

# 电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导



## 第七章 三相异步电动机

---

- 三相异步电动机的结构、工作原理、铭牌数据
- 三相异步电动机的电磁关系
- 三相异步电动机的转矩



# 三相异步电动机概述

## 一、特点、分类

### 1、特点：

结构简单、价格低廉、运行可靠、坚固耐用、  
运行效率较高、具有较好的工作特性；  
功率因数较差、调速性能相对直流机较差。

### 2、分类：

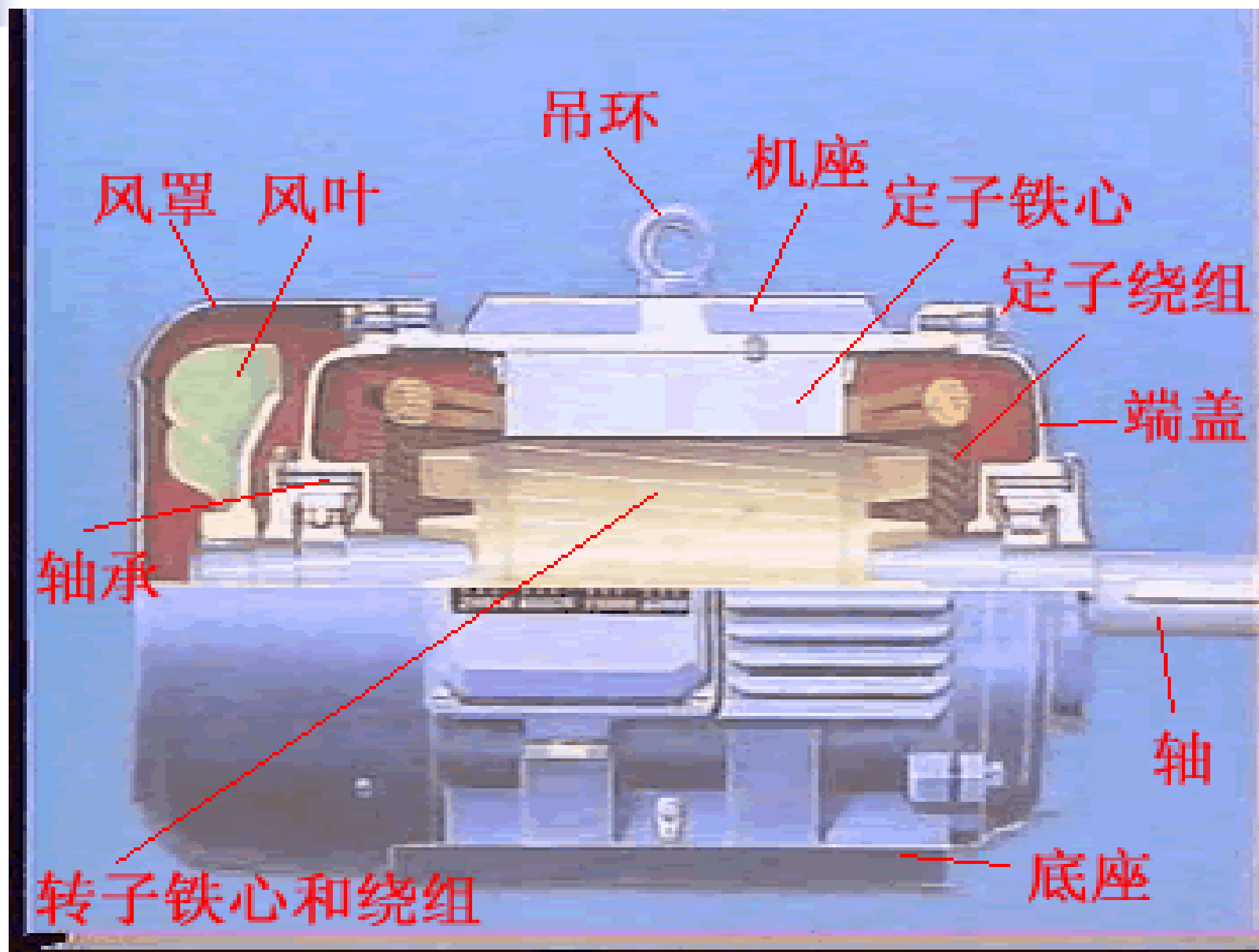
(1) 按定子相数分类：二相、三相

(2) 按转子结构分类：绕线式、鼠笼式

(3) 绕线式按结构分类：有换向器、无换向器

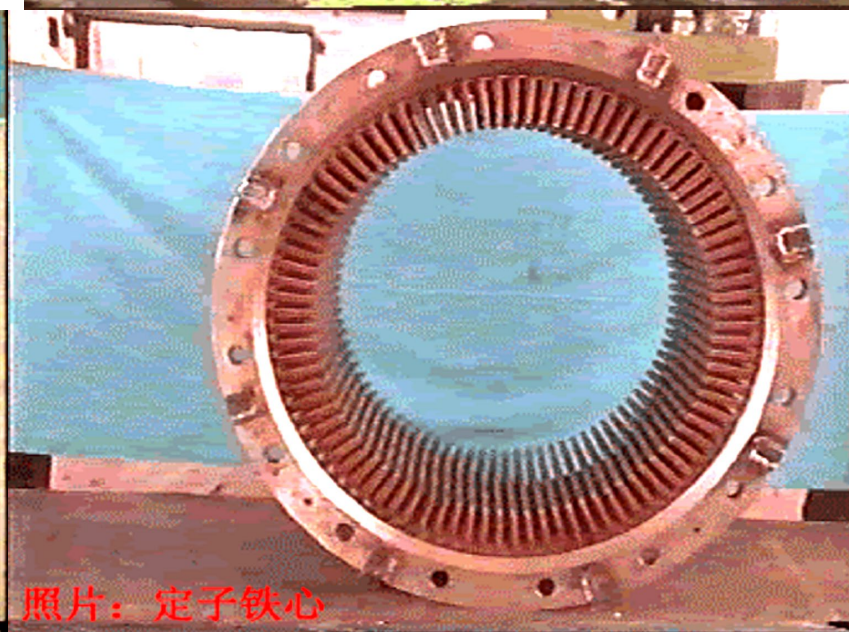
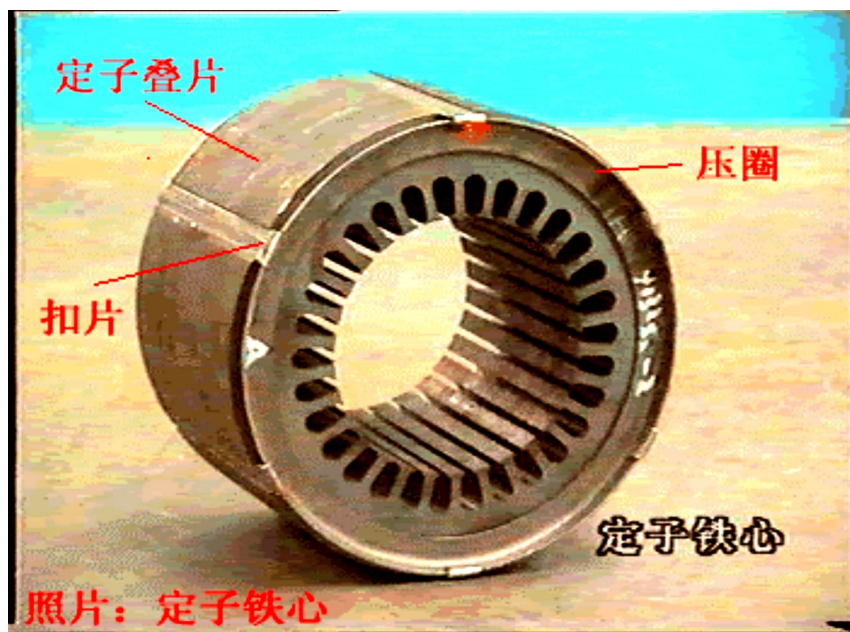
另外：高压、低压、高起动转矩等。

## 二、结构



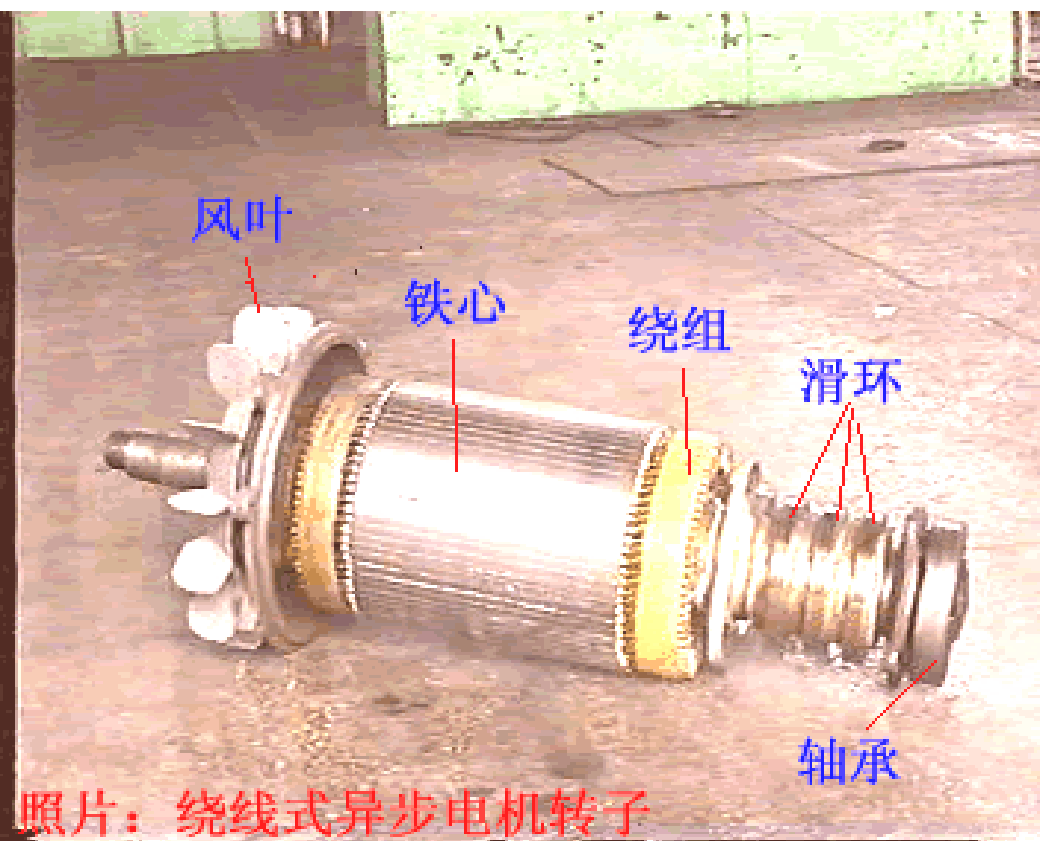
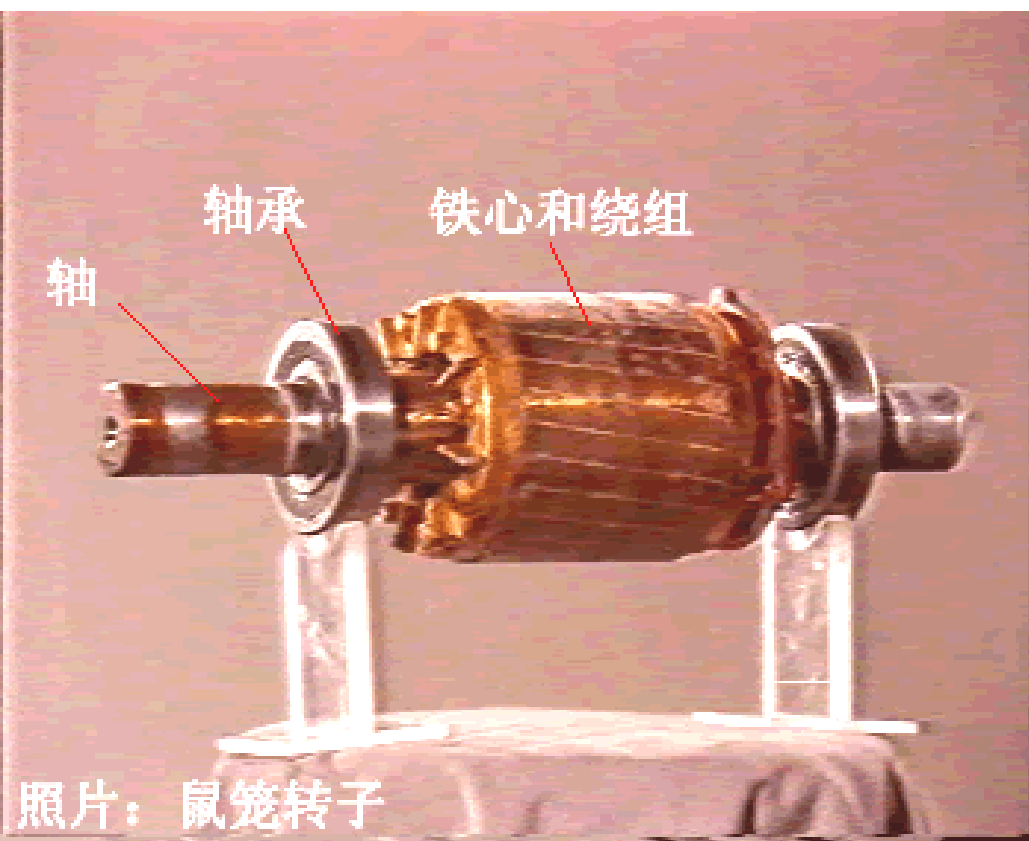
## 二、结构

### 1、定子



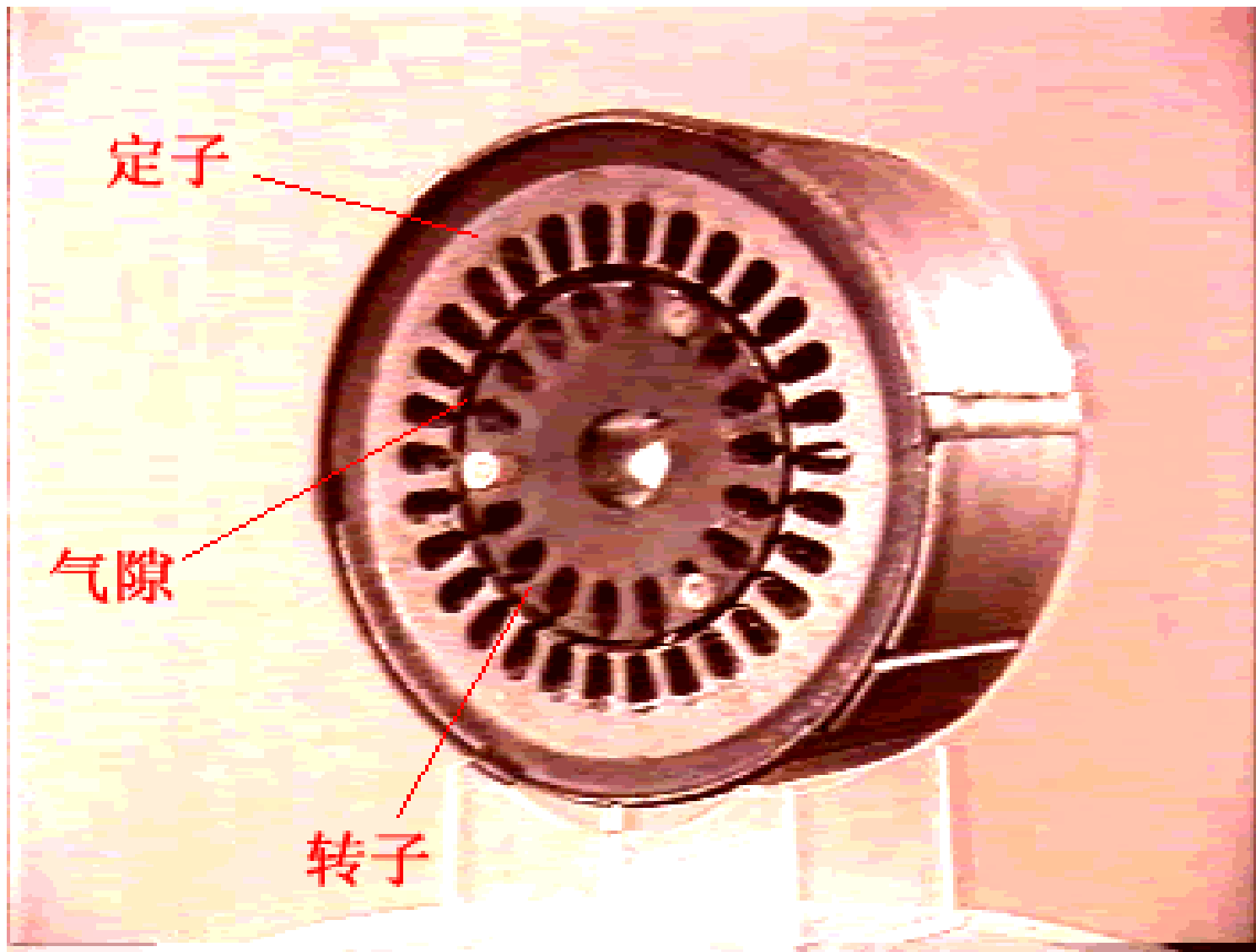
## 二、结构

### 2、转子



## 二、结构

### 3、气隙





# 回顾：交流电机电枢绕组的磁势

- 通俗地讲：对称的三相绕组通以三相对称电流，产生圆形旋转磁势，从而在气隙中形成旋转磁场；
- 推而广之：对称的 $m$ 相绕组通以 $m$ 相对称电流，产生圆形旋转磁势，在气隙中形成旋转磁场；
- 旋转磁场的产生可以从物理上分析，也可进行数学分析，二者结论一致，我们从物理概念上对其进行分析。



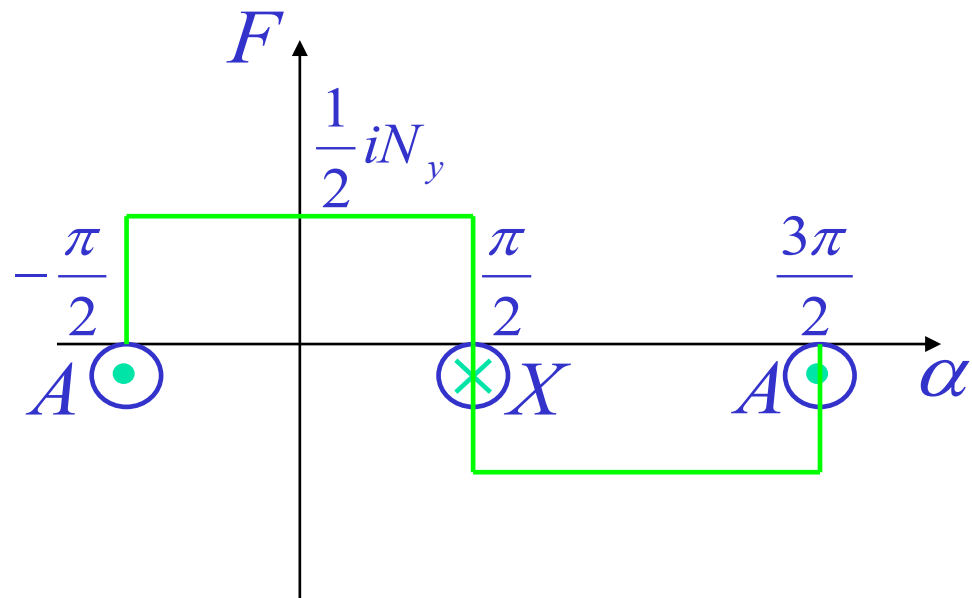
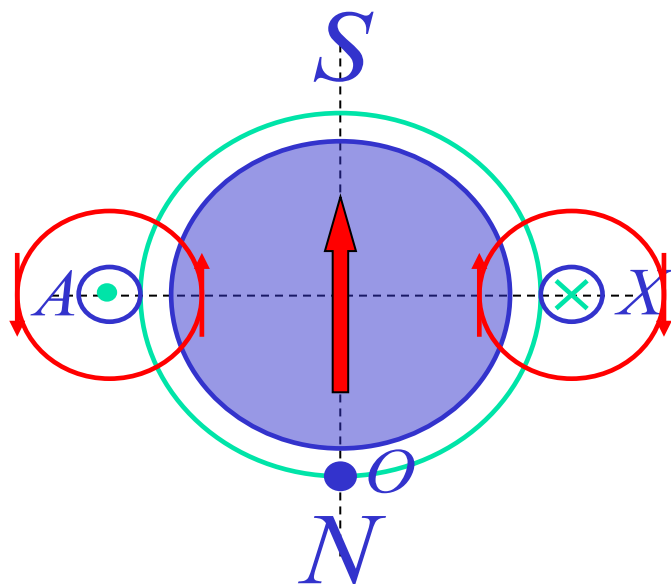


# 回顾：分析的步骤

---

- 整距线圈的磁势
- 三相绕组的磁势
- 旋转磁场的形成

# 回顾：一、整距线圈的磁势



$$i = \sqrt{2}I \cos \omega t$$

$$\Rightarrow f_{\Phi} = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & \left( -\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & \left( \frac{\pi}{2} < \alpha \leq \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases}$$

# 回顾：一、整距线圈的磁势

前式用傅氏级数展开，基波磁势为

$$f_y = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \frac{1}{3} \cos \omega t \cos 3\alpha + \dots$$

$$f_{y1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha \quad \text{空间电角度}$$

基波与各谐波磁势的特点：

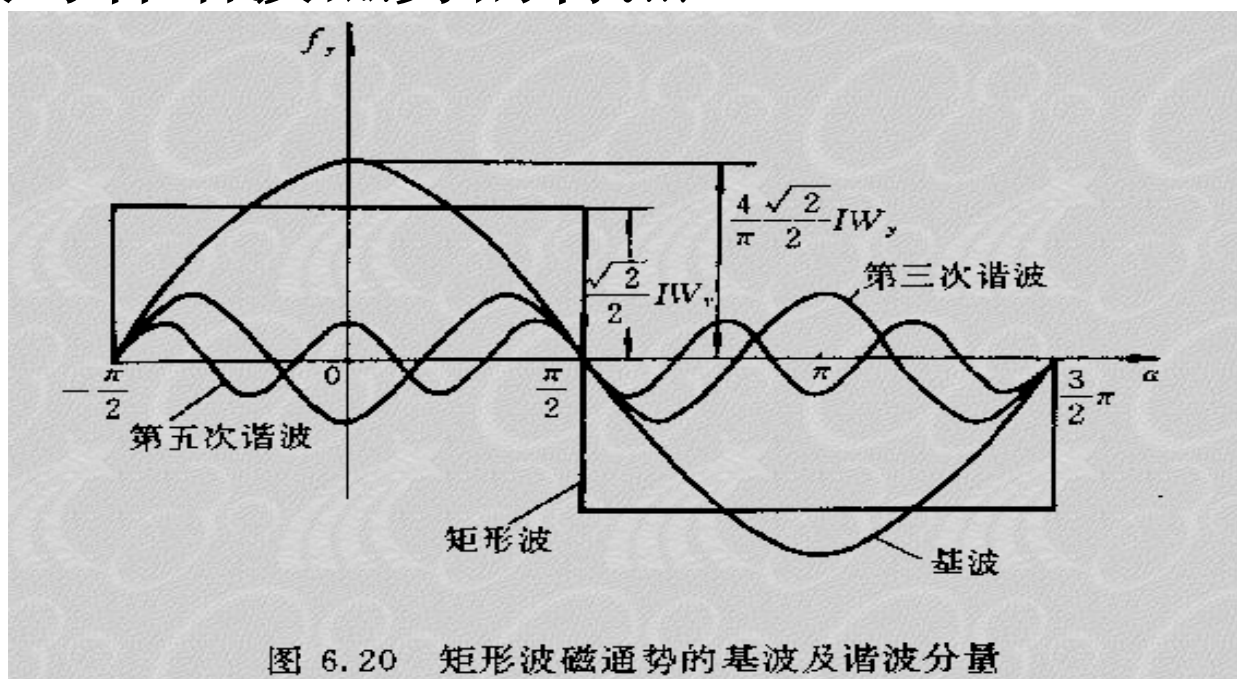


图 6.20 矩形波磁通势的基波及谐波分量

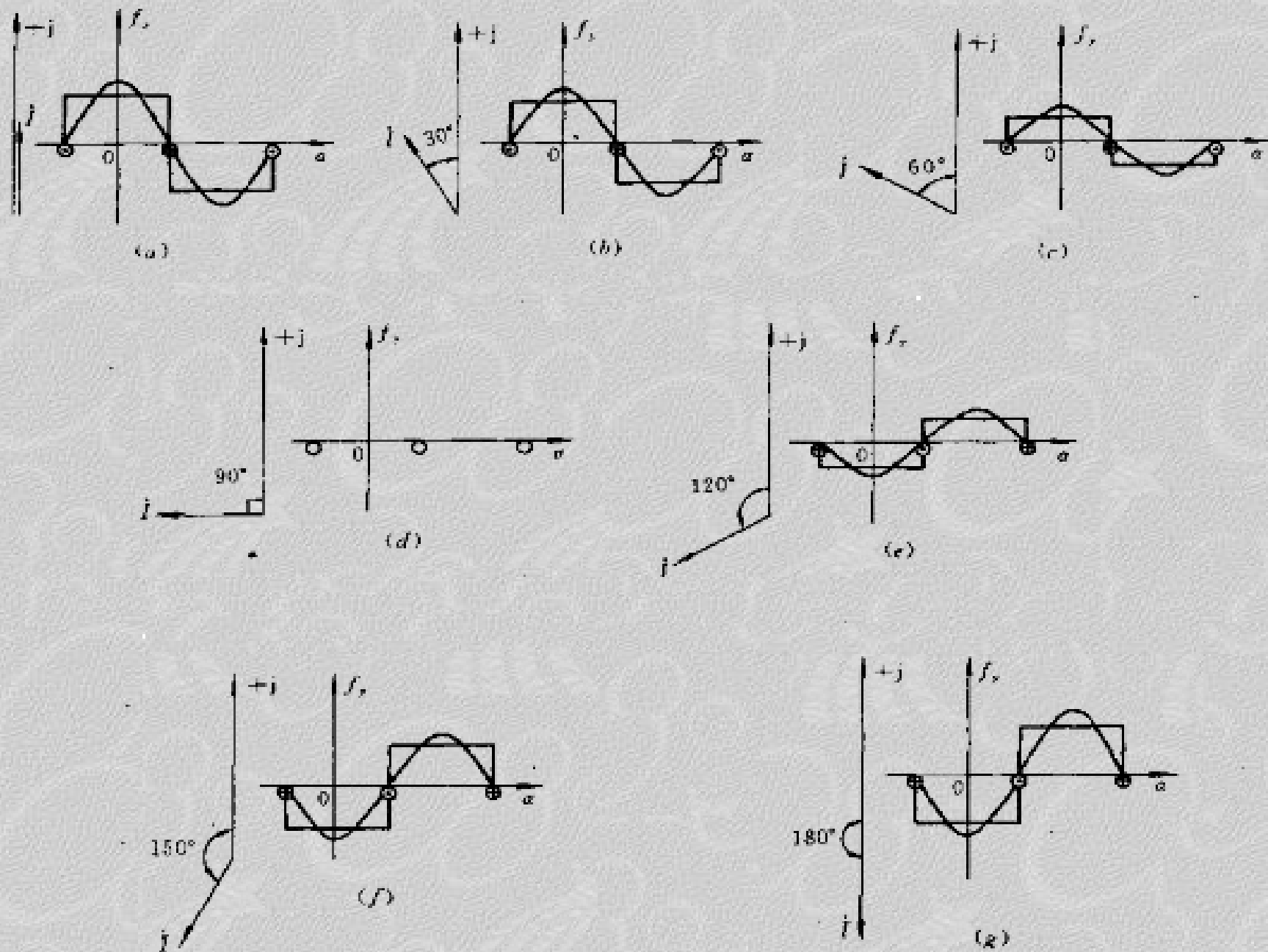


图 6.21 不同瞬间的电流、矩形波磁通势和基波磁通势

# 回顾：短距分布绕组的基波磁势

$$f_{y1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{p1}}{p} \cdot I \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

脉振磁势

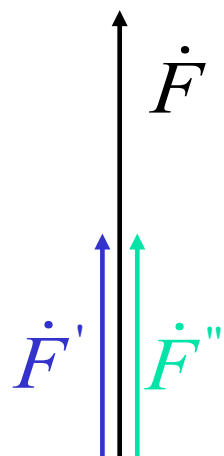
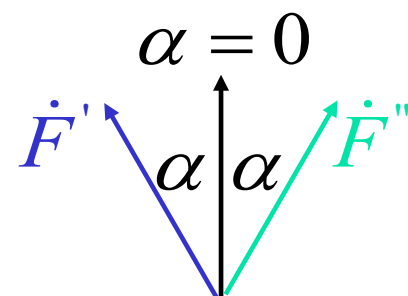
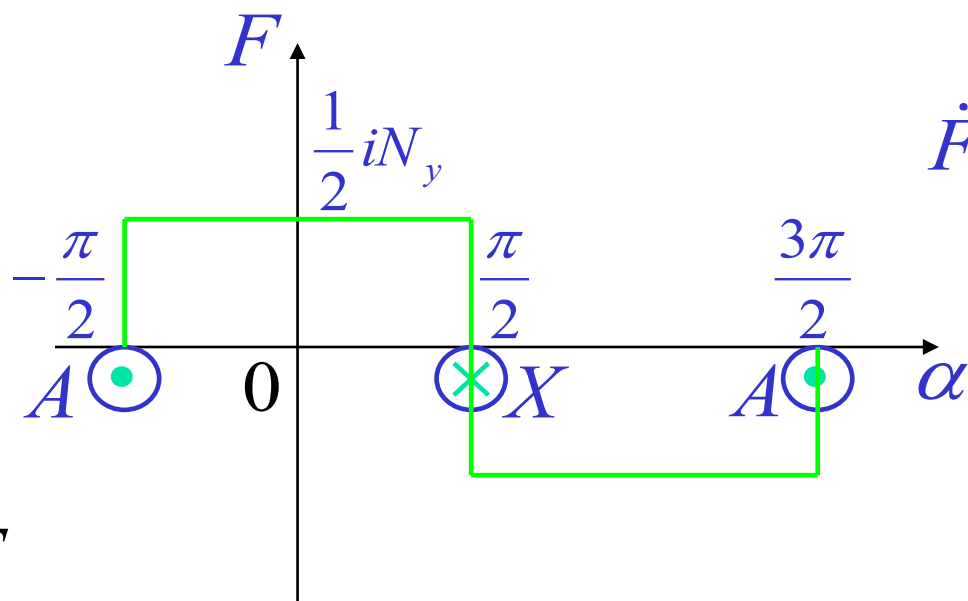
其中：  $N_1 = \frac{2pqN_y}{a}$  —— 每相串联总匝数

$k_{p1}$  —— 基波绕组系数

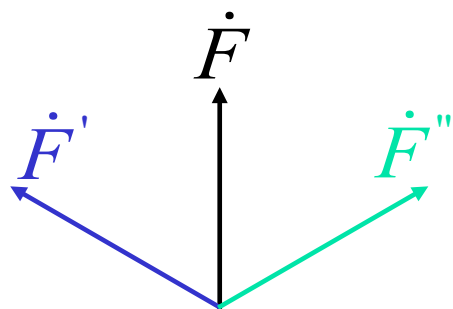
$$f_{y1} = F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$$= f'_{y1} + f''_{y1}$$



$\omega t = 0$



$\omega t = \pi/3$



$\omega t = \pi/2$

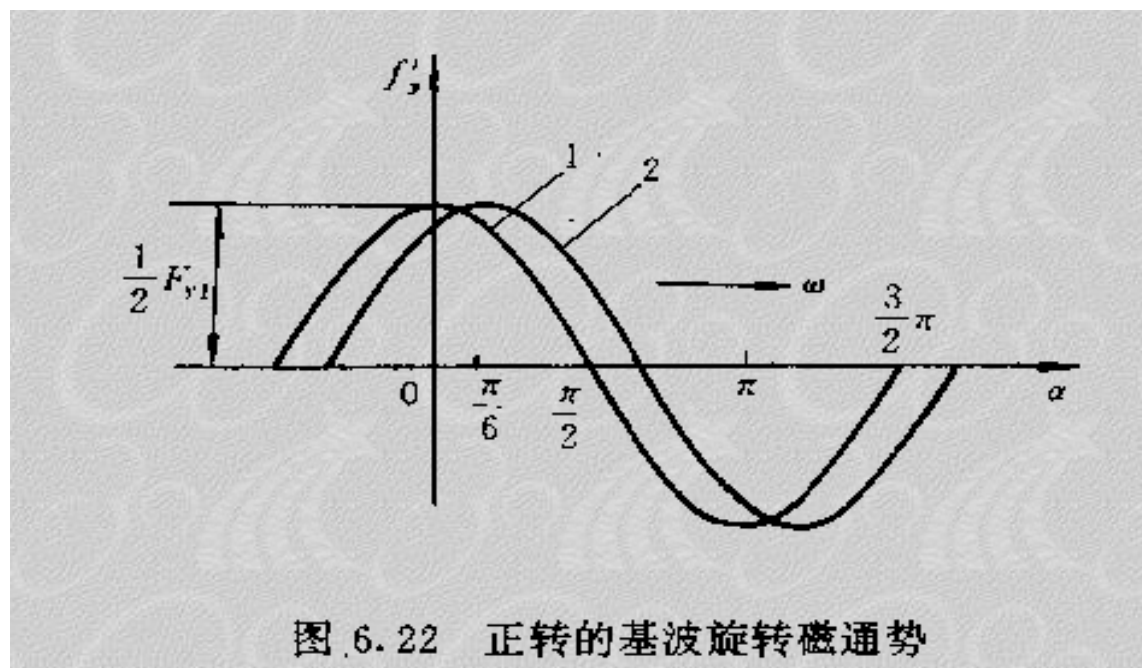
[动画联接1](#)

[动画联接2](#)

$$f_{y1} = F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{y1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$$= f'_{y1} + f''_{y1}$$



# 回顾：三相交流电机的旋转磁场

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t, i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ), i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ)$$

$$f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t)$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 240^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ)$$

$$= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 120^\circ)$$

$$\text{其中 } F_{\phi 1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{Nk_{dp1}}{p} I$$



# 回顾：三相交流电机的旋转磁场

$$\begin{aligned} f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} &= \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t) \\ &+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 240^\circ) \\ &+ \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha + \omega t - 120^\circ) \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) \\ &= F_1 \cos(\alpha - \omega t) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N k_{dp1}}{p} I$$

# 回顾：三相交流电机的旋转磁场

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

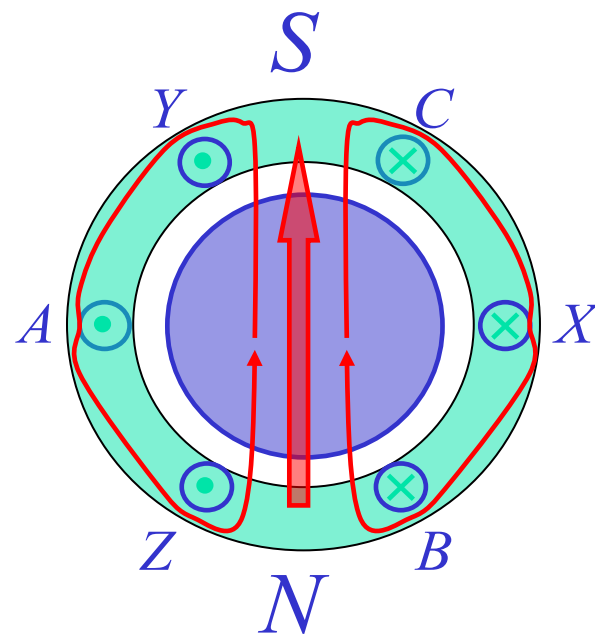
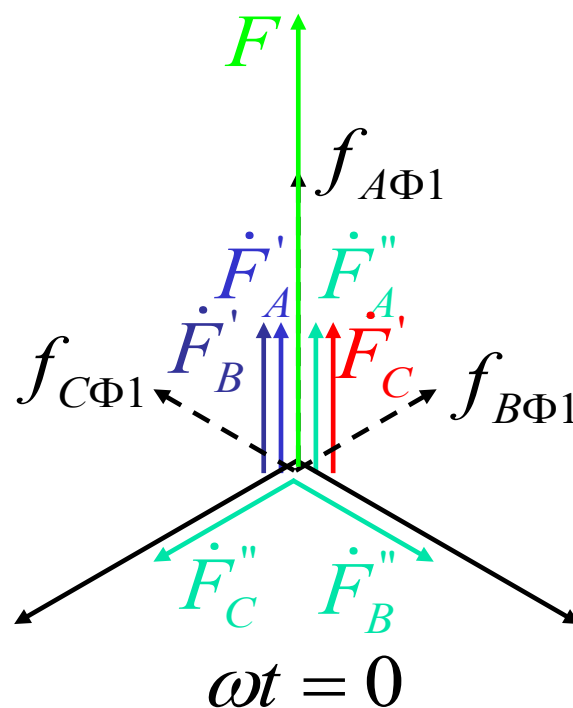
$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

(1) 当  $\omega t = 0$  时

$$i_A = I_m$$

$$i_B = -\frac{1}{2} I_m$$

$$i_C = -\frac{1}{2} I_m$$



# 回顾：三相交流电机的旋转磁场

(2) 当  $\omega t = \pi/3$  时

$$i_A = \frac{1}{2} I_m$$

$$i_B = \frac{1}{2} I_m$$

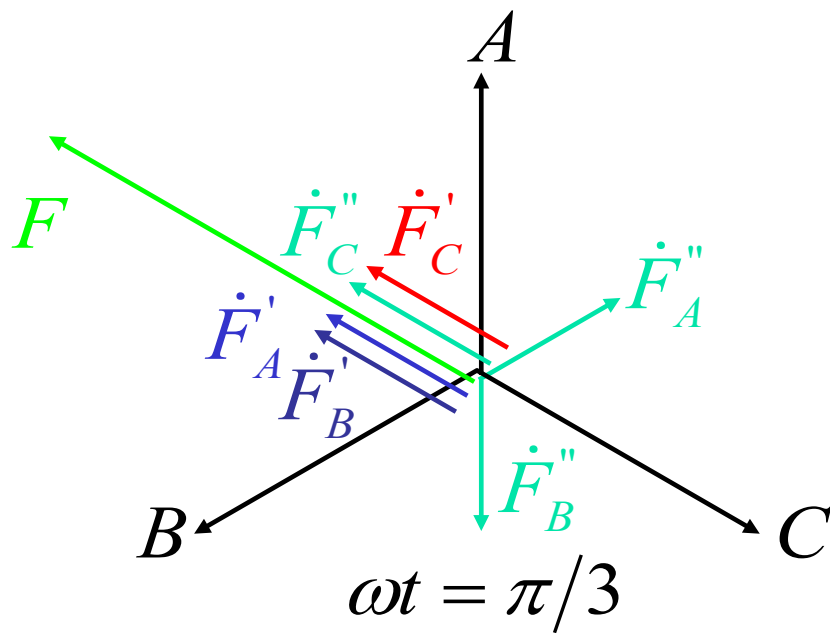
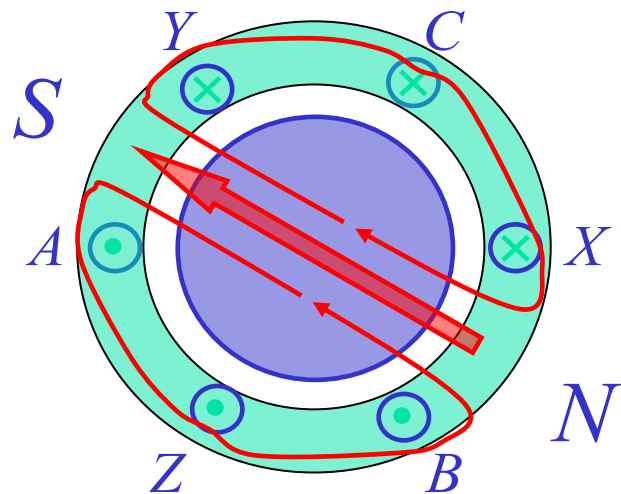
$$i_C = -I_m$$

(3) 当  $\omega t = 2\pi/3$  时

⋮

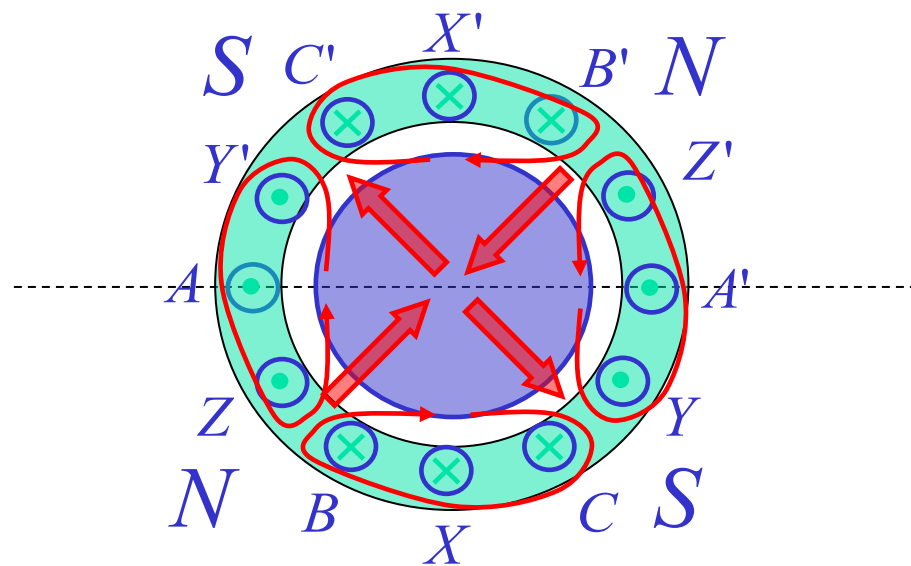
连接动画3

连接动画4



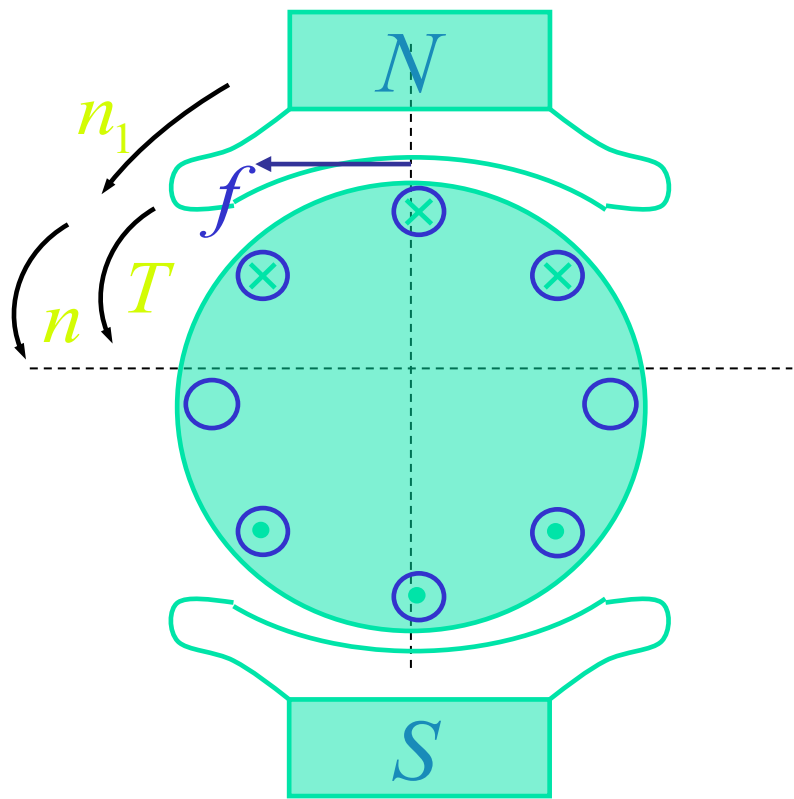
# 回顾：小结

- 三相电流的时间相位变化了多大角度，其合成磁势也在空间上旋转了多大电角度，合成磁势的幅值不变；
- 电流变化一个周期——合成磁势旋转一周；
- 磁场转速  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ ，旋转方向由相序确定；
- $p = 2$  时



[连接动画](#)5

### 三、工作原理（以绕线式电机为例）



1、三相定子绕组接三相交流电，气隙中产生**旋转磁场**。

逆时针同步转速；

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

2、相对转子，有旋转的磁极；

3、转子导体中将产生**感应电势**和**感生电流**；

4、导体中的电流受力，产生转矩，使**转子按旋转磁场的方向旋转**；

5、转子转速能否达到同步转速？

6、转差率：

同步转速  $n_1$ ，转子转速  $n$ ，

转差  $\Delta n = n_1 - n$ ，转差率  $s = \Delta n / n_1$ 。

### 三、工作原理（以绕线式电机为例）

#### 7、转差率的含义：

当同步转速  $n_1$  是确定的时候， $s$  与  $n$  一一对应。

当  $0 < s < 1$  即  $0 < n < n_1$  时，电动状态

当  $s < 0$  即  $n > n_1$  时，发电状态

当  $s > 1$  即  $n < 0$  时，电磁制动状态

正常电动运行时  $s = 0.01 \sim 0.05$

#### 四、额定数据

$P_N(kW)$ ,  $U_N(V)$ ,  $I_N(A)$ ,  $f_N(Hz, 50Hz)$ ,  
 $n_N(r/min)$ ,  $\cos \varphi_N$ ,  $\eta_N$  等

## 例题:

三相异步电动机,  $P_N = 55kW$ ,  $U_N = 380V$ ,  $I_N = 119A$

$n_N = 570 r/min$ ,  $\cos \varphi_N = 0.89$ 。

求: 同步转速  $n_1$ , 极对数  $p$ , 额定负载时的效率  $\eta_N$  和转差率  $s_N$ 。

解:

$$(1) \left. \begin{array}{l} n_N = 570 r/min \\ n_1 = 60 f_1 / p \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n_1 = 600 r/min \\ p = 5 \end{array} \right.$$

$$(2) \eta_N = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N} = 0.79$$

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

再看一下书上230页例题7-4, 7-5



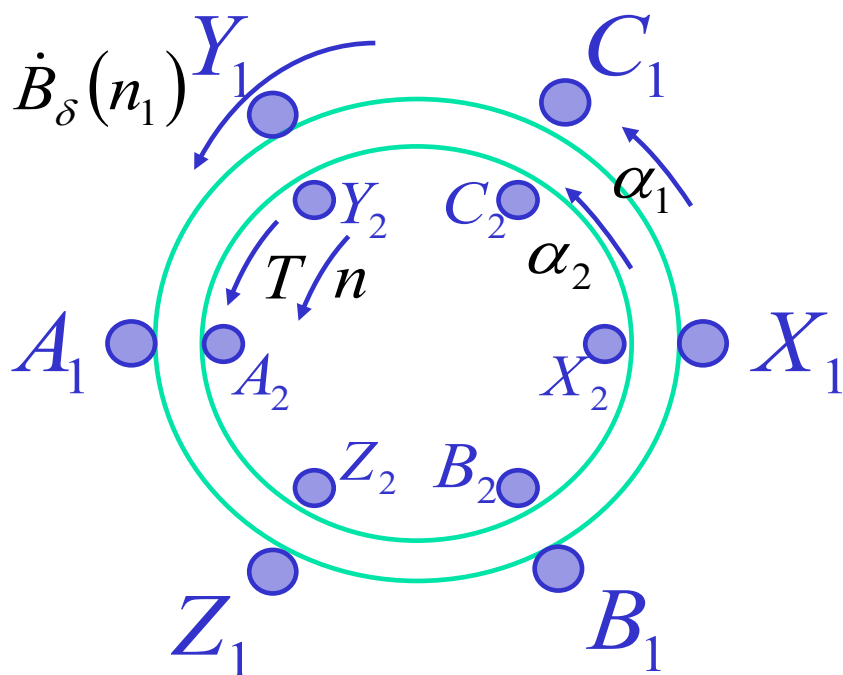
## 第二节 三相异步电动机的电磁关系

- 以绕线式异步电机为例
- 分析步骤：
  - (1) 转子不转，且转子绕组开路；
  - (2) 转子堵转，且转子绕组短路；
  - (3) 转子旋转，正常运行。
- 分析内容：
  - (1) 惯例；
  - (2) 电磁平衡关系式；
  - (3) 折算与等值电路；
  - (4) 向量图。



# 一、转子不转、转子绕组开路

## 1、惯例 (1)



$\dot{B}_\delta(n_1)$ ——气隙磁密（同步转速）

$T$ ——电磁转矩

$n$ ——转速

$\alpha_1$ ——沿定子内表面的角度

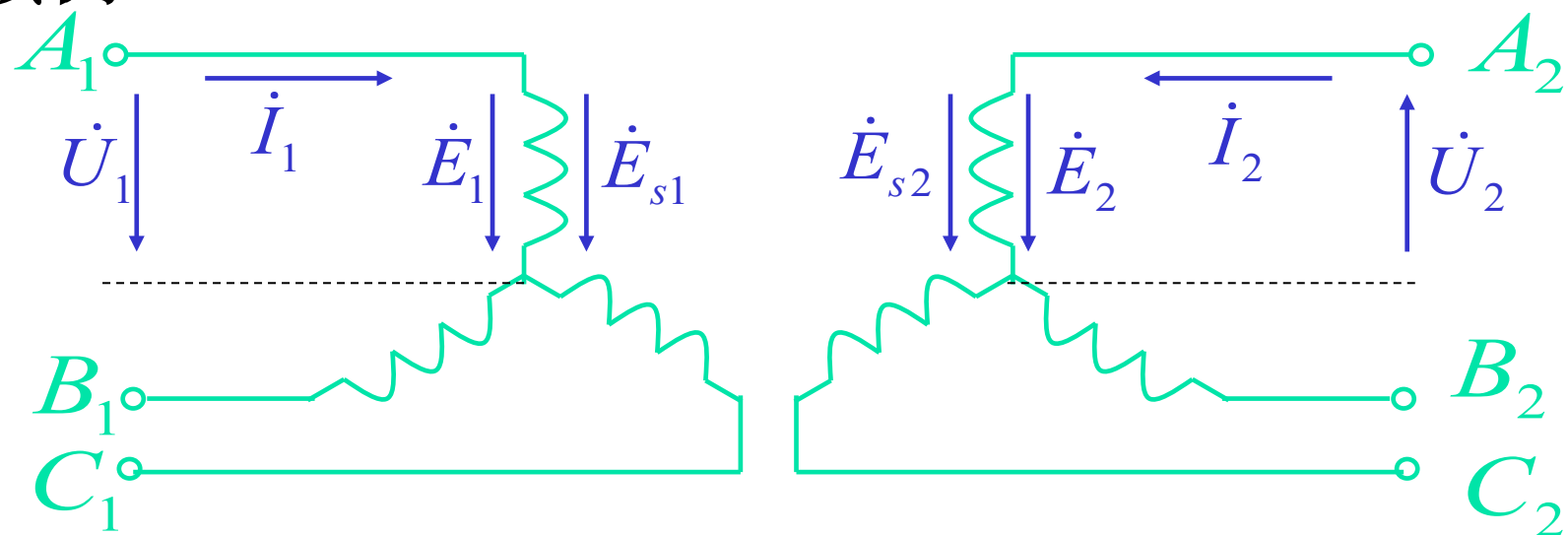
$\alpha_2$ ——沿转子外表面的角度

磁密 $\dot{B}$ 、磁通 $\dot{\Phi}$ 、磁势 $\dot{F}$

均以进入转子方向为正方向

# 一、转子不转、转子绕组开路

## 惯例 (2)



$\dot{U}_1$  —— 电枢绕组相电压

$\dot{E}_1$  —— 电枢绕组相电势

$\dot{I}_1$  —— 电枢绕组相电流

$\dot{E}_{s1}$  —— 电枢绕组相漏电势

$\dot{U}_2$  —— 转子绕组相电压

$\dot{E}_2$  —— 转子绕组相电势

$\dot{I}_2$  —— 转子绕组相电流

$\dot{E}_{s2}$  —— 转子绕组相漏电势

## 2、电磁关系（类似变压器空载运行）

### (1) 磁通 $\dot{\Phi}$ 、磁势 $\dot{F}_0$

定子通以三相对称电流 $\dot{I}_{0A}$ 、 $\dot{I}_{0B}$ 、 $\dot{I}_{0C}$

$\Rightarrow$  空间合成磁势为 $\dot{F}_0$

a、幅值：
$$F_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot I_0$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速：
$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} (r/\min), \quad \omega = 2\pi f_1 (rad/s)$$

d、
$$\left. \begin{array}{l} \text{定子磁势} \dot{F}_1 \\ \text{转子磁势} \dot{F}_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

## 2、电磁关系（类似变压器空载运行）

### (2) 感应电势

a、大小：  $E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{dp1} \Phi_1$ ,  $E_2 = 4.44 f_1 N_2 k_{dp2} \Phi_1$

b、变压比：  $k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}}$

c、相位：  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  滞后于  $\dot{\Phi}_1$   $90^\circ$ ,  $\dot{B}_\delta$  与  $\dot{\Phi}_1$  同相位

d、  $\dot{E}_1 = k \dot{E}_2 = \dot{E}'_2$

### (3) 励磁电流 $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0r} + \dot{I}_{0a}$

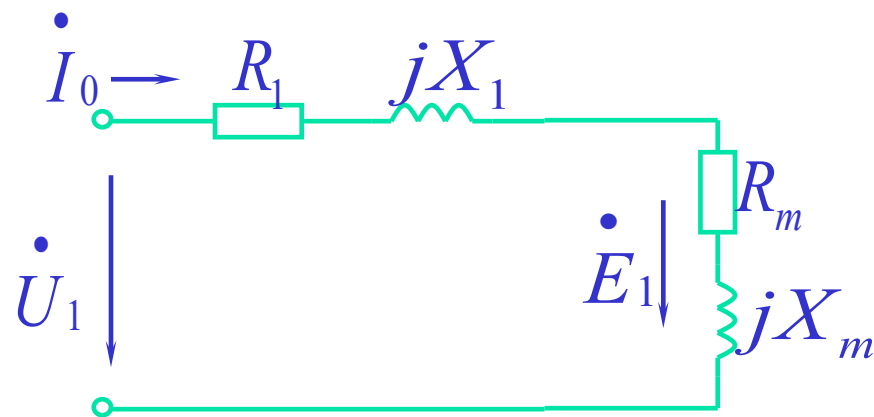
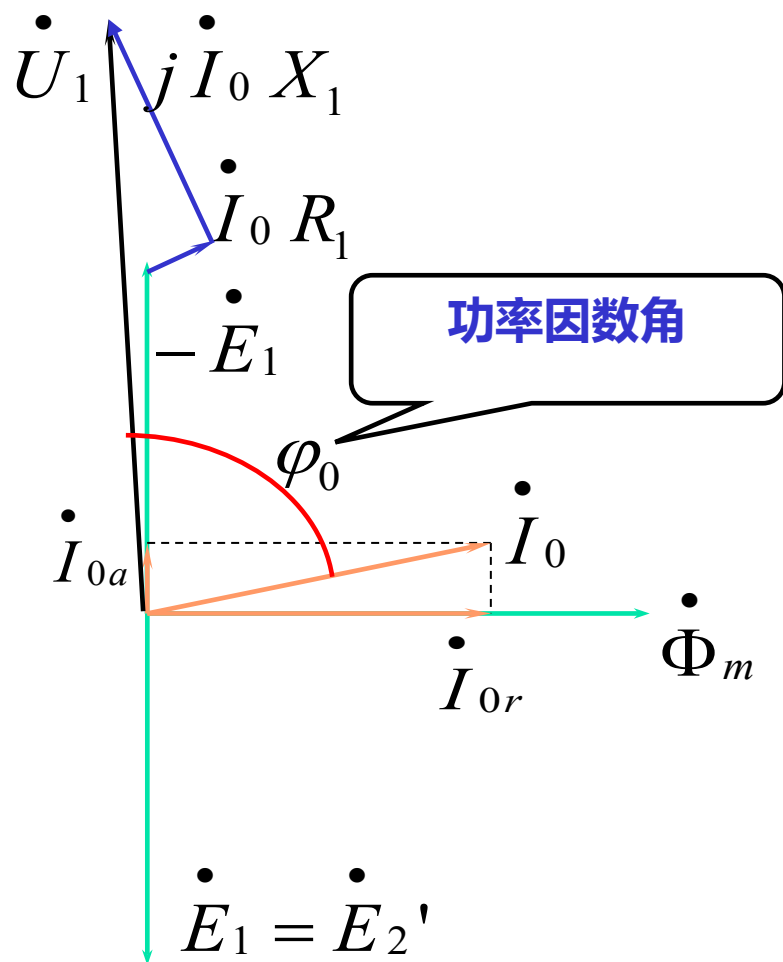
### (4) 电压、电势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_{s1} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

### 3、向量图与等值电路

(与变压器空载运行相似)

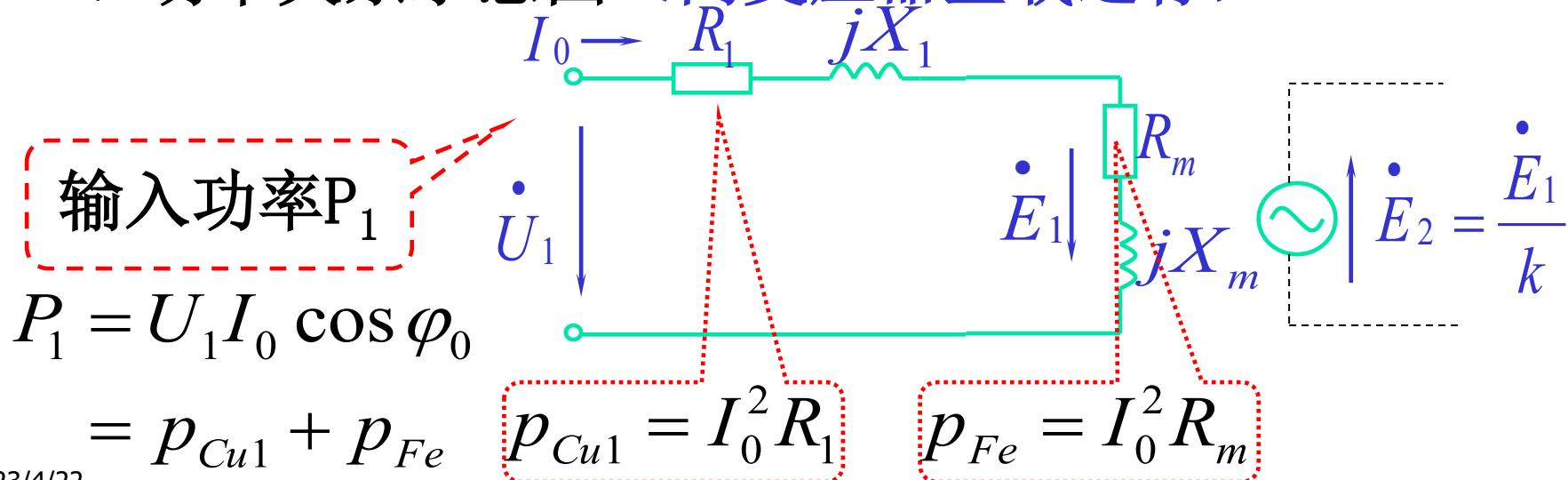


# 一、转子不转、转子绕组开路

## 4、电磁关系示意图（同变压器空载运行）

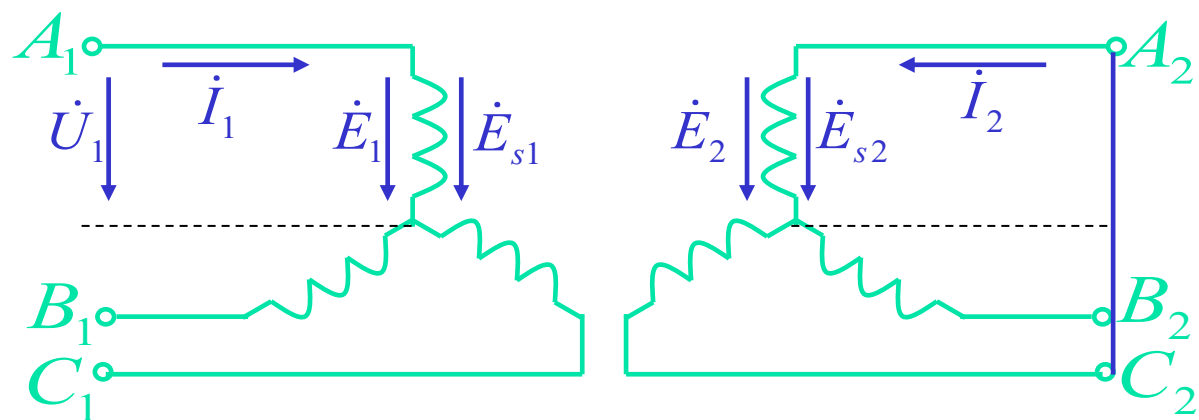
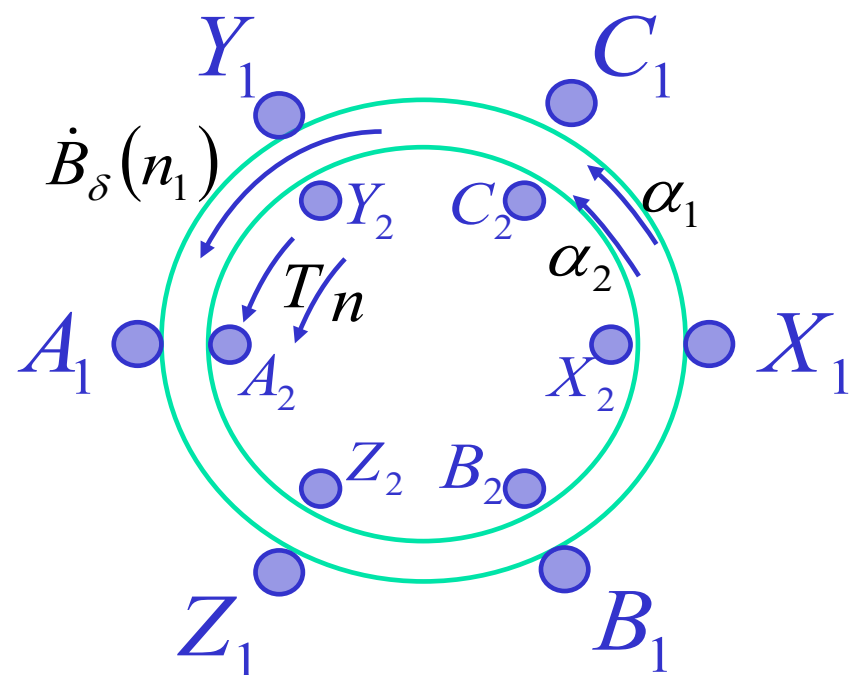
$$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{s1} \rightarrow \dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 X_1 \\ \dot{\Phi}_1 \rightarrow \begin{cases} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{cases} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \end{cases}$$

## 5、功率关系示意图（同变压器空载运行）



## 二、转子堵转、转子绕组短路

### 1、惯例



## 2、磁势、磁通

### (1)定子磁势

a、幅值： 
$$F_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp_1}}{p} \cdot I_1$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速： 
$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} (r/min), \quad \omega = 2\pi f_1 (rad/s)$$

### (2)转子磁势

a、幅值： 
$$F_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp_2}}{p} \cdot I_2$$

b、转向：电流相序决定， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 时，逆时针

c、转速： 
$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f_1}{p} (r/min) = n_1$$



## 2、磁势、磁通

### (3)合成磁势

$$\left. \begin{array}{l} \text{定子磁势} \dot{F}_1 \\ \text{转子磁势} \dot{F}_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

### (4)主磁通

$$\dot{F}_0 \rightarrow \dot{\Phi}_1 \rightarrow \dot{E}_1 \text{和} \dot{E}_2$$

### (5)漏磁通

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_1 \rightarrow \dot{\Phi}_{s1} \text{表现为} jX_1 \\ \dot{I}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_{s2} \text{表现为} jX_2 \end{array} \right\} \text{均不饱和}$$

### 3、定、转子回路方程

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

$$\begin{aligned}\text{转子: } \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ &= 0\end{aligned}$$

$$\text{转子相电流: } \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} e^{-j\varphi_2}$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{X_2}{R_2}$$

#### 例题7-2

## 4、转子绕组的折合（类似变压器）

### (1) 原则与思路

通常异步电机转子的相数 $m_2$ 与定子的相数 $m_1$ 并不相同。

原则：保持折算前后**转子**绕组的**磁势不变**。

思路：用假想的转子 $m_1$ 、 $N_1$ 、 $k_{dp1}$ 代替实际的 $m_2$ 、 $N_2$ 、 $k_{dp2}$

### (2) 结论：

$$k_i = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_1 N_1 k_{dp1}}{m_2 N_2 k_{dp2}} \text{ —— 电流变比}$$

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{dp1}}{N_2 k_{dp2}} \text{ —— 电压变比}$$

### (3) 折合前后 功率关系不变

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 / k_i \quad \dot{E}_2' = k_e \dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

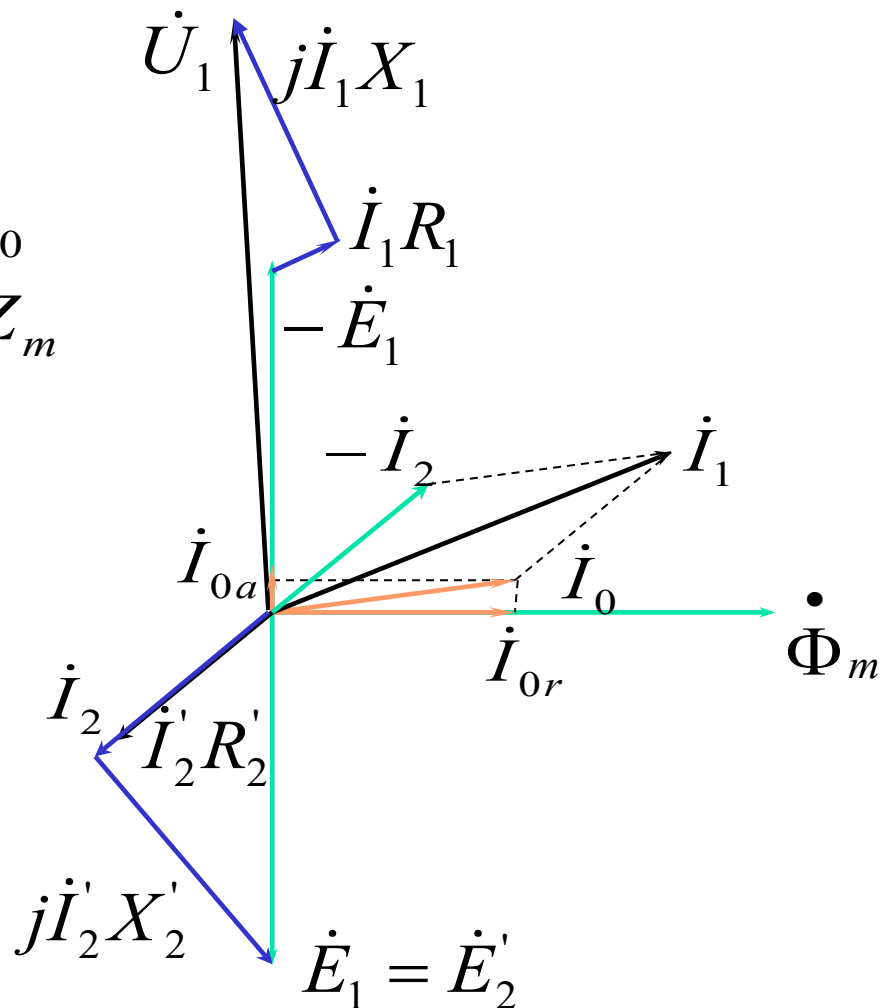
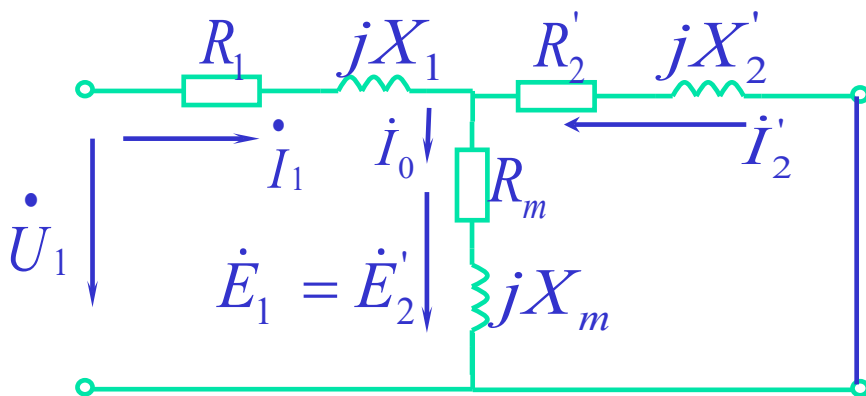
$$Z_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\dot{I}_2'} = \frac{k_e \dot{E}_2}{\dot{I}_2 / k_i} = k_e k_i Z_2$$

$$\varphi_2' = \varphi_2$$

# 5、基本方程、等值电路、向量图

(类似变压器副边短路)

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' & \dot{I}_0 &= -\dot{E}_1 / Z_m \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2'\end{aligned}$$



### 三、转子正常运行时的电磁关系

$$\text{转差率: } s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

1、转子电势  $\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2s})$

转速 $n$ 时的  
相电动势

转速 $n$ 时的  
相电流

转速 $n$ 时的  
相漏电抗

$\dot{B}_s$ 与 $n$ 的相对速度为 $n_2$ ，此时转子绕组电势频率 $f_2$

$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = sf_1$$

$$\dot{E}_{2s} = 4.44 f_2 N_2 k_{dp_2} \dot{\Phi}_1 = 4.44 sf_1 N_2 k_{dp_2} \dot{\Phi}_1 = s \dot{E}_2$$

$$X_{2s} = sX_2$$

## 2、定、转子磁势

(1) 定子磁势  $\dot{F}_1$  (由  $\dot{I}_1$  产生) 不再讨论

(2) 转子磁势  $\dot{F}_2$  (由  $\dot{I}_{2s}$  产生)

a、幅值: 
$$F_2 = \frac{m_2}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp_2}}{p} \cdot I_{2s}$$

b、转向: 电流相序决定,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$  时, 逆时针

c、转速:  $n_2 = \frac{60f_2}{p} (r/min)$  —— 相对于转子外表面

$$n_2 = n_1 \text{ —— 相对于定子内表面}$$

(3) 合成磁势

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

# 3、转子绕组的折合

## (1) 频率折合

目的：转子和定子绕组中的电流频率不同，计算不方便

原则：保持转子磁势相对于定子的位置、大小、转速不变

思路：以频率为  $f_1$  的假想的转子电势、电流、漏抗、电阻

替换频率为  $f_2$  的实际的转子电势、电流、漏抗、电阻

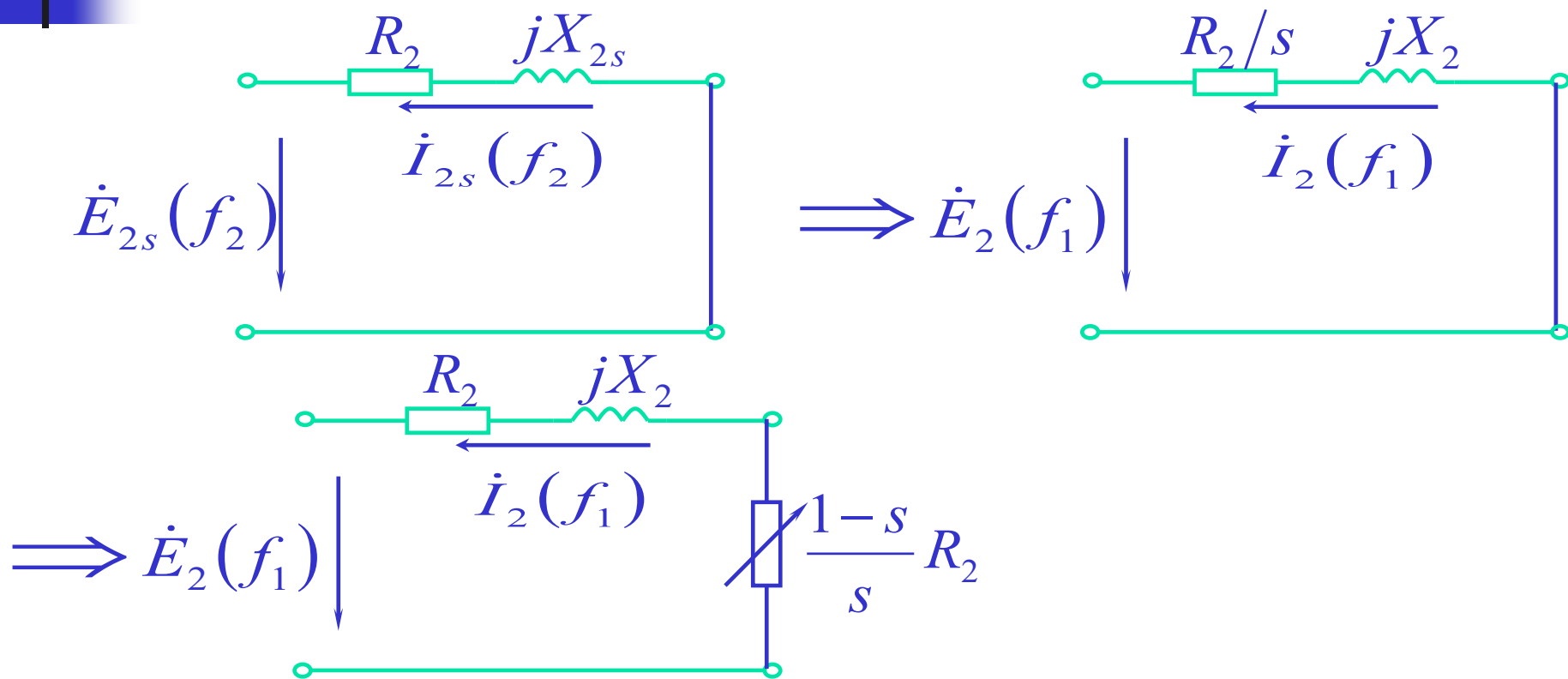
即用静止的等效转子代替旋转的实际转子。

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2s})$$

$$\dot{I}_{2s} \overset{\text{转子旋转}}{\frac{\dot{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_2} \overset{\text{转子静止}}{=} \frac{\dot{E}_2}{R_2/s + jX_2} = \dot{I}_2$$

$$\varphi_{2s} = \varphi_2$$

### 3、转子绕组的折合



$\frac{1-s}{s}R_2$  的含义分析

在转子堵转时转子绕组中串入一个电阻  $(1-s)R_2/s$  后，可以等效旋转的转子

电阻上的功率  $I_2^2 \cdot \frac{1-s}{s}R_2$  为有功功率，转子旋转的总机械功率



## (2) 绕组折算

a、电流折算： $\dot{I}_2 \rightarrow \dot{I}_2'$

$$\dot{F}_2' = \dot{F}_2 \Rightarrow \frac{m_1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_1 k_{dp1}}{p} \cdot \dot{I}_2' = \frac{m_2}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{N_2 k_{dp2}}{p} \cdot \dot{I}_2$$

$$\Rightarrow \dot{I}_2' = \dot{I}_2 / k_i \text{ 电流比}$$

b、电势折算： $\dot{E}_2 \rightarrow \dot{E}_2'$

$$m_1 E_2' I_2' = m_2 E_2 I_2 \Rightarrow \dot{E}_2' \rightarrow k_e \dot{E}_2 \text{ 电压比}$$

c、阻抗折算： $Z_2 \rightarrow Z_2'$

$$Z_2' = k_e k_i Z_2$$

$$R_2' = k_e k_i R_2$$

$$X_2' = k_e k_i X_2$$

## (2) 绕组折算

### 4、基本方程和等值电路

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

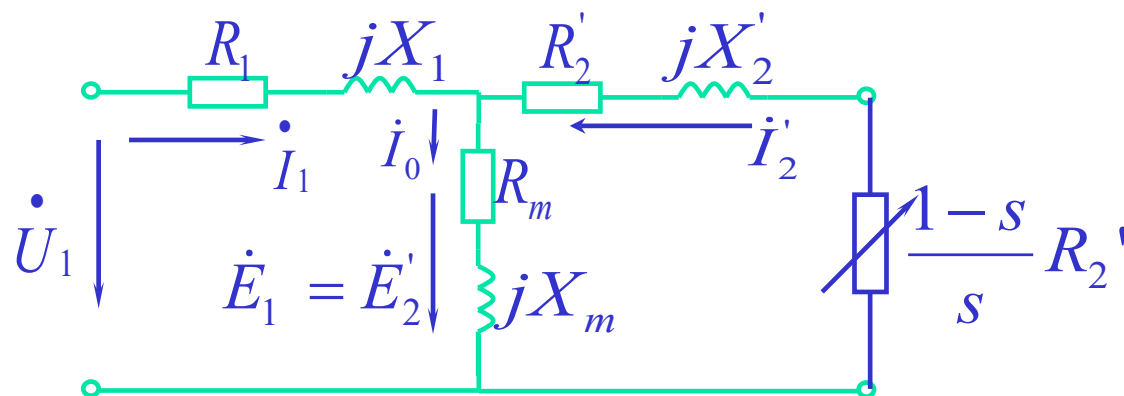
$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0(R_m + jX_m)$$

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

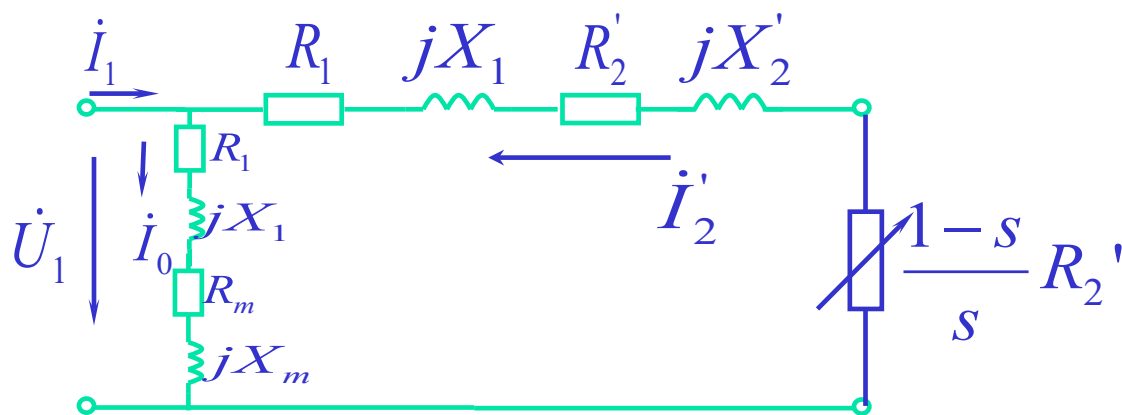
$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2'(R_2'/s + jX_2')$$

$$= \dot{I}_2'Z_2' + \dot{I}_2' \cdot \frac{1-s}{s} R_2'$$



T型等值电路



简化等值电路

### 5、向量图（略）