

自动控制实践 交流绕组的磁场分析

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴



交流绕组磁场分析



- ❖ 旋转磁场是交流电机工作的基础
- ❖ 机械旋转磁场是通过原动机拖动磁极旋转可以产生机械旋转磁场；
- ❖ 电气旋转磁场是三相对称的交流绕组通入三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

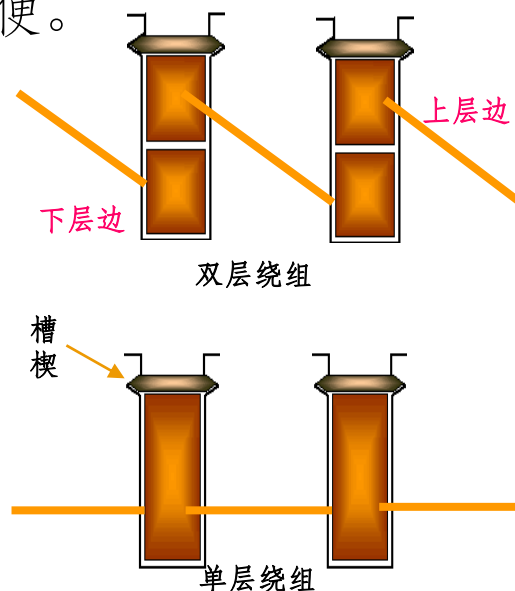
交流绕组磁场分析

❖ 交流绕组的基本要求

- 合成电动势和合成磁动势波形接近正弦，幅值要大、各谐波分量要小；
- 三相绕组基波电势、基波磁势对称，电阻、电抗要平衡；
- 绕组的铜耗要小，用铜量要省；
- 绝缘要可靠，机械强度、散热条件好，制造方便。

❖ 交流绕组的分类

- 相数：单相和多相绕组；
- 根据槽内层数：单层绕组和双层绕组；
- 每极下每相槽数：整数槽和分数槽。
- 根据绕法：叠绕组和波绕组。



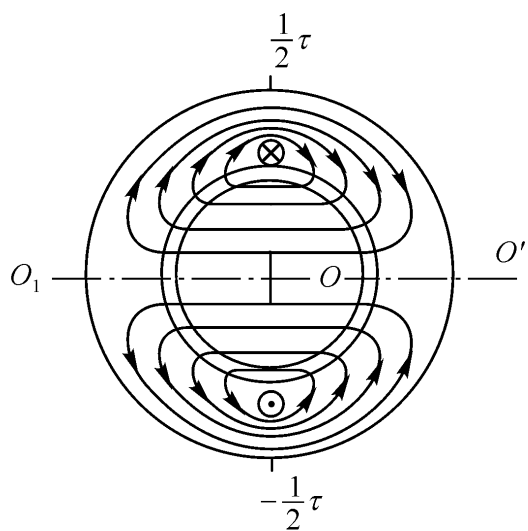
交流绕组磁场分析

❖ 为了简化分析过程，作出下列假设：

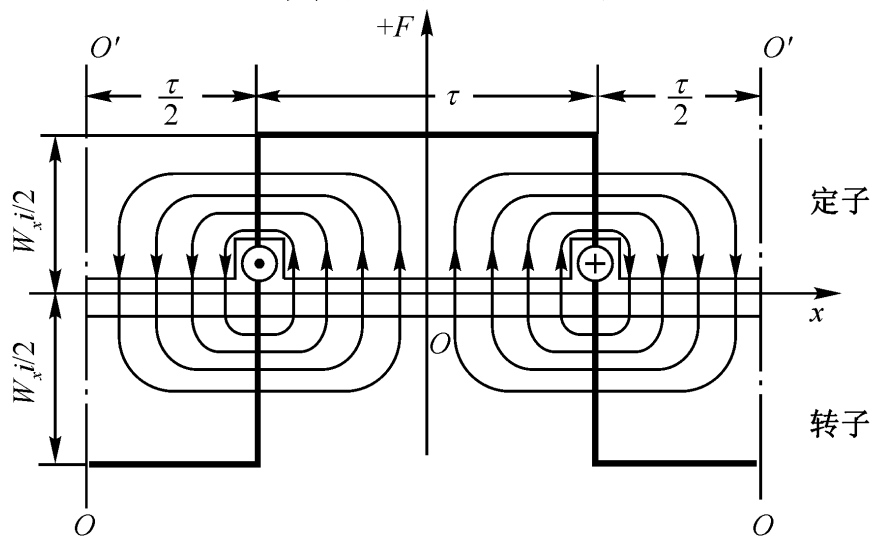
- 绕组中的电流随时间按正弦规律变化（实际上就是只考虑绕组中的基波电流）；
- 槽内电流集中在槽中心处；
- 转子呈圆柱形，气隙均匀；
- 铁心不饱和，铁心中磁压降可忽略不计（即认为磁动势全部降落在气隙上）。

单相集中绕组磁场

- ❖ 线圈的匝数 W_x ，线圈的电流为 i 。磁路磁势 $F=W_x i$
- ❖ 气隙磁阻远大于铁心磁阻，磁势全部落入气隙。
- ❖ 磁通两次穿过气隙，每一次穿越气隙的磁势： $W_x i/2$
- ❖ 定义转子进入定子的磁势为正，反之为负；
- ❖ 当线圈中通直流电，直流的磁势是位置固定的方波



(a) 磁场分布



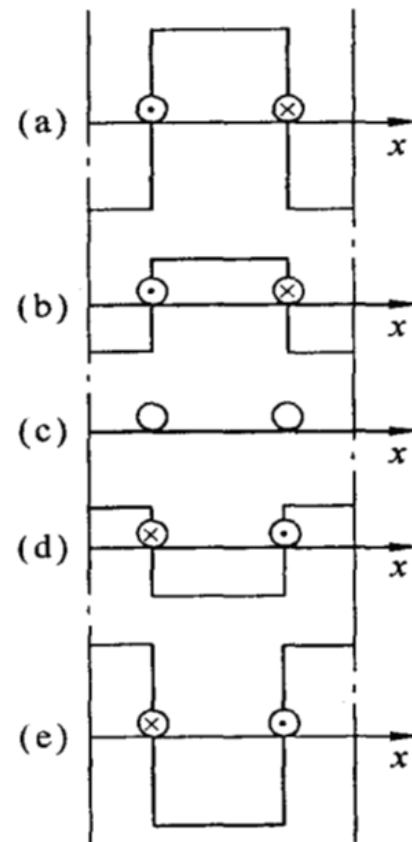
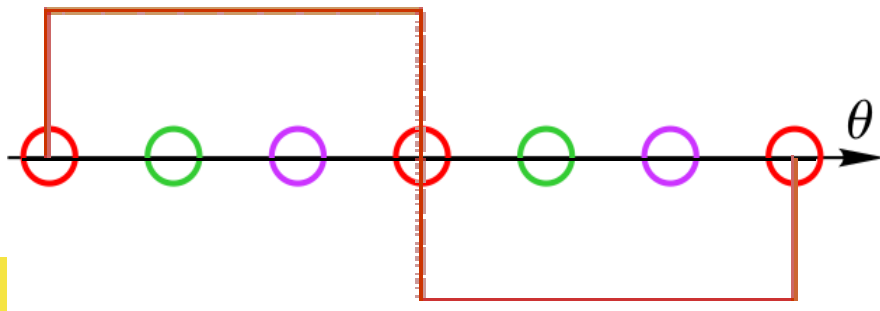
(b) 磁势波形

单相集中绕组脉振磁场

- 当线圈通过交流电， $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$
气隙磁势

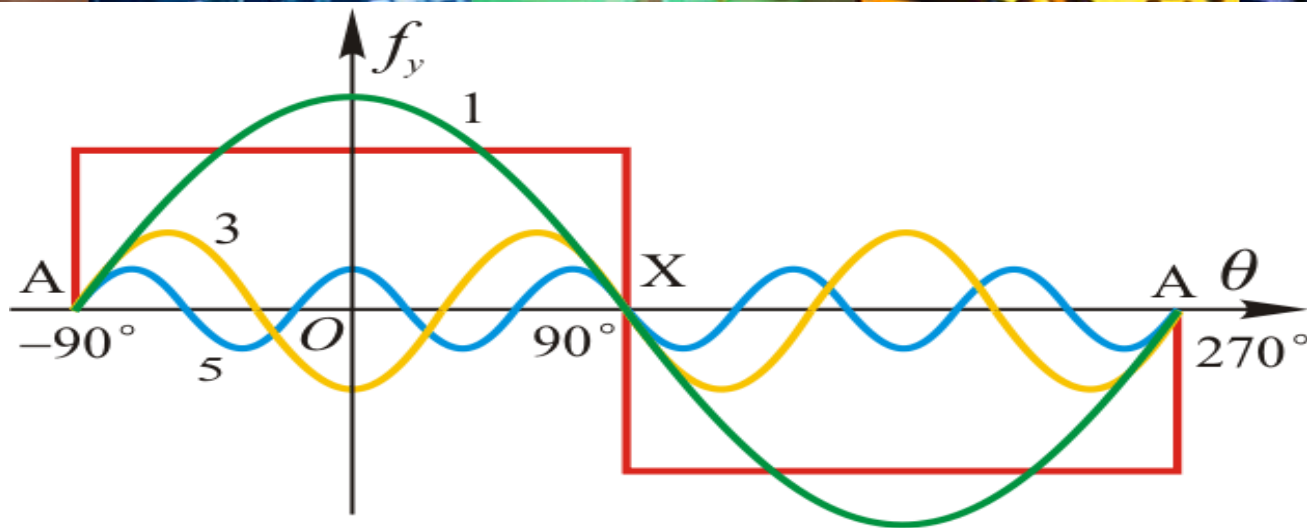
$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t$$

- 交流磁势是方波，位置固定，振幅的大小和正负随时间做周期变化，频率与电流相同。
- 波形空间位置固定，振幅随时间变化的磁势称为脉动磁势，该磁势建立的磁场为脉动磁场。
- 脉动磁势的频率为电流频率。



(a) $\sin \omega t = 1$ (b) $\sin \omega t = 0.5$ (c) $\sin \omega t = 0$
(d) $\sin \omega t = -0.5$ (e) $\sin \omega t = -1$

单相集中绕组脉振磁场



$$F(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} W_x I \sin \omega t \left(\cos x - \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x - \frac{1}{7} \cos 7x + \dots \right)$$

$$= 0.9 W_x I \sin \omega t \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \sin i \frac{\pi}{2} \cos ix$$

基波

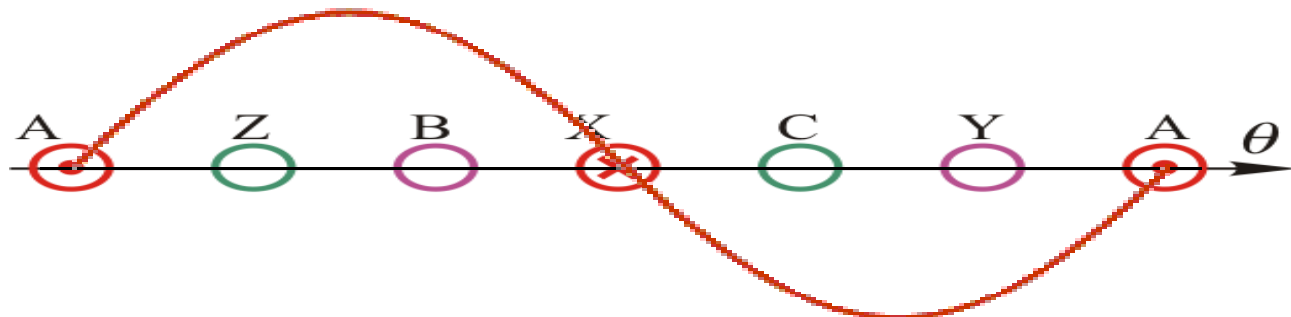
$$F_1(x) = 0.9 W_x I \sin \omega t \cos x = A_1 \sin \omega t \cos x$$

基波幅值

$$F_{1m}(x) = 0.9 W_x I \sin \omega t$$

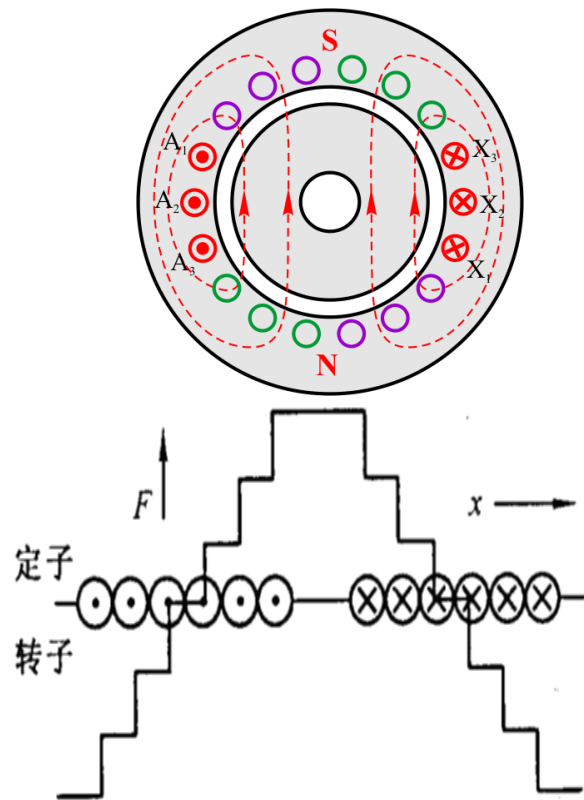
单相集中绕组脉振磁场

- ❖ 脉振物理量：空间和时间的函数，空间的位置（最大值或波形对称轴的位置）固定，振幅的大小和正负随时间周期变化。
- ❖ 交流电的磁势是脉振磁势。
- ❖ 脉振磁势的典型表达式： $F_1 = A_1 \sin \omega t \cos x$
- ❖ 在任何时刻，在空间都按余弦规律分布。磁势分布曲线幅值的位置 $\cos x = 1 \Rightarrow x = 0$ ，位置始终不变。磁势幅值的大小（ $A_1 \sin \omega t$ ）和符号随时间周期变化。



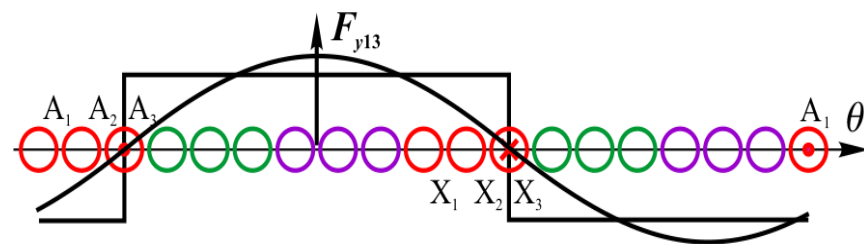
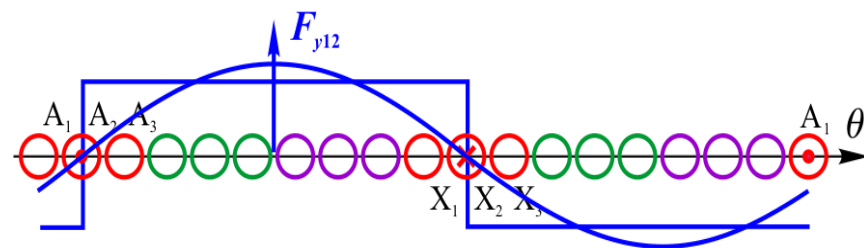
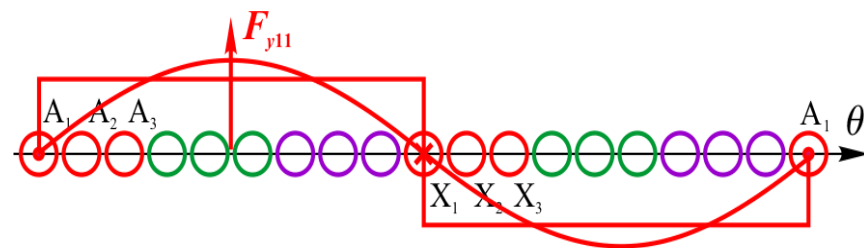
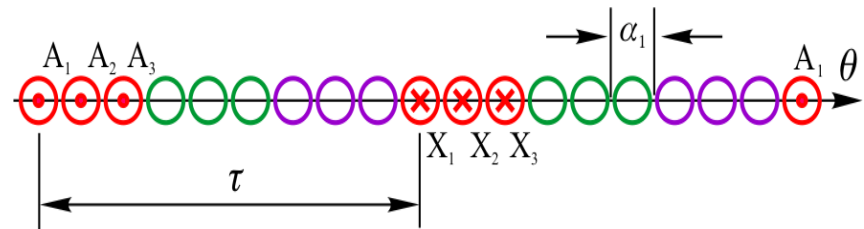
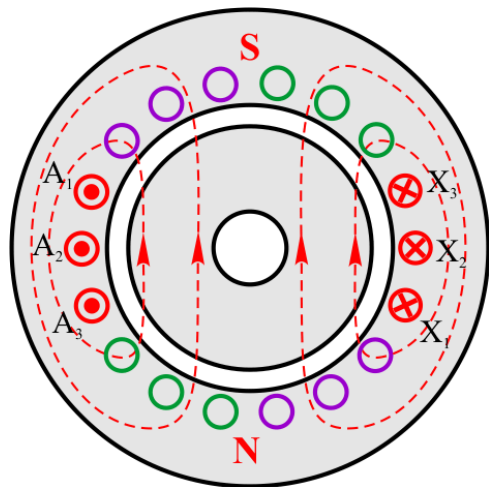
单相分布绕组磁场

- ❖ 分布绕组：由 q 个绕组串联而成，分布在 q 个连续槽中。
- ❖ 单相分布绕组的磁势为各集中绕组磁势之和。
- ❖ 单相分布绕组的磁场是阶梯波，脉振磁场。
- ❖ 有 q 个线圈分布在 q 个槽中，每个槽中有 W_x 匝，傅里叶级数



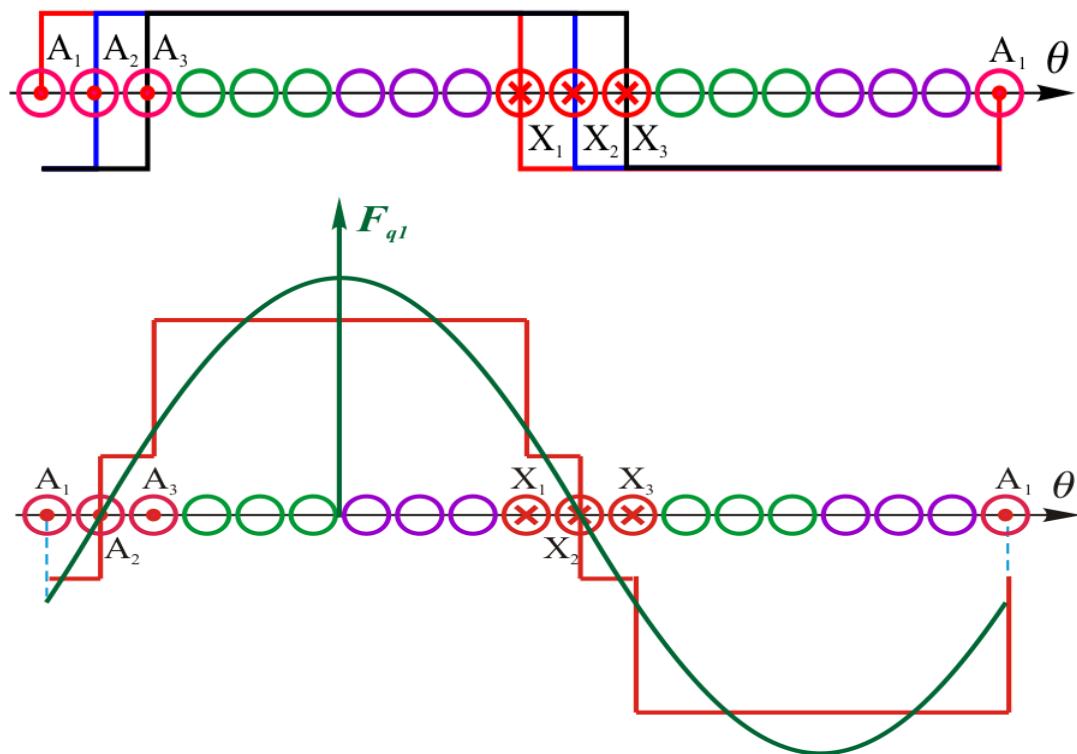
$$F = 0.9qW_x I \sin \omega t \left(k_{b1} \cos x - \frac{1}{3} k_{b3} \cos 3x + \frac{1}{5} k_{b5} \cos 5x - \frac{1}{7} k_{b7} \cos 7x + \dots \right)$$

单相分布绕组磁场



- ❖ 采用磁动势迭加原理，各线圈分别产生矩形波磁动势。磁动势波形一样，依次位移槽距电角 α_1 度。
- ❖ 各线圈磁动势的基波分量为空间分布正弦波，和时间相量相似，可以用空间矢量来表示。
- ❖ 磁动势空间矢量的长度代表幅值大小，矢量的位置代表幅值所处的空间位置。

单相分布绕组磁场

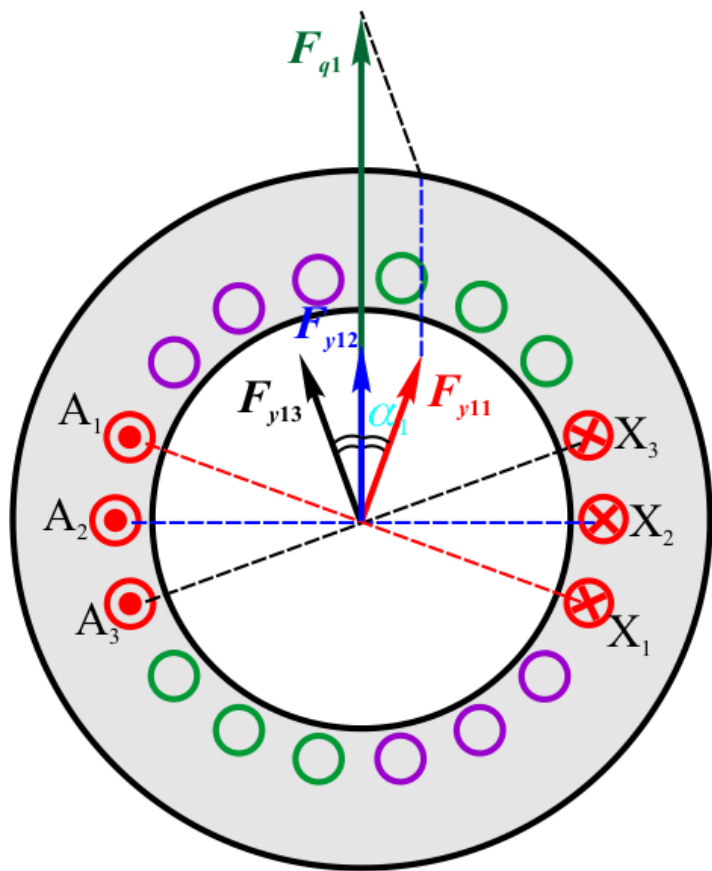


- ❖ 将三个矩形波叠加起来，得到分布绕组磁动势波形——**阶梯波**。
- ❖ 合成磁动势为**脉振磁动势**。
- ❖ 合成磁动势基波幅值位于线圈组的中心线上。
- ❖ 将坐标原点取在线圈组的中心线上，基波磁动势波表达式为

$$F_1 = 0.9qW_x I k_{b1} \sin \omega t \cos x = 0.9 \frac{W}{p} I k_{b1} \sin \omega t \cos x$$

$$= kW I \sin \omega t \cos x = A_1 \sin \omega t \cos x$$

单相分布绕组磁场



- ❖ k_{b1} 为基波磁动势的分布系数
- ❖ 将各线圈的基波磁动势矢量相加得到分布相绕组磁动势基波矢量。
- ❖ 如果绕组电流 $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta)$ ，绕组轴线的位置（即磁势分布曲线幅值的位置）是 x_0 ，则磁势的基波分量

$$\begin{aligned}
 F_1 &= kW I \sin(\omega t - \theta) \cos(x - x_0) \\
 &= A_1 \sin(\omega t - \theta) \cos(x - x_0)
 \end{aligned}$$

单相绕组的脉振磁场



- ❖ 单相绕组通入交流电流产生的磁势是一个脉冲磁势。它既是时间的函数，又是空间位置的函数。
- ❖ 脉振磁势的基波在空间为余弦分布，基波幅值位置为该相绕组的轴线处，空间各点磁势大小随时间作正弦规律变化，频率为电流频率。
- ❖ 基波磁势的最大值由电机本身结构和定子电流大小决定。

脉振磁势的分解

- ❖ 一相绕组产生的脉振磁动势的基波表达式为

$$F_1 = A_1 \sin \omega t \cos x$$

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

$$F_1^+ = A_1 \sin(\omega t - x) / 2$$

$$F_1^- = A_1 \sin(\omega t + x) / 2$$

- ❖ F_1^+ 和 F_1^- 是一个行波的表达式。当我们给定一个时刻，磁动势沿气隙圆周方向按正弦波分布，其幅值为原脉振磁动势最大幅值的一半。但随着时间的推移，这个在空间按正弦波分布的磁动势的位置却发生了变化，而幅值不变。

脉振磁势的分解

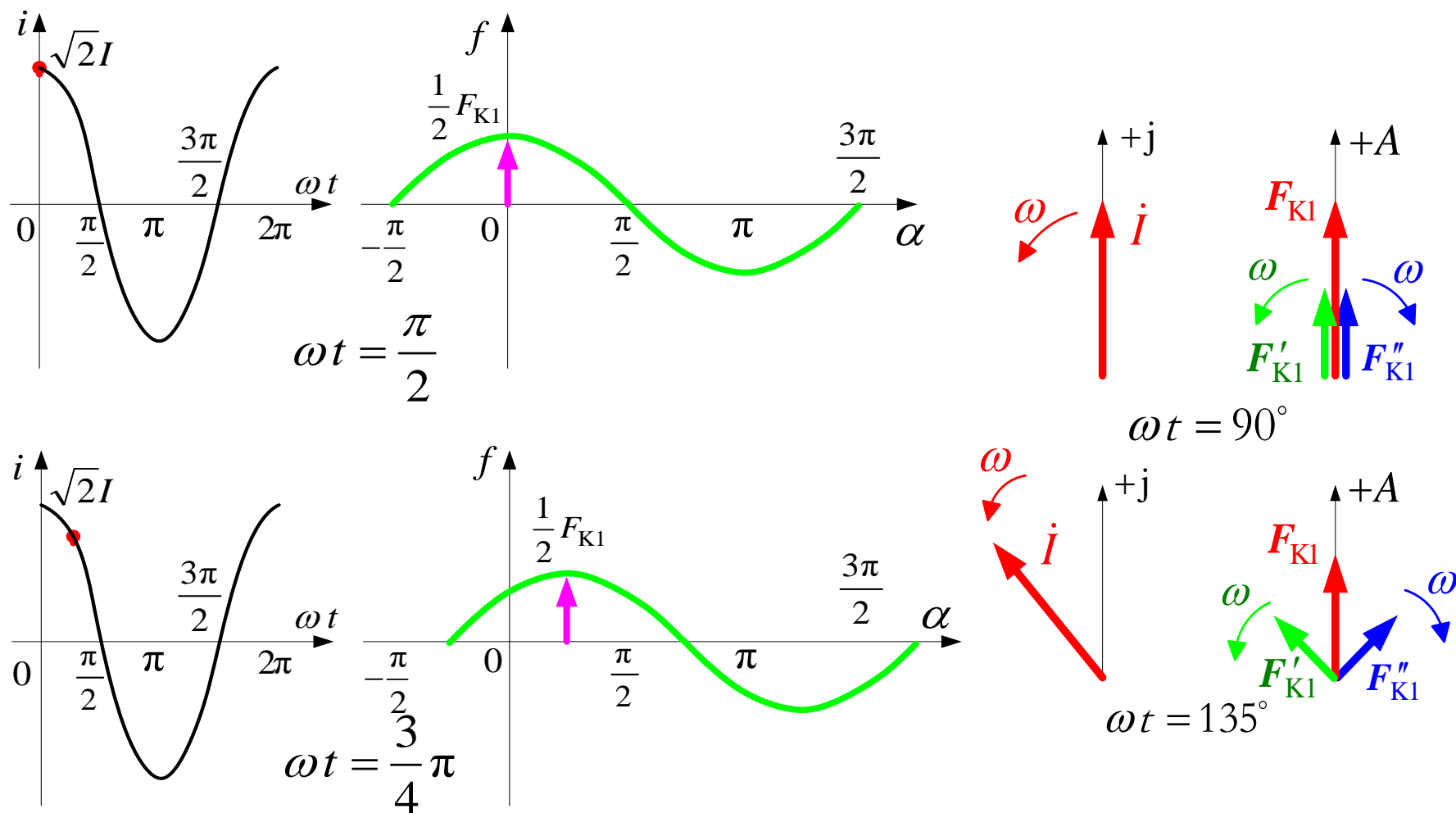
- ❖ 旋转的角速度（电角）为 $\frac{dx}{dt} = \omega \text{ rad/s}$
- ❖ 因为一个圆周为 $2\pi p \text{ rad}$ （电角），磁势波旋转的速度可表示为 $n_s = \frac{\omega}{2\pi p} \text{ r/s} = \frac{f}{p} \text{ r/s} = \frac{60f}{p} \text{ rpm}$ 。
- ❖ 单相绕组的磁动势是空间位置固定(在相绕组的轴线上)、幅值随时间以电流的频率按正弦规律变化的脉振磁动势。
- ❖ 单相绕组的脉振磁动势可分解为空间基波和一系列奇次谐波。基波和各次谐波为沿气隙圆周方向按正弦波分布的脉振磁动势。
- ❖ 一个按正弦波分布的脉振磁动势，可分解为两个转速相等、转向相反的旋转磁动势，其幅值为原脉振磁动势最大幅值的一半。当脉振磁动势达到正的最大值时，两个旋转磁动势分量位于该相绕组的轴线上。

磁势的矢量表示法

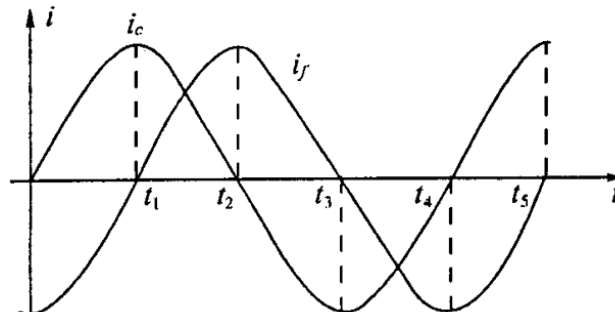
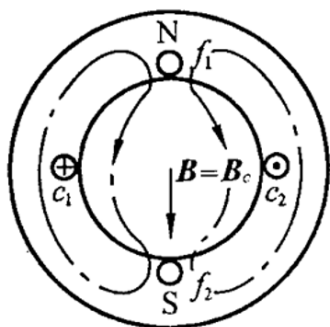


- ❖ 矢量的长度等于幅值，位置表示磁动势波正幅值所在的位置。
- ❖ 只要知道幅值和位置，就可以确定其他位置的磁动势值。
- ❖ 矢量图只能表示某一时刻矢量的位置。

磁势的矢量表示法



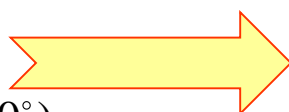
两相绕组的圆形旋转磁场



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

$$\begin{cases} F_c = KW_c I_c \sin \omega t \cos x \\ F_f = KW_f I_f \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(x - 90^\circ) \end{cases}$$

$$W_c I_c = W_f I_f$$



$$\begin{aligned} F &= F_c + F_f \\ &= KW_f I_f \sin(\omega t - x) + KW_c I_c \sin(\omega t - x) \\ &= F_m \sin(\omega t - x) \end{aligned}$$

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ r pm}$$

$$\begin{cases} F_c = \frac{1}{2} KW_c I_c \sin(\omega t - x) + \frac{1}{2} KW_c I_c \sin(\omega t + x) \\ F_f = \frac{1}{2} KW_f I_f \sin(\omega t - x) - \frac{1}{2} KW_f I_f \sin(\omega t + x) \end{cases}$$

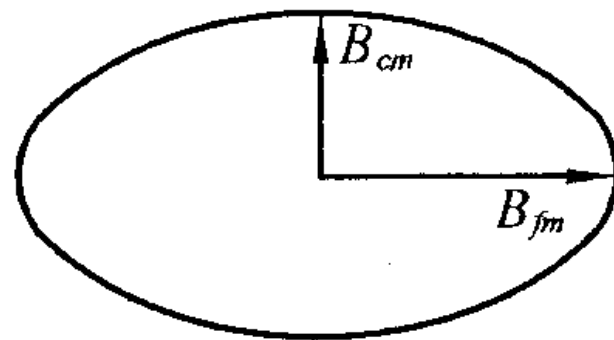
两相绕组的非圆形旋转磁场

- ❖ 非圆形旋转磁场：脉振磁场和椭圆旋转磁场
- ❖ 两相绕组的非圆形旋转磁场

- 两相绕组电流相位相同，产生脉振磁场。
- 两相绕组电流相位差是 90° ，

但 $\alpha = \frac{I_c W_c}{I_f W_f} \neq 1$ 也形成旋转磁

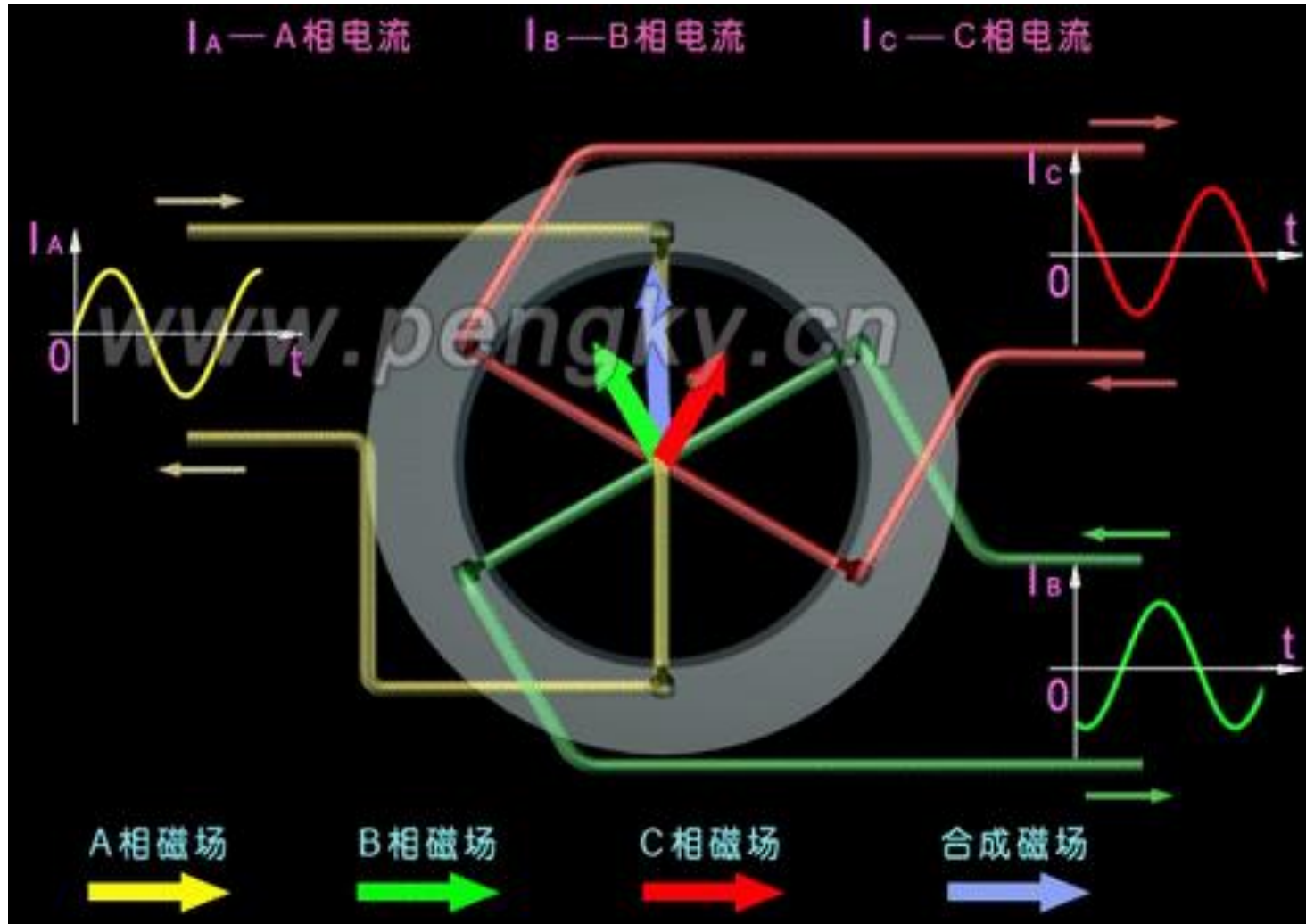
场，但磁密向量 \mathbf{B} 或磁势向量 \mathbf{F} 的端点轨迹是椭圆，称为椭圆旋转磁场。



3.2.3 两相绕组的非圆形旋转磁场

- 椭圆度： $\alpha = \frac{B_{cm}}{B_{fm}}$ ， α 越小，椭圆度越大。
- 两相绕组电流相位差大于 0° 小于 90° ，产生椭圆旋转磁场。
- 椭圆旋转磁场具有下述特点。
 - 转向 与圆形旋转磁场相同。
 - 幅值 磁密幅值不断变化。若 $\alpha < 1$ ，幅值变化范围从 αB_{fm} 至 B_{fm} 。当 $\alpha = 0$ 时变成脉振磁场，当 $\alpha = 1$ 时变成圆形旋转磁场。
 - 转速 电流变化一个周期，磁场在空间旋转了 360° 电角，平均转速是 $60f/p$ r/min。但椭圆旋转磁场的瞬时转速是变化的。

三相交流绕组的旋转磁场



Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY