

# 电机拖动 41讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室



## § 5—3 三相感应电动机的制动

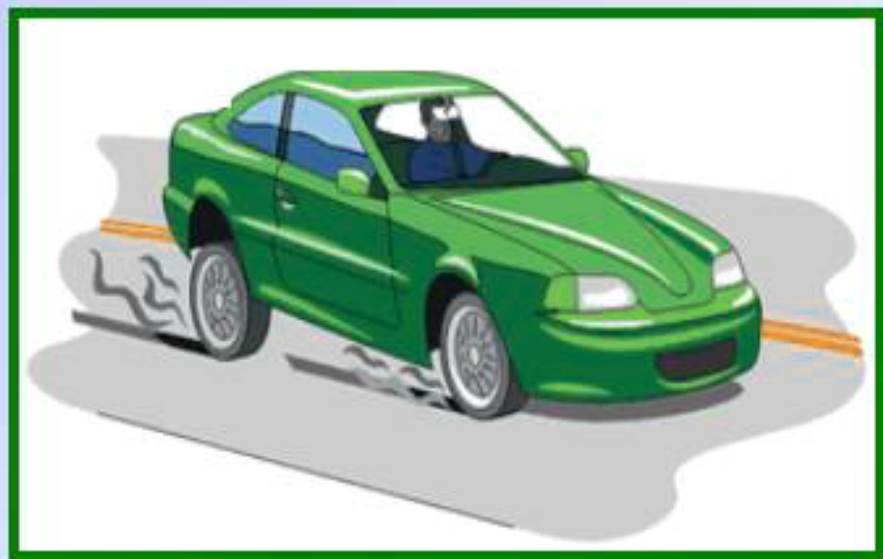
三相异步电动机的电动状态： $T$ 与 $n$ 同方向，电机从电源吸收电功率，扣除自身损耗外，转变为机械功率送至负载；

三相异步电动机的制动状态： $T$ 与 $n$ 方向相反；



制动状态方式：

- 反接制动；
- 回馈制动；
- 能耗制动；





# 三相异步电动机的各种运行状态

## 电动运行状态

$T$ 与 $n$ 方向一致,  $n < n_1$ ,  $0 < s < 1$ ,  $T$ 为拖动转矩, 特性在第I、III象限。



# 制动运行状态

制动分为

反接制动，能耗制动，回馈制动(再生发电制动)

## 反接制动

反接制动状态是指转子旋转方向和旋转磁场方向相反，即转速 $n$ 和同步转速 $n_1$ 反向的运转状态。

反接制动分为转子反转的反接制动和定子两相反接的反接制动。



# 定子两相反接的反接制动

定子两相反接的反接制动又称电源反接制动

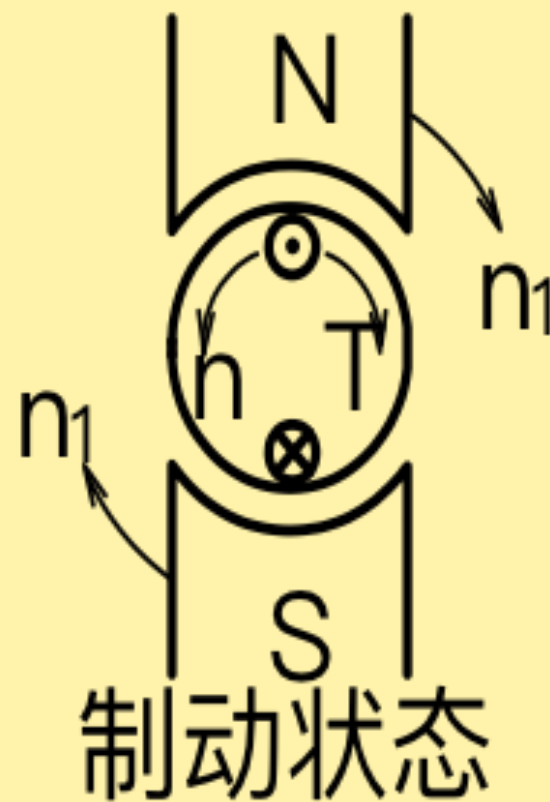
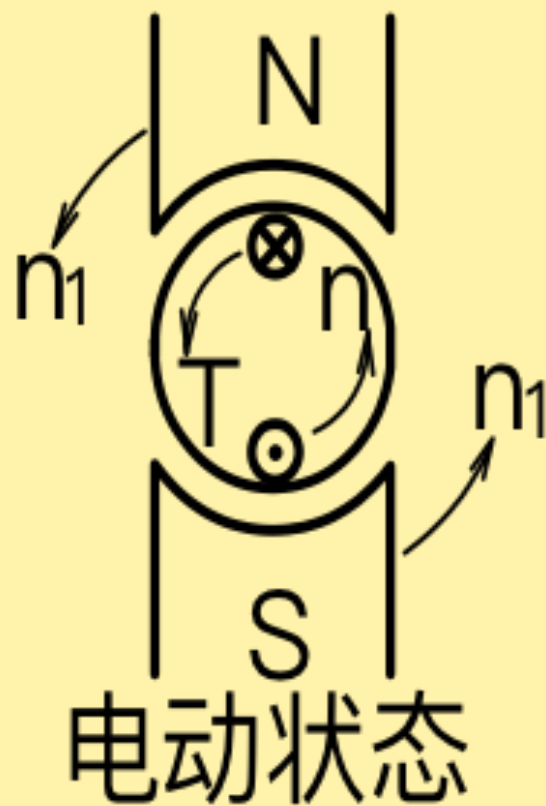
(1)方法及制动原理

方法：

将三相定子绕组二相出线头对调一下,则 $n$ 1转,

同时在转子绕组内串入三相对称电阻 $R\Omega$ 。

# 磁场模型



异步电动机的磁场模型



## 原理

反接瞬间： $n_1 \rightarrow -n_1$ ， $n$  由于惯性来不及变化。

$$s = \frac{-n_1 - n}{-n_1} > 1, 1 < s < 2$$

这时 $s$ 较大 $\rightarrow sE_2$ 较大 $\rightarrow I_2$ 很大。为限制转子电流，要串制动电阻(在转子回路中 $R\Omega$ )。

制动瞬间：

$$s_B = \frac{-n_1 - n_A}{-n_1}, \quad n_A = n_1(1 - s_A) \therefore s_B = 2 - s_A$$

反接制动瞬间因 $s_A$ 很小， $n_A \approx n_1$ ，所以 $s \approx 2$ 。

转子回路串入大电阻，若改变串入的电阻值可改变制动特性的斜率。



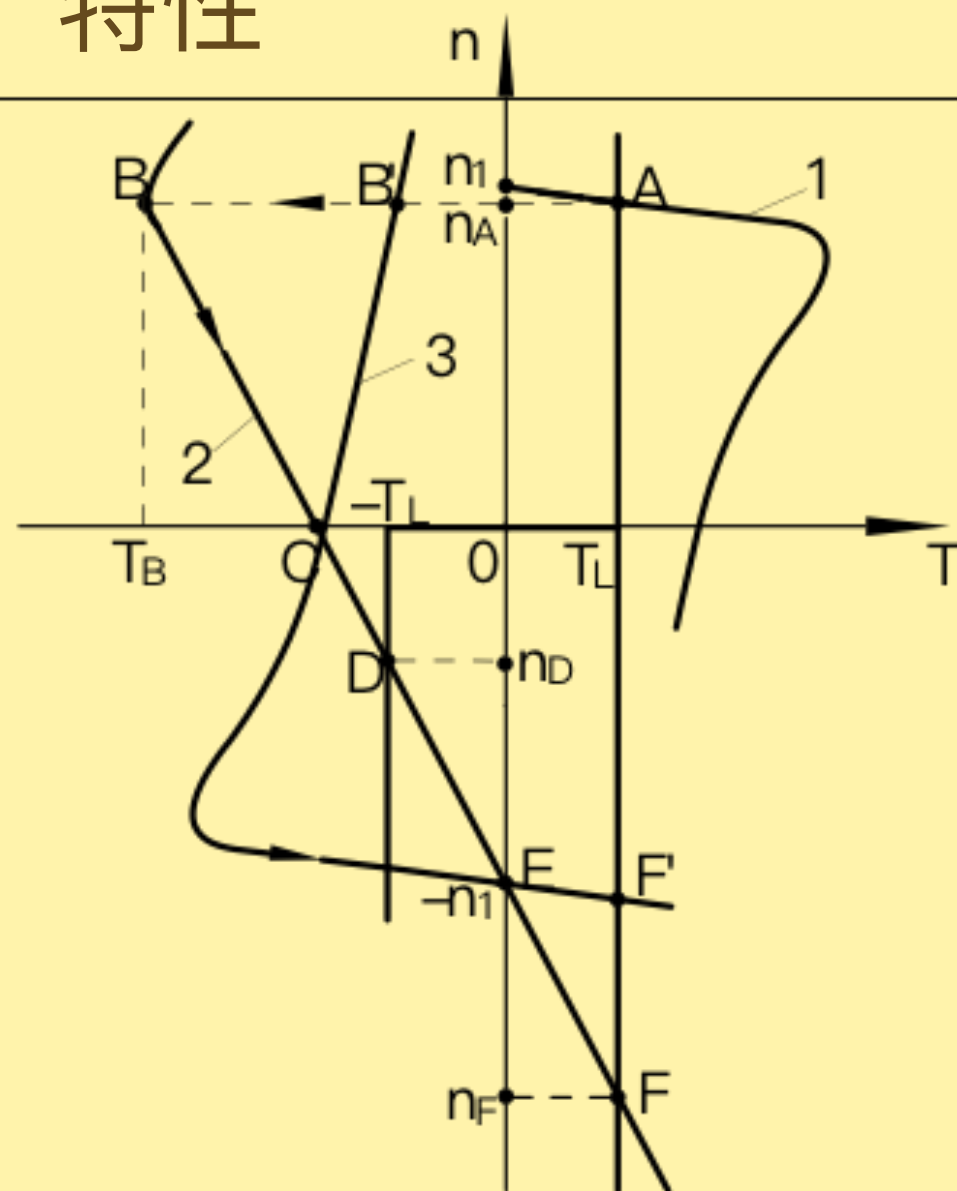


## 特性


当电机拖动恒转矩负载时，在电动机转矩和负载转矩共同作用下，迫使电动机很快减速到C点， $n=0$ ，制动结束。BC段为电源反接制动的制动特性，要想停车，需在 $n=0$ 时拉闸，否则，若电机拖动反抗性负载，而且C点的电动机转矩 $T$ 大于负载转矩，则反向起动到D点稳定运行。CD段为反向电动状态特性。若电动机拖动位能性负载，则要从反向电动状态继续加速到 $-n_1$  (E)点，再到反向回馈制动状态的F点，才能稳定运行。



# 特性



定子两相反接的反接制动

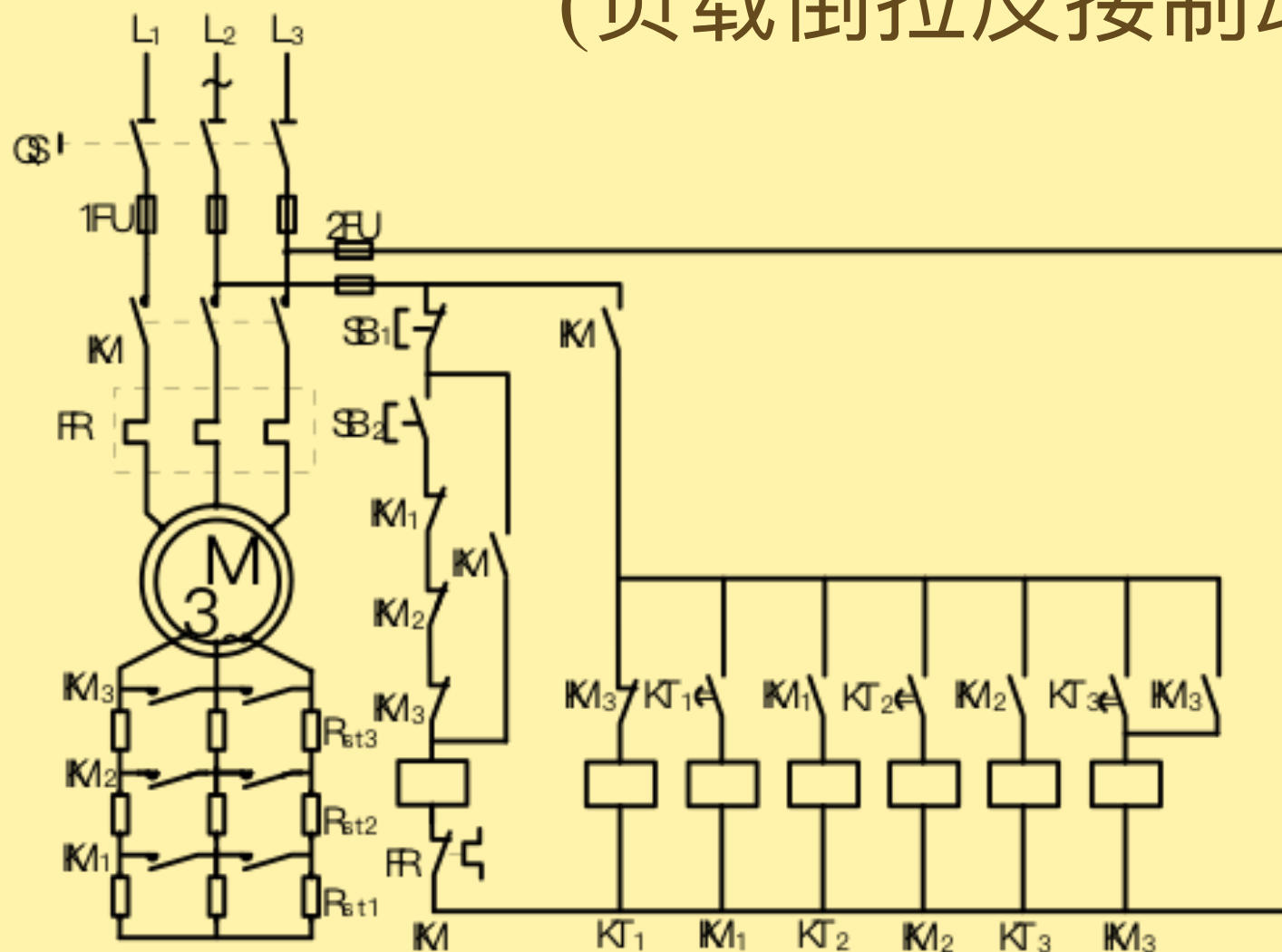


## 应用

**适用于迅速正反转的生产机械。**

# 转子反转的反接制动

(负载倒拉反接制动)




(a)接线图



## 方法及制动原理

绕线式异步电动机转子串入较大的电阻，如图所示，当电机提升重物 $G$ ，电机以 $n_A$ 转速提升重物。这时线路中接触器的常开接点全部闭合，转子回路没有外串电阻。



## 制动原理

若使KM3断电，常开接点打开，串入电阻 $R_{st3}$ 系统以较低转速 $n_B$ 提升重物。若再使KM2断电，其常开接点打开，串入电阻  $R_{st3} + R_{st2}$ ，得特性3，如图所示。这时  $T = T_L$ ， $n = 0$ ，电机既不提升重物也不放下重物。若再使KM1断电，转子回路串入全部电阻 $R_{st1} + R_{st2} + R_{st3}$ ，在  $n = 0$  时， $T < T_L$ ，位能负载拉着电动机反转，使转子逆原先方向转动。 $T$ 与 $n$ 反向，制动状态。 $T$ 为制动转矩起限速作用，使下放重物不会出现危险的高速度。串入大电

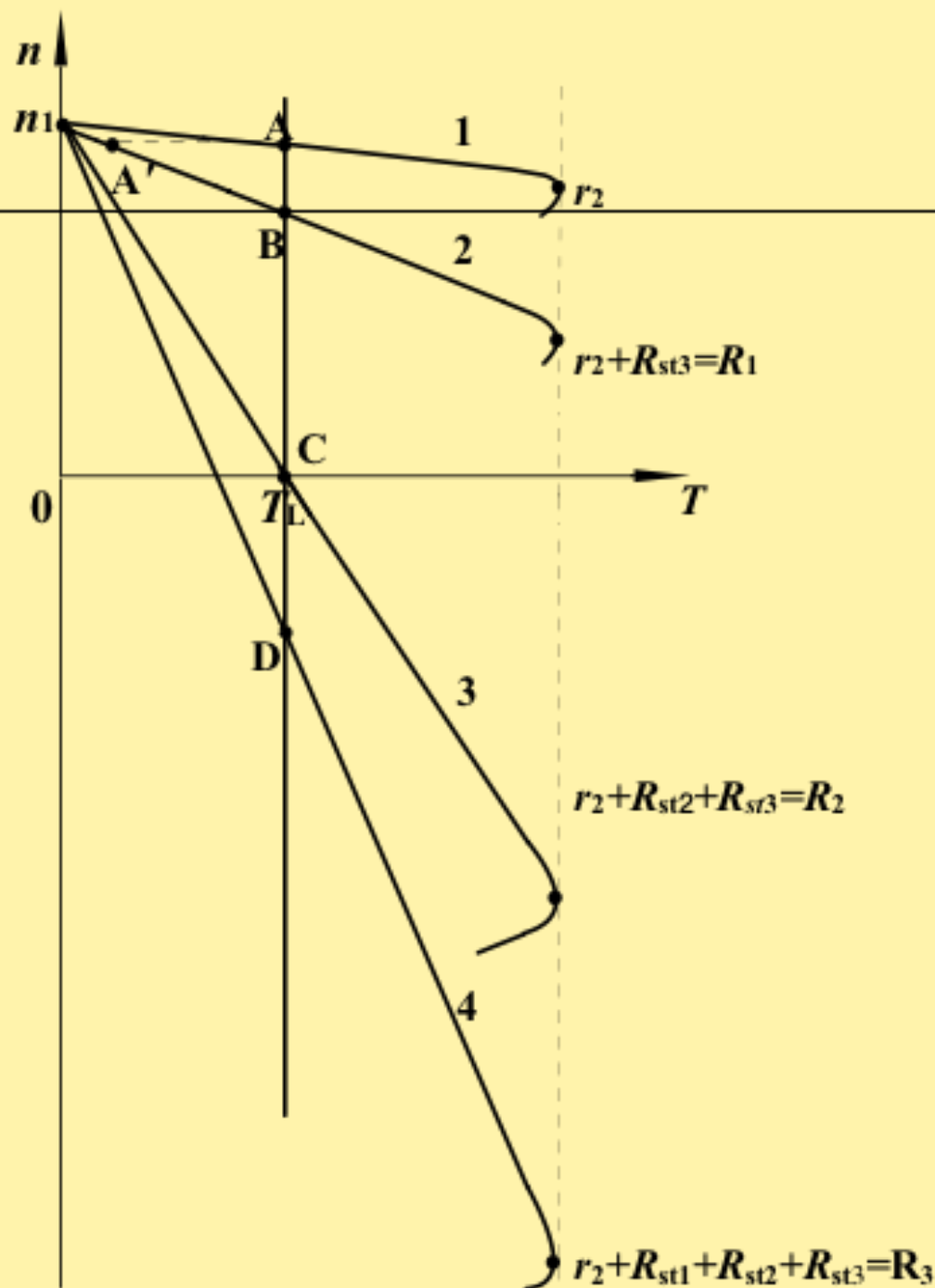


# 特性

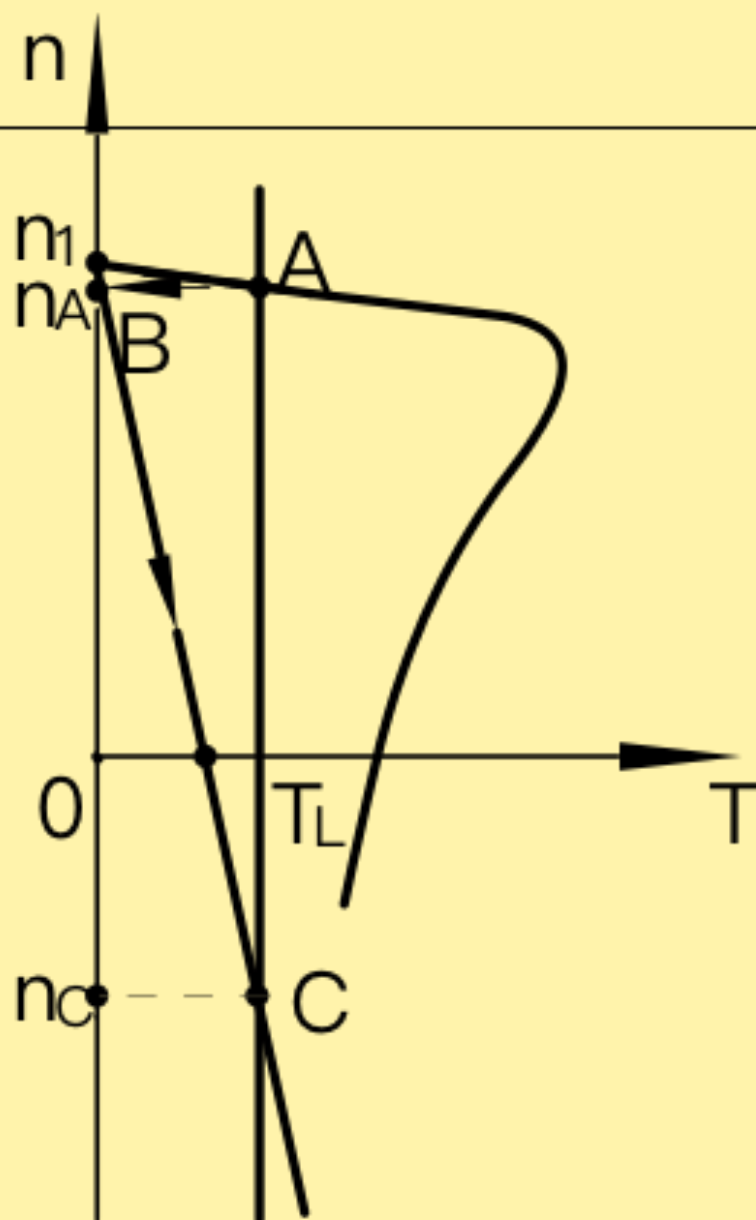
判断

$R$  与  $T_{ST}$  的关系  
注意临界值

先  $\uparrow$ , 后  $\downarrow$



转子反转的反接制动的机械特性



转子反向的反接制动





## 能量关系

机械功率

$$P_j = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' < 0$$

电磁功率

$$P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} > 0$$

转子铜损

$$P_{cu2} = P_{em} + P_j = m_1 I_2'^2 \left( r_2' + R_{\Omega}' \right)$$

说明两部分能量全部消耗在电阻上，一部分消耗在转子本身的内阻 $r_2$ 上，因 $r_2$ 很小，故能量大部分消耗在外串电阻 $R_{\Omega}$ 上。这样可以减小转子发热程度。



## 特点和应用

**特点：**

$s > 1$ ，运行过程中能量消耗多，改变转子串接电阻，可变速速度。

**应用：**


适用于位能性负载下放重物。



# 电机拖动 42讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室



## 回馈制动运行状态(再生发电制动)

### 方法及制动原理

**方法：**电机在拖动位能性负载时，当电动机产生的电磁转矩 $T$ 与负载转矩 $T_L$ 同方向时，使转速 $n \uparrow \uparrow$ ，即 $n > n_1$ ，电动机工作在发电状态，向电网返回能量。

**特点：**电机向电网输送有功功率，由电网向电机输入无功功率。

把转轴上输入的机械功率，经异步机转化为电功率送到电网。

轴上外施驱动转矩，电机以同步方向旋转

$$|n| > |n_1|, \quad S = \frac{n_1 - n}{n_1} < 0,$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{SX_{2\sigma}}{R_2}\right), \quad 90^\circ < \varphi_2 < 180^\circ$$

能量流向：

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

$$P_{em} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{S} < 0$$

$$P_\Omega = (1 - S) \cdot P_{em} = P_{em} + |S| \cdot P_{em}$$

T与n方向相反，  
处于制动状态





# 回馈制动的实现

## (1) 同步转向反向的回馈制动（反接正转）

定子两相对调后，位能性负载最后稳定于第四象限，重物以高于同步速的速度下放。

## (2) 同步转向不变的回馈制动

- 电车下坡；
- 变极或变频调速过程；

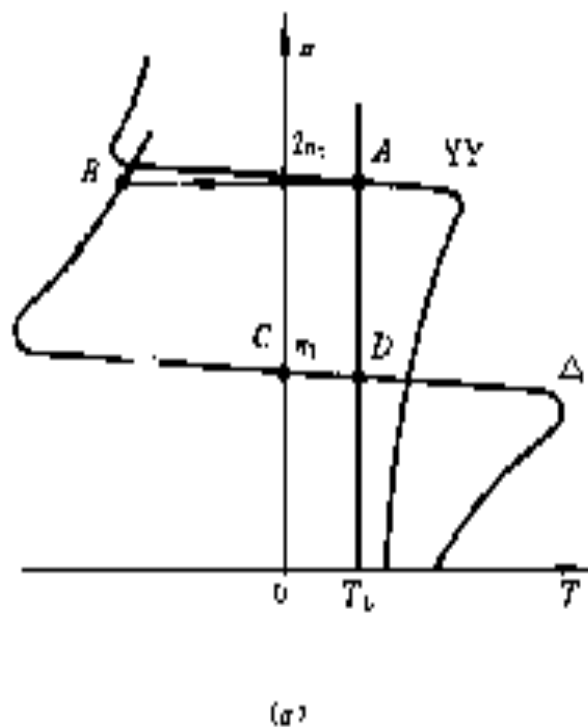




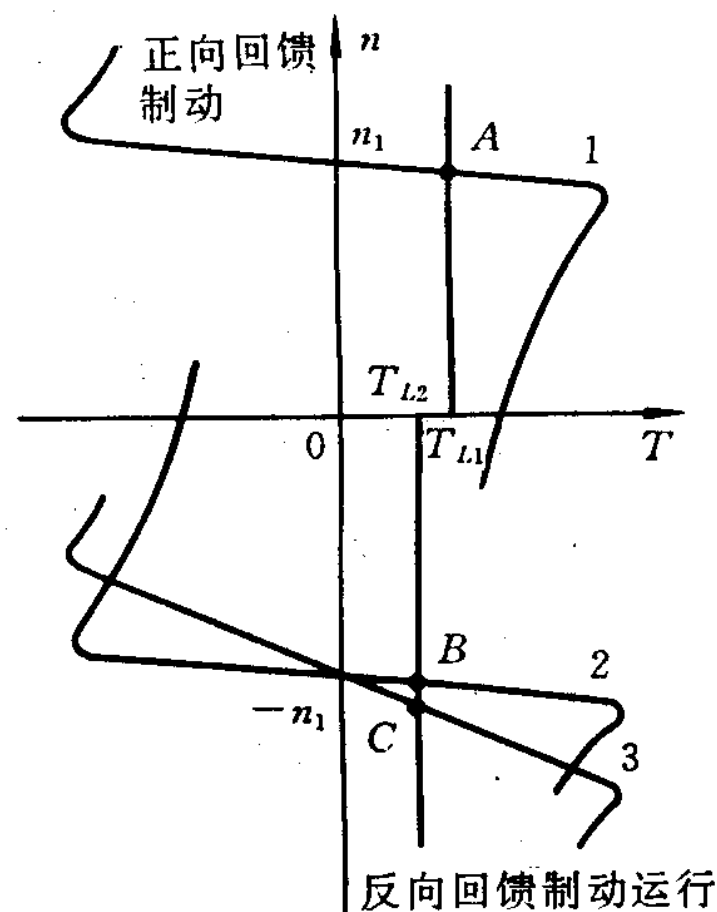


# 机械特性

正向回馈制动运行：通过将一部分机械能转换为电能并回馈回电源的现象。



当三相异步电动机拖动位能性恒转矩负载，电源为负相序时，电动机运行于第IV象限，转子回路串入电阻后，转速绝对值加大





## 特点和应用

**特点：**

$n > n_1$ ，从电网吸收无功建立磁场，向电网  
输送有功，经济。

**应用：**

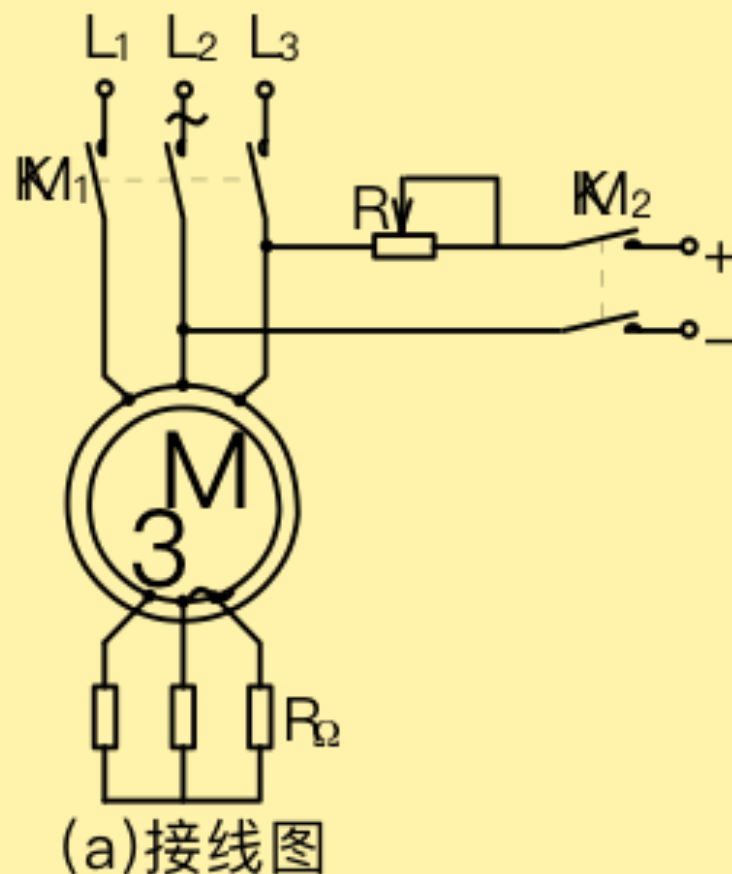
电机拖动位能性负载(如绕线式异步机)下放  
重物。

# 能耗制动运行状态

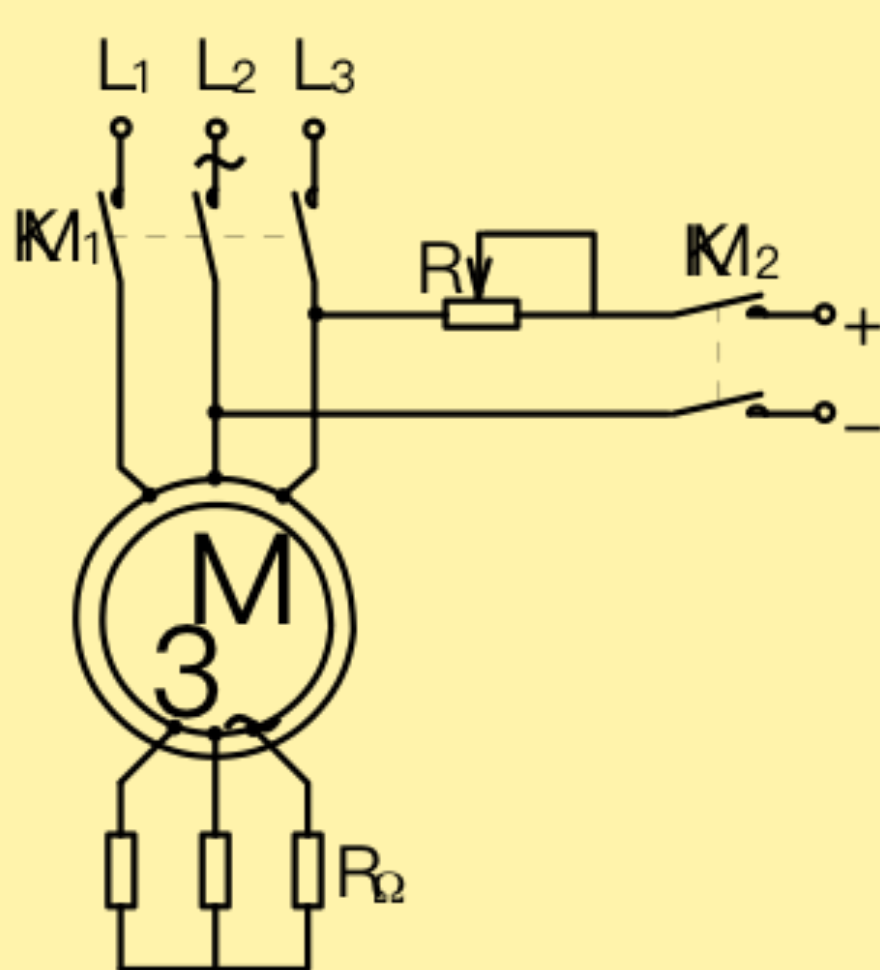
## (1)方法及制动原理

方法：

将正在运行的三相异步电动机定子绕组断开三相交流电源，同时在定子两相绕组内通入直流电流。电动运行状态时，KM1闭合，能耗制动时KM1断开，KM2闭合



# 接线图




(a) 接线图



(b) 能耗制动原理

三相异步电动机能耗制动原理接线



# 制动原理

当定子绕组拉开三相交流电，通入直流电时，定子磁场变为固定不动的恒定磁场。转子由于惯性仍顺时针方向旋转。转子导体切割磁场产生的感应电势和感应电流的方向与电动状态时相反，从而使电动机产生的电磁转矩与电动状态时相反，即 $T$ 为逆时针方向，这时 $T$ 与 $n$ 方向相反，故为制动状态。当转速 $n=0$ 时， $T=0$ ，电动

# 制动原理

制动过程中，

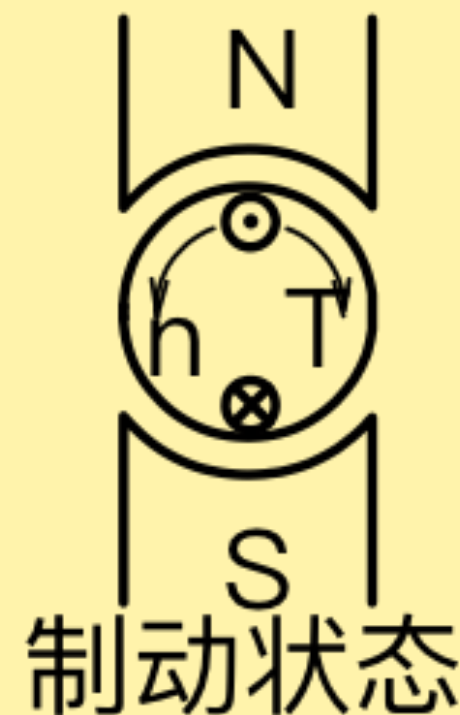
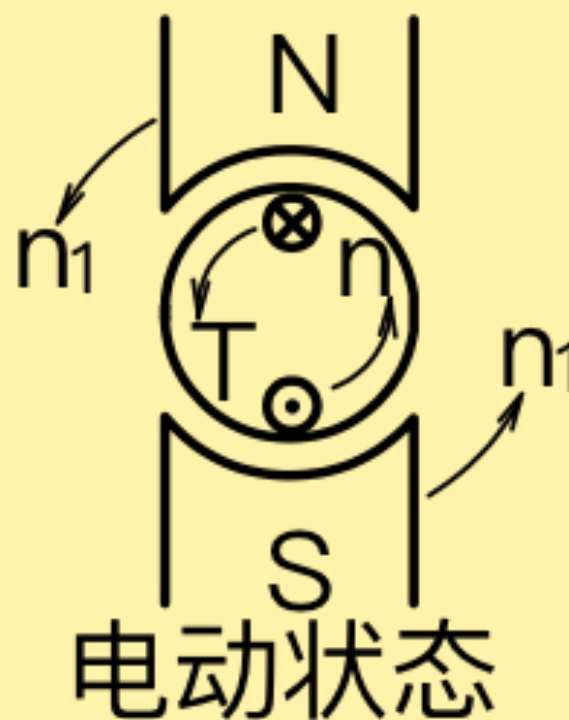
$n > 0$ ,  $T < 0$ , 所以

特性在II象限

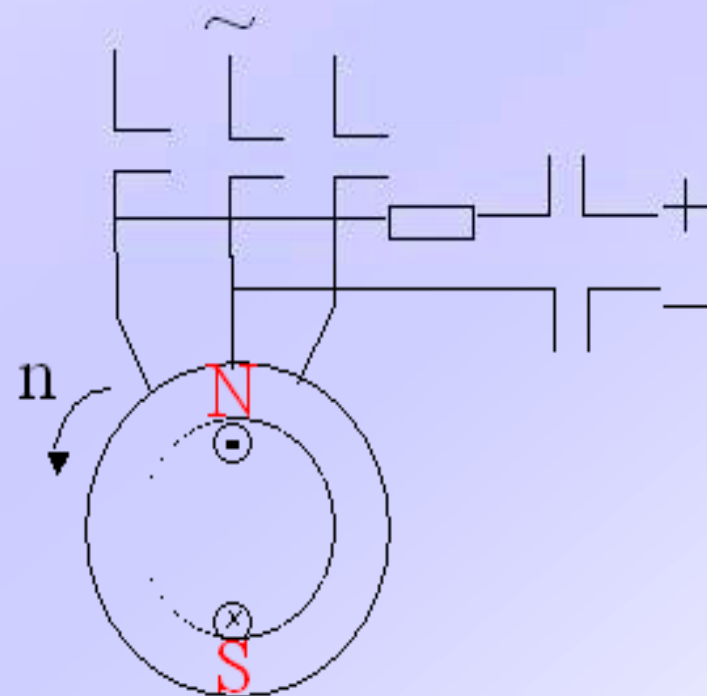
能量关系为：

动能 → 电能 → 消耗

在转子电阻上。



制动时，三相绕组脱离三相电源，由直流电流过定子绕组，在气隙中形成恒定磁场。



过程分析：

由于惯性，转子仍以 $n$ 速度旋转

切割磁力线  $\rightarrow$  感应电势  $\rightarrow$  感应电流  $\rightarrow$  产生电磁力  $\rightarrow$  制动转矩

在制动转矩和负载转矩共同作用下，转子减速至 $n=0$ 。

能耗制动可使反抗性负载准确停机，使位能性负载匀速下放。注意：恒定磁场获得，需通过定子绕组的改接





# 能耗制动时的机械特性

## (1) 定子等效电流 $I_1$ 的大小

能耗制动时，定子绕组通入直流 $I_1$ 产生固定磁势 $F_1$ ，转子以转速 $n$ 切割定子固定磁场。这时能耗制动的转差率 $s_n = n/n_1$ ，也称相对转速。电动机处于电动状态时，转子以 $\Delta n$ 切割定子旋转磁场，其转差率为 $s = (n_1 - n)/n_1$ 。


当 $n=0$ 时，能耗制动的转差率 $s_n=0$ 。当在同步转速下 $n=n_1$ 时， $s_n=1$ 。这时转子电势最大  $s_n E_2 = E_2$ ，电抗为 $s_n X_2 = X_2$ 。

所以能耗制动时其转差为 $0 < s_n < 1$ 。



## 分析

现用分析异步电动机正常运行的方法来分析  
能耗制动的情况。其方法为：将转子看成不动，  
定子固定磁场朝相反方向以转速 $n$ 旋转。结果与  
转子旋转时相同。



## 分析方法

将定子固定磁场，用一个等效的旋转磁场来代替，其转速为 $n$ 、转向与转子实际转向相反，并称产生定子旋转磁场的定子电流——等效交流电流 $I_1$ 。

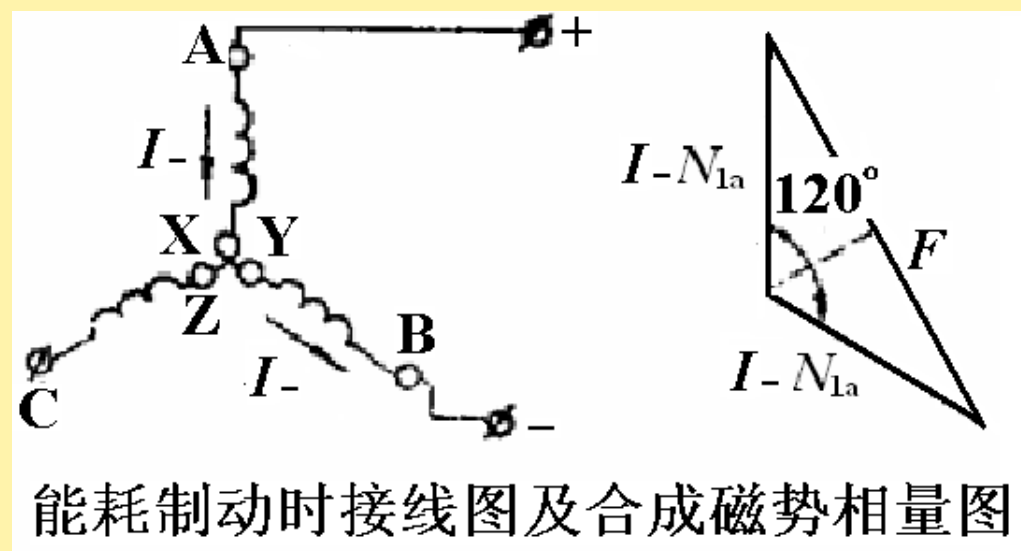
## 推导


令 $F_{\sim}=F_{-}$ ，式中 $F_{-}$ 为合成的直流磁势； $F_{\sim}$ 为通交流电时产生的合成旋转磁势。

如果定子接成Y接，而且其二相通直流电时，合成磁场见图，其中设 $N_{1a}$ 为定子每相绕组的串联有效匝数，即：

$$N_{1a} = N_1 k_{w1}$$

$$F_A = I_{-} N_{1a}$$





## 推导

$$\therefore F_- = 2F_A \cos 30^\circ = \sqrt{3}F_A = \sqrt{3}I_- N_{1a},$$

$$F_- = \frac{3}{2}F_m = \frac{3}{2}\sqrt{2}I_- N_{1a} = F_1 = \sqrt{3}I_- N_{1a}$$

$$\therefore I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}I_- = 0.816I_-$$

## 电流相量图

合成磁势  $\sum \dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$  励磁电流  $\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_\mu$

$I_\mu$ 为励磁电流无功分量,  $I_a$ 为励磁电流有功分量

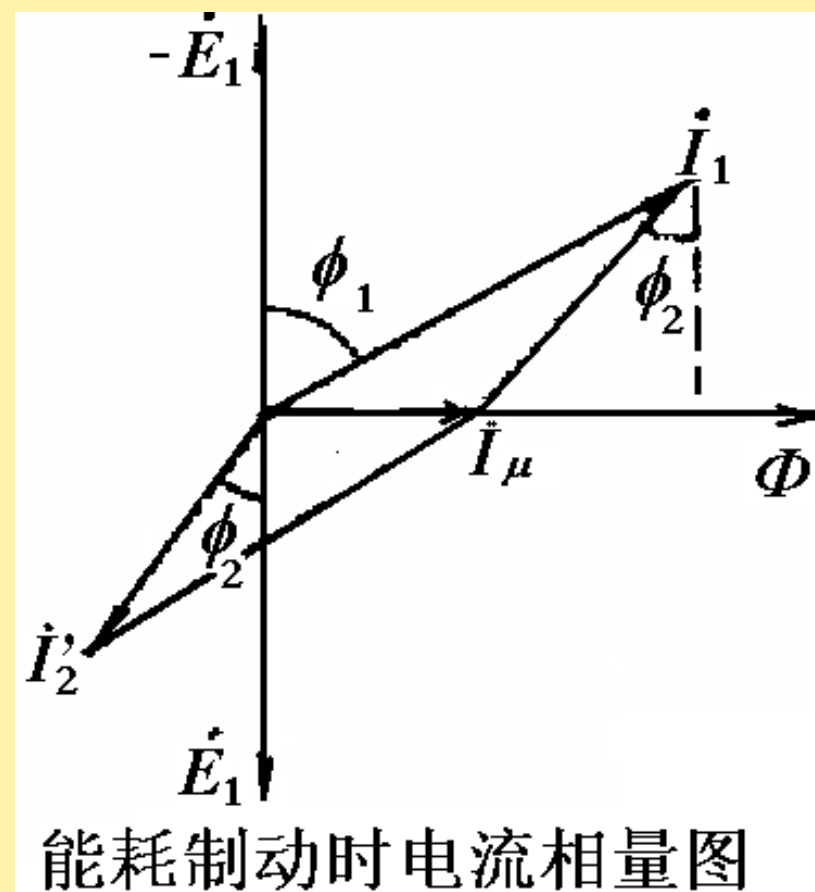
当忽略有功分量时,

$$I_0 \approx I_\mu \quad \sum \dot{F} \rightarrow \dot{\Phi}_m \rightarrow \dot{E}_1 = \dot{E}_2'$$

相量图如图所示由电流相量

图可得:

$$\begin{aligned} I_1^2 &= (I_2' \cos \phi_2)^2 + (I_\mu + I_2' \sin \phi_2)^2 \\ &= I_2'^2 + 2I_\mu I_2' \sin \phi_2 + I_\mu^2 \end{aligned}$$





# 讨论

当 $n=0$ 时,  $I_2 = 0, I_{\mu 0} = I_1$


当 $n \uparrow$ 时,  $E_2 \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow I_{\mu} \downarrow \rightarrow \Phi_m \downarrow$

$n \uparrow$ 时  $\rightarrow s_n \uparrow \rightarrow f_2 \uparrow \rightarrow X_2 \uparrow \rightarrow \Phi_2 \uparrow$

电动状态时:  $I_2' \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow I_0 \text{不变} \rightarrow \Phi_m \text{不变化}$

能耗制动时:  $I_2'$ 随 $n$ 变化, 但  $I_1$ 不变  $\rightarrow I_0 \mu$ 变化  
 $\rightarrow \Phi_m$ 大小变化但方向不变。






# 机械特性方程

特性方程：

$$T = \frac{2T_m}{\frac{S_n}{S_{mn}} + \frac{S_{mn}}{S_n}}$$

上式与电动机实用公式相似，所以机械特性曲线的形状也与电动机相似，只是当 $n=0$ 时， $T=0$ 过原点。



## 分析机械特性曲线

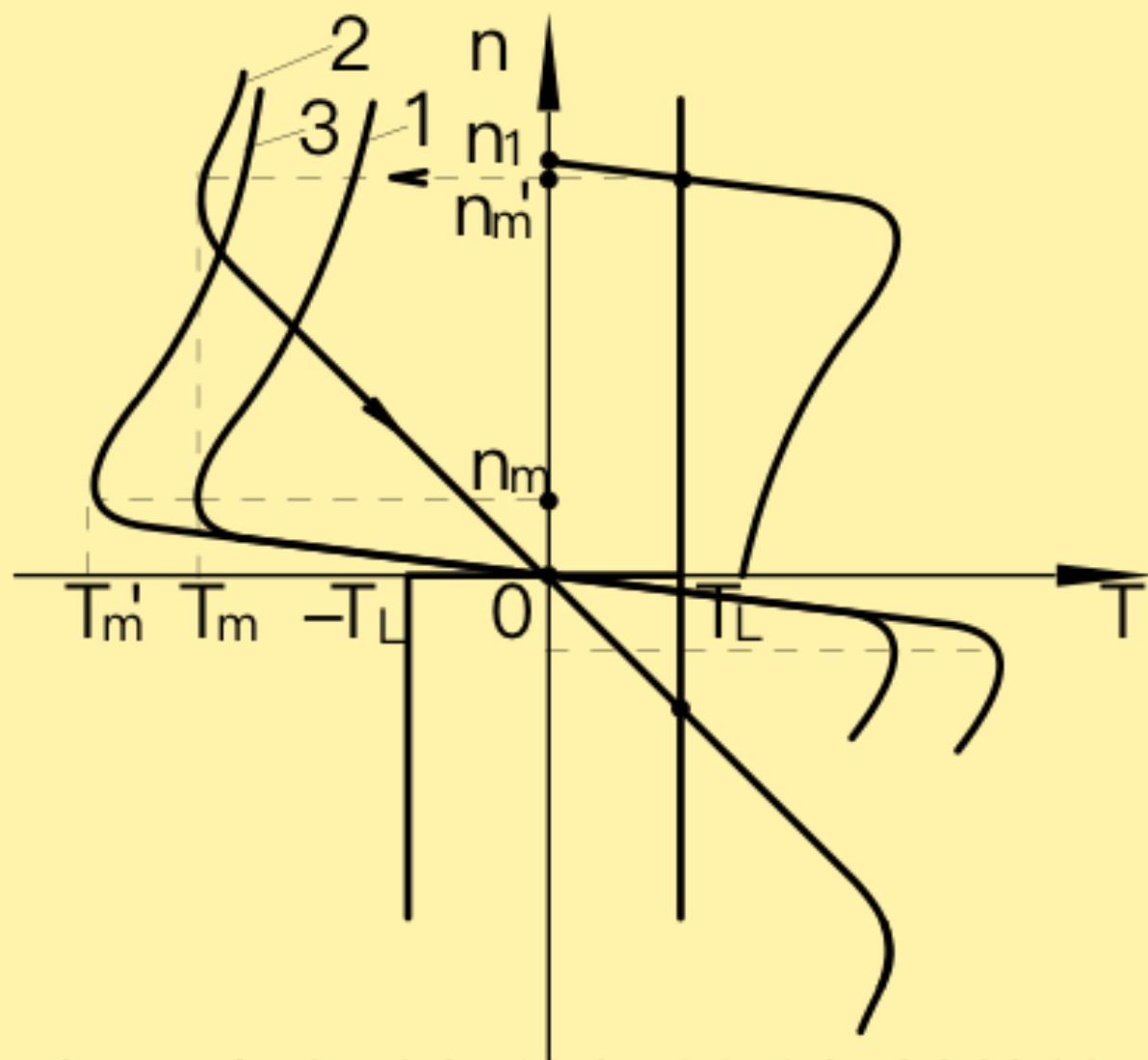
(i) 设磁路不饱和  $X_m = \text{常数}$ ，增大  $r_2'$  ( $I_1$  不变) 时  $\rightarrow s_m N \uparrow$

$T_m$  不变，可得曲线2。(这里是以反向电动状态  $s$  轴为依据)

(ii) 保持  $r_2'$ 、 $s_m$  不变，增大  $I_1$  时  $\rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow T_m \uparrow$

设磁路未饱和  $X_m = \text{常数}$ ，可得曲线3，它同异步机改变定子电压的人为特性变化规律相同(因为改变定子电压就改变了气隙磁通  $\Phi_m$  的大小，而改变直流电流  $I_1$  也将改变恒定磁场的数值，二者实质相同，所以特性变化规律相同)

# 机械特性曲线



三相异步电动机能耗制动机械特性



# 增大制动转矩的方法

## (a) 绕线电机转子串电阻

$$(r_2' + R_\Omega) \uparrow \rightarrow sm \uparrow \rightarrow T_z$$

(b) 鼠笼式电机增大  $I_-$ ，则  $I_1 \uparrow \rightarrow T_m \rightarrow T_z$ ，绕线式电机制动时转子电阻计算

$$I_- = (2 \sim 3)I_0, \quad I_0 = (0.2 \sim 0.5)I_{1N}$$

$$R_\Omega = (0.2 \sim 0.4) \frac{E_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}} - r_2$$



# 电机拖动 43讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室



## 特点与应用

**特点：机械特性过原点，即 $n=0$ 时 $T=0$ 。**

**应用：**

**位能性负载，可以放下重物，如图B点以稳定速度 $n_B$ 下放重物。**

**反抗性负载，用以迅速，准确停车。**







