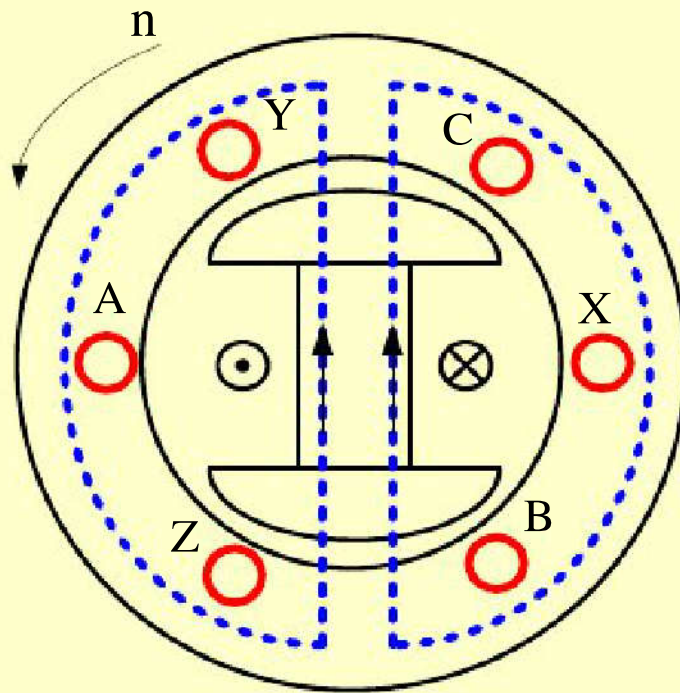


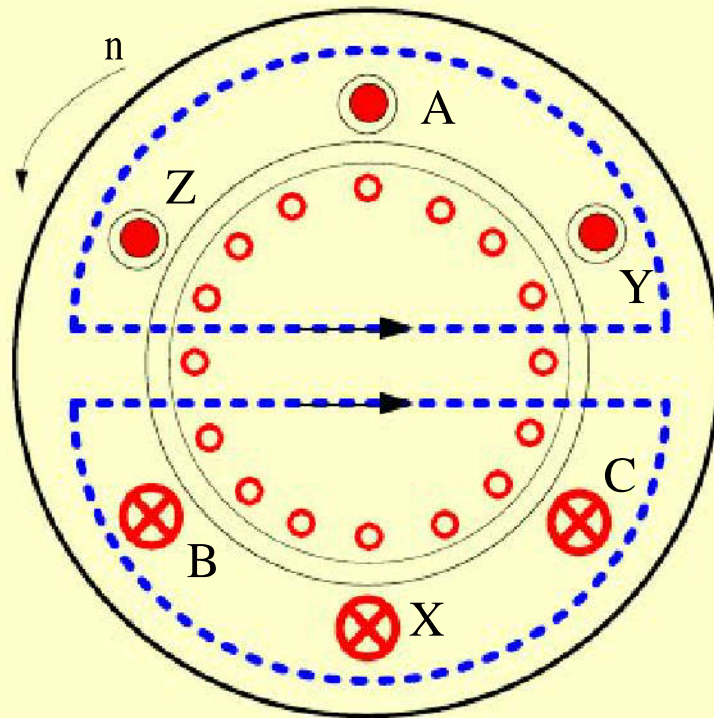


第四章 交流电机理论的一般问题

——交流绕组及其电动势和磁动势



凸极同步发电机结构原理图



笼形感应电动机结构原理图

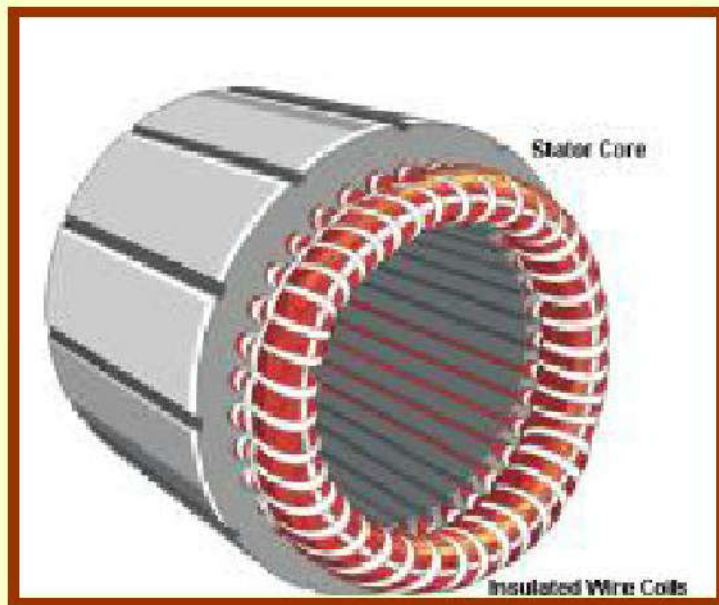
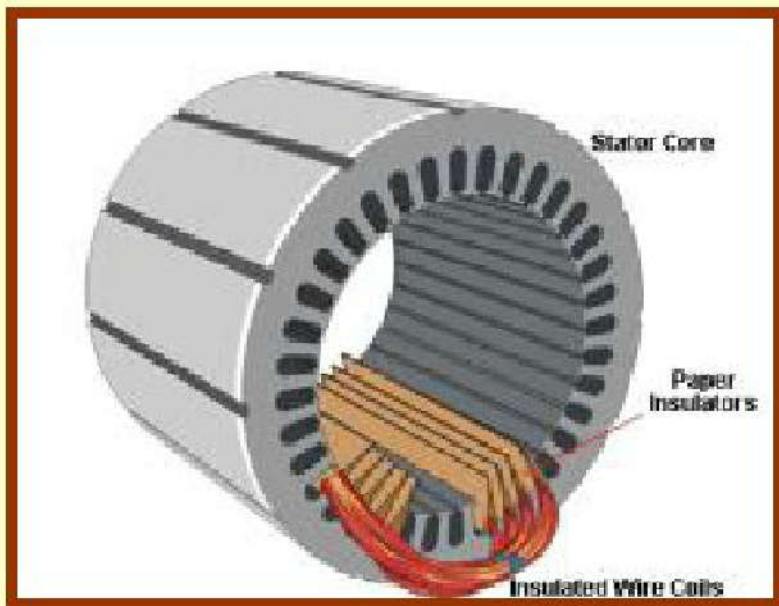


交流电机（感应电机和同步电机）的共同问题

1. 三相交流绕组的结构；
2. 三相交流绕组产生的感应电势分析；
3. 三相交流绕组产生的磁势分析。

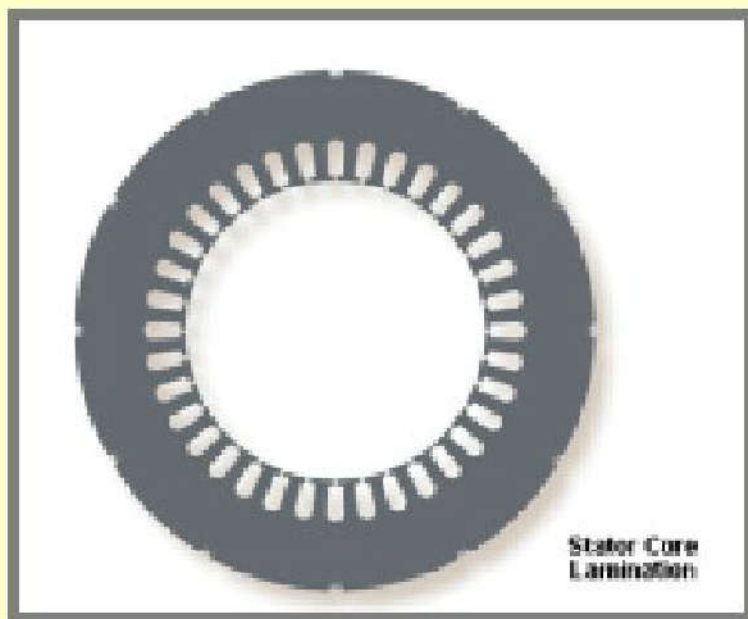


定子铁心





定子冲片





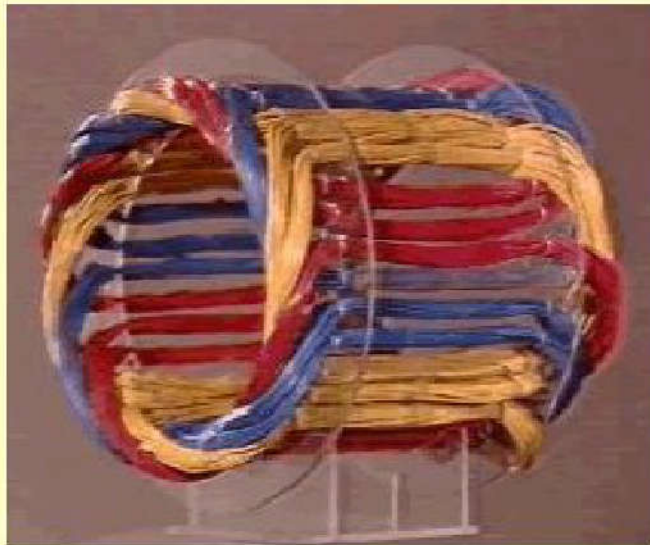
定子线圈



照片：成型线圈



交流电机的绕组分布





交流绕组的构成原则

- **均匀原则**：每个极域内的槽数（线圈数）要相等，各相绕组在每个极域内所占的槽数应相等
 - 每极槽数用极距 τ 表示
 - 每极每相槽数
- **对称原则**：三相绕组的结构完全一样，但在电机的圆周空间互相错开 120° 电角度。
 - 如槽距角为 α ，则相邻两相错开的槽数为 $120/\alpha$ 。
- **电势相加原则**：线圈两个圈边的感应电势应该相加；线圈与线圈之间的连接也应符合这一原则。
 - 如线圈的一个边在N极下，另一个应在S极下。



对交流绕组的要求

- (1) 交流绕组通电后，必须形成规定的磁场极数；
- (2) 多相绕组必须对称，不仅要求 m 相绕组的匝数 N 、跨距 y 、线径及在圆周上的分布情况相同，而且 m 相绕组的轴线在空间上互差 $360/m$ 电角度。
- (3) 交流绕组通过电流所建立的磁场在空间的分布为正弦分布，且旋转磁场在交流绕组中感应电动势必须随时间按正弦规律变化。采用分布绕组和短距绕组。
- (4) 在一定的导体数之下，建立的磁场最强而且感应电动势最大。因此线圈的跨距 y 尽可能接近极距，而且对于三相绕组尽可能采用60相带。（每个极距内属于同一相的槽在圆周上连续所占有的电角度区域称为相带）。
- (5) 用铜少；下线方便；强度好。

§ 4-2 三相交流绕组

绕组基本概念

★ **极距：**沿定子铁心内圆每个磁极所占的范围；

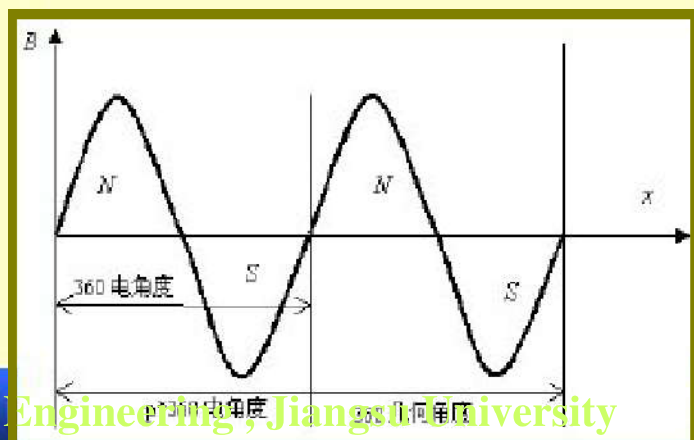
• 用长度表示/用槽数表示；

★ **电角度：**

• 转子铁心的横截面是一个圆，其几何角度为360度。

• 从电磁角度看，一对N,S极构成一个磁场周期，即1对极为360电角度；

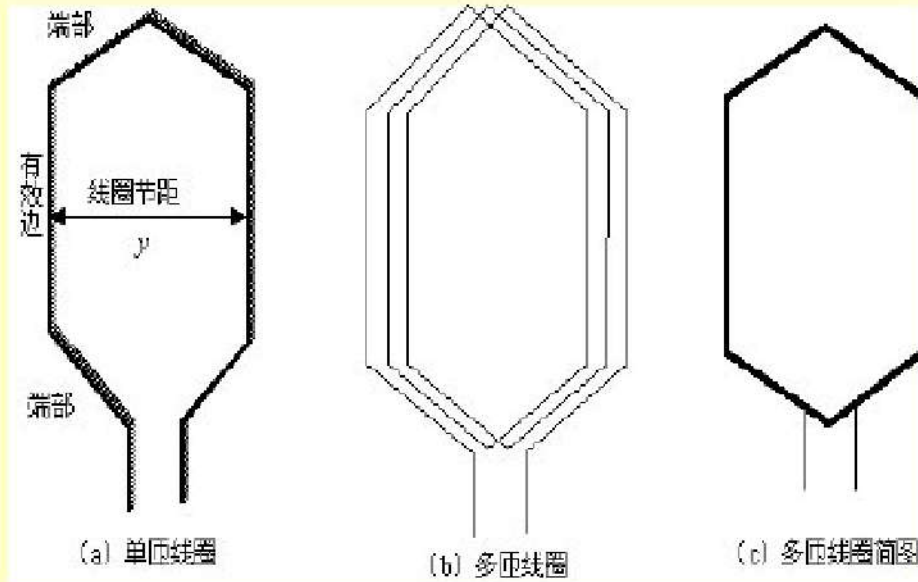
• 电机的极对数为 p 时，气隙圆周的角度数为 $p \times 360$ 电角度。





交流电机的电枢绕组

★ **线圈（绕组元件）**：是构成绕组的基本单元。绕组就是线圈按一定规律的排列和联结。线圈可以区分为**多匝线圈**和**单匝线圈**。





单层绕组和双层绕组

- 单层绕组一个槽中只放一个元件边；
- 双层绕组一个槽中放两个元件边。

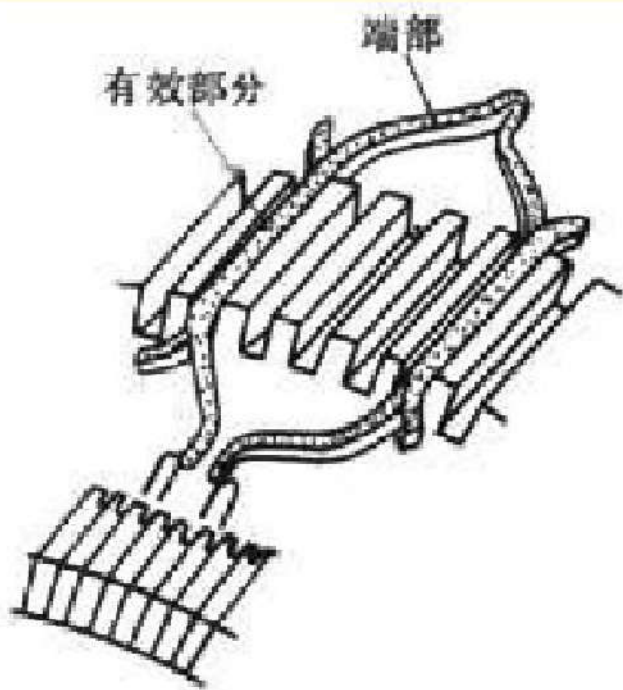
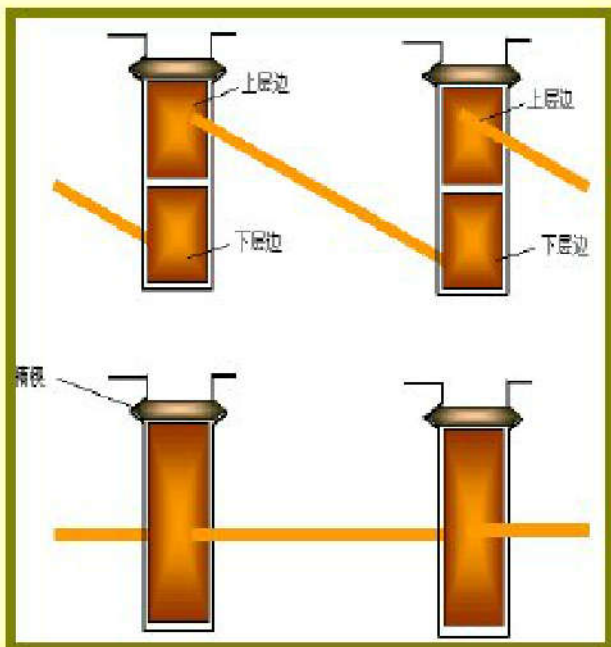
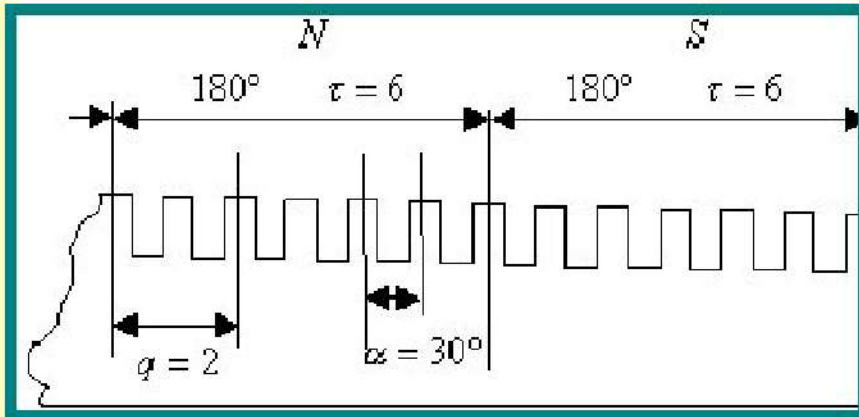


图 1 线圈在槽内的安排



★槽距角，相数，每极每相槽数

- 一个槽所占的电角度数称为槽距角，用 α 表示；
- 相数用 m 表示；
- 每个极域内每相所占的槽数称为每极每相槽数，用 q 表示。



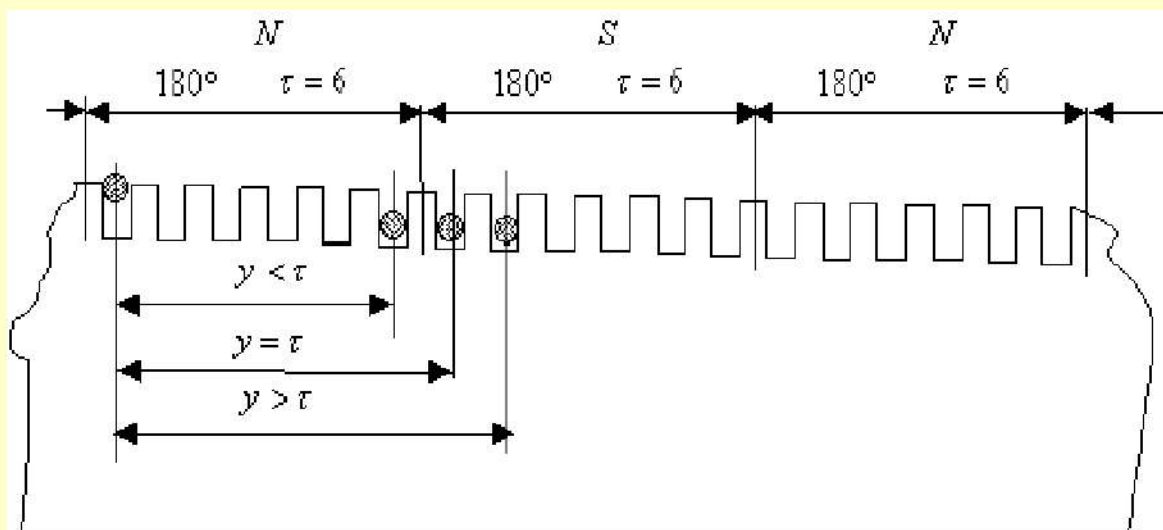
$$\alpha = \frac{p * 360}{Z}$$

$$q = \frac{Z}{2pm}$$



术语6：节距 y (跨距)

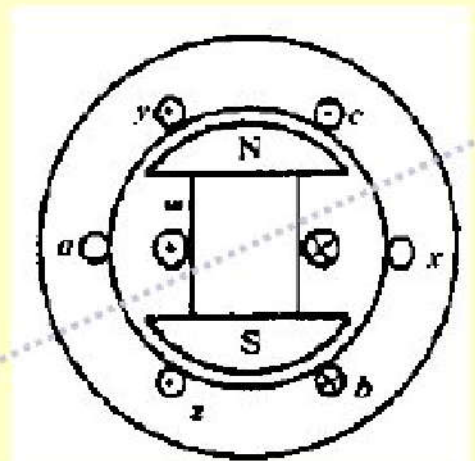
- 表示元件的宽度。元件放在槽内，其宽度可用元件两边所跨越的槽数表示。



图：整距，短距，长距线圈的概念

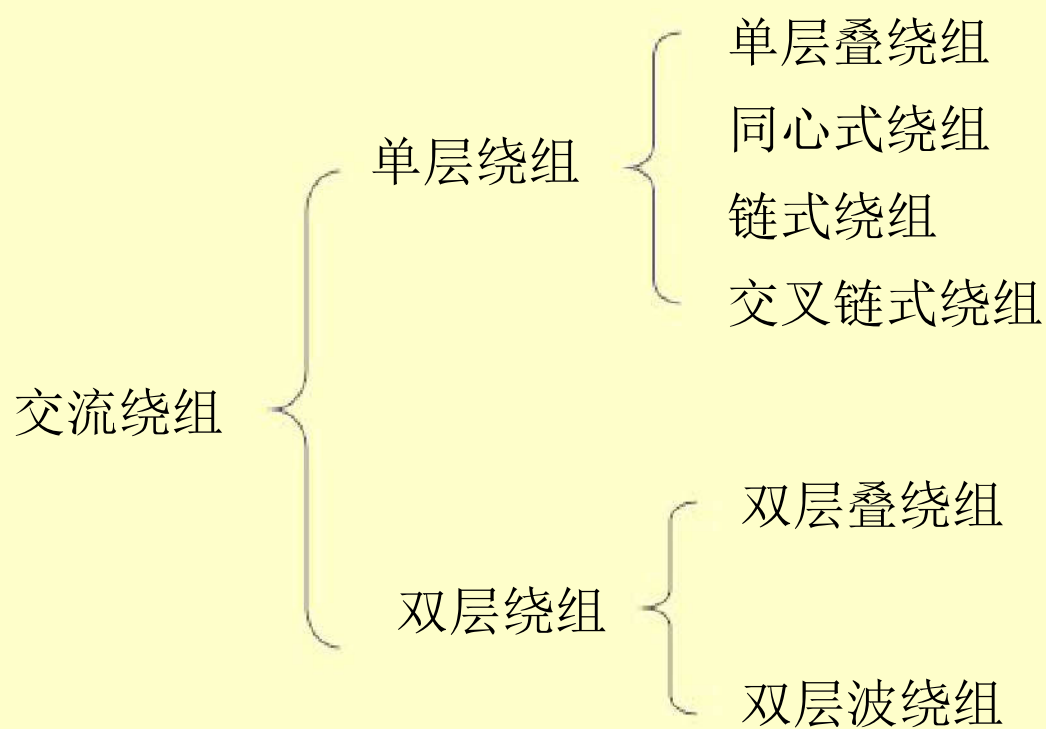
相带

- 为了三相绕组对称，在每个极面下每相绕组应占有相等的范围——相带。
- 每个极对应于 180° 电角度，如电机有 m 相，则每个相带占有 $180^\circ / m$ 电角度。三相电机 $m=3$ ，其相带为 60° ，按 60° 相带排列的绕组称为 60° 相带绕组。



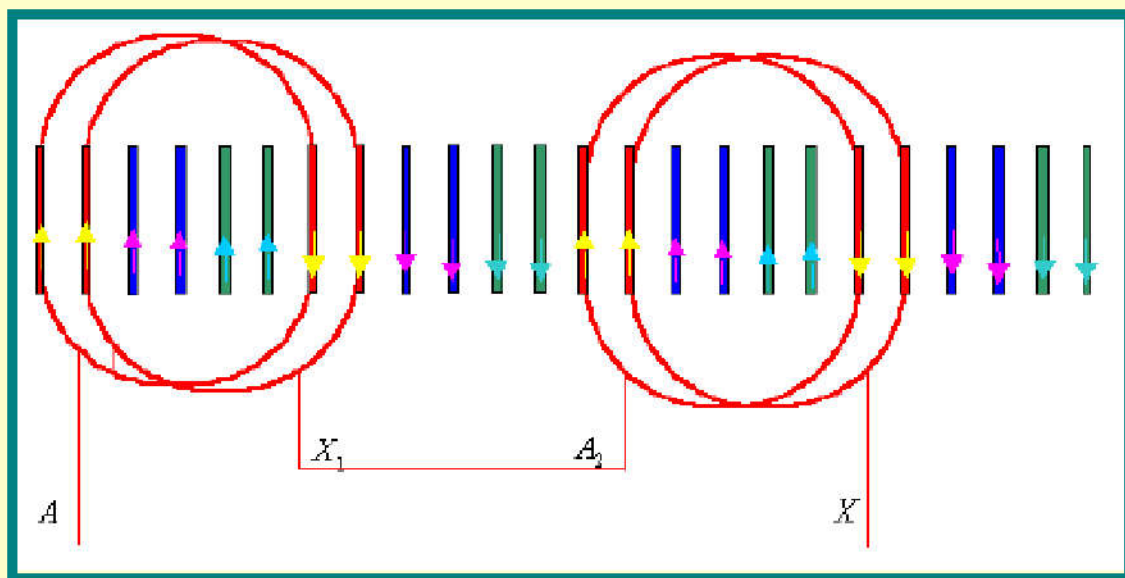


交流绕组的形式



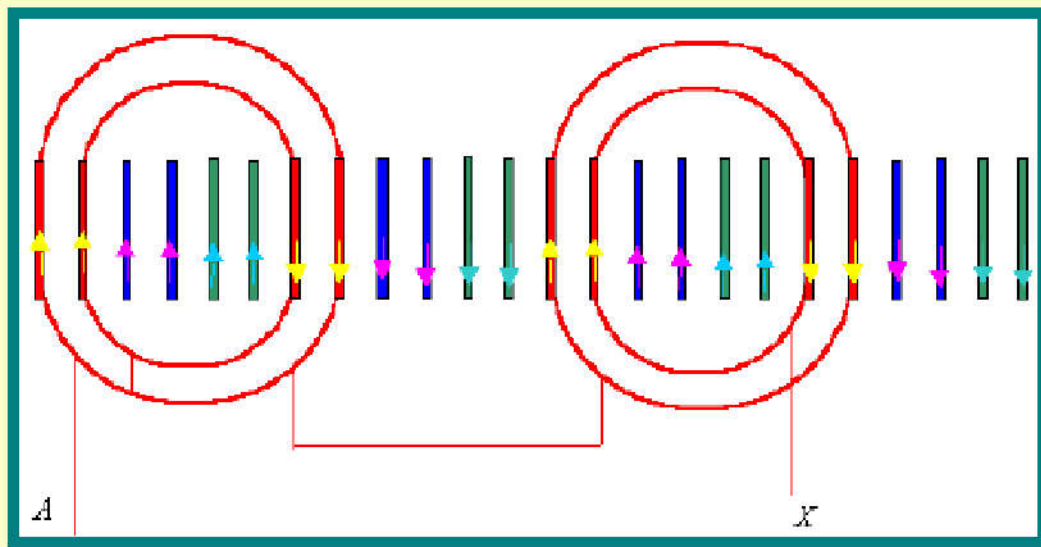


等元件式整距单层叠绕组



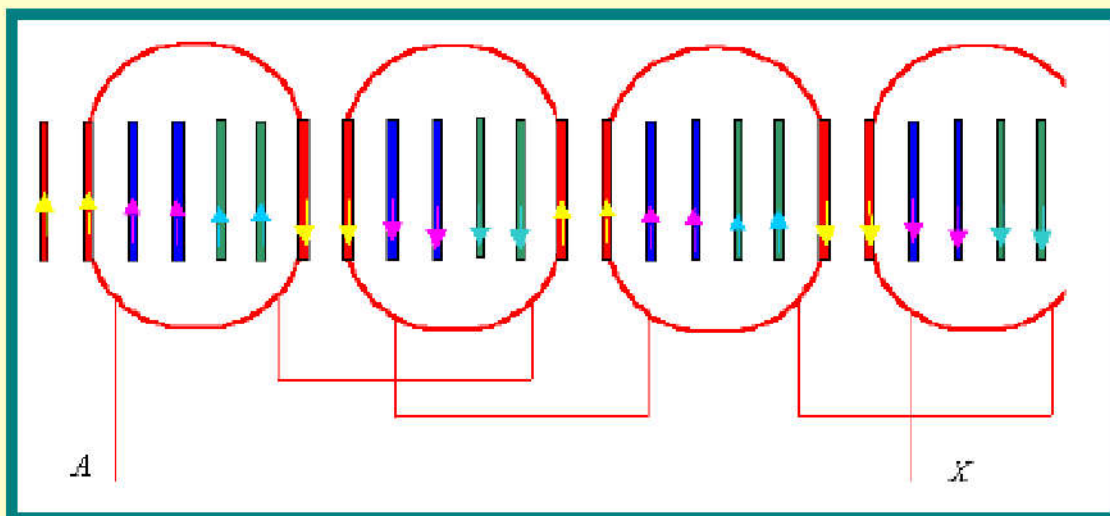


同心式绕组



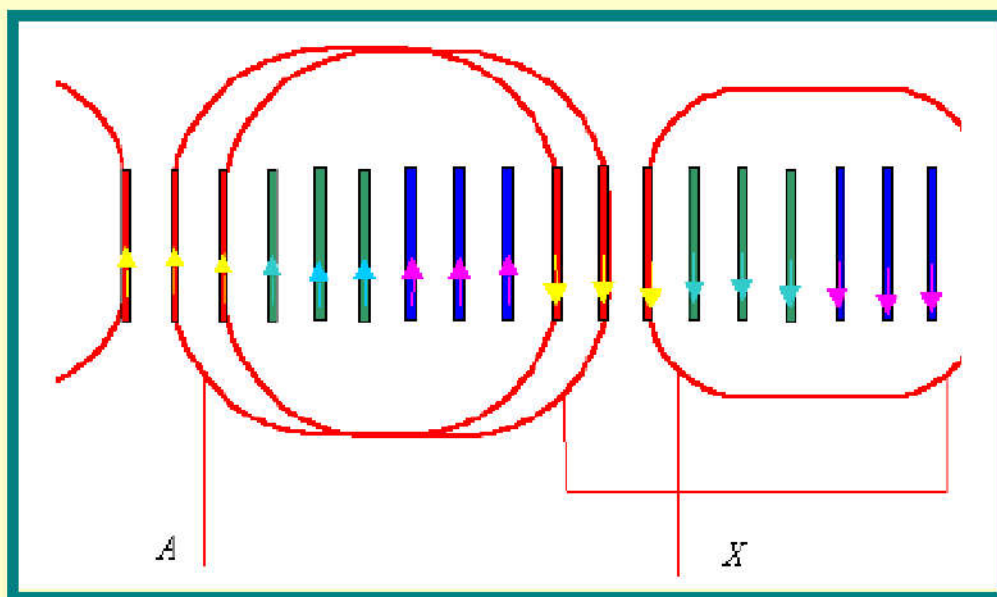


链式绕组



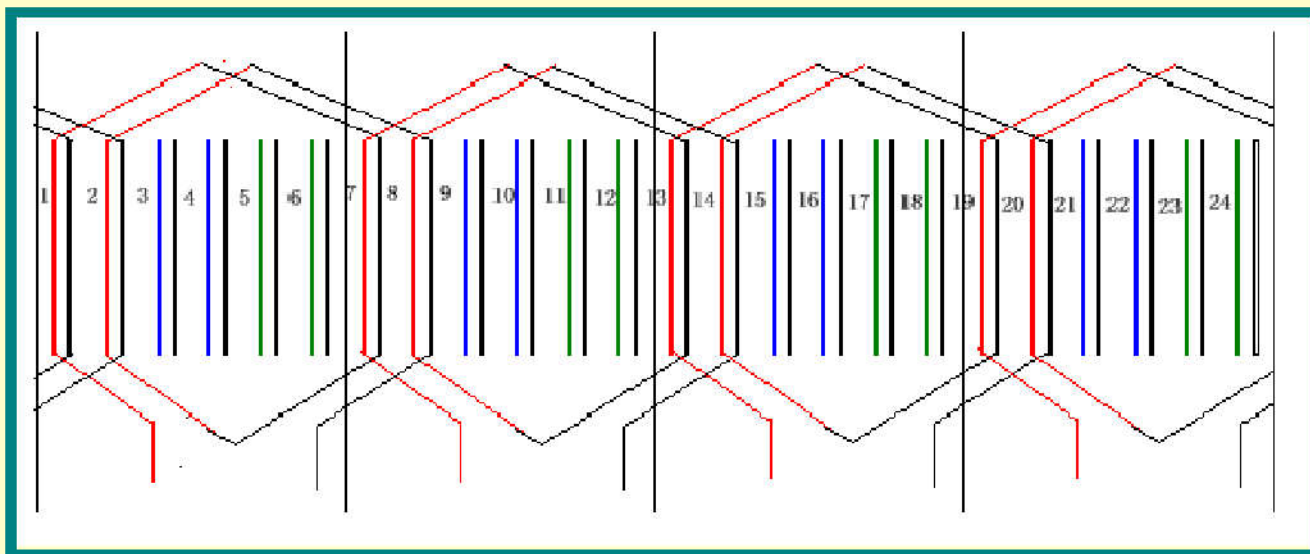


交叉链式绕组





双层叠绕组





(一) 单层叠绕组的构成

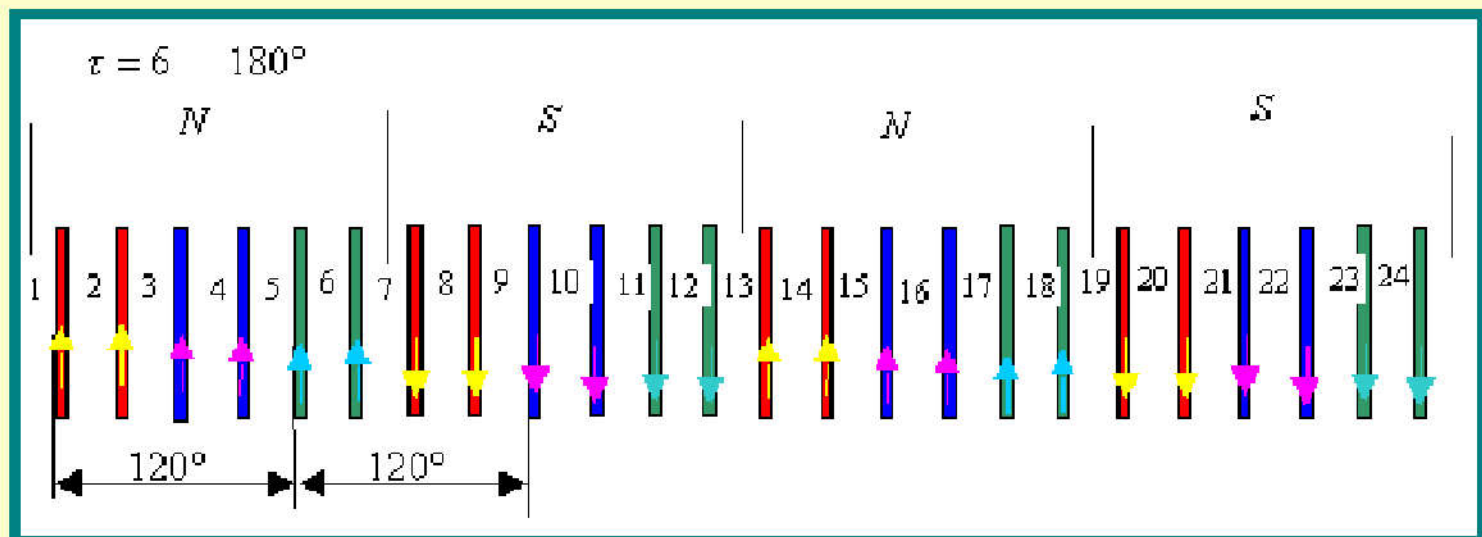
实例：Z=24（槽）、m=3（相）、2p=4（极）的单层叠绕组

基本步骤：

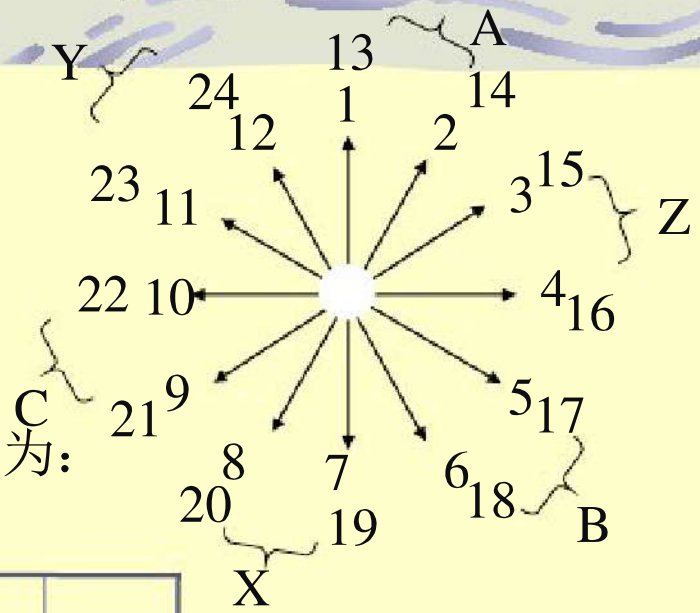
1、分极分相：

- 将总槽数按给定的极数均匀分开（N、S极相邻分布）并标记假设的感应电势方向。
- 将每个极域的槽数按三相均匀分开。三相在空间错开120电角度。

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



$$q = \frac{Z}{2pm}$$



每相绕组所占范围 称为相带。

各相所属的槽号按相带的顺序列表为：

	A	Z	B	X	C	Y
第一对极	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12
第二对极	13 14	15 16	17 18	19 20	21 22	23 24



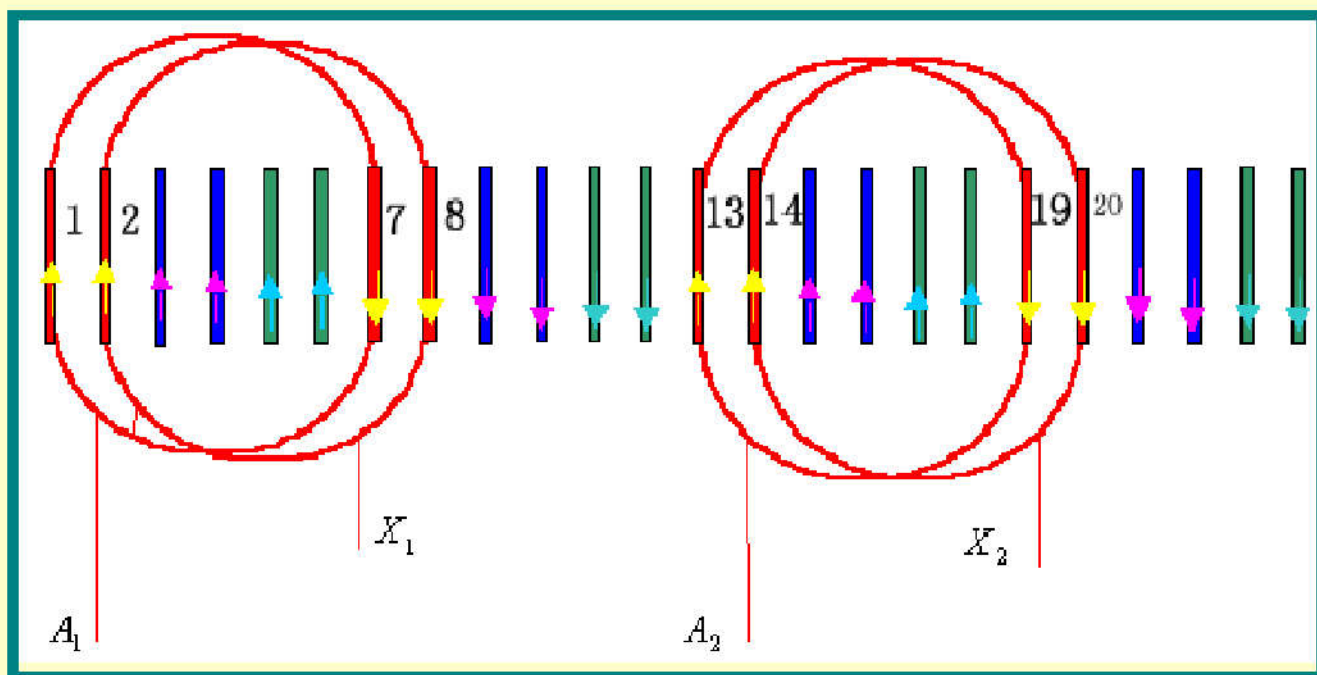
连线圈和线圈组

2、连线圈和线圈组：

- 将一对极域内属于同一相的某两个线圈边连成一个线圈，共有 q 个线圈。
- 将一对极域内属于同一相的 q 个线圈连成一个线圈组；
(共有多少个线圈组？)
- 以上连接应符合电势相加原则。



线圈组连接



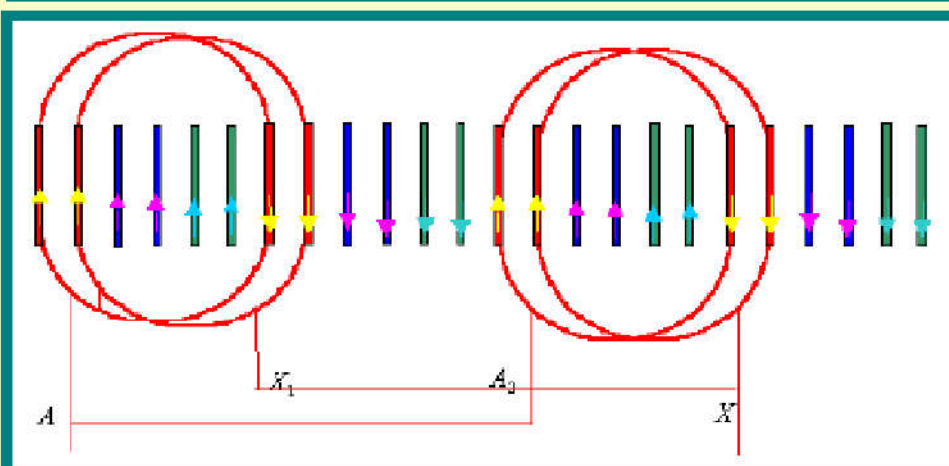
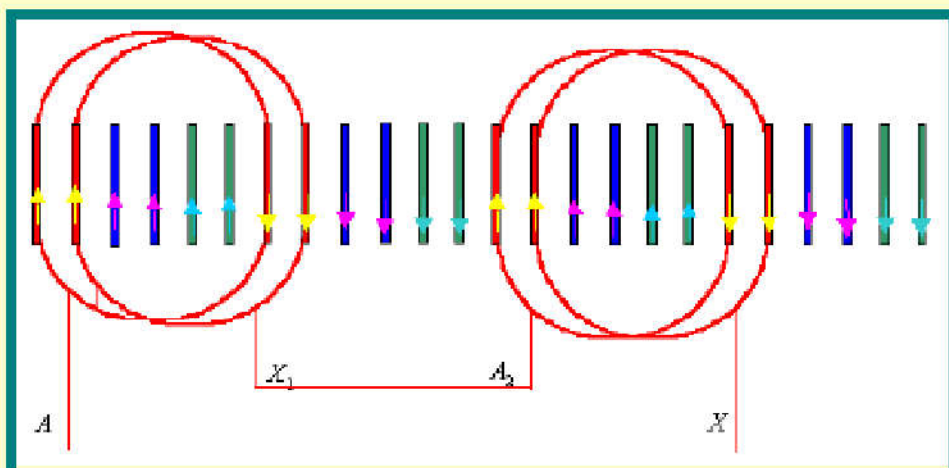


3、连相绕组

将属于同一相的 p 个线圈组连成一相绕组，并标记首尾端。

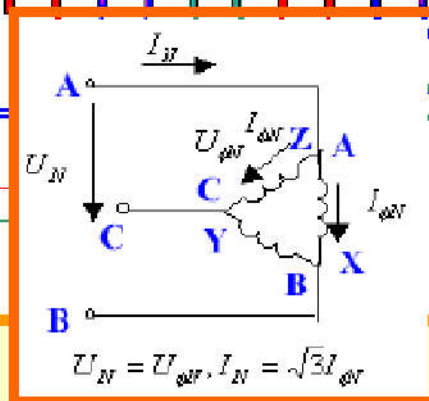
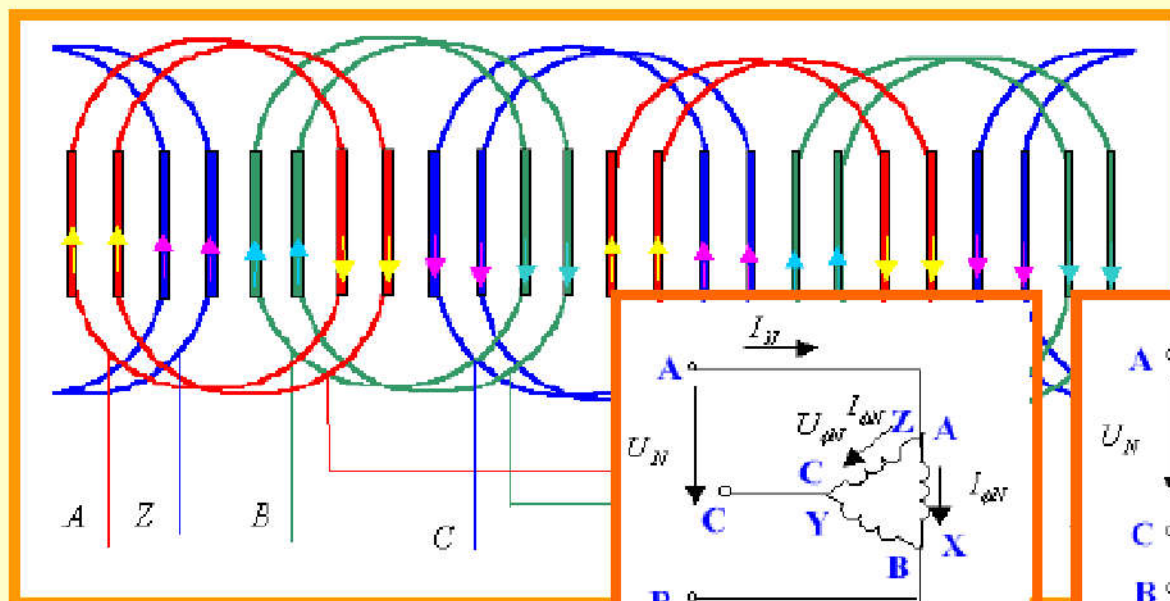
• 串联与并联：电势相加原则。

• 最大并联支路数 $a=p$ 。

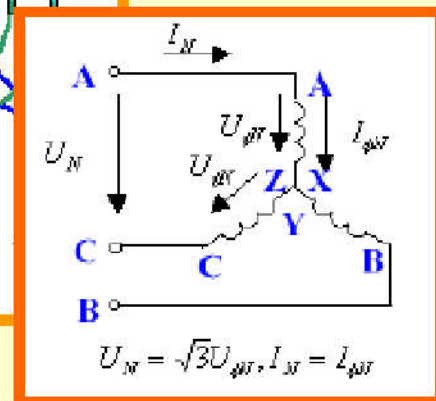


4、连三相绕组

- 将三个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组；
- Δ 接法或Y接法；



三相 Δ 连接



三相Y连接

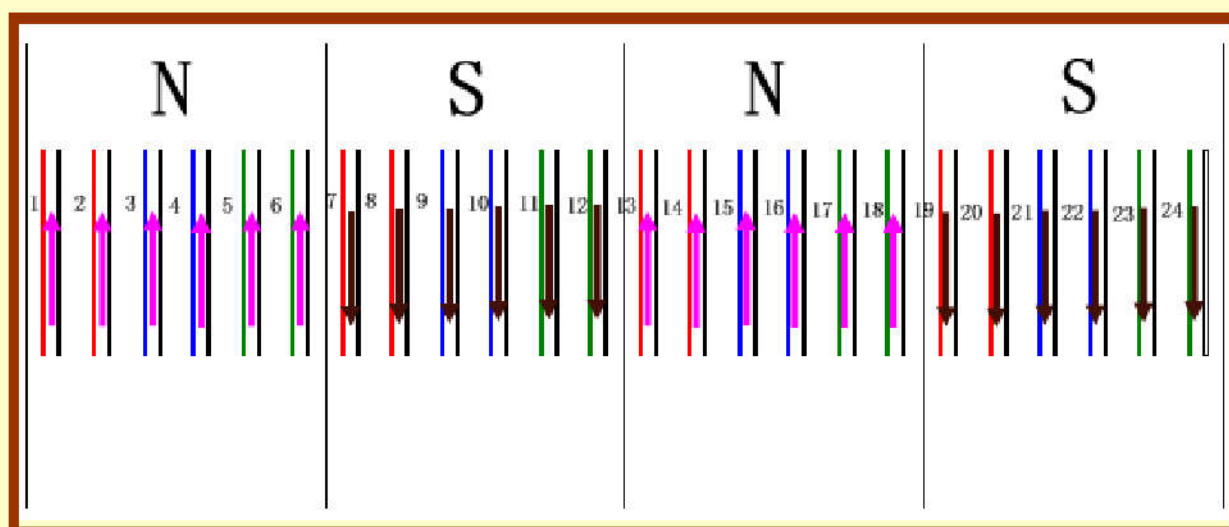


(二) 双层叠绕组的构成

实例： $Z=24$ ， $2p=4$ ，整距， $m=3$ 双层叠绕组

分极分相：

- 将总槽数按给定的极数均匀分开（N、S极相邻分布）并标记假设的感应电势方向；
- 将每个极域的槽数按三相均匀分开。三相在空间错开 120 电角度。



每极每相槽数

$$q = \frac{Z}{2pm}$$



分 相

双层绕组应对每层导体确定其所属相带。

通常用上层导体的分相作为代表，称为槽的分相。

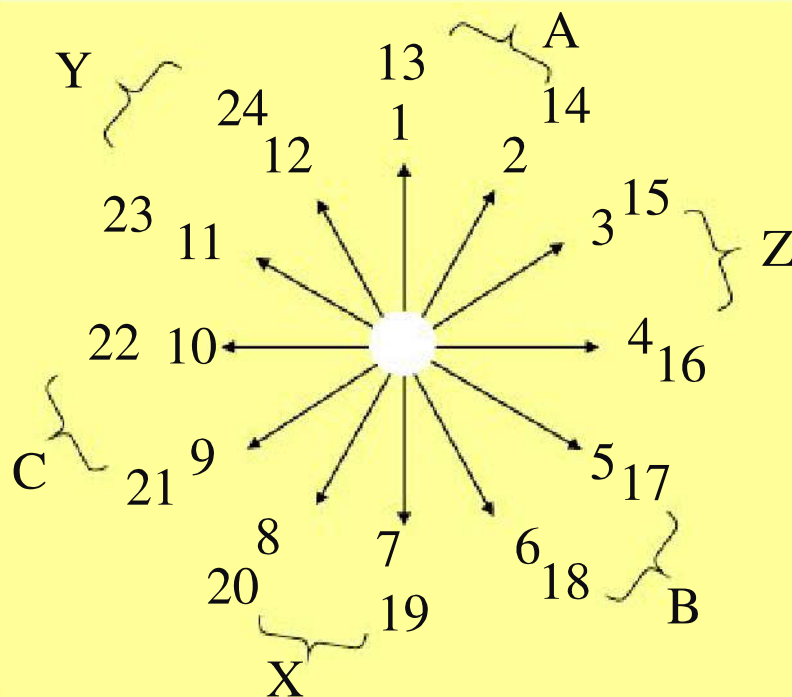
按照绕组节距，下层边分相即自动确定。

	A	Z	B	X	C	Y
第一对极	1	3	5	7	9	11
	2	4	6	8	10	12
第二对极	13	15	17	19	21	23
	14	16	18	20	22	24

槽星形图

- 由于相邻的线圈在空间有一定的电角度（ 30° 电角），它们的电动势相量必然在时间上相差相同的电角 30° 。
- 将各线圈的电动势相量同时绘出，得到电动势的星形图。

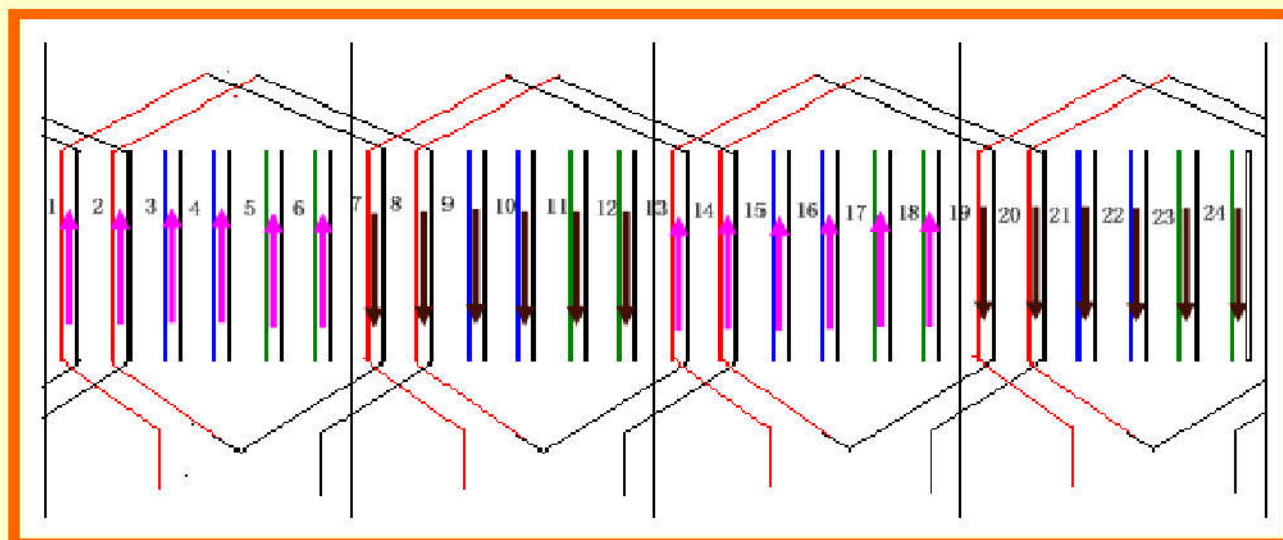
整个电机可绘出 p 个重叠的电动势星形图。





连线圈和线圈组

- 根据给定的线圈节距连线圈（上层边与下层边合一个线圈）；
 - 以上层边所在槽号标记线圈编号；
 - 将该上层边与对应的下层边的两个线圈边连成一个线圈（共有 q 个线圈，为什么？）；
- 将同一极域内属于同一相的 q 个线圈连成一个线圈组（共有多少个线圈组？）；
- 以上连接应符合电势相加原则。



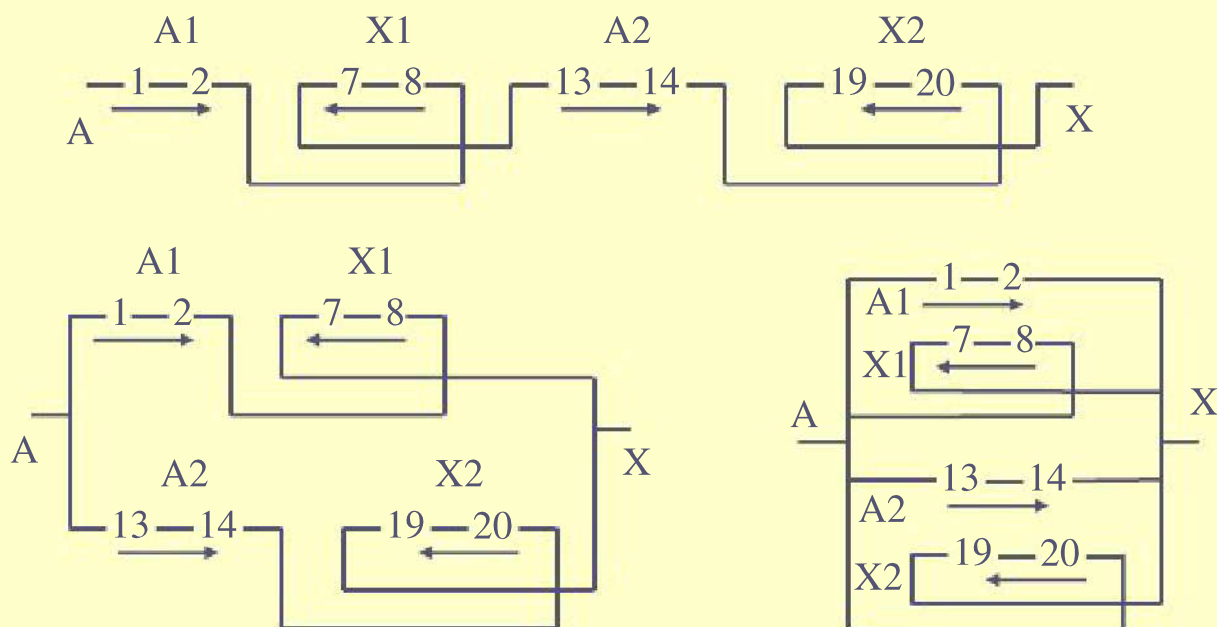
线圈节距

$$y = \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$



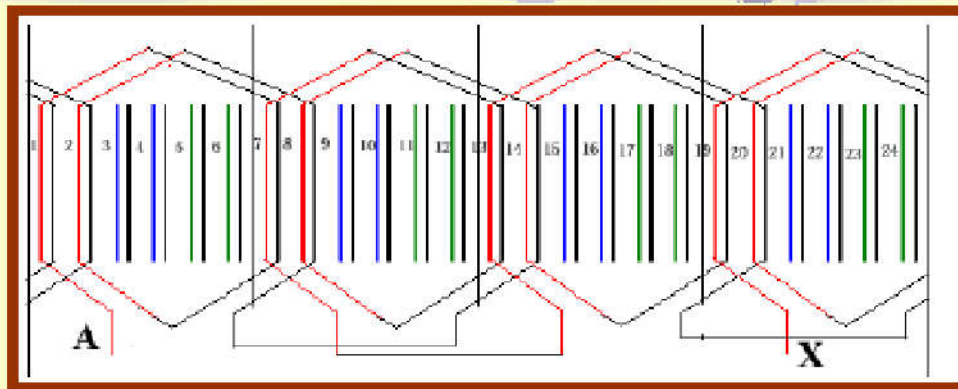
连相绕组

- 将属于同一相的 $2p$ 个线圈组连成一相绕组，并标记首尾端。
- 串联与并联，依照电势相加原则。最大并联支路数 $a=2p$
- 按照同样的方法构造其他两相。



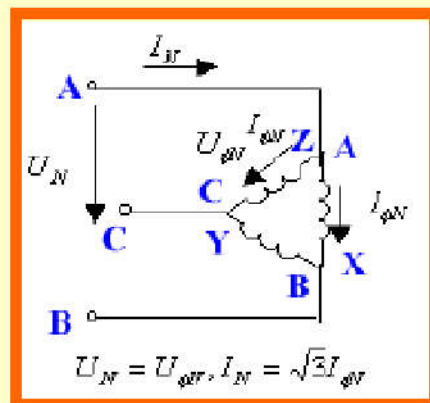


连三相绕组

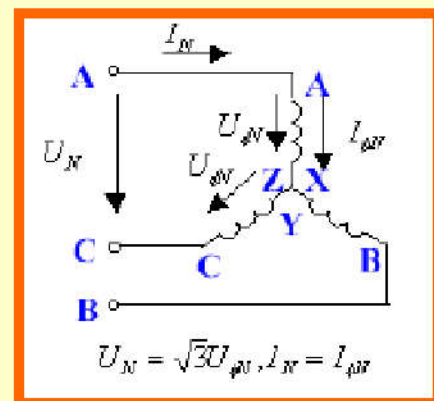


A相连接

将三个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组。



三相Δ连接



三相Y连接



§ 4-3 基波磁场下的绕组电动势

旋转磁场是交流电机工作的基础。在交流电机理论中有两种旋转磁场：

(1) 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**；

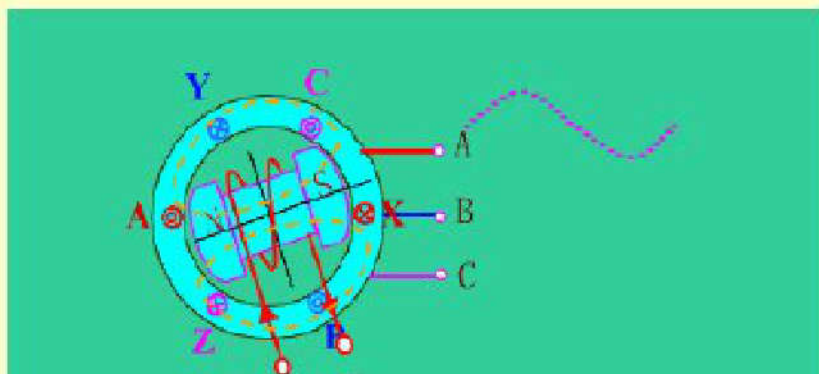
(2) 电气旋转磁场

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；

交流绕组处于旋转磁场中，并切割旋转磁场，产生感应电势。

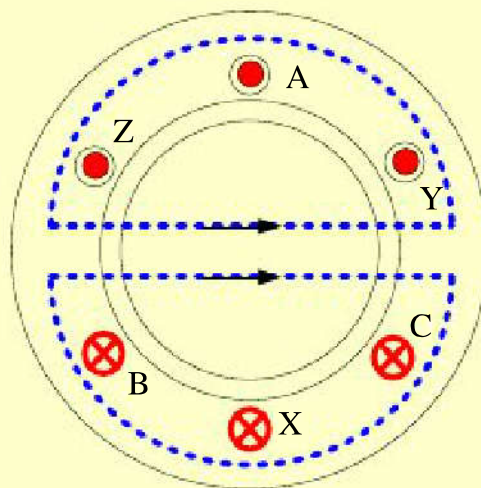


旋转磁场



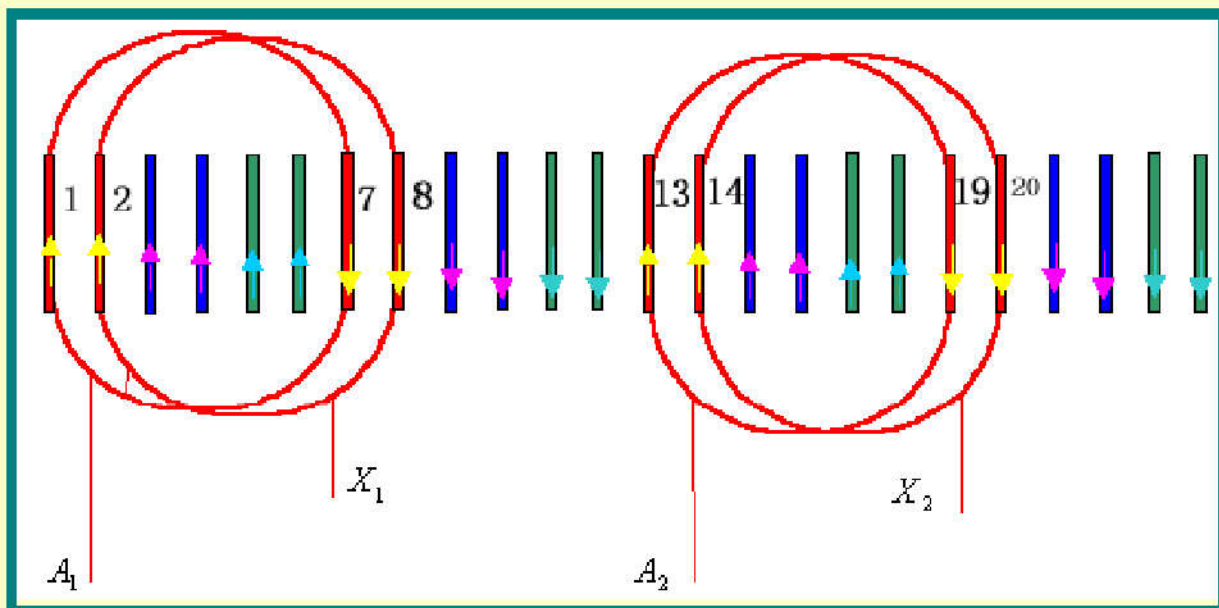
机械旋转磁场

电气旋转磁场



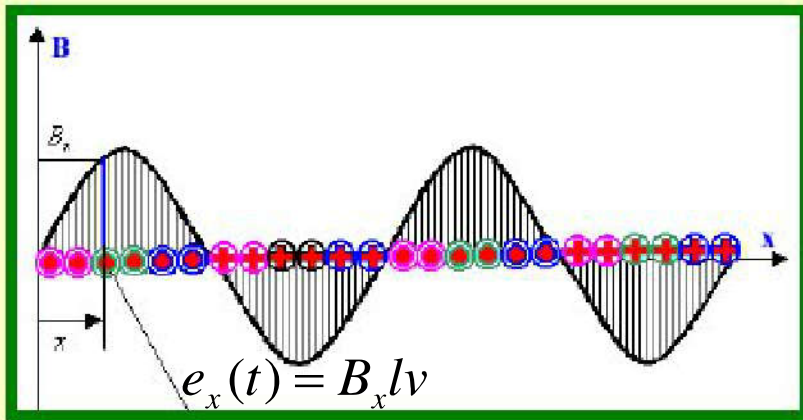


- 交流绕组的构成：导体--线圈--线圈组--一相绕组--三相绕组。



1、导体中的感应电势

• 感应电势的波形



• 感应电势随时间变化的波形和磁感应强度在空间的分布波形相一致。

• 只考虑磁场基波时，感应电势为正弦波。



感应电势的频率

- (1) 磁场转过一对极，导体中的感应电势变化一个周期；
- (2) 磁场旋转一周，转过 p （电机的极对数）对磁极；
- (3) 转速为 n （r/min）的电机，每秒钟转过 $(pn/60)$ 对极；
- (4) 导体中感应电势的频率 $f_1=(pn/60)\text{Hz}$.

•问题：四极电机，要使得导体中的感应电势为50Hz，
转速应为多少？

(r/min)

P	1	2	3	4	5	6
2P	2	4	6	8	10	12
n	3000	1500	1000	750	600	500



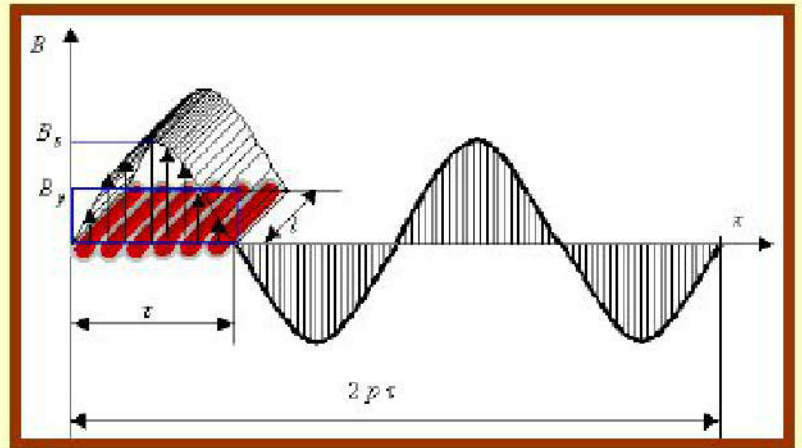
感应电势的大小

- 导体感应电势

$$E_{1\max} = B_{\delta} l v$$

- 导体与磁场的相对速度:

$$v = 2p\tau n/60$$



- 磁感应强度峰值和平均值之间的关系: $B_{\delta} = \frac{\pi}{2} B_{av}$;
- 感应电势最大值: $E_{1\max} = \frac{\pi}{2} B_{av} l \cdot 2\tau f = \pi f \cdot (l\tau) \cdot B_{av} = \pi f \Phi_m$
- 感应电势的有效值: $E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = 2.22 f \Phi_m$



导体感应电势注意：

绕组中均匀分布着许多导体，这些导体中的感应电势有效值，频率，波形均相同；但是他们的相位不相同。

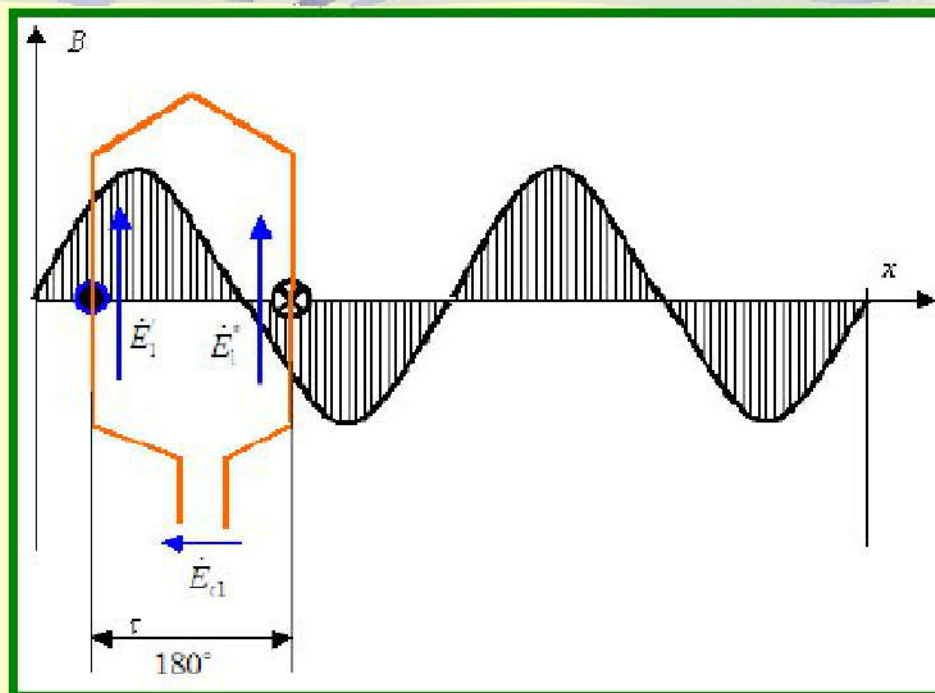
2、线圈中的感应电势

整距线圈中的感应电势

- 线圈的两个有效边处于磁场中相反的位置，其感应电势相差180电角度。
- 整距线圈的感应电势：

$$\dot{E}_{c1} = \dot{E}'_1 - \dot{E}''_1 = 2\dot{E}_1$$

- 考虑到线圈的匝数后： $E_{c1} = 4.44 f N_c \Phi_m$



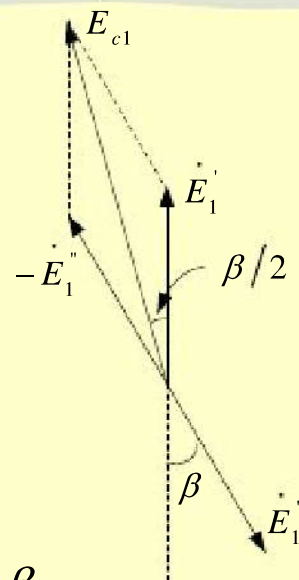


短距线圈中的感应电势

- 线圈的两个有效边在磁场中相距为 y ,
- 其感应电势相位差是 $180^\circ \cdot y / \tau$ 电角度。
- 短距角: $\beta = \frac{\tau - y}{\tau} \cdot 180^\circ$
- 短距线圈的感应电势:

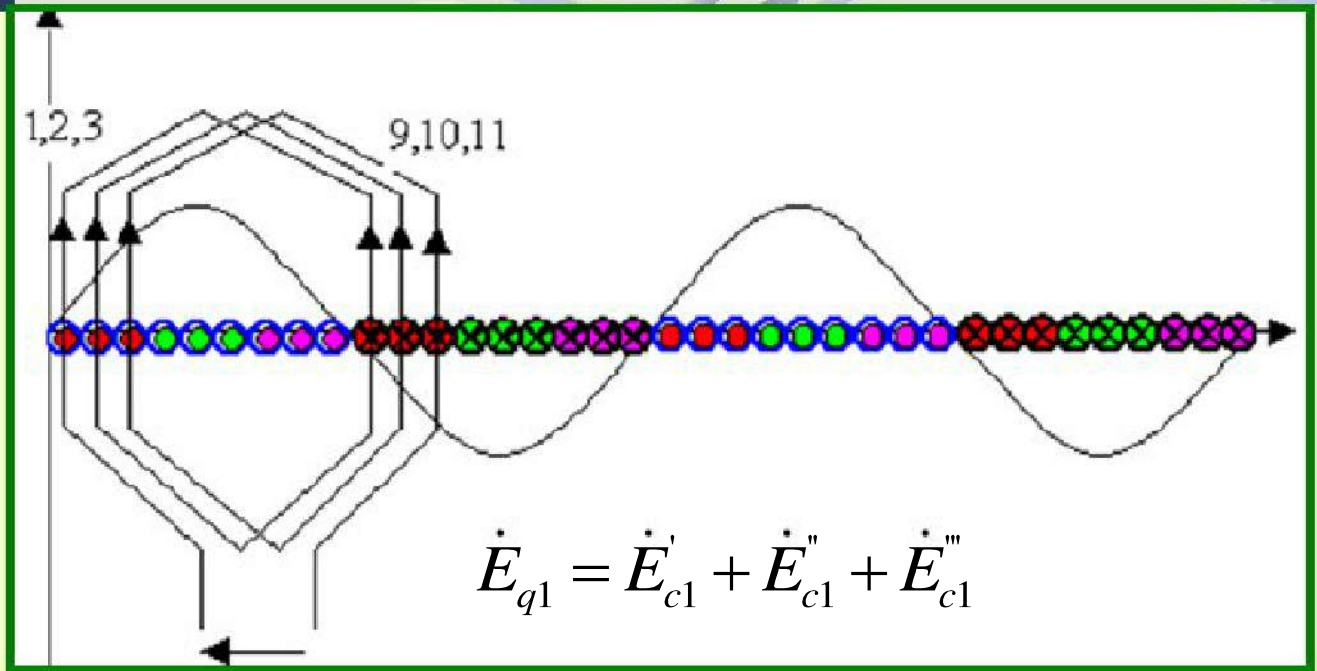
$$E_{c1} = 2E_1 \cos \frac{\beta}{2} = 4.44 f N_c \Phi_m k_{p1}$$

• 基波短距系数: $k_{p1} = \frac{\text{短距线圈电势}}{\text{整距线圈电势}} = \frac{2E_1 \cos \frac{\beta}{2}}{2E_1} = \cos \frac{\beta}{2} = \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ\right)$



- 短距系数小于1, 故短距线圈感应电势有所损失; 但短距可以削弱高次谐波.

线圈组的感应电势



- 每对极下属于同一相的q个线圈，构成一个线圈组。图中q=3
- 每个线圈的感应电势由两个线圈边的感应电势**矢量相加**而成。
- 整个线圈组的感应电势由所有属于该组的导体电势**矢量相加**。



线圈组的感应电势

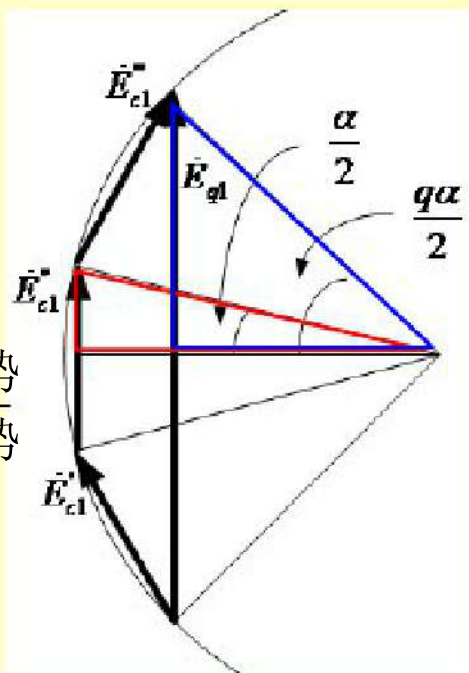
- 矢量式

$$\dot{E}_{q1} = \dot{E}'_{c1} + \dot{E}''_{c1} + \dot{E}'''_{c1}$$

- 基波分布系数:

$$k_{d1} = \frac{\text{分布绕组的感应电势}}{\text{集中绕组的感应电势}}$$

$$= \frac{E_{q1}}{qE_{c1}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$



$$E_{c1} = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$R = E_{c1} / 2 \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$E_{q1} = 2R \sin \frac{q\alpha}{2}$$

$$= qE_{c1} \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

- 线圈组的电势:
$$E_{q1} = q4.44 fN_c \Phi_m k_{p1} k_{d1}$$

$$= 4.44 fN_y \Phi_m k_{N1}$$



3、一相绕组的电势

单层绕组的相电势

- 单层绕组每对极每相 q 个线圈，组成一个线圈组，共 p 个线圈组。
- 若 p 个线圈组全部并联则相电势=线圈组的电势
- 若 p 个线圈组全部串联则相电势= p 倍 线圈组电势
- 实际线圈组可并可串，总串联匝数

$$N = \frac{\text{每相总匝数}}{\text{并联支路数}} = \frac{pqN_c}{a}$$

• 相电势：
$$E_{\phi 1} = 4.44 f N \Phi_m k_{d1}$$



双层绕组的电势

- 双层绕组每对极每相有 $2q$ 个线圈，构成两个线圈组，共 $2p$ 个线圈组；
- 这 $2p$ 个线圈组可并可串，总串联匝数

$$N = \frac{\text{每相总匝数}}{\text{并联支路数}} = \frac{2pqN_c}{a}$$

- 双层绕组要考虑到短距系数：

$$E_{\phi_1} = 4.44 fN\Phi_m k_{p1}k_{d1} = 4.44 fN\Phi_m k_{N1}$$

$$k_{N1} = k_{p1}k_{d1} \quad \text{为基波绕组系数：}$$



三相绕组的电势

- 三相绕组由在空间错开120电角度对称分布的三个单相绕组构成，三相相电势在时间上相差120度电角度。

- 三相线电势与相电势的关系：

三角形接法，线电势=相电势；

星形接法，线电势= $\sqrt{3}$ 相电势



三相绕组电势总结

- 正弦分布的以转速 n 旋转的旋转磁场，在三相对称交流绕组中会感应出三相对称交流电势；
- 感应电势的波形同磁场波形，为正弦波；
- 感应电势的频率为 $f_1=(pn/60)\text{Hz}$ ；
- 相电势的大小为 $E_{\phi_1} = 4.44 fN\Phi_m k_{p1}k_{d1} = 4.44 fN\Phi_m k_{N1}$
- 绕组系数 $k_{N1} = k_{p1}k_{d1}$

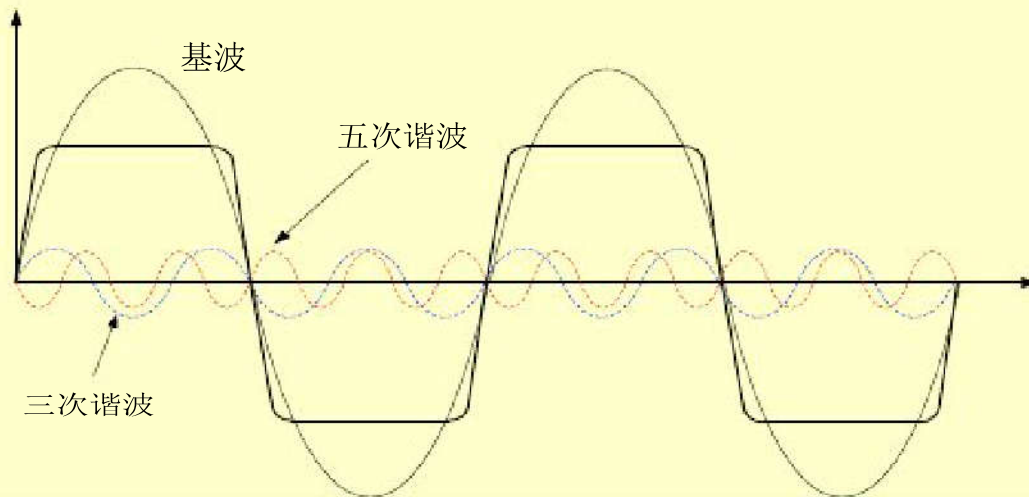
$$k_{p1} = \cos \frac{\beta}{2} = \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ\right) \quad k_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$



§ 4-4 相绕组中的高次谐波电动势

由于种种原因（定转子铁芯开槽、主极的外形、铁心的饱和、气隙磁场的非正弦分布），主极磁场在气隙中不一定是正弦分布，此时绕组的感应电动势中，除基波外还有一系列高次谐波电动势。

通常，主极磁场的分布与磁极中心线相对称，故气隙磁场中含有奇次空间谐波。 $v=1、3、5\dots$





1、主极磁场产生 ν 次谐波的性质

- 极对数为基波的 ν 倍，极距为基波的 $1/\nu$ ，随主极一起以同步转速在空间移动。即

$$p_\nu = \nu p; \quad \tau_\nu = \frac{\tau}{\nu}; \quad n_\nu = n_1$$

- 谐波频率： $f_\nu = \frac{p_\nu n_\nu}{60} = \nu \frac{pn_1}{60} = \nu f_1$

- 谐波电动势的有效值： $E_\nu = 4.44 f_\nu \cdot N \cdot k_{N\nu} \cdot \Phi_{m\nu}$

ϕ_ν 为 ν 次谐波的磁通量， $\Phi_{m\nu} = \frac{2}{\pi} B_{m\nu} \tau_\nu l$

$k_{N\nu}$ 为 ν 次谐波的绕组系数，

$$k_{N\nu} = k_{p\nu} \cdot k_{d\nu} = \left(\sin \nu \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ \right) \cdot \left(\frac{\sin \nu \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \nu \frac{\alpha}{2}} \right)$$



齿谐波电动势

有一种谐波 $\nu = \frac{Z}{p} \pm 1 = 2mq \pm 1$

与一对极下的齿数 Z/p 之间有特定的关系。称为齿谐波。

特点：谐波绕组因数恰等于基波的绕组因数。

- $\sin(2mq \pm 1) \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ = \sin(y \cdot 180^\circ \pm \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ) = \pm \sin \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ = \pm k_{p1}$
- $\frac{\sin(2mq \pm 1) \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin(2mq \pm 1) \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin(q \cdot 180^\circ \pm \frac{q\alpha_1}{2})}{q \sin(180^\circ \pm \frac{\alpha_1}{2})} = \pm \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \pm k_{d1}$



2、相电动势和线电动势大小

- 相电动势的有效值：

$$E_{\phi} = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots}$$

- 线电动势的有效值：

- 三相绕组接成Y或 Δ ，对于对称的三相系统，各相电动势的三次谐波时间上同相，幅值相等。
- Y连接，三次谐波互相抵消； Δ 连接，三次谐波形成环路， $E_{\phi 3}$ 完全消耗与环流的电压降。

线电动势：
$$E_{LY} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots}$$



3、谐波的弊害

高次谐波：

- 对于发电机，电动势波形变坏，降低供电质量；
- 本身杂散损耗增大，效率下降，温升增高；
- 输电线路中的高次谐波产生的电磁场,对邻近线路产生干扰。



4、消除谐波的方法

根据 $E_v = 4.44 f_v k_{Nv} \Phi_{mv}$

减小 k_{Nv} 或 Φ_{mv} 可降低谐波，对齿谐波采用其它措施。

(1) 采用短距绕组

适当地选择线圈的节距，使得某一次谐波的短距系数等于或接近零，达到消除或减弱该次谐波的目的。

$$k_{pv} = \sin v \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ = 0 \Rightarrow v \frac{y}{\tau} 90^\circ = k \cdot 180^\circ \Rightarrow y = \frac{2k}{v} \tau (k=1, 2, \dots)$$



跨距的选择 (1)

对于 $y = \frac{2k}{\nu} \tau$

例：为消除5次谐波，

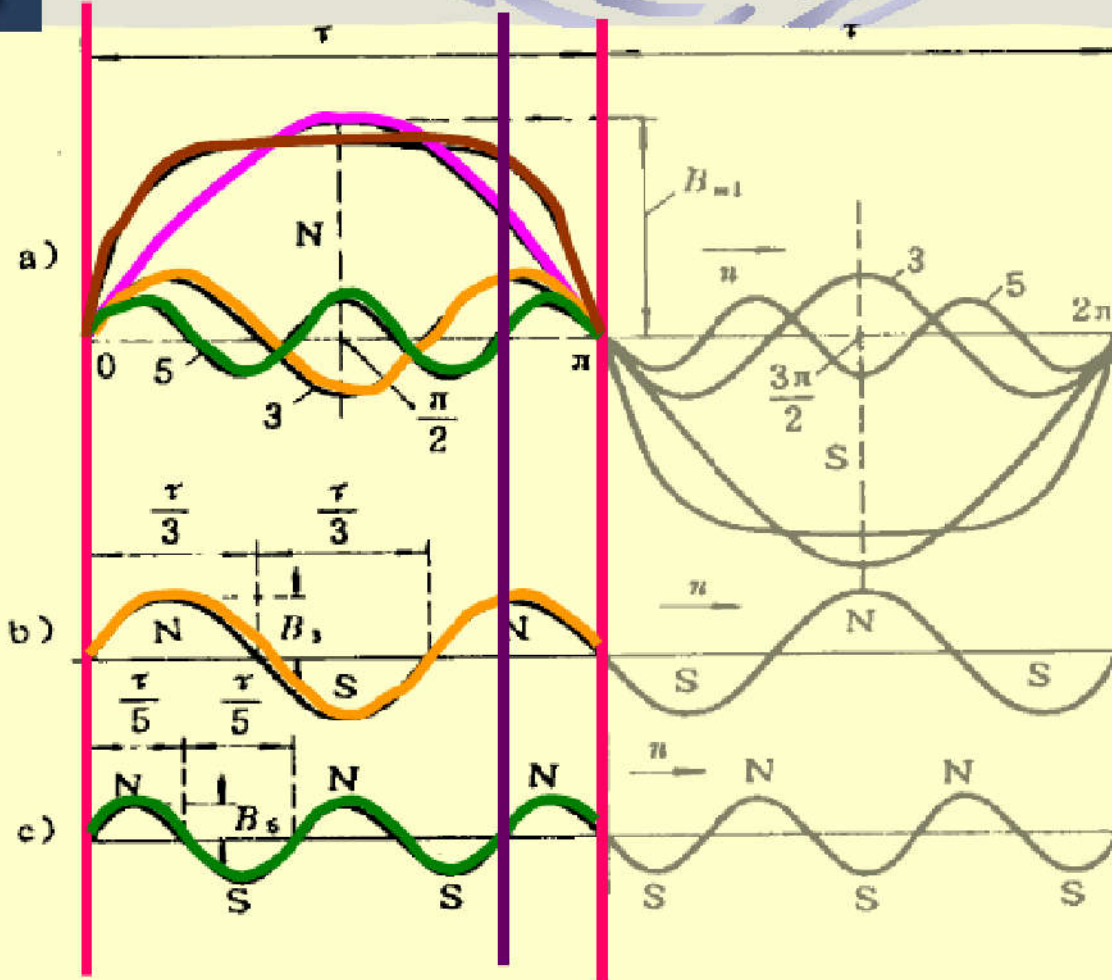
$$y = \frac{2}{5} \tau, \text{ 或 } y = \frac{4}{5} \tau, \dots$$

从不过分消除基波和用铜考虑，应选尽可能接近于整距的短节距。即 $2k = \nu - 1$ ，

此时， $y = \frac{\nu - 1}{\nu} \tau$

换言之，为了消除第 ν 次谐波，只要选比整距短 $\frac{\tau}{\nu}$ 的短距线圈

消除5次谐波的跨距选择





采用分布绕组

对于5次谐波，选用 $\frac{4}{5}\tau$ / 对于7次谐波，选用 $\frac{6}{7}\tau$

短距绕组往往采用 $\frac{5}{6}\tau$ ，主要考虑同时减小5次、7次谐波。

(2) 采用分布绕组

$$k_{dv} = \frac{\sin q \cdot \frac{v\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}$$

就分布绕组来说，每极每相槽数 q 越多，抑制谐波电动势的效果越好，但 q 增多，意味总槽数增多，电机成本提高。



采用Y接法

A、B、C三相绕组对基波磁场来说，在空间上彼此相差 120° 电角度，对于3次和它的奇倍数次谐波来说，三个相电动势是同相的。

采用Y接法可以消除3次及3的奇倍数次谐波电动势。



齿谐波的消除

采用短距和分布绕组的方法主要针对齿谐波以外的一般高次谐波，对于齿谐波，它的绕组系数等于基波绕组系数，不能采用通用的短距和分布绕组的方法。

对于齿谐波，可采用斜槽，采用分数槽的方法进行消除。

$$q = \frac{Z}{2mp} = b + \frac{c}{d} = \frac{bd+c}{d}$$

d个极区内含有bd+c个槽。
具有很大的分布作用

另外也可在电机设计过程中，通过减小槽开口和槽形设计等方法进行高次谐波的减弱或消除。



❖ 作业:

p112习题

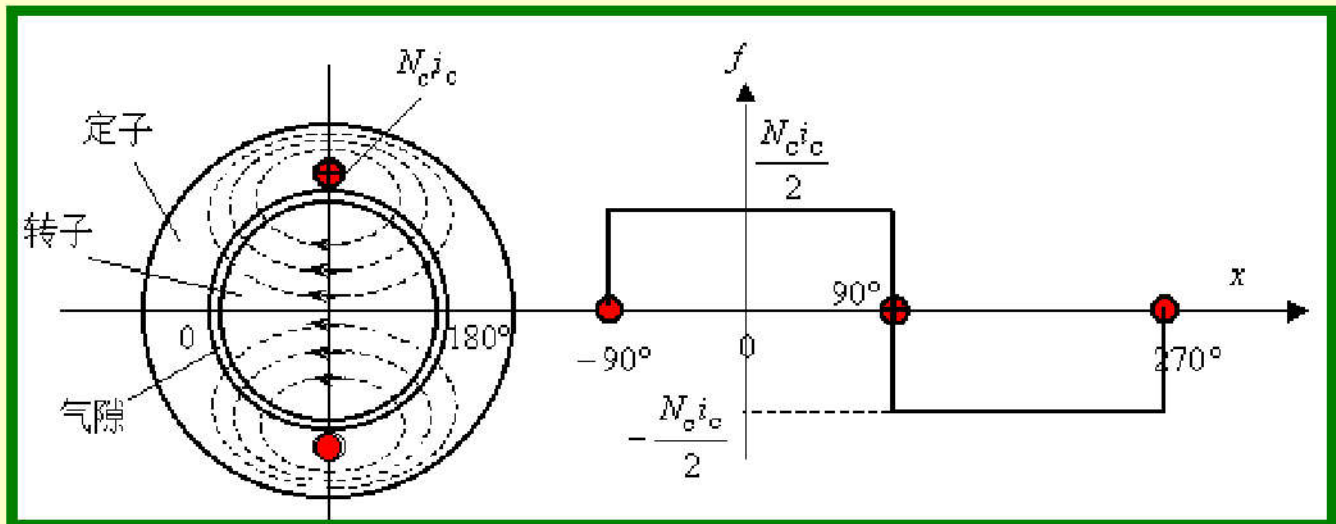
6-2, 6-3 , 6-7



§ 4-5 交流电机定子单相绕组的磁动势

1、单个整距集中绕组的磁势

- 一个整距线圈在异步电机中产生的磁势



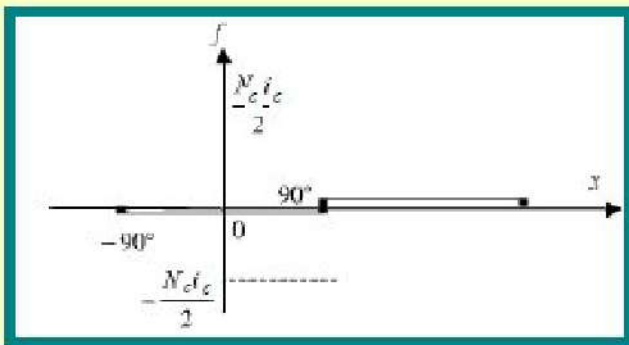


矩形脉振磁势

- 磁力线穿过转子铁心，定子铁心和两个气隙
- 相对于气隙而言，由于铁心磁导率极大，其上消耗的磁势降可以忽略不计，线圈在一个气隙上施加的磁势为：

$$f_c = \frac{1}{2} N_c i_c$$

- 如果通过线圈的电流为正弦波，则矩形波的高度也将按正弦变化。



- 一个位置固定，幅值随时间按正弦变化，**矩形脉振磁势**。



矩形波脉振磁势的分解

- 脉振磁势可以表示为

$$f_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t = F_c \cos \omega t \quad F_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \text{ 为幅值}$$

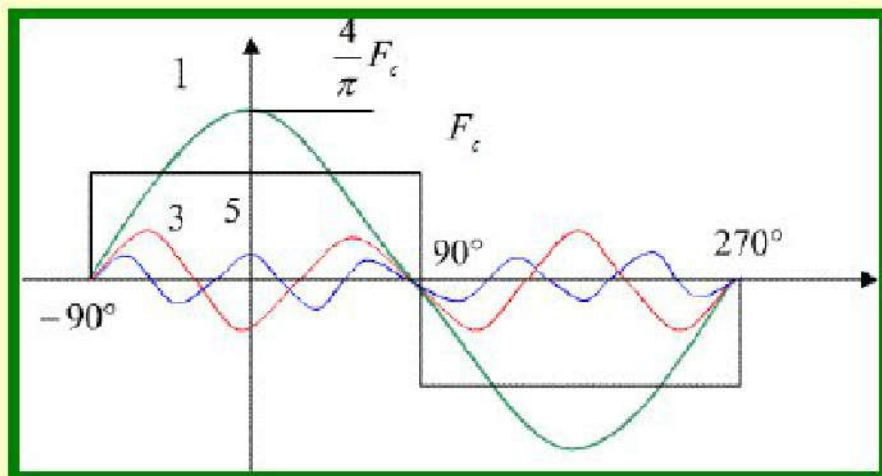
- 按照富立叶级数分解的方法可以把矩形波分解为基波和一系列谐波

- 基波幅值为:

$$F_{c1} = \frac{4}{\pi} F_c = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c = 0.9 N_c I_c$$

- 高次谐波的幅值为

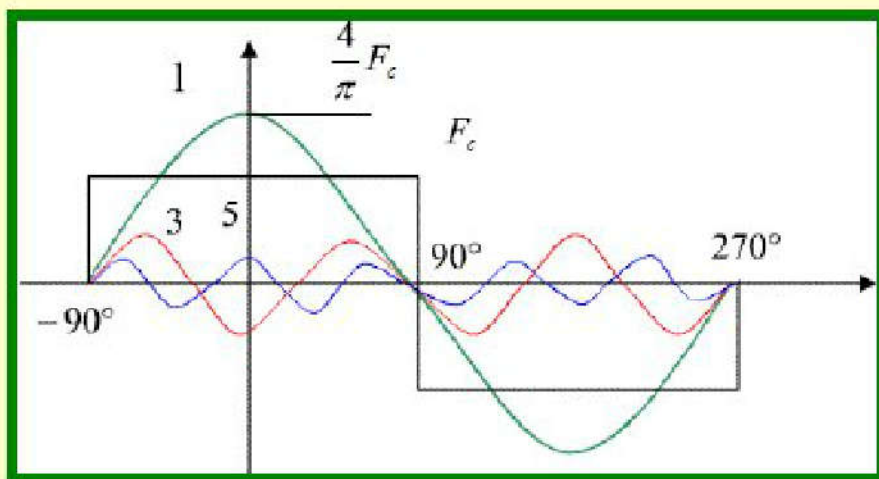
$$F_{cv} = \frac{1}{v} F_c = \frac{1}{v} \cdot 0.9 N_c I_c$$





基波在空间按余弦分布；在时间上，任何一个位置的磁势都按余弦变化。所以基波是一个余弦分布的**余弦脉振磁势**。其表达式为：

$$f_{c1} = F_{c1} \cos x \cos \omega t$$



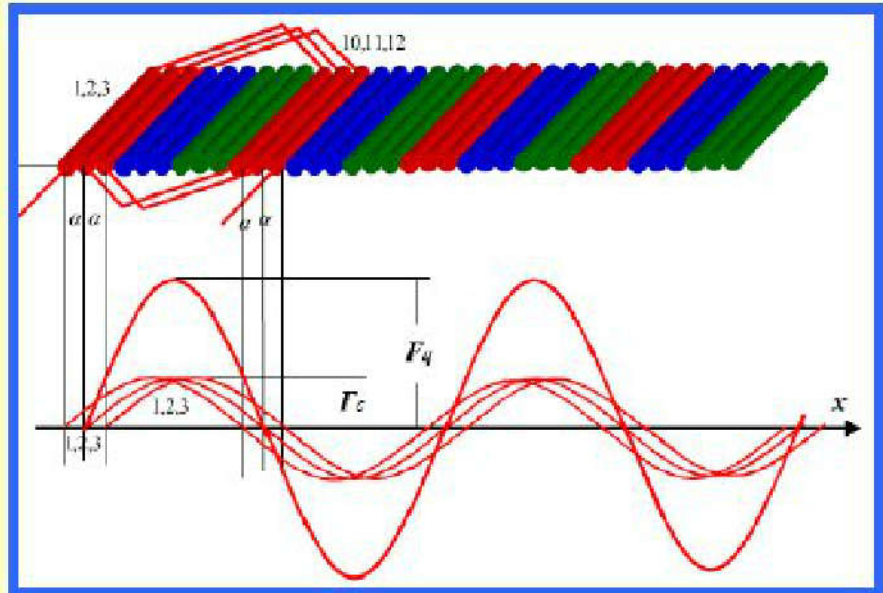
2、 (1) 整距分布绕组的磁势

- 由 q 个线圈构成的线圈组，由于线圈与线圈之间错开一个槽距角，称为分布绕组。
- 取单个线圈的基波进行分析（为余弦脉振磁势）， q 个余弦脉振磁势在空间依次错开一个槽距角；

- 线圈组的磁势为：

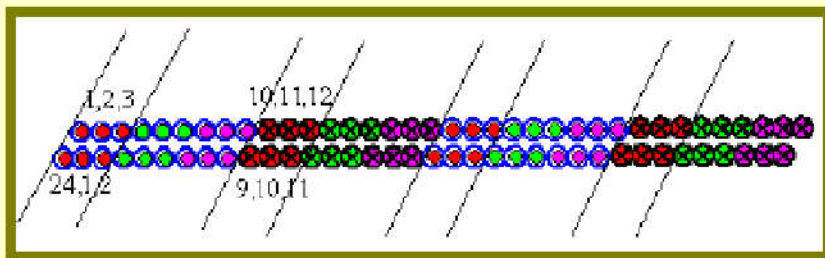
$$F_{q1} = qF_{c1}k_{d1} = 0.9I_c qN_c k_{d1}$$

$$k_{d1} = \frac{F_{q1}}{qF_{c1}} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$



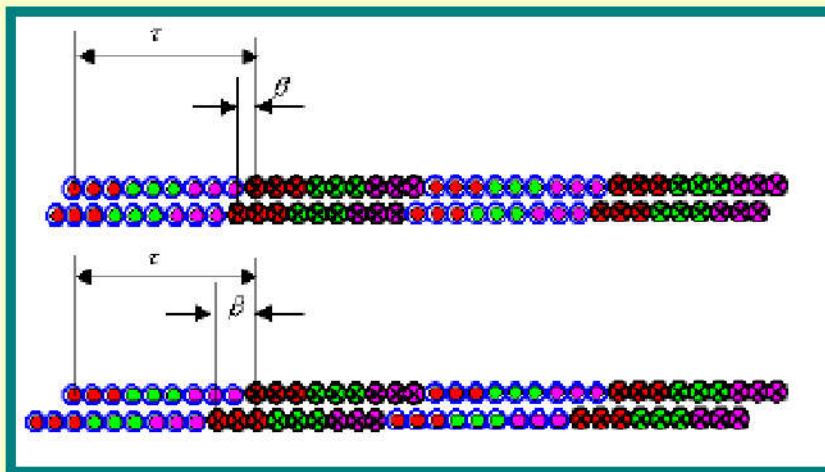


(2) 双层短距绕组的磁势



- 双层整距绕组可以等效为两个整距单层绕组

- 两个等效单层绕组在空间分布上错开一定的角度，这个角度等于短距角；



- 双层短距绕组的磁势等于错开一个短距角的两个单层绕组的磁势在空间叠加。

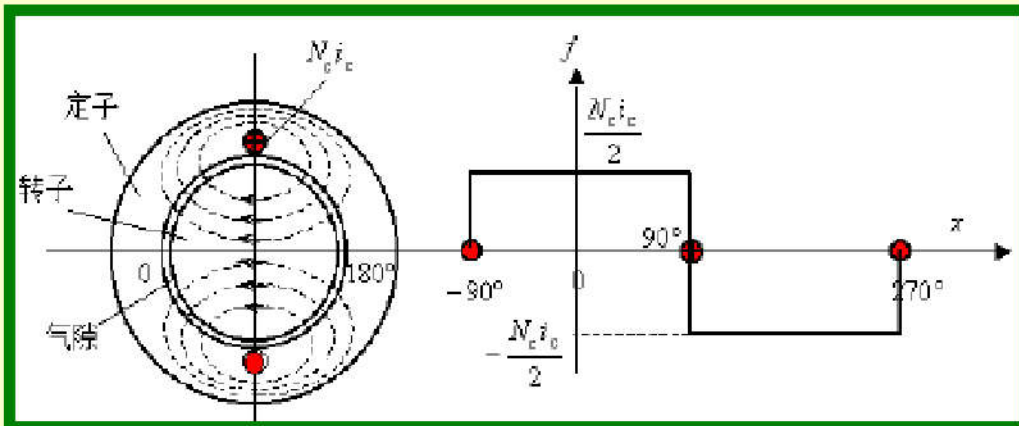


•双层短距绕组的磁势为：

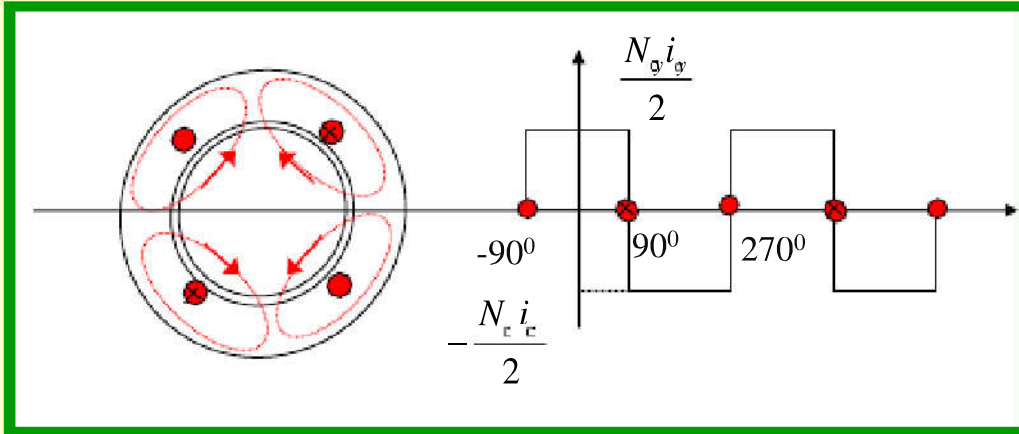
$$F_{m1} = 2F_{q1} \cos \frac{\beta}{2} = 2F_{q1} k_{p1} = 0.9I_c (2qN_c) k_{d1} k_{p1}$$

$$k_{p1} = \frac{2F_{q1} \cos \frac{\beta}{2}}{2F_{q1}} = \cos \frac{\beta}{2} = \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ\right)$$

3、单相绕组磁势的统一表达式



• 如果只看每对极产生的磁动势，与上面的两极电机完全一样，所以多极电机只研究每对极磁动势就行了。



• 一相绕组的总磁动势平均作用于各个磁极，单相绕组磁动势，不是一相绕组的总磁动势，而是作用于一个磁极的磁动势。



$$F_{m1} = 0.9 I_c (2qN_c) k_{d1} k_{p1}$$

- 为了统一表示相绕组的磁势，引入每相电流 I 、每相串联匝数 N 等概念。

$$I_c = \frac{I}{a}; \quad N = \frac{2pqN_c}{a} \text{ (双层绕组)}; \quad N = \frac{pqN_c}{a} \text{ (单层绕组)}$$

- 统一公式：

$$F_{m1} = 0.9 \frac{I}{a} \times 2q \times \frac{aN}{2pq} \times k_{d1} k_{p1} = 0.9 \cdot \frac{I \cdot N}{p} \cdot k_{N1}$$

- 单相绕组产生的基波磁势仍然是余弦脉振磁势，磁势幅值位置与绕组轴线重合，时间上按余弦规律脉振。

$$f_1 = F_{m1} \cos x \cos \omega t$$

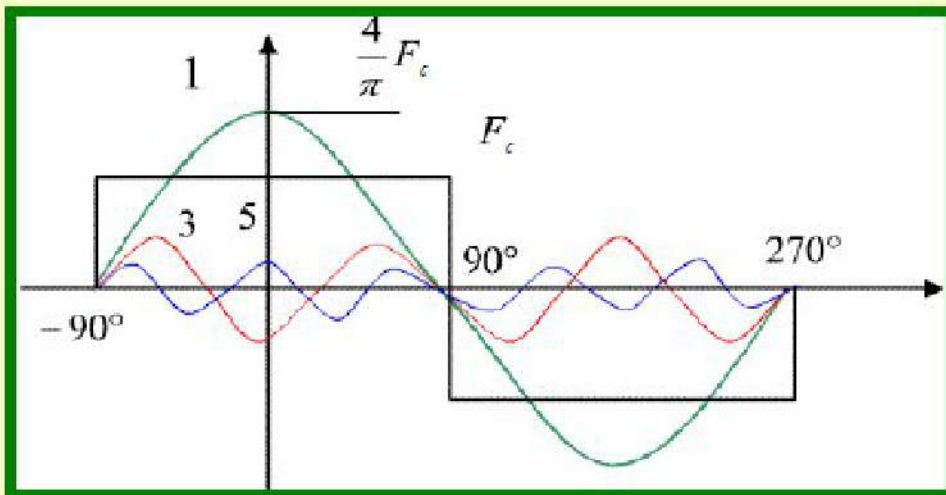


考虑单相绕组电流产生的谐波磁势，其统一表达式为：

$$F_{mv} = \frac{1}{v} \cdot 0.9 \frac{I}{a} \times 2q \times \frac{aN}{2pq} \times k_{dv} k_{pv} = 0.9 \cdot \frac{I \cdot N}{v \cdot p} \cdot k_{mv}$$

- 单相绕组产生的谐波磁势也是余弦脉振磁势，时间上按余弦规律脉振。

$$f_v = F_{mv} \cos v x \cos \omega t$$





单相磁势的结论

- ❖ 单相绕组的磁势是脉振磁势，可分解为一系列谐波，每个谐波都是空间位置不变，但波幅按同一频率交变的脉振波；
- ❖ 谐波磁势随时间而脉振，它既是空间函数又是时间函数；
- ❖ 谐波磁势的绕组系数和谐波电势的绕组系数相同，反映了电势计算和磁势计算的相似性，时间波和空间波的统一性；
- ❖ 对于正常接法的整数槽 p 对极绕组，相绕组磁势包含极对数为 p 的基波和极对数为 νp 的 ν 次奇次谐波；
- ❖ 对正常接法的绕组，相绕组磁势的基波及各次谐波波幅必在相绕组的轴线（既构成相绕组的线圈组的中心线）上；
- ❖ 在削弱磁势高次谐波，与削弱电势中的谐波方法相似，可采用短距和分布绕组的方法进行。



脉振磁动势和旋转磁动势

单相正弦脉振磁势的分解：

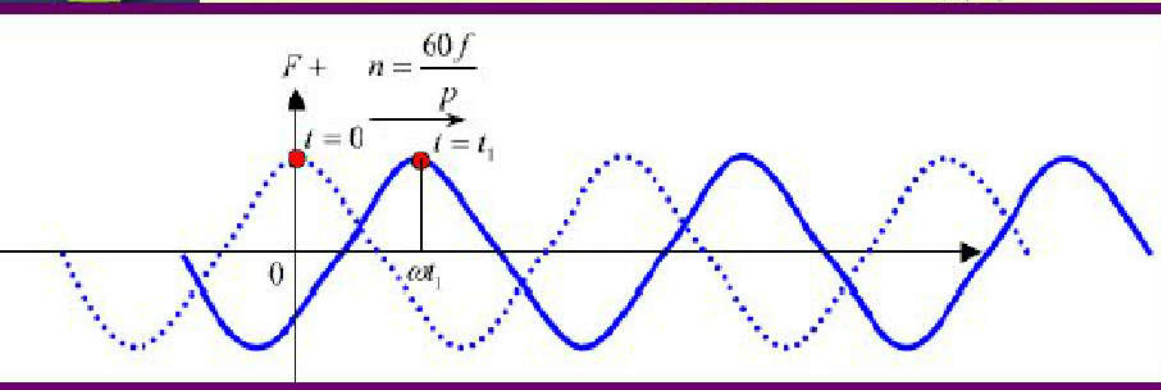
• 设A相绕组通过电流： $i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t$

• 其基波磁势为： $f_{A1} = F_{m1} \cos x \cos \omega t$

$$\begin{aligned} f_{A1} &= \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x + \omega t) \\ &= F_+ \cos(x - \omega t) + F_- \cos(x + \omega t) \end{aligned}$$

• F_+ 最高点的运行轨迹为 $x = \omega t$ ，即最高点的位置随时间以角速度 ω 运动。

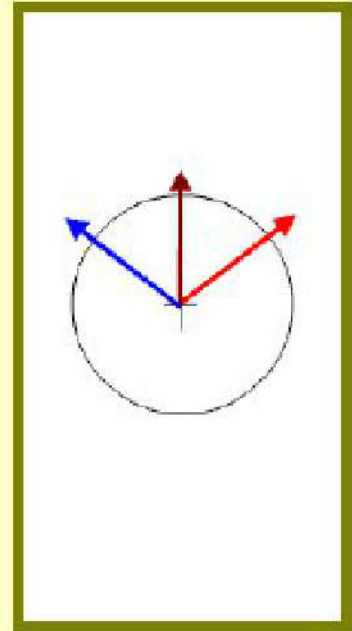
• F_- 最高点的运行轨迹为 $x = -\omega t$ ，即最高点的位置随时间以角速度 $-\omega$ 运动。



- F+波是一个旋转波，在气隙空间以角速度 ω 旋转，转速为：

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

- 单相正弦脉动磁势可以分解为两个转向相反的旋转磁势。





§ 4-6 三相绕组的磁动势—旋转磁势

• 三相对称电流：

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

• 三相对称电流通过三相对称绕组时各自产生的磁势：

$$f_{A1} = F_{m1} \cos x \cos \omega t = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x + \omega t)$$

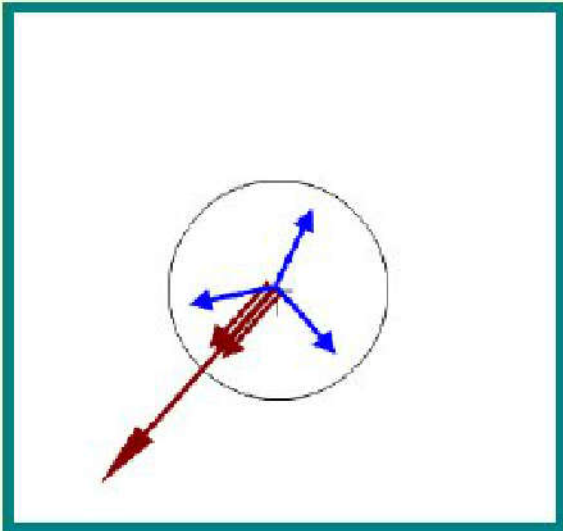
$$f_{B1} = F_{m1} \cos(x - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x + \omega t - 240^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{m1} \cos(x - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) = \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m1} \cos(x + \omega t - 480^\circ)$$



•三相合成磁势为

$$f_1 = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \frac{3}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t)$$



•三相对称交流绕组通过三相对称电流时将产生旋转磁势。



一、旋转磁势

• 三相对称交流绕组通过三相对称交流电流时，三个反向旋转磁势在空间错开120电角度相互抵消，三个正向旋转磁势在空间同相位，合成一个圆形旋转磁势。

• 圆形旋转磁势的幅值为：

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{m1} = \frac{3}{2} \cdot 0.9 \cdot \frac{I \cdot N}{p} \cdot k_{N1} = 1.35 \frac{I \cdot N}{p} \cdot k_{N1}$$

• 圆形旋转磁势的转速为： $n_1 = \frac{60f}{p}$

• 当某相电流达到最大值时，旋转磁势的波幅刚好转到该线绕组的轴线上，旋转磁势的转向：由超前电流的相转向滞后电流的相。



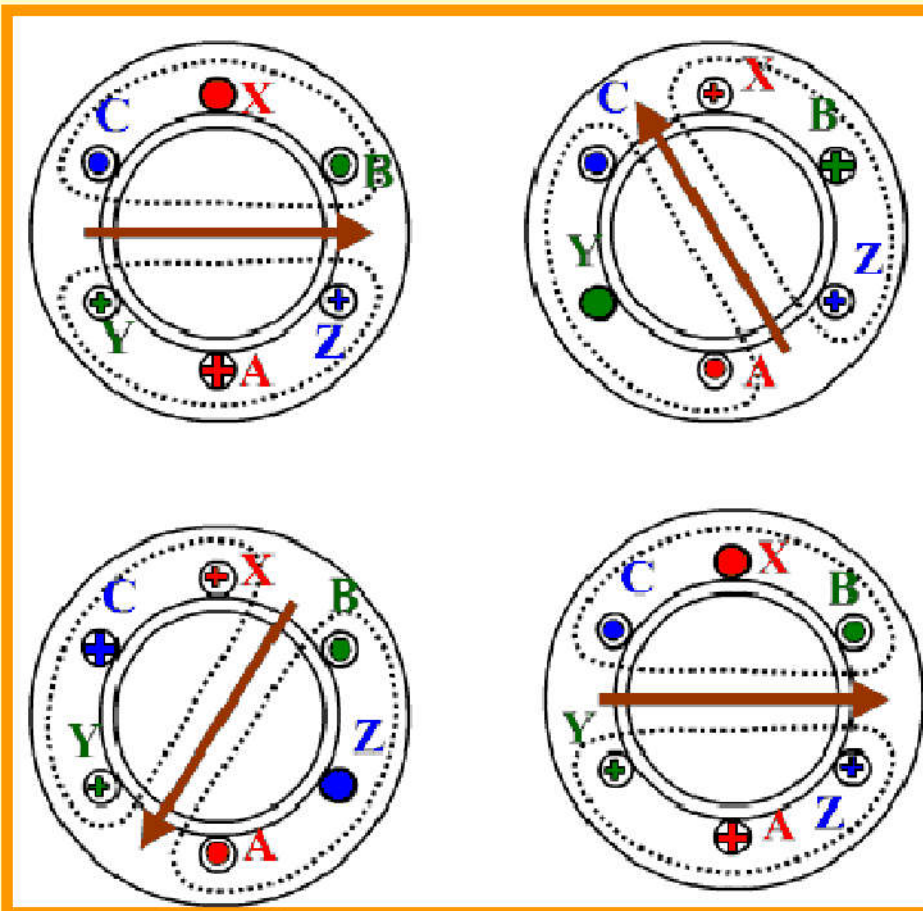
旋转磁势

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

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

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

$$f_1 = \frac{3}{2} F_{m1} \cos(x - \omega t)$$



- 如何改变旋转磁场的转向?
- 调换任意两相电源线 (改变相序)



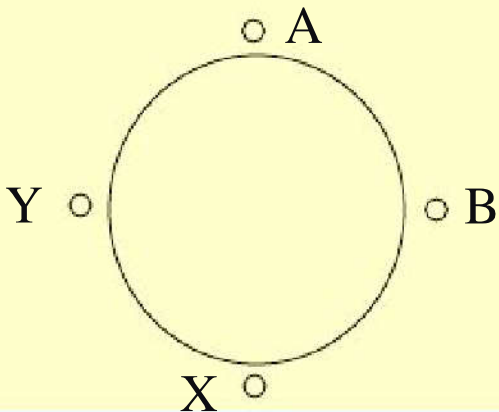
任意m相对称绕组产生的磁势

- 对于任意m相对称绕组，与三相绕组的分析类似。只是各相电流初相角和相轴的空间相角不同。
- 结论：**反转磁动势相消为零，正转磁动势同相相加，对称m相绕组的基波合成磁动势的幅值等于每相脉振磁动势振幅的m/2倍。

$$F_{1m} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{N1}}{p} I$$

思考题：

- 1、**两相绕组：**绕组空间相差 90° 度，通入电流时间上相差 90° 度，产生磁势的性质？通入电流时间上相差 α （不等于 90° ）度，产生磁势的性质？
- 2、三相对称绕组中通入零序电流，产生合成磁势的性质如何？





二、椭圆形旋转磁势

❖ 当对称绕组内通过对称三相电流时，三相合成磁动势的基波分量是一个以恒速 ω 在空间旋转的恒幅正弦波，其波幅的轨迹为一圆，为圆形旋转磁动势。

❖ 如果电流不对称，则产生的磁势是椭圆形旋转磁势。

三相电流不对称时，利用对称分量法将一组不对称的三相电流分解为正序分量、反序分量以及零序分量。

$$i_A = \sqrt{2}I_+ \sin \omega t + \sqrt{2}I_- \sin \omega t + \sqrt{2}I_0 \sin \omega t$$

$$i_B = \sqrt{2}I_+ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}I_- \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \sqrt{2}I_0 \sin \omega t$$

$$i_C = \sqrt{2}I_+ \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \sqrt{2}I_- \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}I_0 \sin \omega t$$

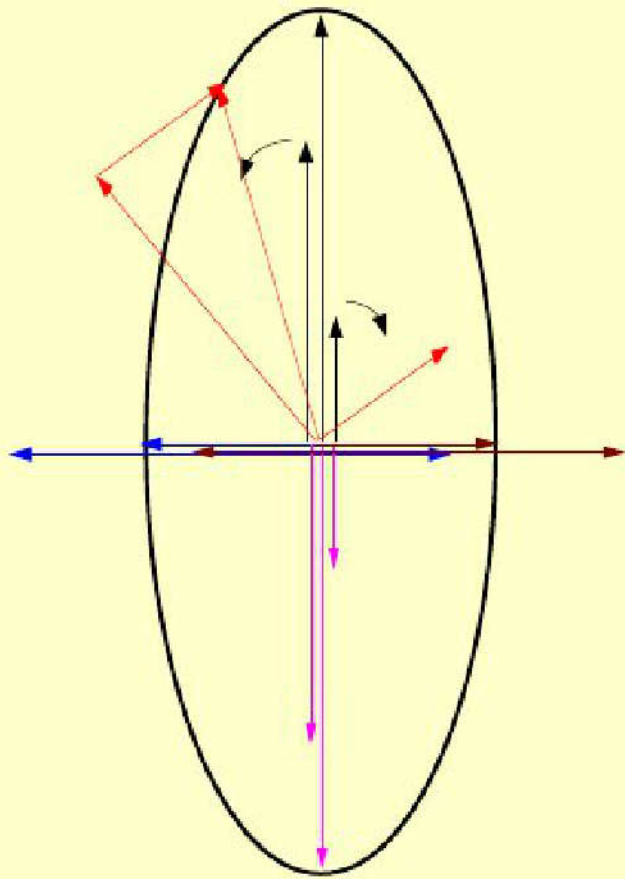


- ✓ 三相正序电流 I_+ 产生正向的基波旋转磁势，
- ✓ 三相负序电流 I_- 产生反向的基波旋转磁势；
- ✓ 三相零序电流 I_0 产生的合成磁势为零。

不对称的三相电流通过对称的三相绕组时，产生的基波旋转磁势为：

$$f(t, x) = 1.35 \frac{N_1 I_+}{p} k_{N1} \sin(\omega t - \alpha) + 1.35 \frac{N_1 I_-}{p} k_{N1} \sin(\omega t + \alpha)$$

两种磁势的幅值不相等，沿相反方向旋转，合成磁势为一幅值变化的椭圆形旋转磁势。

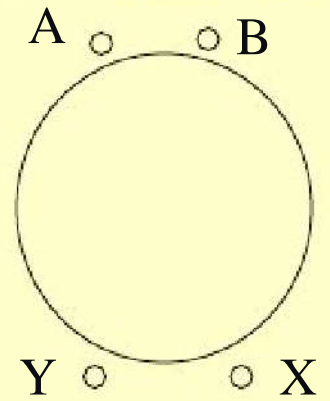


椭圆形的旋转磁势是磁势的普遍形式。

- 当正向旋转磁势或反向旋转磁势任何一个为零时，便是圆形旋转磁势；
- 当正反向旋转磁势相等时，是脉振磁势；

思考题：

1、两相绕组空间错开一定角度，电流时间上错开一定角度，产生椭圆形旋转磁势。



2、三相对称绕组外接三相对称电压，说明下列情况下合成磁势的性质：

- (1) 星形连接绕组一相断线；
- (2) 三角形连接绕组内部一相断线；
- (3) 三角形连接绕组外部一相断线。



三、定子三相绕组建立的磁场

- 在气隙中以同步速 n_1 旋转的基波磁动势及一系列以各种不同转速旋转的谐波磁动势在气隙中形成各自的旋转磁场。基波磁场为：

$$B_1(x, t) = \mu_0 \frac{f_1(x, t)}{\delta} = B_{m1} \cos(x - \omega t)$$

- 若气隙均匀，基波磁场也是以同步速旋转的圆形磁场；
- 忽略铁耗，基波磁密波的幅值位置与产生它的基波磁动势波的幅值位置重合；
- 考虑铁耗，基波磁密波的幅值位置落后于产生它的基波磁动势波的幅值位置一个铁耗角。

四、三相绕组的合成 ν 次谐波磁动势

(1) 三次谐波磁动势的极对数是基波三倍，三相绕组各自建立的三次谐波磁动势表达式

$$f_{A3} = F_{m3} \cos 3x \cos \omega t$$

$$f_{B3} = F_{m3} \cos 3(x - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) = F_{m3} \cos 3x \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$f_{C3} = F_{m3} \cos 3(x - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) = F_{m3} \cos 3x \cos(\omega t - 240^\circ)$$

三相合成的三次谐波磁动势

$$f_3 = f_{A3} + f_{B3} + f_{C3} = 0$$

三相合成的三次谐波磁动势为零。

这个结论可推广到 $\nu = 6k - 3$ 的谐波次数。



五次谐波磁势

(2) 五次谐波磁动势的极对数是基波的五倍，三相绕组各自建立的五次谐波磁动势表达式

$$f_{A5} = F_{m5} \cos 5x \cos \omega t = \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x + \omega t)$$

$$\begin{aligned} f_{B5} &= F_{m5} \cos 5(x - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x - \omega t - 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x + \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C5} &= F_{m5} \cos 5(x - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x - \omega t - 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{m5} \cos(5x + \omega t) \end{aligned}$$

三相合成五次谐波磁动势

$$f_5 = \frac{3}{2} F_{m5} \cos(5x + \omega t)$$

五次谐波磁动势性质：

•转速为基波转速的1/5.;

•转向与基波转向相反;

•幅值： $F_5 = \frac{3}{2} F_{m5} = \frac{1}{5} \times 1.35 \frac{N_1 k_{N5}}{p} I_m$

结论可推广到 $\nu = 6k - 1$ 次的谐波。



七次谐波磁势

(3) 七次谐波磁动势的极对数是基波的七倍，三相绕组各自建立的七次谐波磁动势表达式

$$f_{A7} = F_{m7} \cos 7x \cos \omega t = \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x + \omega t)$$

$$\begin{aligned} f_{B7} &= F_{m7} \cos 7(x - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x + \omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{C7} &= F_{m7} \cos 7(x - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x - \omega t) + \frac{1}{2} F_{m7} \cos(7x + \omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$

三相合成七次谐波磁动势

$$f_7 = \frac{3}{2} F_{m7} \cos(7x - \omega t)$$

七次谐波磁动势性质:

• 转速为基波转速的1/7.;

• 转向与基波转向相同;

• 幅值 $F_7 = \frac{3}{2} F_{m7} = \frac{1}{7} \times 1.35 \frac{N_1 k_{N7}}{p} I_m$

结论可推广到 $\nu = 6k + 1$ 次的谐波。



思考题：

- 1、试比较机械旋转磁场和电气旋转磁场高次谐波的旋转速度。
- 2、试计算机械旋转磁场和电气旋转磁场高次谐波在定子绕组中感应电动势的频率。



作业:

p130思考题

7-3, 7-4, 7-8, 7-9

p130习题

7-2, 7-3(1)(2)(3), 7-6



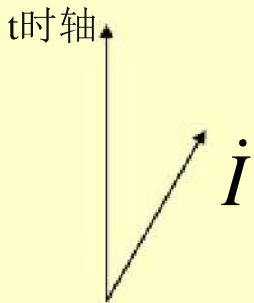
补充：交流电机的时空矢量图

一、时间矢量

- 在时间相量图中，一个频率为 f ，随时间按余弦规律变化的物理量可以用一个长度等于有效值 I ，角速度 $\omega = 2\pi f$ 的旋转矢量表示；

$$\text{如对于 } i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi) \quad \dot{I} = I \angle \varphi$$

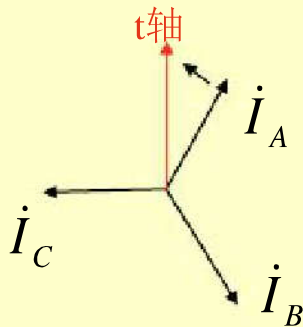
当取纵轴为为时间参考轴、任何瞬间旋转矢量在时轴上的投影，即为缩小 $\sqrt{2}$ 倍的该物理量的瞬时值；



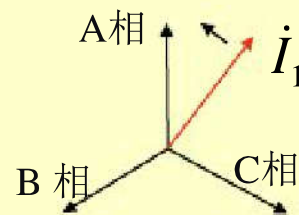
原则上，时轴可按需任意取，但时轴取得不同，计算时间的起点也不同，一个时间相量只有一根时轴。



- 三相电机中，对称的三相电流 i_A 、 i_B 、 i_C 如果采用一根时轴，则用互差 120° 的旋转相量 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 来表示。
- 为减少相量的数目，将各相对称的同一物理量用一根统一的时间量表示，而每相的时间相量都以该相的相轴为时轴



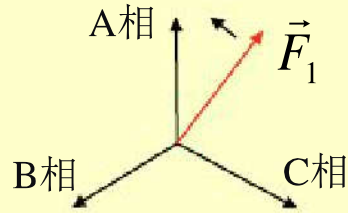
单时轴多相量



多时轴单相量

二、空间矢量

- 在空间矢量图中，任意一个沿空间按余弦规律分布的物理量，如绕组磁势的基波，用一个空间矢量 \vec{F}_1 表示。
- \vec{F}_1 和三相相轴之间的夹角分别表示磁势波的正波幅在空间上与三相相轴的电角度，用以说明空间相量具体位置的相轴，只需画出一相就够了。



- 利用统一时间相量的概念，将时间相量和空间相量联系在一起，画在同一张矢量图上，即为交流电机理论中的**时—空相量图**。



三、电机时-空相量图特点

取各相相轴作为该相的时轴，假设 $t=0$ 时， $i_A = +I_m$

• 电流相量 \dot{I}_1 与 \vec{A} 重合。据旋转磁场理论，由定子三相电流所产生的三相合成基波磁势幅值与 \vec{A} 重合，即 \vec{F}_1 与 \vec{A} 重合，与 \dot{I}_1 重合。

• 由于时间相量 \dot{I}_1 的角频率 ω 与空间矢量 \vec{F}_1 的电角频率 ω_1 相等，在任意时刻， \vec{F}_1 与 \dot{I}_1 都重合，称 \vec{F}_1 与 \dot{I}_1 在时空图上同相。

• 时-空图上： \vec{F}_1 作用下，建立气隙基波旋转磁场 \vec{B}_1

不计及铁耗， \vec{B}_1 幅值与 \vec{F}_1 重合；

计及铁耗， \vec{B}_1 幅值滞后 \vec{F}_1 一个 α_{Fe} 角。

• \vec{B}_1 与 \vec{A} 重合时， B_1 穿过A相绕组的磁通达最大，代表定子对称三相磁通的 Φ_m 与 \vec{A} 重合，与 \vec{B}_1 重合，两者 ω 相等，任何时刻 Φ_m 与 \vec{B}_1 同相。

• 由 \vec{B}_1 所生的定子对称三相电势的统一电势相量 \dot{E}_1 落后 Φ_m 90° 。



思考题：

- 1、证明：任一圆形旋转磁势可以分解为两个振幅相等的脉振磁动势，他们在空间上相差90度，在时间上相差90度。
- 2、证明：任一椭圆形旋转磁动势可以分解为两个振幅不相等的脉振磁动势，他们在空间上相差90度，在时间上相差90度。