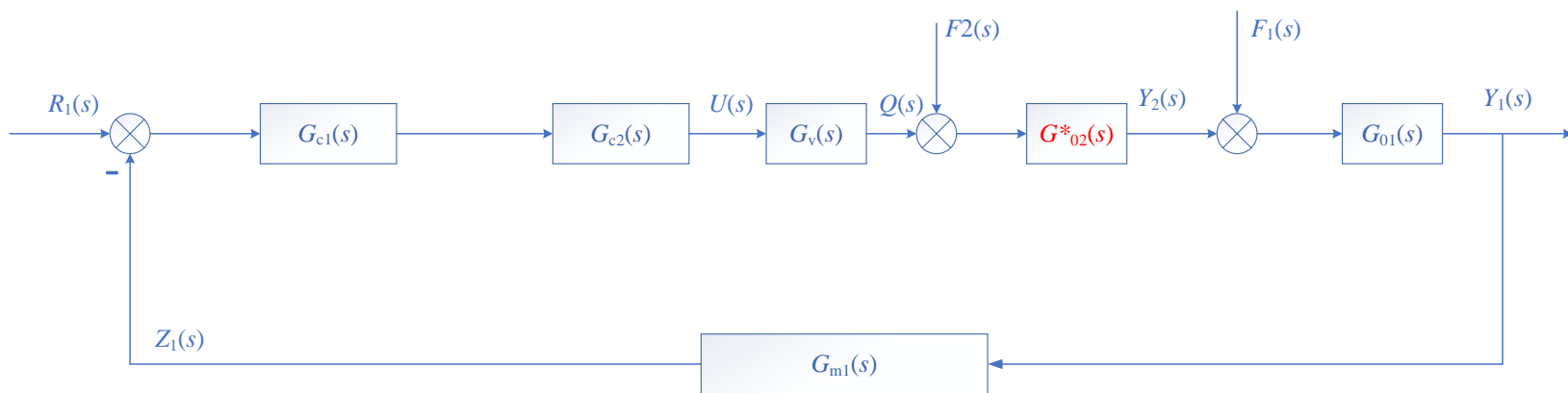
➤ 此时系统输出对输入的传递函数

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}^*(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}^*(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 在干扰 F_2 的作用下，得到系统输出对干扰输入的传递函数为

$$\frac{Y_1(s)}{F_2(s)} = \frac{G_{02}^*(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}^*(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$



7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 对一个控制系统而言

- $Y_1(s)/R_1(s)$ 越接近于“1”，则系统的控制性能越好
- $Y_1(s)/F_2(s)$ 越接近于“0”，则系统的抗干扰能力越强
- 在工程上通常将二者的比值作为衡量系统控制性能和抗干扰能力的综合指标，该值越大，则系统控制性能和抗干扰能力越强
- 表达式为：

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = G_{c1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

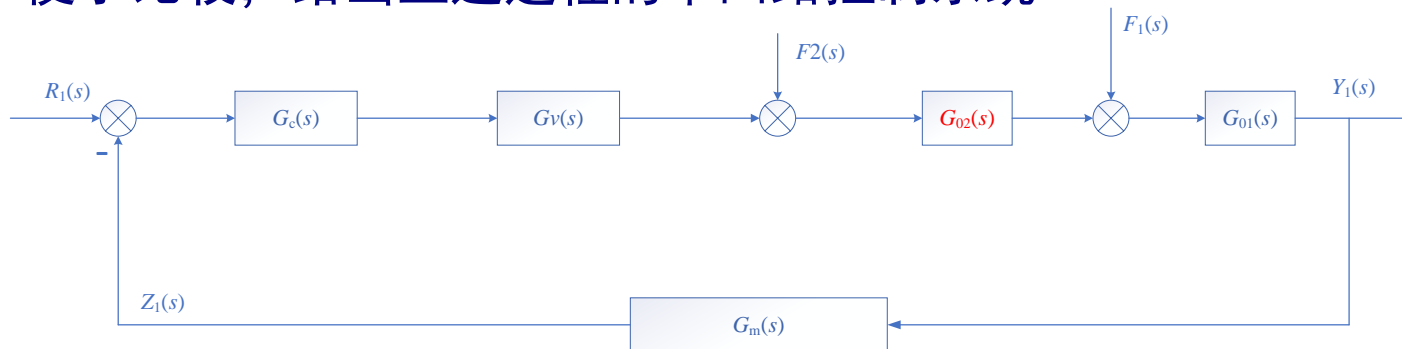
➤ 我们假设 $G_{c1}(s) = K_{c1}, G_{c2}(s) = K_{c2}, G_v(s) = K_v$

➤ 可以推出：
$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = K_{c1}K_{c2}K_v$$

➤ 结论：主、副控制器的比例增益乘积越大，抗干扰能力越强，控制品质越好

7.1.2 串级控制系统特点与分析

- 为了便于比较，给出上述过程的单回路控制系统



- 在给定信号 $R_1(s)$ 的作用下，传递函数为

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_c(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)G_m(s)}$$

- 在干扰 F_2 的作用下，传递函数为

$$\frac{Y_1(s)}{F_2(s)} = \frac{G_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s)}$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 由上式可得单回路控制系统的控制性能和抗干扰能力的综合指标为：

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = G_c(s)G_v(s)$$

➤ 假设

$$G_c(s) = K_c, G_v(s) = K_v$$

➤ 则

$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = K_c K_v$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

- 单回路综合指标为
$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = K_c K_v$$
- 串级系统的综合指标为
$$\frac{Y_1(s)/R_1(s)}{Y_1(s)/F_2(s)} = K_{c1} K_{c2} K_v$$
- 在一般情况下, $K_{c1} K_{c2} > K_c$

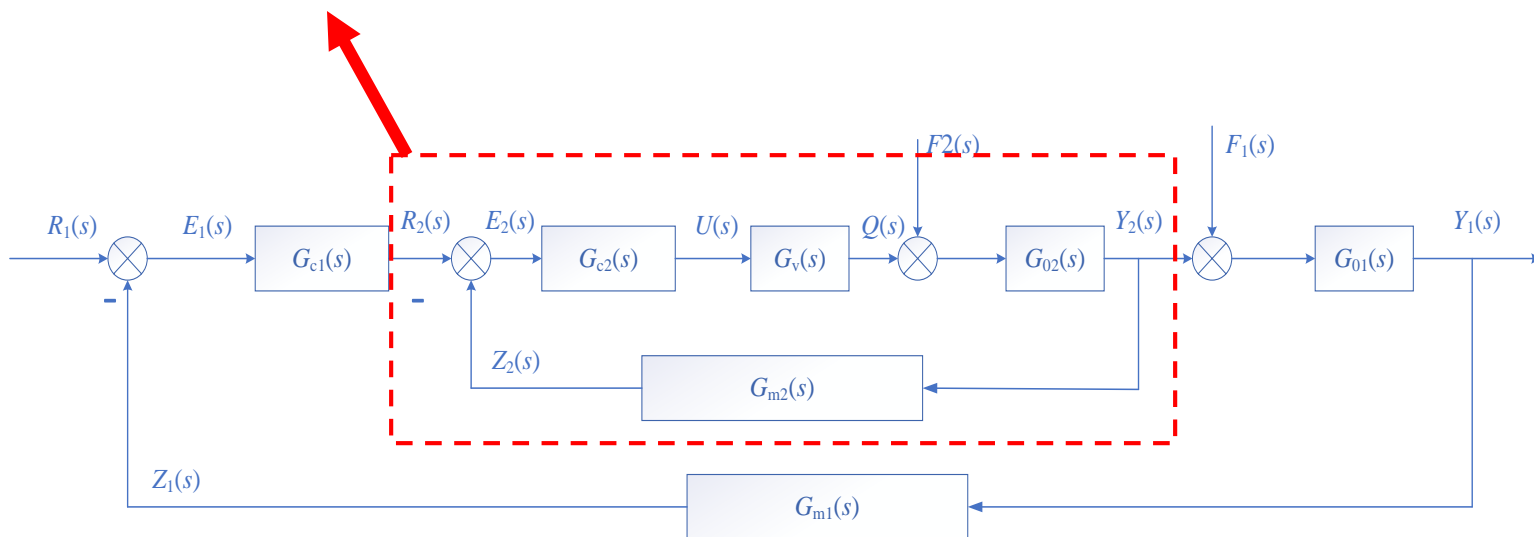
结论: 串级系统副回路提高控制作用的总放大系数, 能迅速克服副回路干扰, 使控制性能和抗干扰能力的综合指标有明显的提高

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 串级控制系统优势2: 改善过程动态特性, 提高系统工作频率

- 将副回路看成一个等效过程, 其传递函数:

$$G'_{02}(s) = \frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{02}(s)G_{m2}(s)}$$



7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 假设副回路中各环节的传递函数为

$$\left. \begin{array}{l} G_{02}(s) = \frac{K_{02}}{T_{02}s + 1} \\ G_{c2}(s) = K_{c2} \\ G_v(s) = K_v \\ G_{m2}(s) = K_{m2} \end{array} \right\} \longrightarrow G'_{02}(s) = \frac{K_{c2}K_vK_{02}/(T_{02}s + 1)}{1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2}/(T_{02}s + 1)} = \frac{K'_{02}}{T'_{02}s + 1}$$

✓ 式中 K'_{02} 、 T'_{02} 为等效过程的放大系数和时间常数

$$K'_{02}(s) = \frac{K_{c2}K_vK_{02}}{1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2}} \qquad T'_{02}(s) = \frac{T_{02}}{1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2}}$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

✓ 比较 T_{02} 和 $T_{02}'(s) = \frac{T_{02}}{1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2}}$

✓ 由 $(1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2}) \gg 1$

推出: $T_{02}' \ll T_{02}$

结论: 由于副回路的存在, 改善了控制通道的动态特性, 使等效过程的时间常数缩小了 $(1 + K_{c2}K_vK_{02}K_{m2})$ 倍

7.1.2 串级控制系统特点与分析

➤ 串级系统的工作频率

- 串级系统的特征方程式为：

$$1 + G_{c1}(s)G'_{02}(s)G_{01}(s)G_{m1}(s) = 0$$

- 假设主回路各环节的传递函数为：

$$G_{01}(s) = \frac{K_{01}}{T_{01}s + 1}, G_{c1}(s) = K_{c1}, G_{m1}(s) = K_{m1}$$

- 带入上式，可得：

$$s^2 + \frac{T_{p1} + T'_{p2}}{T_{p1}T'_{p2}}s + \frac{1 + K_{c1}K'_{p2}K_{p1}K_{m1}}{T_{p1}T'_{p2}} = 0$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

- 化为标准式为：

$$s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2 = 0$$

- 从自动控制原理可知，当 $0 < \xi < 1$ 时，系统的工作频率为：

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

- 同理，可求得单回路控制系统的工作频率为：

$$\omega_{\text{单}} = \omega'_0 \sqrt{1 - \xi'^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi'^2}}{2\xi'} \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01}T_{02}}$$

7.1.2 串级控制系统特点与分析

- 如果通过控制器的参数整定，使串级控制系统与单回路控制系统具有相同的衰减率，即 $\xi = \xi'$ ，则：

$$\frac{\omega_{\text{串}}}{\omega_{\text{单}}} = \frac{1 + \frac{T_{01}}{T'_{02}}}{1 + \frac{T_{01}}{T_{02}}} \gg 1$$

- 所以：

$$\omega_{\text{串}} \gg \omega_{\text{单}}$$

结论：当主副被控过程均为一节惯性环节，主副控制器均为比例控制时，副回路改善了被控过程的动态特性，提高了系统工作频率

7.1.2 串级控制系统特点与分析

- 串级控制系统的优势3: 对负荷和操作条件的变化适应性强
- 对非线性过程, 如果负荷变化过大, 偏离该工作点较远, 若采用单回路控制系统, 控制质量就会下降
 - 但在串级控制系统中
$$K'_{02} = \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}}$$
 - 一般情况下: $K_{c2} K_v K_{02} K_{m2} \gg 1$
 - 因此当副被控过程或调节阀的放大系数 K_{02} 或 K_v 随负荷变化时, 对 K'_{02} 影响不大
 - 由于副回路是一个随动系统, 当负荷或者操作变化时, 主控制器将改变其输出, 使系统适应上述变化

7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 副回路的设计与副被控变量的选择

(1) 副被控变量必须是物理可测的，且应使副被控过程的时间常数小，纯滞后时间短

- 目的：保证副回路的快速反应能力、缩短调节时间
- 例：连续反应釜温度控制系统，选夹套温度为副被控变量，对冷却水入口温度、调节阀前压力变化等干扰具有较强的快速抑制能力

7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 加热炉控制实例

■ 工艺流程

- ✓ 燃料与空气按比例送入加热炉燃烧
- ✓ 物料温度达到生产要求后，进入下个环节

■ 主被控量：物料温度

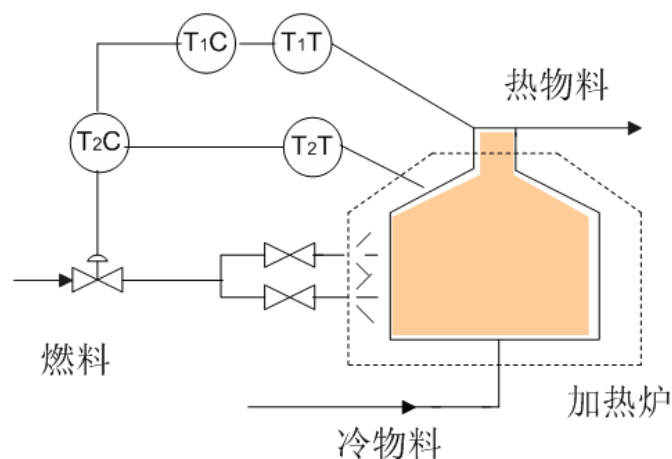
■ 副被控量：炉膛温度

■ 控制量：燃料流量

■ 控制器：调节阀

■ 干扰量

- 燃料压力、燃料成分、烟囱抽力的变化



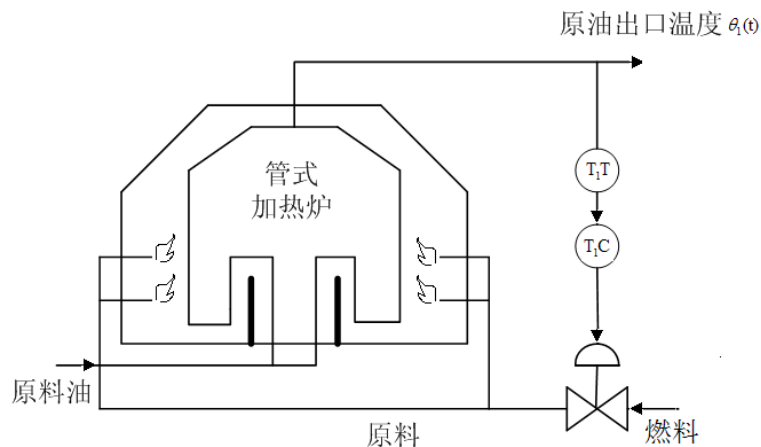
7.1.3 串级控制系统的设计

(2) 副回路应包含生产过程中变化剧烈、频繁且幅度大的主要干扰

- 副回路包含的扰动不能太多，否则使通道加长，时间常数变大，不利于副回路快速克服扰动
- 例：炼油厂管式加热炉原油出口温度控制

工艺流程：

燃料油经过蒸汽雾化后在炉膛中燃烧，
被加热油料流过炉膛四周的排管中，就
被加热到出口温度



7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 方案1:

主被控量: 燃料油出口温度

副被控量: 燃料油阀后压力

控制器: 调节阀

干扰: 燃料油压力

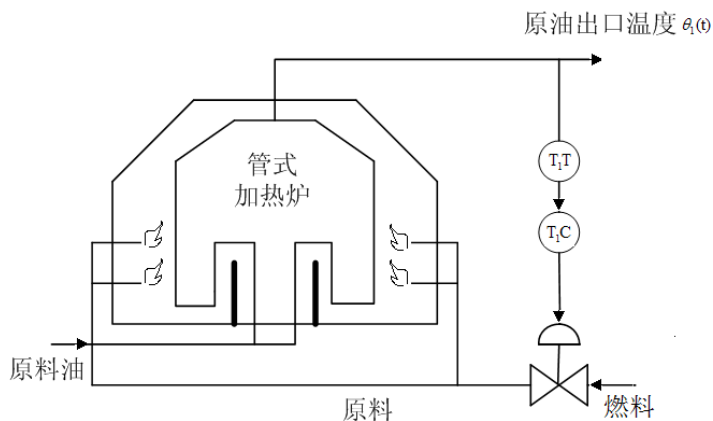
➤ 方案2:

主被控量: 燃料油出口温度

副被控量: 炉膛温度

控制器: 调节阀

干扰: 燃料油粘度、成分、热值



7.1.3 串级控制系统的设计

(3) 使主副过程的时间常数适当匹配

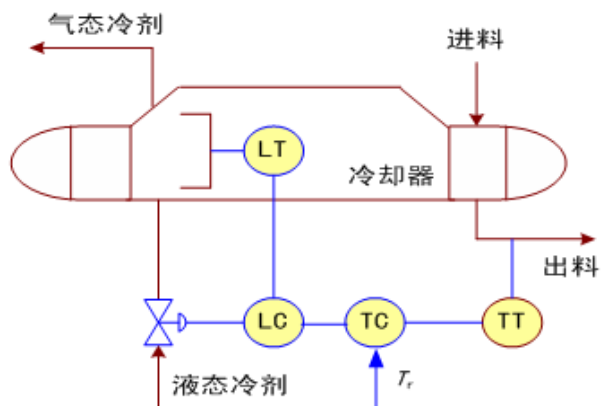
- 当 $T_{01}/T_{02} > 10$ 时, 则 T_{02} 很小, 副回路包括的干扰很少, 作用未发挥
- 当 $T_{01}/T_{02} < 3$ 时, 说明 T_{02} 过大, 副回路的控制作用不及时
- 当 $T_{01}/T_{02} \approx 1$ 时, 主、副回路易出现“共振效应”。主、副回路的动态联系十分紧密, 当一个参数发生振荡时, 会使另一个参数也发生振荡, 使系统稳定性变差

所以为使主副回路的动态联系减少, 避免共振, 主、副回路时间常数之比应在3~10范围内

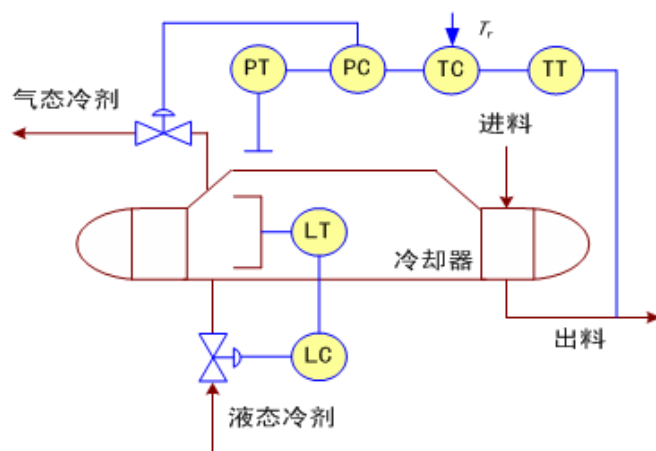
7.1.3 串级控制系统的设计

(4) 副回路设计应考虑工艺上的合理性和经济性

例：冷却器温度串级控制的两种方案



方案1：将冷剂液位作为副被控变量。该方案投资少，适用于对出口温度的控制质量要求不高场合



方案2：以冷剂蒸发压力作为副被控变量，该方案投资多，但副回路相当灵敏，出口温度的控制质量比较高

7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 主、副控制器控制规律的选择

□ 主控制器起定值控制作用，副控制器起随动控制作用

□ 主控制器选用PI或PID控制规律

- 主参数是工艺主要指标，允许波动的范围小，一般要求无余差

□ 副控制器选择P控制规律

- 副参数为了主参数控制质量，允许有余差
- 引入积分控制，会延长控制过程，减弱副回路的速作用
- 引入微分控制，因副回路本身起着快速作用，再引入微分作用会使调节阀动作过大，对控制不利

7.1.3 串级控制系统的设计

不同情况下，选用的控制规律

序号	工艺对变量的要求		应选规律	
	主变量	副变量	主控制器	副控制器
1	重要指标，要求较高	主要指标，允许有余差	PID	P
2	主要指标，要求较高	主要指标，要求较高	PI	PI
3	要求不高，相互协调	要求不高，互相协调	P	P

7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 主、副控制器正、反作用方式的确定

□ 确定的方法:

- 根据工艺生产安全性, 确定调节阀的气开、气关形式
- 根据生产工艺条件和调节阀形式, 确定副控制器的正、反作用
- 根据主副参数的关系, 确定主控制器的正、反作用

□ 对于串级控制系统来说, 主、副控制器中正、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

□ 即主通道各环节放大系数正、负极性相乘必须为正

7.1.3 串级控制系统的设计

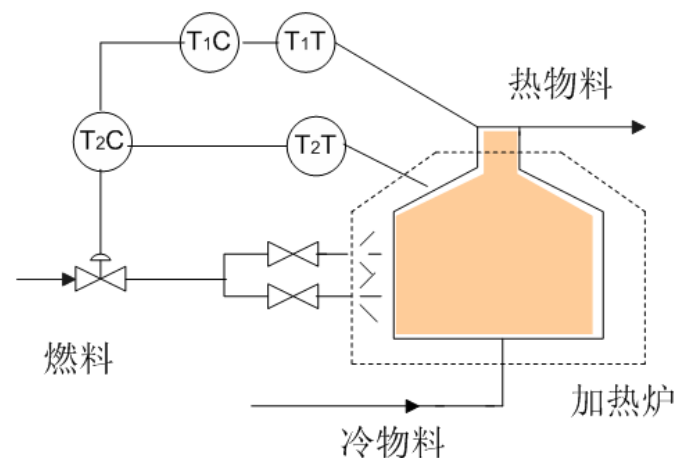
例. 加热炉的温度控制系统, 说明正、负作用方式的确定

□ 调节阀选择: $K_v > 0$

- 从生产工艺安全出发, 燃料油调节阀选用气开式, 即一旦控制器损坏, 调节阀处于全关状态, 以切断燃料油进入管式加热炉, 确保其设备安全, 故调节阀 $K_v > 0$.

□ 副过程确定: $K_{02} > 0$

- 调节阀开度增大, 燃料油增加, 炉膛温度升高, 故副过程 K_{02} 为正



7.1.3 串级控制系统的设计

□ 副控制器放大系数: $K_2 > 0$

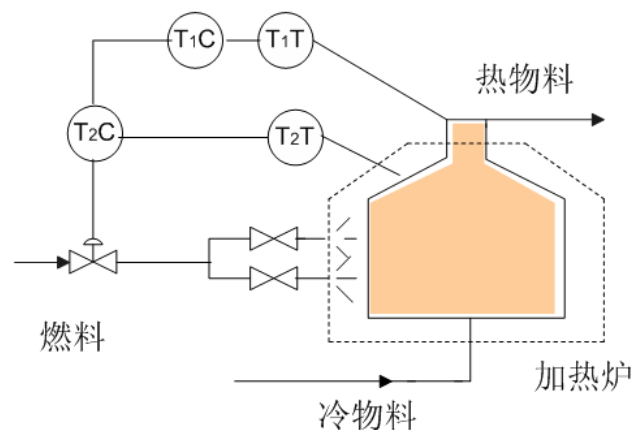
- 为保证副回路为负反馈, 副控制器放大系数 K_2 应取正, 即负作用

□ 主过程确定: $K_{01} > 0$

- 由于炉膛温度升高, 则炉出口温度也升高, 故主过程 $K_{01} > 0$.

□ 主控制器放大系数: $K_1 > 0$

- 为保证整个回路为负反馈, 则主控制器放大系数 K_1 应为正, 即为负作用控制器



7.1.3 串级控制系统的设计

➤ 主、副控制器正、反作用方式的确定

序号	主被控过程 (K_{01})	副被控过程 (K_{02})	调节阀(K_v)	主控制器 (K_{c1})	副控制器 (K_{c2})
1	正	正	正 ⁽¹⁾	正 ⁽²⁾	正
2	正	正	负	正	负
3	负	负	正	负	负
4	负	负	负	负	正
5	负	正	正	负	正
6	负	正	负	负	负
7	正	负	正	正	负
8	正	负	负	正	正

(1) 当 K_v 为正时, 调节阀为气开式, 否则为气关式 (2) 当 K_{c1} 为正时, 控制器为反作用, 否则为正作用 ⁴¹

7.1.4 串级控制系统的参数整定

➤ 参数整定实质

- 通过改变控制器的PID参数来改善系统静态和动态特性，以获得最佳控制质量
- 串级控制系统中，两个控制器是相互关联的
- 系统运行时，一般副回路的频率较高，主回路的频率较低
- 整定时应尽量加大副控制器的增益以提高副回路的工作特性
- 在工程实践中，串级系统常用的参数整定方法有：逐步逼近法、两步整定法、一步整定法

7.1.4 串级控制系统的参数整定

➤ 逐步逼近法

□ 步骤

- 在主回路开环的情况下，整定副控制器参数
- 使主回路闭合，整定主控制器参数
- 在主回路闭合的情况下，整定副控制器参数，完成一次逼近
- 反复逐步逼近，直到获得满意的控制质量指标为止

□ 该方法适用于主、副过程的时间常数相差不大，主、副回路的动态联系比较密切的情况

□ 整定须反复进行，逐步逼近，因而往往费时较多

7.1.4 串级控制系统的参数整定

➤ 两步整定法

□ 原理

- 整定副控制器参数
- 把副控制器视为系统的一个环节，整定主控制器参数

□ 依据：

- 主、副对象的时间参数一般要求 $T_{01}/T_{02}=3\sim 10$
- 对主变量的控制质量要求较高，对副变量的控制要求较低。牺牲一点副变量的控制质量也是允许的

7.1.4 串级控制系统的参数整定

➤ 两步整定法整定步骤

□ 整定副控制器的比例度和操作周期

- 在工况稳定、主副回路闭合下，主控制器为纯比例运行，比例度固定在100%，用4:1衰减曲线法整定副控制器参数，求得副控制器在4:1衰减过程下的比例度 δ_{2s} 和操作周期 T_{2s}

□ 求取主控制器的比例度和操作时间

- 在副控制器比例度 δ_{2s} 条件下，逐步降低主控制器比例度，求取同样的递减比过程中主控制器的比例度 δ_{1s} 和操作周期 T_{1s}

7.1.4 串级控制系统的参数整定

- 计算主、副控制器的比例度，积分时间和微分时间的数值
 - 根据 δ_{1s} 、 δ_{2s} 、 T_{2s} 、 T_{2s} ，结合控制器选型，按单回路控制系统衰减曲线法整定参数的经验公式，整定主、副控制器参数
- 必要时进行适当的调整，直到系统质量达到最佳为止
 - 按照先副后主、先P次I后D的顺序，将计算出的参数值设置到控制器上，作一些扰动实验，观察过度过程曲线，适当调整，直至过度过程质量最佳

7.1.4 串级控制系统的参数整定

➤ 一步整定法

□ 由副被控过程的特性或者经验先确定副控制器的参数，然后按单回路控制系统的整定方法，对主控制器的参数进行整定

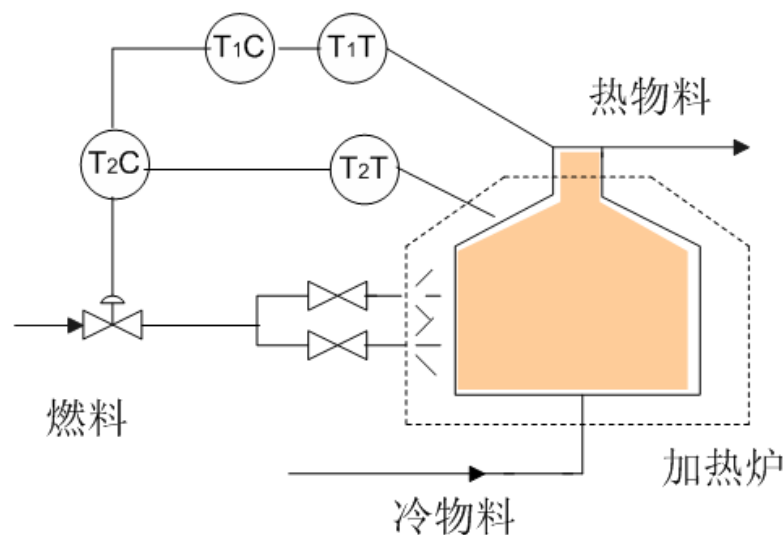
□ 具体步骤：

- 当工况稳定，在纯比例作用下，由 $K_{c1}K_{c2} \leq 0.5$ 或由经验确定 K_{c2}
- 将副回路等效成主回路的一个环节，按照单回路控制系统的衰减曲线法，整定主控制器的参数
- 根据 K_{c1} 与 K_{c2} 互相匹配的原理，适当调整控制器的参数使控制品质满足工艺要求

7.1.5 串级控制系统的应用范围

➤ 应用于容量滞后较大的过程

- 温度、质量等容量滞后较大且控制质量要求较高的系统
- 例如：加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统

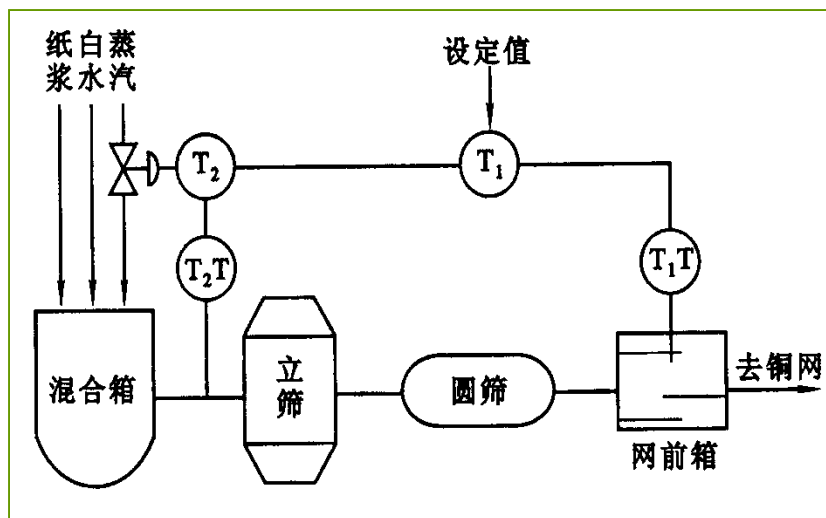


7.1.5 串级控制系统的应用范围

➤ 应用于纯延时较大的过程

□ 在离控制阀较近、纯延时较小地方选择一个副参数，把干扰纳入副回路中

□ 例：网前箱温度-温度串级控制系统



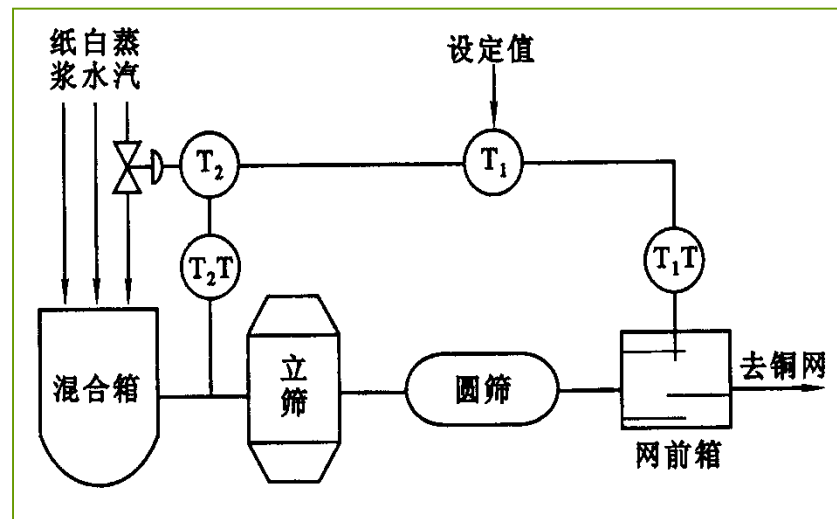
7.1.5 串级控制系统的应用范围

□ 工艺流程

- 纸浆被送至混合器，在混合器中被蒸汽加热至72摄氏度，经过处理去除杂质后送到网前箱

□ 串级控制

- 主被控量：网前箱温度
- 副被控量：混合箱温度
- 控制器：调节阀
- 干扰：纸浆流量波动
- 控制结果：最大偏差不超过1摄氏度，过渡时间为200s



□ 单回路控制

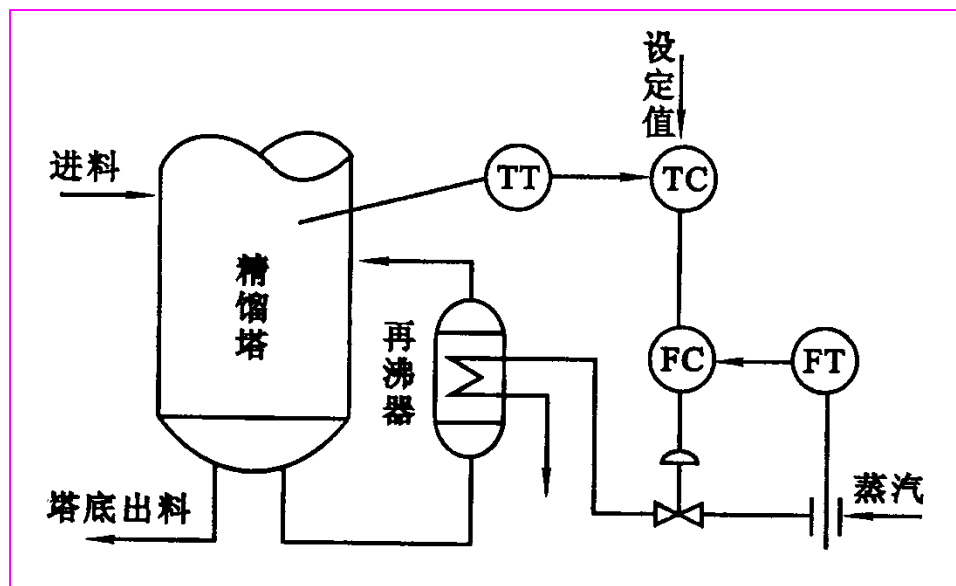
- 当纸浆流量 35 kg/min，温度最大偏差为8.5摄氏度，过渡时间为450s

7.1.5 串级控制系统的应用范围

➤ 应用于有变化剧烈和幅度较大扰动的过程

□ 将变化剧烈且幅度大的干扰包括在副回路中

□ 例：精馏塔釜温度与蒸汽流量串级控制系统，要求：塔釜温度要控制在 ± 1.5 摄氏度范围内



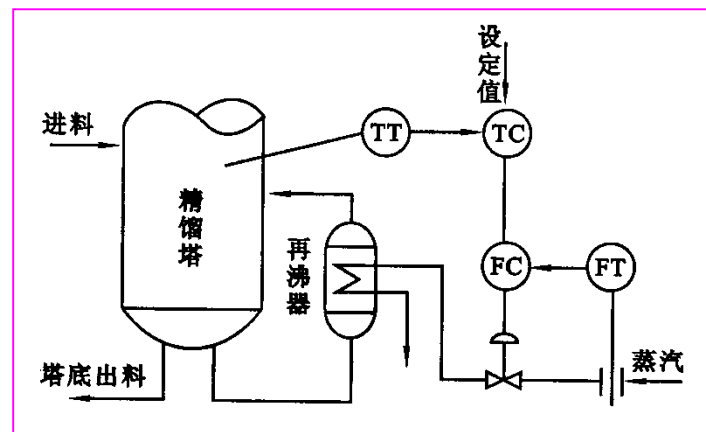
7.1.5 串级控制系统的应用范围

□ 工艺流程

- 利用来料混合成分中各组分挥发度不同, 通过精馏操作, 分离成组分较纯的产品

□ 串级控制

- 主被控量: 塔釜温度
- 副被控量: 蒸汽流量
- 控制器: 调节阀
- 干扰: 蒸汽压力
- 控制结果: 最大偏差在 ± 1.5 度范围内



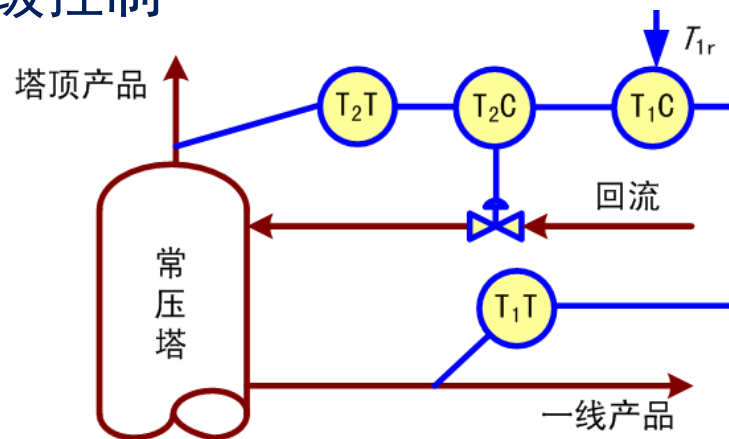
□ 单回路控制

- 温度最大偏差为 ± 10 度

7.1.5 串级控制系统的应用范围

➤ 应用于参数互相关联的过程

- 有些过程中，对两个互相关联的参数需要用同一种介质控制
- 若采用单回路控制系统，需要装两套装置
- 若采用串级控制系统，可根据互相关联的主次，满足工艺要求
- 例：一线温度与塔顶温度的串级控制



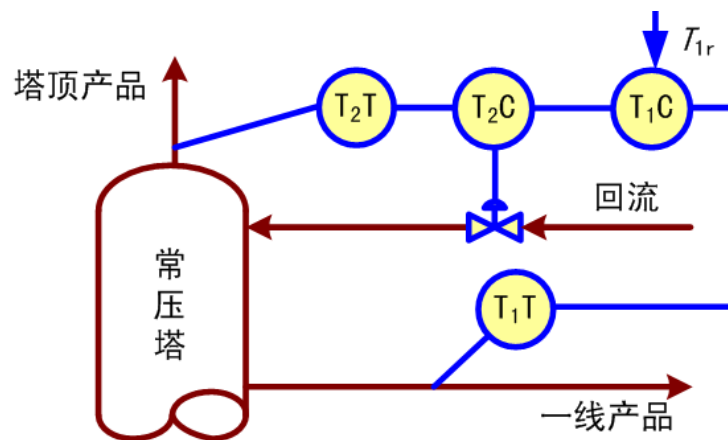
7.1.5 串级控制系统的应用范围

□ 工艺流程

- 进入常压塔的油品，通过精馏将各组分离成塔顶汽油、一线航空煤油等

□ 串级控制

- 主被控量：塔顶出口温度
- 副被控量：一线温度
- 控制器：调节阀
- 干扰：油品压力



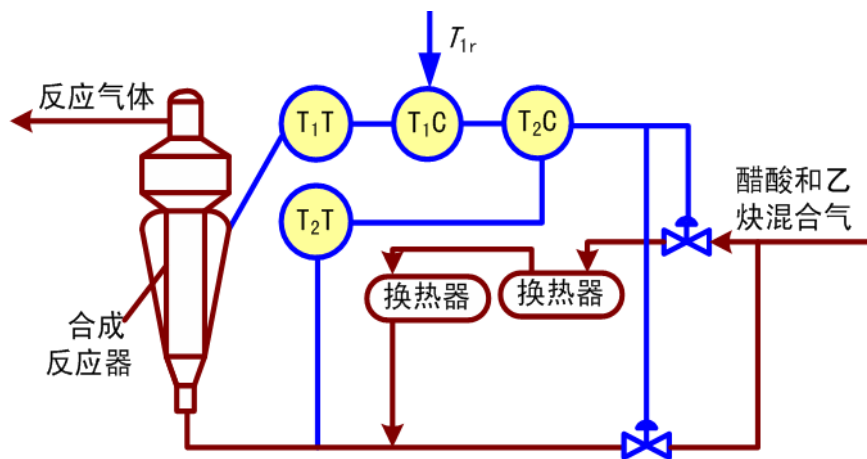
一线温度与塔顶温度的串级控制

7.1.5 串级控制系统的应用范围

➤ 应用克服被控过程的非线性

□ 采用串级控制系统，利用其对负荷和操作条件变化所具有的自适应性，可在一定程度上补偿非线性对系统动态特性的影响

□ 例：合成反应器温度串级控制



合成反应器温度串级控制

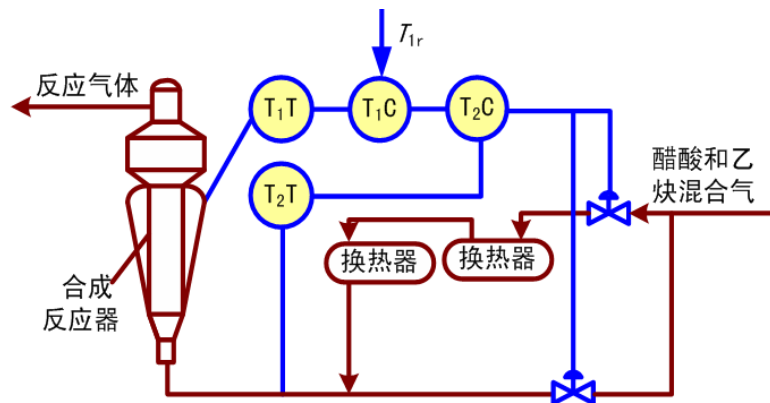
7.1.5 串级控制系统的应用范围

□ 工艺流程

- 包括两个热交换器和一个合成反应器，当混合流量发生变化时，换热器出口温度随负荷减小而明显增加，并呈明显非线性变化

□ 串级控制

- 主被控量：中部温度
- 副被控量：换热器出口温度
- 控制器：调节阀
- 干扰：气体压力



合成反应器温度串级控制

作业

➤ 课后习题：7-12

第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

7.2 前馈控制系统

- 反馈控制系统基于偏差调节，当被控量出现偏差进行调节，控制不及时
- 如果能在干扰出现时就进行控制，就可以在偏差出现以前消除干扰的影响
- 如何设计呢？

7.2.1 前馈控制的基本原理

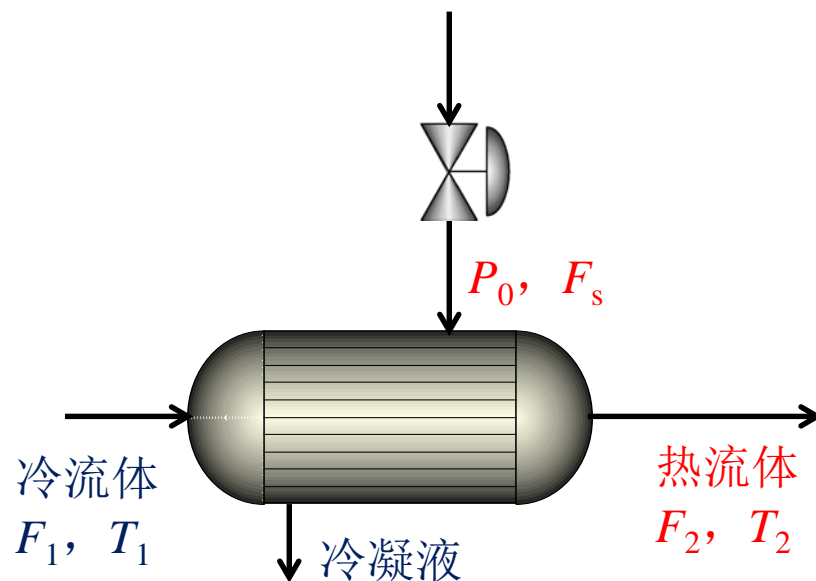
➤ 换热器控制过程

- 工艺要求：热流体出口温度 T_2 稳定
- 被控变量：热流体出口温度 T_2
- 控制变量：蒸汽流量 F_s
- 主要扰动：

冷流体流量 F_1 、

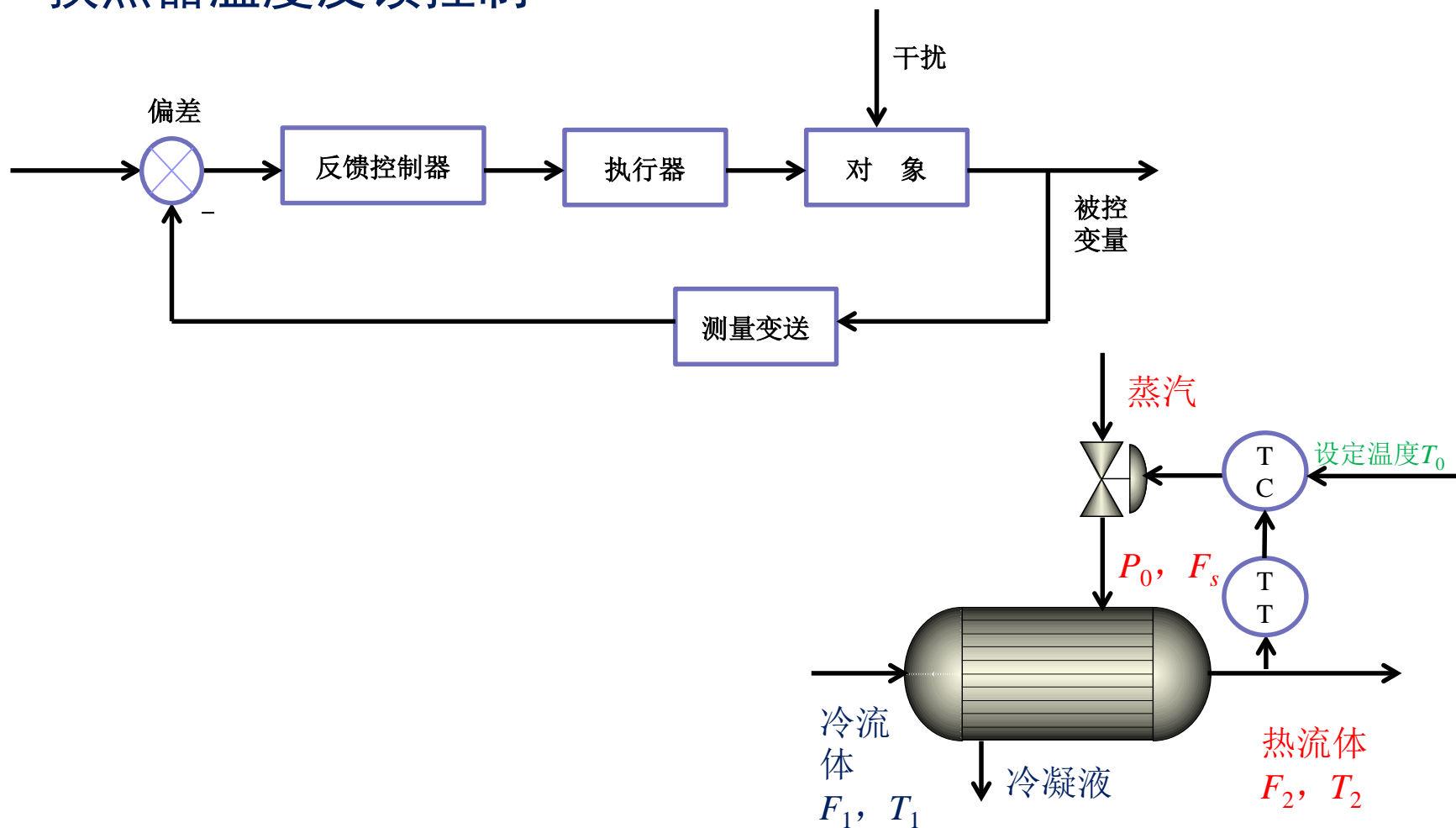
冷流体入口温度 T_1 、

蒸汽压力 P_0



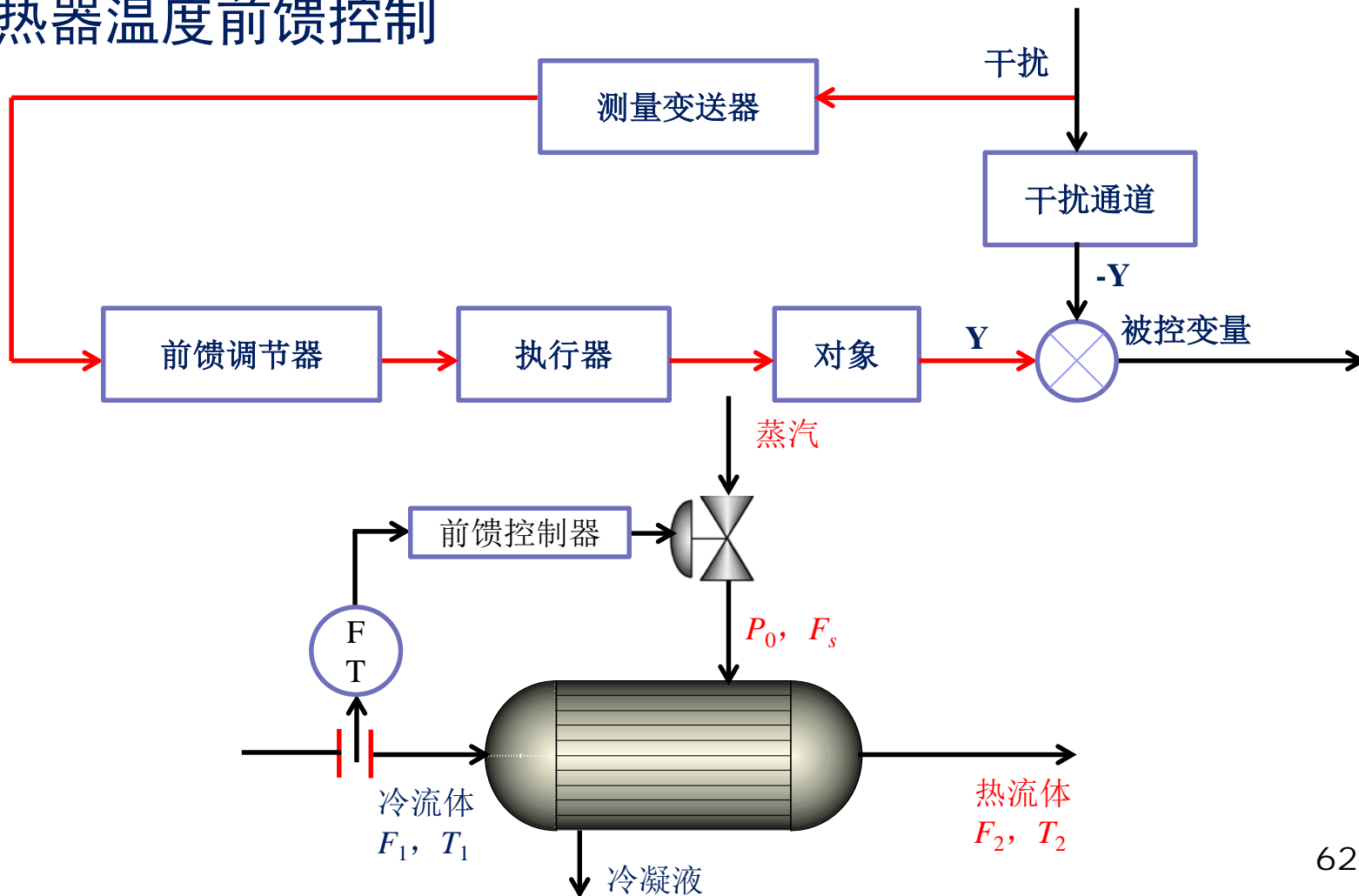
7.2.1 前馈控制的基本原理

➤ 换热器温度反馈控制



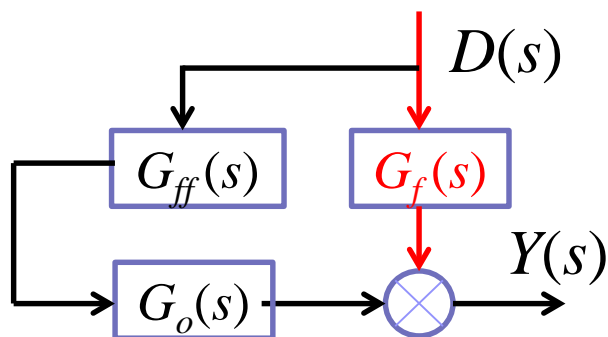
7.2.1 前馈控制的基本原理

➤ 换热器温度前馈控制



7.2.1 前馈控制的基本原理

➤ 换热器温度前馈控制



$D(s)$: 扰动量输入; $Y(s)$: 被控量输出

$G_f(s)$: 扰动通道传递函数;

$G_{ff}(s)$: 前馈控制器传递函数 (包括测量部分)

$G_o(s)$: 控制通道传递函数 (包含执行器)

$$Y(s) = D(s) \times G_{ff}(s) \times G_o(s) + D(s) \times G_f(s)$$

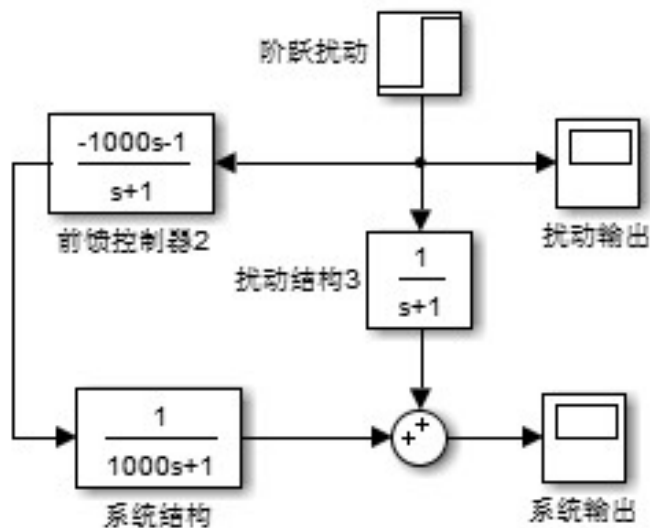
$$\frac{Y(s)}{D(s)} = G_{ff}(s) \times G_o(s) + G_f(s) = 0$$

⇒ 前馈控制器模型为:

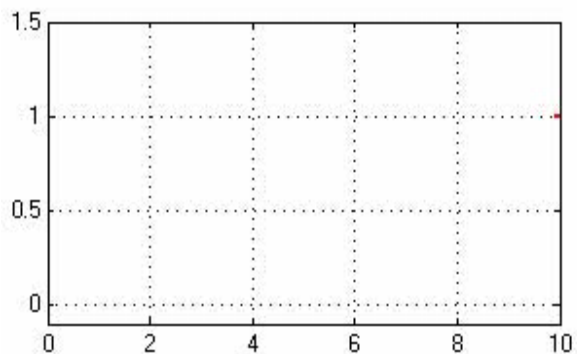
$$G_{ff}(s) = -\frac{G_f(s)}{G_o(s)} \text{ (全补偿条件)}$$

7.2.1 前馈控制的基本原理

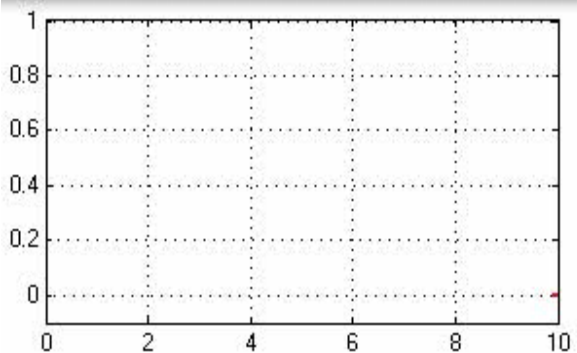
➤ 前馈控制系统仿真实例



扰动为：在 $t = 5s$ 时值为1的阶跃



ne offset: 0



前馈控制对结构已知扰动有很好的提前抑制作用

7.2.2 前馈控制的特点及局限性

➤ 前馈控制系统特点

- 基于干扰的大小进行控制，比反馈控制要及时
- 开环控制，不存在稳定性问题，控制效果不能通过反馈验证，因此对控制器设计的要求比较严格
- 只能用来克服生产过程中主要的、可测不可控的扰动
 - 不可控：扰动量和控制量之间相互独立，干扰通道与控制通道之间无关联，从而控制量无法改变扰动量大小，即扰动量不可控
- 视对象特性而定的“专用”控制器；前算法依对象而不同

7.2.2 前馈控制的特点及局限性

➤ 前馈控制系统局限性

□ 只能实现局部补偿，完全补偿难以实现

- 原因：准确地掌握干扰通道特性和控制通道特性不容易，控制规律难以准确获得

□ 只能克服可测不可控扰动

□ 一种前馈控制只能控制一种干扰

□ 不能单独使用，一般使用前馈-反馈复合控制系统

- 前馈控制及时有效减小主要干扰对被控变量的动态影响；
- 反馈控制使被控量稳定在设定值，保证系统控制质量

7.2.2 前馈控制的特点及局限性

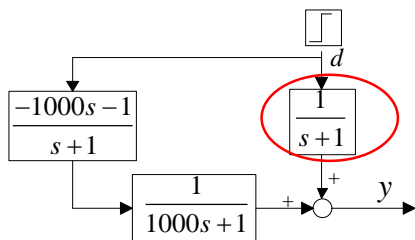
前馈控制与反馈控制的比较

		反馈控制	前馈控制
1	控制的依据	被控变量的偏差	干扰量的波动
2	检测的信号	被控变量	干扰量
3	控制作用发生的时间	偏差出现后	偏差出现前, 扰动发生时
4	系统结构	闭环控制	开环控制
5	控制质量	动态有差控制	无差控制(理想状态)
6	控制器	常规PID控制器	专用控制器
7	经济性	一种系统可克服多种干扰	每一种都要有一个控制系统

7.2.2 前馈控制的特点及局限性

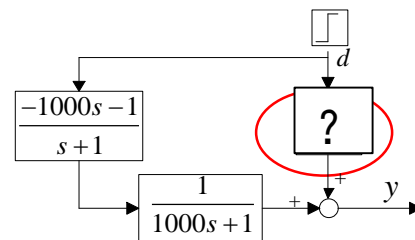
➤ 比较在扰动已知和未知两种情况下前馈控制结果

扰动结构已知

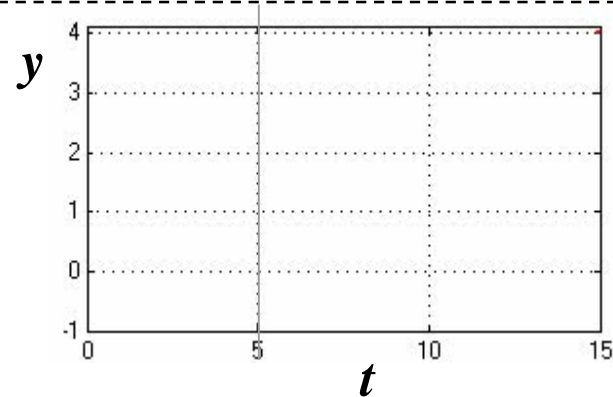
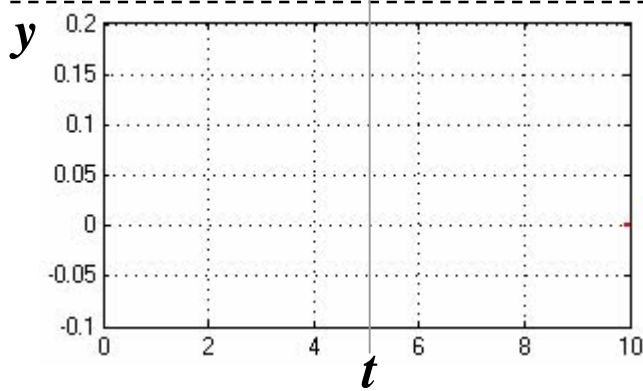


(系统结构图)

扰动结构未知



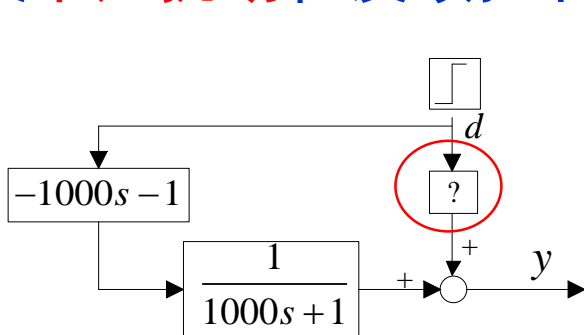
(系统输出)



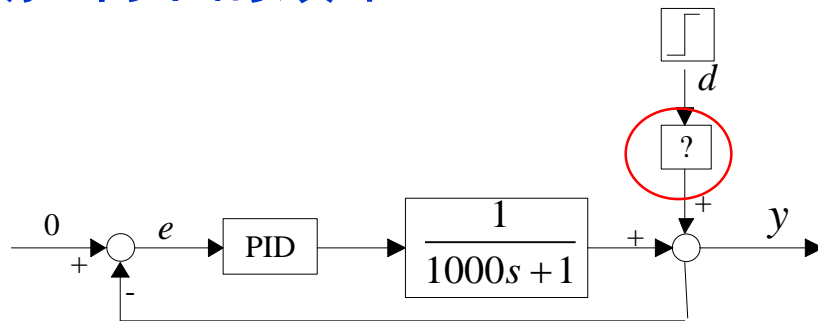
前馈控制对已知扰动抑制效果更好

7.2.2 前馈控制的特点及局限性

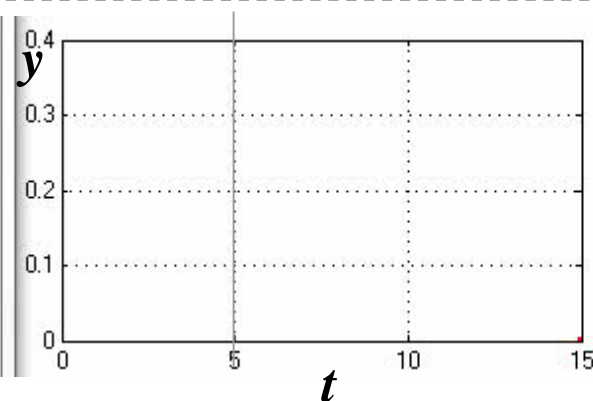
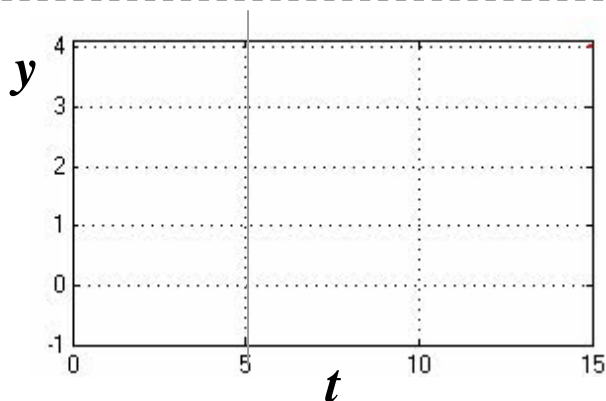
➤ 比较未知扰动在反馈控制和前馈控制下的效果



前馈控制结构图



反馈控制结构图

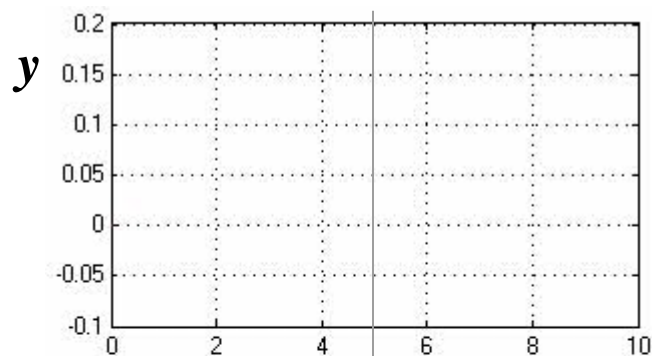


反馈控制对未知扰动的控制效果更好

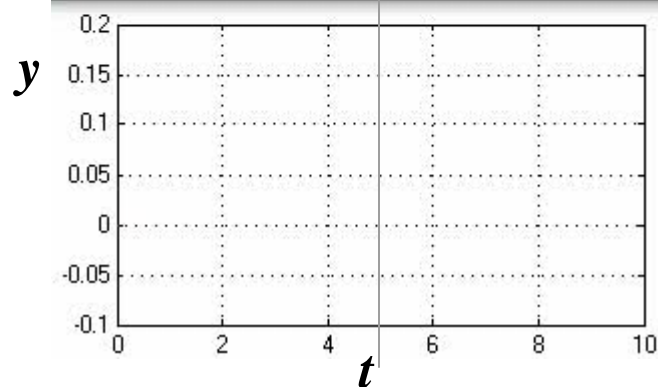
7.2.2 前馈控制的特点及局限性

- 比较已知扰动在反馈控制和前馈控制下的效果

前馈控制



反馈控制



前馈控制对已知扰动比反馈控制更及时，效果更好

7.2.3 前馈控制系统的选用原则

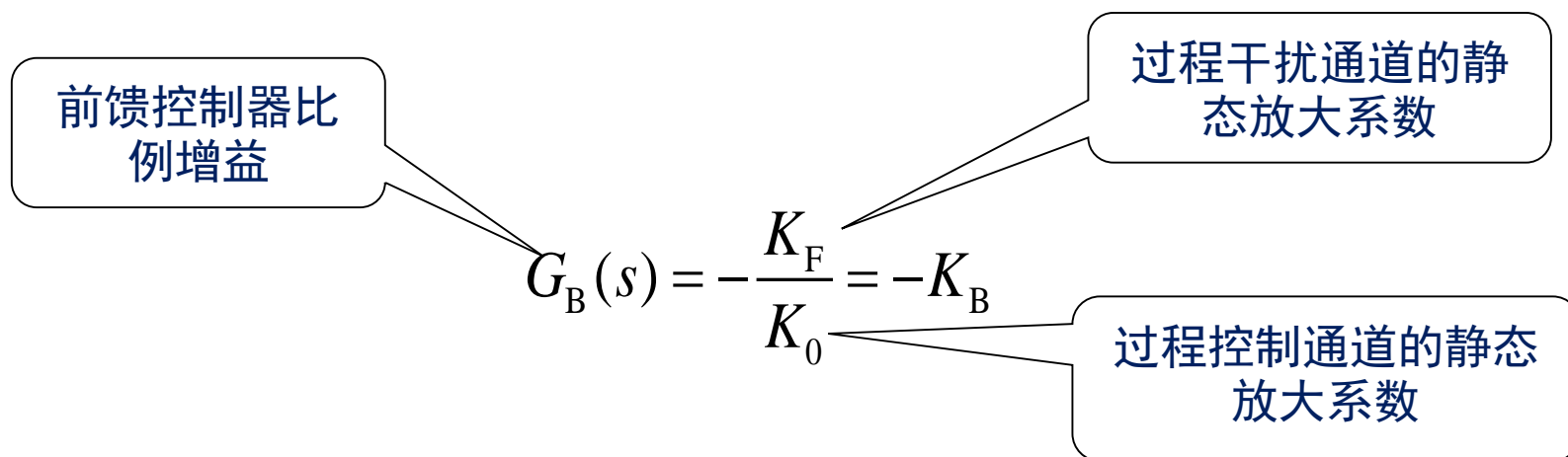
➤ 引入前馈控制的原则

- 若控制通道惯性和迟延较大，反馈控制达不到良好的控制效果时，可引入前馈控制
- 系统中存在着经常变动、可测而不可控的扰动
- 当工艺上要求实现变量间的某种特殊的关系，而需要通过建立数学模型来实现控制时，可以引入前馈控制
- 经济实用原则。在决定选用前馈控制方案后，当静态前馈能满足工艺要求时，就不必选用动态前馈

7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

➤ 静态前馈控制

- 使被控变量的静态偏差接近或等于零，不考虑其动态偏差
- 前馈控制器采用比例控制



- 只能保证被控变量的静态偏差接近或等于零
- 特点：简单，不用专用控制器
- 适用：当干扰通道与控制通道时间常数相差不大，用静态前馈控制

7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

➤ 换热器温度控制系统中， F_1 与 T_1 为主要干扰。则热量平衡式为

$$F_1 \cdot c_p (T_2 - T_1) = F_s \cdot h_s$$

c_p —物料的比热容 h_s —蒸气的汽化潜热

□ 若 T_1 不变，控制通道的静态放大系数

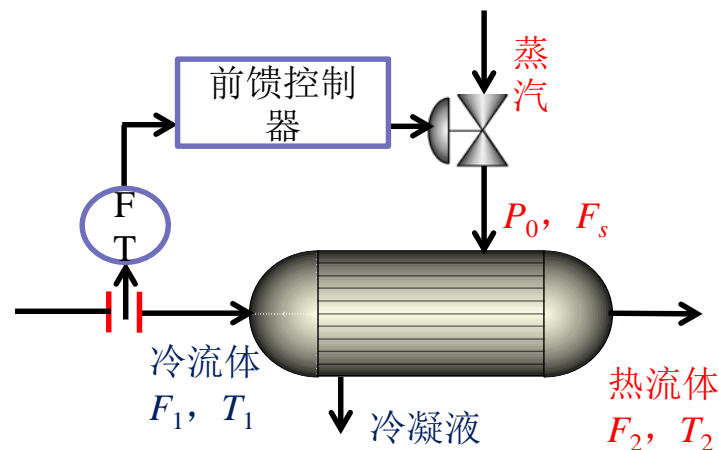
$$K_0 = \frac{dT_2}{dF_s} = \frac{h_s}{F_1 c_p}$$

□ 而干扰通道的放大系数为

$$K_f = \frac{dT_2}{dF_1} = -\frac{T_2 - T_1}{F_1}$$

□ 所以，静态前馈控制器的比例增益为：

$$K_B = -\frac{K_f}{K_0} = -\frac{c_p (T_2 - T_1)}{h_s}$$



7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

➤ 动态前馈控制

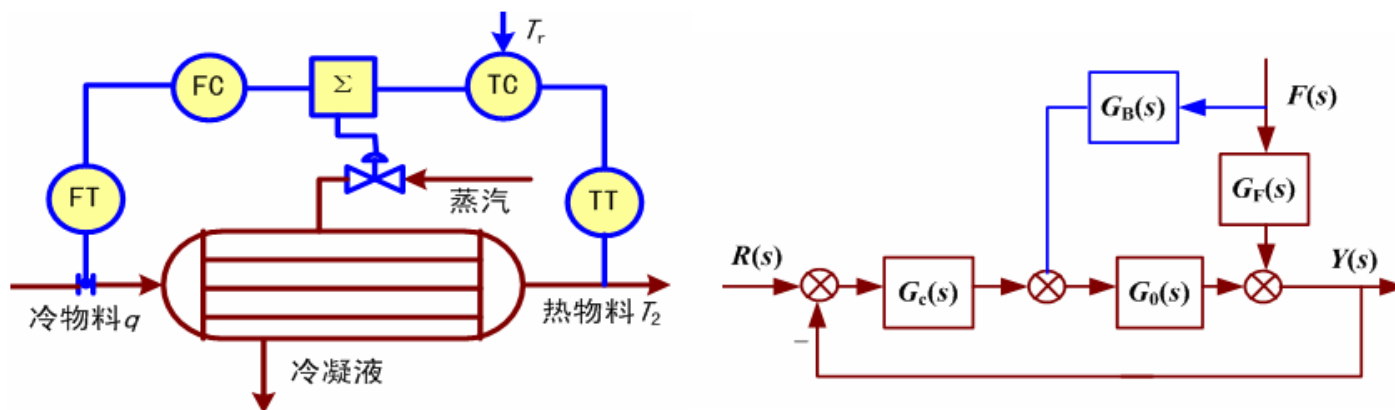
$$G_B(s) = -\frac{G_F(s)}{G_0(s)}$$

- 可消除控制过程的动态偏差
- 根据干扰与控制的动态特性，设计专门控制器，结构复杂
- 干扰变化频繁且动态控制精度要求高的过程，采用动态前馈控制

7.2.4 前馈-反馈复合控制系统的主要结构形式

➤ 前馈-反馈复合控制系统

- 发挥前馈控制及时有效抑制主要干扰对被控变量影响的优点
- 保持反馈控制能抑制多种干扰影响的优势
- 同时可降低系统对前馈控制器的要求，便于工程实现



$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} R(s) + \frac{G_F(s) + G_B(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} F(s)$$

7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

➤ 前馈-反馈复合控制系统

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} R(s) + \frac{G_F(s) + G_B(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} F(s)$$

反馈控制

前馈控制

➤ 单纯前馈控制时

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{G_F(s) + G_B(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} = 0$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = G_F(s) + G_B(s)G_0(s)$$

- ❑ 干扰 $F(s)$ 对被控量的影响要比采用单纯前馈控制时减小 $[1 + G_c(s)G_0(s)]$ 倍。

系统特征方程为 $1 + G_c(s)G_0(s) = 0$

- ❑ 分析：系统稳定性由反馈控制回路决定。加不加前馈控制器并不影响系统的稳定性

7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

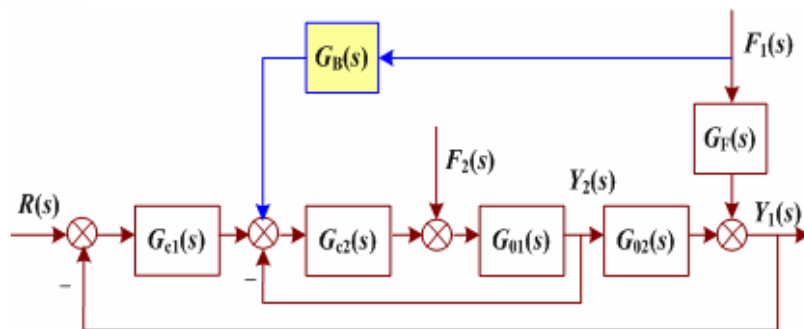
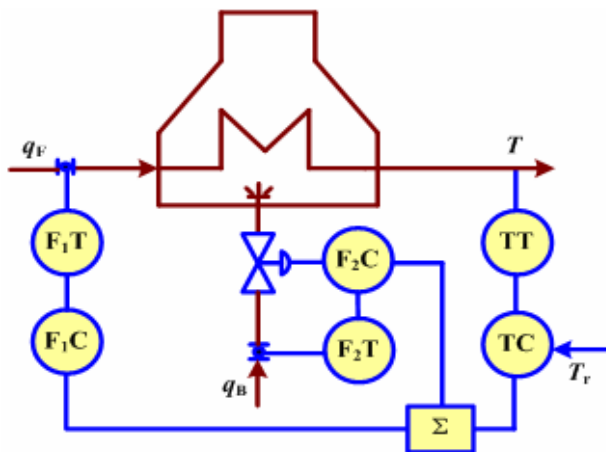
➤ 前馈-反馈复合控制系统

- 在设计复合控制系统时，可先根据系统工艺过程特性和控制品质要求设计反馈控制系统，暂不考虑前馈控制器的设计
- 在反馈控制系统设计好后，再根据不变性原理设计前馈控制器，进一步消除主要干扰对被控量的影响

7.2.4 前馈-串级复合控制系统的主要结构形式

➤ 前馈-串级复合控制系统

- 工业过程中，有些生产过程受多个变化频繁且剧烈的干扰影响，同时对被控量的控制质量和稳定性要求较高，此时采用前馈-串级复合控制系统



$$Y_1(s) = \frac{G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)} R(s) + \frac{G_F(s) + G_B(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)} F_1(s)$$

7.2.4 前馈控制系统的主要结构形式

➤ 前馈-串级复合控制系统

$$Y_1(s) = \frac{G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)} R(s) + \frac{G_F(s) + G_B(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)} F_1(s)$$

串级控制

前馈控制

$$\frac{Y_1(s)}{F_1(s)} = \frac{G_F(s) + G_B(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)G_{02}^*(s)} = 0 \Rightarrow G_B(s) = -\frac{G_F(s)}{G_{01}(s)G_{02}^*(s)}$$

$$G_{02}'(s) \approx 1 \Rightarrow G_B(s) \approx -\frac{G_F(s)}{G_{01}(s)}$$

□ 结论：前馈控制器可由干扰通道特性和主被控过程特性来确定

7.2.5 前馈控制系统应用

➤ 蒸发过程的浓度控制

□ 工艺流程

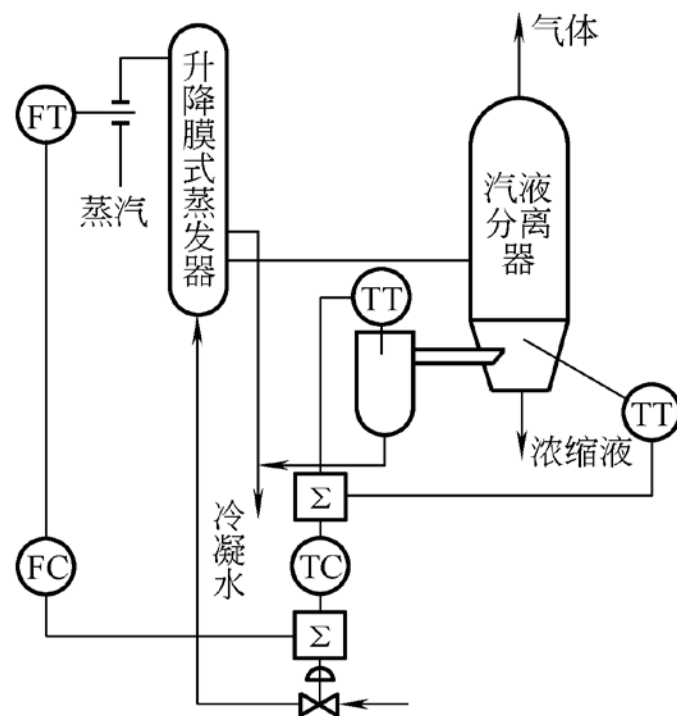
初始浓度50%的葡萄糖溶液用泵送至升降模式蒸发器，经加热蒸发至73%的葡萄糖液，然后送至后道工序结晶

□ 被控量：温差（溶液沸点和水沸点）

□ 控制量：进料溶液

□ 前馈信号：加热蒸汽流量

□ 干扰量：进料液浓度、温度和流量，加热蒸汽的压力和流量



7.2.5 前馈控制系统应用

➤ 锅炉汽包水位控制

□ 工艺流程

水量适应蒸汽量变化的需求，并保持锅筒水位在规定的范围内。

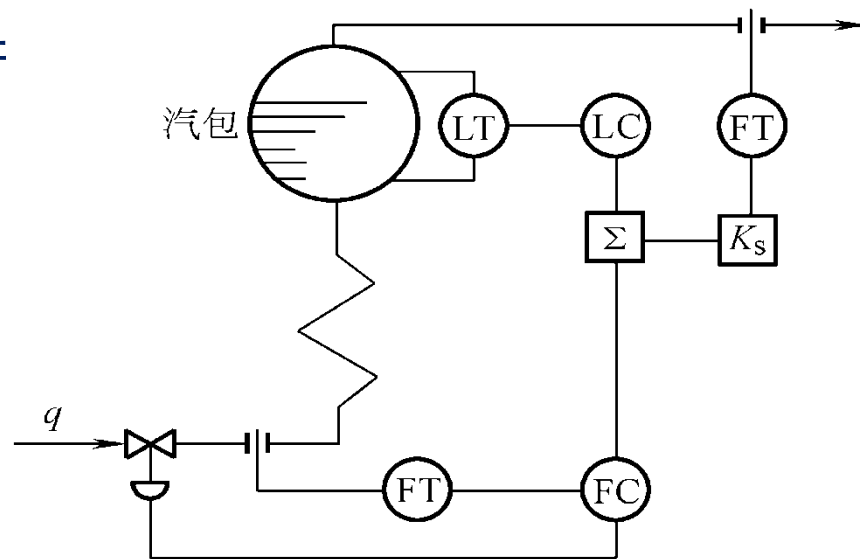
存在虚假液位情况。

□ 前馈信号：蒸汽流量

□ 主被控量：锅筒水位

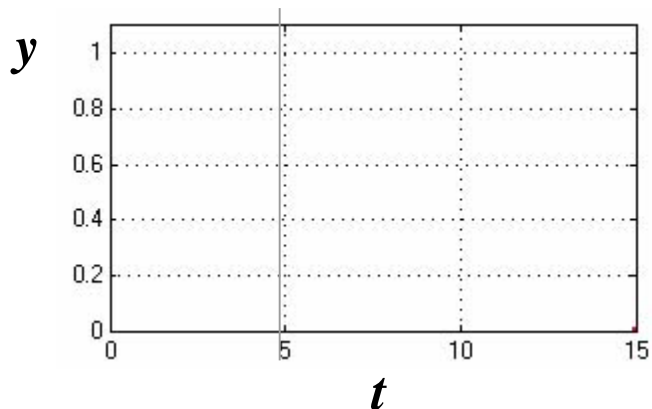
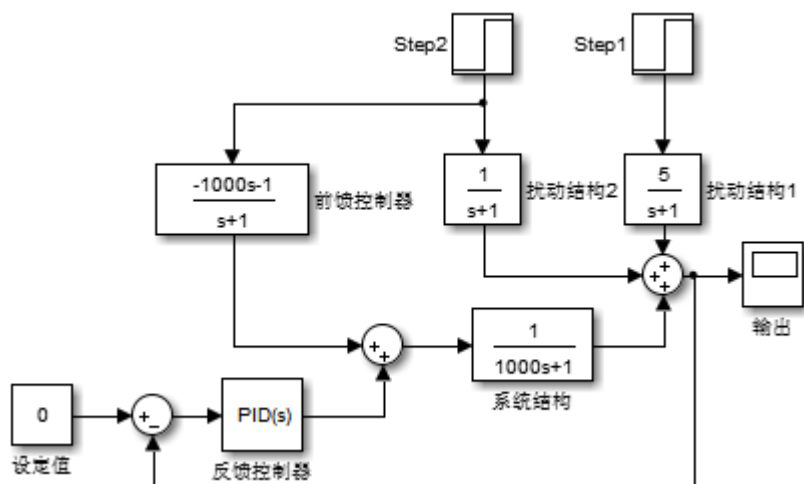
□ 副被控量：给水流量

□ 干扰量：给水压力，虚假水位



7.2.5 前馈控制系统应用

- 为实现锅炉系统液位的更好控制，建立前馈-反馈控制系统



第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

7.3.1 大滞后过程控制系统

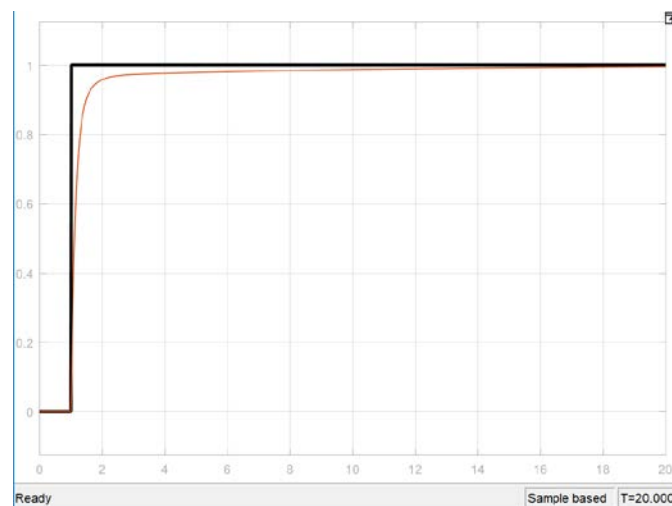
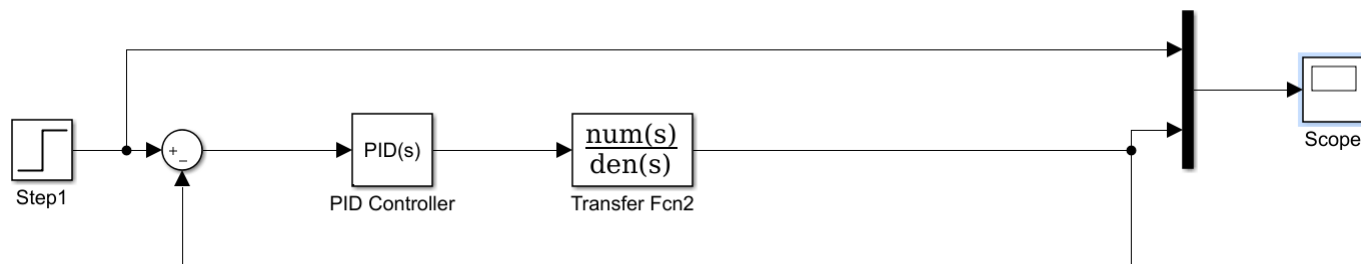
- **惯性时滞**，又称为容积时滞。主要来源于多个容积存在，容积越大或数量越多，其滞后的时间就越长
- **纯时滞**，当控制作用产生后，在滞后时间 τ 范围内，被控变量没有输出响应。如物料传输、分析仪表检测流体的成分等过程

$$\begin{cases} \tau / T < 0.3 & \text{一般滞后过程} \\ \tau / T > 0.3 & \text{大滞后过程} \end{cases}$$

7.3.1 大滞后过程控制系统

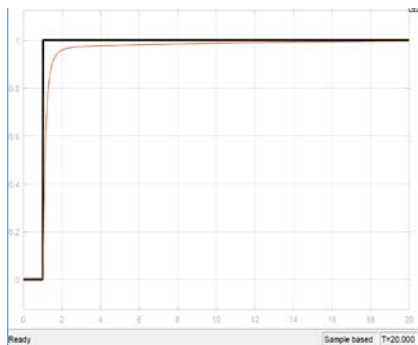
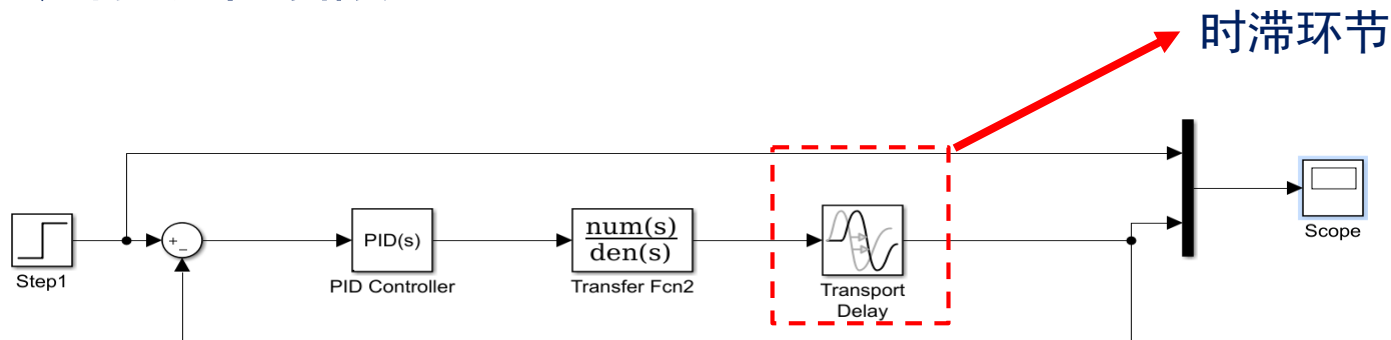
➤ 系统无时滞的情况

$$G(s) = \frac{2}{s^2 + 4s + 1}$$

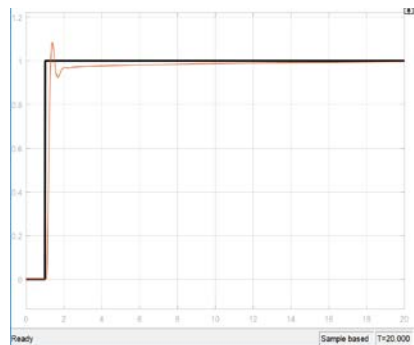


7.3.1 大滞后过程控制系统

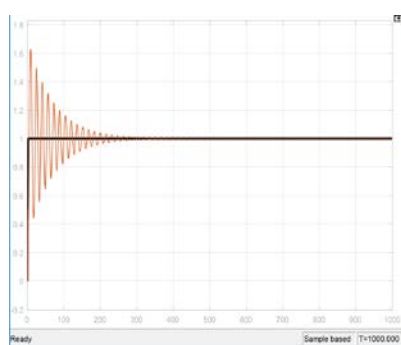
➤ 系统有时滞的情况



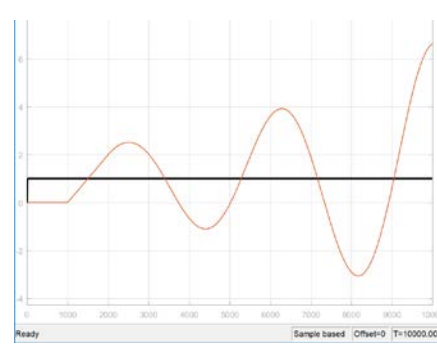
滞后时间为0.001s



滞后时间为0.1s



滞后时间为1s



滞后时间为1000s

7.3.1 大滞后对控制品质的影响

➤ 大滞后过程较难控制，主要原因：

- 检测信号提供不及时
- 控制量的介质传输时间较长
- 纯滞后的增加导致开环相频相角滞后增大，使闭环系统的稳定性下降

➤ 解决方案

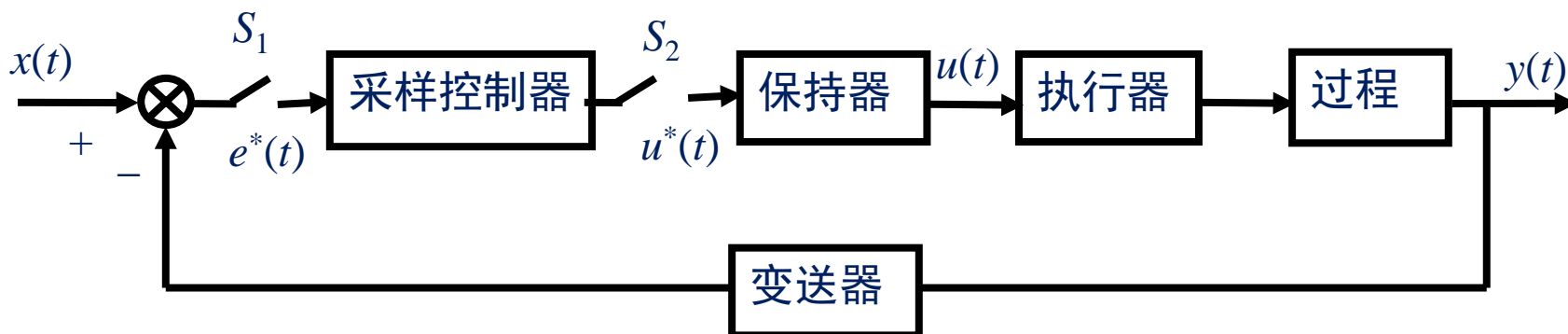
- 采样控制
- 史密斯预估补偿控制
- 改进型史密斯预估补偿控制
- 内模控制

7.3.2 采样控制

➤ 采样控制

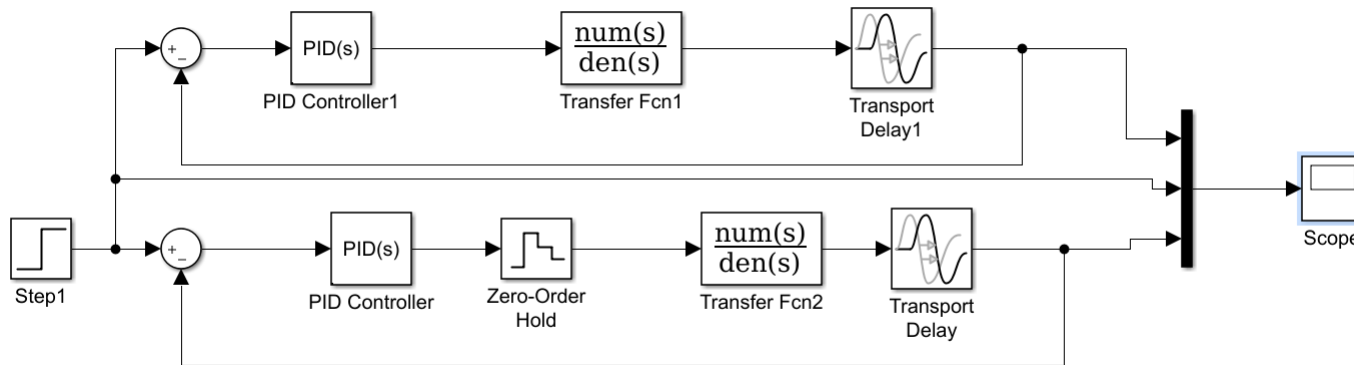
- 一种定周期的断续PID控制方式
- 按周期 T 进行采样控制。在两次采样之间控制信号不变。
- 保持的时间 T 与必须大于纯滞后时间 τ_0
- 核心思想就是放慢控制速度，减少控制器的过度调节
- 采样控制是以牺牲速度来获取稳定的控制效果，如果在采样间隔内出现干扰，必须要等到下一次采样后才能作出反应

7.3.2 采样控制

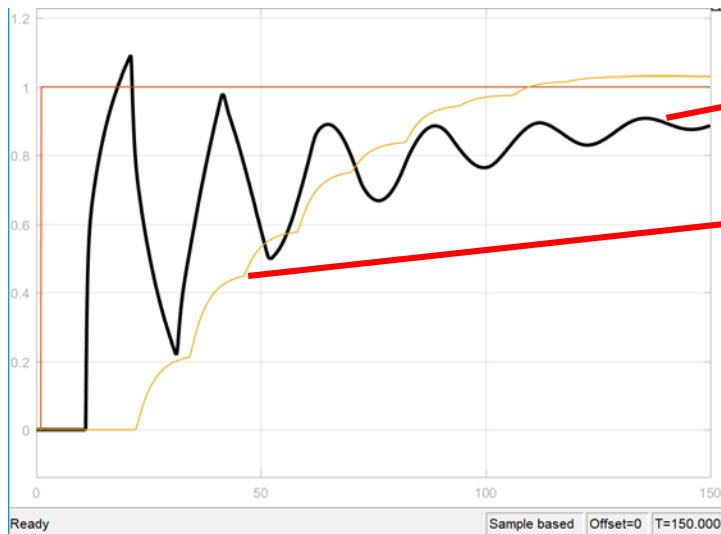


- 采样控制器每隔采样周期 T 动作一次。 S_1 、 S_2 为采样器，同时接通或同时断开
- S_1 、 S_2 接通时，采样控制器闭环工作； S_1 、 S_2 断开时，采样控制器停止工作，输出为零，但是上一时刻的控制值 $u^*(t)$ 通过保持器持续输出

7.3.2 采样控制



滞后时间: 10s
采样时间: 12s



普通PID控制

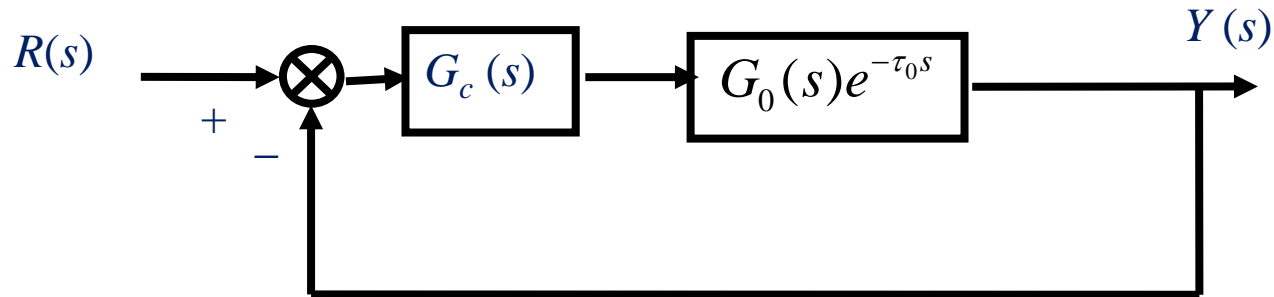
采样控制

7.3.3 史密斯预估补偿控制

- 加利福尼亚大学Smith教授1957、1959年在《Chemical Engineering Progress》及《ISA Journal》发表“Closer Control of Loops with Dead Time”、“A Controller to Overcome Dead Time”
- 基本原理
 - 根据过程特性预先估计出被控过程的动态模型
 - 设计一个预估器对其进行补偿，使被滞后的被控量超前反映到控制器的输入端
 - 使控制器提前动作，减小超调量、加速调节过程

7.3.3 史密斯预估补偿控制

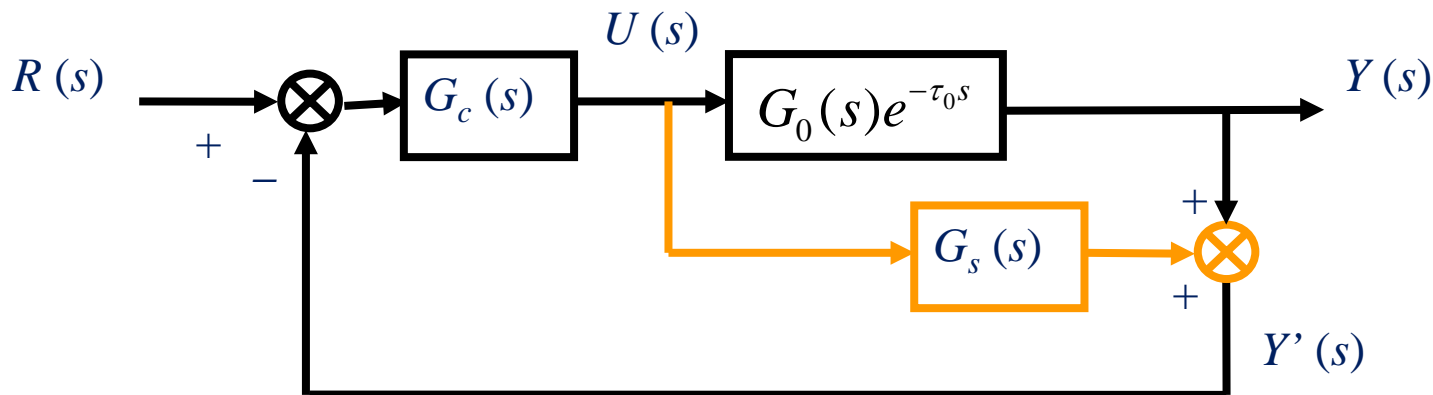
➤ 没有预估补偿器的单回路控制系统



$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-\tau_0 s}}{1 + G_c(s)G_o(s)e^{-\tau_0 s}}$$

7.3.3 史密斯预估补偿控制

➤ Smith预估补偿控制系统框图



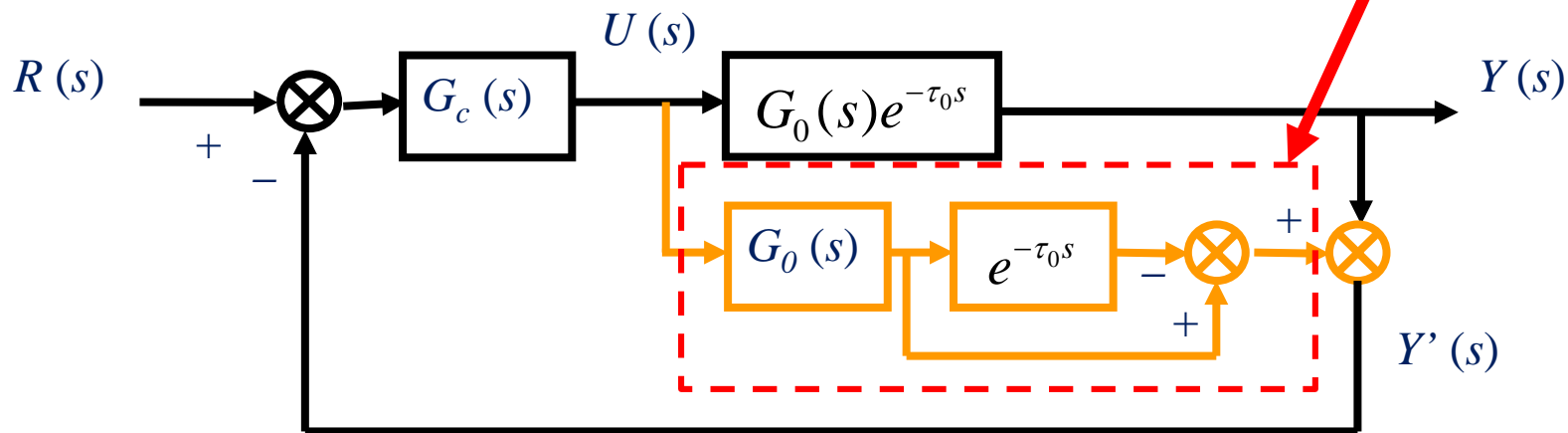
- 采用预估补偿器后，控制量 $U(s)$ 与反馈信号 $Y'(s)$ 之间的传递函数是两个并联通道 $G_0(s)e^{-\tau_0 s}$ 与 $G_s(s)$ 之和，并且应当等于 $G_0(s)$ ：

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau_0 s} + G_s(s) = G_0(s)$$

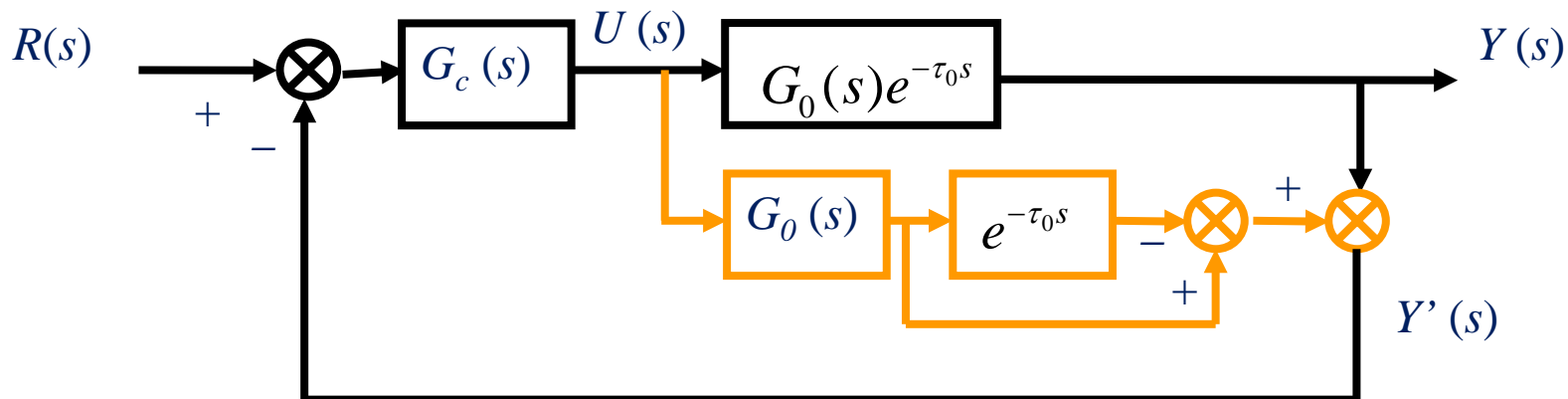
7.3.3 史密斯预估补偿控制

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau_0 s} + G_s(s) = G_0(s) \Rightarrow G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau_0 s})$$

一般称上式表示的预估补偿器为**史密斯预估器**



7.3.3 史密斯预估补偿控制



$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{\frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_s(s)}}{1+\frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_s(s)}} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_s(s)+G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \\ &= \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_0(s)(1-e^{-\tau s})+G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_0(s)} \end{aligned}$$

7.3.3 史密斯预估补偿控制

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} e^{-\tau_0 s}$$

预估补偿控制

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau_0 s}}{1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau_0 s}}$$

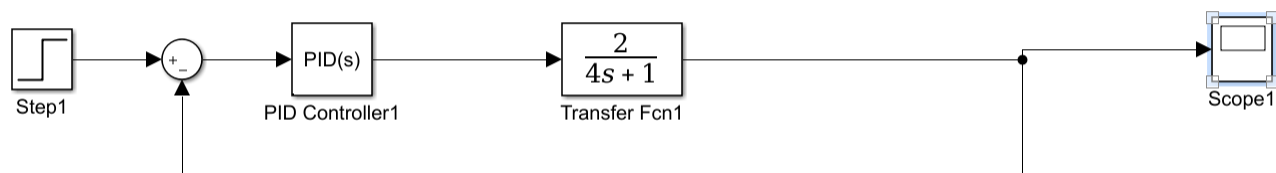
单回路控制

- Smith预估补偿控制系统的特征方程中已不包含 $e^{-\tau_0 s}$ 项，即预估补偿消除了控制通道纯滞后对系统闭环稳定性的影响
- 分子中的 $e^{-\tau_0 s}$ 项只是将被控参数 $y(t)$ 的响应在时间上推迟了 τ_0 时段。说明预估补偿后，设定值通道的控制品质和过程无滞后时完全相同

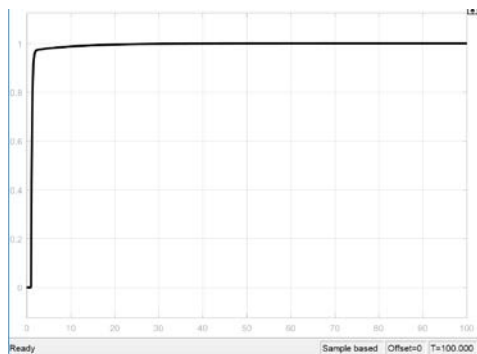
7.3.3 史密斯预估补偿控制

➤ 仿真实例

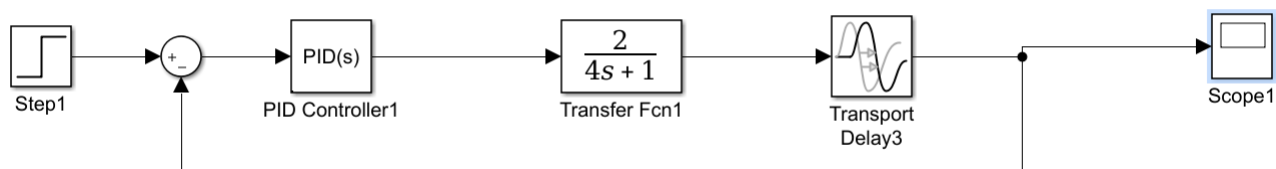
- 已知大纯滞后系统的被控广义对象传递函数为 $G_0(s) = \frac{2e^{-4s}}{4s+1}$
- 设定控制用PID调节器
- 对系统的PID控制与Smith控制分别进行仿真



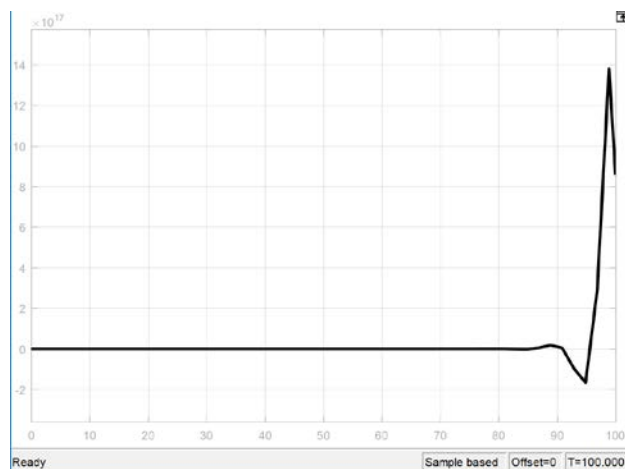
无时滞PID控制



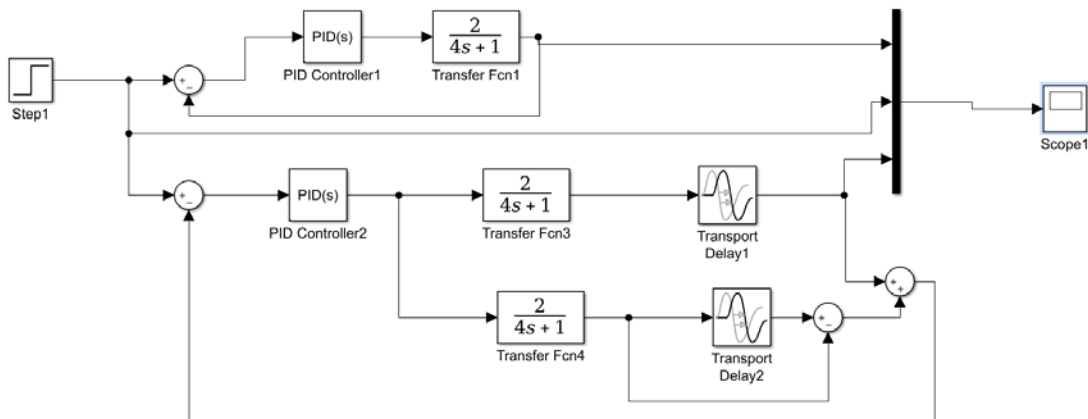
7.3.3 史密斯预估补偿控制



普通PID控制

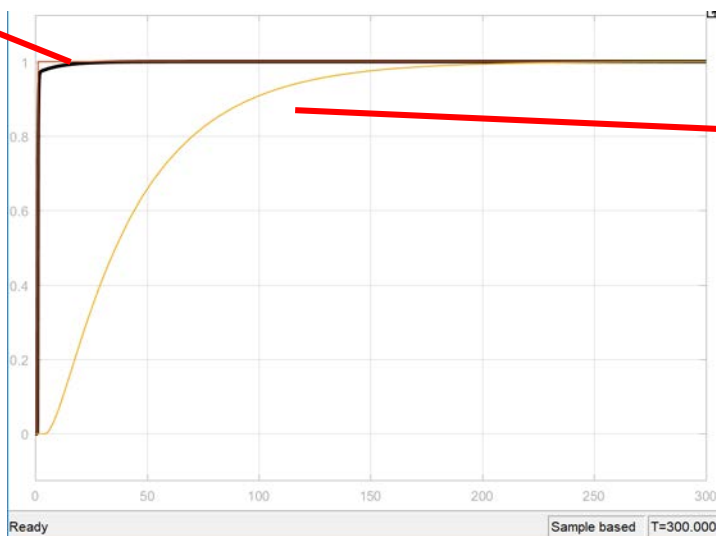


7.3.3 史密斯预估补偿控制



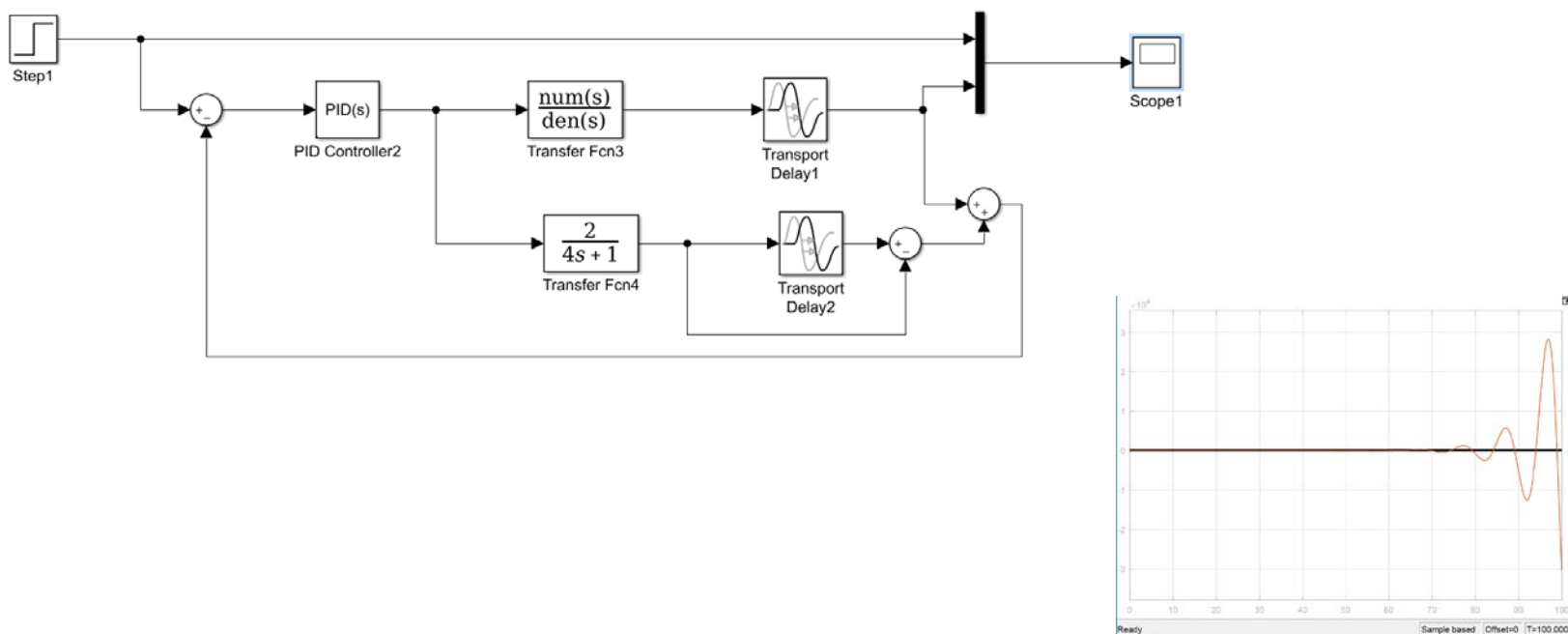
无时滞PID控制

史密斯预估控制



7.3.3 史密斯预估补偿控制

- 史密斯预估器的设计需要知道被控过程的精确数学模型
- 如果被控过程的特性不能精确得到，就很难得到预期的控制效果



第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

7.4 比值控制系统

- 工业过程经常需要控制两种或多种物料**保持一定比例关系**混合
- 比例失调, 影响产品的质量, 造成**环境污染**, 甚至造成**生产事故**
 - ❑ 造纸过程中, 纸浆和水要成一定的比例关系, 保证成纸质量
 - ❑ 石化重油气化, 重油和氧气量要成一定的比例关系, 确保安全以及产品的质量
 - ❑ 锅炉燃烧, 煤气和空气成一定的比例关系, 确保燃烧效率



7.4 比值控制系统

➤ 比值控制系统：一种物料随另一种按一定比例变化的控制系统

□ 主物料/主动量：处于比值控制中的主导地位， q_1

□ 从物料/从动量：按主物料进行配比， q_2

□ 比值控制系统：要求从动量 q_2 与主动量 q_1 成一定的比值关系，即满足：

$$\frac{q_2}{q_1} = K$$

➤ 常用的比值控制系统

□ 开环比值控制系统

□ 单闭环比值控制系统

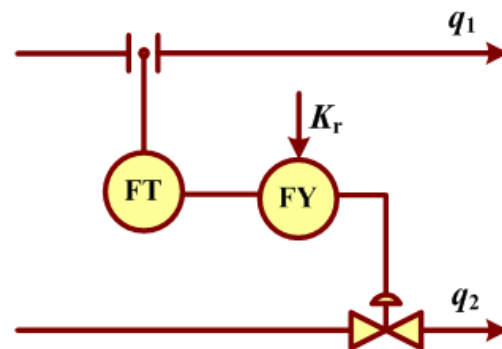
□ 双闭环比值控制系统

□ 变比值控制系统

1 开环比值控制系统

➤ 开环比值控制系统

- ❑ 如图 q_1 是主流量， q_2 是副流量
- ❑ 流量变送器FT检测主物料流量 q_1
- ❑ 由控制器及阀门来控制副流量 q_2



控制目标： $q_2 = K q_1$

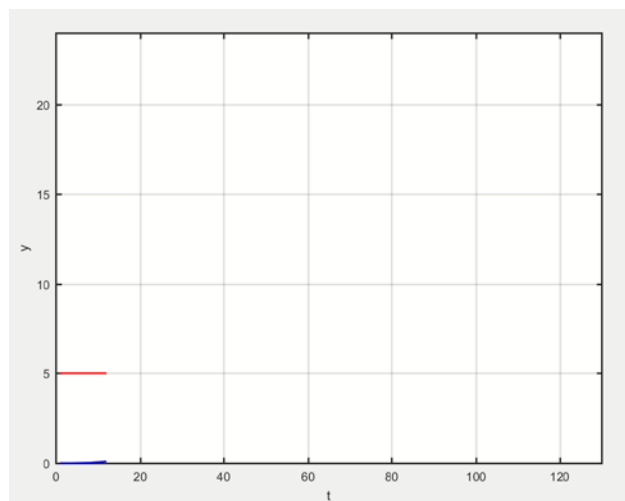
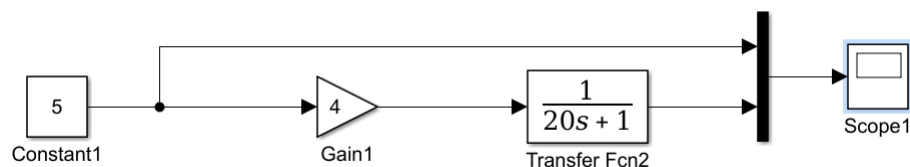
➤ 特点

- ❑ 当主动量发生变化时，通过控制调节阀来调节从动量，从而使两种物料的流量在稳定工况下满足比例要求
- ❑ 主动量或从动量均没有流量自控作用
- ❑ 适用于从物料比较稳定，且比值控制精度要求不高的场合

1 开环比值控制系统

➤ 开环比值控制系统仿真

□ 没有扰动时

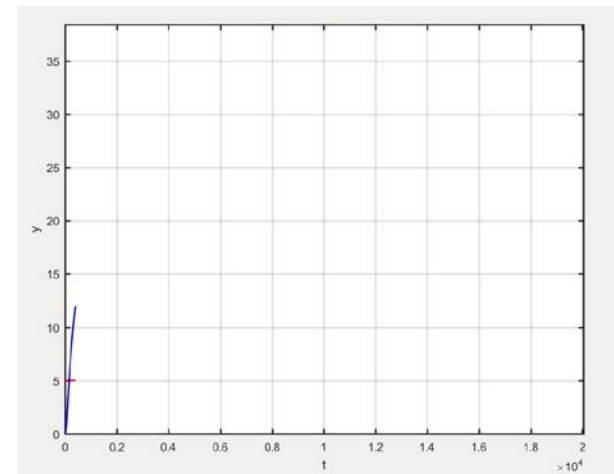
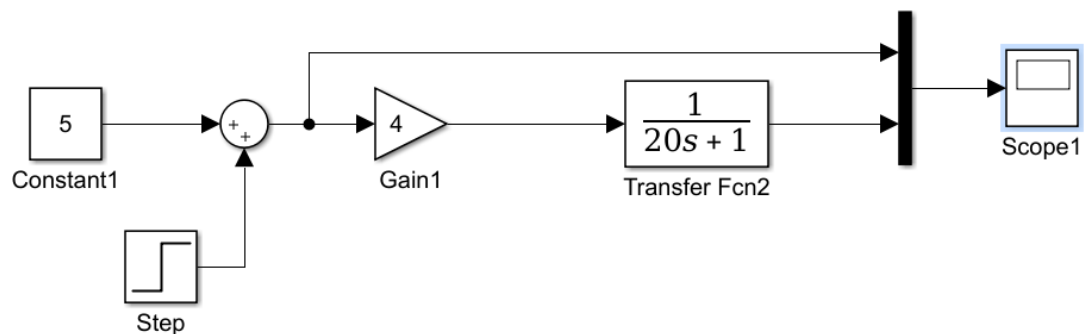


以4倍比值实现开环比值控制

1 开环比值控制系统

➤ 开环比值控制系统仿真

□ q_1 有扰动时

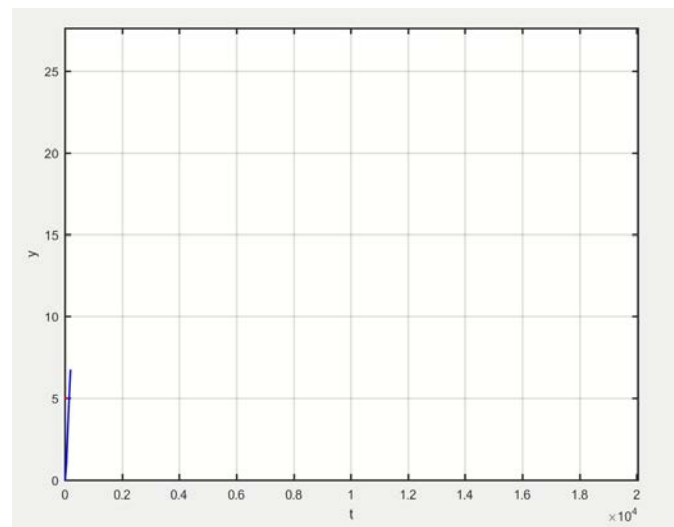
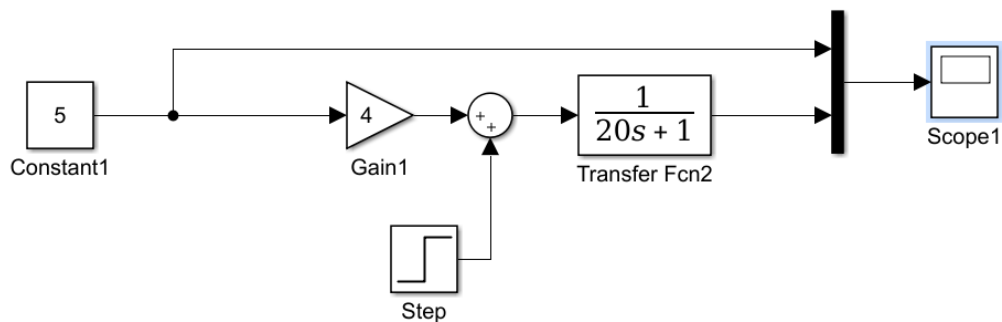


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

1 开环比值控制系统

➤ 开环比值控制系统仿真

□ q_2 有扰动时

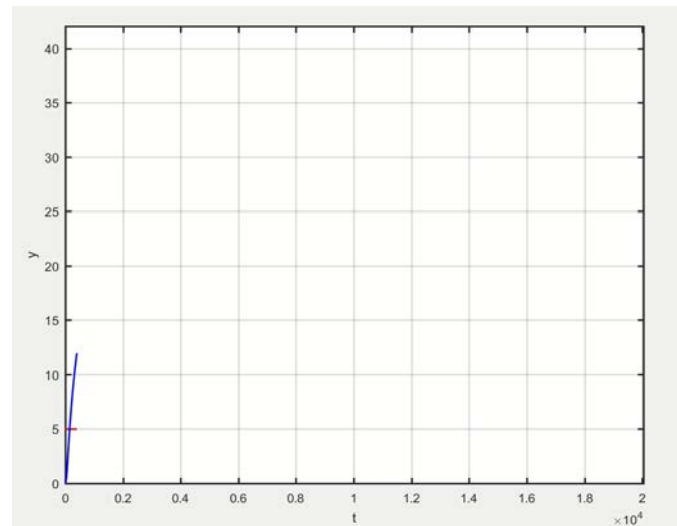
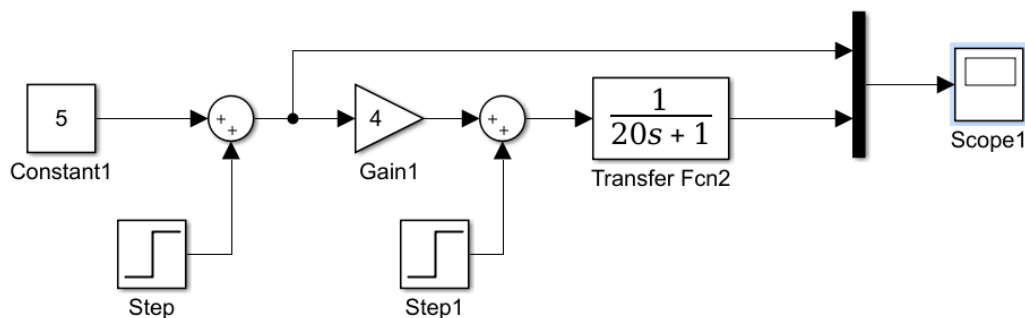


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

1 开环比值控制系统

➤ 开环比值控制系统仿真

□ q_1 、 q_2 有扰动时



- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

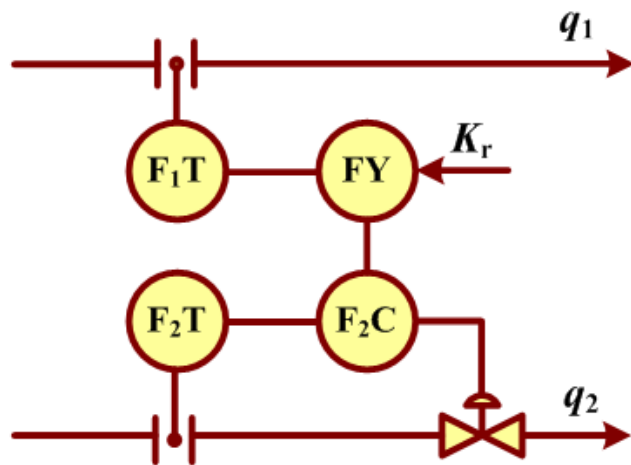
2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统

- ❑ 增加一个副流量的闭环控制系统
- ❑ 实现副流量跟随主流量变化，克服副流量本身干扰对比值的影响
- ❑ q_1 经比值运算器FY的输出作为 q_2 的给定
- ❑ q_2 按照系统设定的比值系数 K 随变化，确保二者比值一定

➤ 存在的问题

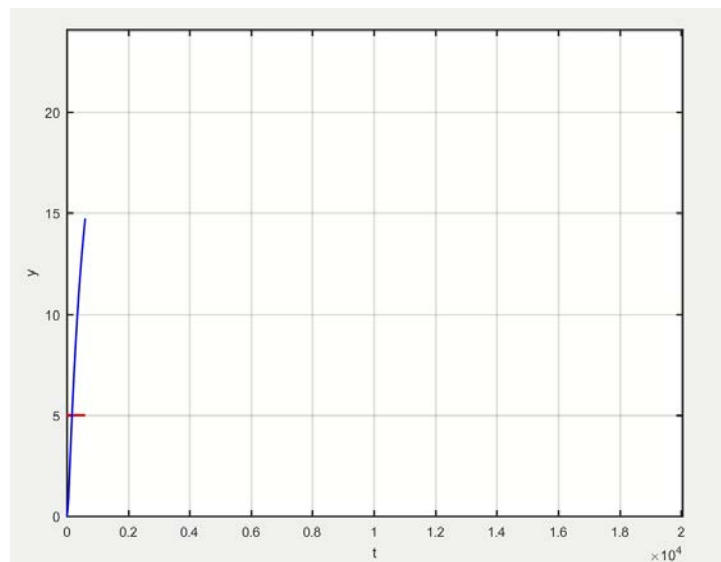
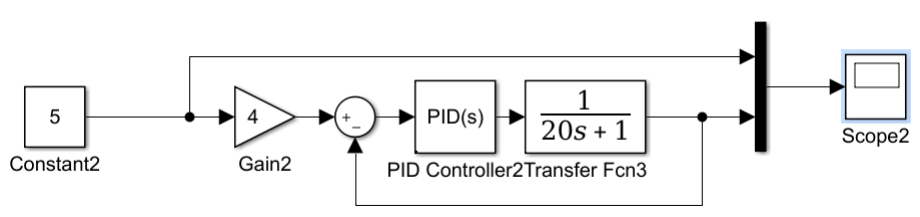
- ❑ 不适合主回路负荷变化幅度大的场合
- ❑ 无法保证动态比值



2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ 没有扰动时

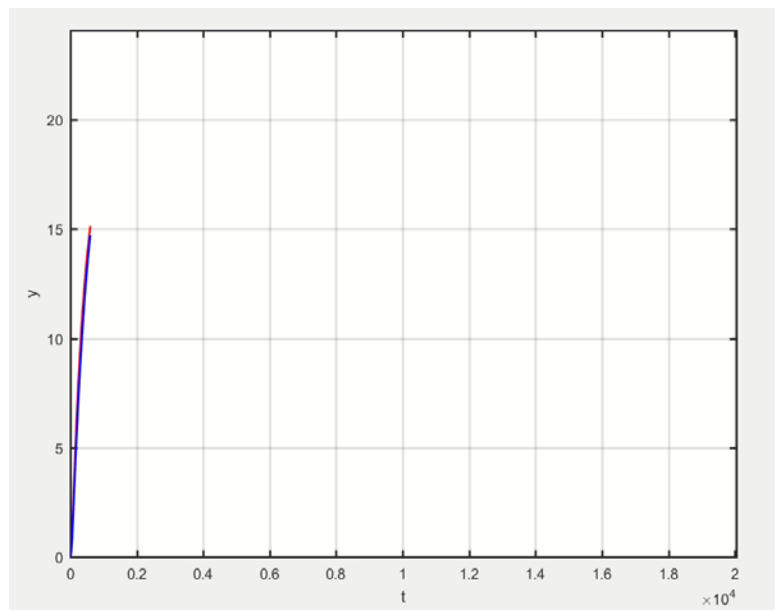


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ 没有扰动时和开环系统对比（单回路蓝线，开环红线）

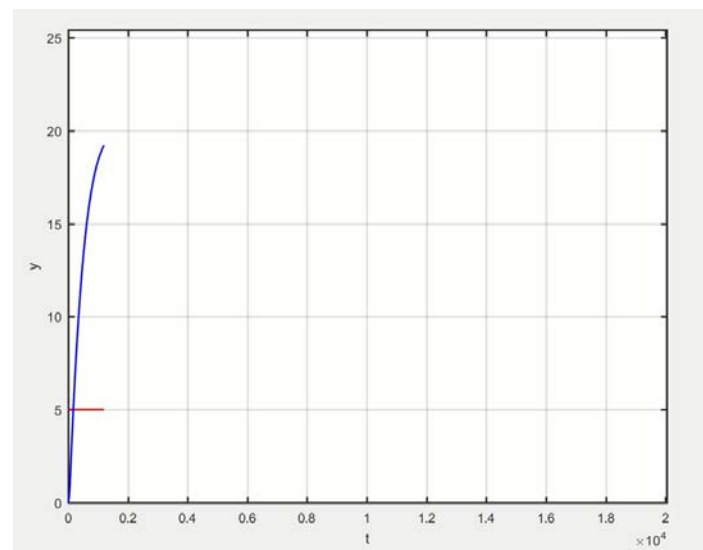
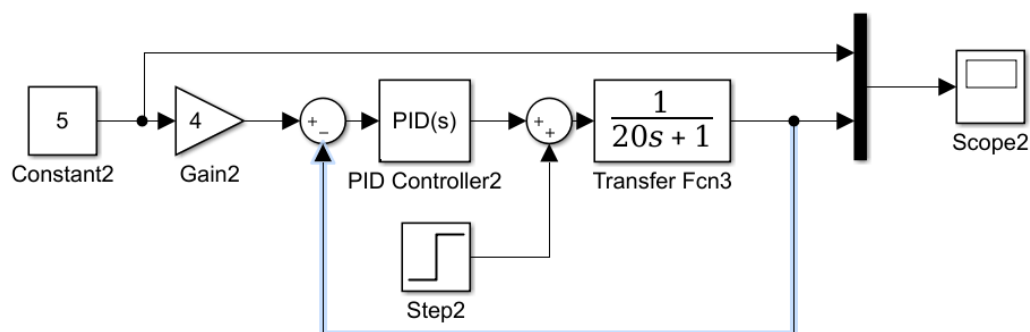


q_2 变化曲线

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_2 扰动时

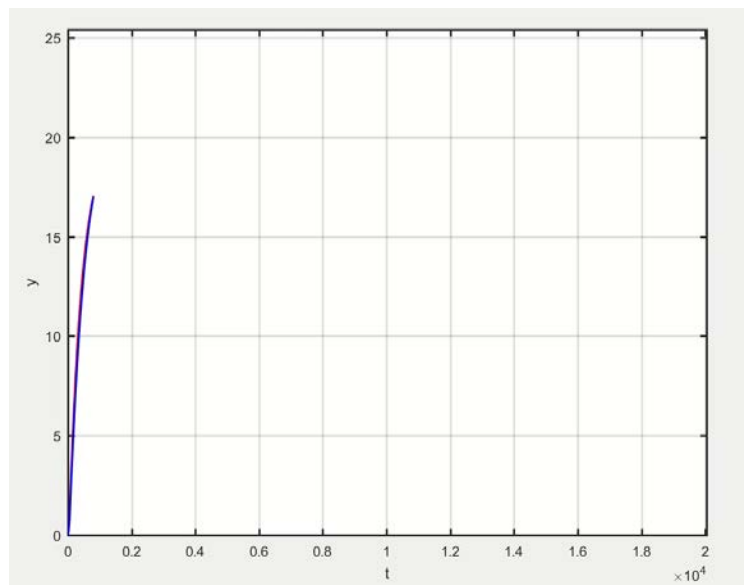


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_2 扰动时和开环比值系统对比 (单回路蓝线, 开环红线)

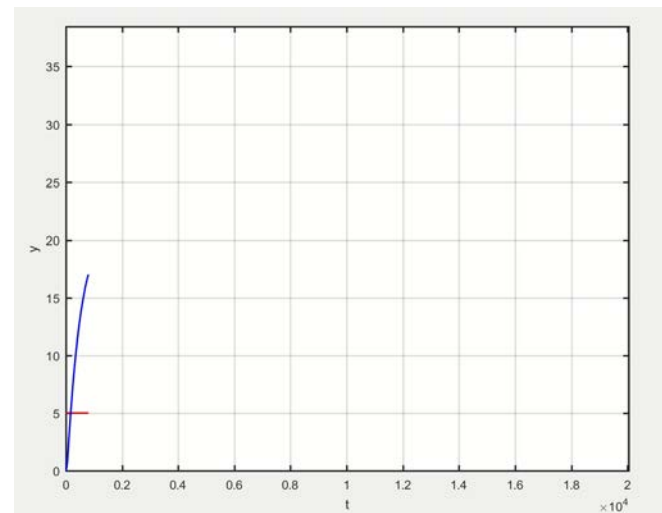
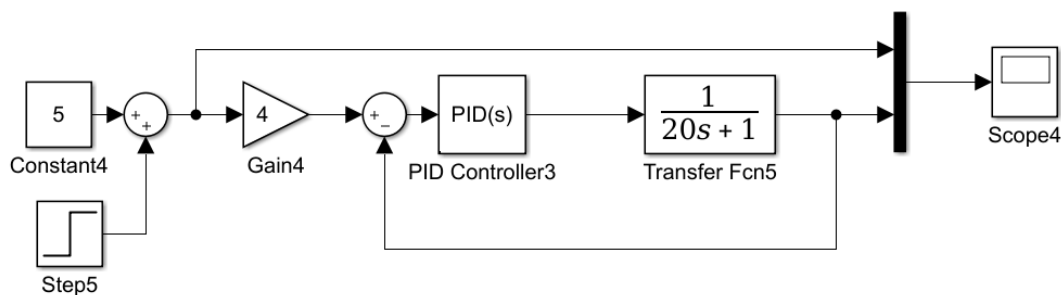


q_2 变化曲线

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_1 扰动时

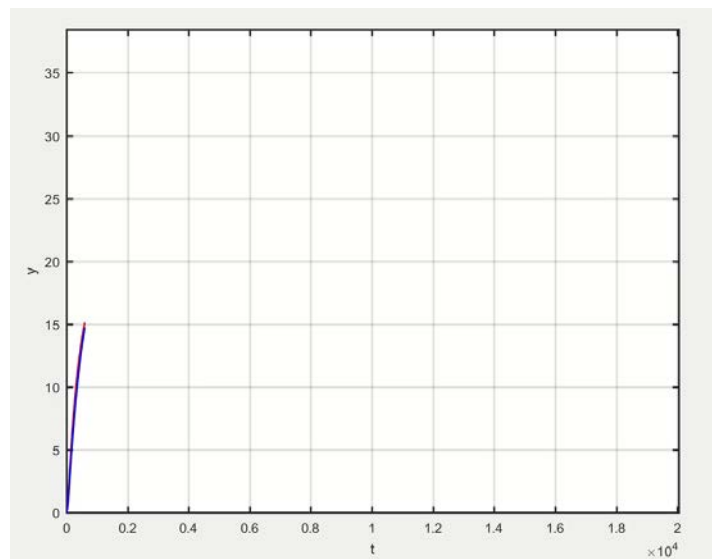


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_1 扰动时和开环比值系统对比 (单回路蓝线, 开环红线)

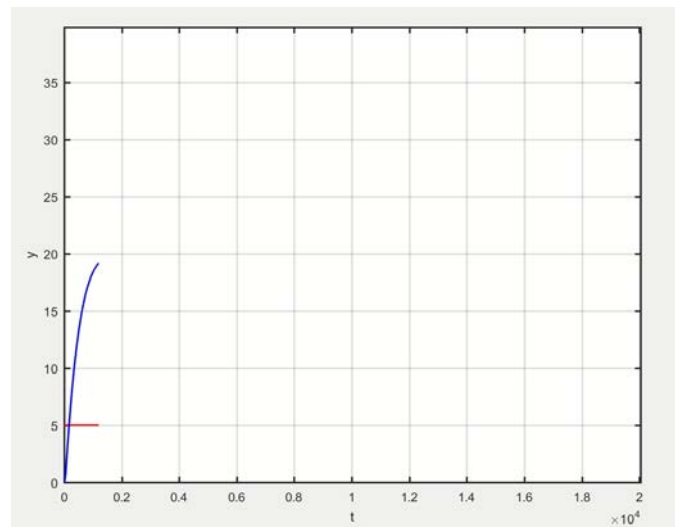
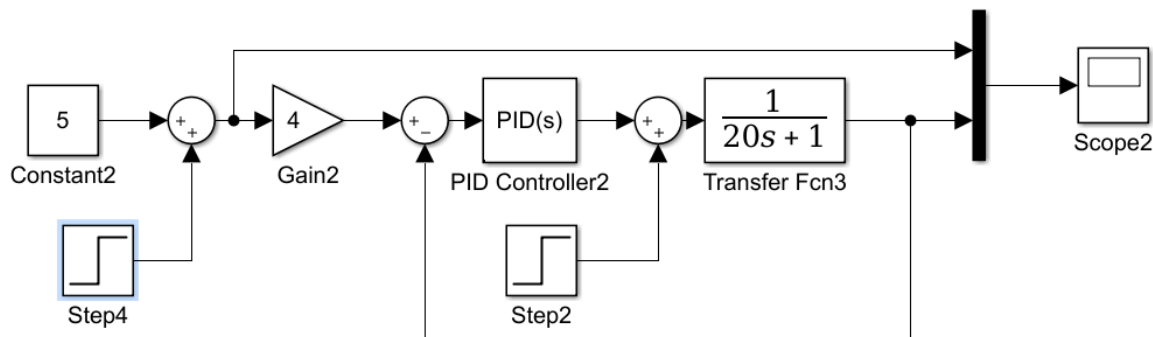


q_2 变化曲线

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_1 、 q_2 扰动时

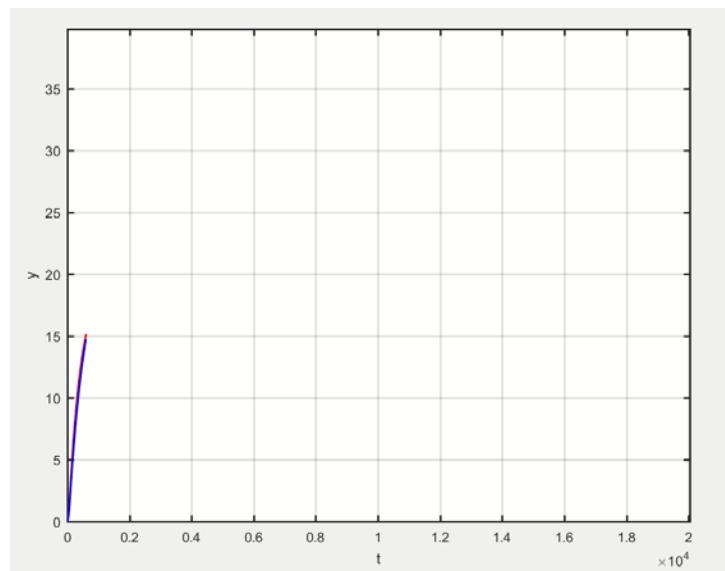


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

2 单闭环比值控制系统

➤ 单闭环比值控制系统仿真

□ q_1 、 q_2 扰动时和开环比值系统对比



q_2 变化曲线

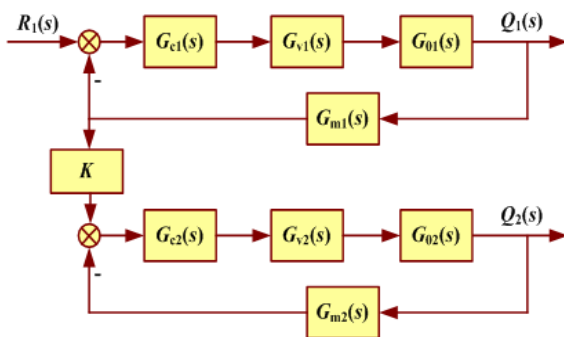
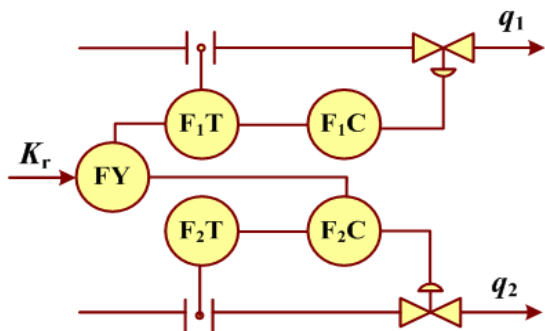
3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统

- ❑ 主动量控制回路能克服主动量干扰，实现对主动量的定值控制
- ❑ 从动量控制回路抑制作用于从动量回路中的干扰，使主、从动量均比较稳定，能保持在一定的比值，使总物料量也保持平稳

➤ 缺点

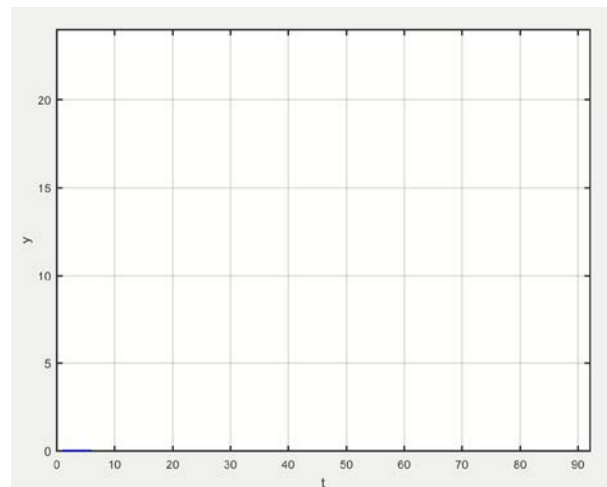
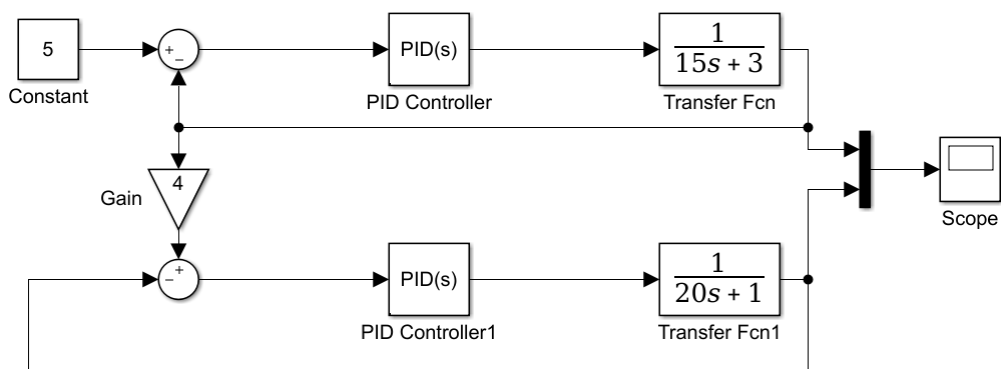
- ❑ 使用的仪表较多
- ❑ 若主副回路工作频率相近时，容易产生共振



3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ 没有扰动时

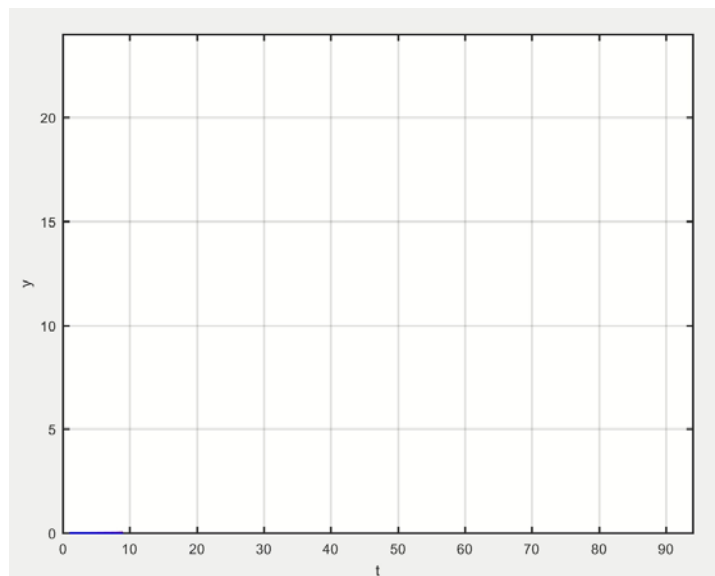


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ 没有扰动时和单闭环比值系统对比（双闭环蓝线，单闭环红线）

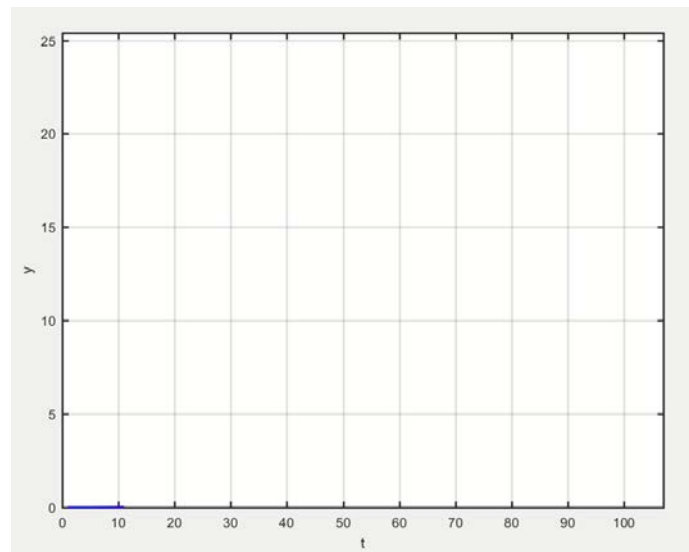
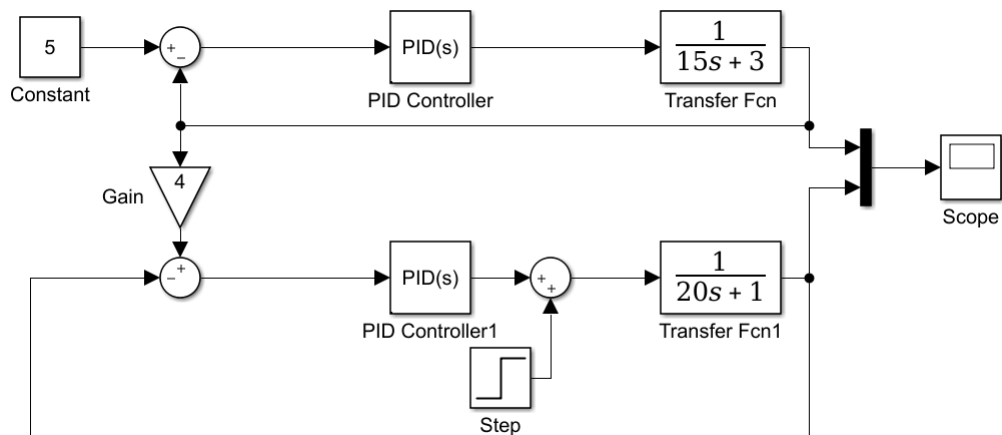


q_2 变化曲线

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_2 扰动时

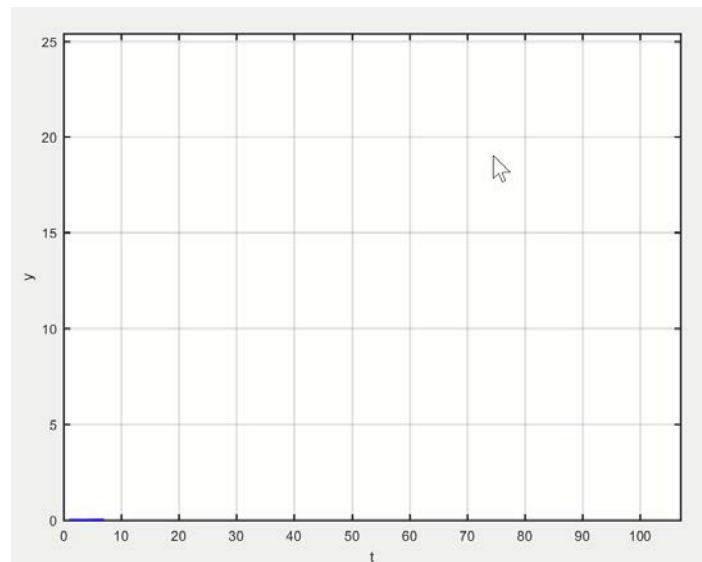


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_2 扰动时和单闭环比值系统对比（双闭环蓝线，单闭环红线）

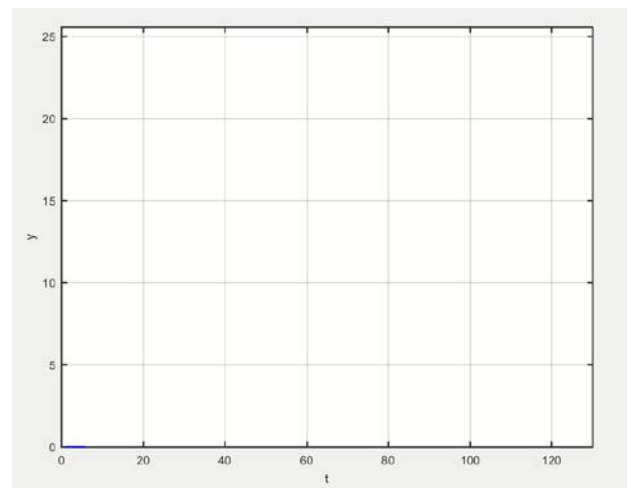
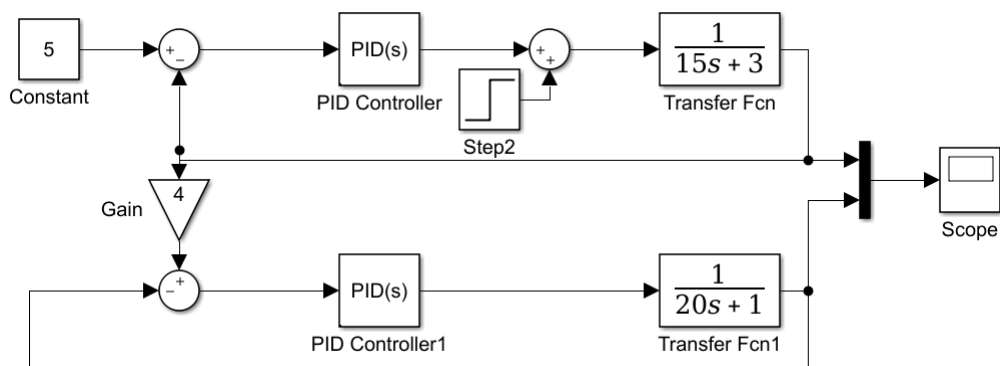


q_2 变化曲线

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_1 扰动时

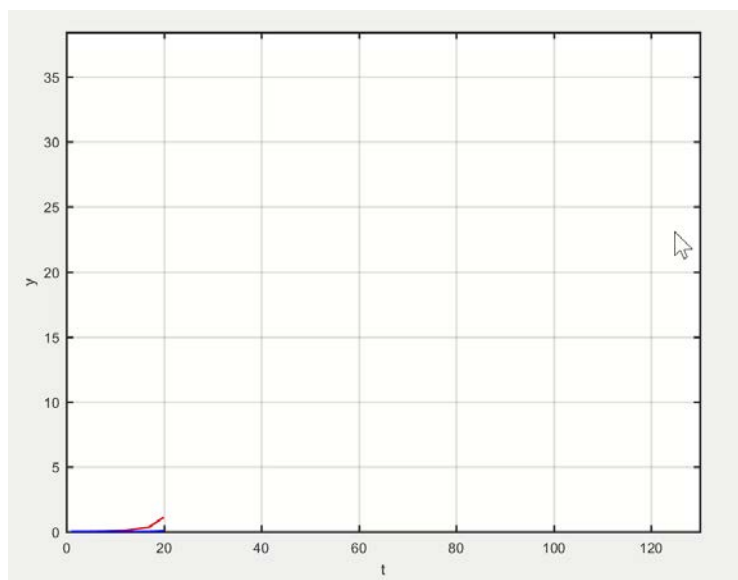


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_1 扰动时和单闭环比值系统对比（双闭环蓝线，单闭环红线）

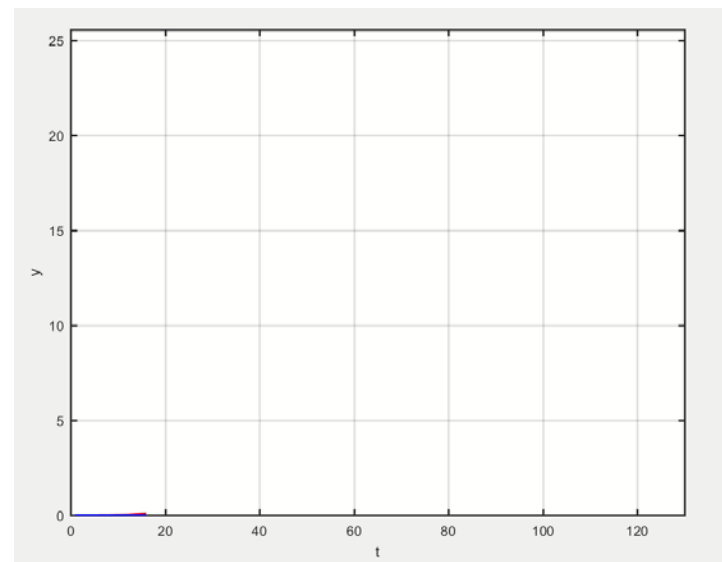
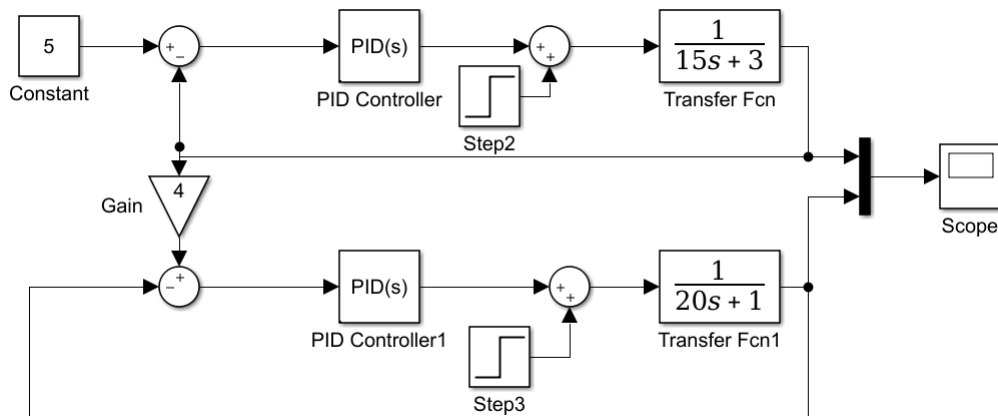


q_2 变化曲线

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_1, q_2 扰动时

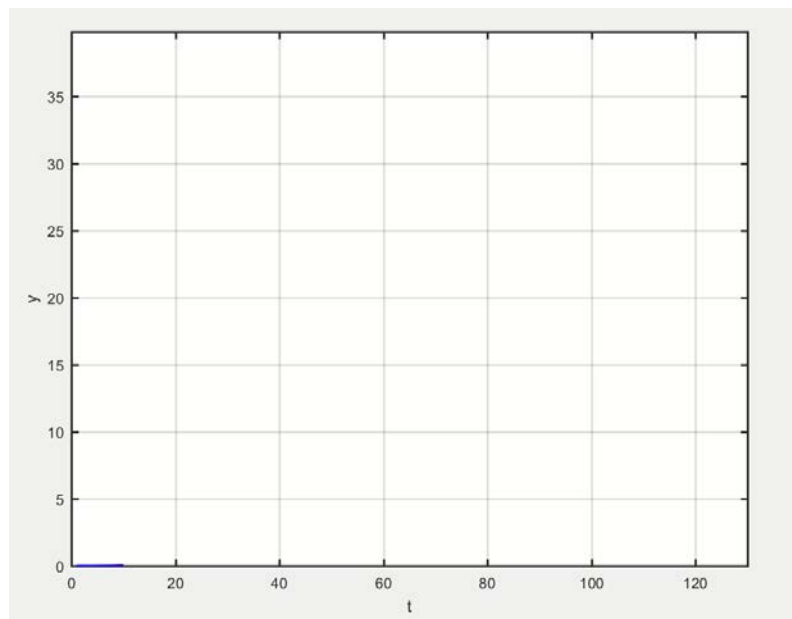


- 阶跃扰动幅值为3
- 以4倍比值实现开环比值控制

3 双闭环比值控制系统

➤ 双闭环比值控制系统仿真

□ q_1 、 q_2 扰动时和单闭环比值系统对比（双闭环蓝线，单闭环红线）



q_2 变化曲线

4 变比值控制系统

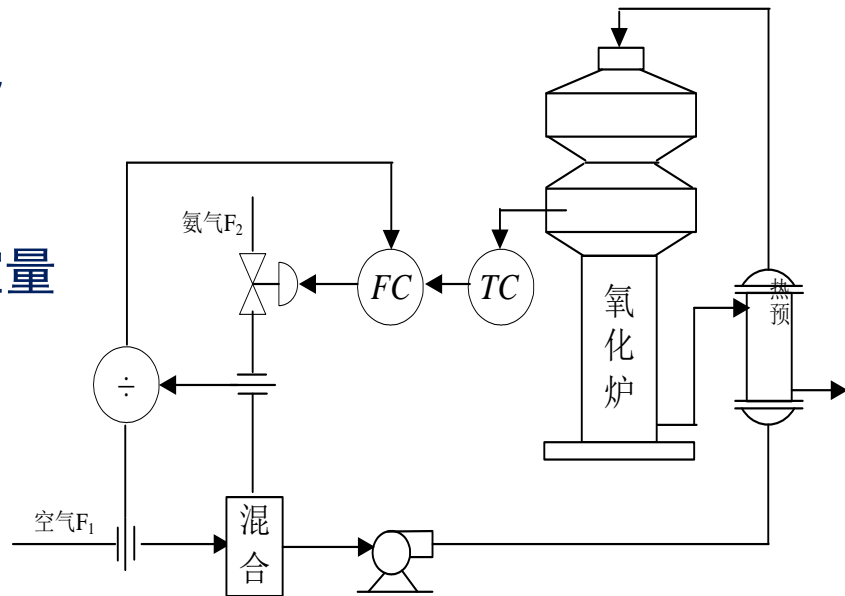
➤ 氧化炉温度对氨气/空气变比值控制系统

□ 工艺流程

- 氨气+空气按照一定比值进入氧化炉，840度温度下，放热反应产生硝酸和一氧化氮
- 氨气浓度对温度有影响，浓度每下降1%，温度下降64度。所以比值不是定值，要补偿温度的变化

□ 主副变量选择

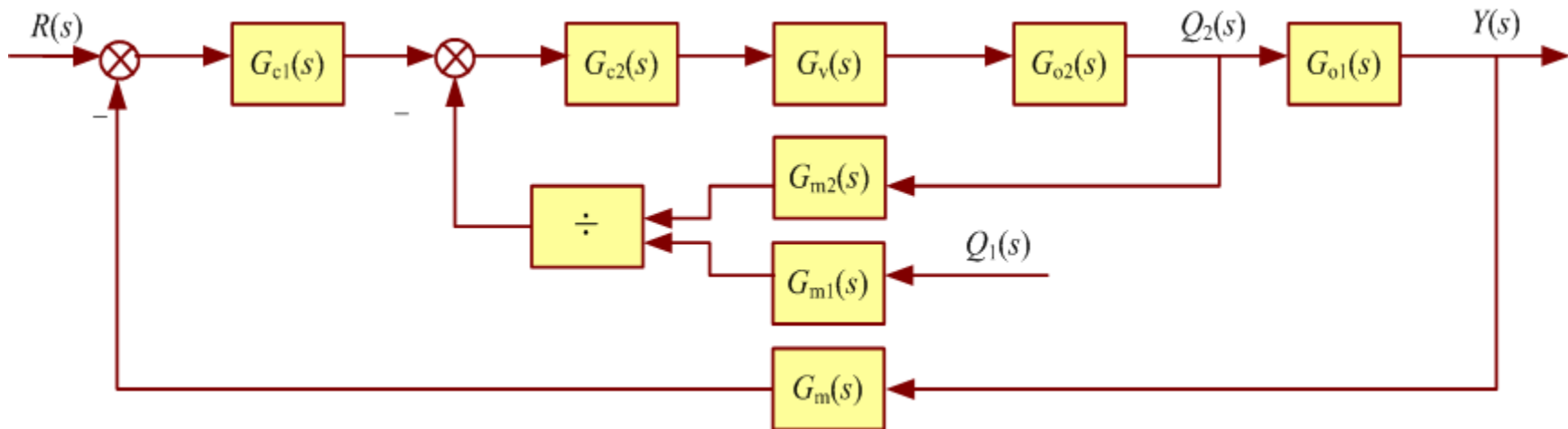
- 以氧化炉的反应温度作为主被控量
- 氨气与空气之比作为副被控量



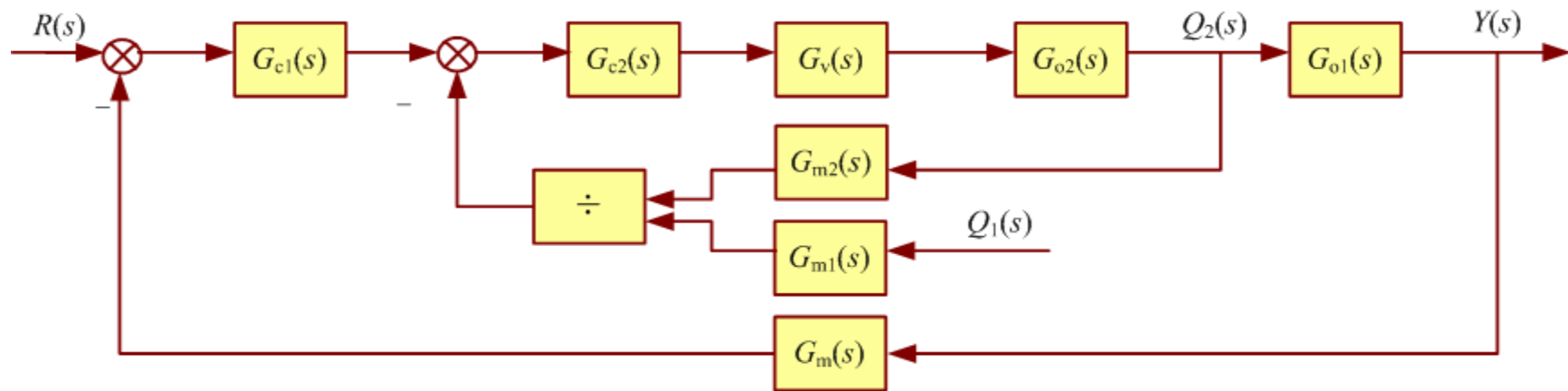
4 变比值控制系统

➤ 变比值控制系统

- 以某种质量指标（第三参数）为主变量，以两个流量比为副变量的串级控制系统
- 即：按照工艺指标自行修正比值系数的变化值。（副回路是个比值控制系统的串级控制系统）



4 变比值控制系统

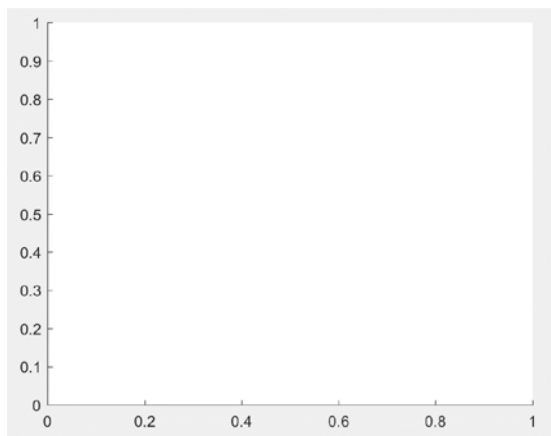
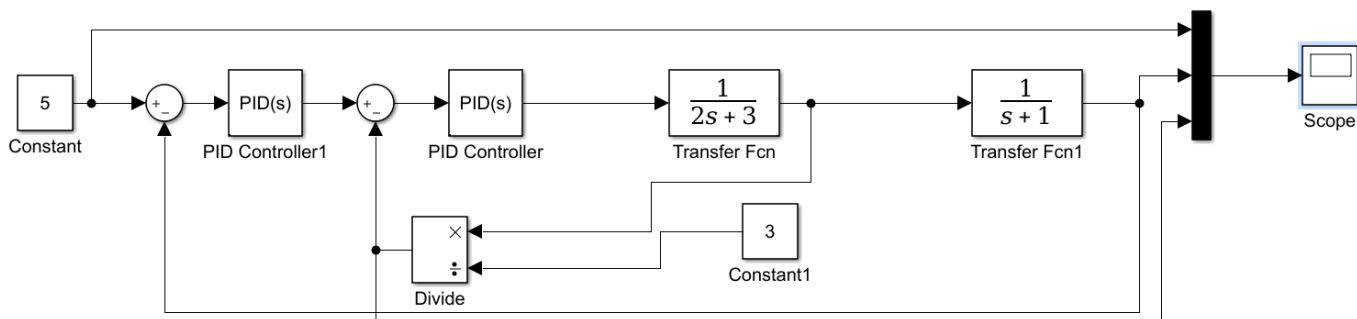


- 稳态时，主、副量恒定，其输出（比值）作为比值控制器的测量反馈信号。主参数恒定，比值控制器输出稳定，主动量符合工艺要求，产品质量合格
- 当 Q_1 ， Q_2 出现扰动，通过比值控制回路，保持比值一定，不影响或大大减小扰动对产品质量影响（相当于串级控制系统的副回路调节）

4 变比值控制系统

变比值控制系统仿真

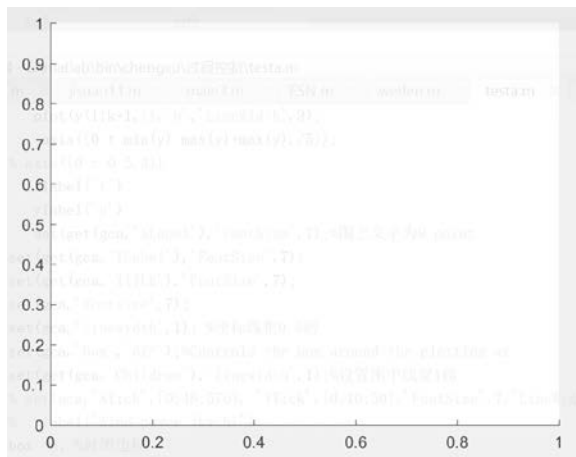
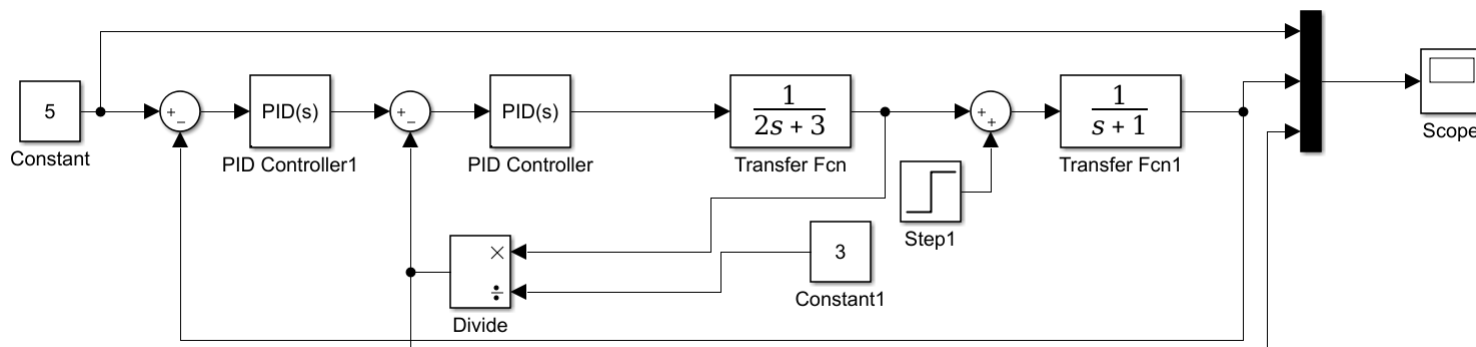
没有扰动时（系统输入红线，外环输出蓝线，比值黑线）



4 变比值控制系统

变比值控制系统仿真

外环有扰动时（系统输入红线，外环输出蓝线，比值黑线）

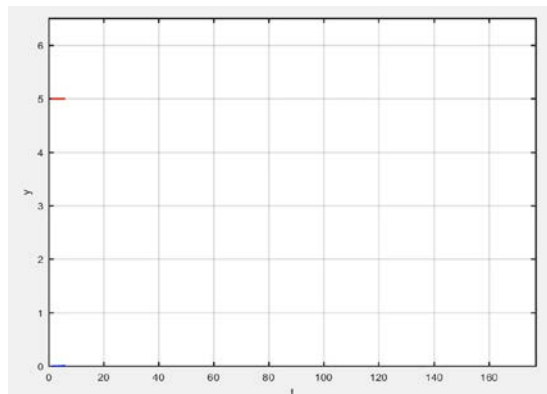
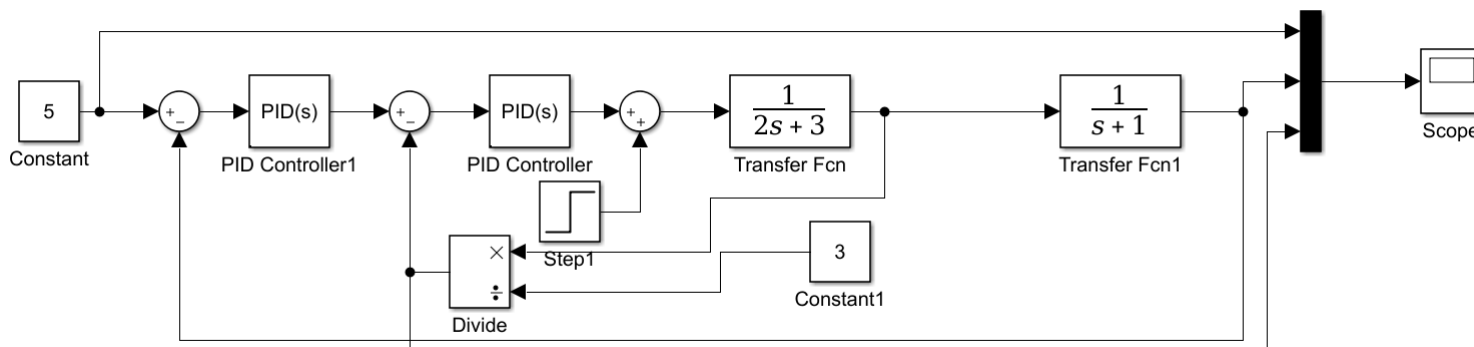


阶跃扰动幅值为3 149

4 变比值控制系统

变比值控制系统仿真

内环有扰动时（系统输入红线，外环输出蓝线，比值黑线）

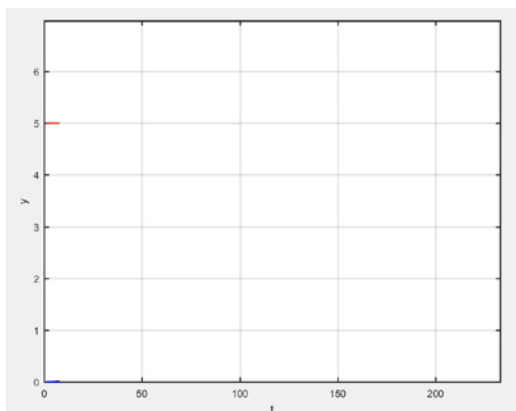
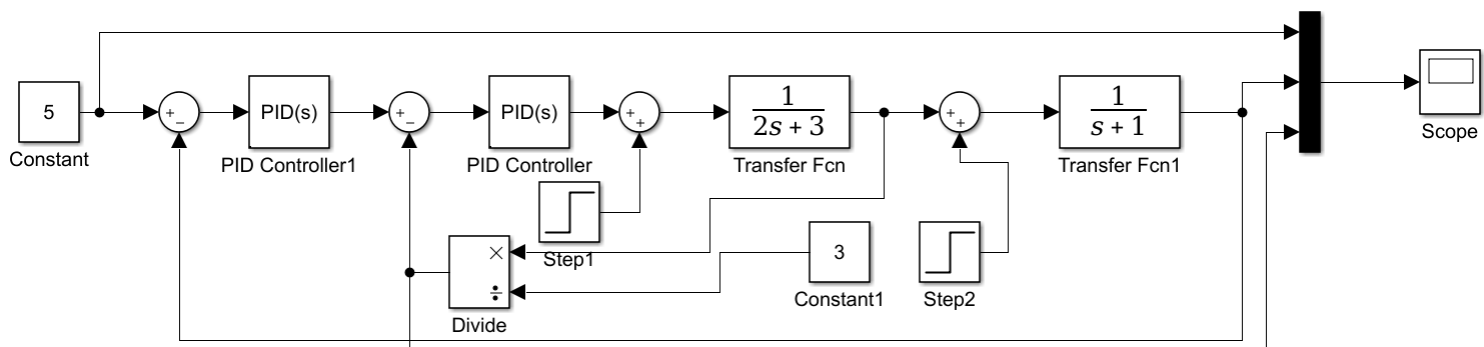


阶跃扰动幅值为3

4 变比值控制系统

变比值控制系统仿真

内外环有扰动时（系统输入红线，外环输出蓝线，比值黑线）



阶跃扰动幅值为3

7.4.2 比值控制系统的设计

1、主动量和从动量的选取

- 主动量：选用起主导作用、可测但不可控、影响到生产安全且较昂贵的过程变量
- 从动量：既可测又可控，并需要保持一定比值的过程变量

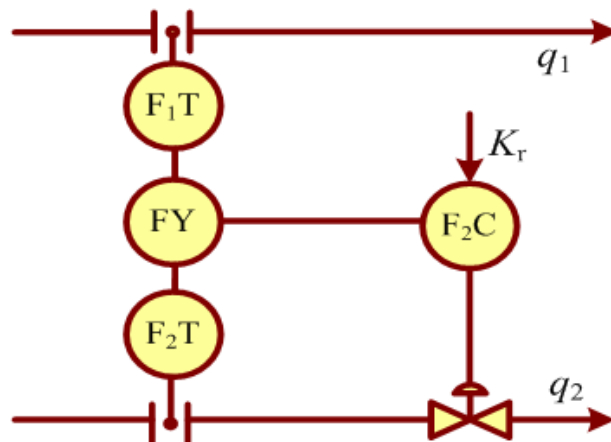
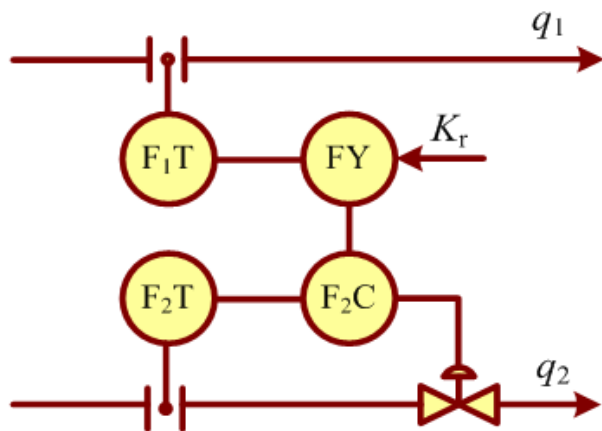
2、控制方案的确定

- 单闭环比值控制：主动量不可控，或主动量可控但变化不大；从动回路控制器要求具有稳定从动量的作用，选用PI控制
- 双闭环比值控制：主动量可测可控但变化较大的情况，其中的主、从动回路控制器要起到稳定各自物料流量的作用，选用PI控制
- 变比值控制：比值需要由另一个控制器来调节，其控制器设计按照串级控制系统中的选取原则

7.4.2 比值控制系统的设计

3、比值控制系统的实施

- 具体实现可采用两种方式：**相乘式和相除式**
- 可采用相乘式、相除式，



7.4.2 比值控制系统的设计

4、比值控制系统的参数整定

- 双闭环比值控制的主动量回路：按**单回路控制系统**整定
- 变比值控制的主控制器：按**串级控制系统**的整定方法
- 从动量回路的整定：从动量回路本质上是**随动控制系统**，要求从动量快速、准确地跟随主动量变化，而且不宜有超调，所以需要将参数**整定在振荡与不振荡的临界状态**

7.4.2 比值控制系统的设计

➤ 具体步骤

- 根据生产工艺要求，计算比值控制器的比值系数，并将系统投入运行
- 将积分时间置于最大，并由大到小逐渐调节比例度，使系统处于振荡与不振荡的临界状态
- 投入积分作用时，先适当增大比例度，再投入积分作用，并逐步减小积分时间，直到系统出现临界状态

7.4.2 比值控制系统的设计

➤ 比值系数的确定

- 工艺上规定的比值 K 是指两种物料的流量（体积或质量）之比，而目前通用仪表使用统一的标准信号，因此必须把工艺规定的流量比值 K 折算成仪表信号的比值系数 K' ，才能进行比值设定
- 变送器的输出检测信号与被测流量是非线性关系
 - 当物料从0变到 q_{max} 时，变送器输出对应为DC4~20mA。假设变送器的输出信号和被测流量之间呈平方关系，则主、从物料流量 q_1 ， q_2 所对应的输出信号为

$$I_1 = \frac{q_1^2}{q_{1max}^2} \times 16 + 4$$

$$I_2 = \frac{q_2^2}{q_{2max}^2} \times 16 + 4$$

7.4.2 比值控制系统的设计

- 又因为生产工艺要求

$$K = \frac{q_2}{q_1}$$

$$I_1 = \frac{q_1^2}{q_{1\max}^2} \times 16 + 4$$

$$I_2 = \frac{q_2^2}{q_{2\max}^2} \times 16 + 4$$

- 所以

$$K^2 = \frac{q_2^2}{q_1^2} = \frac{q_{2\max}^2 (I_2 - 4)}{q_{1\max}^2 (I_1 - 4)} = K' \frac{q_{2\max}^2}{q_{1\max}^2}$$

- 即

$$K' = K^2 \frac{q_{2\max}^2}{q_{1\max}^2}$$

- 虽然变送器的输出检测信号与被测流量是非线性关系，但是比值系数为一个常数
- 只与主从物料变送器的最大量程有关，与负荷无关

7.4.2 比值控制系统的设计

□ 变送器的输出检测信号与被测流量是线性关系

• 则

$$I_1 = \frac{q_1}{q_{1\max}} \times 16 + 4$$

$$I_2 = \frac{q_2}{q_{2\max}} \times 16 + 4$$

• 所以

$$K = \frac{q_2}{q_1} = \frac{q_{2\max} (I_2 - 4)}{q_{1\max} (I_1 - 4)} = K' \frac{q_{2\max}}{q_{1\max}}$$

• 因此

$$K' = K \frac{q_{2\max}}{q_{1\max}}$$

7.4.2 比值控制系统的设计

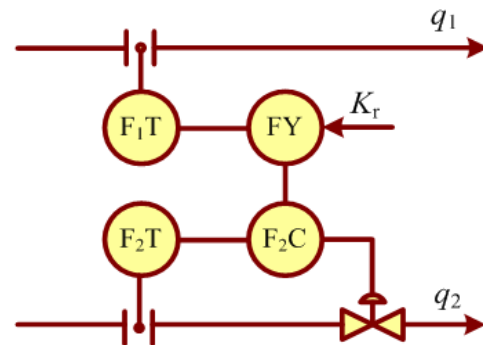
5、比值控制系统的非线性特性补偿

- 被控过程的静态放大系数随负荷变化而变化
- 以上图为例，若流量检测采用节流装置，则被测流量和变送器输出信号之间为非线性关系
- 设 I_2 为从动量变送器输出电流信号， q_{2max} 为从动量检测的最大值， q_2 为从动量的检测值，则

$$I_2 = \frac{q_2^2}{q_{2max}^2} \times 16 + 4$$

- 设 q_{20} 为 q_2 的静态工作点（负荷），则静态放大系数为

$$K_2 = \left. \frac{\partial I_2}{\partial q_2} \right|_{q_2=q_{20}} = \frac{32}{q_{2max}^2} q_{20}$$



7.4.2 比值控制系统的设计

$$K_2 = \left. \frac{\partial I_2}{\partial q_2} \right|_{q_2=q_{20}} = \frac{32}{q_{2\max}^2} q_{20}$$

- 可知静态放大系数与负荷成正比，随负荷的变化而变化，是一个非线性特性
- 由于此非线性包含在广义过程中，即使其他环节是线性的，系统总的放大系数也是非线性的
- 当系统处于小负荷状态时，参数整定后，系统稳定；当负荷变大时，若控制器参数不能随之调整，系统的运行质量会下降
- 为了克服流量检测环节的非线性特性对系统的不利影响，在变送器后串联一个开方器，进行补偿

7.4.2 比值控制系统的设计

□ 设开方器输出电流信号为 $I_2' = \sqrt{I_2 - 4} + 4$

□ 带入 $I_2 = \frac{q_2^2}{q_{2\max}^2} \times 16 + 4$

□ 则 $I_2' = \frac{q_2}{q_{2\max}} \times 4 + 4$

□ 此时总的静态放大系数为

$$K_2' = \left. \frac{\partial I_2'}{\partial q_2} \right|_{q_2=q_{20}} = \frac{4}{q_{2\max}}$$

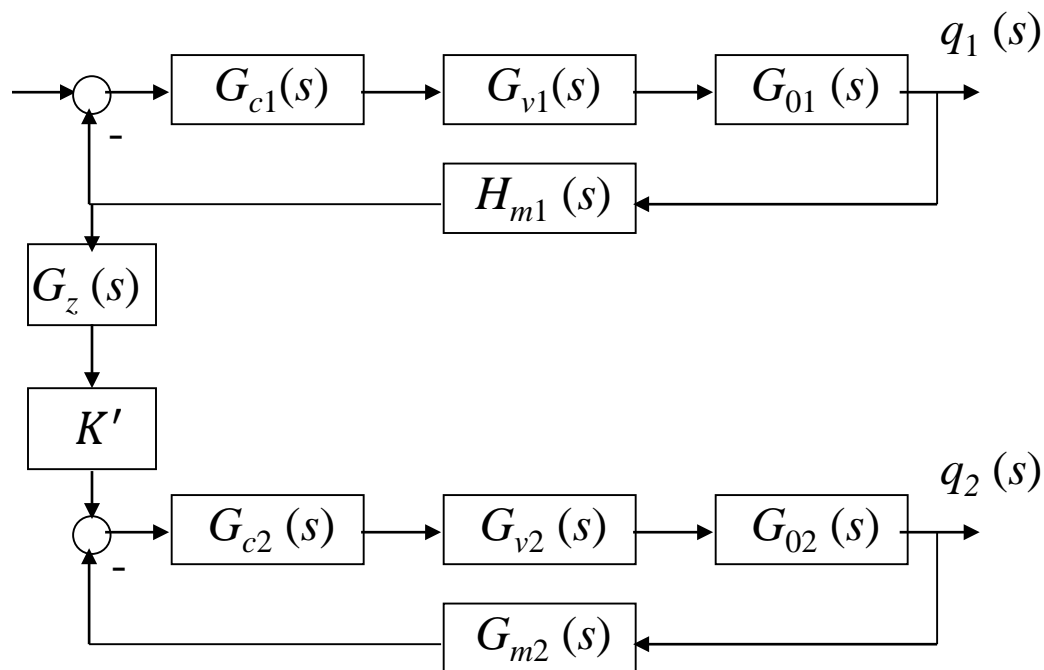
□ 可知为一个常数，不受负荷的影响

□ 若控制精度较高、负荷变化较大，引入开方器；否则，无需使用

7.4.2 比值控制系统的设计

6、比值控制系统中主从动量的比值

- 某些特殊的生产工艺中，对比值控制要求非常高，不仅在静态工况下要求两种物料流量的比值一定，在动态情况下，也要求两种物料流量的比值一定



7.4.2 比值控制系统的设计

- 由图可知主动量对从动量的传递函数为

$$\frac{q_2(s)}{q_1(s)} = \frac{G_{m1}(s)G_z(s)K'G_{c2}(s)G_{v2}(s)G_{02}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{02}(s)G_{v2}(s)G_{m2}(s)}$$

- 加开方器，为使主从动量动态比值一定，则

$$K' = K \frac{q_{2\max}}{q_{1\max}}$$

- 带入，则

$$G_z(s) = \frac{1 + G_{c2}(s)G_{v2}(s)G_{02}(s)G_{m2}(s)}{G_{m1}(s)G_{c2}(s)G_{v2}(s)G_{02}(s)} \frac{q_{2\max}}{q_{1\max}}$$

- 实际应用中，由于从动量总要滞后于主动量，所以动态补偿环节一般具有超前特性

第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

7.5 选择性控制系统

➤ 控制系统要求：

- 正常时，克服干扰，维持生产平稳运行
- 达到安全极限时，具有应变能力，采取相应的措施，使生产离开安全极限，返回正常情况
- 采取的措施包括：
 - 硬保护：采用自动报警或自动联锁，自动停机等方法。一些连续生产、控制高度集中的大型企业，硬保护措施无法满足生产的需要
 - 软保护：既能保证对被控过程的正常控制，又能适应短期内生产异常对系统保护的 control 方法。选择性控制系统属于软保护

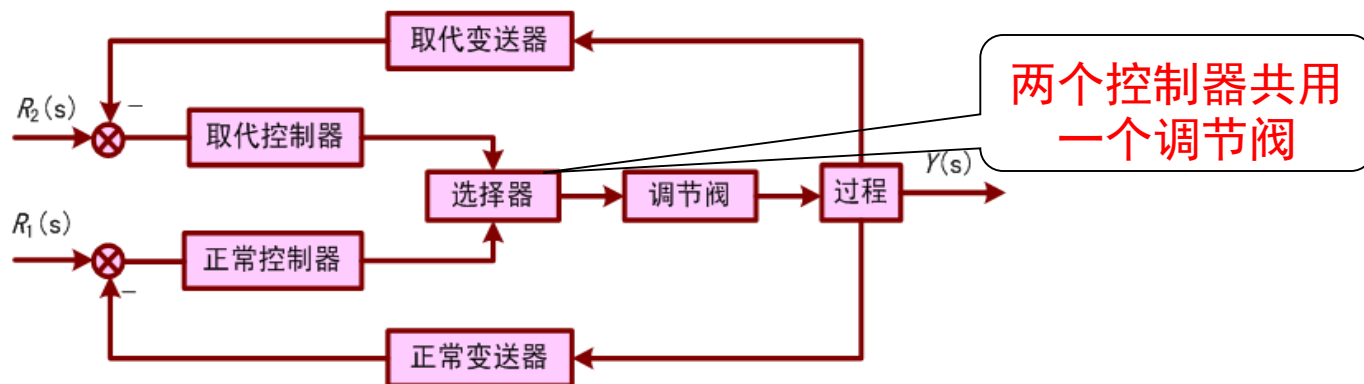
7.5 选择性控制系统

➤ 选择控制系统

- 又称取代控制，超驰控制
- 将限制条件的逻辑关系叠加到自动控制系统上去的一种控制方法
- 当生产操作趋向极限条件时，通过选择器，选择一个用于不正常工况下的备用控制系统自动取代正常工况下的控制系统
- 待工况脱离极限条件回到正常工况后，备用控制系统通过选择器自动脱离进入备用状态，同时将正常工况下的控制系统自动投入运行
- 正常控制器与备用控制器的自动切换由选择器进行判别
- 控制回路中有选择器的控制系统称为选择性控制系统

7.5.1 选择性控制系统的常见类型

➤ 选择器位于控制器输出端，对控制器输出信号进行选择

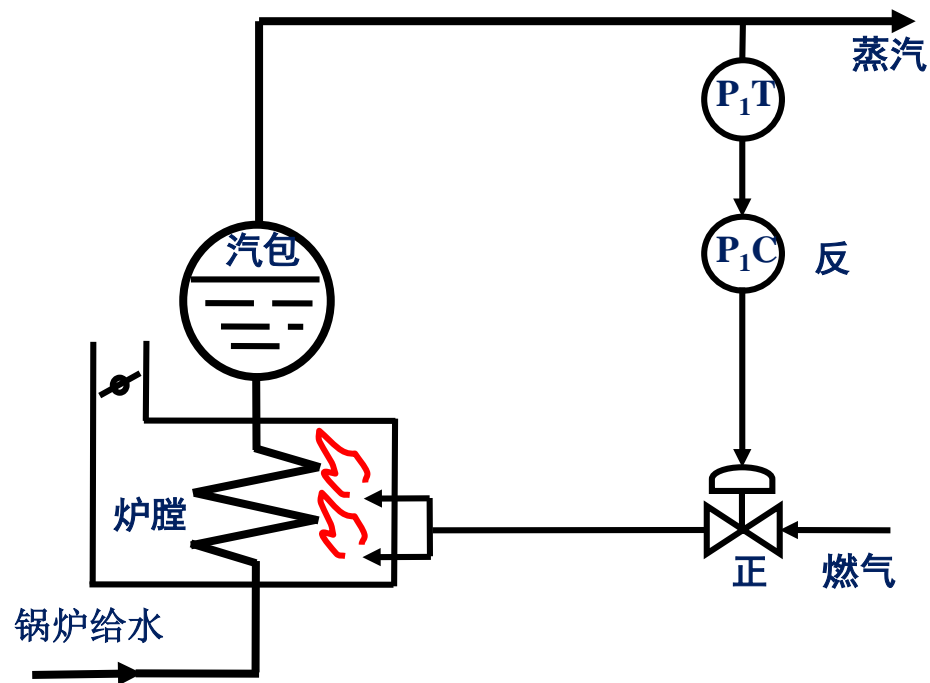


- 生产正常时，正常控制器的输出信号控制调节阀
- 生产工况不正常时，取代控制器对系统进行控制
- 一旦生产状况恢复正常，选择器进行自动切换，重新由正常控制器来控制生产的正常进行

7.5.1 选择性控制系统的常见类型

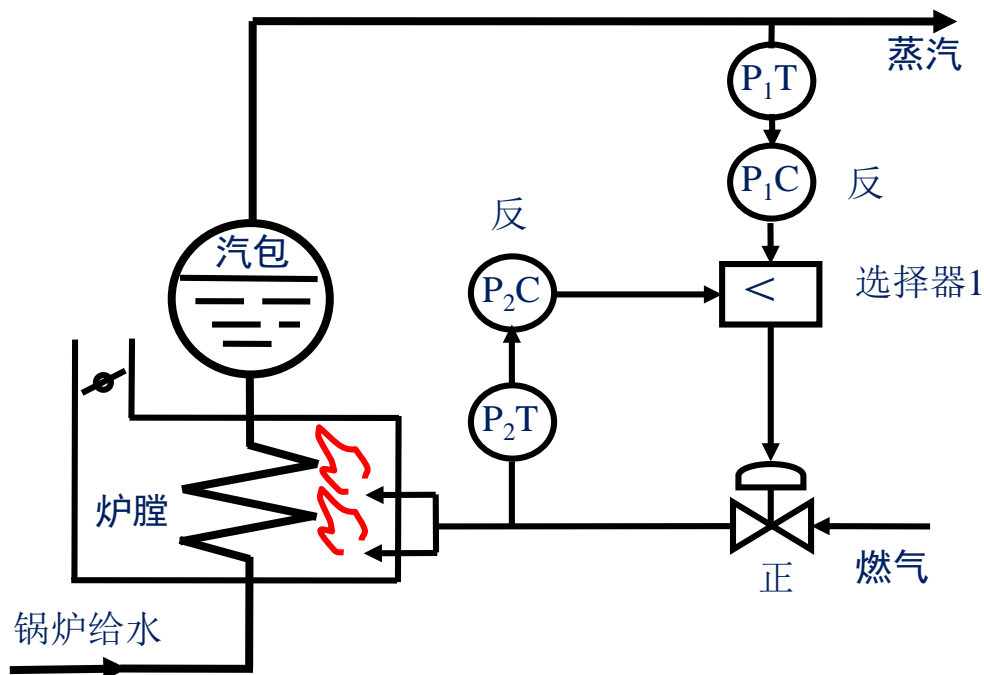
例：锅炉蒸汽压力的控制

- 要求锅炉输出蒸汽压力稳定
- 单回路控制系统控制根据蒸汽出口压力控制燃气量
- 如果蒸汽用量大幅度变化，蒸汽压力控制系统会使燃气阀门开度大幅变化。
- 但煤气压力过高会发生脱火



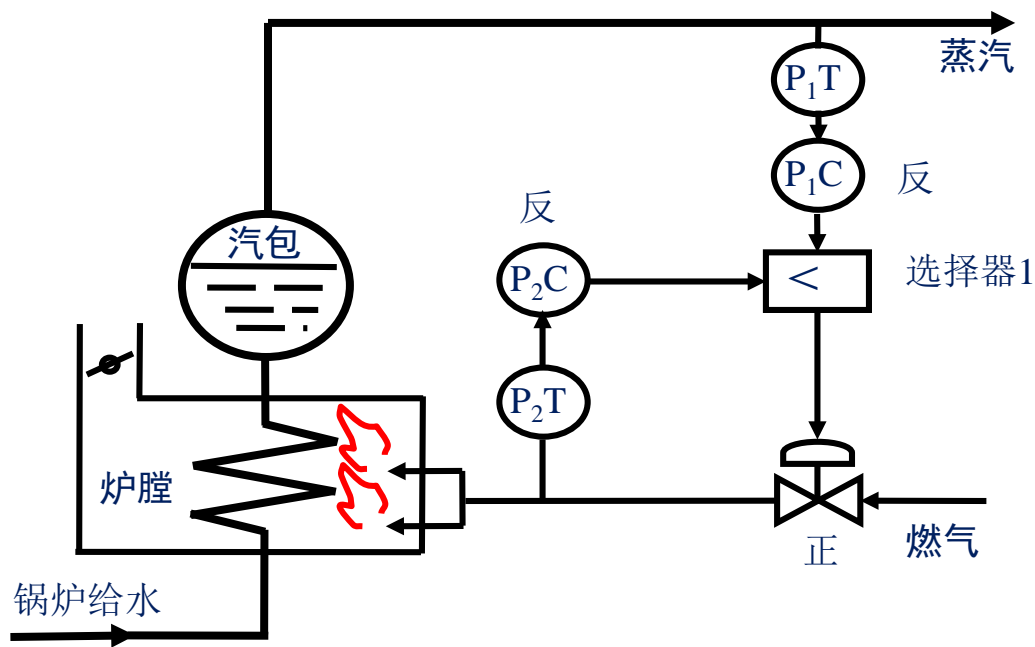
7.5.1 选择性控制系统的常见类型

- 为防止脱火，增加一个燃气高压保护控制回路
- 用 P_2T 测燃气压力， P_2C 的设定值为燃气高压上限值，当燃气压力低于上限值时， P_2C 输出高值信号
- 用低值选择器选择两个控制信号中较低的一个，作为阀门的控制信号



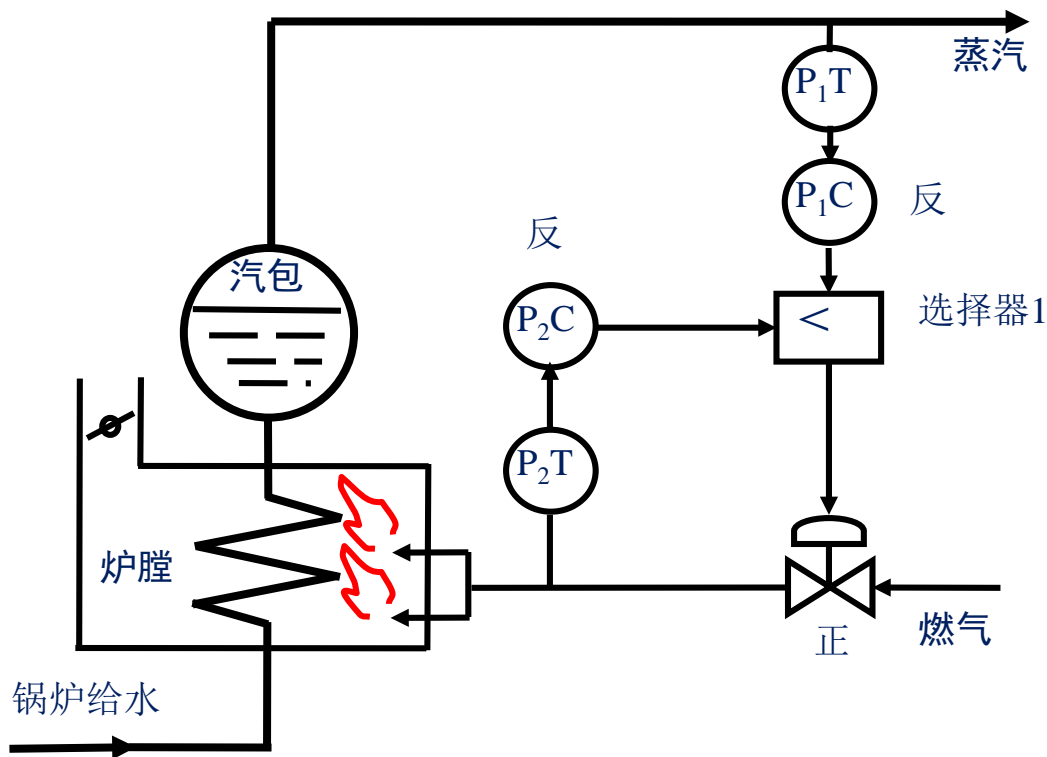
7.5.1 选择性控制系统的常见类型

- P_2C 输出高值时，低值选择器选中 P_1C 作为输出。系统是以蒸汽压力为被控变量的简单控制系统
- 当压力超过 P_2C 给定值时， P_2C 输出低值，低值选择器改选 P_2C 作为输出



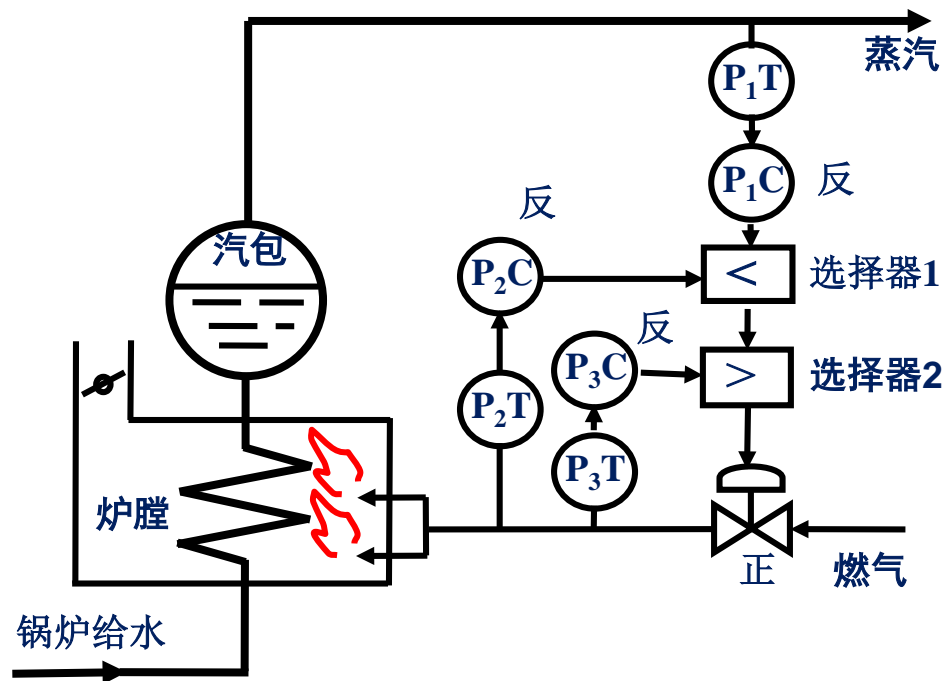
7.5.1 选择性控制系统的常见类型

- 在蒸汽压力定值控制与燃气高压自动保护的选择控制过程中，还可能出
现另一种事故：如果因蒸汽负荷很低，导致燃气流量过低，会出现熄火
现象，也必须加以防止



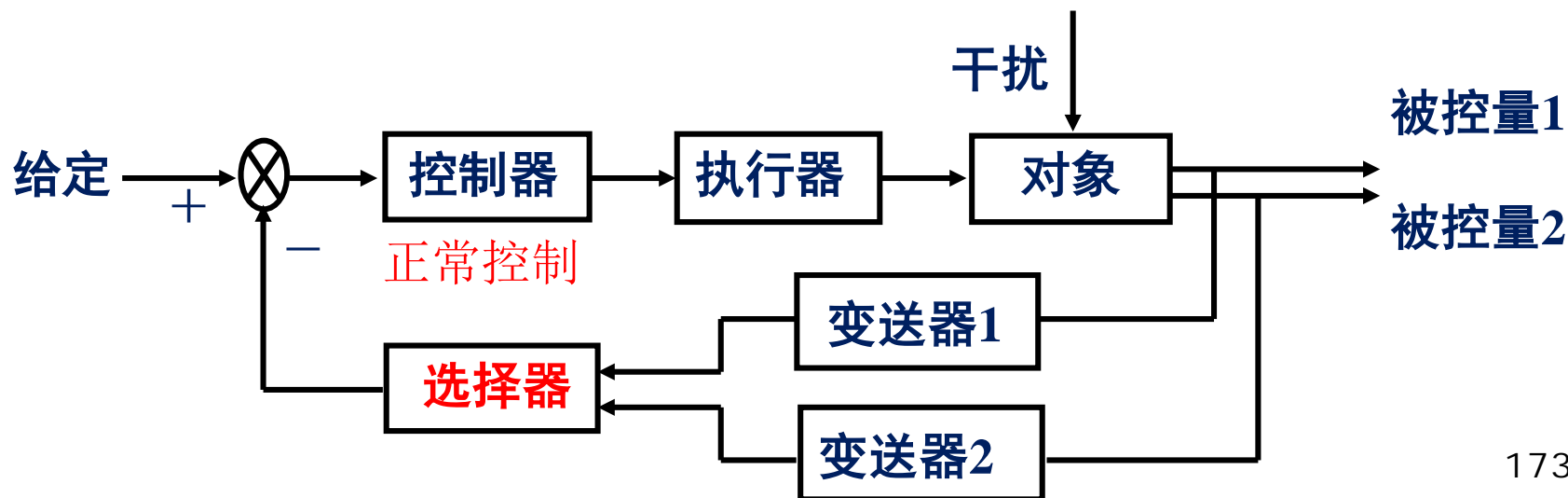
7.5.1 选择性控制系统的常见类型

- 为防止熄火，再增加一个燃气低压保护控制回路 — P_3T 、 P_3C 。 P_3C 的设定值为燃气压力下限值，当燃气压力低于下限值时， P_3C 输出高值信号，被高值选择器选中
- 当燃气压力高于下限值时， P_3C 输出低值信号，不会被高值选择器选中



7.5.1 选择性控制系统的常见类型

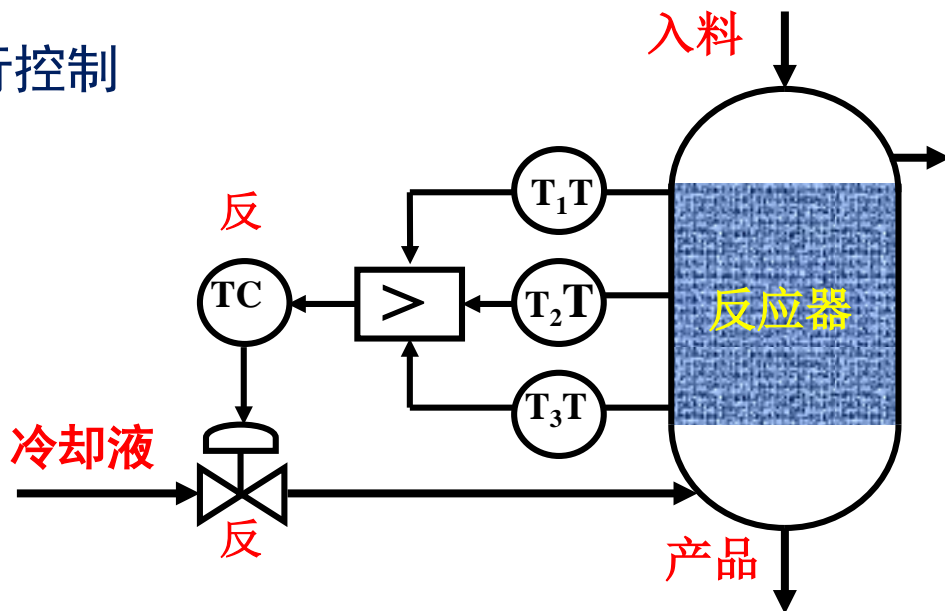
- 选择器位于控制器之前，对变送器输出信号进行选择系统
 - 具有多个变送器，且变送器共用一个选择器
 - 选择器装在控制器之前，对变送器输出信号进行选择
 - 用于几个被控变量的给定值、控制规律都一样的场合
 - 目的在于选出最高或者最低的测量值或最可靠的测量值



7.5.1 选择性控制系统的常见类型

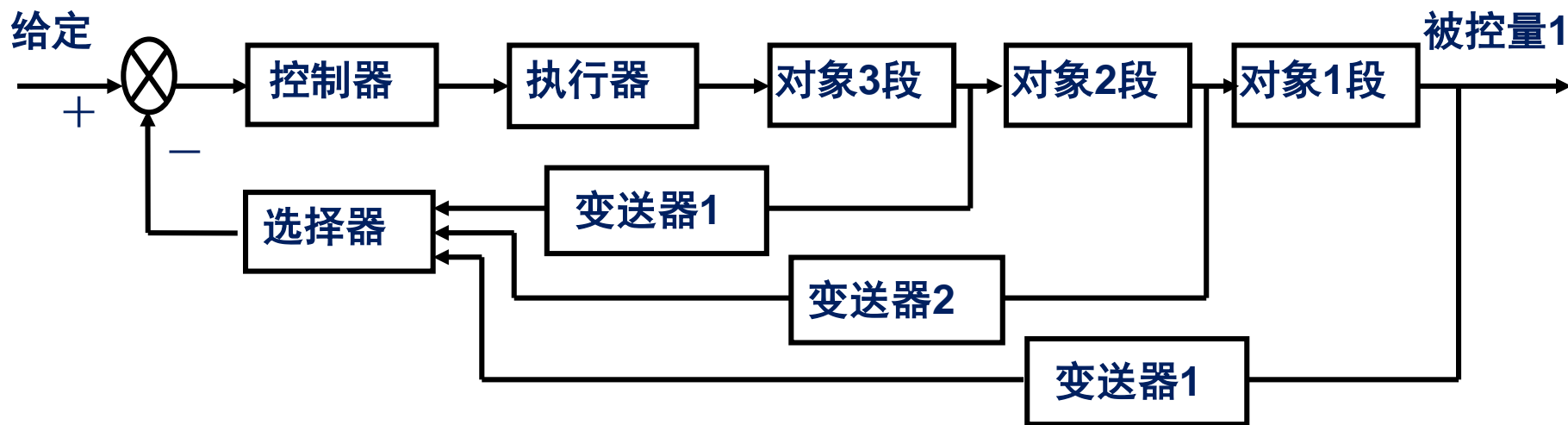
例：固定床反应器中热点温度的控制

- ❑ 反应器内固定床上装有催化剂以加速反应，而反应产生的热量若不及时被冷却液带走，温度过高会烧坏催化剂。因催化剂的老化、变质和流动等原因，固定床不同位置的温度可能不同
- ❑ 在不同位置分别安装温度传感器，由选择器选出热点温度信号，送入控制器进行控制



7.5.1 选择性控制系统的常见类型

- 在此设备中，三点被控温度是串联关系。因此，控制系统方框图中对象特性可等效为串联的三段



7.5.2 选择性控制系统的设计

- 选择性控制系统的设计包括：
 - 控制器控制规律及正反作用方式的确定
 - 选择器的选型
 - 系统参数整定

7.5.2 选择性控制系统的设计

➤ 控制器控制规律选择及参数整定

- 正常调节器，由于有较高的控制精度要求，可用PI调节或PID调节
- 取代调节器，一般只要求其迅速发挥保护作用，可用P调节
- 进行参数整定时，二者分别工作，可以按照单回路系统的参数整定方法进行整定
- 取代控制器运行时，比例度应该整定的小一点；采用积分控制，积分控制要弱一点

7.5.2 选择性控制系统的设计

- 总是有调节器处于开环待命状态，由于设定值与实际值之间存在偏差，只要有积分作用就会使控制器的输出到达最大或最小，产生积分饱和现象
- 克服积分饱和的方法
 - 外反馈法
 - 积分切除法
 - 限幅法

7.5.2 选择性控制系统的设计

➤ 选择器的类型

- 高值选择器：选择高值信号通过
- 低值选择器：选择低值信号通过
- 根据调节阀的选用原则，确定调节阀的气开、气关形式
- 确定控制器的正、反作用方式
- 根据生产处于不正常情况时，取代控制器的输出信号为高值或低值来确定选择器的类型。
- 如果取代控制器的输出信号为高值，则选用高值选择器；如果取代控制器的输出信号为低值，则选用低值选择器

第7章 复杂过程控制系统

- 7.1 串级控制系统
- 7.2 前馈控制系统
- 7.3 大滞后过程控制系统
- 7.4 比值控制系统
- 7.5 选择性控制系统
- 7.6 分程控制系统
- 7.7 本章小结

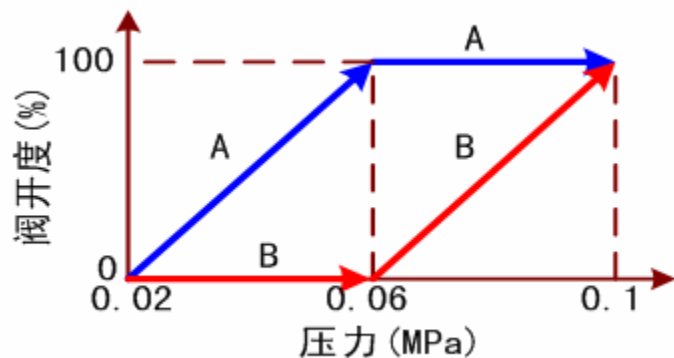
7.6.1 分程控制系统的基本原理

- 将控制器输出信号分段，控制两个或多个分程动作控制阀，使每个阀根据要求，在控制器输出的某段信号范围内动作
- 扩大系统的控制范围，提高系统的控制能力
- 分程控制系统根据调节阀气开，气关形式和分程信号区段不同，可以划分为调节阀同相动作和调节阀异相动作两类

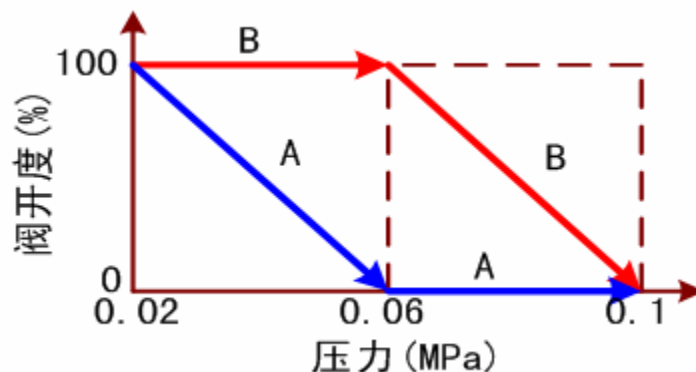
7.6.1 分程控制系统的基本原理

1、调节阀同相动作

- 同相分程控制是指随着调节阀输入信号的增加或减小，调节阀的开度均逐渐增大或减小，即系统中的调节阀同为气开式或气关式



调节阀同为气开式

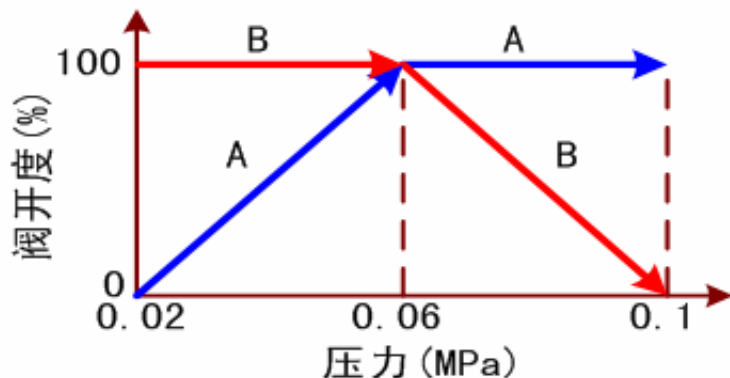


调节阀同为气关式

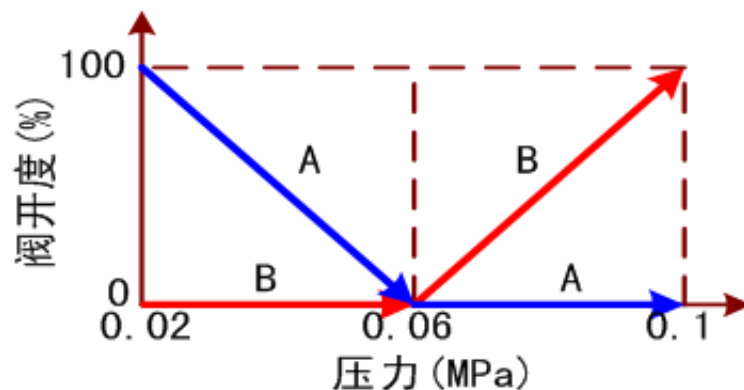
7.6.1 分程控制系统的基本原理

2、调节阀异相动作

- 异相分程控制是指随着调节阀输入信号的增加或减小，调节阀的开度按一个逐渐增大，另一个逐渐减小的方向动作，即系统中的调节阀一个为气开式，一个为气关式



阀A为气开式，阀B为气关式



阀A为气关式，阀B为气开式

7.6.2 分程控制系统的设计

➤ 分程点的确定

- ❑ 分程点是由一个调节阀动作转到另一个调节阀动作的交替点。
- ❑ 分程点的个数、取值等要根据工艺要求确定。
- ❑ 为保证在分程点处的流量特性平滑，需认真选择调节阀的流量特性，以保证系统具有较好的控制效果。

➤ 调节阀选择

- ❑ 如果调节阀放大系数不同，会在分程点处引起流量特性的突变
- ❑ 可以采用分程信号重叠法解决这个问题

7.6.2 分程控制系统的设计

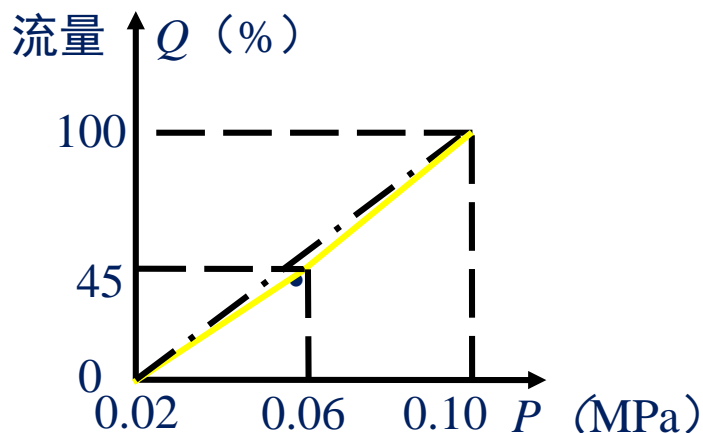
➤ 分程信号重叠法

- 首先选择流量特性合适的调节阀，使两个调节阀的流量特性衔接成直线
- 然后将两个调节阀在分程点附近重叠一段控制器的输出信号，从而使小阀在全开以前，大阀就开始动作，保证两个调节阀的平滑衔接

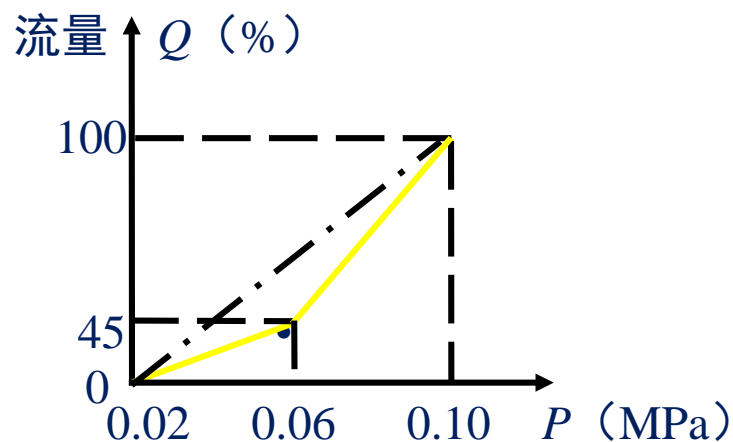


7.6.2 分程控制系统的设计

➤ 若两个调节阀都用直线特性，组合后总流量特性有下列两种情况：



(a) 二阀特性比较接近

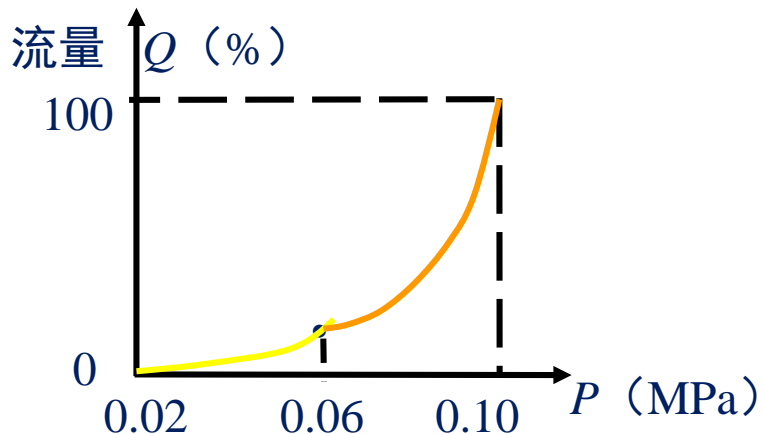


(b) 二阀特性差距较大

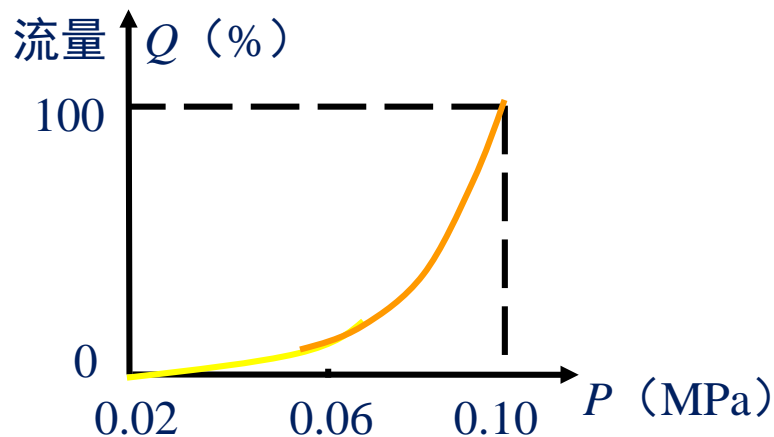
如果两个调节阀的增益差距较大，组合后的总流量特性有突变点，会影响调节品质

7.6.2 分程控制系统的设计

- 如果调节阀是对数流量特性，其总流量特性衔接处必有突变点
- 通过两个调节阀分程信号部分重迭的办法，使调节阀流量特性实现平滑过渡，即将两个阀的工作范围扩大，形成一段重迭区



(a) 分程信号不重叠

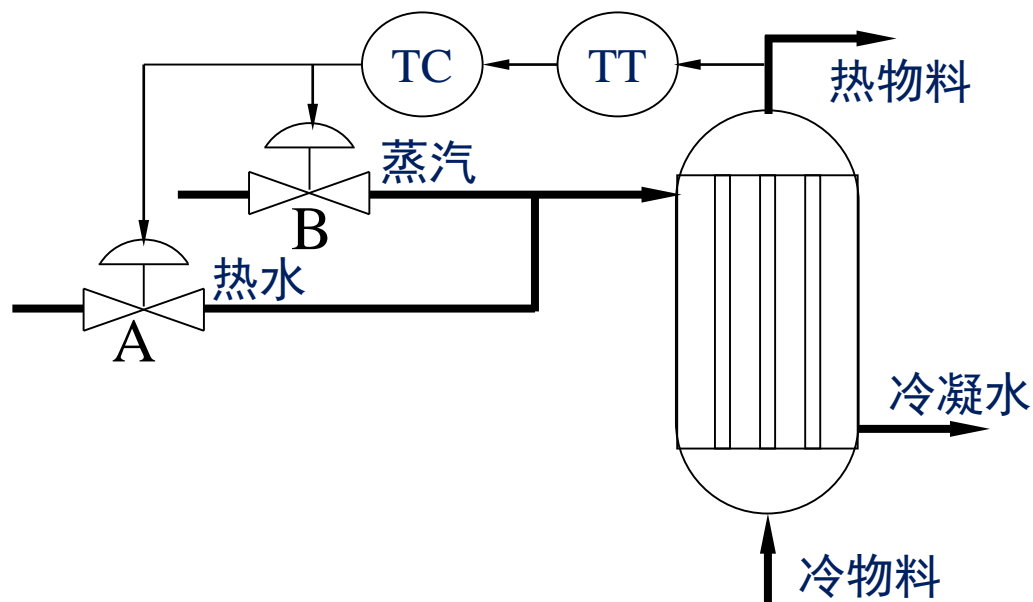


(b) 分程信号重叠

7.6.3 分程控制系统的应用

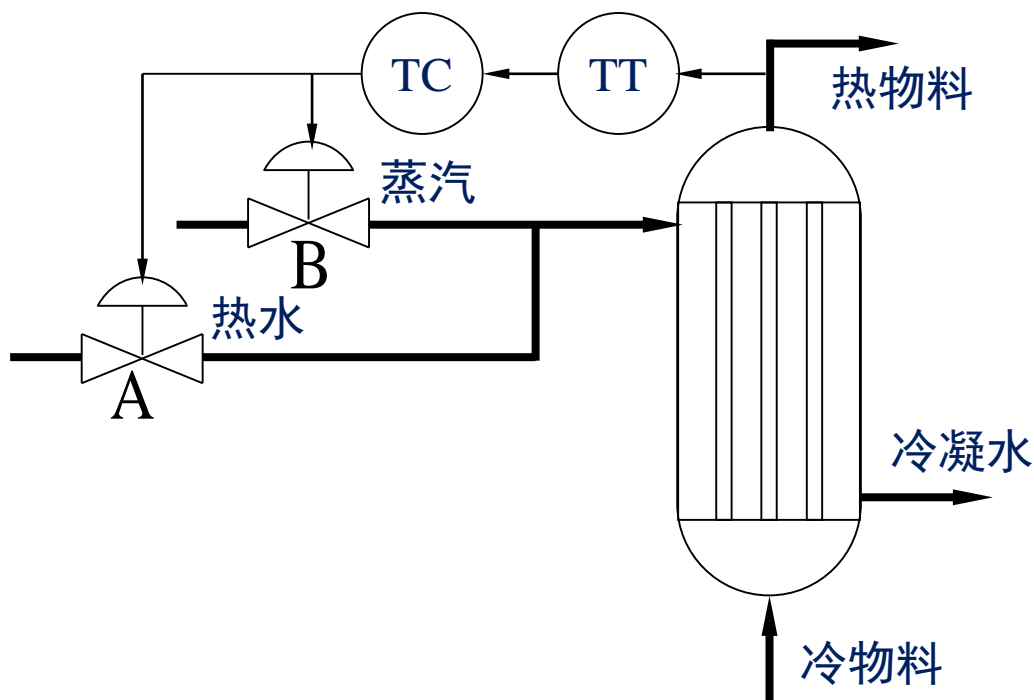
➤ 节能控制

- 热交换过程中，冷物料通过通过热交换器用热水对其进行加热，当热水不能满足其要求时，需要同时采用蒸汽进行加热。由于热水采用工业废水，所以可以节约能源



7.6.3 分程控制系统的应用

- 采用气开阀，控制器为反作用。正常情况下，调节器输出信号使阀A工作（分程点以下），阀B关闭。当干扰特别大时，使出口物料温度下降太大时，阀A全开（分程点以上），阀B打开，蒸汽助力。



7.6.3 分程控制系统的应用

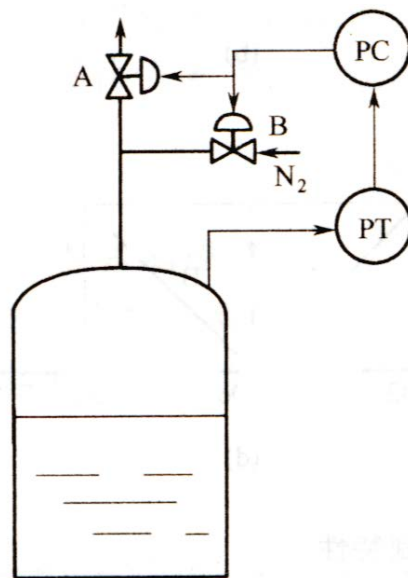
2. 用于扩大调节阀的可调范围

- 采用分程控制，将流通能力不同、可调范围相同的两个调节阀当作一个调节阀使用，扩大可调范围，满足工艺要求
- 例：废水处理的PH值控制
 - 工艺流程
 - 要求调节阀的可调范围较大，废液流量变化达到4~5倍
 - 假设分程控制中两个调节阀的最小流通能力分别为 $C_{1min} = 0.14$ 和 $C_{2min} = 3.5$ ，可调范围分别为 $R_1 = R_2 = 30$ ，调节阀的最大流通能力分别为 $C_{1max} = 4.2$ 和 $C_{2max} = 105$
 - 若合并为一个调节阀使用，则最小流通能力为 $C_{min} = 0.14$ ，最大流通能力为 $C_{max} = 109.2$ ，则可调范围为 $R = (C_{min} + C_{max}) / C_{min} = 781$
 - 可见，分程控制可调范围相对单个调节阀扩大了26倍

7.6.3 分程控制系统的应用

3. 用于保证生产过程的安全、稳定

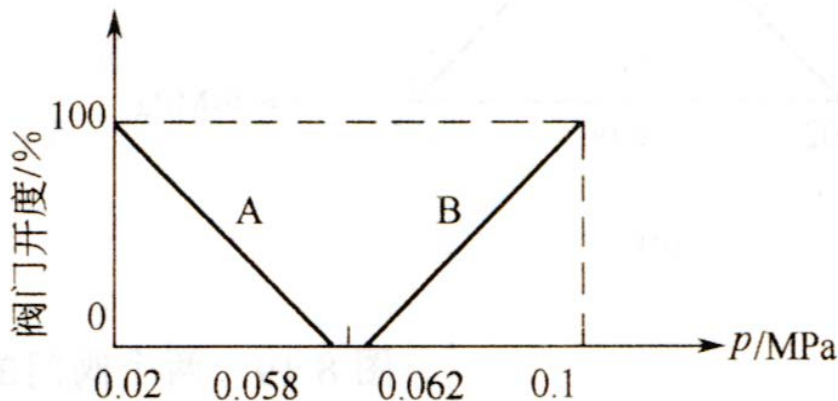
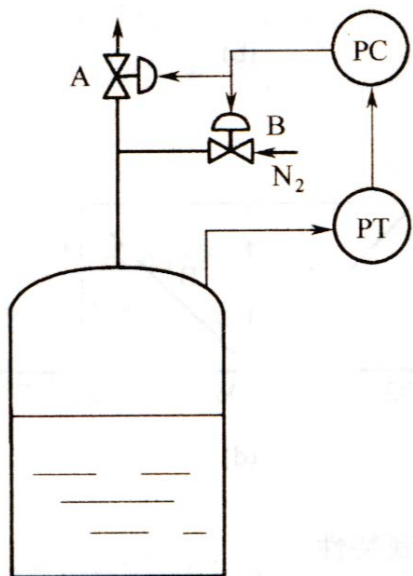
- 工业生产过程中, 有时需要使用不同的控制方式, 如图所示的例子
- 封氮: 有些油品储罐的顶部需要填充氮气, 以隔绝油品与空气中氧气的作用
- 储罐顶部充满氮气, 保持微正压。随着液位变化, 顶部压力会变化
 - 液位升高, 压力增加
 - 液位下降, 压力下降
- 压力增加多或下降多都是不允许的



7.6.3 分程控制系统的应用

➤ 封氮分程控制过程:

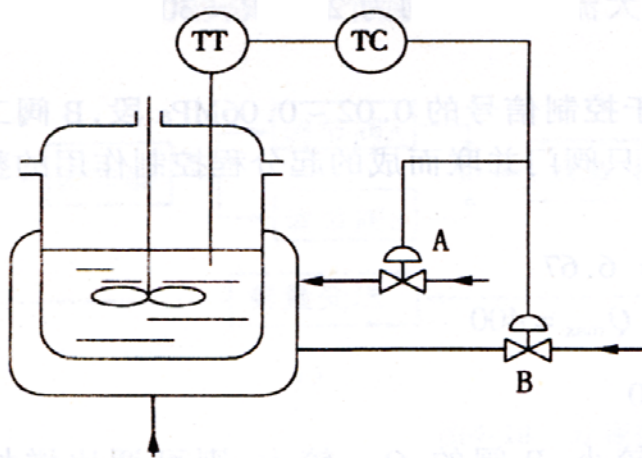
- 液位上升时, 阀门B关闭, 阀门A打开, 排出氮气维持压力不变
- 液位下降时, 阀门B打开, 阀门A关闭, 补充氮气维持压力不变
- 液位在小范围波动时, 压力也在小范围波动, 控制系统不动作, 即不补充也不排出氮气, 称为安全区间。可以避免阀门频繁动作, 保持系统稳定。



7.6.3 分程控制系统的应用

4. 用于控制两种不同的介质

- 对于放热化学反应过程，在反应的初始阶段，需要对物料加热，以启动反应过程
- 由于是放热反应，反应器中的热量在不断累积，所以需要补偿的热量在逐步减小，当放出的热量超过反应过程需要的热量后，不仅不能再补充热量，反而需要冷却反应器，以移走反应过程产生的多余热量。



7.6.3 分程控制系统的应用

- ❑ 为避免气源中断造成反应温度过高，蒸汽阀选气开式、冷水阀选气关式
- ❑ 温度控制取反作用
- ❑ 当温度偏高时，先关小蒸汽再开大冷水；温度控制器为反作用，温度升高，输出信号下降，信号下降时先关小蒸汽，再开大冷水
- ❑ 蒸汽阀的分程为0.06~0.1MPa、冷水0.02~0.06MPa

