

# 第3章 转速闭环控制的直流调速系统

3.1 有静差转速单闭环直流调速系统（比例单环） ✓

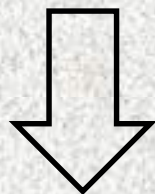
3.2 带电流截止负反馈的直流调速系统（比例单环）

3.3 比例积分控制规律和无静差调速系统（PI单环）

## 3.1 转速闭环直流调速系统

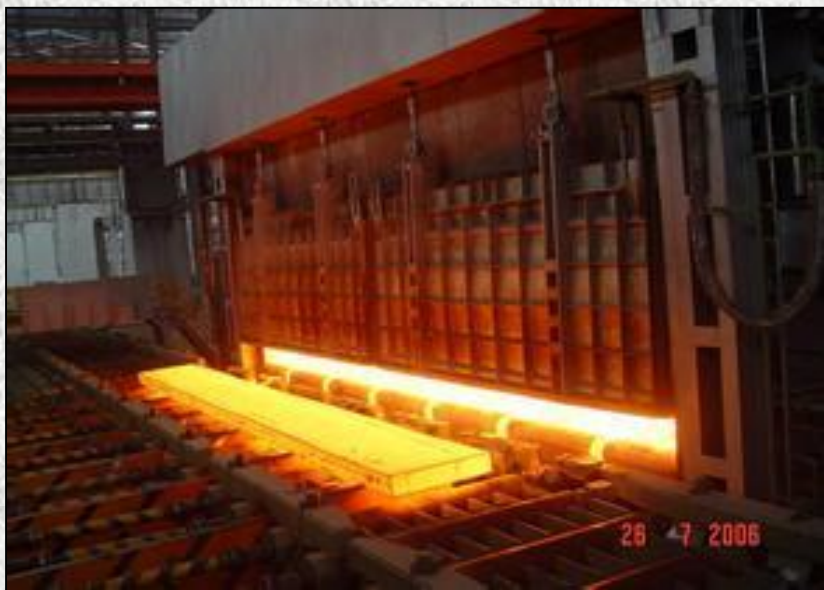
问题的提出：

为什么要构造**转速闭环**调速系统呢？



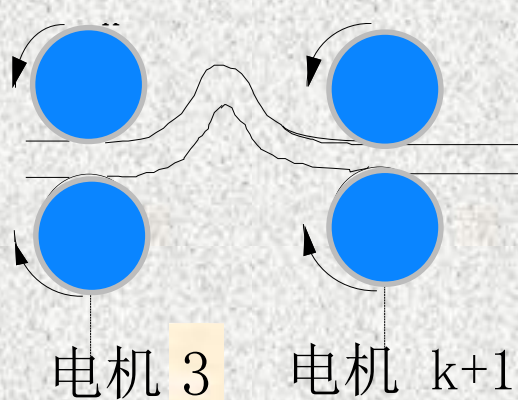
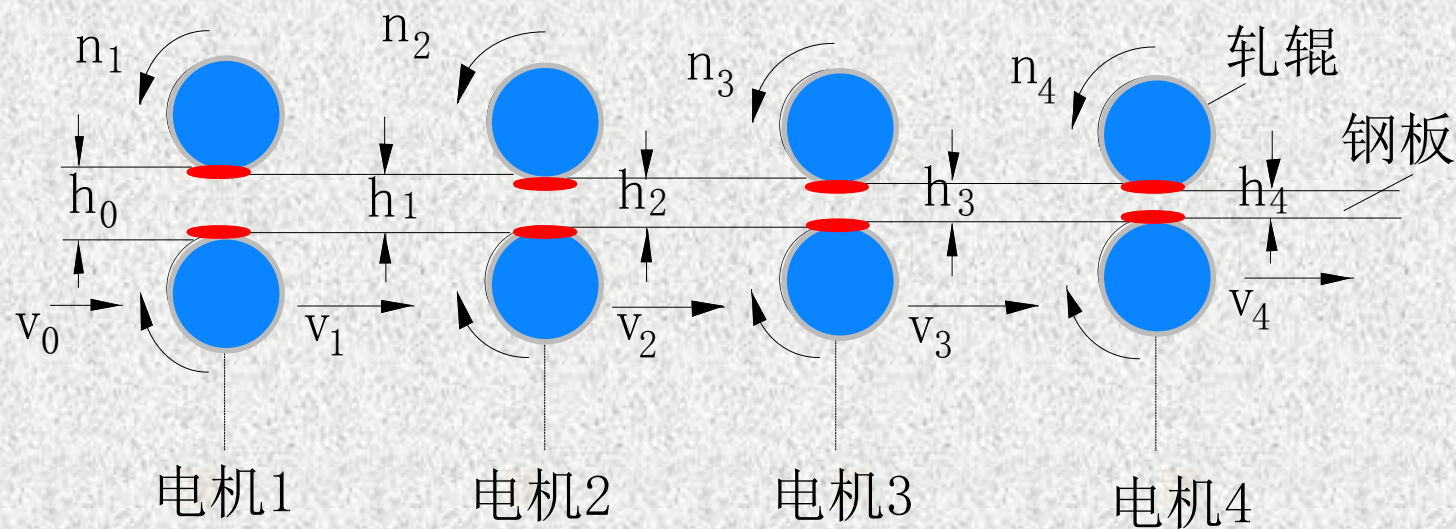
◆ 开环调速系统能否满足所有场合的性能需求？

# 钢板-热连轧

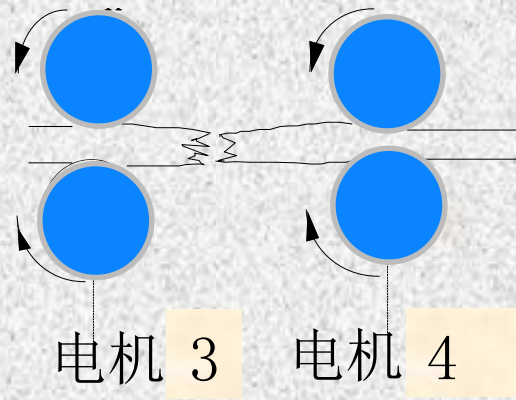




# ■ 钢板四连轧机组

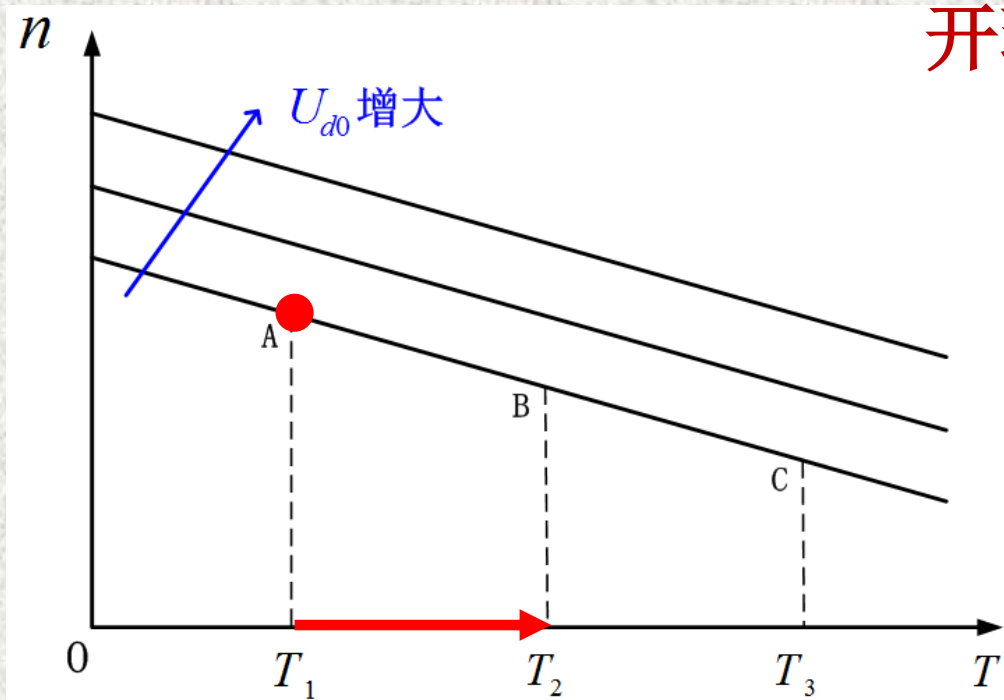
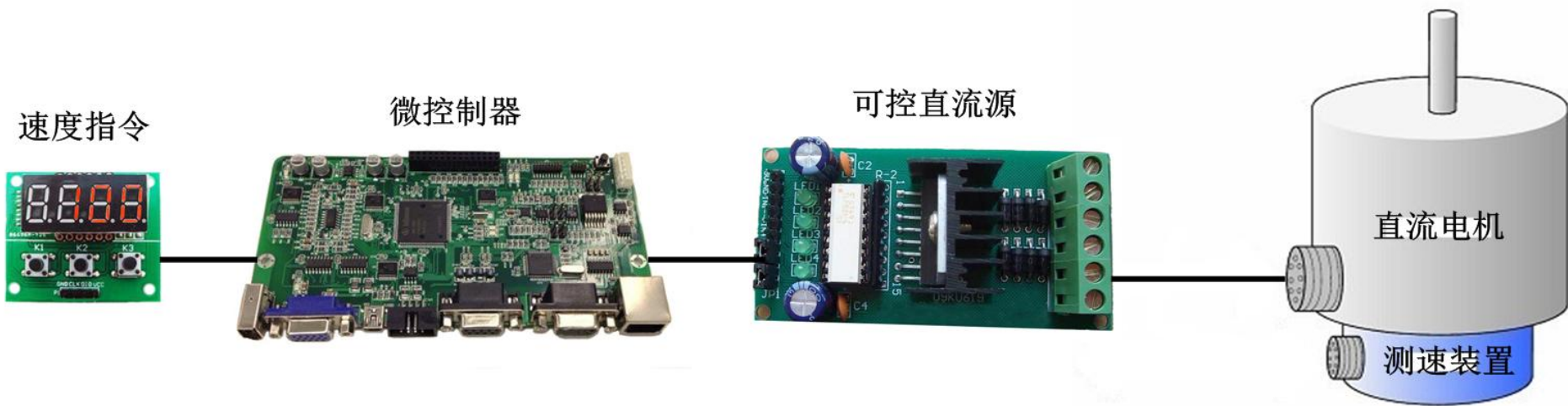


电机4 转速过低



电机4 转速过高

钢板连轧控制示意图



开环调速系统的机械特性：

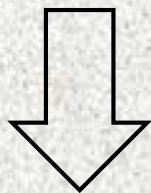
$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

- 1、电枢电流变化；
- 2、电枢电阻变化；
- 3、电网电压波动；
- 4、励磁电流波动；

## 3.1 有静差转速闭环直流调速系统

问题的提出：

为什么要构造转速闭环调速系统？



◆ 开环调速系统能够满足性能需求？

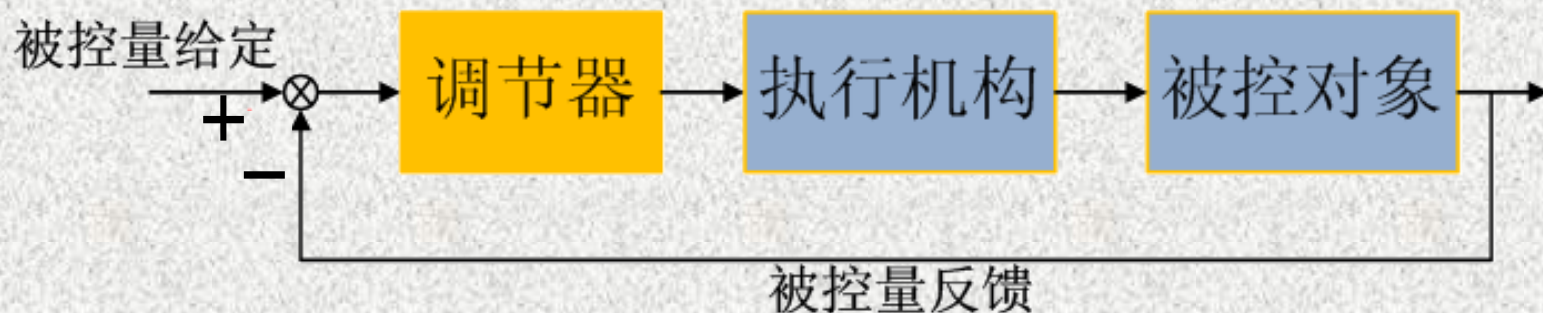
答：对调速精度有一定要求的场合，开环调速系统不能满足性能需求。

◆ 有没有性能更优的控制方案？

## 解决思路

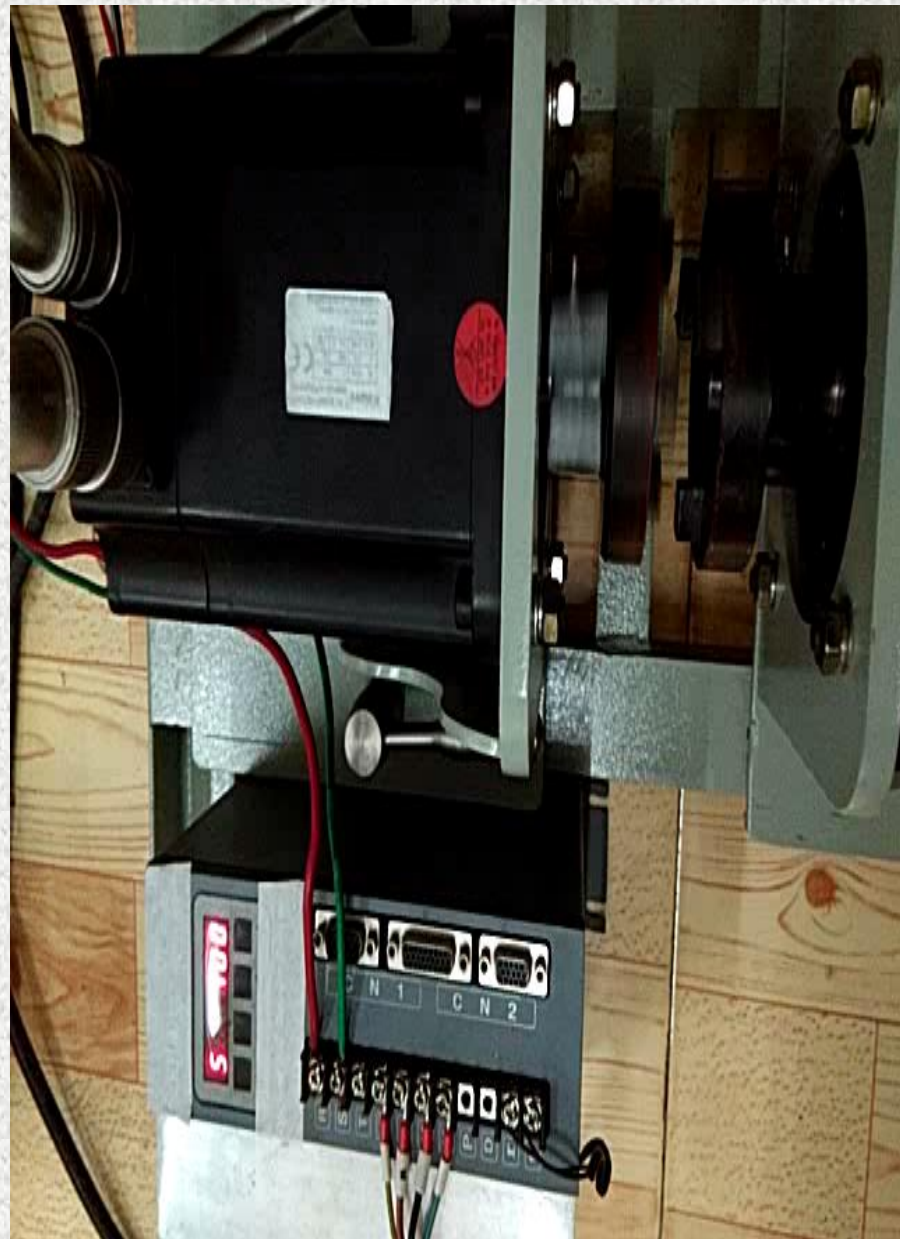
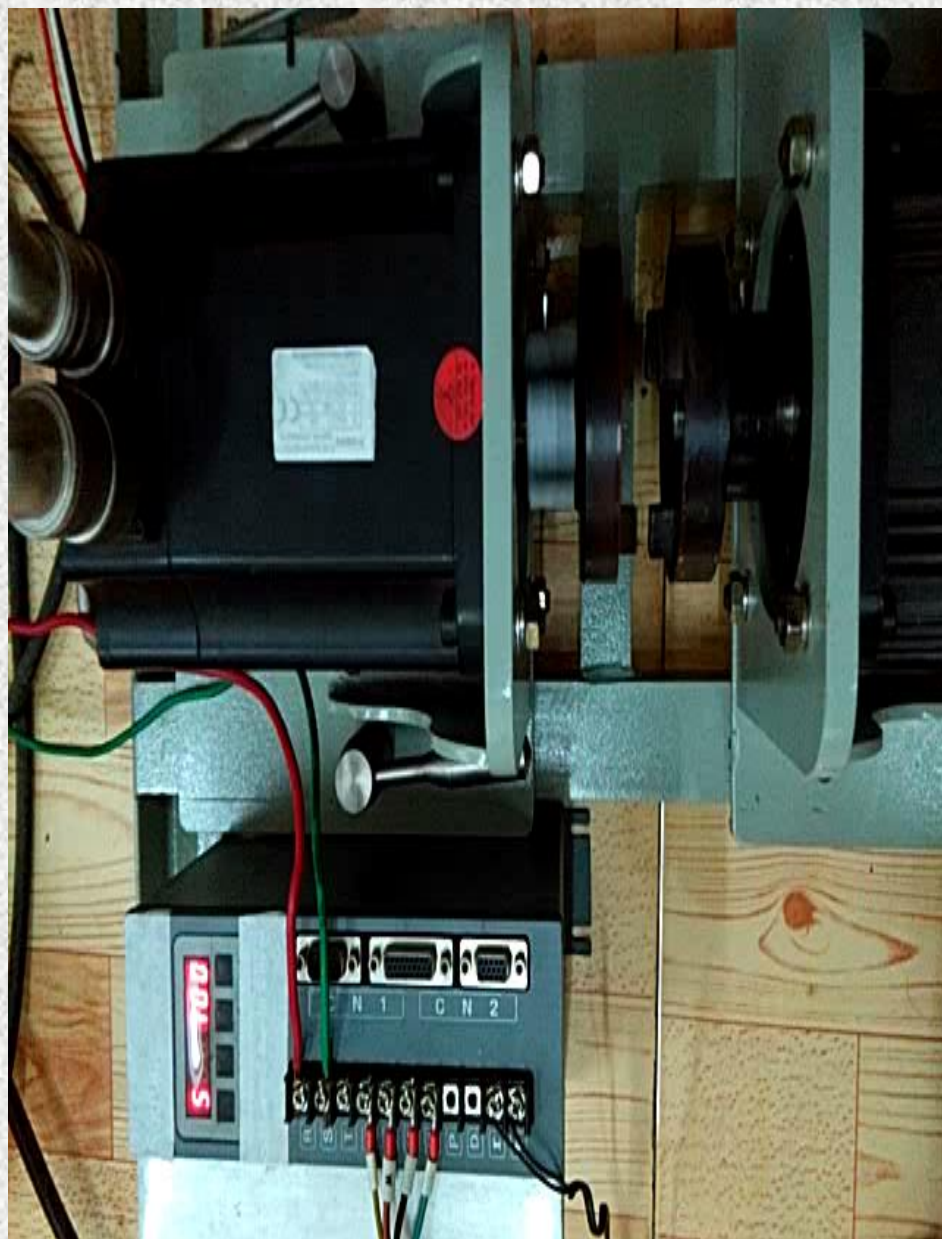
按照反馈控制规律，采用某个物理量的负反馈就可以保持该量基本不变，那么，采用速度负反馈应该能够得到速度控制精度的提升。

所以，采用速度闭环。

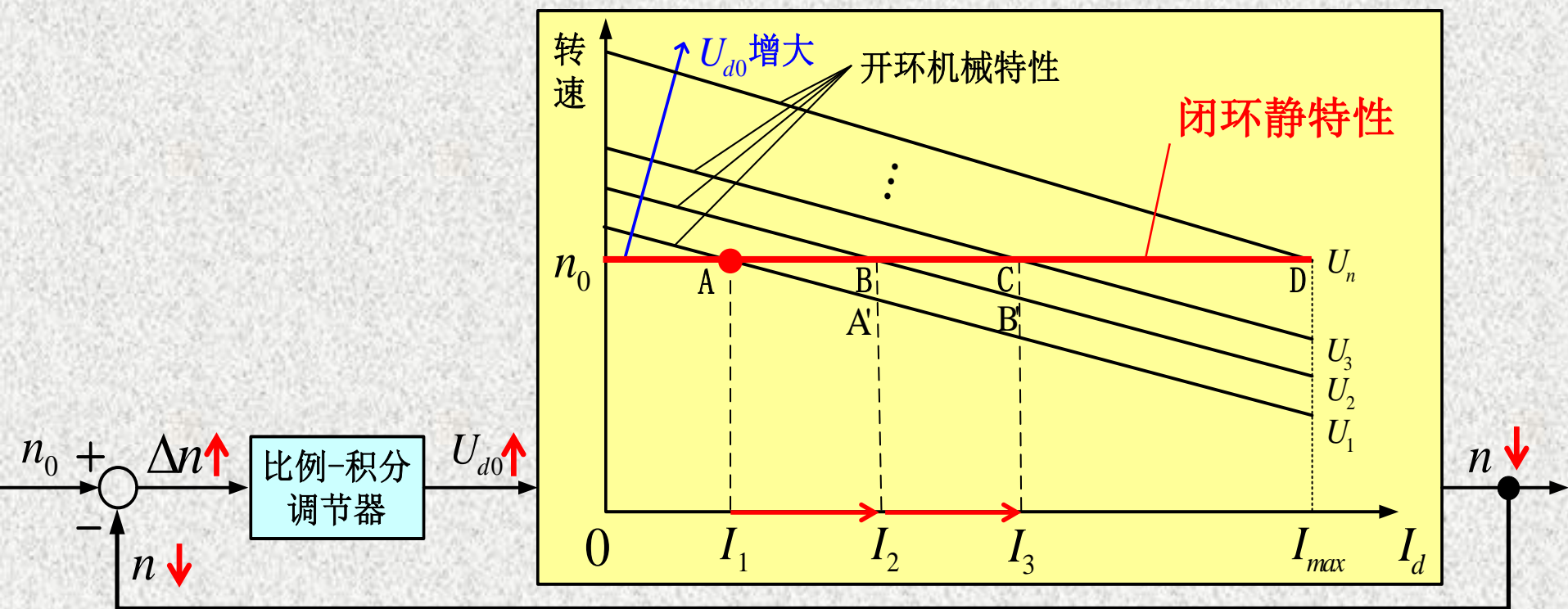
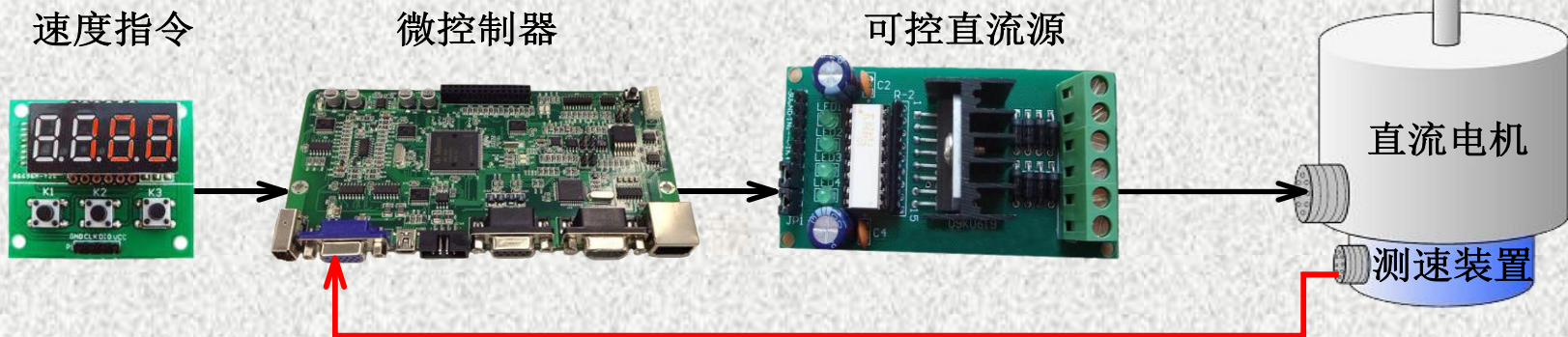




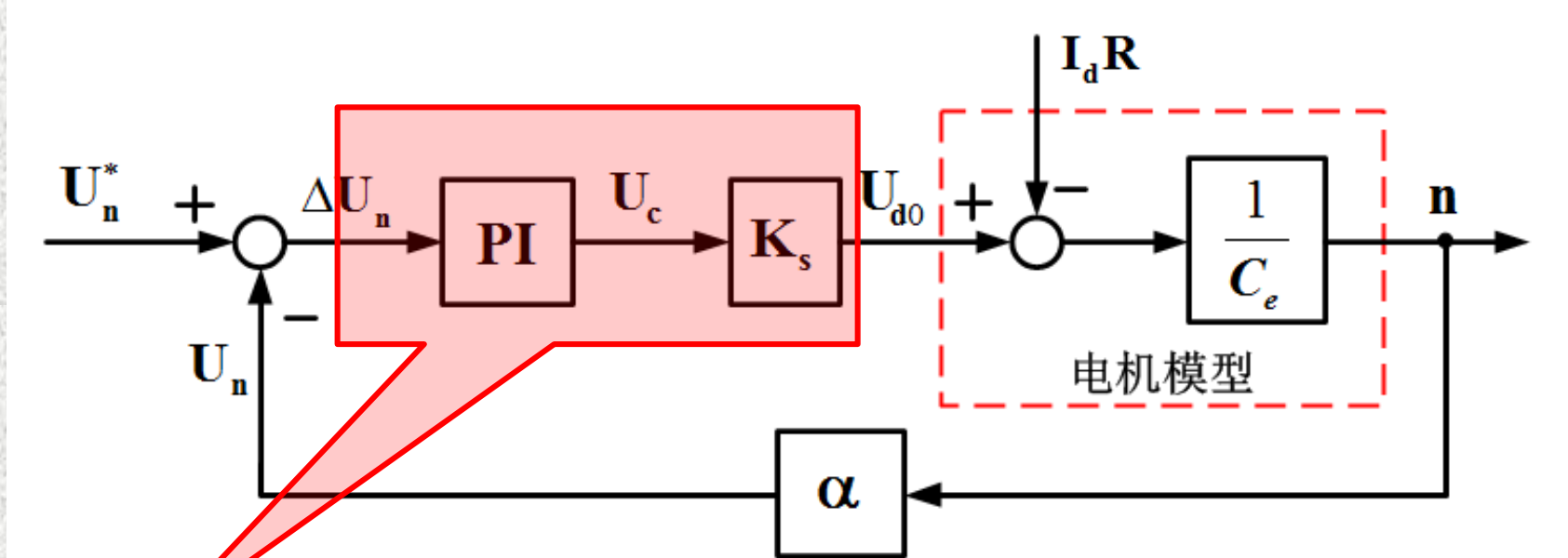
# 开环和闭环的对比实验







闭环系统能大大提高稳速性能的原因是：系统在负载变化时可通过闭环调节使电枢电压自动跟踪负载变化，补偿电枢电流在回路电阻上的压降损失，从而维持转速基本不变。



$$U_{d0} = K_s \left( K_p \Delta U_n + \frac{1}{\tau} \int \Delta U_n dt \right)$$

$\Delta U_n = U_n^* - U_n$   
速度给定与反馈之间的差值

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_s \left( K_p \Delta U_n + \frac{1}{\tau} \int \Delta U_n dt \right) - I_d R}{C_e}$$

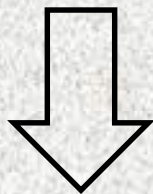
规律:

由于速度调节器的作用， $U_{d0}$ 随着速度偏差的变化而变化，自动实现电枢电阻压降的补偿，保证转速恒定。

## 3.1 有静差转速闭环直流调速系统

问题的提出：

为什么要构造转速闭环调速系统？

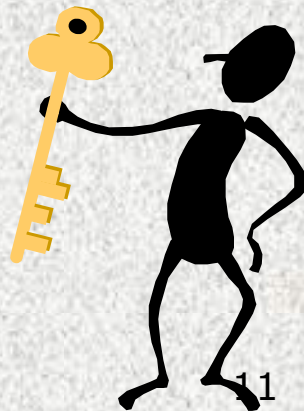


◆ 开环调速系统能够满足性能需求？

答：对稳速精度有一定要求的场合，开环调速系统不能满足性能需求。

◆ 有没有性能更优的控制方案？

答：利用速度反馈，形成速度闭环控制方案。





## 小结：

①为了提高调速系统的速度精度和抗扰能力，有必要引入速度闭环控制方案。

②引入速度闭环，相较于开环系统，增加了算法的复杂性，并且硬件成本有所提高。



# 一、闭环调速系统的组成及静特性

## ■ 静特性:

假定:

1、忽略非线性

2、忽略电源、电位器内阻

电压比较  $\Delta U_n = U_n^* - U_n$

放大器  $U_c = K_p \Delta U_n$

电力电子变换器

$$U_{d0} = K_s U_c$$

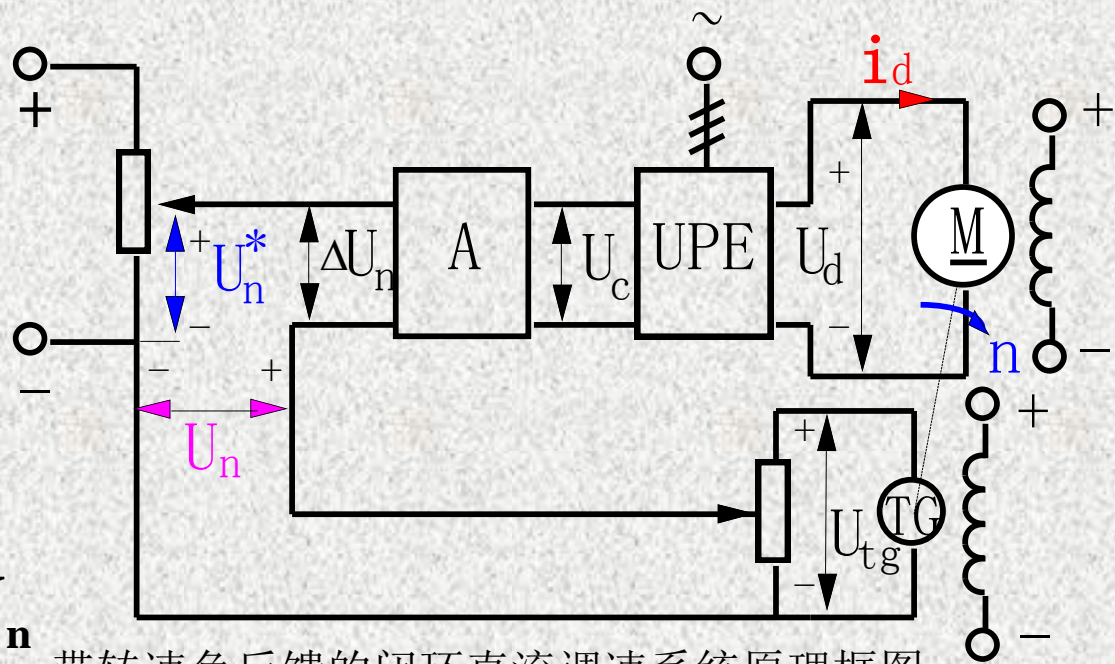
直流电机

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

测速反馈

$U_n = \alpha n, \alpha$ : 转速反馈系数[V·min/r]

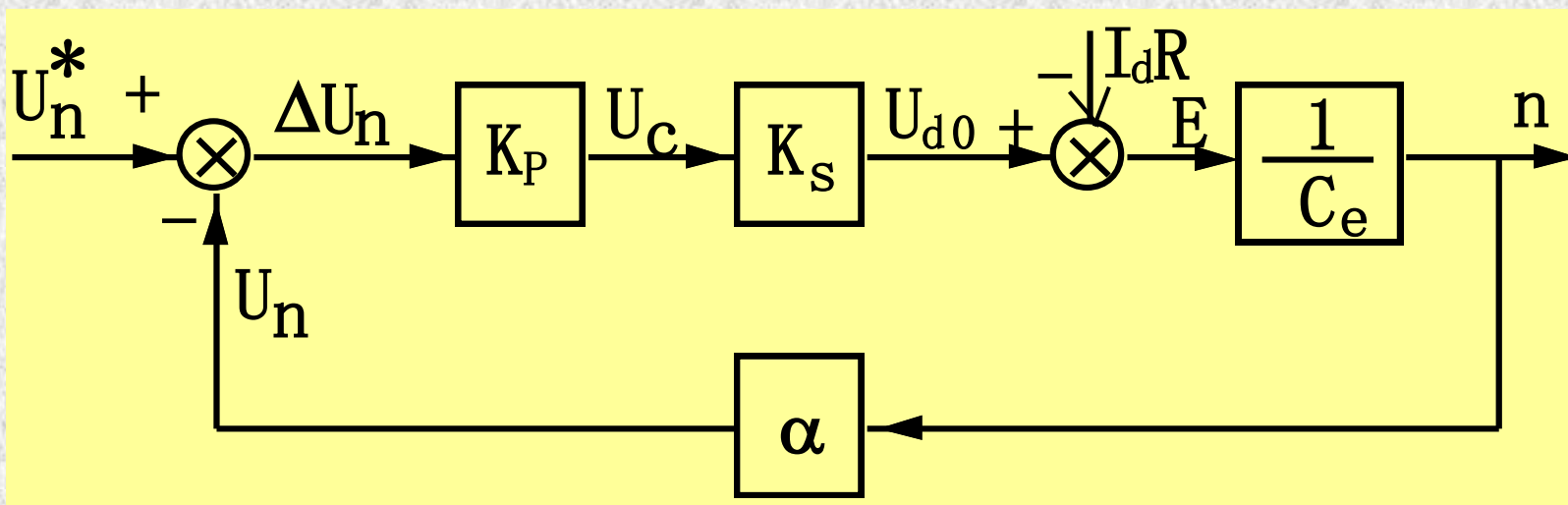
测速发电机的电势常数  
 $\alpha = \alpha_2 \cdot C_{etg}$



带转速负反馈的闭环直流调速系统原理框图

# 静态结构图

$$\Delta U_n = U_n^* - U_n, U_c = K_P \Delta U_n, U_{d0} = K_s U_c, n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}, U_n = \alpha \cdot n$$



$$K = \frac{K_P K_s \alpha}{C_e} \Delta = \text{闭环系统的开环放大系数}$$



# 有静差转速闭环系统的静特性

$$K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e}$$

1) 只考虑给定作用时的闭环系统

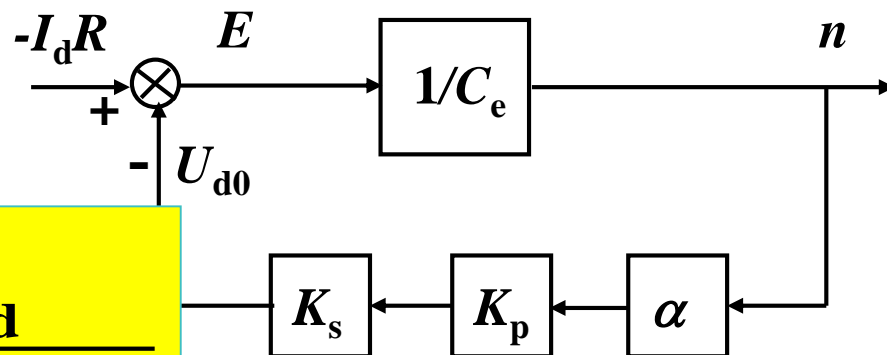
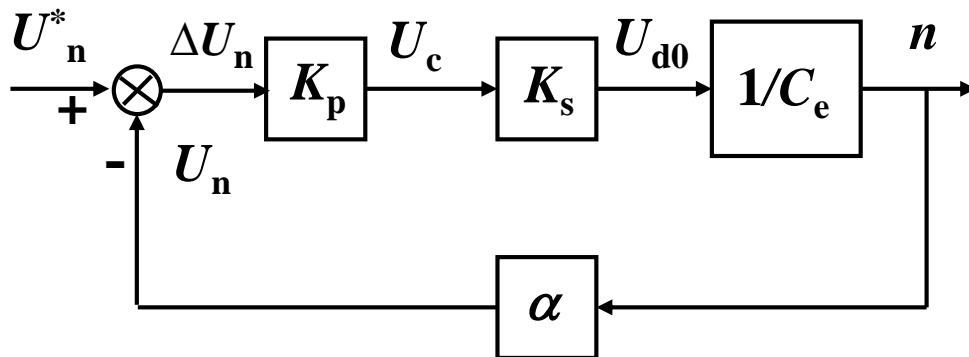
$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)}$$

2) 只考虑扰动作用时的闭环系统

$$n = -\frac{RI_d}{C_e (1 + K)}$$

3) 已假设系统是线性的，把二者叠加起来，即得转速单闭环系统的静特性：

$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{RI_d}{C_e (1 + K)}$$



# 开环机械特性与闭环静特性的关系

## ■ 开环特性

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_P K_s U_n^*}{C_e} - \frac{I_d R}{C_e} = n_{0OP} - \Delta n_{OP}$$

## ■ 闭环静特性

$$n = \frac{K_P K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{I_d R}{C_e (1 + K)} = n_{0CL} - \Delta n_{CL}$$

• 硬度 【在相同负载下两者的速降关系为】

$$\Delta n_{CL} = \frac{\Delta n_{OP}}{1 + K}$$

• 静差率：对相同理想空载转速

$$S_{CL} = \frac{S_{OP}}{1 + K}$$

• 调速范围

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$$

$$D_{CL} = (1 + K) D_{OP}$$

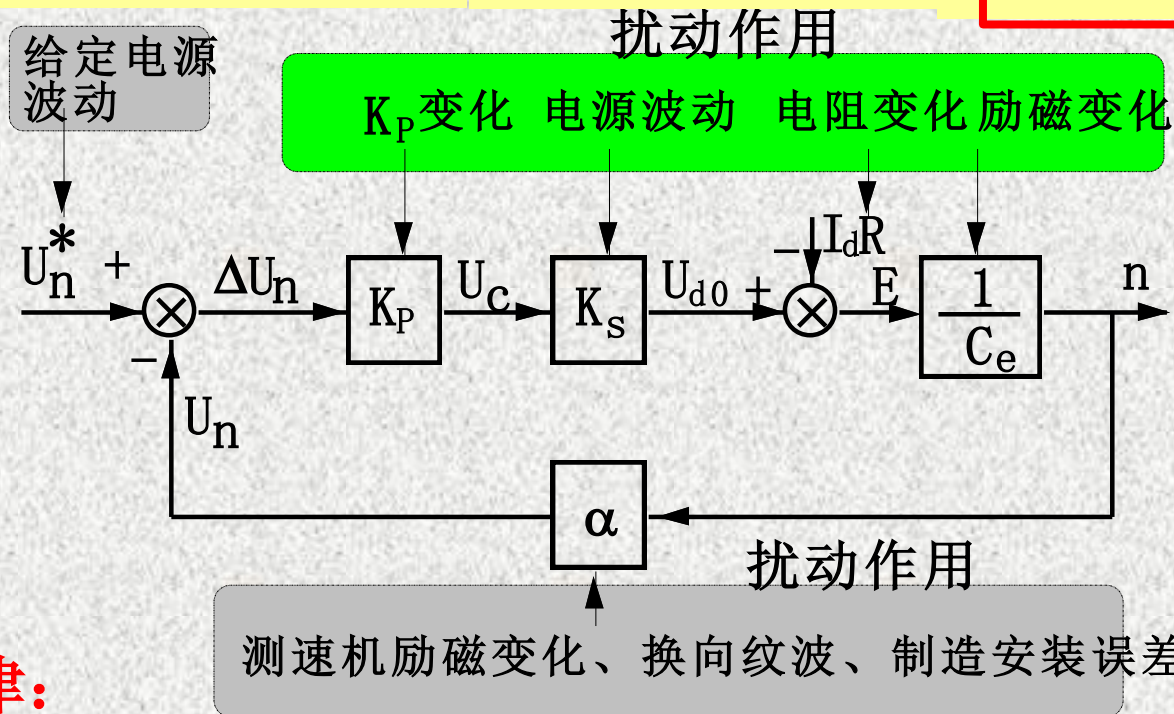
结论：闭环系统硬得多的稳态特性，在保证调速范围的前提下提高了调速范围。

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)}$$

# 比例单闭环反馈控制规律

$$K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e} \gg 1$$

$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1+K)} - \frac{I_d R}{C_e (1+K)} \approx \frac{K_p K_s}{C_e K} U_n^* - \frac{I_d R}{C_e K} = \frac{1}{\alpha} U_n^* - \frac{I_d R}{C_e K}$$



## 控制规律:

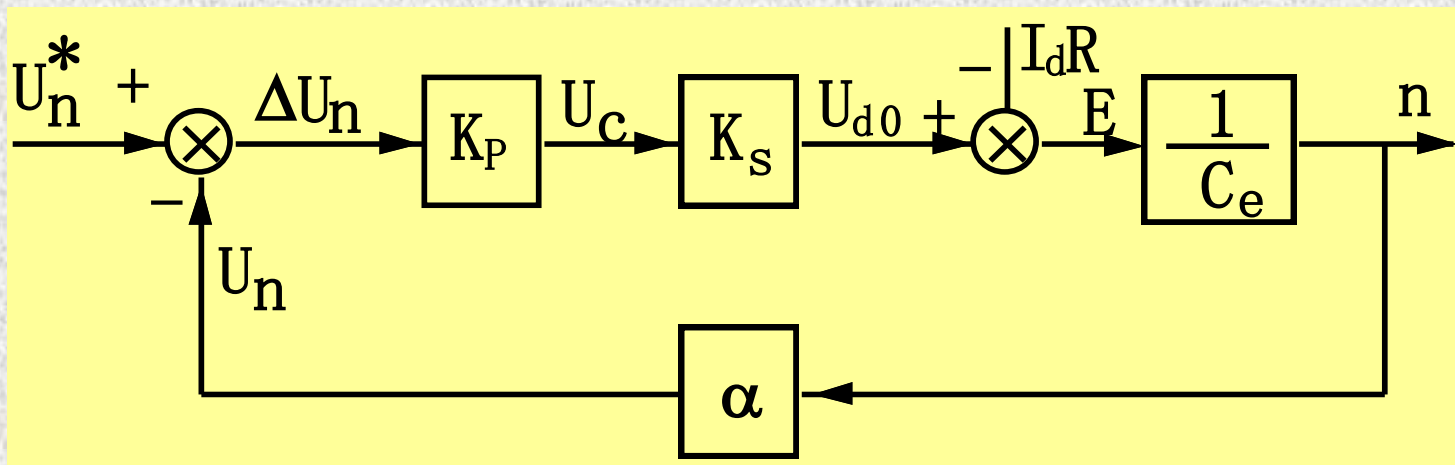
- 1、比例反馈控制系统是有静差的， $K$ 越大，静差越小；
- 2、对作用于前向通道的扰动有较强的抑制作用；
- 3、对作用于给定和反馈通道的扰动无抑制作用，系统精度依赖于给定和反馈精度。

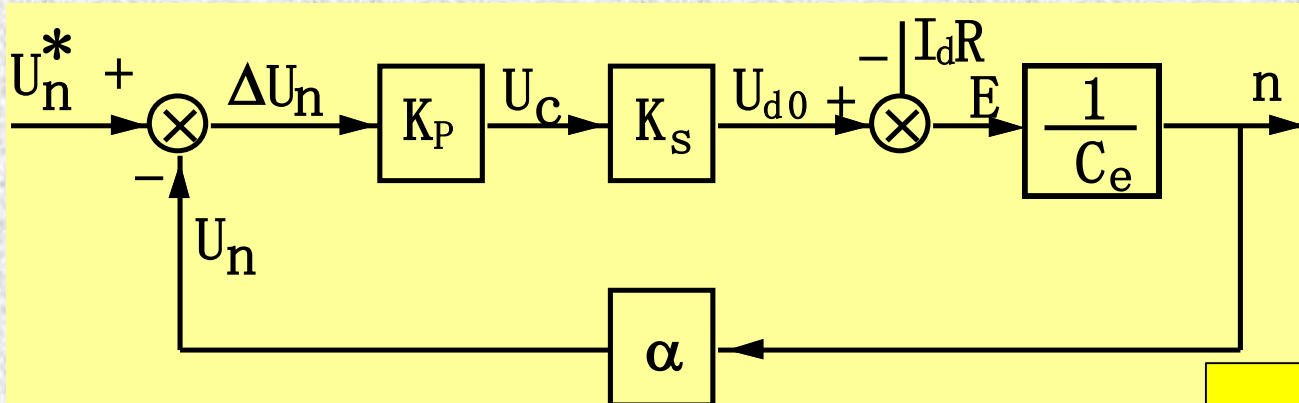


# 稳态参数的计算

表2-2：平均失控时间为1.67ms

- 【例3】V-M系统额定数据为DCM：  
10kW, 220V, 55A, 1000r/min, 电枢电阻 $0.5\Omega$ ;  
晶闸管三相桥式全波可控整流，电压放大系数44；电枢回路总电阻 $1\Omega$ ；永磁直流测速发电机110V, 1900r/min, 转速反馈系数取0.01。
- 要求：D=10,  $s \leq 5\%$ , 计算稳态参数。





■ 注意：电机电势常数计算与电机以外电路参数无关。

解：  $K_s = 44$

$$C_e = \frac{U_N - I_{dN} R_a}{n_N} = \frac{220 - 55 \times 0.5}{1000} = 0.1925 \text{ [V} \cdot \text{min/r]}$$

因  $\alpha = 0.01 = \alpha_2 C_{\text{etg}}$     1000r/min时  $U_n = \alpha n = 10\text{V}$

$$C_{\text{etg}} = \frac{110}{1900} = 0.0579 \text{ [V} \cdot \text{min/r]}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha}{C_{\text{etg}}} = \frac{0.01}{0.0579} \approx 0.173$$

开环额定负载下稳态速降:

$$\Delta n_{\text{op}} = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{55 \times 1}{0.1925} = 285.7 \text{ [r/min]}$$

■ 开环速降与电枢回路参数有关。

指标要求的闭环额定负载下稳态速降:

$$\Delta n_{\text{cl}} = \frac{n_N s}{D(1-s)} \leq \frac{1000 \times 0.05}{10(1-0.05)} = 5.26 \text{ r/min}$$

所以, 闭环系统应有的开环放大系数:

$$K \geq \frac{\Delta n_{\text{op}}}{\Delta n_{\text{cl}}} - 1 = \frac{285.7}{5.26} - 1 = 53.3$$



## 运算放大器比例放大系数

$$K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e}$$

$$K_p = \frac{K}{\alpha K_s / C_e} \geq \frac{53.3 \times 0.1925}{0.01 \times 44} = 23.34 \approx 24$$

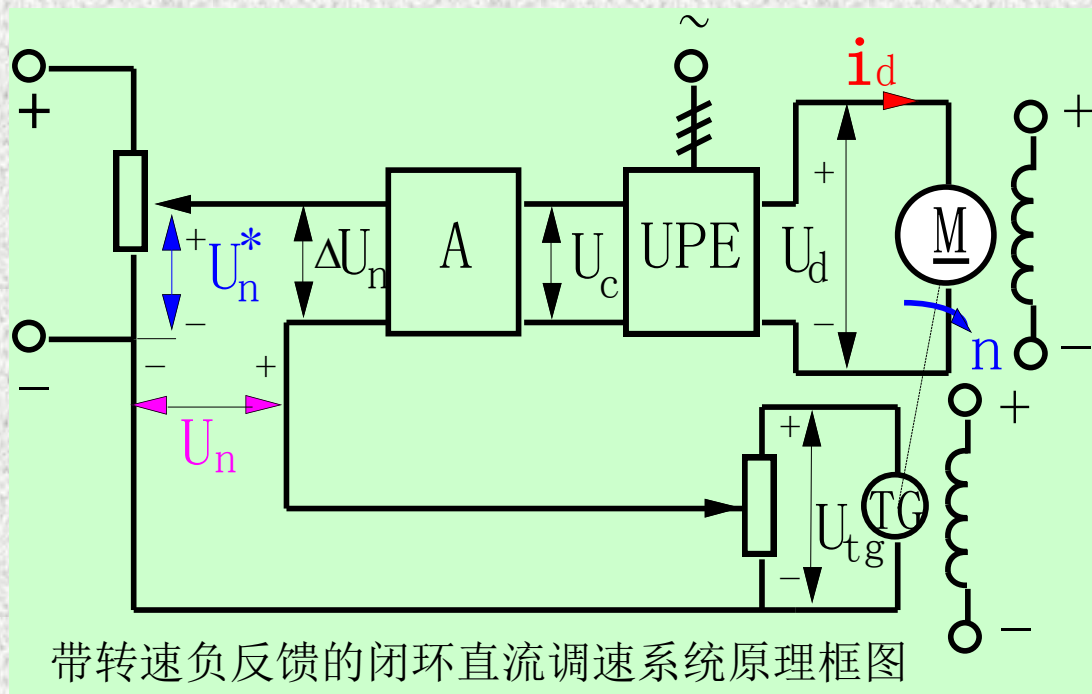
设输入电阻为10K，则比例电阻为240K。

## 二、闭环调速系统的动态模型和分析

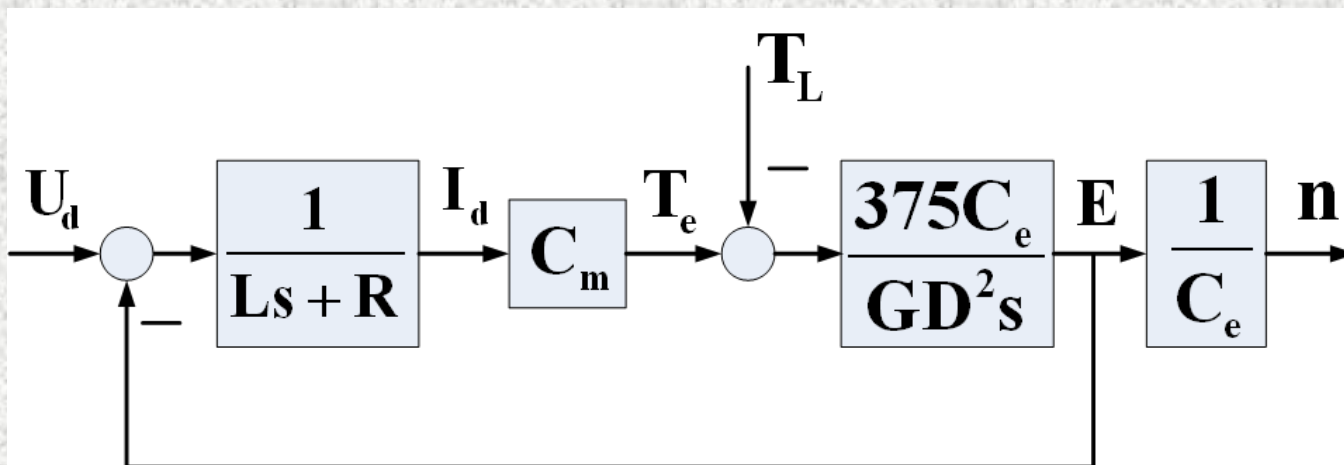
### 1、电力电子变换器：

$$G_s(s) \approx \frac{K_s}{T_s s + 1}$$

$$\omega_c \leq \frac{1}{3T_s}$$



## 2、直流电机的动态模型

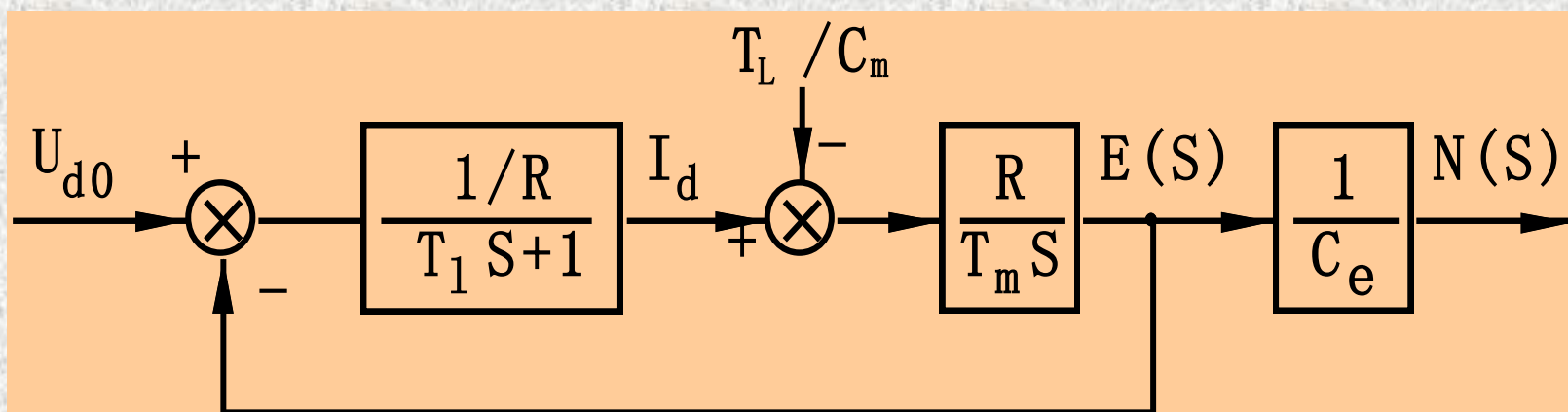


电枢回路的电磁  
时间常数:

$$T_l = \frac{L}{R}$$

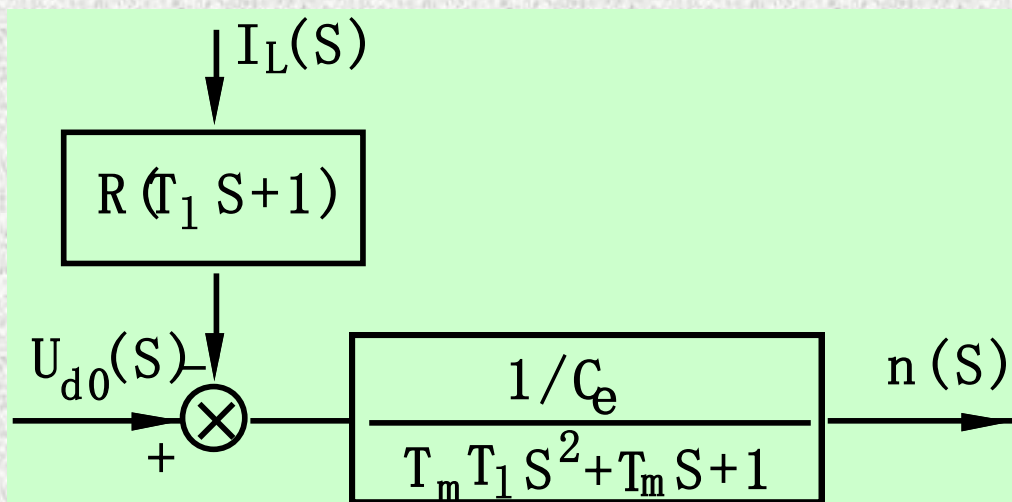
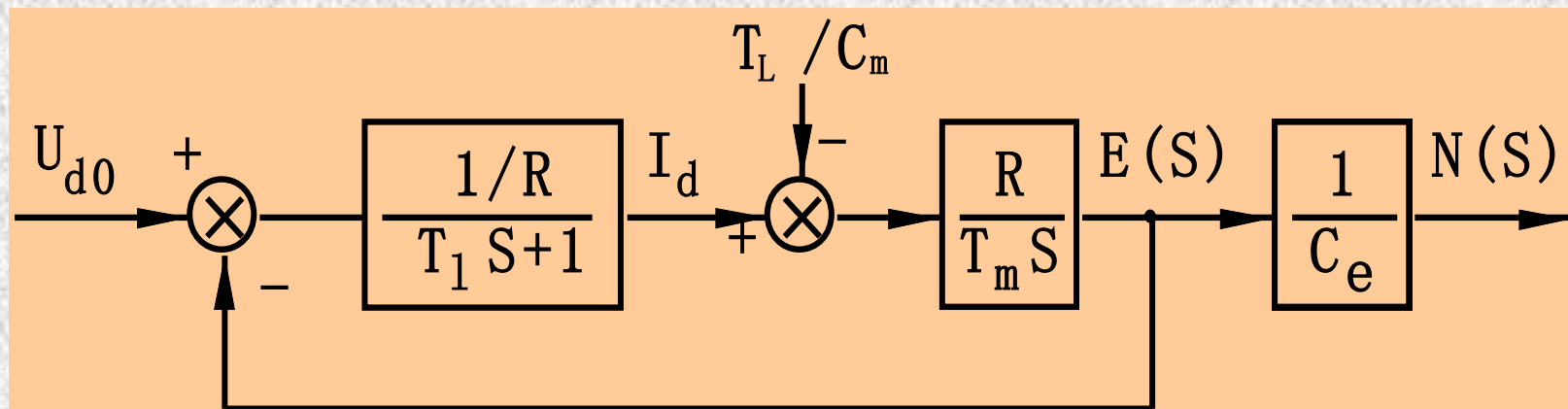
电机拖动系统的  
机电时间常数:

$$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$$





# 直流电机结构图变换



直流电动机的动态结构图的变换

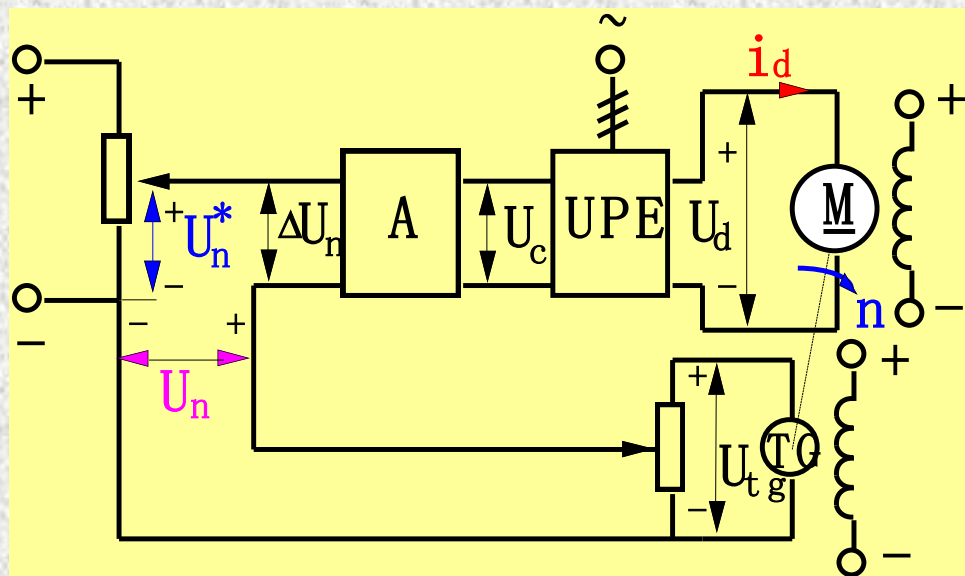
$$\xi > 1 \Rightarrow T_m > 4T_1$$

过阻尼二阶系统

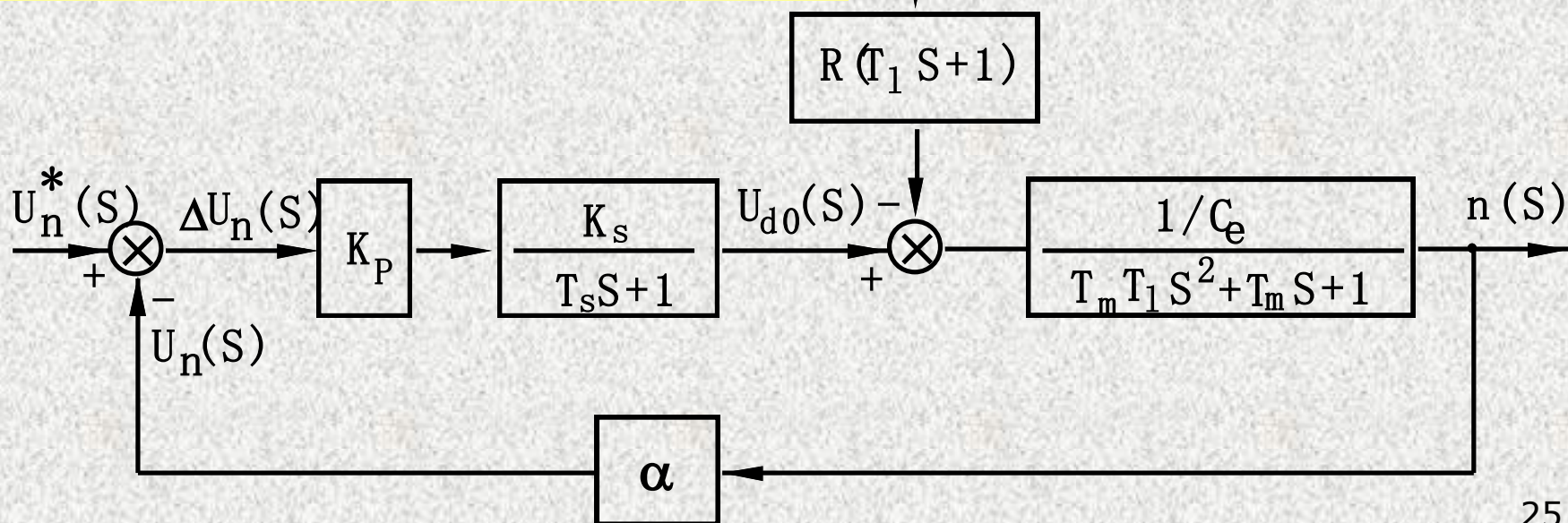
$$\xi < 1 \Rightarrow T_m < 4T_1$$

欠阻尼二阶系统

### 3、单转速闭环比例型直流调速系统动态结构图



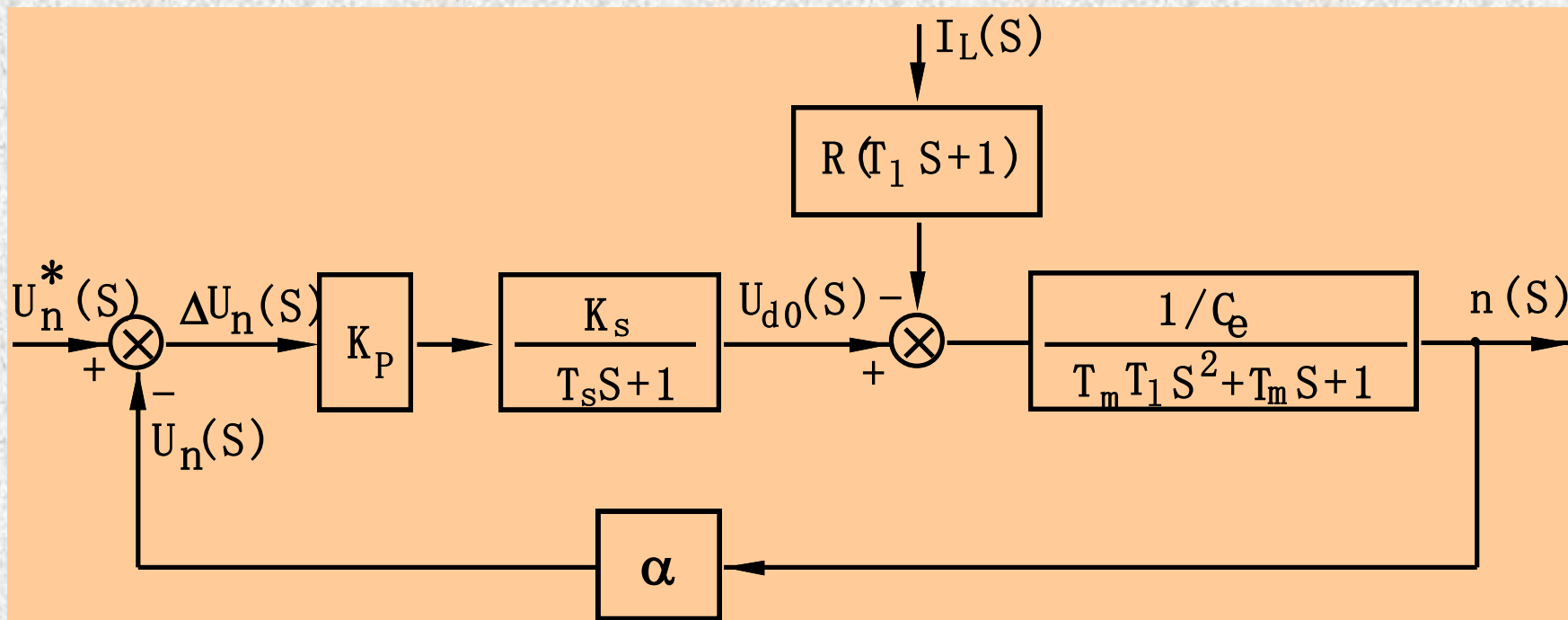
$I_L(S)$  等效负载电流



## 4、系统开环传递函数（对给定而言）

$$W(s) = \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}$$

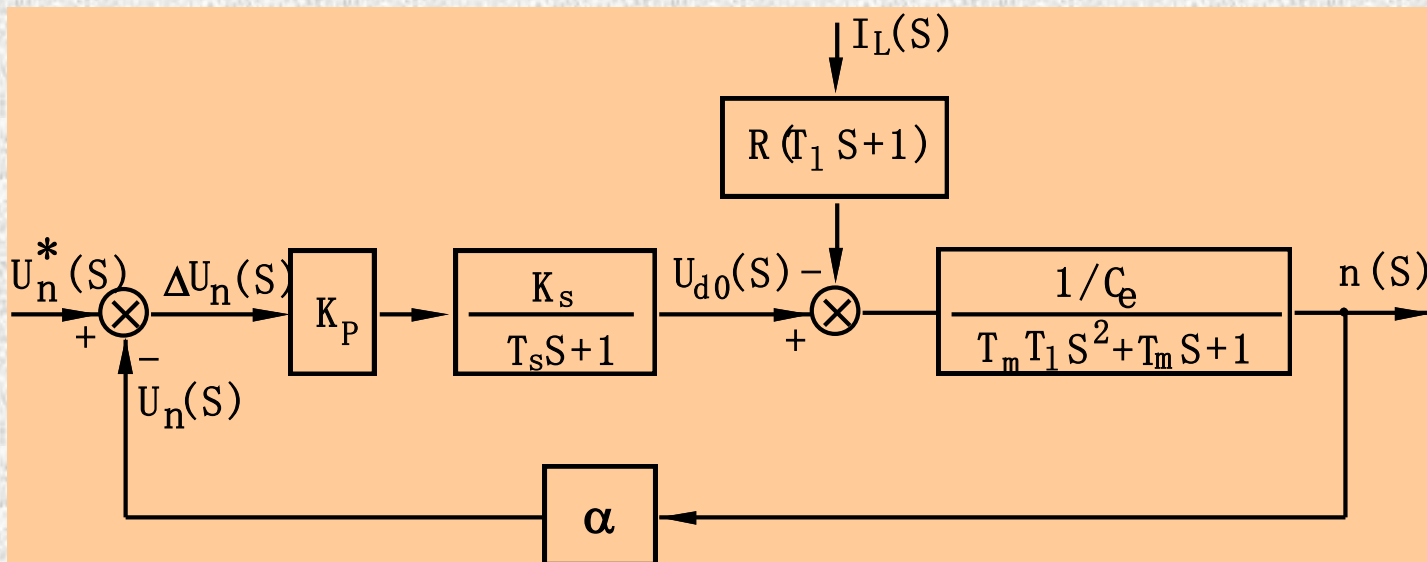
$$K = K_P K_s \alpha / C_e$$





## 5、对给定的闭环传递函数

$$\begin{aligned}
 W_{cl}(S) &= \frac{n(S)}{U_n^*(S)} = \frac{\frac{K_p K_s / C_e}{(T_s S + 1)(T_m T_l S^2 + T_m S + 1)}}{1 + \frac{K_p K_s \alpha / C_e}{(T_s S + 1)(T_m T_l S^2 + T_m S + 1)}} \\
 &= \frac{K_p K_s / C_e}{(T_s S + 1)(T_m T_l S^2 + T_m S + 1) + K} \\
 &= \frac{\frac{K_p K_s}{C_e (1 + K)}}{\frac{T_m T_l T_s}{1 + K} S^3 + \frac{T_m (T_l + T_s)}{1 + K} S^2 + \frac{T_m + T_s}{1 + K} S + 1}
 \end{aligned}$$



闭环特征方程为:

$$\frac{T_m T_l T_s}{1+K} S^3 + \frac{T_m (T_l + T_s)}{1+K} S^2 + \frac{T_m + T_s}{1+K} S + 1 = 0$$

根据劳斯判据:

$$a_0 S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + a_3 = 0$$

系统稳定的充分必要条件是:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$$

$$\therefore \frac{T_m (T_l + T_s)}{1+K} \frac{(T_m + T_s)}{1+K} - \frac{T_m T_l T_s}{1+K} > 0$$

## 闭环系统稳定条件

- 由**Routh**判据，稳定条件为系统开环放大系数**K**:

$$K = K_p K_s \alpha / C_e < \frac{T_m (T_l + T_s) + T_s^2}{T_l T_s}$$

失控时间

或:

$$K < \frac{T_m}{T_s} + \frac{T_m}{T_l} + \frac{T_s}{T_l}$$

则速度调节器放大系数**K<sub>p</sub>**:

$$\therefore K_p < \left( \frac{T_m}{T_s} + \frac{T_m}{T_l} + \frac{T_s}{T_l} \right) \frac{C_e}{K_s \alpha}$$

# 稳定性分析

【例 3】V-M 系统额定数据为 DCM :  
10kW, 220V, 55A, 1000r/min, 电枢电阻 $0.5\Omega$ ;

晶闸管三相桥式全波可控整流, 电压放大系数44; 电枢回路总电阻 $1\Omega$ ; 永磁直流测速发电机110V, 1900r/min。

- 要求:  $D=10$ ,  $s \leq 5\%$ , 计算稳态参数。  $K_p \geq 24$
- 已知电磁时间常数为 $0.017s$ , 机电时间常数为 $0.075s$ , 判断系统的稳定性。

$$K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e} < \frac{T_m}{T_s} + \frac{T_m}{T_l} + \frac{T_s}{T_l}$$



# 稳定性分析

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{K}_p \mathbf{K}_s \alpha}{C_e} < \frac{T_m}{T_s} + \frac{T_m}{T_l} + \frac{T_s}{T_l}$$

已知：  $\because \mathbf{K}_s = 44, \alpha = 0.01, C_e = 0.1925$

$$T_l = 0.017s, T_m = 0.075s, T_s = 0.00167s$$

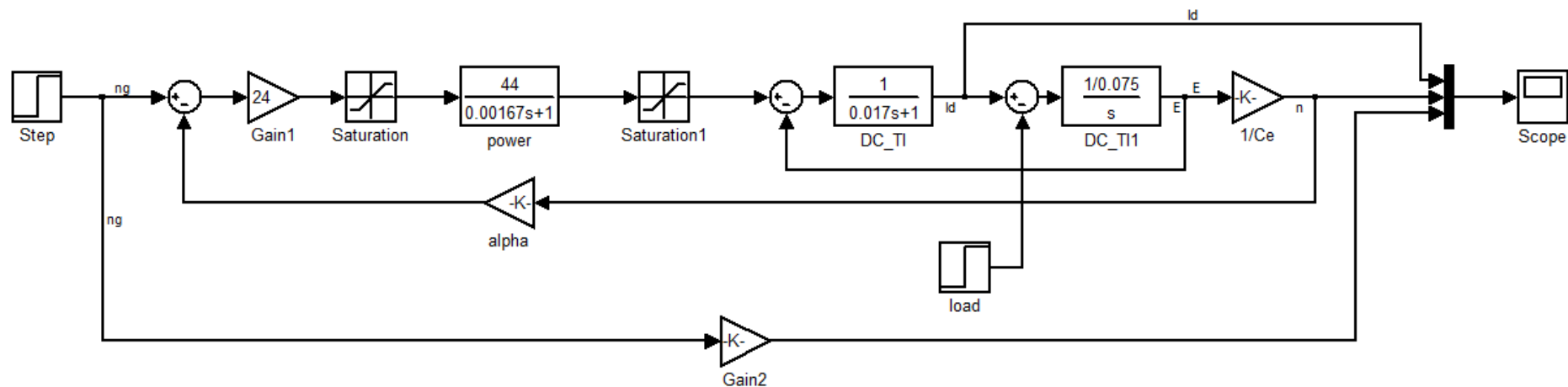
$$\therefore \mathbf{K} < \frac{T_m}{T_s} + \frac{T_m}{T_l} + \frac{T_s}{T_l} \approx 49.4$$

$$\therefore \mathbf{K}_p = \frac{\mathbf{K} C_e}{\mathbf{K}_s \alpha} < 21.6$$

**所以，这样的比例控制系统的动态稳定性和稳态性能要求是矛盾的。**

# 比例单闭环Matlab仿真

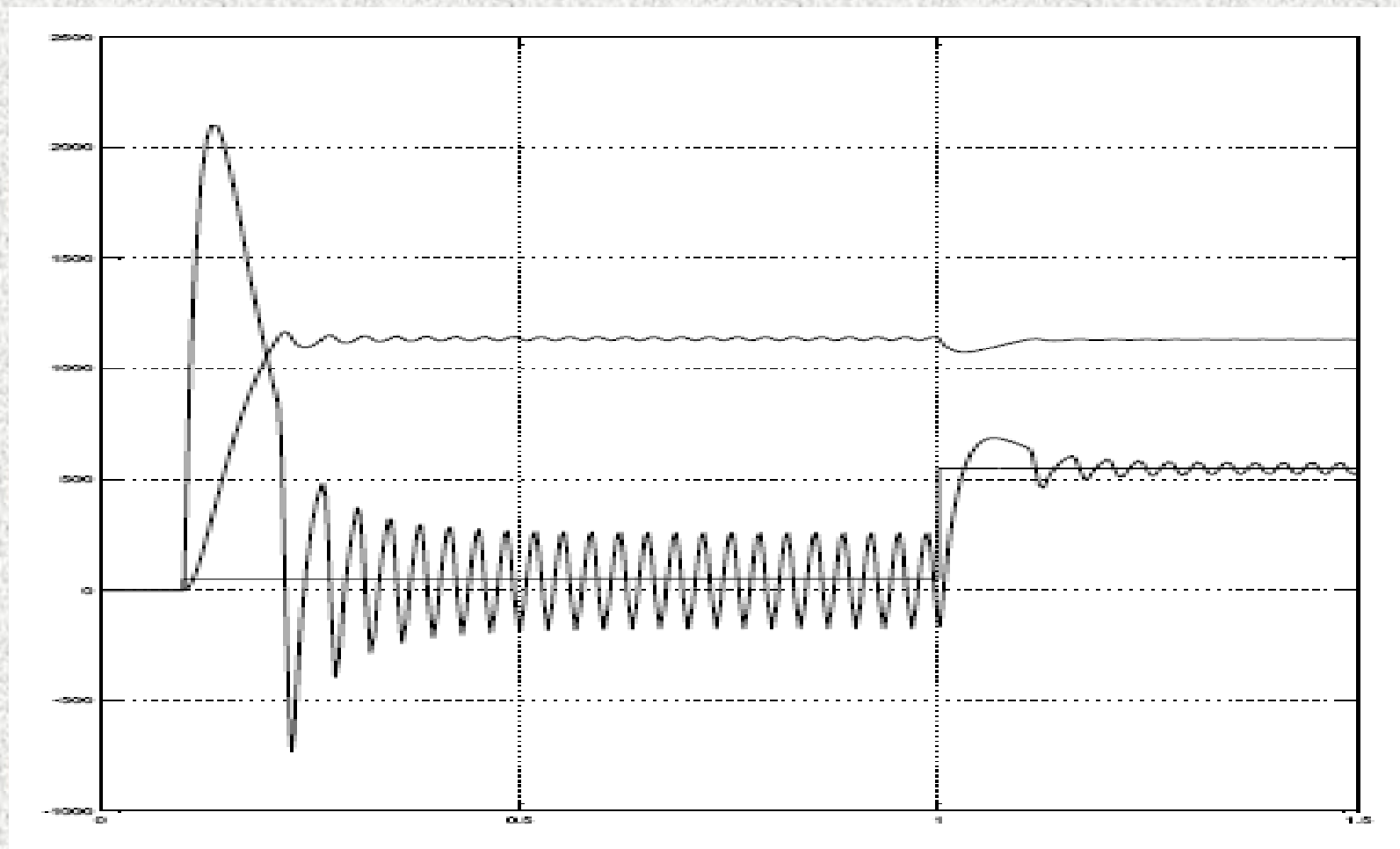
## ■ 无电流限制的比例单闭环调速系统仿真



## 比例单闭环仿真

思考：  
为什么启动电流这么大？

- 电流尖峰=180A>>额定电流55A



# 第3章 转速单闭环控制直流调速系统

3.1 有静差转速闭环直流调速系统（比例单环）

3.2 带电流截止负反馈的直流调速系统（比例单环） ✓

3.3 比例积分控制规律和无静差调速系统（PI单环）



# 限流保护—电流截止负反馈

**1、问题的提出：启动、严重过载、堵转**  
——过流损坏功率器件

$$\left\{ \begin{array}{l} U = E_a + I_a R + L \frac{dI_a}{dt} \\ T = T_L + J \frac{d\Omega}{dt} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \\ E_a = K_e \phi n \quad \text{if } \phi = c = C_e n \\ T = K_T \phi I_a \quad \text{if } \phi = c = C_T I_a \end{array} \right.$$

