

单回路控制系统方框图

调节器的功能

调节器的运算规律（数学模型）

调节器电路分析（运算规律的电路实现）

PI调节器抗积分饱和

# 1、调节器的功能

$$x_s - x_i (\text{变送器}) = \varepsilon \xrightarrow{\text{一定规律}} \Delta y \rightarrow \text{执行器}$$

控制目标  $x_i = x_s$

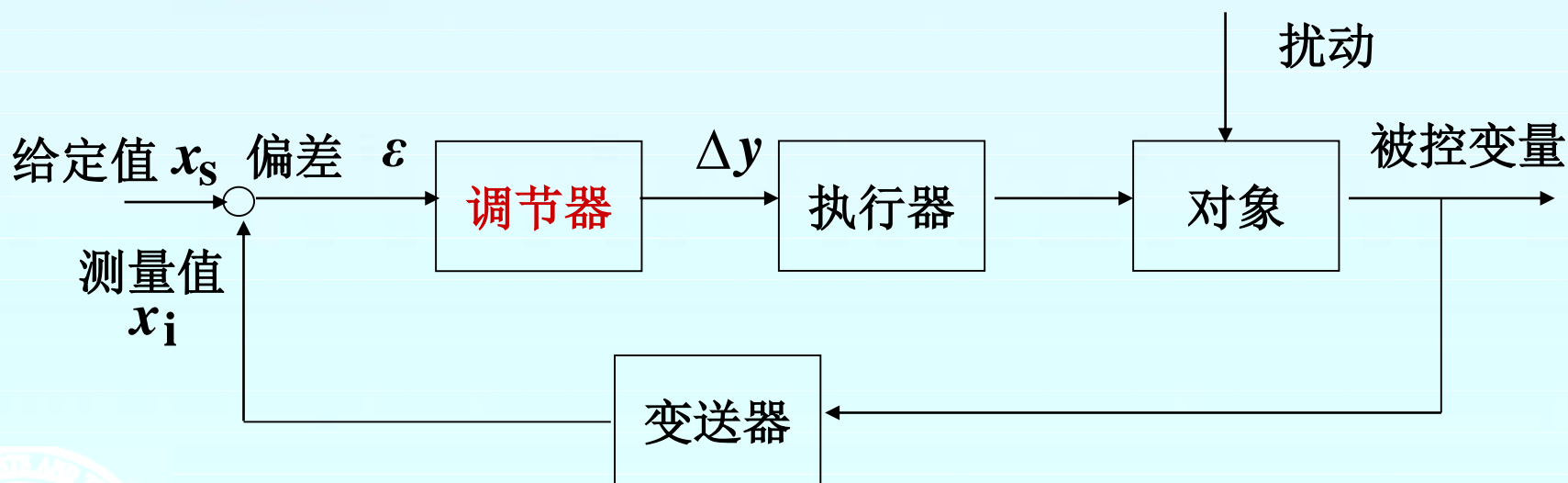


图2-1 单回路控制系统方框图

## 2、运算规律 $\Delta y = F(\varepsilon)$

输出信号  $\Delta y$  随偏差输入信号  $\varepsilon$  的变化规律。

**P、PI、PD、PID**四种。

## 3、控制器（调节器）的作用方式

$$\varepsilon = X_S - X_i$$

$$\varepsilon = x_S - x_i > 0, \quad \Delta y > 0 \quad \text{反作用-}$$

$$\varepsilon = x_S - x_i > 0, \quad \Delta y < 0 \quad \text{正作用+}$$

选择调节器的两种判断方法。负反馈法和过程分析法。

## 调节器作用方式选择举例

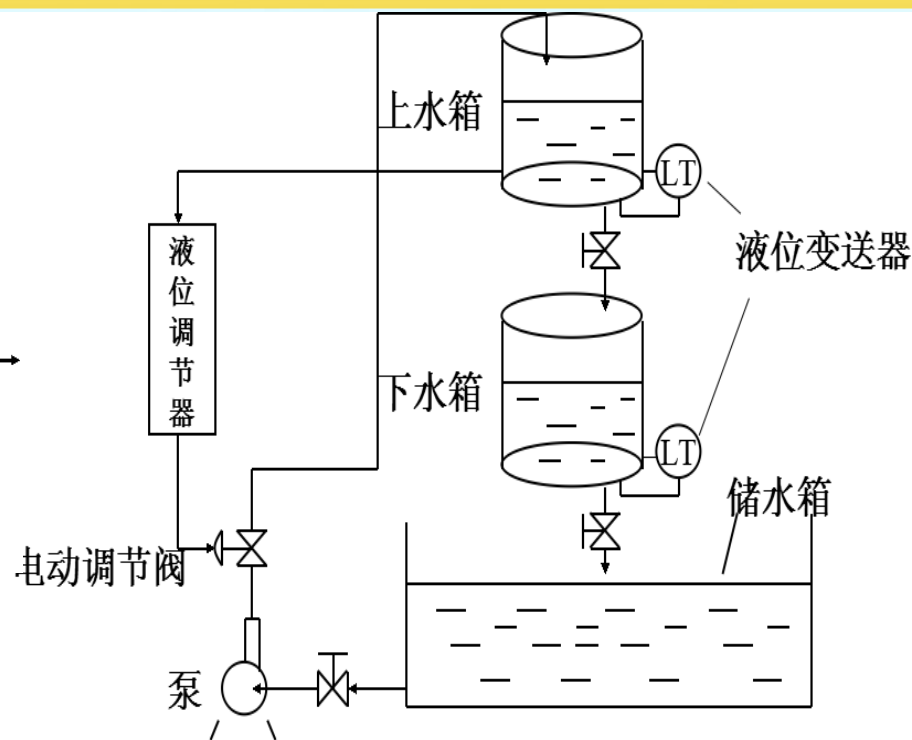
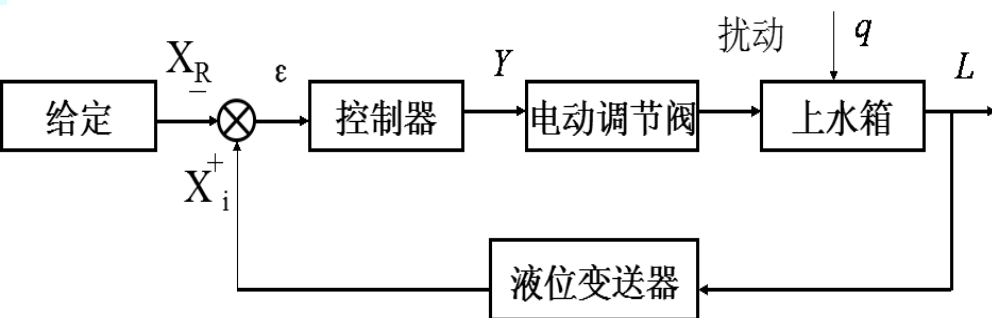
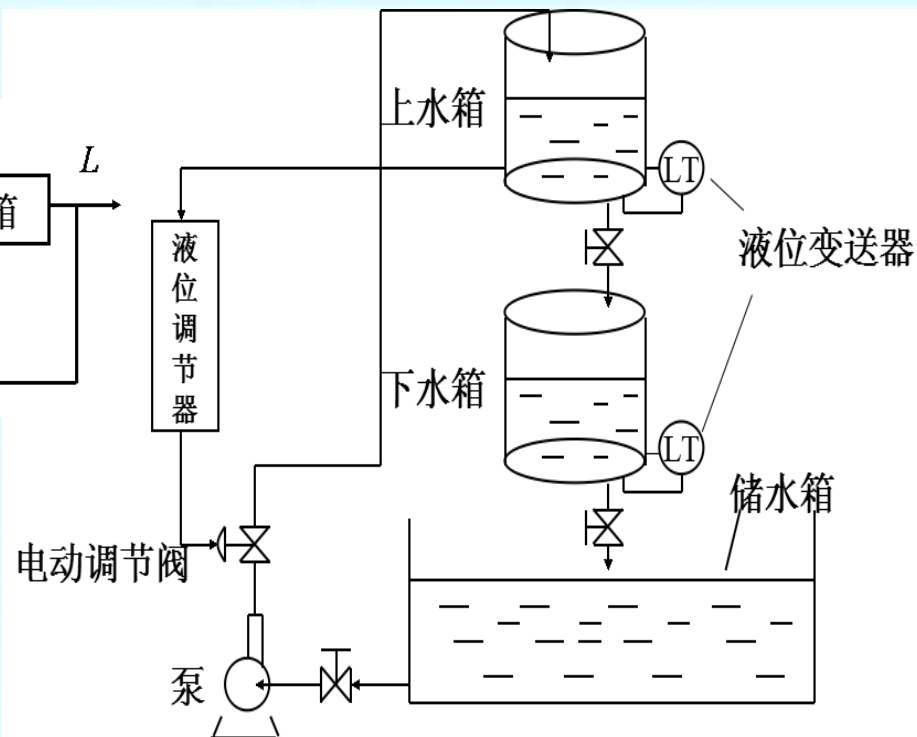
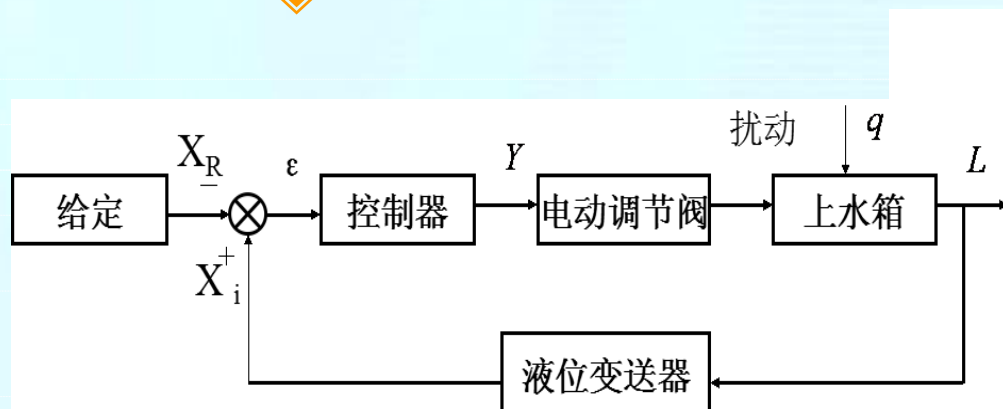


图2-2液位控制系统框图

思考：电开阀，调节器的作用方式。

电关阀，调节器的作用方式。

两种判断方法。负反馈法和过程分析法。

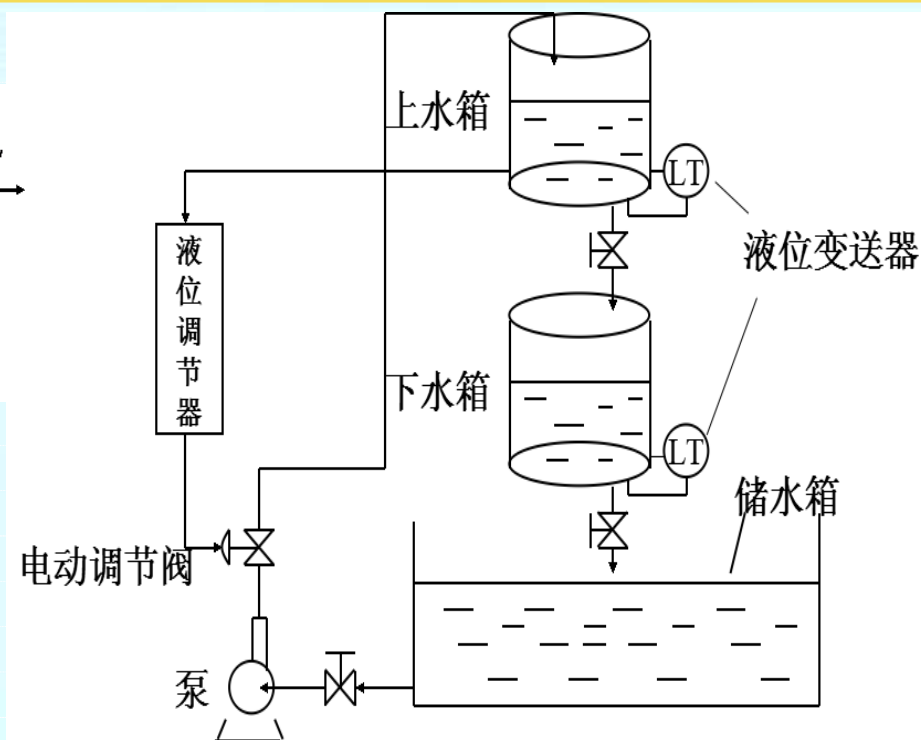
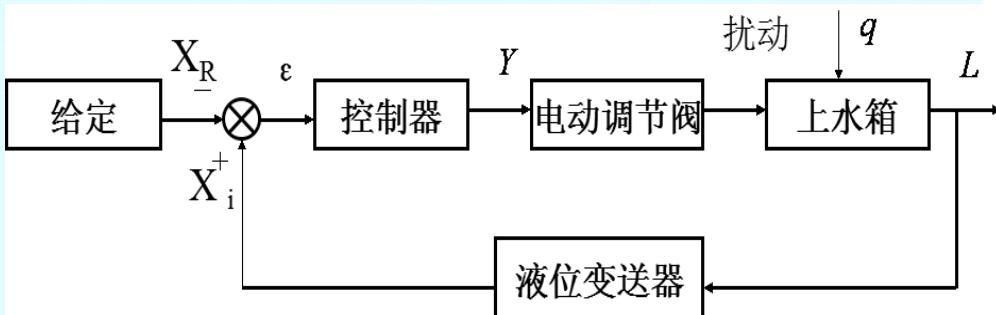


判断方法一：负反馈法

闭环控制系统各环节乘积为负

电开阀+, 液位变送器+, 上水箱+, 控制器-。反作用。

电关阀-, 液位变送器+, 上水箱+, 控制器+。正作用。



## 判断方法二：过程分析法

假设偏差为正，进水量应增大。  
根据阀门性质，判断控制器输出正负。

电开阀，开大阀门，控制器输出为正。反作用。  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \Delta y \uparrow$

电关阀，开大阀门，控制器输出为负。正作用。  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \Delta y \downarrow$

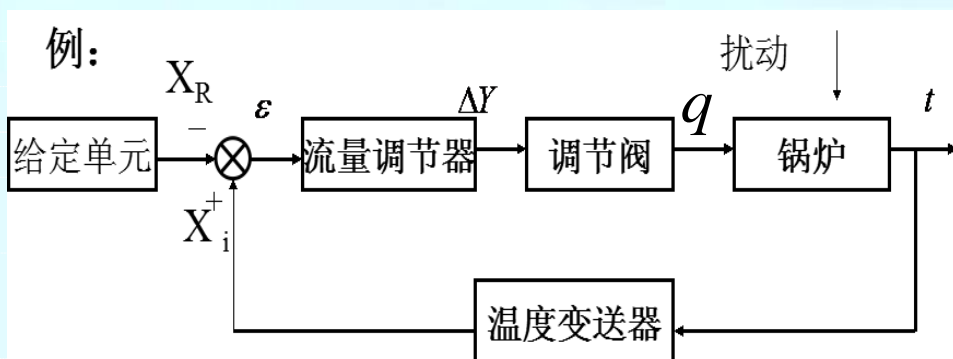
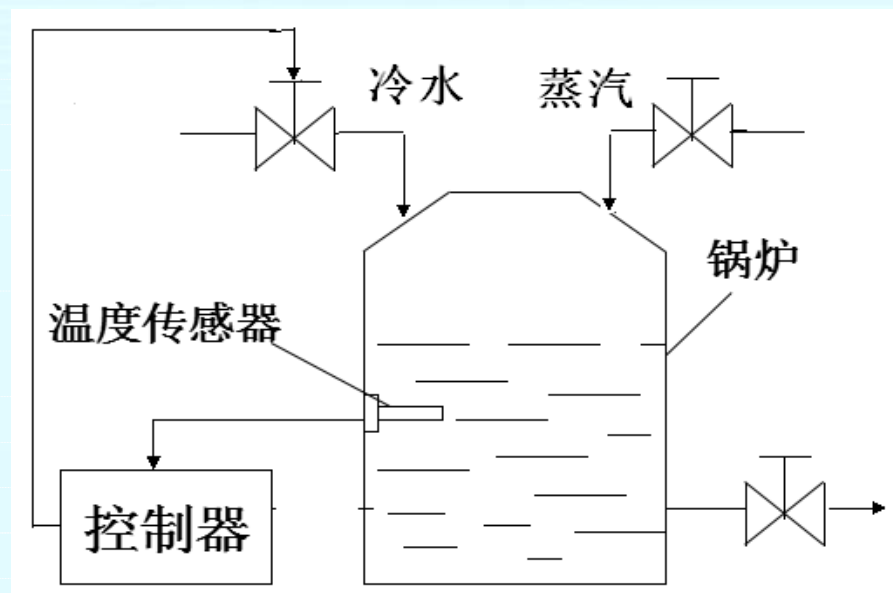


图2-3温度控制系统框图



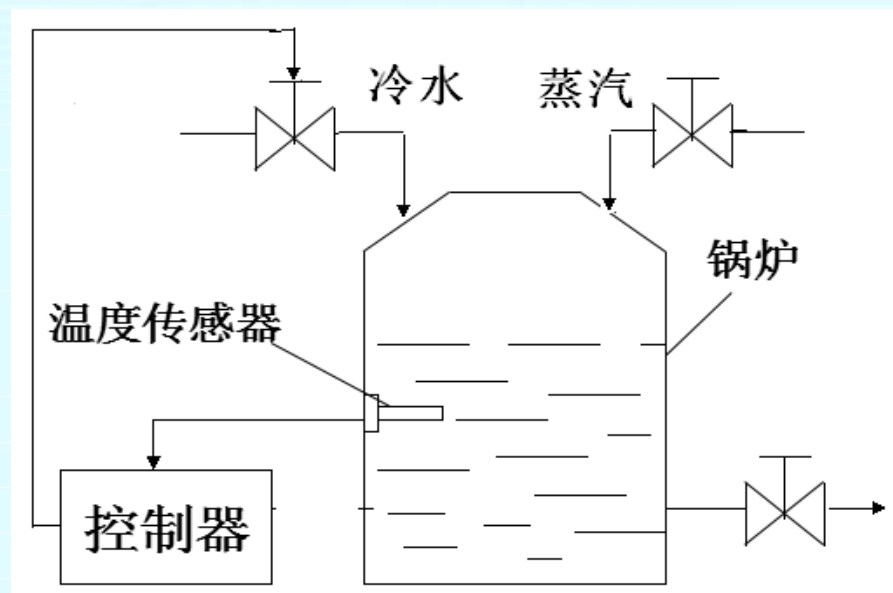
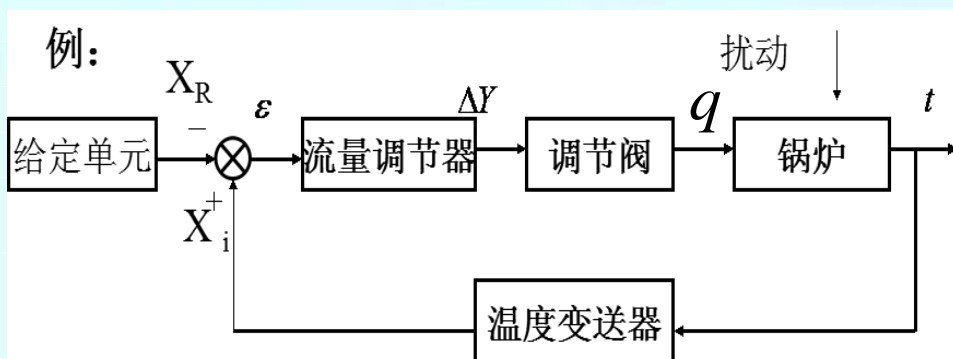
### 思考题：

冷水阀为电关阀，蒸汽阀为电开阀。

蒸汽流量一定，调节冷水水量来控制水箱温度，调节器的作用方式。

冷水流量一定，调节管道蒸汽流量来控制锅炉温度，调节器的作用方式。

例：



## 判断方法一：负反馈法

蒸汽流量一定，调节冷水水量来控制水箱温度，调节器的作用方式。

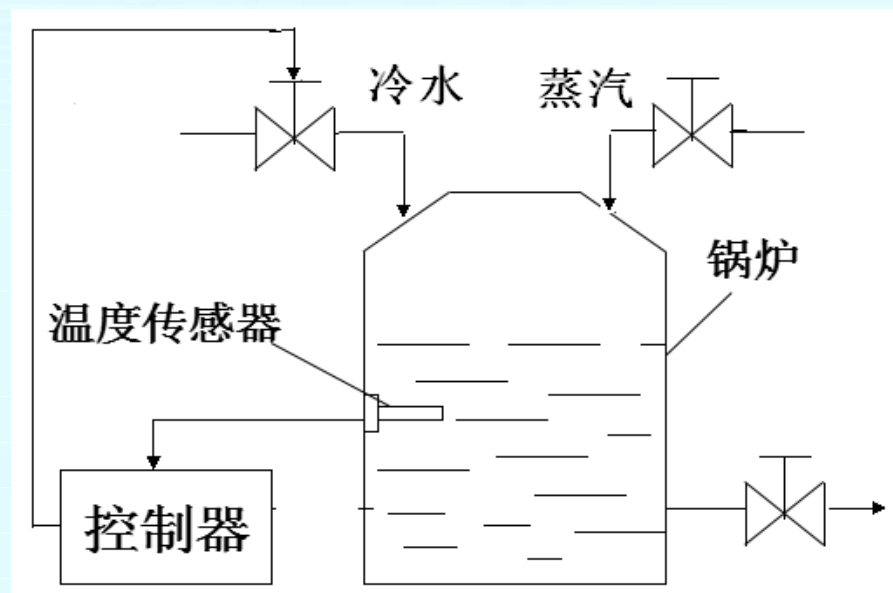
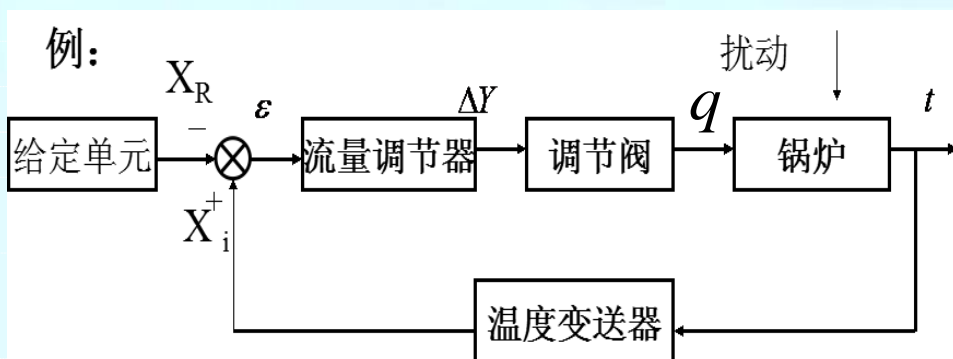
温度变送器 $+$ ，冷水阀 $-$ ，锅炉 $-$ ，控制器 $-$ ，反作用。

冷水流量一定，调节管道蒸汽流量来控制锅炉温度，调节器的作用方式。

温度变送器 $+$ ，蒸汽阀 $+$ ，锅炉 $+$ ，控制器 $-$ ，反作用。



例：



## 判断方法二：过程分析法

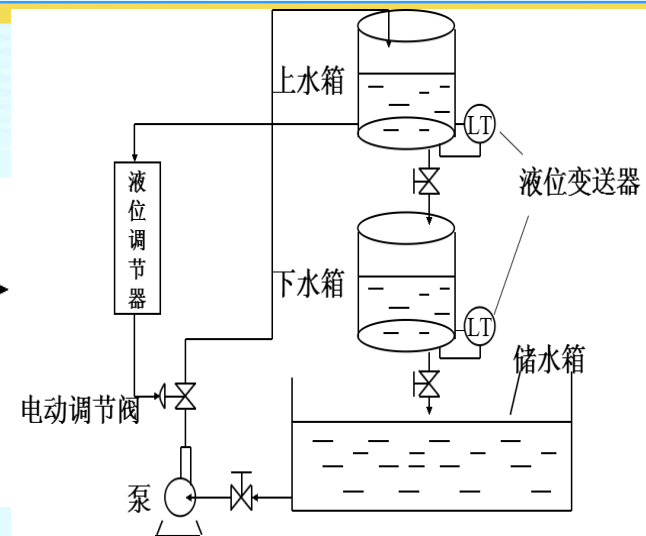
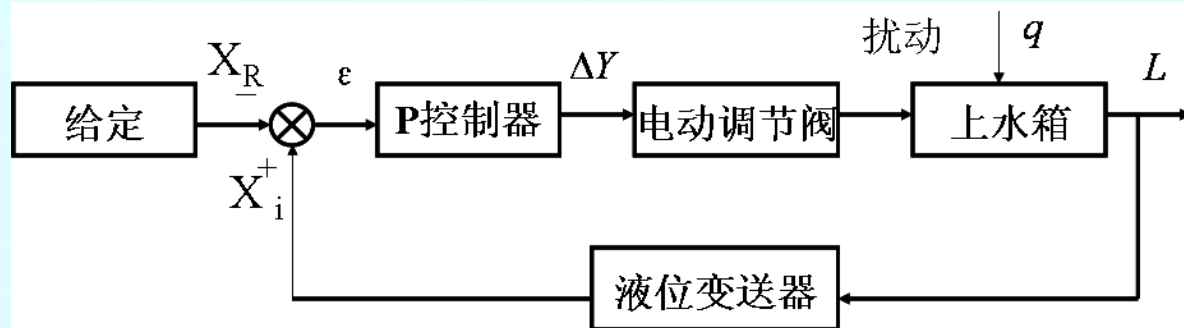
蒸汽流量一定，调节冷水水量来控制水箱温度，调节器的作用方式。

偏差+，电关阀-，关小阀门，控制器输出为正。反作用。

冷水流量一定，调节管道蒸汽流量来控制锅炉温度，调节器的作用方式。

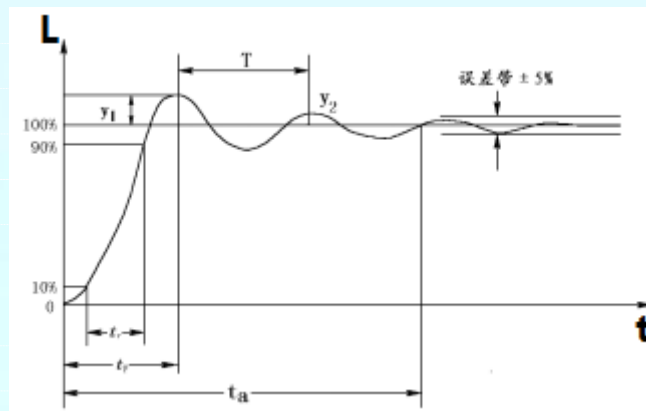
偏差+，电开阀+，开大阀门，控制器输出为正。反作用。

## 1、比例（P）运算



$$\Delta y = K_p \varepsilon \quad \text{比例度 } \delta_p = \frac{1}{K_p} \times 100\%$$

特点：**快速及时，有余差。**

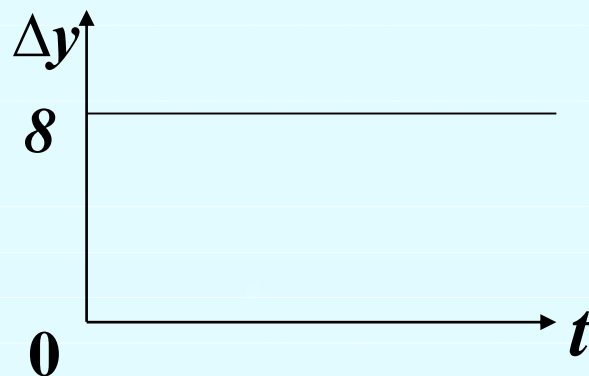


思考：比例度过大、过小会出现什么工况？

比例度过大：调节作用弱，调节缓慢。

比例度过小：调节作用过强，易出现振荡。

## P调节器比例度与比例增益确定（工程测试法）



$$\delta = \frac{\varepsilon}{\Delta y} \times 100\% = \frac{2}{8} \times 100\% = 25\% \quad K_P = 4$$

4~20mA 比例调节器，输入从4 ~5mA DC变化，输出从 4 ~6mA DC变化，  $\delta = ?$

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\Delta y} \times 100\% = \frac{1}{2} \times 100\% = 50\% \quad K_P = 2$$



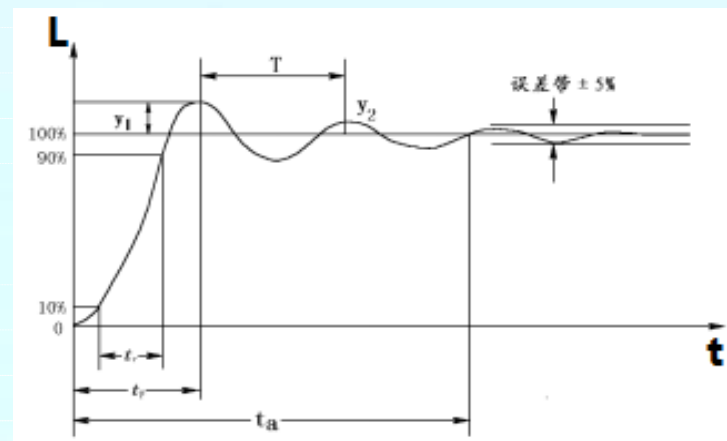
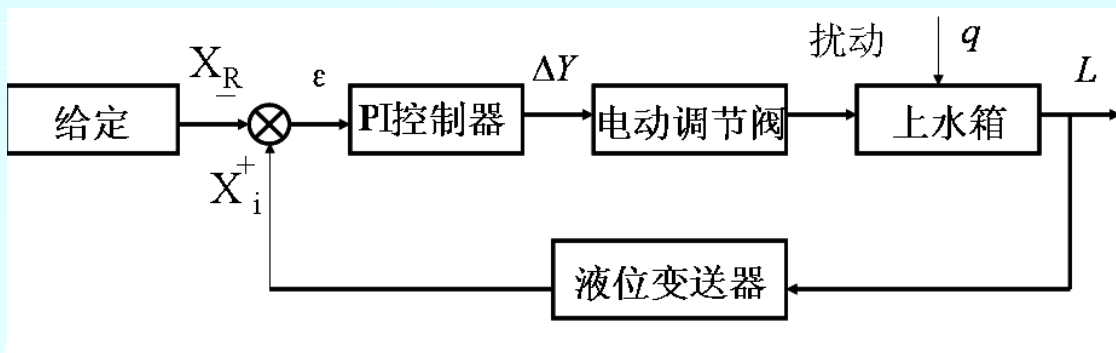
## 2、PI运算规律

$$\Delta y = K_P(\varepsilon + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon dt)$$

$$W(S) = K_P(1 + \frac{1}{T_I S})$$

(1) PI作用特点：

能消除余差，调节速度较快。可能产生超调。



## (2) PI调节 $K_P$ 与 $T_I$ 确定 (工程测试)

$$\Delta y = K_P \left( \varepsilon + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon dt \right)$$

$$K_P = \frac{\Delta y(0)}{\varepsilon}$$

$$\Delta y_P = K_P \varepsilon$$

$$\Delta y_I = K_P \frac{t}{T_I} \varepsilon$$

$$\Delta y_I = \Delta y_P \rightarrow t = T_I$$

输出从PI作用开始，到I作用输出等于P作用输出的时间为积分时间常数。

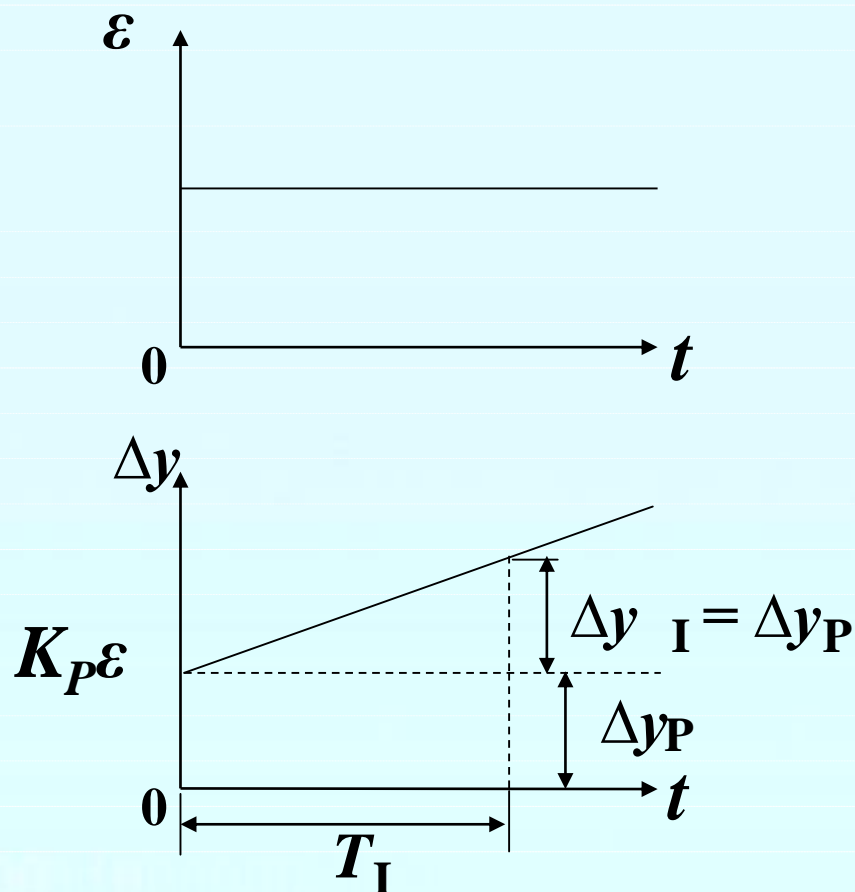


图2-4 PI控制器的阶跃响应特性

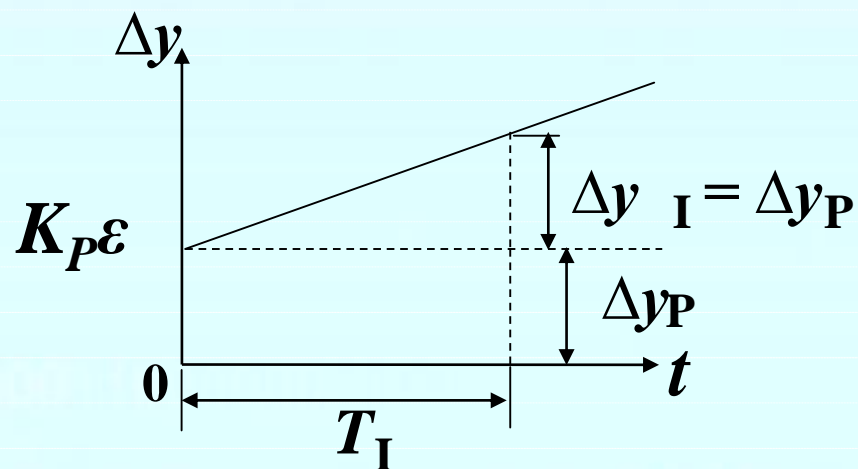
思考题：PI调节器，单位阶跃偏差输入，零时刻输出为2，经过10S，输出为4，确定比例增益及积分时间。

$$K_P = \frac{\Delta y(0)}{\varepsilon} = \frac{2}{1} = 2$$

$$\Delta y(10) = K_P \left( \varepsilon + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon dt \right)$$

$$= 2 \left( 1 + \frac{1}{T_I} \int_0^{10} 1 dt \right) = 4$$

$$T_I = 10S$$



思考题：PI调节器，稳态时，测量、设定和输出值均为5mA，测量值阶跃变化1mA时，输出立刻达到6mA，随后随时间均匀上升，当输出值达到7mA时需要25S，调节器的 $\delta$ 和 $T_i$ 为多少？

解答：PI调节  $\Delta I_i = 1mA$   $\Delta I_o = 1mA$

$$\delta = 100\% \quad \Delta I_o = K_P \left( \Delta I_i + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta I_i dt \right)$$

$$2 = 1 \times \left( 1 + \frac{1}{T_i} \times 25 \right) \quad T_i = 25S$$



### 3、PD运算规律

#### (1) 理想PD控制器的特性

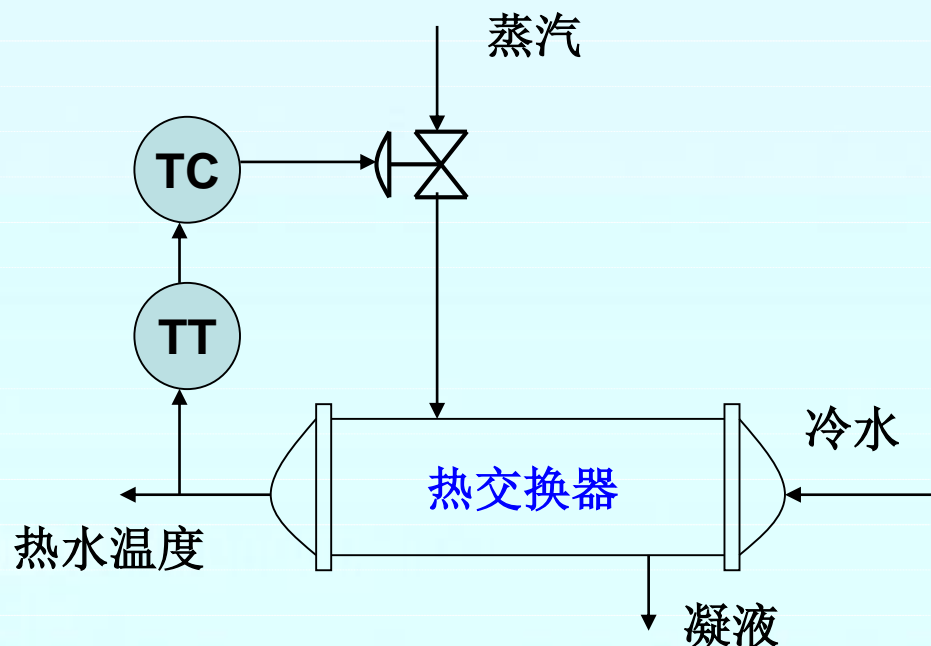
$$\Delta y = K_P (\varepsilon + T_D \frac{d\varepsilon}{dt})$$

$$W(S) = K_P (1 + T_D S)$$

为什么要进行PD调节？

在对象容积滞后较大场合，  
被控量易出现超调。

PD控制特点：**超前控制。**





## PD超前P作用验证

测试偏差输入斜坡信号  $\varepsilon = \alpha t$

P调节  $\Delta y_P = K_p \varepsilon = K_p \alpha t$

PD调节

$$\Delta y_{PD} = K_p \left( \varepsilon + T_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right) = K_p \alpha t + K_p \alpha T_D$$

$$\Delta y_{PD} = \Delta y_P$$

$$K_p \alpha t_1 + K_p \alpha T_D = K_p \alpha t_2$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = T_D$$

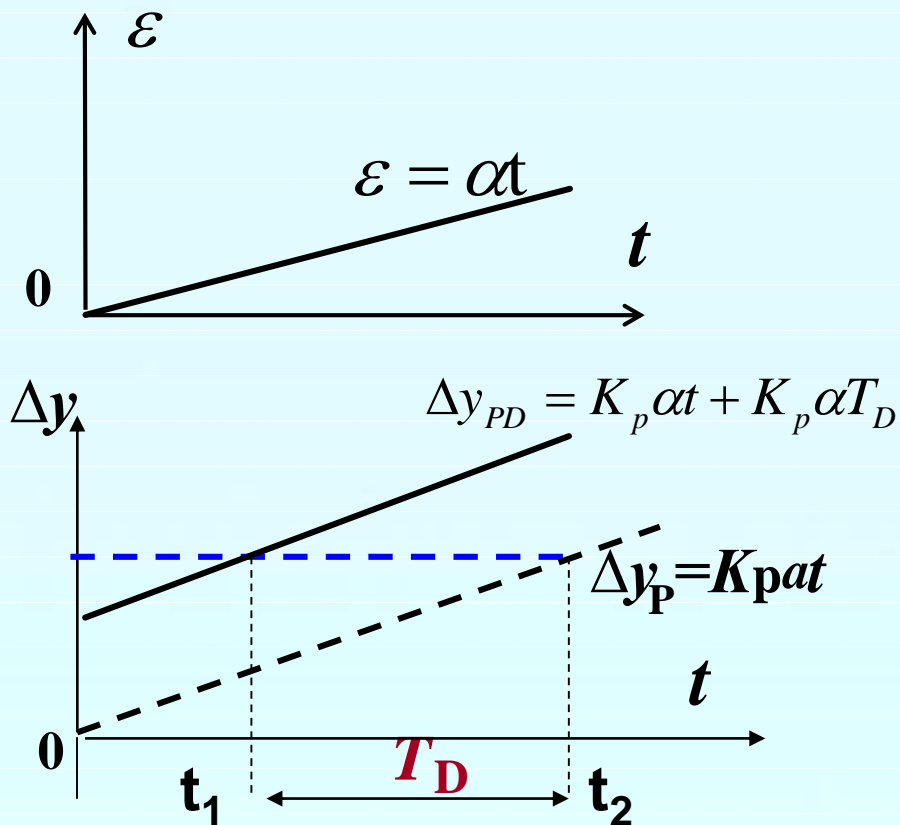


图2-5 理想PD控制器的斜坡响应特性

## 理想PD能否作为调节规律

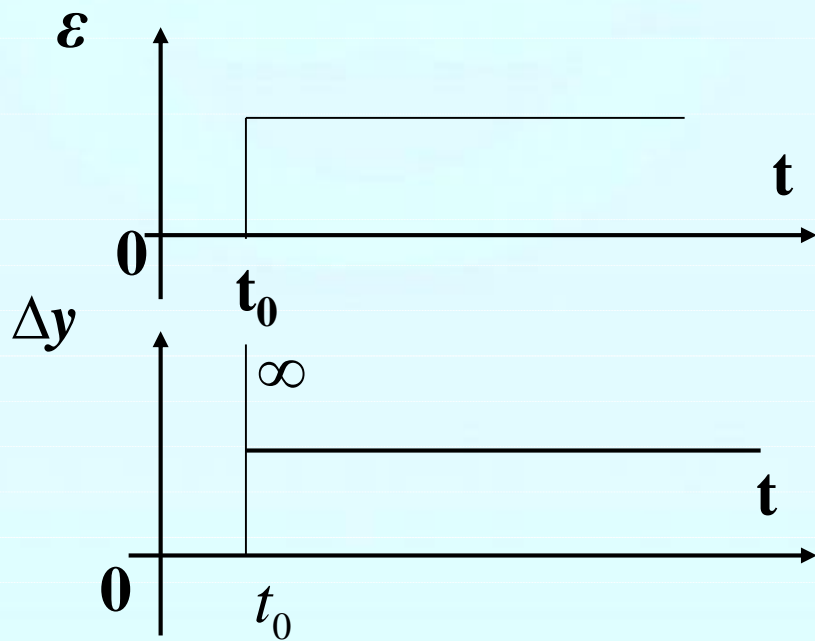


图2-6 (a)理想PD响应曲线

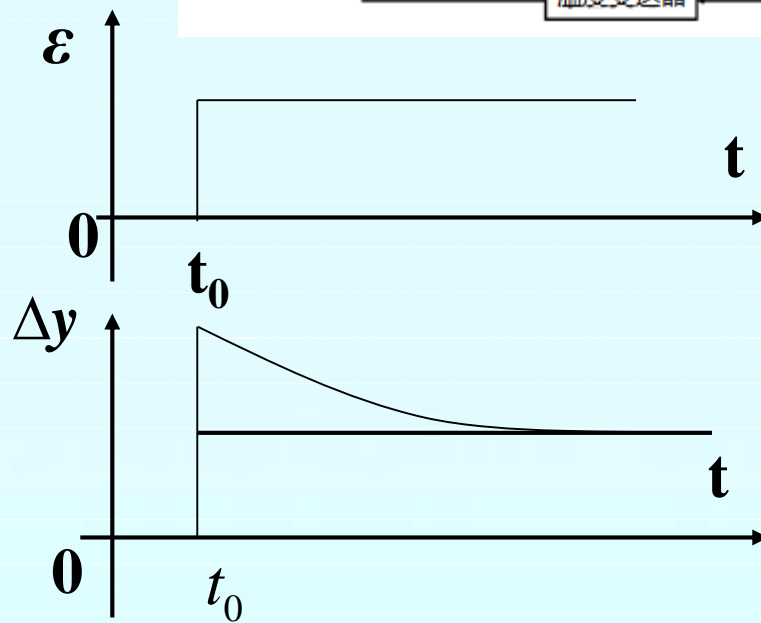
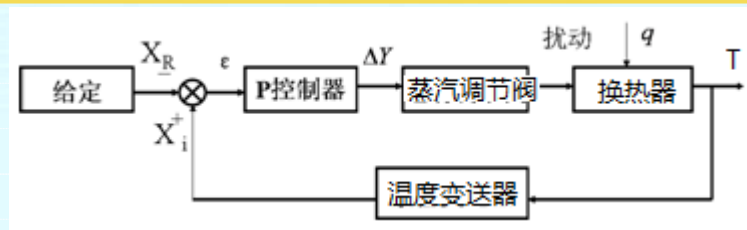


图2-6 (b) 实际PD响应曲线



$$\Delta y = K_P \left( \varepsilon + T_D \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$$

$$\Delta y = K_P \varepsilon \left[ 1 + (K_D - 1) e^{-\frac{K_D}{T_D} t} \right]$$

## (2) 实际PD控制器的特性

实际PD控制器的输出为：

$$\Delta y = K_P \varepsilon [1 + (K_D - 1)e^{-\frac{t}{\tau_D}}]$$

$$W(S) = K_P \frac{1 + T_D S}{1 + \tau_D S} \quad T_D = K_D \tau_D$$

$K_P$ ,  $K_D$ ,  $\tau_D$  的测定

$$K_P = \frac{\Delta y(\infty)}{\varepsilon} \quad K_D = \frac{\Delta y(0)}{\Delta y(\infty)}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_D(\tau_D) &= K_P \varepsilon (K_D - 1) e^{-1} \\ &= 0.368 K_P \varepsilon (K_D - 1) \end{aligned}$$

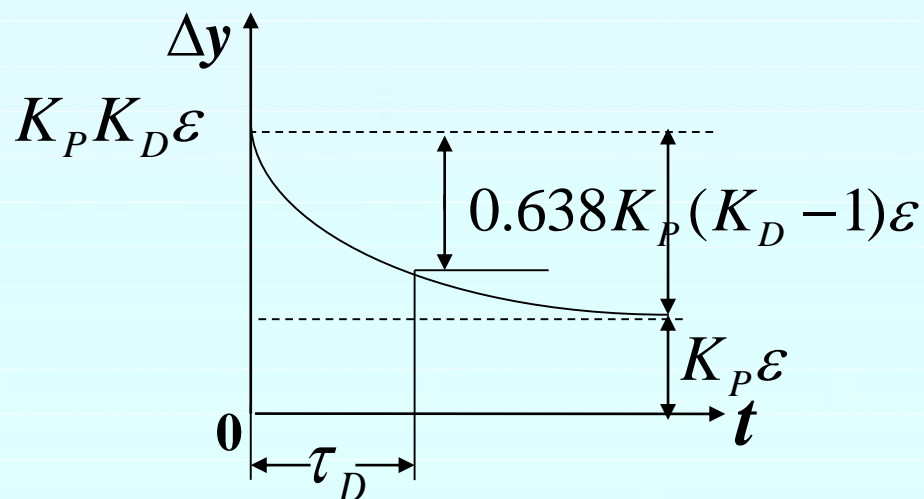


图2-7 实际PD作用的阶跃响应特性

PD作用开始到微分部分输出的37%所经历的时间。

思考:  $\Delta y(0) = 1$   $K_P = 1$   $\varepsilon = 0.1$

求  $K_D$   $\tau_D$   $T_D$

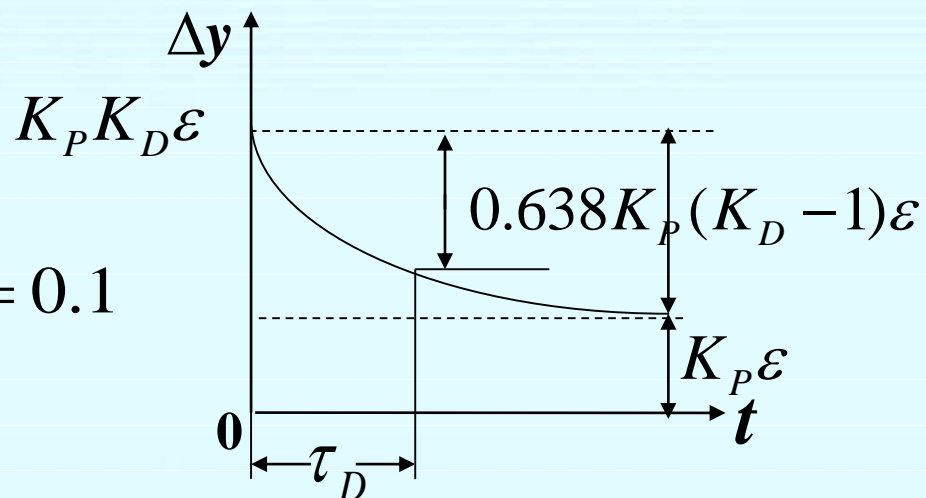
$$K_D = \frac{\Delta y(0)}{\Delta y(\infty)} = \frac{\Delta y(0)}{K_P \varepsilon} = 10$$

$$\Delta y_D(\tau_D) = K_P \varepsilon (K_D - 1) \times e^{-1} = 0.9 \times 0.37$$

**D基准**

$$\Delta y_{PD}(\tau_D) = K_P \varepsilon + K_P \varepsilon (K_D - 1) \times e^{-1} = 1 \times 0.43$$

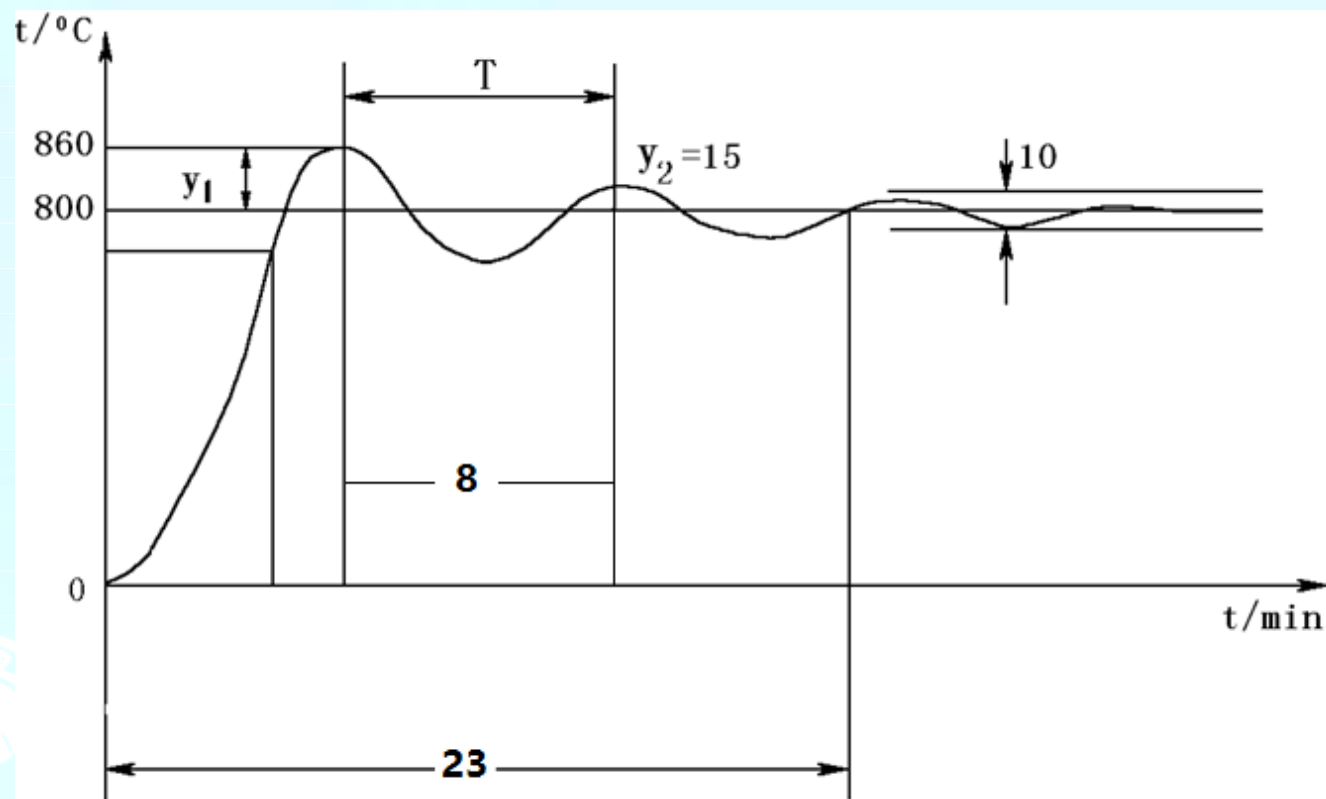
**PD基准**



总结：P、PI、PD、PID控制规律特点，由响应曲线参数确定方法。

控制规律	特点	对象特性	应用场合
<b>P</b>	快速有差	负荷变化不大， 工艺要求不高	气罐压力，贮槽液位
<b>PI</b>	消除余差	负荷变化不大， 对象滞后较小	压力、流量、液位
<b>PID</b>	超前调节	负荷变化较大， 对象滞后较大	蒸汽温度
模糊控制，神经网络等复杂控制		负荷变化很大， 对象滞后很大	模型不确定 反应温度

**P**调节是基础，增加**I**调节改善被控量输出的稳态性能，一次超调有所增大。增加**D**调节，可减小超调量，改善系统的动态性能。合理设置**PID**参数，使响应曲线最佳。



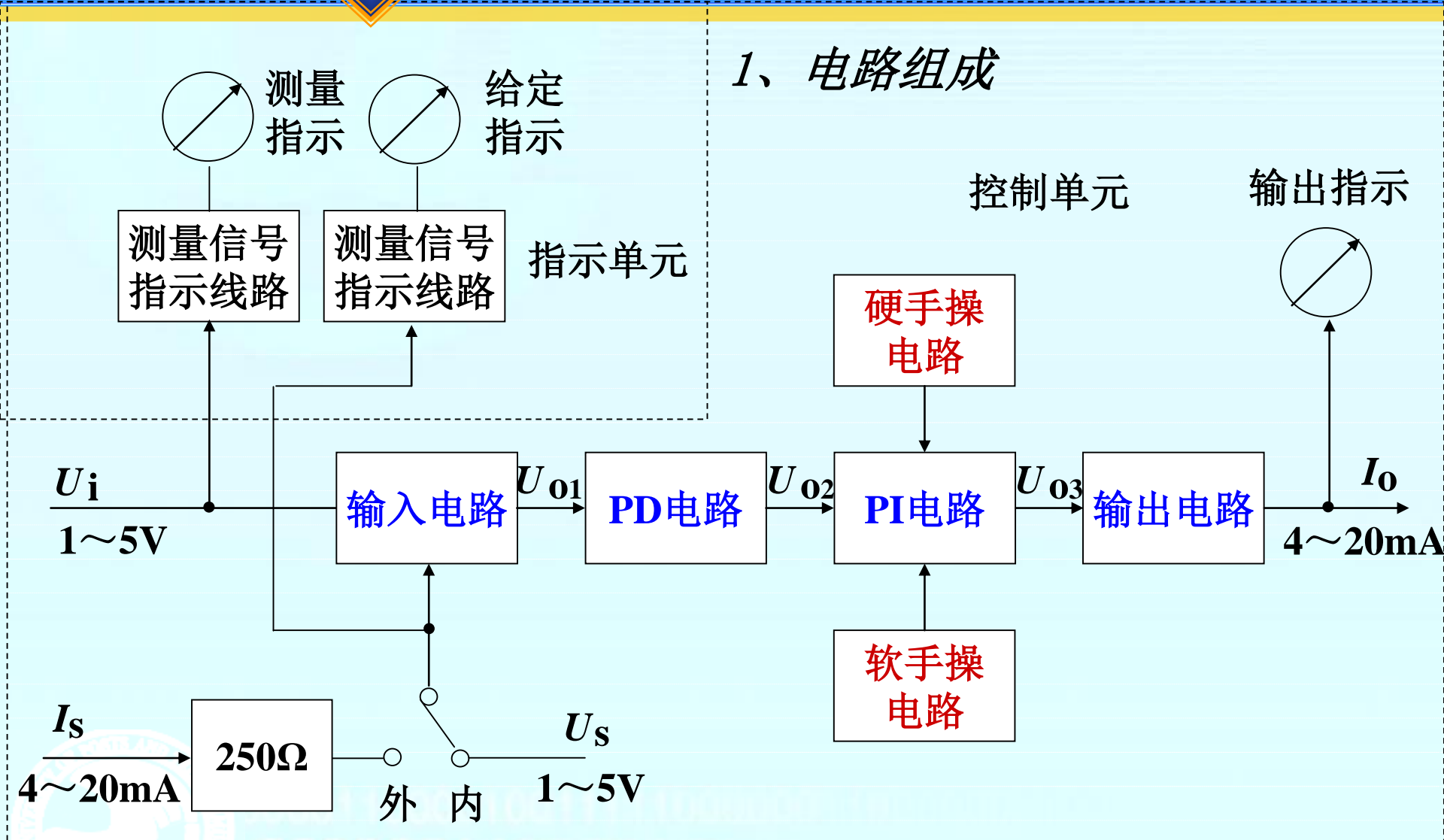
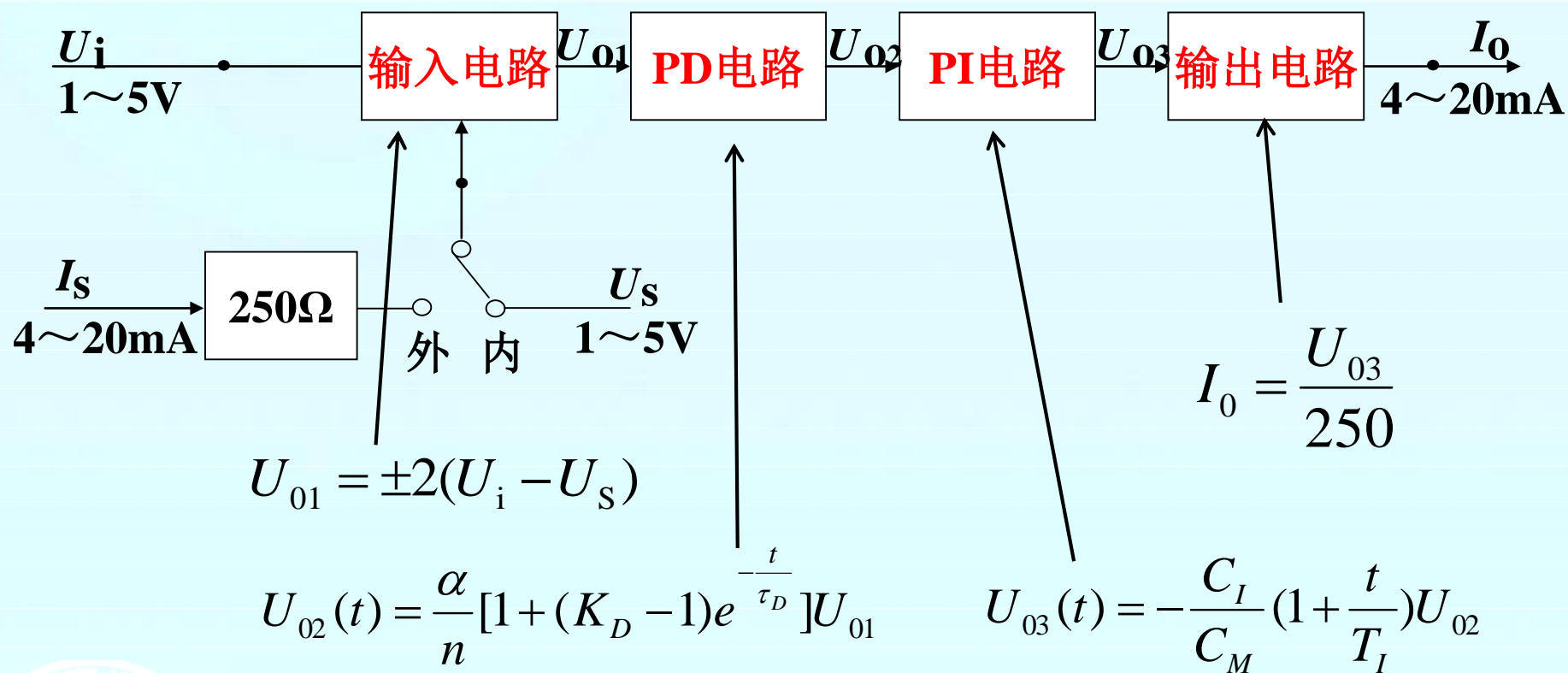


图 2-8 基型控制器方框图

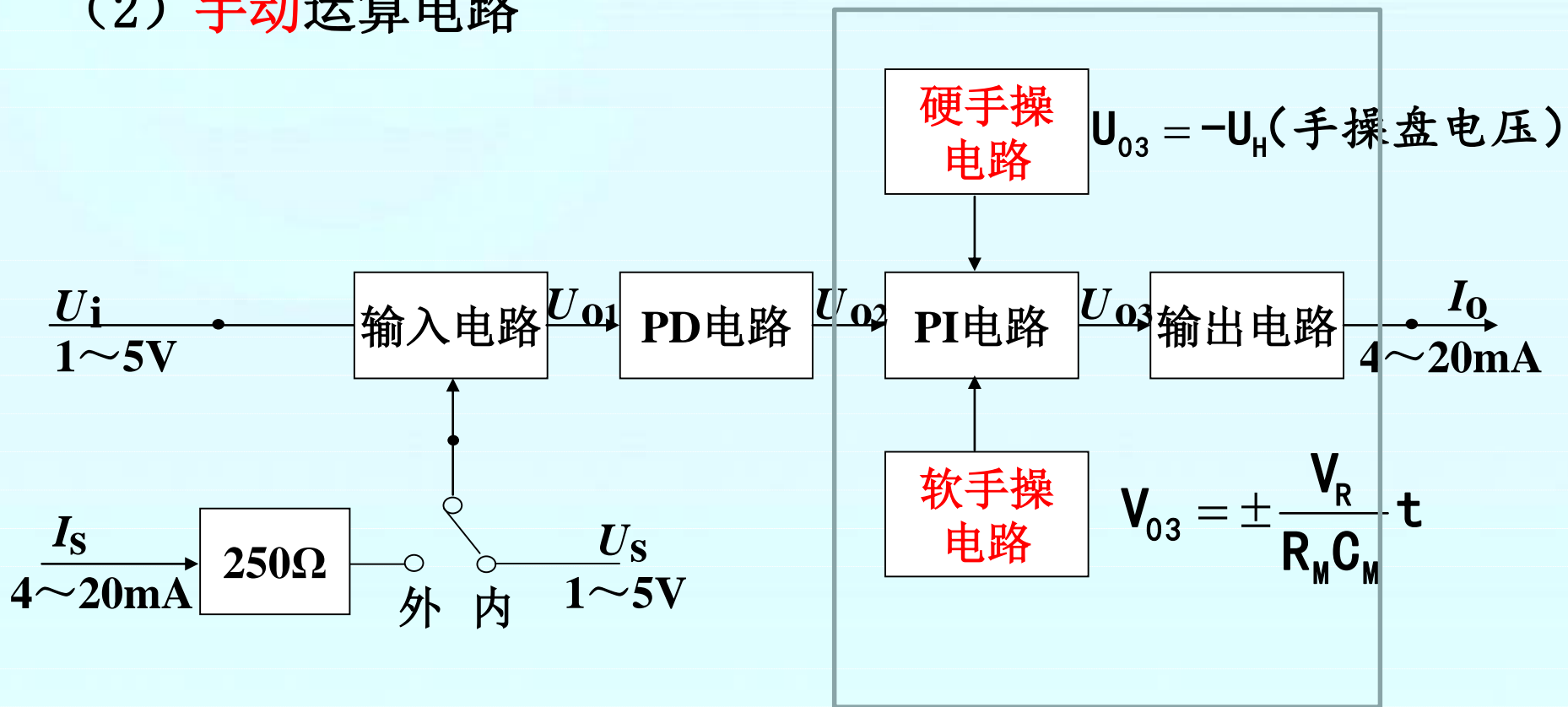
## (1) PID自动运算电路



串联结构, 将偏差信号进行PID运算后, 变为电流信号输出。

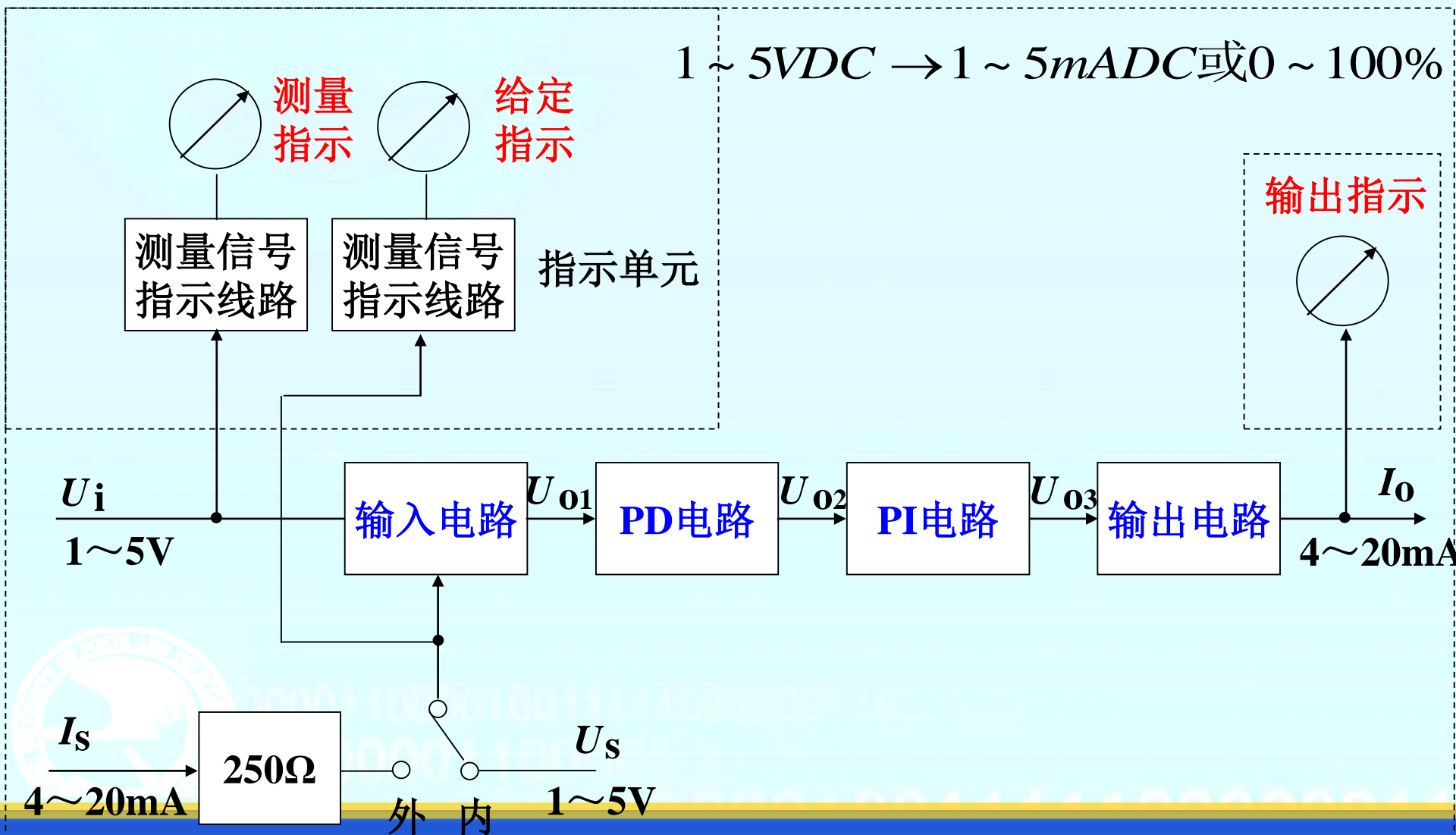


## (2) 手动运算电路



手动方式：自动失灵或仪表测试使用。

(3) **指示**电路：全量程地指示测量值、给定值、输出值。



## 2、输入电路

(1) 功能：差动电路信号综合  $U_{o1}=K(U_S - U_i)$

电平移动保证放大器正常工作。

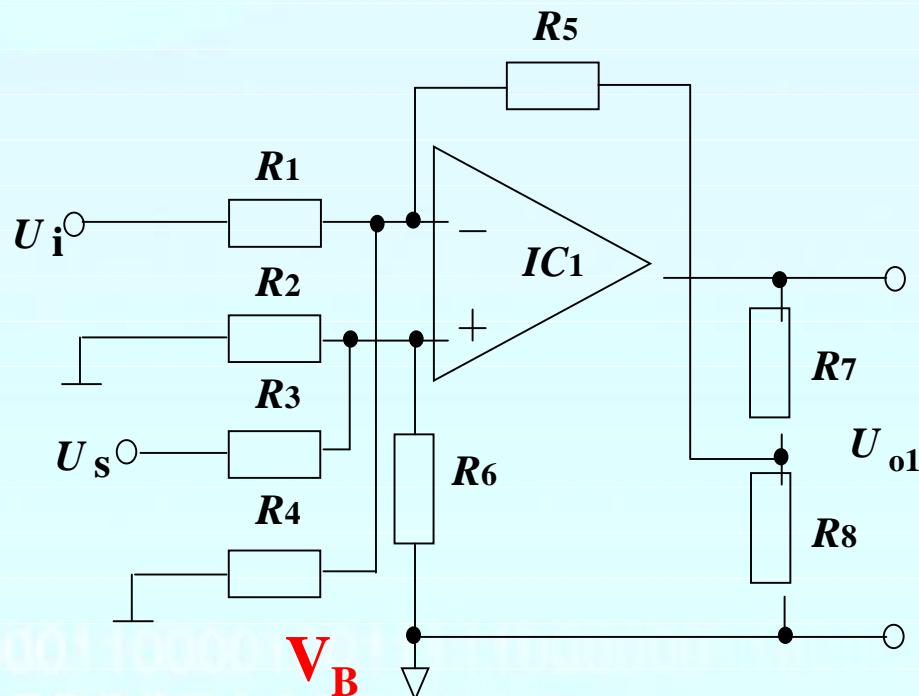


图2-9 输入电路原理图

思考：信号综合时为何采用差动输入方式？

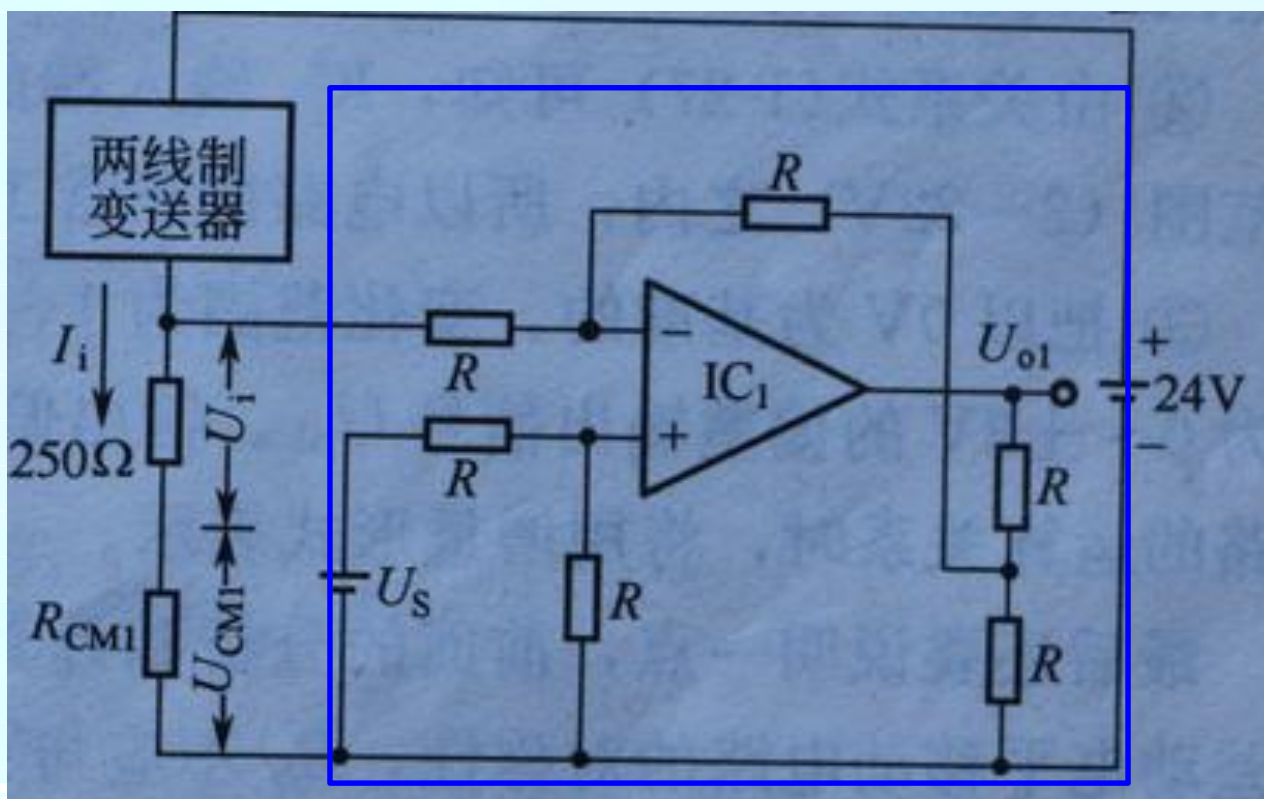


图2-10 集中供电引入的误差

消除传输线附加电压引入的误差。

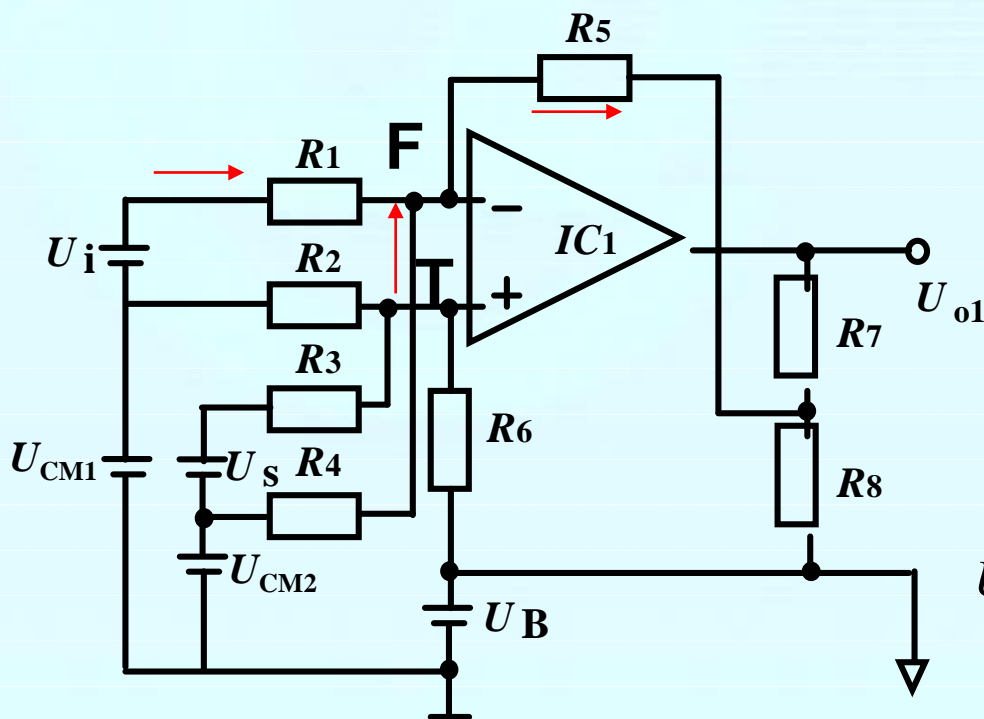


图2-11 引入导线电阻压降后  
的输入电路原理图

(2) 输出电压 $U_{o1}$ 推导

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 500K\Omega$$

$$R_7 = R_8 = 5K\Omega$$

放大器虚短、虚断、叠加定理

$$U_F = \frac{1}{3}(U_i + U_{CM1} + U_{CM2} + \frac{1}{2}U_{o1} + U_B)$$

$$U_T = \frac{1}{3}(U_s + U_{CM1} + U_{CM2} + U_B)$$

$$U_T = U_F$$

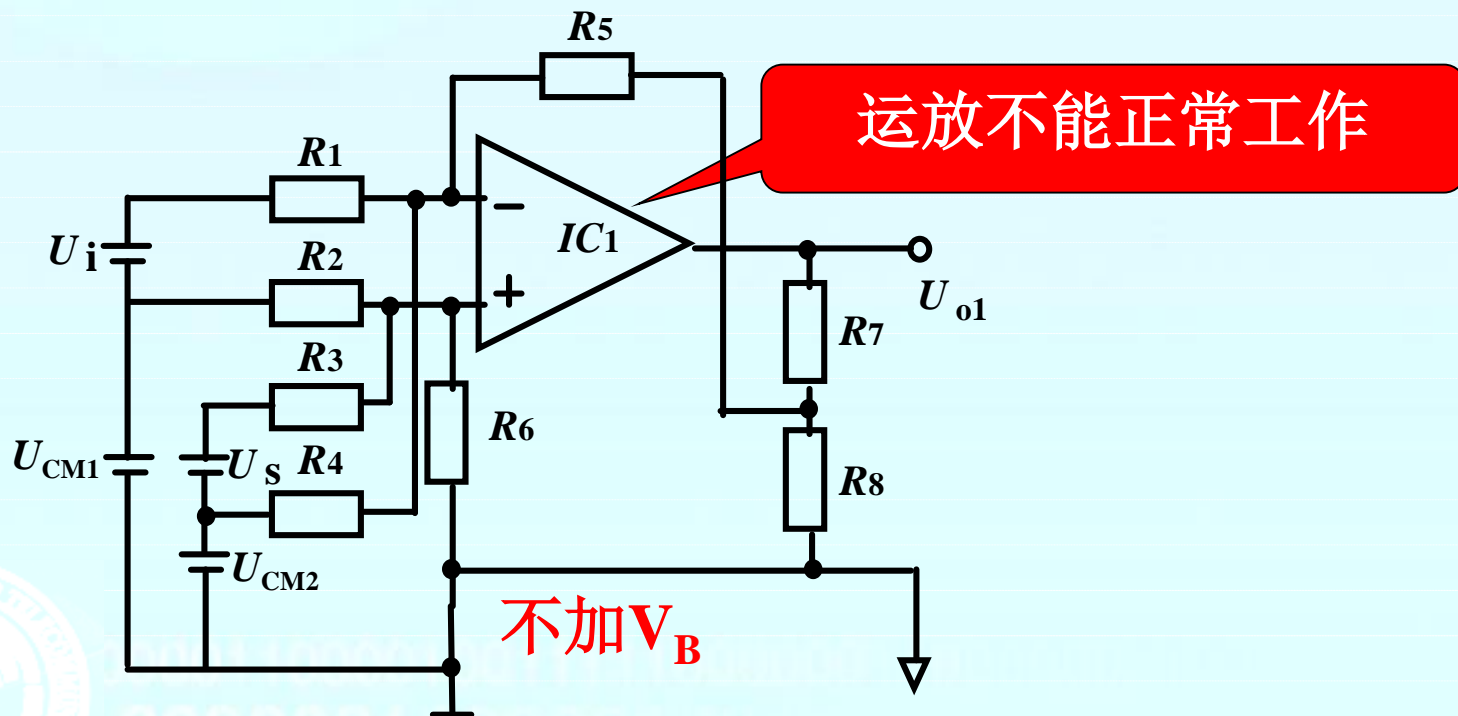
$$U_{o1} = 2(U_s - U_i)$$

(3) 电平移动  $U_i$  (对地)  $\rightarrow U_{o1}$  (对 $V_B$ )

为何要进行电平移动?

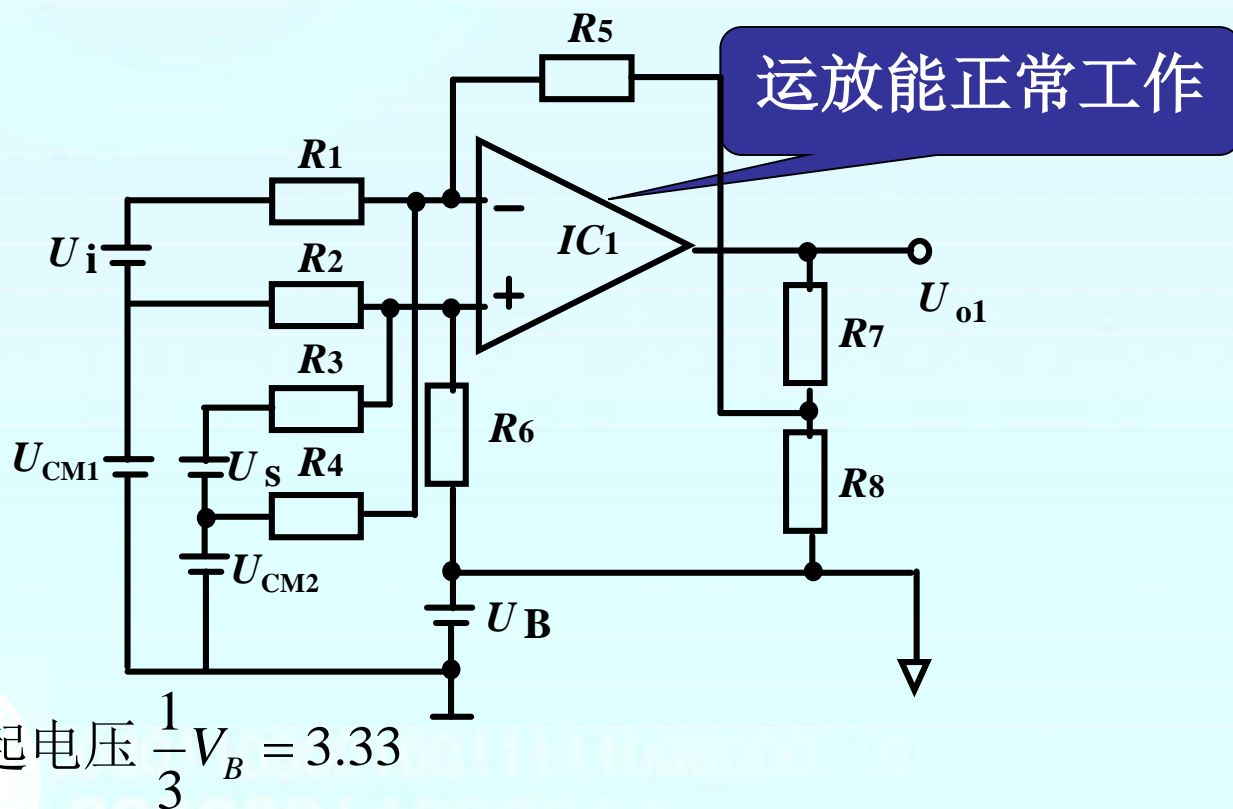
$V_S = 1 \sim 5V$ ,  $V_{CM1} = V_{CM2} = 0 \sim 1V$

$V_T = V_F = 0.33 \sim 2.33V$



加 $V_B$       $V_S=1\sim 5V$ ,  $V_{CM1}=V_{CM2}=0\sim 1V$ ,  $V_B=10V$

$V_T=V_F=3.7\sim 5.7V$



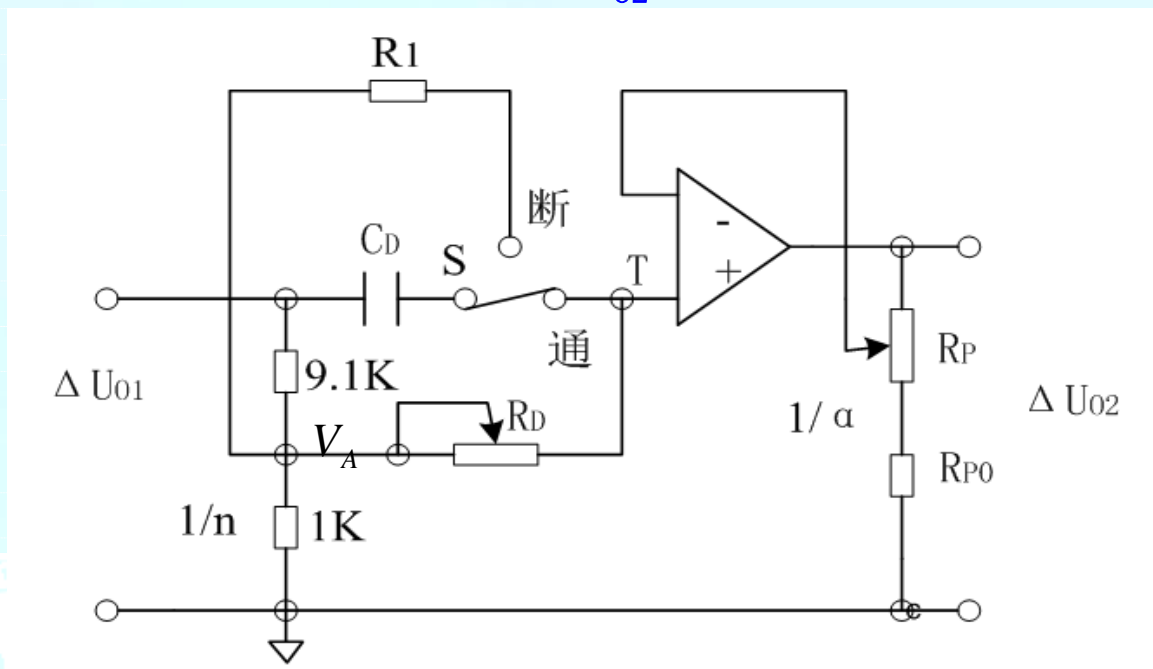
目的使输入电压在运放共模容许输入电压范围内。

### 3、PD电路

(1) 功能 对  $\Delta U_{01}$  进行PD运算输出  $\Delta U_{02}$ 。

思考：S置于“断”位置， $\Delta U_{02}$  值？为何种作用？

S置于“通”位置， $\Delta U_{02}$  值？为何种作用？



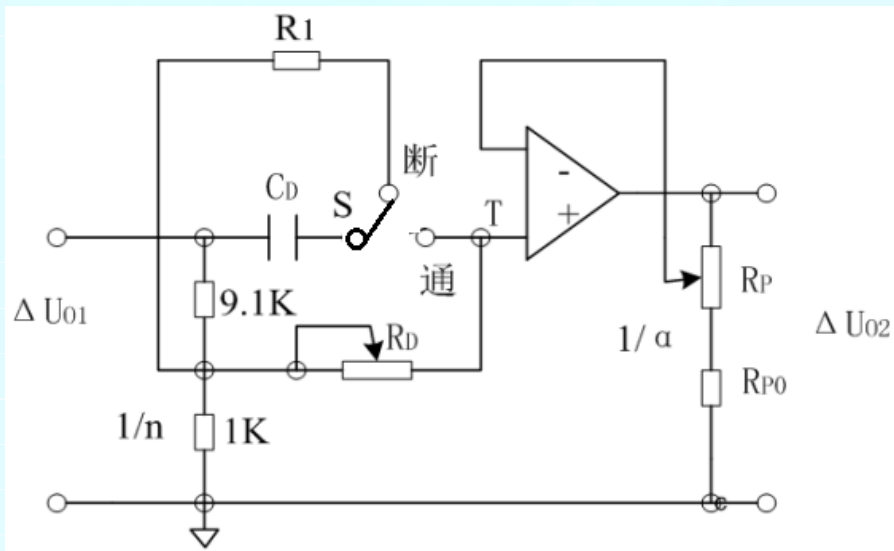
$$V_A = \frac{\Delta V_{01}}{n}$$

$$V_T = \frac{\Delta V_{02}}{\alpha}$$

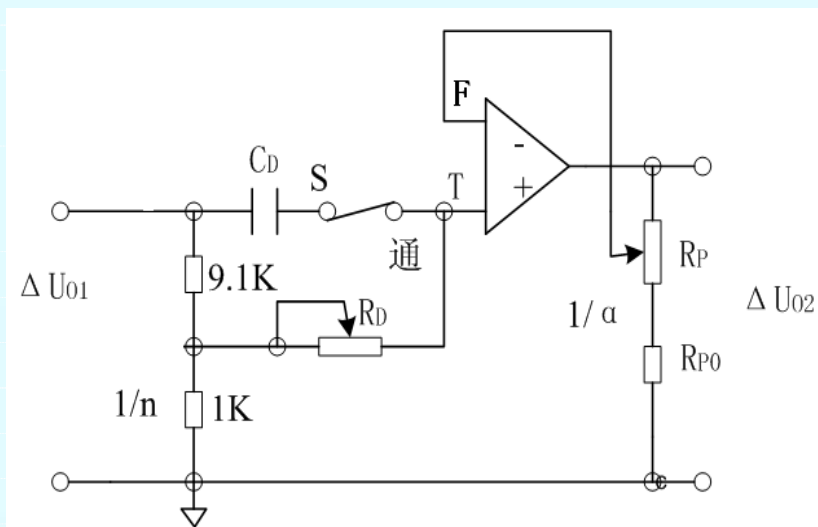
图2-12 PD电路



S置于“断”位置



S置于“通”位置



暂态响应法

$$\Delta U_{02} = \alpha U_T = \frac{\alpha}{n} \Delta U_{01} \quad \Delta V_{02}(t) = \Delta V_{02}(\infty) + [\Delta V_{02}(0) - \Delta V_{02}(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau_D}}$$

比例 (P) 作用

$$= \frac{\alpha}{n} \Delta V_{01} + [\alpha \Delta V_{01} - \frac{\alpha}{n} \Delta V_{01}] e^{-\frac{t}{\tau_D}}$$

比例微分 (PD) 作用

$$= \frac{\alpha}{n} [1 + (K_D - 1) e^{-\frac{t}{\tau_D}}] \Delta V_{01}$$

## 方法二：S域传递函数

$$\Delta U_T = \frac{\Delta U_{01}}{n} + \frac{R_D}{R_D + 1/SC_D} (\Delta U_{01} - \frac{1}{n} \Delta U_{01})$$

$$\Delta U_F = \frac{1}{\alpha} \Delta U_{02}$$

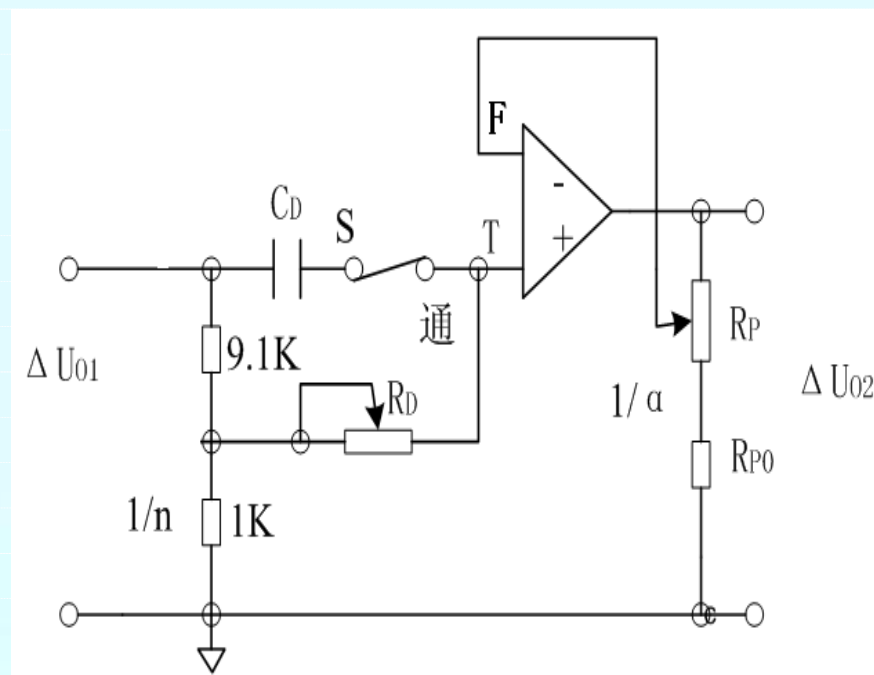
$$\Delta U_T = \Delta U_F$$

$$W_{PD}(S) = \frac{\Delta U_{02}}{\Delta U_{01}} = \frac{\alpha}{n} \times \frac{1 + T_D S}{1 + \frac{T_D}{K_D} S}$$

$$K_D = n \quad T_D = nR_D C_D$$

拉式反变换

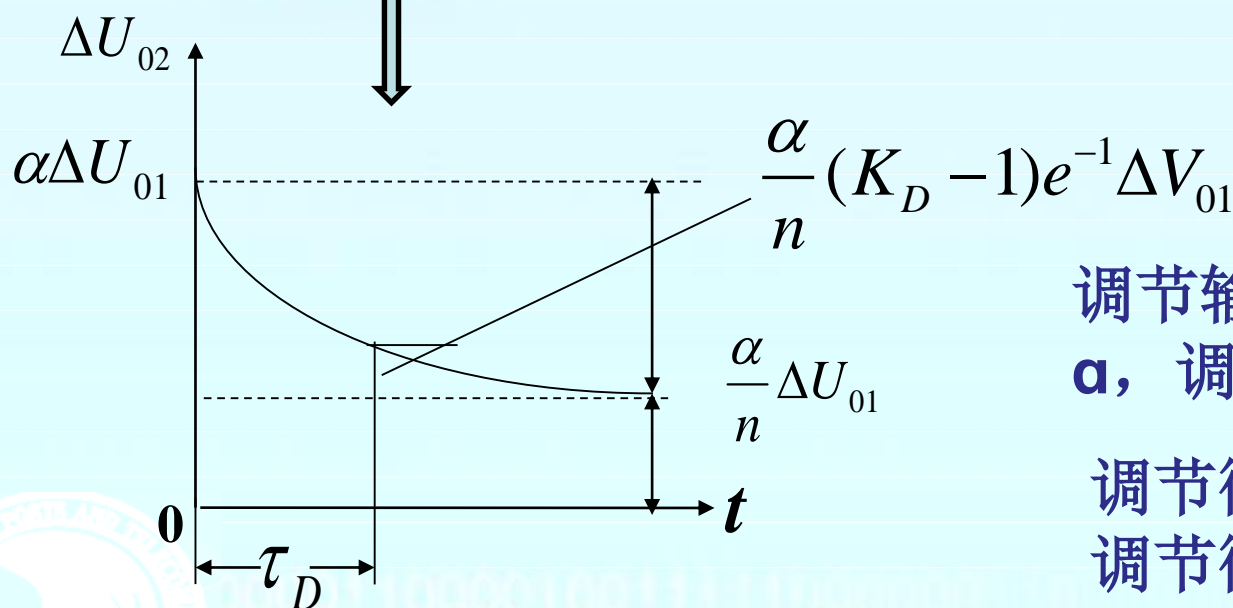
$$\Delta V_{02}(t) = \frac{\alpha}{n} [1 + (K_D - 1)e^{-\frac{t}{\tau_D}}] \Delta V_{01}$$



## (2) PD响应曲线

$$\Delta U_{02}(t) = \frac{\alpha}{n} [1 + (K_D - 1)e^{-\frac{t}{\tau_D}}] \Delta U_{01}$$

响应曲线



思考:

如何调节比例度。

如何调节微分时间常数。

调节输出电位器 $R_p$ 变 $\alpha$ ，调节比例度。

调节微分电位器 $R_D$ ，  
调节微分时间常数 $\tau_D$ 。

## 4、PI电路

(1) 功能：对 $\Delta V_{02}$ 进行PI运算。

$$\Delta U_{03}(s) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \Delta U_{02}(s)$$

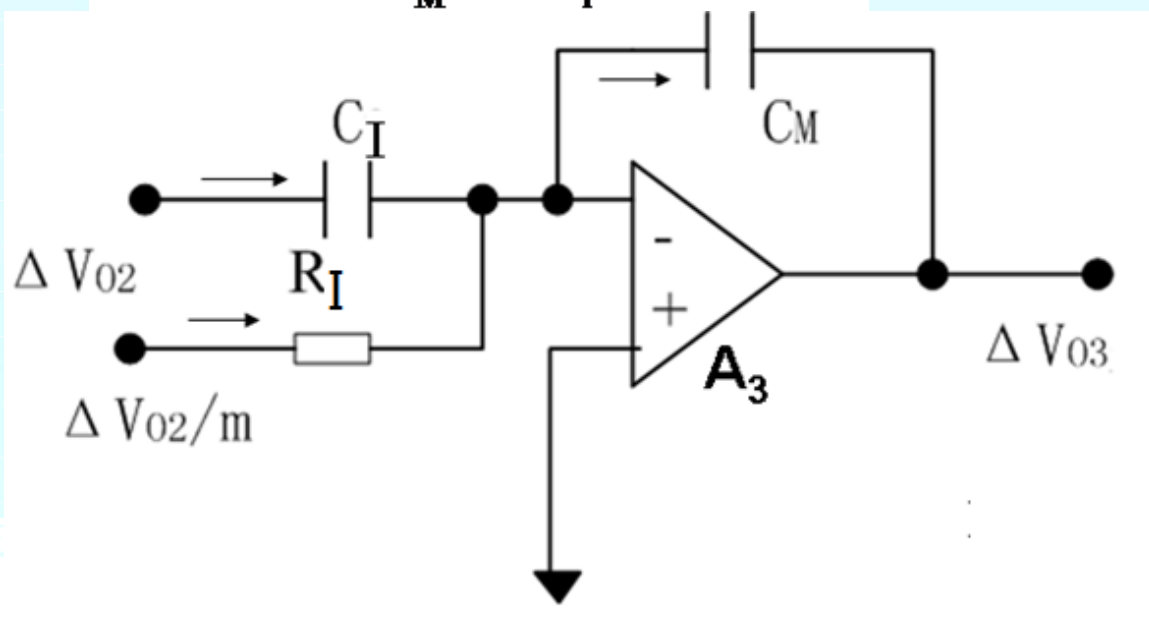
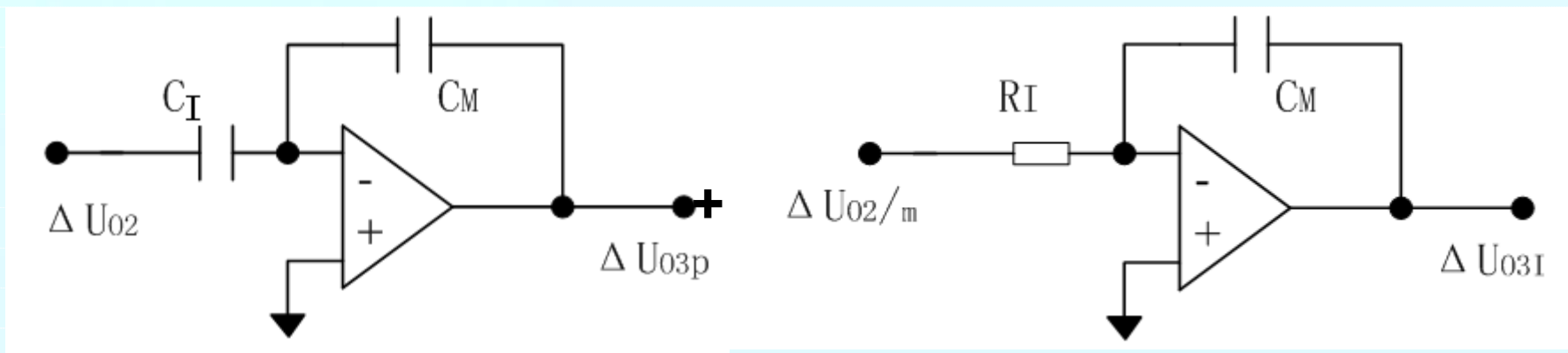


图2-13 PI电路的等效电路图

## (2) PI运算关系推导



$$\Delta U_{03P}(S) = -\frac{1/SC_M}{1/SC_I} \Delta U_{02}(S) = -\frac{C_I}{C_M} \Delta U_{02}(S)$$

$$\Delta U_{03I}(S) = -\frac{1/SC_M}{R_I} \times \frac{\Delta U_{02}(S)}{m} = -\frac{1}{SR_I C_M} \times \frac{\Delta U_{02}(S)}{m}$$

$$\Delta U_{03}(S) = \Delta U_{03P}(S) + \Delta U_{03I}(S) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{mR_I C_I S}\right) \Delta U_{02}(S) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{1}{T_I S}\right) \Delta U_{02}(S)$$

思考：如何调整积分时间？

## (3) PI 快慢积分响应

$$\Delta U_{03}(t) = -\frac{C_I}{C_M} \left(1 + \frac{t}{mR_I C_I}\right) \Delta U_{02}$$

$$m = 1, T_{I1} = R_I C_I$$

$$m = 10, T_{I2} = 10R_I C_I$$

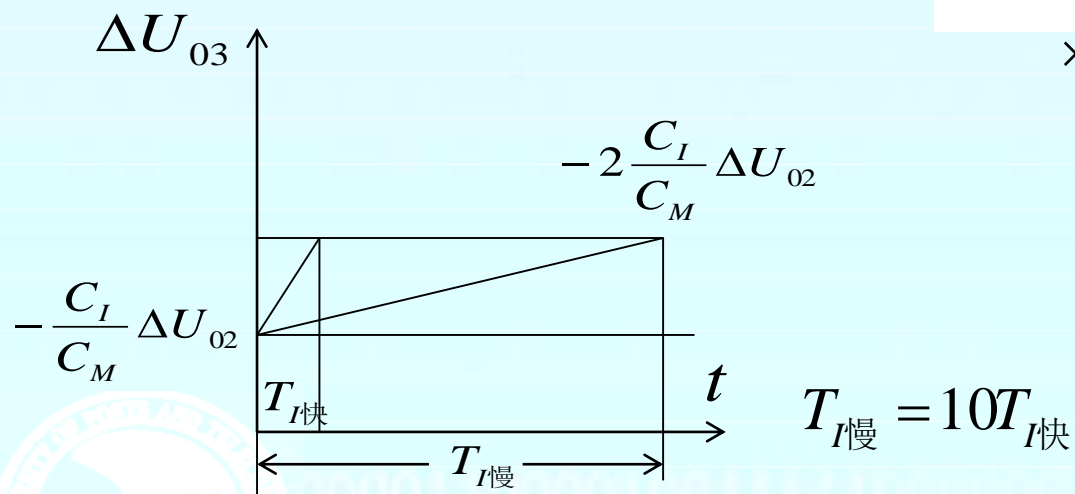


图1-22 PI电路阶跃响应曲线

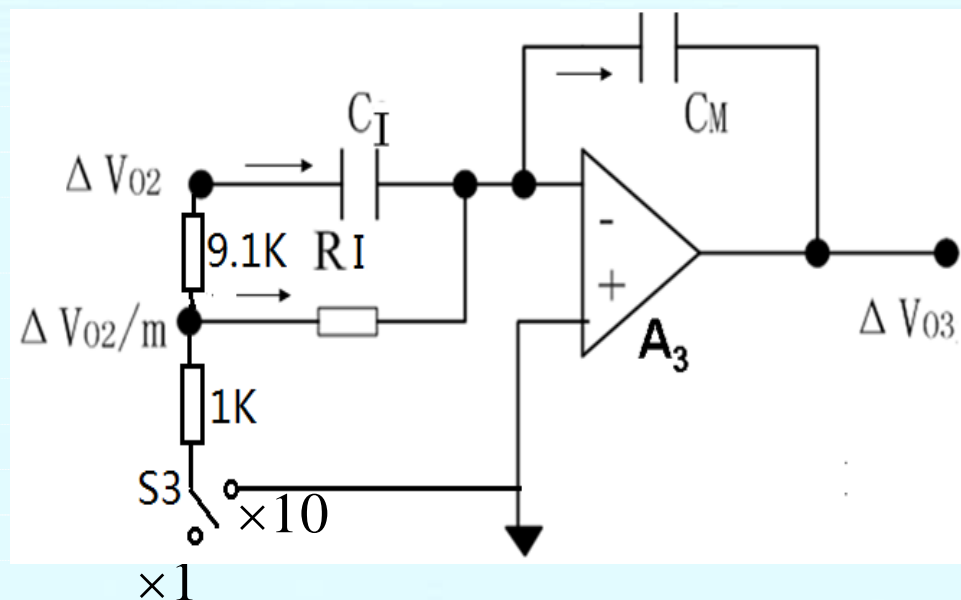


图1-21PI 快慢积分响应电路

## 5、PID电路传递函数

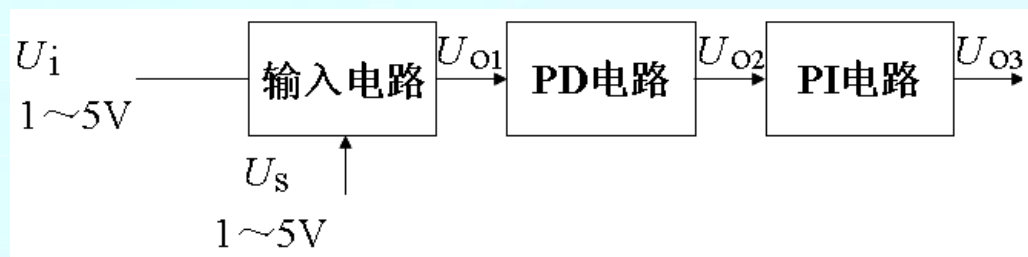


图1-22 PI PID自动控制电路框图

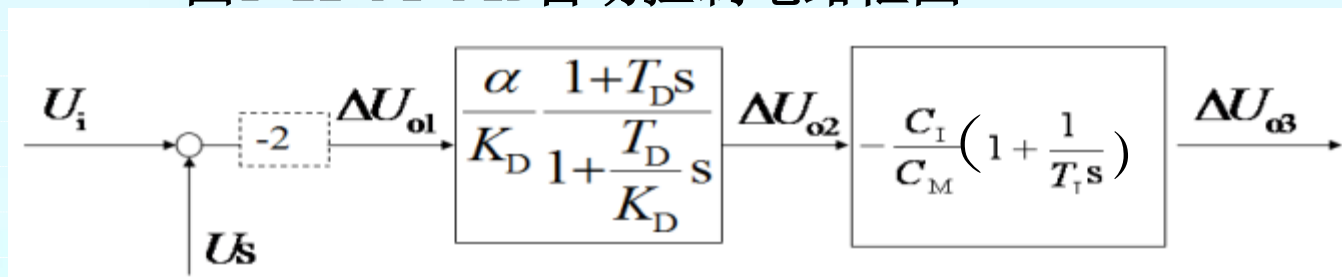


图1-23 控制器PID电路传递函数方框图

$$W(S) = K_P F \frac{1 + \frac{1}{F T_I S} + \frac{T_D}{F} S}{1 + \frac{T_D}{K_D} S} \quad K_P = \frac{2\alpha C_I}{n C_M} \quad F = 1 + \frac{T_D}{T_I} \quad \text{理想 } F = 1$$

## 6、输出电路

功能：电平移动与V/I变换。

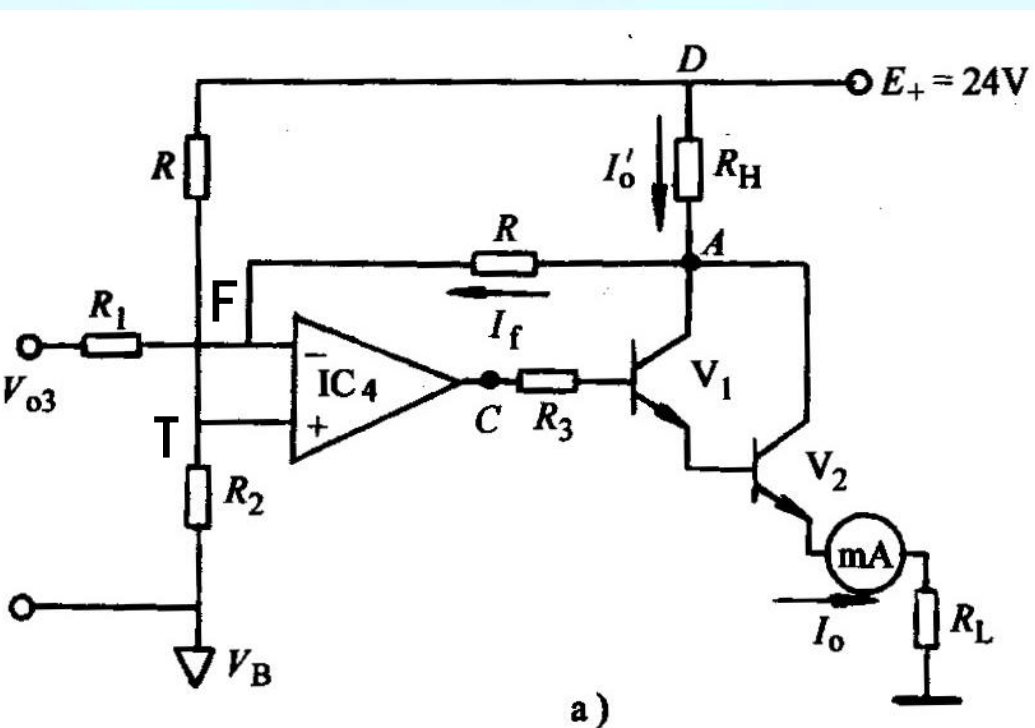


图2-14 输出电路

### 方法1：静态分析法

$$\begin{cases} U_T = \frac{RV_B}{R_2 + R} + \frac{24R_2}{R_2 + R} \quad (R_1 = R_2 = 4R) \\ U_F = \frac{R(V_B + V_{03})}{R_1 + R} + \frac{R_1 V_A}{R_1 + R} \end{cases}$$

$$V_A = 24 - \frac{V_{03}}{4}$$

$$V_A = 24 - I'_0 R_H$$

$$I_0 = I'_0 = \frac{V_{03}}{4R_H}$$



## 方法2：微变等效电路分析法

$$V_{AD} = -\frac{R}{R_1} V_{03} = -\frac{1}{4} V_{03} \quad (R_1 = 4R)$$

$$V_{AD} = -I'_0 R_H \quad I_0 = \frac{V_{03}}{4R_H}$$

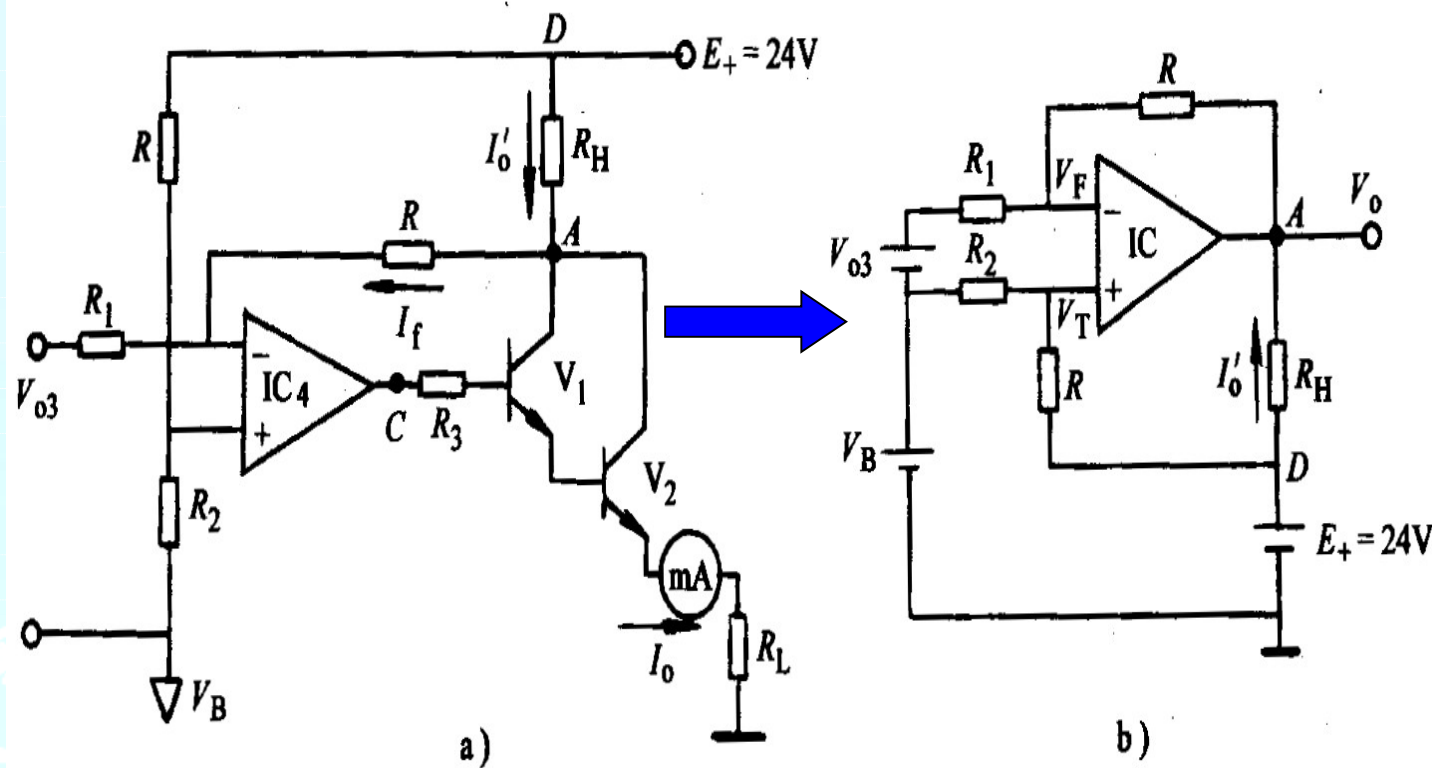
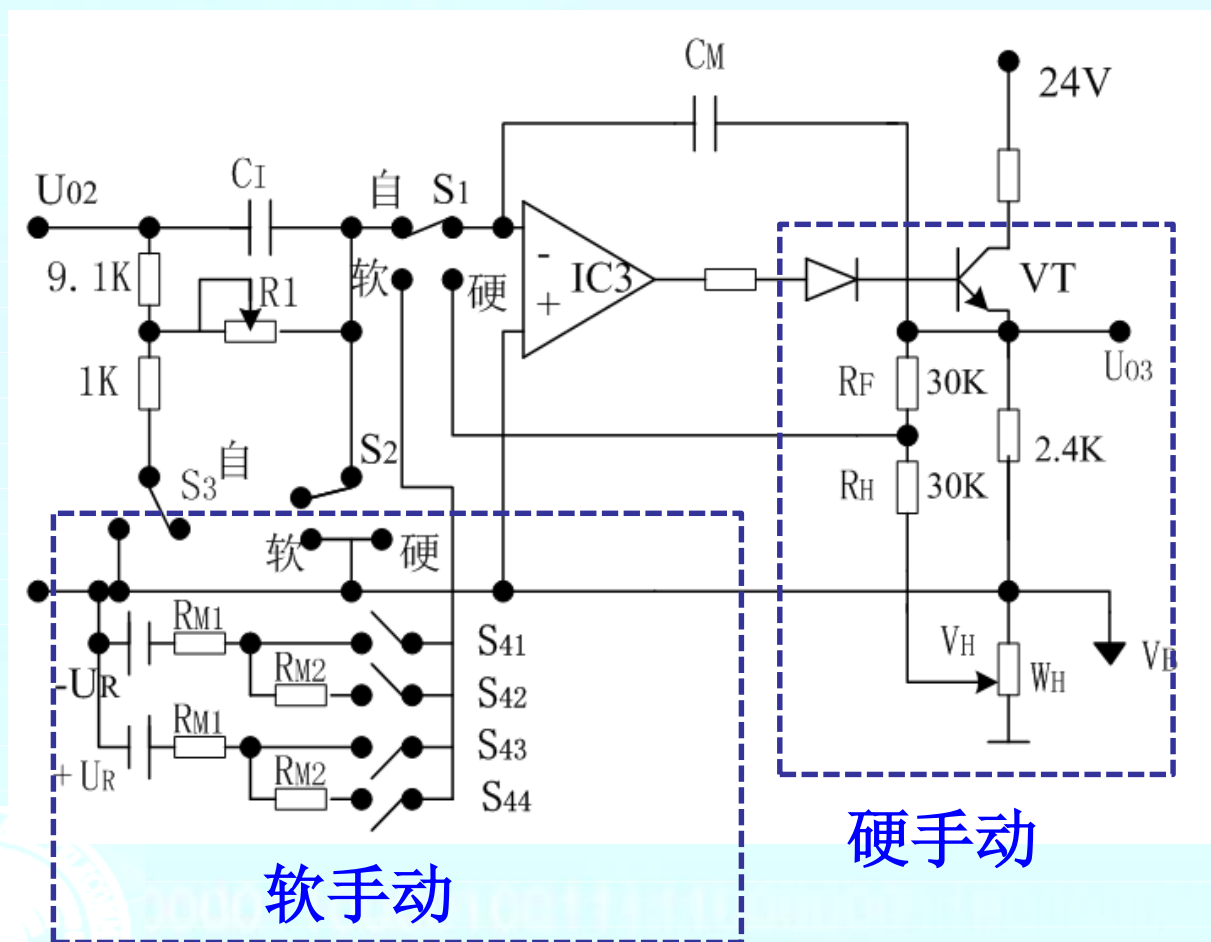


图2-15 输出电路

## 7、手动操作电路（软手动与硬手动）



软手动

$$\Delta V_{03}(t) = \pm \frac{V_R}{R_M C_M} t$$

硬手动

$$\Delta V_{03}(t) = -V_H (V_H < 0)$$

图2-16 手动操作电路

## (1) 软手操电路

**功能：**控制器的输出电压与输入参考电压成积分关系。

$$\Delta V_{03}(t) = \pm \frac{V_R}{R_M C_M} t$$

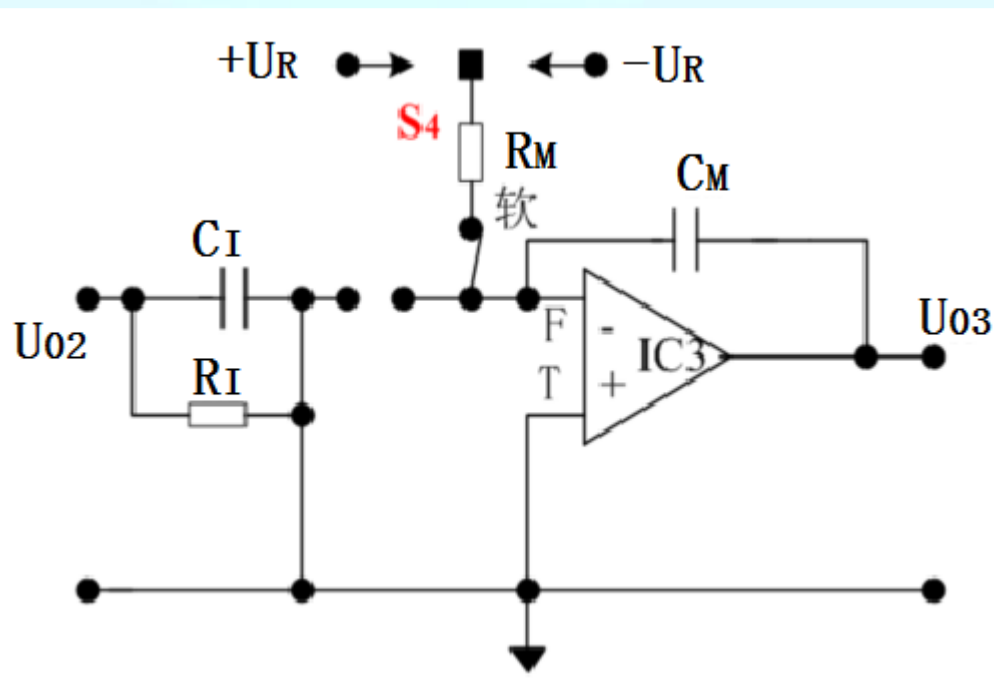


图2-17软手操作电路

积分输出

$$\Delta V_{03}(t) = -\frac{1}{R_M C_M} \int_0^t \pm V_R dt = \pm \frac{V_R}{R_M C_M} t$$

思考：

- (1) 如何实现正反向积分
- (2) 如何实现快慢积分
- (3) 自动与软手动之间切换有无扰动？
- (4) 自动与软手动区别。

(1) 如何实现正反向积分

$S_{41}$ 或 $S_{42}$ 接通正反向积分

$$\Delta V_{03}(t) = \frac{V_R}{R_M C_M} t$$

$S_{43}$ 或 $S_{44}$ 接通反向积分

$$\Delta V_{03}(t) = -\frac{V_R}{R_M C_M} t$$

(2) 如何实现快慢积分

$S_{41}$ 或 $S_{43}$ 接通快积分

$$T_{I快} = R_{M1} C_M = 30 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 0.3S$$

$S_{42}$ 或 $S_{44}$ 接通慢积分

$$T_{I慢} = (R_{M1} + R_{M2}) C_M = 500 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 5S$$

(3) 自动与软手动之间切换有无扰动？

自动与软手动之间切换等电位切换，无扰动。

(4) 自动与软手动区别。

自动为PI控制，软手动为I控制。

软手操电路输出电压满量程1~5V变化所需的时间:

$$T = \frac{4}{V_R} R_M C_M$$

改变 $R_M$ 的大小, 可进行快慢两种速度的软手操

$S_{41}$ 或 $S_{43}$ 接通,  $R_{M1}$ 接入,  $R_M = R_{M1}$ 快积分。

积分时间:  $T_1 = \frac{4}{0.2} \times 30 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 6S$

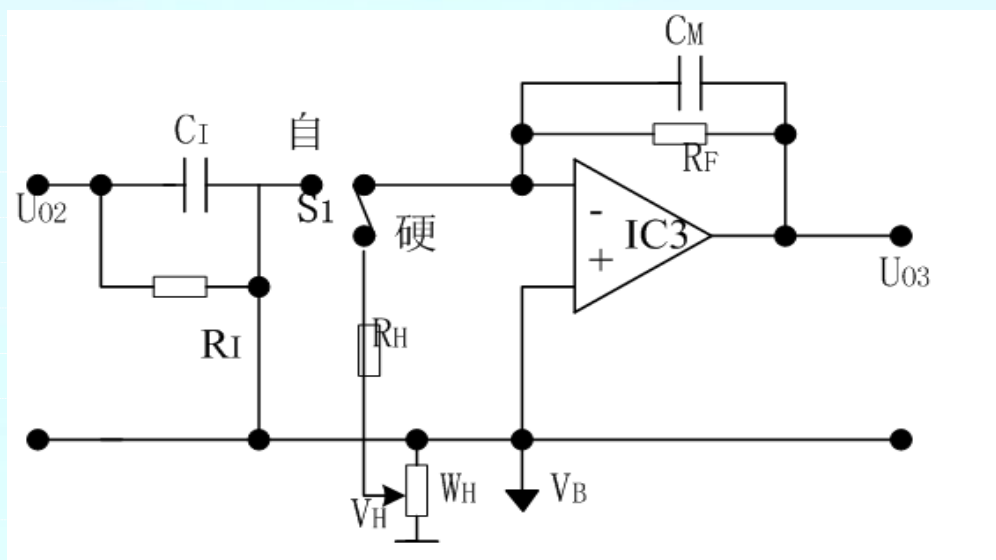
$S_{42}$ 或 $S_{44}$ 接通,  $R_{M1}$ 与 $R_{M2}$ 接入,  $R_M = R_{M1} + R_{M2}$ 慢积分。

积分时间:  $T_2 = \frac{4}{0.2} \times 500 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6} = 100S$

## (2) 硬手操电路

功能：输出电压与手动输入电压信号成比例关系。

$$V_{03} = -\frac{R_F}{R_H} V_H = -V_H \quad (V_H < 0)$$



硬手动切换到自动  
有无扰动？

自动切换到硬手动  
有无扰动？  
如有扰动采取措施。

图2-18 硬手操作电路

自动输出电流如下，手操盘分别拨到什么位置？

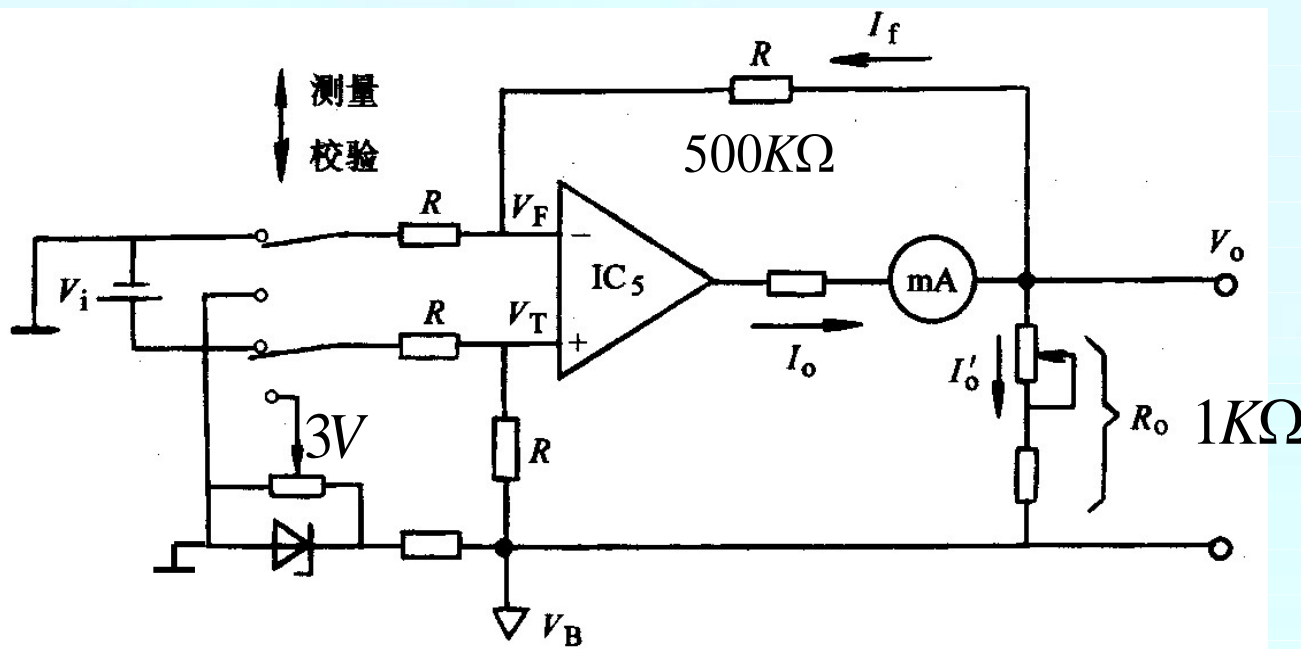
$$I_0 = 12\text{mA DC} (V_0 = 3\text{VDC})$$

$$I_0 = 16\text{mA DC} (V_0 = 4\text{VDC})$$

## 8、指示电路

**功能：** 全量程地指示测量值、给定值、输出值。

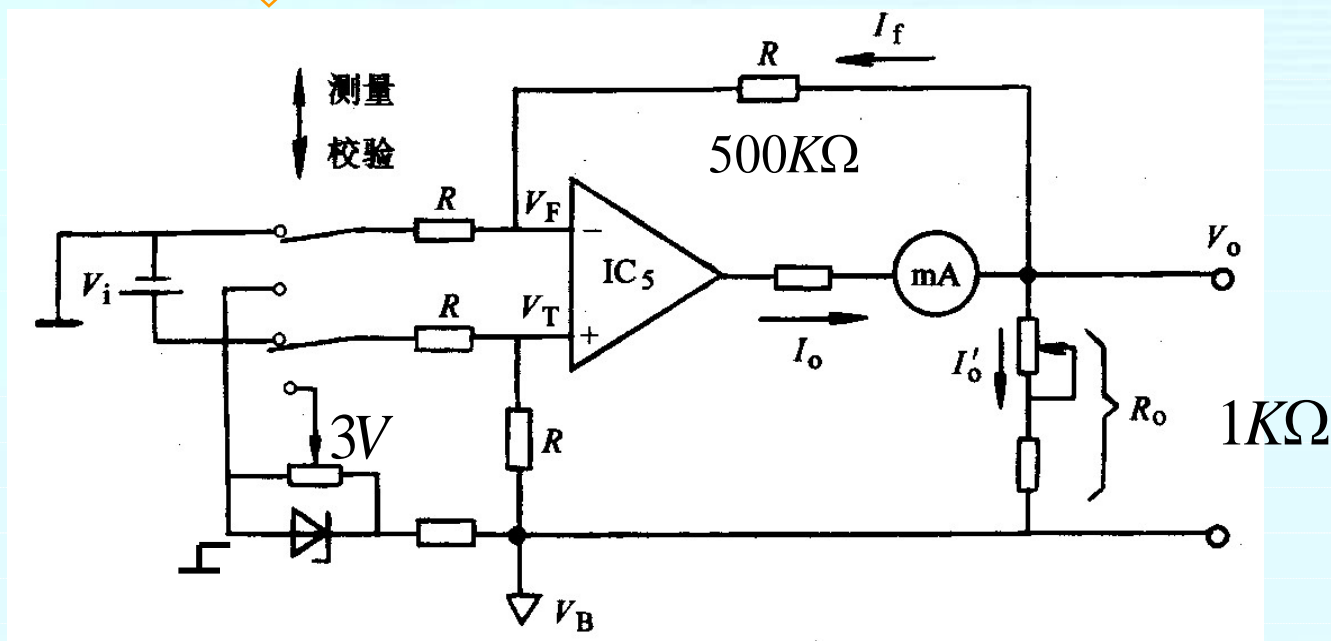
$V_i$ :  $1 \sim 5VDC \rightarrow$  电流表  $1 \sim 5mA$  或  $0 \sim 100\%$



**思考：**

- 1、推导输出电流
- 2、为何电流表接在放大器输出端。
- 3、如何校验指示电路的精度。

图2-19 全刻度指示电路



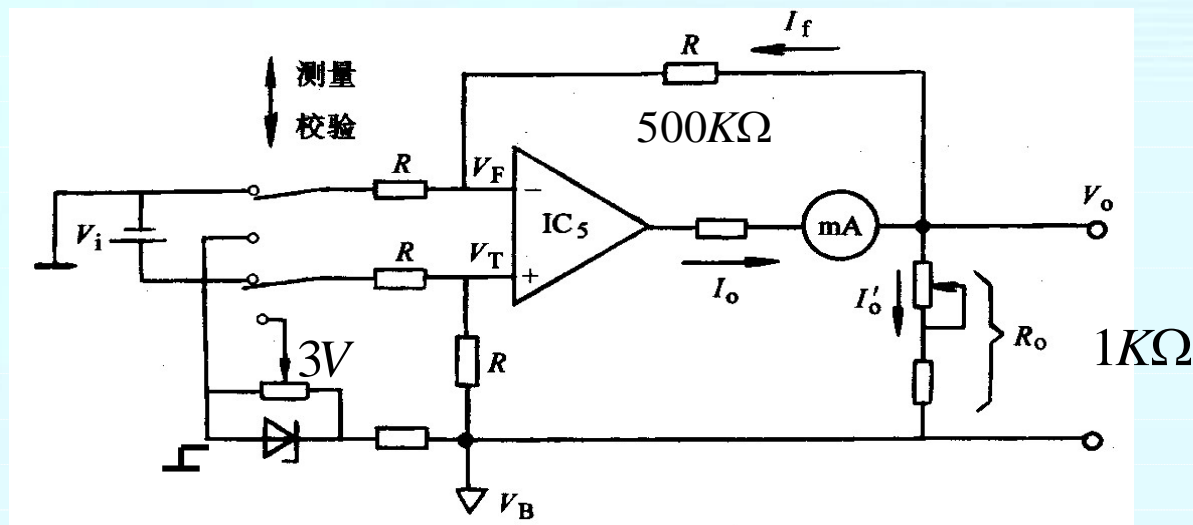
(1) 推导输出电流

开关切到测量端  $V_0 = V_i$   $I_0 = I'_0 + I_f$

$$I'_0 = \frac{V_0}{R_0} = \frac{V_i}{R_0} \quad I_f = \frac{V_F}{R} = \frac{V_T}{R} = \frac{V_i + V_B}{2R}$$

$$I_0 = I'_0 + I_f = \left(\frac{1}{2R} + \frac{1}{R_0}\right)V_i + \frac{V_B}{2R} \approx \frac{V_i}{R_0} \quad R_0 = 1K\Omega$$





## (2) 为何电流表串接在放大器输出端

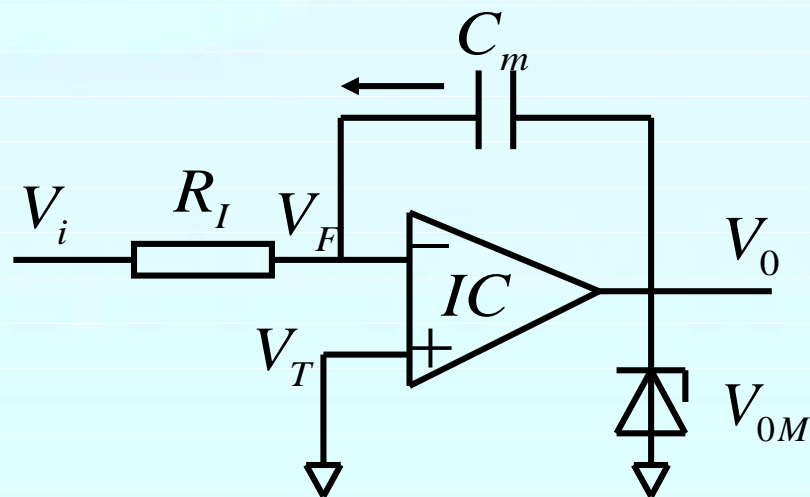
电流表有内阻且内阻受温度影响，电流表接在输出端其内阻变化会影响V/I转换精度。

## (3) 如何校验指示电路的精度

开关置于“校验”位置，3V电压加于输入端，表头指示3mA或50%刻度值。

## 1、正常工况

$$V_0 = \frac{1}{RC_m} \int V_1 dt = \frac{V_1}{RC_m} t$$

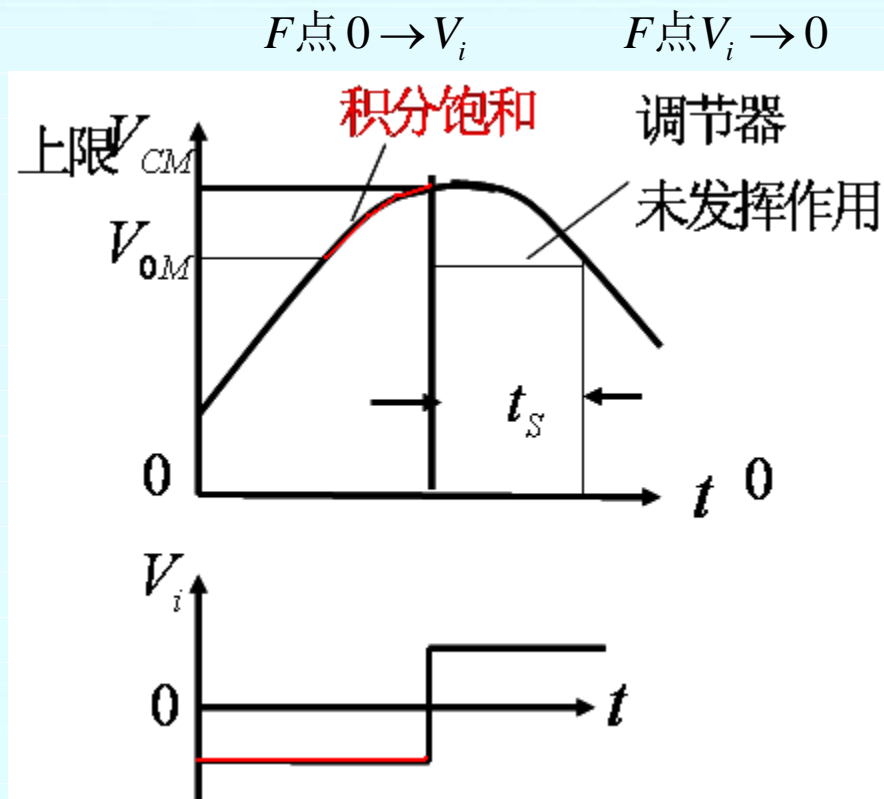
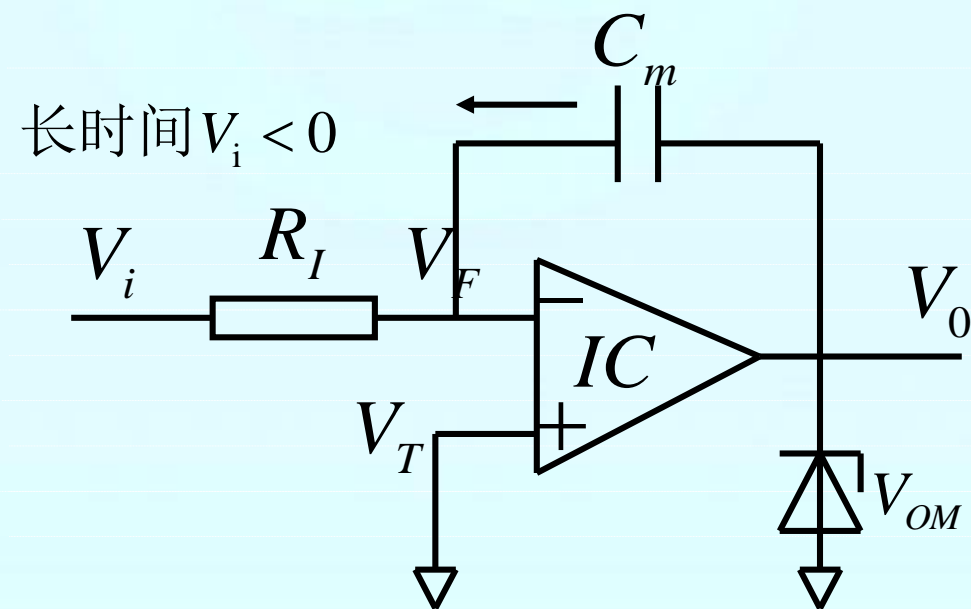


$$V_0 < V_{0M} \quad V_{CM} < V_{0M}$$

$$V_F = V_T$$

图2-20 简单的积分限幅电路

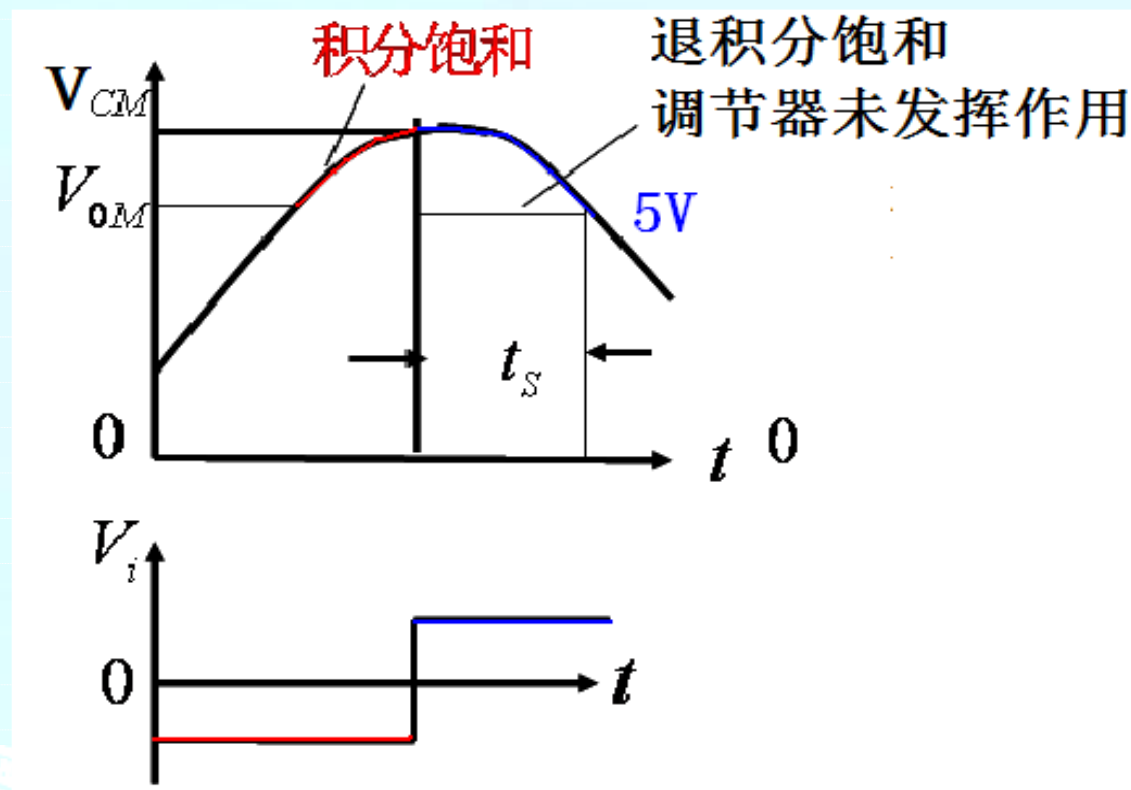
## 2、积分饱和



$$V_{CM} > V_{OM}, \quad V_F \neq V_T, \quad V_0 = V_{OM}$$

**PI**调节器在长期接收**单向偏差**，积分电容两端电压超出正常工作电压范围的现象。

## 3、积分饱和和危害



输入信号反向，输出信号需要一段时间变化，这段时间调节器未发挥作用。易出现事故。

## 积分饱和和危害举例

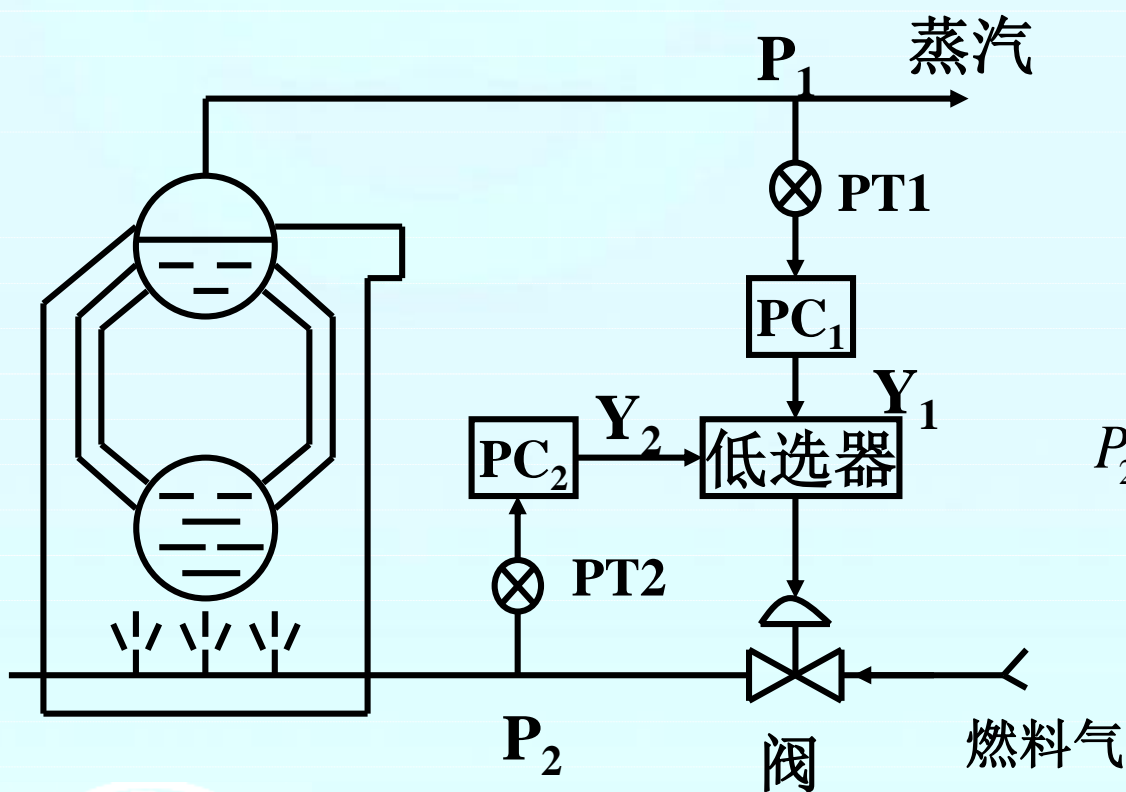


图2-21 取代调节系统

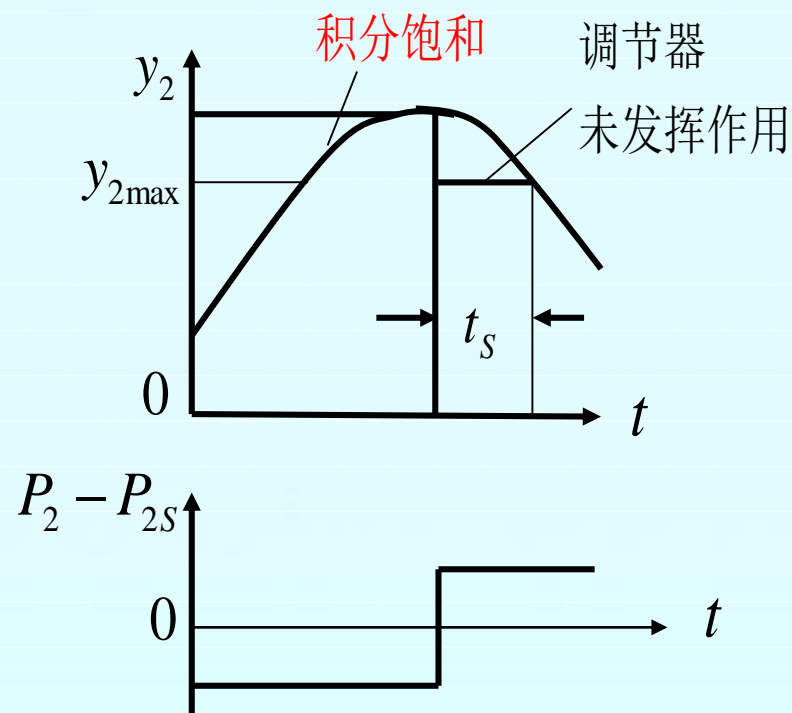
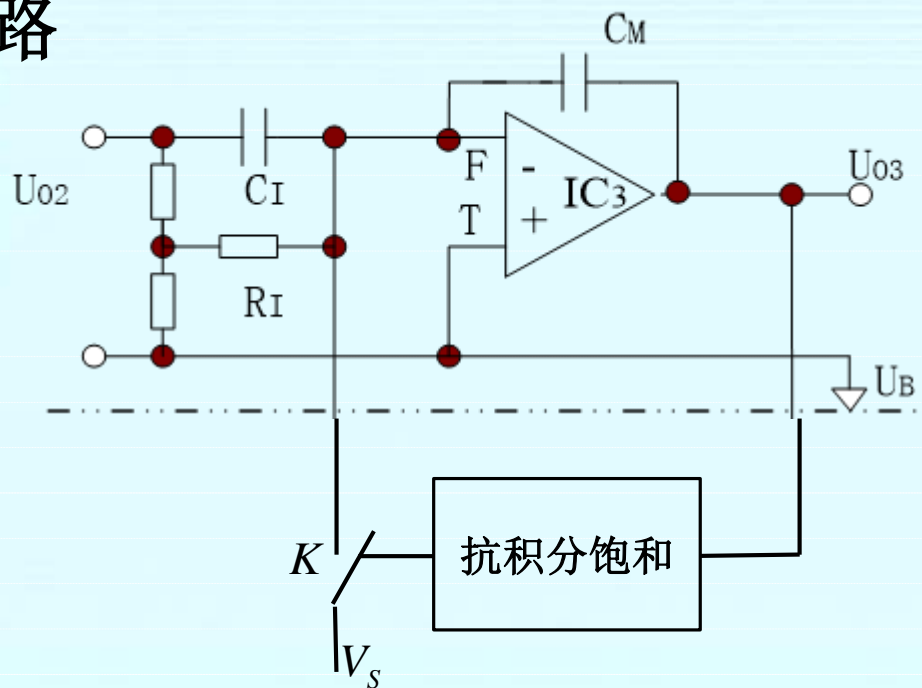


图2-22 PI调节器积分饱和现象

## 4、抗积分饱和电路



$$V_H > V_{03} > V_L$$

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

$$V_{03} > V_H$$

$$V_{02} < 0, \quad K \text{ 接通, } V_S > 0 \text{ 取代 } V_{02}$$

$$V_{03} < V_L$$

$$V_{02} > 0, \quad K \text{ 接通, } V_S < 0 \text{ 取代 } V_{02}$$

## 积分反馈型积分限幅控制器

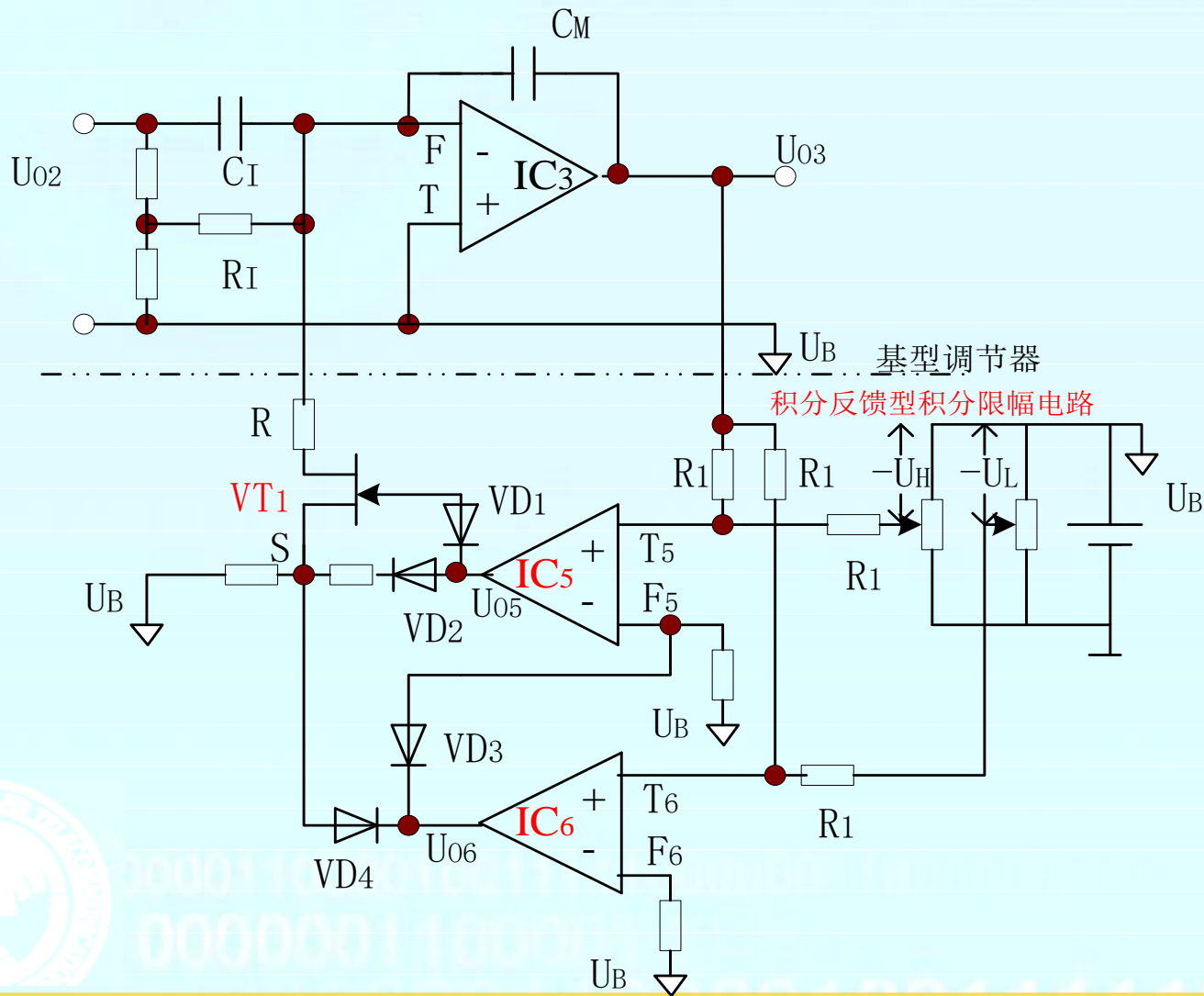
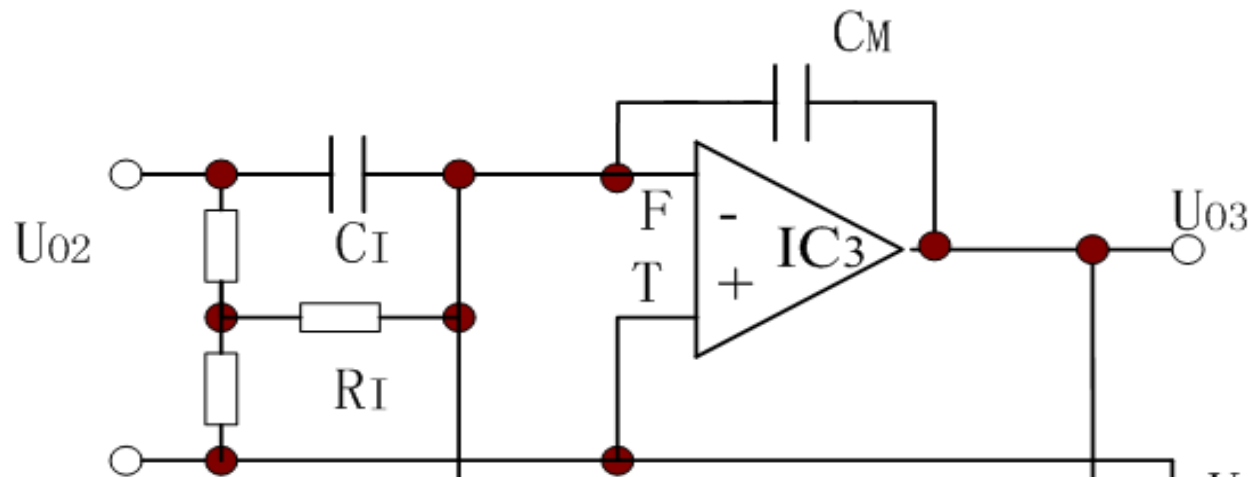
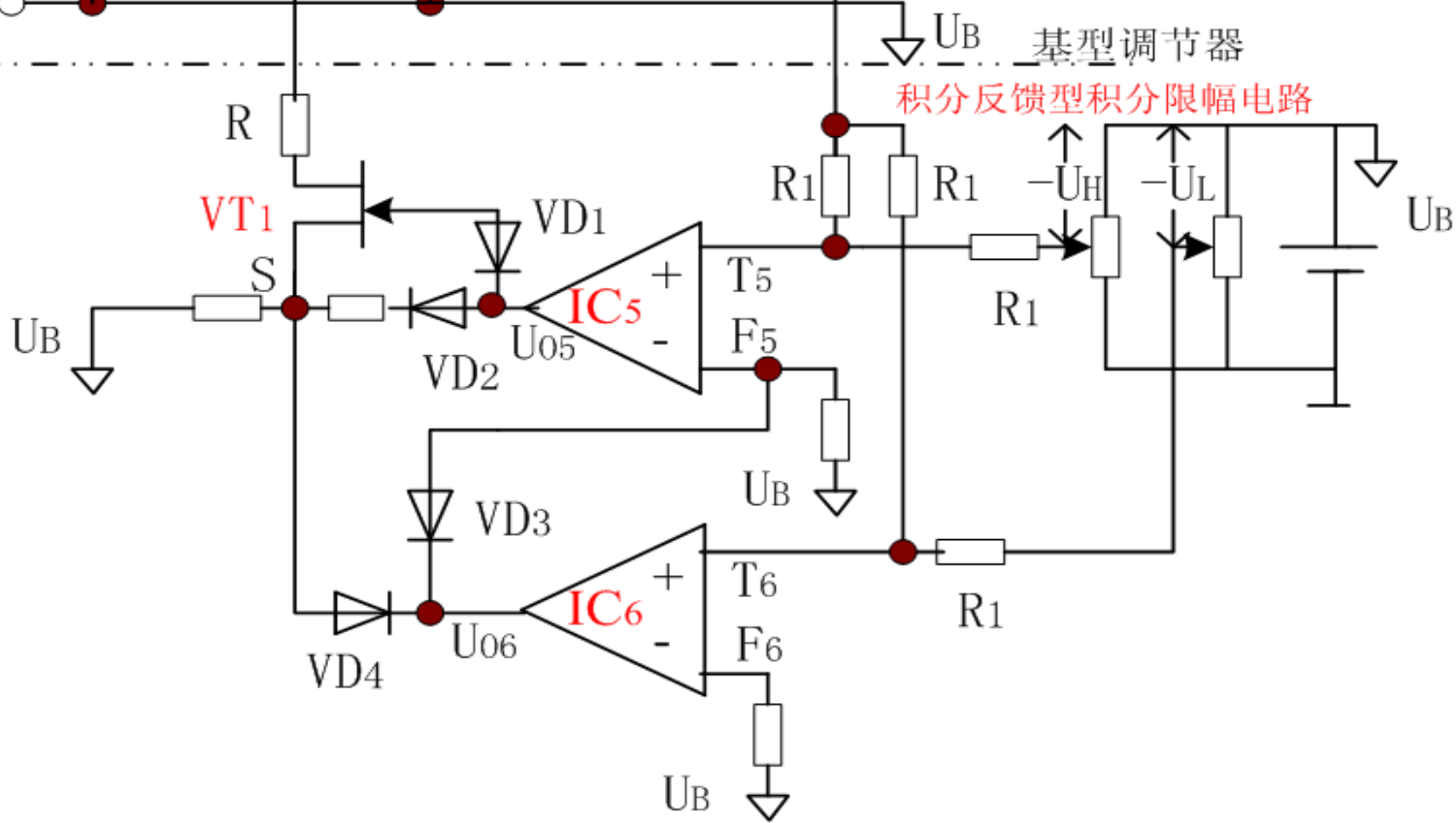


图2-23积分反馈型积分限幅控制器



$$V_{T5} = \frac{V_{03} - V_H}{2}$$

$$V_{T6} = \frac{V_{03} - V_L}{2}$$





在PI调节器上附加上下限限幅和抗积分饱和电路。

### (1) 正常情况

$$V_L < V_{03} < V_H$$

$V_{T5} < V_{F5} \rightarrow IC_5$  输出低电平,  $V_1$  截止。

$V_{T6} > V_{F6} \rightarrow IC_6$  输出高电平,  $VD_3$ 、 $VD_4$  截止。

### (2) 异常情况

输出超上限  $V_{03} \geq V_H$

$V_{T5} > V_{F5} \rightarrow IC_5$  输出高电平,  $V_1$  导通。

$V_{T6} > V_{F6} \rightarrow IC_6$  输出高电平,  $VD_3$ 、 $VD_4$  截止。

$$V_S = \frac{R(V_{05} - V_{D2})}{2R} = \frac{1}{2}(V_{05} - V_{D2}) > 0 \quad (\text{对 } V_B)$$

$V_S$  通过  $R$ 、 $C_M$  积分使  $V_{03}$  下降，到  $V_{03} < V_H$

输出超下限  $V_{03} \leq V_L$

$V_{T5} > V_{F5} \rightarrow IC_5$  输出高电平， $V_1$  导通。

$V_{T6} < V_{F6} \rightarrow IC_6$  输出低电平， $VD_3$ 、 $VD_4$  导通。

$$V_S = (V_{06} + V_{D4}) < 0 \quad (\text{对 } V_B)$$

$V_S$  通过  $R$ 、 $C_M$  积分使  $V_{03}$  上升，到  $V_{03} > V_L$



- 1、某P控制器的输入信号是4~20mA，输出信号是1~5V，当比例度  $\delta = 60\%$  时，1mA输入变化所引起的输出变化是多少？
- 2、某PID控制器（正作用）输入输出信号都是1~5V，控制器的输入输出初始值都是1V，比例度为200%，积分与微分时间都是2min，微分增益为10，积分增益无穷大，在 $t=0$ 时输入1V的阶跃信号，分别求 $t=12S$ 时：
  - (1) PI工况下的输出值
  - (2) PD工况下的输出值。
- 3、DDZ-III调节器输入电路为何采用差动输入和电平移动？
- 4、模拟调节器进行软手操时， $P_B$ 、 $T_I$ 、 $T_D$ 随便置于任何一档，是否会对软手操的输出信号产生影响，为何？
- 5、调节器在无变送器输入信号时，操作硬手动拨盘，产生输出信号，表明输出电路和积分放大器正常。为何？

- 1、理想的P、PI、PD、PID调节规律的特点及其表达式。为何理想的积分、微分调节不能单独使用。
- 2、PID调节器相互干扰系数F的物理意义，实际比例度、积分时间、微分时间与整定刻度值的关系。如何减小相互干扰系数。
- 3、PI调节器调节精度的计算方法及公式。
- 4、说明积分增益与微分增益的物理意义，它们的大小对控制器的输出有什么影响？
- 5、比例度、积分时间、微分时间、微分时间常数、微分增益、积分增益、概念及确定方法。

- 6、在基型控制器PD电路中，如何保证开关S从断到通位置时输出信号保持不变？
- 7、分析基型控制器产生积分饱和现象的原因。若将控制器输出加以限幅，能否消除这一现象？
- 8、基型控制器如何保证自动到软手动，软手动到自动无平衡无扰动切换？
- 9、积分反馈型限幅控制器如何防止积分饱和的？
- 10、输出限幅单元如何实现限幅的？