

# 电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导



# 第八章 三相异步电动机的电力拖动

- 三相异步电动机的机械特性（机械特性的参数表达式、固有特性、人为特性、实用公式和简化公式）
- 三相异步电动机的起动（直接起动、鼠笼电机的降压起动、绕线电机的重载起动）
- 三相异步电动机的各种运行状态（电动运行、能耗制动、反接制动、回馈制动）
- 三相异步电动机的调速（改变转差率调速、改变同步转速调速）

# 第一节 三相异步电动机的机械特性

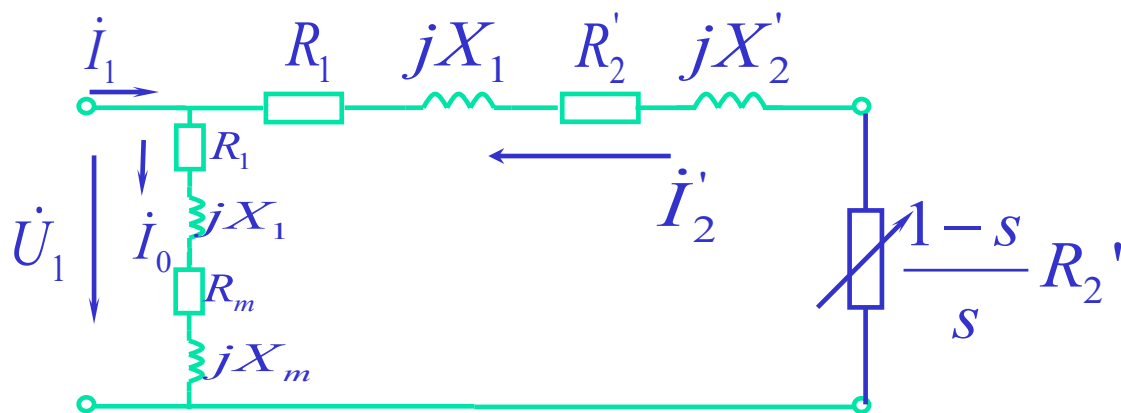
机械特性是指电机的电磁转矩与转速的关系

$$\text{即: } T = f(n)$$

$$\text{或: } T = f(s)$$

## 一、参数表达式

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1}$$
$$= \frac{3I_2'^2 R_2' / s}{2\pi f_1 / p}$$



$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

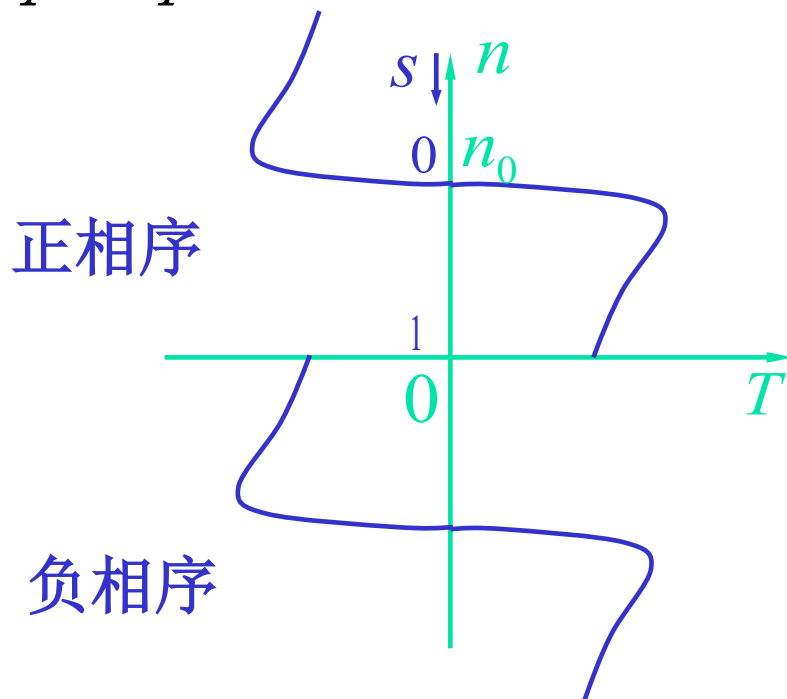
# 第一节 三相异步电动机的机械特性

$$T = \frac{3pU_1^2 R_2' / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

机械特性的参数表达式，也叫一般表达式

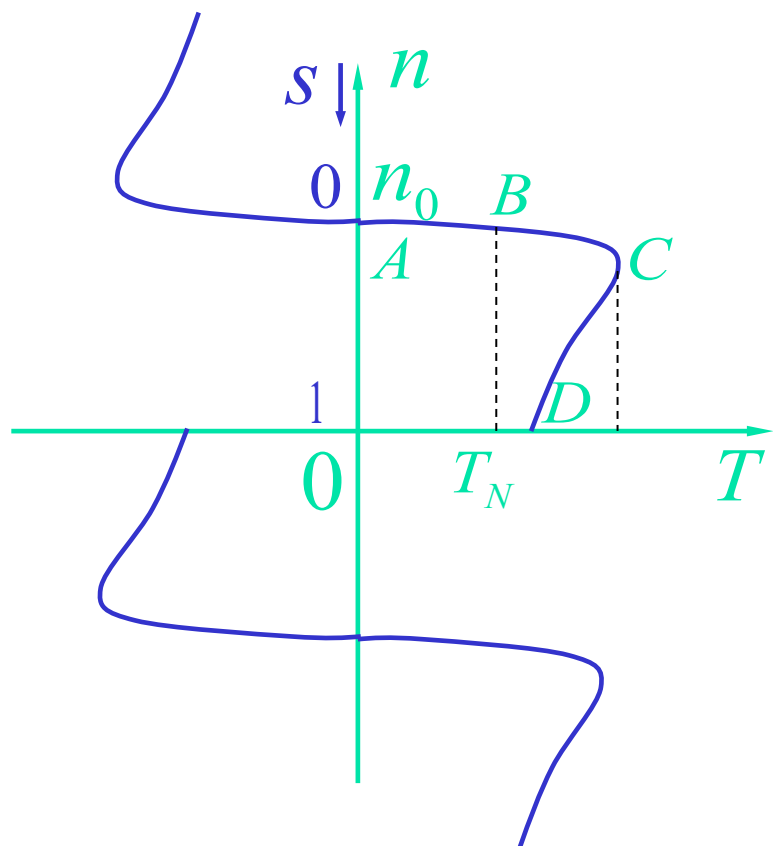
二、固有特性（ $U_1$ 、 $f_1$ 额定，定、转子回路不串元件）

1、曲线



## 二、固有特性

### 2、特点



(1)  $0 \leq s \leq 1$  时,  $n_1 \geq n \geq 0$ , 第一象限  
正向电动状态

(2)  $s < 0$  时,  $n > n_1$ , 第二象限  
发电状态

(3)  $s > 1$  时,  $n < 0$ , 第四象限  
制动状态

(4)  $s > 0$  和  $s < 0$  两部分曲线近似对称

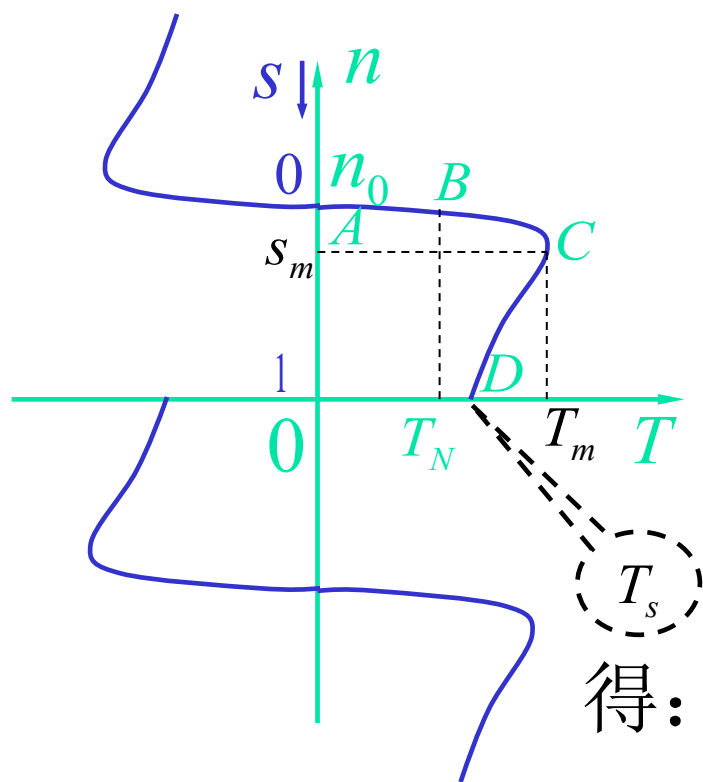
$A$ : 理想空载运行点 (同步转速点)

$B$ : 额定运行点

$C$ : 电磁转矩最大点

$D$ : 起动点

## 二、固有特性



$T_m$  与  $R_2'$  无关

$s_m$  与  $U_1$  无关

### 3、最大电磁转矩与临界转差率

$T_m$  —— 最大电磁转矩

$s_m$  —— 临界转差率

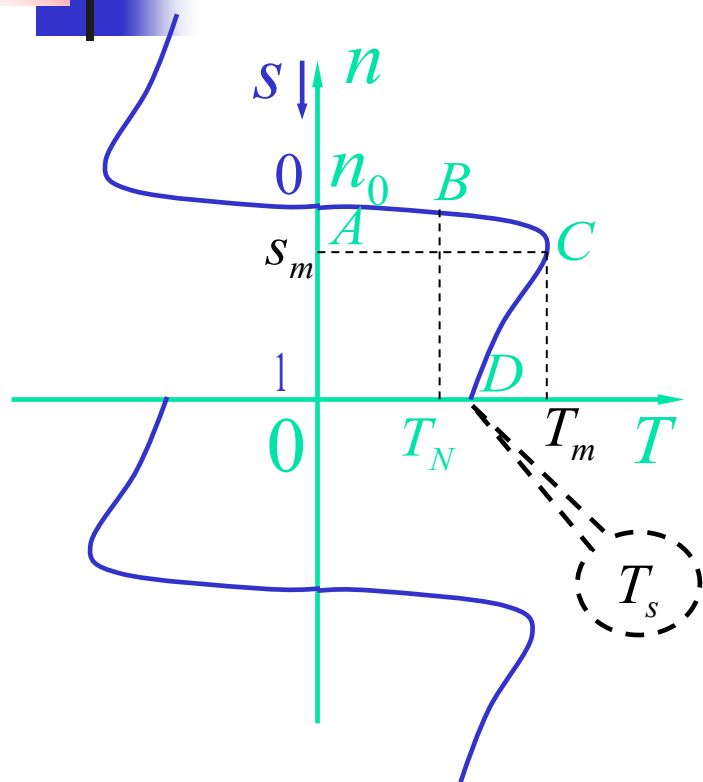
固有机机械特性对  $s$  求导，且导数为0

得：

$$T_m = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}$$

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

## 二、固有特性



一般:  $R_1 < 0.05(X_1 + X_2')$

$$T_m \approx \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1(X_1 + X_2')}$$

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{(X_1 + X_2')}$$

### 4、起动转矩

$$T_s = T|_{s=1} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

### 5、稳定运行的问题

在  $0 < s < s_m$  范围内可稳定运行

在  $0 < s < s_N$  范围内可长期稳定运行

### 6、两个常用参数

$$\lambda = \frac{T_m}{T_N} \text{——过载倍数}$$

一般  $1.6 \sim 2.5$

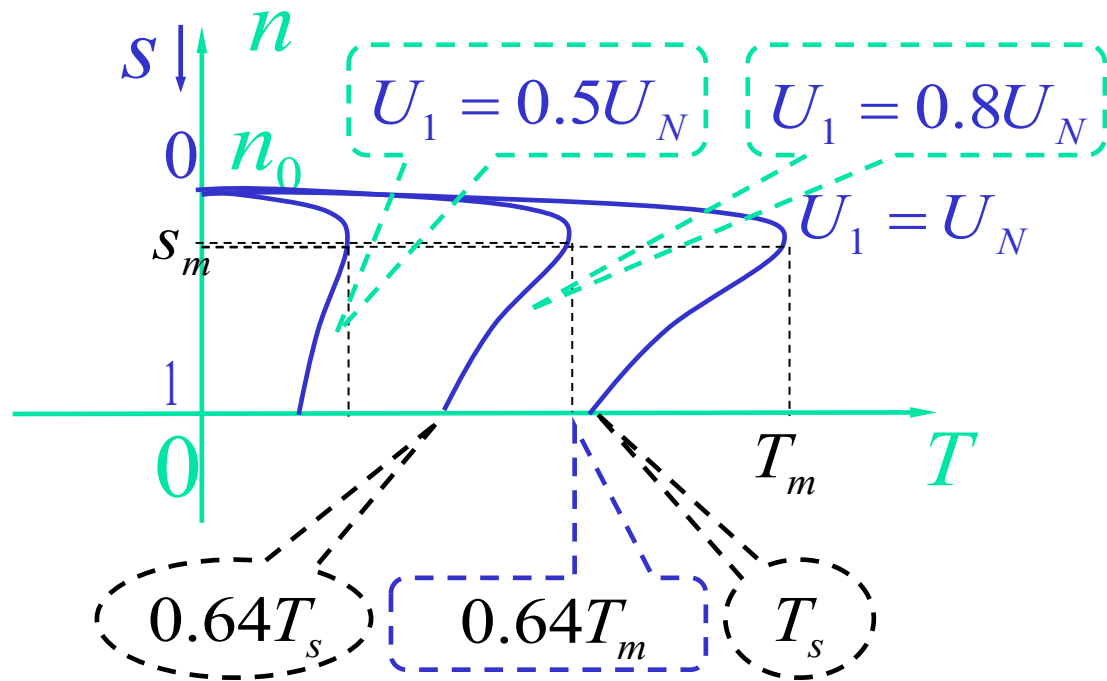
$$K_T = \frac{T_s}{T_N} \text{——堵转转矩倍数}$$

一般  $0.8 \sim 1.2$

# 三、人为特性

(改变  $U_1$ , 或定、转子回路串元件)

## 1、降压特性 (降低定子端电压)



特点:

- (1) 同步转速不变;
- (2) 临界转差率不变;
- (3) 最大电磁转矩、起动转矩与定子电压的平方成正比。

带恒转矩负载时: 由  $T = C_{Tj} \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2$

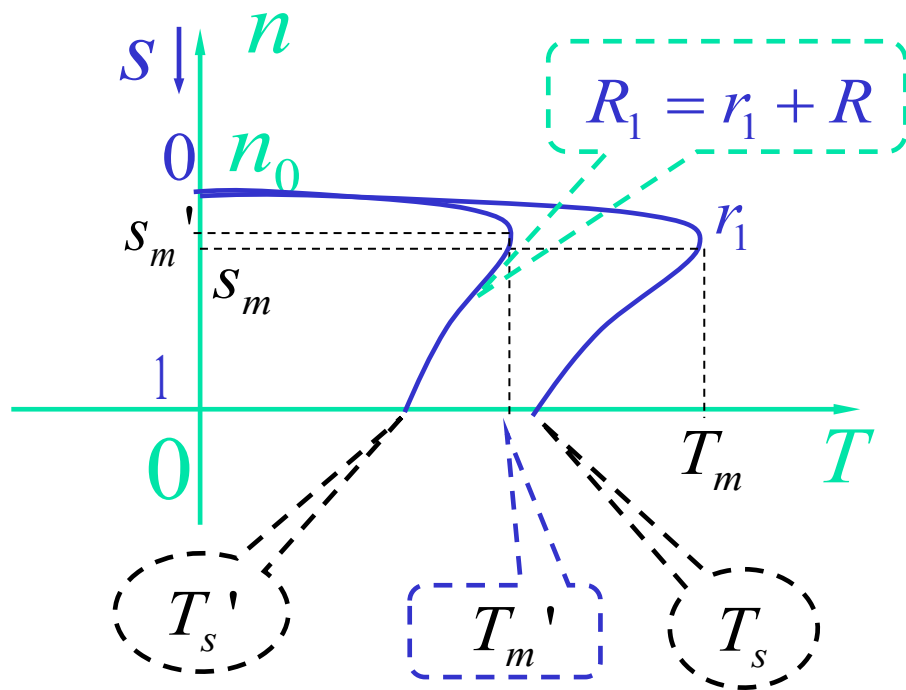
$U_1 \downarrow \Rightarrow \Phi_1 \downarrow, I_2 \uparrow$

即铁耗减小, 铜耗增大



## 三、人为特性

### 2、定子串三相对称电阻特性 $r_1 \rightarrow R_1 = r_1 + R$



特点:

- (1)  $n_1$  不变;
- (2)  $T_m$ 、 $T_s$ 、 $s_m$  减小;
- (3)  $R$  消耗有功功率。

### 3、定子串三相对称电抗特性 $x_1 \rightarrow X_1 = x_1 + X$

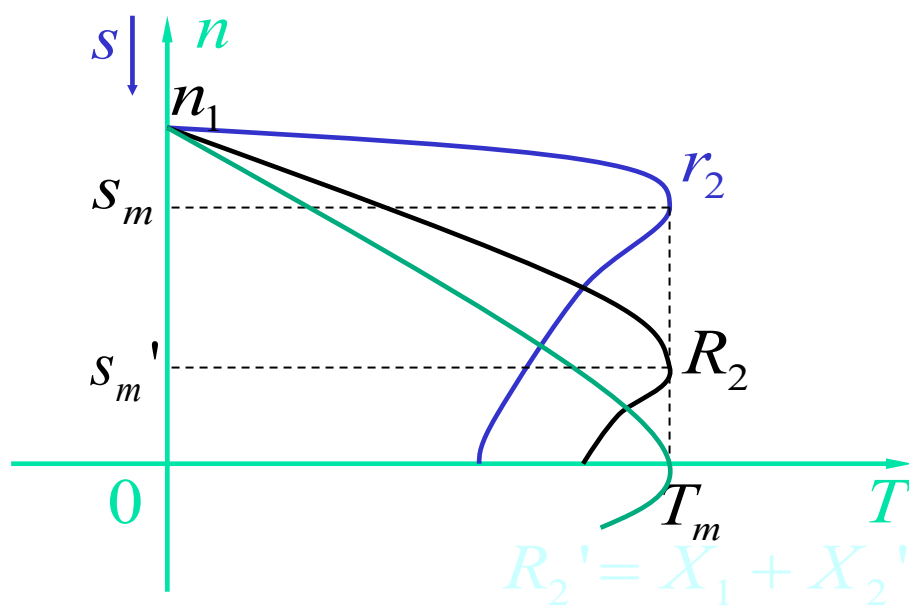
与定子串三相对称电阻特性类似  $X$  不消耗有功功率

### 三、人为特性

#### 4、转子串三相对称电阻特性

$$r_2 \rightarrow R_2 = r_2 + R$$

$$R_2' = k_e k_i R_2$$



特点:

- (1)  $n_1$  不变;
- (2)  $T_m$  不变;
- (3)  $T_s$ 、 $s_m$  均增大;
- (4)  $s_m = \frac{R_2' + R_s'}{X_1 + X_2'} = 1$  时,  $T_s = T_m$

## 四、机械特性实用公式（必考）

1、结论：实用公式

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

### 3、简化公式

$s \leq s_N$ 时

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

2、应用：（要先知道 $T_m$ 、 $s_m$ 后才能使用）

已知： $P_N$ 、 $U_N$ 、 $I_N$ 、 $n_N$ 和 $\lambda$

(1)  $T_m$ 的估算： $T_N \approx T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N}$ ,  $T_m = \lambda T_N$

(2)  $s_m$ 的估算：

a、已知 $s_N$ 、 $T_N$

$$\frac{T_N}{T_m} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}} = \frac{1}{\lambda}$$

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

b、已知 $s_A$ 、 $T_A$

$$\frac{T_A}{T_m} = \frac{2}{\frac{s_A}{s_m} + \frac{s_m}{s_A}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{T_A}{T_N}$$

$$s_m = s_A \left[ \lambda \cdot \frac{T_N}{T_A} + \sqrt{\left( \lambda \frac{T_N}{T_A} \right)^2 - 1} \right]$$

## 第二节 三相异步电动机的启动

### 一、直接启动（鼠笼式和绕线式）

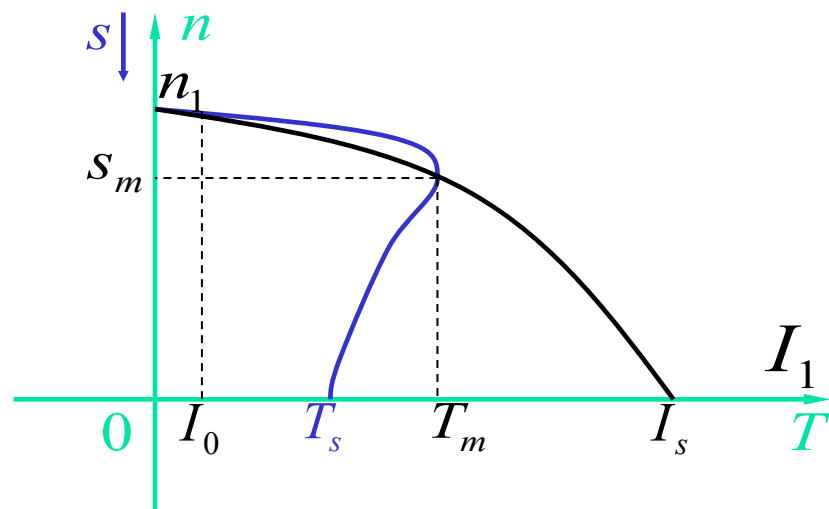
#### 1、 $I_s$ 、 $T_s$ 的分析

启动初始瞬间 $n=0$ ,  $s=1$ ,  $I_0$ 主要是建立磁势

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T_s = T|_{s=1} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$T = C_{Tj} \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2$$



结论：启动电流较大，启动转矩较小

一般鼠笼电机  $I_s = K_I I_N = (4 \sim 7) I_N$        $T_s = K_T T_N = (0.9 \sim 1.3) T_N$

## 第二节 三相异步电动机的起动

2、 $I_s$ 较大的影响  $I_s = K_I I_N = (4 \sim 7) I_N$

(1) 对电机本身

(2) 对配电变压器

3、 $T_s$ 较小的影响  $T_s = K_T T_N = (0.9 \sim 1.3) T_N$

(1) 轻载

(2) 重载

4、结论 (1) 一般情况下可以直接起动

(2) 两种情况下不可直接起动

5、解决途径 即配电变压器容量不足够大和重载

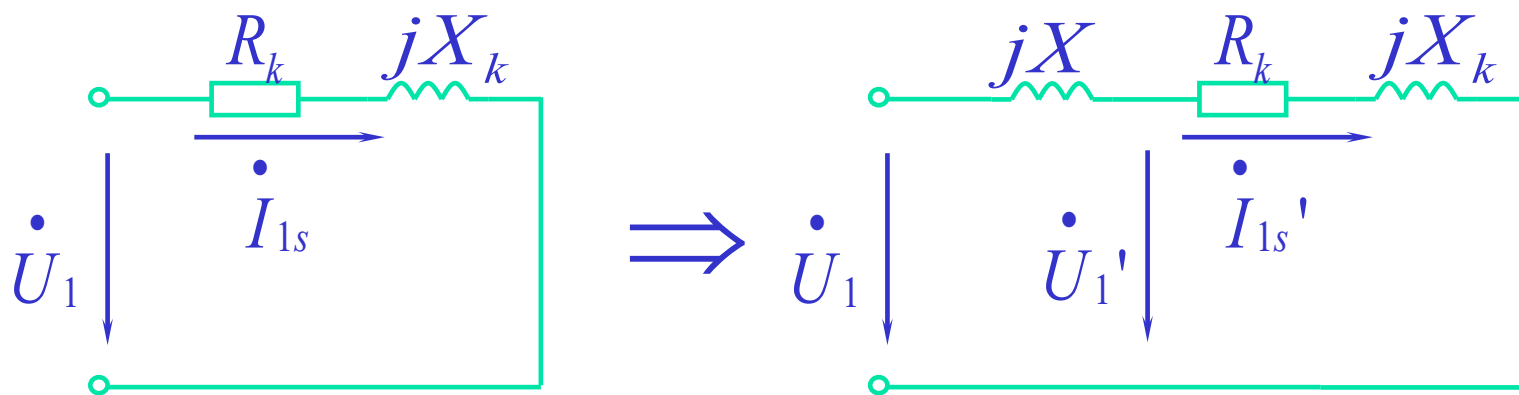
(1) 轻载时降压起动

(2) 重载时转子回路串电阻

## 二、三相鼠笼式异步电动机的降压启动（适用于轻载）

### 1、定子串接电抗器启动

(1) 方法：启动时串入电抗器，正常运行时切除电抗器



(2) 分析： 令：  $u = \frac{U_1'}{U_1} = \frac{Z_k}{Z_k + jX}$

$$\text{则：} \frac{I_{1s}'}{I_{1s}} = \frac{Z_k}{Z_k + jX} = u \qquad \frac{T_s'}{T_s} = \left( \frac{U_1'}{U_1} \right)^2 = u^2$$

(3) 工程中，一般先给出启动电流，再计算串接的电抗

**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起动电流为500A。

(1) 若空载起动，定子串电抗器起动，求每相串入的电抗最少应是多少？

(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器方法起动？若可以，计算每相串入的电抗值的范围是多少？

**解**

(1) 空载起动每相串入电抗值计算

直接起动的起动电流

$$I_S = K_I I_N = 6.5 \times 136 = 884\text{A}$$

串电抗(最小值)时的起动电流与  $I_S$  的比值

$$u = \frac{I'_S}{I_S} = \frac{500}{884} = 0.566$$

短路阻抗

$$z_k = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_S} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 884} = 0.248\Omega$$

每相串入电抗最小值根据式(8-3)计算为

$$X = \frac{(1-u)z_k}{u} = \frac{(1-0.566) \times 0.248}{0.566} = 0.190\Omega$$

(2) 拖动  $T_L=0.3T_N$  恒转矩负载起动的计算



串电抗起动时最小起动转矩为

$$T'_{s1} = 1.1T_L = 1.1 \times 0.3T_N = 0.33T_N$$

起动转矩与直接起动转矩之比值

$$\frac{T'_{s1}}{T_s} = \frac{0.33T_N}{K_T T_N} = \frac{0.33}{1.1} = 0.3 = u_1^2$$

串电抗器起动电流与直接起动电流比值

$$\frac{I'_{s1}}{I_s} = u_1 = \sqrt{0.3} = 0.548$$

起动电流

$$I'_{s1} = u_1 I_s = 0.548 \times 884 = 484.4\text{A} < 500\text{A}$$

可以串电抗起动。每相串入的电抗最大值为

$$X_1 = \frac{(1 - u_1)z_k}{u_1} = \frac{(1 - 0.548) \times 0.248}{0.548} = 0.205\Omega$$

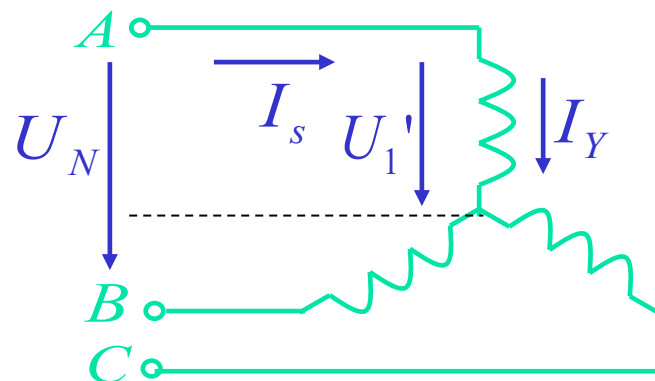
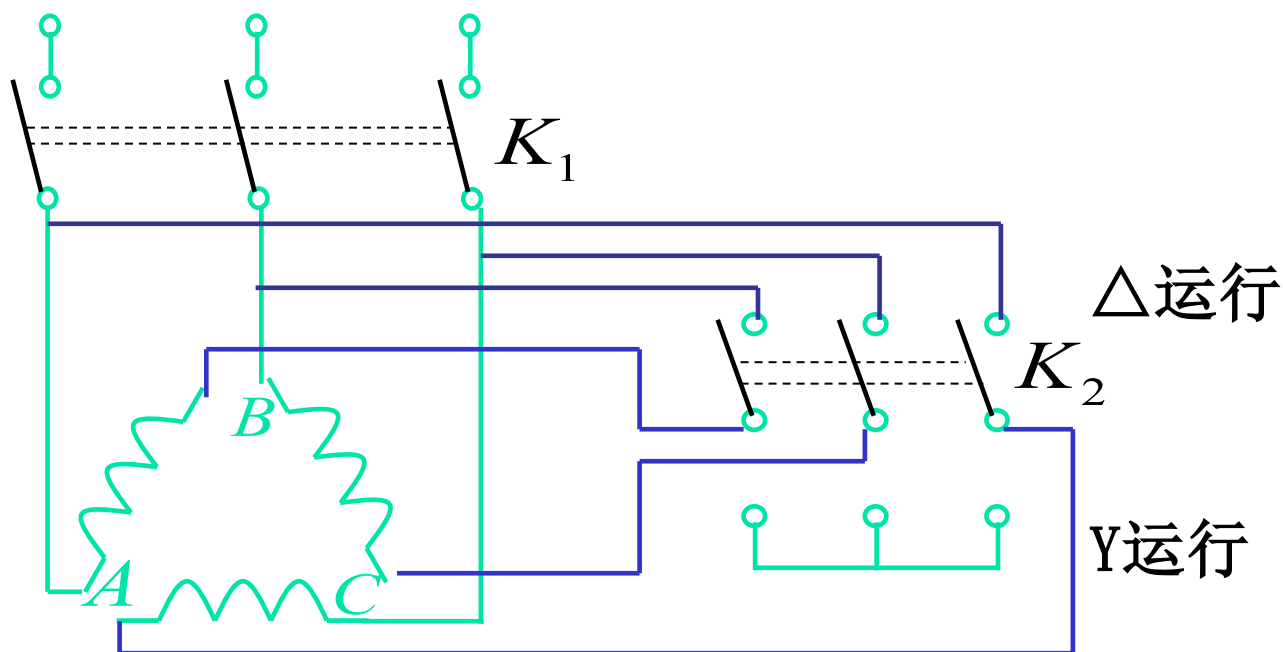
每相串入的电抗最小值为  $X=0.190\Omega$  时, 起动转矩  $T'_s = u^2 K_T T_N = 0.352T_N > T'_{s1}$ , 因此电抗值的范围即为  $0.190 \sim 0.205\Omega$ 。



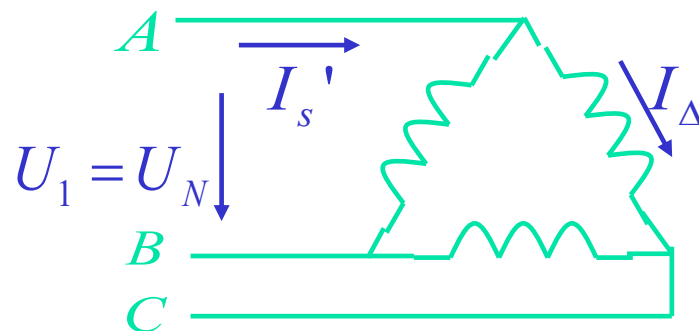
## 二、三相鼠笼式异步电动机的降压起动（适用于轻载）

### 2、Y- $\Delta$ 起动（适用于 $\Delta$ 接使用的电机）

(1) 方法：起动时 $K_2$ 合向下方，正常运行时 $K_2$ 合向上方



Y运行



$\Delta$ 运行

(2) 分析：直接起动时  $I_s = \sqrt{3}I_\Delta$

Y接起动时  $I_s' = I_Y = I_\Delta / \sqrt{3}$

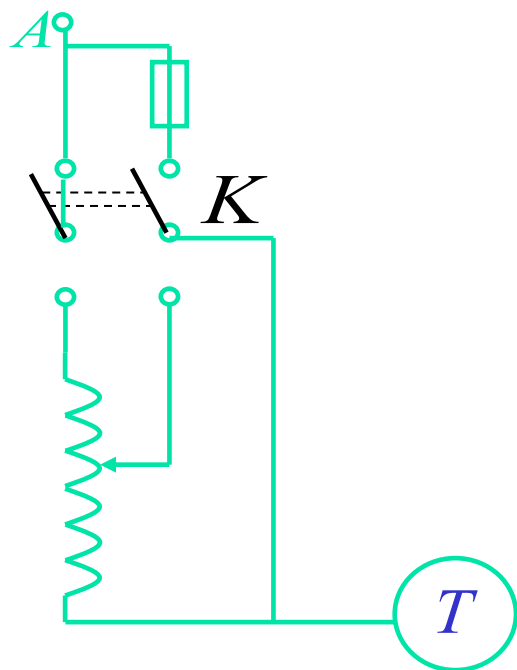
$\therefore I_s' = I_s / 3$

$T_s' = (U_1' / U_1)^2 = T_s / 3$

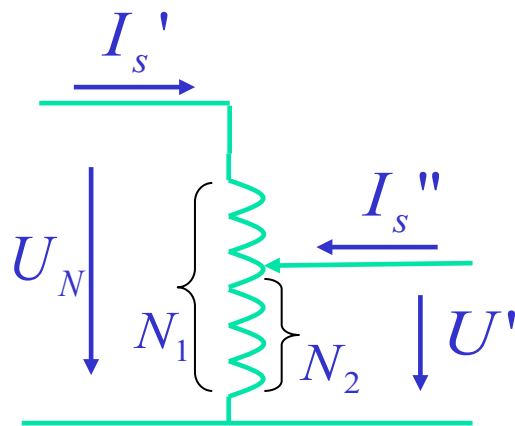
## 二、三相鼠笼式异步电动机的降压启动（适用于轻载）

### 3、自耦变压器降压启动

(1) 方法：K向下合时  
降压启动，K向上合时正  
常运行



(2) 分析：



$$\frac{I_s''}{I_s} = \frac{U'}{U_N} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{I_s''}{I_s'} = \frac{N_1}{N_2}$$

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

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

### 4、延边三角形启动（适用于绕组带中间抽头的电机） 自学

## 二、三相鼠笼式异步电动机的降压启动（适用于轻载）

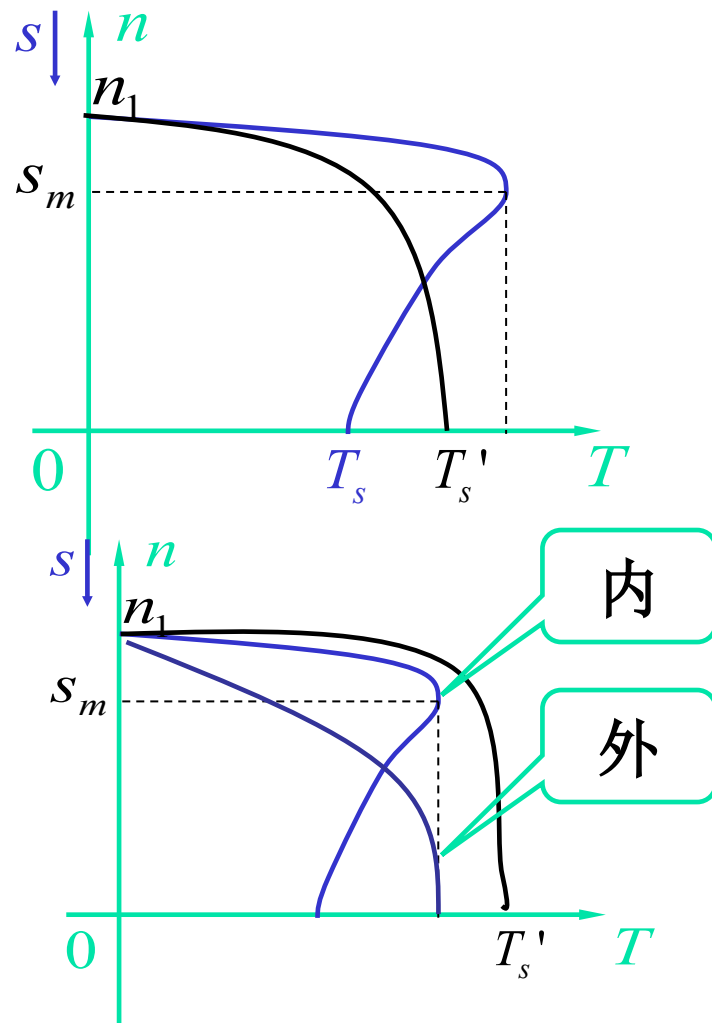
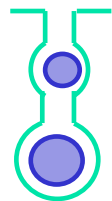
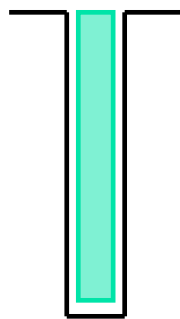
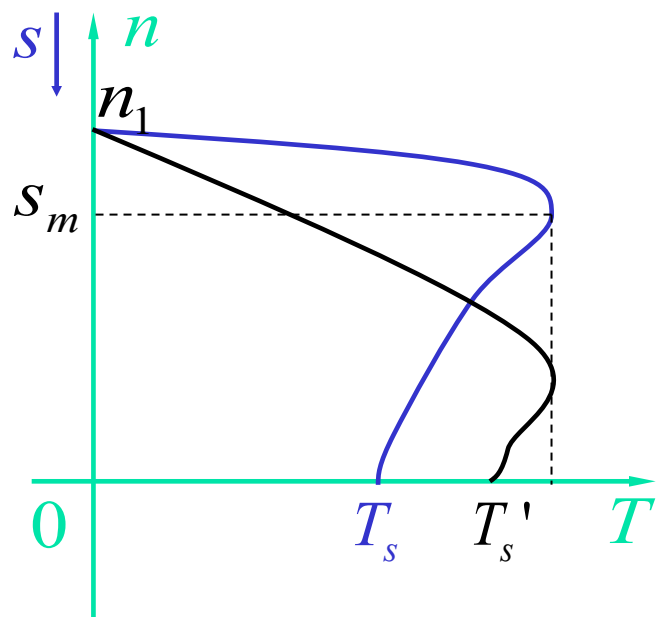
表 8.1 三相鼠笼式异步电动机降压启动与直接启动

| 启动方法          | 启动电压相对值<br>(电动机相电压) | 启动电流相对值<br>(供电变压器线电流) | 启动转矩相对值 | 起 动 设 备                      |
|---------------|---------------------|-----------------------|---------|------------------------------|
| 直接启动          | 1                   | 1                     | 1       | 最简单                          |
| 串电抗<br>启动     | $u$                 | $u$                   | $u^2$   | 一般                           |
| Y $\Delta$ 启动 | $1/\sqrt{3}$        | 1/3                   | 1/3     | 简单,只用于 $\Delta$ 接<br>380V 电机 |
| 自耦<br>变压器     | $u$                 | $u^2$                 | $u^2$   | 较复杂,有三种<br>抽头可选              |
| 延边<br>三角形     | 中心抽头                | 0.5                   | 0.45    | 简单,但要<br>专门设计电机              |

第263页例题8-2

### 三、高起动转矩的三相鼠笼式异步电动机 (适用于重载)

- 1、转子电阻较大的鼠笼式异步电动机  
(包括高转差率电动机、力矩式电动机等)



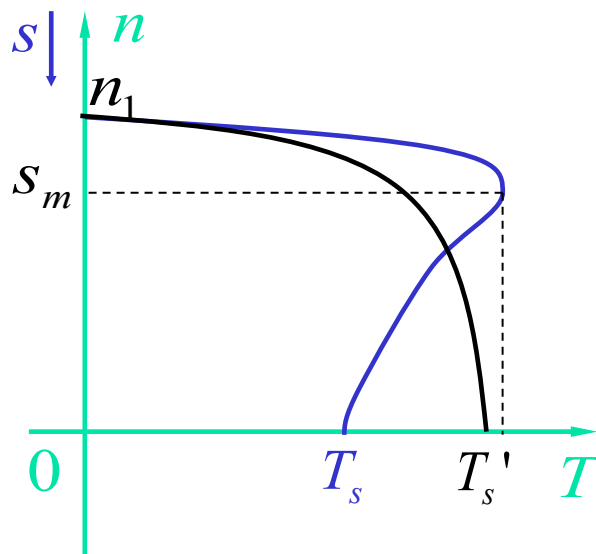
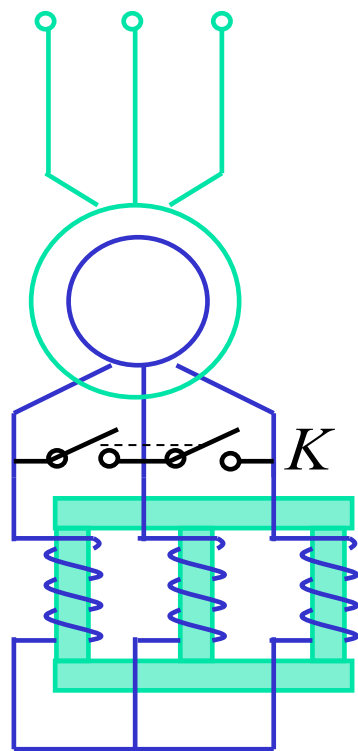
- 2、深槽式鼠笼异步电动机
- 3、双鼠笼异步电动机

## 四、绕线式三相异步电动机的起动（适用于重载）

绕线式异步电机可以在转子回路中串电阻，且

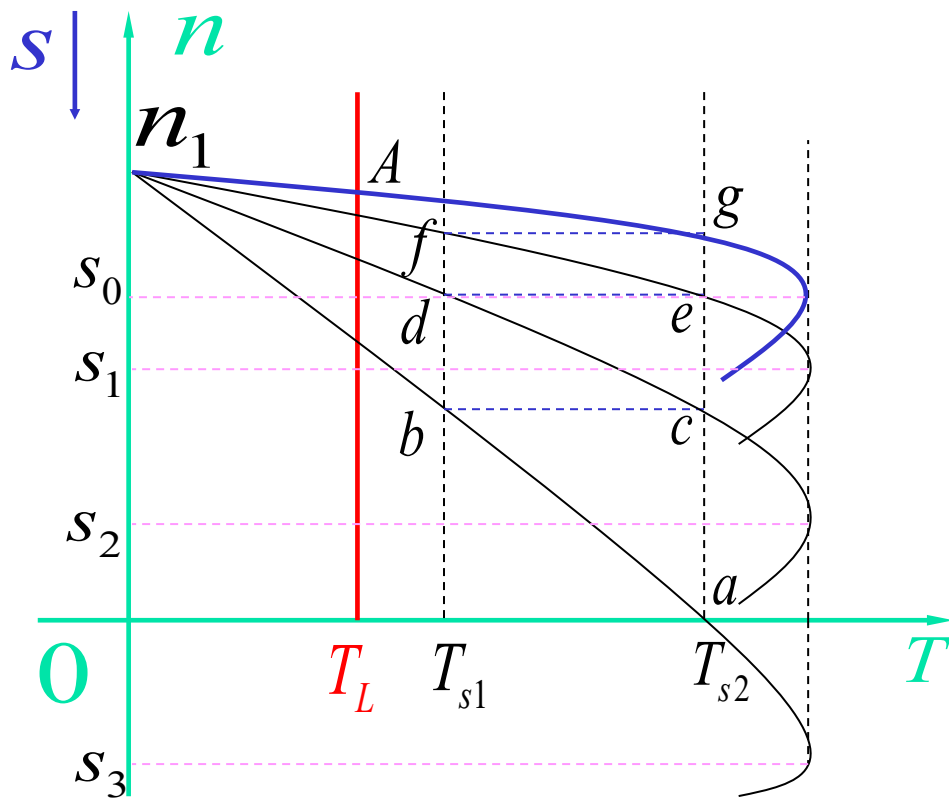
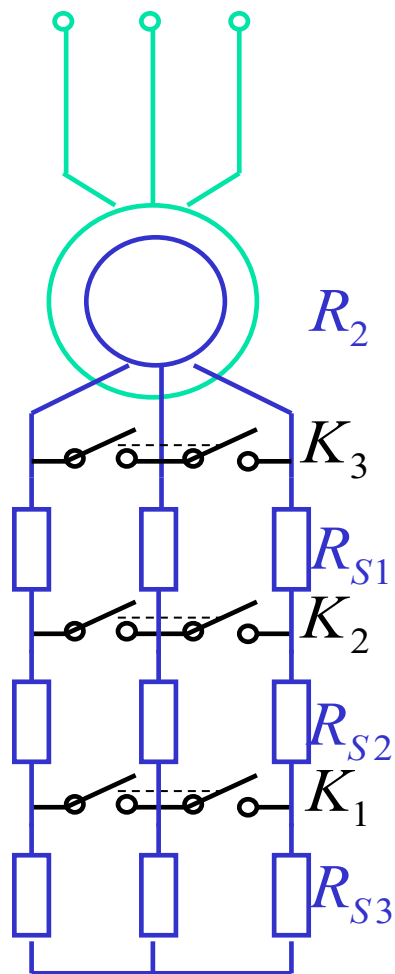
$$R_2' + R_s' = X_1 + X_2' \text{ 时 } T_s = T_m$$

### 1、转子串频敏变阻器起动



## 四、绕线式三相异步电动机的起动（适用于重载）

### 2、转子串电阻分级起动



起动顺序：

$a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow A$

## 四、绕线式三相异步电动机的起动（适用于重载）

### 起动电阻的计算（自学）

#### （1）作图法

a、将  $0 < s < s_m$  近似看成直线

b、确定起动级数， $m = 3$

最大起动转矩  $T_{s1}$     切换转矩  $T_{s2}$

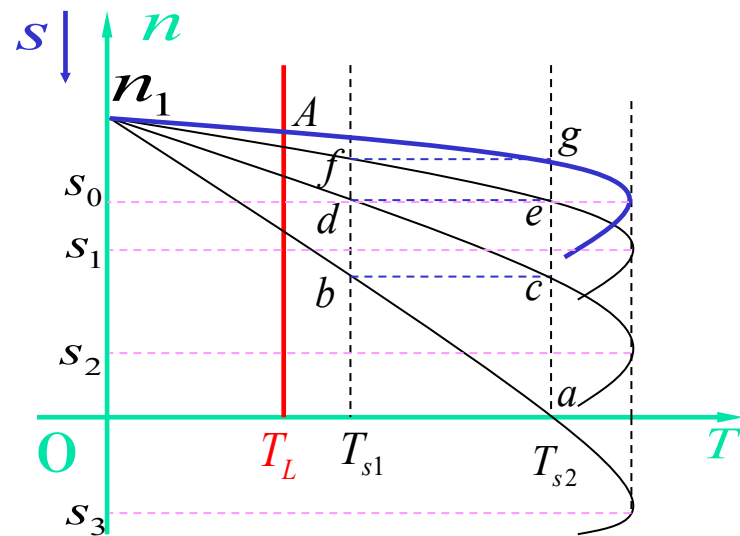
一般  $T_{s1} \leq 0.85T_m$      $T_{s2} \geq (1.1 \sim 1.3)T_L$

c、画出机械特性图（试探作图）

d、计算： $T = \frac{2T_m}{s_m} s$

$T$  为常数时， $s \propto s_m \propto (r_2 + R)$

$$\frac{s_0}{R_2} = \frac{s_1}{R_2 + R_{S1}} = \frac{s_2}{R_2 + R_{S1} + R_{S2}} = \frac{s_3}{R_2 + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}$$



## (2) 解析法

a、将  $0 < s < s_m$  近似看成直线

b、计算：

同一条机械特性上， $T_m$  和  $s_m$  为常数

且  $T \propto s$

不同机械特性上， $T_m$  为常数，切换时  $s$  为常数

且  $T \propto \frac{1}{s_m} \propto \frac{1}{R_2 + R_{S1}}$  令： $\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = \frac{R_2 + R_{S1}}{R_2} = \alpha$

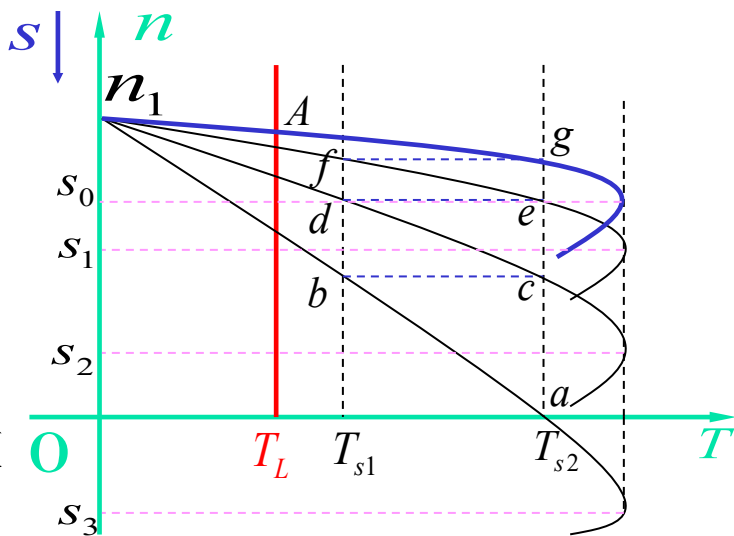
c、已知  $T_{s1}$  而未知  $T_{s2}$  ... 已知  $T_{s2}$  而未知  $T_{s1}$

通过  $\alpha = \sqrt[m]{\frac{T_N}{s_N T_{s1}}} \dots \alpha = \sqrt[m+1]{\frac{T_N}{s_N T_{s2}}}$

再验证  $T_{s2} \geq (1.1 \sim 1.3)T_L \dots T_{s1} \leq 0.85T_m$

d、计算各级电阻

$R_{Z1} = \alpha R_2; R_{Z2} = \alpha^2 R_2; \dots; R_{Zm} = \alpha^m R_2$





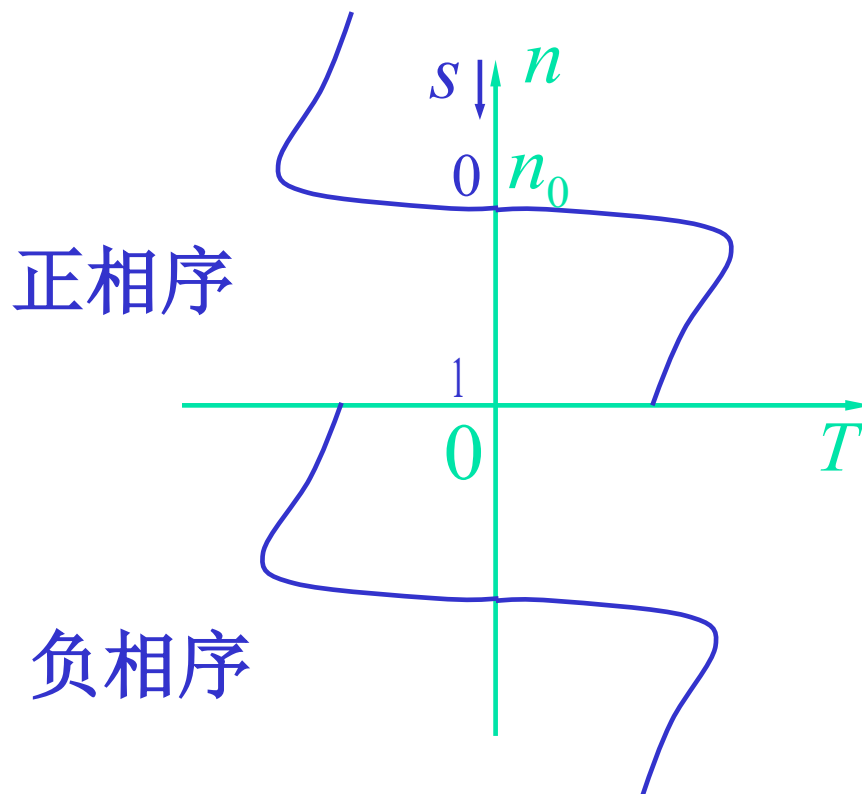
## 第三节 三相异步电动机的各种运行状态

- 各种运行状态的定义与直流电机中的定义类似  
电动运行—— $T$ 与 $n$ 同向  
制动运行—— $T$ 与 $n$ 反向
- 制动运行包括能耗制动、反接制动、倒拉反转、回馈制动

### 一、电动运行

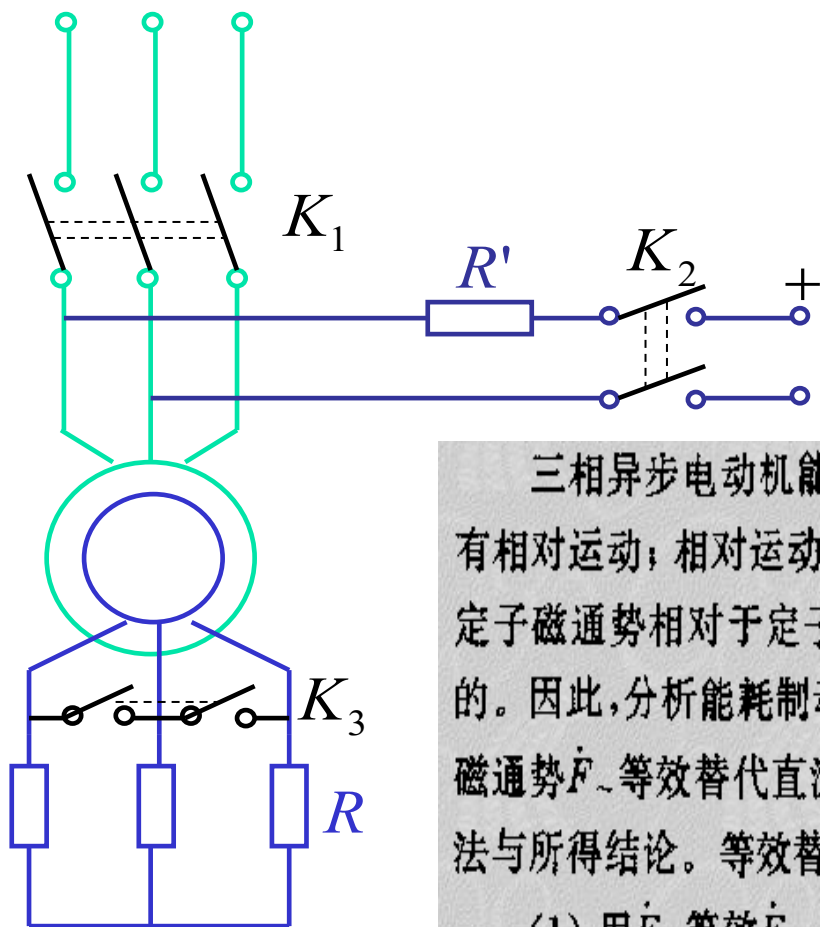
第一象限——正向电动

第三象限——反向电动



## 二、能耗制动

### 1、接线图



### 2、操作与工作原理

#### 类似直流电机的能耗制动

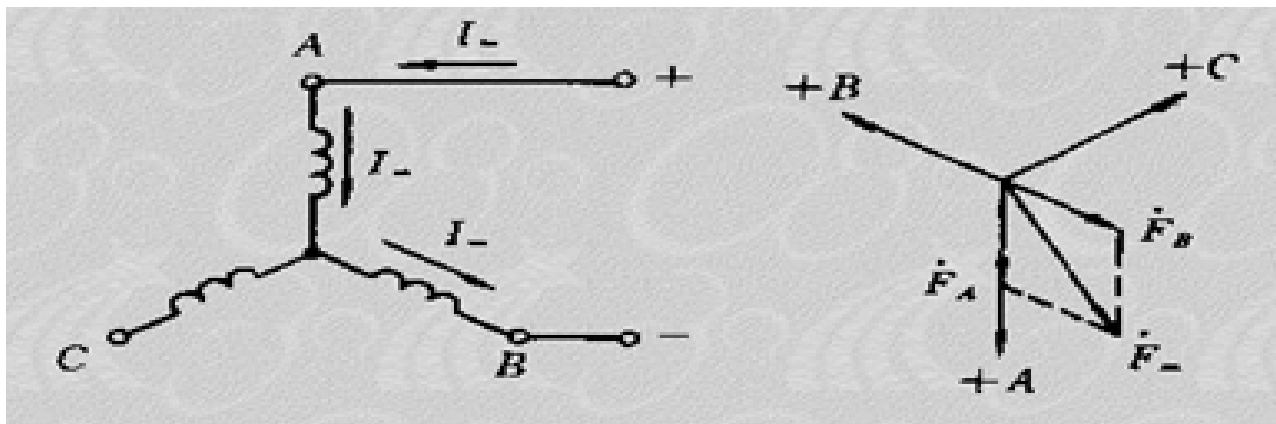
三相异步电动机能耗制动过程中电磁转矩  $T$  的产生,是由于转子与定子磁通势之间有相对运动;相对运动速度的大小与方向不同,则转矩  $T$  的大小与方向也随之不同。至于定子磁通势相对于定子本身是旋转的还是静止的,以及相对转速是多少,都是无关紧要的。因此,分析能耗制动状态下运行的三相异步电动机,可以用三相交流电流产生的旋转磁通势  $\dot{F}_\sim$  等效替代直流磁通势  $\dot{F}_=$ ,在等效替代后,就可以使用电动运行状态时的分析方法与所得结论。等效替代的条件是:

(1) 用  $\dot{F}_\sim$  等效  $\dot{F}_=$ ,需保持磁通势幅值不变,即  $F_\sim = F_ = F$ ;

(2) 用  $\dot{F}_\sim$  等效  $\dot{F}_=$ ,需保持磁通势与转子之间相对转速(即转差)不变,为  $0 - n = -n$ 。

## 二、能耗制动

### 3、定子等效电流



$$F_A = F_B = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_1$$

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

$$F_{=} = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_1$$

$$F_{\sim} = F_{=} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_1 = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_1$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_1$$

## 二、能耗制动

### 4、转差率及等效电路

磁通势  $\dot{F}_m$  与转子相对转速为  $(-n)$ ,  $\dot{F}_m$  的转速即同步转速为  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ , 能耗制动转差率用  $\nu$  表示, 则为

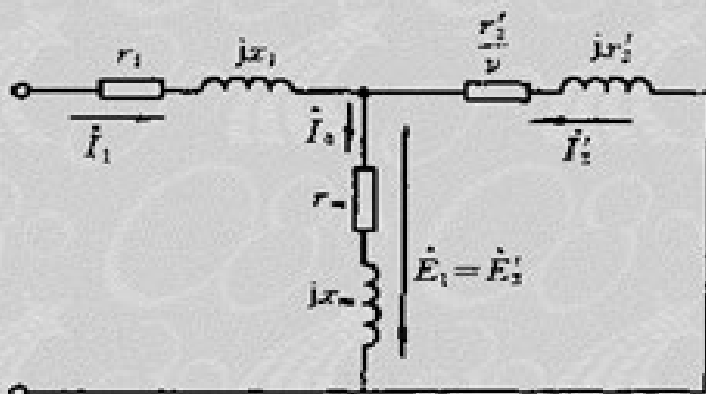
$$\nu = -\frac{n}{n_1}$$

转子绕组感应电动势  $\dot{E}_2$  的大小与频率则为

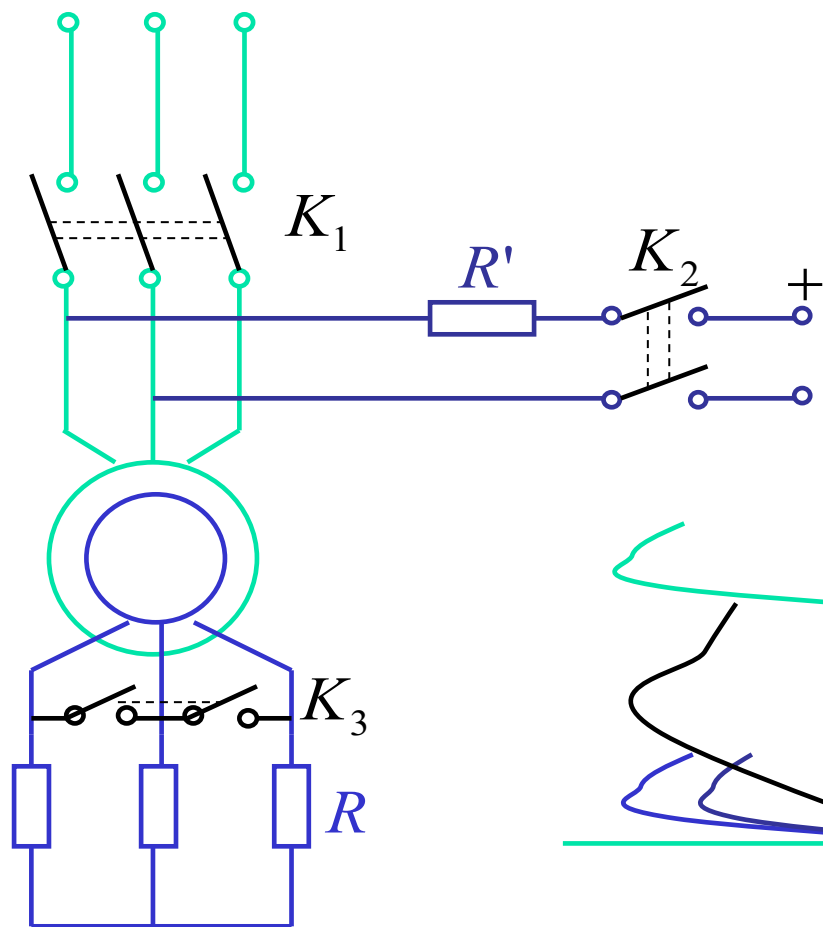
$$\dot{E}_2 = \nu \dot{E}_1$$

$$f_2 = |\nu f_1|$$

把转子绕组相数、匝数、绕组系数及转子电路的频率都折合到定子边后, 三相异步电动机能耗制动的等值电路如图 8.19 所示。注意, 等值电路中各电量是等效电流  $I_1$  产生磁通势  $\dot{F}_m = \dot{F}_m$  作用的结果, 并非指电机运行时的量。



## 二、能耗制动

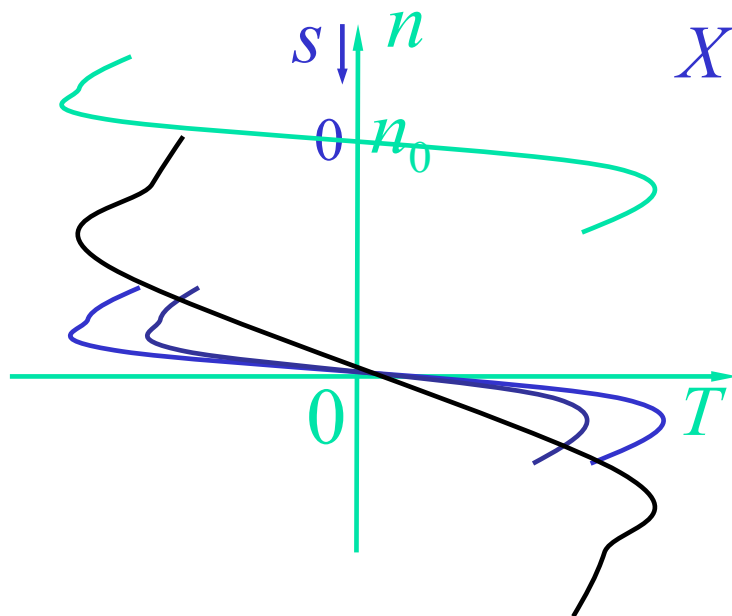


### 5、机械特性

$$T = \frac{3I_1^2 X_m^2 R_2' / \nu}{2\pi f_1 [(R_2' / \nu)^2 + (X_m + X_2')^2]}$$

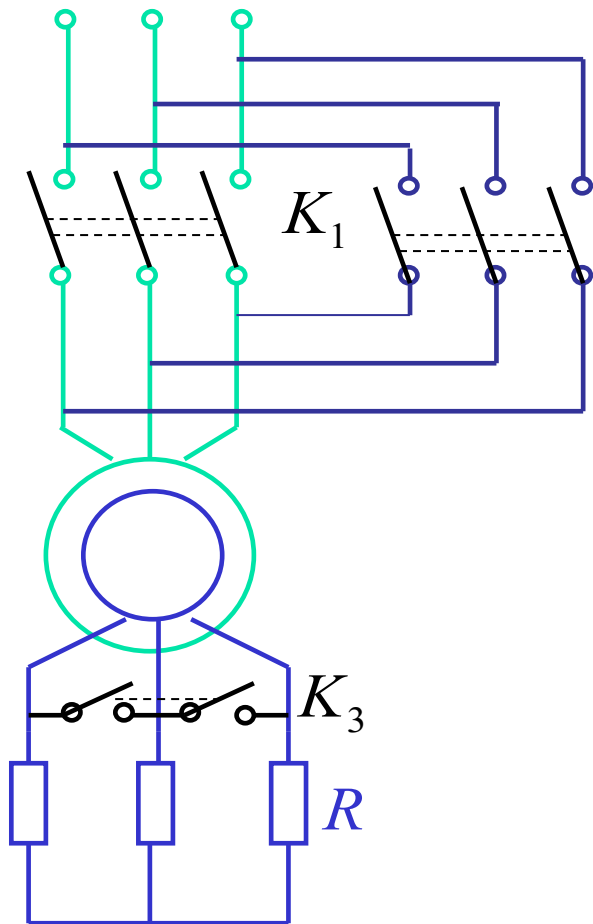
其中：  $\nu = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{0 - n}{n_1} = -\frac{n}{n_1}$

$X_m$  —— 励磁电抗



# 三、反接制动

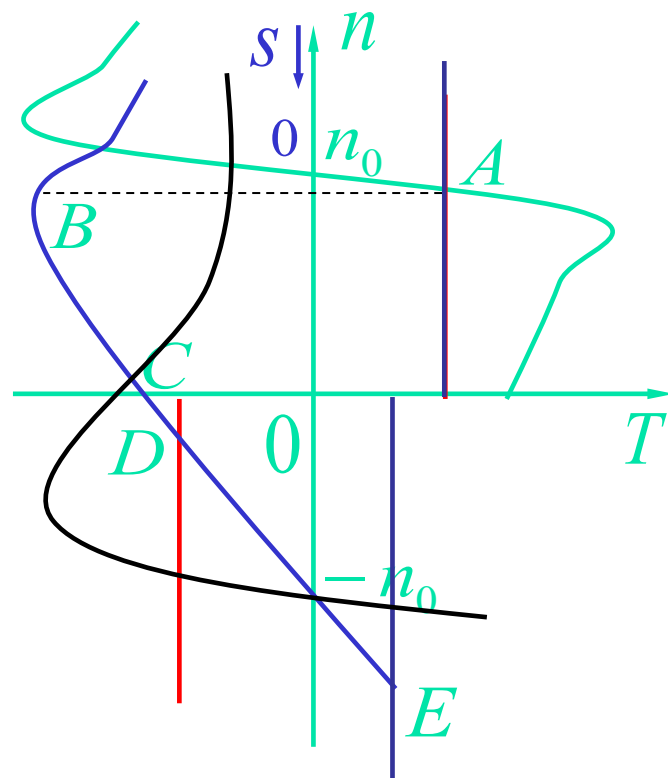
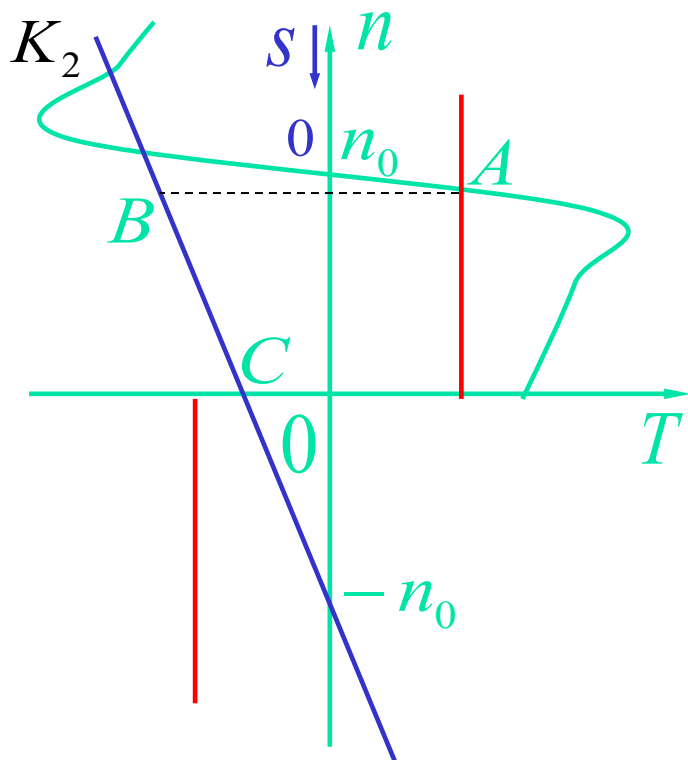
## 1、接线图



## 2、操作与工作原理

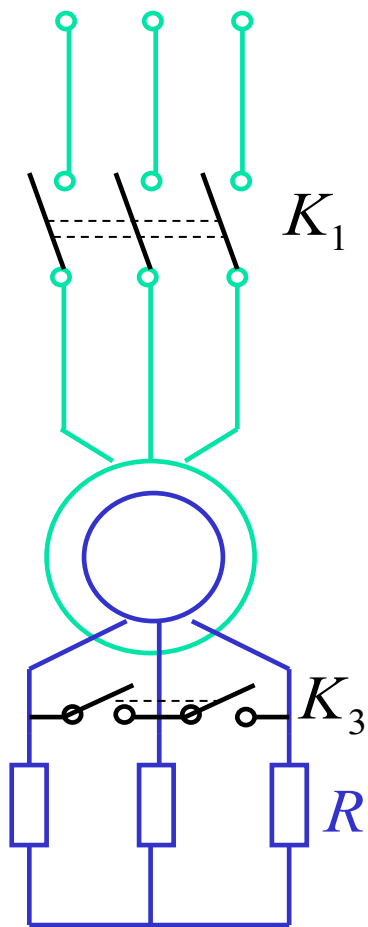
类似直流电机的反接制动

## 3、机械特性



# 四、倒拉反转制动

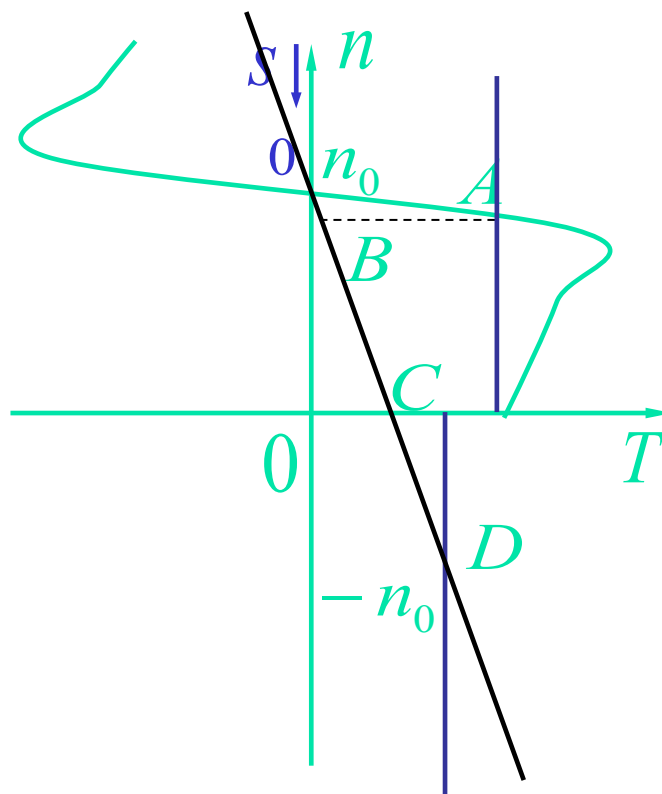
## 1、接线图



## 2、操作与工作原理

类似直流电机的倒拉反转

## 3、机械特性



# 五、回馈制动

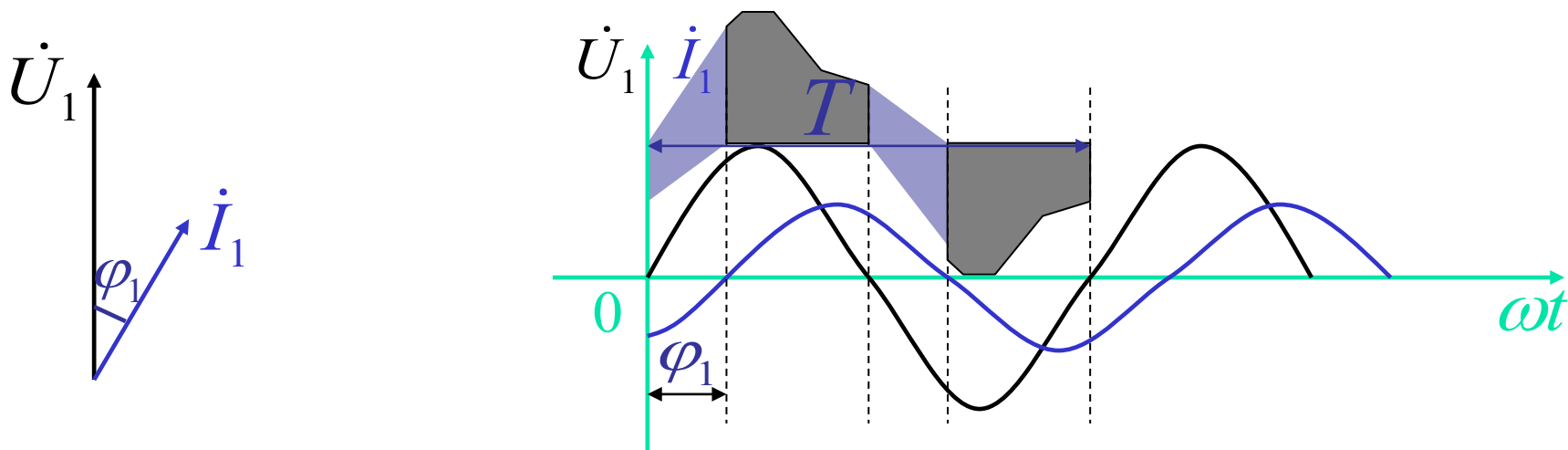
## 1、交流电机功率的吸收与回馈

( 1 ) 直流电机功率的吸收与回馈是如何判别的？

通过电源极性与电流方向的相对关系来判别

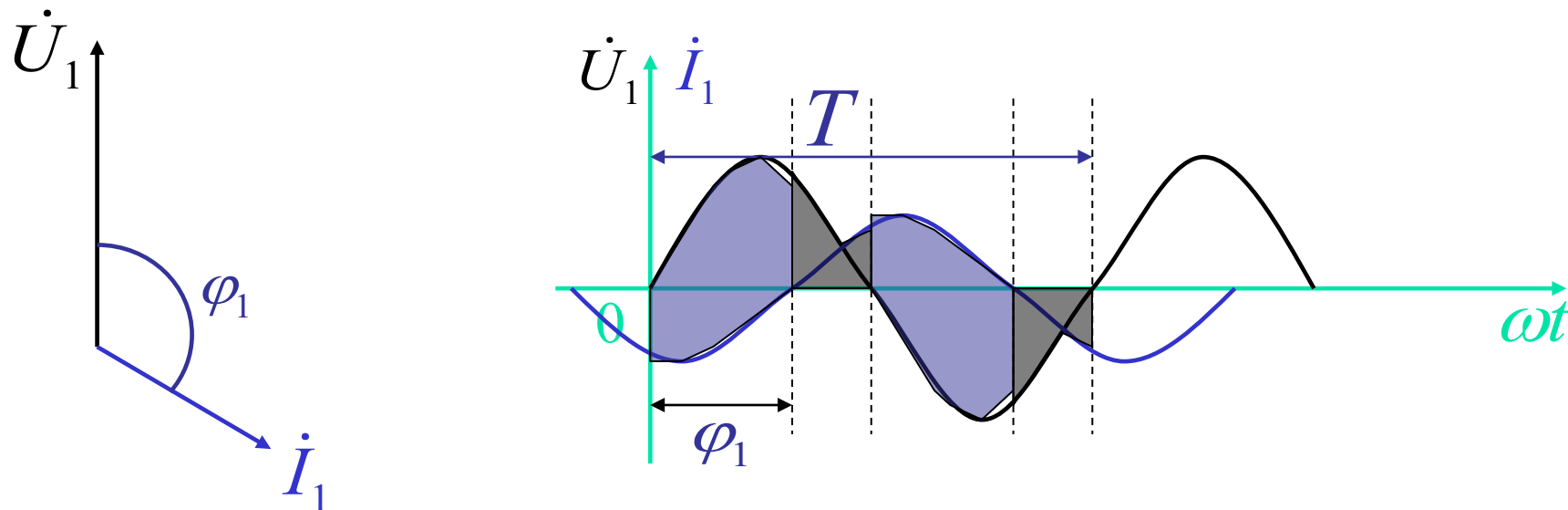
( 2 ) 交流电机功率的吸收与回馈该如何判别？

通过一个周期平均功率的流向来判别





## 五、回馈制动



结论1:  $0 < \varphi_1 < 90^\circ$  时, 电机从电源吸收功率  
 $90^\circ < \varphi_1 < 180^\circ$  时, 电机向电源回馈功率

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' \\ \dot{E}_2' &= \dot{I}_2' (R_2'/s + jX_2') & \dot{I}_1 &\approx \dot{I}_2' \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{U}_1 \approx \dot{I}_1 [(R_2'/s + R_1) + j(X_1 + X_2')]$$

结论2:  $n > n_1$  ( $s < 0$ ) 时,  $\varphi_1 > 90^\circ$ , 回馈制动

也可由电磁功率进行讨论

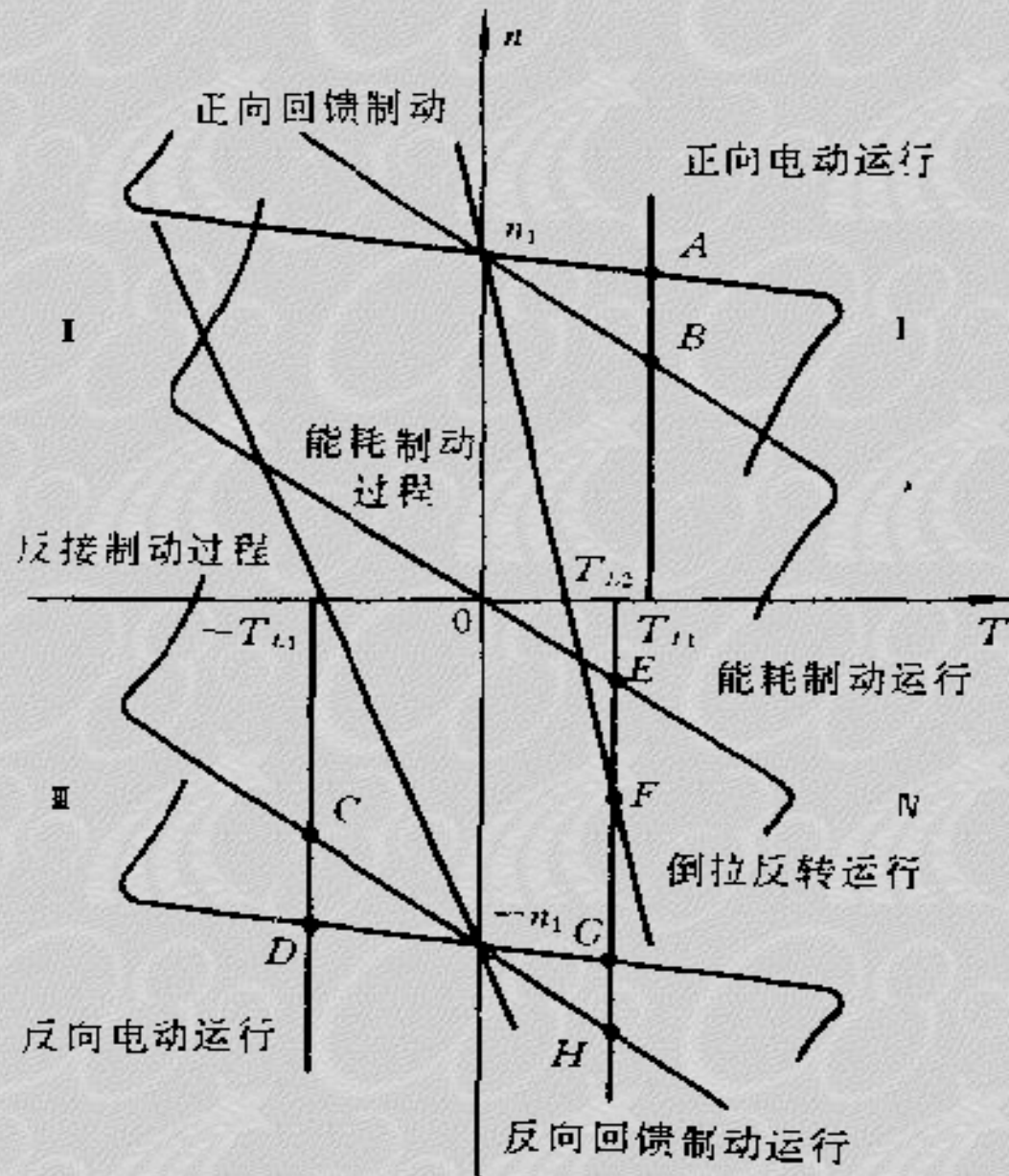


图 8.28 三相绕线式异步电动机的各种运行状态

## 六、例题

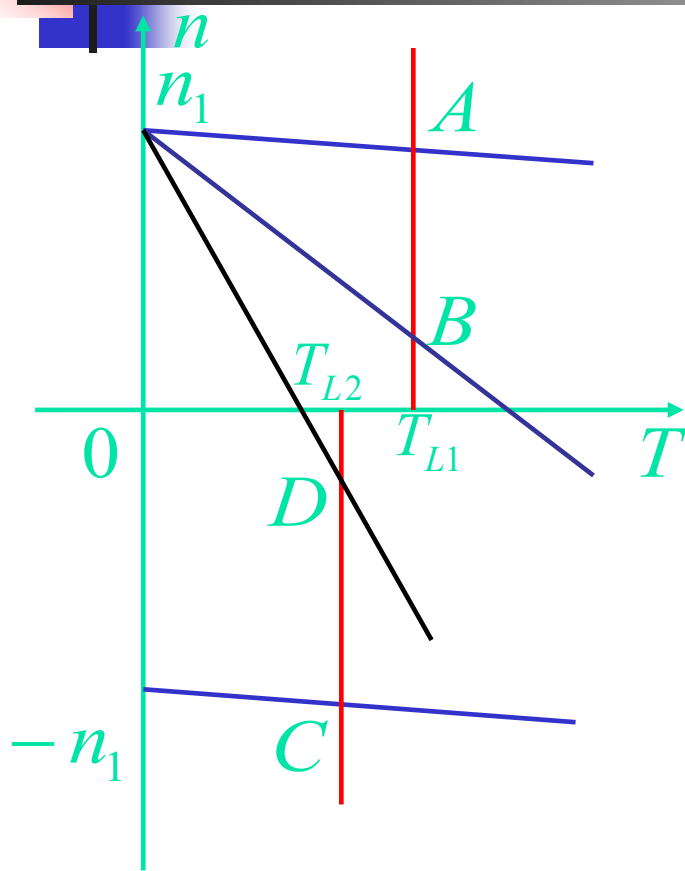
某起重机吊钩有一台绕线式三相异步电动机拖动，电动机的额定数据为： $P_N = 40kW$ ， $n_N = 1464 r/min$ ， $\lambda = 2.2$ ，

$K_T = 1$ ， $R_2 = 0.06\Omega$ 。电机的负载转矩为：提升重物 $T_{L1} = 261N \cdot m$ ，下放重物 $T_{L2} = 208N \cdot m$ 。

(1) 提升重物时要求有低速、高速两档，且高速时工作在正向固有特性上，低速时转速为高速时的0.25倍，工作于转子回路串电阻的特性上。求两档转速各为多少及转子回路串入的电阻值。

(2) 下放重物时要求有低速、高速两档，且高速时工作在反向固有特性上，低速时转速为提升重物时的低速档转速，工作于转子回路串电阻的特性上。求两档转速各为多少及转子回路串入的电阻值。说明电动机的运行状态。

# 解



$$n_1 = 1500 \text{ r/min} \quad s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = 0.024$$

$$s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.1$$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 261 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(1) 提升重物:

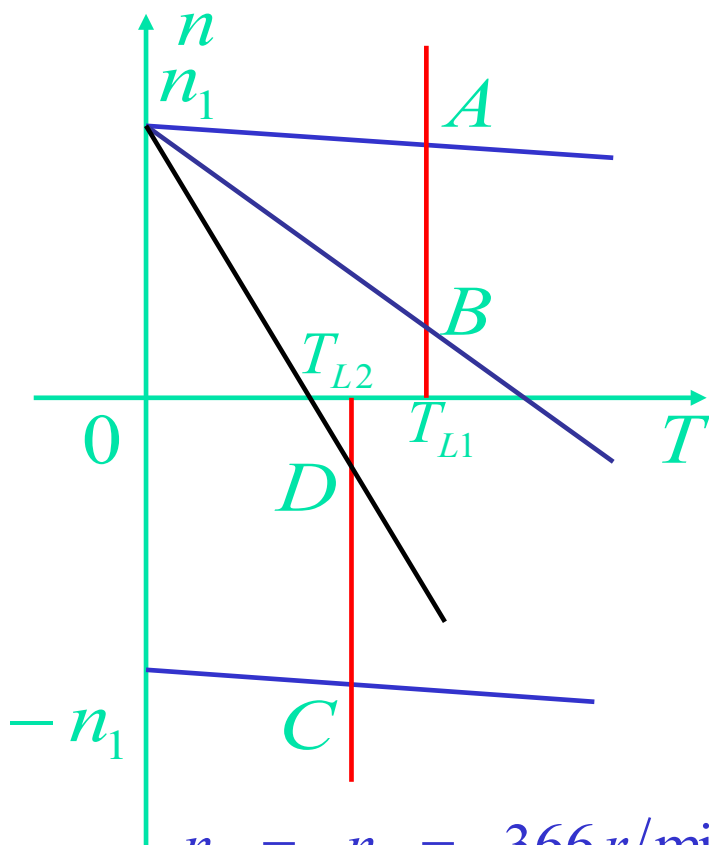
$$\because T_{L1} = 261 \text{ N} \cdot \text{m} = T_N$$

$$\therefore n_A = n_N = 1464 \text{ r/min}$$

$$n_B = 0.25n_A = 366 \text{ r/min} \Rightarrow s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = 0.756 \quad \frac{s_m}{s_{mB}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{SB}}$$

$$s_{mB} = s_B (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 3.145$$

$$R_{SB} = 1.827 \Omega$$



(2) 下放重物:

$$T_{L1} = 208 N \cdot m = 0.8 T_N$$

$$0.8 T_N = \frac{2 \lambda T_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \Rightarrow s = 0.0188$$

$$\Delta n = s n_1 = 28 r/min$$

$$n_C = -n_1 - \Delta n = 1528 r/min$$

$$n_D = -n_B = -366 r/min \Rightarrow s_D = \frac{n_1 - n_D}{n_1} = 1.244$$

$$s_{mD} = s_D \left( \frac{\lambda}{0.8} + \sqrt{\left( \frac{\lambda}{0.8} \right)^2 - 1} \right) = 6.608$$

$$\frac{s_m}{s_{mD}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{SD}}$$

$$R_{SD} = 3.905 \Omega$$

## 第四节 三相异步电动机的调速

在一定负载下，异步电机的速度：

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

异步电机调速

改变转差率  
调速

降低定子电压调速

绕线电机转子串电阻调速

绕线电机转子串附加电势调速

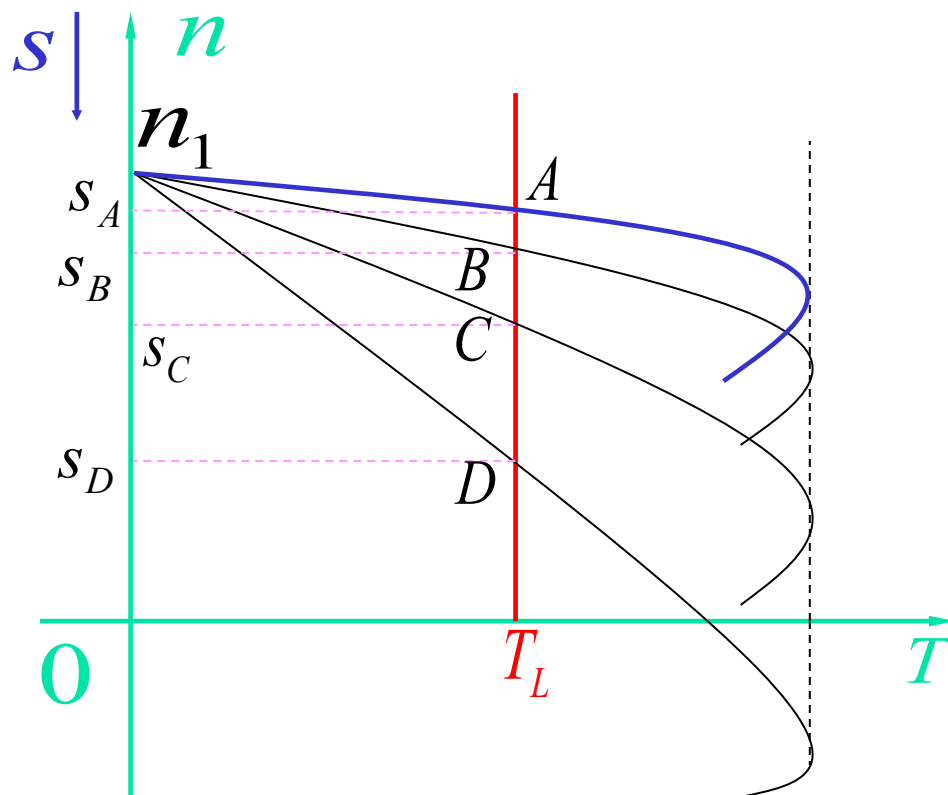
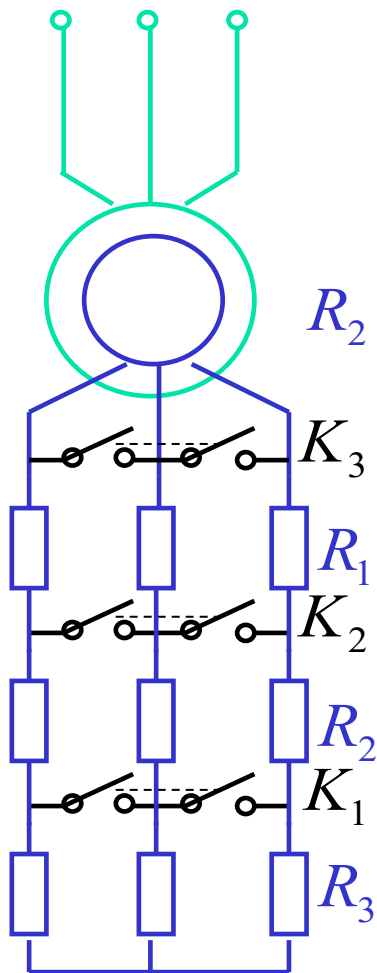
改变同步转速  
调速

变极调速

变频调速

# 一、改变转差率调速

## 1、绕线式异步电动机转子回路串电阻调速



$$\frac{R_2}{s_A} = \frac{R_2 + R_s}{s}$$



# 一、改变转差率调速

## 特点与性能

- (1) 近似属于恒转矩调速方式;
- (2)  $D=(2-3)$  主要受静差率限制;
- (3) 有级调速, 平滑性差;
- (4) 转速较低时, 串接电阻上损耗大, 经济性较差。

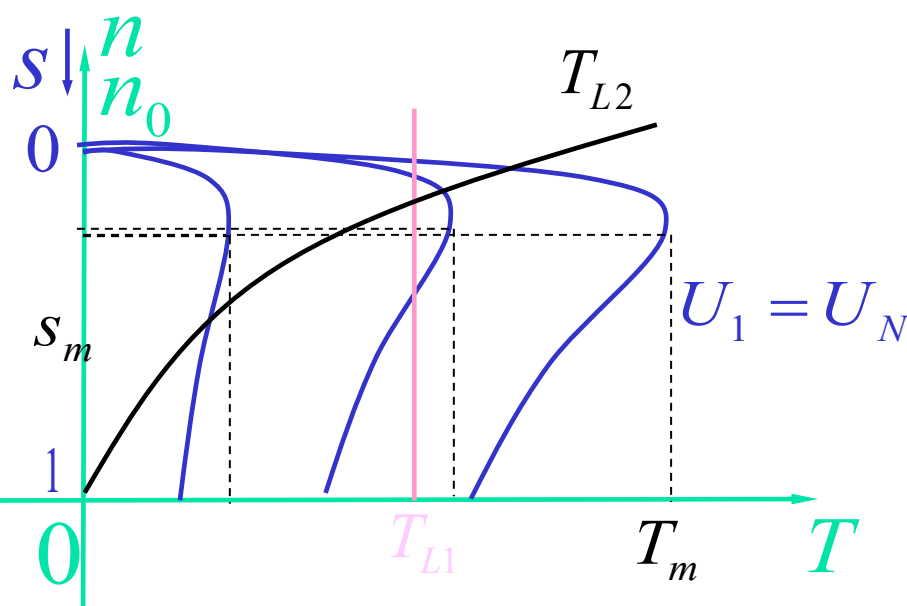
转子损耗称为转差损耗

$$P_s = sP_M = 3I_2^2(R_2 + R_s)$$

$$P_2 = (1-s)P_M$$



## 2、降低定子电压调速



### 特点与性能

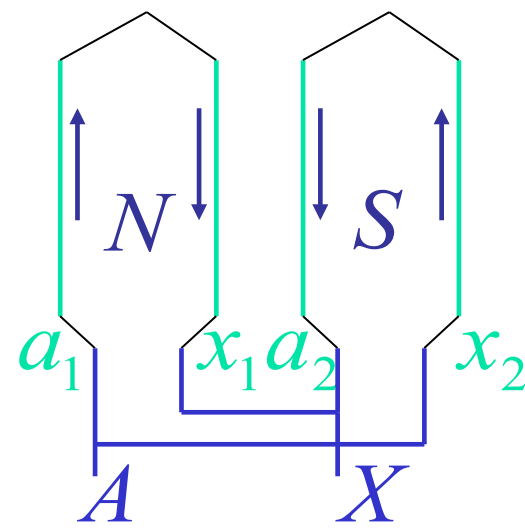
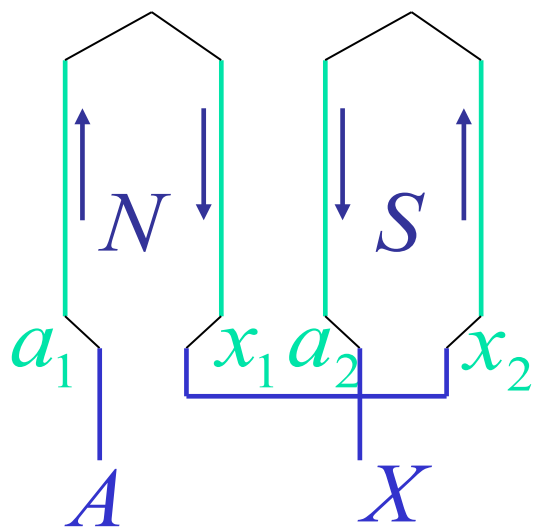
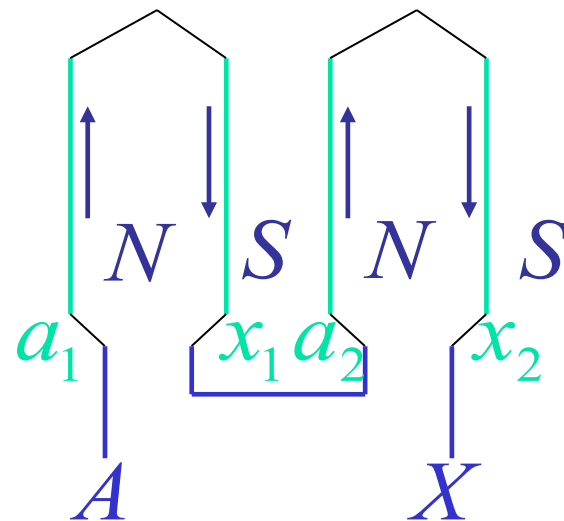
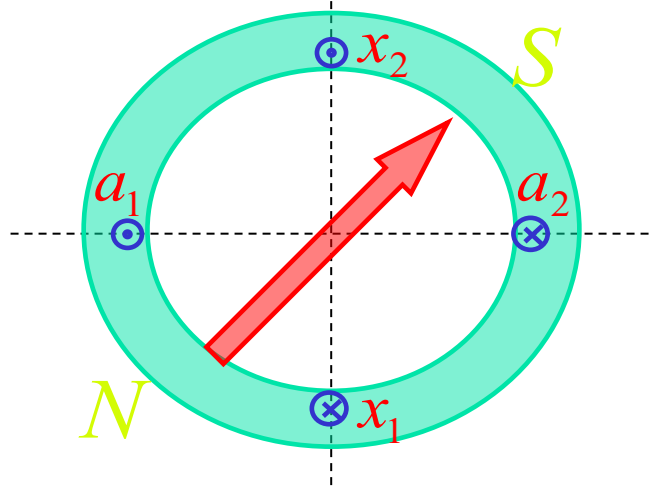
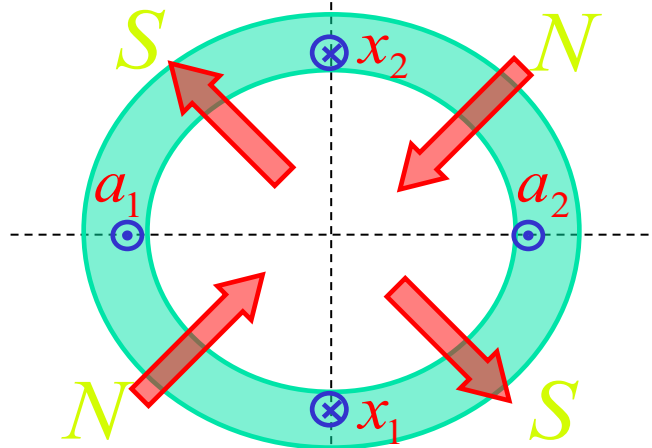
- (1) 近似属于恒转矩调速方式;
- (2) 调速范围小, 带泵类负载时可达10;
- (3) 转速较低时, 转差损耗大, 经济性较差。

## 3、串级调速（附加电势调速）

将串电阻调速时, 外串电阻上的损耗功率, 采用电气或机械方法再利用。分机械串级和电气串级两类。

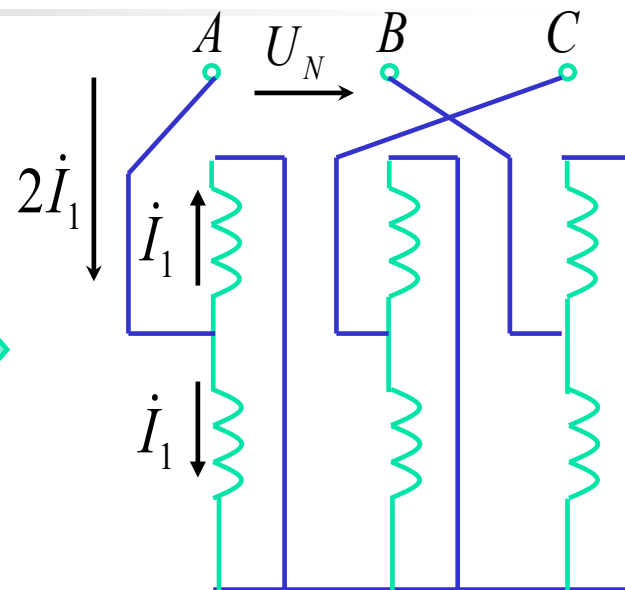
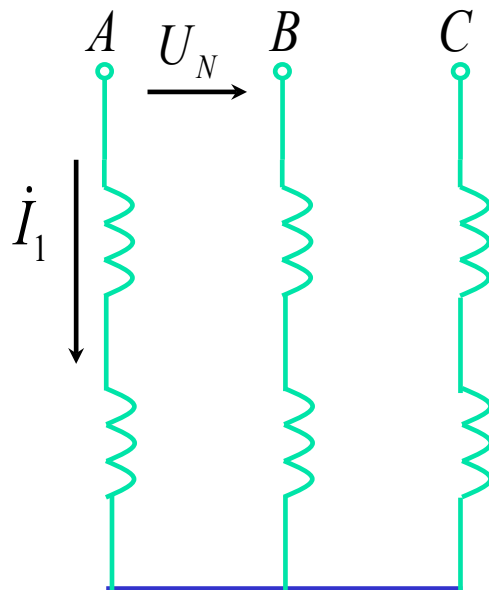
## 二、改变同步转速调速

### 1、变极调速

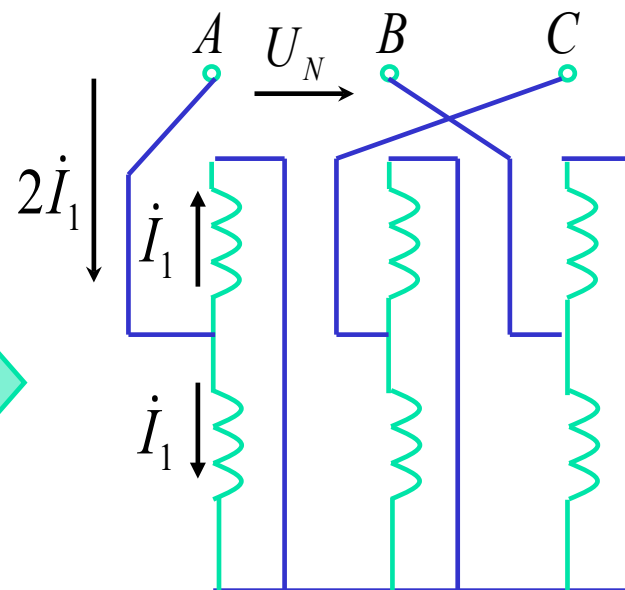
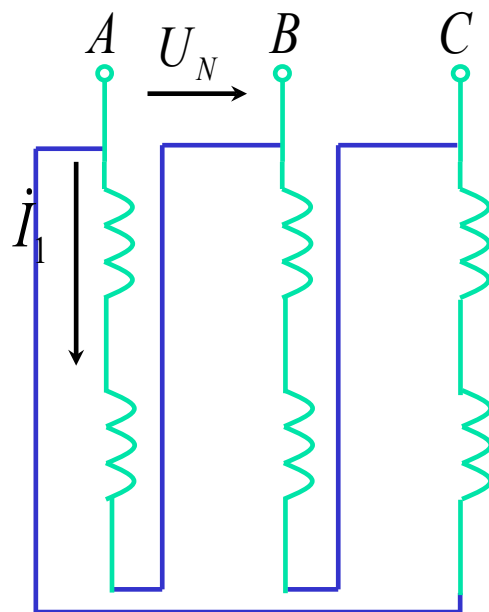


# 变极调速典型应用

Y---YY



$\Delta$  --- YY



## 2、变频调速

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$$

$f_1 \downarrow \Rightarrow \Phi_m \uparrow \Rightarrow I_0 \uparrow \uparrow$  是不允许的

要求  $U_1 \downarrow$ ，保持  $\Phi_m$  基本不变

$f_1 \uparrow \Rightarrow \Phi_m \downarrow$  不允许  $U_1$  超过  $U_N$ ，必然  $\Phi_m \downarrow$

### (1) 从基频向上调速

随着频率的上升，而输入电压不变，主磁通下降，电磁转矩也会下降。接近恒功率调速

## 2、变频调速

保持  $U_N$  不变升高频率时,电动机电磁转矩为

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \quad (10-8)$$

由于  $f_1$  较高,  $r_1$  比  $x_1$ 、 $x_2'$  及  $\frac{r_2'}{s}$  都小很多,故最大转矩  $T_m$  及  $s_m$  分别为

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 \left[ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} \\ &\approx \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 (x_1 + x_2')} \propto \frac{1}{f_1^2} \end{aligned} \quad (10-9)$$

$$\begin{aligned} s_m &= \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \approx \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \\ &= \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \propto \frac{1}{f_1} \end{aligned}$$

因此,频率越高时,  $T_m$  越小,  $s_m$  也减小,最大转矩对应的转速降落为

$$\Delta n_m = s_m n_1 \approx \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \cdot \frac{60 f_1}{p} = \text{常数} \quad (10-10)$$



## 2、变频调速

升高频率保持  $U_N$  不变时,近似为恒功率调速方式,证明如下:

$$P_M = T\Omega_1$$

$$= \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \cdot \frac{2\pi f_1}{p}$$

由于正常运行时,  $s$  很小,  $\frac{r_2'}{s}$  比  $r_1$ 、 $(x_1 + x_2')$  都大得多,因此若忽略  $r_1$  和  $(x_1 + x_2')$ ,则

$$P_M \approx \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 \frac{r_2'}{s}} \cdot \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{m_1 U_1^2}{r_2'} s$$

运行时,若  $I_1$  保持额定不变,  $s$  变化就很小,可近似认为是不变的,则  $P_M \approx$  常数。

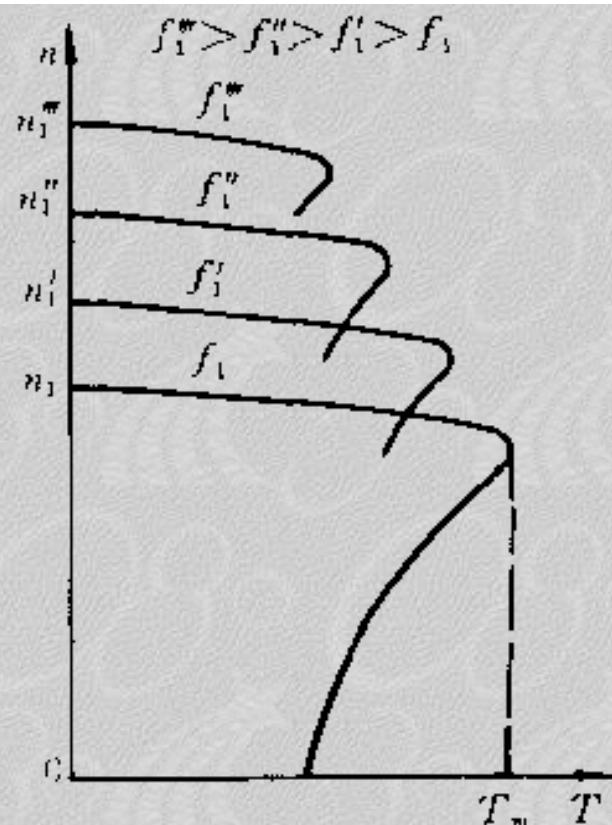


图 10.13 保持  $U_N$  不变升频调速的机械特性

## 2、变频调速

### (2) 从基频向下调速

A: 保持  $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$  (恒磁通控制方式)

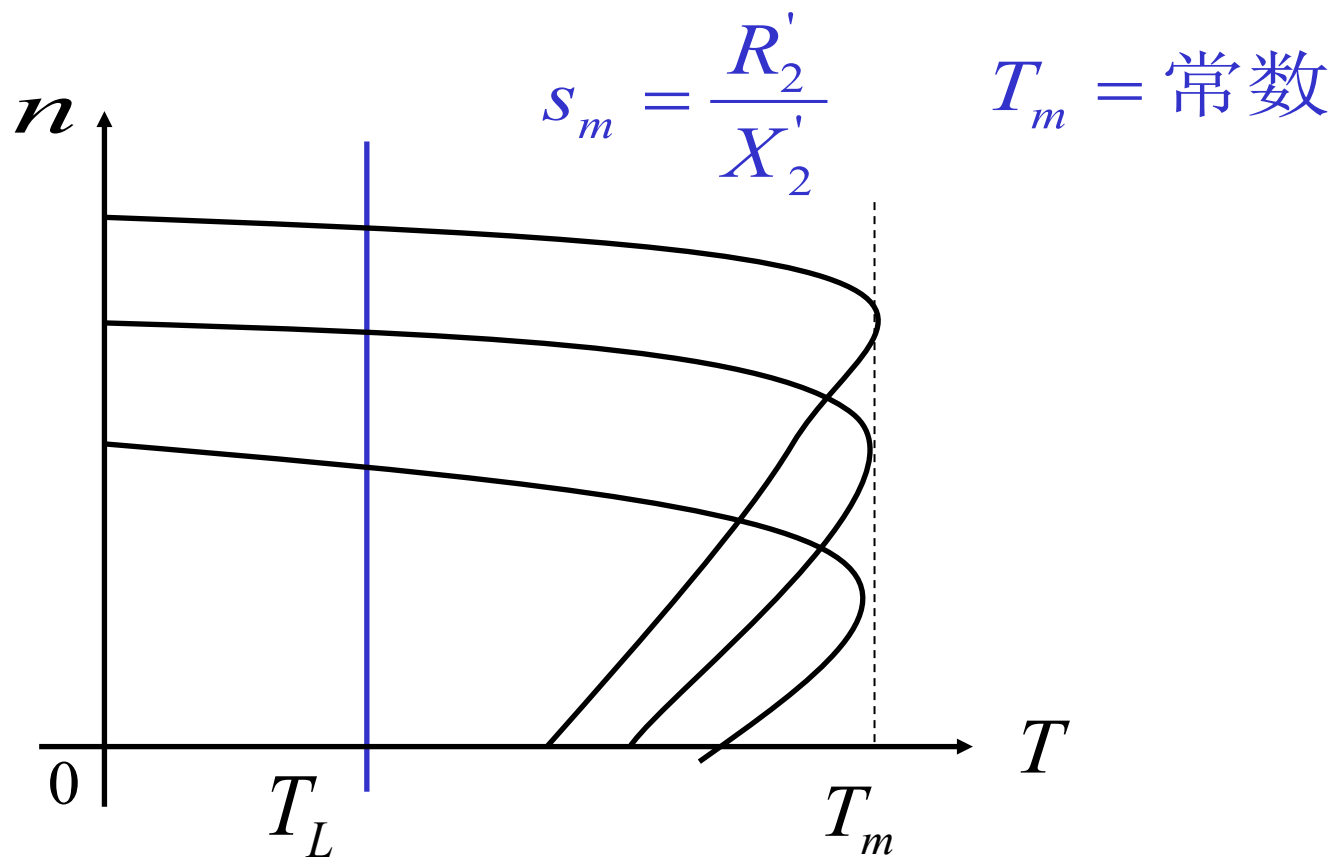
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_m$$

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2' R_2' / s}{2\pi n_1 / 60} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \left[ \frac{E_2'}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} \right]^2 \frac{R_2'}{s}$$

$$= \frac{m_1 p f_1}{2\pi} \left( \frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{\frac{R_2'}{s}}{\left( \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_2')^2}$$

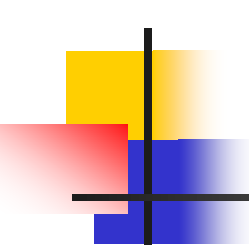
$$= \frac{m_1 p f_1}{2\pi} \left( \frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{1}{R_2' / s + s X_2'^2 / R_2'}$$

# 机械特性



恒转矩调速方式



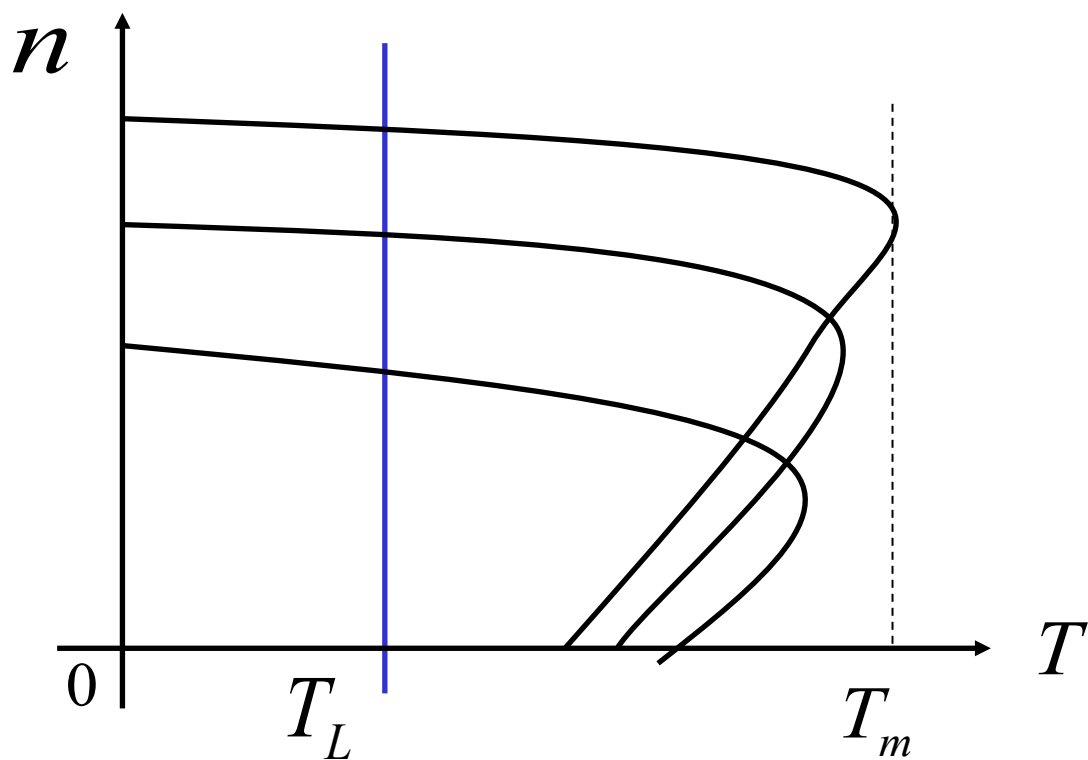


$B$ : 保持  $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$  (恒磁通控制方式)

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp_1} \Phi_m$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{m_1 p U_1^2 R_2' / s}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \\ &= \frac{m_1 p}{2\pi} \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{f_1 \cdot R_2' / s}{[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \\ T_m &= \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} \end{aligned}$$

# 机械特性



近似恒转矩调速方式



# 三相异步电动机变频调速的特点

- 从基速向下调速，为恒转矩调速方式；
- 从基速向上调速，为恒功率调速方式。
- 调速范围大。
- 转速稳定性好。
- 运行时转差率小，效率高。
- 频率可以连续调节，为无级调速。

**例题 10-2** 一台绕线式三相异步电动机,其额定数据为: $P_N=75\text{kW}$ , $n_N=720\text{r/min}$ , $U_N=380\text{V}$ , $I_N=148\text{A}$ , $\lambda=2.4$ , $E_{2N}=213\text{V}$ , $I_{2N}=220\text{A}$ 。拖动恒转矩负载  $T_L=0.85T_N$  时欲使电动机运行在  $n=540\text{r/min}$ ,若

- (1) 采用转子回路串电阻,求每相电阻值;
- (2) 采用降压调速,求电源电压;
- (3) 采用变频调速,保持  $U/f=\text{常数}$ ,求频率与电压各为多少。

**解**

(1) 转子回路串电阻时的计算

额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

临界转差率

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.04 (2.4 + \sqrt{2.4^2 - 1}) \\ &= 0.183 \end{aligned}$$

转子每相电阻

$$r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.04 \times 213}{\sqrt{3} \times 220} = 0.0224\Omega$$

$n=540\text{r/min}$  时的转差率

$$s' = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 540}{750} = 0.28$$

串电阻后的临界转差率  $s_m'$

$$T_L = \frac{2\lambda T_N}{\frac{s'}{s_m} + \frac{s_m'}{s'}}$$

$$\frac{s'}{s_m} + \frac{s_m'}{s'} = \frac{2\lambda T_N}{T_L}$$

$$\frac{s_m'^2}{s'} - \frac{2\lambda T_N}{T_L} s_m' + s' = 0$$

$$s_m' = \frac{\frac{2\lambda T_N}{T_L} \pm \sqrt{\left(\frac{2\lambda T_N}{T_L}\right)^2 - 4 \frac{1}{s'} s'}}{2 \frac{1}{s'}}$$

$$= s' \left[ \frac{\lambda T_N}{T_L} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda T_N}{T_L}\right)^2 - 1} \right]$$

$$= 0.28 \left[ \frac{2.4 T_N}{0.85 T_N} \pm \sqrt{\left(\frac{2.4 T_N}{0.85 T_N}\right)^2 - 1} \right]$$

$$= 1.53 (0.05 \text{ 值不合理, 舍去})$$

转子回路每相串入电阻值为  $R$

$$\frac{r_2 + R}{r_2} = \frac{s_m'}{s_m}$$

$$R = \left( \frac{s_m'}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{1.53}{0.183} - 1 \right) \times 0.0224$$

$$= 0.165 \Omega$$

(2) 降低电源电压调速时  $s_m$  不变,  $s' > s_m$ , 因此不能稳定运行, 故不能用降压调速。

### (3) 变频调速, $U/f = \text{常数}$ 时的计算

$T_L = 0.85T_N$  时在固有机械特性上运行的转差率  $s$ , 根据

$$T_L = \frac{2\lambda T_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

$$0.85T_N = \frac{2 \times 2.4T_N}{\frac{s}{0.183} + \frac{0.183}{s}}$$

$$\frac{s^2}{0.183} - 5.647s + 0.183 = 0$$

$$s = 0.033 (\text{另一值舍去})$$

运行时的转速降落

$$\Delta n = sn_1 = 0.033 \times 750 = 25 \text{ r/min}$$

变频调速后的同步转速

$$n_1' \approx n + \Delta n = 540 + 25 = 565 \text{ r/min}$$

变频的频率为

$$f' = \frac{n_1'}{n_1} f_{1N} = \frac{565}{750} \times 50 = 37.67 \text{ Hz}$$

变频的电压为

$$U' = \frac{f'}{f_{1N}} U_N = \frac{n_1'}{n_1} U_N = \frac{565}{750} \times 380 = 286.3 \text{ V}$$



作业(不交): P288    8-1、8-3 、8-7

P333    10-1 (第四版), 10-3 (第三版)

5月29日, 小组发表5分钟, 5组;

6月5日, 小组发表5分钟, 5组; 共10组

论文每人一份 (针对各组情况, 从不同角度来写, 仿宋5号字体, A4纸1页, 上南开图书馆上查找论文, 学习书写格式)

论文和实验报告交给助教