



自动控制实践I

异步电机的特性和调速方法

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

1 异步电动机的基本关系式

1.1 定子线圈感应电动势

1.2 转速和转差率

1.3 转子的感应电动势

1.4 转子的磁势

1.5 频率归算

1.6 磁势平衡方程

1.7 等效电路

2 三相异步电动机的特性

2.1 三相异步电机的功率与转矩

2.2 三相异步电机的机械特性

3 三相异步电动机的调速

3.1 变极调速

3.2 变转差率调速

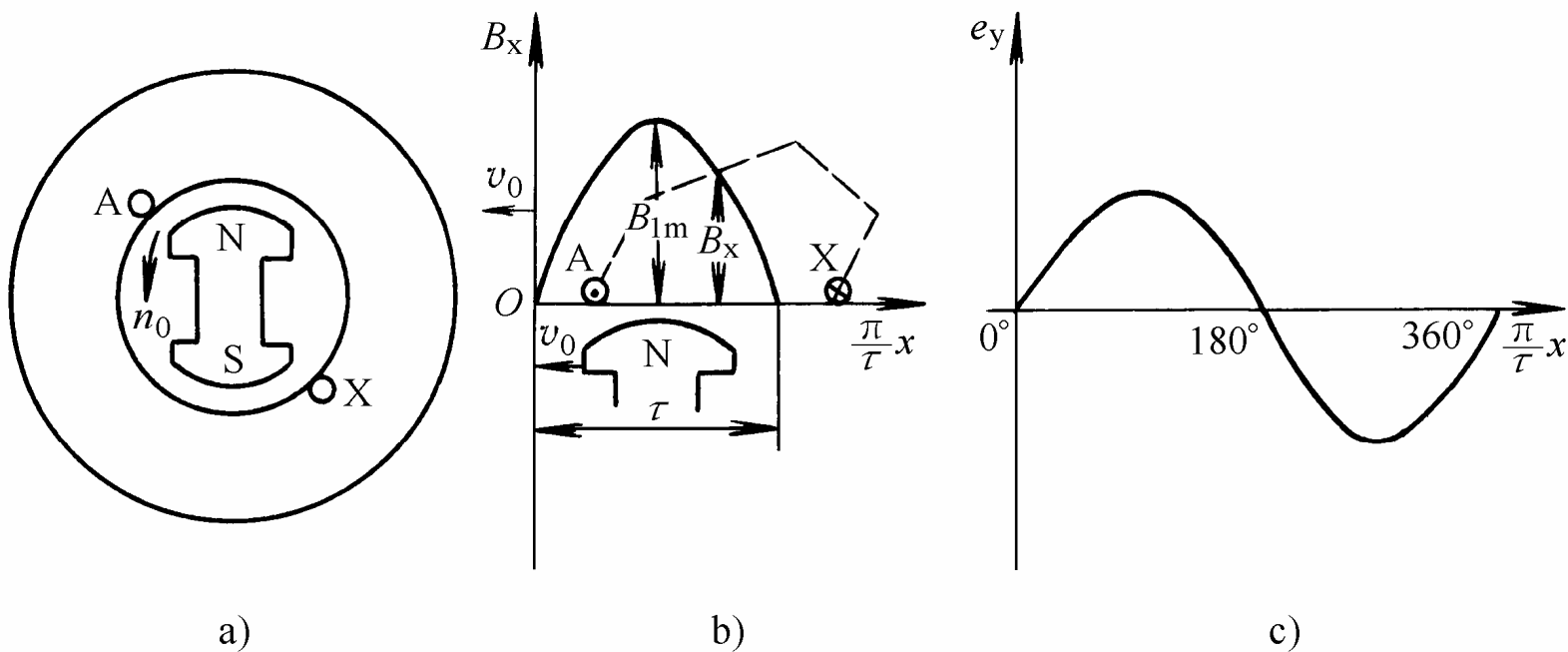
3.3 变频调速

1.1 定子线圈感应电动势

○ 旋转磁极示意图

$$b(t) = B_{1m} \sin \omega t$$

ω 为磁势每秒转过的电角度，即转速



1.1 定子线圈感应电动势

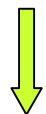
○ 绕组一个边的感应电动势

$$e = blv$$



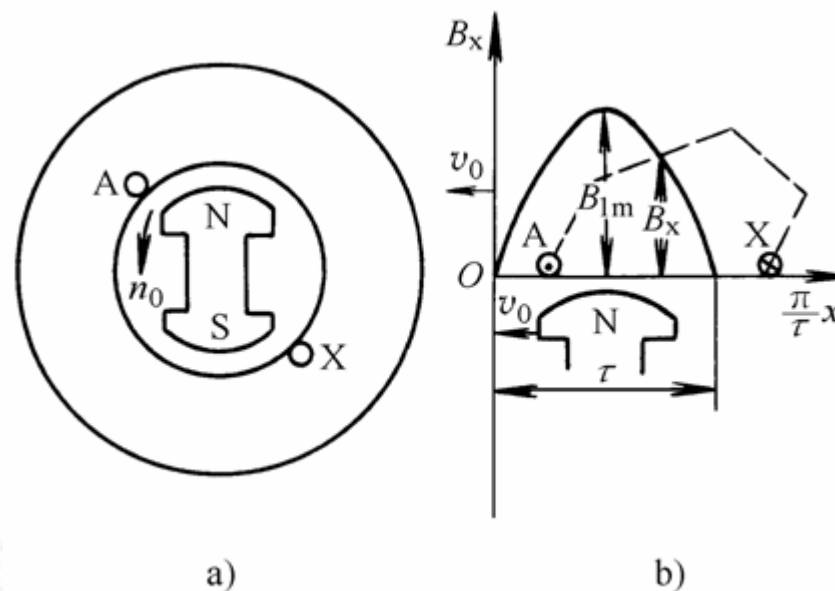
$$b(t) = B_{1m} \sin \omega t$$

$$e = B_{1m} l v \sin \omega t$$



$$v = \frac{\omega}{p} r = \frac{2\pi r}{p} f = 2\pi f r$$

$$e = 2\pi f B_{1m} l \sin \omega t$$



1.1 定子线圈感应电动势

○ 绕组一个边的感应电动势

$$b(t) = B_{1m} \sin \omega t$$

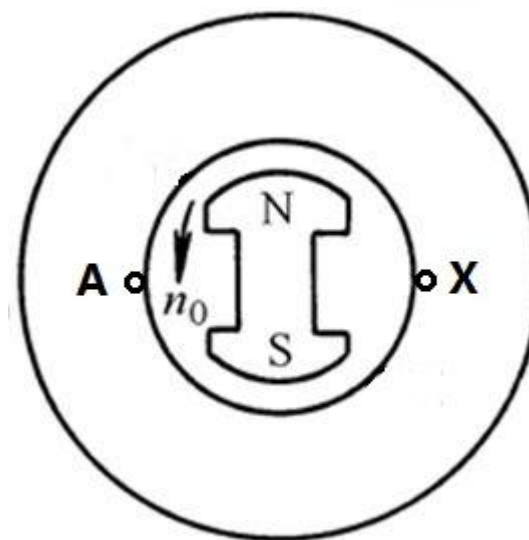
n 磁密的平均值

正弦函数的平均值为其最大值的 $2/\pi$ 倍

$$B_{av} = \frac{2}{\pi} B_{1m}$$

n 线圈中磁通最大值

$$\Phi_m = B_{av} l t = \frac{2}{\pi} B_{1m} l t$$



1.1 定子线圈感应电动势

○ 绕组一个边的感应电动势

$$e = 2l f B_{1m} \sin \omega t$$



$$\Phi_m = B_{av} l t = \frac{2}{p} B_{1m} l t$$

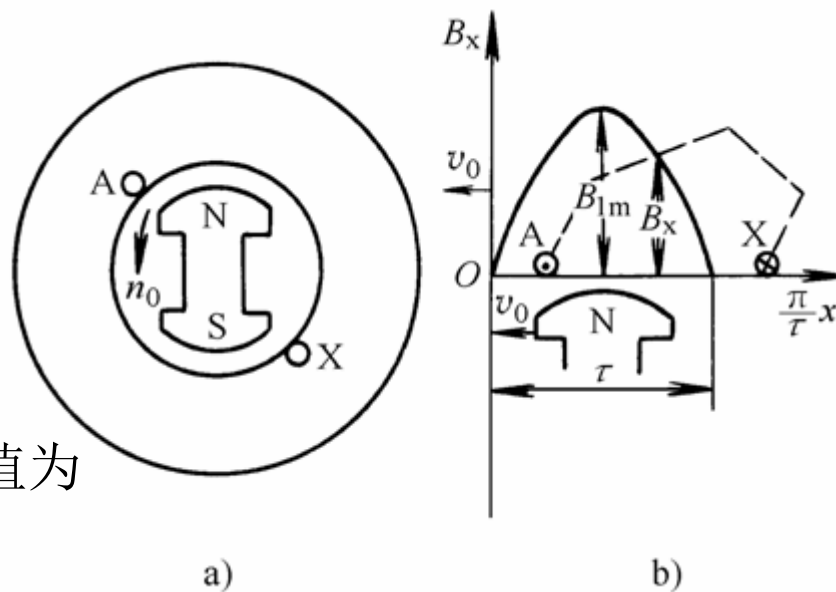
$$e = p f \Phi_m \sin \omega t$$

n 绕组一个边的感应电动势有效值为

$$p f \Phi_m / \sqrt{2}$$

○ W_c 匝绕组的感应电动势有效值为

$$E_c = \frac{2p}{\sqrt{2}} f W_c \Phi_m = 4.44 f W_c \Phi_m$$



1.1 定子线圈组感应电动势

○ 分布式绕组的感应电动势有效值

n 分布绕组感应电势的基波合成布因数

$$k_{w1} = \frac{q \text{ 个分布线圈感应电势基波矢量的几何和}}{q \text{ 个分布线圈感应电势基波矢量的代数和}}$$

K_{w1} 的意义：考虑分布绕组时，整个绕组合成电动势所须的折扣

○ 定子线圈组(相绕组)的感应电动势有效值

$$E = 4.44 f W k_{w1} \Phi_m$$

W 为一相绕组的总串联匝数

1.2 转速和转差率

- 一般情况下，异步电动机的转速不能达到旋转磁场的同步转速 n_s
- 转差：转速 n_s 与 n 之差称为转差，转差 n_s-n 的存在是异步电动机运行的必要条件
- **转差率**：转差 n_s-n 与同步转速 n_s 之比的百分值

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

- 一般情况下，异步电动机的转差率的变化不大，空载转差率在**0.5%**以下，满载转差率在**5%**以下。

1.2 转速和转差率

- 转差率：转差 $n_s - n$ 与同步转速 n_s 之比的百分值

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

- 转子转速

$$n = n_s (1 - s)$$

- 当 $S=1$ 时 $n=0$ ，转子不转，称为堵转状态
- 当 $S=0$ 时 $n=n_s$ ，转子转速等于同步转速，相当于理想空载情况。

1.2 转速和转差率

例：有一台**50Hz**的三相异步电动机，额定转速 $n_N=730\text{r/min}$ ；空载转差率为0.267%，试求该电动机的极数、同步转速、空载转速、及额定负载时的转差率。

解：因为电源为**50Hz**，所以同步转速为 $n_s=60f_1/p=3000/p$ (r/min)；
若 $p=1$ ， $n_s=3000(\text{r/min})$ ；若 $p=2$ ， $n_s=1500(\text{r/min})$ ；若 $p=3$ ，
 $n_s=1000(\text{r/min})$ ；若 $p=4$ ， $n_s=750(\text{r/min})$ ；若 $p=5$ ， $n_s=600(\text{r/min})$ ；

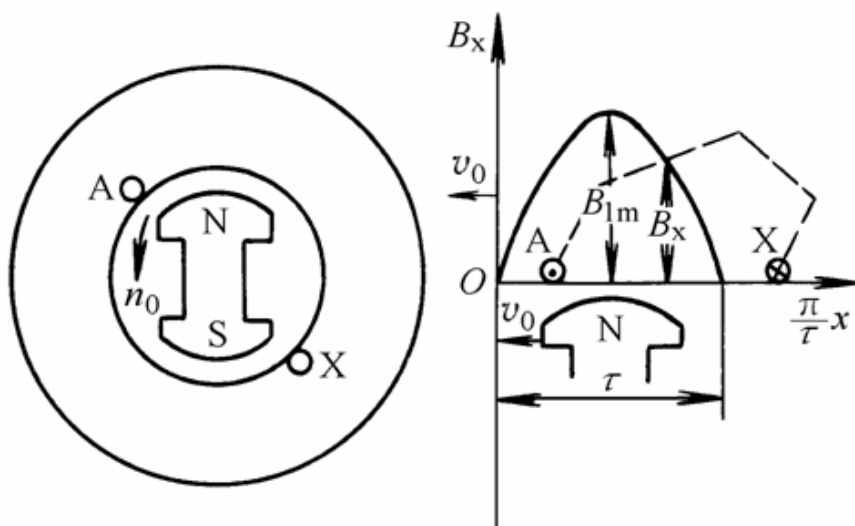
因电机的额定转速略小于同步转速，则电机为8极，同步转速为750r/min

电机的空载转速为 $n_{\text{空载}}=n_s(1-s)=750(1-0.267\%)=748\text{r/min}$

额定负载时的转差率为 $s_N=(n_s-n_N)/n_s=(750-730)/750=2.67\%$

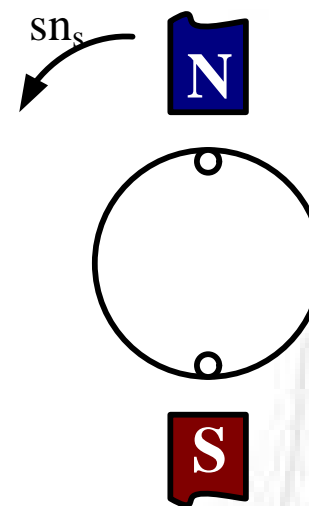
1.3 转子感应电势

○ 转子感应电动势



$$b(t) = B_{1m} \sin \omega t \quad \omega \text{ 为磁势每秒转过的电角度}$$

$$E_1 = 4.44 f W k_{w1} \Phi_m$$



$$b(t) = B_{1m} \sin s \omega t$$

$$E_{2s} = 4.44 s f W_2 k_{w2} \Phi_m$$

1.3 转子感应电势

○ 转子感应电动势

$$b(t) = B_{1m} \sin s\omega t$$

ω 为定子磁势每秒钟转过的电角度

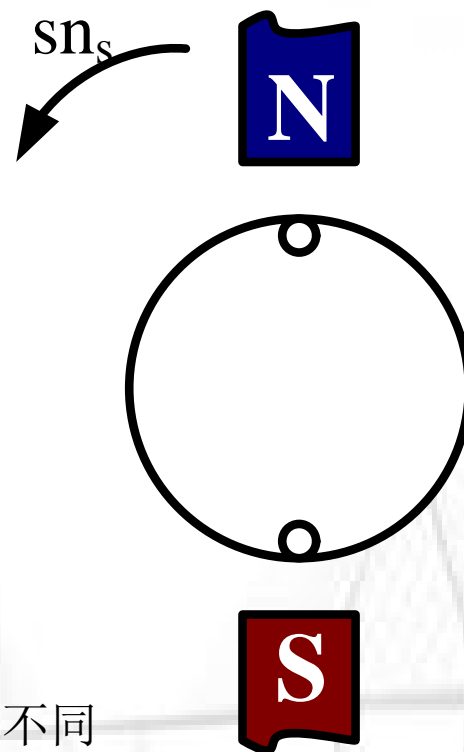
$$E_{2s} = 4.44sfW_2k_{w2}\Phi_m$$

f 定子电流的电角频率

K_{w2} 的意义：转子考虑分布绕组时，整个绕组合成电动势所须的折扣

下角标 1 表示定子，下角标 2 表示转子

下角标 s 表示转子电势的频率与定子电势频率不同



1.4 转子的磁势

○ 三相异步电机转子

n 绕线式转子

n 鼠笼转子

↓
三相对称绕组

↓
多相对称绕组

旋转磁场切割多相对称绕组产生对称多相感应电动势

↓
多相对称电势通过多相绕组产生多相对称电流

↓
多相对称电流 + 多相对称绕组合成旋转磁场

1.4 转子的磁势

○ 转子磁势 F_2 的旋转方向

定子磁势 F_1 为逆时针方向



因为 $n < n_s$ ，则转子绕组感应电势相序为a→b→c



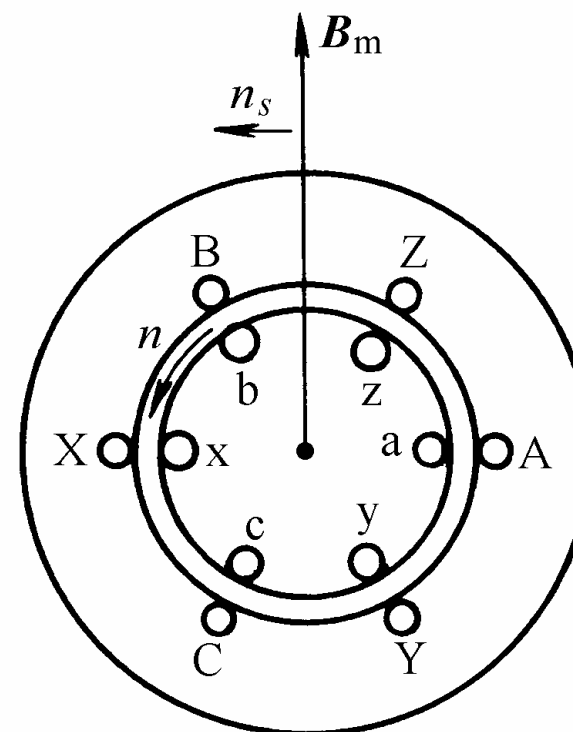
转子感应电流相序为a→b→c



磁势 F_2 旋转方向按a→b→c相序



F_2 与 F_1 同相



1.4 转子的磁势

○ 转子磁势 F_2 的转速大小

n 转子感应电势和电流的频率

$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} = \frac{pn_s}{60} \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right) = sf_1$$

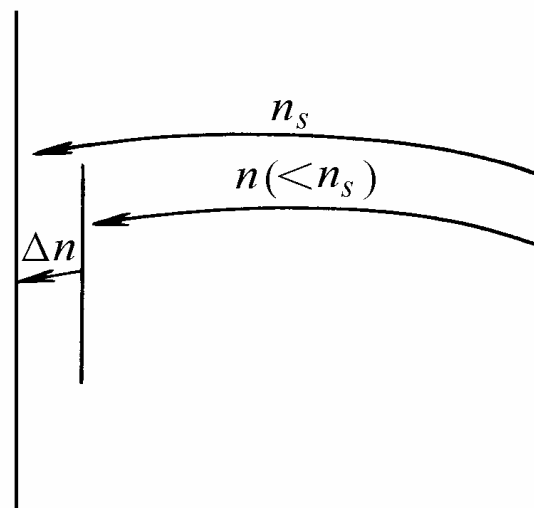
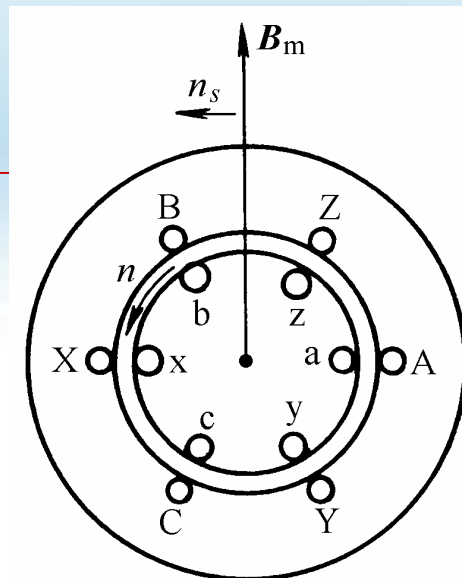
f_2 称为转差频率

n 旋转磁场 F_2 相对于转子的速度

$$\Delta n = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1}{p} s = n_s s = n_s - n$$

n 旋转磁场 F_2 与转子转向相同，则 F_2 的绝对转速为

$$\Delta n + n = n_s$$



转子磁势 F_2 和定子磁势 F_1 的转速是相同的，两者之间无相对运动

1.5 频率归算

○ 电势平衡方程

n 定子电势方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s})\dot{I}_1$$

f_1

r_1 为定子绕组电阻值

x_{1s} 表示定子绕组漏磁通引起的漏感抗

n 转子电势方程(感应电机的转子绕组通常短接)

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s})\dot{I}_{2s}$$

f_2

r_2 为转子绕组电阻值

x_{2s} 表示转子绕组漏磁通引起的漏感抗

n 感应电势的关系

$$\frac{E_1}{E_{2s}} = \frac{4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m}{4.44 s f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m} = \frac{1}{s} \frac{1}{k_e}$$

$$k_e = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}}$$

1.5 频率归算

○ 变压器的基本方程

$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(r_m + jx_m) \dot{I}_0$$

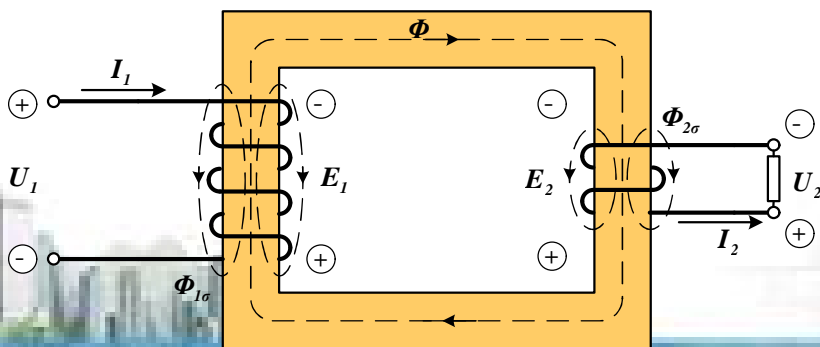
$$\dot{E}_2 = Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_2 + \dot{U}_2$$

$$\dot{U}_2 = Z_L \dot{I}_2$$

$$\frac{r}{I_1} + \frac{1}{k} \frac{r}{I_2} = \frac{r}{I_0}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k$$

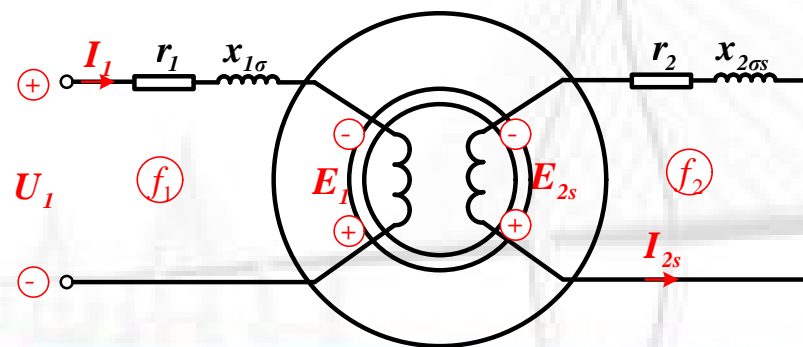


○ 异步电机的基本方程

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_{2s}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s}) \dot{I}_1$$

$$\frac{E_1}{E_{2s}} = \frac{4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m}{4.44 s f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m} = \frac{1}{s} \frac{1}{k_e}$$



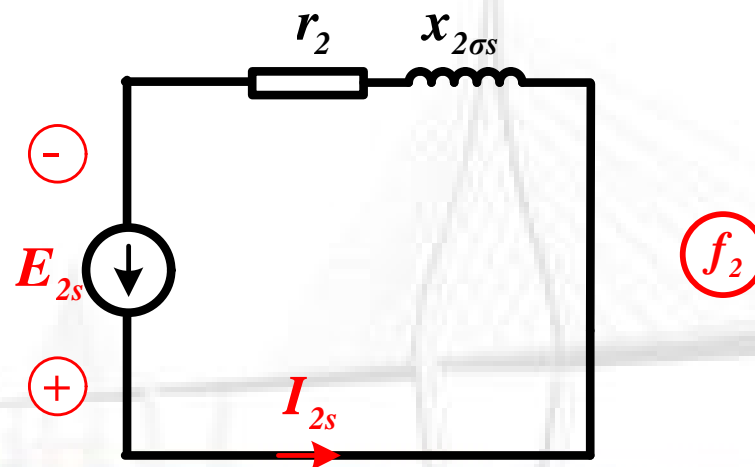
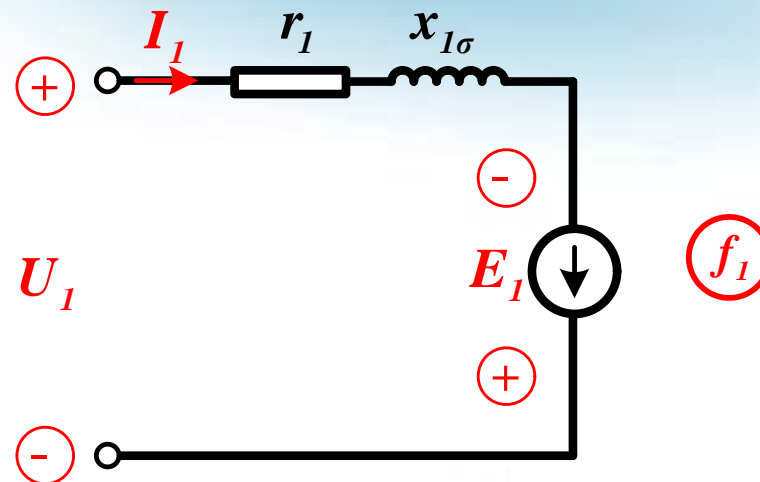
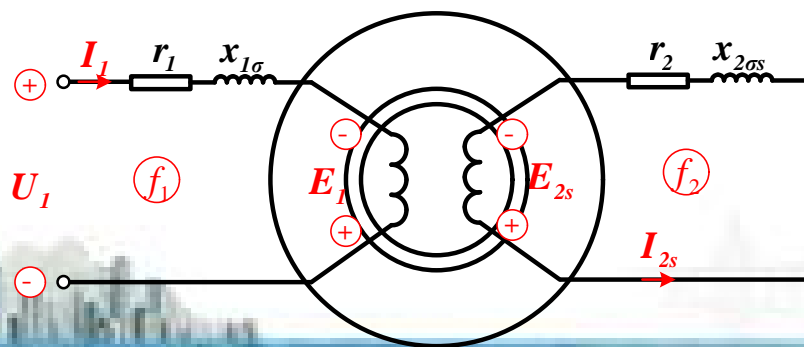
1.5 频率归算

异步电机的基本方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1\sigma})\dot{I}_1$$

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2\sigma s})\dot{I}_{2s}$$

$$\frac{E_1}{E_{2s}} = \frac{4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m}{4.44 s f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m} = \frac{1}{s} \frac{1}{k_e}$$



1.5 频率归算

○ 频率归算

- n 所谓“频率归算”就是指保证整个电磁系统的电磁性能不变，把一种频率的参数及有关物理量换算成另一种频率的参数及有关物理量。
- n 频率归算要保证磁势 F_2 不变。
- n 频率归算要保证功率不变。

$$E_{2s} = 4.44 f_2 W_2 k_{w2} \Phi_m = s(4.44 f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m) = sE_2$$



$$E_{2s} = sE_2$$

$$x_{2ss} = 2p f_2 L_{2s} = s(2p f_1 L_{2s}) = sx_{2s}$$



$$x_{2ss} = sx_{2s}$$

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2ss})\dot{I}_{2s}$$

f_2

两边都除以转差率s



将频率由 f_2 转为 f_1

$$\frac{\dot{E}_2}{s} = (\frac{r_2}{s} + jx_{2s})\dot{I}_2$$

f_1

1.5 频率归算

○ 频率归算

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s})\dot{I}_{2s}$$

f_2



有效值:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2s})^2}}$$

$$\frac{\mathbf{r}}{E_2} = (\frac{r_2}{s} + jx_{2s})\frac{\mathbf{r}}{I_2}$$

f_1



$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_{2s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2s})^2}}$$

相角:

$$\Psi_{2s} = \arctan(sx_{2s} / r_2)$$

$$\Psi_2 = \arctan(sx_{2s} / r_2)$$



$$I_{2s} = I_2$$

n 转子磁势 \mathbf{F}_2 的幅值与空间位移角完全取决于对应电流的有效值和相位角，而上述 I_{2s} 与 I_2 有效值和相角相同，因此 I_{2s} 产生的磁势与 I_2 完全相同。

1.5 频率归算

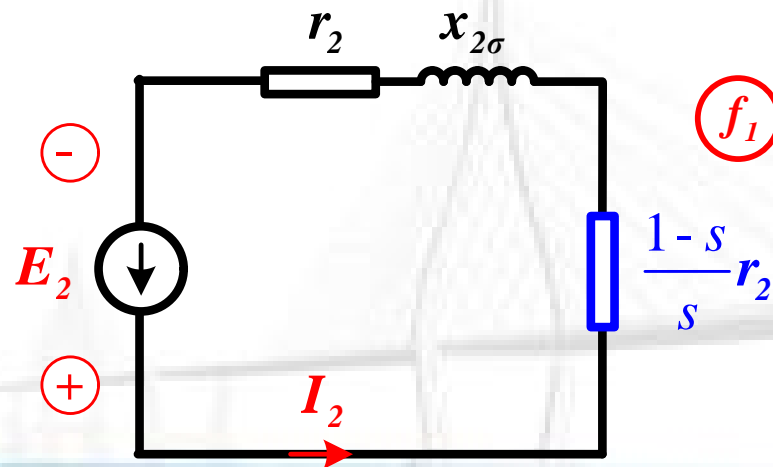
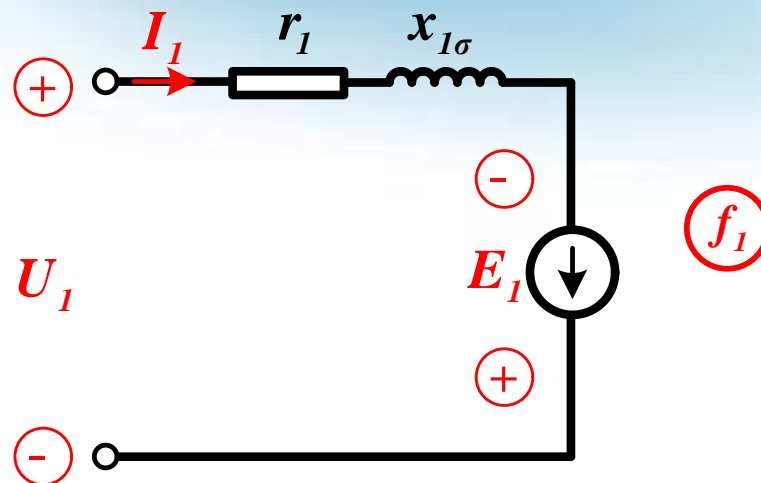
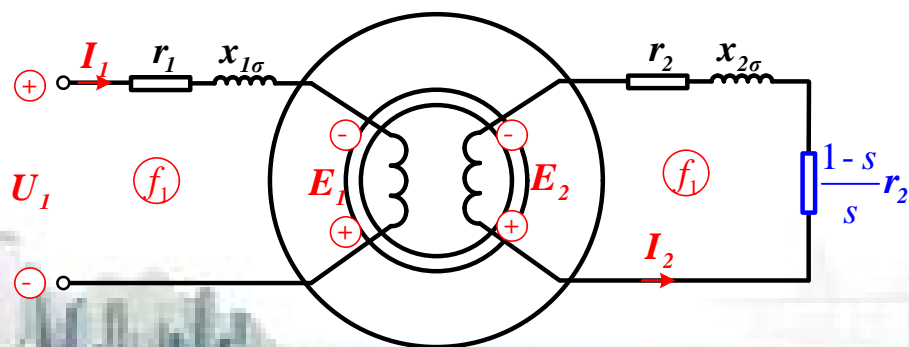
○ 频率归算

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s})\dot{I}_{2s}$$

$$\dot{E}_2 = \left(\frac{r_2}{s} + jx_{2s}\right)\dot{I}_2 = \left(r_2 + \frac{1-s}{s}r_2 + jx_{2s}\right)\dot{I}_2$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_{1s})\dot{I}_1$$

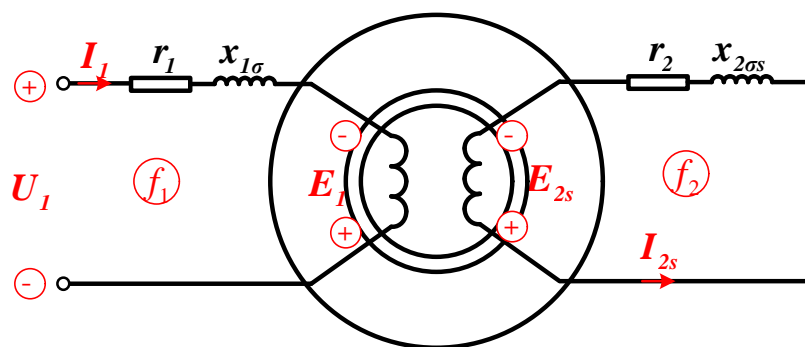
$$\frac{E_1}{sE_2} = \frac{4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m}{s 4.44 f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m} = \frac{1}{s} \frac{1}{k_e}$$



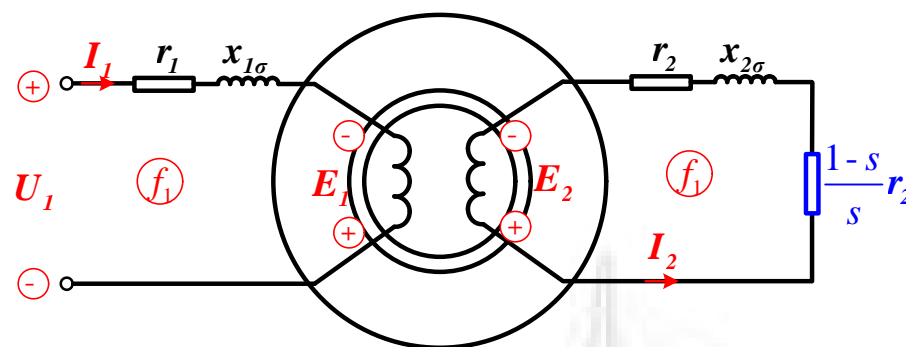
1.5 频率归算

○ 频率归算

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s})\dot{I}_{2s}$$



$$\frac{\mathbf{r}}{E_2} = (r_2 + \frac{1-s}{s}r_2 + jx_{2s})\frac{\mathbf{r}}{I_2}$$

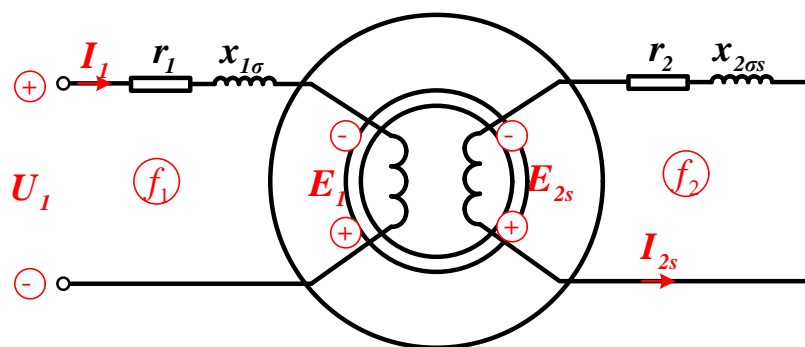


- n** E_2 和 $x_{2\sigma}$ 表示静止转子电路中的电动势和漏电抗， I_2 表示静止转子中的电流，而 I_2 的有效值和相角与 I_{2s} 相等。
- n** 除了改变与频率有关的参数和电动势外，需要用 r_2/s 去替代 r_2 ，可保证 I_2 不变，从而保证 F_2 不变。

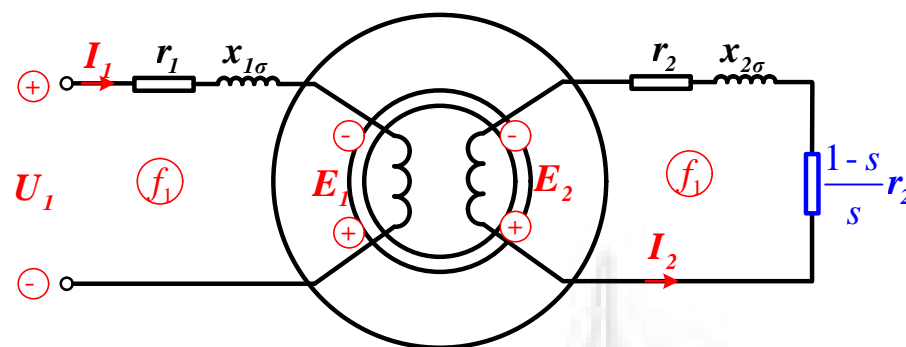
1.5 频率归算

○ 频率归算

$$\dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s})\dot{I}_{2s}$$



$$\dot{E}_2 = (r_2 + \frac{1-s}{s}r_2 + jx_{2s})\dot{I}_2$$



- n** 频率折算后，相当于转子回路串入一个附加电阻 $(1-s)r_2/s$;
- n** 考虑功率变化， I_2 不变，相当于在附加电阻 $(1-s)r_2/s$ 上发生了多余的损耗 $I_2^2 (1-s)r_2/s$ ，而实际转子中并不存在着部分损耗，而是产生机械功率;
- n** 静止转子电路中这部分虚拟的损耗，实质上表征了异步电动机的机械功率。

1.6 磁势平衡方程

○ 空载时的磁势

n 空载时 $n \approx n_s$ ，可认为转子不切割磁力线

$$\dot{E}_{2s} \approx 0$$

$$\dot{I}_{2s} \approx 0$$

n 定子磁势近似为空载磁势

$$\dot{F}_0 \rightarrow \dot{B}_0(\Phi_0)$$

○ 负载时的磁势

n 定子磁势和转子磁势相对静止，可以合成总磁势

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 \rightarrow \dot{B}(\Phi)$$

1.6 磁势平衡方程

○ 空载与负载时总磁势近似不变

n 与变压器类似，当定子励磁电压不变，忽略定子绕组内阻等小量

n 空载时

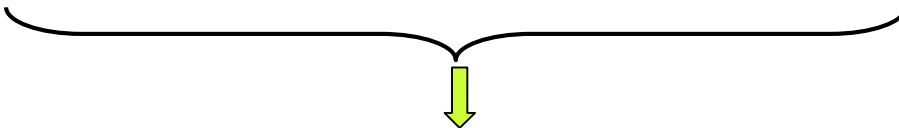
$$U_{1N} \approx E_1$$


$$E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_{m0}$$

n 负载时

$$U_{1N} \approx E_1$$

$$E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m$$


$$\Phi_{m0} = \Phi_m$$


$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

1.6 磁势平衡方程

○ 空载与负载时总磁势近似不变

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

n 空载时，定子绕组磁势

$$\vec{F}_0 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{k_{w1} W_1}{p} \vec{I}_0$$

n 负载时，定子绕组磁势

$$\vec{F}_1 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{k_{w1} W_1}{p} \vec{I}_1$$

n 负载时，转子磁势

$$\vec{F}_2 = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{k_{w2} W_2}{p} \vec{I}_2$$

n 电流平衡方程

$$\vec{I}_1 + \frac{1}{k_i} \vec{I}_2 = \vec{I}_0$$

$$k_i = \frac{m_1 W_1 k_{w1}}{m_2 W_2 k_{w2}}$$

1.7 等效电路

○ 绕组归算

n 转子磁势不变

$$F_2 = 0.9 \frac{m_2}{2} \frac{k_{w2} W_2}{p} I_2 = 0.9 \frac{m_1}{2} \frac{k_{w1} W_1}{p} I'_2 \quad \Rightarrow \quad I'_2 = \frac{m_2 k_{w2} W_2}{m_1 k_{w1} W_1} I_2 = \frac{1}{k_i} I_2$$

n 转子视在功率不变

$$m_2 E_2 I_2 = m_1 E'_2 I'_2 \quad \Rightarrow \quad E'_2 = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}} E_2 = k_e E_2$$

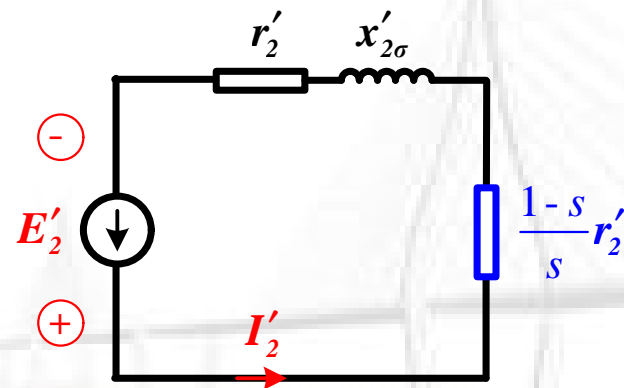
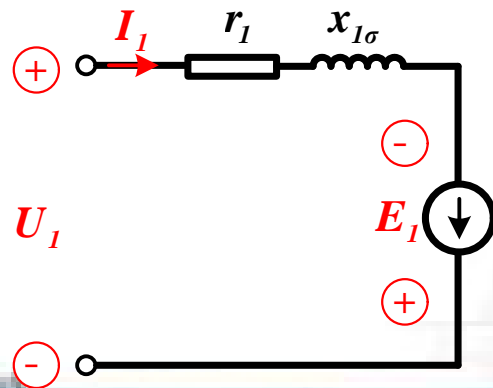
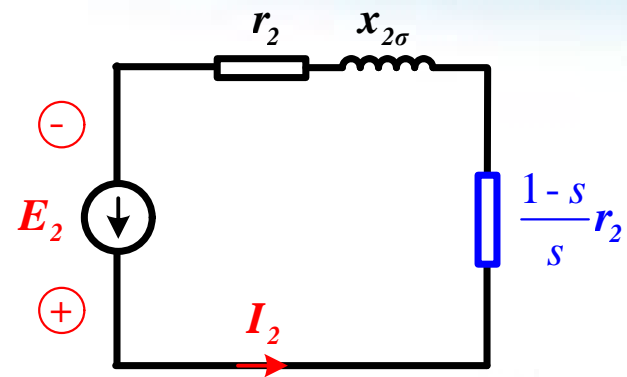
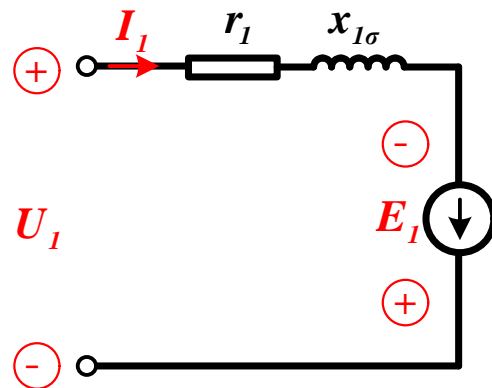
n 转子铜耗和漏磁场储能不变

$$m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I'^2_2 r'_2 \quad \Rightarrow \quad r'_2 = k_e k_i r_2$$

$$\frac{1}{2} m_2 I_2^2 L_{2s} = \frac{1}{2} m_1 I'^2_2 L'_{2s} \quad \Rightarrow \quad x'_{2s} = k_e k_i x_{2s}$$

1.7 等效电路

○ 等效电路



1.7 等效电路

○ 绕组归算

n 电压变换关系

定子感应电势:

$$E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m$$

转子感应电势:

$$E_{2s} = 4.44 s f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m$$

频率归算:

$$E_{2s} = s E_2$$

绕组归算:

$$E'_2 = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}} E_2 = k_e E_2$$

$$E'_2 = E_1$$

n 电流变换关系

电流平衡方程:

$$I_1 + I_2 / k_i = I_0$$

绕组归算:

$$I'_2 = I_2 / k_i$$

$$I_1 + I'_2 = I_0$$

1.7 等效电路

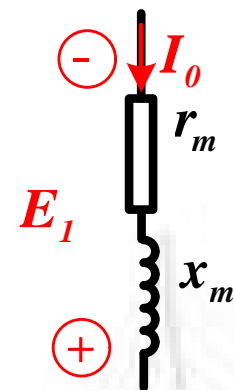
○ 等效电路

n 为了分析问题方便，把 E_1 和 I_0 之间的关系用参数形式反映，即把 E_1 写成 I_0 流过一个阻抗引起的压降

$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0 = -(r_m + jx_m) \dot{I}_0$$

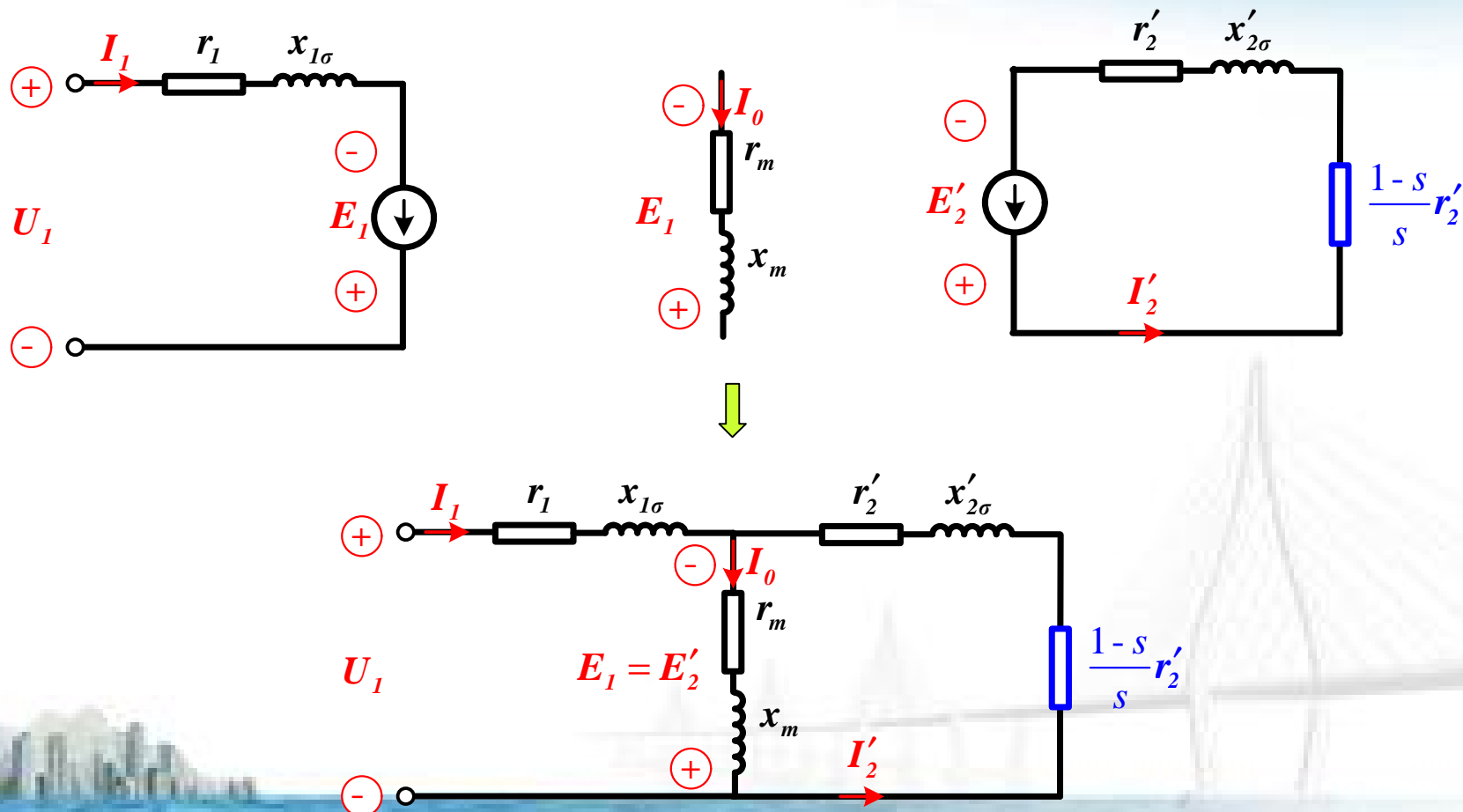
r_m 为异步电动机的激磁电阻

x_m 对应气隙主磁通 Φ 的电抗，称为激磁电抗



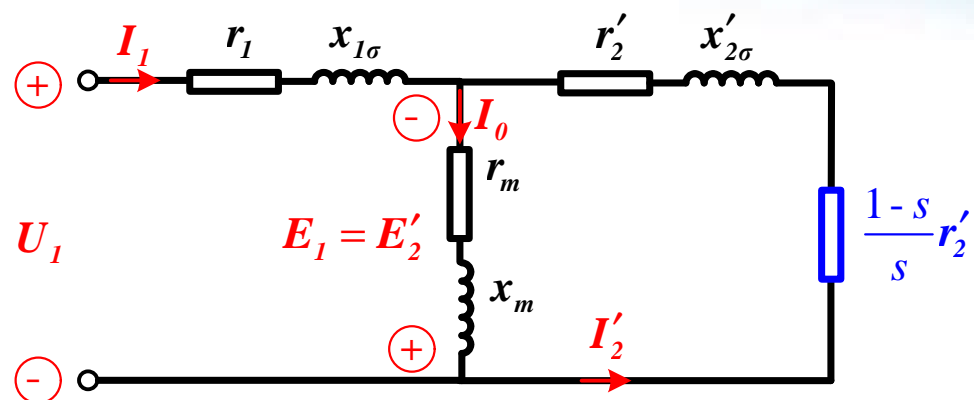
1.7 等效电路

○ 等效电路

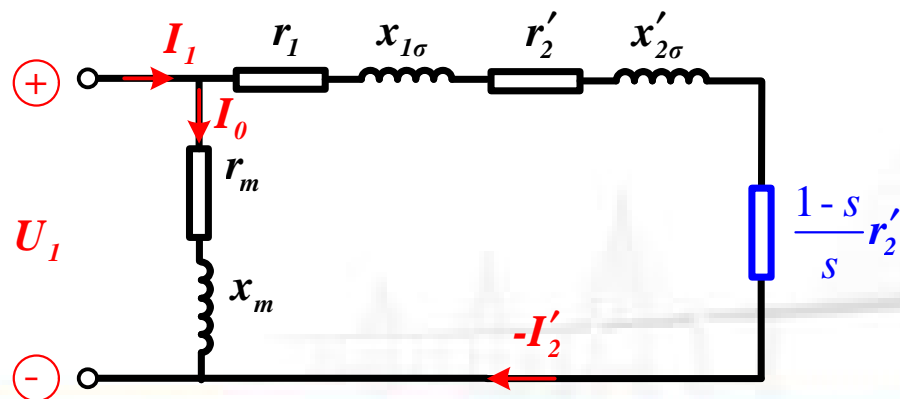


1.7 等效电路

○ 等效T型电路图



○ 近似等效



2.1 三相异步电机的功率与转矩

功率转换过程

P_1 : 由电源供给、从定子绕组输入电动机的电功率。

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

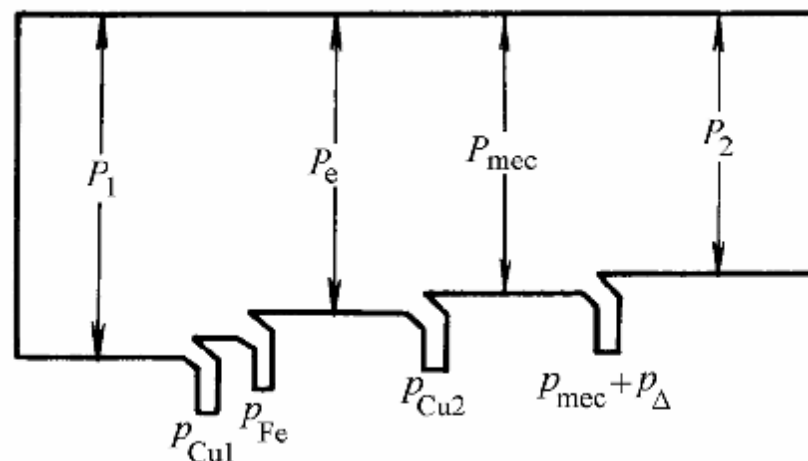
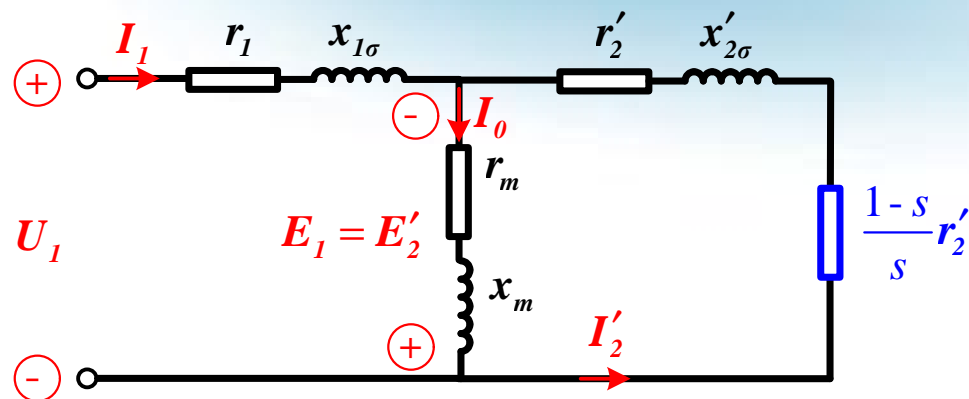
式中: U_1 为定子相电压;
 I_1 为定子相电流;
 φ_1 为定子功率因数;

P_{Cu1} : 消耗于定子绕组上的定子铜耗。

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 r_1$$

P_{Fe} : 消耗于定子铁心上的铁耗。

$$P_{Fe} = m_1 I_0^2 r_m$$



2.1 三相异步电机的功率与转矩

○ 功率转换过程

P_e : 借助于气隙旋转磁场由定子传送到转子的电磁功率。

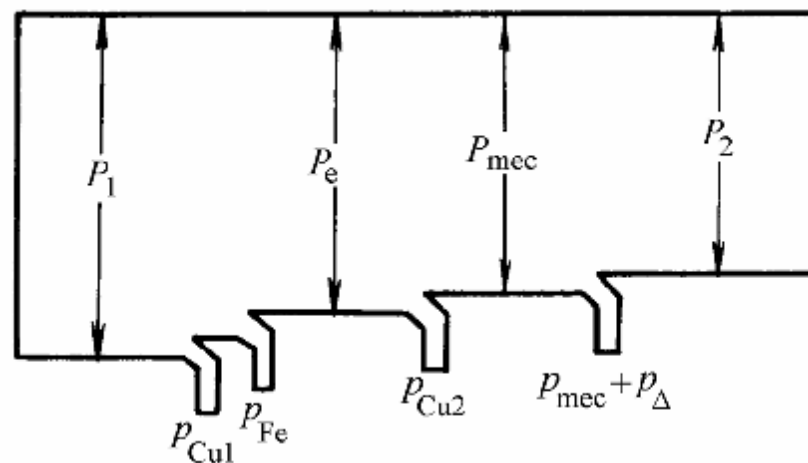
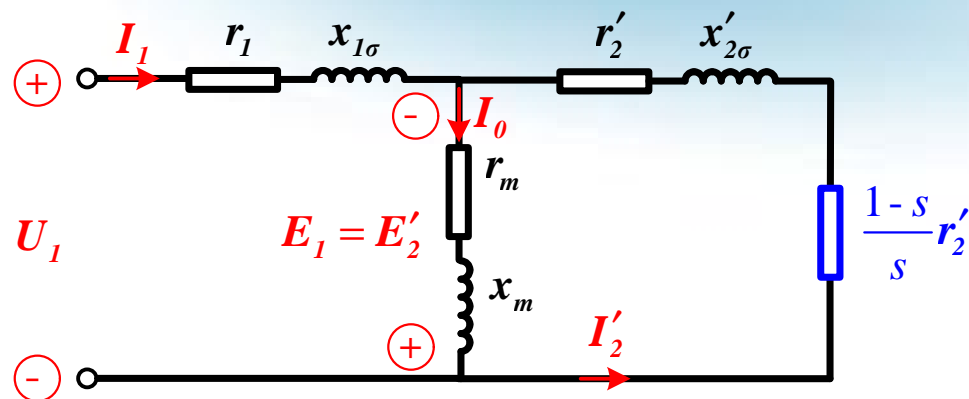
$$P_e = m_1 E'_2 I'_2 \cos \phi'_2 = m_1 I'^2_2 r'_2 / s$$

$$P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = P_e$$

p_{Cu2} : 消耗于转子绕组上的转子铜耗。

$$p_{Cu2} = m_1 I'^2_2 r'_2$$

转子铁耗很小，一般忽略不计。



2.1 三相异步电机的功率与转矩

功率转换过程

P_{mec} : 使转子产生旋转的总机械功率。

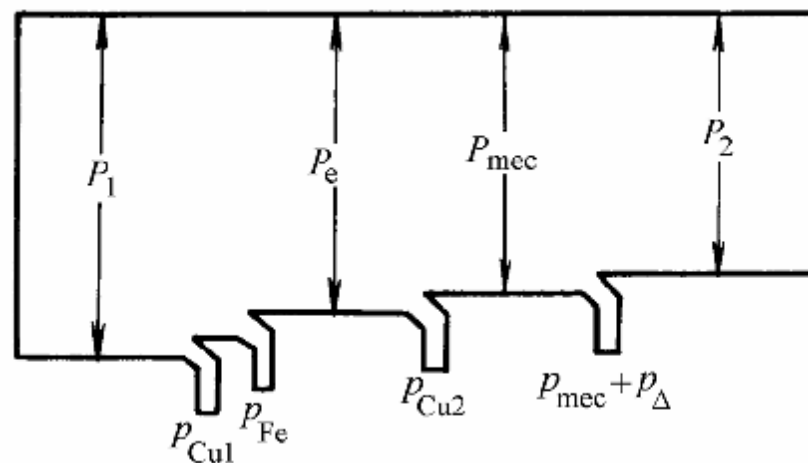
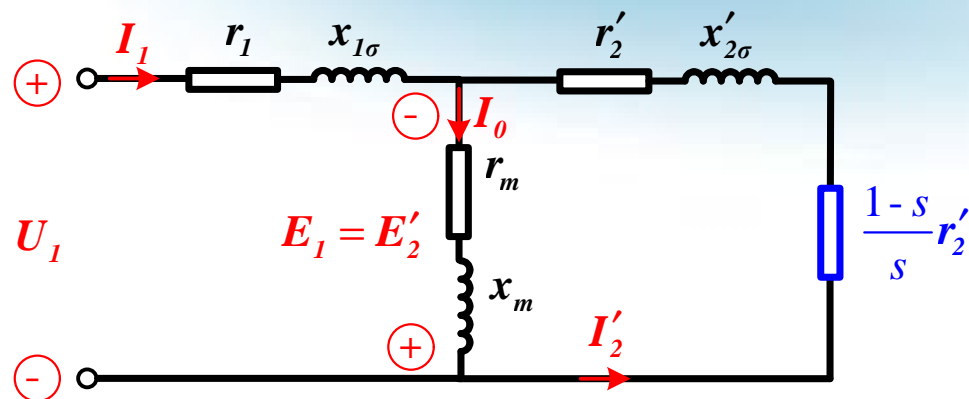
$$P_e - p_{Cu2} = P_{mec}$$

p_{mec} : 机械损耗，包括轴摩擦与风阻等。

p_{Δ} : 附加损耗，其大小与气隙的大小及一些工艺因素有关。

P_2 : 转轴上输出净机械功率。

$$P_{mec} - p_{mec} - p_{\Delta} = P_2$$



2.1 三相异步电机的功率与转矩

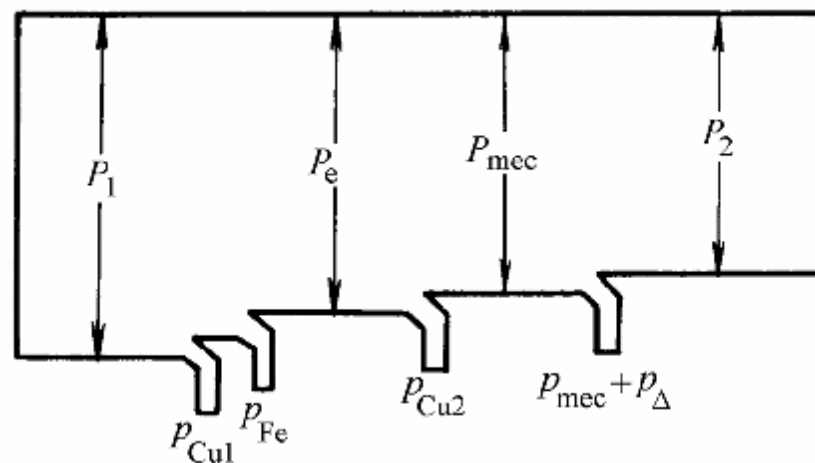
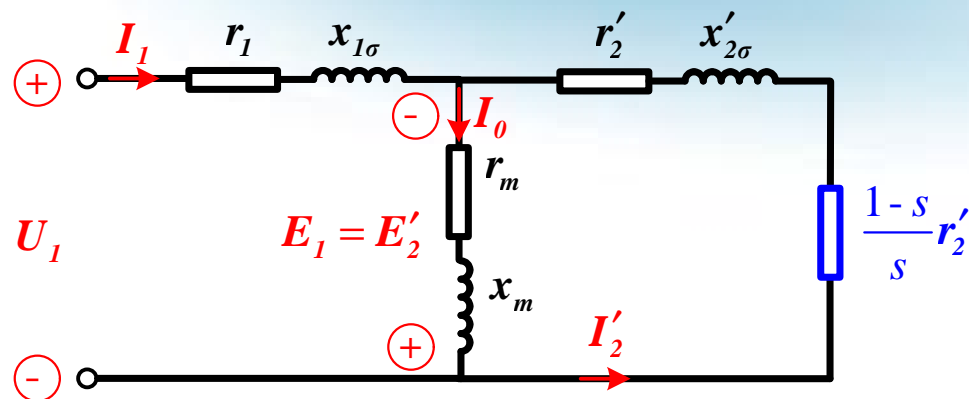
功率转换过程

$$\begin{cases} P_e = m_1 E'_2 I'_2 \cos \phi'_2 = m_1 I'^2_2 r'_2 / s \\ p_{Cu2} = m_1 I'^2_2 r'_2 \\ P_e - p_{Cu2} = P_{mec} \end{cases}$$



$$\begin{cases} p_{Cu2} = s P_e \\ P_{mec} = (1-s) P_e \end{cases}$$

sP_e 称为**转差功率**，其与转差率有关。电动机状态时，转速越低， s 越大，转差功率越大。



2.1 三相异步电机的功率与转矩

○ 转矩方程

当异步电动机稳态运行时：

$$P_{mec} = P_2 + p_{mec} + p_{\Delta}$$



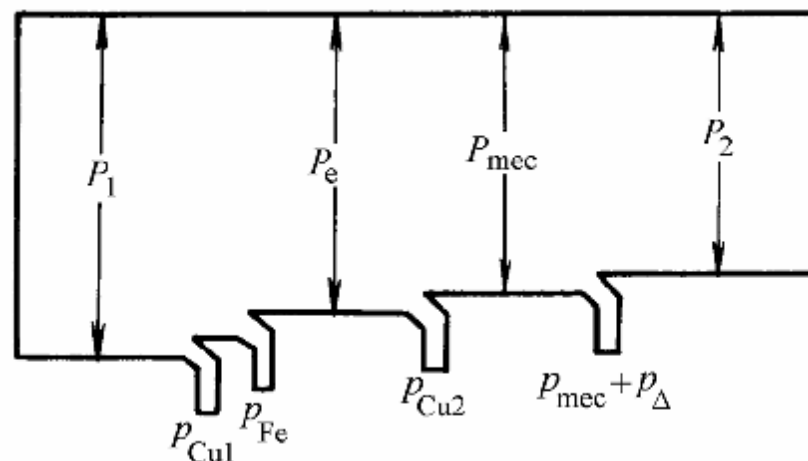
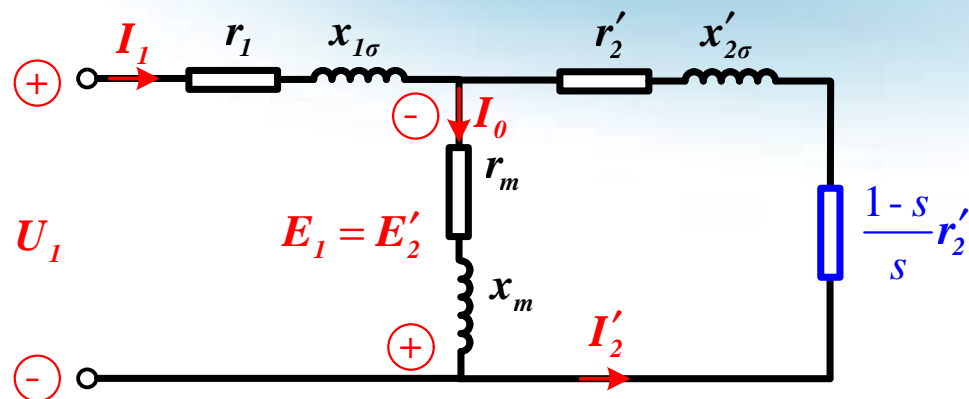
$$T = T_2 + T_0$$

式中： T_2 为电动机输出转矩；

T 为电磁转矩；

T_0 为空载转矩；

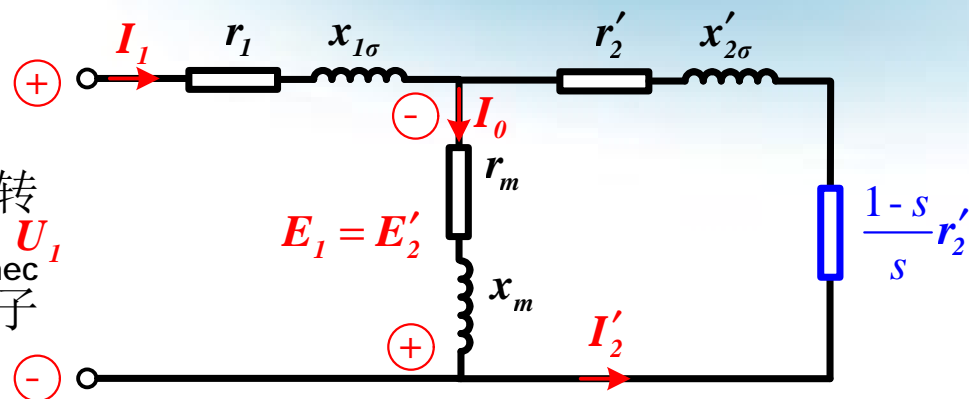
$$T_0 = \frac{p_{mec} + p_{\Delta}}{W}$$



2.1 三相异步电机的功率与转矩

○ 转矩方程

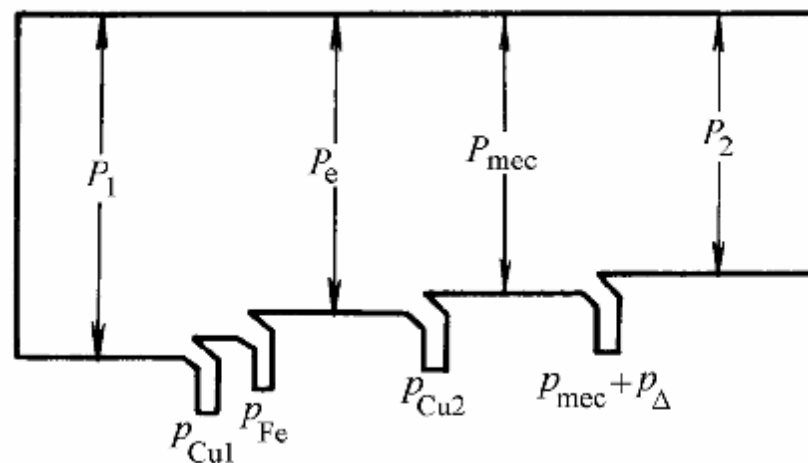
直流电机中电磁功率 P_e 对应着电磁转矩；而异步电机中，总机械功率 P_{mec} 对应着电磁转矩。其中相差一个转子铜耗。



$$P_{mec} = (1-s)P_e = \frac{W}{W_s} P_e$$

$$T = \frac{P_{mec}}{W} = \frac{P_e}{W_s}$$

电磁转矩等于转子总机械功率除以转子机械角速度，又等于电磁功率除以同步角速度。



2.1 三相异步电机的功率与转矩

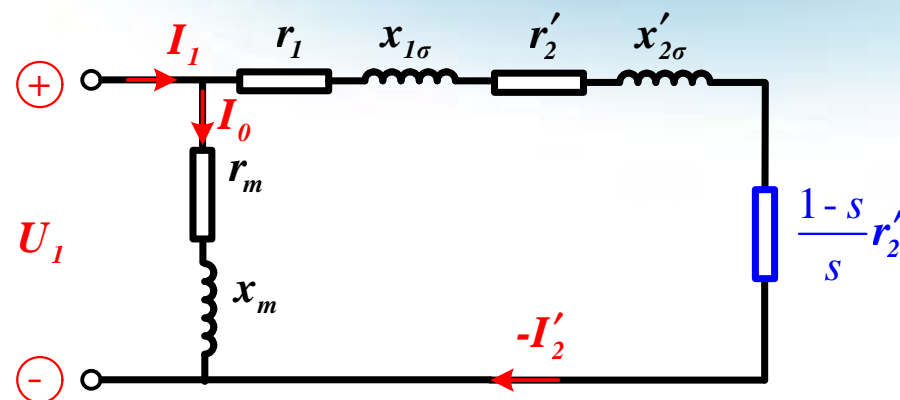
○ 电磁转矩公式

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega_s} = \frac{P_e}{\omega_s}$$

式中 ω_s 为机械同步转速

$$\omega_s = 2\pi f_1 / p \quad f_1 \text{ 为电角频率，即供电电源频率}$$

$$P_e = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2 \right]}$$



2.1 三相异步电机的功率与转矩

○ 电磁转矩公式

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2p f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2s})^2 \right]}$$

式中 U_1 为加在定子绕组上的相电压；

m_1 为定子相数；

f_1 为电源频率；

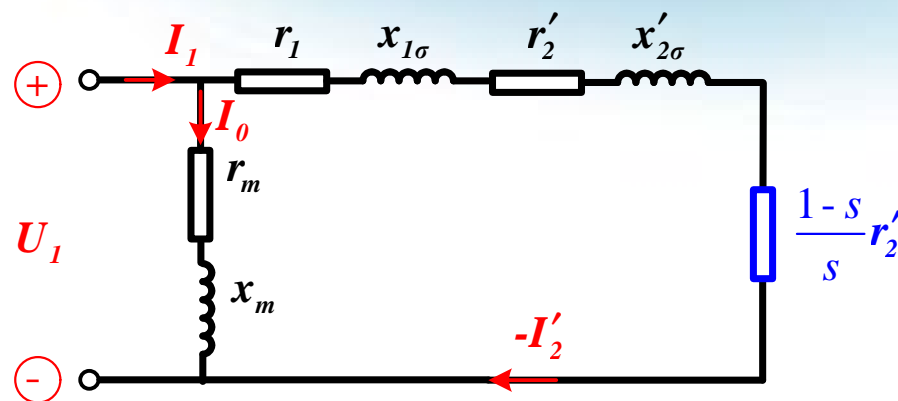
r_1 、 $x_{1\sigma}$ 为定子一相的电阻和漏抗；

r'_2 为转子对应定子一相的折算电阻；

x'_{2s} 为转子不转时转子对应定子一相的折算漏抗；

p 为极对数；

s 为转差率。

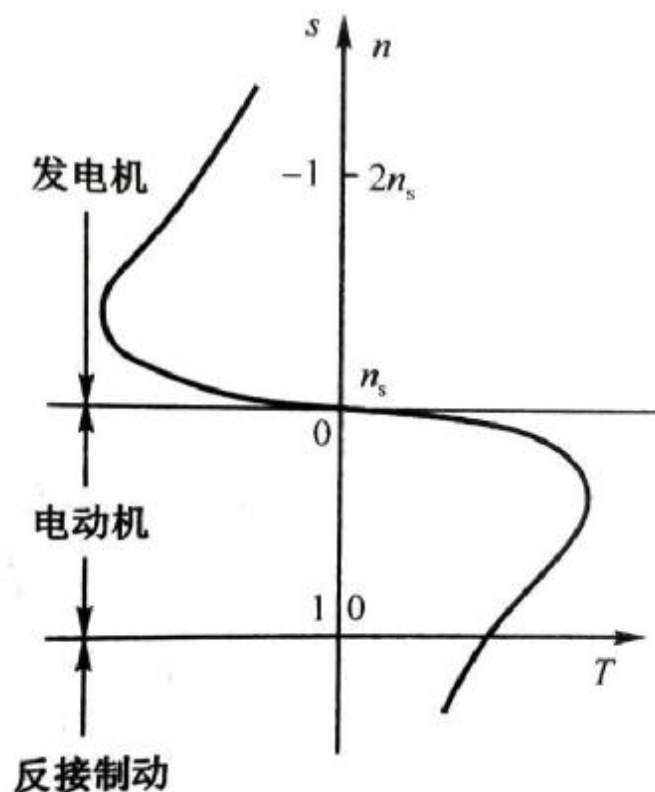


2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2p f_1 \left[(r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_{1s} + x'_{2s})^2 \right]}$$

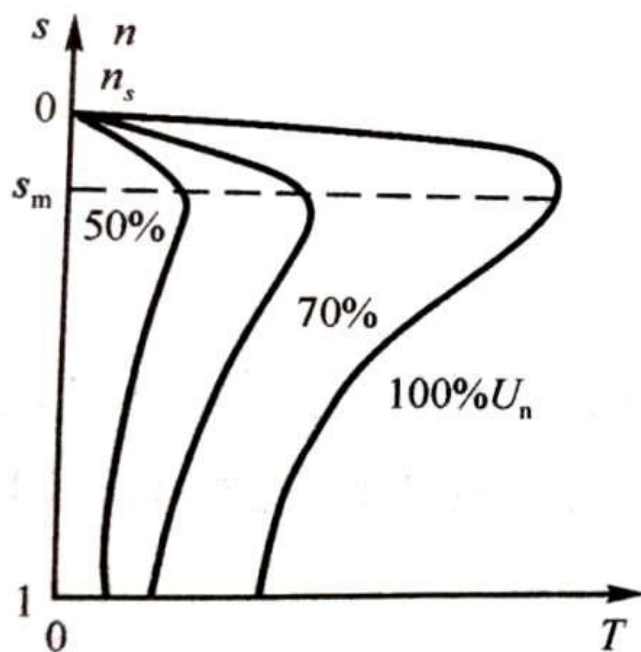
- n** 发电机：转速与转矩反向，转差率 $s < 0$ ，转速高于同步转速 n_s
- n** 电动机：转速与转矩同相，转差率 $0 < s < 1$ ，转速介于静止和同步转速之间
- n** 反接制动：转速与转矩反相，转差率 $s > 1$ ，转速小于0



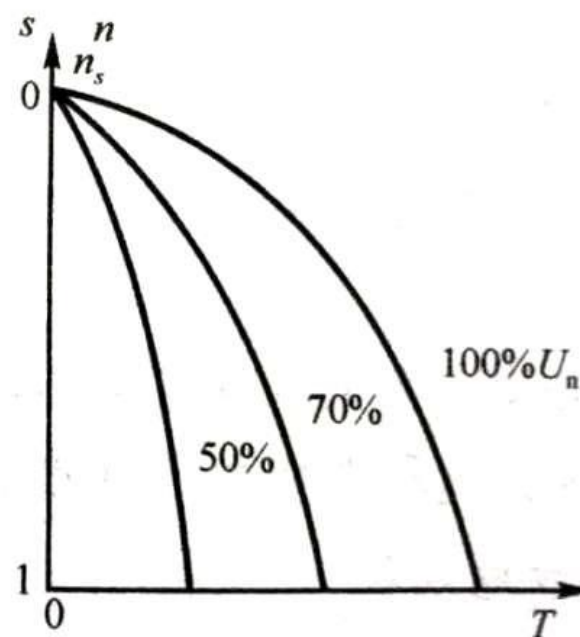
(a) 典型特性

2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性



(a) 普通鼠笼转子的特性



(b) 高电阻转子的特性

2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性

n 临界转差率 s_m : 最大转矩对应的转差率

$$\frac{dT}{ds} = 0 \Rightarrow s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

定子电压改变 $\Rightarrow s_m$ 不变

转子电阻改变 $\Rightarrow s_m$ 同趋势变化

电源频率改变 $\Rightarrow s_m$ 反趋势变化

n 最大转矩 T_m

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{4pf_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]}$$

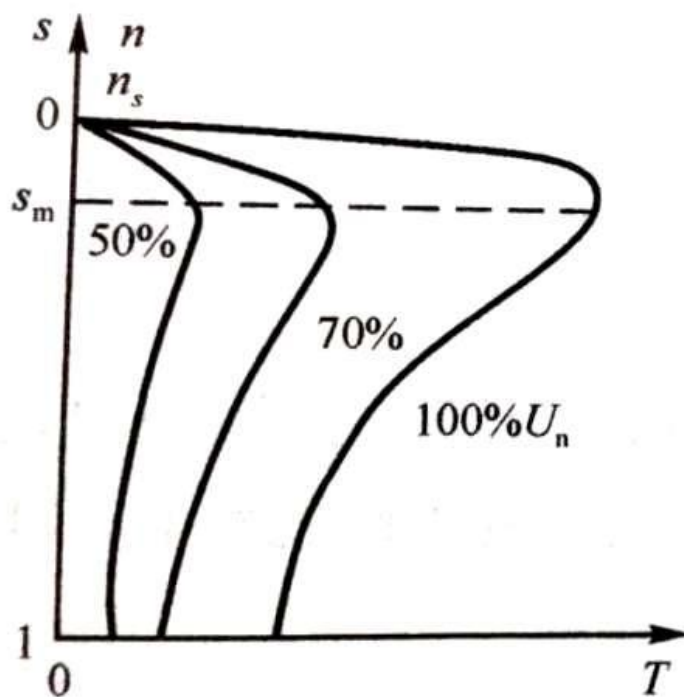
定子电压改变 $\Rightarrow T_m$ 同趋势变化

转子电阻改变 $\Rightarrow T_m$ 不变

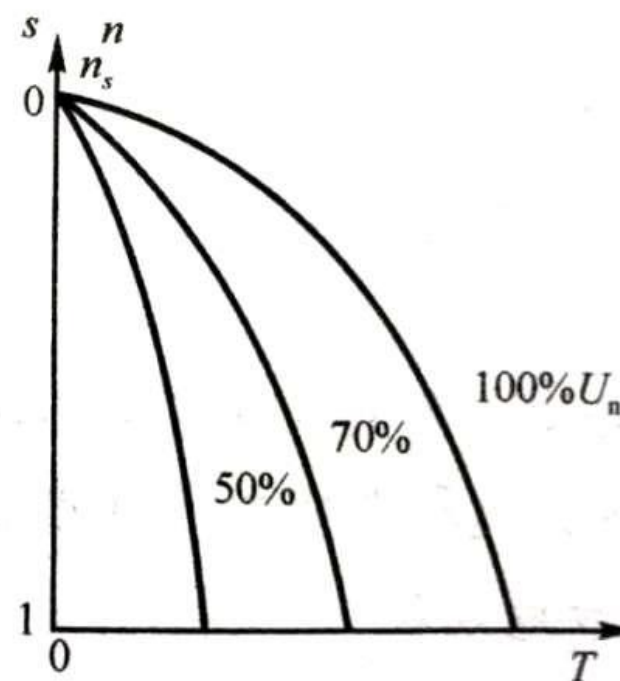
电源频率改变 $\Rightarrow T_m$ 反趋势变化

2.2 三相异步电机的机械特性

○ 启动转矩



(a) 普通鼠笼转子的特性

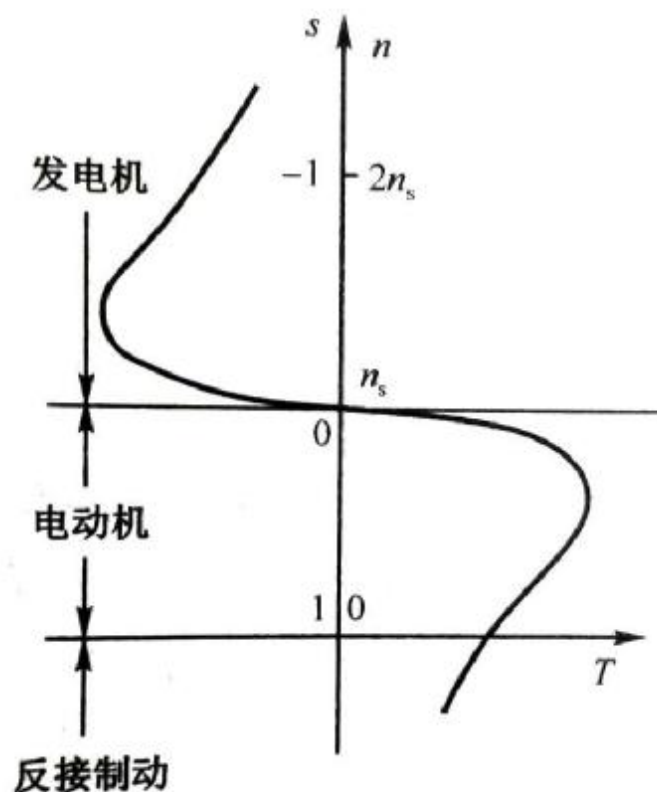


(b) 高电阻转子的特性

2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性

- n 对于普通三相异步电机，为了提高效率，转子电阻 r_2 比较小。因此临界转差率 s_m 也小，约为0.1-0.2。
- n 对于恒转矩负载，第一象限机械特性的下降段是稳定运行区，即 $s < s_m$ 为稳定区， $s > s_m$ 为不稳定区。
- n 对于恒转矩负载，普通三相异步电动机可稳定运行的转速范围小。

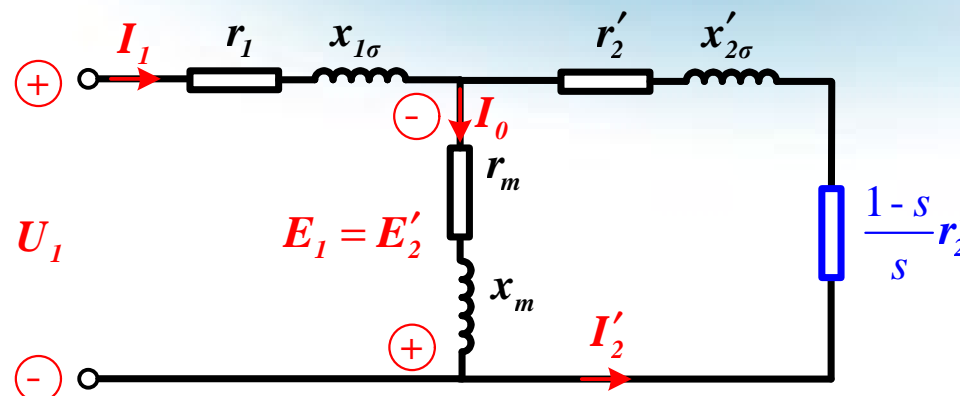


(a) 典型特性

2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性

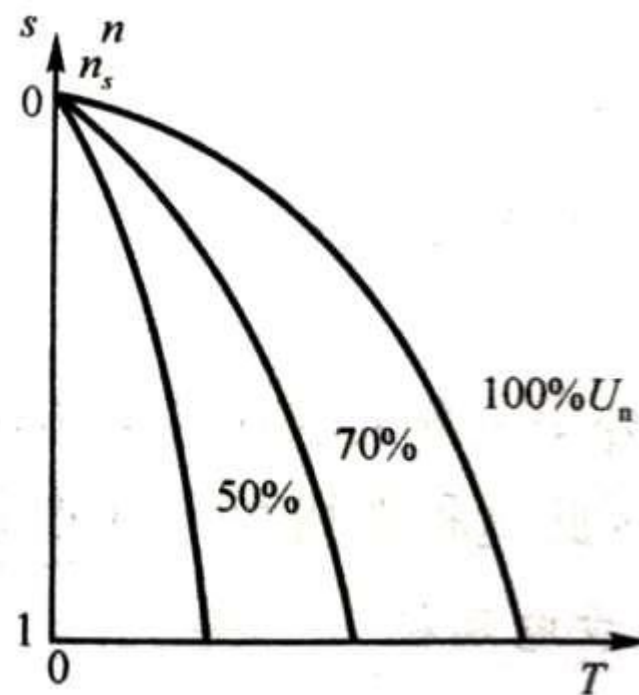
- n 异步电动机的全压启动电流约为额定电流的**4~7**倍。
- n 启动电流过大会引起电源电压降落过大，使其他设备不能正常运行。
- n 减小启动电流的方法是降压启动。
- n 鼠笼异步电机常用的方法：定子电路串电阻或电抗器启动；串自偶变压器启动；采用电力电子技术通过控制加到电动机上的平均电压来控制启动电流。
- n 绕线式异步电机，在转子回路外串三相对称电阻，可增大启动转矩，减小启动电流，因此绕线式异步电机可用在重载和频繁启动的生产机械上，如起重机。



2.2 三相异步电机的机械特性

○ 机械特性

- n 力矩三相异步电机
- n 力矩三相异步电机采用电阻率较高的导电材料作为转子导条及端环，因此转子电阻比鼠笼式大的多，机械特性在第一象限是下垂的。
- n 这种电机可长期低速运转或者堵转。
- n 应用于纺织、印染、造纸、电缆电线、冶金等具有较大的恒转矩或要求变速的机械设备上。



(b) 高电阻转子的特性

3 三相异步电动机的调速

○ 调速方法

n 根据三相异步电机的转差率可知

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

式中： f_1 为供电电源频率

n 调速方法：

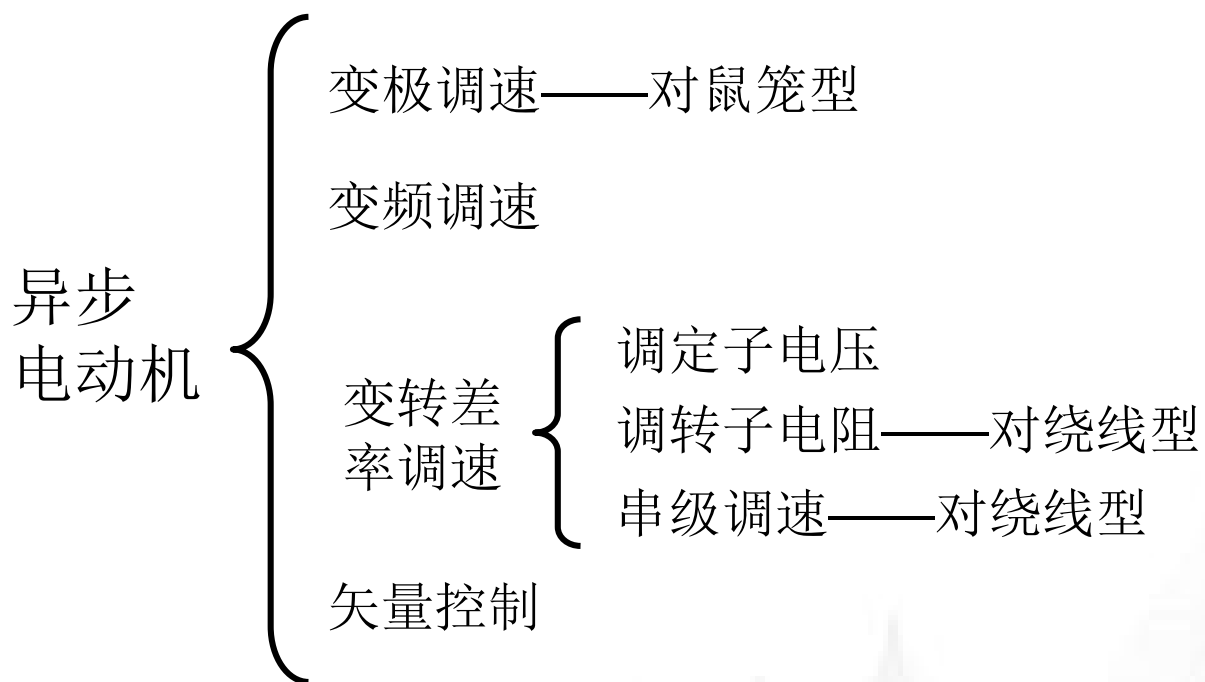
改变极对数 p

改变转差率 s

改变电源频率 f_1

3 三相异步电动机的调速

○ 调速方法



3.1 变极调速

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

○ 变极调速

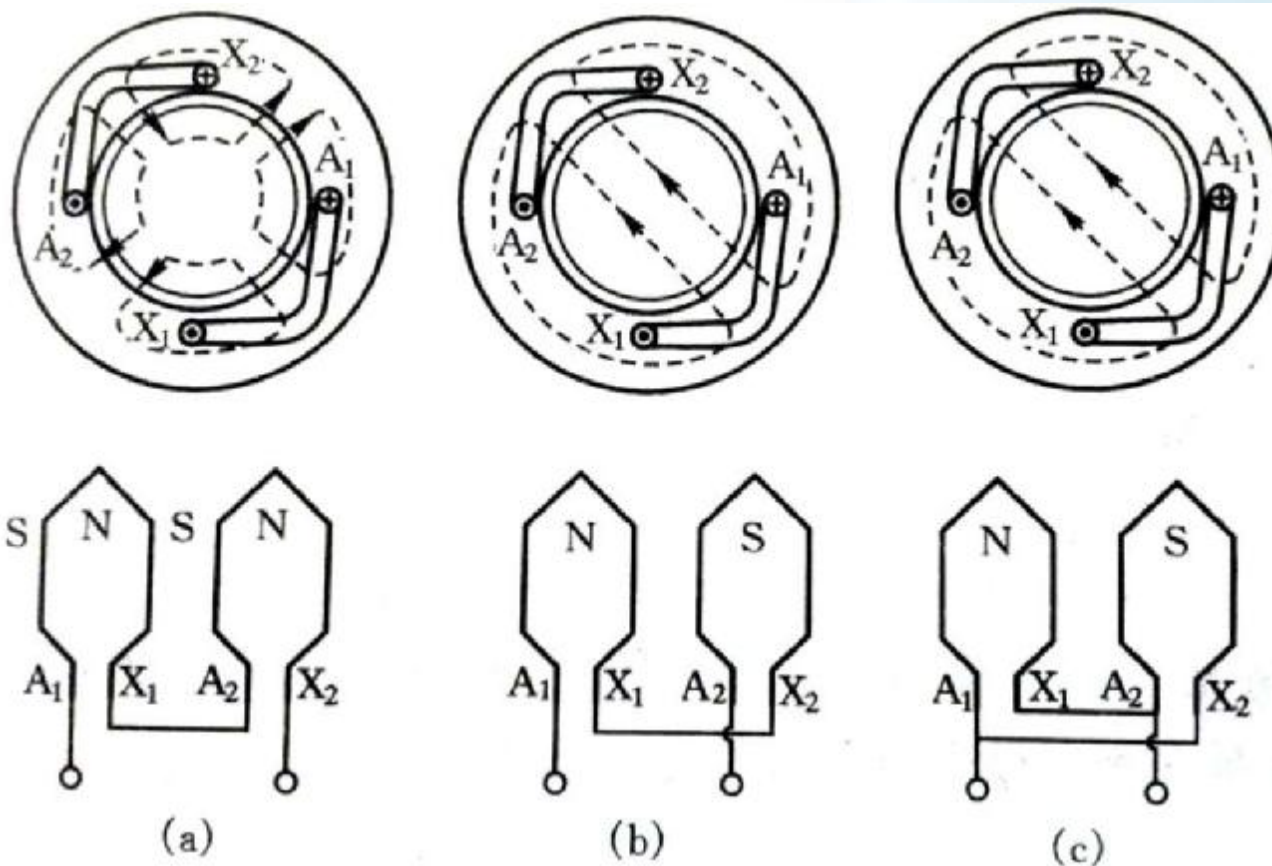
- n 改变定子的极对数，可使异步电机的同步转速改变，从而使电机转动速度得到调节
- n 变极调速通常针对笼型转子异步电机

○ 改变定子极对数的有效方法

- n 在定子中安放两套极对数不同的独立绕组
- n 在一套定子绕组中，改变其连接方法，得到不同的极对数
- n 在定子槽中安放两套极对数不同的独立绕组，而每套绕组又可以分别改变它的连接方法，两种方法配合可以得到更多的调速极对数

3.1 变极调速

n 在一套定子绕组中，改变其连接方法，得到不同的极对数



4极接线

2极串联接法

2极并联接法

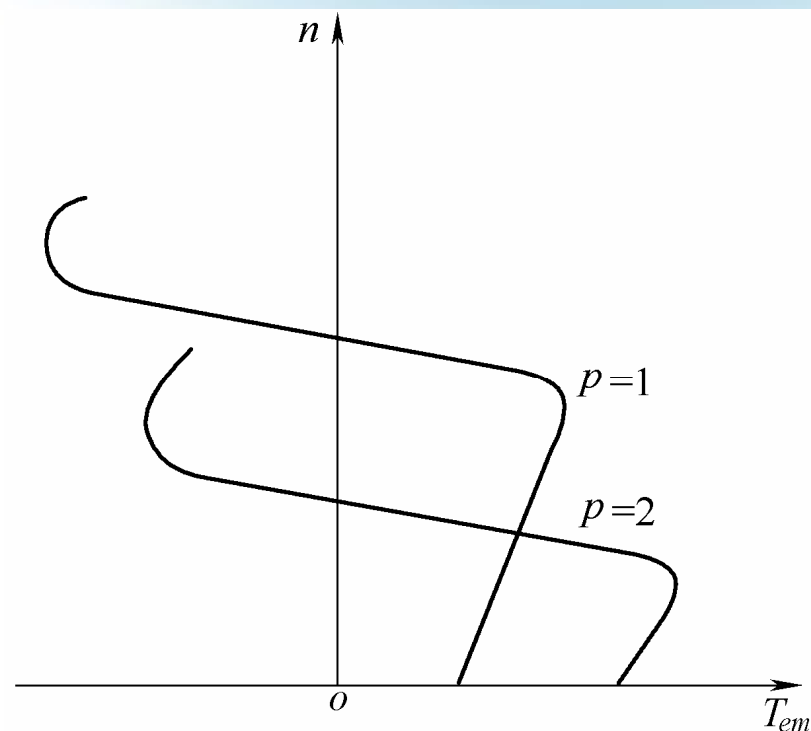
3.1 变极调速

○ 优点

- n 设备简单、运行可靠
- n 机械特性较硬

○ 缺点

- n 只能一极一极的改变转速，而不是平滑的连续调节，只能应用于不需要连续调节的场合，如升降机、起重设备等。



3.2 变频调速

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

○ 变频调速

- n 改变定子绕组供电频率的调速方法称为变频调速
- n 变频调速可以得到很大的调速范围、很好的调速平滑性、具有足够硬度的机械特性

○ 从基频向下调速

- n 异步电机的额定频率称为基频
- n 忽略定子绕组电阻和漏电抗，电机每相电压为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m$$

当电机定子端电压 U_1 一定时，如果降低频率 f_1 ，则主磁通 Φ_m 要增大。电机主磁路通常设计为刚刚进入饱和状态，因此主磁通的提升会使激励电流猛增，使电机带负载能力降低，功率因数变坏，铁耗增加，电机过热。

从额定频率往下调节时，一定要降低压降，以保持或近似保持主磁通不变。

3.2 变频调速

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

○ 从基频向下调速

n 保持 E_1/f_1 等于常数

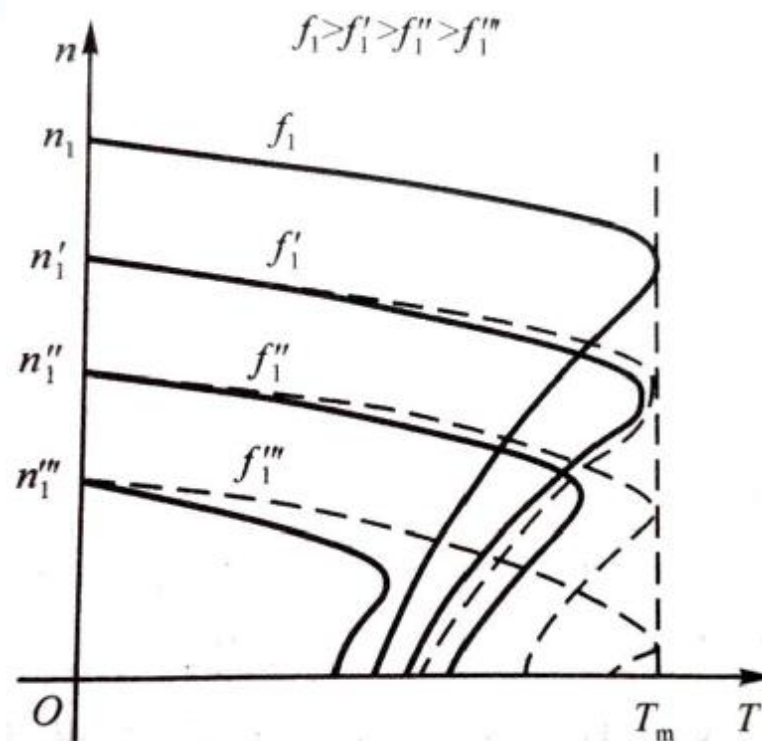
Ø 此时主磁通 Φ_m 等于常数，是恒磁通控制方式。

Ø 机械特性如图虚线所示。

Ø 频率特性彼此间相互平行，最大转矩 T_m 不变，与频率无关。

Ø 特点：机械特性硬，调速范围宽，稳定性好。并且能无级调速，效率高。

Ø 难点： E_1 是电机内部量，无法直接测量和控制。



3.2 变频调速

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

○ 从基频向下调速

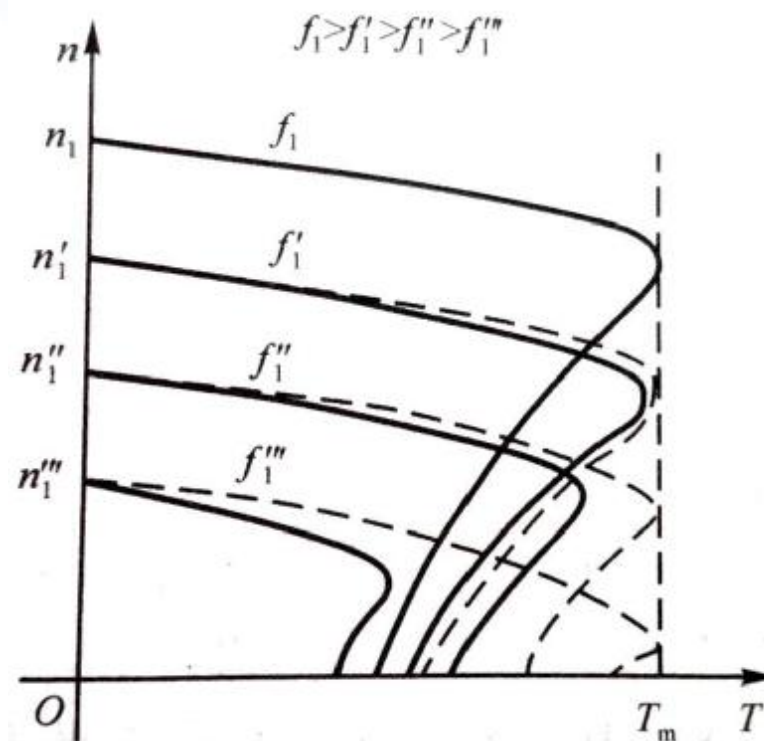
n 保持 U_1/f_1 等于常数

Ø 此时主磁通 Φ_m 近似常数。

Ø 机械特性如图实线所示。

Ø 最大转矩 T_m 随 f_1 降低而减小；低频时，启动转矩减小。

Ø 由于变频同时变压，此类变频器称为变压变频器。



3.2 变频调速

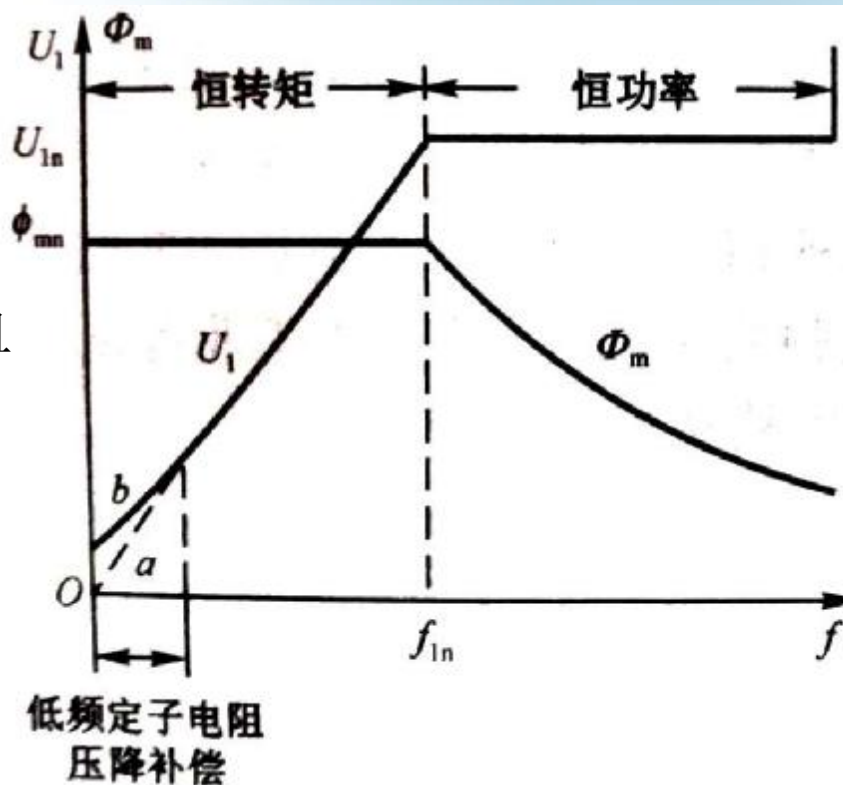
$$n = (1-s)n_s = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

○ 从基频向下调速

n 保持 U_1/f_1 等于常数

低频补偿:

U_1 与 E_1 相差一个漏阻抗压降, 且频率较低时相差明显。所以在频率较高时保持 $U_1/f_1=k$ 为常数; 低频时使 U_1 略大于 kf_1 , 此时性能接近 E_1/f_1 不变的情况。



3.2 变频调速

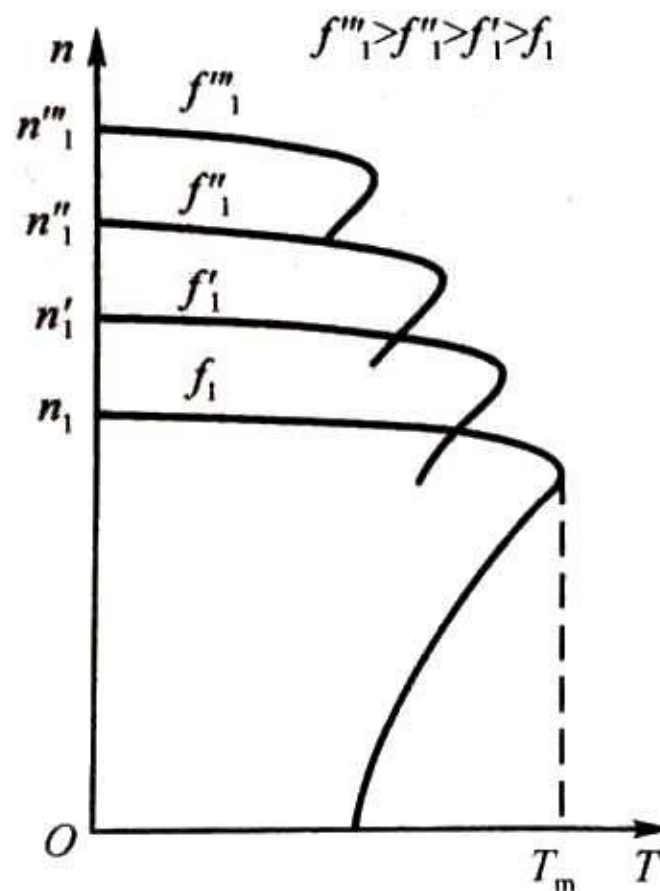
$$n = (1-s)n_s = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

○ 从基频向上调速

Ø 电机端电压不允许高于额定电压，以防止绕组绝缘击穿。

Ø 在频率 f_1 从额定频率向上调时，电机电压只能保持额定值不变。
 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m$

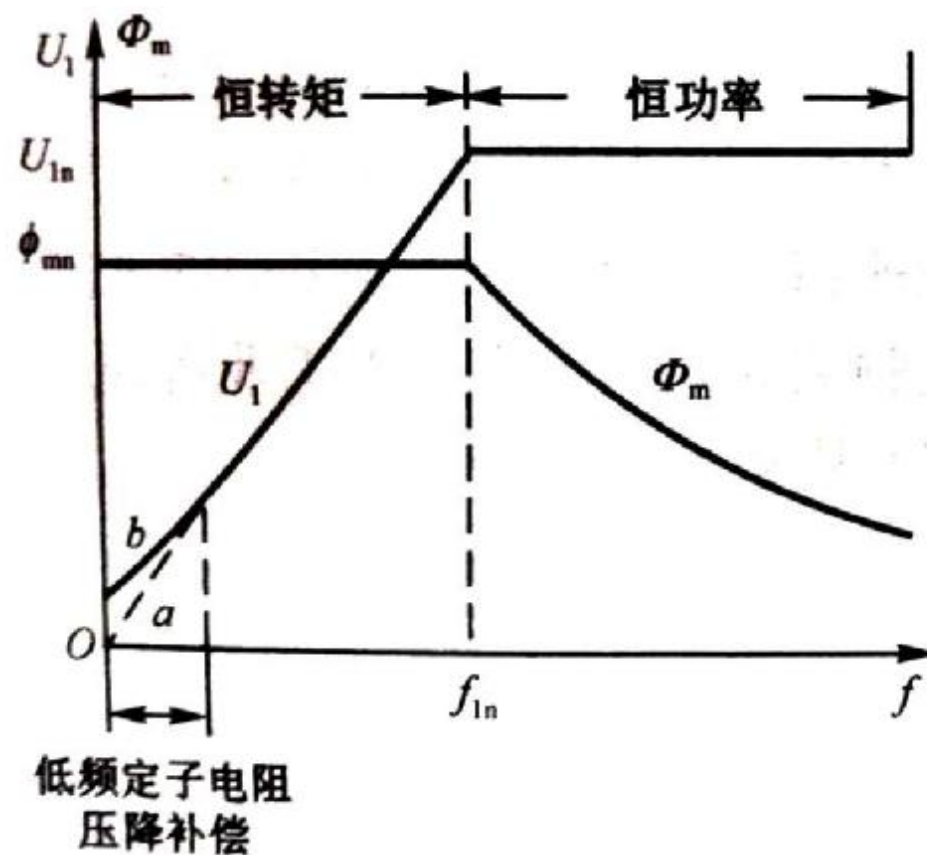
Ø 频率升高，则磁通下降，进而输出转矩下降



3.2 变频调速

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

○ 从基频向上调速



3.3 变转差率调速

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

○ 变转差率调速

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2p f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_{1s} + x'_{2s})^2 \right]}$$

- n 改变定子电压
- n 改变转子回路电阻
- n 串级调速(转子回路中串入附加电势)

3.3 变转差率调速

○ 改变定子电压调速

n 右图为改变定子电压的机械特性

n 曲线1为额定电压机械曲线

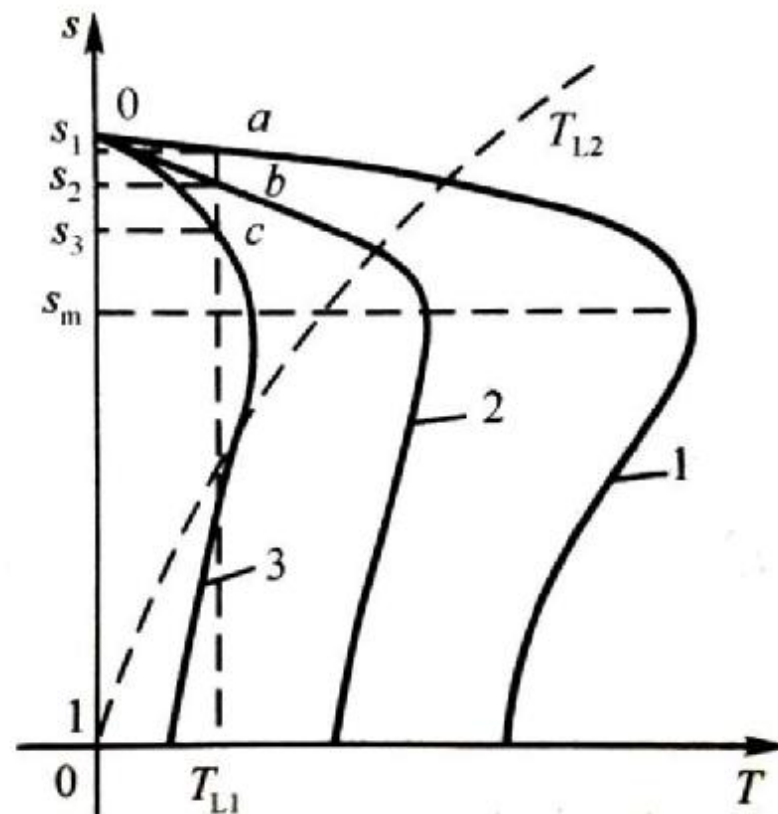
n 曲线对应电压关系为(只能降压)

$$U_1 > U_2 > U_3$$

n 最大转矩对应的临界转差率 s_m 不变

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

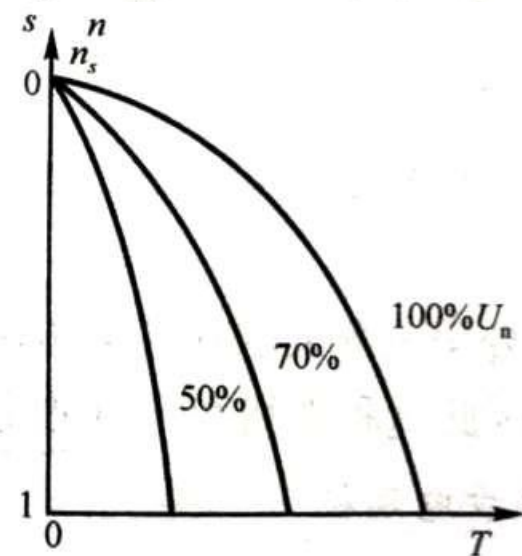
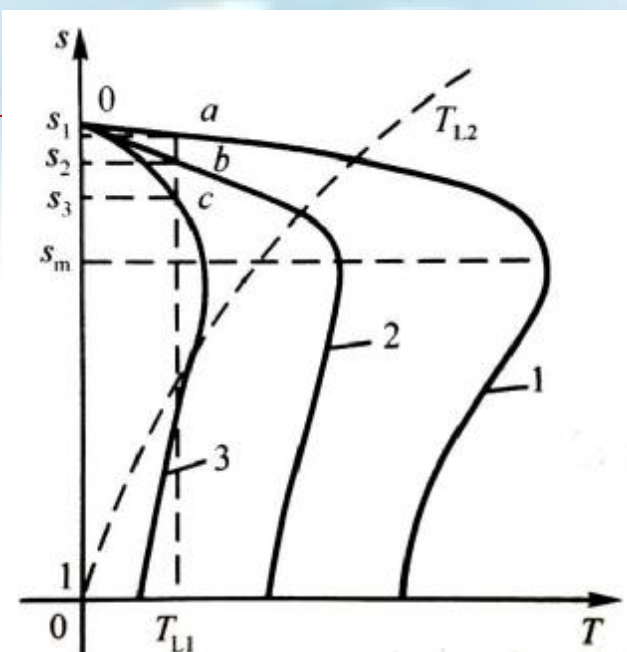
n 在恒转矩负载情况下，转差率随电压降低而增大，但在 $s > s_m$ 时电机不能稳定运行，因此最大调速范围为 $0 \sim s_m$



3.3 变转差率调速

○ 改变定子电压调速

- n 对于普通鼠笼电机 s_m 较小，所以这种调速方法对恒转矩负载来说，调速范围很小。
- n 对于通风机负载 T_{L2} (转矩与转速平方成正比)，当转差率大于 s_m 时，仍能稳定运行，调速范围扩大了。
- n 对于恒转矩负载，为了获得较宽的调速范围，可采用高电阻转子的异步电机，或绕线异步电机转子回路串电阻。
- n 高电阻转子的异步电机，机械特性变软，负载变化时，转速波动大。



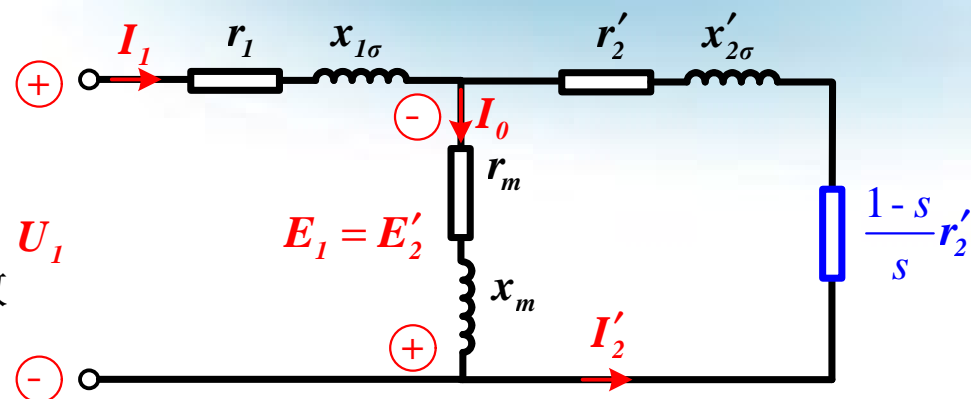
(b) 高电阻转子的特性

3.3 变转差率调速

○ 改变定子电压调速

n 调速方法简单

n 低速时铜耗大、效率低、电机散热差、发热严重



$$\begin{cases} P_{em} = m_1 I_2'^2 r_2' / s \\ p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 r_2' \end{cases}$$



$$P_{Cu2} = s P_{em}$$

$$T = \frac{P_{em}}{W_s} = \text{常值}$$



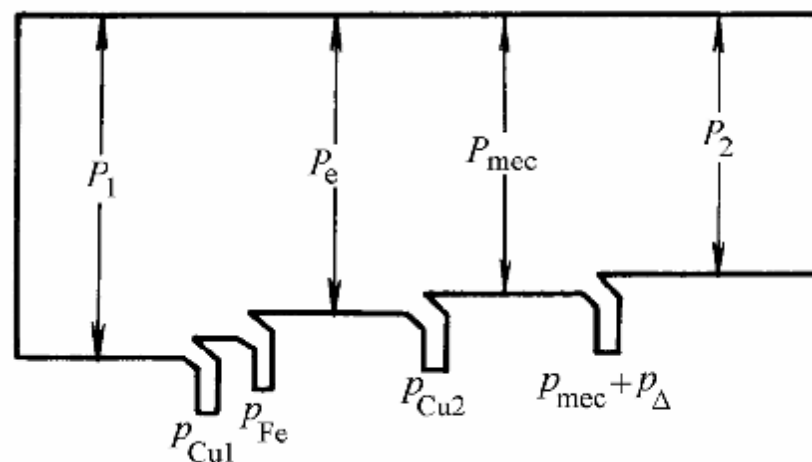
$$P_{em} = \text{常值}$$

$n \downarrow$



$s \uparrow$

$$p_{cu2} = s P_{em} \uparrow$$



3.3 变转差率调速

○ 转子回路串电阻调速

n 右图转子回路串电阻的机械特性

n 只能用于绕线式异步电动机

n 曲线对应电压关系为

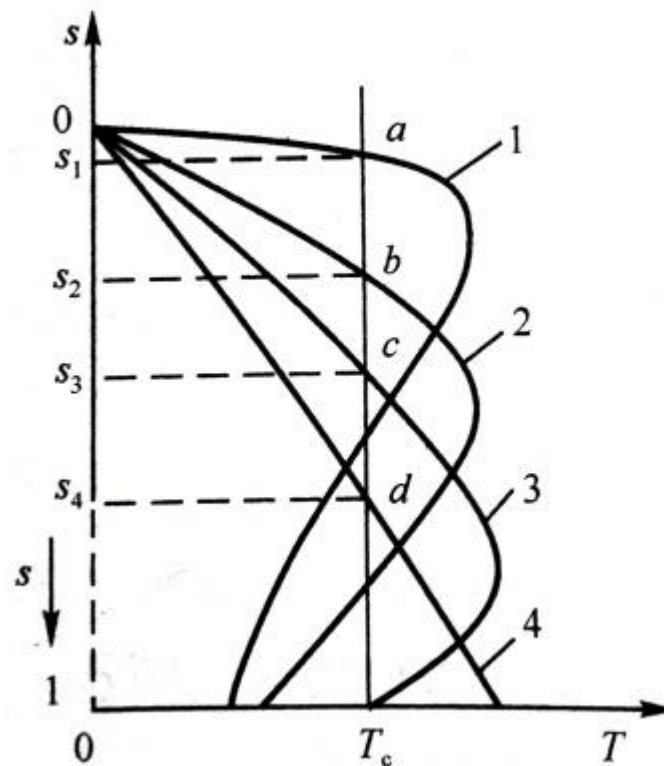
$$0 = r_{s1} < r_{s2} < r_{s3} < r_{s4}$$

n 最大转矩 T_m 不变

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{4pf_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}$$

n 最大转矩对应的 s_m 增加:

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$



3.3 变转差率调速

○ 转子回路串电阻调速

n 对于恒转矩负载调速时有：

$$\frac{r_2}{s_1} = \frac{r_2 + r_s}{s} = \text{常值}$$

s 与转子回路总电阻成正比

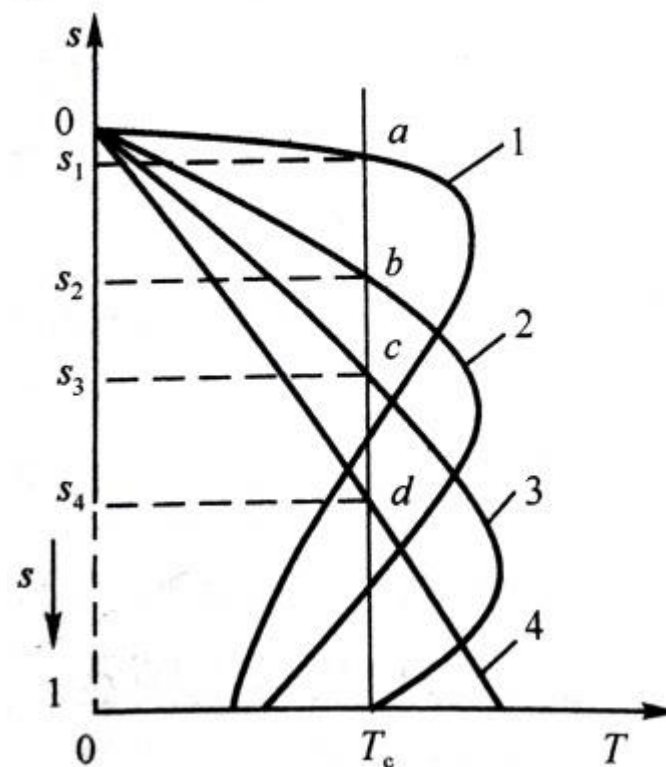
n 转速低时，铜耗大，效率低

$$n \downarrow \Rightarrow s \uparrow \quad p_{cu2} = sP_{em} \uparrow$$

n 不能连续调节，调速平滑性不好

n 串入电阻后机械特性变软

n 简单易行，在中小容量绕线异步电机中应用，如起重机



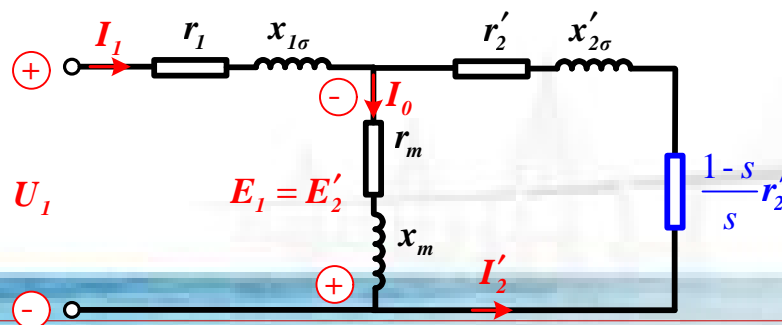
3.3 变转差率调速

○ 串级调速

- n 串级调速就是在异步电动机转子回路里串入附加电势进行调速。
- n 串级调速是为了改善转子回路串电阻调速效率低的缺点。
- n 只能用于绕线式异步电动机。
- n 引入的电动势方向可以与转子电势 E_{2s} 方向相同或相反，其频率与转子频率相同。

E_f 与 E_{2s} 相同 \Rightarrow 电流 I_2 增高 \Rightarrow 输出转矩增大 \Rightarrow 转速升高

E_f 与 E_{2s} 相反 \Rightarrow 电流 I_2 减小 \Rightarrow 输出转矩减小 \Rightarrow 转速下降



3 三相异步电动机的调速

调速方法 比较内容	变极调速	变转差率调速			变频调速
		转子串电阻	调压调速	串级调速	
同步转速	变	不变	不变	不变	变
转差率	小（好）	大（差）	开环时大 闭环时小	小（好）	小（好）
调速范围	较小 ($D=2\sim4$)	较小 ($D=2$)	闭环时较大 ($D=10$)	较小 ($D=2\sim4$)	较大 ($D=10$)
调速平滑性	差 有级调速	差 有级调速	好 无级调速	好 无级调速	好 无级调速
适应负载	恒功率 恒转矩	恒转矩	通风机 恒转矩	恒转矩	恒功率 恒转矩
设备投资	少	少	较少	较多	多
能量损耗	小	大	大	较小	较小
电机类型	鼠笼	绕线	鼠笼 绕线	绕线	鼠笼 绕线