

2022春 过程控制系统

过程控制系统

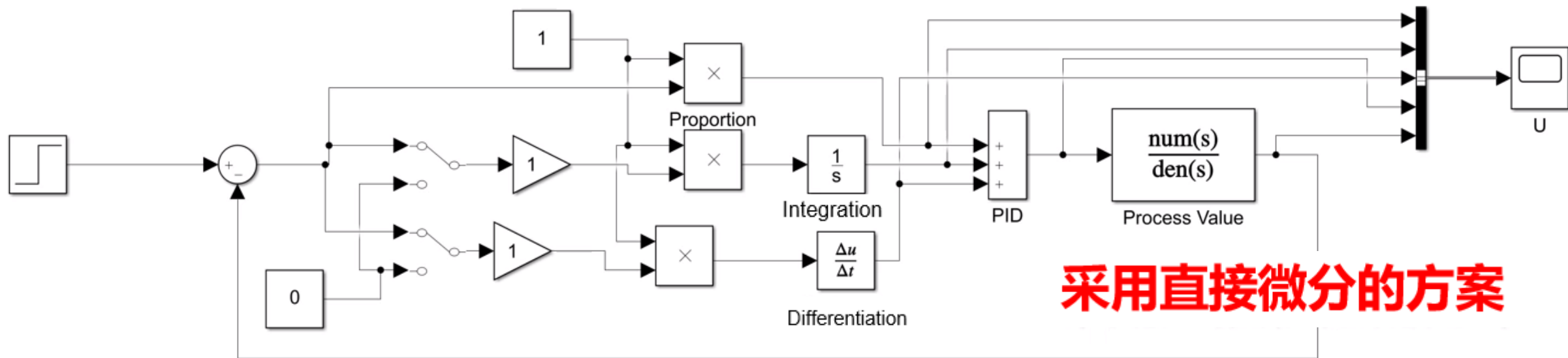
授课教师：苗子博

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。



```
sys = tf([1],[1 2 3 1]);
```

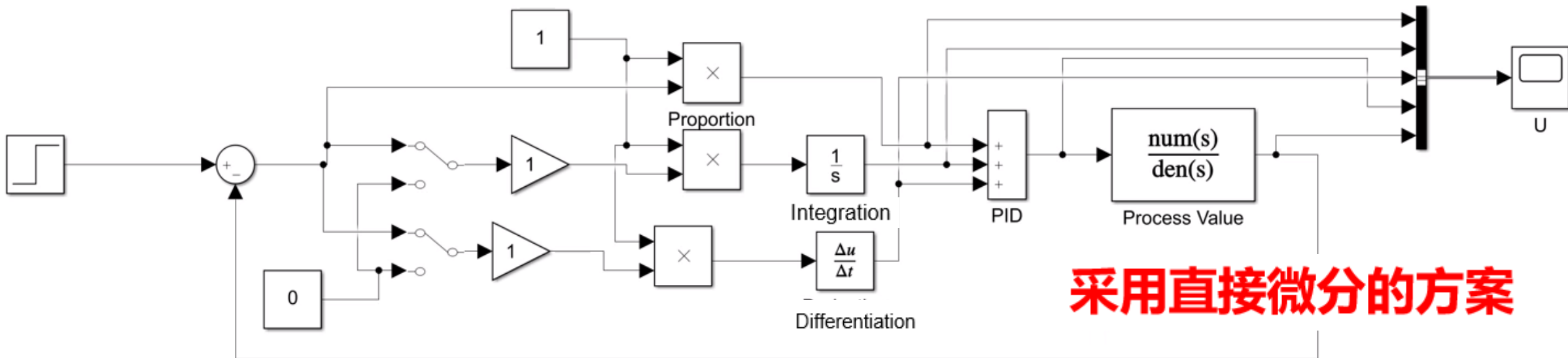
Parameters

Numerator coefficients:

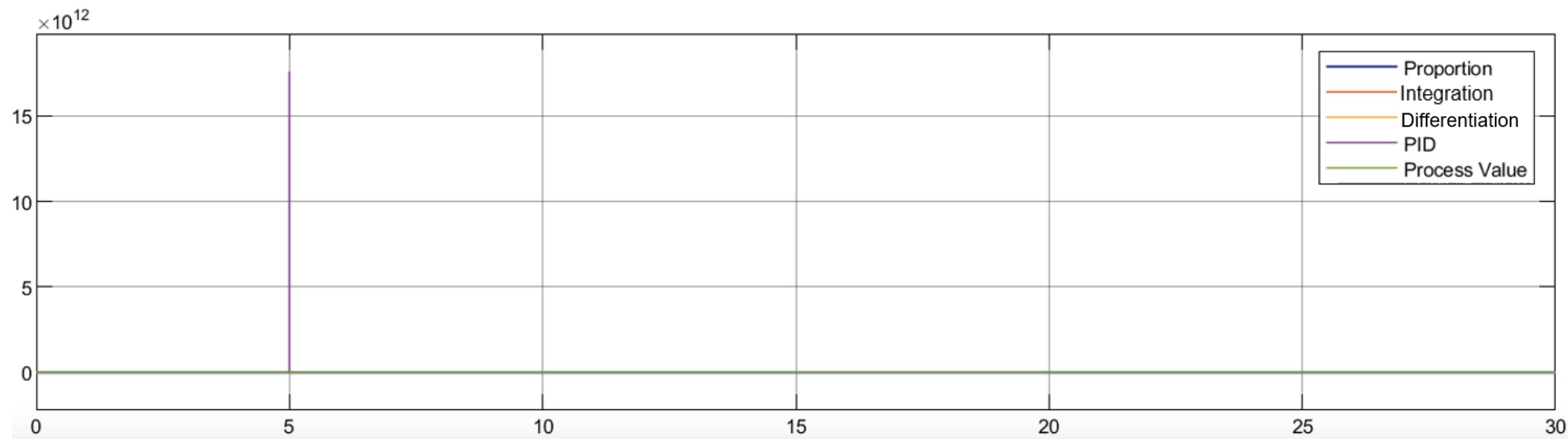
[1]

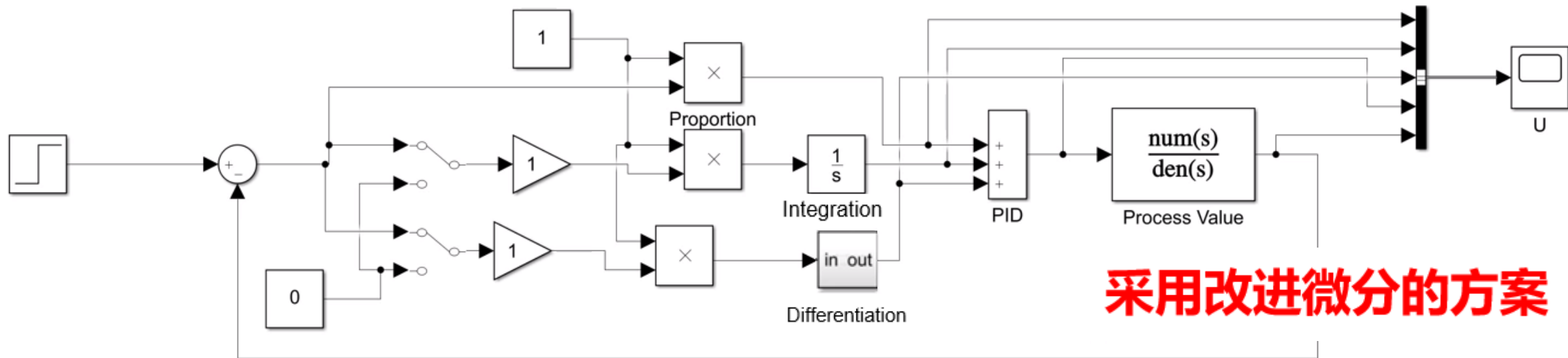
Denominator coefficients:

[1 2 3 1]

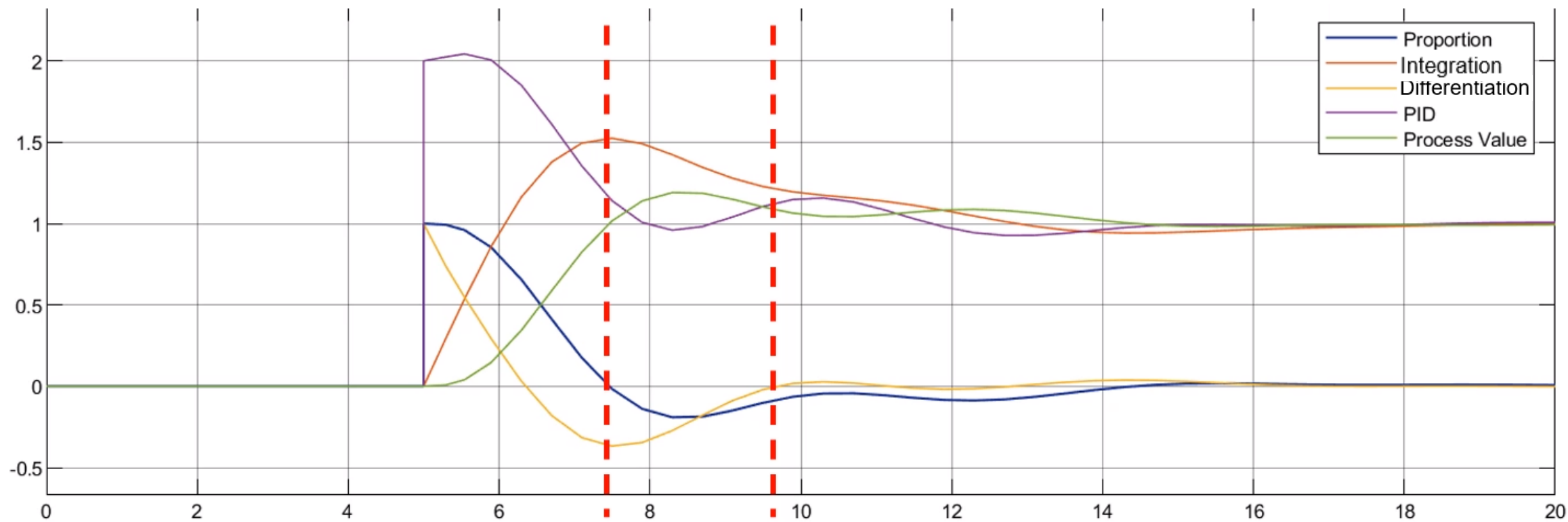


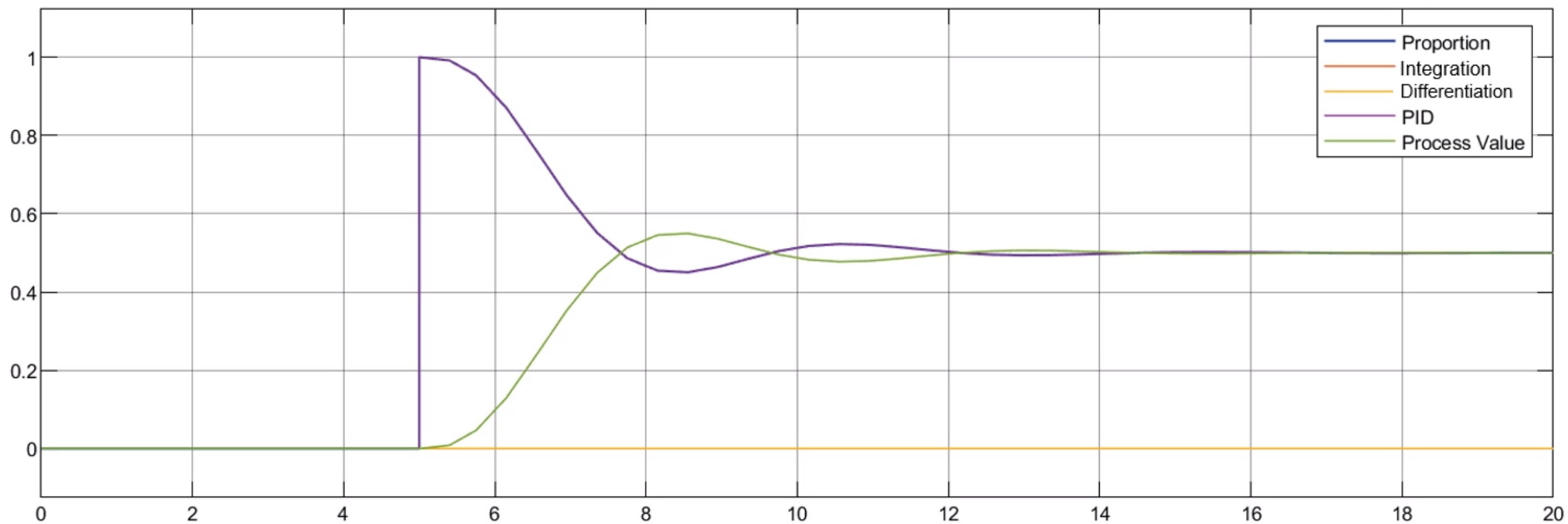
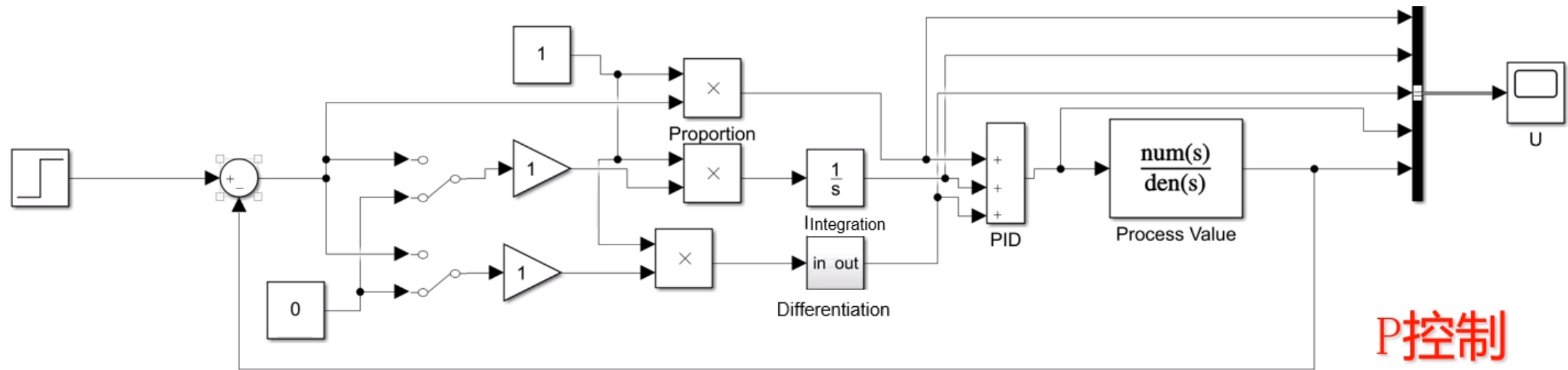
采用直接微分的方案

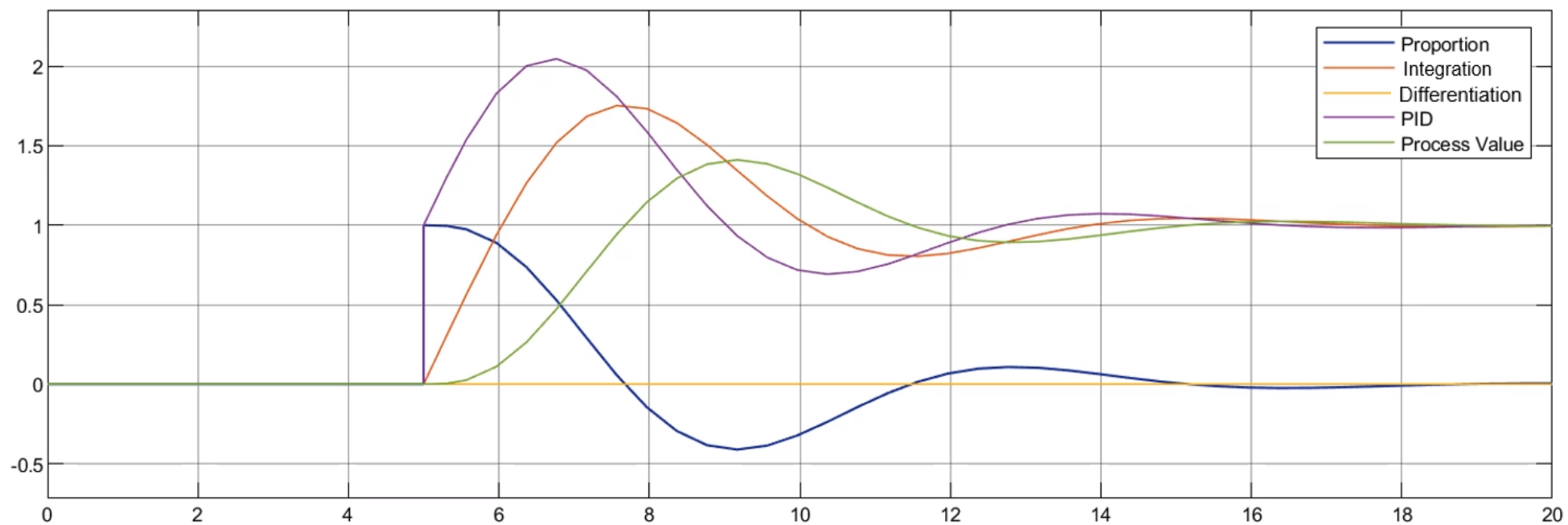
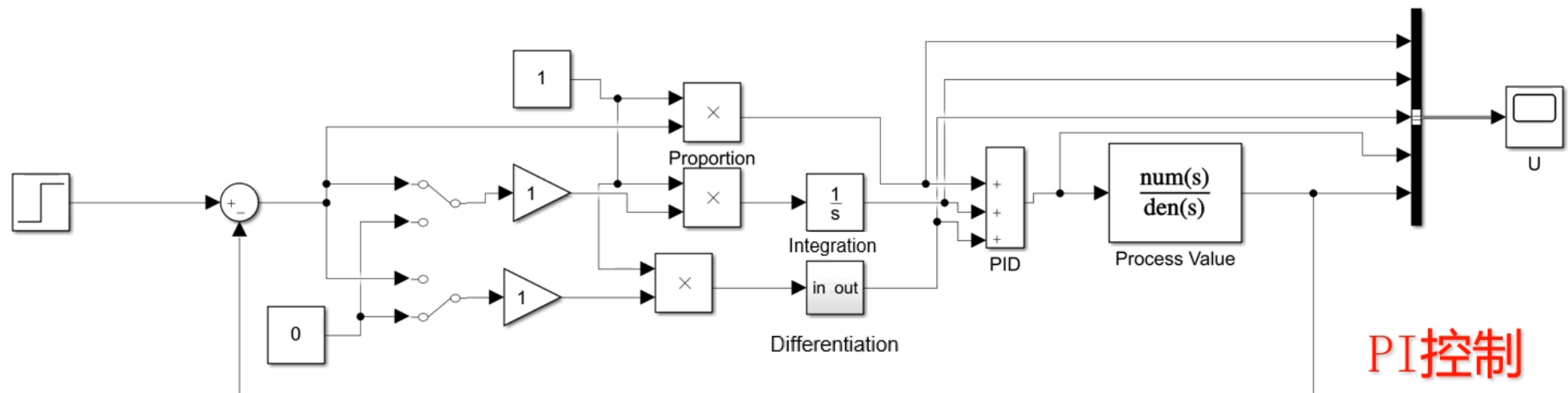


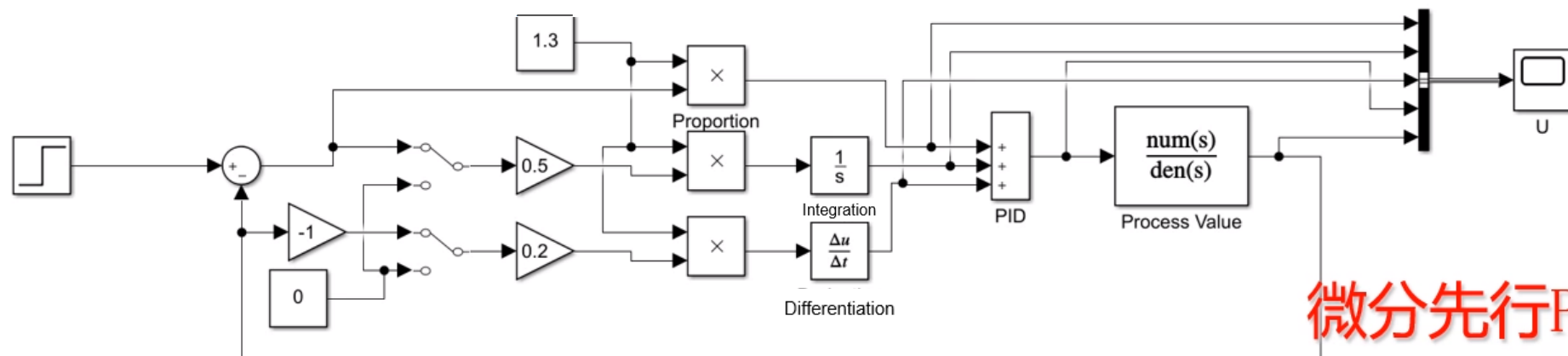


采用改进微分的方案

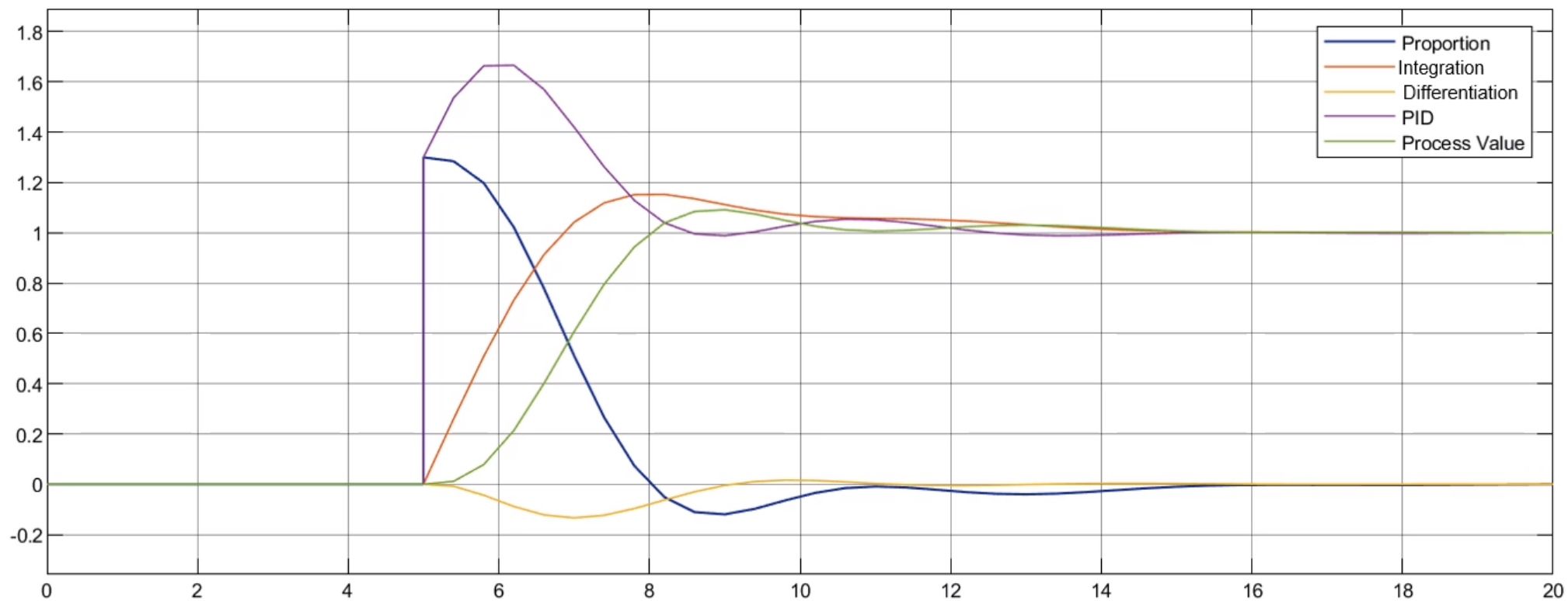




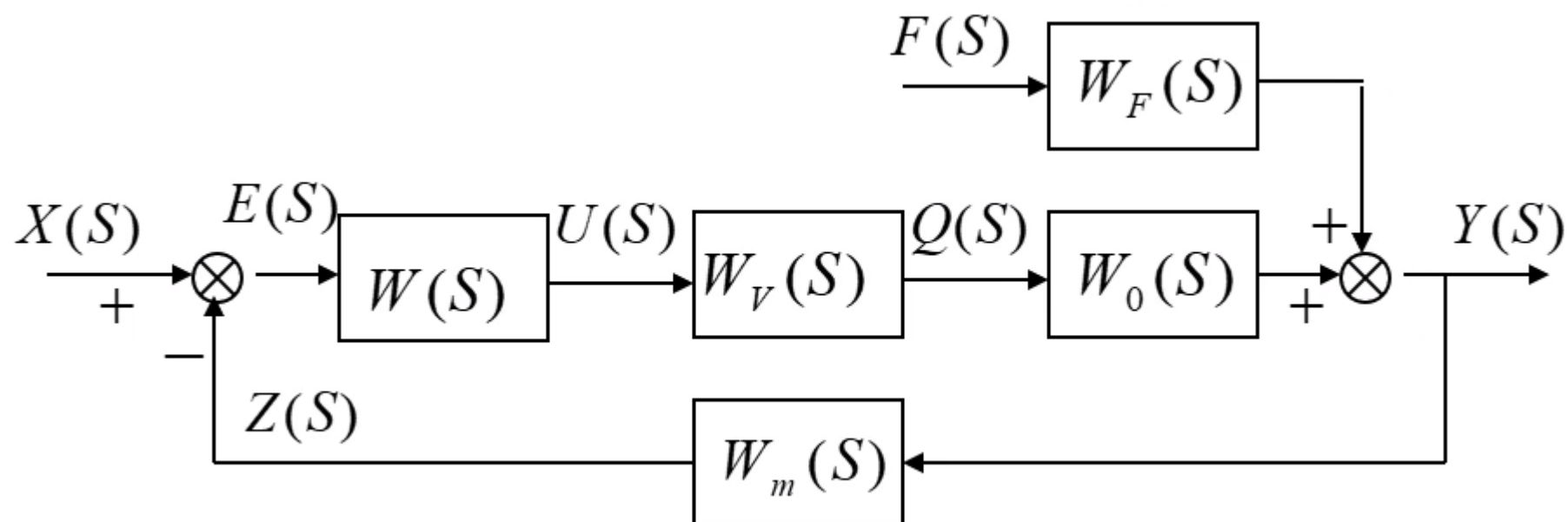




微分先行PID控制



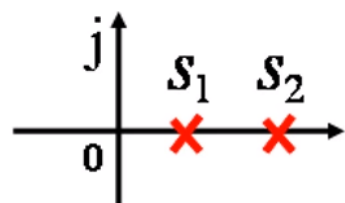
PID基本调节规律的鲁棒性分析



P, PD, PI, PID

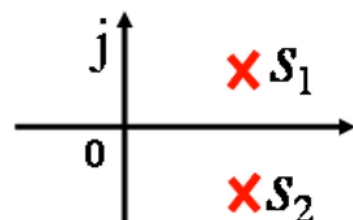
特征根在s平面上的分布 $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$

$$\zeta \leq -1$$



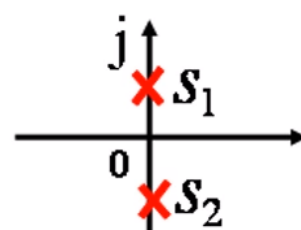
两正实根

$$-1 < \zeta < 0$$



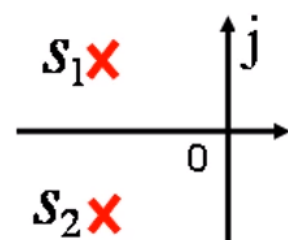
正实部的共轭复根

$$\text{无阻尼 } \zeta = 0$$



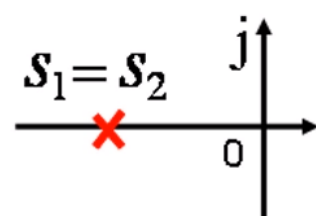
一对共轭虚根

$$\text{欠阻尼 } 0 < \zeta < 1$$



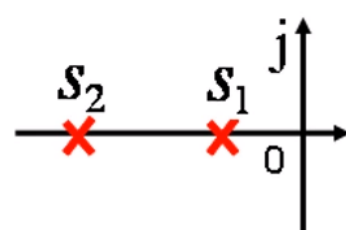
负实部的共轭复根

$$\text{临界阻尼 } \zeta = 1$$



相等的负实根

$$\text{过阻尼 } \zeta > 1$$



两不相等的负实根

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_____。



我的心里只有一件事
就是 **学习**

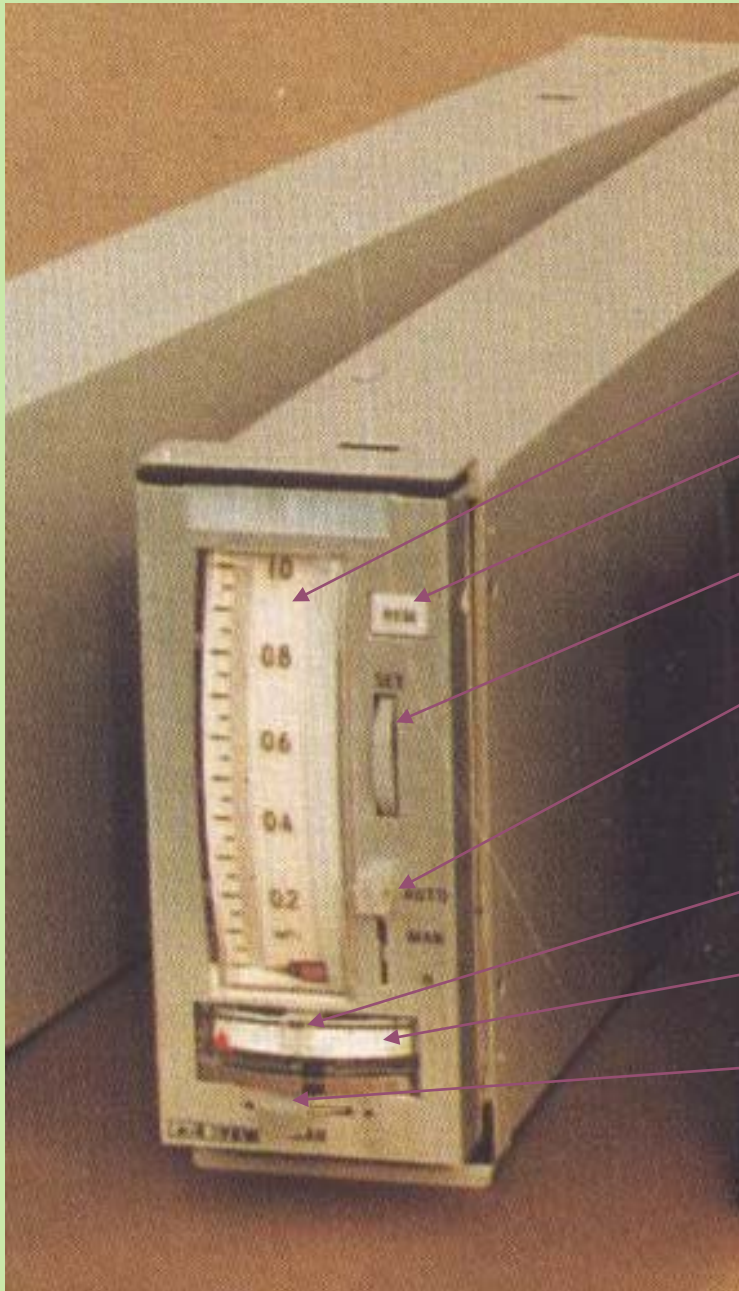
3.2 模拟式控制器

模拟式控制器用模拟电路实现控制功能。其发展经历了I型（用电子管）、II型（用晶体管）和III型（用集成电路）。

3.2.1 DDZ-III型仪表的特点

- 1) 采用统一信号标准：**4~20mA DC**和**1~5V DC**。
这种信号制的主要优点是电气零点不是从零开始，容易识别断电、断线等故障。同样，因为最小信号电流不为零，可以使现场变送器实现两线制。
- 2) 广泛采用集成电路，仪表的电路简化、精度提高、可靠性提高、维修工作量减少。
- 3) 可构成安全火花型防爆系统，用于危险现场。

3.2.2 DDZ-III型控制器的组成与操作



1-双针垂直指示器

2-外给定指示灯

3-内给定设定轮

4-自动—软手动—硬手动
切换开关

5-硬手动操作杆

6-输出指示器

7-软手动操作板键

DDZ-III基型调节器的主要功能电路有：输入电路、给定电路、PID运算电路、自动与手动（硬手动和软手动）切换电路、输出电路及指示电路。

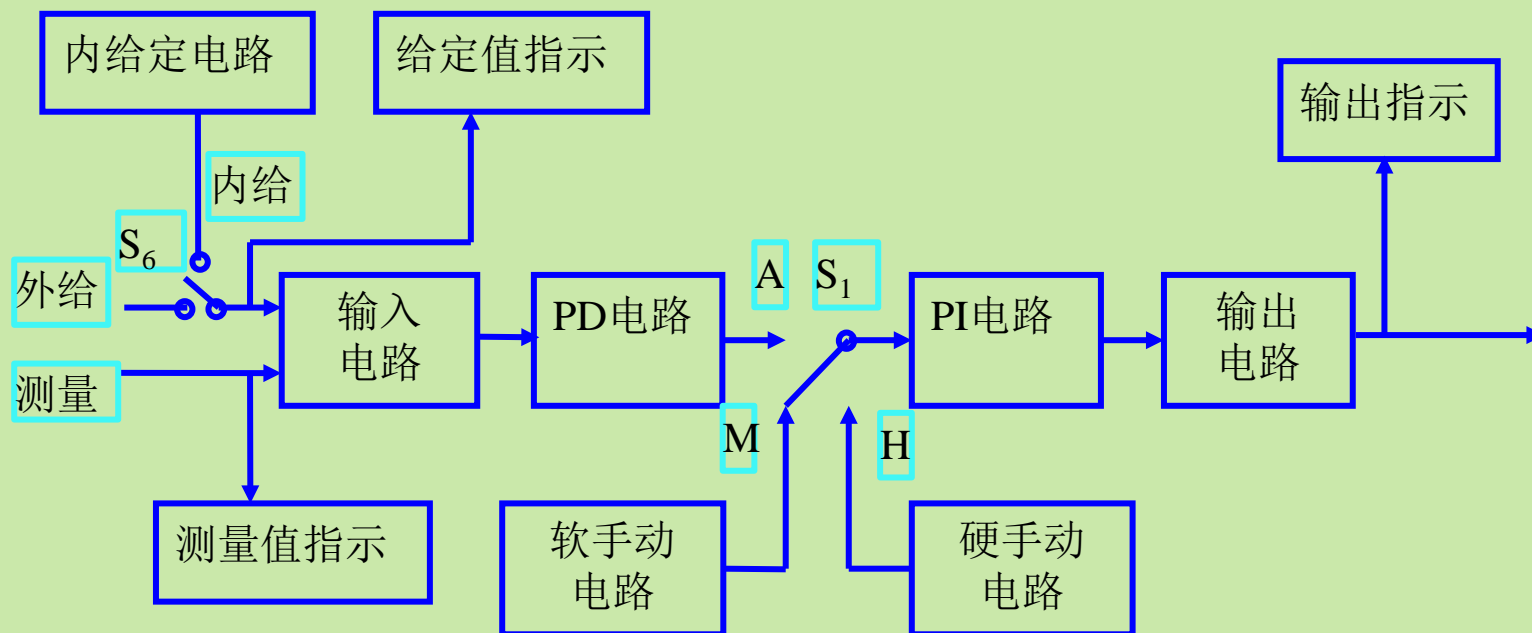
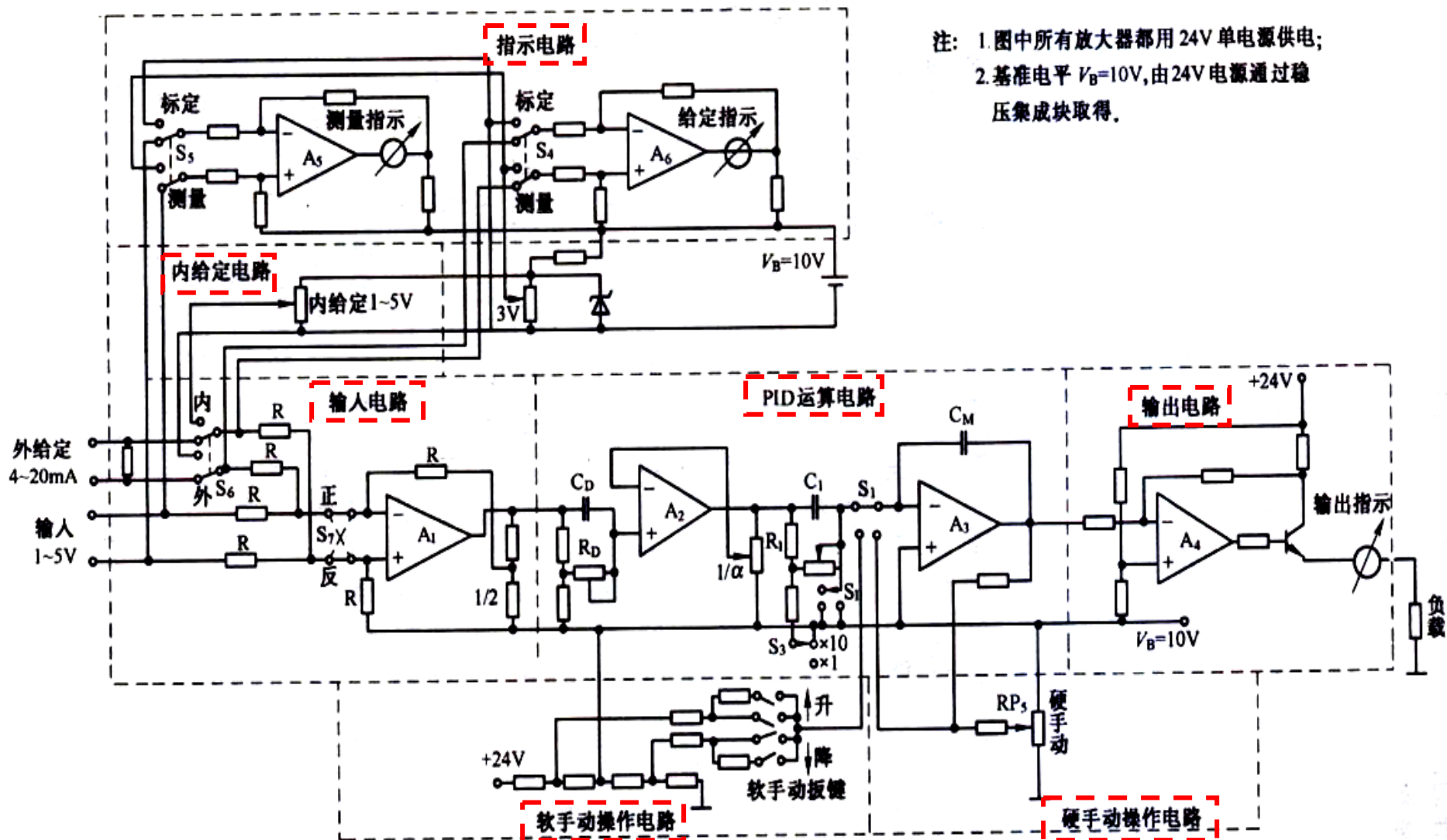


图3.11 DDZ-III型调节器结构方框图

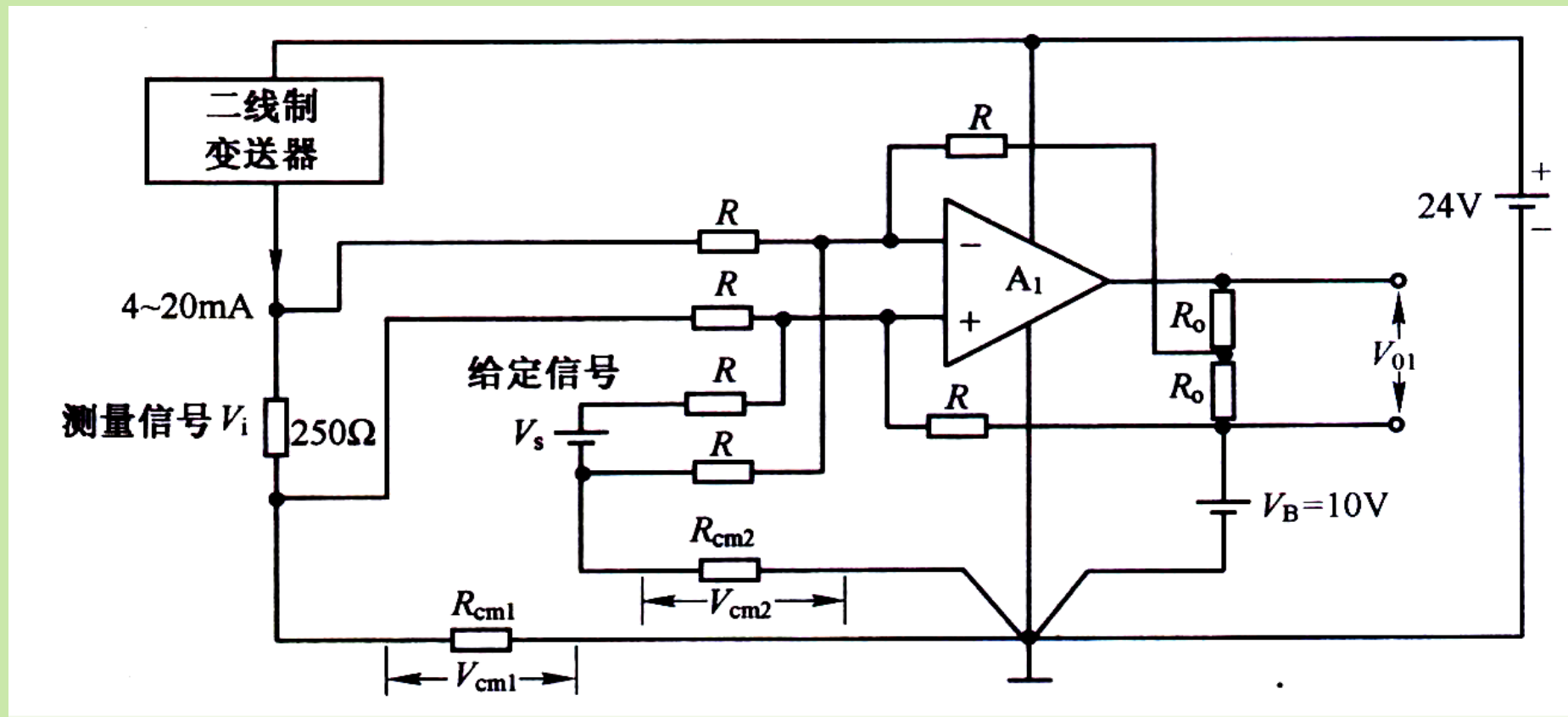
3.2.3全刻度指示调节器的线路实例



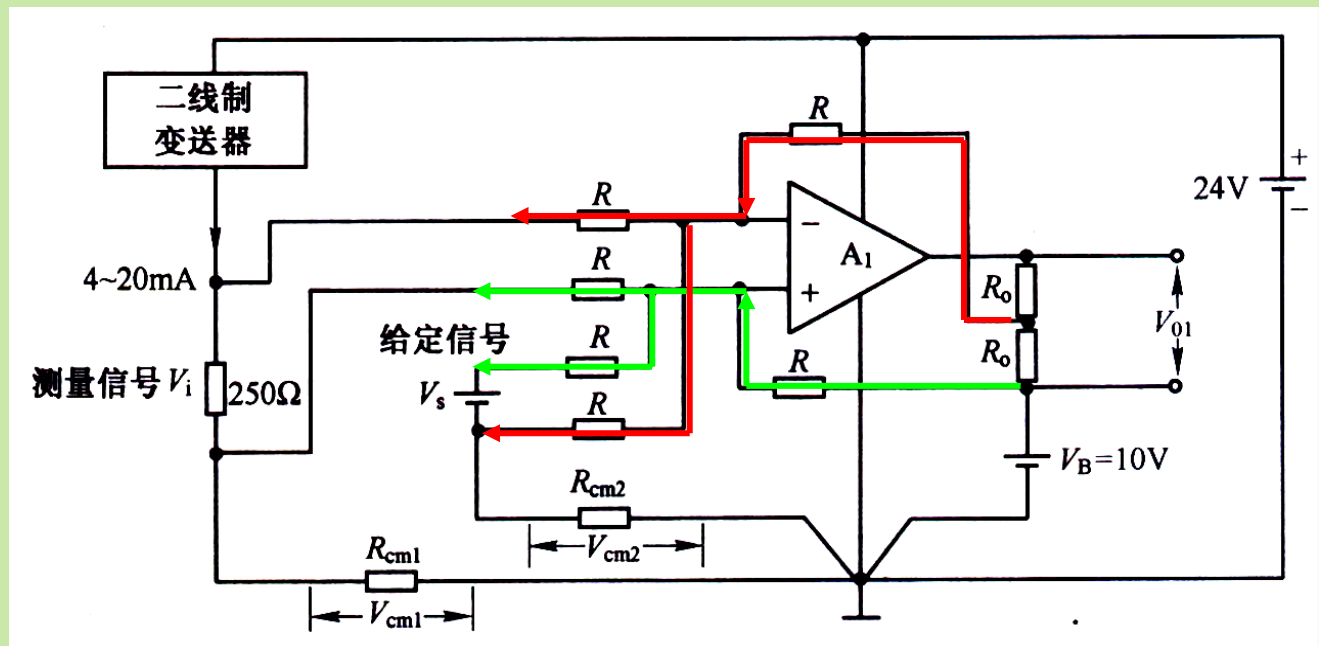
3.2.3.1 输入电路

输入电路的首要任务是求偏差 e :

$$V_{01} = k (V_{\text{给定}} - V_{\text{测量}})$$



因测量信号 V_i 和给定信号 V_s 分别通过双臂电阻差模输入到运放 A_1 的同相和反相输入端。可列出两输入节点的电流方程：



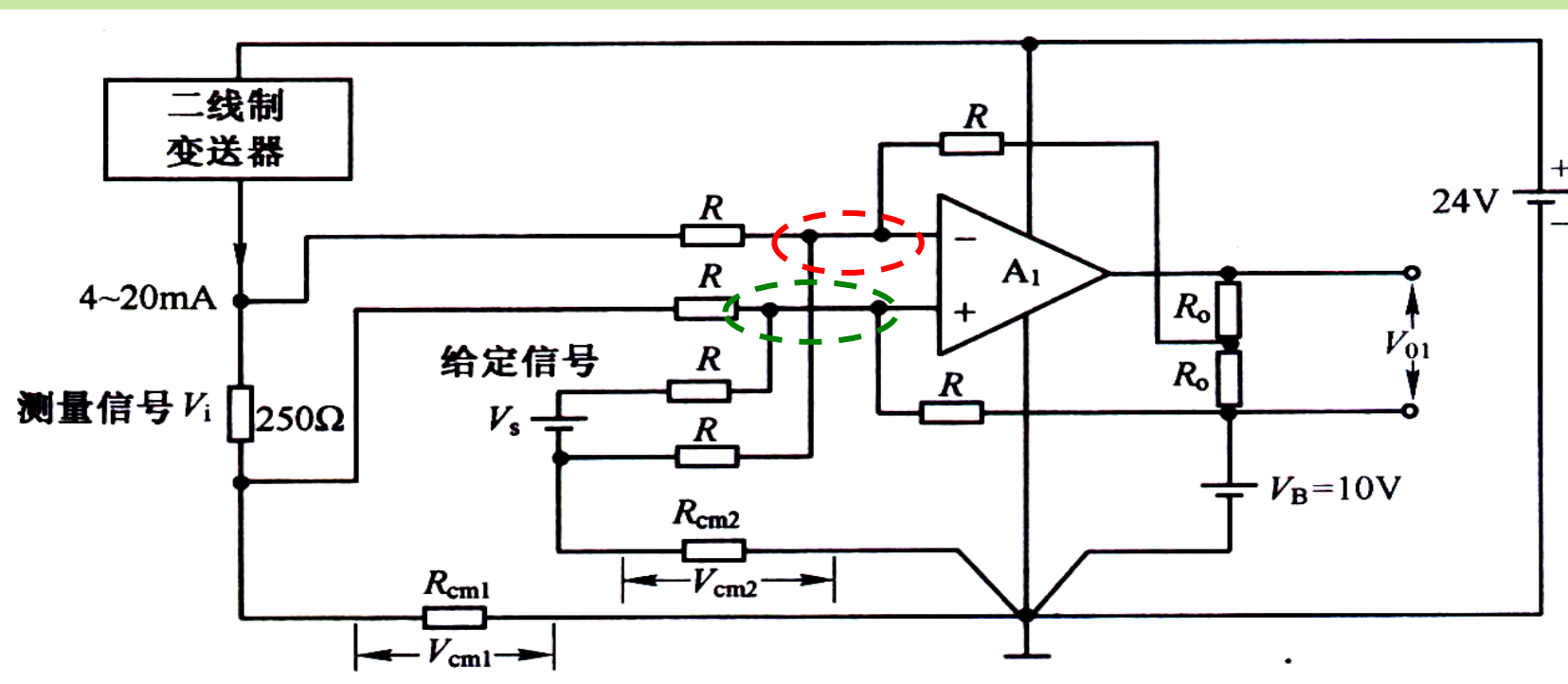
$$\frac{V_- - (V_i + V_{CM1})}{R} + \frac{V_- - V_{CM2}}{R} = \frac{(V_B + \frac{1}{2}V_{O1}) - V_-}{R}$$

$$\frac{V_+ - V_{CM1}}{R} + \frac{V_+ - (V_s + V_{CM2})}{R} = \frac{V_B - V_+}{R}$$

得

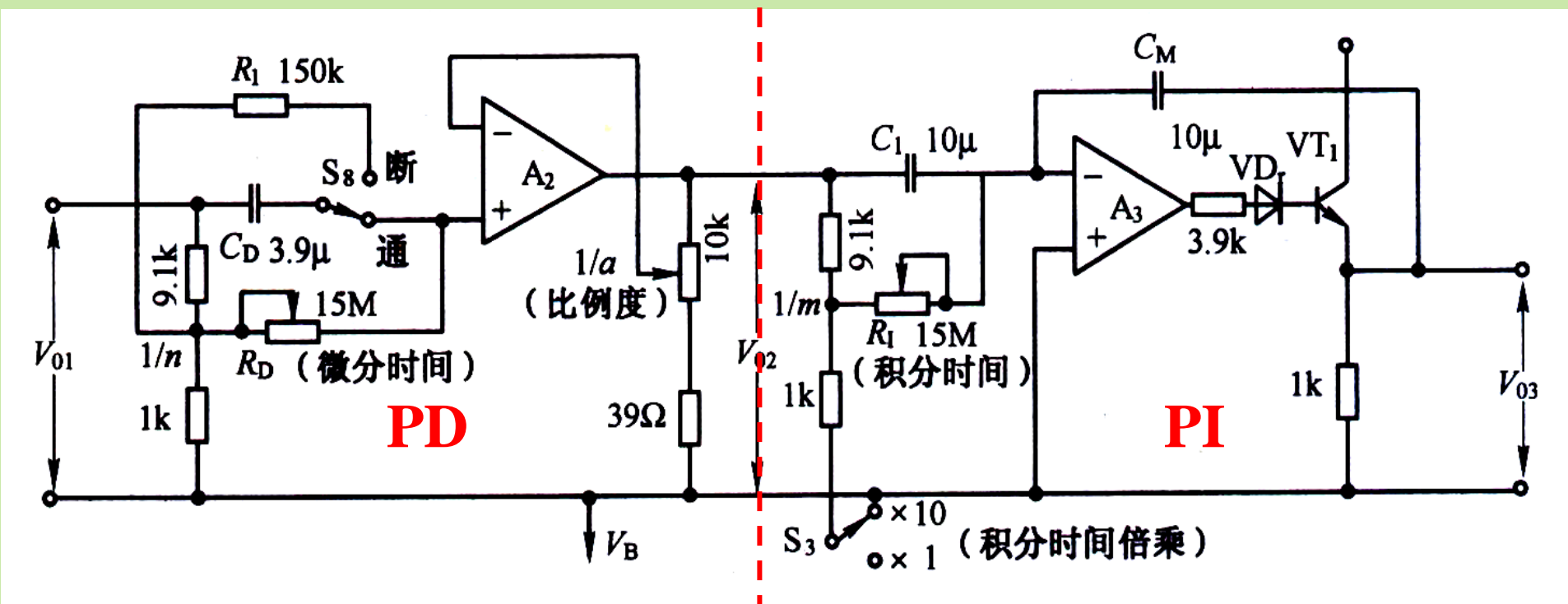
$$\begin{cases} V_- = \frac{1}{3}(V_i + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B + \frac{1}{2}V_{01}) \\ V_+ = \frac{1}{3}(V_S + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B) \end{cases}$$

而 $V_+ \approx V_-$ 则 $V_{01} = -2(V_i - V_S)$



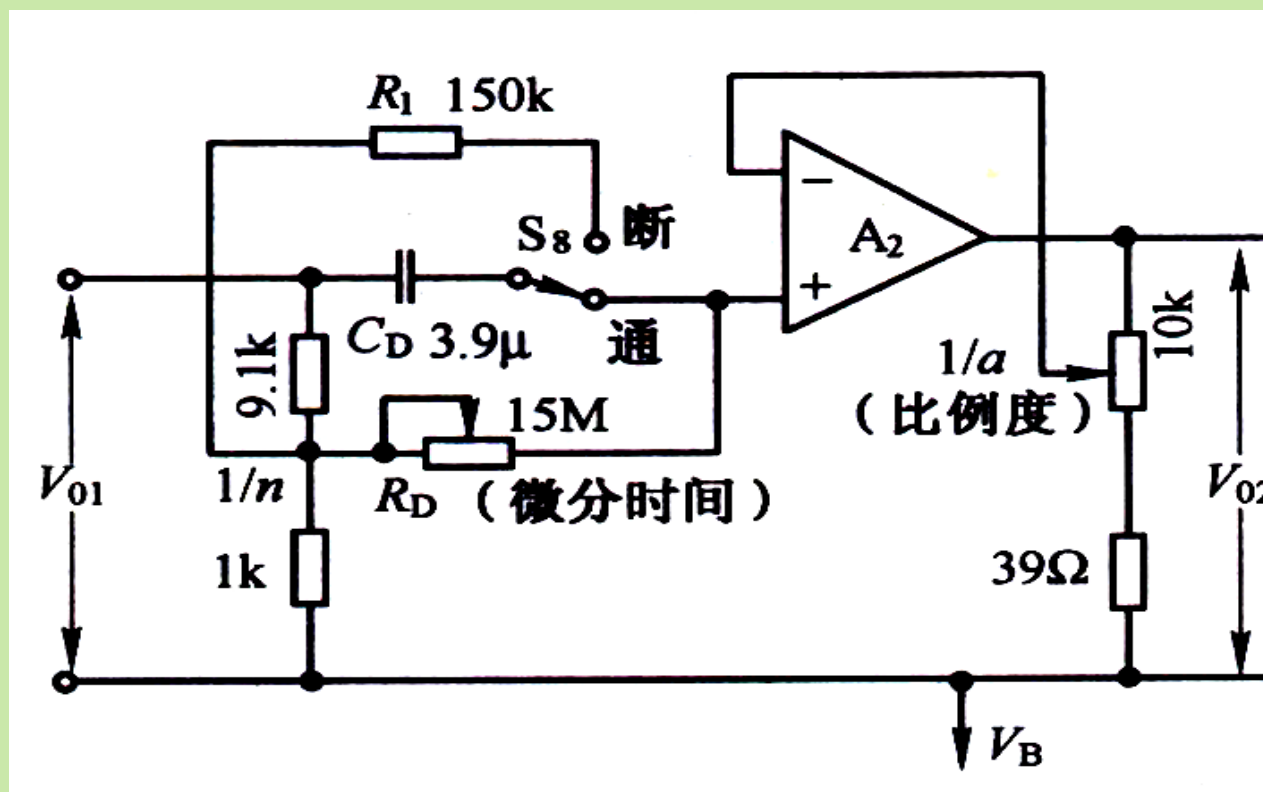
3.2.3.2 PID运算电路

由PI和PD两个运算电路串联而成，由于输入电路中已采取电平移动措施，故这里各信号电压都是以 $V_B=10V$ 为基准起算的。



1、 PD电路分析

PD电路以 A_2 为核心组成。微分作用可选择用与不用。开关 S_8 打向“断”时，构成P电路；开关 S_8 打向“通”时，构成PD电路。

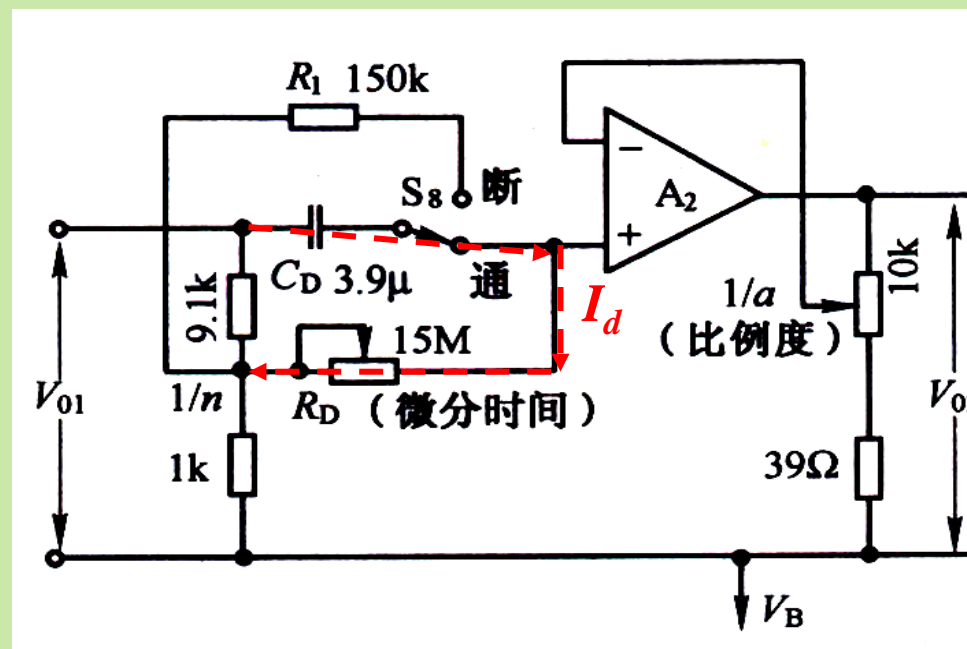


□ PD传递函数

$$\begin{cases} V_+(s) = \frac{1}{n} V_{o1}(s) + I_d(s) R_D \\ I_d(s) = \frac{V_{o1}(s) - \frac{1}{n} V_{o1}(s)}{R_D + \frac{1}{C_D s}} = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{C_D s}{1 + R_D C_D s} V_{o1}(s) \end{cases}$$

得 $V_+(s) =$

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{1 + n R_D C_D s}{1 + R_D C_D s} V_{o1}(s)$$



又因 $V_-(s) = \frac{1}{\alpha} \cdot V_{O2}(s)$

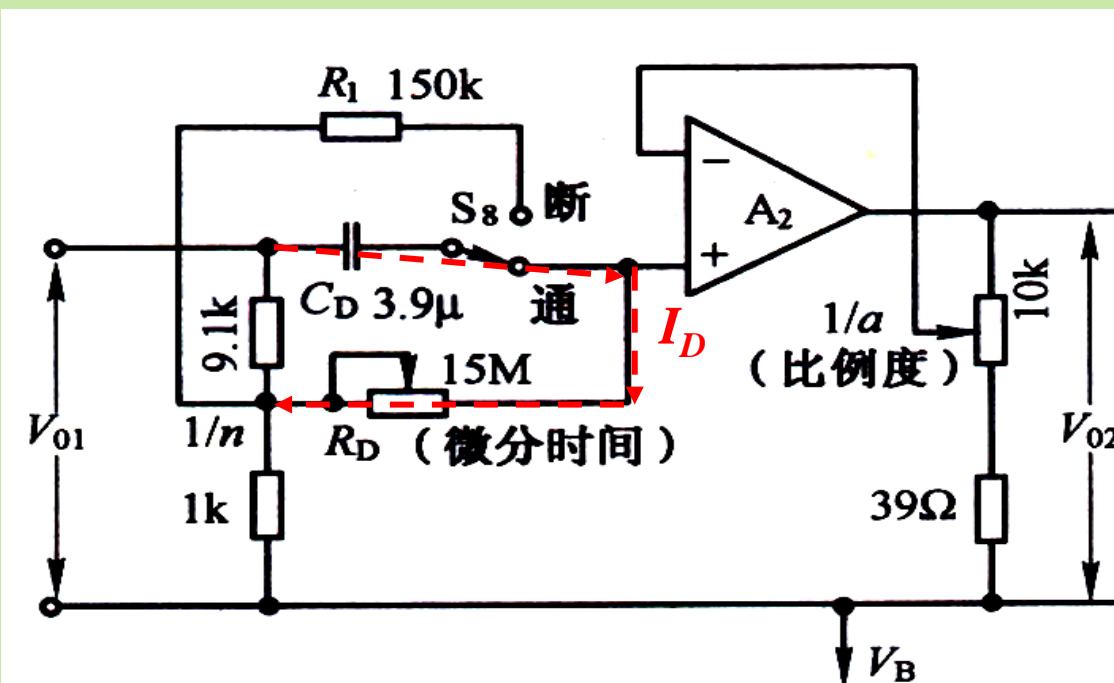
得 $W_{O2}(s) = \frac{V_{O2}(s)}{V_{O1}(s)} = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 + nR_D C_D s}{1 + R_D C_D s} = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 + T_d s}{1 + \frac{T_d}{n} s}$

实际微分因子

式中:

$$T_d = nR_D C_D$$

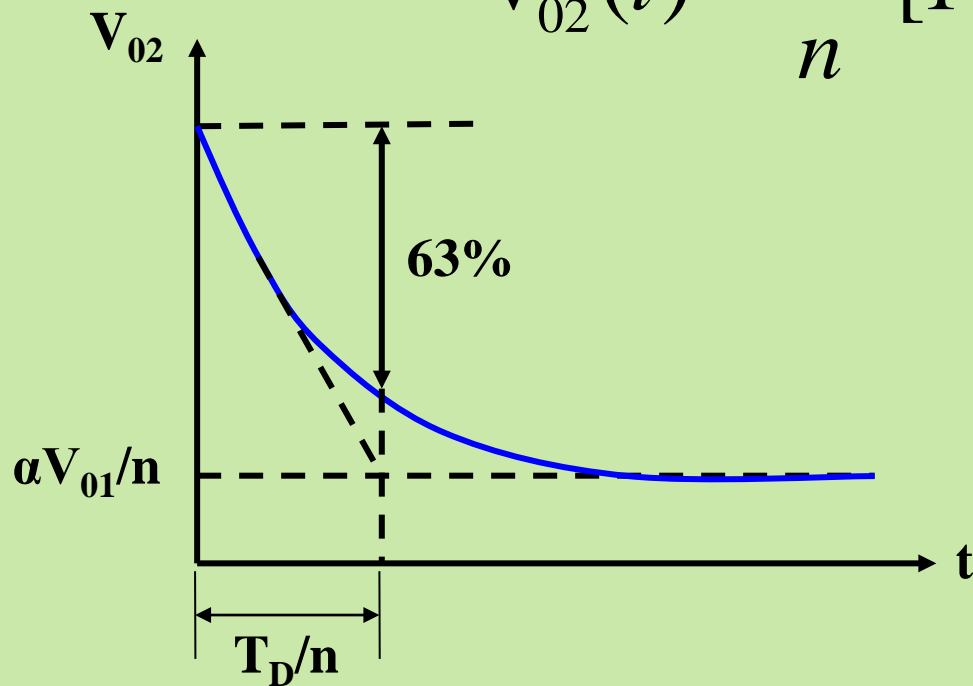
—微分时间常数



□ 阶跃响应

当 V_{01} 为阶跃信号时， V_{02} 的阶跃响应为

$$V_{02}(t) = \frac{\alpha}{n} \cdot [1 + (n-1)e^{-\frac{n}{T_D}t}] V_{01}(t)$$

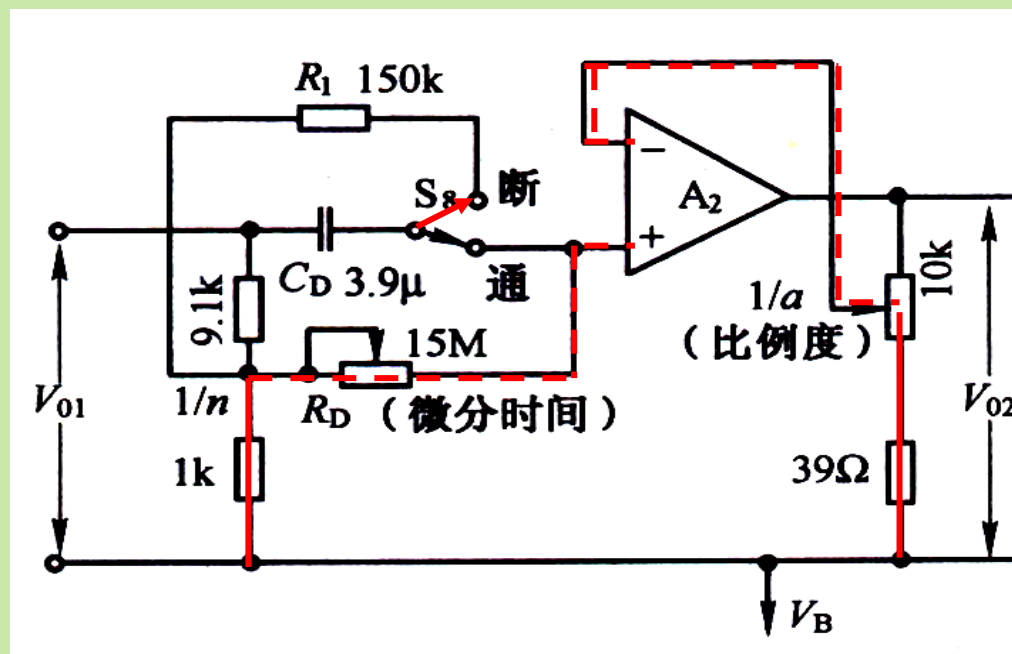


可见，此电路的微分是实际的微分。

当 S_8 置于“断”时，微分被切除， A_2 只作比例运算。有

$$\frac{1}{n}V_{O1} = \frac{1}{\alpha}V_{O2}$$

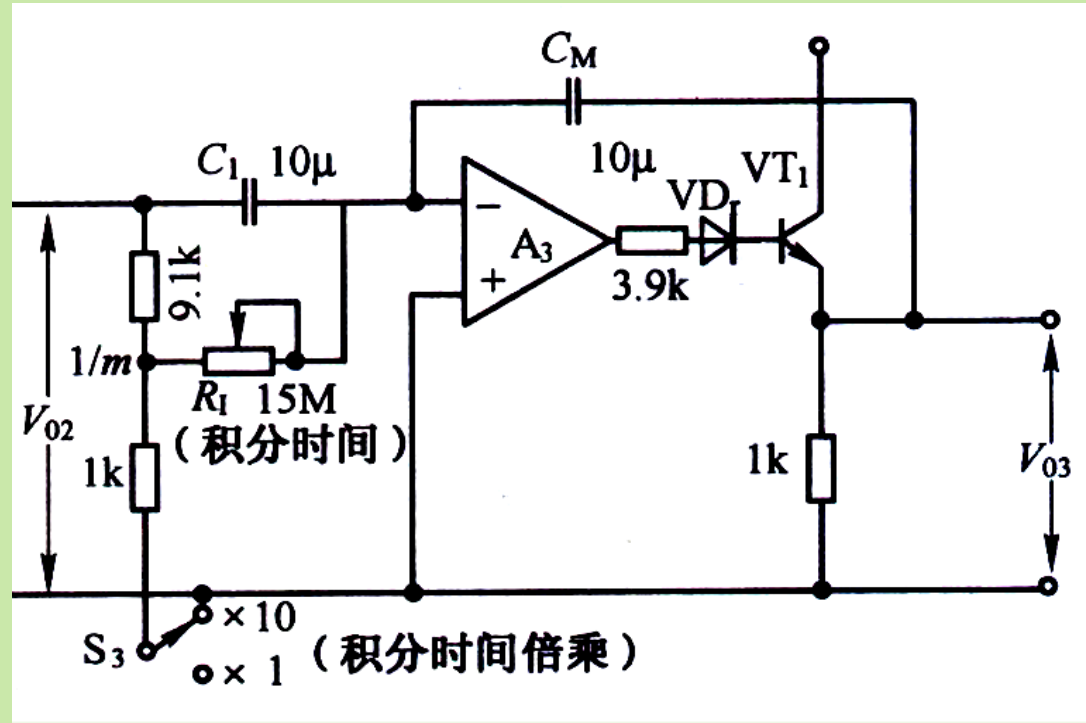
$$V_{O2} = \frac{\alpha}{n}V_{O1}$$



2、PI电路分析

PI电路以 A_3 为核心组成，开关 S_3 为积分时间倍乘开关。当 S_3 打向 $\times 1$ 档时，1K电阻被悬空，不起分压作用；当 S_3 打向 $\times 10$ 档时，1K电阻接到基准线，静态 V_{02} 被分压输入。

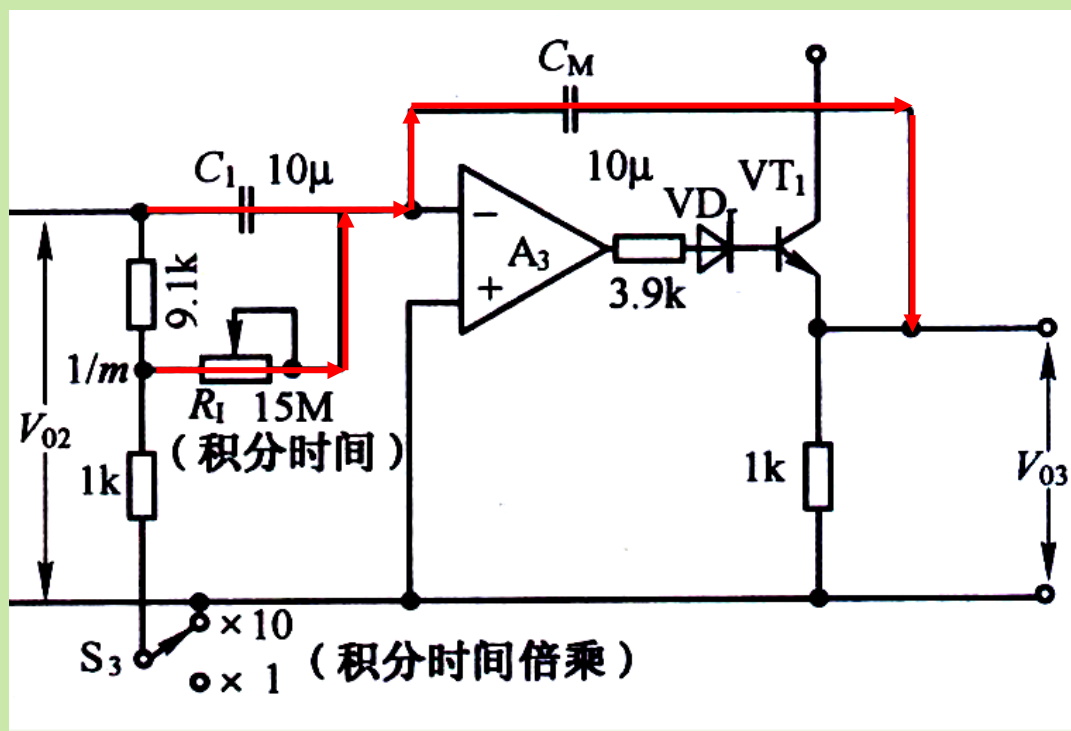
由于 $10\mu\text{F}$ 电容积分需要较大电流，在 A_3 输出端加一功放三极管。



□ PI传递函数

IC负输入端节点电流方程（ S_3 置于×10档）：

$$C_I s \cdot V_{O2}(s) + \frac{1}{m} \cdot \frac{V_{O2}(s)}{R_I} = -C_M s \cdot V_{O3}(s)$$



则 $W_{03}(s) = \frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)}$

$$= -\left(\frac{C_I}{C_M} + \frac{1}{mR_I C_M s}\right)$$

$$= -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{mR_I C_I s}\right)$$

设: $T_I = mR_I C_I$

— 积分时间常数

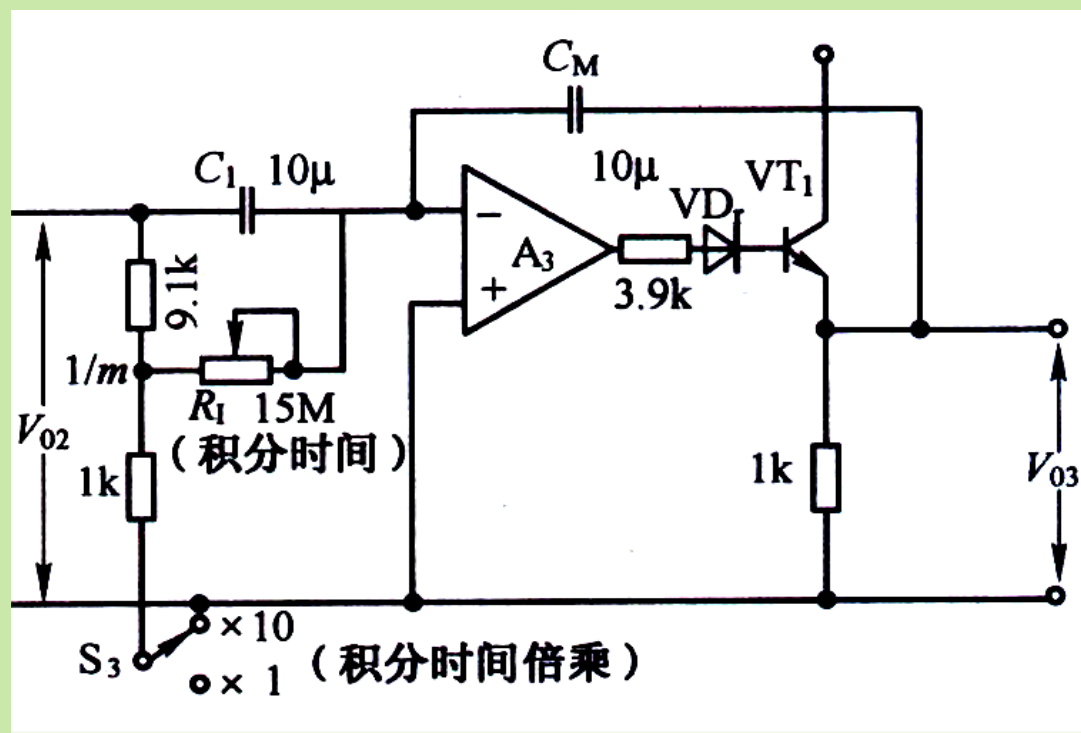
传函为 $W_{03}(s) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$

S_3 打向 $\times 10$ 档时:

$m=10$

S_3 打向 $\times 1$ 档时:

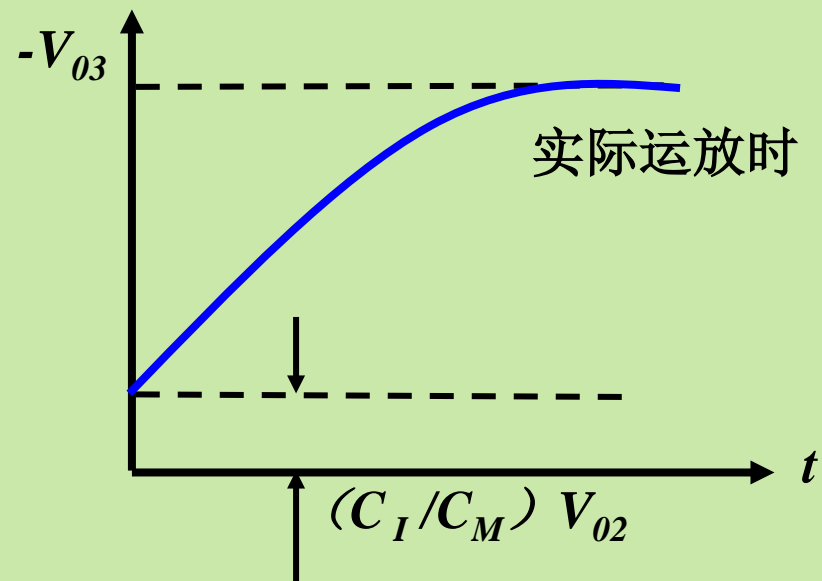
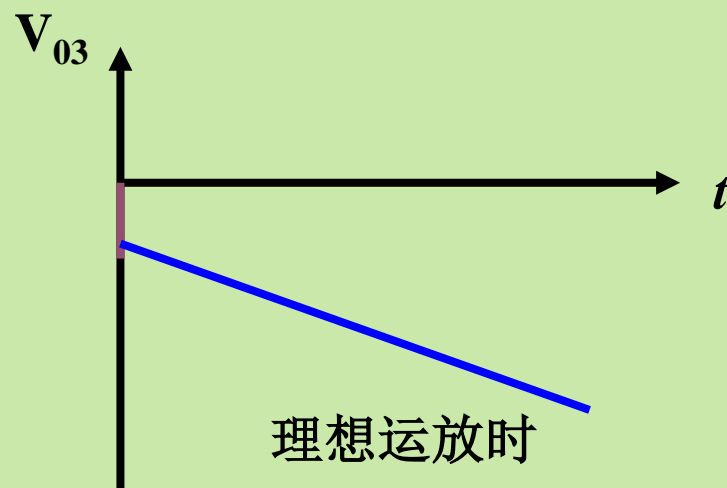
$m=1$



□ 阶跃响应

当 V_{02} 为阶跃信号时， V_{03} 的阶跃响应为

$$V_{03}(t) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{t}{T_I}\right) V_{02}$$



3、PID运算电路的传递函数

输入电路: $V_{01} = -2 (V_i - V_S)$

PD电路: $W_{02}(s) = \frac{V_{02}(s)}{V_{01}(s)} = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 + T_d s}{1 + \frac{T_d}{n} s}$

PI电路: $W_{03}(s) = \frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)} = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$

PID运算是上述三个环节的串联而成。

□ PID传递函数

$$\frac{V_{O3}(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = \frac{2\alpha}{n} \cdot \frac{C_I}{C_M} \cdot \frac{1 + \frac{T_D}{T_I} + \frac{1}{T_I s} + T_D s}{1 + \frac{T_D}{n} s}$$

令： 干扰系数 $F = 1 + \frac{T_D}{T_I}$ 比例度 $P = \frac{n}{2\alpha} \cdot \frac{C_M}{C_I}$
微分增益 $K_D = n$

则：
$$\frac{V_{O3}(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = \frac{F}{P} \cdot \frac{1 + \frac{1}{F T_I s} + \frac{T_D s}{F}}{1 + \frac{T_D}{K_D} s}$$

$$\frac{V_{O3}(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = \frac{F}{P} \cdot \frac{1 + \frac{1}{FT_I s} + \frac{T_D s}{F}}{1 + \frac{T_D}{K_D} s}$$

(1) 若 $T_D \ll K_D$, 则上式分母实际微分项近似为1

$$\text{若 } T_D \ll T_I, \text{ 则 } F = 1 + \frac{T_D}{T_I} \approx 1$$

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

成为理想的PID

(2) 调节器的实际比例度为 P/F ，实际微分时间为 T_D /F ，实际积分时间为 FT_I 。说明三个参数调整时互相干扰，造成调节器整定参数的刻度无法准确。

$$\frac{V_{O3}(s)}{V_i(s) - V_s(s)} = \frac{F}{P} \cdot \frac{1 + \frac{1}{FT_I s} + \frac{T_D s}{F}}{1 + \frac{T_D}{K_D} s}$$

例：当 $T_I / T_D = 4$ 时， $F = 1 + \frac{T_D}{T_I} = 1.25$

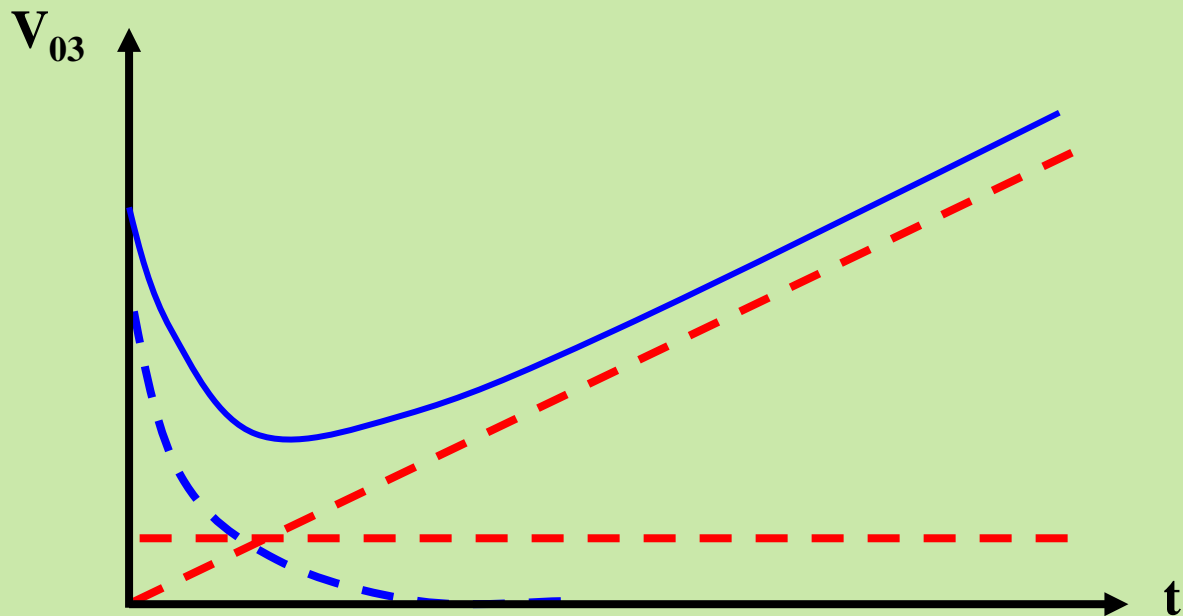
各参数的实际值与 $F = 1$ 时相差25%。

□ 阶跃响应

整个曲线由比例项、积分项和有限制的微分项三部分组成。

调节范围: $P=2\sim 500\%$, $T_D=0.04\sim 10$ 分

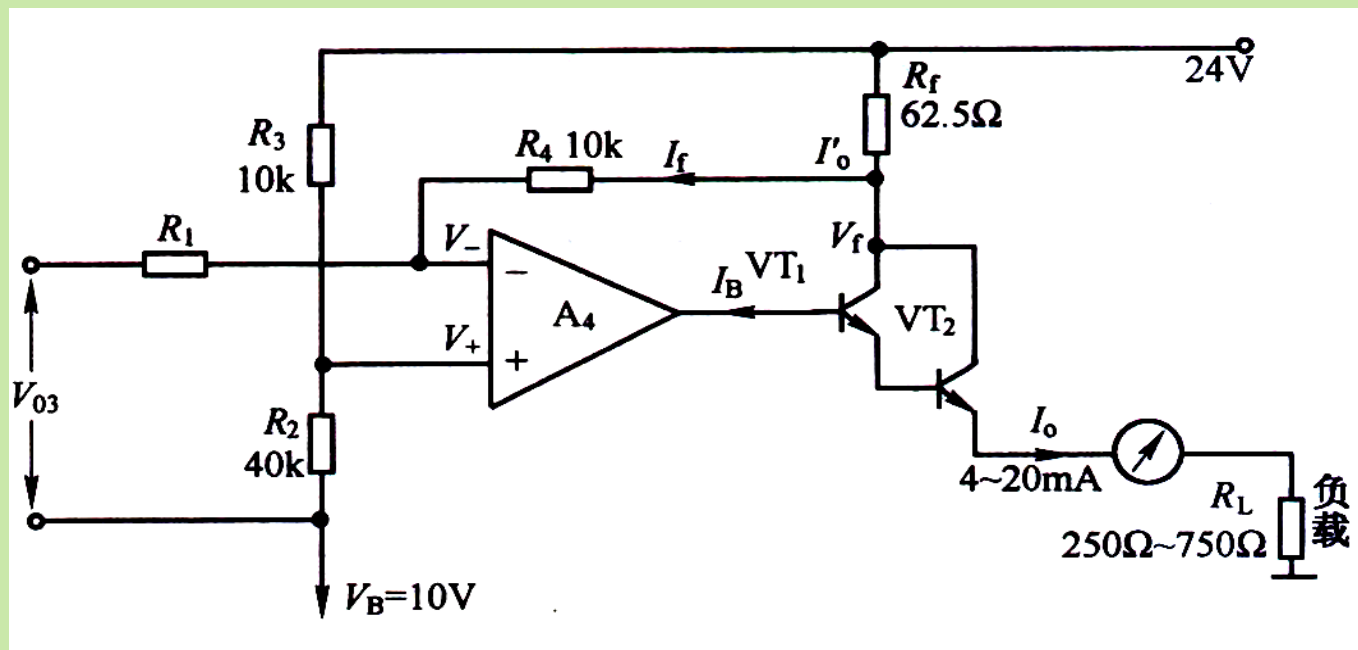
$T_I=0.01\sim 2.5$ 分 ($\times 1$ 档), $T_I=0.1\sim 25$ 分 ($\times 10$ 档)



3.2.3.3 输出电路

其任务是将PID电路输出电压 $V_{O3} = 1 \sim 5V$ 变换为 $4 \sim 20mA$ 的电流输出，并将基准电平移至 $0V$ 。

在 A_4 后面用 VT_1 、 VT_2 组成复合管，进行电流放大，同时以强烈的电流负反馈来保证良好的恒流特性。



□ 转换关系

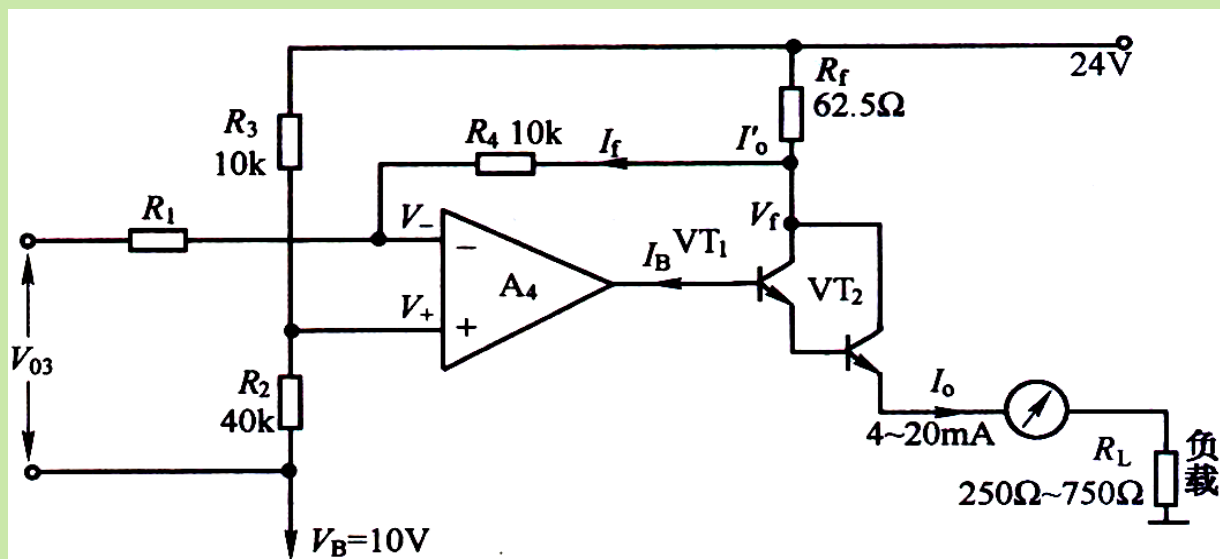
取: $R_3 = R_4 = 10\text{k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 4R_3$

$$V_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_B + \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times 24 = \frac{1}{5} V_B + \frac{4}{5} \times 24$$

$$V_- = \frac{R_4}{R_4 + R_1} (V_B + V_{O3}) + \frac{R_1}{R_4 + R_1} V_f = \frac{1}{5} (V_B + V_{O3}) + \frac{4}{5} V_f$$

由 $V_+ \approx V_-$ 得

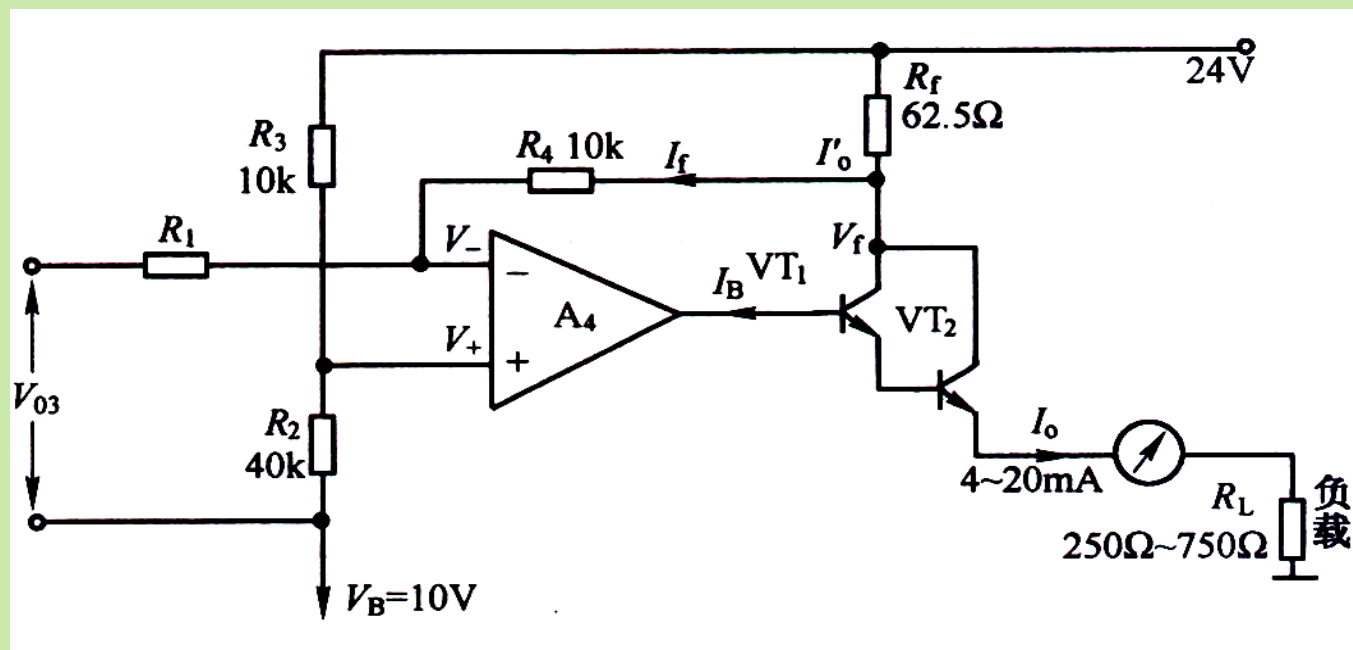
$$\begin{aligned} V_f &= 24 - \frac{1}{4} V_{O3} \\ &= 24 - I'_O R_f \end{aligned}$$



则 $I_o' = \frac{V_{o3}}{4R_f}$ 而 $I_o = I_o' - I_f - I_B$

若取 $R_1 = 4(R_3 + R_f) = 40.25K\Omega$ 时,

可以精确获得关系: $I_o = \frac{V_{o3}}{4R_f} = \frac{1 \sim 5}{4 \times 62.5} = 4 \sim 20mA$

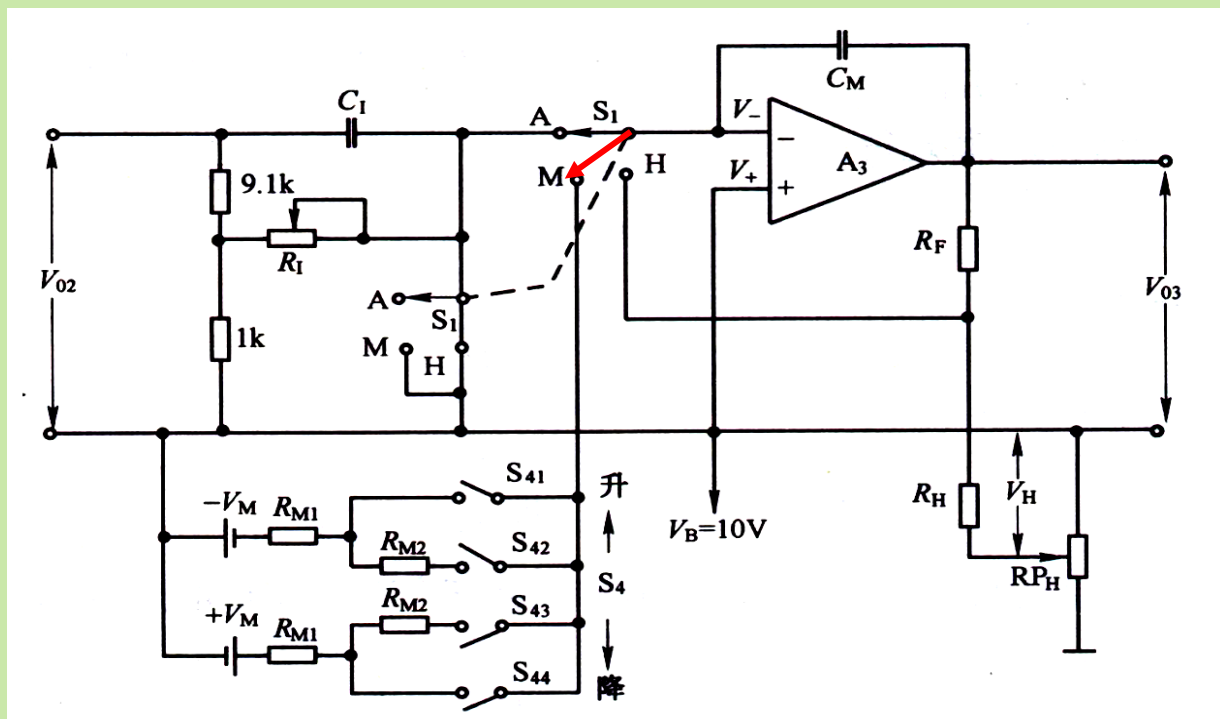


3.2.3.3 手动操作电路及无扰切换

通过切换开关 S_1 可以选择自动调节“A”、软手动操作“M”、硬手动操作“H”三种控制方式。

1. A、M间的切换

S_1 从A切换到M时:



断开 A_3 的输入

C_M 无放电回路

V_{O3} 保持不变

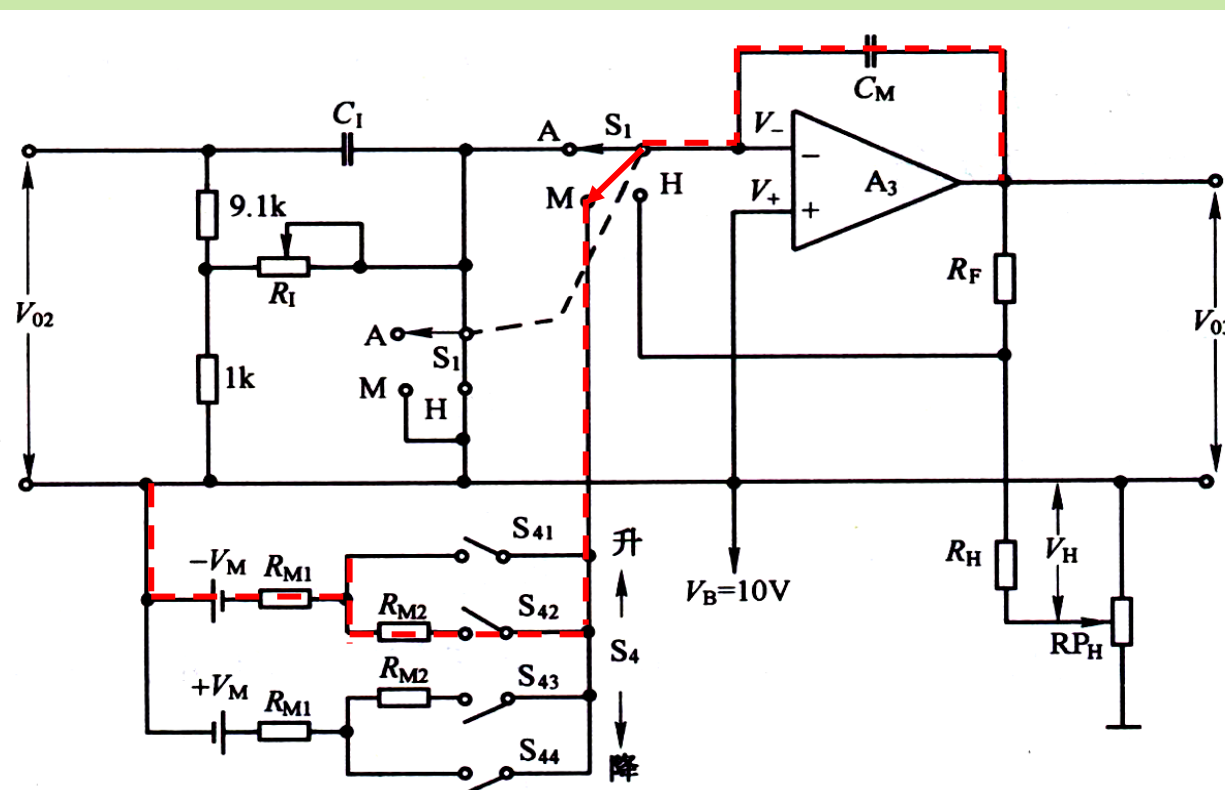
A \rightarrow M无冲击

S_{42} 闭合 $\rightarrow -V_M$ 接入 —— 按 $T_I = 100s$ 的时间积分

S_{41} 闭合 $\rightarrow -V_M$ 接入 —— 按 $T_I = 6s$ 的时间积分

同理, S_{43} (或 S_{44}) 闭合 $\rightarrow +V_M$ 接入 —— 反向积分

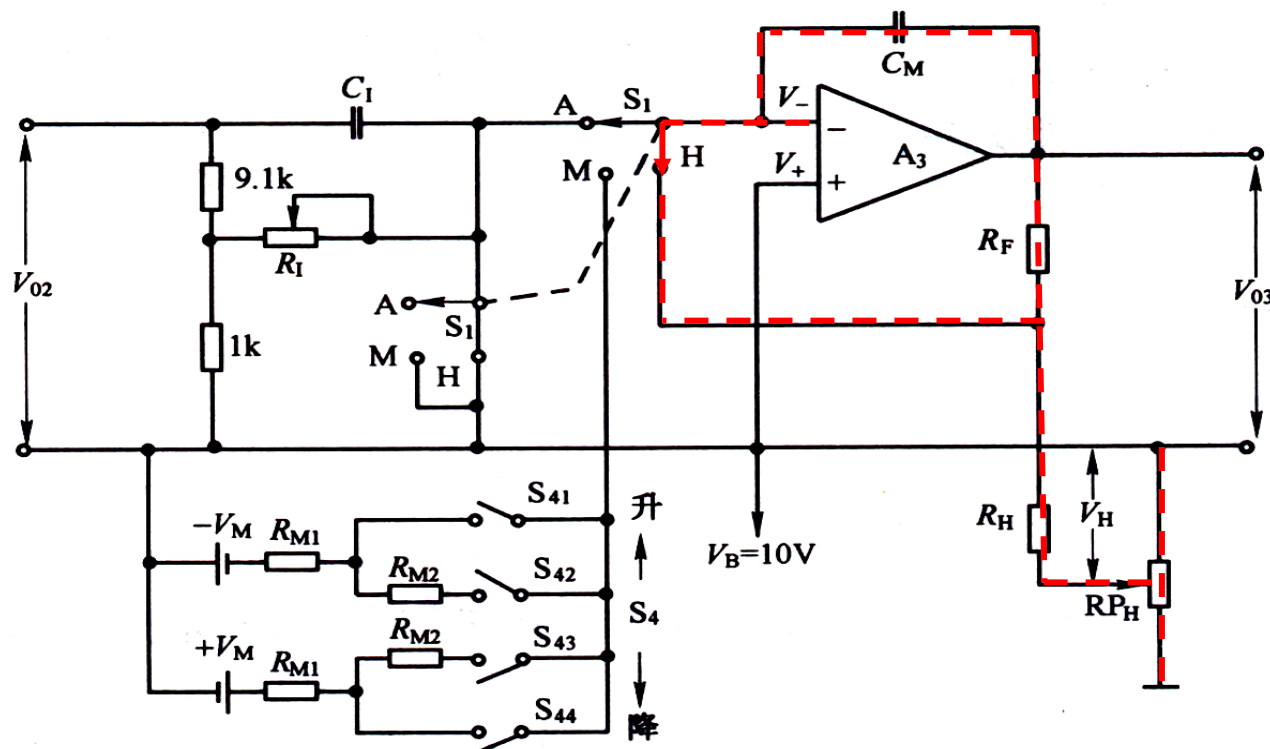
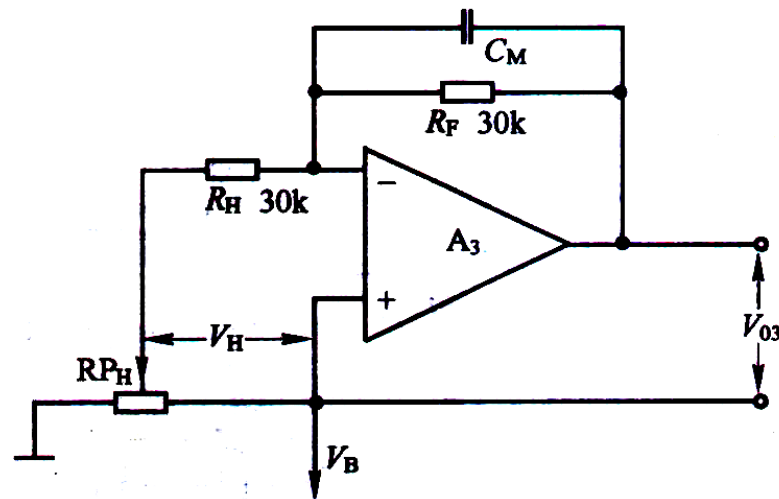
用这种手动操作来改变调节器输出, 信号变化比较缓和, 称为“软手动”。



2. A、H间的切换

当切换开关 S_1 由自动位置A，切向硬手动 H 时，放大器 A_3 接成具有惯性的比例电路。

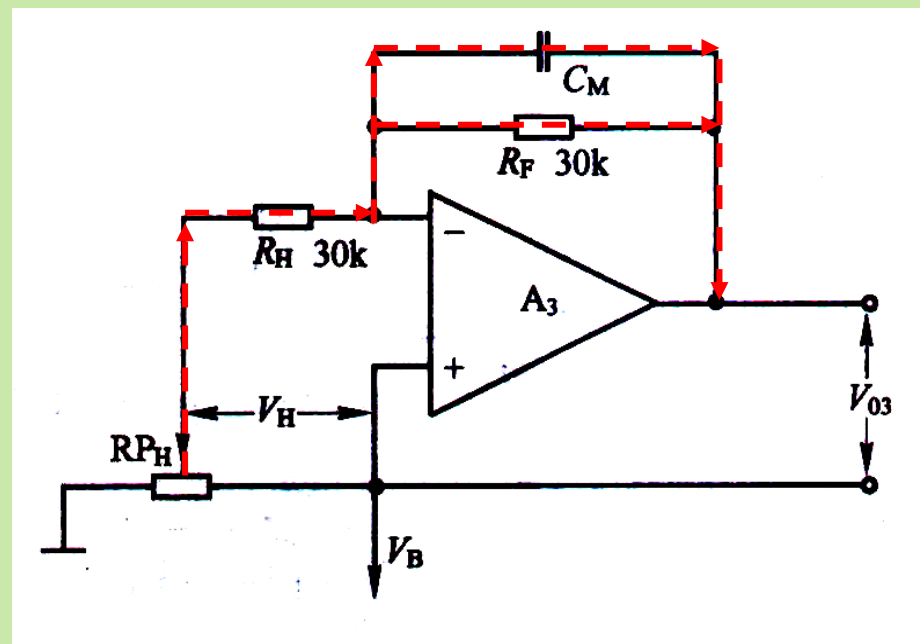
由于 C_M 充电迅速， A_3 的输出近似为比例电路。



❖ 传递函数

$$\frac{V_H(s)}{R_H} = -\left(\frac{1}{R_F} + C_M s\right)V_{O3}(s)$$

$$\frac{V_{O3}(s)}{V_H(s)} = -\frac{R_F}{R_H} \cdot \frac{1}{1 + R_F C_M s}$$



时间常数 $T = R_F C_M = 30 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 0.3s$

可见， V_H 改变时， V_{O3} 很快达到新的稳态值。

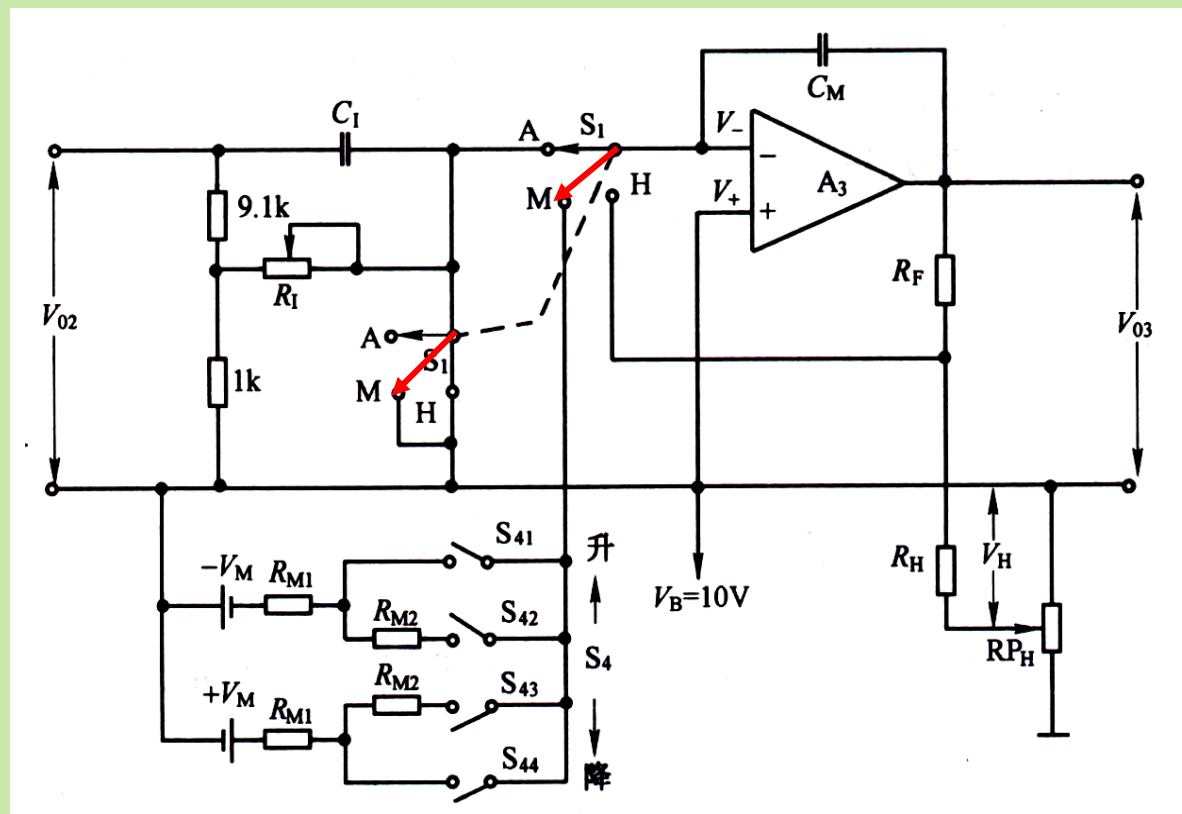
❖ A→H前，须先调R_{P_H}与当时的V_{O3}一致，才能做到无扰动切换。 M→H也同样。

3. M、H→A间的切换

S_1 由A切向M或H时，联动开关同时将积分电容 C_I 接 V_B ，使 V_{CI} 始终等于 V_{02} 。当 S_1 再由H、M切回A时，由于电压没有突变，切换也是无扰动的。

总结：

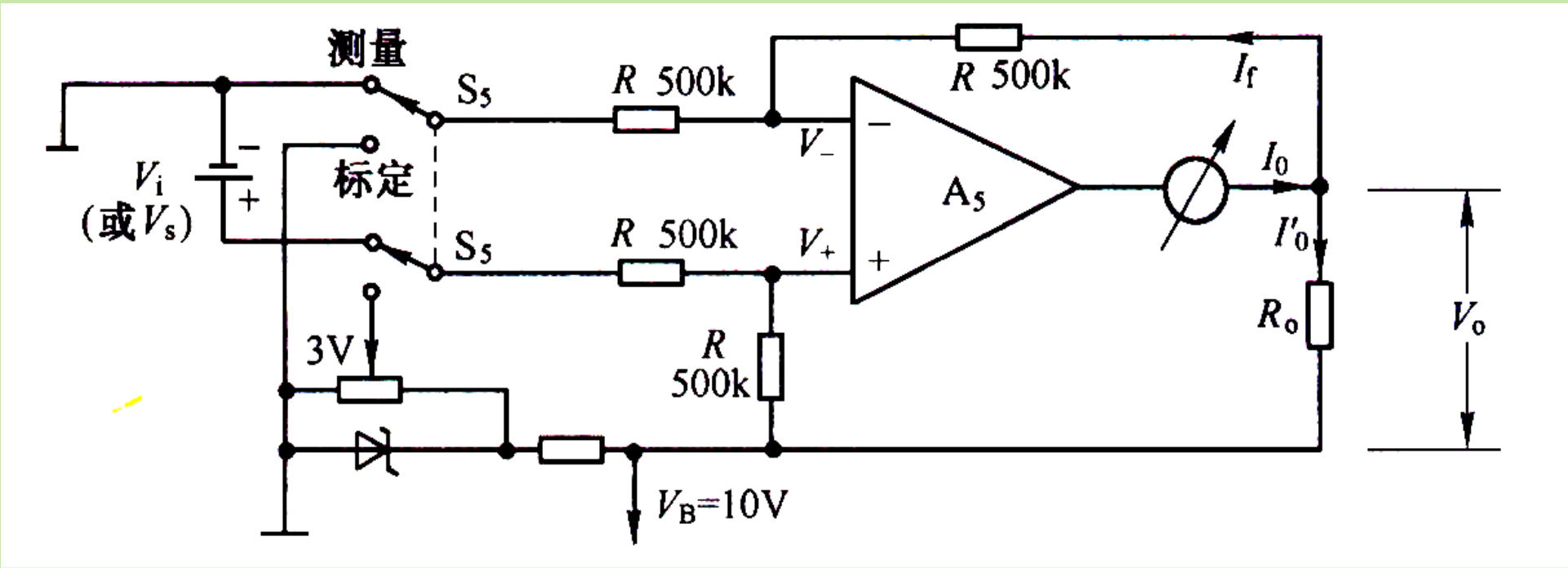
自动 (A)		
无扰	↓↑	无扰
软手动 (M)		
有扰	↓↑	无扰
硬手动 (H)		



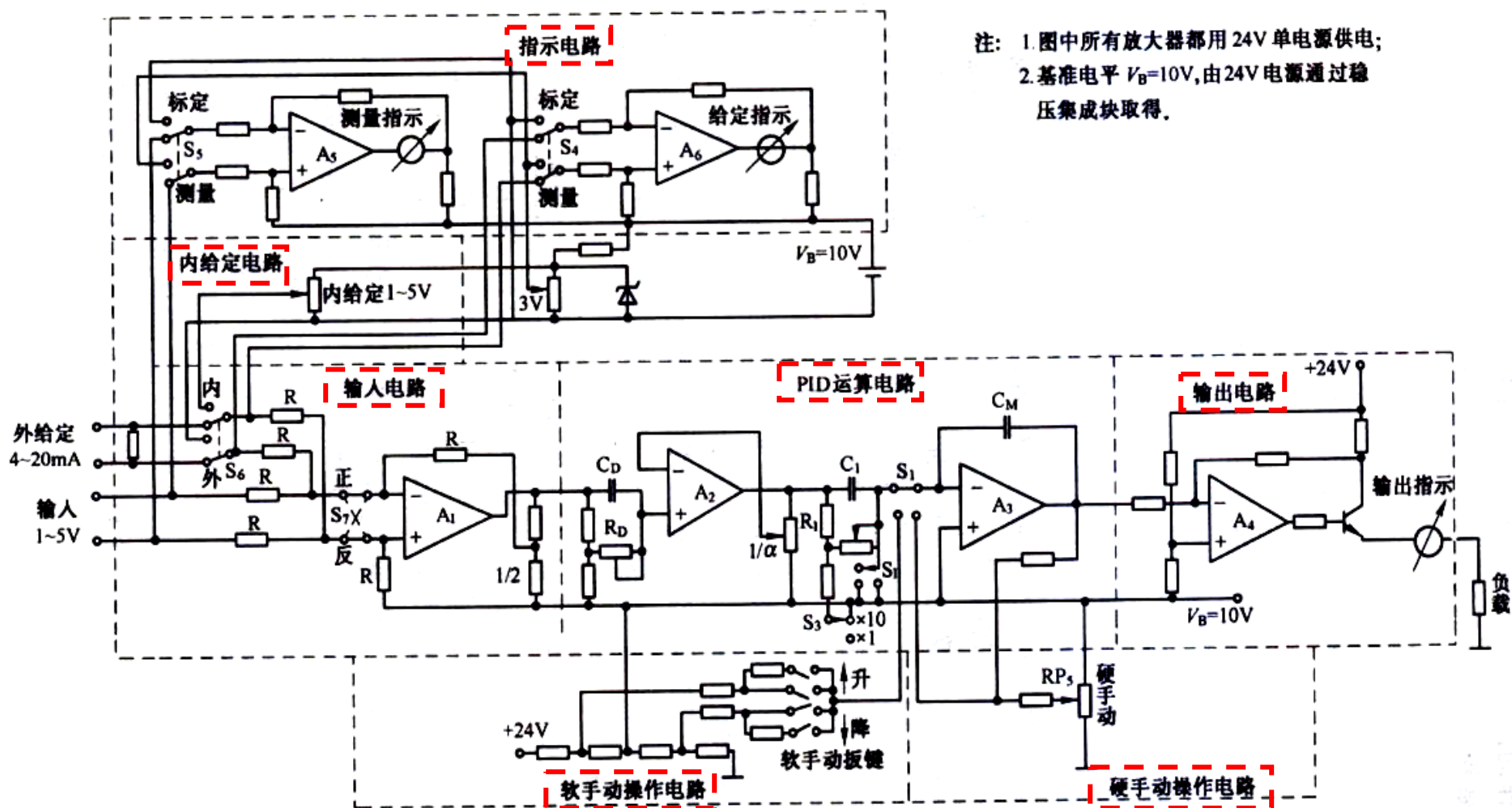
3.2.3.4 测量及给定指示电路

用动圈表头来指示测量值和给定值。 S_5 切换到“标定”时，可进行示值标定。

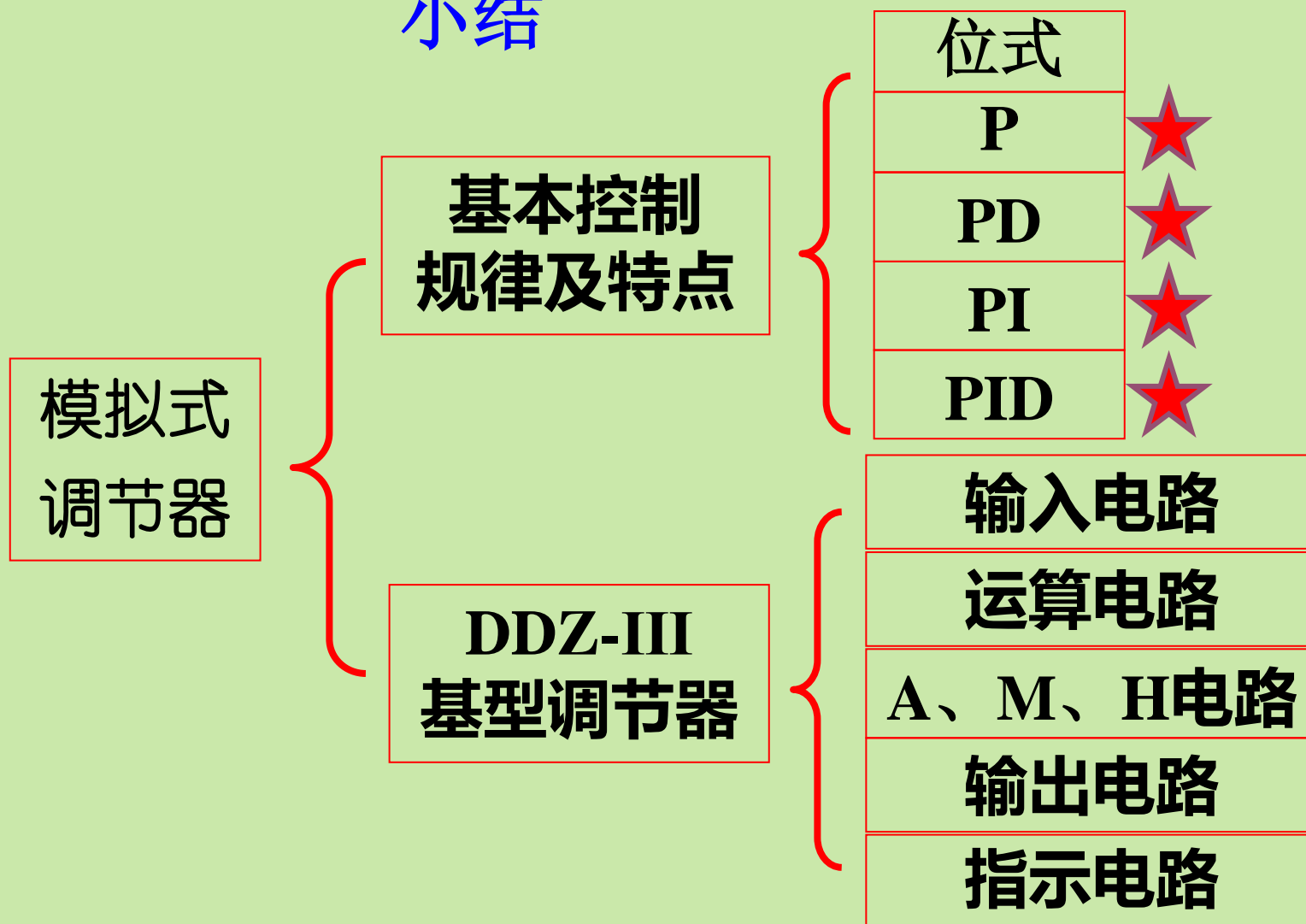
流过动圈表头的电流为
$$I_o \approx \frac{V_o}{R_o} = \frac{V_i}{R_o}$$



DDZ-III型是模拟仪表的典型代表。实际电路中还有电源、补偿、滤波、保护、调整等辅助环节。



小结



3.3 数字式PID控制器

随着生产规模的发展和控制要求的提高，模拟仪表的局限性越来越明显：

- (1) 功能单一，灵活性差**
- (2) 信息分散，需大量仪表，监视操作不便**
- (3) 接线过多，系统维护困难**

随着大规模集成电路和计算机技术的发展，测控仪表也迅速推出各种以微处理器为核心的数字式仪表。

数字仪表的优点

- (1) 功能丰富，更改灵活，体积小、功耗低**
- (2) 具有自诊断功能**
- (3) 具有数据通信功能，可以组成测控网络**

数字仪表集中了自动控制、计算机及通信技术（3C，Control Computer Communication）。

可编程单回路调节器是数字控制仪表的典型代表，如西安仪表厂的YS-80\YS-100，川仪18厂及上海调节器厂的DIGITRONIK系列等。

3.3.2 SLPC的数字控制算法

连续PID调节规律的表达式为

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

$$e(t) = V_S - V_P$$

数字调节器的特点是采样一次、计算一次。必须把连续方程用离散方程表示。第n次采样时：

$$u_n = \frac{1}{P} \left[e_n + \frac{1}{T_I} \sum_{i=1}^n e_i \Delta T + T_D \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta T} \right]$$

$$u_n = \frac{1}{P} \left[e_n + \frac{1}{T_I} \sum_{i=1}^n e_i \Delta T + T_D \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta T} \right]$$

如果调节器的输出是控制阀门的话， u_n 是对应的阀门开度位置，故上式称为“位置型**PID**”算式。此式计算时，需要占用大量内存空间。

可改写为增量型**PID**算式：

如果将上次的输出值 u_{n-1} 保持住，则只需计算出本次与上次输出之间的增量 Δu_n 即可

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n$$

$$\Delta u_n = \frac{1}{P} [(e_n - e_{n-1}) + \frac{\Delta T}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\Delta T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})]$$

优点:

- ❑ 输出 Δu_n 仅决定于最近三次的采样值，所需内存不大，运算比较简单。
- ❑ 每次输出增量值，误动作的影响小，必要时可通过逻辑判断禁止或限制本次输出，容易得到良好的调节效果。
- ❑ 一旦调节器出现故障，停止输出，阀位能保持在故障前的状态。

为避免理想微分对高频干扰过于敏感，还可将理想微分改为实际微分。

实际微分传函：
$$U(s) = \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{K_D} s} E(s)$$

写成差分方程有：

$$u_n = \frac{T_D}{\Delta T + \frac{T_D}{K_D}} (e_n - e_{n-1}) + \frac{\frac{T_D}{K_D}}{\Delta T + \frac{T_D}{K_D}} u_{n-1}$$

将此式代替理想PID中的微分部分，即得实用的**PID**运算式。

改进的PID控制算法

微分先行

只对测量值 $y(t)$ 微分，而不对偏差 $e(t)$ 微分，即对给定值 $r(t)$ 无微分作用。

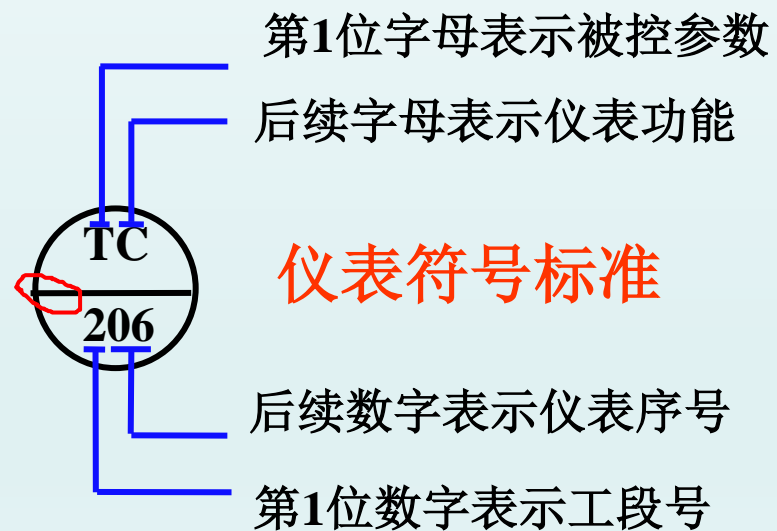
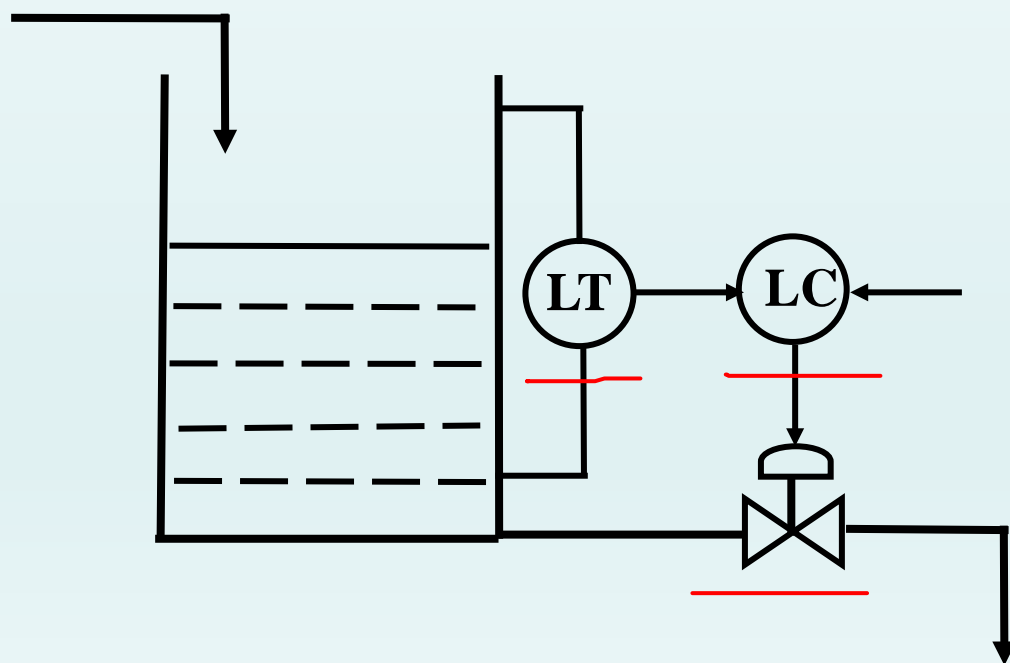
这样在调整设定值时，控制器的输出就不会产生剧烈的跳变，也就避免了设定值升降给系统造成的冲击。

$$\Delta u(k) = K_c [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) - K_D [y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)]$$

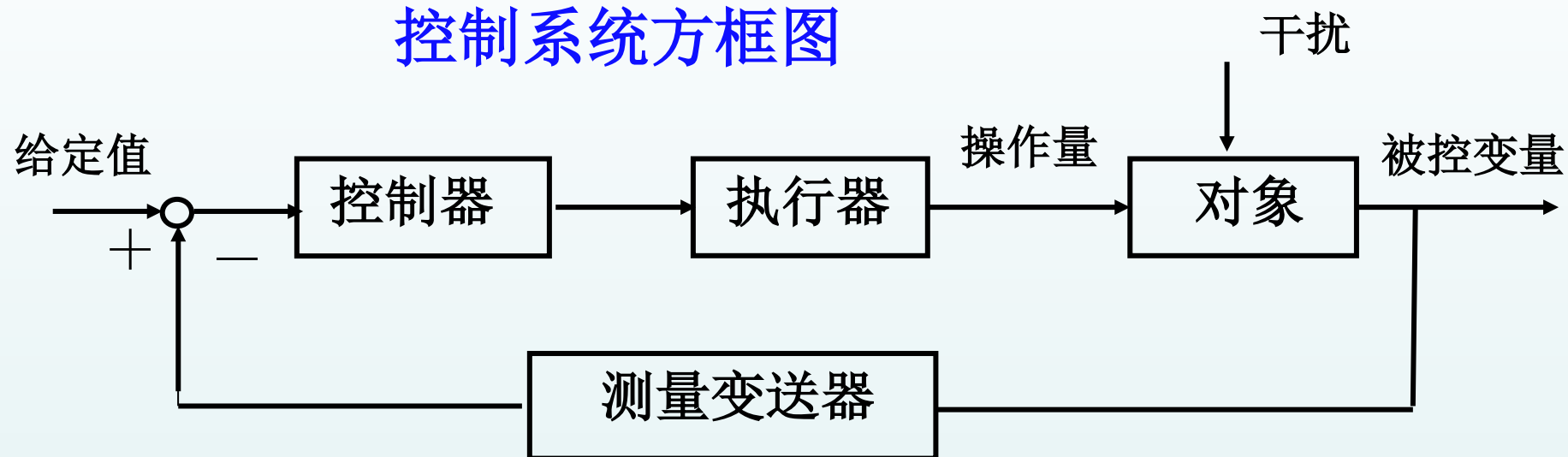
第6章 简单控制系统的设计与参数整定

6.1 简单控制系统的结构与组成

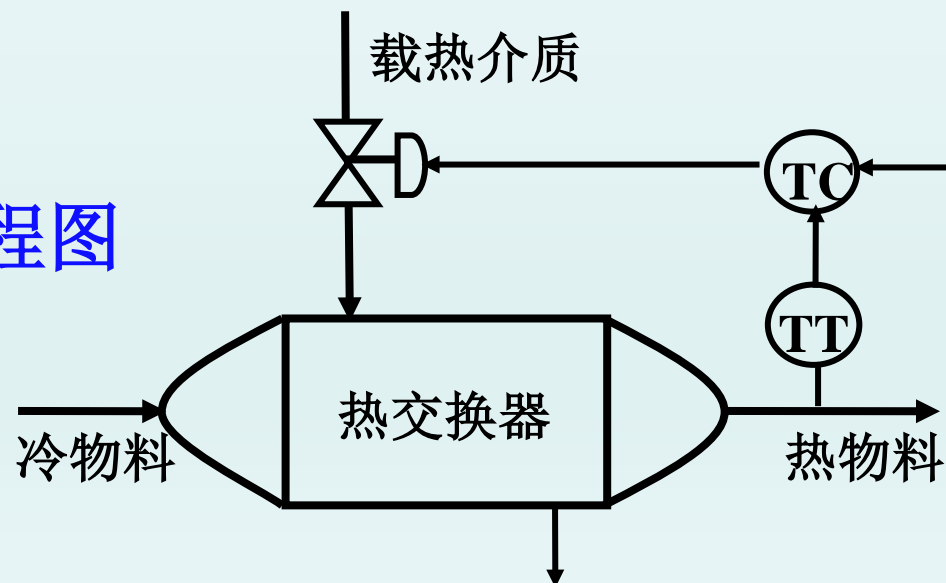
指由一个测量变送器、一个控制器、一个控制阀和一个对象所构成的单闭环控制系统。



控制系统方框图



带控制点的工艺流程图



6.2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。

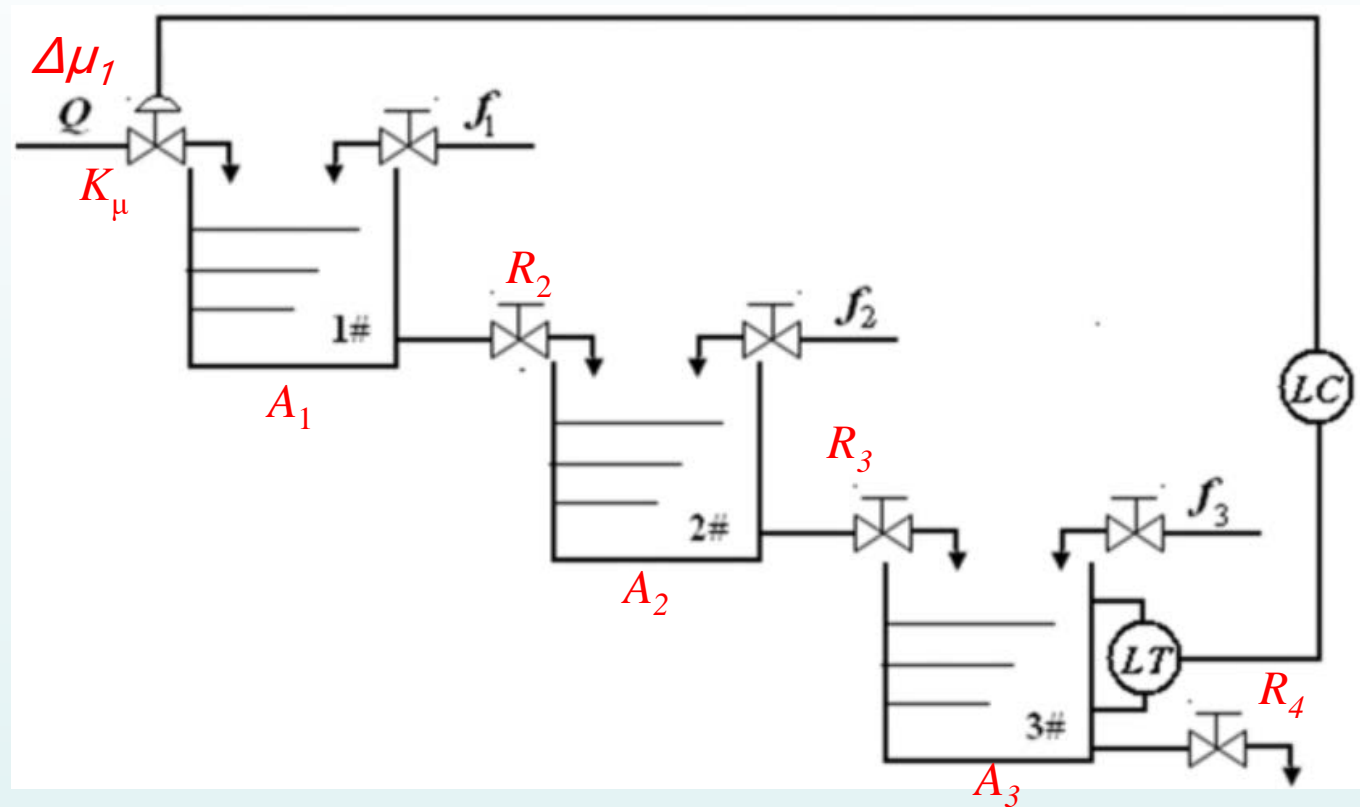
其中控制方案设计是控制系统设计的核心。

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



- 1 什么是单回路控制系统？
- 2 能看懂方框图和工艺流程图，并会互相转化。

6.2.2被控参数与控制变量的选择

6.2.2.1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。

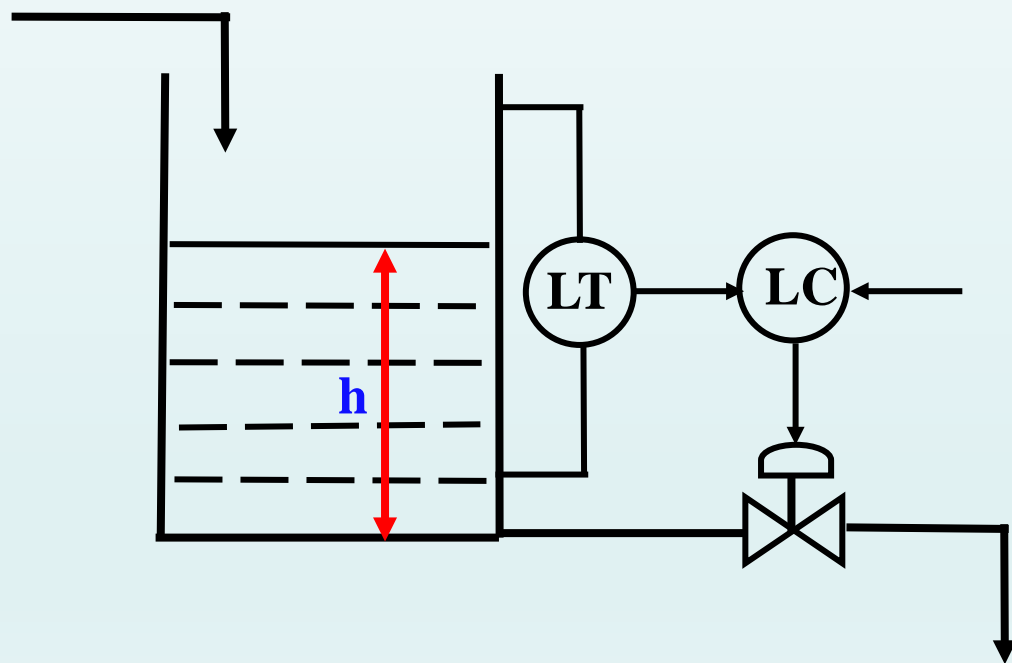
合理选择被控变量，关系到生产工艺能否达到稳定操作、保证质量、保证安全等目的。

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。

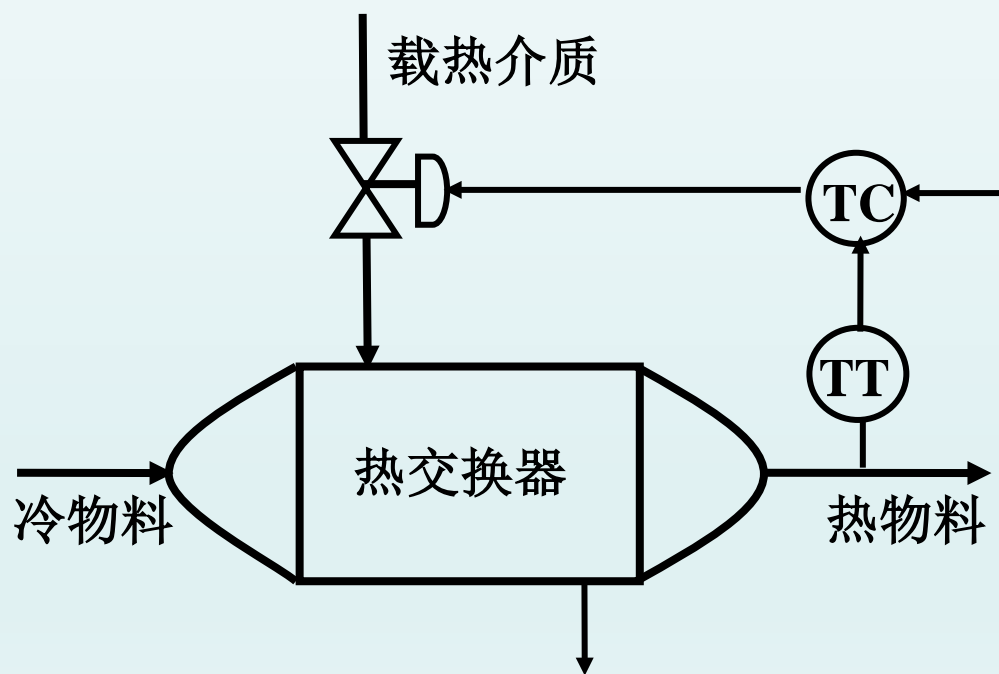
例1 储槽液位控制系统

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。

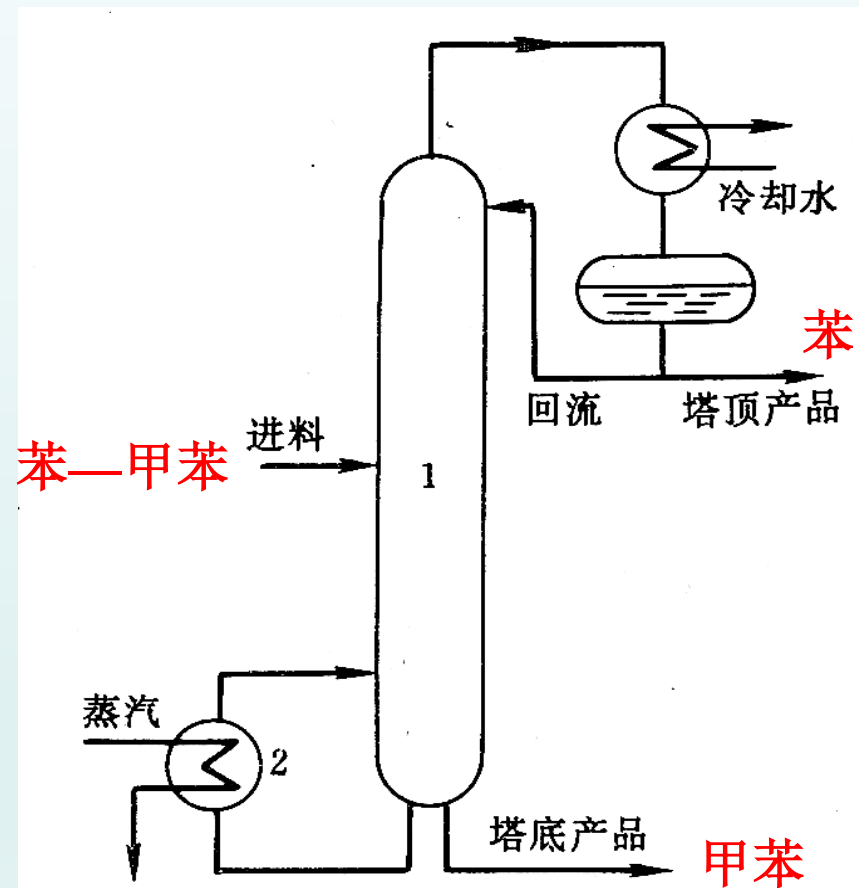


2、当不能用直接工艺参数作为被控变量时，应选择与直接工艺参数有单值函数关系的间接工艺参数作为被控变量。

例3 化工的精馏物纯度控制系统

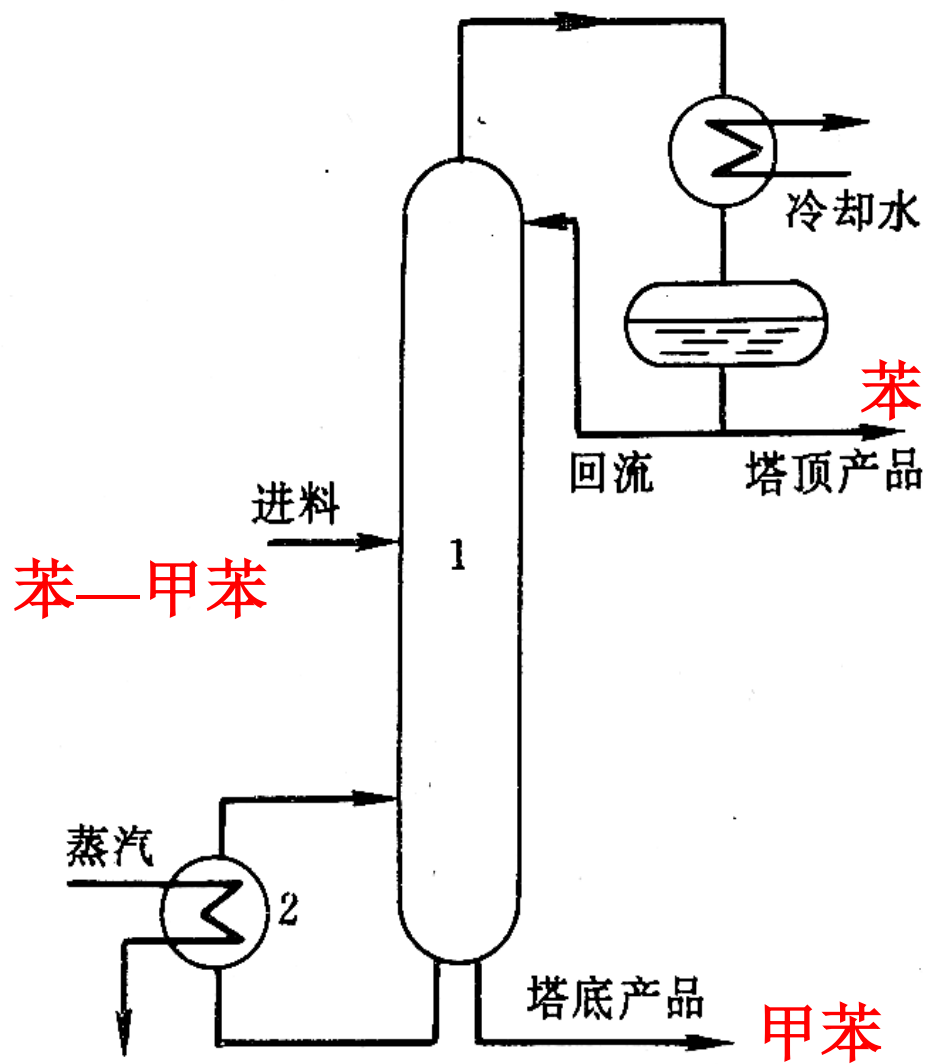
精馏工艺是利用被分离物中各组分的挥发温度不同，将各组分分离。

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

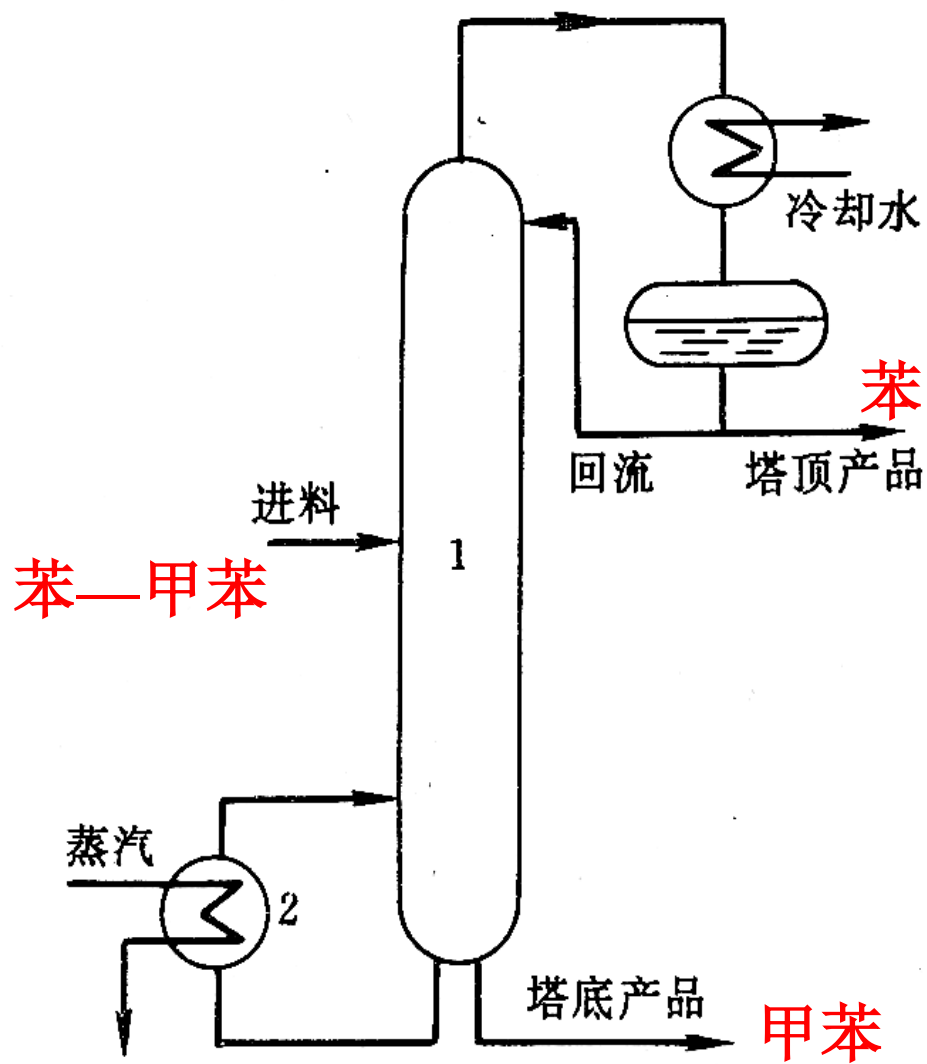


精馏过程示意图

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

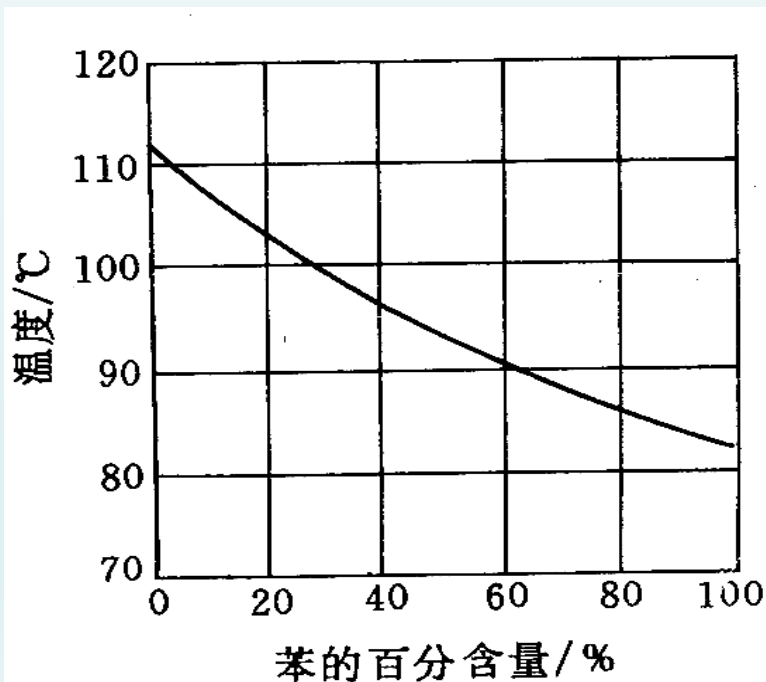
1—精馏塔；2—蒸汽加热器

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。

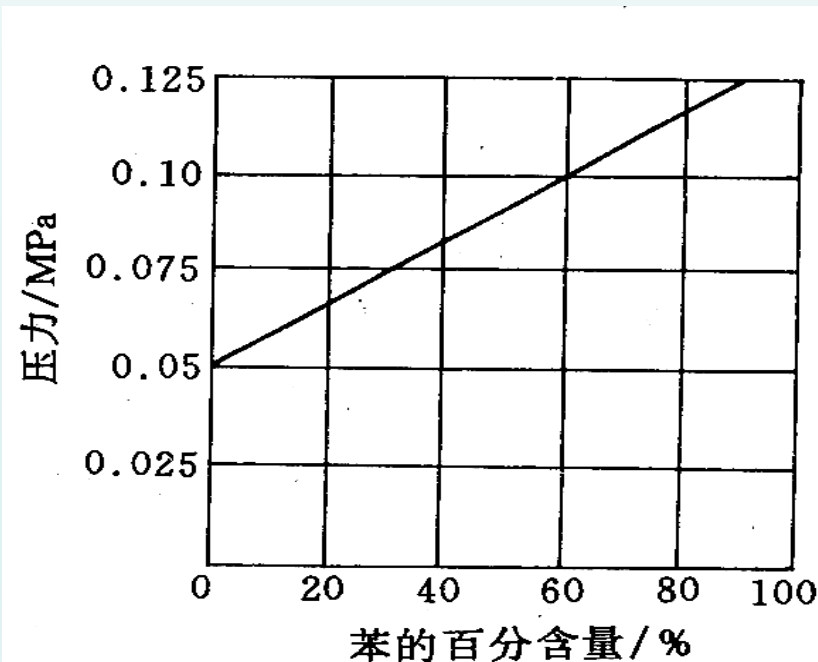
经工艺分析发现，塔内压力和塔内温度都对馏出物纯度有影响。需要对二者进行比较试验，选出一个合适的变量。

间接控制变量的确定

经试验得出，塔顶馏出物苯的浓度分别与压力和温度有单值对应关系。（塔底馏出物甲苯也一样）
从工艺合理性考虑，选择温度作为被控变量。



苯-甲苯溶液的 $T-x$ 图



苯-甲苯溶液的 $p-x$ 图

3、被控变量必须有足够大的灵敏度

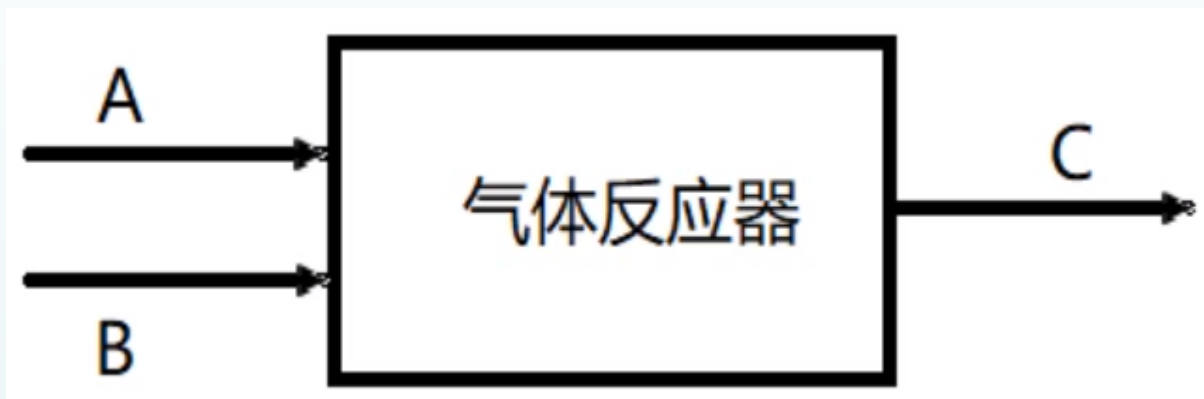
被控变量必须灵敏，容易被测量。

4、选择被控变量时，必须考虑工艺合理性

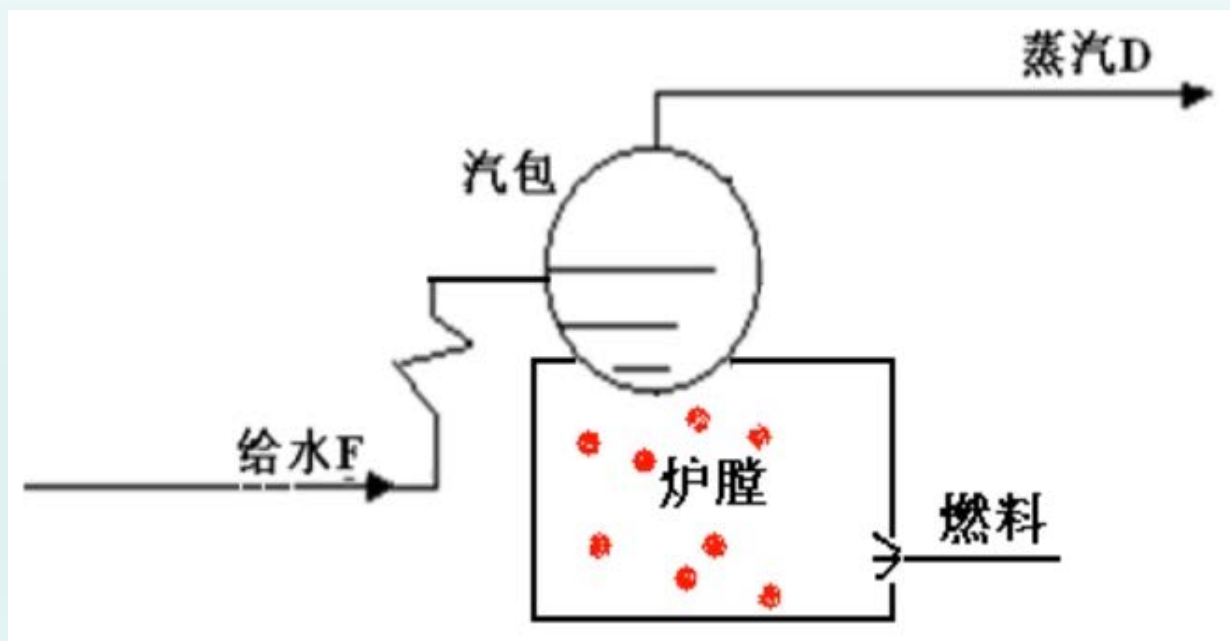
上例中，选择塔内温度作被控变量，就是考虑了工艺上，它是最佳分离效率控制系统的被控变量。

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

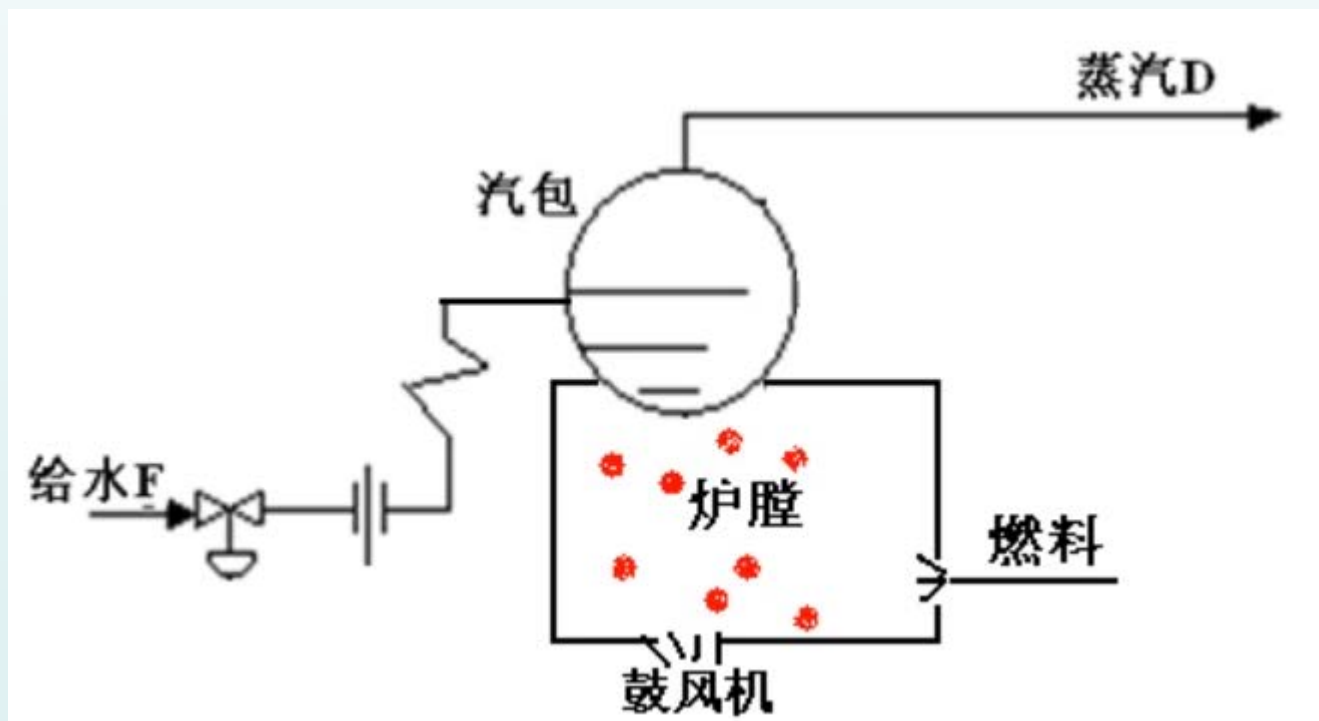
封闭式气相反应器



火力发电厂的锅炉系统

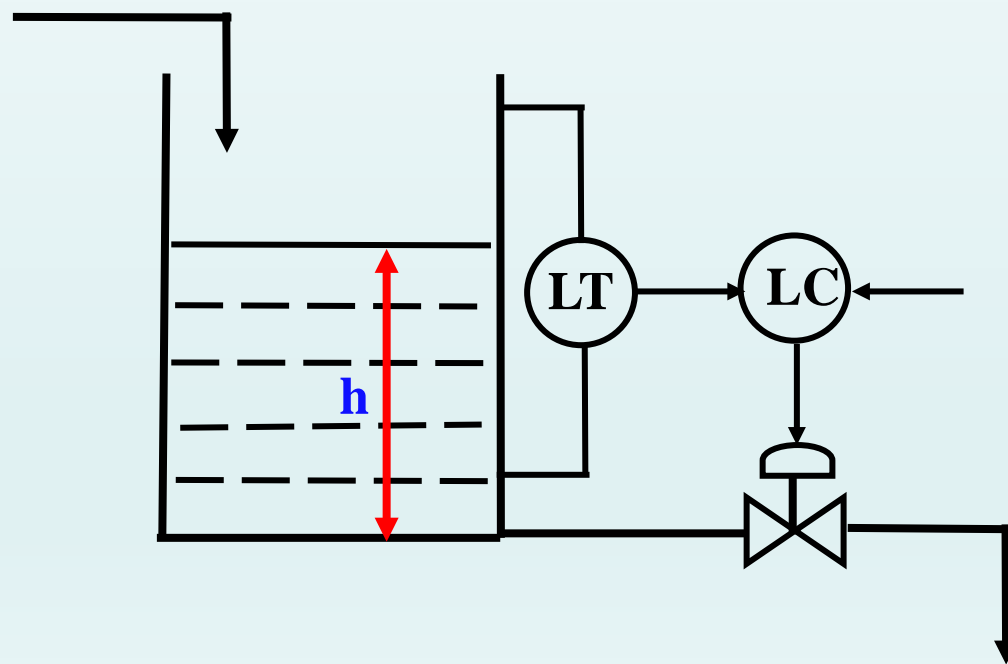


思考题：从燃烧经济性角度出发，应该选择什么被控参数？



6.2.2.2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。

