



第2章 转速开环控制的直流调速系统

- 一. 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- 二. PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性
- 三. 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题



回顾直流电机调速方法：

■ 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以变压调速为主



第2章 转速开环控制的直流调速系统

- 一. 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- 二. PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性
- 三. 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题



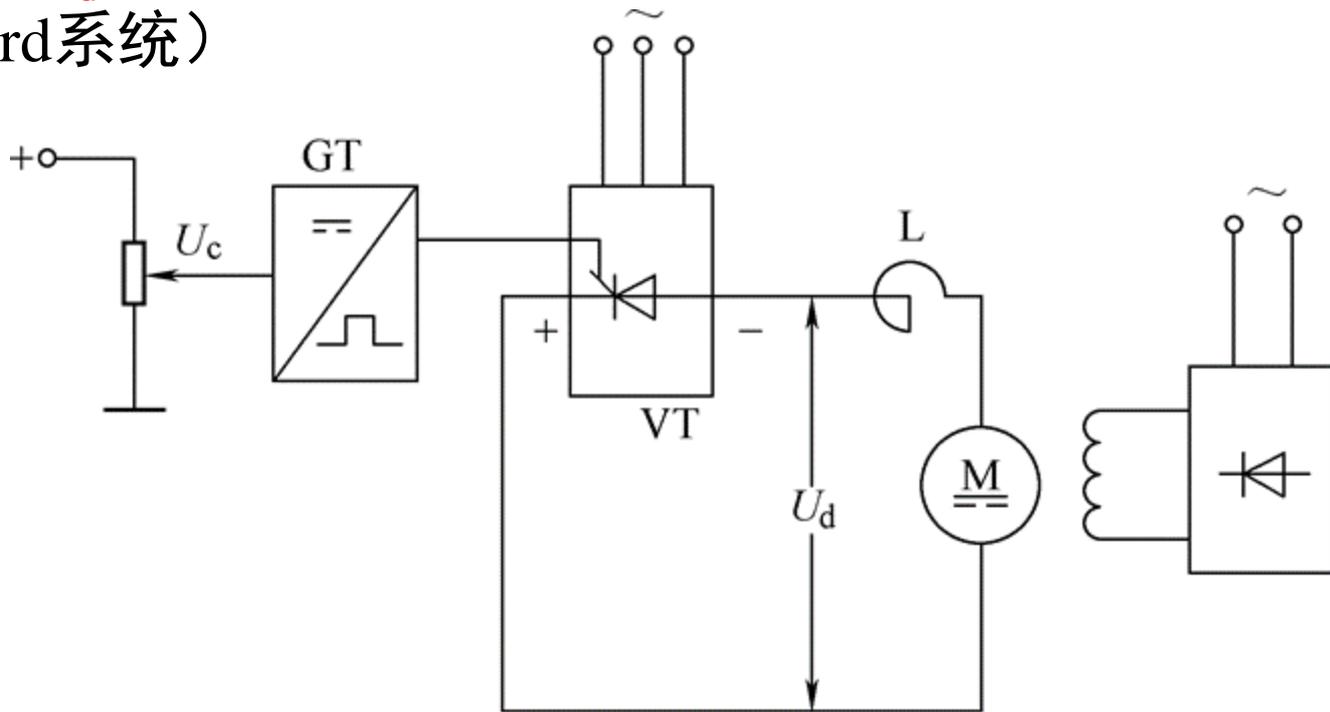
一、晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性

本节学习**要点**:

- 理解晶闸管整流器**工作原理**
- 了解V-M系统**电流波形特点**
- 了解V-M系统电动机**机械特性**
- 掌握V-M系统**传递函数数学模型**

1. 触发脉冲相位控制

- 工作原理：调节控制电压 U_c → 移动触发装置 GT 输出脉冲的相位 → 改变可控整流器 VT 输出瞬时电压 u_d 的波形，以及输出平均电压 U_d 的数值。这样的系统称 V-M 系统（或静止的 Ward - Leonard 系统）



晶闸管-电动机调速系统（V-M系统）原理图

- 在理想情况下， U_d 和 U_c 之间呈**线性关系**：

$$U_d = K_s U_c$$

式中， U_d —平均整流电压， U_c —控制电压，

K_s —晶闸管整流器**放大系数**。

- 瞬时电压平衡方程式：

$$u_{d0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

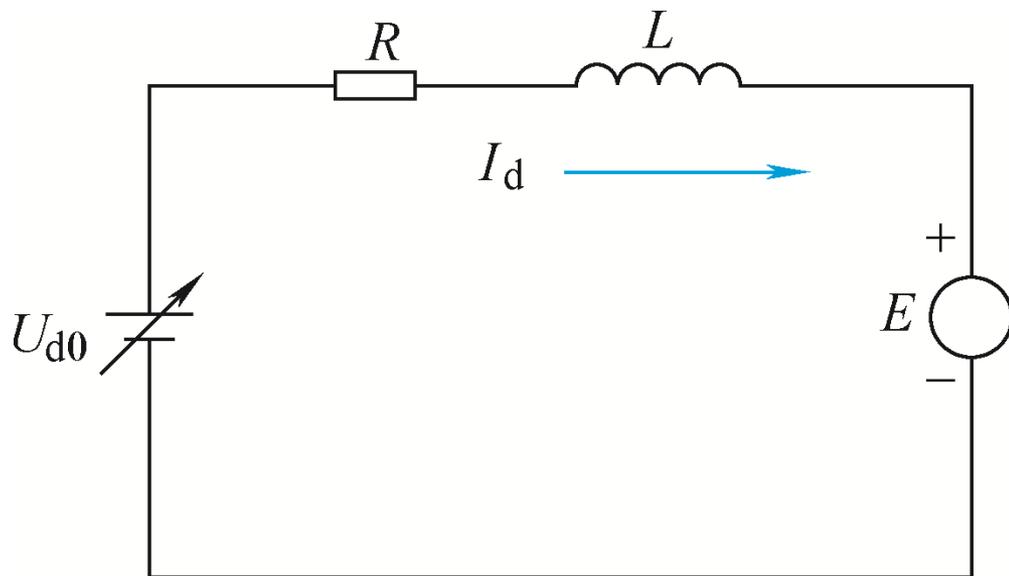
式中，

E —电动机反电动势(V)；

i_d —整流电流瞬时值(A)；

L —主电路总电感(H)；

R —主电路总电阻(Ω)。



V-M系统主电路的**等效电路图**



1. 对于一般的全控整流电路，当**电流波形连续**时， $U_{d0} = f(\alpha)$ 可用下式表示：

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha$$

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；

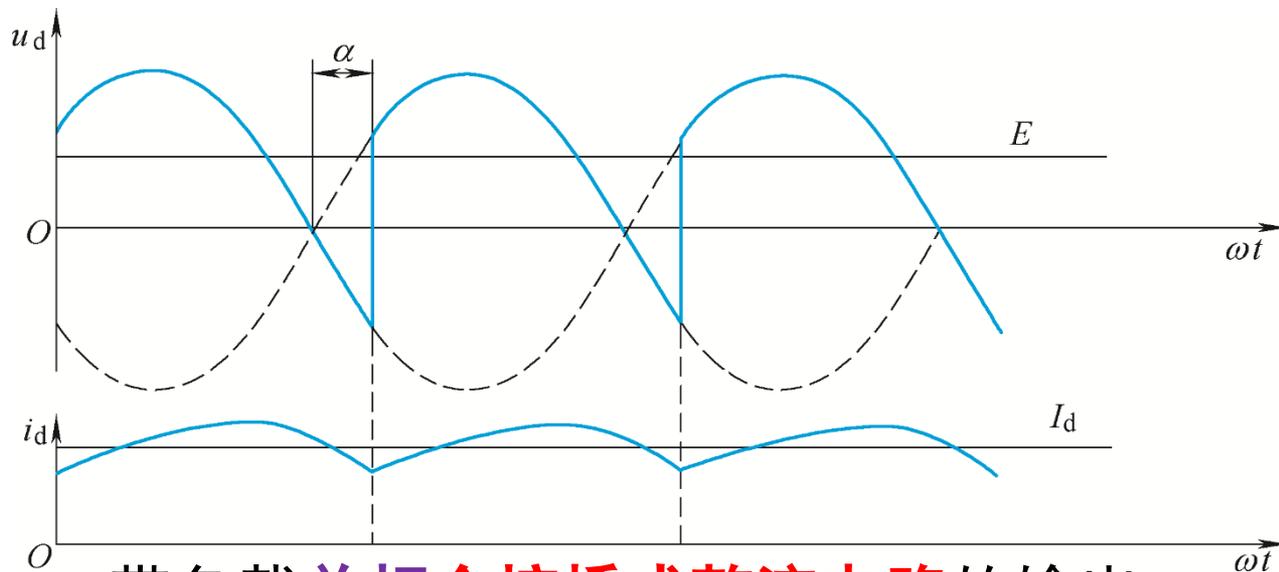
m — 交流电源一周内的**整流电压脉波数**。

不同整流电路的整流电压波峰值、脉冲数及平均整流电压

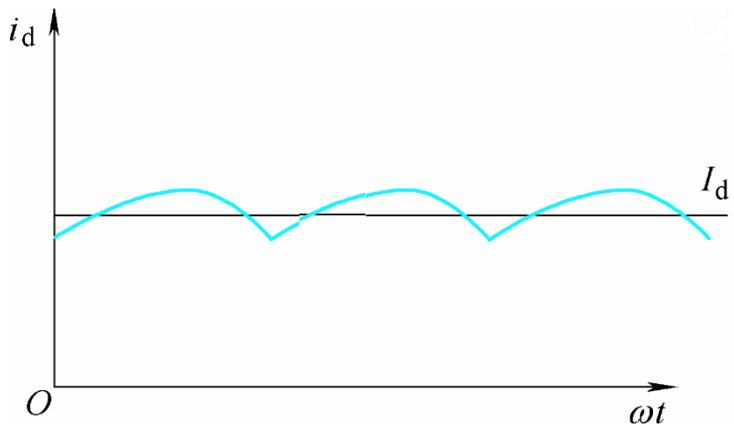
整流电路	单相全波	三相半波	三相桥式（全波）
U_m	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{6}U_2$
m	2	3	6
U_{d0}	$0.9 U_2 \cos \alpha$	$1.17 U_2 \cos \alpha$	$2.34 U_2 \cos \alpha$

2. 电流脉动及其波形断续问题

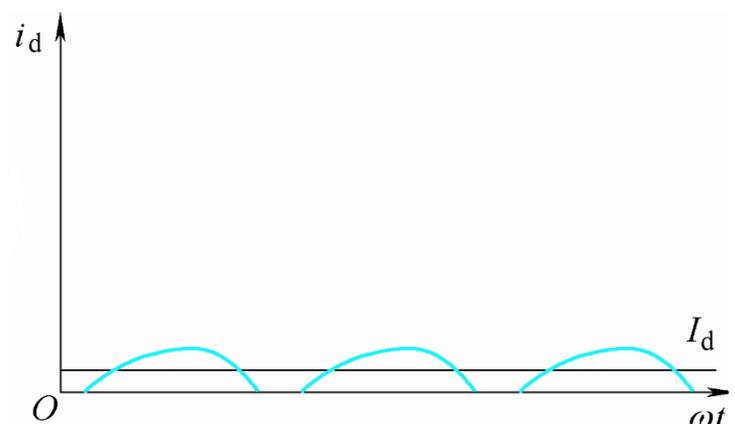
- 在整流变压器二次侧额定相电压 u_2 的瞬时值大于反电动势 E 时，晶闸管才可能被触发导通。
- 导通后如果 u_2 降低到 E 以下，靠电感作用可以维持电流 i_d 继续流通。
- 由于电压波形的脉动，造成了电流波形的脉动。



带负载单相全控桥式整流电路的输出
电压和电流波形



a)



b)

V-M系统的电流波形 (a) 电流连续 (b) 电流断续

- ✓ 在 I_d 上升阶段，电感储能；
- ✓ 在 I_d 下降阶段，电感中的能量将释放出来维持电流连续。

- ✓ 当**负载电流较小**时，电感中的储能较少，
- ✓ 等到 I_d 下降到零时，造成电流波形断续。

■ 抑制电流脉动的措施：

- (1) 增加整流电路相数，或采用多重化技术；
- (2) 设置电感量足够大的平波电抗器。

3、晶闸管整流-直流电动机系统的机械特性

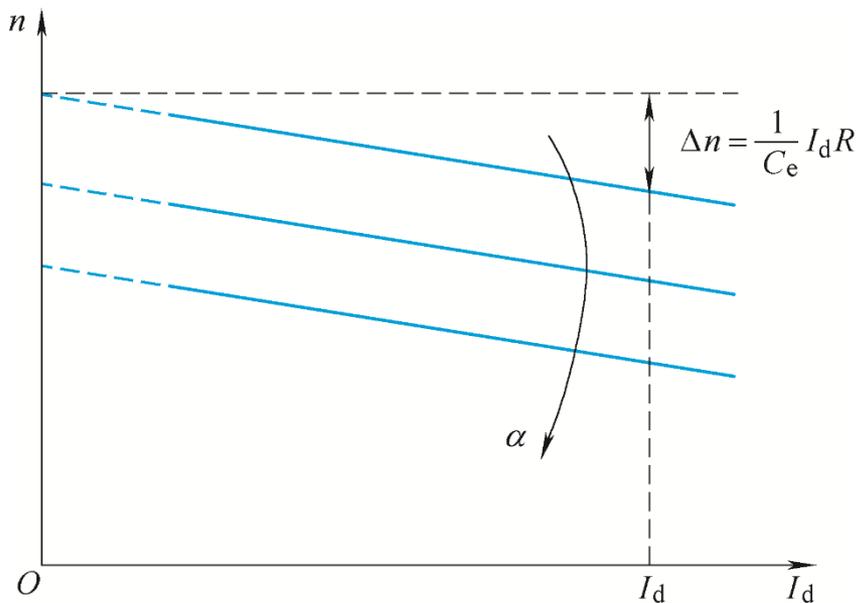
当**电流波形连续**时，V-M系统的机械特性方程式为

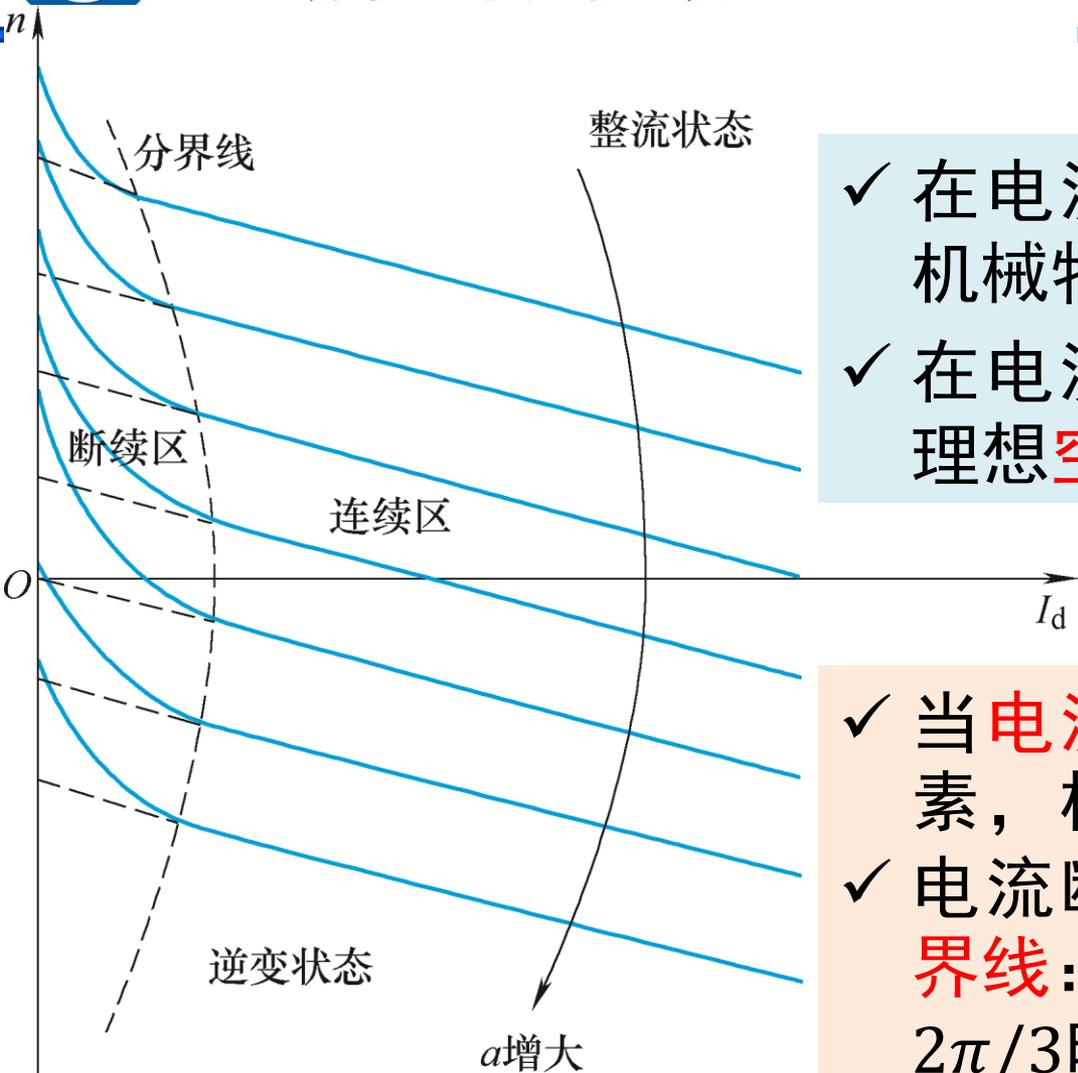
$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right)$$

式中， C_e —电动机在额定磁通下的**电动势系数**，

$$C_e = K_e \Phi_N$$

电流连续时V-M
系统的机械特性





- ✓ 在电流连续区，显示出较硬的机械特性；
- ✓ 在电流断续区，机械特性很软，理想空载转速翘得很高。

- ✓ 当电流断续时，由于非线性因素，机械特性方程要复杂得多。
- ✓ 电流断续区与电流连续区的分界线： $\theta = 2\pi/3$ 的曲线，当 $\theta = 2\pi/3$ 时，电流便开始连续了。
- ✓ θ —一个电流脉波的导通角。

完整V-M系统机械特性
三相半波整流电路

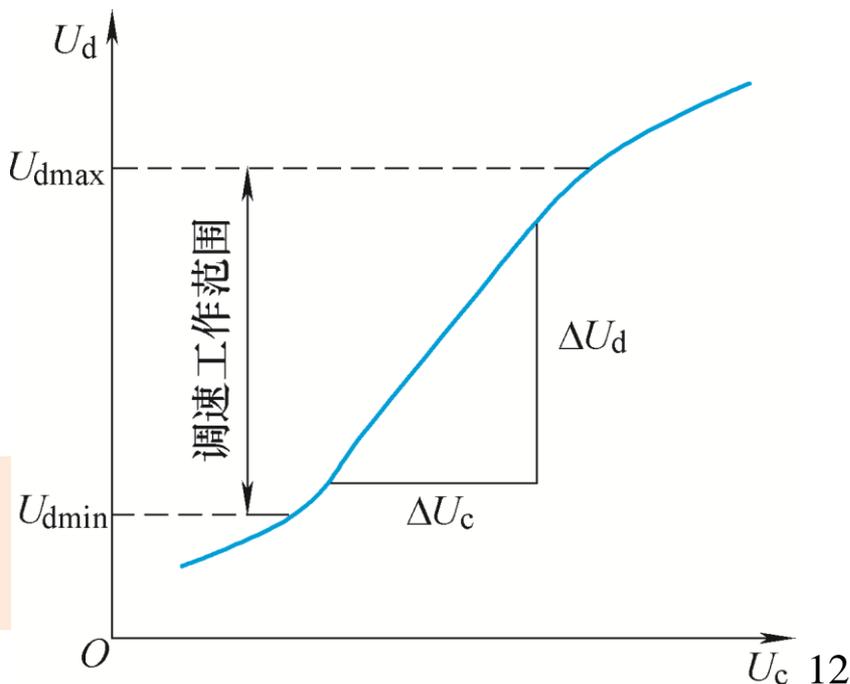
4. 晶闸管触发和整流装置的传递函数

- 晶闸管触发电路和整流电路的特性是**非线性**的。
- 在设计调速系统时，只能在一定的工作范围内**近似**地看成**线性环节**，
- 得到了它的**放大系数**和**传递函数**后，用**线性控制理论**分析整个调速系统。

■ 放大系数的计算

$$K_s = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_c}$$

晶闸管触发与整流装置的**输入输出特性**和 K_s 的测定





■ 滞后环节的输入为阶跃信号 $1(t)$ ，输出要隔一定时间后才出现响应 $1(t-T_s)$ 。

■ **输入输出**关系为： $U_{d0} = K_s U_c \times 1(t - T_s)$

■ 传递函数为：

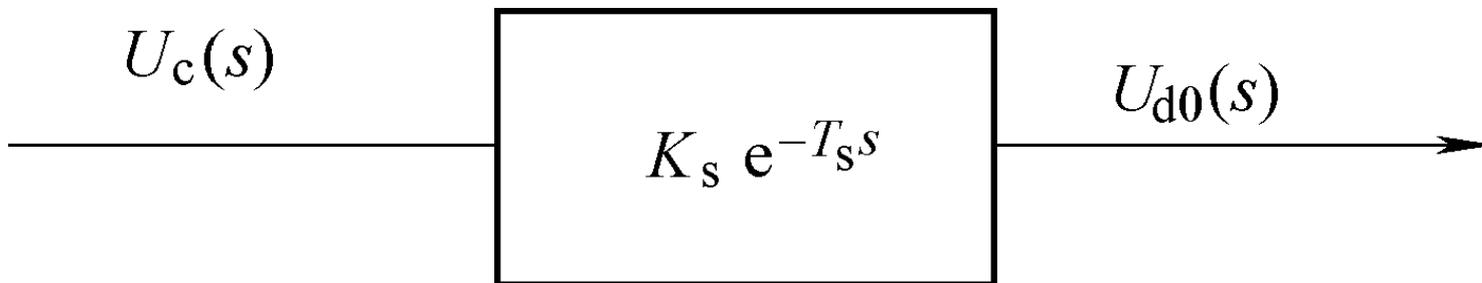
$$W_s(s) = \frac{U_{d0}(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s}$$

■ 按**泰勒级数**展开，可得：

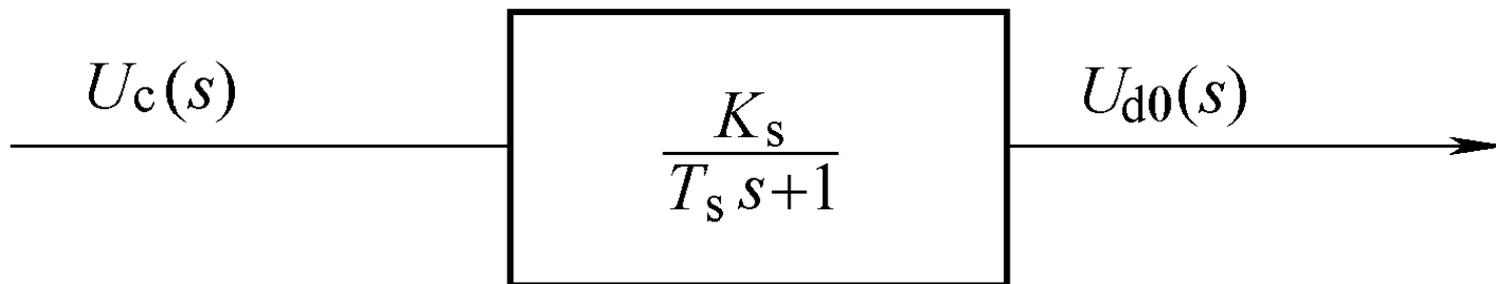
$$W_s(s) = K_s e^{-T_s s} = \frac{K_s}{e^{T_s s}} = \frac{K_s}{1 + T_s s + \frac{1}{2!} T_s^2 s^2 + \frac{1}{3!} T_s^3 s^3 + \dots}$$

■ 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**：

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



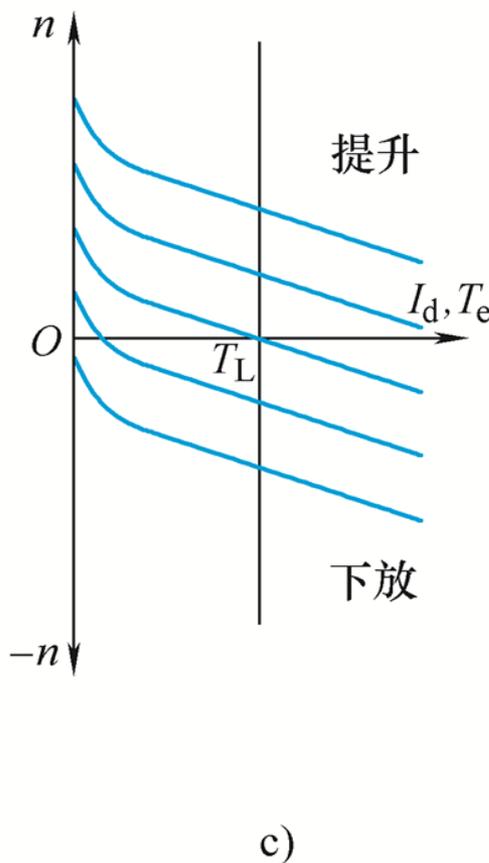
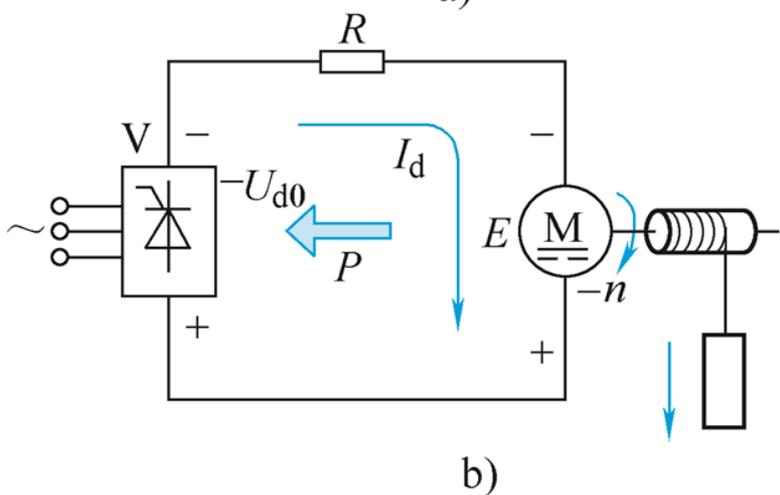
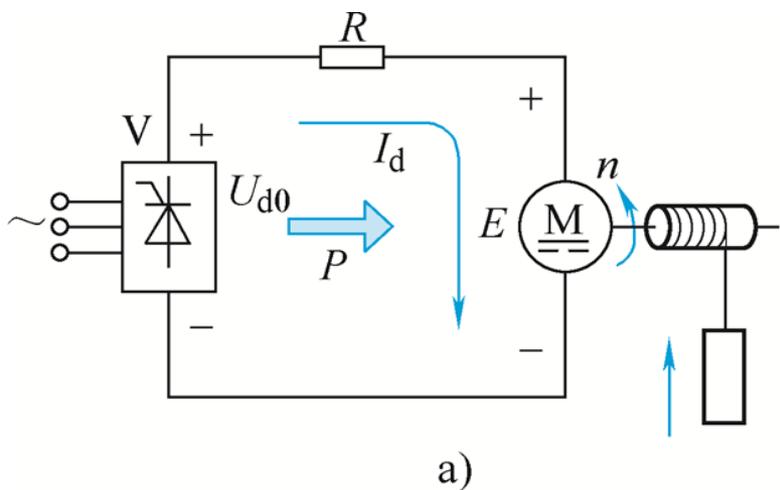
a) 准确的



b) 近似的

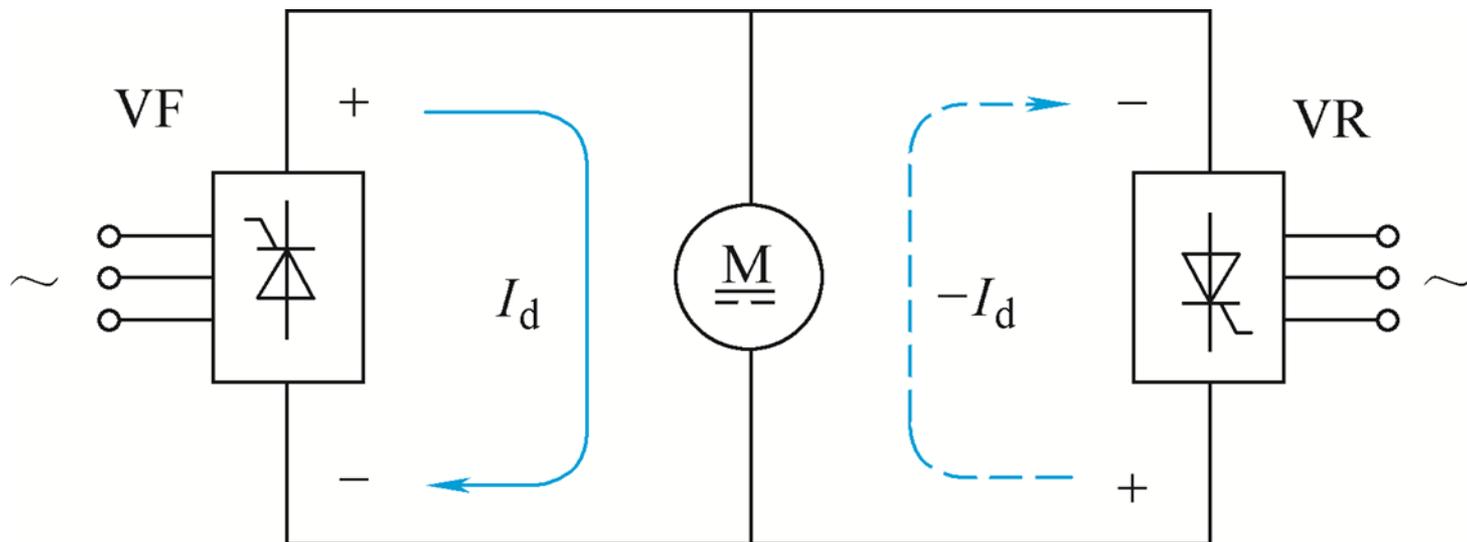
晶闸管触发与整流装置动态结构图

5. 晶闸管整流器-直流电动机系统的可逆运行



对于拖动位能性负载的起重机而言，采用单组晶闸管装置就能实现重物的提升和
下放。

5. 晶闸管整流器-直流电动机系统的可逆运行



- ✓ 对于需要电流反向的直流电动机可逆调速系统，必须使用两组晶闸管整流装置反并联线路来实现可逆调速。
- ✓ 电动机正转时，由正组晶闸管装置VF供电；
- ✓ 反转时，由反组晶闸管装置VR供电。



第2章 转速开环控制的直流调速系统

- 一. 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- 二. PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性
- 三. 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题



二. PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性

本节学习要点:

- 理解不可逆PWM变换器-电机系统工作原理与基本计算公式
- 理解可逆PWM变换器-电机系统工作原理与基本计算公式
- 了解直流PWM调速系统的机械特性
- 掌握PWM控制器与变换器动态数学模型
- 了解直流PWM调速系统的电能回馈和泵升电压



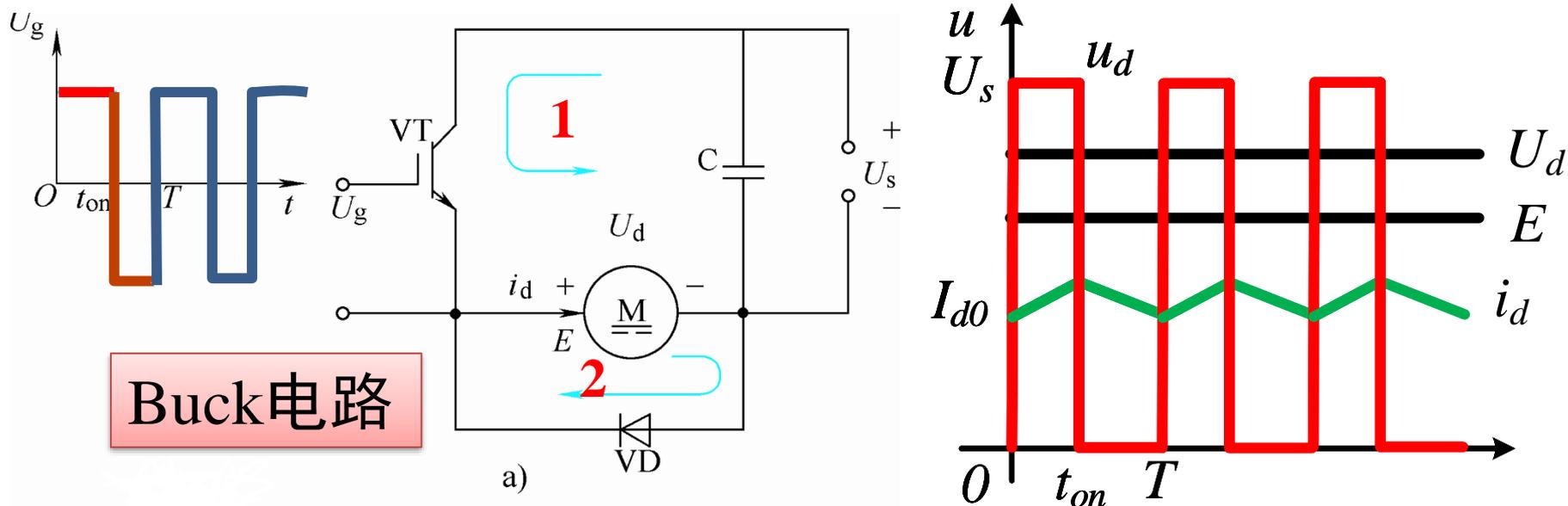
概述：

- **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-直流电动机调速系统，简称**直流脉宽调速系统**，或**直流PWM调速系统**。
- 与V-M系统相比，PWM调速系统在很多方面有**较大的优越性**。
- 直流PWM调速系统的应用日益广泛，特别在中、小容量的高动态性能系统中，已经完全取代了V-M系统。
- 脉宽调制变换器的作用：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，以调节电动机转速。
- PWM变换器电路有多种形式，总体上可分为**不可逆**与**可逆**两大类。

1、不可逆PWM变换器-电机系统

■ 工作原理：在一个开关周期 T 内，

- 当 $0 \leq t \leq t_{on}$ 时， U_g 为正，VT导通，电源电压 U_s 通过VT加到直流电动机电枢两端；
- 当 $t_{on} \leq t \leq T$ 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。



■ 直流电动机电枢两端的平均电压

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

式中， T — 功率器件的开关周期；

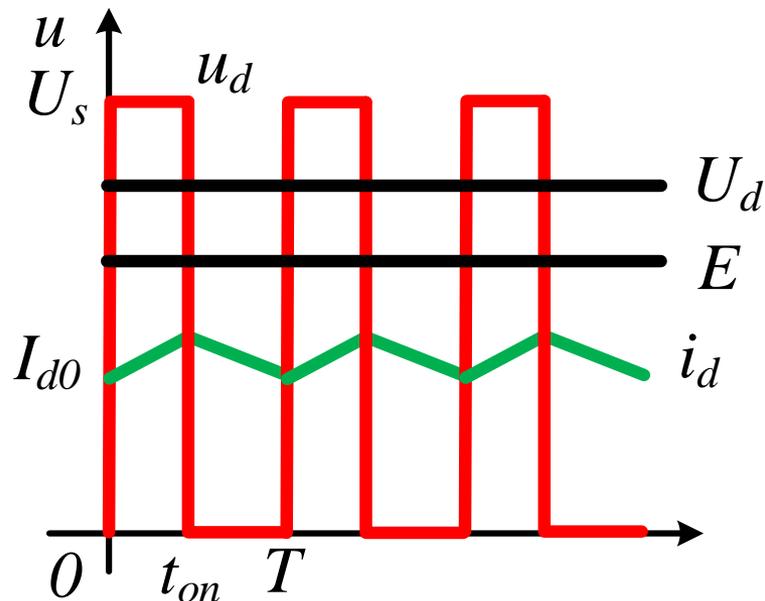
t_{on} — 开通时间；

ρ — 占空比。

- 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

$$\gamma = \rho$$

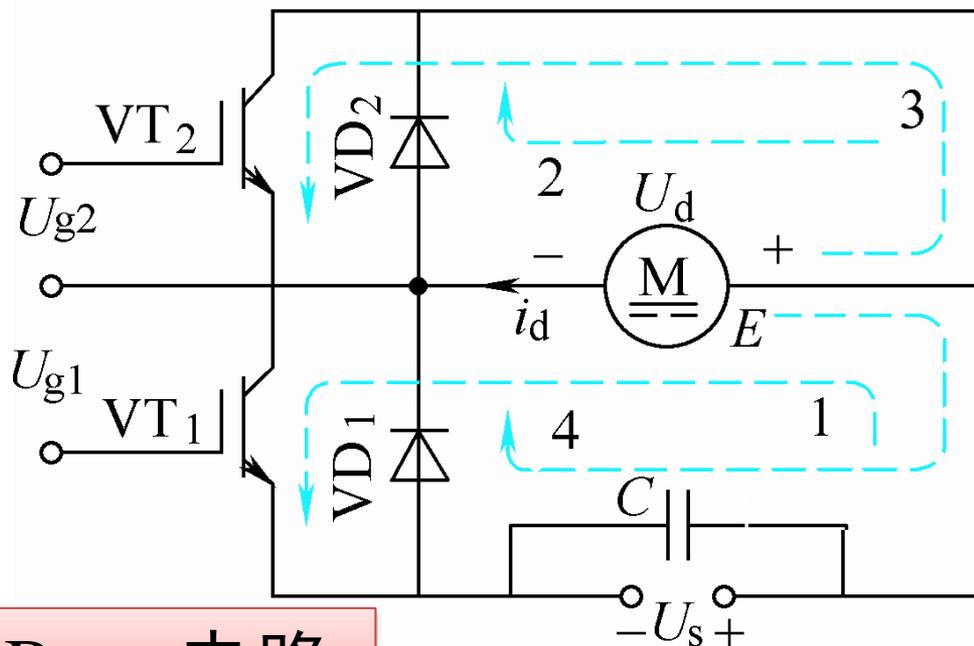


电压和电流波形

■ 结论:

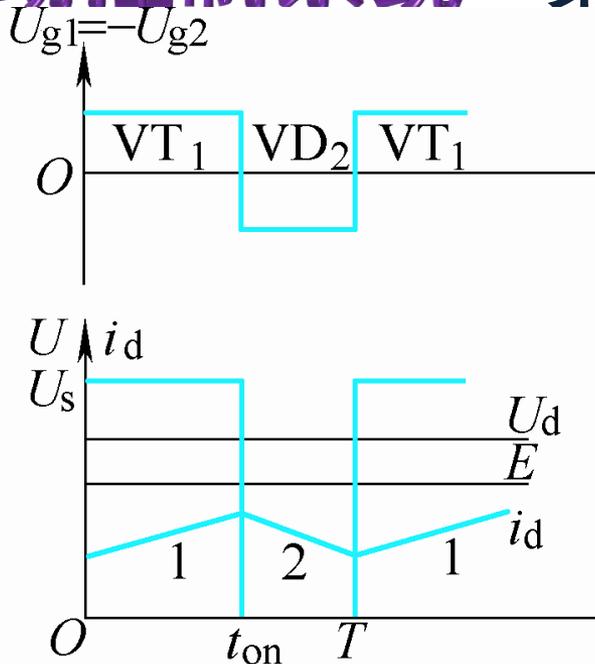
- ✓ 不可逆PWM变换器-直流电动机系统 **不允许电流反向**
- ✓ 续流二极管VD的作用只是为 i_d 提供一个续流的通道
- ✓ 如果要实现电动机的**制动**，必须为其**提供反向电流通道**

有制动电流通路的不可逆PWM变换器-直流电动机系统

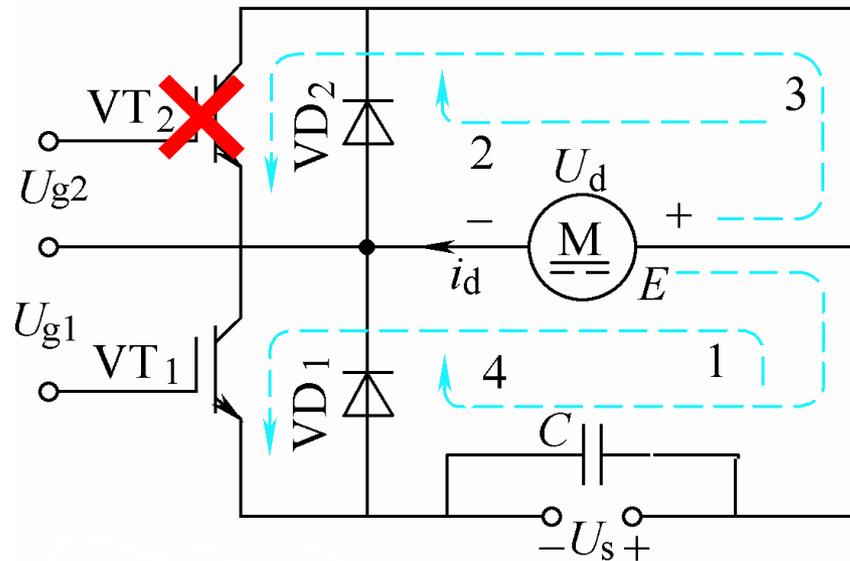


双向Buck-Boost电路

a) 电路原理图



b) **电动状态**的电压、电流波形

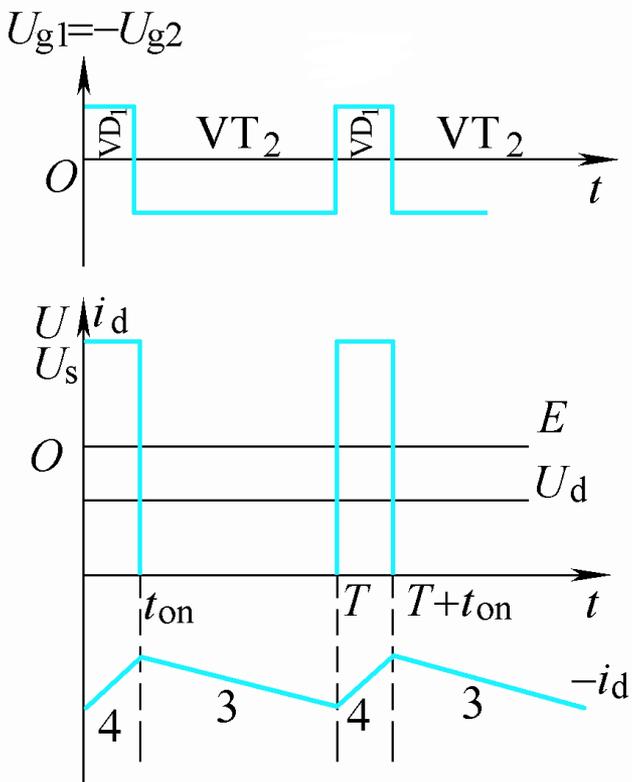


a) 电路原理图

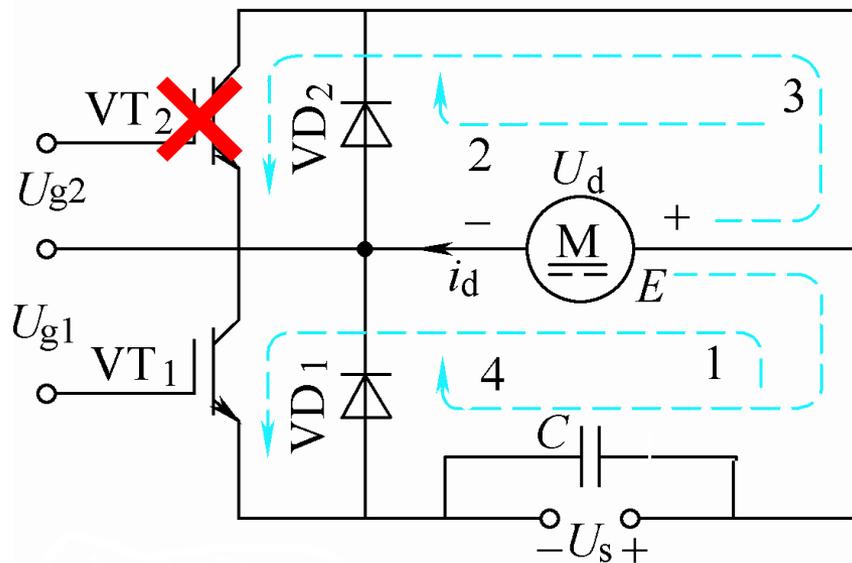
- 在一般**电动状态**中， i_d 始终为**正值**。
- 在 $0 \leq t < t_{on}$ 期间， VT_1 **导通**， VT_2 **关断**。电流 i_d 沿**回路1**流通。
- 在 $t_{on} \leq t < T$ 期间， VT_1 **关断**， i_d 沿**回路2**经二极管 VD_2 **续流**。
- VT_1 和 VD_2 交替**导通**， VT_2 和 VD_1 始终**关断**。



章 转速开环控制的直流调速系统

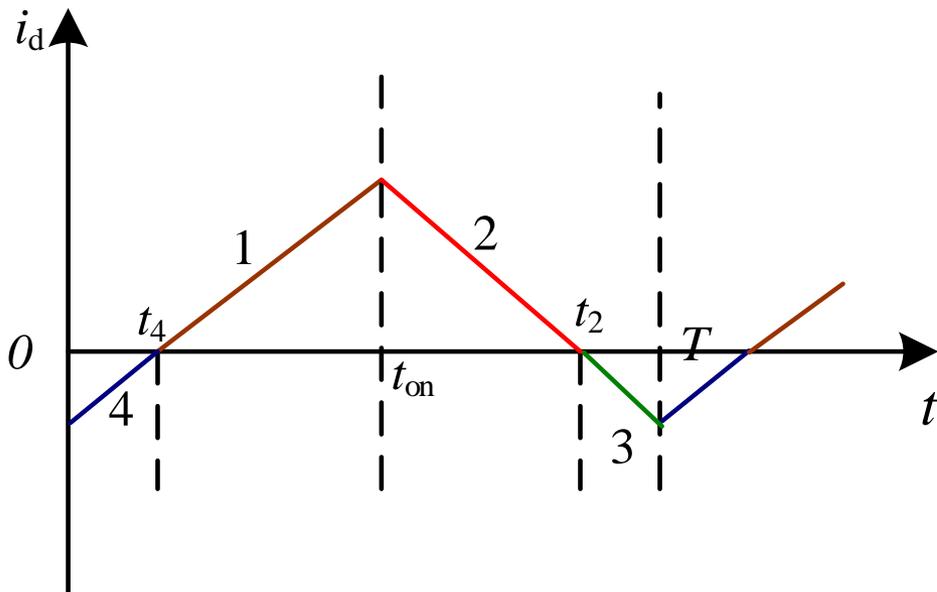


c) **制动状态**的电压、电流波形

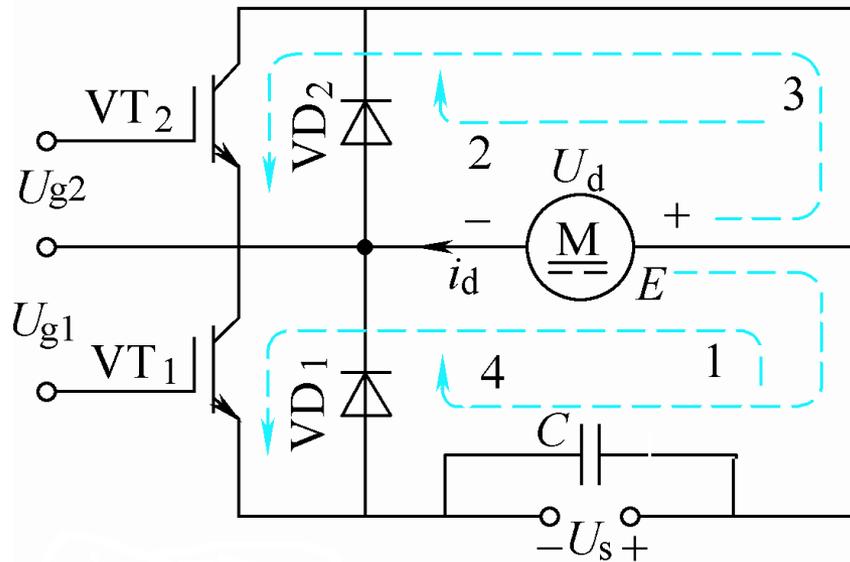


a) 电路原理图

- 在**制动状态**中， i_d 为**负值**。
- 在 $0 \leq t < t_{on}$ 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**。
- 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**。
- VT_2 和 **VD_1** 交替**导通**， VT_1 和 **VD_2** 始终**关断**。



(d) 轻载电动状态的电流波形



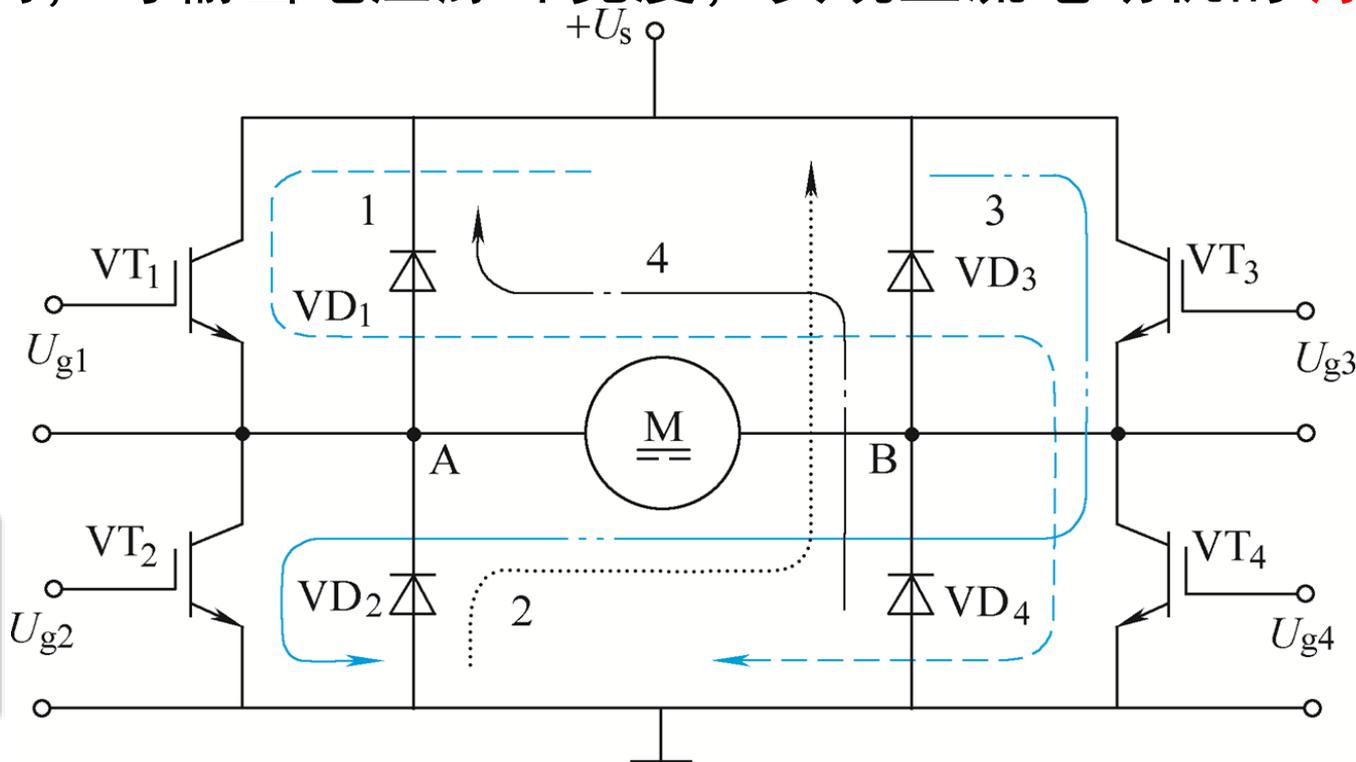
a) 电路原理图

VT_1 、 VD_2 、 VT_2 和 VD_1 四个管子轮流导通。

- 此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-直流电动机系统。

2、可逆PWM变换器-电机系统

- 工作原理：** VT_1 和 VT_4 同时导通和关断， VT_2 和 VT_3 同时通断，使电动机M的电枢两端承受 $+U_s$ 或 $-U_s$ 。改变两组开关器件导通时间，可输出电压脉冲宽度，实现直流电动机的**调压调速**。



单相桥式电路

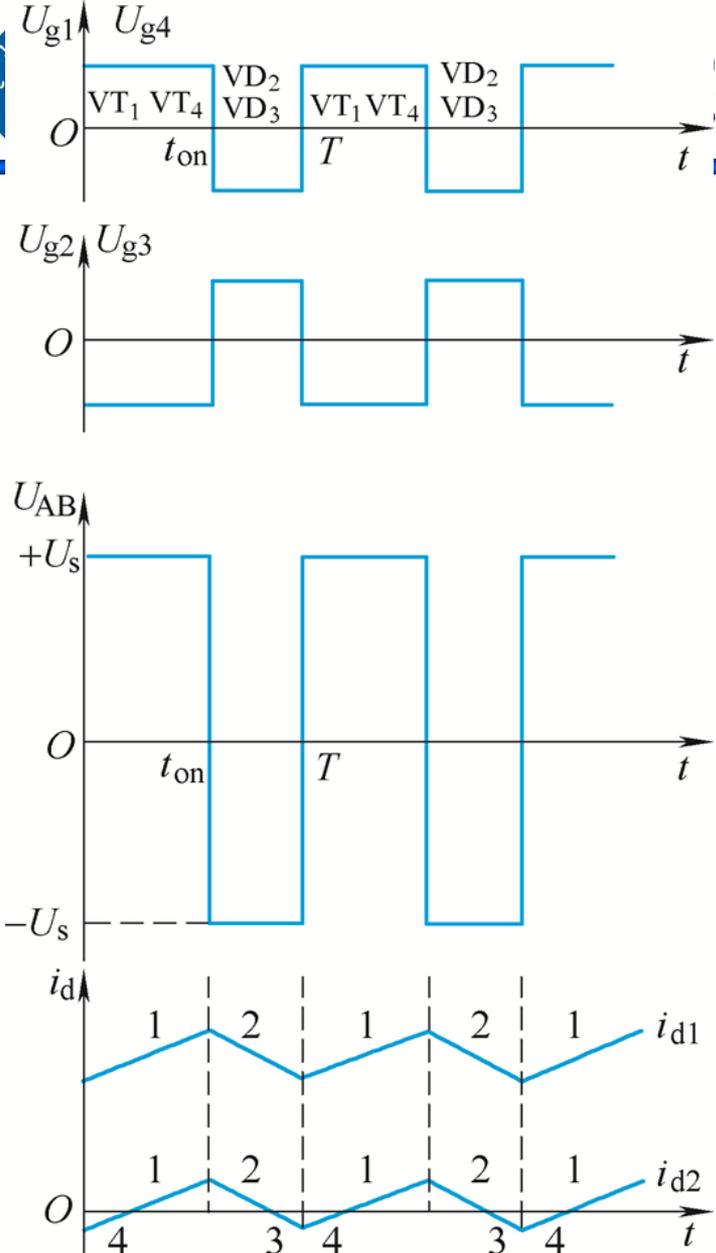
桥式可逆脉宽调速系统

第2章 转速开环控制的直流调速系统

$$U_{g1} = U_{g4} = -U_{g2} = -U_{g3}$$

在一个开关周期内，

- ✓ 当 $0 \leq t < t_{on}$ 时， $U_{AB} = U_S$ ，电枢电流 i_d 沿回路1流通；
- ✓ 当 $t_{on} \leq t < T$ 时，驱动电压反号， i_d 沿回路2经二极管续流， $U_{AB} = -U_S$ 。
- ✓ $t_{on} > T/2$ ， U_{AB} 的平均值为正，电动机正转；反之则反转。
- ✓ $t_{on} = T/2$ ，平均输出电压为零，电动机停止。



双极式控制可逆PWM变换器的驱动电压、输出电压和电流波形

■ 电流波形存在两种情况

- 电动机负载较重的情况时，负载电流 i_{d1} 大，在续流阶段电流仍维持正方向，电动机始终工作在第I象限的电动状态。
- 负载很轻时，平均电流小，在续流阶段电流很快衰减到零，于是二极管终止续流，而反向开关器件导通，电枢电流反向，电动机处于制动状态。 i_{d2} 电流中的线段3和4是工作在第II象限的制动状态。
- 电枢电流的方向决定了电流是经过续流二极管还是经过开关器件流动。



- 双极式控制可逆PWM变换器的输出**平均电压**为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s - \frac{T - t_{on}}{T} U_s = \left(\frac{2t_{on}}{T} - 1 \right) U_s$$

- 占空比 ρ 和电压系数 γ 的关系为 $\gamma = 2\rho - 1$
 - 当 $\rho > 1/2$ 时, γ 为正, 电动机**正转**;
 - 当 $\rho < 1/2$ 时, γ 为负, 电动机**反转**;
 - 当 $\rho = 1/2$ 时, $\gamma = 0$, 电动机停止。



■ 双极式控制的桥式可逆PWM变换器**优点**:

- (1) 电流一定**连续**;
- (2) 可使电动机在**四象限运行**;
- (3) 电动机停止时有微振电流, 能**消除静磨擦死区**;
- (4) 低速平稳性好, 系统的**调速范围大**;
- (5) **低速**时, 每个开关器件的驱动脉冲仍较宽, 有利于保证器件的可靠导通。

□ 双极式控制方式的**不足之处**:

- (1) 在工作过程中, 4个开关器件可能都处于开关状态, **开关损耗大**;
- (2) 开关切换时可能发生上、下桥臂直通的事故。为了防止直通, 在上、下桥臂的驱动脉冲之间应**设置逻辑延时**。

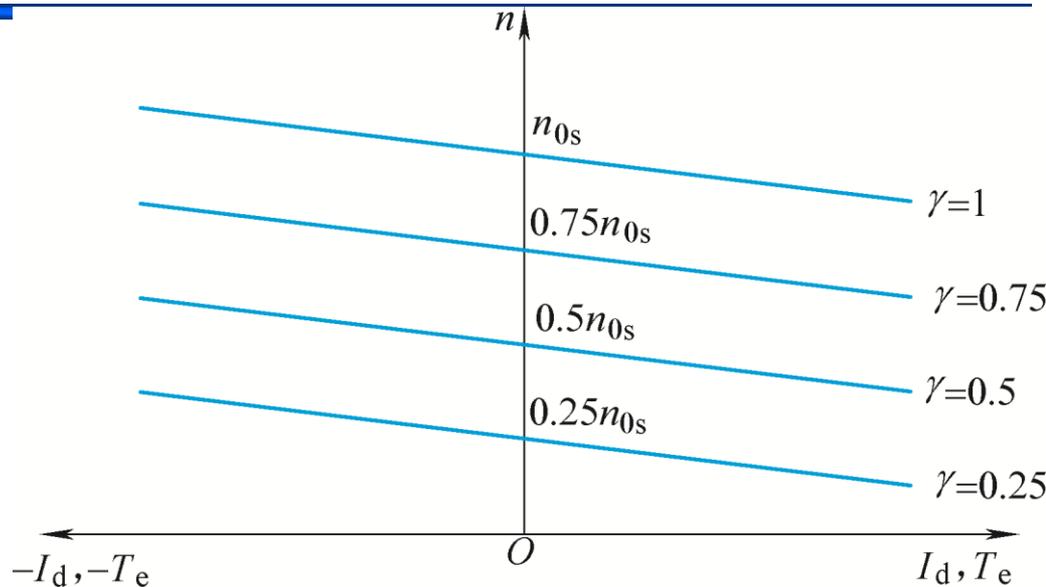
■ 机械特性

● 机械特性方程式为

$$n = \frac{\gamma U_s}{C_e} - \frac{R}{C_e} I_d = n_0 - \frac{R}{C_e} I_d$$

● 或用转矩表示

$$n = \frac{\gamma U_s}{C_e} - \frac{R}{C_e C_m} T_e = n_0 - \frac{R}{C_e C_m} T_e$$

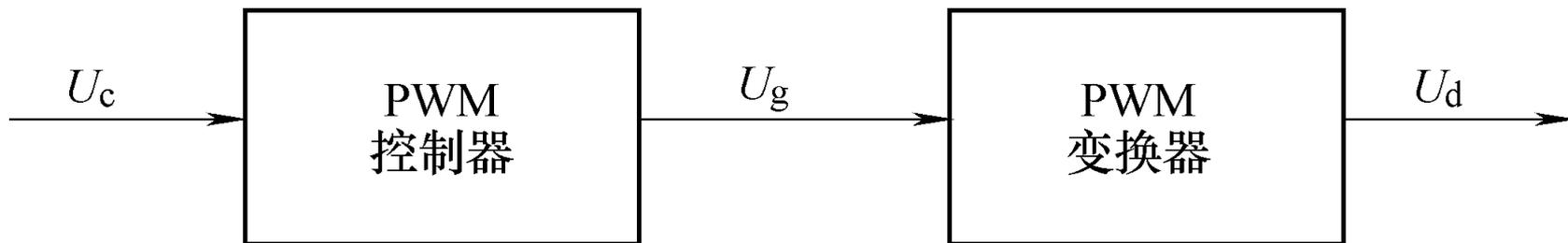


式中，

$C_m = K_m \Phi_N$ ——电动机在额定磁通下的**转矩系数**；

$n_0 = \frac{\gamma U_s}{C_e}$ ——理想**空载转速**，与电压系数成正比。

4、PWM控制器和变换器的动态数学模型



PWM控制器与变换器框图

传递函数：

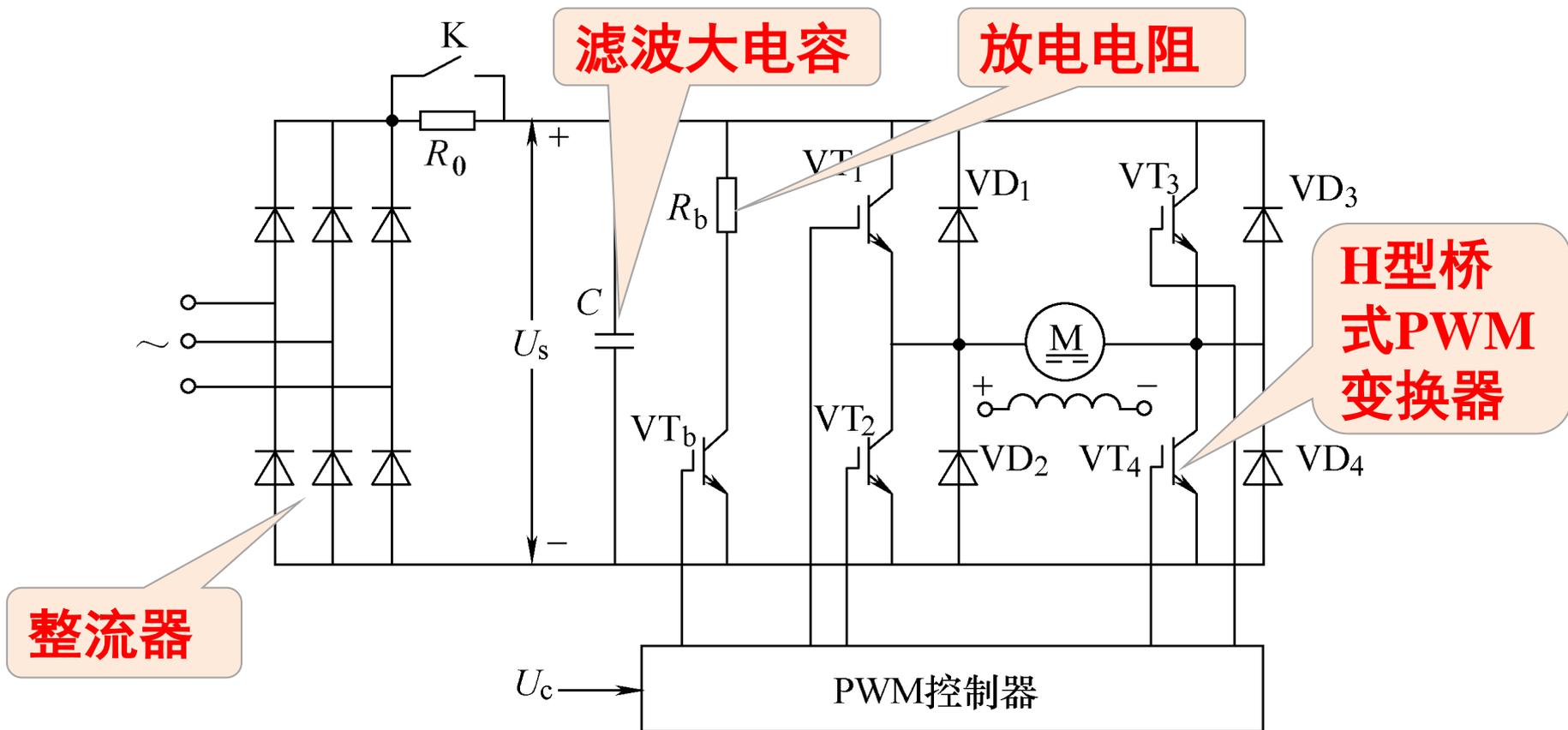
$$W_s(s) = \frac{U_d(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s}$$

式中： K_s —PWM装置的放大系数， T_s —PWM装置的延迟时间

近似的传递函数：

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

5、直流PWM调速系统的电能回馈和泵升电压



桥式可逆直流脉宽调速系统主电路的原理图



第2章 转速开环控制的直流调速系统

- 一. 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- 二. PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性
- 三. 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题



三.稳态调速性能指标和开环系统存在的问题

本节学习要点：

- 掌握直流电动机稳态调速性能指标定义与计算
- 理解速度开环控制系统存在的问题



1、转速控制的要求和稳态调速性能指标

■ 对于调速系统转速控制的要求：

- (1) 调速：在一定的**最高**转速和**最低**转速范围内调节转速；
- (2) 稳速：以一定的**精度**在所需转速上稳定运行，在各种干扰下不允许有过大的转速波动；
- (3) 加、减速：频繁起、制动的设备要求加、减速**尽量快**；不宜经受剧烈速度变化的机械则要求起、制动尽量平稳。



■ 调速范围

- 生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{\max} 和最低转速 n_{\min} 之比称为调速范围，用字母D表示，即

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

n_{\max} 和 n_{\min} 是电动机在额定负载时的最高和最低转速。

■ 静差率s

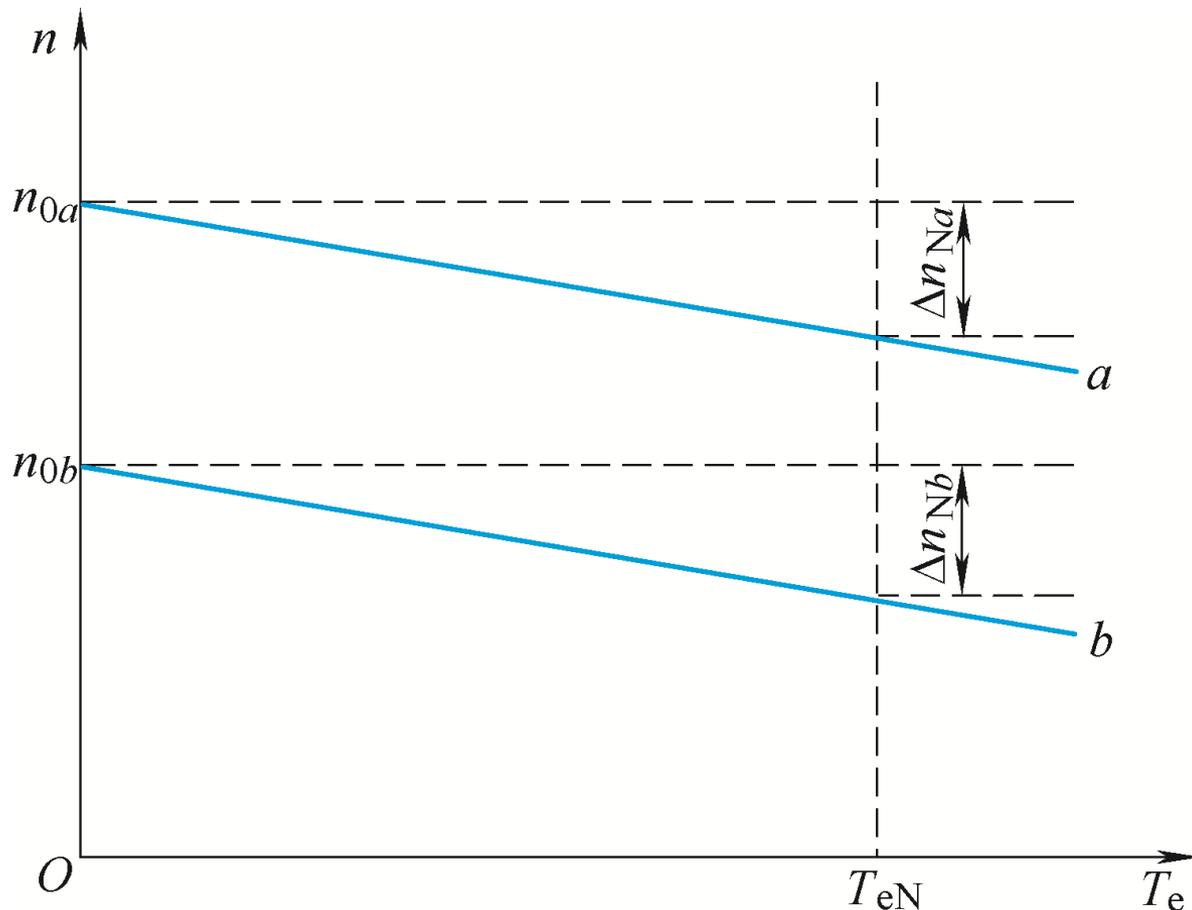
- 当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载增加到额定值所对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比：

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0}$$

- 用百分数表示 $s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$



- ✓ 特性 a 和 b 的硬度相同,
- ✓ 特性 a 和 b 额定速降相同,
- ✓ 特性 a 和 b 的静差率不相同。



不同转速下的静差率



■ 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

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

- 对于同一个调速系统， Δn_N 值是**定值**。
- 要求 **s 值越小时**，系统能够允许的**调速范围D也越小**。
- 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。

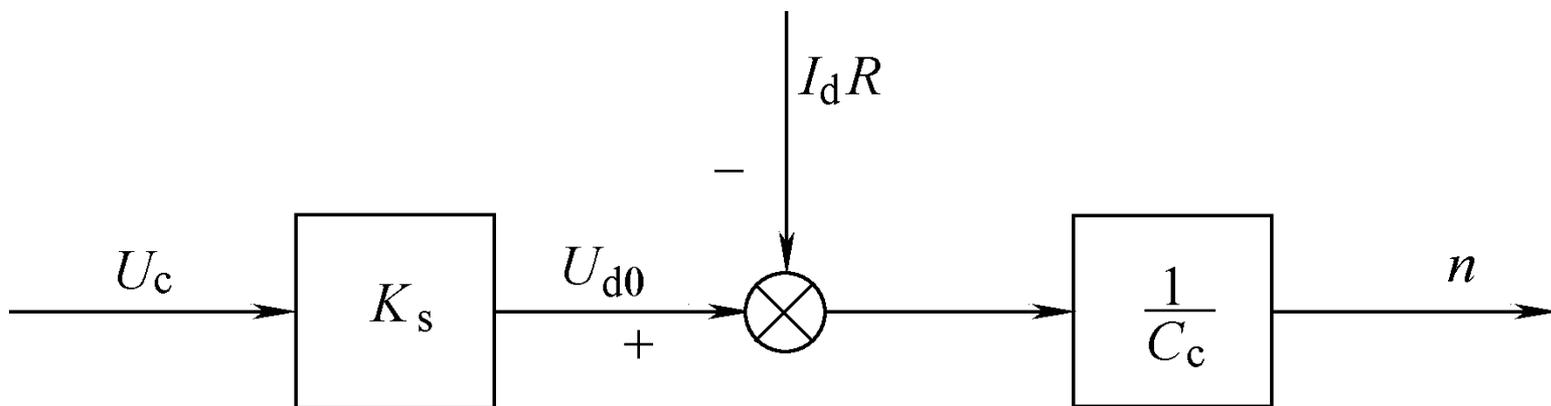
2、开环直流调速系统的性能和存在的问题

■ 开环调速系统的机械特性

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

■ 电力电子变换器

$$U_{d0} = K_s U_c$$



开环调速系统稳态结构图



例题2-2某龙门刨床工作台拖动采用直流电动机，其额定数据如下：60kW，220V，305A，1000r/min，采用V-M系统，主电路总电阻 $R=0.18\Omega$ ，电动机电动势系数 $C_e=0.2\text{Vmin/r}$ 。如果要求调速范围 $D=20$ ，静差率 $s\leq 5\%$ ，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 Δn_N 最多能有多少？

解：当电流连续时，V-M系统的额定速降为

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

开环系统在额定转速时的静差率为

$$s_N = \frac{\Delta n_N}{n_N + \Delta n_N} = \frac{275}{1000 + 275} = 0.216 = 21.6\%$$

如要求 $D=20$ ， $s\leq 5\%$ ，即要求

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



本章结束

作业：2-3和2-5