

2022春 过程控制系统

过程控制系统

授课教师：苗子博

要点回顾

执行器（阀门）

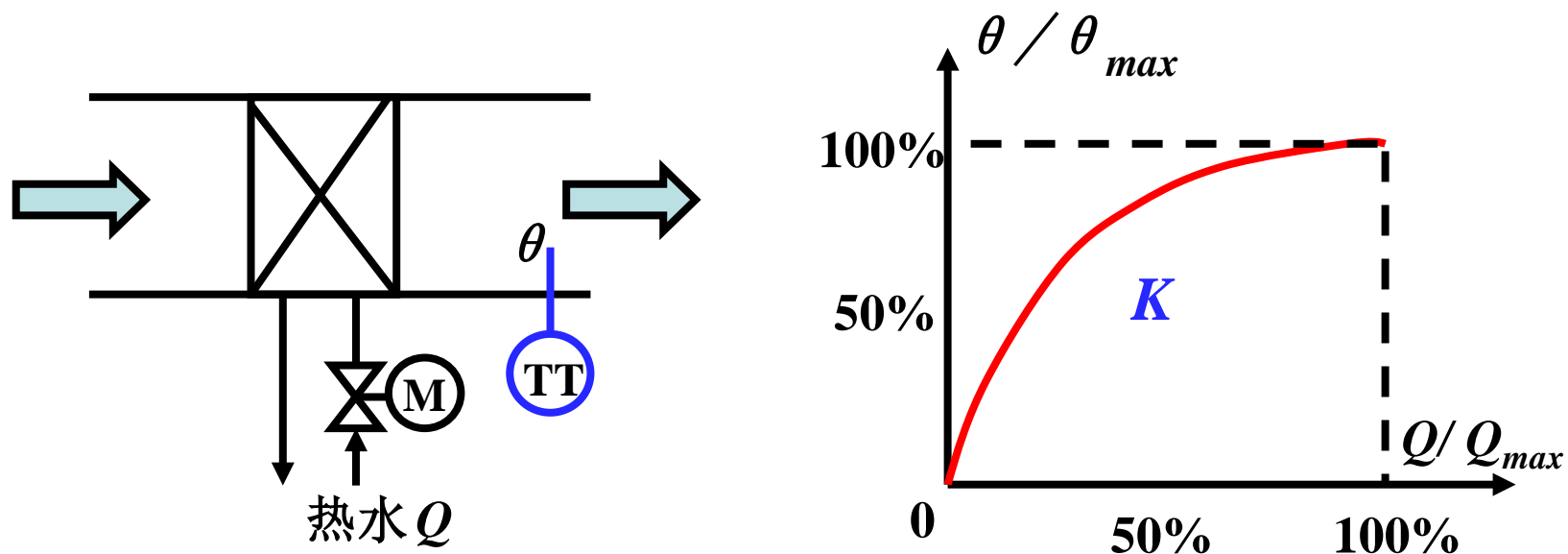
结构、原理

流量特性

调节阀的选择

前情
回顾

如热水加热器的热水流量与送风温度的静特性



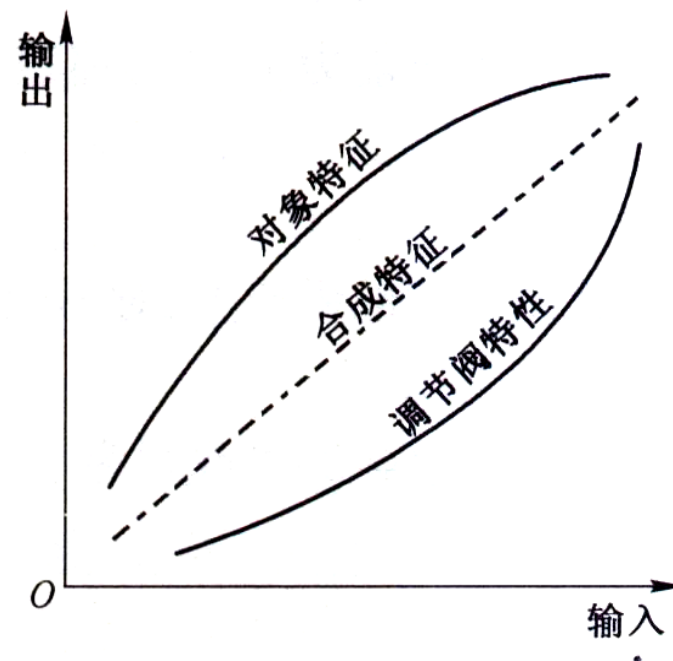
由图可见，随着热水流量增大，对送风的加热效果越来越差。因为热交换需要时间，热水很快流走，不能充分热交换所致。但若用蒸汽加热，由于冷凝放热很快，该特性为直线特性。

很多对象在工作区域内稳态放大倍数 K 不是常数，在不同的工艺负荷点， K 不相同。因此希望调节阀的流量特性能补偿对象的静特性使调节阀的特性与过程特性乘积为一常数。

(1) 若调节对象的静特性是非线性的，工艺负荷变化又大，用等百分比特性补偿。

(2) 若调节对象的静特性是线性的，或工艺负荷变化不大，用直线阀。

(3) 配管阻力大、 s 值低，等百分比阀会畸变成直线阀。

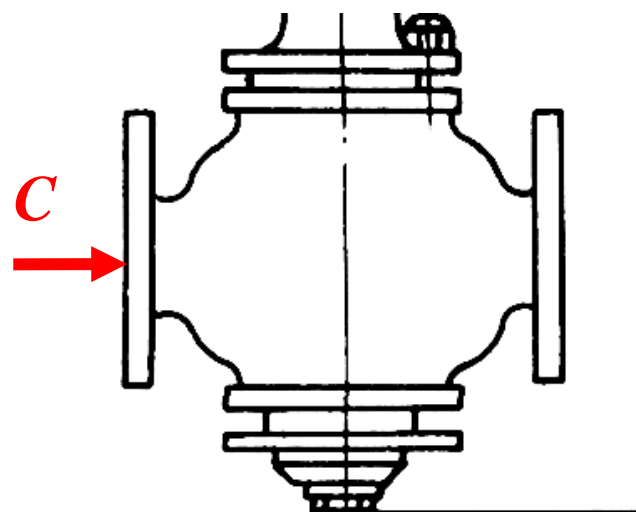


4. 调节阀口径的选择

为保证工艺的正常进行，必须合理选择调节阀的尺寸。如果调节阀的口径选得太大，使阀门经常工作在小开度位置，造成调节质量不好。如果口径选得太小，阀门完全打开也不能满足最大流量的需要，就难以保证生产的正常进行。

调节阀的口径决定了调节阀的流通能力。

调节阀的流通能力用C值表示。

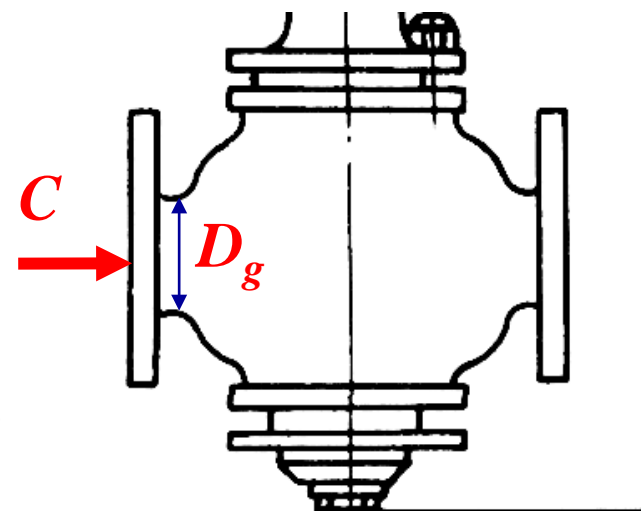


流通能力C的定义：

在阀两端压差**100kPa**，流体为水（ **$10^3\text{Kg} / \text{m}^3$** ）的条件下，阀门全开时每小时能通过调节阀的流体流量（ **m^3 / h** ）。

例如，某一阀门全开、阀两端压差为**100kPa**时，流经阀的水流量为 **$20 \text{ m}^3 / \text{h}$** ，则该调节阀的流通能力系数为： **$C=20$** 。

在调节阀技术手册上，给出了各种阀门的口径和流通能力 C ，供用户查阅。



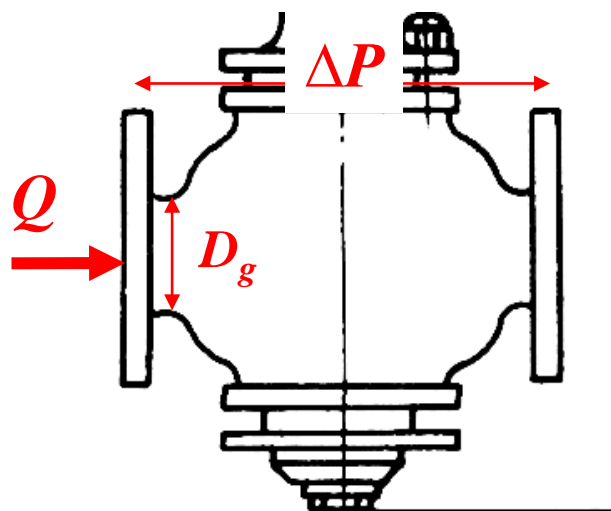
实际应用中阀门两端压差不一定是100kPa，流经阀门的流体也不一定是水，因此必须换算。

(1) 液体流通能力C值的计算

根据基本流量公式

$$Q = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

将流通能力的定义条件代入基本流量公式：



$$C = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{1000} \times 100} = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{10}}$$

两式相除得

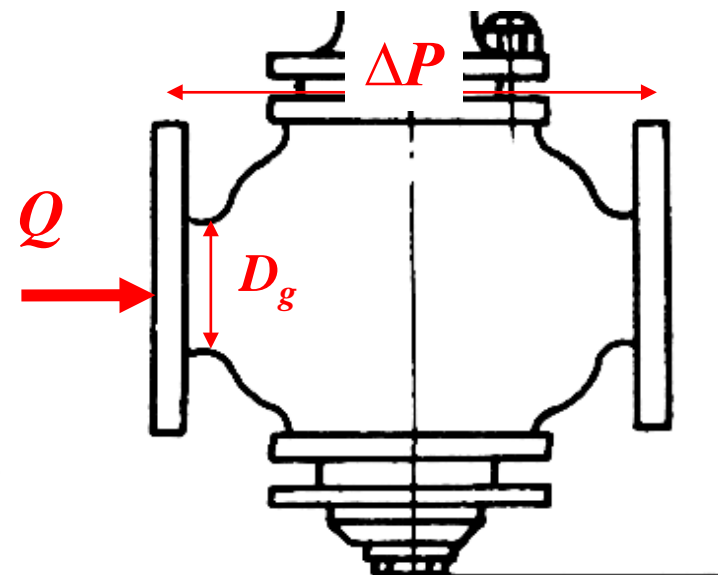
$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{10 \Delta P}}$$

(2) 气体、蒸汽C值的计算

气体、蒸汽都具有可压缩性，其C值的计算必须考虑气体的可压缩性和二相流问题，计算时进行相应的修正。

$$C = kQ\sqrt{\frac{\rho}{10\Delta P}}$$

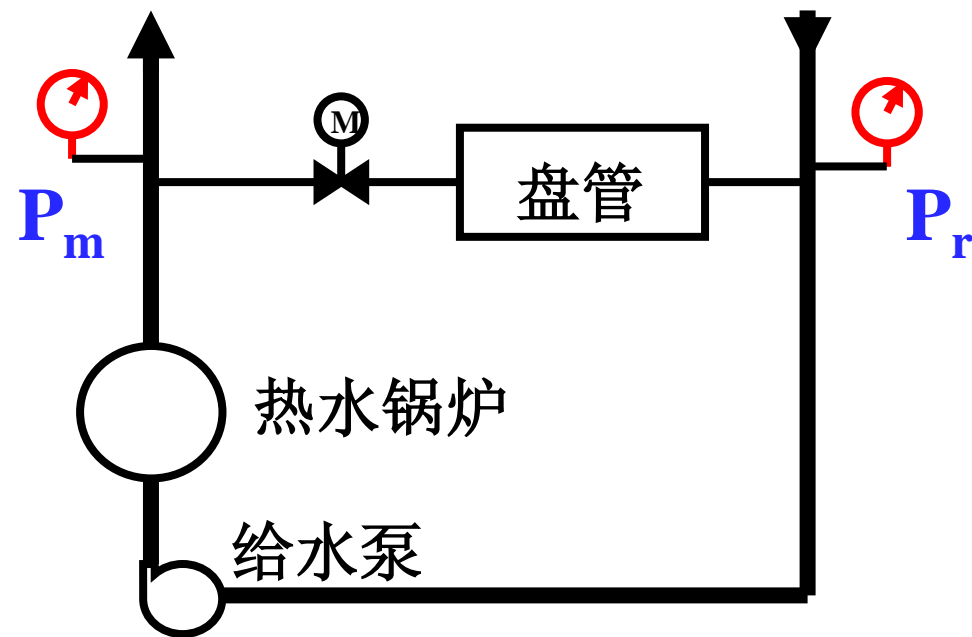
根据实际的工艺流量和管道压力换算出C值后，查阀门手册确定口径。



例 某供暖系统，流过加热盘管的水流量为 $Q=31\text{m}^3/\text{h}$
热水为 80°C ， $P_m-P_r=2.0\times 100\text{kPa}$ ，所装阀门C可以从
28，30，32，34四种中选取，应该选择那种？

（配管 $s=0.5$ ， 80°C 热水的密度 $\rho=971\text{Kg}/\text{m}^3$ ）

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{10\Delta P}}$$



4.1.2 电/气转换器

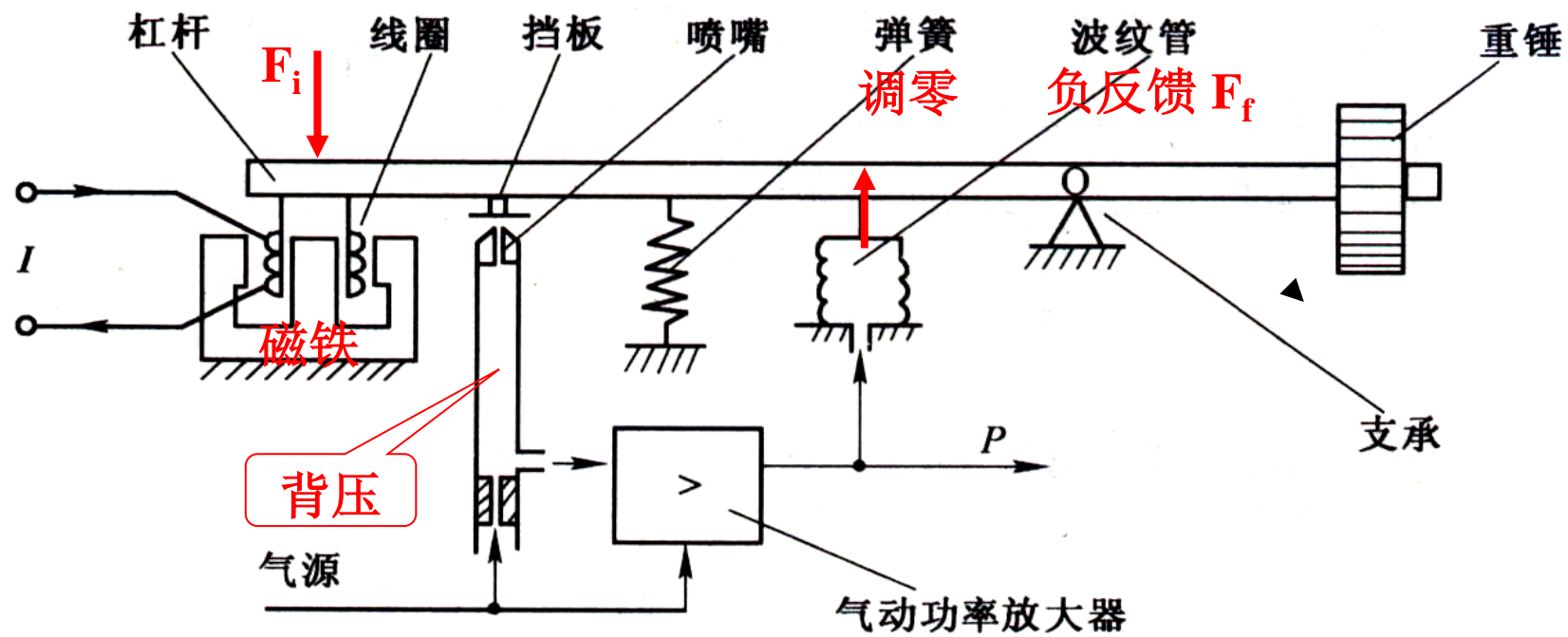
为了使气动调节阀能够接收电动调节器的输出信号，必须把标准电流信号转换为标准气压信号。

电/气转换器作用：

将4~20mA的电流信号
转换成20~100KPa的标准
气压信号。



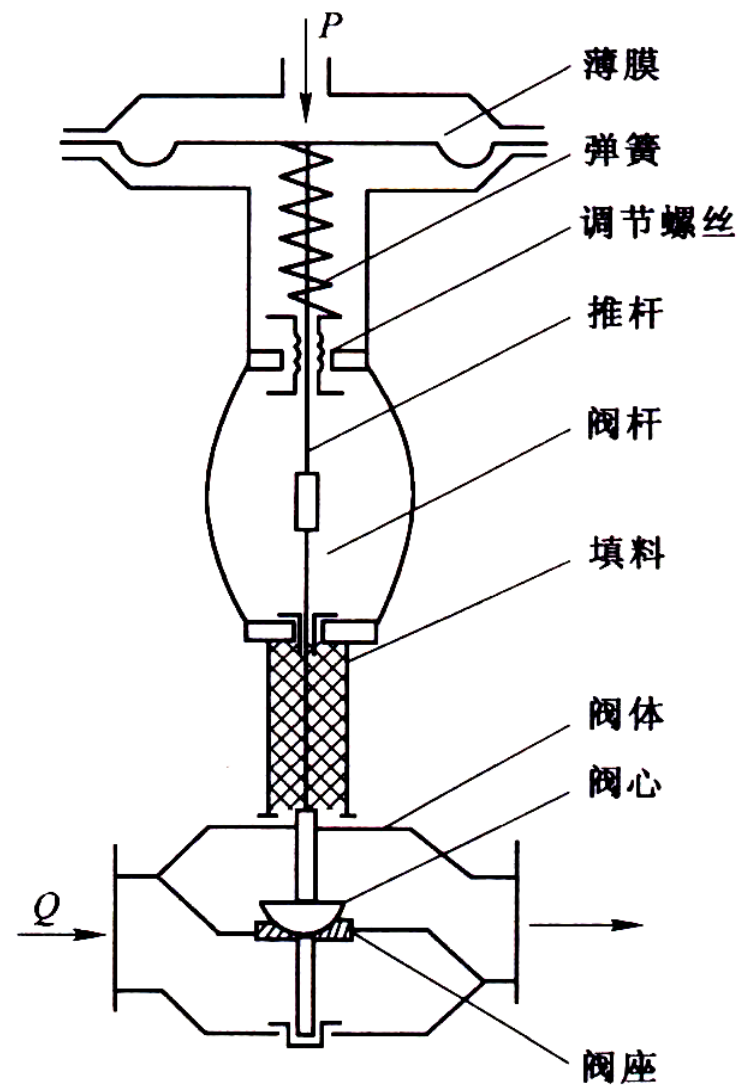
工作原理



4.1.3 阀门定位器

气动调节阀中，阀杆的位移是由薄膜上气压推力与弹簧反作用力平衡确定的。

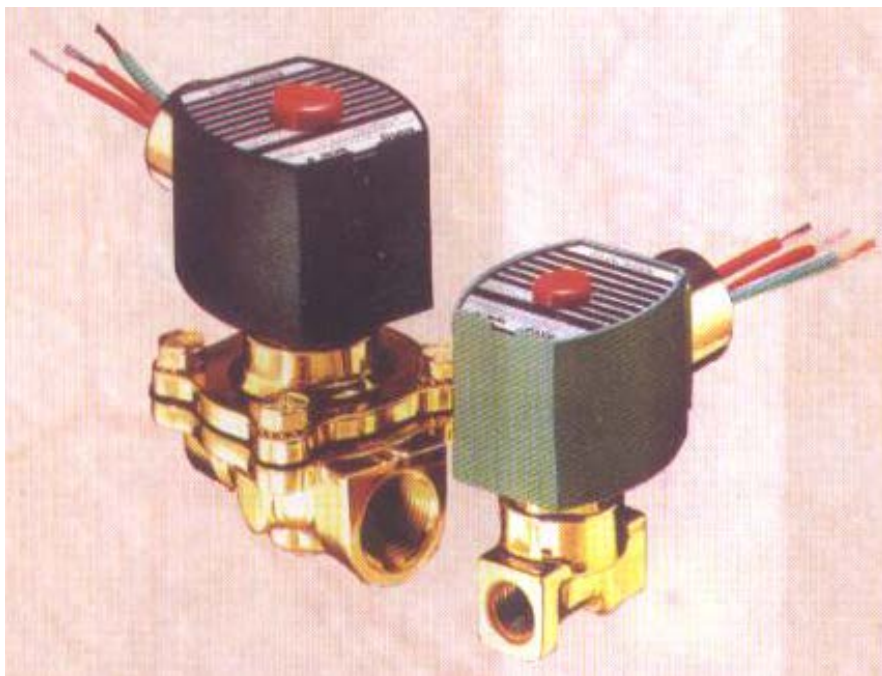
为了防止阀杆处的泄漏要压紧填料，使阀杆摩擦力增大，且个体差异较大，这会影响输入信号 P 的执行精度。



4.1.5 电动调节阀

电动调节阀接受来自调节器的电流信号，阀门开度连续可调。

电磁阀也接受来自调节器的电流信号，但阀门开度是位式调节。



4.1.6 智能式调节阀

随着电子技术的迅速发展，微处理器也被引入到调节阀中，出现了智能式调节阀。主要功能如下：

1. 控制及执行功能
2. 补偿及校正功能
3. 通信功能
4. 诊断功能
5. 保护功能



6.2.3.2执行器的选择

1. 调节阀工作区间的选择

正常工况下，调节阀的开度应在**15%~85%**区间。据此原则计算、确定控制阀的口径尺寸。

2. 调节阀的流量特性选择

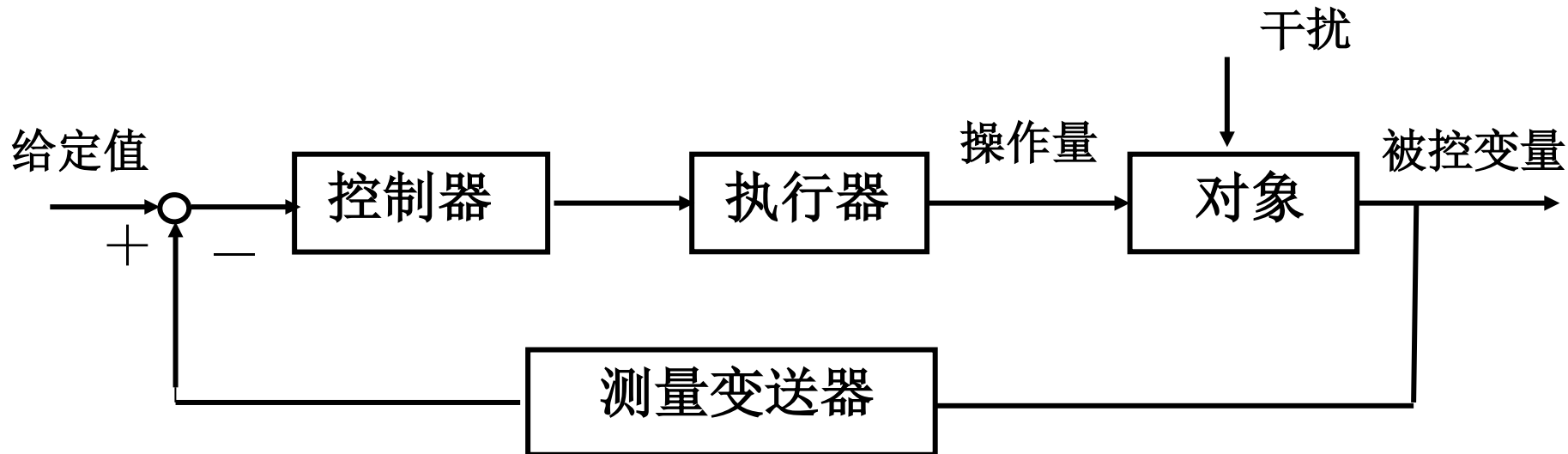
按补偿对象特性的原则选取。

3. 调节阀的气开、气关作用方式选择

按控制信号中断时，保证生产设备安全的原则确定。

6.2.3.3 调节器正反作用的选择

负反馈控制系统的控制作用对被控变量的影响应与干扰作用对被控变量的影响相反，才能使被控变量值回复到给定值。为了保证负反馈，必须正确选择调节器的正反作用。



为了说明选择方法，先定义作用方向：

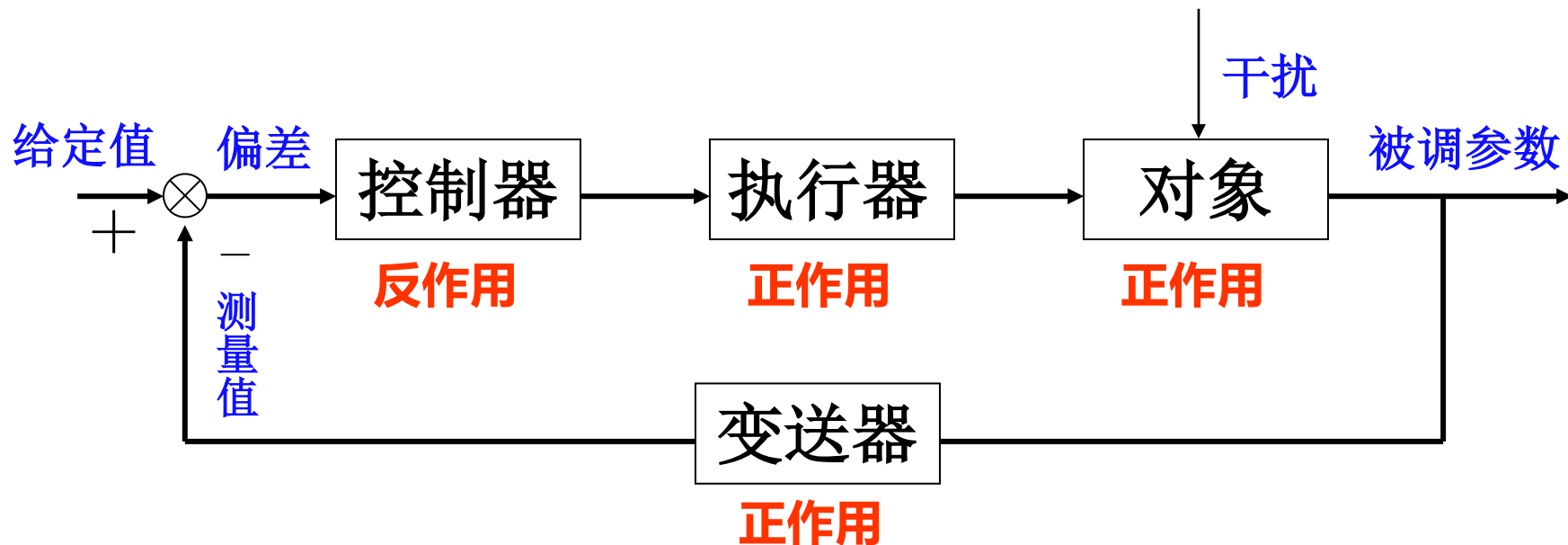
当某个环节的输入增加时，其输出也增加，称该环节为“正作用”；反之，称为“反作用”。

按此定义：

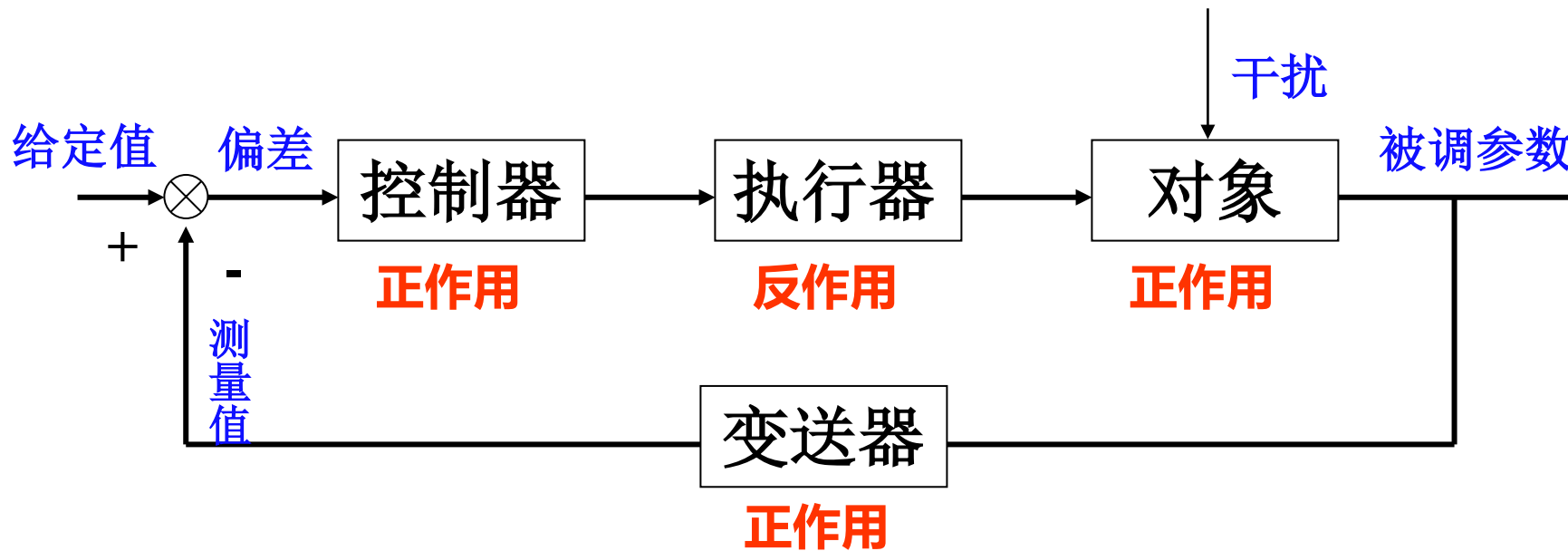
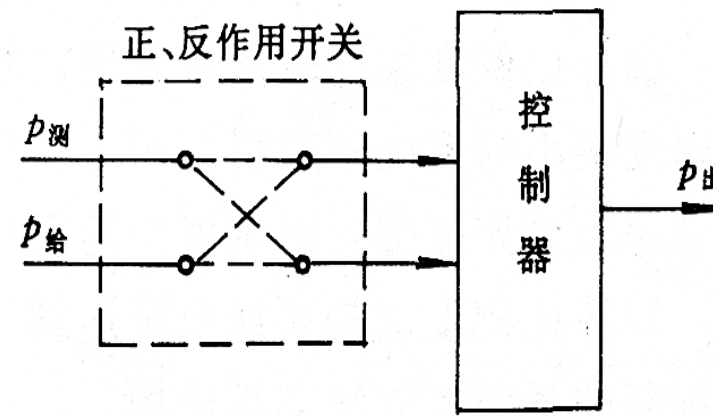
- ❑ 变送器都是正作用
- ❑ 气开阀是正作用，气关阀是反作用
- ❑ 被控对象有的正作用，有的反作用
- ❑ 控制器作用方向以测量输入与输出的关系定义

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。

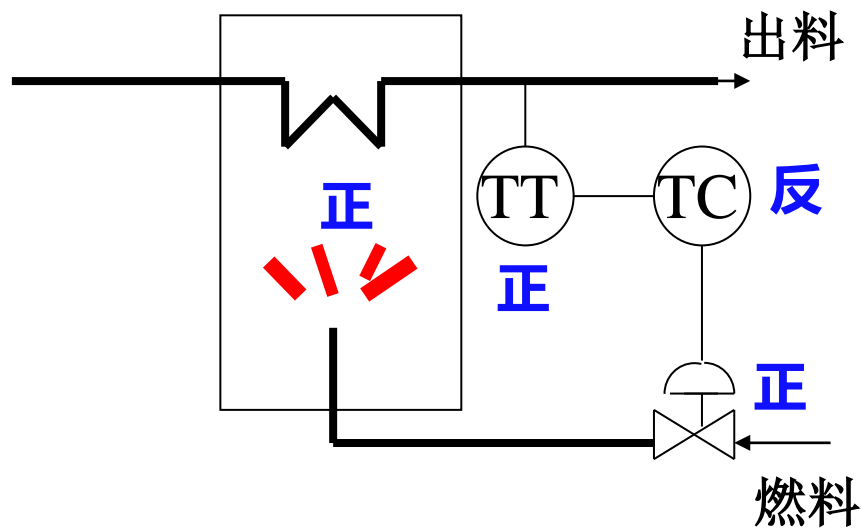
因为执行器和对象有正、反作用，为了保证控制系统负反馈，调节器必须有正、反作用之调整。



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。**



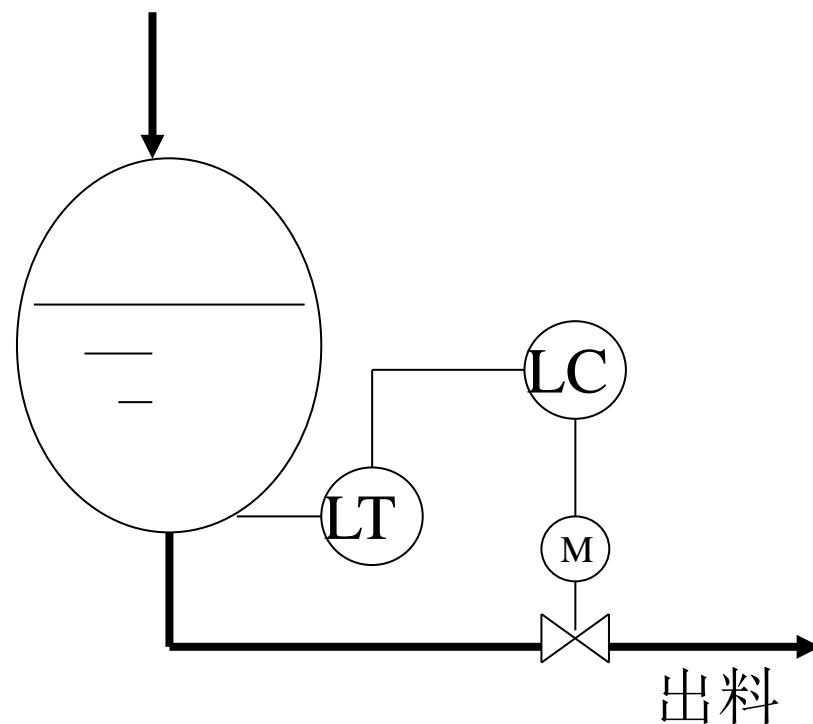
例1：加热炉出口温度控制系统



负反馈验证：

设某时刻燃料压力 \uparrow →燃料流量 \uparrow →炉温 \uparrow →出料温度 \uparrow
→TC输入 \uparrow → TC输出 \downarrow →阀关小→炉温 \downarrow →出料温度 \downarrow

例2：储槽液位控制系统（要求：液位不能为零）



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

6.3 调节规律对控制品质的影响与调节规律选择

确定调节系统的方案时，要根据对象的特性和工艺要求，选择合适的调节规律，使组成的调节系统满足预期的品质指标。

调节器的调节规律，即它的输出量与输入量（偏差值）之间的函数关系。

$$P = f(e)$$

调节器的作用是根据偏差，按规定的调节规律产生输出信号，推动执行机构，对生产过程进行调节。

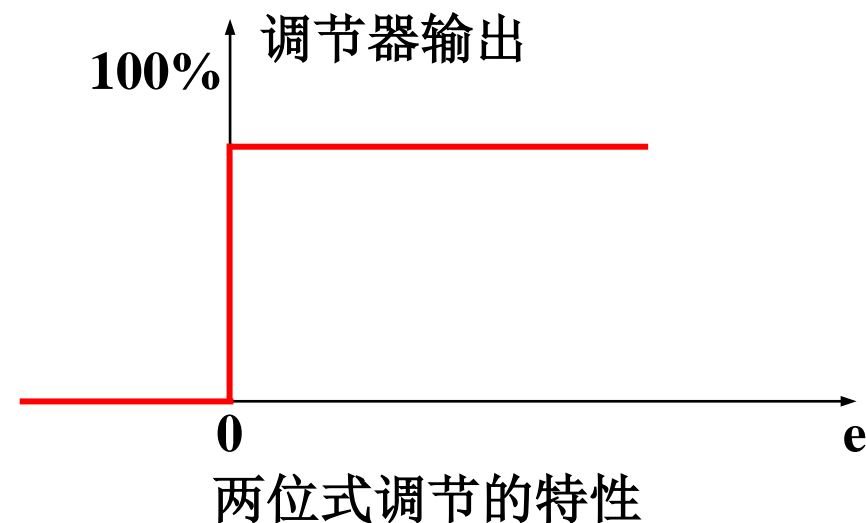
6.3.1 调节规律对控制品质影响的分析

要正确地选择调节规律，首先必须理解各种调节规律对控制品质的影响。

最简单的调节规律是位式调节规律。

根据偏差 e 的正、负，调节器输出只有两个位置：0或100%。

在位式调节下，被控参数不能稳定在给定值上。要获得平稳的高精度的调节，必须采用连续调节规律。



要使控制过程平稳准确，必须使用输出值能连续变化的调节器，采用比例，微分、积分等算法进行调节。

6.3.1.1比例（P）调节对系统控制品质的影响

比例调节器输出变化 $u(t)$ 随输入偏差 $e(t)$ 成比例关系：

$$u(t) = \frac{1}{P} e(t)$$

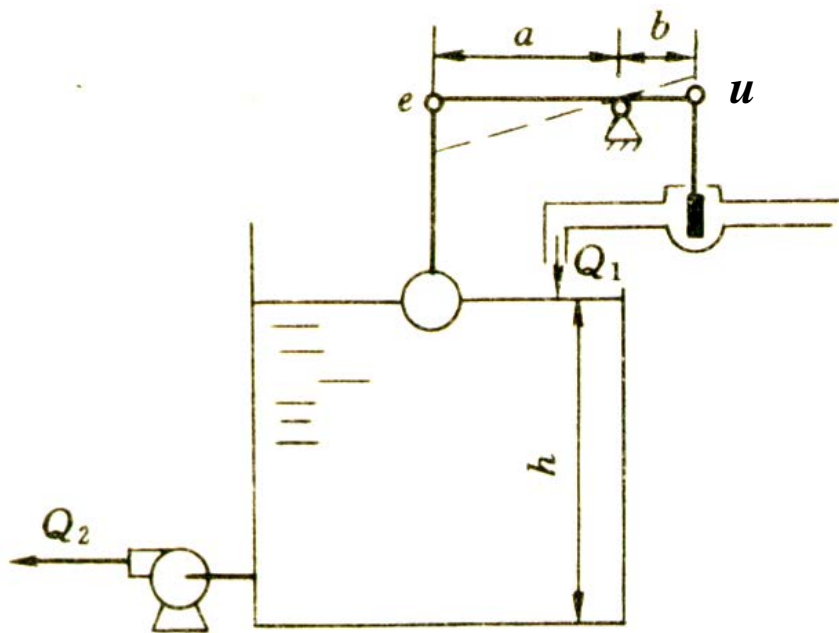
$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{P} \quad P\text{—比例度}$$

比例度就是控制器输入偏差的相对变化值与相应的输出相对变化值之比。

例 自力式水位比例控制系统

浮球为水位传感器，杠杆为控制器，活塞阀为执行器。如果某时刻 Q_2 加大，造成水位下降，则浮球带动活塞提高，使 Q_1 加大阻止水位下降。

杠杆a、b之比例关系，决定调节作用强弱。



$$\frac{a}{b} = \frac{u}{e} \Rightarrow u = \frac{a}{b} e = \frac{1}{P} e$$

如果 $e = 0$ ，则活塞无法提高， Q_1 无法加大，调节无法进行。

□ 比例度 P 对控制过程的影响

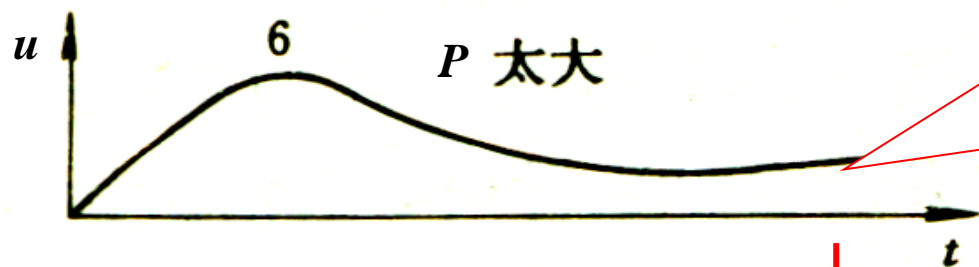
$$u(t) = \frac{1}{P} e(t)$$

比例度的物理意义：

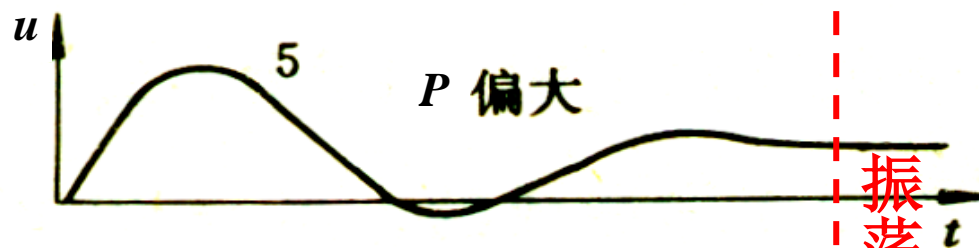
比例度 P 是放大倍数 K_C 的倒数，其大小决定比例控制作用的强弱。

P 越小，控制作用越强、系统调节越快、系统稳定性越小。

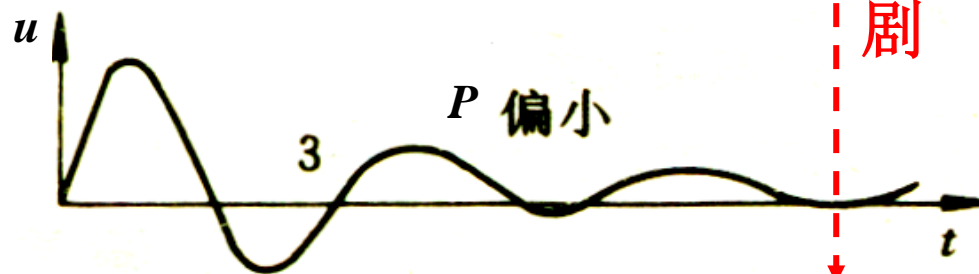
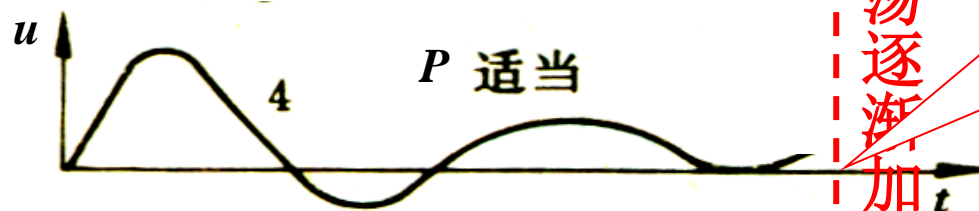
P 越小，控制余差越小。



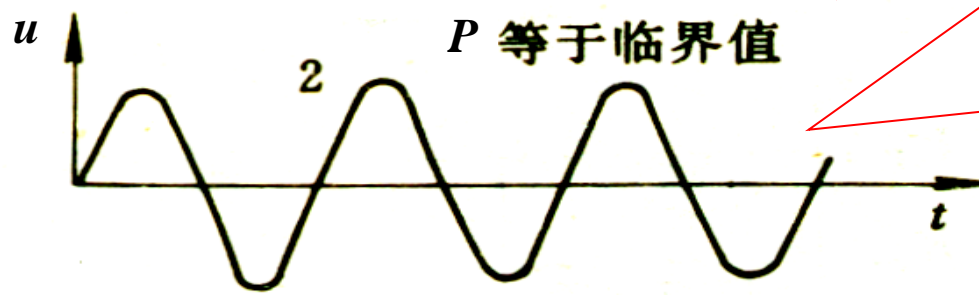
P 越大，控制过程曲线越平稳，但控制过程时间越长，余差也越大。



P 越小，控制过程曲线越振荡，周期缩短。



出现等幅振荡，这时的比例度称为临界比例度 P_{min} ，振荡频率称为临界振荡频率 ω_M 。



振荡逐渐加剧

□ 系统调节性能指标（又称可控性指标）

调节过程的概貌主要由四个品质指标来衡量：

1. 衰减率：反映系统的稳定性
2. 振荡频率：反映调节速度
3. 余差：反映稳态精度
4. 最大动态偏差：反映动态精度

上述指标的提高是有限度的，受制于控制系统的临界比例度 P_{min} 和临界振荡频率 ω_M 。

而被控对象的特性决定了控制系统 P_{min} 和 ω_M 的大小。

临界比例度 P_{min} 的倒数是临界放大倍数 K_{max}

K_{max} 与 ω_M 的乘积 $K_{max} \cdot \omega_M$ 在一定程度上代表了被控过程的控制性能。 $K_{max} \cdot \omega_M$ 越大，意味着：

1. 控制器放大系数 K_c 的可选上限越大，则系统稳态误差越小。
2. 控制系统可选的工作频率 ω_c 越大，则过渡过程越快。

因此， $K_{max} \cdot \omega_M$ 作为调节性能指标，越大表明系统的控制性能越好。可用于工程上的简便判断。

❖ 比例控制的特点

- ❑ 控制及时、适当。只要有偏差，输出立刻成比例地变化，偏差越大，输出的控制作用越强。
- ❑ 控制结果存在余差。如果被调量偏差为零，调节器的输出也就为零

$$u = e/P$$

即调节作用是以偏差存在为前提条件，不可能做到无静差调节。

6.3.1.2 积分（I）调节与比例积分（PI）调节对系统控制质量的影响

1 积分控制（I）

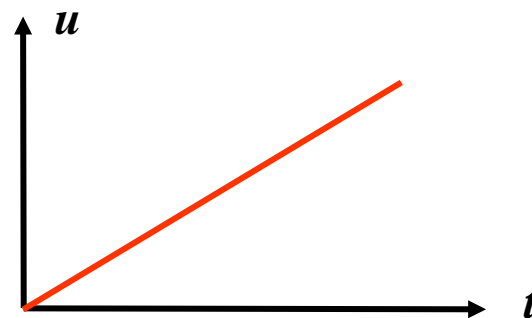
输出变化量 u 与输入偏差 e 的积分成正比

$$u = \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt$$

T_I —积分时间

当输入偏差 e 是幅值为 Δe 的阶跃时：

$$u = \frac{\Delta e}{T_I} t$$

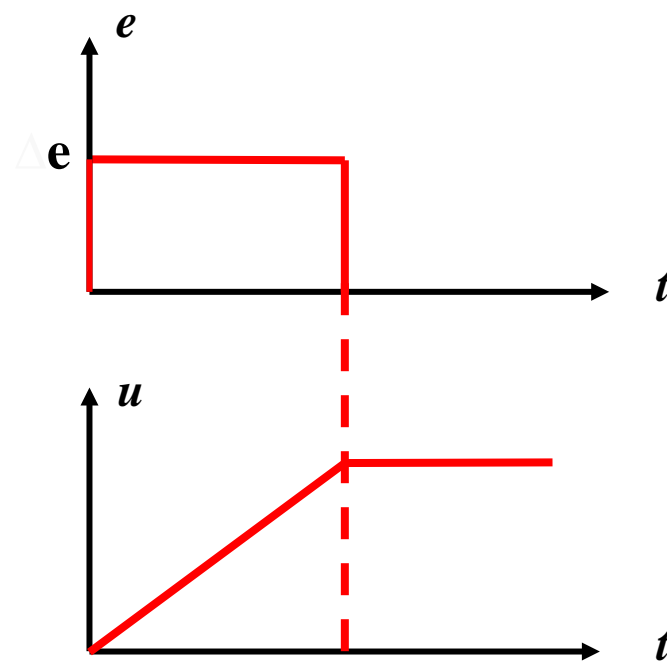


❖ 积分控制的特点

有偏差时，积分输出随时间增大（或减小）；
当偏差消失时，输出保持在某一值上。

❑ 积分控制可以消除余差。

❑ 积分输出信号是随时间逐渐增强的，控制作用缓慢，故一般积分作用不单独使用。



2 比例积分控制 (PI)

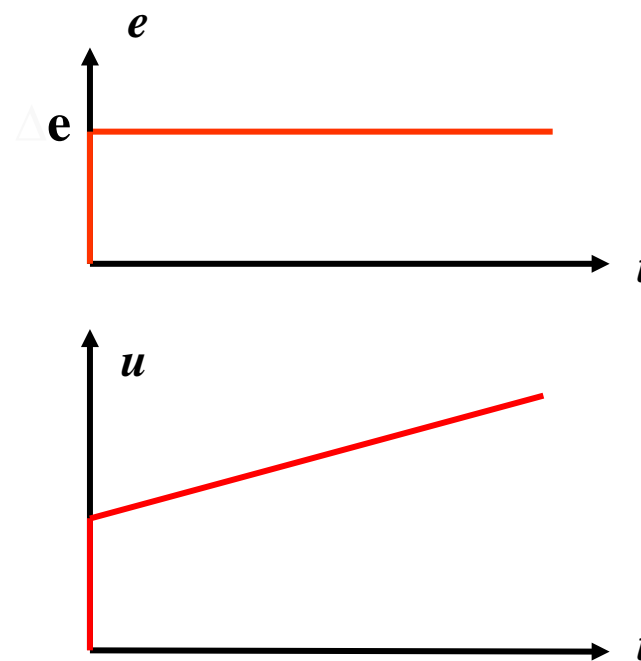
将比例与积分组合起来，这样既控制及时，又能消除余差，可以用于控制精度要求高的场合。

$$u = \frac{1}{P} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right)$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{P} \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

若偏差是幅值为 Δe 的阶跃干扰

$$u = \frac{\Delta e}{P} \left(1 + \frac{1}{T_I} t \right)$$



❑ 积分时间 T_I 对控制过程的影响

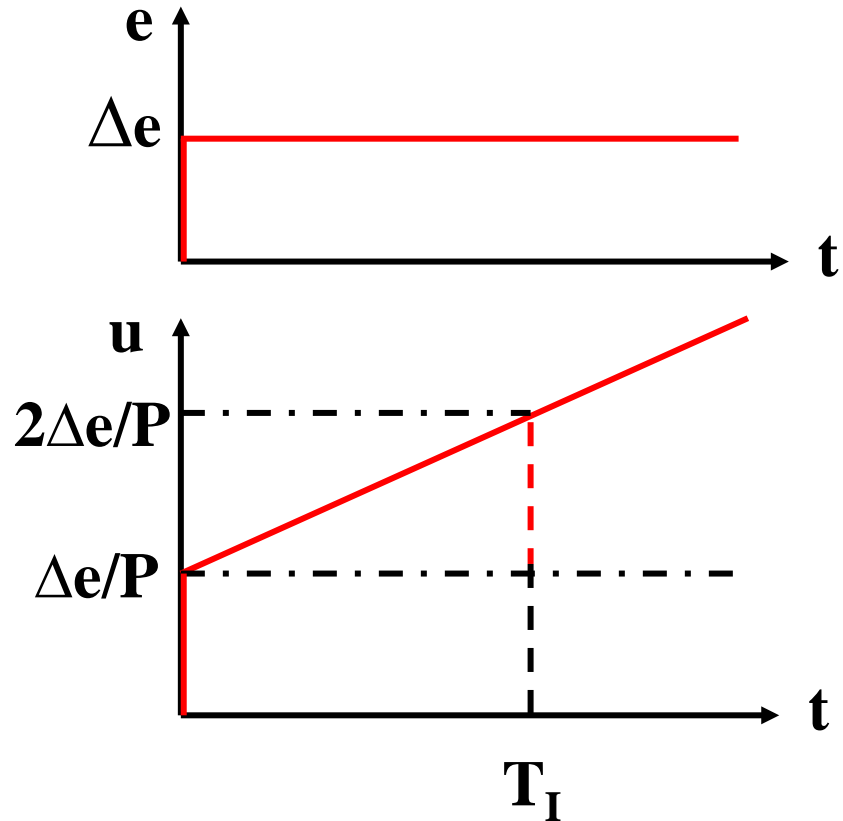
积分时间的物理意义: $u = \frac{1}{P} (e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt)$

若偏差是幅值为 Δe 的阶跃:

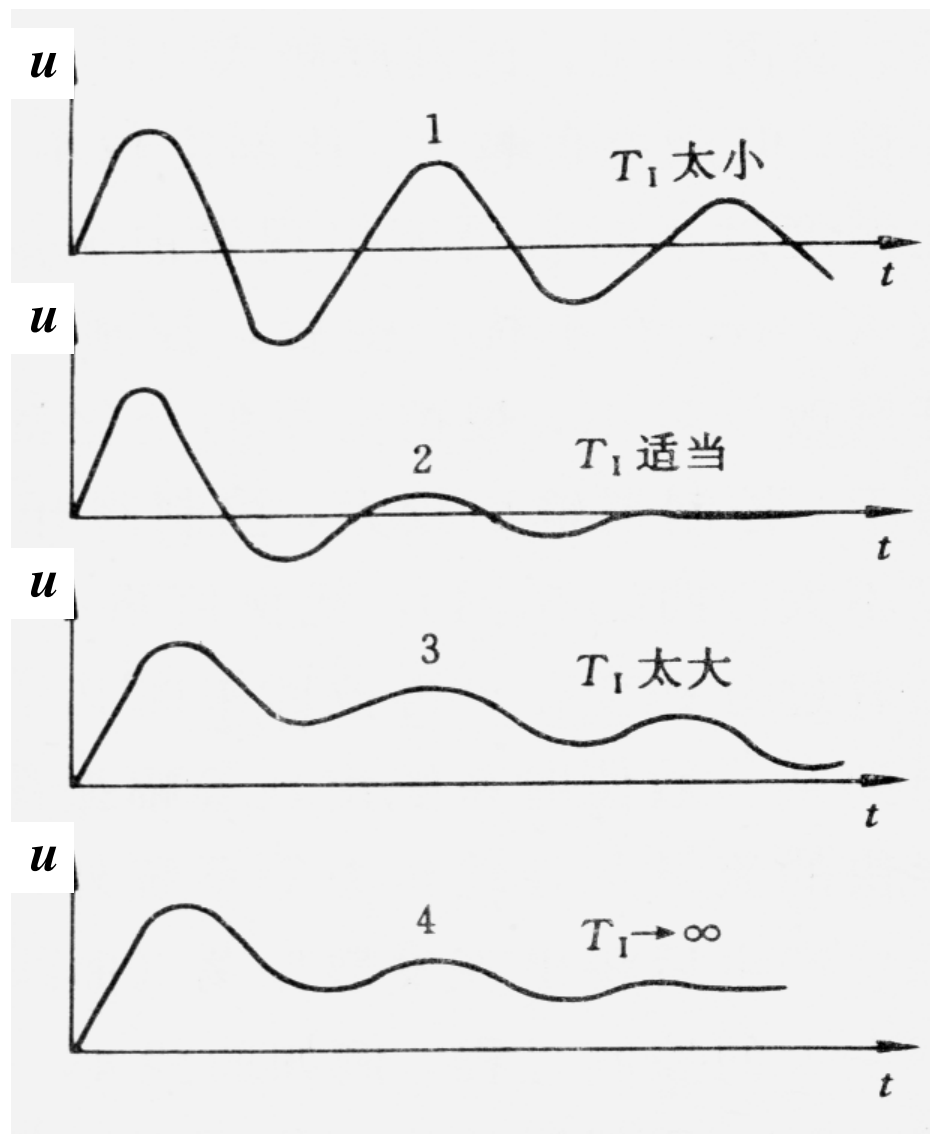
$$u = \frac{1}{P} \Delta e (1 + \frac{1}{T_I} t)$$

当 $t = T_I$ 时:

$$u(T_I) = \frac{2}{P} \Delta e$$



积分时间 T_I 对过渡过程的影响



1. T_I 越大，积分作用越弱， $T_I = \infty$ ，积分作用为零。 T_I 减小，积分作用增强，系统振荡加剧，稳定性下降。因此，加积分后，比例度要适当加大。

2. 如果 T_I 适当，系统能很快消除余差。

6.3.1.3比例微分（PD）调节对系统控制品质的影响

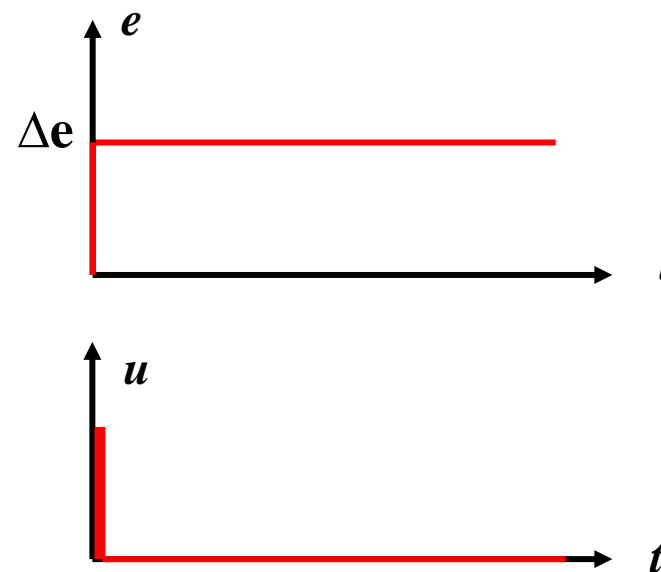
对于惯性较大的对象，常常希望能加快控制速度，此时可增加微分作用。

1 微分控制（D）

理想微分 $u = T_D \frac{de}{dt}$

式中： T_D — 微分时间

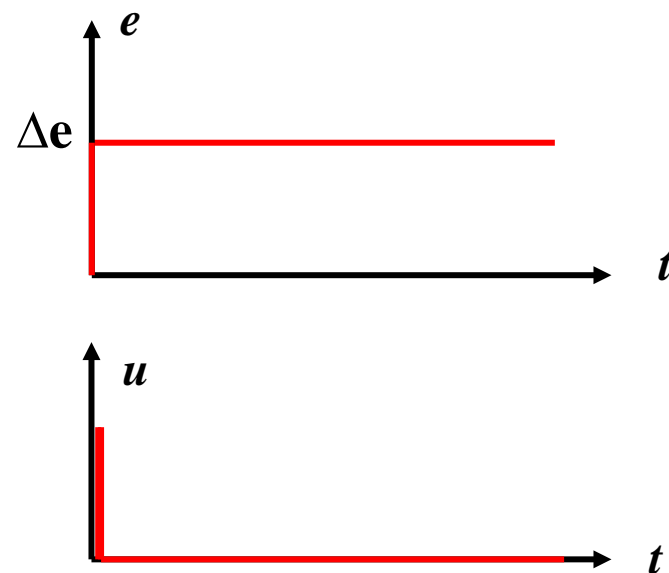
$\frac{de}{dt}$ — 偏差变化速度



❖ 微分控制的特点

□ 微分控制能在偏差出现或变化的瞬间，立即根据变化的趋势，产生强烈的调节作用，使偏差尽快地消除于萌芽状态之中。

□ 当偏差存在，但不变化时，微分输出为零，对静态偏差毫无抑制能力。因此不能单独使用，总要和比例或比例积分调节规律结合起来，组成PD调节器或PID调节器。



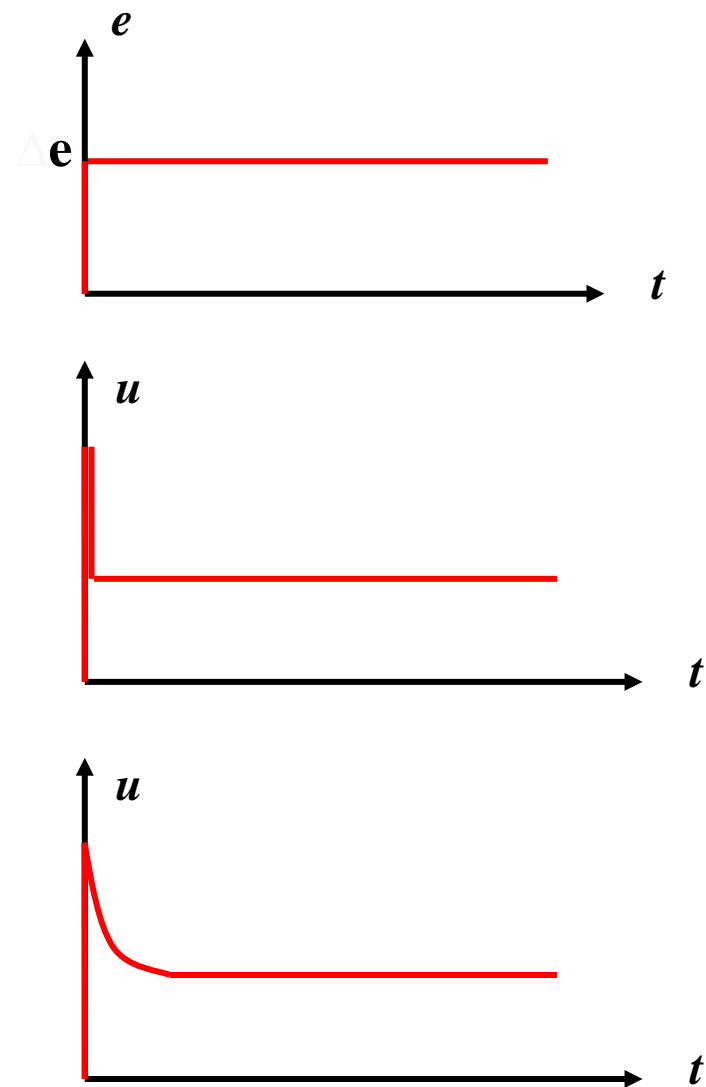
2 比例微分控制 (PD)

理想的比例微分控制

$$u = \frac{1}{P} \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

$$G(s) = \frac{1}{P} (1 + T_D s)$$

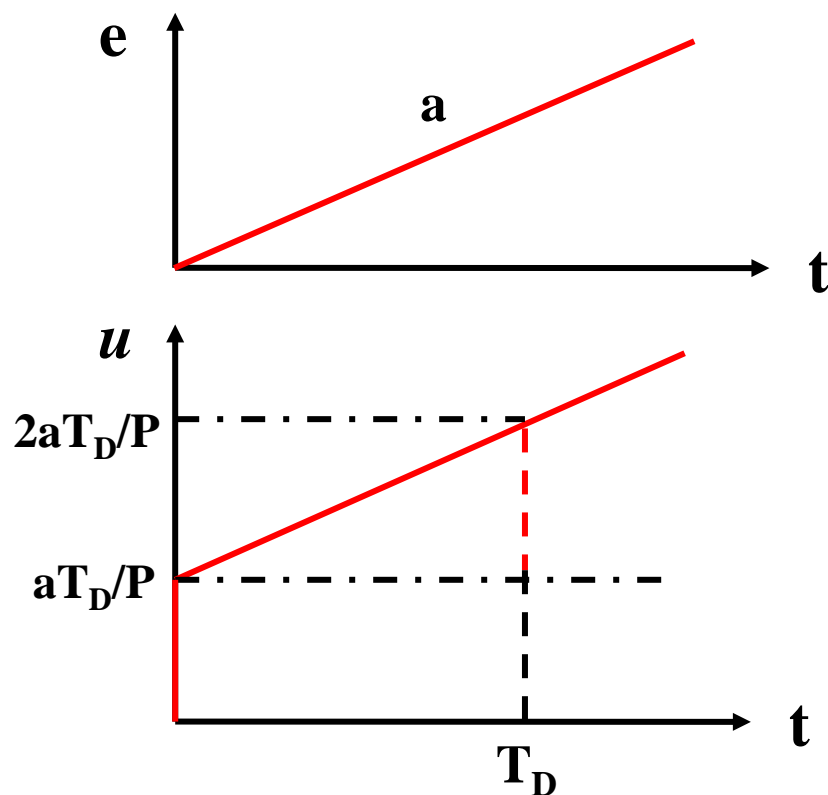
理想的微分作用持续时间太短，执行器来不及响应。一般使用实际的比例微分作用。



□ 微分时间 T_D 对控制过程的影响

微分时间的物理意义

$$u = \frac{1}{P} \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right)$$



若偏差是系数为 a 的
斜坡信号:

$$u = \frac{a}{P} (t + T_D)$$

当 $t = T_D$ 时:

$$u(T_D) = \frac{a}{P} 2T_D$$

❖ **微分控制的优点：**能加快系统的控制速度

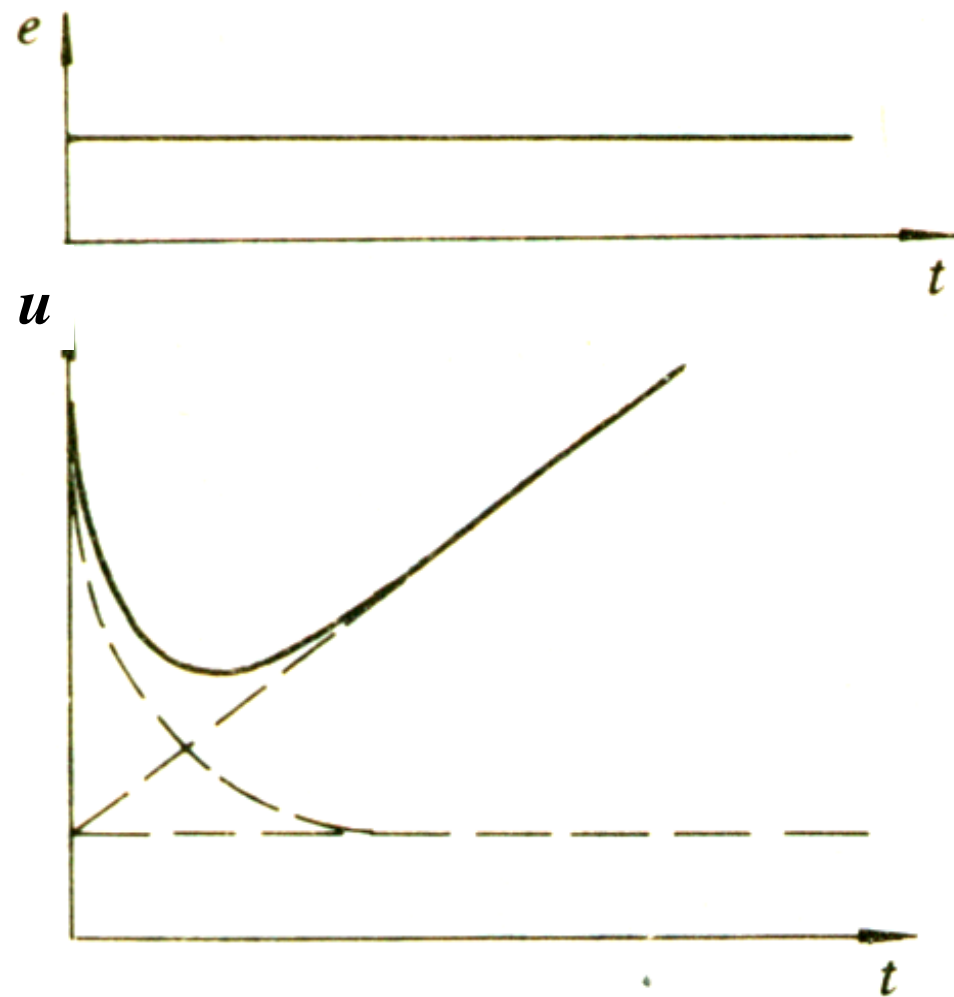
缺点：偏差存在但不变化时，无控制作用。

□ 将比例、积分、微分三种调节规律结合在一起，只要三项作用的强度配合适当，既能快速调节，又能消除余差，可得到满意的控制效果。

$$u(t) = \frac{1}{P} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

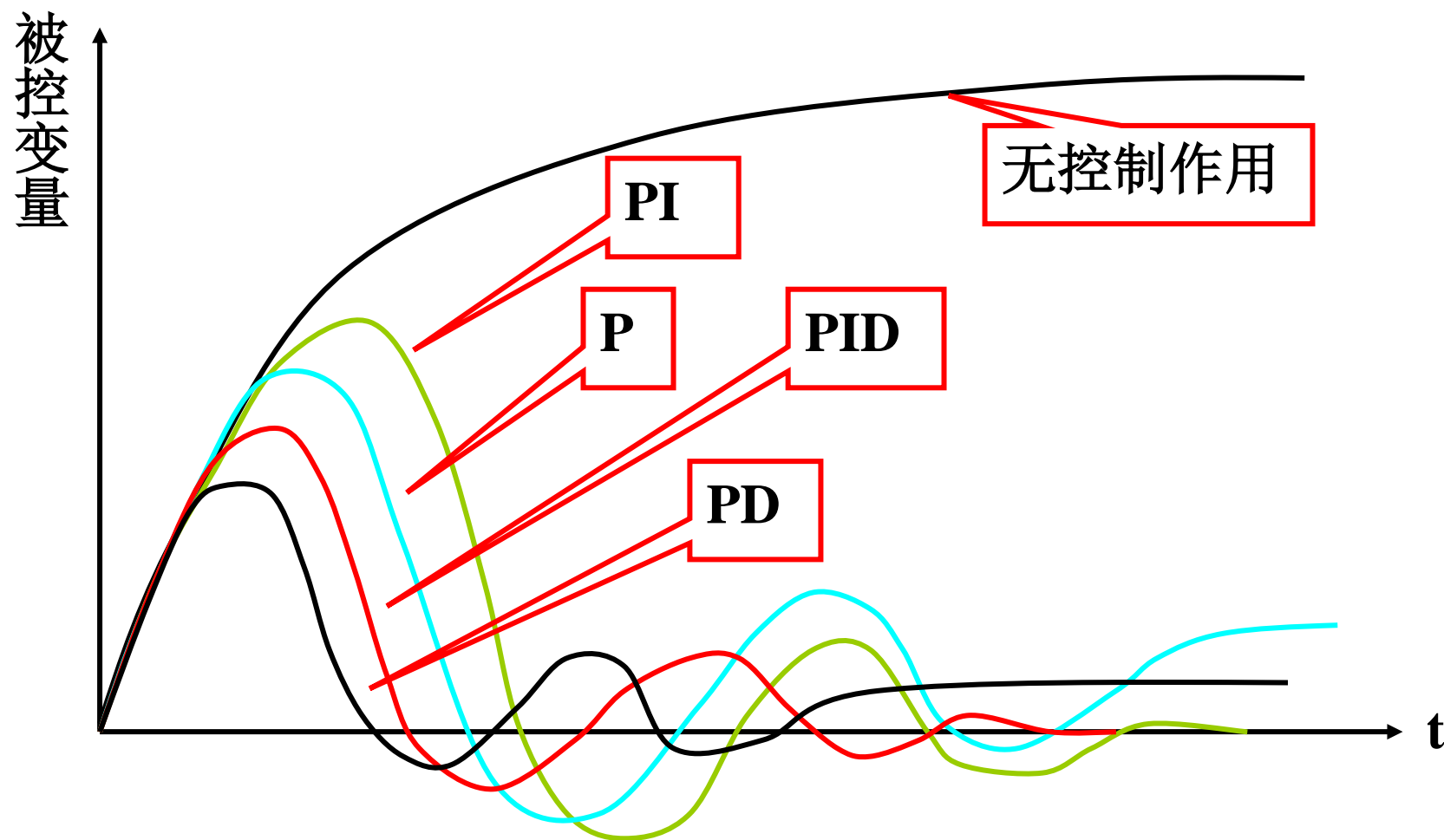
$$G(s) = \frac{1}{P} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

□ 在PID调节中，比例作用是基础；微分作用可以加快系统控制速度，减小超调；积分作用可以消除静差。但不是任何对象都是用PID控制最好。



6.3.1.4 (PID) 调节对系统控制品质的影响

对某一对象，用不同控制规律时阶跃干扰过程比较。



6.3.2 调节规律的选择

1、比例控制 (P)

适用于控制通道滞后较小、负荷变化不大、工艺上没有提出无差要求的系统，

2、比例积分控制 (PI)

适用于控制通道滞后较小、负荷变化不大、工艺参数不允许有余差的系统。

3、比例微分控制 (PD)

适用于控制通道滞后较大的系统。例如加热较慢的温度控制系统。

4、比例积分微分控制（PID）

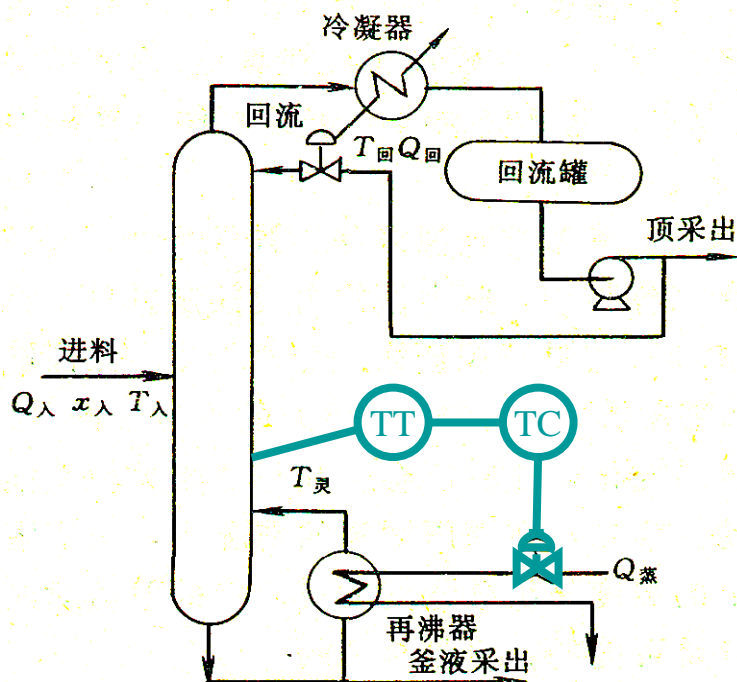
适用于容量滞后较大、负荷变化大、控制质量要求较高的系统，应用最普遍的是温度控制系统与成分控制系统。

也可根据 τ_0/T_0 来选择调节器的调节规律：

$\tau_0/T_0 < 0.2$ ，用P或PI

$0.2 < \tau_0/T_0 < 1.0$ ，用PD或PID

$\tau_0/T_0 > 1.0$ ，用简单控制系统效果不好。



精馏塔流程图

调节规律	优 点	缺 点	应 用
P	灵敏、简单，只有一个整定参数；	存在静差	负荷变化不显著，工艺指标要求不高的对象。
PI	能消除静差，又控制灵敏	对于滞后较大的对象，比例积分调节太慢，效果不好。	应用于调节通道容量滞后较小、负荷变化不大、精度要求高的调节系统。例如，流量调节系统。
PD	增进调节系统的稳定度，可调小比例度，而加快调节过程，减小动态偏差和静差	系统对高频干扰特别敏感，系统输出易夹杂高频干扰。	应用于调节通道容量滞后较大，但调节精度要求不高的对象。
PID	综合了各类调节作用的优点，所以有更高的调节质量。	对于滞后很大，负荷变化很大的对象，PID调节也无法满足要求，应设计复杂调节系统	应用于调节通道容量滞后较大、负荷变化较大、精度要求高的对象。

6.4 系统的投运

系统投运：在单回路控制系统方案设计、仪表正确选型、安装调试就绪后，或者装置经过停车全面检修之后，再将系统投入生产使用的过程就称为系统的投运。

手动—自动切换的一般程序

一、准备工作

- 1、熟悉生产工艺过程
- 2、熟悉控制方案
- 3、全面检查过程检测控制仪表
- 4、进行仪表联调试验

二、系统投运

- 1、检测系统投入运行
- 2、调节阀手动遥控
- 3、调节器投运（手动—自动）

当系统正确投运、调节器参数继续整定后，若其品质指标一直达不到要求时，有可能是系统设计问题，也可能是仪器仪表功能不合格。此时需将系统由自动切换到手动，再行研究解决。

系统由自动控制切换到手动操作的程序：

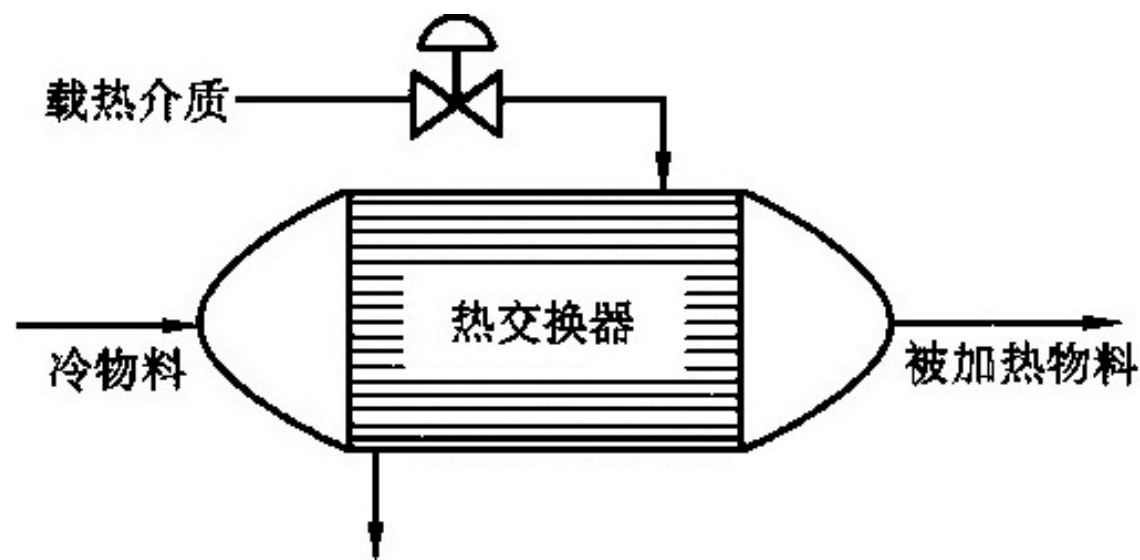
- 1、系统先由自动控制转入手动遥控；
- 2、再进行手动操作。

思考题

- 利用微分作用来克服控制系统的信号传递滞后的设想是否合理与正确？

- 利用微分作用来克服控制系统的信号传递滞后的设想是否合理与正确？
- 答：这种设想不合理，因为信号传送滞后是纯滞后，而微分作用不能克服纯滞后。合理的措施是采用继电器加在信号传输线之间，以增大信号流速，从而减小传输滞后，改善系统特性。

例： 如图所示的热交换器，将进入其中的冷却物料加热到设定温度。工艺要求热物料温度的偏差绝对值不超过 1°C ，而且不能发生过热情况，以免造成生产事故。试设计一个简单控制系统（画出工艺流程图）实现热物料的温度控制，并确定调节阀的气开、气关方式和流量特性，调节器的正反作用方式，以及调节器的调节规律。



6.4调节器参数的工程整定方法

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

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

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

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

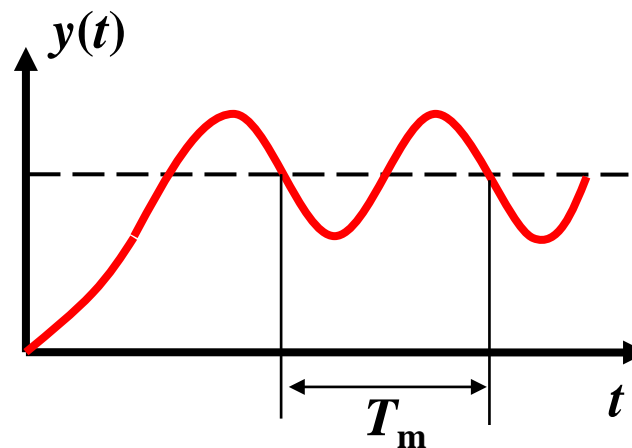
□ 工程整定法是在已经投运的实际控制系统中，通过试验或探索，来确定控制器的最佳参数。这种方法是工艺技术人员在现场经常使用的。

6.4.1 稳定边界法（临界比例度法）

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

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

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



系统临界振荡曲线

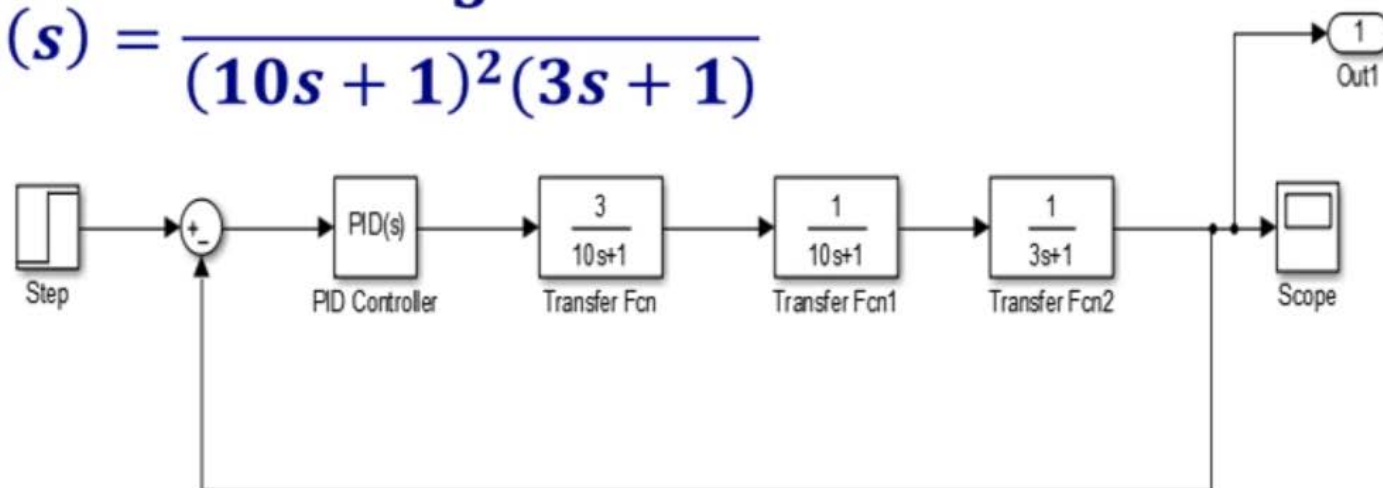
表6.1 稳定边界法整定参数计算表

根据 P_m 和 T_m ，
按经验公式计算出控制器的
参数整定值。

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

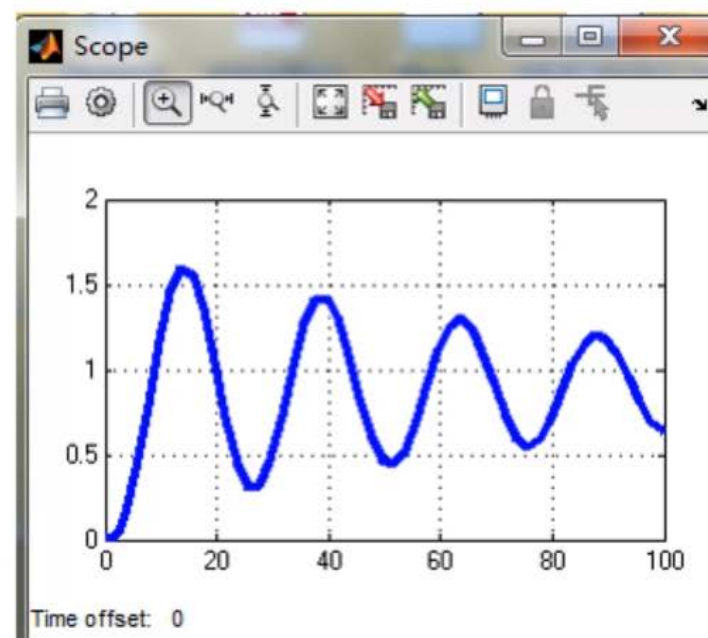
❖ 经验公式虽然是在实验基础上归纳出来的，但它有一定的理论依据。就以表中PI调节器整定数值为例，可以看出PI调节器的比例度较纯比例调节时增大，这是因为积分作用产生一滞后相位，降低了系统的稳定度的缘故。

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



先采用纯比例调节器

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



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

出现等幅振荡，记录下此时的

$$\delta_K = 0.267$$

和振荡周期 $T_K = 23$

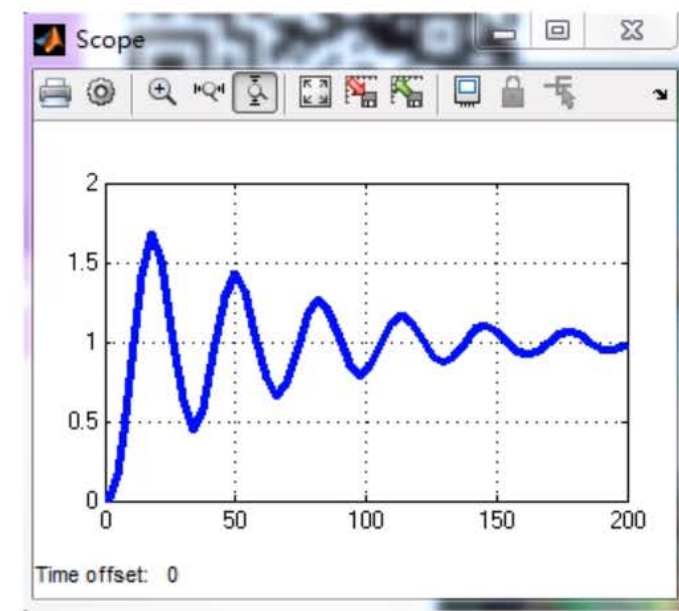
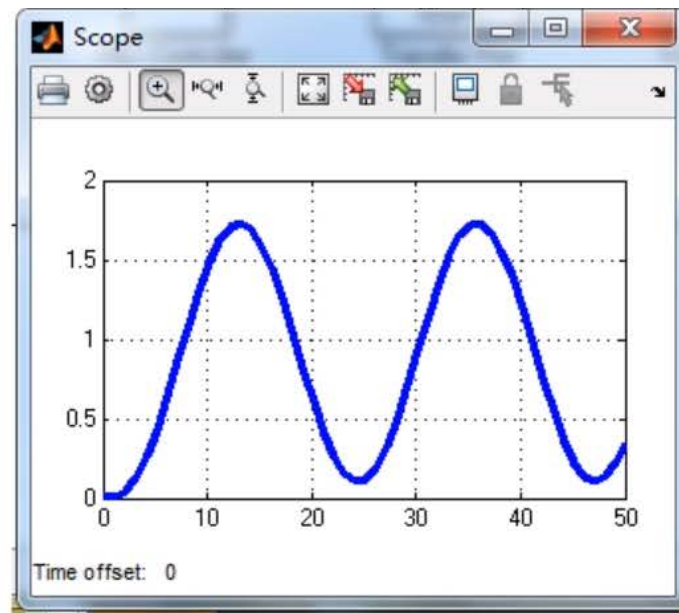
采用PI调节器

查表 $\delta = 2.2\delta_K = 0.5874$,

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

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

超调量太大，微调



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

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

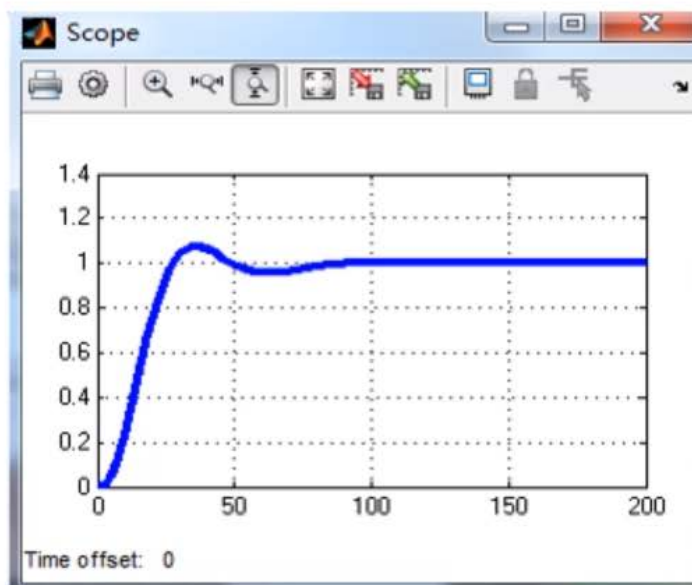
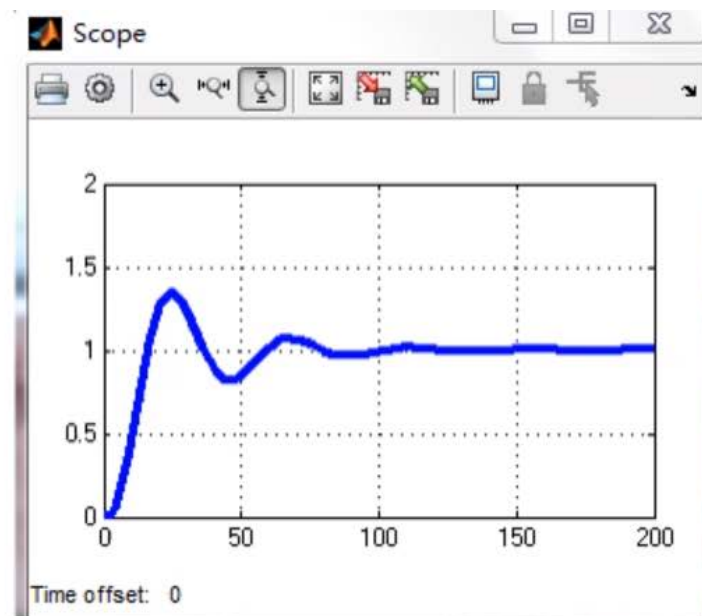
$$\sigma_p = 35\%, t_s = 96s \ (\Delta = 2\%)$$

要继续减小超调，减小 K_p 或增大 δ

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

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

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



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

出现等幅振荡，记录下此时的

$$\delta_K = 0.267$$

和振荡周期 $T_K = 23$

采用PID调节器

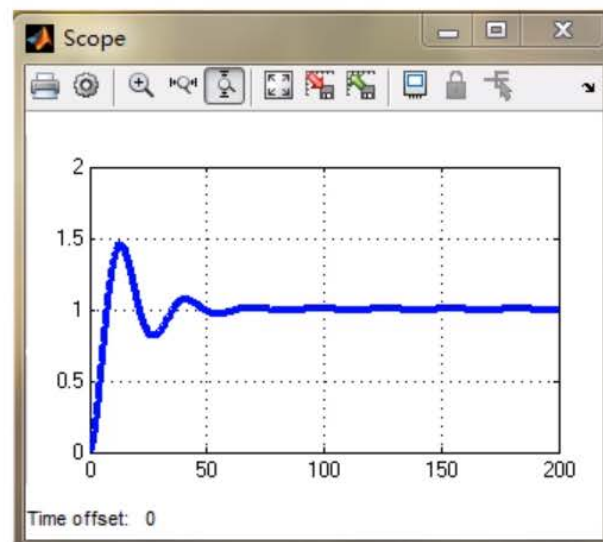
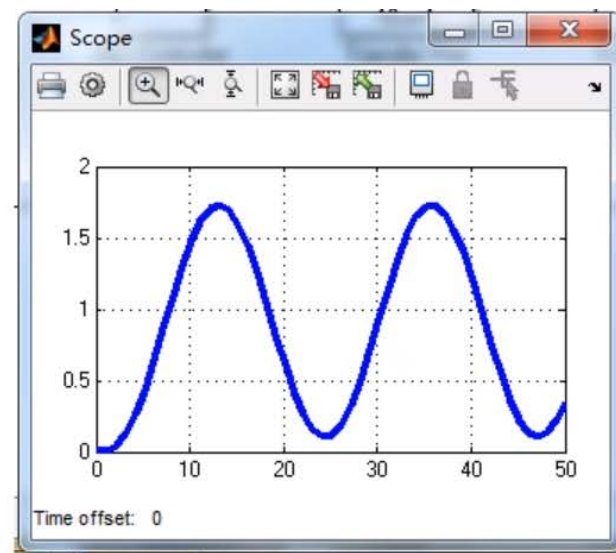
查表 $\delta_0 = 1.6\delta_K = 0.427$,

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

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

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

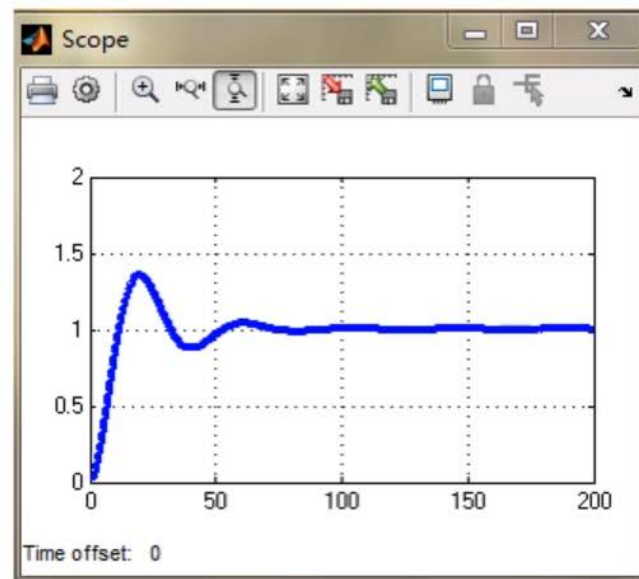
超调量太大，微调



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

在调系数是保持这个比例不变。
 要想减小超调，减小 K_p 或增大 δ

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



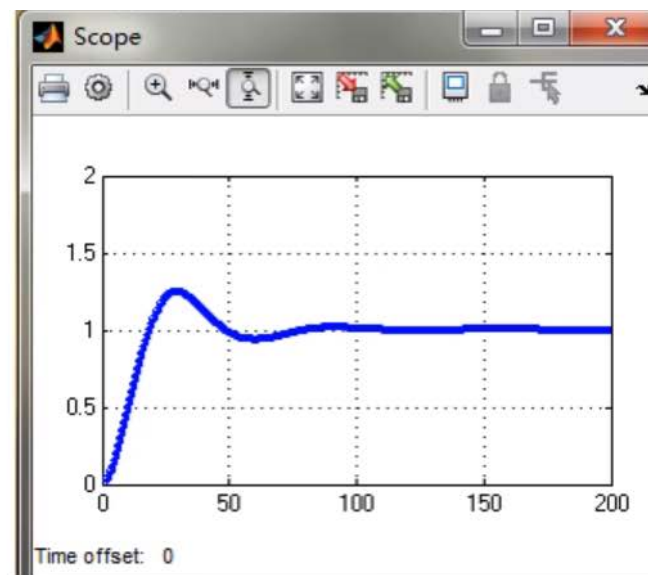
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



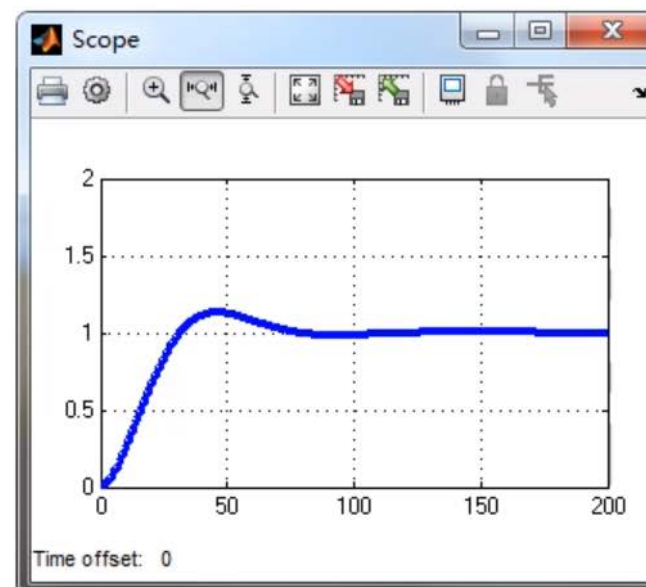
想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



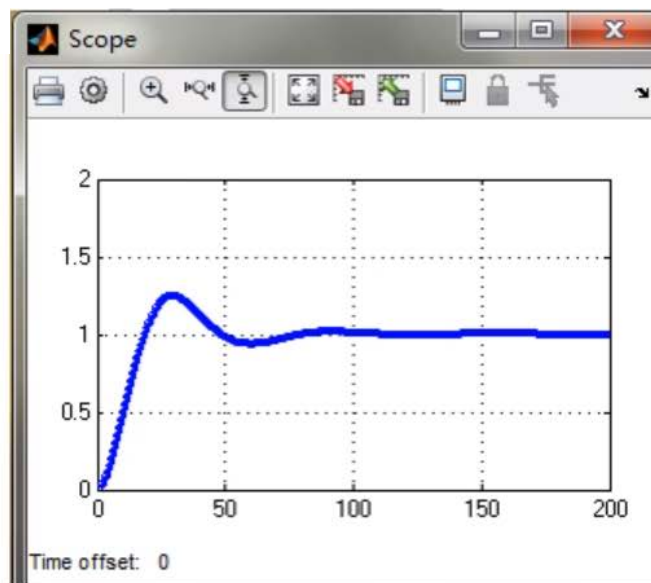
要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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



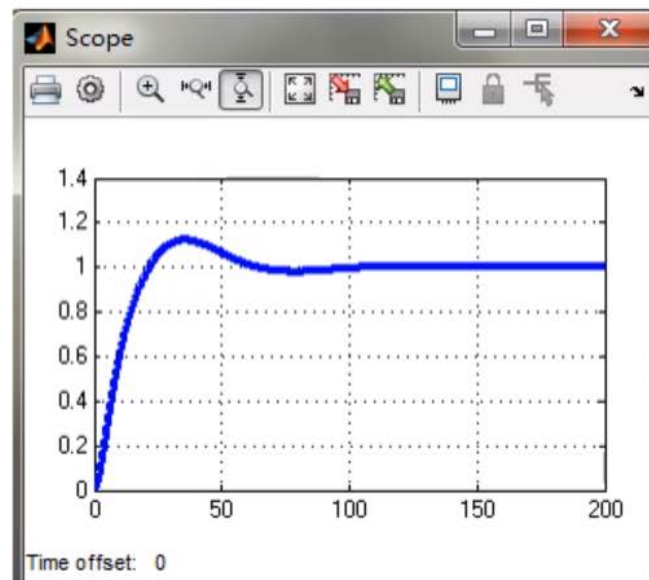
也可以改变比例，微分可以减小超调，把微分系数增加一点

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

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

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

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



要想减小超调，继续减小 K_p 或增大 δ

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

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

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

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

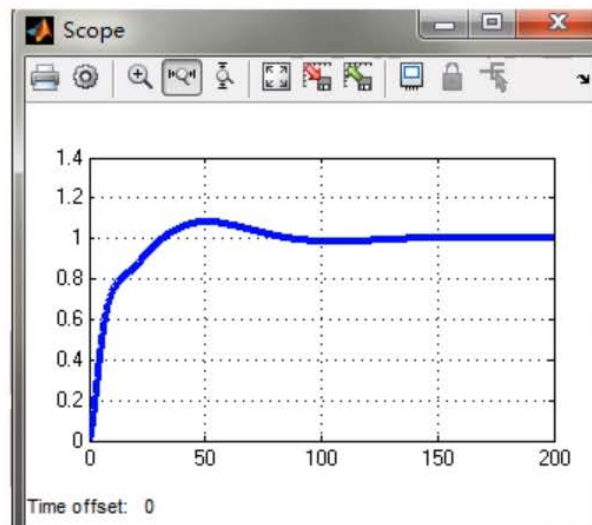
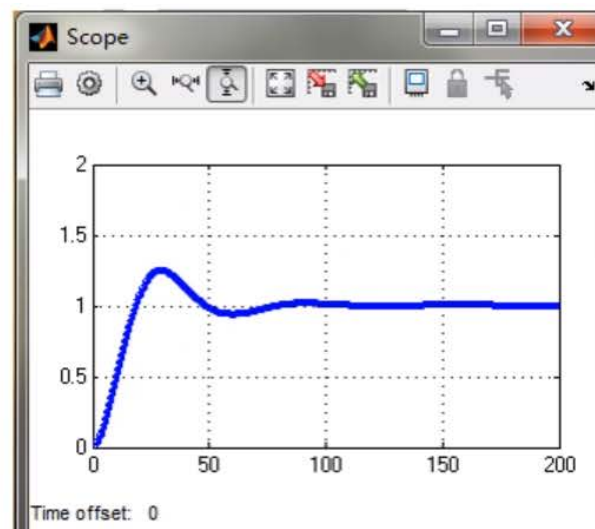
继续增加微分作用

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

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

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

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



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

6.4.2 衰减曲线法

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

方法:

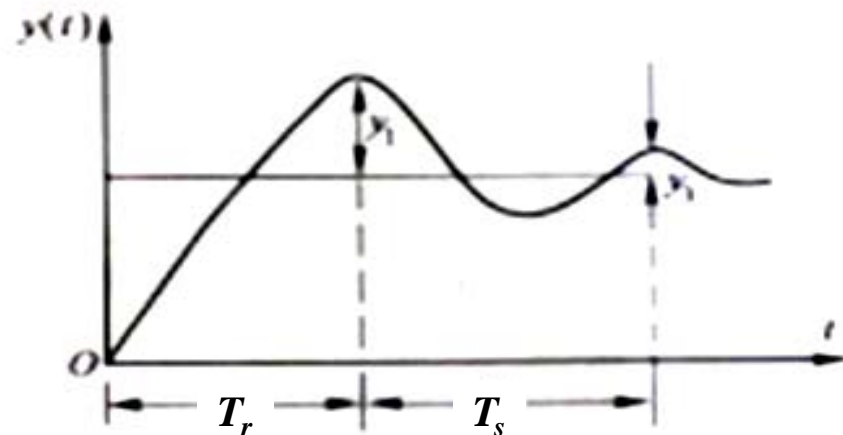
(1) 把调节器设成比例作用 ($T_i=\infty$, $T_d=0$) , 置于较大比例度, 投入自动运行。

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

(3) 适当改变比例度, 重复上述实验, 到出现满意的衰减曲线为止。

n=4:1时, 记下此时的比例度 P_s 及周期 T_s 。

n=10:1时, 记为 P'_s 及 T_r 。



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

表6.2
衰减比为4:1时,
整定参数计算表

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

表6.3
衰减比为10:1时,
整定参数计算表

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

采用衰减曲线法进行参数整定必须注意以下两点：

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

衰减曲线法优缺点：

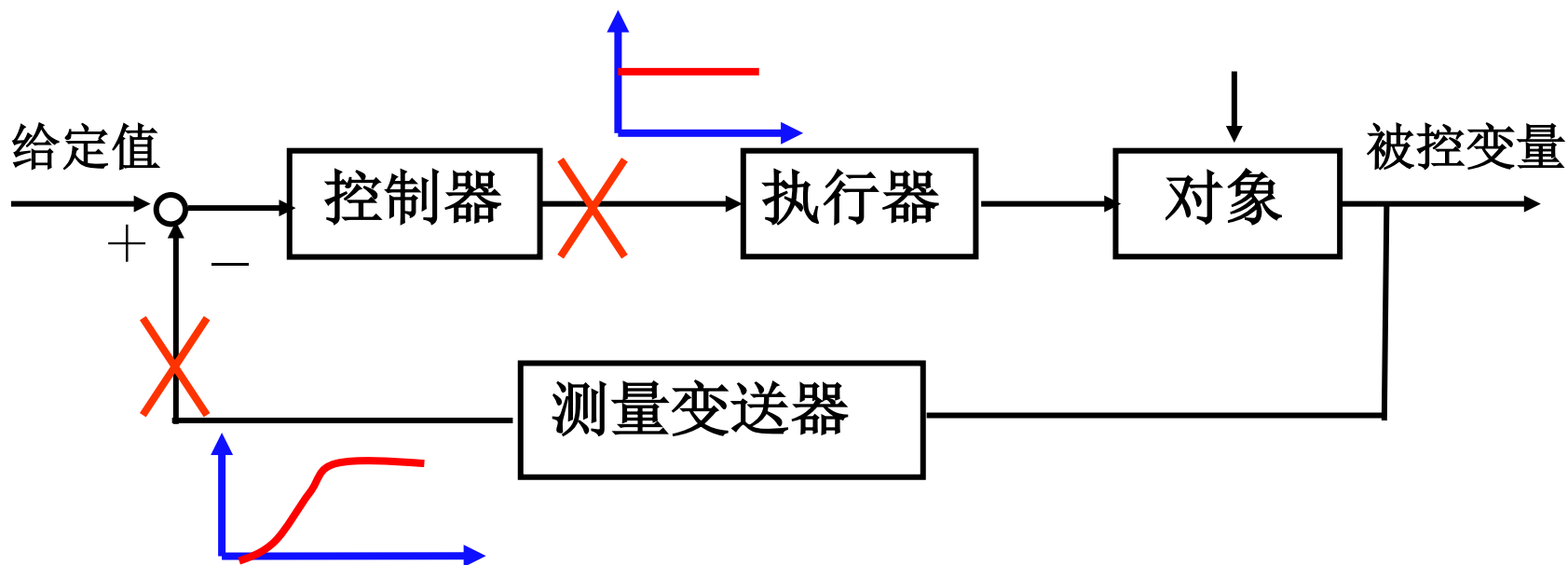
优点：比较简单，适用于各种控制系统的参数整定。

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

6.4.3 响应曲线法

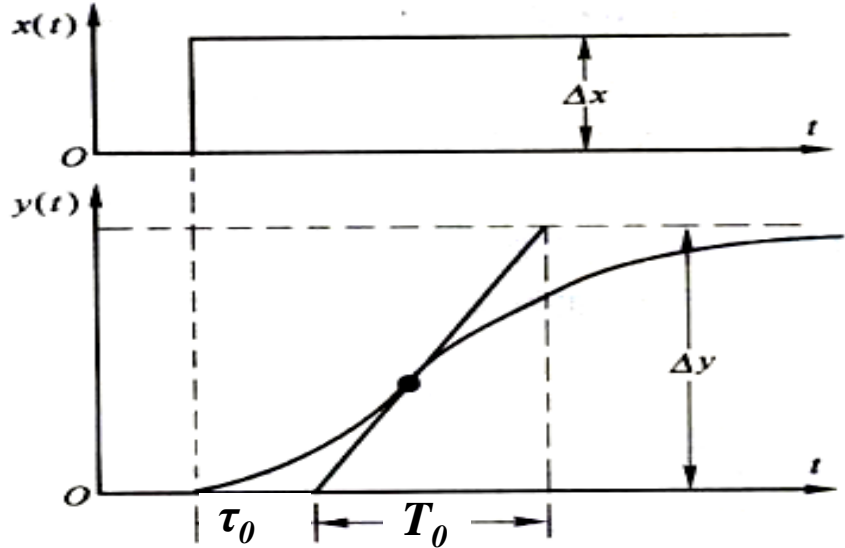
属于开环整定方法。以被控对象控制通道的阶跃响应为依据，通过经验公式求取调节器的最佳参数整定值。

方法：不加控制作用，作控制通道特性曲线。



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

表6.4 响应曲线法整定参数的公式



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

此方法在不加控制作用的状态下进行，对于不允许工艺失控的生产过程，不能使用。

响应曲线法经验公式的理论依据

设被控对象特性用如下传递函数表示：

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

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

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

将 $G_0(s)$ 、 $G_c(s)$ 代入上式

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

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

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

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

所以

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

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

由幅值条件可得:

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

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

解：首先计算出控制对象放大倍数 K_0 。（或比例度 P_0 ）值

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

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

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

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

可得

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

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

采用**PI**调节时

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

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

采用**PID**调节时

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

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

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

6.4.4 经验法

凭经验凑试。其关键是“看曲线，调参数”。

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

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

经验法整定调节器参数的步骤有两种：

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

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

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

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

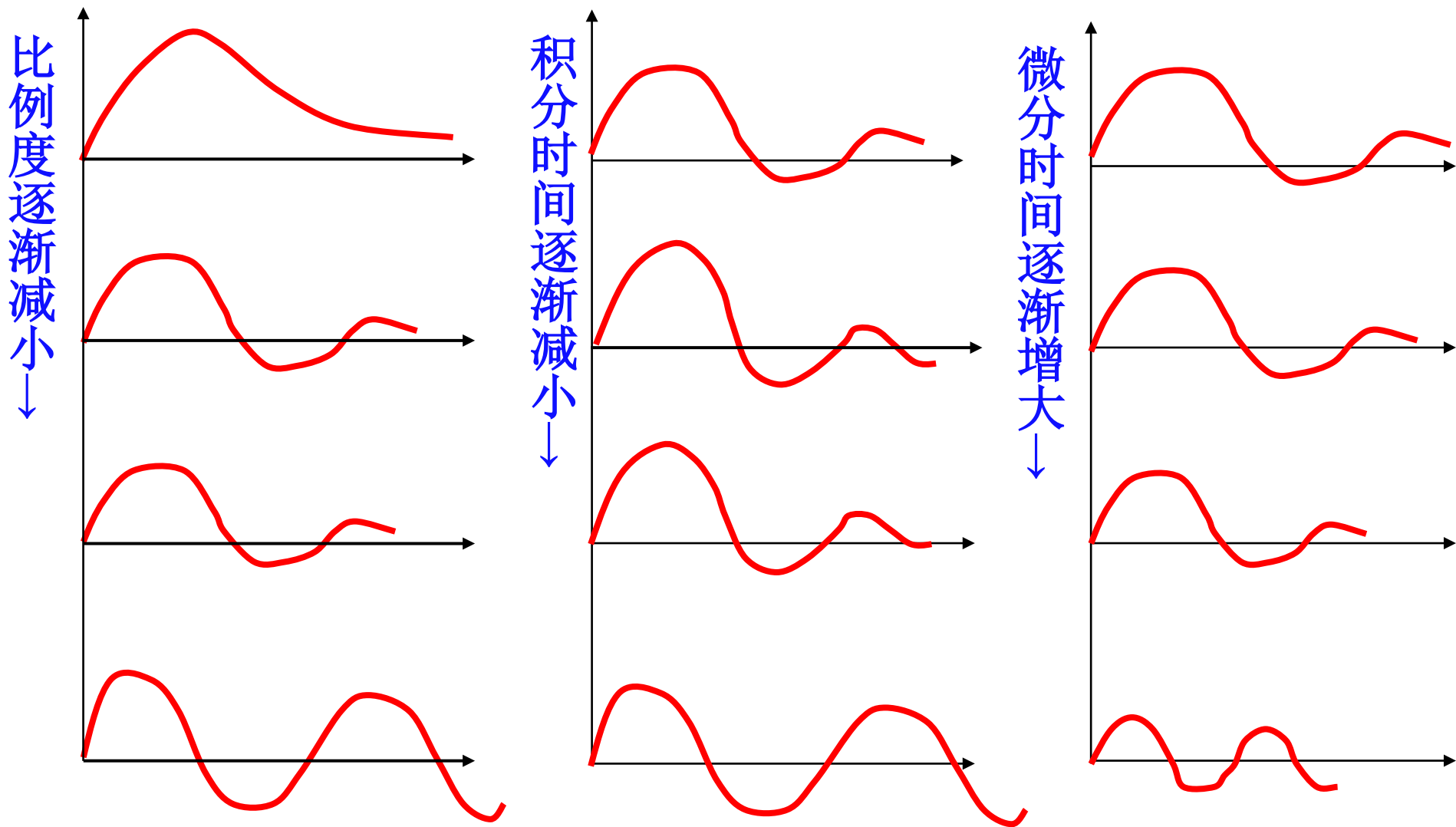
~20%, T_i 适当缩短后, 再把 T_d 由短至长逐步加入, 过渡过程曲线, 直到获得满意的过渡过程。

整定步骤2:

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

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

控制器参数对控制过程的影响：



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

如果比例度 P 过大或积分时间 T_i 过长，都会使过渡过程变化缓慢。一般比例度过大，响应曲线振荡较剧烈、不规则、较大幅度地偏离设定值；积分时间 T_i 过长时，则响应曲线在设定值一方振荡，且慢慢地回复到设定值。

6.4.5 几种整定方法的比较

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

□ 注意：

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

例如某蒸馏塔塔顶温度控制系统，控制器采用以下两组参数时：

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

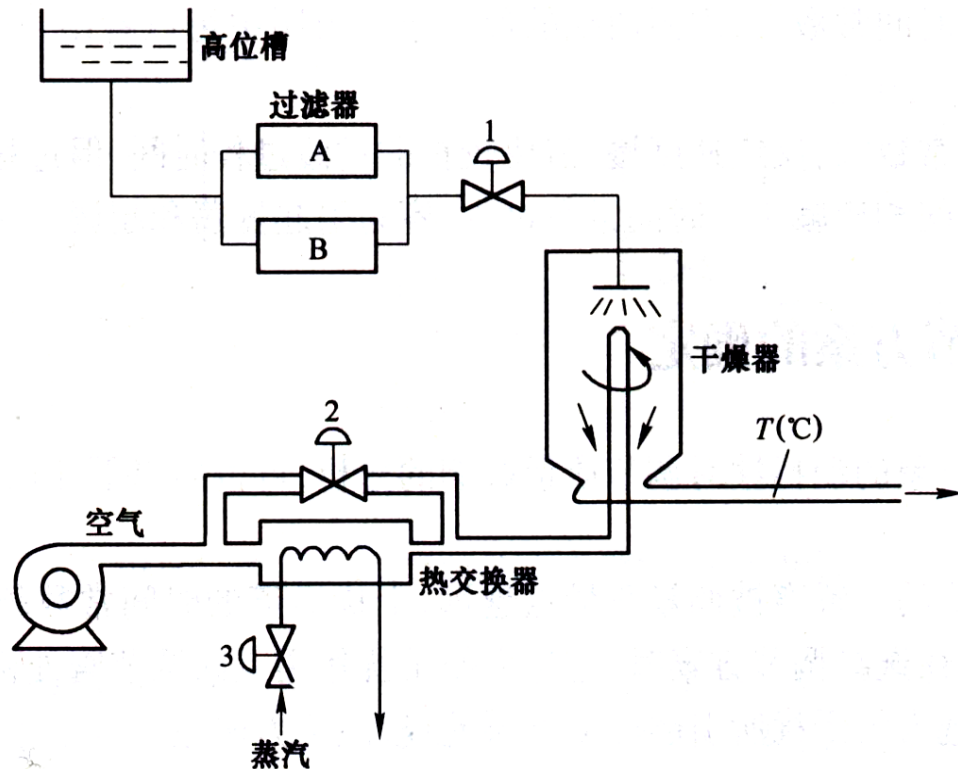
$$P = 35\% \quad T_I = 3 \text{ min}$$

系统都得到**10:1**的衰减曲线，超调量和过渡时间基本相同。

6.5 简单控制系统设计实例

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

6.5.1 生产过程概述



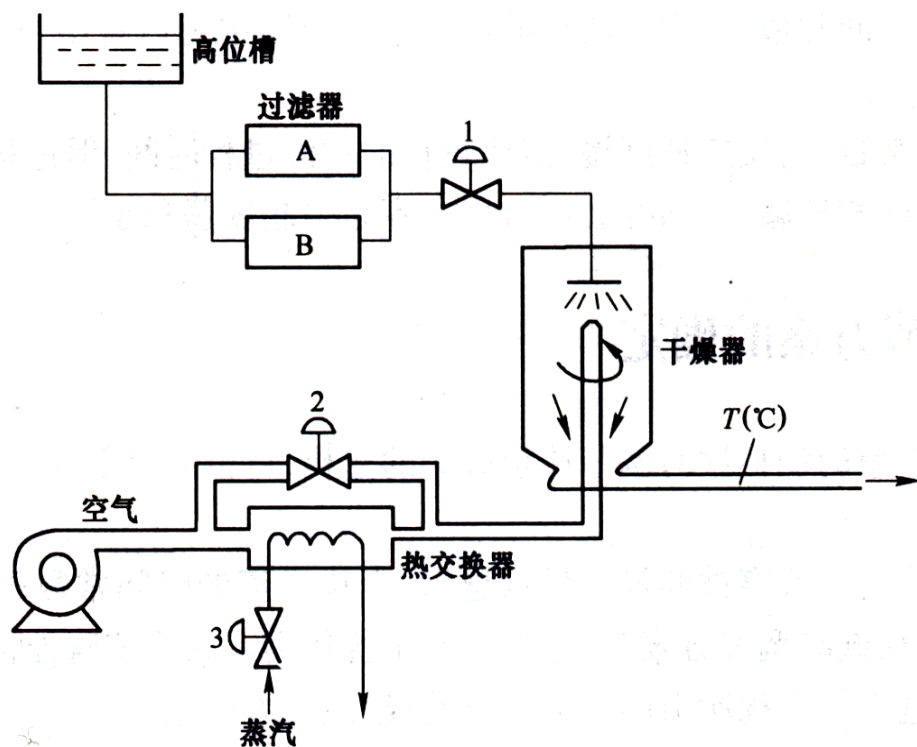
已浓缩的奶液从储槽流下，经过滤后从干燥器顶部喷出。干燥空气被加热后经风管吹入干燥器。滴状奶液在热风中干燥成奶粉，并被气流带出干燥器。

6.5.2 控制方案设计

6.5.2.1 被控参数选择

按工艺要求应首选奶粉含水量为被控变量，但此类在线测量仪表精度低、速度慢。

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



6.5.2.2 控制变量选择

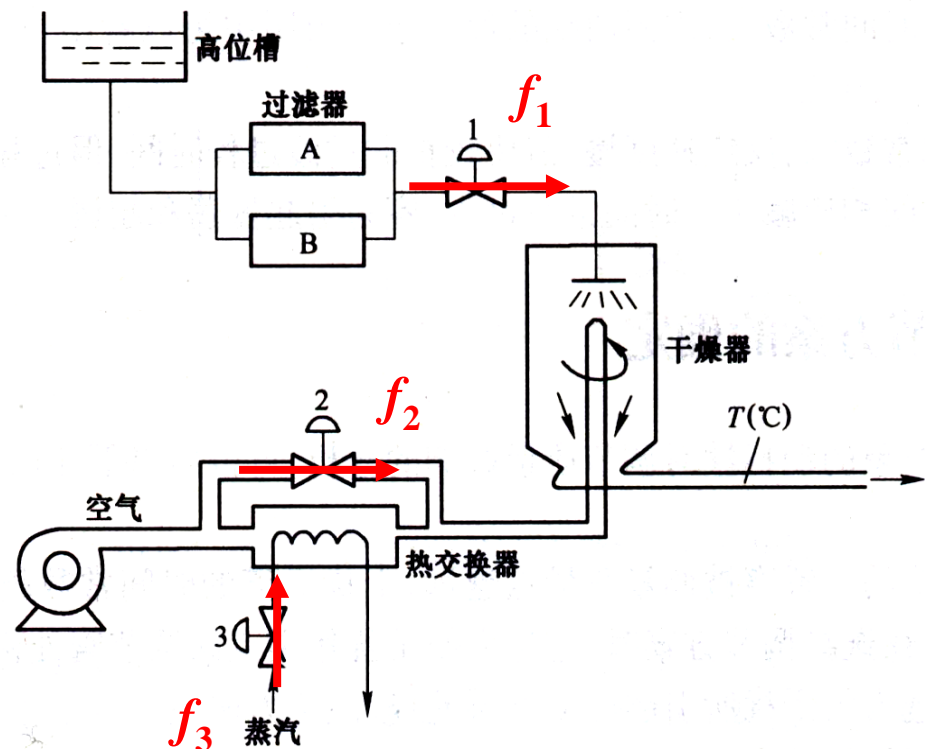
影响干燥器出口奶粉流体温度的主要**可控**因素有：

乳液流量变化 f_1

旁路空气流量变化 f_2

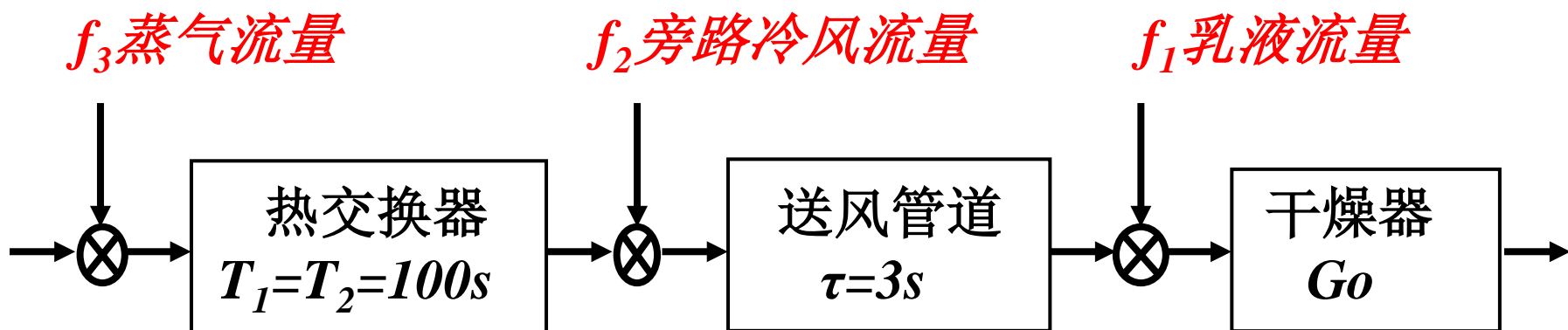
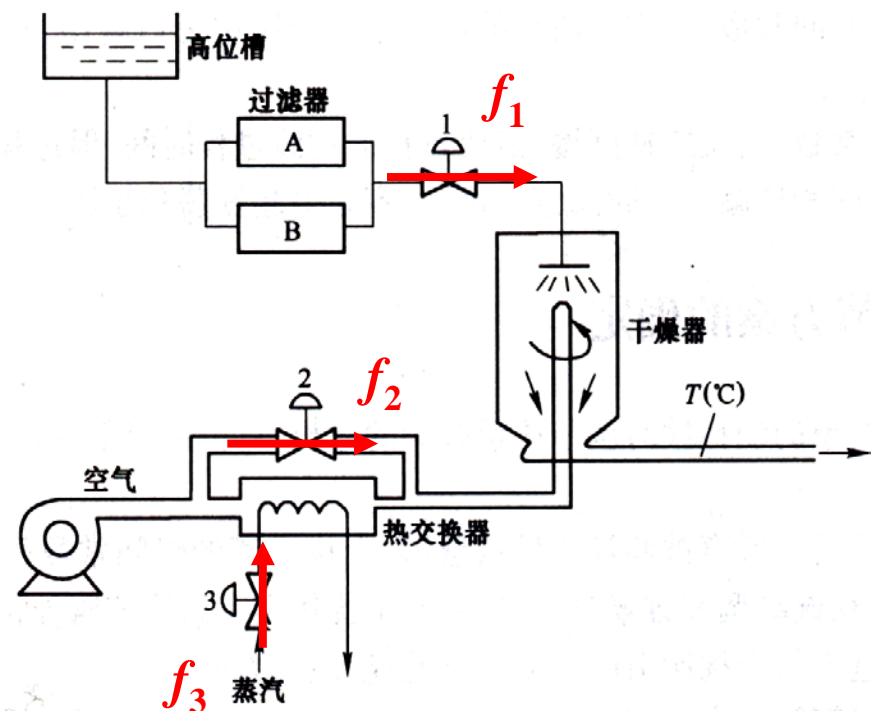
加热蒸汽流量变化 f_3

若分别以这三个变量为控制变量，可以得到三个不同的控制方案。



影响量作用的位置不同：

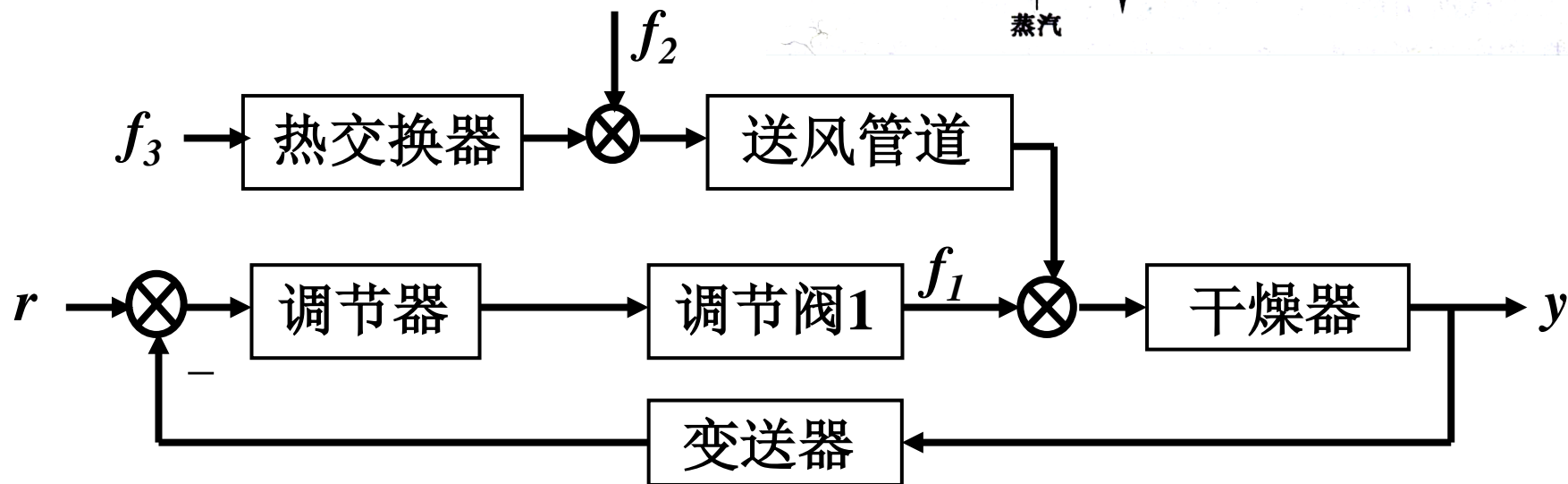
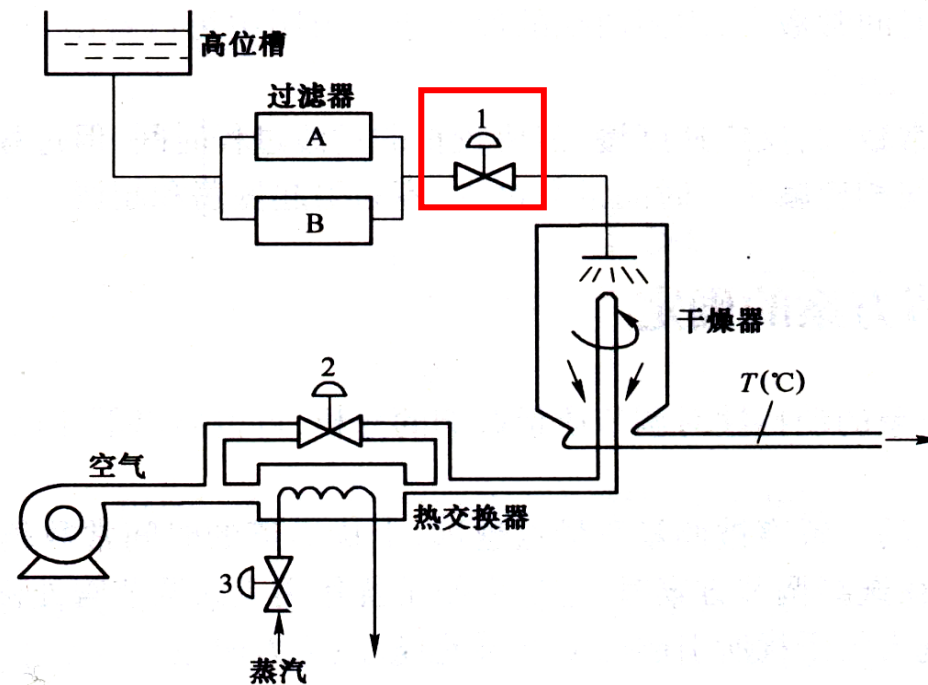
乳液流量变化 f_1 的作用通道最短；旁路空气流量变化 f_2 的作用通道增加了3秒的滞后；加热蒸汽流量变化 f_3 的作用通道又增加了两个100秒的双容滞后。



□ 调节方案:

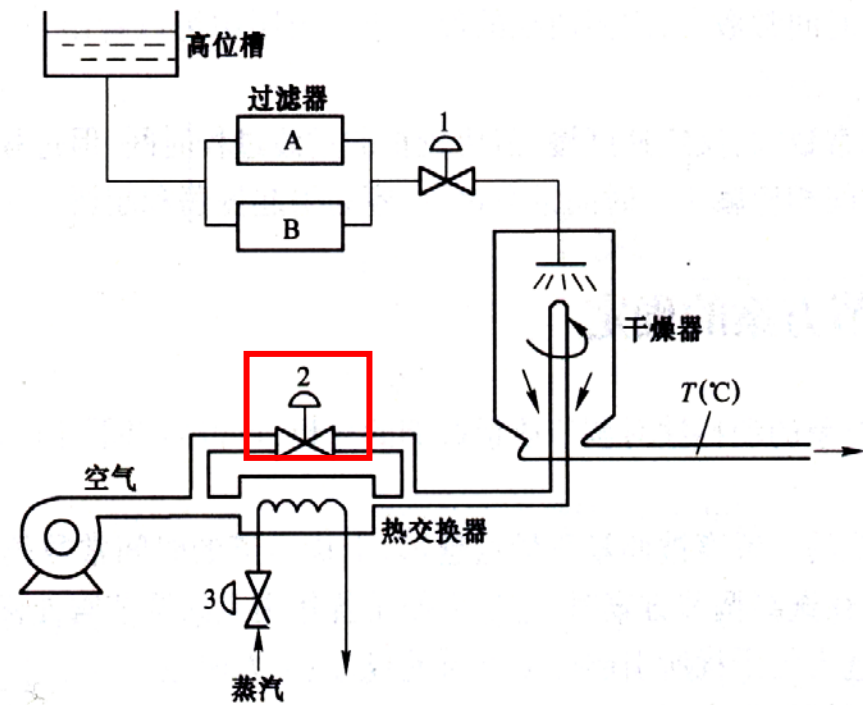
方案1: 取乳液流量
为控制变量 (调节阀1)

❖ 控制通道最短



方案2：取旁通冷风流量为控制变量（调节阀2）

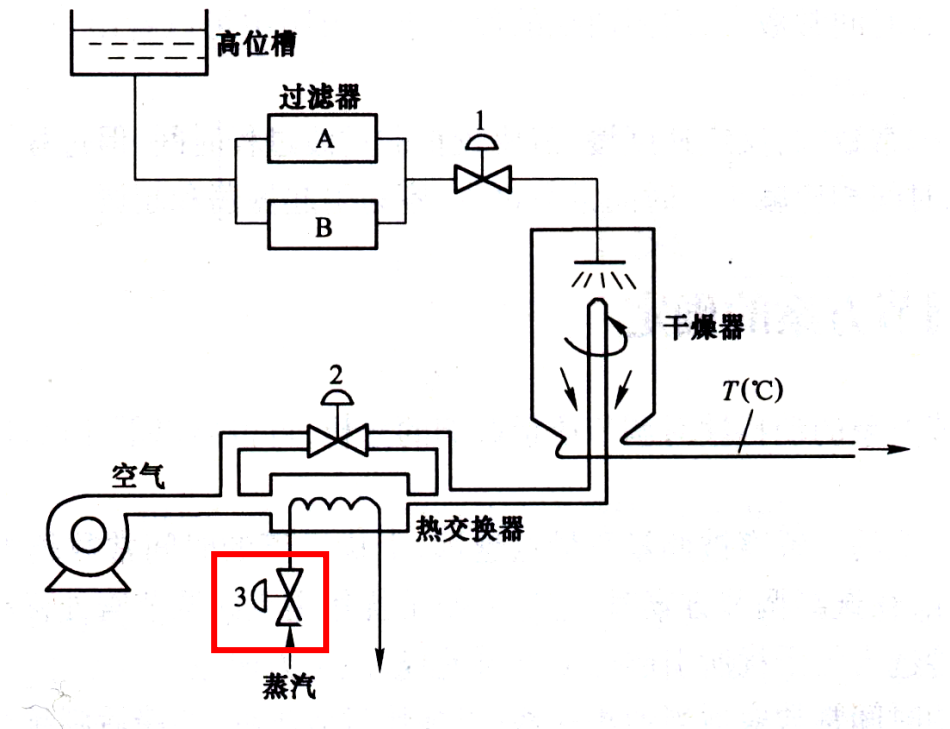
❖ 由于有送风管路的传递滞后存在，较方案1多一个纯滞后环节 $\tau=3s$ 。



原理方框图

方案3：取蒸汽流量
为控制变量（调节阀3）

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



原理方框图

控制参数的选用原则

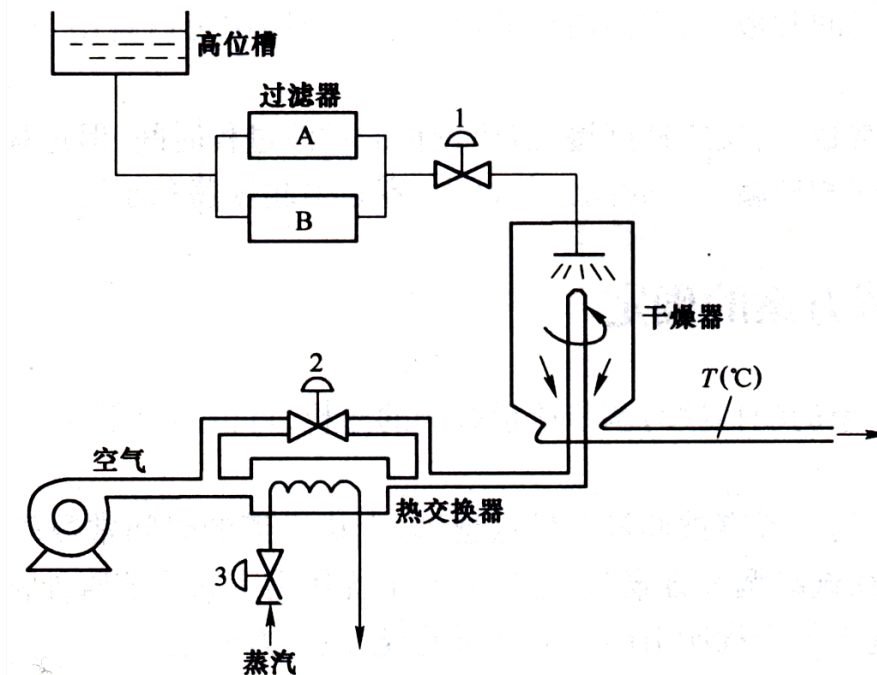
- 控制参数应具有可控性、工艺操作的合理性和经济性，
- 一般情况生产负荷不能作为控制参数
- 选择控制参数应使扰动通道的时间常数越大越好，而控制通道的时间常数应该适当的小一些，纯滞后时间越小越好。（从控制系统易控性角度考虑的）

当 $\tau_f > \tau_0 \quad T_f > T_0$

系统比较好控制。

□ 控制方案的判别：

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



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

6.5.2.3检测仪表、调节阀及调节器调节规律选择

①温度传感器及变送器

选用热电阻温度传感器。为了减少测量滞后，温度传感器应安装在干燥器出口附近。

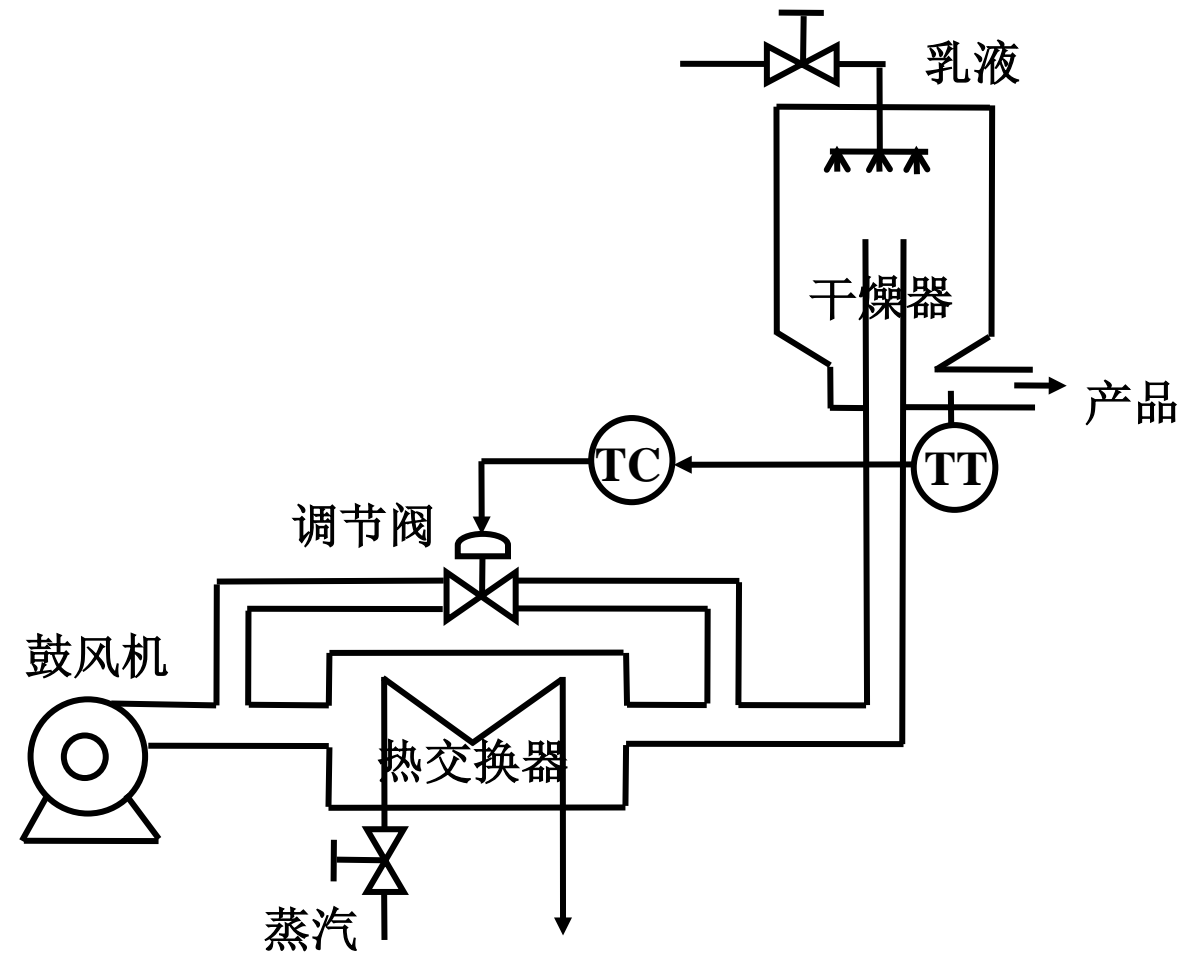
②调节阀

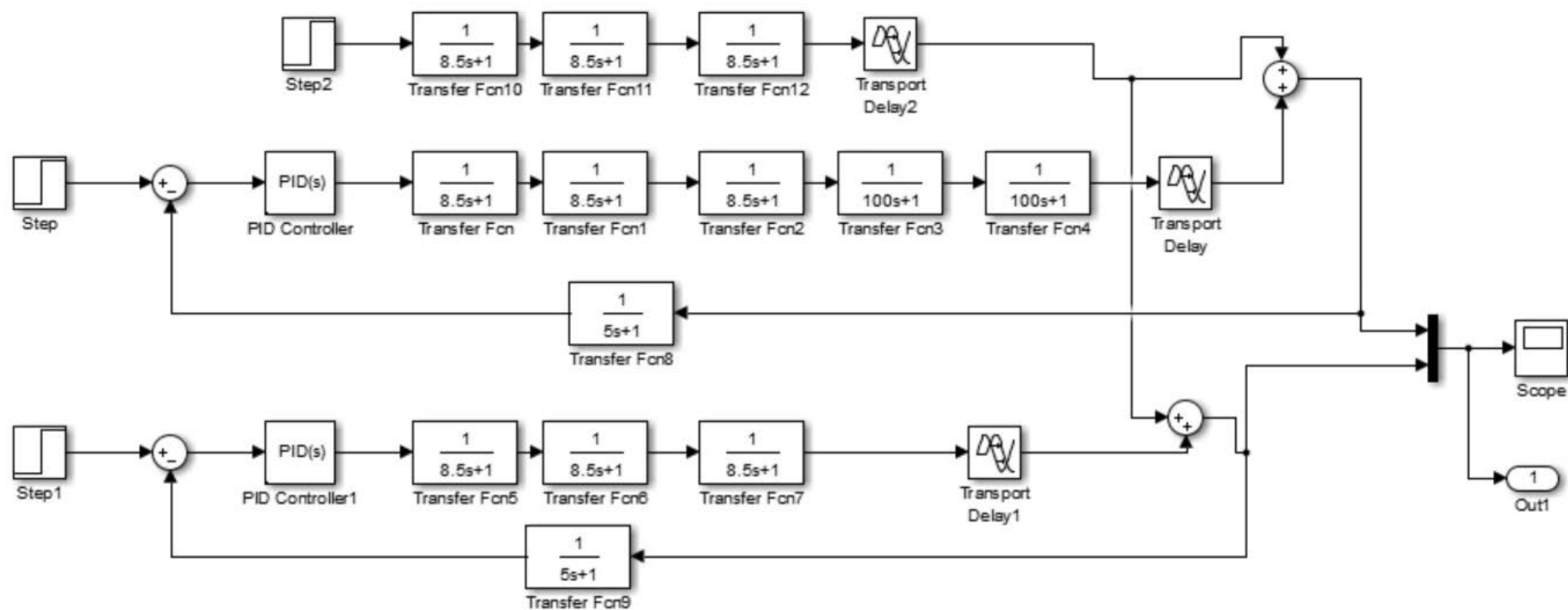
选择气关型调节风阀。其流量特性近似线性。

③调节器

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

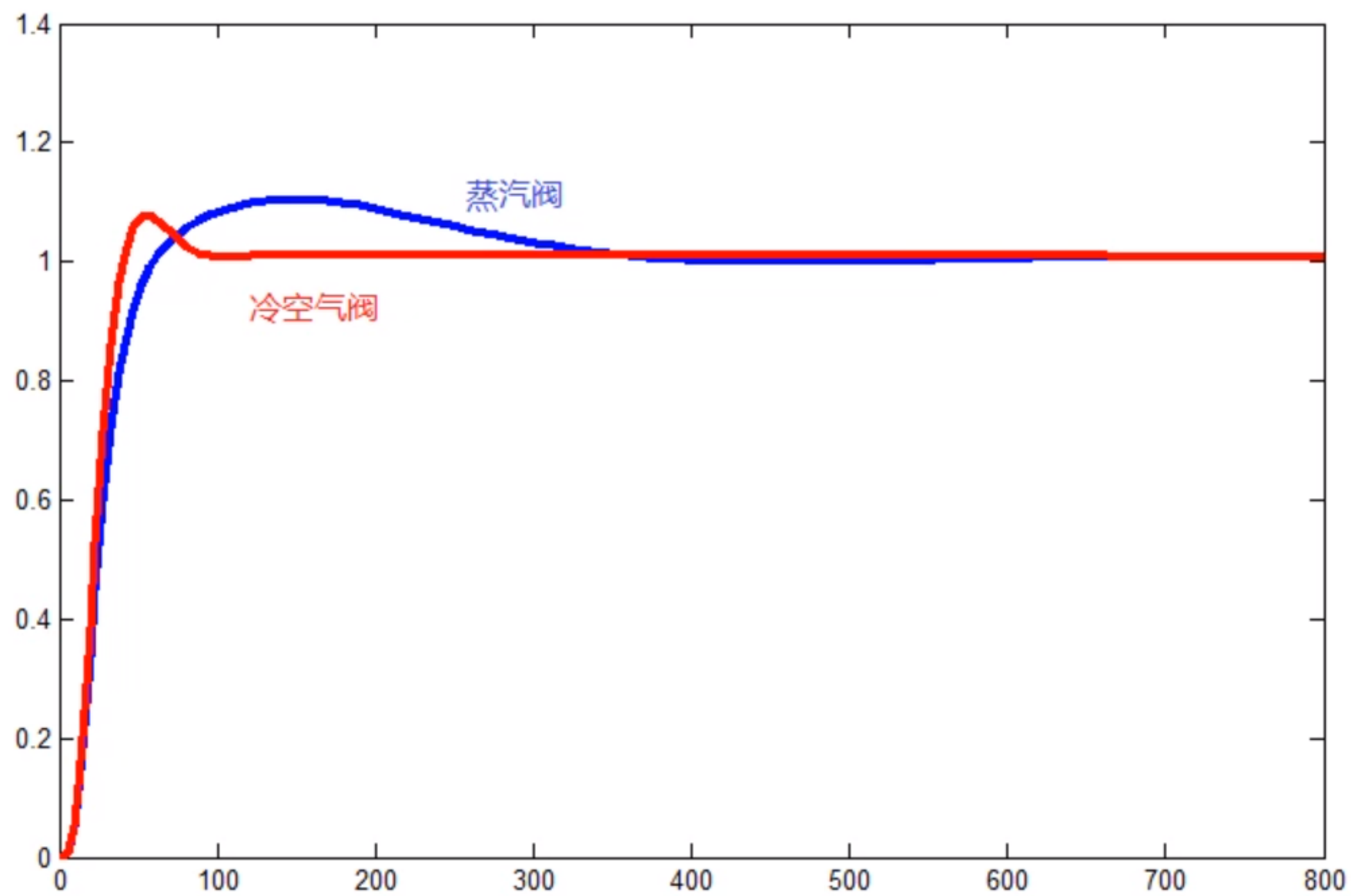
6.5.2.4 绘制带控制点的工艺流程图





上面回路蒸汽阀为控制参数： $P=0.9, I=0.00125$

下面冷空气阀为控制参数： $P=0.25, I=0.000625$



本章小结

简单控制系统
的结构



四个环节组成
闭环负反馈



简单控制系统
的设计



被控变量的选择

控制变量的选择

控制规律的选择

控制参数的整定

