



自动控制实践I

异步电机的工作原理

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

- 1 异步电动机的概述与基本原理
- 2 旋转磁场
 - 2.1 两相电机的旋转磁场
 - 2.2 三相电机的旋转磁场
- 3 异步电动机的结构
- 4 交流绕组磁场的分析
 - 4.1 单相绕组的脉振磁场
 - 4.2 两相绕组的旋转磁场
 - 4.3 三相绕组的旋转磁场

1 异步电动机概述

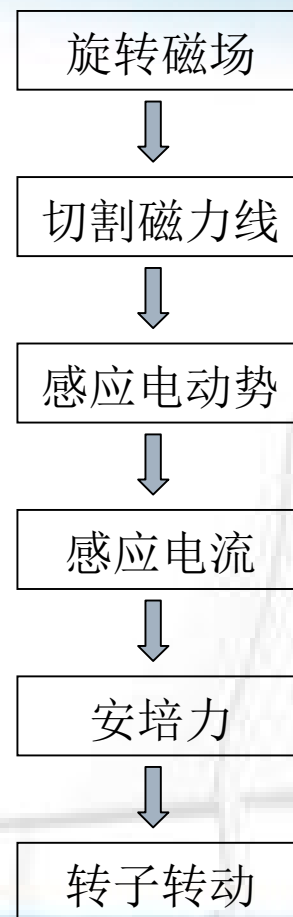
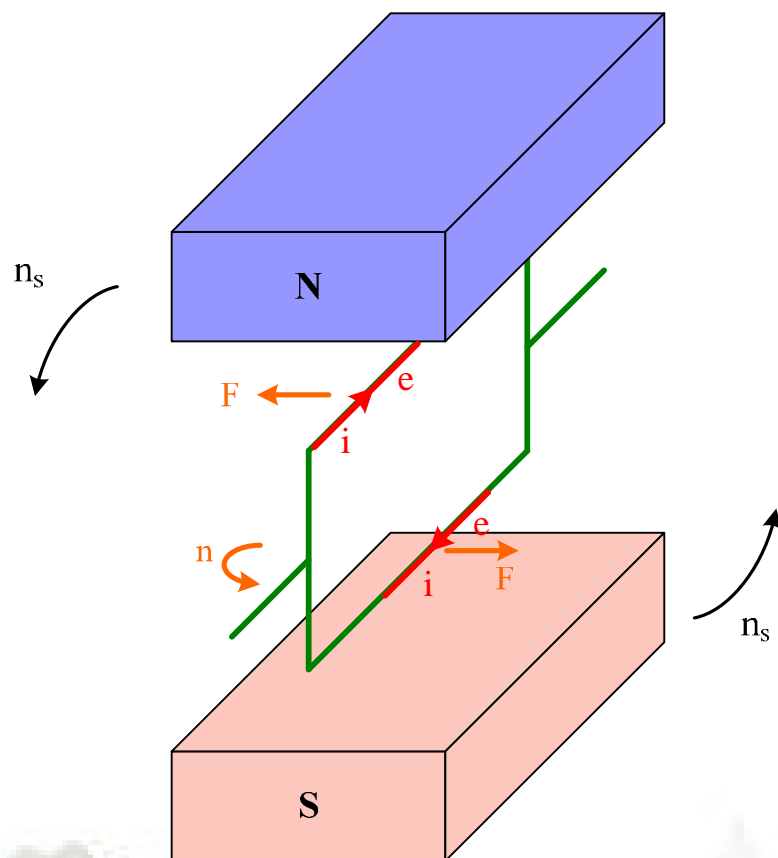
- 异步电机是交流电机的一种
- 异步电机一般都做电动机用，因异步发电机的性能较差
- 异步电机具有结构简单、制造方便、运行可靠、价格低廉等一系列优点
- 与同容量的直流电动机相比，异步电动机的重量约为直流电动机的一半，其价格仅为直流电动机的**1/3**
- 缺点：不能经济地实现范围较广的平滑调速；必须从电网吸取滞后的励磁电流，使电网功率因数变坏
- 广泛应用于工农业、交通运输、国防工业等

1 异步电动机基本原理



1 异步电动机基本原理

○ 旋转磁场+线圈闭合



1 异步电动机基本原理

○ 结论

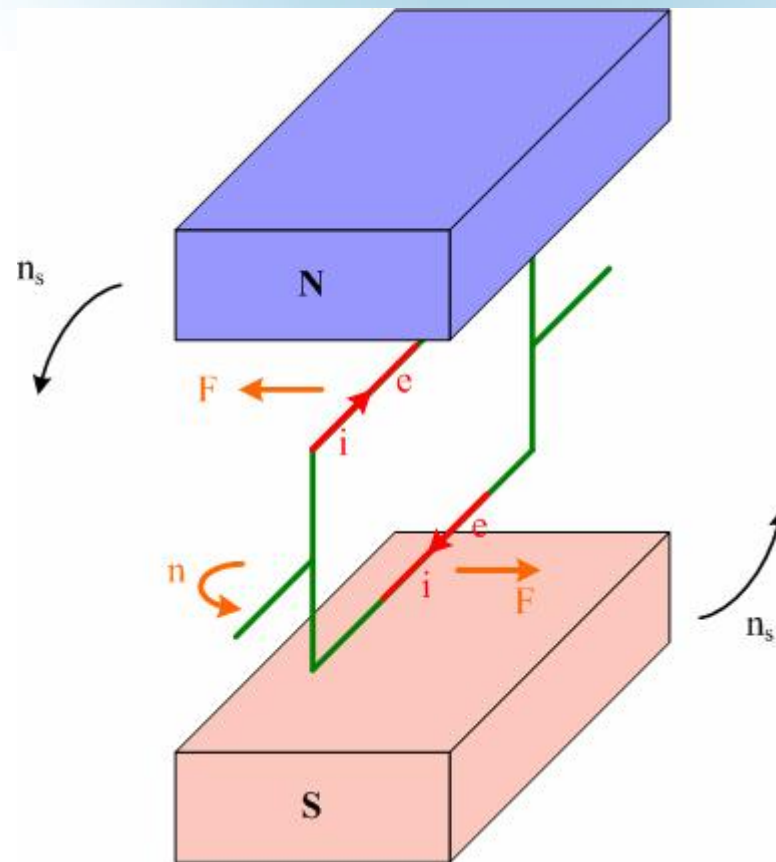
n 线圈跟着磁铁转 **a** 两者转动方向一致

n 线圈比磁场转得慢

$$n < n_s$$

为什么？

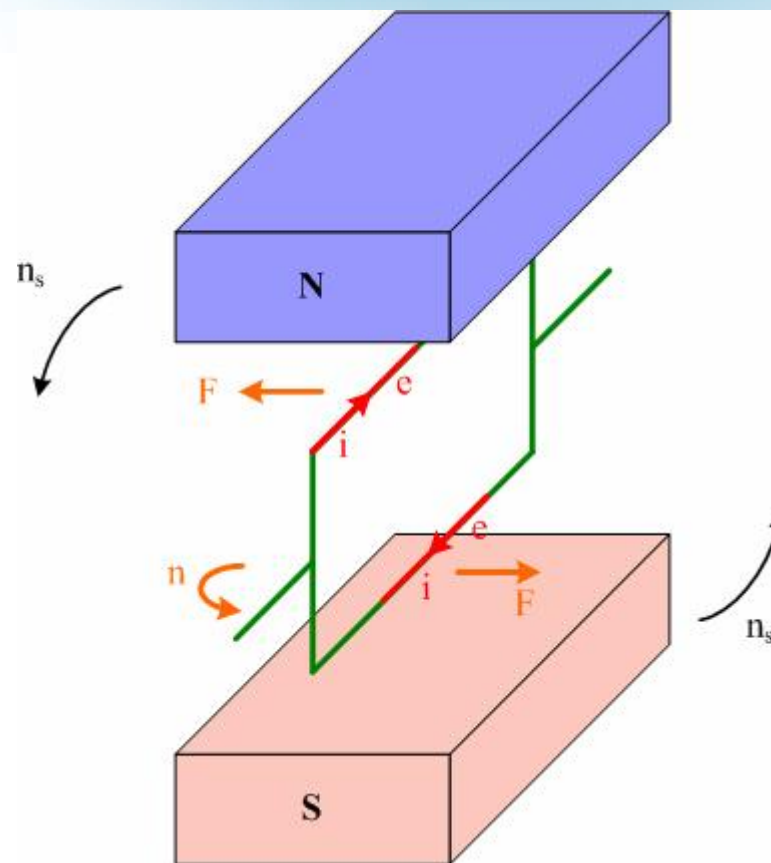
n 异步电动机的转子转速 **n** 总是略小于旋转磁场的同步转速 **n_s**，即与旋转磁场“异步”地转动，“异步”电动机由此而命名



1 异步电动机基本原理

○ 旋转磁场是交流电机的基础

- n 机械旋转磁场：通过原动机拖动磁极旋转可以产生机械旋转磁场
- n 电气旋转磁场：多相对称的交流绕组通过多相对称的交流电流时会在电机的气隙空间产生电气旋转磁场



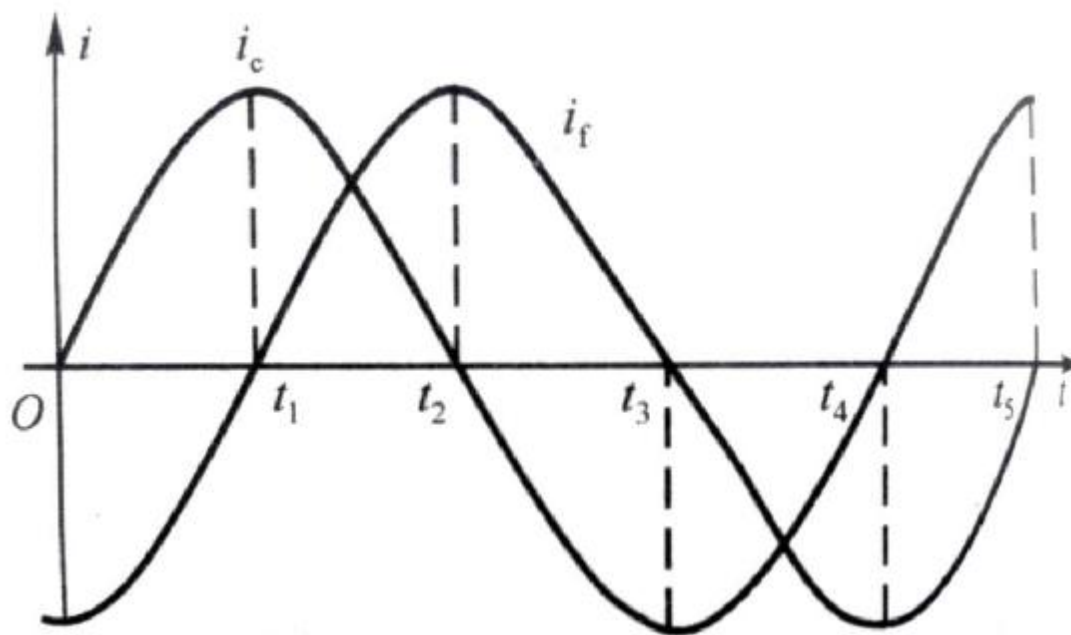
2.1 两相电机的旋转磁场

○ 两相电机的旋转磁场

■ 两相对称电流：两个正弦电流，相位上彼此相差 90° ，幅值相等

$$i_c = I_m \sin \omega t$$

$$i_f = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$



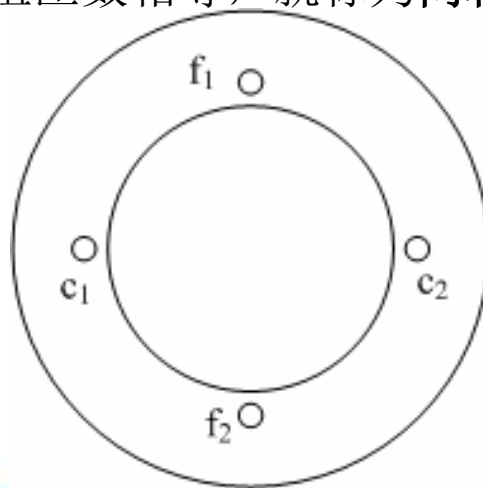
2.1 两相电机的旋转磁场

○ 两相电机的旋转磁场

- n 交流电机中，串联在一起的一组线圈称为一相绕组。
- n 一相绕组通直流电时形成的磁场的极数就是电机的极数。

○ 两相两极电机

- n 对于两相两极电机，其定子槽中嵌放着两相绕组，他们在空间相交成 90° ，且两相绕组匝数相等，就称为两相对称绕组。

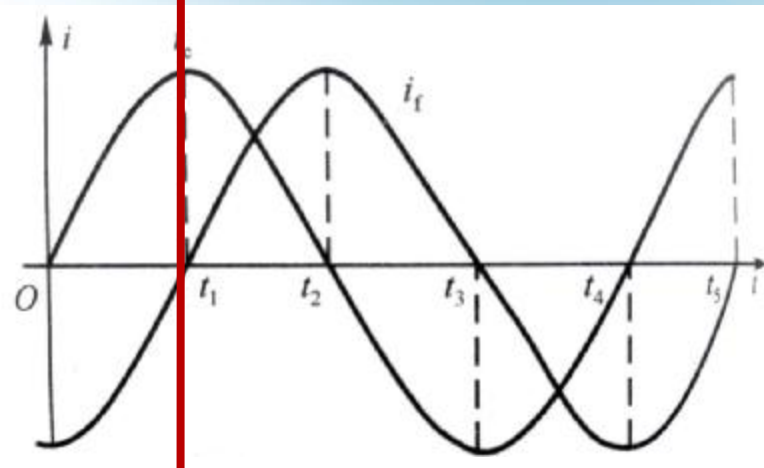
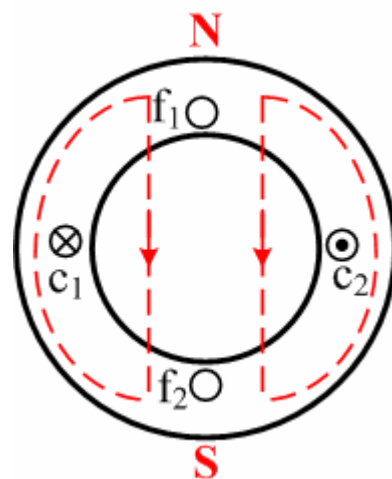


2.1 两相电机的旋转磁场

n $t=t_1$ 时

$$i_c(t=t_1) = I_m$$

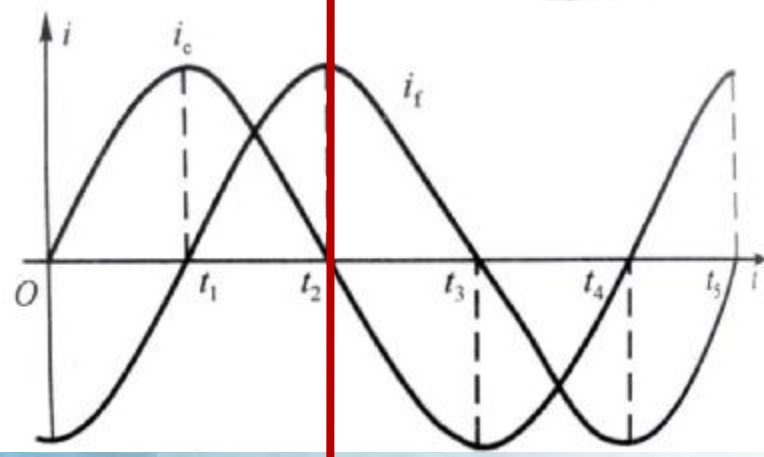
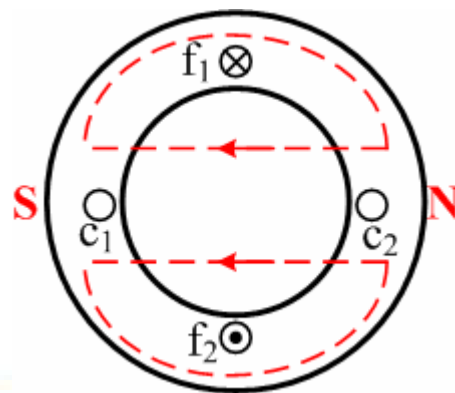
$$i_f(t=t_1) = 0$$



n $t=t_2$ 时

$$i_c(t=t_2) = 0$$

$$i_f(t=t_2) = I_m$$

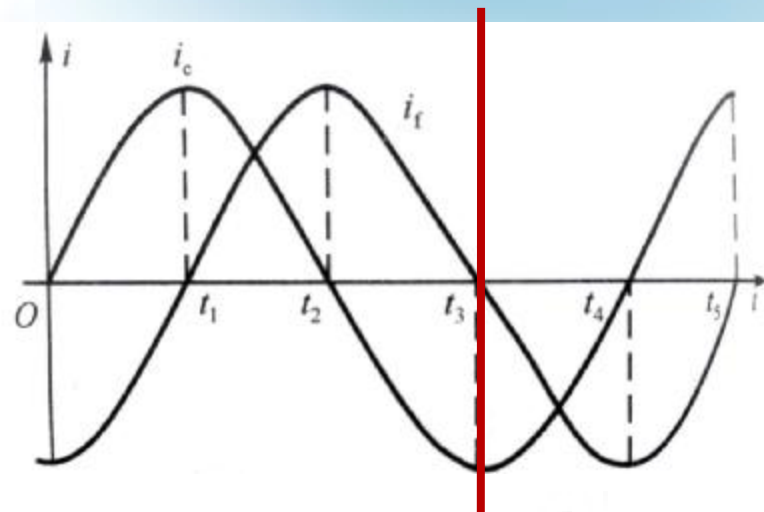
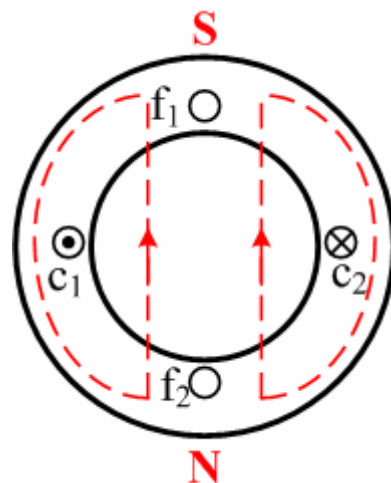


2.1 两相电机的旋转磁场

n $t=t_3$ 时

$$i_c(t=t_3) = -I_m$$

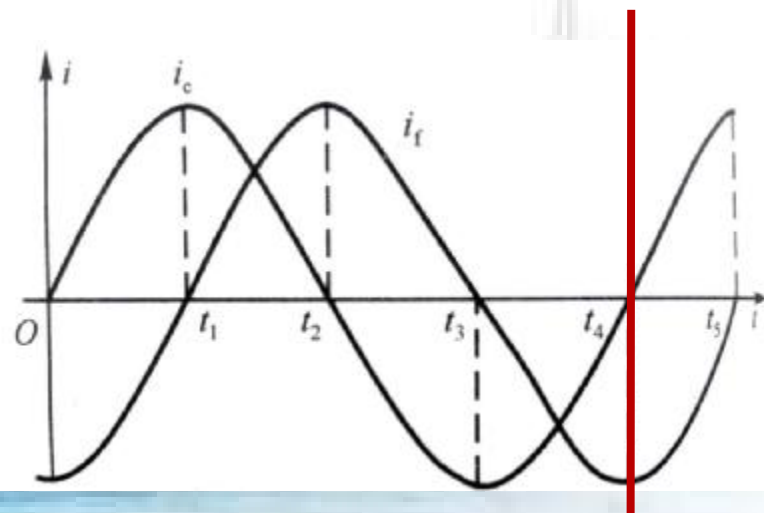
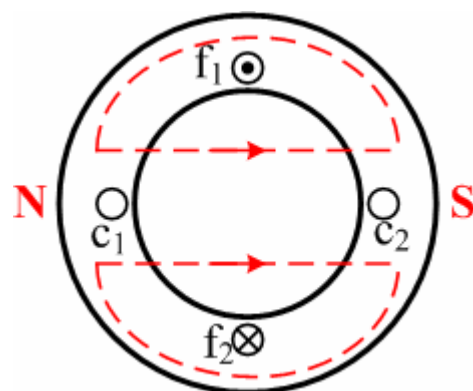
$$i_f(t=t_3) = 0$$



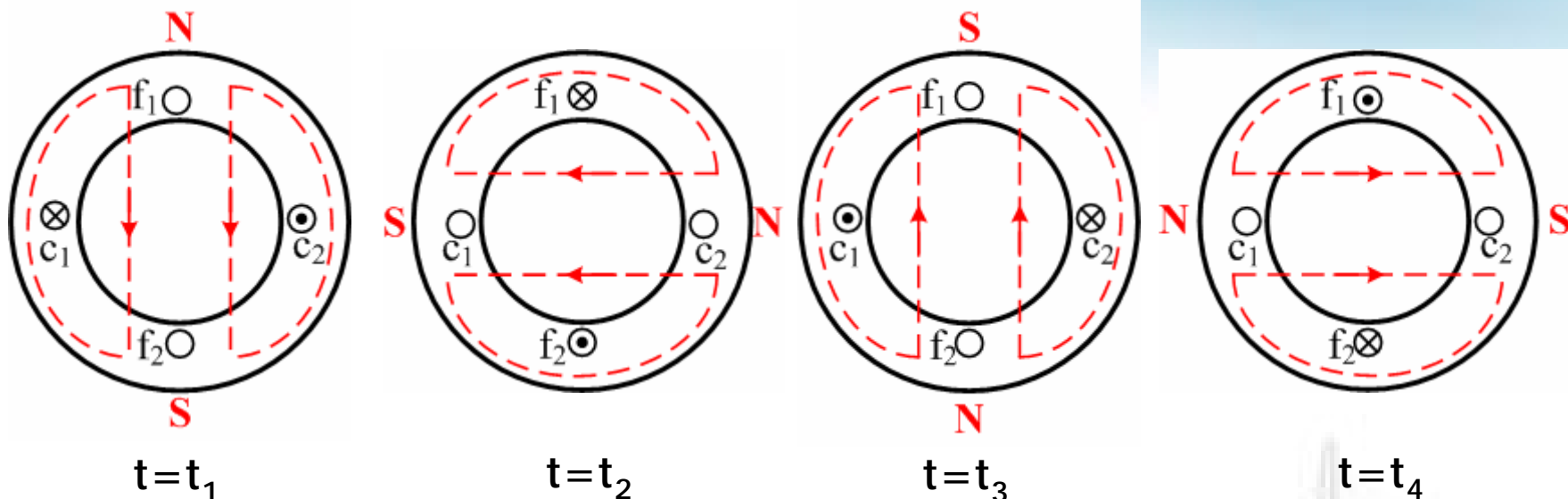
n $t=t_4$ 时

$$i_c(t=t_4) = 0$$

$$i_f(t=t_4) = -I_m$$



2.1 两相电机的旋转磁场

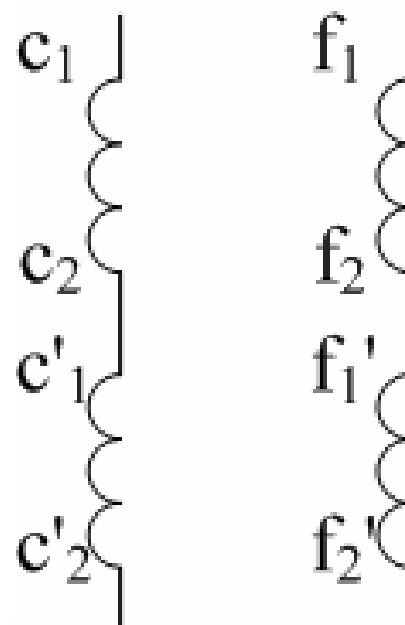
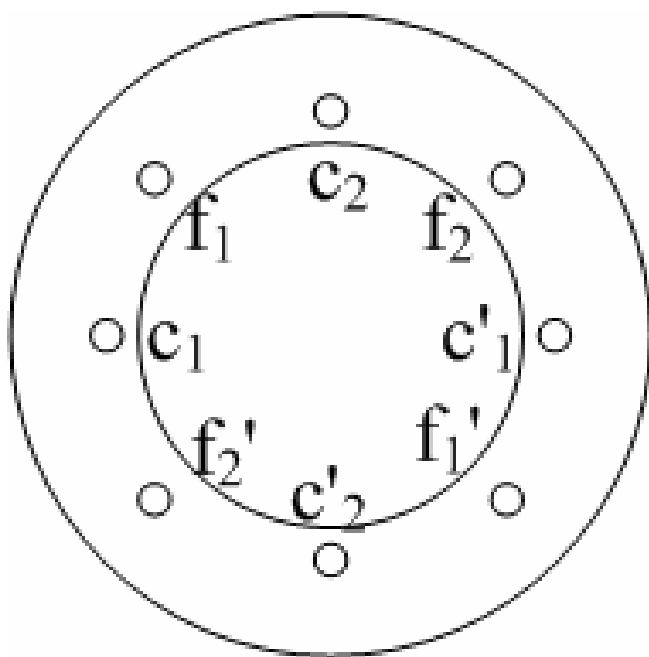


- 两相两极电机，当电流变化一个周期时，磁场就旋转一周。
- 当两相对称绕组通入两相对称电流后，在定子内腔空间中就会产生一个旋转磁场。
- 若电源频率为 f ，则同步转速：

$$n_s = f(r/s) = 60f(r/min)$$

2.1 两相电机的旋转磁场

○ 两相四极电机

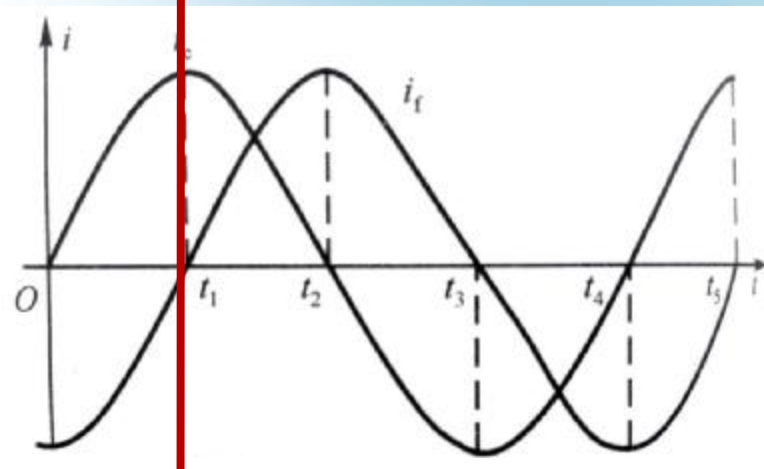
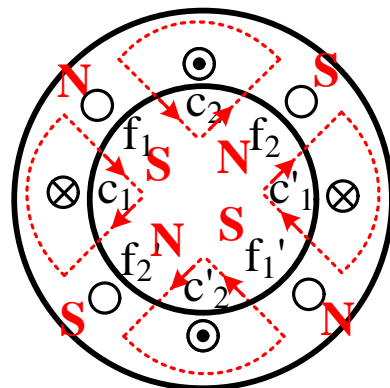


2.1 两相电机的旋转磁场

n $t=t_1$ 时

$$i_c(t=t_1) = I_m$$

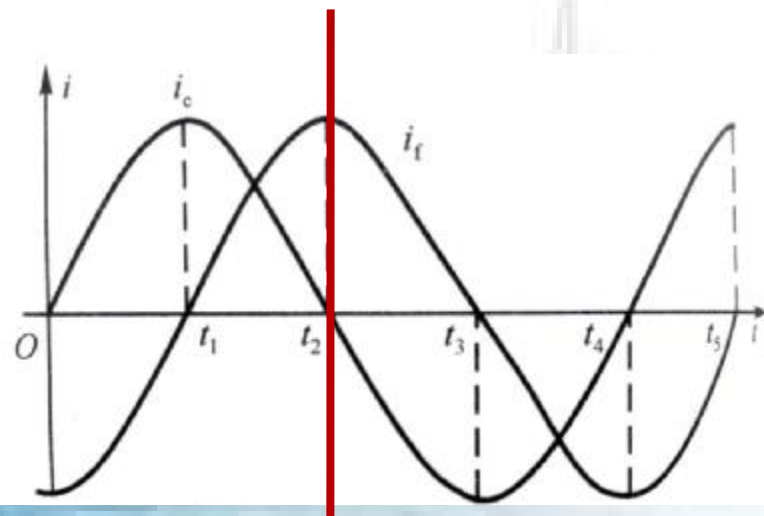
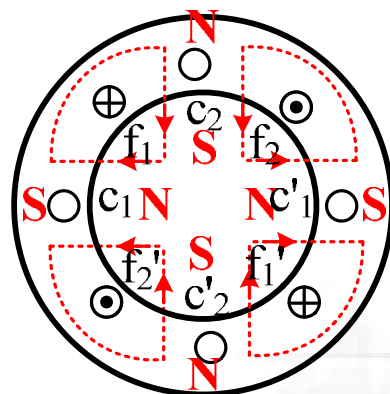
$$i_f(t=t_1) = 0$$



n $t=t_2$ 时

$$i_c(t=t_2) = 0$$

$$i_f(t=t_2) = I_m$$

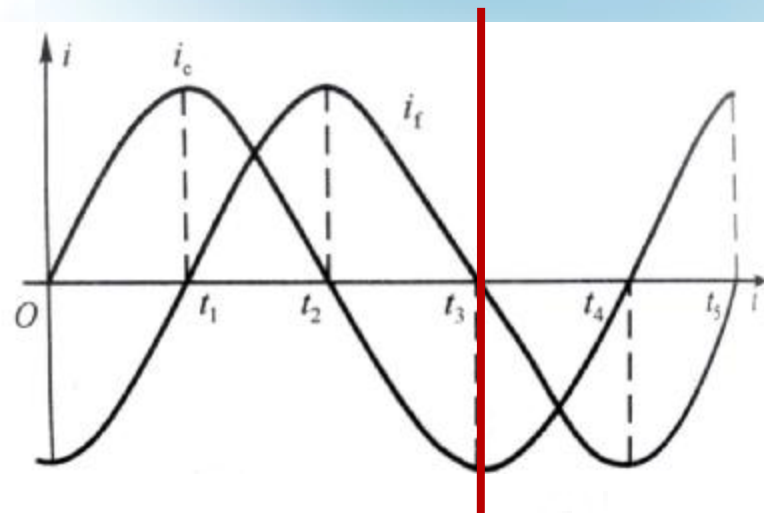
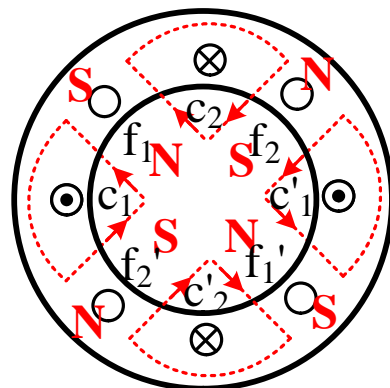


2.1 两相电机的旋转磁场

n $t=t_3$ 时

$$i_c(t=t_3) = -I_m$$

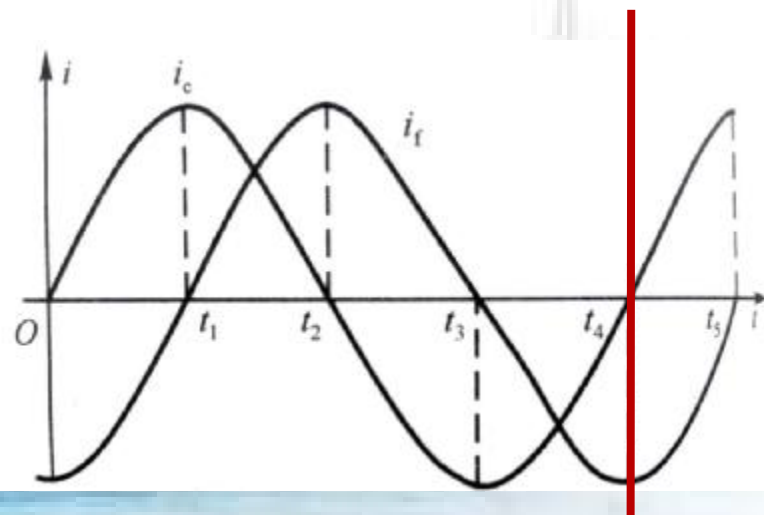
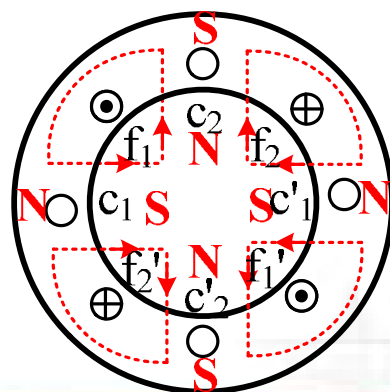
$$i_f(t=t_3) = 0$$



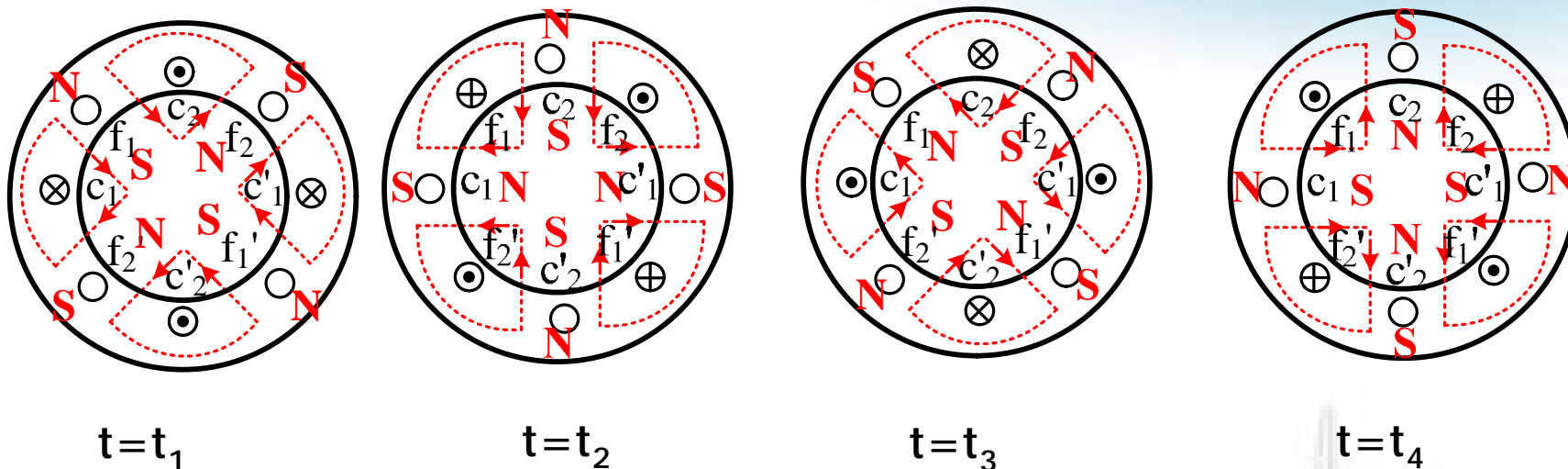
n $t=t_4$ 时

$$i_c(t=t_4) = 0$$

$$i_f(t=t_4) = -I_m$$



2.1 两相电机的旋转磁场



- 两相四极电机，当电流变化一个周期时，磁场就旋转半周。
- 若电源频率为 f ，则同步转速：

$$n_s = \frac{f}{2} (r/s) = 60 \frac{f}{2} (r/min)$$

2.1 两相电机的旋转磁场

- 若电机绕组极对数是 p ，则旋转磁场的转速为

$$n_s = \frac{f}{p} (r/s) = 60 \frac{f}{p} (r/min)$$

- 同直流电机类似，定义电角：

$$\text{电角} = \text{极对数 } p \times \text{机械角}$$

- n 当电流变化一个周期时，旋转磁场转过 360° 电角或 2π 电角

2.2 三相电机的旋转磁场

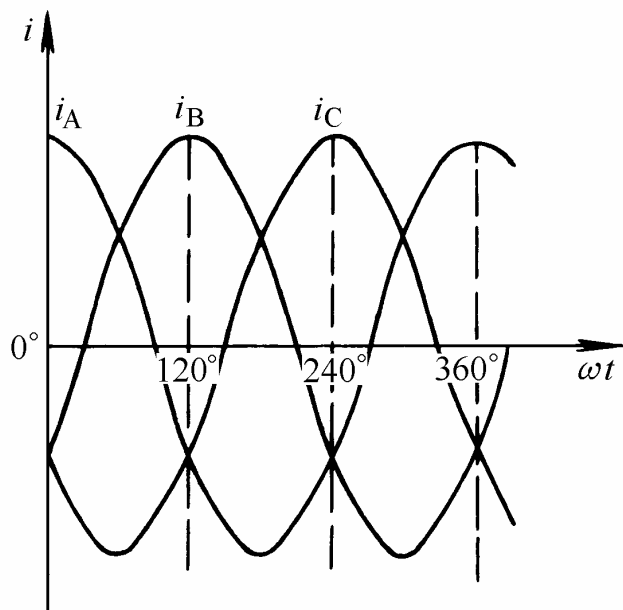
○ 三相电机的旋转磁场

n 三相对称电流

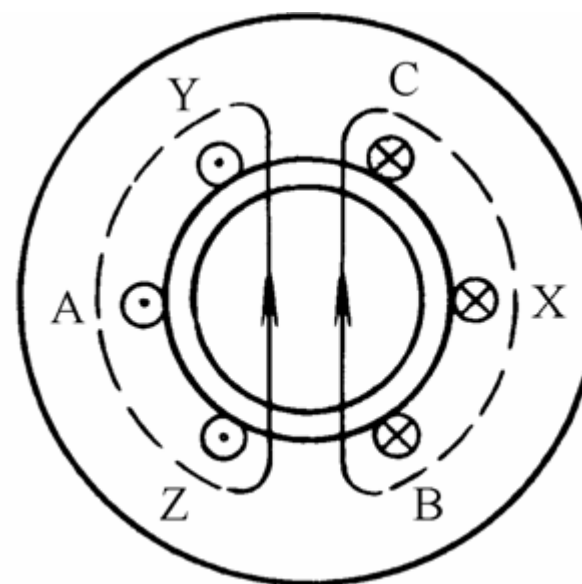
$$i_A = I_m \cos \omega t$$

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

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

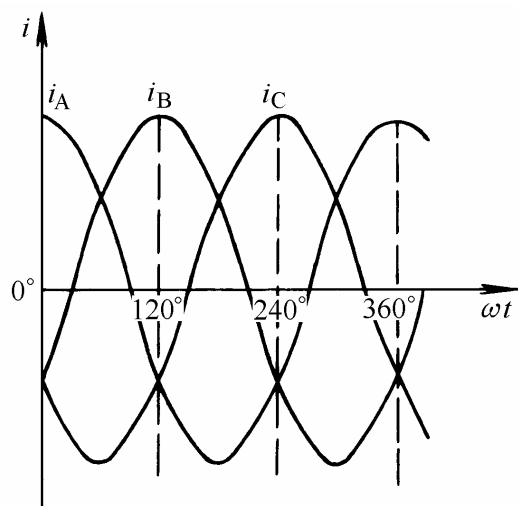


n 三相对称绕组：三个绕组在空间彼此相隔 120°



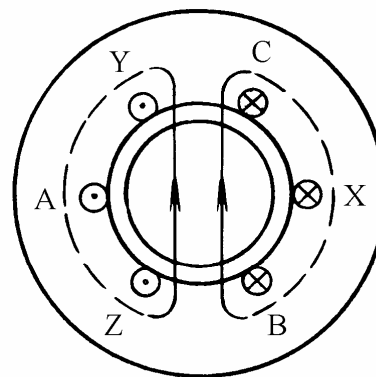
2.2 三相电机的旋转磁场

○ 三相两极电机

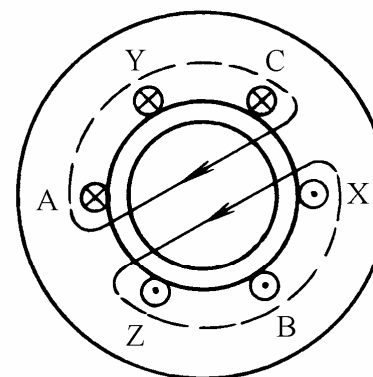


○ 若电源频率为 f ，则同步转速：

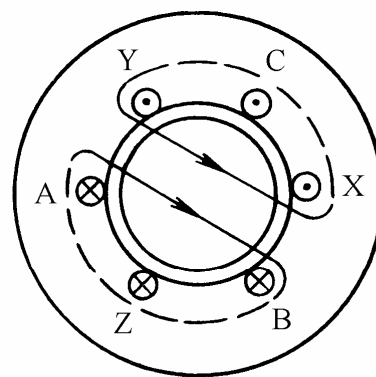
$$n_s = f(r/s) = 60f(r/min)$$



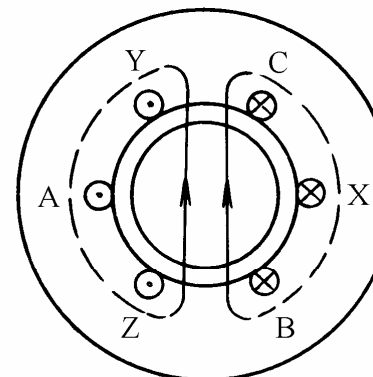
a) $\omega t = 0^\circ$
 $i_A = I_m$
 $i_B = i_C = -\frac{1}{2} I_m$



b) $\omega t = 120^\circ$
 $i_B = I_m$
 $i_C = i_A = -\frac{1}{2} I_m$



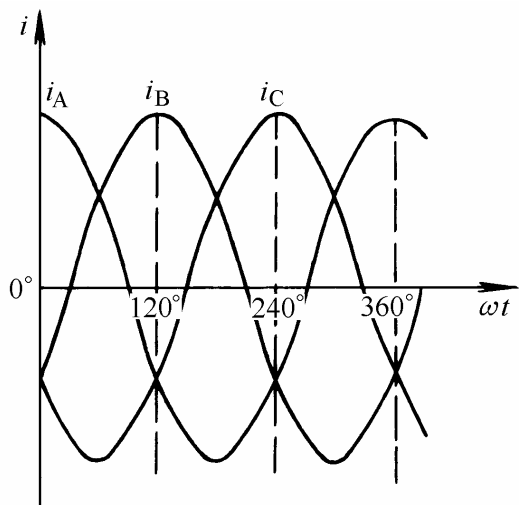
c) $\omega t = 240^\circ$
 $i_C = I_m$
 $i_A = i_B = -\frac{1}{2} I_m$



d) $\omega t = 360^\circ$
 $i_A = I_m$
 $i_B = i_C = -\frac{1}{2} I_m$

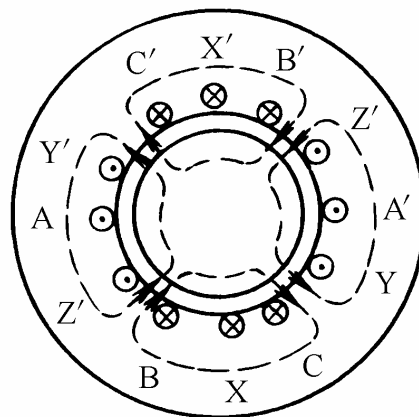
2.2 三相电机的旋转磁场

○ 三相四极电机

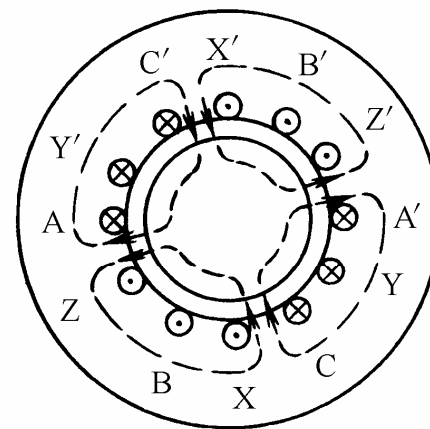


○ 若极对数为 p ，电源频率为 f ，则同步转速：

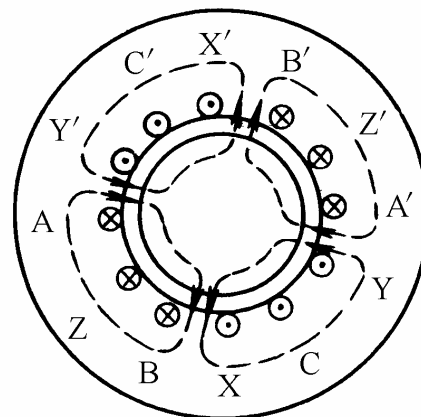
$$n_s = \frac{f}{p} (r/s) = 60 \frac{f}{p} (r/min)$$



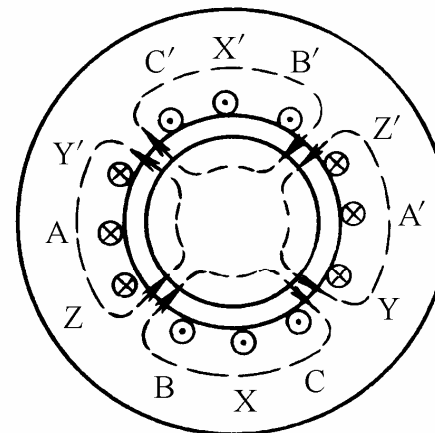
a) $\omega t = 0^\circ$



b) $\omega t = 120^\circ$



c) $\omega t = 240^\circ$



d) $\omega t = 360^\circ$

2.2 三相电机的旋转磁场

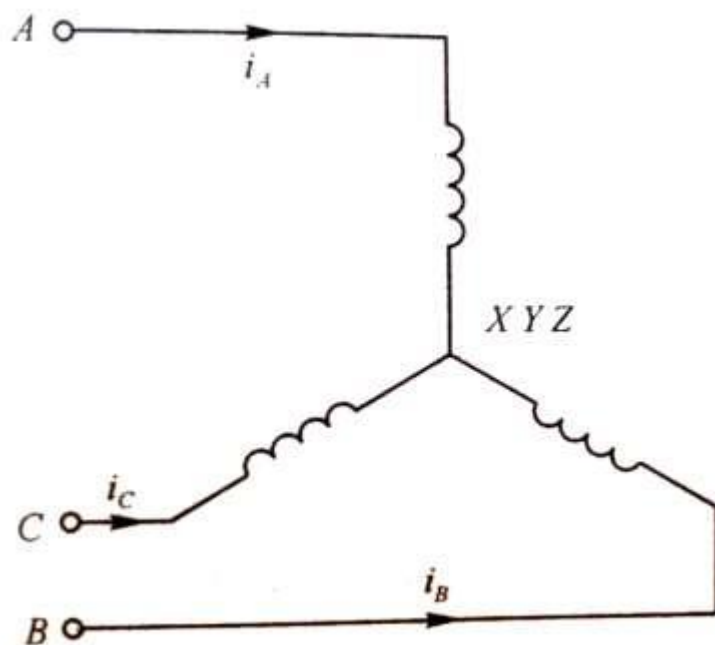
○ 磁场旋转方向

- n 旋转磁场的方向是从正向超前电流的磁场方向转到正向落后电流的磁场方向
- n 若规定绕组通过正向电流时磁通的方向为绕组轴线的正方向，则旋转磁场的转向是从流过超前电流的绕组轴线正方向转向流过落后电流的绕组轴线正方向
- n 对于三相电机，只要任意两相端子与电源的连接位置对调，旋转磁场的方向就会改变

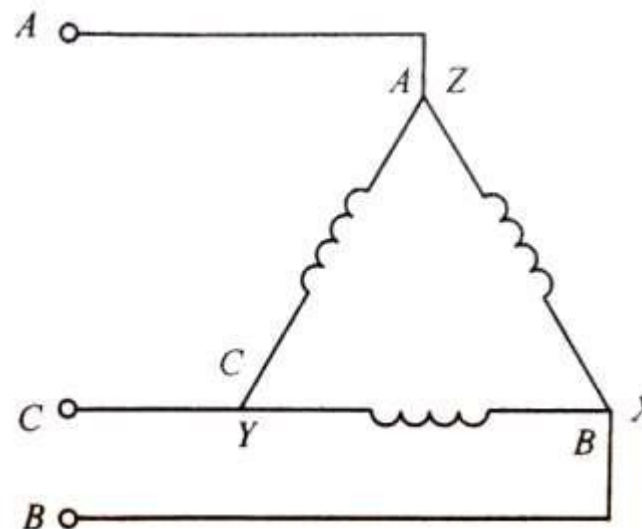
2.2 三相电机的旋转磁场

○ 三相电机绕组连接方法

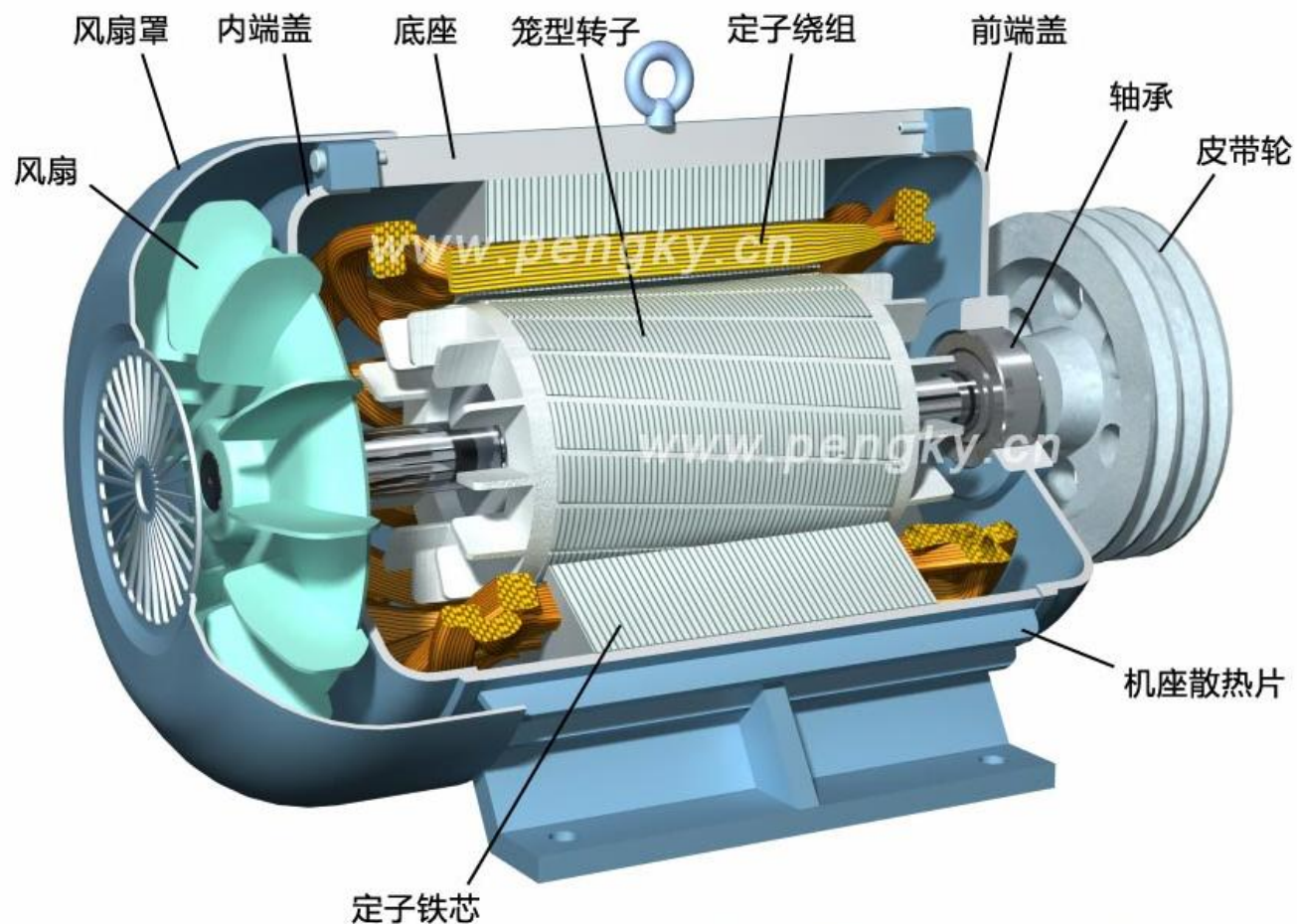
n 星形接法



n 三角形接法

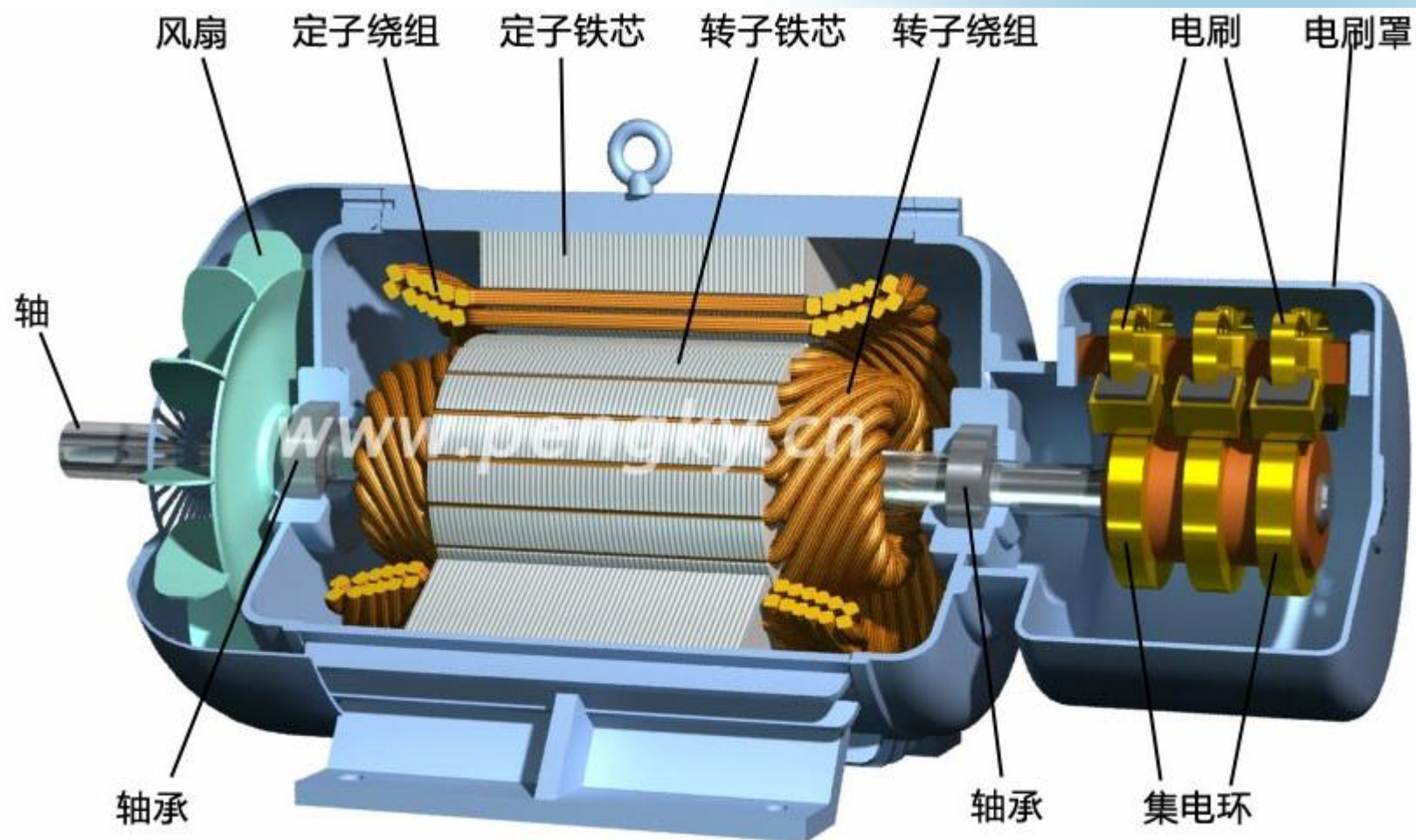


3 异步电动机的结构



笼型转子异步电动机结构图

3 异步电动机的结构



绕线转子异步电动机结构图

3 异步电动机的结构



3 异步电动机的结构

○ 定子铁心

作用：主磁路的一部分，嵌放定子绕组。

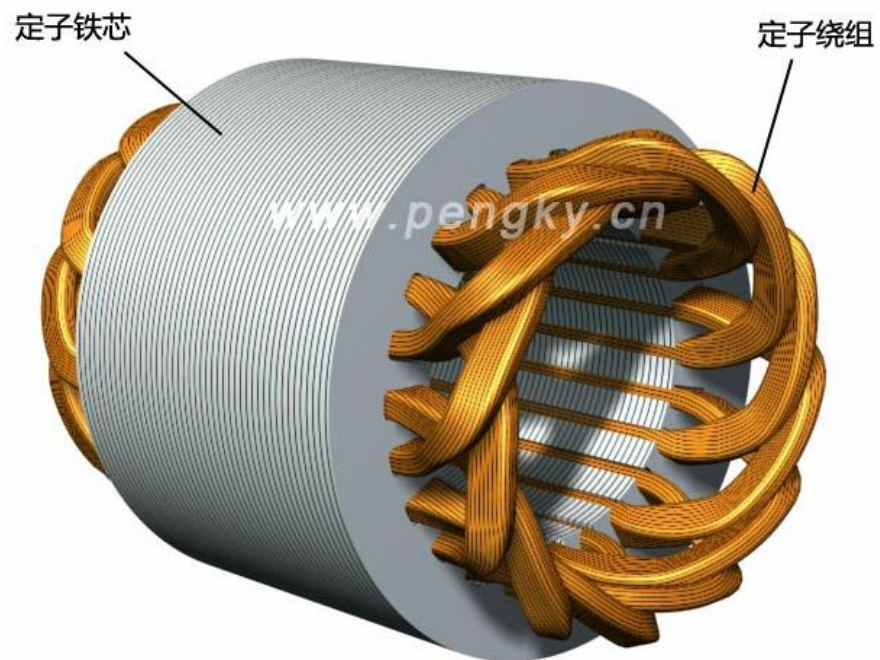
- n 异步电机定子绕组产生旋转磁场，定子铁心中磁通大小和方向都是变化的，为了减小涡流损耗，定子铁心由导磁性能较好的**0.5mm**厚且冲有一定槽形的硅钢片叠压而成。



3 异步电动机的结构

○ 定子绕组

作用：定子电路的一部分，
产生旋转磁场。



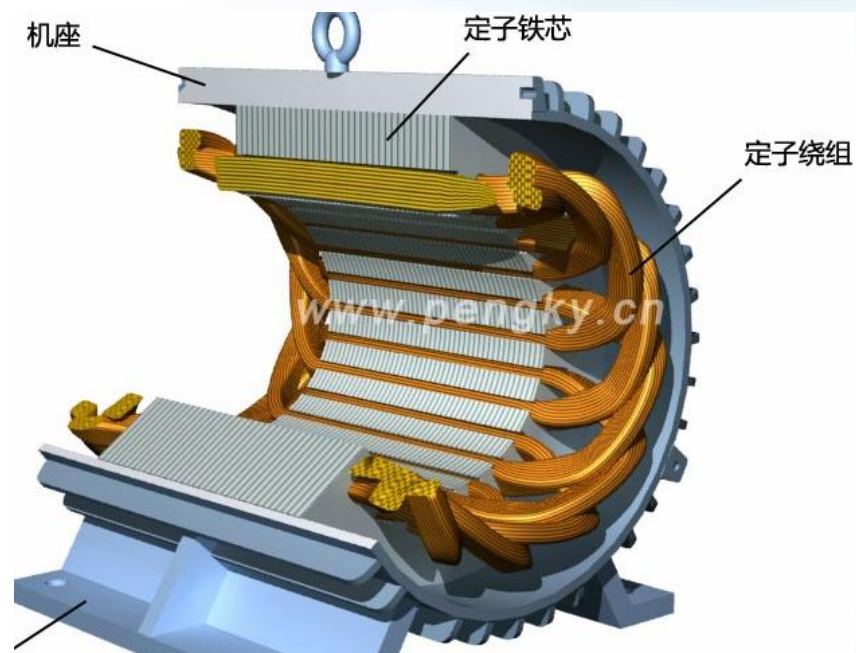
图片：成型线圈

3 异步电动机的结构

○ 基座

作用：固定和支撑定子铁心。

- n 小型异步电机一般采用铸铁基座。
- n 大中型异步电机一般采用钢板焊接的基座。

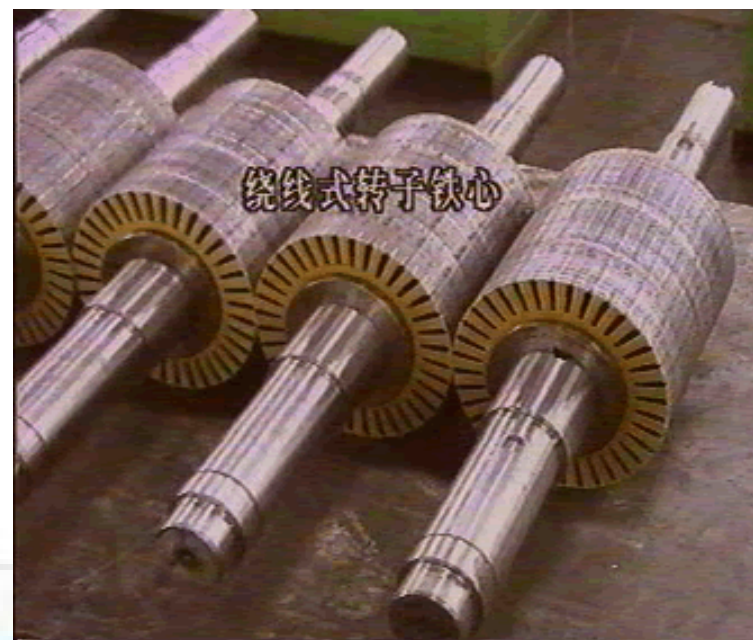
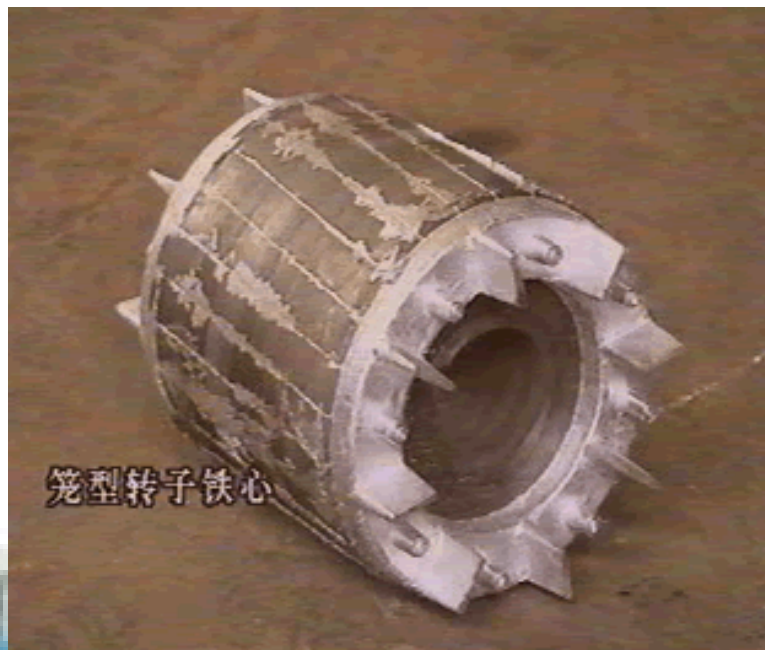


3 异步电动机的结构

○ 转子铁心

作用：主磁路的一部分

n 由导磁性能较好的0.5mm厚的硅钢片叠压而成。



3 异步电动机的结构

○ 转子绕组

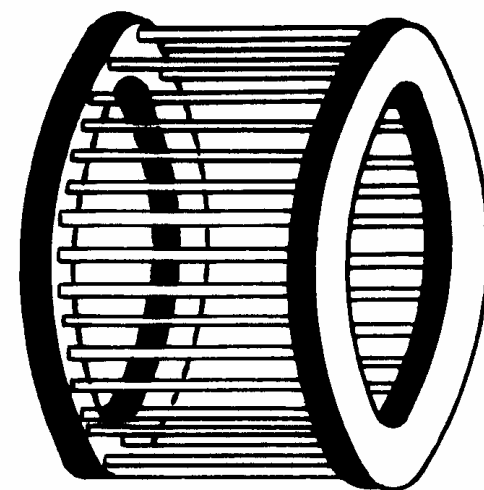
分为笼型和绕线型两种结构。

n 笼型绕组

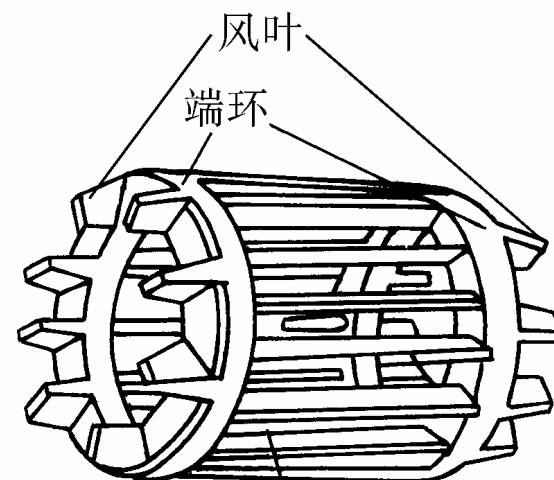
转子电流由电磁感应作用产生，不需要外电源对转子供电，因此绕组可以自行闭合，绕组的相数也不必为三相。

转子每个槽内装有一根导线称为导条，导条两端有两个短路环把所有导条连在一起，构成闭合绕组。

可以采用铸造方式制成。



铜条鼠笼转子



铝导条
铸铝鼠笼转子

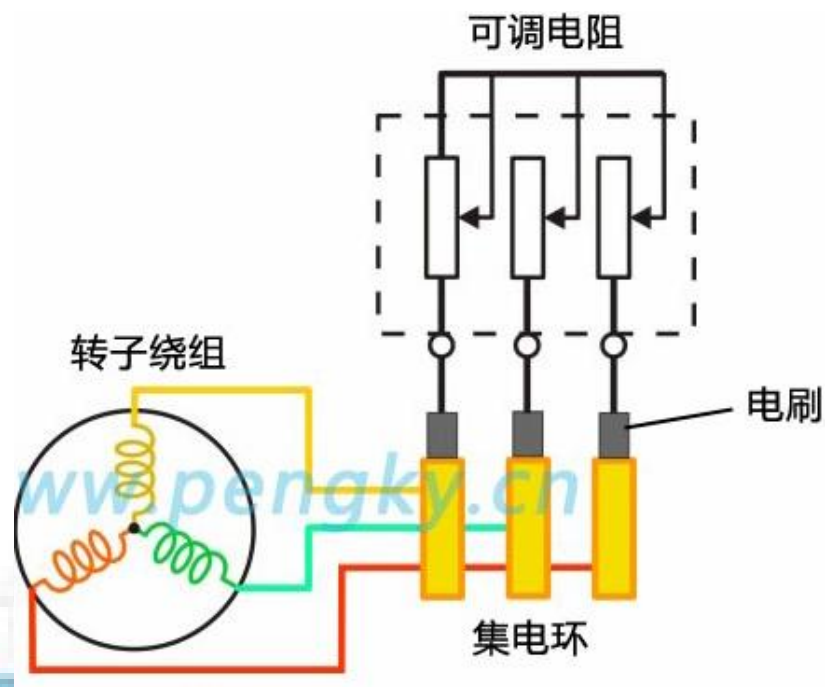
3 异步电动机的结构

○ 转子绕组

n 绕线型绕组

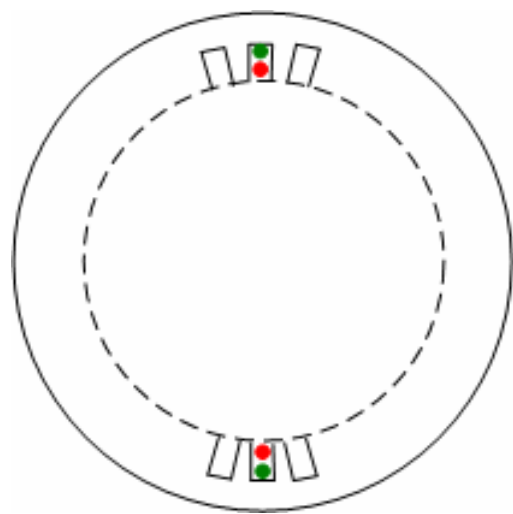
对称三相绕组，接成星形，并接到转轴上的三个集电环，再通过电刷与外电路接通。

绕线型绕组的特点是通过集电环和电刷可在转子回路中接入附加电阻或其他控制装置，以便改善电动机的启动性能或调节转速。

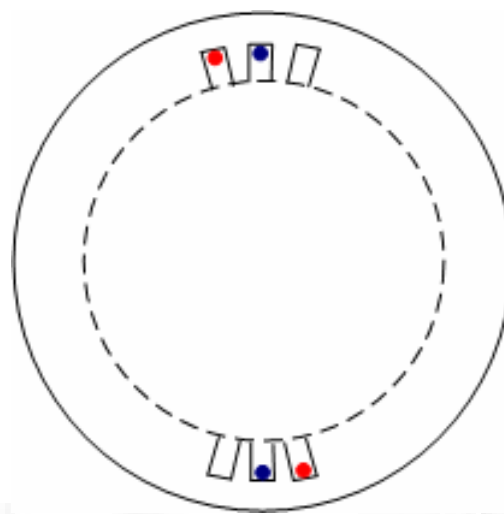


4 交流绕组的磁场分析

- 绕组：串联在一起的一组线圈
- 集中绕组：一相绕组放在一个槽中
- 分布绕组：一相绕组分布在若干个槽中



集中绕组

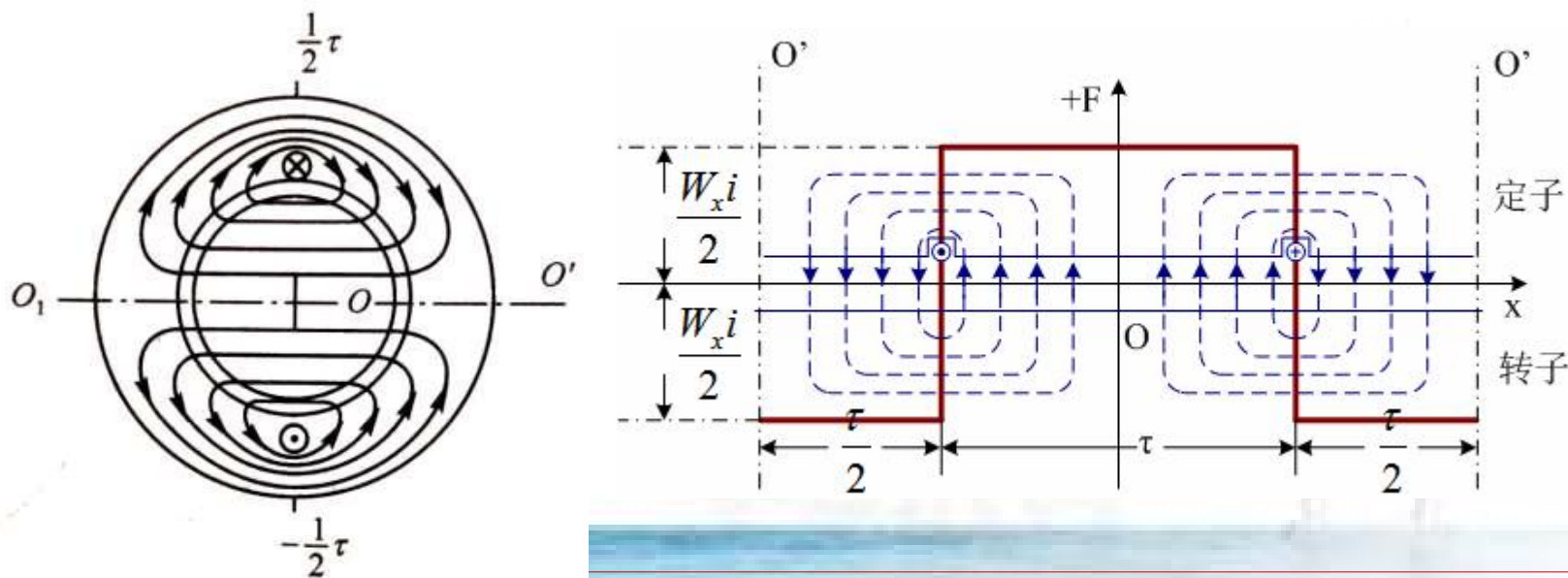


分布绕组

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

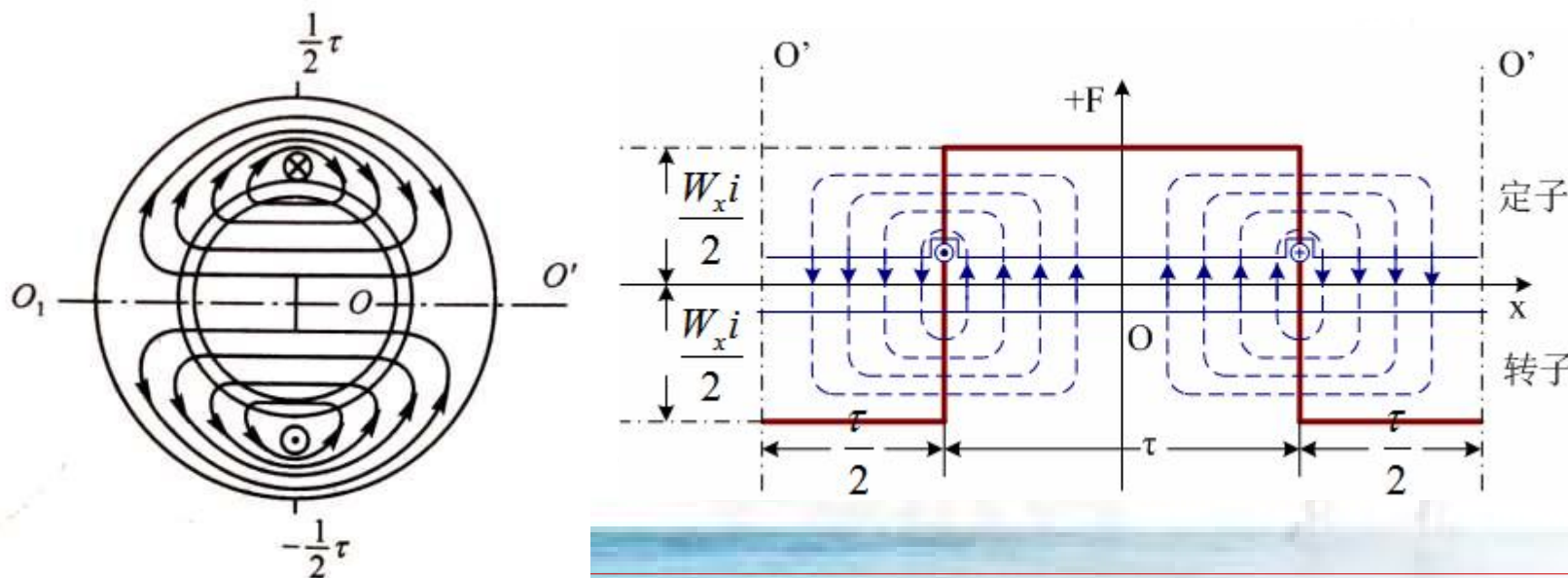
- n 绕组有 W_x 匝，绕组中的电流为 i ，磁回路路径如左图。
- n 设想将电机从 OO' 处切开，展开后如右图。
- n 根据安培环路定理，绕组的每个有效边形成的磁势为 $W_x i$ 。



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

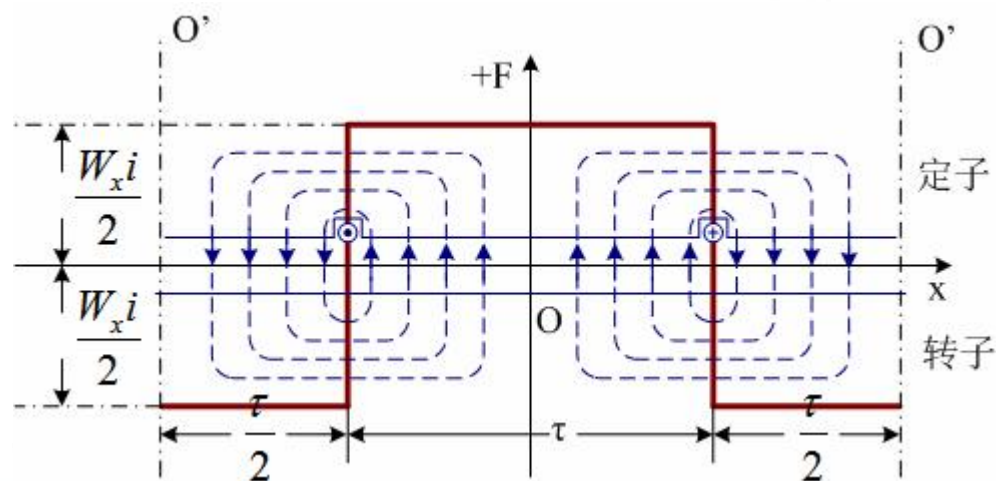
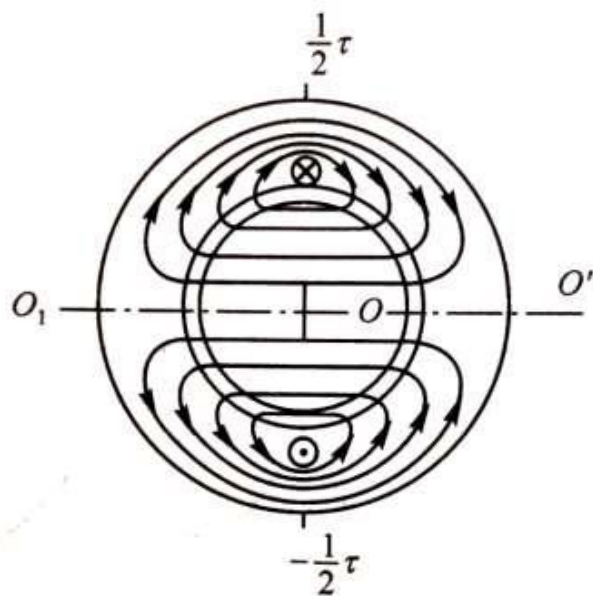
- n 气隙的磁阻远大于铁心的磁阻，可认为磁势全部降落在气隙中。
- n 假设气隙是均匀的，所以磁回路经过一次气隙所消耗的磁势为磁回路总磁势的一半，即 $W_x i / 2$ 。
- n 令转子进入定子的磁势为正，定子进入转子的磁势为负。



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

- n 单相集中绕组的磁势曲线为一矩形波，其宽度为 2τ ，幅值为 $W_x i/2$ 。
- n 若线圈中的电流为直流，则矩形波的振幅不随时间而变。

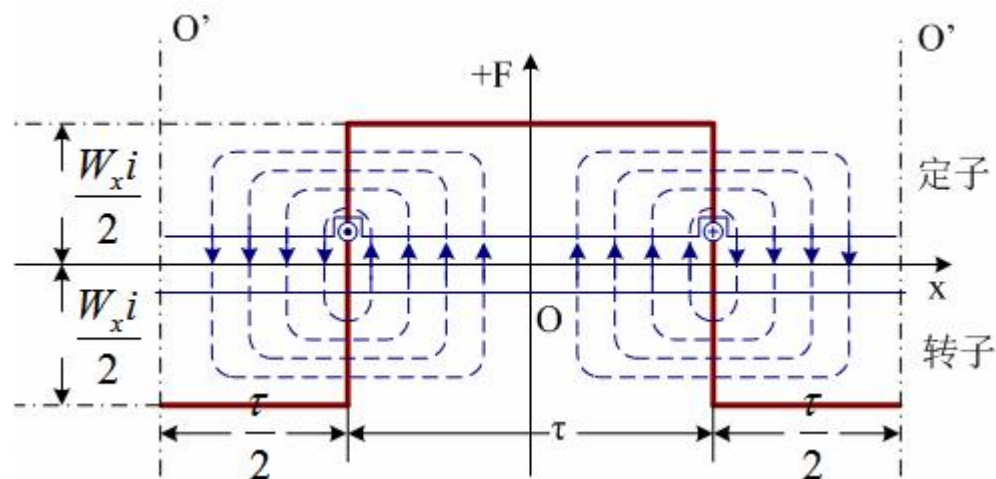
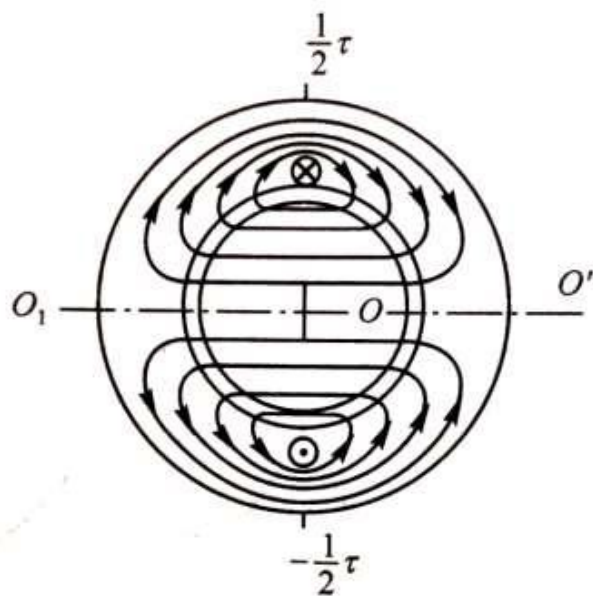


4.1 单相绕组的脉振磁场

n 若绕组中通过电流随时间按正弦规律变化，即 $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$

n 绕组磁势为

$$\begin{cases} F(x, t) = \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t, & -\frac{p}{2} < x < \frac{p}{2} \\ F(x, t) = -\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t, & -p < x < -\frac{p}{2} \text{ 或 } \frac{p}{2} < x < p \end{cases}$$

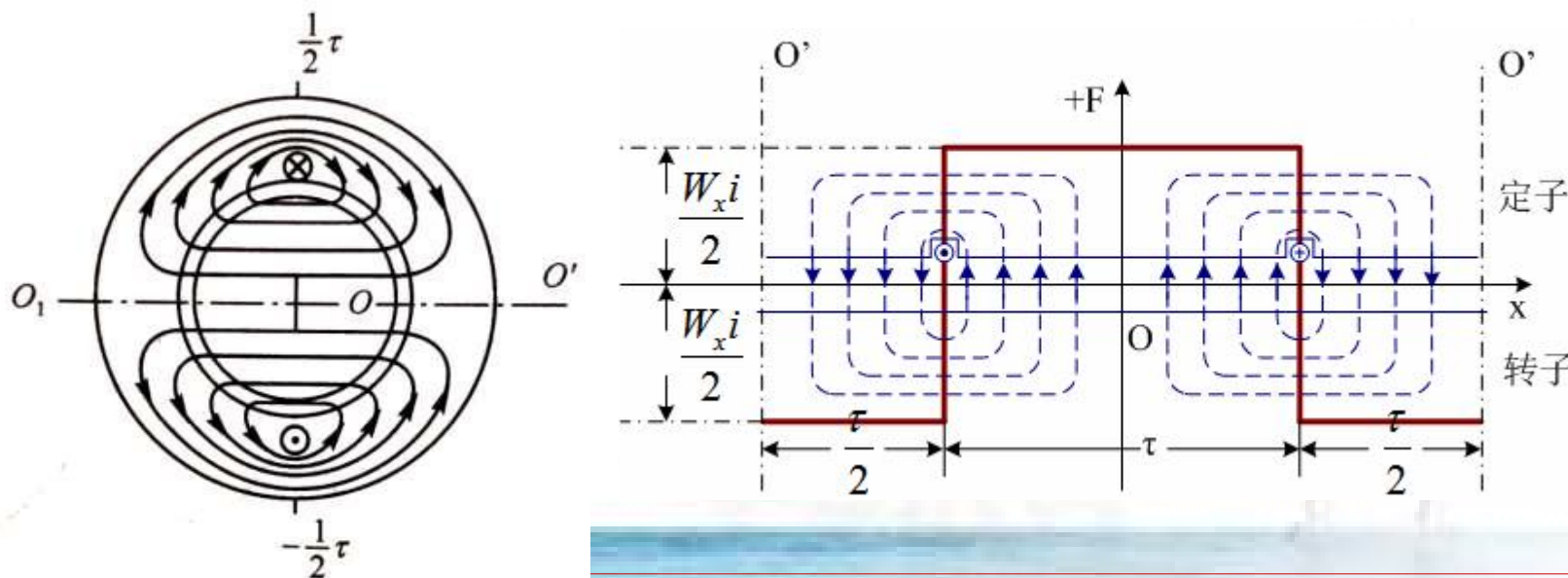


4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

n 矩形波的幅值为: $\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin wt$

n 绕组磁势的幅值是时间的函数，当电流达到最大值是，矩形波的高度达到最大值；当电流为零时，矩形波的高度为零；当电流为负时，磁势将改变方向。



4.1 单相绕组的脉振磁场

$$\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin wt$$

$$wt = 90^\circ$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I$$

$$wt = 135^\circ$$

$$\frac{\sqrt{2}}{4} W_x I$$

$$wt = 180^\circ$$

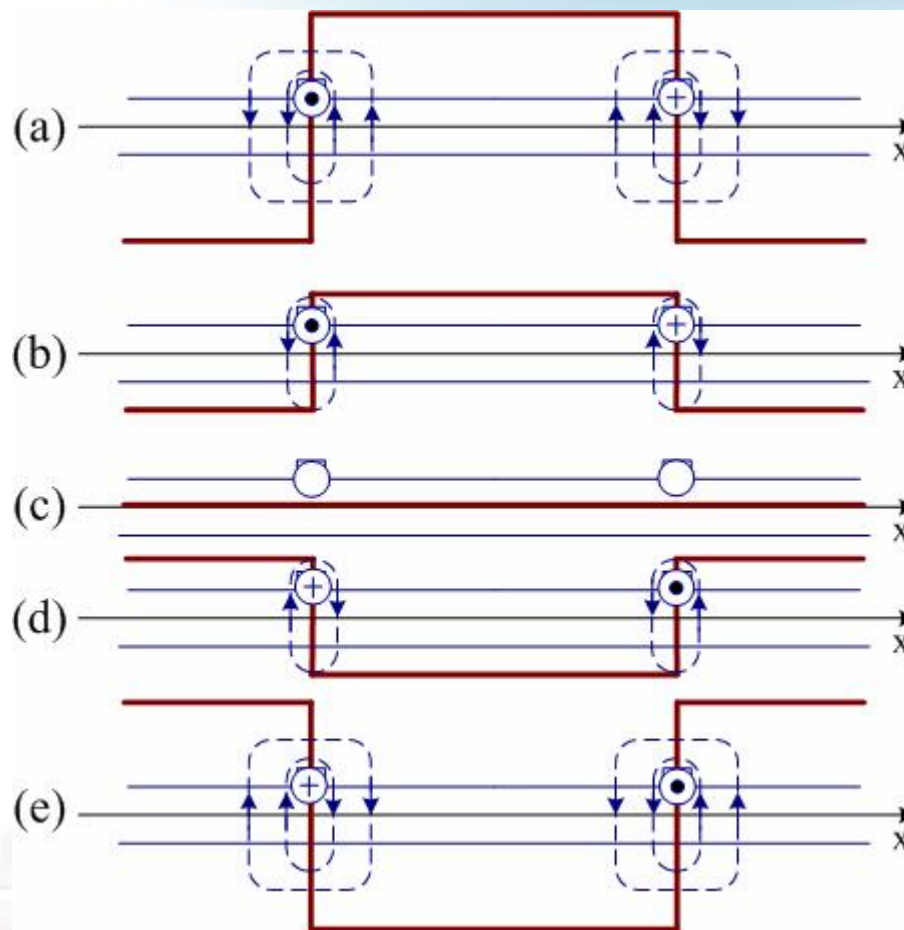
$$0$$

$$wt = 225^\circ$$

$$-\frac{\sqrt{2}}{4} W_x I$$

$$wt = 270^\circ$$

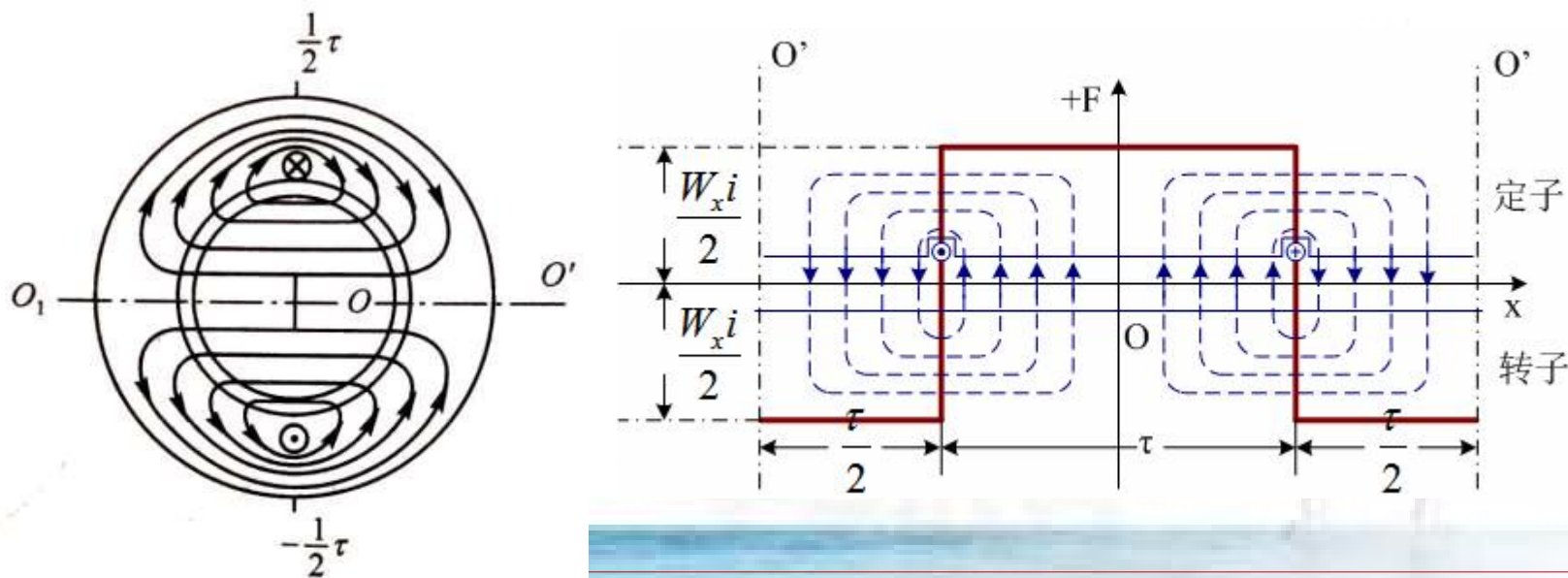
$$-\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I$$



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

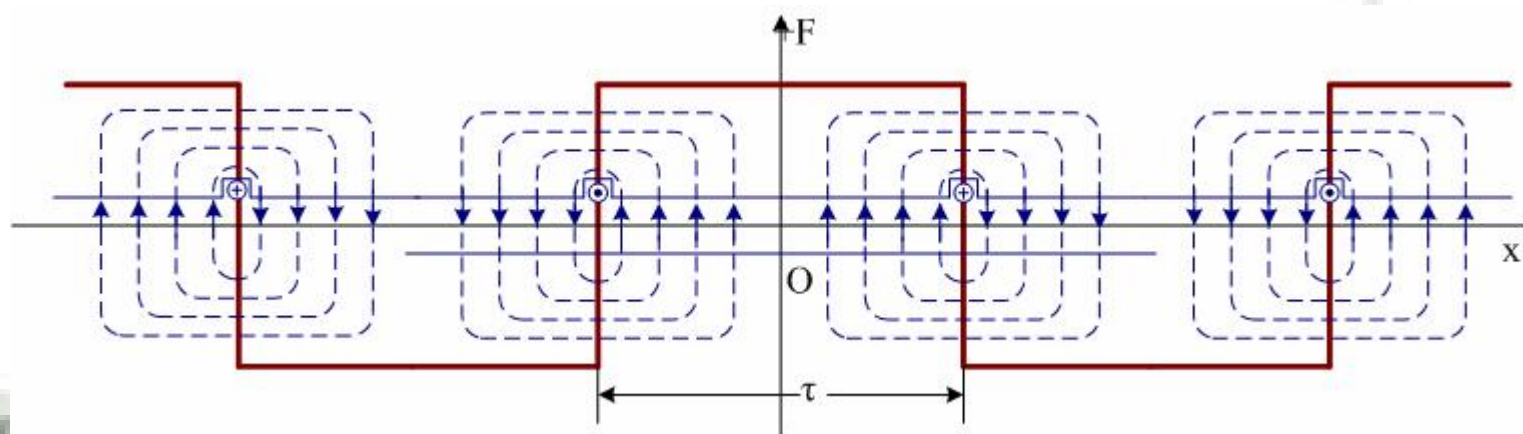
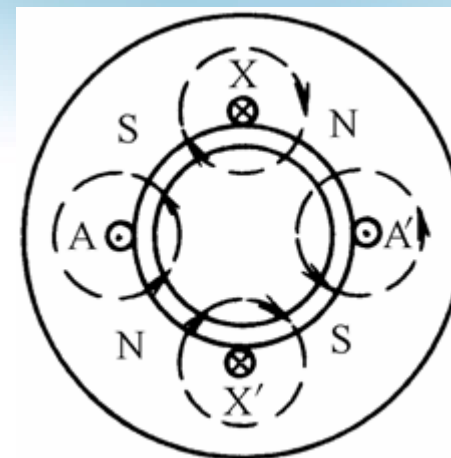
- n 脉振磁势：波形在空间位置固定，而振幅的大小和正负随时间变化的磁势称为脉振磁势，他所建立的磁场为脉振磁场，脉振磁势的频率等于电流的频率。
- n 单相集中绕组通正弦电流时产生的磁势为脉振磁势。



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

- n 在多极电机中，如果取一对极的磁势来分析，与两极电机的磁势完全相同，即 p 对极电机磁势分布波形仅是周期数增加为 p 倍。



4.1 单相绕组的脉振磁场

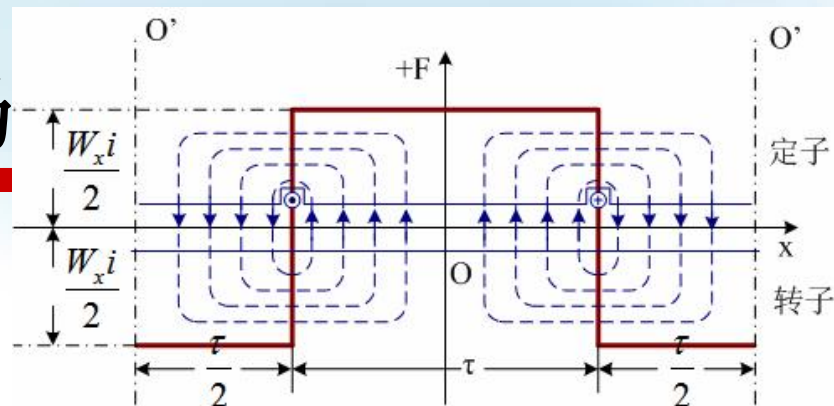
○ 单相集中绕组的磁场

n 绕组磁势为

$$\begin{cases} F(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t, & -\frac{p}{2} < x < \frac{p}{2} \\ F(x,t) = -\frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t, & -p < x < -\frac{p}{2} \text{ 或 } \frac{p}{2} < x < p \end{cases}$$

n 分解为傅立叶级数

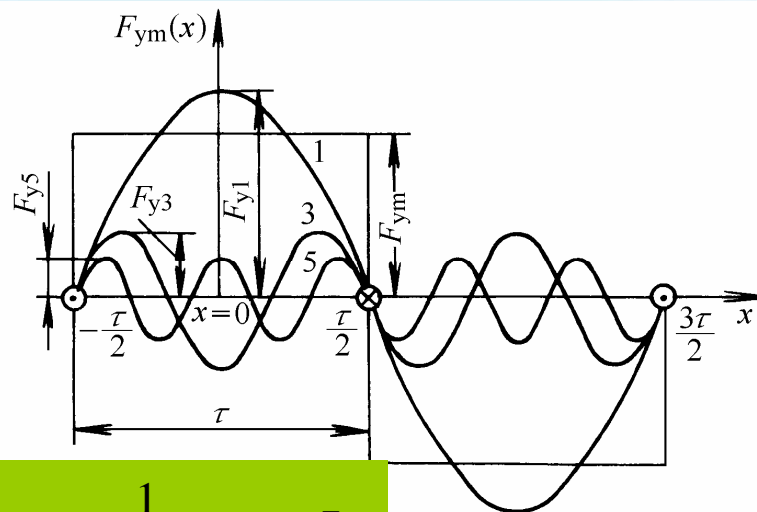
$$\begin{aligned} F(x,t) &= \frac{4}{p} \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t \left(\cos x - \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x + \dots \right) \\ &= 0.9 W_x I \sin \omega t \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin \left(i \frac{p}{2} \right) \cos ix \end{aligned}$$



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相集中绕组的磁场

n 分解为傅立叶级数



$$F(x,t) = \frac{4}{p} \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t \left(\cos x - \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x + \dots \right)$$

$$= 0.9 W_x I \sin \omega t \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin \left(i \frac{p}{2} \right) \cos ix$$

n 基波磁势

$$F_1(x,t) = 0.9 W_x I \sin \omega t \cos x = F_{y1} \cos x$$

幅值

$$F_{y1} = 0.9 W_x I \sin \omega t$$

n i次谐波磁势

$$F_i(x,t) = 0.9 W_x I \sin \omega t \left[\frac{1}{i} \sin \left(i \frac{p}{2} \right) \cos ix \right] = F_{yi} \cos ix$$

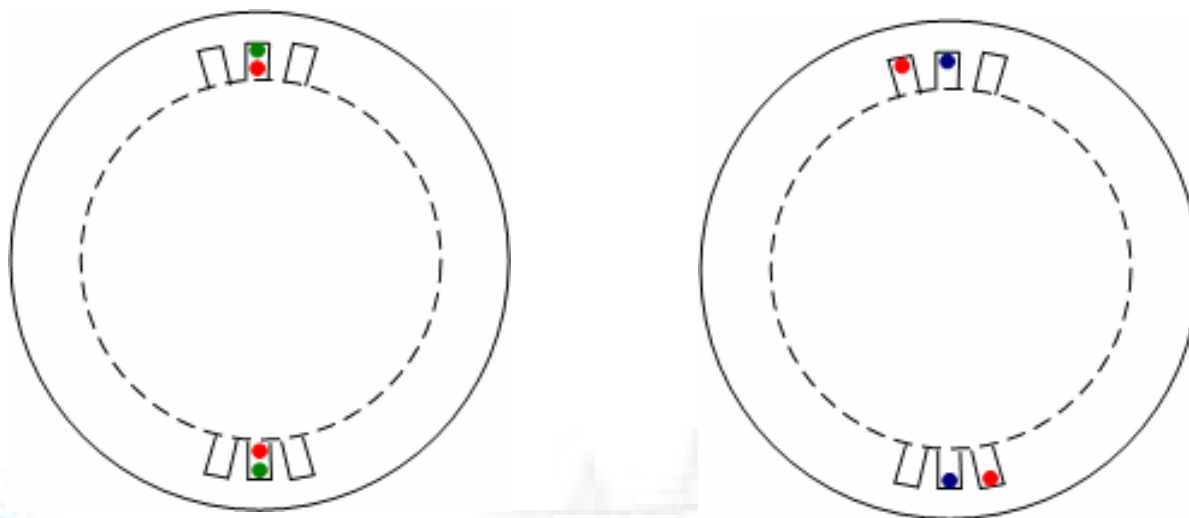
幅值

$$F_{yi} = \frac{1}{i} 0.9 W_x I \sin \left(i \frac{p}{2} \right) \sin \omega t$$

4.1 单相绕组的脉振磁场

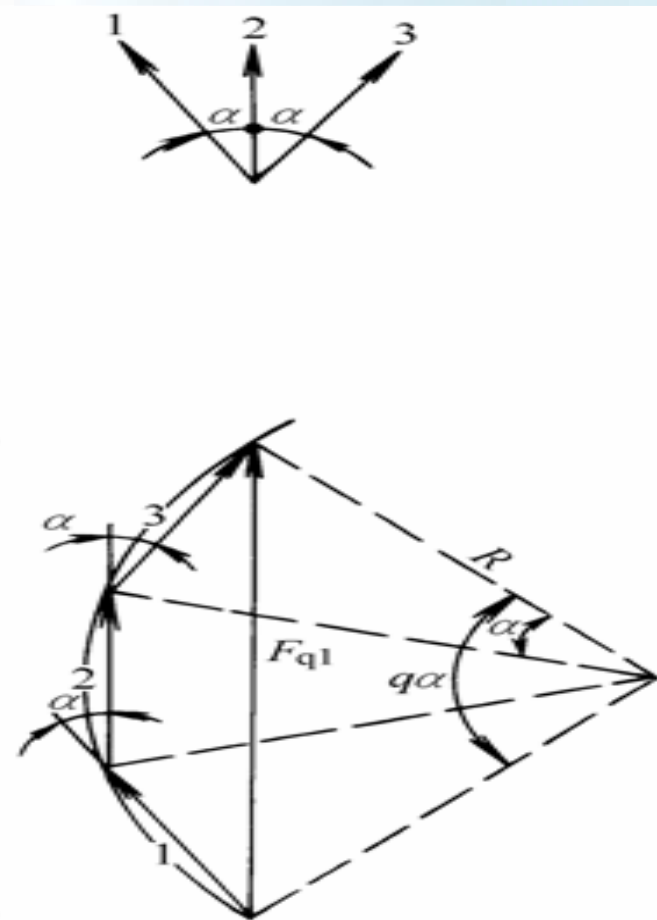
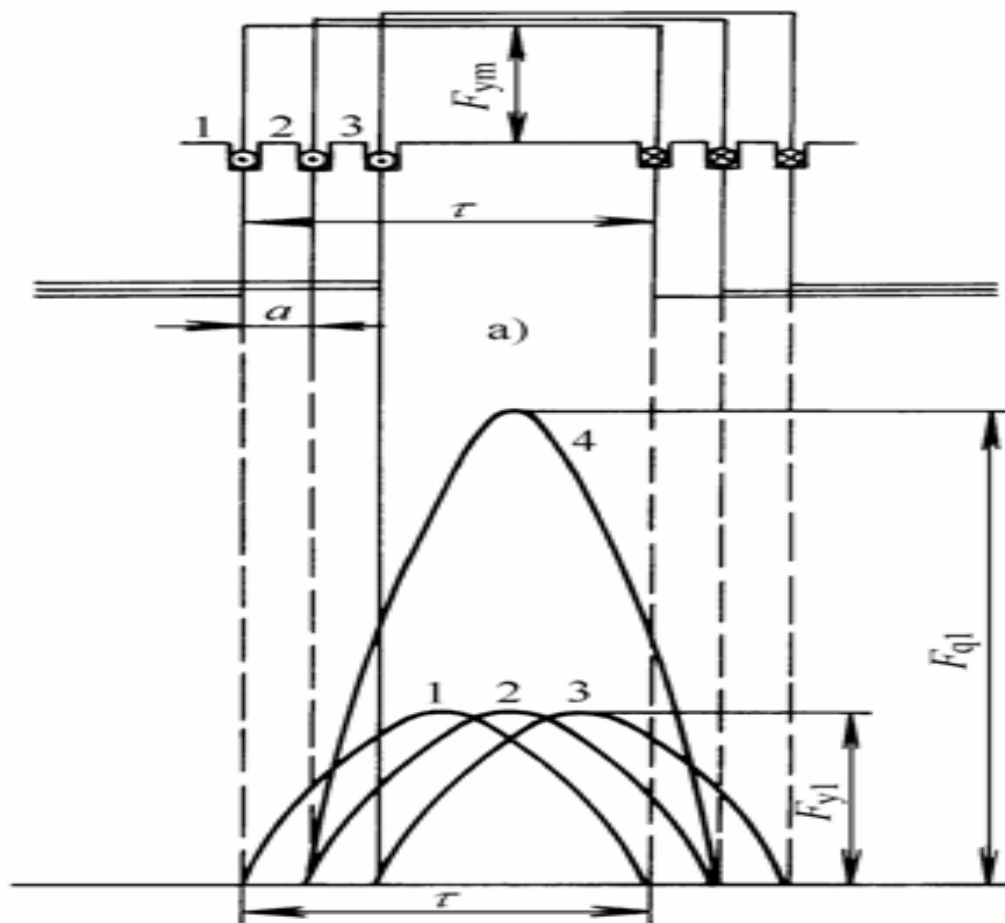
○ 单相分布绕组的磁场

- n 单相分布绕组可以看成是几个集中线圈串联而成
- n 每个线圈产生的磁势皆为矩形波
- n 单相分布绕组所产生的磁势为各线圈的磁势之和



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相分布绕组的磁场



4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相分布绕组的磁场

n 分布绕组的基波合成磁势可以用分布因数来表示

$$k_{w1} = \frac{q \text{个分布线圈基波磁动势矢量的几何和}}{q \text{个分布线圈基波磁动势矢量的代数和}}$$

$$F_{q1} = qk_{w1}F_{y1}$$

n 由集中绕组改为分布绕组，基波合成磁势应该打一个折扣 k_{w1}

n 高次谐波的分布因素可以用 k_{wi} 来表示

n 单相分布绕组的合成磁势

$$F(x,t) = 0.9qW_x I \sin wt (k_{w1} \cos x - \frac{1}{3}k_{w3} \cos 3x + \frac{1}{5}k_{w5} \cos 5x + \mathbf{L})$$

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相分布绕组的磁场

- n 分布因数与电机结构和绕组方式有关，当电机制成之后，分布因数随之确定
- n 各次谐波的分布因数是不相同的。基波的分布因数略小于1，高次谐波分布因数接近于零。也就是说，分布绕组对基波磁势的影响较小，而对高次谐波的磁势有较大的削弱，从而改善了磁动势的波形。
- n 基波磁势对电机的工作具有决定性的意义，所以分析电机是主要分析基波磁势。

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相分布绕组的合成磁势

- n** 设某电机极对数为 p ，每极每相下有 q 个分布绕组，每个绕组有 W_x 匝，每相绕组的串联总匝数为 W 。则每相绕组每对极下的线圈匝数为

$$\frac{W}{p} = qW_x$$

- n** 磁势的基波分量为

$$\begin{aligned} F_{q1} &= qk_{w1}F_{y1} = qk_{w1} \times 0.9W_x I \sin wt \\ &= 0.9k_{w1}(qW_x)I \sin wt \\ &= 0.9k_{w1}\frac{W}{p}I \sin wt \end{aligned}$$

- n** 单相分布绕组的合成磁势

$$F(x,t) = 0.9\frac{W}{p}I \sin wt (k_{w1} \cos x - \frac{1}{3}k_{w3} \cos 3x + \frac{1}{5}k_{w5} \cos 5x + \dots)$$

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 单相分布绕组的合成磁势(总结)

- n 单相绕组的磁势是空间位置固定(在相绕组的轴线上)、幅值随时间以电流的频率按正弦规律变化的脉振磁势。
- n 单相绕组的脉振磁势可分解为空间基波和一系列奇次谐波。基波和各次谐波为沿气隙圆周方向按正弦波分布的脉振磁势。
- n 单相绕组采用分布绕组，对基波磁势的影响较小，而对各高次谐波磁势有较大削弱，从而改善了磁势波形。

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 脉振磁势的分解

n 单相分布绕组的合成磁势

$$F(x,t) = 0.9 \frac{W}{p} I \sin \omega t (k_{w1} \cos x - \frac{1}{3} k_{w3} \cos 3x + \frac{1}{5} k_{w5} \cos 5x + \dots)$$

n 考虑其基波磁势

$$F_1(x,t) = 0.9 k_{w1} \frac{W}{p} I \sin \omega t \cos x = A_1 \sin \omega t \cos x$$

$$F_1(x,t) = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x) = F_1^+ + F_1^-$$

其中

$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x)$$

$$F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 脉振磁势的分解

n 基波磁势
$$F_1(x, t) = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x) = F_1^+ + F_1^-$$

其中
$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x) \quad F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$

- n 考虑 F_1^+ ：当时间 t 一定时， F_1^+ 是一个空间正弦波，其幅值为 $A_1/2$ ，表示在空间按正弦规律分布的磁势。
- n 考虑 F_1^+ ：当空间位置 x 一定时， F_1^+ 是一个时间正弦波，其幅值为 $A_1/2$ ，表示某一固定点处随时间按正弦规律脉振的磁势。

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 脉振磁势的分解

n 基波磁势

$$F_1(x, t) = A_1 \sin \omega t \cos x = F_1^+ + F_1^-$$

其中

$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x)$$

$$F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$

n 若观察 F_1^+ 所表示磁势波形上某一定值的点，比如最大值 $F_1^+ = A_1/2$ 的点，此时有

$$\omega t - x = \frac{p}{2}$$

$$x = \omega t - \frac{p}{2}$$

F_1^+ 波形上某一定值的点其所在位置 x 随时间而变化，也即 F_1^+ 为一个正向旋转的磁势波，其转速为

$$\frac{dx}{dt} = \omega (\text{rad/s}) \quad (\text{电角})$$

$$n_s = \frac{60f}{p} (\text{r/min}) \quad (\text{机械角})$$

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 脉振磁势的分解

n 基波磁势

$$F_1(x, t) = A_1 \sin \omega t \cos x = F_1^+ + F_1^-$$

其中

$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x)$$

$$F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$

n F_1^+ 表示一个正向旋转的磁势波

n 同理, F_1^- 表示一个负向旋转的磁势波

n 任意一个在时间上按正弦规律变化, 在空间上按余弦规律分布的脉振磁势, 可以分解为两个速度相同但方向相反的旋转磁势, 每一个磁势振幅大小不变, 为原来脉振磁势最大值的一半。

4.1 单相绕组的脉振磁场

○ 脉振磁势的空间向量表示

n 基波磁势

$$F_1(x, t) = A_1 \sin \omega t \cos x = F_1^+ + F_1^-$$

其中

$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x)$$

$$F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$

n 在空间按正弦(余弦)分布的物理量可以用空间向量表示，向量的长度表示物理量的幅值，向量的方向表示物理量的空间位置。

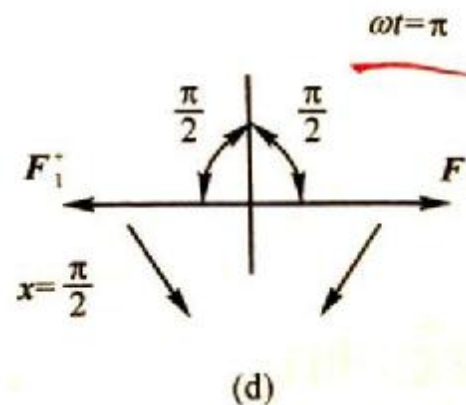
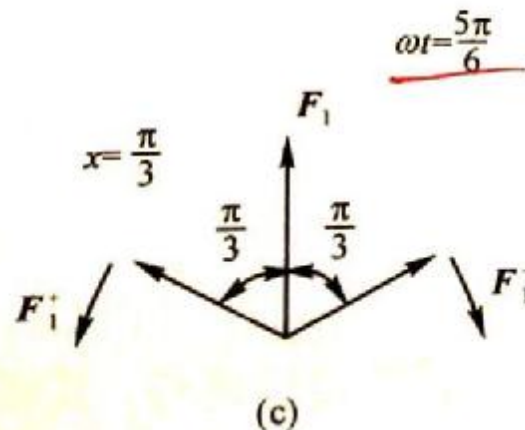
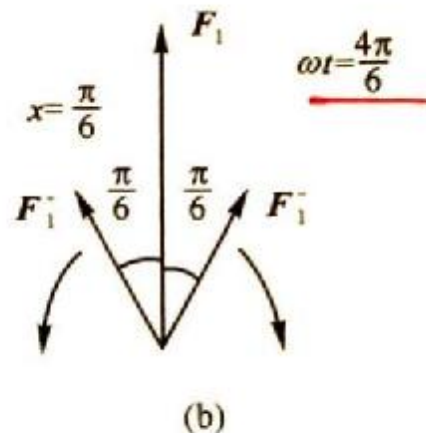
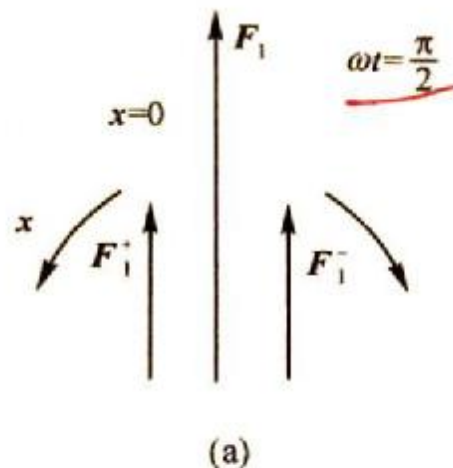
4.1 单相绕组的脉振磁场

$$F_1(x, t) = A_1 \sin \omega t \cos x = F_1^+ + F_1^-$$

○ 脉振磁势的空间向量表示

$$F_1^+ = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t - x)$$

$$F_1^- = \frac{1}{2} A_1 \sin(\omega t + x)$$



15:16:10



哈尔滨工业大学
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

4.2 两相绕组的圆形旋转磁场

- 两相绕组的匝数分别为 W_c 和 W_f ，其中c绕组的轴线位置是 0° ，f绕组的轴线位置是 90°
- 两相绕组的激磁电流为

$$\begin{cases} i_c = \sqrt{2}I_c \sin \omega t \\ i_f = \sqrt{2}I_f \sin(\omega t - 90^\circ) \end{cases}$$

- 两相绕组的基波磁势为

$$\begin{cases} F_c = 0.9k_{w1} \frac{W_c}{p} I_c \sin \omega t \cos x = F_{c1} \sin \omega t \cos x \\ F_f = 0.9k_{w1} \frac{W_f}{p} I_f \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(x - 90^\circ) = F_{f1} \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(x - 90^\circ) \end{cases}$$

4.2 两相绕组的圆形旋转磁场

- 利用三角公式，将脉振磁势 F_c 和 F_f 分解为两个旋转磁场

$$\begin{aligned} F_c &= 0.9k_{b1} \frac{W_c}{p} I_c \sin \omega t \cos x = F_{c1} \sin \omega t \cos x \\ &= \frac{1}{2} F_{c1} \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{c1} \sin(\omega t + x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_f &= 0.9k_{b1} \frac{W_f}{p} I_f \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(x - 90^\circ) = F_{f1} \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(x - 90^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{f1} \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{f1} \sin(\omega t + x - 180^\circ) \end{aligned}$$

- 因此可将两个脉振磁势 F_c 和 F_f 分解为四个旋转磁场
- 若 $W_c I_c = W_f I_f$ ，则有 $F_{c1} = F_{f1}$

4.2 两相绕组的圆形旋转磁场

- 利用三角公式，将脉振磁势 F_c 和 F_f 分解为两个旋转磁场

$$F_c = \frac{1}{2} F_{c1} \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{c1} \sin(\omega t + x)$$

$$F_f = \frac{1}{2} F_{f1} \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} F_{f1} \sin(\omega t + x - 180^\circ)$$

- 两个脉振磁势的合成磁势为

$$F = F_c + F_f = F_1 \sin(\omega t - x)$$

旋转磁势

其中：

$$F_1 = F_c = F_f = 0.9 k_{w1} \frac{W_c}{p} I_c = 0.9 k_{w1} \frac{W_f}{p} I_f$$

其转速为：

$$\frac{dx}{dt} = \omega (\text{rad/s}) \quad (\text{电角})$$

$$n_s = \frac{60f}{p} (\text{r/min}) \quad (\text{机械角})$$

4.2 两相绕组的圆形旋转磁场

- 两相对称绕组通入两相对称电流，两相绕组基波合成磁势是一个在空间按正弦分布、幅值恒定的圆形旋转磁势，其幅值与每相基波脉振磁势最大值相等，即

$$F_1 = F_c = F_f = 0.9k_{w1} \frac{W_c}{p} I_c = 0.9k_{w1} \frac{W_f}{p} I_f$$

- 合成磁势的转速为同步转速

$$\frac{dx}{dt} = \omega (\text{rad/s}) \quad (\text{电角})$$

$$n_s = \frac{60f}{p} (\text{r/min}) \quad (\text{机械角})$$

- 合成磁势是从超前电流的绕组轴线转向滞后电流的绕组轴线。实际方向取决于电源与绕组的连接。改变电流相序即可改变旋转磁势的转向。

4.3 三相绕组的圆形旋转磁场

