



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A

9.2-异步电机的运行分析和等效电路



目 录

1.异步电机的运行分析

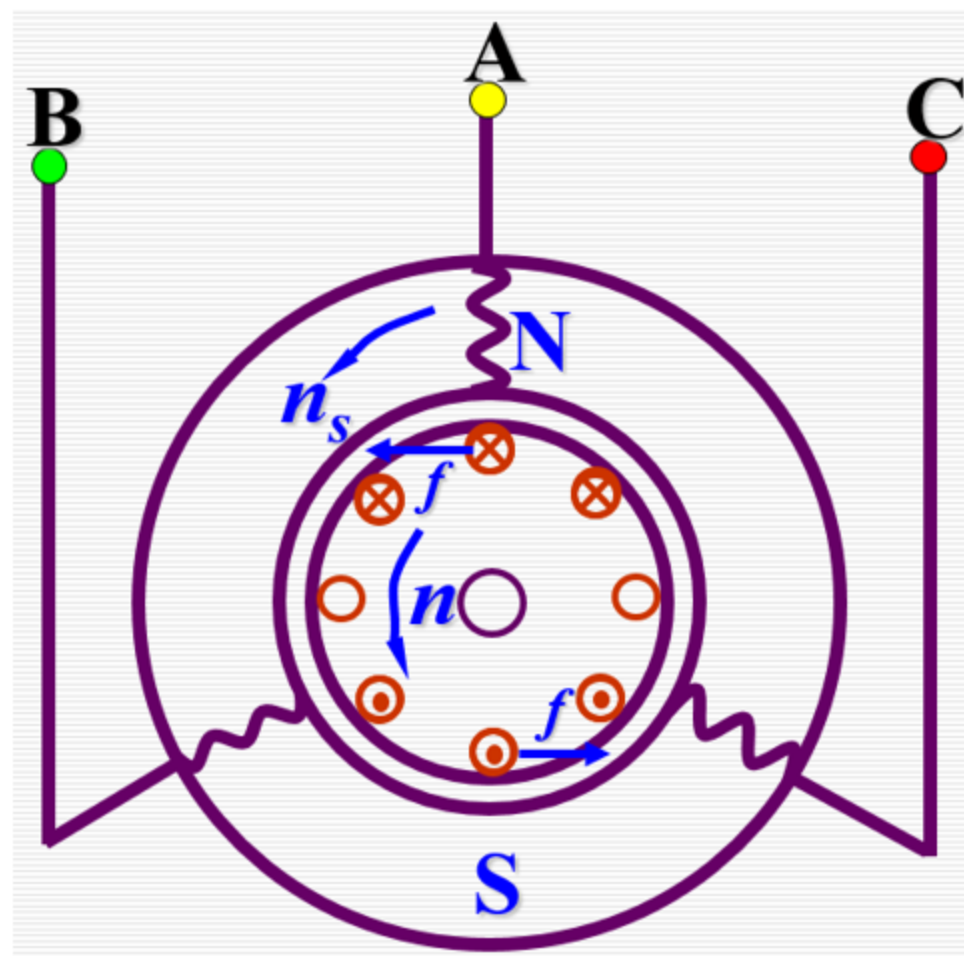
2.异步电机的等效电路



1. 异步电机的运行分析

三相感应电动机的基本工作原理

⊗为流入
⊙为流出



1. 异步电机的运行分析

转差率

$$n \neq n_s$$

转差率 s (slip)

$$n=0 \quad s=1$$

$$0 < n < n_s \quad 1 > s > 0$$

电动机运行:

感应电机又称为异步电机

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$n=n_s \quad s=0$$

电动机运行时转速和转差率的范围

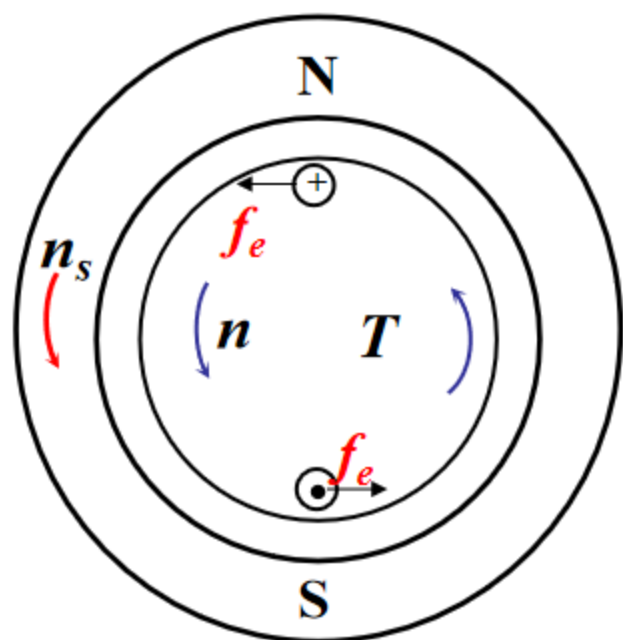
电磁转矩为驱动转矩



1. 异步电机的运行分析

电动机运行状态

$$n < n_s$$



旋转磁场相对转子的旋转方向为
逆时针；

电磁转矩 T 与转子转动方向相同

电磁转矩 T 是**驱动转矩**

$$n < n_s$$
$$n > 0$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad 1 > s > 0$$

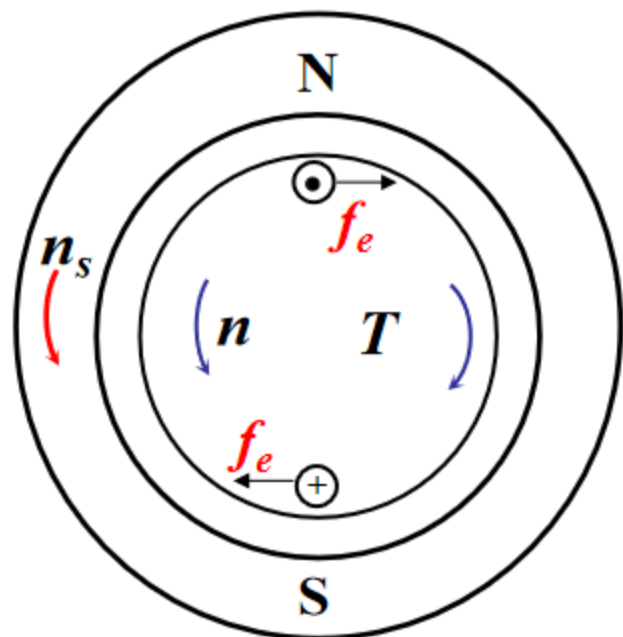
n_s 是发电机和电动机状态的分界点



1. 异步电机的运行分析

发电机运行状态

$$n > n_s$$



$$n > n_s \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad s < 0$$

旋转磁场相对转子的旋转方向为
顺时针；

电磁转矩 T 与转子转动方向相反

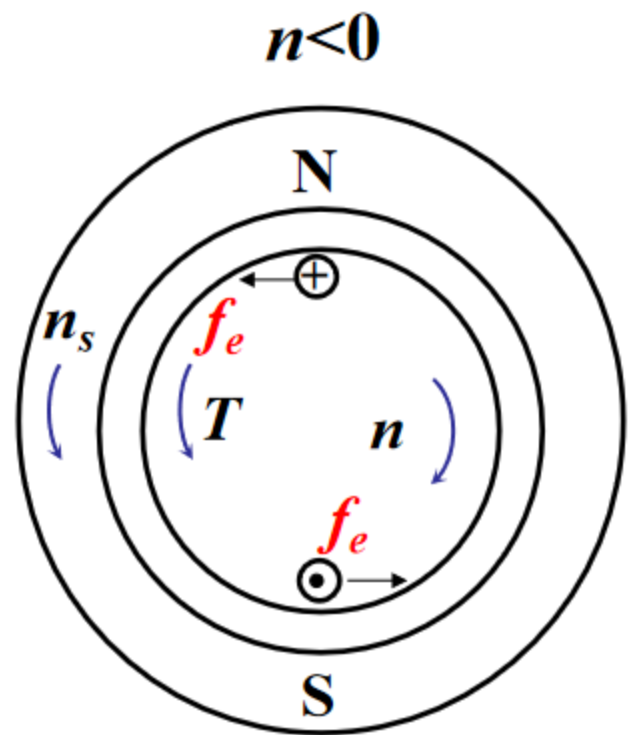
电磁转矩 T 是**制动转矩**

n_s 是发电机和电动机状态的分界点



1. 异步电机的运行分析

电磁制动运行状态



$s > 1$ 电磁制动状态

外力拖着与转子反着磁场方向旋转

旋转磁场相对转子的旋转方向为
逆时针

电磁转矩 T 与转子转速方向相反

电磁转矩 T 是制动转矩



1. 异步电机的运行分析

转差率 (s)	$s > 1$	$1 > s > 0$	$s < 0$
转速(n)	$n < 0$	$0 < n < n_s$	$n > n_s$
运行状态	电磁制动	电动机	发电机
电磁转矩 T 性质	制动	驱动	制动
能量转换	电能、机械能转换为热损耗	电能转换为机械能	机械能转换为电能



1. 异步电机的运行分析

1. 转差率/滑差/Slip s
2. 理想空载下异步电机运行分析
3. 堵转下异步电机运行分析
4. 电动运行下异步电机运行分析



因为电机各相物理量： $F/\phi/U/I/E$ 有着明确的时间和空间对应关系，因此电机运行分析针对一相而展开。以下标1表示定子，以下标2表示转子。



目 录

1.异步电机的运行分析

2.异步电机的等效电路



2. 异步电机的等效电路

三相感应电动机的定、转子电路之间没有直接的电联系，它们之间的联系是通过电磁感应而实现的，这一点和变压器完全相同。三相感应电动机的定子绕组相当于变压器的一次绕组，转子绕组则相当于变压器的二次绕组，因此对三相感应电动机的分析，可以仿照变压器的方式进行。

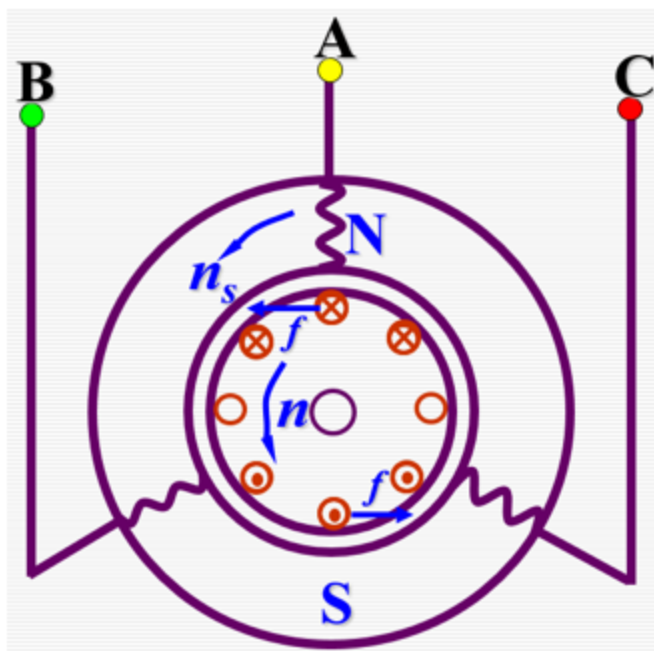


2. 异步电机的等效电路

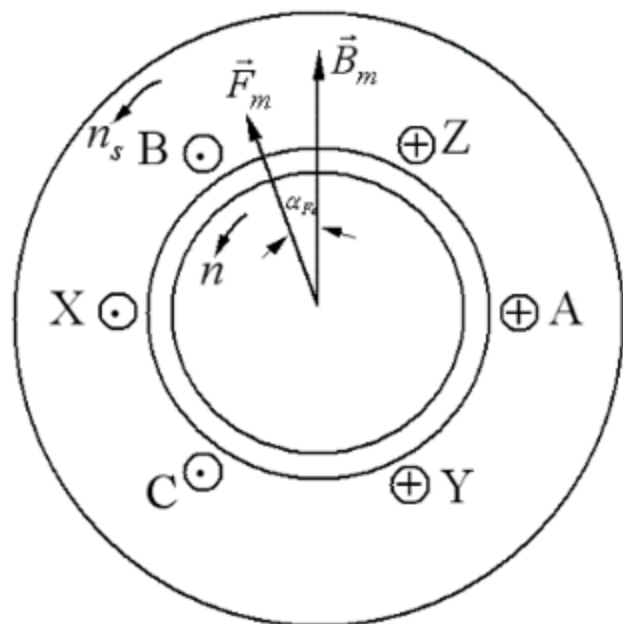
空载运行的定义：

定子接到电压为 U_1 、频率为 f_1 的三相对称电源，电机轴上没有任何机械负载。

$$\begin{matrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{matrix} \rightarrow F_1$$



$$\begin{aligned} n &\approx n_s, \quad s \approx 0 \\ I_2 &\approx 0, \quad F_2 \approx 0 \\ F_1 &\approx F_0 \end{aligned}$$



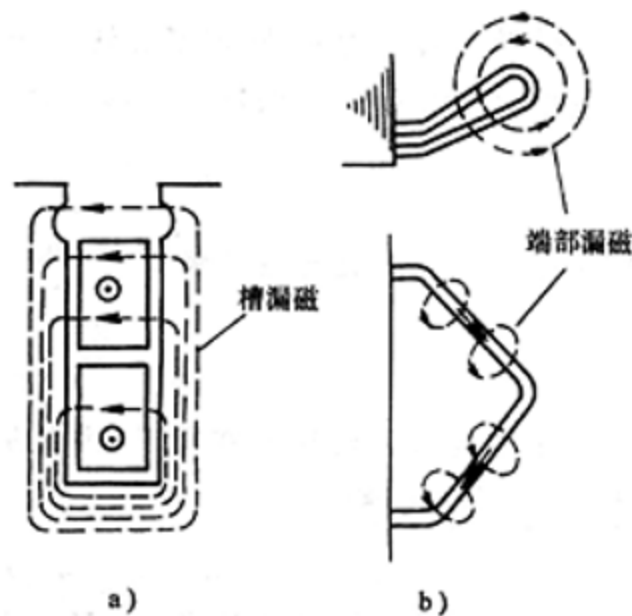
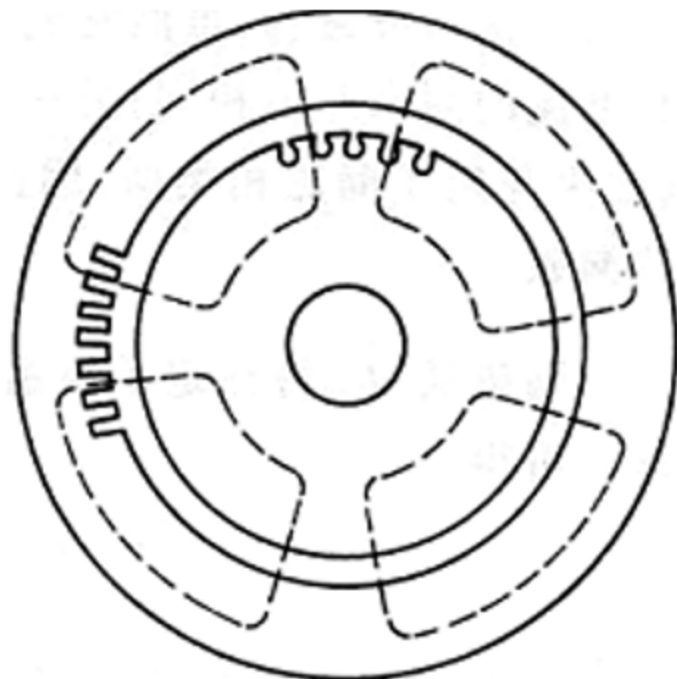
2. 异步电机的等效电路

主磁通与漏磁通

空载磁通 { 主磁通 Φ_m
定子漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$

主磁通：基波旋转磁势产生的，与定、转子绕组相交链的磁通。

主磁路的组成：定子轭、定子齿、气隙、转子齿、转子轭。



漏磁通包括槽漏磁，端部漏磁和谐波漏磁



2. 异步电机的等效电路

主磁通和漏磁通对比

1 作用不同:

主磁通直接关系到能量转换，在电机中产生有用的电磁转矩。漏磁通只产生漏抗压降。

2 对应的磁路不同:

主磁通-主磁路（主要铁磁材料）-饱和，漏磁通-漏磁路（空气）-不饱和

3 对应参数不同:

主磁通-励磁电抗；漏磁通-漏抗；漏抗远小于励磁电抗。



2. 异步电机的等效电路

定子感应电势

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f_1 W_1 k_{w1} \dot{\Phi}_m$$

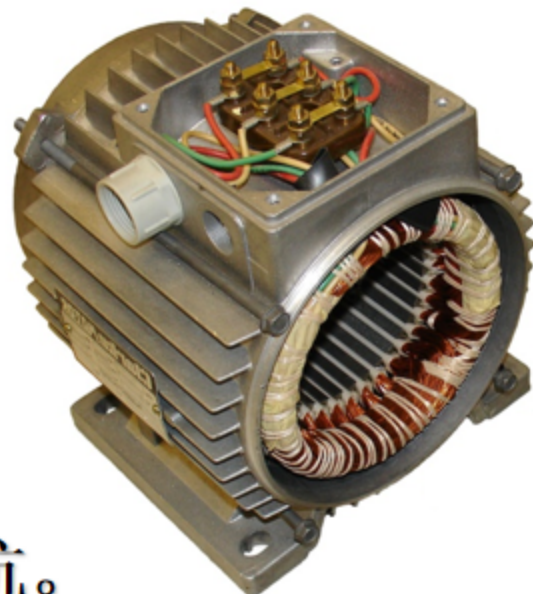
引入励磁阻抗 Z_m $\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m = -\dot{I}_m (r_m + jx_m)$

励磁电阻 $r_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_m^2}$ —反映铁心损耗的等效电阻。

励磁电抗 $x_m = 2\pi f_1 L_m = 2\pi f_1 N_1^2 \Lambda_m$ —反映主磁路的等效电抗。

励磁电抗与主磁路的磁导 Λ_m 成正比。可见，气隙越大，磁导越小，励磁电抗越小，在相同电压下产生相同大小磁场所需要的励磁电流就会越大。

励磁电抗受铁芯饱和程度影响，铁芯越饱和，磁导就会减少，励磁电抗越小

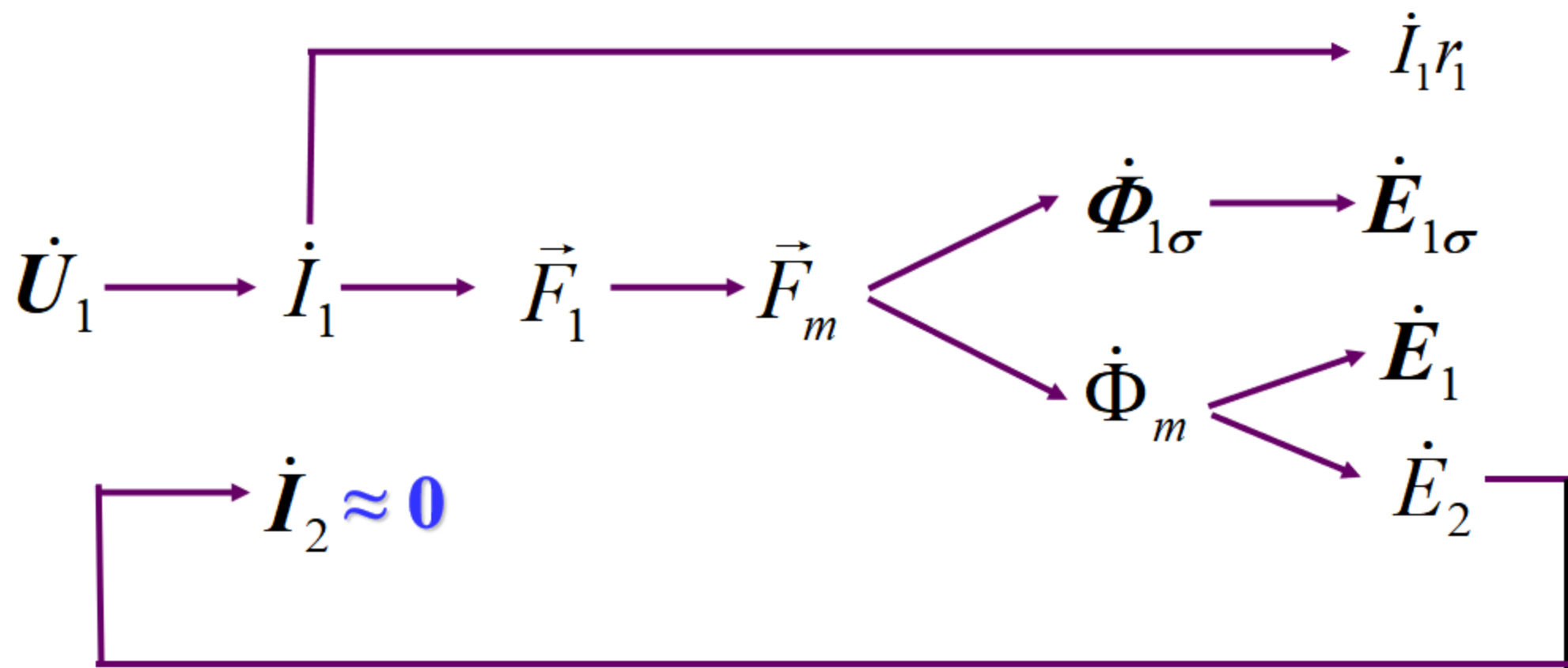


磁场旋转过程中
定子绕组不动



2. 异步电机的等效电路

空载时各物理量之间的电磁关系



2. 异步电机的等效电路

定子漏电势

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44f_1W_1k_{w1}\dot{\Phi}_{1\sigma}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1x_{1\sigma}$$

引入定子漏电抗 $x_{1\sigma}$ —反映定子绕组漏磁效应的电抗

$$x_{1\sigma} = 2\pi f_1L_{1\sigma} = 2\pi f_1W_1^2\Lambda_{1\sigma}$$

由于漏磁路的磁阻基本不变, 定子漏感和漏抗为常数。



2. 异步电机的等效电路

定子电压方程

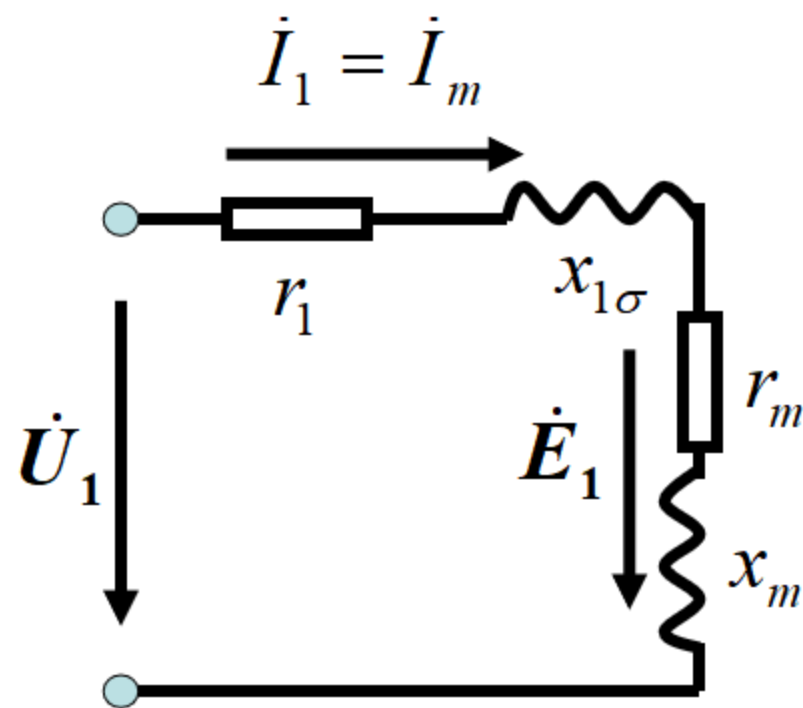
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 - \dot{E}_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

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

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

其中： $Z_{1\sigma} = r_1 + jx_{1\sigma}$ 定子漏阻抗



感应电动机的空载等效电路



2. 异步电机的等效电路

空载时的特点

因为 $|\dot{E}_1| \gg |\dot{I}_1 Z_{1\sigma}|$ ，可以认为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。对于给定的电机，当频率一定时， $U_1 \propto \Phi_m$ ，由此可见，感应电机中，若外施电压一定，主磁通幅值基本为定值。

感应电动机与变压器的比较：

- (1) 感应电动机空载电流比变压器的大；
- (2) 变压器磁场是脉振磁场，感应电机的磁场是旋转磁场。



2. 异步电机的等效电路

感应电动机负载运行时的转子频率

- 负载运行时，感应电动机的转子以转速 n 旋转，低于同步转速 n_s ，其转向与气隙磁场的转向一致。
- 旋转磁场相对于转子的转速为

$$\Delta n = n_s - n = sn_s \quad s = \frac{n_s - n}{n}$$

转子感应电动势和电流的频率 f_2

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_s - n)}{60} = \frac{p \cdot sn_s}{60} = sf_1 \quad \text{转差频率}$$



2. 异步电机的等效电路

转子旋转磁动势

转子绕组为对称交流绕组，流过对称多相电流，产生转子旋转磁势 F_2 （转速、幅值、相位和转向）

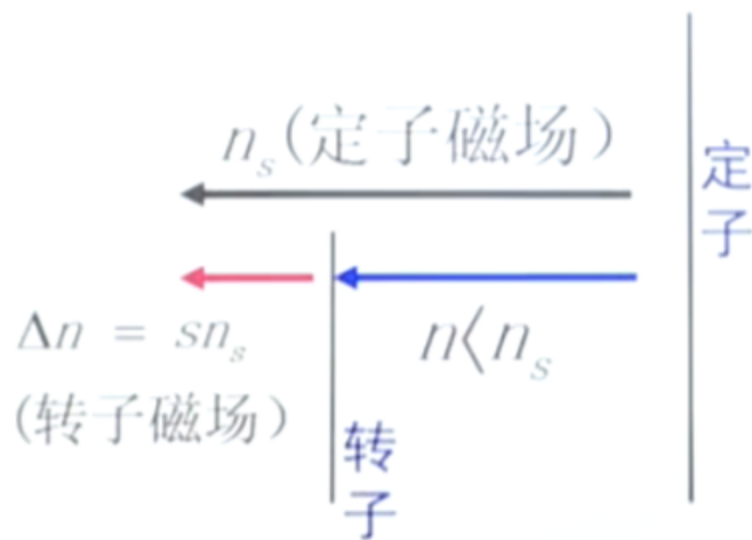
F_2 相对于转子的转速 n_2

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60sf_1}{p} = sn_s = \Delta n$$

□ 转子磁势 F_2 相对于定子的转速为

$$n_2 + n = \Delta n + n = (n_s - n) + n = n_s$$

结论：无论转子转速为多少，定、转子磁动势在空间保持相对静止。



2. 异步电机的等效电路

转子旋转磁动势的幅值

每相转子电流的有效值记作 I_{2s} ，下标s表示转子频率为转差频率。

转子基波磁动势 F_2 的幅值为
$$F_2 = \frac{m_2}{2} \times 0.9 \times \frac{W_2 k_{w2} I_{2s}}{p}$$

转子磁动势 F_2 的幅值取决于转子电流

下标2表示转子绕组相关参数，后面页面有具体介绍。

F_2 的空间相位取决于转子电势和电流的相位差 ϕ_2 ，即转子阻抗角 ϕ_2 。



2. 异步电机的等效电路

磁势平衡方程

定、转子磁动势相对静止，电机内部的磁场由定转子磁动势共同建立

$$F_0 = F_1 + F_2$$

感应电动机负载运行时，电源电压不变，与变压器一样，可认为从空载运行到负载运行，主磁通基本不变，即 $\Phi_m \approx$ 常值，因此负载时产生主磁通的合成磁动势和空载时产生主磁通的励磁磁动势基本不变。

$$F_1 = F_0 + (-F_2) = F_0 + F_{1L} \qquad F_{1L} = -F_2$$



2. 异步电机的等效电路

磁势平衡方程

$$F_0 = F_1 + F_2$$

$$F_1 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1}}{p} I_1 \quad F_0 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1}}{p} I_0 \quad F_2 = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{W_2 k_{w2}}{p} I_{2s}$$

$$\frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1}}{p} I_0 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1}}{p} I_1 + \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{W_2 k_{w2}}{p} I_{2s}$$

$$I_0 = I_1 + \frac{I_2}{k_i} \quad (\text{电流比 } k_i = \frac{m_1 W_1 k_{w1}}{m_2 W_2 k_{w2}})$$



2. 异步电机的等效电路

异步电机的极数和相数

定子极对数: p_1

转子极对数: p_2

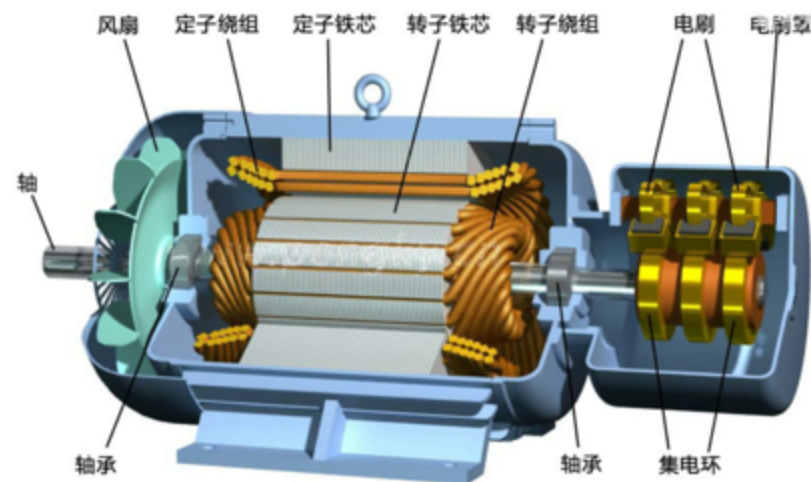
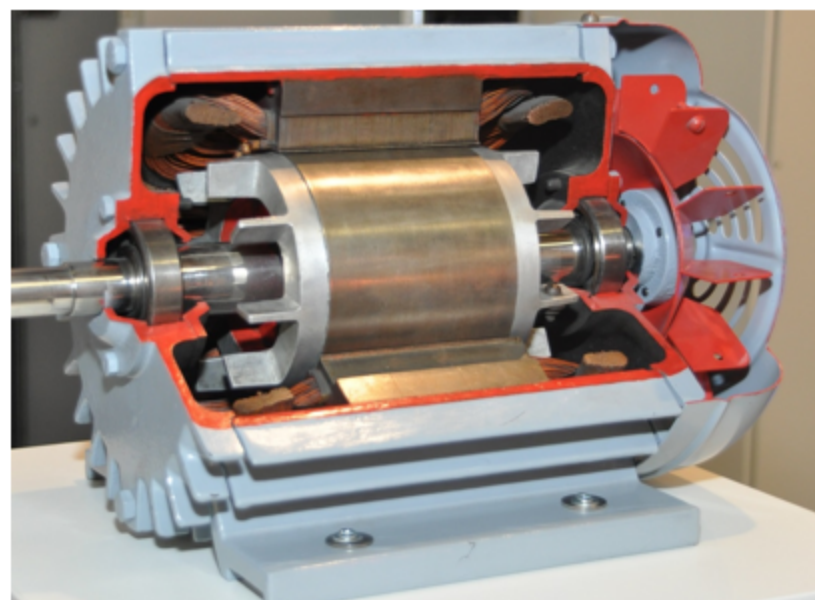
$p_2 = p_1 = p$ 是所有旋转电机产生恒

定电磁转矩、正常运行的**必要条件**。

定子相数: m_1

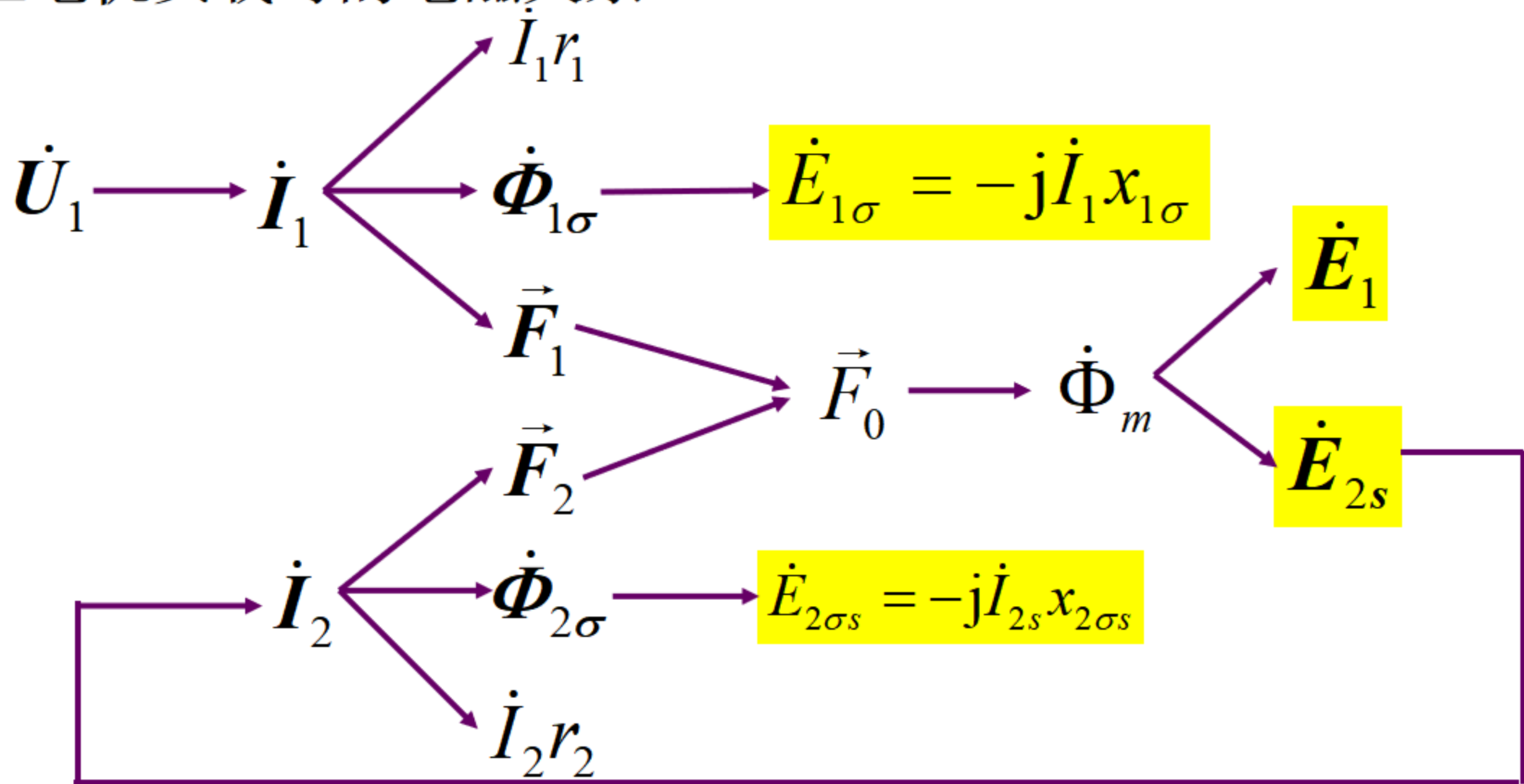
转子相数: m_2

m_1 与 m_2 可以相等, 也可以不相等



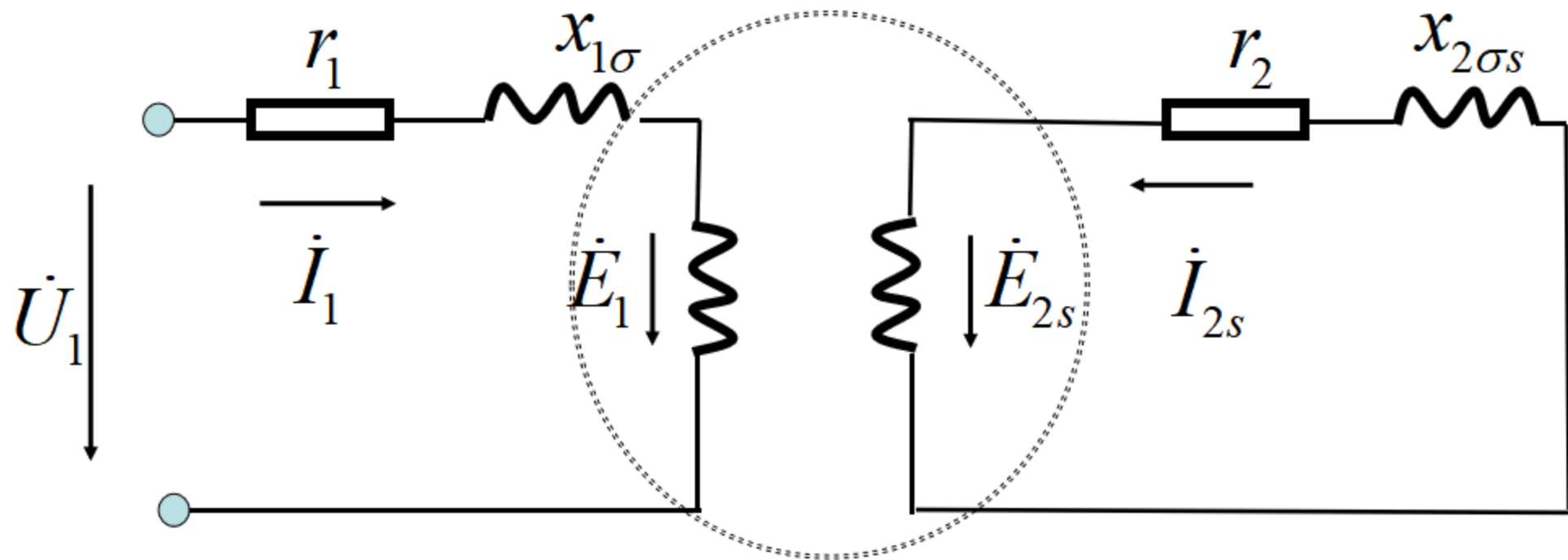
2. 异步电机的等效电路

感应电机负载时的电磁关系



2. 异步电机的等效电路

定转子耦合电路图



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_{1\sigma}) \quad \dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(r_2 + jx_{2\sigma s})$$

注意： 定子电路的频率为 f_1 ，转子电路的频率为 f_2 。



2. 异步电机的等效电路

负载时的转子电路方程

转子电路各个电量的频率为 $f_2=sf_1$

1、转子感应电动势有效值 E_{2s}

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

当转速 $n = 0 (s = 1)$ 时, f_2 最高, 且 E_{2s} 最大, 有

$$E_2 = 4.44 f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m$$

转子静止时的感应电势

$$\text{即: } E_{2s} = s E_2$$

转子转动时的感应电势

静止时, 转子感应电动势最大, 随着转子转速增加, 转子感应电动势降低。



2. 异步电机的等效电路

负载时的转子电路方程

2、转子感应漏磁电动势 $\dot{E}_{2\sigma s}$

$$\dot{E}_{2\sigma s} = -j\dot{I}_{2s} 2\pi f_2 L_{2\sigma} = -j\dot{I}_{2s} x_{2\sigma s}$$

3、转子漏感抗 $x_{2\sigma s}$

$$x_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma}$$

当转速 $n = 0 (s = 1)$ 时, f_2 最高, 且 $x_{2\sigma s}$ **最大**, 有

$$x_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_{2\sigma}$$

转子静止时的漏感抗

$$\text{即: } x_{2\sigma s} = s x_{2\sigma}$$

转子转动时的漏感抗

静止时, 转子漏电抗最大, 随着转子转速增加, 转子漏电抗降低。



2. 异步电机的等效电路

负载时的转子电路方程

4、转子电路方程

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

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



2. 异步电机的等效电路

负载时的转子电路方程

5、转子电流 \dot{I}_{2s}

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

有效值 $I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2\sigma s}^2}}$

$$= \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2\sigma})^2}}$$

$$\begin{cases} s = 0 \rightarrow I_{2s} = 0 (n = n_s) \\ s = 1 \rightarrow I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{2\sigma}^2}} = I_{2s, \max} \end{cases}$$

6、转子电路功率因数 $\cos \phi_2$

$$\cos \phi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{2\sigma s}^2}}$$
$$= \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2\sigma})^2}}$$

$$\begin{cases} s \text{ 很小时 } r_2 \gg sx_{2\sigma} \rightarrow \cos \phi_2 \approx 1 \\ s \text{ 较大时 } r_2 \ll sx_{2\sigma} \rightarrow \cos \phi_2 \propto \frac{1}{s} \end{cases}$$



2. 异步电机的等效电路

负载时的转子电路方程

$I_{2s}, \cos \phi_2$ 随 s 的变化曲线

转子绕组的感应电流

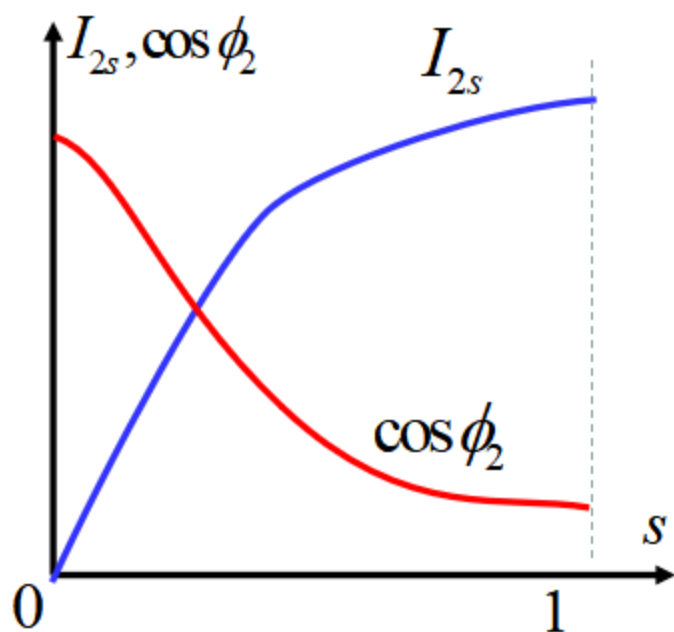
$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2\sigma s}^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2\sigma})^2}} \quad (n \uparrow \rightarrow s \downarrow \rightarrow I_{2s} \downarrow)$$

转子电路功率因数

$$\cos \phi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{2\sigma})^2}}$$

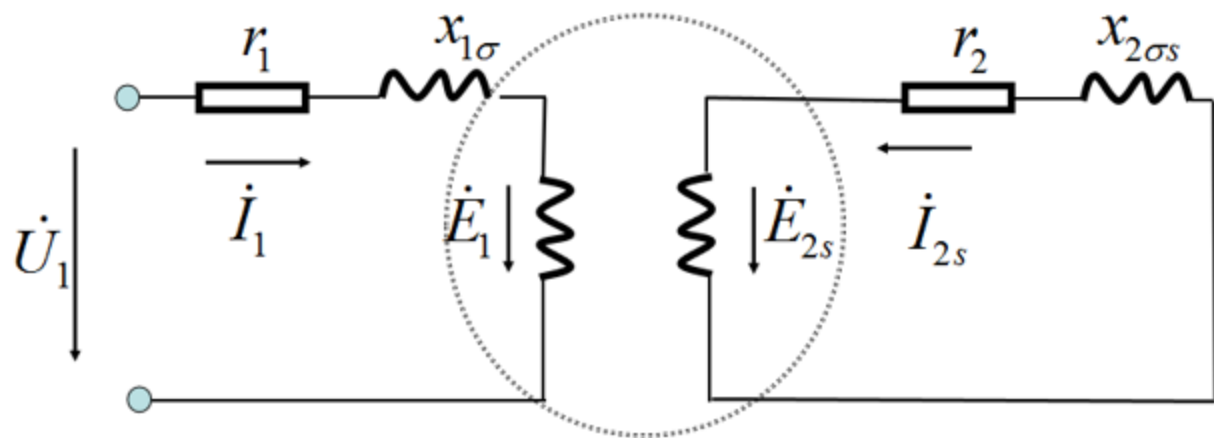
$$(n \uparrow \rightarrow s \downarrow \rightarrow \cos \phi_2 \uparrow)$$

结论：转子转动时，转子电路中的各量均与转差率有关，即与转速有关。



2. 异步电机的等效电路

归算之前的定、转子电压方程



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_{1\sigma}) \Rightarrow f_1$$

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(r_2 + jx_{2\sigma s}) \Rightarrow f_2 = s f_1$$

转子对定子的影响是通过**转子磁势**实现的。

要保证归算前后，转子磁动势不变。

而转子磁势的相位和幅值取决于**转子电流的大小和转子阻抗角**，而与转子电流的频率无关。

因此在归算前后，要保证转子**电流大小和转子阻抗角不变**

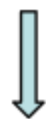


2. 异步电机的等效电路

频率归算

转子电流

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



$$\dot{I}_{2s} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_{2\sigma}}$$

分子分母同除以 s

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



$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s}r_2$$

频率

$$E_{2s} = 4.44 f_2 W_2 k_{w2} \Phi_m$$

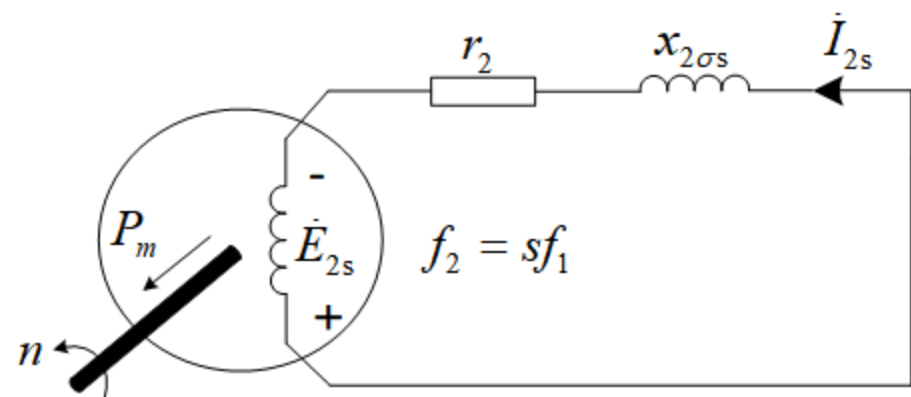
$$= \underline{4.44 s f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m} = \underline{s E_2}$$

$$x_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = \underline{2\pi s f_1 L_{2\sigma}} = \underline{s x_{2\sigma}}$$

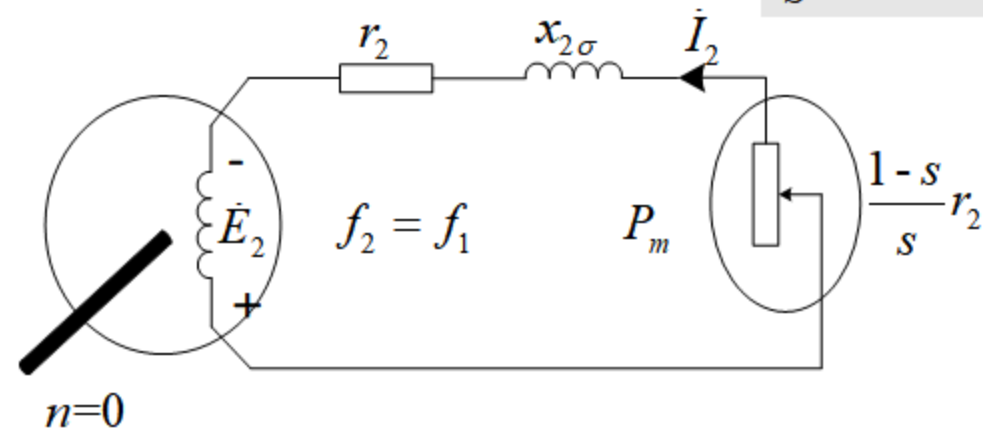
转子频率变为 f_1 

2. 异步电机的等效电路

频率归算前、后对比



(a) 转子旋转



(b) 转子静止

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} r_2$$

- 用静止的、转子电阻为 r_2/s 、频率为 f_1 的转子代替旋转的、电阻为 r_2 、频率是 f_2 的转子。
- 变换前后转子电流有效值和转子阻抗角不变。 $\varphi_2 = \arctan \frac{x_{2\sigma s}}{r_2} = \arctan \frac{x_{2\sigma}}{r_2/s}$
- 则转子磁动势的大小、转速和空间位置不变，对定子的影响不变。
- 定子侧的所有物理量以及定、转子之间的功率传递情况不变。



2. 异步电机的等效电路

频率归算后转子电阻

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} r_2$$

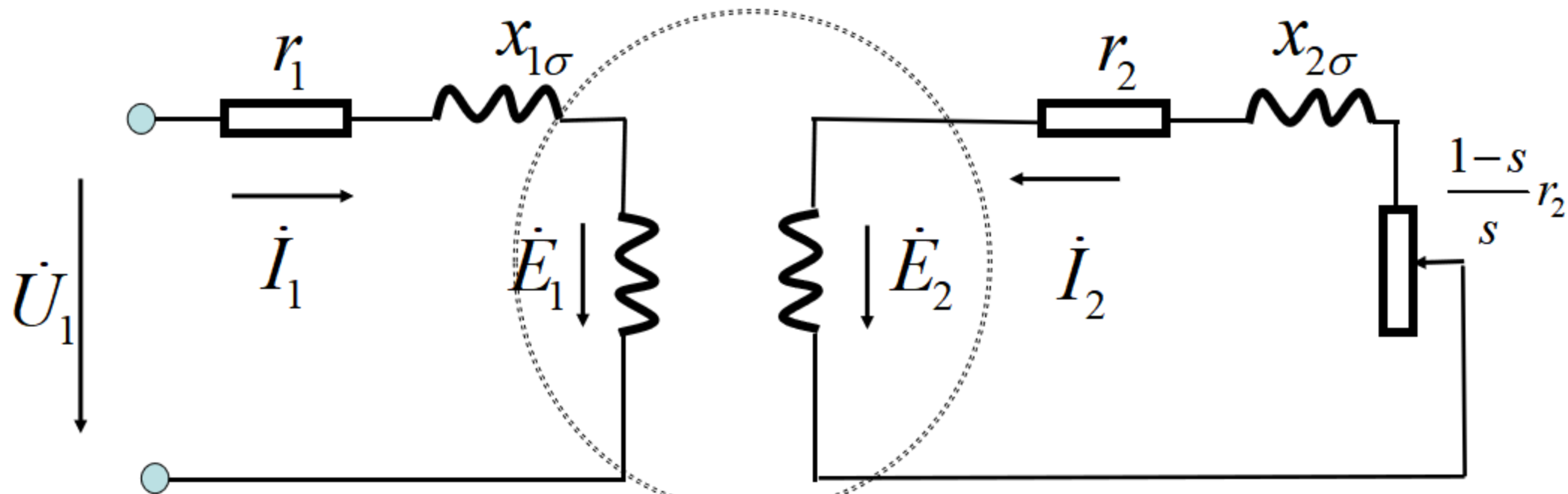
- 等号右边的**第一项**为转子本身的**电阻**，其上消耗的功率为转子铜耗；
- 等号右边的**第二项**为与转子旋转时的机械功率对应的电阻，其上消耗的功率等于转子旋转时的**总机械功率**。

进行频率归算有两方面的意义，一是使定、转子频率相等；二是推出了代表机械功率的等效电阻。



2. 异步电机的等效电路

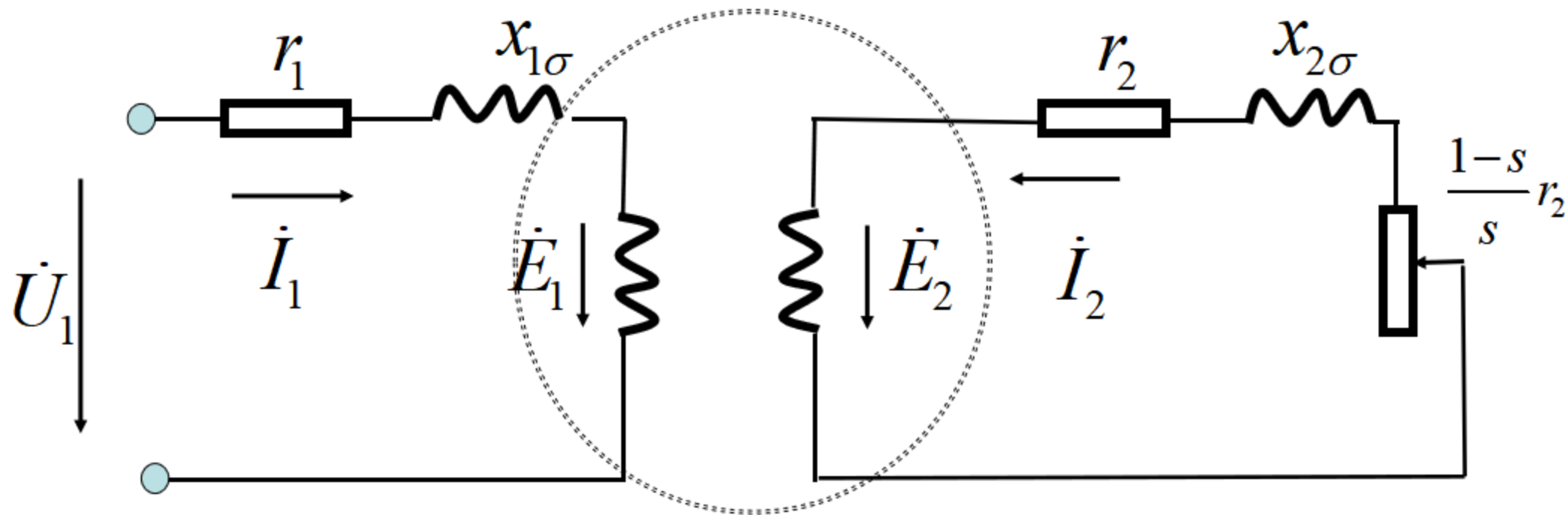
频率归算后的小结



- 静止的等效转子，频率与定子电路一样；
- 转子回路多了一个附加电阻，其上电功率表示机械功率；

2. 异步电机的等效电路

频率归算后的定转子电路图



问题：由于定、转子绕组不相同，定、转子感应电势大小不等。

2. 异步电机的等效电路

目的：获得等效电路

方法：在转子对定子影响不变的原则下，用与定子绕组的匝数、相数和绕组因数相同的等效转子绕组代替实际转子绕组。

归算后转子方的各物理量均加“'”以示区别：

$$m'_2 = m_1 \quad W'_2 = W_1 \quad k'_{w2} = k_{w1}$$

问题：转子电流、电势、阻抗如何归算？



2. 异步电机的等效电路

转子电流归算

依据：归算前后转子磁动势大小和空间相位不变。

$$F_2' = F_2$$

其中： $F_2 = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{W_2 k_{w2} I_2}{p}$ $F_2' = \frac{m_2'}{2} 0.9 \frac{W_2' k_{w2}' I_2'}{p} = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1} I_2'}{p}$

即： $\frac{m_1}{2} 0.9 \frac{W_1 k_{w1} I_2'}{p} = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{W_2 k_{w2} I_2}{p}$

$I_2' = \frac{m_2 W_2 k_{w2}}{m_1 W_1 k_{w1}} I_2 = \frac{I_2}{k_i}$ 电流变比 $k_i = \frac{m_1 W_1 k_{w1}}{m_2 W_2 k_{w2}}$

转子电流归算方法：转子电流除以电流变比 k_i

$$I_2' = \frac{I_2}{k_i}$$



2. 异步电机的等效电路

转子电势归算

依据：主磁通不变

$$E'_2 = 4.44 f_1 W'_2 k'_{w2} \Phi_m = 4.44 f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m = E_1$$

$$= \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}} 4.44 f_1 W_2 k_{w2} \Phi_m = k_e E_2$$

$$\text{电势变比 } k_e = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}}$$

转子电势归算方法：乘以电势变比 k_e

$$\dot{E}'_2 = k_e \dot{E}_2$$



2. 异步电机的等效电路

转子阻抗归算

依据：绕组归算前后转子上消耗的有功功率和无功功率应保持不变

有功：
$$m_2' I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s}$$

转子电阻的归算值
$$r_2' = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 r_2 = k_e k_i r_2$$

无功：
$$m_2' I_2'^2 x_{2\sigma}' = m_1 I_2'^2 x_{2\sigma}' = m_2 I_2^2 x_{2\sigma}$$

转子漏抗的归算值
$$x_{2\sigma}' = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 x_{2\sigma} = k_e k_i x_{2\sigma}$$

转子漏阻抗： 乘以电流变比和电势变比的乘积 $k_e k_i$



2. 异步电机的等效电路

转子电势归算

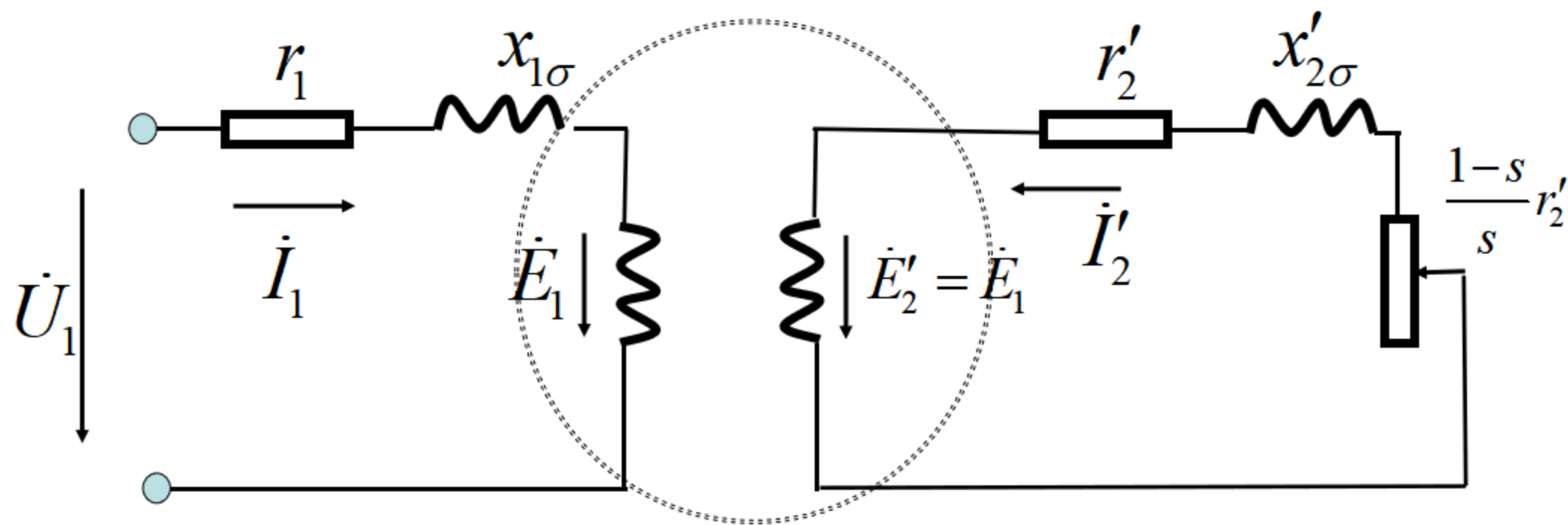
小结

- 转子电流：除以电流变比 k_i 。
- 转子电势：乘以电势变比 k_e 。
- 转子漏阻抗：乘以电流变比和电势变比的乘积 $k_e k_i$



2. 异步电机的等效电路

转子电势归算



归算结果:

- 最终采用静止转子代替旋转转子，机械输出功率用电阻损耗替代
- 采用与定子同匝数、相数的绕组替代转子绕组，磁势不变，有功无功不变；
- 与变压器结论相似



2. 异步电机的等效电路

感应电动机的基本方程

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

电压等效

$$\dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_{2\sigma}) - \dot{I}'_2 \frac{1-s}{s} r'_2 = 0$$

转子回路电压方程

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2$$

磁势平衡方程

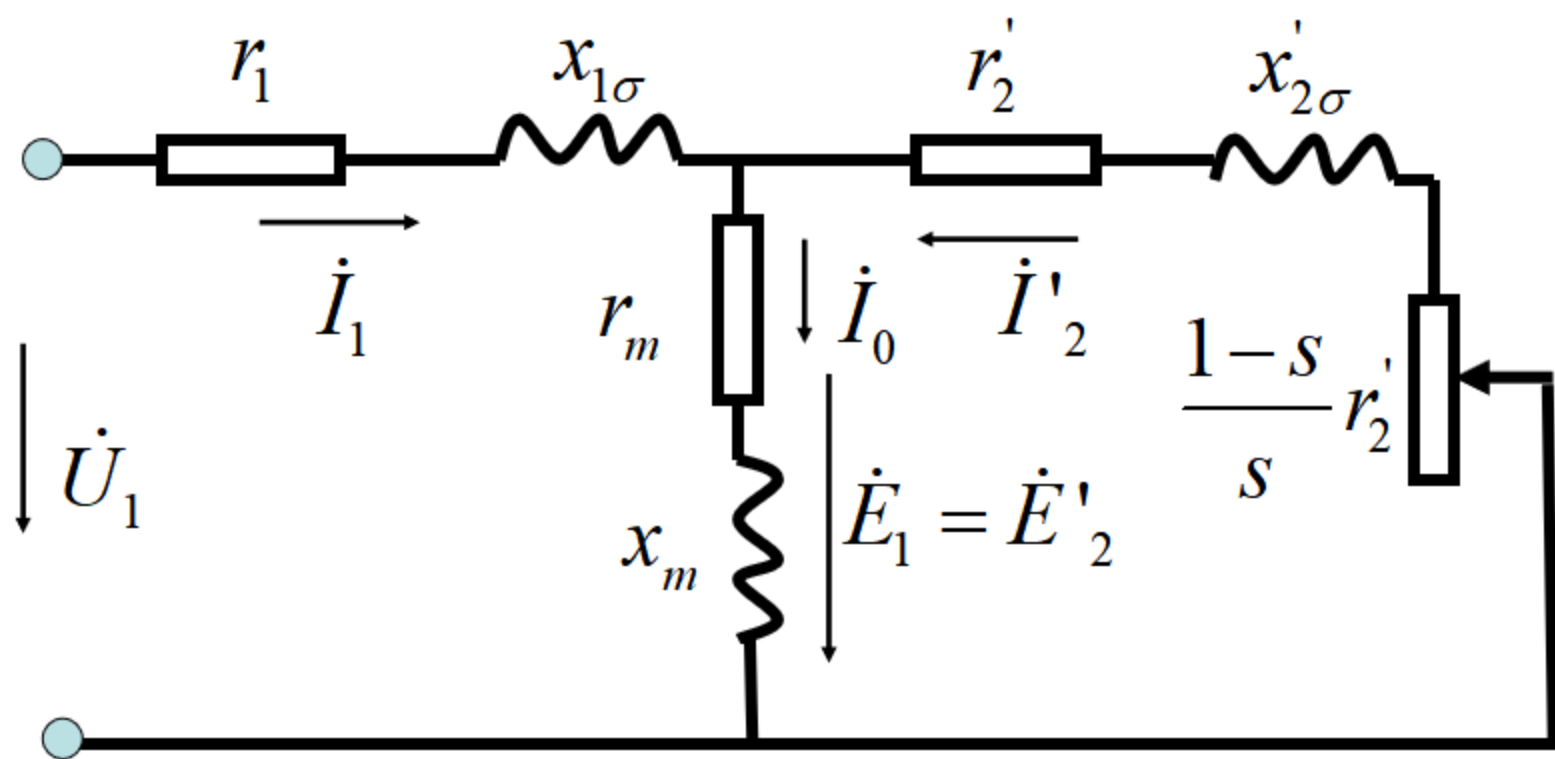
$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (r_m + jx_m)$$

励磁支路阻抗特性



2. 异步电机的等效电路

感应电动机的T型等效电路



感应电机与变压器的不同点

- 负载性质不同
- 励磁电抗和漏抗数值不同

理解等效电路各个参数的物理意义。



2. 异步电机的等效电路

用等效电路分析典型运行情况

空载: $n \approx n_s, s \approx 0, r_2' / s \rightarrow \infty$ 空载时转子近似开路;

□ 定子电流主要是激磁电流, 定子功率因数很低。

□ 定子漏阻抗压降很小, 因此 U_1 近似等于 E_1 。

起动: $n=0, s=1$, 附加电阻为0 (类似变压器副边短路), 只有漏阻抗

定转子电流都很大

额定运行: 转差率 s 很小, 转子侧阻抗基本呈阻性, 转子功率因数很高。
转子电流基本为有功分量, 相应的电机定子的功率因数也比较高。



小结

- **重点掌握**异步运行下转子感应电势、电流频率。转子磁势与定制磁势关系；
- 感应电机的等效电路，电压方程式和相量图，掌握电路中各个参数意义；
- 学会分析感应电机与变压器等效电路的异同；
- 学会分析不同工作状态下的电路（起动、空载、额定）；



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

本节PPT“**2. 异步电机的等效电路 3. 异步电机的功率传输关系**”，参考刘慧娟教授在机械工业出版社网站上提供的第四章课件。

[1] 刘慧娟主编，电机学[M]，北京：机械工业出版社，2021.

