



第2章 调节器



第二章调节器

回顾:

2.3 PID运算电路

2.4 PID 调节器的阶跃响应和频率特性



第二章调节器

主要内容:

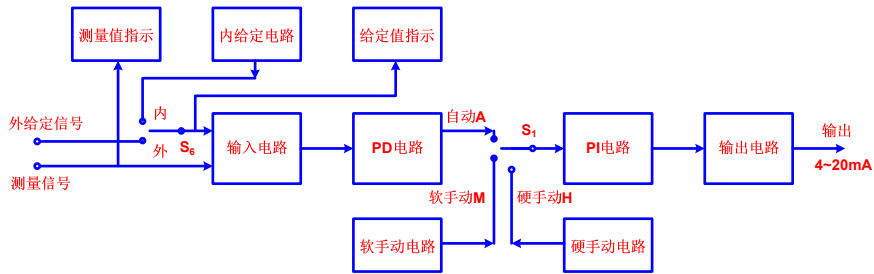
- 2.1 控制系统及其性能
- 2.2 调节器的调节规律
- 2.3 PID运算电路
- 2.4 PID 调节器的阶跃响应和频率特性
- 2.5 PID 调节器的完整结构
- 2.6 数字控制算法



2.5 PID调节器的完整结构

- **核心:** 比例积分微分运算电路
- **其它配套电路包括:**
 - (1) 给定信号电路;
 - (2) 输入电路 (偏差信号、电平移动) ;
 - (3) 输出电路;
 - (4) 指示电路;
 - (5) 自动切换电路---用于应付事故状态或开车停车。

2.5 PID调节器的完整结构

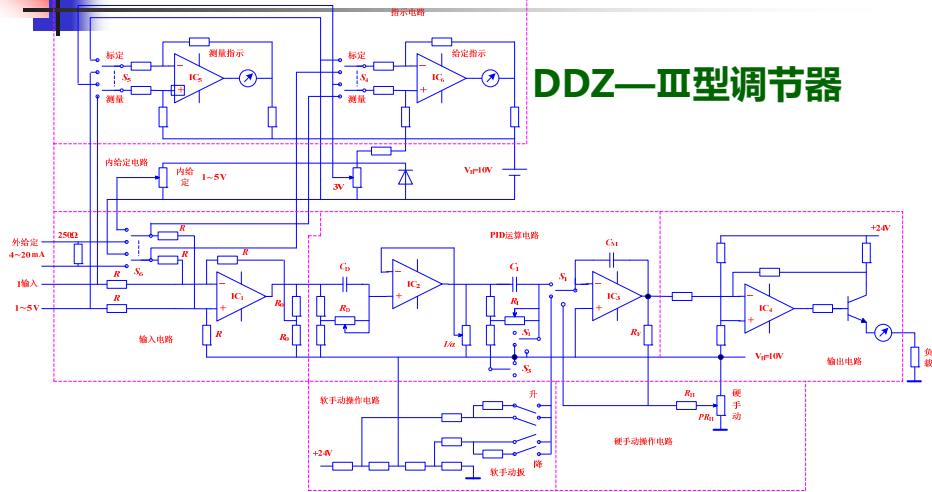


DDZ—Ⅲ型调节器 原理框图

一台完整的调节器是由输入电路、给定电路、PID运算电路、自动与手动切换电路、输出电路及指示电路等组成。

2.5 PID调节器的完整结构

DDZ—Ⅲ型调节器



2.5 PID调节器的完整结构

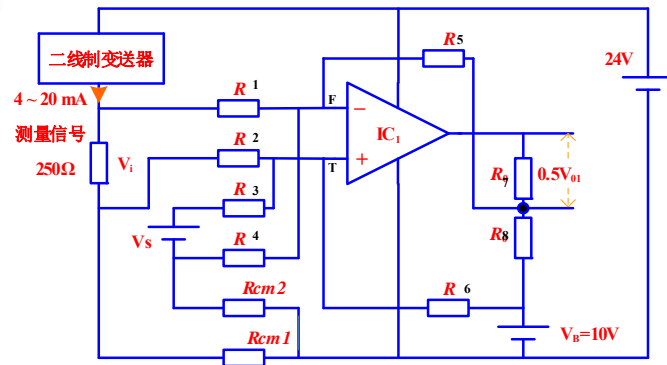
原理框图主要功能概述

- **1、输入电路**
 - 测量信号：接收来自变送器的输出（4~20mA或1~5V）；
 - 电平移动：适应单电源供电要求，主要作用如下：
 - (1)将输入信号转换为相对电平移动中点的变化；
 - (2)后级输出电路则可实现相对抬高后电位起点的负极性变化。
- **2、给定信号及内外给定切换**
 - 给定信号：用于设定控制要求，有2种设定形式。
 - (1) 内给定：给定信号取至内部精密电源，信号1~5V；
 - (2) 外给定：利用其它设备给定控制信号，4~20mA（例：控制计算机给定信号）。

2.5 PID调节器的完整结构

- **3、手动/自动切换**
 - (1) 手动：用于启动、停车、故障的需要而切断PID运算电路；
- 手动状态细分：
 - 1) 硬手动：输出电流完全由操作电位器调节；
 - 2) 软手动：用于自动--手动过渡，调节输出从自动状态平滑增减。
- (2) 自动：调节器正常运行状态（根据算法，有调节器自行控制）；
- **4、表头指示电路**
 - 全刻度指示，调节器指示内容包括：1) 输出电流、2) 给定信号、3) 测量信号（双针指示）

DDZ—Ⅲ型调节器输入电路分析



基本作用：测量信号与给定信号相减获取偏差信号；
其它作用：电平移动，差动输入（电路无共地信号）。

DDZ—Ⅲ型调节器 输入电路

1. 输入电路 $R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R$; $R_7=R_8$ $R_7, R_8 \ll R$

由 V_F 点知 $I_{R5} + I_{R1} + I_{R4} = 0$

$$\frac{V_F - V_B - \frac{1}{2}V_{01}}{R} + \frac{V_F - V_i - V_{CM1}}{R} + \frac{V_F - V_{CM2}}{R} = 0$$

由 V_T 点知 $I_{R6} + I_{R3} + I_{R2} = 0$

$$\frac{V_T - V_B}{R} + \frac{V_T - V_s - V_{CM2}}{R} + \frac{V_T - V_{CM1}}{R} = 0$$



DDZ—Ⅲ型调节器 输入电路

两式联立求解得：

$$V_F = \frac{1}{3}(V_i + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B + \frac{1}{2}V_{o1})$$

$$V_T = \frac{1}{3}(V_s + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B)$$

$$V_T \approx V_F$$

$$V_i + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B + \frac{1}{2}V_{o1} = V_s + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B$$

$$V_{o1} = -2(V_i - V_s)$$

结论：

- 1) 实现测量信号 V_i 与给定信号 V_s 可实现相减，获得放大2倍的偏差信号；
- 2) 输出 V_{o1} 与 V_{CM1} 、 V_{CM2} 无关（抗共模干扰）；
- 3) 接受两个以零点为起点的测量和给定信号，而输出以 $V_B(10V)$ 为起点的偏差电压，实现了电平移动。



DDZ—Ⅲ型调节器 输入电路

输入分析：

设 $V_B=0V$ 输入信号 V_i 、 V_s 范围为 $1\sim 5V$ V_{CM1} 、 V_{CM2} 在 $0\sim 1V$ 间变化

$$V_F = V_T = \frac{1}{3}(V_s + V_{CM1} + V_{CM2} + V_B) = 0.33 \sim 2.33V$$

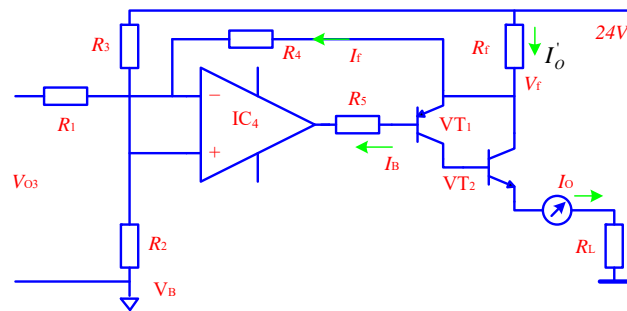
$V_B=10V$ 后， V_F 、 V_T 电压提高到 $3.67 \sim 5.67 V$

输出分析：

设输入信号 V_i 、 V_s 范围为 $1\sim 5V$

$$V_B + V_{o1} = V_B - 2(V_i - V_s) = 2 \sim 18V \quad (V_i \text{ 与 } V_s \text{ 差值最大为 } \pm 4 V \text{ 时})$$

DDZ—Ⅲ型调节器输出电路



输出电路 电路形式：电压-电流转换器

分析计算---条件： $R_3 = R_4 = 10K\Omega$ $R_1 = R_2 = 4R_3 = 40K\Omega$

$$V_+ = \frac{24V - V_B}{R_3 + R_2} R_2 + V_B = \frac{24V}{R_3 + R_2} R_2 - \frac{R_2}{R_3 + R_2} V_B + \frac{R_3}{R_3 + R_2} V_B + \frac{R_2}{R_3 + R_2} V_B$$

$$= \frac{24VR_2}{R_3 + R_2} + \frac{R_3 V_B}{R_3 + R_2} = \frac{1}{5} (V_B + 4 \times 24V)$$

$$V_- = \frac{V_f - V_B - V_{O3}}{R_4 + R_1} R_1 + V_B + V_{O3} = \frac{R_1}{R_4 + R_1} V_f + (V_B + V_{O3}) \left[1 - \frac{R_1}{R_4 + R_1} \right]$$

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

DDZ—Ⅲ型调节器输出电路

$$V_+ \approx V_- \quad \frac{1}{5}(V_B + 4 \times 24V) = \frac{1}{5}(V_B + V_{O3}) + \frac{4}{5}V_f$$

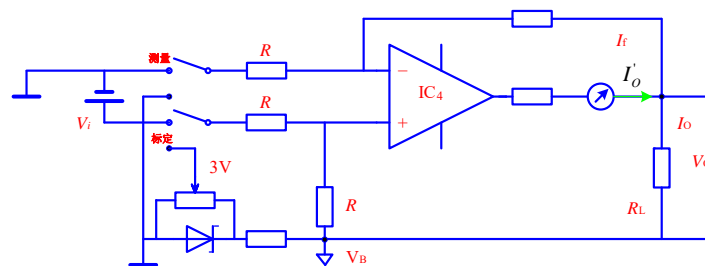
$$V_f = 24V - \frac{1}{4}V_{O3} \quad V_f = 24V - I'_O R_f$$

$$I'_O R_f = \frac{1}{4}V_{O3} \quad I'_O = \frac{V_{O3}}{4R_f} \quad I_O \approx \frac{V_{O3}}{4R_f}$$

$$\text{取 } R_f = 62.5\Omega \quad V_{O3} = 1 \sim 5V \quad I_O = 4 \sim 20mA$$

$$\text{实际考虑 } R_1 = 4(R_3 + R_f)$$

指示电路



DDZ—Ⅲ型调节器指示电路

用动圈表头来指示测量值和给定值。



指示电路

电路形式：具有电平移动的比例运放。

$$V_T = \frac{V_i - V_B}{R + R} R + V_B = \frac{1}{2}(V_i + V_B)$$

$$V_F = \frac{V_O + V_B}{R + R} R = \frac{1}{2}(V_O + V_B)$$

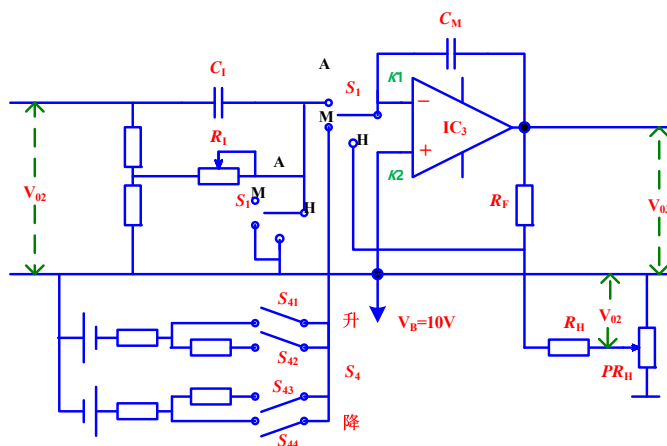
$$V_T \approx V_F \quad \frac{1}{2}(V_i + V_B) = \frac{1}{2}(V_O + V_B) \quad \text{即} \quad V_i = V_O$$

$$I_O = I'_O + I_f \quad \rightarrow \quad I'_O = \frac{V_O}{R_L} = \frac{V_i}{R_L}$$

$$\downarrow \quad I_f = \frac{V_F}{R} = \frac{V_B + V_i}{2R}$$

$$I_O = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{2R}\right)V_i + \frac{1}{2R}V_B$$

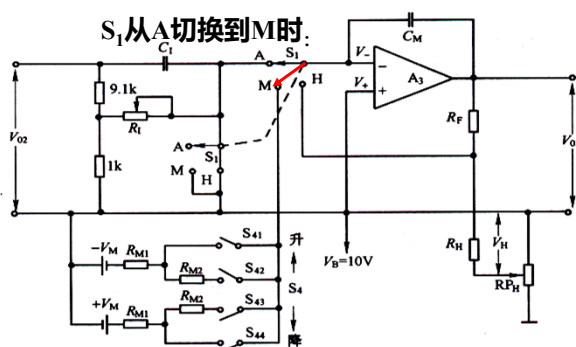
自动—手动切换电路



手动操作电路及无扰切换

通过切换开关S₁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



断开A₃的输入

C_M 无放电回路

V_{O3} 保持不变

A→M无冲击

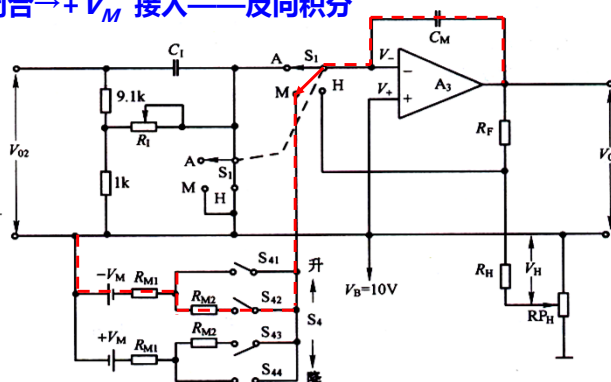
手动操作电路及无扰切换

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”。

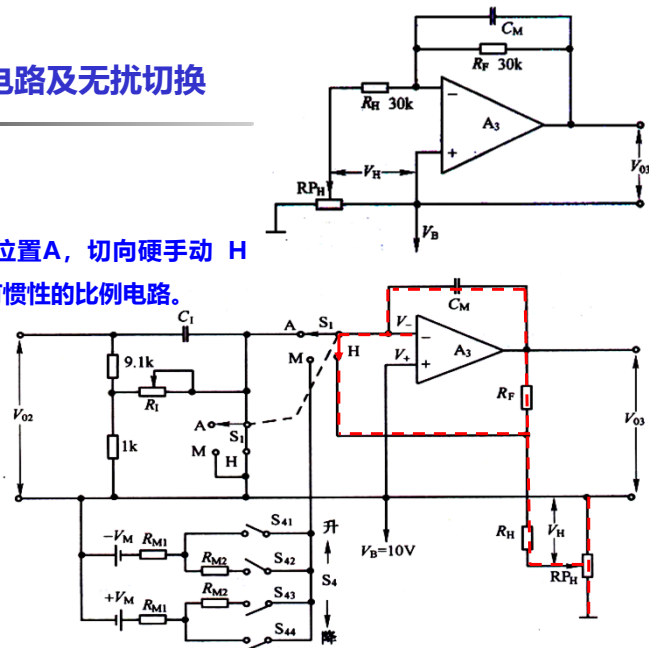


手动操作电路及无扰切换

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。

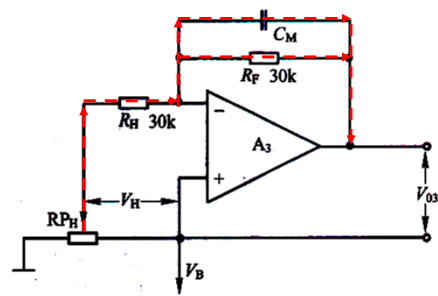


手动操作电路及无扰切换

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 RP_H 与当时的 V_{O3} 一致，才能做到无扰动切换。M→H也同样。

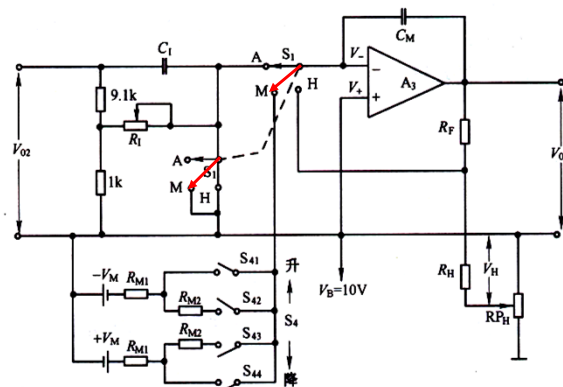
手动操作电路及无扰切换

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)
需平衡 ↓↑ 无扰
才能无
扰 硬手动 (H)



2.6 数字控制算法

主要优点：

- (1) **功能丰富**--调节灵活方便，在相同硬件配置下利用程序可实现多种功能。（软件实现）
- (2) **自诊断功能**—可在运行中及时发现自身故障，避免误测误控。
- (3) **数据通信功能**—可组网增加信息量，扩大传输距离，易于集中监测。（上数据总线）
- (4) **高性价比**—在尺寸、功耗、价格方面相对模拟仪表具有明显优势。

基本PID的离散表达式

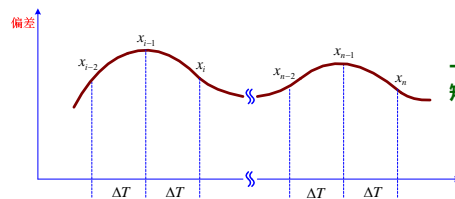
连续PID调节器的调节规律为：

$$y(t) = \frac{1}{P} \left(x(t) + \frac{1}{T_i} \int x(t) dt + T_d \frac{dx(t)}{dt} \right)$$

PID调节器的离散化表示法：

$$y_n = \frac{1}{P} \left(x_n + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^n x_i \Delta T + T_d \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta T} \right)$$

位置式PID算式



离散化（数字式）表示的特点

- (1) 输出为相对第n次采样的结果。
- (2) 输出表达式均为四则运算形式，便于计算机编程控制。
- (3) 分为位置式和增量式2种：位置式---含本次、上次历史偏差，适用于绝对计算形式（程序较长）；增量式---含本次、上次、上次偏差，适用于相对计算形式（程序较短）。

偏差信号x(t)的采样序列

$$\Delta y_n = y_n - y_{n-1} = \frac{1}{P} \left(\frac{\Delta T}{T_i} x_n + (x_n - x_{n-1}) + \frac{T_d}{\Delta T} (x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}) \right)$$

增量式PID算式

数字式调节器的优、缺点及改进措施

优点：易实现无扰切换。

缺点：相对于模拟调节器更易受高频干扰。（相当于理想微分作用于某时刻的采样值）

措施：将理想微分改为不完全微分。

实际有限微分表达式 $Y(s) = \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d s}{K_d}} x(s)$ 与理想表达式的关系 $Y(s)(1 + \frac{T_d s}{K_d}) = T_d s x(s)$



$$Y(s)(1 + \frac{T_d s}{K_d}) = T_d s X(s) \quad \text{用微分替代算子} \quad \frac{T_d}{K_d} \frac{dy}{dt} + y_n = T_d \frac{dx}{dt}$$

设采样周期为 ΔT ，以增量替代微分项，对于第 n 次采样有：

$$\frac{T_d}{K_d} \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta T} + y_n = T_d \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta T}$$

整理后得

$$y_n = \frac{T_d}{\Delta T + \frac{T_d}{K_d}} (x_n - x_{n-1}) + \frac{\frac{T_d}{K_d}}{\Delta T + \frac{T_d}{K_d}} y_{n-1}$$

以有限制微分替代理想微分得实用的PID运算式

$$y_n = \frac{1}{P} \left(x_n + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^n x_i \Delta T + \frac{T_d}{\Delta T + \frac{T_d}{K_d}} (x_n - x_{n-1}) + \frac{\frac{T_d}{K_d}}{\Delta T + \frac{T_d}{K_d}} y_{n-1} \right)$$



采样周期的选择

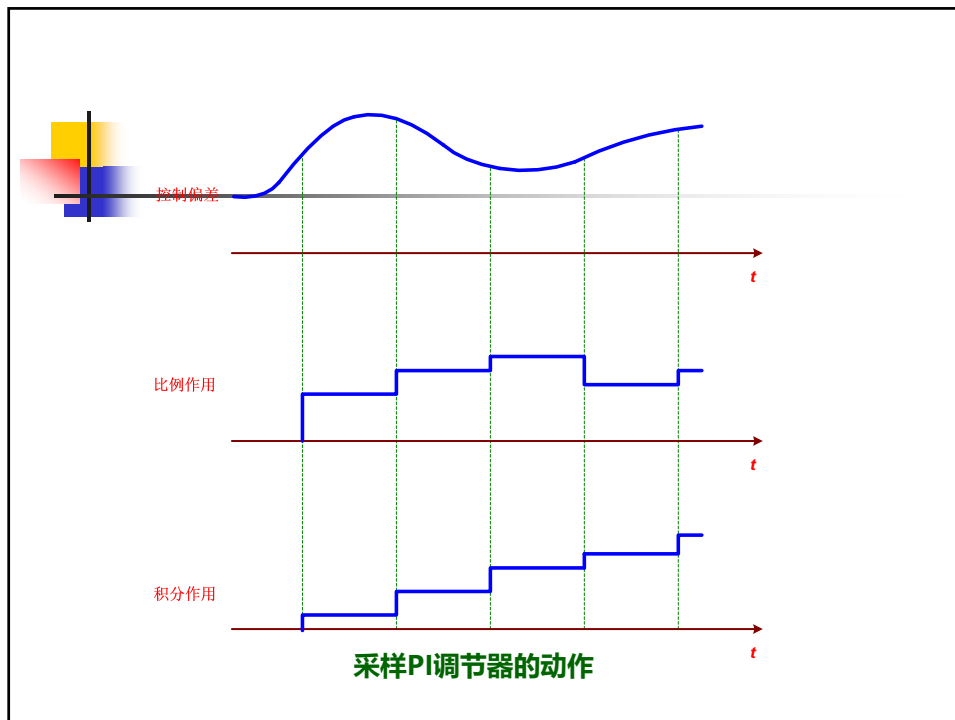
采样周期的一般选择原则：

- (1) 采样周期一般应小于主要扰动周期的1/5。
- (2) 工程取值 \leq 主要扰动周期的1/10。
- (3) 为使测量信号不出现阶梯跳动，工程取值为 \leq 对象时间常数的1/10。

狭义对象：高速脉动对象一般不易满足（例单独考虑水流）。

广义对象：对于整体动作过程容易满足（同时考虑水流、阀门、仪表等）。

采样周期：目前常用数字仪表定为0.1~0.2S。



变形的PID控制算法

有些工艺生产中，经常改变给定值。而用基本PID控制的话，当给定值突变时，微分作用会使调节器输出产生剧烈的跳动，称微分冲击，影响工况的稳定。因此操作工人在改变设定值时，必须小心翼翼地注意着输出的变化。

为了改善这种操作特性，有人提出让微分对设定值不起作用，而只对测量值PV进行微分运算的算法，称为微分先行PID 算法。



变形的PID控制算法

微分先行的PID调节器表达式：

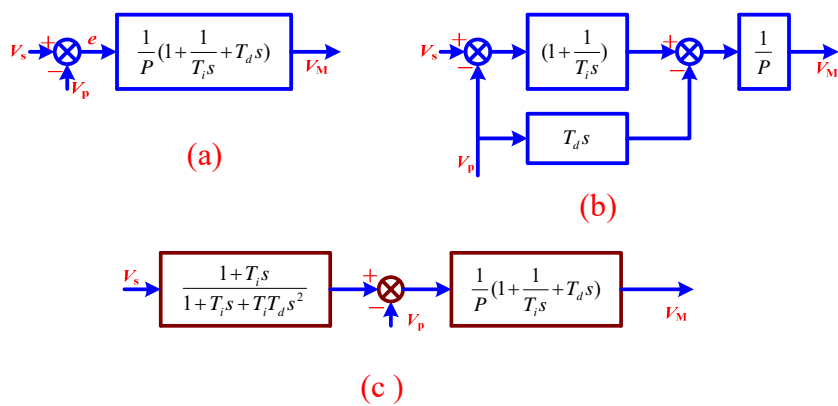
$$V_M(s) = \frac{1}{P} \left[\left(\frac{1}{T_i s} + 1 \right) E(s) - T_d s P V(s) \right]$$

等效功能：相当于在设定值通道加传递函数

$$\frac{1 + T_i s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} \quad (\text{一阶滤波器})$$



微分先行的PID调节器的框图分解过程 (相对基本PID调节器的比较)



PI-D等效证明:

图(b):

$$V_M(s) = \left\{ [V_s(s) - V_p(s)] \cdot \left(\frac{1}{T_i s} + 1 \right) - T_d s V_p(s) \right\} \frac{1}{P} = \left\{ V_s(s) \cdot \left(\frac{1}{T_i s} + 1 \right) - V_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right\} \frac{1}{P}$$

图(c):

$$\begin{aligned} V_M(s) &= \left[V_s(s) \cdot \frac{1 + T_i s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} - V_p(s) \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \frac{1}{P} \\ &= \left\{ V_s(s) \cdot \frac{(1 + T_i s)(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} - V_p(s) \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right\} \cdot \frac{1}{P} \end{aligned}$$

证明内容:

上述两公式相等: $\frac{1}{T_i s} + 1 = \frac{(1 + T_i s)(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)}{1 + T_i s + T_i T_d s^2}$

等式右边展开: $\frac{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s + 1 + T_i s + T_i T_d s^2}{1 + T_i s + T_i T_d s^2}$ 组合 $\frac{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} + 1$ 即 $\frac{1}{T_i s} + 1$

$T_i \gg T_d$ 或 $T_i s \gg 1$ $\frac{1 + T_i s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} \approx \frac{1}{1 + T_d s}$

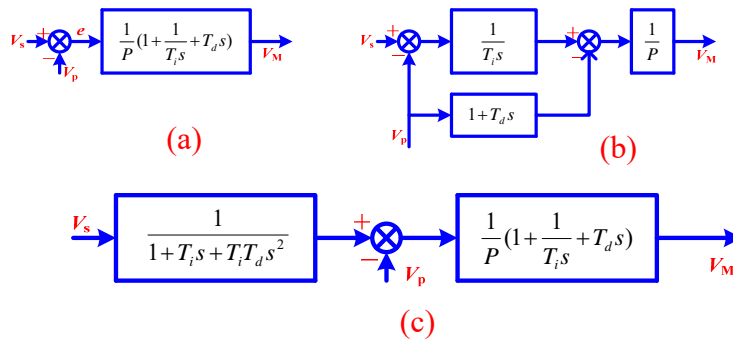
PI-D调节器的框图可以表示为:

比例先行的PID调节器 (I-PD)

$$V_M(s) = \frac{1}{P} \left[\frac{1}{T_i s} E(s) - (1 + T_d s) V_P(s) \right]$$

等效功能：相当于在设定值通道加传函

$$\frac{1}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} \quad (\text{二阶滤波器})$$



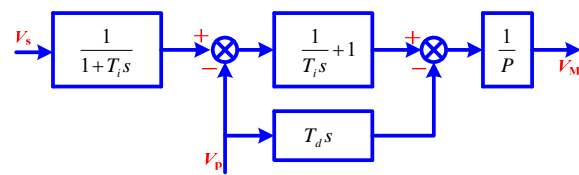
I-PD等效证明:

$$\begin{aligned} V_M(s) &= \left\{ [V_s(s) - V_P(s)] \cdot \frac{1}{T_i s} - V_P(s)(1 + T_d s) \right\} \cdot \frac{1}{P} = \left[V_s(s) \cdot \frac{1}{T_i s} - V_P(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right] \cdot \frac{1}{P} \\ &= \left[V_s(s) \cdot \frac{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} - V_P(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \right] \cdot \frac{1}{P} = \left[V_s(s) \cdot \frac{1}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} - V_P(s) \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \cdot \frac{1}{P} \end{aligned}$$

$$T_i \gg T_d \quad \frac{1}{1 + T_i s + T_i T_d s^2} \approx \frac{1}{1 + T_i s} \quad \frac{1}{1 + T_i s}$$

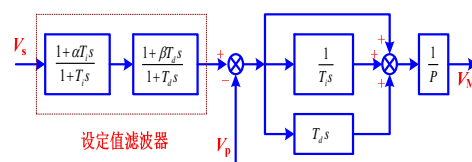
两个环节串联，则有近似框图：

$T_i \gg T_d$ 比例先行PID的化简框图



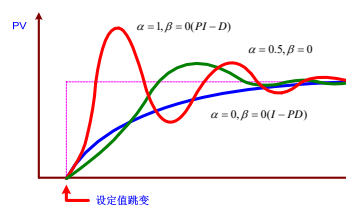
带可变形设定值滤波器SVF的PID算法

基本型PID调节器前增加一个二阶滤波器，其传递函数为：



设定值滤波器

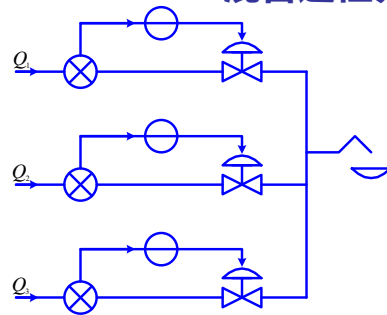
$$\frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s} \cdot \frac{1 + \beta T_d s}{1 + T_d s}$$



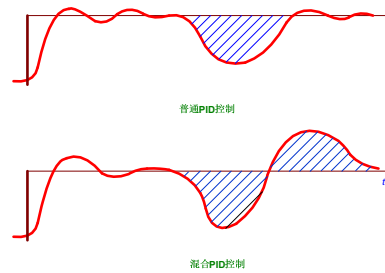
设定值跳变时的响应

带可变形设定值滤波器SVF的PID算法

混合过程算法



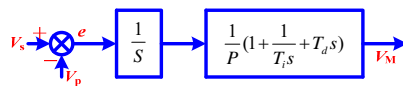
管道混合示意图



普通PID与混合PID的比较

混合过程算法

混合PID控制框图（相当于对偏差先积分后再进行PID调节）



混合PID的连续函数表达式
$$V_M(s) = \frac{1}{s} \frac{1}{P} \left[\frac{1}{T_i s} + 1 + T_d s \right] E(s) = \frac{T_d}{P} \left[\frac{1}{T_i T_d s^2} + \frac{1}{T_d s} + 1 \right] E(s)$$

混合算法的离散表达式
$$V_{M_n} = \frac{T_d}{P} \left[\frac{\Delta T^2}{T_i T_d s^2} \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n e_i + \frac{\Delta T}{T_d} \sum_{i=1}^n e_i + e_n \right]$$



2.7 单回路可编程序控制器

概述

- 单回路控制器是以微处理器为基础的多功能控制仪表。
- 具有多路模拟输入、多路开关量输入/输出、通信及诊断功能，可实现复杂运算、控制。
- 原则上只有一路模拟量输出信号---单回路控制器。
- 与模拟调节器在功能上的区别：是自控、计算机、通信技术组合，不仅是调节控制。



2.7 单回路可编程序控制器

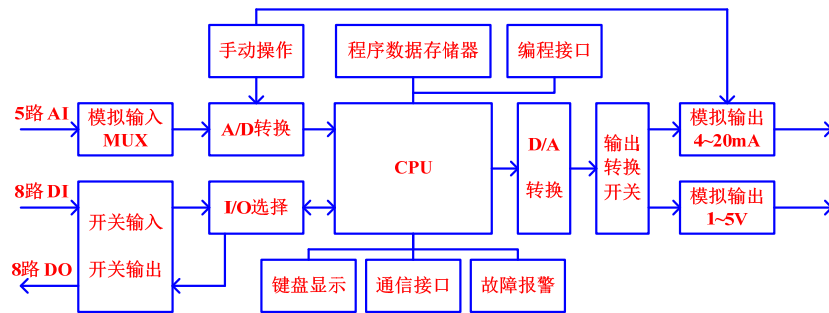
SLPC单回路可编程序控制器的电路原理

SLPC (Single Loop Programmable Controller)单回路控制器是西安仪表厂生产的YS-80系列的基型品种。特点为：

- 可接受5路模拟量、6路开关量输入/输出、2路1~5VDC输出，但只有1路4~20mADC输出，只能控制一个执行器，这是称为单回路仪表的原因。
- 能取代多台单元仪表，实现复杂的控制运算。外形、操作与模拟仪表相同，可与模拟仪表混用。
- 具有通信及故障诊断功能。

SLPC型可编程序控制器的电路

代表机种：YS-80系列的SLPC (Single Loop Programmable Controller)



组成示意图

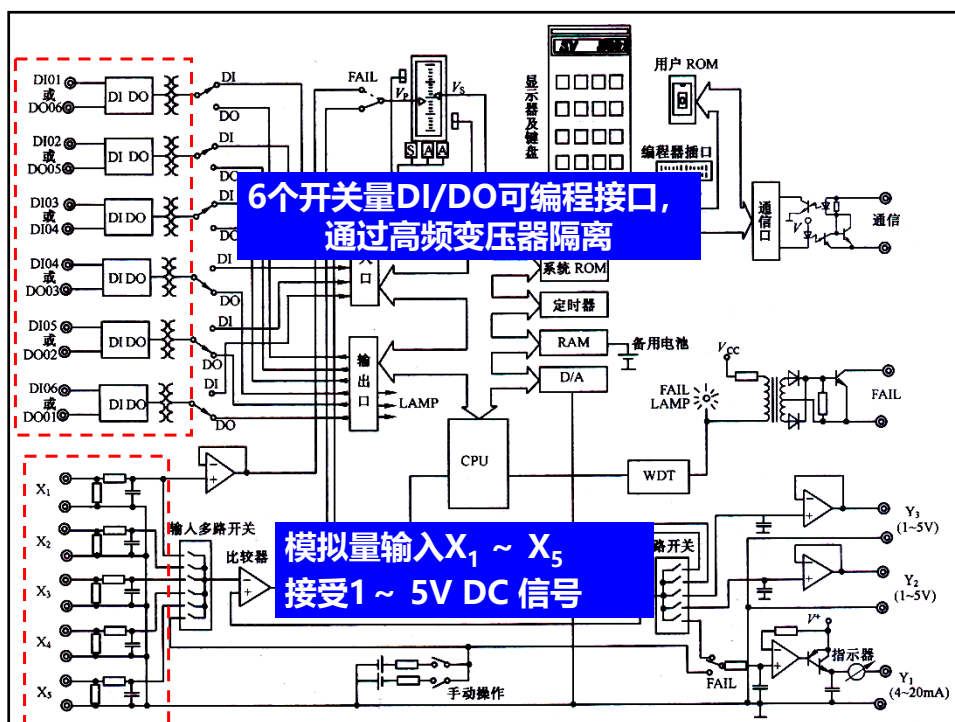
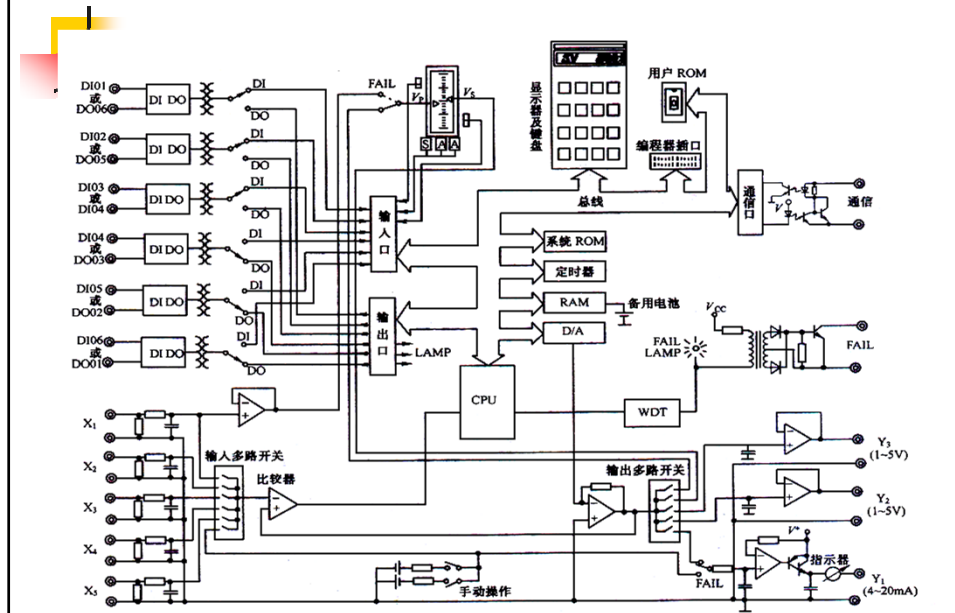
RF-P86 FIG 2-30 SLPC 控制器的电路方框图

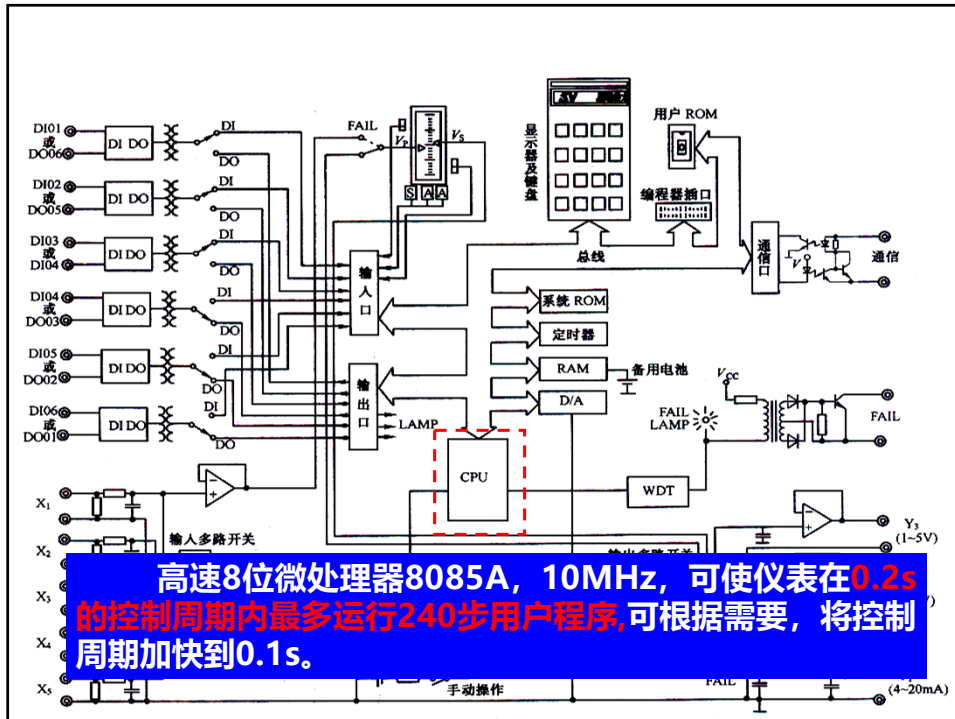
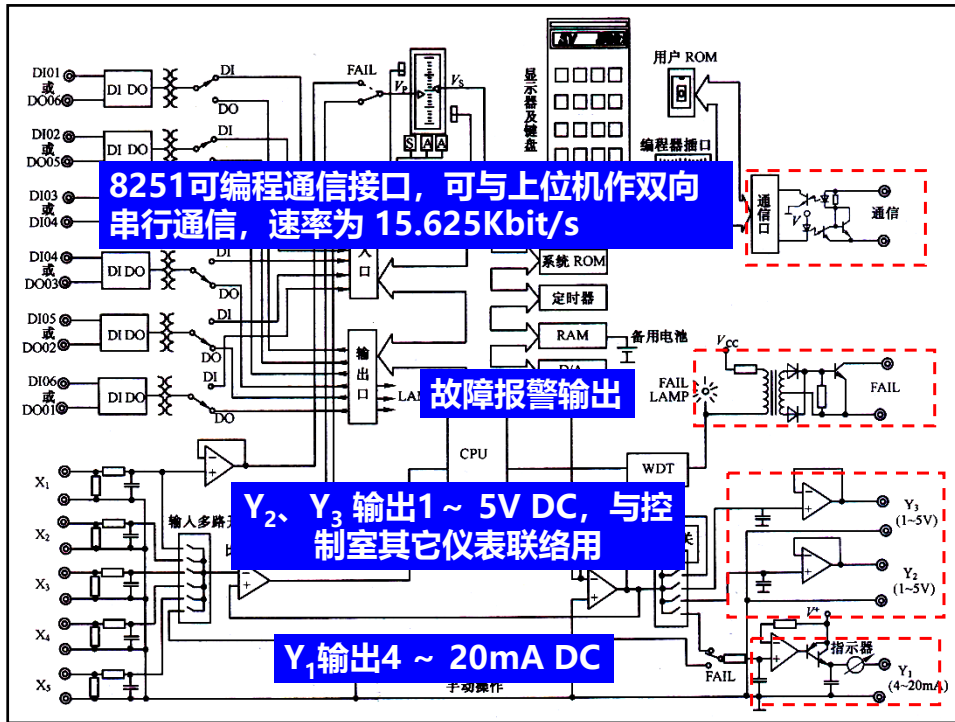
主要组成部分

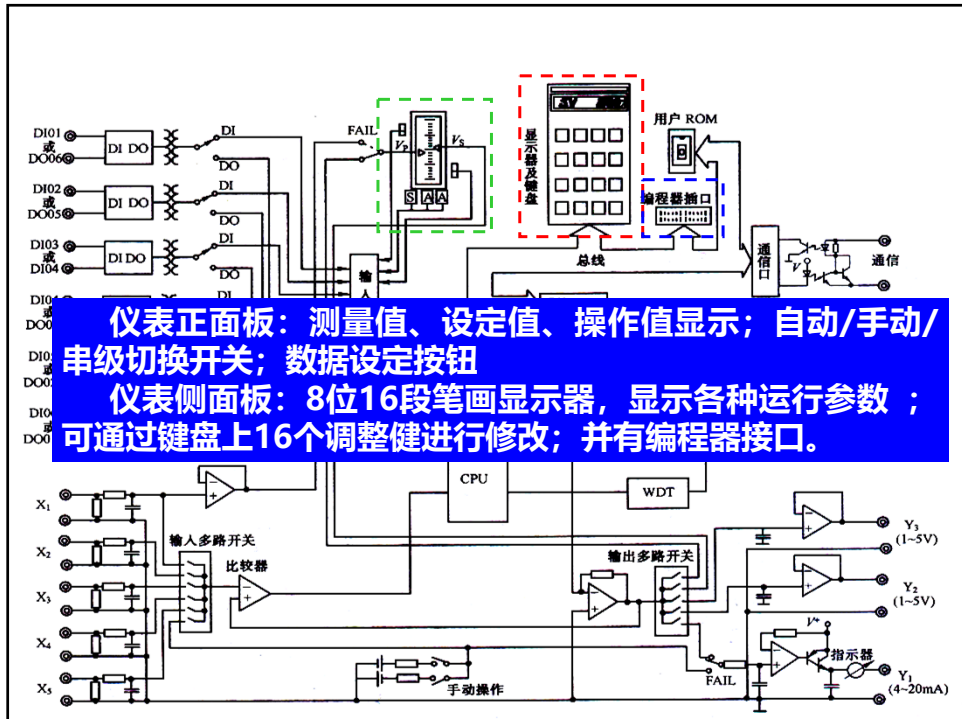
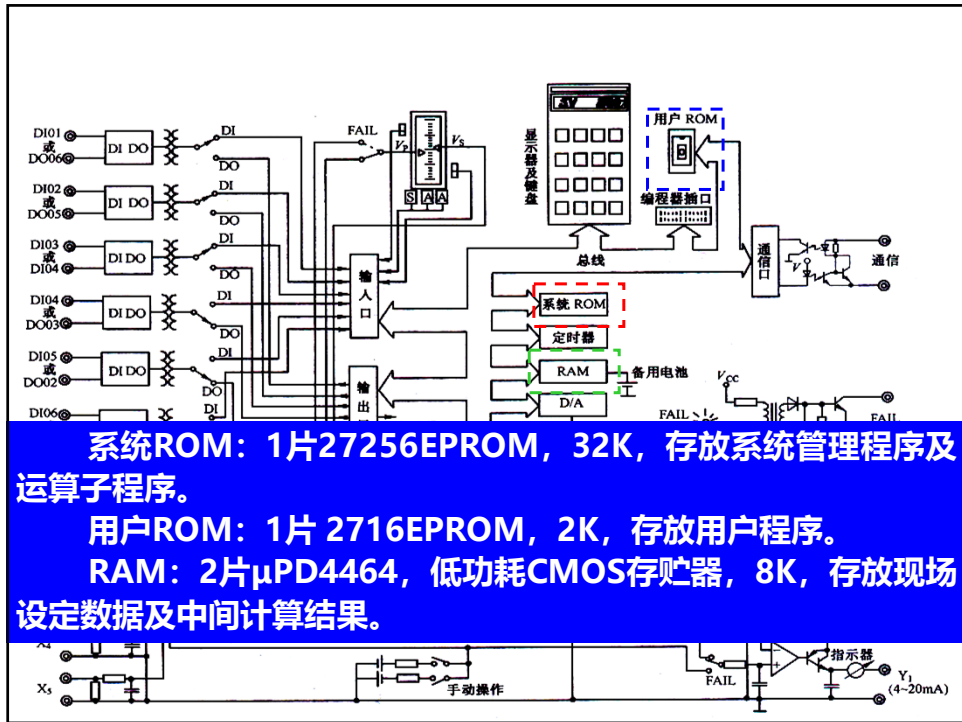
参考电路原理方块图- RF-FIG-2-30

- (1) CPU 采用8位微处理器8085A, 10MHZ、0.2s控制周期 (最多可运行240步)。
- (2) 系统软件 and 用户程序存入内部**32K EPROM**。
- (3) 现场设定数据及中间结果存入内部**2K RAM**。
- (4) 5个模拟输入端, 可以同时接受5路1~5V直流电平信号。
- (5) 3个模拟输出端, 1路4~20mA电流输出驱动执行器, 2路1~5V联络信号。
- (6) 6个开关量输入/输出端, 利用三态门电路切换输入、输出方式。

2.6.1 SLPC型可编程序控制器的电路原理









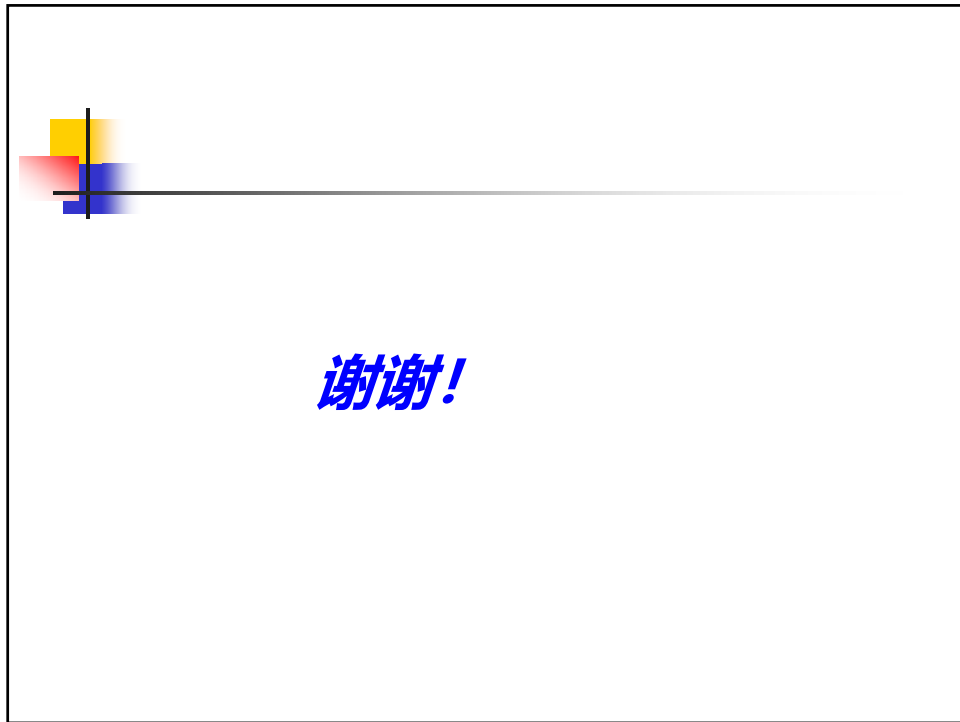
思考

控制器的正反作用? P65



作业

P 101: 2-5,2-7, 2-9



谢谢!