



运动控制系统的分析与设计

毛维杰

wjmao@zju.edu.cn

浙江大学控制科学与工程学院



运动控制系统的特点

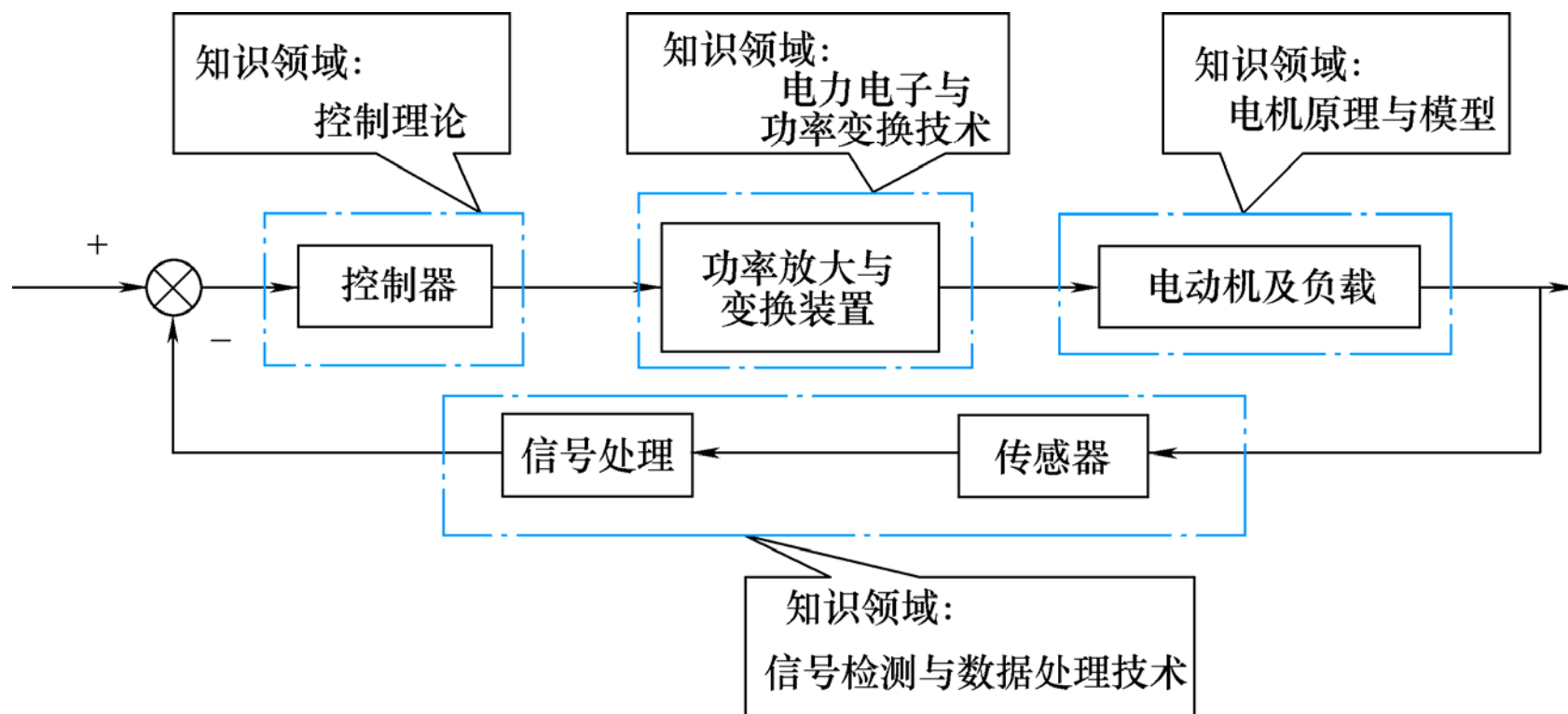
■ 运动控制

以机械运动为主要生产方式，以电机为主要被控对象的快速、高精度的控制，其主要被控变量是速度和位移。

■ 过程控制

工业生产过程的自动控制，其主要被控变量是温度、压力、液位等，主要应用于化工、石油、冶炼等工业。

运动控制系统的组成





运动控制系统的控制对象

- 从类型上区分

直流电动机、交流感应电动机（交流异步电动机）和交流同步电动机。

- 从用途上区分

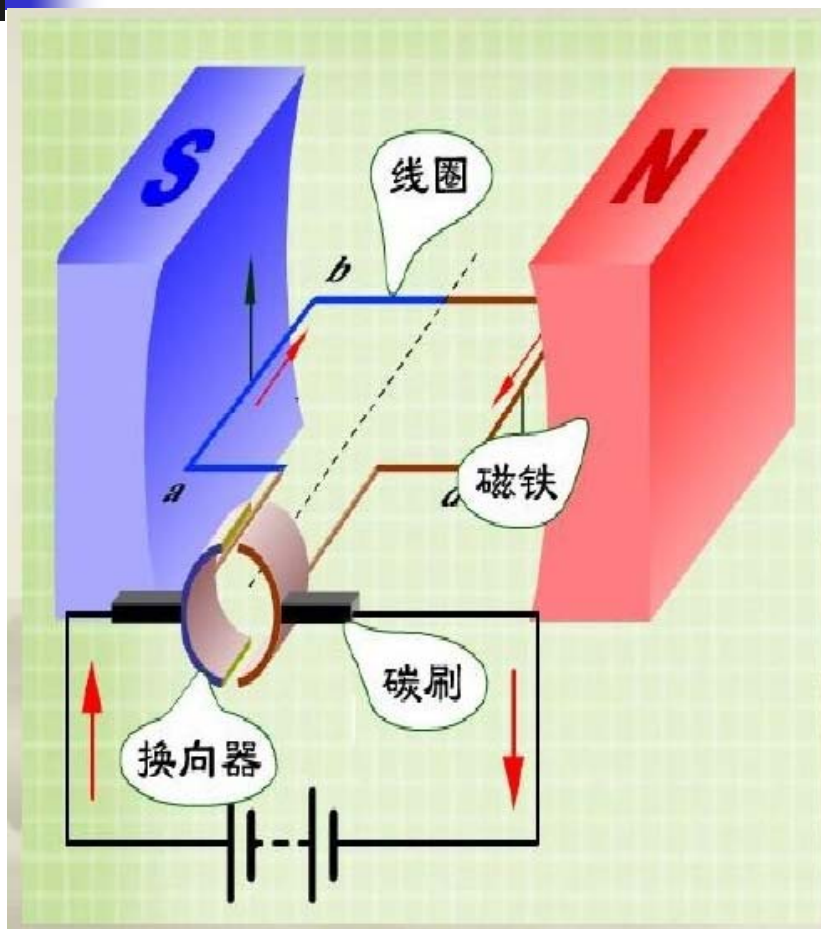
用于调速系统的拖动电动机和用于伺服系统的伺服电动机。



直流运动控制系统

1. 直流电机的机械特性与数学模型
2. 直流PWM变换器
3. 转速闭环运动控制系统的设计
4. 转速、电流双闭环运动控制系统的设计

直流电动机的工作原理



直流电动机与交流电动机工作原理大致相似，都是基于**电磁感应原理**：

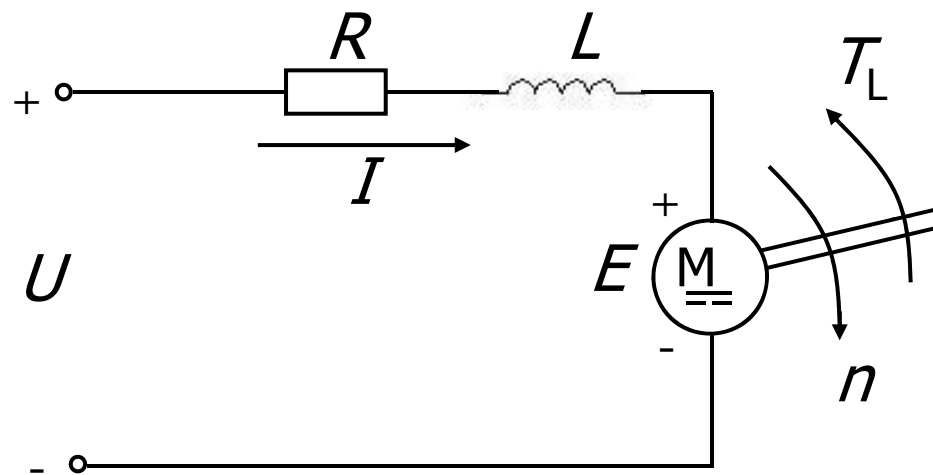
- 通电线圈在磁场中受到电磁力矩作用旋转起来；
- 线圈在磁场中旋转产生感应电动势（反电动势）；
- 换向器可自动改变线圈中电流方向，使线圈不停地转动下去。

直流电动机的稳态转速

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi}$$

式中

n ——转速 (r/min) ; U ——电枢电压 (V) ;
 I ——电枢电流 (A) ; R ——电枢回路总电阻(Ω) ;
 Φ ——励磁磁通 (Wb) ;
 K_e ——由电机结构决定的电动势常数。





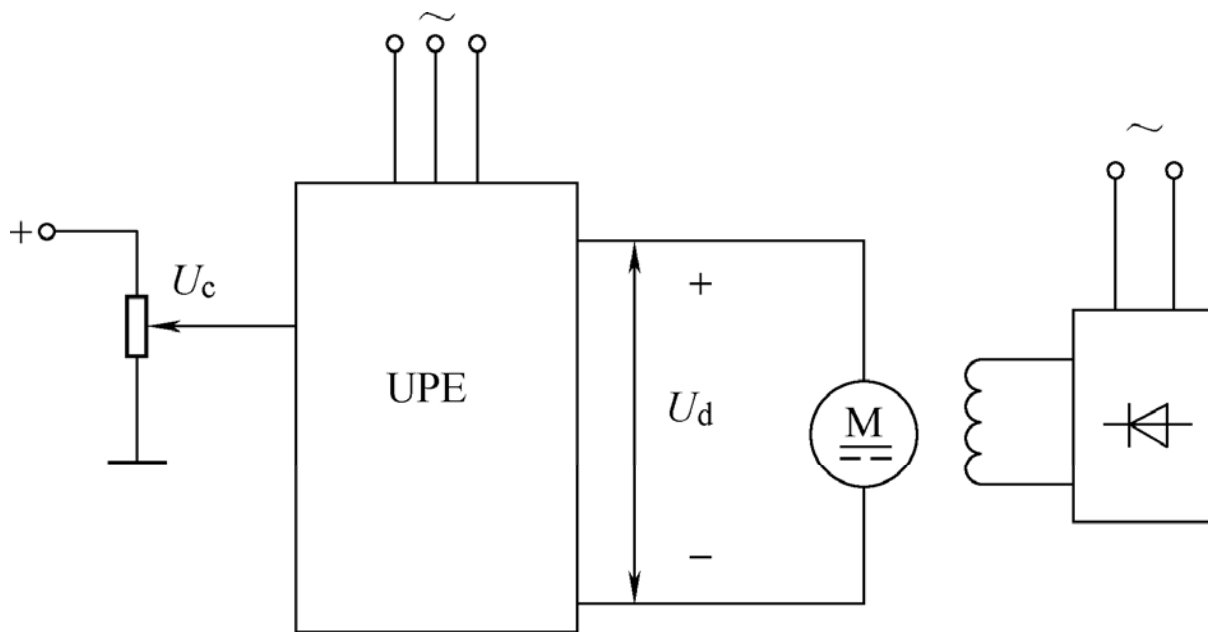
调节直流电动机转速的方法

- (1) 调节电枢供电电压;
- (2) 减弱励磁磁通;
- (3) 改变电枢回路电阻。

自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主。

直流调速系统的机械特性

- 开环调速系统，即无反馈控制的直流调速系统。
- 调节控制电压 U_c 就可以改变电动机的转速。





直流调速系统的机械特性

- 开环调速系统中各环节的稳态关系如下：

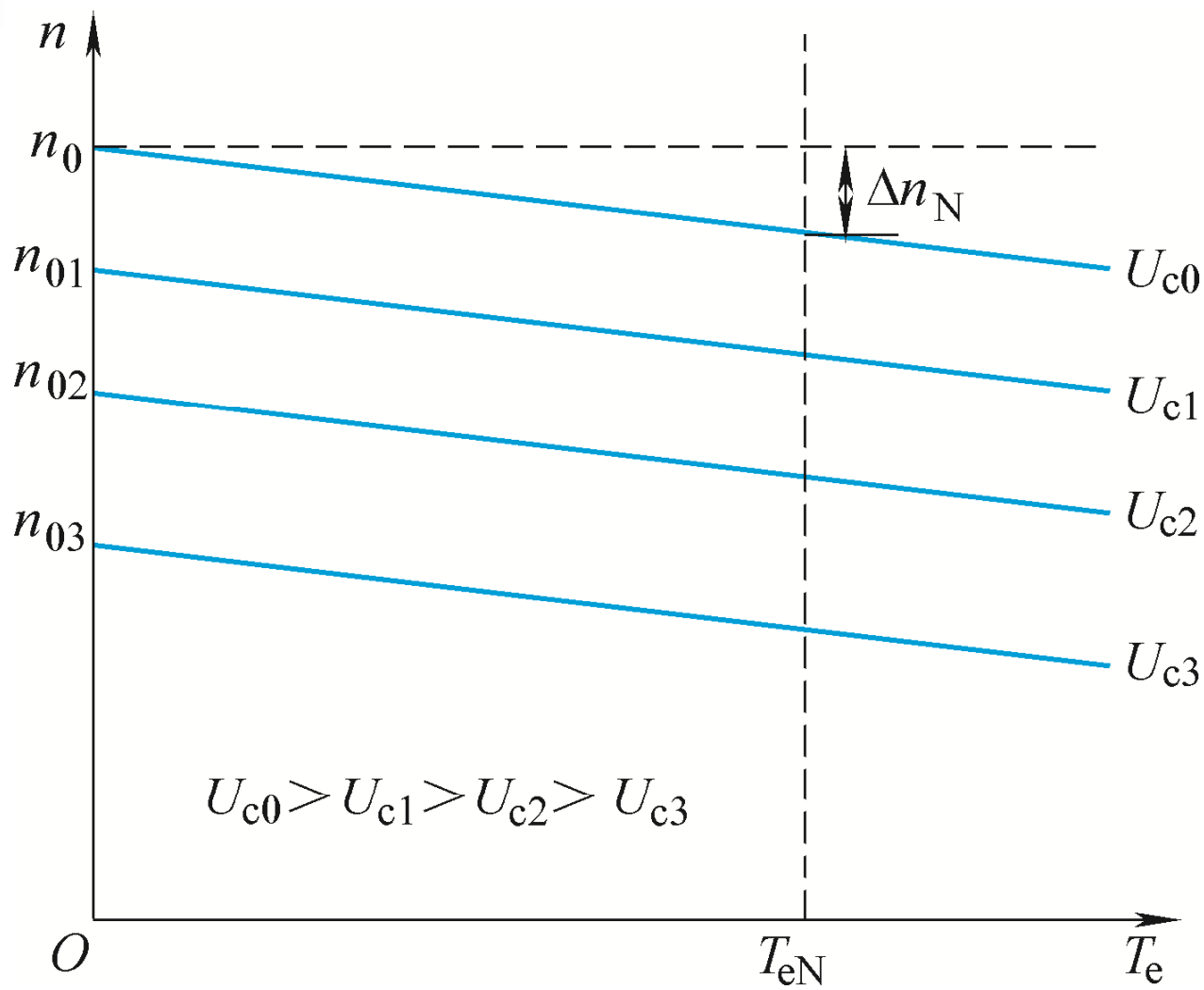
电力电子变换器 $U_{d0} = K_s U_c$

直流电动机 $n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$

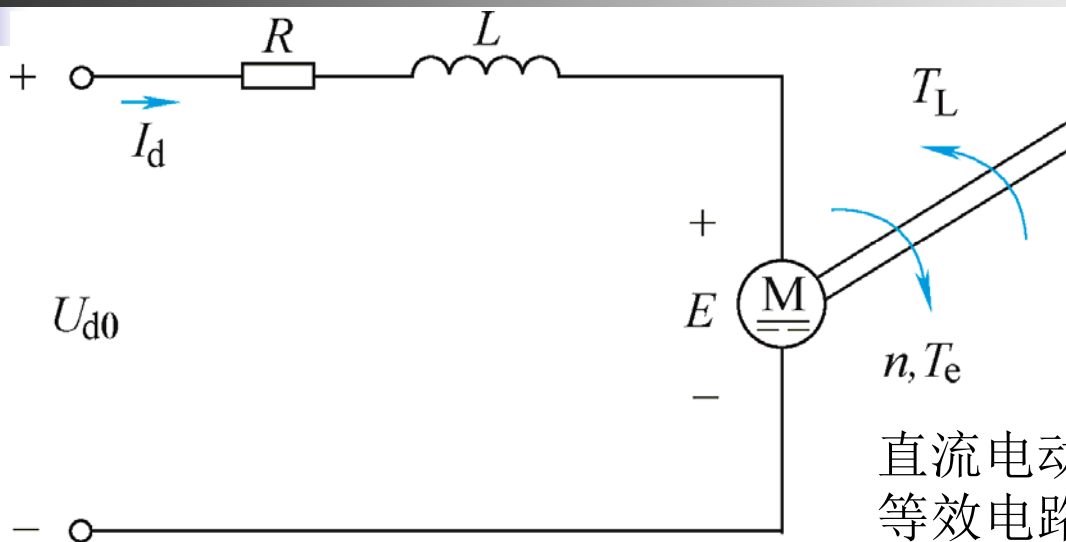
- 开环调速系统的机械特性为

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

直流调速系统的机械特性



直流电机的动态数学模型



直流电动机在额定励磁下的等效电路

- 假定主电路电流连续，动态电压方程为

$$U_{d0} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} + E$$

- 忽略粘性摩擦及弹性转矩，电机轴上的动力学方程为

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

直流电机的动态数学模型

- 额定励磁下的感应电动势和电磁转矩分别为

$$E = C_e n$$

$$T_e = C_m I_d$$

T_L ——包括电动机空载转矩在内的负载转矩，(N·m)

GD^2 ——电力拖动装置折算到电动机轴上的飞轮惯量，(N·m²)

$C_m = \frac{30}{\pi} C_e$ ——电动机额定励磁下的转矩系数，(N·m/A)

- 再定义下列时间常数：

$T_l = \frac{L}{R}$ ——电枢回路电磁时间常数(s)

$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$ ——电力拖动系统机电时间常数(s)



直流电机的动态数学模型

■ 整理后得

$$U_{d0} - E = R(I_d + T_l \frac{dI_d}{dt})$$

$$I_d - I_{dL} = \frac{T_m}{R} \frac{dE}{dt}$$

式中， $I_{dL} = \frac{T_L}{C_m}$ ——负载电流（A）



直流电机的动态数学模型

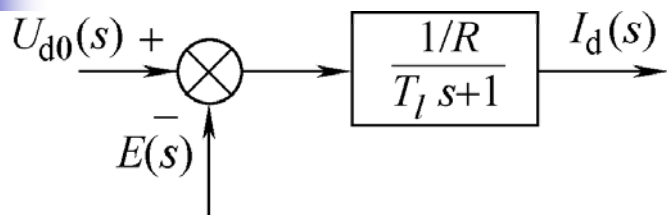
- 在零初始条件下，取拉氏变换，得电压与电流间的传递函数

$$\frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E(s)} = \frac{1}{T_1 s + 1}$$

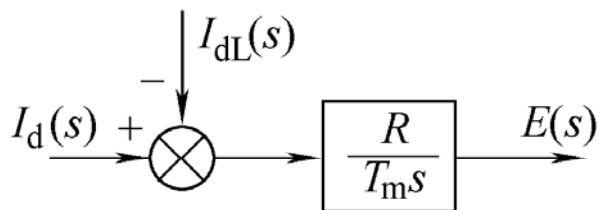
- 电流与电动势间的传递函数

$$\frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dL}(s)} = \frac{R}{T_m s}$$

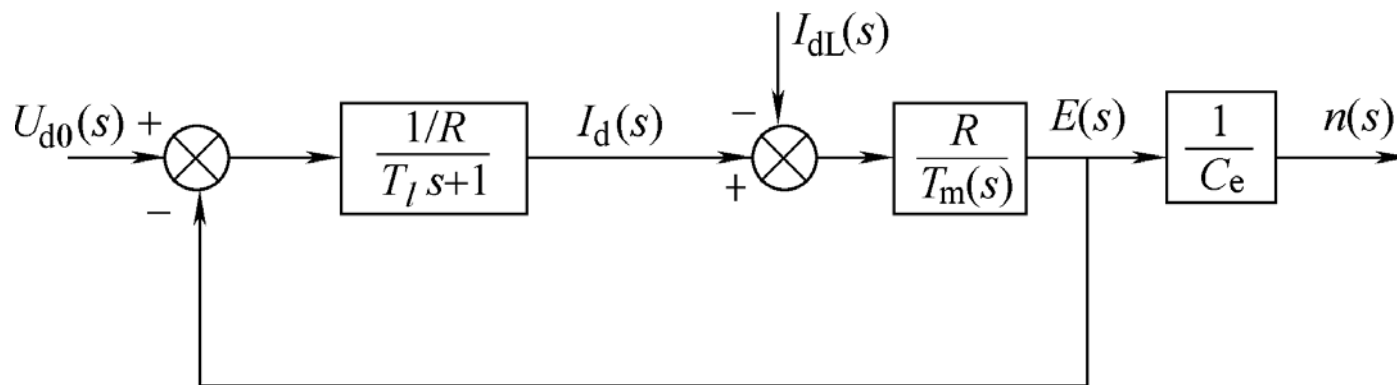
直流电机的动态数学模型



a)



b)



c)

额定励磁下直流电机的动态结构框图

(a)电压电流间的结构框图

(b)电流电动势间的结构框图

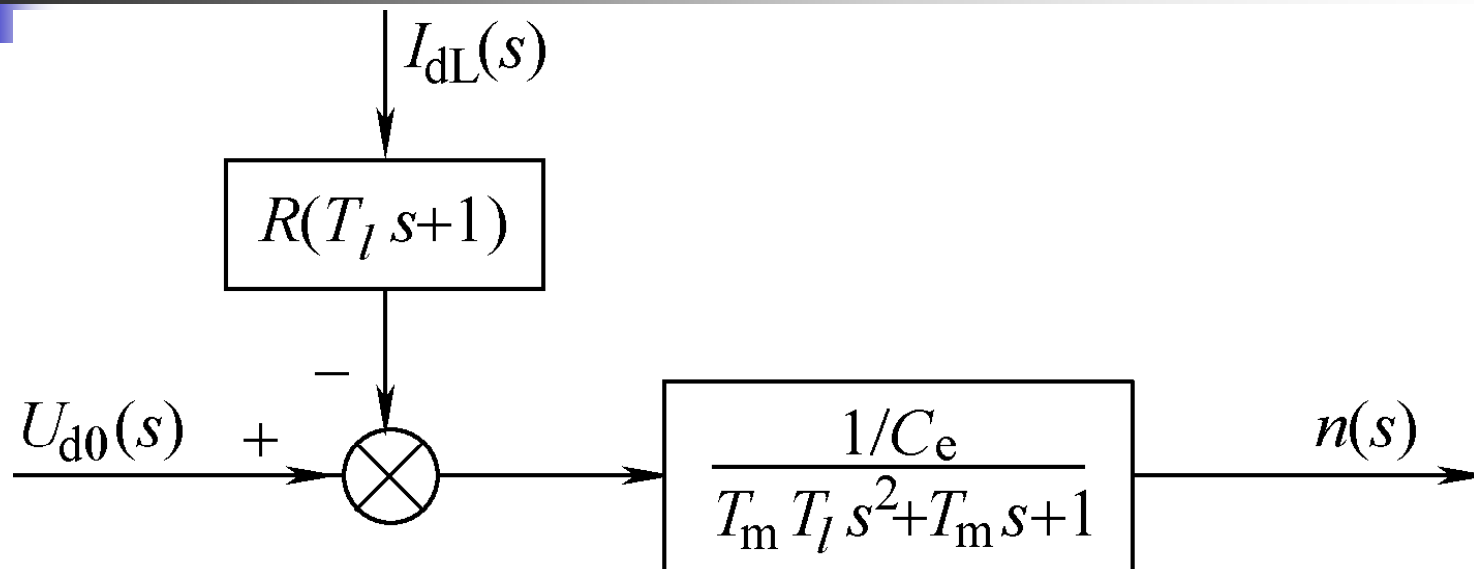
(c)直流电机的动态结构框图



直流电机的动态数学模型

- 直流电机有两个输入量：
 - 一个是施加在电枢上的理想空载电压 U_{d0} ，控制输入量
 - 另一个是负载电流 I_{dL} ，扰动输入量
- 如果不需要在结构图中显现出电流，可将扰动量的综合点移前，再进行等效变换，得到下图

直流电机的动态数学模型



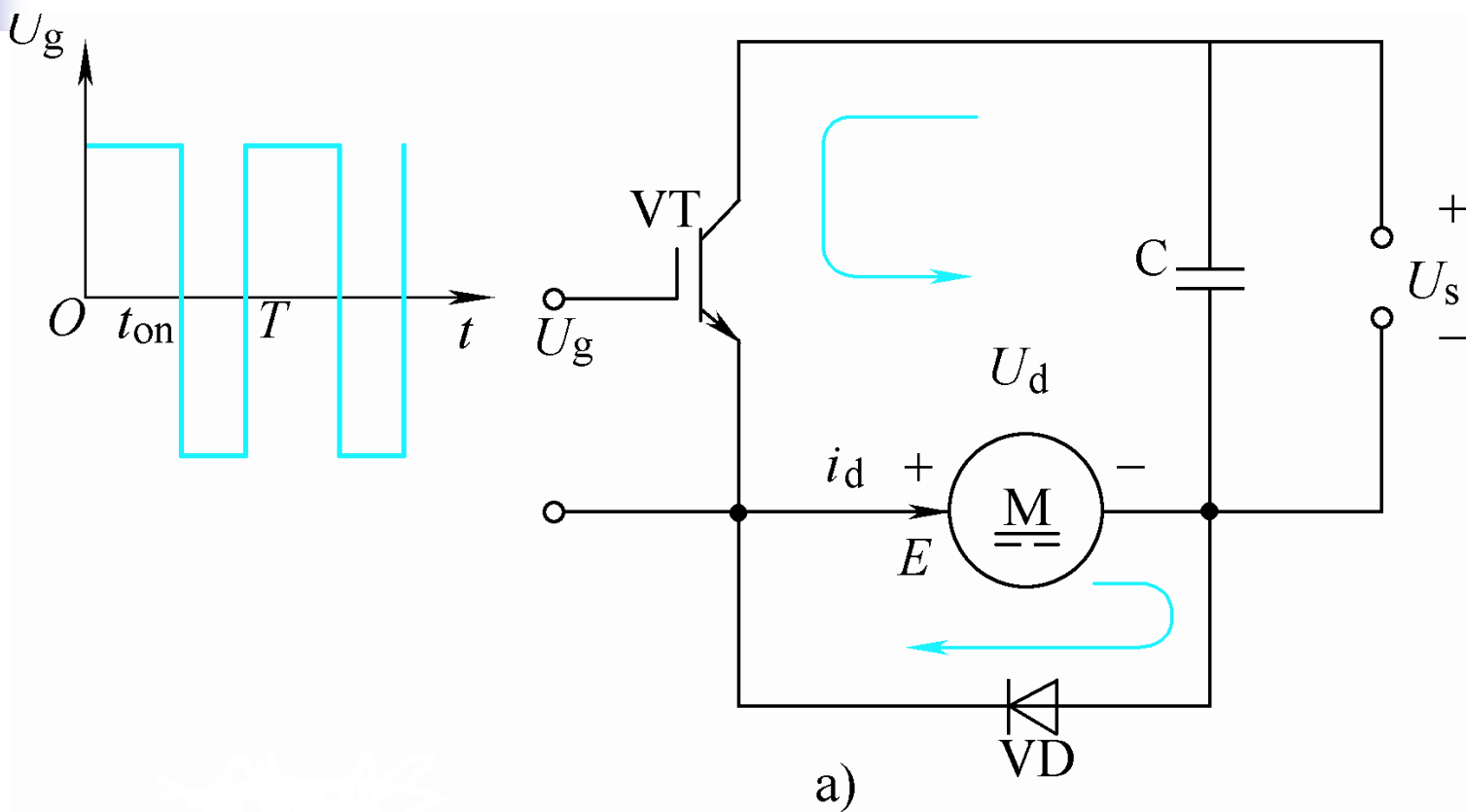
- 额定励磁下的直流电机是一个二阶线性环节
- 时间常数 T_m 表示机电惯性
- 时间常数 T_l 表示电磁惯性。



直流PWM变换器

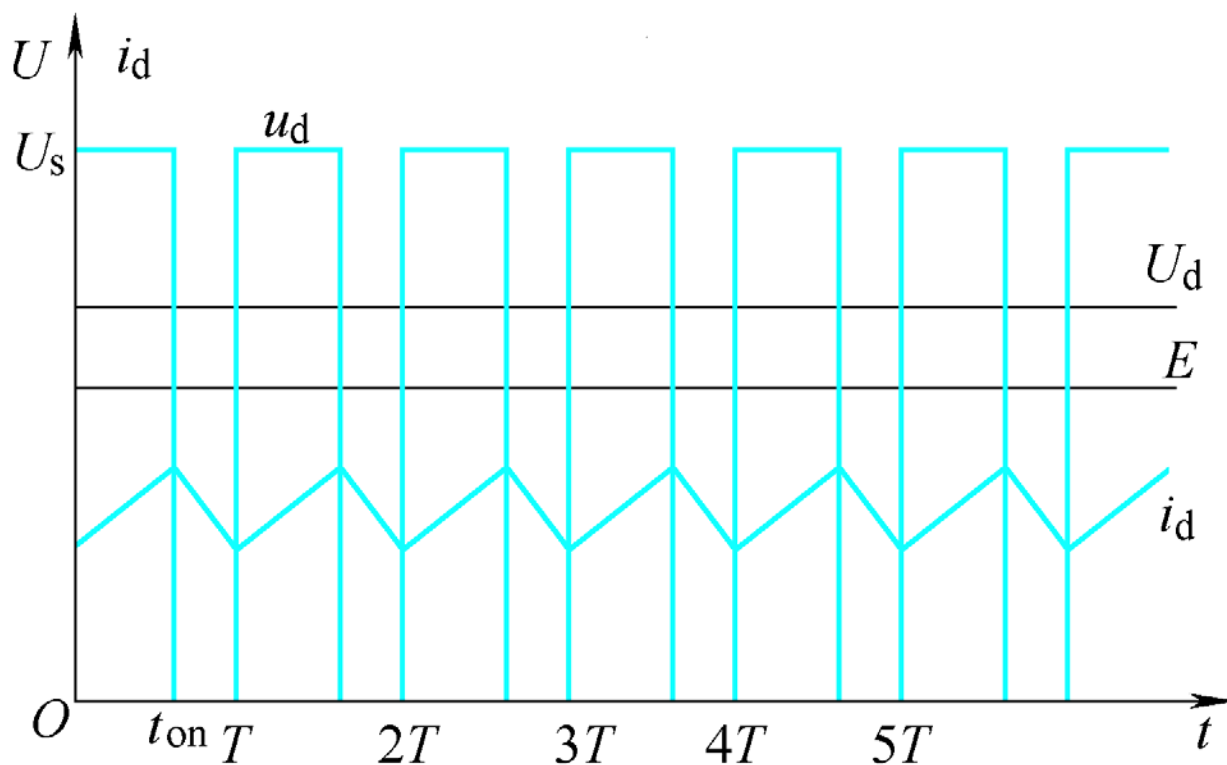
- 全控型电力电子器件问世以后，就出现了采用脉冲宽度调制的高频开关控制方式，形成了脉宽调制变换器-直流电机调速系统，简称直流脉宽调速系统，或直流PWM调速系统。
- PWM变换器的作用是：用脉冲宽度调制的方法，把恒定的直流电源电压调制成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列，从而可以改变平均输出电压的大小，以调节电机转速。
- PWM变换器电路有多种形式，总体上可分为不可逆与可逆（能量回馈）两大类。

直流PWM变换器



简单的不可逆PWM变换器

直流PWM变换器



b)

简单的不可逆PWM变换器



简单的不可逆PWM变换器

- 在一个开关周期 T 内，
- 当 $0 \leq t < t_{on}$ 时， U_g 为正， VT 饱和导通，电源电压 U_s 通过 VT 加到直流电动机电枢两端。
- 当 $t_{on} \leq t < T$ 时， U_g 为负， VT 关断，电枢电路中的电流通过续流二极管 VD 续流，直流电动机电枢电压近似等于零。



简单的不可逆PWM变换器

- 直流电动机电枢两端的平均电压为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$$

- 改变占空比 $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ ，即可实现直流电动机的调压调速。

- 令 $\gamma = U_d / U_s$ 为PWM电压系数，则在不可逆PWM变换器中

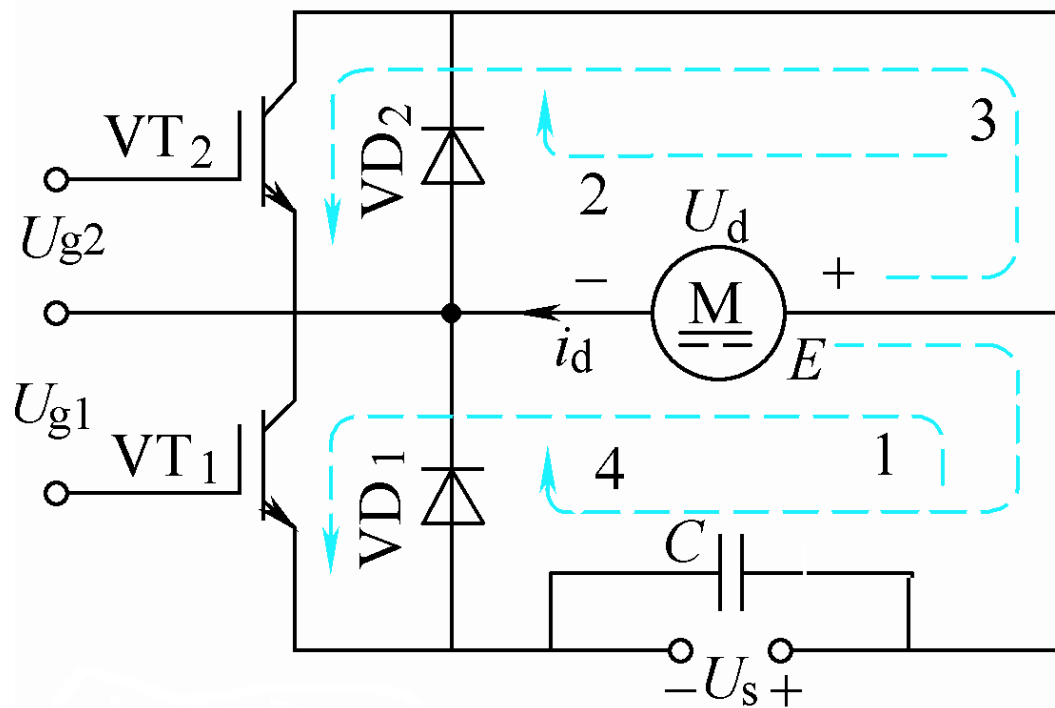
$$\gamma = \rho$$



简单的不可逆PWM变换器

- 上述不可逆PWM变换器-直流电机系统不允许电流反向，
- 续流二极管 VD 的作用只是为 i_d 提供一个续流的通道。
- 如果要实现电动机的制动，必须为其提供反向电流通道。

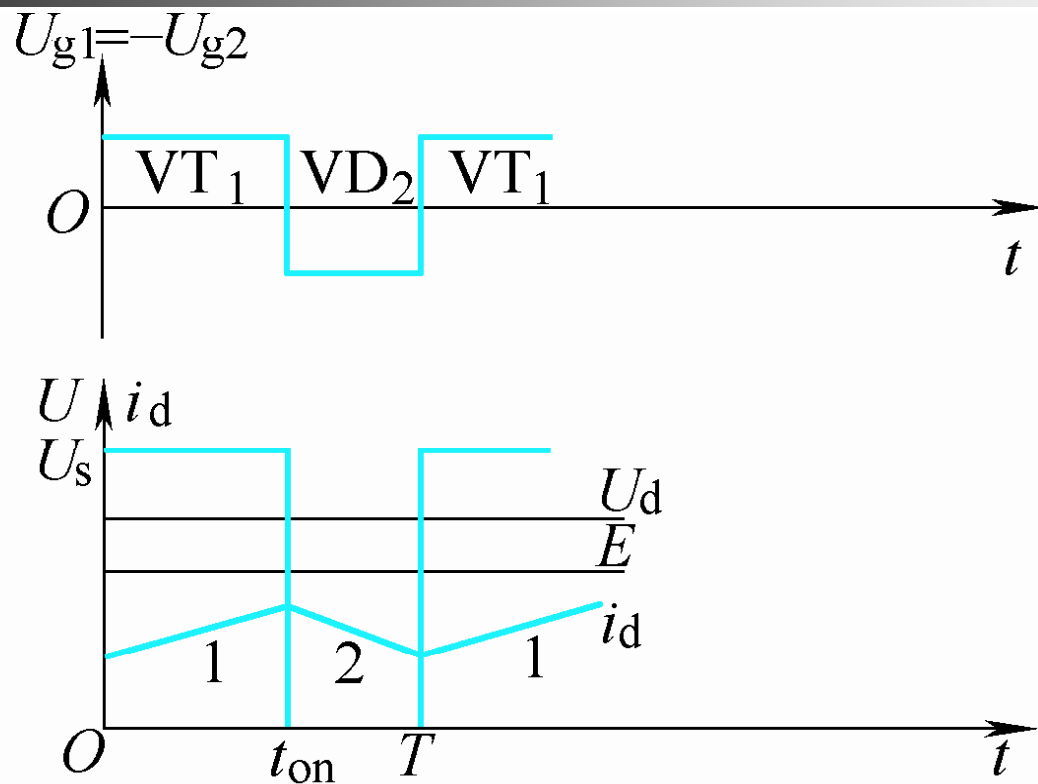
直流PWM变换器



a) 电路原理图

有制动电流通路的不可逆PWM变换器

一般电动状态

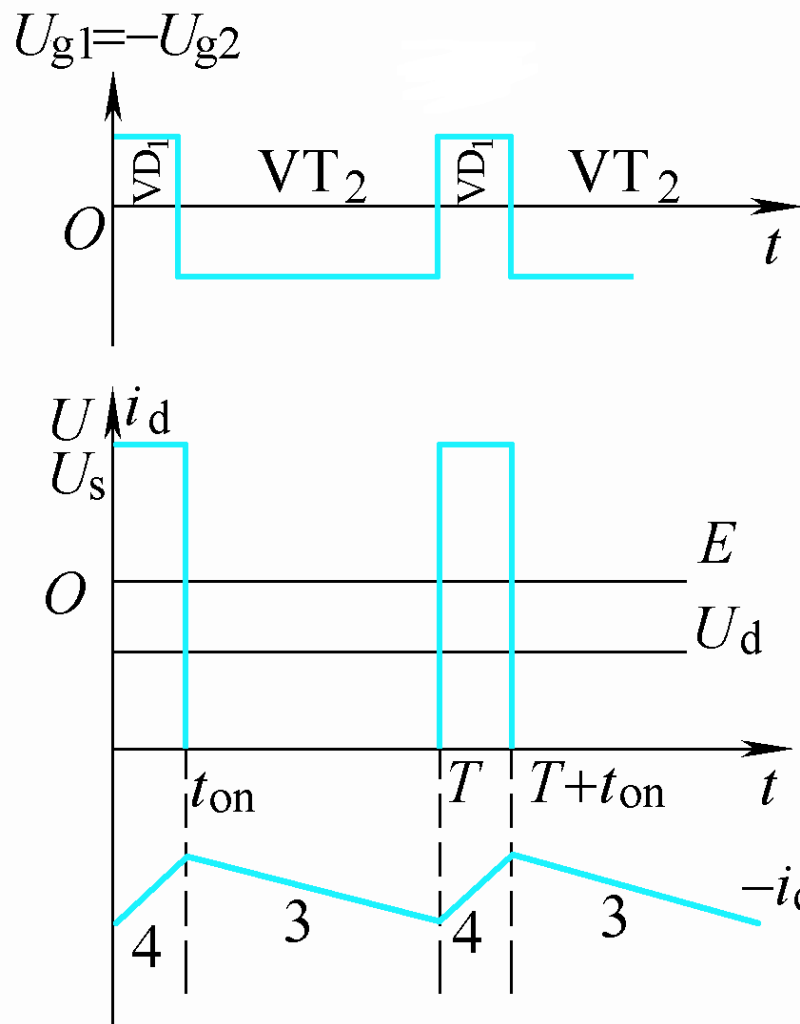


b) 一般电动状态的电压、电流波形
有制动电流通路的不可逆PWM变换器



一般电动状态

- 在一般电动状态中， i_d 始终为正值（其正方向示于图(a)中）。
- 在 $0 \leq t < t_{on}$ 期间， VT_1 导通， VT_2 关断。电流 i_d 沿图中的回路1流通。
- 在 $t_{on} \leq t < T$ 期间， VT_1 关断， i_d 沿回路2经二极管 VD_2 续流。
- VT_1 和 VD_2 交替导通， VT_2 和 VD_1 始终关断。



c) 制动状态的电压、电流波形

制动状态

U_{g1} 的正脉冲比
负脉冲窄，

$$E > U_d$$

i_d 始终为负。

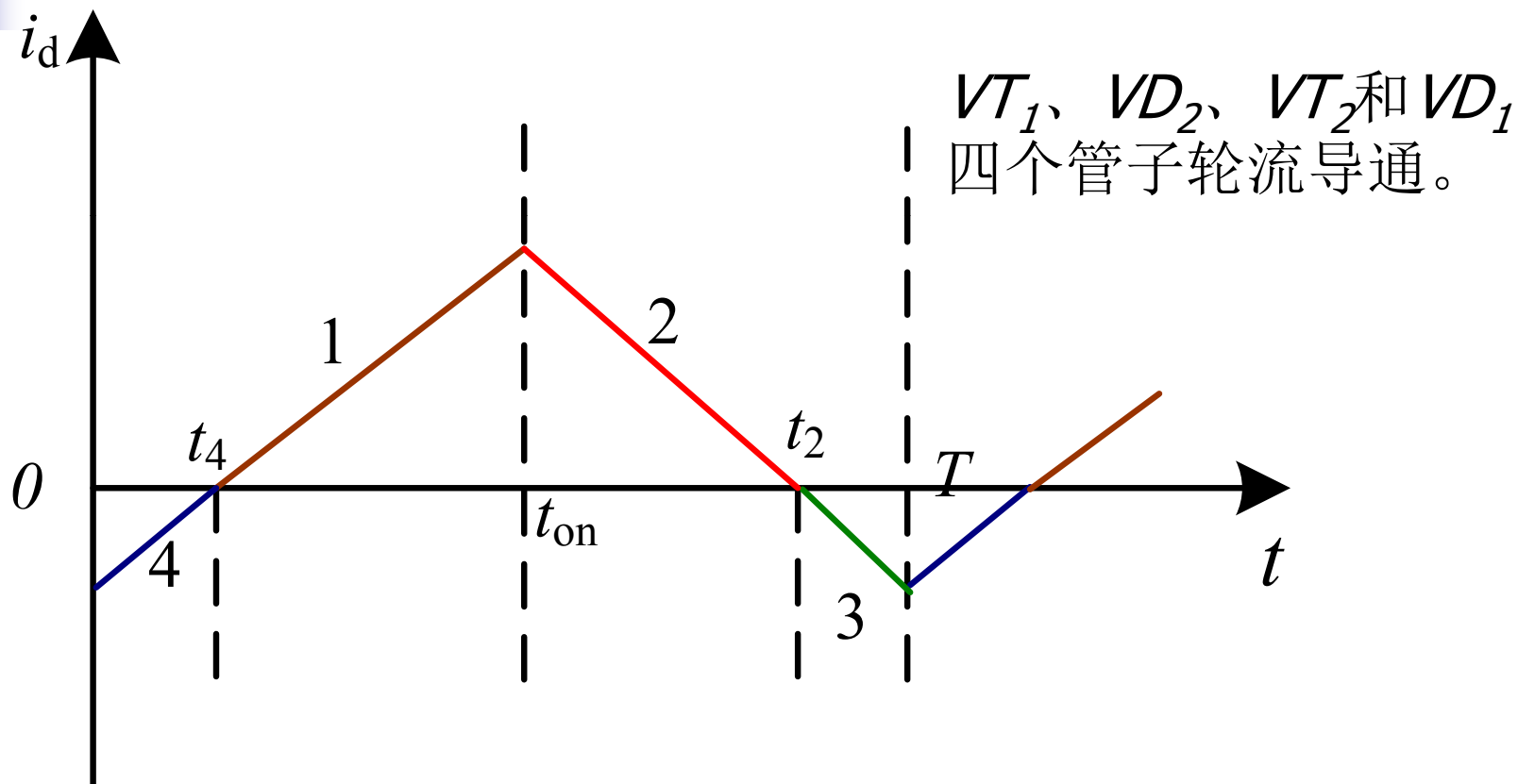
有制动电流通路的不可逆PWM变换器



制动状态

- 在 $t_{on} \leq t < T$ 期间， V_{g2} 为正， VT_2 导通，在感应电动势 E 的作用下，反向电流沿回路3能耗制动。
- 在 $T \leq t < T + t_{on}$ （即下一周期的 $0 \leq t < t_{on}$ ）期间， V_{g2} 为负， VT_2 关断， $-i_d$ 沿回路4经 VD_1 续流，向电源回馈能量。
- VT_2 和 VD_1 交替导通， VT_1 和 VD_2 始终关断。

轻载电动状态



(d) 轻载电动状态的电流波形



轻载电动状态

- 在 VT_1 关断后， i_d 经 VD_2 续流。
- 还没有到达周期 T ，电流已经衰减到零，
- 在 $t=t_2$ 时刻， VT_2 导通，使电流反向，产生局部时间的制动作用。
- 轻载时，电流可在正负方向之间脉动，平均电流等于负载电流，一个周期分成四个阶段。



有制动电流通路的不可逆PWM变换器

- 图(a)所示电路之所以为不可逆是因为平均电压 U_d 始终大于零，电流虽然能够反向，而电压和转速仍不能反向。
- 如果要求转速反向，需要再增加VT和VD，构成可逆的PWM变换器。



直流PWM变换器的近似模型

- PWM不是一个线性环节，而是具有继电器特性的非线性环节。
- 所谓稳态/静态特性，是指电机的平均电磁转矩与负载转矩相平衡的状态，机械特性是平均转速与平均转矩（电流）的关系。
- 稳态/静态的平均电压方程可写成：

$$U_d = \gamma U_s$$



直流PWM变换器的近似模型

- 动态特性：输入为阶跃信号 $1(t)$ ，输出要隔一定时间后才出现响应 $1(t-T_s)$
- 滞后作用是由PWM开关的失控时间引起的
- 失控时间是个随机值
- 最大失控时间是两个相邻切换点之间的时间，即PWM开关周期



直流PWM变换器的近似模型

- 输入输出关系为:

$$U_{d0} = K_s U_c \times 1(t - T_s)$$

- 传递函数为

$$W_s(s) = \frac{U_{d0}(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s}$$

K_s — PWM装置的放大系数

T_s — PWM装置的延迟时间（平均失控时间 $T_s = \frac{1}{2} T_{smax}$ ）



直流PWM变换器的近似模型

- 按泰勒级数展开，可得

$$W_s(s) = K_s e^{-T_s s} = \frac{K_s}{e^{-T_s s}} = \frac{K_s}{1 + T_s s + \frac{1}{2!} T_s^2 s^2 + \frac{1}{3!} T_s^3 s^3 + \dots}$$

- 依据工程近似处理的原则，可忽略高次项，把整流装置近似看作一阶惯性环节

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



问题讨论与练习

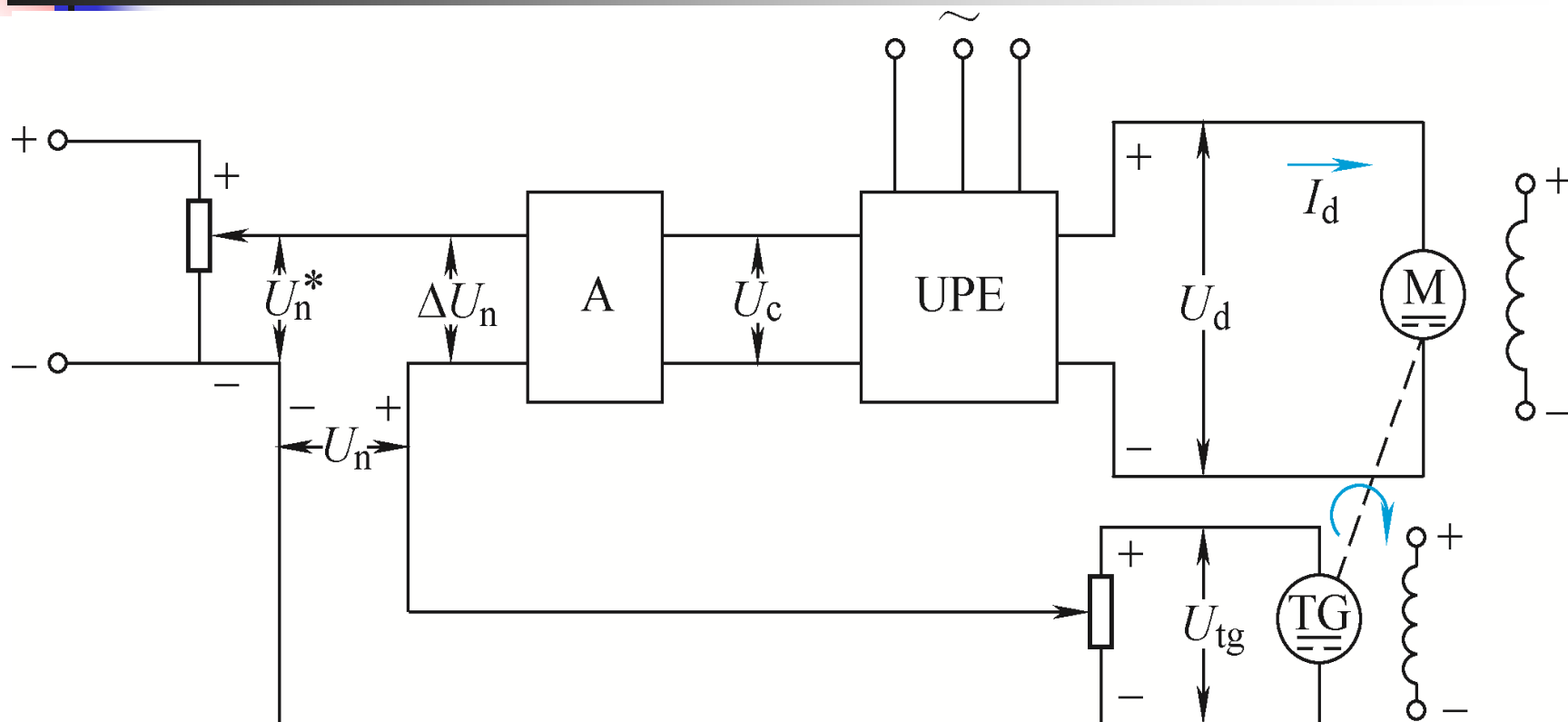
1. 直流电机有哪几种调速方法？
2. 简述直流PWM变换器的电路结构与原理。



转速闭环直流调速系统

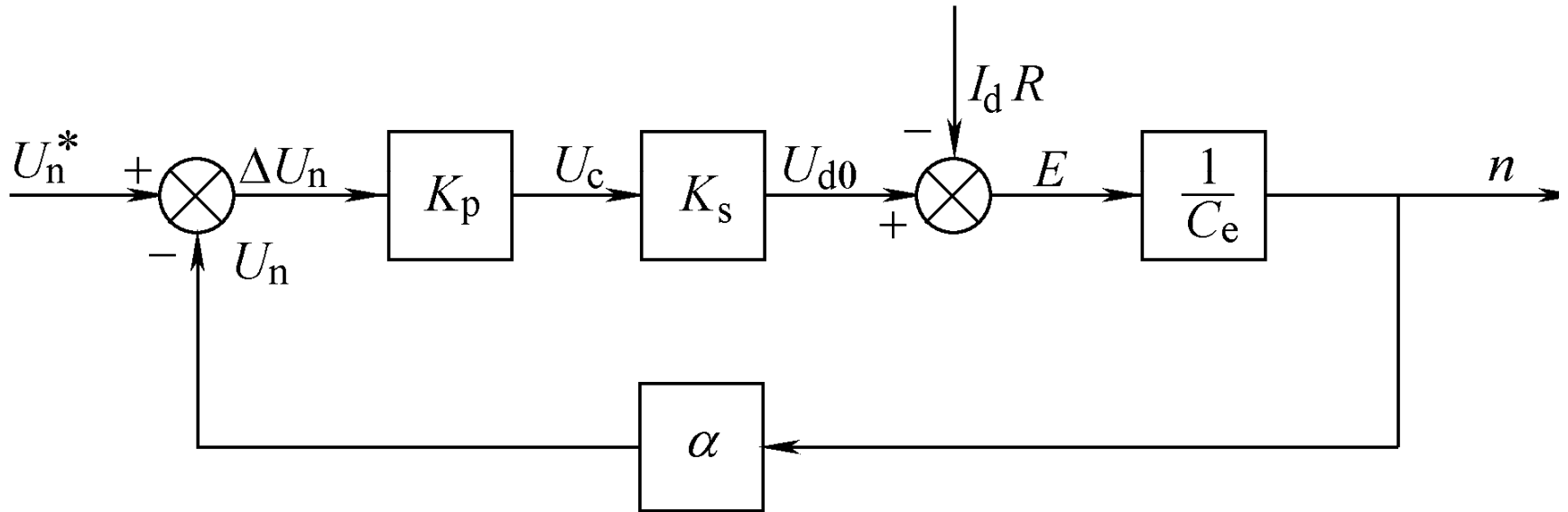
- 根据自动控制原理，将系统的被调节量作为反馈量引入系统，与给定量进行比较，用比较后的偏差值对系统进行控制，可以有效地抑制甚至消除扰动造成的影响，而维持被调节量很少变化或不变，这就是**反馈控制**的基本作用。

转速闭环直流调速系统



转速负反馈闭环直流调速系统原理框图

转速闭环直流调速系统的静特性



转速负反馈闭环直流调速系统稳态结构框图



转速闭环直流调速系统的静特性

■ 电压比较环节

$$\Delta U_n = U_n^* - U_n$$

■ 比例调节器

$$U_c = K_p \Delta U_n$$

■ 测速反馈环节

$$U_n = \alpha n$$

■ 电力电子变换器

$$U_{d0} = K_s U_c$$

■ 直流电动机

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

K_p —比例调节器的比例系数 α —转速反馈系数 (V·min/r)



转速闭环直流调速系统的静特性

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

式中： $K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e}$ —— 闭环系统的开环放大系数

- 闭环调速系统的**静特性**表示闭环系统电机转速与负载电流（或转矩）间的稳态关系。



闭环静特性和开环机械特性的关系

- 开环机械特性为

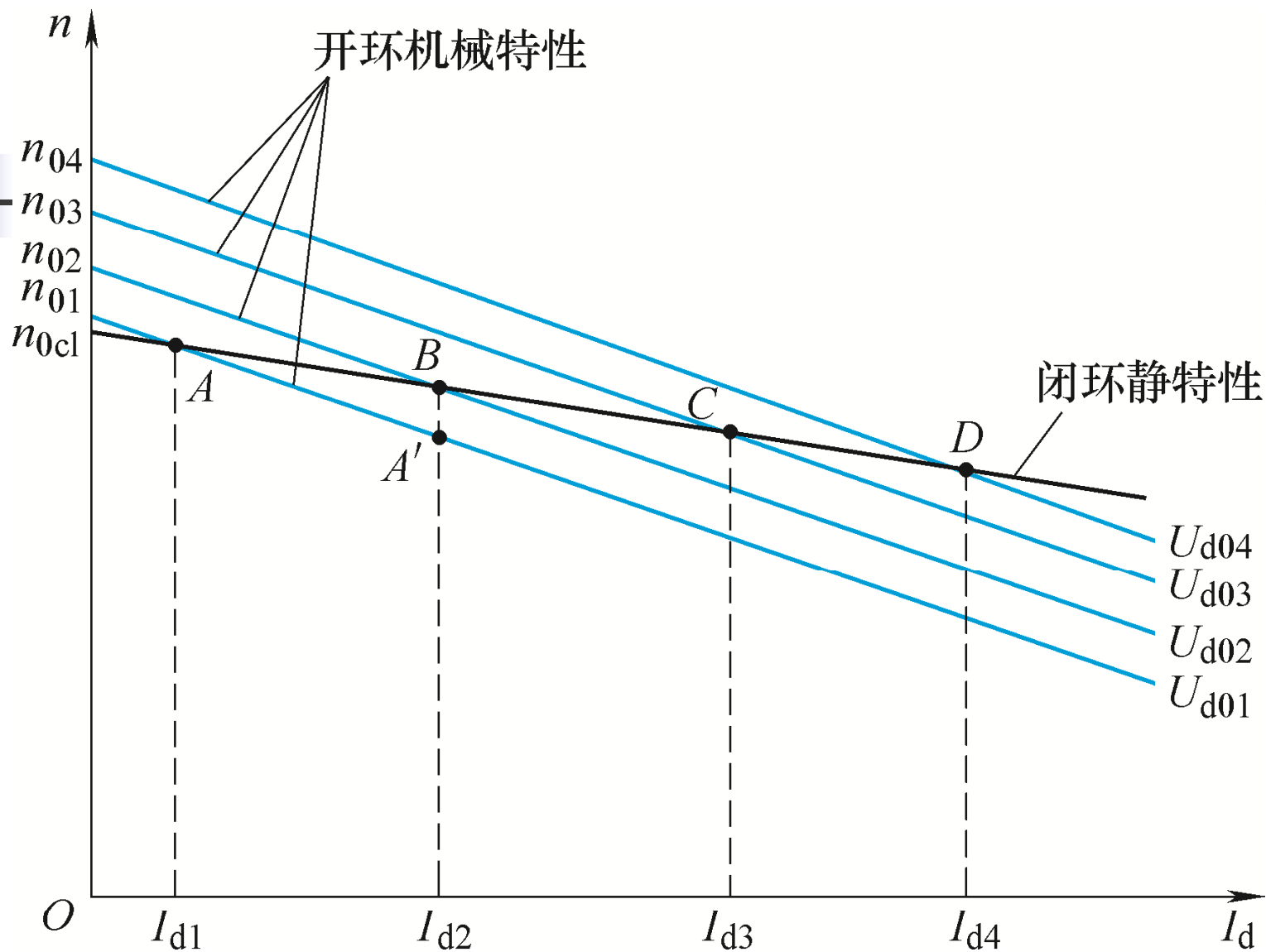
$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e} - \frac{R I_d}{C_e} = n_{0op} - \Delta n_{op}$$

式中， n_{0op} 表示开环系统的理想空载转速，
 Δn_{op} 表示开环系统的稳态速降。

- 比例控制闭环系统的静特性为

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

式中， n_{0cl} 表示闭环系统的理想空载转速，
 Δn_{cl} 表示闭环系统的稳态速降。



闭环系统静特性和开环系统机械特性的关系



闭环静特性和开环机械特性的关系

- 在同样的负载扰动下，

开环系统的转速降落 $\Delta n_{op} = \frac{RI_d}{C_e}$

闭环系统的转速降落 $\Delta n_{cl} = \frac{RI_d}{C_e(1+K)}$

- 它们的关系是

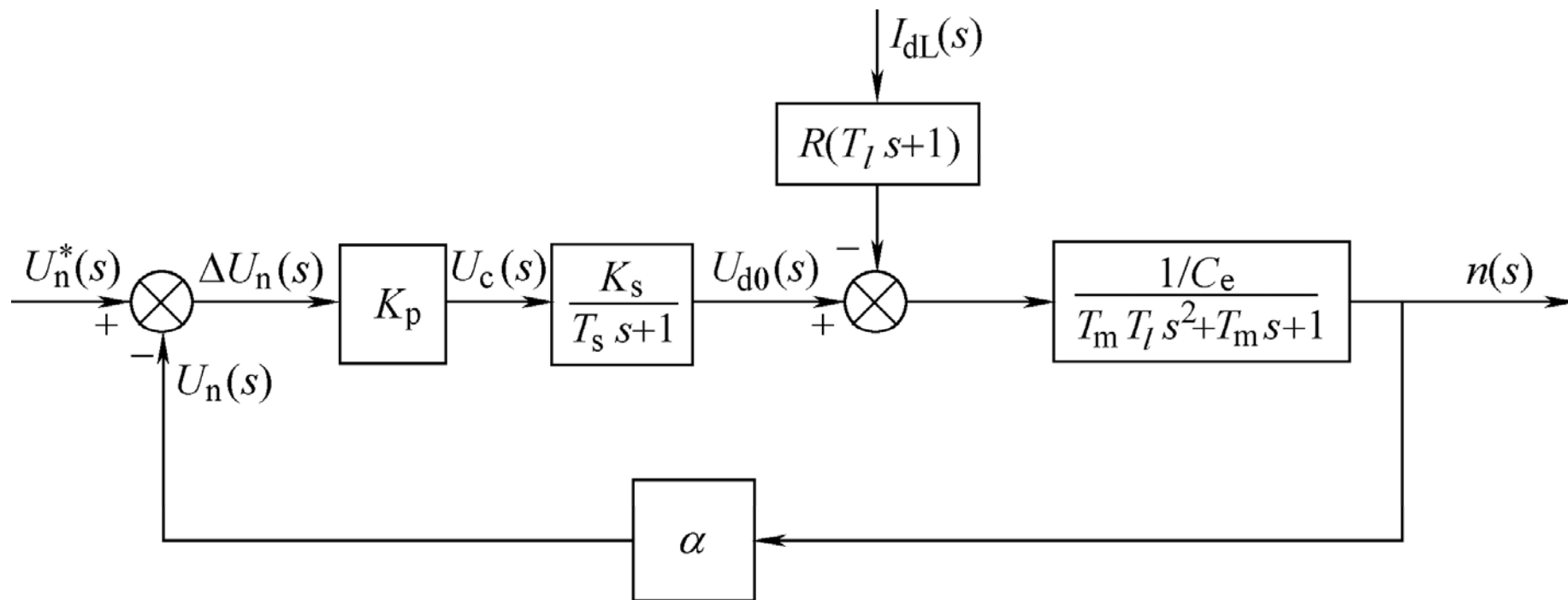
$$\Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1+K}$$



转速闭环直流调速系统的动态特性

- 一个带有储能环节的线性物理系统的动态过程可以用线性微分方程（传递函数）描述；
- 微分方程的解即系统的动态过程，它包括两部分：动态响应和稳态解；
- 在动态过程中，从施加给定输入值的时刻开始，到输出达到稳态值以前，是系统的动态响应；
- 系统达到稳态后，可用稳态解来描述系统的稳态特性。

转速闭环直流调速系统的动态特性



转速反馈控制直流调速系统的动态结构框图



转速闭环直流调速系统的动态特性

开环传递函数：

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

式中 $K = K_p K_s \alpha / C_e$



转速闭环直流调速系统的动态特性

闭环传递函数：

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

转速闭环直流调速系统的动态特性

- 比例控制闭环系统的特征方程为

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

- 根据三阶系统的劳斯-古尔维茨判据，系统稳定的充分必要条件是

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

- 整理后得

$$K < \frac{T_m (T_l + T_s) + T_s^2}{T_l T_s}$$



转速闭环直流调速系统的动态特性

- 在比例控制的直流调速系统中，稳态性能和动态稳定性的要求常常是互相矛盾的。
- 根据自动控制原理，要解决这个矛盾，必须恰当地设计动态校正装置，用来改造系统。
- 在自动控制系统中，常用串联校正和反馈校正。
- 对于带电力电子变换器的直流闭环调速系统，传递函数阶次较低，一般采用PID调节器的串联校正方案就能完成动态校正的任务。

转速闭环直流调速系统的PI控制

- 比例积分调节器（PI调节器）的输入输出关系为

$$U_{ex} = K_p U_{in} + \frac{1}{\tau} \int_0^t U_{in} dt$$

式中， U_{in} —PI调节器的输入， U_{ex} —PI调节器的输出。

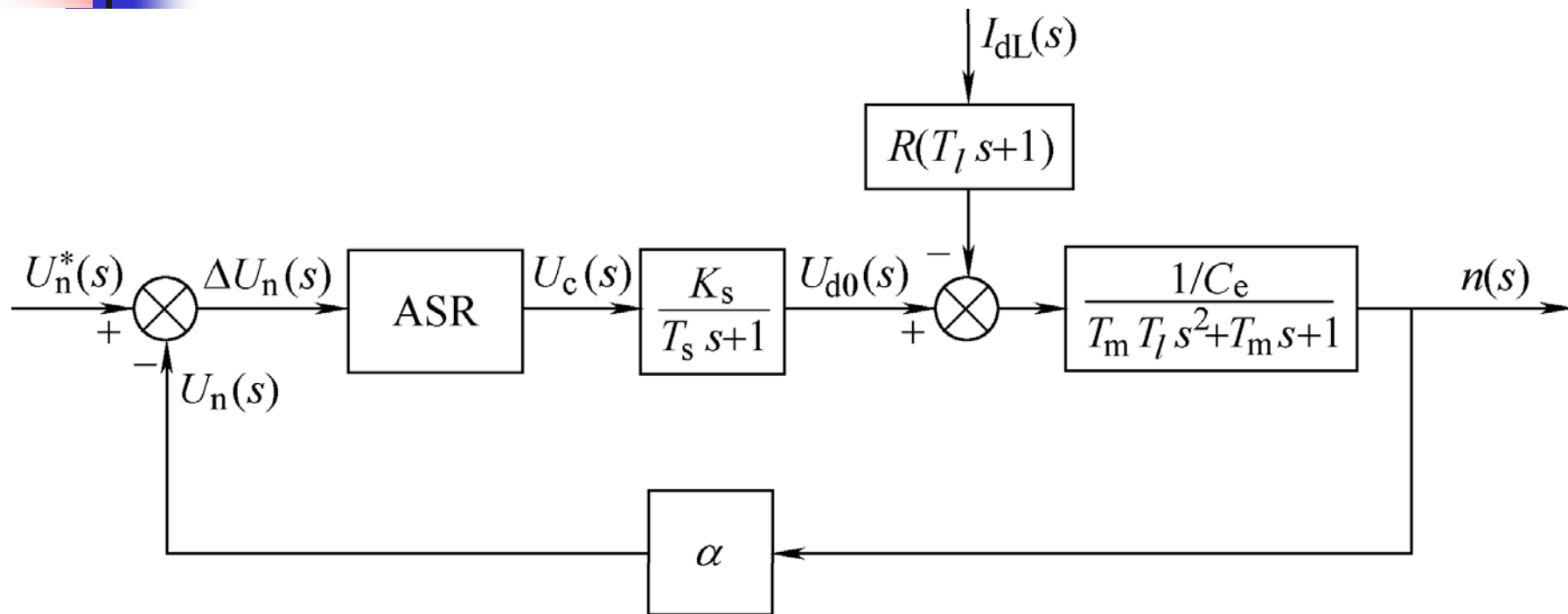
- 其传递函数为 $W_{PI}(s) = K_p + \frac{1}{\tau s} = \frac{K_p \tau s + 1}{\tau s}$

式中， K_p —PI调节器的比例放大系数，
 τ —PI调节器的积分时间常数。

- 令 $\tau_1 = K_p \tau$ ，则PI调节器的传递函数也可写成如下形式

$$W_{PI}(s) = K_p \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s}$$

PI控制的转速闭环系统稳态误差



PI控制的直流调速系统的动态结构框图

(转速调节器用**ASR**表示)

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 使用比例调节器时，系统的开环传递函数为

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

式中 $K = K_p K_s \alpha / C_e$

- 使用积分调节器时，系统的开环传递函数为

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

式中 $K = K_s \alpha / \tau C_e$

- 使用比例积分调节器时，系统的开环传递函数为

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

式中 $K = K_s \alpha / \tau C_e$

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 在分析阶跃给定输入的稳态误差时，令 $I_{dL}(s)=0$ 。
比例调节器系统的误差传递函数为

$$\Delta U_n(s) = U_n^*(s) \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃给定输入 $U_n^*(s) = \frac{U_n^*}{s}$ 的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{U_n^*}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = \frac{U_n^*}{1 + K}$$

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 积分调节器系统的误差传递函数为

$$\Delta U_n(s) = U_n^*(s) \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃给定输入 $U_n^*(s) = \frac{U_n^*}{s}$ 的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{U_n^*}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = 0$$

PI控制的转速闭环系统的稳态误差

- 比例积分调节器系统的误差传递函数为

$$\Delta U_n(s) = U_n^*(s) \cdot \frac{1}{1 + \frac{K(K_p \tau s + 1)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃给定输入 $U_n^*(s) = \frac{U_n^*}{s}$ 的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{U_n^*}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K(K_p \tau s + 1)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = 0$$

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 在分析由扰动引起的稳态误差时，令 $U_n^*(s)=0$ 。
比例调节器系统的误差为

$$\Delta U_n(s) = I_{dL}(s) \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃扰动 $I_{dL}(s) = \frac{I_{dL}}{s}$ 引起的的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{I_{dL}}{s} \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = \frac{R I_{dL}}{C_e(1 + K)}$$

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 积分调节器系统的误差为

$$\Delta U_n(s) = I_{dL}(s) \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃扰动 $I_{dL}(s) = \frac{I_{dL}}{s}$ 引起的的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{I_{dL}}{s} \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = 0$$

PI控制的转速闭环系统稳态误差

- 比例积分调节器系统的误差为

$$\Delta U_n(s) = I_{dL}(s) \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K(K_p \tau s + 1)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}$$

- 阶跃扰动 $I_{dL}(s) = \frac{I_{dL}}{s}$ 引起的的稳态误差是

$$\Delta U_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta U_n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{I_{dL}}{s} \cdot \frac{\frac{R(T_l s + 1)}{C_e(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K(K_p \tau s + 1)}{s(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}} = 0$$



转速闭环直流调速系统的PI控制

- PI控制综合了比例控制和积分控制两种规律的优点，又克服了各自的缺点
- 比例部分能迅速响应控制作用
- 积分部分则最终消除稳态偏差（包括扰动引起的稳态偏差）



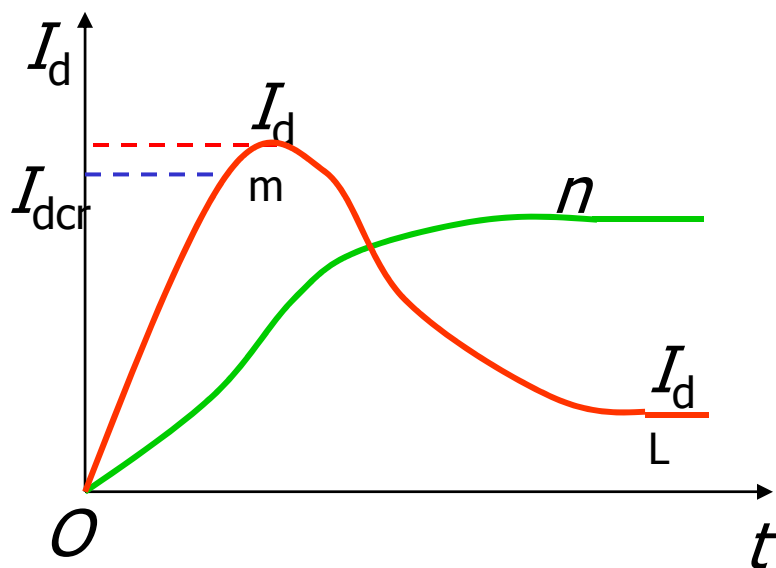
转速、电流双闭环直流调速系统

- 问题的提出

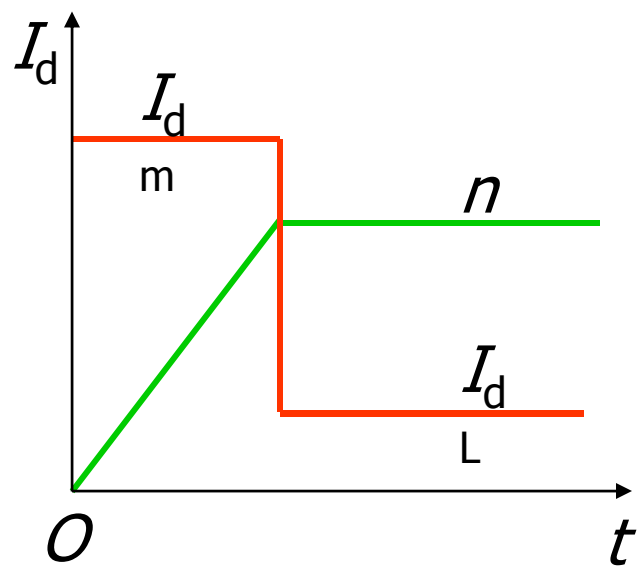
采用转速负反馈和**PI**调节器的单闭环直流调速系统可以在保证系统稳定的前提下实现转速无静差。但是，如果对系统的动态性能要求较高，例如：要求快速起制动，突加负载动态速降小等等，单闭环系统就难以满足需要。

转速、电流双闭环直流调速系统

- 主要原因：是因为在单闭环系统中不能随心所欲地控制电流和转矩的动态过程。



a) 带电流限制的单闭环调速系统



b) 理想的快速启动过程



转速、电流双闭环直流调速系统

- 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。



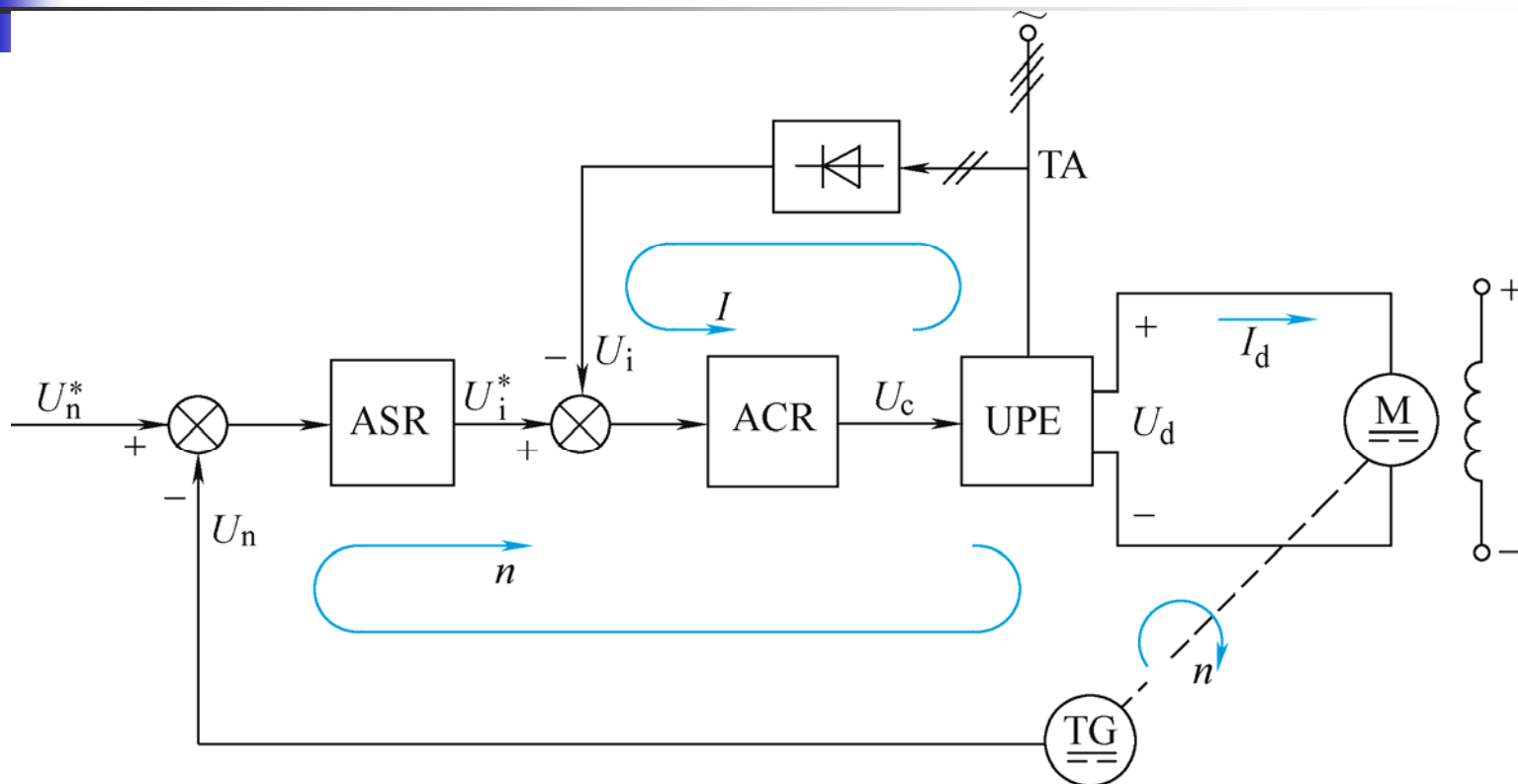
转速、电流双闭环直流调速系统

现在的问题是，我们希望能实现控制：

- 起动过程，只有电流负反馈，没有转速负反馈；
- 稳态时，转速负反馈发挥主要作用，电流负反馈不要起阻碍作用。

怎样才能做到这种既存在转速和电流两种负反馈，又使它们只能分别在不同的阶段里起作用呢？

转速、电流双闭环直流调速系统



转速、电流反馈控制直流调速系统原理图

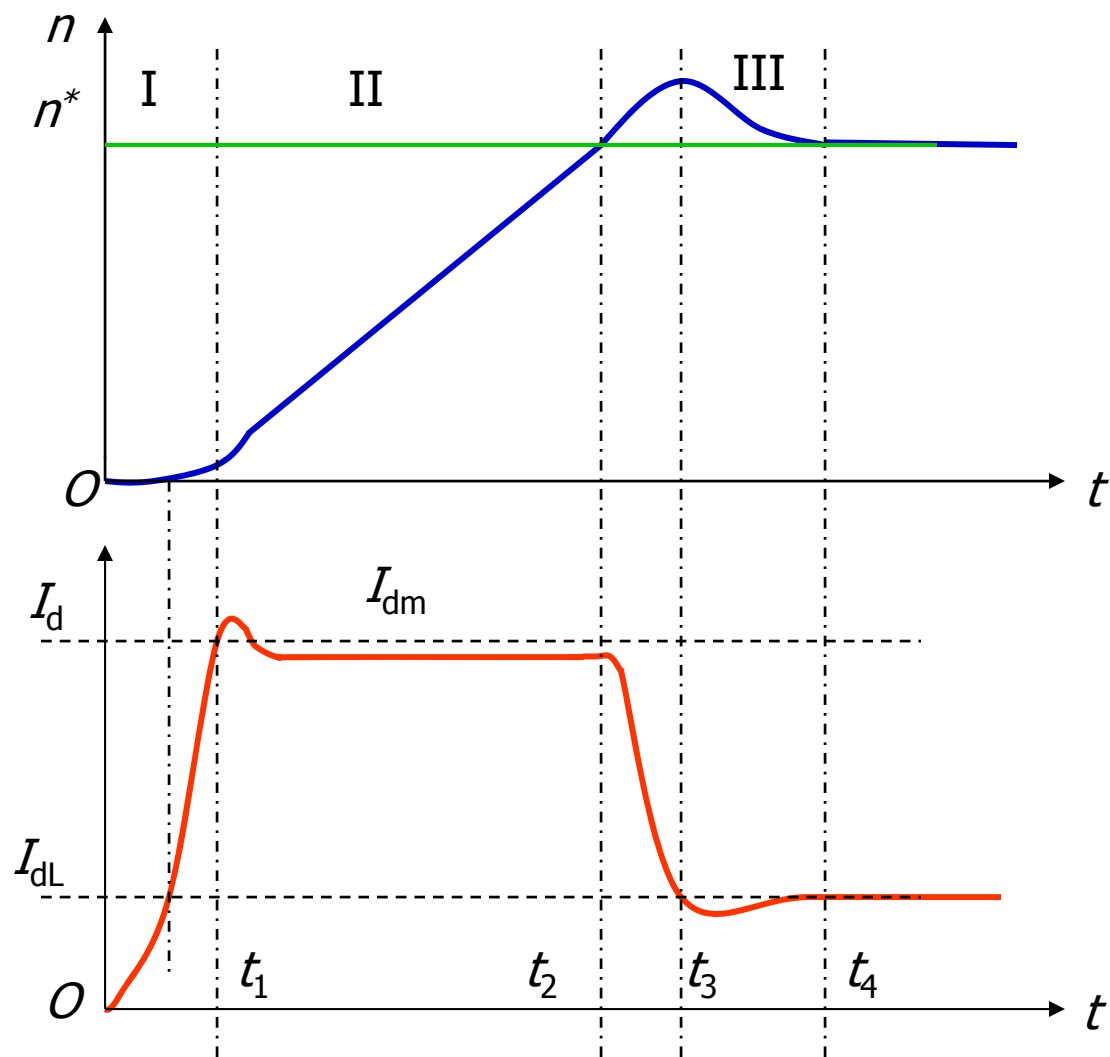
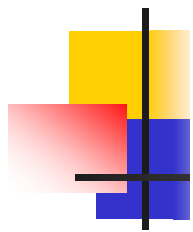
ASR —— 转速调节器 ACR —— 电流调节器

TG —— 测速发电机



起动过程（动态过程）分析

- 双闭环直流调速系统突加给定电压 U_n^* 由静止状态起动时，转速和电流的动态过程示于下图。
- 在起动过程中转速调节器ASR经历了不饱和、饱和、退饱和三种情况，整个动态过程就分成下图中标明的I、II、III三个阶段。



双闭环直流调速系统启动时的转速和电流波形



起动过程（动态过程）分析

第I阶段电流上升的阶段（ $0 \sim t_1$ ）

- 突加给定电压 U_n^* 后， I_d 上升，当 I_d 小于负载电流 I_{dL} 时，电机还不能转动。
- 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，因而转速调节器ASR的输入偏差电压的数值仍较大，其输出电压保持限幅值 U_{im}^* ，强迫电流 I_d 迅速上升。
- 直到， $I_d = I_{dm}$ ， $U_i = U_{im}^*$ 电流调节器很快就压制了 I_d 的增长，标志着这一阶段的结束。

在这一阶段中，ASR很快进入并保持饱和状态，而ACR一般不饱和。



起动过程（动态过程）分析

第 II 阶段恒流升速阶段 ($t_1 \sim t_2$)

- 在这个阶段中，ASR始终是饱和的，转速环相当于开环，系统成为在恒值电流 U_{im}^* 给定下的电流调节系统，基本上保持电流 I_d 恒定，加速度恒定，转速呈线性增长。
- 与此同时，电机的反电动势 E 也按线性增长，对电流调节系统来说， E 是一个线性渐增的扰动量， U_{d0} 和 U_c 也必须基本上按线性增长，才能保持 I_d 恒定。
- 当ACR采用PI调节器时，要使其输出量按线性增长，其输入偏差电压必须维持一定的恒值，也就是说， I_d 应略低于 I_{dm} 。



起动过程（动态过程）分析

第 II 阶段恒流升速阶段 ($t_1 \sim t_2$)

- 恒流升速阶段是起动过程中的主要阶段。
- 为了保证电流环的主要调节作用，在起动过程中 ACR 是不应饱和的，电力电子装置 UPE 的最大输出电压也须留有余地，这些都是设计时必须注意的。



起动过程（动态过程）分析

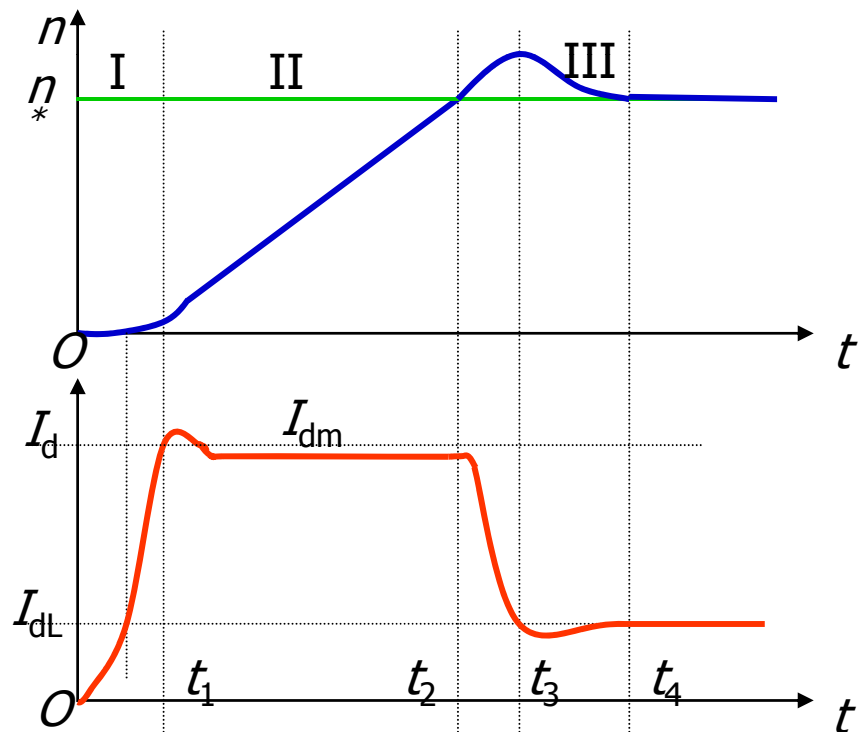
第 III 阶段转速调节阶段（ t_2 以后）

- 当转速上升到给定值时，转速调节器ASR的输入偏差减少到零，但其输出却由于积分作用还维持在限幅值 U_{im}^* ，所以电机仍在加速，使转速超调。
- 转速超调后，ASR输入偏差电压变负，使它开始退出饱和状态， U_i^* 和 I_d 很快下降。但是，只要 I_d 仍大于负载电流 I_{dL} ，转速就继续上升。

起动过程（动态过程）分析

第 III 阶段转速调节阶段（ t_2 以后）

- 直到 $I_d = I_{dL}$ 时，转矩 $T_e = T_L$ ，则 $dn/dt = 0$ ，转速 n 才到达峰值（ $t = t_3$ 时）。
- 此后，电机开始在负载的阻力下减速，相应地在一小段时间内（ $t_3 \sim t_4$ ）， $I_d < I_{dL}$ ，直到稳定。如果调节器参数整定得不好，也会有一些振荡过程。





起动过程（动态过程）分析

第 III 阶段转速调节阶段（ t_2 以后）

在最后的转速调节阶段内，ASR和ACR都不饱和，ASR起主导的转速调节作用，而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。



转速、电流双闭环直流调速系统

综上所述，双闭环直流调速系统的启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。



转速、电流双闭环直流调速系统

(1) 饱和非线性控制

根据ASR的饱和与不饱和，整个系统处于完全不同的两种状态：

- 当ASR饱和时，转速环开环，系统表现为恒值电流调节的单闭环系统；
- 当ASR不饱和时，转速环闭环，整个系统是一个无静差调速系统，而电流内环表现为电流随动系统。



转速、电流双闭环直流调速系统

(2) 转速超调

由于ASR采用了饱和非线性控制，起动过程结束进入转速调节阶段后，必须使转速超调，ASR的输入偏差电压 ΔU_n 为负值，才能使ASR退出饱和。

这样，采用PI调节器的双闭环调速系统的转速响应必然有超调。



转速、电流双闭环直流调速系统

(3) 准时间最优控制

起动过程中的主要阶段是第II阶段的恒流升速，它的特征是电流保持恒定。一般选择为电动机允许的最大电流，以便充分发挥电动机的过载能力，使起动过程尽可能最快。

这阶段属于有限制条件的最短时间控制。因此，整个起动过程可看作为是一个准时间最优控制。



转速、电流双闭环系统的设计

- 转速、电流反馈控制直流调速系统的设计原则：先内环后外环。
- 先从电流环（内环）开始，对其进行必要的变换和近似处理，然后根据电流环的控制要求确定把它校正成哪一类典型系统；
- 再按照控制对象确定电流调节器的类型，按动态性能指标要求确定电流调节器的参数；
- 电流环设计完成后，可把电流环等效成转速环（外环）中的一个环节，再用同样的方法设计转速环。

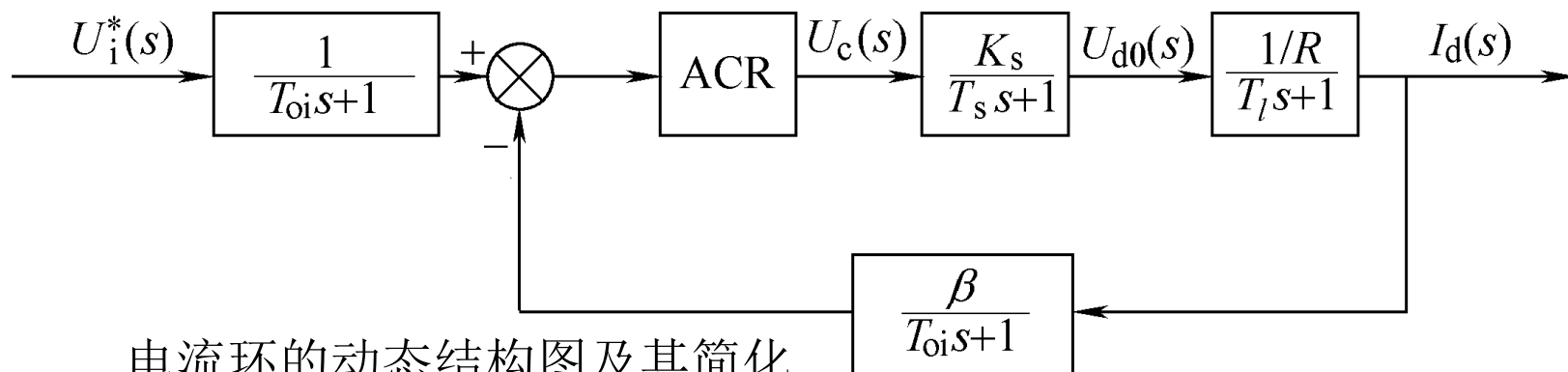


T_{oi} ——电流反馈滤波时间常数; T_{on} ——转速反馈滤波时间常数

双闭环调速系统的动态结构图

电流调节器的设计

- 转速的变化往往比电流变化慢得多，对电流环来说，反电动势是一个变化较慢的扰动，在按动态性能设计电流环时，可以暂不考虑反电动势变化的动态影响， $\Delta E \approx 0$
- ACR采用PI调节器 $W_{\text{ACR}}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$ ，通过合并小惯性环节，电流开环传递函数含1个积分环节，可按典型I型系统设计

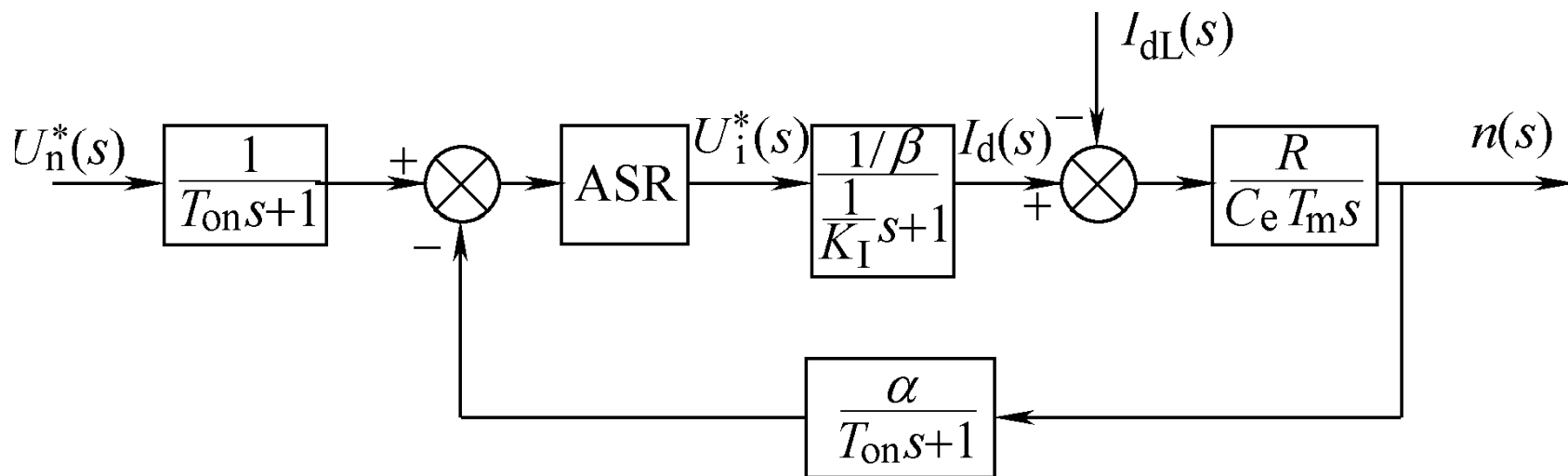


电流环的动态结构图及其简化
忽略反电动势的动态影响

转速调节器的设计

- ASR采用PI调节器 $W_{ASR}(s) = \frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s}$ ，转速开环

传递函数有2个积分环节，可按典型 II 型系统设计。



转速环的动态结构图及其简化
用等效环节代替电流环



问题讨论与练习

1. 比较双闭环直流调速系统和单闭环直流调速系统的性能：静态特性、动态特性。
2. 在双闭环系统中，若速度调节器改为比例调节器，或电流调节器改为比例调节器，对系统的稳态性能影响如何？