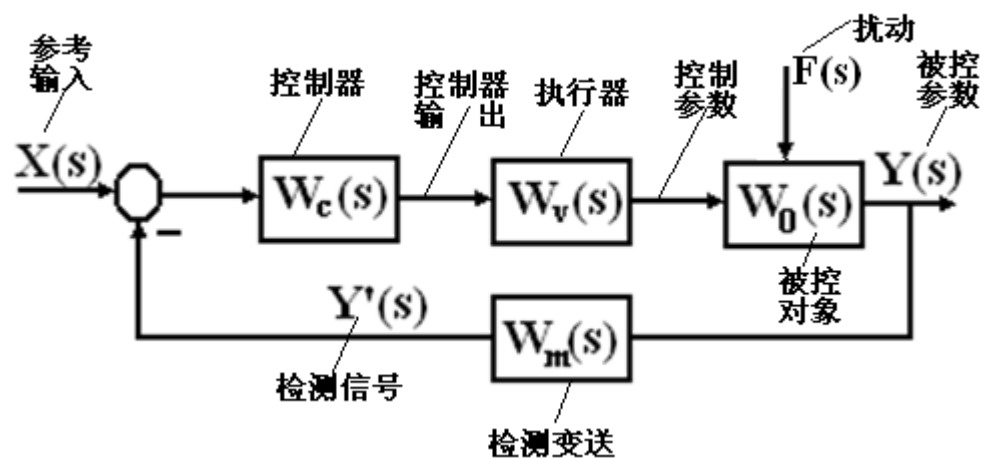
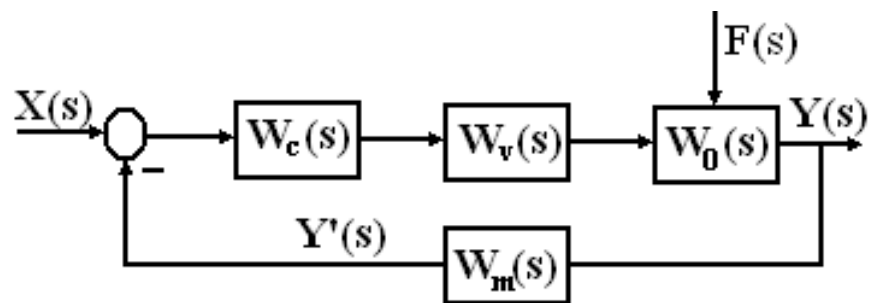
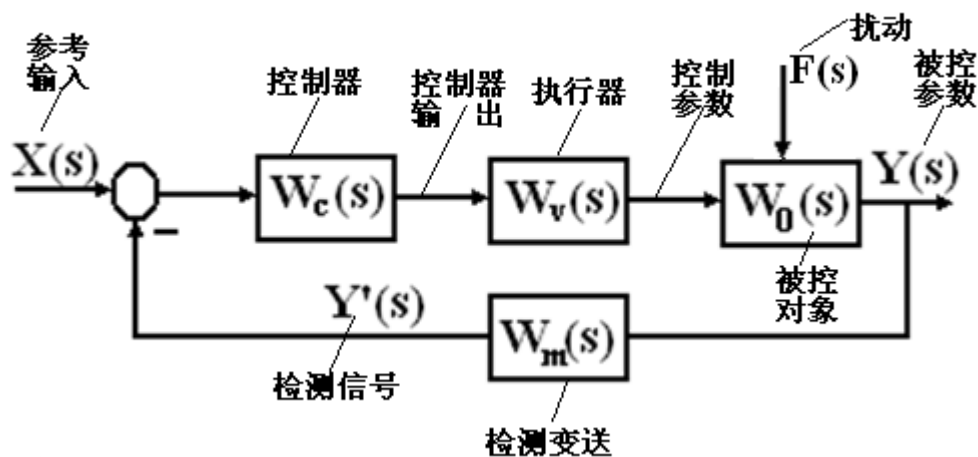


第五章 单回路控制系统设计







第二章建立数学模型

—— $W_0(s)$

确定被控参数和控制参数

第三章调节器

—— $W_c(s)$ 特点

第四章执行器

—— $W_v(s)$ 如何选择

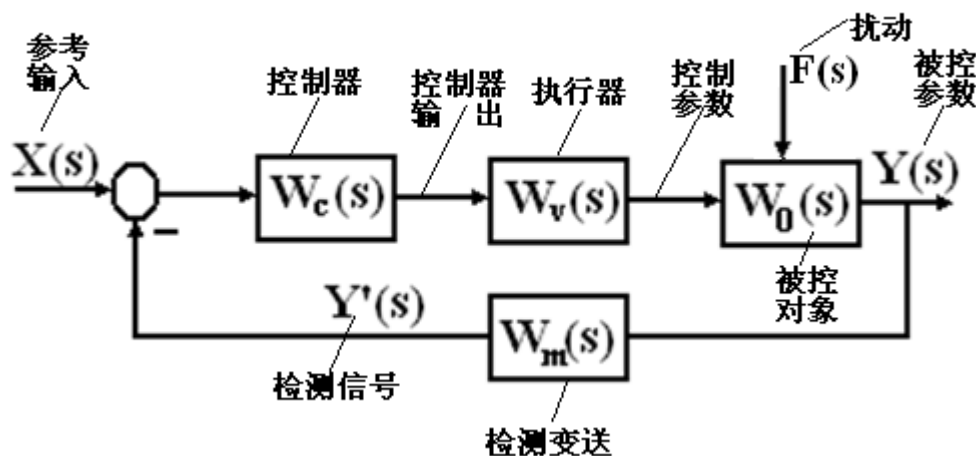
本章内容就是将这个系统建立起来，每个环节确定下来，运行起来。



5.1 单回路控制系统设计的概述

一、什么是单回路控制系统

只有一个被控参数（检测变送），一个控制参数（执行器）、一个控制器的反馈控制系统。



$W_c(s)$ —— 控制器（调节器）

$W_0(s)$ —— 被控对象

$W_v(s)$ —— 执行器

$W_m(s)$ —— 检测仪表

二、过程控制系统设计目标

首先有一个设备（被控对象、被控过程），保证这个设备正常运行可能需要提出一个或多个要求。保证设备正常运行的要求称为**生产工艺要求**。

系统设计——从**工程应用**的层面即满足生产工艺要求设计单回路系统。

常见的工艺要求：

保证生产安全性（不能爆炸，烧干，溢出）

保证产品质量

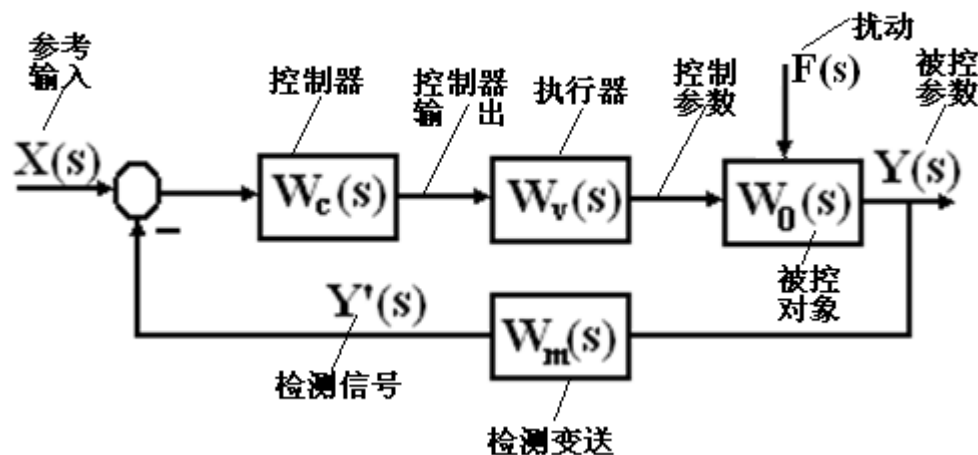
提高产量

经济性（节能）

环境保护（减排）

三、单回路控制系统设计步骤

- 1、确定被控参数
- 2、确定控制参数（扰动）；
- 3、选择检测仪表和执行器；
- 4、控制器选择及参数整定；
- 5、系统投运



四、单回路控制系统分类

常按照被控参数分类

被控参数为温度的——温度控制系统

被控参数为压力的——压力控制系统

被控参数为液位的——液位控制系统

被控参数为流量的——流量控制系统

被控参数为成分的——成分控制系统

被控参数为物性的——物性控制系统

五、设计图的表达方式

方块图是一种抽象的表示方式，用 $W_0(s)$ 可以表示所有的被控对象，工程设计希望在具体设备上建立控制系统。

过程控制系统设计大多数用**原理图**来表示，原理图是在设备流程图的基础上添加控制器、检测单元和执行器（阀门）

原理图符号



温度检测



压力检测



流量检测



液位检测



温度控制器



压力控制器

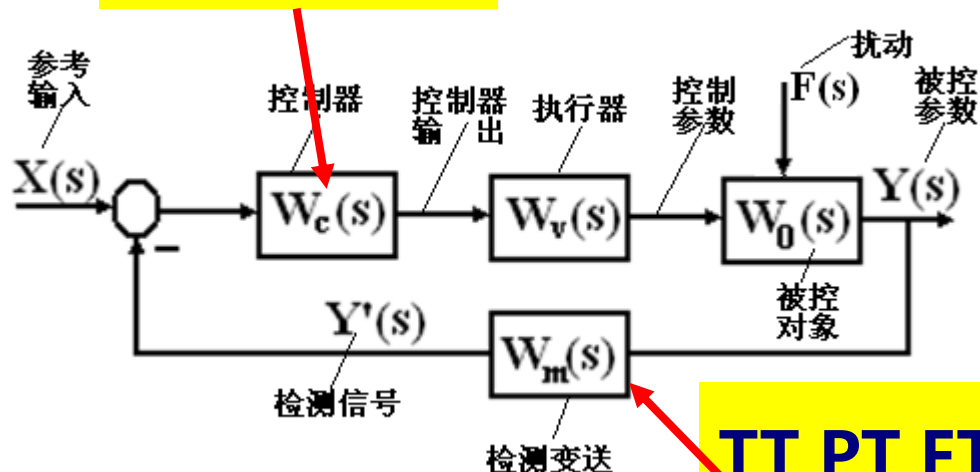


流量控制器

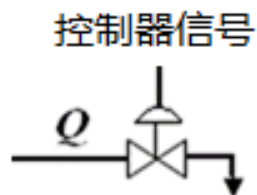


液位控制器

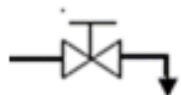
TC PC FC LC



TT PT FT LT

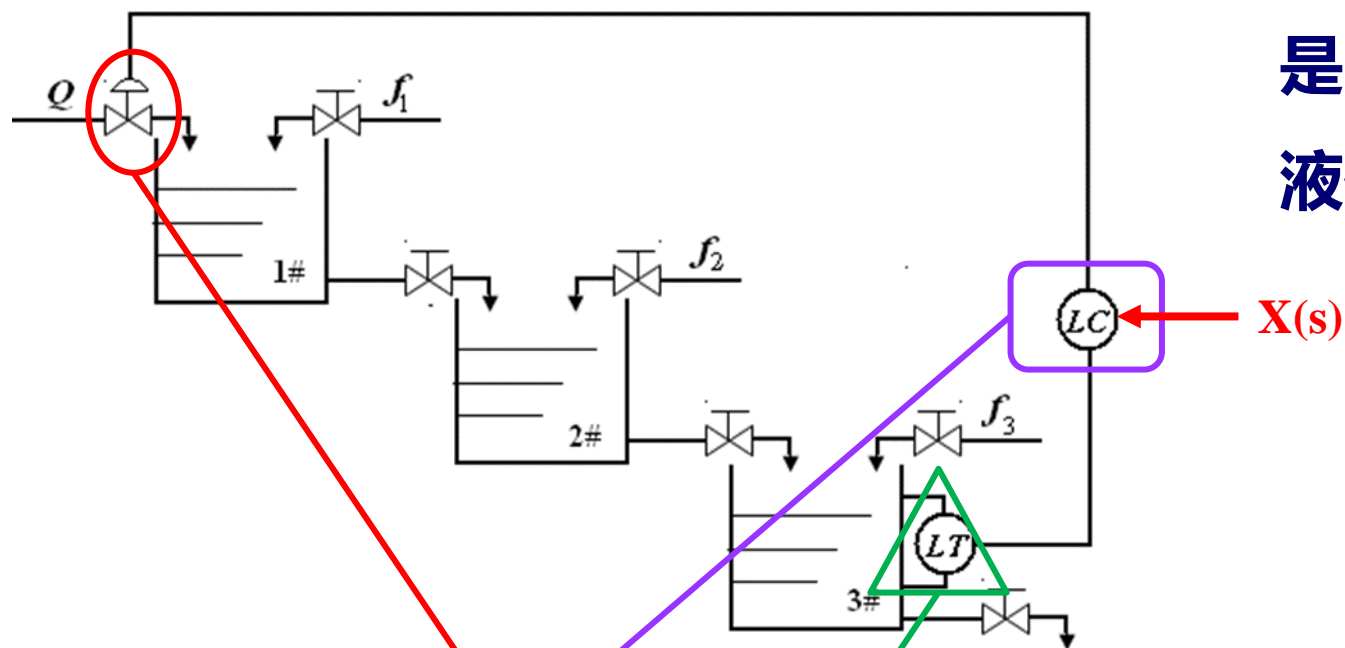


执行器（调节阀），对应的是控制参数

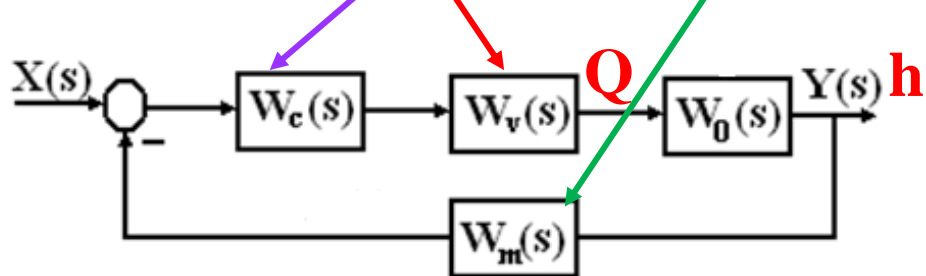


手动阀（类似生活中的水龙头），对应的就是扰动

原理图



方块图



原理图好像没有 $X(s)$

当 $X(s)$ 为常数时可以省略

小结:

- 1、什么是单回路控制系统?**
- 2、会看懂原理图，并根据原理图能画方块图。**

5.2 单回路控制系统设计

5.2.1 被控参数的选择

1、选择直接反映生产工艺要求的并且可直接测量的物理参数作为被控参数。

常见的工艺要求：

保证生产安全性

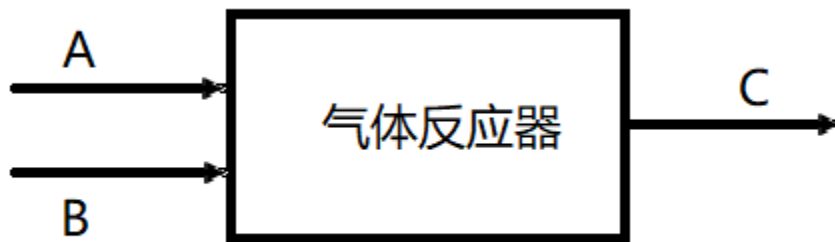
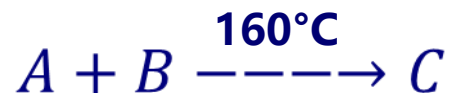
保证产品质量

提高产量

经济性（节能）

环境保护（减排）

例：如有一个气相反应器



解：根据化学反应式可知化学反应在 160°C 才能很好进行
我们需要将反应器的温度控制在 160°C ；

被控参数选择为反应器的温度——建一个温度控制系统

这个选择是为了保证产品的产量。

另一方面如果这是一个封闭的容器还需要考虑什么？

压力——当压力大于一定值这个容器会变形

被控参数选择反应器压力——建立另一个压力控制系统

这个控制系统是为了保证安全性。

例：火力发电厂的锅炉系统

用途：产生的蒸汽是用来推动汽轮机转动的；

那么产生的蒸汽要保证一定的压力

被控参数：蒸汽压力——设计蒸汽压力单回路控制系统

安全角度

汽包水位太高

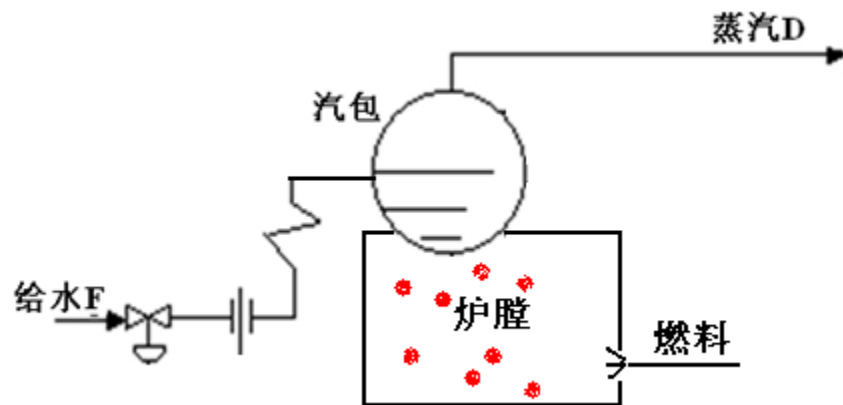
——容易溢出

汽包水位太低

——容易烧干

被控参数：汽包水位——设计汽包水位单回路控制系统

维持同一套设备安全正常运转可能不止一个单回路控制系统。



前面2个例子中的被控参数是温度、压力或液位，这些都是可以直接测量的，所以这类被控参数称为**直接参数**。

2、**间接参数**——当所选直接参数不能在线测量或测量滞后太大；而有些可测量的物理量与直接参数有一单值对应的函数关系；
可选这些物理量作为间接参数。

燃烧经济性角度

生产工艺：对于锅炉的燃烧系统是有燃料加氧气才能完成，燃料多了氧气不够也不行，氧气多了燃料不够也不行

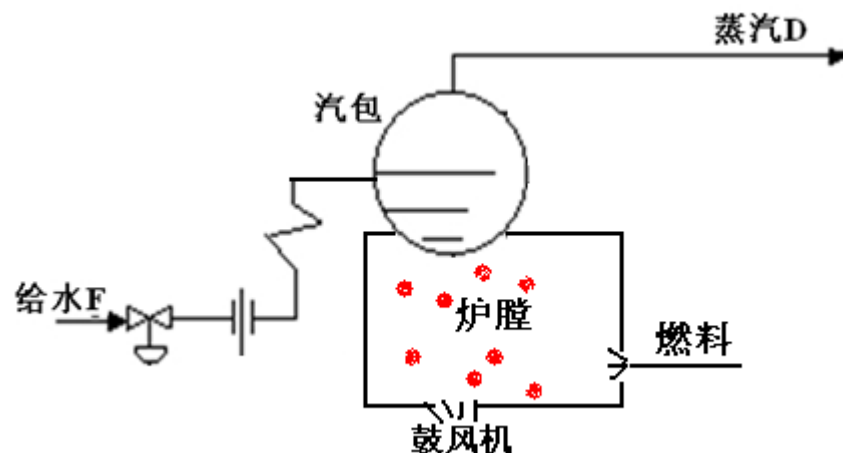
被控参数：炉膛氧气含量2%

——直接参数

氧含量测量仪表氧化锆探头比较容易坏

被控参数：燃料与空气的比值

——间接参数



小结:

单回路控制系统的设计起点: 选择被控参数

选择原则: 被控参数这个物理量要体现生产工艺要求;

常见的被控参数: 液位、温度、压力、流量、成分 (PH值)

直接参数

间接参数

课堂练习:

某工厂生产废水PH值为3.4左右, 国家规定生产废水排放标准为PH值为7.0, 如果建一个单回路控制系统, 被控参数应选择哪个物理量?

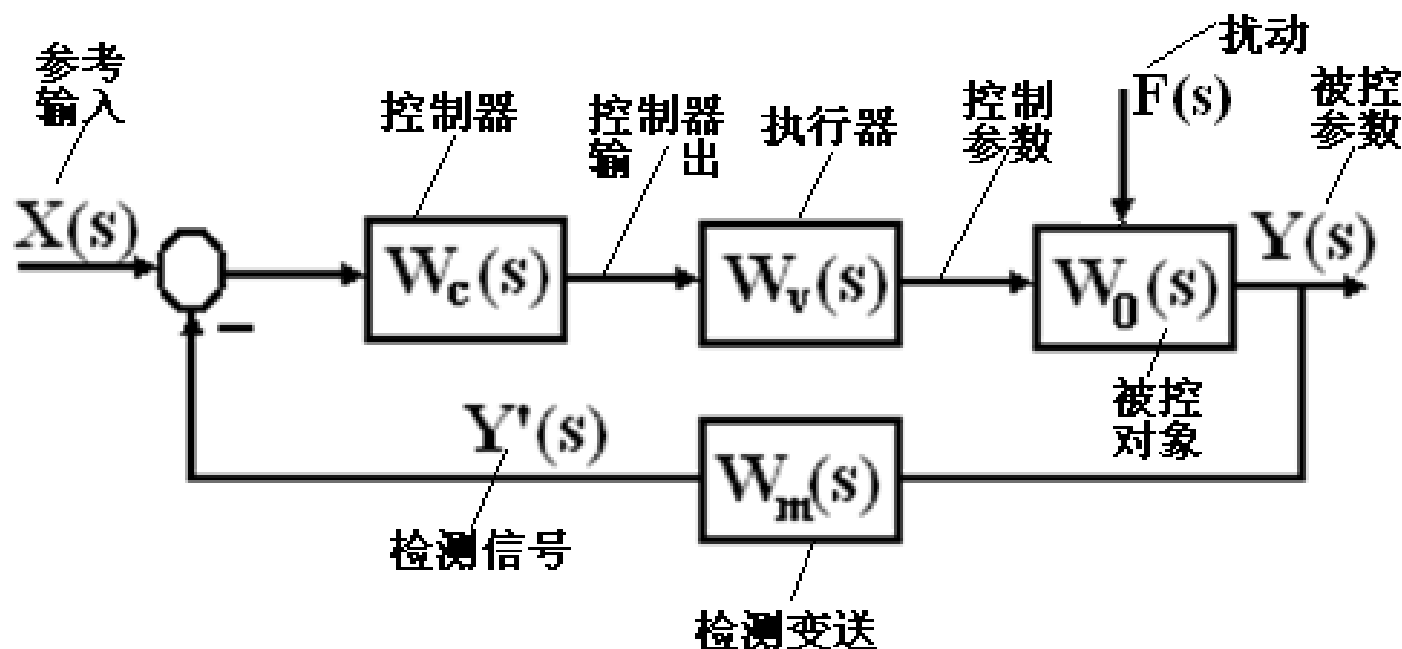
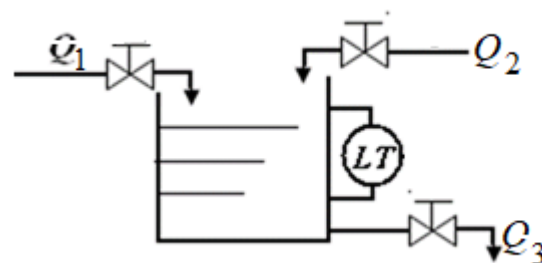
5.2.2 控制参数的选择

控制参数是对被控参数有影响的量；

对被控参数有影响的量不止一个；

Q_1 、 Q_2 、 Q_3 对液位都有影响

单回路控制系统只能有一个控制参数；



在对被控参数有影响的量中选择一个作为控制参数，其他的有影响的量都属于扰动；

控制参数：接受控制器命令变化的

扰动：随机变化的

控制参数选择原则：

- 1、对被控参数有较强的影响力；
- 2、应具有可控性；（能够接受控制器命令变化的）
- 3、工艺操作的合理性和经济性；
- 4、易控性（比较容易获得好的控制系统性能）

前两条必须遵守的原则，后两条可以根据实际工程的具体需求决定。

例：锅炉系统

被控参数：蒸汽压力——蒸汽压力单回路控制系统

对蒸汽压力有影响的量

燃料量和蒸汽流量

控制参数：燃料阀

被控参数：汽包水位——汽包水位单回路控制系统

对汽包水位有影响的量

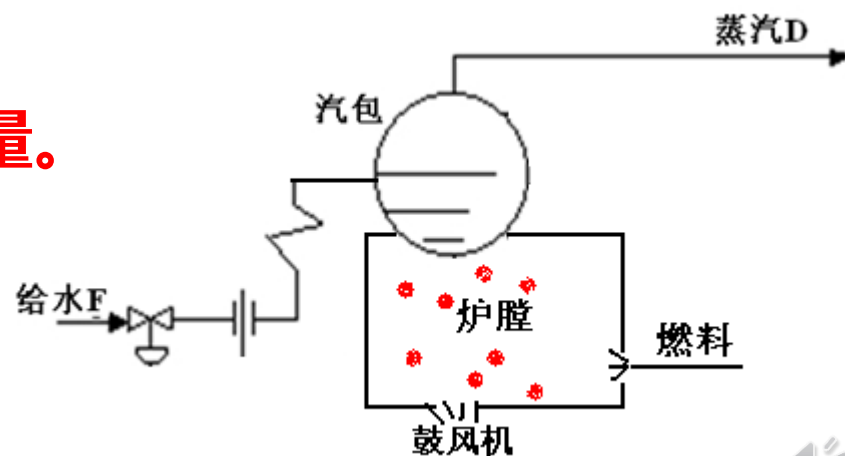
进水阀和蒸汽流量

生产负荷：根据生产需要而改变的量。

生产负荷不能作为控制参数。

这里蒸汽流量是生产负荷

控制参数：进水阀



喷雾式干燥生产奶粉为例

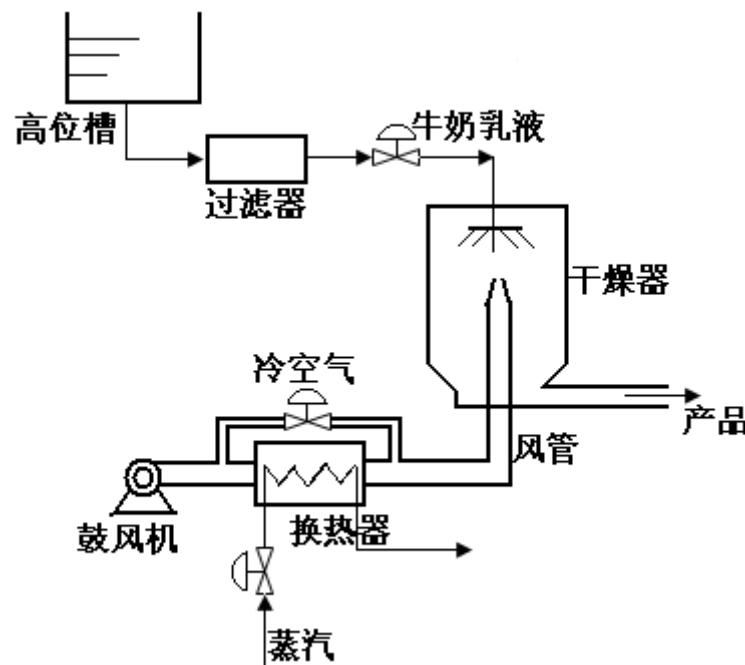
保证奶粉的质量要求奶粉的**含水率低于0.1%**

被控参数 —— 干燥器出口含水率 直接参数

但是含水率的检测属成分检测，测量时间比较长，出口温度和含水率有对应关系，若出口温度 $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，就能保证含水率小于0.1%。

被控参数：干燥器出口温度

间接参数



被控参数：干燥器出口温度

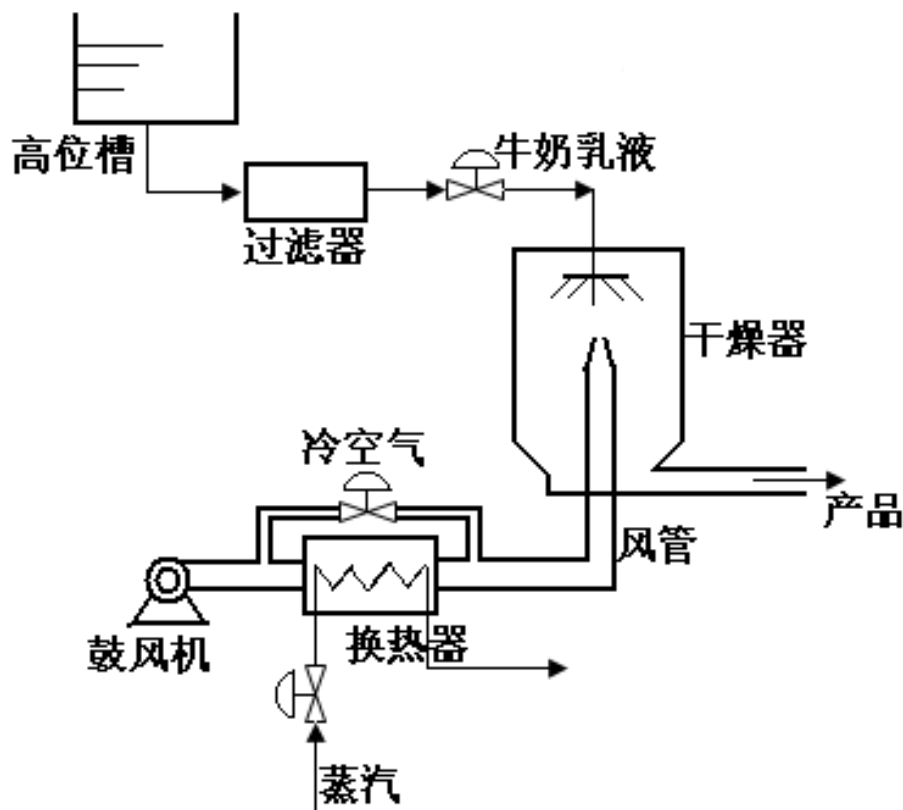
对干燥器出口温度有影响的量：

牛奶乳液流量

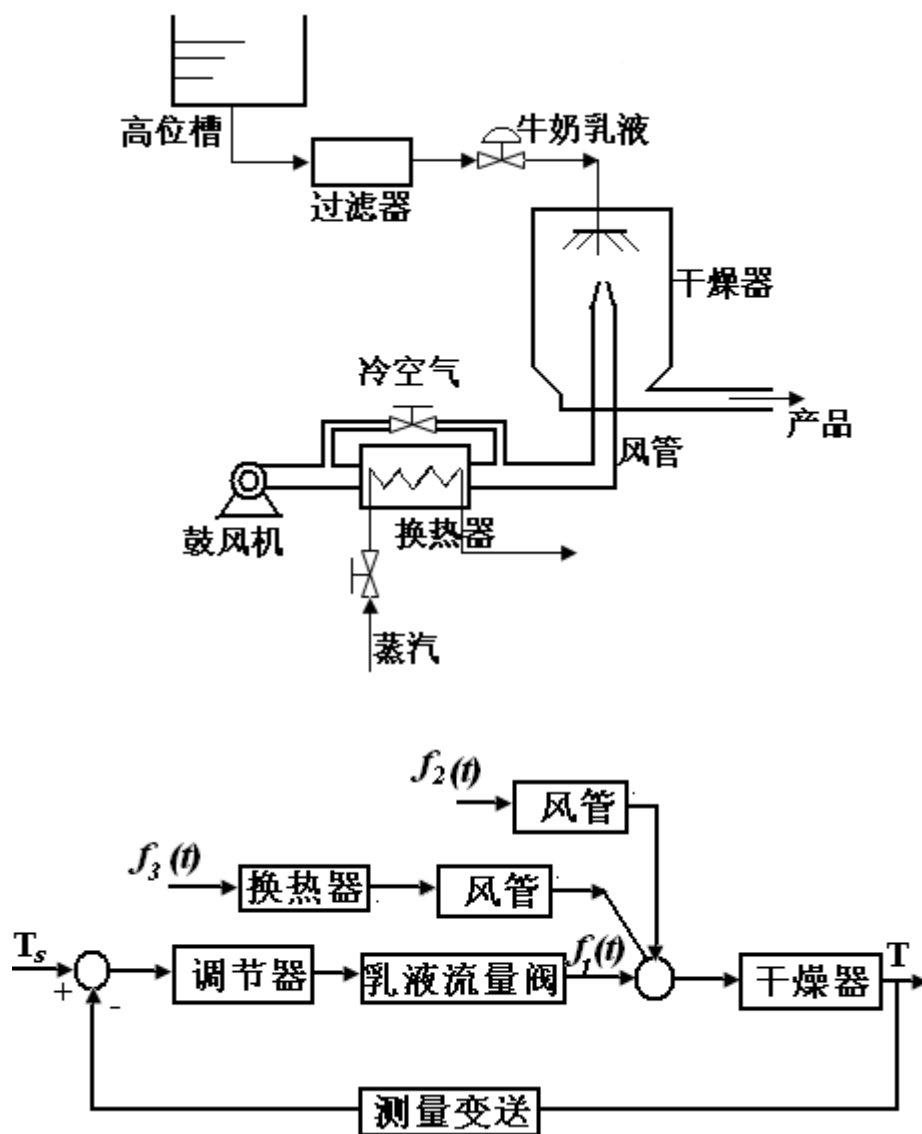
冷空气量

加热蒸汽量

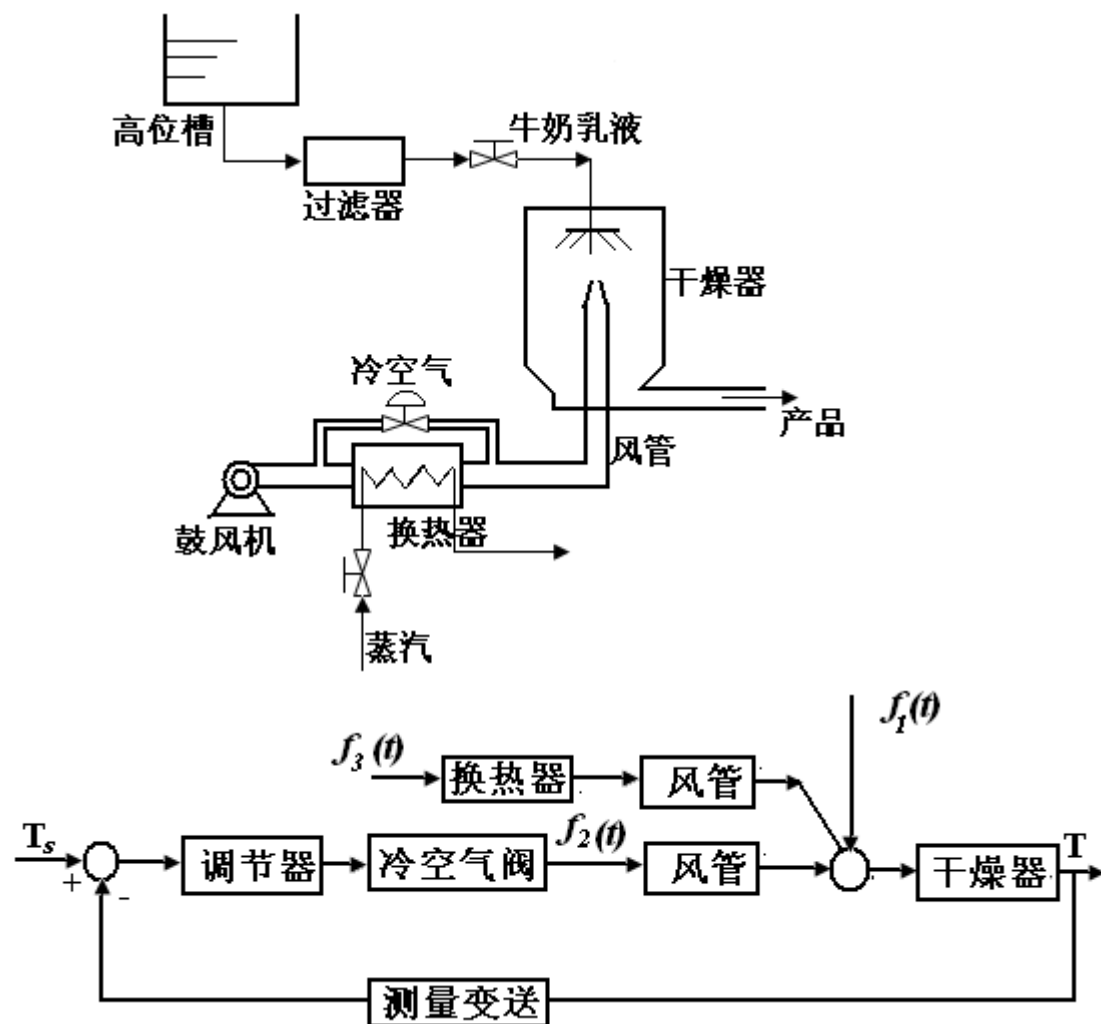
**当选择不同的控制参数
时，方块图是不一样的。**



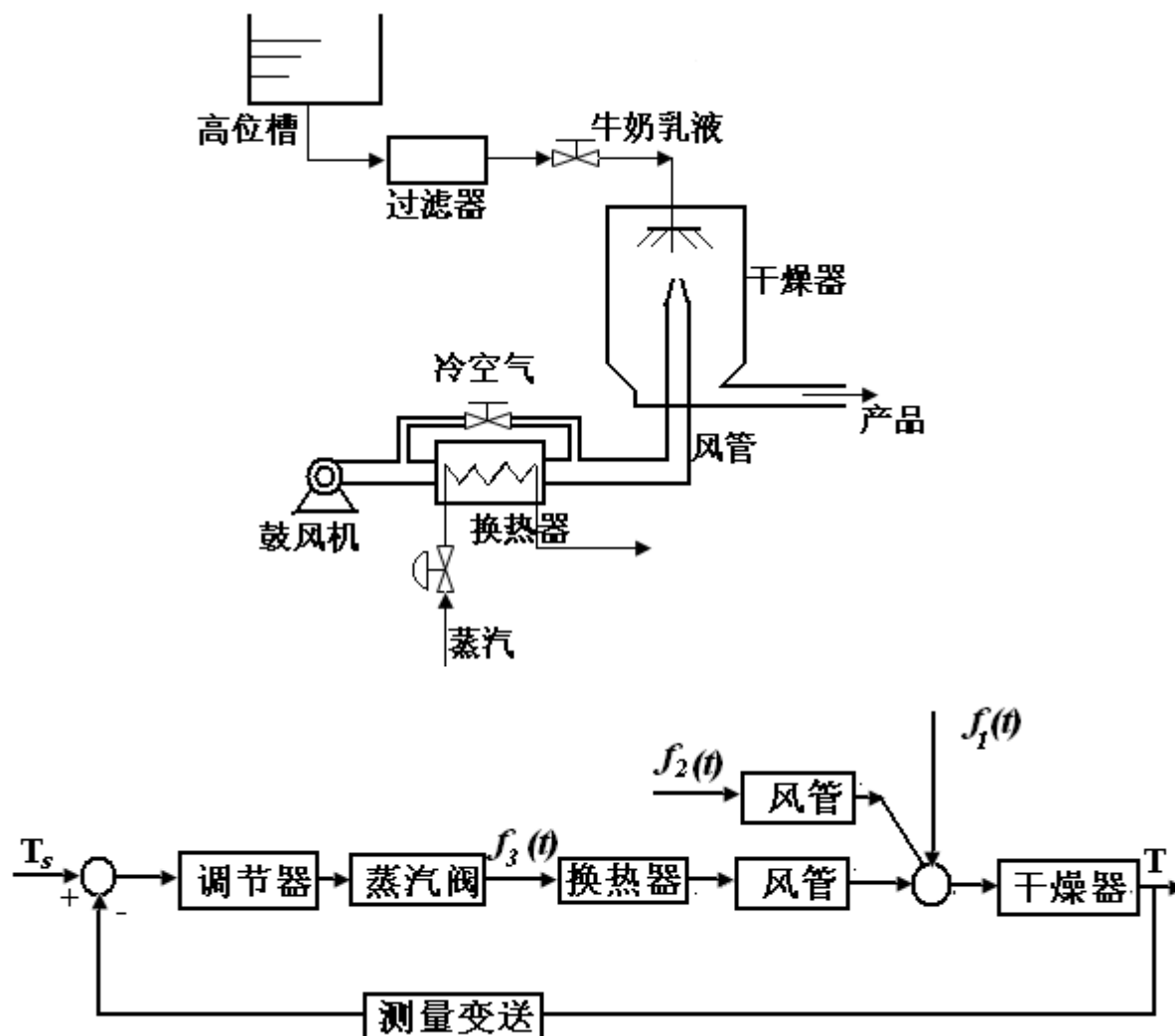
如以牛奶乳液为控制参数，那么冷空气阀和蒸汽阀为手动阀



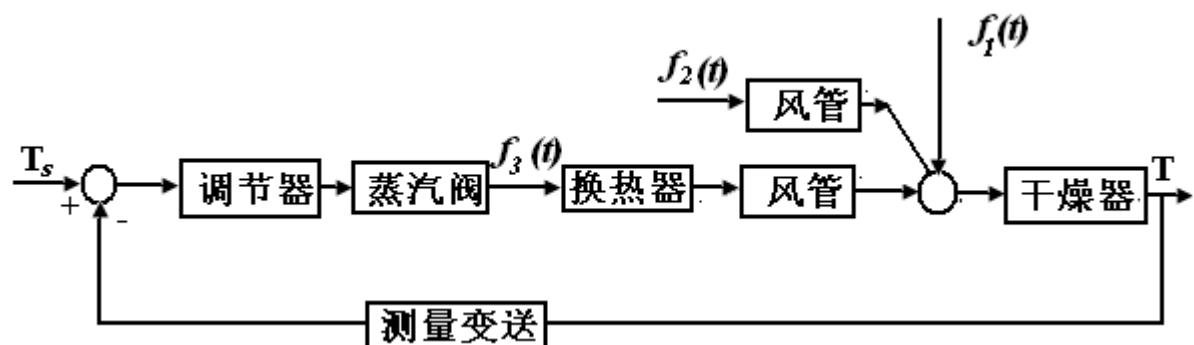
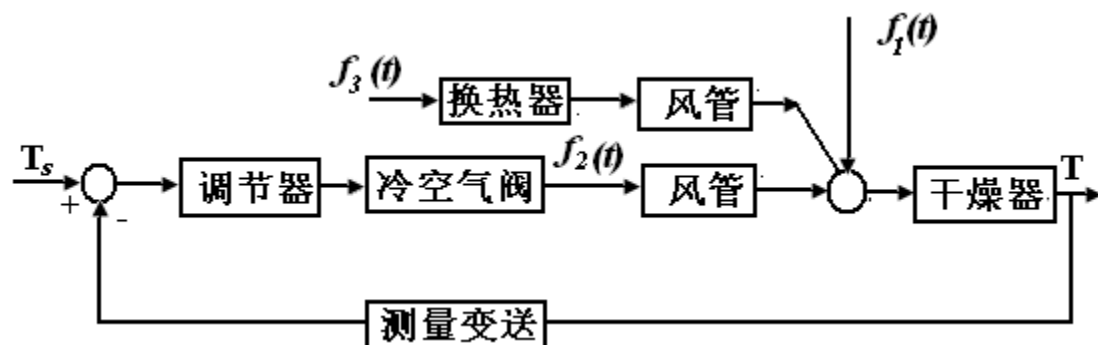
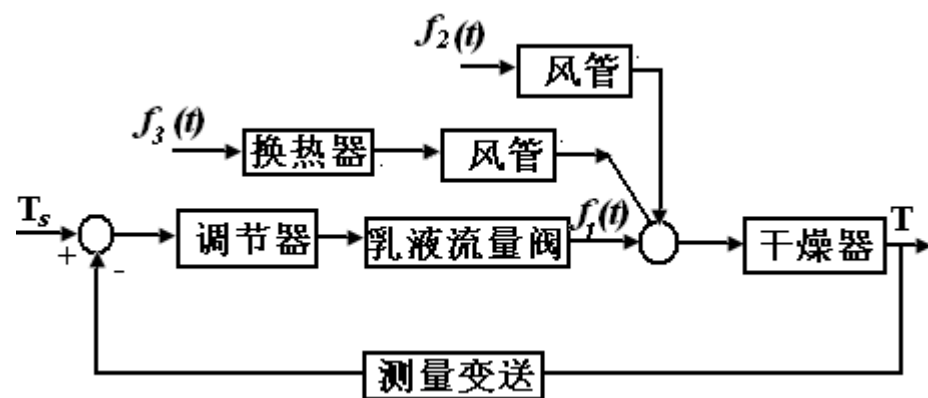
如以风量为控制参数，那么牛奶乳液阀和蒸汽阀为手动阀



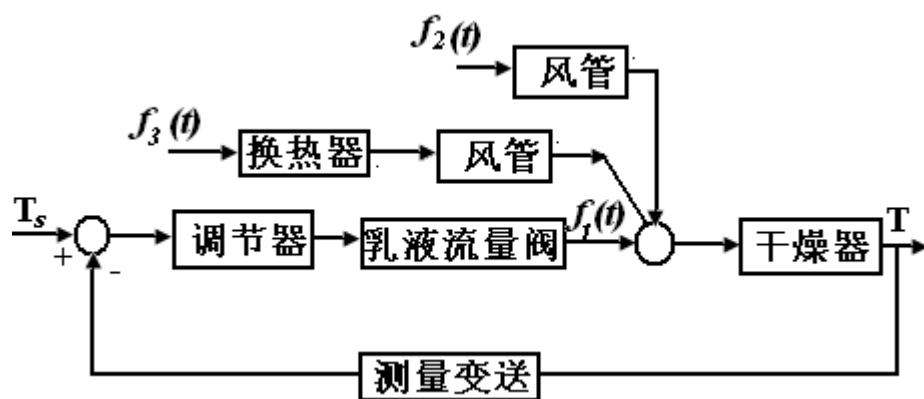
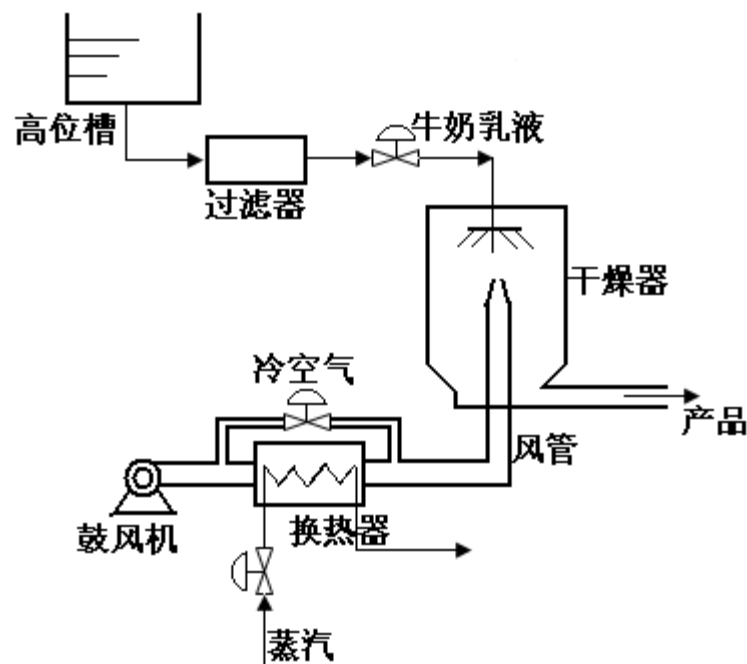
如以蒸汽为控制参数，那么冷空气阀和牛奶乳液阀都是手动阀



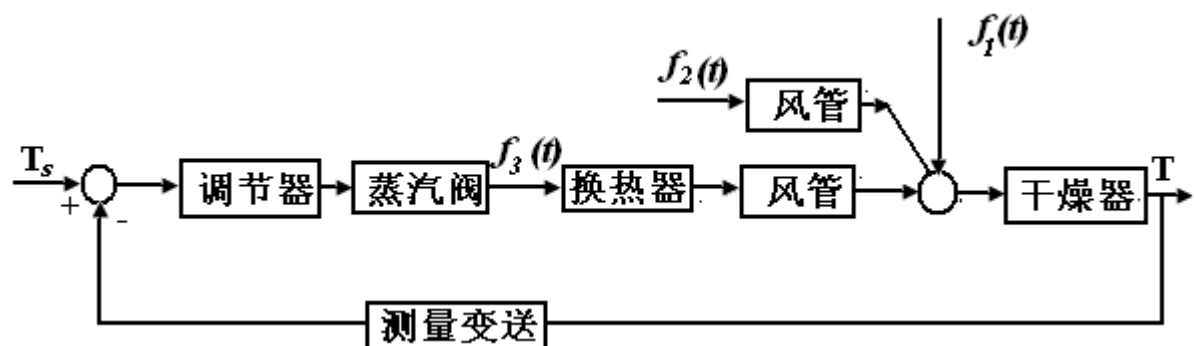
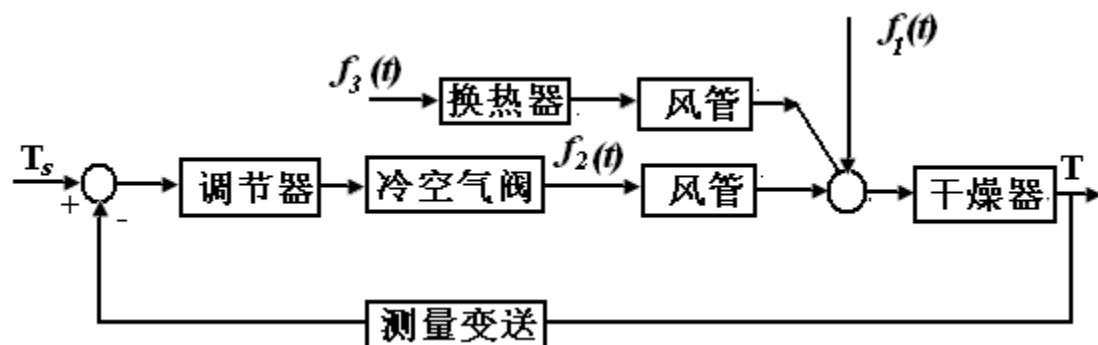
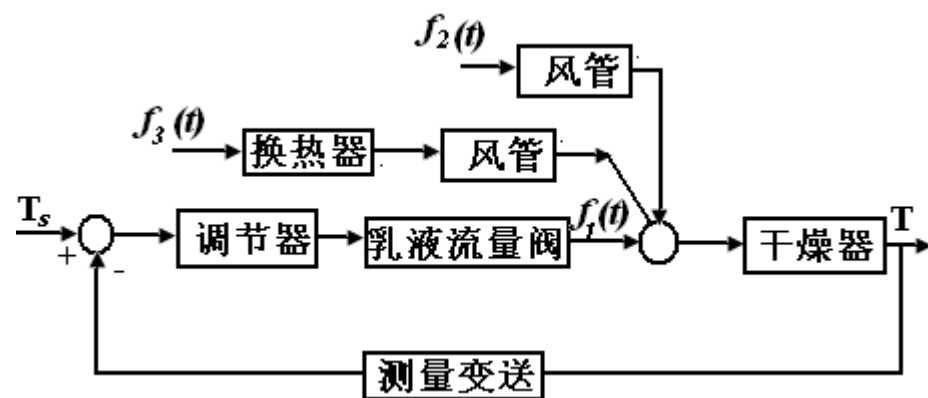
测量元件的时间常数为5s；干燥器可看成由一个2s纯滞后环节和三个时间常数均为8.5s的环节串联；换热器可用具有两个时间常数均为100s的环节来表示；风管可视为一个3s纯滞后后的环节。



从工艺角度考虑的话，
乳化物流量一般是根据
生产订单决定的
所以它是生产负荷
因此不能为控制参数。

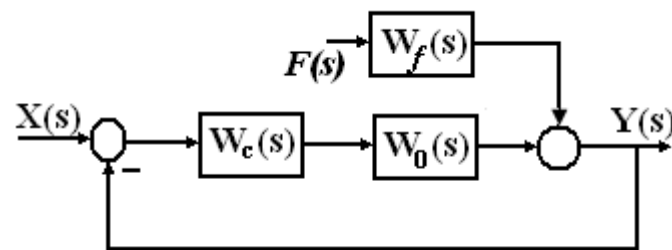


测量元件的时间常数为
5s；干燥器可看成由一个
2s纯滞后环节和三个
时间常数均为8.5s的环节
串联；换热器可用具有
两个时间常数均为100s
的环节来表示；风管可
视为一个3s纯滞后的环
节。



当对被控参数有影响的几个量都具有可控性、工艺操作的合理性时，一般从静态、动态分析。

1、过程静态特性的分析



$$W_c(s) = K_c \quad W_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1}$$

$$W_f(s) = \frac{K_f}{T_f s + 1} \quad \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{(T_0 s + 1) K_f}{(T_0 s + 1)(T_f s + 1) + K_0 K_c (T_f s + 1)}$$

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y(s) = \frac{K_f}{1 + K_0 K_c}$$

要使控制通道的放大系数 K_0 大于扰动通道的放大系数 K_f 。

2、过程动态特性的分析

1) 讨论时间常数T

$$W_c(s) = K_c$$

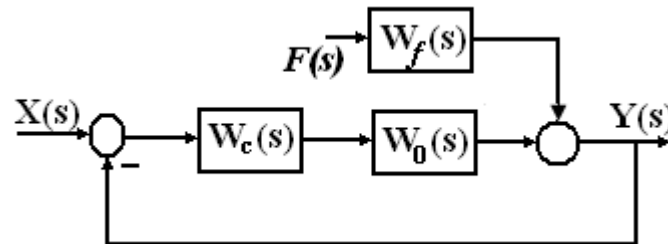
$$W_f(s) = \frac{K_f}{T_f s + 1} \quad W_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_f(s)}{1 + W_c(s)W_0(s)} = \frac{K_f}{T_f} \frac{1}{(s + \frac{1}{T_f})[1 + W_c(s)W_0(s)]}$$

整个过渡过程的幅值减小 T_f 倍，从而使其超调量随着 T_f 的增大而减小，提高了系统的控制质量。

扰动通道传递函数对扰动起到滤波的作用，

T_f 越大越好， T_0 越小越好， $T_f > T_0$



2) 再讨论纯滞后 τ 的影响

扰动通道上的纯滞后不会出现在特征方程中，不影响稳定性；
控制通道的纯滞后会出现在特征方程中，对稳定性有很大影响。
应该尽量将大纯滞后安排在扰动通道上。即

$$\tau_f > \tau_0$$

总结：如果单独分析

$$\frac{Y(s)}{X_1(s)} = \frac{3}{4s + 1} e^{-3s}$$

$$\frac{Y(s)}{X_2(s)} = \frac{4}{s + 1} e^{-4s}$$

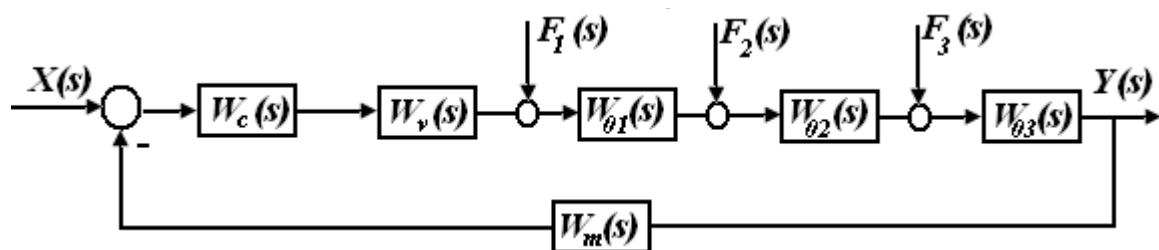
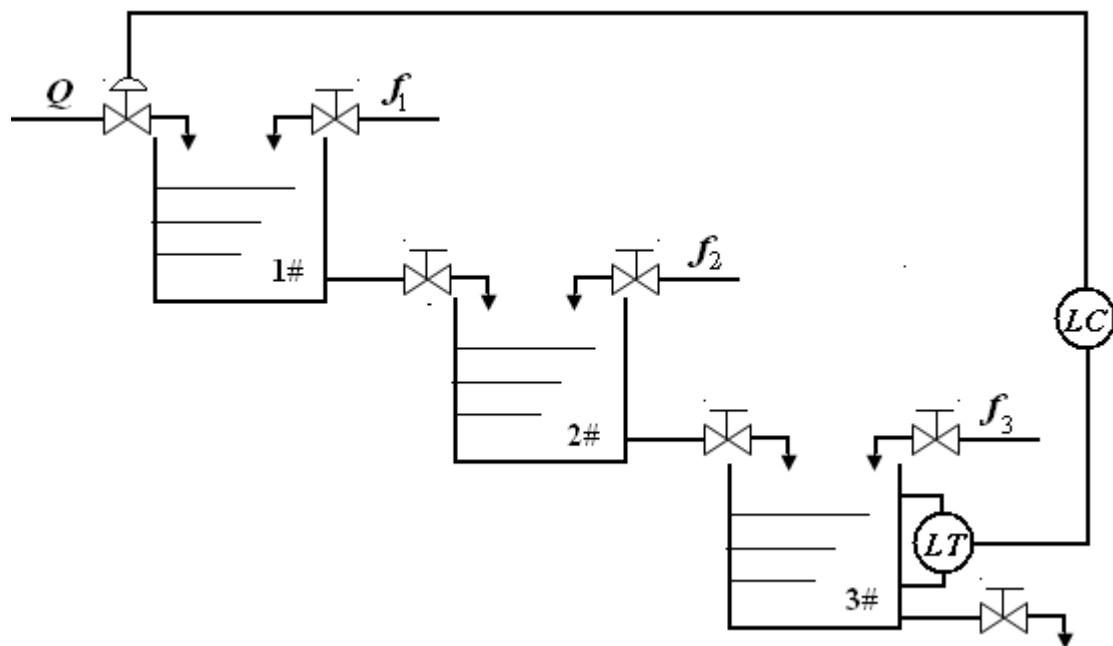
$$\tau_f > \tau_0$$

$$T_f > T_0$$

$$K_f < K_0$$

优先级增加方向

X_1 和 X_2 哪个应该作为控制参数？



当扰动离被控参数越远（即离控制阀越近）时，则对其影响越小。

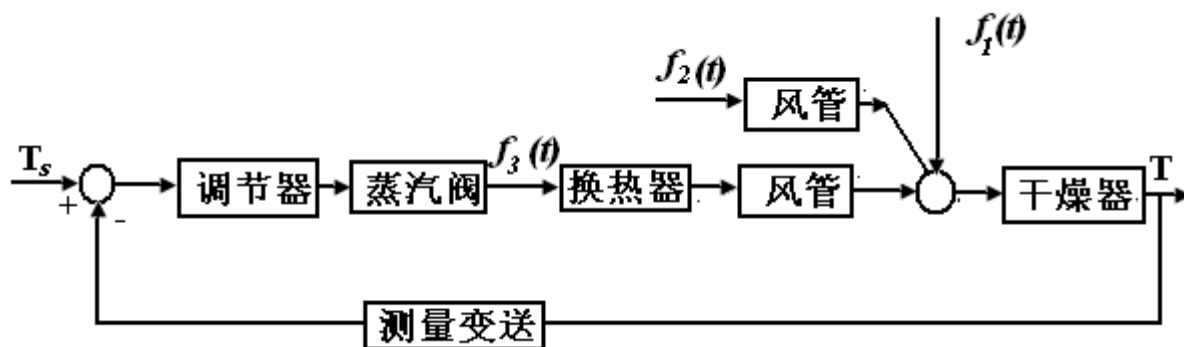
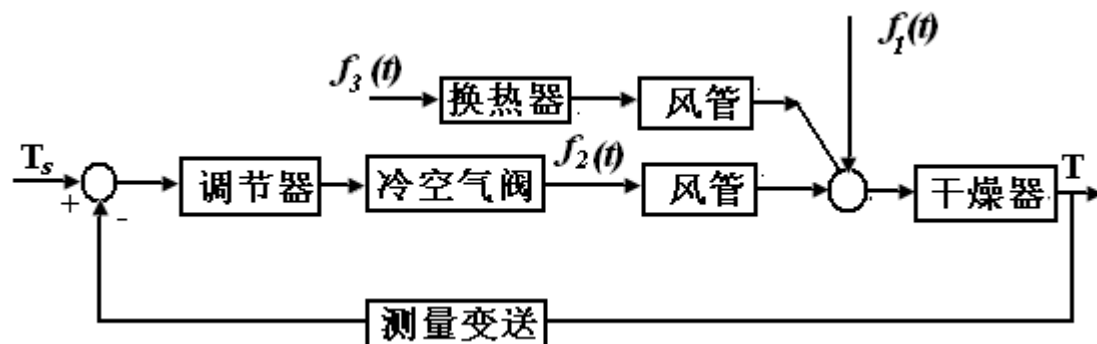
控制参数的选用原则

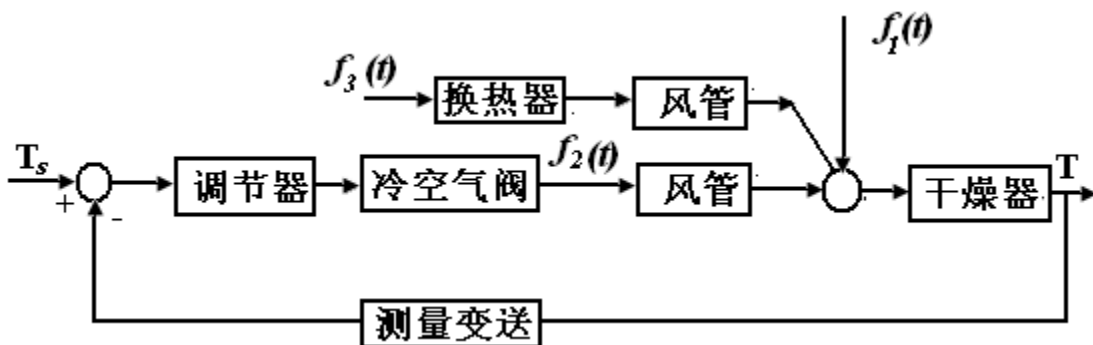
- 控制参数应具有可控性、工艺操作的合理性和经济性，
- 一般情况**生产负荷**不能作为控制参数
- 选择控制参数应使扰动通道的时间常数越大越好，而控制通道的时间常数应该适当的小一些，纯滞后时间越小越好。
(从控制系统易控性角度考虑的)

当 $\tau_f > \tau_0 \quad T_f > T_0$

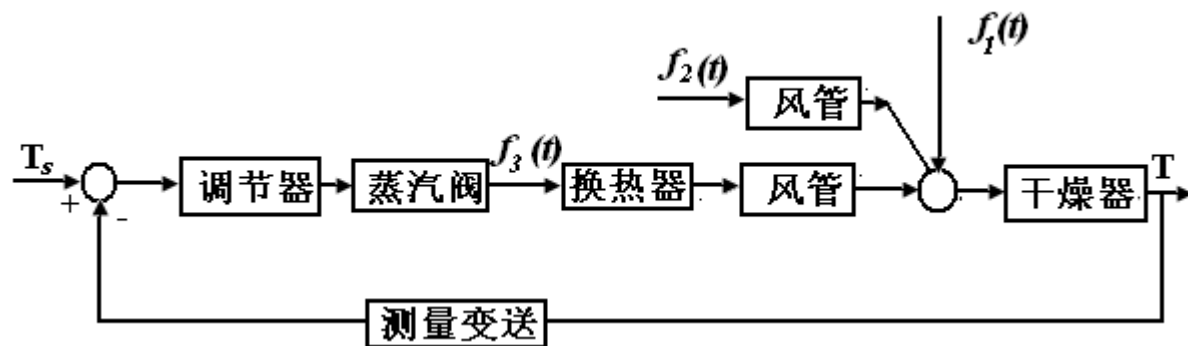
系统比较好控制。

测量元件的时间常数为5s；干燥器可看成由一个2s纯滞后环节和三个时间常数均为8.5s的环节串联；换热器可用具有两个时间常数均为100s的环节来表示；风管可视为一个3s纯滞后后的环节。



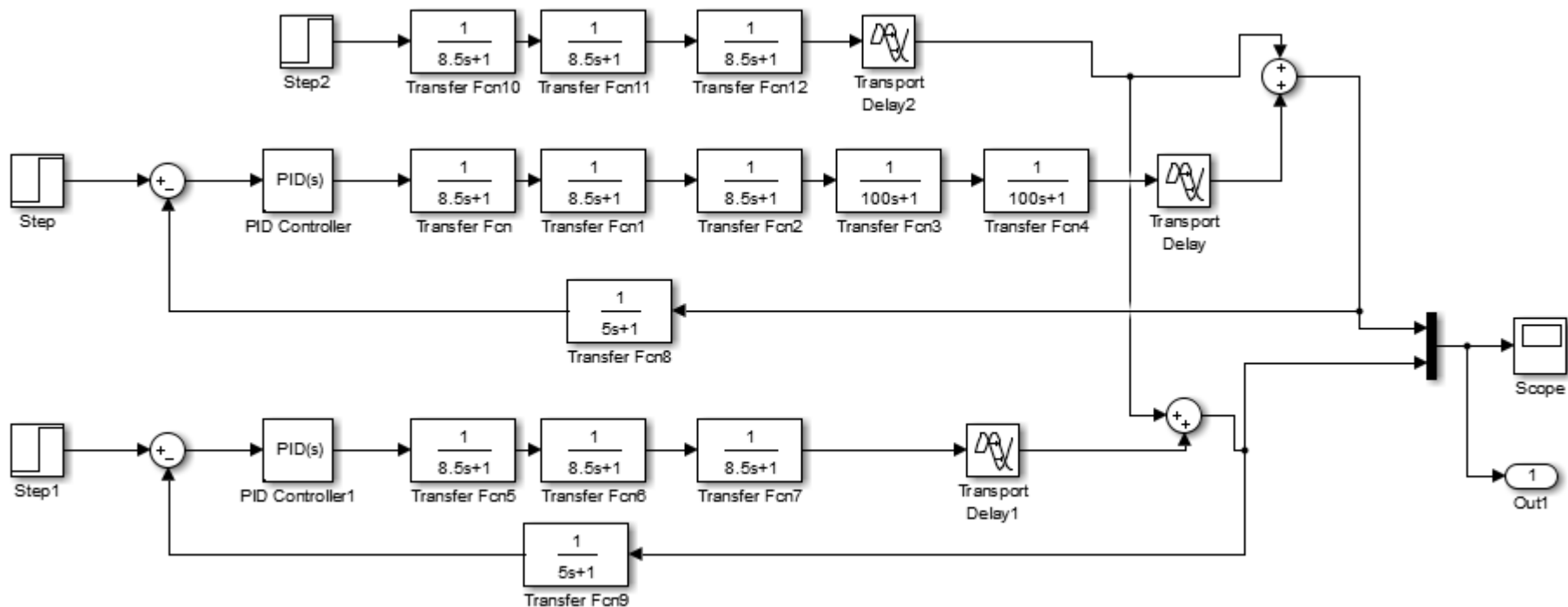


✓



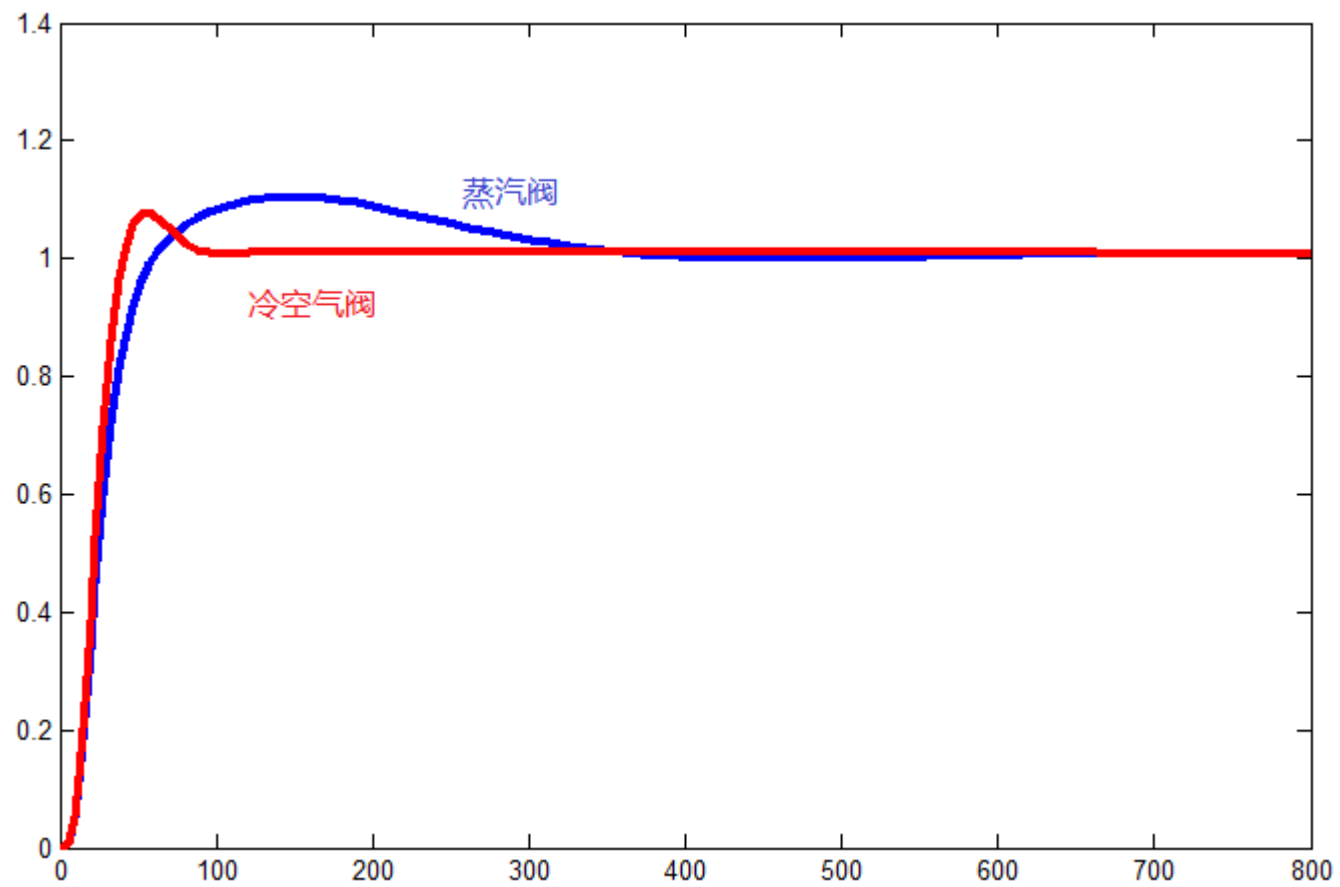
选择冷空气阀为控制参数（从易控性角度）

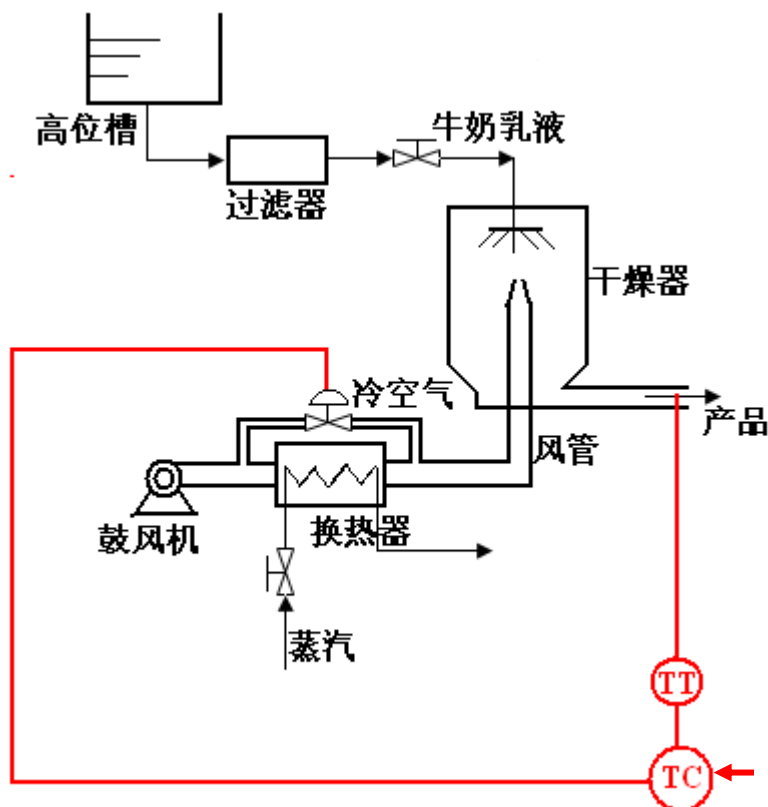




上面回路蒸汽阀为控制参数： $P=0.9, I=0.00125$

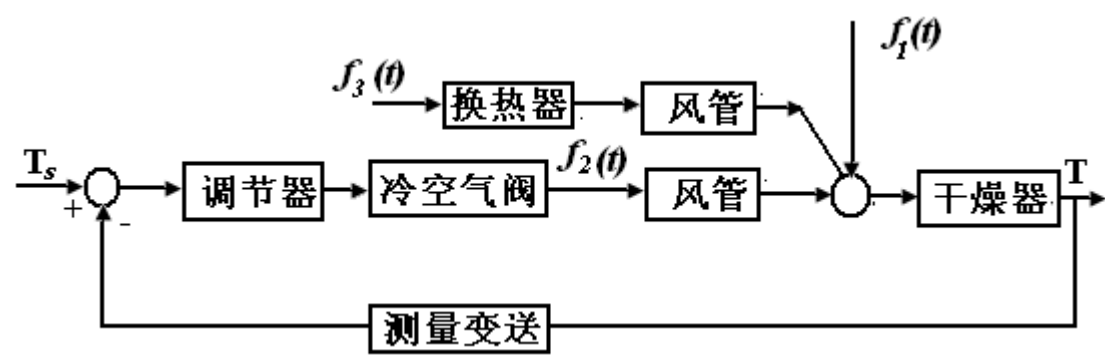
下面冷空气阀为控制参数： $P=0.25, I=0.000625$



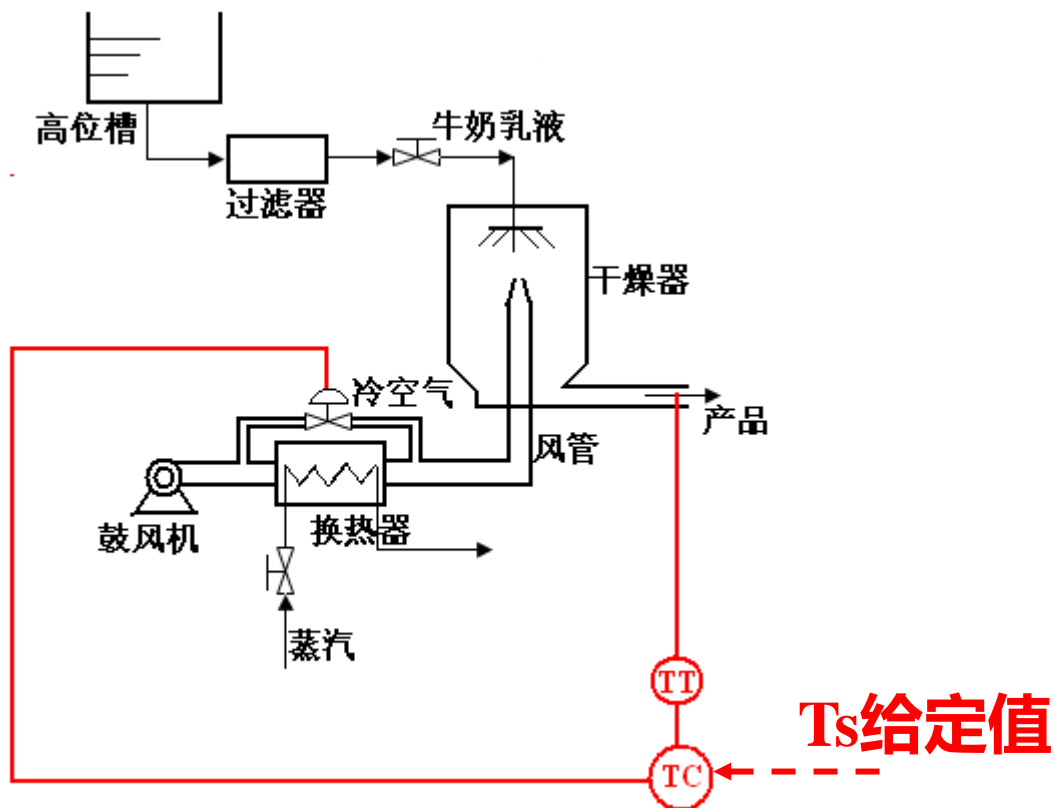


给定值 T_s 为恒定值时，
在原理图上可以不画。

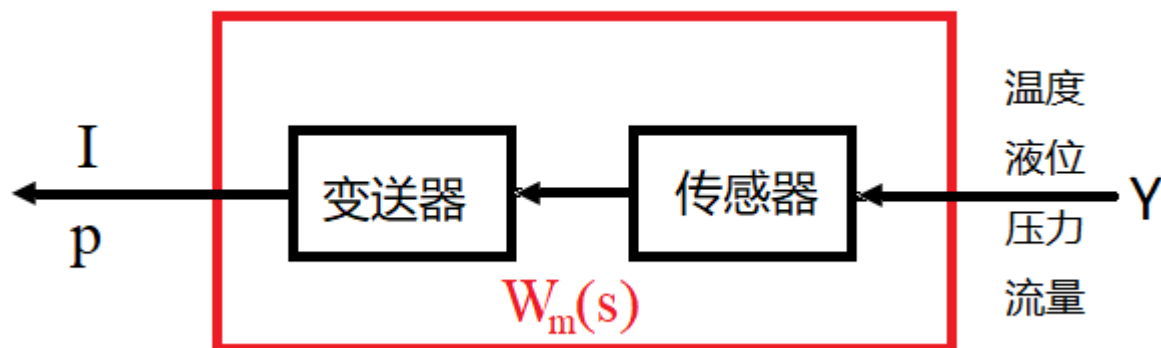
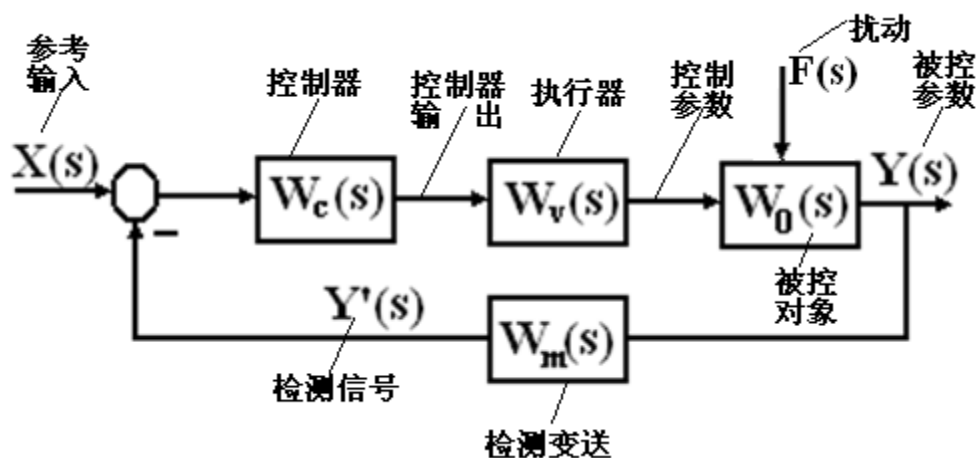
T_s 给定值



这个方案有没有什么缺点？（与选择蒸汽阀作为控制参数比较）



5.2.3 检测仪表和调节阀的选择



一、检测仪表的选择

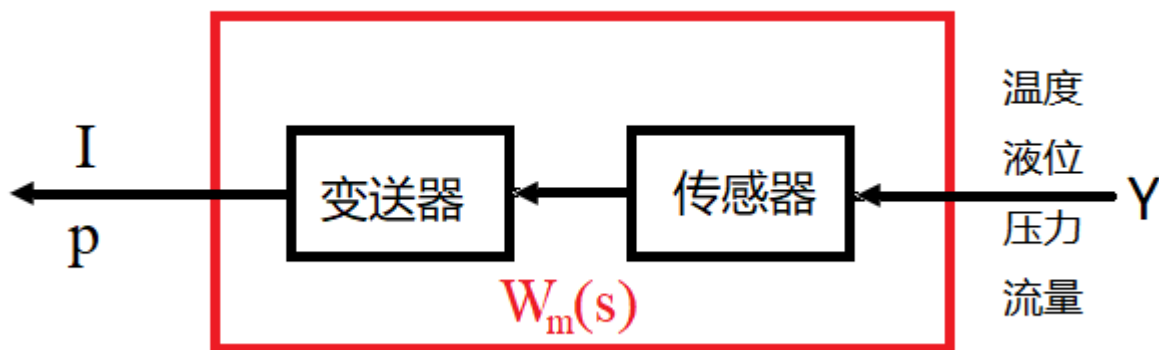
1、检测仪表概述

检测仪表把各种非电量，如温度、压力、流量、物位等转换为标准信号。由**传感器sensor**和**变送器transmitter**两部分组成

传感器sensor将温度、压力、流量、物位等非电量转换成为微小信号

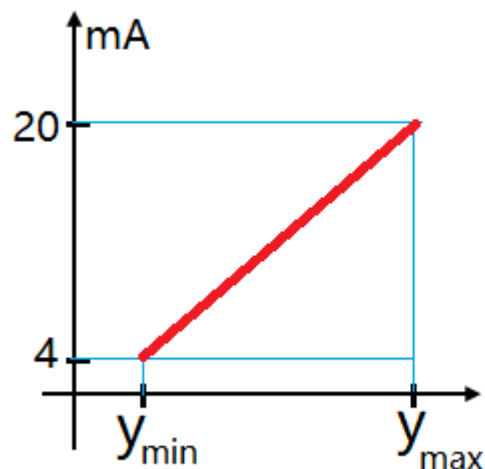
变送器transmitter将微小信号转换为标准输出信号，对电动三型仪表，标准信号为 $4 \sim 20\text{mA}$ （或 $1-5\text{V}$ ），对于气动单元组合仪表，标准信号为 $0.02-0.1\text{MPa}$ ；

变送器包含信号放大，信号处理（非线性校正）



若
$$W_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$$

一般
$$K_m > 0$$

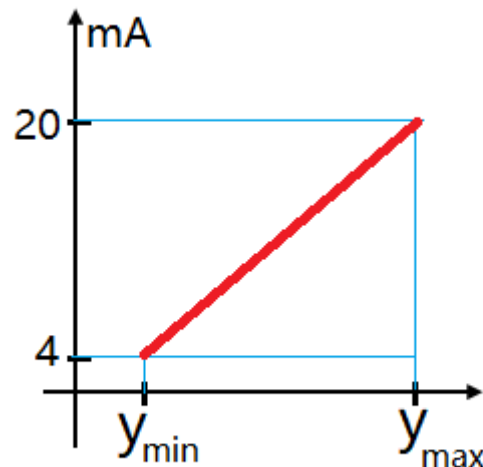


测量仪表的时间常数 T_m 相对于被控对象的时间常数 T_0 来说一般比较小，所以可以忽略，这样检测变送就相当于一个比例环节。

2、检测仪表选择因素

1) 检测仪表量程选择

如果工艺要求给出测量上限和测量下限，
则可以直接用上下限作为仪表的上下限；



若系统工艺要求给出静态工作点（额定工作点或给定值）

一般静态工作点在最大量程的50-70%左右。

比如液位给定值为1米，那么液位检测仪表测量上限1.4-2米；
如果液位最小值为0米，仪表测量下限就是0米，
量程选择对仪表精度的选择也有影响

2) 检测仪表的精度

目前我国仪表精度有国家标准的，生产的仪表的精度等级有：

0.001、0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0等

仪表精度根据最大允许误差和量程决定

$$\delta = \frac{\pm \Delta X}{\Delta Y} \times 100\%$$

其中 $\pm \Delta X$ 为最大允许测量误差， $\Delta Y = Y_{max} - Y_{min}$

例 某台测温仪表的量程是600--1100℃，工艺要求该仪表指示值的误差不得超过±4℃，应选精度等级为多少的仪表才能满足工艺要求。

解 根据工艺要求，仪表的最大允许误差为

$$\delta_{\max} = \frac{\pm 4}{1100 - 600} \times 100\% = 0.8\%$$

±0.8%介于允许误差±0.5%与±1.0%之间，如果选择允许误差为±1.0%，则其精度等级应为1.0级。量程为600 ~ 1100℃，精确度为1.0级的仪表，可能产生的最大绝对误差为±5℃，超过了工艺的要求。所以只能选择一台允许误差为±0.5%，即精确度等级为0.5级的仪表，才能满足工艺要求。

3) 工作环境、材料、安装条件、介质等因素选择仪表类型

4) 信号滤波——克服测量噪声

5) 测量延时和测量滞后问题

测量延时——测量惯性一般在0.1左右，所以相对于被控对象一般可以忽略测量惯性；

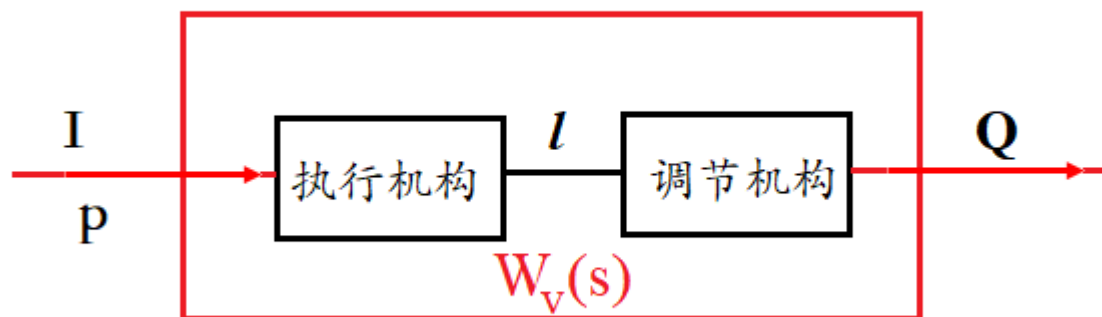
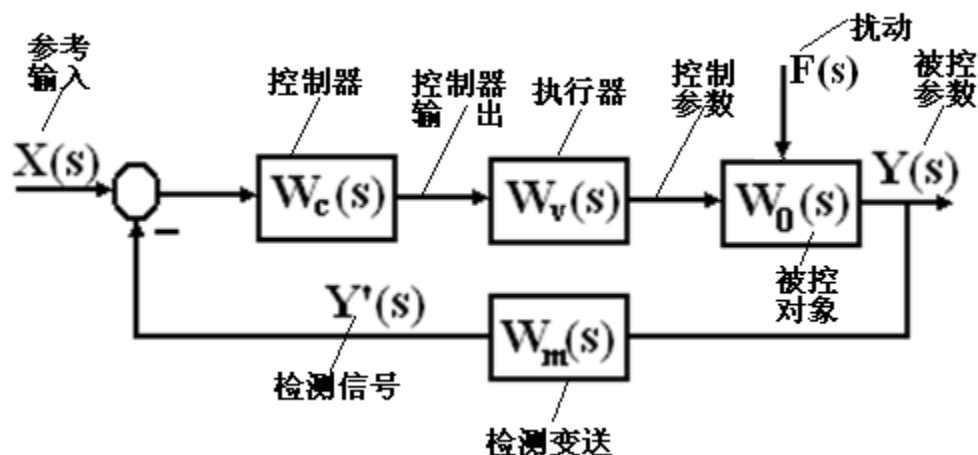
但如果仪表控制室和现场距离很远就可能存在

传送延时——安装问题

测量元件在现场，控制器在控制室，

若是气动仪表，尽量缩短气路的距离；

二、调节阀的选择（第四章）



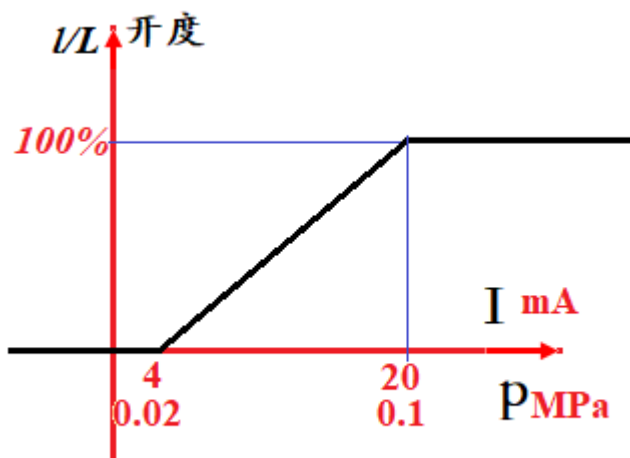
气开式、气关式与执行机构有关
流量特性与调节机构有关

1、调节阀的尺寸选择

根据**最大流量**需求计算流通能力再查表得到调节阀的尺寸

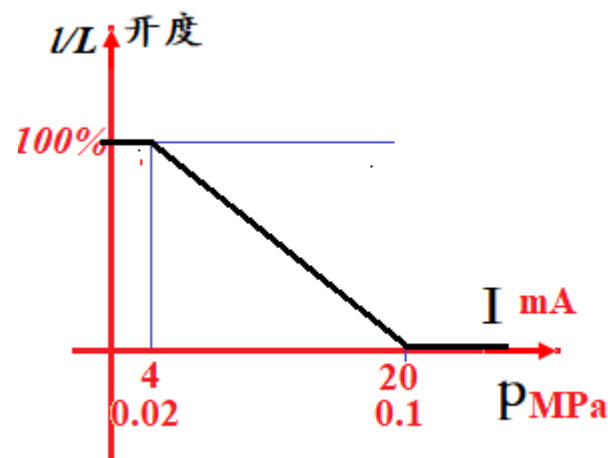
2、气开式、气关式阀门的选择

根据安全原则——在停电或停气故障时，阀门的状态要保证设备和生产安全。



气开阀 $K_v > 0$

在停电或停气故障时
阀门状态全关



气关阀 $K_v < 0$

在停电或停气故障时
阀门状态全开

3、流量特性的选择

线性阀—— K_v 是常数，执行器是线性的

对数阀

抛物线阀

快开阀

K_v 是变化的，执行器是非线性的

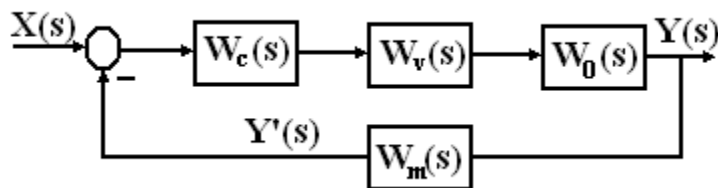
根据系统特点和配管情况

4、单座阀、双座阀的选择

根据泄漏量和不平衡力

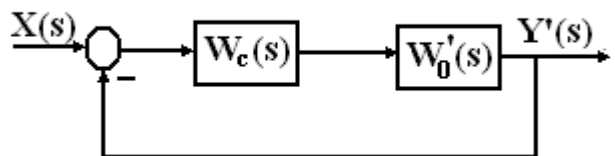
5、材质和结构的选择

根据工艺要求以及介质特点



$W_0(s)$ ——被控对象 $W_v(s)$ ——执行器 $W_m(s)$ ——检测仪表

这三个环节选择好，结构和参数就确定了，都不能变了，所以这个方块图也可以变为



其中 $W'_0(s) = W_v(s)W_0(s)W_m(s)$

$W'_0(s)$ ——广义对象 是结构参数不可改变部分

$W_c(s)$ ——调节器

只有调节器的结构参数可根据控制性能要求进行选择

小结

检测仪器的选择

量程选择

精度选择

执行器选择

尺寸选择

气开气关选择

流量特性选择

5.2.4 调节器的选择

调节规律选择

P, PI, PD, PID

比例放大器的符号选择

K_p

调节器的参数确定

$$K_p e \quad \frac{1}{T_i} \int e dt \quad T_d \frac{de}{dt}$$

1、调节规律的选择

1) PID控制规律及作用 $u = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt})$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

K_p ——为比例系数，也是控制器的放大系数；

T_i ——为积分时间常数， T_i 越大，积分作用越弱；

T_d ——为微分时间常数， T_d 越大，微分作用越强；

P——基本控制；

I——改善稳态性能；

但会使动态性能恶化

D——改善动态性能；

不能太大

2) 调节规律的选择

根据被控对象的特点选择

$$W_0(s) = \frac{K_0 e^{-\tau_0 s}}{T_0 s + 1}$$

原则: $\frac{\tau_0}{T_0}$ 越大, 反映系统容量滞后或纯滞后越大

惯性或容量滞后较大时要用微分作用

系统有无稳态误差的要求时要用积分作用

控制性能要求快速性的时候可能需要微分作用。

当 $\tau_0/T_0 < 0.2$ 选用比例或比例积分控制规律;

$0.2 < \tau_0/T_0 < 1$ 选用比例积分或比例积分微分控制规律

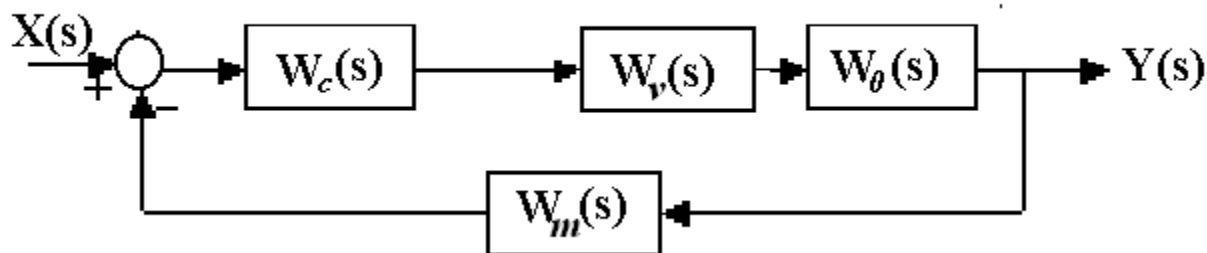
$\tau_0/T_0 > 1$ 单回路反馈控制系统已不能满足控制要求,
应根据具体情况, 采用其他的控制方式。



2调节器的正反作用确定——确定 K_p 的符号

要保证系统是负反馈，必须要求回路增益的乘积大于零

调节器的正反作用及其符号是这样规定的：



$$K_p K_v K_o K_m > 0$$

一般情况下测量变送单元的放大系数 K_m 都是正的，
根据安全原则确定阀门气开气关状态

对于气开阀 $K_v > 0$

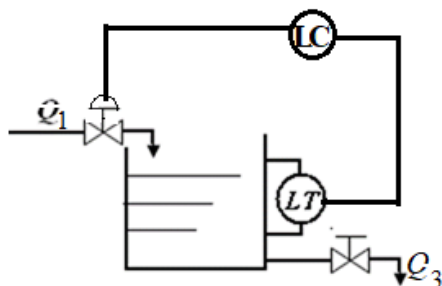
对于气关阀 $K_v < 0$

被控对象也定义为**正特性**和**反特性**

正特性：当进入对象的流量增大时被控参数增大； $K_0 > 0$

反特性：当进入对象的流量增大时被控参数减小； $K_0 < 0$

例：如图所示液位系统



被控参数是液位

控制参数是进水阀

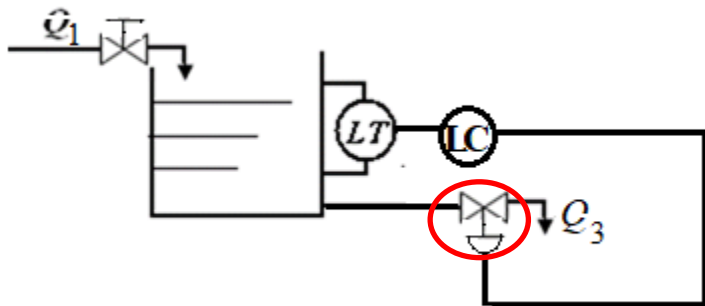
$K_0 > 0$

如果这个系统提示不能溢出，应该选气开阀还是气关阀？

气开阀

如果这个系统提示容器液位不能为0，应该选气开阀还是气关阀？

气关阀



被控参数是液位

控制参数是出水阀

$K_0 < 0$

如果这个系统提示不能溢出，应该选气开阀还是气关阀？

气关阀

如果这个系统提示容器液位不能为0，应该选气开阀还是气关阀？

气开阀

当被控参数和控制参数确定后，被控对象的正反特性也就确定了。

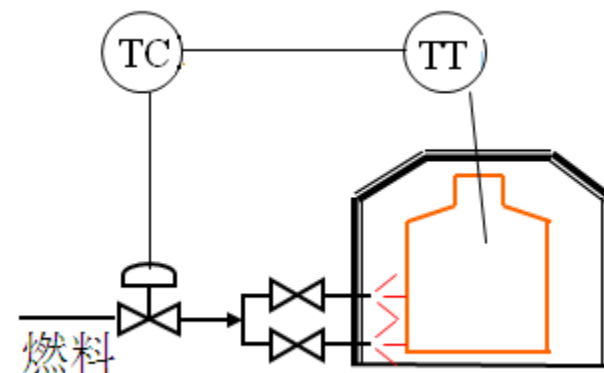
根据 $K_p K_v K_0 K_m > 0$

确定 K_p 的符号

正作用调节器：当系统的被控参数增加时，调节器的输出也增加，此时，调节器的放大系数 $K_p < 0$ ；

反作用调节器：当系统的被控参数增加时，调节器的输出减小，此时，调节器的放大系数 $K_p > 0$ 。

以隔焰式隧道窑温度控制系统为例，
隧道窑是对陶瓷制品进行预热、烧成、冷却的装置。陶瓷制品在窑道的烧成带内，按工艺规定的温度进行烧结，烧结温度一般为 1300°C ，偏差小于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

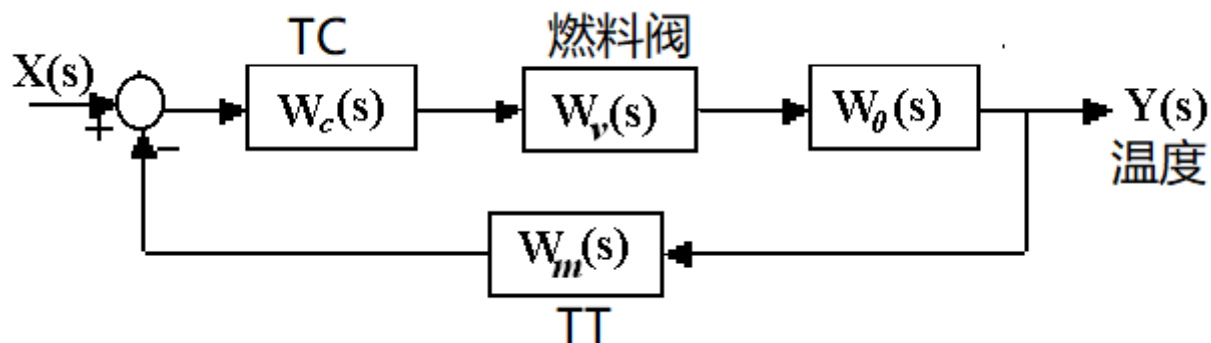


由于烧成带的烧结温度是影响产品质量的重要控制指标之一

被控参数:烧成带温度

控制参数:燃料的流量作为。

构成隔焰式隧道窑温度控制系统。



阀门 气开阀 $K_v > 0$

对象 正特性 $K_0 > 0$

控制器 $K_p K_v K_0 K_m > 0$ $K_p > 0$

反作用

烧结温度一般为1300°C，偏差小于±5 °C。

需要积分作用；

是否需要微分作用取决于对象的数学模型

小结

调节规律选择

取决于对象是否好控制

取决于对系统性能要求是否高

调节器的正反作用的确定

满足 $K_p K_v K_0 K_m > 0$

了解如何确定被控对象的正反特性即 K_0 的符号

调节器正作用 $K_p < 0$

调节器反作用 $K_p > 0$

5.3 PID参数工程整定法及系统投运

系统参数整定是指选择调节器的比例度 δ 、积分时间 T_i 和微分时间 T_d 的具体数值。

调节器参数整定的方法可分为两大类：

一类是理论计算整定：根轨迹法、频率特性法

已知过程的数学模型

工程整定方法：看曲线，选参数，一种近似方法，

无需知道过程的数学模型，实用

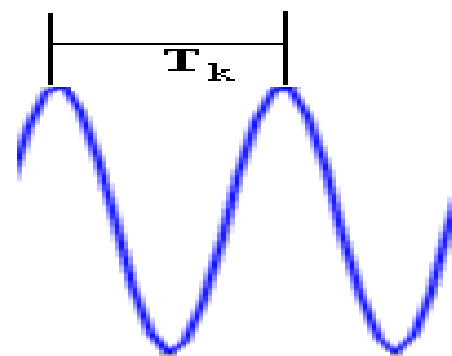
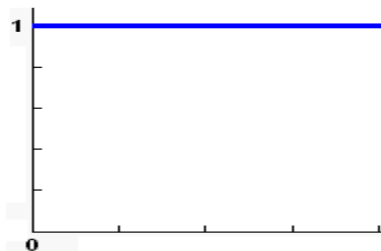
5.3.1 PID参数工程整定法

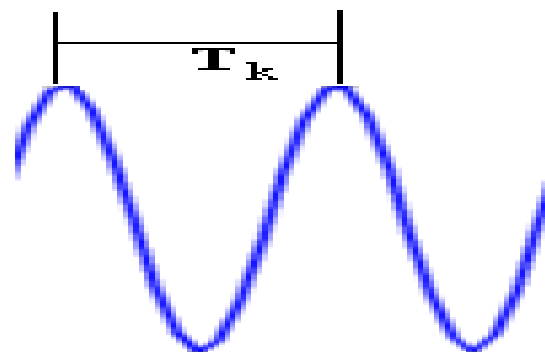
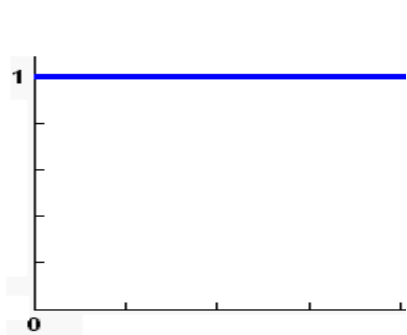
一、临界比例度法

在系统**闭环状态**下进行的参数整定方法

具体步骤为：

- 1) 将 $T_i=\infty$ ， $T_d=0$ ，选择一个较大的比例度 δ 值，将控制系统投入到自动状态；
- 2) 将设定值突增一个数值，观察记录曲线，，此时应是一个衰减过程曲线。逐步减小比例度 δ ，再做设定值扰动实验，直至出现**等幅振荡**为止。





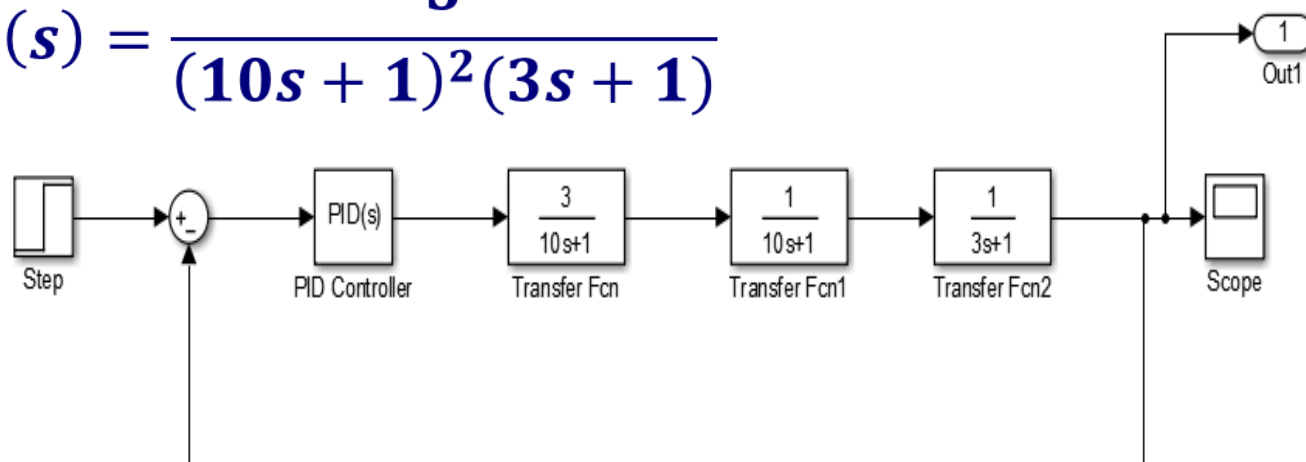
- 3) 记录下此时控制器的比例度 δ_k 和等幅振荡周期 T_k ;
- 4) 按表5-7 (P183)计算控制器的参数;

	δ	T_i	T_d
P	$2\delta_k$	-	-
PI	$2.2\delta_k$	$0.83T_K$	-
PID	$1.6\delta_k$	$0.5T_K$	$0.25T_I$

表5-7

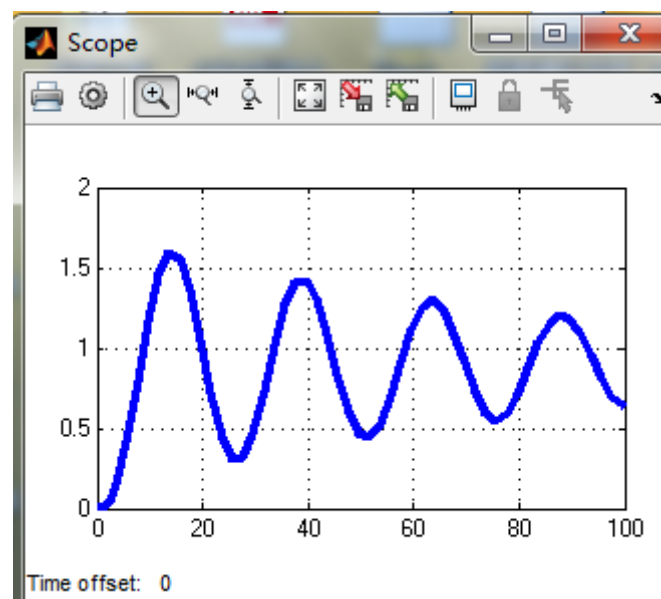
- 5) 按照表上计算的PID参数并不是最后最佳参数，还需要进行微调。

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



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 $T_K = 23$

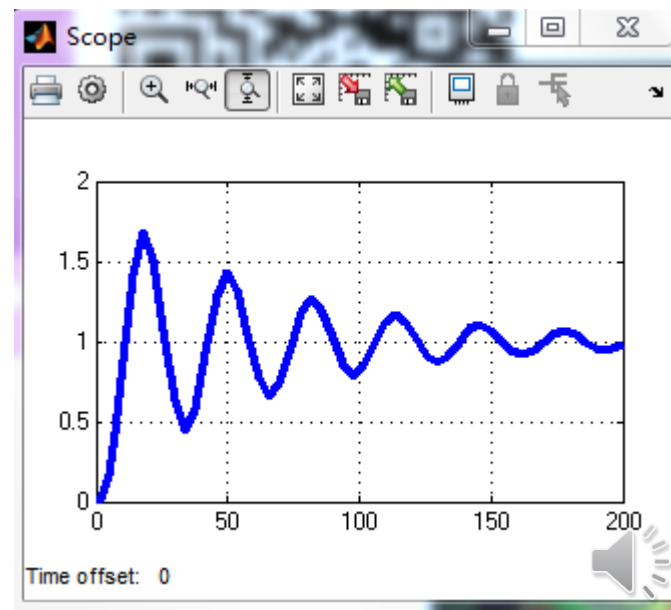
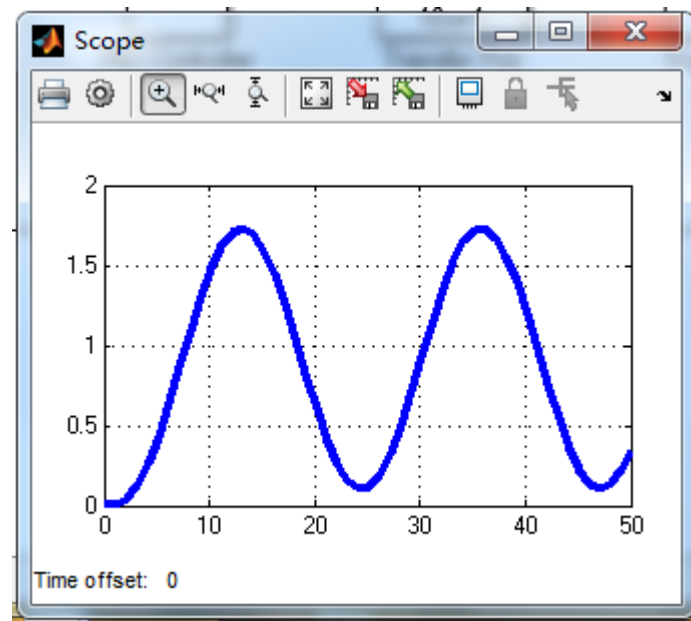
采用PI调节器

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



$$\delta_0 = 2.2\delta_K = 0.587, \quad T_{i0} = \frac{T_K}{1.2} = 19.17, T_d = 0$$

超调量太大，**微调**

怎么调呢？

$$W_c(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

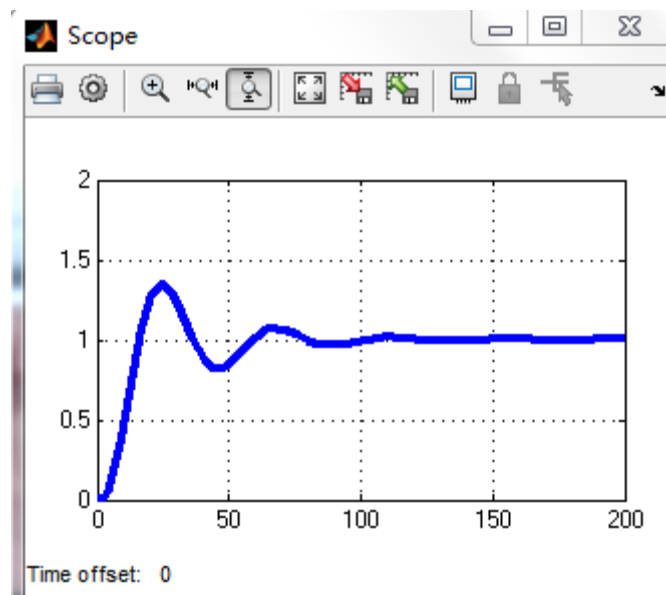
表5-7给出了比例作用和积分作用的合理权系数，也就是 T_{i0} 不变

要想减小超调，减小 K_p 或增大 δ

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

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

$$\sigma_p = 35\%, \quad t_s = 96s$$



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

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

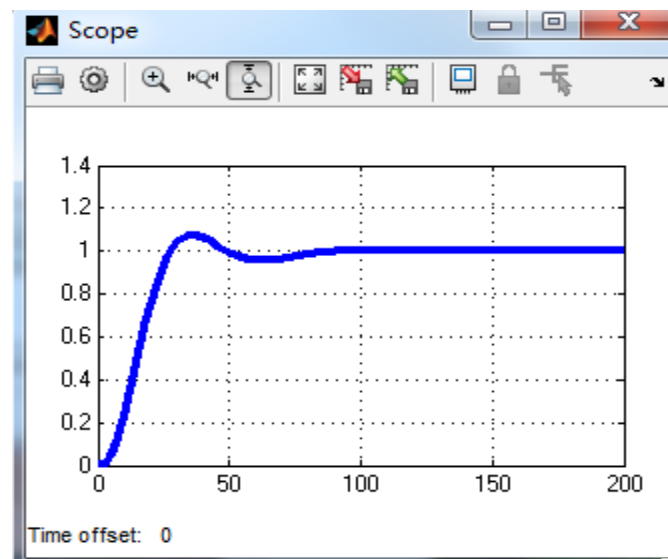
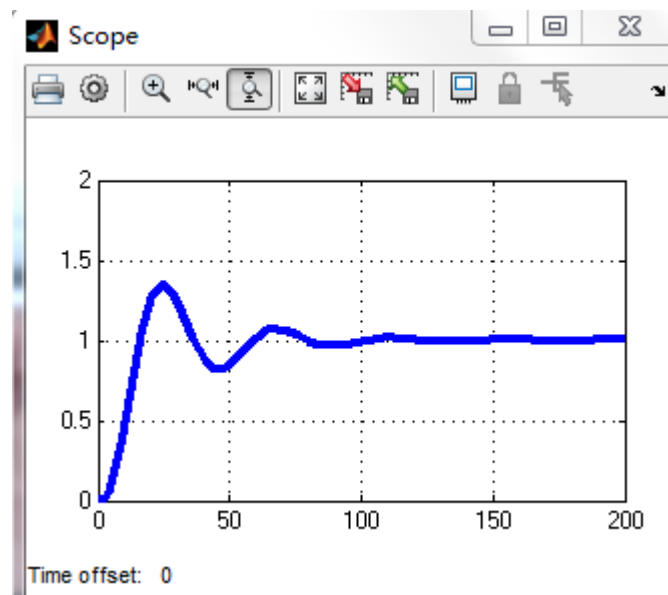
$$\sigma_p = 35\%, t_s = 96s \ (\Delta = 2\%)$$

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

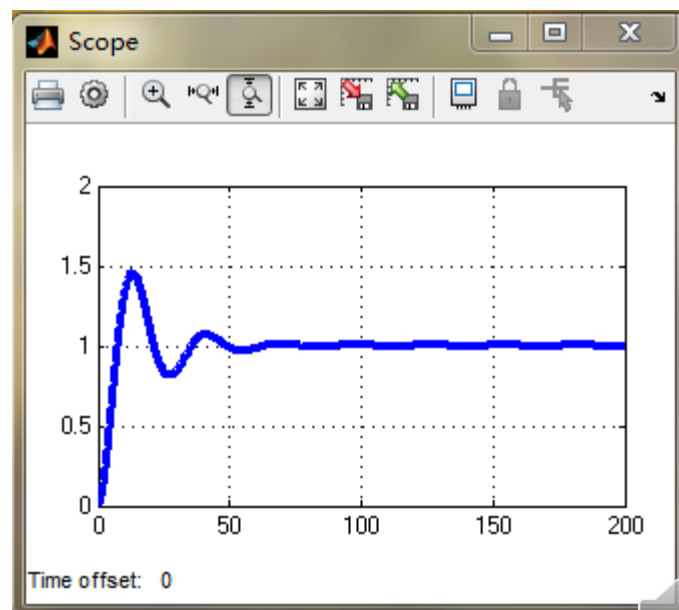
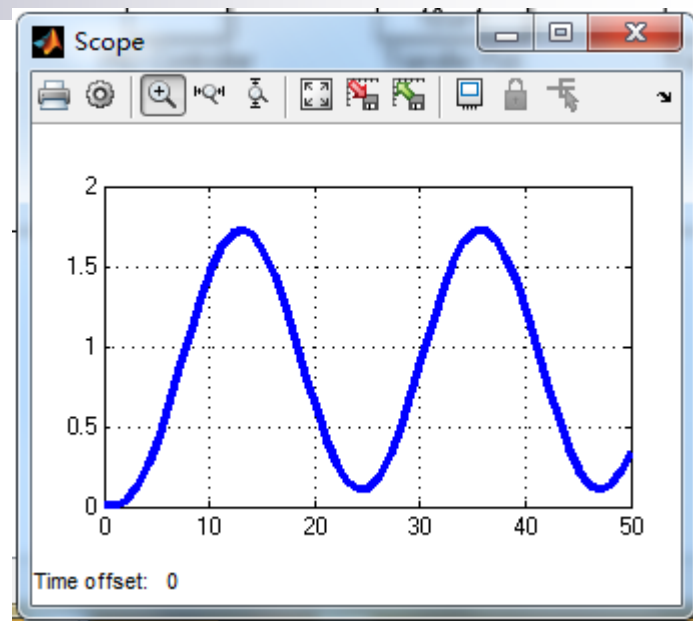
查表 $\delta_0 = 1.6\delta_K = 0.427$,

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

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

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

超调量太大，微调



查表 $\delta_0 = 1.6\delta_K = 0.427$, $T_{i0} = 0.5T_K = 11.5$,

$$W_c(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_{i0}s} + T_{d0}s \right) \quad T_{d0} = 0.25T_i = 2.875$$

表5-7给出了比例作用、积分作用和微分作用的合理权系数，
在调系数是保持这个比例不变。

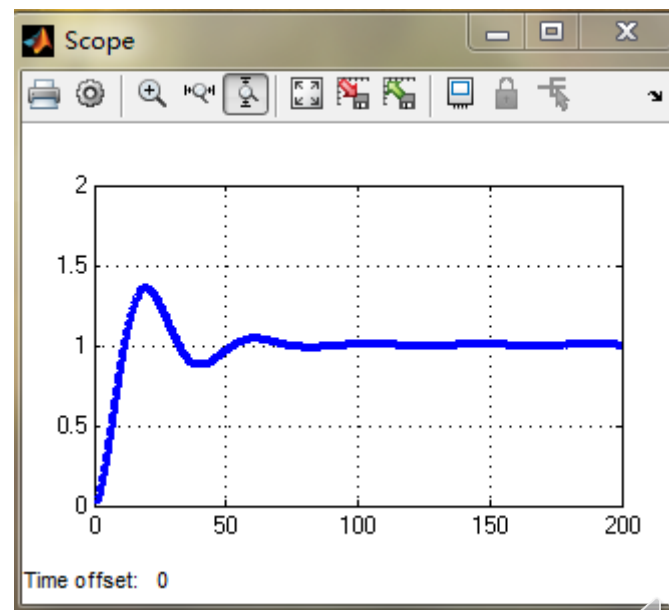
要想减小超调，减小 K_p 或增大 δ

$$\delta_1 = 2\delta_0 = 0.854,$$

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

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

$$\sigma_p = 35\%, \quad t_s = 69.1s$$



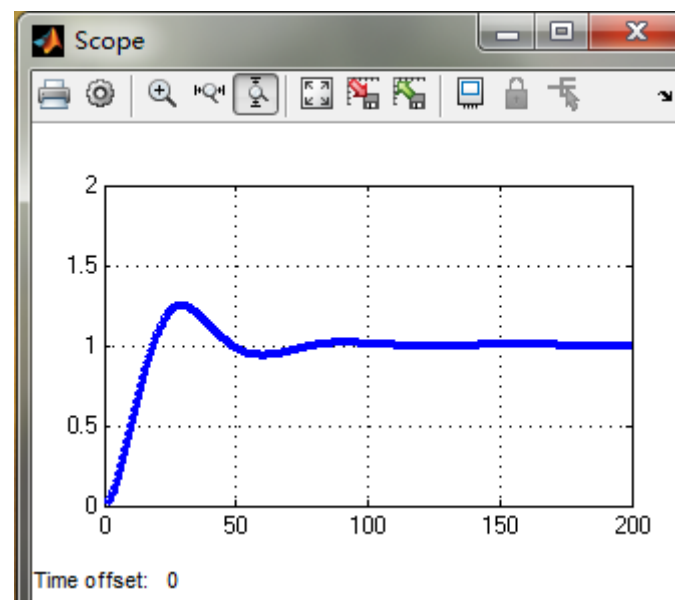
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



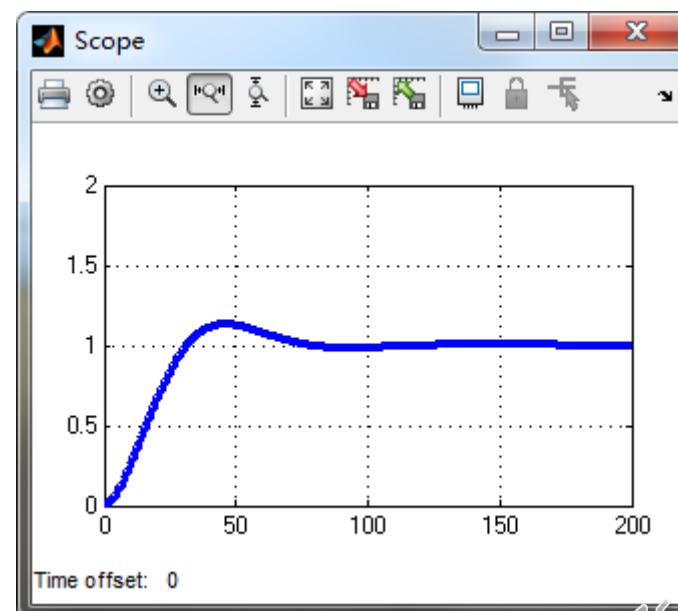
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



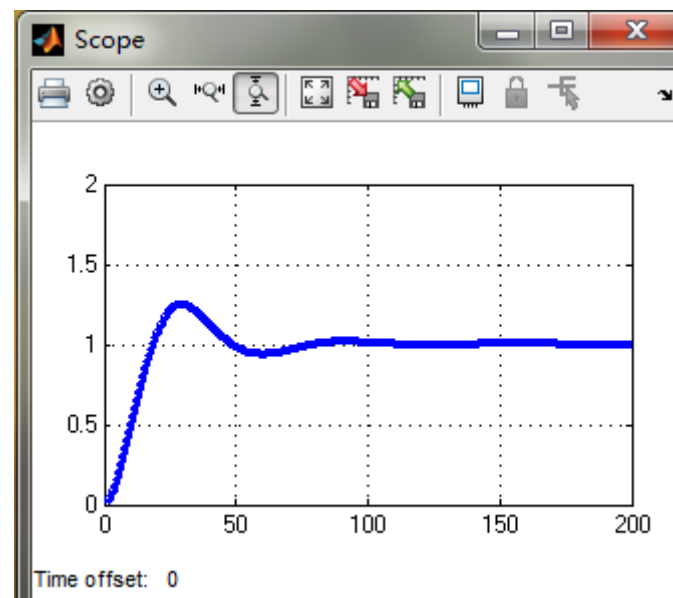
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



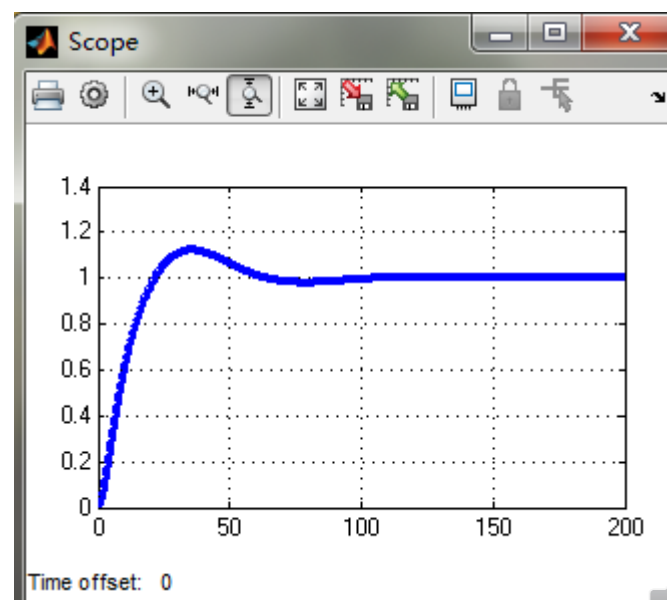
也可以改变比例，微分可以减小超调，把微分系数增加一点

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

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

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

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



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

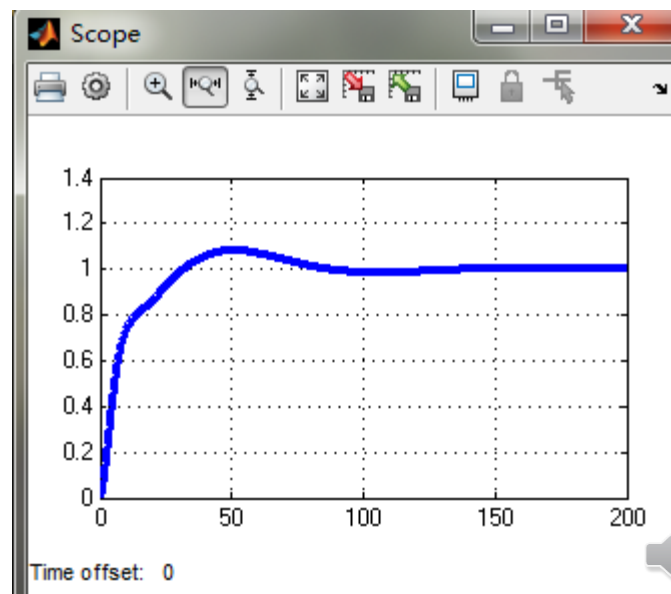
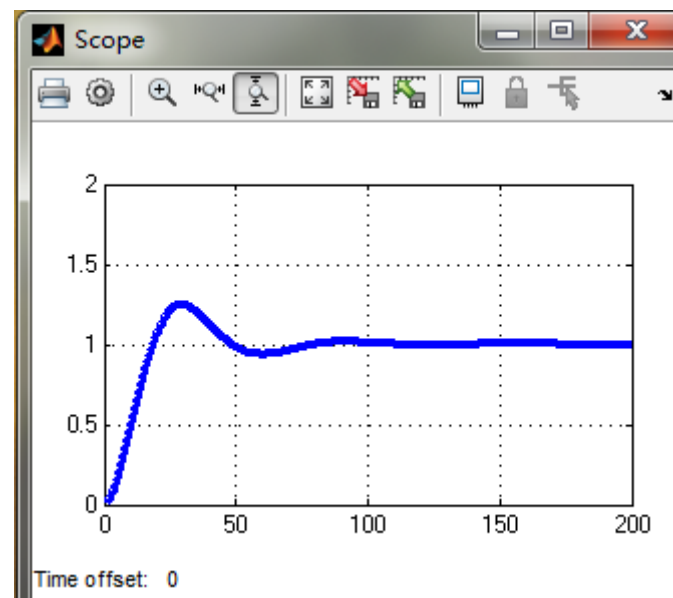
$$\delta_2 = 4\delta_0 = 1.707,$$

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

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

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

当微分作用太大是曲线容易出现变形



按照查表得到的参数，往往超调量比较大，需要微调，微调原则是什么呢？

维持 T_i 、 T_d 不变，只是减小K值或增大比例度 δ 。

后面几种方法同样需要微调，微调原则也同上。

微调方法也不是唯一，比如可以加大微分的比例，大家可以自己仿真找出一个更好的方法。

临界比例度法整定控制器参数的特点，

❖ 临界比例度法是有理论依据的，即根据控制系统边界稳定条件（劳斯判据）得出的，因此精度较高。

❖ 如果生产工艺中不允许被控参数作长时间的等幅振荡，这种方法就不能采用；

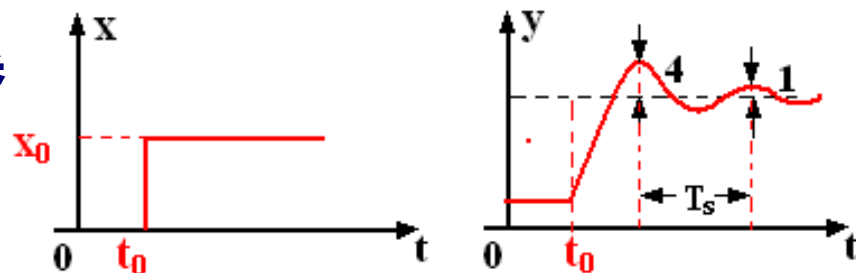
❖ 哪些系统不能用这个方法？

二、衰减曲线法

衰减曲线法是针对临界比例度法的不足，并在此基础上经过反复实验而得出的一种参数整定方法。

如果要求过渡过程达到4 : 1衰减比，步骤：

- 1) 将 $T_i=\infty$ ， $T_d=0$ ，在纯比例作用下，根据系统特性，将比例度设置在一个比较大的数值，系统投入运行；逐渐减小比例度直到出现4 : 1衰减过程为止。记录下此时的比例度 δ_s 和振荡周期 T_s
- 2) 根据 δ_s 和 T_s 的值，按表5-8所列经验公式，计算出控制器的相应参数。



$\varphi=0.75$ (4:1), 衰减曲线法参数计算公式

	δ	T_i	T_d
P	δ_s	-	-
PI	$1.2\delta_s$	$0.5T_s$	-
PID	$0.8\delta_s$	$0.3T_s$	$0.1T_s$

表5-8

3) 微调 (超调量很大, 原则同前)

衰减曲线法整定控制器参数的特点:

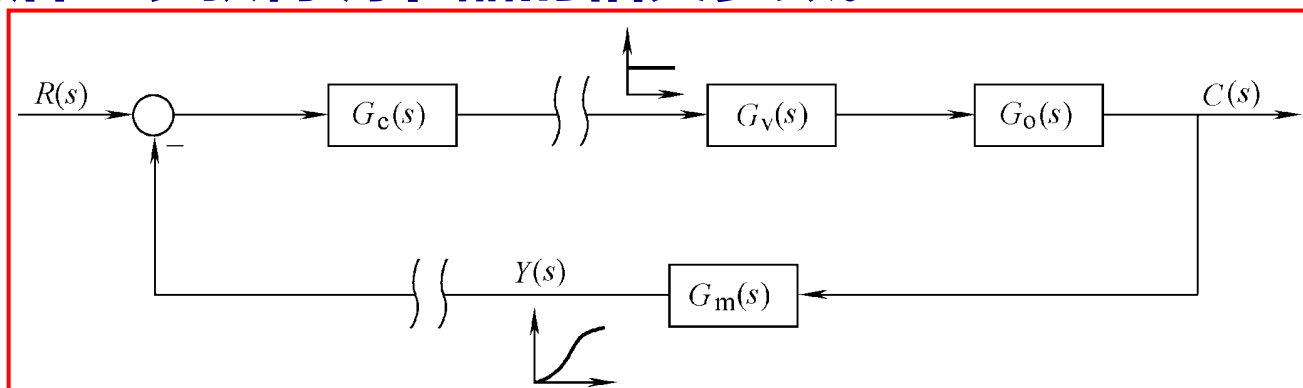
- ❖ 对生产影响较小;
- ❖ 希望获得不同的衰减比响应曲线, 需要查不同的表
- ❖ 按照查表公式计算出来的参数超调量也很大, 微调

这种方法有没有不适用的系统?

三、响应曲线法

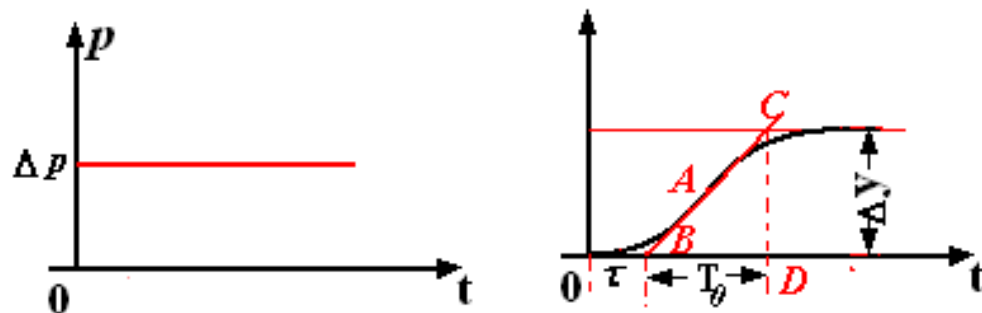
在系统开环情况下，测取系统的阶跃响应，得到系统近似传递函数，然后查表获得调节器的相关参数。

步骤：



瞬间改变控制器的输出使其产生一阶跃变化 ΔP ，并同时记录下被控参数 y 随时间变化的曲线。

$$K_0 = \frac{\Delta y / (y_{\max} - y_{\min})}{\Delta P / (P_{\max} - P_{\min})}$$



根据 τ 、 T_0 、 K_0 三个数据，即可按表5-6所给出的经验公式

$\varphi=0.75$ ，过程有自平衡能力时的整定计算公式

调节规律	$W_c(s)$	$\tau/T_0 \leq 0.2$		
		$\frac{1}{\delta}$	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\delta}$	$K_0 \frac{\tau}{T_0}$		
PI	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s})$	$1.1 K_0 \frac{\tau}{T_0}$	3.3τ	
PID	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$0.85 K_0 \frac{\tau}{T_0}$	2τ	0.5τ

微调（超调量很大，需要微调参数）



$\varphi=0.75$ ，过程有自平衡能力时的整定计算公式

调节规律	$W_c(s)$	$0.2 < \tau/T_0 \leq 1.5$		
		δ	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\delta}$	$2.6K_0 \frac{\frac{\tau}{T_0} - 0.08}{\frac{\tau}{T_0} + 0.7}$		
PI	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s})$	$2.6K_0 \frac{\frac{\tau}{T_0} - 0.08}{\frac{\tau}{T_0} + 0.6}$	$0.8T_0$	
PID	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$2.6K_0 \frac{\frac{\tau}{T_0} - 0.15}{\frac{\tau}{T_0} + 0.08}$	$0.81T_0 + 0.19 \tau$	$0.25T_i$

微调（超调量很大，需要微调参数）

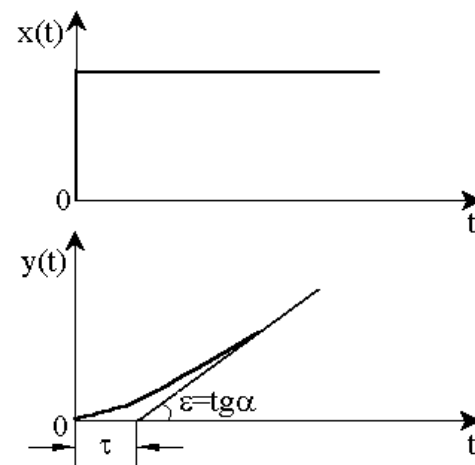
无自衡系统

阶跃响应曲线如图所示

近似传递函数为

$$W_0(s) = \frac{\varepsilon}{s} e^{-\tau s}$$

$\varphi=0.75$ ，过程无自平衡能力时的整定计算公式



调节规律	$W_c(s)$	δ	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\delta}$	$\varepsilon \tau$		
PI	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s})$	$1.1 \varepsilon \tau$	3.3τ	
PID	$\frac{1}{\delta} (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$0.85 \varepsilon \tau$	2τ	0.5τ

微调（超调量很大，需要微调参数）



例：有一个蒸汽加热器温度控制系统，当电动II型控制器手动输出电流从6mA突然增加到7mA时，加热器温度从原先的稳态值85.0℃上升到新的稳态值87.8℃。所用仪表量程为50 ~ 100℃。试验测得响应曲线的 $\tau=1.2\text{min}$ ， $T_0=2.5\text{min}$ 。如果采用PI控制器，其整定参数应为多少？

解： $\Delta I = 7 - 6 = 1\text{mA}$ $I_{\max} - I_{\min} = 10 - 0 = 10\text{mA}$

$$\Delta y = 87.8 - 85 = 2.8^\circ\text{C} \quad y_{\max} - y_{\min} = 100 - 50 = 50^\circ\text{C}$$

$$K_0 = \frac{\Delta y / (y_{\max} - y_{\min})}{\Delta I / (I_{\max} - I_{\min})} = \frac{2.8/50}{1/10} = 0.56$$

当采用PI控制器时：

$$\delta = 2.6K_0 \frac{\tau/T_0 - 0.08}{\tau/T_0 + 0.7} \times 100\% = 49.3\%$$

$$T_i = 0.8T_0 = 2\text{min}$$

5.3.2 系统投运

所谓控制系统的投运就是将系统由手动工作状态切换到自动工作状态。

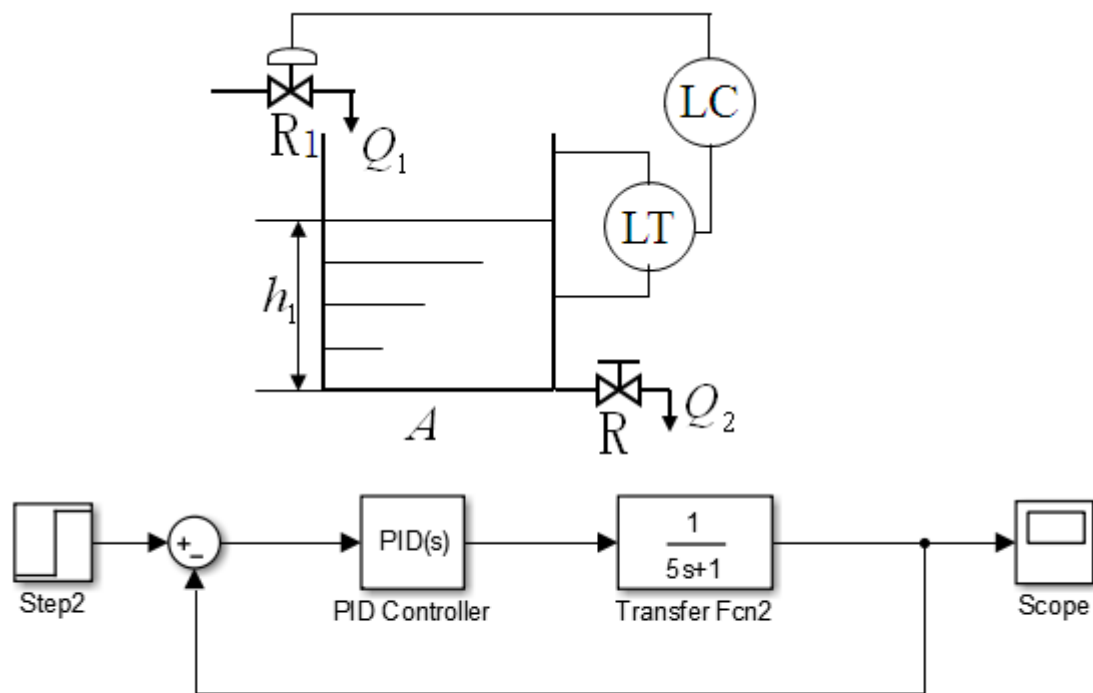
原则：

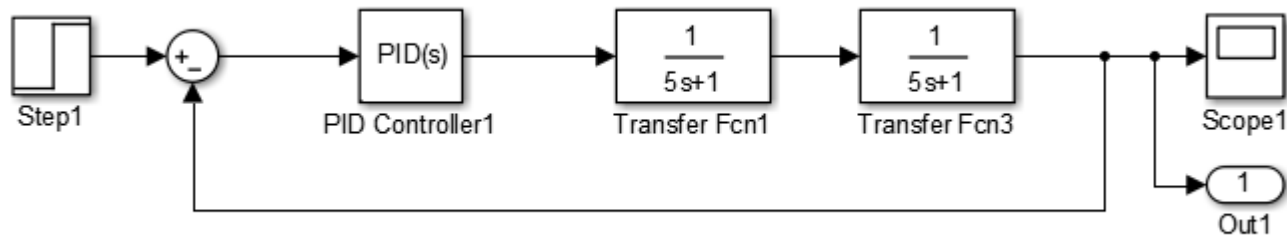
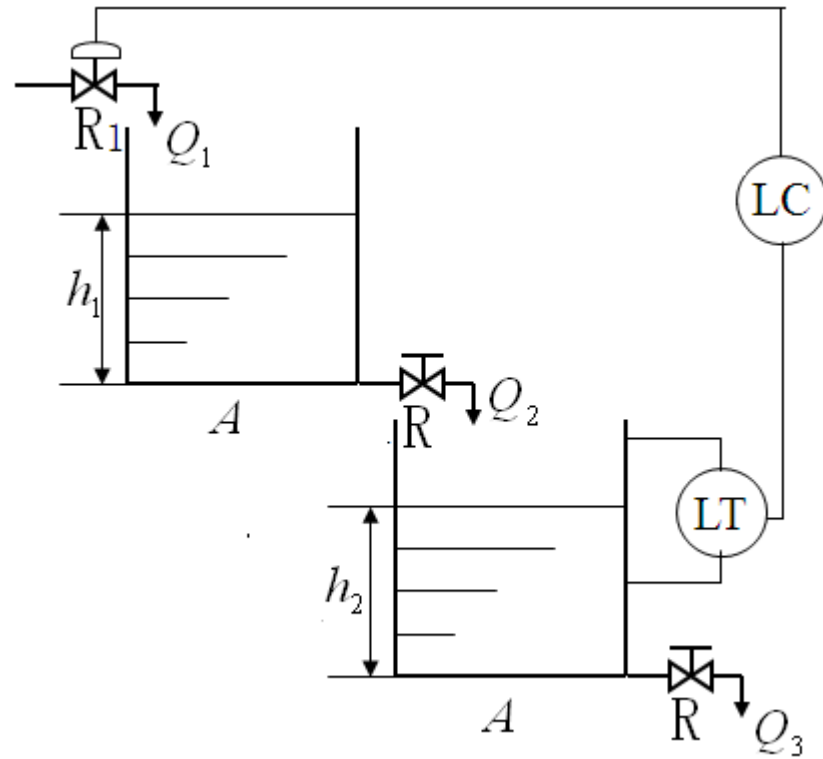
这种切换必须保证**无扰动**地进行。

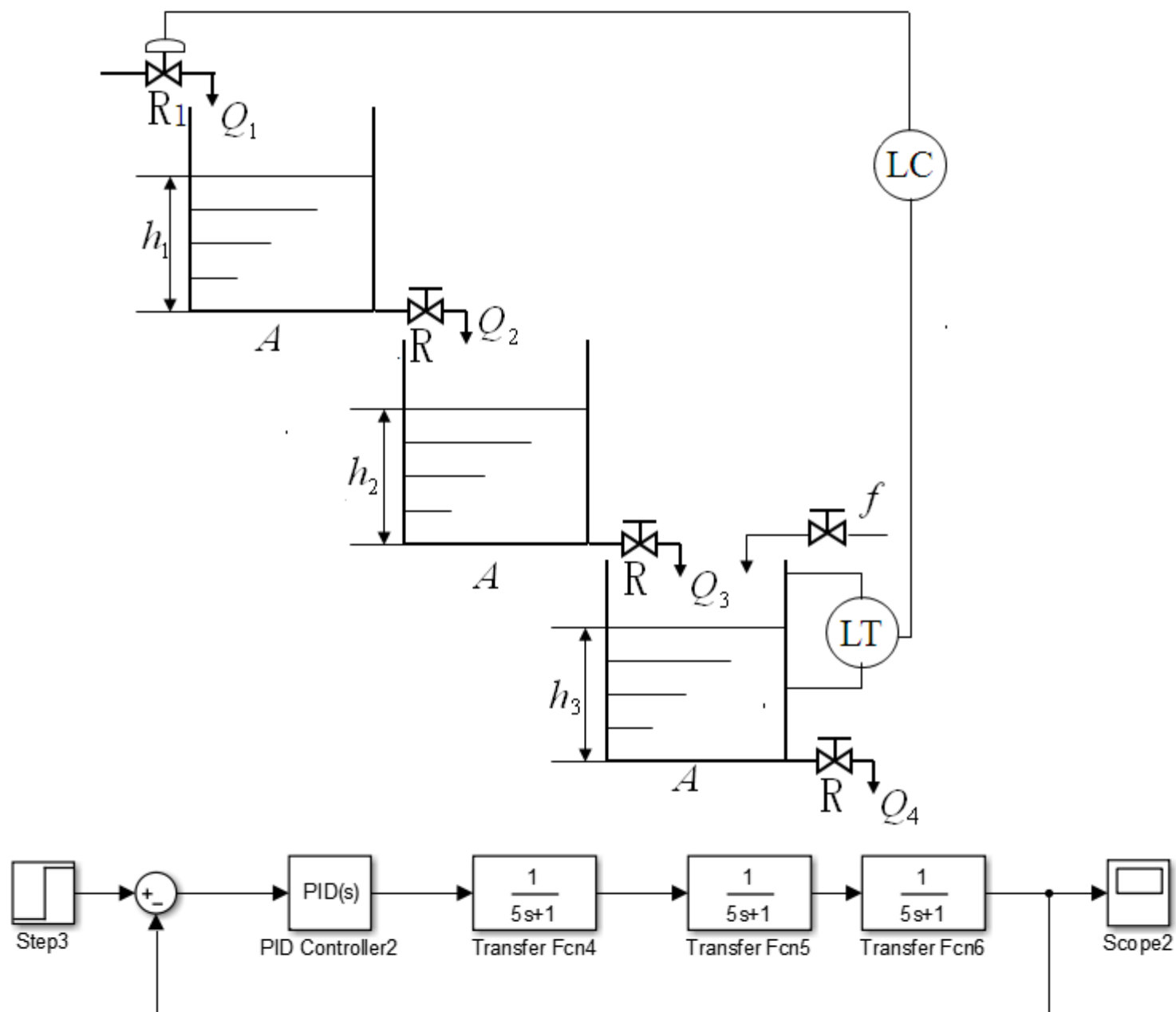
设计比较先进的电动III型、I系列、EK系列等控制器来说，具有双向平衡无扰动切换功能。

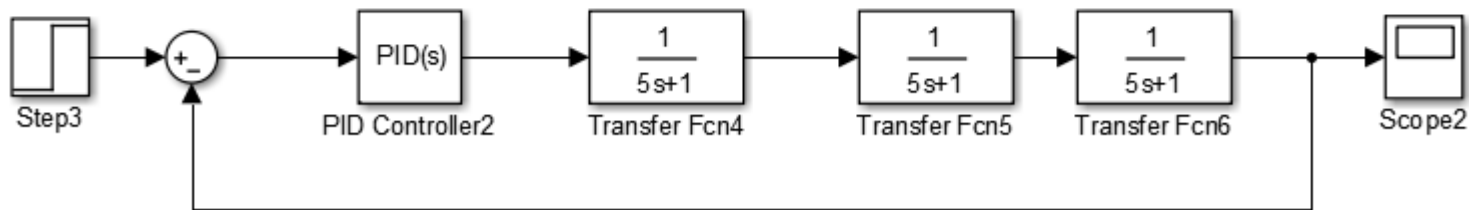
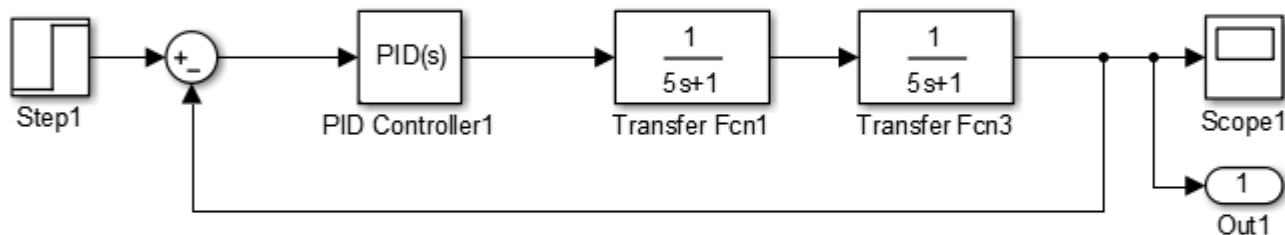
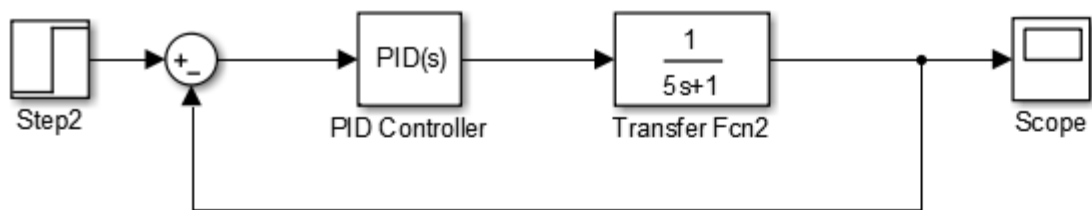
电动II型控制器没有这么方便。为了保证无扰动切换，必须在切换之前做找平衡工作，即必须在偏差等于零时，才能进行切换。

不同阶次系统仿真比较





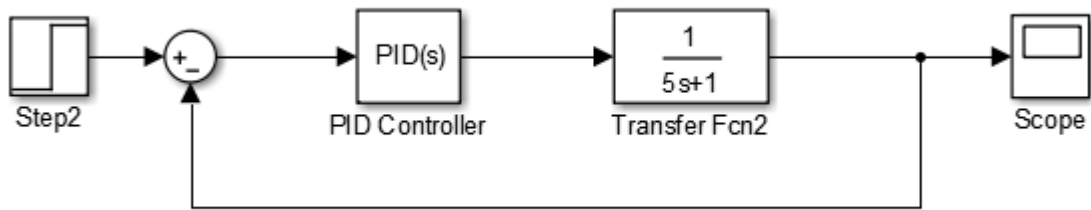




通过仿真一阶系统很好控制——很容易获得好性能
系统阶次越高越难控制，

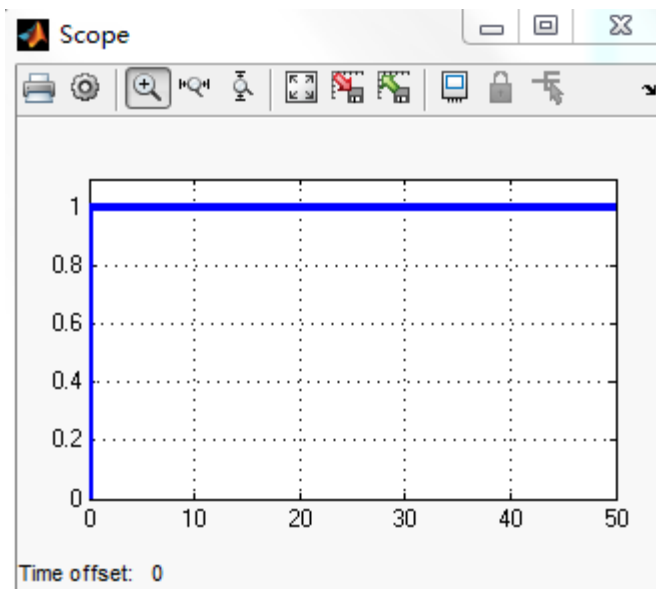
若用一节惯性环节加纯滞后表示模型，高阶性体现在 $\frac{\tau}{T}$ 比值越大。



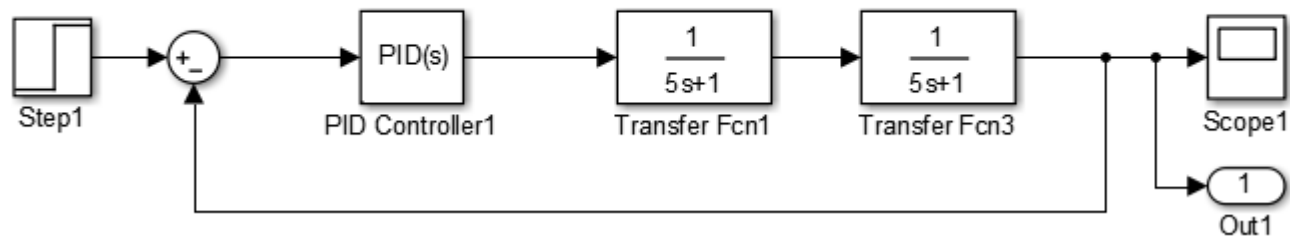


$$W_c(s) = K_c + I \frac{1}{s} + Ds$$

$$K_c = 1000, I = 1000, D = 0$$

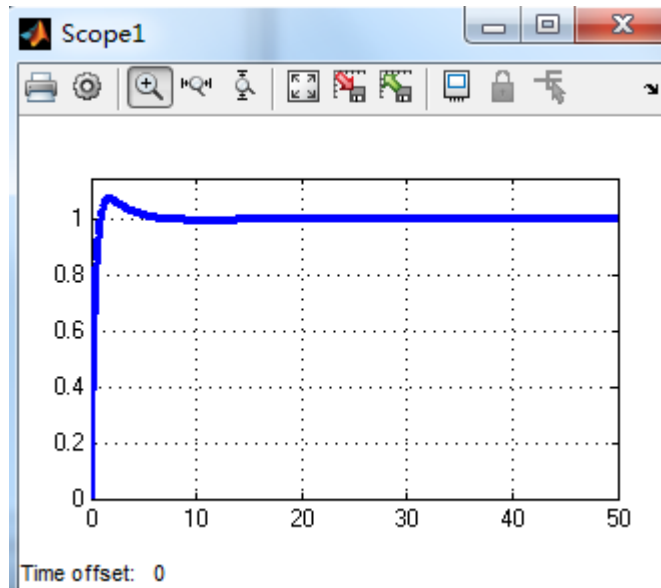


$$\sigma_p = 0.3\%, t_s = 0.19s$$

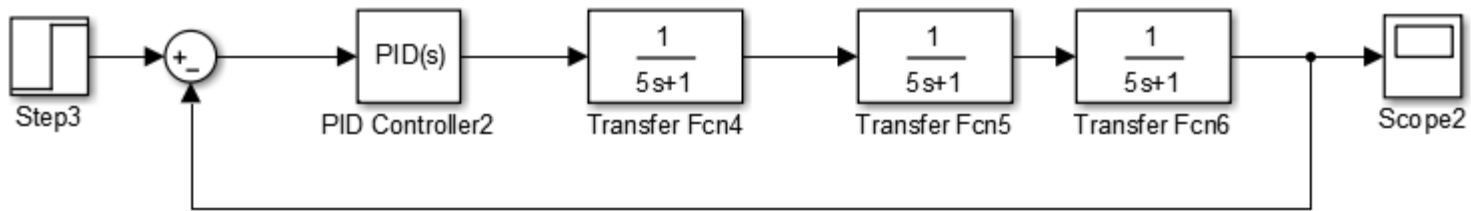


$$W_c(s) = K_c + I \frac{1}{s} + Ds$$

$$K_c = 48, I = 11.4, D = 67.2$$

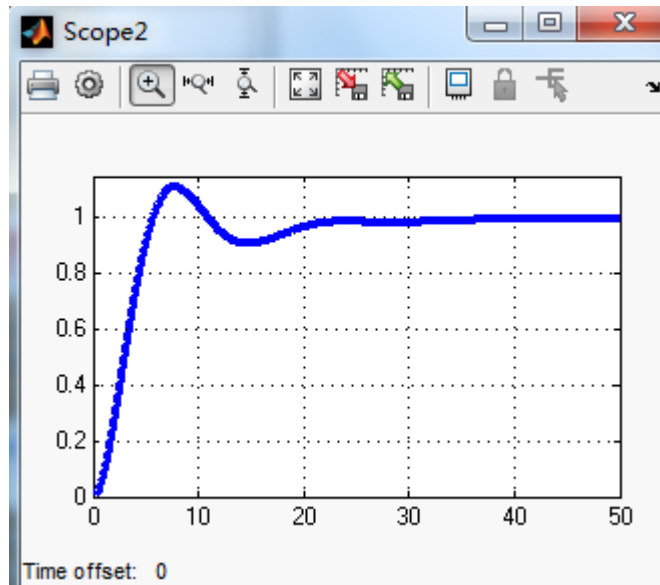


$$\sigma_p = 7.7\%, t_s = 5s$$



$$W_c(s) = K_c + I \frac{1}{s} + Ds$$

$$K_c = 5, I = 0.28, D = 22.5$$



$$\sigma_p = 9.76\%, t_s = 23.19s$$

$$W_c(s) = K + I \frac{1}{s} + Ds$$

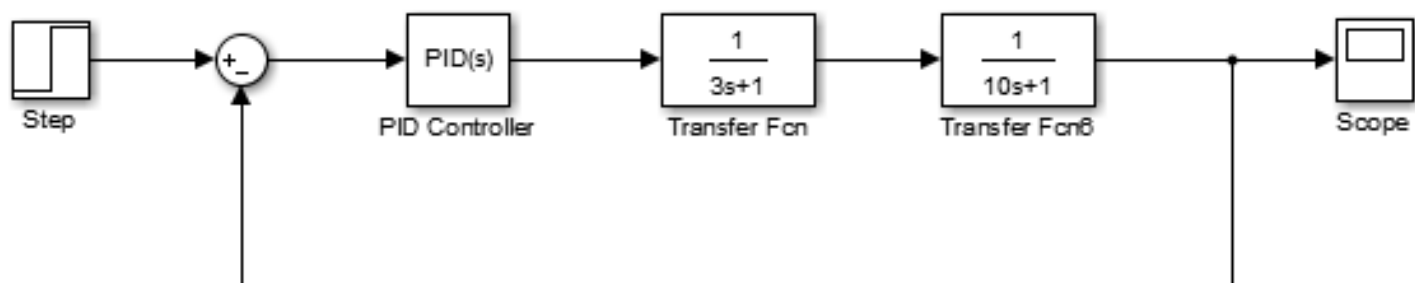
	K	I	D	s	ts
一阶对象	1000	1000	0	0.3%	0.19
二阶对象	48	11.4	67.2	7.7%	5
三阶对象	5	0.28	22.5	9.8%	23.19

系统阶次越高，允许稳定的K值越小，动态过程越慢。

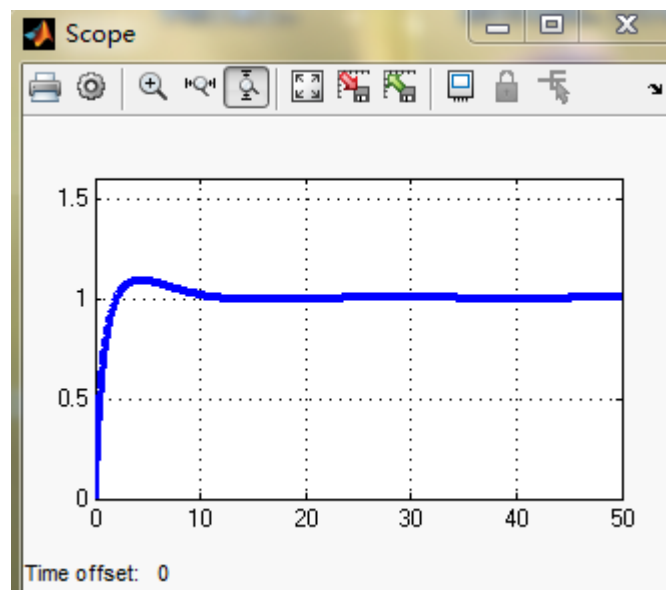
系统抗扰动的能力越差。

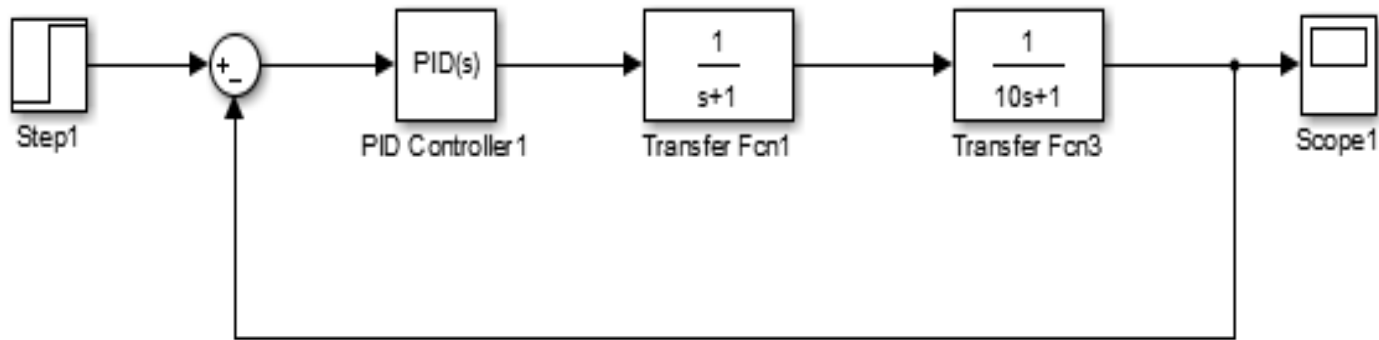
串级讲过调节器比例系数越大，抗扰动性能越好，但是当系统阶次越高时，受稳定性约束，调节器的比例系数越小。

二阶系统参数变化仿真比较

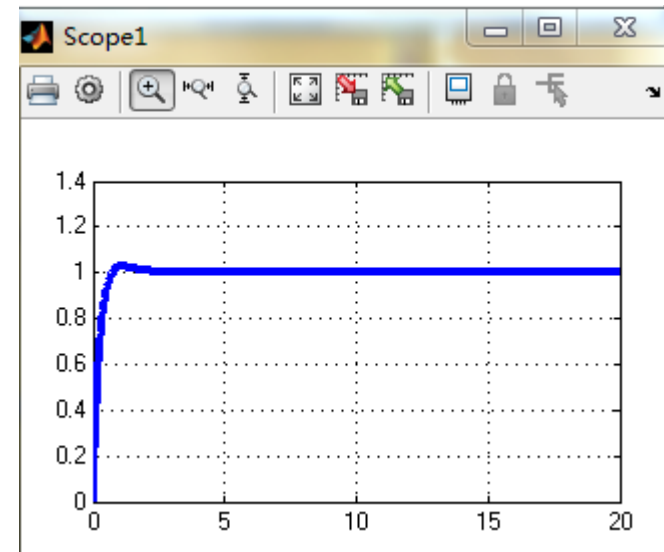


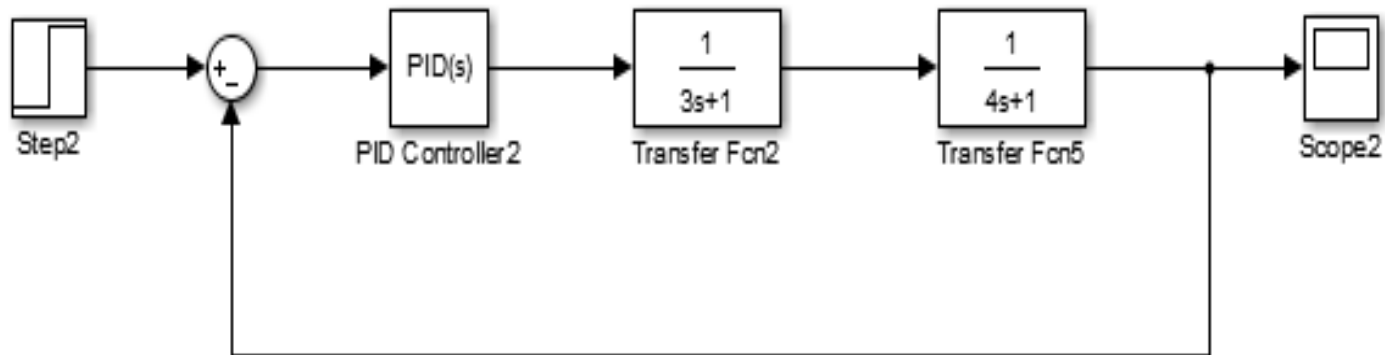
$K=20$, $I=5$, $D=40$



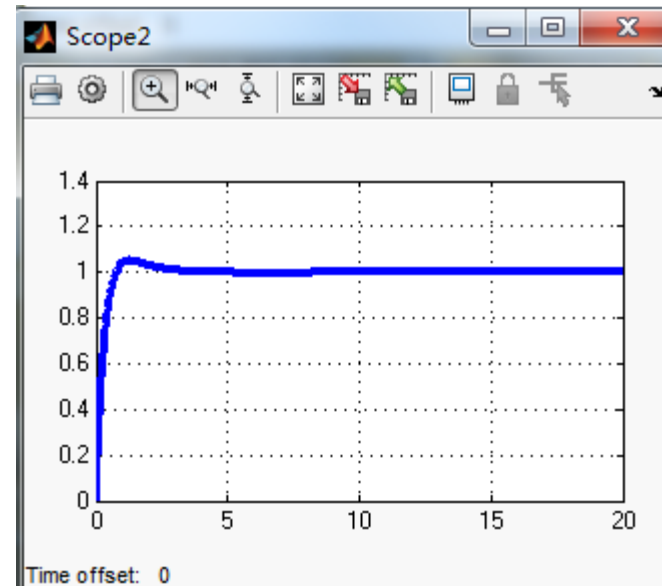


$K=60$ $I=5$ $D=40$





$K=40$ $I=5$ $D=40$



	K	I	D	t_s
$\frac{1}{(3s+1)(10s+1)}$	20	5	40	10
$\frac{1}{(s+1)(10s+1)}$	60	5	40	4
$\frac{1}{(3s+1)(4s+1)}$	40	5	40	6

第二组性能最好

这个仿真我想说明当二阶系统由于某些原因可以使得其中一个一阶环节时间常数变小，系统性能都会变好；

如果两个环节时间常数相差较大比如10倍，则可以看作一阶系统，动态性能会更好（第二种情况）

实际案例

放热反应过程在催化剂C的作用下，原料A与原料B反应生成主产物D和副产物E，反应方程式如下：



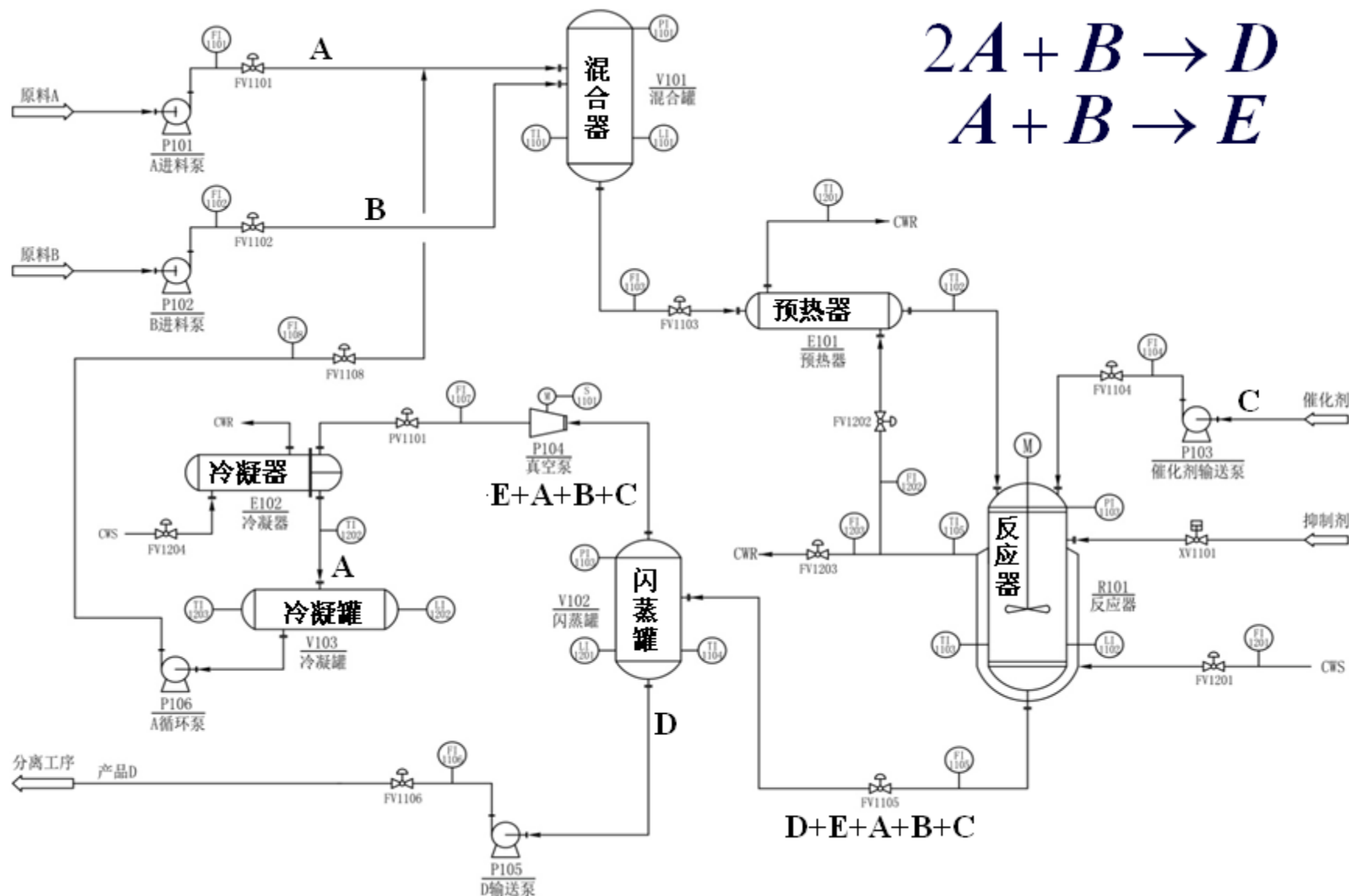
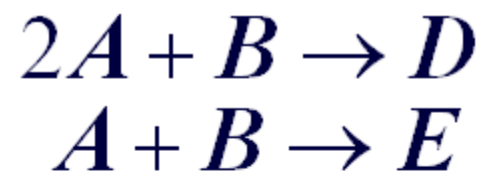
其中，主生成物D是所需产品，副生成物E是杂质。

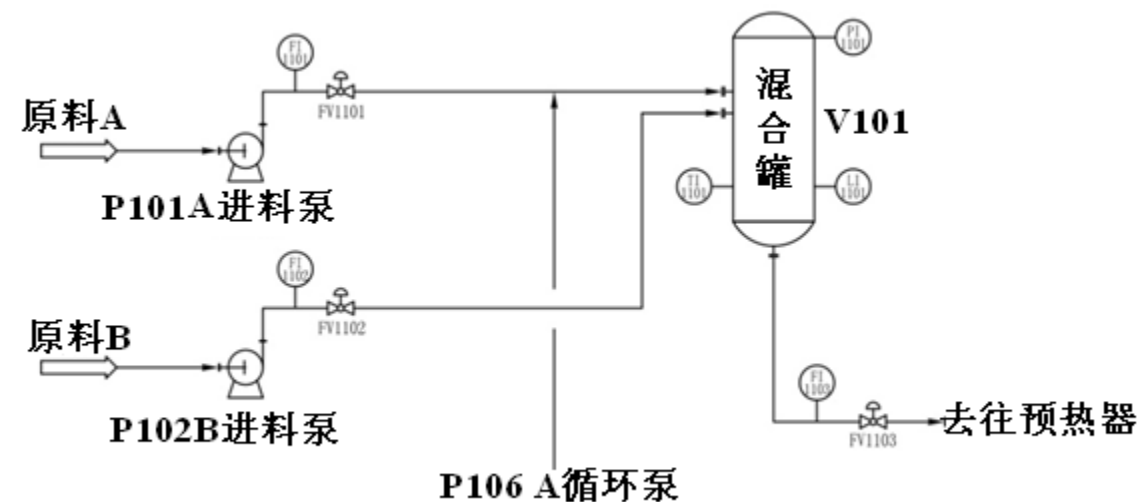
生产需求：

(1) 产物达到规定浓度要求的前提下，**产量越多越好**（D流量*产物浓度值的累积量）。

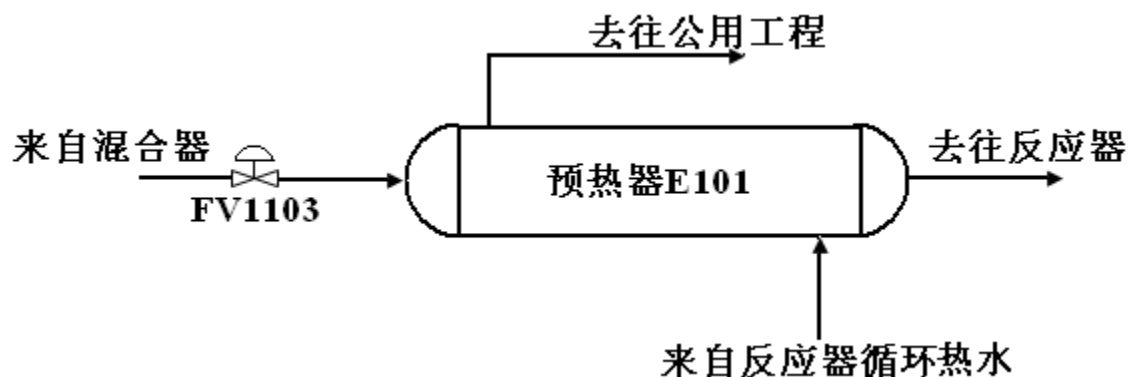
(2) **不能出现安全事故。**

为了获得较高的反应转化率，采用原料A过量的工艺。

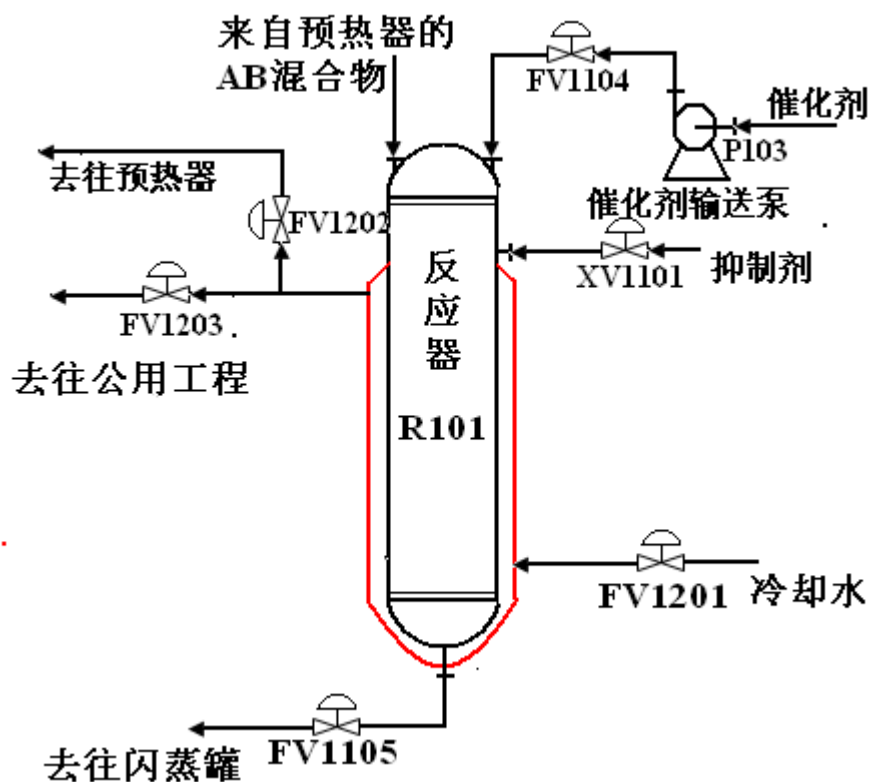




**原料A与原料B分别由原料A进料泵、原料B进料泵输送进入混合罐V101
(立式圆罐) 内混合**



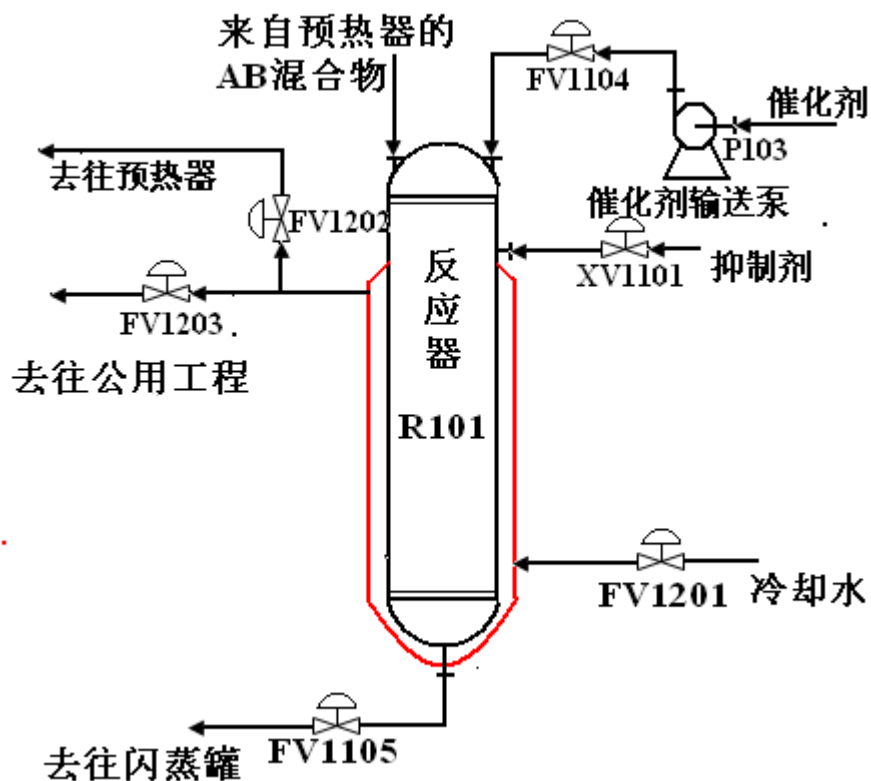
混合物料经预热器E101升温后，进入放热反应器R101进行反应。



正常工况下工艺过程如下：
反应所需的催化剂C，由催化剂C输送泵P103从反应器顶部加入。反应器R101底部出口生成物含有产品D、杂质E，催化剂C、以及未反应的原料A和少量原料B，进入下游的闪蒸罐。

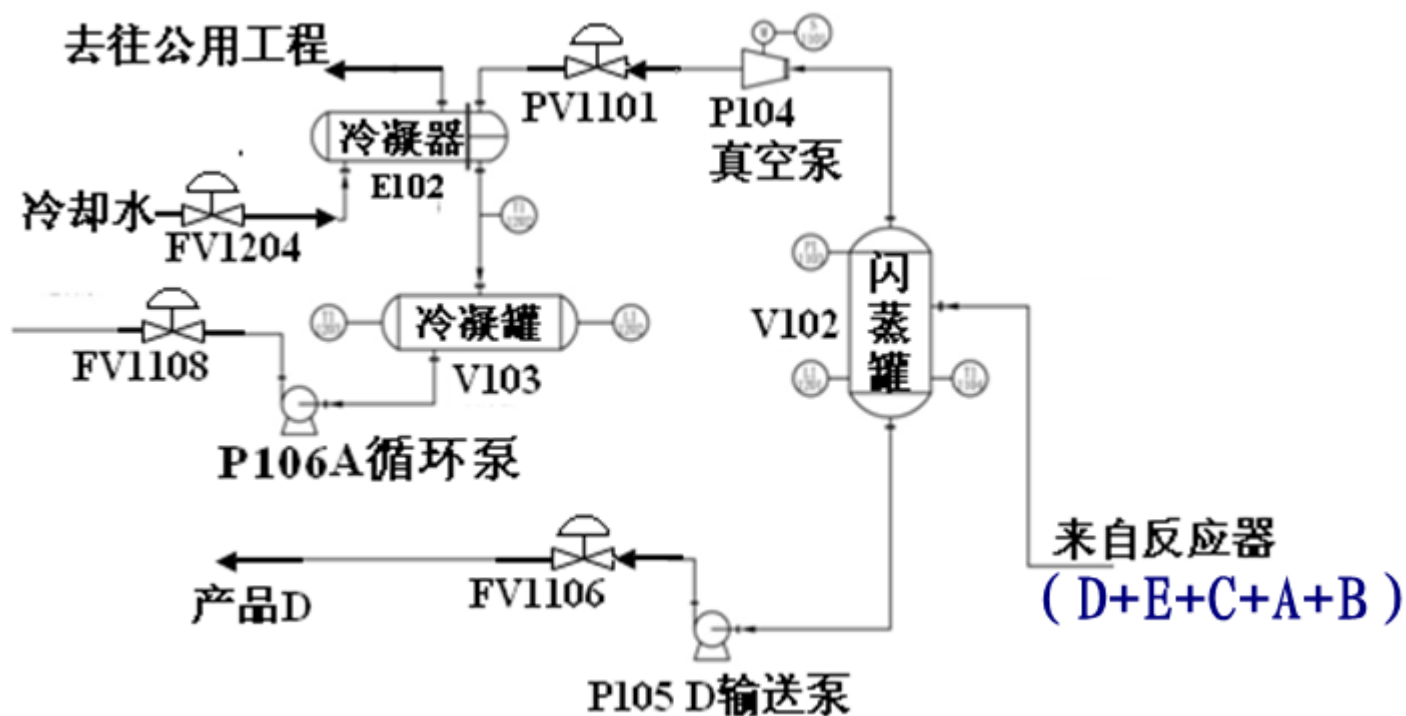
在反应过程中，反应放热强烈，因此反应器R101采用夹套式水冷却。

反应转化率与反应温度、停留时间、反应物料浓度及混合配比有关。

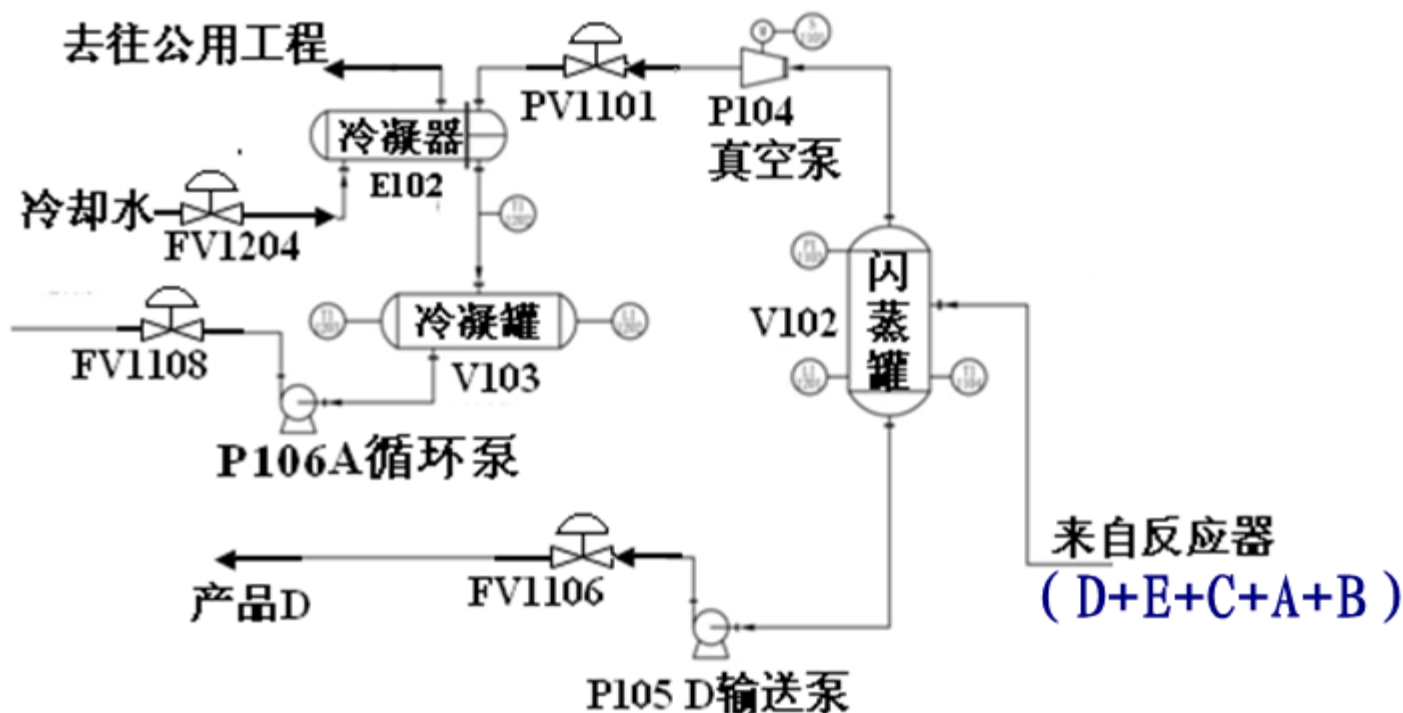


反应体系气相压力对温度敏感，在冷却失效产生的高温条件下，过高的气相压力使反应器有爆炸的风险。在反应器顶部设一路抑制剂，当反应压力过高危及安全时，通入抑制剂F，使催化剂C迅速中毒失活，从而中止反应。

冷却水吸收反应器的放热量形成热水，热水通往E101预热器对进料进行预热，以回收一部分热量，多余的热量通往公用工程。



反应器R101底部出口生成物含有产品D、杂质E，催化剂C、以及未反应的原料A和少量原料B，在反应器下游设置闪蒸罐V102，将混合生成物（D+E+C+A+B）中过量的原料A分离提纯。闪蒸罐通过减压使介质沸点降低容易气化。



首先进入冷凝器E102与冷却水进行换热冷凝，冷凝后的混合物进入冷凝罐V103,通过循环泵P106再送入混合罐V101循环利用。闪蒸罐V102底部的混合生成物（D+E+C+A+B）经输送泵加压，送到下游分离工序，进行提纯精制，以分离出产品D。

物料物性:

物料	分子量M g/mol	密度 ρ kg/m ³	沸点t °C
A	36	720	65
B	24	840	150
C	72	980	112
D	96	910	155
E	60	880	135
F	108	1100	167
H ₂ O	18	1000	100

参考工艺参数如下：

A、B、C进料比约为：9:3:1

反应器温度范围 100度

反应器液位范围0% - 100% (0%表示抽空，100%表示溢出)

反应器压力范围不得超过130 Kpa

闪蒸罐压力范围 20 – 120 Kpa

闪蒸罐底部出口物料产量浓度要求75%以上

结束

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

绘制单回路系统方块图

过程对象的正反特性

控制器正反作用

PID参数整定

系统设计

课堂作业：

- 1、气动调节阀输入信号的压力为0.02~_____ MPa。
- 2、设某双容自衡对象的时间常数 $T_1=80$ （秒）， $T_2=20$ （秒），放大系数 $K_0=5$ ，则该对象的传递函数为_____。

已知单回路控制系统调节器的传递函数为 $W(s) = 3(1 + \frac{1}{9s})$ ，调节阀的传递函数为 $W_v(s) = 2.6$ ，过程的传递函数为 $W_0(s) = \frac{5}{26s+1}e^{-3s}$ ，测量变送的传递函数为 $W_m(s) = \frac{0.15}{5s+1}$ ，则系统广义过程的传递函数为_____。

根据过程纯滞后时间与过程时间常数比值 $\frac{\tau_0}{T_0}$ 可选择调节规律，若 $\frac{\tau_0}{T_0} = 0.19$ ，则调节规律应选用_____。

设锅炉燃烧过程如图所示。工艺要求锅炉燃烧产生蒸汽时，必须满足水—汽平衡关系，维持汽包液位在给定值。为设计一个合理的单回路控制系统，试回答以下问题：

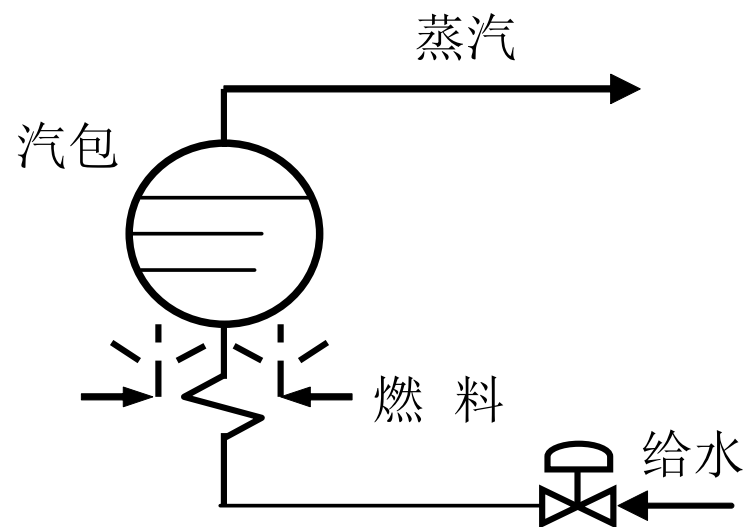


图 2-1

1. 系统的控制变量为_____;
2. 气动调节阀的开关方式为_____;
3. 调节器的调节规律为_____;
4. 调节器的作用方式为_____;
5. 调节器参数工程整定法有_____;
6. 画出控制系统流程图。