



电机与拖动**课件**之六

异步电机 拖动

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

5.1 三相异步电动机的机械特性

5.2 三相异步电动机的起动

5.3 三相异步电动机的制动

5.4 三相异步电动机的调速

➤ 异步电动机的机械特性通常用 $T_{em} = f(s)$ 表示。

一、电磁转矩的物理表达式

$$T_{em} = C_T \Phi_0 I_2' \cos \varphi_2$$

表明：三相异步电动机的电磁转矩是由主磁通 Φ_0 与转子电流的有功分量 $I_2' \cos \varphi_2$ 相互作用产生的。

电磁转矩常数

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 E_{20}' I_2' \cos \varphi_2}{\Omega_1}$$

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$$

$$E_{20}' = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_1$$

$$\frac{4.44}{2\pi} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

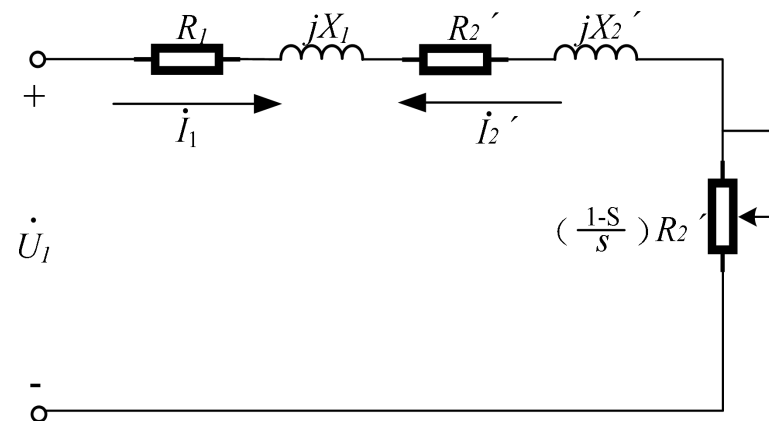
$$\text{令 } C_T = pm_1 N_1 k_{N1} / \sqrt{2}$$

$$T = \frac{pm_1 N_1 k_{N1}}{\sqrt{2}} \Phi_1 I_2' \cos \varphi_2$$

$$T = C_T \Phi_1 I_2' \cos \varphi_2$$

忽略励磁电流的等值电路为：

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



二、电磁转矩的参数表达式

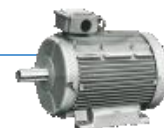
1、参数表达式推导：

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2}{\frac{2\pi f_1}{p}} \quad \text{转子电流为: } I_2' = U_1 / \sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

机械特性的参数表达式为：

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

电磁转矩与电源参数 (U_1 、 f_1)、结构参数 (R 、 X 、 m 、 p) 和运行参数 (s) 有关。



二、电磁转矩的参数表达式

2、机械特性曲线 $T-n$ 或 $T-s$

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

① 按象限对 $T - n$ 进行讨论

发电机状态：

- n 与 T_{em} 反方向
- $n > n_1$
- $s < 0$

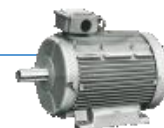
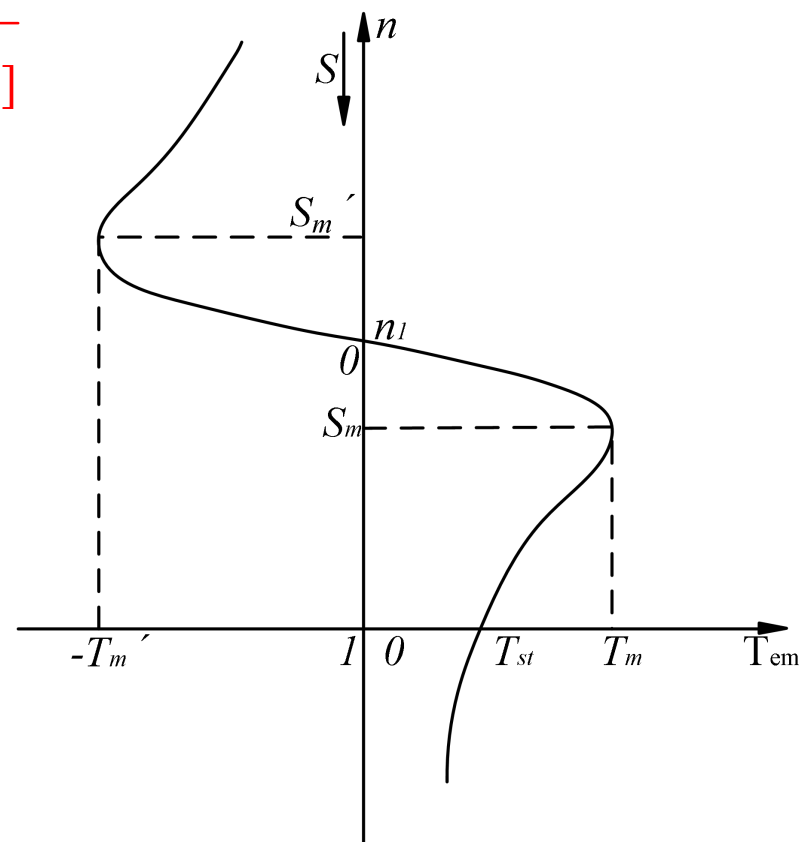
正向电动机状态：

- n 与 T_{em} 同方向
- $0 < n < n_1$
- $1 > s > 0$

电磁制动状态：

- n 与 T_{em} 反方向
- $n < 0$

反向电动机状态



二、电磁转矩的参数表达式

2、机械特性曲线 $T-n$ 或 $T-s$

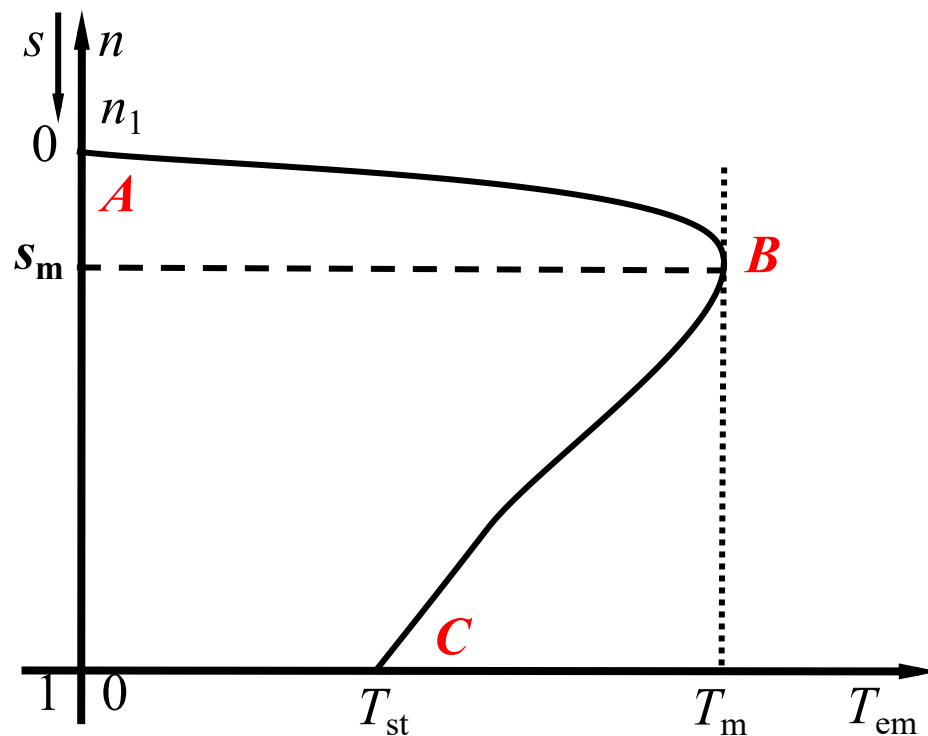
$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

② $T-n$ 特性曲线电动状态（第I象限）的三个关键点

A点: $T=0$, $n=n_1=60f_1/p$, $s=0$, A点为理想空载点

B点: $T=T_m$, $s=s_m$, s_m 为临界转差率, T_m 为最大转矩

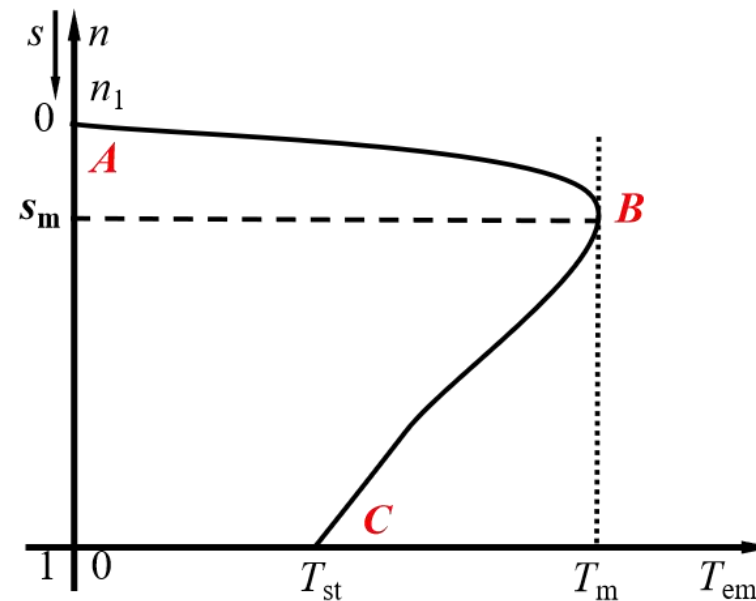
C点: $n=0$, $s=1$, $T=T_{st}$, T_{st} 为起动转矩



二、电磁转矩的参数表达式

2、机械特性曲线 $T-n$ 或 $T-s$

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



③ $T-n$ 特性曲线 **临界转差率 s_m** 和 **最大转矩 T_m**

令 $dT/ds = 0$, 求出 s_m :

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \xrightarrow[\text{忽略 } R_1]{R_1 \ll X_1 + X_2'} s_m = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}$$

代入机械特性公式, 得:

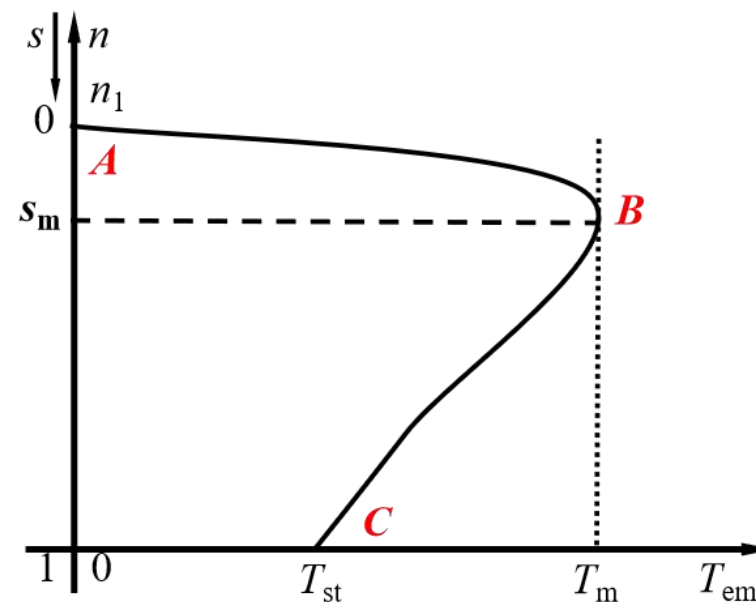
$$T_m = \frac{3p}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{\left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \xrightarrow[\text{忽略 } R_1]{R_1 \ll X_1 + X_2'} T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')}$$



二、电磁转矩的参数表达式

2、机械特性曲线 $T-n$ 或 $T-s$

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$



④ $T-n$ 特性曲线起动转矩 T_{st}

起动时, $n=0$, $s=1$, 代入机械特性式得: $T_{st} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$

过载倍数: $\lambda_m = \frac{T_{max}}{T_N}$

一般 $\lambda_m = 1.8 \sim 2.2$, 起重冶金 $\lambda_m = 2.2 \sim 2.8$ 。

起动转矩倍数: $K_T = \frac{T_{st}}{T_N}$

只有当 $T_{st} > T_2$ 时, 电动机才能起动。

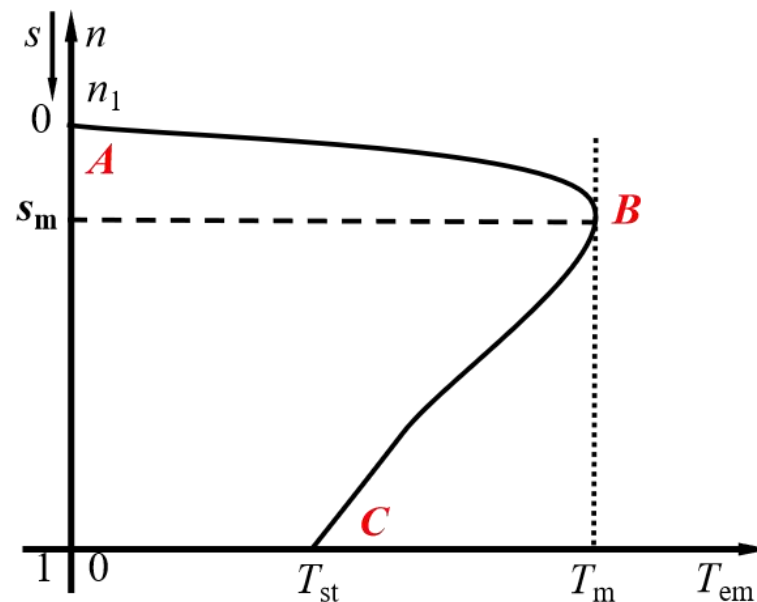


二、电磁转矩的参数表达式

2、机械特性曲线 $T-n$ 或 $T-s$ ⑤分段讨论异步电动机机械特性 $T-s$:

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]} = \frac{3pU_1^2 R'_2 s}{2\pi f_1 [s^2 R_1^2 + R_2'^2 + 2sR_1 R_2' + s^2 (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$= \frac{3n_p U_s^2 R'_r s}{2\pi f_1 [(X_1 + X'_2)^2 s^2 + R_s^2 s^2 + 2R_s R'_r s + R_r'^2]}$$



当 s 很小时, 忽略分母中含 s 各项: $T_e \approx \frac{3pU_1^2 s}{2\pi f_1 R'_2} \propto s$ 直线, 见AB段

当 s 较大时, 忽略分母中 s 的一次项和零次项 $T_e \approx \frac{3n_p U_s^2 R'_r}{\omega_1 s [R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2]} \propto \frac{1}{s}$ 双曲线, 见BC段



三、电磁转矩的实用表达式

实际工程中，利用异步电机产品技术手册中给出的数据(λ_m , n_N , P_N)找出异步电动机的机械特性公式，即便是粗糙些，但也很有用。

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]} \quad \text{将} R_1 \text{忽略不计, 得}$$

$$T = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1} \frac{R'_2/s}{[(R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1} \frac{1}{2(X_1 + X'_2)}$$

将 T/T_m , 得 $T = \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$

机械特性的实用表达式

将 $T = T_N$, $s = s_N$, $T_m = \lambda_m T_N$ 代入得

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

若异步电动机所带负载 $T_L \leq T_N$, $s \ll s_m$, 则

则 $s/s_m \ll s_m/s$, 若忽略 s/s_m , 则实用式变为

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

若 $\lambda_m^2 \gg 1$, 则 $s_m \approx 2\lambda_m s_N$, 则有:

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

机械特性的简化实用表达式



【例】 一台三相笼型异步电动机，已知 $U_{IN} = 380V$ ， $P_N = 7.5kW$ ， $f_1 = 50Hz$ ， $n_N = 950r/min$ ， $\lambda_m = 2$ 。

试求：(1)机械特性的实用表达式；(2)当 $s=0.025$ 时的电磁转矩 T 。

解： (1) 由 $n_N = 950r/min$ ，可推知 $n_1 = 1000r/min$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

$$s_m = s_N(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0.05 \times (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0.187$$

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = (9550 \times \frac{7.5}{950}) N.m = 75.4 N.m$$

$$T = \frac{2T_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times \lambda_m \times T_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

(2) 由 $s = 0.025$ 代入上式得：

$$T = \frac{2 \times 2 \times 75.4}{\frac{0.025}{0.187} + \frac{0.187}{0.025}} N.m = 39.17 N.m$$

如果用线性表达式计算，则：

$$s_m = 2\lambda_m s_N = 2 \times 2 \times 0.05 = 0.2$$

$$T = \frac{2T_{max}}{s_m} s = (\frac{2 \times 2 \times 75.4}{0.2} \times 0.025) N.m = 37.7 N.m$$

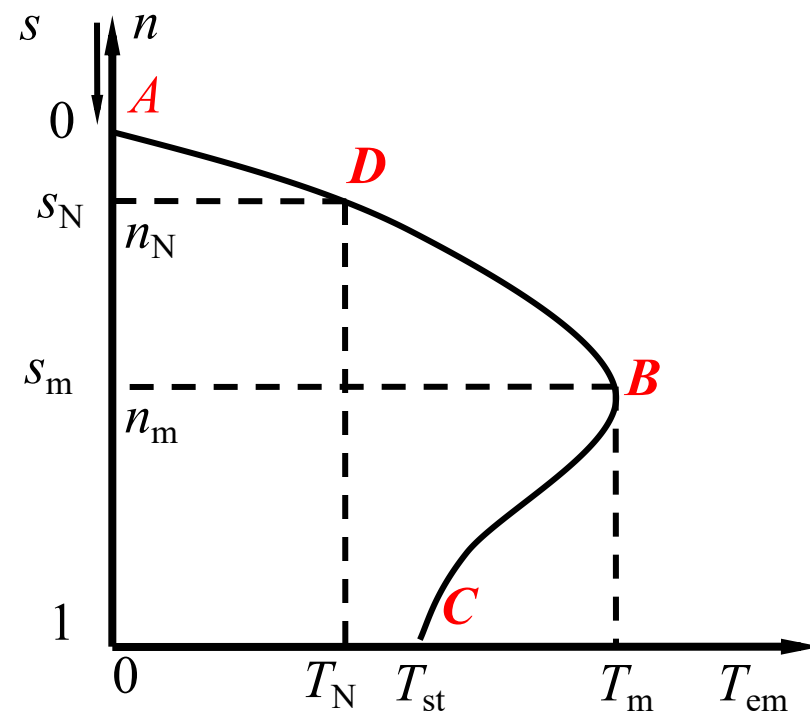


一、固有机械特性

固有机械特性是指电动机在额定电压和额定频率下，按规定的接线，定、转子电路不外接阻抗时的机械特性。

几个特殊点：

1. 同步运行点A $n = n_1, s = 0, T_{em} = 0$
2. 最大转矩点B: $n = n_m, s = s_m, T_{em} = T_m$
3. 起动点C: $n = 0, s = 1, T_{em} = T_{st}$
4. 额定运行点D $n = n_N, s = s_m, T_{em} = T_N$



二、人为机械特性

人为机械特性是指人为改变电源参数或电动机参数而得到的机械特性。

1. 降压时的人为机械特性

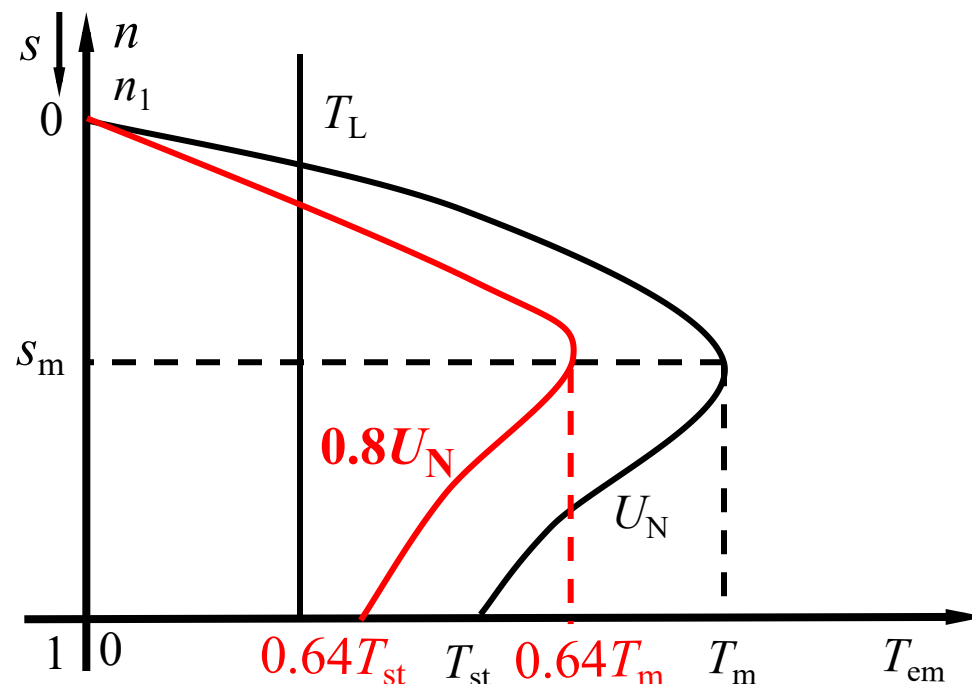
U_1 下降后, T_m 和 T_{st} 均下降, 但 s_m 不变, λ_m 和 K_{st} 减少。

➤ 如果电机在定额负载下运行, U_1 下降后, n 下降, s 增大, 转子电流因 $E_{2s} = sE_2$ 增大而增大, 导致电机过载。长期欠压过载运行将使电机过热, 减少使用寿命。

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad T_m = \pm \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1(X_1 + X'_2)}$$

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



二、人为机械特性

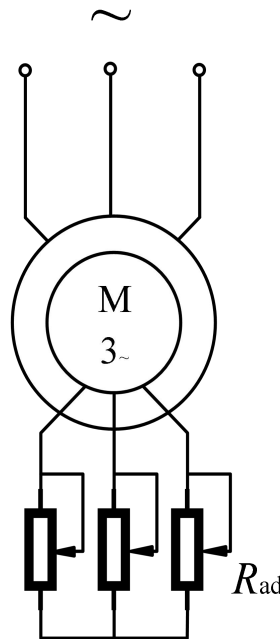
2. 转子回路串对称电阻时的人为机械特性

串电阻后，机械特性线性段斜率变大，特性变软。

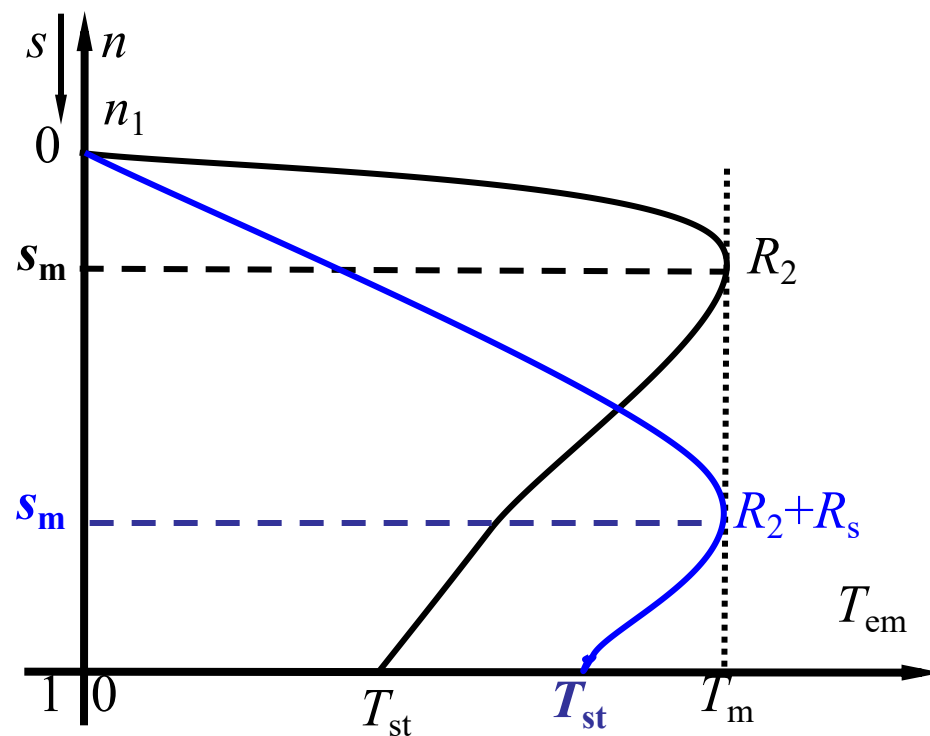
在一定范围内增加电阻，可以增加 T_{st} 。
当 $s_m = 1$ 时 $T_{st} = T_m$ ，若再增加电阻， T_{st} 减小。

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad T_m = \pm \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1(X_1 + X_2')}$$

$$s_m \approx \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad T_{st} = \frac{3pU_1^2 R_2'}{2\pi f_1[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$



串电阻后， n_1 、 T_m 不变， s_m 增大。



二、人为机械特性

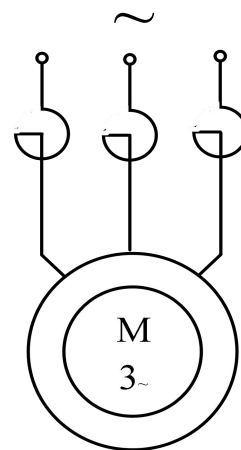
3. 定子回路串入对称电阻或电抗的人为机械特性

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

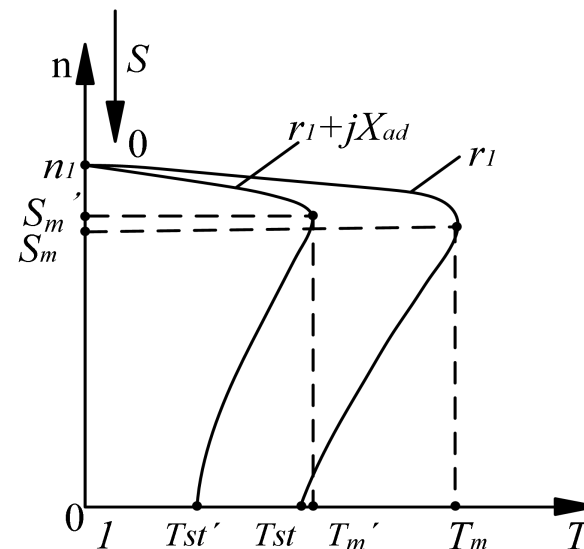
$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T_m = \pm \frac{3p}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{\left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}$$

$$T_{st} = \frac{3p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$



(a) 接线图



(b) 人为机械特性

定子回路串入电阻或电抗后, s_m , T_m , T_{st} 都减小。

除了上述特性外, 还有改变电源频率、极对数等人为机械特性。



【例1】 一台三相笼型异步电动机，已知 $U_{IN} = 380\text{V}$ ， $P_N = 7.5\text{kW}$ ， $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $n_N = 1460\text{r/min}$ ， $\lambda_m = 2$ 。试求：(1)固有机械特性表达式；(2)起动转矩 T_{st} ；(3)轴上带 $T_L = 250\text{N.m}$ 的恒转矩负载时的转速。

解：(1)由 $n_N = 1460\text{r/min}$ ，可推知 $n_1 = 1500\text{r/min}$

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

$$s_m = s_N(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0.027 \times (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0.1$$

$$T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = (9550 \times \frac{7.5}{1460})\text{N.m} = 490.6\text{N.m}$$

$$T = \frac{2T_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times \lambda_m \times T_N}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2 \times 2 \times 981.2}{\frac{s}{0.1} + \frac{0.1}{s}} = \frac{196.24 \times s}{s^2 + 0.01} \text{N.m}$$



【例1】 一台三相笼型异步电动机，已知 $U_{IN} = 380\text{V}$ ， $P_N = 7.5\text{kW}$ ， $f_1 = 50\text{Hz}$ ， $n_N = 1460\text{r/min}$ ， $\lambda_m = 2$ 。试求：(1)固有机械特性表达式；(2)起动转矩 T_{st} ；(3)轴上带 $T_L = 250\text{N.m}$ 的恒转矩负载时的转速。

(2) 起动时， $s = 1$ ，将 $s = 1$ 代入固有特性表达式中，起动转矩为：

$$T_{st} = \frac{196.24 \times 1}{1^2 + 0.01} \text{N.m} = 194.3 \text{N.m}$$

(3) 将 $T_L = 250\text{N.m}$ 代入固有特性方程得： $250 = \frac{196.24 \times s}{s^2 + 0.01}$

$$\text{则： } s = \frac{196.24 \pm \sqrt{196.24^2 - 4 \times 250 \times 2.5}}{2 \times 250} = \begin{cases} 0.013 \\ 0.77 \end{cases}$$

其中， $s = 0.77 > s_m$ 对于恒转矩负载是不能稳定运行的，舍去，则：

$$n = (1 - s)n_1 = (1 - 0.013) \times 1500 \text{r/min} = 1480.5 \text{r/min}$$



【例2】 一台三相绕线式异步电动机 $n_N=1460\text{r/min}$ ，转子每相电阻 $R_2=0.06\Omega$ ，轴上带额定转矩负载运行，现要求转速将为 $n=1200\text{r/min}$ ，求应在转子中每相串入多大的电阻？

$$\text{解: } s_A = s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}$$

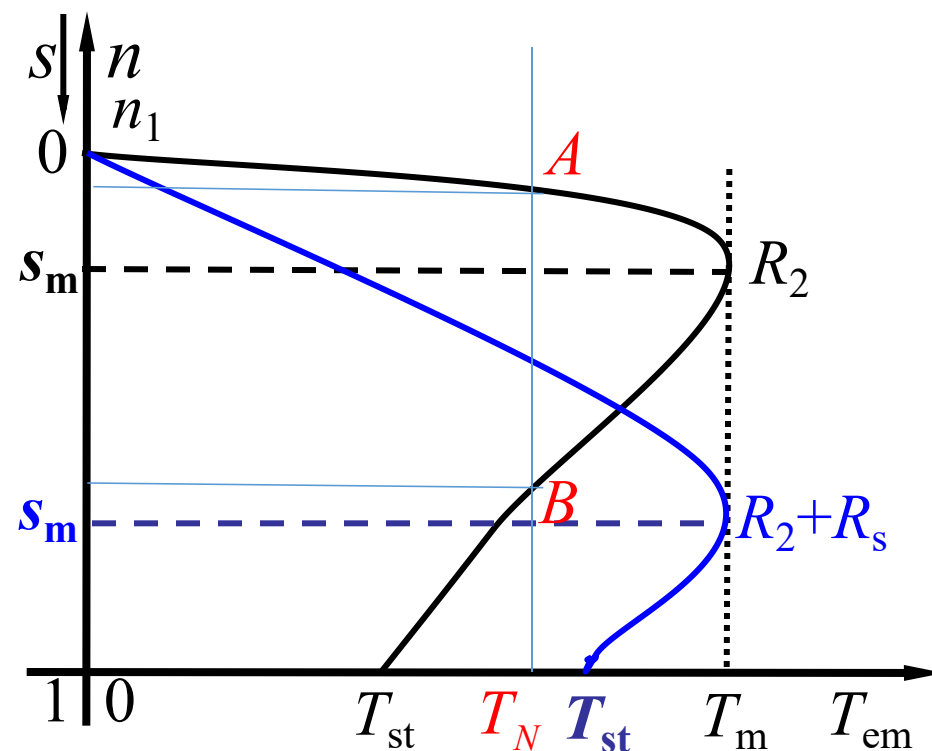
$$s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = \frac{1500 - 1200}{1500} = 0.2$$

$$\because T_A = T_B = T_N \quad T = \frac{2T_m s}{s_m}$$

$$\frac{T_N}{2T_m} = \frac{s_A}{s_{Am}} = \frac{s_B}{s_{Bm}}$$

$$\frac{s_B}{s_A} = \frac{R_2 + R_\Omega}{R_2} = 1 + \frac{R_\Omega}{R_2}$$

$$\text{则: } R_\Omega = \left(\frac{s_B}{s_A} - 1 \right) R_2 = \left(\frac{0.2}{0.027} - 1 \right) \times 0.06\Omega = 0.38\Omega$$



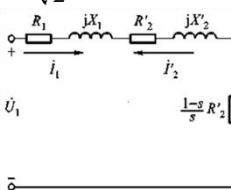
小结

物理表达式

$$\begin{cases} T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 E'_{20} I'_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1} \\ \Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p} \\ E'_{20} = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_1 \\ \frac{4.44}{2\pi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

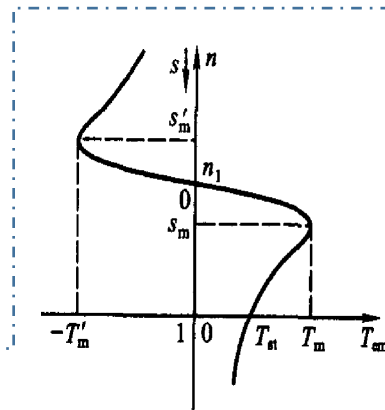
电磁转矩常数

$$\begin{aligned} &\text{令 } C_T = \frac{pm_1 N_1 k_{N1}}{\sqrt{2}} \\ &\Rightarrow T = \frac{pm_1 N_1 k_{N1}}{\sqrt{2}} \Phi_1 I'_2 \cos \varphi_2 \Rightarrow T = C_T \Phi_1 I'_2 \cos \varphi_2 \end{aligned}$$



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

忽略励磁电流的等值电路为:



发电机状态:	正向电动机状态:
• n 与 T_{em} 反方向	• n 与 T_{em} 同方向
• $n > n_1$	• $0 < n < n_1$
• $s < 0$	• $1 > s > 0$
	电磁制动状态:
	• n 与 T_{em} 反方向
	• $n < 0$

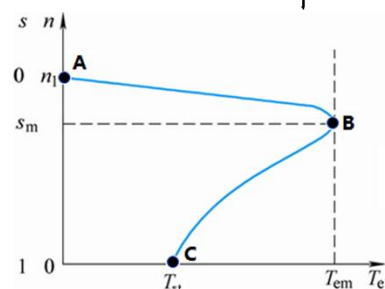
机械特性

参数表达式

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{3 \frac{R'_2}{s} I'^2_2}{2\pi n_1} = \frac{3 \frac{R'_2}{s} I'^2_2}{2\pi f_1} \quad \text{转子电流为: } I'_2 = U_1 / \sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

$$\text{机械特性的参数表达式为: } T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X'_2)} \quad T_{st} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$



- A点: $T=0, n=n_1=60f_1/p, s=0$, A点为理想空载点
- B点: $T=T_m, s=s_m, s_m$ 为临界转差率, T_m 为最大转矩
- C点: $n=0, s=1, T=T_{st}, T_{st}$ 为起动转矩

$$\text{过载倍数: } \lambda_m = \frac{T_{max}}{T_N}$$

$$\text{起动转矩倍数: } K_T = \frac{T_{st}}{T_N}$$

实用表达式

$$\text{将 } R_1 \text{ 忽略不计, 得 } T = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1} \frac{R'_2/s}{[(R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

将 $T = T_N, s = s_N, T_m = \lambda_m T_N$ 代入得: 若异步电动机所带负载 $T_L \leq T_N$, 由于 $s \ll s_m$,

则 $\frac{s}{s_m} \ll \frac{s_m}{s}$, 若忽略 $\frac{s}{s_m}$, 则实用式变为

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

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

$$T/T_m, \text{ 得: } T = \frac{2T_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

若 $\lambda_m^2 \gg 1$, 则 $s_m \approx 2\lambda_m s_N$, 则有:

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

机械特性的实用表达式

机械特性的简化实用表达式

人为机械特性: 降电压、转子回路串电阻、定子回路串电阻或电抗