

## 第一章P16页思考与习题

1-1 自动控制系统主要由哪里些环节组成？各环节起什么作用？

答：自动控制系统由被控对象、测量变送器、执行器（控制阀）和控制器组成。

**被控对象**：是指被控制的生产设备或装置。

**测量变送器**：用于测量被控变量，并按一定的规律将其转换为标准信号作为输出。

**执行器**：常用的是控制阀，接受来自控制器的命令信号，用于改变控制阀的开度。

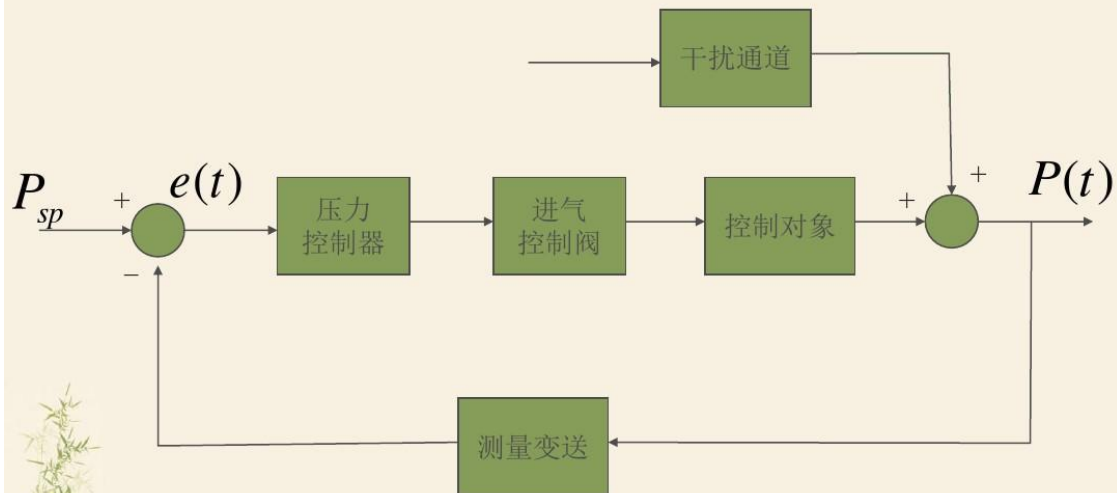
**控制器**：它将被告控变量的测量值与设定值进行比较，得出偏差信号 $e(t)$ ，并按一定规律性输出控制信号 $u(t)$ 。

## 1-2 试讨论比较常见的计算机控制装置的系统结构与特点

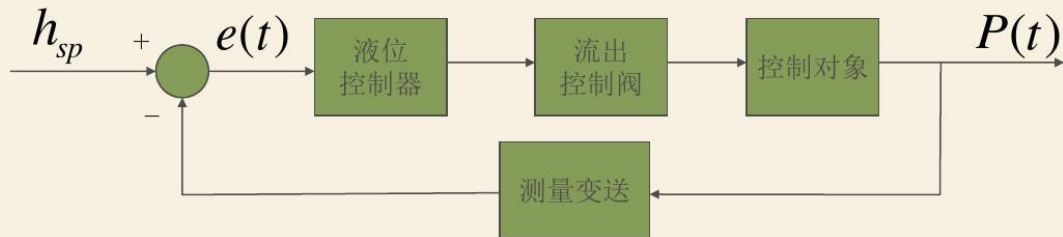
- 1) 直接数字控制：计算灵活，不仅能实现典型的PID控制规律，还可以分时处理多个控制回路。
- 2) 集中型计算机控制系统：可实现解耦控制、联锁控制等各种更复杂的控制功能；信息集中，便于实现操作管理与优化生产；灵活性大，控制回路的增减、控制方案的改变可由软件来实现；人机交互好，操作方便。
- 3) 集散控制系统：同时适应管理与控制两方面的需要，一方面使用若干个控制器完成系统的控制任务，每个控制器实现一定的控制目标，可以独立的完成数据采集、信号处理、算法实现与控制输出等功能；另一方面，强调系统的集中性。

### 1-3

- P:被控变量，储罐：被控对象
- U:控制变量， 进气流量：操纵变量
- 被控变量：被控对象需要维持在其理想值的工艺变量，也是测量变送的输入。
- 控制变量：控制器的输出电信号。
- 操作变量：执行器的操作对象，对被控变量有影响。
- 扰动变量：影响被控变量的变量（除了操作变量）。



1-4 以图1-16所示的液位控制系统为例，当进料量  $Q_i$  突然增大时，详细说明系统如何运用反馈控制机制来实现液位定值控制之目的。



假设控制阀为气关阀，控制器为反作用，偏差为指定值与测量值之差。

### 习题2-1 工业过程中被控对象的动态特性有哪些特点？

答：根据输出相对于输入变化的响应情况可将过程分为两大类：自衡过程和非自衡过程。

**自衡过程：**当输入变化时，无需外加的任何控制作用，过程能够自发地趋于新的平衡状态的性质称为自衡性。自衡过程包括纯滞后过程、单容过程和多容过程。

**非自衡过程：**与自衡过程不同，当输入发生变化时，非自衡过程不能够自发地趋于新的平衡状态。



## 习题2-2

- 液阻：凡是能局部改变液流的通流面积使液流产生压力损失（阻力特性）或在压力差一定情况下，分配调节流量（控制特性）的液压阀口以及类似结构，如薄壁小孔、短孔、细长孔、缝隙等，都称之为液阻。各种液阻都应满足流量压力方程。液阻可类似电阻用 $R=P/q$ 确定， $P$ 与液位差 $\Delta H$ 有关。
- 或者，当液体流过一段较长的管道或各种阀孔、弯管及管接头时，由于流动液体各质点之间以及液体与管壁之间的相互摩擦和碰撞会产生阻力，这种阻碍液体流动的阻力称为液阻。液阻的大小由流量和压力决定

### (1) 据液体力学原理有：

$$\frac{AdH}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_3$$

$$\frac{Ad\Delta H}{dt} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - \Delta Q_3$$

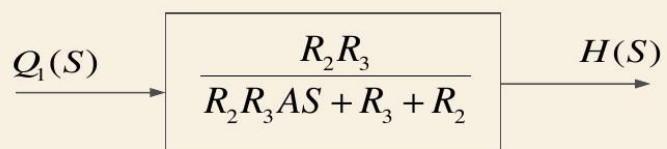
$$\Delta Q_2 = Q_2 - Q_{20} = \frac{\Delta H}{R_2}$$

$$\Delta Q_3 = Q_3 - Q_{30} = \frac{\Delta H}{R_3}$$

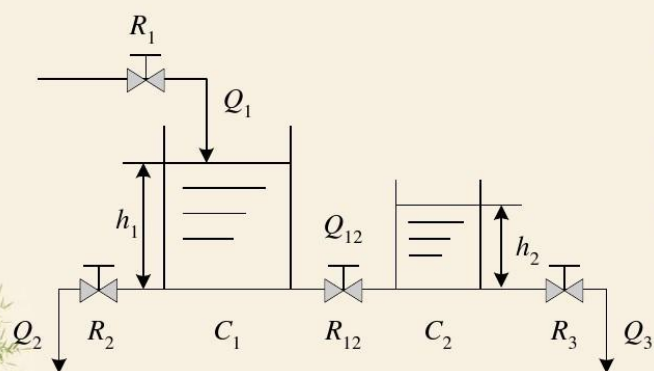
$$R_2 R_3 A S H(S) = R_2 R_3 Q_1(S) - R_3 H(S) - R_2 H(S)$$

$$G(S) = \frac{H(S)}{Q_1(S)} = \frac{R_2 R_3}{R_2 R_3 A S + R_3 + R_2}$$

## (2) 过程的方框图



## 习题 2-3：机理建模举例



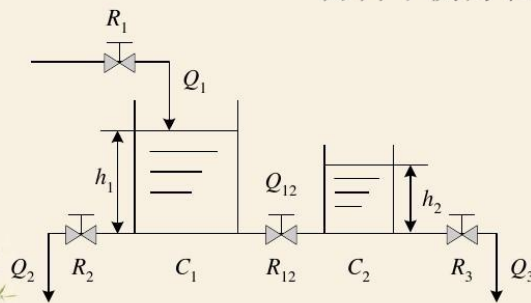
(1) 列写过程微分方程组;

(2) 画出方框图;

(3) 求传递函数

$$G_p(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)}$$

## 习题2-3：列写状态方程



物料平衡方程：  $C_1 \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_{12},$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_3$$

$$Q_2 = \frac{h_1}{R_2}, Q_3 = \frac{h_2}{R_3},$$

$$Q_{12} = \frac{h_1 - h_2}{R_{12}}$$

将流量方程代入物料平衡方程，  
即得到过程状态方程

## 习题2-3：状态方程传递函数表示

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_{12},$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = Q_{12} - Q_3$$

$$Q_2 = \frac{h_1}{R_2}, Q_3 = \frac{h_2}{R_3},$$

$$Q_{12} = \frac{h_1 - h_2}{R_{12}}$$



$$H_1(s) = \frac{1}{C_1 s} (Q_1(s) - Q_2(s) - Q_{12}(s)),$$

$$H_2(s) = \frac{1}{C_2 s} (Q_{12}(s) - Q_3(s))$$

$$Q_2(s) = \frac{H_1(s)}{R_2}, Q_3(s) = \frac{H_2(s)}{R_3},$$

$$Q_{12}(s) = \frac{H_1(s) - H_2(s)}{R_{12}}$$

由以上传递函数方程，可画出相应的方框图。



## 2-4 什么是线性化？为什么在过程控制中经常采用近似线性化模型？

- 所谓线性化，就是在一定的条件下作某种近似，或者缩小一些工作范围，而将非线性微分方程近似地作为线性微分方程来处理。
- 自然界中并不存在真正的线性系统，而所谓的线性系统，也只是在一定的工作范围内保持其线性关系。实际上，所有元件和系统在不同程度上，均具有非线性的性质。例如，机械系统中的阻尼器，在低速时可以看作线性的，但在高速时，粘性阻尼力则与运动速度的平方成正比，而为非线性函数关系。又例如，电路中的电感，由于磁路中铁心受饱和的影响，电感值与流过的电流呈非线性函数关系。对于包含非线性函数关系的系统来说，非线性数学模型的建立和求解，其过程是非常复杂的。

为了绕过非线性系统在数学处理上的困难，对于大部分元件和系统来说，当信号或变量变化范围不大或非线性不太严重时，都可以近似地线性化，即用线性化数学模型来代替非线性数学模型。一旦用线性化数学模型来近似地表示非线性系统，就可以运用线性理论对系统进行分析 and 设计。

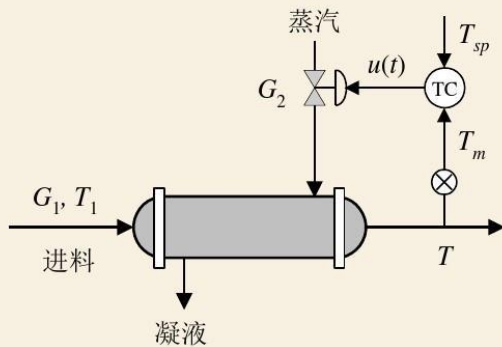
### 习题2-6 测量变送环节如下：

$$\frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau_m s}$$

- 式中  $K_m$  为增益， $T_m$  为时间常数，
- $\tau_m$  为滞后时间。
- 测量变送环节的非线性会影响这些参数，为了便于处理，一般采用线性化处理得到以上动态特性。



## 习题2-7：控制阀流量特性选择



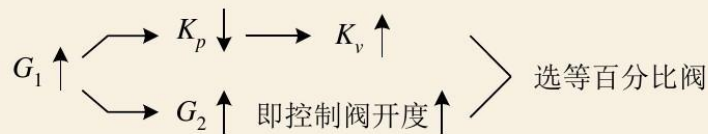
热平衡方程：

$$C_1 G_1 (T - T_1) = \lambda G_2$$

控制通道静态增益：

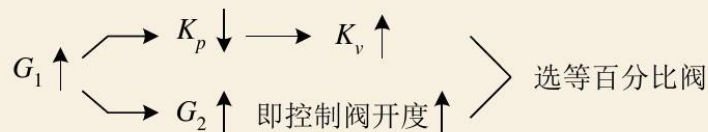
$$K_p = \frac{\partial T}{\partial G_2} = \frac{\lambda}{C_1 G_1} \propto \frac{1}{G_1}$$

$$T_p = \frac{M_1}{G_1} \propto \frac{1}{G_1} \quad \bar{G}_1 \text{ 为平衡点流量。}$$



## 被控对象的动态特性变化 对控制阀流量特性选择的考虑

从静态增益补偿的角度

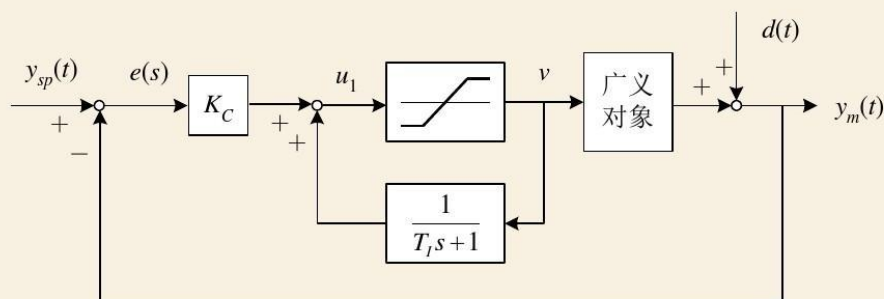


从动态特性变化的角度 (Why?)



阀特性选择请参考表2-1：控制阀固有流量特性

## 单回路系统防积分饱和原理分析



$$v = \begin{cases} u_{\min}, & u_1 \leq u_{\min} \\ u_1, & u_{\min} < u_1 < u_{\max} \\ u_{\max}, & u_1 \geq u_{\max} \end{cases}$$

讨论：正常情况为标准的PI控制算法；而当出现超限时，自动切除积分作用。为什么？

## 习题 2-8

1、注意：液阻与液位高度（压力）的关系为  $R = \Delta H / \Delta Q$ 。  
那么有：

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{20}{1000} = 0.02$$

2、根据流量压力平衡方程有  $\frac{dH}{dt}$   $H = RQ$

$$H = R(Q - A \frac{dH}{dt}) \quad \text{即：} \quad RA \frac{dH}{dt} + H = RQ$$

注意：这里在假设液位升高，那么  $\frac{dH}{dt} > 0$  否则  $\frac{dH}{dt} < 0$

$$\text{拉氏变换得：} \quad RAsH(s) + H(s) = RQ(s) \quad \text{即：} \quad \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{0.02}{0.01s + 1}$$

时间常数为：  $T = 0.01$

## 习题2-9

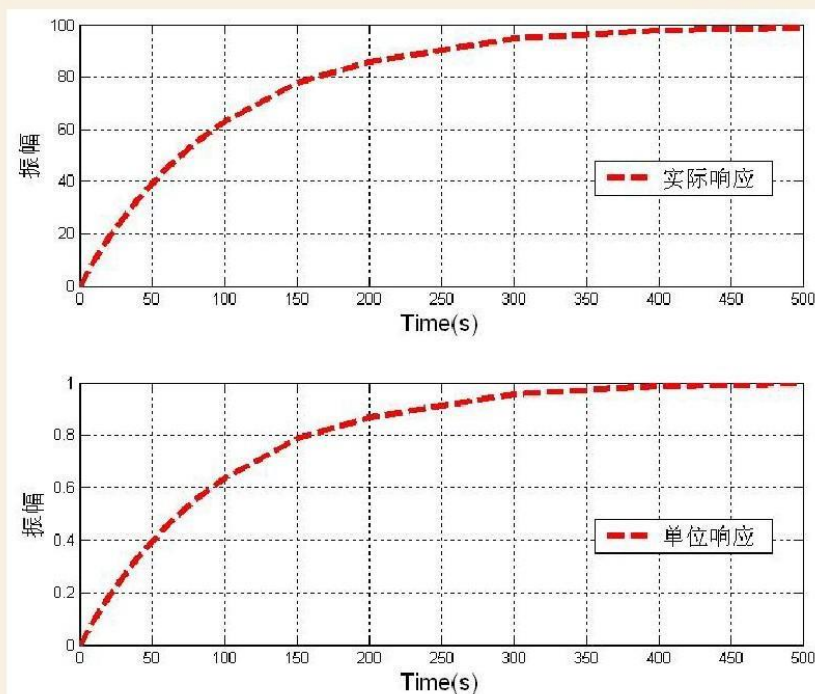
单位化: 
$$K = \frac{y_{\infty} - y_0}{y_{\max} - y_{\min}} \bigg/ 20\% = \frac{99/1000}{0.2} \approx 0.5$$

t [ 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500 ]

y = [0, 0.09596, 0.18182, 0.33333, 0.45455, 0.55556, 0.63636, 0.78788, 0.86869, 0.9596,

0.9899, 1], 假设液位的测量范围为0---1000.

单位阶跃响应, 当t=T时, 振幅为0.632, 由表可知, 当和t=100时, h=0.632, 所以, T=100.



## 习题2-10

◉ 单位阶跃响应:  $y^* = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)}$

◉ 取:  $y^*(t_1) = 0.4, \quad y^*(t_2) = 0.8$

查表得:  $t_1 = 23, \quad t_2 = 43$  因为:  $\frac{t_1}{t_2} = 0.53 > 0.46$

则说明该阶跃响应需要更高级的函数才能拟全的更好,

查表2-2得,  $n=3$

◉ 由:  $T \approx \frac{t_1 + t_2}{2.16 \times 3} = 10, \quad K_p = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} = \frac{2}{1} = 2$

◉ 得:  $G(s) = \frac{2}{(10s+1)^3}$

## 习题2-11

◉ 依题意系统模型为:

$$G(s) = \frac{K_p}{Ts+1}$$

$$K_p = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} = \frac{180}{0.01 \times 10^6} = 1.8 \times 10^{-2}$$

◉ 单位阶跃响应:  $y^* = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)}$

查表得:  $T = 5.1466 \approx 5$

得:  $G(s) = \frac{1.8 \times 10^{-2}}{5s+1}$



## 习题3-1

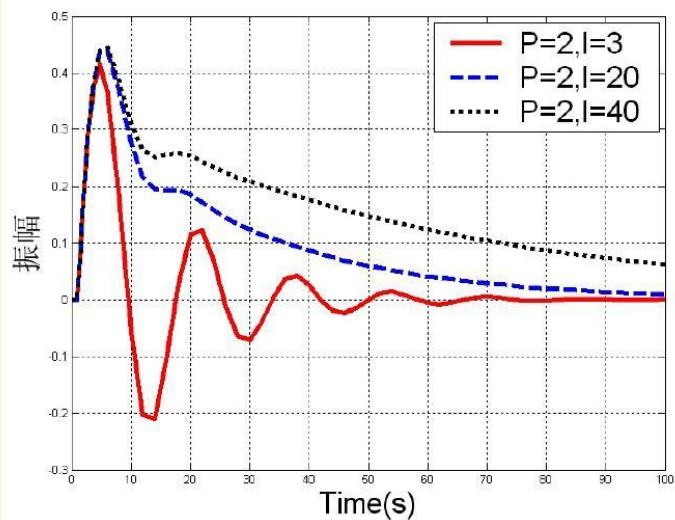
- PID控制表达式：
$$u(t) = K_c[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] + u_0$$
- 偏置值  $u_0$  是控制器的稳态输出，反映了控制系统的稳态工作点，所以它的值由控制系统的稳态输出确定。传递函数反映的是系统在工作点的动态特性，故在时域变为频域时没有这一项，即：

$$u^*(t) = u(t) - u_0 = K_c[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

## 习题3-2 仅加强控制器的积分作用

- 在相同阶跃干扰情况下，最大偏差是否增大？振荡是否加剧？

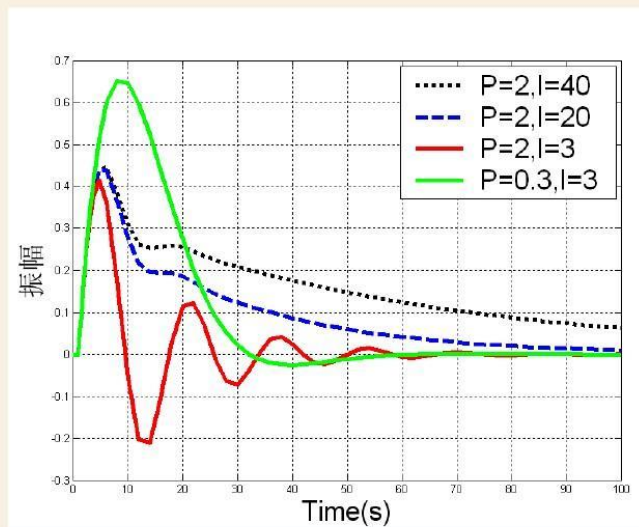
答：在相同阶跃干扰情况下，增强积分作用，最大偏差会减小，振荡会加剧。参考仿真。



## 习题3-2 仅加强控制器的积分作用

- 在相同阶跃干扰情况下，最大偏差是否增大？振荡是否加剧？

答：在相同阶跃干扰情况下，**增强积分作用**，最大偏差会减小，振荡会加剧。为了获得以前相同的稳定性，可减小 $K_c$ ，参考仿真。



## 习题3-3

- 积分饱和：**对于一个有积分功能的偏差，控制器的作用就会对偏差进行累积来改变控制器的输出。如果这时阀门已经达到饱和（已经全开或者全关），而无法继续进行调节，那么偏差将无法消除。然而由于积分作用，控制的输出仍在增加，直到达到某个极限值并停留在那里，这种情况成为积分饱和。
- 由定义可知，发生积分饱和的前提是控制器具有积分功能，控制器的饱和输出极限值要比热先机摇信号范围大。
- 后果：**系统控制效果差，产品质量无法保证，可能对人或者设备构成威胁。

## 习题3-4

• 见表3-3

(1)  $P$ 控制器:  $K_{c-P} = 0.5K_{c\max}$

(2)  $PI$ 控制器:  $K_{c-PI} = 0.45K_{c\max}$

(3)  $PID$ 控制器:  $K_{c-PID} = 0.6K_{c\max}$ ,  $K_{c-PID} = 1.2K_{c-P}$

## 习题3-5——两点法

• 设阶跃相应传递函数为:  $G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$

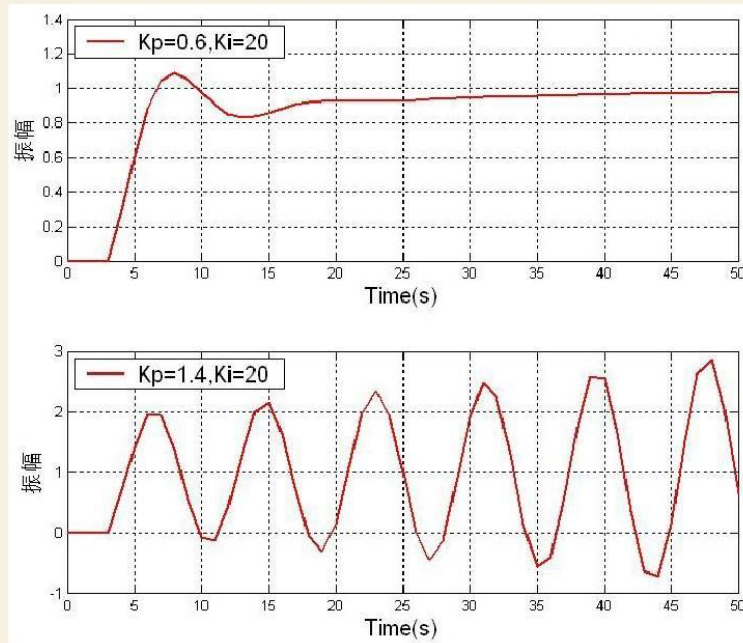
$$K = \frac{\frac{y_{\infty} - y_0}{y_{\max} - y_{\min}}}{\frac{u_1 - u_0}{u_{\max} - u_{\min}}} = \frac{15/100}{0.03} = 5$$

• 作无量纲阶跃响应:  $y^*(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y_{\infty} - y(0)}$

• 取 :  $y^*(t_1) = 0.283$ ,  $y^*(t_2) = 0.632$

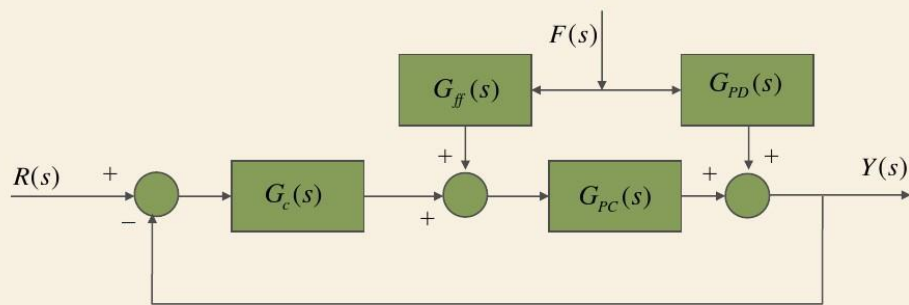
得:  $T = 1.5(t_2 - t_1), \tau = t_2 - t_0 - T = 2.2$

参考仿真实验, 对比:  $K=0.6, K_I=20$ ;  $K=1.4, K_I=20$ ;

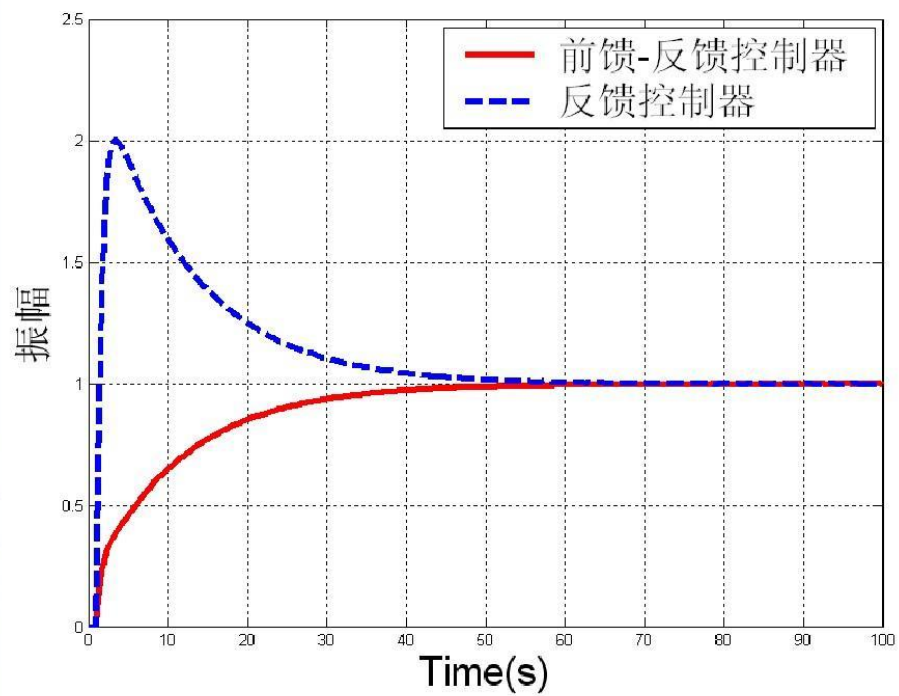
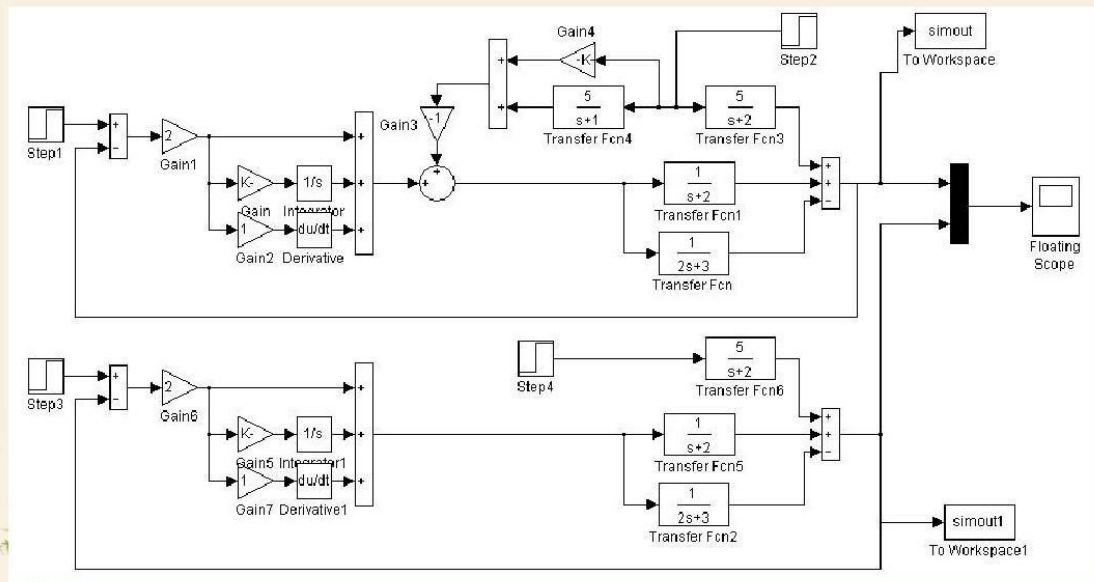


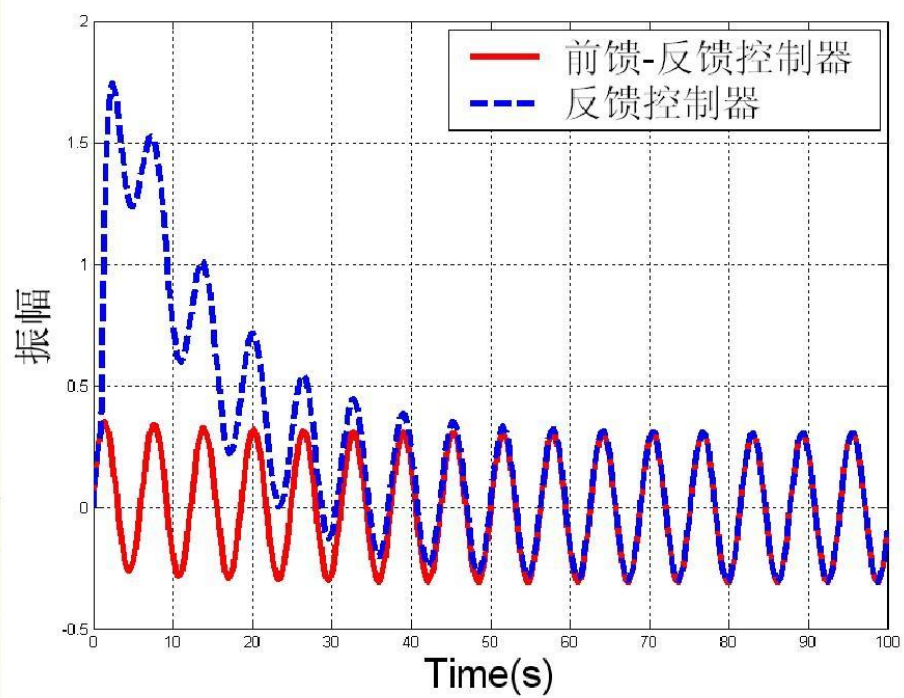
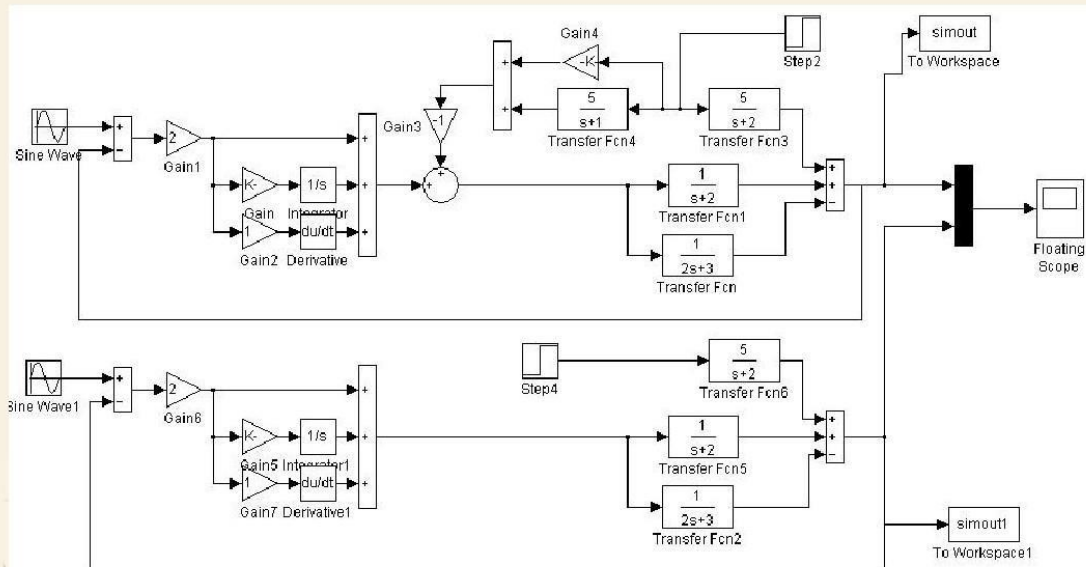
## 习题4-1

◉ 前馈反馈控制器:  $G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} = -\frac{5(2s+3)}{s+1}$









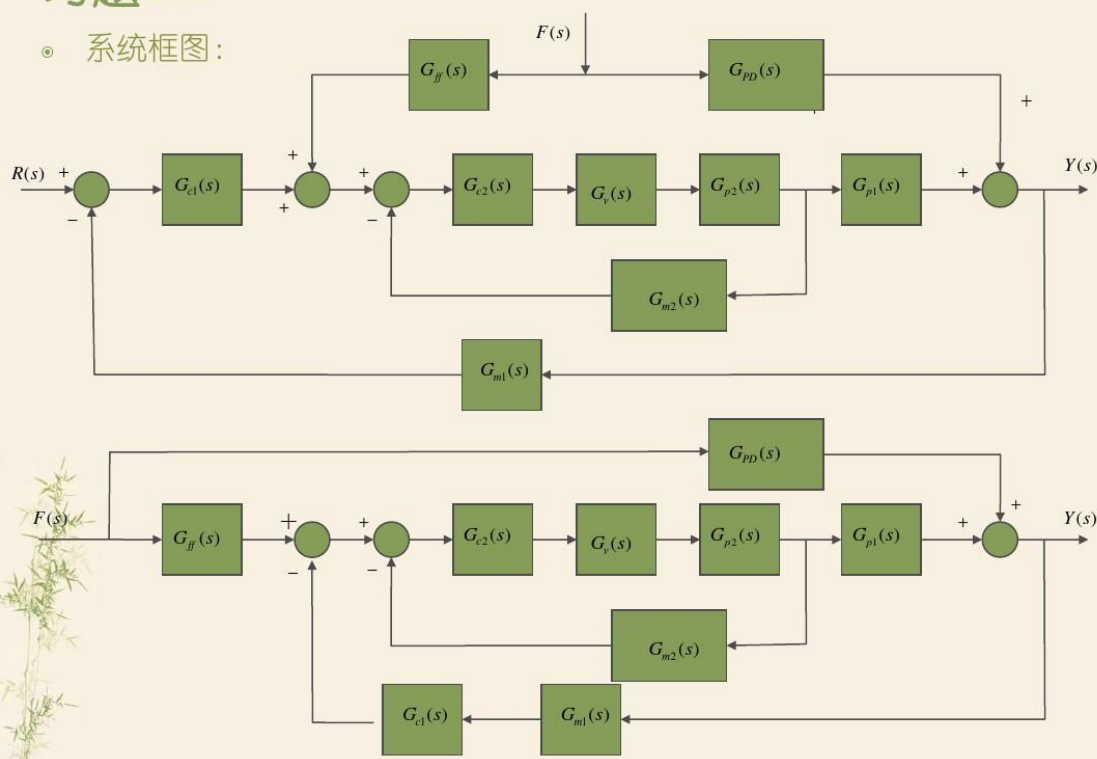
## 习题4-2

◉ 前馈控制器：

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} = -\frac{1.05(55s+1)}{0.94(41s+1)}e^{2s}$$

## 习题4-3

◉ 系统框图：



- 由图可得：

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{G_{PD} + G_{ff}G_{P1}A}{1 + AG_{P1}G_{C1}G_{m1}}, \quad A = \frac{G_{C2}G_vG_{P2}}{1 + G_{C2}G_vG_{P2}G_{m2}}$$

- 由不变性原理 得： $F(s) \neq 0, Y(s) = 0$

即： $G_{PD} + G_{ff}G_{P1}A = 0$

得：

$$G_{ff} = -\frac{G_{PD}}{G_{P1}A} = -\frac{0.5/(2s+1)}{3A/(2s+1)}, \quad A = \frac{9 \times \frac{2}{2s+1}}{1 + 9 \times \frac{2}{2s+1} \times 1} = \frac{18}{2s+19}$$

$$G_{ff} = \frac{s+9.5}{54}$$

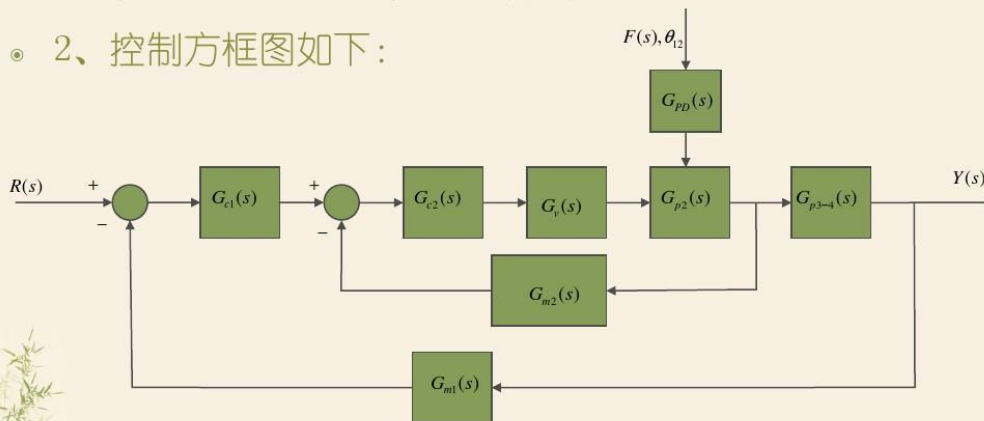
## 习题5-1

- 1、副控制器的正反作用要改变，主控制器的正反作用不改变。阀门是副加中的执行器，在主回路中，副回路作为一个整体为正作用，故执行器的改变对主回路无影响，主控制器正反作用不变。在副回路中，执行器由气开阀变以为气关阀，正反作用改变。而正反作用的选择是使系统成为负反馈系统，而副回路中除副控制器外其余正反作用不变。帮副控制器正反作用改变。
- 2、比例度的积分都要改变，副控制器的输出是改变阀门，比例度要增加，而积分时间要减小。口径变大相当于控制通道放大倍数增加，此时若比例度和积分不变则控制系统的开环放大倍数增加，系统余差变小，但是系统会变得不稳定。对于一个不稳定系统谈余差是没有意义的。因此，首先要保持系统稳定性，那么要减小控制器放大倍数，即增大比例度。此时余差肯定会变大，因此要加强积分作用，即减小积分时间，喷水消除余差。
- 3、主控制器的比例度和积分时间不改变，由于串级控制系统对副对象和控制阀特性变化具有鲁棒性，即副对象控制阀特性的变化不会影响主控制器。



## 习题5-2

- 1、最合适的应该选择 $\theta_{12}$ ，因为它包含的干扰最多，而且距离第四贮罐比较远，不容易引起系统共振。
- 2、控制方框图如下：



- 3、副控制器的选择与主回路无关，而测量变送器，副对象为正作用，调节阀为正作用，故副控制器为负作用，主控制器与主对象正反作用相反。而主对象为正作用，故主控制器为负作用。

## 习题5-3

- 应该把下面这个采用串级控制，首先，因为干扰通道时间常数为0.2，对被变量的影响相当大。其次副本回路中包含的纯滞后时间上，有利于提高副回路的快速性。第三主控制对象为大惯性环节，其响应时间比副回路要大。
- 上面那个回路，前面那个环节为大惯性环节，通道没延时，主控制对象时间常数小，响应快速，当干扰影响到副变量的时候，很快影响到主控变量，而由于大惯性环节，副回路还来不及处理干扰。

## 习题5-5

- 首先在结构上来看，串级控制由两个反馈控制回路组成，而前馈-反馈控制器由一个反馈和一个开环补偿回路叠加而成。
- 在变量上，串级控制的副参数与前馈-反馈控制的输入量是两截然不同的变量，

前者是串级控制系统中反映主被控变量的中间变量，控制作用对他产生明显的调节效果。

后者是对主被控变量有显著影响的干扰量，是完全不受控制作用约束的独立变量，引入前馈的目的是为了补偿原料干扰对输出的影响。

- 在功能上，前馈控制器与串级控制的副控制器担负不同的功能。

- 图5-73中(a)为串级控制，(b)为前馈-反馈控制。

## 习题5-7

- (1) A、B阀均选气开阀时，为正作用，

控制器为反作用，

$$T(s) \uparrow \quad e \downarrow \quad u \uparrow \quad f \uparrow \quad T'(s) \downarrow$$

- (2) A、B阀均选气关阀时，为反作用，

控制器为正作用。

$$T(s) \uparrow \quad e \downarrow \quad u \downarrow \quad f \uparrow \quad T'(s) \downarrow$$

