



电机与拖动**课件**之五

# 异步 电机

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



# 章节目录

4.1 三相异步电动机的工作原理和结构

4.2 交流电机的绕组

4.3 交流电机绕组的感应电动势

4.4 交流电机绕组的磁动势

4.5 三相异步电动机的空载运行

4.6 三相异步电动机的负载运行

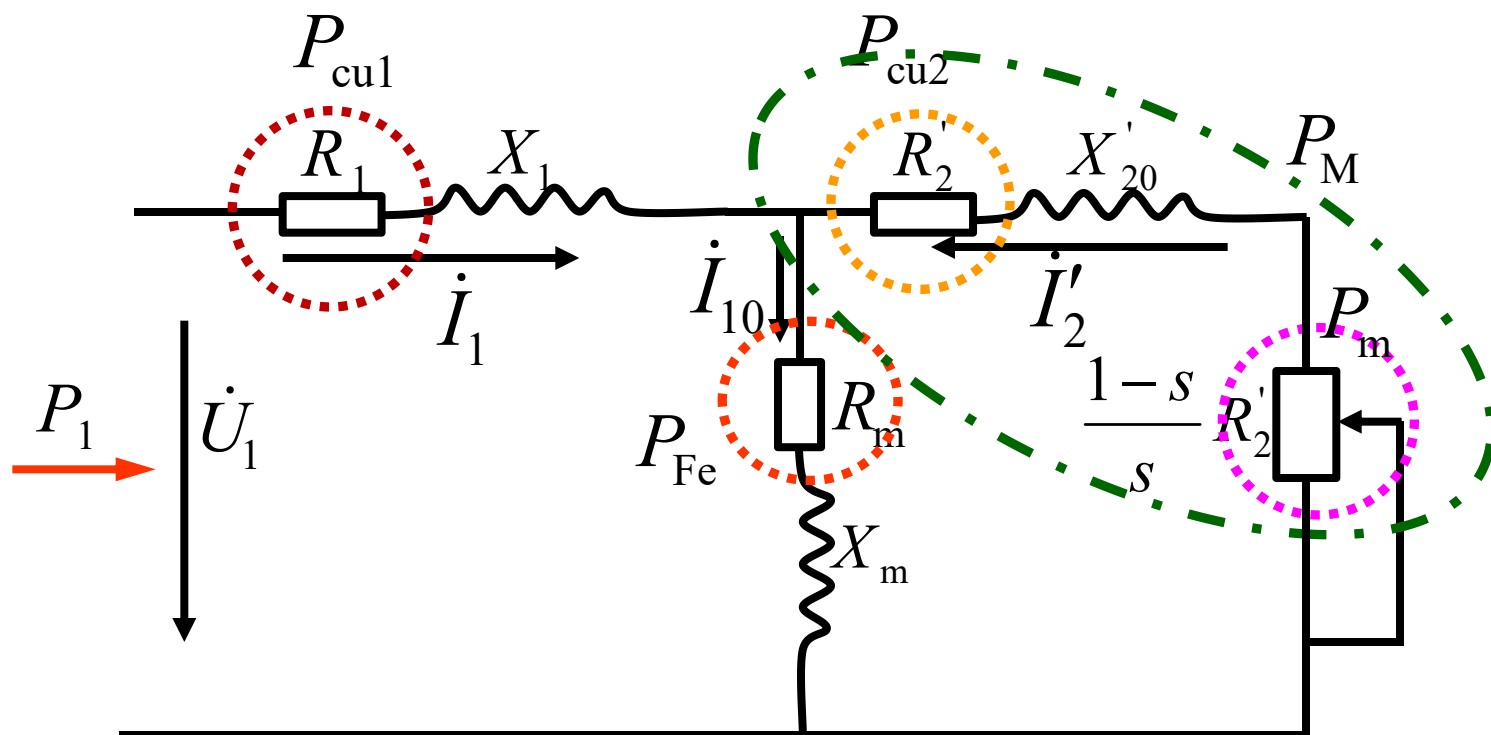
4.7 三相异步电动机的等效电路和相量图

**4.8 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡**

## 一、功率平衡

### 1、功率变换和传递过程

三相异步电动机轴上带负载稳定运行时，功率变换和传递过程，可用T形等值电路来进行分析。



## 一、功率平衡

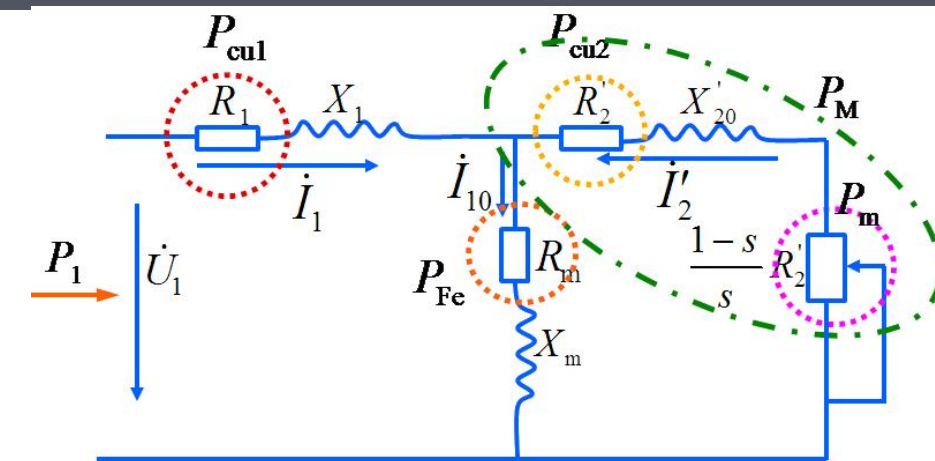
## 2、公式

(1) 电动机从电源吸收的电功率 $P_1$  (有功功率)

$$P_1 = 3U_{1P}I_{1P} \cos \varphi_1 = \sqrt{3}U_{1L}I_{1L} \cos \varphi_1$$

电磁功率

$$P_1 \rightarrow \begin{cases} P_{Fe} = 3R_m I_{10}^2 & \text{定子铁损} \\ P_M = 3E'_{20}I'_2 \cos \varphi_2 = 3I_2'^2 \frac{R'_2}{s} & \text{转子铜损 (转差功率)} \\ P_{Cu1} = 3R_1 I_1^2 & \text{定子铜损} \end{cases}$$



转子铜损 (转差功率)

$$\begin{cases} P_{Cu2} = 3R'_2 I_2'^2 = sP_M \\ P_m = 3\left(\frac{1-s}{s}\right)R'_2 I_2'^2 = (1-s)P_M \end{cases}$$

机械功率

**重要公式:**  $P_M : P_m : P_{Cu2} = 1 : (1-s) : s$

(2) 电动机轴上输出的机械功率 $P_2$  (有功功率)

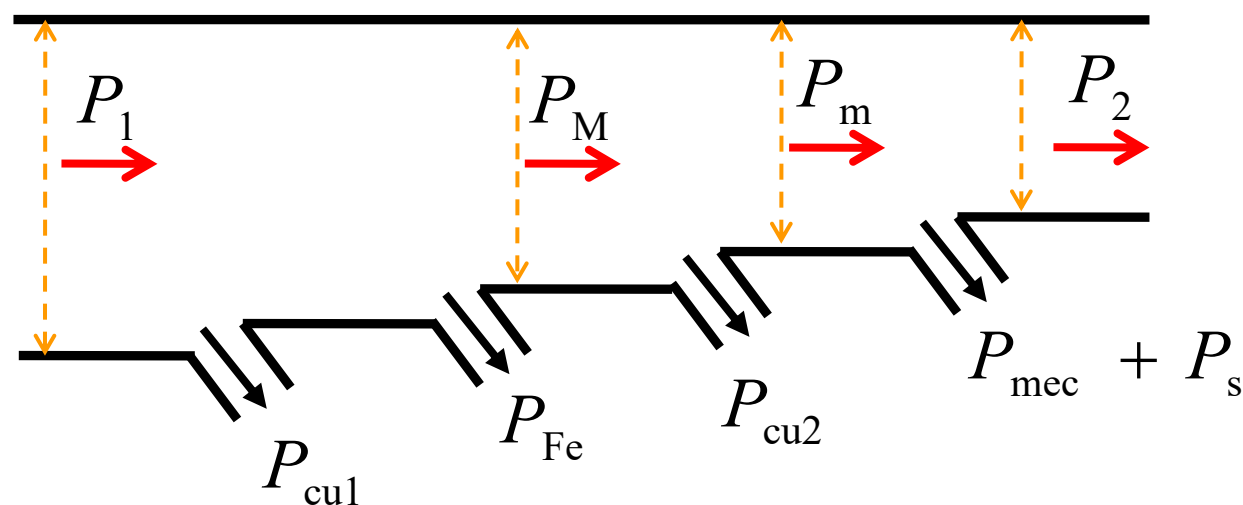
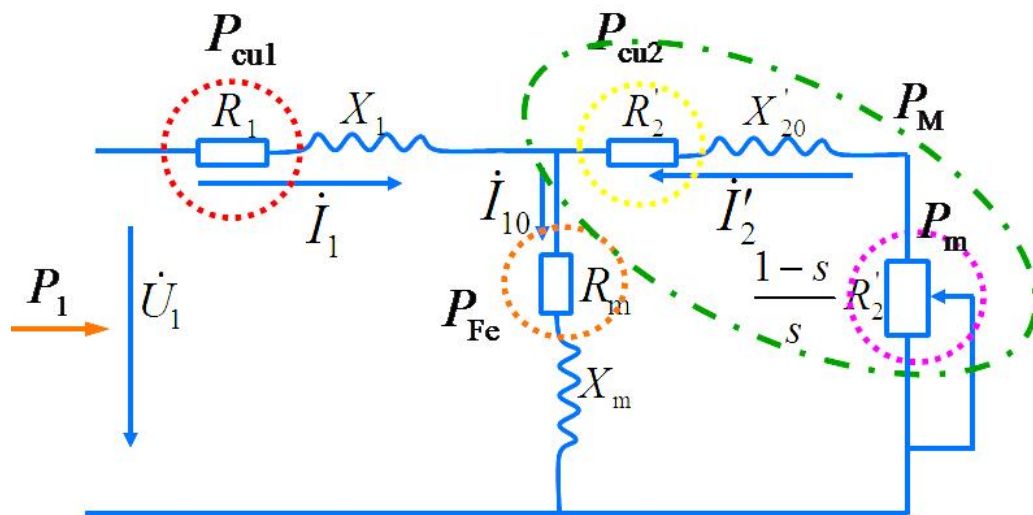
$$P_2 = P_m - (P_{mec} + P_s) \quad \text{附加损耗}$$

机械摩擦损耗



## 一、功率平衡

## 3、功率流程图



异步电动机功率流程图



**【例】** 一台三相50Hz绕线转子异步电动机，额定电压 $U_{1N} = 380\text{V}$ ，额定功率 $P_N = 100\text{kW}$ ，额定转速 $n_N = 950\text{r/min}$ ，在额定负载下运行时，机械功率损耗 $P_{mec} = 1\text{kW}$ ，忽略附加损耗。求额定运行时：(1) $s_N$ ；(2) $P_M$ ；(3) $P_{Cu2}$ 。

解：(1)额定转差率：由 $n_N = 950\text{r/min}$ 可判断电机的同步转速 $n_1 = 1000\text{r/min}$

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

(2) 额定运行时的电磁功率 $P_M$

由 $P_M = P_2 + P_{mec} + P_{Cu2}$ ， $P_{Cu2} = s_N P_M$  得：

$$P_M = \frac{P_2 + P_{mec}}{(1 - s_N)} = \frac{100 + 1}{1 - 0.05} \text{kW} = 106.3 \text{kW}$$

(3) 额定运行时转子的铜损耗 $P_{Cu2}$

$$P_{Cu2} = s_N P_M = 0.05 \times 106.3 \text{kW} = 5.3 \text{kW}$$



## 二、转矩平衡

## 1. 电磁转矩公式

异步电动机的电磁转矩等于电磁功率 $P_M$ 除以同步角速度 $\Omega_1$ ，其公式为：

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 E'_{20} I'_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1}$$

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

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

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

电磁转矩常数

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

说明：电磁转矩 $T$ 的大小与主磁通 $\Phi_1$ 及转子电流的有功分量 $I'_2 \cos \varphi_2$ 的乘积成正比，即电磁转矩是由气隙磁场与转子电流的有功分量共同作用产生的，揭示了电磁转矩的本质。



## 二、转矩平衡

### 2、转矩平衡方程式

转矩平衡方程式为：

$$\frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_2}{\Omega} + \frac{P_{mec} + P_s}{\Omega}$$

$$T = T_2 + T_0$$

电磁转矩    机械转矩    空载转矩

$$T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s)P_M}{(1-s)\Omega_1} = \frac{P_M}{\Omega_1}$$

$$T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega_1}$$

电磁转矩既可以用总机械功率除以机械角速度来计算，也可以用电磁功率除以同步角速度来计算。

忽略 $T_0$ 时,  $T = T_2$

额定运行时,  $T = T_N = \frac{60P_N}{2\pi n_N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$





**【例】** 一台四极三相50Hz异步电动机,  $U_N = 380V$ ,  $P_N = 10kW$ , 电动机各损耗  $P_{Cu1} = 227W$ ,  $P_{Cu2} = 314W$ ,  $P_{mec} = 50W$ ,  $P_s = 200W$ 。试求:(1)总机械功率 $P_m$ ;(2)电磁功率 $P_M$ ;(3)转差率 $s_N$ ;(4)负载转矩 $T_2$ ;(5)空载转矩 $T_0$ ;(6)电磁转矩 $T$ 。

解: (1) 总机械功率  $P_m = P_2 + P_{mec} + P_s = (10 + 0.05 + 0.2) = 10.25kW$

(2) 电磁功率  $P_M = P_m + P_{Cu2} = (10.25 + 0.314) = 10.564kW$

(3) 额定转差率  $s_N = P_{Cu2} / P_M = 0.314 / 10.564 = 0.03$

额定转速  $n_N = n_1(1 - s_N) = 1500 \times (1 - 0.03) = 1455r / min$

同步转速  $n_1 = 60 f_N / p = 60 \times 50 / 2 = 1500r / min$

(4) 负载转矩  $T_2 = P_2 / \Omega = 10 \times 10^3 / 2\pi \frac{1455}{60} = 65.7N.m$

(5) 空载转矩  $T_0 = P_0 / \Omega = P_{mec} + P_s / \Omega = 250 / 2\pi \frac{1455}{60} = 1.64N.m$

(6) 电磁转矩  $T = T_2 + T_0 = 65.7 + 1.64 = 67.34N.m$

$$T = P_M / \Omega_1 = 10.564 \times 10^3 / 2\pi \frac{1500}{60} = 67.34N.m$$



**工作特性：**指电源电压和频率为额定值的情况下，定子电流、转速（或转差率）、功率因素、电磁转矩、效率与输出功率的关系。

### 1、定子电流特性 $I_1=f(P_2)$

$$\because \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}_2')$$

$$\text{空载时 } P_2 = 0 \Rightarrow \dot{I}_2' \approx 0 \Rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_{10}$$

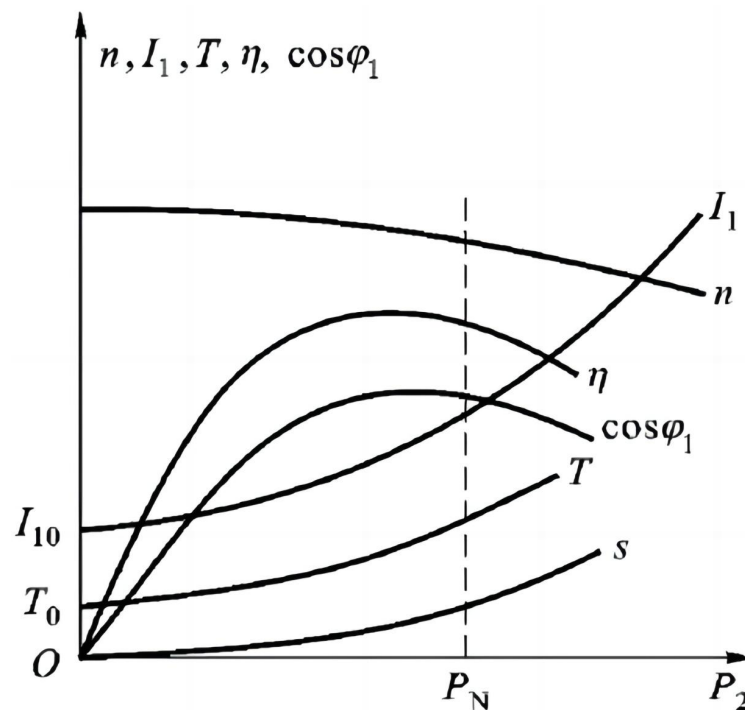
$$\text{负载时 } P_2 \uparrow \Rightarrow \dot{I}_2' \uparrow \text{ 且 } \dot{I}_{10} \text{ 不变} \Rightarrow \dot{I}_1 \uparrow$$

### 2、转速特性 $n=f(P_2)$

$$n = (1-s)n_1$$

$$\text{空载时 } P_2 = 0 \Rightarrow n \approx n_1$$

$$\text{负载时 } P_2 \uparrow \Rightarrow T_2(T_L) \uparrow \xrightarrow{T-T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}} \frac{dn}{dt} \downarrow \Rightarrow n \downarrow$$



异步电动机的工作特性



3、转矩特性  $T=f(P_2)$ 

$$\text{稳态时 } T = T_0 + T_2 \xrightarrow[\Omega=2\pi n/60]{T_2=P_2/\Omega} T = T_0 + 9.55 P_2 / n$$

$$P_2 : 0 \sim P_N \Rightarrow n : n_1 \sim n_N \quad s_N \text{ 很小, 近似认为 } n \text{ 没变}$$

$$\Rightarrow T=f(P_2) \text{ 近似一直线}$$

4、功率因数特性  $\cos\varphi_1=f(P_2)$ 

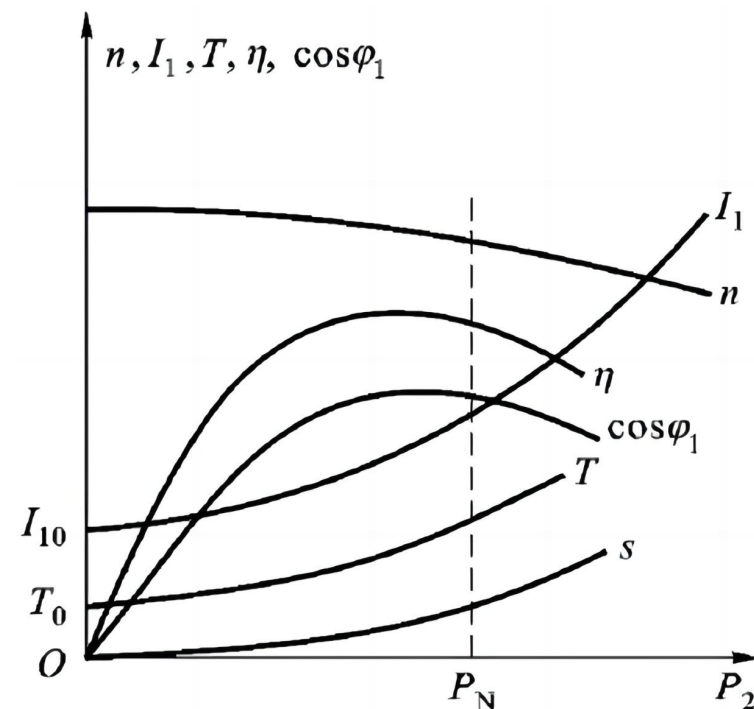
由等效电路可知异步电机为感性电路  $\Rightarrow \cos\varphi_1 < 1$  且  $\varphi_1 > 0$

$$\text{空载时 } P_2=0 \Rightarrow I_2' \approx 0 \xrightarrow{i_1=i_{10}+(-i_2')} I_1 \approx I_{10} \xrightarrow[\dot{I}_{10a} \ll \dot{I}_{10r}]{\dot{I}_{10}=\dot{I}_{10a}+\dot{I}_{10r}} \cos\varphi_1 \text{ 很小 } \approx 0.1 \sim 0.2$$

加负载,  $P_2 \uparrow \Rightarrow$  定子电流有功分量  $\uparrow \Rightarrow \cos\varphi_1 \uparrow$

额定负载  $P_2 = P_N$  时,  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_{1\max}$ ,  $\cos\varphi_1$  最大

$$P_2 \text{ 继续 } \uparrow \Rightarrow T_2 \uparrow \xrightarrow{T-T_L=\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}} n \downarrow \xrightarrow{s=n_1-n/n_1} s \uparrow \rightarrow R_2/s \downarrow \xrightarrow{\varphi_2=\arctan X_2/(R_2/s)} \varphi_2 \uparrow \rightarrow \cos\varphi_2 \downarrow \rightarrow \cos\varphi_1 \downarrow$$



异步电动机的工作特性



5、效率特性 $\eta=f(P_2)$ 

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{mec}} + P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_s}$$

## 负载很小时

- 可变损耗很小
- 负载从零开始增加时，总损耗增加较慢， $\eta \uparrow$ 。

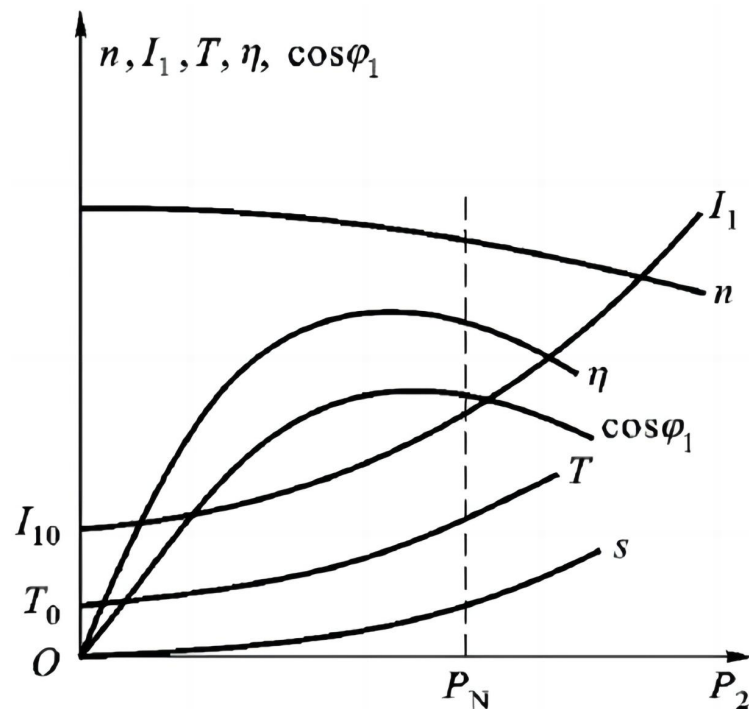
## 不变损耗=可变损耗时

- $\eta = \eta_{\text{max}}$

## 由额定负载继续增加

可变损耗增加很快， $\eta \downarrow$

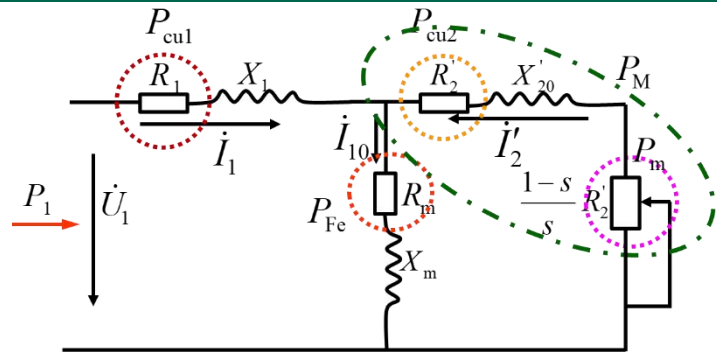
损耗: 不变损耗 $P_{\text{Fe}} + P_{\text{mec}}$  ; 可变损耗 $P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_s$



异步电动机的工作特性



# 小结

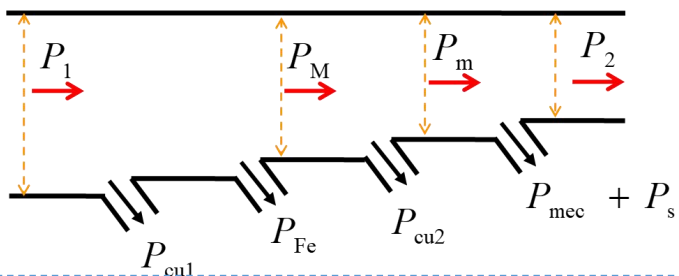


公式

**重要公式:**  $P_M : P_m : P_{Cu2} = 1 : (1-s) : s$

功率平衡

功率流程



$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 E'_{20} I'_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1}$$

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

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

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

电磁转矩常数

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

$$T = C_T \Phi_1 I'_2 \cos \varphi_2$$

$$T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s)P_M}{(1-s)\Omega_1} = \frac{P_M}{\Omega_1}$$

(1) 电动机从电源吸收的电功率P1 (有功功率)

$$P_1 = 3U_{1P} I_{1P} \cos \varphi_1 = \sqrt{3}U_{1L} I_{1L} \cos \varphi_1$$

电磁功率

$$P_1 \rightarrow \begin{cases} P_{Fe} = 3 R_m I_{10}^2 & \text{定子铁损} \\ P_M = 3 E'_{20} I'_2 \cos \varphi_2 = 3 I_2'^2 \frac{R'_2}{s} & \text{转子铜损 (转差功率)} \\ P_{Cu1} = 3 R_1 I_1^2 & \text{定子铜损} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{Cu2} = 3 R_2' I_2'^2 = s P_M \\ P_m = 3 \left( \frac{1-s}{s} \right) R_2' I_2'^2 = (1-s) P_M \end{cases}$$

机械功率

(2) 电动机轴上输出的机械功率P2 (有功功率)

$$P_2 = P_m - (P_{mec} + P_s) \quad \text{附加损耗}$$

机械摩擦损耗

$$\frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_2}{\Omega} + \frac{P_{mec} + P_s}{\Omega}$$

忽略T0时,  $T = T_2$

$$\text{额定运行时, } T = T_N = \frac{60 P_N}{2\pi n_N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

电磁转矩 机械转矩 空载转矩

转矩平衡

工作特性

1. 定子电流特性  $I_1 = f(P_2)$

2. 转速特性  $n = f(P_2)$

3. 转矩特性  $T = f(P_2)$

4. 功率因数特性  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$

5. 效率特性  $\eta = f(P_2)$

