

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

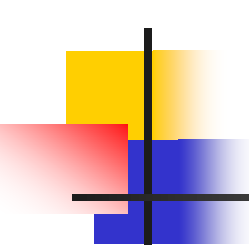
段 峰

教授 博导



第六章 交流电机基础

- 基本概念和结构
- 交流电机电枢绕组电动势
- 交流电机电枢绕组
- 交流电机电枢绕组磁通势



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：

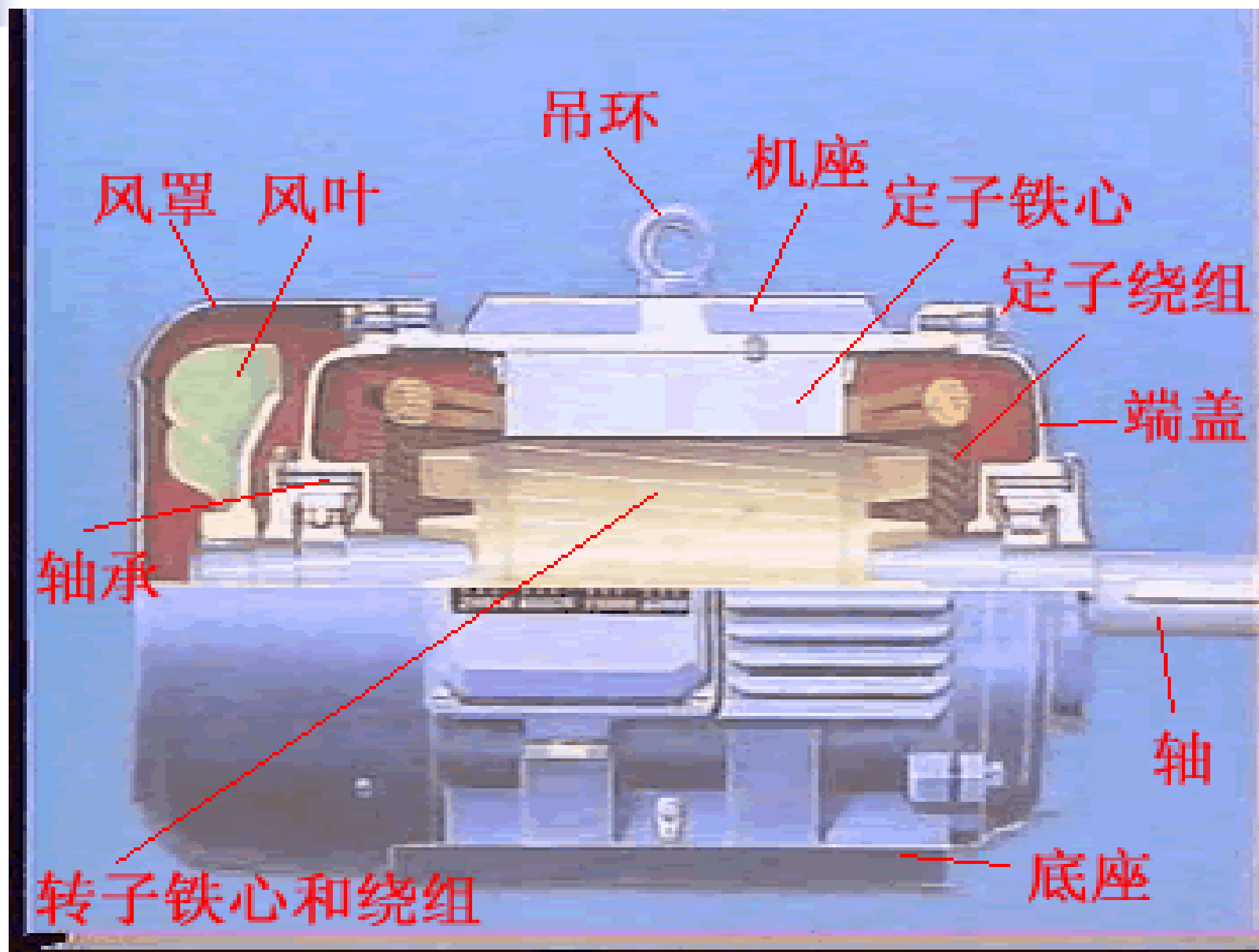
(1) 按定子相数分类：二相、三相

(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

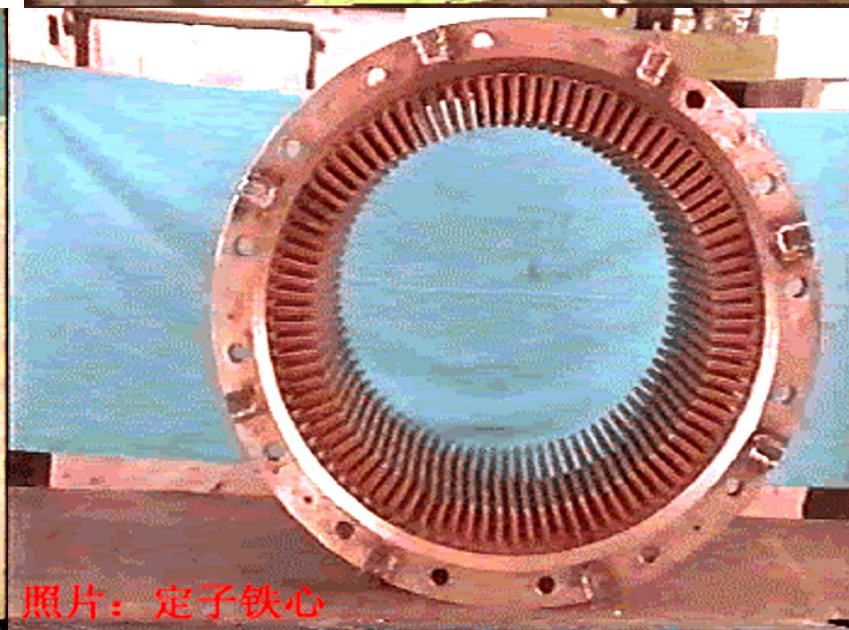
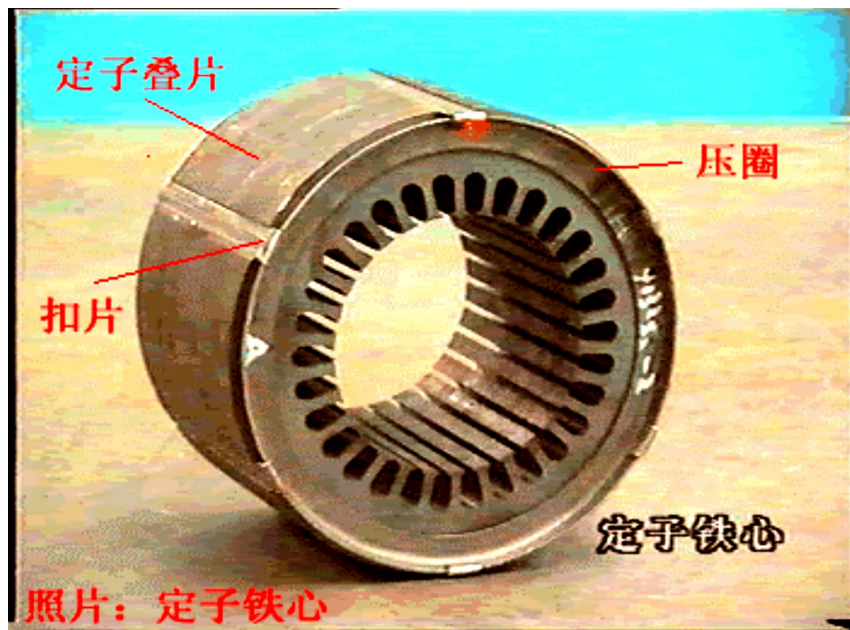
另外：高压、低压、高起动转矩等。

二、结构



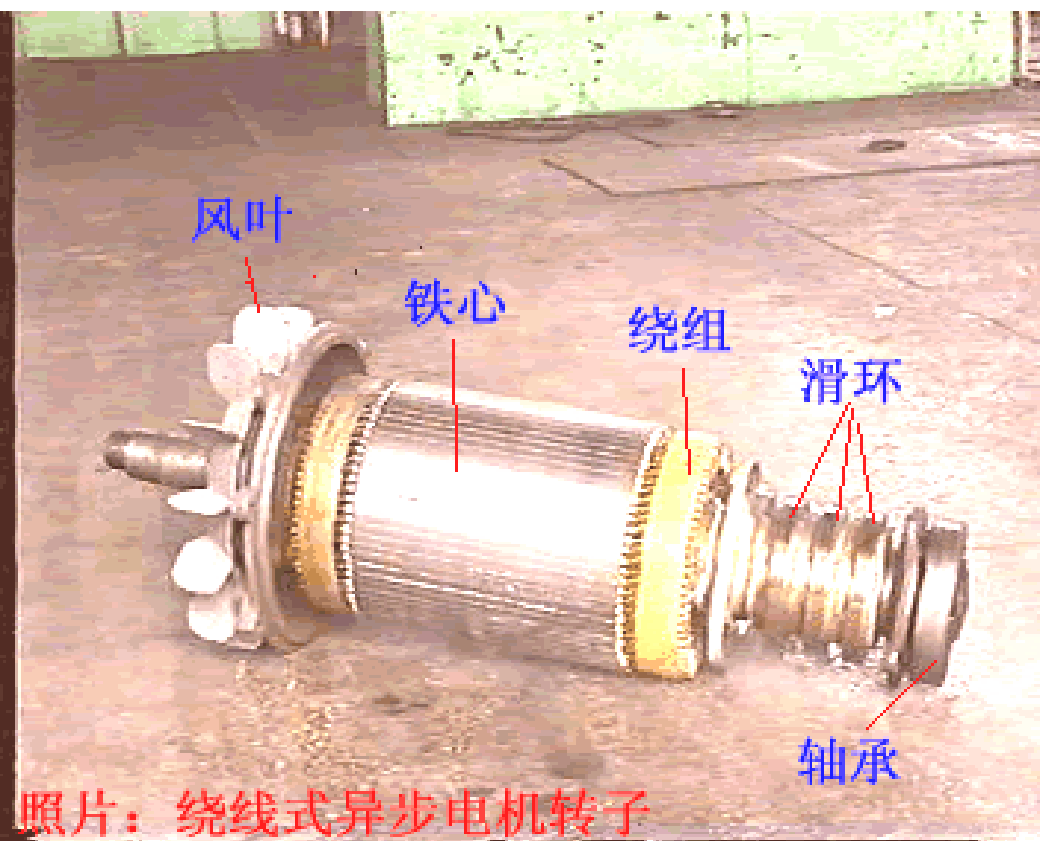
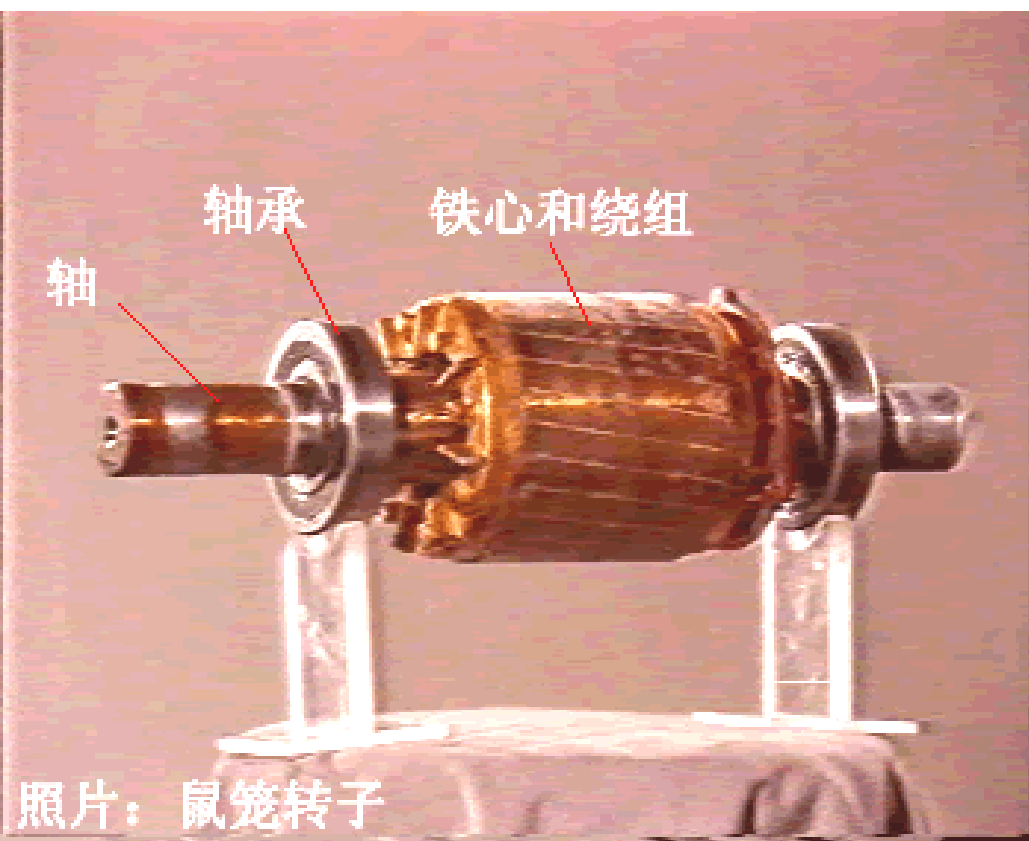
二、结构

1、定子



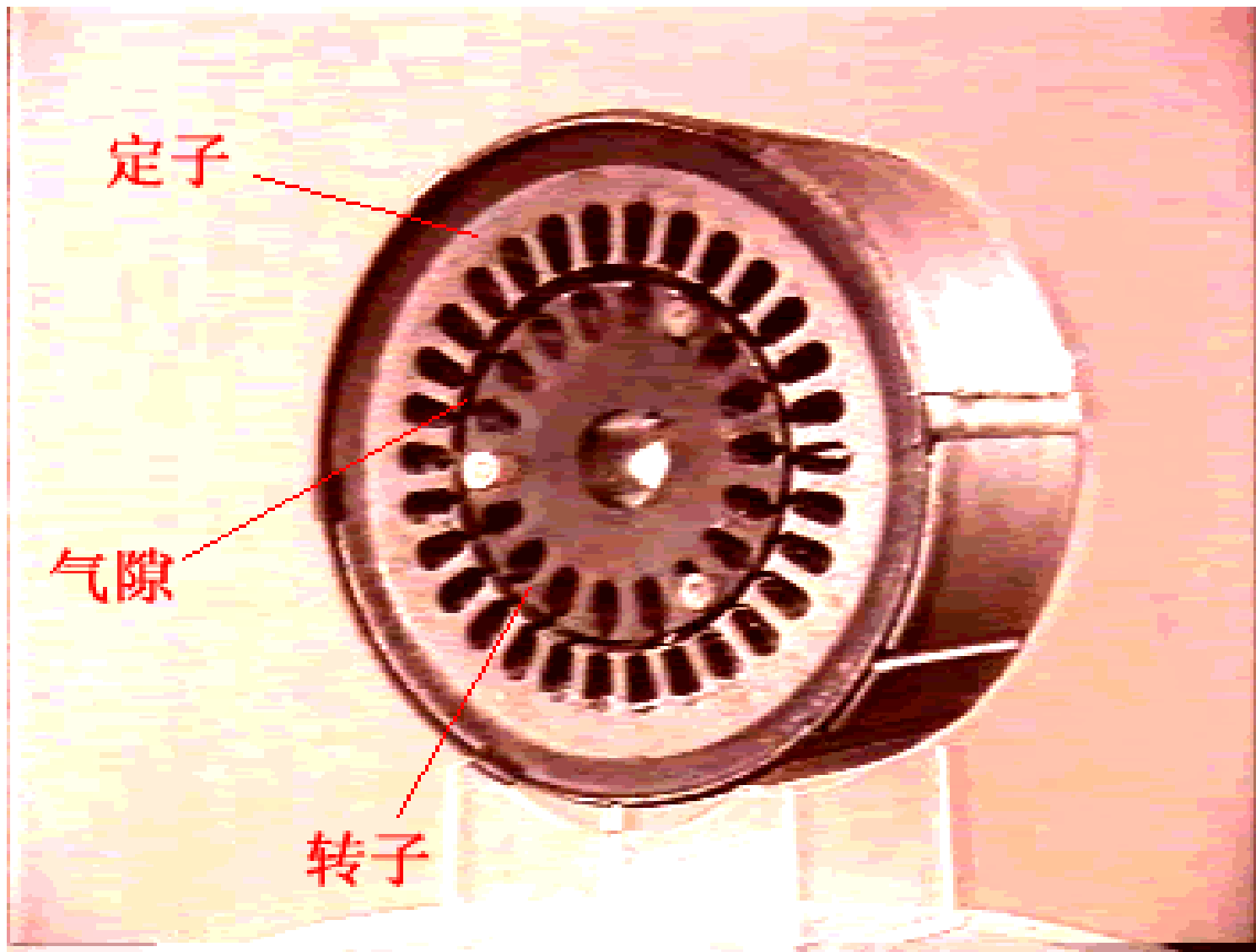
二、结构

2、转子

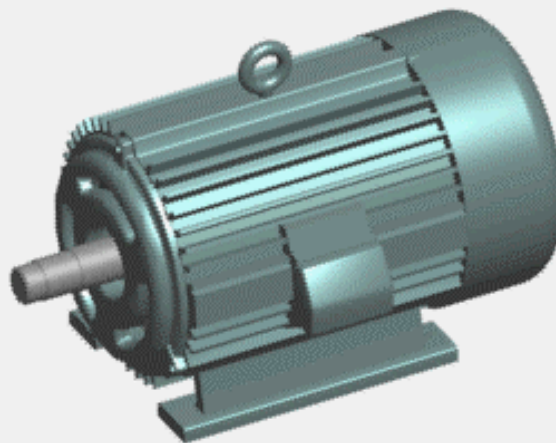


二、结构

3、气隙



三、异步电机电动画



三、同步电机动画





交流电机基本概念

1、同步电机和异步电机

$$n = \frac{60f_1}{p} \rightarrow \text{同步电机}$$

$$n \neq \frac{60f_1}{p} \rightarrow \text{异步电机}$$

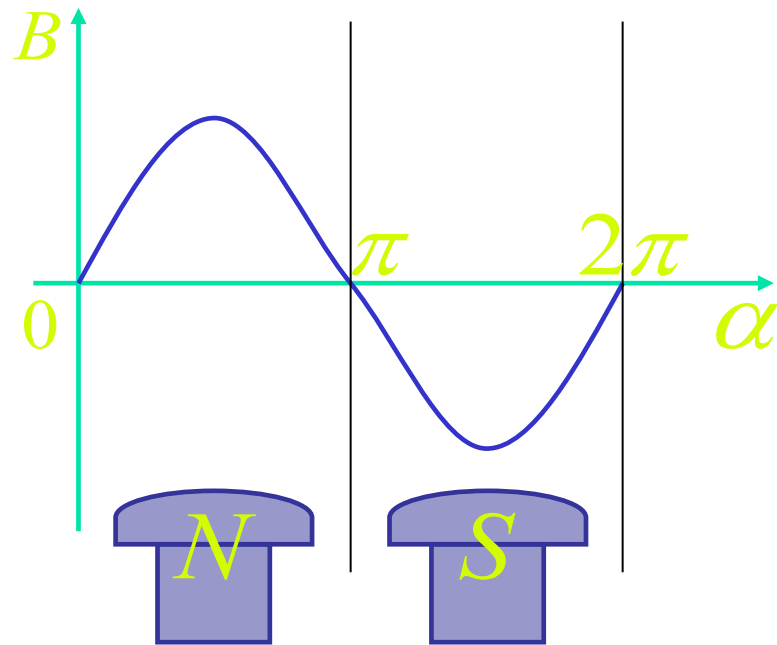
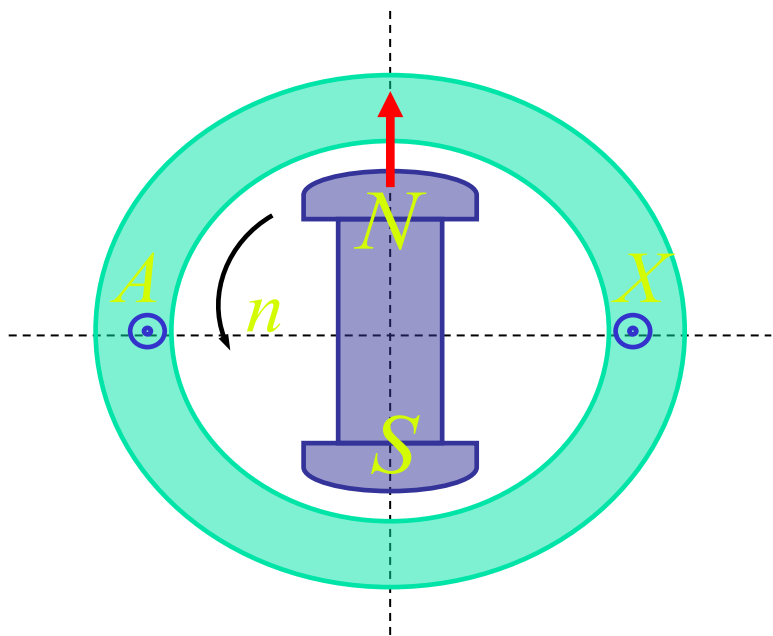
n —— 电机转速

f_1 —— 绕组感应电势基波频率

p —— 电机极对数

交流电机基本概念

2、交流电机电枢：定子绕组为电枢绕组，定子为电枢



3、机械角度 β ：电机定子内圆两点间对应的圆心角。

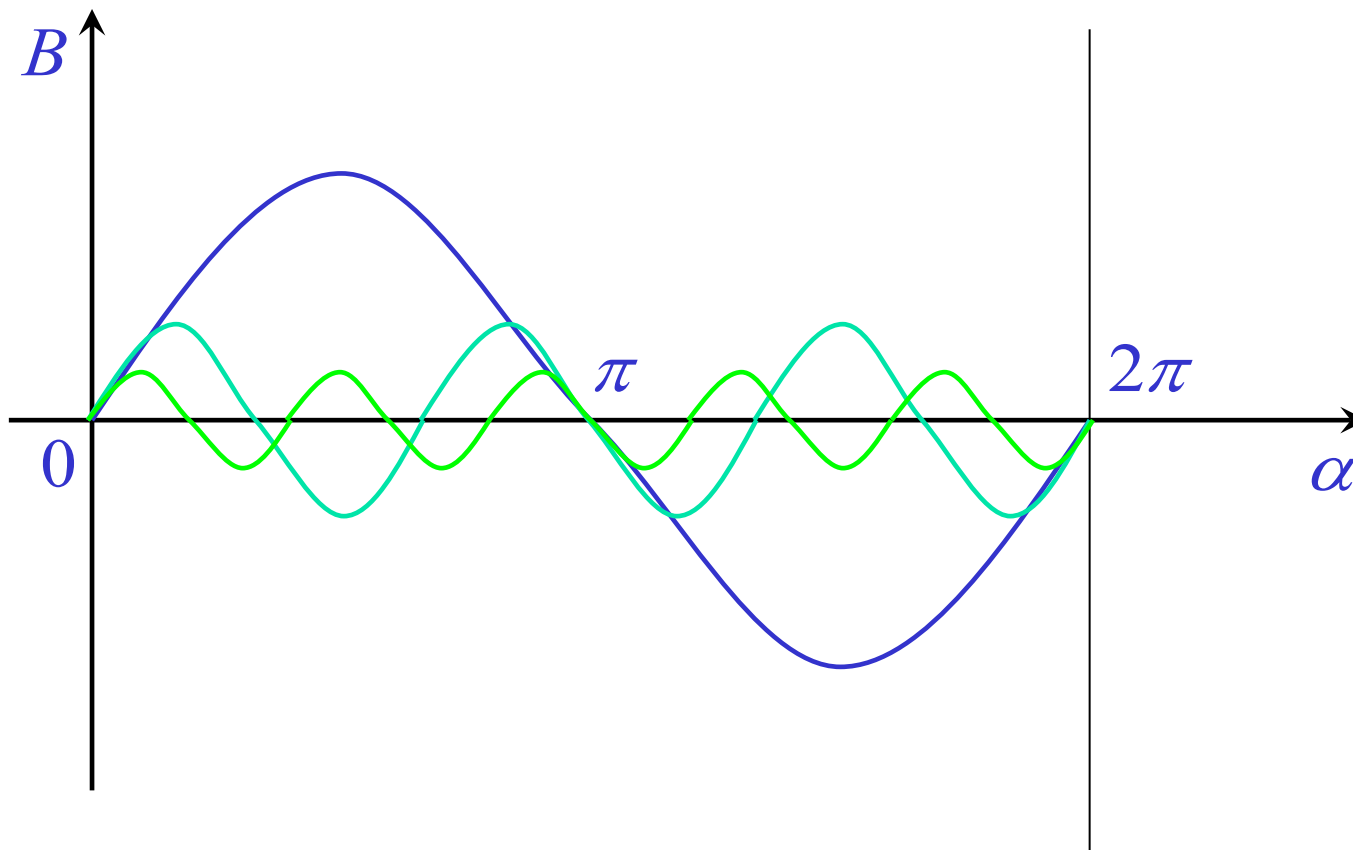
4、空间电角度 α ：一对主磁极 p 对应的磁场为一个周期

$$\alpha = p\beta$$

两点间对应这个周期的角度。

交流电机基本概念

5、基波磁密与谐波磁密：





第一节 交流电机电枢绕组电动势

- 导体电动势
- 整距线匝电动势
- 整距线圈电动势
- 短距线圈电动势
- 整距分布线圈组电动势
- 短距分布绕组电动势
- 谐波电动势

1. 导体电动势（以发电机模型为例）

- 设基波磁密：

$$b_{\delta} = B_{\delta} \sin \alpha$$

B_{δ} 是气隙磁密最大值

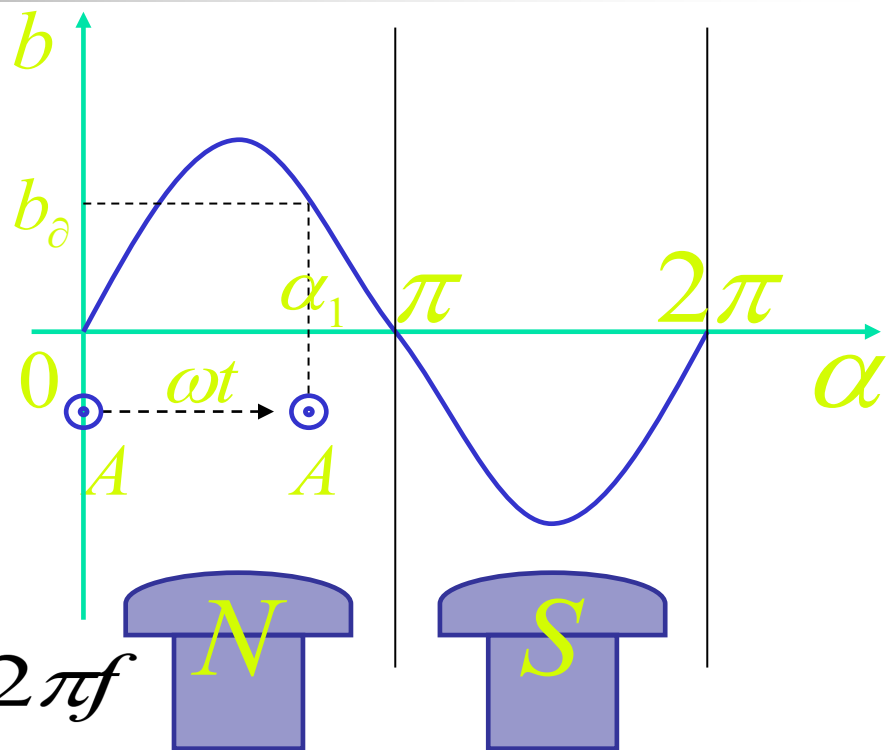
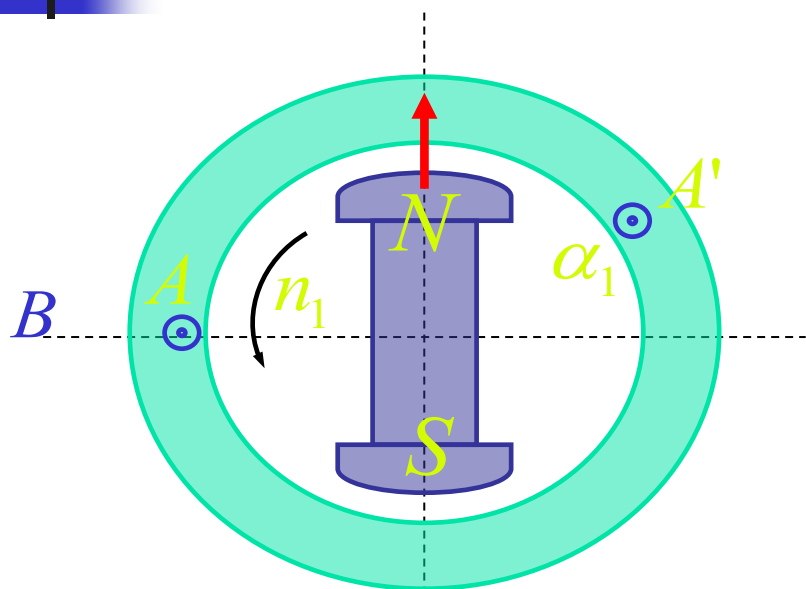
- 基波感应电动势为：

$$e = b_{\delta} l v$$

b_{δ} 为气隙磁密， l 为切割磁力感应线的导体长度

v 为导体垂直切割磁感应线的相对线速度

一、导体电动势（以发电机模型为例）



$$\omega = 2\pi p \frac{n}{60} = 2\pi f$$

$$\alpha = \omega t$$

$$b_\delta = B_\delta \sin \alpha = B_\delta \sin \omega t$$

$$e = b_\delta l v = B_\delta l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t$$

感生电动势

导体有效长度

基波最大值

基波有效值

一、导体电动势（以发电机模型为例）

e 的频率: $f = \frac{n}{60}$

每极平均磁密: $B_{av} = \frac{2}{\pi} B_{\delta}$

极对数 p 时: $f = \frac{pn}{60}$

即: $B_{\delta} = \frac{\pi}{2} B_{av}$

$$n = \frac{60f}{p}$$

每极磁通: $\Phi = B_{av} \tau l$

$$B_{av} = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_{\delta} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} B_{\delta}$$

线速度: $v = 2p\tau \frac{n}{60} = 2\tau f$

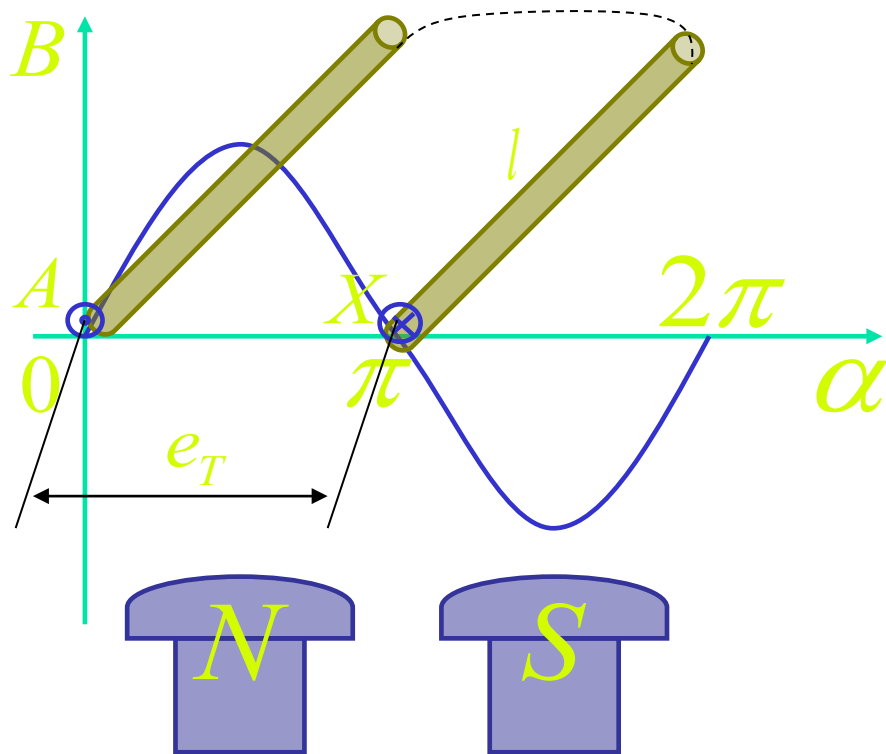
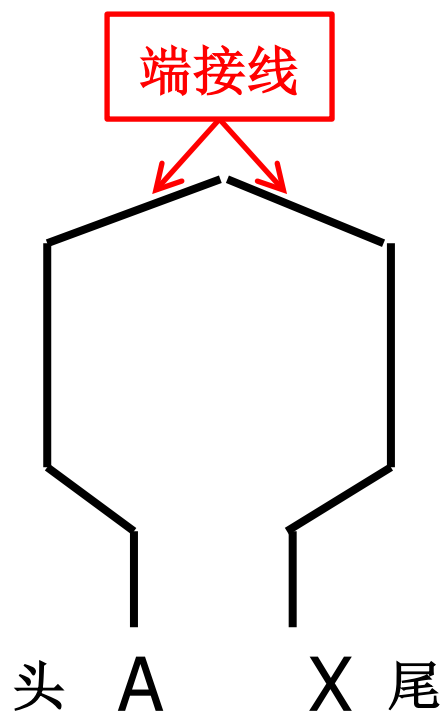
$$\therefore E_m = B_{\delta} l v = \frac{\pi}{2} B_{av} l \times 2\tau f = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi}{\tau l} \times l \times 2\tau f = \pi f \Phi$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f \Phi = 2.22 f \Phi$$

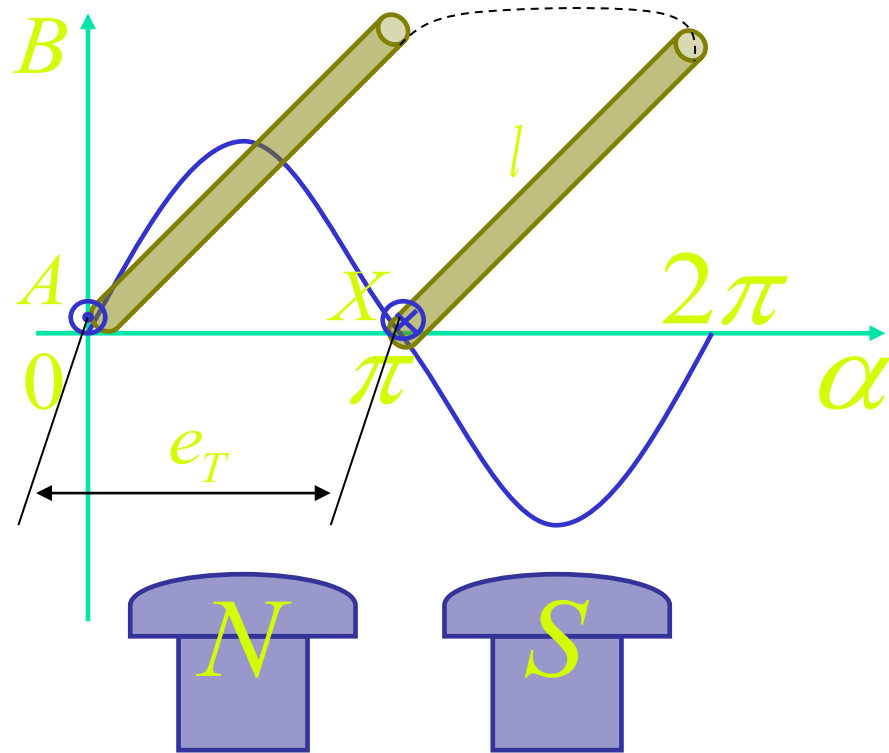
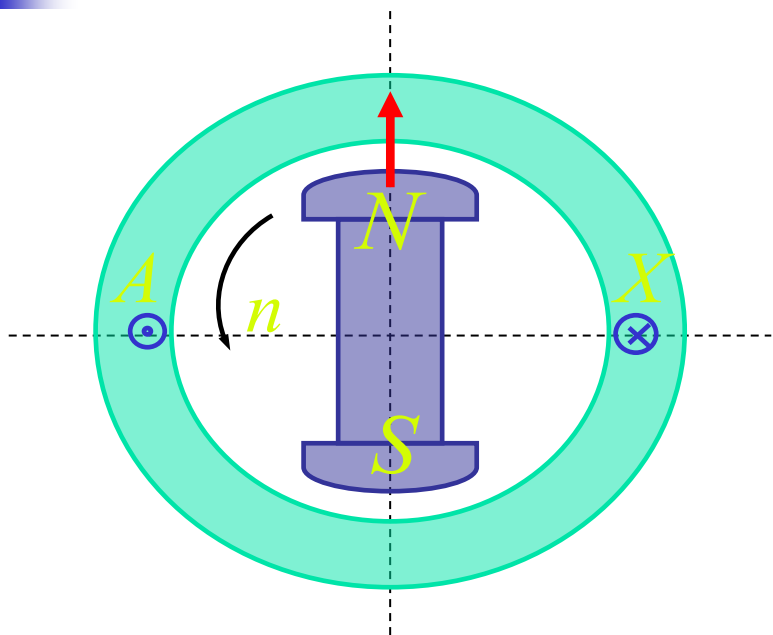
单根导体电动势基波有效值

二、整距线匝电动势

整距：二导体相距一个整极距，一个在N极下，另一个在S极下



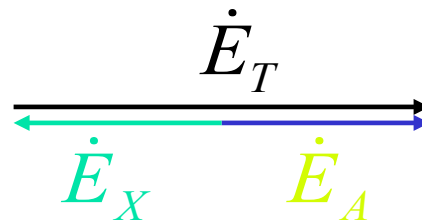
二、整距线匝电动势



$$e_T = e_A - e_X$$

$$\dot{E}_T = \dot{E}_A - \dot{E}_X$$

有效值: $E_T = 2E_A = 4.44f\Phi$



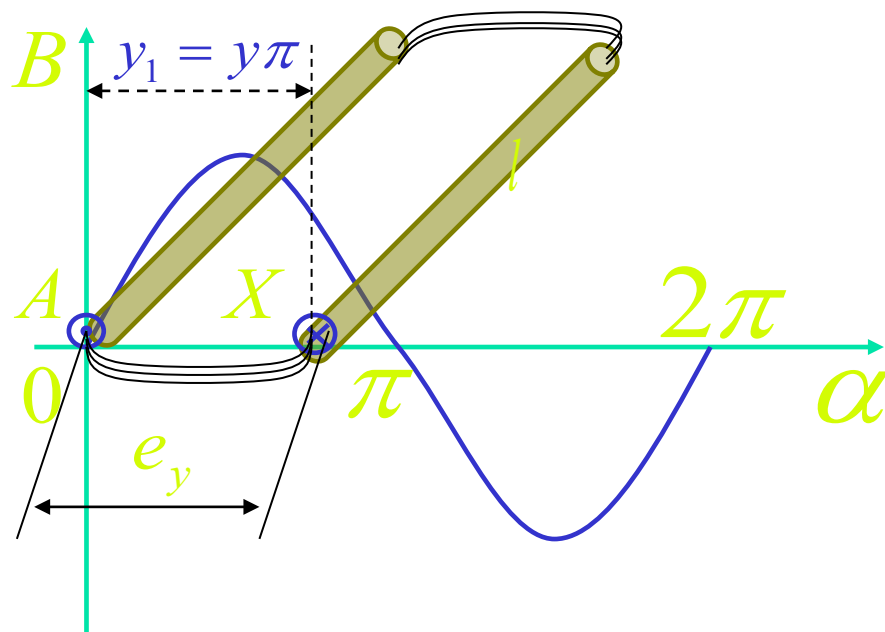
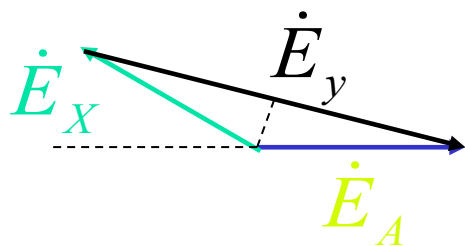
三、整距线圈电动势——很多匝元件组成

- N_y 匝元件串联——线圈
- y_1 为节距——线圈两边的距离
- 当 $y_1 = \pi$ 时，为整距线圈
- 当 $y_1 < \pi$ 时，为短距线圈

$$E_y = 4.44 f N_y \Phi$$

四、短距线圈电动势

$$y_1 = y\pi \quad 0 < y < 1$$



$$E_y = 2E_A \sin \frac{y\pi}{2} = 4.44 f N_y k_p \Phi \quad k_p = \sin \frac{y\pi}{2} \text{ 基波短距系数}$$

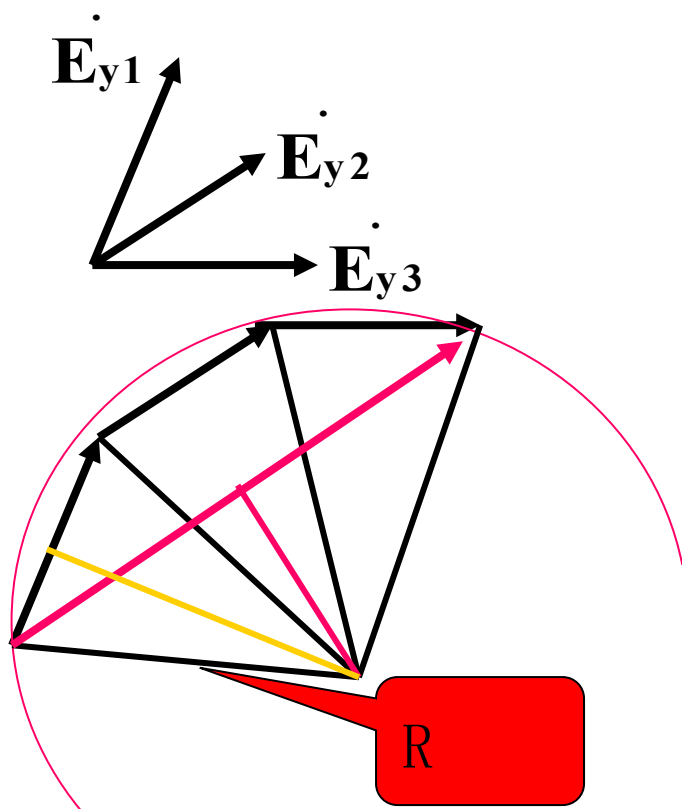
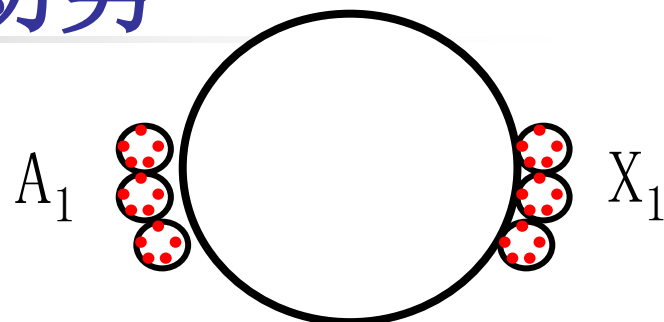
■ 例题: 174页6-2

五、整距分布线圈组电动势

线圈组由 q 个槽中线圈串联而成。

设 $q=3$ ，三个线圈基波电势分别为：

$\dot{\mathbf{E}}_{y1}, \dot{\mathbf{E}}_{y2}, \dot{\mathbf{E}}_{y3}$ ，大小相等，相位差一个槽距角 α 。

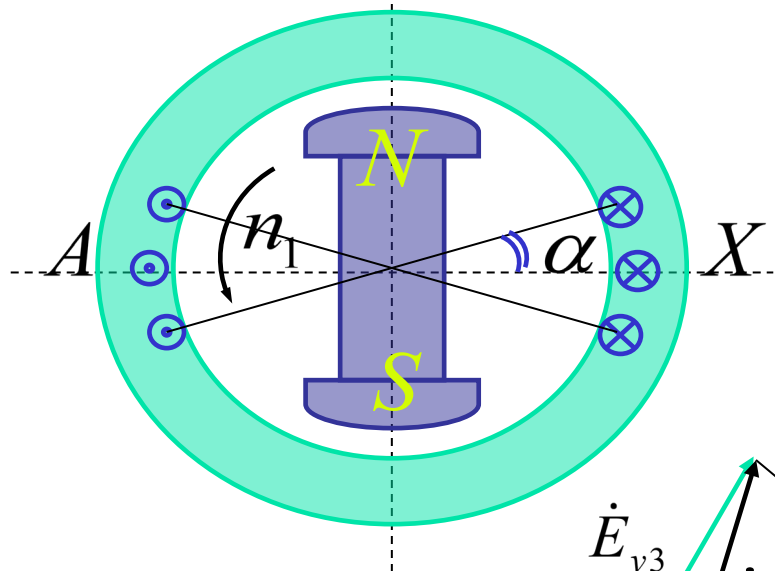


线圈组电势应是 q 个线圈电势的相量和。

$$\dot{\mathbf{E}}_{q1} = \dot{\mathbf{E}}_{y1} + \dot{\mathbf{E}}_{y2} + \dot{\mathbf{E}}_{y3}$$

相量合成时有一个外接圆。

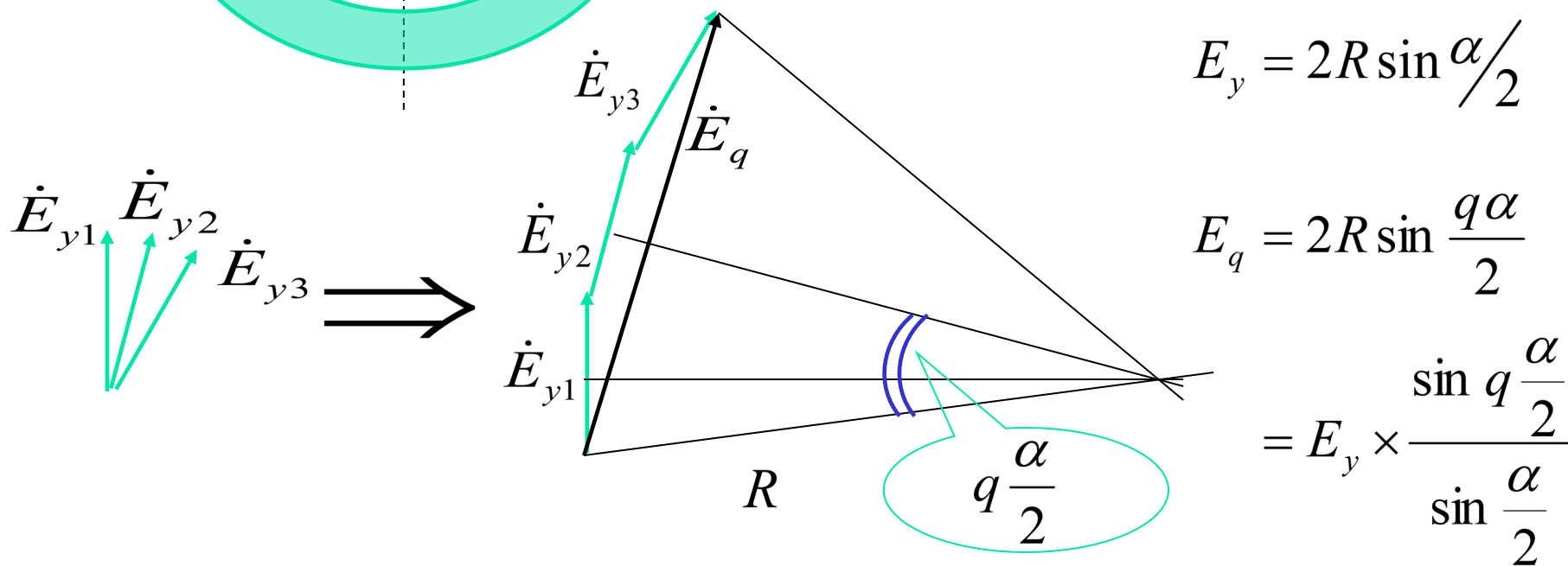
五、整距分布线圈组电动势



α ——槽距角

q ——分布线圈个数

$$\dot{E}_q = \dot{E}_{y1} + \dot{E}_{y2} + \dots + \dot{E}_{yq}$$



五、整距分布线圈组电动势

- 几何学求解：

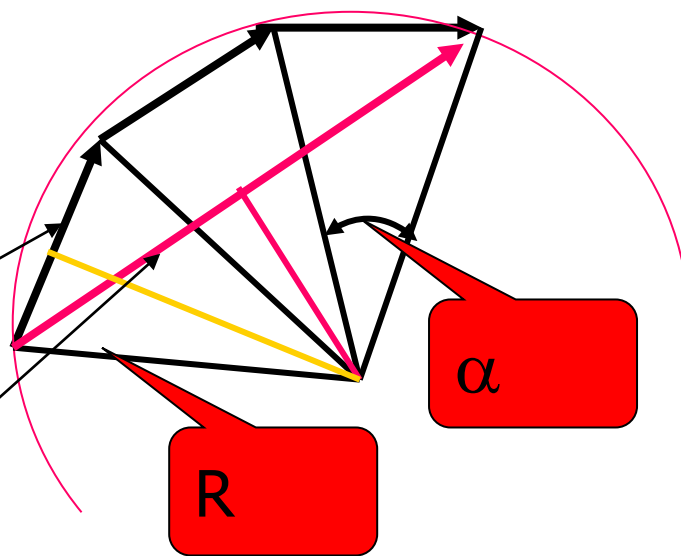
$$E_y = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

α 为相邻线圈的空间电角度

一个组的：

$$E_q = 2R \sin q \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{E_q}{qE_y} = \frac{2R \sin(q \frac{\alpha}{2})}{2qR \sin(\frac{\alpha}{2})}$$





五、整距分布线圈组电动势

$$E_q = qE_y \frac{\sin(q \frac{\alpha}{2})}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = qE_y k_d$$

$$k_d = \frac{\sin(q \frac{\alpha}{2})}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad \text{基波分布系数}$$

$$E_q = qk_d 4.44 f N_y \Phi = 4.44 f q N_y k_d \Phi$$

六、短距分布线圈组的电动势

$$E_q = 4.44 f q N_y k_d k_p \Phi$$
$$= 4.44 f q N_y k_{dp} \Phi$$

$$k_{dp} = k_d k_p$$

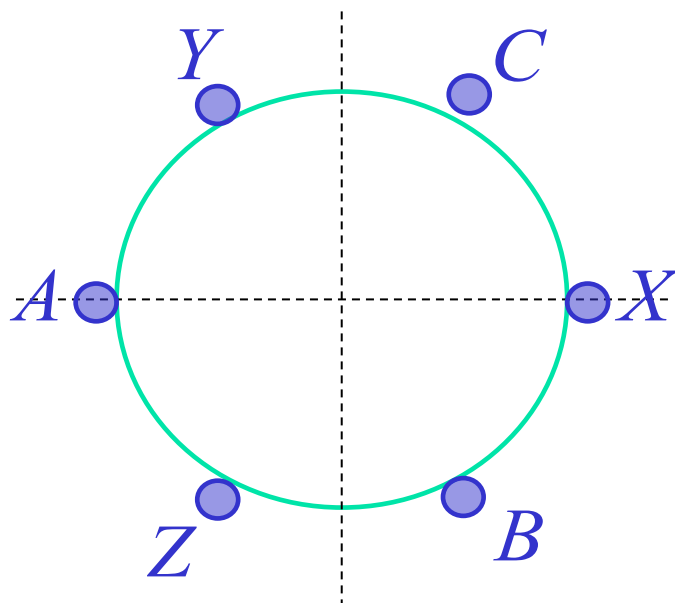
基波绕组系数

分布系数

短距系数

第二节 交流电机电枢绕组的电动势

- 一、三相单层绕组
- 1、三相单层集中整距绕组



- 感应电动势波形不理想，电枢表面空间利用不好

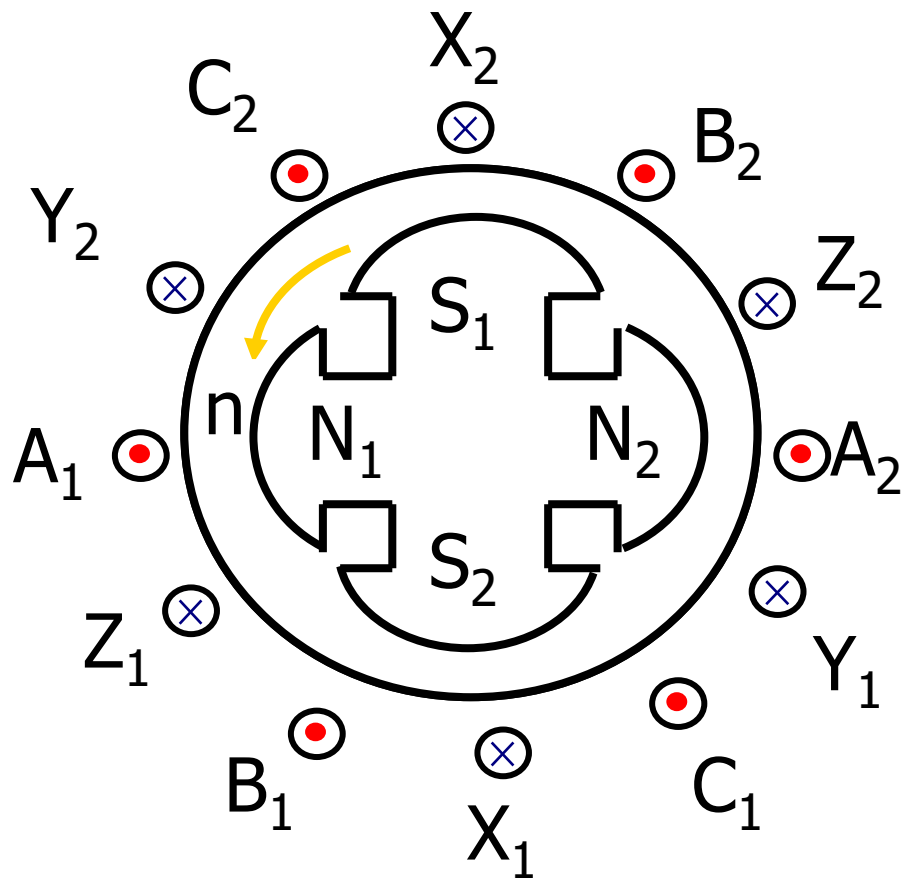
1、三相单层集中整距绕组

$P=2$ 时，绕组的排列

每对磁极下，都应有一个ABC三相绕组，其排列顺序在一对磁极下应对称。

结论：

三相绕组排列顺序为：每对磁极下，六个绕组端在空间沿转子转向排列顺序为：A、Z、B、X、C、Y；且互差 60° 电角度。





1、三相单层集中整距绕组

$$\dot{E}_A = E \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_B = E \angle -120^\circ$$

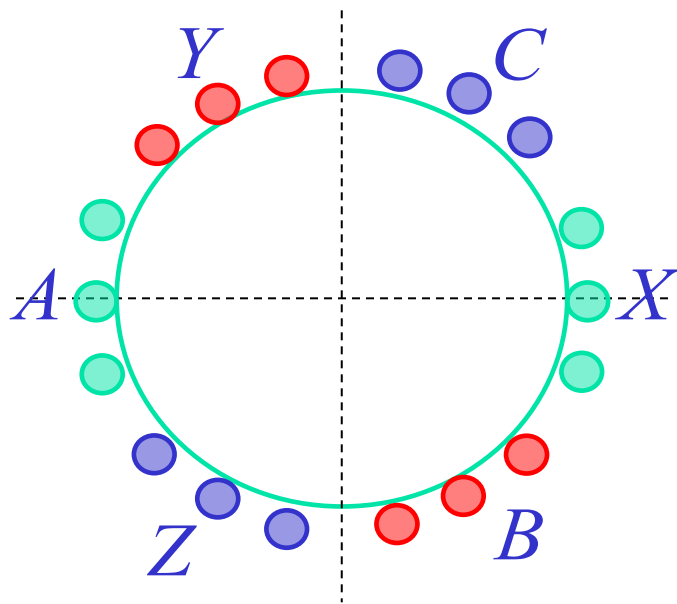
$$\dot{E}_C = E \angle -240^\circ$$

$$E_{A1X1} = E_{A2X2} = 4.44 f N_y \Phi$$

$$E_\phi = 2E_{A1X1}$$

2、三相单层分布绕组

每相绕组不可能放在一个槽中，应均匀放在相邻的几个槽中，串联在一起。

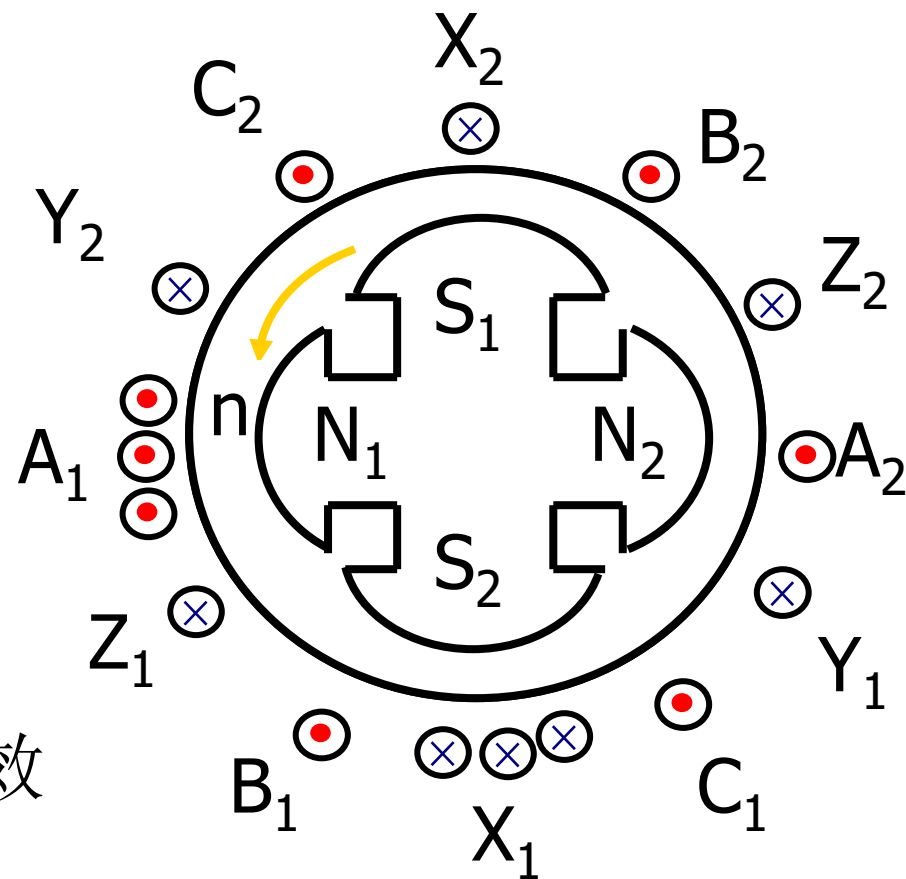


2、三相单层分布绕组

$$\text{每极每相槽数 } q = \frac{\text{总槽数 } Z}{2pm}$$

P: 极对数; m: 相数为3。

线圈节距 Y_1 : 一个线圈的两个有效边之间的距离。



$$y_1 \approx \tau = \frac{Z}{2p} \quad \text{槽距角 } \alpha = \frac{p \times 360}{Z} = \frac{\text{总电角度}}{\text{总槽数}}$$

已知一台电机,如图 6.11 所示,定子上总槽数 $Z=24$,极对数 $p=2$,转子逆时针方向旋转,转速为 $n(\text{r/min})$,试连接成三相单层分布绕组。分析的步骤如下:

第一步,先计算定子相邻两槽之间的槽距角 α :

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$

第二步,画基波电动势星形相量图。

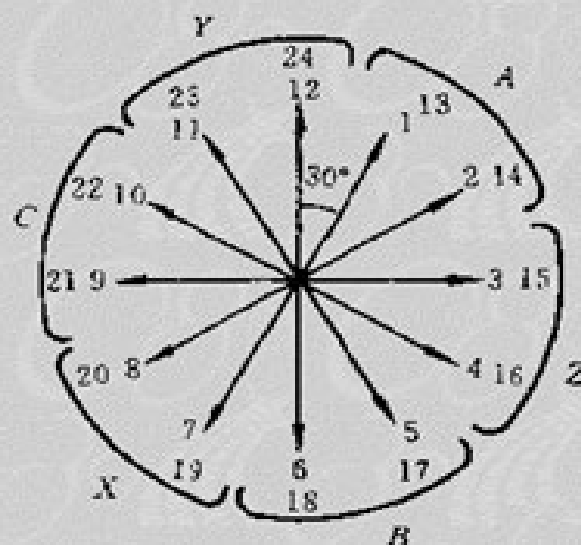
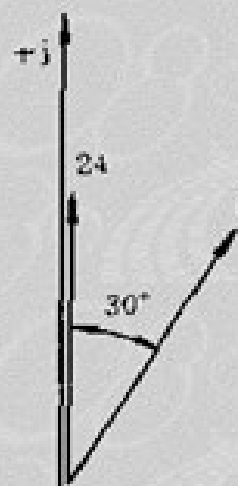
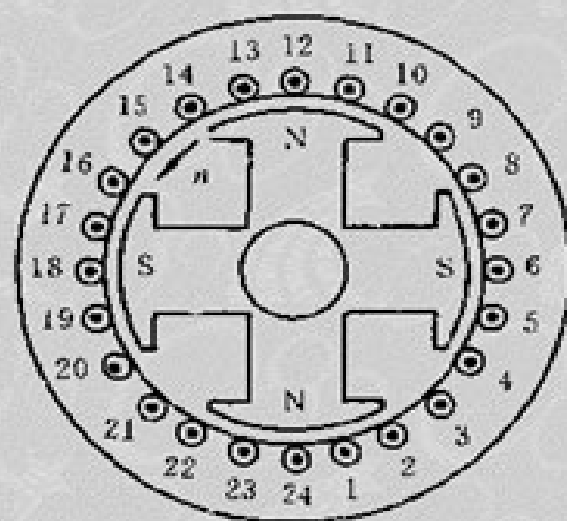


图 6.11 $p=2, Z=24$ 的电机 图 6.12 导体 24 与导体 1 的基波电动势

第三步,按 60° 相带法分相。

根据基波电动势星形相量图,把有关槽里的导体分配到三个相里去,从而连接成三相对称绕组。

60°相带法。图 6.13 中每 60°相带中有两个槽导体,用每相在每极下的槽数 q 表示。 q 的计算方法为

$$q = \frac{Z}{2mp} = \frac{24}{2 \times 3 \times 2} = 2$$

第四步,画绕组的连接图。

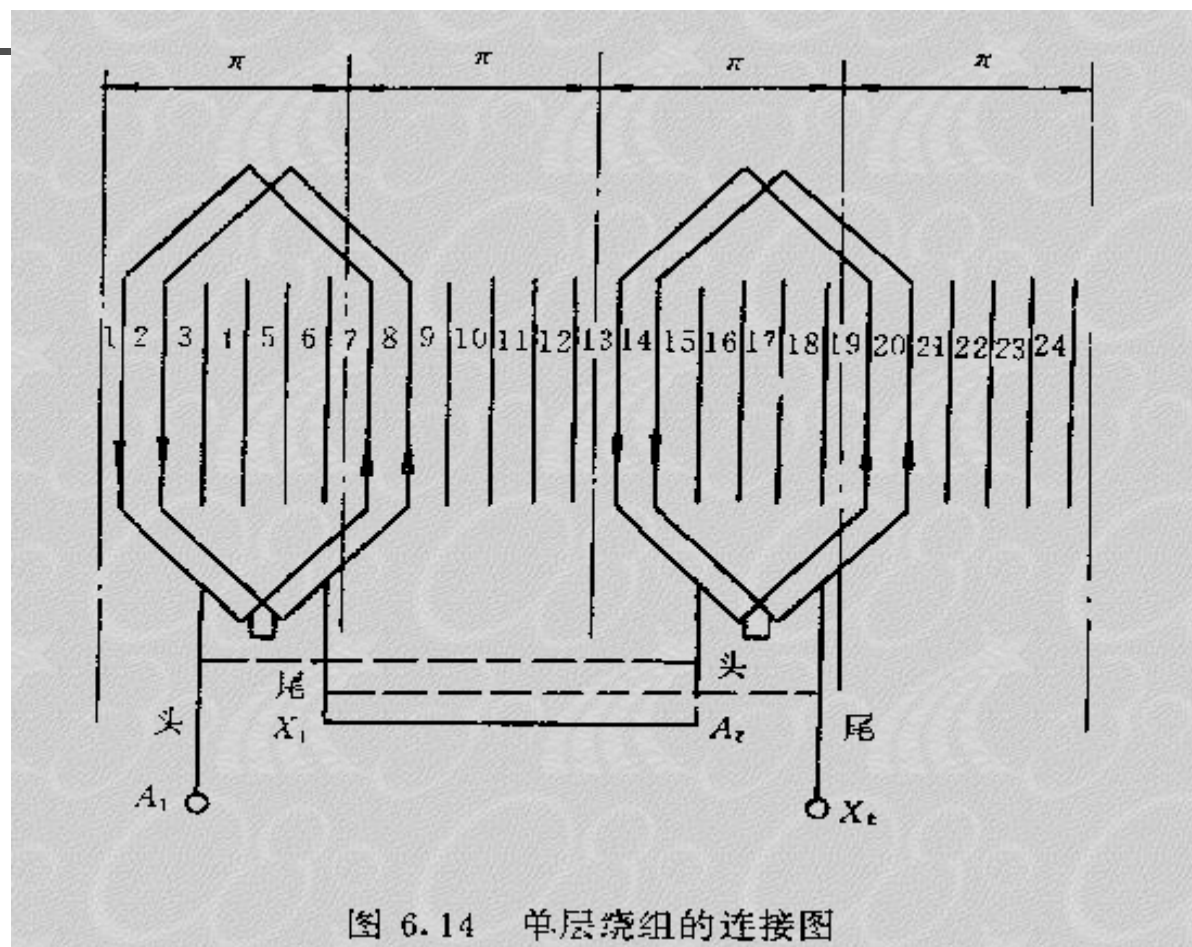


图 6.14 单层绕组的连接图

第五步,确定绕组并联的路数。

第六步,计算相电动势。

2、三相单层分布绕组

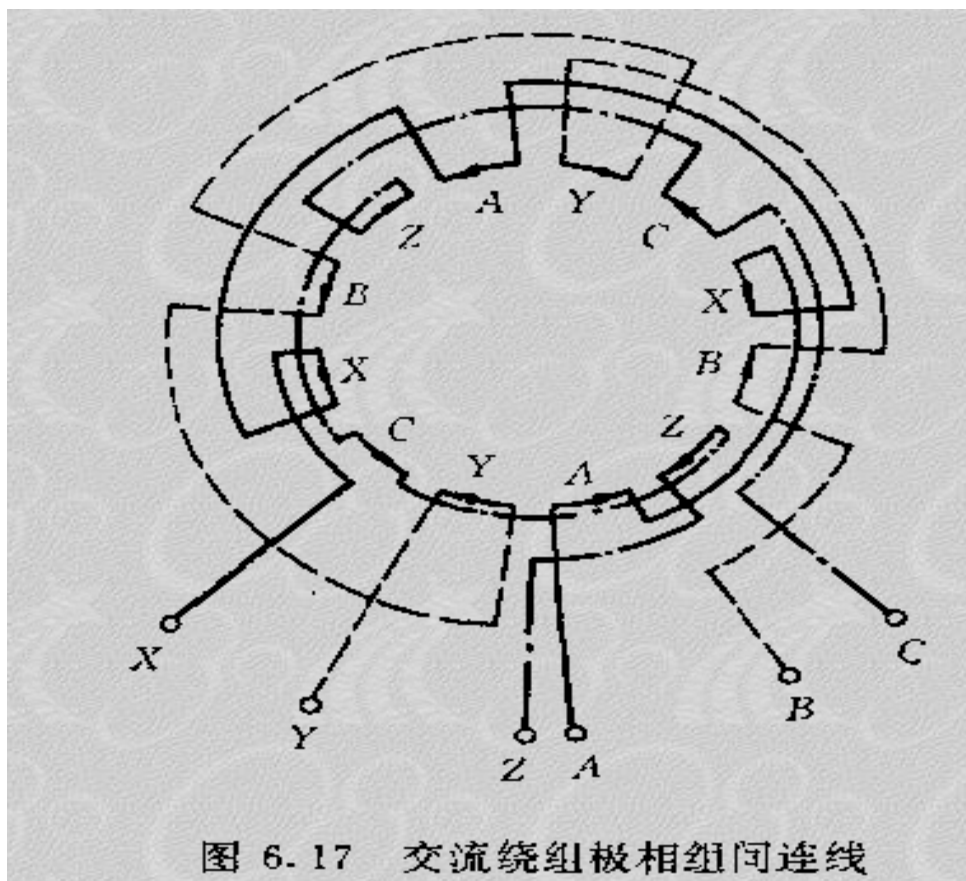
■ 每相基波电动势：

$$\begin{aligned} E_{\phi} &= 4.44 f q N_y k_d p \frac{1}{a} \Phi \\ &= 4.44 f \frac{pq N_y}{a} k_d \Phi \\ &= 4.44 f N k_d \Phi \\ N &= \frac{pq N_y}{a} \quad \text{一相绕组串联的总匝数} \end{aligned}$$

并联支路数

二、三相双层绕组

- 1、每个槽分上下两层；
- 2、线圈的一个边在上层，另一个边在下层；
- 3、最大 $a=2p$ ；





二、三相双层绕组的电动势

显然有：

$$E_{\phi} = 4.44 f N k_{dp} \Phi$$

$$N = \frac{2pqN_y}{a} \quad \text{每相绕组串联的总匝数}$$

注： 1 . 单层绕组嵌线方便，无需层间绝缘。**10Kw以下用单层绕组。**

缺点：不能灵活采用短距线圈以抑制谐波电动势，漏电抗比较大。

2 . 双层绕组可改变短距系数，可改善电动势波形。

三、绕组的谐波电动势

- 绕组电动势：基波、谐波
- 基波 + 3 次，5 次，7 次 . . .
- 谐波短距系数： $k_{pv} = \sin v\gamma \frac{\pi}{2}$

$$\text{谐波分布系数： } k_{dv} = \frac{\sin q \frac{v\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}$$

$$\text{谐波绕组系数： } k_{dpv} = k_{dv} \cdot k_{pv}$$

三、绕组的谐波电动势

五次、七次谐波短距系数

$$k_{p5} = \sin 5y \frac{\pi}{2} = \sin 5 \times \frac{5}{6} \times \frac{\pi}{2} = 0.259$$

$$k_{p7} = \sin 7y \frac{\pi}{2} = \sin 7 \times \frac{5}{6} \times \frac{\pi}{2} = 0.259$$

五次、七次谐波分布系数

$$k_{d5} = \frac{\sin q \frac{5a}{2}}{q \sin \frac{5a}{2}} = \frac{\sin 2 \times \frac{5 \times 30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{5 \times 30^\circ}{2}} = 0.259$$

$$k_{d7} = \frac{\sin q \frac{7a}{2}}{q \sin \frac{7a}{2}} = \frac{\sin 2 \times \frac{7 \times 30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{7 \times 30^\circ}{2}} = -0.259$$



三、绕组的谐波电动势

五次、七次谐波绕组系数

$$k_{dp5} = k_{d5} k_{p5} = 0.067$$

$$k_{dp7} = k_{d7} k_{p7} = 0.067$$

因此：谐波电动势很小，可以忽略。

例题 6-4 一台三相异步电动机,定子采用双层短距分布绕组。已知定子总槽数 $Z=36$,极对数 $p=3$,线圈的节距 $y_1=5$ 槽,每个线圈串联的匝数 $W_y=20$,并联支路数 $a=1$,频率 $f=50\text{Hz}$,基波每极磁通量 $\Phi=0.00398\text{Wb}$,求:

- (1) 导体基波电动势;
- (2) 线匝基波电动势;
- (3) 线圈基波电动势;
- (4) 极相组基波电动势;
- (5) 相绕组基波电动势。

解

- (1) 导体基波电动势:

$$E = 2.22f\Phi = 2.22 \times 50 \times 0.00398 \\ = 0.442\text{V}$$

- (2) 线匝基波电动势:先计算基波短距系数

$$k_y = \sin y \frac{\pi}{\tau} = \sin \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2} = \sin \frac{5}{6} \frac{\pi}{2} = 0.966$$

式中 τ 是极距(用槽数表示),数值为

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

$$y = \frac{y_1}{\tau} = \frac{5}{6}$$

于是短距线匝基波感应电动势为

$$E_T = 4.44fk_y\Phi_1 = 4.44 \times 50 \times 0.966 \times 0.00398 = 0.854\text{V}$$

(3) 线圈基波电动势

$$\begin{aligned} E_y &= 4.44 f k_y W_y \Phi = 4.44 \times 50 \times 0.966 \times 20 \times 0.00398 \\ &= 17\text{V} \end{aligned}$$

(4) 极相组基波电动势: 每极每相的槽数(线圈数)

$$q = \frac{Z}{2mp} = \frac{36}{2 \times 3 \times 3} = 2$$

槽距角

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{3 \times 360^\circ}{36} = 30^\circ$$

基波分布系数

$$k_q = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 2 \times \frac{30^\circ}{2}}{2 \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0.965$$

绕组系数

$$k_w = k_y k_q = 0.966 \times 0.965 = 0.932$$

极相组基波电动势为

$$\begin{aligned} E_q &= 4.44 f q W_y k_w \Phi \\ &= 4.44 \times 50 \times 2 \times 20 \times 0.932 \times 0.00398 \\ &= 32.94\text{V} \end{aligned}$$

(5) 相绕组基波电动势：每相绕组串联总匝数

$$W = \frac{2pq}{a} W_y = \frac{2 \times 3 \times 2}{1} \times 20 = 240$$

相绕组基波电动势为

$$\begin{aligned} E_\phi &= 4.44 f W k_w \Phi \\ &= 4.44 \times 50 \times 240 \times 0.932 \times 0.00398 = 197.6 \text{V} \end{aligned}$$

第三节 交流电机电枢绕组的磁势

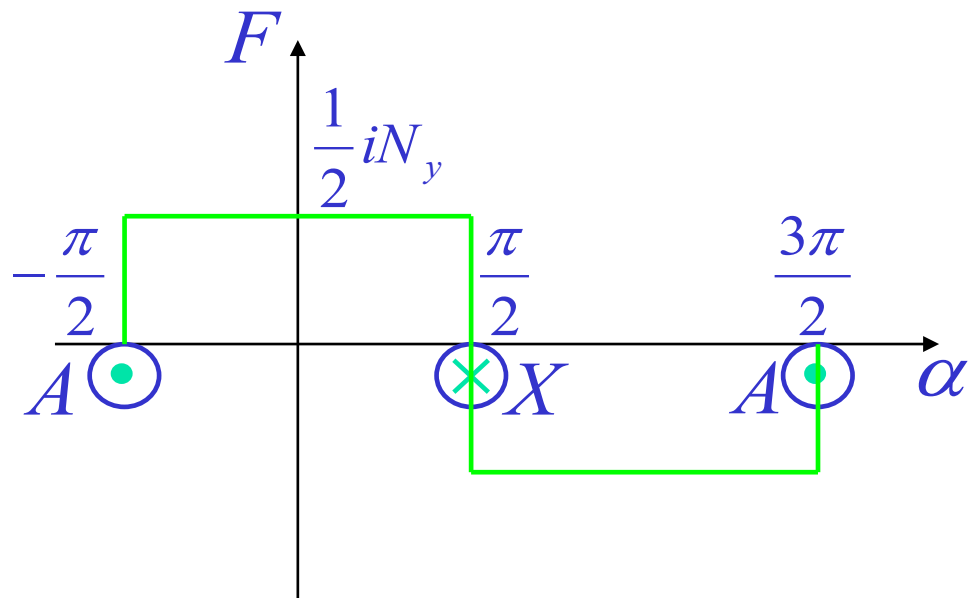
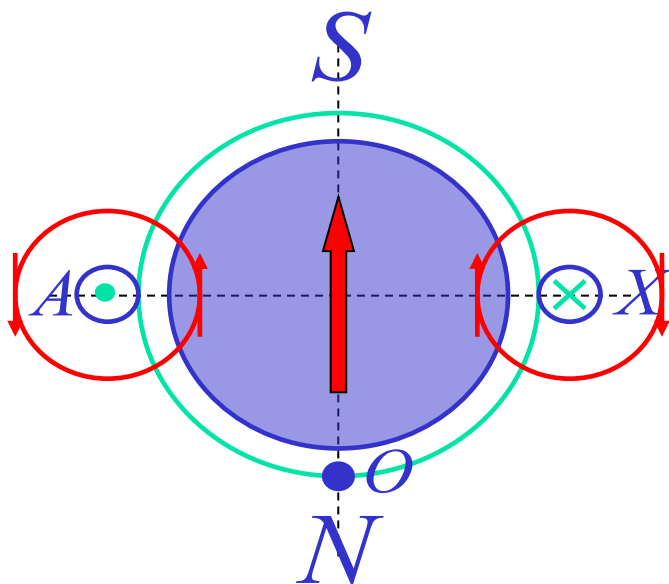
- 本节讲述旋转磁场产生的基本原理；
- 通俗地讲：对称的三相绕组通以三相对称电流，产生圆形旋转磁势，从而在气隙中形成旋转磁场；
- 推而广之：对称的 m 相绕组通以 m 相对称电流，产生圆形旋转磁势，在气隙中形成旋转磁场；
- 旋转磁场的产生可以从物理上分析，也可进行数学分析，二者结论一致，我们从物理概念上对其进行分析。



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
- 同步电机的工作原理

一、整距线圈的磁势



$$i = \sqrt{2} I \cos \omega t \quad \text{I是电流有效值, } \omega t \text{是时间电角度}$$

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

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：

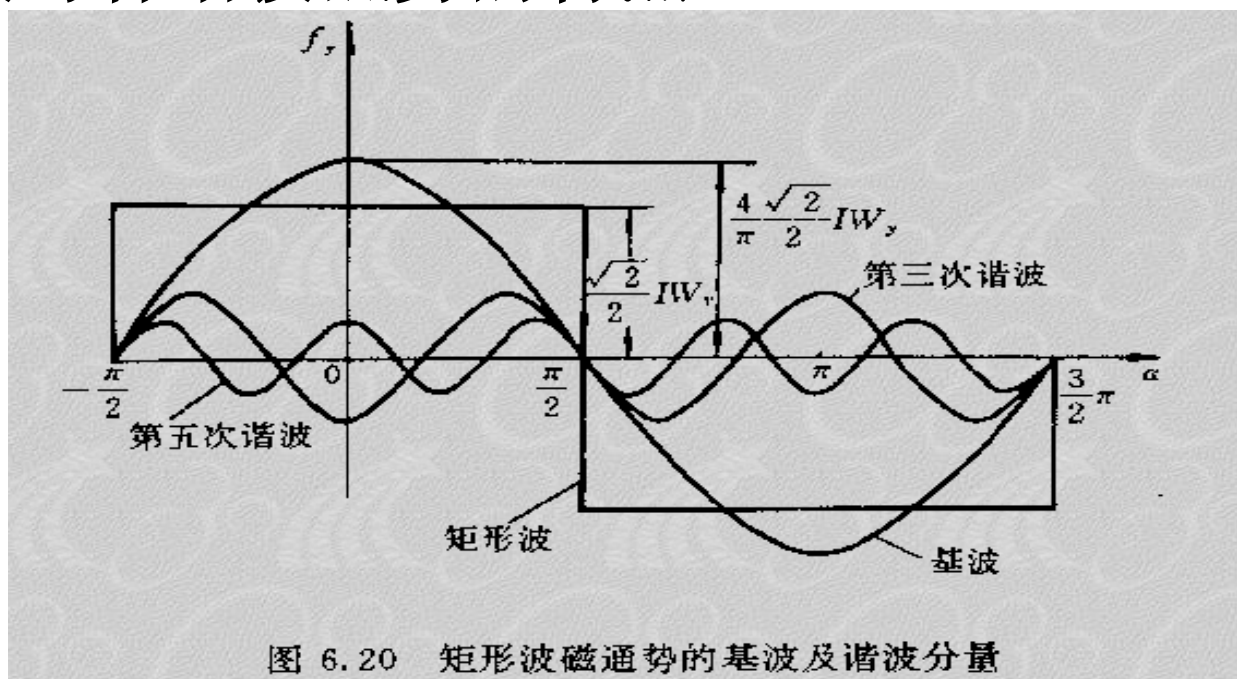


图 6.20 矩形波磁通势的基波及谐波分量

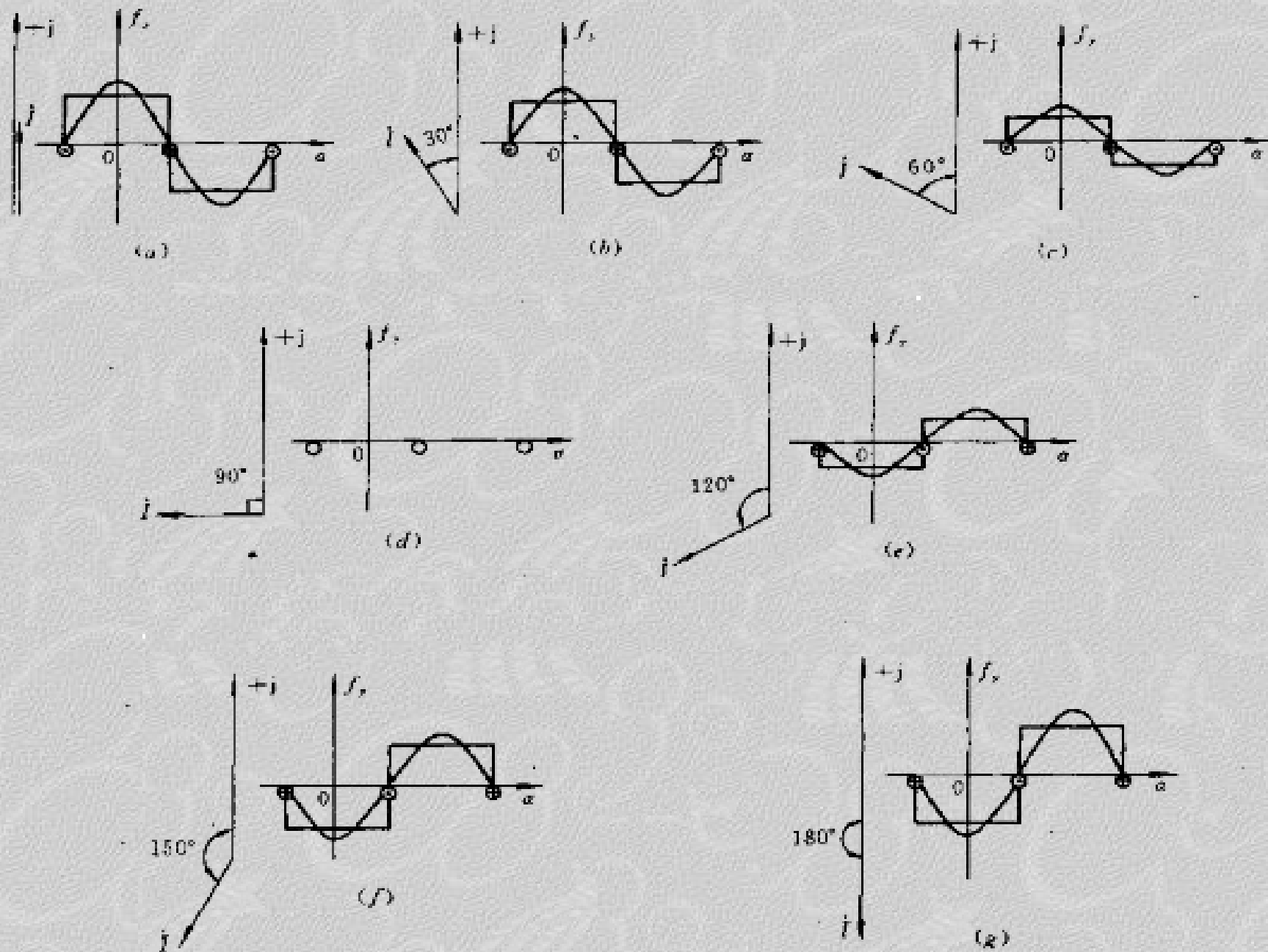


图 6.21 不同瞬间的电流、矩形波磁通势和基波磁通势

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

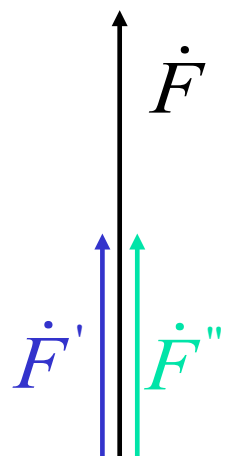
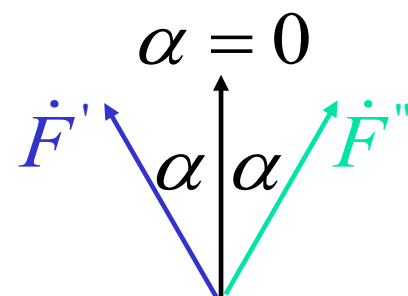
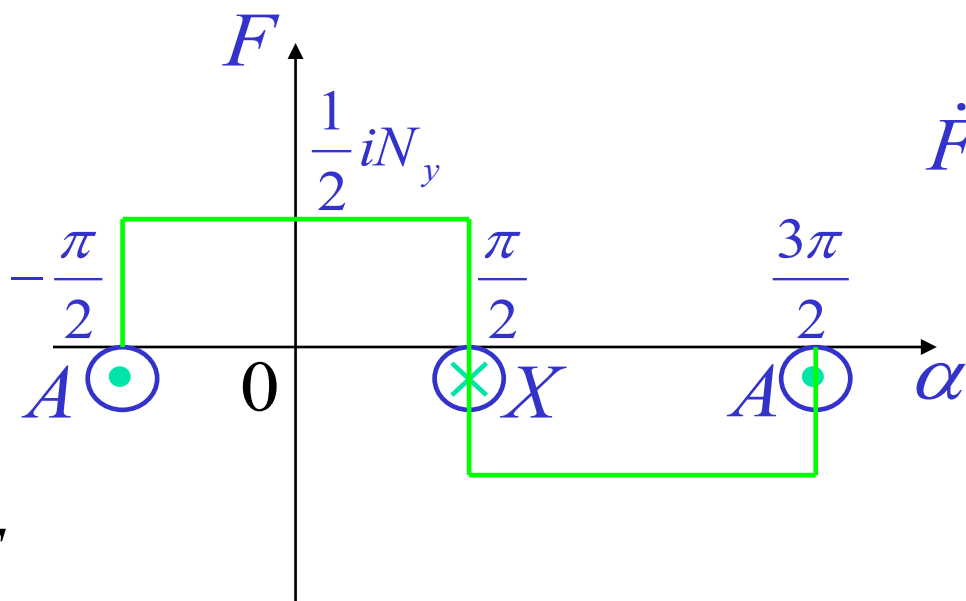
其中： $N_1 = \frac{2pqN_y}{a}$ —— 每相串联总匝数

k_{p1} —— 基波绕组系数

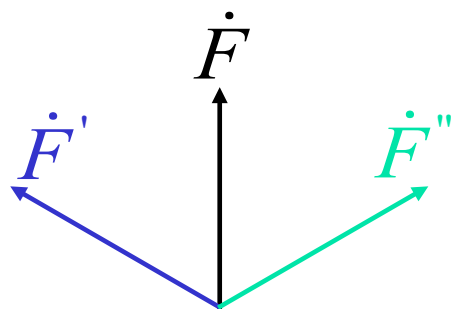
$$f_{y1} = F_{y1} \cos \omega t \cos \alpha$$

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

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



$\omega t = 0$



$\omega t = \pi/3$



$\omega t = \pi/2$

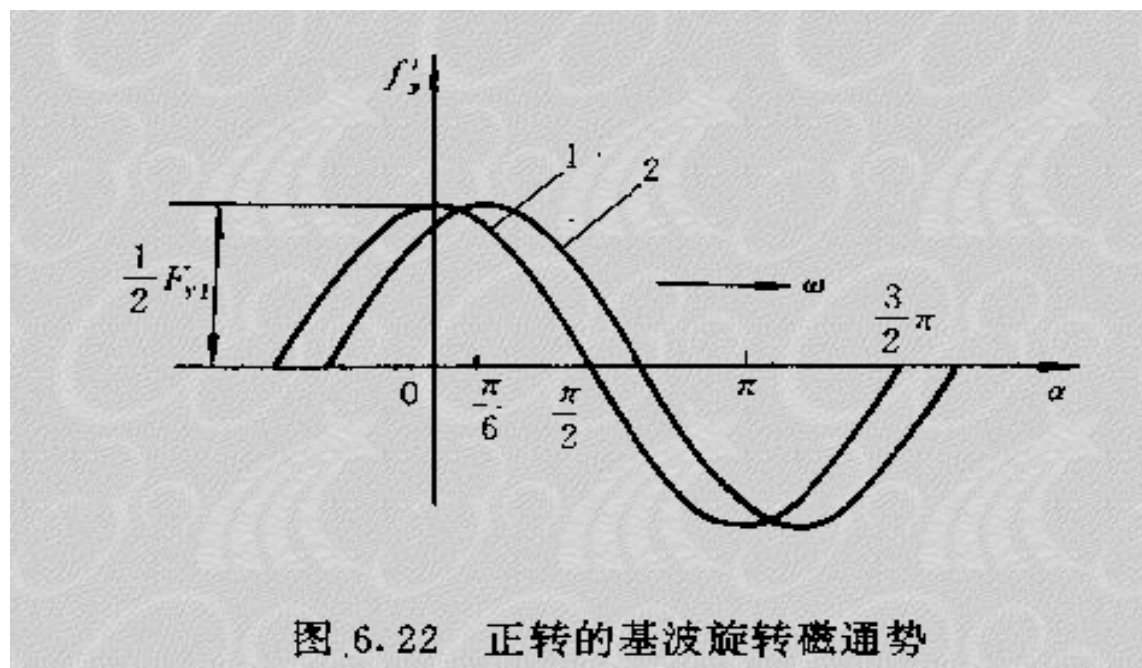
[动画联接1](#)

[动画联接2](#)

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

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

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





二、三相交流电机的旋转磁场

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

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

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

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

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

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

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

二、三相交流电机的旋转磁场

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

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

二、三相交流电机的旋转磁场

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

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

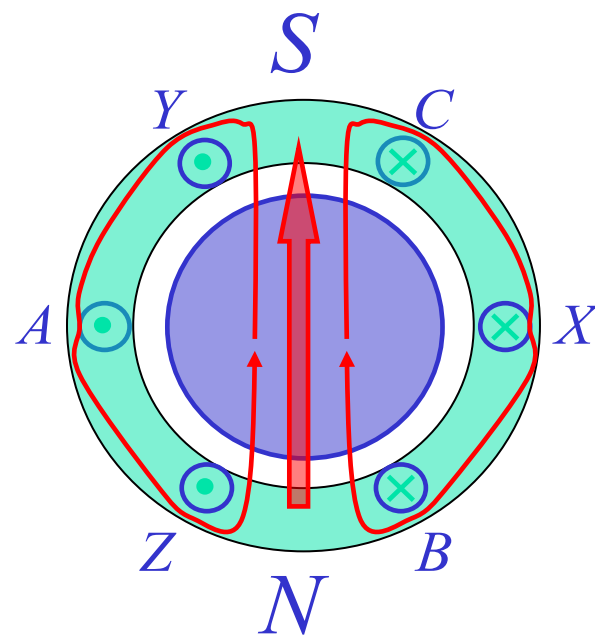
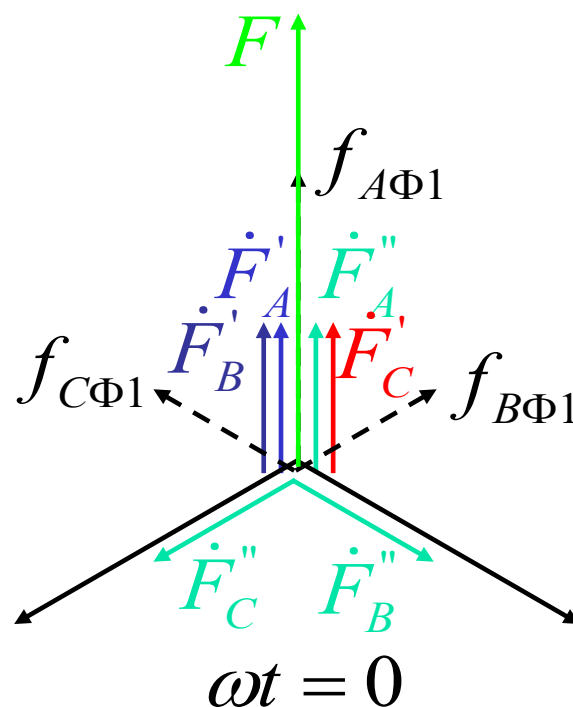
$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

(1) 当 $\omega t = 0$ 时

$$i_A = I_m$$

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

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



(2) 当 $\omega t = \pi/3$ 时

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

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

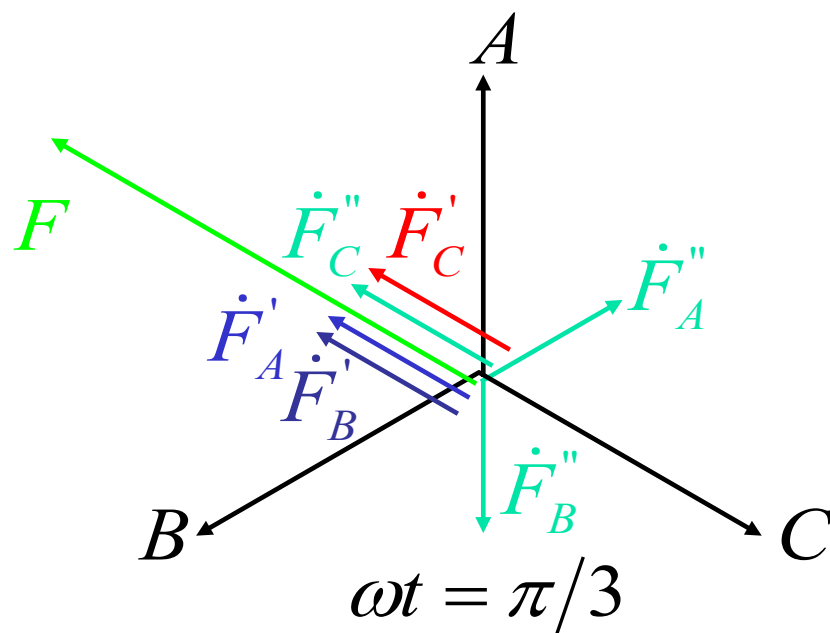
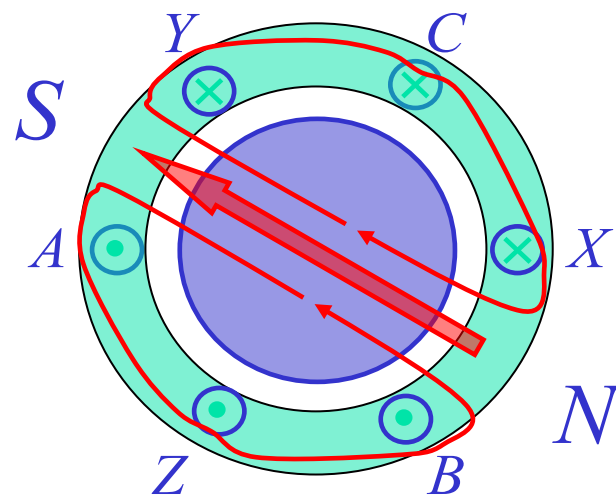
$$i_C = -I_m$$

(3) 当 $\omega t = 2\pi/3$ 时

⋮

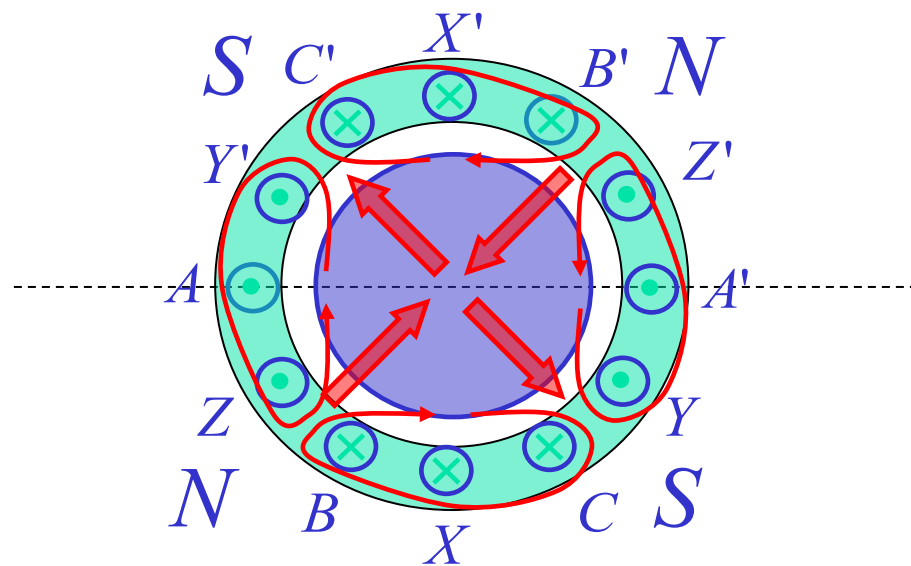
连接动画3

连接动画4



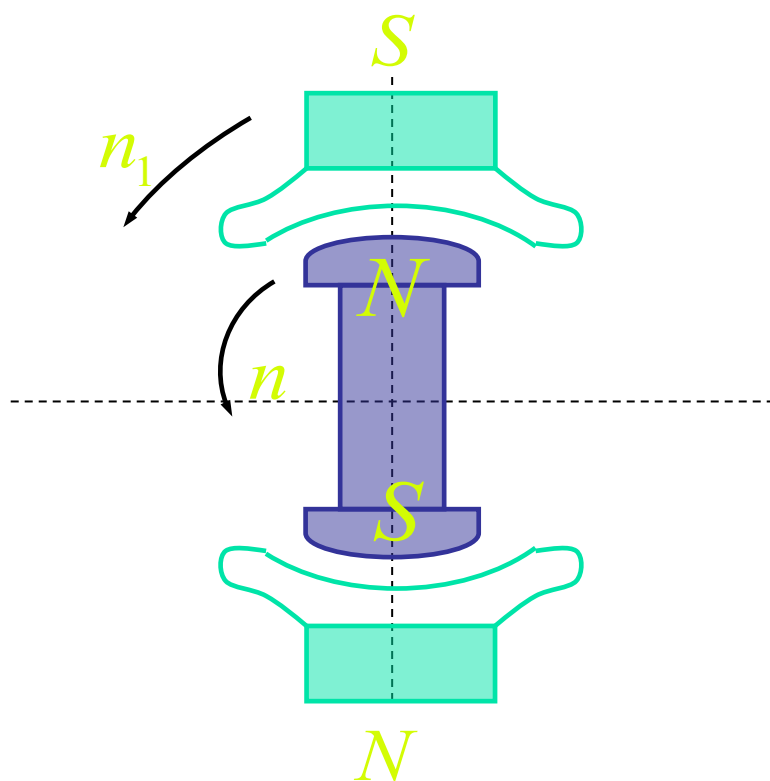
小结

- 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



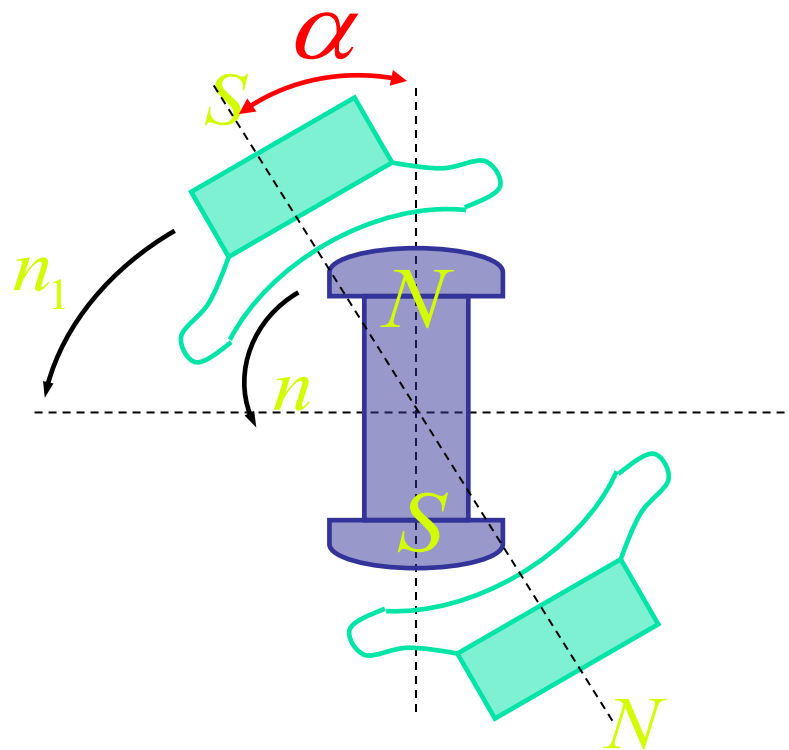
[连接动画](#)5

三、交流同步电动机的工作原理



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

[连接动画6](#)



[连接动画7](#)