

运动控制系统

Motion Control Theory

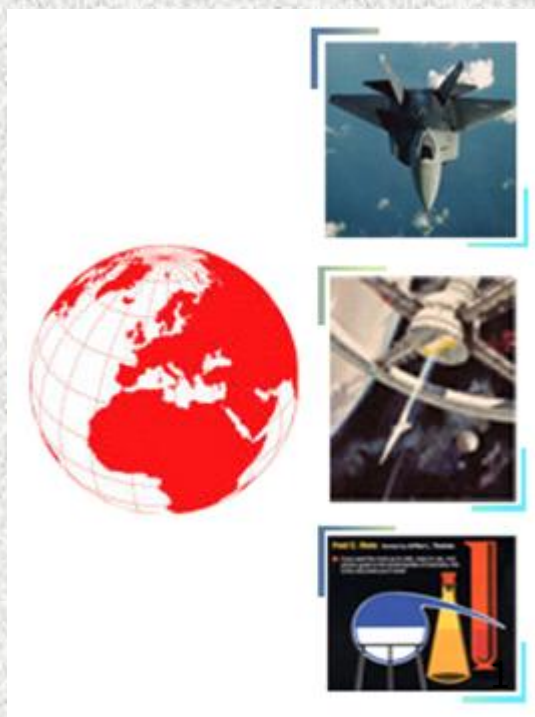
第一篇

直流调速系统

罗慧(人工智能与自动化学院)

E_mail: keyluo@hust.edu.cn

qq: 1035676819



第一章 引言

1、电机到底是干什么用的呢？

2、我们为什么要控制电机？





低精度控制





高精度控制



昵图网 www.nipic.com BY: keyibu2002

NO.38181173152225049348

1、电机到底是干什么用的呢？

答：电能→机械能的一种能量转换装置。

2、我们为什么要控制电机？

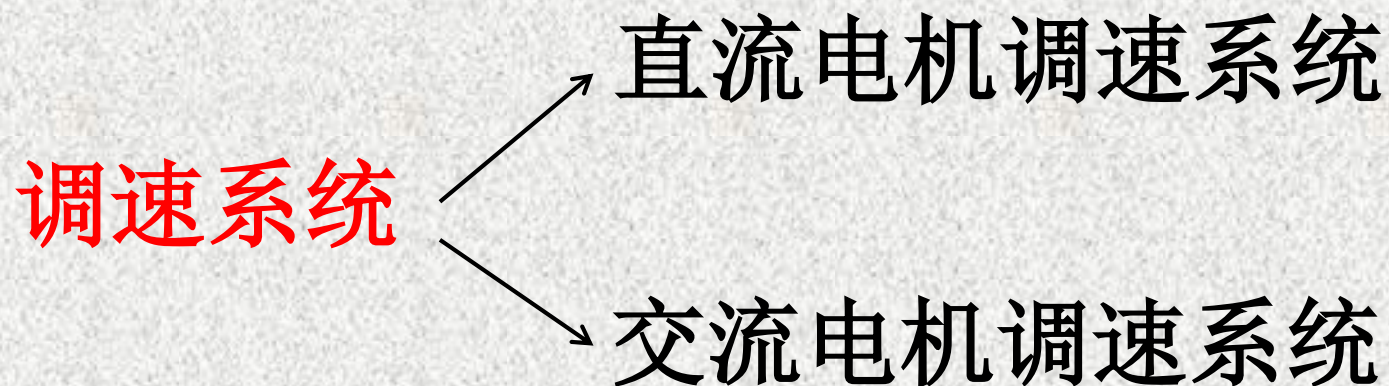
答：希望得到受控的运动。



3、电机控制系统的分类：

调速系统、伺服系统

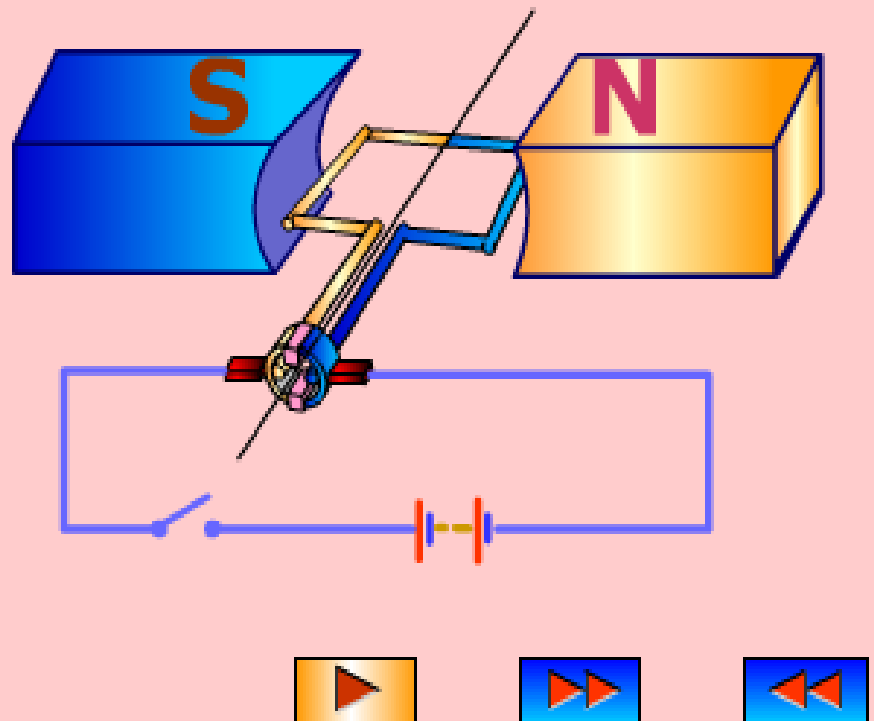
调速系统：以电机为被控对象，电机输出轴的转速为被控量，采用各种控制方法和外加装置，实现转速自动跟随给定值的自动控制系统。



直流电动机工作原理

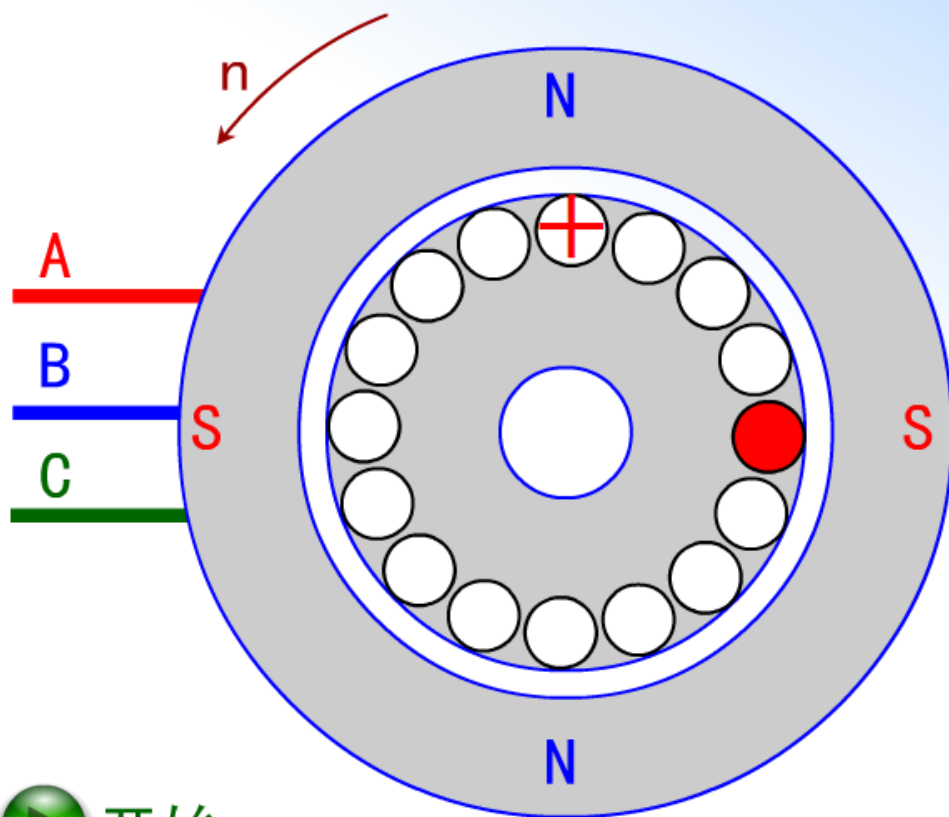
直流电动机的磁场为**固定磁场**，当线圈通入直流电时，线圈中蓝色和黄色部分会分别受到不同方向的电磁力作用从而带动转子旋转，当蓝色线圈和黄色线圈位置互换后，通过换向器和电刷的作用，使得两线圈的受力方向保持不变，从而使电枢可以连续转动。

直流电动机的工作原理



交流电机工作原理

异步电动机的工作原理



异步电动机定子上有三相对称的交流绕组。

交、直流电机调速系统的优缺点对比

• 直流电机调速系统

优点：调速范围广，易于实现平滑调速，起动、制动性能好，动态性能良好。

缺点：有换向器和电刷，高速或过载时容易产生换向火花，使用环境受限；噪声大，维护困难；结构复杂，成本高。

• 交流电机调速系统

优点：异步电动机结构简单、坚固耐用、维护方便、造价低廉，使用环境广，运行可靠，便于制造大容量、高转速、高电压电机。

缺点：强耦合非线性系统，调速性能比直流电机差，尤其是低速时。

第二章 转速开环控制的直流调速系统

2.1 直流电机数学模型回顾

2.2 可控直流源及建模

2.3 开环系统的机械特性

2.4 稳态调速性能指标

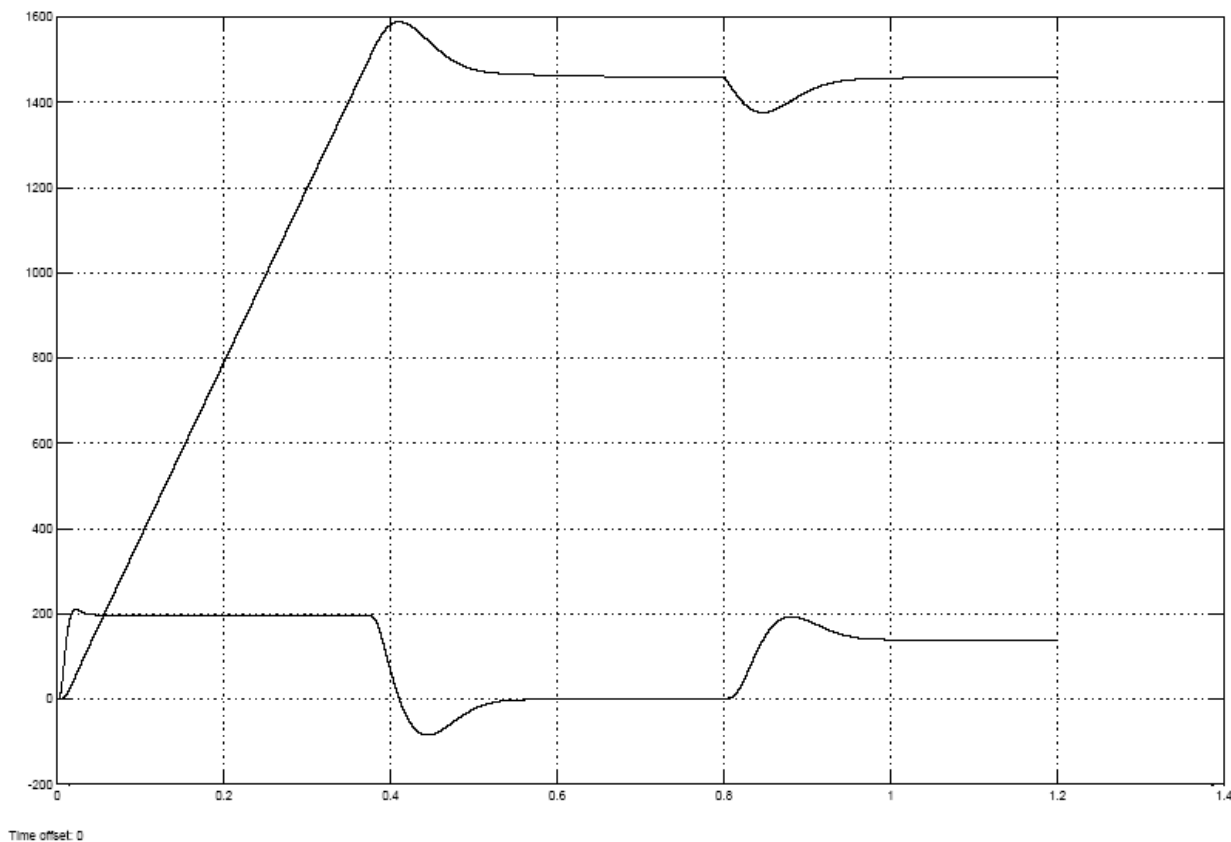
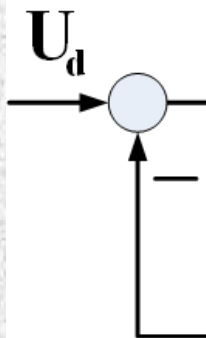
2.1 直流电机模型回顾

■ 直流电动机运行遵循的4个基本方程:

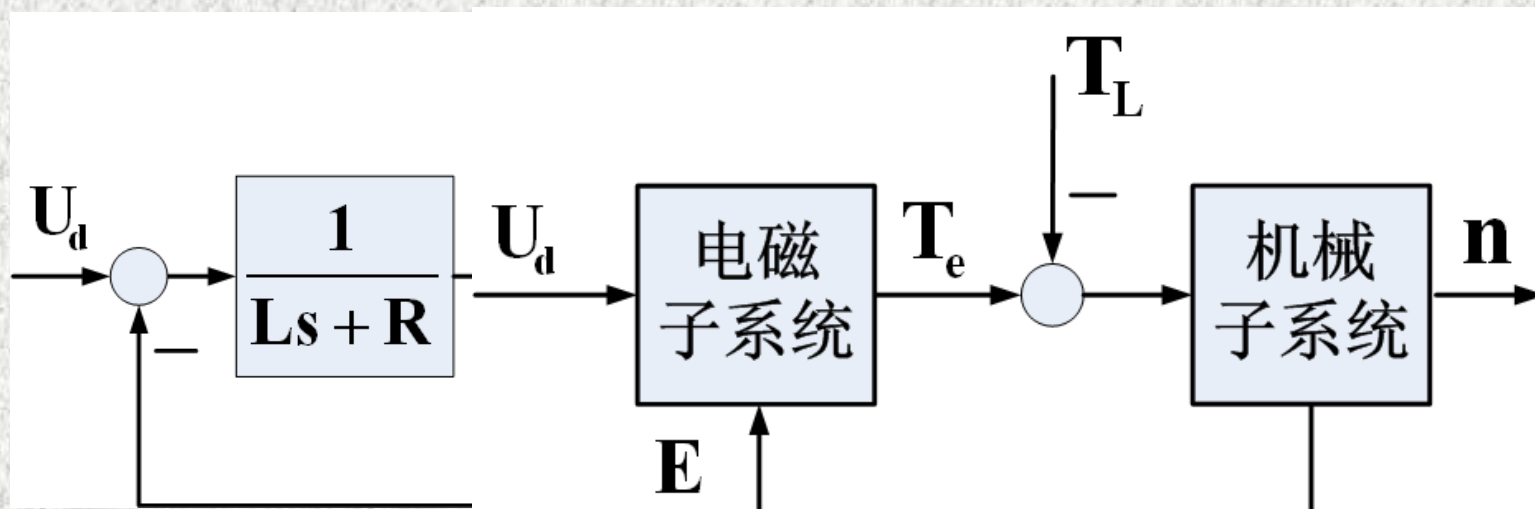
$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = E + I_d R + L \frac{dI_d}{dt} \\ T_e = T_L + J \frac{d\Omega}{dt} \quad GD^2 \frac{dn}{dt} \\ E = K_e \phi n \quad \text{if } \phi = \text{const} \\ T_e = K_m \phi I_d \quad \text{if } I_d = \text{const} \end{array} \right.$$

$$C_m = C_e \cdot \frac{60}{2\pi}$$

转矩系数 反电动势系数



直流电机的动态模型

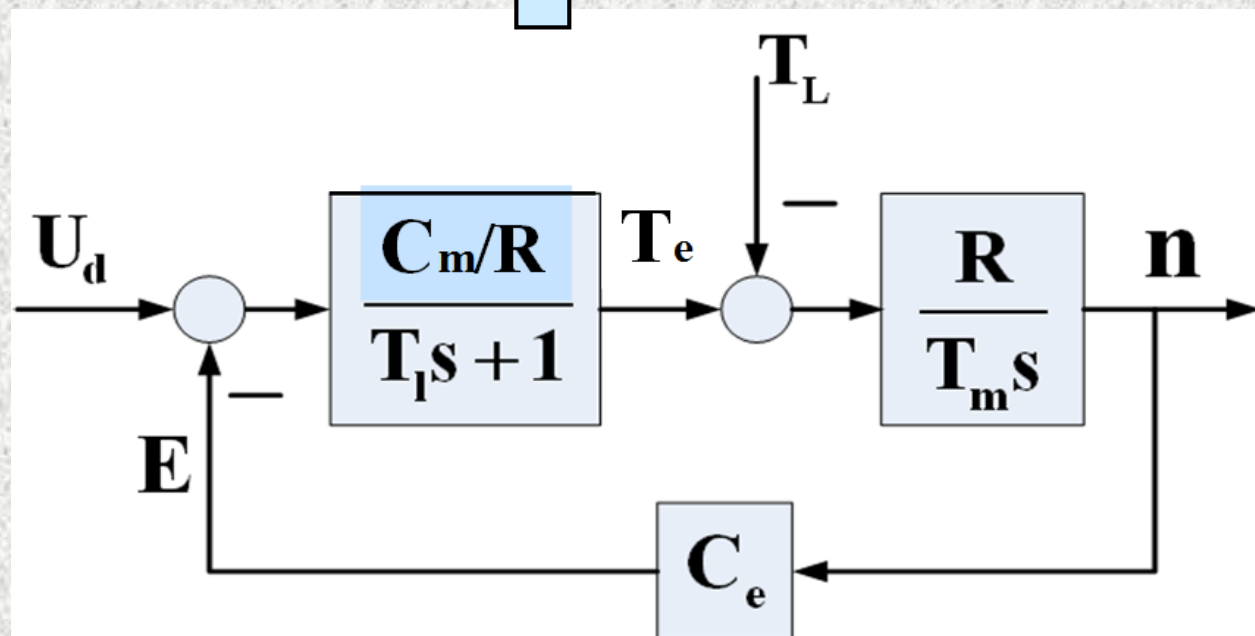


电枢回路的电磁
时间常数:

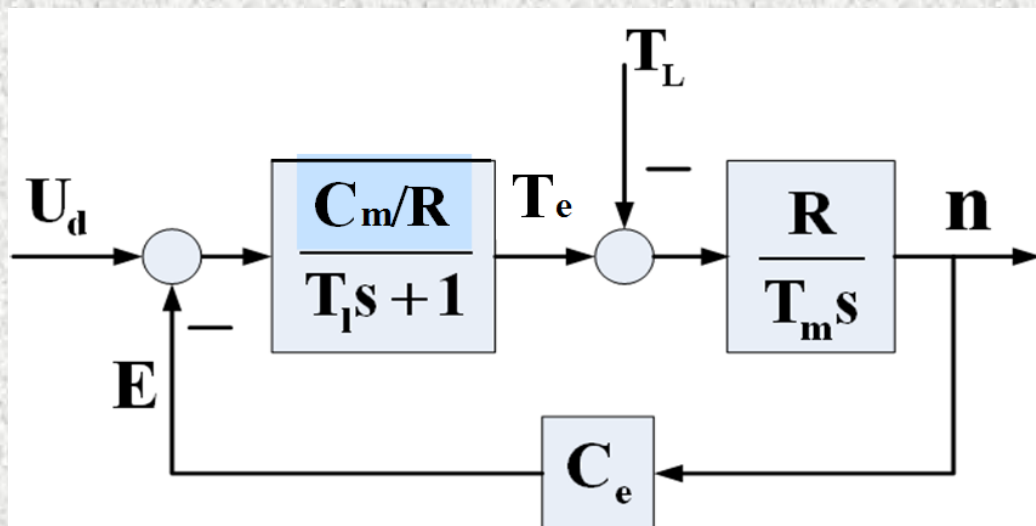
$$T_l = \frac{L}{R}$$

电机拖动系统的
机电时间常数:

$$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$$



直流电机的动态模型



$$T_m \geq 4T_L :$$

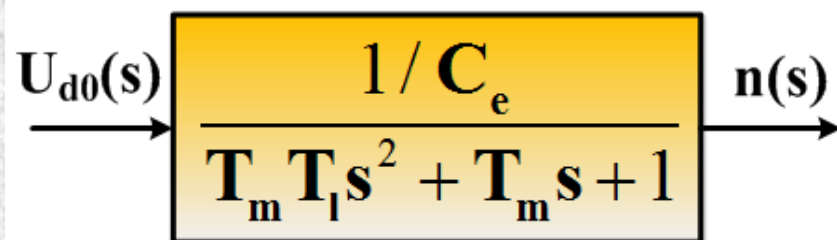
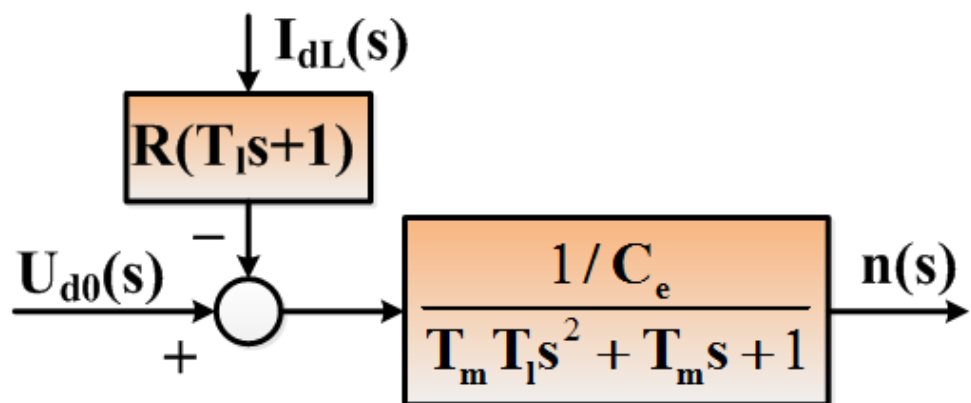
直流电机是一个过阻尼（临界阻尼）二阶系统。

$$T_m < 4T_L :$$

直流电机是一个振荡环节。

负载不为零

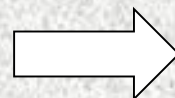
负载为零



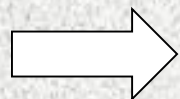
线性二阶系统

直流电机的静态模型

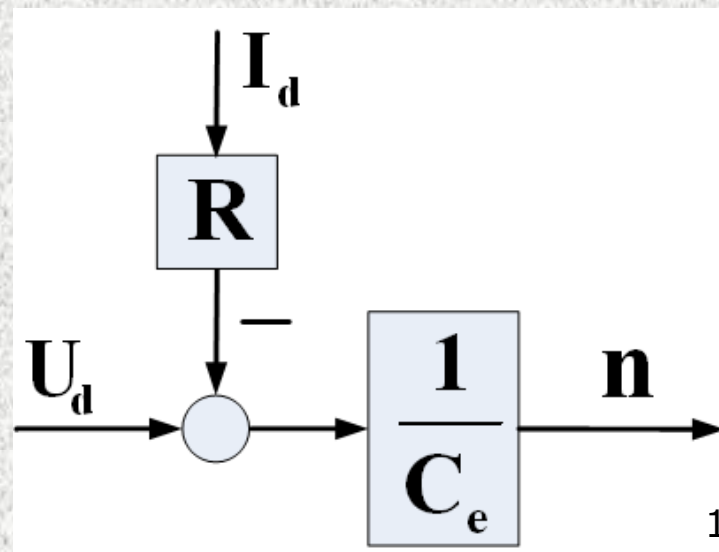
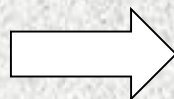
$$\begin{cases} U_d = E_a + I_d R + L \frac{dI_d}{dt} \\ T_e = T_L + J \frac{d\Omega}{dt} = T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \\ E = K_e \phi n \stackrel{\text{if } \phi = c}{=} C_e n \\ T_e = K_m \phi I_d \stackrel{\text{if } \phi = c}{=} C_m I_d \end{cases}$$



$$\begin{cases} U_d = E_a + I_d R \\ T_e = T_L \\ E \stackrel{\text{if } \phi = c}{=} C_e n \\ T_e \stackrel{\text{if } \phi = c}{=} C_m I_d \end{cases}$$



$$\stackrel{\text{if } \phi = c}{n} = \frac{U_d - I_d R}{C_e}$$



□ 直流电机调速方法

直流电机稳态转速方程：

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \Phi}$$

式中： n — 转速 (r/min)
 U_d — 电枢电压 (V)
 I_d — 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

调节转速的方法：

- 1、改变电枢回路电阻 R
- 2、改变励磁磁通 Φ
- 3、改变电枢电压 U_d

(1) 调阻调速

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \phi}$$

■ 工作条件:

保持励磁 $\Phi = \Phi_N$

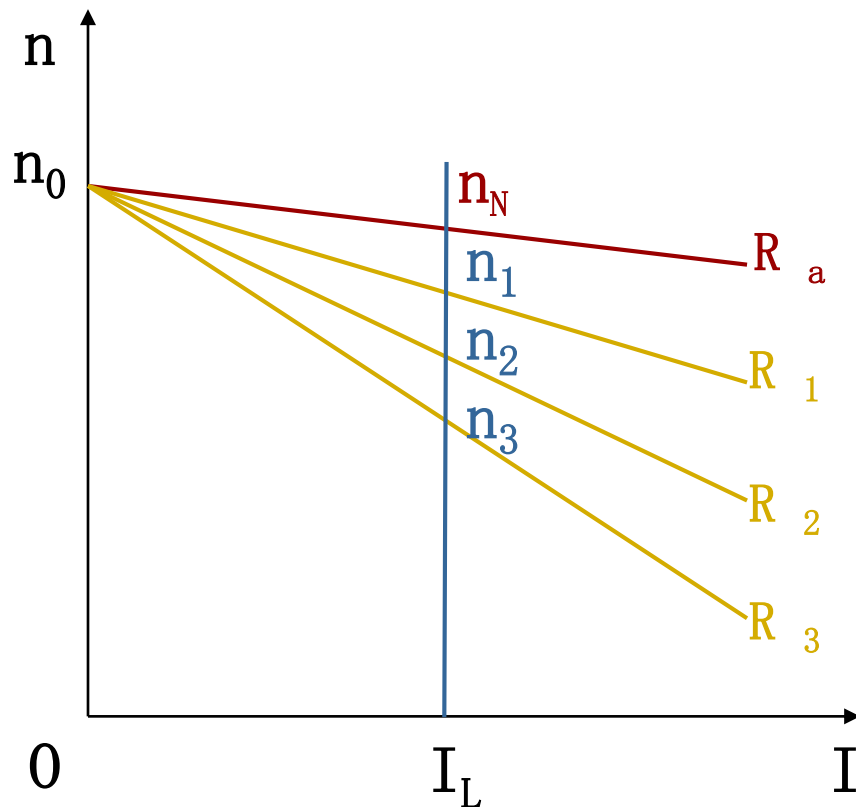
保持电压 $U_d = U_{dN}$

■ 调节过程:

$R \uparrow \rightarrow n \downarrow$

■ 调速特性:

- 1、机械特性曲线变软
- 2、有级调速
- 3、高能耗



调阻调速特性曲线

(2) 调磁调速

■ 工作条件:

保持电压 $U = U_N$

保持电阻 $R = R_a$

■ 调节过程:

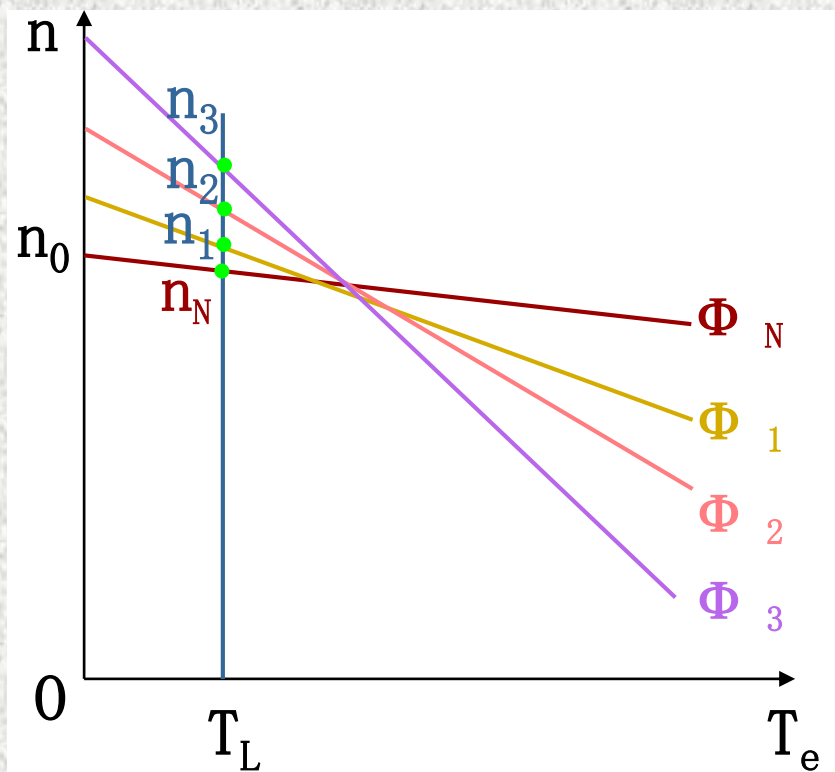
$\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow, n_0 \uparrow$

■ 调速特性:

转速上升, 机械特性
曲线变软, 响应变慢。

$$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$$

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \phi}$$



调磁调速特性曲线

(3) 调压调速

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \phi}$$

■ 工作条件:

保持励磁 $\Phi = \Phi_N$

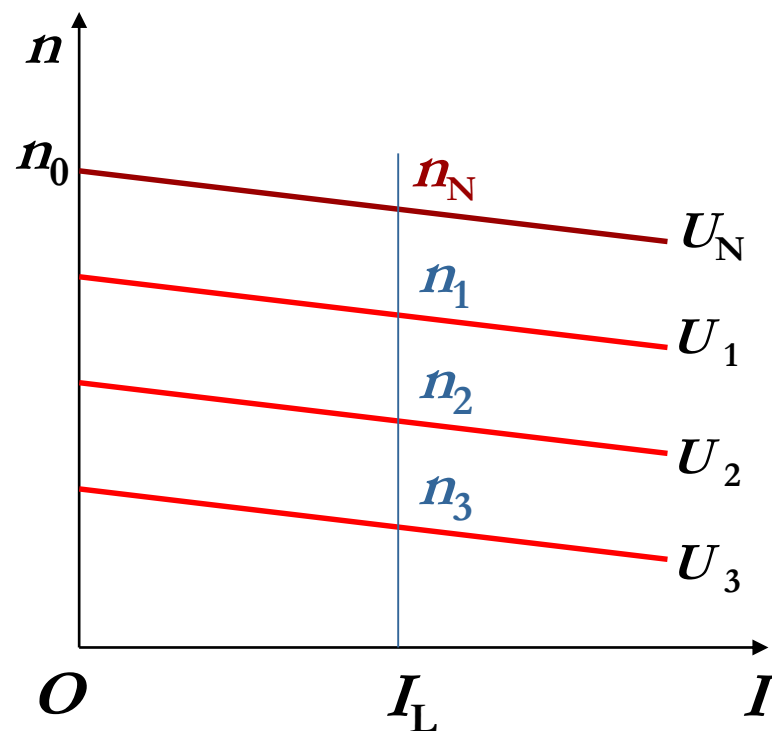
保持电阻 $R = R_a$

■ 调节过程:

改变电压 $U \downarrow \rightarrow n \downarrow, n_0 \downarrow$

■ 调速特性:

转速下降, 机械特性曲线平行下移。



调压调速特性曲线

· 三种调速方法的性能与比较

- 1、改变电阻只能有级调速，而且高能耗；
- 2、减弱磁通虽然能够平滑调速，但调速范围不大，在基速以上作小范围的弱磁升速。
- 3、**调压调速**能在较大的范围内无级平滑调速。

2.2 可控直流电源及建模

- **旋转变流机组**——用交流电动机和直流发电机组成机组，以获得可调的直流电压。
- **晶闸管相控整流器**——用静止式的可控整流器，以获得可调的直流电压。
- **直流斩波器或脉宽调制变换器**——用恒定直流电源或不控整流电源供电，利用电力电子开关器件斩波或进行脉宽调制，以产生可变的平均电压。

1、旋转变流机组

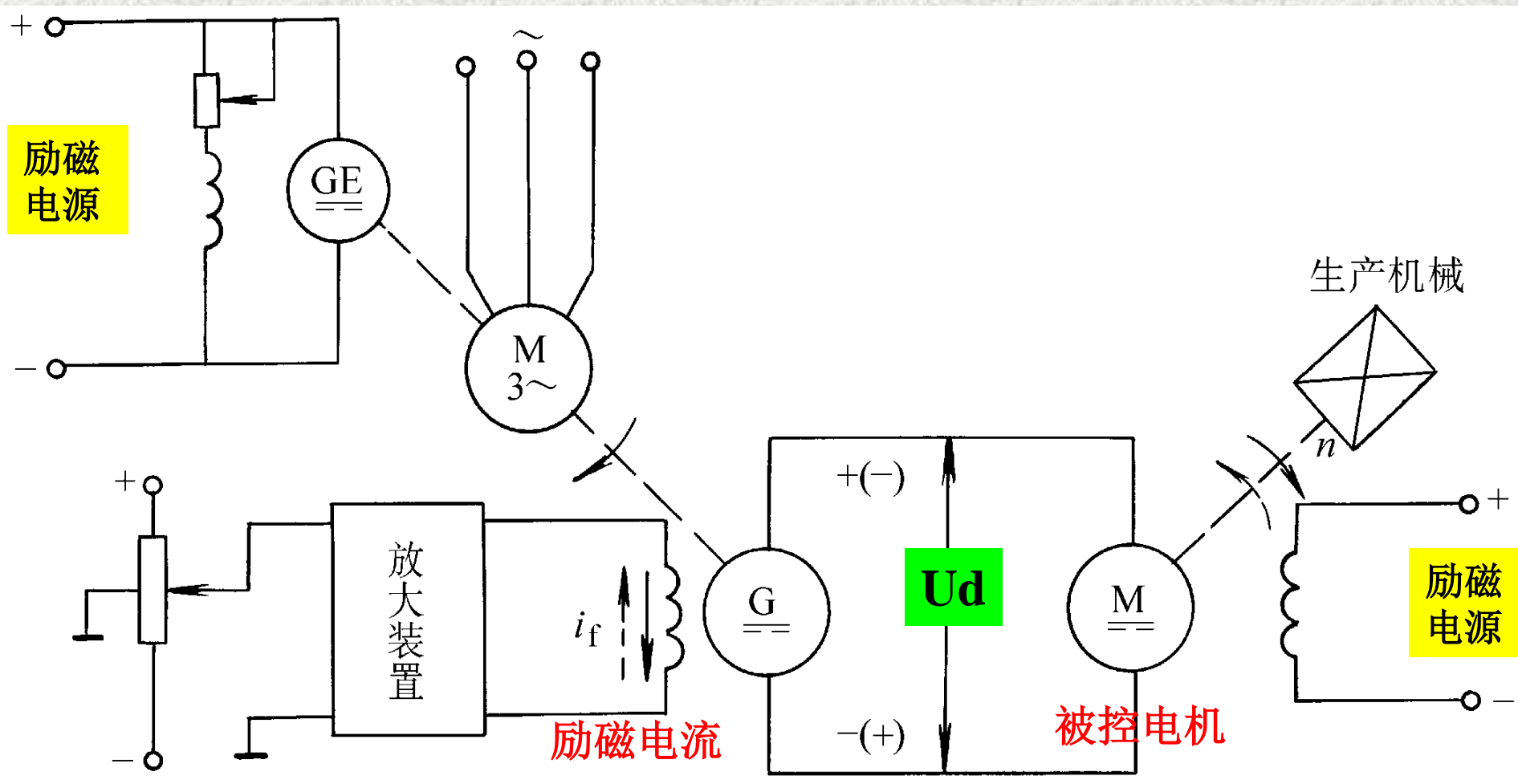


图1旋转变流机组供电的直流调速系统（G-M系统）

2、晶闸管相控整流器

- 通过晶闸管 (Thyristor) 直接对交流电源电压进行可控整流。

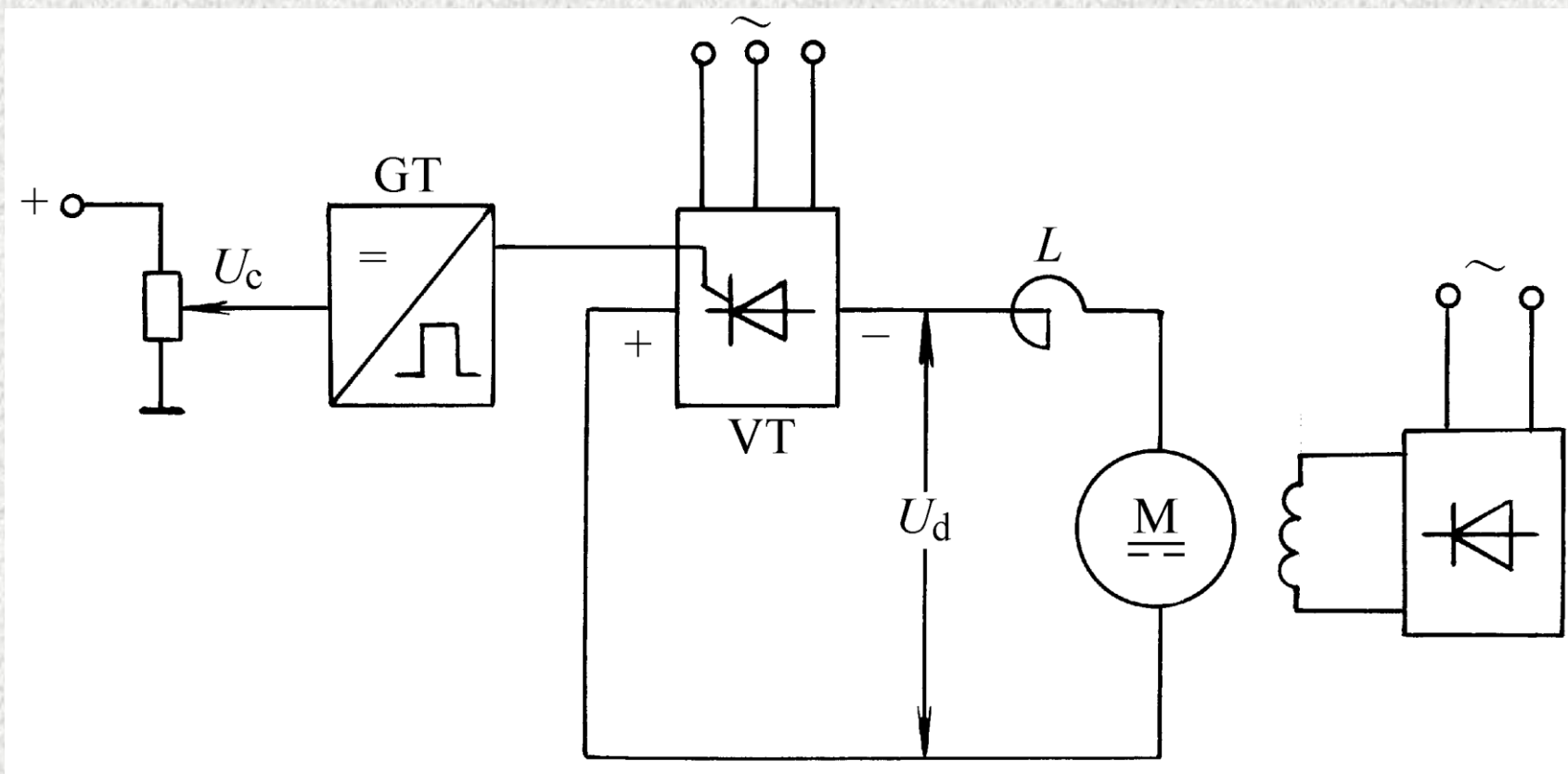
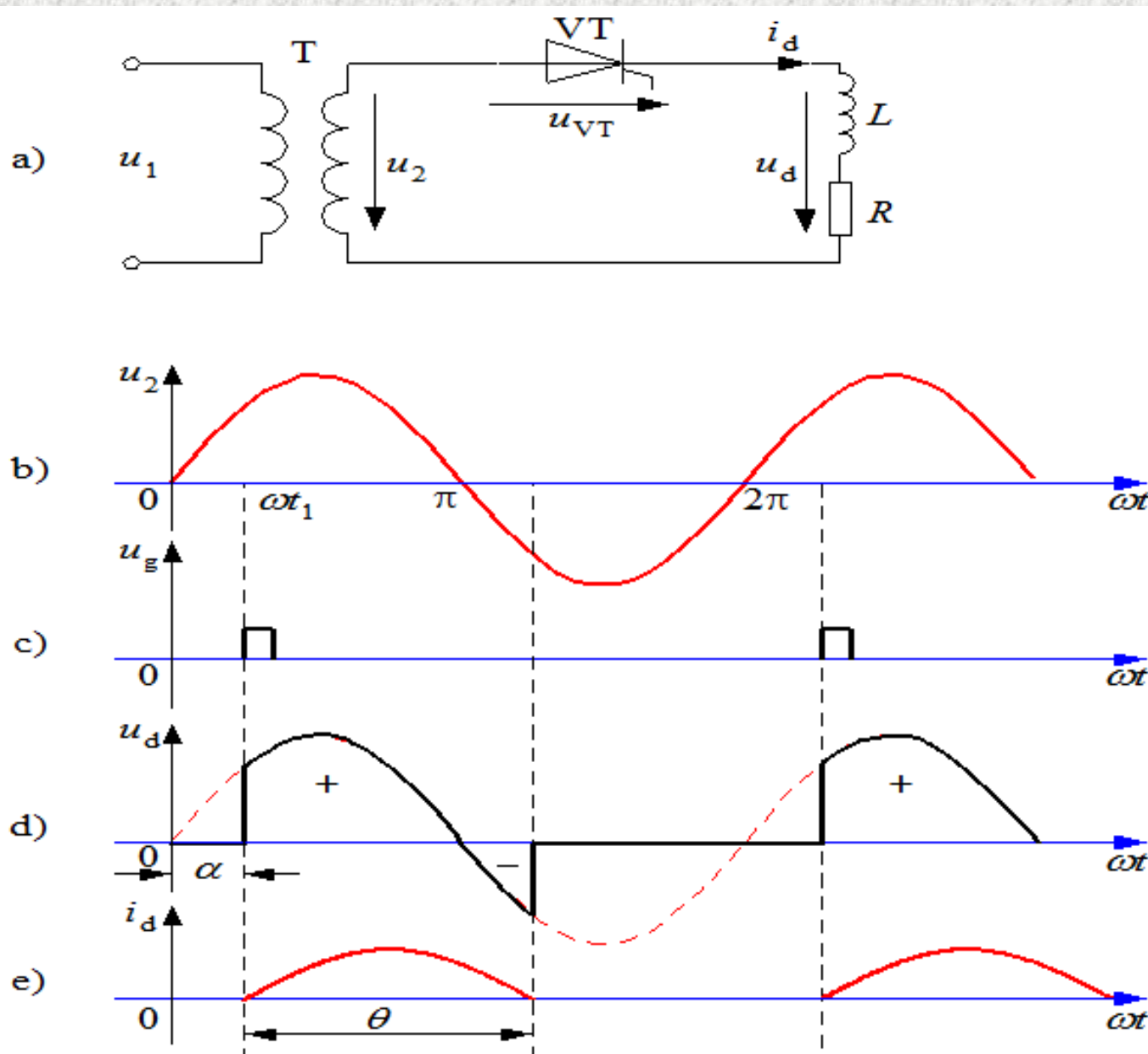


图2 晶闸管相控整流器供电的直流调速系统（V-M系统）

晶闸管单相半波整流电路



在如图可控整流电路中，调节触发装置GT 输出脉冲的相位，即可很方便地改变整流器输出瞬时电压 u_d 的波形，以及输出平均电压 U_d 的数值。

- 电流连续时，晶闸管整流器的平均整流电压：

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = k U_2 \cos \alpha$$

式中： α — 从自然换相点算起的触发脉冲控制角；
 U_m — $\alpha = 0$ 时的整流电压波形峰值；
 m — 交流电源一周内的整流电压脉波数；

表 2-1 不同整流电路的平均整流电压

整流电路	单相全波	三相半波	三相全波	六相半波
U_m	$\sqrt{2}U_2^*$	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{6}U_2$	$\sqrt{2}U_2$
m	2	3	6	6
U_{d0}	$0.9U_2 \cos \alpha$	$1.17U_2 \cos \alpha$	$2.34U_2 \cos \alpha$	$1.35U_2 \cos \alpha$

* U_2 是整流变压器二次侧额定相电压的有效值。

• V-M系统的优点

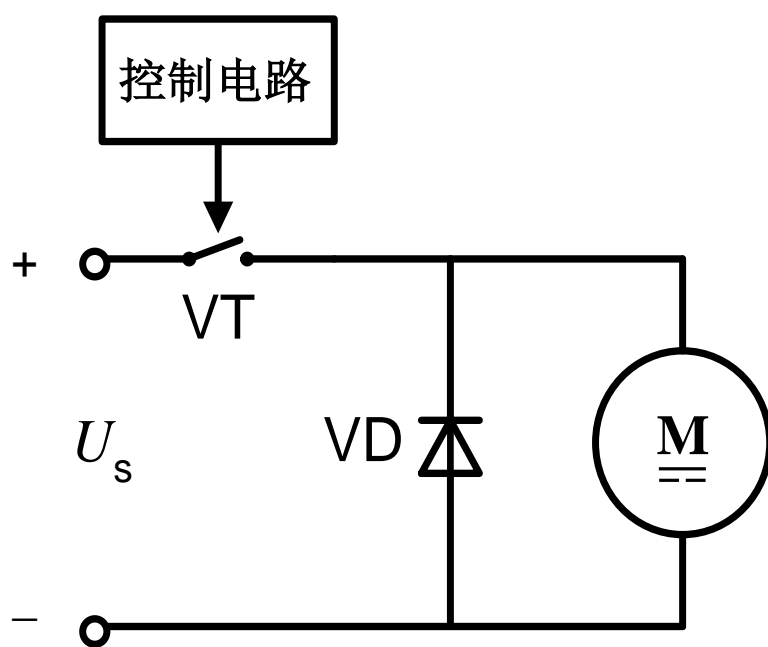
- 晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上，其门极电流可以直接用晶体管来控制，不再像直流发电机那样需要较大功率的放大器；
- 在控制作用的快速性上，变流机组是秒级，而晶闸管整流器是毫秒级，大大提高系统的动态性能；
- 晶闸管的耐压值很高，可达几万伏；

• V-M系统的缺点:

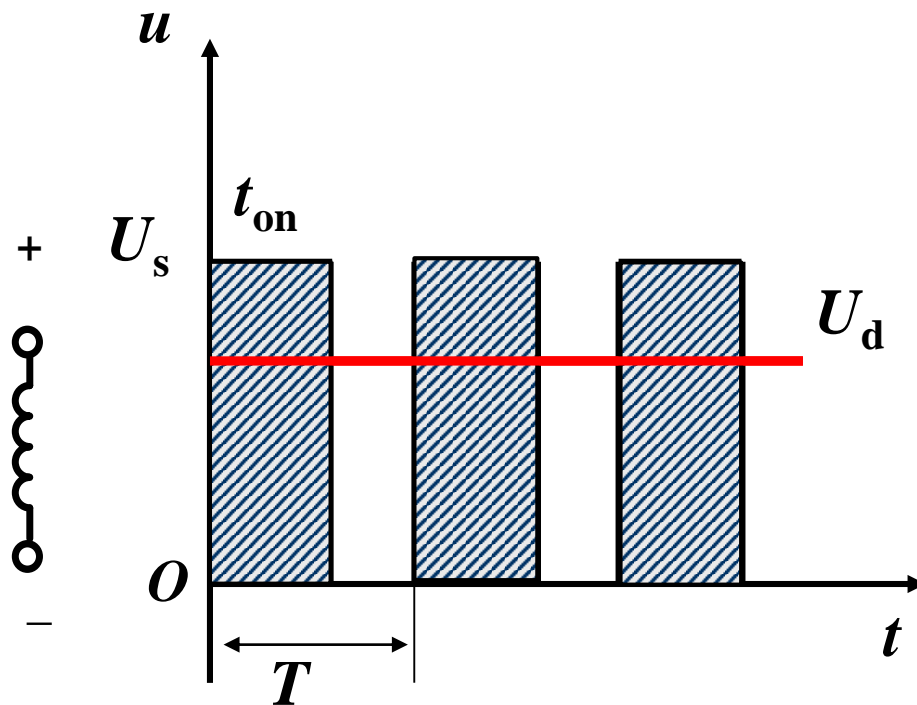
- 由于晶闸管整流器的单向导电性，它不允许电流反向，给系统的可逆运行造成困难。
- 电流容易断续，需串联较大的平波电抗器。
- 晶闸管对过电压、过电流和过高的 dV/dt 与 di/dt 都十分敏感，若超过允许值会在很短的时间内损坏器件。
- 电流畸变，功率因数低，谐波污染严重。

3、直流PWM变换器（Pulse Width Modulation）

(1) 直流斩波器



a) 原理图



b) 电压波形图

图1-5 直流斩波器-电动机系统的原理图和电压波形

输出电压计算

采用直流斩波器时，电动机得到的平均电压为：

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

式中： T — 开关周期

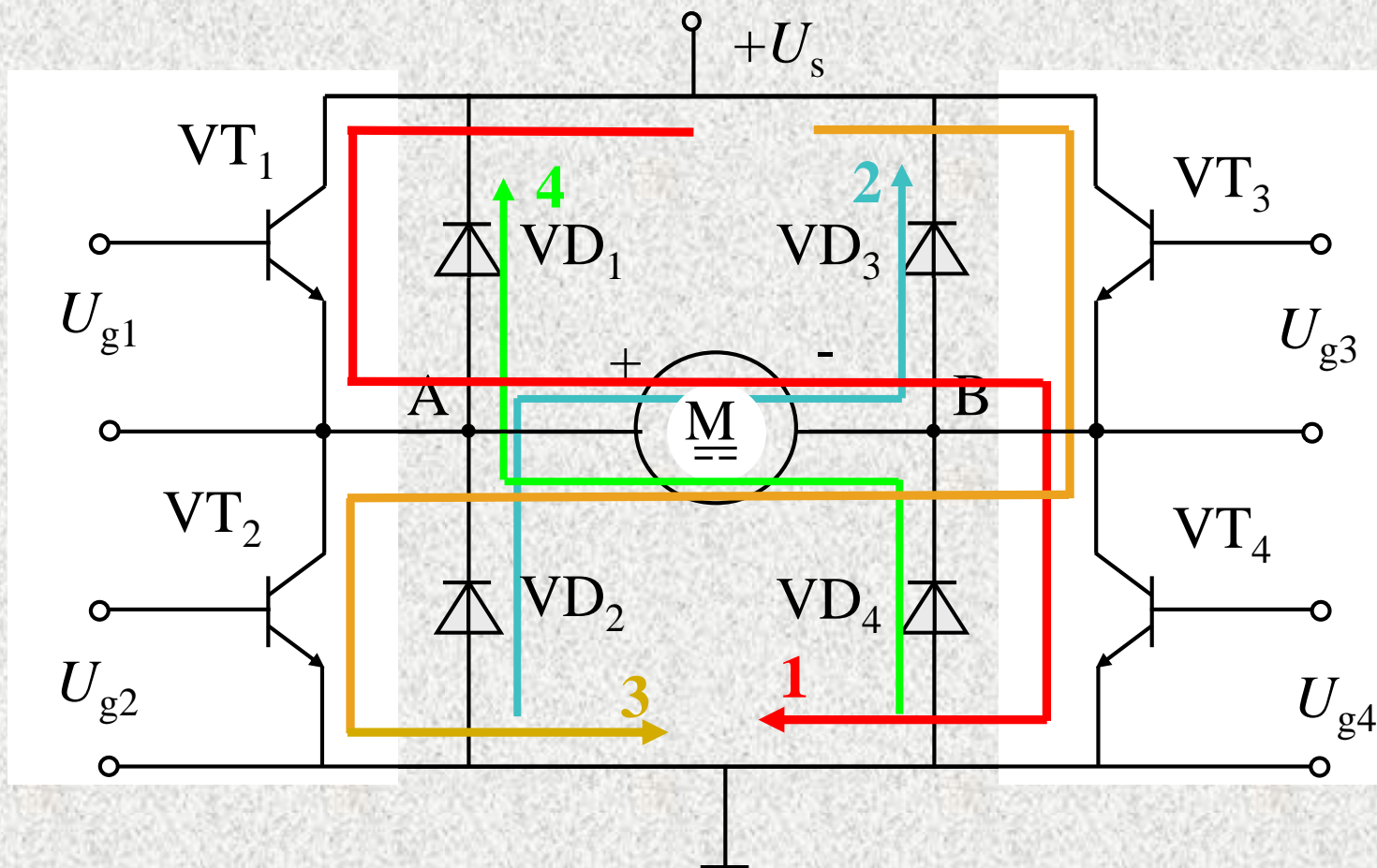
t_{on} — 开通时间

ρ — 占空比， $\rho = t_{on} / T = t_{on} f$

其中： f 为开关频率

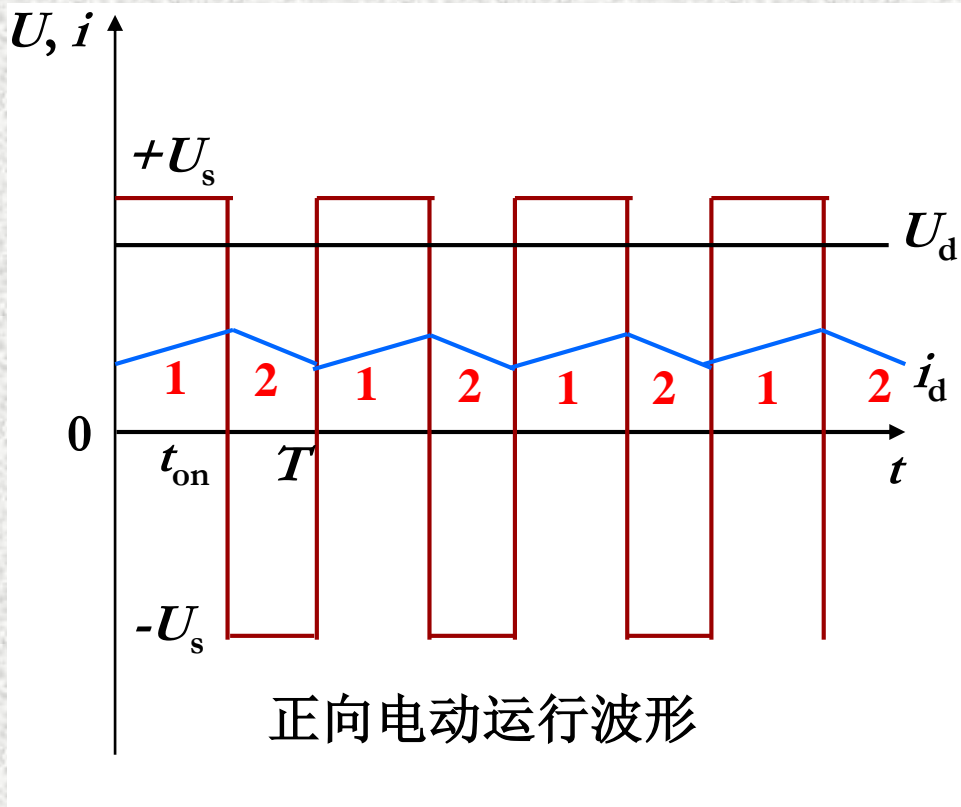
(2) 桥式双极性PWM变换器

■ H形主电路结构



■ 双极式控制方式

(一般负载情况下)

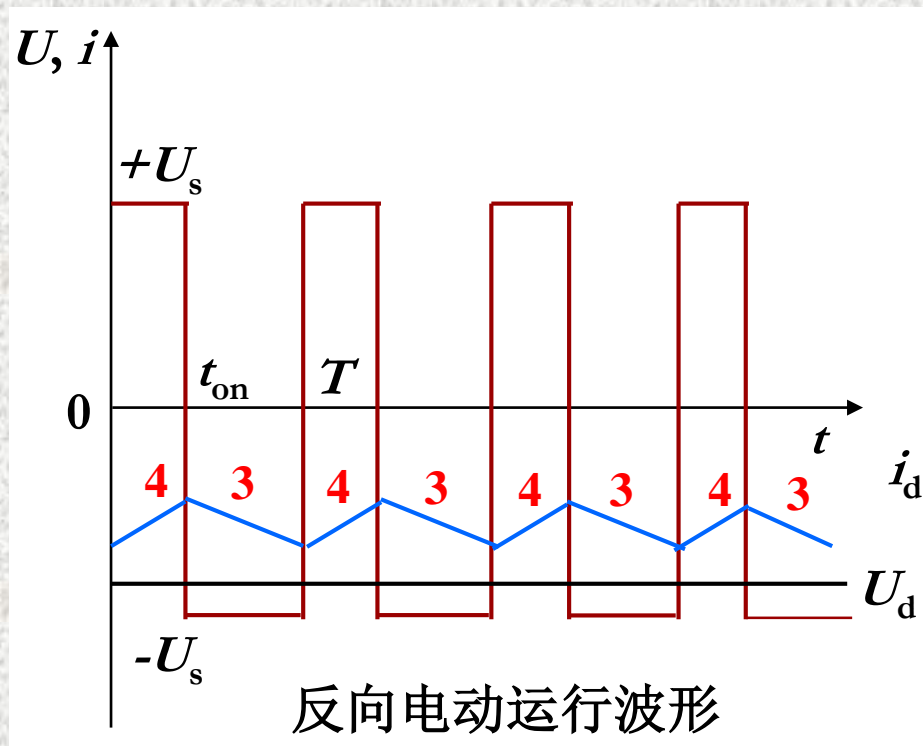


(1) 正向运行

- 第1阶段，在 $0 \leq t \leq t_{\text{on}}$ 期间， U_{g1} 、 U_{g4} 为正，**VT₁、VT₄导通**， U_{g2} 、 U_{g3} 为负，VT₂、VT₃截止，电流 i_d 沿**回路1**流通，电动机M两端电压 $U_{AB} = +U_s$ ；
- 第2阶段，在 $t_{\text{on}} \leq t \leq T$ 期间， U_{g1} 、 U_{g4} 为负，VT₁、VT₄截止，**VD₂、VD₃续流**，并钳位使VT₂和VT₃保持截止，电流 i_d 沿**回路2**流通，电动机M两端电压 $U_{AB} = -U_s$ ；

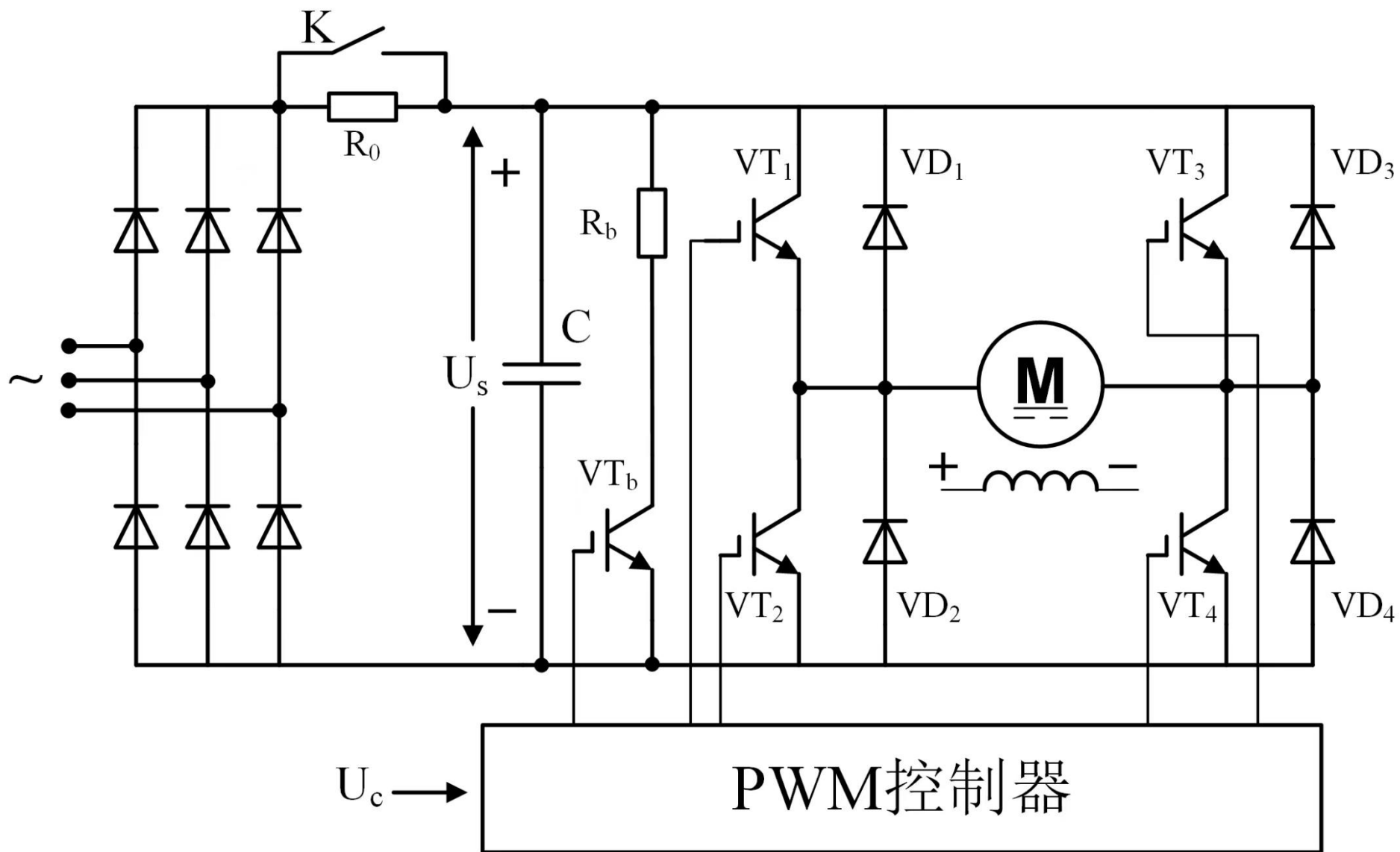
■ 双极式控制方式

(一般负载情况下)

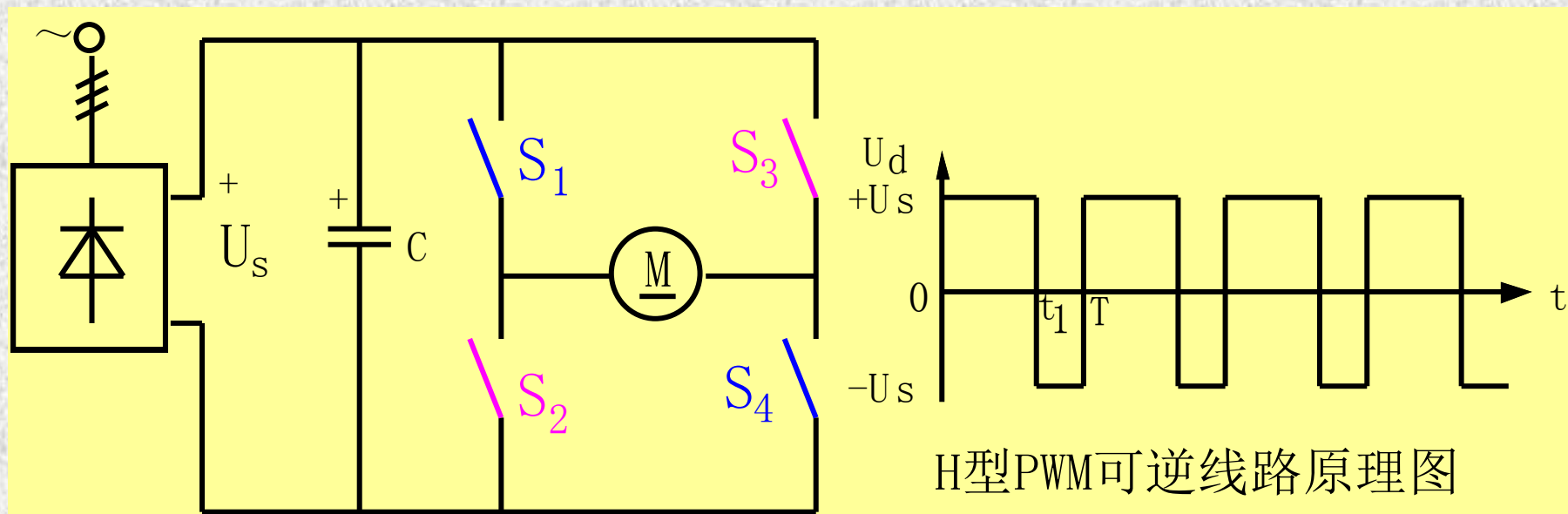


(2) 反向运行

- 第4阶段，在 $0 \leq t \leq t_{\text{on}}$ 期间， U_{g2} 、 U_{g3} 为负， VT_2 、 VT_3 截止， **VD_1 、 VD_4 续流**，并钳位使 VT_1 、 VT_4 截止，电流 $-i_d$ 沿**回路4**流通，电动机M两端电压 $U_{AB} = +U_s$ ；
- 第3阶段，在 $t_{\text{on}} \leq t \leq T$ 期间， U_{g2} 、 U_{g3} 为正， **VT_2 、 VT_3 导通**， U_{g1} 、 U_{g4} 为负，使 VT_1 、 VT_4 保持截止，电流 $-i_d$ 沿**回路3**流通，电动机M两端电压 $U_{AB} = -U_s$ ；



(2) 桥式双极性PWM变换器



■ 输出电压平均值

$$U_d = \frac{t_1}{T} U_s - \frac{T-t_1}{T} U_s = \left(\frac{2t_1}{T} - 1\right) U_s = (2\rho - 1) U_s = \gamma U_s$$

占空比

电压系数

• PWM调速系统的优点

- (1) 主电路结构简单，需用的功率器件少；
- (2) 低速性能好，稳速精度高，调速范围宽，可达1:10000左右；
- (3) 开关频率高，动态性能好，若与快速响应的电机配合，则系统频带宽，动态响应快；
- (4) 直流电源采用不控整流时，电网功率因数比相控整流器高。

晶闸管整流器的放大系数和传递函数

■ 非线性晶闸管整流放大系数的线性化处理

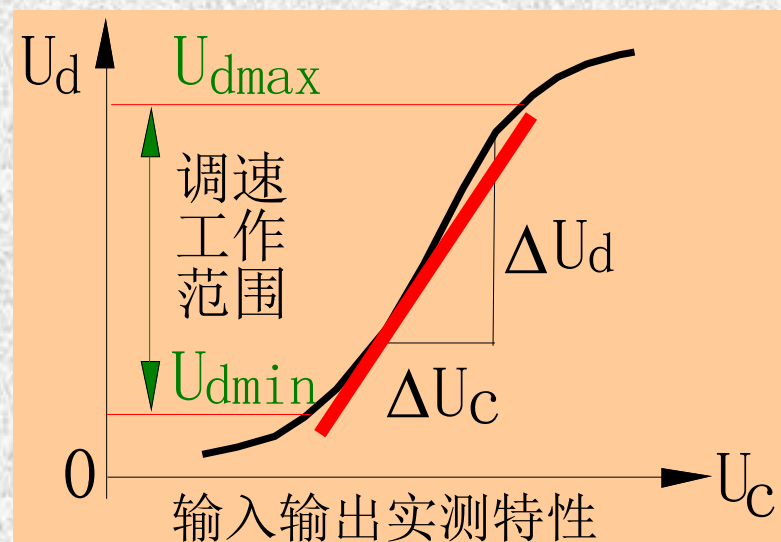
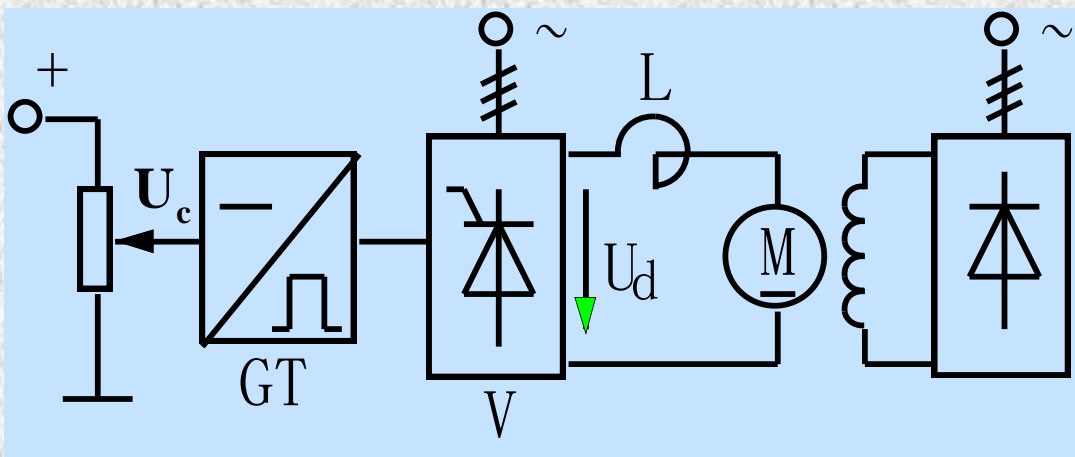
1、触发控制电压 U_c 和触发角 α 之间是线性关系；

当 $U_c = U_{c\max}$ 时, $\alpha = 0$; 当 $U_c = 0$ 时, $\alpha = \pi / 2$;

2、平均整流电压 $U_{d0} = kU_2 \cos \alpha$, U_{d0} 是触发角 α 的超越方程；

3、因此，触发整流装置的放大系数具有强烈非线性；

线性化：在主要调速区间 $K_s \approx \frac{\Delta U_d}{\Delta U_c}$ 或 $K_s \approx \frac{U_{d\max}}{U_{c\max}}$



• 晶闸管触发和整流装置的放大系数估算

- 一种方法是把触发装置和整流装置的输入输出特性实测出来，取其近似线性的工作区域进行建模。
- 如果不能实测特性，可以根据装置的参数估算。

例如：

设触发电路控制电压的调节范围为：

$$U_c = 0 \sim 10V$$

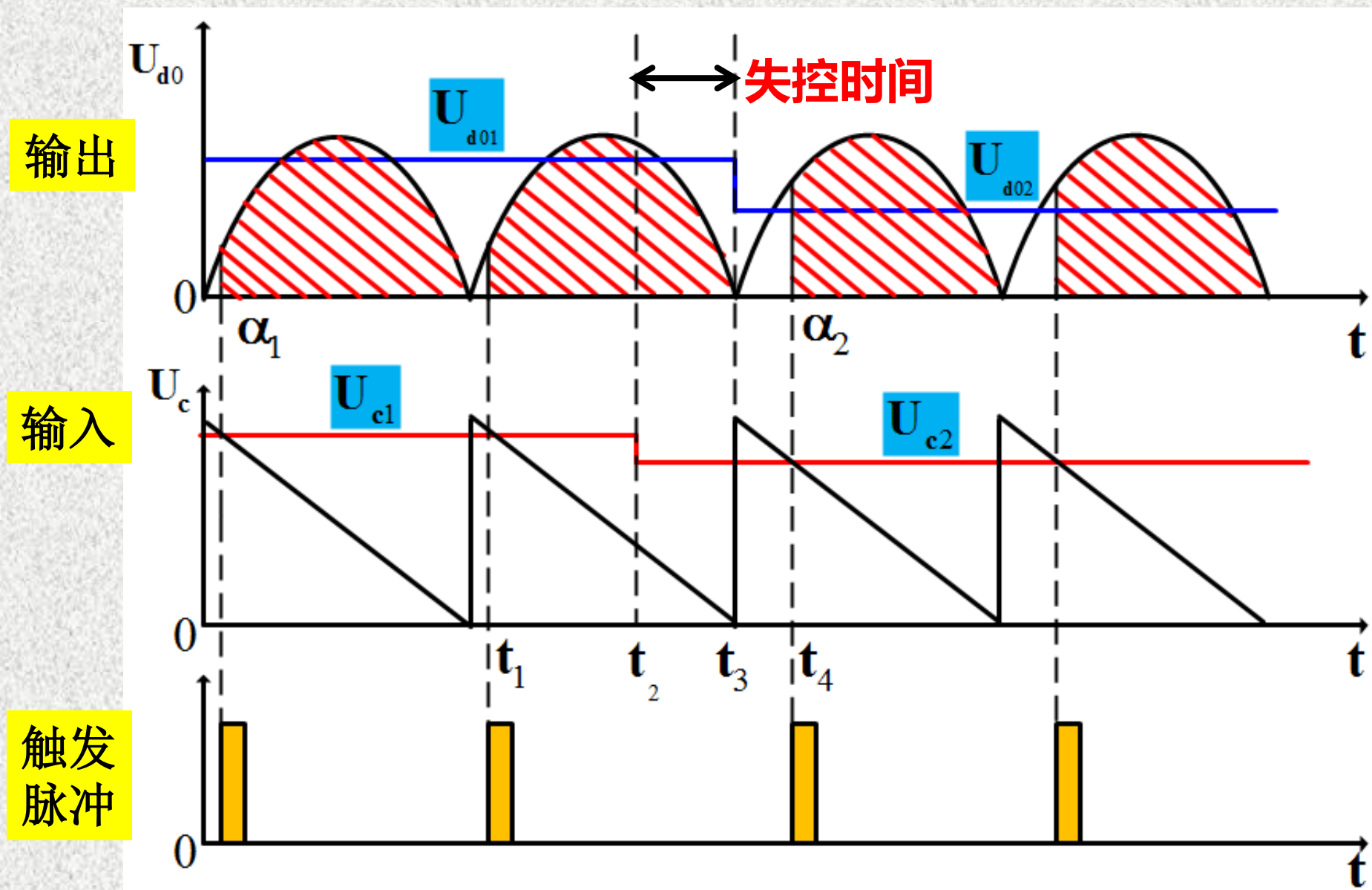
相对应的整流平均电压的变化范围是：

$$U_d = 0 \sim 220V$$

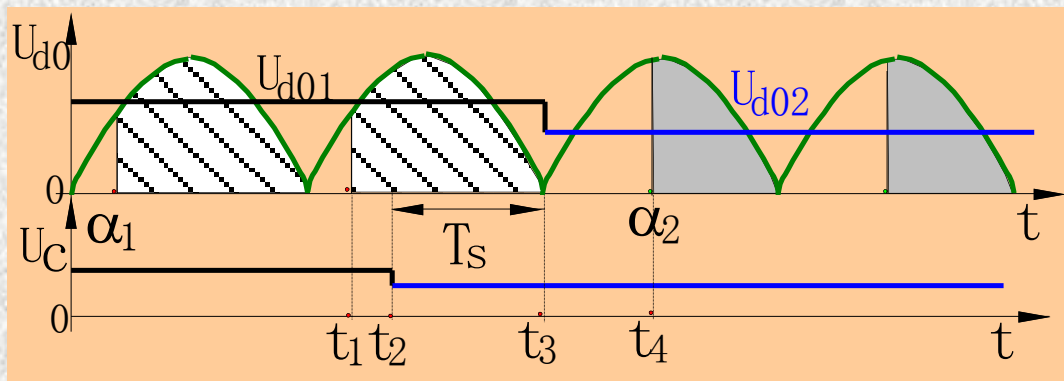
可取： $K_s = 220/10 = 22$

晶闸管触发与整流的**失控时间**与纯滞后特性

以**单相全波纯电阻负载**整流电路为例：



• 晶闸管触发与整流装置的传递函数



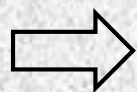
$$U_{d0} = K_s U_c \bullet 1(t - T_s)$$

泰勒级数展开

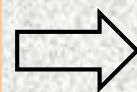
$$G_s(S) = \frac{U_{d0}(S)}{U_c(S)} = K_s e^{-T_s s} = \frac{K_s}{e^{T_s s}} = \frac{K_s}{1 + T_s S + \frac{1}{2!} T_s^2 S^2 + \dots} \approx \frac{K_s}{1 + T_s S}$$

- 如果失控时间足够小（**满足以下条件**），可以忽略高阶项，晶闸管触发与整流装置的传递函数可近似为一阶惯性环节。

$$\frac{1}{2} T_s^2 \omega^2 \leq \frac{1}{10}$$



$$\omega_b \leq \frac{1}{2.24 T_s}$$



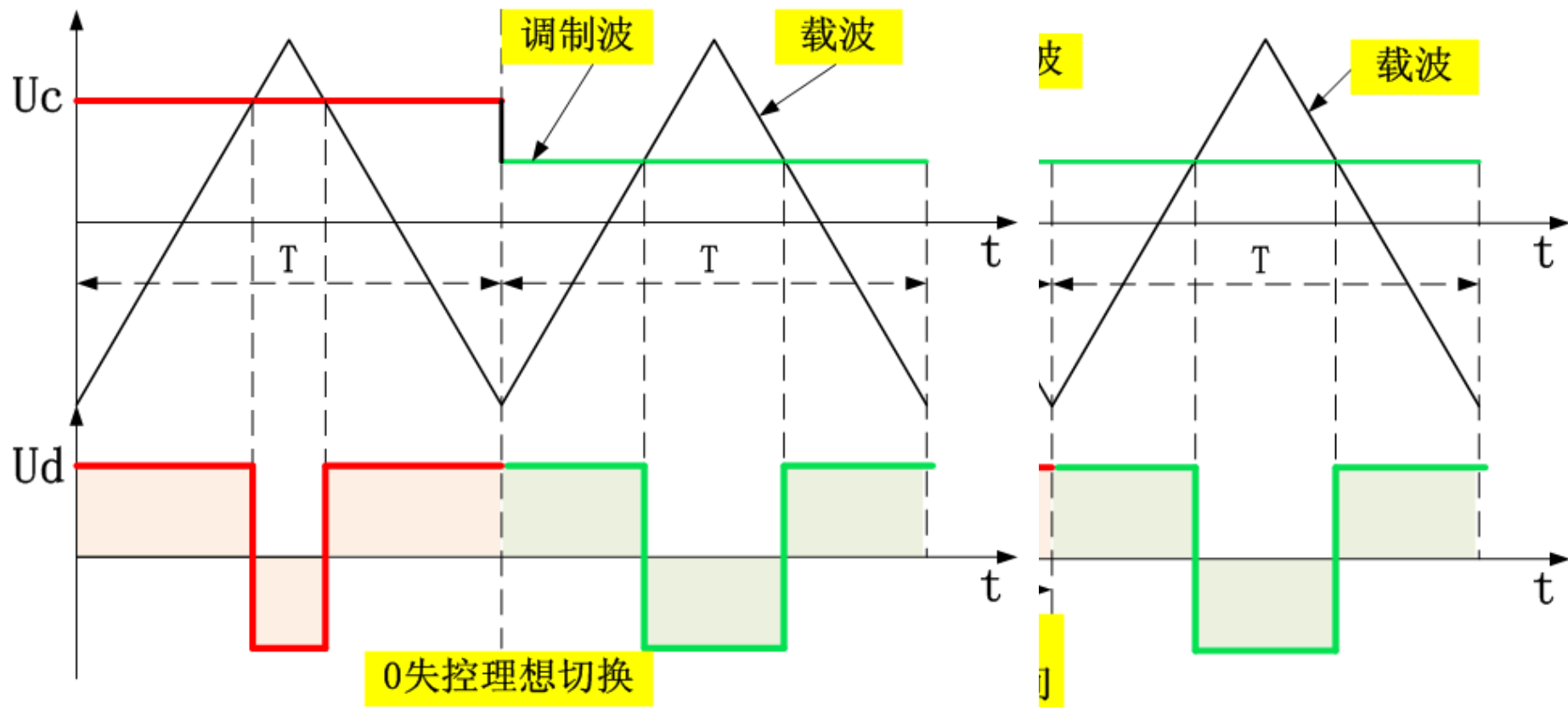
$$\omega_c \leq \frac{1}{3 T_s}$$

闭环截止频率

开环截止频率

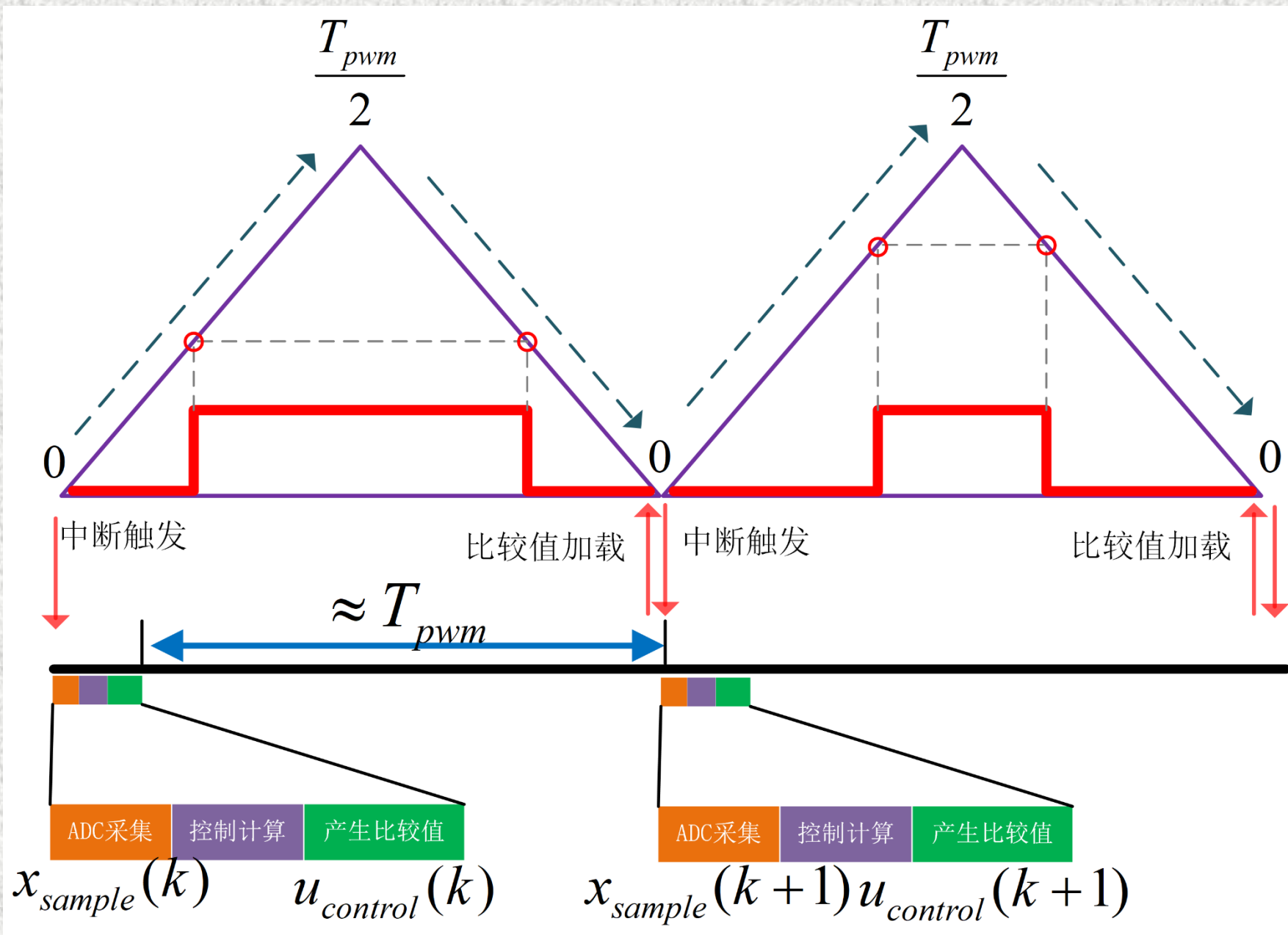
三、直流PWM变换器的传递函数

■ 直流PWM放大器的失控时间与滞后特性:

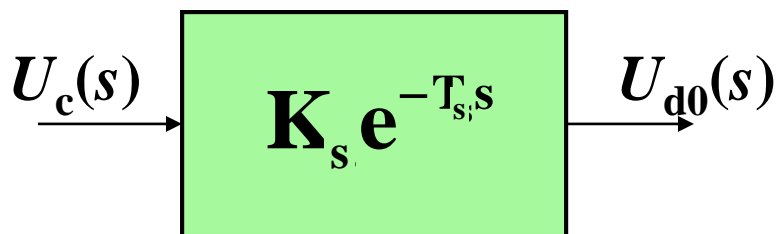


传递函数与V-M系统具有相同的形式，但滞后时间远远小于V-M系统:

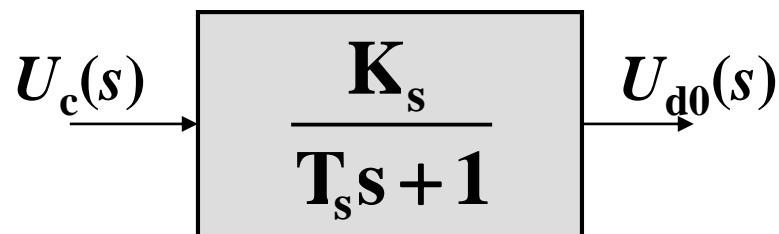
$$W_s(S) = \frac{U_d(S)}{U_c(S)} = K_s e^{-T_s s} = \frac{K_s}{e^{T_s s}} \approx \frac{K_s}{1 + T_s S}$$



总结：功率变换器的动态模型



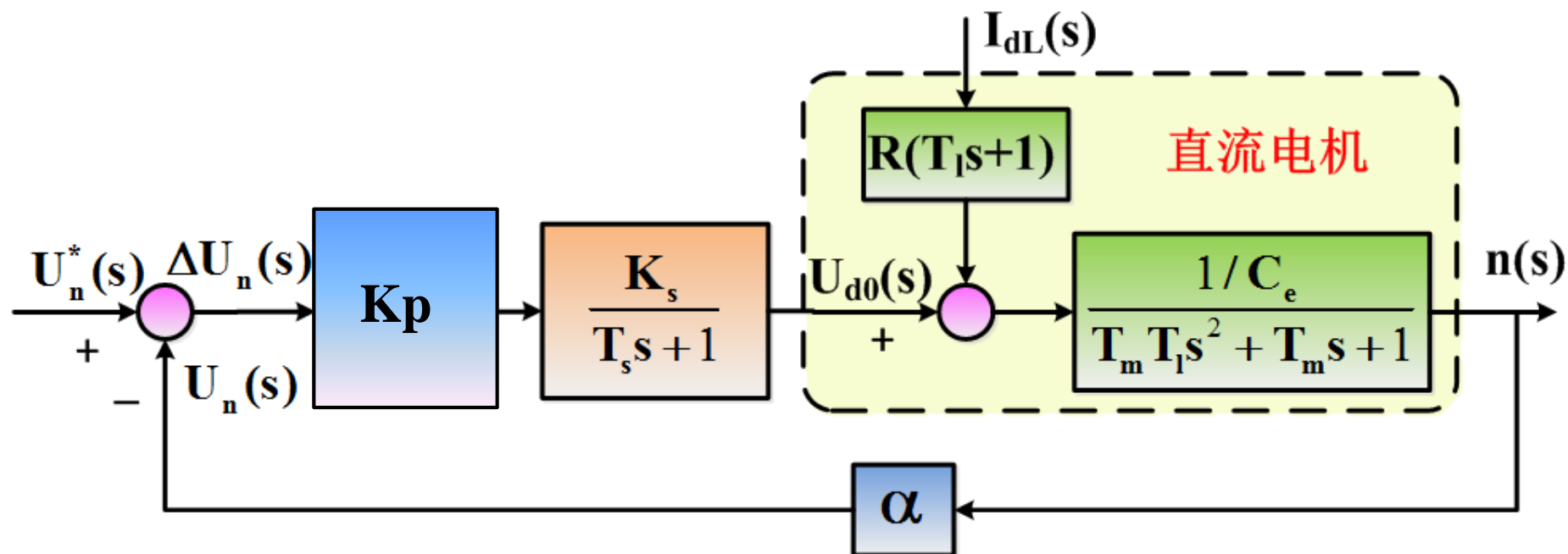
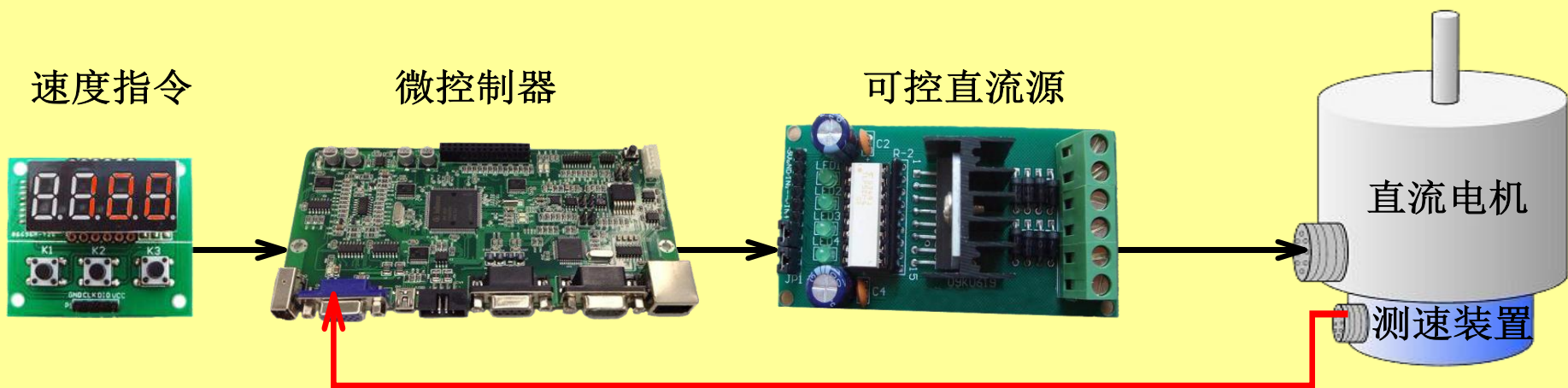
(a) 准确传函



(b) 近似传函

$$\omega_c \leq \frac{1}{3T_s}$$

建模举例：单闭环直流调速系统动态模型



2.3 开环调速系统的机械特性

➤ V-M调速系统的机械特性

■ 电流连续时

$$n = \frac{U_{d0}}{C_e} - \frac{R}{C_e} I_d = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \right) - \frac{R}{C_e} I_d \quad (\text{见表1-2})$$

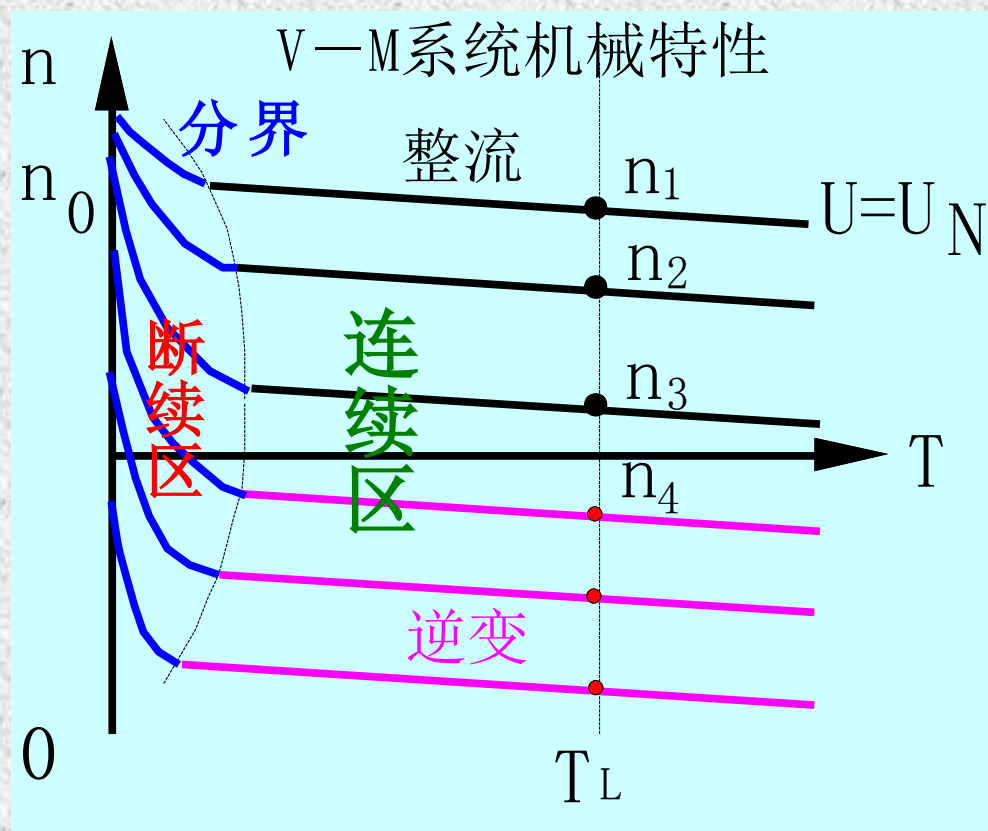
$$= \frac{kU_2 \cos \alpha}{C_e} - \frac{R}{C_e} I_d$$

$$= \frac{kU_2 \cos \alpha}{C_e} - \frac{R}{C_e C_T} T$$

$$= n_0 - \Delta n$$

■ 电流断续时

- 1、理想空载转速很高；
- 2、机械特性很软，相当于整流内阻变大。



2.3 开环调速系统的机械特性

➤ 直流**PWM**调速系统的机械特性（课本**P21**）

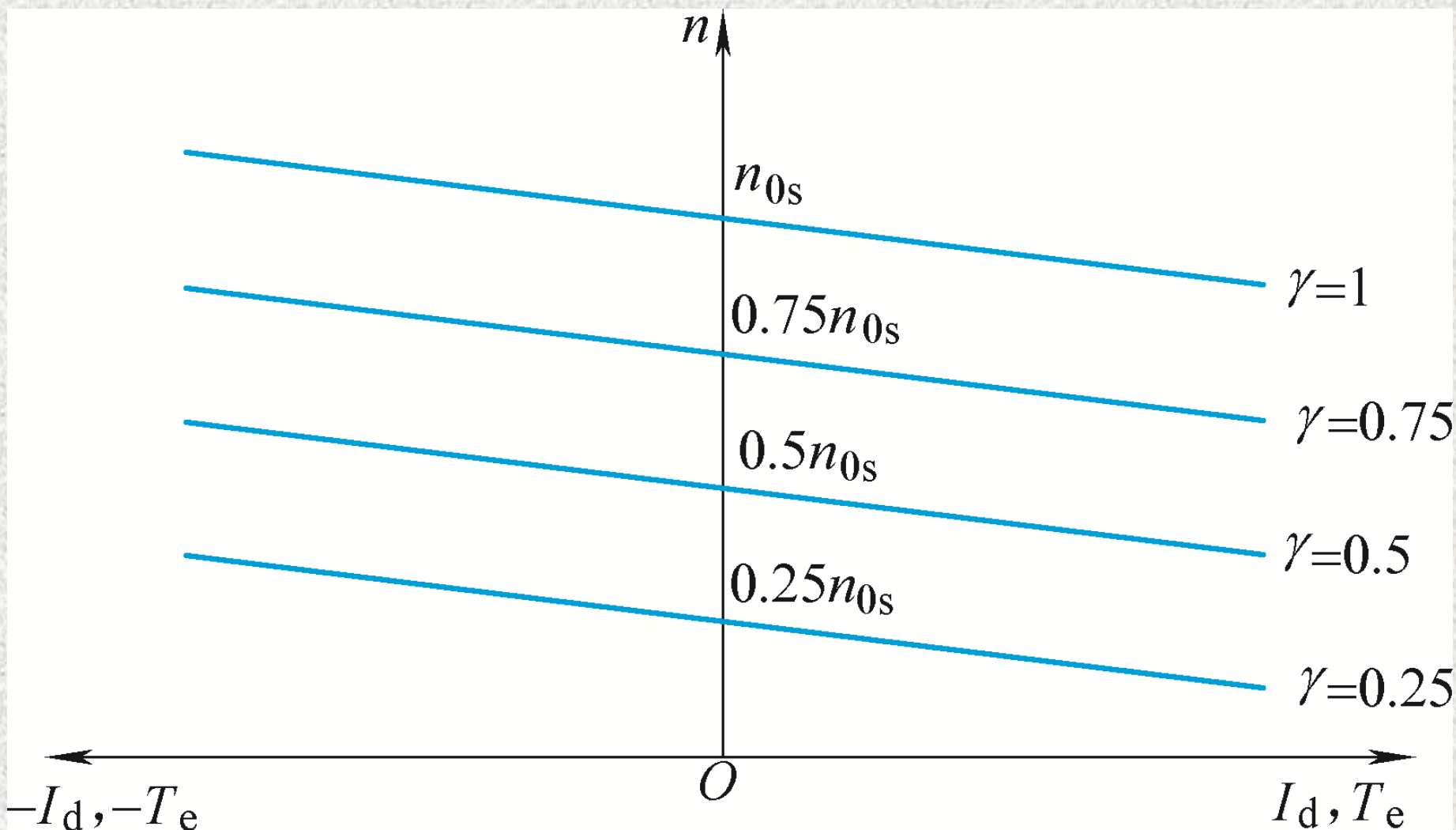


图2-15 直流PWM调速系统的机械特性

2.4 稳态调速性能指标

一、转速控制的要求

- 1、 调速：范围宽、无级**
- 2、 稳速：精度高、抗扰强、波动小。**
- 3、 加减速：快、平稳**

二、稳态性能指标

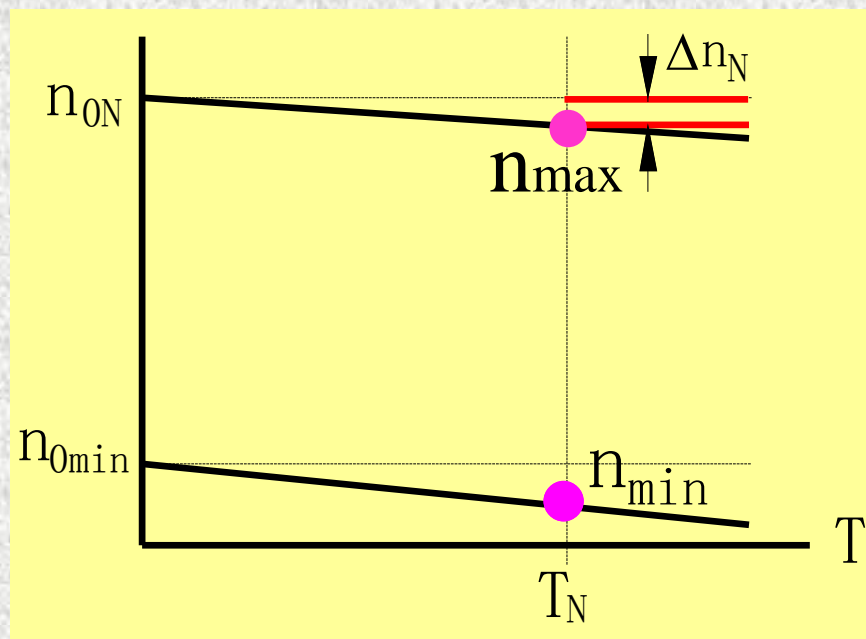
■ 调速范围D

生产机械要求电动机提供的**额定负载**下最高转速和最低转速之比叫做调速范围，用字母 D 表示，即：

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

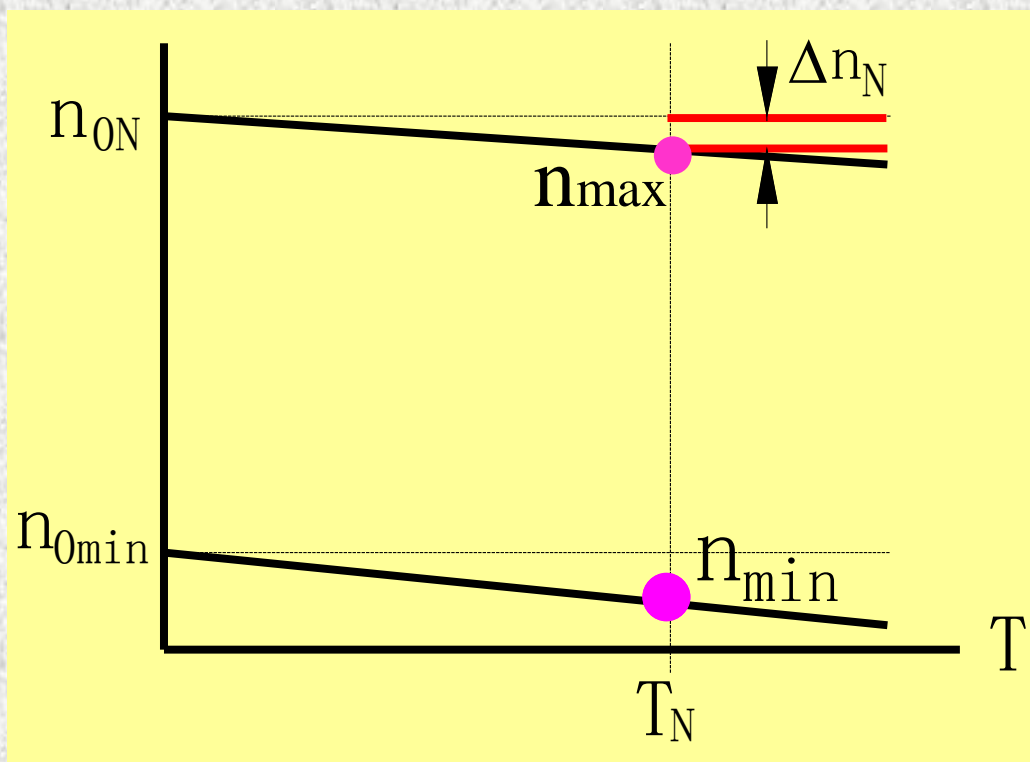
D越大越好！

其中 n_{\min} 和 n_{\max} 都指电机**额定负载**时的转速。



■ 静差率（衡量转速在负载变化时的相对平稳度）

当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载增加到额定值时所对应的**转速降落** Δn_N ，与**理想空载转速** n_0 之比，称作静差率 s ，即：



$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$$

$$s_{\max} = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} \times 100\%$$

静差率指标一般是最低转速时的静差率！

最大静差率越小越好！

■ 稳速精度

在规定的电网质量和负载扰动条件下，在规定的运行时间(如**1**小时或**8**小时)内，在某一指定的转速下，**t**时间(通常取**1**秒)内平均转速最大值和另一**t**时间内平均转速最小值的相对误差百分数。

$$\delta = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}} \times 100\%$$

一般闭环调速系统高速运行时稳速精度比较容易达到，稳速精度指标通常被用来确定调速范围的速度下限。

三、 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

设：电机额定转速 n_N 为最高转速，转速降落为 Δn_N ，
该系统的最大静差率是：

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N}$$

于是，最低转速为：

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N$$

Δn_N 一定时： $s \downarrow \rightarrow n_{\min} \uparrow$

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N = \frac{(1-s)\Delta n_N}{s}$$

调速范围和静差率之间关系为：

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}} = \frac{n_N}{\frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N} = \frac{n_N}{\Delta n_N (\frac{1}{s} - 1)}$$

Δn_N 一定时： $s \downarrow \rightarrow n_{\min} \uparrow \rightarrow D \downarrow$

- **结论1：** 一个调速系统的调速范围，是指在最低速时还能满足所需静差率的转速可调范围，所以D和s这两个指标要同时提才有意义。
- **结论2：** 如果要S小D大，最后只能减小额定转速降落 Δn_N 。

- 例1：某直流调速系统电动机额定转速为 $n_N = 1430 \text{r/min}$ ，额定速降 $\Delta n_N = 115 \text{r/min}$ ，当要求静差率30%时，允许多大的调速范围？如果要求静差率20%，则调速范围是多少？如果希望调速范围达到10，所能满足的静差率是多少？

解：若要求静差率30%时，调速范围为：

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1430 \times 0.3}{115 \times (1-0.3)} \approx 5.3$$

解：若要求静差率30%时，调速范围为：

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1430 \times 0.3}{115 \times (1-0.3)} \approx 5.3$$

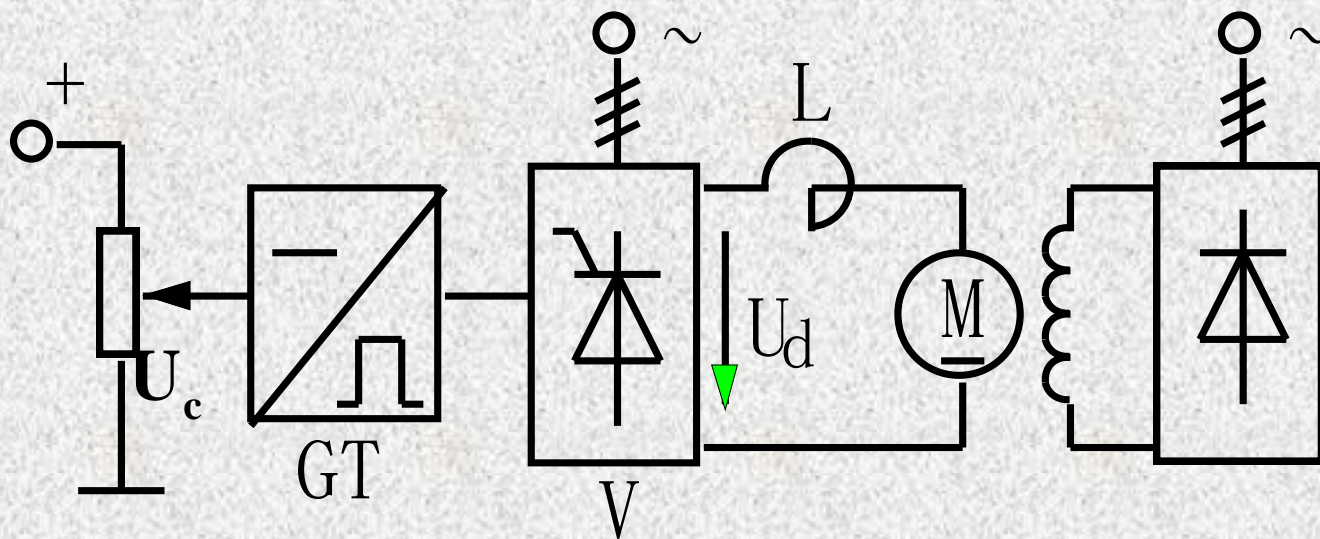
若要求静差率20%，则调速范围只有：

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1430 \times 0.2}{115 \times (1-0.2)} \approx 3.1$$

若要求调速范围为10，则静差率为：

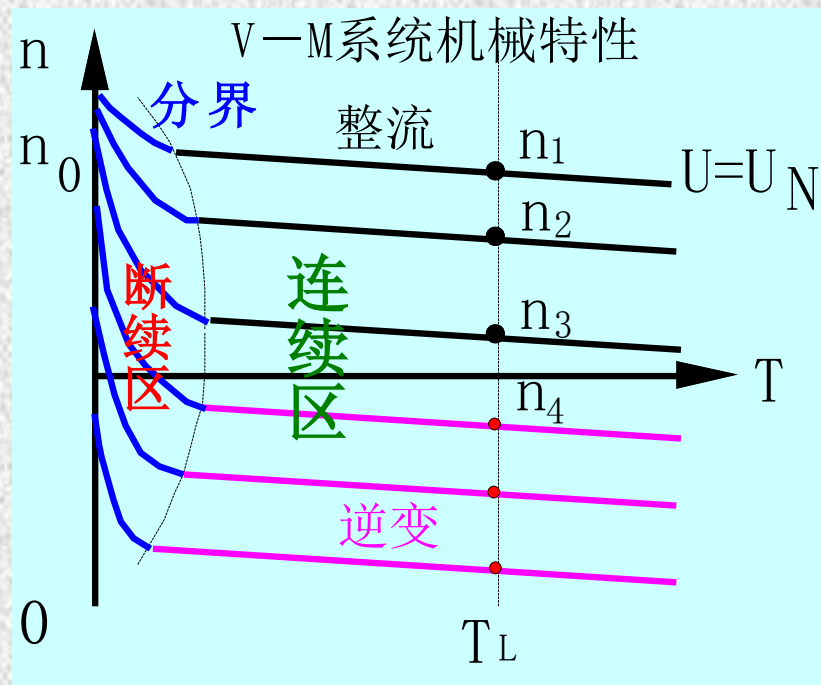
$$s = \frac{D \Delta n_N}{n_N + D \Delta n_N} = \frac{10 \times 115}{1430 + 10 \times 115} \approx 44.6\%$$

四、开环调速系统的机械特性



开环调速系统的机械特性：

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



■ 例2:

某龙门刨床工作台拖动采用直流电动机，额定数据如下：**60kW**、**220V**、**305A**、**1000r/min**，采用**V-M**系统，电动机电动势系数 $C_e = 0.2V \cdot \text{min}/r$ ，主电路总电阻 $R = 0.18\Omega$ ，如果要求调速范围 $D = 20$ ，静差率5%，采用开环调速能否满足？若要满足这个要求，系统的额定速降最多能有多少？

解： 当电流连续时，V-M系统的额定速降为：

$$\Delta n_N = \frac{I_{dN} R}{C_e} = \frac{305 \times 0.18}{0.2} \text{ r/min} = 275 \text{ r/min}$$

如果要求 $D = 20$ ， $s \leq 5\%$ ，则额定速降为：

$$\Delta n_N = \frac{n_N s}{D(1-s)} \leq \frac{1000 \times 0.05}{20 \times (1-0.05)} \text{ r/min} = 2.63 \text{ r/min}$$

开环系统调速的问题

从控制理论的立场分析：

- 速度指令可视为阶跃型输入指令；
- Δn_N 实际是额定状态下系统输出对阶跃输入的稳态误差；
- 在开环状态下，当静差率要求较高即 S 较小时，系统所能达到的调速范围 D 是很小的；而当调速范围 D 要求大时，静差率 S 很难保证足够小；

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1-S)} = \frac{n_N}{\Delta n_N \left(\frac{1}{S} - 1 \right)}$$