

第十一章 交流绕组的磁动势

11-1 单层集中整距绕组的一相磁动势

11-2 单层整距分布绕组的一相磁动势

11-3 双层短距分布绕组的一相磁动势

11-4 三相绕组的磁动势

小 结

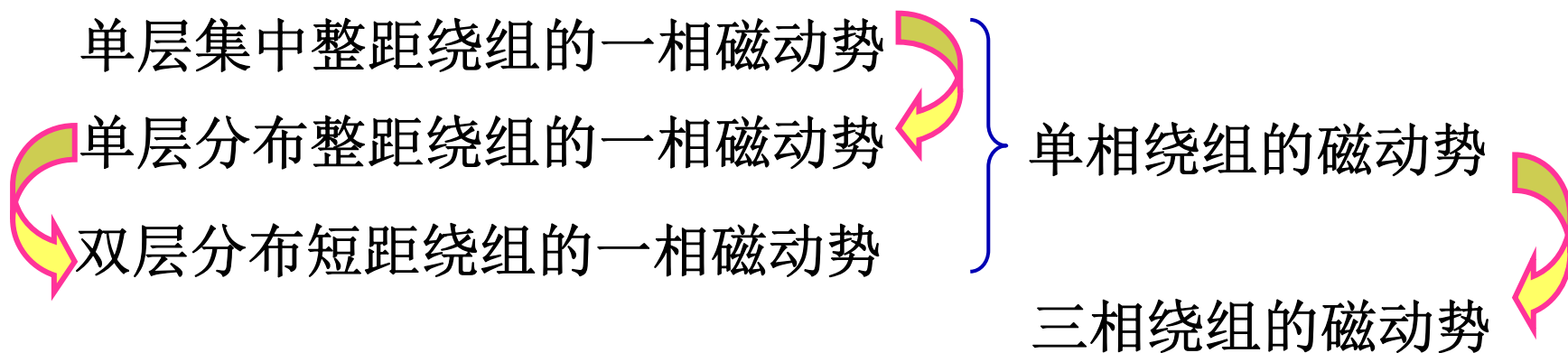
第十一章 交流绕组的磁动势

- ▶ 磁动势问题是电机内部能量转换的关键问题。
- ▶ 交流电机的磁动势：
 - 励磁绕组通以直流电流产生的磁动势；
 - 交流绕组流过交流电流产生的磁动势。
- ▶ 交流绕组的磁动势既是时间的函数，又是空间的函数，其大小及分布情况较复杂。
- ▶ 重点分析交流绕组磁动势的大小、波形和性质。
- ▶ 分析磁动势的方法：解析法、图解法。

第十一章 交流绕组的磁动势

■基本要求:

- 1.掌握单相绕组基波磁动势的性质及其特点
- 2.掌握基波脉振磁动势与旋转磁动势之间的关系
- 3.掌握三相绕组合成基波磁动势的性质及其特点



11-1 单层集中整距绕组的一相磁动势

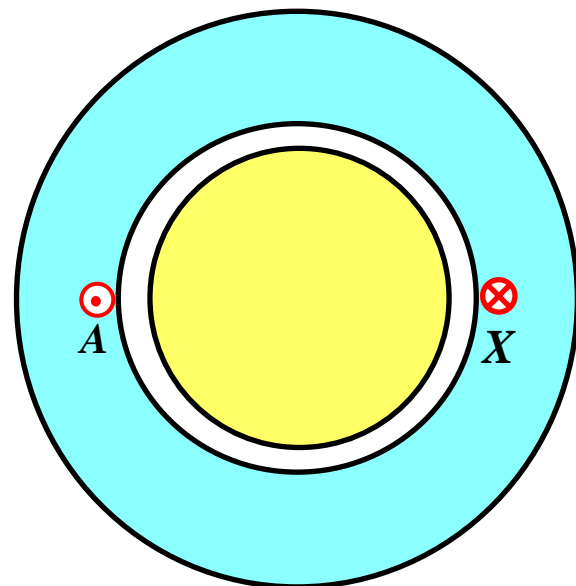
➤ 假设条件:

- 绕组中的电流随时间按余弦规律变化;
- 槽内电流集中在槽中心处;
- 转子呈圆柱形, 定、转子间的气隙均匀;
- 铁心不饱和, 即定、转子铁心的磁压降可忽略不计。

1. 磁动势表示方法

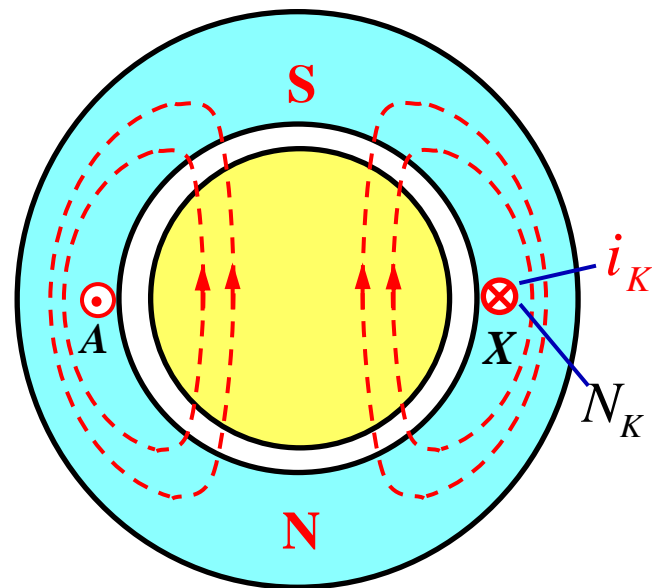
定子采用三相单层绕组, $Q=6$, $p=1$ 。

$q=1$, 每相绕组为一个整距线圈, 线圈匝数为 N_K 。



➤ 正方向的规定

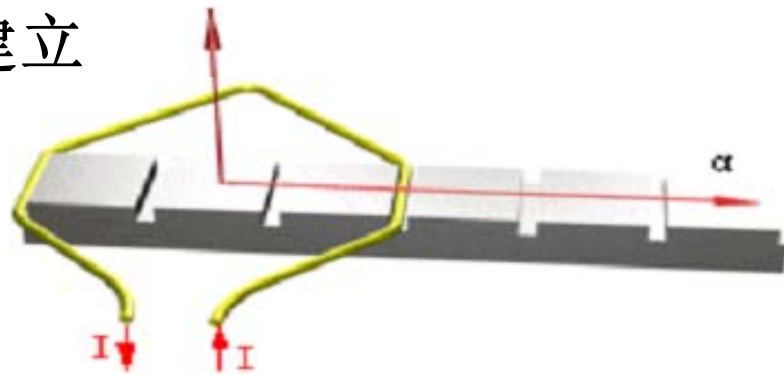
- 电流的正方向：从绕组末端流进，首端流出为正。
- 磁通的正方向：与电流的正方向符合右手螺旋关系。
- 气隙磁动势的正方向：磁力线出定子进转子为正。



在线圈AX中通以交流电流 i_K 后，建立起一个两极磁场，由全电流定律得

$$\oint H dl = \sum N \cdot i = N_K i_K$$

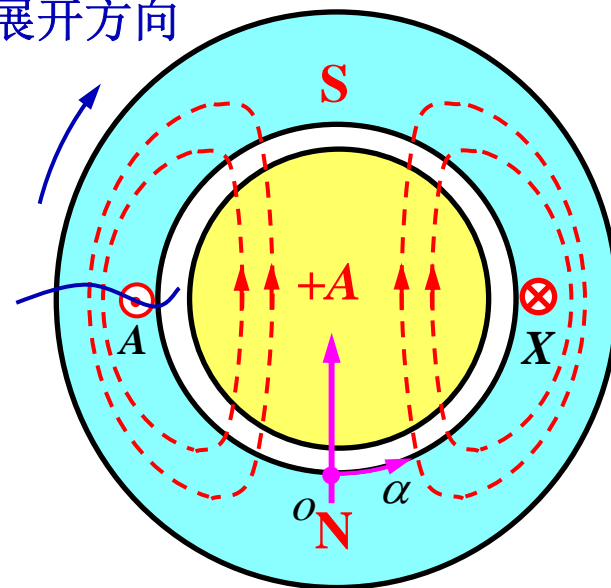
忽略铁心磁路中的磁压降，则每个气隙消耗的磁动势为 $\frac{1}{2} N_K i_K$ 。



➤在定子内圆表面建立直角坐标系

- 坐标原点：线圈AX的轴线+A与定子内圆表面的交点；
- 横坐标 α ：表示沿气隙圆周方向距坐标原点的距离，逆时针方向为正；
- 纵坐标 f ：表示气隙磁动势的大小和方向。

展开方向



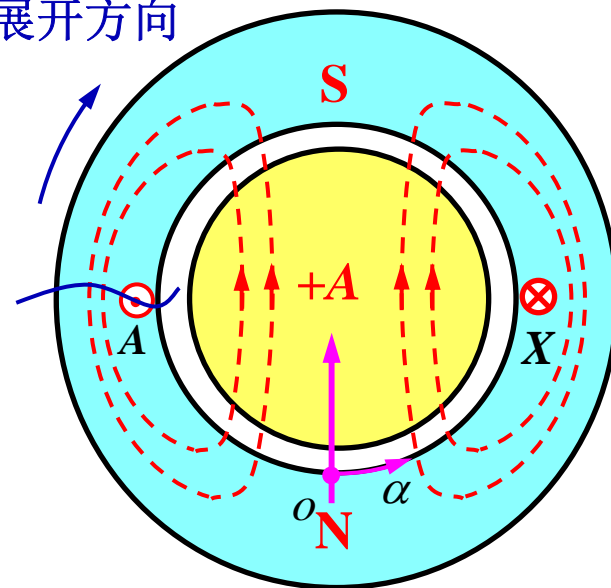
■气隙磁动势的空间分布表达式：

$$\left. \begin{aligned} f_K(\alpha) &= f_K = \frac{1}{2} N_K i_K & \alpha: -\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2} \\ f_K(\alpha) &= -f_K = -\frac{1}{2} N_K i_K & \alpha: \frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{2} \end{aligned} \right\}$$

❖ 结论:

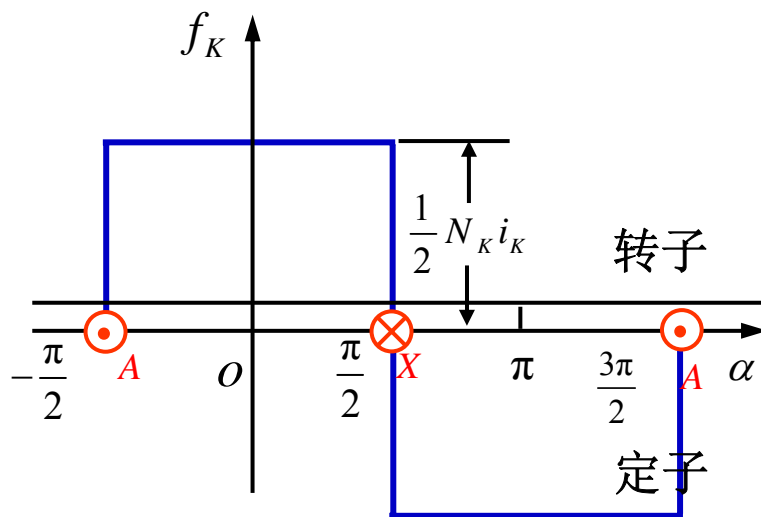
- 通入电流的一个整距线圈所产生的气隙磁动势沿气隙圆周方向的分布为一矩形波;
- 在通电线圈处, 气隙磁动势发生突跳。

展开方向

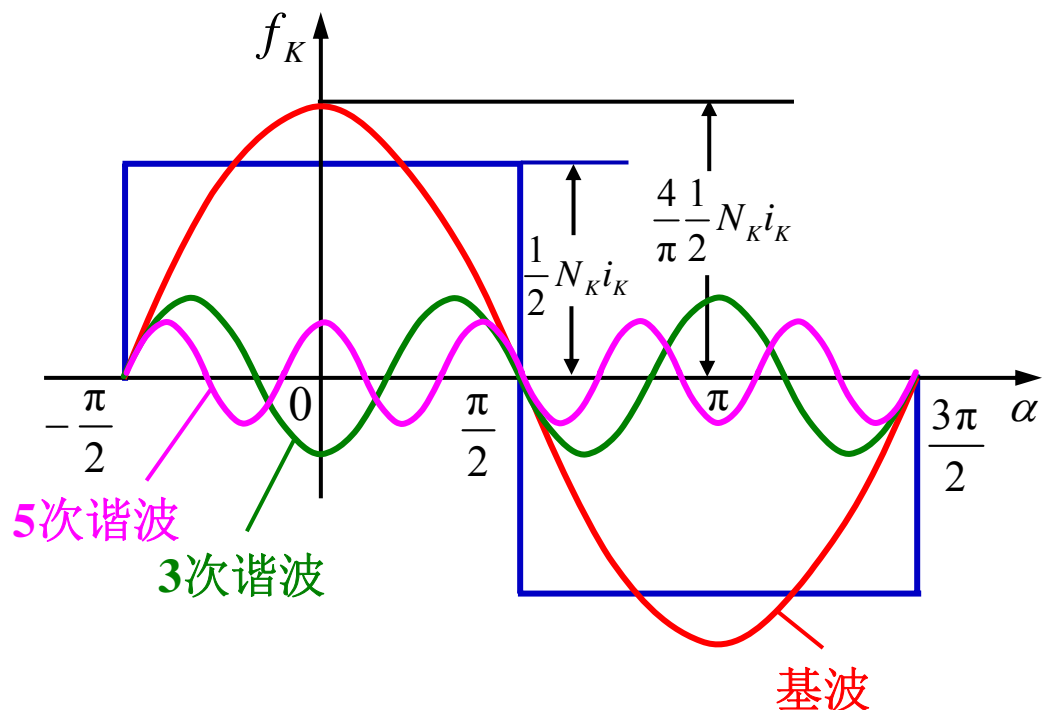


■ 矩形波磁动势的幅值

$$f_K = \frac{1}{2} N_K i_K$$



2.用傅里叶级数分解矩形波磁动势



应用傅里叶级数对矩形波气隙磁动势进行分解，得

$$f_K(\alpha) = f_{K1}(\alpha) + f_{K3}(\alpha) + f_{K5}(\alpha) + \dots$$

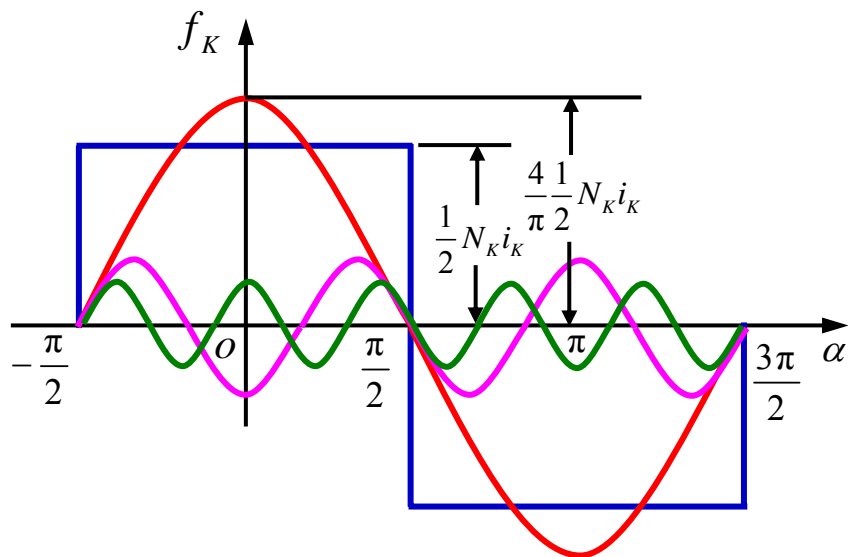
$$= C_1 \cos \alpha + C_3 \cos 3\alpha + C_5 \cos 5\alpha + \dots = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} C_v \cos v\alpha$$

式中， $v=1$ 称为基波； $v=3,5,7,\dots$ 称为谐波。

谐波磁动势的幅值

$$C_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_K(\alpha) \cos v\alpha d\alpha$$

$$= \frac{4}{\pi} f_K \frac{1}{v} \sin v \frac{\pi}{2}$$



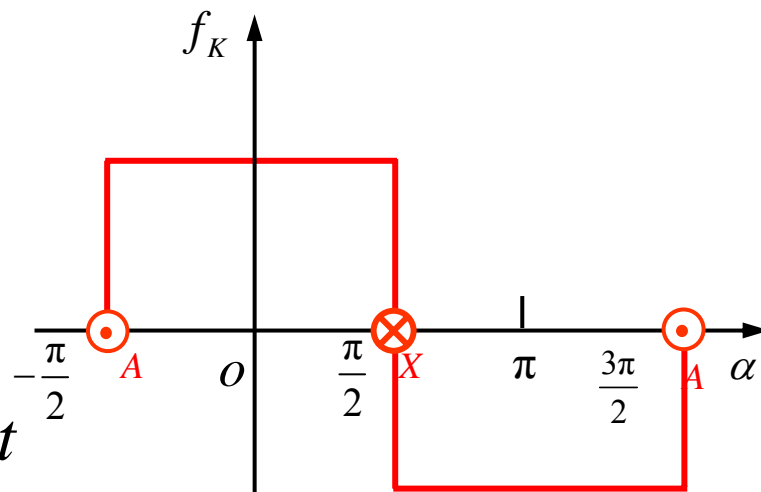
3.线圈中通入交变电流产生脉振磁动势

当线圈电流 i_K 随时间作余弦变化时，即

$$i_K = \sqrt{2} I_K \cos \omega t$$

矩形波磁动势的幅值

$$f_K = \frac{1}{2} N_K i_K = \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \cos \omega t$$



对矩形波磁动势进行傅里叶分解，得

$$f_K(t, \alpha) = f_{K1}(t, \alpha) + f_{K3}(t, \alpha) + f_{K5}(t, \alpha) + \dots$$

$$= F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha - F_{K3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{K5} \cos \omega t \cos 5\alpha - \dots$$

$$f_{Kv}(\alpha) = C_v \cos v\alpha$$

$$C_v = \frac{4}{\pi} f_K \frac{1}{v} \sin v \frac{\pi}{2}$$

$$f_K = \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \cos \omega t$$

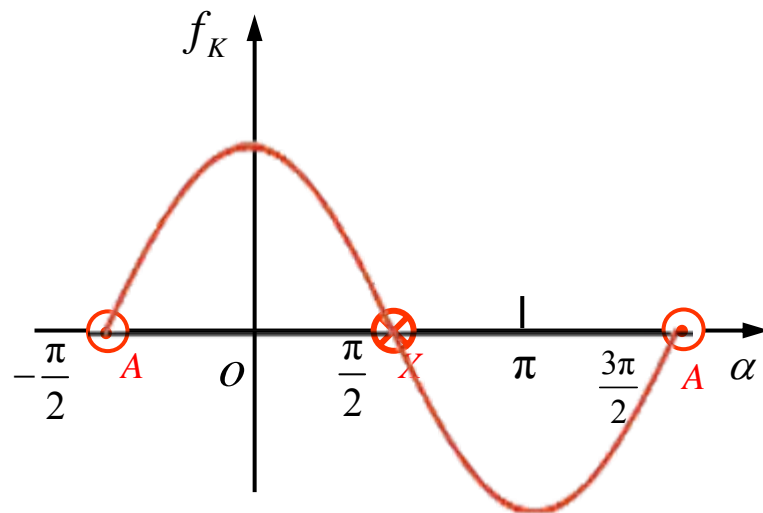
1) 基波磁动势

$$f_{K1}(t, \alpha) = \frac{4}{\pi} f_K \cos \alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \cos \omega t \cos \alpha$$

$$= F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha$$

基波磁动势的最大振幅

$$F_{K1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K = 0.9 N_K I_K$$



$$f_{Kv}(\alpha) = C_v \cos v\alpha$$

$$C_v = \frac{4}{\pi} f_K \frac{1}{v} \sin v \frac{\pi}{2}$$

$$f_K = \frac{\sqrt{2}}{2} N_K I_K \cos \omega t$$

2) v 次谐波磁动势

$$f_{Kv}(t, \alpha) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \frac{1}{v} \cos \omega t \sin v \frac{\pi}{2} \cos v\alpha$$

$$= \sin v \frac{\pi}{2} F_{Kv} \cos \omega t \cos v\alpha$$

v 次谐波磁动势的最大振幅 $F_{Kv} = \frac{1}{v} F_{K1} = \frac{1}{v} 0.9 N_K I_K$

矩形波磁动势的傅里叶级数展开式:

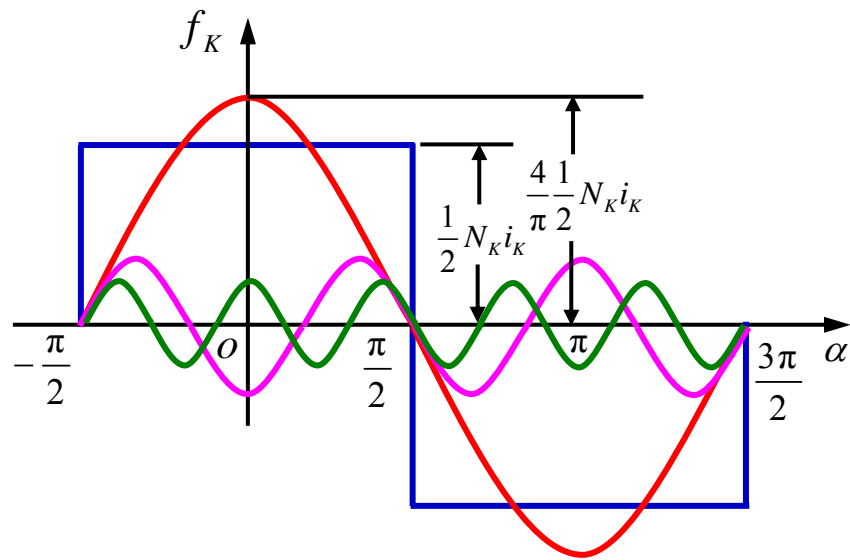
$$f_K(t, \alpha) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} N_K I_K \cos \omega t \left(\cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \right)$$

$$= F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha - F_{K3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{K5} \cos \omega t \cos 5\alpha - \dots$$

$$= f_{K1}(t, \alpha) + f_{K3}(t, \alpha) + f_{K5}(t, \alpha) + \dots$$

❖ 结论:

① 整距线圈通以交流电流后产生的气隙磁动势沿气隙圆周按矩形分布，其幅值随时间以电流的角频率 ω 作余弦变化。



② 矩形波磁动势可以分解为基波和一系列谐波磁动势，它们在空间都按余弦分布，其极对数 $p_v = \nu p$ ，极距 $\tau_v = \tau / \nu$ ；它们的振幅都随时间以电流的角频率 ω 作余弦变化。

③ ν 次谐波磁动势的最大振幅 $F_{K\nu} = \frac{1}{\nu} F_{K1} = \frac{1}{\nu} 0.9 N_k I_K$ 。

④ 基波和各次谐波磁动势都有一个振幅在线圈轴线+A处，其正负由谐波次数决定。

这种空间位置固定不动，但波幅的大小和正负随时间变化的磁动势称为脉振磁动势。

4.脉振磁动势分解为两个旋转磁动势

整距线圈通以交流电流产生的基波脉振磁动势为

$$f_{K1}(t, \alpha) = F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha \quad F_{K1} = 0.9 N_K I_K$$

利用三角公式可将基波脉振磁动势分解为

$$\begin{aligned} f_{K1}(t, \alpha) &= \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t) \\ &= f'_{K1}(t, \alpha) + f''_{K1}(t, \alpha) \end{aligned}$$

式中, $f'_{K1}(t, \alpha) = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$;

$$f''_{K1}(t, \alpha) = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)。$$

$$1) f'_{K1}(t, \alpha) = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t)$$

• $f'_{K1}(t, \alpha)$ 在气隙空间按余弦分布

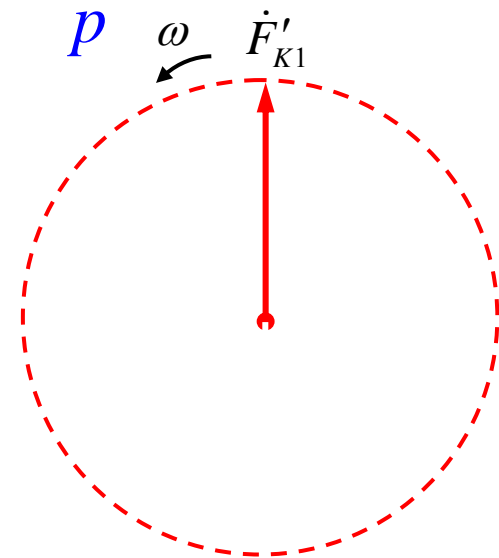
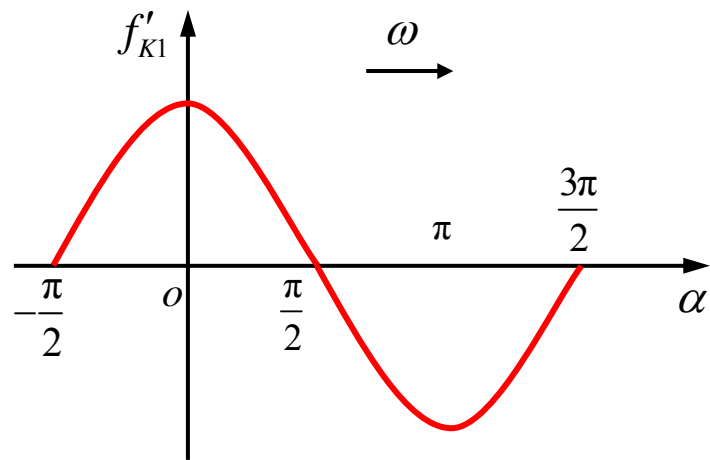
• $f'_{K1}(t, \alpha)$ 的正波幅在 $\alpha = \omega t$ 处

• $f'_{K1}(t, \alpha)$ 的电角速度: $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$

• $f'_{K1}(t, \alpha)$ 的转速: $n_1 = \frac{60\omega}{2\pi p} = \frac{60}{2\pi p} \cdot 2\pi f = \frac{60f}{p}$

• $f'_{K1}(t, \alpha)$ 的性质: **正转圆形旋转磁动势**

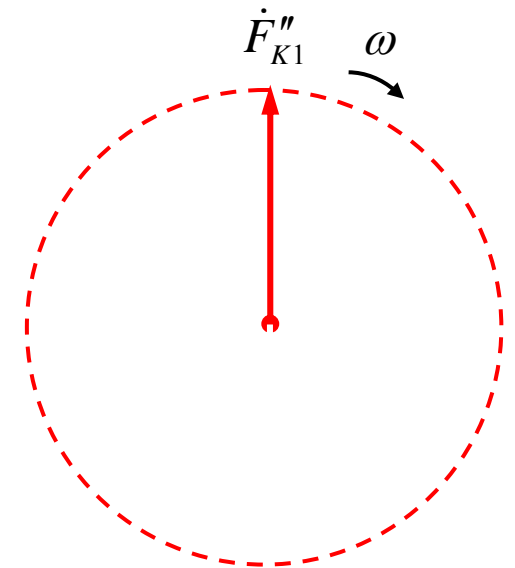
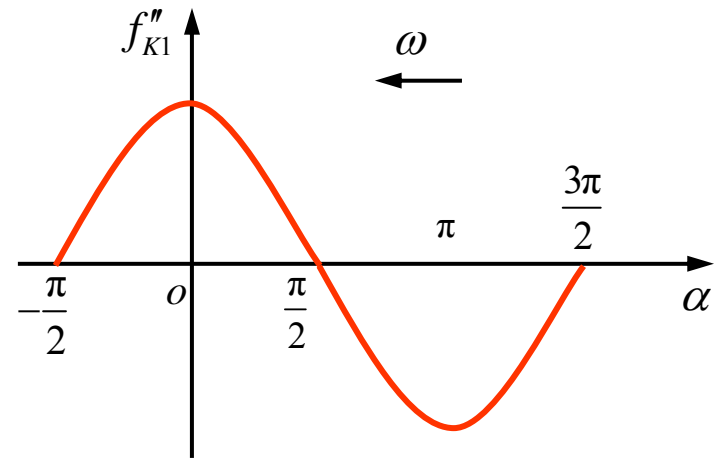
$f'_{K1}(t, \alpha)$ 是一个在气隙空间余弦分布, 幅值为 $F_{K1}/2$ 恒定不变, 以电角速度 ω 沿 α 的正方向移动的行波。



$$2) f''_{K1}(t, \alpha) = \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t)$$

- $f'_{K1}(t, \alpha)$ 在气隙空间按余弦分布
- $f''_{K1}(t, \alpha)$ 的正波幅在 $\alpha = -\omega t$ 处。
- $f''_{K1}(t, \alpha)$ 的电角速度: $\frac{d\alpha}{dt} = -\omega$
- $f''_{K1}(t, \alpha)$ 的转速: $n_1 = \frac{60f}{p}$
- $f''_{K1}(t, \alpha)$ 的性质: **反转圆形旋转磁动势**

$f''_{K1}(t, \alpha)$ 是一个在气隙空间余弦分布，幅值为 $F_{K1}/2$ 恒定不变，以电角速度 ω 旋转的反转磁动势波。



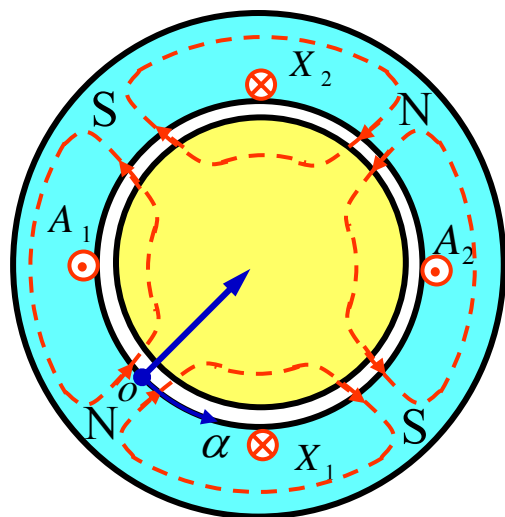
$$\begin{aligned} f_{K1}(t, \alpha) &= F_{K1} \cos \omega t \cos \alpha \\ &= \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{K1} \cos(\alpha + \omega t) \\ &= f'_{K1}(t, \alpha) + f''_{K1}(t, \alpha) \end{aligned}$$

❖ 结论:

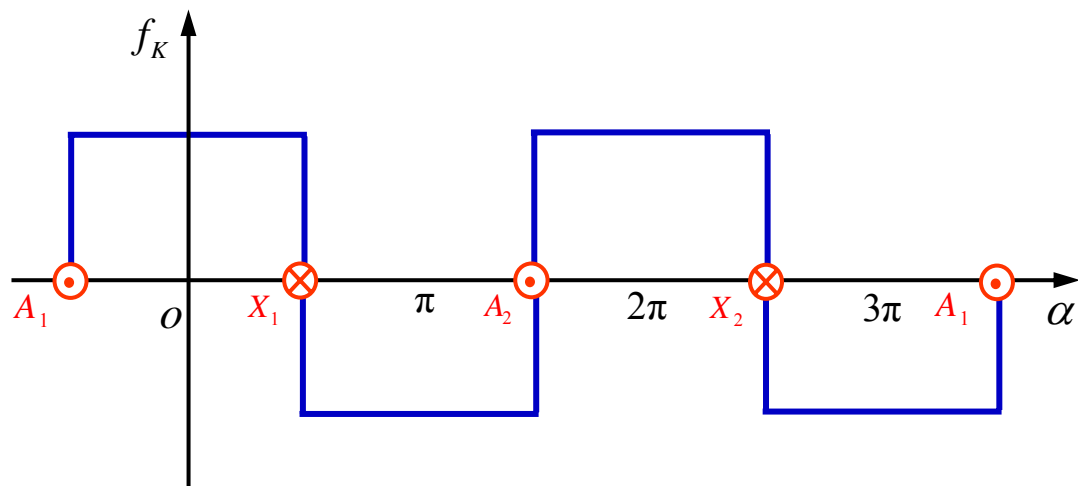
(1) 一个在空间按照余弦分布，幅值随时间作余弦变化的脉振磁动势可以分解为两个幅值相同、转速相同(为 ω ，与电流的电角频率相等)、转向相反的圆形旋转磁动势，其波长与原脉振磁动势相同，幅值为原脉振磁动势最大振幅的一半。

(2) 当通电电流为正的最大值时，脉振磁动势的振幅为正的最大值，此时两个旋转磁动势的正波幅恰好转到通电线圈的轴线处($\alpha=0^\circ$)。

11-2 单层整距分布绕组的一相磁动势



磁场分布

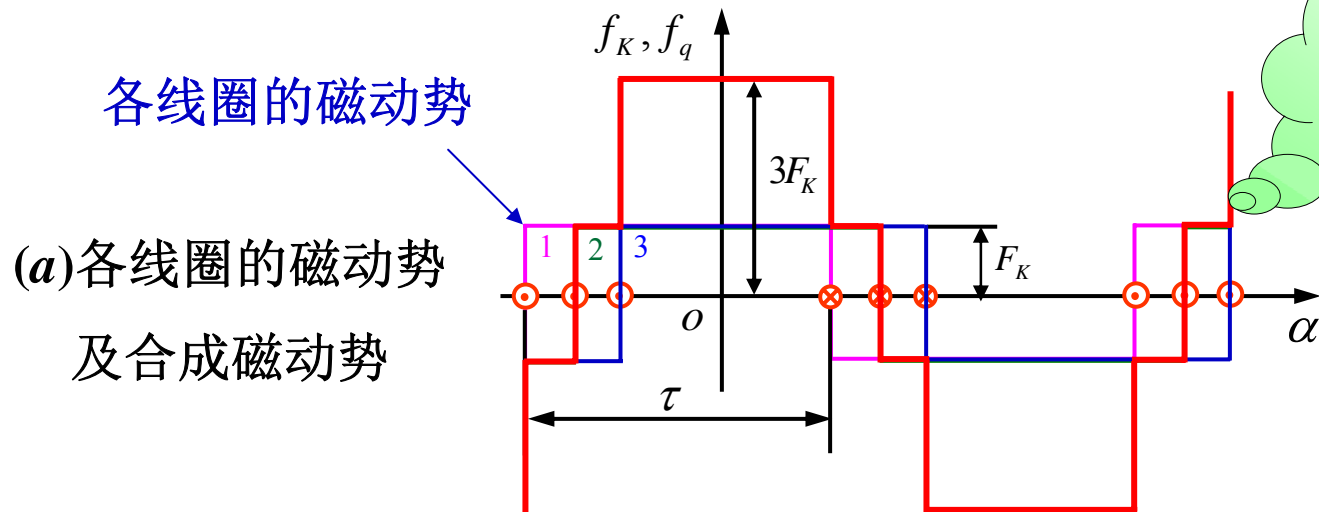
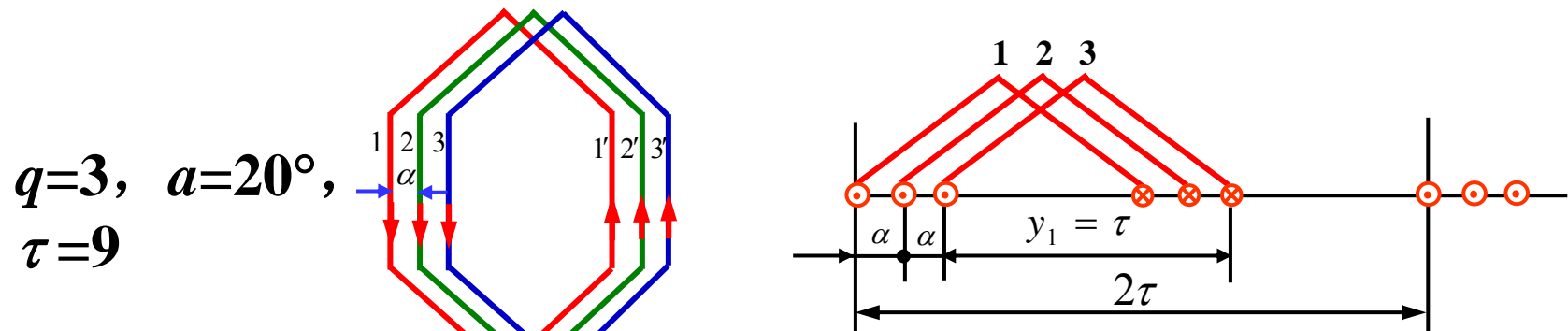


磁动势分布

两组整距线圈形成的四极磁场

多对极电机，由于各对极下的磁动势和磁阻分别组成一个个对称且独立的分支磁路，每相绕组处在不同极对下的磁动势作用的磁路不同不能叠加，所以一相绕组的磁动势是指每对极下一相线圈的磁动势。

单层分布绕组： 在每对极下由 q 个在空间依次相距 α 电角度的线圈串联组成一个线圈组。

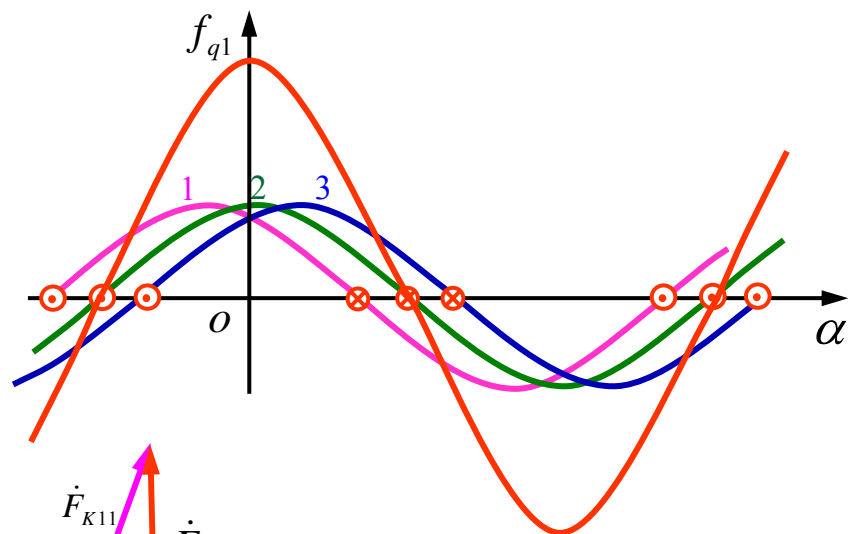


单层分布绕组的磁动势为一阶梯波

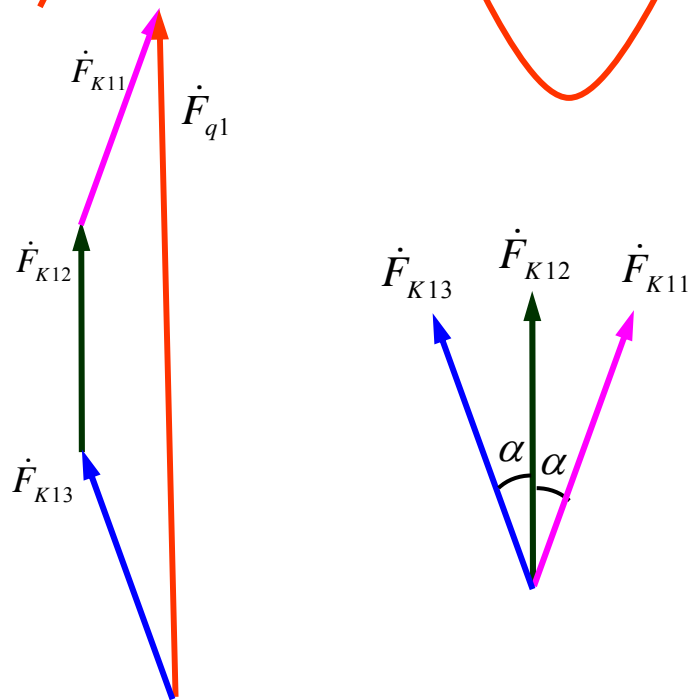
单层分布绕组的磁动势波形 ($q=3$)

$$q=3, a=20^\circ, \tau=9$$

(b) 线圈组的基波磁动势



(c) 用空间矢量求合成基波磁动势



每个整距线圈产生的基波磁动势的最大振幅为

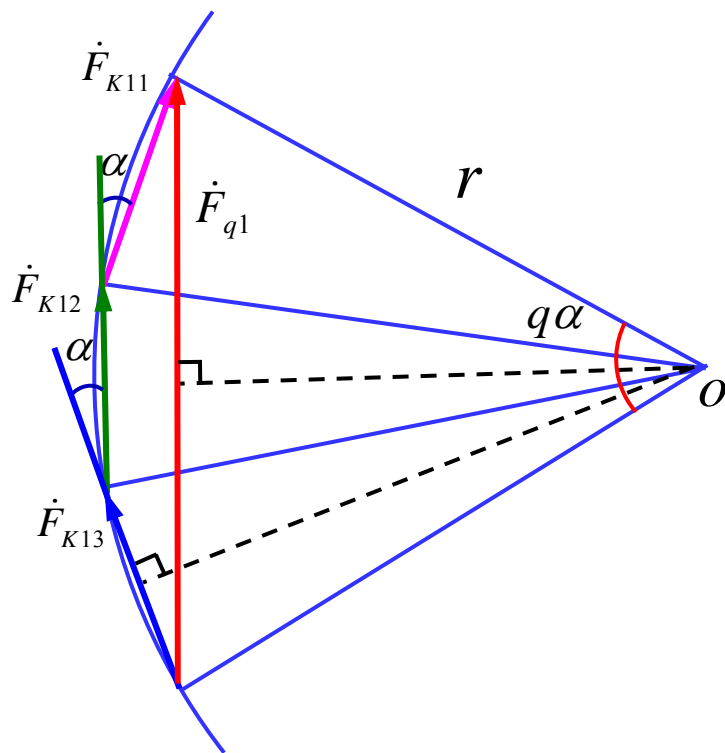
$$F_{K1} = 0.9N_K I_K$$

分布线圈组产生的基波磁动势
的最大振幅为

$$F_{q1} = F_{K1} \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = qF_{K1} \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$= qF_{K1} k_{d1} = 0.9qN_K I_K k_{d1}$$

式中, $k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$ 称为基波磁动势的分布因数。



单层绕组的每相串联匝数 $N_1 = \frac{pqN_K}{a}$

相电流 $I = aI_K$

用相电流 I 、每相串联匝数 N_1 表示时，单层整距分布绕组一相基波脉振磁动势的最大振幅为

$$F_{\phi 1} = F_{q1} = 0.9qN_K I_K k_{d1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{d1}$$

单层整距分布绕组一相 ν 次谐波脉振磁动势的最大振幅为

$$F_{\phi \nu} = F_{q\nu} = 0.9 \frac{N_1 I}{\nu p} k_{d\nu}$$

式中， $k_{d\nu} = \frac{\sin q \frac{\nu\alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha}{2}}$ 为 ν 次谐波磁动势的分布因数。

单层分布绕组，相绕组中通以余弦交变电流，若将空间坐标的原点取在一相绕组的轴线上，则该相绕组基波磁动势的表达式为

$$f_{\phi_1}(t, \alpha) = F_{\phi_1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$i_K = \sqrt{2} I_K \cos \omega t$$

$$= 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{d1} \cos \omega t \cos \alpha$$

单层分布绕组一相 ν 次谐波磁动势的表达式为

$$f_{\phi_\nu}(t, \alpha) = \sin \nu \frac{\pi}{2} F_{\phi_\nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha$$

$$= \sin \nu \frac{\pi}{2} 0.9 \frac{N_1 I}{\nu p} k_{d\nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha$$

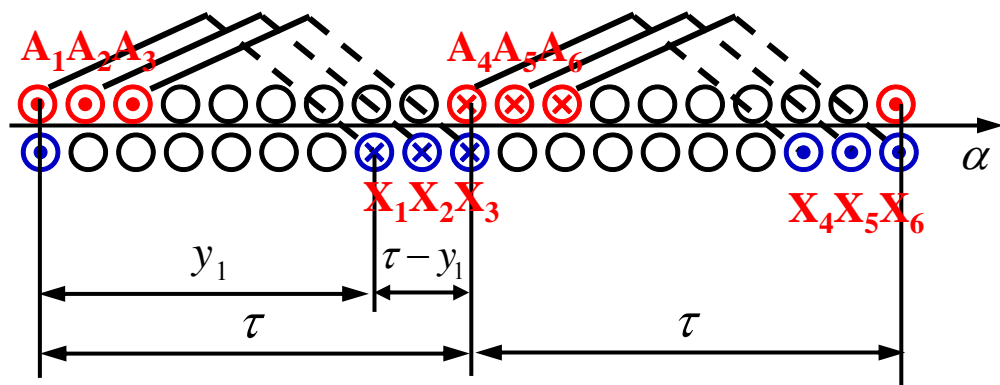
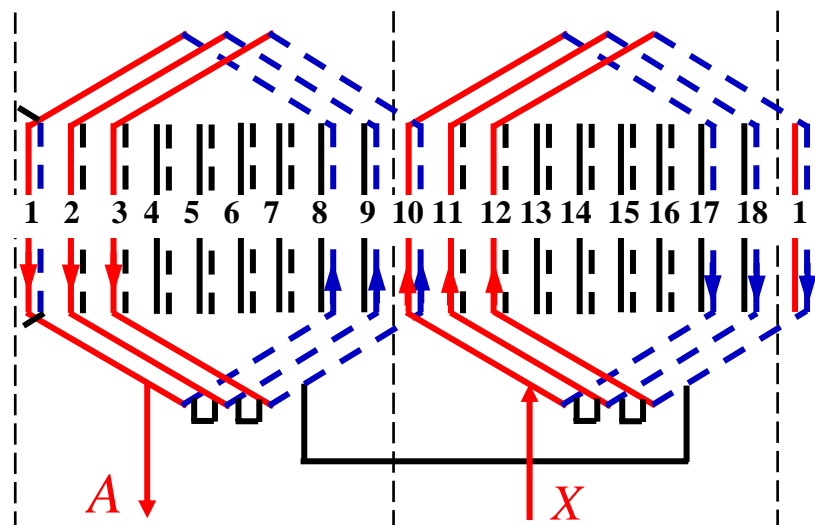
11-3 双层短距分布绕组的一相磁动势

双层分布绕组：在每对极下每相绕组有两个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成。

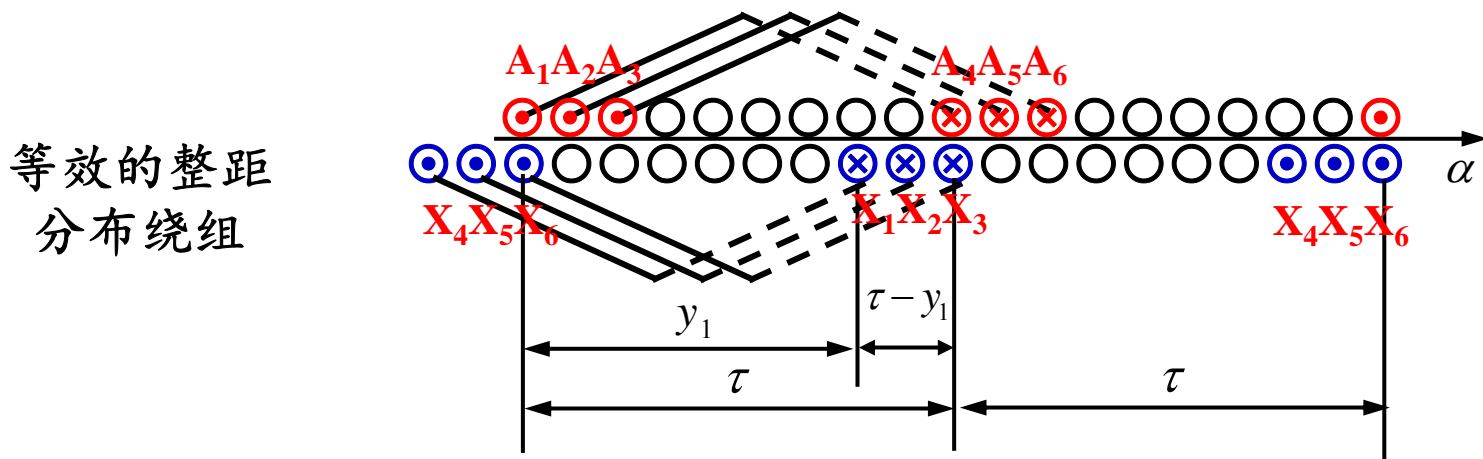
例：三相交流电机，定子绕组为双层叠绕组， $Q=18$ ， $p=1$ ， $y_1=7$ ， $a=1$ 。

$q=3$ ， $a=20^\circ$ ， $\tau=9$

注意：磁动势的大小和分布只与槽内导体电流的大小和导体在空间的分布有关，而与导体连接的先后次序无关。



11-3 双层短距分布绕组的一相磁动势



双层短距分布绕组产生的一相磁动势可视为：由短距线圈组的上层边构成的整距分布线圈组和下层边构成的整距分布线圈组的磁动势的合成。

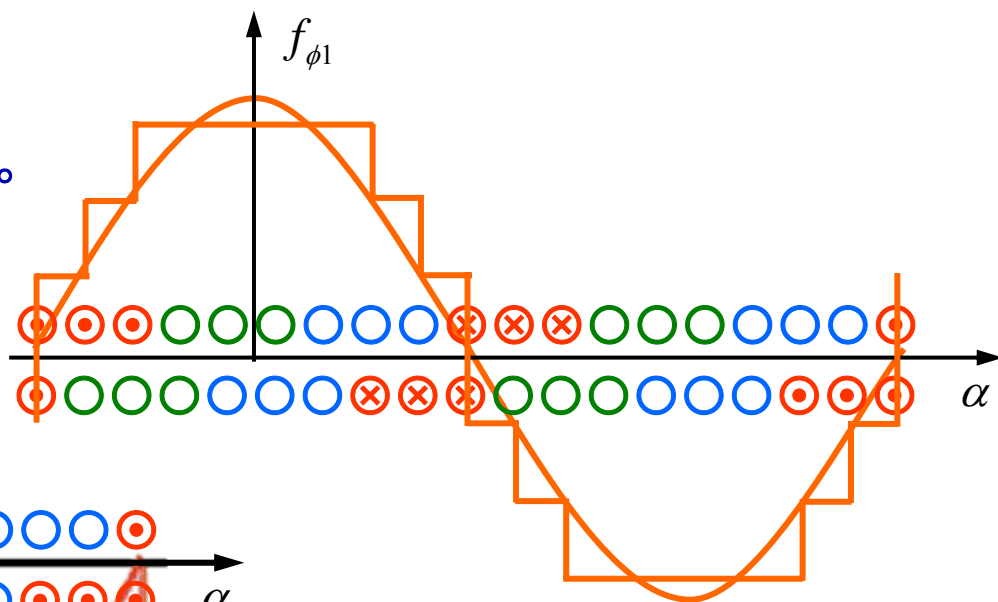
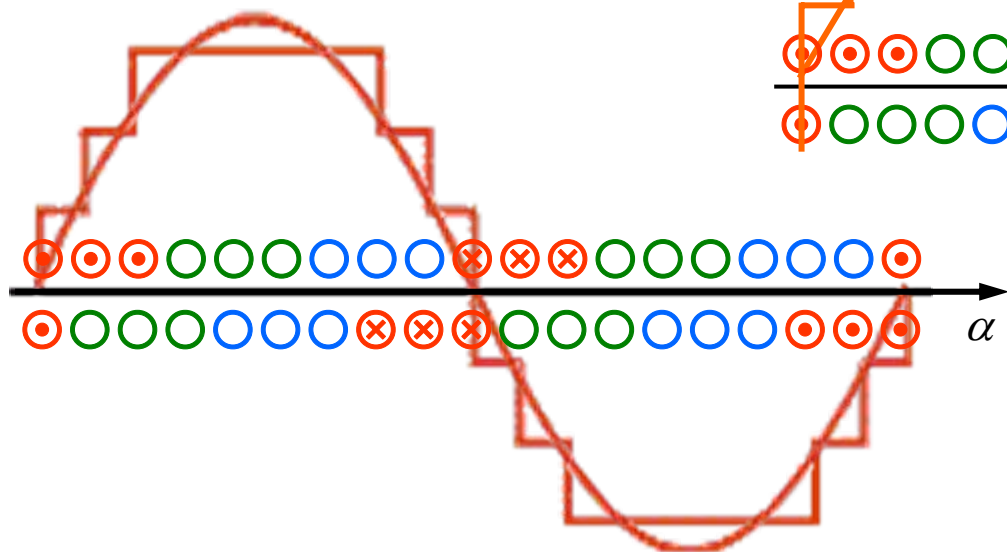
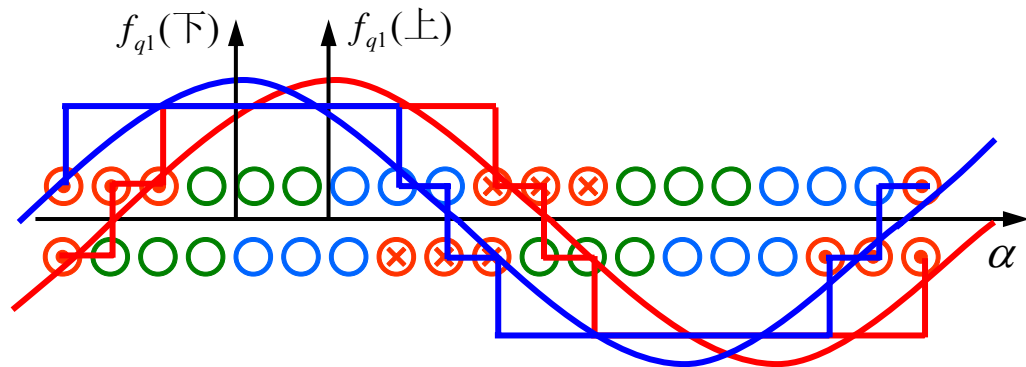
双层短距分布绕组的一相绕组可等效为两个在空间相距 β 电角度的单层整距分布绕组。

$$\beta = \frac{\tau - y_1}{\tau} 180^\circ$$

两个单层整距分布绕组产生的磁动势均为**阶梯波**。

两个阶梯波合成即得相绕组磁动势仍为阶梯波。

相绕组磁动势为脉振磁动势。

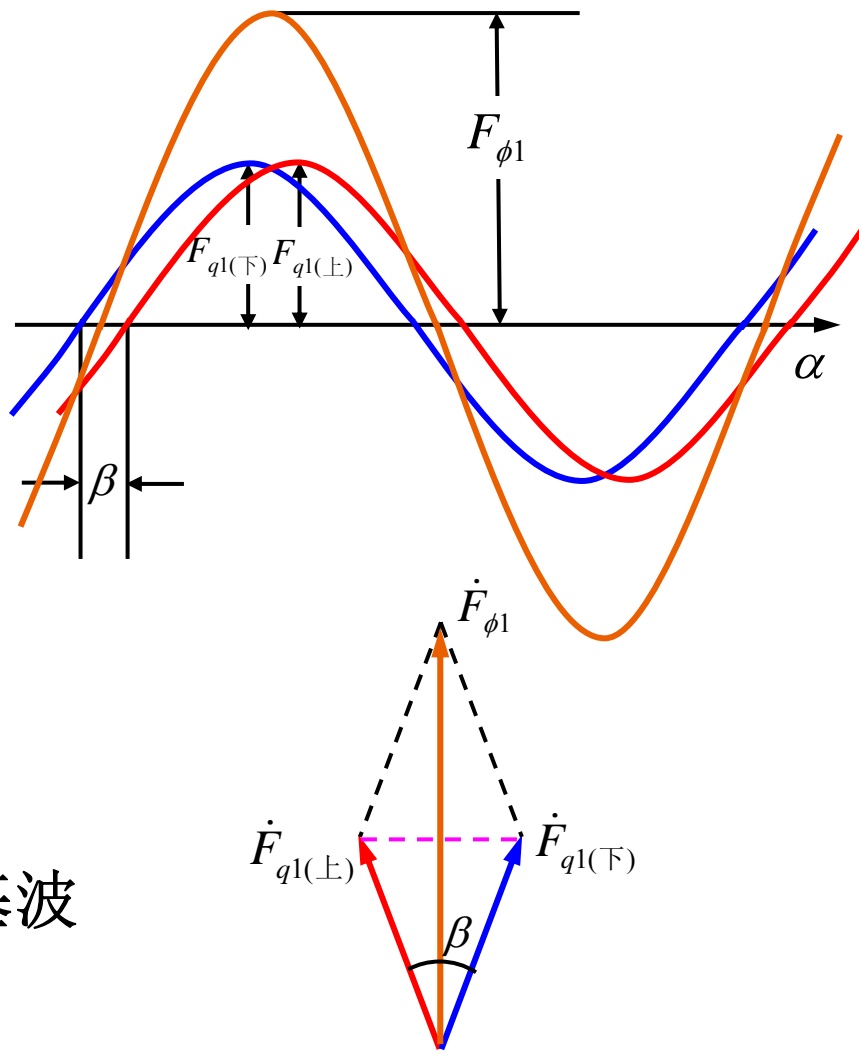


1. 一相绕组的基波磁动势

$$\beta = \frac{\tau - y_1}{\tau} 180^\circ$$

$$\begin{aligned}
 F_{\phi 1} &= 2F_{q1(\text{上})} \cos \frac{\beta}{2} \\
 &= 2F_{q1(\text{上})} \cos \frac{1}{2} \frac{\tau - y_1}{\tau} 180^\circ \\
 &= 2F_{q1(\text{上})} \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ \\
 &= 2F_{q1(\text{上})} k_{p1}
 \end{aligned}$$

式中， $k_{p1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$ 称为基波磁动势的节距因数。



$$F_{\phi 1} = 2F_{q1(\text{上})}k_{p1}$$

$$F_{q1(\text{上})} = 0.9qN_K I_K k_{d1}$$

$$N_1 = \frac{2pqN_K}{a}$$

$$I = aI_K$$

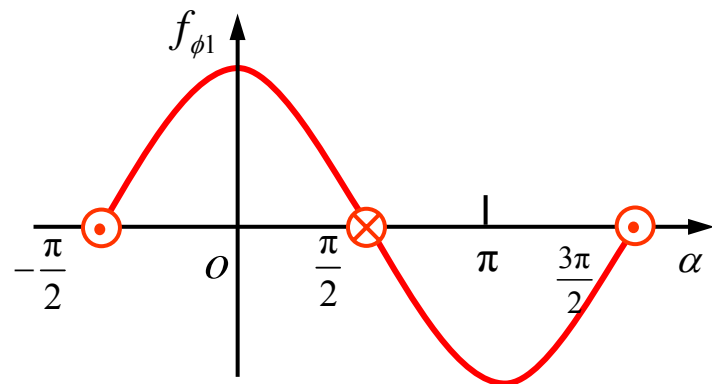
$$\rightarrow F_{\phi 1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{d1} k_{p1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$

式中， $k_{dp1} = k_{d1} k_{p1}$ 为基波磁动势的绕组因数。

当某相绕组中通以余弦交变电流，且把空间坐标的原点取在该相绕组的轴线上时，该相绕组基波磁动势的表达式为

$$f_{\phi 1}(t, \alpha) = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

$$F_{\phi 1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$



2. 一相绕组的 ν 次谐波磁动势

$$F_{\phi\nu} = 2F_{qv(\text{上})} k_{p\nu} = 2qF_{K\nu} k_{d\nu} k_{p\nu} = 2q \frac{1}{\nu} F_{K1} k_{d\nu} k_{p\nu}$$

$$F_{K1} = 0.9 N_K I_K \quad N_1 = \frac{2pqN_K}{a} \quad I = aI_K$$

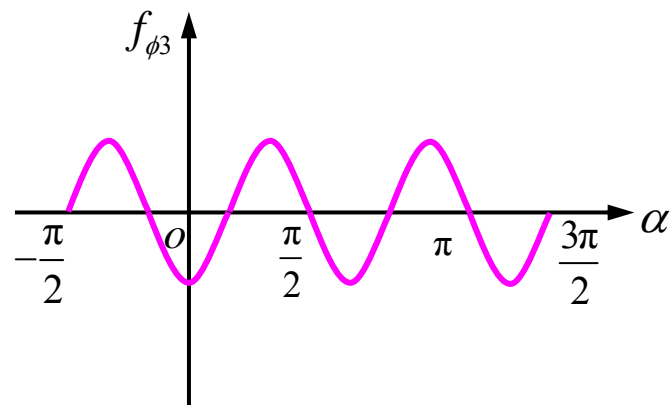
ν 次谐波磁动势的最大振幅为

$$F_{\phi\nu} = 0.9 \frac{N_1 I}{\nu p} k_{dp\nu}$$

式中, $k_{dp\nu} = k_{d\nu} k_{p\nu}$ 为 ν 次谐波磁动势的绕组因数。

一相绕组 ν 次谐波磁动势的表达式:

$$f_{\phi\nu}(t, \alpha) = F_{\phi\nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha$$



3. 一相绕组的磁动势

当某相绕组中通以余弦交变电流，且把空间坐标的原点取在该相绕组的轴线上时，该相绕组磁动势的傅里叶级数展开式为

$$\begin{aligned} f_{\phi}(t, \alpha) &= 0.9 \frac{N_1 I}{p} \cos \omega t (k_{dp1} \cos \alpha + \frac{1}{3} k_{dp3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} k_{dp5} \cos 5\alpha + \dots) \\ &= F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha + F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{\phi 5} \cos \omega t \cos 5\alpha + \dots \\ &= f_{\phi 1}(t, \alpha) + f_{\phi 3}(t, \alpha) + f_{\phi 5}(t, \alpha) + \dots \end{aligned}$$

■单相绕组磁动势的特点：

①性质：单相分布绕组产生的磁动势是一脉振磁动势，沿气隙圆周呈阶梯波分布，其幅值位置在空间固定不变，幅值随时间以电流的频率作余弦变化。

②脉振频率：该梯形波磁动势可分解为基波和一系列奇次谐波，各次波都是振幅位置在空间固定不变，但振幅随时间作余弦变化的脉振磁动势，其脉振频率等于电流的频率。

③极对数和极距：基波磁动势的极对数就是电机的极对数 p ，极距就是电机的极距 τ ； ν 次谐波磁动势的极对数 $p_\nu = \nu p$ ，极距 $\tau_\nu = \tau / \nu$ 。

④振幅：基波磁动势的最大振幅 $F_{\phi_1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$ ； ν 次谐波磁动势的最大振幅 $F_{\phi_\nu} = 0.9 \frac{N_1 I}{\nu p} k_{dp\nu}$ 。

⑤各次波都有一个波幅在该相绕组的轴线上。

11-4 三相绕组的磁动势

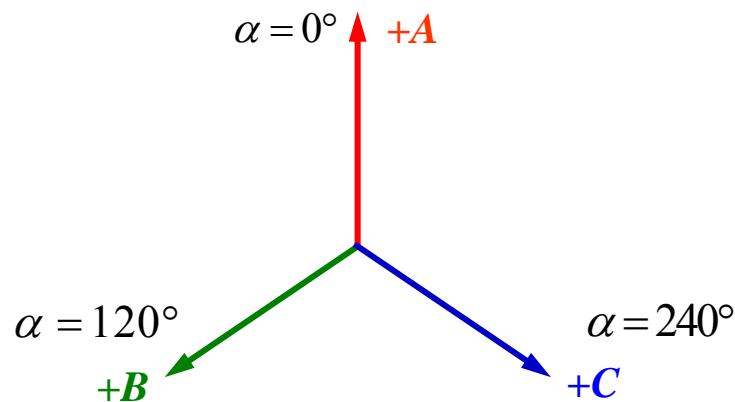
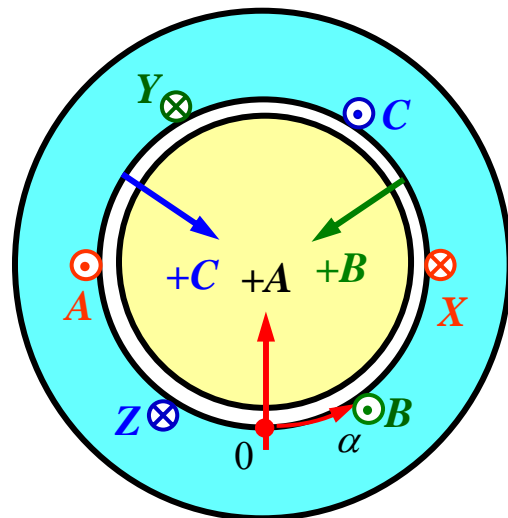
三相对称绕组通入对称正序电流，选A相电流为正的最大值时为时间的起点，三相电流分别为

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

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

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

把空间坐标的原点取在A相绕组的轴线上，并以顺着A、B、C相绕组的方向作为 α 的正方向。

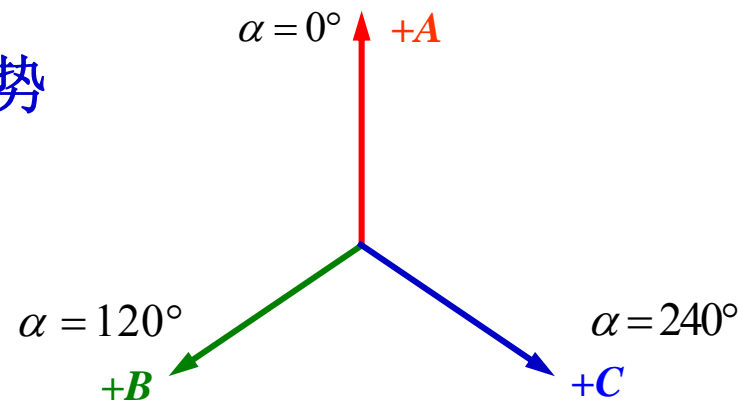


三相绕组各自产生的基波脉振磁动势分别为

$$f_{A1}(t, \alpha) = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

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

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



各相的基波脉振磁动势均可分解成两个圆形旋转磁动势：

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

$$\begin{aligned} f_{B1}(t, \alpha) &= F_{\phi_1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha + \omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C1}(t, \alpha) &= F_{\phi_1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha + \omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$

三相绕组的合成基波磁动势

$$\begin{aligned} f_1(t, \alpha) &= f_{A1}(t, \alpha) + f_{B1}(t, \alpha) + f_{C1}(t, \alpha) \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha - \omega t) = F_1 \cos(\alpha - \omega t) \end{aligned}$$

式中， F_1 为三相合成基波磁动势的幅值。

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1} = 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$$

$$f_1(t, \alpha) = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\alpha - \omega t) = F_1 \cos(\alpha - \omega t)$$

■三相合成基波磁动势的特点：

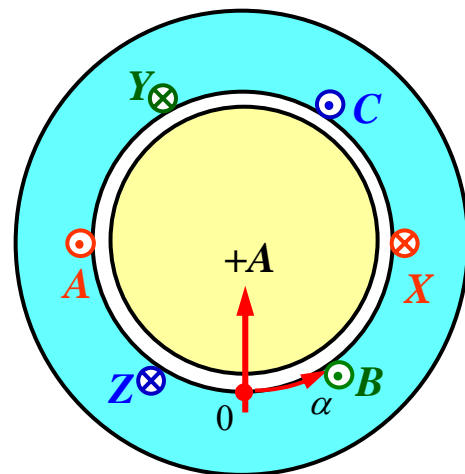
①性质：三相对称绕组流过三相对称电流产生的合成基波磁动势为圆形旋转磁动势；

②极对数：三相合成基波旋转磁动势的波长和一相基波脉振磁动势的波长相同，即极对数一样；

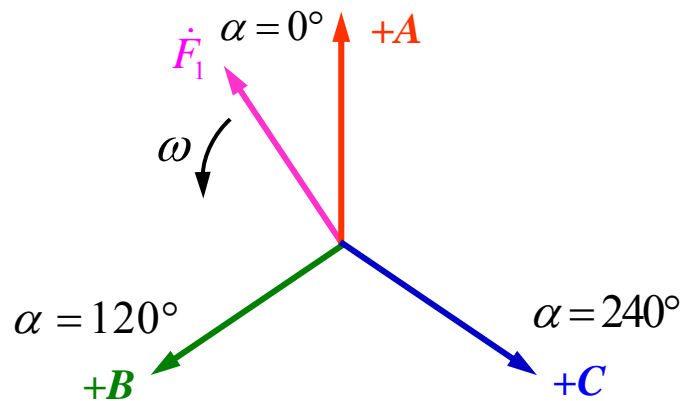
③幅值：三相合成基波磁动势的幅值为每相基波脉振磁动势最大振幅的3/2倍；

④ **转速**：三相合成基波磁动势旋转的电角速度为 ω ，转速为 n_1 ；

$$n_1 = \frac{60\omega}{2\pi p} = \frac{60 \cdot 2\pi f}{2\pi p} = \frac{60f}{p}$$



⑤ **幅值瞬间位置**：当某相电流达到正的最大值时，三相合成基波磁动势的正波幅恰好在该相绕组的轴线上；



⑥ **转向**：从电流超前的相绕组轴线转向电流滞后的相绕组轴线。

如何改变三相电机
旋转磁场的方向？

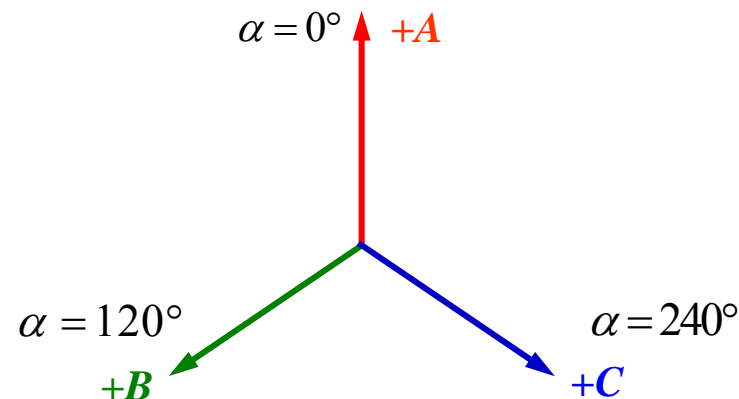
调换三相电源线的任意两个接头，即可**改变旋转磁场的转向**。



3.三相谐波磁动势

1) 三相的3次谐波磁动势

各相3次谐波脉振磁动势的表达式分别为



$$f_{A3}(t, \alpha) = F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\alpha$$

$$\begin{aligned} f_{B3}(t, \alpha) &= F_{\phi 3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3(\alpha - 120^\circ) \\ &= F_{\phi 3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C3}(t, \alpha) &= F_{\phi 3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3(\alpha - 240^\circ) \\ &= F_{\phi 3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3\alpha \end{aligned}$$

式中, $F_{\phi 3} = 0.9 \frac{N_1 I}{3p} k_{dp3}$ 为3次谐波脉振磁动势的最大振幅。

三相的3次谐波合成磁动势

$$\begin{aligned} f_3(t, \alpha) &= f_{A3}(t, \alpha) + f_{B3}(t, \alpha) + f_{C3}(t, \alpha) \\ &= F_{\phi_3} \cos \omega t \cos 3\alpha + F_{\phi_3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3\alpha \\ &\quad + F_{\phi_3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3\alpha \\ &= F_{\phi_3} \cos 3\alpha [\cos \omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ)] \\ &= 0 \end{aligned}$$

❖ **结论：**当三相对称绕组中流过三相对称电流时，三相绕组的合成磁动势中不存在3次及3的倍数次谐波。

2) 三相的5次谐波磁动势

各相5次谐波脉振磁动势的表达式分别为

$$\begin{aligned} f_{A5}(t, \alpha) &= F_{\phi 5} \cos \omega t \cos 5\alpha \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha + \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{B5}(t, \alpha) &= F_{\phi 5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 5(\alpha - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha - \omega t + 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha + \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C5}(t, \alpha) &= F_{\phi 5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 5(\alpha - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha - \omega t + 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha + \omega t) \end{aligned}$$

三相的5次谐波合成磁动势

$$\begin{aligned} f_5(t, \alpha) &= f_{A5}(t, \alpha) + f_{B5}(t, \alpha) + f_{C5}(t, \alpha) \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi 5} \cos(5\alpha + \omega t) = F_5 \cos(5\alpha + \omega t) \end{aligned}$$

式中， F_5 为三相5次谐波合成磁动势的幅值。

$$F_5 = \frac{3}{2} F_{\phi 5} = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{N_1 I}{5p} k_{dp5} = 1.35 \frac{N_1 I}{5p} k_{dp5}$$

三相5次谐波合成磁动势的旋转电角速度为 $\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega}{5}$

当 $v=6k-1(k=1,2,3\dots)$ 即 $v=5,11,17\dots$ 时，三相 v 次合成谐波磁动势为一反转圆形旋转磁动势，其转速为 $\frac{n_1}{v}$ ，幅值为

$$F_v = \frac{3}{2} F_{\phi v} = 1.35 \frac{N_1 I}{vp} k_{dpv} \circ$$

3) 三相的7次谐波磁动势

各相7次谐波脉振磁动势的表达式分别为

$$\begin{aligned} f_{A7}(t, \alpha) &= F_{\phi 7} \cos \omega t \cos 7\alpha \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha + \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{B7}(t, \alpha) &= F_{\phi 7} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 7(\alpha - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha + \omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C7}(t, \alpha) &= F_{\phi 7} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 7(\alpha - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha + \omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$

三相的7次谐波合成磁动势

$$\begin{aligned} f_7(t, \alpha) &= f_{A7}(t, \alpha) + f_{B7}(t, \alpha) + f_{C7}(t, \alpha) \\ &= \frac{3}{2} F_{\phi 7} \cos(7\alpha - \omega t) = F_7 \cos(7\alpha - \omega t) \end{aligned}$$

式中， F_7 为三相7次谐波合成磁动势的幅值。

$$F_7 = \frac{3}{2} F_{\phi 7} = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{N_1 I}{7p} k_{dp7} = 1.35 \frac{N_1 I}{7p} k_{dp7}$$

三相7次谐波合成磁动势的旋转电角速度为 $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\omega}{7}$

当 $\nu=6k+1(k=1,2,3\dots)$ 即 $\nu=7,13,19\dots$ 时，三相 ν 次合成谐波磁动势为一正转圆形旋转磁动势，其转速为 $\frac{n_1}{\nu}$ ，幅值为

$$F_\nu = \frac{3}{2} F_{\phi \nu} = 1.35 \frac{N_1 I}{\nu p} k_{dp\nu} \circ$$

■三相合成磁动势

$$f(t, \alpha) = f_1(t, \alpha) + f_5(t, \alpha) + f_7(t, \alpha) + \dots$$

$$= F_1 \cos(\alpha - \omega t) + F_5 \cos(5\alpha + \omega t) + F_7 \cos(7\alpha - \omega t) + \dots$$

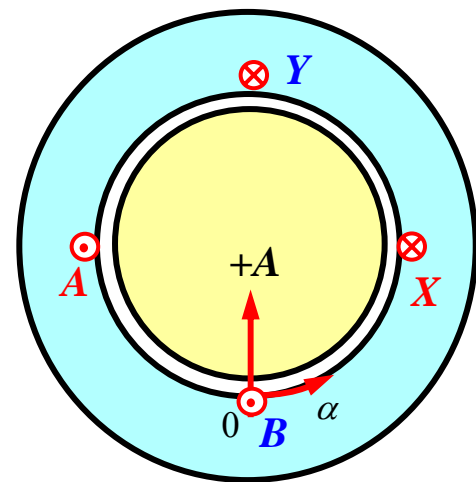
5) 谐波磁动势的不良影响

- 对同步发电机，产生谐波电动势，引起谐波电流，产生附加损耗，使电机温升升高，效率降低。
- 对异步电动机，谐波磁动势产生附加转矩，影响电动机的起动转矩和过载能力，使电机的运行性能变差。

6) 削弱谐波磁动势的方法

采用适当短距的分布绕组。

例11-1 两个整距线圈AX、BY均为 N_K 匝，在电机定子上相距 90° 空间电角度，坐标原点取在AX线圈的轴线+A处，如右图所示，今在两个线圈中分别通以电流 $i_A = \sqrt{2}I \sin \omega t$ 和 $i_B = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 90^\circ)$ ，求两个整距线圈的基波合成磁动势及3次谐波合成磁动势。

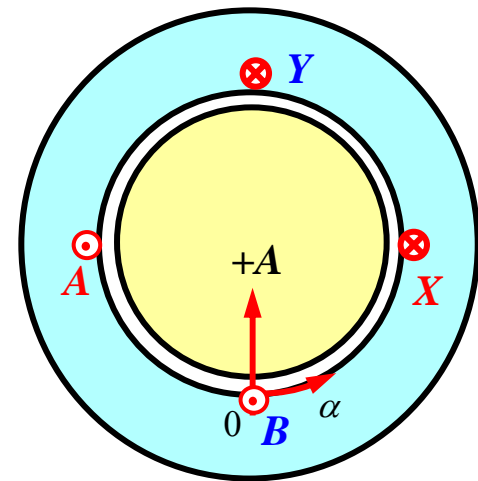


解：整距线圈AX、BY各自产生的基波脉振磁动势分别为

$$\begin{aligned}
 f_{AK1}(t, \alpha) &= F_{K1} \sin \omega t \cos \alpha \\
 &= \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t + \alpha) + \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t - \alpha)
 \end{aligned}$$

$$F_{K1} = 0.9 N_K I$$

$$\begin{aligned}
 f_{BK1}(t, \alpha) &= F_{K1} \sin(\omega t - 90^\circ) \cos(\alpha - 90^\circ) \\
 &= \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t + \alpha - 180^\circ) + \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t - \alpha)
 \end{aligned}$$



两个整距线圈的基波合成磁动势

$$\begin{aligned}
 f_1(t, \alpha) &= f_{AK1}(t, \alpha) + f_{BK1}(t, \alpha) \\
 &= \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t + \alpha) + \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t - \alpha) \\
 &\quad + \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t + \alpha - 180^\circ) + \frac{1}{2} F_{K1} \sin(\omega t - \alpha) \\
 &= F_{K1} \sin(\omega t - \alpha) = 0.9 N_K I \sin(\omega t - \alpha)
 \end{aligned}$$

整距线圈AX、BY各自产生的3次谐波脉振磁动势分别为

$$f_{AK3}(t, \alpha) = -F_{K3} \sin \omega t \cos 3\alpha$$

$$= -\frac{1}{2} F_{K3} \sin(\omega t + 3\alpha) - \frac{1}{2} F_{K3} \sin(\omega t - 3\alpha)$$

$$f_{BK3}(t, \alpha) = -F_{K3} \sin(\omega t - 90^\circ) \cos 3(\alpha - 90^\circ)$$

$$= -\frac{1}{2} F_{K3} \sin(\omega t + 3\alpha) - \frac{1}{2} F_{K3} \sin(\omega t - 3\alpha + 180^\circ)$$

$$F_{K3} = 0.9 \frac{N_K I}{3} = 0.3 N_K I$$

两个整距线圈的3次谐波合成磁动势

$$f_3(t, \alpha) = f_{AK3}(t, \alpha) + f_{BK3}(t, \alpha) = -F_{K3} \sin(\omega t + 3\alpha)$$

$$= -0.3 N_K I \sin(\omega t + 3\alpha)$$

小 结

1.单相绕组的基波磁动势

单相绕组中流过余弦交流电流产生的磁动势为脉振磁动势，其磁动势轴线在空间固定不动，各点磁动势的大小随时间而变化。该磁动势可以分解为基波和一系列谐波之和。

■单相绕组基波磁动势的表达式

$$f_{\phi 1}(t, \alpha) = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha$$

■单相绕组的基波磁动势的特点

- 性质：脉振磁动势
- 波形：余弦波

- 脉振频率：等于电流的频率 ω
- 极对数：电机的极对数 p
- 波幅位置：相绕组的轴线
- 最大振幅： $F_{\phi_1} = 0.9 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$

2.脉振磁动势和旋转磁动势之间的关系

$$F_{\phi_1} \cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha - \omega t) + \frac{1}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha + \omega t)$$

在空间按余弦分布，幅值随时间作余弦变化的脉振磁动势可以分解为两个转速相同，转向相反的圆形旋转磁动势，每个旋转磁动势的幅值为原脉振磁动势最大振幅的一半。

3. 三相绕组的基波合成磁动势

三相对称绕组中流过对称三相电流所产生的基波合成磁动势是一个圆形旋转磁动势。

■ 三相基波合成磁动势的表达式


$$f_1(t, \alpha) = \frac{3}{2} F_{\phi_1} \cos(\alpha - \omega t) = F_1 \cos(\alpha - \omega t)$$

■ 三相基波合成磁动势的特点：

• 性质：圆形旋转磁动势

• 幅值： $F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi_1} = 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$

• 转速： $n_1 = \frac{60 f}{p}$

- 
- 幅值瞬间位置：当某相电流达到正的最大值时，三相基波合成磁动势的正波幅恰好在该相绕组的轴线上。
 - 转向：从电流超前相的绕组轴线转向电流滞后相的绕组轴线。