

# 课程安排

## 第1章 绪论

## 第2章 检测仪表

## 第3章 控制仪表

## 第4章 执行器

## 第5章 被控过程的数学模型

## 第6章 简单控制系统的设计与参数整定

## 第7章 复杂控制系统

## 第8章 先进过程控制技术

## 第9章 集散控制系统

## 第10章 过程控制系统应用实例

实验1：单容/双容水箱液位数学模型的测定实验

实验2：双容水箱液位定值控制实验

实验3：双容水箱串级控制实验

实验4：前馈-反馈控制实验

实验5：过程控制系统解耦控制及流程模拟

实验6：双容水箱液位预测控制

# 零、绪论

过程控制 (Process control) 是指连续生产过程的自动控制

石油、化工、水利、电力、冶金、轻工、纺织、制药、建材、核能、环境工程等诸多领域的自动控制系统，都属于过程控制系统

连续生产过程的特征是：生产过程中的各种流体，在连续（或间歇）的流动过程中进行着物理、化学反应、物质能量的转换或传递

例如室内温度的控制

## 基本概念

被控对象：需要实现控制的设备、机械或生产过程称为被控对象

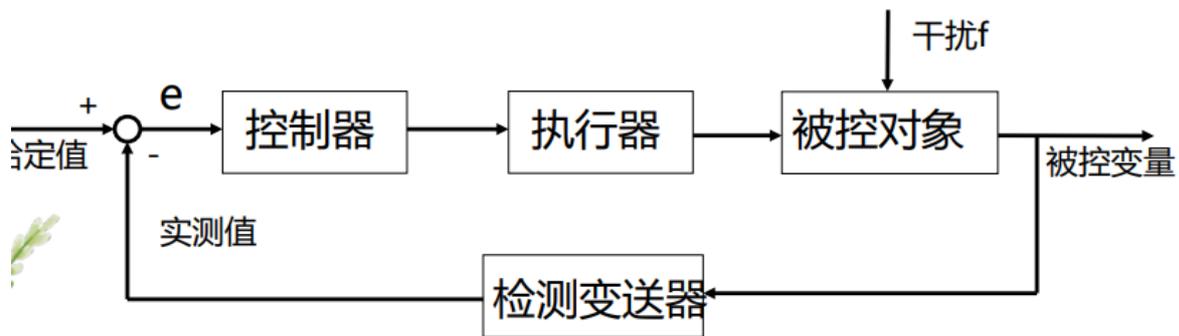
被控变量：对象内要求保持一定数量（或按一定规律变化）的物理量称为被控变量

控制变量：受执行器控制，用以使被控变量保持一定数值的物料或能量称为控制变量

干扰量：除控制变量以外，作用于对象并引起被控变量变化的一切因素称为干扰。当控制变量确定以后，其他所有未被选中的变量均称为干扰量

设定值：工艺规定被控变量所要保持的数值

偏差：偏差本应是设定值与被控变量的实际值之差，但能获取的信息是被控变量的测量值而非实际值。在控制系统中通常把设定值与测量值之差定义为偏差



## 过程控制的特点

1. 控制对象复杂、控制要求多样
2. 控制方案丰富
3. 控制对象大多属于慢过程
4. 大多数工艺要求定值控制
5. 大多使用标准化的检测、控制仪表及装置

## 过程控制的发展概况

1. 局部自动化
2. 模拟单元仪表控制阶段
3. 集散控制阶段

## 过程控制系统分类及其性能指标

过程控制系统有多种分类方法

按所控制的参数来分，有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统等；

按控制系统所处理的信号方式来分，有模拟控制系统与数字控制系统；

按照控制器类型来分，有常规仪表控制系统与计算机控制系统等

但在讨论控制原理时，常用的分类方法是按设定值的形式或系统的结构特点分类

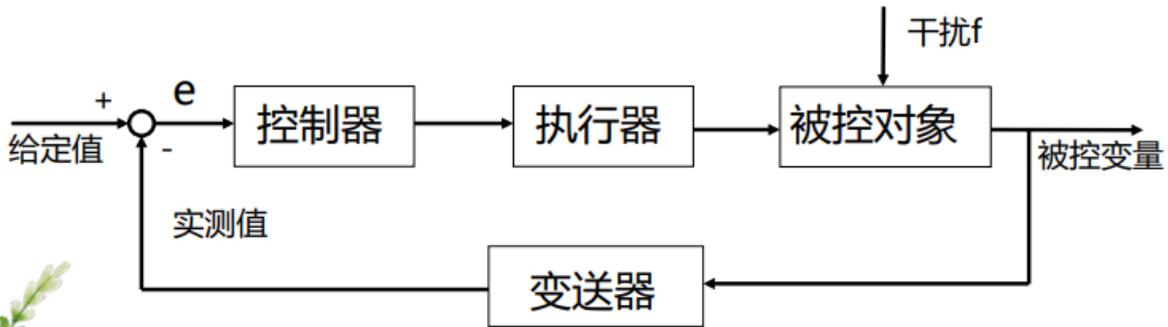
### 按设定值的形式分类

1. 定值控制系统——设定值恒定不变
2. 随动控制系统——设定值随时可能变化
3. 程序控制系统——设定值按预定的时间程序变化

### 按系统的结构特点分类

1. 反馈控制系统（闭环控制系统）

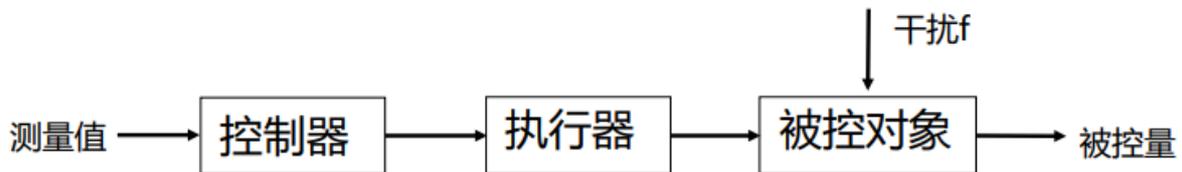
将被控变量输入到控制器，形成闭环，具有被控变量负反馈的控制系统



反馈控制系统是过程控制最基本的结构形式。

### 2. 前馈控制系统（开环控制系统）

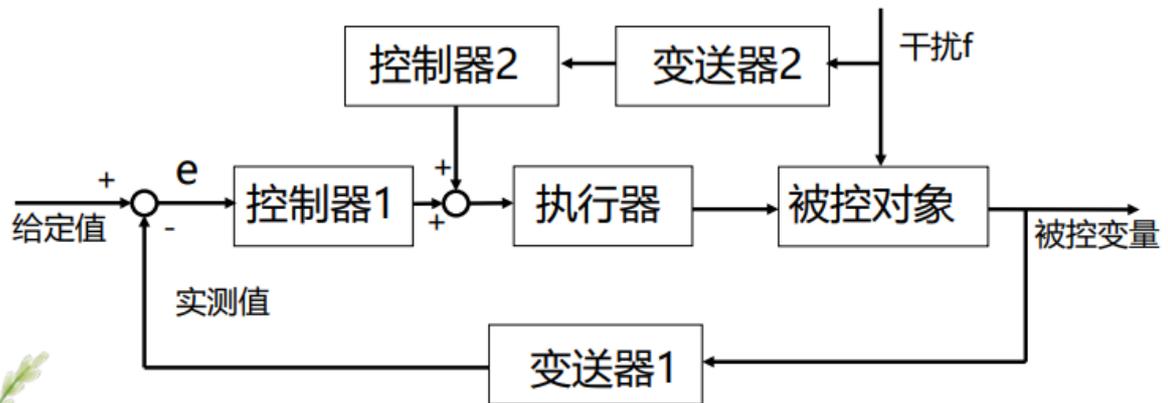
控制系统没有被控变量负反馈，不将被控变量引入到控制器输入端



### 开环控制系统原理框图

### 3. 复合控制系统

前馈与反馈相结合，优势互补



### 性能指标

控制系统的性能指标是根据工艺对控制的要求来制定的

概括为稳定性、准确性和快速性

### 稳态与动态

#### 1. 稳态—把被控变量不随时间变化的平衡状态称为系统的稳态（静态）

当自动控制系统的输入和输出均恒定不变时，系统就处于一种相对稳定的平衡状态，系统的各个环节也都处于稳定状态，但生产还在进行，物料和能量仍然有进有出，只是平稳进行没有改变就是了

静态特性—静态时系统各环节的输入输出关系

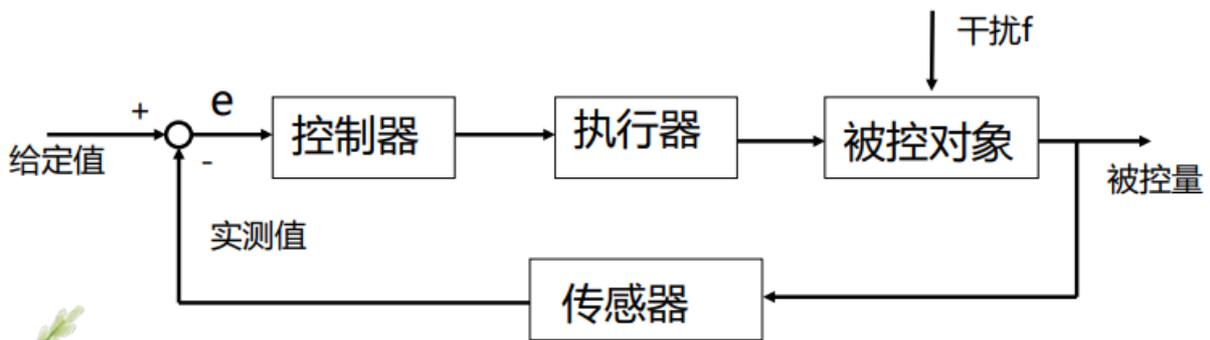
2. 动态—把被控变量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态

即控制系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过渡过程。当干扰破坏了系统的平衡时，被控变量就会发生变化，而控制器、控制阀等自动化装置就要产生控制作用来使系统恢复平衡

动态特性—在动态过程中系统各环节的输入 输出变化关系

### 控制系统的过渡过程

控制系统的输入变化后，系统从原来的平衡状态，经过动态过程到达新的平衡状态的动态历程称为系统的过渡过程



系统的过渡响应受内部和外部两种因素的影响。

1. 内部因素：系统特性

系统的特性是由系统中各环节的特性和系统的结构所决定的

2. 外部因素：输入信号

在系统特性一定的情况下，被控变量随时间的变化规律取决于系统的输入信号

生产中，出现的干扰信号是随机的。但在分析和设计控制系统时，为了充分体现系统的特性和分析方便，常选择一些特定的输入信号，其中常用的是阶跃信号和正弦信号

## 控制性能指标

单项性能指标以控制系统被控参数过渡过程的单项特征量作为性能指标，而偏差积分性能指标则是一种综合性指标

由于在多数情况下，都希望得到衰减振荡过程，所以以衰减振荡的过渡过程形式为例，讨论控制系统的品质指标

### 单项性能指标

1. 系统阶跃响应的单项性能指标

单项性能指标包含了对控制系统的稳定性、准确性和快速性三方面的评价

衰减比 $n$ 和衰减率 $\psi$

## 1) 衰减比 $n$ 和衰减率 $\psi$

设第一个波振幅为  $y_1$ 、第三个波振幅为  $y_3$

$$n = \frac{y_1}{y_3} \quad \psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{1}{n}$$

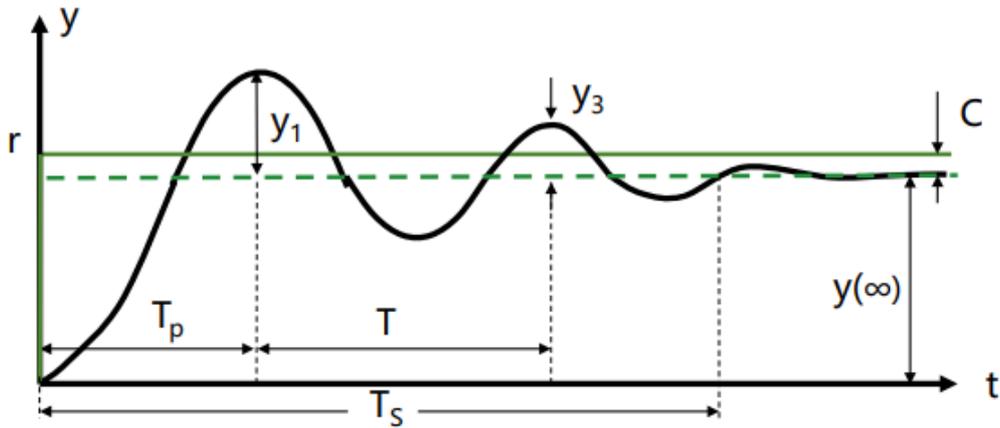


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

最大动态偏差 $A$ 和超调量 $\sigma$

## 2) 最大动态偏差 $A$ 和超调量 $\sigma$

最大动态偏差表示系统瞬间偏离给定值的最大程度。即:  $A = y_{\max} - r$

最大动态偏差是控制系统动态准确性指标。

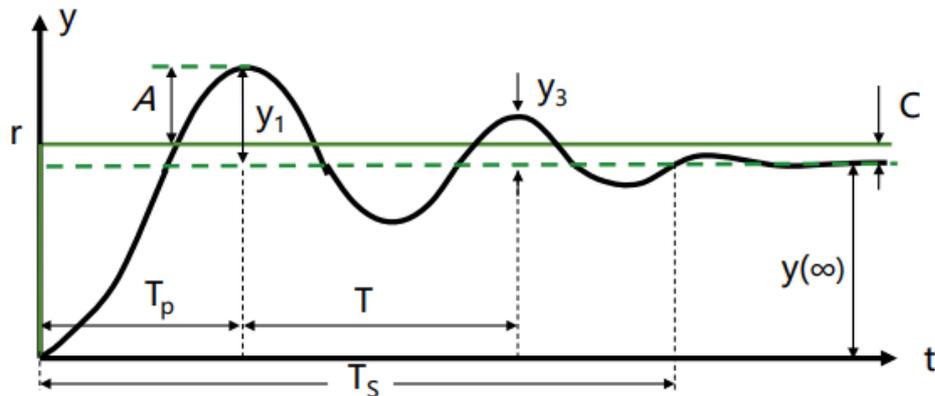


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

有时也采用超调量 $\sigma$ 来表示被控参数偏离设定值的程度， $\sigma$ 的定义是第一个波振幅与最终稳态值 $y(\infty)$ 之比。即

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\%$$

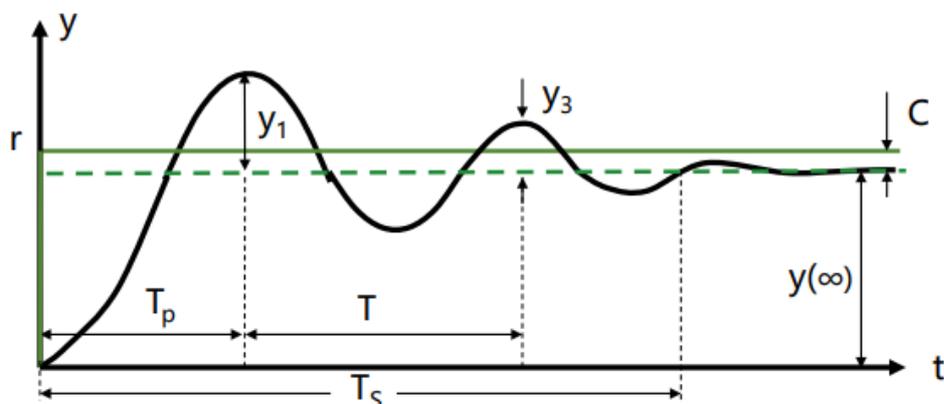


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

余差C

### 3) 余差C

过渡过程结束后，被控参数的稳态值 $y(\infty)$ 与设定值之间的残余偏差叫做余差，也称静差。是衡量控制系统稳态准确性的指标。

$$C = y(\infty) - r$$

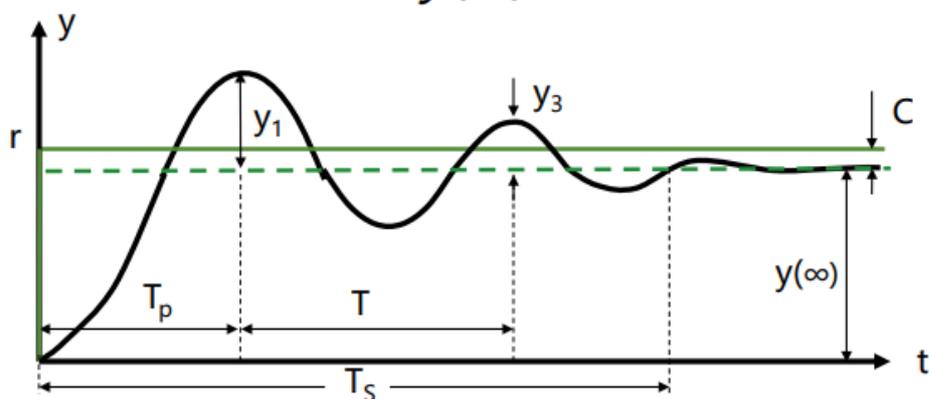


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

调节时间 $T_s$ 和振荡频率 $\omega$

#### 4) 调节时间 $T_s$ 和振荡频率 $\omega$

$T_s$  是指从过渡过程开始到过渡过程结束所需的时间。当被控参数与稳态值间的偏差进入稳态值的  $\pm 5\%$  (或  $\pm 2\%$ ) 范围内, 就认为过渡过程结束。

。

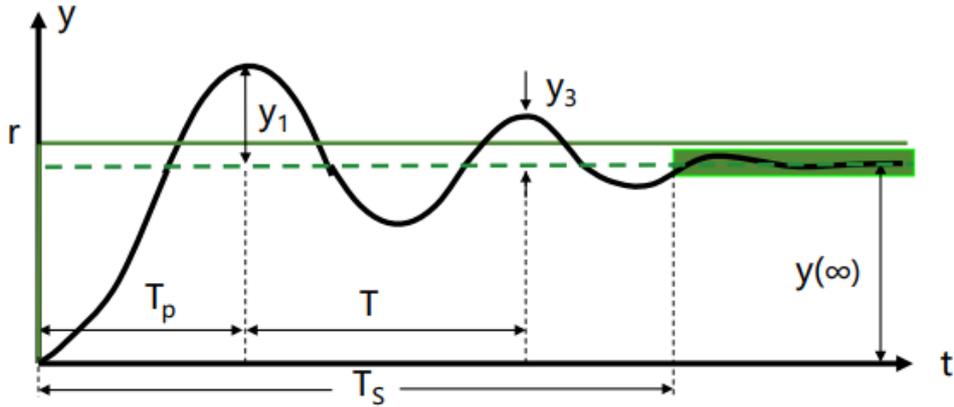


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

调节时间和振荡频率是衡量控制系统快速性的指标。

过渡过程中相邻两同向波峰 (或波谷) 之间的时间间隔叫振荡周期  $T$ , 其倒数称为振荡频率

$$\omega = 1/T$$

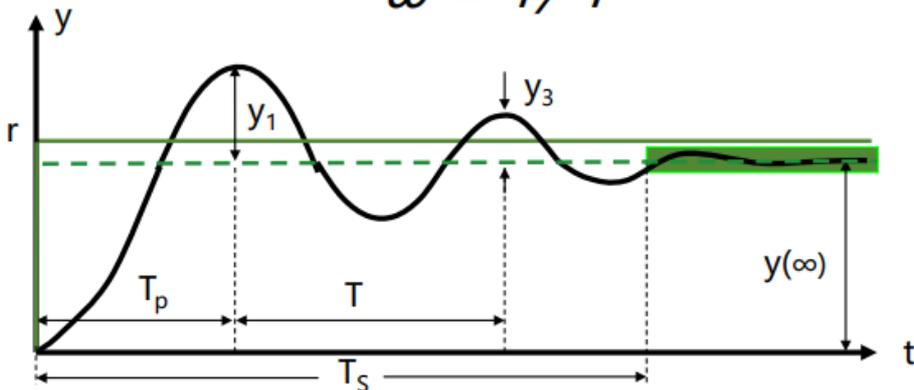


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

峰值时间

另外还有峰值时间 $T_p$  (又称上升时间), 是指过渡过程开始, 至被控参数到达第一个波峰所需要的时间。也是衡量控制系统快速性的指标。

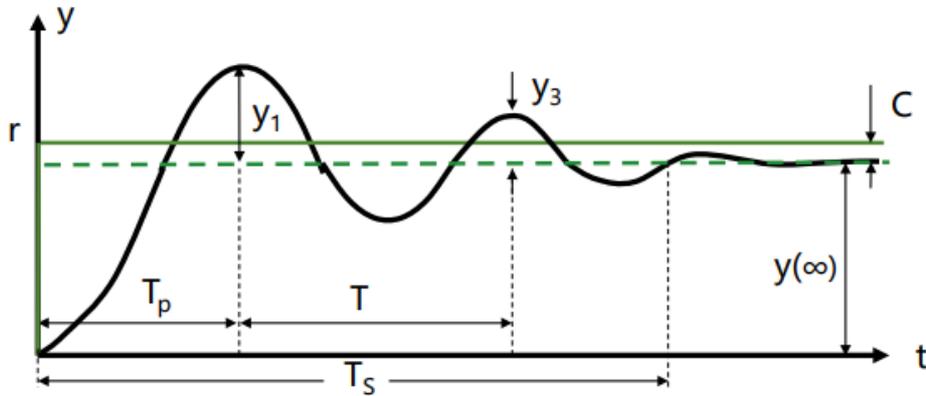


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

### 控制系统的单项品质指标小结

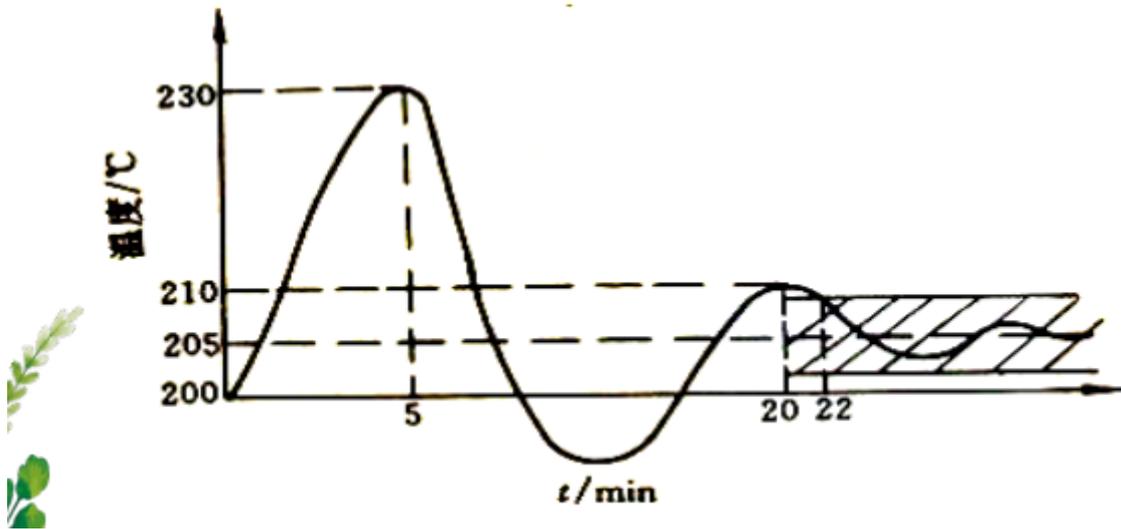
- ❑ 稳定性 衰减比  $n = 4:1 \sim 10:1$  最佳
- ❑ 准确性 余差  $C$  小好  
最大偏差  $A$  小好
- ❑ 快速性 过渡时间  $T_s$  短好  
振荡周期  $T$  短好

各品质指标之间既有联系、又有矛盾。例如, 过分减小最大偏差, 会使过渡时间变长。因此, 应根据具体工艺情况分清主次, 对生产过程有决定性意义的主要品质指标应优先予以保证。

## 例题

[例] 某换热器的温度控制系统给定值为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。  
在阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图所示。试求最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间。

解：



最大偏差： $A=230-200=30^{\circ}\text{C}$

余差： $C=205-200=5^{\circ}\text{C}$

衰减比： $n=(230-205)/(210-205)=5$

振荡周期： $T=20-5=15$

过渡时间： $T_s=22$

## 综合性能指标

### 2. 系统阶跃响应的综合性能指标——偏差积分

单项指标虽然清晰明了，但如何统筹考虑比较困难

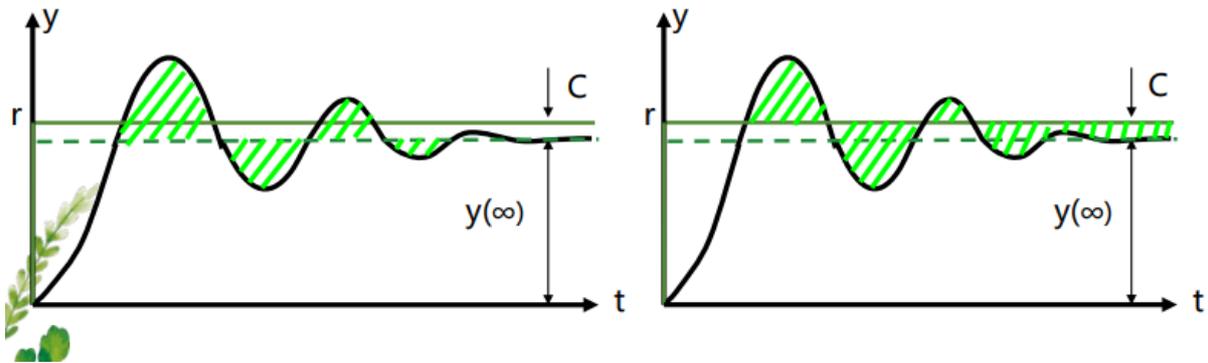
而偏差幅度和偏差存在的时间都与偏差积分有关，因此用偏差积分一个指标，就可以全面反映控制系统的品质

偏差积分的原始定义： $IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$

偏差的定义存在分歧：

$e(t) = y(t) - y(\infty)$  不能表达余差

$e(t) = y(t) - y(r)$  如有余差则积分无穷大



偏差积分指标有以下几种形式

1. 偏差积分IE
2. 绝对偏差积分IAE
3. 平方偏差积分ISE
4. 时间与绝对偏差乘积积分ITAE

偏差积分指标有以下几种形式：

① 偏差积分  $IE$  (Integral of Error)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

缺点：不能保证系统是衰减振荡。

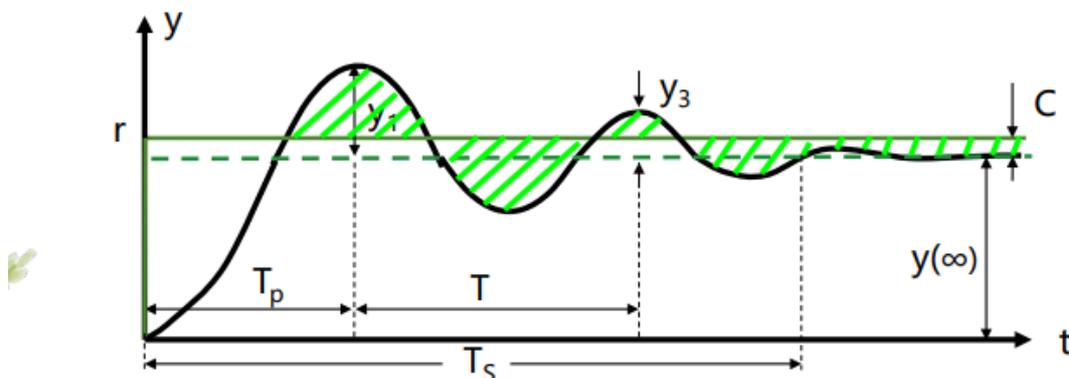


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

②绝对偏差积分IAE  
(Integral Absolute value of Error)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

排除了正负偏差抵消的可能。

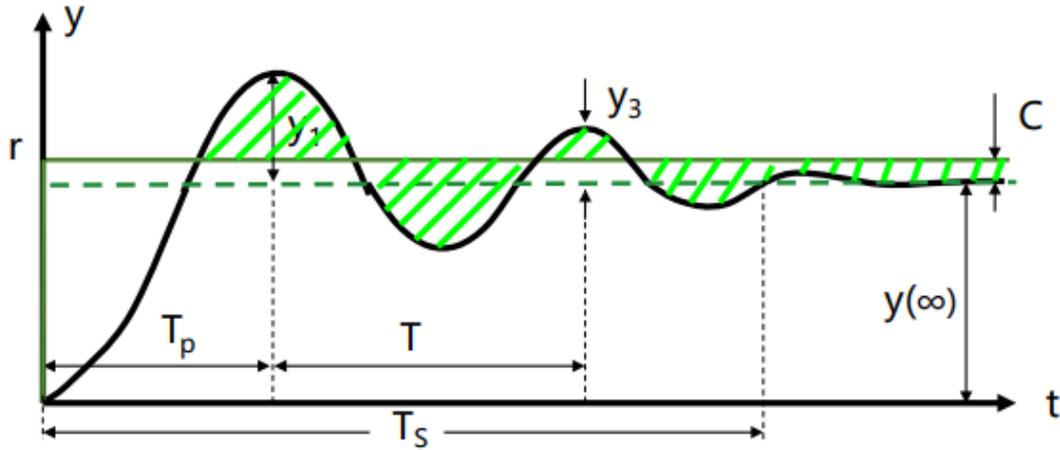


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

③平方偏差积分ISE (Integral of Squared Error)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

对大偏差敏感

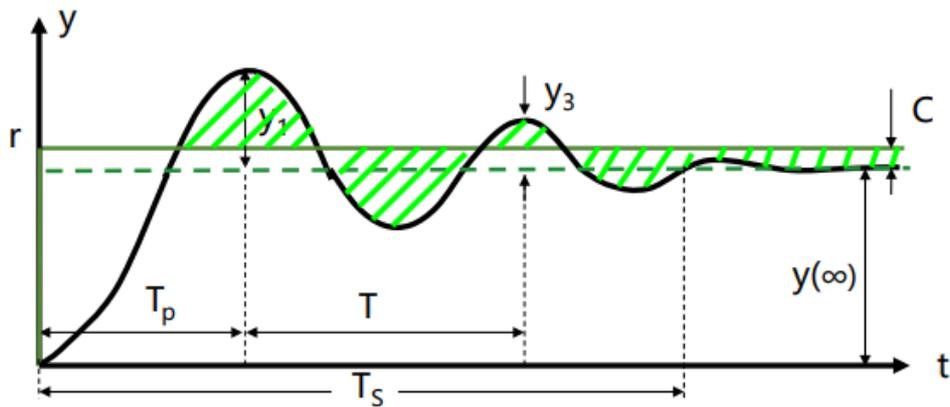


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

④时间与绝对偏差乘积积分ITAE  
(Integral of Time multiplied by  
the Absolute value of Error)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad \text{对调节时间敏感}$$

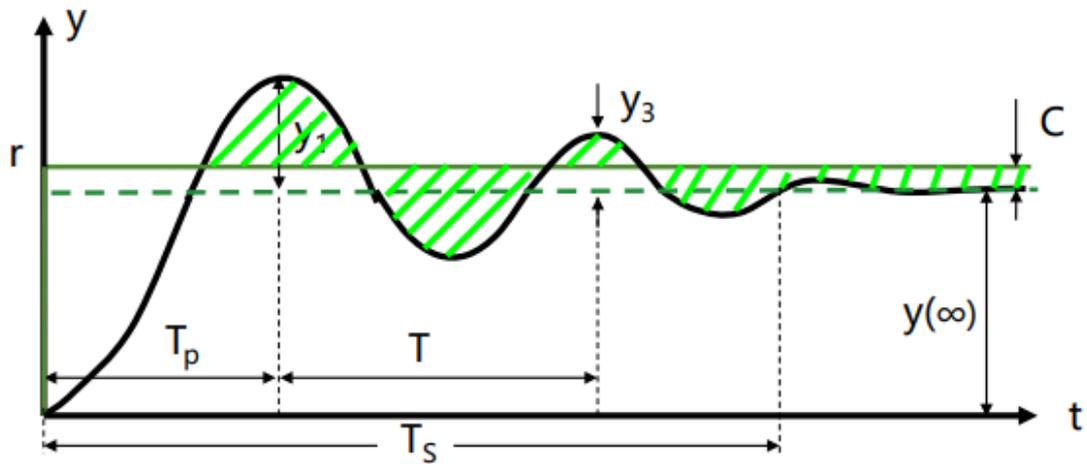


图3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

## 一、检测仪表

### 检测仪表的基本技术指标

#### 绝对误差

## 1. 绝对误差

检测仪表的指示值 $X$ 与被测量真值 $X_t$ 之间存在的差值称为绝对误差 $\Delta$ 。表示为：

$$\Delta = X - X_t$$

由于真值是无法得到的理论值。实际计算时，可用精确度较高的标准表所测得的标准值 $X_0$ 代替真值 $X_t$ ，表示为：

$$\Delta = X - X_0$$

仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差中最大的绝对误差称为最大绝对误差 $\Delta_{\max}$ 。

### 基本误差

## 2. 基本误差

基本误差是一种简化的相对误差，又称引用误差或相对百分误差。定义为：

$$\text{基本误差 } \delta = \frac{\text{最大绝对误差 } \Delta_{\max}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

而：仪表量程 = 测量上限 - 测量下限

仪表的基本误差表明了仪表在规定的工作条件下测量时，允许出现的最大误差。

## 精确度

### 3. 精确度（精度）

为了便于量值传递，国家规定了仪表的精确度（精度）等级系列。如**0.5级**，**1.0级**，**1.5级**等。

仪表精度的确定方法：将仪表的基本误差去掉“**±**”号及“**%**”号，套入规定的仪表精度等级系列。

例如某台仪表的基本误差为**±1.0%**，则确认该表的精确度等级符合**1.0级**；如果某台仪表的基本误差为**±1.3%**，则该表的精确度等级符合**1.5级**。

目前，我国生产的仪表常用的精确度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 等

精度等级数值越小，就表征该仪表的精确度等级越高，也说明该仪表的精确度越高

0.05级以上的仪表，常用来作为标准表；工业现场用的测量仪表，其精度大多为0.5级以下

仪表的精度等级一般用符号标志在仪表面板上

## 例题

**例1** 某台测温仪表的测温范围为  $-100\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，校验该表时测得全量程内最大绝对误差为  $+5^{\circ}\text{C}$ ，试确定该仪表的精度等级。

**解：** 该仪表的基本误差为：

$$\delta = \frac{+5}{700+100} \times 100\% = +0.625\%$$

将该表的  $\delta$  去掉“+”号与“%”号，其数值为0.625。由于国家规定的精度等级中没有0.625级仪表，而该仪表的误差超过了0.5级仪表所允许的最大绝对误差。

**故：** 这台测温仪表的精度等级为1.0级。

**例2** 某台测压仪表的测压范围为  $0\sim 8\text{MPa}$ 。根据工艺要求，测压示值的误差不允许超过  $\pm 0.05\text{MPa}$ ，问应如何选择仪表的精度等级才能满足以上要求？

**应选择0.5级的表。**

## 灵敏度和分辨率

### 4、灵敏度和分辨率

**灵敏度**表示指针式测量仪表对被测参数变化的敏感程度，常以仪表输出（如指示装置的直线位移或角位移）与引起此位移的被测参数变化量之比表示：

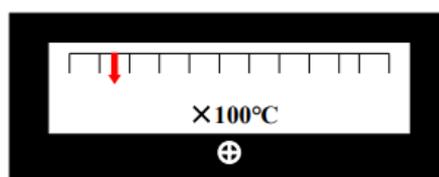
$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

**S** — 仪表灵敏度；

**ΔY** — 仪表指针位移的距离（或转角）；

**ΔX** — 引起ΔY的被测参数变化量。

**灵敏限**表示指针式仪表在量程起点处，能引起仪表指针动作的最小被测参数变化值。



对于数字式仪表，则用分辨率和分辨力表示灵敏度和灵敏限。



**分辨率**表示仪表显示值的精细程度。

如一台仪表的显示位数为四位，其分辨率便为千分之一。数字仪表的显示位数越多，分辨率越高。

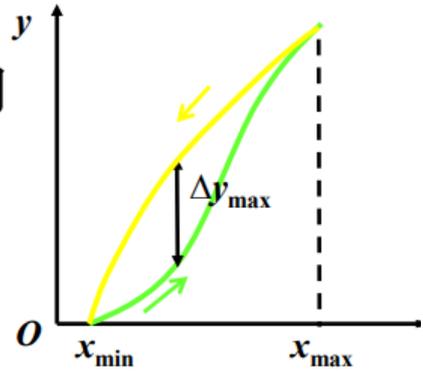
**分辨力**是指仪表能够显示的、最小被测值。

如一台温度指示仪，最末一位数字表示的温度值为0.1°C，即该表的分辨力为0.1°C。

## 变差

### 5、变差

在外界条件不变的情况下，同一仪表对被测量进行往返测量时（正行程和反行程），产生的最大差值与测量范围之比称为变差。



$$\text{变差} = \frac{\text{正反行程最大差值}}{\text{量程}} \times 100\%$$

造成变差的原因:

传动机构间存在的间隙和摩擦力; 弹性元件的弹性滞后等。



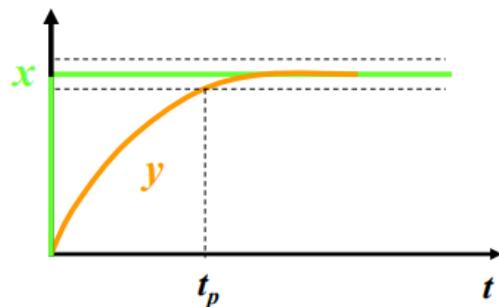
## 响应时间

### 6、响应时间

当用仪表对被测量进行测量时，被测量突然变化以后，仪表指示值总是要经过一段时间后才能准确地显示出来。这段时间称为响应时间。

响应时间的计算:

从输入一个阶跃信号开始，到仪表的输出信号（即指示值）变化到新稳态值的95%所用的时间。



以上是检测仪表常用的性能指标。

## 温度检测及仪表

温度是表征物体冷热程度的物理量

是工业生产中最普遍而重要的操作参数

## 温度检测方法

一般利用物体的某些物理性质随温度变化的特性来感知、测量温度，有

**接触式测温**——通过测温元件与被测物体的接触而感知物体的温度

**非接触式测温**——通过接受被测物体发出的热辐射热来感知温度

接触式测温仪表有

1. 膨胀式温度计
  - 液体膨胀式温度计
  - 固体膨胀式温度计
2. 压力式温度计
3. 热电偶温度计
4. 热电阻温度计
5. 半导体温度计

非接触式测温仪表有

1. 辐射式温度计
2. 红外式温度计

## 热电偶

热电偶是以热电效应为原理的测温元件，能将温度信号转换成电势信号（mV）

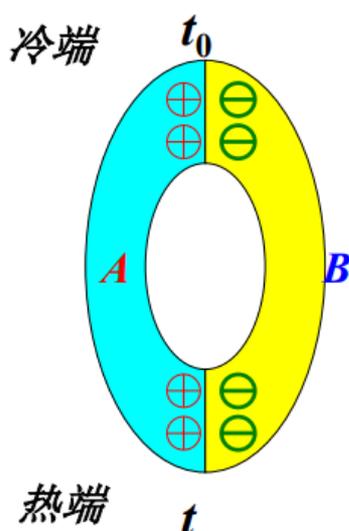
特点：结构简单、测温准确可靠、信号便于远传

一般用于测量500 ~ 1600°C之间的温度

### 热电偶的测温原理

将两种不同的导体或半导体连接成闭合回路，若两个连接点温度不同，回路中会产生电势。此电势称为热电势

1. 接触电势



## 1、接触电势

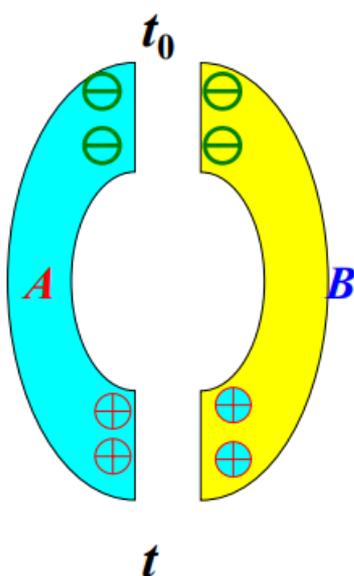
当不同导体A、B接触时，两边的自由电子密度不同，在交界面上产生电子的相互扩散，致使在接触处产生**接触电势**。

其大小取决于两种材料的种类和接触点的温度。

$$e_{AB}(t) = \frac{kt}{e} \ln \frac{N_A(t)}{N_B(t)}$$

$N_A(t)$ 、 $N_B(t)$ —自由电子密度； $e$ —单位电荷

## 2. 温差电势



## 2、温差电势

对于同一金属A（或B），其两端温度不同，自由电子所具有的动能不同，也会产生相应的电势，称为**温差电势**。

热电势由两部分组成：**接触电势**和**温差电势**。但温差电势值远小于接触电势，常忽略不计。

## 3. 回路总电势

### 3、回路总电势

热电偶回路总电势由接触电势和温差电势叠加而成，称**热电势**。由于温差电势很小，热电势基本由接触电势构成：

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

此计算式中，有的常数很难确定，无法实用。实际中用实测标定。但从上述公式可以得出基本结论：

对于确定的热电偶，**热电势只与热端和冷端温度有关**。当冷端温度固定时， $E(t, t_0)$  是热端温度  $t$  的单值函数。

t: 热端温度

$t_0$ : 冷端温度

#### 热电偶的基本定律

1. 均质导体定律
2. 中间导体定律
3. 中间温度定律

### 1、均质导体定律

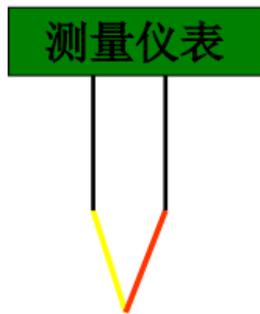
由一种均质导体或半导体组成的闭合回路中，不论其截面和长度如何，以及沿长度方向上各处的温度分布如何，都不能产生热电势。

因此，热电偶必须由两种不同材料的均质导体或半导体组成。但其截面和长度不限。



## 2、中间导体定律

在热电偶回路中接入另一种中间导体后，只要中间导体两端温度相同，中间导体的引入对热电偶回路的热电势没有影响。



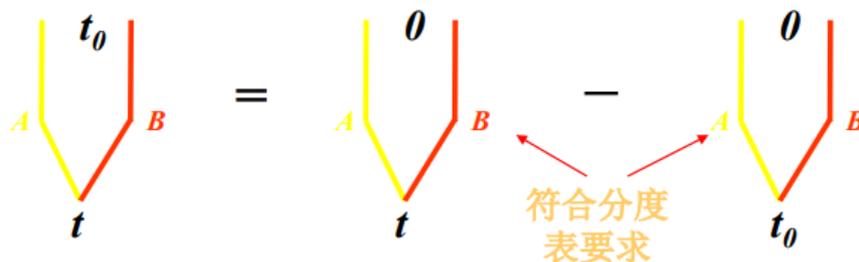
因为热电偶在使用时，总要将热电偶回路打开，接入测量仪表，即插入第三种导体。

## 3、中间温度定律

一支热电偶在两接点温度为 $t$ 、 $t_0$ 时的热电势，等于两支同温度特性热电偶在接点温度为 $t$ 、 $t_a$ 和 $t_a$ 、 $t_0$ 时的热电势之代数和。即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_a) - E_{AB}(t_a, t_0)$$

据此，只要给出冷端为 $0^\circ\text{C}$ 时的热电势关系 $E_{AB}(t, 0)$ ，便可求出冷端任意温度时的热电势。



### 热电偶冷端温度补偿

1. 查表法（计算法）
2. 仪表零点调整法
3. 冰浴法
4. 补偿电桥法
5. 半导体PN结补偿法

## 几种常用的标准型热电偶简介

热电偶名称	分度号	测温范围 (°C)	平均灵敏度	特点
铂铑 <sub>30</sub> —铂铑 <sub>6</sub>	B	0~+1800	10 μV/°C	稳定性好,精度高,可在氧化气氛使用
铂铑 <sub>10</sub> —铂	S	0~+1600	10 μV/°C	同上,线性度优于B
镍铬—镍硅	K	0~+1000	40 μV/°C	价廉,可在氧化及中性气氛中使用
镍铬—康铜	E	-200~ +900	80 μV/°C	灵敏,价廉,可在氧化及弱还原气氛中使用
铜—康铜	T	-200~ +400	50 μV/°C	价廉,但铜易氧化,常用于150°C以下温度测量

### 查表法

使用补偿导线只是将热电偶的冷端延长到温度比较稳定的地方,而标准热电势要求冷端温度为零度,为此还要采取进一步的补偿措施。

#### 1. 查表法(计算法)

如果某介质的温度为 $t$ ,用热电偶进行测量,其冷端温度为 $t_0$ ,测得的热电势为 $E_{AB}(t, t_0)$ 。根据中间温度定律,有

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$

得出标准热电势 $E_{AB}(t, 0)$ ,再查分度表就可得出被测温度。

**例题**

**镍铬—镍硅热电偶分度表（简表）**  
分度号 K  $t_0=0^\circ\text{C}$ , E/mV

t/°C	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.850	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.919	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.632	13.039	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.327	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.325	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.897
1000	41.269	41.657	42.045	42.432	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.238	46.612	46.985	47.356	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.049
1300	52.398									

**例** 用K型热电偶测量某加热炉的温度。测得的热电势  $E(t, t_0) = 36.122\text{mV}$ ，而自由端的温度  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，求被测的实际温度。

**解** 由分度表可以查得  $E(30, 0) = 1.203\text{mV}$

则  $E(t, 0) = E(t, 30) + E(30, 0)$

$$= 36.122 + 1.203 = 37.325\text{mV}$$

再查分度表可以查得  $37.325\text{mV}$  对应的温度为  $900^\circ\text{C}$ 。

❖ 计算法适用于实验或临时测温。

**例** 有两块直流电流表，它们的精度和量程分别为

- 1) 2.0级，0—75mA；
- 2) 1.0级，0—160mA。

现要测量50mA的直流电流，从准确性、经济性考虑哪块表更合适。

**例** 某压力表的测量范围是0—10MPa，精度等级为1.0级。试问此压力表允许的最大绝对误差是多少？若用标准压力计来校验该表，在校验点为5MPa时，校验压力计上面读数为5.08MPa。试问被校压力表在这一点上是否符合1级精度，为什么？

1. 第一块表；测量数值大概在量程的2/3左右，较为准确，2%和1%的误差许可比较接近，且精度更高成本更高
2.  $(10-0)*1\%=0.1\text{Mpa}=10^5\text{Pa}$ ；符合，未超出最大绝对误差允许范围

## 回顾

检测仪表：六个指标

热电偶：

均质导体定律

中间导体定律

中间温度定律

## 热电阻

1. 金属热电阻
2. 半导体热敏电阻

## 2.2.3 热电阻

对于500°C以下的中、低温，热电偶输出的热电势很小，容易受到干扰而测不准。一般使用热电阻温度计来进行中低温度的测量。

热电阻有金属热电阻和半导体热敏电阻两类。

### 2.2.3.1 金属热电阻

金属热电阻测温精度高。大多数金属电阻阻值随温度升高而增大。具有正温度系数。

$$\text{温度系数 } \alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

作为工业用热电阻的材料要求：

- 电阻温度系数大，电阻率大；
- 在测温范围内物理化学性能稳定；
- 温度特性的线性度好。

工业中用得最多的是铂电阻和铜电阻，也有镍电阻、钨电阻、锰电阻及碳电阻等用于低温及超低温测量。

固定螺纹管接头式热电阻  
Thermal Resistance with Fixed Threaded Tube Connector



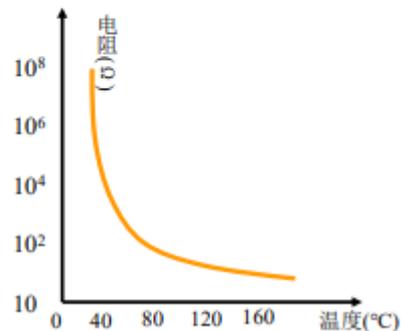
型号 Type	分度号 Graduation	测温范围°C Measuring Range	管径尺寸 Connection Size	保护管材料 Protection Tube Material	规格 Specification	
WZP-34	Pt100	-200~500	MS-1.5	1Cr18Ni9Ti	44	250
WZP-34A			NPT1/2		46	275
WZP-34A					48	300
WZC-34	Cu50	-50~100	MS-1.5		46	450
WZC-34A			NPT1/2		48	500
	Cu100				48	650
				48	750	

1. 铂电阻
2. 铜电阻
3. 热电阻的三线制接法

### 2.2.3.2 热敏电阻

半导体材料的电阻值具有负温度系数，可以作温度传感元件，特点是：

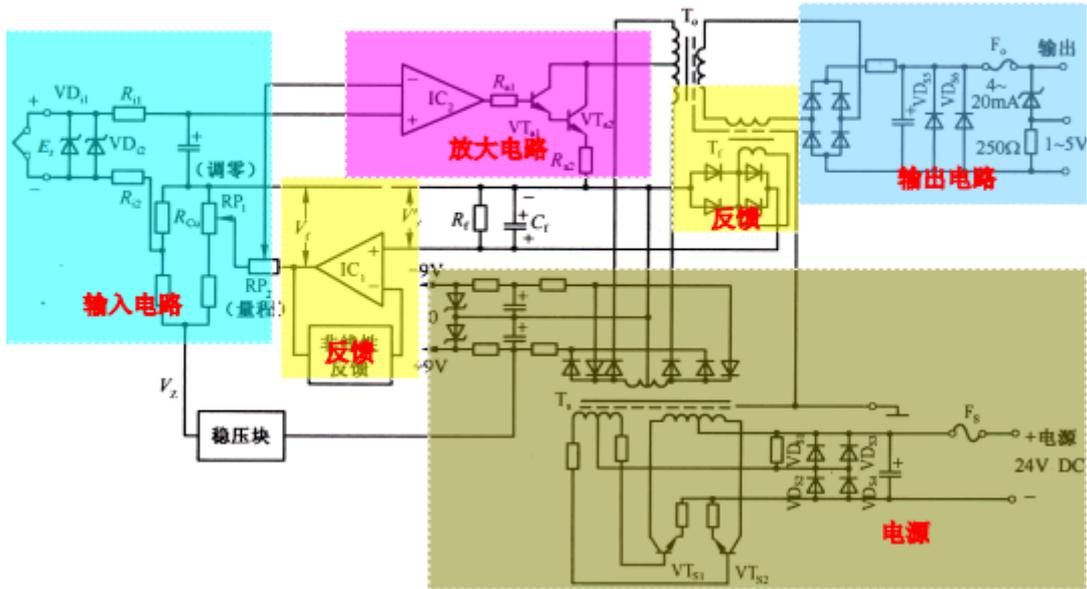
- 电阻率大—电阻体积小，响应快；
- 温度系数大—灵敏度高；
- 非线性严重—影响精度；
- 温度特性分散—互换性差。



负温度系数热敏电阻特性

- 集成温度传感器
- 温度显示与记录
  - 动圈式指示仪表
    - 动圈测量机构原理
    - 配热电偶的动圈仪表
    - 配热电阻的动圈仪表
  - 数字式指示仪表
  - 自动记录仪表
    - 自动平衡电桥式记录仪
    - 自动电位差计式记录仪
    - 数字式记录仪表
  - 温度变送器
    - 模拟式温度变送器
    - DDZ-III型热电偶温度变送器

## 以DDZ-III型热电偶温度变送器为例:



DDZ-III型热电偶温度变送器的简化原理图

1. 输入电路
2. 放大电路
3. 反馈电路
4. 实际线路

## 压力检测及仪表

压力是工业生产中的重要工艺参数之一

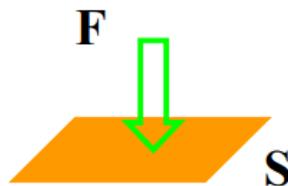
如在化工、炼油等生产工艺中，经常会遇到压力，包括高压、超高压和真空度（负压）的测量

### 压力检测的方法

#### 2.3.1 压力检测的方法

工程上习惯把垂直作用于单位面积上的力称为“压力”。即

$$P = F/S$$



压力的单位是“帕斯卡”—— $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$

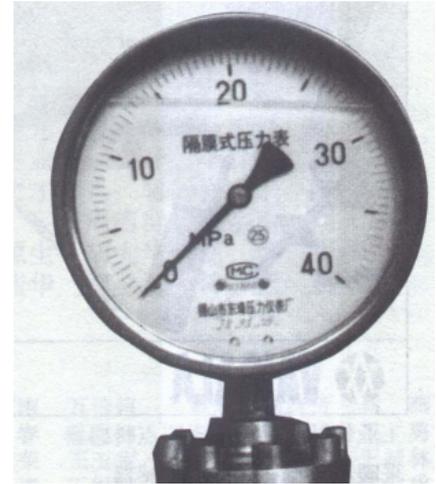
$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

$$1\text{工程大气压} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$$

$$\approx 0.1\text{MPa}$$

工程中压力的表示方式有：  
表压、负压（真空度）、  
差压、绝对压力。

工业中所用仪表的压力指示值，大多数为表压和差压。



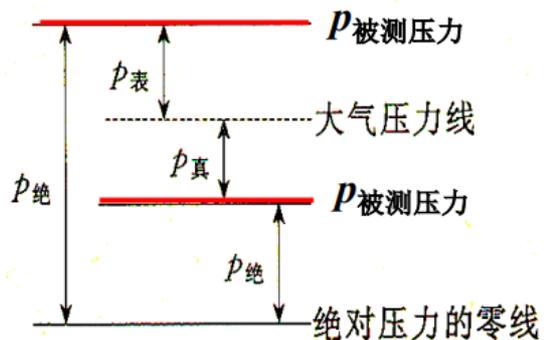
表压、绝对压力、负压（真空度）、差压之间的关系

表压、绝对压力、负压（真空度）、差压之间的关系：

$$P_{\text{表压}} = P_{\text{绝对压力}} - P_{\text{大气压力}}$$

$$P_{\text{真空度}} = P_{\text{大气压力}} - P_{\text{绝对压力}}$$

$$P_{\text{差压}} = P_{\text{被测压力1}} - P_{\text{被测压力2}}$$



压力测量仪表品种很多，按照其转换原理的不同，大致可分为四大类。

### 压力计的分类

1. 液柱式压力计
2. 弹性式压力计
3. 电气式压力计

弹性式压力计

### 2.3.2 弹性式压力计

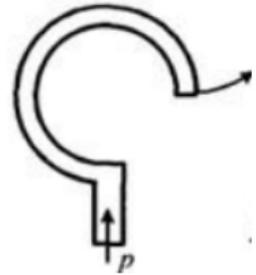
利用弹性元件受压产生变形可以测量压力。由于其产生的位移或力易转化为电量，且构造简单，价格便宜，测压范围宽，被广泛使用。

常用的弹性元件有5种：

#### (1) 单圈弹簧管

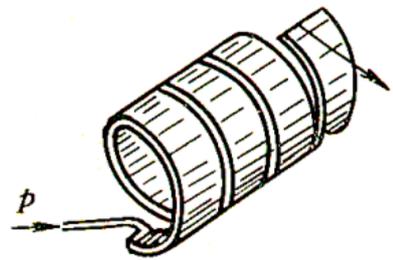
将截面为椭圆形的金属空心管弯成 $270^\circ$ 圆弧形，顶端封口，当通入压力 $p$ 后，它的自由端就会产生位移。

□测压范围较宽，可高达1000MPa。



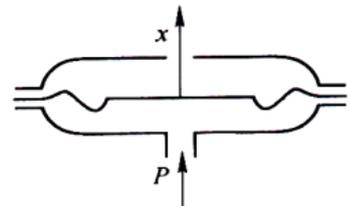
#### (2) 多圈弹簧管

为了在测低压时增加位移，可以将弹簧管制成多圈状。



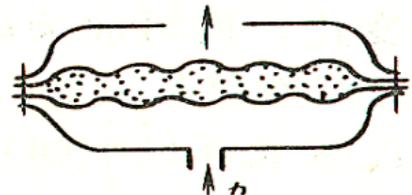
#### (3) 膜片

用金属或非金属材料做成的具有弹性的圆片（有平膜片和波纹膜片）。在压力作用下，其中心产生变形位移。可测低压。

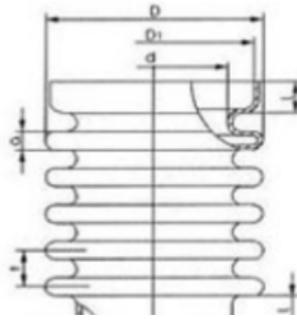


#### (4) 膜盒

将两张金属膜片沿周口对焊，内充硅油。使膜片增加强度。



(5) 波纹管  
位移最大，可测微  
压 ( $<1\text{MPa}$ )。

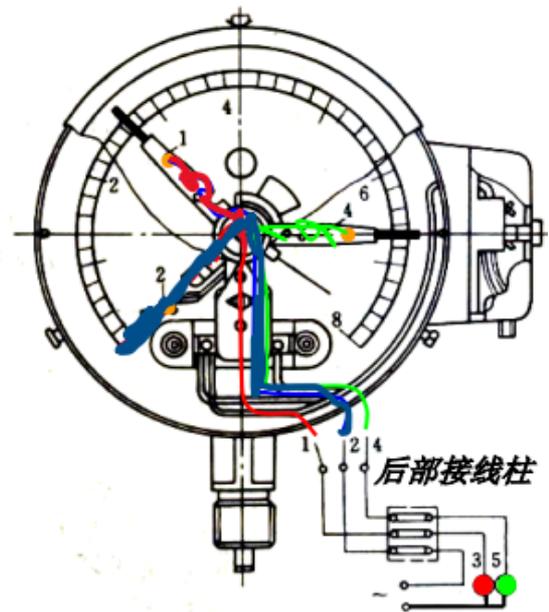


### □ 电接点压力表

在普通弹簧管压力表的基础上稍添部件，便可成为电接点信号压力表。

增加两个报警针，上面分别装静触点1和4，指示针上装动触点2。分别用软导线引至输出接线柱。

使用时可后接两个信号灯或继电器3、5。



### 电气式压力计

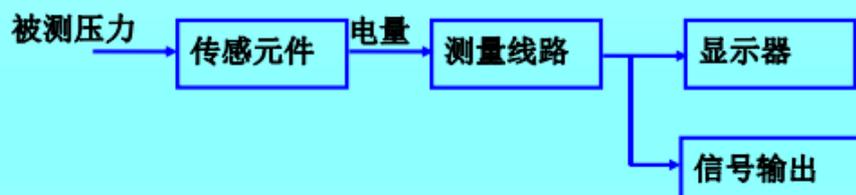
电气式压力计是指将压力转换成电信号进行显示的仪表

电气式压力计一般由压力传感元件、测量电路和信号处理电路所组成

### 2.3.3 电气式压力计

电气式压力计是指将压力转换成电信号进行显示的仪表。

电气式压力计一般由压力传感元件、测量电路和信号处理电路所组成。



#### 2.3.3.1 电容式差压（压力）变送器

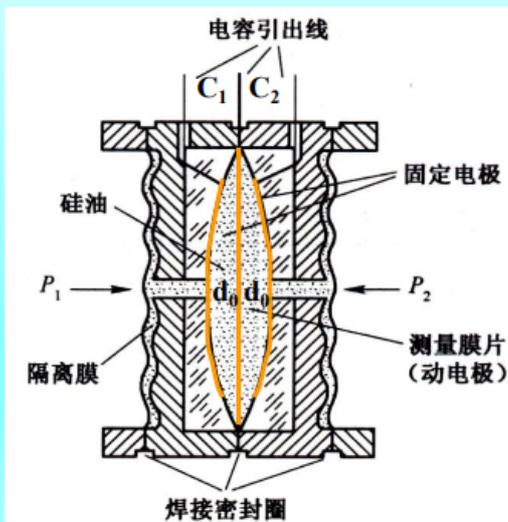
当电容式差压变送器的一个被测压力是大气压时，就成为压力变送器。

电容式压力变送器是20世纪70年代初由美国公司研发。结构简单、过载能力强、可靠性好、精度高、体积小。

电容式压力变送器先将压力的变化转换为电容量的变化，然后用电路测电容。其输出信号是标准的4~20mA（DC）电流信号。

## 差压传感部件

$P_1 - P_2 = \Delta P \Rightarrow$  中心膜片变形位移  $\Rightarrow$  电容量变化



$P_1 = P_2$  时:

$$C_1 = C_2 = K_2 / d_0$$

$$K_2 = \epsilon S / 4 \pi k$$

$P_1 > P_2$  时:

测量膜片中心位移:

$$\Delta d = K_1 \Delta P$$

$K_1$  — 弹力系数

当  $P_2$  是大气压时, 为压力传感部件。

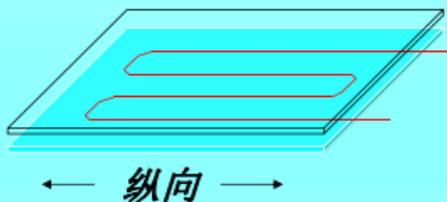
特点: 灵敏度高, 量程宽, 过载能力强

没有杠杆传动机构, 因而结构紧凑, 稳定性与抗振性好, 测量精度高, 可达0.2级

### 2.3.3.2 应变式压力传感器

应变式压力传感器是利用电阻应变原理构成的。电阻应变片有金属应变片(金属丝或金属箔)和半导体应变片两类。如金属丝应变片的结构:

$$R = \rho L / S$$



□ 电阻应变原理:

当应变片产生纵向拉伸变形时,  $L$  变大、 $S$  变小, 其阻值增加; 当应变片产生纵向压缩变形时,  $S$  变大、 $L$  变小, 其阻值减小。

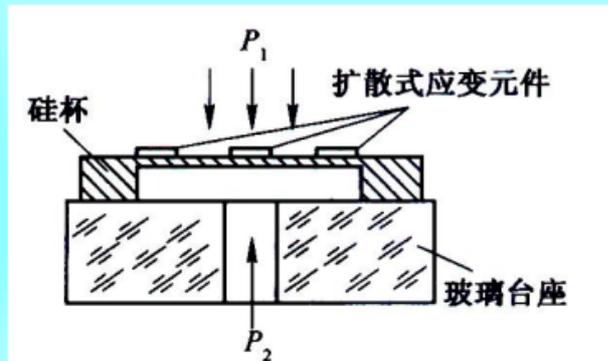
### 2.3.3.3 压阻式压力传感器

利用半导体材料的压阻效应将压力转换为电信号。

压阻效应——受压时电阻率发生变化。

如图是一种半导体测压传感部件。

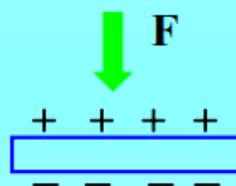
在杯状单晶硅膜片的表面上，沿一定的晶轴方向和位置扩散着长条形电阻。



### 2.3.3.4 压电式压力传感器

利用某些材料的压电效应原理制成。具有这种效应的材料如压电陶瓷、压电晶体称为压电材料。

压电效应：压电材料在一定方向受外力作用产生形变时，内部将产生极化现象，在其表面上产生电荷。当去掉外力时，又重新返回不带电的状态。这种机械能转变成电能的现象，称之为压电效应。



#### 例题

**例** 某台空压机的缓冲器，其工作压力范围为1.0—1.6MPa，工艺要求在远处观察罐内压力，并要求测量结果的误差不得大于罐内压力的 $\pm 5\%$ 。试选择一块合适的压力表（类型、测量范围、精度等级），并说明其理由。

类型：要求远处观察-电气式压力计

测量范围：0~3MPa

精度等级：2.5%

## 压力表的选择、安装与校验

### 仪表类型的选择

1. 满足工艺的要求

例如是否需要远传、自动记录或报警

2. 被测介质的物理化学性能（诸如腐蚀性、温度高低、粘度大小、脏污程度、易燃易爆性能等）是否对测量仪表提出特殊要求

3. 现场环境条件（诸如高温、电磁场、振动及现场安装条件等）对仪表类型有否特殊要求等

**根据工艺要求正确选用仪表类型是保证仪表正常工作及安全生产的重要前提。**

**例如普通压力计的弹簧管大多采用铜合金，而氨用压力计弹簧管的材料却都采用碳钢，不允许采用铜合金。因为氨气对铜的腐蚀极强，普通压力计用于氨气压力测量时很快就要损坏。**

**又如氧气压力计与普通压力计在结构和材质上完全相同，但是氧用压力计禁油。因为油进入氧气系统易引起爆炸。所以，氧用压力计校验时，不用变压器油作为工作介质。**

### 仪表测量范围的确定

为了合理、经济使用仪表，仪表的量程不能选得太大，但为了保证测量精度，一般被测压力的最小值不低于仪表满量程的1/3为宜

同时为了延长弹性元件的使用寿命，避免弹性元件因长期受力过大而永久变形，压力计的上限值应该高于被测量的最大值（量程的 1/2~2/3），留有余量

### 仪表精度的选取

仪表精度是根据工艺生产上所允许的最大测量误差来确定的

不能认为选用的仪表精度越高越好，应在满足工艺要求的前提下，尽可能选用精度较低、价廉耐用的仪表

## 例题

**例** 某台压缩机（脉动压力）的出口压力范围是25-30MPa，测得绝对误差不得大于1MPa。工艺上面要求就地观察，并能高低限报警。请正确的选用一台压力表，指出类型、精度和测量范围。

就地观察-弹性式压力计；高低限报警-电接点式压力计

精度： $1/75=0.01333$ ，精度0.02等级

范围：0~75Mpa

**例** 如果某反应器最大压力为1.0MPa，允许最大绝对误差为0.01MPa。现用一台测量范围为0—1.6MPa，精度为1级的压力表来进行测量，问能否符合工艺要求？若采用一台测量范围为0—1.0MPa，精度为1级的压力表，能符合要求吗？试说明其理由。

**例** 某台空压机的缓冲器，其工作压力范围为1.0—1.6MPa，工艺要求在远处观察罐内压力，并要求测量结果的误差不得大于罐内压力的±5%。试选择一块合适的压力表（类型、测量范围、精度等级），并说明其理由。（可供选择的精度有1.5, 2.0, 2.5；可供选择的量程有0-2.0MPa, 0-2.5MPa, 0-3.0MPa）

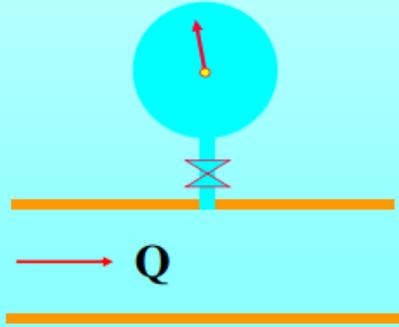
## 压力表的安装

压力计的安装正确与否，直接影响到测量结果的准确性和压力计的使用寿命

## 4、压力表的安装

压力计的安装正确与否，直接影响到测量结果的准确性和压力计的使用寿命。

### 1、测压点的选择

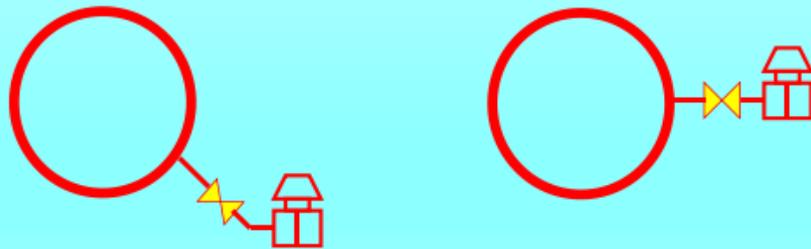


① 选在被测介质直线流动的管段部分，不要选在管路拐弯、分叉或死角处。

② 测量流体压力时，应使取压点与流动方向垂直，取压管内端面与设备内壁平齐，不应有凸出物或毛刺。

③ 测量液体压力时，取压点应在管道下部，使导压管内不积存气体；测量气体压力时，取压点应在管道上方，使导压管内不积存液体。

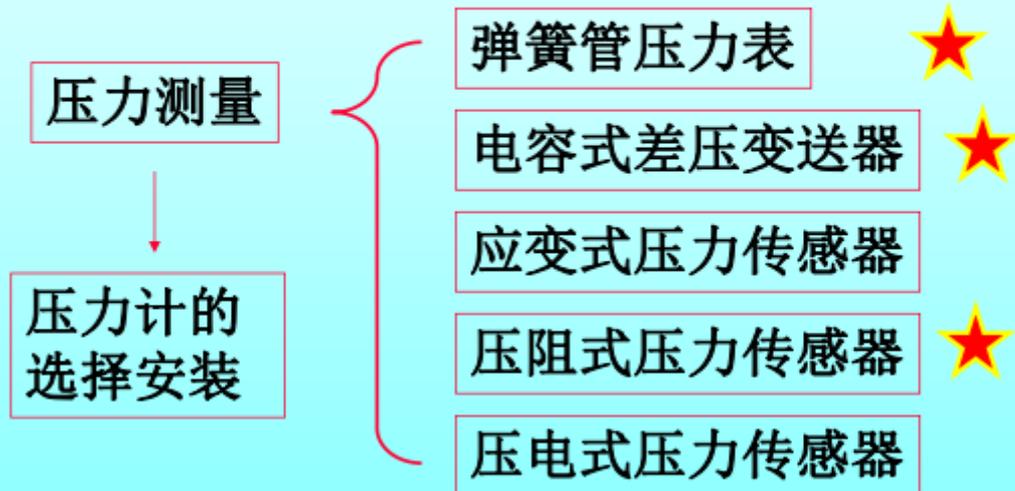
④ 取压口到压力计之间应装有切断阀，以备检修压力计时使用。切断阀应装在取压口附近。



## 压力表的校验

1. 用活塞式压力计的砝码校验
2. 用标准压力表校验

## 小结:



## 流量检测及仪表

### 流量的基本概念

#### 2.4 流量检测及仪表

流量检测是控制生产以及经济核算的一个重要检测参数。

##### 2.4.1 流量的基本概念

流量指单位时间内流过某一截面的流体数量。即瞬时流量。表示方法有：

- 质量流量  $M$  (t/h、kg/h、kg/s)
- 体积流量  $Q$  (m<sup>3</sup>/h、L/h、L/min)

二者的关系：

$$M = \rho Q \quad \rho \text{—流体的密度}$$

总量指一定时间内流过某截面的流体流量的总和。即累计流量。

以  $t$  表示时间，则流量和总量之间的关系是：

$$Q_{\text{总}} = \int_0^t Q dt \quad M_{\text{总}} = \int_0^t M dt$$

流量计的种类繁多，若按测量原理分，流量计可分为：

节流式流量计

速度式流量计

容积式流量计

电磁式流量计

.....

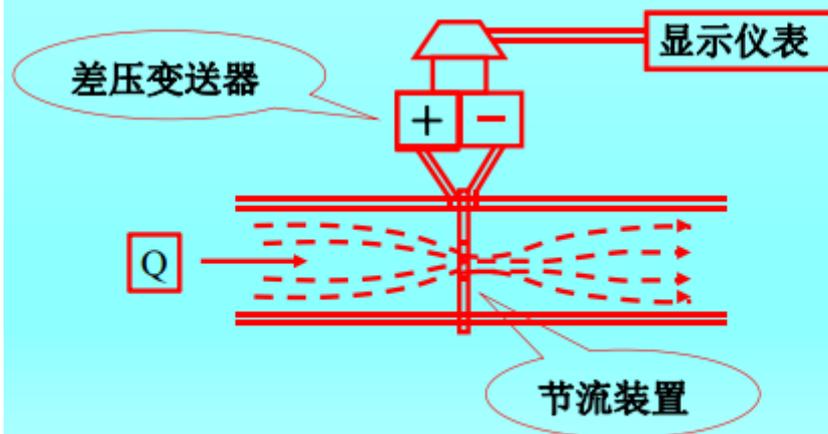
## 流量计分类

- 差压式流量计
- 转子流量计
- 靶式流量计
- 椭圆齿轮流量计
- 涡轮流量计
- 电磁流量计
- 漩涡式流量计 (涡街)
- 超声波流量计

## 差压式流量计工作原理

### 2.4.2 差压式流量计

差压式（也称节流式）流量计是基于流体流动的节流原理，利用流体流经节流装置时产生的压力差而实现流量测量。



$$\text{将 } \mu = \frac{S_2}{S_0} \quad m = \frac{S_0}{S_1} \quad \psi = \frac{P_1' - P_2'}{P_1 - P_2}$$

代入 $v_2$ 式，得

$$v_2 = \sqrt{\frac{\psi}{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}$$

因体积流量： $Q = v_2 S_2$

$$Q = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \cdot S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \quad \text{称流量系数}$$

则得到（不可压缩的流体）流量基本方程式：

$$\text{体积流量} \quad Q = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)}$$

$$\text{质量流量} \quad Q_m = \rho Q = \alpha S_0 \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}$$

如果流体是可压缩的（如蒸汽），则要对公式进行修正。

结论：流量与节流件前后压差的平方根成正比。只要测得差压（ $P_1 - P_2$ ）便可测得流量。

$$\text{因为} \quad \alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 + \xi}} \quad \xi \text{——动能损失系数}$$

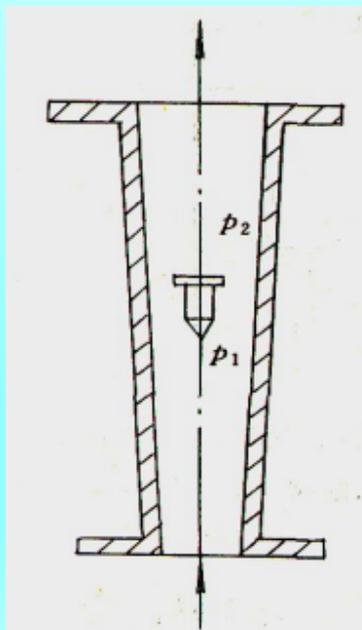
$$\mu = \frac{S_2}{S_0} \quad m = \frac{S_0}{S_1} \quad \psi = \frac{P_1' - P_2'}{P_1 - P_2}$$

故流量系数 $\alpha$ 与节流装置的结构形式、取压方式、开孔面积与管道截面积之比 $m$ 、管壁粗糙度、流体流动状态等因素有关；很难准确计算，一般通过实验确定。因此，节流装置都是标准化的，由厂家提供 $\alpha$ 数据。

## 转子流量计工作原理

### 工作原理

转子流量计与前面所讲的差压式流量计在工作原理上是不相同的。差压式流量计是在节流面积（如孔板流通面积）不变的条件下，以差压变化来反映流量的大小。而转子流量计，却是以压降不变，利用节流面积的变化来测量流量的大小，即转子流量计采用的是恒压降、变节流面积的流量测量方法。

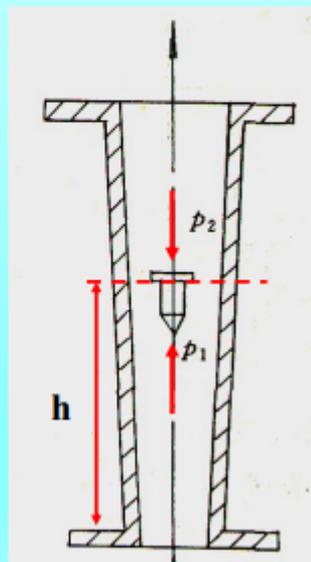


由于锥形管由下往上逐渐扩大，所以 $S_0$ 是转子浮起的高度的函数。

根据转子浮起的高度 $h$ 就可以得出被测介质的流量大小。

$$S_0 = k h$$
$$Q = a k h \sqrt{\frac{2(\rho_z - \rho_f) g V}{\rho_f S}}$$

故：转子流量计是以定压降、变节流面积法测量流量的。



差压式：节流面积不变，以差压变化来反映流量的大小

转子式：压降不变，利用节流面积的变化来测量流量的大小

转子位置信号的引出

1. 锥形管是玻璃的，直接目视转子的位置
2. 在转子内安装磁铁，锥形管外安装磁环随转子上下移动，触发显示
3. 在转子内安装磁铁，锥形管外安装双霍尔磁场传感器，测出磁场的水平分量和垂直分量，可确定转子位置
4. 在转子上方安装一导磁棒，使差动变压器输出随转子位置变化

## 小结

流量测量



体积流量	质量流量	总量
------	------	----

差压式流量计 ★

转子流量计 ★

靶式流量计

椭圆齿轮流量计 ★

涡轮流量计

电磁流量计

涡街流量计 ★

超声波流量计

## 例题

**例** 一转子流量计，转子材料为钢，密度为 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ，用 $20^\circ\text{C}$ 的水标定（标定时水的密度为 $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ），流量计测量上限为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。现用户用来测量某溶液A，其密度为 $\rho = 1527 \text{ kg/m}^3$ 。求

(1) 流量计显示 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，实际通过流量计的溶液A流量为多少？

(2) 若转子材料改为铅，铅密度为 $\rho = 11350 \text{ kg/m}^3$ ，则测量水的最大流量为多少？

(3) 转子材料改为铅后，流量计显示为量程一半读数时，溶液A的实际流量为多少？

$$Q = akh \sqrt{\frac{2(\rho_z - \rho_f) g V}{\rho_f S}}$$

(1) 记钢密度为  $\rho_{\text{钢}} = 7800 \text{ kg/m}^3$ , 液体A密度  $\rho_A = 1527 \text{ kg/m}^3$ , 水密度  $\rho_t = 998 \text{ kg/m}^3$

当流量计示数为  $Q_1 = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 实际液体A流量为  $Q_A$

$$Q_1 = a h \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{钢}} - \rho_t) g V}{\rho_t \cdot S}}$$

$$Q_A = a h \sqrt{\frac{2(\rho_A - \rho_t) g V}{\rho_A \cdot S}}$$

$$\frac{Q_A}{Q_1} = \sqrt{\frac{(\rho_{\text{钢}} - \rho_t) \cdot \rho_t}{\rho_A (\rho_{\text{钢}} - \rho_t)}}$$

$$\text{即 } Q_A = 23.909 \text{ kg/m}^3$$

(2) 材料为钢时,  $Q_{\text{max}} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

材料为铝时,  $Q_{\text{max}}$  为小量程侧流量

记铝密度为  $\rho_{\text{铝}} = 11350 \text{ kg/m}^3$

$$Q_{\text{max}1} = a h \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{钢}} - \rho_t) g V}{\rho_t \cdot S}}$$

$$Q_{\text{max}2} = a h \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{铝}} - \rho_t) g V}{\rho_t \cdot S}}$$

$$\frac{Q_{\text{max}2}}{Q_{\text{max}1}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{钢}} - \rho_t}{\rho_{\text{铝}} - \rho_t}}$$

$$Q_{\text{max}2} = 6.6828 \text{ kg/m}^3$$

(3) 流量计示数为  $Q_2 = \frac{1}{2} Q_{\text{max}2} = 30.844 \text{ kg/m}^3$  时

液体A实际流量为  $Q_{A2}$

$$Q_2 = a h \sqrt{\frac{2(\rho_A - \rho_t) g V}{\rho_t \cdot S}}$$

$$Q_{A2} = a h \sqrt{\frac{2(\rho_A - \rho_t) g V}{\rho_A \cdot S}}$$

$$\frac{Q_{A2}}{Q_2} = \sqrt{\frac{(\rho_{\text{钢}} - \rho_t) \cdot \rho_t}{\rho_A (\rho_{\text{钢}} - \rho_t)}}$$

$$\text{即 } Q_{A2} = 29.2879 \text{ kg/m}^3$$

## 物位检测及仪表

### 2.5 物位检测及仪表

物位测量在工业生产中具有重要的地位。例如蒸汽锅炉运行时, 如果汽包水位过低, 就会危及锅炉的安全, 造成严重事故。

#### 2.5.1 概述

物位的含义包括:

**液位:** 容器中液体介质的高低

**料位:** 容器中固体物质的堆积高度

**界面:** 两种密度不同液体介质的分界面的高度

#### 1. 静压式物位测量

利用液体或物料对某定点产生的压力随液位高度而变化的原理而工作

## 2. 浮力式物位测量

利用浮子所受的浮力随液位高度而变化的原理工作

## 3. 电气式物位测量

利用敏感元件将物位的变化转换为电量参数的变化，而得知物位

## 4. 核辐射式物位测量

利用核辐射线穿透物料时，核辐射线的透射强度随物质层的厚度而变化的原理进行测量

## 5. 声学式物位测量

测量超声波在物质中传播时间的长短，据此可测出物位

## 6. 光学式物位测量

利用光波在传播中可被不同的物质界面遮断和反射的原理测量物位

# 成分检测及仪表

## 2.6 成分检测及仪表

**成分：**在多种物质的混合物中某一种物质所占的比例。

氧化锆氧量计

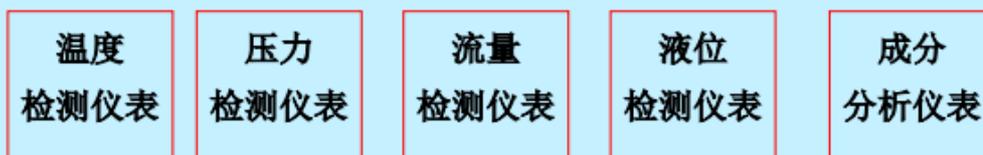
气相色谱分析仪

红外线气体分析仪

工业酸度计

## 本章总结

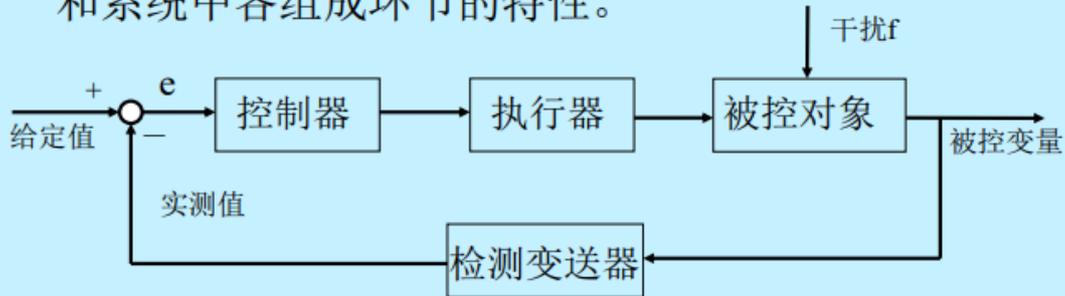
### 检测仪表



## 二、被控过程的数学模型

### 第5章 被控过程的数学模型

控制系统的控制过程品质主要取决于系统的结构和系统中各组成环节的特性。



过程控制系统原理方框图

过程控制系统的主要任务是：对生产过程中的重要参数（温度、压力、流量、物位、成分、湿度等）进行控制，使其保持恒定或按一定规律变化。

1. 被控过程数学模型的作用与要求、建立被控过程数学模型的方法
2. 机理法建模
  - a. 单容过程建模
  - b. 多容过程建模
3. 测试法建模

## 被控过程数学模型的作用与要求

被控对象大都是生产中的工艺设备，它是控制系统的重要环节。无论是设计、还是操作控制系统，都需要了解被控对象的特性。

**动态数学模型：**输入变量与输出变量之间动态关系的数学描述

**静态数学模型：**系统运行在稳定的平衡工况下，输入变量与输出变量之间的数学关系

其他分类方式：**参数与非参数；连续与离散；定常与时变；线性与非线性等**

## 第5章 被控过程的数学模型

### 数学模型的作用：

- 1、设计过程控制系统及整定控制参数的重要依据；
- 2、指导生产工艺及其设备的设计与操作；
- 3、对被控过程进行仿真研究；
- 4、培训运行操作人员；
- 5、工业过程的故障检测与诊断。

### 数学模型的要求：

**总得原则：**一是尽量简单，二是正确可靠。

## 第5章 被控过程的数学模型

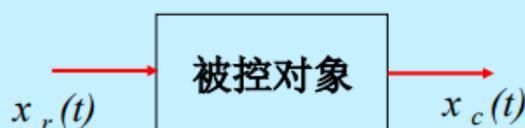
1、如果数学模型是根据输入输出数据估计得到的，选用的数学模型越复杂，需要计算的模型参数就越多。

计算过程的近似处理及误差积累，难以保证精度和模型的准确性；

2、当采用前馈控制、解耦控制等方法时，模型过于复杂，则控制规律和算法也会比较复杂、很难实现；

3、模型太复杂，控制系统进行在线参数整定与系统优化的计算量大，难以保证实时性。

**最常用的是传递函数。**主要采用具有纯滞后的一阶和二阶模型，带纯滞后的一阶最常用。



$$W(s) = \frac{X_c(s)}{X_r(s)}$$

# 建立被控过程数学模型的基本方法

## 第5章 被控过程的数学模型

### 5.2 建立被控过程数学模型的基本方法

求对象的数学模型有两条途径：

□ **机理法：**根据生产过程的内部机理，列写出有关的平衡方程，从而获取对象的数学模型。

机理法建模的**首要条件**是必须对生产过程的机理有充分的了解，并能比较准确地用数学语言加以描述。

机理法建模的基础是**物质与能量平衡关系**，利用物质与能量平衡的基本关系及相应的物理、化学定理，列写出相应的方程，并进行一定的运算、变换即可得到需要的传递函数。

## 第5章 被控过程的数学模型

**常用的简化方法：**1、一开始就引入假定，使复杂的方程简化；2、在得到较复杂的高阶方程后，用低阶方程去近似；3、对得到的原始模型进行仿真，得到一系列响应曲线，再用低阶模型近似。

□ **测试法：**通过实验测试，来识别对象的数学模型。

**混合法：**由于影响生产过程的因素较多，单纯用机理法建模较困难，一般用机理法的分析结论，指导测试结果的辨识。

## 机理法建模

### 机理法建模的基本原理

通过分析生产过程的内部机理，找出变量之间的关系

如物料平衡方程、能量平衡方程、化学反应定律、电路基本定律等，从而导出对象的数学模型

被控变量与控制变量的变化都与物质和能量的流动与转换有密切关系，这一点是机理法建模的重要依据

1. 流入量与流出量
2. 静态平衡与动态平衡

物质与能量的动态平衡关系可表示为：

单位时间内被控过程流入量与流出量之差等于被控过程内部的存储变化率。

即

单位时间内物质/能量流入量－单位时间内物质/能量流出量＝被控过程内部物质/能量存储量的变化率

物质与能量的平衡关系是反映过程特性的基本关系，也是机理法建立被控过程的数学模型的基础。

**机理法建模的步骤：**

1. 根据过程和模型使用目的作出合理假设
2. 根据被控过程内在机理建立数学模型
3. 简化

**单容过程建模**

当对象的输入输出可以用一阶微分方程式来描述时，称为单容过程或一阶特性对象

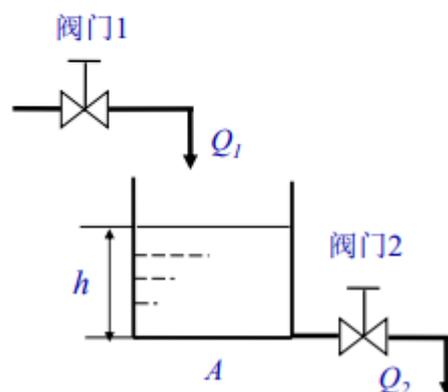
大部分工业对象可以用一阶特性描述

典型代表是水槽的水位特性

### 5.3.2.1 单容贮液箱液位过程I

如图是一个水槽，水经过阀门1不断地流入水槽，水槽内的水又通过阀门2不断流出。工艺上要求水槽的液位 $h$ 保持一定数值。在这里，水槽就是被控对象，液位 $h$ 就是被控变量。

如果想通过调节阀门1来控制液位，就应了解进水流量 $Q_1$ 变化时，液位 $h$ 是如何变化的。



此时，对象的输入量是流入水槽的流量 $Q_1$ ，对象的输出量是液位 $h$ 。

机理建模步骤：

从水槽的物料平衡关系考虑，找出表征 $h$ 与 $Q_1$ 关系的方程式。

设水槽的截面积为 $A$

$Q_{10} = Q_{20}$ 时，系统处于平衡状态，即静态。

这时液位稳定在 $h_0$ 。

假定某一时刻，阀门1突然开大 $\Delta\mu_1$ ，则 $Q_1$ 突然增大，不再等于 $Q_2$ ，于是 $h$ 也就开始变化。

$Q_1$ 与 $Q_2$ 之差被囤积在水槽中，造成液位上升。

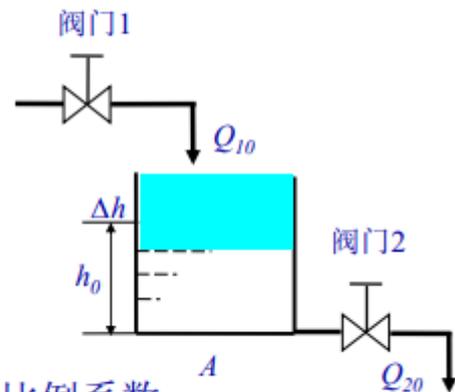
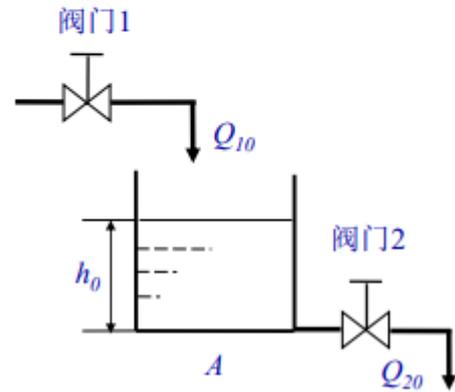
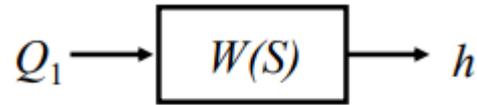
$$(\Delta Q_1 - \Delta Q_2) / A = d\Delta h / dt$$

思考题  $\Delta Q_2 = \frac{\Delta h}{R_s}$

$$\Delta Q_1 = K_\mu \Delta\mu_1$$

式中：

$R_s$ ——阀门2阻力系数； $K_\mu$ ——阀门1比例系数；  
 $\mu_1$ ——阀门1的开度；



$$\text{解得 } \frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{A} (K_{\mu} \Delta \mu_1 - \frac{1}{R_s} \Delta h)$$

$$\text{即 } AR_s \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_{\mu} R_s \Delta \mu_1$$

令:  $T = AR_s$  ——时间常数;  $K = K_{\mu} R_s$  ——放大倍数。

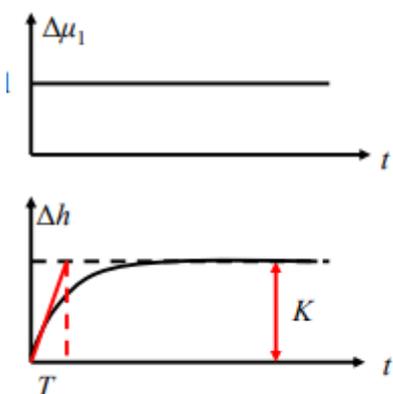
$$\text{写成标准形式 } T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \Delta \mu_1$$

$$\text{进行拉氏变换 } TsH(s) + H(s) = K\mu_1(s)$$

$$\text{传递函数为: } \frac{H(s)}{\mu_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

### 阶跃响应（飞升）曲线

输入量 $\mu_1$ 阶跃变化 ( $\Delta\mu_1$ ) 时, 其输出 ( $\Delta h$ ) 随时间变化的曲线。



$$\text{因 } \frac{H(s)}{\mu_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad \mu_1(s) = \frac{1}{s}$$

$$\text{则 } H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\text{时域表达式 } \Delta h = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \Delta \mu_1$$

又称一阶惯性特性或单容特性

对象的特性参数 $K$ 、 $T$ 反映了对象的物理本质。

因为工艺过程就是能量或物质的交换过程，在此过程中，肯定存在能量的储存和阻力。

(1) 容量系数——反映对象存储能量的能力。

如水槽面积 $A$ ，它影响时间常数 $T$ 的大小。

$$T = AR_S$$

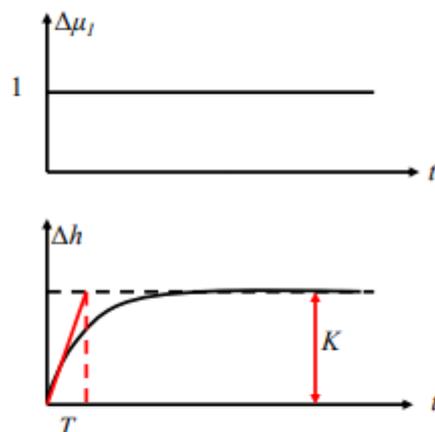
(2) 阻力系数——反映对象对物料或能量传递的阻力。

如阀门阻力系数 $R_S$ ，它影响放大系数 $K$ 的大小。

$$K = K_\mu R_S$$

### 5.3.2.2 被控过程的自衡特性与单容贮液箱液位过程II

从一阶惯性特性曲线可以看出，对象在扰动作用下，其平衡状态被破坏后，在没有人工干预或调节器干预下，能自动达到新的平衡状态，这种特性称为“自衡特性”。

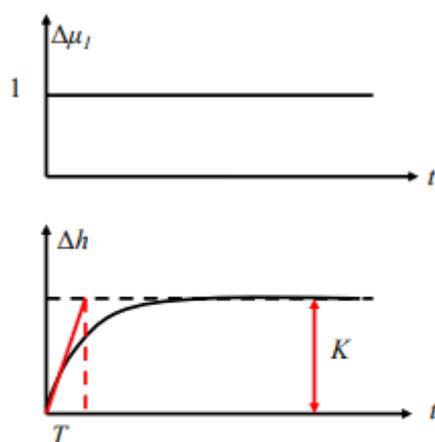


用自衡率 $\rho$ 表征对象自衡能力的大小

$$\rho = \frac{\Delta\mu_1}{\Delta h(\infty)} = \frac{1}{K}$$

与放大系数 $K$ 互为倒数

如果 $\rho$ 大，说明对象的自衡能力大。即对象能以较小的自我调整量 $\Delta h(\infty)$ ，来抵消较大的扰动量 $\Delta\mu_1$ 。



并不是所有被控过程都具有自衡特性。同样的单容水槽如果出水用泵抽出，则成为无自衡特性。

## 多容过程建模

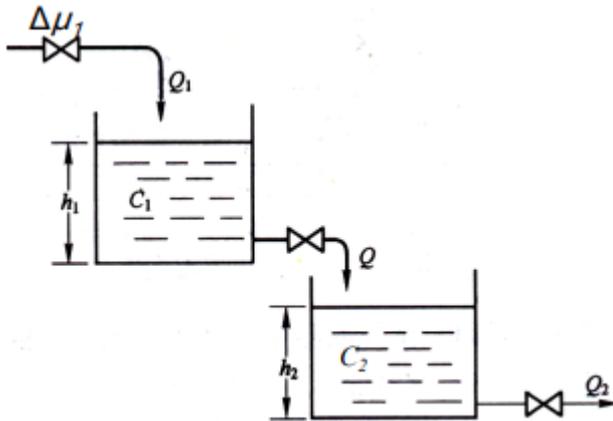
有一个以上贮蓄容量的过程称为多容过程

### 5.3.3 多容过程建模

有一个以上贮蓄容量的过程称为多容过程。

#### 5.3.3.1 多容液位过程

如图所示为双容对象。



由两个一阶惯性环节串联起来，操纵变量是  $\Delta\mu_1$ ，被控变量是第二个水槽的水位  $h_2$ 。

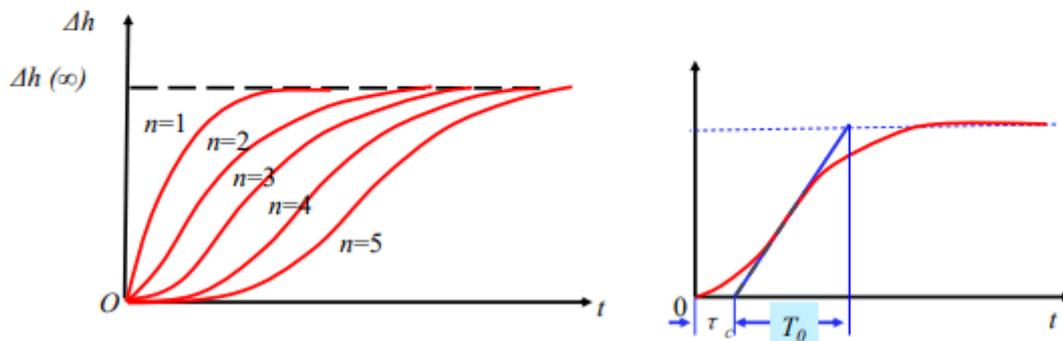
容量滞后与纯滞后

#### 5.3.3.2 容量滞后与纯滞后

##### 1. 容量滞后

切线在时间轴上截出的时间段  $\tau_c$  为容量滞后。

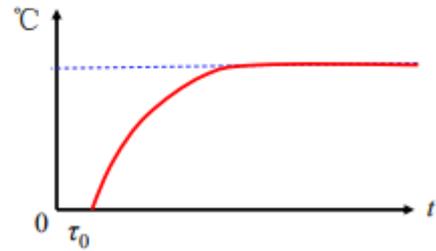
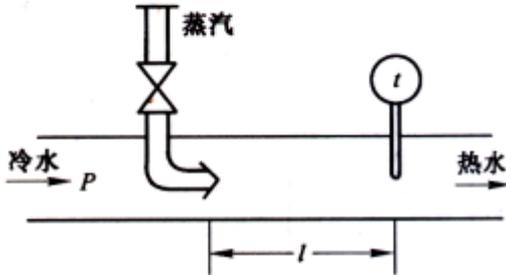
被控过程的容量系数  $C$  越大， $\tau_c$  越大；容量个数越多（阶数  $n$  越多），阶跃响应曲线上升越慢。



## 2. 纯滞后

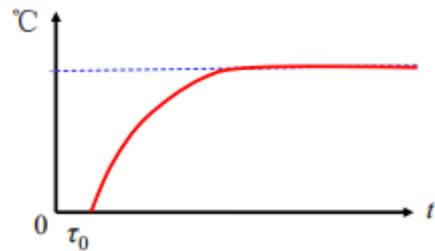
由信号或能量的传输时间造成的滞后现象，是纯粹的滞后。

如图是一个用蒸汽来控制水温的系统。蒸汽作用点与被调量测量点相隔  $l$  距离，蒸汽量阶跃增大引起的水温升高，要经过路程  $l$  后才反应出来。



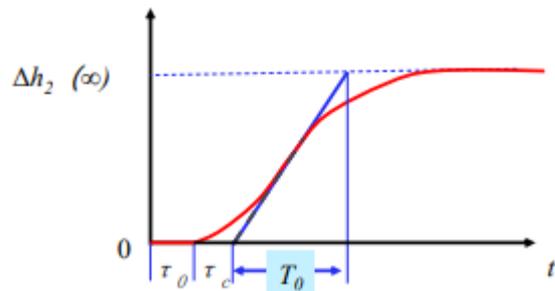
$$\text{纯滞后时间 } \tau_0 = \frac{l}{v}$$

$v$  —— 水的流速；



❖ 有些对象容量滞后与纯滞后同时存在，很难严格区分。常把两者合起来，统称为滞后时间  $\tau$ 。

$$\tau = \tau_0 + \tau_c$$



## 测试法建模

根据工业过程中某因果变量的实测数据，进行数学处理后得到的数学模型

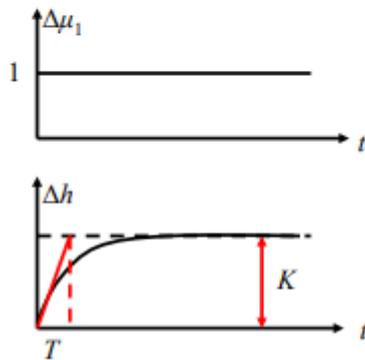
测定对象特性的实验方法主要有三种：

1. 时域法——输入阶跃或方波信号，测对象的飞升曲线或方波响应曲线
2. 频域法——输入正弦波或近似正弦波，测对象的频率特性
3. 统计相关法——输入随机噪音信号，测对象参数的变化

### 5.4.1 阶跃响应曲线法建模

给对象输入一阶跃信号或方波信号测其输出响应。

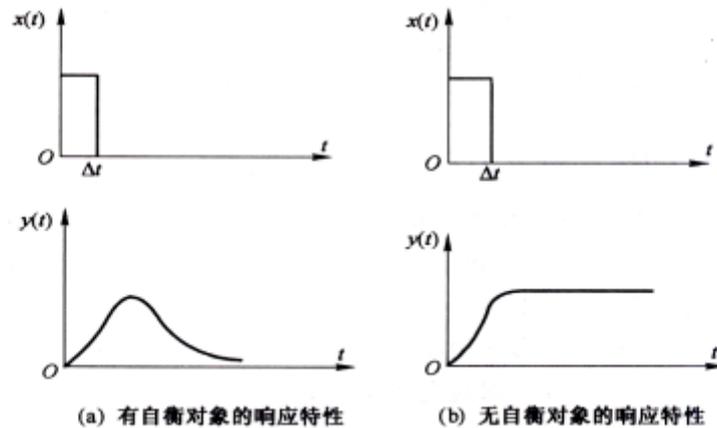
#### 1. 阶跃响应曲线的直接测定



在被控过程处于开环、稳态时，将选定的输入量做一阶跃变化（如将阀门开大），测试记录输出量的变化数据，所得到的记录曲线就是被控过程的阶跃响应曲线。

#### 2. 矩形脉冲法测定被控过程的阶跃响应曲线

有些工艺对象不允许长时间施加较大幅度的扰动，那么施加脉宽为  $\Delta t$  的方波脉冲，得到的响应曲线称为“方波响应”。



(a) 有自衡对象的响应特性

(b) 无自衡对象的响应特性

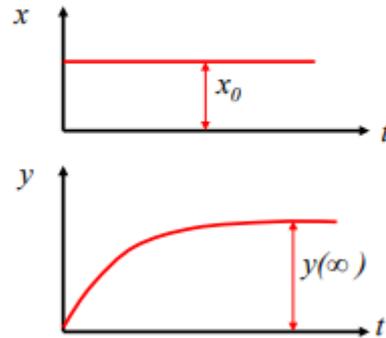
- 1.由阶跃响应曲线确定一阶惯性加滞后环节模型  
 一阶对象的特性参数都具有明显的物理意义：

$$W(s) = e^{-s\tau} \frac{K_0}{T_0s + 1}$$

❖ 放大倍数 $K$ 的物理意义

$K$ 表明了稳态时，输出对输入的放大倍数。求法：

$$K = y(\infty) / x_0$$

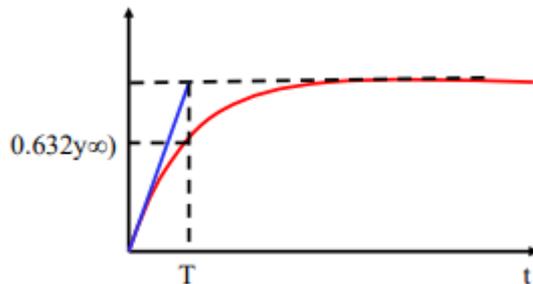


❖  $K$  越大，表示对象的输入对输出的影响越大。

❖ 时间常数的物理意义

对象受到阶跃输入后，输出达到新的稳态值的63.2%所需的时间，就是时间常数 $T$ 。

或对象受到阶跃输入后，输出若保持初始速度变化到新的稳态值所需时间就是时间常数。



求法：

$$y(t) = [Kx_0(1 - e^{-\frac{t}{T}})]_{t=T}$$

$$\begin{aligned} y(T) &= Kx_0(1 - e^{-1}) \\ &= 0.632Kx_0 \end{aligned}$$

## 统计相关分析法

测定动态特性的统计相关分析法

相关分析法是在生产正常进行中，向被控过程输入一种对正常生产过程影响不大的特殊信号——伪随机测试信号，通过对被控过程的输入、输出数据进行相关分析得到被控过程的数学模型

有时也可以不加专门信号，直接利用生产过程正常运行时所记录的输入、输出数据，进行相关分析得到数学模型

这种方法对系统运行干扰程度低

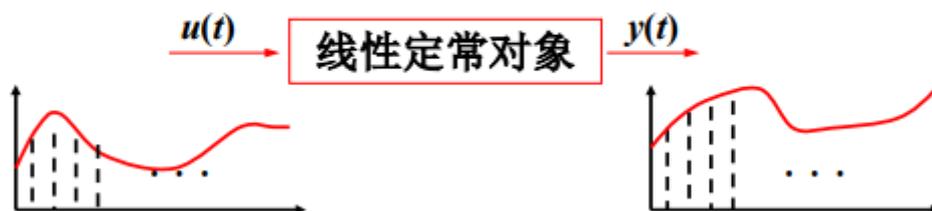
若系统备有计算机在线工作，整个试验可由计算机完成

## 最小二乘法

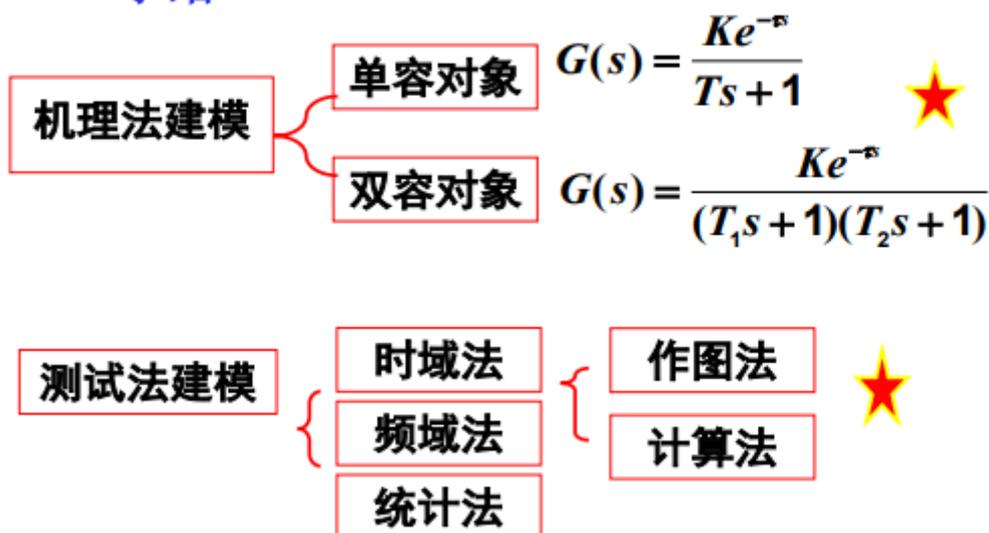
### 5.4.4 最小二乘法建立被控过程的数学模型

前面讨论的方法都是建立连续时间数学模型。为了适应计算机控制技术的发展，需要建立被控过程的离散时间数学模型。

如果对被控过程的输入信号 $u(t)$ 、输出信号 $y(t)$ 进行采样，则可得到一组输入序列 $u(k)$ 和输出序列 $y(k)$ ：

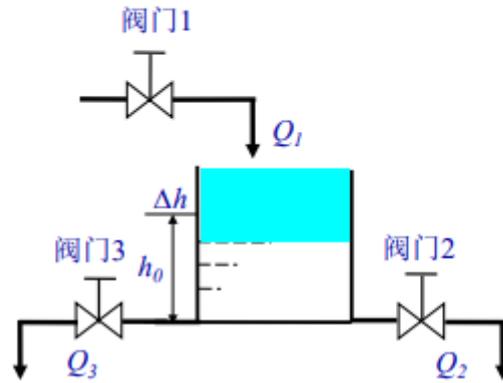


### 小结



## 例题

### 练习题



## 三、控制仪表

控制仪表又称控制器或调节器

其作用是把被控变量的测量值和给定值进行比较，得出偏差后，按一定的调节规律进行运算，输出控制信号，以推动执行器动作，对生产过程进行自动调节

### 控制仪表的分类

控制仪表按工作能源分类有

#### 1. 电动仪表

以220VAC或24VDC作为工作能源，其输入输出信号均4~20mA的标准信号

#### 2. 气动仪表

以140kPa的气压信号作为工作能源，其输入输出信号均采用20~100kPa的标准气压信号

#### 3. 自力式仪表

不需要专门提供工作能源

### 控制仪表的发展阶段

#### 1. 基地式仪表

#### 2. 单元式组合仪表

#### 3. 以微处理器为中心的控制仪表（装置）

## 1、基地式仪表

□ 将检测、控制、显示功能设计在一个整体内，安装在现场设备上。

□ 安装简单、使用方便。但一般通用性差，只适用于小规模、简单控制系统。



## 2、单元式组合仪表

□ 单元组合式仪表是将仪表按其功能的不同分成若干单元（变送单元、给定单元、控制单元、显示单元等），每个单元只完成其中的一种功能。

□ 其中的控制单元是接受测量与给定信号，然后根据它们的偏差进行控制运算，运算的结果作为控制信号输出。

□ 各个单元之间以统一的标准信号相互联系。

## 3、以微处理器为中心的控制仪表（装置）

内设微处理器，控制功能丰富，很容易构成各种复杂控制系统。

在自动控制系统中广泛应用的有：

- 工业控制计算机（DDS）
- 集散控制装置（DCS）
- 单回路数字控制器（SLPC）
- 可编程数字控制器（PLC）
- 现场总线控制装置（FCS）

# 基本控制规律及特点

所谓控制规律是指控制器的输出信号与输入偏差信号之间的关系

$$y = f(e)$$

控制器的输入信号是变送器送来的测量信号和内部人工设定的或外部输入的设置信号

设定信号和测量信号经比较环节比较后得到偏差信号  $e$ ，它是设定值信号  $r$  与测量信号  $x$  之差

$$e = r - x$$

## 控制规律

控制规律有断续控制和连续控制两类

1. 断续控制——控制器输出干接点信号，如双位控制、三位控制
2. 连续控制——控制器输出连续信号，如比例控制、比例积分控制、比例微分控制、比例积分微分控制

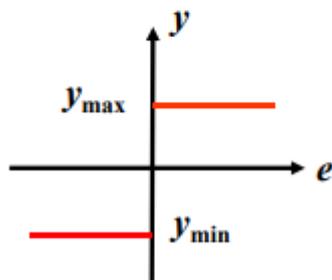
## 双位控制、三位控制

### 3.1.1 双位控制

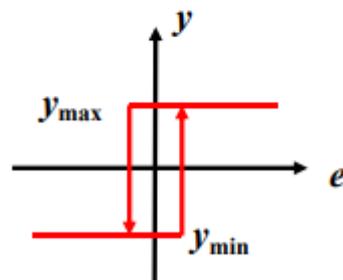
双位控制器只有两个输出值，相应的执行机构只有开和关两个极限位置，因此又称**开关控制**。

理想的双位控制器输出  $y$  与输入偏差  $e$  之间的关系为：

$$y = \begin{cases} y_{\max} & e > 0 \quad (\text{或 } e < 0) \text{ 时} \\ y_{\min} & e < 0 \quad (\text{或 } e > 0) \text{ 时} \end{cases}$$



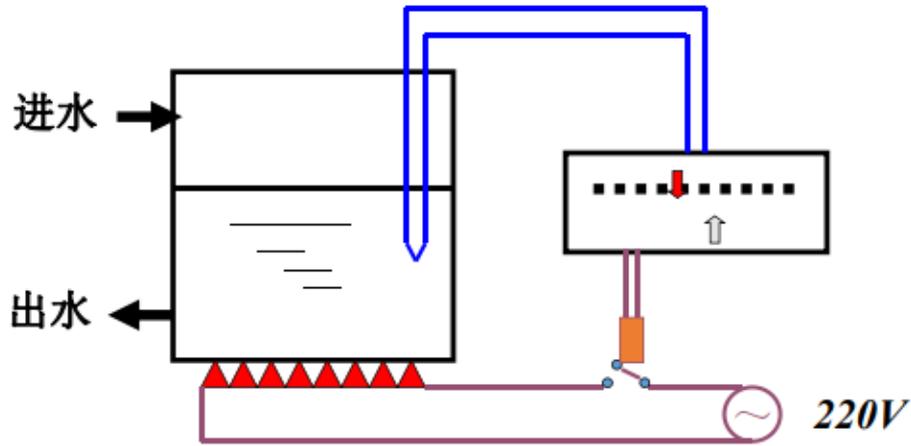
理想的双位控制特性



有中间区的双位控制特性

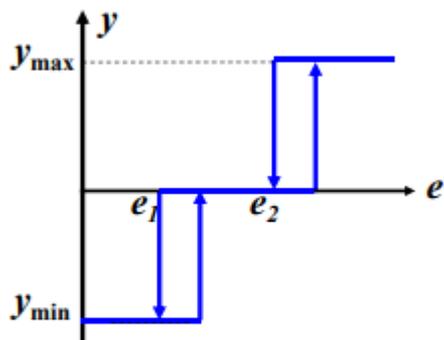
### 例1：温度双位控制系统：

温度低于给定值时，温控器输出高电平，继电器吸合，加热器通电加热；温度高于给定值时，温控器输出低电平，继电器断开，加热器断电。

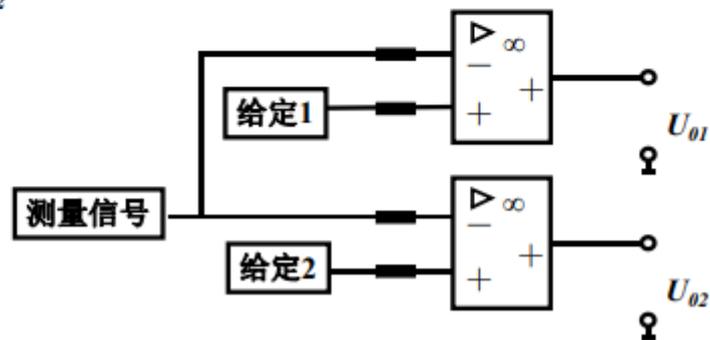


### 三位控制：

控制器有三个输出位值，可以控制两个继电器。



### 三位控制器电路原理框图：

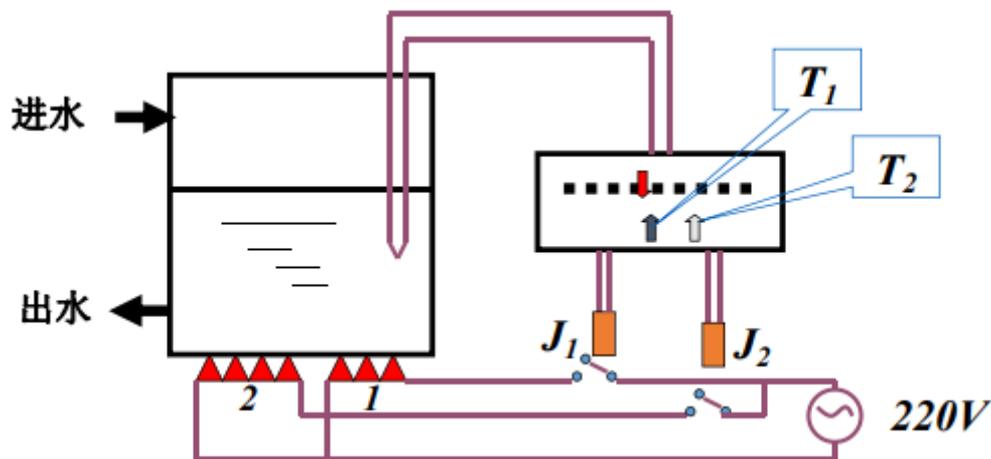


## 例2：温度三位控制系统

温度低于 $T_1$  ( $T_1 < T_2$ ) 时，温控器使继电器1、2都吸合，加热器1、2都通电加热；

温度高于 $T_1$  低于 $T_2$  时，温控器使继电器1断开、继电器2吸合，只有加热器2通电；

温度高于 $T_2$  时，继电器1、2都断开。



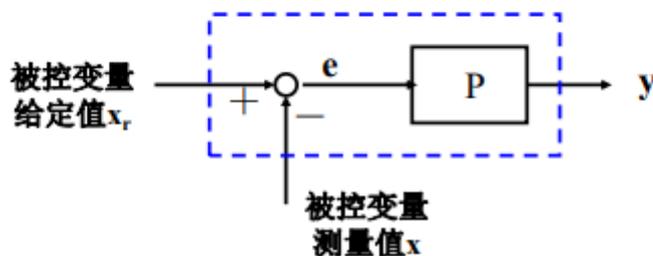
## 比例控制

### 3.1.2 比例控制 (P)

控制器输出 $y(t)$  和偏差信号 $e(t)$  成比例关系

$$y(t) = K_p e(t) \quad K_p \text{——比例增益}$$

传递函数为  $W(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p$



## ❖ 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。
- 控制结果存在静差。因为，如果被调量偏差为零，调节器的输出也就为零。

$$y = K_p e$$

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。

纯比例控制的输出是输入偏差的K倍，静态偏差是系统稳定时候， $spv$ 与 $pv$ 的差

如果存在静态偏差，则说明输入偏差不为零，那么纯比例控制会继续作用

那么为什么说，纯比例控制是不可以消除静态偏差呢？

## 比例度

在实际的比例控制器中，习惯上使用比例度（比例带） $P$ 来表示比例控制作用的强弱。

所谓比例度就是指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，用百分数表示。

$$P = \left( \frac{e}{X_{\max} - X_{\min}} / \frac{y}{Y_{\max} - Y_{\min}} \right) \times 100\%$$

式中 $e$ 为输入偏差； $y$ 为控制器输出的变化量； $(X_{\max} - X_{\min})$ 为测量输入的最大变化量，即控制器的输入量程； $(Y_{\max} - Y_{\min})$ 为输出的最大变化量，即控制器的输出量程。

比例度：
$$P = \left( \frac{e}{x_{\max} - x_{\min}} / \frac{y}{y_{\max} - y_{\min}} \right) \times 100\%$$

如果控制器输入、输出量程相等，则：

$$P = \frac{e}{y} \times 100\% = \frac{1}{K_c} \times 100\%$$

比例度除了表示控制器输入和输出之间的增益外，还表明比例作用的有效区间。

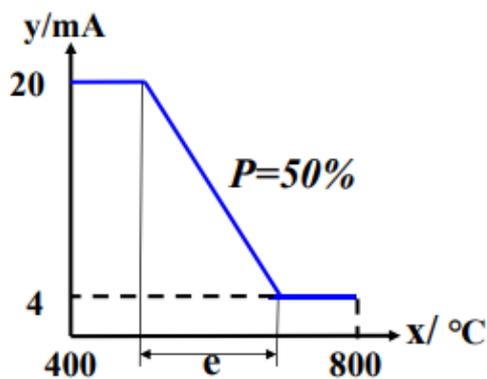
使控制器输出变化100%时，所对应的偏差变化相对量。如P=50%表明：

### 例题

**例** 某比例控制器，温度控制范围为400~800°C，输出信号范围是4~20mA。当指示指针从700°C变到600°C时，控制器相应的输出从8mA变为16mA。求设定的比例度。

**解**

$$\begin{aligned}
 P &= \left( \frac{\Delta e}{\Delta e_{\max}} / \frac{\Delta y}{\Delta y_{\max}} \right) \times 100\% \\
 &= \left( \frac{700-600}{800-400} / \frac{16-8}{20-4} \right) \times 100\% \\
 &= 50\%
 \end{aligned}$$



## 比例积分控制

### 3.1.3 比例积分控制 (PI)

当要求控制结果无余差时，就需要在比例控制的基础上，加积分控制作用。

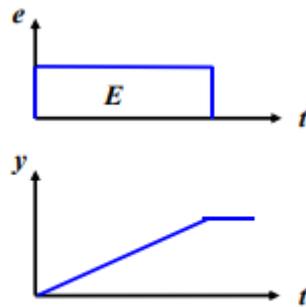
#### (1) 积分控制 (I)

输出变化量 $y$ 与输入偏差 $e$ 的积分成正比

$$y = \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \quad T_I \text{—积分时间}$$

当 $e$ 是幅值为 $E$ 的阶跃时

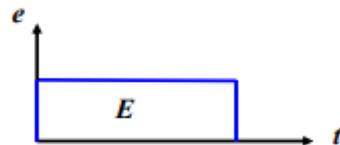
$$y = \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt$$
$$= \frac{E}{T_I} \cdot t$$



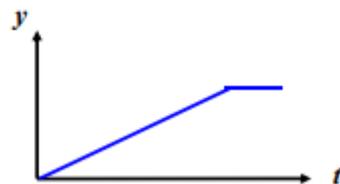
#### ❖ 积分控制的特点

当有偏差存在时，积分输出将随时间增长（或减小）；当偏差消失时，输出能保持在某一值上。

□ 积分作用具有保持功能，故积分控制可以消除余差。



□ 积分输出信号随着时间逐渐增强，控制动作缓慢，故积分作用不单独使用。



若将比例与积分组合起来，既能控制及时，又能消除余差。

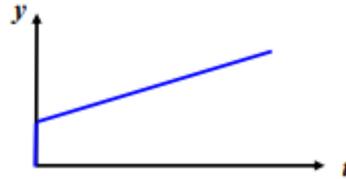
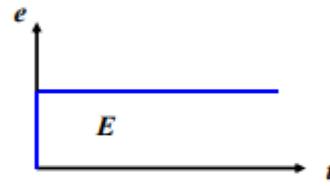
## (2) 比例积分控制 (PI)

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

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

若偏差是幅值为 $E$ 的阶跃干扰

$$y = \frac{E}{P} \left( 1 + \frac{1}{T_I} t \right)$$



### 例题

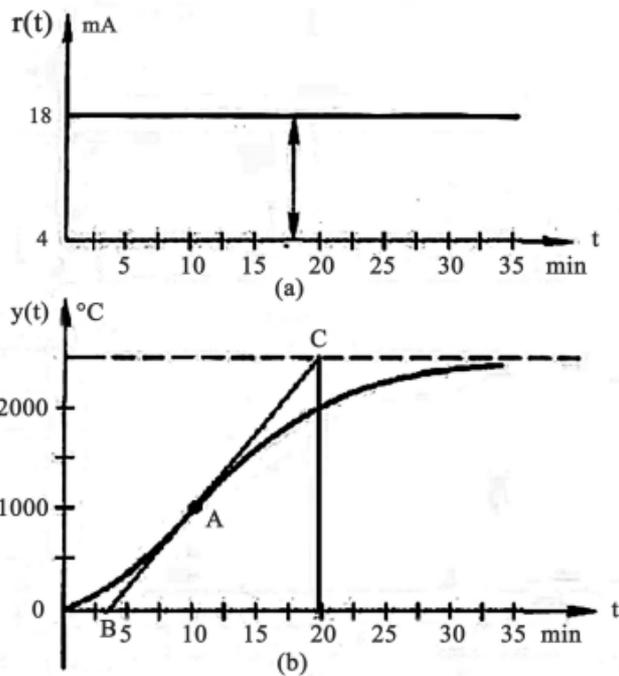
**例** 某比例积分控制器输入、输出范围均为4~20mA，若将比例度设为100%，积分时间设为2min，稳态时输出为5mA。某时刻开始，输入偏差为幅值为+0.2mA的阶跃时，试问经过5min后，输出将由5mA变化为多少？

$$E=+0.2\text{mA}, P=100\%, T_i=2\text{min}$$

$$y = E/P * (1 + t/T_i) = 0.2 * (1 + 5/2) = 0.7$$

$$5 + 0.7 = 5.7\text{mA}$$

**例** 设计一个比例积分调节器，控制一温度调节系统。控制器的调节范围为0~3000°C，控制器的输出为4~20mA。当给定被控对象一个如图(a)所示的阶跃输入时，测定的被控对象响应曲线如图(b)所示。



调节规律	调节参数		
	比例度 $\delta\%$	积分时间 $T_I$	微分时间 $T_D$
P	$(K_0\tau_0/T_0)\times 100\%$		
PI	$1.1(K_0\tau_0/T_0)\times 100\%$	$3.3\tau_0$	
PID	$0.85(K_0\tau_0/T_0)\times 100\%$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

$$K_0 = \left( \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} \right) / \left( \frac{\Delta r}{r_{\max} - r_{\min}} \right)$$

## 比例微分控制

### 3.1.4 比例微分控制 (PD)

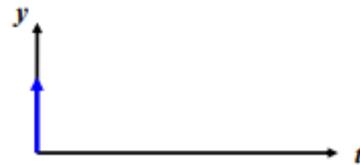
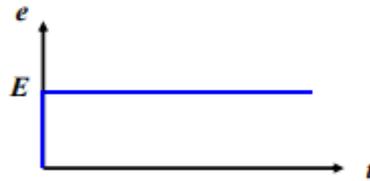
对于惯性较大的对象，常常希望能加快控制速度，此时可增加微分作用。

#### (1) 微分控制 (D)

$$\text{理想微分 } y = T_D \frac{de}{dt}$$

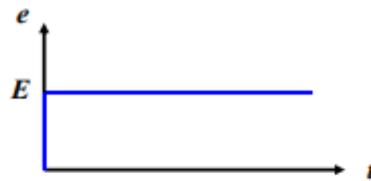
式中:  $T_D$ — 微分时间

$$\frac{de}{dt} \text{ — 偏差变化速度}$$



#### ❖ 微分控制的特点

□ 微分作用能超前控制。在偏差出现或变化的瞬间，微分立即产生强烈的调节作用，使偏差尽快地消除于萌芽状态之中。



□ 微分对静态偏差毫无控制能力。当偏差存在，但不变化时，微分输出为零，因此不能单独使用。必须和P或PI结合，组成PD控制或PID控制。

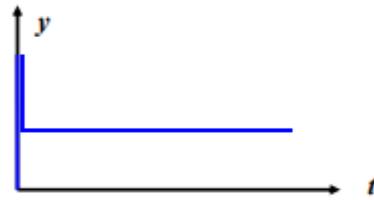
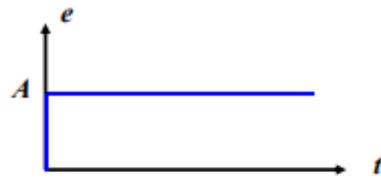
## (2) 比例微分控制 (PD)

理想的比例微分控制

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

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

理想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。



## 比例积分微分控制

### 3.1.5 比例积分微分控制 (PID)

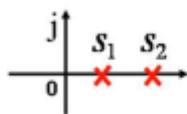
$$y = \frac{1}{P} \left( e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

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

□ 将比例、积分、微分三种控制规律结合在一起，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。

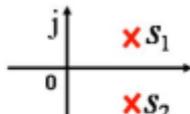
特征根在s平面上的分布  $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$

$\zeta \leq -1$



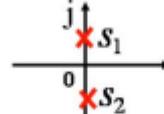
两正实根

$-1 < \zeta < 0$



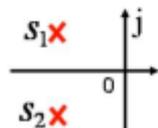
正实部的共轭复根

无阻尼  $\zeta = 0$



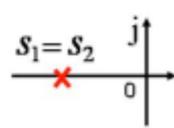
一对共轭虚根

欠阻尼  $0 < \zeta < 1$



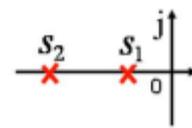
负实部的共轭复根

临界阻尼  $\zeta = 1$



相等的负实根

过阻尼  $\zeta > 1$



两不相等的负实根

## 例题

**作业** 对PID调节器而言，当积分常数 $T_I$ 趋近于无穷，微分常数 $T_D$ 等于0时，调节器呈\_\_\_\_调节特性。积分作用的特点是可以消除\_\_\_\_，但引入积分作用会使系统稳定度\_\_\_\_。假如调节系统在纯比例作用下已整定好，加入积分作用后，为了保持原稳定度，此时应将比例度\_\_\_\_\_。

比例；静差；下降；降低

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

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

## 四、简单控制系统的设计与参数整定

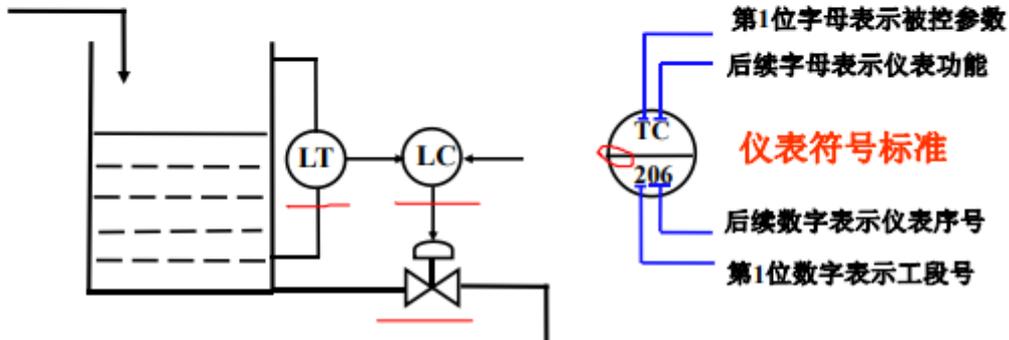
### 简单控制系统的结构与组成

指由一个测量变送器、一个控制器、一个控制阀和一个对象所构成的单闭环控制系统

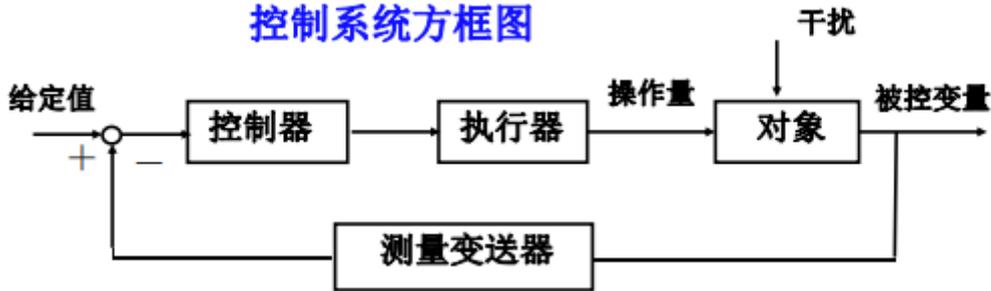
# 第6章 简单控制系统的设计与参数整定

## 6.1 简单控制系统的结构与组成

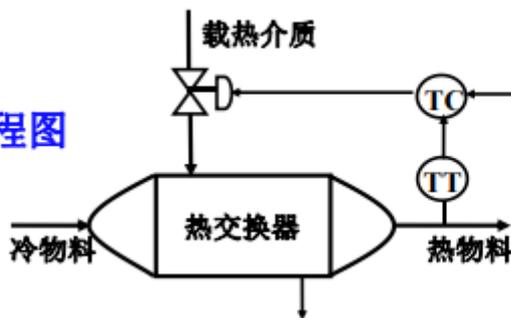
指由一个测量变送器、一个控制器、一个控制阀和一个对象所构成的单闭环控制系统。



控制系统方框图



带控制点的工艺流程图



## 简单控制系统设计

### 1. 过程控制系统方案设计的基本要求

生产过程对过程控制系统的要求可简要归纳为安全性、稳定性和经济性三个方面

### 2. 过程控制系统设计的主要内容

过程控制系统设计包括控制系统方案设计、工程设计、工程安装和仪表调校、调节器参数整定等四个主要内容

其中控制方案设计是控制系统设计的核心

### 3. 过程控制系统设计的步骤

1. 掌握生产工艺对控制系统的技术要求
2. 建立被控过程的数学模型
3. 确定控制方案

包括控制方式和系统组成结构的确定，是过程控制系统设计的关键步骤

4. 控制设备选型

5. 实验（或仿真）验证

## 被控参数与控制变量的选择

被控参数的选择

**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
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

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

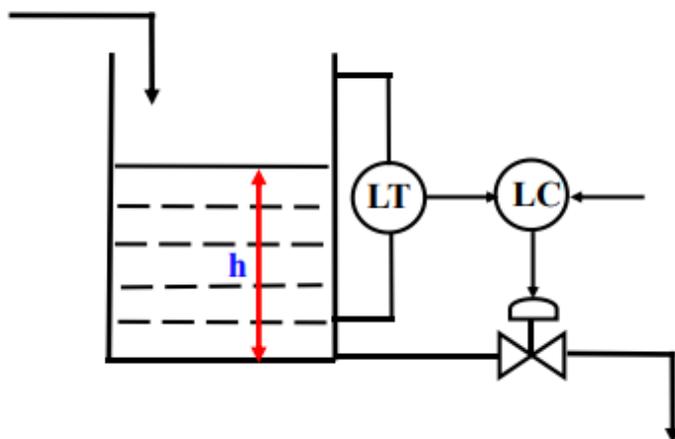
4. 选择被控变量时，必须考虑工艺合理性

下方例子中，选择塔内温度作被控变量，就是考虑了工艺上，它是最佳分离效率控制系统的被控变量

### 例题

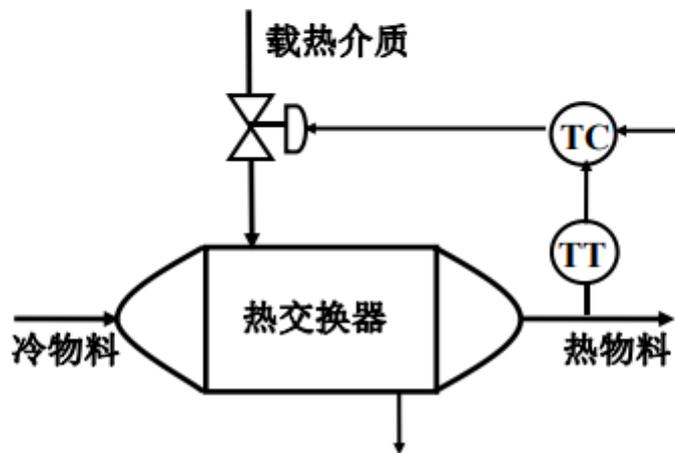
#### 例1 储槽液位控制系统

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。

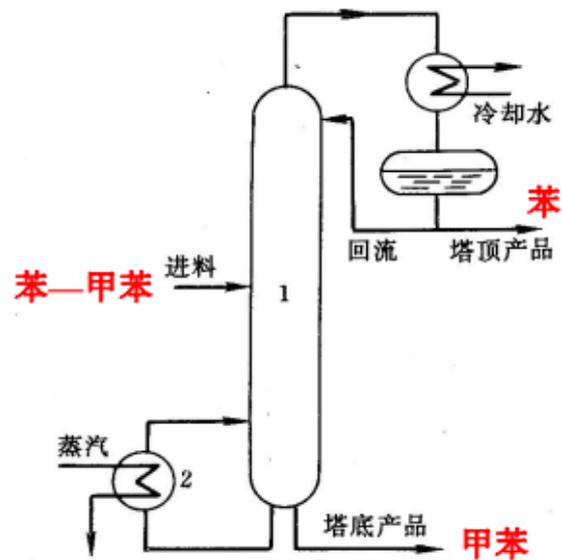


2、当不能用直接工艺参数作为被控变量时，应选择与直接工艺参数有单值函数关系的间接工艺参数作为被控变量。

## 例3 化工的精馏物纯度控制系统

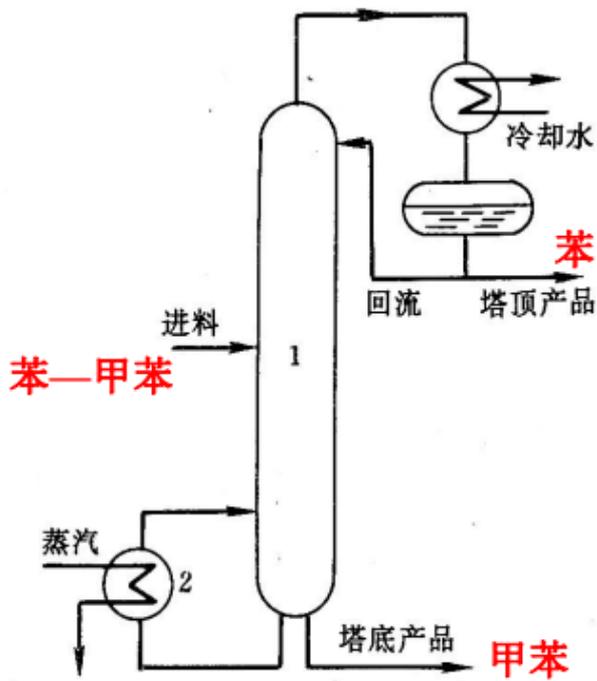
精馏工艺是利用被分离物中各组分的挥发温度不同，将各组分分离。

如图将苯—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

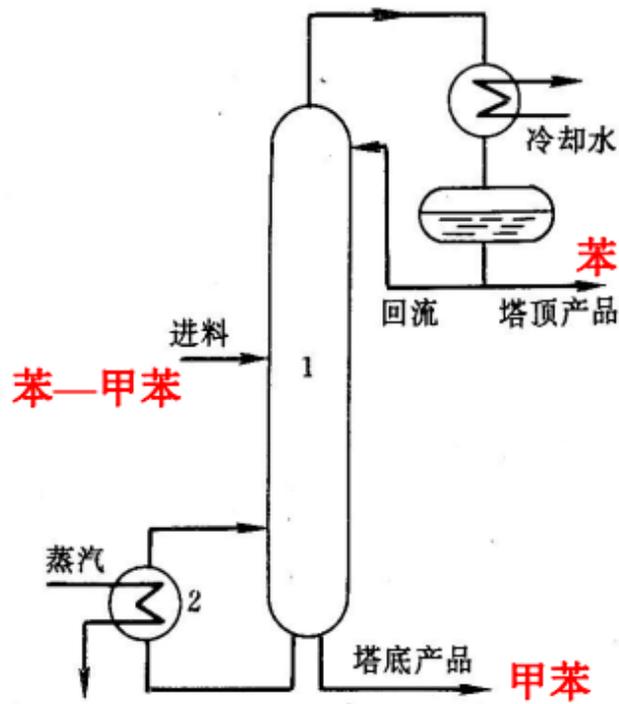


精馏过程示意图

1—精馏塔；2—蒸汽加热器

该精馏塔的工艺要求是要使塔顶（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。



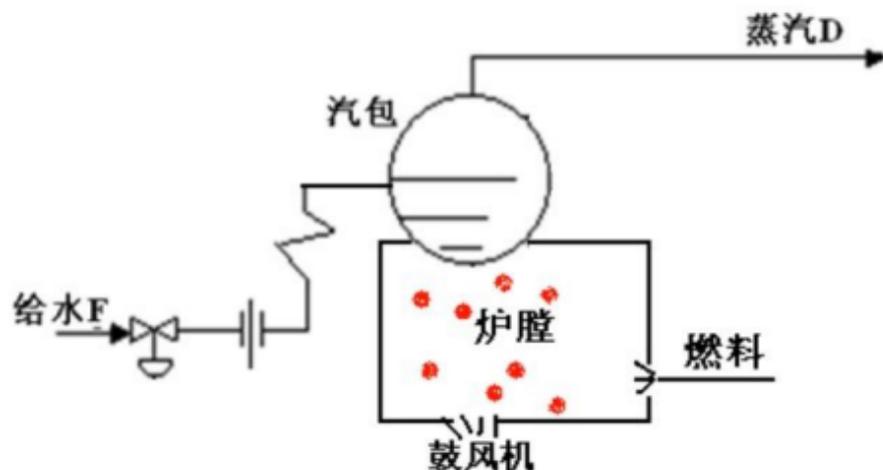
精馏过程示意图

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。

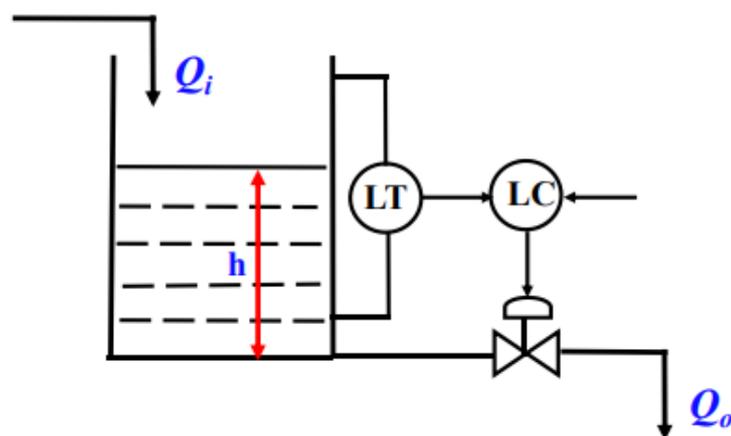
经工艺分析发现，塔内压力和塔内温度都对馏出物纯度有影响。需要对二者进行比较试验，选出一个合适的变量。

思考题：从燃烧经济性角度出发，应该选择什么被控参数？

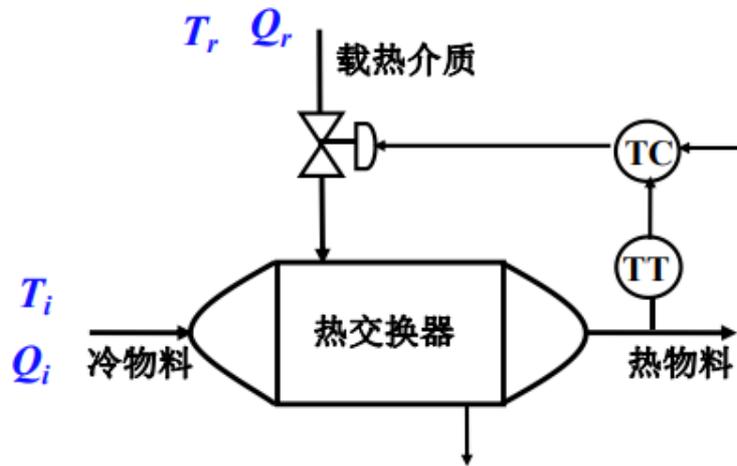


解答

例1中，影响储槽液位的主要因素有：液体流入量和液体流出量。这两个变量影响力相当，显然，液体流出量可控。故选液体流出量作为控制变量。

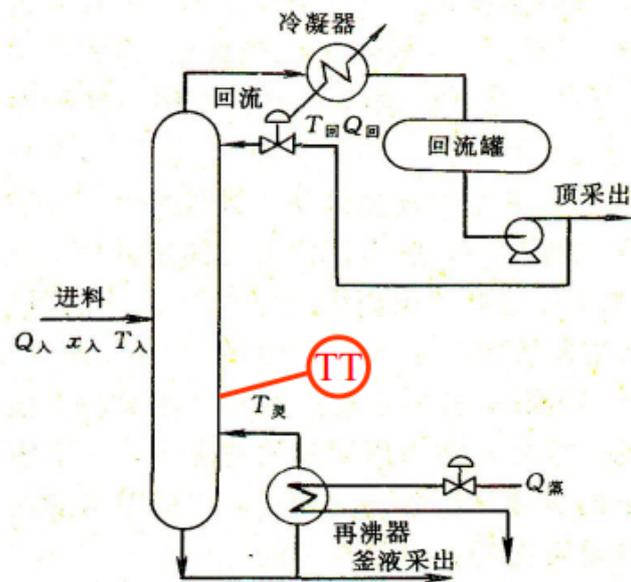


例2中，影响出口温度的主要因素有：载热介质温度、载热介质流量、冷物料温度、冷物料流量等。显然，载热介质流量影响力最大且可控。故选载热介质流量作为控制变量。



例3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 $T_{灵}$ 的因素主要有：

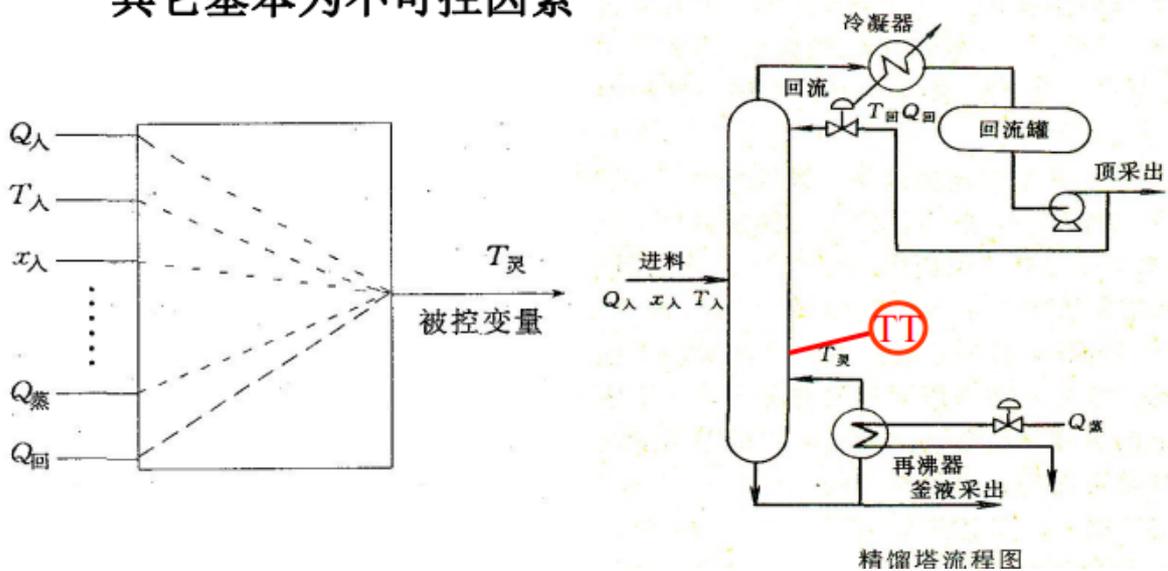
进料的流量 ( $Q_{\lambda}$ )、  
 进料的成分 ( $x_{\lambda}$ )、  
 进料的温度 ( $T_{\lambda}$ )、  
 回流的流量 ( $Q_{回}$ )、  
 回流的温度 ( $T_{回}$ )、  
 加热蒸汽流量 ( $Q_{蒸}$ )、  
 冷凝器冷却温度等。



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

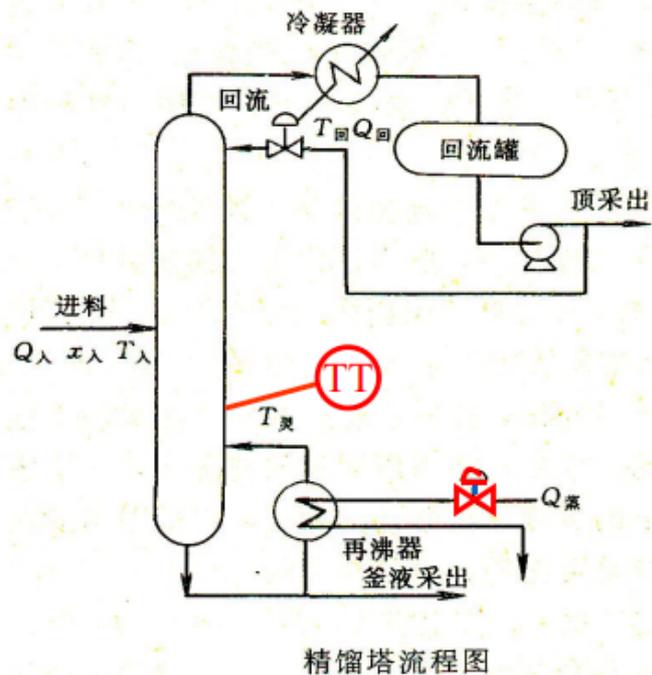


精馏塔流程图

在两个可控因素中，选蒸汽流量为操纵变量。

因为：

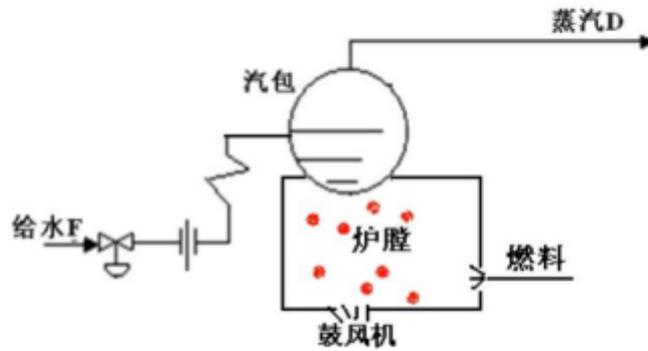
- 1、蒸汽流量对提馏段温度影响比回流量对提馏段温度影响更迅速、更显著。
- 2、从节能角度来讲，控制蒸汽流量比控制回流量消耗的能量要小。



精馏塔流程图

## 思考题：控制变量的选取

(1)



(2)

$$W_1(s) = \frac{3}{4s + 1} e^{-3s} \quad W_2(s) = \frac{4}{3s + 1} e^{-4s}$$

## 控制变量选择

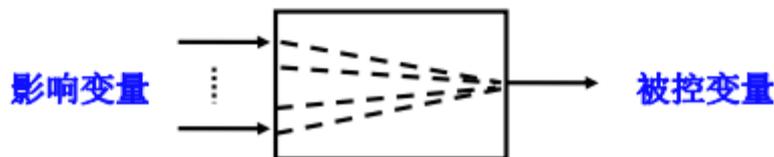
把用来克服干扰对被控变量的影响，实现控制作用的变量称为控制变量或操纵变量

最常见的操纵变量是介质的流量，也有以转速、电压等作为操纵变量的

### 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。



## 对象特性对控制品质影响的分析

1. 过程（通道）静态特性对控制品质的影响

如图所示为单回路控制系统的等效框图



$G_c(s)$  —控制器的传递函数;

$G_o(s)$  —广义控制通道的传递函数;

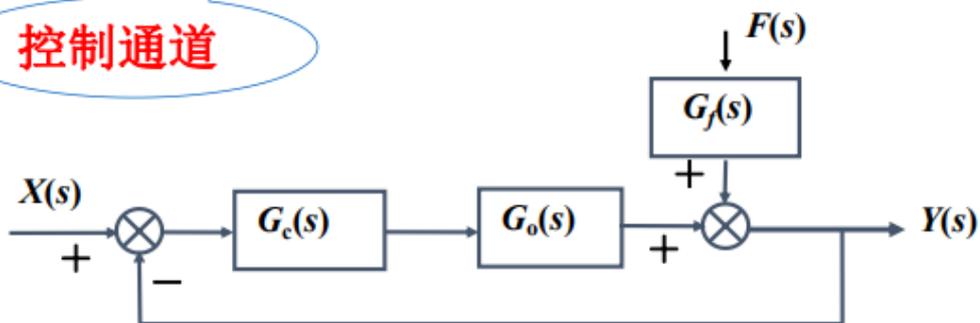
$G_f(s)$  —扰动通道的传递函数。

被控参数 $y(t)$ 受到设定信号 $x(t)$ 和干扰信号 $f(t)$ 的共同影响:

干扰通道

$$Y(s) = \frac{G_o(s)G_c(s)}{1 + G_o(s)G_c(s)} X(s) + \frac{G_f(s)}{1 + G_o(s)G_c(s)} F(s)$$

控制通道



将 
$$Y(s) = \frac{G_0(s)G_c(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)}X(s) + \frac{G_f(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)}F(s)$$

代入系统偏差公式中：

$$E(s) = X(s) - Y(s)$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_o(s)}X(s) - \frac{G_f(s)}{1 + G_c(s)G_o(s)}F(s) = \underbrace{E_x(s)}_{\dots\dots\dots} + \underbrace{E_f(s)}_{\dots\dots\dots}$$

可见，控制通道偏差和干扰通道偏差的传函分母是一样的。将  $G_c(s)$ 、 $G_o(s)$ 、 $G_f(s)$  代入：

$$G_c(s) = K_c \quad G_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} \quad G_f(s) = \frac{K_f}{T_f s + 1}$$

$$E_x(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_o(s)}X(s) = \frac{T_o s + 1}{(T_o s + 1) + K_o K_c}X(s)$$

$$E_f(s) = -\frac{G_f(s)}{1 + G_c(s)G_o(s)}F(s) = \frac{K_f(T_o s + 1)}{(T_o s + 1)(T_f s + 1) + K_o K_c(T_f s + 1)}F(s)$$

- ❖  $K_o$  越大，控制作用越强，稳态误差越小；
  - ❖  $K_o$  越大，被控变量对控制作用的反应越灵敏；
  - ❖  $K_f$  越大，干扰作用越强，稳态误差越大。
- 故应选放大系数大的变量作为控制变量。

2. 过程（通道）动态特性对控制品质的影响

## 2. 过程（通道）动态特性对控制品质的影响

### 1) 干扰通道动态特性对控制品质的影响

$$Y_f(s) = \frac{G_f(s)}{1 + G_c(s)G_o(s)} F(s) = \frac{K_f(T_o s + 1)}{(T_o s + 1)(T_f s + 1) + K_o K_c (T_f s + 1)} F(s)$$

干扰通道的惯性因子  $(T_f s + 1)$  使干扰作用的影响缓慢。

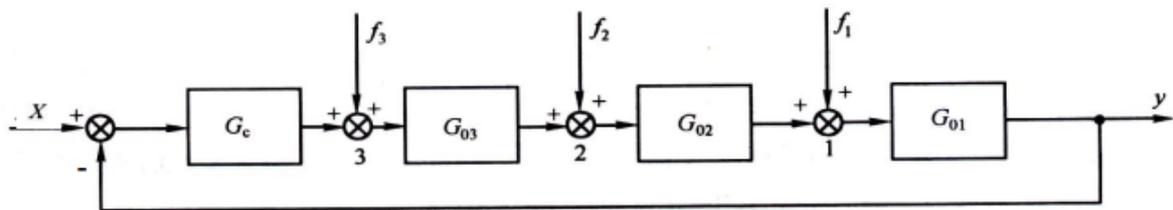
❖  $T_f$  越大，干扰对被控变量的影响越缓慢，越有利于控制。

❖ 干扰进入系统的位置离被控变量检测点越远，则  $T_f$  越大，控制时最大偏差越小。

### 例题

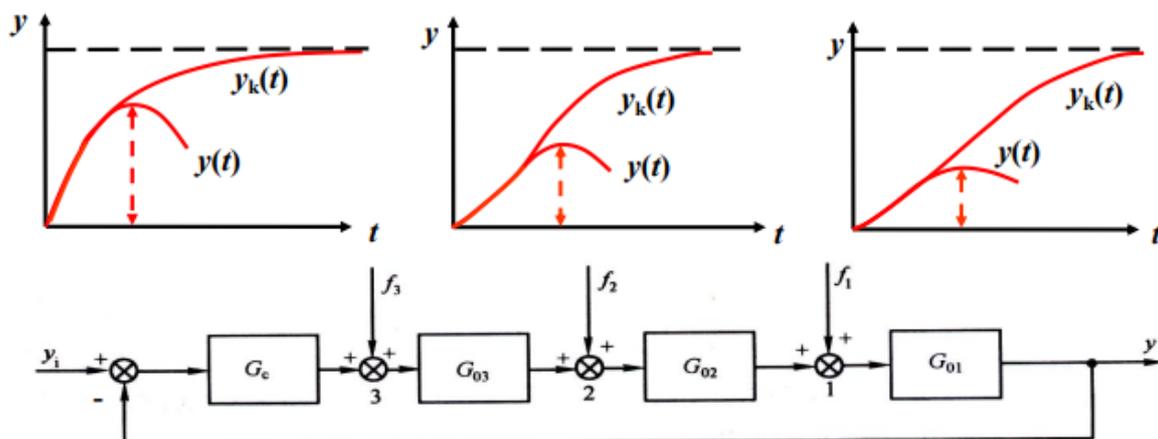
**例：**某控制系统中，干扰  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别在三个位置进入系统。干扰离被控变量检测点越远，则干扰通道的时间常数越大，对被控变量的影响越慢。

$$Y_f(s) = \frac{G_{01}(s)G_{02}(s)G_{03}(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)} F_3(s) + \frac{G_{02}(s)G_{01}(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)} F_2(s) + \frac{G_{01}(s)}{1 + G_0(s)G_c(s)} F_1(s)$$



$f_1(t)$ 通道惯性小，受干扰后被调参数变化速度快；当控制作用见效时，被调参数已经变化较大——造成动态偏差较大。

所以扰动进入系统的位置离被控参数检测点越远，干扰对被控参数影响越小。

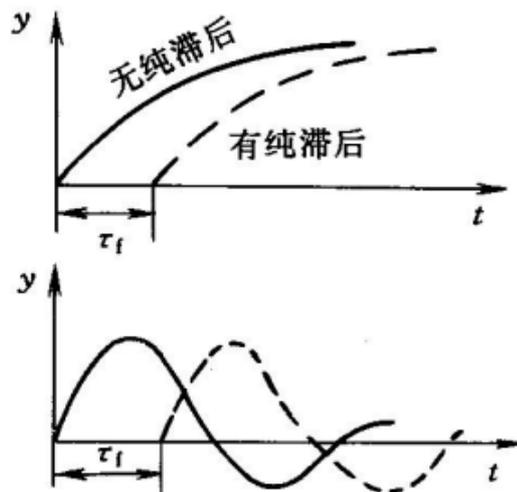


❖ 干扰通道纯滞后 $\tau_f$ 不影响控制质量。

$$Y_f(s) = \frac{G_f(s)}{1 + G_c(s)G_o(s)} F(s) \quad \text{含有 } e^{-\tau_f s}$$

$$= \frac{K_f(T_o s + 1)}{(T_o s + 1)(T_f s + 1) + K_o K_c(T_f s + 1)} F(s)$$

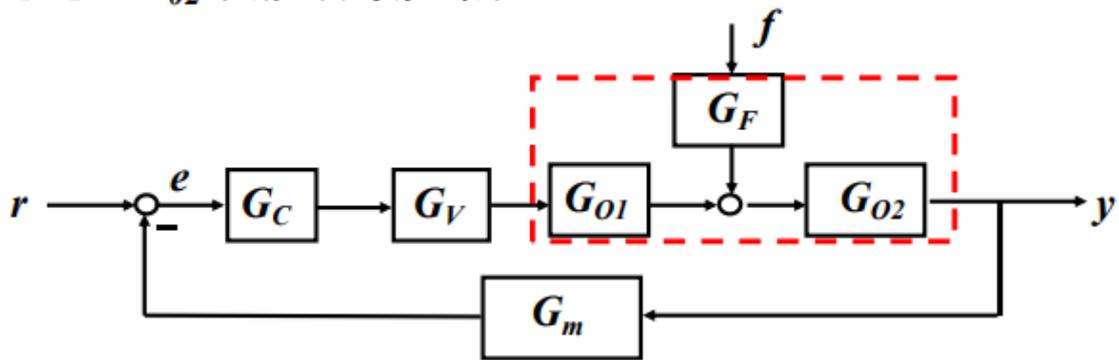
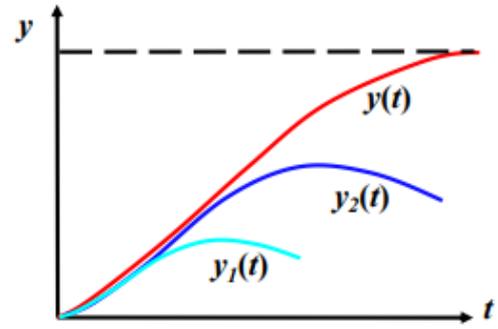
因为， $\tau_f$ 使干扰对被控变量的影响推迟了 $\tau_f$ 时间，则控制作用也推迟 $\tau_f$ 时间，整个过渡过程曲线也推迟时间 $\tau_f$ ，但控制品质未变。



## 2) 控制通道动态特性对控制品质的影响

❖ 控制通道 $G_{01}$ 的时间常数 $T_{01}$ 增大，使控制速度变慢，最大偏差增大。

❖  $G_{02}$ 是控制、干扰共用通道， $T_{02}$ 不影响最大偏差。



因此，控制通道时间常数 $T_0$ 小一些好。表明控制变量对被控变量的影响迅速，有利于控制。

控制通道纯滞后 $\tau_0$ 越小越好。 $\tau_0$ 会使控制时间延长、最大偏差增大。

### 控制变量的选择原则

1. 控制变量应是可控的，即工艺上允许调节的变量
2. 控制变量一般应比其他干扰对被控变量的影响灵敏。因此，控制通道应当放大系数大、时间常数小、纯滞后越小越好
3. 为使其他干扰对被控变量的影响减小，应使干扰通道的放大系数尽可能小、时间常数尽可能大，扰动引入系统的位置要远离被控变量，尽可能靠近调节阀
4. 被控过程存在多个时间常数，在选择设备及控制参数时，应尽量使时间常数错开，使其中一个时间常数比其他时间常数大很多，同时注意减少其他时间常数
5. 选择控制变量时，还要考虑工艺的合理性与生产效率及生产过程的经济性

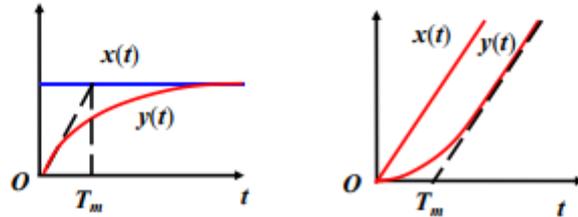
## 检测环节、执行器及调节器正负作用选择

### 传感器、变送器选择

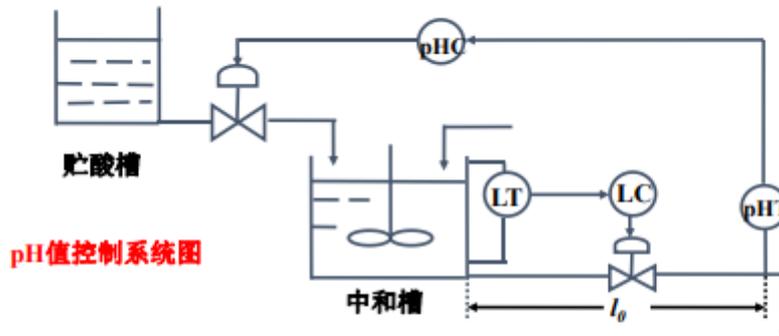
## 6.2.3检测环节、执行器及调节器正负作用选择

### 6.2.3.1传感器、变送器选择

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。



3. 合理选择检测点，避免测量造成对象纯滞后 $\tau_0$



### 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。

执行器的选择

### 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。

# 五、执行器

执行器是自动控制系统中的重要组成部分，它将控制器送来的控制信号转换成执行动作，从而操纵进入设备的能量，将被控变量维持在所要求的数值上或一定的范围内

执行器有自动调节阀门、自动电压调节器、自动电流调节器、控制电机等

其中自动调节阀门是最常见的执行器，种类繁多

## 执行器的分类

自动调节阀按照工作所用能源形式可分为

- 电动调节阀：电源配备方便，信号传输快、损失小，可远距离传输；但推力较小
- 气动调节阀：结构简单，可靠，维护方便，防火防爆；但气源配备不方便
- 液动调节阀：用液压传递动力，推力最大；但安装、维护麻烦，使用不多

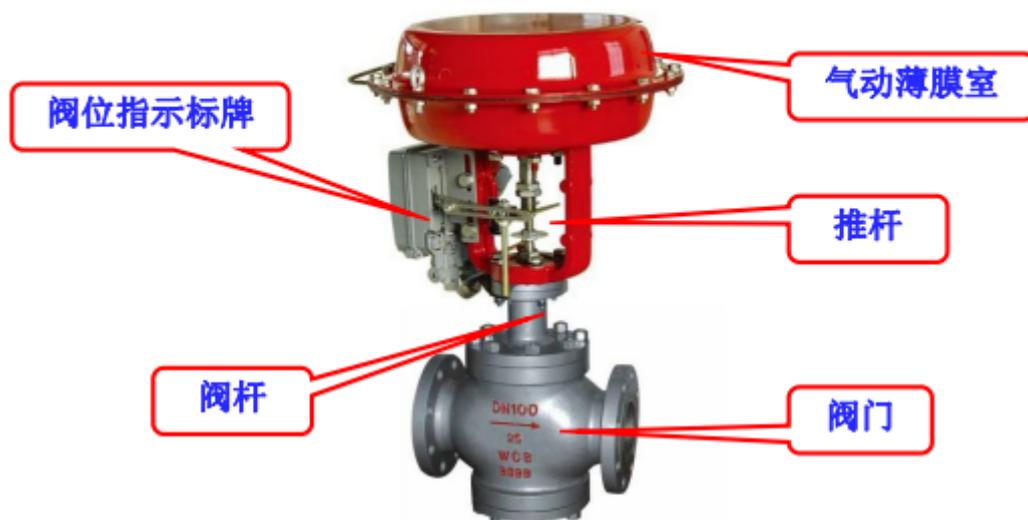
工业中使用最多的是气动调节阀和电动调节阀

## 气动调节阀

气动调节阀是由气压信号控制的阀门

### 4.1.1 气动调节阀

气动调节阀是由气压信号控制的阀门。



气动调节阀的结构与分类

气动调节阀由执行机构和调节机构（阀）两部分组成

- 执行机构是推动装置，它是将信号压力的大小转换为阀杆位移的装置
- 调节机构是阀门，它将阀杆的位移转换为流通面积的大小

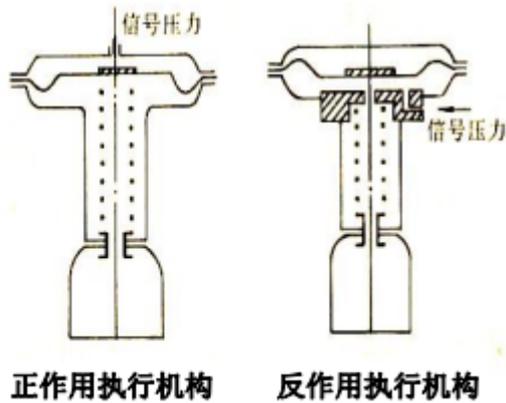
## 执行机构

执行机构按调节器输出的控制信号，驱动调节机构动作

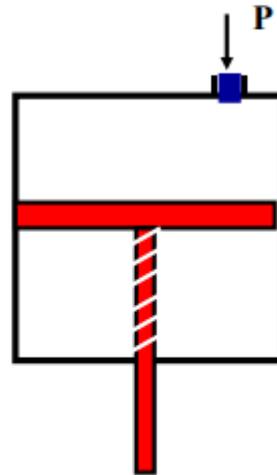
气动执行机构的输出方式有角行程输出和直行程输出两种

直行程输出的气动执行机构有两类。

### 薄膜式执行机构



### 气动活塞式执行机构

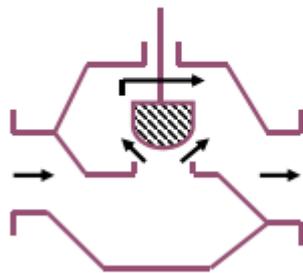


## 调节机构

调节机构就是阀门，是一个局部阻力可以改变的节流元件

根据不同的使用要求，阀门的结构型式很多

### (1) 直通单座阀

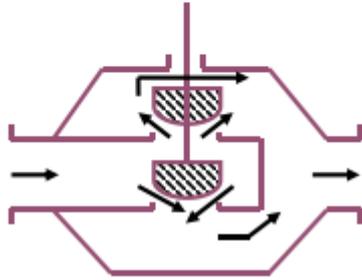


- 结构简单、泄漏量小。
- 流体对阀芯的不平衡作用力大。一般用在小口径、低压差的场合。

## (2) 直通双座阀

阀体内有两个阀芯和阀座。

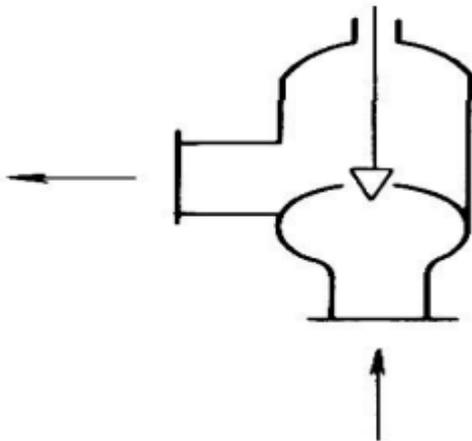
□ 流体流过时，作用在上、下两个阀芯上的推力方向相反且大小相近，可以互相抵消，所以不平衡力小。



□ 但是，由于加工的限制，上下两个阀芯阀座不易保证同时密闭，因此泄漏量较大。

## (3) 角形控制阀

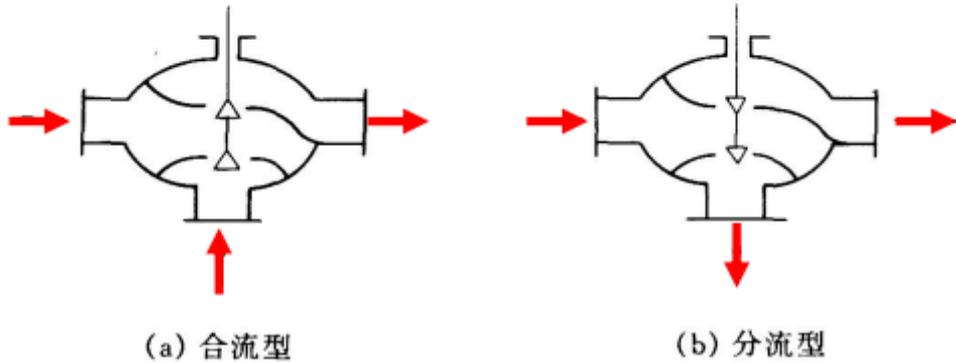
两个接管呈直角形，一般为底进侧出，这种阀的流路简单、对流体的阻力较小。



□ 适用于现场管道要求直角连接，介质为高粘度、高压差和含有少量悬浮物和固体颗粒状的情况。

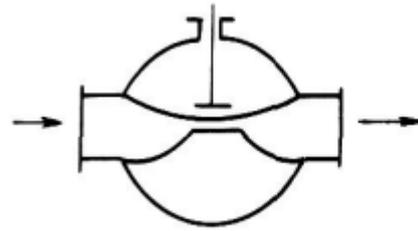
#### (4) 三通控制阀

有三个出入口与工艺管道连接。流通方式有合流型（两种介质混合成一路）和分流型（一种介质分成两路）两种。适用于配比控制与旁路控制。



#### (5) 隔膜控制阀

采用耐腐蚀材料作隔膜，将阀芯与流体隔开。

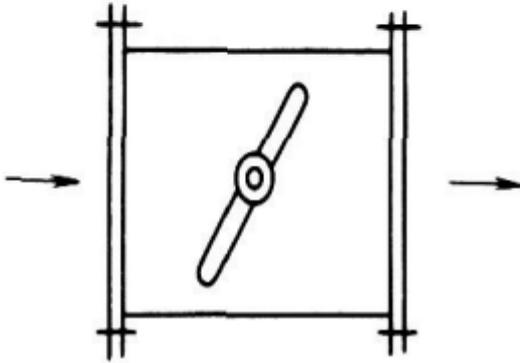


- 结构简单、流阻小、流通能力比同口径的其他种类的阀要大。由于介质用隔膜与外界隔离，故无填料，介质也不会泄漏。
- 耐腐蚀能力强，适用于强酸、强碱、强腐蚀性介质的控制，也能用于高粘度及悬浮颗粒状介质的控制。

## (6) 蝶阀

又名翻板阀。

结构简单、重量轻、流阻极小，但泄漏量大。

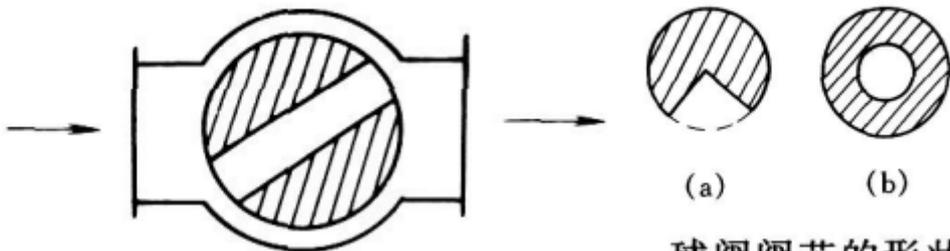


□ 适用于大口径、大流量、低压差的场合，也可以用于含少量纤维或悬浮颗粒状介质的控制。

## (7) 球阀

阀芯与阀体都呈球形，阀芯内开孔。转动阀芯使之与阀体处于不同的相对位置时，就有不同的流通面积。

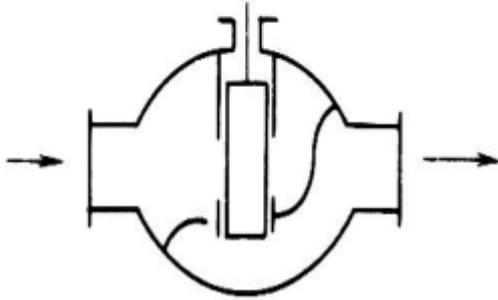
□ 流量变化较快，可起控制和切断的作用，常用于双位式控制。



球阀阀芯的形状

### (8) 笼式阀

阀内有一个圆柱形套筒（笼子）。套筒壁上有一个或几个不同形状的孔（窗口），利用套筒导向，阀芯在套筒内上下移动，改变阀的节流孔面积。

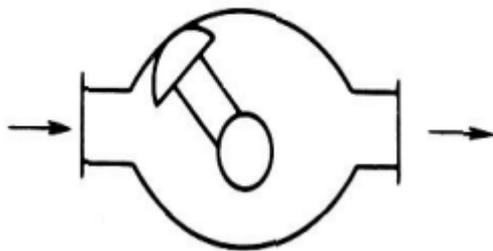


□ 可调比大，不平衡力小，更换开孔不同的套筒，就可得到不同的流量特性。但不适于高粘度或带有悬浮物的介质流量控制。

### (9) 凸轮挠曲阀

又名偏心旋转阀。其阀芯呈扇形球面状，与挠曲臂及轴套一起铸成，固定在转动轴上。

□ 阀芯球面与阀座密封圈紧密接触，密封性好。适用于高粘度或带有悬浮物的介质流量控制。



调节阀除了结构类型的不同外，其它的主要技术参数是流量特性和口径。

## 调节阀的流量特性

### 4.1.1.2 调节阀的流量特性

调节阀的阀芯位移与流量之间的关系，对控制系统的调节品质有很大影响。

流量特性的定义：

被控介质流过阀门的相对流量与阀门的相对开度（相对位移）间的关系称为调节阀的流量特性。

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{L}\right)$$

$Q/Q_{\max}$ —相对流量

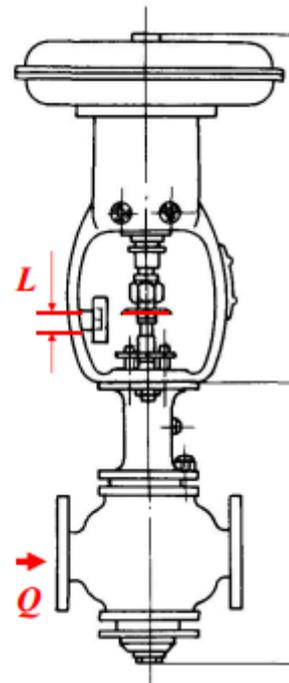
$l/L$ —相对开度

相对流量 $Q/Q_{\max}$ 是控制阀某一开度流量 $Q$ 与全开时流量 $Q_{\max}$ 之比；

相对开度 $l/L$ 是控制阀某一开度行程 $l$ 与全开行程 $L$ 之比。

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{L}\right)$$

调节阀的流量特性不仅与阀门的结构和开度有关，还与阀前后的压差有关，必须分开讨论。



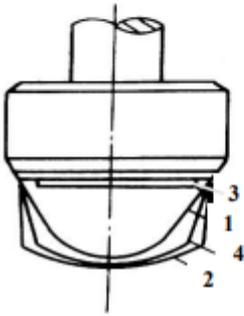
### 固有（理想）流量特性

- 直线特性
- 等百分比特性
- 快开特性
- 抛物线特性

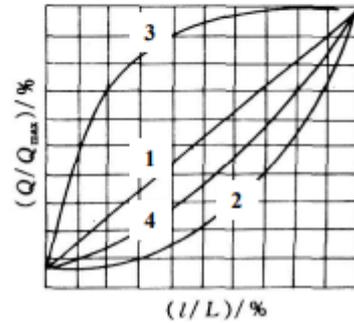
为了便于分析，先将阀前后压差固定，然后再引伸到实际工作情况，于是有**固有流量特性**与**工作流量特性**之分

### 1、固有（理想）流量特性

在将控制阀前后压差固定时得到的流量特性称为**固有流量特性**。它取决于阀芯的形状。



- (1) 直线特性
- (2) 等百分比特性
- (3) 快开特性
- (4) 抛物线特性

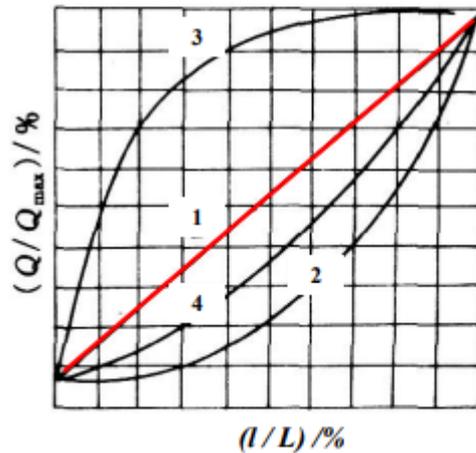


#### (1) 直线流量特性

控制阀的相对流量与相对开度成直线关系，即单位位移变化所引起的流量变化是常数。用数学式表示为：

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \frac{l}{L} + \frac{1}{R}$$

$R$  — 调节阀的可调比系数。

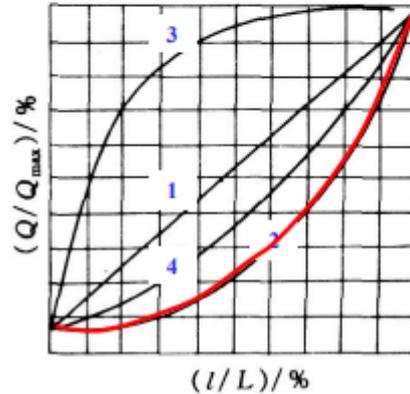


## (2) 等百分比（对数）流量特性

相对流量变化与引起此流量变化的阀门相对开度变化之间的比值，和此点的相对流量成正比关系：

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = R \left( \frac{l}{L} \right)^{1/R}$$

❖ 曲线斜率（放大系数）随行程的增大而增大。流量小时，流量变化小；流量大时，流量变化大。

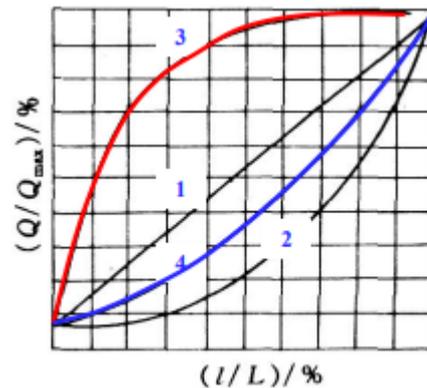


## (3) 快开特性

开度较小时就有较大流量，随开度的增大，流量很快就达到最大，故称为快开特性。适用于迅速启闭的切断阀或双位控制系统。

## (4) 抛物线流量特性

特性曲线为抛物线，介于直线和对数曲线之间，使用较少。

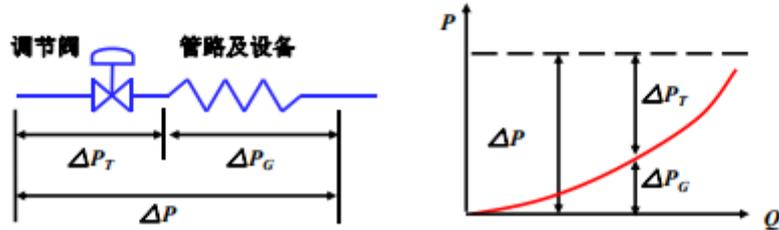


## 2、调节阀的工作流量特性

实际使用时，调节阀装在具有阻力的管道系统中。管道对液体的阻力随流量而变化，阀前后压差也是变化的，这时流量特性会发生畸变。

例：管道串联时的工作流量特性

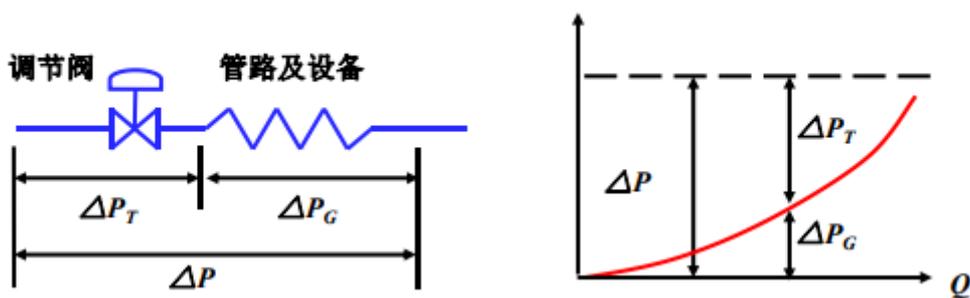
如图，管道系统总压力 $\Delta P$ 等于管路系统的压降 $\Delta P_G$ 与控制阀的压降 $\Delta P_T$ 之和。



从串联管道中调节阀两端压差 $\Delta P_T$ 的变化曲线可看出，调节阀全关时阀上压力最大，基本等于系统总压力；调节阀全开时阀上压力降至最小。

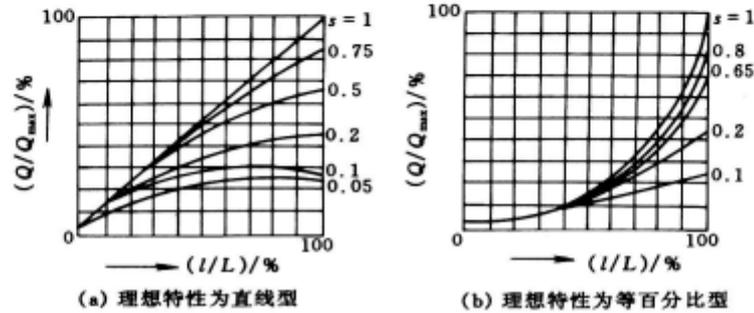
为了表示调节阀两端压差 $\Delta P_T$ 的变化范围，以阀权度 $s$ 表示调节阀全开时，阀前后最小压差 $\Delta P_{Tmin}$ 与总压力 $\Delta P$ 之比。

$$s = \Delta P_{Tmin} / \Delta P$$



## 结论

- ❑ 串联管道使调节阀的流量特性发生畸变。
- ❑ 串联管道使调节阀的流量可调范围降低，最大流量减小。
- ❑ 串联管道会使调节阀的放大系数减小，调节能力降低， $s$ 值低于0.3时，调节阀能力基本丧失。



## 调节阀的选择

选用调节阀时，一般应考虑以下几个方面

### 调节阀结构的选择

通常根据工艺条件，如使用温度、压力，介质的物理、化学特性（如腐蚀性、粘度等），对流量的控制要求等，来选择调节阀的结构形式

例如，一般介质条件选用直通单座阀或直通双座阀；高压介质选用高压阀；强腐蚀介质采用隔膜阀等

### 气开式与气关式的选择

气动调节阀在气压信号中断后阀门会复位

无压力信号时阀全开，随着信号增大，阀门逐渐关小的称为气关式

反之，无压力信号时阀全闭，随着信号增大，阀门逐渐开大称为气开式

❖ 阀门气开气关式的选择原则：

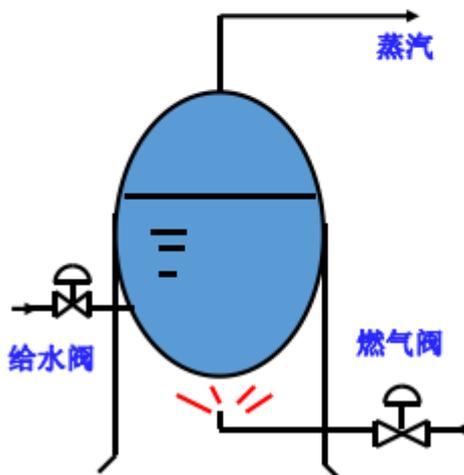
当控制信号中断时，阀门的复位位置能使工艺设备处于安全状态。

例如：

选择蒸汽锅炉的控制阀门时，为保证失控时不能烧干：

给水阀应选气关式

燃气阀应选气开式

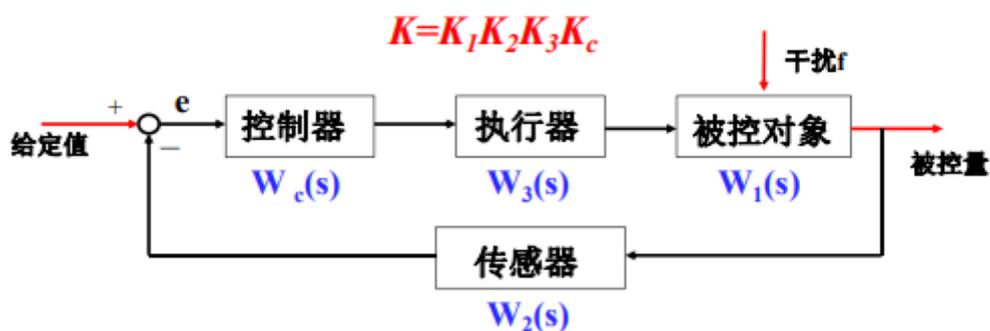


### 调节阀流量特性的选择

保证控制品质的重要因素之一是：保持控制系统的总放大倍数在工作范围内尽可能恒定

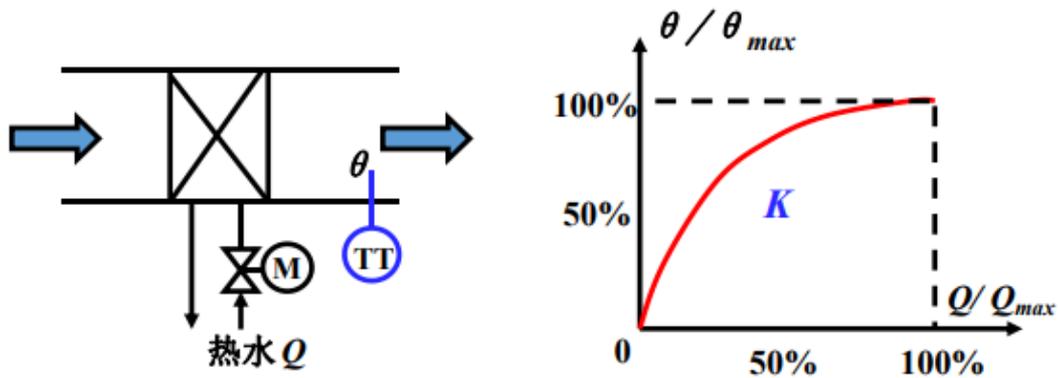
#### 3. 调节阀流量特性的选择

保证控制品质的重要因素之一是：保持控制系统的总放大倍数在工作范围内尽可能恒定。



有的被控对象的放大倍数，在不同的工艺点不同。

## 如热水加热器的热水流量与送风温度的静特性



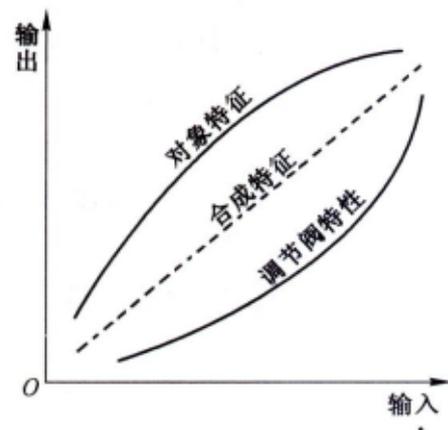
由图可见，随着热水流量增大，对送风的加热效果越来越差。因为热交换需要时间，热水很快流走，不能充分热交换所致。但若用蒸汽加热，由于冷凝放热很快，该特性为直线特性。

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。



## 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

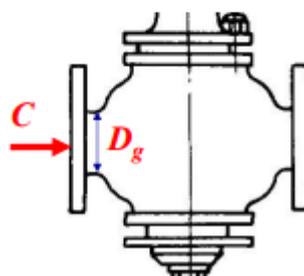
调节阀的流通能力用 $C$ 值表示

### 流通能力系数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 ( $\text{m}^3 / \text{h}$ )。

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。



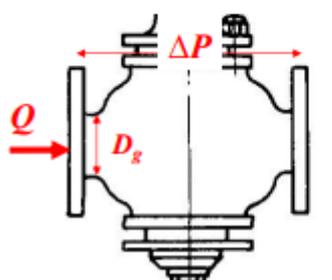
### C值的计算

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

将流量系数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

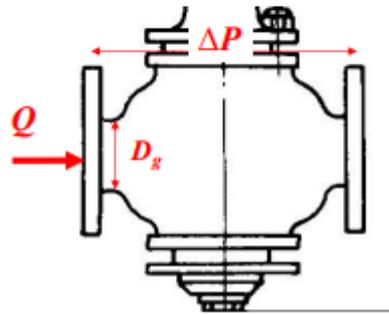
$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{10 \Delta P}}$$

## (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。

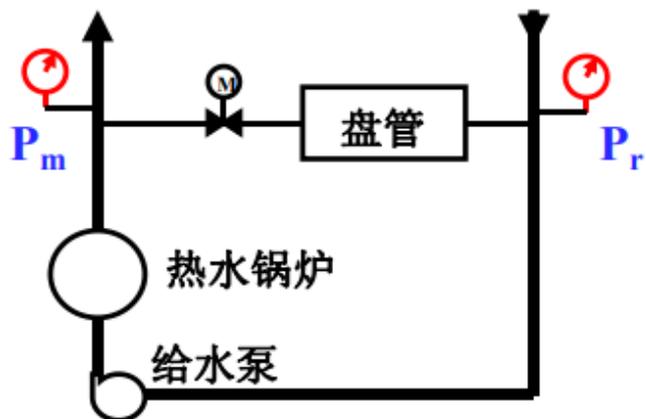


### 例题

**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 $80^\circ\text{C}$ ， $P_m-P_r=2.0\times 100\text{kPa}$ ，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 $s=0.5$ ， $80^\circ\text{C}$ 热水的密度 $\rho=971\text{Kg}/\text{m}^3$ )

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

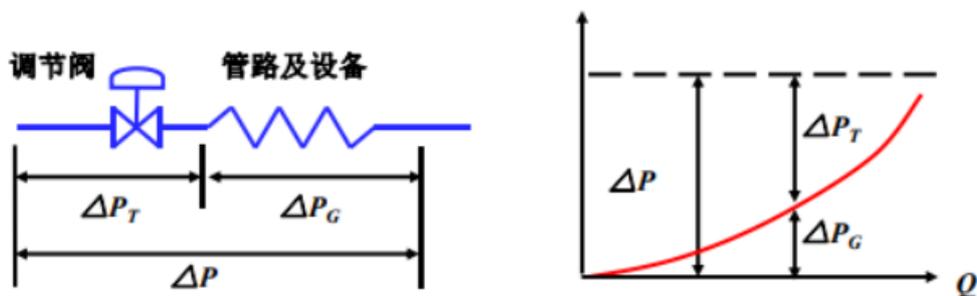


$$C = Q\sqrt{\frac{\rho}{10\Delta P}} = 31 * \sqrt{\frac{971}{10*2*100*0.5}} \approx 30.547$$

注意管配 $s=0.5$

为了表示调节阀两端压差 $\Delta P_T$ 的变化范围，以阀权度 $s$ 表示调节阀全开时，阀前后最小压差 $\Delta P_{Tmin}$ 与总压力 $\Delta P$ 之比。

$$s = \Delta P_{Tmin} / \Delta P$$



## 其他类型调节阀

### 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

#### 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。

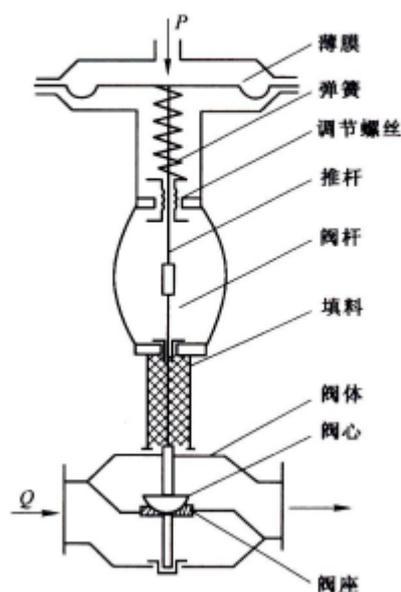


## 阀门定位器

### 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。



## 电动调节阀

### 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。



## 智能式调节阀

### 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

智能电动执行机构



## 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”

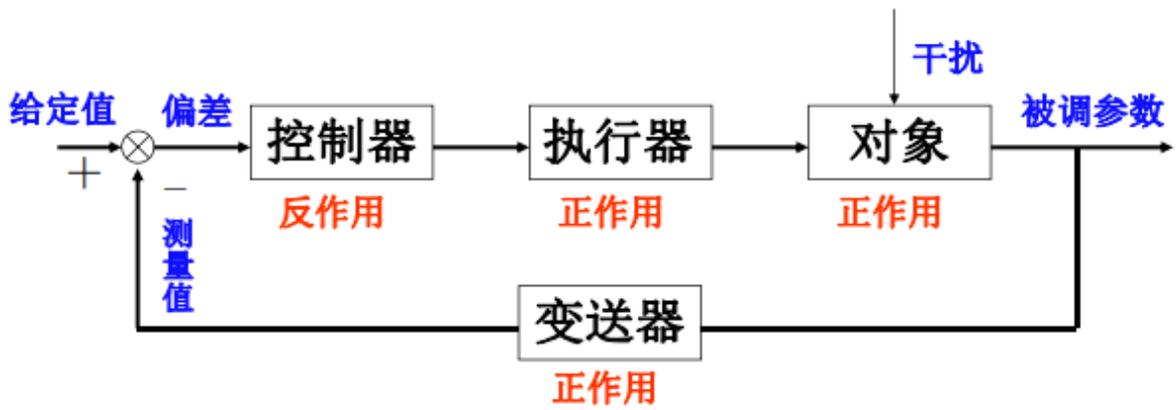
反之，称为“反作用”

按此定义：

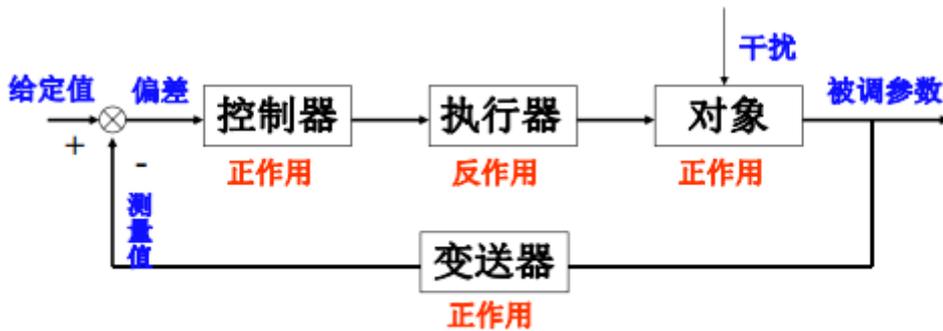
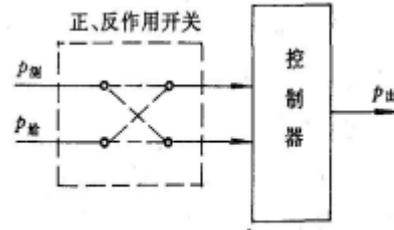
- 变送器都是正作用
- 气开阀是正作用，气关阀是反作用
- 被控对象有的正作用，有的反作用
- **控制器作用方向以测量输入与输出的关系定义**

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

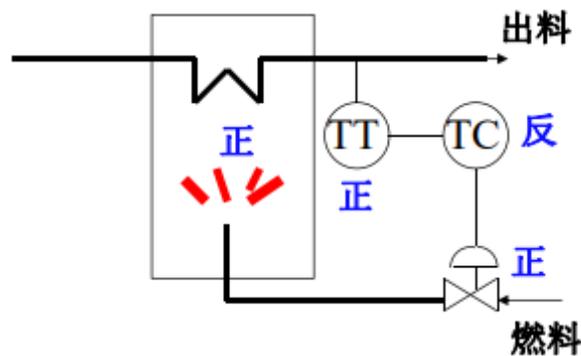


调节器正反作用的确定原则：**保证系统构成负反馈**  
 简单的判定方法：**闭合回路中有奇数个反作用环节。**



### 例题

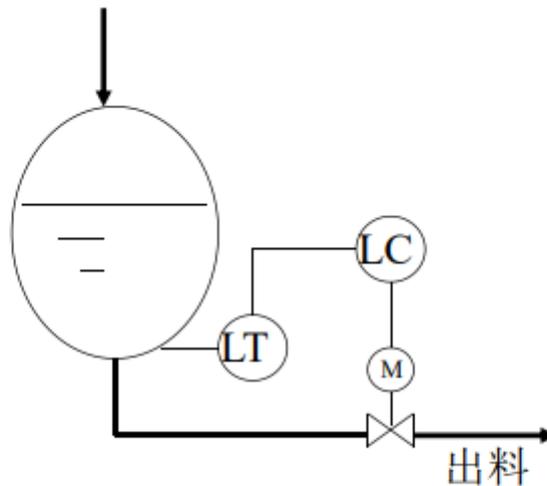
例1：加热炉出口温度控制系统（气开阀）



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（液位不能为0）



负反馈验证：

设某时刻进料量↑→液位↑→LC输入↑  
→LC输出↑→阀开大→出料量↑→液位↓

## 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

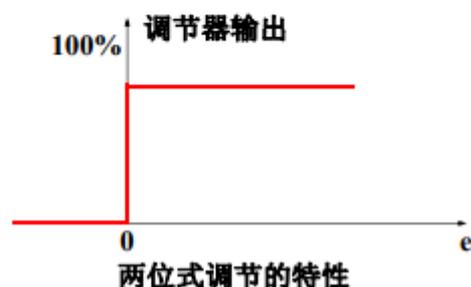
### 6.3.1 调节规律对控制品质影响的分析

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：

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

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

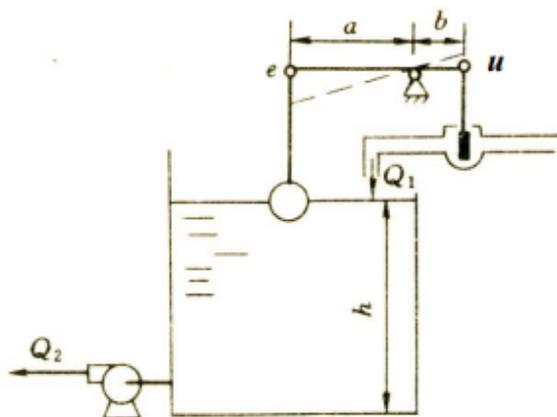
比例度就是控制器输入偏差的相对变化值与相应的输出相对变化值之比。

#### 例题

#### 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。



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

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

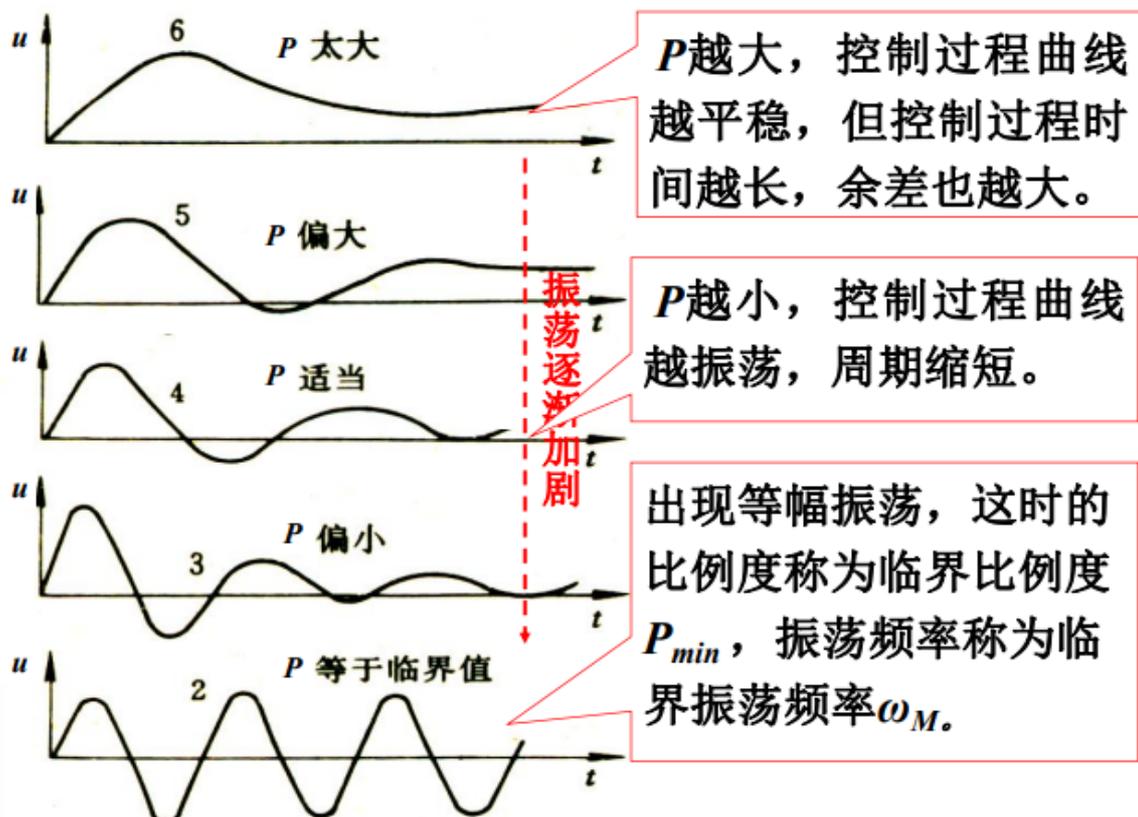
$$u(t) = \frac{1}{P} e(t)$$

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。



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  $\omega_M$

而被控对象的特性决定了控制系统  $P_{min}$  和  $\omega_M$  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 $\omega_M$ 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 $\omega_c$ 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 $\Delta e$ 的阶跃时:

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

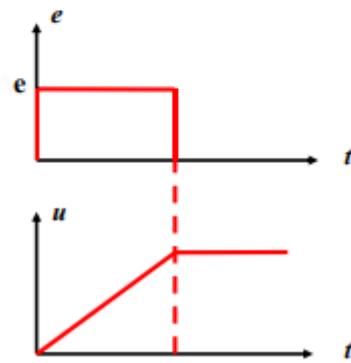


## ❖ 积分控制的特点

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)

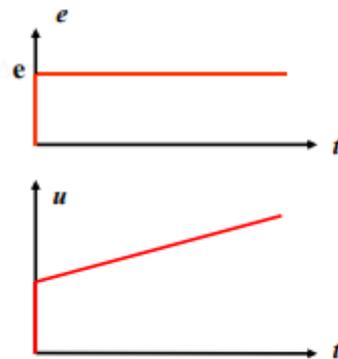
将比例与积分组合起来，这样既控制及时，又能消除余差，可以用于控制精度要求高的场合。

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

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

若偏差是幅值为 $\Delta e$ 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

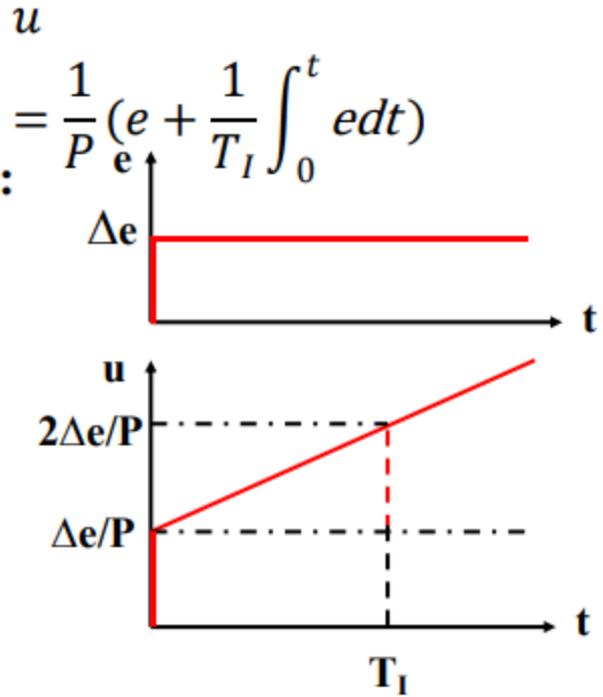
积分时间的物理意义：

若偏差是幅值为  $\Delta e$  的阶跃：

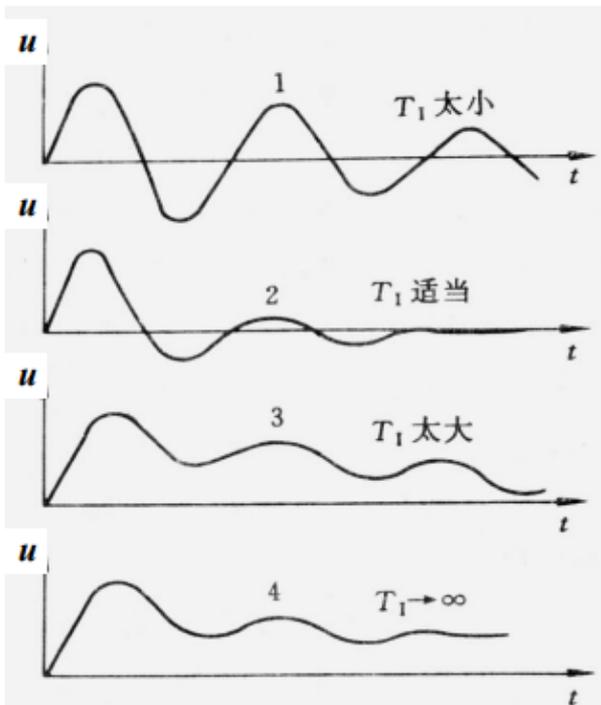
$$u = \frac{1}{P} \Delta e \left( 1 + \frac{1}{T_I} t \right)$$

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

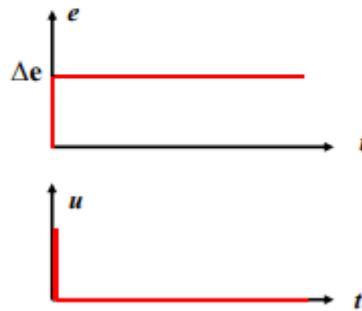
对于惯性较大的对象，常常希望能加快控制速度，此时可增加微分作用。

#### 1 微分控制（D）

理想微分  $u = T_D \frac{de}{dt}$

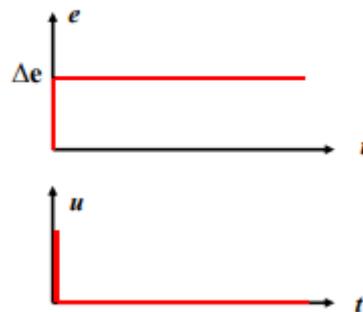
式中： $T_D$ —微分时间

$\frac{de}{dt}$ —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。

❖ **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。

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

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

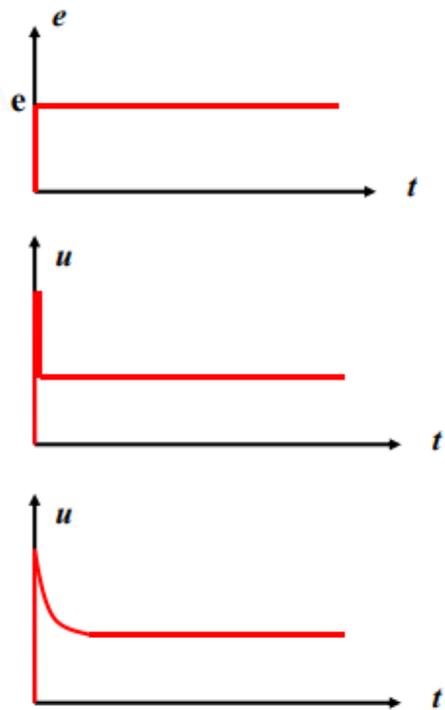
## 2 比例微分控制 (PD)

理想的比例微分控制

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

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

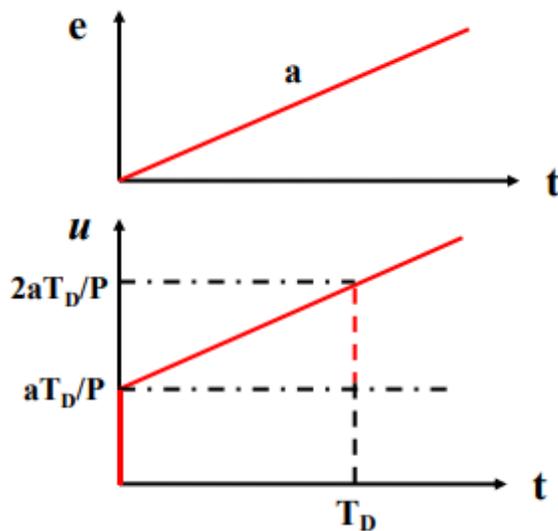
理想的微分作用持续时间太短，执行器来不及响应。一般使用实际的比例微分作用。



### □ 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

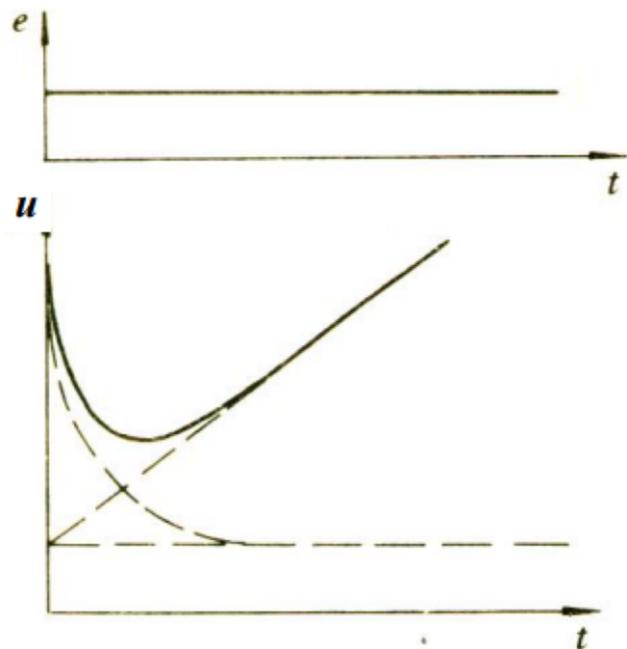
**缺点：**偏差存在但不变化时，无控制作用。

□ 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。

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

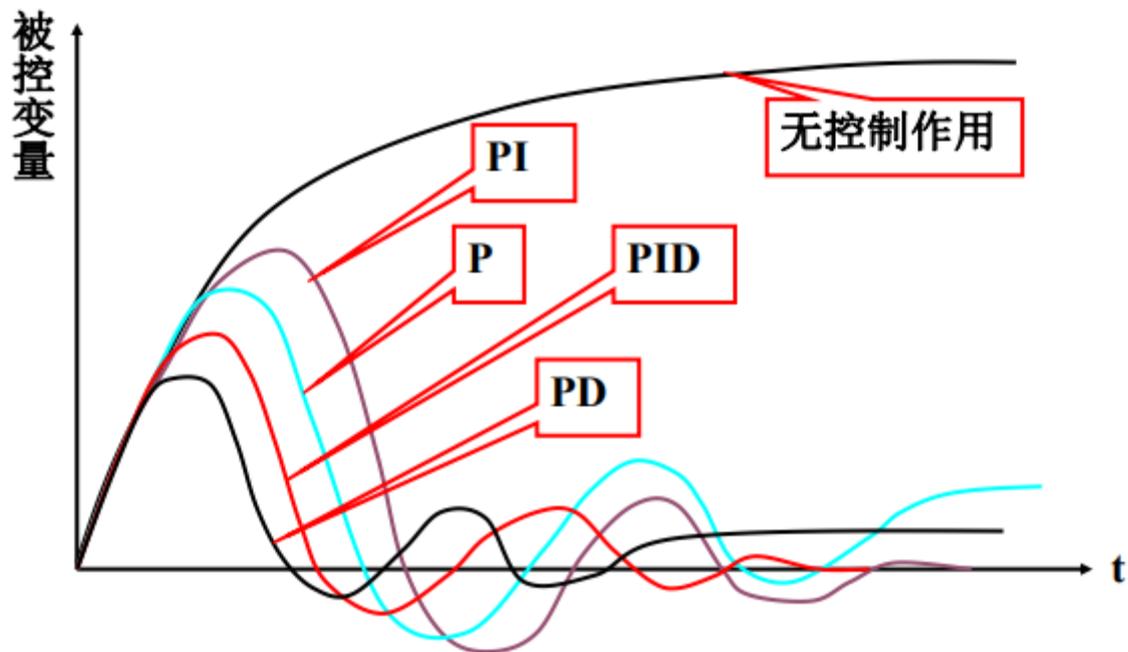
$$G(s) = \frac{1}{P} \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

□ 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。



#### 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

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性，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。

## 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

### 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

### 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：

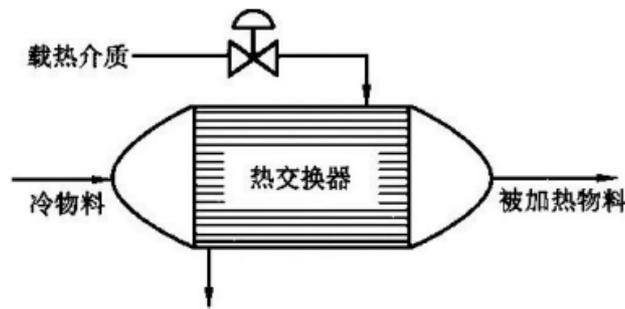
1. 系统先由自动控制转入手动遥控
2. 再进行手动操作

## 例题

- 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？

- 答：这种设想不合理，因为信号传递滞后是纯滞后，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 $1^{\circ}\text{C}$ ，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。



## 控制器参数整定

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

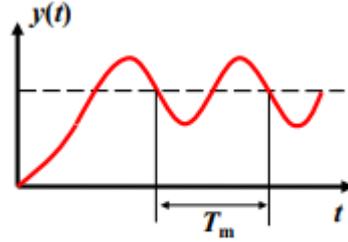
## 稳定边界法

### 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 $P$  ( $\delta$ )  $\rightarrow$  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。

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允许。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。

## 衰减曲线法

### 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：

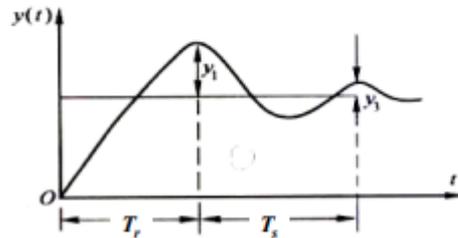
(1) 把调节器设成比例作用 ( $T_i = \infty$ ,  $T_d = 0$ )，置于较大比例度，投入自动运行。

(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

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

表6.3  
衰减比为10:1时，  
整定参数计算表

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

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

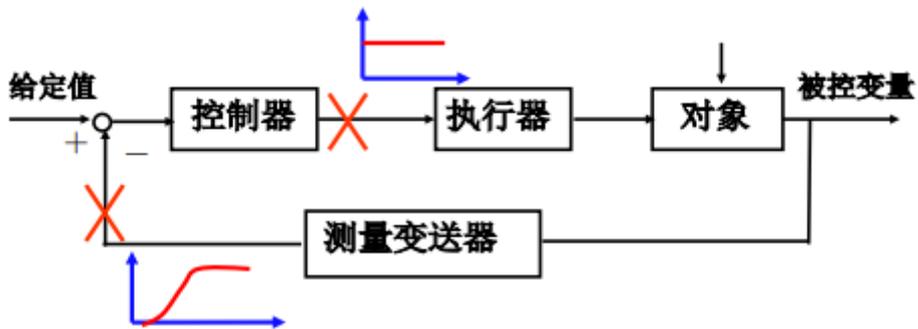
缺点：不易准确确定衰减程度（衰减比为4:1或10:1），从而较难得到准确的 $P_s$ 及周期 $T_s$

## 响应曲线法

### 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 $K_0$ 、 $T_0$ 、 $\tau_0$ ，用表6-4的经验公式求整定参数。

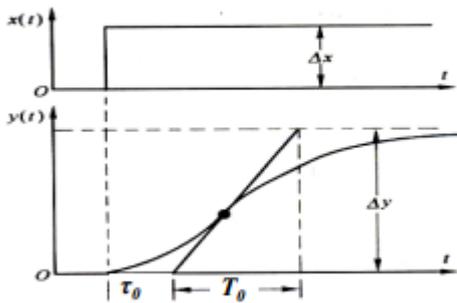


表6.4 响应曲线法整定参数的公式

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  $\omega_m$ ，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  $\omega_m$  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：

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

## 例题

**例：**一蒸汽加热的热交换温度控制系统，要求热水温度保持在 $65^{\circ}\text{C}$ 。当阀门输入电流增加 $1.6\text{mA DC}$ （阀门输入电流范围为 $4\sim 20\text{mA DC}$ ）时，热水温度上升为 $67.8^{\circ}\text{C}$ ，并达到新的稳态。温度变送器量程和调节器的刻度范围为 $30\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。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

$$\begin{aligned}\Delta x &= 1.6\text{mA} \\ x_{\max} - x_{\min} &= (20 - 4)\text{mA} \\ \Delta y &= 67.8 - 65.0 = 2.8^{\circ}\text{C} \\ y_{\max} - y_{\min} &= 80 - 30 = 50^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

**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

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

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

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

## 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、TI、TD对过渡过程的影响为指导，对比例度P、积分时间TI和微分时间TD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。

如果比例度P过小，积分时间过短或微分时间过长，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过大或积分时间过长，都会使过渡过程变化缓慢

### 6.4.5 几种整定方法的比较

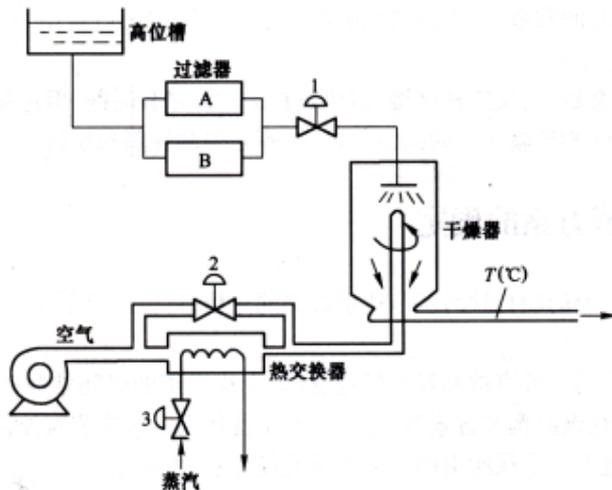
整定方法	优点	缺点
响应曲线法	方法简单	系统开环, 被调量变化较大, 影响生产
稳定边界法	系统闭环	会出现被调量等幅振荡
衰减曲线法	系统闭环, 安全	实验费时
经验法	系统闭环, 不需计算	需要经验

## 控制系统设计实例

### 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。

## 控制参数的选用原则

### 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）

$$\text{当 } \tau_f > \tau_0 \quad T_f > T_0$$

系统比较好控制。

### 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。

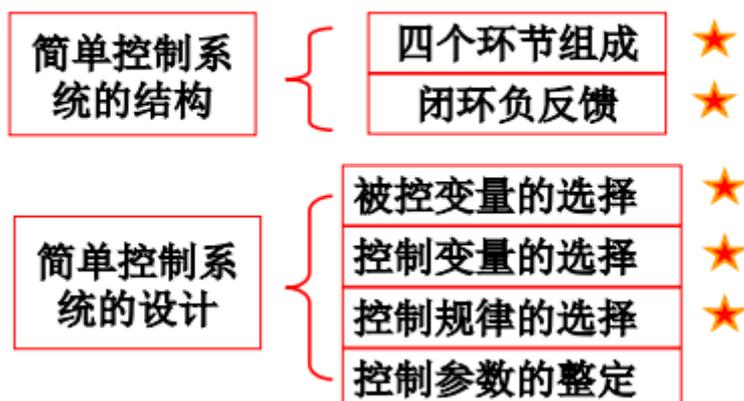
#### ② 调节阀

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，采用反作用？正作用？

### 本章小结



# 六、复杂控制系统

简单控制系统是过程控制中最基本、应用最广的控制形式，约占全部控制系统的80%，但是：

- 随着生产过程的大型化和复杂化，操作条件更加严格，变量之间的关系更加复杂
- 有些生产工艺和控制要求比较特殊
- 随着技术发展，对工艺的控制目标多样化，如产量、质量、节能、环保、效率等

为此，设计出各种复杂控制系统

## 串级控制系统

当对象的滞后较大，干扰比较剧烈、频繁时，采用简单控制系统往往控制质量较差，满足不了工艺上的要求，这时，可考虑采用串级控制系统

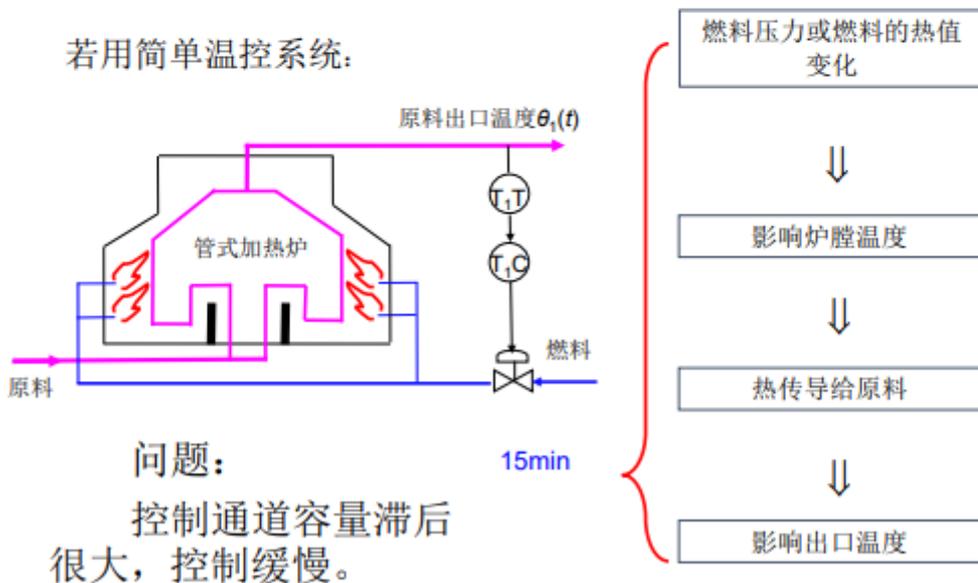
### 串级控制系统基本结构及工作过程

串级控制是在简单控制系统基础上的改进

#### 例题

**例** 管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。

## 第 7 章 复杂控制系统



# 第 7 章 复杂控制系统

## 结构特点:

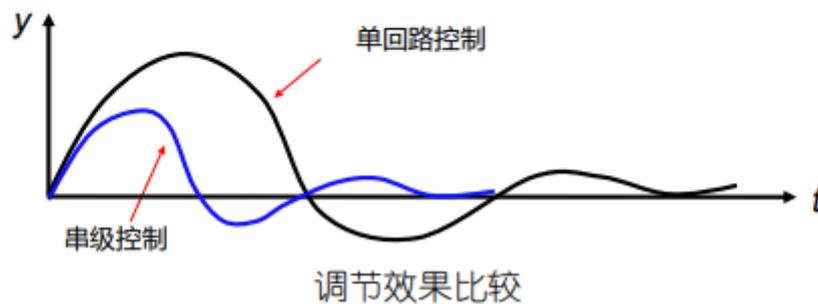
- ❑ 系统有两个闭合回路，形成内外环。主变量是工艺要求控制的变量，副变量是为了更好地控制主变量而选用的辅助变量。
- ❑ 主、副调节器是串联工作的，主调节器的输出作为副调节器的给定值。



## 特点总结

### 串级系统特点总结:

- ①对进入副回路的干扰有很强的克服能力;
- ②改善了被控过程的动态特性，提高了系统的工作频率；对进入主回路的干扰控制效果也有改善；
- ③对负荷或操作条件的变化有一定自适应能力。



## 串级控制系统的设计与参数整定

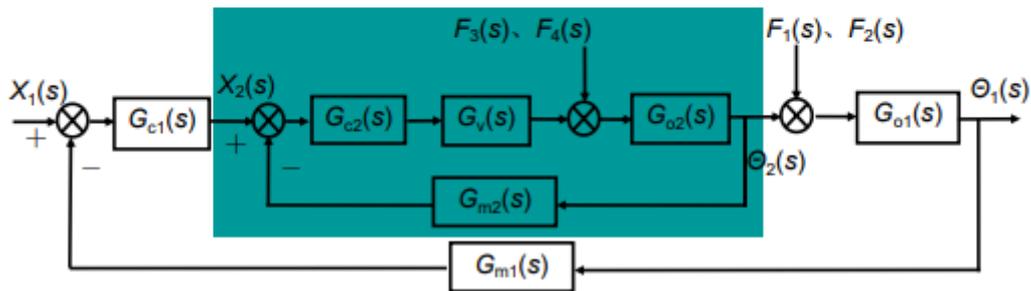
### 串级控制系统的方案设计

## 7.1.3 串级控制系统的设计与参数整定

### 7.1.3.1 串级控制系统的方案设计

#### 1. 主回路设计

主回路设计与单回路控制系统一样。



#### 2. 副回路的选择

副回路设计中，最重要的是选择副回路的被控变量（串级系统的副变量）。副变量的选择一般应遵循下面几个原则：

①主、副变量有对应关系

②副变量的选择必须使副回路包含变化剧烈的主要干扰，并尽可能多包含一些干扰

③副变量的选择应考虑主、副回路中控制过程的时间常数的匹配，以防“共振”的发生

④应注意工艺上的合理性和经济性

#### 3. 主、副调节器调节规律的选择

在串级系统中，主变量是系统控制任务，副变量辅助变量。这是选择调节规律的基本出发点。

主变量是生产工艺的主要控制指标，工艺上要求比较严格。所以，主调节器通常选用PI调节，或PID调节。控制副变量是为了提高主变量的控制质量，对副变量的要求一般不严格，允许有静差。因此，副调节器一般选P调节就可以了。

#### 4. 主、副调节器正、反作用方式的确定

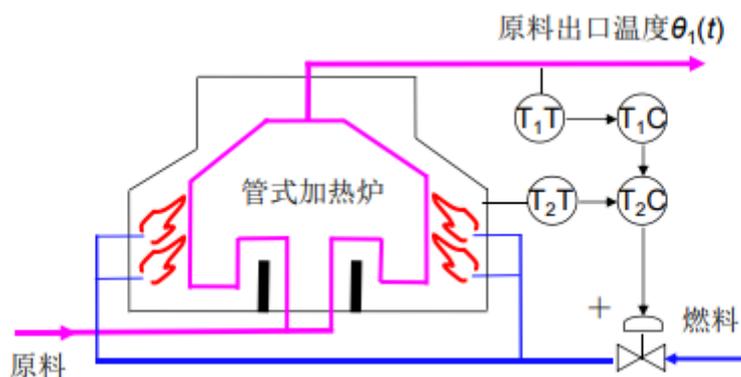
对串级控制系统来说，主、副调节器正、反作用方式的选择原则依然是使系统构成负反馈。

选择时的顺序是：

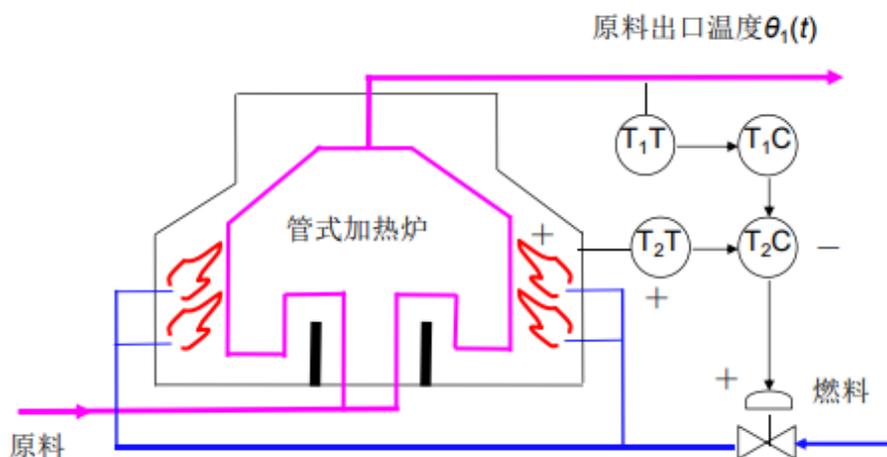
- 1、根据工艺安全或节能要求确定调节阀的正、反作用；
- 2、按照副回路构成负反馈的原则确定副调节器的正、反作用；
- 3、依据主回路构成负反馈的原则，确定主调节器的正、反作用。

以管式加热炉为例，说明串级控制系统主、副调节器的正、反作用方式的确定方法。

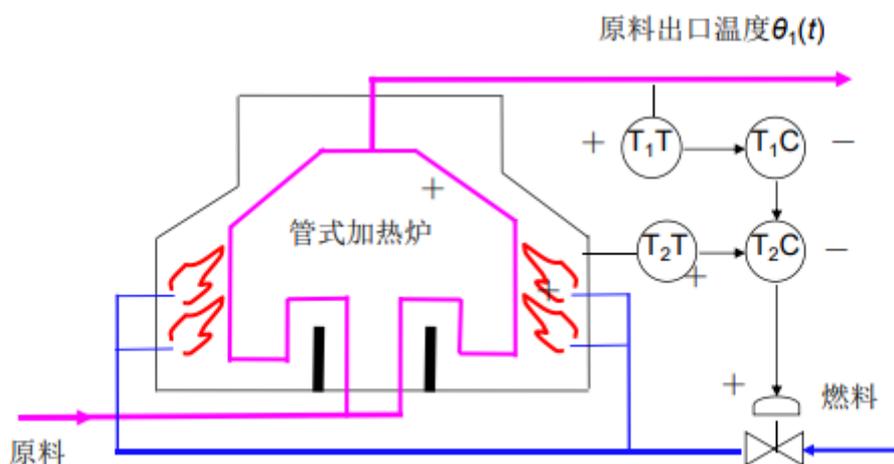
1、从生产工艺安全出发，燃料油调节阀选用气开式（正作用）。一旦出现故障或气源断气，调节阀应关闭，切断燃料油进入加热炉，确保设备安全。



2、副回路中，调节阀开大，炉膛温度升高，测量信号增大，说明副对象和变送器都是正作用。为保证副回路为负反馈，副调节器应为反作用方式。



3、对于主调节器，调节阀开大，炉膛温度升高时，原料油出口温度也升高，说明主对象和主变送器也都是正作用。为保证主回路为负反馈，主调节器也应为反作用方式。



### 5. 串级系统的工业应用

当生产工艺要求高，采用简单控制系统满足不了工艺要求的情况下，可考虑采用串级控制系统。串级控制系统常用于下面一些生产过程。

- 1) 容量滞后较大的过程
- 2) 纯滞后较大的过程
- 3) 干扰幅度大的过程
- 4) 非线性严重的过程

## 串级控制系统的参数整定

有逐步逼近法、两步整定法和一步整定法

### 1. 逐步逼近法

依次整定副回路、主回路。并循环进行，逐步接近主、副回路最佳控制状态

### 2. 两步整定法

系统处于串级工作状态，第一步按单回路方法整定副调节器参数；第二步把已经整定好的副回路视为一个环节，仍按单回路对主调节器进行参数整定

### 3. 一步整定法

所谓一步整定法，就是根据经验，先将副调节器参数一次调好，不再变动，然后按一般单回路控制系统的整定方法直接整定主调节器参数

## 前馈控制系统

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

### 前馈控制的工作原理及其特点

#### • 反馈控制的特点

不论是什么干扰，只要引起被调变量的变化，调节器均可根据偏差进行调节

但必须被调变量变化后才进行调节，调节速度难以进一步提高

通过分析可发现反馈控制的特点

#### 1. 反馈控制是按偏差进行控制来消除偏差的

没有偏差出现时，调节器的输出信号不变。调节器随着偏差的出现才开始动作，控制不及时

#### 2. 由于反馈系统构成闭环，存在系统是否稳定的问题

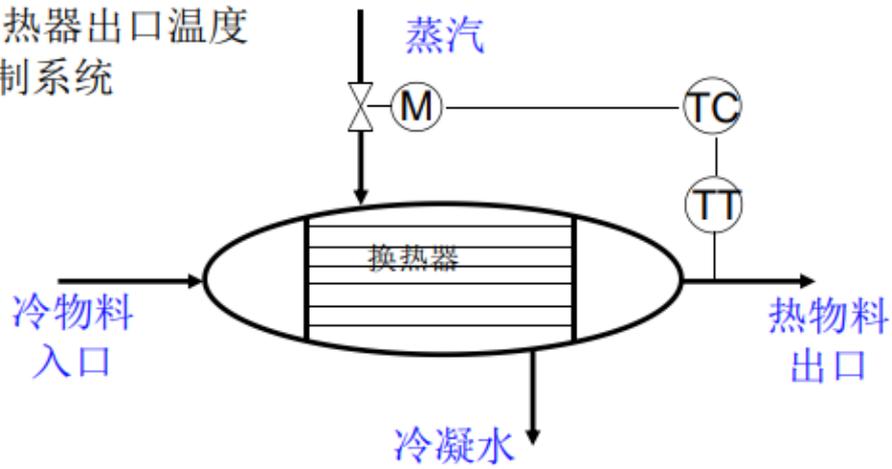
为保证系统正常工作，必须确保系统的稳定性

#### 3. 只要干扰位于反馈环之内，反馈控制总能消除其对被控变量的影响，即反馈控制可以消除反馈环之内各种扰动的影响

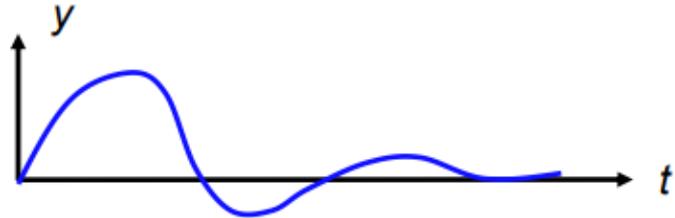
#### • 前馈控制的原理与特点

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

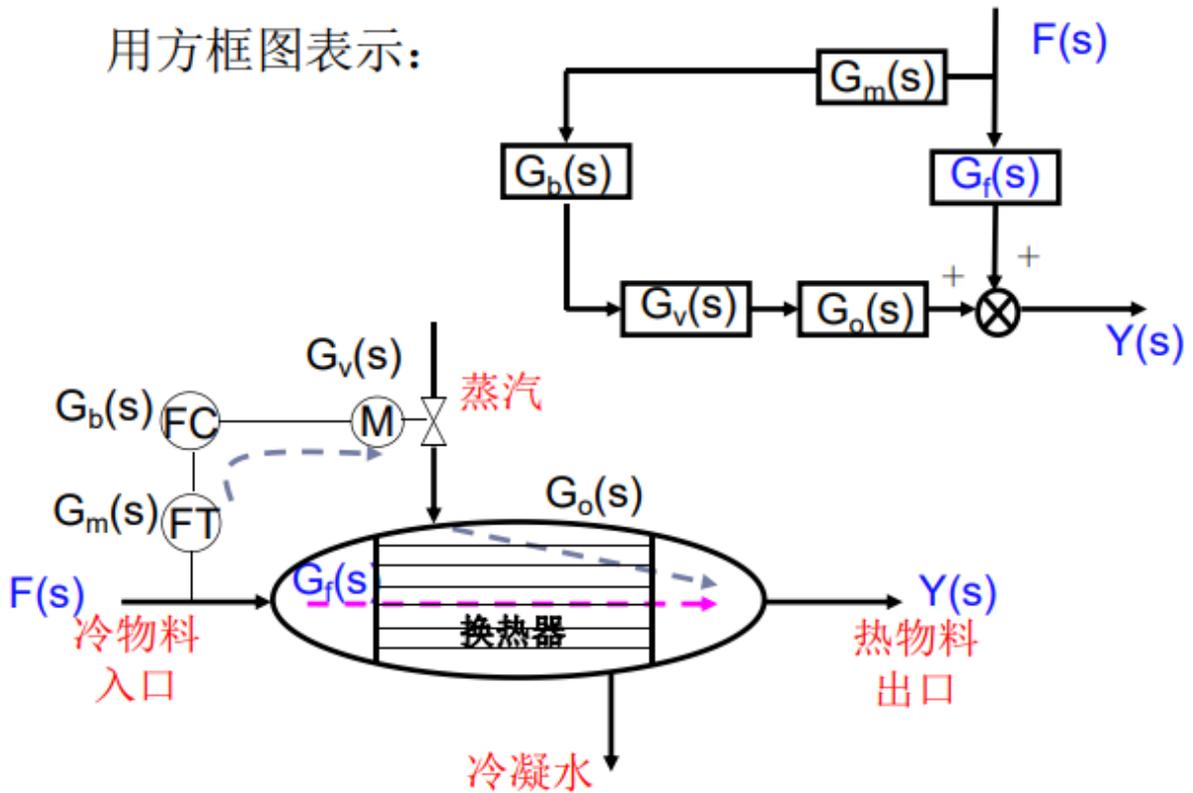
例 换热器出口温度  
反馈控制系统



针对冷物料流量变化的  
最佳调节效果:



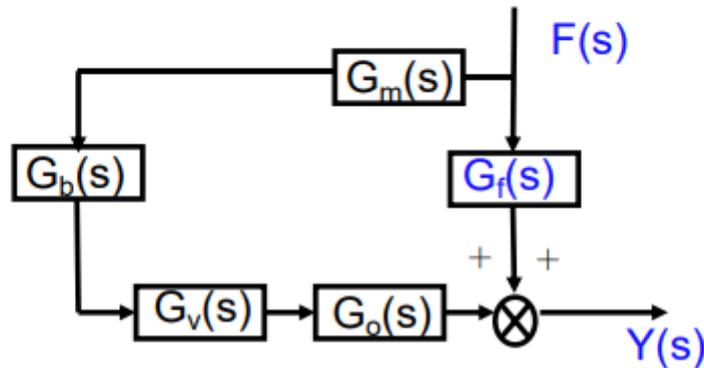
用方框图表示:



## 补偿原理（不变性原理）

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

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

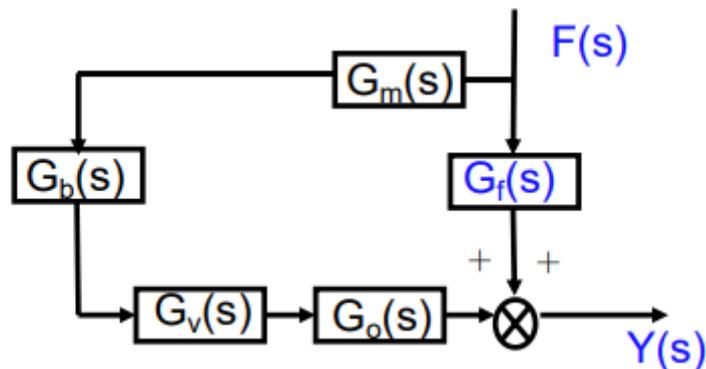


前馈补偿规律的推导：

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

可以得到：

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



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，能实现“不变性”控制
2. 前馈控制是开环控制，控制作用几乎与干扰同步产生，是事先调节，速度快
3. 前馈控制器的控制规律不是PID控制，是由对象特性决定的
4. 前馈控制只对特定的干扰有控制作用，对其它干扰无效

## 前馈控制与反馈控制的区别

### 1. 产生控制作用的依据不同

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

### 2. 控制效果不同

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

### 3. 实现的经济性和可能性不同

前馈控制需要对每一个干扰单独构成一个控制系统，因此不经济，也不完全可能

## 前馈控制的局限性

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

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

因此，一般将前馈控制与反馈控制结合使用

前馈控制针对主要干扰，反馈控制针对所有干扰

## 前馈控制系统的结构

前馈控制的结构有静态补偿和动态补偿

1. 静态前馈控制系统

2. 动态前馈控制系统

3. 前馈-反馈复合控制系统

4. 前馈-串级复合控制系统

## 7.2.2前馈控制系统的结构

前馈控制的结构有静态补偿和动态补偿。

### 1. 静态前馈控制系统

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

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

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

(S=0时)

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

### 2. 动态前馈控制系统

完全按照补偿控制规律制作控制器。

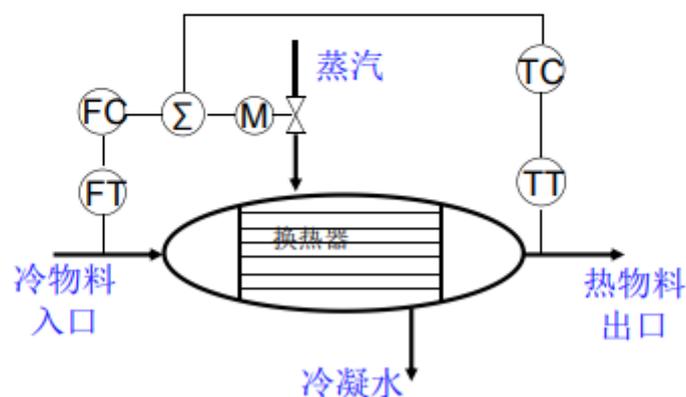
$$G_b(s) = -\frac{G_f(s)}{G_o(s) \cdot G_m(s) \cdot G_v(s)}$$

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

### 3. 前馈—反馈复合控制系统

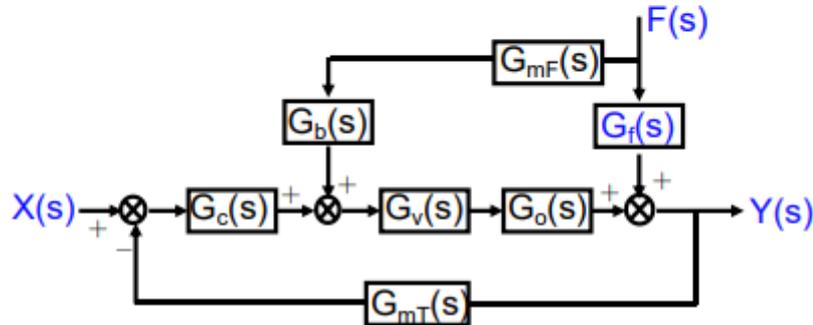
为了克服前馈控制的局限性，将前馈控制和反馈控制结合起来，组成前馈—反馈复合控制系统。

❖ 如换热器出口温度前馈—反馈复合控制系统。



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

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



干扰通道的传递函数为：

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

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

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

#### 复合控制系统具有以下优点：

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

主要干扰是指“可测不可控”的主要扰动

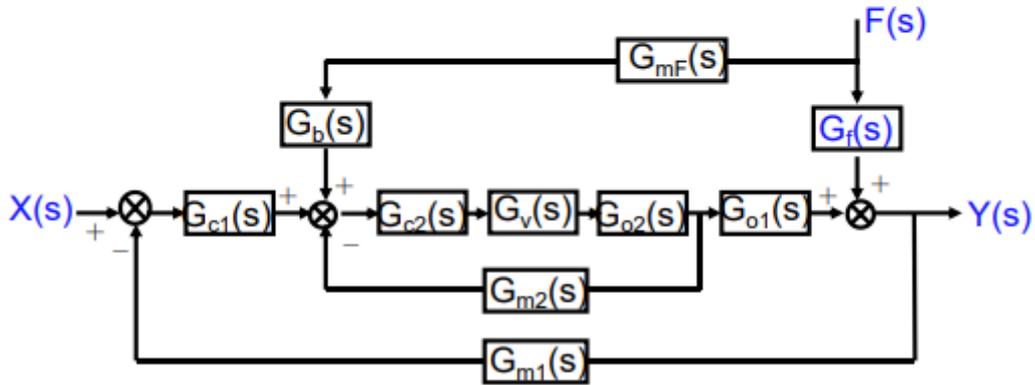
所谓“可测”是指可通过测量变送器，在线将扰动量转换为前馈补偿器所能接收的信号

“不可控”是指这些扰动不易通过控制回路予以控制

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

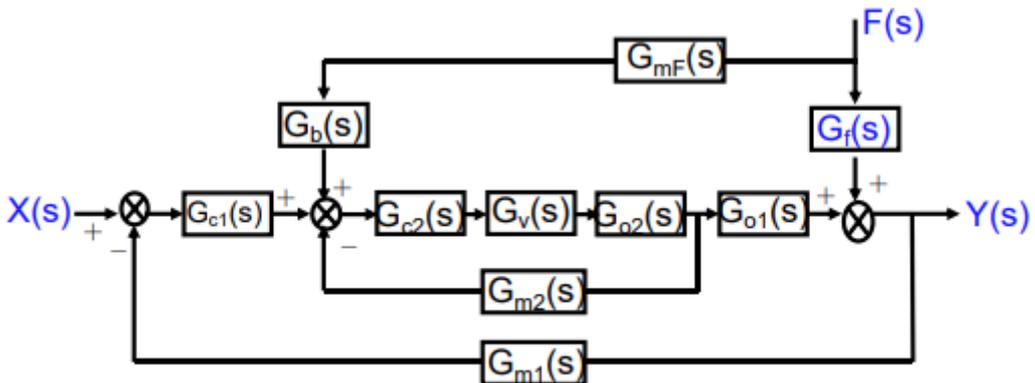
#### 4. 前馈——串级复合控制系统

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



从前馈—串级复合控制系统的传递函数可知：

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



### 前馈控制系统的设计

采用前馈控制系统的条件

采用前馈控制的条件必然与干扰对象特性有关

一般来说，在系统中引入前馈控制的原则：

#### 1. 系统中存在下列情况的干扰

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

#### 2. 干扰的变化幅值大，频率高

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

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

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

2. 控制通道的滞后大或干扰通道的时间常数小

如加热炉的温度控制、化学反应器的产品质量控制

因此可以得到前馈控制器输入变量的选择依据，也即是扰动变量的选择依据：

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

## 前馈控制器的通用模型

### 二、前馈控制器的通用模型

前面按照不变性条件，求得前馈控制器的传递函数表达式

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

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

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

前馈控制器的通用模型：

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

各系数物理意义：

$K_{ff}$ —静态放大系数； $T_1$ —加速系数；  
 $T_2$ —减速系数； $\tau$ —纯滞后时间。

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

前馈控制的应用场合

1. 某个干扰幅值大而频繁，对被控变量影响剧烈，而对象的控制通道滞后大
2. 采用单纯的反馈控制，控制速度慢、质量差
3. 用串级控制，效果改善不明显

目前，比较高档的控制仪表中都配备通用前馈控制模块，供用户选用

## 大滞后过程控制系统

在工业生产中，控制通道往往不同程度地存在着纯滞后

一般将纯滞后时间 $\tau_0$ 与时间常数 $T$ 之比大于0.3 ( $\tau_0 / T > 0.3$ ) 的过程称之为大滞后过程

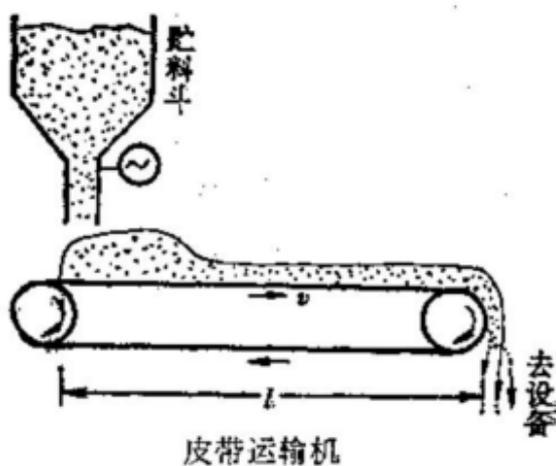
大滞后过程是公认较难控制的过程

其难于控制的主要原因是纯滞后的增加导致开环相频特性相角滞后增大，使闭环系统的稳定性下降

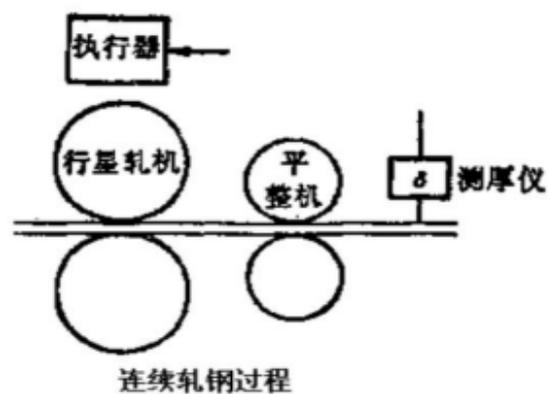
为了保证稳定裕度，不得不减小调节器的放大系数，造成控制质量的下降

### 7.3 大滞后过程控制系统

典型工艺过程



传输时延



测量时延

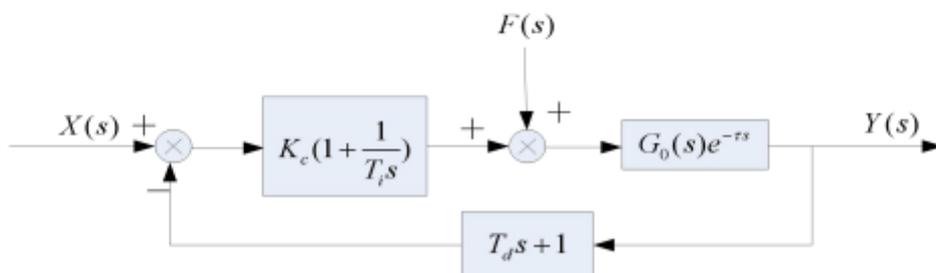
### 常规控制方案

1. 微分先行控制方案
2. 中间微分控制方案

### 7.3.1 常规控制方案

#### 一、微分先行控制方案

对于纯滞后过程的系统调节器若采用PI或PID时，系统的静态和动态品质均下降，纯滞后愈大，问题愈突出。试验和分析都表明，微分先行控制方案与PID控制系统相比，其控制品质有较大提高。



微分先行控制方案

微分环节的输出包括了被控量及其变化速度值，此

系统的闭环传函：

在给定值作用下：
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_c(T_i s + 1)e^{-\tau s}}{T_i s G_0^{-1}(s) + K_c(T_i s + 1)(T_d s + 1)e^{-\tau s}}$$

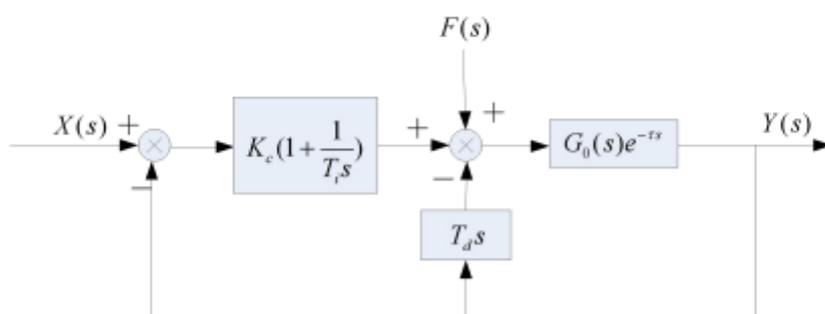
在扰动作用下：

$$\frac{F(s)}{X(s)} = \frac{T_i s e^{-\tau s}}{T_i s G_0^{-1}(s) + K_c(T_i s + 1)(T_d s + 1)e^{-\tau s}}$$

微分先行控制方案的系统传函比PI+D的控制方案少一个零点，相对于PI+D控制方案，微分先行控制方案的超调量要小一些，提高了控制质量。

#### 二、中间微分控制方案

系统中的微分作用是独立的，能在被控量变化时及时根据变化的速度大小起附加校正作用，微分校正作用与PI调节器的输出信号无关，只在动态时起作用，而在静态时或在被控量变化速度恒定时失去作用。



中间微分控制方案

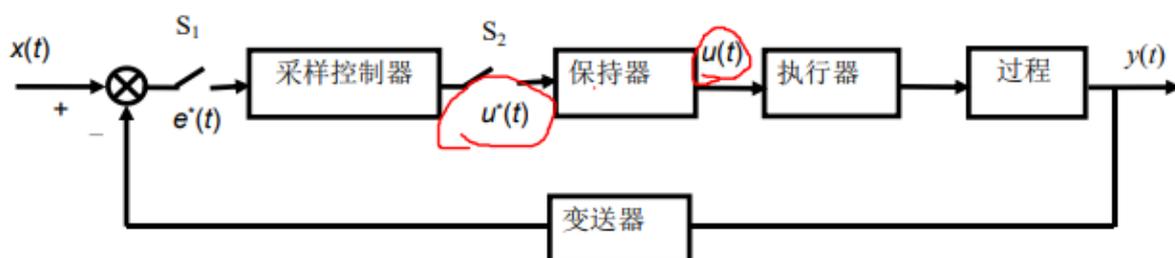
## 采样控制

### 7.3.2大滞后过程的采样控制

所谓**采样控制**，是一种定周期的断续PID控制方式，即控制器按周期 $T$ 进行采样控制。在两次采样之间，保持该控制信号不变，直到下一个采样控制信号到来。保持的时间 $T$ 必须大于纯滞后时间 $\tau_0$ 。这样重复动作，一步一步地校正被控参数的偏差值，直至系统达到稳定状态。这种“调一调，等一等”的方案的核心思想就是放慢控制速度，减少控制器的过度调节。

典型的大滞后过程的采样控制系统框图如图所示。图中，采样控制器每隔采样周期 $T$ 动作一次。 $S_1$ 、 $S_2$ 表示采样器，它们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。



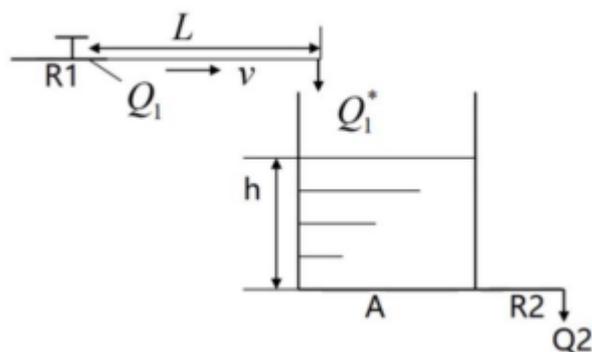
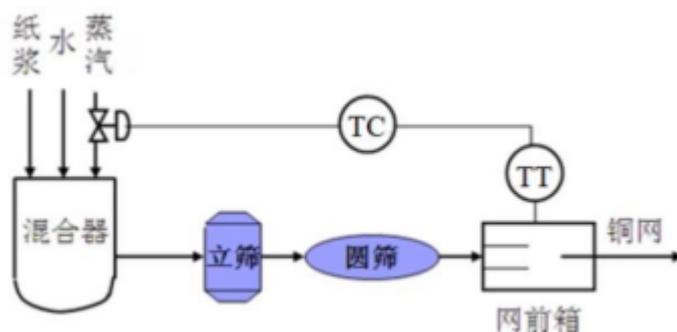
采样控制是以牺牲速度来获取稳定的控制效果，如果在采样间隔内出现干扰，必须要等到下一次采样后才能作出反应。

## Smith预估补偿控制

### 7.3.3大滞后过程的Smith预估补偿控制

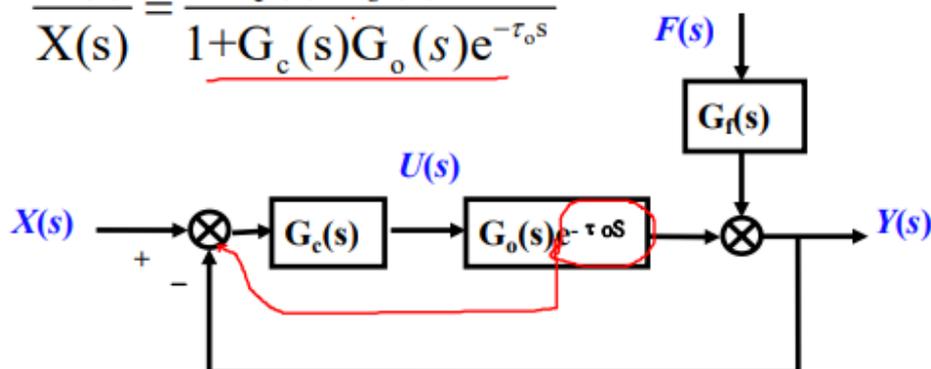
Smith预估补偿控制是按照对象特性，设计一个模型加入到反馈控制系统，提早估计出对象在扰动作用下的动态响应，提早进行补偿，使控制器提前动作，从而降低超调量，并加速调节过程。

为理解Smith预估控制的工作原理，先分析采用简单控制方案时，大滞后过程的特性。

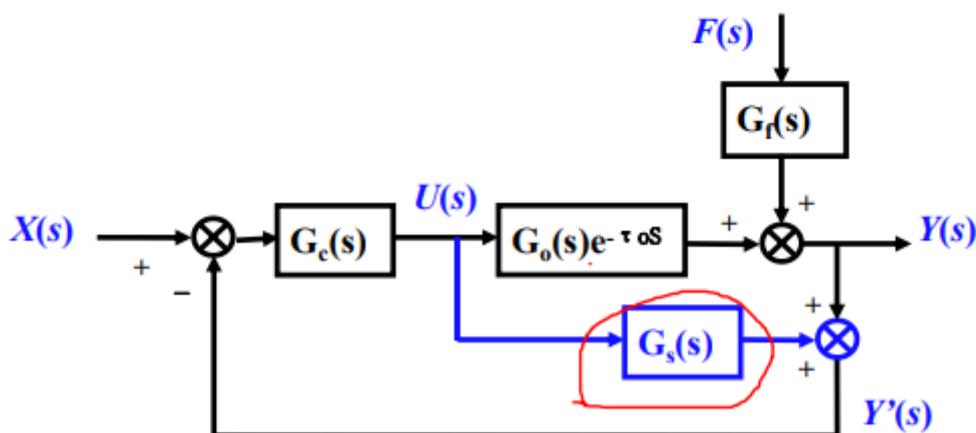


如图是采用简单控制方案的大滞后过程控制系统框图。其中  $G_0(s)e^{-\tau_0 s}$  为控制通道的广义传递函数，特意将纯滞后环节  $e^{-\tau_0 s}$  单独写出，并且变送器的传递函数简化为1。该系统  $X(s)$  与  $Y(s)$  之间的闭环传递函数为：

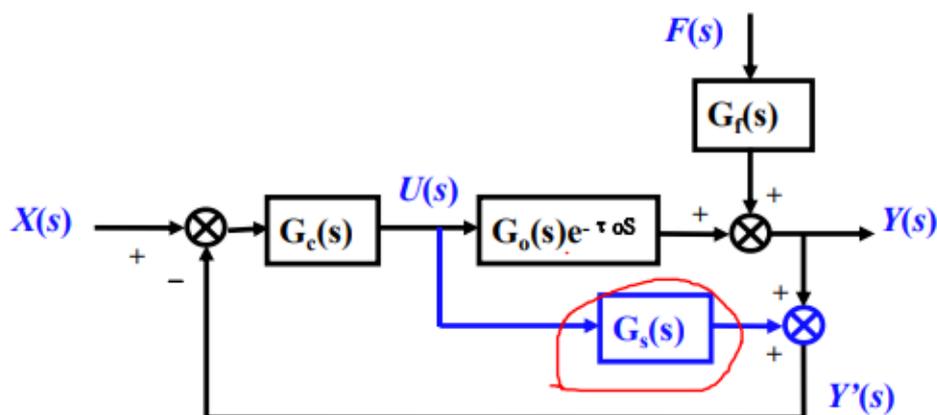
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau_0 s}}{1+G_c(s)G_0(s)e^{-\tau_0 s}}$$



若能将  $G_0(s)e^{-\tau_0 s}$  中的  $e^{-\tau_0 s}$  补偿掉，则实现无滞后控制。Smith提出了一种大滞后系统预估补偿控制方法，下图是Smith预估补偿控制系统框图， $G_s(s)$  是Smith预估补偿器的传递函数。



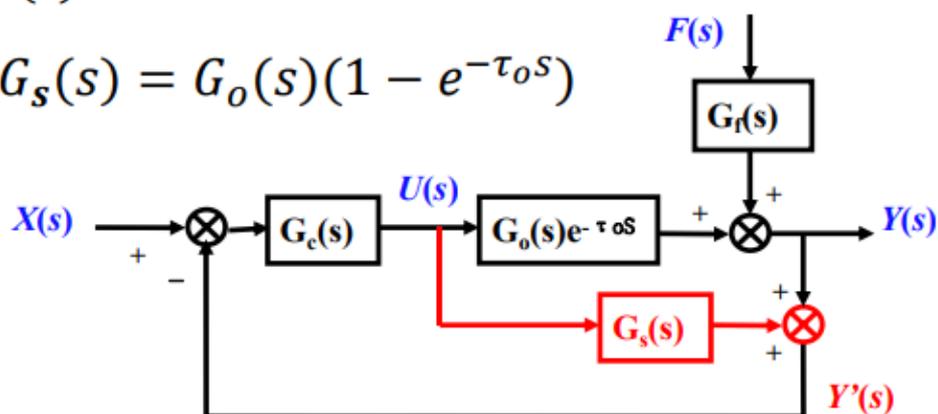
若能将 $G_0(s)e^{-\tau_0 s}$ 中的 $e^{-\tau_0 s}$ 补偿掉，则实现无滞后控制。Smith提出了一种大滞后系统预估补偿控制方法，下图是Smith预估补偿控制系统框图， $G_s(s)$ 是Smith预估补偿器的传递函数。



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 $G_0(s)$ ：

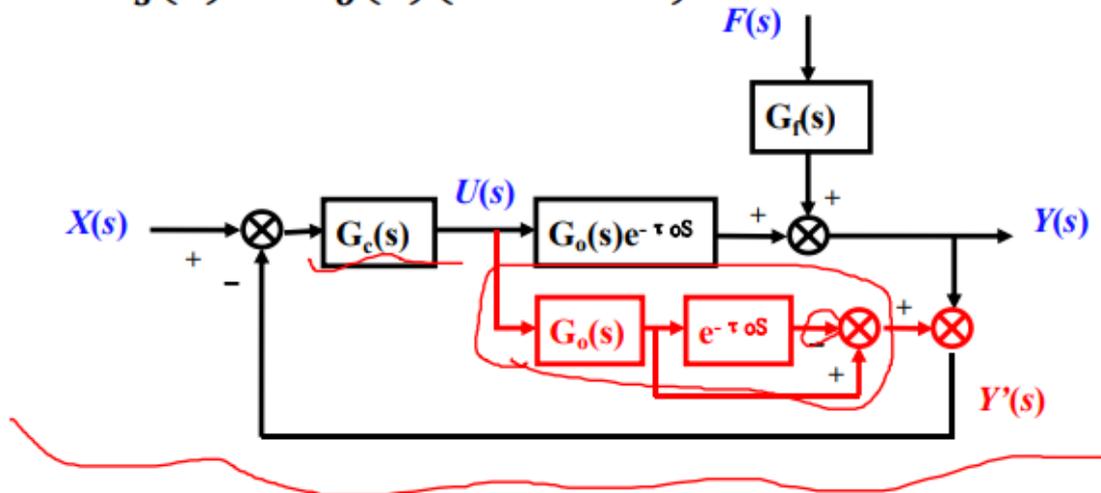
$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau_0 s} + G_s(s) = G_0(s)$$

得： $G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau_0 s})$



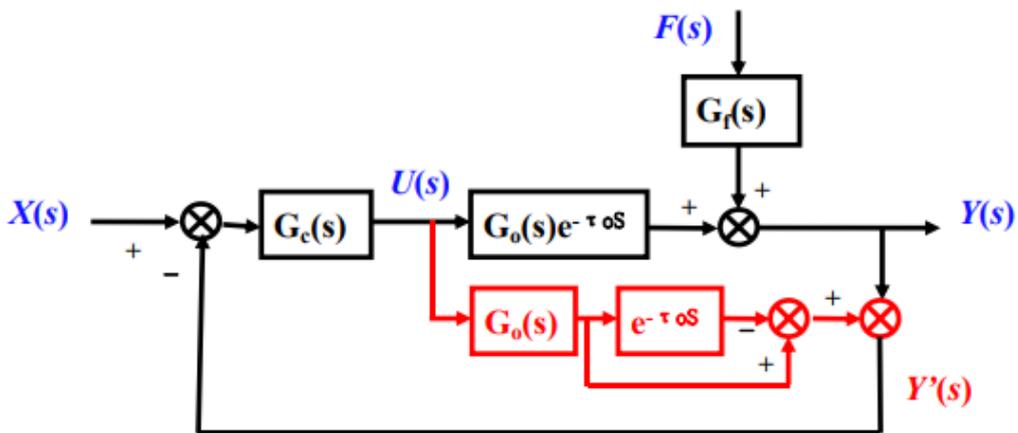
根据Smith预估器的传递函数 $G_s(s)$ 表达式，就可得到下图的Smith预估补偿控制系统实施框图。

$$G_s(s) = G_o(s)(1 - e^{-\tau_o s})$$



可得到设定值 $X(s)$ 与 $Y(s)$ 之间的闭环传递函数为

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



对比基本的单回路控制系统，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。

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

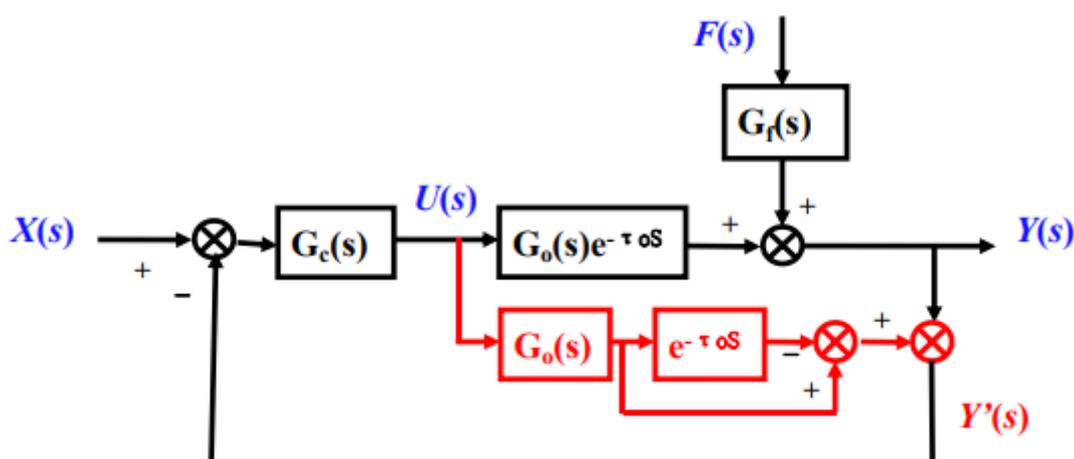
预估补偿控制

单回路控制

至于分子中的 $e^{-\tau_0 s}$ 项只是将被控参数 $y(t)$ 的响应在时间上推迟了 $\tau_0$ 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。

干扰 $F(s)$ 与 $Y(s)$ 之间的闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = G_f(s) \left\{ 1 - \frac{G_c(s)G_o(s)}{1+G_c(s)G_o(s)} e^{-\tau_0 s} \right\}$$



和设定值通道一样，干扰通道的传递函数特征方程中也不包含 $e^{-\tau_0 s}$ 项，即预估补偿消除了纯滞后对系统闭环稳定性的影响。

但是，Smith预估补偿器并没有消除纯滞后 $\tau_0$ 对干扰 $F(s)$ 抑制过程的影响。因为

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = G_f(s) \left\{ 1 - \frac{G_c(s)G_o(s)}{1+G_c(s)G_o(s)} e^{-\tau_0 s} \right\}$$

式中，干扰 $F(s)$ 与被控参数 $Y(s)$ 之间的传递函数由两部分组成：第一项是干扰对被控参数的扰动作用；**第二项是控制系统抑制干扰影响的控制作用。**

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = G_f(s) \left\{ 1 - \frac{G_c(s)G_o(s)}{1+G_c(s)G_o(s)} e^{-\tau_0 s} \right\}$$

由于上式第二项含有 $e^{-\tau_0 s}$ 项，表明系统对干扰的控制作用比干扰作用纯滞后 $\tau_0$ 时段，这仍然影响控制效果。

因此，Smith预估补偿系统对设定值扰动的控制效果很好；对负荷扰动的控制效果有所改善。

但是，Smith预估补偿系统对补偿模型的误差十分敏感，补偿效果取决于补偿器模型的精度。

$$G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau_0 s})$$

## 总结

了解Smith预估器的结构

原理——抵偿方式消去特征方程中的纯时延

会求Smith预估器

会求广义调节器

容易出现的问题

对模型精度依赖性很高

不易用模拟仪表实现

## 实现特定要求的过程控制系统

### 7.4-7 实现特定要求的过程控制系统

比值控制系统

均匀控制系统

分程控制系统

选择性控制系统

控制系统	结构特点	控制特点
大滞后	采样控制 Smith预估补偿控制	调一调、等一等； 利用预估器提前做出响应、提前控制
比值	单闭环 双闭环 变比值	实现几个流量参数 符合一定比例关系
均匀	简单均匀控制 串级均匀控制	对两个有控制矛盾 的被控变量，进行 协调控制

控制系统	结构特点	控制特点
分程	一个控制器 对多个控制阀	实现多个操 纵量协调操作
选择	多个控制回路 对一个控制阀	实现多个被控变 量选择控制
解耦	前馈解耦 对角矩阵解耦 单位矩阵解耦	解除控制回路 间的耦合影响

## 解耦控制

### 7.8 解耦控制

有些生产过程中，在一个设备上需要设置若干个控制系统，分别对多个被控变量进行控制。在这种情况下，多个控制系统之间就有可能存在相互关联和相互影响，称为相互耦合。

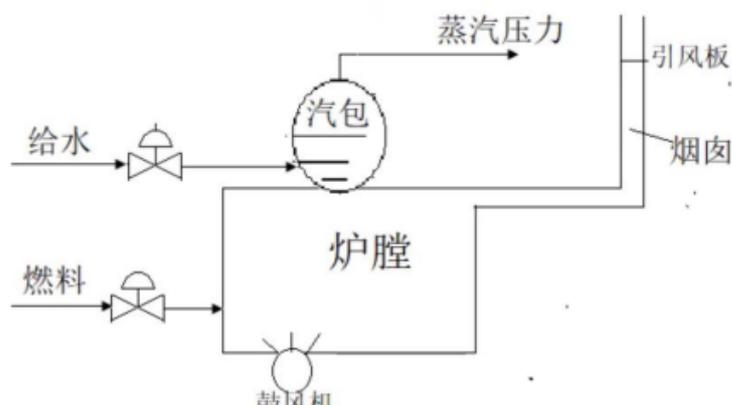
控制系统间的耦合，会妨碍各被控变量的独立控制，严重时甚至会破坏各系统的正常工作。

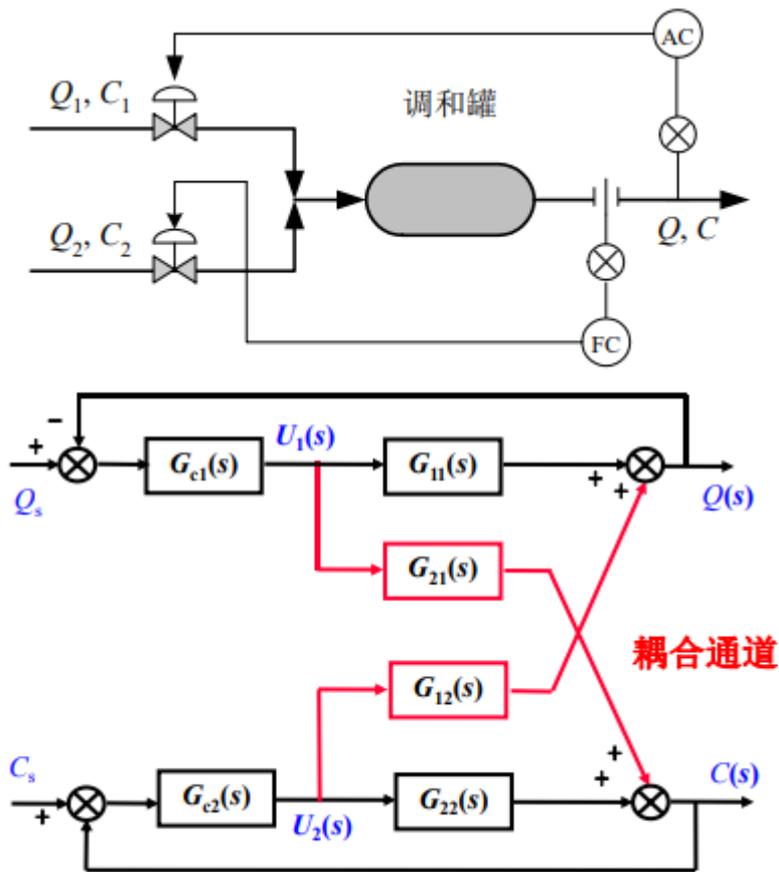
通过采取措施，把相互关联的多变量控制过程转化为几个彼此独立的控制系统。把这样的系统称为解耦控制系统。

### 被控过程的耦合现象及对控制过程的影响

下面用一个实例来分析被控过程的耦合现象及对控制过程的影响。

图中，锅炉的蒸汽压力、炉膛负压、汽包水位等存在相互关联。





## 相对增益

- 相对增益

对于一个具有 $N$ 个被控变量和 $N$ 个控制变量的过程，可以有 $N!$ 种不同构成方式来组成 $N!$ 个不同的控制方案，分析全部 $N!$ 个控制方案中系统间的关联，可以选出关联最小的控制方案。相对增益是描述耦合程度的一种方法。

### 一、相对增益的定义

**第一放大系数：**在相互耦合的控制回路中，使其他各控制量  $u_n (n = 1, 2, \dots, n \neq j)$  都保持不变，即其他通道开路（不控制），只改变所考虑的那个控制量  $u_j$ ，所得到  $y_i$  的变化量与  $u_j$  改变量之比，称为  $u_j$  到  $y_i$  通道的第一放大系数。

第一放大系数（第一增益）：只改变所考虑的那个控制量  $u_j$ ，得到  $y_i$  的变化量与  $u_j$  改变量之比，称为  $u_j$  到  $y_i$  通道的第一放大系数

$$\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_u$$

第二放大系数（第二增益）：其他被控量保持不变，即其他回路闭合，只改变所要考虑的那个被控量  $y_i$ ，控制量  $u_j$  对被控量  $y_i$  的增益

$$\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_y$$

$u_j$  和  $y_i$  间的相对增益  $\lambda_{ij}$  为

$$\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_u \bigg/ \left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_y$$

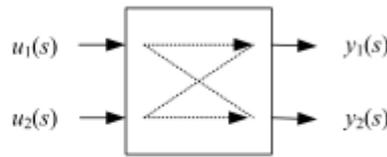
这是布里斯托(Bristol)首先提出的相对增益的概念。它能揭示多变量耦合系统的内部关系，可以确定变量间的配对选择，判断该系统是否需要解耦。

这样可以求得相对增益矩阵：

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & \cdots & u_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

# 相对增益的计算

## 二、相对增益的计算



稳态方程:

$$\begin{aligned} y_1 &= K_{11}u_1 + K_{12}u_2 \\ y_2 &= K_{21}u_1 + K_{22}u_2 \end{aligned}$$

式中:  $K_{ij} = \left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_u$  表示第  $i$  个被控量相对于第  $j$  个控制量的静态增益。

$$\left. \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \right|_{u_2} = K_{11} \quad \left. \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \right|_{y_2} = K_{11} - \frac{K_{12}K_{21}}{K_{22}}$$

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

同理可得:

$$\lambda_{12} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\lambda_{21} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\lambda_{22} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

对于高阶多变量系统

$$Y = KU \quad \longrightarrow \quad U = HY, H = K^{-1}$$

$$\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_u = k_{ij} \quad h_{ji} = \left. \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right|_y = \frac{1}{\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_y}$$

注意, 此处矩阵K与其逆矩阵的转置的运算为点乘

$$\lambda_{ij} = k_{ij}h_{ji}$$

$$\Lambda = K \cdot H^T = K \cdot [K^{-1}]^T$$

**相对增益的性质：**

- 相对增益矩阵中每行或每列的总和均为1；

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = \sum_{j=1}^n k_{ij} \frac{\text{adj}(K)_{ji}}{\det K} = \frac{1}{\det K} \sum_{j=1}^n k_{ij} C_{ij} = \frac{\det K}{\det K}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^n k_{ij} \frac{C_{ij}}{\det K} = \frac{\det K}{\det K} = 1$$

- 对于 $2 \times 2$ 系统，当 $k_{ij}$ 为正的个数是奇数时，所有的相对增益都在 $0 \sim 1$ 之间，称为正耦合；
- 当 $k_{ij}$ 为正的个数是偶数时，存在相对增益小于0，称为负耦合。

**相对增益的物理意义：**

$$u_j \rightarrow y_i \quad \lambda_{ij} = \frac{\left( \frac{y_i}{u_j} \right)_u}{\left( \frac{y_i}{u_j} \right)_y} = \frac{\left( \frac{y_i}{u_j} \right)_{\text{其它回路开环}}}{\left( \frac{y_i}{u_j} \right)_{\text{其它回路闭环}}}$$

$\lambda_{ij} < 0$  在这种情况下，稳态增益的符号随着其它回路状态的改变（开环、闭环）而不同

$$u_j \rightarrow y_i \quad \lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_u}{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_y} = \frac{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_{\text{其它回路开环}}}{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_{\text{其它回路闭环}}}$$

$\lambda_{ij} = 0$  在这种情况下，当其它回路都开环时，稳态增益为**0**。

$0 < \lambda_{ij} < 1$  在这种情况下，其它回路闭环时的稳态增益比开环时要大。

$\lambda_{ij} = 1$  在这种情况下，其它回路的开环与闭环对稳态增益的大小没有影响。

$\lambda_{ij} = 1$  是否表示回路间没有关联？

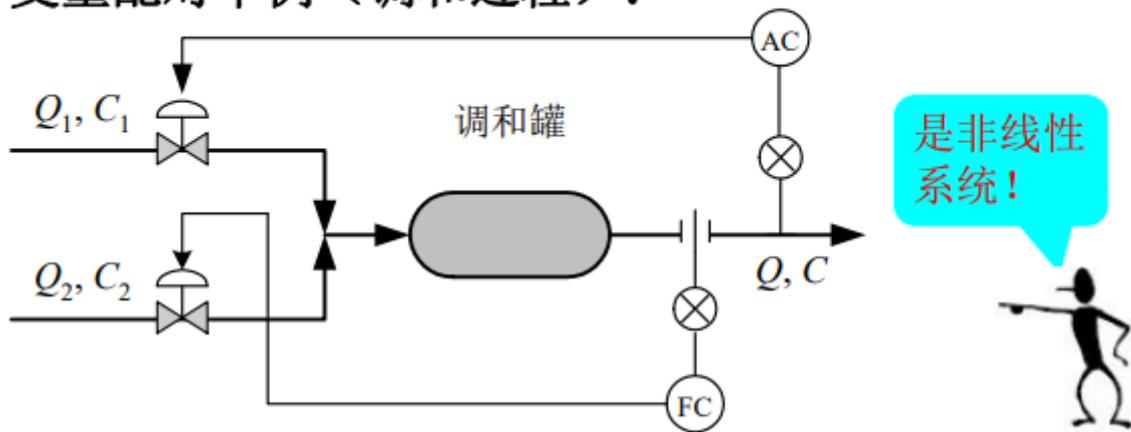
$$u_j \rightarrow y_i \quad \lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_u}{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_y} = \frac{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_{\text{其它回路开环}}}{\left(\frac{y_i}{u_j}\right)_{\text{其它回路闭环}}}$$

$1 < \lambda_{ij}$  在这种情况下，其它回路开环时的稳态增益比闭环时要大。

$\lambda_{ij} = \infty$  在这种情况下，其它回路闭环时的稳态增益为**0**。无法进行多回路控制。

## 举例

变量配对举例（调和过程）：



$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$C = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

### 1. 计算静态增益：

$$\begin{cases} \Delta Q = K_{11} \Delta Q_1 + K_{12} \Delta Q_2 \\ \Delta C = K_{21} \Delta Q_1 + K_{22} \Delta Q_2 \end{cases}$$

$$K_{11} = \left. \frac{\partial Q}{\partial Q_1} \right|_{Q_2} = 1$$

$$K_{21} = \left. \frac{\partial C}{\partial Q_1} \right|_{Q_2} = \frac{(C_1 - C_2) Q_2}{(Q_1 + Q_2)^2}$$

$$K_{12} = \left. \frac{\partial Q}{\partial Q_2} \right|_{Q_1} = 1$$

$$K_{22} = \left. \frac{\partial C}{\partial Q_2} \right|_{Q_1} = \frac{(C_2 - C_1) Q_1}{(Q_1 + Q_2)^2}$$

## 2. 计算一个相对增益:

$$\begin{cases} \Delta Q = K_{11}\Delta Q_1 + K_{12}\Delta Q_2 \\ \Delta C = K_{21}\Delta Q_1 + K_{22}\Delta Q_2 \end{cases}$$

$$\lambda_{12} = \frac{K_{12}}{K_{12} - \frac{K_{11}K_{22}}{K_{21}}} = \frac{1}{1 - \frac{K_{11}K_{22}}{K_{21}K_{12}}} = \frac{1}{1 - \frac{K_{22}}{K_{21}}}$$

$$\lambda_{12} = \frac{1}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}} = \frac{1}{1 + \frac{C - C_2}{C_1 - C}} = \frac{C_1 - C}{C_1 - C_2}$$

## 3. 构造相对增益矩阵:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}} = \frac{1}{1 + \frac{C - C_2}{C_1 - C}} = \frac{C_1 - C}{C_1 - C_2}$$

$$\longrightarrow \Lambda = \begin{pmatrix} \frac{C - C_2}{C_1 - C_2} & \frac{C_1 - C}{C_1 - C_2} \\ \frac{C_1 - C}{C_1 - C_2} & \frac{C - C_2}{C_1 - C_2} \end{pmatrix}$$

假设：稳态工作点( $Q_{10}, Q_{20}, Q_0, C_0$ )；  $C_1 > C_0 > C_2$

$$Q_{10} = \frac{C_0 - C_2}{C_1 - C_2} Q_0, Q_{20} = \frac{C_1 - C_0}{C_1 - C_2} Q_0$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \frac{C_0 - C_2}{C_1 - C_2} & \frac{C_1 - C_0}{C_1 - C_2} \\ \frac{C_1 - C_0}{C_1 - C_2} & \frac{C_0 - C_2}{C_1 - C_2} \end{pmatrix} \longrightarrow \Lambda = \begin{pmatrix} \frac{Q_{10}}{Q_0} & \frac{Q_{20}}{Q_0} \\ \frac{Q_{20}}{Q_0} & \frac{Q_{10}}{Q_0} \end{pmatrix}$$

## 多变量控制系统设计

### 多变量控制系统设计

- 经合适输入输出变量配对后，若关联不大，则可采用常规的多个单回路PID控制；
- 尽管系统稳态关联严重，但主要控制通道动态特性相差较大，则可通过调整PID参数，使各回路的工作频率拉开；
- 若系统稳态关联严重，而且动态特性相近，则需要解耦设计。

当系统变量配对后，如果需要解耦的系统，下一步就是解耦系统设计。

什么是解耦系统呢？

原系统

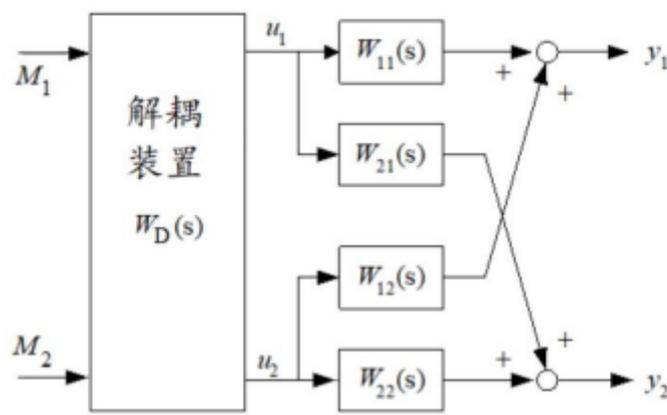
$$W_0(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) & \cdots & W_{1n}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) & \cdots & W_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1}(s) & W_{n2}(s) & \cdots & W_{nn}(s) \end{bmatrix}$$

对角阵法

通过加一些装置，使得等效系统模型变为**对角阵**。

前馈补偿法

$$W'_0(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_n(s) \end{bmatrix}$$



传递函数阵逆存在

$$W_D(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} W_1(s) & 0 \\ 0 & W_2(s) \end{bmatrix}$$

$$W_0(s) = \begin{bmatrix} \frac{2}{s+1} & \frac{0.4}{s+1} \\ \frac{1}{s+1} & \frac{0.6}{s+1} \end{bmatrix}$$

解耦后不改变特征值

单位矩阵法

其他方法

# 模型预测控制 Model Predictive Control

### 模型预测控制的特点：

- 1、简化了建模过程和计算；
- 2、采用了滚动优化策略；
- 3、预测控制算法除一般线性过程外，已推广到有约束条件、大时延、非线性等过程，获取较满意的控制效果；
- 4、鲁棒性好。

已知无约束线性模型预测控制中的预测模型可以表示为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

最优控制的成本函数可以表示为

$$J = x^T(N)Px(N) + \sum_{k=0}^{N-1} x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k) \quad (\text{控制序列长度为 } N)$$

其中 $x(N)$ 是末态,  $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 均为实对称正定矩阵, 分别刻画了末态、过程状态和控制量的惩罚。

(1) 在进行求解时候, 我们常常会使用如下的等价形式, 即

$$J = x^T(0)Qx(0) + \bar{x}^T\bar{Q}\bar{x} + \bar{u}^T\bar{R}\bar{u}$$

这里 $\bar{x} = [x(1) \ \cdots \ x(N)]^T$ ,  $\bar{u} = [u(0) \ \cdots \ u(N-1)]^T$ 。

请给出 $\bar{Q}$ 和 $\bar{R}$ 的具体形式, 用 $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 表示。

(2) 另外, 注意到 $\bar{x}$ 可以由 $x(0)$ 和 $\bar{u}$ 表示, 记为 $\bar{x} = \bar{S}\bar{u} + \bar{T}x(0)$ 。请给出 $\bar{S}$ 和 $\bar{T}$ 的具体形式,

用 $A$ 、 $B$ 表示。(提示: 例如 $x(2) = A^2x(0) + ABu(0) + Bu(1)$ )

(3) 所要求取的最优控制序列 $\bar{u}^*$ , 即是在 $x(0)$ 已知的情况下, 使得成本函数 $J$ 最小的控制序列。请证明

$$(\bar{R} + \bar{S}^T\bar{Q}\bar{S})\bar{u}^* + \bar{S}^T\bar{Q}\bar{T}x(0) = 0$$

解答:

2023年05月20日 星期六 18

(1)

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P \end{bmatrix}$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

(2)

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} B & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ AB & B & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & AB & B & 0 & \cdots \\ A^{N-2}B & \cdots & AB & B & 0 \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \cdots & AB & B \end{bmatrix}$$

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \dots \\ A^{N-1} \\ A^N \end{bmatrix}$$

(3)

$$\begin{aligned} J &= (\bar{S}z + \bar{T}x_0)' \bar{Q} (\bar{S}z + \bar{T}x_0) + z' \bar{R} z + x_0' Q x_0 \\ &= \frac{1}{2} z' 2(\bar{R} + \bar{S}' \bar{Q} \bar{S}) z + x_0' 2\bar{T}' \bar{Q} \bar{S} z + \frac{1}{2} x_0' 2(Q + \bar{T}' \bar{Q} \bar{T}) x_0 \\ &= \frac{1}{2} z' H z + x_0' F' z + \frac{1}{2} x_0' Y x_0 \end{aligned}$$

J最小, 则要求其导数为0

$$\nabla_z J = H z + F x_0 = 0$$

即

$$(\bar{R} + \bar{S}' \bar{Q} \bar{S}) \bar{u}^* + \bar{S}' \bar{Q} \bar{T} x(0) = 0$$

## 复习

考试题型:

- 填空
- 判断
- 选择
- 简答
- 计算
- 综合

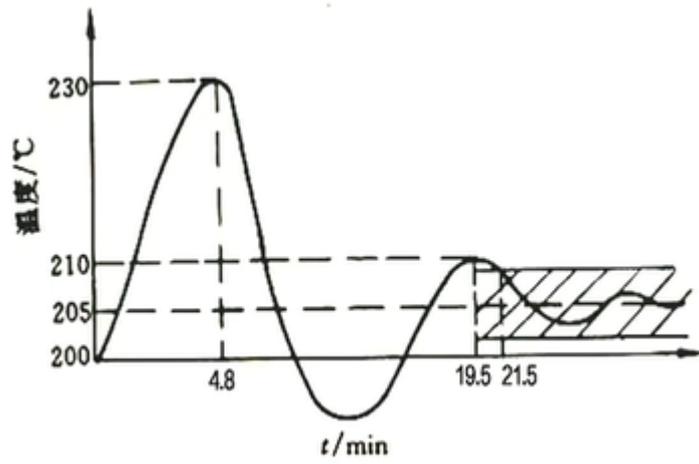
### 1. 过程控制系统

- 特点: 滞后、大延迟
- 分类:
  - 系统结构特点-前馈、反馈、复合
- 发展过程-三个阶段: 局部、集中、集散

例题:

设定值200, 进入稳态±2%

性能指标: 最大偏差、余差、衰减比、振荡周期、过渡时间



## 2. 检测仪表

绝对误差、基本误差、仪表精度、变差

温度检测:

热电偶-较高温度、热电阻-较低温度

均为接触式测量元件

### 查表法测温

K型,  $E(t, t_0) = 34.516\text{mV}$ ,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $t = 850^\circ\text{C}$

## 镍铬—镍硅热电偶分度表（简表）

分度号 K

$t_0=0^{\circ}\text{C}$ , E/mV

t/°C	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	0.397	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.850	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.919	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.632	13.039	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.327	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.325	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.897
1000	41.269	41.657	42.045	42.432	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.238	46.612	46.985	47.356	47.726	48.059	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.049
1300	52.398									

### 中间温度定律

#### 压力检测

- 弹性式压力计
- 电气式压力计
- DDZ-III

#### 压力表安装

#### 流量检测

- 节流式-固定横截面
- 转子式-恒压降
- 椭圆齿轮
- 涡街

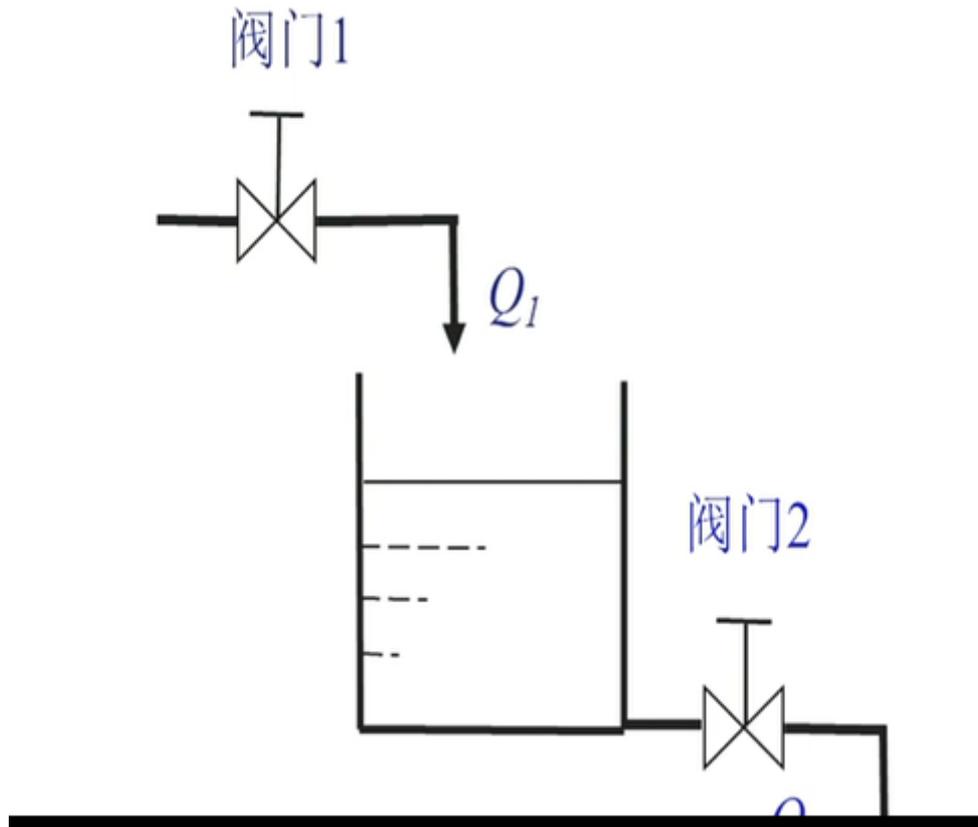
计算流量公式:

流量与节流件前后压差成正比

- 机理法
- 测试法
- 混合法

机理法：变化率-单容水箱建模过程-阀门1

时域响应、曲线K、T



#### 4. 第六章-简单控制系统设计

三大原则：经济性、**安全性**、稳定性

被控变量的选取-直接、间接

控制变量-其它的视为干扰： $\tau$  (小)、 $T$  (小)、 $K$  (大)

仪表符号&工艺流程图

LT、FC、PT

PID-连续控制

- 断续控制：双位、三位控制、开关控制
- 消除延迟：继电器

I：消除余差、系统稳定性下降-比例P下降/上升

调节阀

- 气动、电动调节阀
- 类型
- 适用场景
- 流量特性-快开、直线、对数、抛物线

理想、工作特性-调节度S-畸变。。。。

气开、气关的选择

流通能力系数C-计算和选取

**确定各个环节的正反作用-奇数个反作用环节**

控制器：被控变量增加-输出增加-正作用；反之反作用

5. 第七章-复杂控制系统

- 串级控制系统-管式加热炉

正反作用

- 前馈

对单一扰动进行补偿-静态补偿较多

一般不会单独使用

- 反馈
- 大滞后

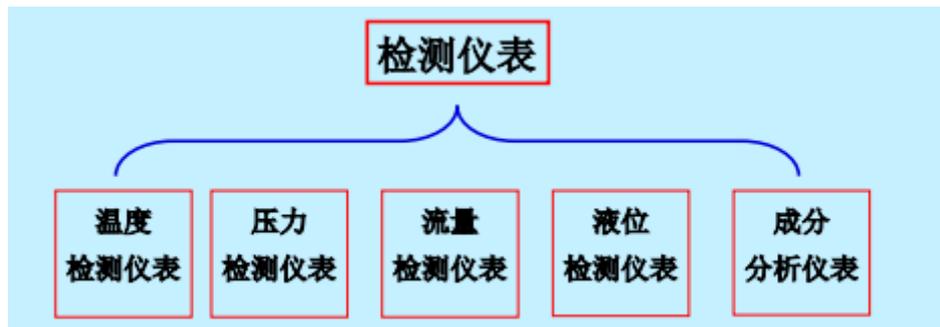
解耦

相对增益定义

计算方法

被控对象-被控量

# PPT纰漏



第5次课PPT-44页

“液位检测仪表”→“物位检测仪表”

## 第5章 被控过程的数学模型

### 数学模型的作用：

- 1、设计过程控制系统及整定控制参数的重要依据；
- 2、指导生产工艺及其设备的设计与操作；
- 3、对被控过程进行仿真研究；
- 4、培训运行操作人员；
- 5、工业过程的故障检测与诊断。

### 数学模型的要求：

**总得原则：**一是尽量简单，二是正确可靠。

第5次课PPT-48页

总得原则→总体原则