

# 第2章 直流电动机的电力拖动

## 主要内容

电力拖动系统动力学基础

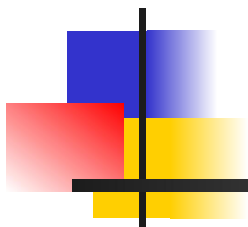
直流电动机的机械特性

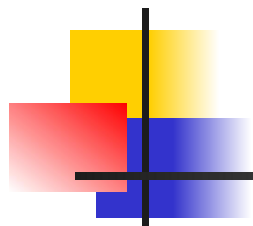
直流电动机的起动

直流电动机的制动

直流电动机的调速

电力拖动系统的过渡过程





## § 2-1 电力拖动系统动力学基础

---

2.1.1 电力拖动系统转动方程式

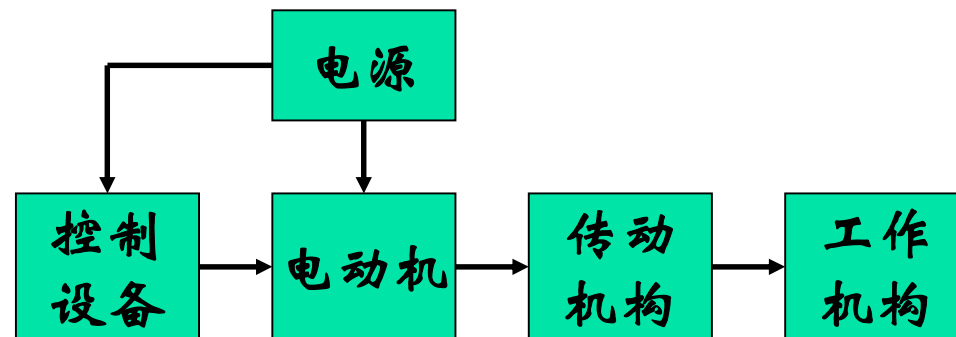
2.1.2 电力拖动系统的运动方程式

2.1.3 多轴拖动系统的折算

## 2.1.1 电力拖动系统的组成

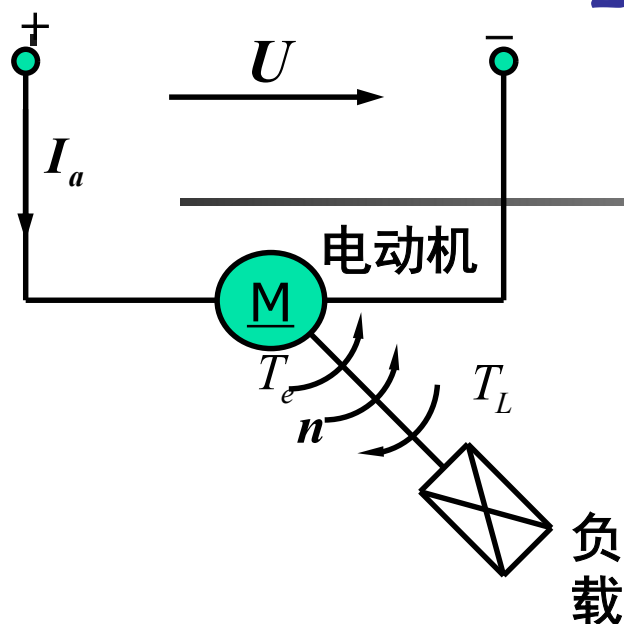
电力拖动系统中电动机带动负载的力学问题是我们主要讨论的主要问题。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成。



## 单轴电力拖动系统

## 2.1.2 电力拖动系统转动方程式



$T_e$  电动机电磁转矩 (N. m)

$T_L$  阻转矩 (N. m)

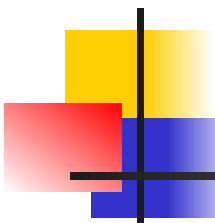
$n$  电动机转速 (r/min)

单轴电力拖动系统转动方程式:  $T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$

$T_e - T_L$  : 动转矩 (N. m)

$J$  : 转动惯量

$\Omega$  : 系统转动角速度



又有： $J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}$ ； $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$

$m$ ：系统转动部分的质量，kg；

$G$ ：系统转动部分的重力，N；

$\rho$ ：系统转动部分的转动惯性半径，m；

$D$ ：系统转动部分的转动惯性直径，m；

$g$ ：重力加速度， $m/s^2$ 。

将上面两式带入转动方程式，得：

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

$GD^2$ ：转动部分飞轮矩， $N \cdot m^2$ 。

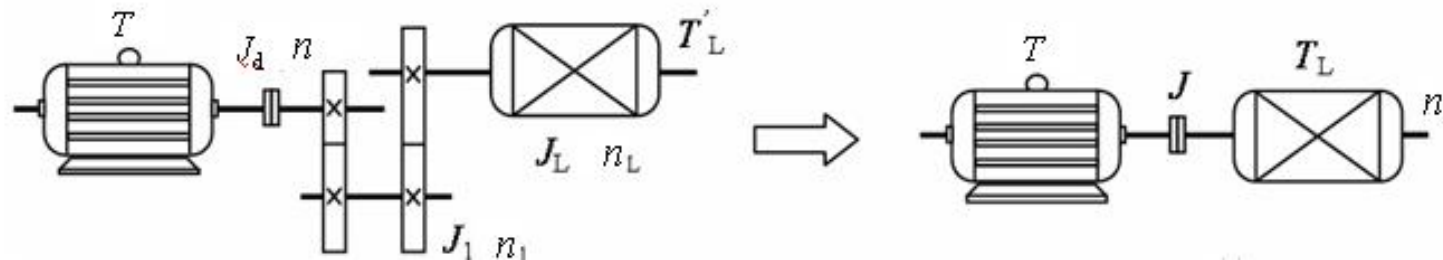
$\Delta T = 0$ ：系统恒速运行；

$\Delta T > 0$ ：系统加速运行；

$\Delta T < 0$ ：系统减速运行。

## 2.1.3 多轴电力拖动系统的简化

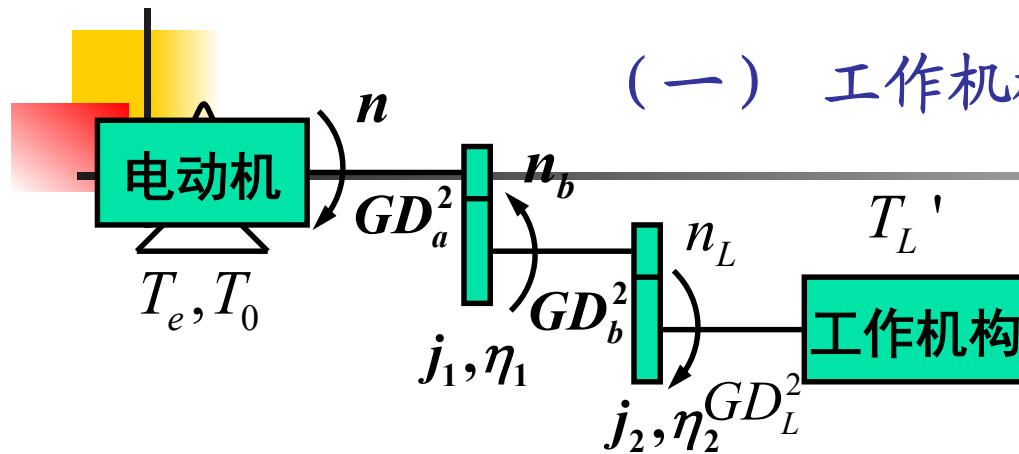
### 一、系统等效的原则和方法



- 分析多轴电力拖动系统，可以分别对每一根转轴列写转动方程式，然后再联立求解，但比较复杂。
- **简化计算方法：**通常把负载转矩与系统飞轮矩折算到电动机轴上来，变多轴系统为单轴系统。
- **多轴电力系统折算的原则是：**保持系统的功率传递关系及系统的贮存动能不变。
- 多轴电力拖动系统几种典型的情况是：工作机构转动，工作机构平动，工作机构提升和下放。

## 二、多轴旋转系统等效为单轴旋转系统的方法

### (一) 工作机构为转动情况时转矩的折算

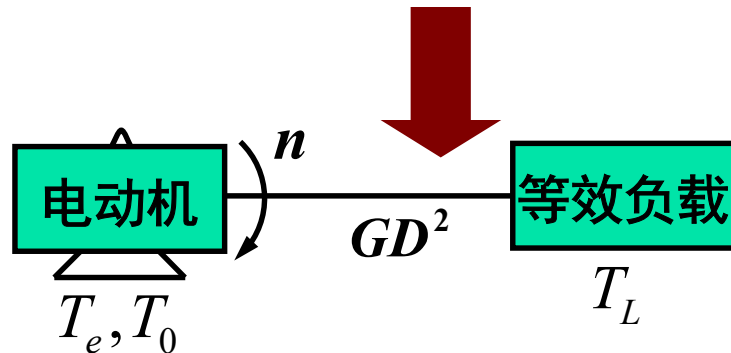


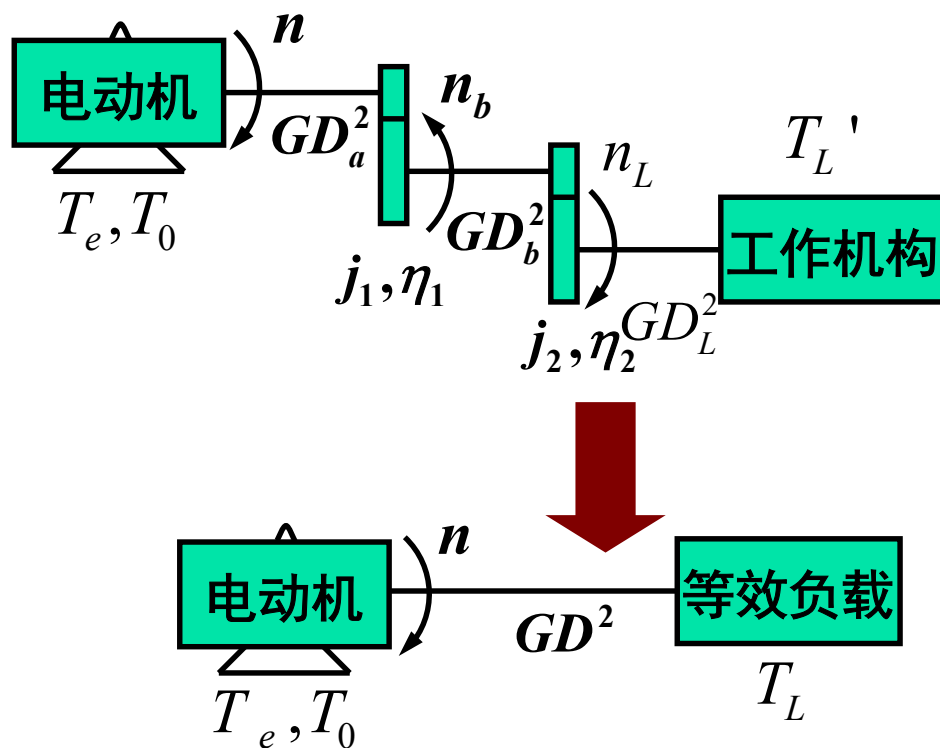
忽略传动机构的**损耗**，  
由折算前后功率不变，  
得：

$$T_L' \Omega_L = T_L \Omega$$

$$T_L = \frac{T_L' \Omega_L}{\Omega} = \frac{T_L' n_L}{n} = \frac{T_L'}{j}$$

$j = \frac{n}{n_z} = j_1 j_2 j_3 \dots$  传动机构总的速比，等于各级速比的乘积。





考虑传动机构的损耗时：

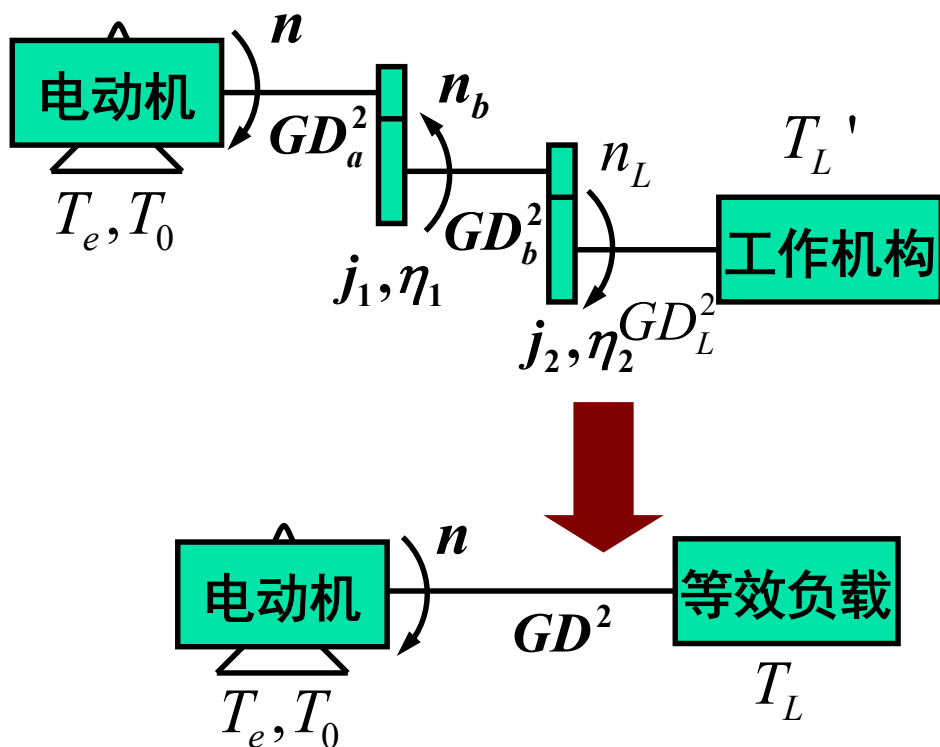
$$T_L' \Omega_L = T_L \Omega \eta;$$

$$T_L = \frac{T_L' \Omega_L}{\Omega \eta} = \frac{T_L' n_L}{n \eta} = \frac{T_L'}{j \eta}$$

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$$

为传动机构总效率。





## (二) 飞轮矩的折算

由动能不变原则：

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4g} \cdot \left( \frac{2n\pi}{60} \right)^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_L^2}{4g} \cdot \left( \frac{2n_L\pi}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4g} \cdot \left( \frac{2n\pi}{60} \right)^2$$

$$\Rightarrow GD^2 = \frac{GD_L^2}{j^2}$$

$$\text{总的飞轮矩为: } GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{(j_1 j_2)^2}$$

总的飞轮矩的估算： $GD^2 = (1 + \delta) GD_D^2$ ,  $\delta = 0.2 \sim 0.3$  或加大。

$GD_D^2$  为电动机转子的飞轮矩。

### (三) 工作机构为平移运动时的折算

#### 1、静态力的折算

##### (1) 提升重物，电动机在电动状态

考虑传动机构的损耗：

$$\frac{F_L v_L}{\eta} = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_c}$$

##### (2) 下放重物，电动机在发电状态

$$F_L v_L \eta'_c = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta'_c$$

**结论：**以同样的速度提升和下降重物时，传动机构的效率之间的关系是：

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c}$$



## 2、质量的折算

---

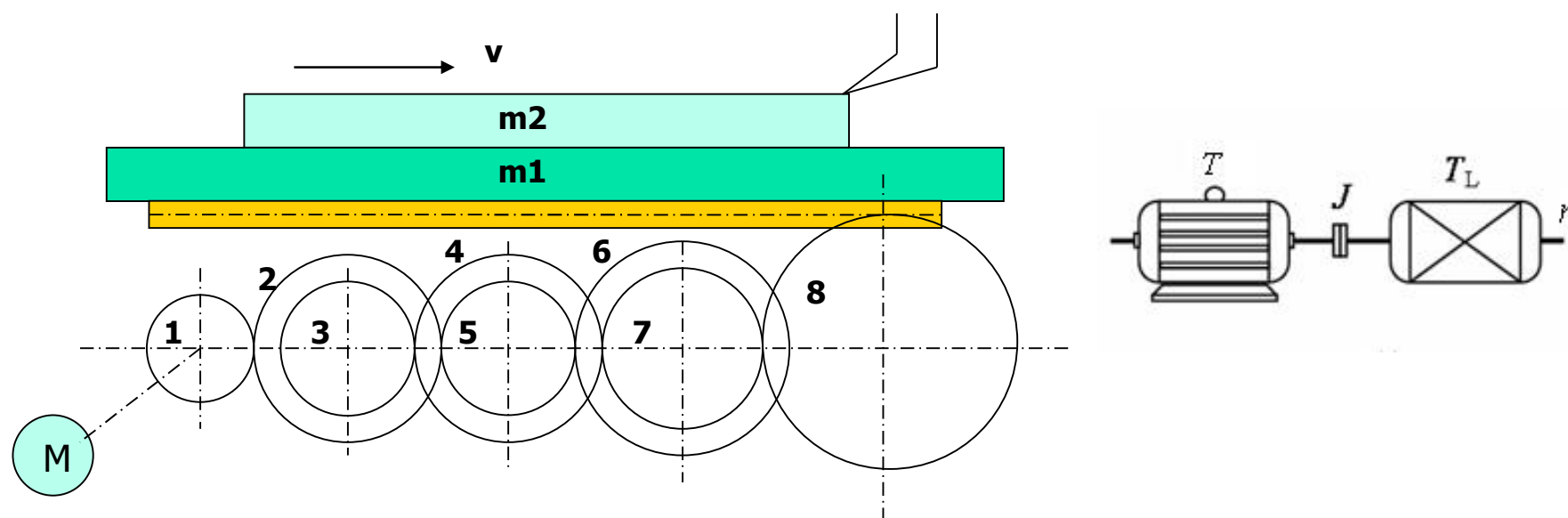
$$\frac{1}{2}m_L v_L^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_L^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

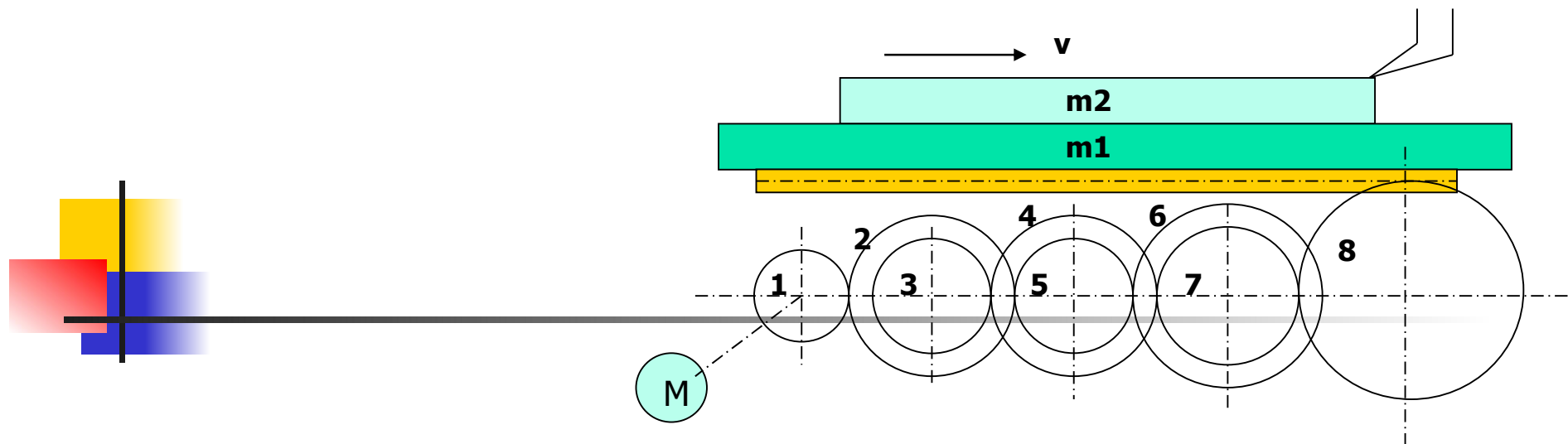
$$\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot \frac{G_L}{g} v_L^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_L^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

$$GD_L^2 = 365 \frac{G_L v_L^2}{n^2}$$

**例2-1** 龙门刨床传动系统如图。求折算到电动机轴上的静态和传动系统的总飞轮转矩。已知：电动机的转速 $n=860\text{r/min}$   
 工作台重 $m_1=3003.1\text{kg}$  工件重 $m_2=600\text{kg}$  切削力 $F=19620\text{N}$   
 各齿轮的齿数及飞轮矩如表，每对齿轮的传动效率 $\eta_n=0.8$ ，齿轮8的直径 $D_8=0.5\text{m}$ 。

齿轮号	1	2	3	4	5	6	7	8
齿数 $z$	15	47	22	58	18	58	14	46
$GD^2$	3.03	14.91	7.85	23.6	13.7	37.3	25.5	41.2






解：把刨床运动分为旋转与直线运动两部分。

(1) 旋转部分（不包括电动机电枢）的飞轮矩  $GD_a^2$ 。

$$GD_a^2 = GD_1^2 + (GD_2^2 + GD_3^2) \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 + (GD_4^2 + GD_5^2) \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left( \frac{z_3}{z_4} \right)^2 \\ + (GD_6^2 + GD_7^2) \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left( \frac{z_3}{z_4} \right)^2 \left( \frac{z_5}{z_6} \right)^2 + GD_8^2 \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left( \frac{z_3}{z_4} \right)^2 \left( \frac{z_5}{z_6} \right)^2 \left( \frac{z_7}{z_8} \right)^2$$

$$GD_a^2 = 3.04 + (14.91 + 7.85) \left( \frac{15}{47} \right)^2 + (23.6 + 13.7) \left( \frac{15}{47} \right)^2 \left( \frac{22}{58} \right)^2 \\ + (37.3 + 25.5) \left( \frac{15}{47} \right)^2 \left( \frac{22}{58} \right)^2 \left( \frac{18}{58} \right)^2 + 41.2 \left( \frac{15}{47} \right)^2 \left( \frac{22}{58} \right)^2 \left( \frac{18}{58} \right)^2 \left( \frac{14}{46} \right)^2 = 6.01 (N \cdot m^2)$$

(2) 直线运动部分的等效飞轮矩 $GD_b^2$ 。齿轮8的转速为


$$n_8 = n \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \frac{z_5}{z_6} \frac{z_7}{z_8} = 860 \times \frac{15}{47} \times \frac{22}{58} \times \frac{18}{58} \times \frac{14}{46} = 9.8 r / \min$$

工作台的直线运动速度（即切削速度） $v$

$$v = \pi D_8 n_8 = \pi \times 0.5 \times 9.8 m / \min = 15.4 m / \min = 0.257 m / s$$

$$GD_b^2 = \frac{365(G_1 + G_2)v^2}{n^2} = 365 \times 9.81 \times (3003.1 + 600) \times \left(\frac{0.257}{860}\right)^2 = 1.15 N \cdot m^2$$

(3) 折算到电动机轴上的总飞轮矩 $GD^2$ （不包括电动机电枢）

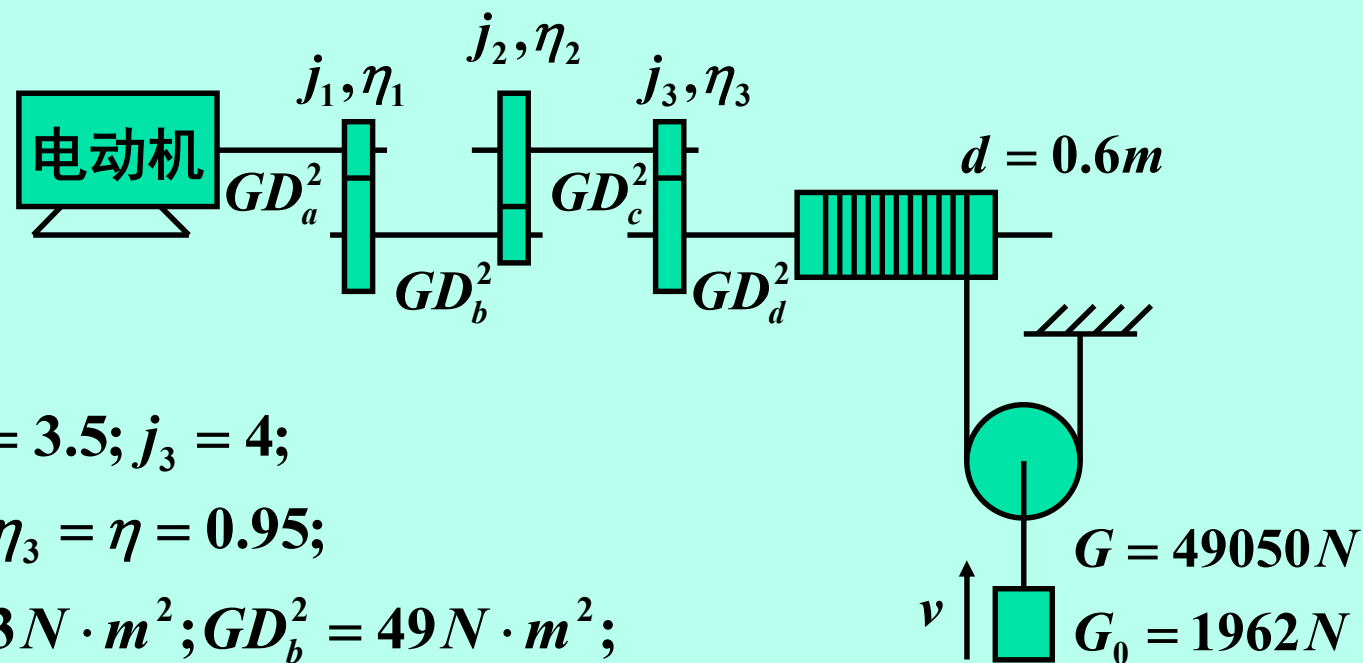
$$GD^2 = GD_a^2 + GD_b^2 = 6.01 + 1.15 = 7.16 (N \cdot m^2)$$

(4) 折算到电动机轴上的静态转矩 $T_L$

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_c} = 9.55 \times \frac{19620 \times 0.257}{860 \times (0.8)^4} = 136.7 N \cdot m$$

**案例分析1:** 某起重机的电力拖动系统如图所示。求:

- 1、以速度  $v=0.3\text{m/s}$  提升重物时, 负载 (重物及钓钩) 转矩、卷筒转速、电动机输出转矩及电动机转速;
- 2、负载及系统的飞轮矩 (折算到电动机轴上)
- 3、以加速度  $a=0.1\text{m/s}^2$  提升重物时, 电动机输出的转矩。



$$j_1 = 3; j_2 = 3.5; j_3 = 4;$$

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta = 0.95;$$

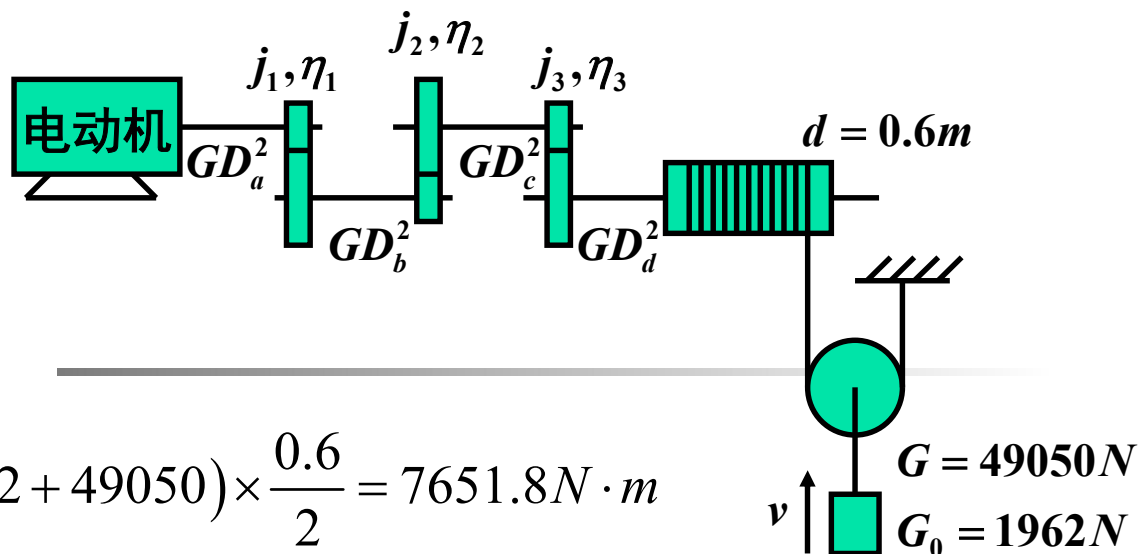
$$GD_a^2 = 123\text{N} \cdot \text{m}^2; GD_b^2 = 49\text{N} \cdot \text{m}^2;$$

$$GD_c^2 = 40\text{N} \cdot \text{m}^2; GD_d^2 = 465\text{N} \cdot \text{m}^2$$

解：

(1) 负载转矩（未折合）

$$T_L = \frac{1}{2}(G_0 + G) \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \times (1962 + 49050) \times \frac{0.6}{2} = 7651.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$



卷筒转速：

$$n_L = \frac{60\Omega_L}{2\pi} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{2v}{\frac{d}{2}} = \frac{120v}{\pi d} = \frac{120 \times 0.3}{0.6\pi} = 19.1 \text{ r/min}$$

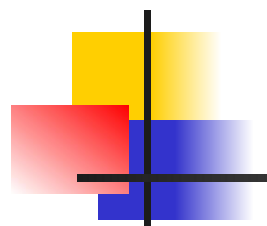
电动机转速：  $n = n_L \cdot j = 19.1 \times 3 \times 3.5 \times 4 = 802.2$

电动机输出转矩：

$$T_e = \frac{T_L}{j_1 j_2 j_3 \eta^3} = \frac{7651.8}{3 \times 3.5 \times 4 \times 0.95^3} = 212.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

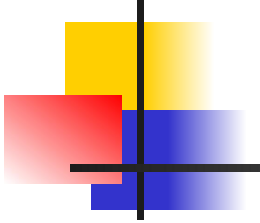


## (2) 负载及系统的飞轮矩


$$GD_L^2 = 365 \frac{G_L v^2}{n^2} = 365 \times \frac{(1962 + 49050) \times 0.3^2}{802.2^2} = 2.604$$

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \frac{GD_d^2}{(j_1 j_2 j_3)^2} + GD_L^2 \\ &= 123 + \frac{49}{3^2} + \frac{40}{(3 \times 3.5)^2} + \frac{465}{(3 \times 3.5 \times 4)^2} + 2.604 \\ &= 131.67 N \cdot m^2 \end{aligned}$$

(3) 以加速度 $a=0.1\text{m/s}^2$ 提升重物时，电动机输出的转矩。

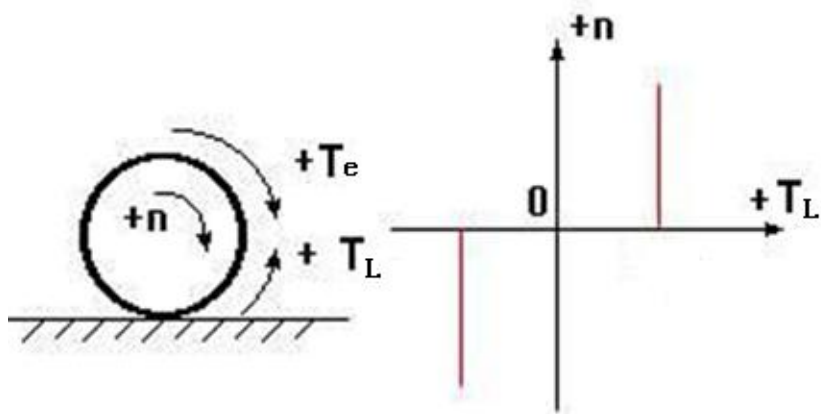

$$n = jn_L = j \frac{60\Omega_L}{2\pi} = \frac{60j}{2\pi} \cdot \frac{2v}{\frac{d}{2}} = \frac{120j}{\pi d} \cdot v$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{120j}{\pi d} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{120j}{\pi d} \cdot a = \frac{120 \times 3 \times 3.5 \times 4}{0.6\pi} \times 0.1 = 267.38 r / \text{min} \cdot s$$

$$T_e = T_L + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = 212.5 + \frac{131.67}{375} \times 267.38 = 306.4 N \cdot m$$

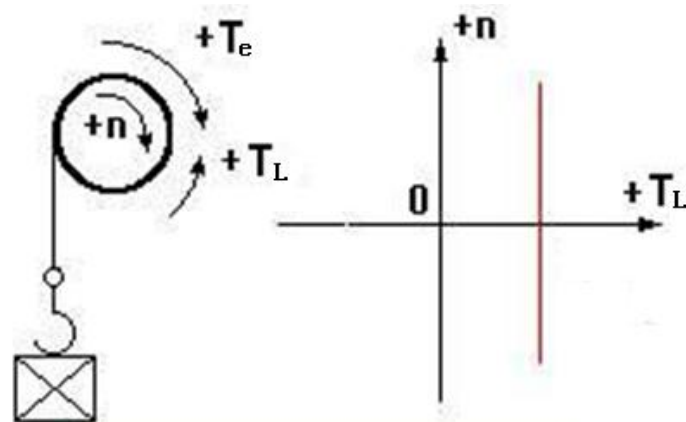
## § 2-2 负载的转矩特性

### 1、恒转矩负载的转矩特性



反抗性恒转矩负载

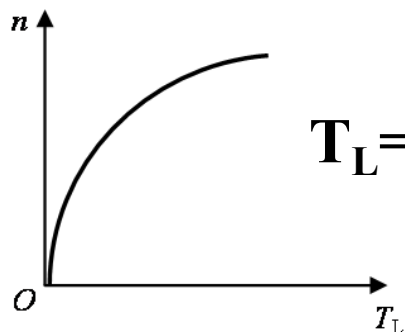
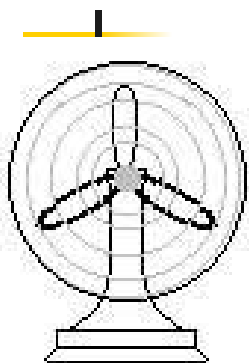
$T_L$ 大小不变,但作用方向总是与运动方向 $n$ 相反,是阻碍运动的制动性质转矩。



位能性恒转矩负载

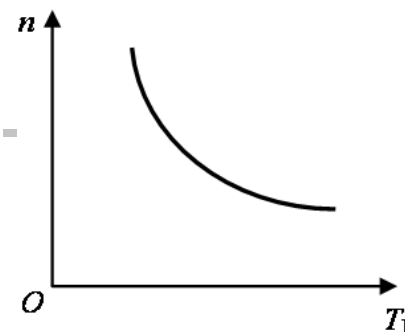
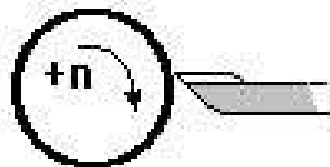
这种负载转矩是由重力作用产生的。 $T_L$ 大小不变,而且作用方向也保持不变。

## 2、泵类负载的转矩特性



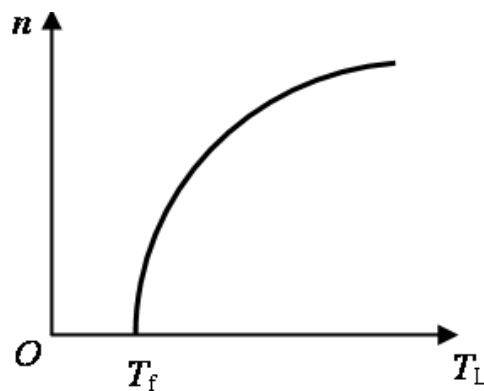
$$T_L = kn^2$$

## 3、恒功率负载的转矩特性



$$T_L = \frac{k}{n}$$

实际生产机械的负载  
转矩特性可能是以上  
几种典型特性的综合

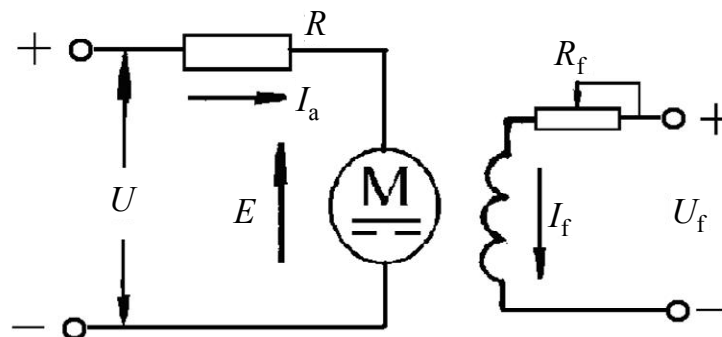


$$T_L = T_f + kn^2$$

## § 2.3 他励直流电动机的机械特性 $n=f(T_e)$

描述他励直流电动机电磁转矩和转速之间的关系。是研究电动机起动、调速、运行时的有效形式。

### 2.3.1 机械特性的机械特性方程



$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R}{K_e K_m \Phi^2} T_e$$

$$= n_0 - \beta T_e$$

机械特性的斜率

理想空载转速

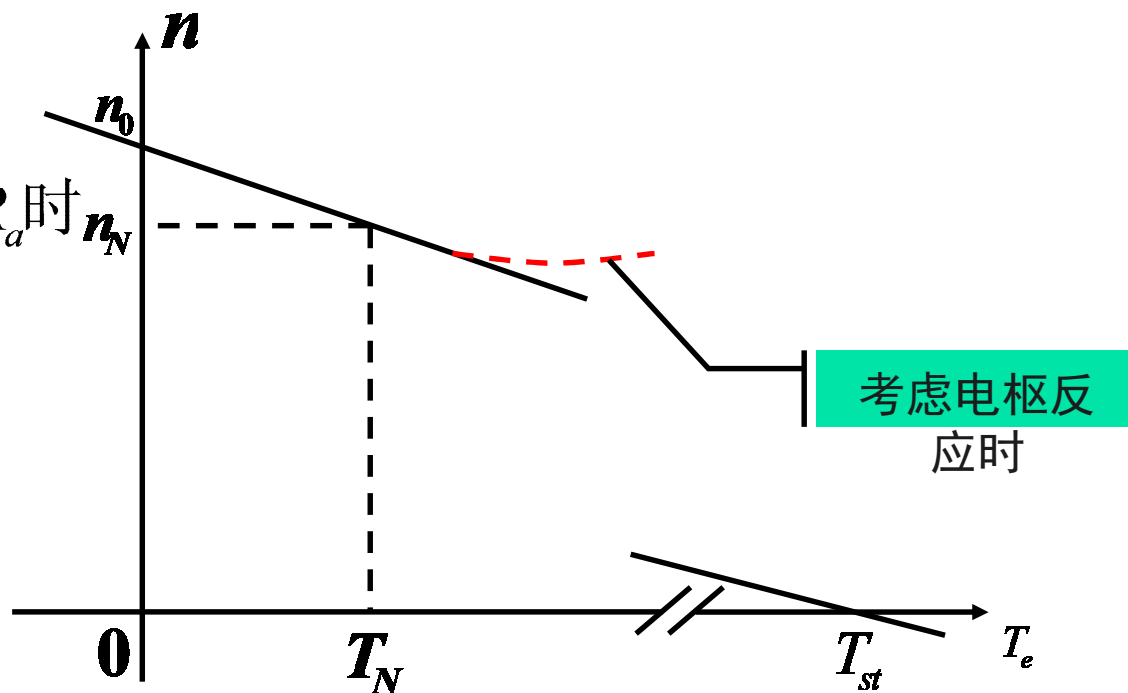
## 2.3.2 他励直流电动机的机械特性曲线

### 1 固有机械特性

当电枢两端加额定电压、气隙每极磁通量为额定值、电枢回路不串电阻时的机械特性称为电动机的固有机械特性。

即当 $U = U_N$ ,  $\Phi = \Phi_N$ ,  $R = R_a$ 时

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi_N^2} T_e$$



## 固有机械特性的特点：

1、是一条下斜直线，可以由一点和一斜率来确定：一点可以是理想空载转速点，也可以是额定运行点；斜率为  $\beta$ 。

2、理想空载转速点处有：
$$T_e = 0, n = n_0$$
$$I_a = 0, E_a = U_N$$

3、斜率值很小，特性较平，习惯上称为硬特性；而斜率值大时的特性称为软特性。

4、在额定工作点处，转速降  $\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta T_N$  为额定转速降，一般地说， $n_N$  约为  $0.95n_0$ ，而  $\Delta n_N$  约为  $0.05n_0$ ，这是硬特性的数量体现。

5、在起动点，电磁转矩  $T_{st}$  称为起动转矩，电枢电流  $I_a = \frac{U_N}{R_a} = I_{st}$  称为起动电流。直接起动时，起动电流很大，会烧坏换向器，因此，直流电机（除微型）不允许直接起动。

6、固有机械特性位于三个象限之内，在第 I 象限为正向电动运行，其它两个象限都为制动运行。





## 2 人为机械特性

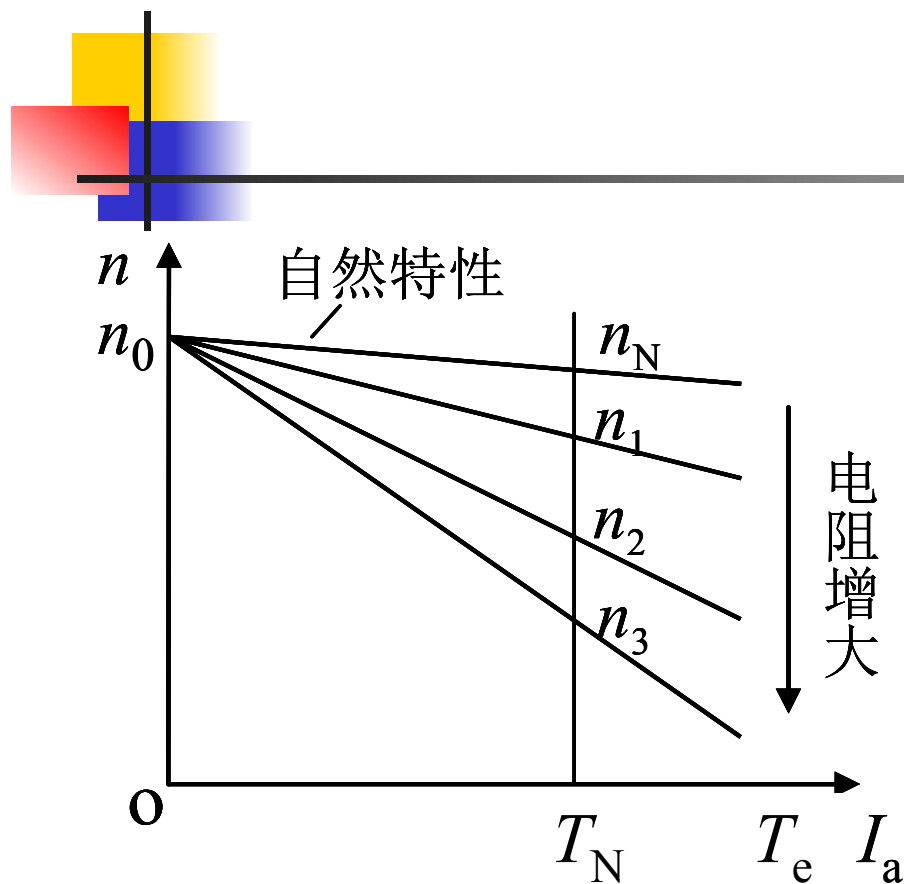
- 他励直流电动机的参数如电压、励磁电流、电枢回路电阻大小等改变后，其机械特性称为人为机械特性。  
分三种情况：

电枢回路串电阻

改变电源电压

减弱励磁磁通

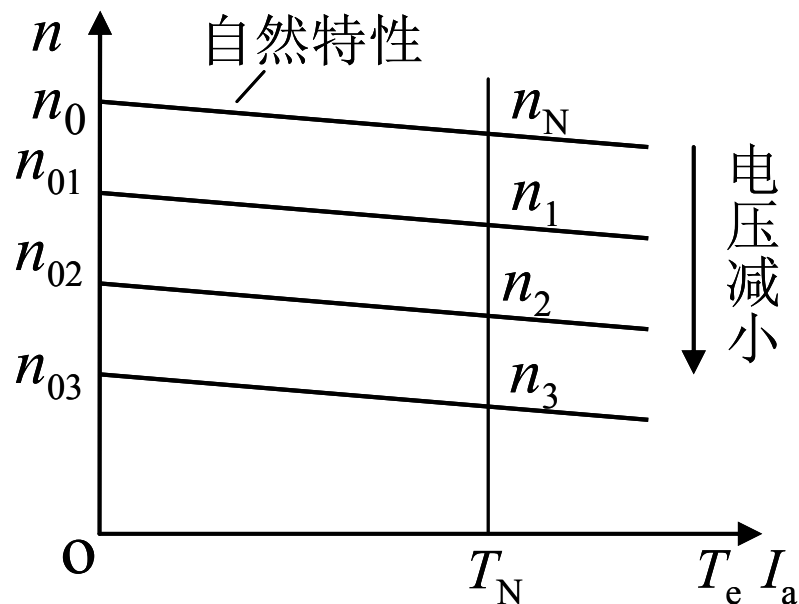
## (1) 电枢回路串电阻的人为机械特性



$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_\Omega}{K_e K_m \Phi_N^2} T$$

$n_0$  不变,  $\Delta n$  越大, 特性越软

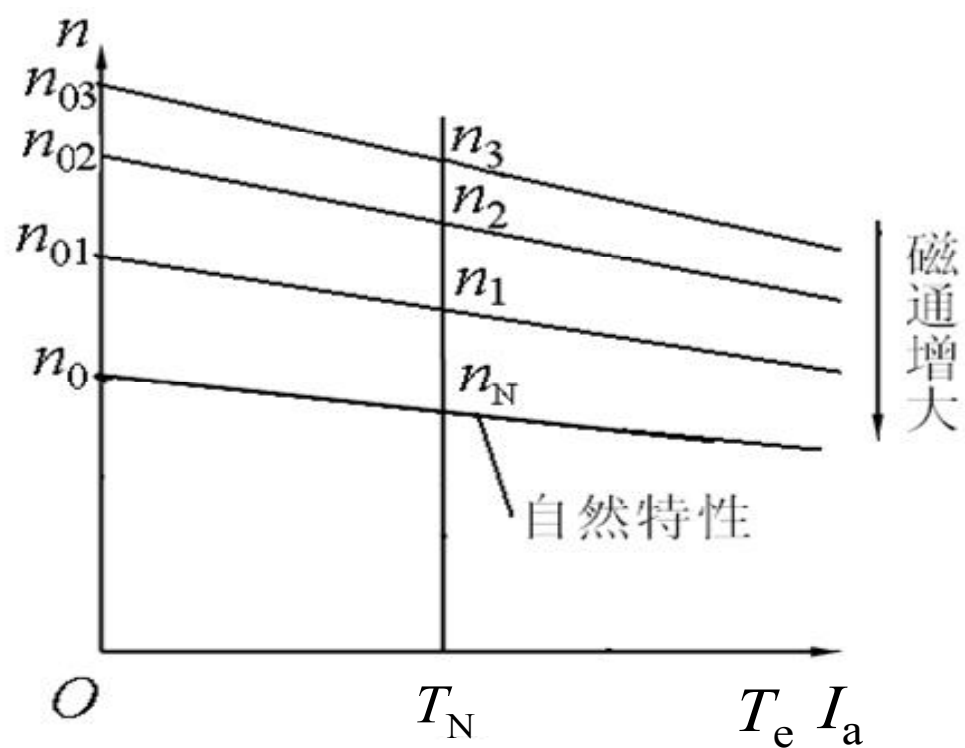
## (2) 改变电枢电压的人为机械特性



$$n = \frac{U}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi_N^2} T_e$$

**$n_0$ 改变,  $\Delta n$ 不变**  
**特性硬度不变**

### (3) 减少气隙磁通量的人为机械特性



$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi^2} T_e$$

$n_0$ 变大,  $\Delta n$ 变大, 特性变软

### 三、机械特性的绘制

根据电机的铭牌数据估算固有机械特性

步骤: (1) 实测或估算  $R_a$       (2) 求  $K_e \Phi_N$   
(3) 求  $n$       (4) 求  $T_N$

选择理想空载点 ( $T_e=0, n=n_0$ ) 和额定运行点 ( $T_e=T_N, n=n_N$ )

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \Phi_N}$$

$$K_e \Phi_N = \frac{U_N - I_{aN} R_a}{n_N}$$

$$R_a = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

$$T_N = K_m \Phi_N I_{aN} = 9.55 K_e \Phi_N I_{aN}$$

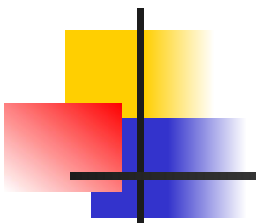
$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

**例2-2** 有一台他励直流电动机，其铭牌数据如下：

$P_N=40\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=210\text{A}$ ， $n_N=750\text{r/min}$ ， $R_a=0.07\Omega$ 。求：

- (1) 自然机械特性方程和曲线, 求额定工作条件下电动机输出的额定电磁转矩；
- (2)  $R_{ad}=0.4\Omega$  的人为机械特性方程和曲线；
- (3)  $U=110\text{V}$  的人为机械特性方程和曲线；
- (4)  $\Phi=0.8\Phi_N$  时的人为机械特性（其中  $\Phi_N$  为电动机的额定磁通）方程和曲线。

解：先求出电动机的 $K_e \Phi$ 、 $K_m \Phi$ 的值。即


$$K_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 210 \times 0.07}{750} = 0.2737$$

$$K_m \Phi_N = 9.55 K_e \Phi_N = 2.6136$$

(1)自然机械特性

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} = \frac{220}{0.2737} = 804 \text{ r/min}$$

$$\text{转速降为: } \Delta n = \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_a = \frac{0.07}{0.2737} I_a = 0.2557 I_a \text{ (r/min)}$$

$$n = 804 - 0.2557 I_a \text{ (r/min)}$$

$$T_N = K_m \Phi_N I_a = 2.6136 \times 210 = 548.86 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$(n_0 = 804 \text{ r/min, } I_0 = 0) \quad (n_N = 750 \text{ r/min, } I_N = 210 \text{ A})$$



## (2) $R_{ad}=0.4\Omega$ 的人工机械特性

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e \Phi_N} I_a = 804 - \frac{0.07 + 0.4}{0.2737} I_a = 804 - 1.7172 I_a$$

理想空载点：  $I_a=0A$ ，  $n_0=804r/min$ ；

额定负载点：  $I_N=210A$ ，  $n=804-1.7172 \times 210=443r/min$ 。

## (3) 绘制 $U=110V$ 的人工机械特性。

$$n = \frac{U}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_a = \frac{110}{0.2737} - \frac{0.07}{0.2737} I_a = 402 - 0.2557 I_a$$

理想空载点：  $I_a=0A$ ，  $n_0=402r/min$ ；

额定负载点：  $I_N=210A$ ，  $n=402-0.2557 \times 210=348r/min$ 。





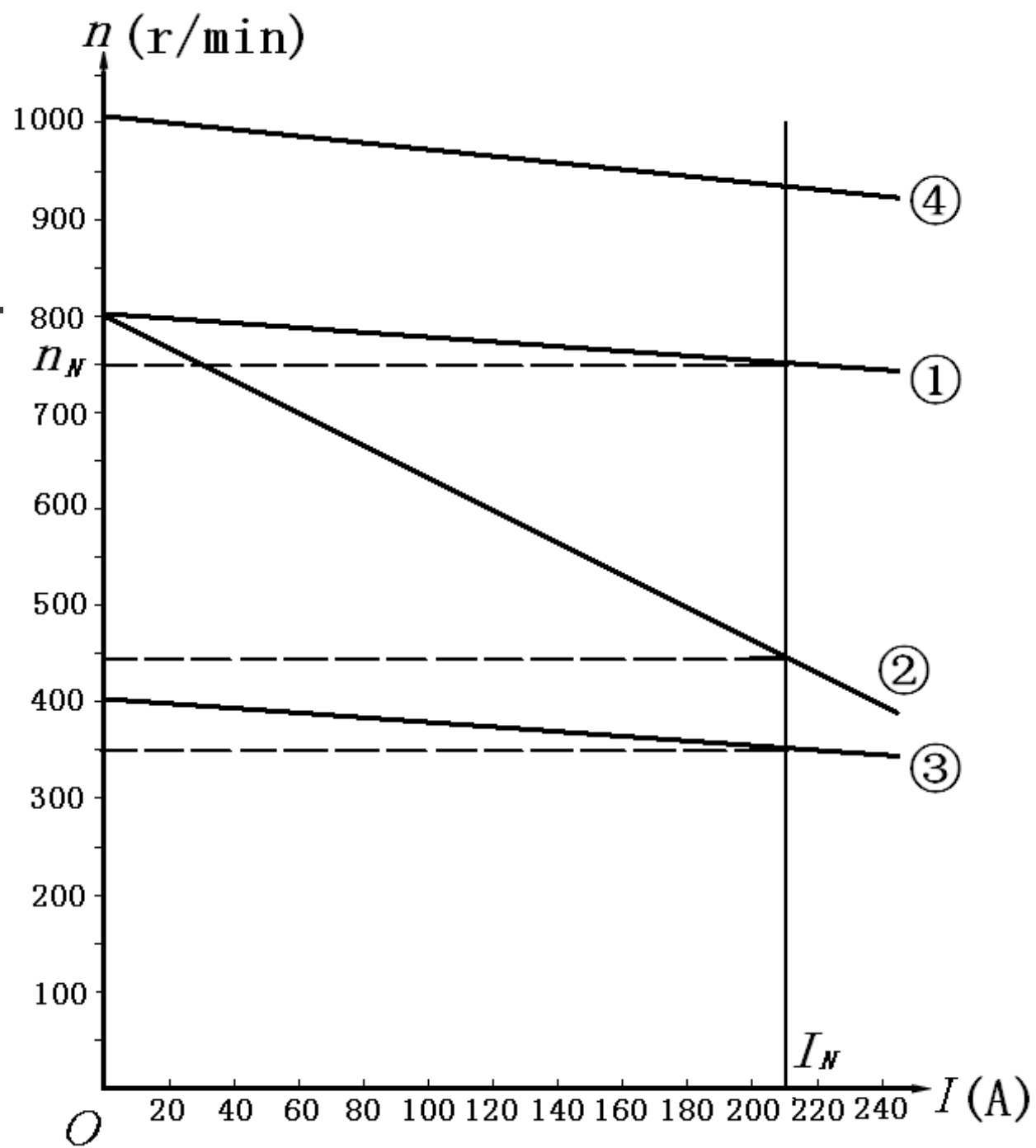
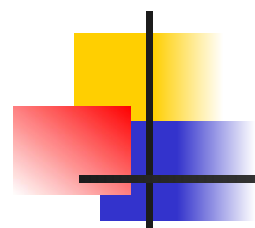
#### (4) $\Phi=0.8\Phi_N$ 的人工机械特性

---

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e \Phi} I_a = \frac{220}{0.8 \times 0.2737} - \frac{0.07}{0.8 \times 0.2737} I_a$$

理想空载点：  $I_a=0$ ，  $n_0=1005\text{r/min}$ ；

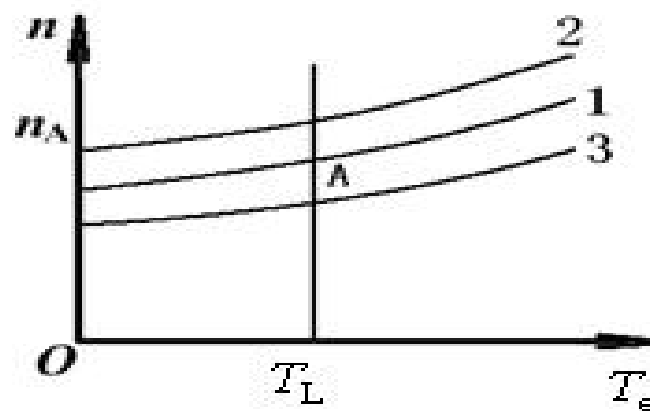
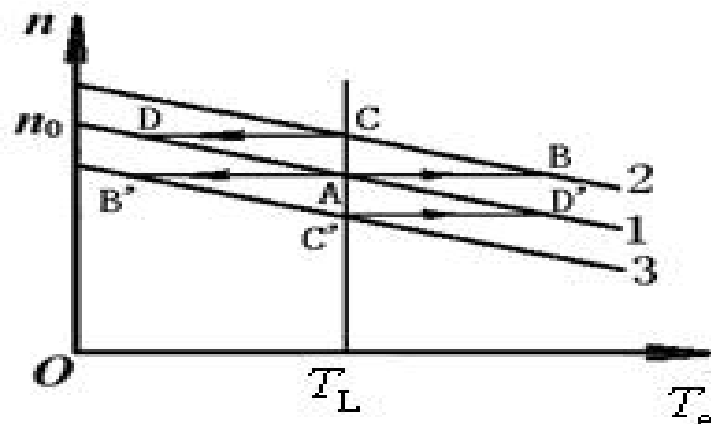
额定负载点：  $I_N=210\text{A}$ ，  $n=1005-0.3197 \times 210=938\text{r/min}$ 。



**案例分析2：**一他励直流电动机的铭牌数据： $P_N=22\text{kW}$ ，  
 $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=116\text{A}$   $n_N=1500\text{r/min}$

- 1 绘制固有特性曲线
- 2 分别绘制下列三种情况的人为机械特性曲线
  - (1) 电枢电路串入电阻 $R_{pa}=0.7\ \Omega$
  - (2) 电源电压降至一半额定电压
  - (3) 磁通减弱至 $2/3$ 额定磁通
- 3 电机带额定负载时，要求电机转速为 $1000\text{r/min}$ ，有几种可行方案，并分别求其参数。

### 2.3.3 电力拖动系统稳定运行条件

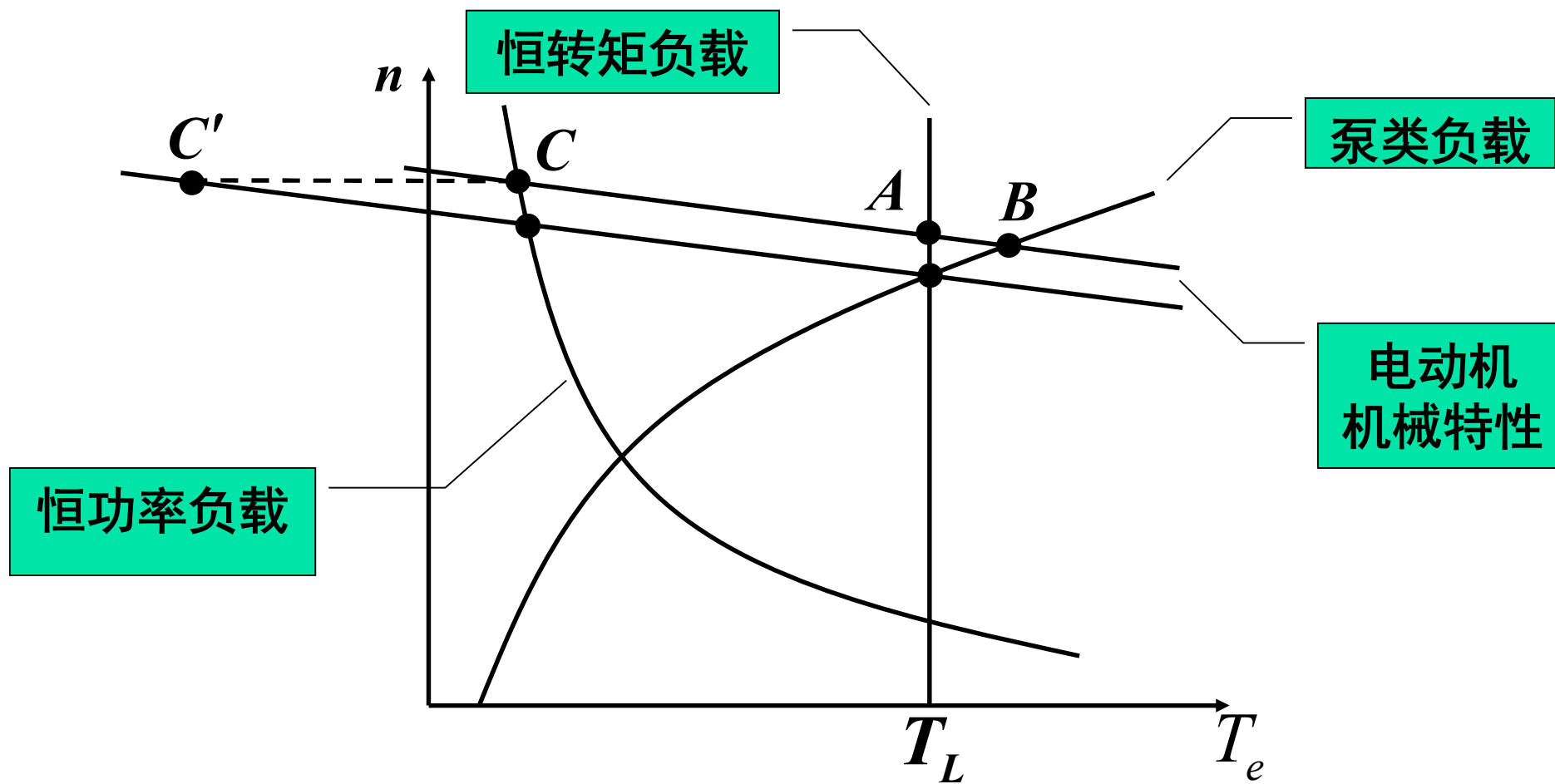


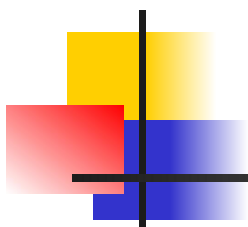
电力拖动系统稳定:

- 1、满足动转矩为零的条件;
- 2、系统在受到干扰时, 仍能稳定运行且当干扰消失时, 系统仍能回到原来的稳定的工作状态。

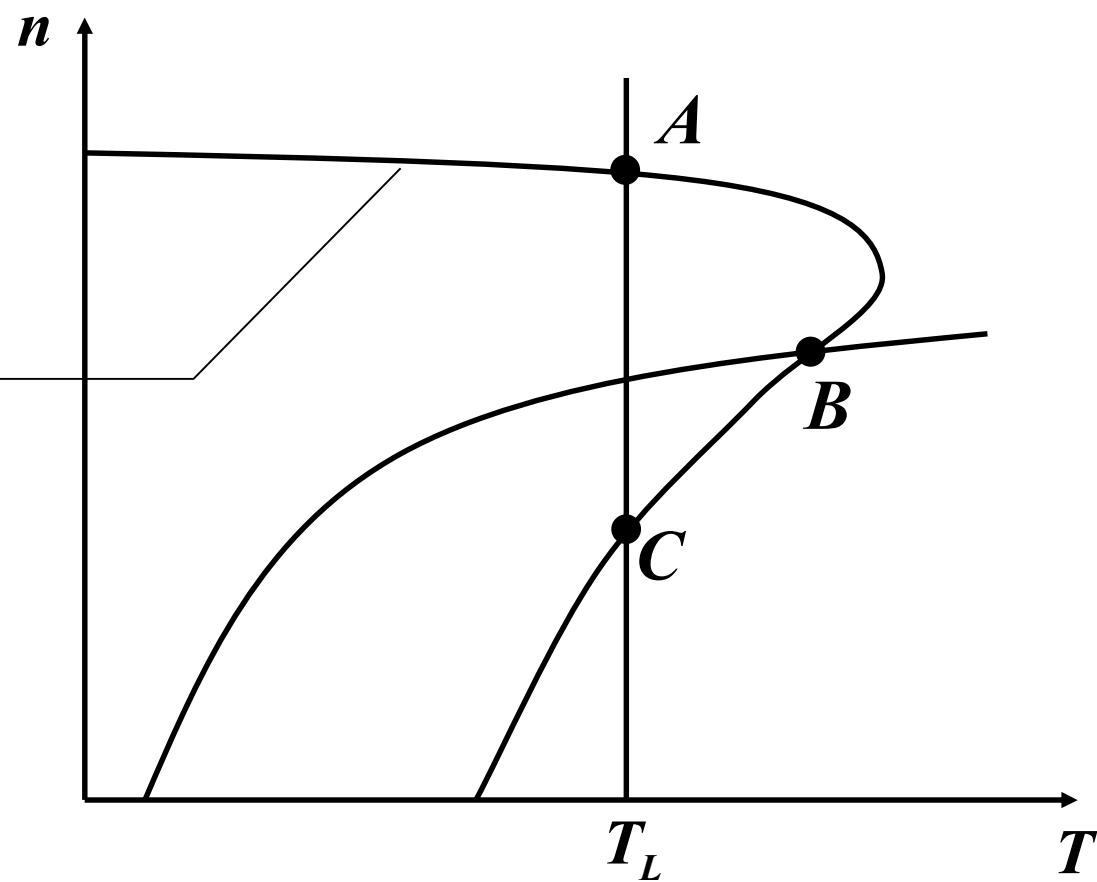
电力拖动系统稳定运行的条件为

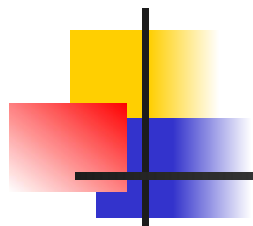
$$\begin{cases} T_e = T_L; \\ \frac{dT_e}{dn} < \frac{dT_L}{dn} \end{cases}$$





异步电动机  
机械特性





# 他励直流电动机的运行

---

他励直流电动机的起动

他励直流电动机的制动

他励直流电动机的调速


直流拖动的过渡过程

## § 2.4 他励直流电动机的起动

### 2.4.1 对起动的要求

一般直流电机都不允许直接起动，起动的方法有两种：

**串电阻、降电压**



**起动时一般要求：**1、起动转矩大；2、电流冲击不要太大，以免对电源或电机本身造成损害；3、起动过程中损耗的能量少；

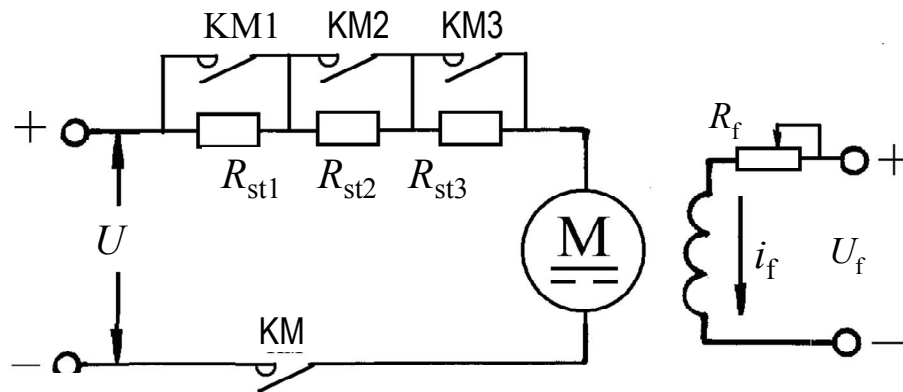
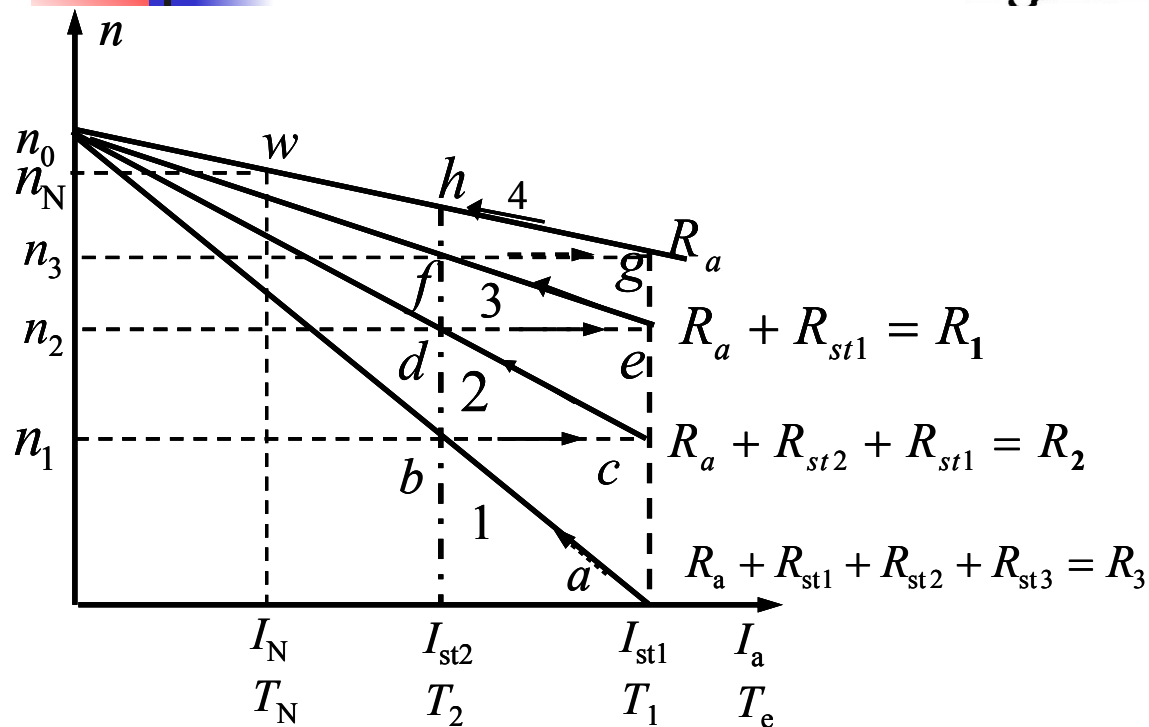
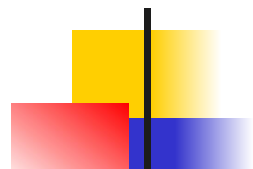
1、满磁通起动，即励磁回路不能串电阻或断路；

2、 $I_{st} \leq (2 \sim 2.5)I_N$

3、 $T_{st} \geq (1.1 \sim 1.2)T_N$



## 2.4.2 电枢回路串电阻启动



$$\frac{I_{st1}}{I_{st2}} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a} = \beta$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_a + R_{st1} = \beta R_a \\ R_2 &= R_a + R_{st2} + R_{st1} = \beta^2 R_a \\ R_3 &= R_a + R_{st1} + R_{st2} + R_{st3} = \beta^3 R_a \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} I_{st1} &= (2 \sim 2.5) I_N \\ I_{st2} &= (1.1 \sim 1.2) I_N \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{st1} &= R_1 - R_a \\ R_{st2} &= R_2 - R_1 \\ R_{st3} &= R_3 - R_2 \end{aligned} \right\}$$

$$\beta = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_a}}$$

在具体计算时，可能有下述两种情况：

**(1) 起动级数 $m$ 未知** 此时可按尖峰电流  $I_{st1}$ 、切换电流  $I_{st2}$  的规定范围，初选电流  $I_{st1}$ 、 $I_{st2}$  及初选  $\beta$  值，并利用公式求出  $m$ ，式中  $R_m = U / I_{st1}$ ，若求得  $m$  为分数，则将其加大至相近的整数值，然后将  $m$  的整数值代入式，求新的  $\beta$  值，用新的  $\beta$  值代入公式，求个部分起动电阻。

**(2) 起动级数 $m$ 已知** 先选定尖峰电流  $I_{st1}$ ，算出  $R_m = U / I_{st1}$ ，将  $m$  及  $R_m$  代入公式算出  $\beta$  值，然后求各级起动电阻。

**例2-3** 一台他励直流他励电动机的铭牌数据为： $P_N=29\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=76\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ， $R_a=0.377\Omega$ 。试计算四级启动时的启动电阻值。

**解：**  $m=4$ ，得尖峰电流  $I_{st1}=2I_N=2 \times 76\text{A}=152\text{A}$  —  $R_m = R_4 = \frac{U_N}{I_{st1}} = \frac{440}{152}\Omega = 2.895\Omega$

得  $\beta = \sqrt[4]{\frac{R_4}{R_a}} = \sqrt[4]{\frac{2.895}{0.377}} = 1.664$

各级启动总电阻值为  $R_1 = \beta R_a = 1.664 \times 0.377\Omega = 0.627\Omega$

$$R_2 = \beta R_1 = 1.664 \times 0.627\Omega = 1.043\Omega$$

$$R_3 = \beta R_2 = 1.664 \times 1.043\Omega = 1.736\Omega$$

$$R_4 = \beta R_3 = 1.664 \times 1.736\Omega = 2.889\Omega$$

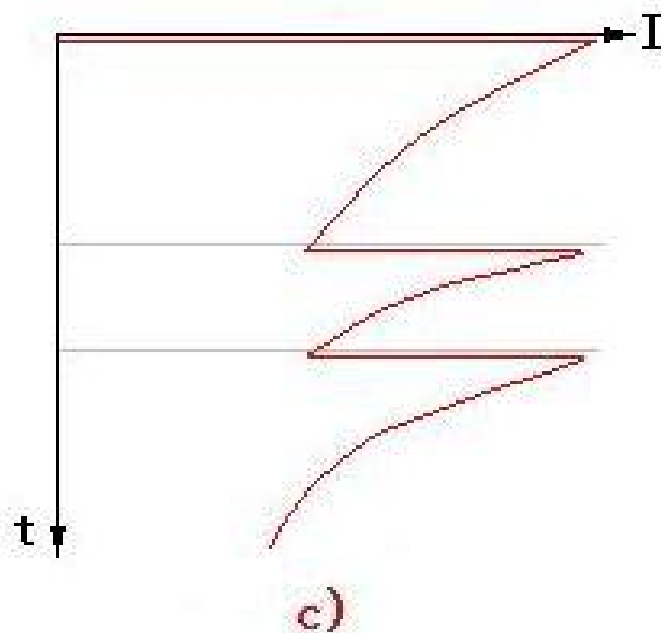
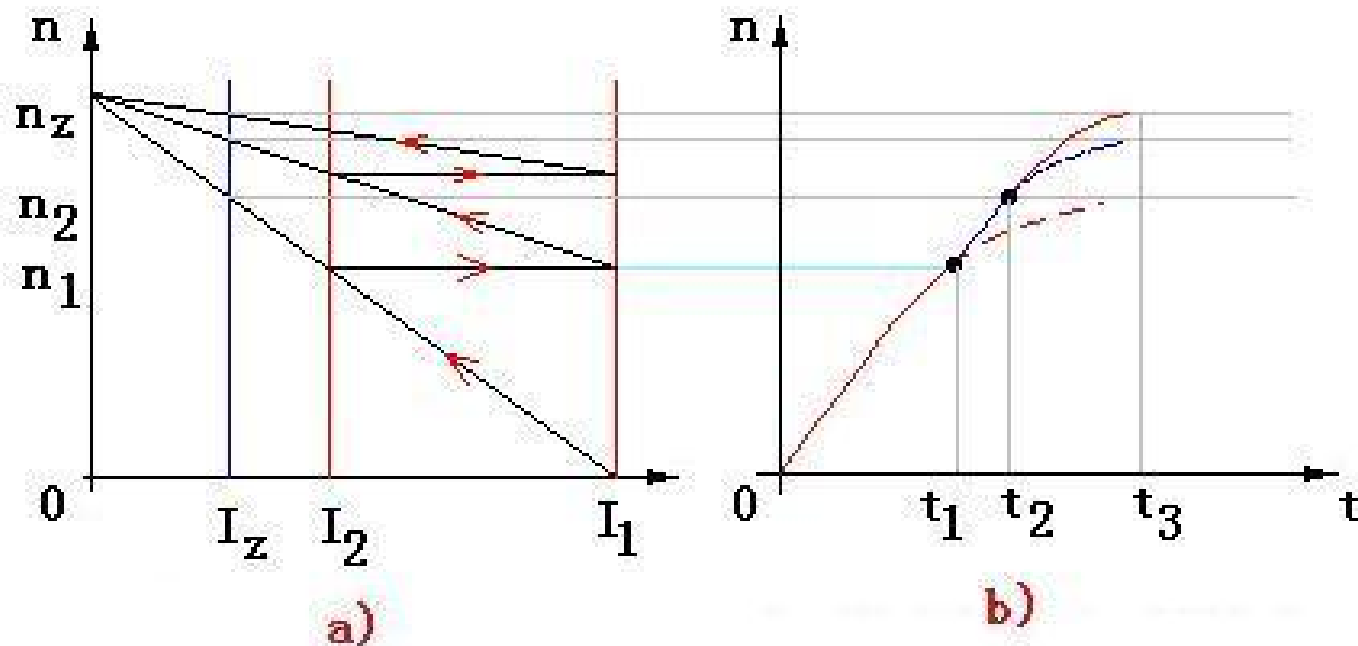
则各级启动电阻值为  $R_{st1} = R_1 - R_a = 0.627\Omega - 0.377\Omega = 0.250\Omega$

$$R_{st2} = R_2 - R_1 = 1.043\Omega - 0.627\Omega = 0.416\Omega$$

$$R_{st3} = R_3 - R_2 = 1.736\Omega - 1.043\Omega = 0.693\Omega$$

$$R_{st4} = R_4 - R_3 = 2.889\Omega - 1.736\Omega = 1.153\Omega$$

# 起动过程分析



串二级电阻的起动过程

- a) 机械特性曲线
- b) 转速变化曲线  $n = f(t)$
- c) 电流变化曲线  $I = f(t)$



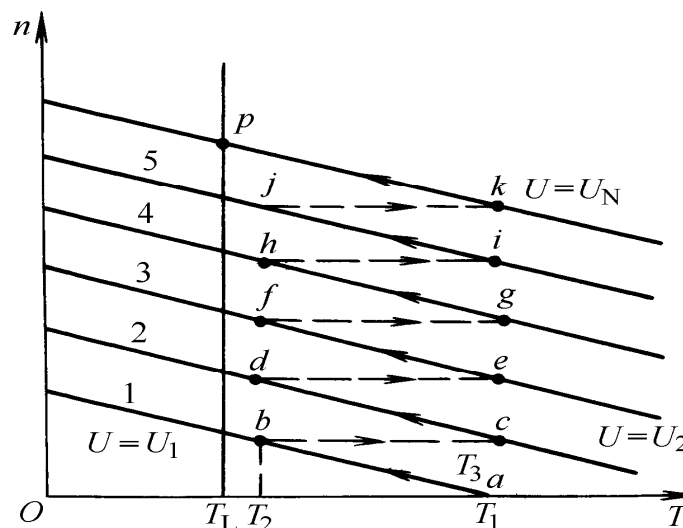
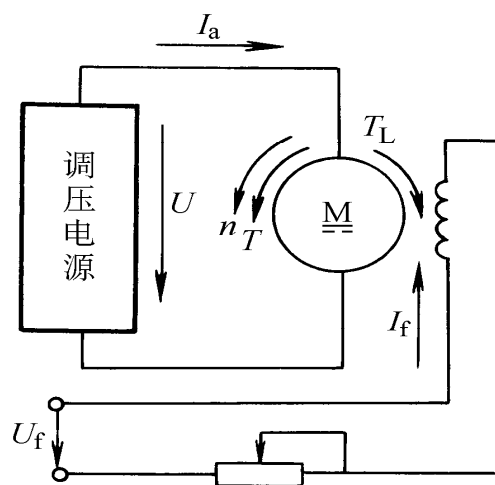
## 电枢回路串电阻起动的特点：

---

- 电路构成简单；
- 起动过程电阻会消耗能量，不适用于经常起动的大中型直流电机。

### 2.4.3 降低电源电压起动

电动机的电枢由可调直流电源供电。起动时，需先将励磁绕组接通电源，并将励磁电流调到额定值，然后从低到高调节电枢回路的电压。



在起动瞬间：电流 $I_{st}$ 通常限制在 $(1.5 \sim 2)I_N$ 内，因此起动时最低电源电压为  $U_1 = (1.5 \sim 2)I_N R_a$ ，此时电动机的电磁转矩大于负载转矩，电动机开始旋转。

随着转速 $n$ 升高,  $E_a$ 逐渐增大, 电枢电流相应减小, 此时电压 $U$ 必须不断升高(手动调节或自动调节), 并且使 $I_a$ 保持在 $(1.5 \sim 2)I_N$ 范围内, 直至电压升到额定电压 $U_N$ , 电动机进入稳定运行状态, 起动过程结束。

降压起动方法在起动过程中, 平滑性好, 能量损耗小, 易于实现自动控制, 但需要一套可调的直流电源, 增加了初投资。

## 2.5 他励直流电动机的制动

当电磁转矩的方向与转速方向相同时,电机运行于电动机状态;当电磁转矩方向与转速方向相反时,电机运行于制动状态。

- 当电机运行在第Ⅰ和第Ⅲ象限时,电机分别工作在正向和反向电动运行状态。当电机运行在第Ⅱ和第Ⅳ象限时,电机处于制动运行状态。
- 在电动运行状态时,电机的电磁转矩是拖动性转矩,而负载转矩为制动转矩。

电气制动方法:

能耗制动, 反接制动, 回馈制动 (也称再生制动)

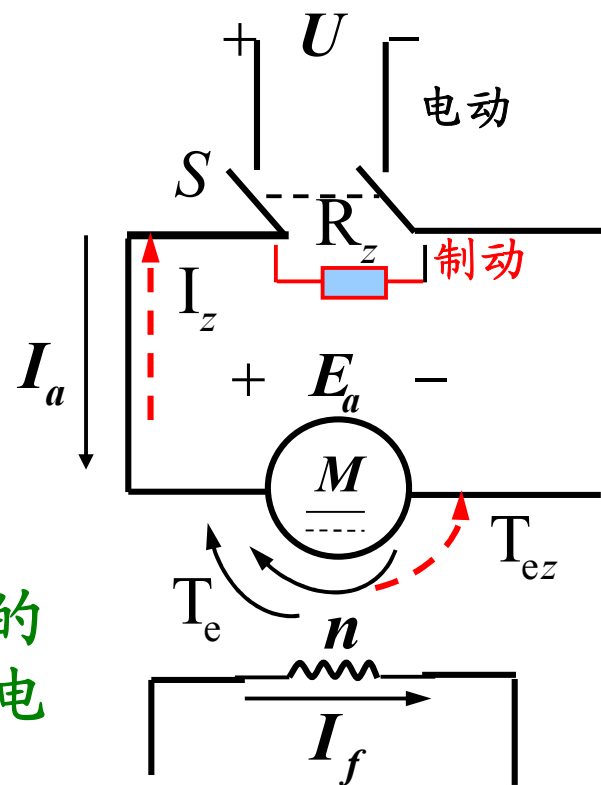


## 2.5.1 能耗制动

将开关S投向制动电阻 $R_z$ 上即实现制动。

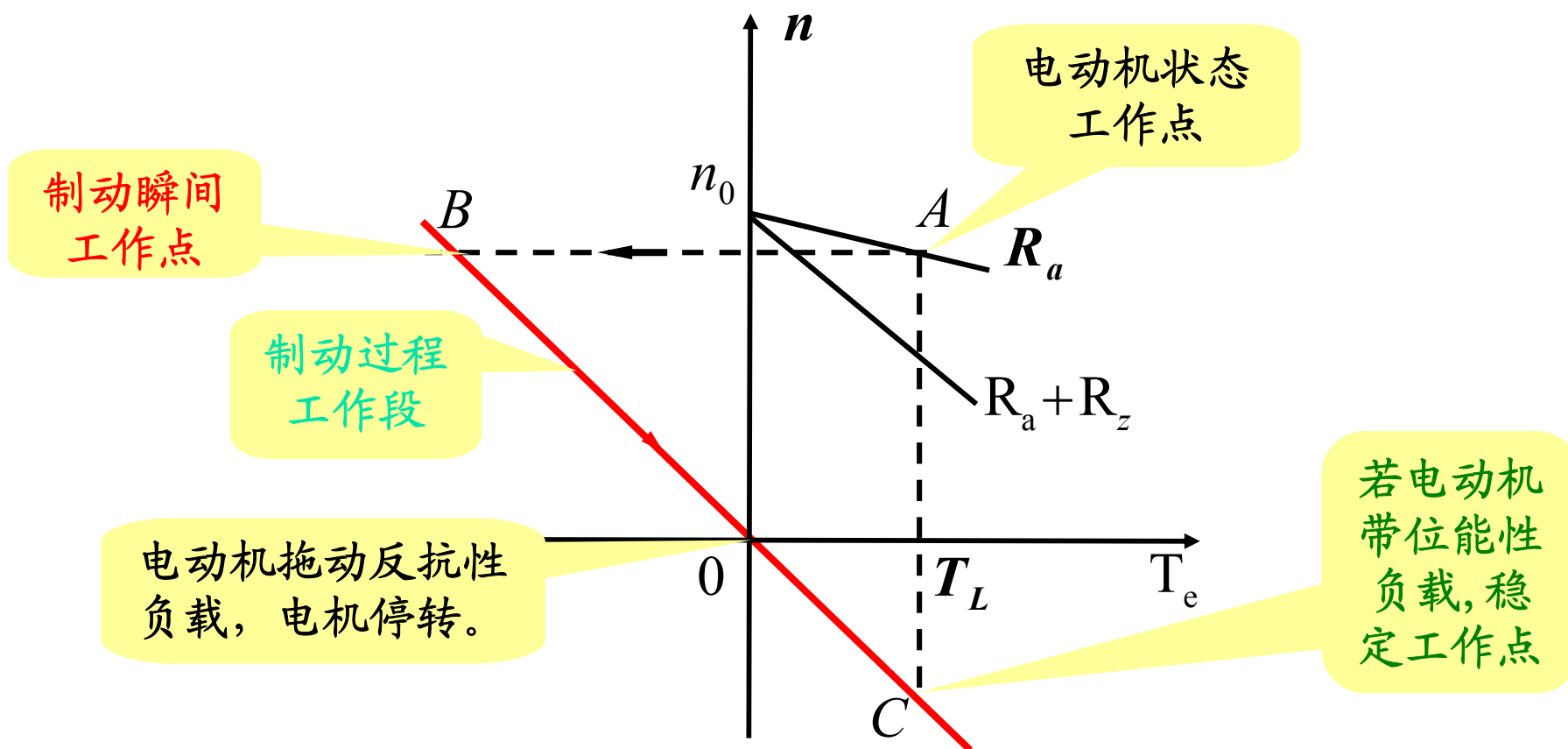
由于惯性，电枢保持原来方向继续旋转，电动势  $E_a$  方向不变。由  $E_a$  产生的电枢电流  $I_z$  的方向与电动状态时的  $I_a$  方向相反，对应的电磁转矩  $T_{ez}$  与  $T_e$  方向相反，为制动性质，电机处于制动状态。

制动运行时，电机靠生产机械的惯性力的拖动而发电，将生产机械储存的动能转换成电能，消耗在电阻上，直到电机停止转动。



能耗制动时的机械特性为：

$$n = -\frac{R_a + R_z}{K_e K_m \Phi_N^2} T_e = 0 - \beta T_e$$



改变制动电阻 $R_z$ 的大小可以改变能耗制动特性曲线的斜率,从而可以改变制动转矩及下放负载的稳定速度。 $R_z$ 越小,特性曲线的斜率越小,起始制动转矩越大,而下放负载的速度越小。

制动电阻越小, 制动电流越大。选择制动电阻的原则是

$$I_z = \frac{E_a}{R_a + R_z} \leq (2 \sim 2.5) I_N$$
$$R_z \geq \frac{E_a}{(2 \sim 2.5) I_N} - R_a$$

其中 $E_a$ 为制动瞬间的电枢电动势。

能耗制动操作简单,但随着转速下降,电动势减小,制动电流和制动转矩也随着减小,制动效果变差。若为了尽快停转电机,可在转速下降到一定程度时,切除一部分制动电阻,增大制动转矩。

**例2-4** 一他励直流电动机,  $P_N=22\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=116\text{A}$ ,  $n_N=1500\text{r/min}$ , 电枢电阻  $R_a=0.175\Omega$ 。计算:

(1) 该电动机在额定工作状态时, 进行能耗制动, 取最大制动电流  $I_z=2I_N$ , 试求电枢回路中应串入的电阻  $R_z$ ;

(2) 用该电动机拖动起重机, 当轴上负载转矩为额定转矩的  $2/3$  (或电流为额定电流的  $2/3$ ) 时, 要求电动机在能耗制动状态下, 以  $800\text{r/min}$  的速度下放重物, 试求电枢电路中应串入的电阻  $R_{z2}$ 。

解: (1)  $E=K_e\Phi n=U_N-I_N R_a=220-116\times 0.175=199.7\text{ (V)}$

$$\text{则电枢回路总电阻为 } R_a + R_z = \frac{E}{I_z} = \frac{199.7}{2\times 116} = 0.86(\Omega)$$

$$\text{电枢回路中应串入的电阻: } R_z = 0.86 - 0.175 = 0.685\text{ (}\Omega\text{)}$$

(2) 能耗制动时的机械特性方程式为

$$n = -\frac{R_a + R_z}{K_e\Phi_N} I_z \quad K_e\Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 116\times 0.175}{1500} = 0.133$$

解得  $R_{z2}=1.20\Omega$

## 2.5.2 反接制动

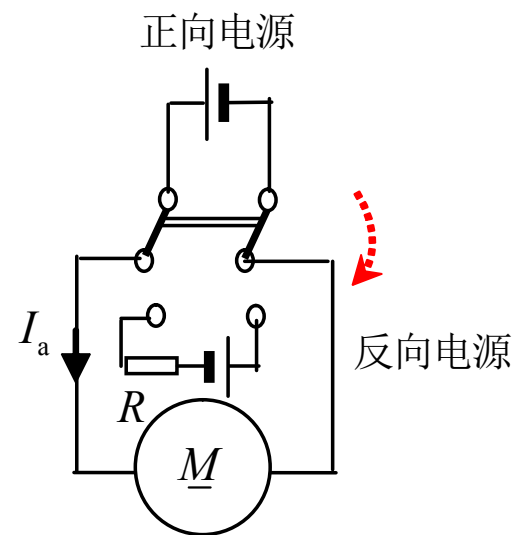
电压反接制动  
倒拉反接制动

### 1、电压反接制动

开关S投向“电动”侧时，电枢接正极电压，电机处于电动状态。进行制动时，开关投向“制动”侧，电枢回路串入制动电阻  $R$  后，接上极性相反的电源电压，电枢回路内产生反向电流：

$$I_{az} = \frac{-U - E_a}{R_a + R_z} = -\frac{U + E_a}{R_a + R_z}$$

反向的电枢电流产生反向的电磁转矩，从而产生很强的制动作用——**电压反接制动**。



电压反接制动时的机械特性为：

$$n = -\frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_z}{K_e K_m \Phi_N^2} T_e = -n_0 - \beta T_e$$

曲线如图中BC所示。

工作点变化为： $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ 。

制动过程中  $U$ 、 $I_a$ 、 $T_e$  均为负，而  $n$ 、 $E_a$  为正

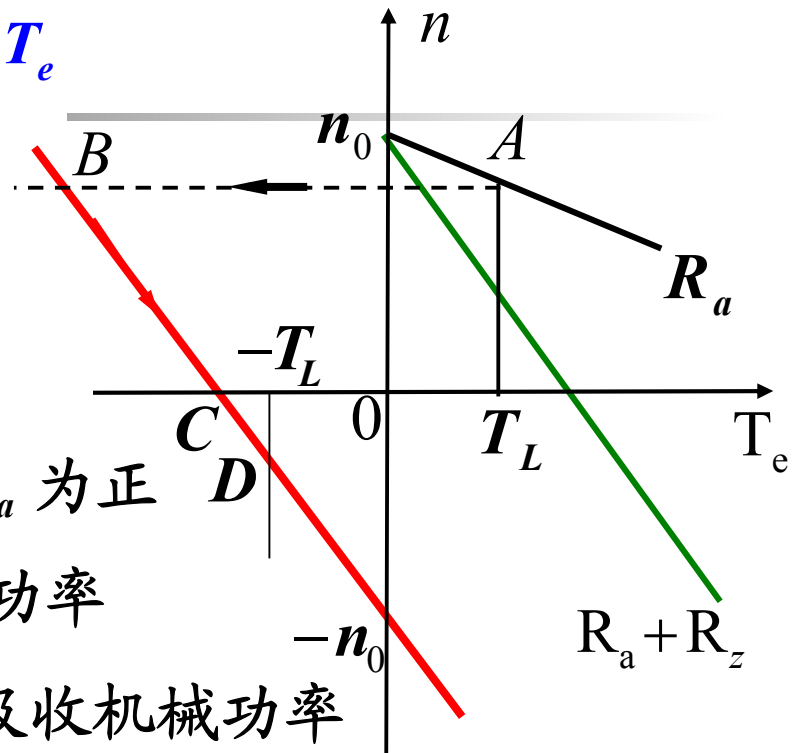
$P_1 = UI_a > 0$  表明电机从电源吸收电功率

$P_2 = T_2 \Omega \approx T_e \Omega < 0$  表明电机从轴上吸收机械功率

$$P_{em} = E_a I_a < 0$$

表明轴上输入的机械功率转变为电枢回路电功率。

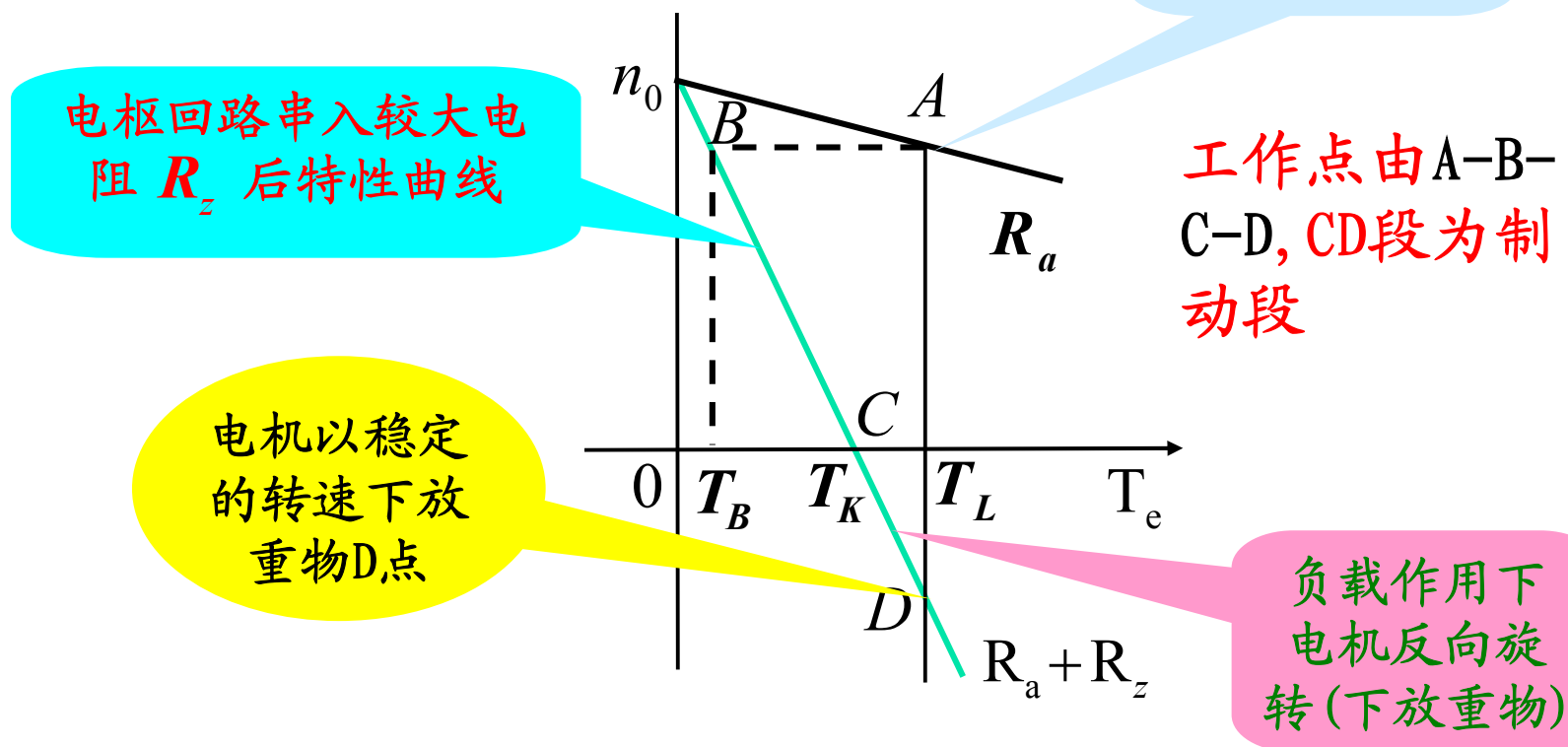
可见，反接制动时，从电源输入的电功率和从轴上输入的机械功率转变成的电功率一起消耗在电枢回路电阻上。



## 2、倒拉反转反接制动

倒拉反转反接制动只适用于位能性恒转矩负载

在电枢回路中串联一个较大的电阻,即可实现制动.



倒拉反转反接制动时的机械特性方程就是电动状态时电枢串电阻时的人为特性方程。由于串入电阻很大，有

$$n = n_0 - \frac{R_a + R_z}{K_e K_T \Phi_N^2} T_L < 0$$

倒拉反转反接制动时的机械特性曲线就是电动状态时电枢串电阻时的人为特性在第四象限的部分。

倒拉反转反接制动时的能量关系和电压反接制动时相同。

思考：位能性以外的负载能否实现倒拉反转反接制动？



**例2-5** 直流电动机 $P_N=22\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=116\text{A}$ ,  $n_N=1500\text{r/min}$ ,  $R_a=0.175\Omega$ ,  $C_e\Phi=0.133$ 。电动机运行在倒拉反接制动状态, 以 $800\text{r/min}$ 的速度放下重物, 轴上仍为额定负载。试求电枢电路中应串入的电阻 $R_z$ 、从电网输入的功率 $P_1$ 、从轴上输入的功率 $P_2$ 及电枢电路电阻上消耗的功率。

解: 倒拉反接制动的机械特性方程式为

$$n = n_0 - \frac{R_a + R_z}{K_e \Phi_N} I_a$$

将有关数据代入, 解得  $R_z=2.64\Omega$

电网输入功率为  $P_1=U_N I_N=220 \times 116\text{W}=25520\text{W}=25.52\text{kW}$

轴上输入的功率即为电动机的电磁功率, 所以

$$P_2=E I_a=C_e \Phi n I_a=0.133 \times 800 \times 116\text{W}=12342\text{W}=12.342\text{kW}$$

电阻消耗的功率

$$P_{cu}=I_a^2 (R_a+R_z)=116^2 \times (0.175+2.64)\text{W}=37.879\text{kW}$$

可见  $P_1+P_2=P_{cu}$

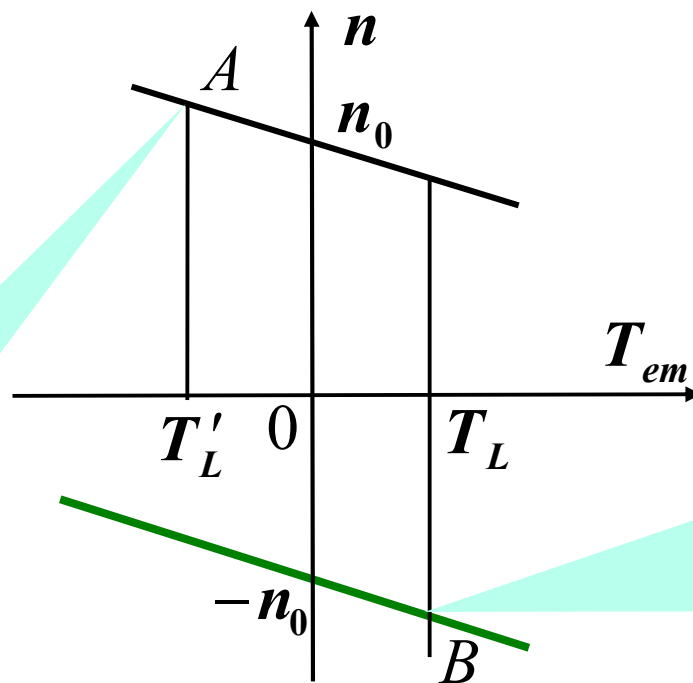
### 2.5.3 回馈制动

电动状态下运行的电动机，在某种条件下会出现 $n > n_0$ 情况，此时 $E_a > U$ ， $I_a$ 反向， $T_e$ 反向，由驱动变为制动。从能量方向看，电机处于发电状态——回馈制动状态。

回馈制动时的机械特性方程与电动状态时相同。

稳定运行有两种情况：

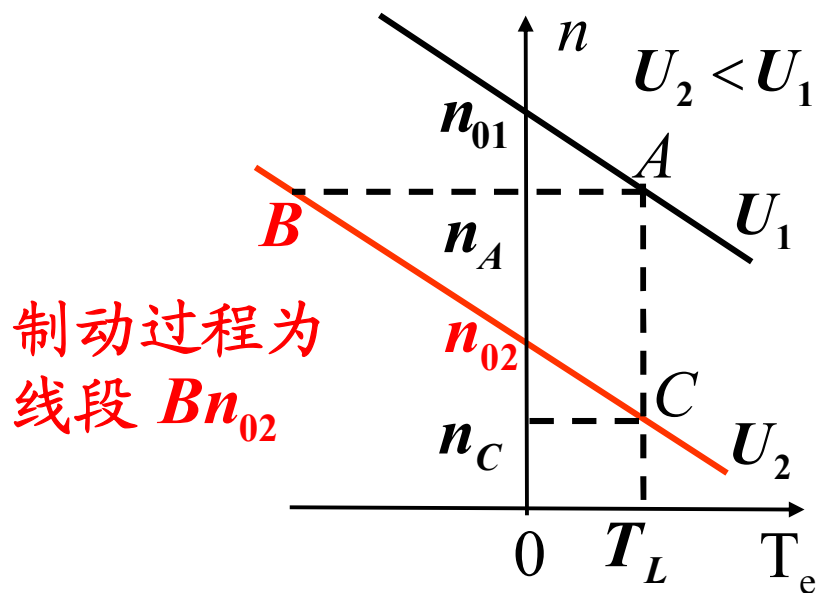
当电车上坡时，运行转速可能超过理想空载转速，进入第二象限



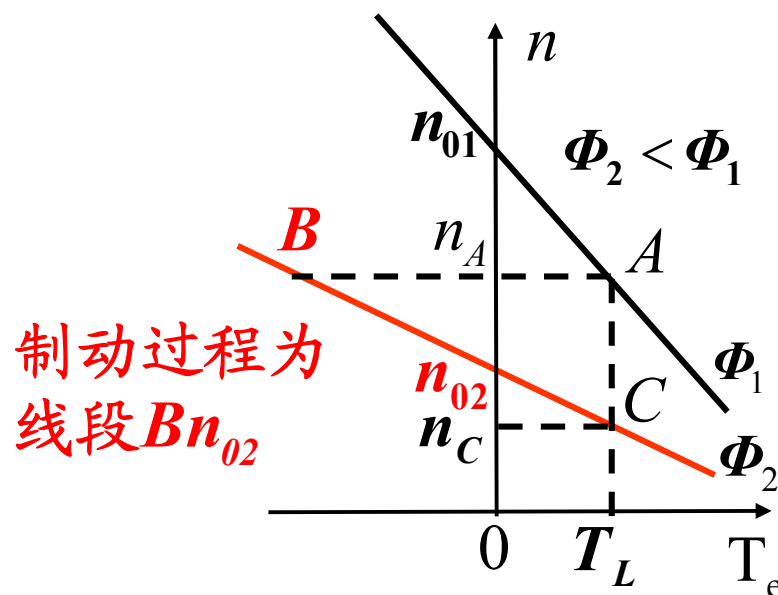
电压反接制动带位能负载进入第四象限

发生在动态过程中的回馈制动过程有以下两种情况:

1、降压调速时产生的回馈制动

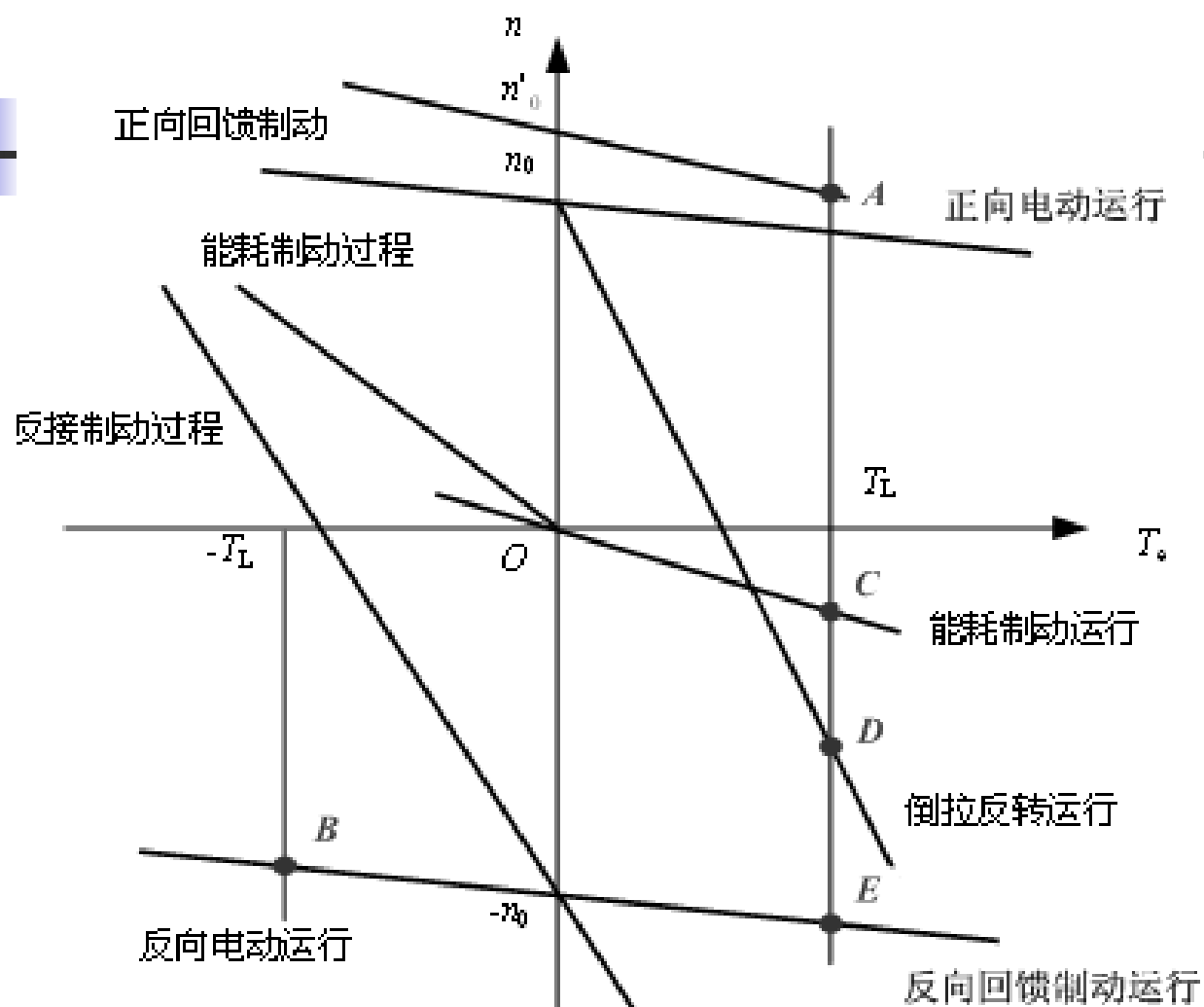
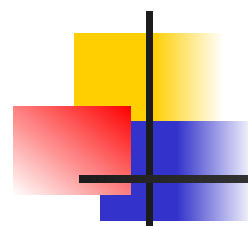


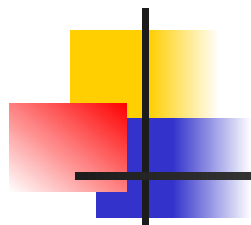
2、增磁调速时产生的回馈制动



回馈制动时由于有功率回馈到电网，因此与能耗和反接制动相比，回馈制动是比较经济的。

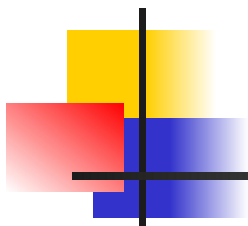
## 2.5.4 他励直流电动机的四象限运行





功率关系如下:

运行状态	$P_1$	$P_{cua}$	$P_{em}$	$p_0$	$P_2$
	$UI_a = I_a^2(R_a + R) + E_a I_a$				
	$T_e \Omega = T_0 \Omega + T_2 \Omega$				
电动运行	+	+	+	+	+
能耗制动	0	+	-	+	-
反接制动	+	+	-	+	-
回馈制动	-	+	-	+	-



**案例分析** 一台他励直流电动机额定数据为： $P_N=29\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=76\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ， $R_a=0.39\Omega$ 。试求：

- (1) 电动机以 $700\text{ r/min}$ 转速提升额定负载时应串入的电阻值；
- (2) 可采用哪些方法使所带位能性负载 $T_L=0.8T_N$ 以 $500\text{r/min}$ 转速下放；各种方法电枢应串入的电阻值；
- (3) 在以 $500\text{r/min}$ 转速提升位能性负载 $T_L=0.8T_N$ 时，突将电枢反接，并使电流不超过 $I_N$ ，求最后稳定下降转速。

**例2-6** 他励直流电动机:  $P_N=22\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=116\text{A}$ ,  
 $n_N=1500\text{r/min}$ ,  $R_a=0.175\ \Omega$ ,  $K_e\Phi=0.133$ 。

电动机在固有特性上做回馈制动放下重物,  $I_a=100\text{A}$ , 试求重物放下时电动机的转速。

**解:** 设电动机提升重物时, 转向为正, 则下放重物时, 转向为负, 电动机属于回馈制动运行状态, 反转回馈制动的机械特性为

$$-n = -n_0 - \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_a$$

将有关数据代入得  $-n = -1654 - \frac{0.175}{0.133} \times 100 = -1785.6\text{r/min}$

所以放下重物时电动机的转速为  $1785.6\text{r/min}$



## 2.6 他励直流电动机的调速

为了提高生产率和满足生产工艺的要求，生产机械往往需要在不同速度下运行。

例如，车床切削工件时，精加工用高速，粗加工用低速；轧钢机在轧制不同钢种和不同规格的钢材时，须用不同的轧制速度。

这些事例说明，生产机械的工作速度需要根据工艺要求可以调节。所以，调速就是根据生产机械工艺要求人为地改变速度。

**注意：**调速和由于负载变化而引起的速度变化是截然不同的概念。



# 他励直流电动机的调速

■ 本节介绍直流电动机的电气调速方法、调速方式、调速的性能指标。

## 他励直流电动机的调速方法

- 由他励直流电动机的机械特性：

$$n = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi}$$

可以通过三种方法对电机进行电气调速——

电枢回路串电阻调速、降电压调速、减弱磁通调速。



## 2.6.1 调速的性能指标

---

- 调速的性能指标是决定电动机选择哪一种调速方法的依据，主要的性能指标有几方面：

调速范围与静差率

调速的平滑性

调速的经济性

# 1、调速范围

- 调速范围是指电动机在额定负载转矩调速时，其最高转速与最低转速之比，用D表示。

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \Big|_{T=T_N}$$

注意: 最高转速受电动机的换向及机械强度限制，最低转速受生产机械对转速相对稳定性要求（即静差率要求）的限制。

不同的生产机械要求调速范围的大小不同。例如热连轧机一般要求 $D=3—10$ ，车床主轴要求 $D=20—50$ ，而精密镗床的进给机构要求 $D>1000$ 。有的精密机床要求其调速范围达到10000以上。

## 2、静差率

■ 静差率或称转速变化率，是指电动机由理想空载到额定负载时转速的变化率。

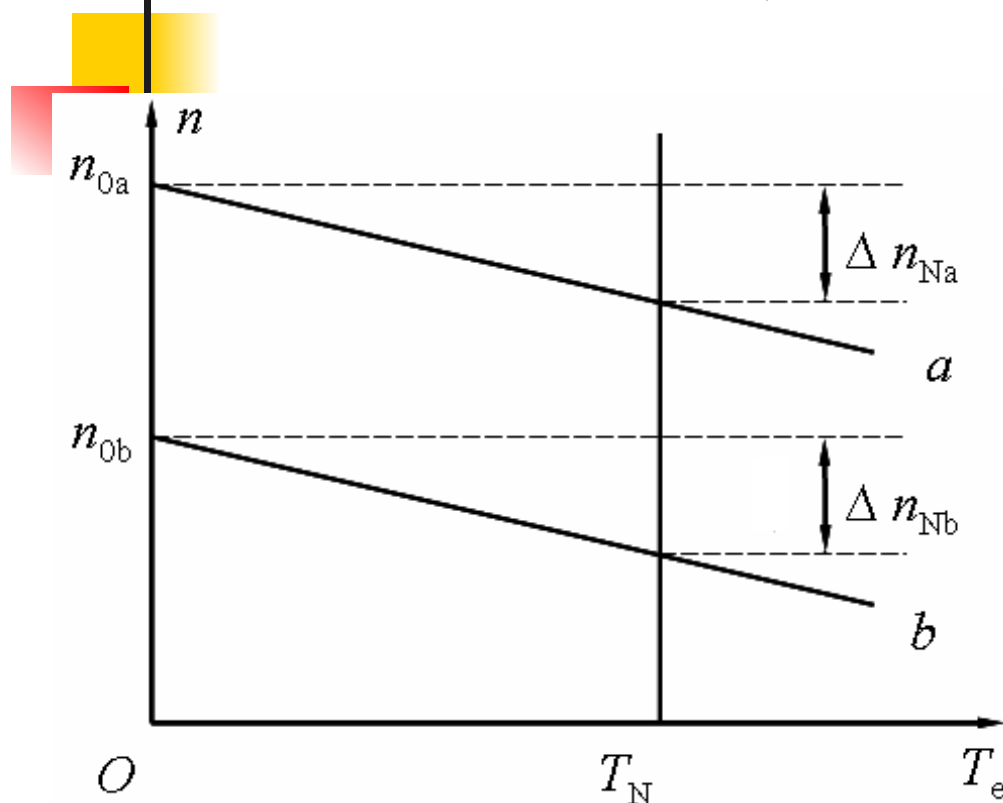
$$s = \frac{\Delta n}{n_0} \bigg|_{T=T_N} = \frac{n_0 - n}{n_0} \bigg|_{T=T_N}$$

**注意：**静差率越小，转速的相对稳定性越好，负载波动时，转速变化也越小。

静差率是根据电动机的最低转速下来定义的。不同的生产机械，对静差率的要求也不同，一般设备  $s < 30\% \sim 50\%$ ，而精度高的造纸机则要求  $s \leq 0.1\%$ 。

调速范围和静差率之间的关系：

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



静差率限制了调速的最低转速。两个性能指标相互制约，**但应先满足静差率要求才能讨论调速范围。**

### 3、调速的平滑性

在一定调速范围内，调速的级数越多就认为调速越平滑，两个相邻转速 $n_i$ 与 $n_{i-1}$ 之比称为平滑系数 $K$ 来衡量，即

$$K = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

$K$ 值越接近1，调速的平滑性越好。在一定的调速范围内，可能得到的调节转速的级数越多，则调速的平滑性越好。 $K=1$ 时，称为无级调速，即转速是连续可调的。

### 4、调速的经济性

经济性包含两个方面的内容，一是指所需的设备投资和调速过程中的能量损耗，另一方面则指电动机在调速时能否得到充分利用。

**例2-7** 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 $\Delta n_N=115\text{r/min}$ ，若要求静差率为30%，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：**  $s=30\%$ 时

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

$s=20\%$

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

$D=10$

$$s = \frac{D \Delta n_N}{n_N + D \Delta n_N} = \frac{10 \times 115}{1430 + 10 \times 115} = 0.446 = 44.6\%$$

## 2.6.2 他励直流电动机的调速方法

根据直流电动机机械特性方程式，可知：

$$n = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi}$$

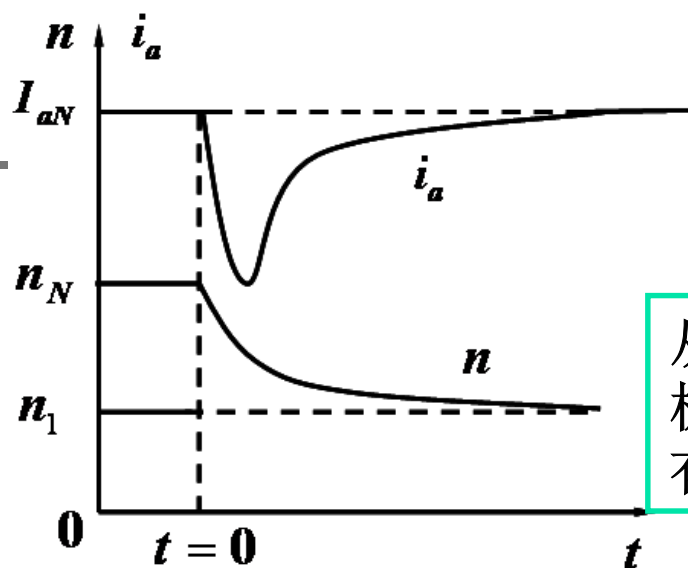
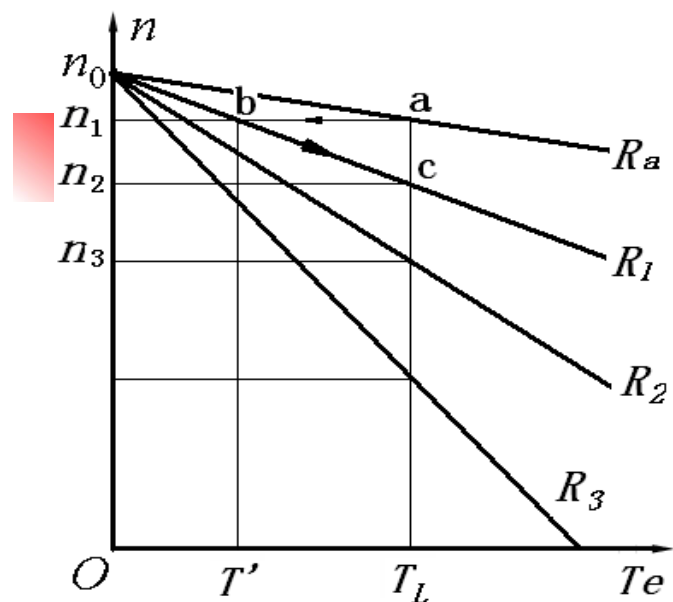
在电流 $I_a$ 不变时，即在一定负载下，只要改变电枢电压 $U$ 、串入电枢回路的电阻 $R$ 、主磁通 $\Phi$ 三个量中的任一个，都会引起转速的变化，因此，他励直流电动机有三种调速方法：

串电阻调速、调压调速、弱磁调速。



# 1 电枢串联电阻调速

$$U = U_N, \Phi = \Phi_N$$



从基速向下调速；  
机械特性会变软；  
有级调速。

外串电阻 $R_c$ 只能分段调节，所以这种调速方法不能实现无级调速。

**优点：**设备简单，初投资少。

**缺点：**①属于有级调速，且级数有限，平滑性差；

②轻载时，调速范围小；

③低速时， $\eta$ 低，电能损耗大；

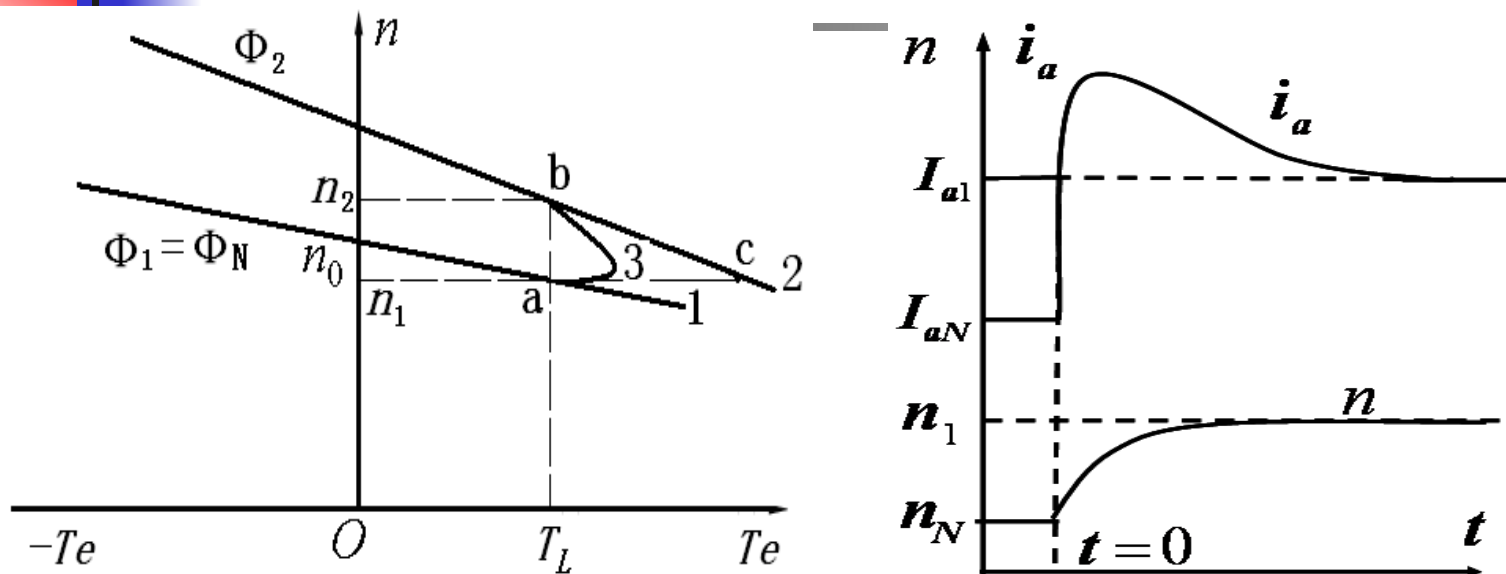
④低速运行时，转速的稳定性差。

**适合场合：**用于各种对调速性能要求不高的设备上。

## 2 弱磁调速

$$U = U_N, R = R_a$$

因为改变磁通只能从额定磁通往下调，故称为弱磁调速。



从基速向上调速；机械特性会变软；无级调速。

对于恒转矩负载，调速前后电动机的电磁转矩相等。  
因为  $\Phi_2 < \Phi_1$ ，所以调速后稳定的电枢电流要升高。

**优点：**①在电流较小的励磁电路中进行调节、控制方便，功率损耗小。

②用于调速的变阻器功率小，可以较平滑地调节转速，实现无级调速。

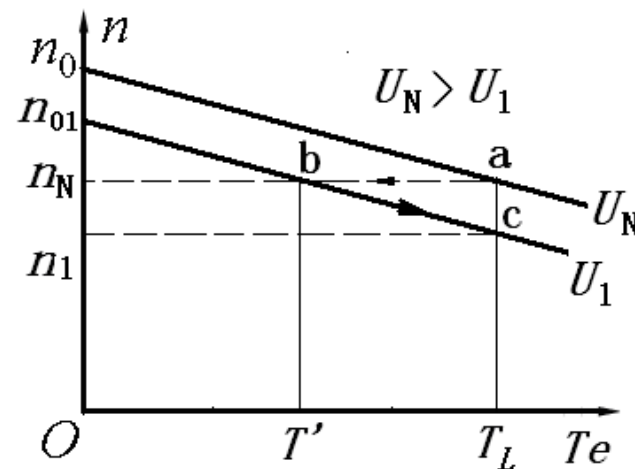
**缺点：**调速范围较小。由于弱磁调速只能升速，而 $n_{max}$ 受电机本身换向条件和机械强度的限制，一般只能调到额定转速的1.2~1.5倍。

在实际生产中，通常把**降压调速和弱磁调速配合起来**使用，以电动机的额定转速作为基速，在基速以下调压，在基速以上调磁，以实现双向调速，**扩大调节范围**。

### 3 降电压调速

$$R = R_a, \Phi = \Phi_N$$

直流电动机的工作电压不能大于额定电压，因此电枢电压只能向小于额定电压的方向改变，降低电压后的人为机械特性与固有机械特性平行，硬度不变。



降低电源电压调速需要独立可调的直流电源。

**优点：**

- ①电源电压能连续调节，调速的平滑性好，可达到无级调速；
- ②无论是高速还是低速，机械特性硬度不变，因此低速时稳定性好；
- ③低速时电能损耗小，效率高。

**缺点：**设备的初投资大。

**适用场合：**降压调速是一种性能优越的调速方法，广泛应用于对调速性能要求较高的设备上。

**例2-8** 一台他励直流电动机，铭牌数据为

$$P_N = 22\text{kW}, U_N = 220\text{V}, I_a = 115\text{A}, n_N = 1500\text{r/min}, R_a = 0.1\Omega$$

该电机拖动额定负载运行，要求把转速降低到 $1000\text{r/min}$ ，不计电动机的空载转矩 $T_0$ ，试计算：

- (1) 用电枢串电阻调速时需串入的电阻值，这时的静差率是多少？
- (2) 用降压调速时需把电源电压降低到多少伏？此时的静差率是多少？
- (3) 上述两种情况下拖动系统输入的电功率和输出的机械功率是多少？

**解：**先计算 $K\Phi$ 、 $n_0$ 及 $\Delta n_N$ 。

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1583\text{r/min}$$

$$K_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139$$

$$\Delta n_N = n_0 - n_N = 1583 - 1500 = 83\text{r/min}$$

**(1) 电枢串电阻调速：**

拖动额定负载运行时  $T = T_L = T_N$        $n_{\min} = 1000\text{r/min}$

由转速表达式

$$n = \frac{U_N - (R_a + R_n)I_N}{K_e \Phi_N}$$

可知串入的电阻：

$$R_n = \frac{U_N - K_e \Phi_N n_{\min}}{I_N} - R_a = \frac{220 - 0.139 \times 1000}{115} - 0.1 = 0.604\Omega$$

静差率：

$$\delta = \frac{n_0 - n_{\min}}{n_0} \times 100\% = \frac{1583 - 1000}{1583} \times 100\% = 36.8\%$$

## (2) 降压调速:

降压时最低转速  $n_{\min} = 1000 \text{ r/min}$ ,  $I_a = I_N$ , 则电源电压最低为:

$$U = K_e \Phi_N n_{\min} + R_a I_N = 0.139 \times 1000 + 0.1 \times 115 = 150.5 \text{ V}$$

$$n_{01} = \frac{U_1}{K_e \Phi_N} = \frac{150.5}{0.139} = 1083 \text{ r/min}$$

$$\Delta n = \Delta n_N \quad \text{则静差率: } \delta = \frac{\Delta n}{n_{01}} 100\% = \frac{83}{1083} 100\% = 7.7\%$$

## (3) 输入、输出功率的计算:

串电阻调速时系统输入的电功率:  $P_1 = U_N I_N = 220 \times 115 = 25300 = 25.3 \text{ kW}$

$$\text{输出转矩: } T_2 = T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{22}{1500} = 140.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电枢串电阻调速与降低电压调速时系统输出的机械功率相同, 即:

$$P_2 = \frac{T_2 n}{9550} = \frac{140.1 \times 1000}{9550} = 14.67 \text{ kW}$$

降压调速时系统输入的电功率:  $P_1 = U_1 I_N = 150.5 \times 115 = 17380 = 17.38 \text{ kW}$

**案例分析** 一台他励直流电动机，铭牌数据为

$$P_N = 60\text{kW}, U_N = 220\text{V}, I_a = 350\text{A}, n_N = 1000\text{r/min}, R_a = 0.037\Omega$$

生产机械要求静差率,  $\delta \leq 20\%$ , 调速范围  $D=4$ , 最高转速  $n_{\max}=1000\text{r/min}$ , 试问采用哪种调速方法能满足要求?

解: 计算电动机的  $K_e\Phi$ :

$$K_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 350 \times 0.037}{1000} = 0.207$$

计算理想空载转速:

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e\Phi_N} = \frac{220}{0.207} = 1063\text{r/min}$$

由于  $n_{\max}=n_N$ , 所以只能从上向下调速, 故有两种方法可供选择:

### (1) 电枢串电阻调速

电枢串电阻调速时,  $n_0$  保持不变, 静差率  $\delta = \frac{n_0 - n}{n_0}$ , 若想保持  $\delta \leq 20\%$ ,

则最低转速:  $n_{\min} = n_0(1 - \delta) = 1063 \times (1 - 0.2) = 850\text{r/min}$

调速范围:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000}{850} = 1.176$$

由此可知, 采用电枢串电阻调速方法不能满足  $D=4$  的要求。

## (2) 降压调速

降压调速时，理想空载转速发生变化，额定转速降不变

$$\Delta n_N = n_0 - n_N = 1063 - 1000 = 63 r / \min$$

若想保持  $\delta \leq 20\%$ ，则最低理想空载转速为

$$n_{0\min} = \frac{\Delta n_N}{\delta} = \frac{63}{0.2} = 315 r / \min$$

对应的最低转速：

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N = 315 - 63 = 252 r / \min$$

此时调速范围：

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000}{252} = 3.968 \approx 4$$

由此可知，采用降压调速方法可满足调速性能指标的要求。





## 2.7 直流调速方式与负载的配合

- “调速方式”问题讨论一种具体的调速方法是否与负载相匹配的问题，以便在调速过程中，电动机都能得到充分的利用。

电动机在长期运行的条件下，电枢电流规定的上限值就是电枢额定电流。充分利用电动机，就是让它工作在电枢电流为额定值的情况下。

## 2.7.1 电动机的容许输出

电动机在长期运行时输出功率和最大转矩都受一定条件的限制，即不能超过其容许输出值。所谓容许输出，指电动机在某一转速下长期可靠工作时所能输出的最大转矩和功率。电动机的输入电功率要大于电动机轴上输出的电磁功率。

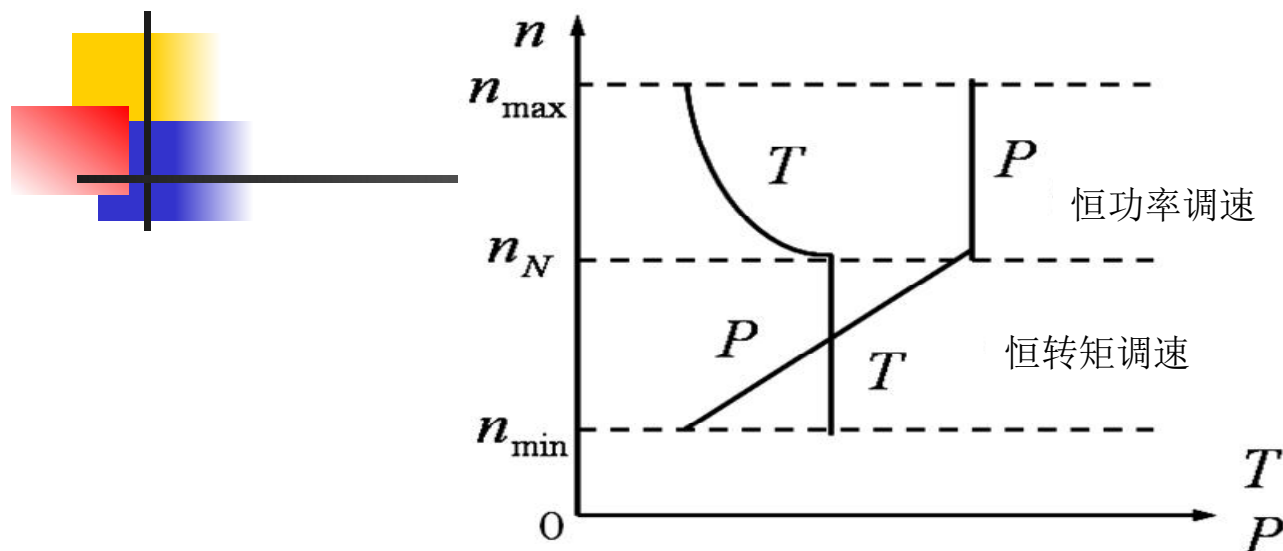
最充分利用电动机，就是指在一定的转速下电动机的实际输出转矩和功率达到它的容许值，即让它的电枢电流 $I_a$ 达到额定值 $I_N$ 。

当电动机调速时，在不同的转速下，电枢电流能否总保持为额定值，即电动机能否在不同转速下都得到充分利用，这个问题与调速方式和负载类型的配合有关。

## 2.7.2 他励直流电动机调速方式的分类

恒转矩调速

恒功率调速



(1) 他励直流电动机电枢串电阻调速和降压调速时，电动机的容许输出功率与转速成正比，而容许输出转矩为恒值，即恒转矩调速。电机得到充分利用，容许输出转矩和功率分别为

$$T \approx T_e = K_m \Phi_N I_N = \text{常数}$$

$$P = \frac{Tn}{9550} = C_1 n$$

(2) 他励直流电动机减弱磁通调速时，电动机的容许输出转矩与转速成反比，而容许输出功率为恒值，即恒功率调速。

$$T \approx T_{em} = K_m \Phi I_N = K_m \frac{U_N - I_N R_a}{K_e n} I_N = \frac{C_2}{n}$$

$$P = \frac{Tn}{9550} = \frac{C_2}{n} \frac{n}{9550} = \frac{C_2}{9550}$$



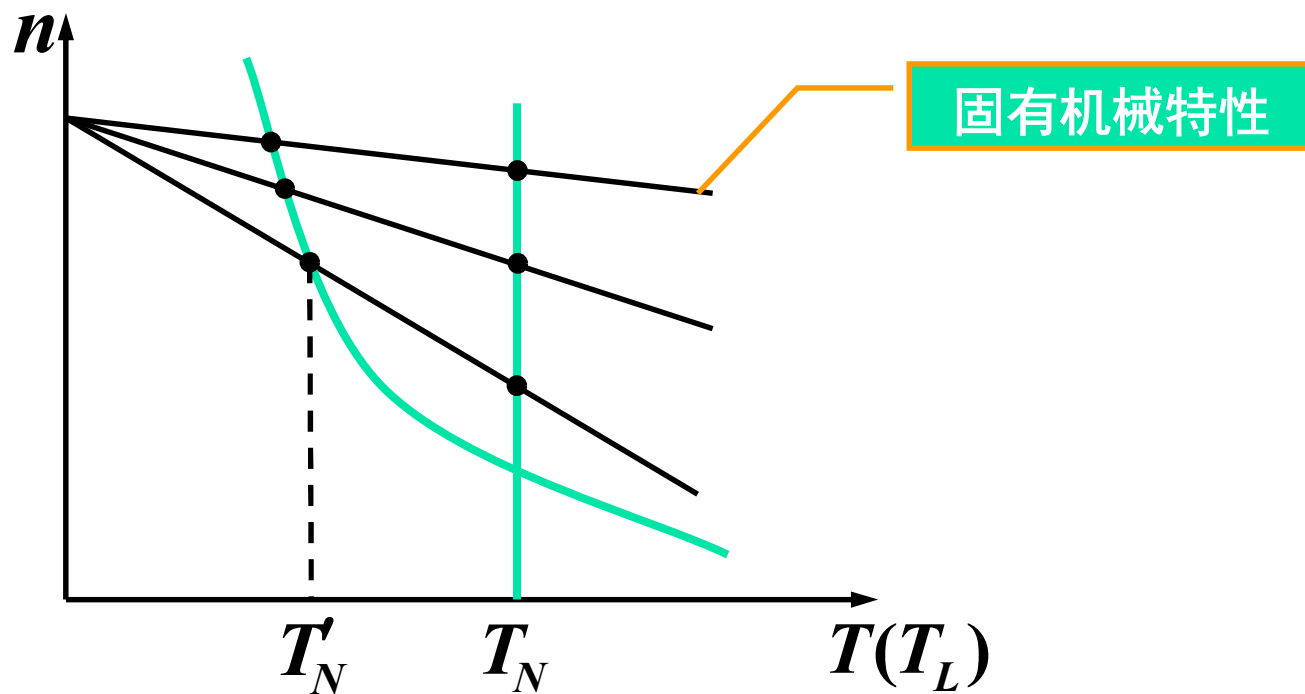
## (1) 恒转矩调速方式

---

- 在某种调速方法中，保持电枢电流为额定值不变，若电动机电磁转矩恒定不变，则称这种调速方法属于恒转矩调速方式。
- 电枢回路串电阻和降电压的调速方法属于恒转矩的调速方式。

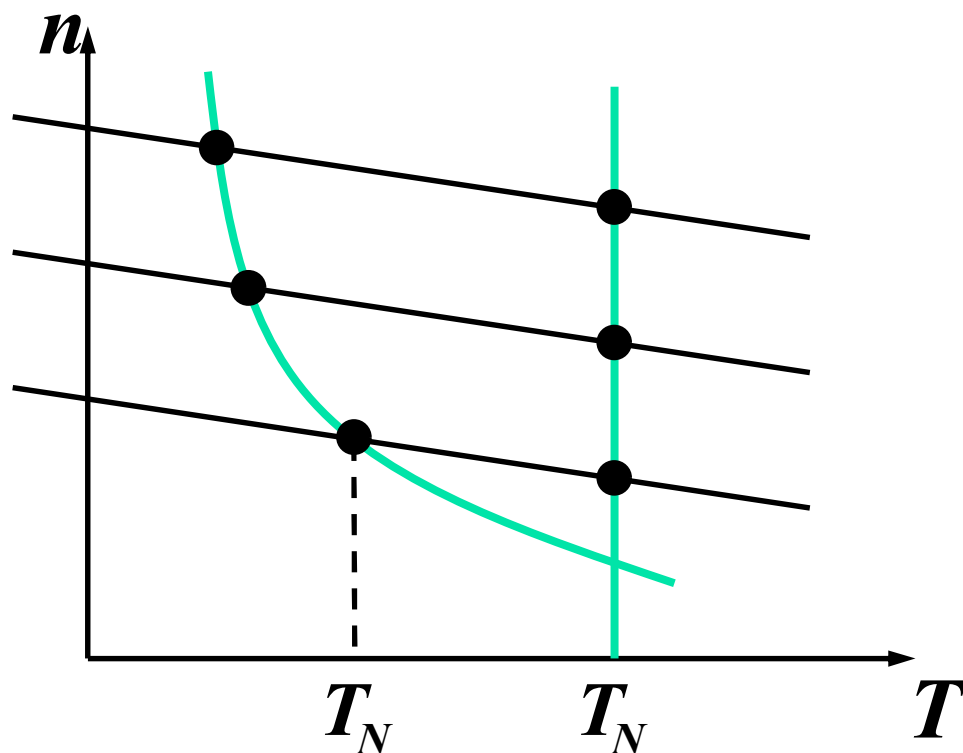
## 电枢回路串电阻调速

当 $I_a$ 为额定值时,  $T = K_m \Phi_N I_a = \text{常数(额定值)}$



## 降电压调速

当 $I_a$ 为额定值时,  $T = K_m \Phi_N I_a = \text{常数(额定值)}$





## (2) 恒功率调速方式:

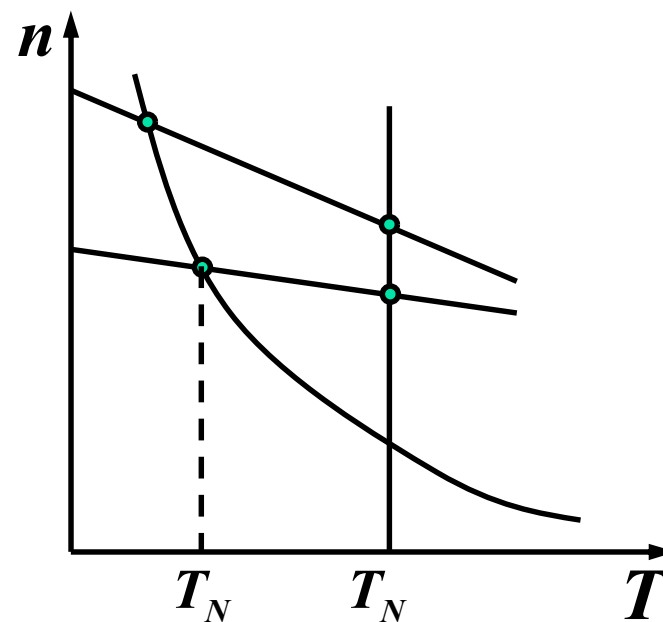
---

- 在某种调速方法中，保持电枢电流为额定值不变，若电动机电磁功率恒定不变，则称这种调速方法属于恒功率调速方式。
- 弱磁升速属于恒功率调速方式。

## 弱磁升速

当 $I_a$ 为额定值时,  $T = K_m \Phi I_a \neq \text{常数(额定值)}$

$$\begin{aligned} P_{em} &= T_e \Omega = K_m \Phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60} \\ &= 9.55 K_e \Phi I_a \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \left( \frac{U_N - I_a R_a}{K_e \Phi} \right) \\ &= 9.55 \frac{2\pi}{60} \cdot (U_N I_a - I_a^2 R_a) \\ &= U_N I_a - I_a^2 R_a = \text{常数} \end{aligned}$$





## 三种调速方法调速性能的比较

调速方法	电枢串电阻	降电压	减弱磁通
调速方向	向下调	向下调	向上调
$\delta \leq 50\%$ 调速范围	约 <b>2</b>	约 <b>10~12</b>	<b>1.2~2; 3~4</b> (与 $\delta$ 无关)
一定调速范 围内转速的 稳定性	差	好	较好
负载能力	恒转距	恒转距	恒功率
调速平滑性	有级调速	无级调速	无级调速
设备初投资	少	多	较多
电能损耗	多	较少	少

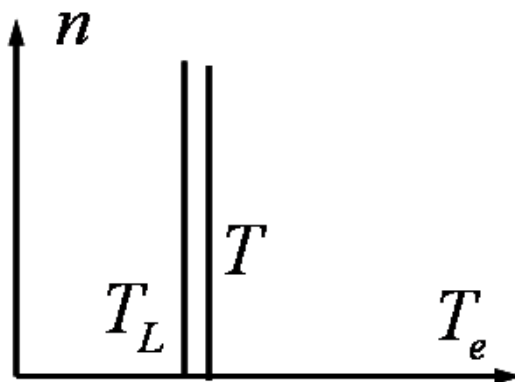
### 2.7.3 负载类型与电动机调速方式的匹配

不同的负载类型需要采用不同的调速方式与之配合，才使电动机既满足负载的要求，又使电动机得到充分利用，根据生产过程中出现的一般负载类型，我们分别讨论负载类型与电动机调速方式的匹配情况。

- 恒功率调速方式与恒功率负载相匹配；
- 恒转矩调速方式与恒转矩负载相匹配。
- 泵类负载无论采用哪种调速方法都不能达到匹配。

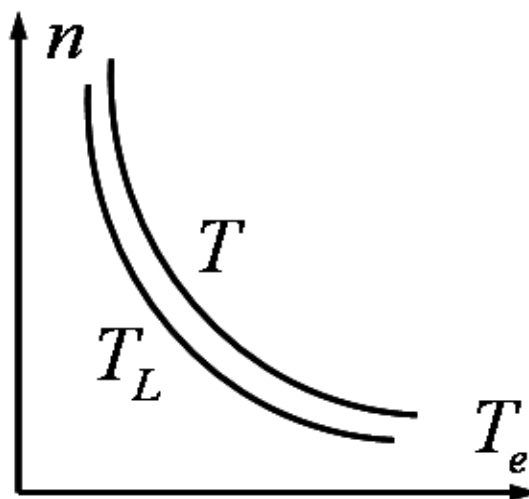
## 1、恒转矩负载配恒转矩调速方式

电动机采用恒转矩调速方式时，如果拖动恒转矩负载运行，并且使电动机电磁转矩 $T$ 与负载转矩 $T_L$ 均为常数，只要选择 $T=T_L$ ，那么不论运行在什么转速上，电动机的电枢电流 $I_a=I_N$ 不变，输出功率 $P=P_L$ ，电动机得到了充分利用。我们称这种恒转矩调速方式与恒转矩负载性质的配合关系为匹配。这是一种理想的配合，转速是从额定转速向下调，所以额定转速为系统的最高转速。



## 2、恒功率负载配恒功率调速方式

电动机采用恒功率调速方式时，如果拖动恒功率负载运行，只要使电动机电磁功率  $P=T_e\Omega$  不变，那么不论运行在什么转速上，电枢电流  $I_a=I_N$  也不变，电动机被充分利用。恒功率调速方式与恒功率负载相配合，电动机既满足了负载要求，又得到了充分利用，也可以作到匹配。这也是一种理想的配合，转速是从额定转速向上调，所以额定转速为系统的最低转速。

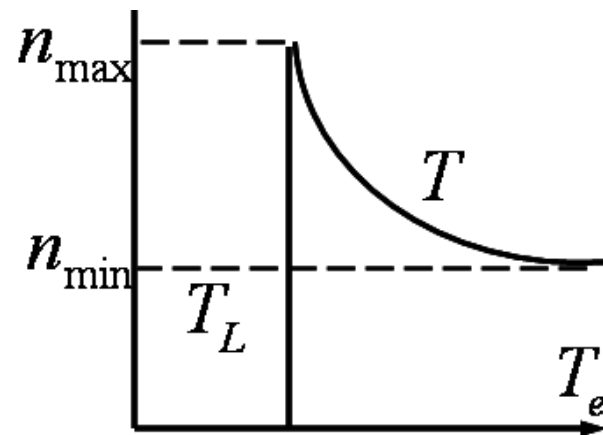


### 3、恒转矩负载配恒功率调速方式

使系统在高速运行时负载转矩等于电动机允许转矩，这时电动机电枢电流则等于额定电流  $I_N$ ，电动机得到充分利用。当系统运行到较低速 ( $n > n_N$ )，由于负载是恒转矩性质的，电动机的电磁转矩也不变，但是低速时的磁通  $\Phi$  比高速时数值要大， $T = C_T \Phi I_a$ ，因此电枢电流  $I_a$  变小了， $I_a < I_N$ ，电动机没能得到充分利用。这种调速方式与负载性质不匹配。

拖动恒转矩负载的电动机，若采用恒功率调速方式，只能按高速运行转速选配合适的电动机，而低速时电动机容量则有所浪费。

最低转速时，电动机的实际输出功率（负载功率）只是电动机额定功率的  $1/D$ （ $D$  为调速范围）。

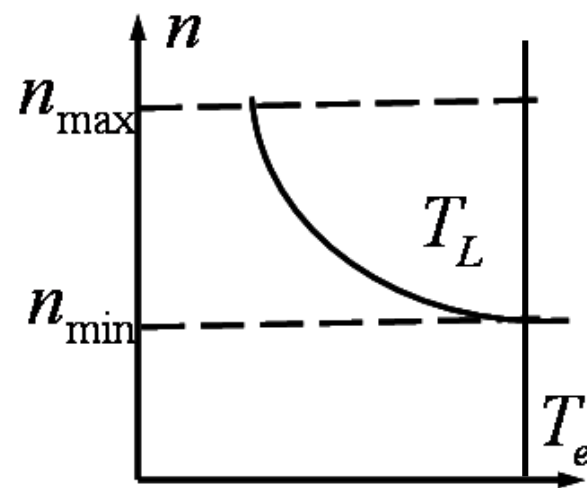


$$P_N = P_{L\max} = \frac{T_L n_{\max}}{9550} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \frac{T_L n_{\min}}{9550} = D P_{L\min}$$

## 4、恒功率负载配恒转矩调速方式

使电动机低速运行时，负载转矩等于电动机额定转矩，电动机的电流等于额定电流，电动机利用是充分的。但是当系统运行在高速时，由于负载是恒功率的，高速时转矩小，低于额定转矩，因此电动机电磁转矩也低于额定转矩，而恒转矩调速方式时磁通为 $\Phi_N$ 不变， $T=C_T\Phi_N I_a$ ， $T$ 减小， $I_a$ 也必然减小，结果 $I_a < I_N$ ，电动机的利用则不充分了。电动机调速方式与所拖动的负载不匹配。

拖动恒功率负载时，恒转矩调速方式的电动机，只能按低速运行转速选配合适的电动机，作到 $T=T_N$ ，而高速时电动机容量则有所浪费。这种配合，电动机的实际输出功率（恒定的负载功率）只是电动机额定功率的 $1/D$ （ $D$ 为调速范围）。



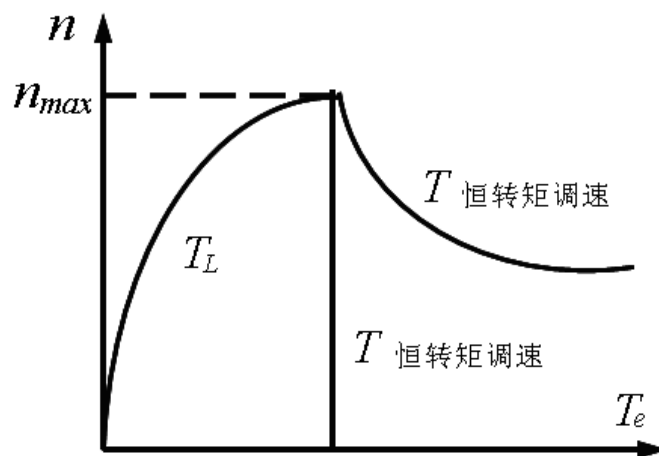
$$P_N = \frac{T_N n_N}{9550} = \frac{T_{L\max} n_{\max}}{9550} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \frac{T_{L\max} n_{\min}}{9550} = D P_L$$

## 5、风机类负载与两种调速方式的配合

对于风机类负载，既非恒转矩类型，也非恒功率类型，无论采用恒转矩调速方式或恒功率调速方式的电动机，拖动泵类负载时，都不能做到调速方式与负载性质匹配。由于负载转矩随转速的升高而增大，为了使电动机在最高转速时（所需的转矩最大）能满足负载的需要，应使

$$T(n=n_{\max})=T_L(n=n_{\max})$$

只有在最高转速时，电动机才被充分利用。恒转矩调速方式所造成的电动机容量浪费比恒功率调速方式小一些。





调速方式问题归纳起来主要是：

(1) 恒转矩调速方式与恒功率调速方式都是用来表征电动机采用某种调速方法时的负载能力，不是指电动机的实际负载。

(2) 应使电动机的调速方式与其实负载匹配，电动机才可以得到充分利用。从理论上讲，匹配时，可以让电动机的额定转矩或额定功率与负载实际转矩与功率相等，但实际上，即使电动机电枢电流尽量接近额定值，由于电动机容量分成若干等级，有时只能尽量接近而不能相等。

(3) 对于泵与风机类负载，三种调速方式都不十分合适，但采用电枢串电阻和降压调速比弱磁调速合适一些。



**例2-9** 某他励直流电动机，额定功率 $P_N=17\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=220\text{V}$ ，额定电流 $I_N=90\text{A}$ ，额定转速 $n_N=1500\text{r/min}$ ，额定励磁电压 $U_f=110\text{V}$ 。

该电动机在额定电压额定磁通时拖动某负载运行的转速为 $n=1550\text{r/min}$ ，当负载要求向下调速，最低转速 $n_{\min}=600\text{r/min}$ ，现采用降压调速方法，请计算下面两种情况下调速时电枢电流的变化范围。

- (1) 若该负载为恒转矩负载；
- (2) 若该负载为恒功率负载。

**解：**额定电枢感应电动势取为 $E_N=0.94U_N$ 进行计算。

电枢电阻  $R_a = \frac{U_N - E_N}{I_N} = \frac{220 \times (1 - 0.94)}{90} = 0.14667\Omega$

额定电压运行时电枢的感应电动势  $E = \frac{n}{n_N} E_{aN} = \frac{1550}{1500} \times 0.94 \times 220 = 213.69V$

额定电压运行时的电枢电流  $I_a = \frac{U_N - E}{R_a} = \frac{220 - 213.69}{0.14667} = 43.02A$

(1) 若负载为恒转矩时

降压调速时 $\Phi = \Phi_N$ ， $T = T_L = K_T \Phi I_a = \text{常数}$ ，因此  $I_a = 43.02A$

(2) 若负载为恒功率时

负载的功率为  $P = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60}$  式中 $T_L$ 为额定电压转速为 $n$ 时负载转矩的值，

降低电源电压降速后的负载功率为  $P = T'_L \Omega_{\min} = T'_L \frac{2\pi n_{\min}}{60} = T_L \frac{2\pi n}{60}$

式中 $T'_L$ 为降压调速转速为 $n_{\min}$ 时负载转矩的值。

比较上面两式，得到  $T'_L = \frac{n}{n_{\min}} T_L$

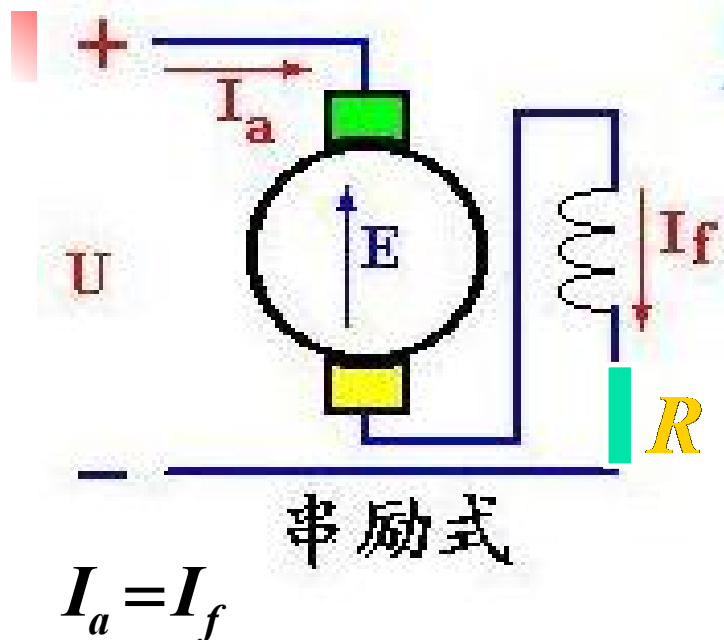
降压调速时 $\Phi = \Phi_N$ ， $T = T_L = K_m \Phi_N I_a$ ，因此低速时电枢电流加大，对应 $n_{\min}$ 的电枢电流 $I_{a\max}$ 为

$$I_{a\max} = \frac{n}{n_{\min}} I_a = \frac{1550}{600} \times 43.02 = 111.14A$$

因此，电流变化范围是43.02A--111.14A，但是低速时已经超过了 $I_N=90A$ ，不能在 $n_{\min}$ 长期运行，说明降低电源电压调速的方法不适合带恒功率负载。

## 2.8 串励和复励直流电动机

### 1 串励直流电动机的机械特性



若电动机在磁通未饱和状态，每极磁通应与电路电流成线性正比，即

$$\Phi = K_f I_f = K_f I_a$$

当电动机带负载运行时，电枢电流是变化的，这将引起串励电动机磁通 $\Phi$ 的变化，此时串励电动机的转速公式为

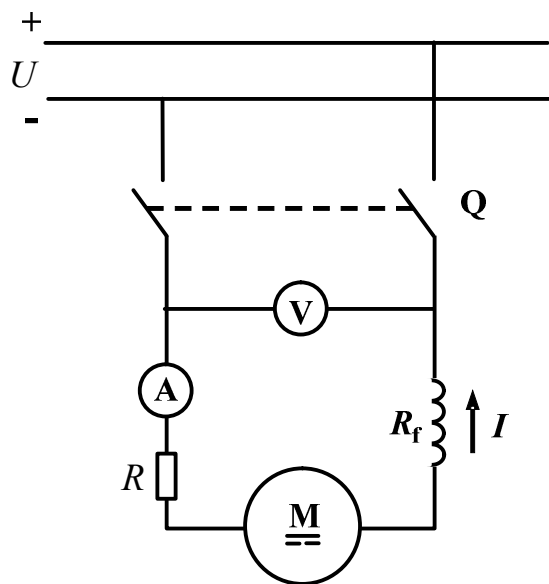
$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_f + R)}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_{es} I_a} - \frac{R_{as}}{K_{es}}$$

电磁转矩公式为

$$T_e = K_m \Phi I_a = K_m K_f I_f I_a = K_{ms} I_a^2$$

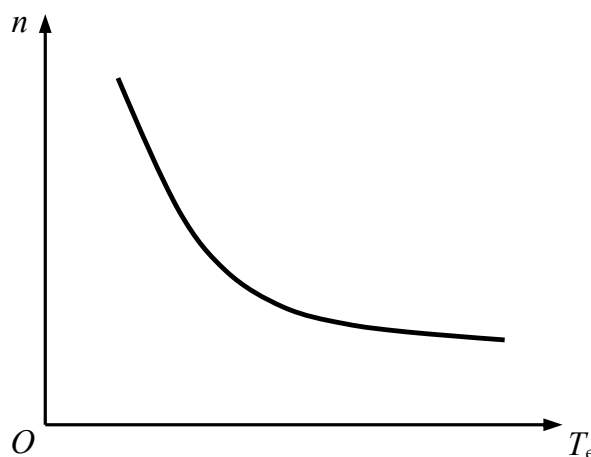
机械特性公式为

$$n = \frac{\sqrt{K_{ms}}}{K_{es}} \frac{U}{\sqrt{T_e}} - \frac{R_{as}}{K_{es}}$$



## 电动机磁通不饱和状态

$$n = \frac{\sqrt{K_{ms}}}{K_{es}} \frac{U}{\sqrt{T_e}} - \frac{R_{as}}{K_{es}}$$



由于转速与转矩的开方成反比，转矩增大，转速迅速减小；而转矩减小，则转速很高。理想状态下  $T_e=0$ ， $n_0 \rightarrow \infty$ 。特性曲线是一条**非线性的软特性**。一般串励电动机不允许空载运行。

若电动机磁通处于饱和状态，其磁通  $\Phi$  为额定值常数，电磁转矩为

$$T_e = K_m \Phi_N I_a \propto I_a$$

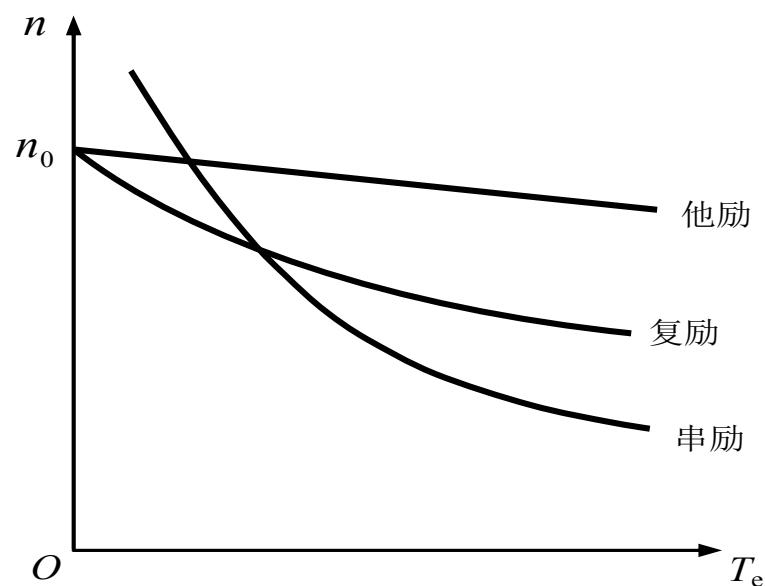
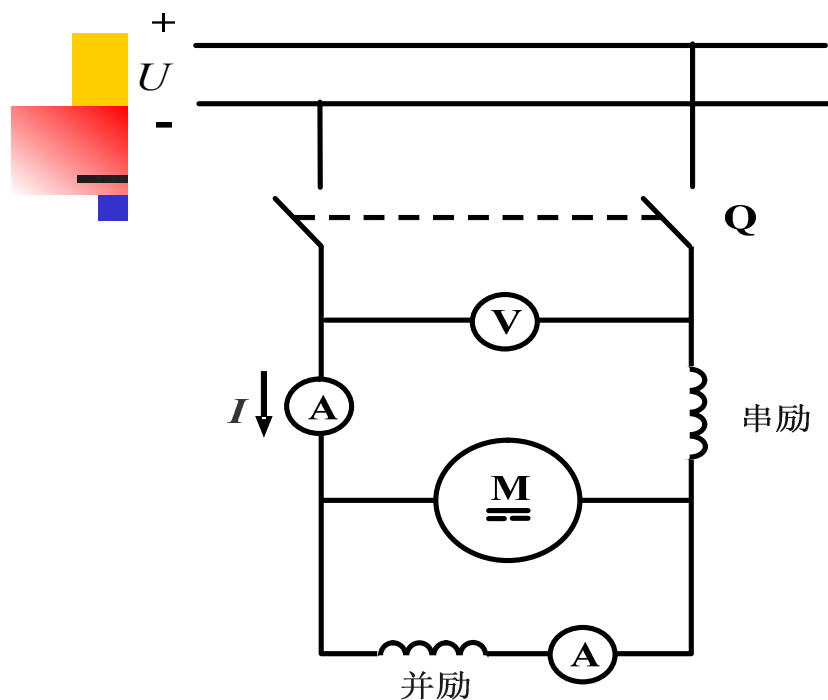


## 机械特性的特点：

---

- (1) 是一条非线性的软特性：
- (2) 串励直流电动机不允许空载运行；
- (3) 电磁转矩与电枢电流的平方成正比，因此起动转矩大，过载能力强。
- (4) 若磁路饱和，串励电动机的机械特性接近于他励直流电动机。

## 2 复励直流电动机的机械特性



- 一般来说，都采用积复励的电动机。
- 积复励直流电动机的机械特性介于并励（他励）与串励直流电动机机械特性之间。

## 2.9 电力拖动系统的过渡过程

电力拖动系统中，电动机的工作状态：起动、调速、制动。不同生产机械对拖动系统的过渡过程有不同的要求。经常起制动、正反转的机械，如可逆轧钢机、刨床工作台，要求过渡时间短，提高生产率；但是造纸机、印刷机这类机械则要求过渡过程中加减速度有一定限度；而电梯、矿井提升结构、地铁电车又要求较小的加减速度。

以电机拖动系统的运动方程式为基础，应用数学解析方法，研究直流电机拖动的动态过程，掌握其动态特性。

(1) 分析过渡过程中转速、转矩电流的变化规律及其定量计算问题。

(2) 缩减过渡过程时间，减少过渡过程中的能量损耗，提高劳动生产率。

## 2.9.2 电机拖动系统动态过程的基本概念

### 1. 动态过程的基本概念

系统将从一个稳定工作状态过渡到另一个稳定工作状态，这样的动态运行过程称为过渡过程，即动态过程。

电机拖动系统的过渡过程分为两种：

①**机械的过渡过程**，它只考虑系统的机械惯性对各参量变化过程的影响，而对影响较小的电磁惯性忽略不计。

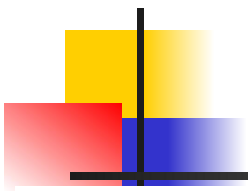
②**电气-机械的过渡过程**，它同时考虑机械特性和电磁惯性的影响。

### 2. 研究动态过程的目的

分析动态过程，掌握系统各参数变化规律，设法缩短过渡过程的时间，探讨减小动态过程损耗的途径，正确选择电动机的容量。



## 2.9.2 电力拖动系统的动态分析

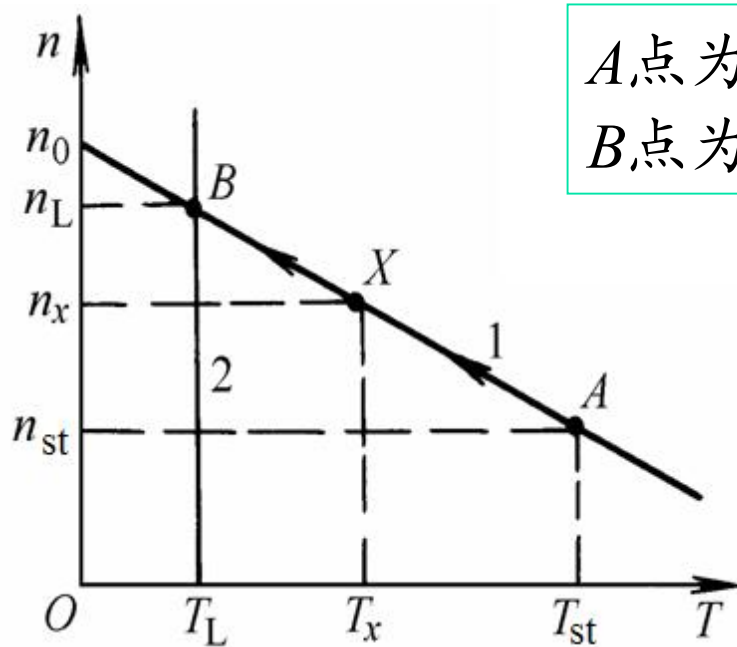


由于多数情况下，机械惯性的影响远大于电磁惯性的影响，为简化分析，略去电磁惯性的影响，只考虑机械惯性对过渡过程的影响。同时假设在过渡过程中：

- (1) 电源电压 $U$ 恒定不变；
- (2) 磁通 $\Phi$ 恒定不变；
- (3) 负载转矩 $T_L$ 保持常数不变。

电力拖动系统的过渡过程是电动机的运行点从过渡过程的起始点开始，沿着电动机的机械特性曲线向稳态点变化的过程。

**起始点**是机械特性上的一个点，对应着过渡过程开始瞬间的转速。**稳态点**是过渡过程结束后的工作点。



$A$ 点为起始点：转速  $n_{st}$ ，电磁转矩  $T_{st}$ ；  
 $B$ 点为稳态点：转速  $n_L$ ，电磁转矩  $T_L$ 。

从 $A$ 点到 $B$ 点沿着曲线进行的  
动态特性分析：

机械特性上 $A \rightarrow B$ 的过渡过程

## 1. 转速 $n$ 的变化规律 $n=f(t)$

已知电力拖动系统的运动方程式为

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

电动机的机械特性方程式为：

$$n = n_0 - \beta T$$

以上两式都表达了系统中电动机的电磁转矩与转速的关系，  
将前式代入后式，得：

$$n = n_0 - \beta \left( T_L + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \right) = n_0 - \beta T_L - \beta \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

式中， $n_0 - \beta T_L$  为过渡过程结束后电动机转速的稳态值 $n_L$ 。

令  $T_m = \beta \frac{GD^2}{375}$ ，因此上式可写成  $n = n_L - T_m \frac{dn}{dt}$  即：  $T_m \frac{dn}{dt} + n = n_L$

式中， $n_L$ —稳态点的转速；

$T_m$ —机电时间常数；  $T_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R}{K_e K_m \Phi_N^2}$

$R$ —电枢回路总电阻。

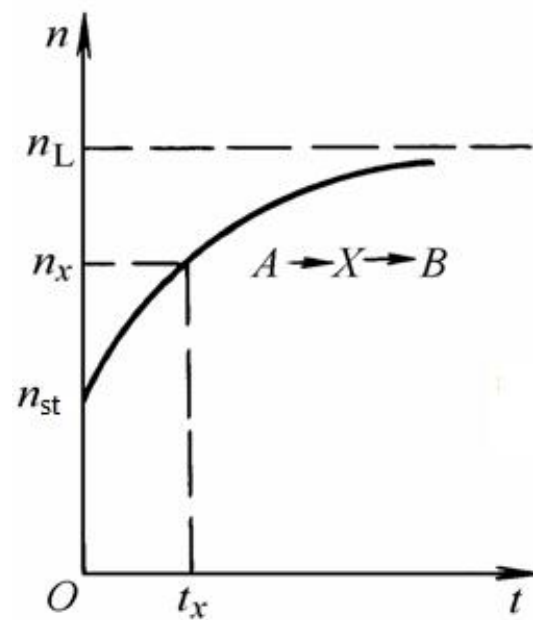
用分离变量法求微分方程通解  $n - n_L = -T_m \frac{dn}{dt} \rightarrow \frac{dn}{n - n_L} = \frac{-dt}{T_m}$

上式两边积分得  $\ln(n - n_L) = -\frac{t}{T_m} + C$  则  $n - n_L = e^{-t/T_m + C} = Ke^{-t/T_m}$

式中,  $K$ 、 $C$ 均为常数, 由初始条件决定。

将初始条件  $t=0, n=n_{st}$  代入上式得  $K = n_{st} - n_L$

于是可得:  $n = n_L + (n_{st} - n_L)e^{-t/T_m}$



a)  $n=f(t)$

## 2. 转矩的变化规律 $T=f(t)$

从机械特性，可得  $T$  与  $n$  的对应关系为：

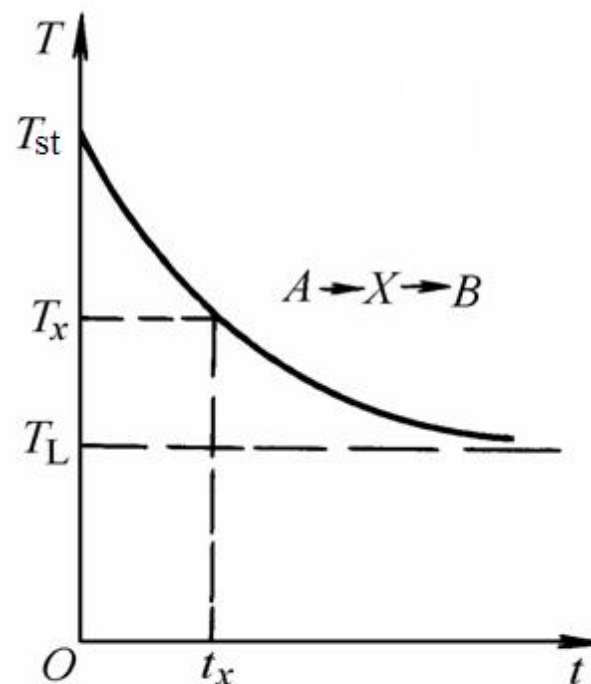
$$n = n_0 - \beta T$$

$$n_L = n_0 - \beta T_L$$

$$n_{st} = n_0 - \beta T_{st}$$

代入转速方程，整理后得表达式为：

$$T = T_L + (T_{st} - T_L)e^{-t/T_m}$$



b)  $T=f(t)$

### 3. 电枢电流的变化规律 $I_a = f(t)$

由转矩基本表达式得:

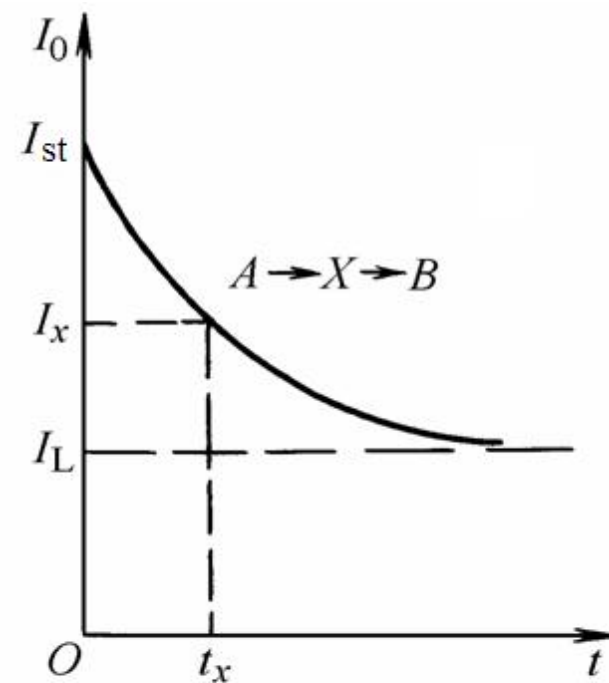
$$T = K_m \Phi_e I_a$$

$$T_L = K_m \Phi_e I_L$$

$$T_{st} = K_m \Phi_e I_{st}$$

代入转矩方程，整理后得表达式为:

$$I_a = I_L + (I_{st} - I_L)e^{-t/T_m}$$



c)  $I_a = f(t)$

## 4. 过渡过程时间

从起始值到稳态值，理论上讲需要时间 $t=\infty$ ，但实际上当

$t = (3 \sim 4)T_m$ 时，各量就达到95%~98%的稳态值，这时就可以认为动态过程已经结束。

工程上普遍认为过渡过程时间为 $4T_m$ ，即 $T_m$ 决定过渡过程时间的长短。

在工程设计中，有时需要计算过渡过程中各量达到某一数值时所经历的时间。

若已知 $T=f(t)$ 及 $X$ 点的转矩 $T_X \longrightarrow t_X = T_m \ln \frac{T_{st} - T_L}{T_X - T_L}$

若已知 $I_a=f(t)$ 及 $X$ 点的电流 $I_X \longrightarrow t_X = T_m \ln \frac{I_{st} - I_L}{I_X - I_L}$

若已知 $n=f(t)$ 及 $X$ 点的转速 $n_X \longrightarrow t_X = T_m \ln \frac{n_{st} - n_L}{n_X - n_L}$

### 3、他励直流电机起动过程的动态特性

#### (1) 起动过程的动态特性

图中，他励直流电动机电枢串电阻起动时的机械特性。

S点是起动过程的初始点，其转矩 $T=T_s$ ，电流 $I=I_s$ ，转速 $n=0$ ；

A点是起动过程结束的稳态点，其转矩 $T=T_L$ ，电流 $I=I_L$ ，转速 $n=n_A$ 。

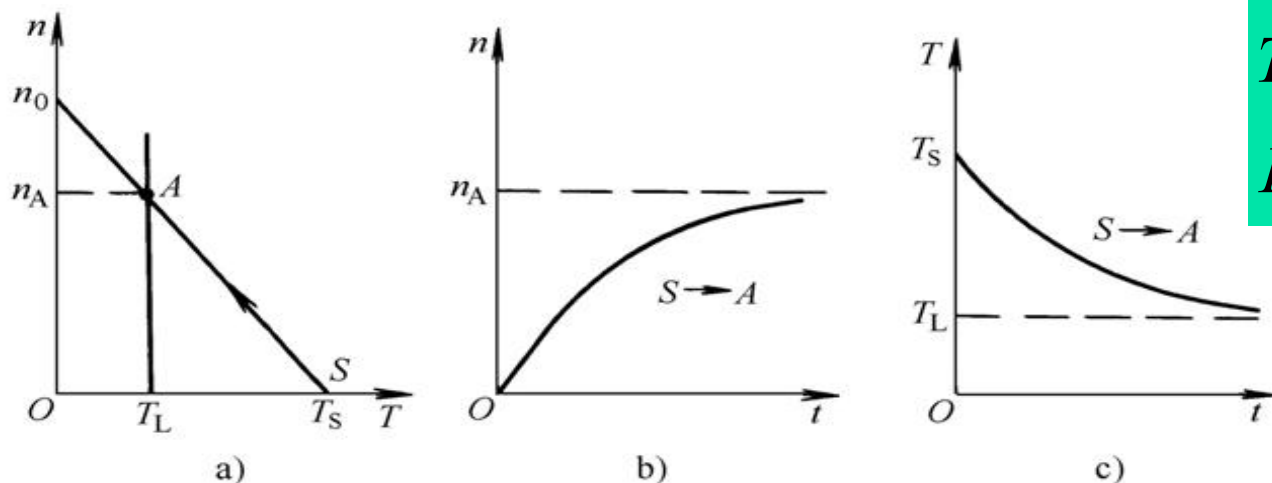
把S点与A点的数据代入相应公式即可得到过渡过程中，  
 $n=f(t)$ 、 $T=f(t)$ 和 $I=f(t)$ 的数学表达式：

$$n = n_A - n_A e^{-t/T_m}$$

$$T = T_L + (T_s - T_L) e^{-t/T_m}$$

$$I_a = I_L + (I_s - I_L) e^{-t/T_m}$$

$$T_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R_a + R_C}{K_e K_m \Phi^2}$$





## (2) 机电时间常数 $T_m$ 的物理意义

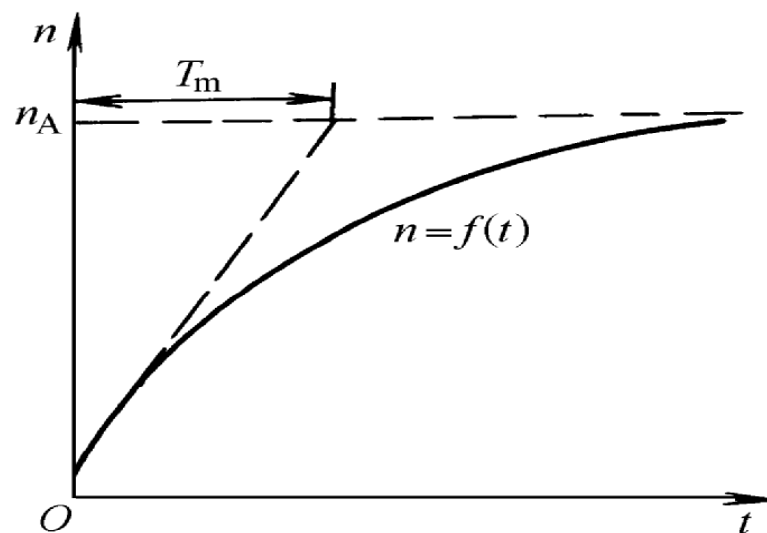
对转速公式进行微分可得

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_A}{T_m} e^{-t/T_m}$$

由式可知，在 $t=0$ 时，其加速度为最大。  
将 $t=0$ 代入上式，可得起动初始加速度为

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = \frac{n_A}{T_m}$$

如果电动机的转速一直按 $t=0$ 处的加速度直线上升，则达到稳态转速 $n$ 所需的时间就是 $T_m$ ，这就是 $T_m$ 的物理意义。



### (3) 缩短过渡过程的方法

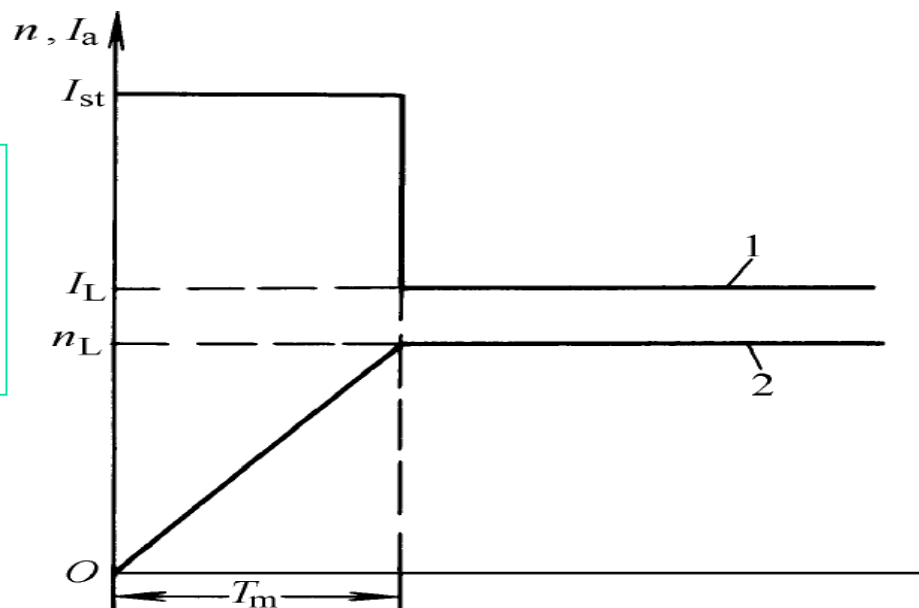
#### 1) 减小机电时间常数 $T_m$

减小 $T_m$ 的主要方法是减小系统总飞轮矩 $GD^2$

- ①选用专门设计制造的小惯量电动机，其特点是电枢细长， $GD^2$ 小；
- ②采用双电动机拖动，即用两台容量为系统所需总容量的1/2的电动机，同轴硬联接后共同拖动负载，可减小飞轮矩。

#### 2) 改善起动电流的波形

如能保持 $I_a$ =常数，即可以保持 $dn/dt$ =常数的理想情况，则起动过程时间就由 $4T_m$ 减小为 $T_m$ 。



理想起动时电流、转速曲线

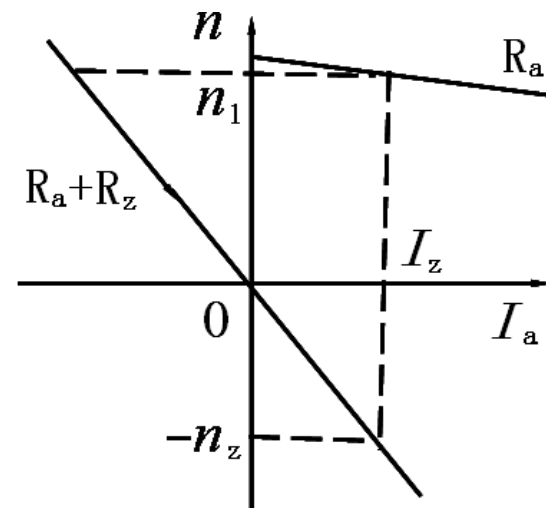


#### (4) 动态特性和机械特性的关系

- (1) 动态特性的起始点和稳定点的参数值，是机械特性上两个稳定点的坐标。
- (2) 从 $n=f(t)$ 和 $T_e=f(t)$ 曲线上消去同时起作用的时间变量 $t$ ，就可获得机械特性 $n=f(T_e)$ 曲线。
- (3) 机械特性表征同一时间下电流（或转矩）和转速间的关系，而动态特性则表征了它们随时间变化的规律。

电流和转速变化规律的一般形式及时间的表达式，它们不仅适用于起动过程，也适用于制动、调速及负载突然变化等各种过程。关键问题是在具体应用时，**必须注意起始值和稳定值的不同特点以及机电时间常数的变化**，例如在实行多级起动时，不同的加速级的机电时间常数是不同的，电枢回路的电阻越大，则 $T_m$ 越大，同时不同加速级的起始转速和稳定转速也是不同的。

电动机在转速为 $n_1$ 的稳定运转状态下进行**能耗制动**，电枢串入制动电阻 $R_z$ ，电动机在机械特性上工作点的变化如图所示，则此时的机电时间常数将由 $R_a+R_z$ 所决定，过渡过程的起始值(对转速而言)为 $n_1$ ，稳定转速为 $-n_z$ 。



**例2-10** 例2-3中，他励直流电动机的铭牌数据为： $P_N=29\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=76\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ， $R_a=0.377\Omega$ ，系统飞轮惯量。实现四级起动，求各级起动时间及总的起动时间。

$$\text{解: } K_e \Phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 76 \times 0.377}{1000} = 0.411, \quad K_m \Phi = 9.55 K_e \Phi = 9.55 \times 0.411 = 3.93, \quad +$$

$$K_e K_m \Phi^2 = 0.411 \times 3.93 = 1.615. \quad +$$

例2-3中已求得四段起动电阻为  $R_{st1}=0.250\Omega$ ， $R_{st2}=0.416\Omega$ ， $R_{st3}=0.693\Omega$ ， $R_{st4}=1.153\Omega$ 。  
各级起动时间常数  $T_{m1}$ ， $T_{m2}$ ， $T_{m3}$ ， $T_{m4}$ ， $T_{m5}$  分别为

$$T_{m1} = \frac{GD^2(R_a + R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{375 K_e K_m \Phi^2} = \frac{49.05(0.377 + 0.212 + 0.405 + 0.695 + 1.158)}{375 \times 1.615} \text{s} = 0.231 \text{s}$$

$$T_{m2} = \frac{GD^2(R_a + R_1 + R_2 + R_3)}{375 K_e K_m \Phi^2} = \frac{49.05(0.377 + 0.212 + 0.405 + 0.695)}{375 \times 1.615} \text{s} = 0.137 \text{s}$$

$$T_{m3} = \frac{GD^2(R_a + R_1 + R_2)}{375K_s K_m \Phi^2} = \frac{49.05(0.377 + 0.212 + 0.405)}{375 \times 1.615} s = 0.081s$$

$$T_{m4} = \frac{GD^2(R_a + R_1)}{375K_s K_m \Phi^2} = \frac{49.05(0.377 + 0.212)}{375 \times 1.615} s = 0.048s$$

$$T_{m5} = \frac{GD^2 R_a}{375K_s K_m \Phi^2} = \frac{49.05 \times 0.377}{375 \times 1.615} s = 0.031s$$

$$\text{设 } I_{st1} = I_1 = 2I_N = 2 \times 76A = 152A, \quad I_x = I_{st2} = 1.2I_N = 1.2 \times 76A = 91.2A, \quad I_L = I_N = 76A,$$

$$\ln\left(\frac{I_{st1} - I_L}{I_{st2} - I_L}\right) = \ln\left(\frac{152 - 76}{91.2 - 76}\right) = \ln 5 = 1.61$$

各级起动时间分别为

$$\text{第一级起动时间为 } t_1 = T_{m1} \ln\left(\frac{I_{st1} - I_L}{I_{st2} - I_L}\right) = 0.231 \times 1.61 = 0.3719s$$

$$\text{第二级起动时间为 } t_2 = T_{m2} \ln\left(\frac{I_{st1} - I_L}{I_{st2} - I_L}\right) = 0.137 \times 1.61 = 0.2206s$$

$$\text{第三级起动时间为 } t_3 = T_{m3} \ln\left(\frac{I_{st1} - I_L}{I_{st2} - I_L}\right) = 0.081 \times 1.61 = 0.1304s$$

$$\text{第四级起动时间为 } t_4 = T_{m4} \ln\left(\frac{I_{st1} - I_L}{I_{st2} - I_L}\right) = 0.048 \times 1.61 = 0.0773s$$

电阻全部切除后电动机达到稳定的时间为

$$t_5 = 4T_{m5} = 4 \times 0.031 = 0.124s$$

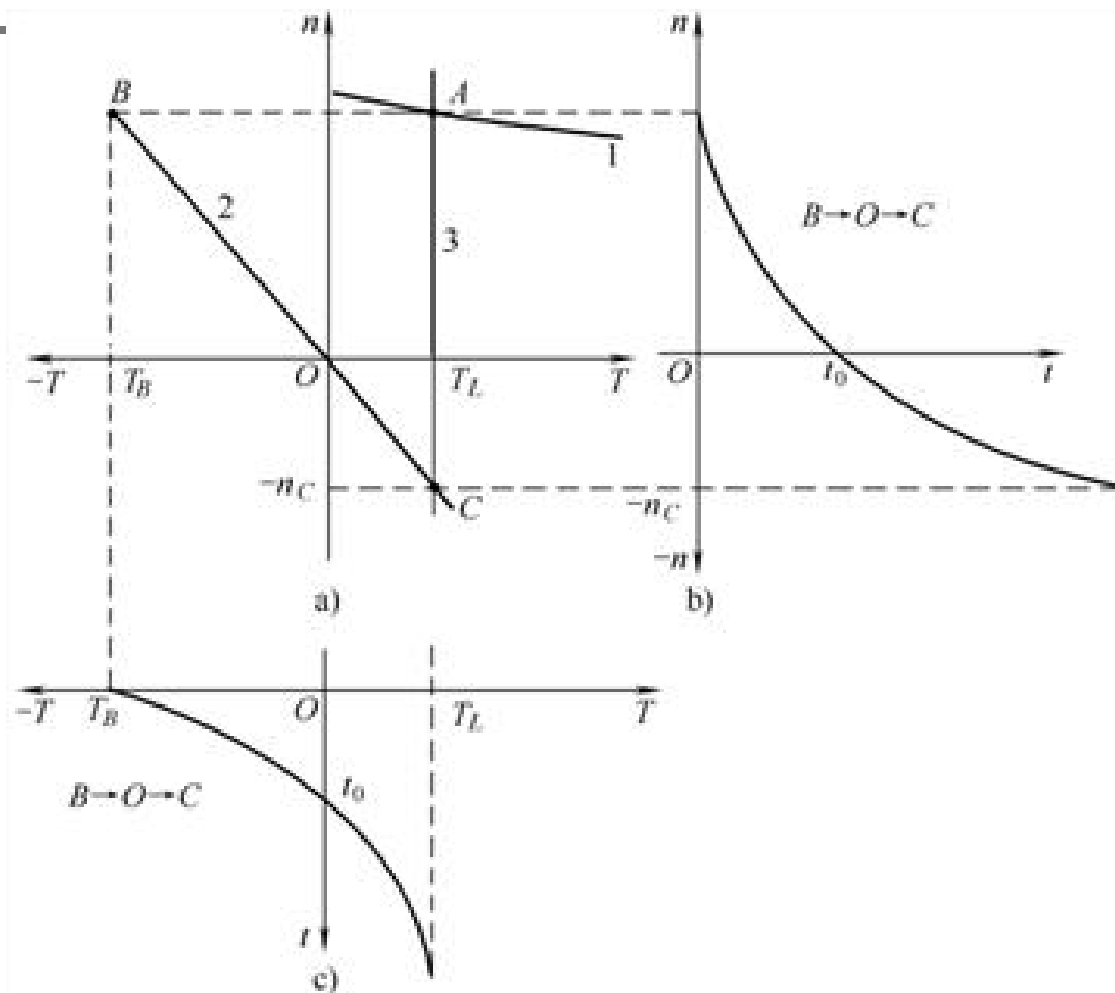
总起动时间为  $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$

$$= 0.3719 + 0.2206 + 0.1304 + 0.0773 + 0.124 = 0.924s$$

## 4、他励直流电机制动过程的动态特性

### (1) 位能性恒转矩负载能耗制动动态特性

他励直流电动机拖动位能性恒转矩负载进行能耗制动时的机械特性如图a，其中曲线1为电动机的固有机械特性，曲线2为能耗制动的机械特性，曲线3为位能性负载的机械特性。



能耗制动过程的起始点为B点，系统是以 $n_B$ 和 $-T_B$ 等参数进入过渡过程的，最终的稳定点为C点，系统最后将以 $n_c$ 和 $T_L$ 等参数稳定运转。据此即可确定  $n=f(t)$  的起始值为 $n_B$ ，稳态值为 $-n_c$ 。而 $T=f(t)$ 的起始值为 $-T_B$ ，稳态值为 $T_L$ ，代入到过渡过程的一般公式, 得到:

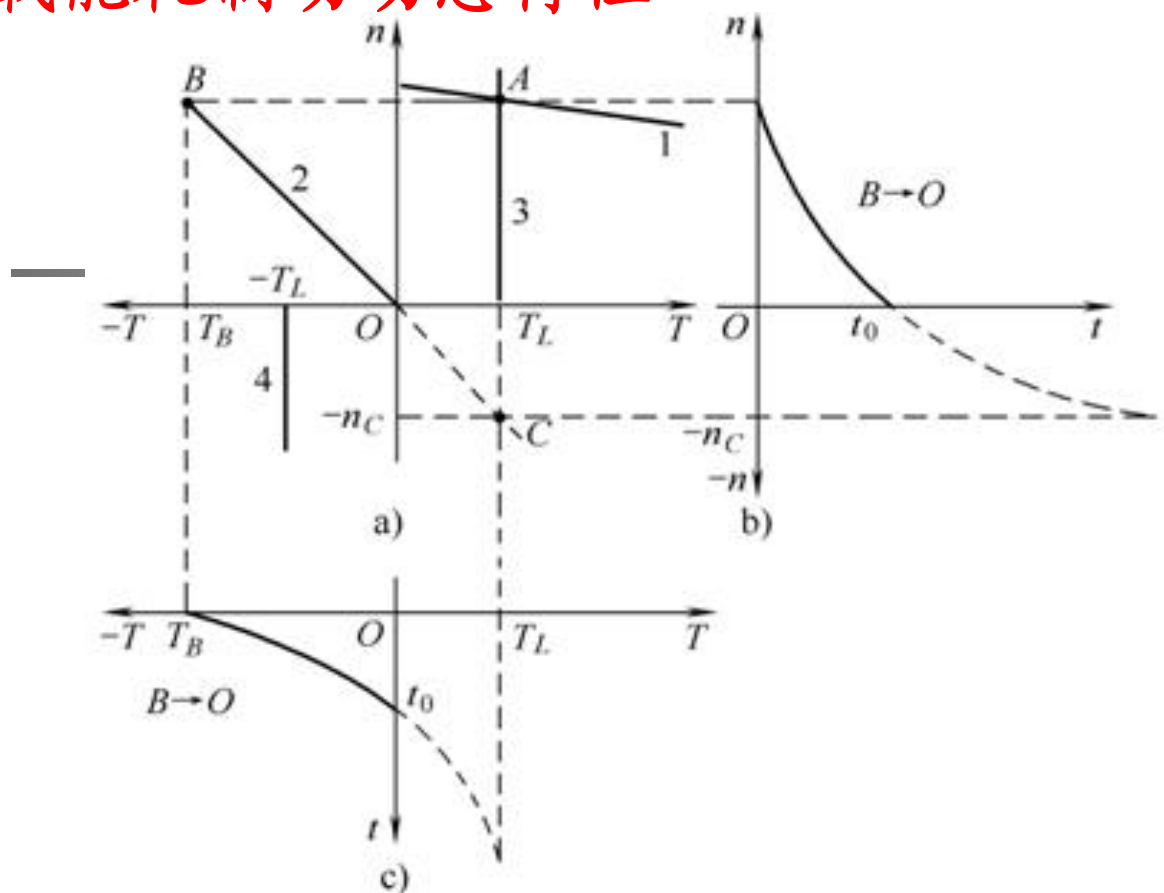
$$n = -n_c + (n_B + n_c)e^{-\frac{t}{T_m}}$$
$$T = T_L + (-T_B - T_L)e^{-\frac{t}{T_m}}$$

如果能耗制动只用于停车，那么从B点开始，制动到0点 $n=0$ 时，应采用机械闸将电机制动住。这时过渡过程为 $B \rightarrow 0$ ，C点为虚稳定点。



## (2) 反抗性恒转矩负载能耗制动动态特性

他励直流电动机拖动反抗性恒转矩负载进行能耗制动时的机械特性如图a，其中曲线1为电动机的固有机械特性，曲线2为能耗制动的机械特性，曲线3和4是反抗性负载的机械特性。



能耗制动过程的起始点为B点，到坐标原点O点时， $n=0$ ， $T=0$ ，过渡过程结束。由于反抗性恒转矩负载在 $n=0$ 时要发生突变， $n \geq 0$ 时为 $T_L$ ， $n \leq 0$ 时为 $-T_L$ ，这与推导过渡过程一般式时 $T_L=\text{常数}$ 的假定条件不符。为了计算过渡过程，可假想负载机械特性延长到第IV象限，使它与电动机的能耗制动机械特性相交于C点，如图a中的虚线。

假如在0点负载转矩不发生突变，仍为 $T_L$ ，那么，过渡过程就将从初始点B经过中间点0一直进行到稳定点C，这与电动机拖动位能性恒转矩负载进行能耗制动的情況完全一样。

但实际的能耗制动停车过渡过程仅是从B到0的这一段，到0点时， $n=0$ ， $T=0$ ，因负载转矩突变，过渡过程中断了，并非是一个完整的过渡过程，所以对能耗制动停车的过渡过程来说，式（2-41）仅在 $n \geq 0$ 及 $T \leq 0$ 的范围内才适用。从 $0 \rightarrow C$ 这段过渡过程并未实现，是假想的结果，因此把C点称为虚稳定点。

据此，拖动反抗性恒转矩负载进行能耗制动停车的过渡过程可表示为

$$\left. \begin{aligned} n &= -n_C + (n_B + n_C)e^{-\frac{t}{T_m}} & (n \geq 0) \\ T &= T_L + (-T_B - T_L)e^{-\frac{t}{T_m}} & (T \leq 0) \end{aligned} \right\}$$

动态特性曲线 $n=f(t)$ 和 $T=f(t)$ ，如图b及c的实线所示。由于 $0 \rightarrow C$ 这段过渡过程实际并未实现，所以在图中这段过渡过程曲线用虚线表示。

## 制动时间的求取:

把初始点B、稳定点C、终了点0的转速值，代入公式，可得到制动时间为

$$t_0 = T_m \ln \frac{n_B - n_C}{-n_C}$$

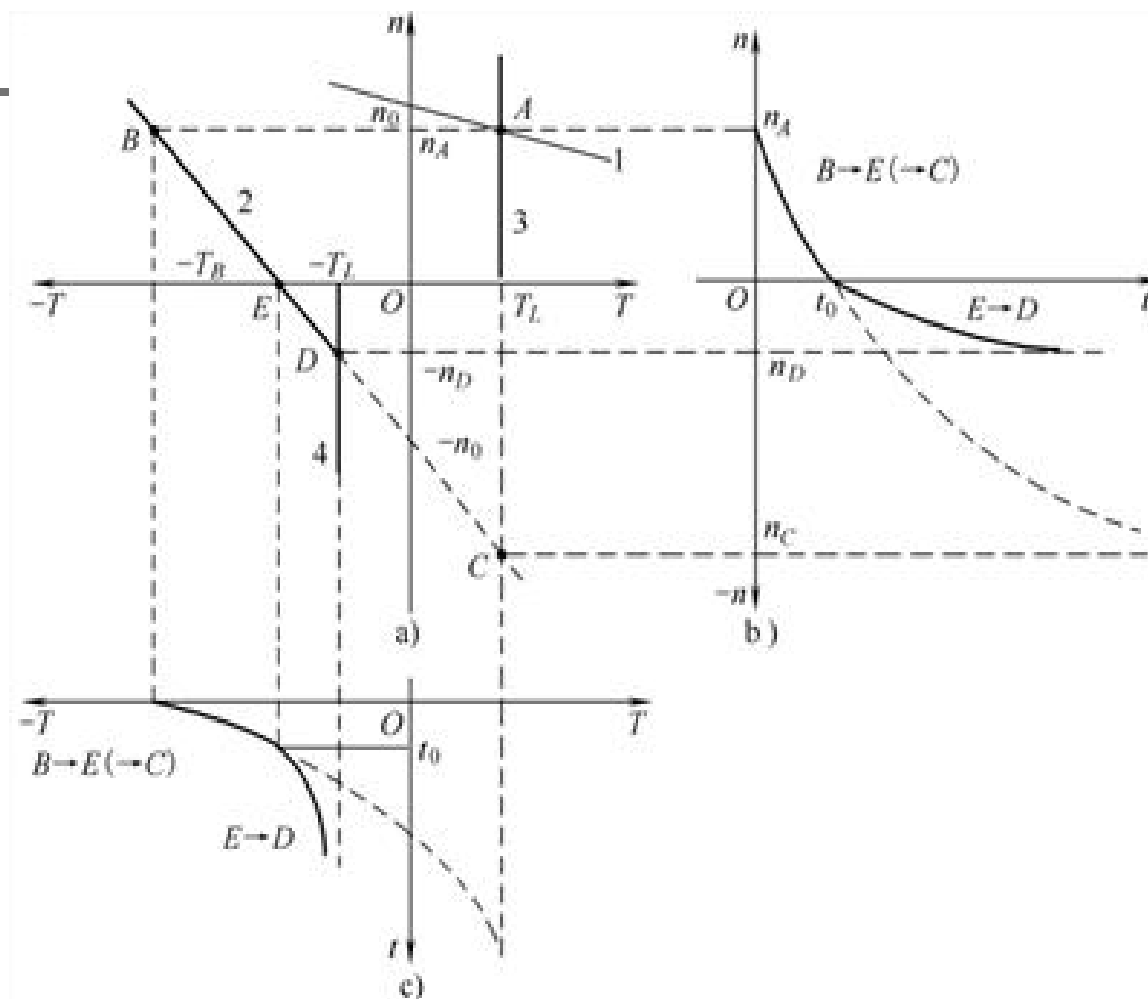
也可以根据  $T=f(t)$  曲线求出

$$t_0 = T_m \ln \frac{T_B - T_L}{-T_L}$$

### (3) 反抗性恒转矩负载电压反接制动过程

#### 动态特性

他励直流电动机拖动反抗性恒转矩负载进行反接制动时的机械特性如图a所示。其中曲线1为电动机的固有机械特性；曲线2为电动机反接制动机械特性；曲线3为 $n \geq 0$ 时的负载机械特性；曲线4为 $n \leq 0$ 时负载的机械特性。



1) 如果反接制动只用于停车，过渡过程为B→E这一段，当过渡过程进行到E点时， $n=0$ ，应立即断电抱闸。

在反接制动停车B→E这一段过渡过程中，B点为起始点，E为终了点，C点为虚稳态点，起始值 $n_B$ ，稳态值为 $-n_C$ 。

而  $T=f(t)$  的起始值为  $-T_B$ ，稳态值为  $T_L$ 。

代入到过渡过程的一般公式得到反抗性恒转矩负载进行反接制动停车的过渡过程为：

$$\left. \begin{aligned} n &= -n_C + (n_B + n_C)e^{-\frac{t}{T_m}} & (n \geq 0) \\ T &= T_L + (-T_B - T_L)e^{-\frac{t}{T_m}} & (T \leq 0) \end{aligned} \right\}$$

可绘出动态特性曲线 $n=f(t)$ 和 $T=f(t)$ ，如图b及c中B→E段实线所示。从E点到虚稳态点C这段实线并未实现。



制动到 $n=0$ 的时间 $t_0$ 为

$$t_0 = T_m \ln \frac{n_B - n_C}{-n_C}$$

或

$$t_0 = T_m \ln \frac{T_B - T_L}{T_E - T_L}$$

计算时， $n_C$ 、 $T_B$ 和 $T_E$ 均应带负值。

2) 如果反接制动用于电动机反转，这时应分成两段计算过渡过程。

第一段: B→E, 计算方法与反接制动停车时相同。

第二段: E点开始, 电动机反向起动, 最后在D点稳定运行。这段过渡过程的E点为起始点, D点为实际的稳态点, 其转速的起始值为0, 稳态值为 $-n_D$ 。而  $T=f(t)$ 的起始值为 $T_E$ , 稳态值为 $-T_L$ 。

在转速制动到零后, 由于电动机的机械特性没有改变, 特性斜率未变, 因而系统的机电时间常数 $T_m$ 也不变。反抗性恒转矩负载进行反向起动的过渡过程为

$$\left. \begin{aligned} n &= -n_D (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) \\ T &= -T_L + (-T_E + T_L) e^{-\frac{t}{T_m}} \end{aligned} \right\}$$

过渡过程曲线 $n=f(t)$ 和 $T=f(t)$ 如图b、c中E→D这一段。

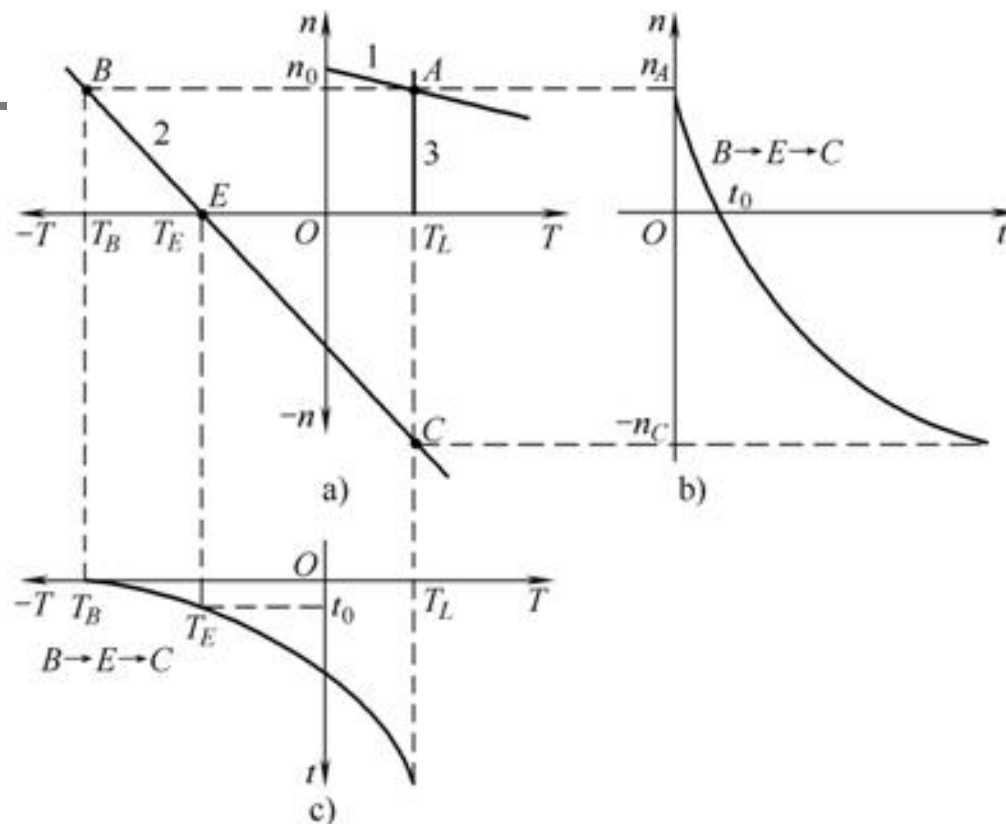
由正转到反转的稳定运行, 其过渡过程曲线由B→E及E→D这两段曲线组成。

电动机由正转到反转的过渡过程所经历的时间为:

反接制动停车时间 $t_0$ 加上反向起动时间 $4T_m$

#### (4) 位能性恒转矩负载电压反接制动过程动态特性

他励直流电动机拖动位能性恒转矩负载反接制动的机械特性如图a所示。其中曲线1为电动机的固有机械特性，曲线2为反接制动的机械特性，曲线3为位能性负载的机械特性。





反接制动过程的起始点为B点，系统是以 $n_B$ 和 $-T_B$ 等参数进入过渡过程的，最终的稳定点为C点，系统最后将以 $n_C$ 和 $T_L$ 等参数稳定运转。据此即可确定 $n=f(t)$ 的起始值 $n_B$ ，稳态值为 $-n_C$ 。而 $T=f(t)$ 的起始值为 $-T_B$ ，稳态值为 $T_L$ ，代入到过渡过程的一般公式得到：

$$n = -n_C + (n_B + n_C)e^{-\frac{t}{T_m}}$$
$$T = T_L + (-T_B - T_L)e^{-\frac{t}{T_m}}$$

根据上式即可绘出动态特性曲线 $n=f(t)$ 和 $T=f(t)$ ，如图b、c所示。

如果反接制动只用于停车，那么从B点开始，制动到E点时应立即断电抱闸，这时过渡过程为B→E这一段，C点为虚稳态点。

它与前述拖动反抗性负载反接制动停车的过渡过程是相同的。