

第3章 过程控制仪表

本章要点

- 1) 熟悉调节器的功能要求，掌握基本调节规律的数学表示及其响应特性；
- 2) 熟悉 DDZ-III 型调节器的基本构成、电路原理及其应用特点；
- 3) 了解智能调节器的硬件和软件构成；
- 4) 掌握 SLC 可编程控制器的硬件构成及工作原理；
- 5) 熟悉 SLC 可编程控制器的模块指令及编程方法；
- 6) 了解各类执行器的组成原理和使用特点，熟悉气动执行器的应用特点；
- 7) 了解电/气转换器与阀门定位器的工作原理
- 8) 熟悉智能式电动执行器的功能特点；
- 9) 熟悉安全栅的基本类型及构成原理。

3.1 过程控制仪表概述

过程仪表的定义及作用

1 调节器的功能

(1) 偏差显示

调节器的输入电路接收测量信号和给定信号，两者相减后的偏差信号由偏差显示仪表显示其大小和正负。

(2) 输出显示

调节器输出信号的大小由输出显示仪表显示，习惯上显示仪表也称阀位表。阀位表不仅显示调节阀的开度，而且通过它还可以观察到控制系统受干扰影响后的调节过程。

(3) 内、外给定的选择

当调节器用于定值控制时，给定信号常由调节器内部提供，称为**内给定**；而在随动控制系统中，调节器的给定信号往往来自调节器的外部，则称为**外给定**。内、外给定信号由内、外给定开关进行选择或由软件实现。

(4) 正、反作用的选择

工程上，通常将调节器的输出随反馈输入的增大而增大时，称为**正作用调节器**；而将调节器的输出随反馈输入的增大而减小时，称为**反作用调节器**。

(5) 手动切换操作

在控制系统投入运行时，往往先进行手动操作改变调节器的输出，待系统基本稳定后再切换到自动运行状态；当自动控制时的工况不正常或调节器失灵时，必须切换到手动状态以防止系统失控。通过调节器的手动/自动双向切换开关，可以对调节器进行手动/自动切换，而在切换过程中，又希望切换操作不会给控制系统带来扰动，即要求无扰动切换。

(6) 其它功能

如抗积分饱和、输出限幅、输入超限报警、偏差报警、软手动抗漂移、停电对策等，所有这些附加功能都是为了进一步提高调节器的控制性能

2 执行器的作用

执行器在过程控制中的作用是接受来自调节器的控制信号，改变其阀门开度，从而达到控制介质流量的目的。执行器直接与控制介质接触，是过程控制系统的最薄弱环节。

若执行器是采用电动式的，则无需电/气转换器；若执行器是采用气动式的，则电/气转换器是必不可少的。

3 安全栅

安全栅是构成安全火花防爆系统的关键仪表，其作用一方面保证信号的正常传输；另一方面则控制流入危险场所的能量在爆炸性气体或爆炸性混合物的点火能量以下，以确保过程控制系统的安全火花性能。

3.2 DDZ-III 型模拟式调节器

DDZ仪表的发展简史

3.2.1 比例积分微分调节规律

理想PID的增量式数学表达式：

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

$\Delta u(t)$ 为调节器输出的增量值， $e(t)$ 为被控参数与给定值之差。

写成传递函数形式：

$$G_c(s) = \frac{\Delta U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I} s + T_D s \right)$$

第一项为比例（P）部分，第二项为积分（I）部分，第三项为微分（D）部分；

K_c 为调节器的比例增益， T_I 为积分时间（以s或min为单位）， T_D 为微分时间（也以s或min为单位）。

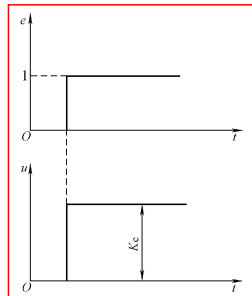
1 比例调节规律

比例控制数学表达式：

$$\Delta u(t) = K_c e(t)$$

$\Delta u(t)$ 为调节器输出的增量值， $e(t)$ 为被控参数与给定值之差。

纯比例调节器的阶跃响应特性



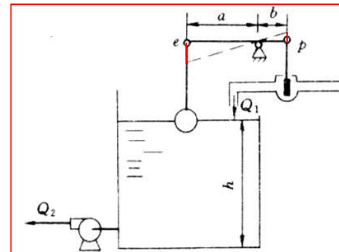
例：自力式液位比例控制系统：

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 加大才能阻止水位下降。

$$\frac{a}{b} = \frac{p}{e} \Rightarrow p = \frac{a}{b} \cdot e$$

$$y = K_c e$$

如果 $e = 0$ ，则活塞无法提高， Q_1 无法加大，调节无法进行。

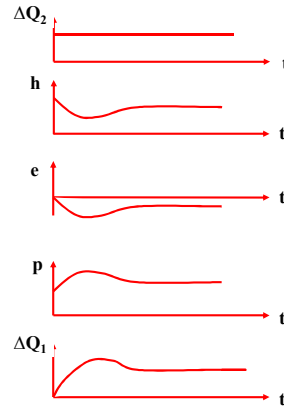


比例控制过程

原来系统处于平衡，进水量与出水量相等，此时进水阀有一开度。

$t=0$ 时，出水量阶跃增加，引起液位下降，浮球下移带动进水阀开大。

当进水量增加到与出水量相等时，系统重新平衡，液位也不再变化。



❖ 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

$$u = K_C e$$

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。

在实际的比例控制器中，习惯上使用比例度 δ 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。

$$\delta = \left(\frac{e}{e_{\max} - e_{\min}} / \frac{u}{u_{\max} - u_{\min}} \right) \times 100\%$$

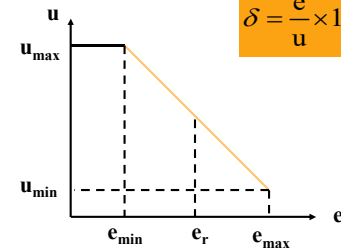
式中 e 为输入偏差； u 为控制器输出的**变化量**；
($e_{\max} - e_{\min}$)为输入的最大变化量,及输入量程；
($u_{\max} - u_{\min}$)为输出的最大变化量，即控制器的输出量程。

比例度：

$$\delta = \left(\frac{e}{e_{\max} - e_{\min}} / \frac{u}{u_{\max} - u_{\min}} \right) \times 100\%$$

如果控制器输入、输出量程相等，则：

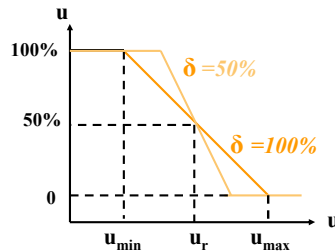
$$\delta = \frac{e}{u} \times 100\% = \frac{1}{K_C} \times 100\%$$



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。

比例带 δ 的物理意义:

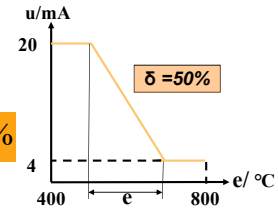
使控制器输出变化100%时, 所对应的偏差变化相对量。如 $\delta=50\%$ 表明:



控制器输入偏差变化50%, 就可使控制器输出变化100%, 若输入偏差变化超过此量, 则控制器输出饱和, 不再符合比例关系。

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

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



答 温度的偏差在输入量程的50%区间内 (即 200°C) 时, e 和 u 是2倍的关系。

2 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。

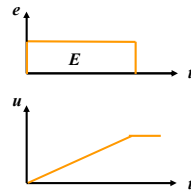
(1) 积分控制 (I)

输出变化量 $u(t)$ 与输入偏差 e 的积分成正比

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

当 e 是幅值为 E 的阶跃时

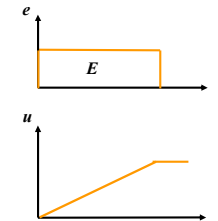
$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt = \frac{E}{T_I} \cdot t$$



❖ 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。



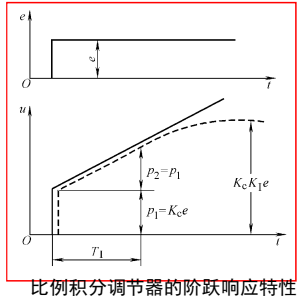
若将比例与积分组合起来，既能控制及时，又能消除余差。

(2) 比例积分控制 (PI)

PI控制

$$G_C(s) = K_C \times \frac{1 + \frac{1}{T_I s}}{1 + \frac{1}{K_I T_I s}}$$

K_I 称为PI调节器的积分增益，它定义为：在阶跃信号输入下，其输出的最大值与纯比例作用时产生的输出变化之比。



比例积分调节器的阶跃响应特性

3 比例微分控制 (PD)

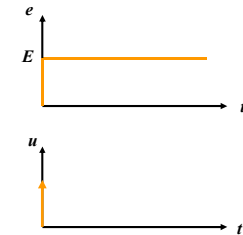
对于惯性较大的对象，常常希望能加快控制速度，此时可增加微分作用。

(1) 微分控制 (D)

理想微分 $u(t) = T_D \frac{de}{dt}$

式中： T_D —微分时间

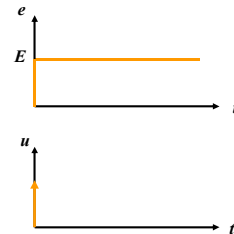
$\frac{de}{dt}$ —偏差变化速度



❖ 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。



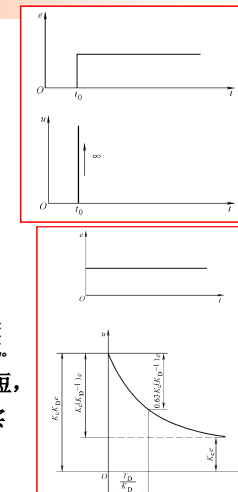
(2) 比例微分控制 (PD)

实际的比例微分控制

$$G_C(s) = K_C \times \frac{1 + T_D s}{1 + \frac{T_D}{K_D} s}$$

K_D 称为PD调节器的微分增益，它定义为：在阶跃信号输入下，其输出的最大跳变值与纯比例作用时产生的输出变化之比。

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。



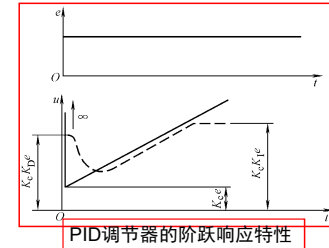
4 比例积分微分控制 (PID)

$$G_C(s) = K_C \frac{1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s}{1 + \frac{1}{K_I T_I s} + \frac{T_D}{K_D} s}$$

□ 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。

□ PID控制作用中，比例作用是基础控制；微分作用是用于加快系统控制速度；积分作用是用于消除静差。

逻辑分析



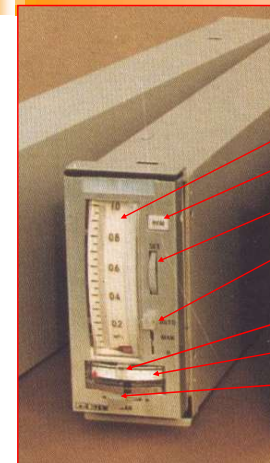
3.2.2 DDZ-III型基型调节器

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）。

1 DDZ-III型仪表的特点及外形

特点：

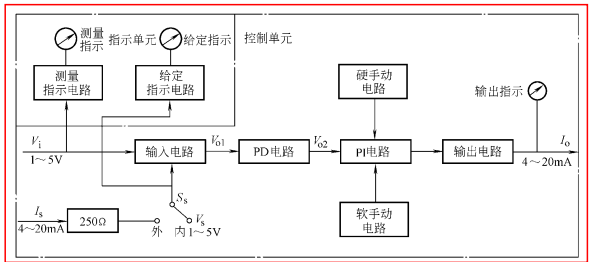
测量信号：1~5V.DC；
外给定信号：4~20mA.DC；
内给定信号：1~5V.DC；
测量与给定信号的指示精度：±1%；
输入阻抗影响：≤满刻度的0.1%；
输出保持特性：-0.1%（每小时）；
输出信号：4~20mA.DC；
调节精度：±0.5%；
负载电阻：250~750Ω。



- 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

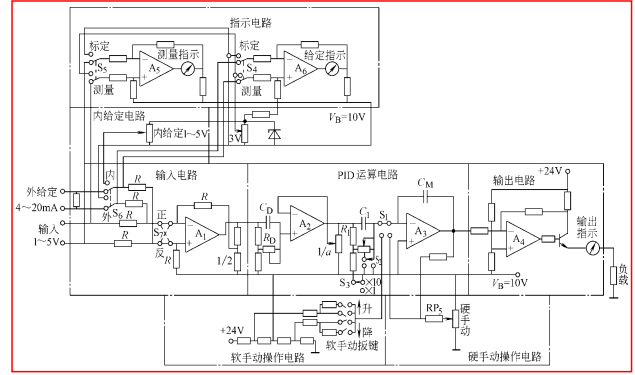
2 全刻度指示调节器的构成原理

DDZ-III 基型调节器由控制单元和指示单元组成。控制单元包括输入电路、PD与PI电路、输出电路、软手动与硬手动操作电路；指示单元包括输入信号指示电路和给定信号指示电路。



全刻度指示调节器的构成框图

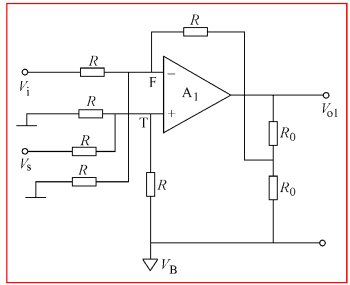
全刻度指示调节器的线路实例



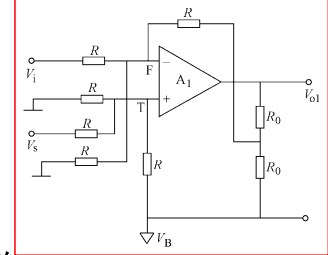
1 输入电路

输入电路的主要作用一是用来获得与输入信号 \$V_i\$ 和给定信号 \$V_s\$ 之差成比例的偏差信号；二是将偏差信号进行电平移动。

求偏差 \$e\$: $V_{01} = k (V_s - V_i)$



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：



$$\frac{V_i - V_F}{R} + \frac{0 - V_F}{R} = \frac{V_F - (\frac{1}{2}V_{01} + V_B)}{R}$$
$$\frac{0 - V_T}{R} + \frac{V_s - V_T}{R} = \frac{V_T - V_B}{R}$$

而 $V_T \approx V_F$ 则

$$V_{01} = -2 (V_i - V_s)$$

电路的特点

(1) 输入阻抗高

采用差动输入电路，输入阻抗很高，不从信号 V_i 、 V_s 取用电流，使测量信号不受衰减，

(2) 求偏差

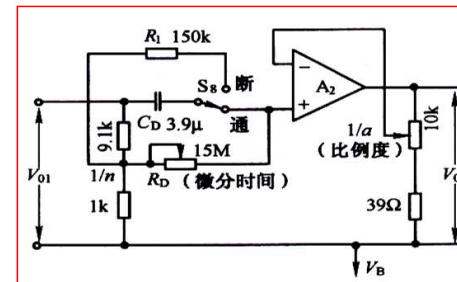
$V_i - V_s$ ，进行偏差运算。

(3) 将偏差放大

为了提高调节器对偏差的灵敏度，对其后的运算有利，这里先将偏差放大两倍。

2、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。

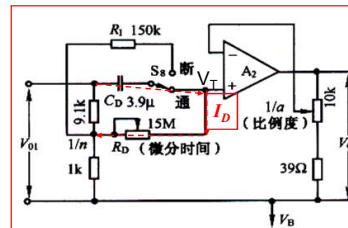


PD传递函数

$$V_T(s) = \frac{V_{01}(s)}{n} + I_D(s)R_D$$

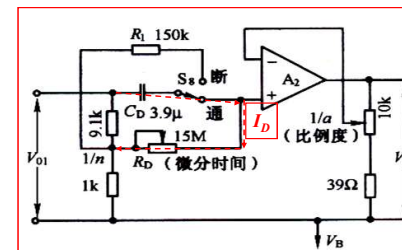
$$I_D(s) = \frac{\frac{n-1}{n}V_{01}(s)}{R_D + \frac{1}{C_D s}} = \frac{n-1}{n} \times \frac{C_D s}{1 + R_D C_D s} V_{01}(s)$$

得
$$V_T(s) = \frac{1}{n} \times \frac{1 + nR_D C_D s}{1 + R_D C_D s} V_{01}(s)$$



又因
$$V_F(s) = \frac{1}{a} V_{02}(s)$$

得
$$V_{02}(s) = \frac{a}{n} \times \frac{1 + nR_D C_D s}{1 + R_D C_D s} V_{01}(s)$$



$$G_C(s) = K_C \times \frac{1 + T_D s}{1 + \frac{T_D}{K_D} s}$$

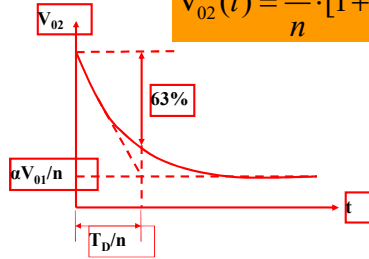
式中: $n = K_D$

$T_d = nR_D C_D$
—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

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

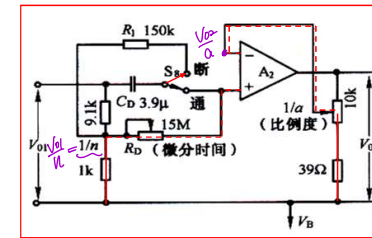


可见，此电路的微分是实际的微分。

当 S_8 置于“断”时，微分被切除， A_2 只作比例运算。有

$$\frac{1}{n} V_{01} = \frac{1}{a} V_{02}$$

$$V_{02} = \frac{a}{n} V_{01}$$

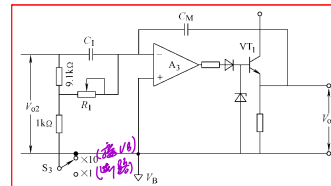


这时微分电容被开关 S_8 接在9.1K分压电阻两端，使 C_D 右端始终跟随电压 V_{01}/n 。当开关 S_8 切换到“通”时，保证无扰动切换。

3、PI电路分析

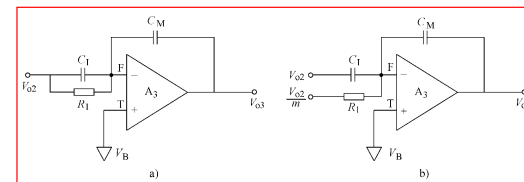
它接收以10V为基准的PD电路的输出信号 V_{02} ，进行PI运算后，输出以10V为基准的1~5V电压 V_{03} ，送至输出电路。该电路由 A_3 、 R_1 、 C_1 、 C_M 等组成。 S_3 为积分档切换开关， S_1 、 S_2 为自动、软手动、硬手动联动切换开关，该电路除了实现PI运算外，手动操作信号也从该级输入。 A_3 的输出接电阻和二极管，然后通过射极跟随器输出。

由于电容 C_M 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

S_1 置于“自动”位置、 S_3 分别置于“×1”、“×10”档时的简化电路：



根据基尔霍夫第一定律，输出量与输入量之间的拉氏变换式为：

$$\frac{V_{02}(s) - V_F(s)}{1/C_1 s} + \frac{V_{02}(s)/m - V_F(s)}{R_1} + \frac{V_{03}(s) - V_F(s)}{1/C_M s} = 0$$

$= \frac{V_F(s) - V_{02}(s)}{1/C_M s}$

$$V_{03}(s) = -KV_F(s)$$

$$\frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)} = \frac{-\frac{C_I}{C_M} [1 + \frac{1}{mR_I C_I s}]}{1 + \frac{1}{K} [1 + \frac{C_I}{C_M}] + \frac{1}{KR_I C_M s}}$$

$$\frac{V_{03}(s)}{V_{02}(s)} = -\frac{C_I}{C_M} \frac{1 + \frac{1}{mR_I C_I s}}{1 + \frac{1}{KR_I C_M s}} = -\frac{C_I}{C_M} \frac{1 + \frac{1}{T_I s}}{1 + \frac{1}{K_I T_I s}}$$

S_3 打向 $\times 10$ 档时:
 $m=10$
 S_3 打向 $\times 1$ 档时:
 $m=1$

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。

4 输出电路
 其任务是将 PID 电路输出电压 $V_{03}=1\sim 5V$ 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: $R_3 = R_4 = 10K\Omega$, $R_1 = R_2 = 4R_3$

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

$$I_f = \frac{V_f - V_T}{R_4} = \frac{V_f - V_{03} - V_B}{R_1} = \frac{V_f - V_{03} - V_B}{4R_4}$$

由 $V_f \approx V_T$ 得

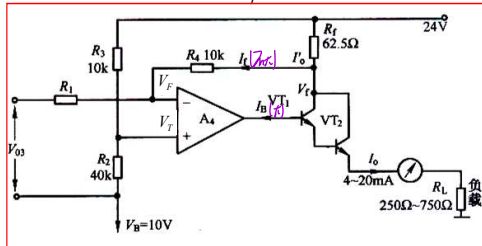
$$V_f = 24 - \frac{1}{4} V_{03}$$

$$= 24 - I_o R_f$$

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

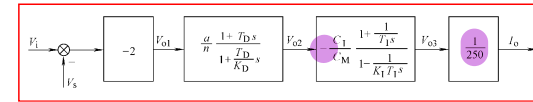
若取 $R_1 = 4(R_3 + R_f) = 40.25K\Omega$ 时,

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



5 调节器的整机传递函数

输入电路、及运算电路、输出电路的传递函数皆已获得，
整个调节器的结构框图



整机传递函数可表示为:

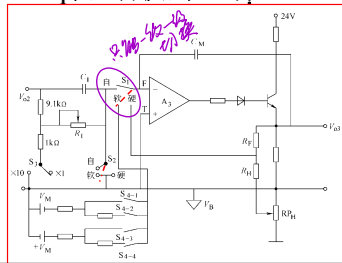
$$\frac{I_o(s)}{V_i(s) - V_o(s)} = \frac{2\alpha}{n} \times \frac{C_l}{C_m} \times \frac{1+T_d s}{1+\frac{T_d}{K_d}s} \times \frac{1+\frac{1}{T_i s}}{1+\frac{1}{T_i K_i s}} \times \frac{1}{250}$$

6 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

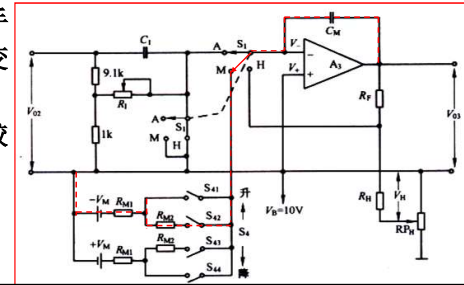
A → M 无冲击

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

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

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

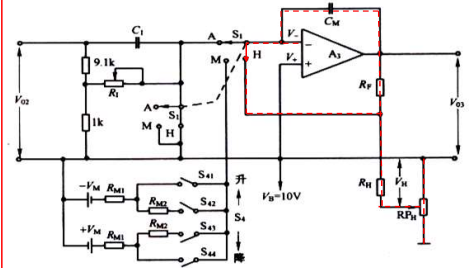
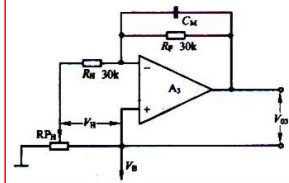
用这种手动操作来改变调节器输出, 信号变化比较缓和, 称为“软手动”。



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

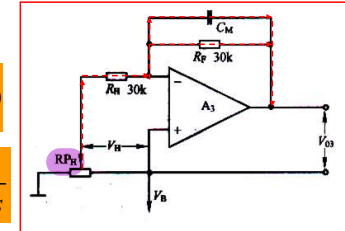
$$\frac{V_H(s)}{R_H} = -\left(\frac{1}{R_F} + C_M s\right) V_{O3}(s)$$

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

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

可见， V_H 改变时， V_{O3} 很快达到新的稳态值。

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

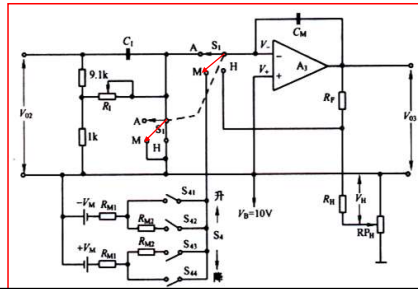


3) M、H→A间的切换

S_1 由A切向M或H时，联动开关同时将积分电容
 C_1 接 V_B ，使 V_{C1} 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)



DDZ-III型调节器软、硬手动的切换过程可总结为：

- 1) 自动切换到软手动，无需平衡即可做到无扰动切换；
- 2) 软手动切换到硬手动，需平衡后切换才能做到无扰动切换；
- 3) 硬手动切换到软手动，无需平衡即可做到无扰动切换；
- 4) 软手动切换到自动，无需平衡即可做到无扰动切换。

7 指示电路

现以输入信号指示电路为例进行讨论。

调节器采用双针指示式电表，全量程地指示测量值与给定值。偏差大小由两个指针间的距离反映，当两针重合时，偏差为零。S₅切换到“标定”时，可进行示值标定。

流过动圈表头的电流为

$$I'_O \approx I_0 = \frac{V_O}{R_O} = \frac{V_i}{R_O}$$

