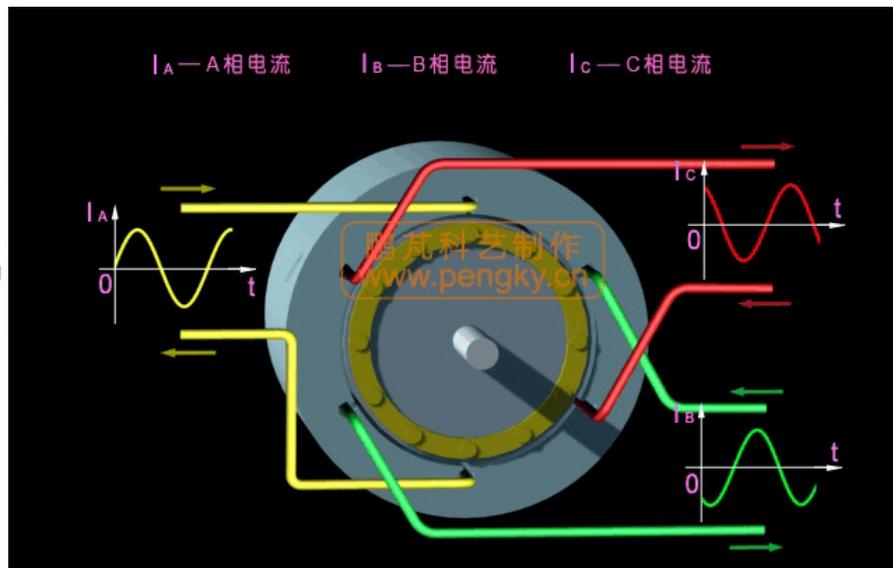
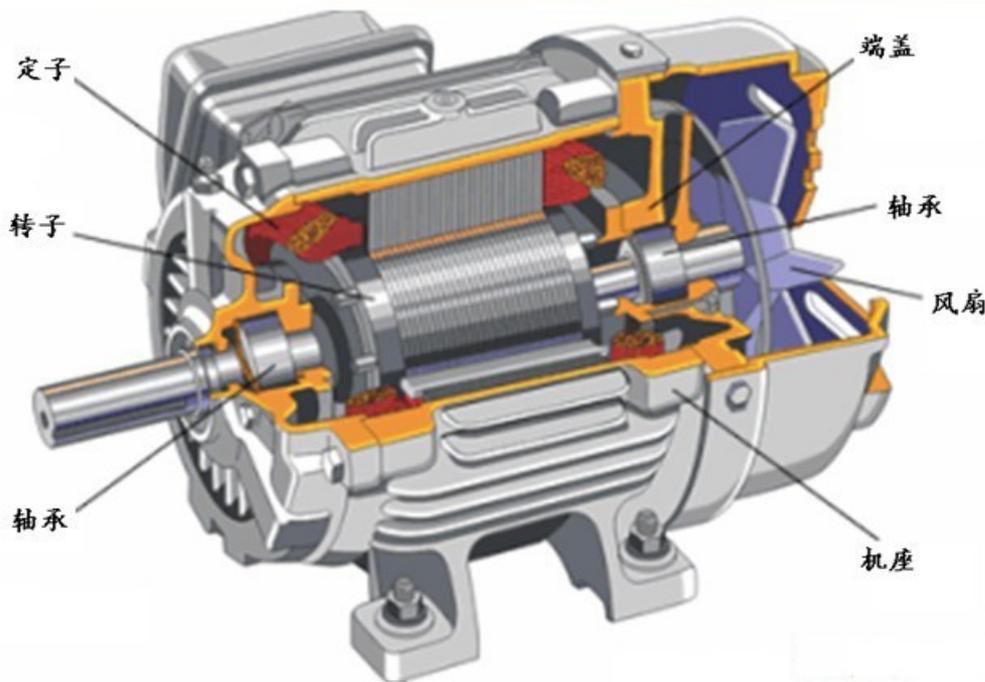




第7章 异步电动机原理

Chapter 7 Induction Machine Principle





- 一. 异步电机结构、额定数据与工作原理
- 二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系
- 三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系
- 四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系
- 五. 三相异步电动机的功率与转矩
- 六. 三相异步电动机的机械特性
- 七. 三相异步电动机的工作特性及其测试方法
- 八. 三相异步电动机参数的测定



- 一. **异步电机结构、额定数据与工作原理**
- 二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系
- 三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系
- 四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系
- 五. 三相异步电动机的功率与转矩
- 六. 三相异步电动机的机械特性
- 七. 三相异步电动机的工作特性及其测试方法
- 八. 三相异步电动机参数的测定



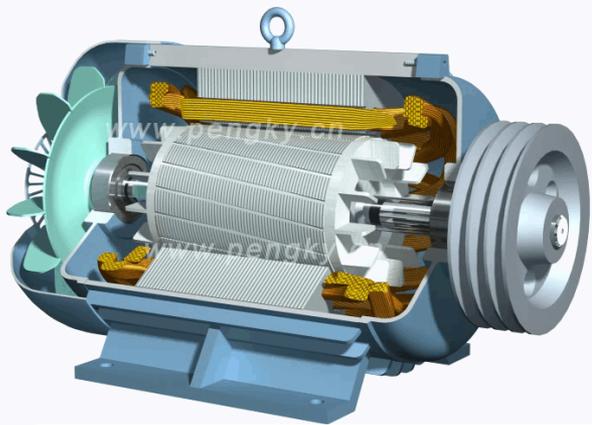
一. 异步电机结构、额定数据与工作原理

本节学习要点：

- ① 了解异步电动机的分类和主要结构部件
- ② 熟悉异步电动机的铭牌数据
- ③ 掌握异步电动机的工作原理

什么异步电机？

异步电机（**感应电机**）是**交流电机**中的一种。它的**定子**接**交流电源**，依靠**定、转子间的电磁感应**作用，在**转子内感应电流**以实现**机电能量转换**。感应电机一般用作**电动机**。三相感应电动机在工业中应用极广，单相感应电动机则多用于家用电器。



- ◆ **主要优点：** 结构简单、容易制造、价格低廉、运行可靠、效率较高。
- ◆ **主要缺点：** 运行时必须从电网**吸收滞后无功功率**，因而**功率因数恒为滞后**；调速性能不及直流电机。

1、异步电动机的分类

电源
相数

单相异步电动机

单相电源供电，家用电器

两相异步电动机

三相异步电动机

三相电源供电，工业用

转子
结构
形式

绕线式

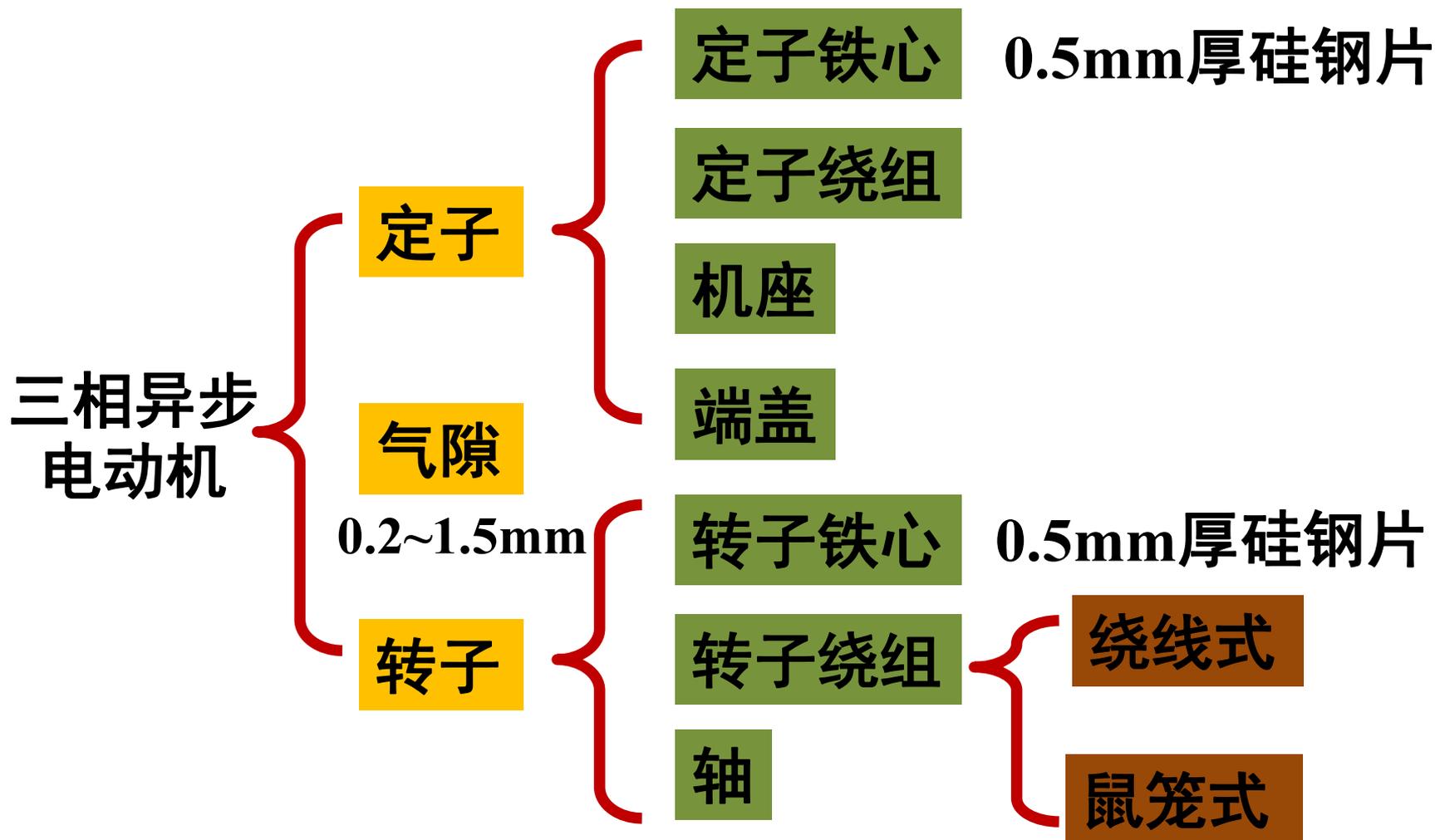
启动、制动、调速性能较好

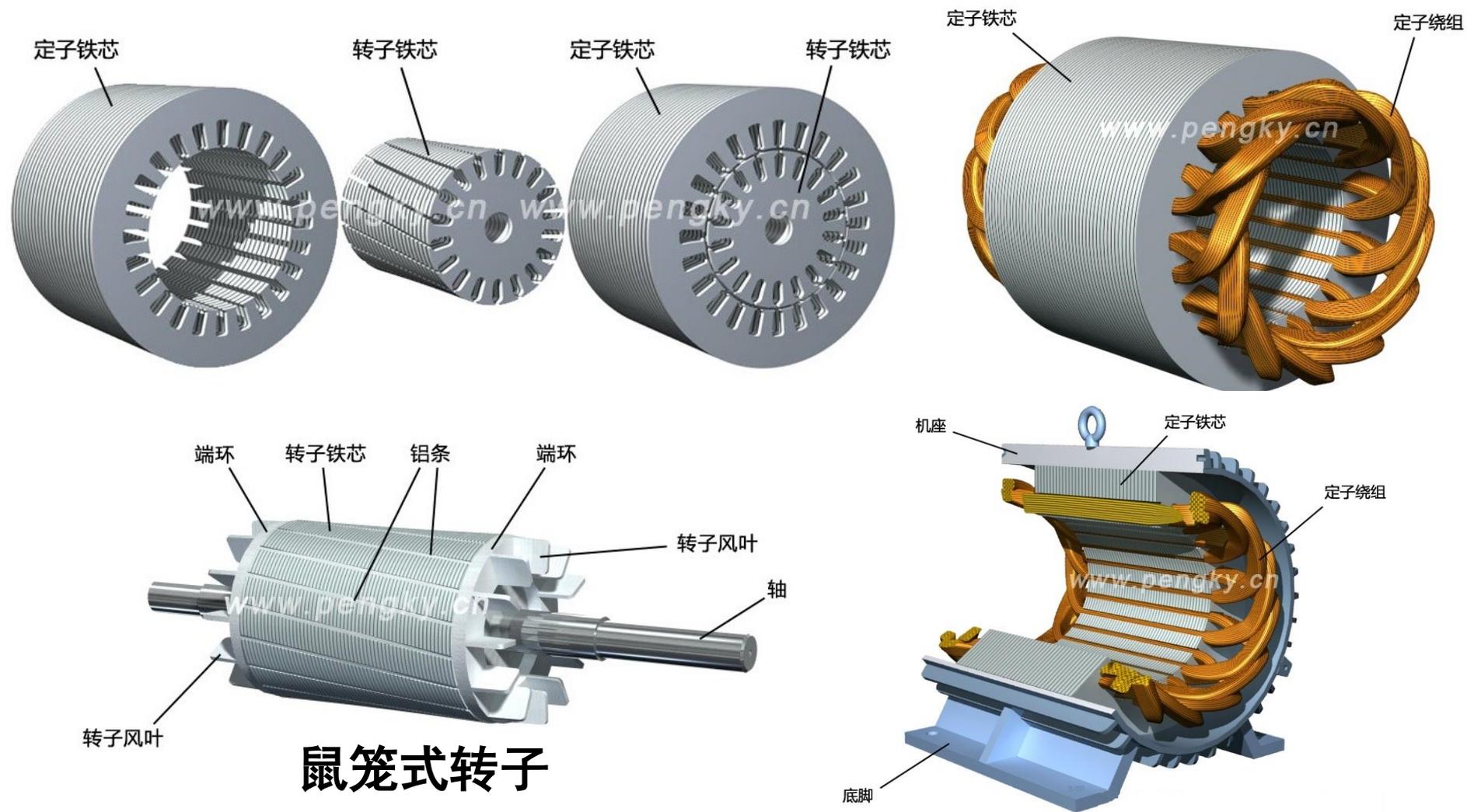
鼠笼式

结构简单，制造成本低

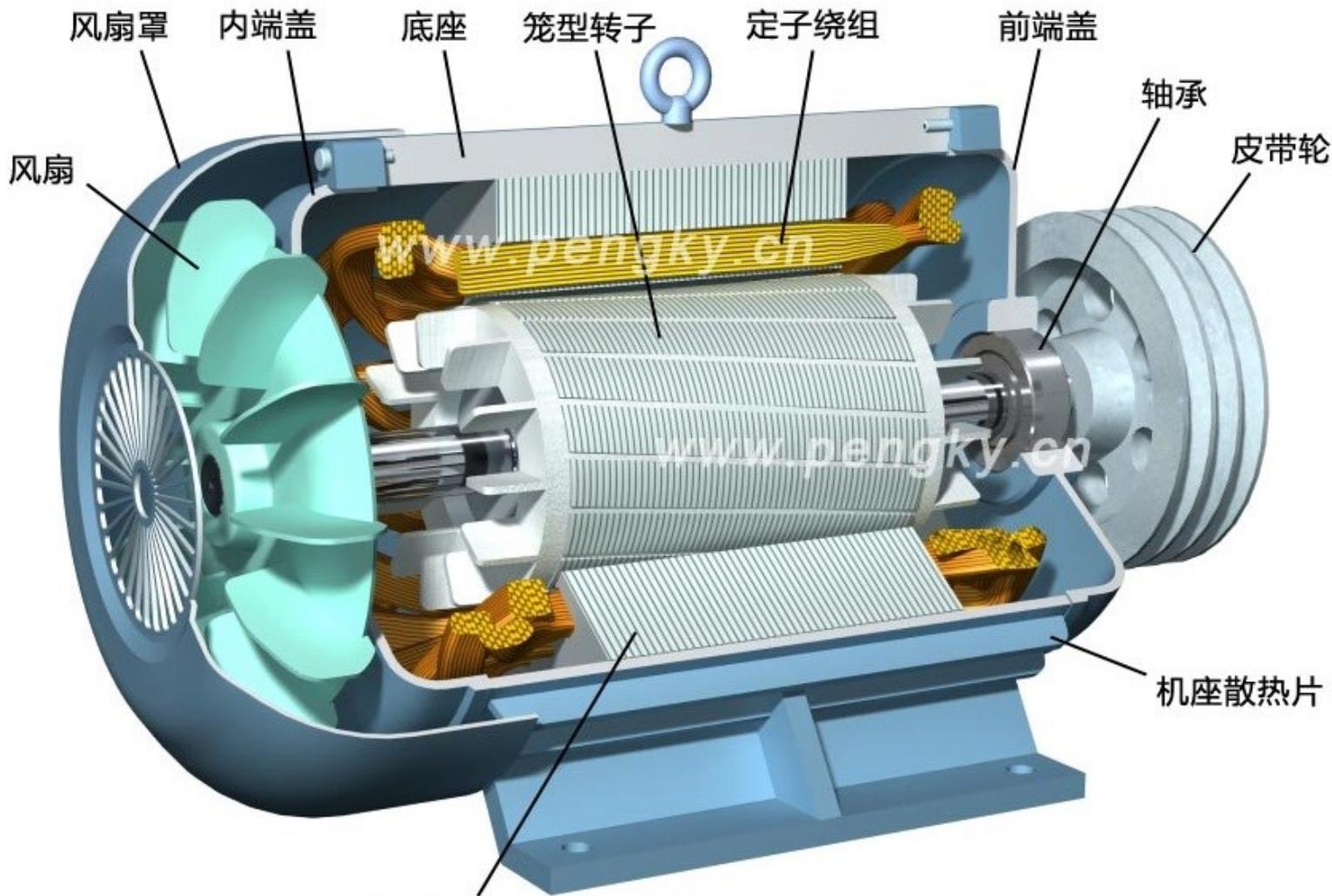
此外，可以按**有无换向器**分类，和按电机**定子绕组所加电压大小**分类。

2、三相异步电动机的结构



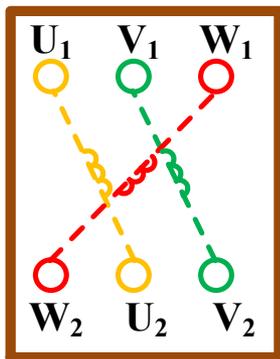
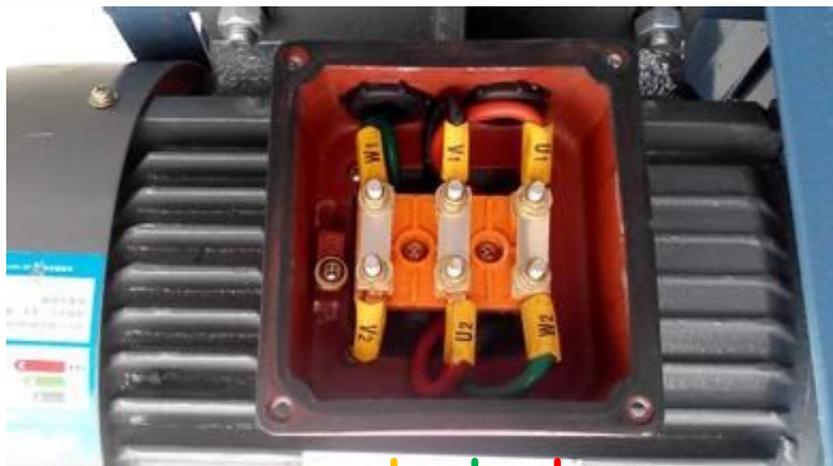


数据来源: www.pengky.cn

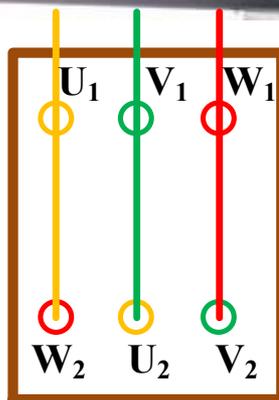


鼠笼式三相异步电机结构图

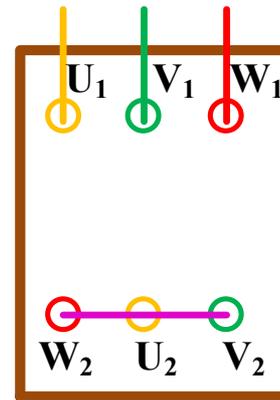
三相异步电机的接线方式（定子绕组）



定子绕组
接线盒中的布置



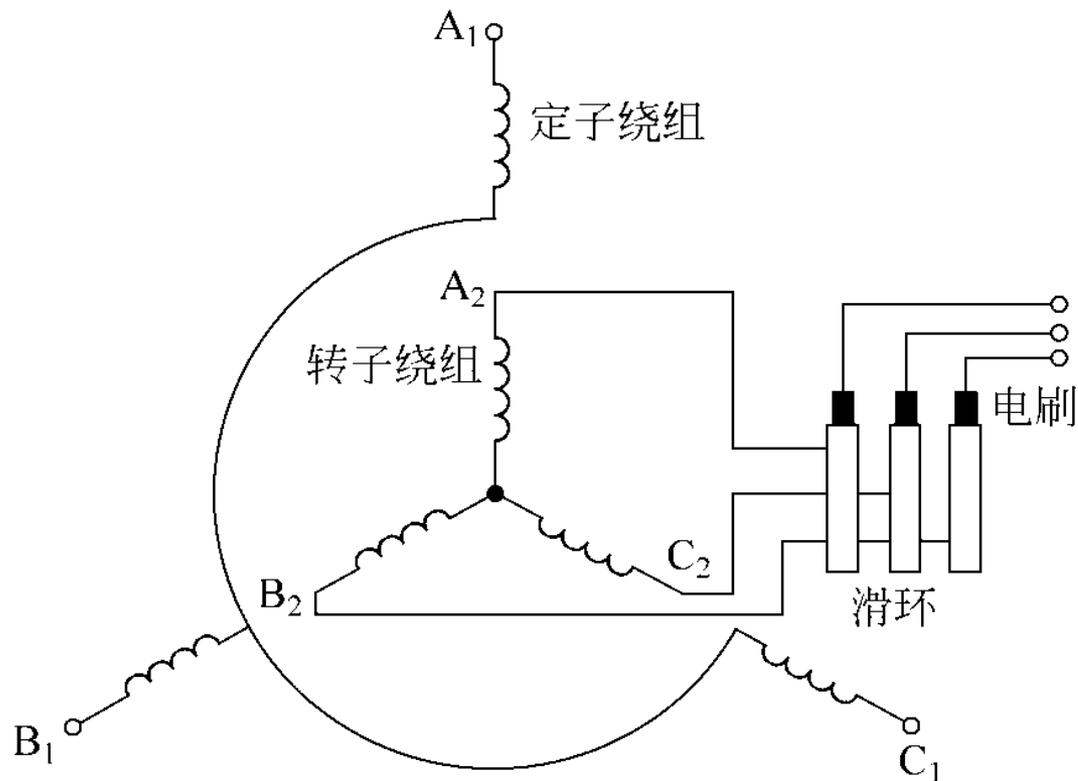
定子绕组
D(Δ)型连接



定子绕组
Y型连接

绕线式异步电动机转子绕组接线方式

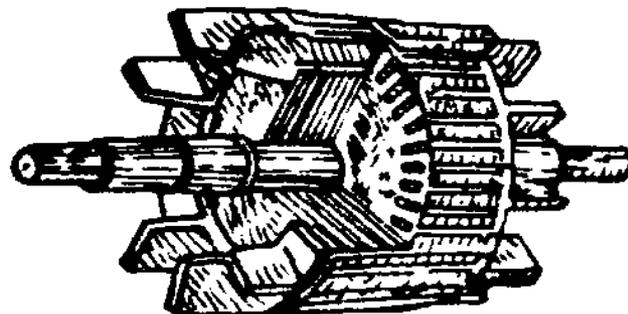
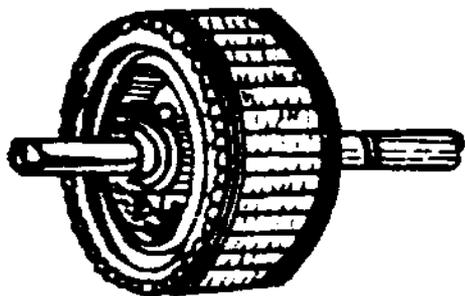
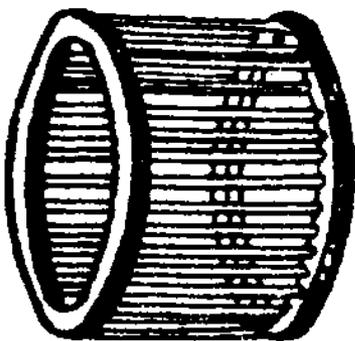
绕线式异步电动机的转子绕组：可连成D(Δ)型或Y型。



D(Δ)型：小容量电动机

Y型：中、大容量电动机

鼠笼式异步电动机转子绕组



鼠笼式绕组是一个自己短路的绕组。

铜材料绕组：先在每个槽内放一根导体，在两侧用两个端环将所有导条焊接起来，形成一个鼠笼。

铝材料绕组：将熔化的铝液直接浇铸在转子槽里，连同端环、风扇一次铸成。



3、异步电动机的结构形式

根据冷却、保护方式的不同，异步电动机有**开启式**、**防护式**、**封闭式**和**防爆式**几种。

防护式结构能在一定范围内防止水滴和铁削掉入电机，冷空气从轴向进入，冷却后从机座两旁排出。

封闭式异步电动机内部空气和机壳外部空气是隔开的，靠风扇和机壳上的散热片进行散热。

防爆式异步机是一种全封闭电机，将易燃易爆气体隔离在机壳外。



4、异步电动机的铭牌数据（额定值）

- (1) 额定功率 P_N 指电动机在额定运行时轴上输出的机械功率，单位是kW。
- (2) 额定电压 U_N 指额定状态下，定子绕组上的线电压，单位为V。
- (3) 额定电流 I_N 定子在额定电压下，轴上输出额定功率时，定子绕组中的线电流，单位为A。
- (4) 额定频率 f_1 我国规定工业用电频率是50Hz。
- (5) 额定转速 n_N 在定子加额定频率的额定电压，且轴上输出额定功率时的转速，单位为r/min。



4、异步电动机的铭牌数据（额定值）

(6) 额定功率因数 $\cos\varphi$ 指额定负载时定子边的功率因数。

(7) 绝缘等级与温升。

此外，还有工作方式、连接方法等。

对于线绕式异步电机

转子绕组额定电动势 E_{2N} 和转子额定电流 I_{2N} 。

额定输出转矩 T_{2N} 计算：

$$T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

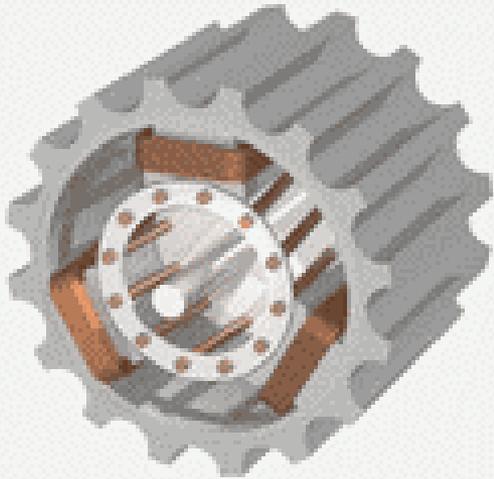


例题7-1 一台三相异步电动机的额定功率 $P_N = 4\text{kW}$ ，额定电压 $U_N = 380\text{V}$ ，额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.77$ ，额定效率 $\eta_N = 0.84$ ，额定转速 $n_N = 960\text{ r/min}$ ，求额定电流。

解：

$$\begin{aligned} \because P_N &= \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N \\ \therefore I_N &= \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.77 \times 0.84} = 9.4 \text{ (A)} \end{aligned}$$

5、异步电动机的工作原理



1、当三相感应电动机定子接三相电源时，在气隙中产生以同步速旋转的旋转磁场；

2、旋转磁场切割转子导体，在转子导体中产生感应电动势；

3、转子绕组自行闭合，转子中产生电流；

4、转子绕组在磁场中受力，产生电磁转矩，驱动转子旋转；

5、转子的转速始终小于旋转磁场的转速，两者之差称为转差。



旋转磁场

1. 在三相对称绕组中通入三相对称的电流会在气隙中形成一个**旋转磁场**。
2. 旋转磁场的**转速（同步速）**：
$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$
3. 改变通入电流的**相序**（对调任意两根电源线）就可以**改变旋转磁场的转向**，从而**改变电机的转向**。



转差率

- 1、三相感应电动机的转速恒小于磁场转速，即 $n < n_1$ ，故称为异步电机。
- 2、转差， $n_2 = n_1 - n \neq 0$ ，即转子与旋转磁场之间存在相对运动，是异步电动机稳定运行的必要条件。
- 3、转差率定义为转差与同步速之比

$$s = (n_1 - n) / n_1$$

其大小反映了电机的转速，即 $n = (1 - s) \cdot n_1$

电动机状态 $0 < n < n_1$ 即 $0 < s < 1$

额定转差率 $s_N < 5\%$



- 一. 异步电机结构、额定数据与工作原理
- 二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系**
- 三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系
- 四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系
- 五. 三相异步电动机的功率与转矩
- 六. 三相异步电动机的机械特性
- 七. 三相异步电动机的工作特性及其测试方法
- 八. 三相异步电动机参数的测定



二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系

本节学习要点：

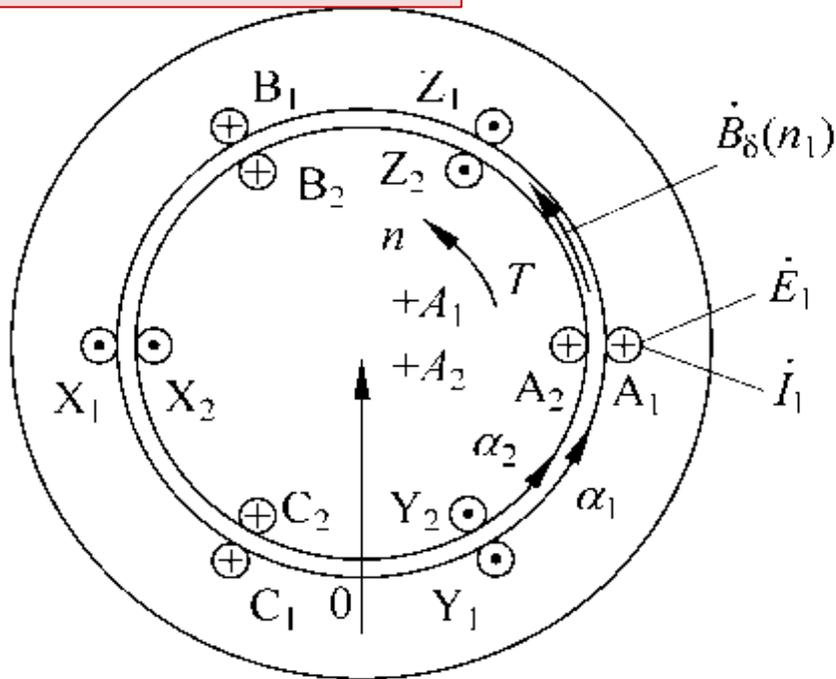
三相异步电动机转子不转、转子绕组开路（等效变压器副边开路）

① 电磁关系

② 基本方程式

- 磁通势平衡方程式
- 电动势平衡方程式
- 基本方程组

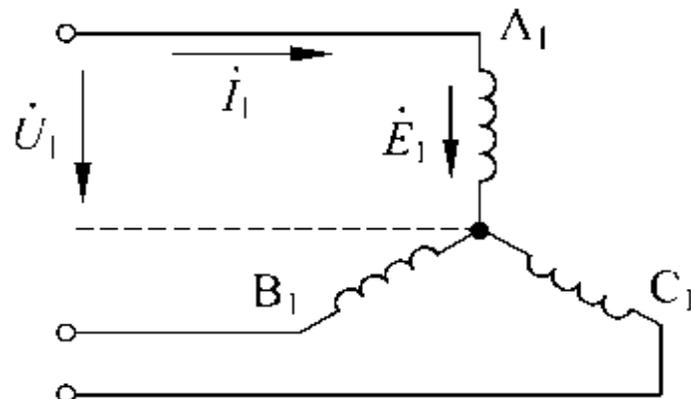
1、规定正方向



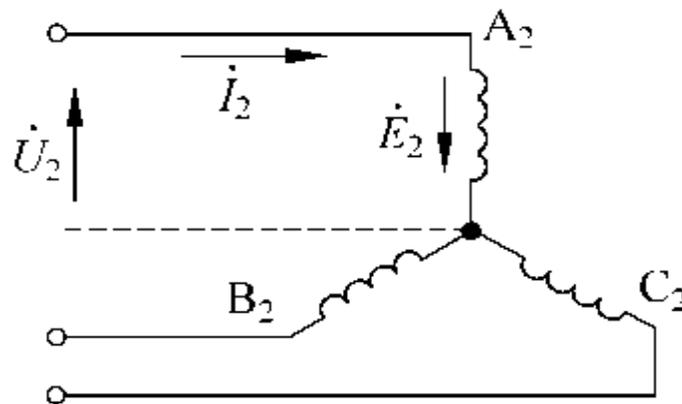
转子绕组开路

线绕式异步电动机的正方向

+A₁、+A₂ : 定子、转子空间坐标轴
磁场正方向: 从定子进入转子



定子绕组



转子绕组

2、磁通及磁通势

励磁磁通势 F_0

三相异步电动机转子**不转**、**转子**绕组开路**电磁关系**：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &\rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \dot{I}_0 R_1 \\ \dot{F}_0 &\rightarrow \begin{cases} \Phi_{s1} \rightarrow \dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 \dot{X}_1 \\ \Phi_1 \rightarrow \begin{cases} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \rightarrow \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \right\} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1)$$

相数 $m_1=3$

$$F_0 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_0$$

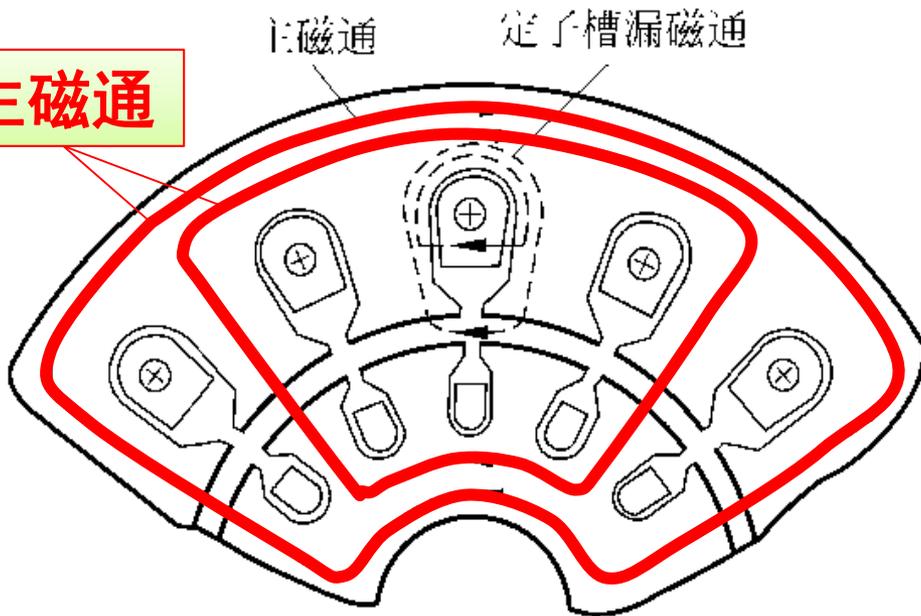
F_0 转速：

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

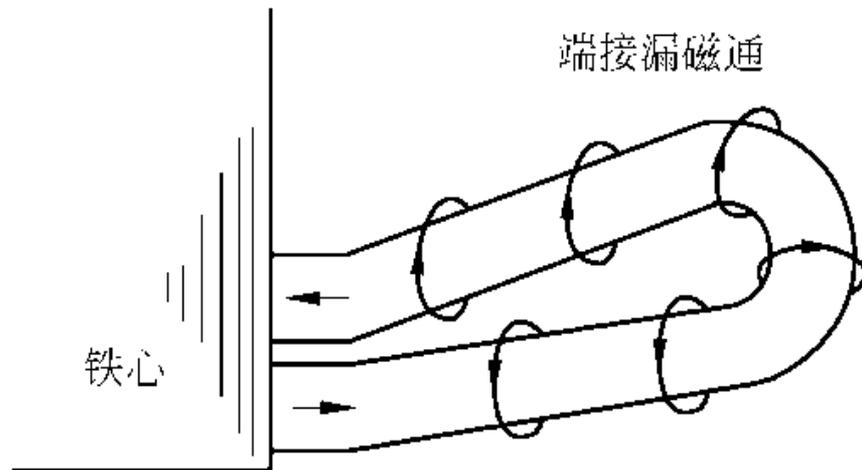
$\left\{ \begin{aligned} N_1 &\rightarrow \text{定子一相绕组串联匝数} \\ k_{dp1} &\rightarrow \text{定子绕组系数} \end{aligned} \right.$

主磁通与定子漏磁通

主磁通



(a)



(b)

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau l$$

- $\frac{2}{\pi} B_\delta \rightarrow$ 气隙平均磁密
- $\tau \rightarrow$ 定子的极距
- $l \rightarrow$ 电机轴向的有效长度

3、感应电动势

定子中的感应电动势

定子绕组系数

$$\dot{E}_1 = -j4.44f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_1$$

$$\rightarrow \dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m)$$

R_m → 励磁电阻，等效铁损耗的参数

X_m → 励磁电抗

转子中的感应电动势

转子绕组系数

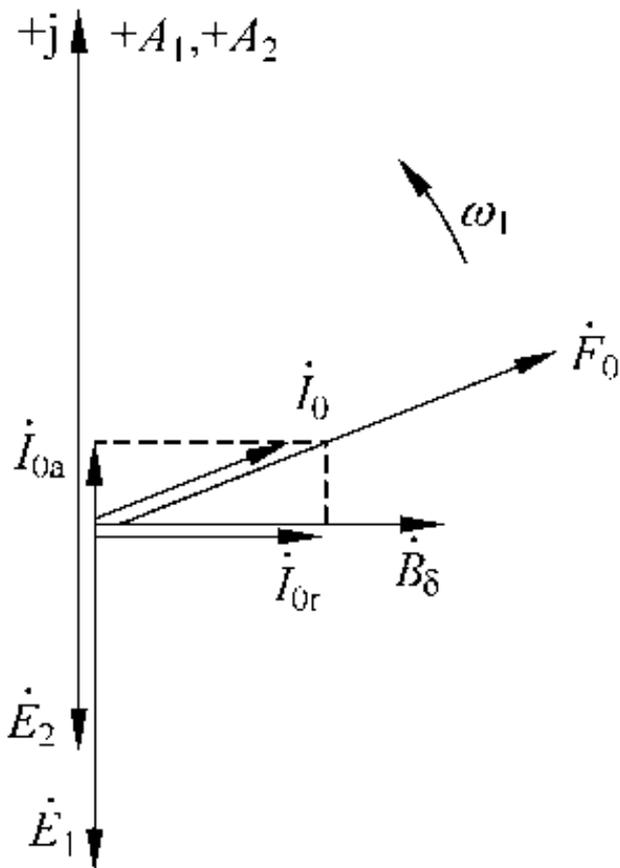
$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= -j4.44f_2 N_2 k_{dp2} \Phi_1 \\ &= -j4.44f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_1 \end{aligned} \quad f_2 = f_1$$

电压变比

$$k_e = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}} \rightarrow \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = k_e \dot{E}_2$$

电压折合

4、励磁电流 (I_0)



$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$$

- I_{0a} → 对应励磁电阻，对应铁损耗，是有功分量。
- I_{0r} → 建立磁通势，产生磁通，是无功分量。

励磁电流、磁通势与绕组电动势
时空相矢量图

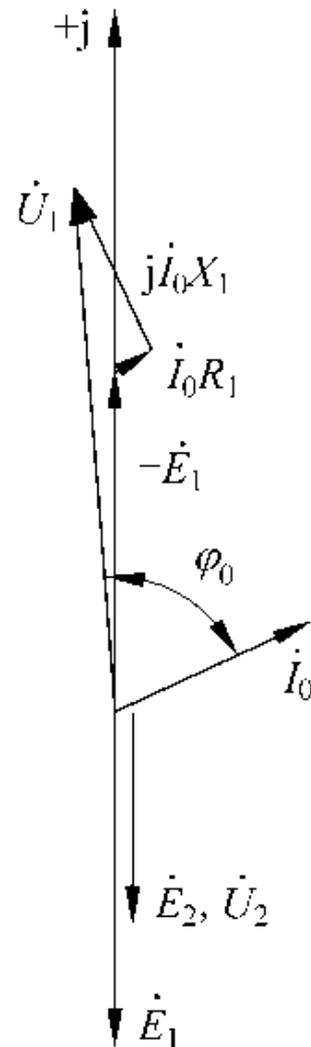
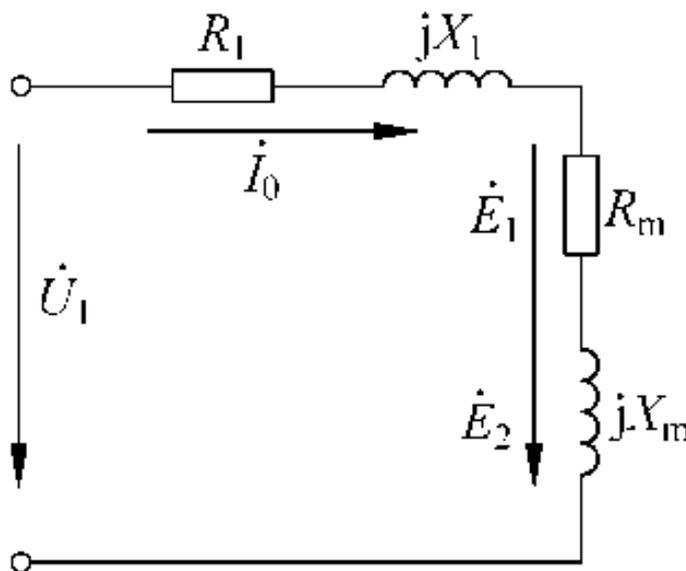
5、电压方程式

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = k_e \dot{E}_2 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m) \end{cases}$$

定子一相绕组漏阻抗 $Z_1 = R_1 + jX_1$

6、等效电路

转子绕组开路时
异步电机等效电路



转子绕组开路时
相量图



- 一. 异步电机结构、额定数据与工作原理
- 二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系
- 三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系**
- 四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系
- 五. 三相异步电动机的功率与转矩
- 六. 三相异步电动机的机械特性
- 七. 三相异步电动机的工作特性及其测试方法
- 八. 三相异步电动机参数的测定



三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系

本节学习要点：

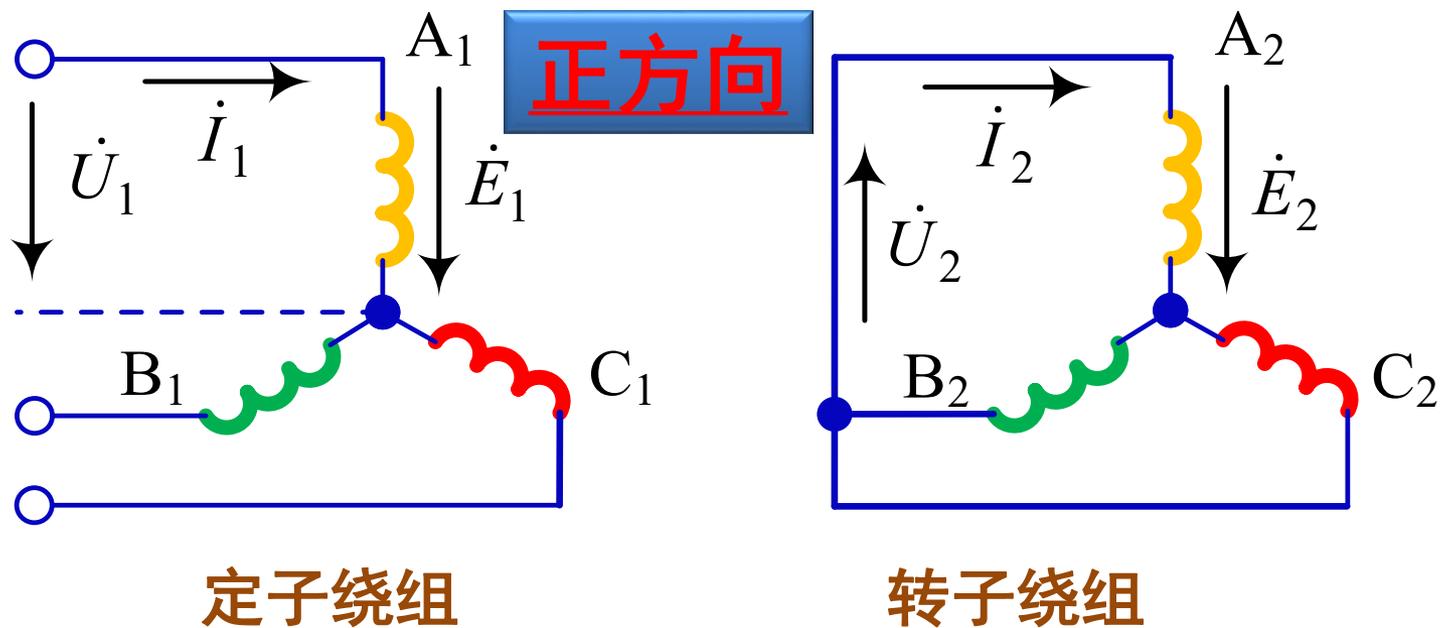
三相异步电动机转子堵转（等效变压器副边短路）

- ① 电磁关系
- ② 转子绕组折合
- ③ 基本方程式
 - 磁通势平衡方程式
 - 电动势平衡方程式
 - 基本方程组

1、磁通势与磁通

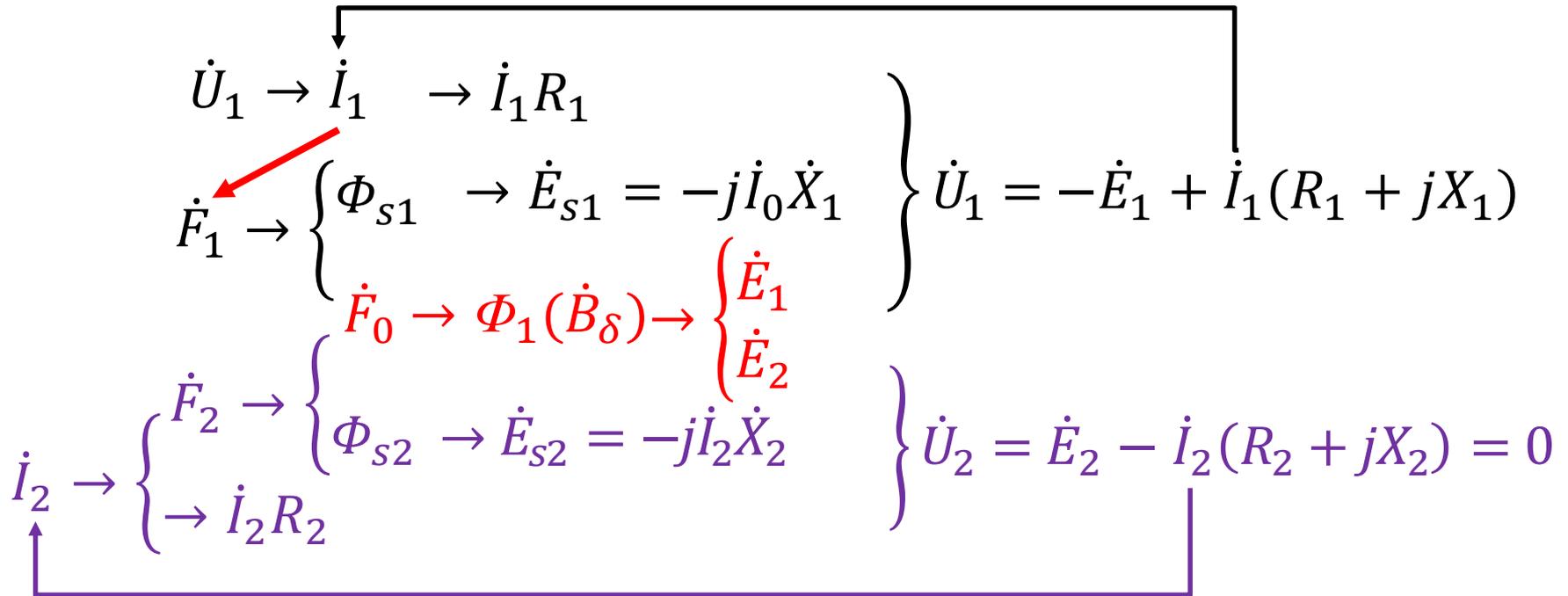
磁通势

定、转子接线图



转子短路并堵转时三相异步电动机

三相异步电动机转子堵转时的电磁关系：



转子绕组磁通势

相数 $m_2=3$

$$F_2 = \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 k_{dp2}}{p} I_2$$

F_2 转速: $n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1}{p} = n_1$

定子绕组磁通势

相数 $m_1=3$

$$F_1 = \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_1$$

F_1 转速: $n_1 = \frac{60f_1}{p}$

相对静止

磁势平衡方程式: $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \Rightarrow \Phi_1(B_\delta)$ **主磁通**



2、定、转子回路电压方程

转子一相绕组回路电压方程：

$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

转子一相绕组漏阻抗 $Z_2 = R_2 + jX_2$

定子一相绕组回路电压方程：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

定子一相绕组漏阻抗 $Z_1 = R_1 + jX_1$

定、转子磁势平衡方程式：

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

改写为

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2)$$

抵消 \dot{F}_2 的作用

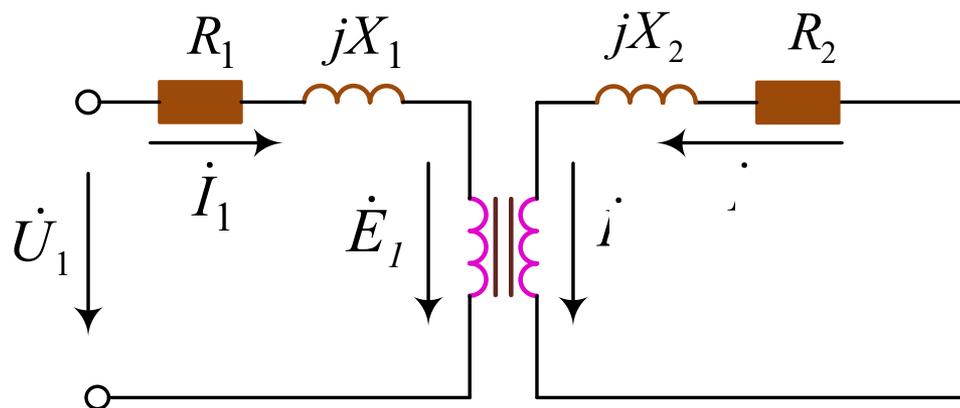
励磁的作用

例题7-2 一台三相四极50Hz的绕线式异步电动机，转子每相电阻 $R_2=0.02\Omega$ ，转子不转时每相的漏电抗 $X_2=0.08\Omega$ ，电压变比 $k_e = E_1/E_2=10$ 。当 $E_1=200V$ 时，求转子不转时的转子一相电动势 E_2 ，转子相电流 I_2 以及转子功率因数 $\cos\phi_2$ 。

解题思路：

- 1) 求 E_2 ，已知 E_1 和 k_e
- 2) 求相电流 I_2 ， $I_2 = E_2 / Z_2$
- 3) 求转子功率因数

$$\cos\phi_2 = R_2 / |Z_2|$$





解：（1）转子不转时的转子一相电动势 E_2 ：

$$E_2 = \frac{E_1}{k_e} = \frac{200}{10} = 20V$$

（2）转子相电流 I_2 ：

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 242.5 (A)$$

（3）转子功率因数 $\cos\varphi_2$ ：

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 0.243$$

3、转子绕组折合

- 磁势平衡方程式电流形式：

由磁势平衡方程式以及 F_0 、 F_1 和 F_2 表达式可得：

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_1 &= \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \dot{I}_1 \\ \dot{F}_2 &= \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 k_{dp2}}{p} \dot{I}_2 \\ \dot{F}_0 &= \frac{m_1}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \dot{I}_0 \\ \dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= \dot{F}_0 \end{aligned} \right\}$$

电流变比

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{dp1}}{m_2 N_2 k_{dp2}}$$

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

负载分量
(抵消转子磁通势)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k_i} \right) = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$$

励磁分量
(建立主磁场)



● 转子绕组的折合(折算):

转子绕组向定子绕组折合 → 把异步电机转子绕组的实际相数、匝数和绕组系数看成和定子的相数、匝数和绕组系数完全一样的办法。

电流折合 $I'_2 = \frac{I_2}{k_i}$

电压折合 $E'_2 = E_1 = k_e E_2$

折合后转子电压方程式:

$$0 = E'_2 - I'_2(R'_2 + jX'_2) \Rightarrow Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = \frac{E'_2}{I'_2} = \frac{k_e E_2}{\frac{I_2}{k_i}} = k_e k_i (R_2 + jX_2)$$

漏阻抗折合关系

$$\begin{aligned} R'_2 &= k_e k_i R_2, \\ X'_2 &= k_e k_i X_2 \end{aligned}$$

$$\varphi'_2 = \arctan \frac{X'_2}{R'_2} = \arctan \frac{k_e k_i X_2}{k_e k_i R_2} = \varphi_2$$

折合前后阻抗角 **不变**



折合前后功率守恒

电流变比 $k_i = \frac{m_1 N_1 k_{dp1}}{m_2 N_2 k_{dp2}}$

电压变比 $k_e = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}}$

$$m_1 I_2'^2 R_2' = m_1 \left(\frac{1}{k_i} I_2\right)^2 k_e k_i R_2 = m_2 (I_2)^2 R_2$$

转子有功损耗不变

$$m_1 I_2'^2 X_2' = m_1 \left(\frac{1}{k_i} I_2\right)^2 k_e k_i X_2 = m_2 (I_2)^2 X_2$$

转子无功功率不变



4、基本方程式、等效电路与相量图

● 电压平衡方程式：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = k_e \dot{E}_2 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m) \end{cases}$$

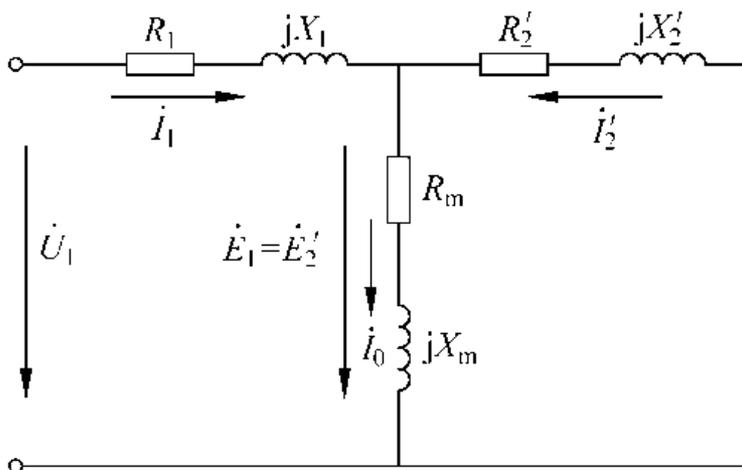
转子堵转、开路

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) = 0 \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = k_e \dot{E}_2 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \end{cases}$$

转子堵转、短路

4、基本方程式、等效电路与相量图

● 等效电路

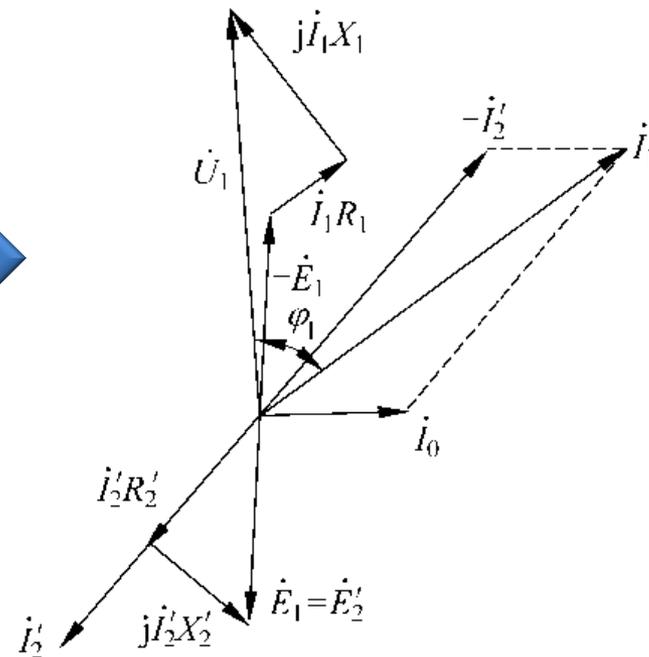


转子绕组短路且堵转的等效电路



X_1 , X_2 和 Z_m 为一相的参数，其性质、意义与变压器相似。不同的是，由于三相绕组在空间交叠，任一相的参数均由三相共同来决定。 Z_m 不是恒定的，随主磁路饱和程度的增加而减小。

● 相量图



例题7-3 一台三相绕线式异步电动机，当定子加额定电压而转子开路时，滑环上电压为260V，转子绕组为Y接，不转时转子每相漏阻抗为 $0.06+j0.2\Omega$ （设定子每相漏阻抗 $Z_1 = Z_2'$ ）。（1）定子加额定电压，求转子不转时**转子相电流**；（2）在转子串入三相对称电阻，每相阻值 0.2Ω 时，计算**转子每相电流**。

解题思路：

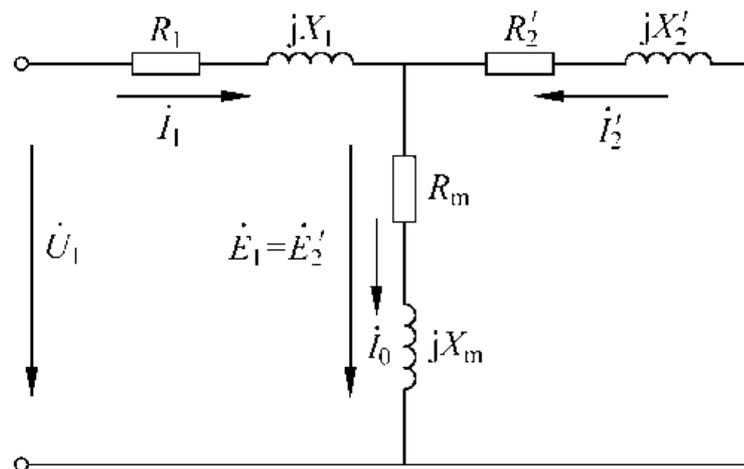
由于变比未知，只能想办法在转子侧计算。

由 $Z_1 = Z_2' \leftrightarrow Z_2 = Z_1'$

已知线电压 E_2 ，则堵转相电流

$$I_2 = \frac{E_{2\phi}}{Z_2 + Z_1'} = \frac{E_{2\phi}}{2Z_2}$$

和,
$$I_2 = \frac{E_{2\phi}}{2Z_2 + R}$$





解：（1）转子相电压：

$$E_{2\varphi} = \frac{260}{\sqrt{3}} = 150.1 \text{ V}$$

转子相电流 I_2 ：

$$I_2 = \frac{E_{2\varphi}}{Z_2 + Z'_1} = \frac{E_{2\varphi}}{2Z_2} = \frac{150.1}{\sqrt{(2 \times 0.06)^2 + (2 \times 0.2)^2}} = 359.2 \text{ (A)}$$

（2）串电阻后的转子相电流 I_2 ：

$$I_2 = \frac{E_{2\varphi}}{2Z_2 + R} = \frac{150.1}{\sqrt{(2 \times 0.06 + 0.2)^2 + (2 \times 0.2)^2}} = 293 \text{ (A)}$$



- 一. 异步电机结构、额定数据与工作原理
- 二. 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系
- 三. 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系
- 四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系**
- 五. 三相异步电动机的功率与转矩
- 六. 三相异步电动机的机械特性
- 七. 三相异步电动机的工作特性及其测试方法
- 八. 三相异步电动机参数的测定



四. 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系

本节学习要点：

- ① 转子旋转是对各物理量的影响及电磁关系
- ② 频率折合及转子绕组折合
- ③ 基本方程组及等效电路
- ④ 鼠笼型转子的绕组数据



1、转差率

- 1、三相感应电动机的转速恒小于磁场转速，即 $n < n_1$ ，故称为异步电机。
- 2、转差， $n_2 = n_1 - n \neq 0$ ，即转子与旋转磁场之间存在相对运动，是异步电动机稳定运行的必要条件。
- 3、转差率定义为转差与同步速之比
 - 当两者同转向时，转差率为 $s = (n_1 - n) / n_1$
 - 当两者反转向时，转差率为 $s = (n_1 + n) / n_1$

电动机状态 $0 < n < n_1$ 即 $0 < s < 1$

额定转差率 $s_N < 5\%$



2、定、转子磁通势及磁通势关系

● 电磁关系：

$$\begin{array}{l}
 \dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_1 \rightarrow \dot{I}_1 R_1 \\
 \dot{F}_1 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{s1} \rightarrow \dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 \dot{X}_1 \\ \dot{F}_0 \rightarrow \Phi_1(\dot{B}_\delta) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_{2s} \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 \dot{F}_2 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{s2} \rightarrow \dot{E}_{s2} = -j\dot{I}_{2s} \dot{X}_{2s} \\ \rightarrow \dot{I}_{2s} R_2 \end{array} \right.
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \right\} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) \\ \left. \right\} \dot{U}_2 = \dot{E}_{2s} - \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{2s}) = 0
 \end{array}$$



- 转子旋转是对各物理量的影响

气隙磁场转速: $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ (同步速)

转子转速 n : $n < n_1$

转差率

转差(切割速度): $n_2 = n_1 - n = sn_1$

转子绕组感应电动势频率(转子频率):

转差频率 $f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{psn_1}{60} = sf_1 \propto s$ 转差率

● 励磁磁通势 (F_0) :

旋转转子磁通势:
$$F_2 = \frac{m_2}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N_2 k_{dp2}}{p} I_{2s}$$

旋转转子电
流

F_2 相对于转子绕组的转速:
$$n_2 = \frac{60f_2}{p}$$

转子相对于定子的转速:
$$n$$

F_2 相对于定子绕组的转速:
$$n'_2 = n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$$

结论

定、转子磁通势 F_1 和 F_2
同转速、同转向, 相对静止。

定、转子磁通势相对静止是一切电机能正常运行的必要条件。只有这样, 才能产生恒定的平均电磁转矩。

磁通势平衡方程式：

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

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2)$$

定子、转子磁通势相对静止
可以合成

注意!

由于定、转子电流频率不同，磁通势平衡的电流形式不成立。

$$\dot{I}_1 + \frac{1}{k_i} \dot{I}_{2s} \neq \dot{I}_0$$

频率折合

$$f_2 = sf_1$$

3、转子旋转时的转子绕组中的感应电动势：

$$E_{2s} = 4.44f_2 N_2 k_{dp2} \Phi_1 = s(4.44f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_1) = sE_2$$

转子不转时绕组中的感应电动势

注意!

$$\dot{E}_{2s} \neq s\dot{E}_2$$

频率折合

$$f_2 = sf_1$$

$$f_1$$



例题7-4 一台三相异步电动机，定子绕组接到频率 $f_1 = 50\text{Hz}$ 的三相对称电源上，已知它运行在额定转速 $n_N = 960\text{r/min}$ 。求：（1）该电动机的极对数 p ；（2）额定转差率 s_N ；（3）额定转速运行时，转子电动势的频率 f_2 。

解：（1） $n_1 = 1000\text{ r/min}$ 同步转速，该电动机的极对数 p ：

$$p = \frac{60f_1}{n_1} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3$$

（2）额定转差率 s_N ：

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

（3）转子电动势的频率 f_2 ：

$$f_2 = s_N f_1 = 0.04 \times 50 = 2\text{ Hz}$$



例题7-5 假设例题7-4这台三相异步电动机实际运行时，它的转子转向、转速有下述几种情况，试分别求它们的转差率 s 。（1）转子的转向与B的转向相同，转速分别为950r/min、1000r/min、1040r/min和0。（2）转子的转向与B的转向相反，转速500r/min。

解：（1）转子的转向与B的转向相同时， $n = 950$ r/min

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

若 $n = 1000$ r/min，则 $s = 0$ 。

若 $n = 1040$ r/min，则 $s = -0.04$ 。

若 $n = 0$ r/min，则 $s = 1$ 。

（2）转子的转向与B的转向相反，转速500 r/min：

$$s = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{1000 + 500}{1000} = 1.5$$



4、转子绕组的频率折合

折合目的：

用等效**静止**的转子代替以**转速 n** 转动的转子，即将**转子实际频率 f_2** 用**定子频率 f_1** 来代替，从而建立定、转子之间**电流与电动势**的关系。

折合原则：

保持折算前后电机的**电磁本质不变**，即保持从电网的**输入电流、有功功率和无功功率不变**，传递给转子的**电磁功率**、从轴上输出的**机械功率**也不变。

实质：

保持折算前后

$$F_{2s} \equiv F_2 \quad (\text{大小、相位、转速、转向})$$



\dot{F}_{2s} 与 \dot{F}_1 相对**静止**

$$I_{2s} = I_2 \quad \varphi_{2s} = \varphi_2$$

● 转子绕组的频率折合

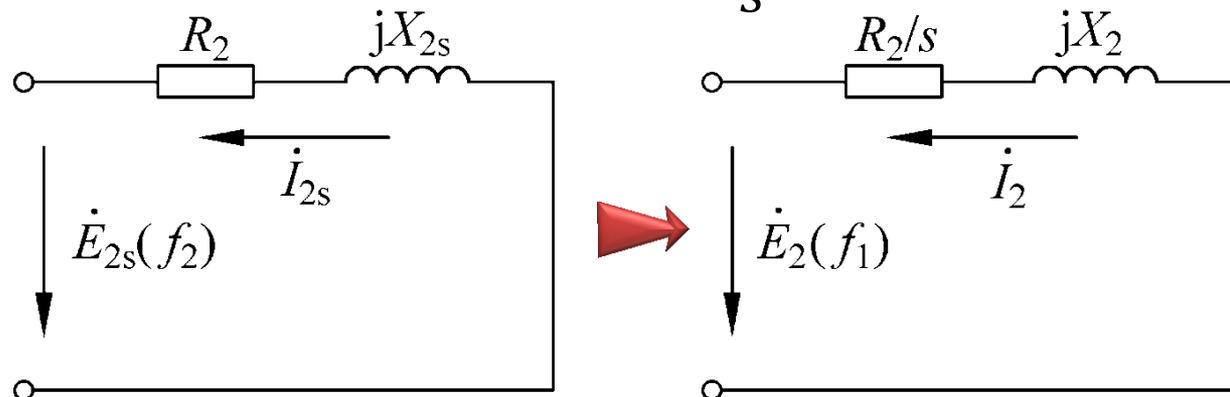
旋转转子回路的电压方程式： $\dot{E}_{2s} - \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{2s}) = 0$

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2}$$

$$= \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = I_2$$

$$\varphi_{2s} = \arctan \frac{X_{2s}}{R_2} = \arctan \frac{sX_2}{R_2} = \arctan \frac{X_2}{\frac{R_2}{s}} = \varphi_2$$

等效静止转子
 $(\frac{R_2}{s}, X_2)$



转子频率的折合

● 转子绕组的折合

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

电流折合

电流变比

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{dp1}}{m_2 N_2 k_{dp2}}$$

$$E_2' = E_1 = k_e E_2$$

电压折合

电压变比

$$k_e = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}}$$

● 折合后转子电压方程式：

$$U_2' = E_2' - I_2' \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_2' = \frac{E_2'}{I_2'} = \frac{k_e E_2}{\frac{I_2}{k_i}} = k_e k_i \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)$$

$$\Rightarrow \quad R_2' = k_e k_i R_2 \quad X_2' = k_e k_i X_2$$

● 折合前后功率守恒

$$m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} = m_1 \left(\frac{1}{k_i} I_2 \right)^2 k_e k_i \frac{R_2}{s} = m_2 (I_2)^2 \frac{R_2}{s}$$

转子有功损耗不变

$$m_1 I_2'^2 X_2' = m_1 \left(\frac{1}{k_i} I_2 \right)^2 k_e k_i X_2 = m_2 (I_2)^2 X_2$$

转子无功功率不变



例题7-6 一台三相绕线式异步电动机，当定子绕组加频率为50Hz的电压，转子绕组开路时转子绕组滑环上的电动势 E_2 为260V（已知转子绕组为Y接）。转子不转时转子一相的电阻 $R_2=0.06\Omega$ ， $X_2=0.2\Omega$ ，电动机的额定转差率 $s_N=0.04$ 。求这台电动机额定运行时转子电动势 E_{2sN} ，转子电流 I_{2sN} 的有效值及频率。

解：（1）转子电动势与电流频率：

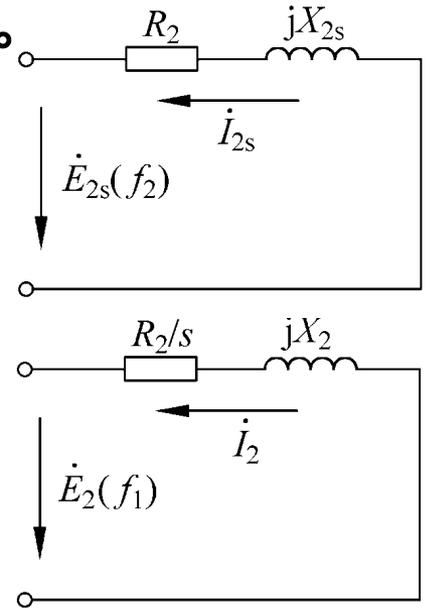
$$f_2 = s_N f_1 = 0.04 \times 50 = 2 \text{ Hz}$$

（2）转子相电动势 E_{2sN} 的有效值：

$$E_{2sN} = s_N \frac{E_2}{\sqrt{3}} = 0.04 \times \frac{260}{\sqrt{3}} = 6 \text{ (V)}$$

（3）转子电流 I_{2sN} 的有效值：

$$I_{2sN} = \frac{E_{2sN}}{Z_{2s}} = \frac{E_{2sN}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} = \frac{6}{\sqrt{0.06^2 + (0.04 \times 0.2)^2}} = 100 \text{ (A)}$$

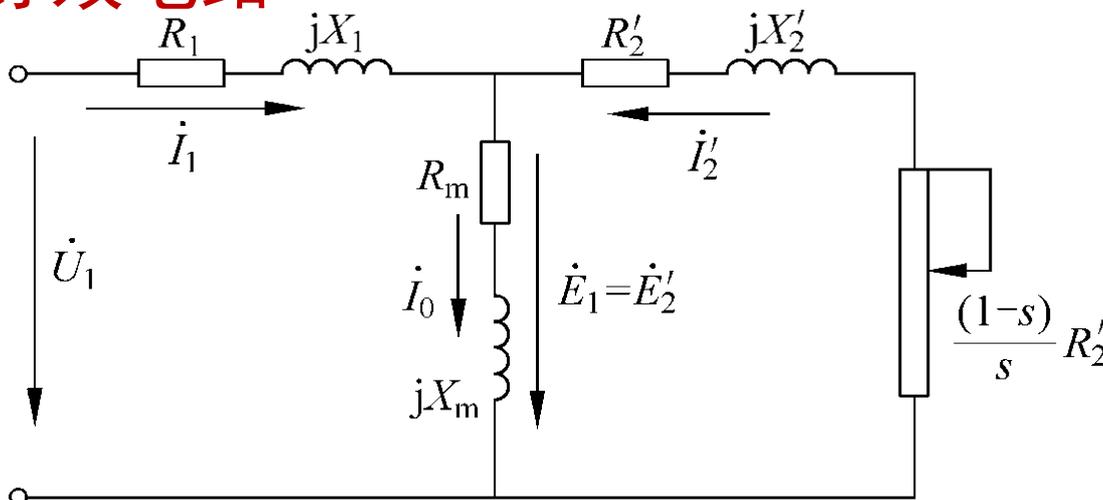


5、基本方程式、等效电路和时空相矢量图

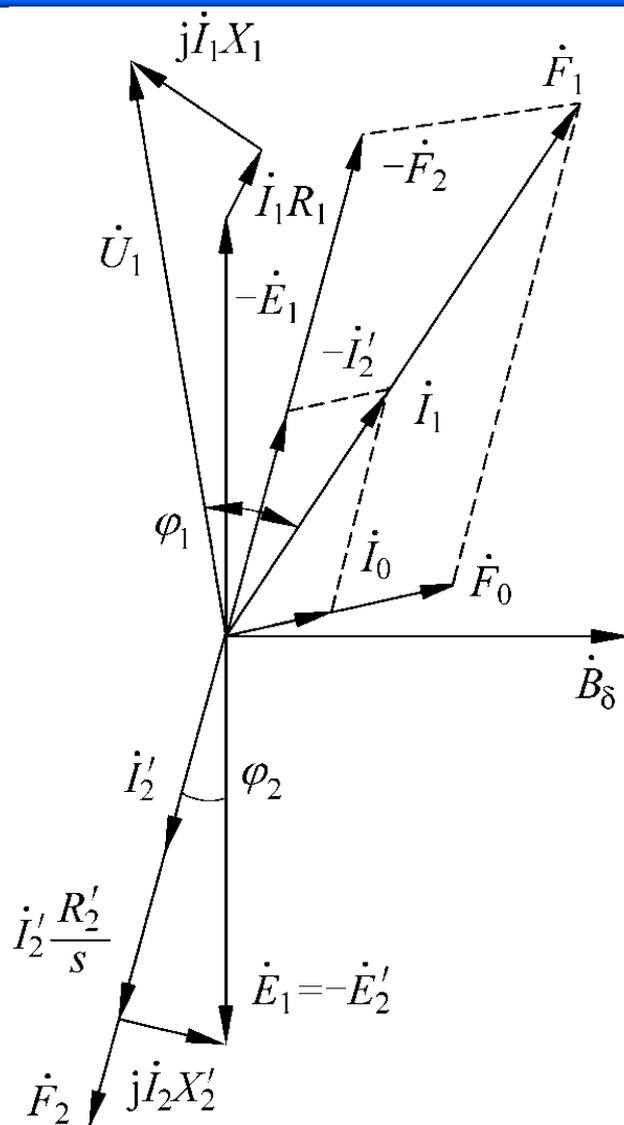
● 基本方程式

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) = 0 \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2' = k_e \dot{E}_2 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0 \end{cases}$$

● 等效电路

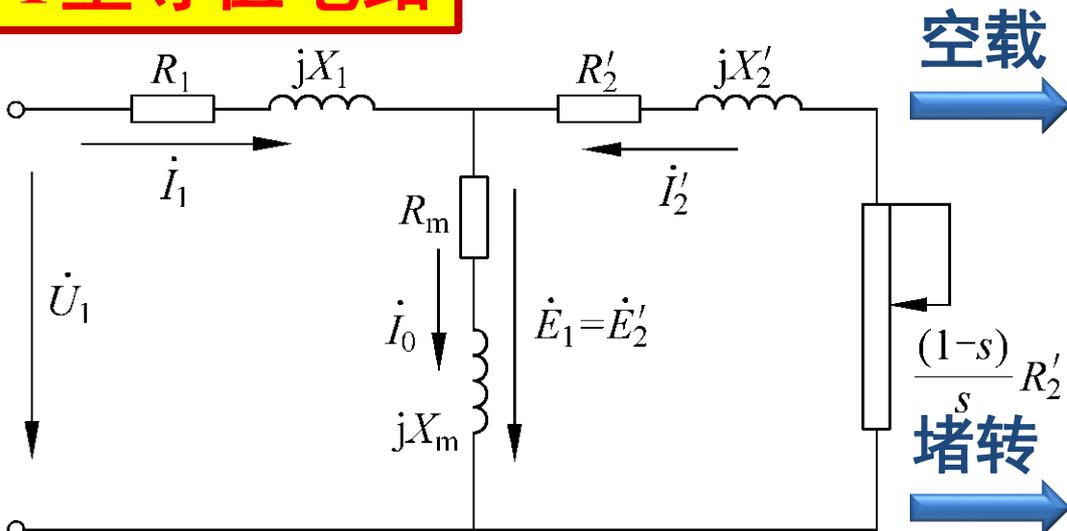


附加电阻物理意义等效静止转子附加电阻上消耗的功率表征实际转动转子的总机械功率。



三相异步电动机时空相矢量图

T型等值电路



空载

$$T_z = 0 \rightarrow P_2 = 0$$

$$n \approx n_1 \rightarrow s \approx 0 \rightarrow \frac{1-s}{s} R_2' \approx \infty$$

空载等值电路

堵转

$$n \approx 0 \rightarrow s \approx 1 \rightarrow \frac{1-s}{s} R_2' = 0$$

$$z_m \gg z_2' \rightarrow \dot{I}_m = 0$$

堵转等值电路

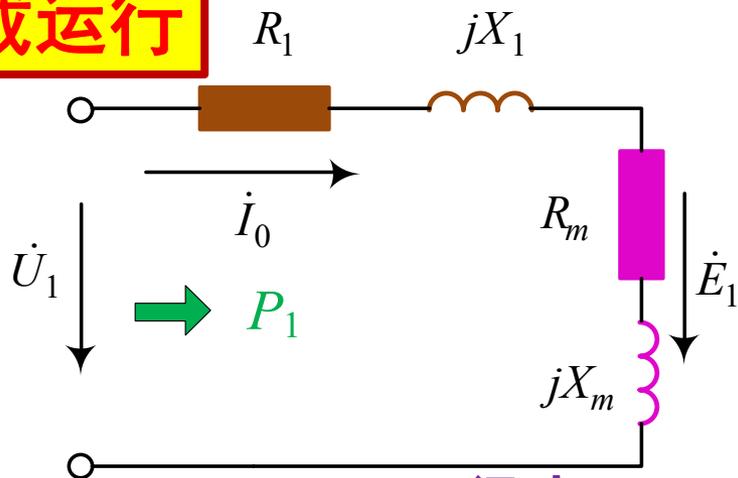
负载

$$T_z \neq 0 \rightarrow P_2 \neq 0$$

$$n < n_1 \rightarrow s_N < 0.05$$

负载等值电路

空载运行



$n \approx n_1 \rightarrow n_2 \text{ 很小} \rightarrow E_2 \text{ 很小} \rightarrow T_{em} = T_0$
 $I_2 \text{ 很小}$
 $I_1 = I_0 \approx I_m \xrightarrow{\dot{\Phi}_m} \cos \varphi_1 \text{ 很小}$

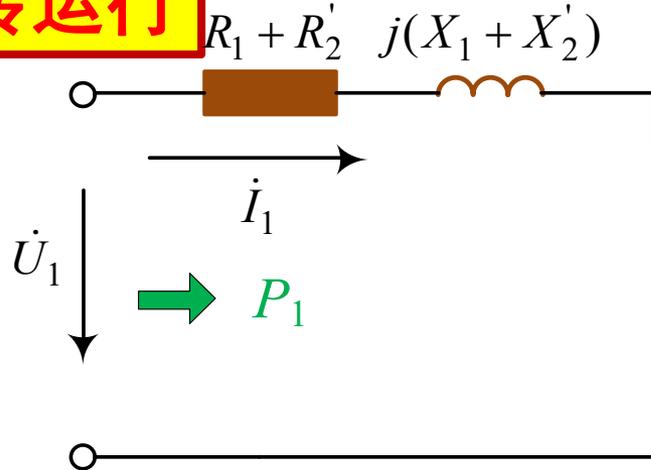
克服空载损耗

有功功率: $P_1 = m_1 U_1 I_0 \cos \varphi_1 = p_0$

无功功率: $Q_1 = m_1 U_1 I_0 \sin \varphi_1$

电网功率因数下降

堵转运行



$n \approx 0 \rightarrow s \approx 1 \rightarrow \frac{1-s}{s} R_2' = 0$
 $Z_m \gg Z_2' \rightarrow I_m = 0$

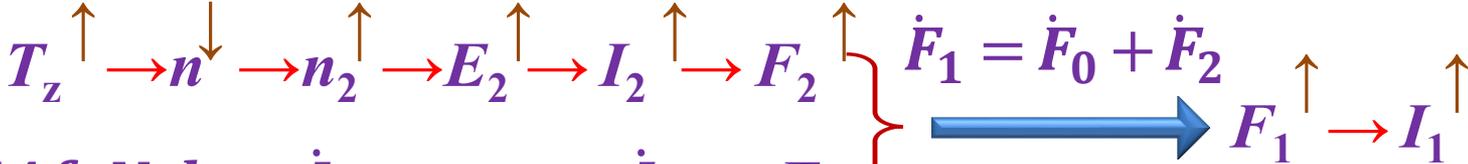
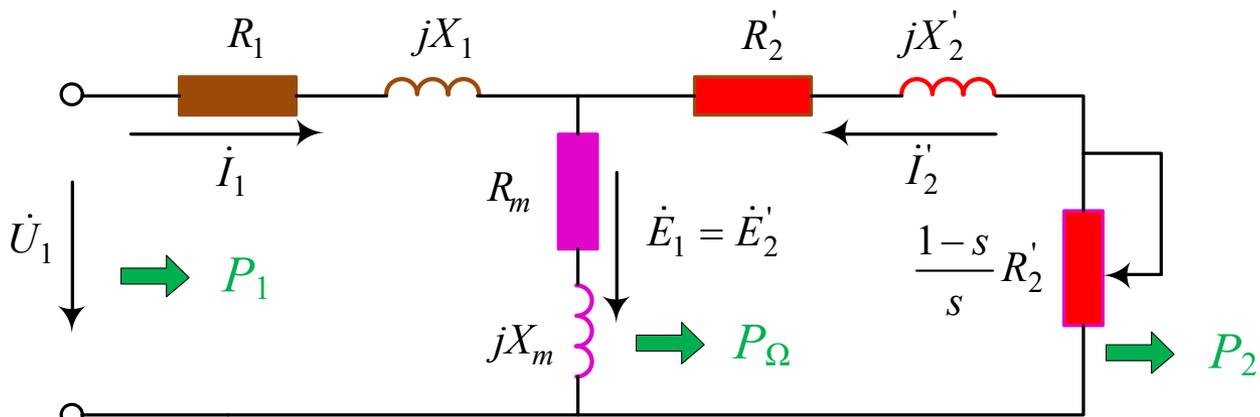
有功功率:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \\
 &= m_1 I_1^2 (R_1 + R_2')
 \end{aligned}$$

感应电动机堵转或起动



负载运行



$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 4.44f_1 N_1 k_{dp1} \dot{\Phi}_m = \text{const} \rightarrow \dot{\Phi}_m \rightarrow F_0$$

$$I_2 \uparrow \rightarrow \cos\varphi_2 \uparrow \rightarrow \cos\varphi_1 \uparrow \rightarrow P_1 \uparrow = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 \rightarrow$$

**输出机械功率 P_2
+ 内部损耗**

结论!

异步电机的定、转子是通过磁势平衡相互联系起来。
当电动机轴上负载增加时，转子电流 I_2 增大，电动机通过磁势平衡自动增大定子电流 I_1 和输入功率以满足输出功率的要求，体现了感应电机的“自跟随”作用。



6、鼠笼转子数据

1、鼠笼型转子的极数

鼠笼型转子没有固定的极数，它的极数自动保持与定子绕组极数相等，与转子导条数无关，即

$$2p_1 = 2p_2$$

2、鼠笼型转子的相数

鼠笼型转子的相数 m_2 等于一对磁极范围内鼠笼条的根数。

$$m_2 = z_2 / p_2$$

3、鼠笼型转子的匝数和绕组系数

每相串联匝数： $N_2 = 1/2$ （每相一根导体）

并联支路数： $a = 1$

绕组系数： $k_{dp2} = 1$ （不存在绕组短距和分布）



作业：7.2