

---

## 4.2 转速、电流反馈控制直流调速系统的数学模型与动态过程分析

- 转速、电流反馈控制直流调速系统的动态数学模型
  - 起动过程分析（转速、电流）
  - 制动过程分析（转速、电流）
-

## 4.2.1 转速、电流反馈控制直流调速系统的数学模型

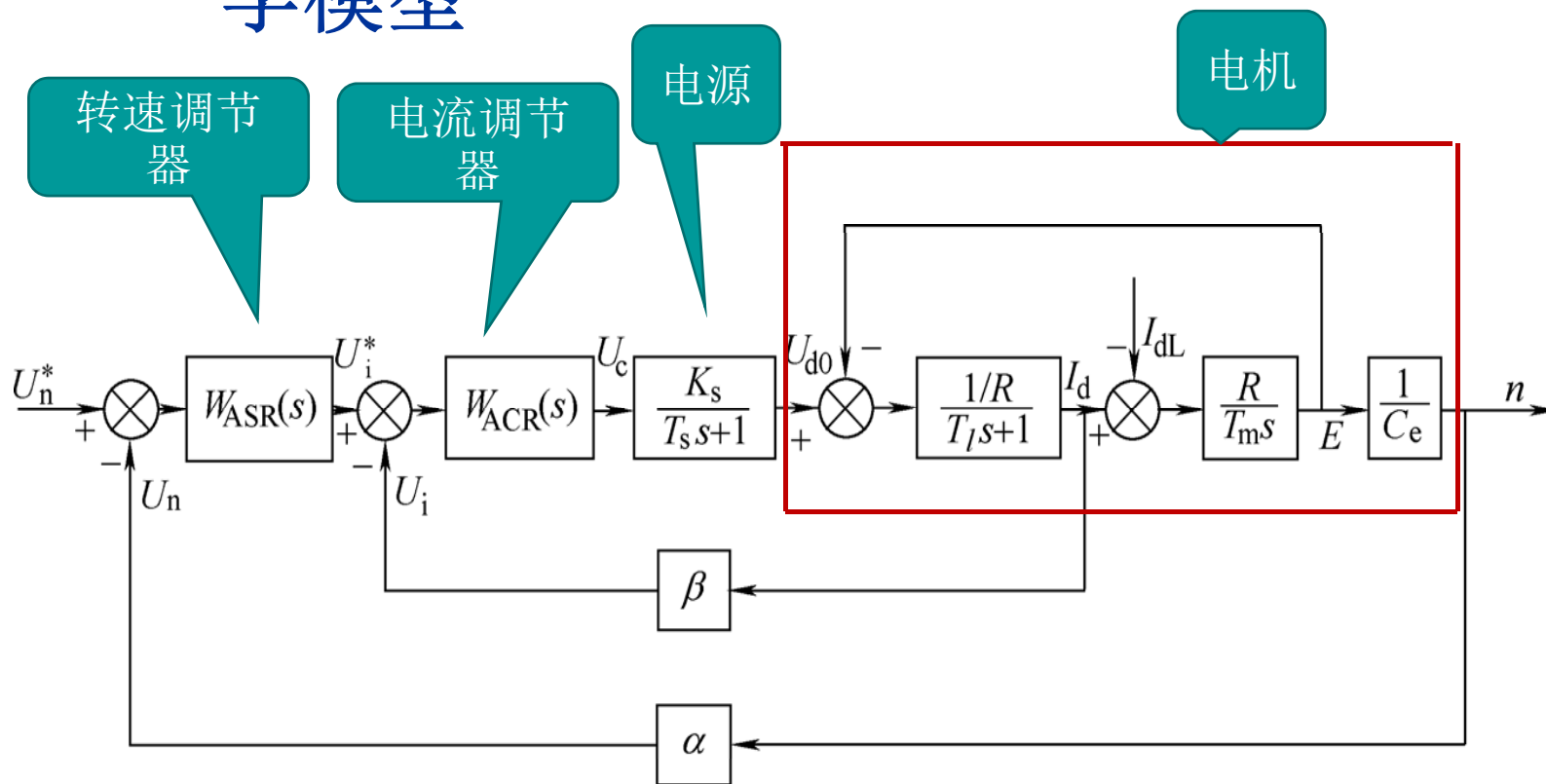
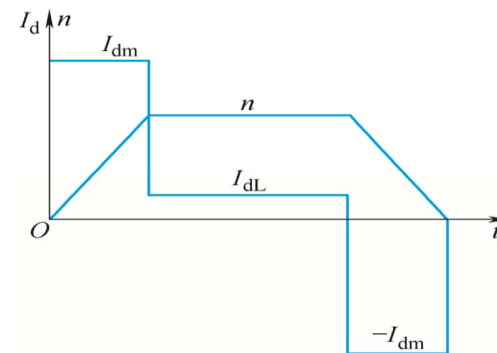


图4-5 双闭环直流调速系统的动态结构图

## 4.2.2 转速、电流反馈控制直流调速系统的动态过程分析

- 对调速系统而言，被控制的对象是转速。
- 跟随性能可以用阶跃给定下的动态响应描述。
- 能否实现所期望的恒加速过程，最终以时间最优的形式达到所要求的性能指标，是设置双闭环控制的一个重要的**追求目标**。

能否实现最优起动  
??



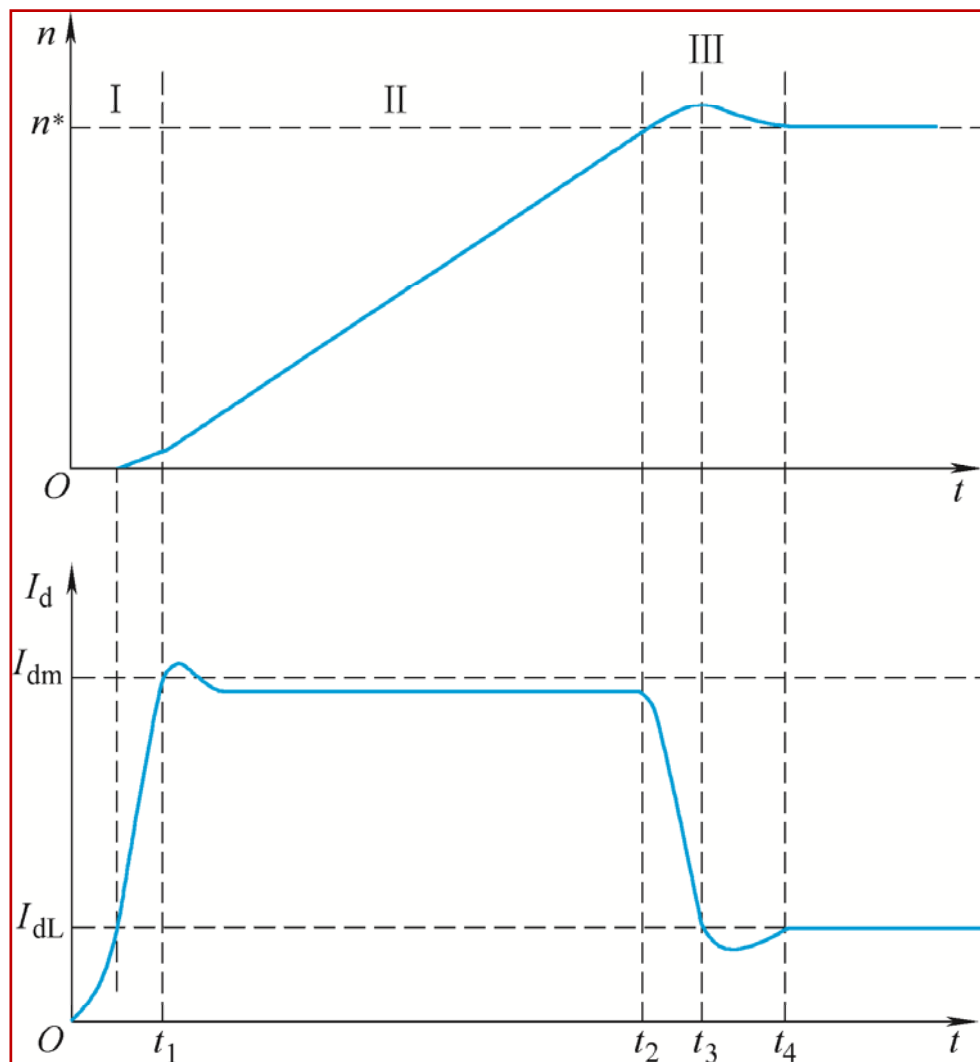


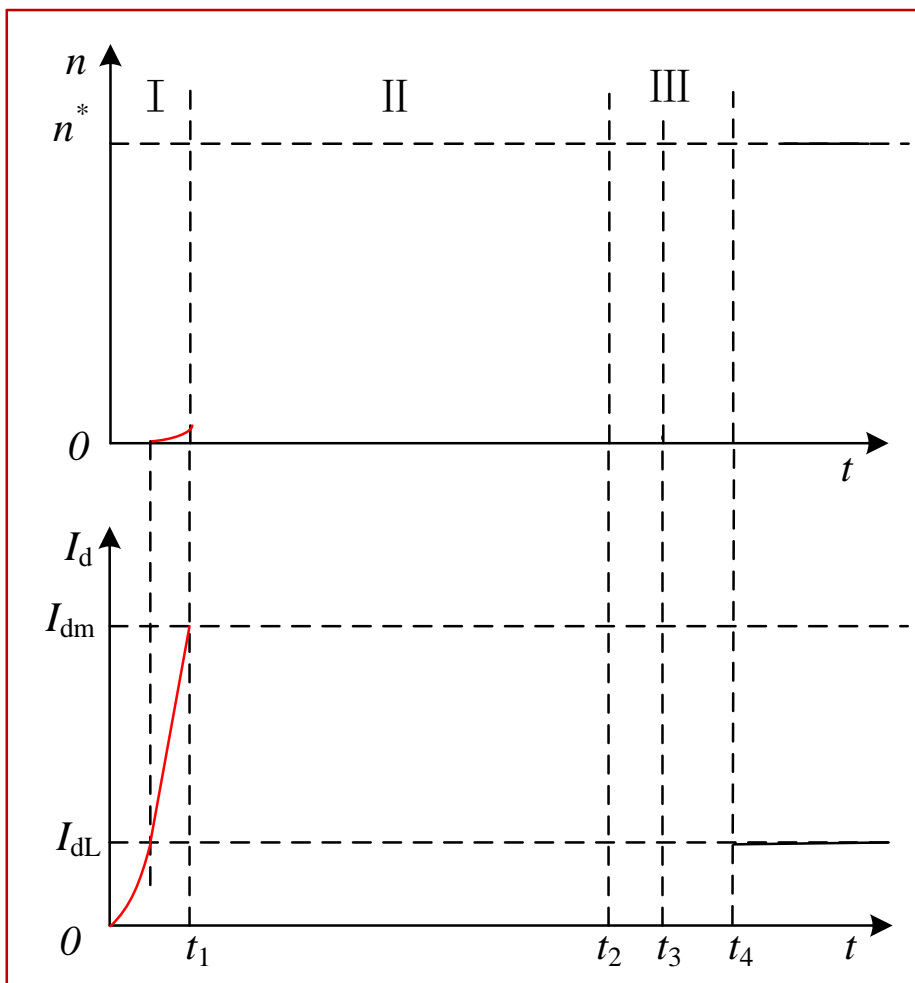
图4-6 双闭环  
直流调速系统  
起动过程的转速  
和电流波形

---

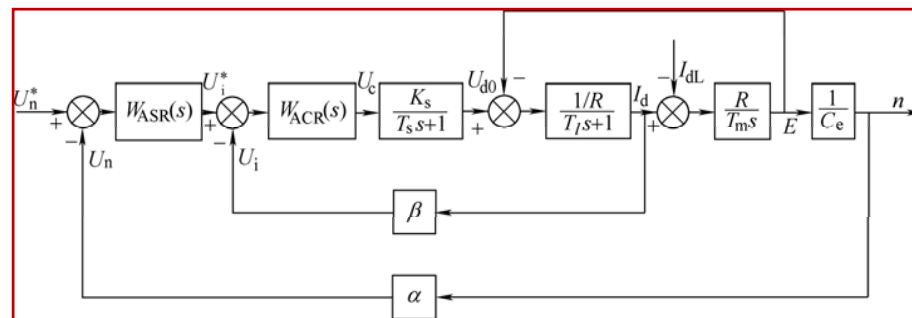
## 1. 起动过程分析-以拖动反抗性负载为例

- 电流 $I_d$ 从零增长到 $I_{dm}$ ，然后在一段时间内维持其值等于 $I_{dm}$ 不变，以后又下降并经调节后到达稳态值 $I_{dL}$ 。
  - 转速波形先是缓慢升速，然后以恒加速上升，产生超调后，到达给定值 $n^*$ 。
  - 起动过程分为电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段，
  - 转速调节器在此三个阶段中经历了不饱和、饱和以及退饱和三种情况。
-

## 第 I 阶段：电流上升阶段（ $0 \sim t_1$ ）

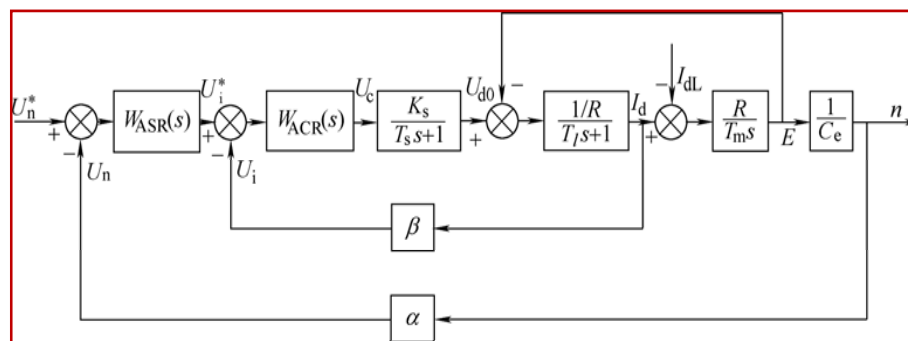


电流从0到达最大允许值  $I_{dm}$

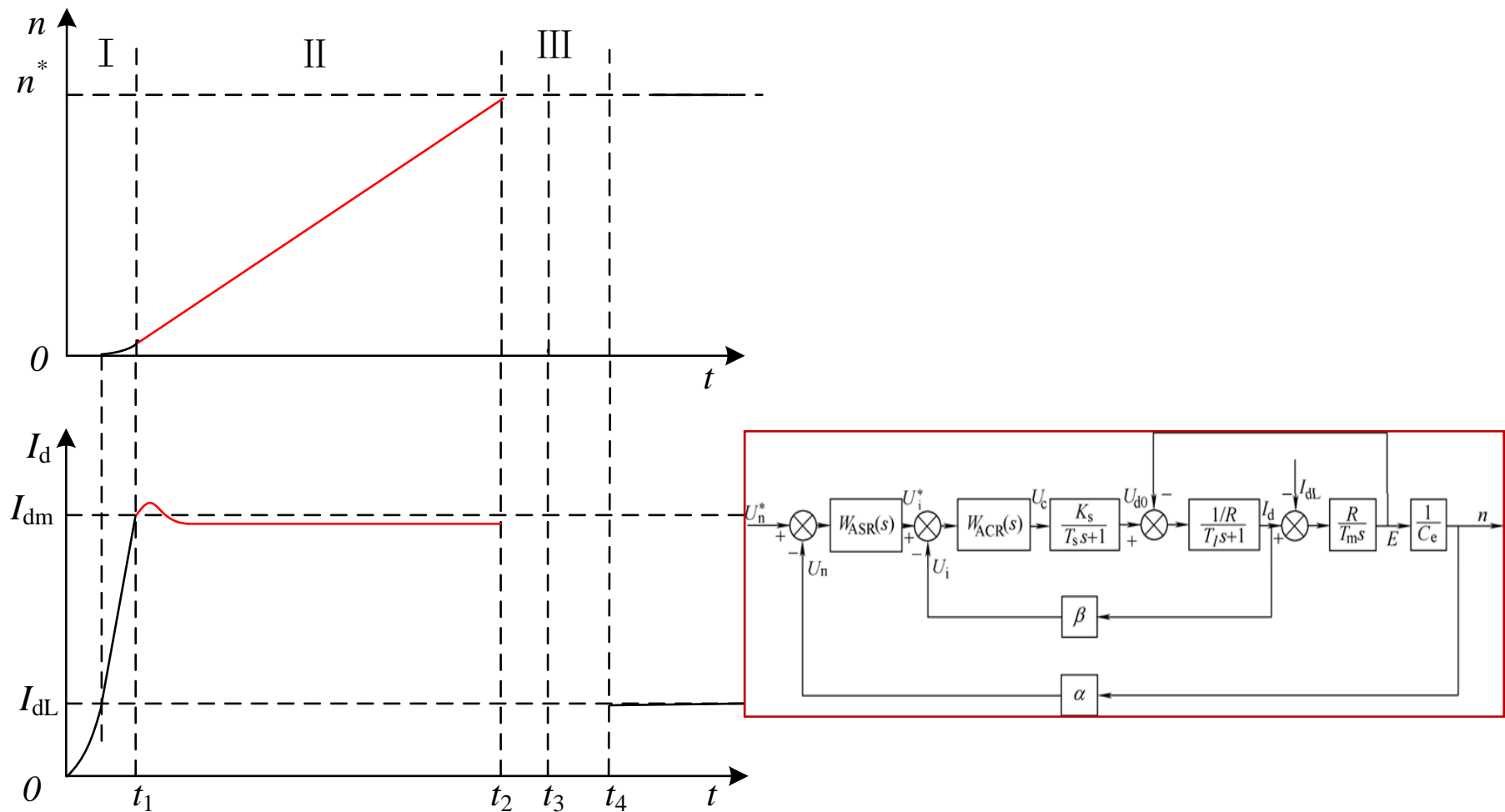


## 第 I 阶段：电流上升阶段（ $0 \sim t_1$ ）

- 在 $t=0$ 时，系统突加阶跃给定信号 $U_n^*$ ，在ASR和ACR两个PI调节器的作用下， $I_d$ 很快上升，在 $I_d$ 上升到 $I_{dL}$ 之前，电动机转矩小于负载转矩，转速为零。
- 当 $I_d \geq I_{dL}$ 后，电机开始起动，由于机电惯性作用，转速不会很快增长，ASR输入偏差电压仍较大，ASR很快进入饱和状态，而ACR一般不饱和。直到 $I_d = I_{dm}$ ， $U_i = U_{im}^*$ 。



## 第II阶段:恒流升速阶段 ( $t_1 \sim t_2$ )



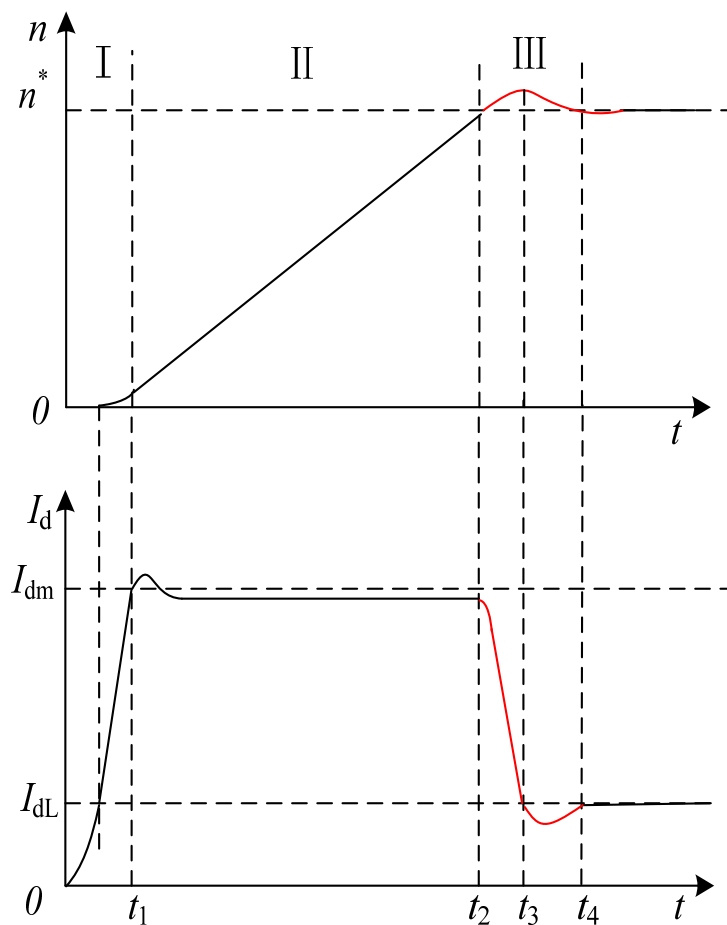


---

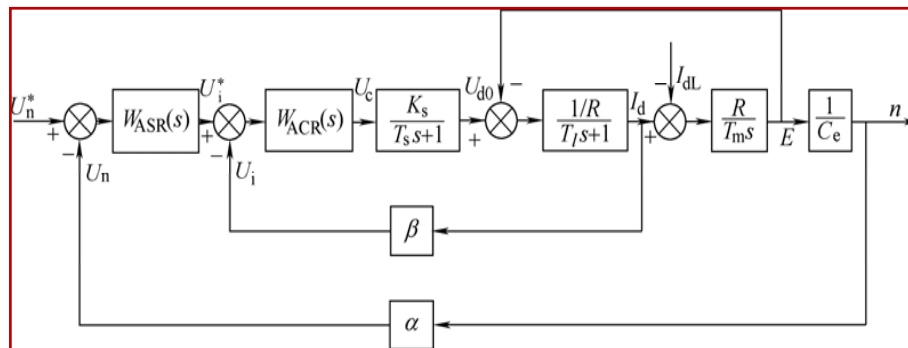
## 第 II 阶段: 恒流升速阶段 ( $t_1 \sim t_2$ )

- **ASR**调节器始终保持在饱和状态, 转速环仍相当于开环工作。系统表现为使用**PI**调节器的电流闭环控制;
  - 电流调节器的给定值就是**ASR**调节器的饱和值  $U_{im}^*$ , 基本上保持电流  $I_d = I_{dm}$  不变;
  - 电流闭环调节的扰动是电动机的反电动势, 它是一个线性渐增的斜坡扰动量, 系统做不到无静差, 而是  $I_d$  略低于  $I_{dm}$ 。
-

## 第III阶段：转速调节阶段（ $t_2$ 以后）



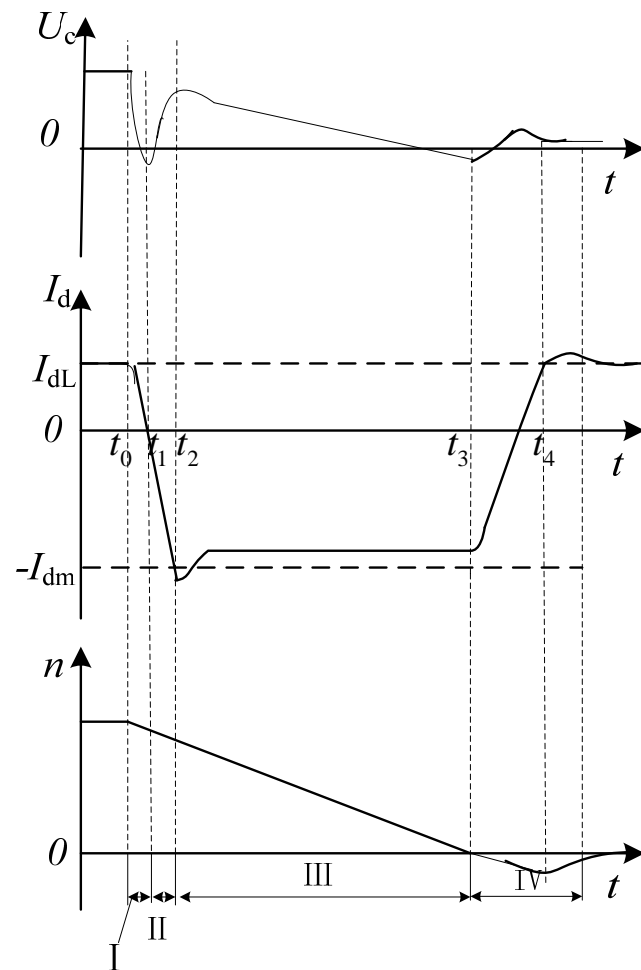
起始时刻是  
 $n$ 上升到了  
给定值 $n^*$ 。



- $n$  上升到了给定值  $n^*$ ,  $\Delta U_n = 0$ 。因为  $I_d > I_{dm}$ , 电动机仍处于加速过程, 使  $n$  超过了  $n^*$ , 称之为启动过程的转速超调。
- 转速的超调造成了  $\Delta U_n < 0$ , ASR 退出饱和状态,  $U_i$  和  $I_d$  很快下降。转速仍在上升, 直到  $t = t_3$  时,  $I_d = I_{dl}$ , 转速才到达峰值。
- 在  $t_3 \sim t_4$  时间内,  $I_d < I_{dl}$ , 转速由加速变为减速, 直到稳定。
- 如果调节器参数整定得不够好, 也会有一段振荡的过程。
- 在第 III 阶段中, ASR 和 ACR 都不饱和, 电流内环是一个电流随动子系统。

- 
- 双闭环直流调速系统的起动过程有以下三个特点：
    - (1) 饱和非线性控制
    - (2) 转速超调
    - (3) 准时间最优控制
-

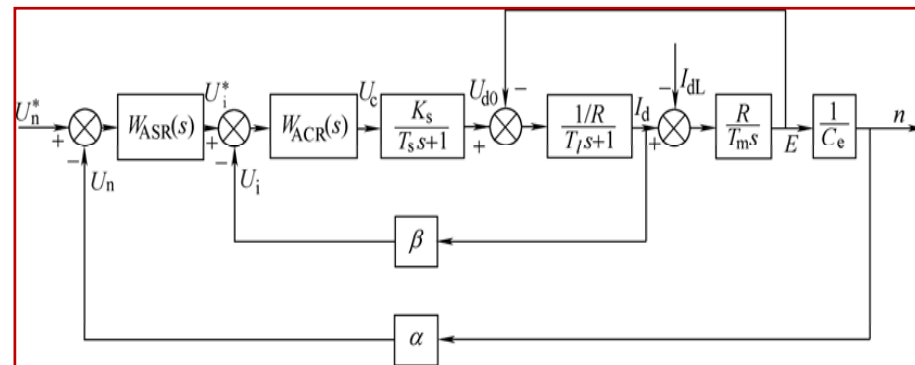
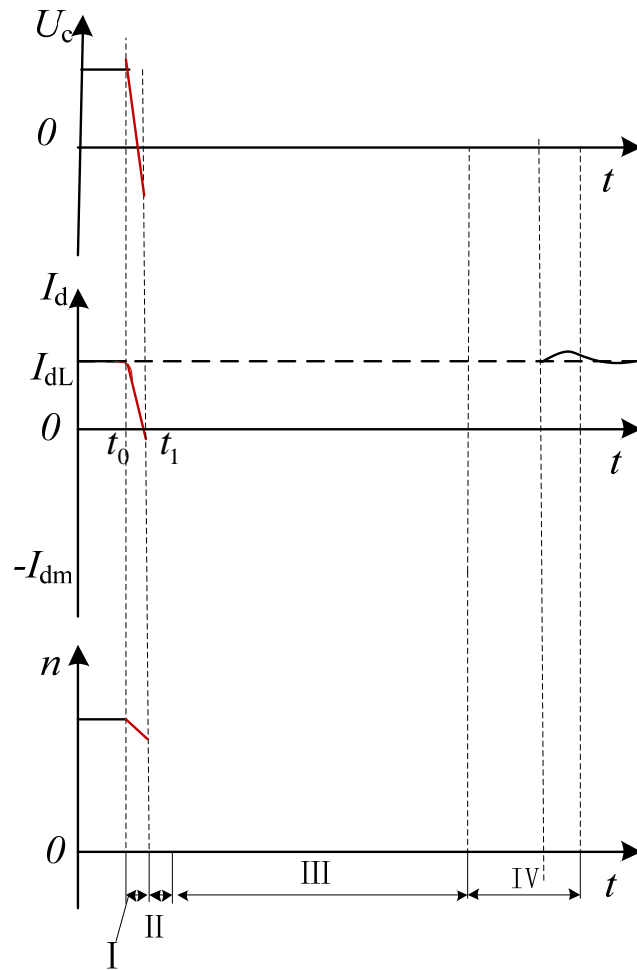
## 2.制动过程分析-以拖动位能性负载为例



- 正向电流衰减
- 反向电枢电流建立
- 恒流制动
- 转速调节

图4-7 双闭环直流调速系统正向制动过渡过程波形

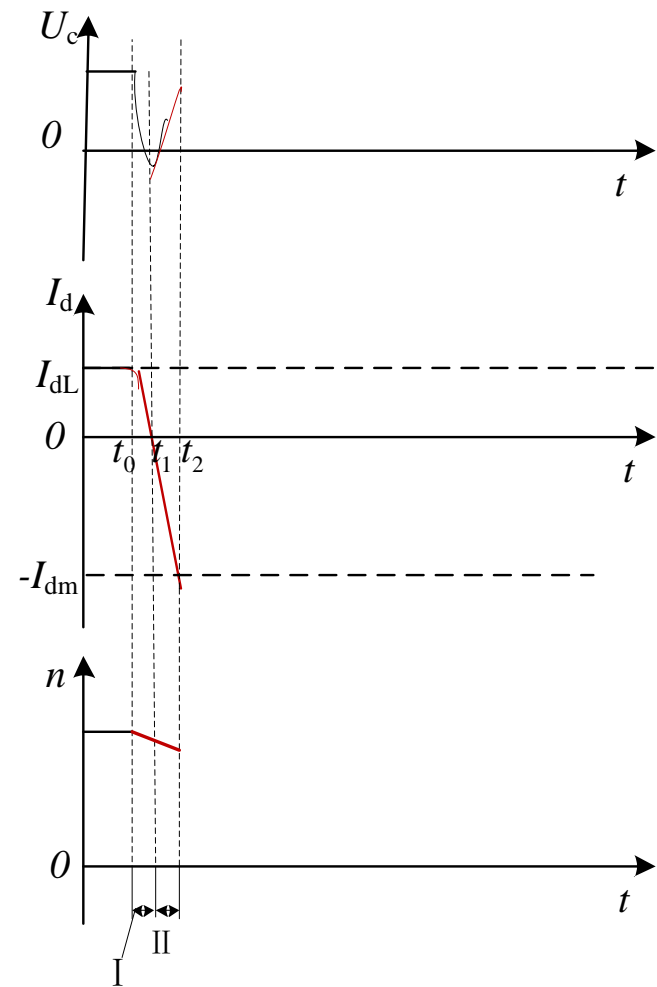
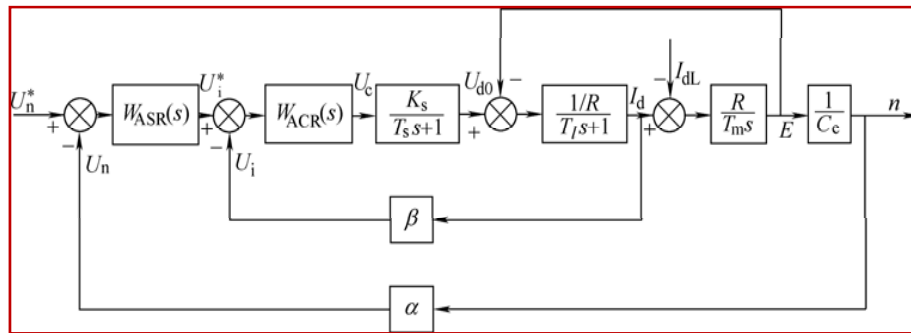
# 正向电枢电流衰减阶段 ( $t_0 \sim t_1$ )



## 正向电枢电流衰减阶段

- 收到停车指令，转速调节器的输入偏差电压为较大负值，其输出电压很快下降达到反向限幅值 $-U_{im}^*$ ，电流环强迫电枢电流迅速下降到0，标志着这一阶段结束。
- 电流调节器的输入偏差电压  $\Delta U_i = -U_{im}^* - U_i$ ，调节器输出控制电压快速下降，电枢电压也随之快速下降。
- 转速调节器很快进入并保持饱和状态。

# 反向电枢电流建立阶段 ( $t_1 \sim t_2$ )

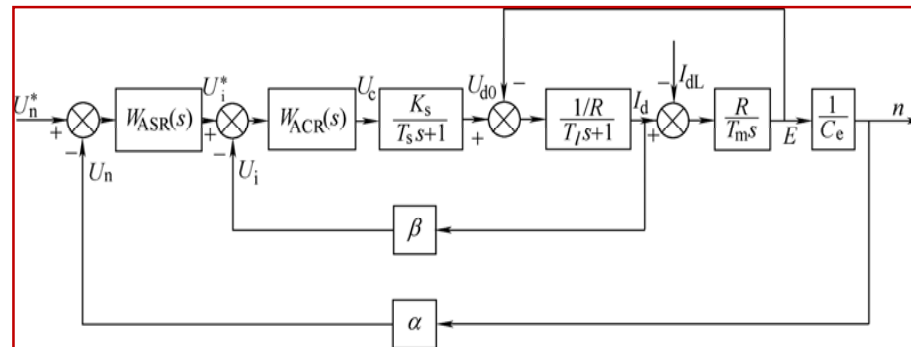
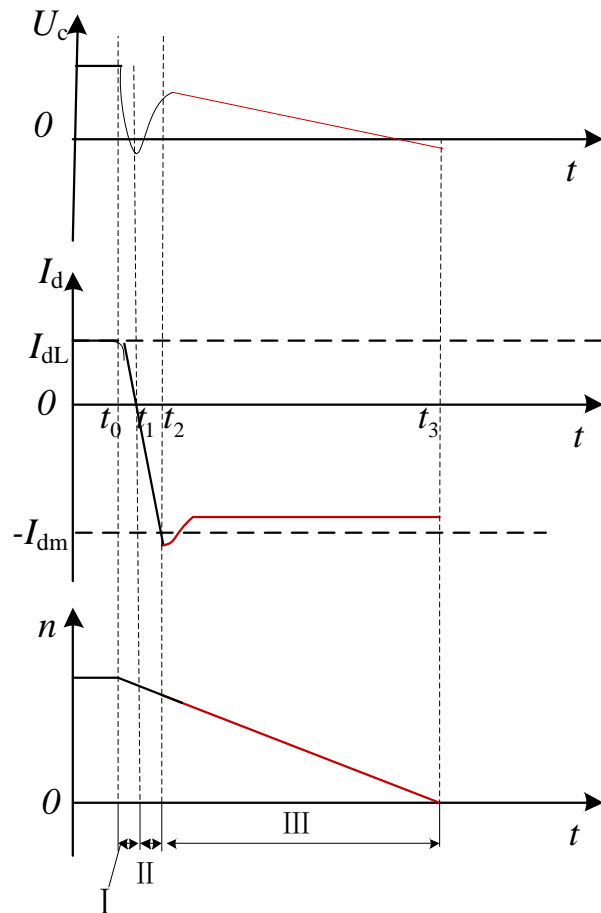




## 反向电枢电流建立阶段 ( $t_1 \sim t_2$ )

- 转速调节器输出始终处在反向饱和状态，转速环相当于开环，系统成为在恒值给定控制下的电流单环系统，强迫电流在  $t_1$  时刻反向增加至  $-I_{dm}$ 。
- 电流调节器输入仍为负值，电枢电流的快速下降，电流调节器中比例输出在快速增加，待电枢电流下降到一定值后，输出控制电压和电枢电压开始上升，但只要  $U_d < E$ ，电流继续下降。
- 这个阶段电机处于反接制动状态，所占时间也很短，转速仍来不及产生明显下降。

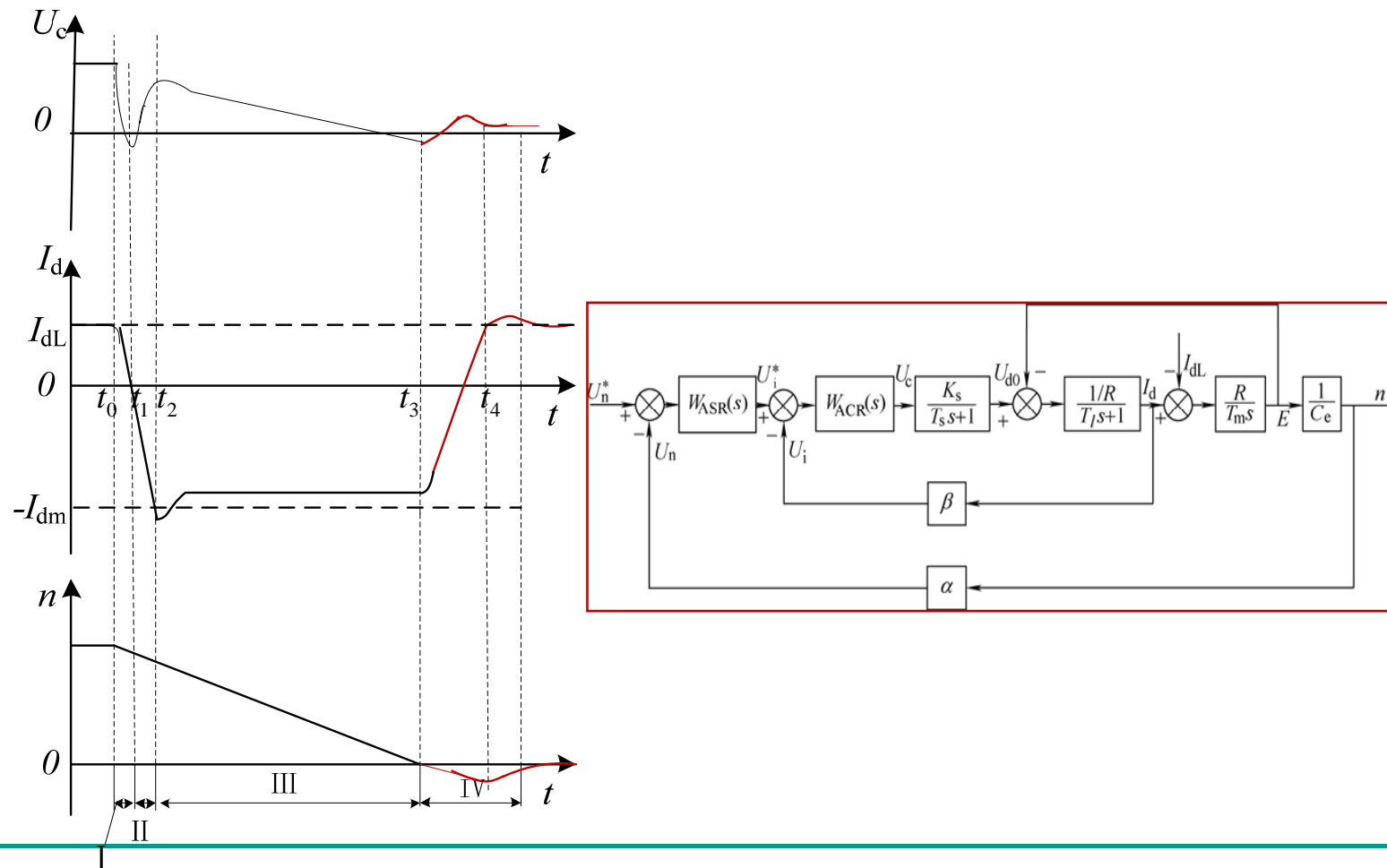
# 恒流制动阶段 ( $t_2 \sim t_3$ )



## 恒流制动阶段（ $t_2 \sim t_3$ ）

- 转速仍旧开环，系统仍为恒值给定-  $U_{im}^*$  控制下的电流单环系统，除短暂的电流调节阶段外，
- 在恒流制动阶段中反电动势 线性下降，为维持  $I_d \cong -I_{dm}$ ，控制电压线性降低，电枢电压也随之线性下降。
- 由于电流调节系统的扰动量是电动机的反电动势，它是一个线性渐减的扰动量，而扰动作用点之前只有一个积分环节，所以系统做不到无静差，而是接近于。

# 转速调节阶段 ( $t_3 \sim t_4$ )



## 转速调节阶段（ $t_3$ 以后）

- 转速调节器ASR由于积分作用还维持在限幅值- $U_{im}$ ，电动机反转，转速调节器输出反向退饱和，电枢电流跟随给定，反向快速下降到零后建立正向电枢电流，只要 $I_d < I_{dL}$ ，转速继续下降，直到 $I_d = I_{dL}$ 时，转速到达反向最大值。此后，电动机又开始反向减速，直到电机停转。
- 反电动势很小，电枢电压主要用于改变电枢电流，控制电压变化趋势与电流波形相似，但相位超前。
- 如果调节器参数整定得不够好，最后还会有一段振荡过程。
- ASR和ACR都不饱和，ASR起主导的转速调节作用，而ACR则力图使尽快地跟随其给定值。

---

### 3. 动态抗扰性能分析

- 双闭环系统与单闭环系统的差别在于多了一个电流反馈环和电流调节器。
  - 调速系统，最主要的抗扰性能是指抗负载扰动和抗电网电压扰动性能，
  - 闭环系统的抗扰能力与其作用点的位置有关。
-

## (1) 抗负载扰动

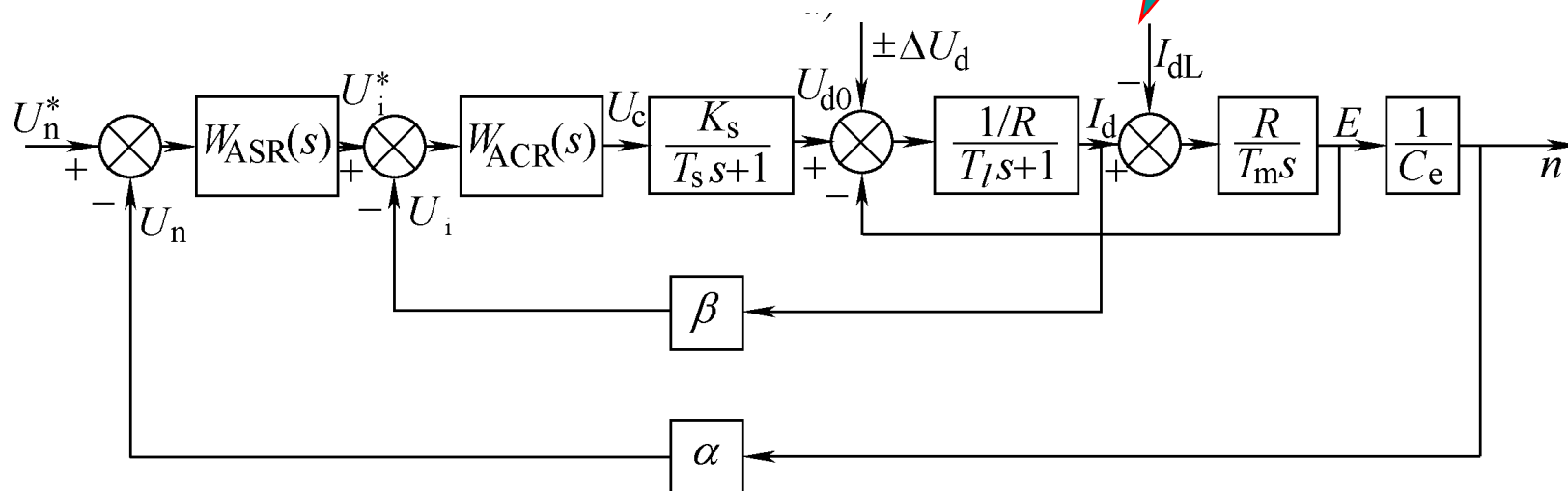


图4-8 直流调速系统的动态抗扰作用

- 负载扰动作用在电流环之后，只能靠转速调节器 **ASR** 来产生抗负载扰动的作用。
- 在设计 **ASR** 时，要求有较好的抗扰性能指标。

## (2) 抗电网电压扰动

电网电压扰动

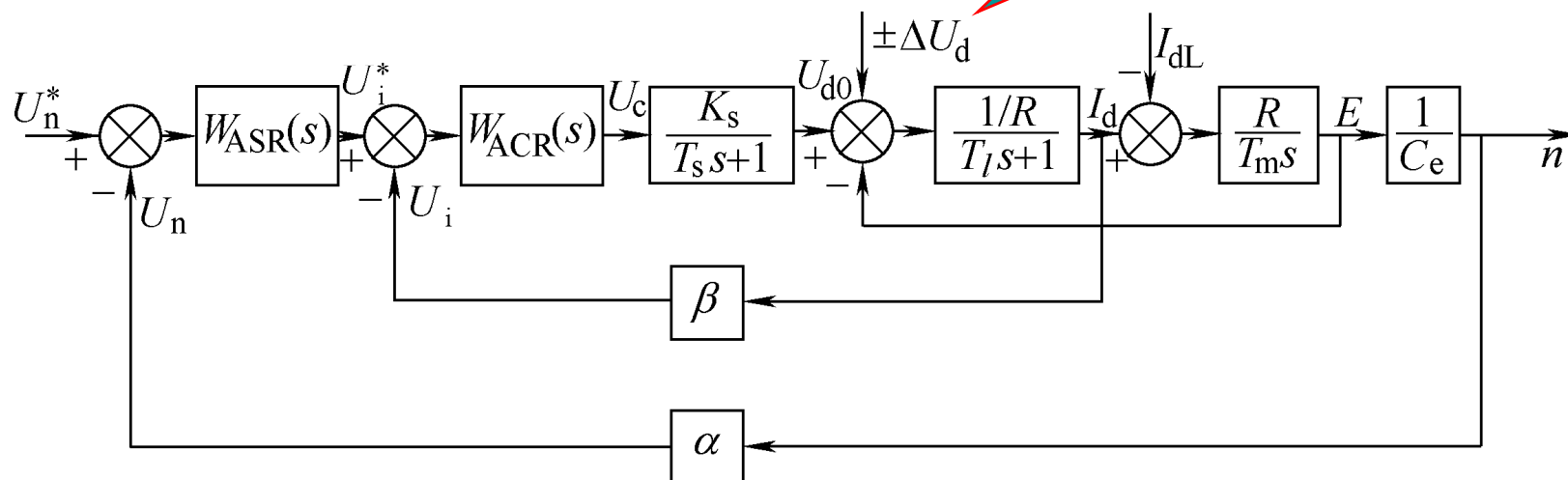


图4-8 直流调速系统的动态抗扰作用

- 电压波动可以通过电流反馈得到比较及时的调节，使抗扰性能得到改善。
- 在双闭环系统中，由电网电压波动引起的转速变化会比单闭环系统小得多。



## 4.2.3 转速、电流调节器在双闭环直流调速系统中的作用

### 1. 转速调节器的作用

- 转速调节器是调速系统的主导调节器，它使转速很快地跟随给定电压变化, 如果采用**PI**调节器，则可实现无静差。
- 对负载变化起抗扰作用。
- 其输出限幅值决定电动机允许的最大电流。

---

## 2. 电流调节器的作用

- 在转速外环的调节过程中，使电流紧紧跟随其给定电压（即外环调节器的输出量）变化。
  - 对电网电压的波动起及时抗扰的作用。
  - 在转速动态过程中，保证获得电机允许的最大电流。
  - 当电动机过载甚至堵转时，限制电枢电流的最大值，起快速的自动保护作用。一旦故障消失，系统立即自动恢复正常。
-