

第4章

转速、电流双闭环控制的直流调速系统

内容提要

- 转速、电流双闭环直流调速系统及其静特性；
- 双闭环直流调速系统的数学模型和动态性能分析；

绪言

1 问题的提出

动态性能要求: 对于经常正、反转运行的调速系统，缩短起、制动过程的时间是提高生产率的重要因素。

如何控制动态性能？

电力拖动系统的运动方程：

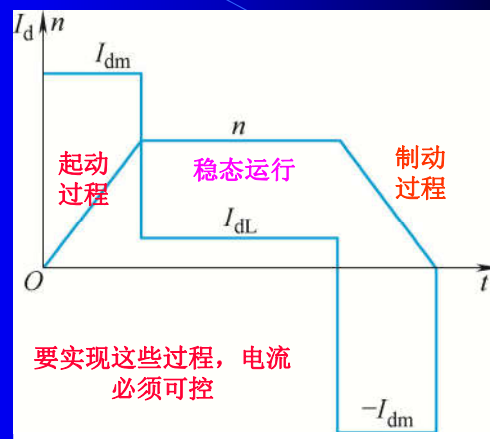
$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad I_d - I_L = \frac{GD^2}{375C_m} \frac{dn}{dt}$$

- **结论:** 要得到好的动态性能，必须控制好转矩，即控制好电流，控制电流的动态波形。

2 实现目标——时间最优的理想过渡过程

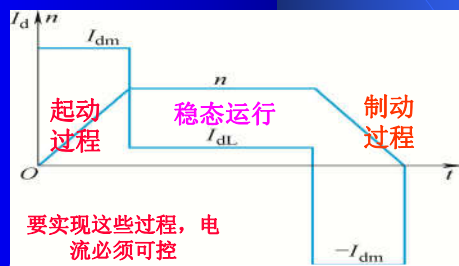
- 在**起动（或制动）**过渡过程中，希望始终保持**电流（电磁转矩）为允许的最大值**，使调速系统以最大的加（减）速度运行。
- 当到达**稳态转速**时，最好使**电流立即降下来**，使电磁转矩与负载转矩相平衡，从而迅速转入稳态运行。

图4-1 时间最优的理想过渡过程



单闭环系统能否实现 ？

- 转速单闭环系统不能控制电流（或转矩）的动态过程。

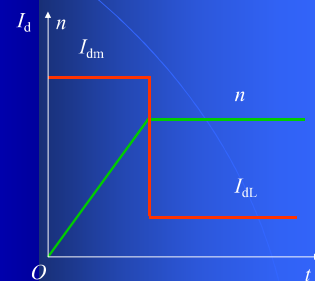


3. 解决思路

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。

采用电流负反馈应该能够得到近似的恒流过程。

理想的快速起动过程



我们希望能实现如下控制：

- 起动过程，只有电流反馈，没有转速负反馈；
- 在达到稳态转速后，又希望转速负反馈发挥主要作用，不再让电流负反馈起阻碍作用。

怎样才能做到这种既存在转速和电流两种负反馈，又使它们能分别在不同的阶段里采用不同配合方式起作用呢？

§ 4.1 转速、电流反馈控制直流调速系统的组成及其静特性

§ 4.1.1 双闭环控制直流调速系统的组成

- 在系统中设置两个调节器，分别引入转速负反馈和电流负反馈以调节转速和电流，
- 把转速调节器的输出当作电流调节器的输入，再用电流调节器的输出去控制电力电子变换器UPE。
- 从闭环结构上看，电流环在里面，称作内环；转速环在外边，称作外环。形成了转速、电流反馈控制直流调速系统（简称双闭环系统）。

§ 4.1.1 双闭环控制直流调速系统的组成

系统的组成

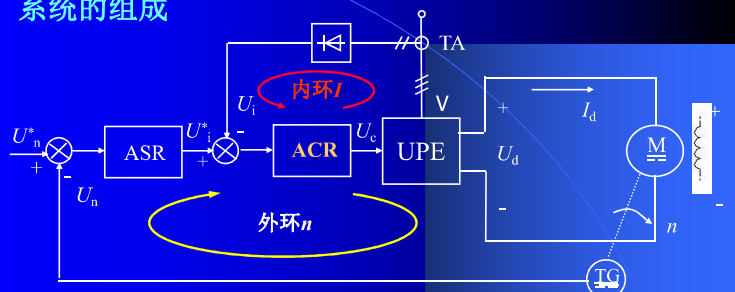


图4-2 a) 转速、电流双闭环直流调速系统结构

ASR—转速调节器 ACR—电流调节器 TG—测速发电机
TA—电流互感器 UPE—电力电子变换器

系统电路原理图

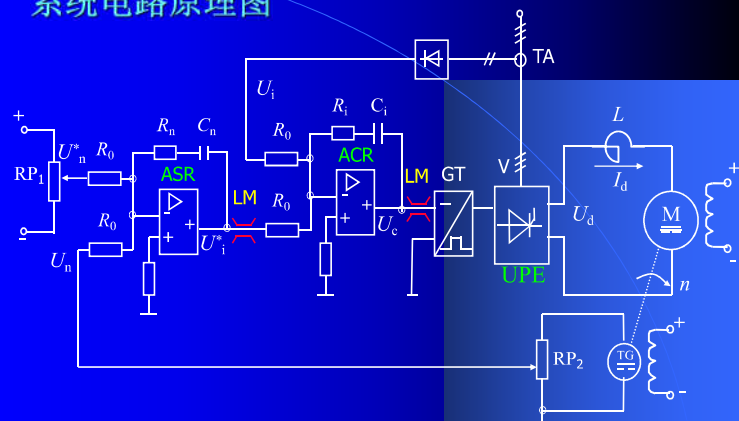


图4-2 b) 双闭环直流调速系统电路原理图

§ 4.1.2 系统静特性分析和参数计算

1. 系统稳态结构图

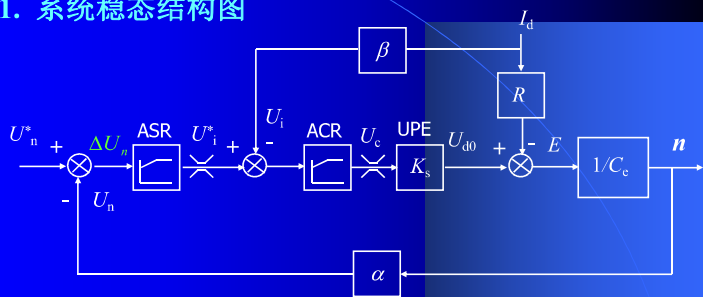


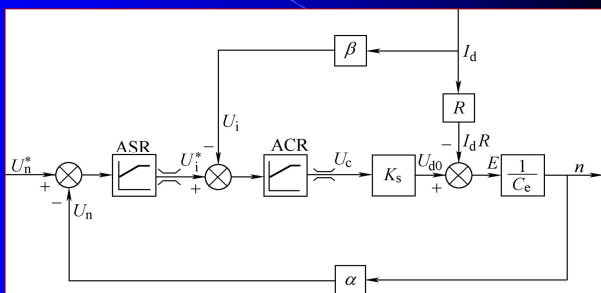
图4-3 双闭环直流调速系统的稳态结构框图

α —转速反馈系数； β —电流反馈系数

- ◆ 转速调节器ASR的输出限幅电压决定了电流给定的最大值，电流调节器ACR的输出限幅电压限制了电力电子变换器的最大输出电压，
- ◆ 当调节器饱和时，输出达到限幅值，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；
- ◆ 当调节器不饱和时，PI调节器工作在线性调节状态，其作用是使输入偏差电压在稳态时为零。
- ◆ 对于静特性来说，只有转速调节器饱和与不饱和两种情况，电流调节器不进入饱和状态。

2. 系统静特性

(1) 转速调节器饱和



- ◆ 突加给定，当ASR调节器进入饱和状态，输出达到限幅值，输入量的变化不再影响输出，即 \$\Delta U_n\$ 再增加，输出 \$U_i\$ 不变化。

转速调节器饱和

● 静特性的垂直段

- ASR输出达到限幅值时，转速外环呈开环状态，转速的变化对转速环不再产生影响。
- 双闭环系统变成一个电流无静差的单电流闭环调节系统。稳态时：

$$I_d = \frac{U_{im}^*}{\beta} = I_{dm} \quad (4-2)$$

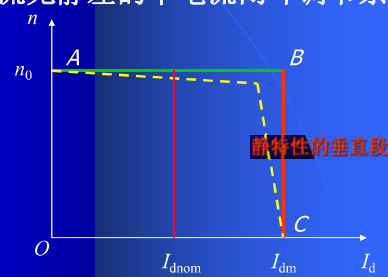


图4-4 双闭环直流调速系统的静特性

(2) 转速调节器不饱和

■ 静特性的水平段

- 两个调节器都不饱和，稳态时，它们的输入偏差电压都是零。

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

$$U_i^* = U_i = \beta I_d = \beta I_{dL}$$

$$n = \frac{U_n^*}{\alpha} = n^* \quad (4-1)$$

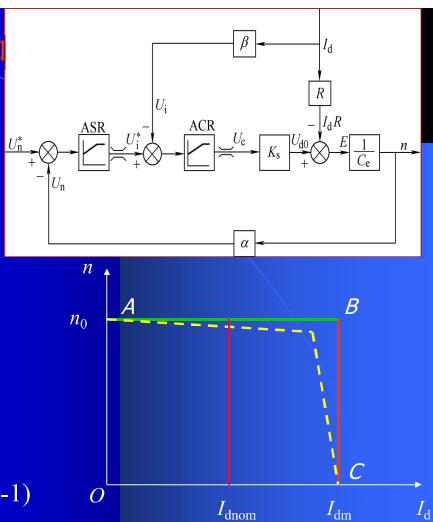
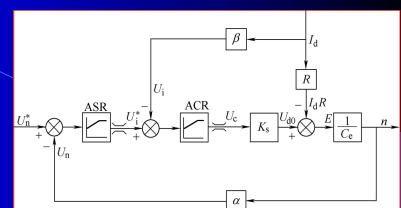


图4-4 双闭环直流调速系统的静特性

3. 各变量稳态参数计算



- ◆ 双闭环调速系统在稳态工作中，当两个调节器都工作在线性段时，各变量之间有下列关系：

$$U_n^* = U_n = \alpha n = \alpha n^* \quad (4-3)$$

$$U_i^* = U_i = \beta I_d = \beta I_{dL} \quad (4-4)$$

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{C_e U_n^* / \alpha + I_{dL} R}{K_s} \quad (4-5)$$

上述关系表明，在稳态工作点上，

■ 转速 n 是由给定电压 U_n^* 决定的； $U_n^* = U_n = \alpha n = \alpha n^*$

■ ASR的输出量 U_i^* 是由负载电流 I_{dL} 决定的；

$$U_i^* = U_i = \beta I_d = \beta I_{dL}$$

■ 控制电压 U_c 的大小则同时取决于 n 和 I_d ，或者说，同时取决于 U_n^* 和 I_{dL} 。

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{C_e U_n^* / \alpha + I_{dL} R}{K_s}$$

这些关系反映了PI调节器不同于P调节器的特点。比例环节的输出量总是正比于其输入量，而PI调节器则不然，其输出量的稳态值与输入无关，而是由它后面环节的需要决定的。后面需要PI调节器提供多大的输出值，它就能提供多少，直到饱和为止。

■ 反馈系数计算

鉴于这一特点，双闭环调速系统的稳态参数计算与单闭环有静差系统完全不同，而是和无静差系统的稳态计算相似，即根据各调节器的给定与反馈值计算有关的反馈系数：

$$\text{转速反馈系数} \quad \alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_{\max}} \quad (4-6)$$

$$\text{电流反馈系数} \quad \beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}} \quad (4-7)$$

两个给定电压的最大值 U_{nm}^* 和 U_{im}^* 由设计者选定。

§ 4.2 双闭环直流调速系统的数学模型与动态过程分析

本节提要

- ◆ 双闭环直流调速系统的动态数学模型
- ◆ 动态过程分析
- ◆ 转速和电流两个调节器的作用

§ 4.2.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型

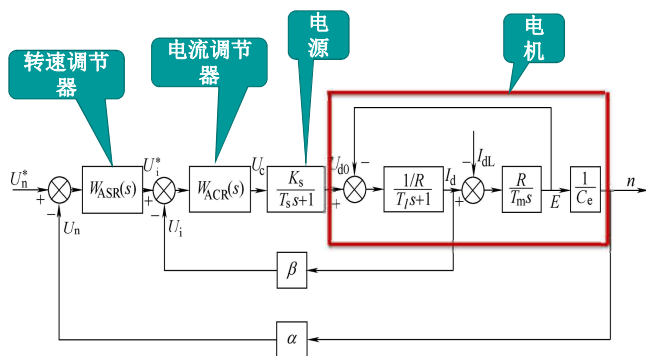


图4-5 双闭环直流调速系统的动态结构图

§ 4.2.2 双闭环直流调速系统的动态过程分析

能否实现最优启动
??

- ◆ 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。

1 起动过程分析

- ◆ 起动过程分为电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段，

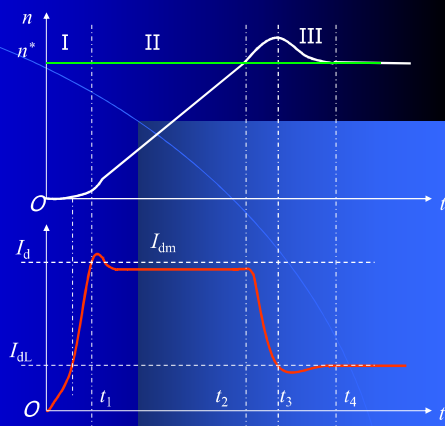
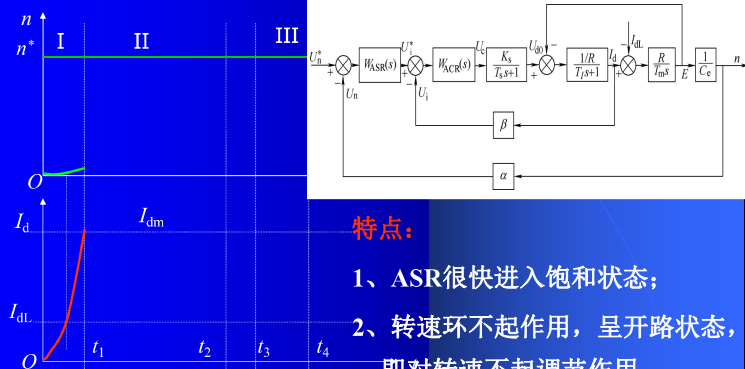


图4-6 双闭环直流调速系统起动过程的转速和电流波形

第I阶段：电流上升阶段（0~t₁） 电流从0到达最大允许值

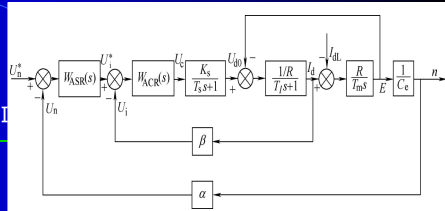


特点：

- 1、ASR很快进入饱和的状态；
- 2、转速环不起作用，呈开路状态，即对转速不起调节作用；
- 3、电流迅速上升为最大值。

第II阶段：恒流升速阶段（t₁~t₂）

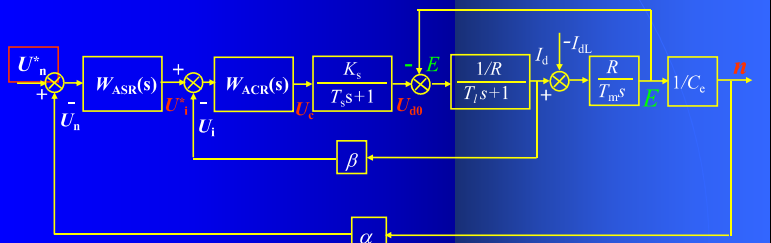
$$I_d - I_L = \frac{GD^2}{375C_m} \frac{dn}{dt}$$



- ◆ 电流保持为最大值；
- ◆ 电动机转速迅速上升为给定值 n^* ；
- ◆ ASR为饱和状态，不起作用。ACR为调节器起作用。

恒流升速阶段（t₁~t₂）特点

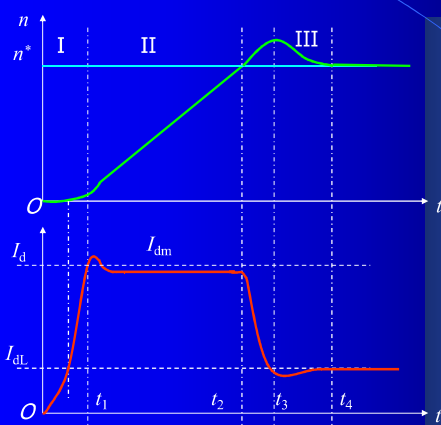
- 1、ASR调节器始终保持在饱和状态，转速环仍相当于开环工作。
- 2、 $U_n < U_n^*$ ， $U_i = U_{im}^*$ ， $I_d = I_{dm1}$
- 3、电流闭环调节的扰动是电动机的反电动势，它是一个线性渐增的斜坡扰动量，系统做不到无静差，而是 I_d 略低于 I_{dm} 。



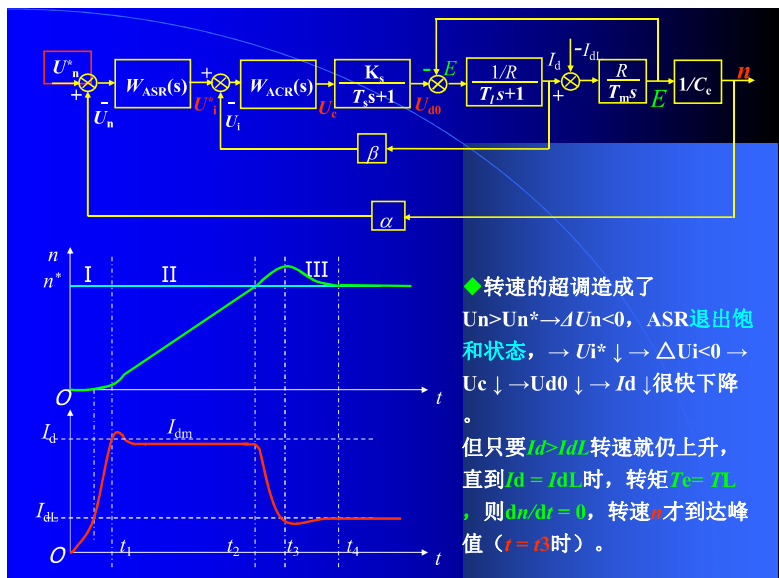
第III阶段：转速调节阶段（t₂以后）

(I) 在 $t_2 \sim t_3$, $I_d > I_{dL}$

$$I_d - I_L = \frac{GD^2}{375C_m} \frac{dn}{dt}$$



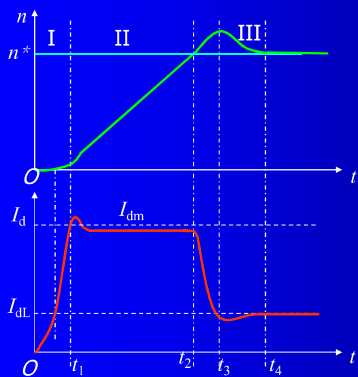
- ◆ 转速上升到了给定值 $n = n^*$ ， $\Delta U_n = 0$ 。因为 $I_d > I_{dL}$ ，电动机仍处于加速过程，使 $n > n^*$ ，称之为起动过程的转速超调。



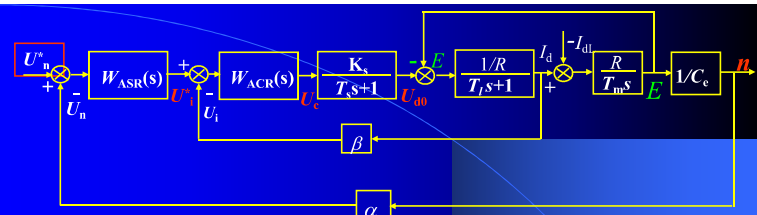
- ◆ 转速的超调造成了 $U_n > U_n^* \rightarrow \Delta U_n < 0$ ，ASR退出饱和状态， $\rightarrow U_i^* \downarrow \rightarrow \Delta U_i < 0 \rightarrow U_c \downarrow \rightarrow U_{d0} \downarrow \rightarrow I_d \downarrow$ 很快下降。但只要 $I_d > I_{dL}$ 转速就仍上升，直到 $I_d = I_{dL}$ 时，转矩 $T_e = T_L$ ，则 $dn/dt = 0$ ，转速才到达峰值（ $t = t_3$ 时）。

(2) 在 $t_3 \sim t_4$, $I_d < I_{dL}$

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$



- ◆ 在 $t_3 \sim t_4$ 时间内, $I_d < I_{dL}$, 电动机开始在负载的阻力下减速, 转速由加速变为减速, 直到稳定 $n = U_n^* / \alpha$ 。
- 如果调节器参数整定得不够好, 也会有一些振荡过程。
- ◆ 在第III阶段中, ASR和ACR都不饱和。

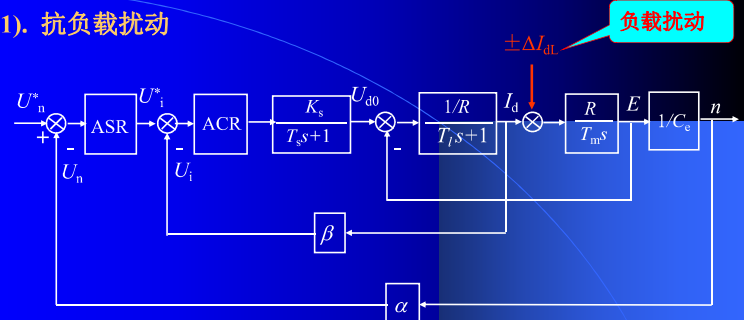


- 第III阶段: 转速调节阶段 (t_2 以后) 特点:
 - 1、转速上升超过了给定转速, 称为超调;
 - 2、ASR退出饱和, 对转速进行调节, ASR起主导的转速调节作用;
 - 3、电流下降直至等于负载电流, ACR则力图使 I_d 尽快地跟随其给定值 U_i^* , 或者说, 电流内环是一个电流随动子系统;
 - 4、转速调节至等于给定转速 $n = U_n^* / \alpha$ 。

2. 双闭环系统抗扰性能分析

- 调速系统, 最主要的扰动源是 **负载波动** 和 **电网电压波动**。

(1). 抗负载扰动

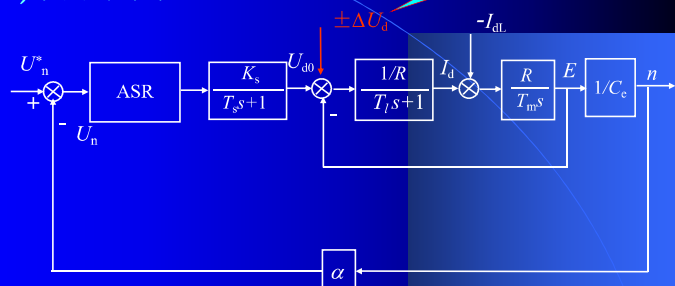


- 负载扰动作用在电流环之后, 只能靠转速调节器ASR来产生抗负载扰动的作用。
- 在稳态时, 若负载突增即 $I_{dL} \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_i^* \uparrow \rightarrow \Delta U_i \uparrow \rightarrow U_{d0} \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$
在新的负载电流下, $I_d = I_{dL} = U_i^* / \beta$, $n = U_n^* / \alpha$ 。转速只与 U_n^* 有关, 与负载大小无关, 但会引起转速的短暂波动。

(2) 抗电网电压扰动

电网电压扰动

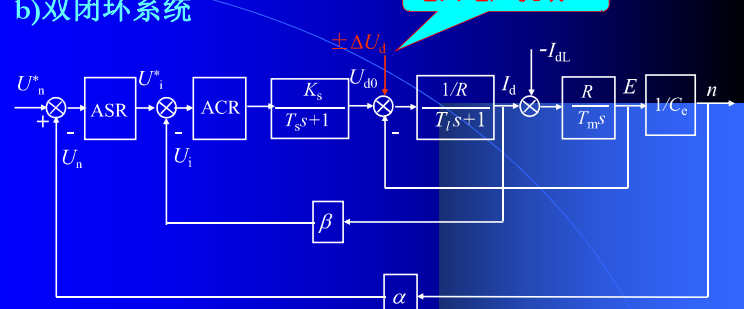
a) 单闭环系统



在单闭环调速系统中, 电网电压扰动的作用点离被调量较远, 调节作用受到多个环节的延滞, 因此单闭环调速系统抵抗电压扰动的性能要差一些。

b) 双闭环系统

电网电压扰动



双闭环系统中, 由于增设了电流内环, 电压波动可以通过电流反馈得到比较及时的调节, 不必等它影响到转速以后才能反馈回来, 抗扰性能大有改善。

结论: 在双闭环系统中, 由电网电压波动引起的转速动态变化会比单闭环系统小得多。

§ 4.2.3 转速和电流两个调节器的作用

1) 转速调节器的作用

(1) 转速调节器是调速系统的主导调节器，它使转速 n 很快地跟随给定电压变化，稳态时可减小转速误差，如果采用PI调节器，则可实现无静差。

(2) 对负载变化起抗扰作用。

(3) 其输出限幅值决定于电机允许的最大电流。

2) 电流调节器的作用

(1) 作为内环的调节器，在外环转速的调节过程中，它的作用是使电流紧紧跟随其给定电压（即外环调节器的输出量）变化。

(2) 对电网电压的波动起及时抗扰的作用。

(3) 在动态过程中，保证获得电机允许的最大电流，从而加快动态过程。

(4) 当电机过载甚至堵转时，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。这个作用对系统的可靠运行来说是十分重要的。

§ 4.3 单片微机控制的PWM可逆直流调速系统

- 三相交流电源经不可控整流器变换为电压恒定的直流电源，再经过直流PWM变换器得到可调的直流电压，给直流电动机供电。
- 检测回路包括电压、电流、温度和转速检测，转速检测用数字测速。
- 微机控制具备故障检测功能，对电压、电流、温度等信号进行实时监测和报警。
- 一般选用专为电机控制设计的单片微机，配以显示、键盘等外围电路，通过通信接口与上位机或其他外设交换数据。

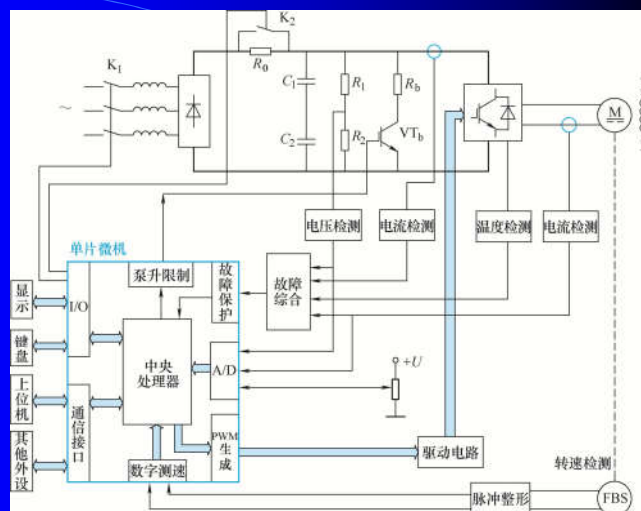


图4-6 微机数字控制双闭环直流PWM调速系统硬件结构图

- 控制软件一般采用转速、电流双闭环控制，电流环为内环，转速环为外环，内环的采样周期小于外环的采样周期。
- 无论是电流采样值还是转速采样值都含有扰动，常采用阻容电路滤波，但滤波时间常数太大时会延缓动态响应，为此可采用硬件滤波与软件滤波相结合的办法。
- 转速调节器ASR和电流调节器ACR大多采用PI调节，当系统对动态性能要求较高时，还可以采用各种非线性和智能化的控制算法，使调节器能够更好地适应控制对象。

§ 4.3 转速、电流双闭环控制直流调速系统的设计

§ 4.3.1 控制系统的动态性能指标

- 控制系统的动态性能指标：
- (1) 对给定输入信号的跟随性能指标
- (2) 对扰动输入信号的抗扰性能指标

1、动态跟随性能指标

- 以输出量的初始值为零，给定阶跃信号下的过渡过程作为典型的跟随过程；
- 此跟随过程的输出量动态响应称作阶跃响应。
- 常用的阶跃响应跟随性能指标有上升时间、超调量和调节时间。

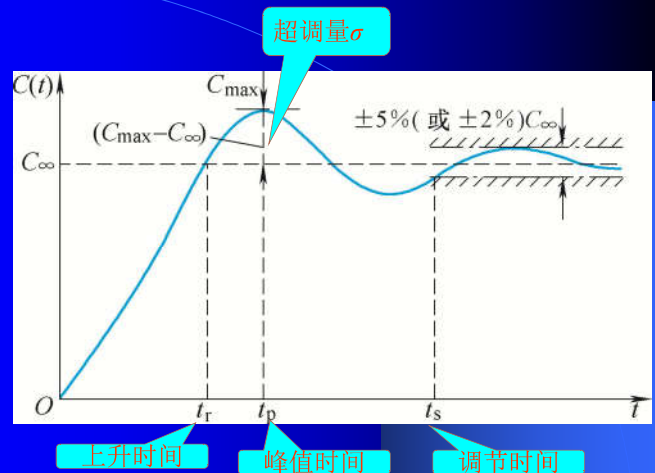


图4-9 典型的阶跃响应过程和跟随性能指标

2. 抗扰性能指标

- 当调速系统在稳定运行中，突加一个使输出量降低（或上升）的扰动量 F 之后，输出量由降低（或上升）到恢复到稳态值的过渡过程就是一个抗扰过程。
- 常用的抗扰性能指标为动态降落和恢复时间。

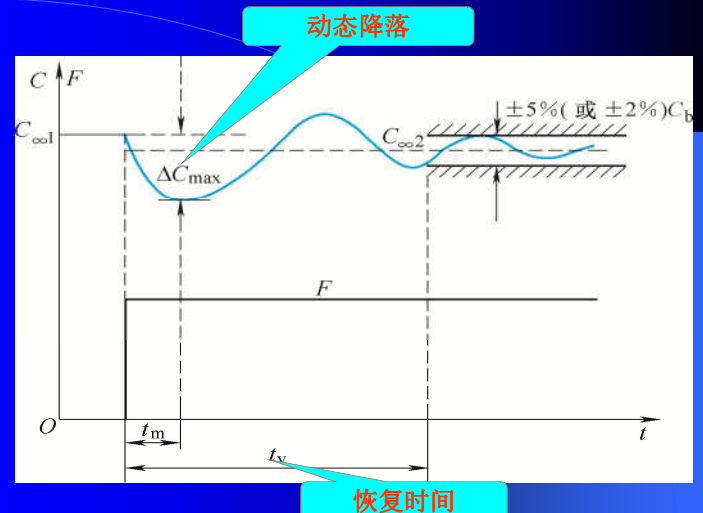


图4-10 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

本章小结

- 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。
- 通过内外环的分时配合工作，使得系统能够实现快速的起制动过程。
- 抗扰性能方面：调速系统中最主要的扰动是负载和电网电压扰动。
- 而电流环对电网电压的波动起到及时抗扰的作用。

本章作业：P100

思考题：4-3, 10

习题：4-1, 2, 4,

1、直流调速系统要求一定范围内无级平滑调速，以()调速方式为最好。

- A 降低励磁电压
- B 励磁回路串电阻
- C 降低电枢电压
- D 电枢回路串电阻

答案：C

2、V-M直流调速系统中采用了平波电抗器来抑制电流脉动，改善()问题。

- (A) 轻载时电流断续
- (B) 低速时的高次谐波
- (C) 功率因数
- (D) 堵转时电流过大。

答案：A

3、直流PWM变换器-电动机系统，当电动机工作在()状态时，向电容充电造成直流侧电压升高，称作()电压。

- A 电动、回馈
- B 回馈制动、回馈
- C 回馈制动、泵升
- D 电动、泵升

答案：C

4、下列说法不正确的是()。

- A 采用比例放大器的转速闭环系统可使系统无静差
- B 采用比例放大器的PWM-电动机的稳定性能优于V_M系统
- C 调速范围和静差率两个指标必须同时提出才有意义

答案：A

5 转速闭环直流调速系统不能够有效抑制的扰动包括()。

- A 电动机励磁变化
- B 调节器误差
- C 电源波动
- D 测速误差

答案：D 测速误差

6 三相桥式晶闸管整流装置的失控时间一般选为()ms。

- A 3.33
- B 6.67
- C 1.67
- D 0.84

答案：C

7 转速、电流双闭环直流调速系统中，转速调节器输出的最大值决定了电动机的 ()。

- A 最大电压
- B 转速
- C 最大电流
- D 电流

答案：C

8 转速、电流双闭环直流调速系统起动过程中，()阶段ASR迅速饱和，ASR的输出量对应了()。

- A 转速调节、给定转速
- B 转速调节、最大电流
- C 电流上升、给定转速
- D 电流上升、最大电流

答案：D

9 某双闭环调速系统在额定负载下稳定运行，若电动机突然失磁，则 ()。

- A 电动机在最大控制电压下运行
- B 电动机在给定转速运行
- C 电动机堵转
- D 电动机在最大电流下运行。

答案：C

10 转速、电流双闭环直流调速系统中，转速调节器输出的最大值决定了电动机的 ()。

- A 最大电压
- B 转速
- C 最大电流
- D 电流

答案：C

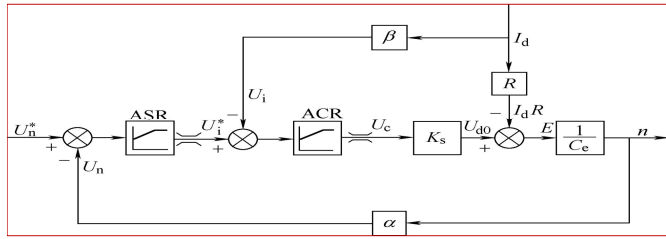
11 (多选) 转速、电流双闭环直流调速系统中，转速调节器的作用包括 ()。

- A 对电网电压波动起及时抗扰作用
- B 输出限幅决定了允许的最大电流
- C 对负载变化起抗扰作用
- D 使转速跟随给定电压变化

答案：B、C、D

思考（附加）：

1 双闭环系统在额定状态下稳定运行，如果转速反馈线突然断开，系统的运行情况如何？



双闭环系统在稳定运行中，如果转速反馈信号线断开，则在ASR输入端有 $U_n = 0$ ，

$$U_{im}^* \Rightarrow U_{cm} \Rightarrow U_{dom} \Rightarrow I_d \uparrow \Rightarrow T_e > T_L \Rightarrow n \uparrow \Rightarrow E \uparrow$$

$$\because U_d = I_{dL}R + C_e n \quad \text{所以使 } I_d \text{ 回落到 } I_d = I_{dL}。$$

系统进入稳定状态。

思考（附加）：

2 设系统拖动恒转矩负载并在额定状态下正常运行，若因为某种原因励磁电压降低使磁通下降一半，且取 $I_{dm} = 1.5I_N$ ，系统工作情况如何变化？

写出 U_i^* ， U_c ， U_d ， I_d ， n 在稳定后的表达式。

稳态时：

$$U_i^* = U_{im}^*, \quad U_c = U_{cm}, \quad I_d = I_{dN}$$

$$n = \frac{U_{dm} - I_N R}{C_e}$$

此时转速很高。系统可以稳定运行，但已经失控。

答：因为电流环的作用维持 $I_d = I_N$ 不变，

$$T_e = \frac{1}{2} C_m I_N < T_L \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow U_n \downarrow \Rightarrow \Delta U_n \uparrow \Rightarrow U_{im}^*$$

$$U_{im}^* \Rightarrow U_{cm} \Rightarrow U_{dom} \Rightarrow I_d \uparrow = I_{dm}$$

因为 $I_{dm} = 1.5I_N$ 则

$$T_e = \frac{1}{2} C_m I_{dm} = \frac{1}{2} C_m \cdot 1.5I_N = 0.75T_N < T_L \\ \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow 0$$

此时， $I_d = I_{dm} = 1.5I_N, U_i^* = U_{im}^*, U_c = \frac{U_{dm}}{K_s}$,

$$U_d = U_{dm} = 1.5I_N R + \frac{1}{2} K_e \Phi_N \cdot n = 1.5I_N R$$

