

# Power Electronics

## *Chap. 13*

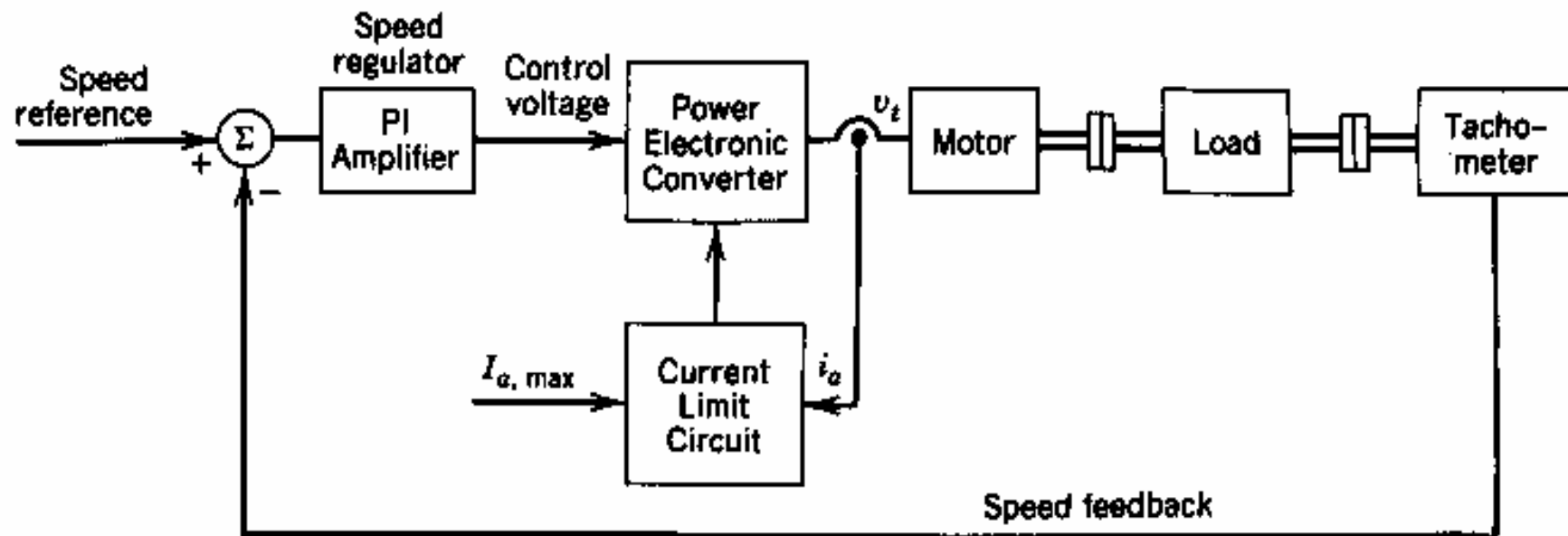
### DC Motor Drives

#### Dual Loop Control of DC Motor Drives

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

### 单闭环调速系统的特点



可以获得精确的速度控制,但是其动态性能,如起动性能并不理想。影响动态过程性能的主要原因是没有转矩控制。

## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

### 直流电机调速系统控制原理

电机运动方程式

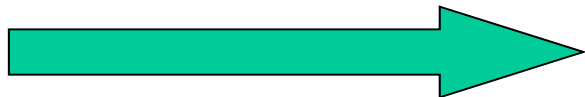
$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_{WL}(t)$$

直流电机的电磁转矩方程式

$$T_e = C_T \Phi I_d$$

可以看出，在电机磁通恒定的条件下，电机的转矩和电机电枢电流成正比，即使是动态条件下亦是如此。

要控制动态转矩，必须控制电枢电流，可采用电流闭环控制系统，但无法控制转速！



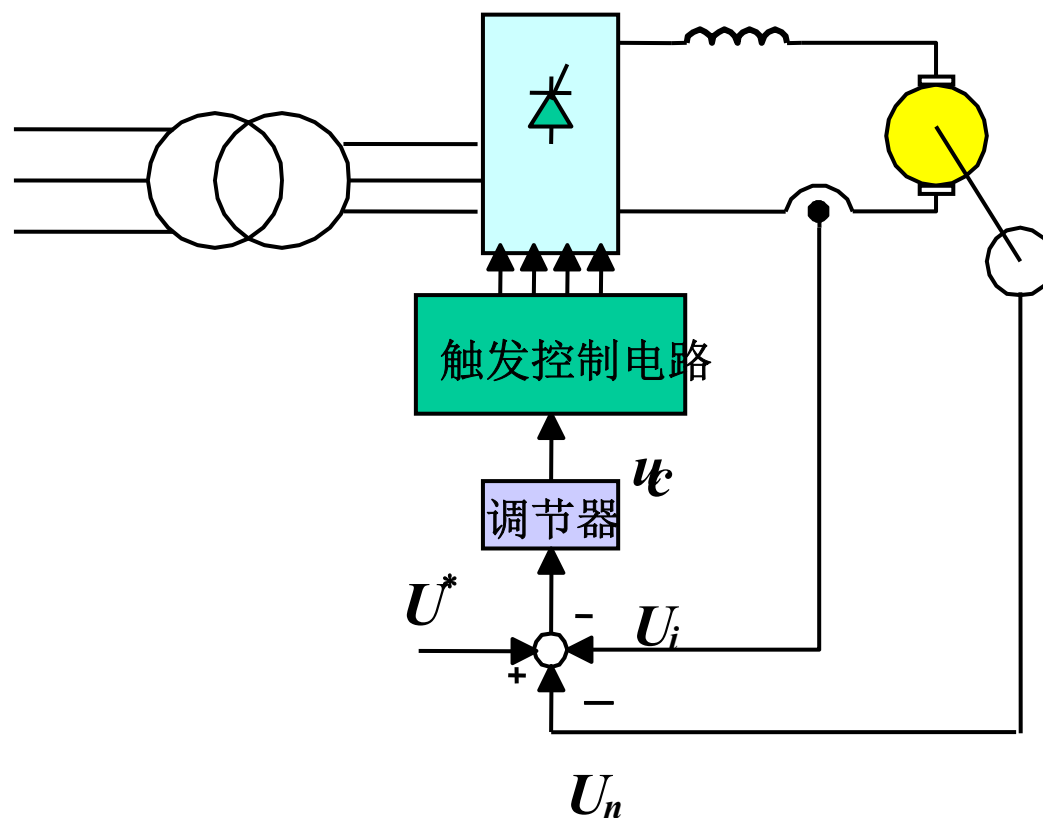
电流闭环+速度闭环

## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

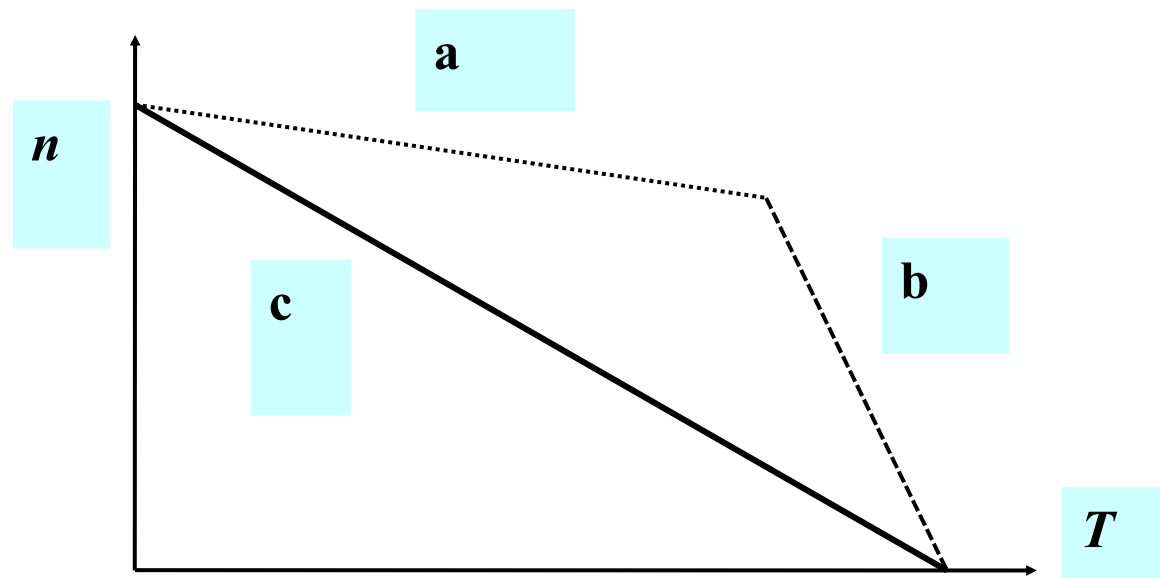
**问题：**如何将电机的速度控制和电流控制有机地结合起来，使系统既具有良好的**稳态性能**，又具有良好的**动态性能**？如何将这两个闭环**连接**起来，是采用串联方式还是采用并联方式？如果采用串联方式，哪一个作为**外环**，哪一个作为**内环**？

并联的双闭环控制方式：



## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

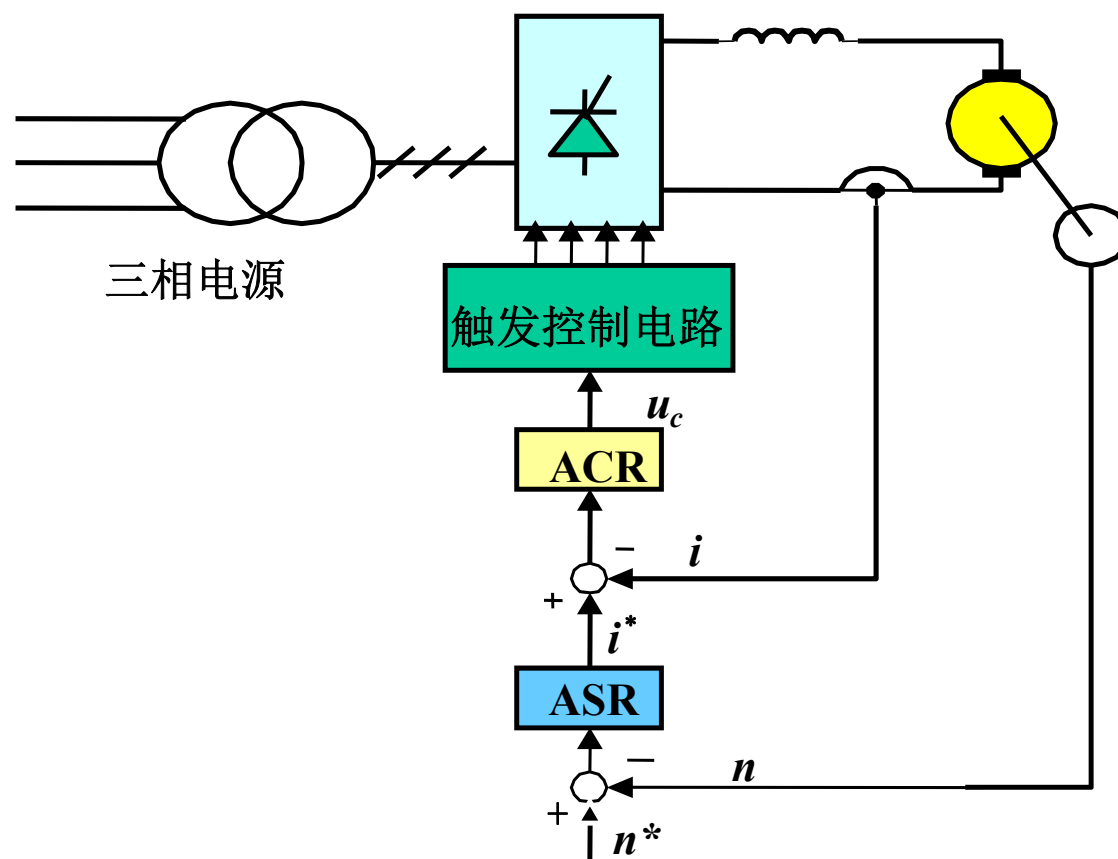


**并联方式：**速度反馈信号和电流反馈信号同时引入调节器的输入端。根据线性系统的叠加原理，采用速度、电流并联反馈控制的性能应为速度闭环控制系统的性能和电流闭环控制系统二者单独作用的叠加。曲线a为只有速度反馈时的机械特性，曲线b为只有电流反馈时的机械特性，曲线c为速度、电流反馈同时作用的机械特性。采用并联方式的系统稳态性能并不理想，其**机械特性很软（高速时输出转矩小）**，因此**不实用**。

## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

串联方式可以很好地解决系统的静、动态性能，又能克服并联方式的缺点。



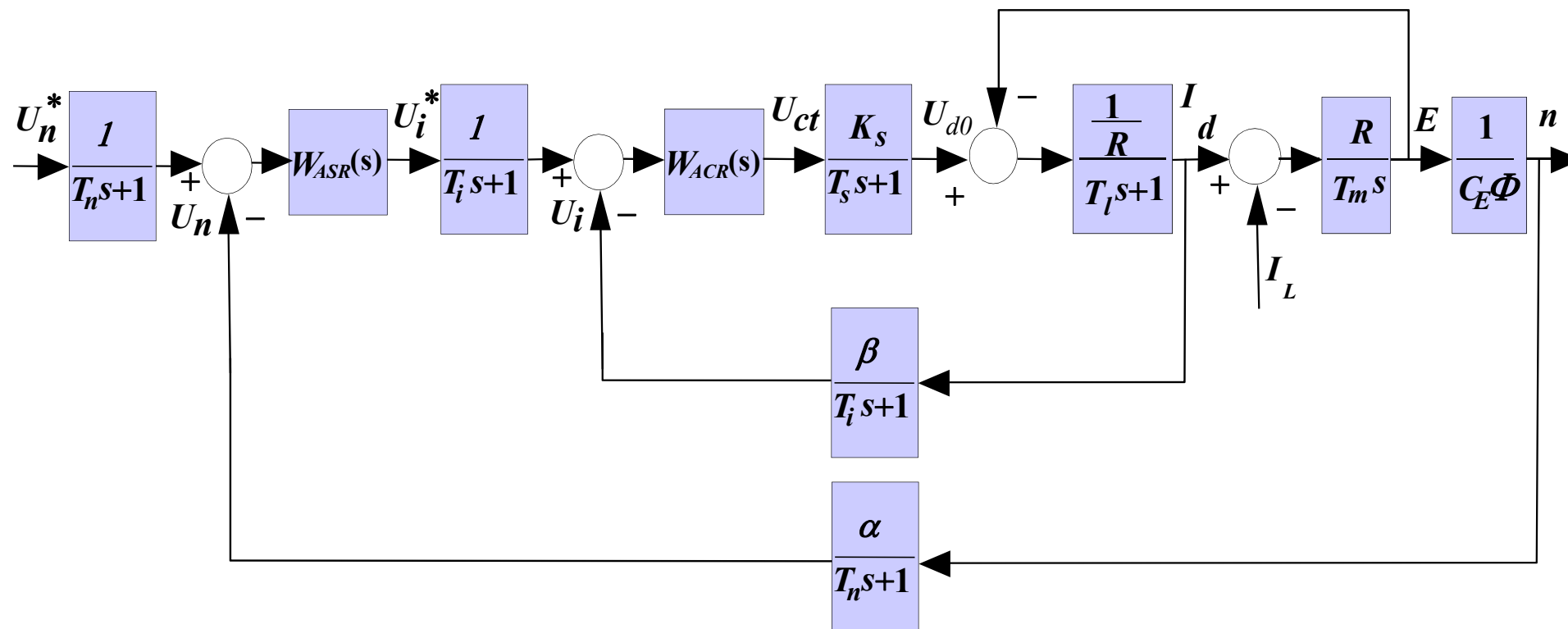
为何转速作为外环？  
电流作为内环？

采用速度、电流串联反馈控制的系统图

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

根据各环节传递函数，可得到转速、电流串联双闭环调速系统的动态结构图，其中还包含了电流和转速给定滤波环节：

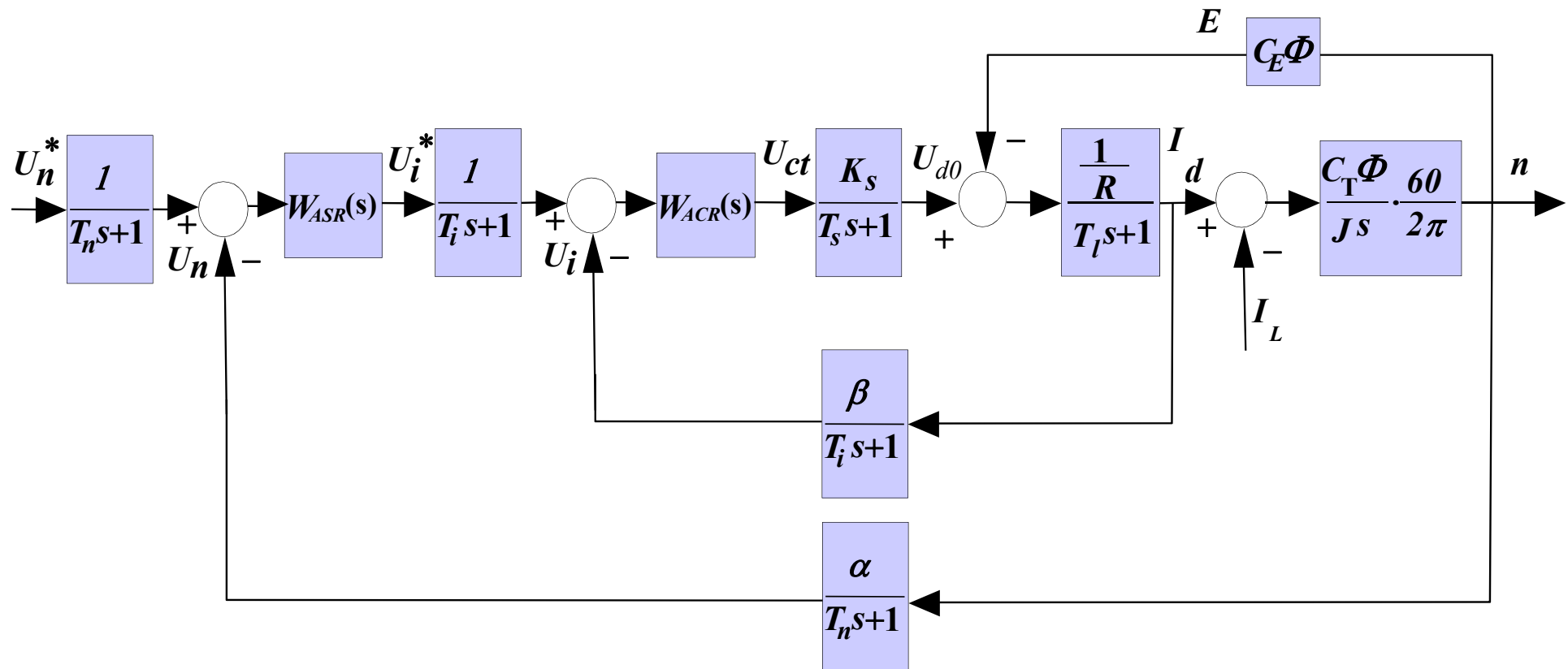


双闭环调速系统动态结构图

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

另一种形式





## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

两个调节器正常的工作原则：

- ASR在动态时将会出现饱和
- ACR不会出现饱和

如何使调节器出现饱和或者不出现饱和？

- 通过反馈量变化的分析、比例积分系数的选择

两个调节器的输出限幅值如何设定？

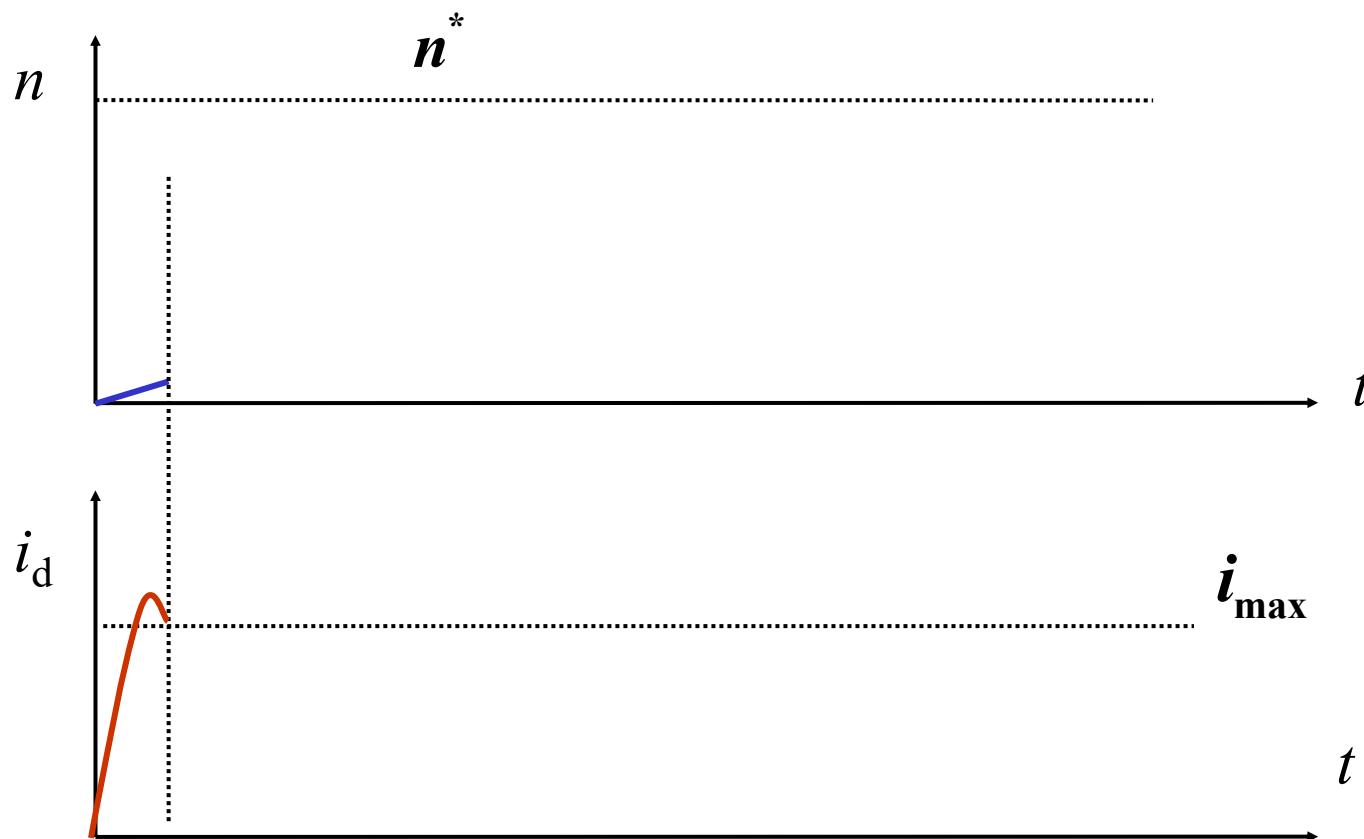
- ASR的输出限幅值根据电动机容许的电流最大值确定
- ACR的输出限幅值根据整流器容许最大输出电压所对应的控制电压确定

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

### 调节过程分析

#### ① 电流上升阶段

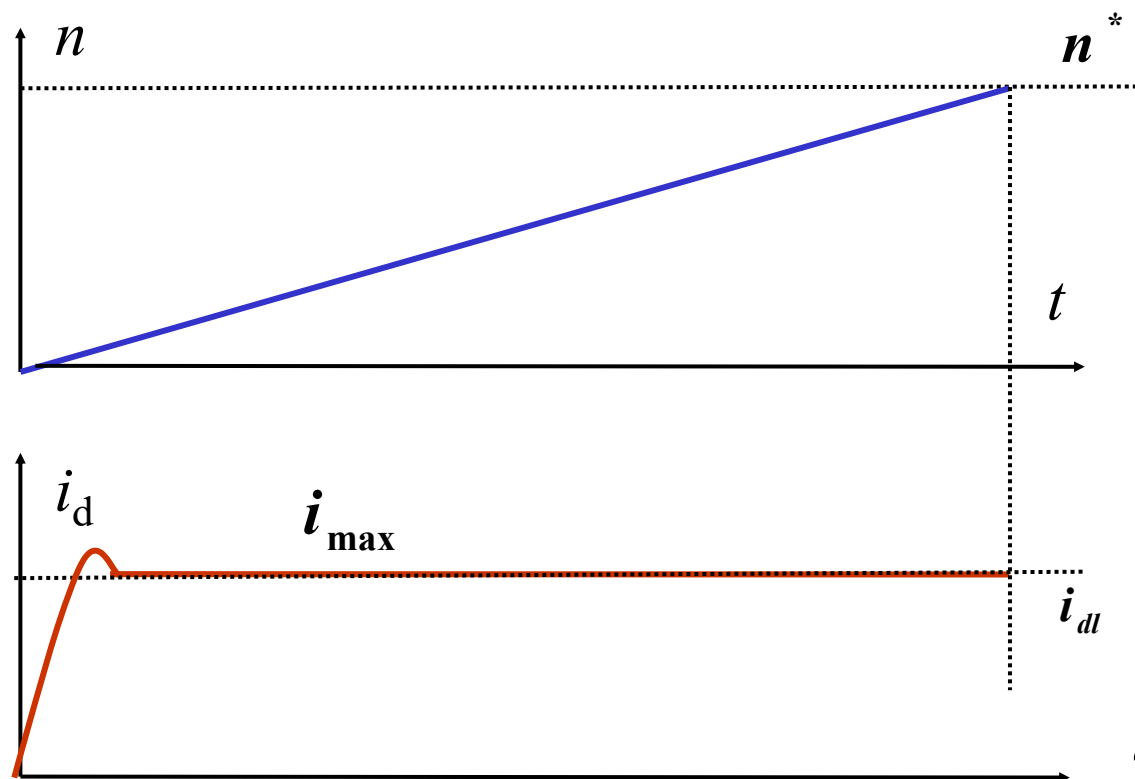


电动机的电流由零逐渐增加到某一数值，转速同时开始上升

## Chap.13 DC Motor Drives

# Dual Loop Control

### ②恒定电流加速阶段

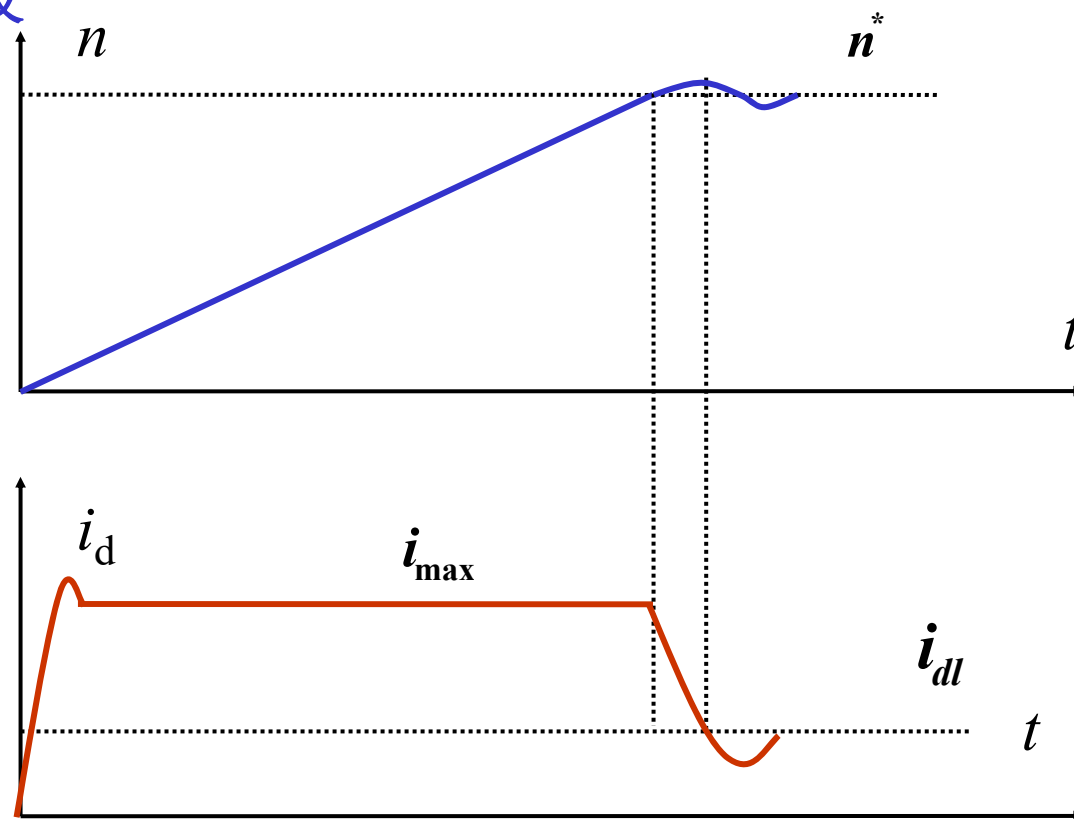


转速设定与转速反馈差值很大，速度调节器输出饱和值，即最大限流值，系统仅相当于电流单闭环控制，电动机以恒定最大电流（转矩）加速，电机的速度不断增加，直至电机速度达到设定转速，这段过程称之为恒流加速阶段。

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

### ③系统调整阶段

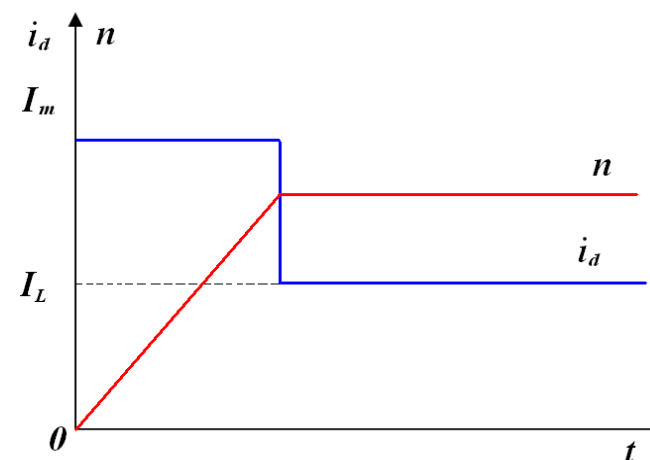
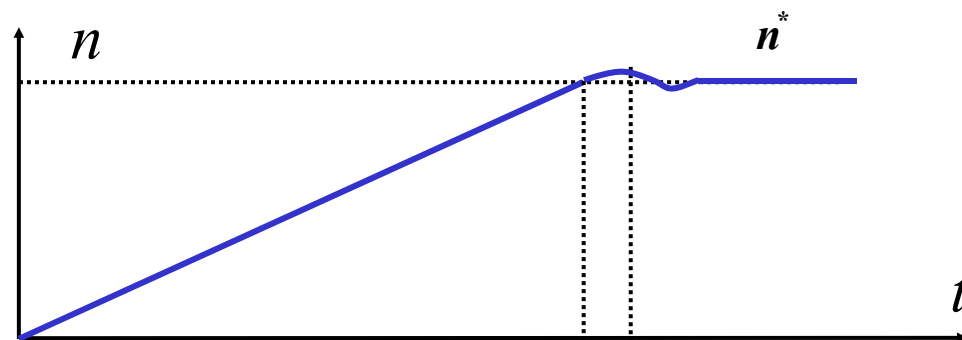


当转速达到设定转速后，速度调节器开始退饱和。由于电机电枢电流比负载电流大，电动机继续加速，电枢电流减小。当电动机的电枢电流减小到与负载电流相等之后，电动机转速下降。经过转速和电流在稳定点附近的几次调整，系统达到稳态。<sup>12</sup>

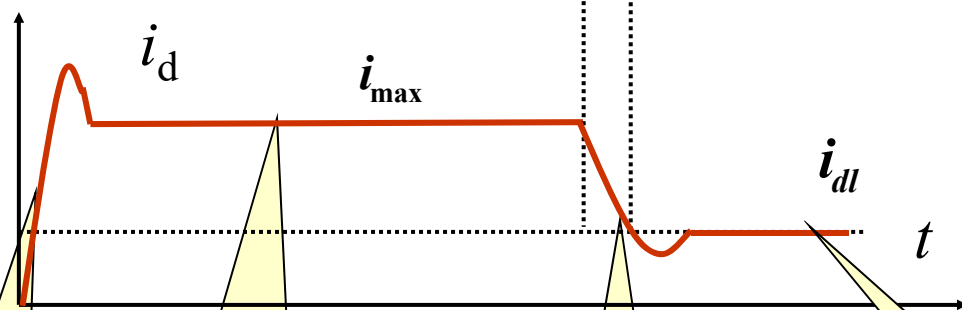
# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

双闭环调速系统启动过程的转速与电流变化



理想启动过程



恒流加速阶段

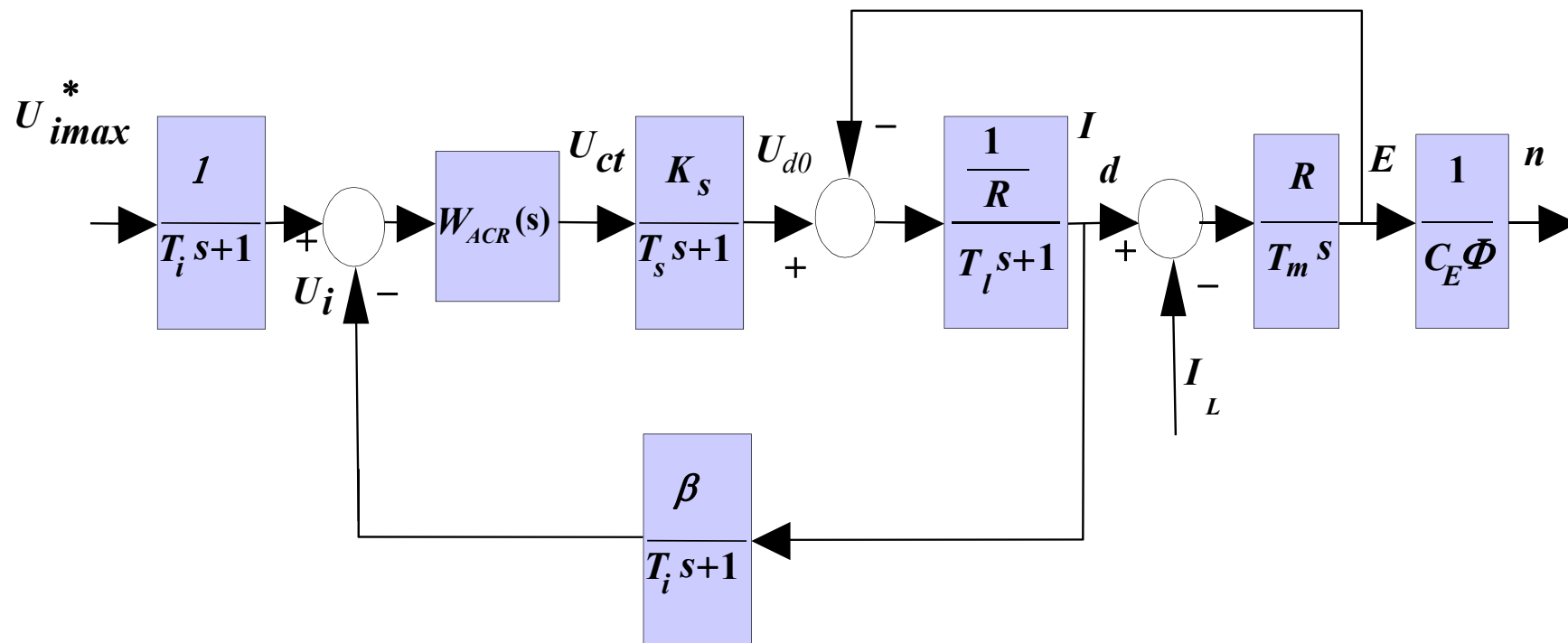
电流上升阶段

系统调节阶段

进入稳态阶段<sup>13</sup>

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control



双闭环调速系统中电流环动态结构图

### 动态抗扰动性能

负载扰动在电流环之后，只能靠速度环调节；电网电压及电力电子变换器参数扰动被包含在电流环内，可通过电流反馈得到及时调节，动态特性好于单闭环调速系统。

# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

### 双闭环作用分析

#### 转速调节器:

- 使转速跟踪给定
- 对负载变化起抗扰动作用
- 输出限幅用以限制最大电流值

#### 电流调节器:

- 使电流（转矩）跟踪给定
- 对内环扰动起抗扰作用
- 保证系统恒流启动
- 输出限幅用于限制电力电子变换器的最大控制信号

### 双闭环调速系统的设计

- 1) 整流器的设计
- 2) 电机、反馈装置的选择
- 3) 调节器的设计，包括调节器的结构设计和参数设计，可采用：

➤ **经典控制理论**，如果系统模型较准确，参数已知，可采用经典控制理论，遵循从内环到外环的顺序在频域进行设计

➤ **现代控制理论**，如果系统模型不够准确，参数不易获取，外界扰动很大，传统的经典控制理论难以获得满意的性能，则可采用自适应控制、变结构控制、人工智能方法等现代控制理论进行设计

➤ **数字仿真技术和计算机辅助设计技术**，可加快设计进程，并能直观地把握系统动态过程，方便地对系统参数进行修改和微调 16



# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

### 基于经典控制理论的设计方法

基础知识:

—典型I型系统，超调小，抗扰动性能稍差

开环传递函数

$$W(s) = \frac{1}{2Ts(Ts + 1)}$$

闭环传递函数

$$\Phi(s) = \frac{1}{2T^2s^2 + 2Ts + 1}$$

—典型II型系统，超调稍大，抗扰动性能好

开环传递函数

$$W(s) = \frac{4Ts + 1}{8T^2s^2(Ts + 1)}$$

闭环传递函数

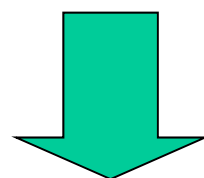
$$\Phi(s) = \frac{4Ts + 1}{8T^3s^3 + 8T^2s^2 + 4Ts + 1}$$

## Chap.13 DC Motor Drives

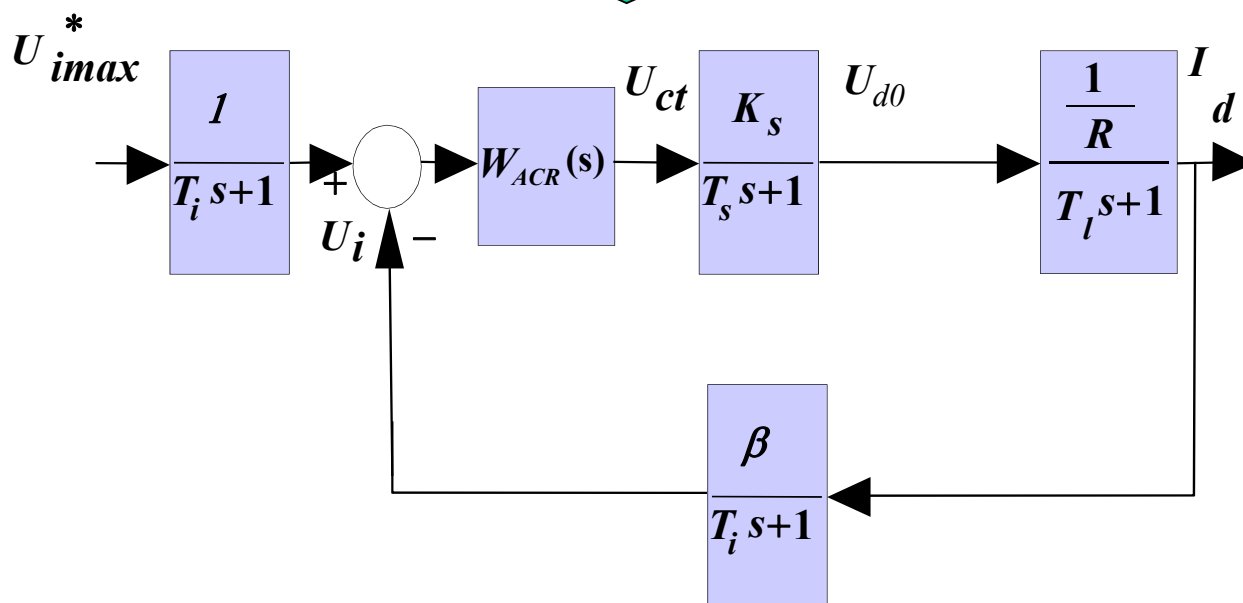
# Dual Loop Control

### 电流环的设计

简化：一般系统电磁时间常数远小于机械时间常数，因此电流的调节过程比转速的调节过程要快得多。所以反电势的扰动对电流环来说只是一个变化缓慢的作用，在电流调节器的调节过程中可不考虑它的动态作用。



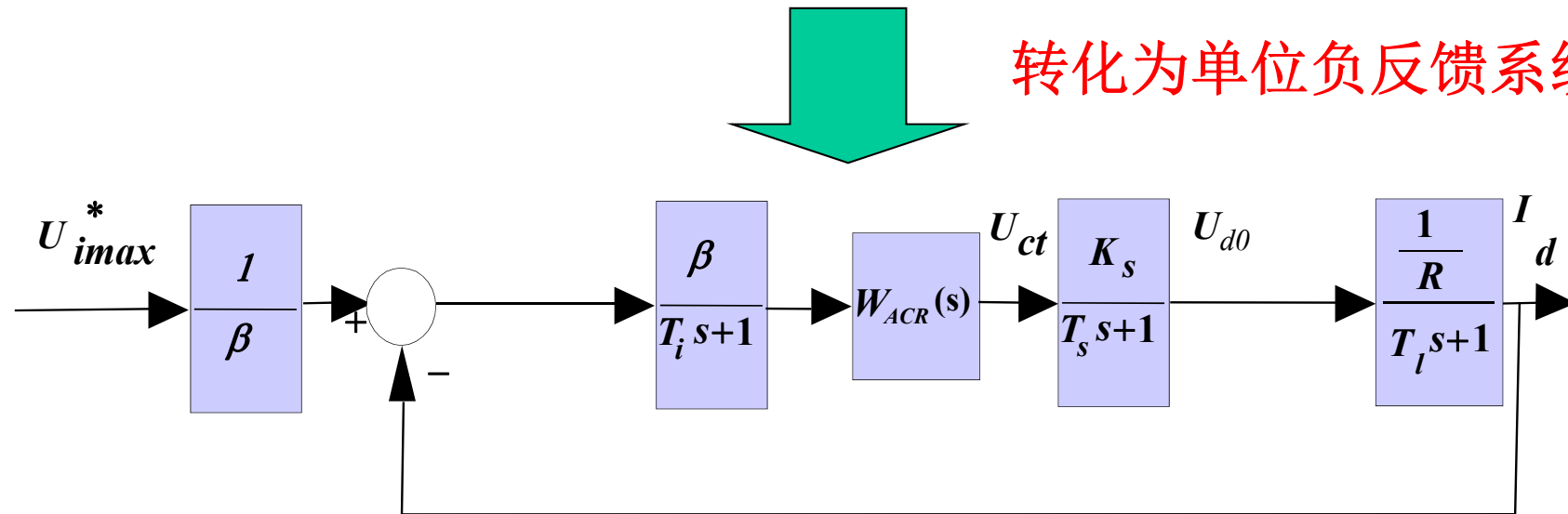
忽略反电势扰动，简化  
电流环结构



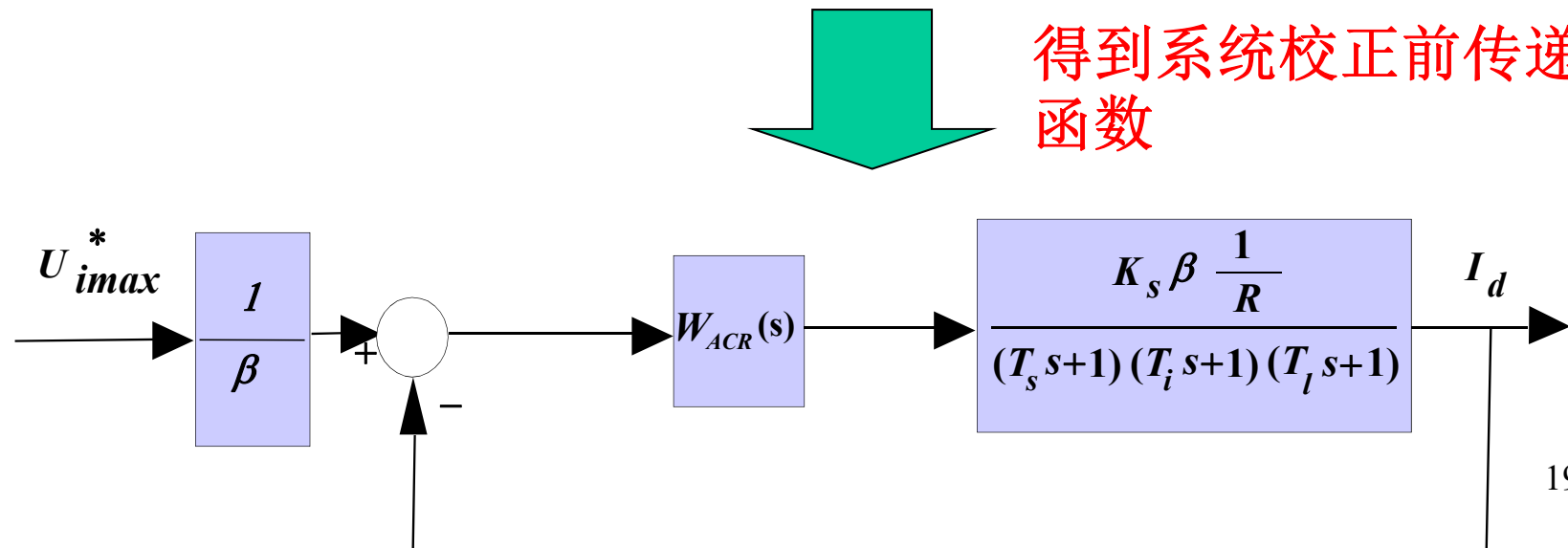
# Chap.13 DC Motor Drives

## Dual Loop Control

转化为单位负反馈系统



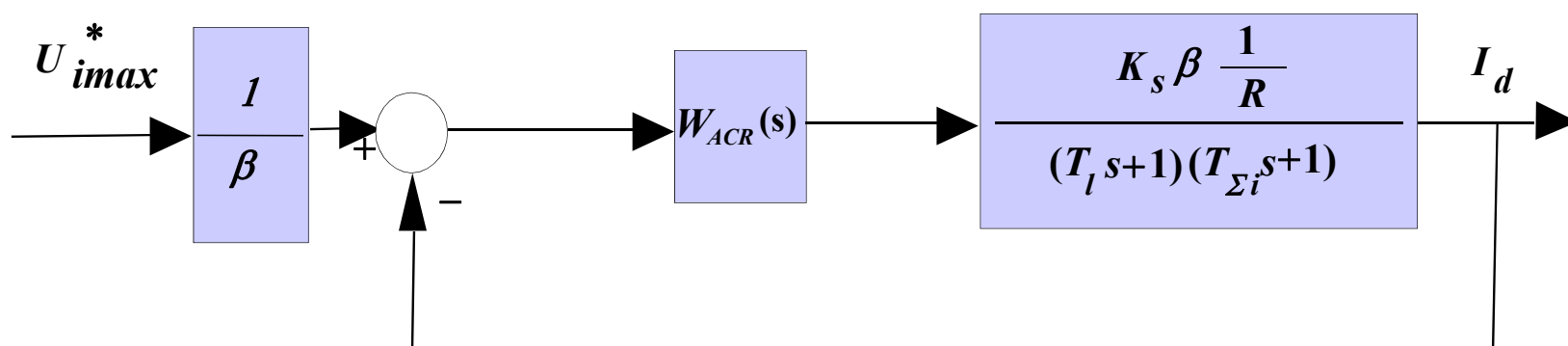
得到系统校正前传递函数



## Chap.13 DC Motor Drives

### Dual Loop Control

根据时间常数的大小，将开环传递函数典型化（在此假设电机电磁时间常数远大于电力电子变换器和电流反馈时间常数）



取

$$W_{ACR}(s) = \frac{T_l s + 1}{2(K_s \beta \frac{1}{R})T_{\Sigma i} s}$$

可将电流环校正为典型I型系统，这样电流环将具有较好的动静态性能

可看出，此时电流调节器具有PI调节器的形式

## Chap.13 DC Motor Drives

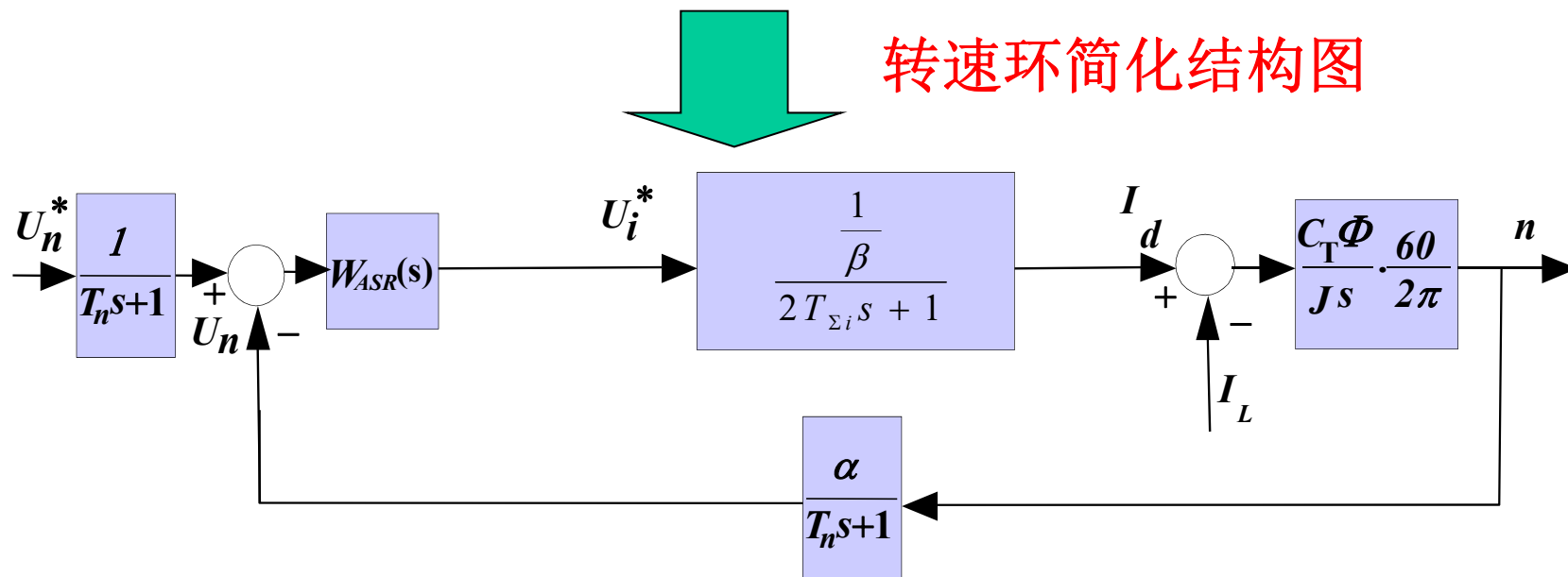
# Dual Loop Control

### 速度环的设计

在设计速度环时，可不考虑电流环的动态过程，电流环闭环传递函数可简化为：

$$\Phi_i(s) \approx \frac{\frac{1}{\beta}}{2T_{\Sigma i}s + 1}$$

转速环简化结构图



在简化结构图基础上，转速环设计与电流环设计类似。为增加系统抗扰性能，经常将速度环设计成典型II型系统。**速度调节器一般也为PI调节器形式。**更多环的设计也与此类似。

### 实际双闭环直流调速系统的设计原则

- 内外环均采用PI调节器；
- 根据反馈信号跟踪给定信号的性能选择比例和积分系数，原则为快速无超调；
- 先调内环（电流环）调节器参数，再调外环调节器；
- 先调 $K_p$ ，再调 $K_i$ 。