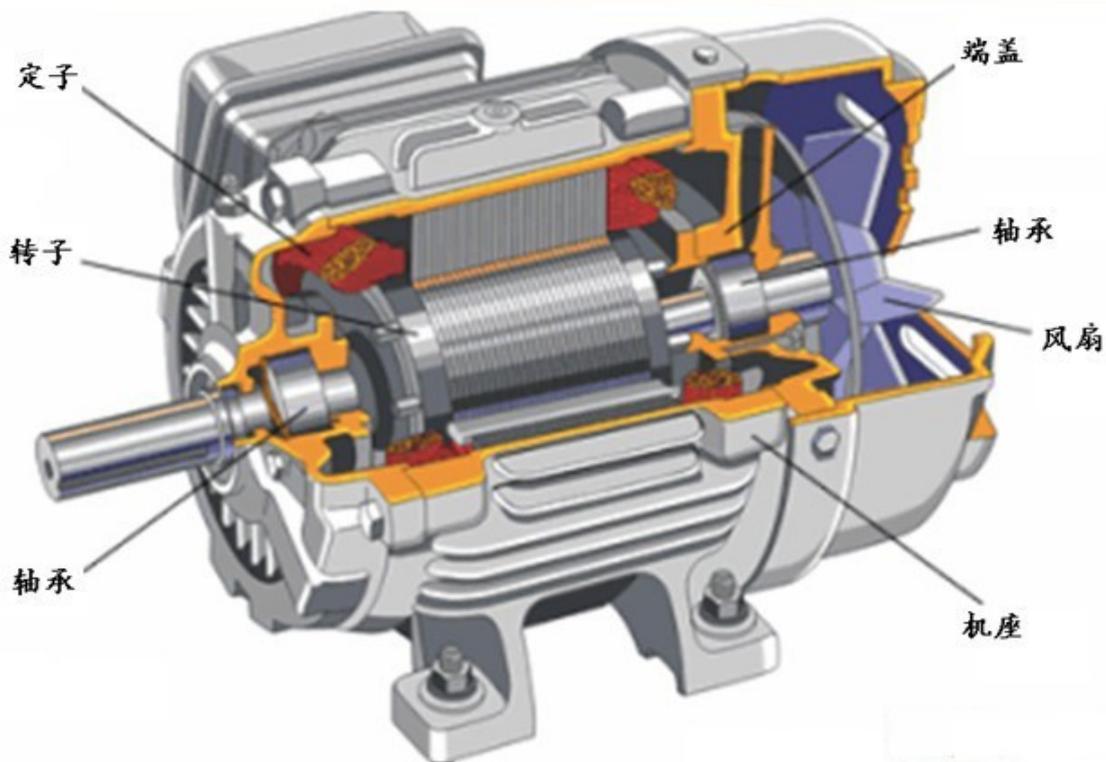


## 第八章 三相异步电机的启动与制动

### Three-Phase Asynchronous Motor Starting and braking





- 一. 三相异步电机直接启动
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态



- 一. 三相异步电机直接启动**
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态



### 一. 三相异步电机直接启动

#### 本节学习要点：

- ① 掌握异步电动机直接启动方法、特点和影响

三相异步机在额定电压下 **直接启动**：主磁通低，功率因数又低，启动电流大，启动转矩不大。

启动电流（堵转电流）：

$$I_{1s} = K_I I_N = (4 \sim 7) I_N$$

$K_I$  为启动电流倍数

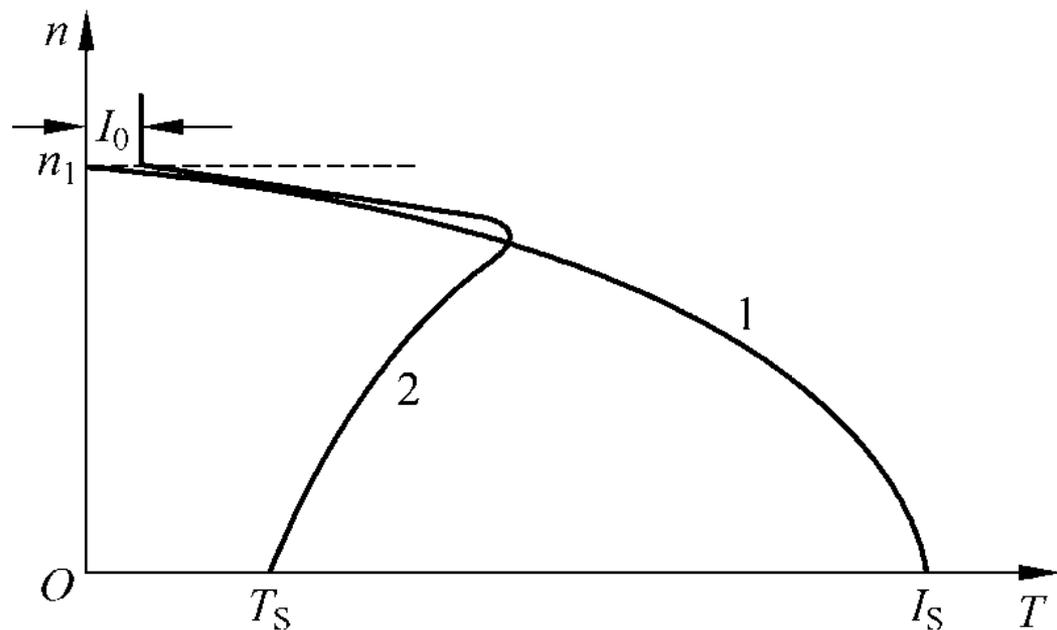
启动转矩：

$$T_s = K_T T_N = (0.8 \sim 1.2) T_N$$

$K_T$  为启动转矩倍数

适用范围：

电动机容量较小，供电变压器容量相对较大。



直接启动

1—电流特性；

2—固有机机械特性



### 经验公式:

起动时电网提供的定子线电流

电动机额定电流

$$\frac{I_s}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{S_H}{4P_N}$$

供电变压器总容量

电动机额定功率

### 校核起动转矩:

$$T_s = \frac{2T_m}{\frac{s_m}{1} + \frac{1}{s_m}} > T_N$$

一般额定功率在 **7.5kW以下** 的感应电动机允许直接起动。



**大容量（7.5kW以上）**异步电动机直接启动时，导致变压器输出电压短时下降幅度大，造成**不利影响**：

- ① 电压太低，电机的**启动转矩下降很多**，**重负载时不能启动**。
- ② 影响同一台配电变压器供电的其他负载，如电灯变暗，数控设备失常，重载异步电动机停转等。

启动电流  $I_{1s}$ ：

$$I_{1s} \approx I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

启动转矩  $T_s$ ：

$$T_s = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

降低启动电流的方法：

**降低电源电压；加大定子边电阻或电抗；加大转子边电阻或电抗。**  
过份加大转子电阻反而使启动转矩减小。



- 一. 三相异步电机直接启动
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动**
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态



### 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动

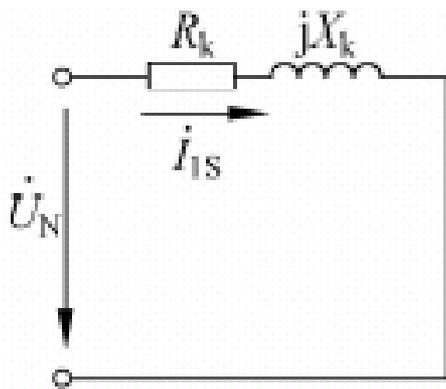
#### 本节学习要点：

- ① 掌握异步电动机降压启动方法、特点和影响
  - ✓ 定子串电抗启动
  - ✓ Y- $\Delta$  启动
  - ✓ 自耦电压器降压启动
  - ✓ 三相反并联晶闸管降压启动

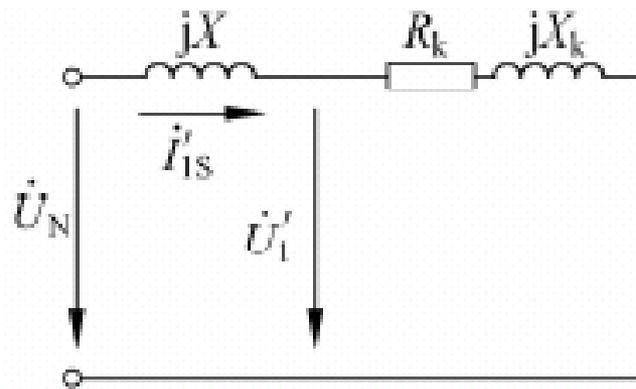
### 1、定子串接电抗器启动

**方法：** 启动时将电抗器接入定子电路，启动后切除电抗器，进入正常运行。

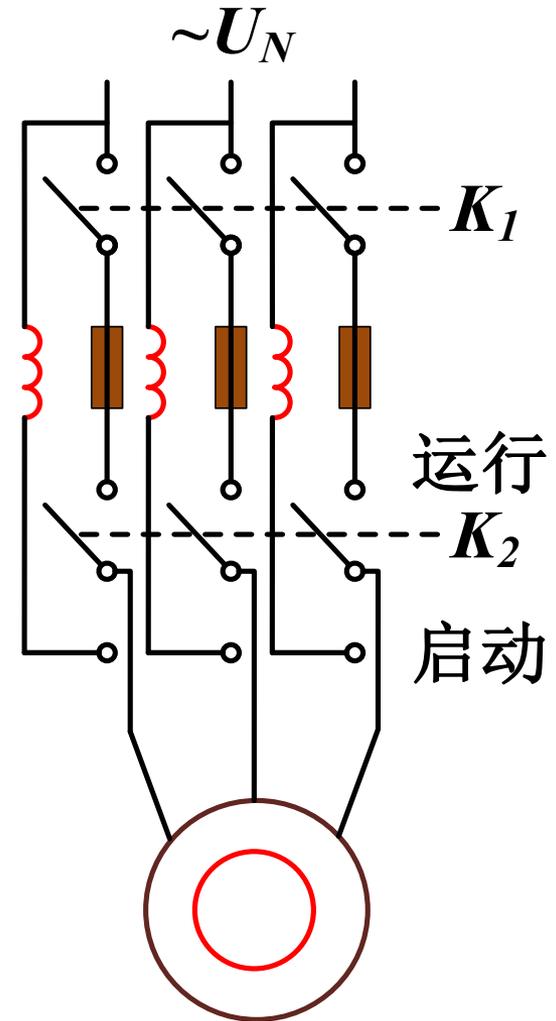
**目的：** 减小启动电流。



(a) 直接启动



(b) 定子串电抗启动



接线框图

### 1、定子串接电抗器启动

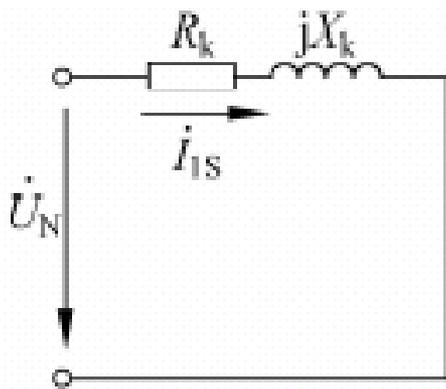
电压方程式:

$$\begin{cases} \dot{U}_N = \dot{I}'_{1s}(Z_k + jX) \\ \dot{U}'_1 = \dot{I}'_{1s}Z_k \end{cases}$$

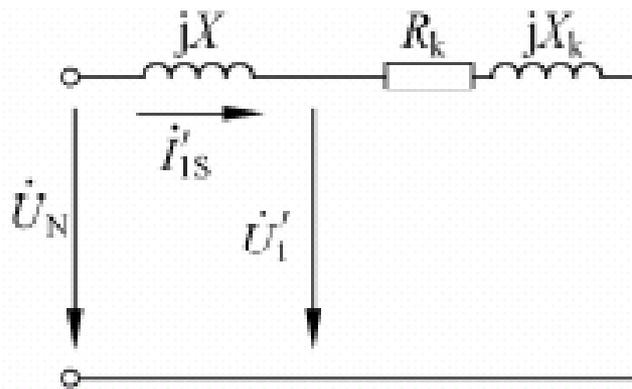
$Z_k$ 与外串电抗直接相加

$$\begin{cases} \frac{U'_1}{U_N} = u = \frac{Z_k}{Z_k + X} \\ \frac{I'_{1s}}{I_{1s}} = u = \frac{Z_k}{Z_k + X} \\ \frac{T'_s}{T_s} = u^2 = \left( \frac{Z_k}{Z_k + X} \right)^2 \end{cases}$$

定子串电抗启动降低了启动电流，也降低了启动转矩，只适用电机空载和轻载启动。



(a) 直接启动



(b) 定子串电抗启动



**例题8-1** 一台鼠笼式三相异步电动机的有关数据为： $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=136\text{A}$ ， $K_I=6.5$ ， $K_T=1.1$ ，供电变压器限制该电动机最大启动电流为 $500\text{A}$ 。（1）若空载定子串电抗启动，每相串入的电抗最少应该是多少？

**解题思路：**已知  $I'_{1s} = 500$ ，可用如下公式计算 $X$ ，

$$\frac{I'_{1s}}{I_{1s}} = u = \frac{Z_k}{Z_k + X}$$

已知 $K_I$ 和 $I_N$ ，容易计算： $I_{1s} = K_I I_N$ ， $u$

利用 $U_N$ 和 $I_{1s}$ 和 $u$ 算 $Z_k$ ：

$$Z_k = \frac{U_{1\phi}}{I_{1s}} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_{1s}}$$



**例题8-1** 一台鼠笼式三相异步电动机的有关数据为： $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=136\text{A}$ ， $K_I=6.5$ ， $K_T=1.1$ ，供电变压器限制该电动机最大启动电流为500A。（1）若空载定子串电抗启动，每相串入的电抗最少应该是多少？

**解：**（1）直接启动电流： $I_{1s} = K_I I_N = 6.5 \times 136 = 884\text{A}$   
串电抗启动电流与 $I_{1s}$ 比：

$$u = \frac{I'_{1s}}{I_{1s}} = \frac{500}{884} = 0.566$$

**短路阻抗：**

$$Z_k = \frac{U_{1\phi}}{I_{1s}} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_{1s}} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 884} = 0.248$$

**每相串入阻抗最小值：**

$$X = \frac{1-u}{u} Z_k = \frac{1-0.566}{0.566} \times 0.248 = 0.19\Omega$$



**例题8-1** 一台鼠笼式三相异步电动机的有关数据为： $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=136\text{A}$ ， $K_I=6.5$ ， $K_T=1.1$ ，供电变压器限制该电动机最大启动电流为500A。（2）若拖动 $T_L=0.3T_N$ 恒转矩负载，可不可以采用定子串电抗方法启动？若可以，计算每相串入的电抗值的范围。

**解：**（2）串电抗最小启动转矩与直接启动转矩比：

$$\frac{T'_s}{T_s} = \frac{T_L}{K_T \times T_N} = \frac{0.3}{1.1} = u^2 \rightarrow u = \sqrt{0.3/1.1} = 0.522$$

**启动电流：**

$$I'_{1s} = uI_{1s} = 0.522 \times 884 = 461.65 \text{ (A)} < 500 \text{ (A)}$$

**可以串电抗启动，每相串入阻抗最大值：**

$$X = \frac{1-u}{u} Z_k = \frac{1-0.522}{0.522} \times 0.248 = 0.227 \Omega$$

**因此，每相串入电抗值的范围： $0.190 \Omega < X < 0.227 \Omega$ 。**

### 2、Y- $\Delta$ 启动

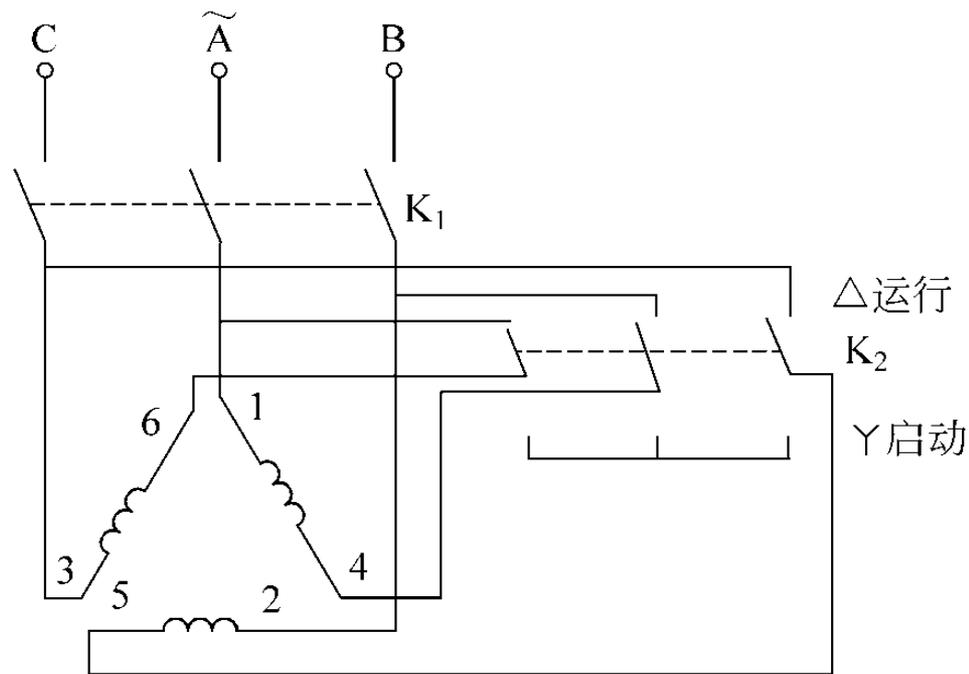
**方法：** 启动时，定子绕组Y接法；启动后，换成 $\Delta$ 接法。

**目的：** 用 Y- $\Delta$  降压启动，减小启动电流。

**工作过程：**

开关 $K_2$ 合到下边，电动机定子Y接法，开关 $K_1$ 接通电源，电动机开始启动；

当转速升到一定程度，开关 $K_2$ 从下边断开合向上边，定子 $\Delta$ 接法，电动机进入正常运行。

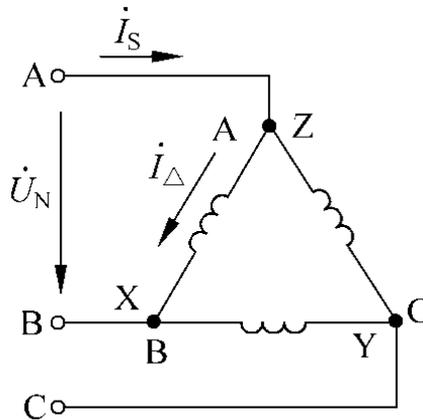


Y- $\Delta$ 启动接线图

### (a) 直接启动

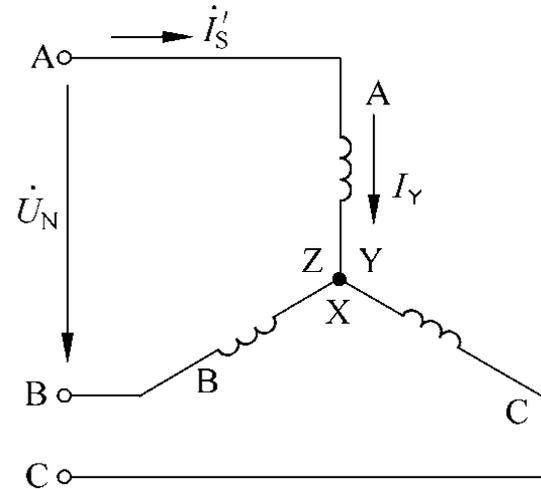
定子绕组  $\Delta$  接启动时，  
每相启动电流:  $I_{\Delta}$

→ **线启动电流:**  $I_S = \sqrt{3}I_{\Delta}$



(a)

(a) 直接启动



(b)

(b) Y-Δ启动

### (b) Y-Δ启动

每相启动电压:  $U_{1\phi} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$

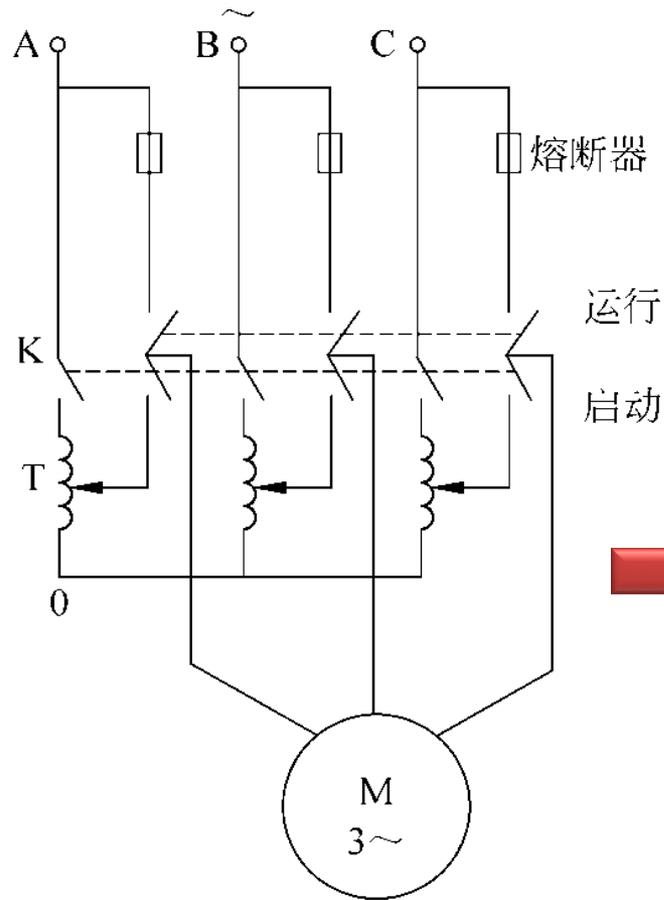
每相启动电流:  $\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{U_{1\phi}}{U_N} = \frac{1}{\sqrt{3}}$

线启动电流:  $I'_S = I_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\Delta} \Rightarrow \frac{I'_S}{I_S} = \frac{1}{3} \Rightarrow$  启动电流降低到直接启动的 **三分之一**

启动转矩:  $\frac{T'_S}{T_S} = \left(\frac{U'_1}{U_1}\right)^2 = \frac{1}{3} \Rightarrow$  此种方法只适用于 **轻负载启动**

### Y-Δ启动时的启动电流

### 3、自耦变压器(启动补偿器)降压启动

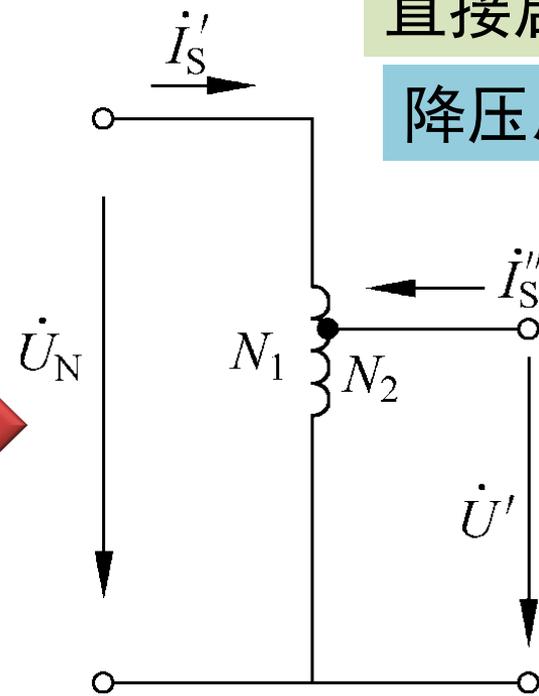


**方法:**

启动时, 采用自耦变压器降压。

直接启动时的启动电流:  $I_S$

降压后的电压  $U_1'$  直接启动



一相电路

$$\frac{I_S'}{I_S} = \frac{U_1'}{U_N} = \frac{N_2}{N_1}$$

一次侧启动电流:  $I_S'$

$$\frac{I_S'}{I_S} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

启动转矩

$$\frac{T_S'}{T_S} = \left(\frac{U_1'}{U_N}\right)^2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

自耦变压器降压启动



### 各种起动方法的比较

起动电压相对值 (电动机相电压)	起动电流相对值 (电网供给线电流)	起动转矩相对值
---------------------	----------------------	---------

直接启动

1

1

1

串电抗

$u$

$u \frac{1}{\sqrt{3}}$

$u^2 \frac{1}{3}$

Y-Δ启动

$\frac{1}{3}$

$\frac{1}{3} \frac{1}{3}$

$\frac{1}{3} \frac{1}{3}$

自耦变压器

$\frac{N_2}{N_1}$

$(\frac{N_2}{N_1})^2 \frac{1}{3}$

$(\frac{N_2}{N_1})^2 \frac{1}{3}$

三种起动方法得到**相同起动转矩**的情况下，利用**串电抗器启动**时，电网提供的**起动电流较大**。



**例题8-2** 一台鼠笼式三相异步电动机  $P_N=28\text{kW}$ ， $\Delta$ 接法， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=58\text{A}$ ， $\cos\varphi_N=0.88$ ， $n_N=1455\text{r/min}$ ， $K_I=6$ ， $K_T=1.1$ ，过载倍数 $\lambda=2.3$ 。供电变压器要求启动电流 $\leq 150\text{A}$ ，负载启动转矩为 $73.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。请选择一合适的降压启动方法，写出必要的计算数据。（自耦变压器抽头55%、64%、73%）。

解：直接启动电流： $I_S = K_I I_N = 6 \times 58 = 348\text{ A}$

直接启动转矩：

$$T_S = K_T T_N = K_T 9550 \frac{P_N}{n_N} = 1.1 \times 9550 \times \frac{28}{1455} = 202.16\text{ N}\cdot\text{m}$$

(1) 效验是否可以采用Y- $\Delta$ 启动：

启动电流： $I'_S = I_S / 3 = 116(\text{A}) < 150(\text{A})$

启动转矩： $T'_S = T_S / 3 = 67.39(\text{N}\cdot\text{m}) < 73.5(\text{N}\cdot\text{m})$

**不适合采用。**



**例题8-2** 一台鼠笼式三相异步电动机  $P_N=28\text{kW}$ ， $\Delta$ 接法， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=58\text{A}$ ， $\cos\varphi_N=0.88$ ， $n_N=1455\text{r/min}$ ， $K_I=6$ ， $K_T=1.1$ ，过载倍数 $\lambda=2.3$ 。供电变压器要求启动电流 $\leq 150\text{A}$ ，负载启动转矩为 $73.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。请选择一合适的降压启动方法，写出必要的计算数据。（自耦变压器抽头55%、64%、73%）。

解：（2）效验是否可以串电抗方法：

启动电流： $I'_S = uI_S = 150, \rightarrow u = 0.43$

启动转矩： $T'_S = u^2T_S = 0.43^2 \times 202.16 = 37.56 (\text{N}\cdot\text{m}) < 73.5 (\text{N}\cdot\text{m})$

**不适合采用。**

（3）效验是否可以自耦变压器降压方法：

自耦变压器抽头55%时：

启动电流： $I'_S = k^2I_S = 0.55^2 \times 348 = 105.27 (\text{A}) < 150 (\text{A})$

启动转矩： $T'_S = k^2T_S = 0.55^2 \times 202.16 = 61.15 (\text{N}\cdot\text{m}) < 73.5 (\text{N}\cdot\text{m})$

**不适合采用。**



**例题8-2** 一台鼠笼式三相异步电动机  $P_N=28\text{kW}$ ， $\Delta$ 接法， $U_N=380\text{V}$ ， $I_N=58\text{A}$ ， $\cos\varphi_N=0.88$ ， $n_N=1455\text{r/min}$ ， $K_I=6$ ， $K_T=1.1$ ，过载倍数 $\lambda=2.3$ 。供电变压器要求启动电流 $\leq 150\text{A}$ ，负载启动转矩为 $73.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。请选择一合适的降压启动方法，写出必要的计算数据。（自耦变压器抽头55%、64%、73%）。

**解：**自耦变压器抽头64%时：

启动电流： $I'_S = k^2 I_S = 0.64^2 \times 348 = 142.5\text{ (A)} < 150\text{ (A)}$

启动转矩： $T'_S = k^2 T_S = 0.64^2 \times 202.16 = 82.8\text{ (N}\cdot\text{m)} > 73.5\text{ (N}\cdot\text{m)}$

**适合采用。**

自耦变压器抽头73%时：

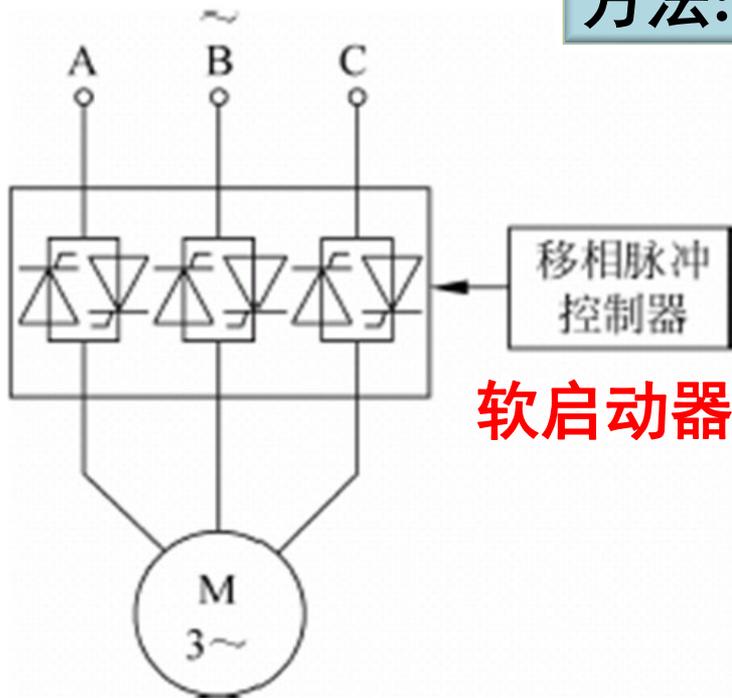
启动电流： $I'_S = k^2 I_S = 0.73^2 \times 348 = 185.45\text{ (A)} > 150\text{ (A)}$

**不适合采用。**

### 4、三相反并晶闸管降压启动

方法:

三相反并晶闸管串联在三相交流电源与被控电动机之间，通过控制器改变导通角实现降压启动。



软启动器

三相反并联晶闸管软启动

优点:

启动电压可由低到高连续可调，避免了启动电流对电网和电机的冲击。

缺点:

波形偏离了正弦形，产生了一些谐波，使电机损耗增大，性能变差。



- 一. 三相异步电机直接启动
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机**
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态



### 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机

#### 本节学习要点：

- ① 了解转子电阻值较大的鼠笼式异步电动机
- ② 了解深槽式鼠笼异步电动机
- ③ 了解双鼠笼异步电动机

### 1、转子电阻值较大的鼠笼式异步电动机

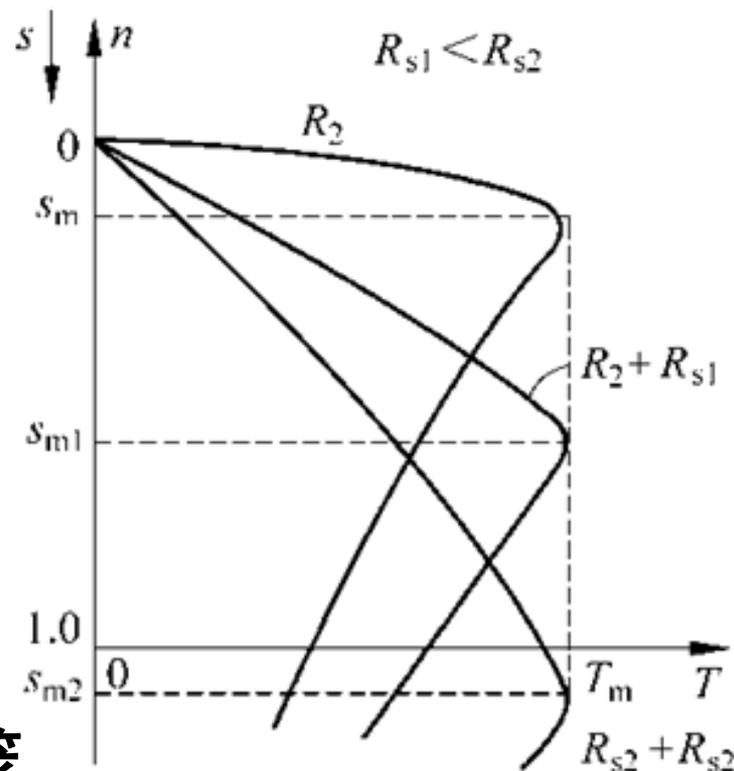
$$\begin{cases} s_m = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \\ T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1(X_1 + X'_2)} \end{cases}$$

启动转矩:

$$\begin{cases} T_s \propto R'_2 \uparrow, & (0 < s_m \leq 1) \\ T_s \propto \frac{1}{R'_2} \uparrow, & (s_m > 1) \end{cases}$$

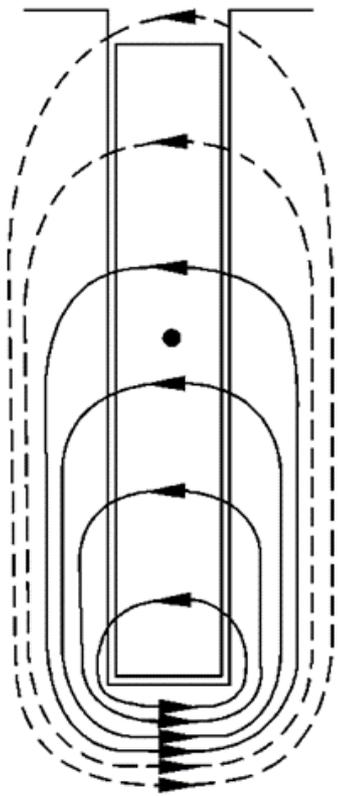
方法:

选用电阻率较大的新材料作鼠笼导条，或减小鼠笼导条截面都使鼠笼转子电阻增加，使启动转矩、最大转矩、额定转差率都变大，运行段机械特性变软。



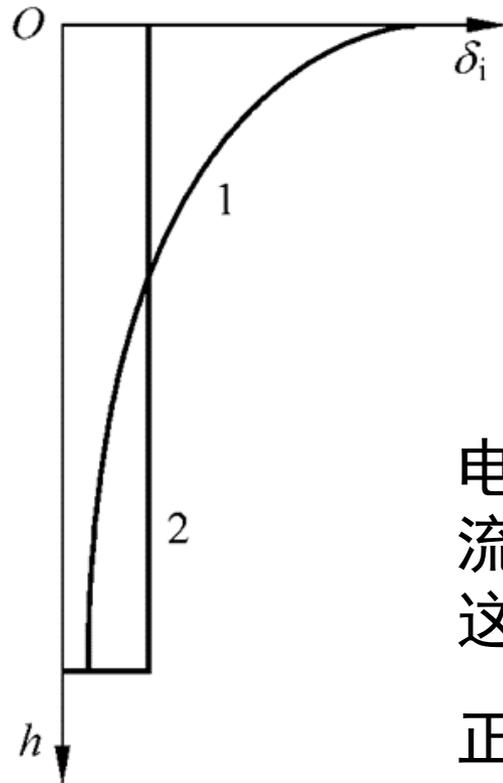
转子回路穿对称三相电阻的人为机械特性

### 2、深槽式鼠笼异步电动机



(a)

深槽式异步电动机



(b)

(a)槽漏磁通分布 (b) 电流密度

深槽鼠笼异步电动机的  
**槽形深而窄。**

磁通分布不均

**槽底**部分的漏磁通多

**槽口**部分的漏磁通少

电机刚启动时， $s = 1$ ，转子电流频率较高，**电流分布曲线1**，这种现象称**趋表效应**。

正常运行时，转子电流频率很低，转子**漏电抗很小**，转子电流主要取决于电阻，且集肤效应不明显，**电流分布曲线2**。

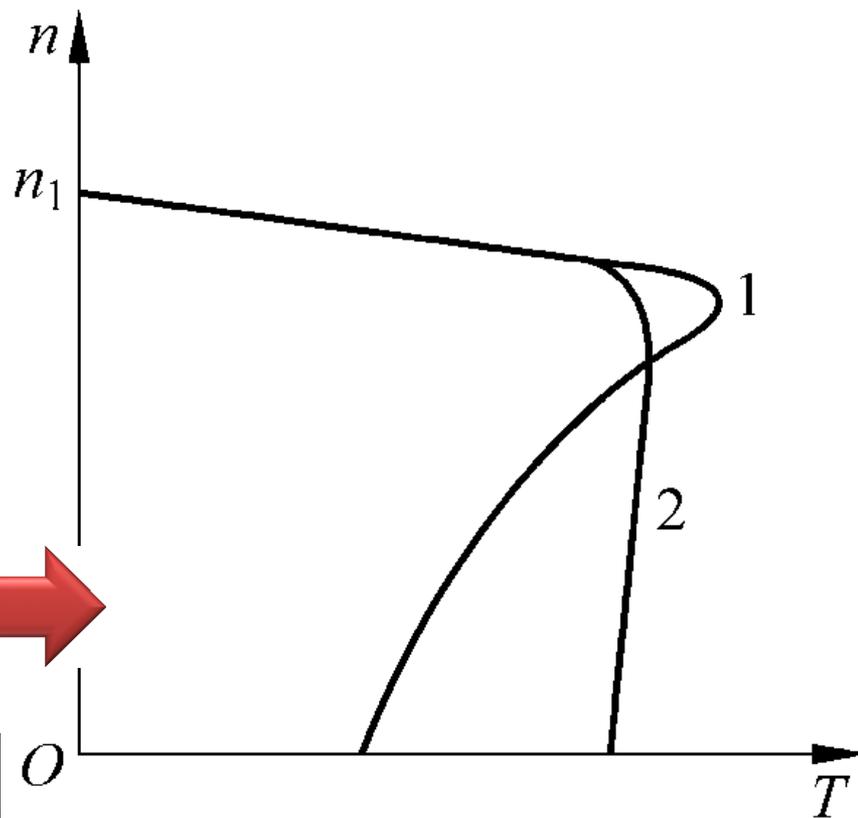
## 2、深槽式鼠笼异步电动机

深槽电机在启动时由于集肤效应导致转子电阻增大，获得了较大的启动力矩。

转速升至正常值后转子电阻也回到正常值，故不会降低电动机的效率。

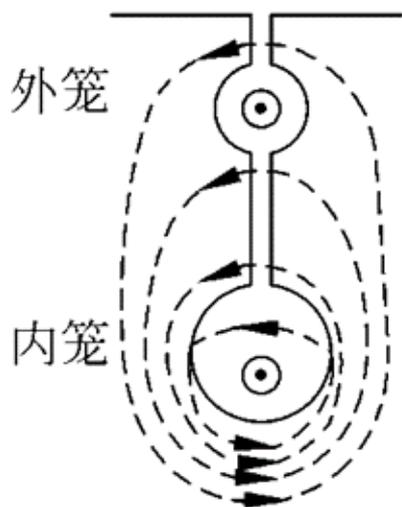
曲线 1 为普通鼠笼式  
曲线 2 为深槽式

**深槽式异步电动机转子槽漏抗较大，功率因数稍低，最大转矩倍数稍小。**

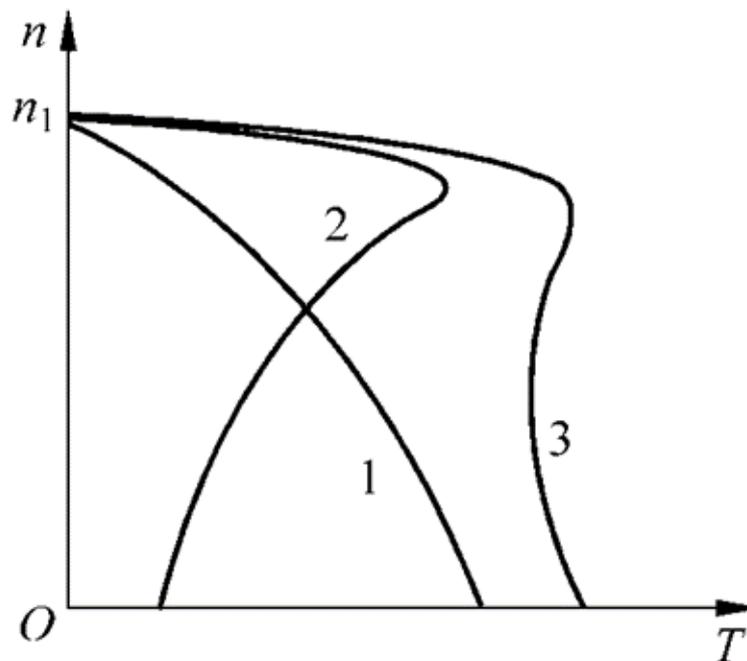


深槽式异步电动机机械特性

### 3、双鼠笼异步电动机



(a)

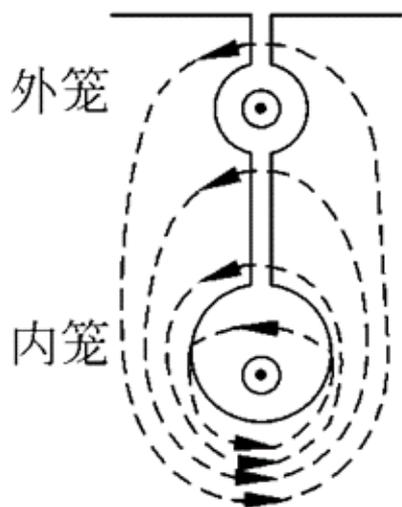


(b)

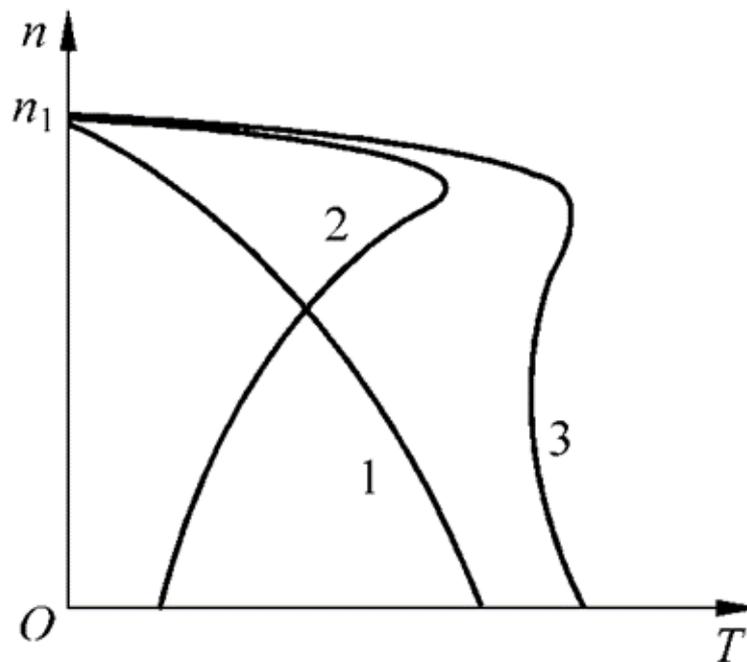
双鼠笼异步电动机转子上装有两套鼠笼：

- ✓ 外笼电阻率高、截面小；
- ✓ 内笼电阻率低、截面大。

### 3、双鼠笼异步电动机



(a)

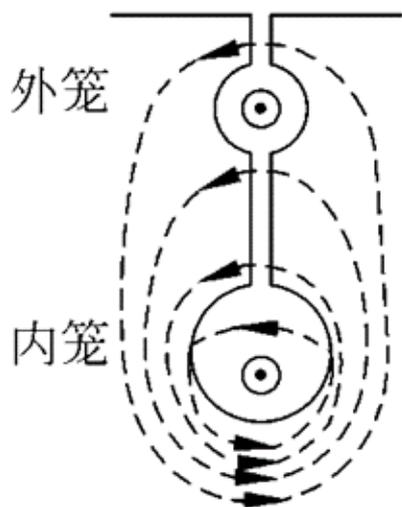


(b)

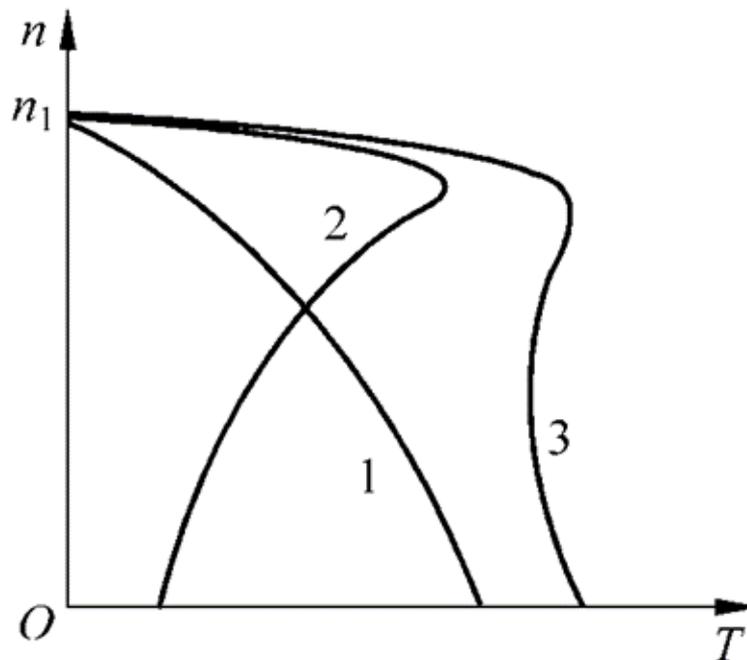
电机启动时：转子电流频率高，内笼电抗大、电流小，外笼电抗小、电流大，外笼起主要作用，外笼又称启动笼。

正常运行时：转子电流频率很低，电流分配主要取决于电阻，内笼电流比外笼大，内笼起主要作用，内笼又称运行笼。

### 3、双鼠笼异步电动机



(a)



(b)

曲线 1 为外笼机械特性，曲线 2 为内笼机械特性，曲线 3 为合成机械特性。

双鼠笼异步电动机的启动转矩比较大。双鼠笼异步电动机比普通异步电动机转子漏抗大，功率因数低，效率相差不多。



# 结 论

- 1、加大转子电阻、选用深槽和双鼠笼槽的转子槽形均能增加启动转矩；
- 2、加大转子电阻降低了电动机的运行效率；
- 3、选用深槽和双鼠笼槽的转子槽形降低了电动机的功率因数。



- 一. 三相异步电机直接启动
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动**
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态



### 四. 绕线式三相异步电动机的启动

#### 本节学习要点:

- ① 转子串频敏变阻器启动方法
- ② 转子串电阻分级启动的阻值计算方法

### 1、转子串**频敏变阻器**启动

方法:

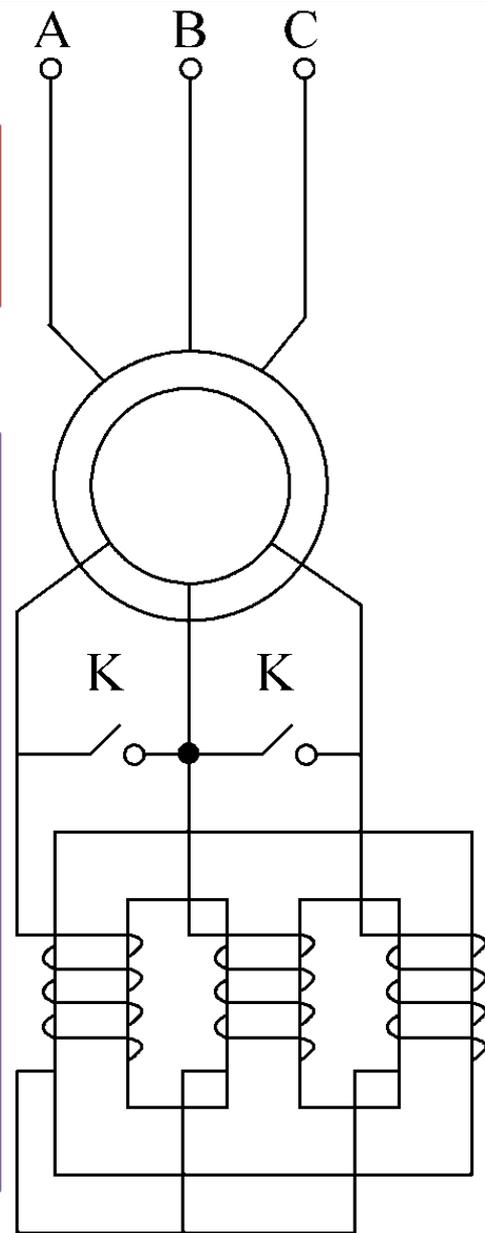
频敏变阻器**设计得较为饱和**，忽略漏阻抗时，其**阻抗**表示为：

$$Z_P = R_P + jX_P$$

原理:

启动瞬间， $s=1$ ，转子回路频率为50Hz，铁芯饱和，磁滞涡流损耗大，则 $R_P$ 较大。由于饱和，励磁电流较大，励磁电抗 $X_P$ 较小，故 $R_P > X_P$ 。串入频敏变阻器后，电流得到了限制；

由于 $R_P > R_2$ **功率因数大大提高**，电流下降并不多，**启动转矩明显增大**。

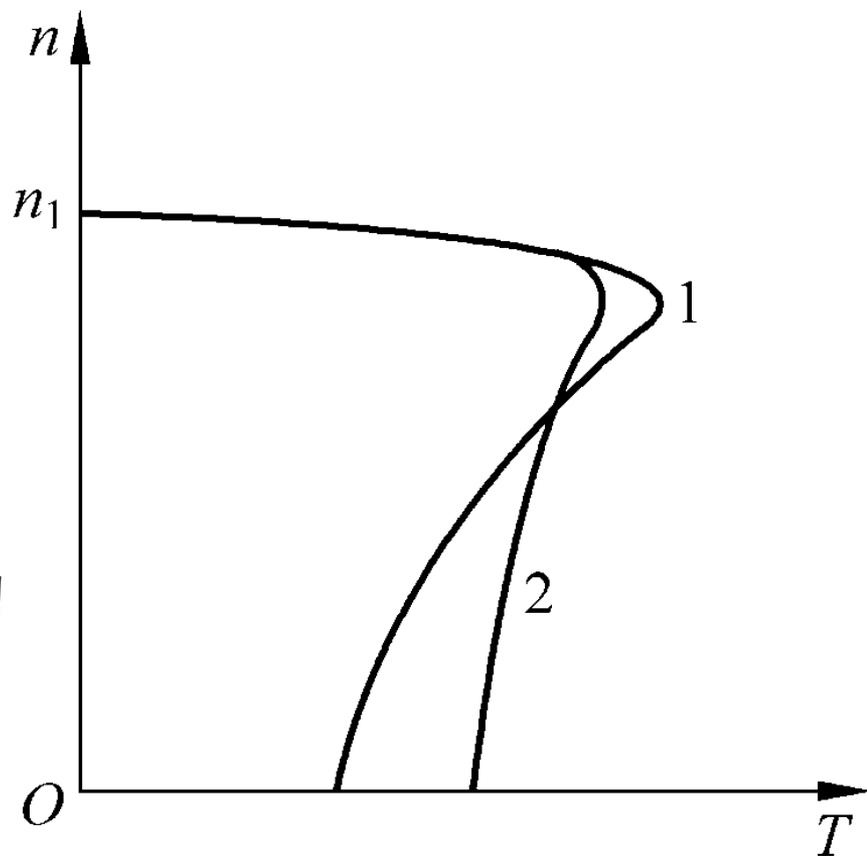


启动过程中：随转速增加转子电流频率 $sf_1$ 不断降低，导致损耗不断减小，电阻 $R_p$ 不断减小，电抗 $X_p$ 也不断减小。

启动完毕：转子电流频率很小， $Z_p = R_p + jX_p$ 近似为零，可将频敏变阻器切除。

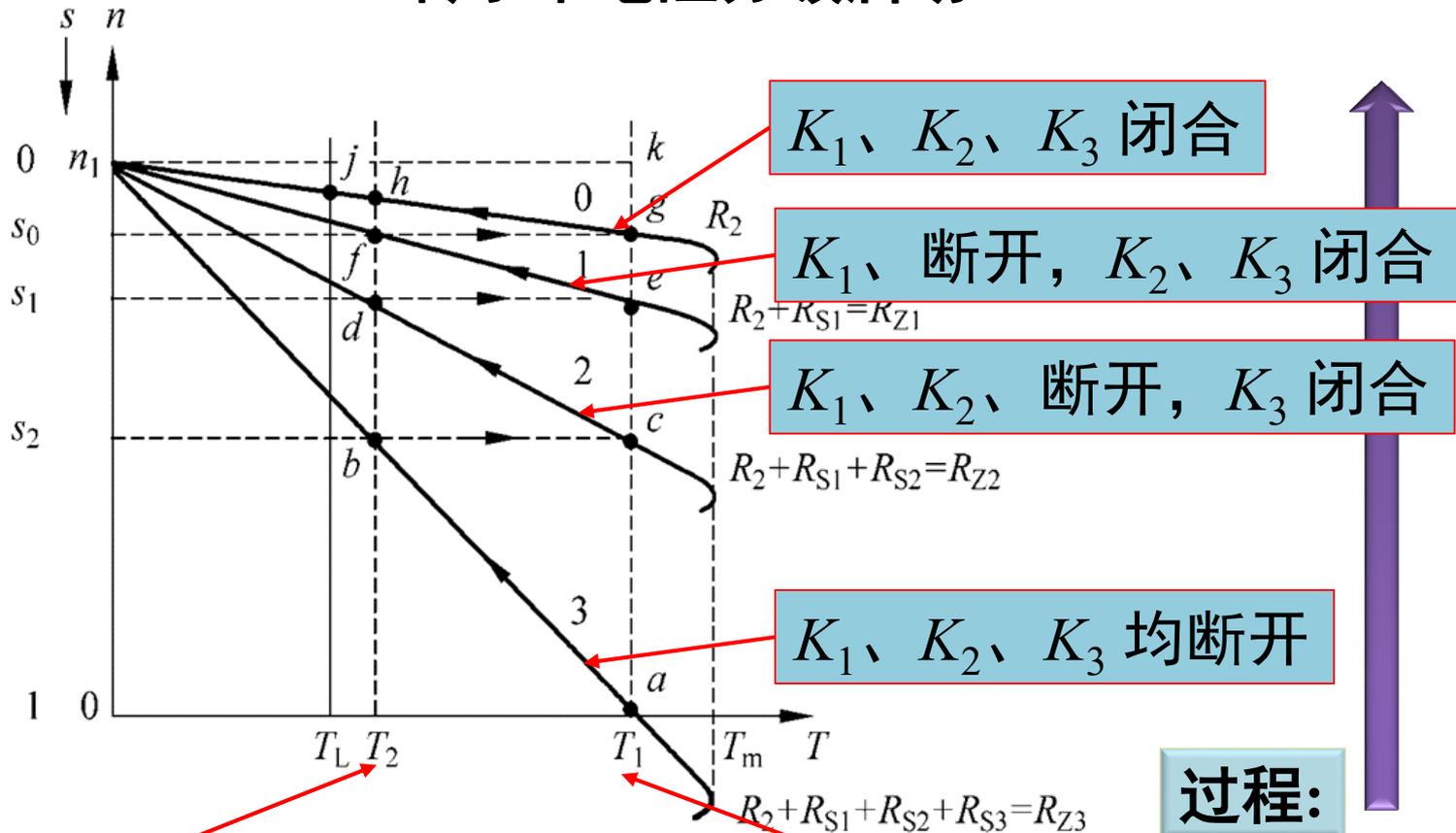
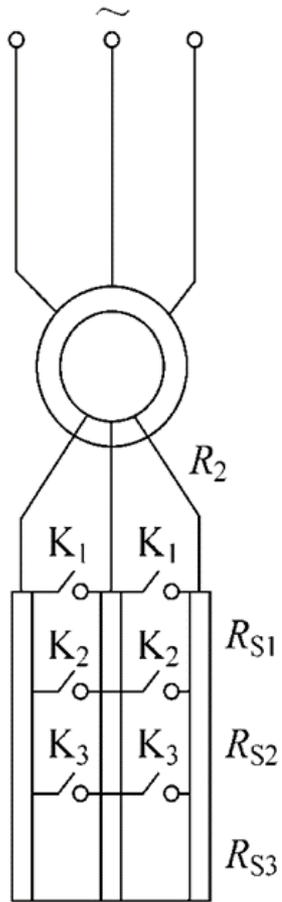
① 利用频敏变阻器启动异步电动机可获得启动特性接近最大启动转矩的机械特性曲线 2。

② 曲线 1 为固有机械特性



### 2、转子串电阻分级启动

转子串电阻分级启动:



(a) 最小启动（切换）转矩  $T_2$       最大启动转矩  $T_1$

过程:

 **作图法计算启动电阻：**以启动级数  $m=3$  为例

- (1) 先画固有机械特性。通过理想空载点( $n_1, T=0$ )和额定工作点( $n_N, T_N$ ) 两点画出固有机械特性。
- (2) 确定**最大启动转矩** $T_1$ 和**切换转矩** $T_2$ 。通常取 $T_1 \leq 0.85T_m$ ,  $T_2 \geq 1.1T_1$ 。
- (3) 通过启动点 $a(s_a=1, T_a=T_1)$  与理想空载点, 画**第一级启动机械特性曲线 3**。
- (4) 经曲线 3上的  $b$ 点水平右移至 $T=T_1$ 处, 找到**第二机械特性曲线 2**上的  $c$ 点, 再与理想空载点连接, 画出第二级机械特性。
- (5) 用第(4)步的方法画出**第三级启动机械特性**。
- (6) 从第三级启动特性上的 $f$ 点向右平移至 $T=T_1$ 得到交点 $g$ ,  $g$ 点也必须是固有机械特性上的点, 即 **$g$ 为三条曲线交点时, 则作图正确**, 否则需修改 $T_1$ 、 $T_2$ 大小, 重新作图, 直至正确。



若  $T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[ (R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} = const \rightarrow \frac{s}{R_2 + R_s} = const$

当  $T=T_1$  不变时

$$\frac{s_0}{R_2} = \frac{s_1}{R_2 + R_{s1}} = \frac{s_2}{R_2 + R_{s1} + R_{s2}} = \frac{s_3}{R_2 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}$$

$$\frac{\bar{k}g}{R_2} = \frac{\bar{k}e}{R_{Z1}} = \frac{\bar{k}c}{R_{Z2}} = \frac{\bar{k}a}{R_{Z3}}$$

$$R_{S1} = R_{Z1} - R_2 = \left( \frac{\bar{k}e}{\bar{k}g} - \frac{\bar{k}g}{\bar{k}g} \right) = \frac{\bar{g}e}{\bar{k}g} R_2$$

$$R_{S2} = R_{Z2} - R_{Z1} = \left( \frac{\bar{k}c}{\bar{k}g} - \frac{\bar{k}e}{\bar{k}g} \right) = \frac{\bar{e}c}{\bar{k}g} R_2$$

$$R_{S3} = R_{Z3} - R_{Z2} = \left( \frac{\bar{k}a}{\bar{k}g} - \frac{\bar{k}c}{\bar{k}g} \right) = \frac{\bar{c}a}{\bar{k}g} R_2$$

其中，转子绕组为Y接法，每相电阻：

$$R_2 \approx Z_{2s} = s_N \frac{E_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}}$$

### 解析法计算启动电阻:

根据机械特性的**实用公式**:

$$T = \frac{2T_m}{s_m} s$$

- (1) 在同一条机械特性上,  $T_m$  与  $s_m$  为常数, 则  $T \propto s$ 。
- (2) 对**转子串电阻**后的不同机械特性, 其  $T_m$  为常数, 当  $s$  为常数时, 有:  $T \propto 1/s_m \propto 1/(R_2 + R_s)$ 。

在不同机械特性上  $\longrightarrow$

$$\frac{R_{Z1}}{R_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{R_{Z2}}{R_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \frac{R_{Z3}}{R_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

令

$$\frac{T_1}{T_2} = \alpha$$

, 为启动转矩比。  $\longrightarrow$

$$\frac{R_{Z1}}{R_2} = \frac{R_{Z2}}{R_{Z1}} = \frac{R_{Z3}}{R_{Z2}} = \alpha$$

### 解析法计算启动电阻:



$$R_{Z1} = \alpha R_2$$

$$R_{Z2} = \alpha R_{Z1} = \alpha^2 R_2$$

...

$$R_{Zm} = \alpha R_{Z(m-1)} = \alpha^m R_2$$

启动机械特性

当  $T=T_1$  时,



$$\frac{R_{Zm}}{1} = \frac{R_2}{s_0}$$

$$\frac{R_{Zm}}{R_2} = \frac{1}{s_0}$$

固有机械特性

$T \propto s$



$$\frac{s_N}{s_0} = \frac{T_N}{T_1}$$

$$\frac{1}{s_0} = \frac{T_N}{s_N T_1} = \frac{T_N}{s_N \alpha T_2}$$

$$\alpha^m = \frac{R_{Zm}}{R_2} = \frac{1}{s_0} = \frac{T_N}{s_N T_1}$$

$$\alpha^{m+1} = \frac{T_N}{s_N T_2}$$



$$\alpha = \sqrt[m]{\frac{T_N}{s_N T_1}}$$

$$\alpha = \sqrt[m+1]{\frac{T_N}{s_N T_2}}$$



### 计算启动电阻步骤:

(1) 计算启动转矩比:  $\alpha = \sqrt{\frac{T_N}{s_N T_1}}$

(2) 校核  $T_2 \geq (1.1 \sim 1.2) T_L$

(3) 各级启动时转子回路总电阻

$$R_{Z1} = \alpha R_2$$

$$R_{Z2} = \alpha R_{Z1} = \alpha^2 R_2$$

...

$$R_{Zm} = \alpha R_{Z(m-1)} = \alpha^m R_2$$

(4) 各级启动时转子外串启动电阻:



例题8-3 某生产机械用绕线式三相异步电动机拖动，有关技术数据为： $P_N=40\text{kW}$ ， $n_N=1460\text{r/min}$ ， $E_{2N}=420\text{V}$ ， $I_{2N}=61.5\text{A}$ ， $\lambda=2.6$ ，负载启动转矩为 $T_L=0.75T_N$ ，求串电阻三级启动的启动电阻。

解：额定转差率：

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

转子每相电阻：

$$R_2 \approx \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.027 \times 420}{\sqrt{3} \times 61.5} = 0.106 \Omega$$

最大启动转矩： $T_1 \leq 0.85 T_m = 0.85 \times 2.6 \times T_N = 2.21 T_N$

启动转矩比：

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{T_N}{s_N T_1}} = \sqrt[3]{\frac{T_N}{0.027 \times 2.21 T_N}} = 2.56$$



例题8-3 某生产机械用绕线式三相异步电动机拖动，有关技术数据为： $P_N=40\text{kW}$ ， $n_N=1460\text{r/min}$ ， $E_{2N}=420\text{V}$ ， $I_{2N}=61.5\text{A}$ ， $\lambda=2.6$ ，负载启动转矩为 $T_L=0.75T_N$ ，求串电阻三级启动的启动电阻。

解：校核切换转矩： $T_2 = T_1/\alpha = 2.21T_N/2.56 = 0.86T_N > 1.1T_L$

各级启动时转子回路总电阻：

$$R_{Z1} = \alpha R_2 = 0.271 \Omega$$

$$R_{Z2} = \alpha R_{Z1} = 0.695 \Omega$$

$$R_{Z3} = \alpha R_{Z2} = 1.778 \Omega$$

各级启动时转子外串启动电阻：

$$R_{S1} = R_{Z1} - R_2 = 0.165 \Omega$$

$$R_{S2} = R_{Z2} - R_{Z1} = 0.424 \Omega$$

$$R_{S3} = R_{Z3} - R_{Z2} = 1.083 \Omega$$



- 一. 三相异步电机直接启动
- 二. 鼠笼三相异步电动机降压启动
- 三. 高启动转矩的鼠笼三相异步电动机
- 四. 绕线式三相异步电动机的启动
- 五. 三相异步电动机的各种运行状态**



### 五. 三相异步电动机的各种运行状态

#### 本节学习要点：

- ① 掌握三相异步电动机**电动**与**制动**方法的原理及特点

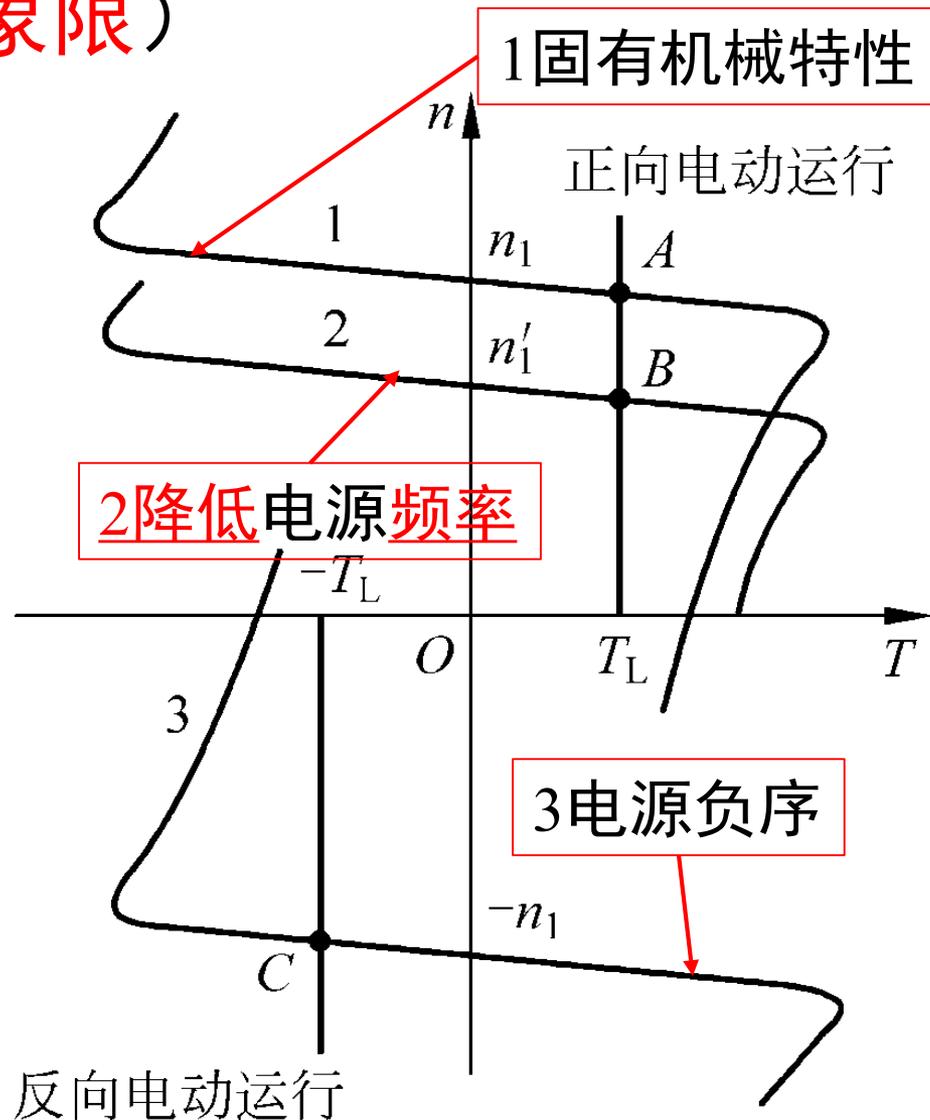


### 概述:

- ① 三相异步电动机各种运行状态的定义方法与直流电动机是一致的；
- ② 若电磁转矩  $T$  与转速  $n$  的方向一致时，电动机运行于电动状态；反之，若  $T$  与  $n$  的方向相反，电动机运行于制动状态。
- ③ 制动状态中，根据  $T$  与  $n$  的不同情况，分成：回馈制动、反接制动、倒拉反转及能耗制动等。

### 1、电动运行（I和III象限）

- ✓ 电动机运行于第一象限的工作点，如A、B点为正向电动运行状态；
- ✓ 电动机运行于第三象限的工作点，如C点为反向电动运行状态。
- ✓ 电动状态下的电磁转矩为拖动性转矩。

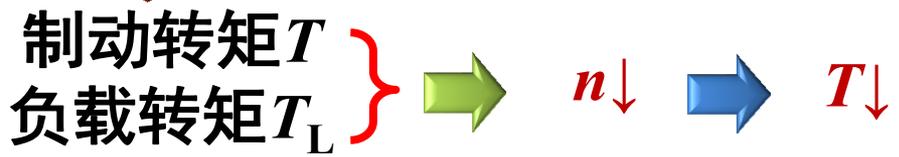
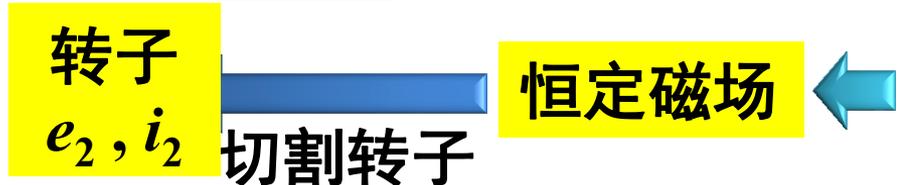


### 2、能耗制动

☞ 能耗制动的基本原理:

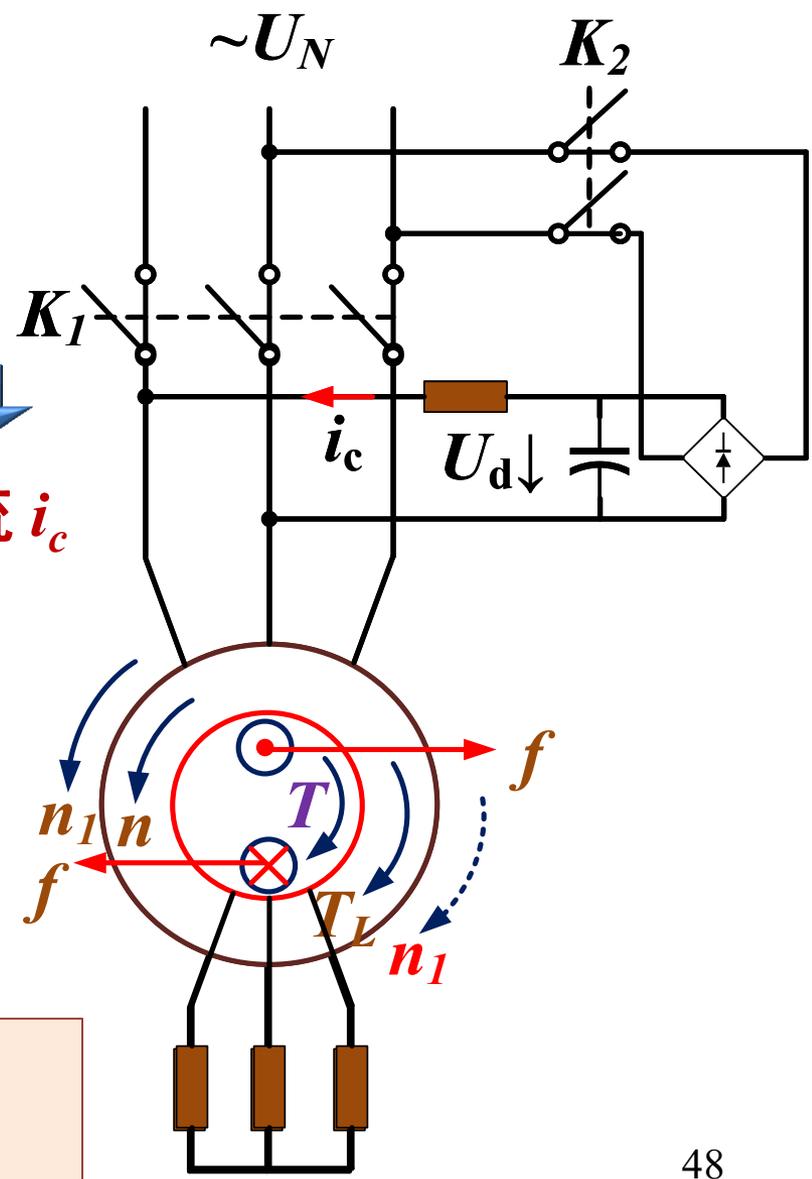
**正常运行:**  $K_1$  闭合,  $K_2$  断开

**能耗制动:**  $K_2$  闭合,  $K_1$  断开



- 反抗性: 系统准确停机
- 位能性: 匀速下放

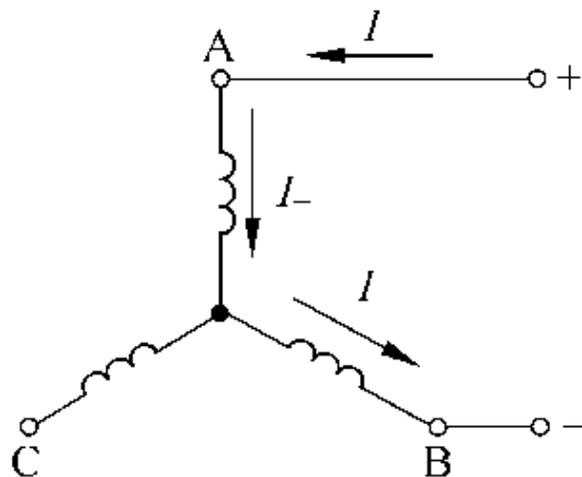
能耗制动时, **转子动能** 转化成 **电能** 全部 **消耗于转子回路** 中。



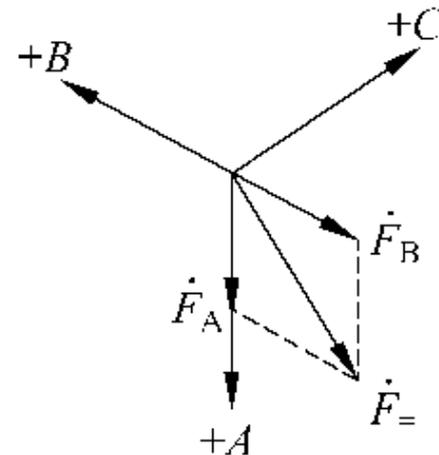
### Y 定子等效电流:

当  $I_{\sim}$  从出线端 A 进 B 出时，则 A 相绕组和 B 相绕组分别产生磁通势  $\dot{F}_A$  和  $\dot{F}_B$ ，两者幅值相等，空间差 60 度电角度。

$$F_A = F_B = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\sim}$$



(a)



(b)

### Y 定子通入直流时的磁通势

$$F_{\sim} = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\sim}$$

等效原则  $F_{\sim} = F_{=}$

三相交流磁通势:

$$F_{\sim} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_1$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{\sim}$$

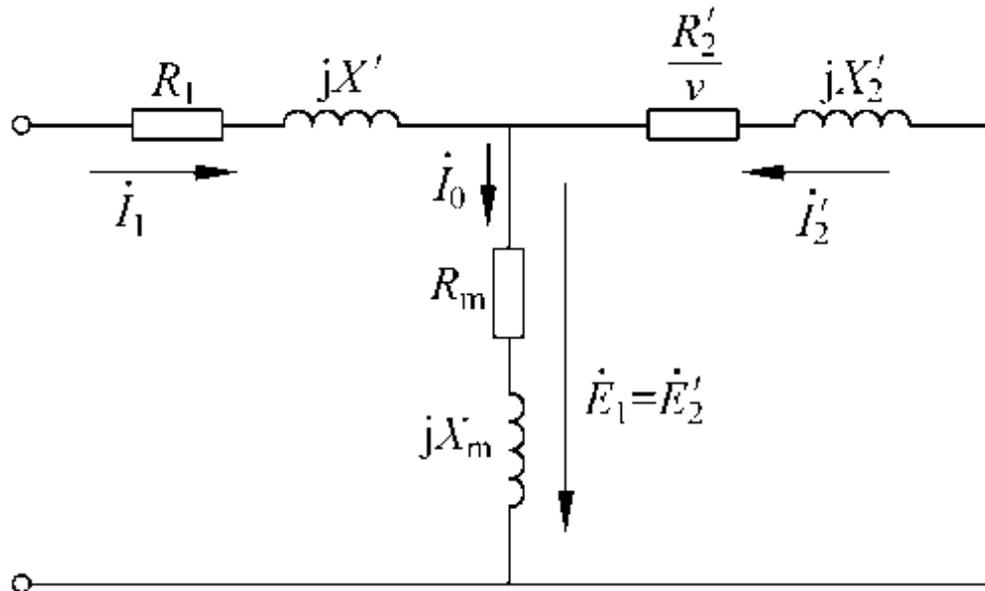
### 转差率及等效电路:

磁通势  $F_m$  与转子的**相对转速**  $-n$

能耗制动的转差率: 
$$v = \frac{-n}{n_1}$$

转子绕组感应电动势的大小: 
$$\dot{E}_{2v} = v\dot{E}_2$$
      频率: 
$$f_2 = vf_1$$

把转子绕组的相数、匝数、绕组系数及转子频率折合到定子边后, 其**能耗制动的等效电路**



### 能耗制动的机械特性:

$$I_1^2 = I_2'^2 + I_0^2 - 2I_2' I_0 \cos(90 + \varphi_2)$$

$$= I_2'^2 + I_0^2 + 2I_2' I_0 \sin\varphi_2$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{X_2'}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{v}\right)^2 + X_2'^2}}$$

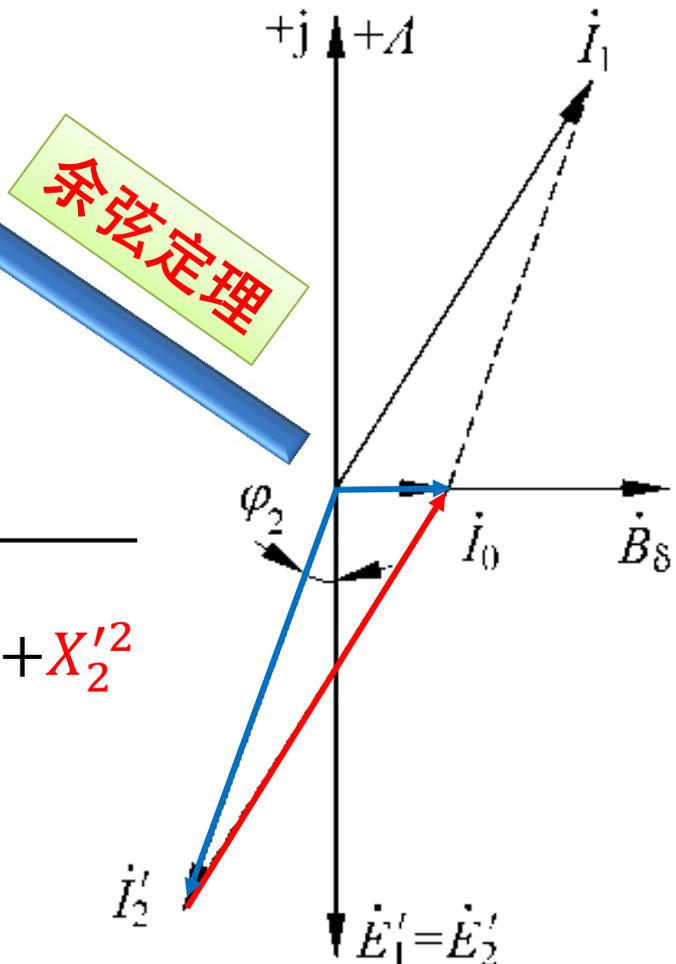
忽略铁耗:

$$I_0 = \frac{E_1}{X_m} = \frac{E_2'}{X_m} = \frac{I_2' Z_2'}{X_m} = \frac{I_2'}{X_m} \sqrt{\left(\frac{R_2'}{v}\right)^2 + X_2'^2}$$

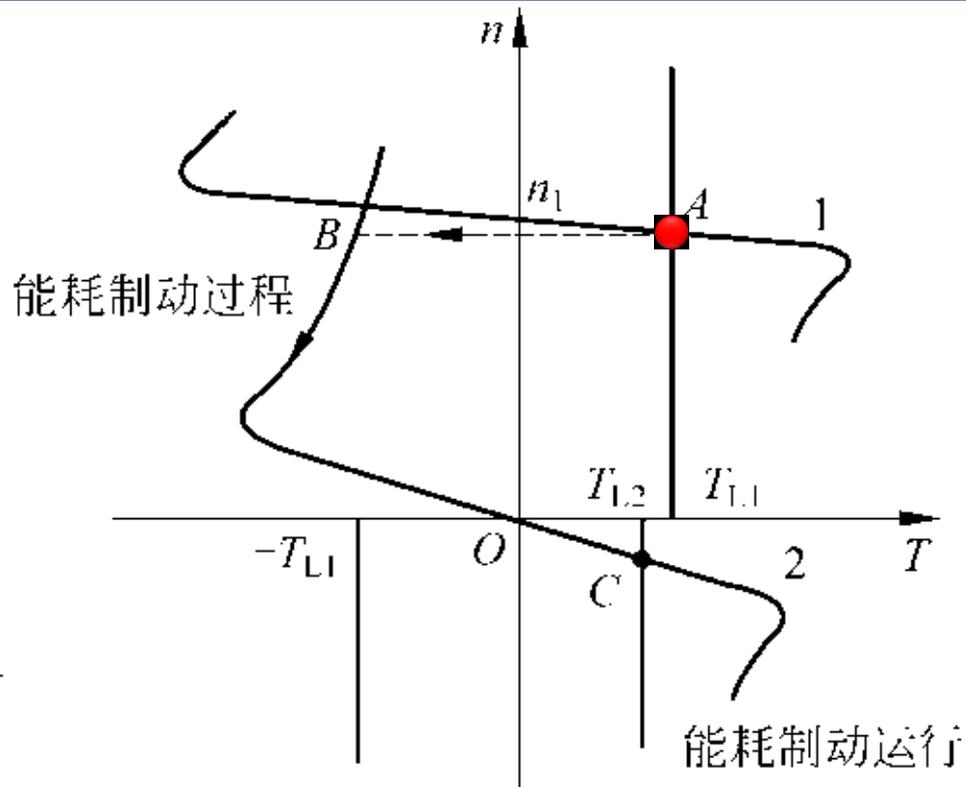
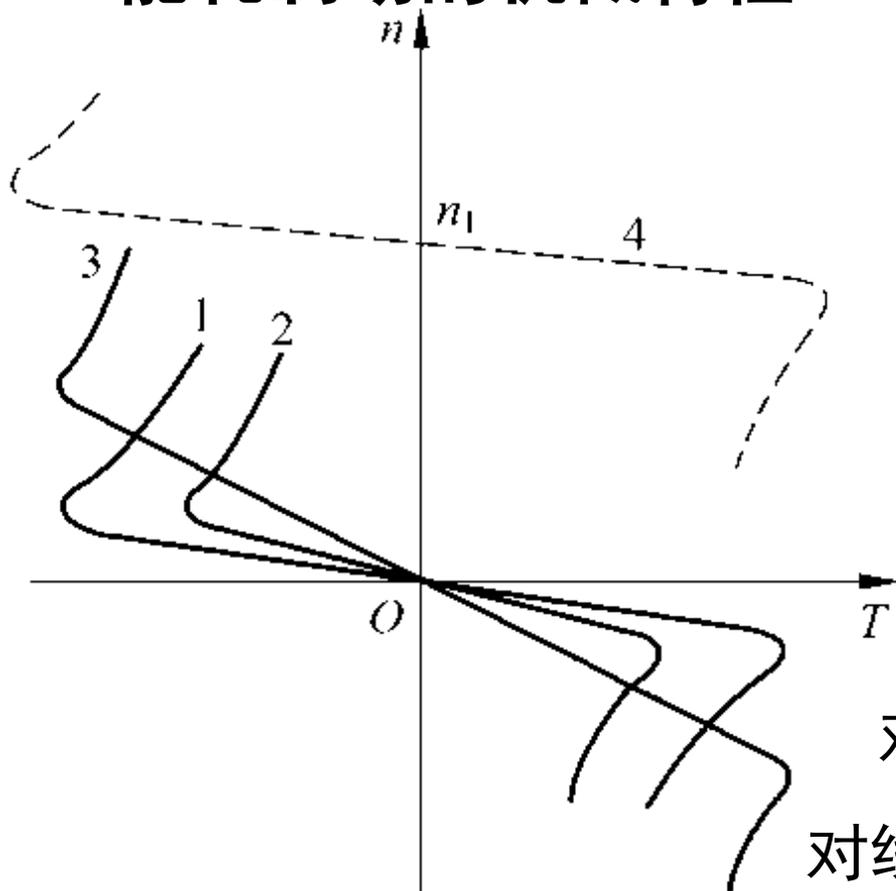
$$I_2'^2 = \frac{I_1^2 X_m^2}{\left(\frac{R_2'}{v}\right)^2 + (X_m + X_2')^2}$$

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3I_2'^2 \frac{R_2'}{v}}{\Omega_1} = \frac{3I_1^2 X_m^2 \frac{R_2'}{v}}{\Omega_1 \left[\left(\frac{R_2'}{v}\right)^2 + (X_m + X_2')^2\right]}$$

能耗制动时的电流关系



### 能耗制动的机械特性:



对鼠笼异步电动机:  $I_{\Sigma} = (4 \sim 5)I_0$

对线绕式异步电动机:  $I_{\Sigma} = (2 \sim 3)I_0$

$$R_s = (0.2 \sim 0.4) \frac{E_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}}$$

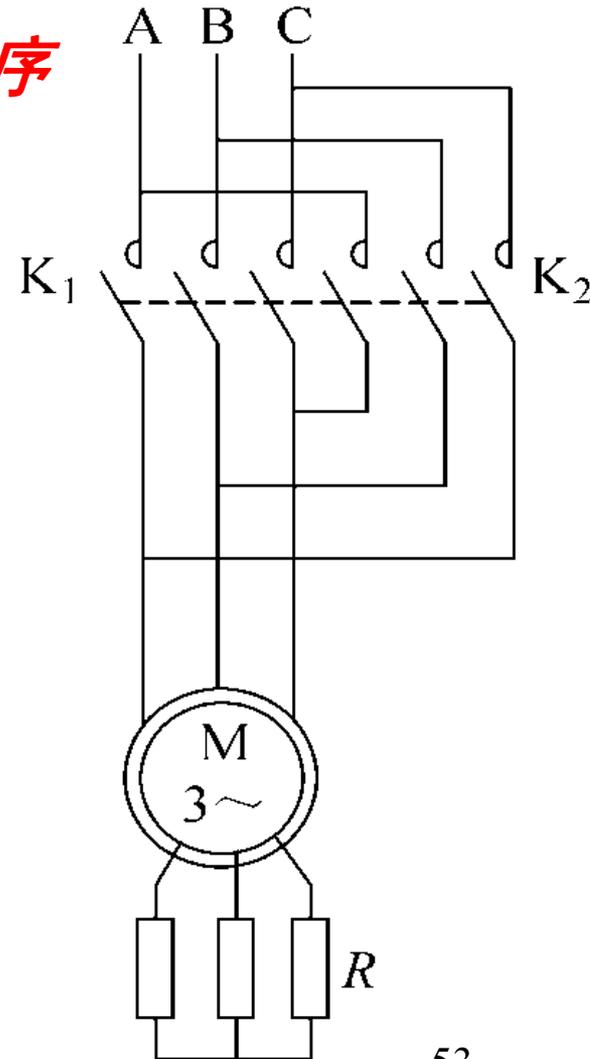
**曲线1比曲线2磁通势强、转矩大；  
曲线3与曲线1比，转子串电阻大**

### 3、反接制动（定子两相对调- 快速停机 II象限）

**实现方法：** 定子任意两相对调，电源**反相序**

$-n_1 \rightarrow \Delta n$  反向  $\rightarrow \dot{E}_{2s}, \dot{I}_{2s}$  反向

**固有特性：**  $T$  反向

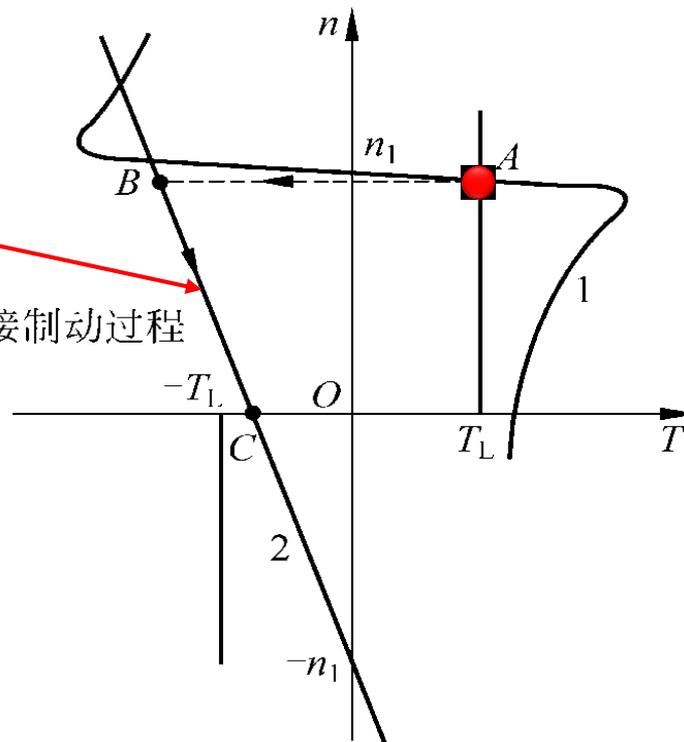


**串大电阻**

反接制动过程

$$-T_L < T < T_L$$

**准确停车**



### 3. 反接制动 (定子两相对调-快速停机 II象限)

#### 功率关系:

电源负相序,  $n \geq 0$  时, 有  $s \geq 1$ , 机械功率为负值。

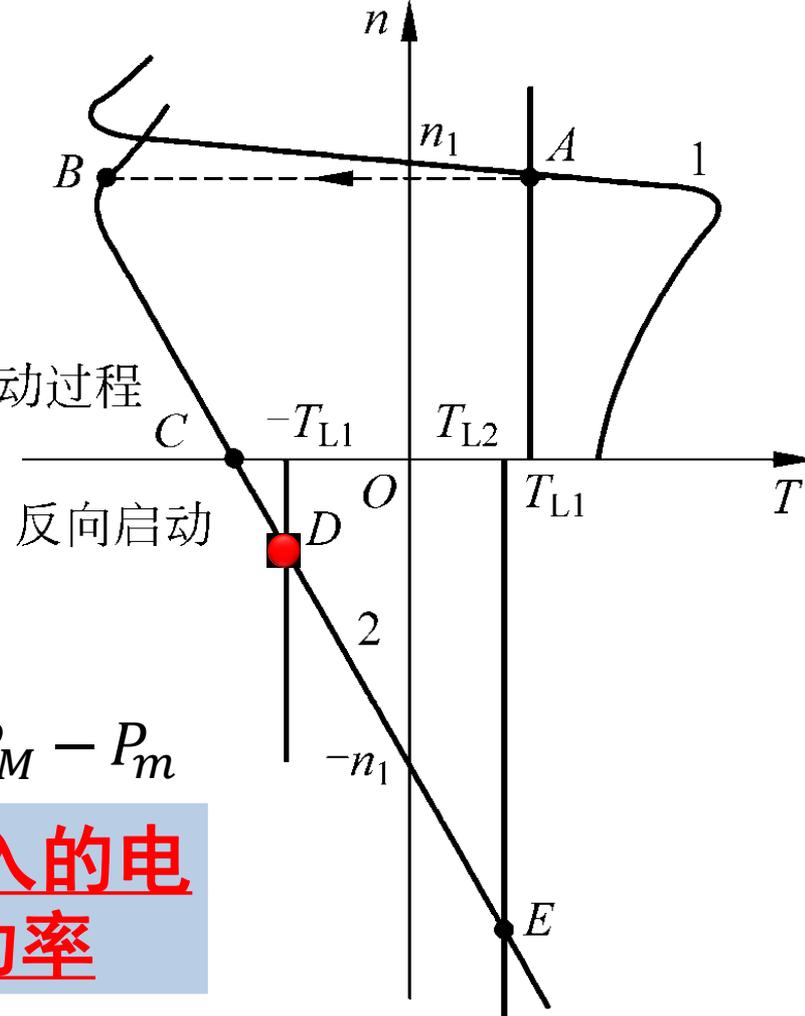
$$P_m = 3I_2'^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_2' < 0 \quad \text{反接制动过程}$$

从定子到转子的电磁功率

$$P_M = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} > 0$$

转子回路的铜耗  $p_{Cu2} = 3I_2'^2 R_2' = P_M - P_m$

转子回路中不仅消耗从电源输入的电磁功率, 还吸收了负载的机械功率



### 3. 反接制动 (定子两相对调-快速停机 II象限)

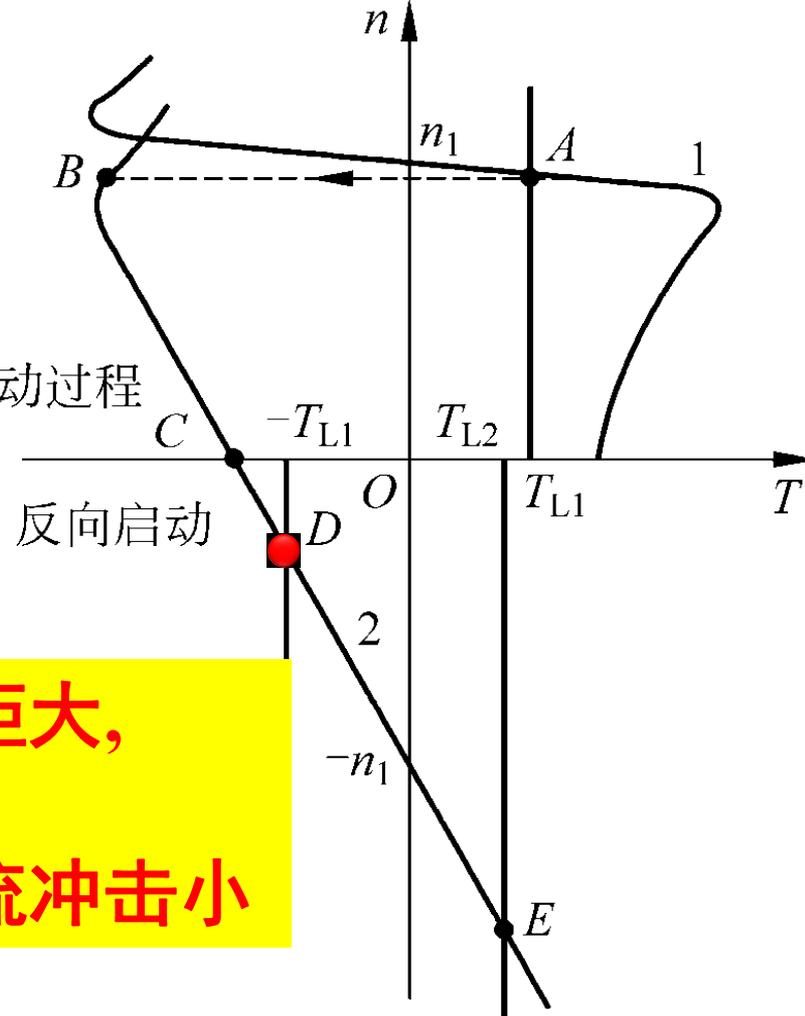
**定量计算:** 计算一定转速下停机时, **最初制动转矩  $T_B$**  与串入**制动电阻  $R_s$**  的关系。

将B点( $s_b, T_B$ )代入人为机械特性反接制动过程

$$T_B = \frac{2T_m}{\frac{s'_m}{s_B} + \frac{s_B}{s'_m}} \longrightarrow s'_m$$

$s'_m$  两个解 {  
 曲线段: 平均制动转矩大, 停机时间短  
 直线段: 阻值大, 电流冲击小

$$\frac{s'_m}{s_m} = \frac{R_2 + R_s}{R_2} \longrightarrow R_s$$



**例题8-4** 已知绕线式异步电动机的额定数据为： $P_N=22\text{kW}$ ， $n_N=723\text{r/min}$ ， $E_{2N}=197\text{V}$ ， $I_{2N}=70.5\text{A}$ ， $\lambda=3$ 。如果拖动额定负载运行时，采用**反接制动停车**，要求制动开始时最大制动转矩为 $2T_N$ ，求转子每相串入的制动电阻值。

**解题思路：**通过机械特性曲线1和2的**临界转差比**，计算转子电阻

按定义计算临界转差率：

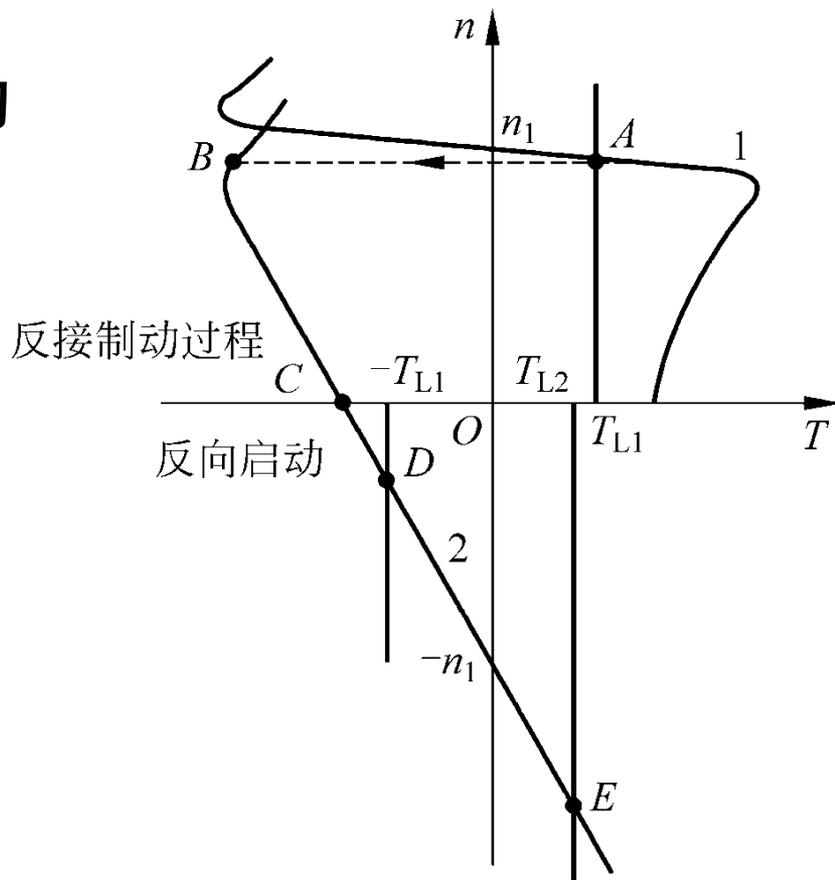
$$s_m = s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

根据已知的B点( $s_b, T_B$ )，

算机械特性曲线2的 $s'_m$

根据已知电压电流，按定义算

转子每相电阻： $R_2 = s_N E_{2N} / \sqrt{3} I_{2N}$





解：额定转差率：

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 723}{750} = 0.036$$

转子每相电阻：

$$R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.036 \times 197}{\sqrt{3} \times 70.5} = 0.0581 \Omega$$

制动后，瞬间电动机转差率：

$$s = \frac{-n_1 - n_N}{-n_1} = \frac{-750 - 723}{-750} = 1.964$$

反接制动机械特性的临界转差率：

$$\because T = \frac{2\lambda T_N}{\frac{s'_m}{s} + \frac{s}{s'_m}} = 2T_N \quad \therefore s'_m = s \left[ \frac{\lambda}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - 1} \right] = 5.14 \text{ 或 } 0.75$$



固有机械特性的临界转差率： $s_m = s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.21$

转子串入反接制动电阻：

$$s'_m = 5.14 \text{ 时, } R_S = (s'_m/s_m - 1)R_2 = 1.364\Omega$$

$$s'_m = 0.75 \text{ 时, } R_S = (s'_m/s_m - 1)R_2 = 0.15\Omega \text{ (舍去)}$$

### 4、倒拉反转运行(转向反向的反接制动)

--位能负载低速下放 (IV象限)

**实现方法:**

拖动位能性恒转矩负载时, **转子回路串入足够大三相电阻**, 使  $s'_m \gg 1$ , 对应稳定运行点位于于第IV象限。

**功率关系:**

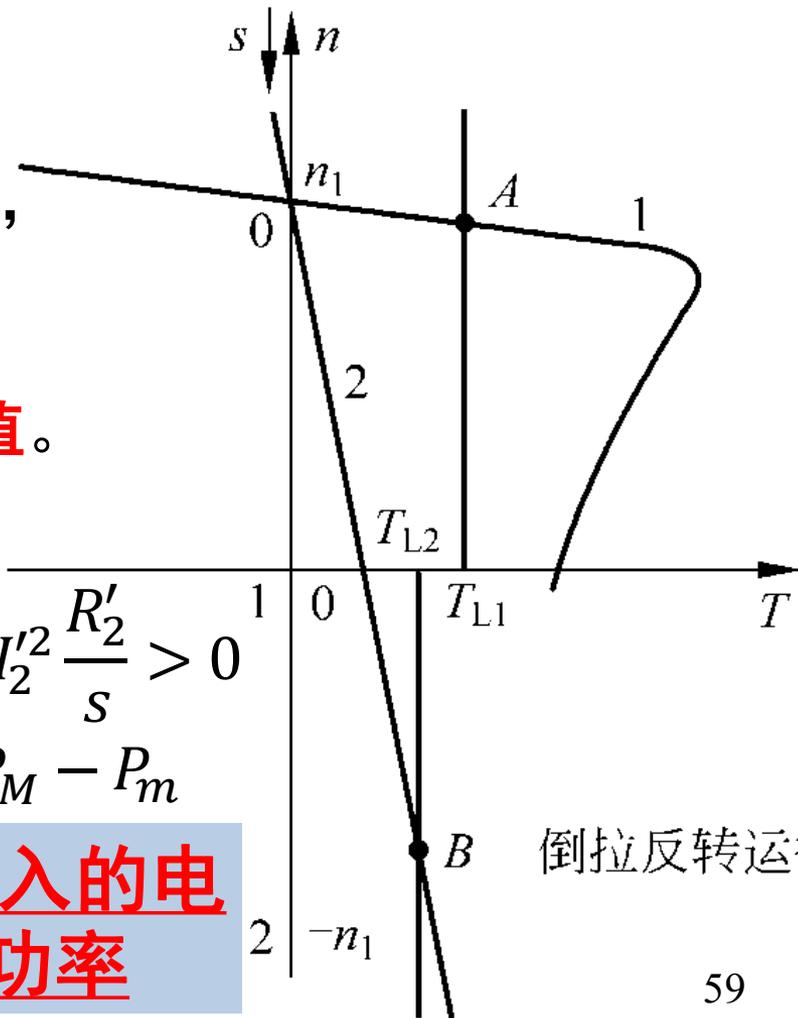
$s > 1$ , 机械功率为**负值**。

$$P_m = 3I_2'^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_2' < 0$$

从**定子到转子**的电磁功率:  $P_M = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} > 0$

转子回路的铜耗  $p_{Cu2} = 3I_2'^2 R_2' = P_M - P_m$

转子回路中不仅**消耗从电源输入的电磁功率**, 还**吸收了负载的机械功率**



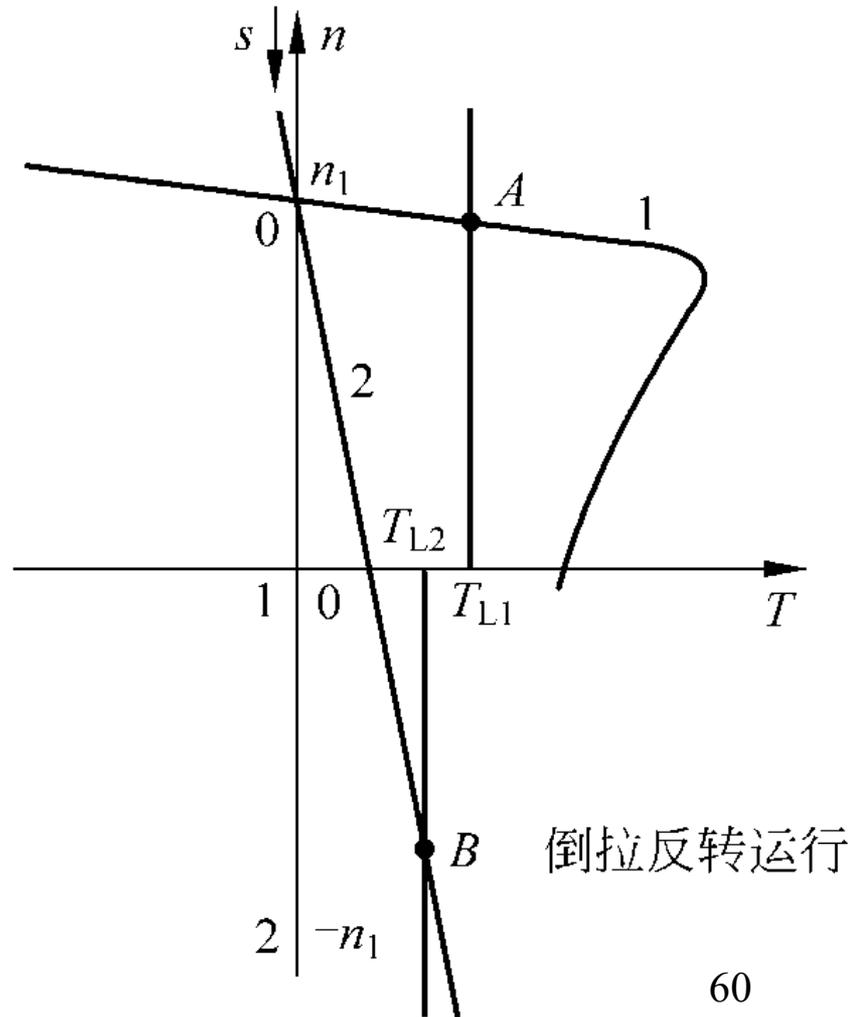
### 4、倒拉反转运行(转向反向的反接制动) --位能负载低速下放 (IV象限)

**定量计算:** 计算一定负载转矩 $T_L$ 下, 下放速度 $n$ 与外接电阻 $R_s$ 的关系。

将B点( $s_b, T_{L1}$ )代入人为机械特性

$$T_{L1} = \frac{2T_m}{\frac{s'_m}{s} + \frac{s}{s'_m}} \quad \text{或} \quad T_{L1} = \frac{2T_m}{s'_m} s \quad \longrightarrow \quad s'_m$$

$$\frac{s'_m}{s_m} = \frac{R_2 + R_s}{R_2} \quad \longrightarrow \quad R_s$$



### 5、回馈制动运行

转向反向的回馈制动  
--位能负载高速下放 (IV象限)

**实现方法:** 定子任意两相对调,

电源反相 → 反接制动 → C

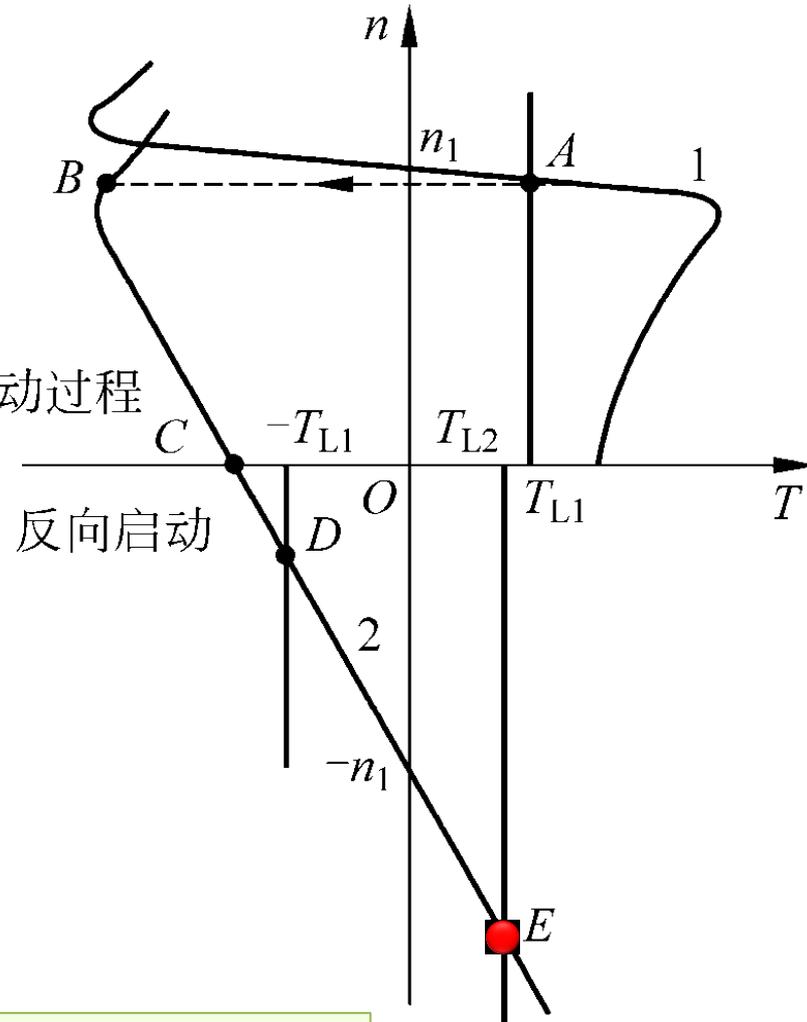
(T+T<sub>L2</sub>)驱动 → 反向启动

→ IV象限E点 (T=T<sub>L2</sub>) 稳定

**功率关系:** 电动机输出的机械功率

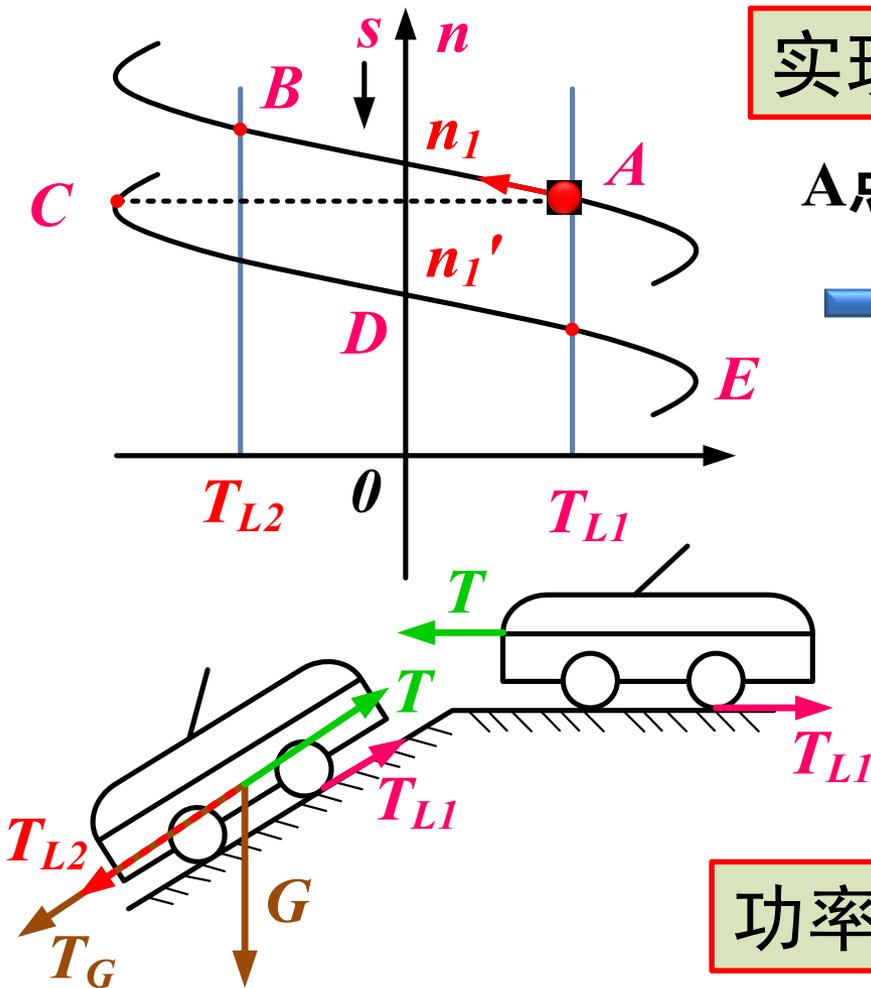
$$P_m = 3I_2'^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_2' < 0$$

电磁功率:  $P_M = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} < 0$



**电磁功率减去损耗后回馈给电网**

### 转向不变的回馈制动--电天下坡或变频、变极调速 (II象限)



实现方法:

① 电天下坡

A点( $T+T_{L2}$ )驱动  $\rightarrow n > n_1$ ,  $T$ 反向

$\rightarrow$  II象限B点 ( $T=T_{L2}$ ) 稳定

② 变频、变极调速

$f \downarrow$   
 $p \uparrow$  }  $n_1 \downarrow$

$n_A$  不突变

A点  $\rightarrow$  C点  $\rightarrow$  E点稳定

功率关系:

电磁功率减去损耗后回馈给电网

### 回馈制动的功率关系

两种回馈制动的共同特点：

II 象限

IV 象限

轴上受外来**驱动**转矩

$$|n| > |n_1|, s < 0$$

$$\cos\psi_2 < 0, \cos\varphi_1 < 0$$

$$P_M = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} < 0$$

$$P_m = (1 - s) \cdot P_M < 0$$

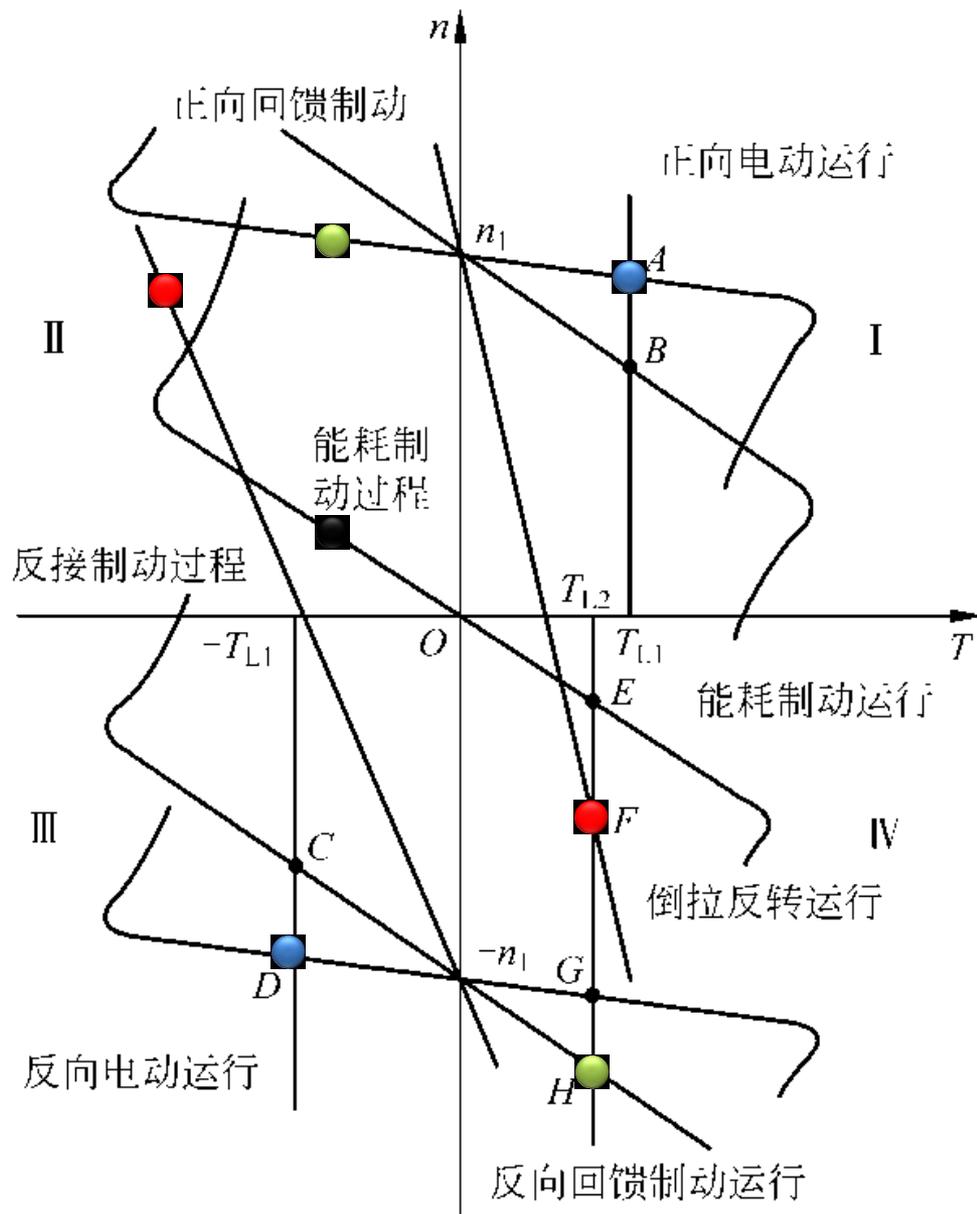
$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 < 0$$

轴上输入机械功率

向电网发出有功功率

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin\varphi_1 > 0$$

从电网吸收  
无功功率用来**建立**磁场



**例题8-5** 某起重机吊钩由一台绕线式三相异步电动机拖动，电动机额定数据为： $P_N=40\text{kW}$ ， $n_N=1464\text{r/min}$ ， $\lambda=2.2$ ， $K_T=1$ ， $R_2=0.06\ \Omega$ 。电动机负载转矩情况，提升重物时 $261\text{Nm}$ ，下放重物时 $208\text{Nm}$ 。（1）提升重物，高速档转速 $n_A$ 为工作在固有机械特性上的转速，低速档时 $n_B=0.25n_A$ ，工作于转子回路串电阻特性上，计算两档转速与转子回路串入电阻值。

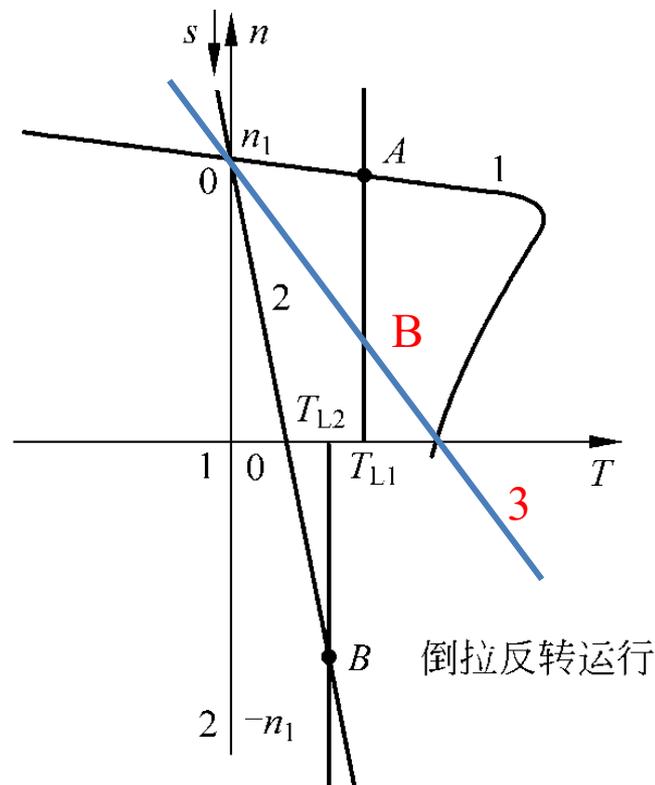
**解题思路：**

先根据已知条件计算实用公式。

已知A点转矩，代入实用公式求 $n_A$ 。

已知B点转速（即， $s_b$ ），由于A、B点转矩相同，转差率之比**等于**转子电阻比，

解法2：临界转差比**等于**转子电阻比。





解：额定转差率：
$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1464}{1500} = 0.024$$

固有机械特性的临界转差率：
$$s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.1$$

额定转矩：
$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 261 (N \cdot m)$$

(1) 提升重物时负载转矩 261Nm

高速时转速：
$$n_A = n_N = 1464 r/m$$

低速时转速：
$$n_B = 0.25 n_N = 366 r/m$$

B点时转差率：
$$s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = \frac{1500 - 366}{1500} = 0.756$$

过B点的机械特性的临界转差率：
$$s_{mB} = s_B (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 3.145$$

低速时转子串入电阻值：
$$R_s = (s_B / s_N - 1) R_2 = 1.83 \Omega$$

**另解：** 
$$R_s = (s_{mB} / s_m - 1) R_2 = 1.827 \Omega$$



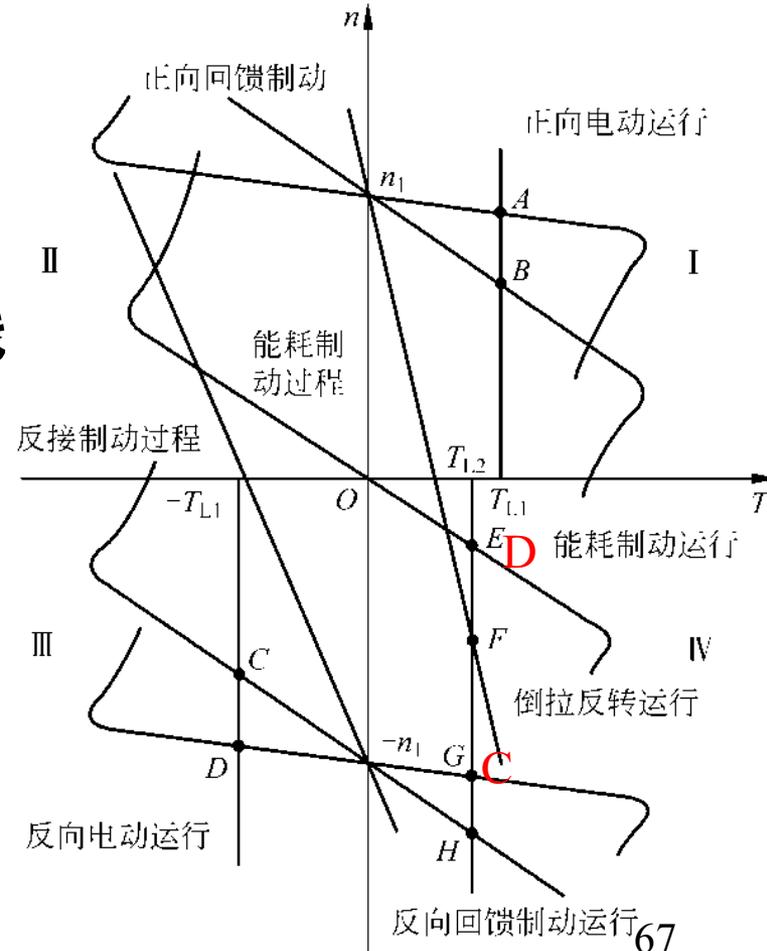
**例题8-5 (2)** 下放重物，高速档转速 $n_C$ 为工作在**负序电源固有机械特性**上的转速，低速档时 $n_D = -n_B$ ，仍然工作于转子回路串电阻特性上，计算两档转速与转子回路串入电阻值。

**解题思路：**

已知C点转矩，代入机械特性曲线实用公式算转速。

已知D点 ( $s_D, T_D$ ) ,计算机械特性曲线临界转差率，通过临界转差比

**等于**转子电阻比，计算转子串电阻。





解：（2）下放重物时负载转矩  $208\text{Nm}$ ，即  $0.8 T_N$

负载转矩  $0.8 T_N$  时转差率：

$$\because -0.8 T_N = \frac{2 \lambda T_N}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}}, \therefore s = -0.0188 (\text{另一个解不合理, 舍去})$$

高速时转速： $n_C = -(n_1 - sn_1) = -1528 r/m$

低速下放重物工作于倒拉反转，转速： $n_D = -n_B = -366 r/m$



**D点时转差率：**

$$s_D = \frac{n_1 - n_D}{n_1} = \frac{1500 + 366}{1500} = 1.244$$

**过D点的机械特性的临界转差率：**

$$s_{mD} = s_D \left( \frac{\lambda T_N}{T_L} + \sqrt{\left(\frac{\lambda T_N}{T_L}\right)^2 - 1} \right) = 6.608$$

**低速时转子串入电阻值：**  $R_s = (s_{mD}/s_m - 1)R_2 = 3.905\Omega$



**例题8-6** 某三相异步电动机拖动起重机主钩，其 $P_N=20\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ，Y接法， $n_N=960\text{r/min}$ ， $\lambda=2$ ， $E_{2N}=208\text{V}$ ， $I_{2N}=76\text{A}$ ，Y接法。升降某重物 $0.72T_N$ ，忽略 $T_0$ 。求：（1）在固有机械特性上运行时转子转速；（2）转子回路每相串入 $R_A=0.88\Omega$ 时转子转速；（3）转速为 $-430\text{r/m}$ 时转子回路每相串入的电阻值。

**解题思路：**（1）已知转矩 $0.72T_N$ ，

代入实用公式求转速。

（2）同一负载转矩下，转差率之比**等于**转子电阻比（已知）

（3）已知转速（转差率），同一负载转矩下，转差率之比**等于**转子电阻比



解：（1）额定转差率：

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

固有机械特性的临界转差率： $s_m = s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.1493$

负载转矩 $0.72T_N$ 时转差率：

$$\because 0.72 T_N = \frac{2 \lambda T_N}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}}, \therefore s = 0.0278 (\text{另一个解不合理, 舍去})$$

转速： $n = n_1 - sn_1 = 972.2 r/m$

（2）转子每相电阻：

$$R_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.04 \times 208}{\sqrt{3} \times 76} = 0.0632 \Omega$$

转子串电阻后转速 $n_A$ ，转差率 $s_A$ ：

$$s_A = \frac{R_2 + R_A}{R_2} s = 0.4149$$

转速： $n_A = n_1 - s_A n_1 = 585.1 \text{ r/m}$

(3) 转速为-430r/m时，转差率 $s_B$ ：

$$s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = \frac{1000 + 430}{1000} = 1.43$$

转子串入电阻值： $R_S = (s_B/s - 1)R_2 = 3.247\Omega$

**注意！**

$$T = T_L = \frac{2 \lambda T_N}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \rightarrow s_m = s \left[ \frac{\lambda T_N}{T_L} + \sqrt{\left(\frac{\lambda T_N}{T_L}\right)^2 - 1} \right]$$

**若电磁转矩 $T$ 恒定不变， $s \propto s_m \propto (R_2 + R_S)$**



# 本章结束

作业：8.1，8.2，8.4，8.6，8.7