

第4章 转速、电流双闭环直流调速系统

4.1 双闭环调速系统的组成及静特性 ✓

4.2 双闭环调速系统的数学模型与动态过程分析

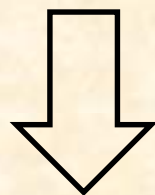
4.3 调节器的工程设计方法

4.4 双闭环调速系统的工程设计方法

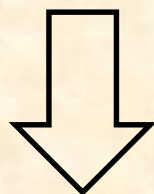
4.1 转速电流双闭环调速系统

直流电机调速方案：

开环调速



转速单闭环调速



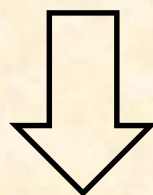
电流截止负反馈转速单闭环调速



4.1 转速电流双闭环调速系统

一、问题的提出：

为什么要构造双闭环调速系统？



电流截止负反馈调速系统能够满足性能需求？

电机理想的起动过程应该是什么样？

快！

$$\boxed{T_e} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad \Rightarrow \quad C_m (\boxed{I_d} - I_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

- 理想起动过程波形如图，起动电流呈方形波，转速按线性增长。这是在最大电流（转矩）受限制时调速系统所能获得的最快的起动过程，称为**准时间最优控制**。

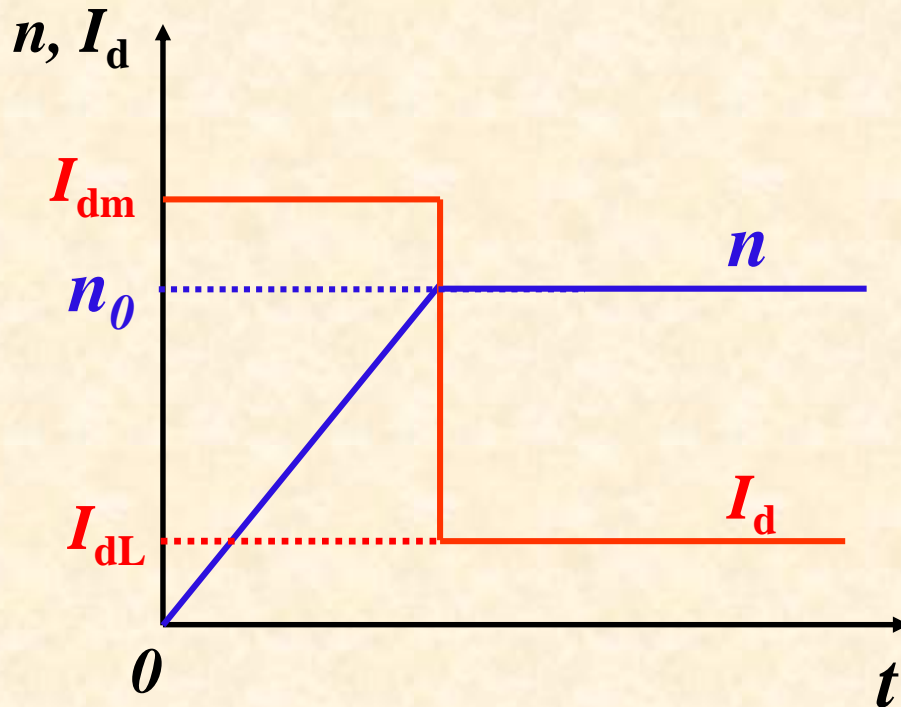
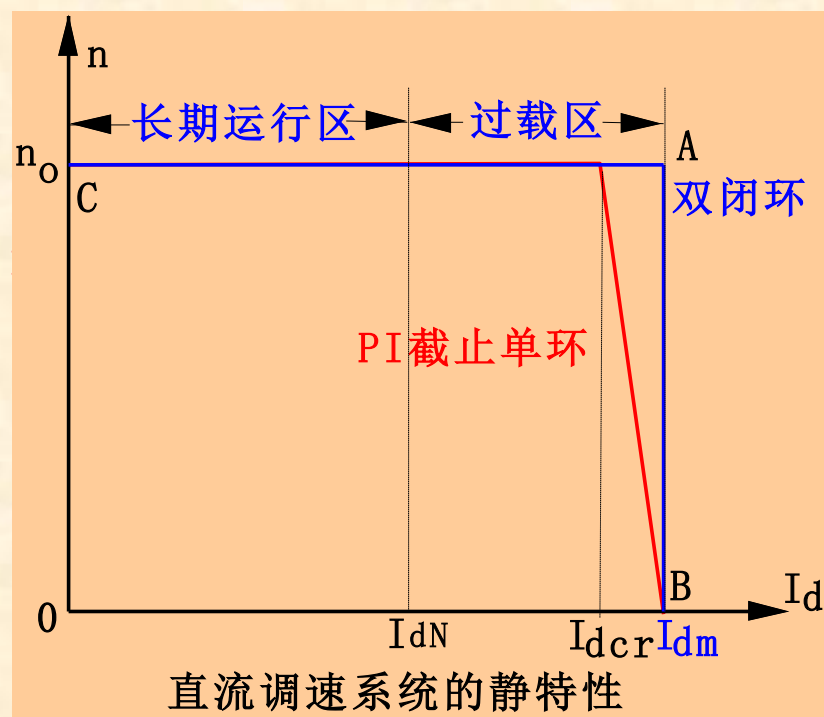
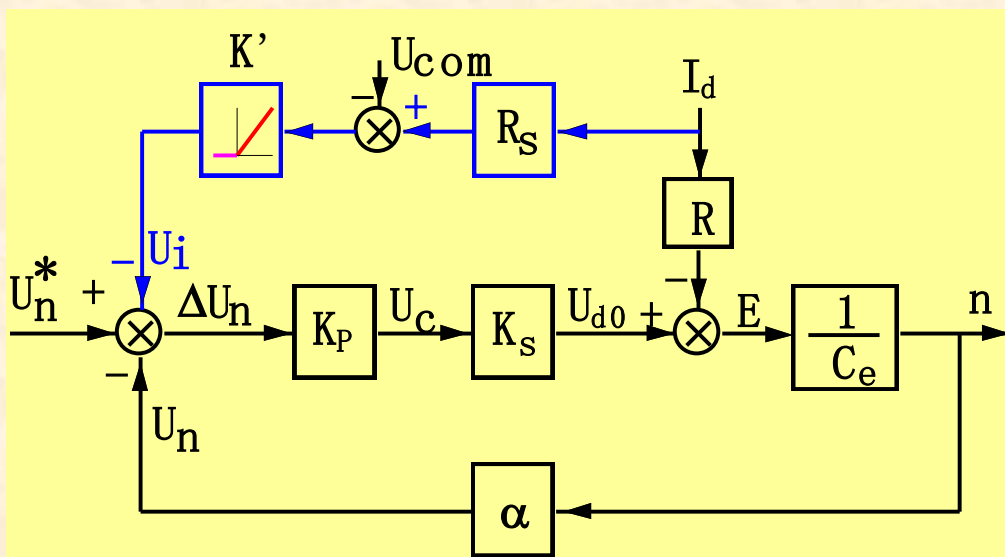


图1 电机的理想起动过程

电流截止负反馈调速系统能行吗？

电流截止转速单环系统的缺陷：

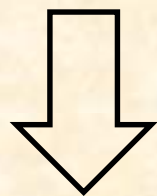
共用1个调节器，起动时，控制器力图使转速指令、转速反馈和电流反馈共同形成的偏差等于0。随转速的不断上升，电流必不断相应减小，使起动时不能保持电流恒为最大允许值，起动时间长，动态性能差。



4.1 转速电流双闭环调速系统

一、问题的提出：

为什么要构造双闭环调速系统？



◆ 电流截止负反馈调速系统能够满足性能需求？

答：电流截止负反馈调速系统无法最大程度发挥直流电机的动态性能。

◆ 有没有性能更优的控制方案？

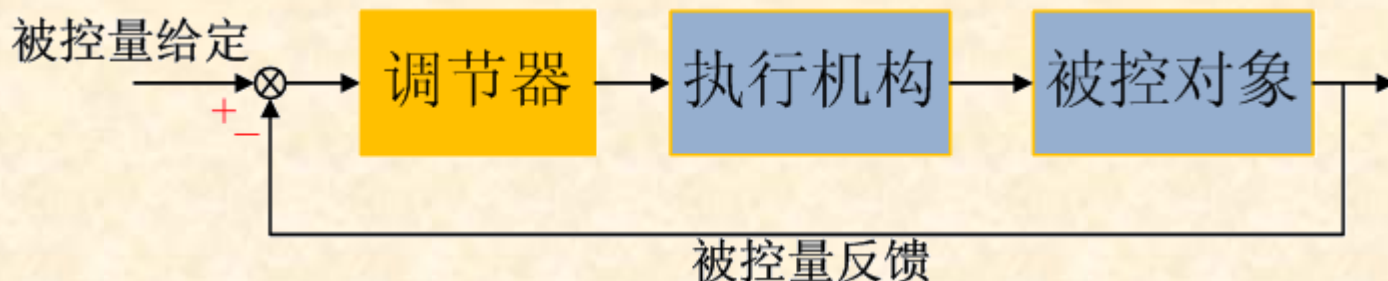


解决思路

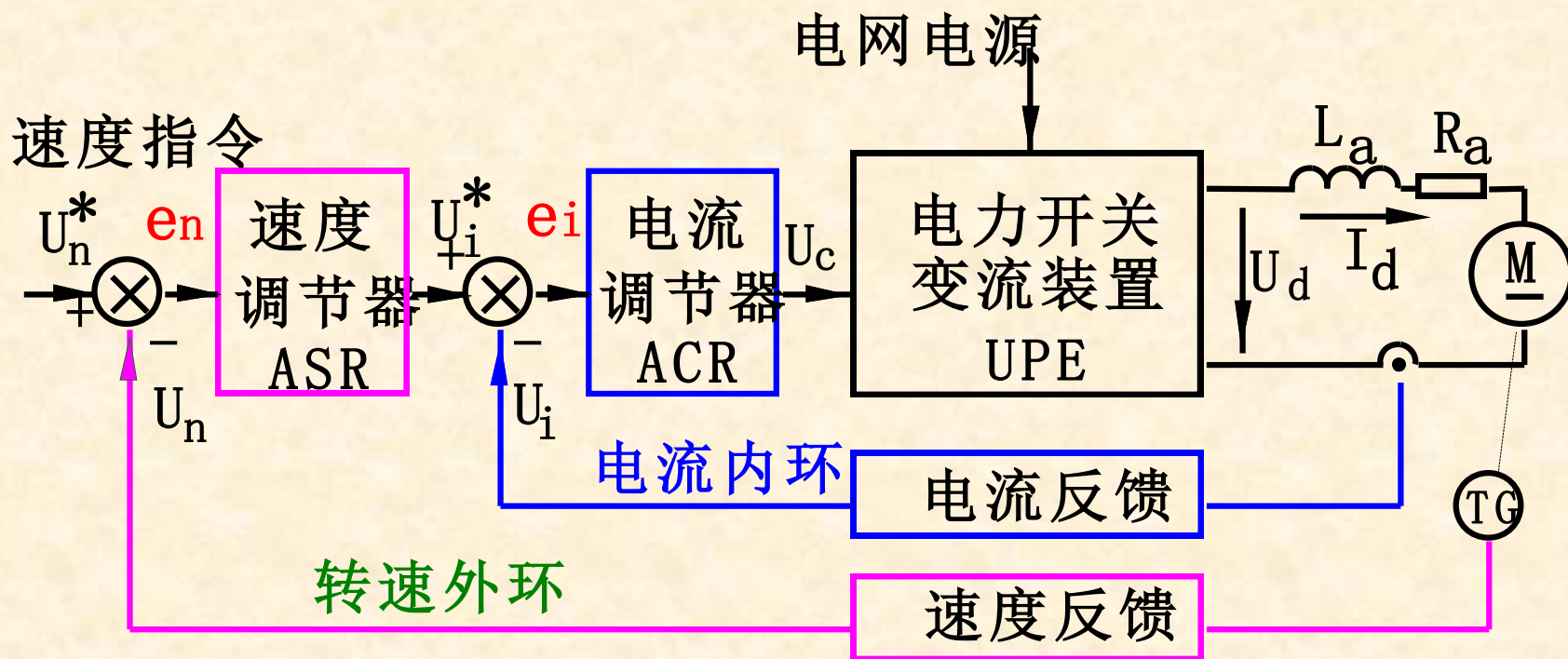
为了实现在允许条件下的最快起动，关键是要获得一段使电流保持为最大值 I_{dm} 的恒流过程。

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，采用电流负反馈应该能够得到近似的恒流过程。

所以，不但转速闭环，电流也闭环。



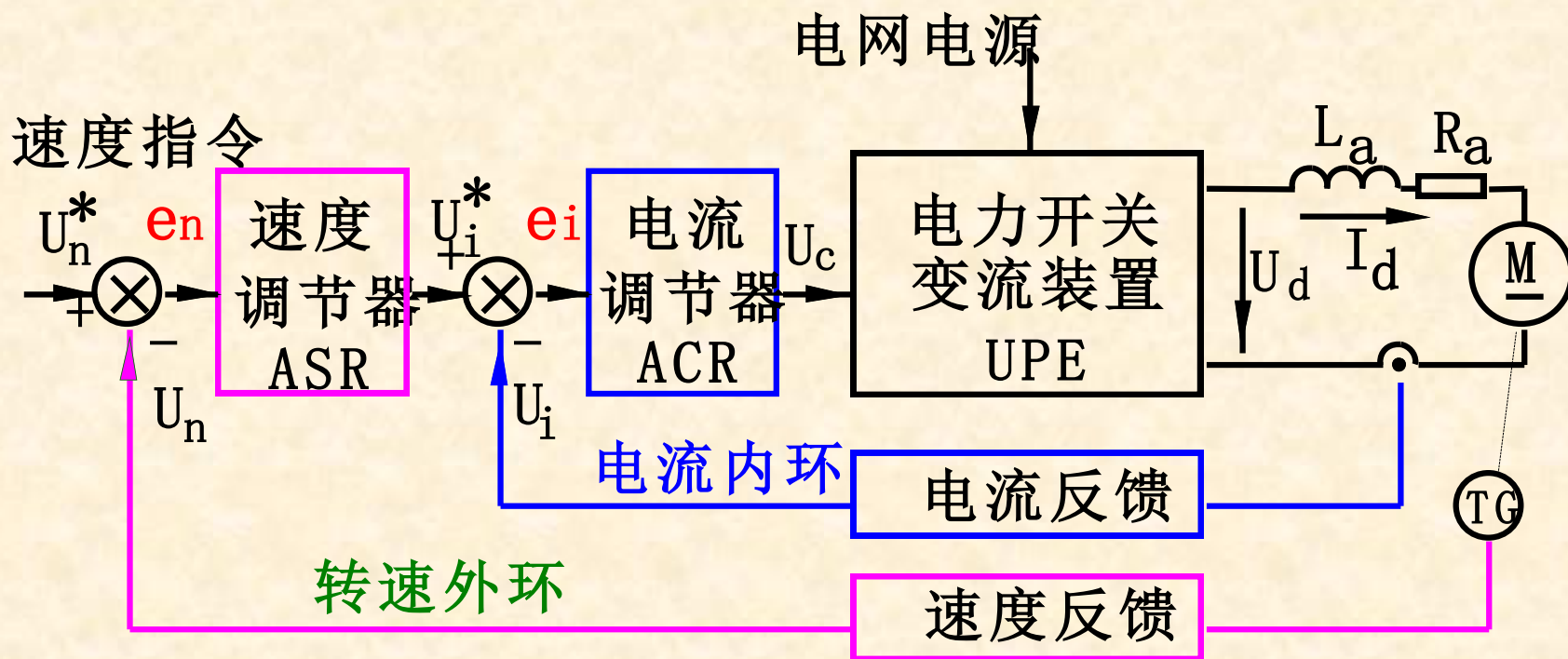
系统组成



双环直流调速系统的一般结构

- 问题1: 两个调节器的限幅值怎么选取?
- 问题2: 为什么电流环在内环, 转速环在外环?
- 问题3: 电流内环什么时候是恒值控制? 什么时候是随动控制?

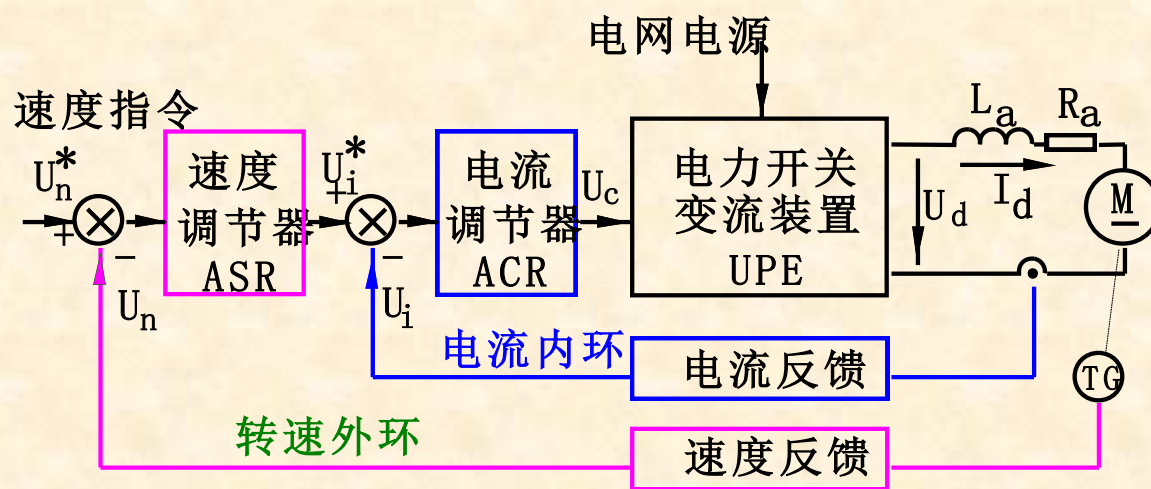
系统组成



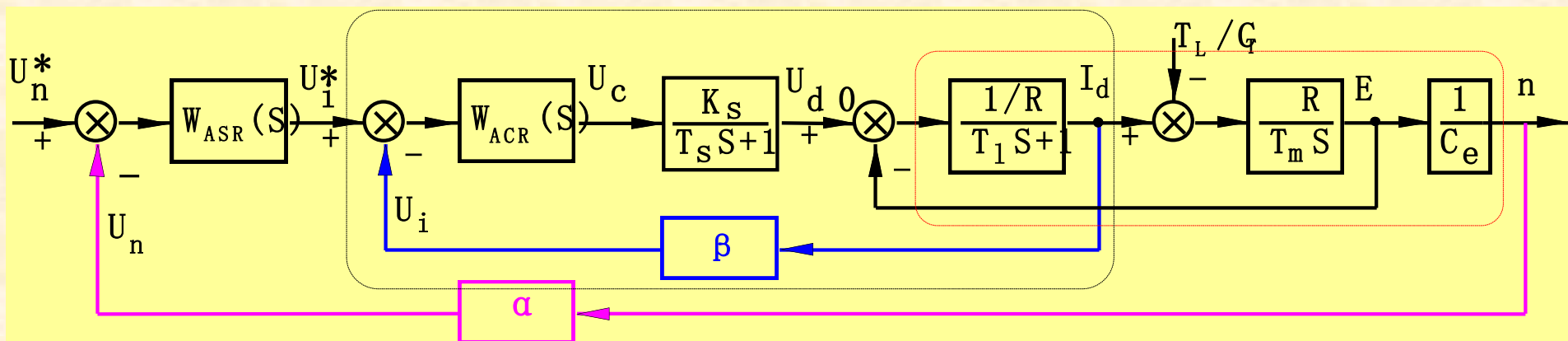
双环直流调速系统的一般结构

问题4：双闭环系统如何实现最大电流启动？

问题5：严重过载时，双闭环系统如何进行限流保护以实现理想挖土机特性？



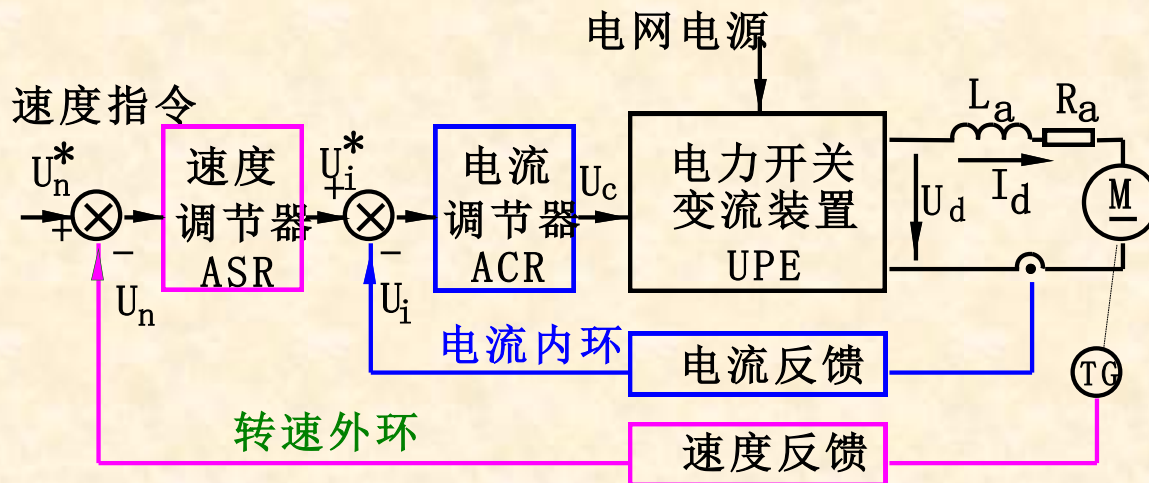
双环直流调速系统的一般结构



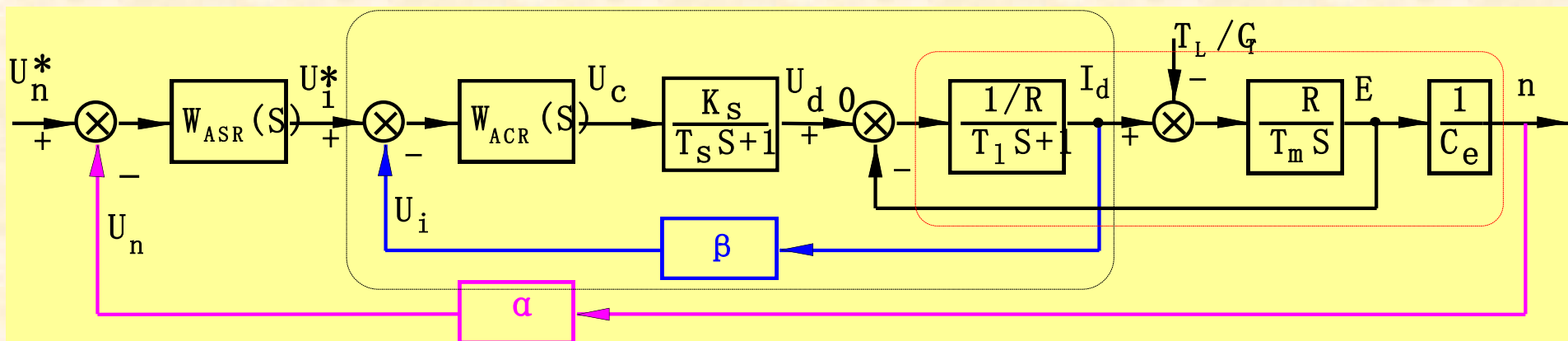
双环系统动态结构图

问题6：启动和严重过载时，速度调节器都饱和，电流环都工作在恒值控制模式，两者有什么区别？

问题7：启动过程中电流调节器能不能饱和？

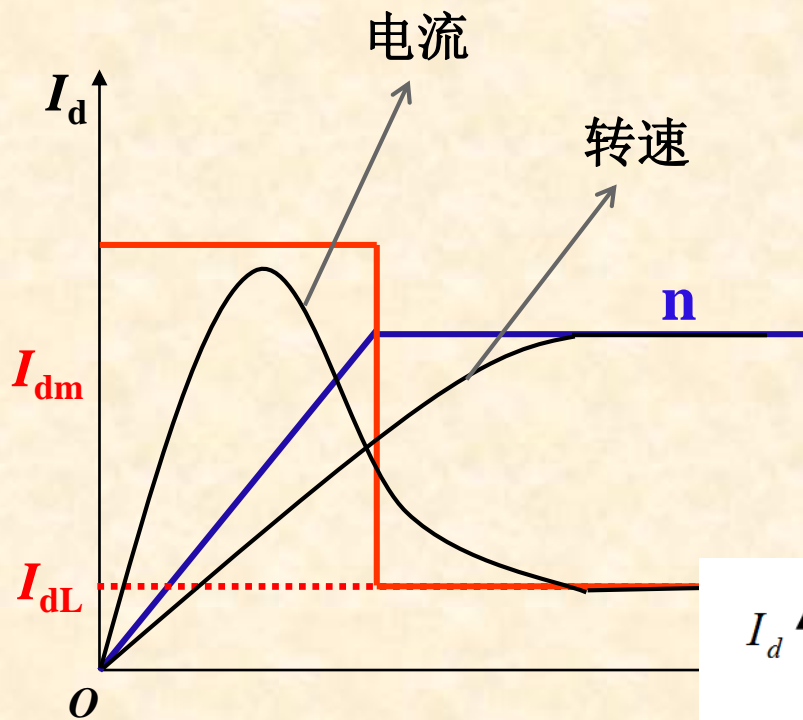


双环直流调速系统的一般结构



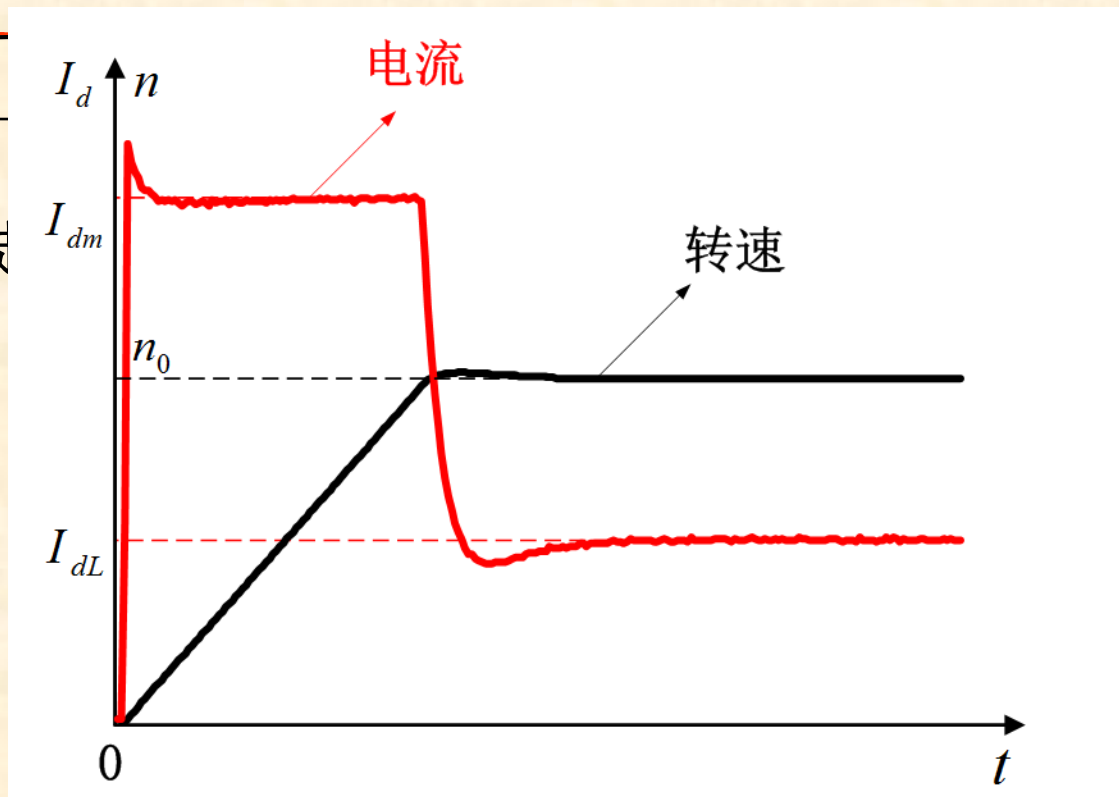
双环系统动态结构图

问题8：启动过程中，电流环输出做不到无静差，为什么？



双闭环调速系统的起动过程

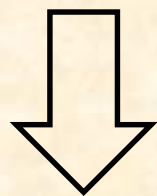
电流截止闭环调速系统的起



4.1 双闭环调速系统的组成及静特性

一、问题的提出：

为什么要构造双闭环调速系统？



◆ 电流截止负反馈调速系统能够满足性能需求？

答：电流截止负反馈调速系统无法最大程度发挥直流电机的动态和静态性能。

◆ 有没有性能更优的控制方案？

答：有，可以采用转速、电流双闭环调速方案。



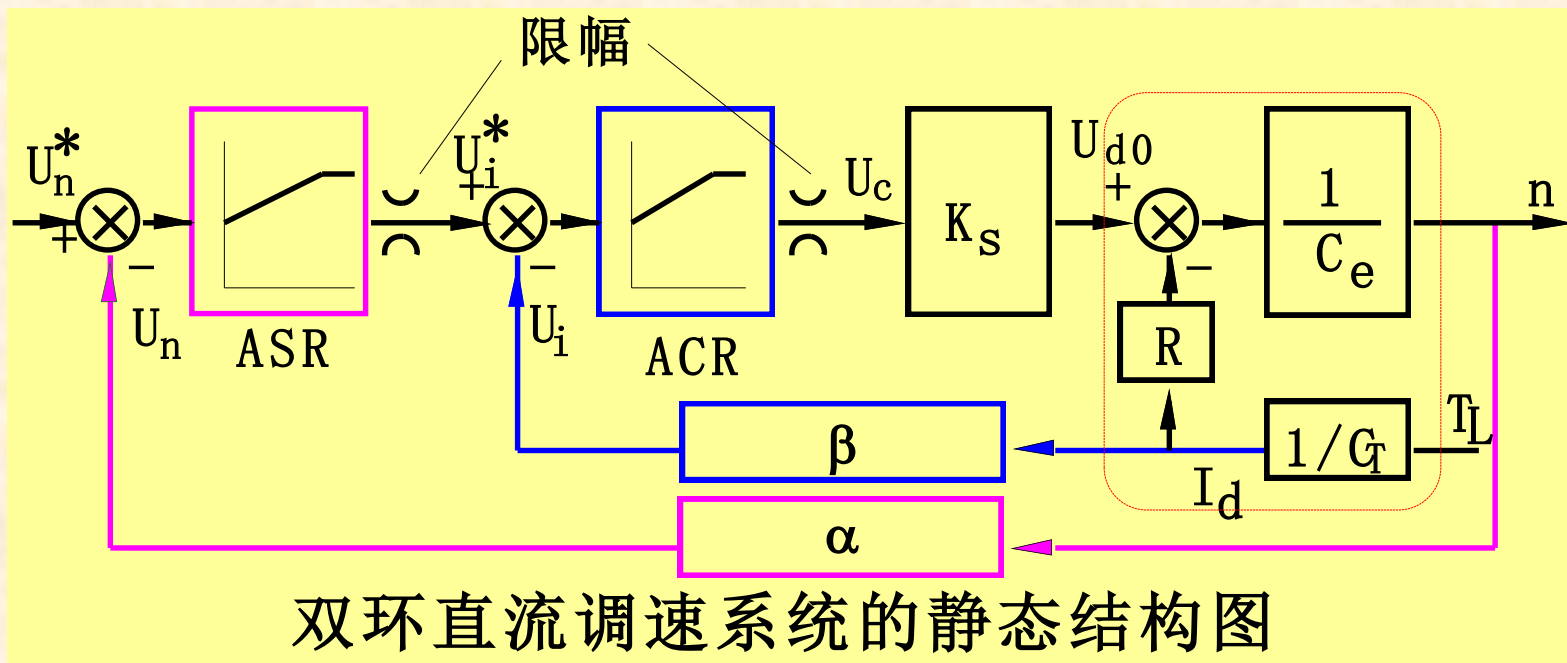
小结：

①为了进一步提高调速系统的动态性能，有必要引入速度、电流双闭环控制方案。

②引入电流内环，提高了电流控制的性能，但同时也大大增加了算法的复杂性，并且硬件成本有所提高。



二、稳态结构图与静特性



- 转速调节器ASR的输出限幅电压 U_{im}^* 决定了电流给定电压的最大值；
- 电流调节器ACR的输出限幅电压 U_{cm} 限制了电力电子变换器的最大输出电压 U_{dm} 。

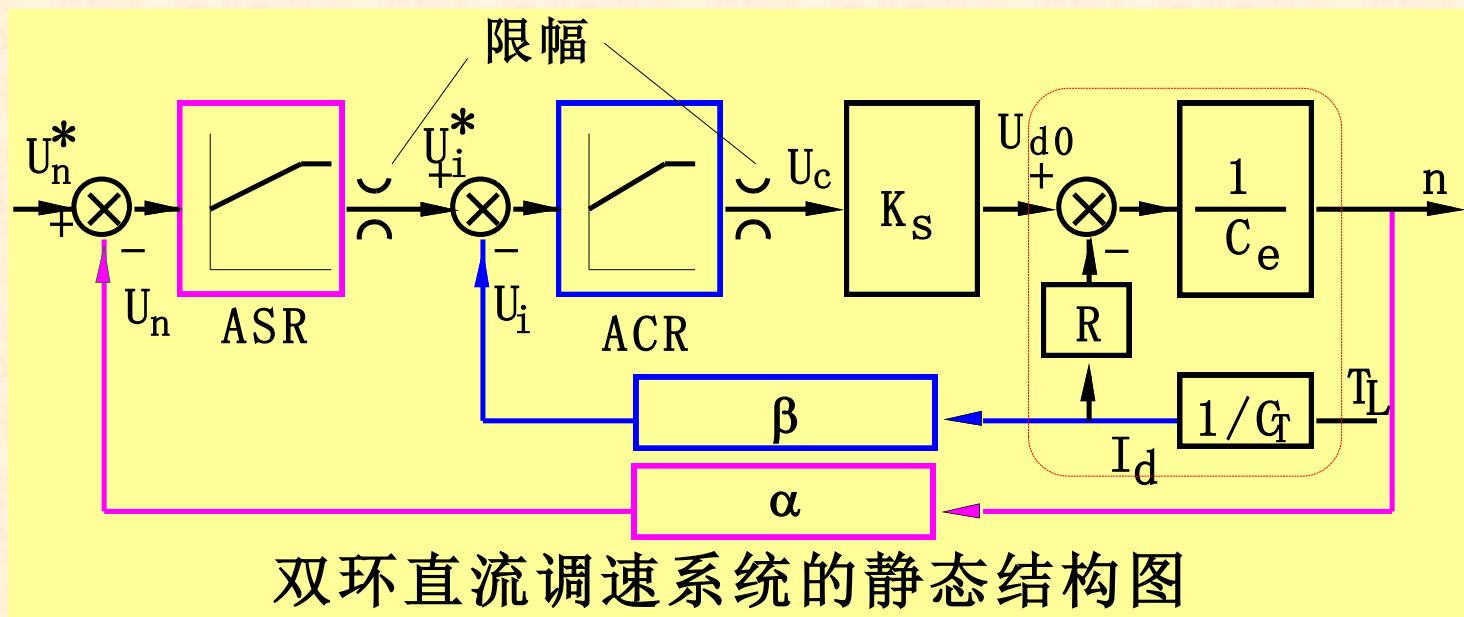
调节器限幅作用

1、饱和——输出达到限幅值

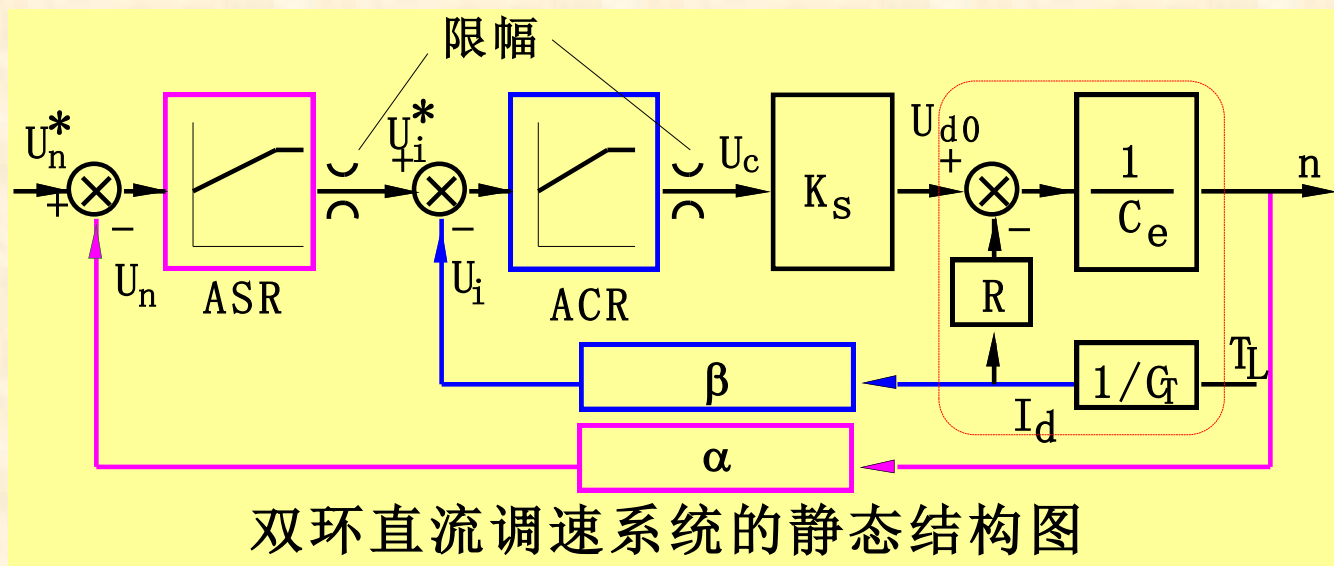
当调节器饱和时，输出为恒值，输入量的变化不再影响输出，除非有反向的输入信号使调节器退出饱和；换句话说，饱和的调节器暂时隔断了输入和输出间的联系，**相当于使该调节环开环**。

2、不饱和——输出未达到限幅值

当调节器不饱和时，工作在线性区，PI作用使输入偏差电压在稳态时总是零。



静特性

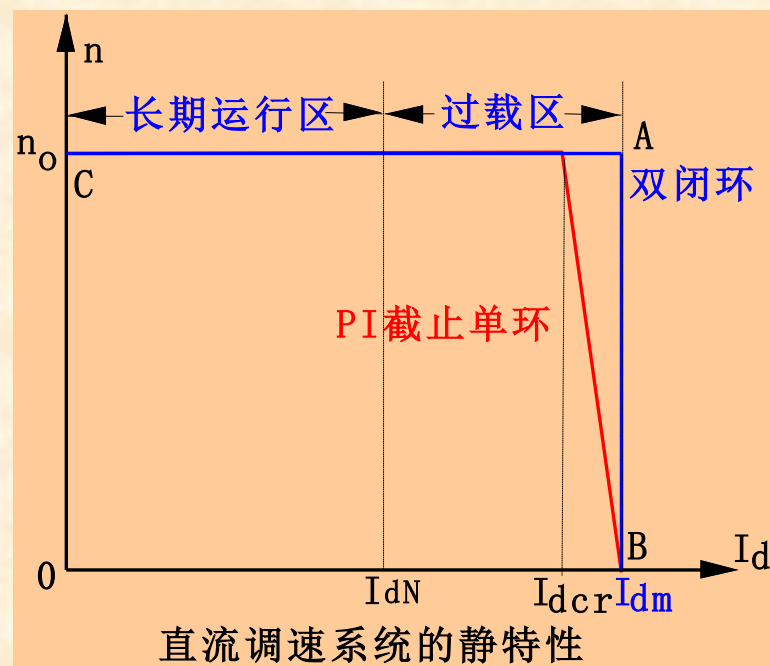


- 正常运行时，电流调节器不能达到饱和（重要！）
- 转速调节器不饱和：两调节器均不饱和，
稳态时输入偏差电压均为0；

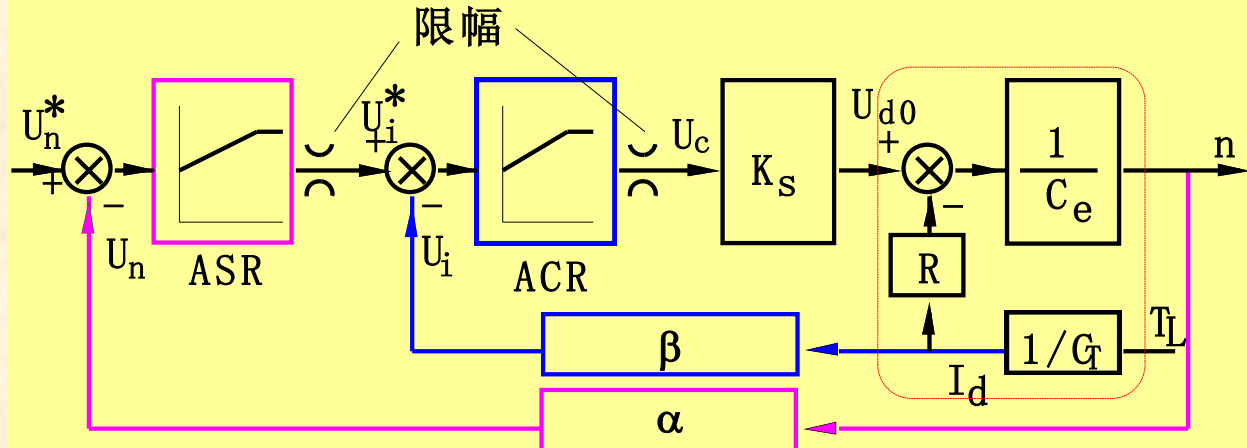
$$U_n^* = U_n = \alpha n$$

$$U_i^* = U_i = \beta I_d$$

对应静特性CA段。



静特性

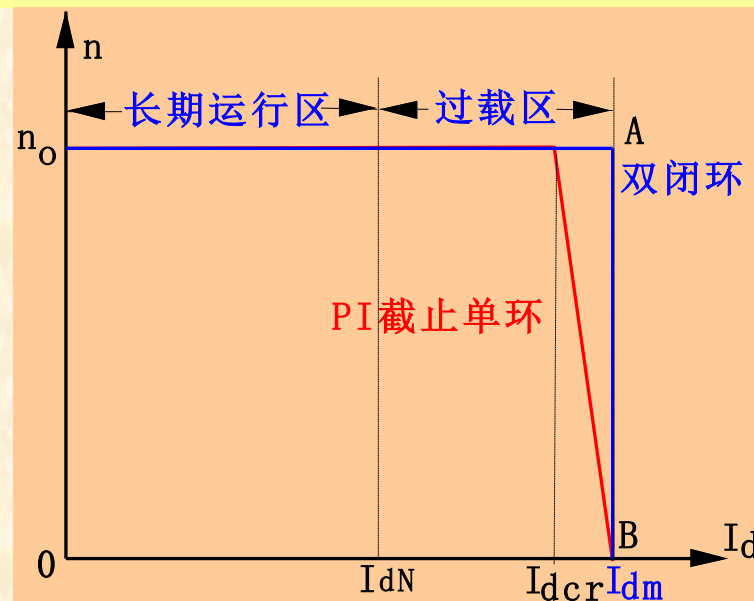


双环直流调速系统的静态结构图

转速调节器饱和:

ASR输出达到限幅值，转速环呈开环， n 变化对系统影响暂时隔断。系统按无静差电流单环运行，**对应静特性AB段。**

$$I_d = \frac{U_{im}^*}{\beta} = I_{dm}$$



直流调速系统的静特性

双环系统静特性的特点：负载电流小于最大值时为转速无静差，转速负反馈起主要调节作用；负载电流达到最大值时为电流无静差，电流调节器起主要调节作用。

三、各变量的稳态工作点和稳态参数计算

- 双环调速系统在稳态工作时，两调节器均不饱和

$$\mathbf{U}_{ne} = \mathbf{U}_{ie} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{U}_n^* = \mathbf{U}_n = \alpha \mathbf{n} = \alpha \mathbf{n}_0$$

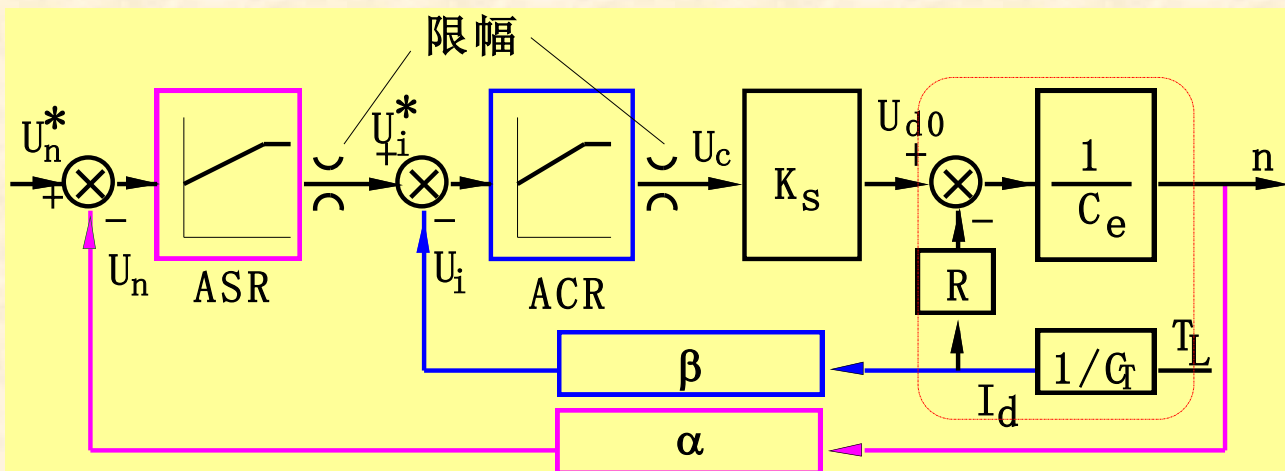
$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i = \beta \mathbf{I}_d = \beta \mathbf{I}_{dL}$$

$$\alpha = \frac{\mathbf{U}_{nm}^*}{\mathbf{n}_{\max}}$$

$$\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}}$$

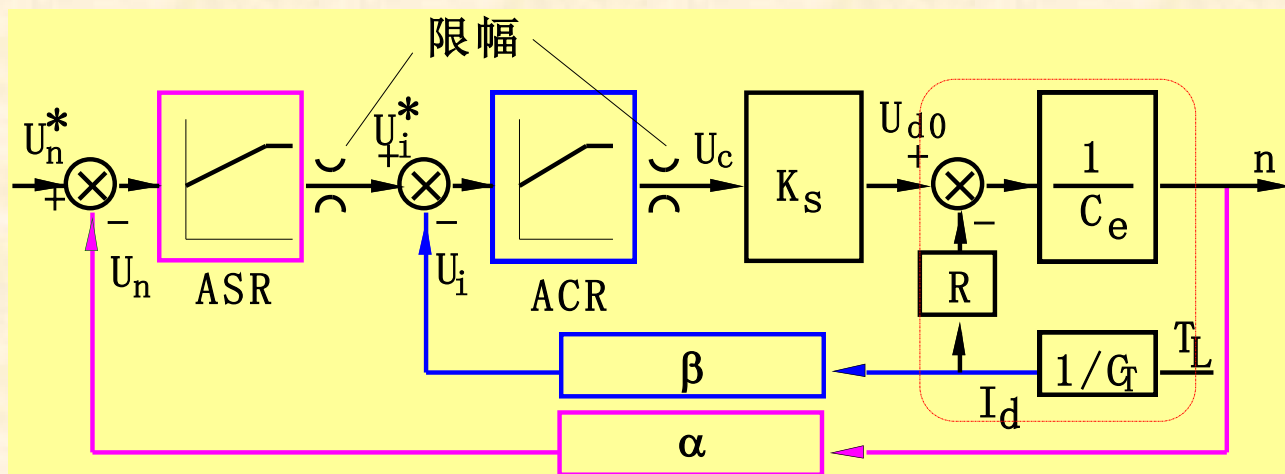
$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s}$$

$$= \frac{\mathbf{C}_e \mathbf{U}_n^* / \alpha + \mathbf{I}_{dL} \mathbf{R}}{\mathbf{K}_s}$$



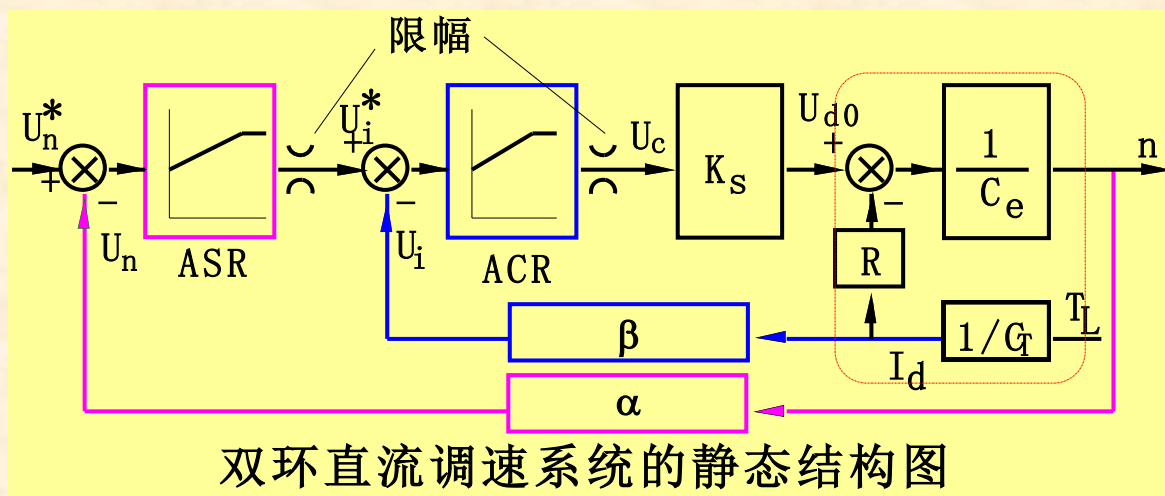
双环直流调速系统的静态结构图

三、各变量的稳态工作点和稳态参数计算



双环直流调速系统的静态结构图

在两调节器均采用 PI 的转速电流双闭环调速系统中，若 $U_n^* = 15V$ ，
 $n_N = 1500r/min$ ， $U_{i\max}^* = 10V$ ， $I_N = 20A$ ， $I_{d\max} = 2I_N$ ，电枢回路总电阻
 $R = 2\Omega$ ， $K_s = 20$ ， $C_e = 0.127V/r/min$ 。当 $U_n^* = 5V$ ， $I_{dL} = 10A$ 时，求稳
 态运行时 U_{d0} 和电流调节器的输出电压。

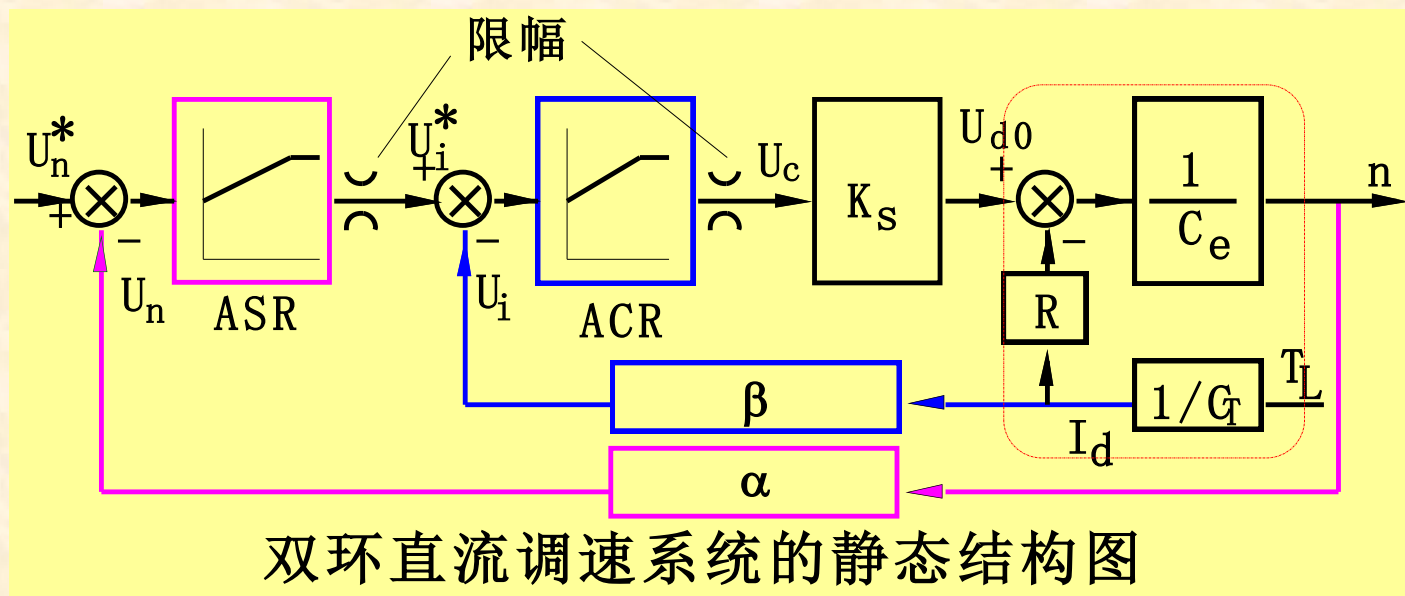


在两调节器均采用 PI 的转速电流双闭环调速系统中，若 $U_n^* = 15V$ ， $n_N = 1500r/min$ ， $U_{i\max}^* = 10V$ ， $I_N = 20A$ ， $I_{d\max} = 2I_N$ ，电枢回路总电阻 $R = 2\Omega$ ， $K_s = 20$ ， $C_e = 0.127V/r/min$ 。当 $U_n^* = 5V$ ， $I_{dL} = 10A$ 时，求稳态运行时 U_{d0} 和电流调节器的输出电压。

解： $n = 500r/min$ 。

$$U_{d0} = C_e n + R I_d = 0.127 \times 500 + 2 \times 10 = 83.5V$$

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{83.5}{20} = 4.175V$$



双闭环直流调速系统的ASR和ACR均为PI调节器，设系统最大给定电压 $U_{nm}^* = U_{im}^* = 15V$, $n_N = 1500\text{rpm}$, $I_N = 20A$, 电流过载倍数为2，电枢回路总电阻为 $R = 2\Omega$, $K_s = 20$, $C_e = 0.127V \cdot \text{min}/r$, 求：

- (1) 当系统稳定运行在 $U_n^* = 5V$, $I_{dL} = 10A$ 时，系统的 n 、 U_n 、 U_i^* 、 U_i 、 U_c 各为多少？
- (2) 当电动机负载过大而堵转时， U_i^* 和 U_c 各为多少？

解：转速反馈系数和电流反馈系数分别为：

$$\alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{15}{1500} = 0.01 (\text{V} \cdot \text{min/r})$$

$$\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}} = \frac{15}{2 \times 20} = 0.375 (\text{V/A})$$

(1) 当系统稳定运行在 $U_n^* = 5\text{V}, I_{dL} = 10\text{A}$ 时：

$$U_n = U_n^* = 5(\text{V})$$

$$n = \frac{U_n^*}{\alpha} = \frac{5}{0.01} = 500 (\text{r/min})$$

$$U_i = \beta I_{dL} = 0.375 \times 10 = 3.75 (\text{V})$$

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{0.127 \times 500 + 10 \times 2}{20} = 4.175 (\text{V})$$

(2) 当电动机负载 $U_i^* = \beta I_{dm} = 0.375 \times 2 \times 20 = 15 (\text{V})$

过大而堵转时：

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{C_e n + I_{dm} R}{K_s} \\ &= \frac{2 \times 20 \times 2}{20} = 4 (\text{V}) \end{aligned}$$