



电机与拖动**课件**之五

# 异步 电机

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



# 章节目录

4.1 三相异步电动机的基本工作原理和结构

4.2 交流电机的绕组

4.3 交流电机绕组的感应电动势

**4.4 交流电机绕组的磁动势**

4.5 三相异步电动机的空载运行

4.6 三相异步电动机的负载运行

4.7 三相异步电动机的等效电路和相量图

4.8 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡

## 一、集中整距线圈的磁动势

## 1、整距线圈磁动势波形

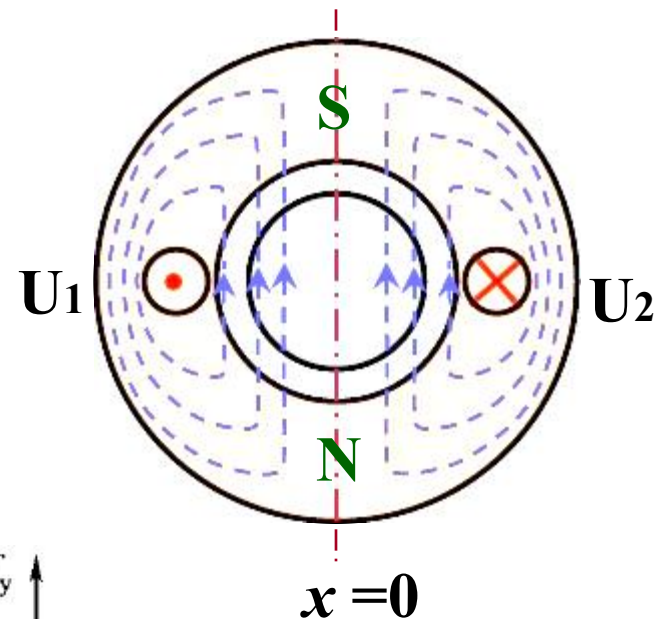
一台两极气隙均匀的交流电机,一个整距绕组通入交流电流,线圈磁动势在某瞬间的分布如图, 由全电流定律得:

$$\oint H \, dl = i = N_y i$$

忽略铁心磁阻,磁动势完全降落在两个气隙上, 每个气隙的磁动势为:

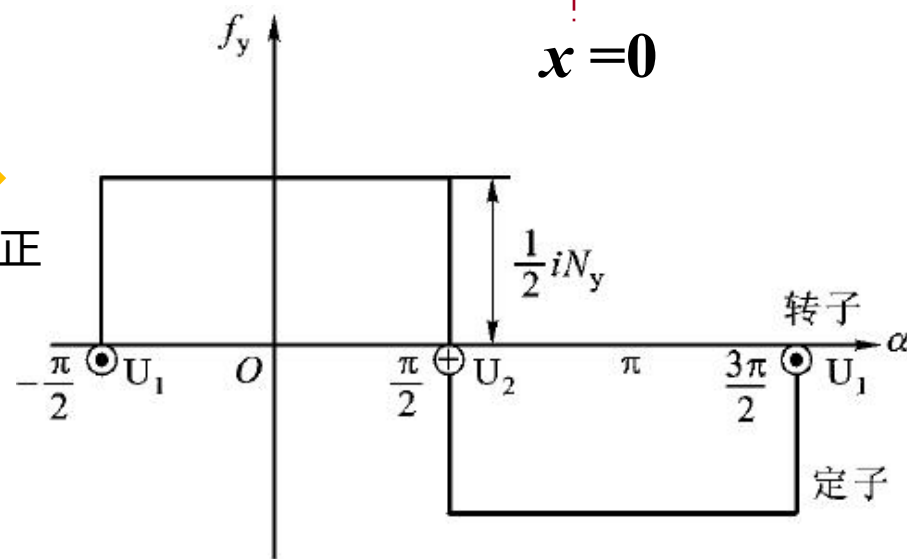
$$f_y = \frac{1}{2} N_y i$$

结论: 交流电机整距线圈磁动势空间分布波形为矩形波。



沿逆时针方向展开

规定: 磁力线从定子到转子为正



## 一、集中整距线圈的磁动势

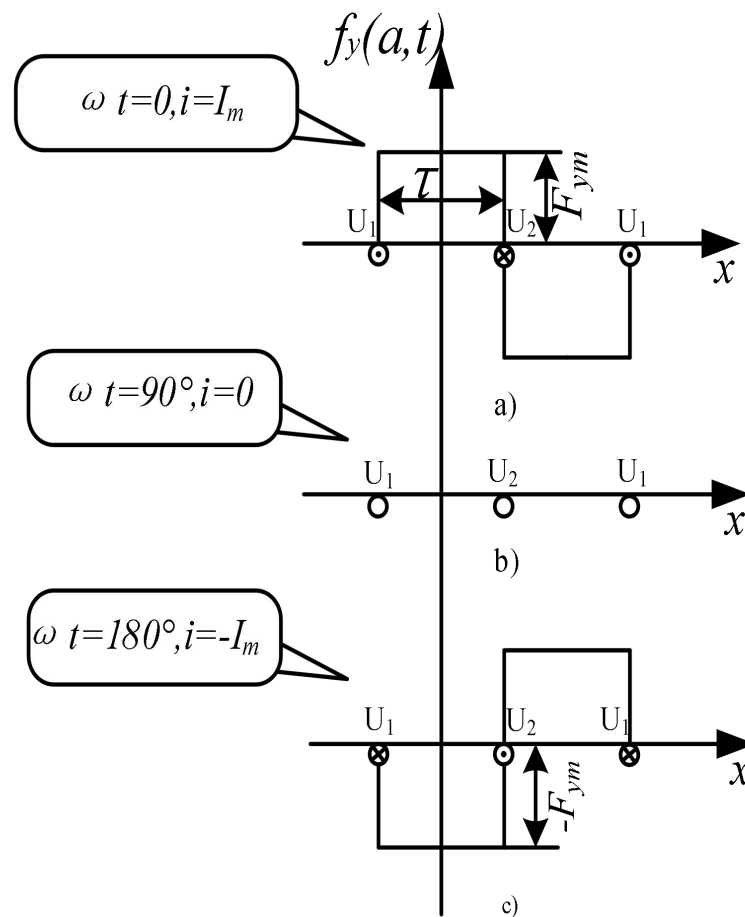
## 2、矩形波磁动势瞬时值表达式

$$f_y(\alpha, t) = \frac{1}{2} N_y i \quad i = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$f_y(\alpha, t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & (-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & (\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$$

**整距线圈的磁动势：**空间分布为矩形波，随时间按余弦规律变化，变化频率为电流频率。

**脉动磁动势：**空间位置不变而幅值和方向随时间变化的磁动势，脉动频率为通入交流电流的频率。



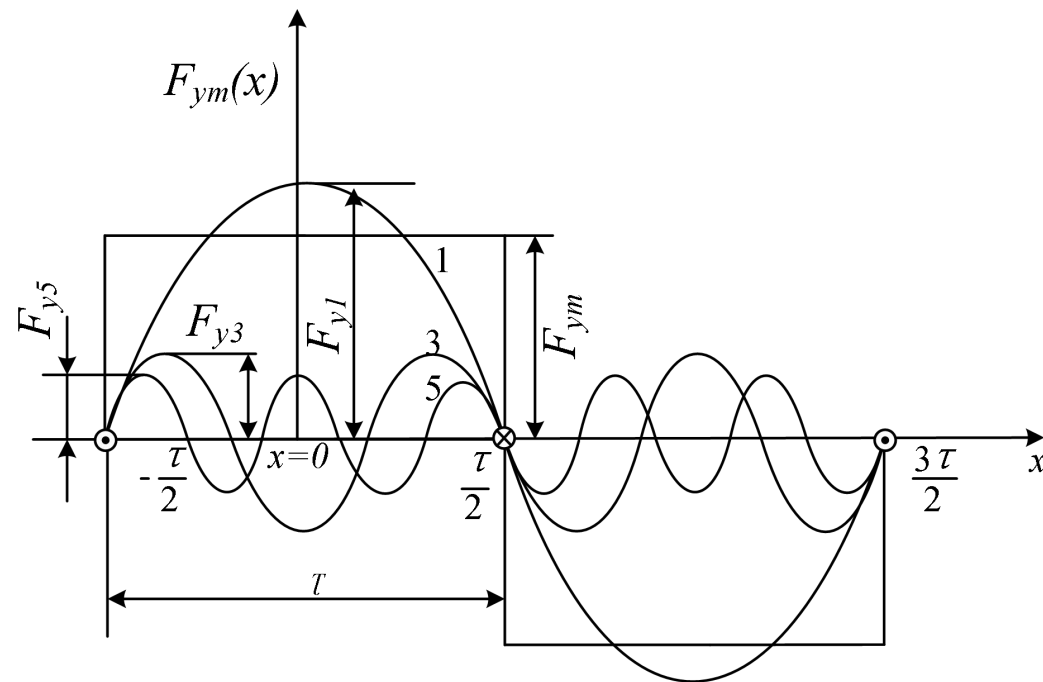
## 一、集中整距线圈的磁动势

## 3、整距线圈基波磁动势

$$\begin{aligned}
 f_y(x, t) &= f_y(\alpha, t) \\
 &= \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \left( \cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \right) \\
 &= 0.9 N_y I \cos \omega t \left[ \cos \frac{\pi}{\tau} x - \frac{1}{3} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x + \frac{1}{5} \cos 5 \frac{\pi}{\tau} x - \dots \right]
 \end{aligned}$$

基波磁动势为:  $f_{y1}(x, t) = \frac{4}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha = 0.9 N_y I \cos \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$

基波磁动势幅值为:  $F_{y1} = \frac{4}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I = 0.9 N_y I$



整距绕组基波磁动势特点：①在空间按余弦分布；②幅值（振幅）位于绕组轴线；③空间每一点的磁动势大小随时间按余弦规律变化；④为脉动磁动势。



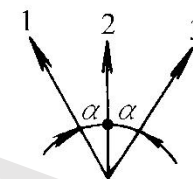
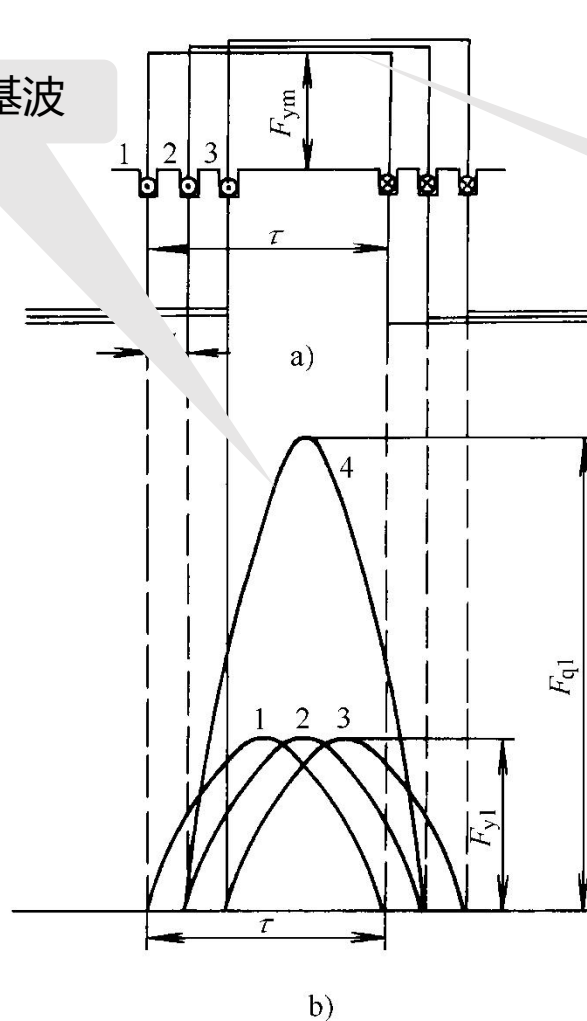
## 二、整距线圈组的磁动势

(1) 若每个线圈组由  $q = 3$  个相同的线圈串联起来，各线圈之间相差一个槽距角  $\alpha$ 。

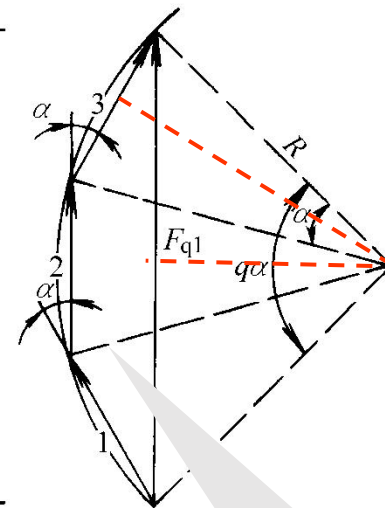
(2) 线圈组的基波合成磁动势的相量可用  $q$  个依次相差  $\alpha$  电角度的基波磁动势相量之和来表示：

$$\dot{F}_{q1} = F_{y1} \angle 0^\circ + F_{y1} \angle \alpha + \cdots + F_{y1} \angle (q-1)\alpha$$

合成磁动势的基波



3个线圈磁动势波



基波磁动势矢量相加

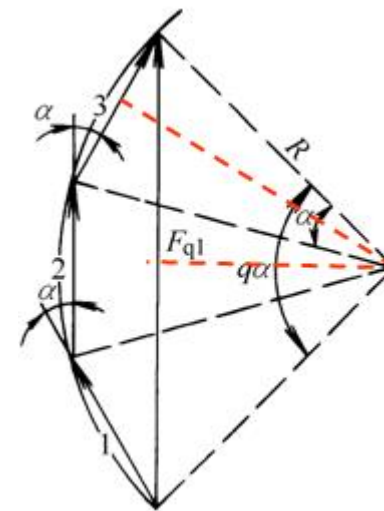


## 二、整距线圈组的磁动势

(3) 整距线圈组的基波磁动势  $\dot{F}_{q1} = F_{y1} \angle 0^\circ + F_{y1} \angle \alpha + \cdots + F_{y1} \angle (q-1)\alpha$

基波磁动势幅值:  $F_{q1} = qF_{y1}k_{q1} = 0.9IN_y qk_{q1}$

基波分布系数:  $k_{q1} = \frac{F_{q1}}{qF_{y1}} = \left( 2R \sin \frac{q\alpha}{2} / q2R \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \left( \sin \frac{q\alpha}{2} / q \sin \frac{\alpha}{2} \right)$



(4) 整距线圈组的谐波磁动势

谐波磁动势幅值:  $F_{qv} = \frac{1}{v} \times 0.9IN_y qk_{qv}$       谐波分布系数:  $k_{qv} = \sin q \frac{v\alpha}{2} / q \sin \frac{v\alpha}{2}$

结论: 采用分布绕组也可削弱磁动势中的高次谐波, 使磁动势更接近正弦波。





### 三、短距线圈组的磁动势

(1) 短距线圈组的磁动势：在 $q$ 个整距线圈所组成线圈组产生的磁动势基础上，乘上一个短距系数 $k_y$ 即可。

(2) 短距线圈组的基波合成磁动势幅值：
$$F_{q1(y<\tau)} = qF_{y1}k_{q1}k_{y1} = 0.9IN_y qk_{q1}k_{y1}$$

(3) 短距线圈组的基波短距系数：
$$k_{y1} = \sin y \frac{\pi}{2}$$

(4)  $v$ 次谐波短距系数：
$$k_{yv} = \sin vy \frac{\pi}{2}$$

(5) 短距线圈组的 $v$ 次谐波合成磁动势幅值：
$$F_{qv(y<\tau)} = \frac{1}{v} \times 0.9IN_y qk_{qv}k_{yv}$$





### 四、单相绕组产生的磁动势

是指气隙中的合成磁动势，即每一对磁极下对应的合成磁动势。

参数	单层绕组	双层绕组
相绕组基波磁动势幅值	$F_{\Phi 1} = F_{q1} = 0.9 I q N_y k_{q1} k_{y1}$	$F_{\Phi 1} = 2 F_{q1(y_1 < \tau)} = 2 \times 0.9 I q N_y k_{q1} k_{y1}$
一相绕组总匝数	$N_1 = p q N_y / b$	$N_1 = 2 p q N_y / b$
线圈电流	$I = I_1 / b$	$I = I_1 / b$
绕组系数	$k_{N1} = k_{q1} k_{y1}$	$k_{N1} = k_{q1} k_{y1}$

单层绕组:  $F_{\Phi 1} = 0.9 I q N_y k_{q1} k_{y1}$

$$\xrightarrow[\begin{matrix} N_1 = \frac{pqN_y}{b} \Rightarrow qN_y = \frac{bN_1}{p} \end{matrix}]{\begin{matrix} I = \frac{I_1}{b}, \quad k_{N1} = k_{q1} k_{y1} \end{matrix}} F_{\Phi 1} = 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1}$$

双层绕组:  $F_{\Phi 1} = 2 \times 0.9 I q N_y k_{q1} k_{y1}$

$$\xrightarrow[\begin{matrix} N_1 = \frac{2pqN_y}{b} \Rightarrow 2qN_y = \frac{bN_1}{p} \end{matrix}]{\begin{matrix} I = \frac{I_1}{b}, \quad k_{N1} = k_{q1} k_{y1} \end{matrix}} F_{\Phi 1} = 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1}$$

结论：不论是单层或双层绕组，相绕组的基波磁动势幅值均为

$$F_{\Phi 1} = 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1}$$


#### 四、单相绕组产生的磁动势

基波磁动势瞬时值表达式：

$$f_{\Phi 1}(x, t) = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t$$

$\nu$ 次谐波磁动势幅值：

$$F_{\Phi \nu} = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N\nu}$$

谐波磁动势瞬时表达式：

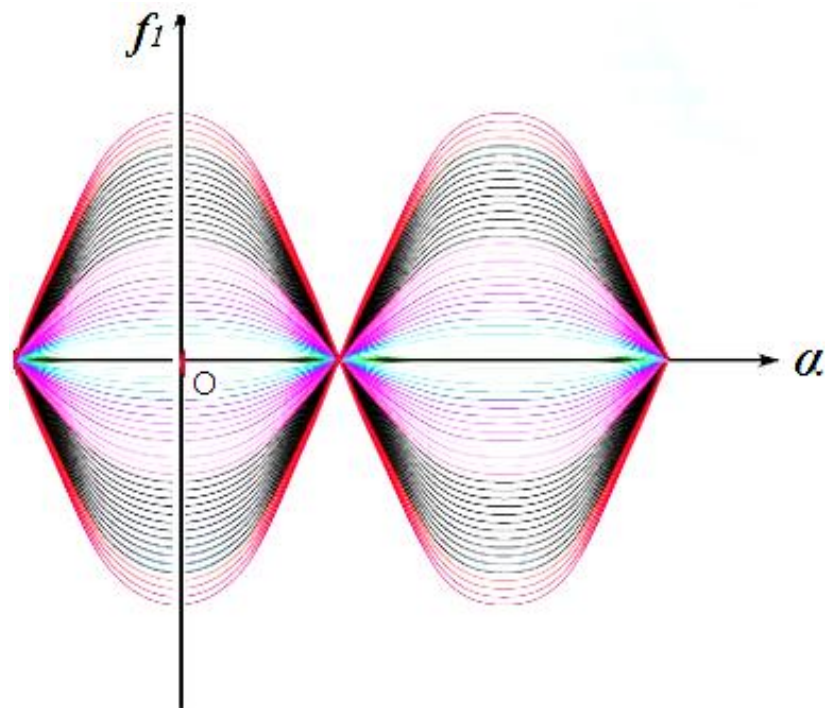
$$f_{\Phi \nu} = F_{\Phi \nu} \cos \omega t = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N\nu} \cos \frac{\nu \pi}{\tau} x \cos \omega t$$



#### 四、单相绕组产生的磁动势

##### 单相绕组磁动势特点：

- 1) 脉振磁动势；
- 2) 基波磁动势幅值的位置与绕组的轴线相重合；
- 3) 谐波磁动势幅值与谐波次数成反比；
- 4) 布及短距绕组，可显著减小高次谐波幅值，改善磁动势波形。



## 五、单相脉动磁动势的分解

$$f_{p1}(x,t) = F_{p1} \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x = \frac{1}{2} F_{p1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{1}{2} F_{p1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) = f_{p1}^+(x,t) + f_{p1}^-(x,t)$$

➤ 即一个脉动磁动势可以分解成两个幅值大小相等的磁动势。

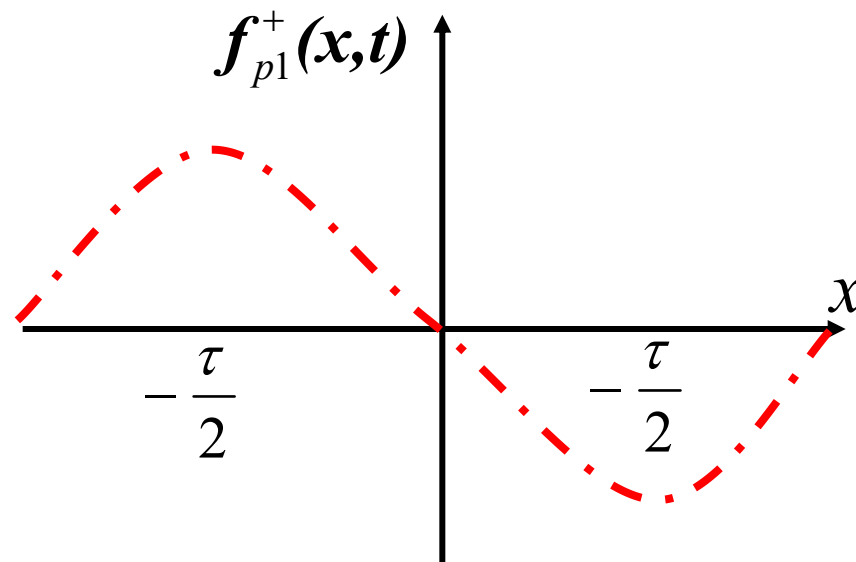
先分析  $f_{p1}^+(x,t) = \frac{1}{2} F_{p1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)$

取幅值点分析  $\omega t - \frac{\pi}{\tau} x = \frac{\pi}{2}$

$\omega t = 0$  时,  $x = -\frac{\tau}{2} = -\frac{\pi}{2}$ ;

$\omega t = \frac{\pi}{2}$  时,  $x = 0$ ;

$\omega t = \pi$  时,  $x = \frac{\tau}{2} = \frac{\pi}{2}$ ;



#### 分析

- 1)  $f_{p1}^+(x, t)$  称为正向旋转磁动势;
- 2)  $f_{p1}^+(x, t)$  的幅值为单相基波磁动势幅值的一半;
- 3) 线速度为  $v = dx/dt = 2f\tau(m/s)$   
旋转速度为  
 $n_1 = 2f\tau/2p\tau = f/p(r/s) = 60f/p(r/min)$
- 4)  $f_{p1}^-(x, t)$  的性质基本一致, 只是旋转方向是  $x$  的负方向。

#### 结论

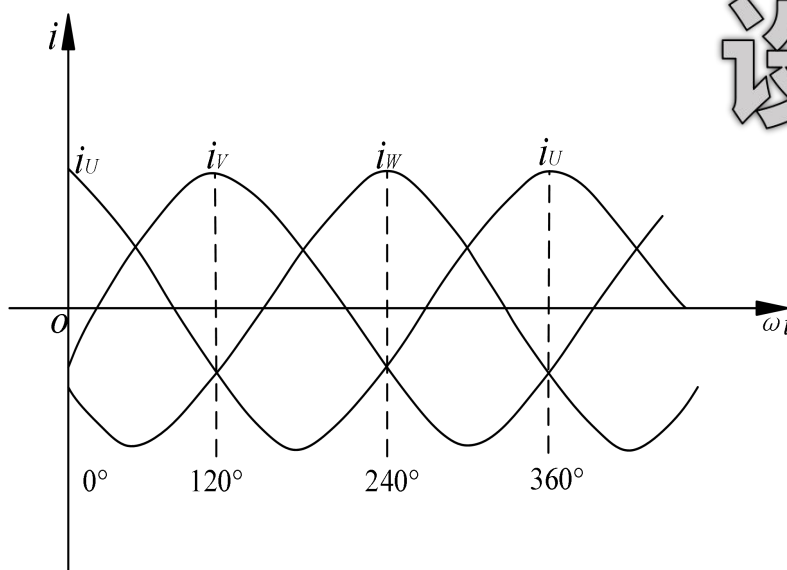
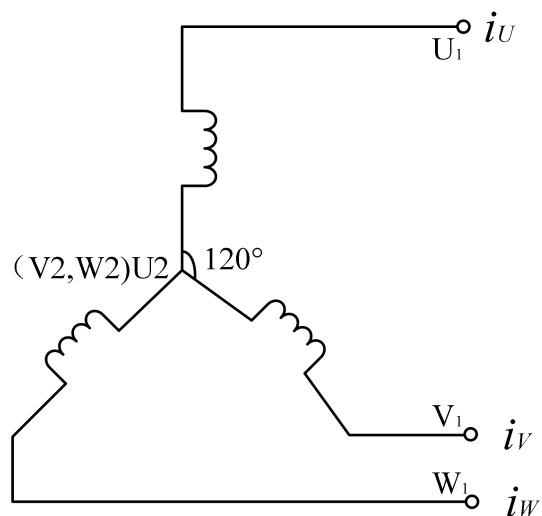
- 1) 单相绕组的基波磁动势为脉振, 它可以分解为大小相等、转速相同而转速相反的两个旋转磁场;
- 2) 反之, 满足上述性质的两个旋转磁动势的合成即为脉动磁动势。
- 3) 由于两个旋转磁动势在旋转过程中, 大小不变, 两矢量顶点的轨迹为一圆形, 所以这两个磁动势为圆形旋转磁动势。



三相空间对称绕组通入三相时间对称电流，产生圆形旋转磁场。

### 一、图解法

三相绕组流过三相对称电流，每相绕组在各自的绕组轴线上产生脉振磁动势，它们在空间上彼此相差 $120^\circ$ 电角度。



设

- 三相对称电流按余弦规律变化
- U相电流最大时为计时点
- 电流取首进尾出为正

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

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

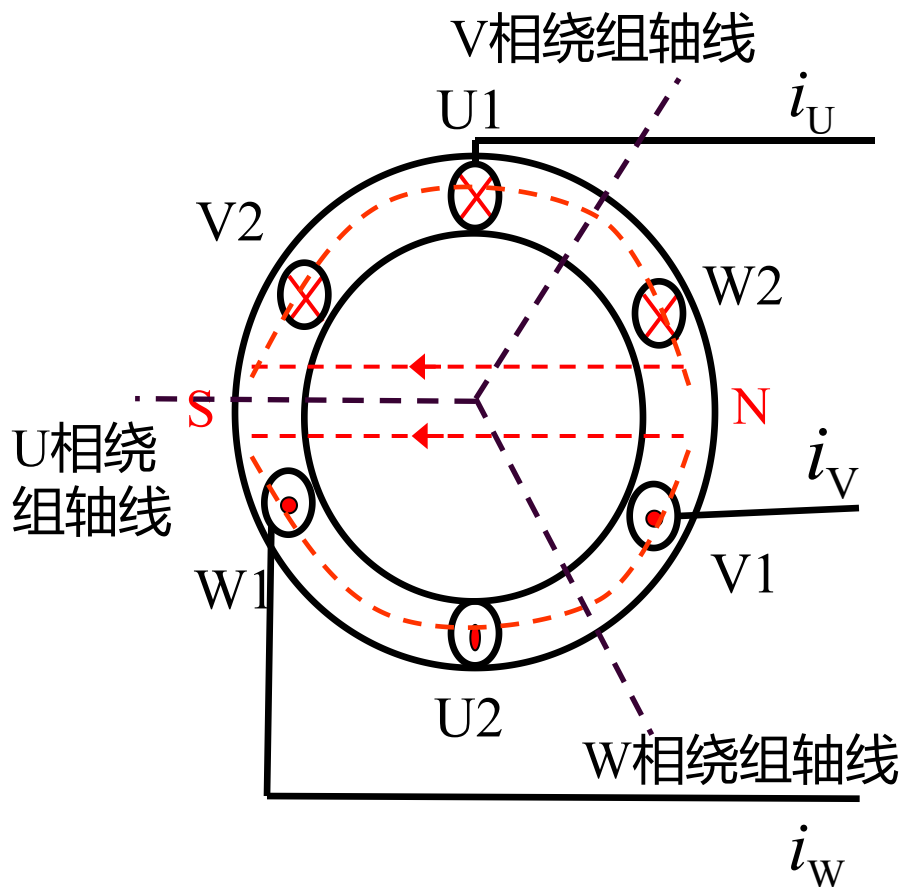
$$i_W = \sqrt{2}I \cos (\omega t + 120^\circ)$$



## 一、图解法

$$i_U = \sqrt{2}I \cos \omega t, \quad i_V = \sqrt{2}I \cos (\omega t - 120^\circ), \quad i_W = \sqrt{2}I \cos (\omega t + 120^\circ)$$

(1) 当  $\omega t = 0^\circ$  时,  $i_U = \sqrt{2}I \cos 0 = \sqrt{2}I > 0$ ,  $i_V = \sqrt{2}I \cos (-120^\circ) < 0$ ,  $i_W = \sqrt{2}I \cos (120^\circ) < 0$

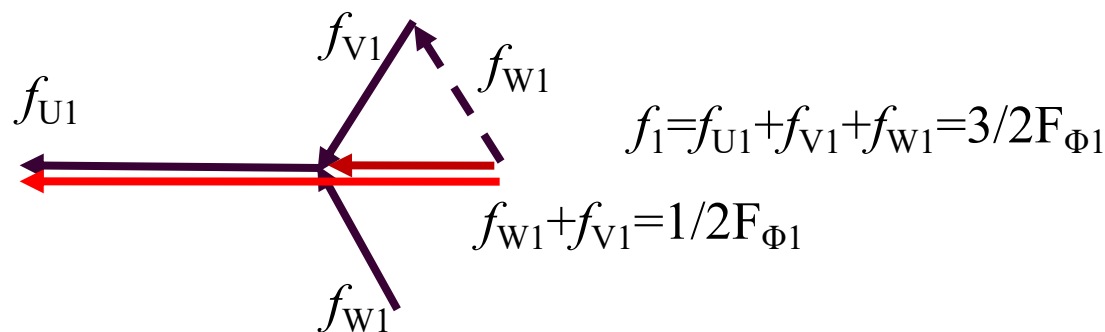


电流取**首进尾出**为正

$$f_{U1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos 0^\circ = F_{\Phi 1}$$

$$f_{V1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos (-120^\circ) = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{W1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos (120^\circ) = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$



当  $\omega t = 0$  时, U相电流幅值最大, 合成磁动势轴线在U相绕组轴线上,  $f_1 = 3/2 F_{\Phi 1}$



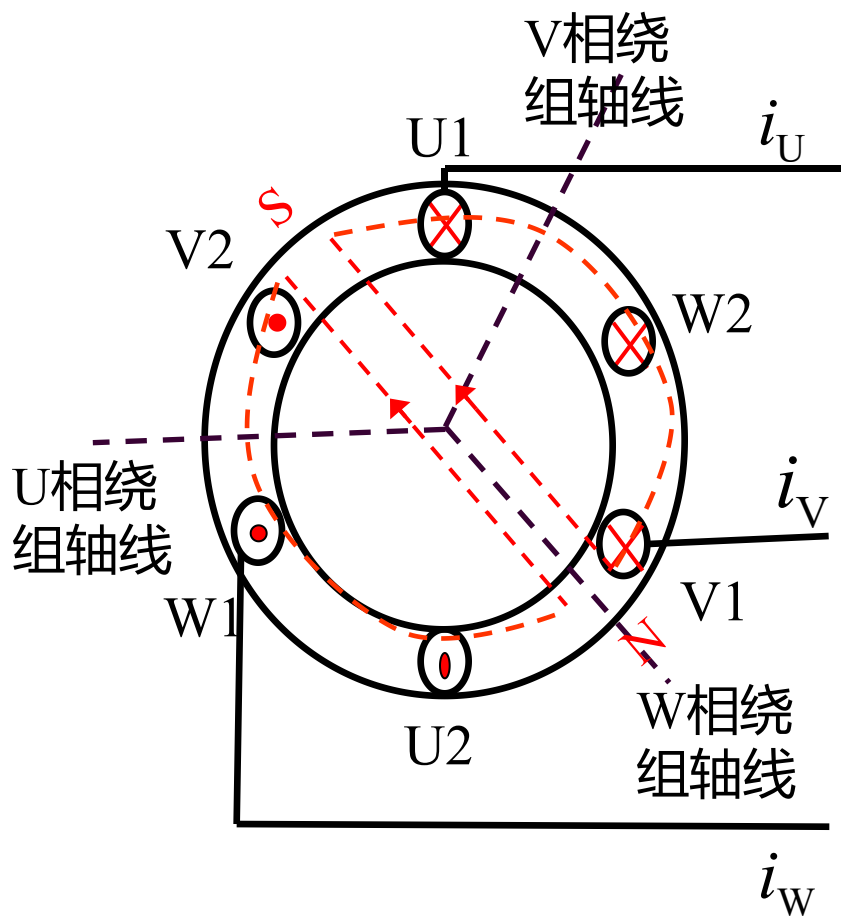


## 一、图解法

(2)当 $\omega t=60^\circ$ ,

$$i_U = \sqrt{2}I \cos \omega t, \quad i_V = \sqrt{2}I \cos (\omega t - 120^\circ), \quad i_W = \sqrt{2}I \cos (\omega t + 120^\circ)$$

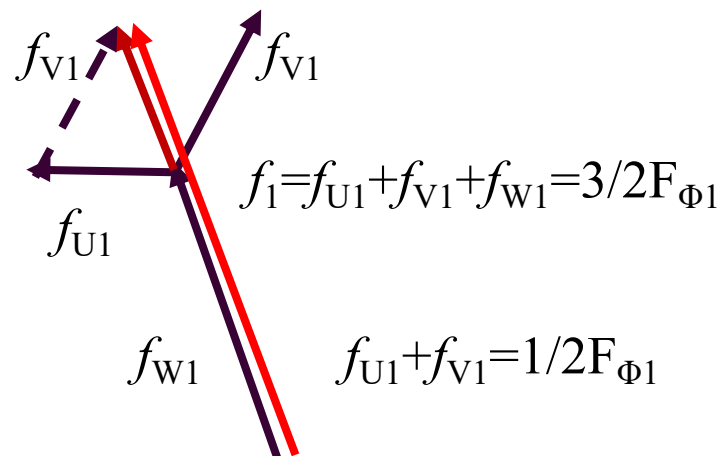
$$i_U = \sqrt{2}I \cos 60^\circ > 0, \quad i_V = \sqrt{2}I \cos (-60^\circ) > 0, \quad i_W = \sqrt{2}I \cos (180^\circ) < 0$$

电流取**首进尾出**为正

$$f_{U1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos 60^\circ = \frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{V1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos (-60^\circ) = \frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{W1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos (180^\circ) = -F_{\Phi 1}$$

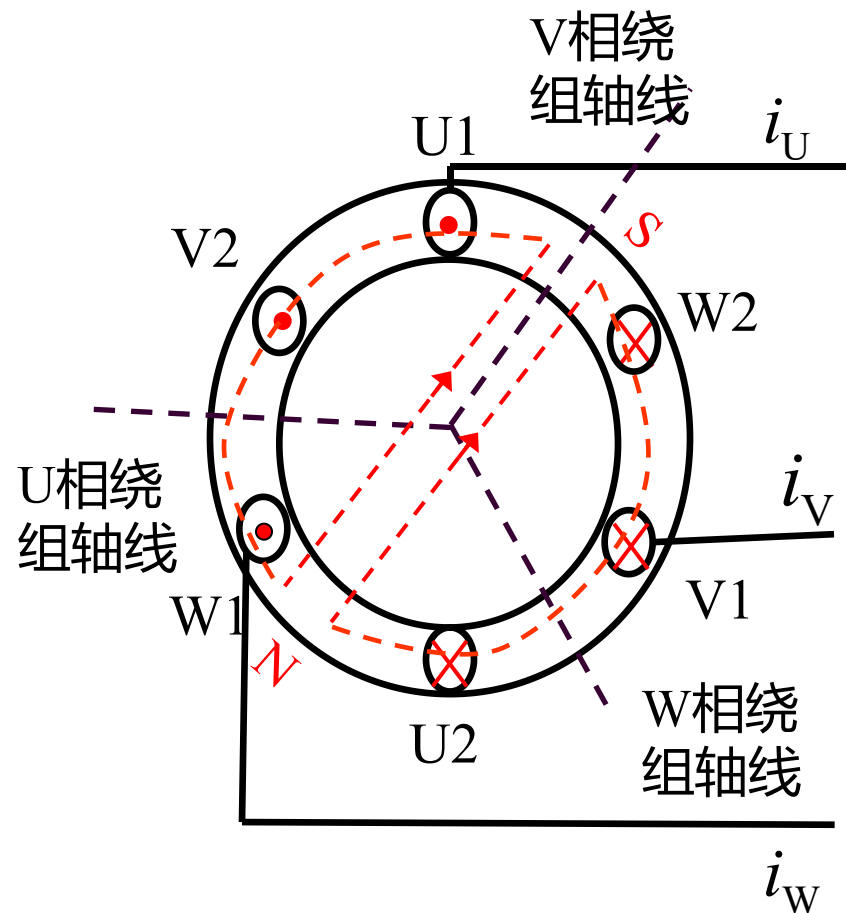


当 $\omega t=60^\circ$ 时, W相电流幅值最大, 合成磁动势轴线在W相绕组轴线上,  $f_1=3/2 F_{\Phi 1}$



## 一、图解法

(3)当 $\omega t=120^\circ$ ,  $i_U = \sqrt{2}I \cos 120^\circ < 0$ ,  $i_V = \sqrt{2}I \cos(0^\circ) > 0$ ,  $i_W = \sqrt{2}I \cos(240^\circ) < 0$

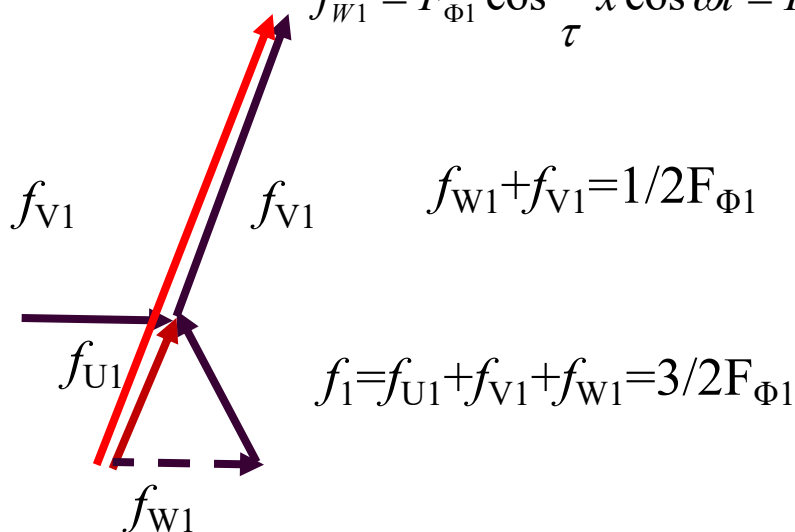


电流取**首进尾出**为正

$$f_{U1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{V1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos(0^\circ) = F_{\Phi 1}$$

$$f_{W1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos(240^\circ) = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$



$$f_{W1} + f_{V1} = 1/2 F_{\Phi 1}$$

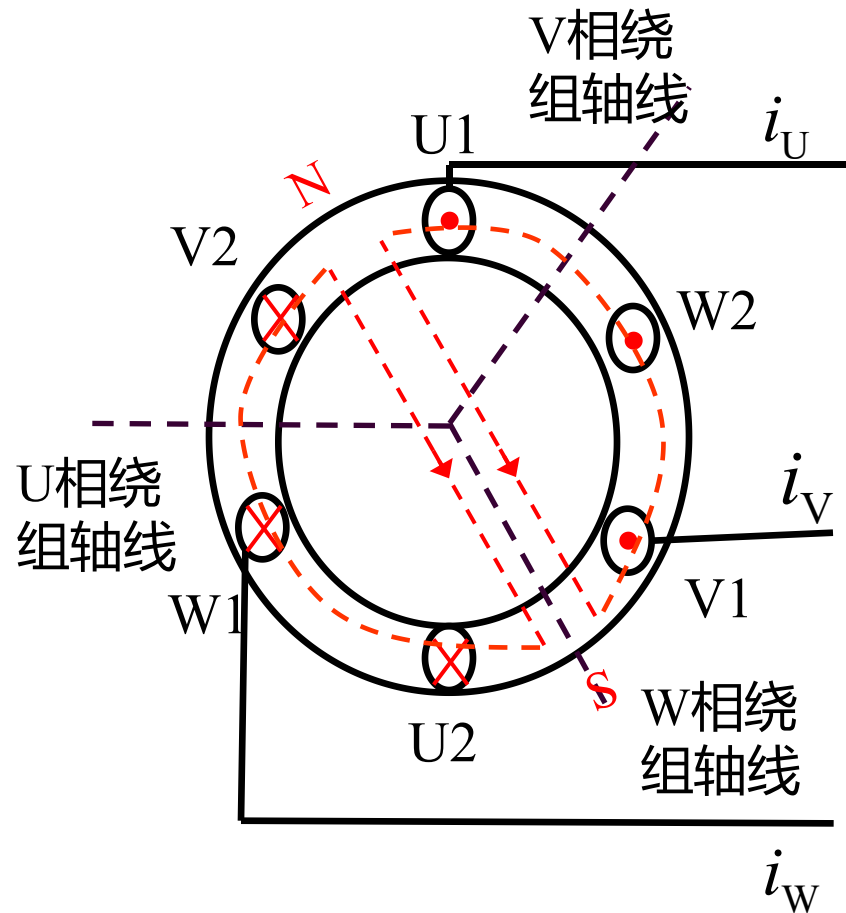
$$f_1 = f_{U1} + f_{V1} + f_{W1} = 3/2 F_{\Phi 1}$$

当 $\omega t=120$ 时,V相电流幅值最大,合成磁动势轴线在V相绕组轴线上,  $f_1=3/2F_{\Phi 1}$



## 一、图解法

(4)当 $\omega t=240^\circ$ ,  $i_U = \sqrt{2}I \cos 240^\circ < 0$ ,  $i_V = \sqrt{2}I \cos(120^\circ) < 0$ ,  $i_W = \sqrt{2}I \cos(360^\circ) > 0$

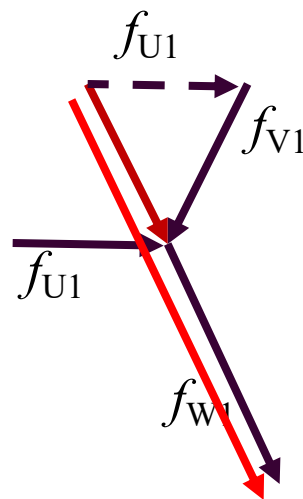


电流取**首进尾出**为正

$$f_{U1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos 240^\circ = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{V1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos(120^\circ) = -\frac{1}{2} F_{\Phi 1}$$

$$f_{W1} = F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = F_{\Phi 1} \cos 0^\circ \cos(360^\circ) = F_{\Phi 1}$$



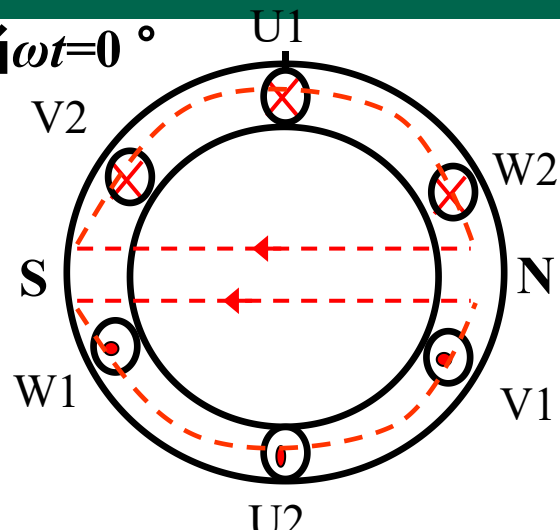
$$f_{U1} + f_{V1} = 1/2 F_{\Phi 1}$$

$$f_1 = f_{U1} + f_{V1} + f_{W1} = 3/2 F_{\Phi 1}$$

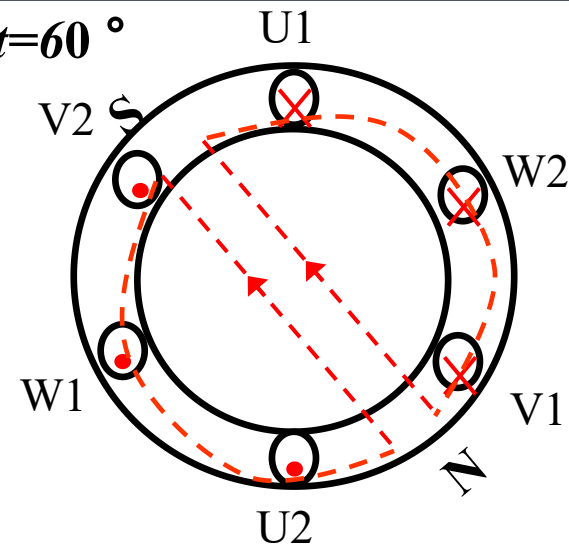
当 $\omega t=240^\circ$ 时, W相电流幅值最大, 合成磁动势轴线在W相绕组轴线上,  $f_1 = 3/2 F_{\Phi 1}$



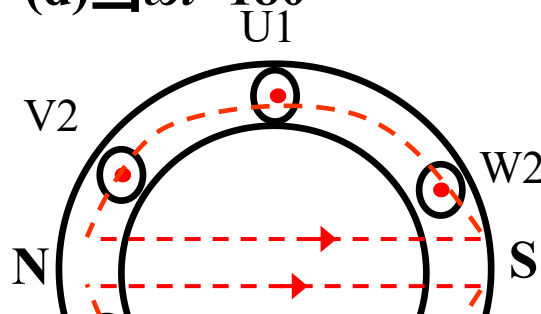
(a) 当  $\omega t = 0^\circ$



(b) 当  $\omega t = 60^\circ$

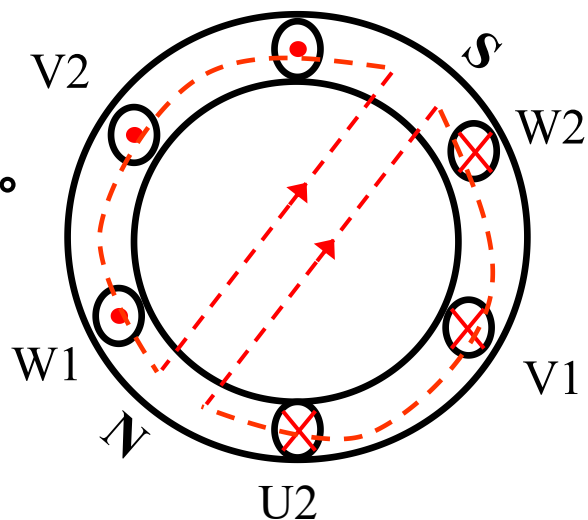


(d) 当  $\omega t = 180^\circ$

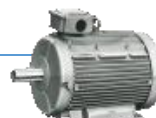
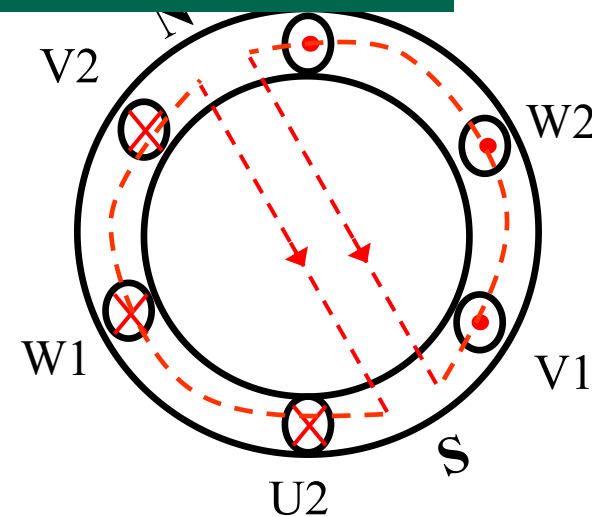


若三相电流为正序，则合成磁动势顺时针转，若三相电流为负序，则合成磁动势逆时针转，总之，合成磁动势是从超前电流的相转到滞后电流的相。

(c) 当  $\omega t = 120^\circ$



(e) 当  $\omega t = 240^\circ$



## 一、图解法

三相绕组基波合成磁动势是一个幅值恒定不变的**圆形旋转磁动势**，它有以下主要性质：

## 幅值

- 幅值是单相脉动磁动势最大幅值的3/2倍；

## 转向

- 转向由电流相序决定，从超前电流相转到滞后电流相；

## 转速

- 转速决定于电流的频率和电机的磁极对数：

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

## 位置

- 当某相电流达最大值时，旋转磁动势的幅值位置刚好转到该相绕组的轴线位置上。



## 二、数学分析法

**三相空间对称绕组通入三相时间对称电流，产生圆形旋转磁场。**

将空间坐标的纵轴取在U相绕组轴线上，以顺时针方向作为横坐标轴 $x$ 的正方向，同时把U相电流达到最大值的瞬间作为 $t$ 的起点，各相脉振磁动势的表达式为：

$$f_{U1}(x, t) = F_{\Phi 1} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \cos \omega t$$

$$f_{V1}(x, t) = F_{\Phi 1} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ\right) \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$f_{W1}(x, t) = F_{\Phi 1} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + 120^\circ\right) \cos(\omega t + 120^\circ)$$



## 二、数学分析法

$$f_{U1}(x,t) = \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right)$$

$$f_{V1}(x,t) = \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - 240^\circ\right)$$

$$f_{W1}(x,t) = \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ\right)$$

三相合成磁动势为：

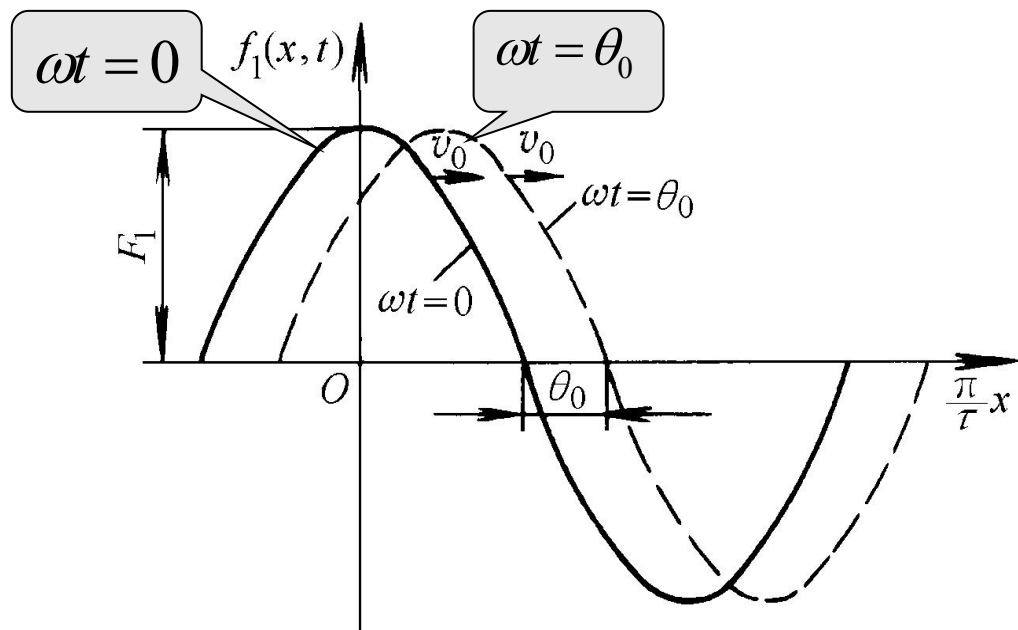
$$\begin{aligned} f_1(x,t) &= f_{U1}(x,t) + f_{V1}(x,t) + f_{W1}(x,t) = \frac{3}{2} F_{\Phi1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) \\ &= 1.35 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) \end{aligned}$$





## 二、数学分析法

$$f_1(x, t) = 1.35 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) = F_1 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right)$$



$\omega t = 0$  和  $\omega t = \theta_0$  时磁动势波的位置

当  $t = 0$ , 即  $\omega t = 0$  时,  $f_1(x, t) = F_1 \cos\left(-\frac{\pi}{\tau} x\right)$

当  $t = t_1$ , 即  $\omega t_1 = \theta_0$  时,  $f_1(x, t) = F_1 \cos\left(\theta_0 - \frac{\pi}{\tau} x\right)$

三相合成磁动势表示的是一个在空间按余弦规律分布, 幅值  $F_1$  恒定不变、随着时间前移而旋转的磁动势波。



## 二、数学分析法

$$f_1(x, t) = 1.35 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) = F_1 \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right)$$

磁动势波的旋转速度可由波上任意一点的移动速度来确定，若选择波幅点，则要求：

$$\cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) = 1, \quad \text{即 } \omega t - \frac{\pi}{\tau} x = 0 \text{ 或 } x = \frac{\tau}{\pi} \omega t$$

则磁动势波移动的线速度：

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\tau}{\pi} \omega = \frac{\tau}{\pi} 2\pi f = 2\tau f$$

则转速：

$$n_1 = \frac{60v}{2p\tau} = \frac{60 \times 2\tau f_1}{2p\tau} = \frac{60f_1}{p} (\text{r/min})$$



## 二、数学分析法

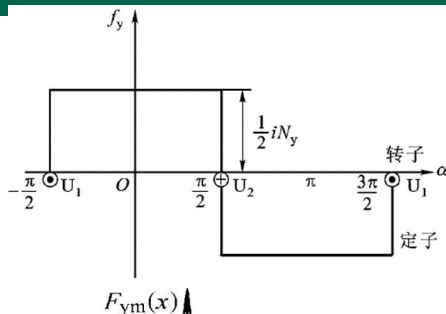
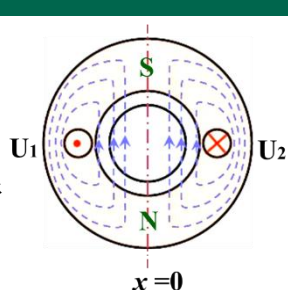
## 三相合成基波磁动势的特点

磁动势的性质	旋转磁动势
幅值	$F_1=1.35I_1N_1k_{N1}/p$
转向	由电流领先相转向电流滞后相
转速	$n_1=60f_1/p$ (r/min)
极对数	合成磁动势波长为 $2\tau$ , 极对数为电机极对数 $p$
幅值瞬间位置	合成基波旋转磁动势在空间位置上与绕组电流时间上一致



# 小结

集中整距线圈磁动势波形



$$\oint H dl = i = N_y i$$

$$f_y = \frac{1}{2} N_y i$$

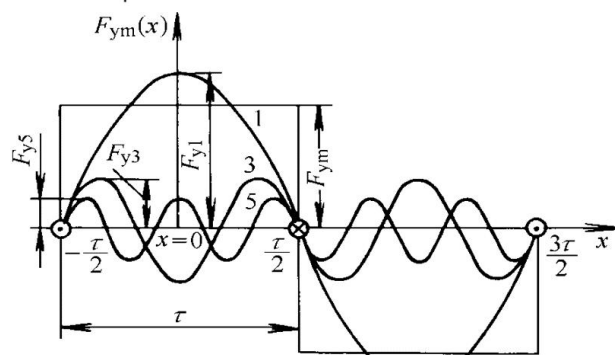
$$f_y(\alpha, t) = \frac{1}{2} N_y i \quad i = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$f_y(\alpha, t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & (-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t & (\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$$

$$f_y(x, t) = f_y(\alpha, t)$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \left( \cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \right)$$

$$= 0.9 N_y I \cos \omega t \left[ \cos \frac{\pi}{\tau} x - \frac{1}{3} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x + \frac{1}{5} \cos 5 \frac{\pi}{\tau} x - \dots \right]$$



$$f_{y1}(x, t) = \frac{4}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I \cos \omega t \cos \alpha = 0.9 N_y I \cos \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

$$F_{y1} = \frac{4}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} N_y I = 0.9 N_y I$$

磁动势

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{F}_{q1} &= F_{y1} \angle 0^\circ + F_{y1} \angle \alpha + \dots + F_{y1} \angle (q-1)\alpha & F_{q1} &= q F_{y1} k_{q1} = 0.9 I N_y q k_{q1} \\ k_{q1} &= \frac{F_{q1}}{q F_{y1}} = \left( \frac{2R \sin \frac{q\alpha}{2}}{q 2R \sin \frac{\alpha}{2}} \right) = \left( \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \right) & \text{分布系数} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_{qv(y < \tau)} &= \frac{1}{v} \times 0.9 I N_y q k_{qv} k_{yv} \\ k_{yv} &= \sin v y \frac{\pi}{2} \\ k_{qv} &= \sin q \frac{v\alpha}{2} / q \sin \frac{v\alpha}{2} \end{aligned} \right. \quad \text{谐波}$$

$$\text{短距线圈磁动势} \quad F_{q1(y < \tau)} = q F_{y1} k_{q1} k_{y1} = 0.9 I N_y q k_{q1} k_{y1} \quad k_{y1} = \sin y \frac{\pi}{2} \quad \text{短距系数}$$

$$\text{单相绕组磁动势 脉振磁动势} \quad F_{\Phi 1} = 0.9 I q N_y k_{q1} k_{y1} \xrightarrow[N_1 = \frac{pqN_y}{b} \Rightarrow qN_y = \frac{bN_1}{p}]{I = \frac{I_1}{b}, \quad k_{N1} = k_{q1} k_{y1}} F_{\Phi 1} = 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1}$$

$$\text{三相绕组磁动势 旋转磁动势 (图解法, 数学分析法)} \quad f_1(x, t) = f_{U1}(x, t) + f_{V1}(x, t) + f_{W1}(x, t) = \frac{3}{2} F_{\Phi 1} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) = 1.35 \frac{I_1 N_1}{p} k_{N1} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right)$$