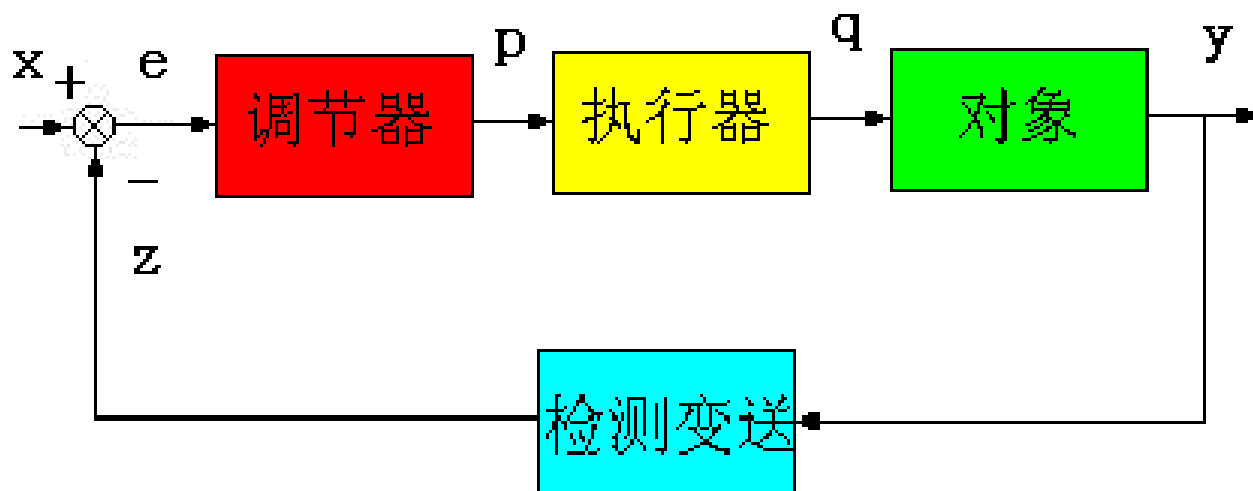


第5章 单回路调节系统

——简单控制系统设计

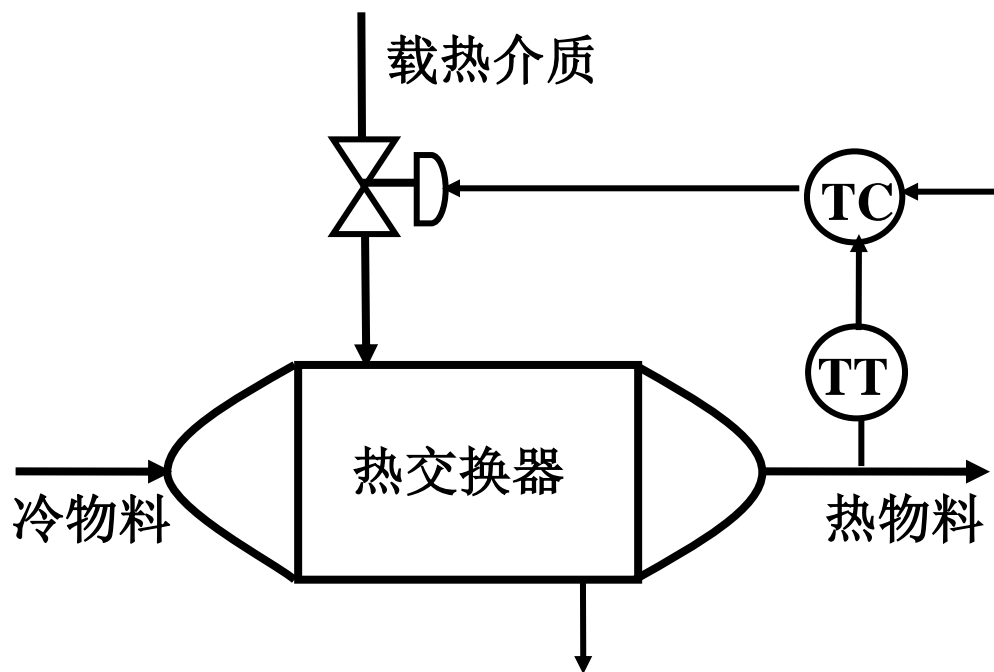


单回路调节系统（简单控制系统），一般指在一个调节对象上用一个调节器来保持一个参数恒定，而调节器只接收一个测量信号，其输出也只控制一个执行机构。

(一) 简单控制系统的设计概述

1、简单控制系统的结构：

由一个受控对象、一个测量变送器、一个控制器和一个执行器（调节阀）所组成的闭环控制系统。



管式加热炉温度控制系统组成

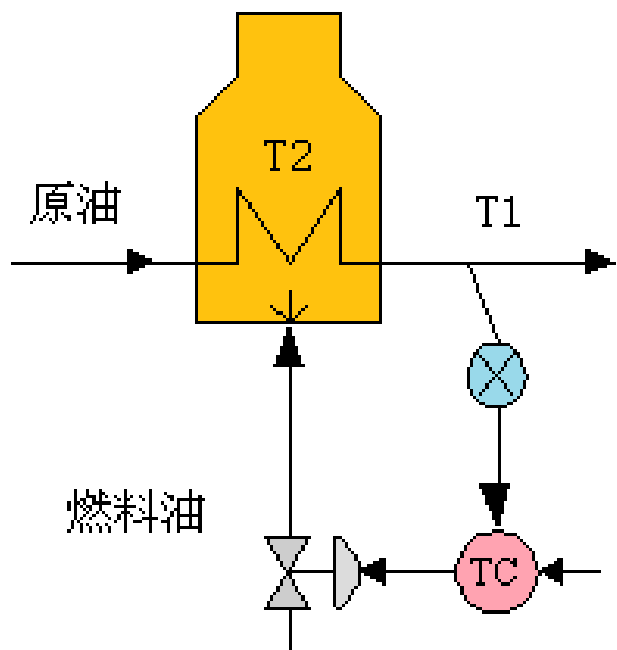
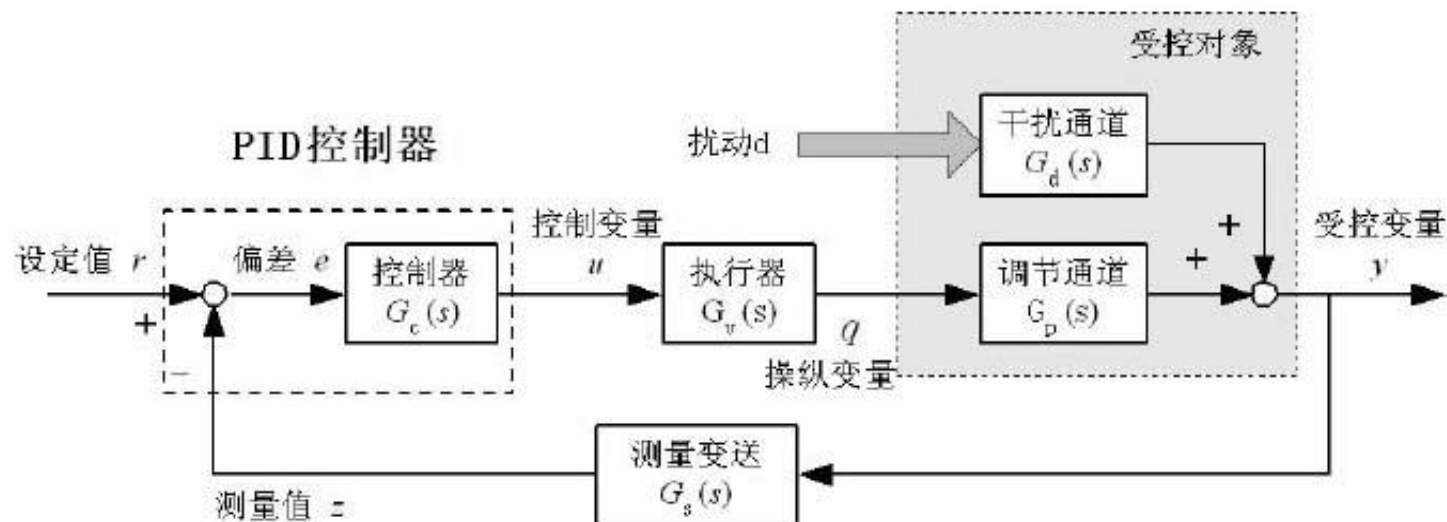


图1 加热炉温度控制系统

由控制器、控制阀、测量变送器及控制对象组成。

- 1.检测（变送热电偶、温度变送器）
- 2.调节器（温度控制器）
- 3.执行器（调节阀）
- 4.被控对象（加热炉）

简单控制系统的结构框图如下：

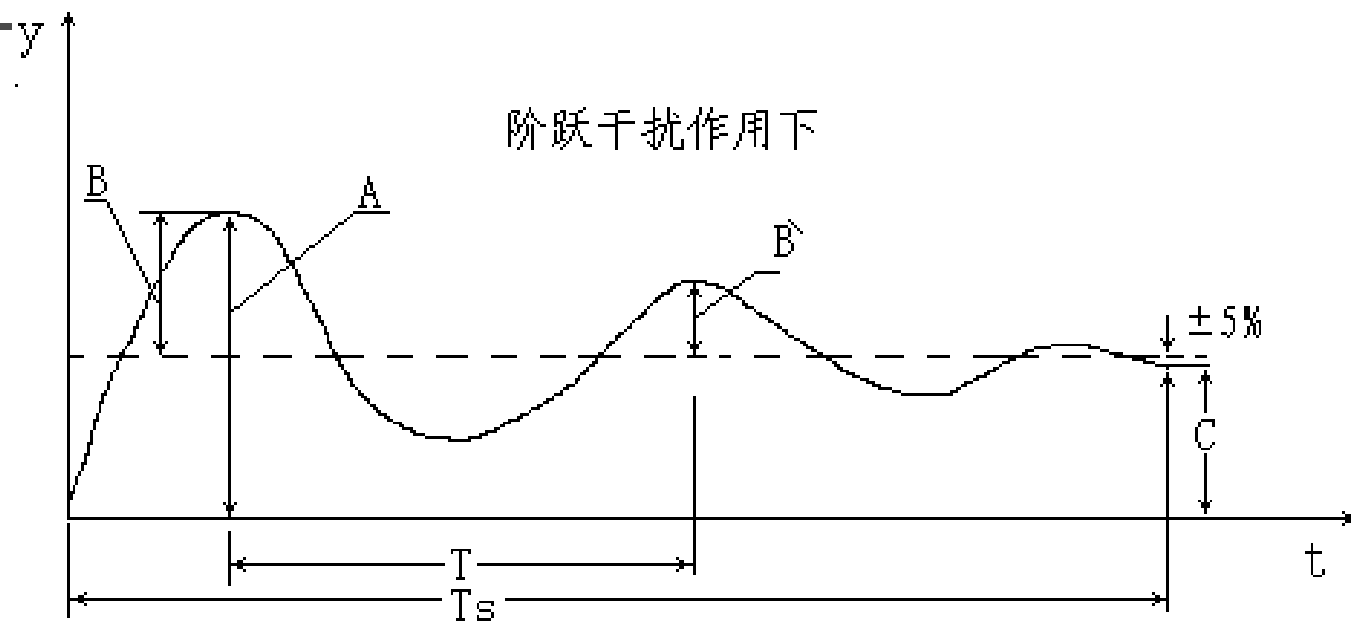


单回路调节系统典型结构

2、对控制系统的一般要求：

系统**稳定**，过度过程时间短，**快**，控制**精度高**，**准**。

系统性能指标



最大偏差: A

超调量: B

峰值时间

过渡时间 (调整时间); T_s

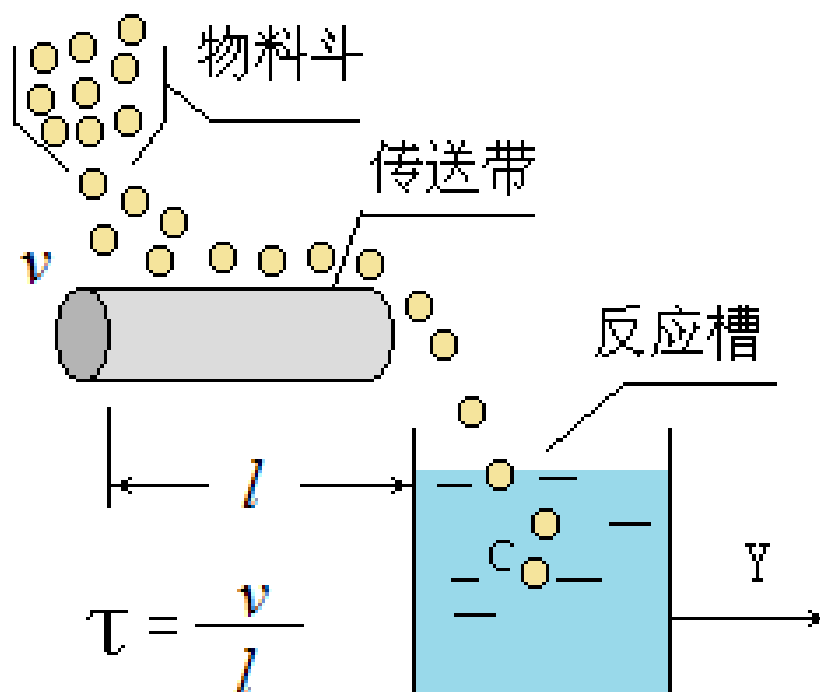
余差: C

衰减比: N

衰减率: ψ

振荡周期: T

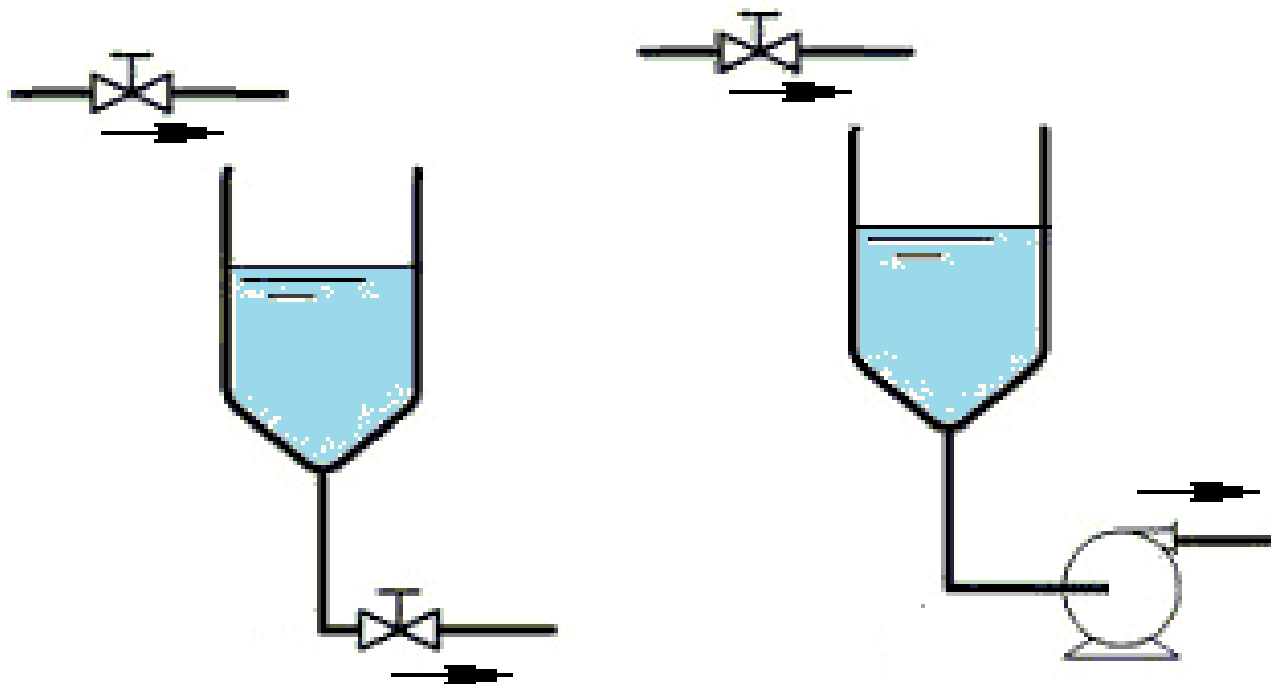
纯滞后



$$G(s) = e^{-\tau s}$$

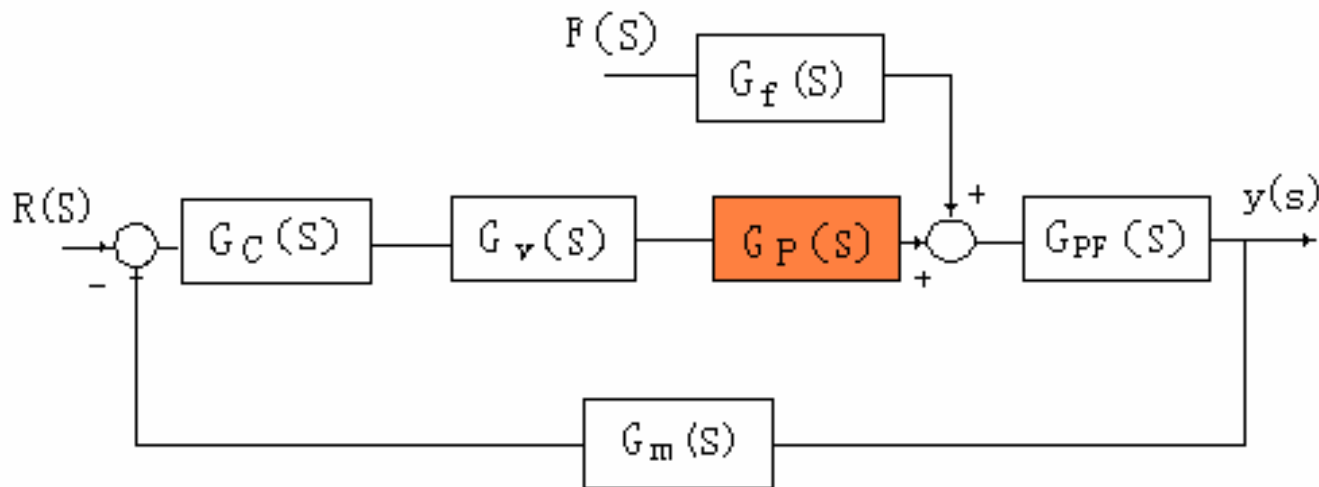
系统自衡特性

自衡特性对调节质量的影响



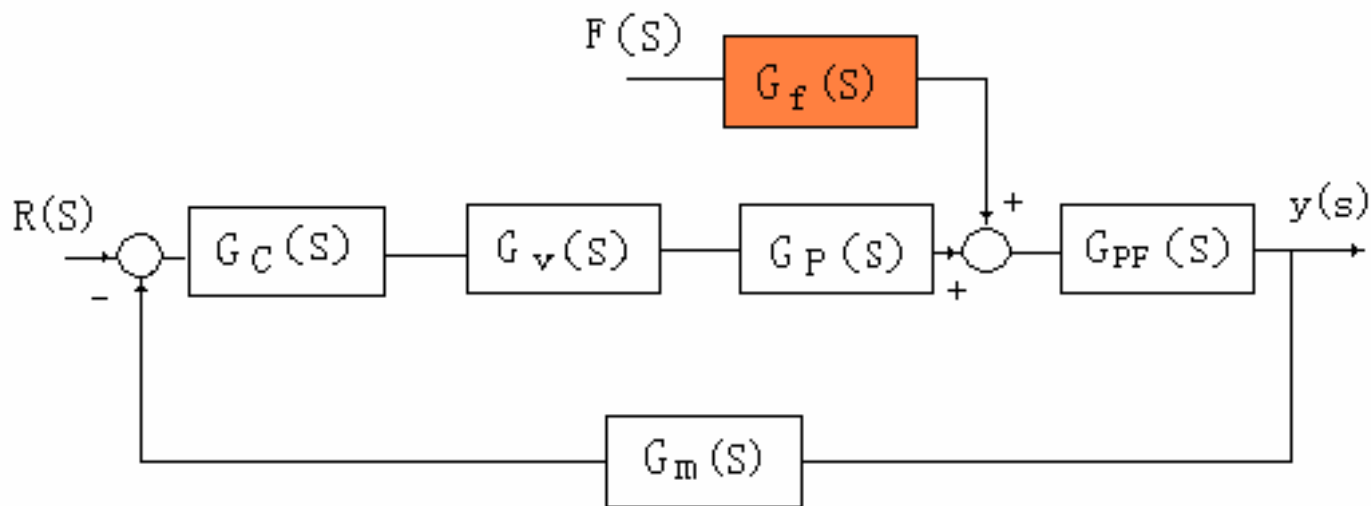
调节通道特性对调节质量的影响

- 纯滞后会使超调增加，控制质量变差。
- 时间常数大，会使系统响应变长，但过程趋于平稳。
- 放大系数越大，控制作用明显，但容易引起系统的不稳定。

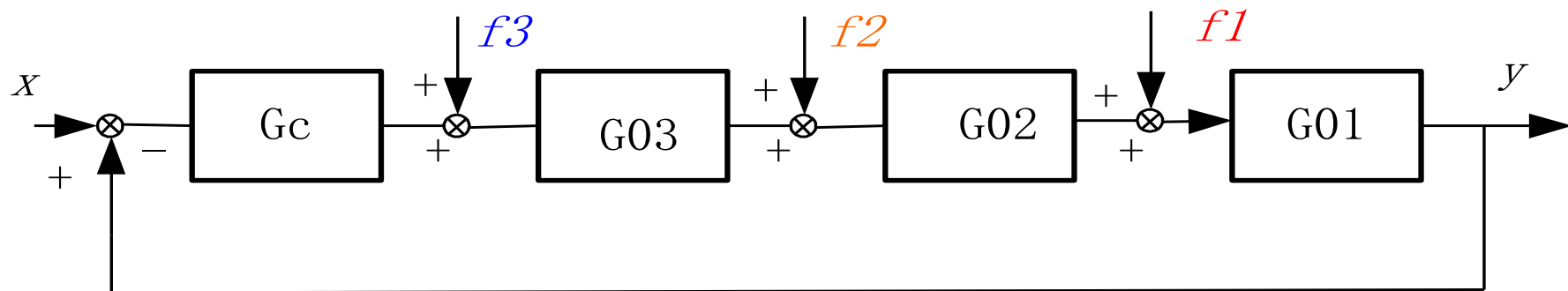


干扰通道特性对调节质量的影响

- 时间常数越大，干扰对控制质量影响越小。
- 放大系数越小，控制系统精度越高。
- 纯滞后对系统质量没有影响。
- 干扰点离调节作用越近，控制质量越好。



干扰进入位置的影响



干扰进入位置离调节器输出调节作用越远对调节质量的影响越大。



（三）控制方案的确定

1、系统被控参数选取的一般原则

被控变量—生产过程中希望借助自动控制保持恒定值（或按一定规律变化）的变量。

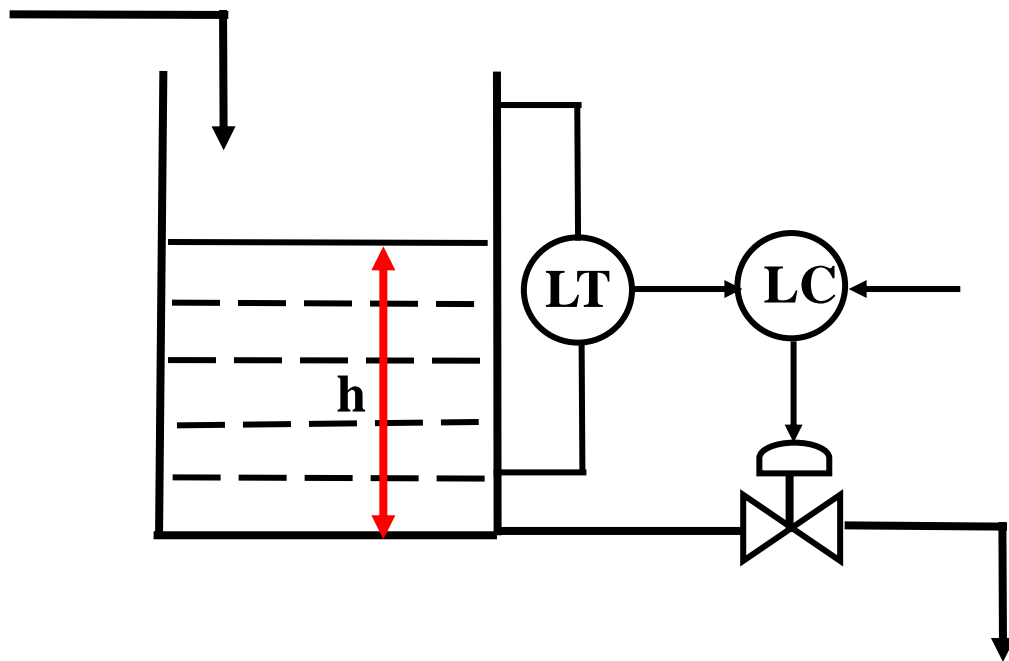
合理选择被控变量，关系到生产工艺能否达到稳定操作、保证质量、保证安全等目的。

被控变量的选择依据：

1) 根据生产工艺的要求，找出影响生产的关键变量作为被控变量。

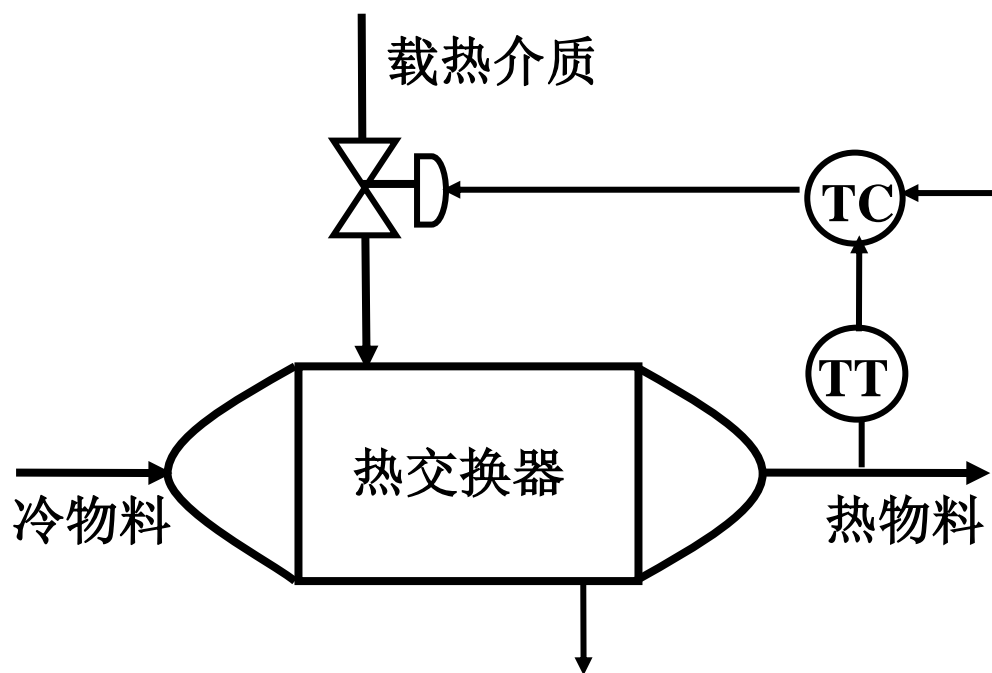
例1 储槽液位控制系统

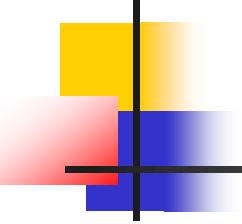
工艺要求储槽液位稳定。那么设计的控制系统
就应以储槽液位为被控变量。



例2 换热器出口温度控制系统

工艺要求出口温度为定值。那么设计的控制系统就应以出口温度为被控变量。





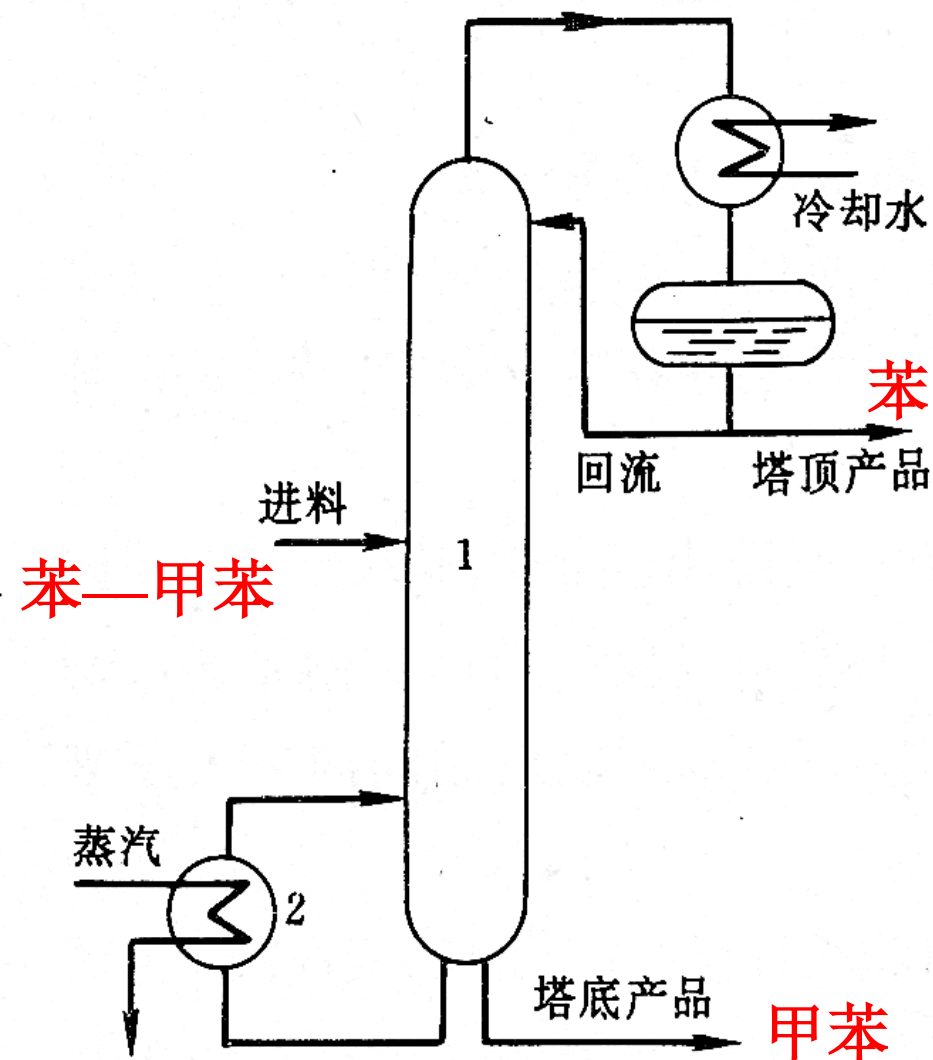
2) 当不能用直接工艺参数作为被控变量时，应选择与直接工艺参数有单值函数关系的间接工艺参数作为被控变量。

例3 化工的精馏物纯度控制系统

精馏工艺是利用被分离物中各组分的挥发温度不同，将各组分分离。如将**苯—甲苯**混合液进行分离。







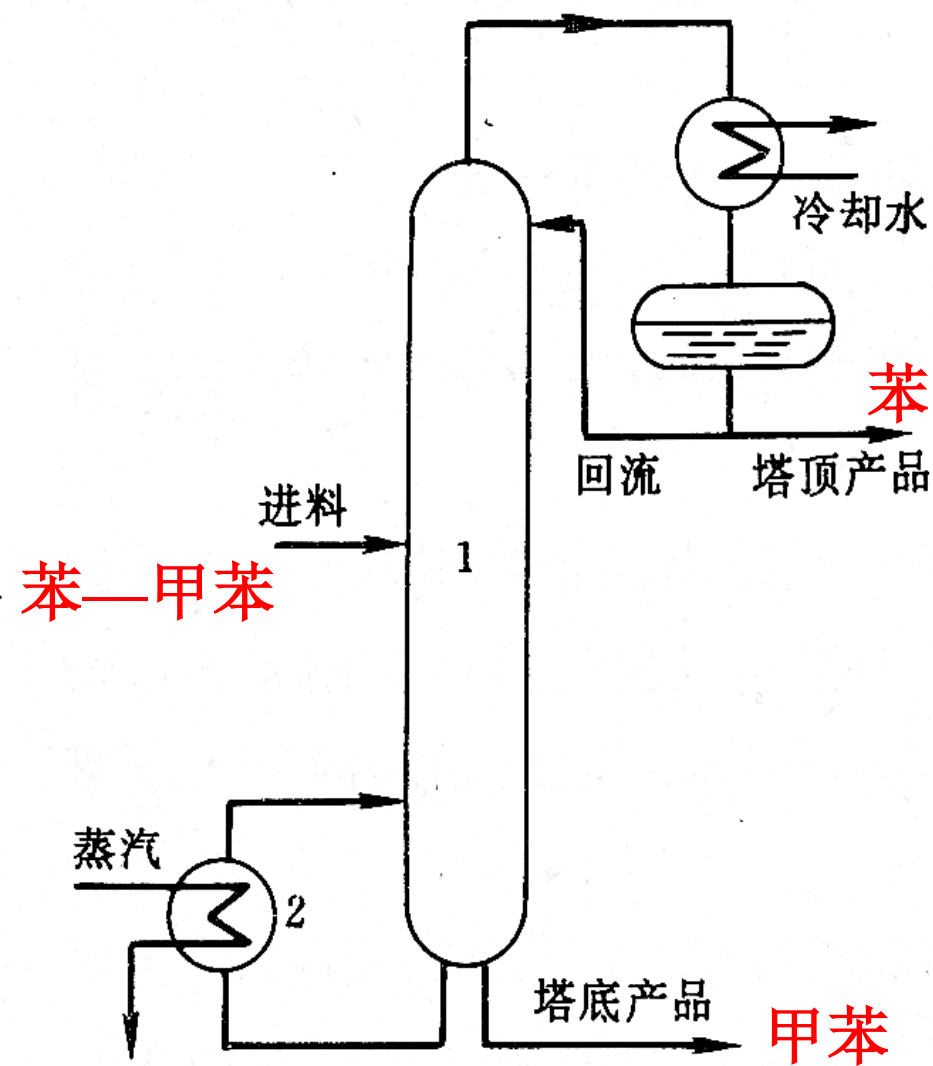
精馏过程示意图

1—精馏塔；2—蒸汽加热器

该精馏塔的工艺要求是使塔顶（或塔底）馏出物达到规定的纯度。

按照被控变量的选择原则1，塔顶（或塔底）馏出物的组分应作为被控变量。

但是，没有合适的仪表在线检测馏出物的纯度，则不能直接作为被控变量。



精馏过程示意图

1—精馏塔；2—蒸汽加热器

只好在与馏出物的
纯度有单值关系的工艺
参数中，找出合适的变
量作为被控变量，进行
间接参数控制。

经工艺分析发现，
塔内压力和塔内温度都
对馏出物纯度有影响，
选哪个？

间接控制参数的确定

经试验得出，塔顶馏出物苯的浓度分别与压力和温度有单值对应关系，（塔底馏出物甲苯也一样）。

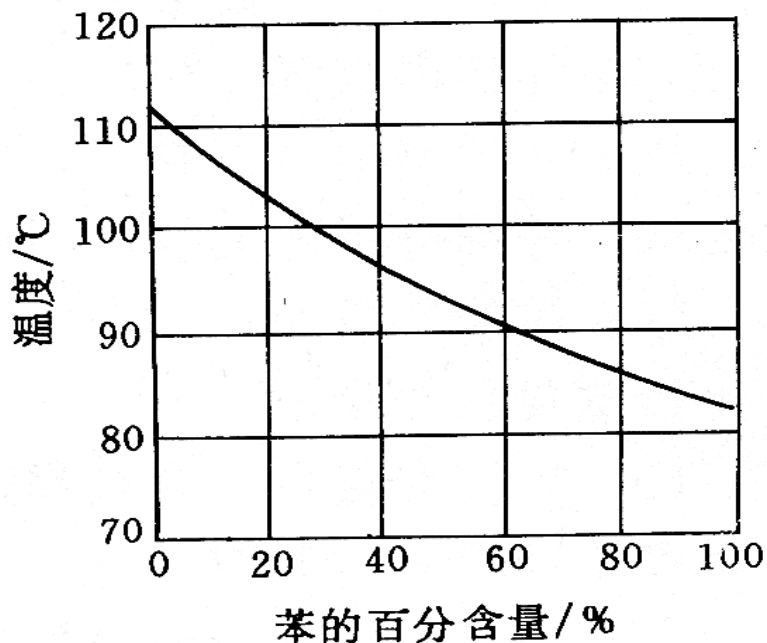


图 7-5 苯-甲苯溶液的 $T-x$ 图

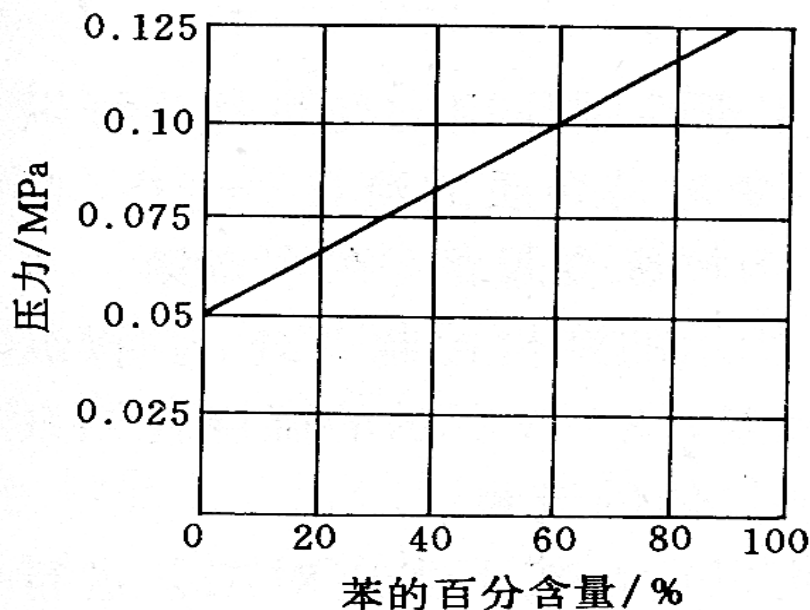


图 7-6 苯-甲苯溶液的 $p-x$ 图

从工艺合理性考虑，选择温度作为被控变量。



3) 被控变量必须有足够大的灵敏度

被控变量必须灵敏，容易被测量。

4) 选择被控变量时，必须考虑工艺合理性

上例中，选择塔内温度作被控变量，就是考虑了工艺上塔内压力一般要求固定，只有在规定压力下，才能保证分离纯度和生产效率，如果塔压波动、塔内的汽液平衡不稳定，相对挥发度就不稳定，导致塔处于不良工况，此外塔压变化会引起与之相关的物料量变化，导致负荷变化。

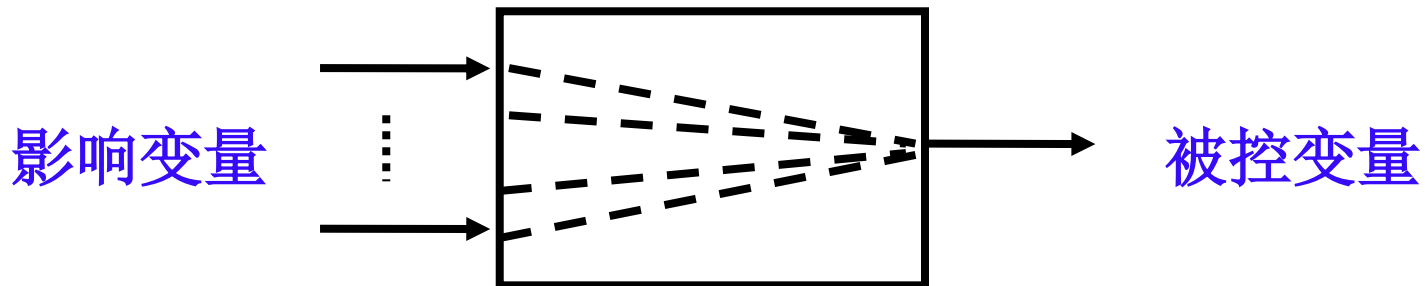
上例中，若塔顶、塔底的产品纯度都分别设置温控系统，会相互干扰，存在关联。因此，若采用简单控制系统，只能**设置一个温控系统**，保证塔顶或塔底一端的产品质量。

特别说明：被控参数一般由工艺工程师确定，控制工程师无多大选择余地。

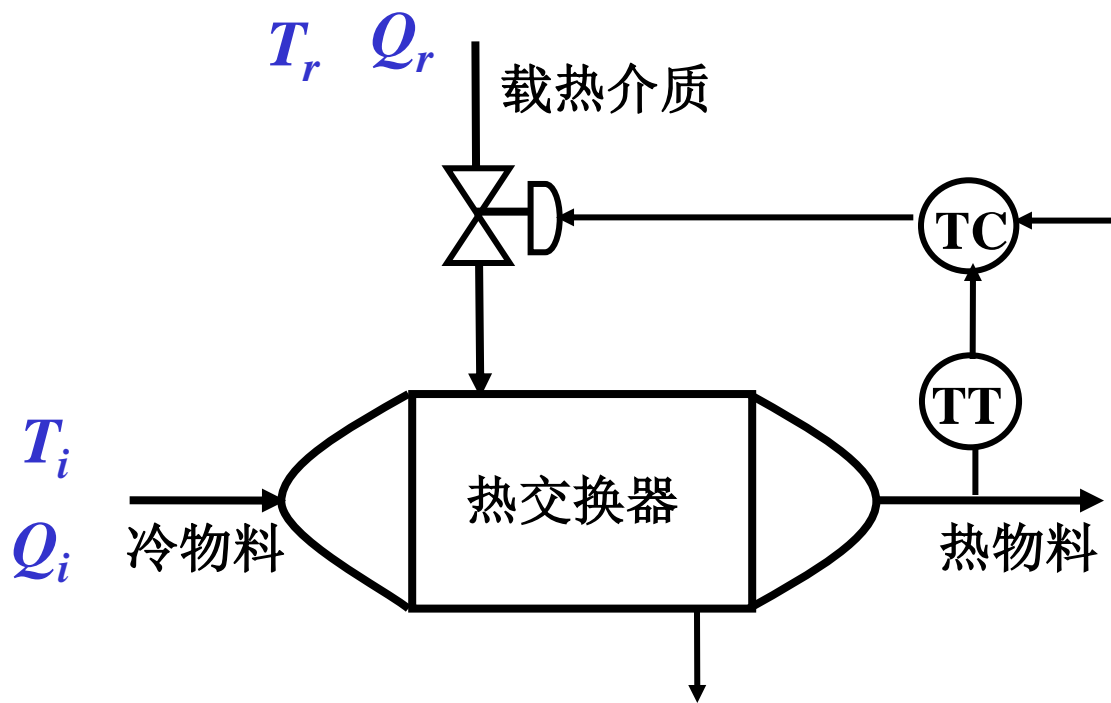
控制变量的确定：

被控变量选定以后，应对工艺进行分析，找出所有影响被控变量的因素。在这些变量中，有些是可控的，有些是不可控的。

- 在诸多影响被控变量的因素中选择一个对被控变量影响显著且便于控制的变量，作为控制变量；
- 其它未被选中的因素则视为系统的干扰。

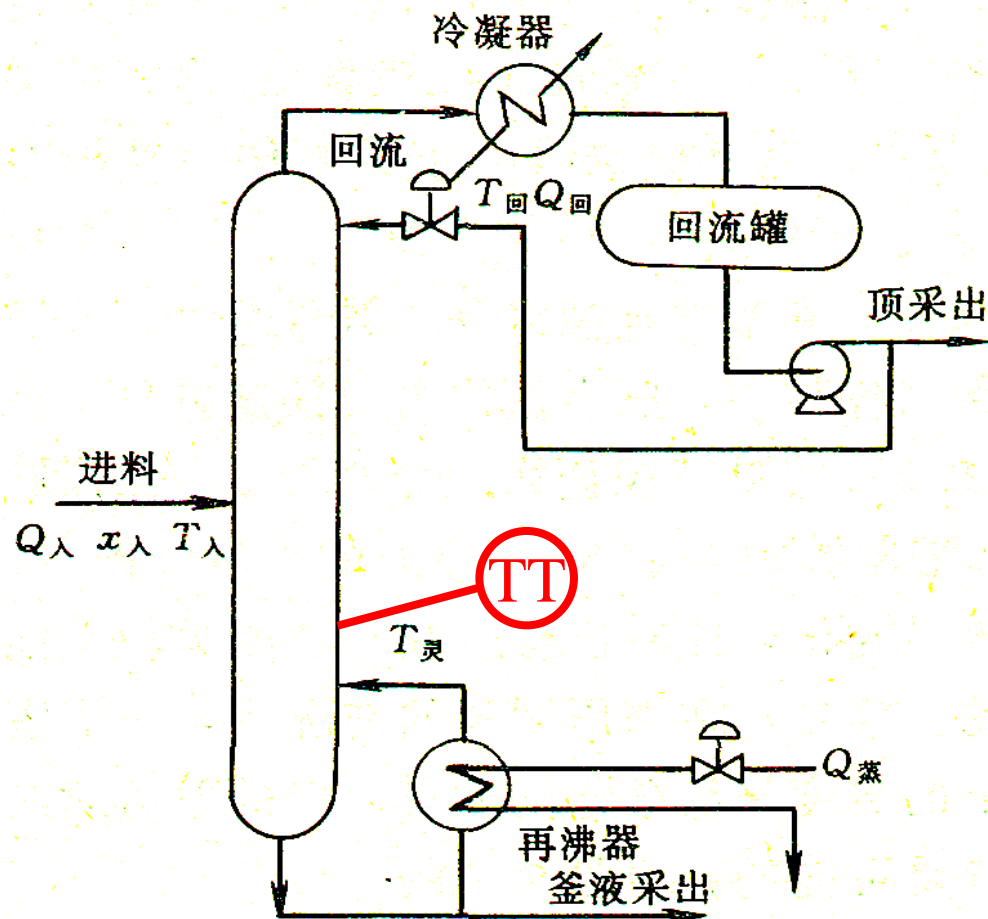


例1中，影响出口温度的主要因素有：载热介质温度、载热介质流量、冷物料温度、冷物料流量等。显然，**载热介质流量影响力最大且可控**。故选载热介质流量作为控制变量。



例2中，若选择提馏段某块塔板（灵敏板）
的温度作为被控变量。那么，影响灵敏板温度 $T_{\text{灵}}$
的因素主要有：

进料的流量（ $Q_{\text{入}}$ ）、
进料的成分（ $x_{\text{入}}$ ）、
进料的温度（ $T_{\text{入}}$ ），
回流的流量（ $Q_{\text{回}}$ ）、
回流的温度（ $T_{\text{回}}$ ），
加热蒸汽流量（ $Q_{\text{蒸}}$ ），
冷凝器冷却温度等。

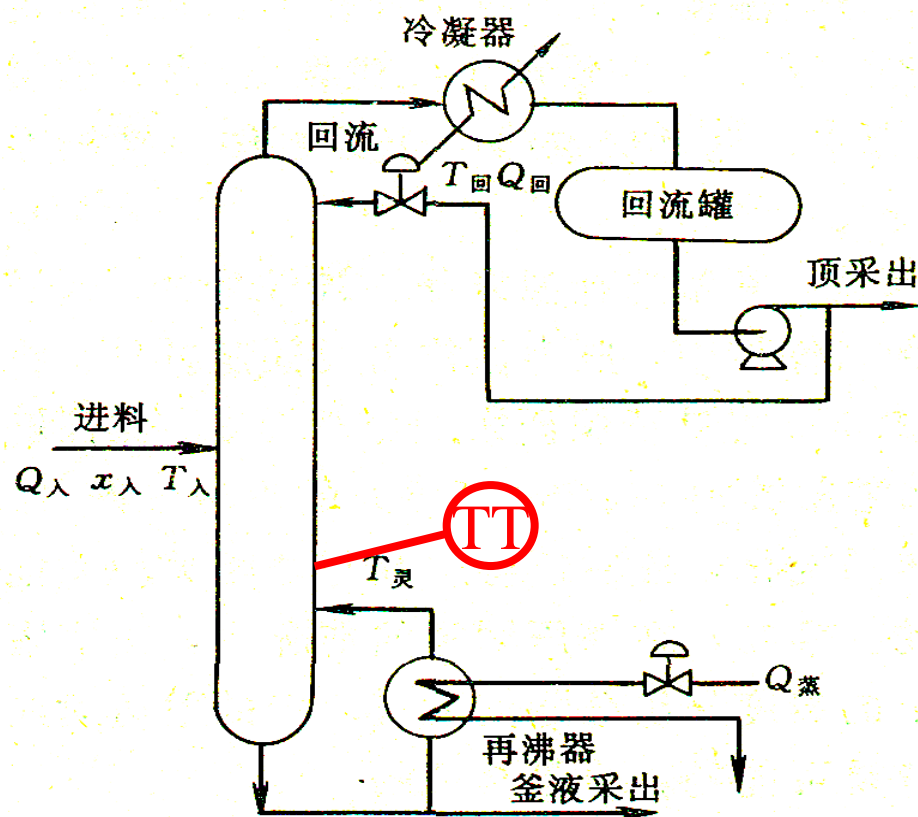
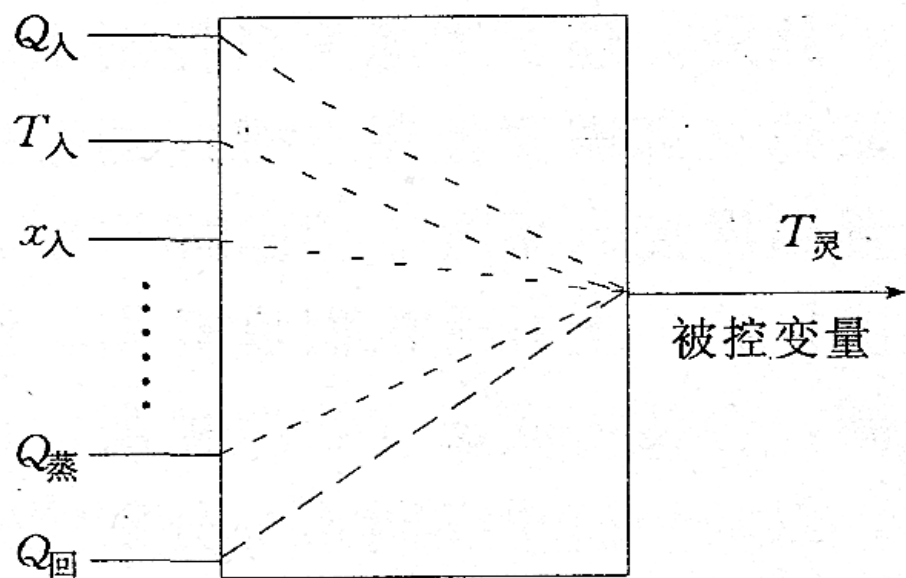


精馏塔流程图

这些影响因素分为可控的和不可控的两大类：

回流量和蒸汽流量为可控因素

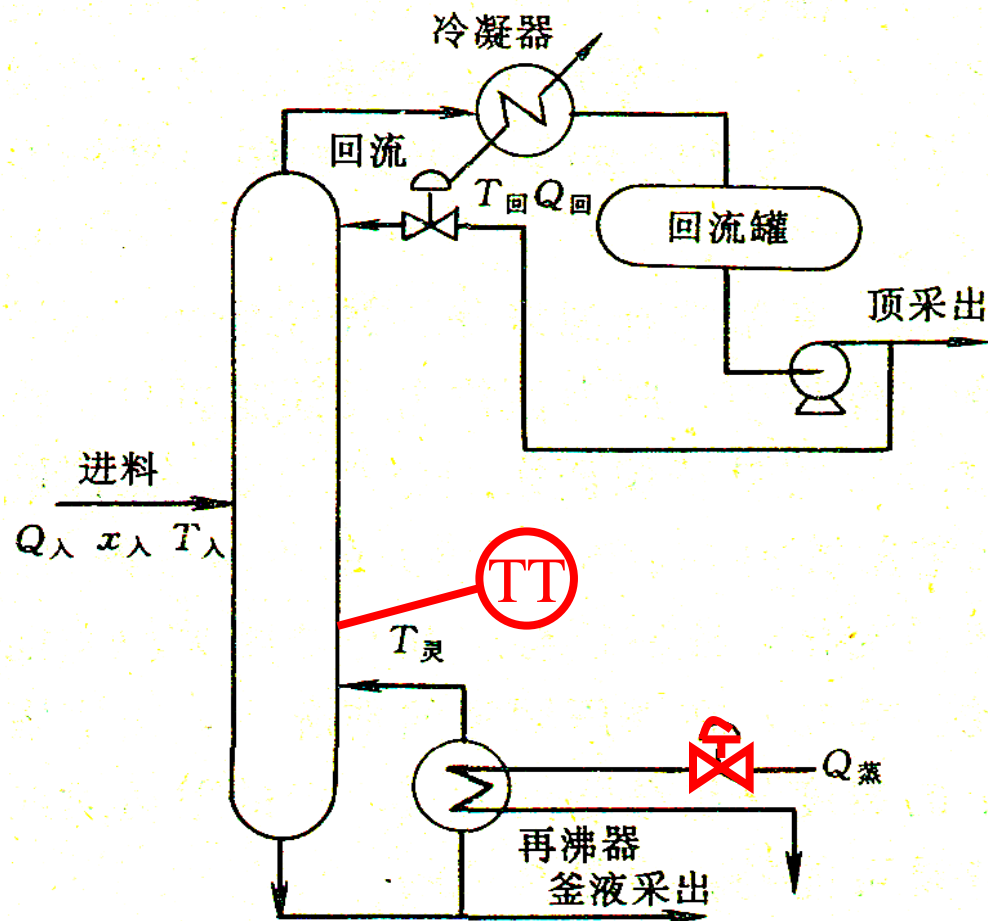
其它基本为不可控因素



在两个可控因素中，
选蒸汽流量为操纵变量。

因为：

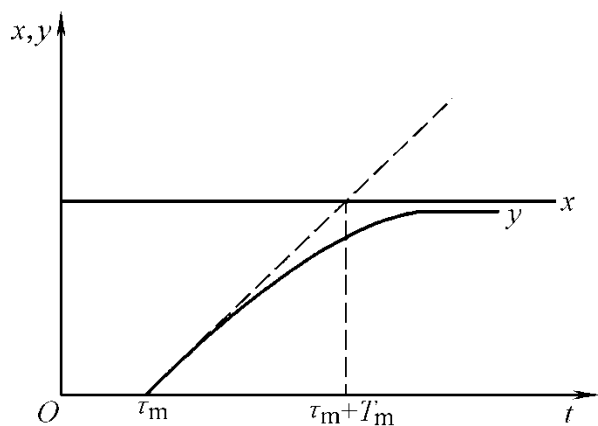
蒸汽流量对提馏段
温度影响比回流量对
提馏段温度影响更迅
速、更显著。



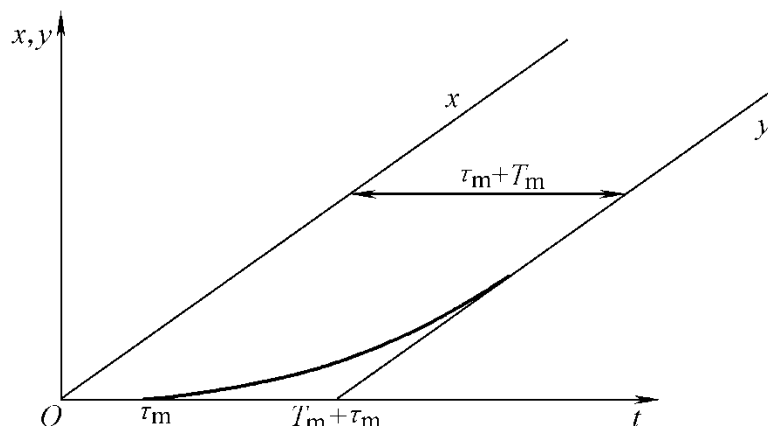
精馏塔流程图

2、被控参数的测量与变送器

- 1) 按照生产过程的工艺要求，首先确定传感器与变送器合适的测量范围（量程）与精度等级。
- 2) 测量仪表反应慢，会造成测量失真。应尽可能选择时间常数小的传感器、变送器。

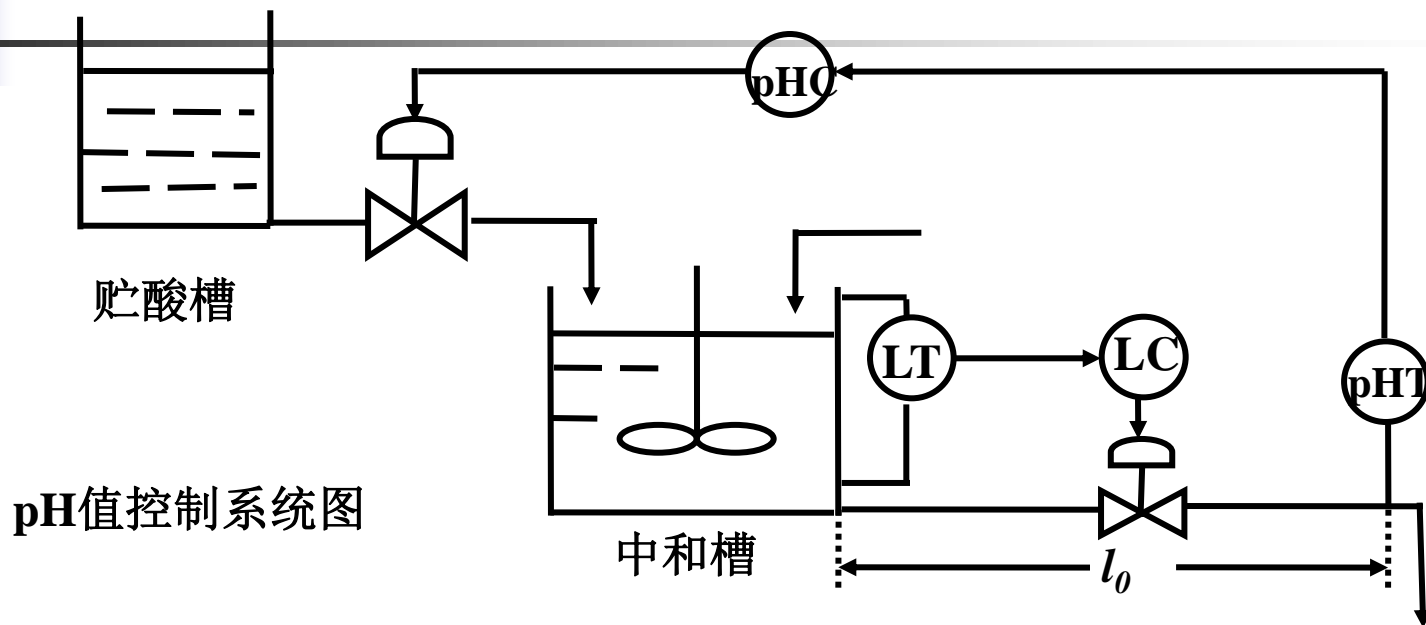


a)



b)

3) 合理选择检测点，避免测量造成对象纯滞后 τ_0



pH值控制系统图

4) 测量信号的处理

测量信号的校正与补偿、测量噪声的抑制、测量信号的线性化处理。



第五章 简单控制系统的设计

3、控制参数的选择（控制通道参数选择）

依据过程特性对控制质量的影响，不难归纳选择控制参数的一般原则：

(a) K_p 越大越好， T_p 适当小一些；

(b) τ_p 越小越好， $\tau_p / T_p < 0.2$

(c) K_f 尽可能小， T_f 尽可能大， τ_f 尽可能大，尽可能将大的纯滞后置于干扰通道，干扰进入系统的位置尽可能远离被控参数。

(d) 尽可能将广义对象的时间常数错开，即 T_{\max} / T_{\min} 越大越好。

(e) 考虑工艺操作的合理性、经济性等因素。



第五章 简单控制系统的设计

4、调节阀的选择

(1) 气动与电动的选择：考虑的因素：推力的大小、被控介质的情况（高温，高压，易燃，易爆，剧毒，易结晶，强腐蚀，高粘度等）、安全保证等。

(2) 气动执行器气开、气关的选择原则：当调节器输出为零时，使生产处于安全状态。

(3) 调节阀开度和口径的选择原则：在正常运行状态下，使调节阀开度处于15%~80%之间。

(4) 调节阀流量特性的选择原则：使被控过程的特性与调节阀的流量特性相互作用成线性特性。



5、调节器正反作用的选择

为了说明选择方法，先定义作用方向：

当某个环节的输入增加时，其输出也增加，称该环节为“正作用”；反之，称为“反作用”。

按此定义：

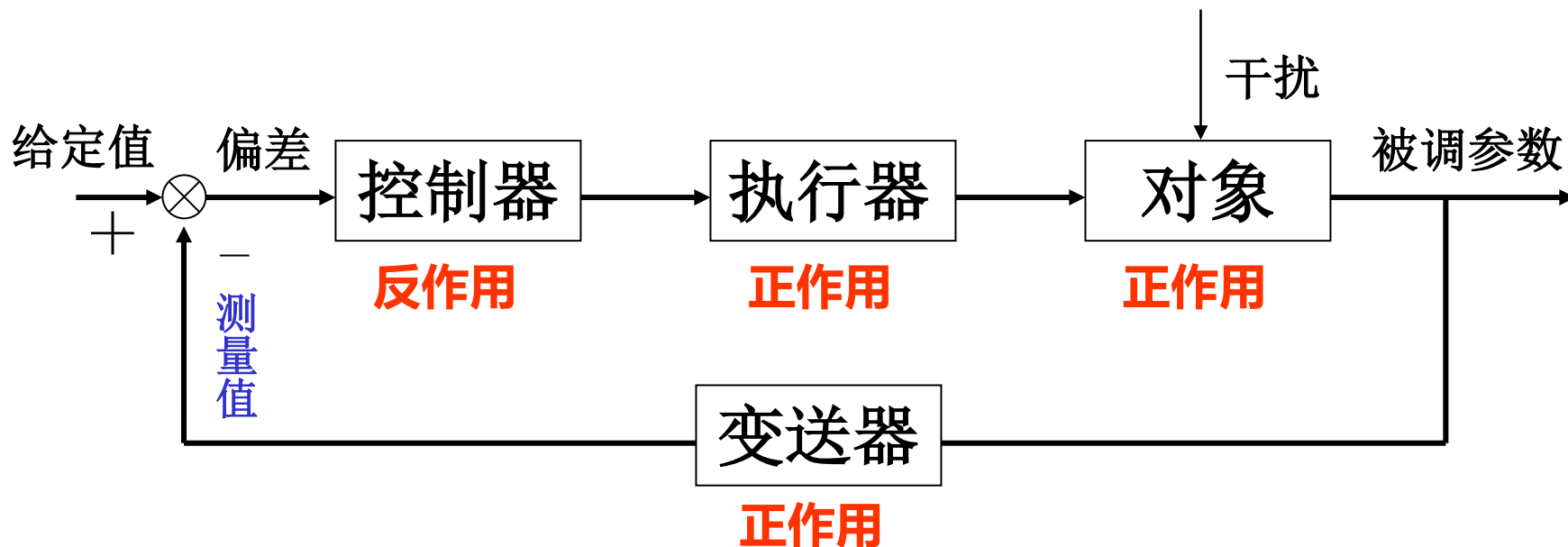
- ☐ 变送器一般都是正作用
- ☐ 气开阀是正作用，气关阀是反作用
- ☐ 被控对象有的正作用，有的反作用
- ☐ 控制器作用方向以测量输入与输出的关系定义：

正作用：输入端增加时，输出端增加

反作用：输入端增加时，输出端减小

控制系统中，各个环节的作用方向组合不当的话，会使系统构成正反馈，不但不能起控制作用，反而会破坏生产过程的稳定。

因为执行器和对象有正、反作用，为了保证控制系统负反馈，调节器必须有正、反作用选择。

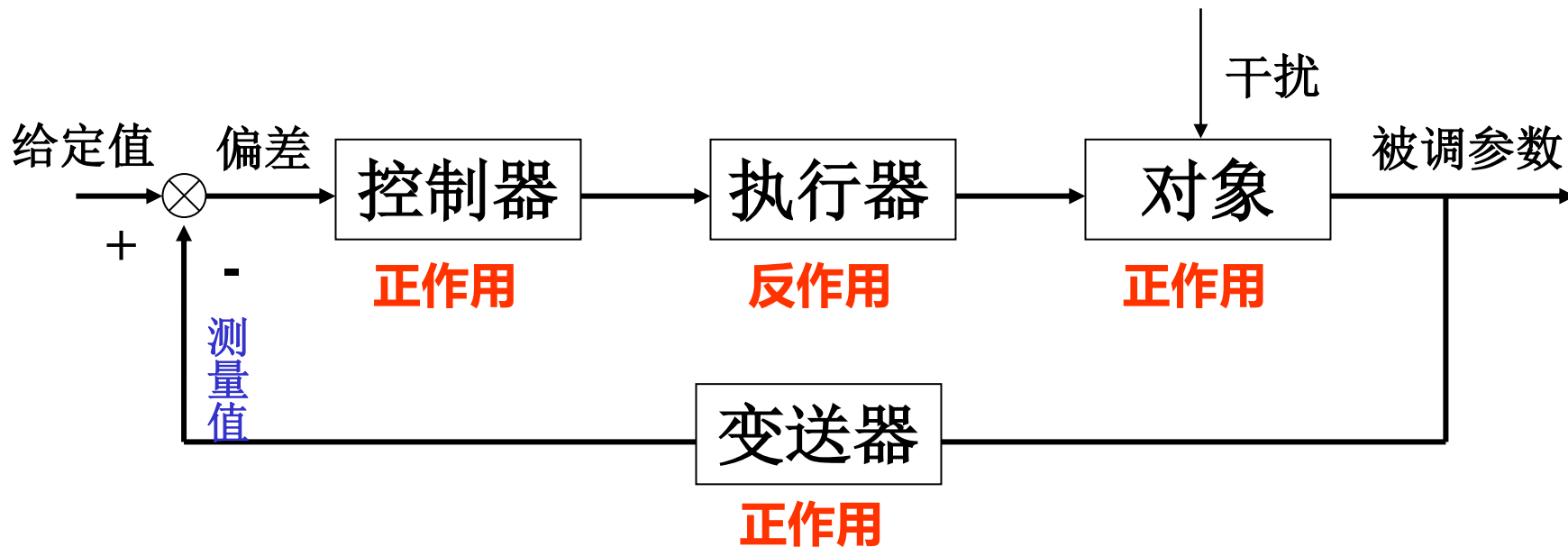
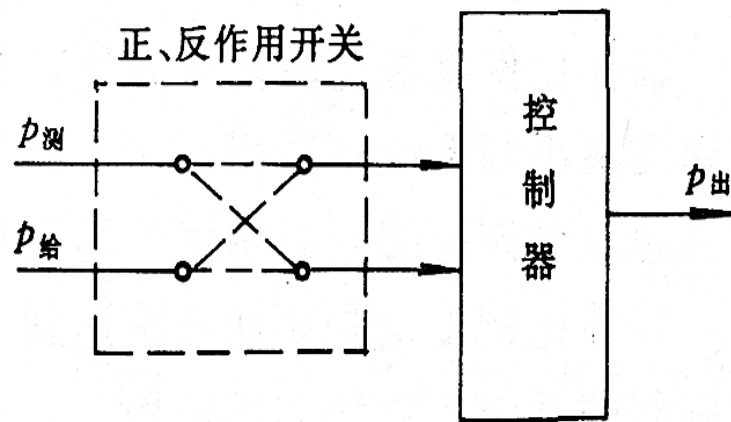


调节器正反作用的确定原则：

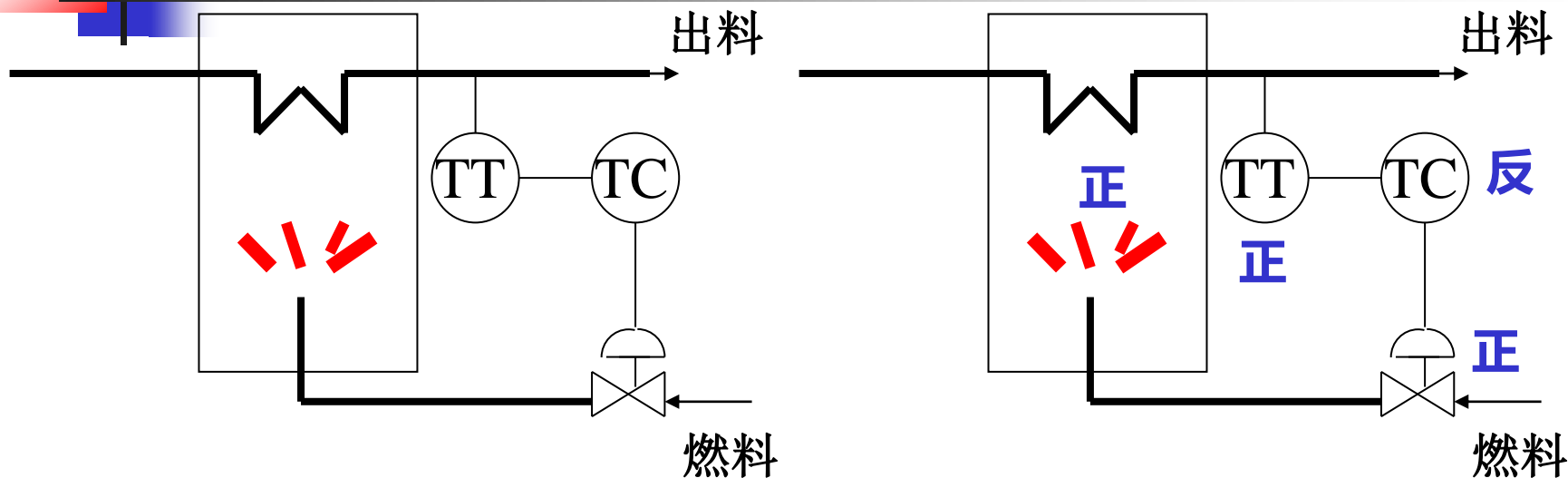
保证系统构成负反馈

简单的判定方法：闭合回路

中有奇数个反作用环节。



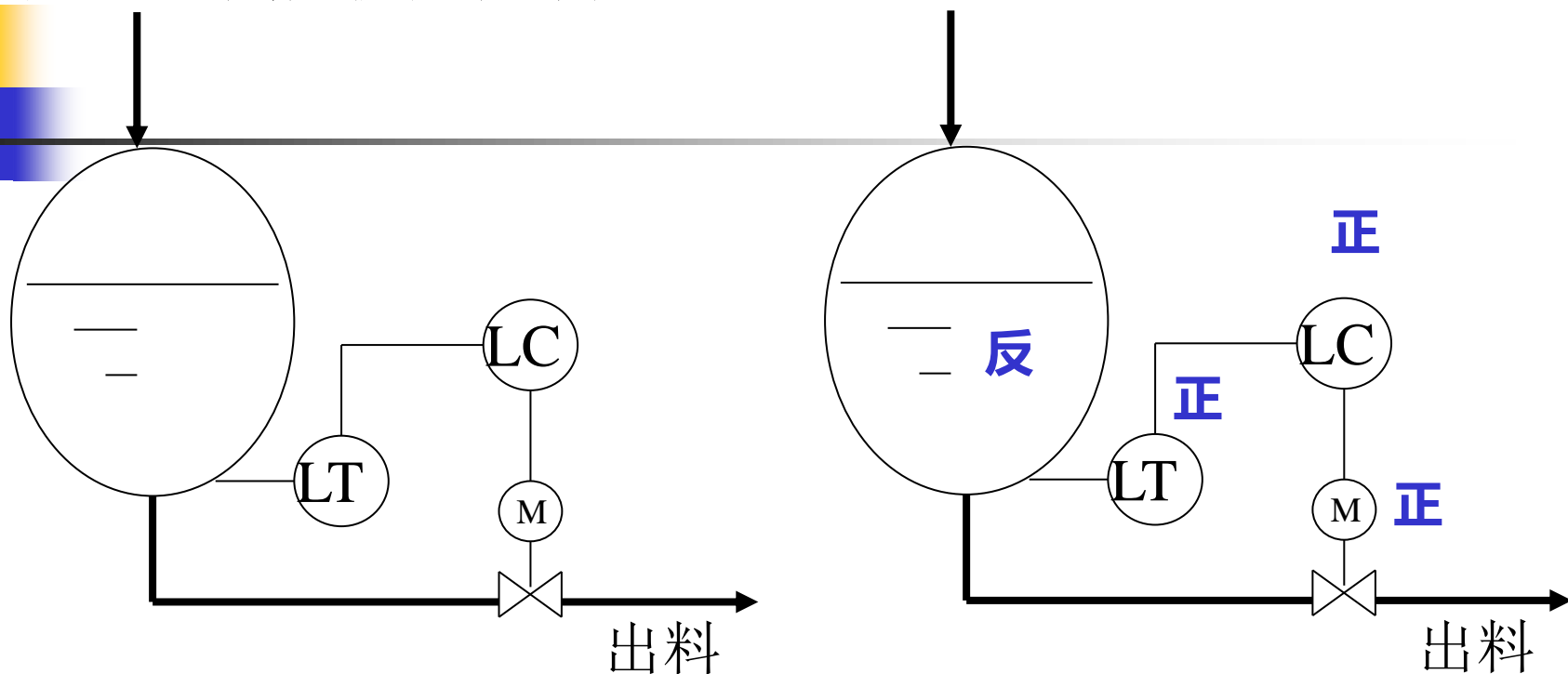
例1：加热炉出口温度控制系统



负反馈验证：

设某时刻燃料压力 $\uparrow \rightarrow$ 燃料流量 $\uparrow \rightarrow$ 炉温 $\uparrow \rightarrow$ 出料温度 \uparrow
 \rightarrow TC输入 $\uparrow \rightarrow$ TC输出 $\downarrow \rightarrow$ 阀门关小 \rightarrow 炉温 $\downarrow \rightarrow$ 出料温度 \downarrow

例2：储槽液位控制系统



负反馈验证：

设某时刻进料量 $\uparrow \rightarrow$ 液位 $\uparrow \rightarrow$ LC输入 \uparrow
 \rightarrow LC输出 $\uparrow \rightarrow$ 阀开大 \rightarrow 出料量 $\uparrow \rightarrow$ 液位 \downarrow



确定步骤:

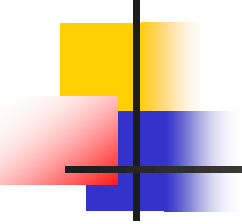
(1) 先确定 K_v ; (2) 再确定 K_p ; (3) 最后确定 K_c 。

(四) 调节规律的确定

(1) 当过程时间常数较大或容积延迟较大时, 引入D;
或 PD、PID;

(2) 当过程时间常数较小, 负荷变化不大, 允许有静差时, 可选P;

(3) 当过程时间常数较小, 负荷变化不大, 要求无静差时, 可选PI;



(4) 当时间常数很大，纯延迟较大，负荷变化剧烈，应采用其他控制方案。

(5) 当 $G_P(s) = \frac{K_P e^{-\tau_P s}}{T_P s + 1}$ 时，

当 $\tau_P / T_P < 0.2$ 时，可选 P 或 PI 。

当 $0.2 < \tau_P / T_P < 1.0$ 时，可选用 PD 或 PID 。

当 $\tau_P / T_P > 1.0$ 时，采用其他控制方案。



主要问题

问题：

$\tau / T_0 > 1.0$ ；几个惯性环节串联导致控制通道过长；干扰过于频繁或过于剧烈——单回路控制难以获得好的控制效果。

解决办法：

（一） 串级控制

（二） 前馈-反馈复合控制

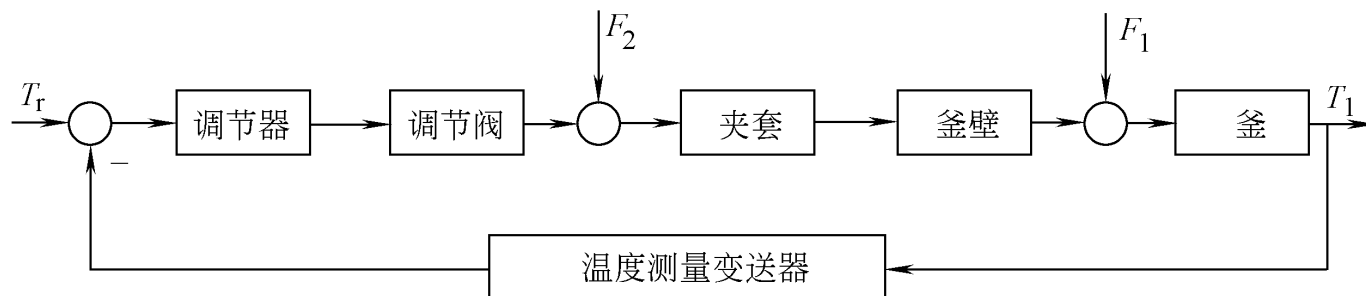
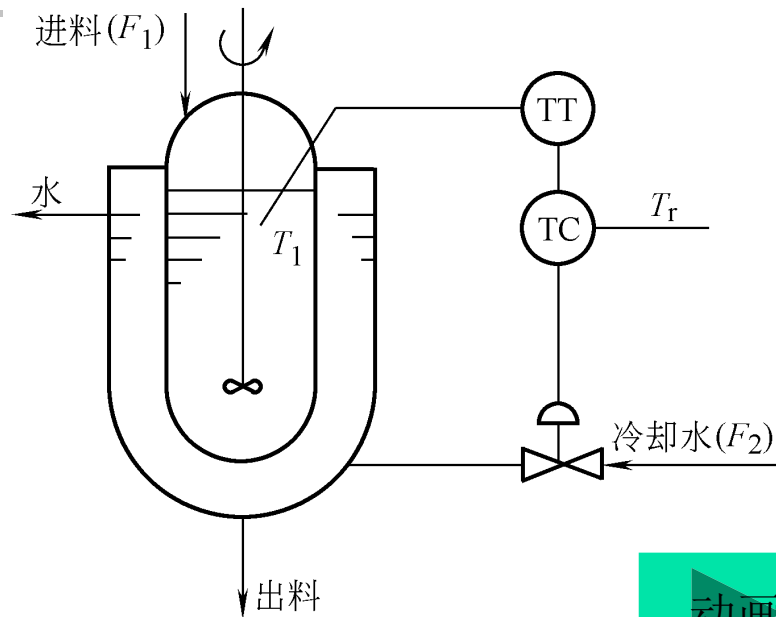
一 串级控制系统

例：化学反应釜温度控制系统

系统干扰

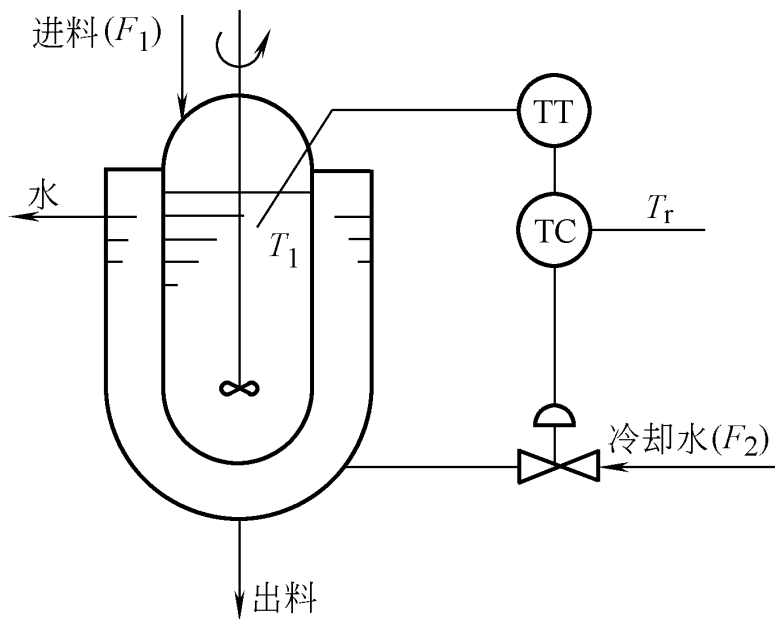
进料方面：进料量，进料温度，
进料化学成分等。以上干扰统称为
 F_1

冷却水方面：冷却水温度，冷却
水流量、压力。以上干扰称为 F_2



反应釜温度控制系统框图

控制系统实例

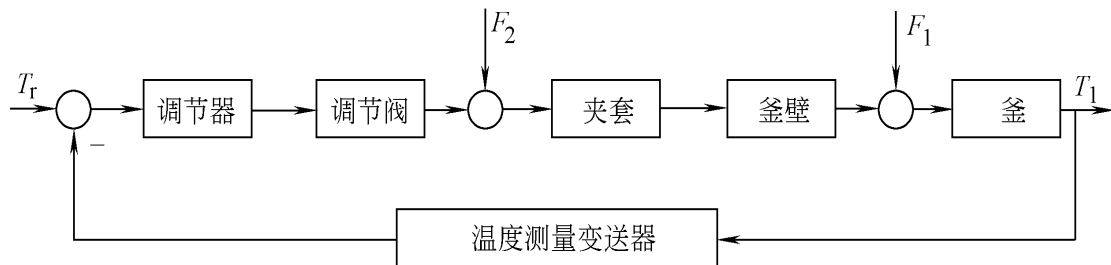


问题:

调节滞后很大, 效果不好

假设冷却水的压力升高!

冷却水流量 \uparrow \Rightarrow 夹套温度 \downarrow
夹套温度 \downarrow (传热) \Rightarrow 釜壁温度 \downarrow
釜壁温度 \downarrow (传热) \Rightarrow 介质温度 \downarrow
介质温度 \downarrow (调节) \Rightarrow 阀门开度 \downarrow
阀门开度 \downarrow (节流) \Rightarrow 冷水流量 \downarrow



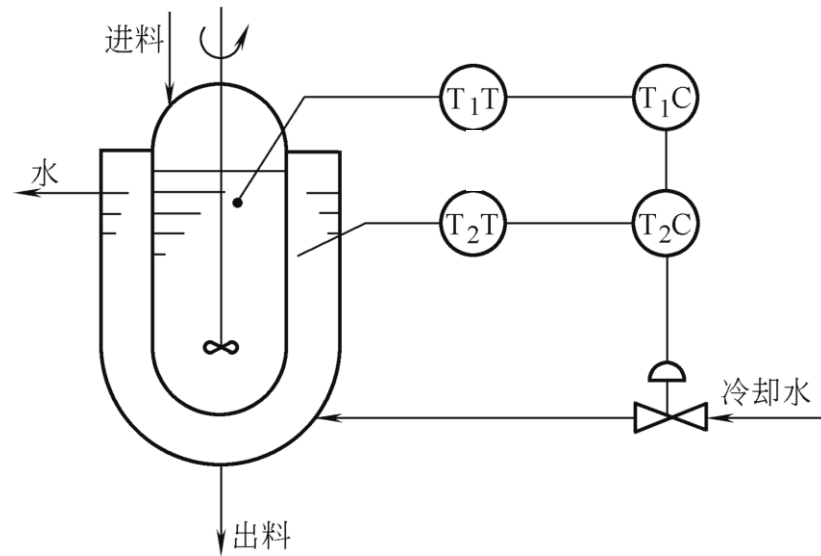
反应釜温度控制系统框图

改进后控制系统结构

能否在反应釜温度降低前提前关小阀门？

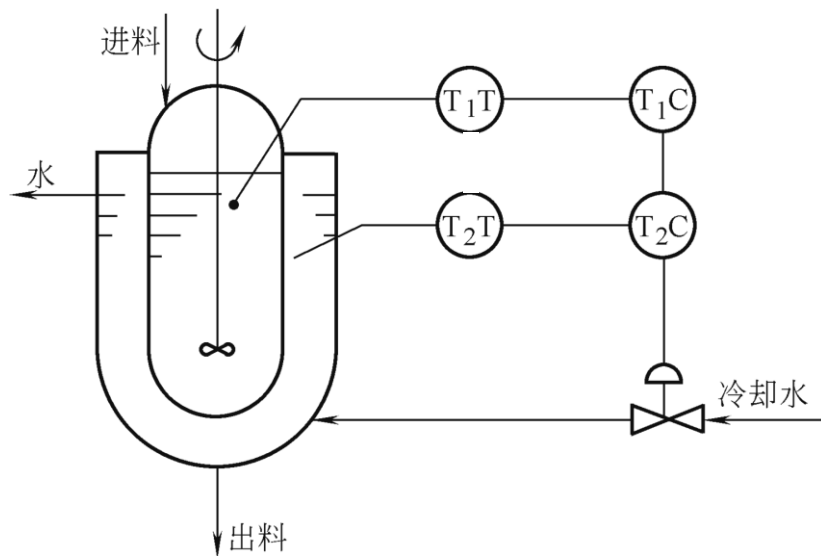
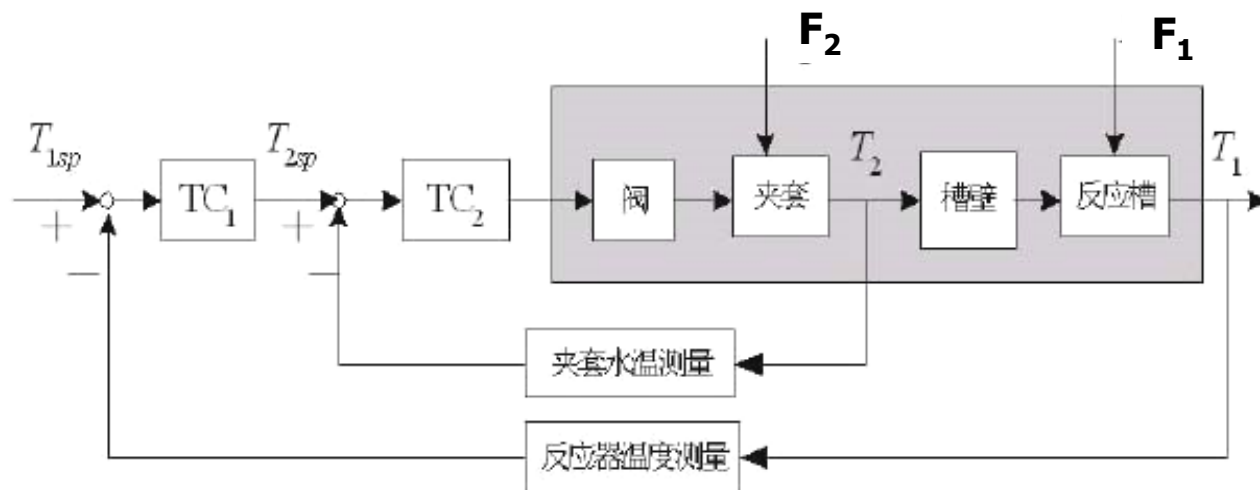
为了及时发现来自冷却水方面的干扰，可以用一个温度传感器测量对冷却水参数变化比较敏感的夹套温度。

如果如图所示用 T_2T 和 T_2C 构成夹套温度控制系统就可以有效抑制来自冷却水方面的干扰。



串级控制系统

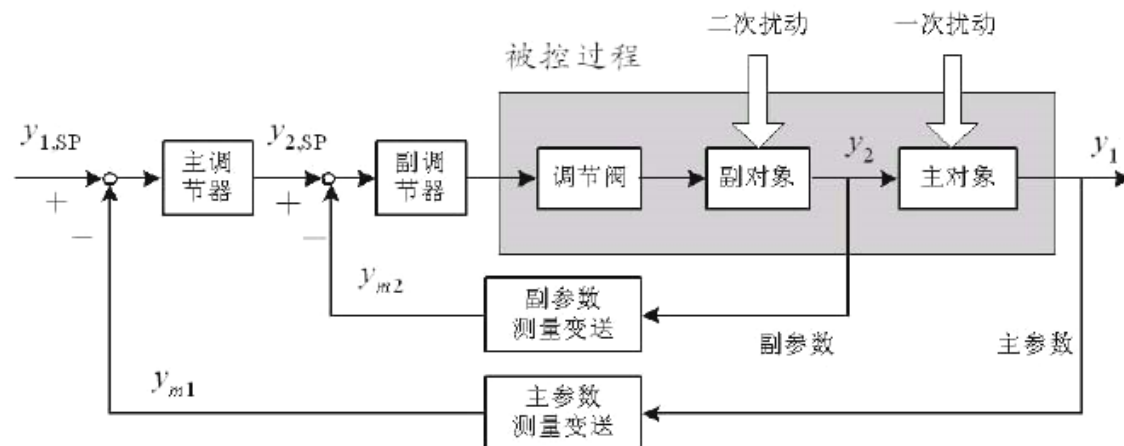
串级控制系统的结构



TC_1 称为“主调节器”； TC_2 称为“副调节器”。

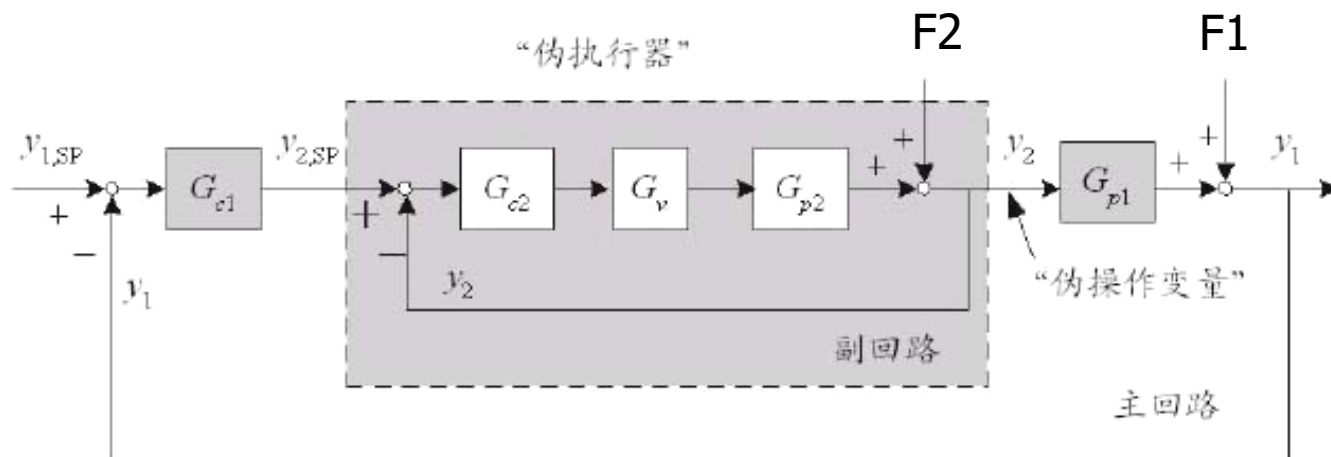
F_1 称为“一次扰动”； F_2 称为“二次扰动”。

串级控制系统的标准结构



对外环来讲，操作量
(控制量) 为夹套温度！
对内环来讲，被控量为
夹套温度，操作量为阀门
开度！

副回路相当
“伪执行





二、前馈控制系统

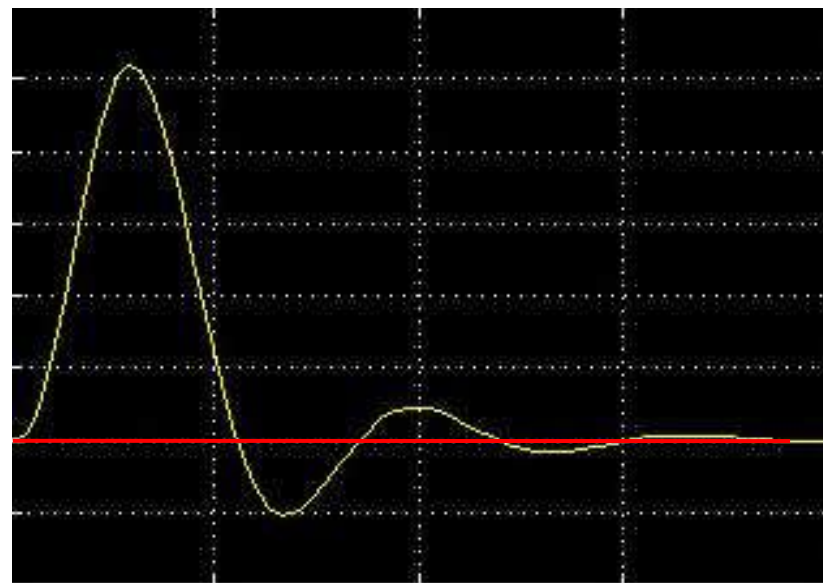
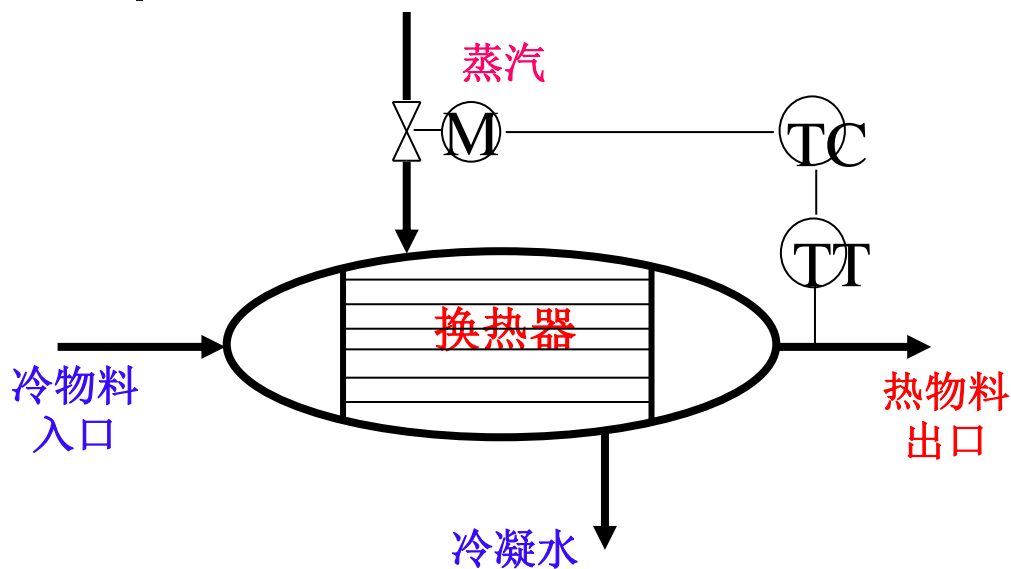
前馈控制的原理：当系统出现扰动时，立即将其测量出来，通过前馈控制器，根据扰动量的大小改变控制变量，以抵消扰动对被控参数的影响。

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，只要引起被调参数的变化，调节器均可根据偏差进行调节。但必须被调**参数变化后才进行调节**，调节滞后。**亡羊补牢！**

例 换热器出口温度反馈控制系统



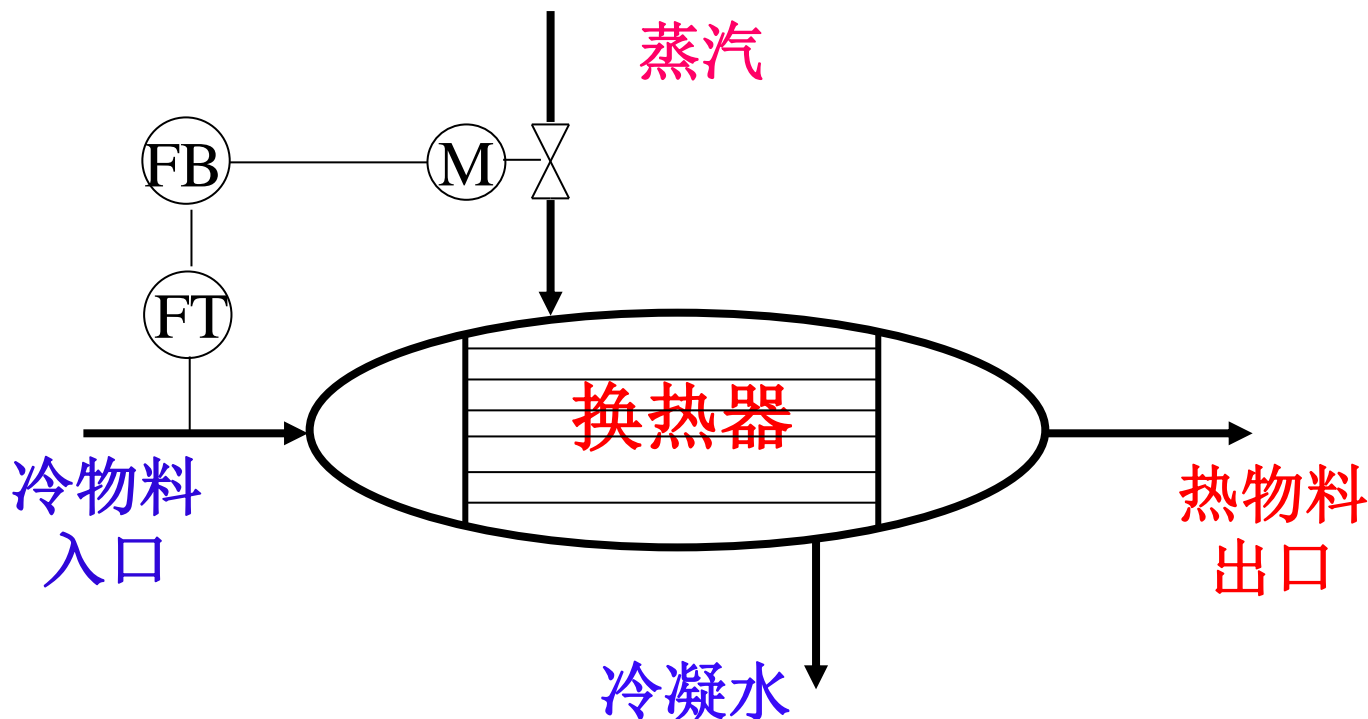
针对冷物料流量变化的最佳调节效果

由于反馈控制过程中需要出现偏差才进行调整，所以反馈控制无法实现完美的控制。

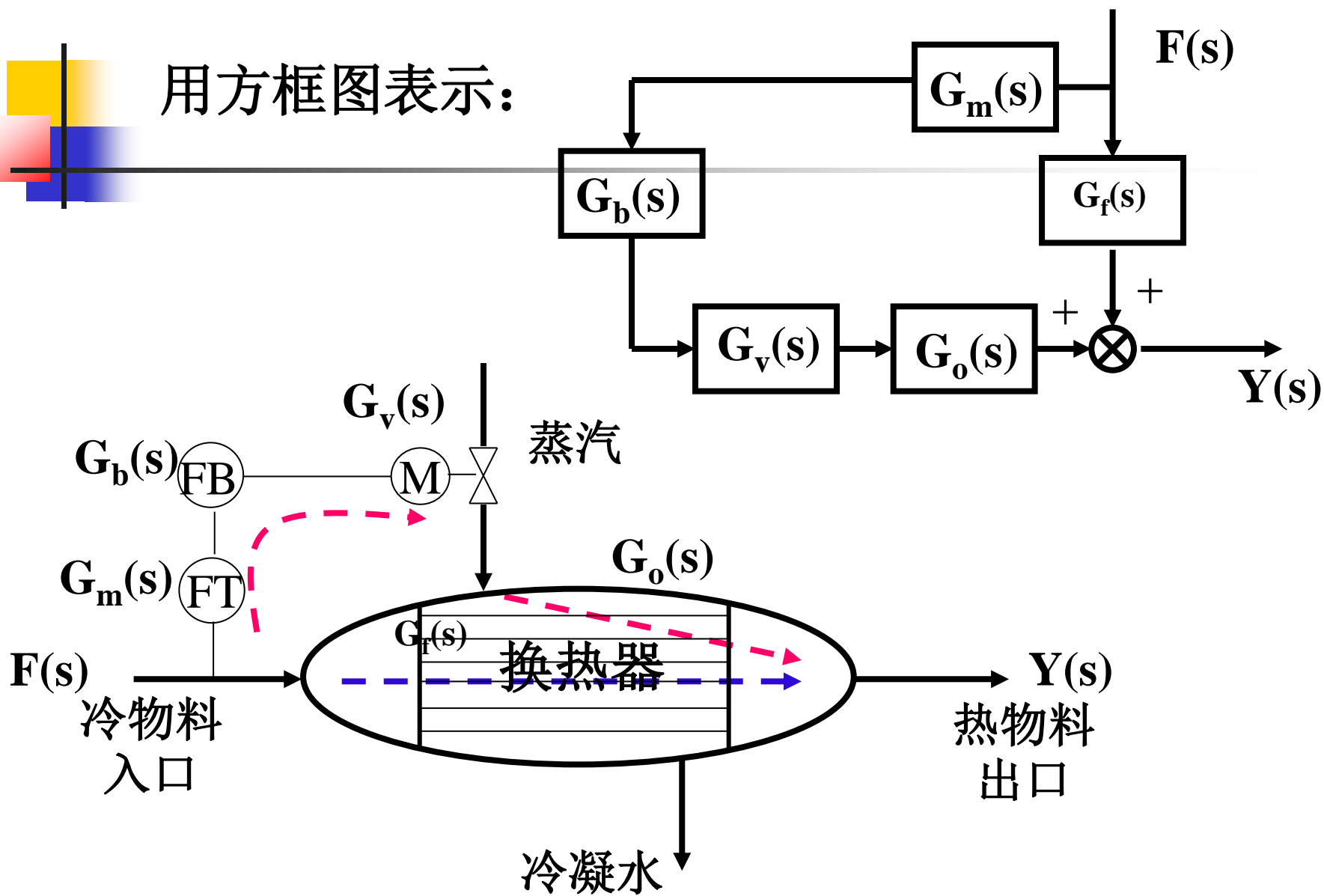
2) 前馈控制的原理与特点

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



用方框图表示:





前馈控制的特点：

- ①前馈控制器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，能够实现“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，尤其可测不可控的干扰，对其它干扰无效。



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。

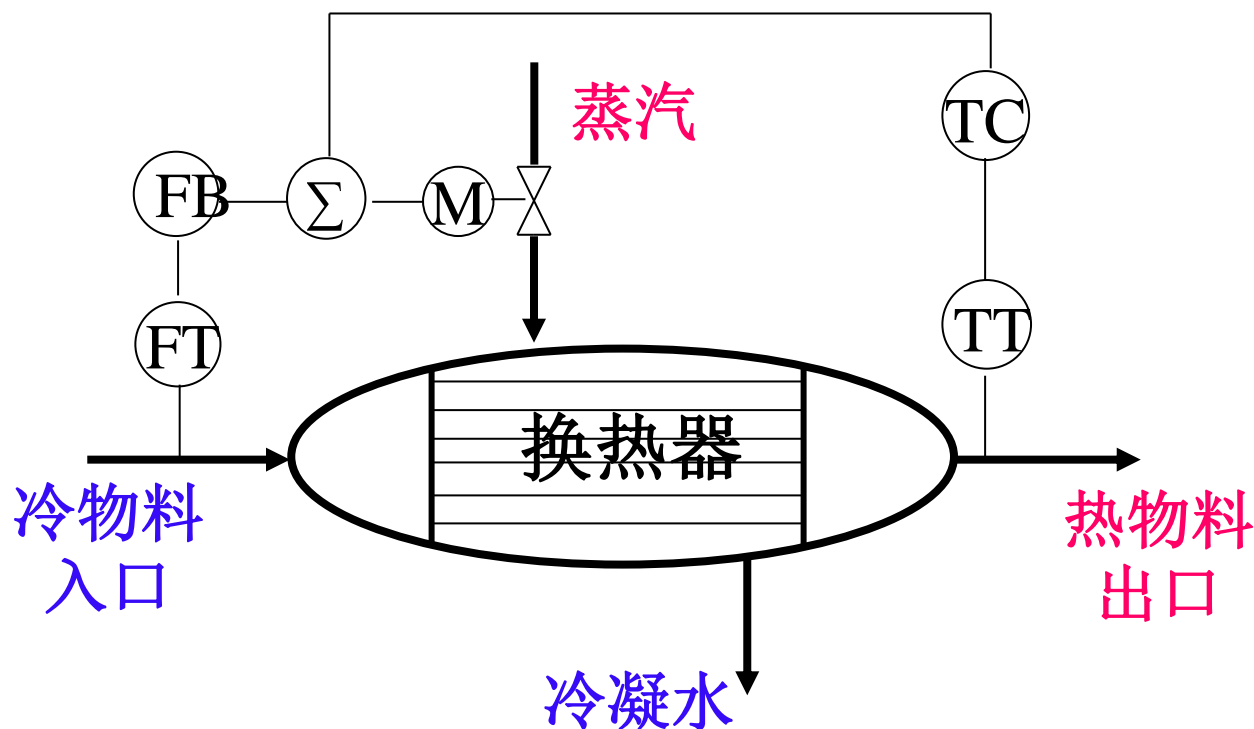
②前馈控制器的补偿控制规律很难精确计算，即使前馈控制器设计的非常精确，实现时也会存在误差，而开环系统对误差无法自我纠正。

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。

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。





复合控制系统具有以下优点：

①在反馈控制的基础上，针对主要干扰进行前馈补偿。既提高了控制速度，又保证了控制精度。

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。