

第十章 交流电机的绕组和电动势

10-1 交流电机的工作原理，对绕组的基本要求

10-3 三相单层分布绕组

10-4 三相双层分布短距绕组

10-5 交流绕组的感应电动势

小结

第十章 交流电机的绕组和电动势

■基本要求:

- 1.了解交流绕组的基本概念
- 2.掌握利用电动势星形相量图分析三相绕组的方法
- 3.掌握三相单层分布绕组和三相双层叠绕组的连接规律
- 4.理解基波绕组因数的物理意义，掌握交流绕组基波电动势的计算

10-1 交流电机的工作原理，对绕组的基本要求

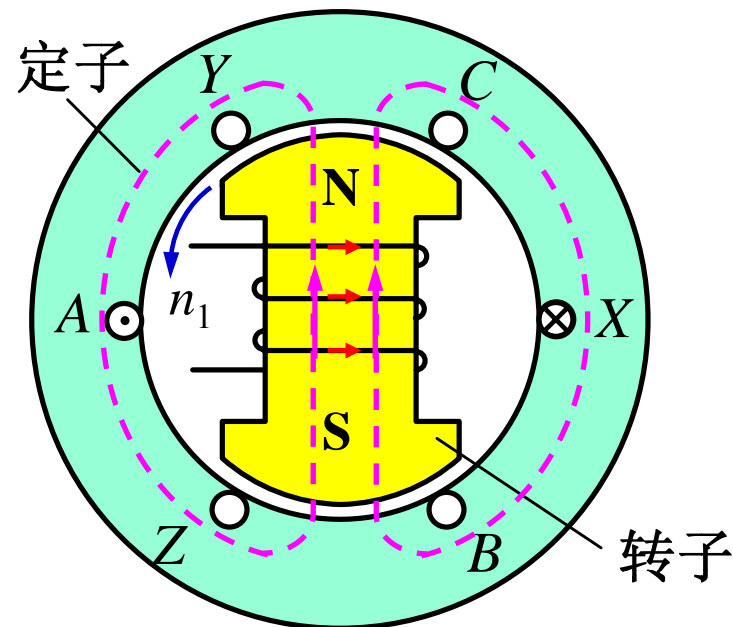
1.交流电机的基本工作原理



1) 同步电机的基本工作原理

■ 结构

- 定子：定子铁心、三相对称定子绕组AX、BY、CZ
- 转子：转子铁心、励磁绕组

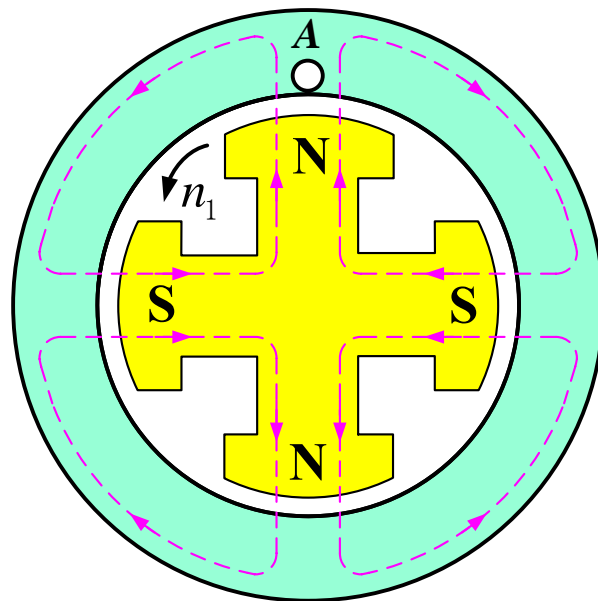


■ 同步发电机的工作原理

- 给励磁绕组通以直流电流，建立主极磁场；
- 原动机拖动转子以恒定转速 n_1 沿逆时针方向旋转；
- 定子导体与磁场之间存在相对运动，在定子绕组中感应产生交流电动势；
- 若在定子三相绕组出线端接上负载则可以输出交流电能。

■ 导体感应电动势

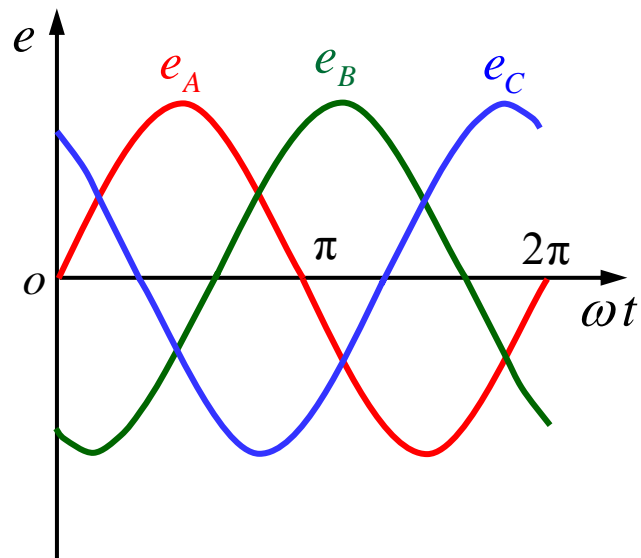
- 大小: $e = b_{\delta} l v$
- 方向: 用右手定则确定
- 波形: 取决于气隙磁密的波形
- 频率: $f = \frac{pn_1}{60}$ (Hz)



■ 同步电机的转速

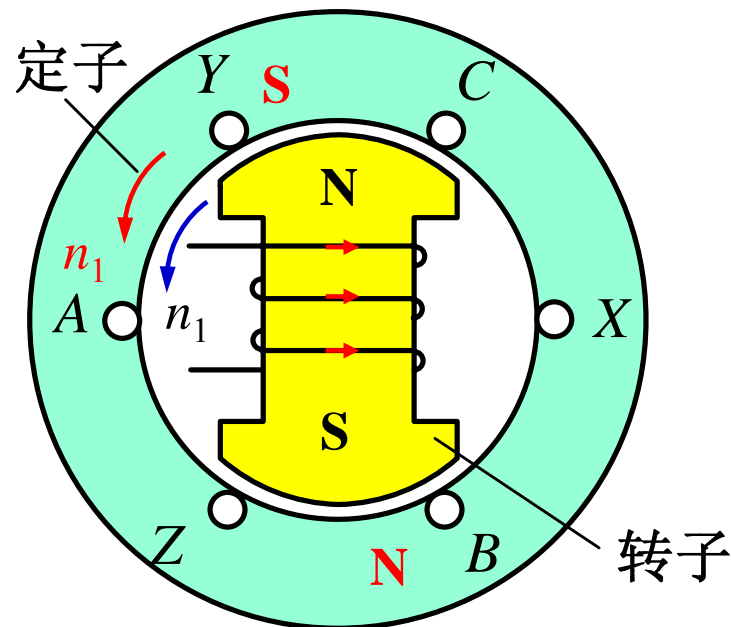
$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (r / min)}$$

n_1 称为同步转速。



■同步电动机的工作原理

- 给励磁绕组通以直流电流，建立主极磁场；
- 在定子三相对称绕组中通以三相对称电流，在气隙中产生与转子极对数相同，以同步速 n_1 旋转的圆形旋转磁场；
- 定子旋转磁场吸引转子磁极，拖动转子和轴上的机械负载同步旋转。

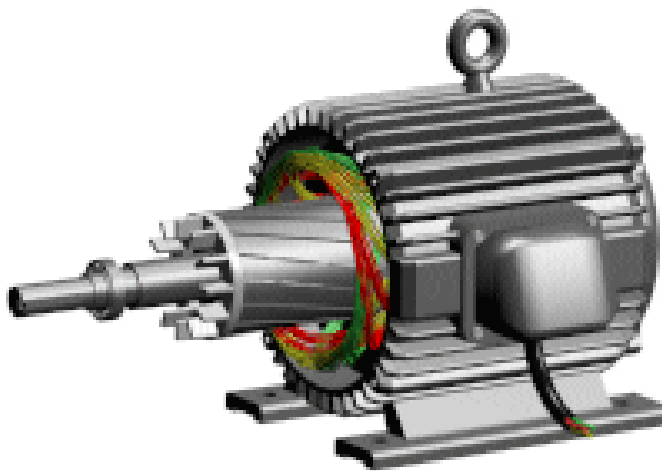


交流电能 → 机械能

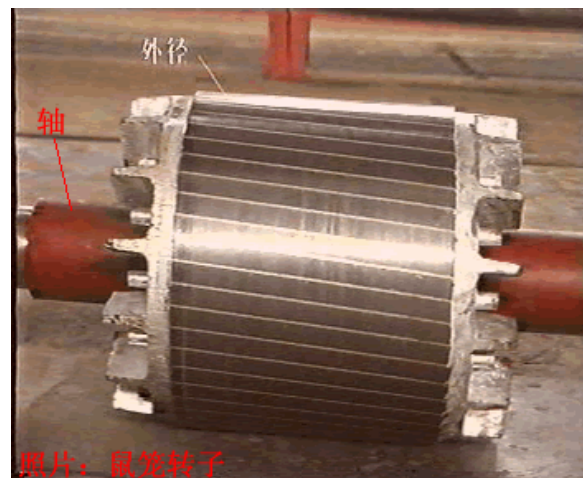
2) 异步电机的基本工作原理

■ 结构

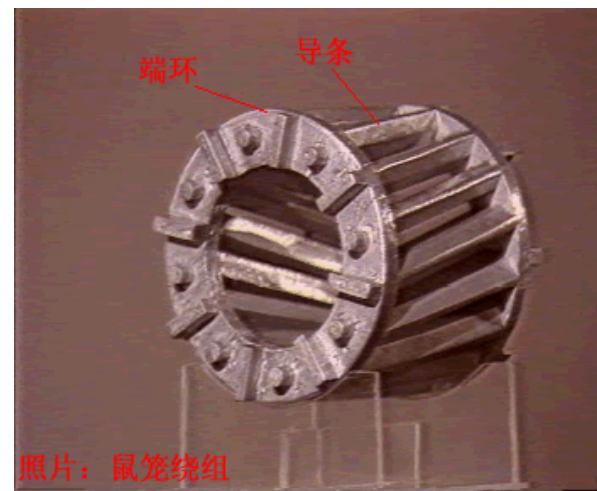
- 定子：定子铁心、三相对称定子绕组
- 转子：转子铁心、转子绕组（多相对称短路绕组）



鼠笼型异步电动机



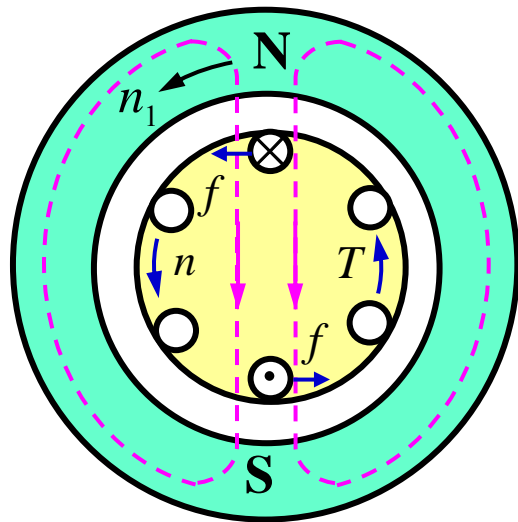
照片：鼠笼转子



照片：鼠笼绕组

■三相异步电动机的基本工作原理

- 定子三相对称绕组通以三相对称电流，产生转速为 n_1 的圆形旋转磁场；
- 旋转磁场切割转子导体，产生感应电动势；
- 闭合的转子绕组中有电流流过；
- 转子载流导体在磁场中受到**电磁力**的作用；
- 电磁力作用在转子上产生电磁转矩，驱动转子及轴上的机械负载沿旋转磁场的转向以转速 n 旋转。



异步电机： $n \neq n_1$

异步电动机的转子转速 n 能否达到同步转速 n_1 ？

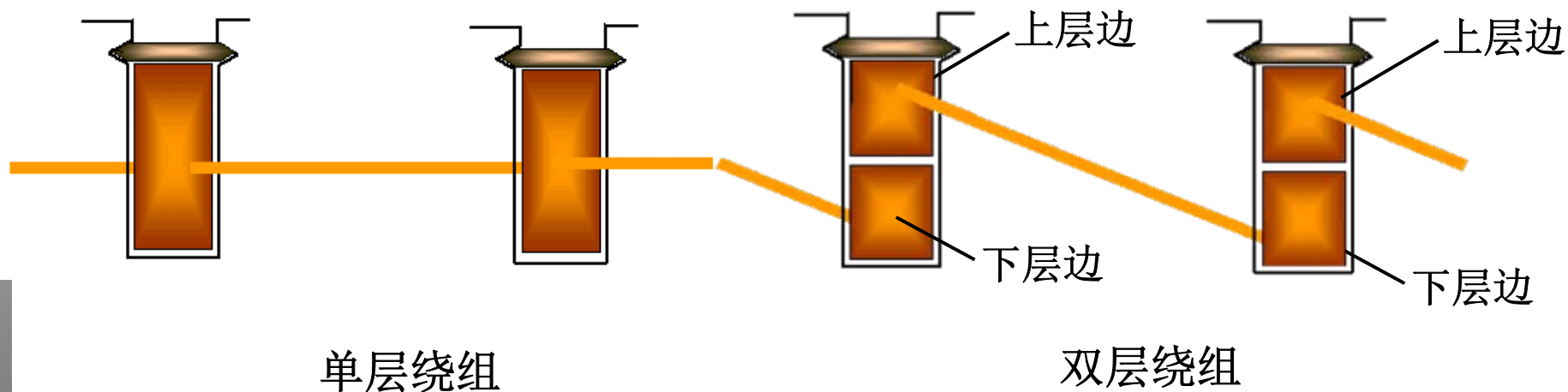


2.对交流绕组的基本要求

- (1) 在导体数一定的条件下，能得到较大的基波电动势和基波磁动势。
- (2) 在三相电机中，三相绕组的基波电动势要对称。
- (3) 三相绕组的电阻、电抗应彼此相等。
- (4) 电动势和磁动势的波形应尽量接近正弦波，即谐波分量较小。
- (5) 导体具有一定的截面积，绕组具有一定的绝缘强度。
- (6) 运行中有较好的散热性能。
- (7) 制造简单、维修方便。

3.交流绕组的分类

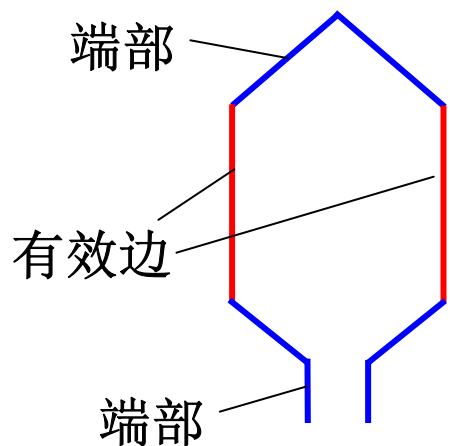
- 按相数：单相绕组、两相绕组、三相绕组、多相绕组
- 按槽内层数：单层绕组、双层绕组（叠绕组、波绕组）
- 按每极每相槽数：整数槽、分数槽



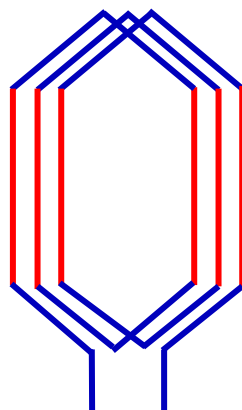
4. 交流绕组的基本概念

1) 线圈

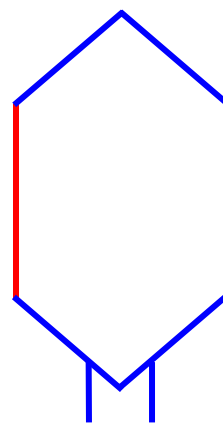
线圈是构成交流绕组的基本单元，它由一匝或多匝串联而成。



单匝线圈



多匝线圈

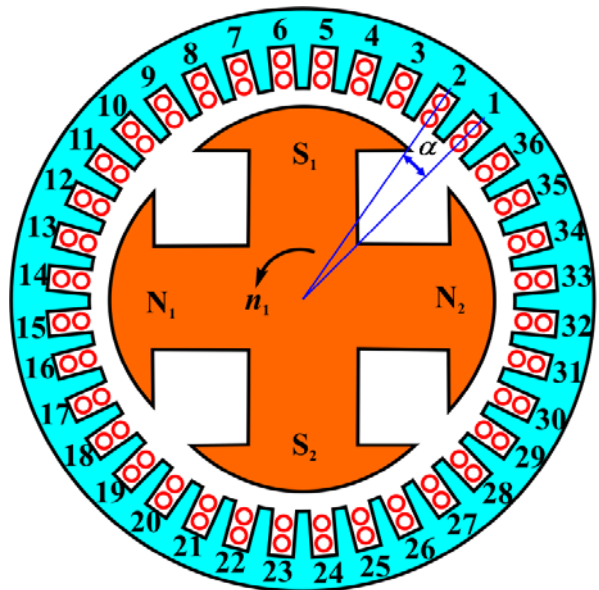


多匝线圈简图

2) 电角度

计量电磁关系的角度称为电角度。从电磁观点看，一对磁极占有的空间电角度为 360° 。

空间电角度=极对数 p ×空间机械角度



3) 极距 τ

一个磁极在定子铁心内圆表面所占的距离称为极距，通常用槽数或长度表示。

$$\tau = \frac{Q}{2p} \text{ (槽)} \quad \text{或} \quad \tau = \frac{\pi D}{2p} \text{ (m)}$$

式中， Q 为定子总槽数， D 为定子内圆的直径。

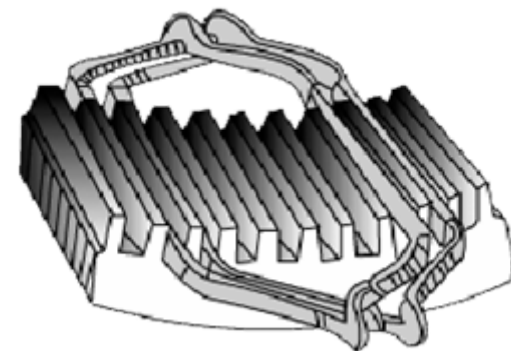
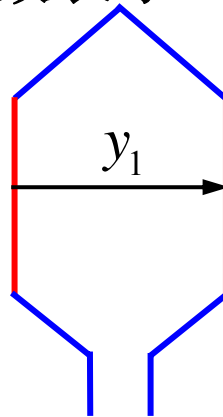
4) 线圈节距 y_1

一个线圈的两个有效边在定子内圆所跨的距离称为节距 y_1 ，用所占槽数表示。

• $y_1 < \tau$ 短距绕组

• $y_1 = \tau$ 整距绕组

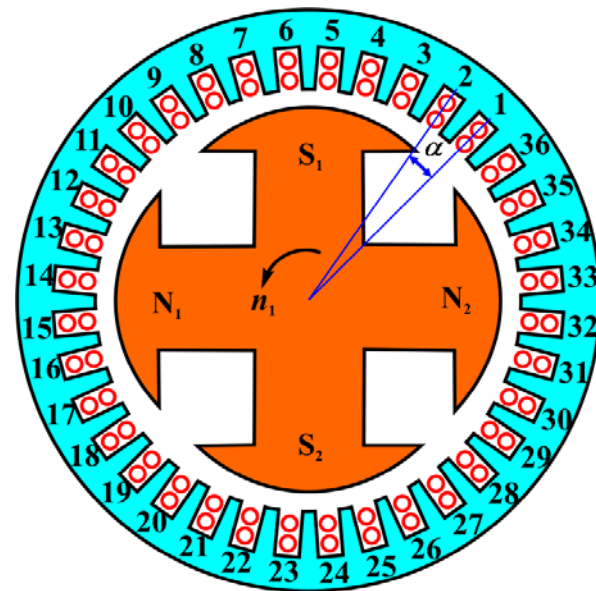
• $y_1 > \tau$ 长距绕组



5) 槽距角 α

是指相邻两槽之间相距的空间电角度。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q}$$



$$Q=36, \quad 2p=4$$

6) 相带

每相绕组在每个极面下连续占有的空间地带（用电角度表示）称为相带。

60°相带： 将一个极面分成 3 等份，每份占有 60°电角度。

7) 每极每相槽数 q

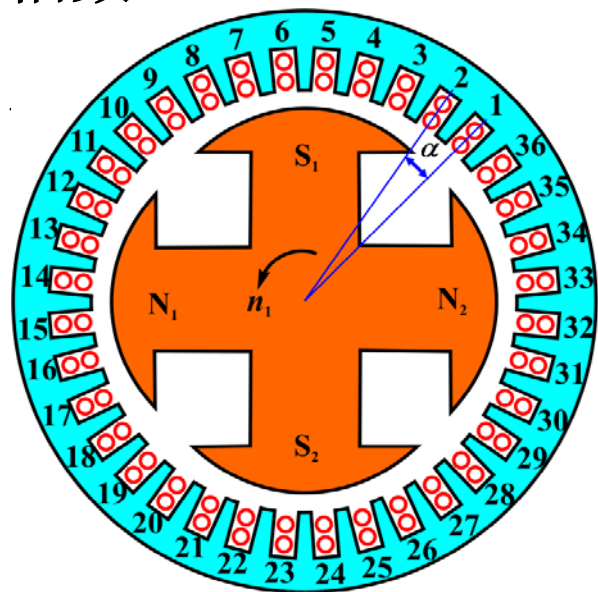
每个极面下每相占有的槽数称为每极每相槽数。

已知电机的总槽数 Q 、极对数 p 和相数 m ,

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

• 集中绕组: $q=1$

• 分布绕组: $q>1$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{整数槽绕组: } q=\text{整数} \\ \text{分数槽绕组: } q=\text{分数} \end{array} \right.$



$$Q=36, 2p=4$$

10-3 三相单层分布绕组

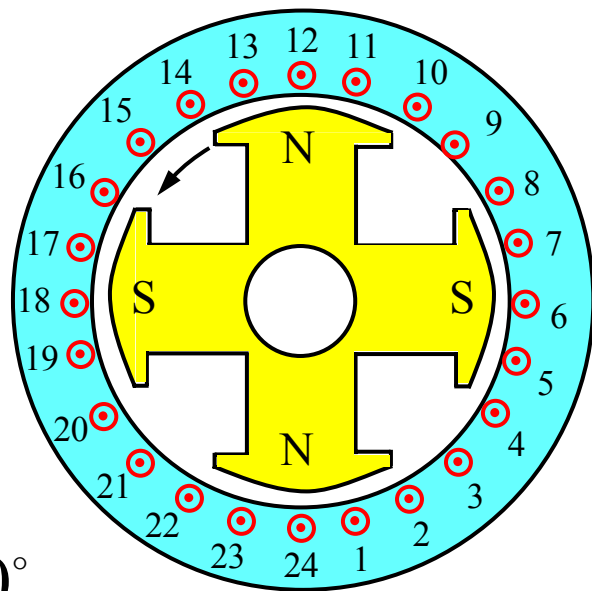
■ **单层绕组：** 每个槽内只放置一个线圈边，线圈数等于槽数的一半。

例10-1 一台三相交流电机，定子绕组为三相单层分布绕组，已知电机的极对数 $p=2$ ，槽数 $Q=24$ ，每相并联支路数 $a=1$ ，试绘出其绕组展开图。

1. 计算参数

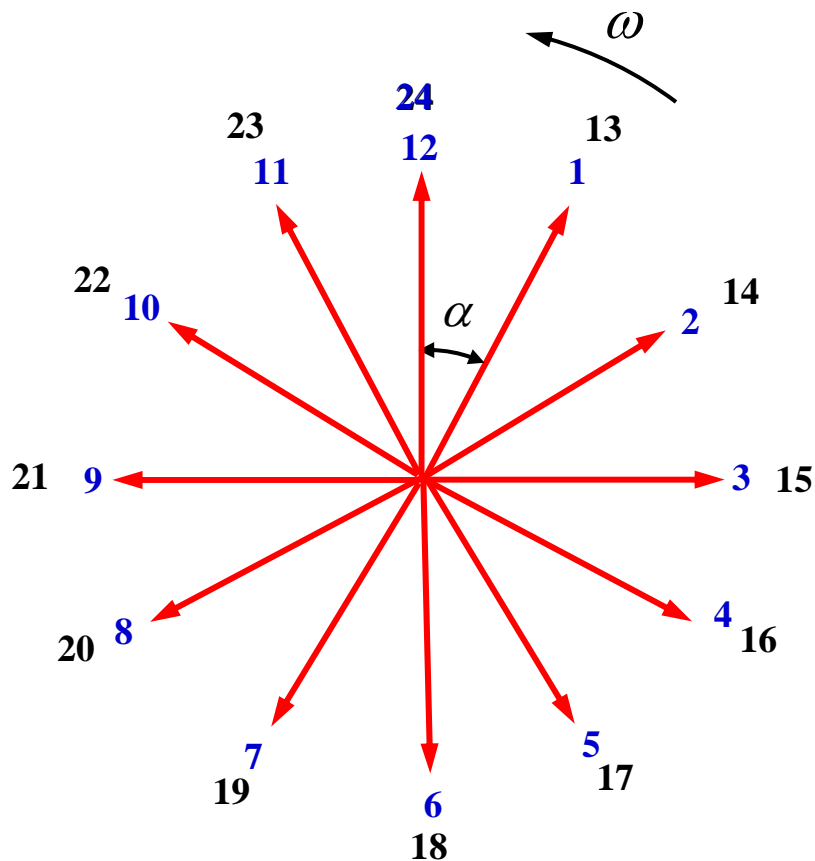
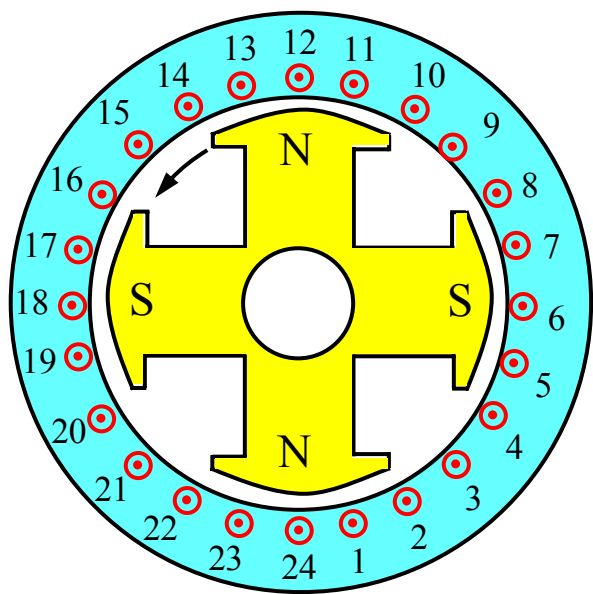
极距 $\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{24}{2 \times 2} = 6$

槽距角 $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$



每极每相槽数 $q = \frac{Q}{2pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$

2. 绘制电动势星形相量图

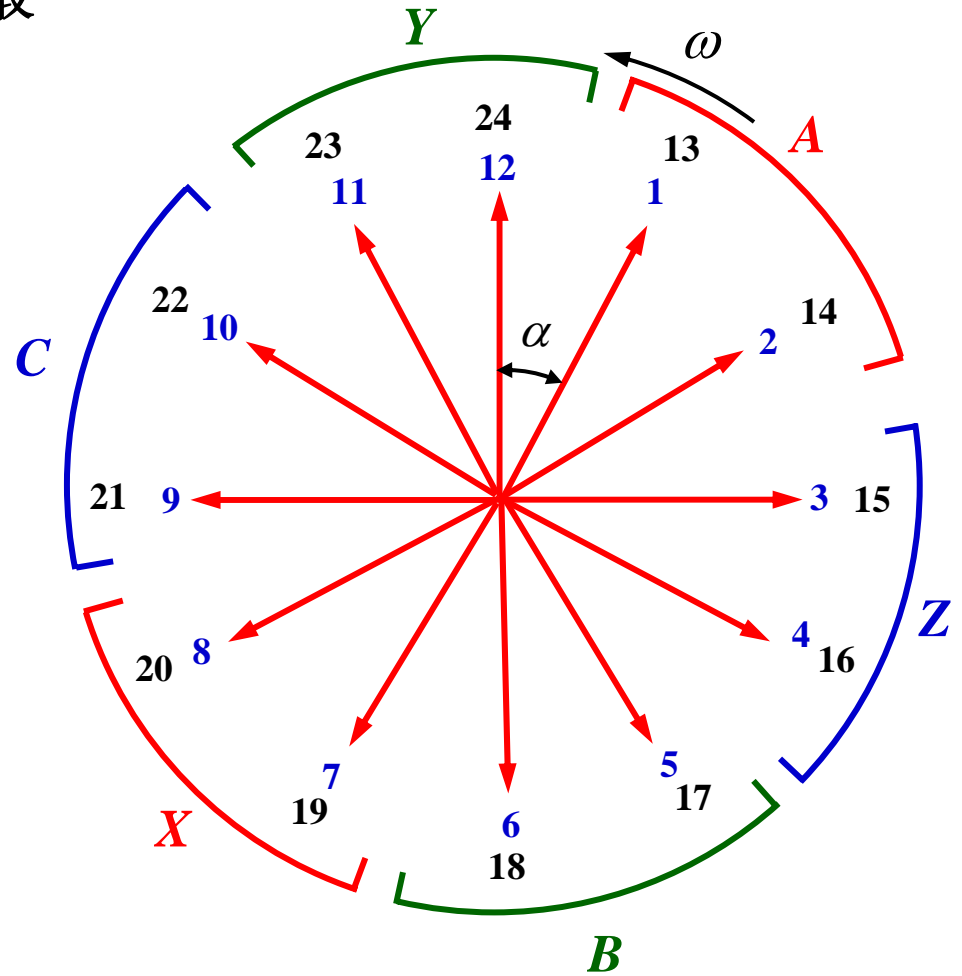


槽导体电动势星形相量图 ($p=2, m=3, Q=24$)

$$q=2$$

3.按60°相带法分相

分相的原则：每相电动势最大，且三相电动势对称。



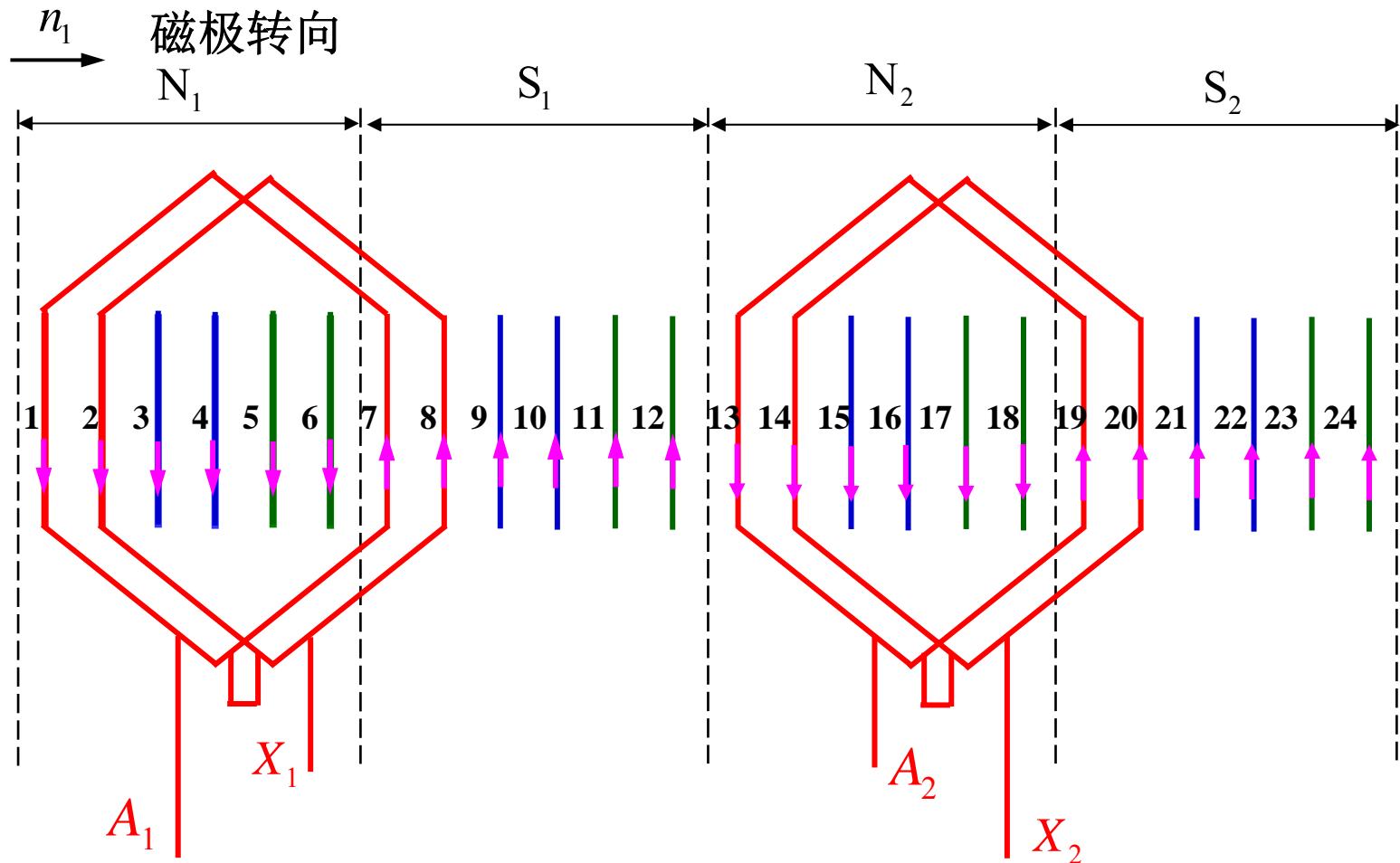
A相带： 1、 2； 13、 14

X相带： 7、 8； 19、 20

4. 绘制绕组展开图

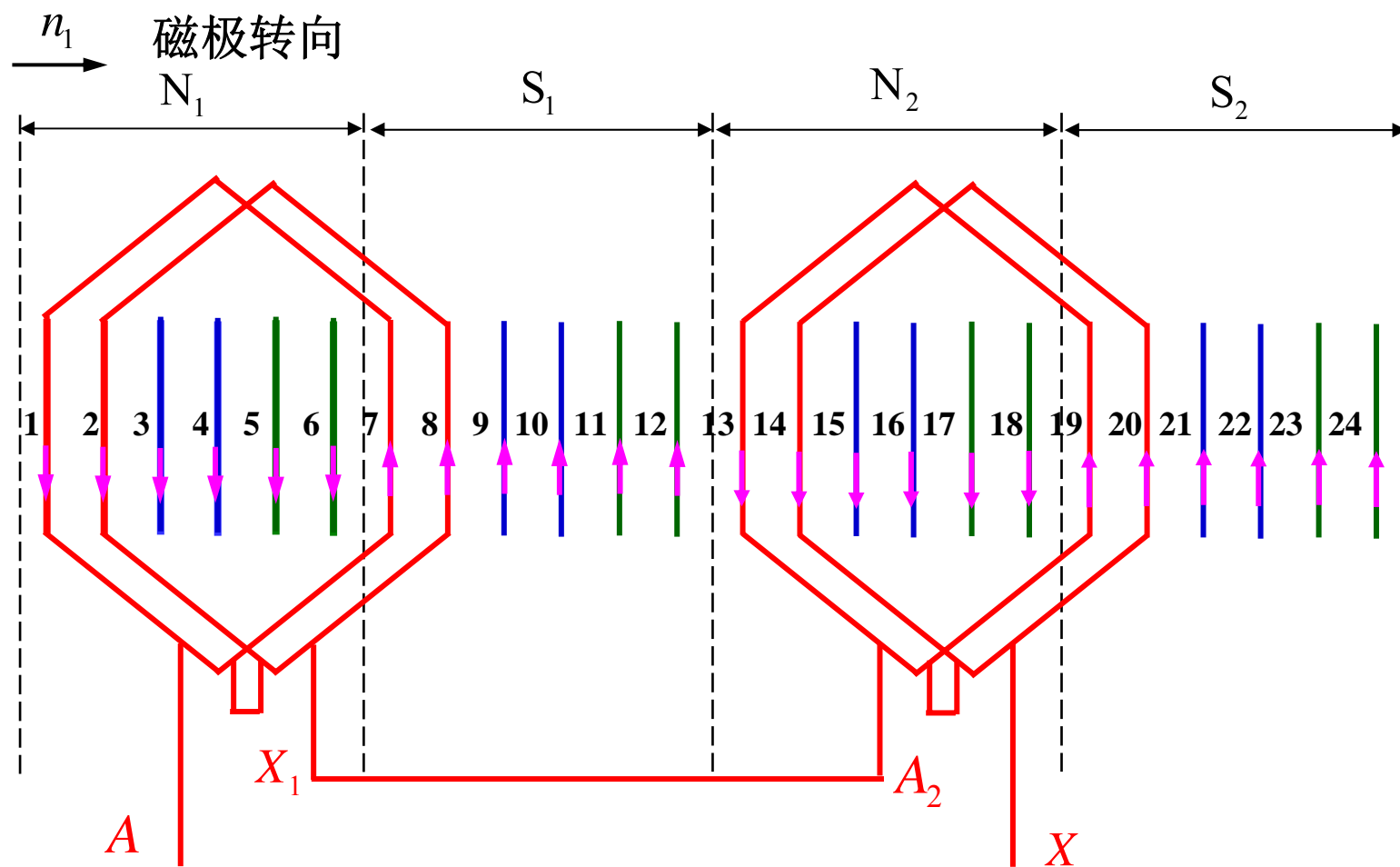
A相带: 1、2; 13、14

X相带: 7、8; 19、20



- **单层绕组:** 每对极下属于一相的 q 个线圈按电动势相加的原则串联成一个线圈组。每相共有 p 个线圈组。

1) 单层等元件式绕组

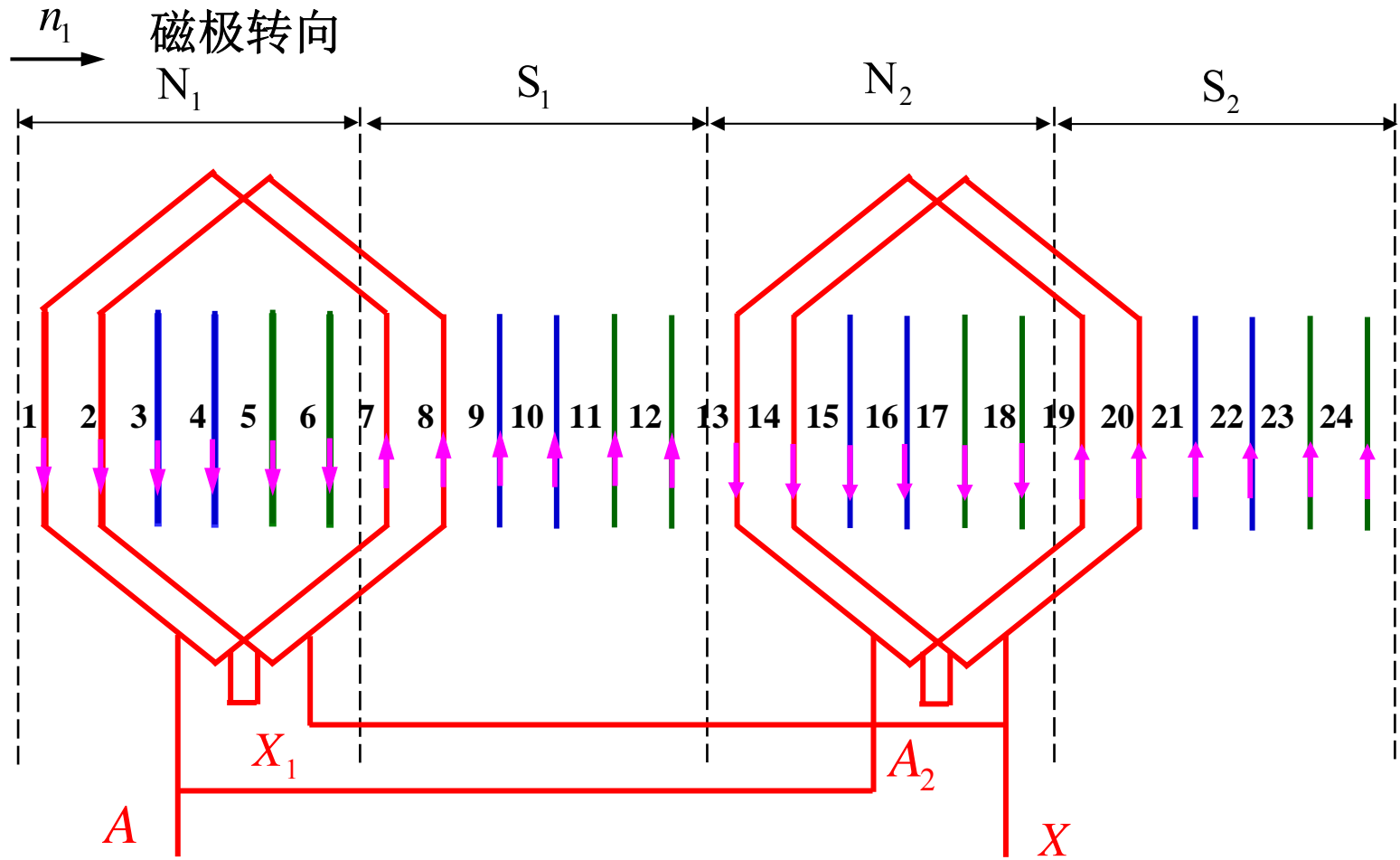


每相并联支路数 $a=1$ ，属于A相的 p 个线圈组按电动势相加的原则串联，即按“尾接头”的方法相连。

1) 单层等元件式绕组

最大可能的并联支路数 $a_{\max} = p$

每相并联支路数 $a = 2$

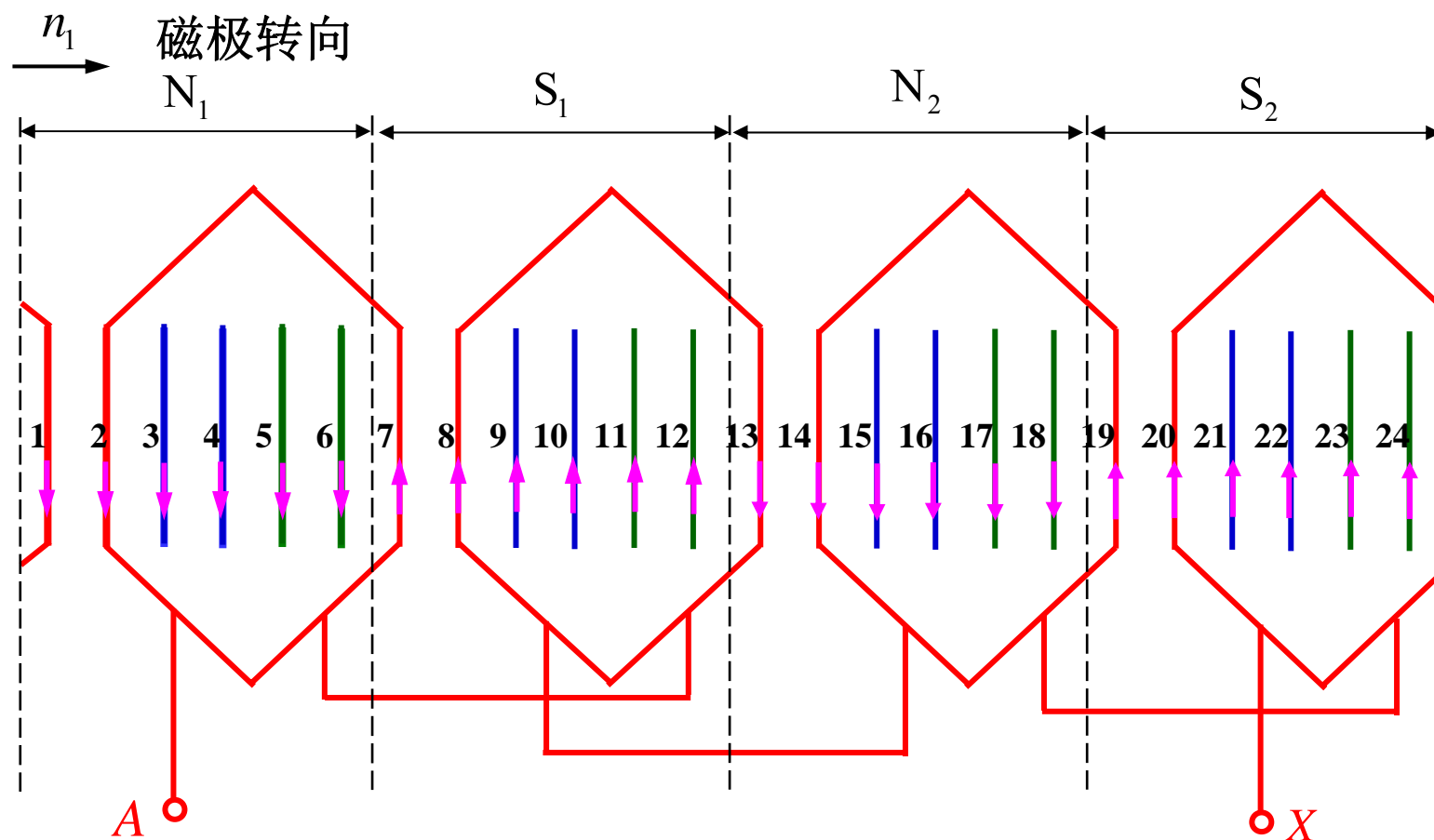


每相并联支路数 $a = p$ ，属于A相的 p 个线圈组按“头接头、尾接尾”的方法并联。

2) 单层链式绕组

A相带: 1、2; 13、14

X相带: 7、8; 19、20



单层链式绕组由形状、几何尺寸和节距都相同的线圈连接而成，适用于 $q=2$ 、极数较多的小型异步电动机。

5. 单层分布绕组的特点

- 每个槽内只有一个线圈边，线圈数等于 $Q/2$ 。
- 每相有 p 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成。
- 每相串联匝数为 $N_1 = \frac{pqN_K}{a}$ 。

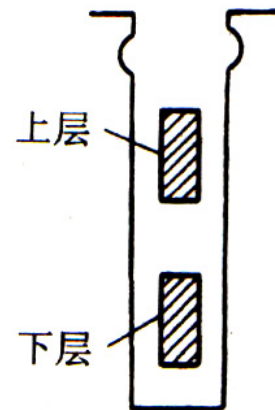


6. 单层分布绕组的优缺点

- 槽内只有一个线圈边，嵌线方便。
- 无层间绝缘，槽的利用率高。
- 不能利用短矩来削弱电动势和磁动势中的高次谐波。



10-4 三相双层分布短距绕组



■ **双层绕组：**每槽中有两个线圈边，分为上下两层放置。线圈数等于槽数。

■ **双层绕组的优点：**

- (1) 可采用短距，改善电动势、磁动势的波形；
- (2) 线圈尺寸相同，便于制造；
- (3) 端部排列整齐，有利于散热和增加机械强度。

■ **双层绕组的分类：**叠绕组、波绕组

■ **双层绕组的应用场合：**10kW以上交流电机的定子绕组

例13-2 一台三相交流电机，定子绕组为双层叠绕组，定子槽数 $Q=36$ ，极对数 $p=2$ ，节距 $y_1=7$ ，并联支路数 $a=1$ ，试绘制电动势星形图和绕组展开图。

1. 计算参数

极距

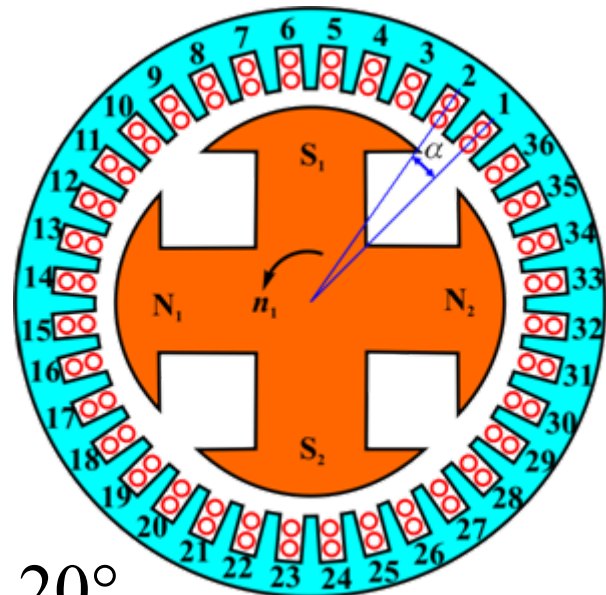
$$\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{2 \times 2} = 9$$

槽距角

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

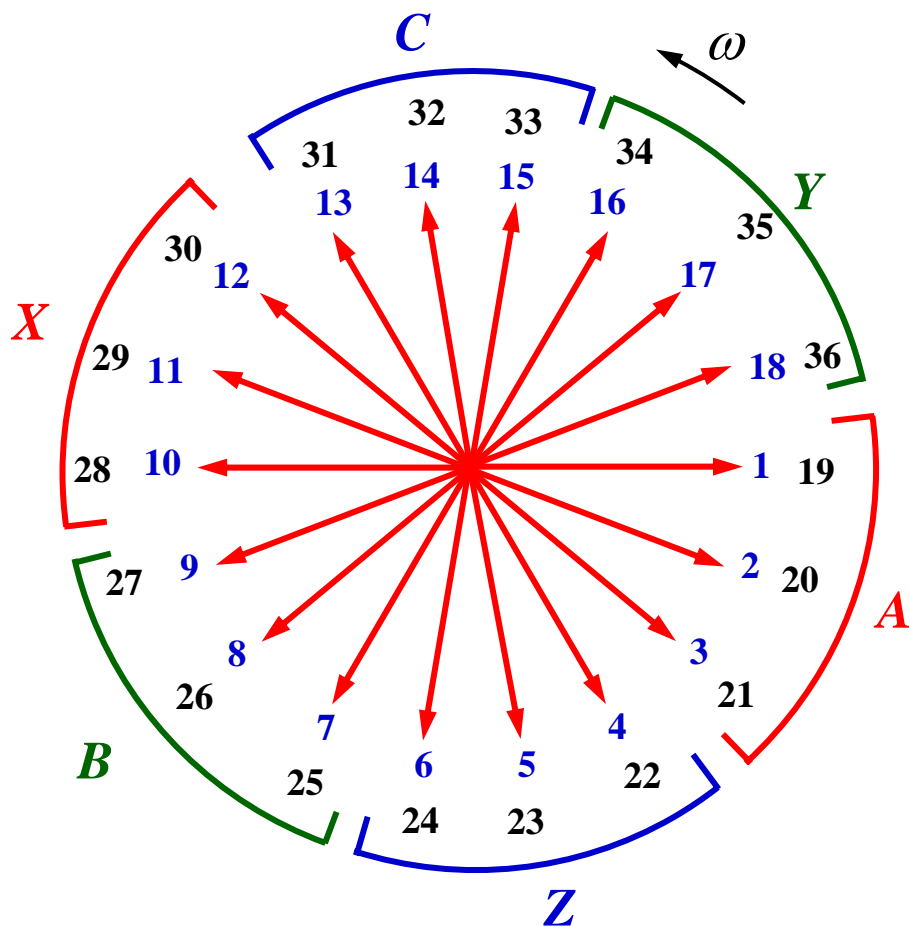
每极每相槽数

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$$



2. 绘制基波电动势星形相量图 $Q=36, p=2, q=3, \alpha=20^\circ$

对于双层绕组，基波电动势星形相量图中的每一个相量代表各短距线圈的基波电动势相量。



3. 按60°相带法分相

A相带: 线圈1,2,3;

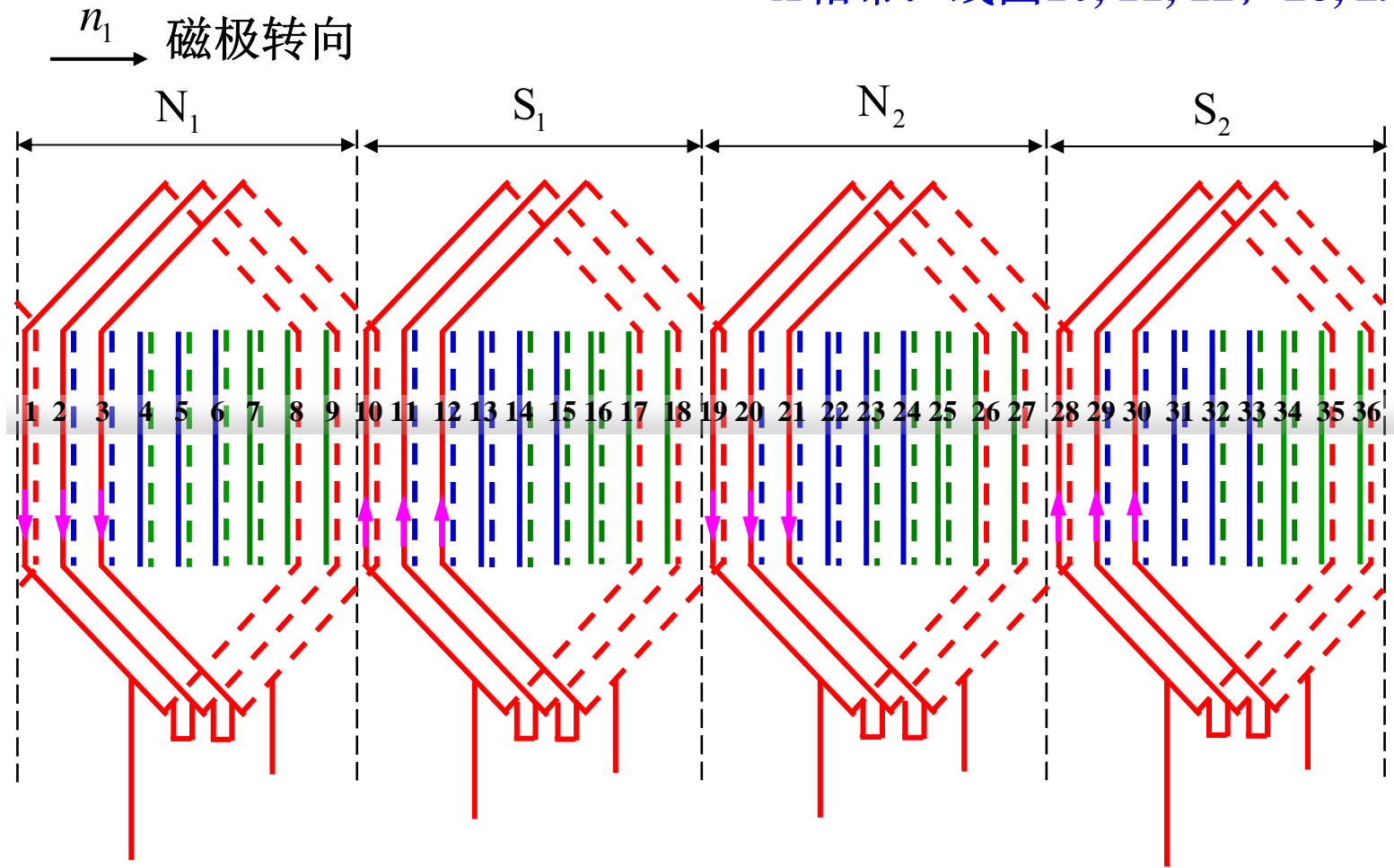
线圈19,20,21

X相带: 线圈10,11,12;

线圈28,29,30

4. 绘制绕组展开图

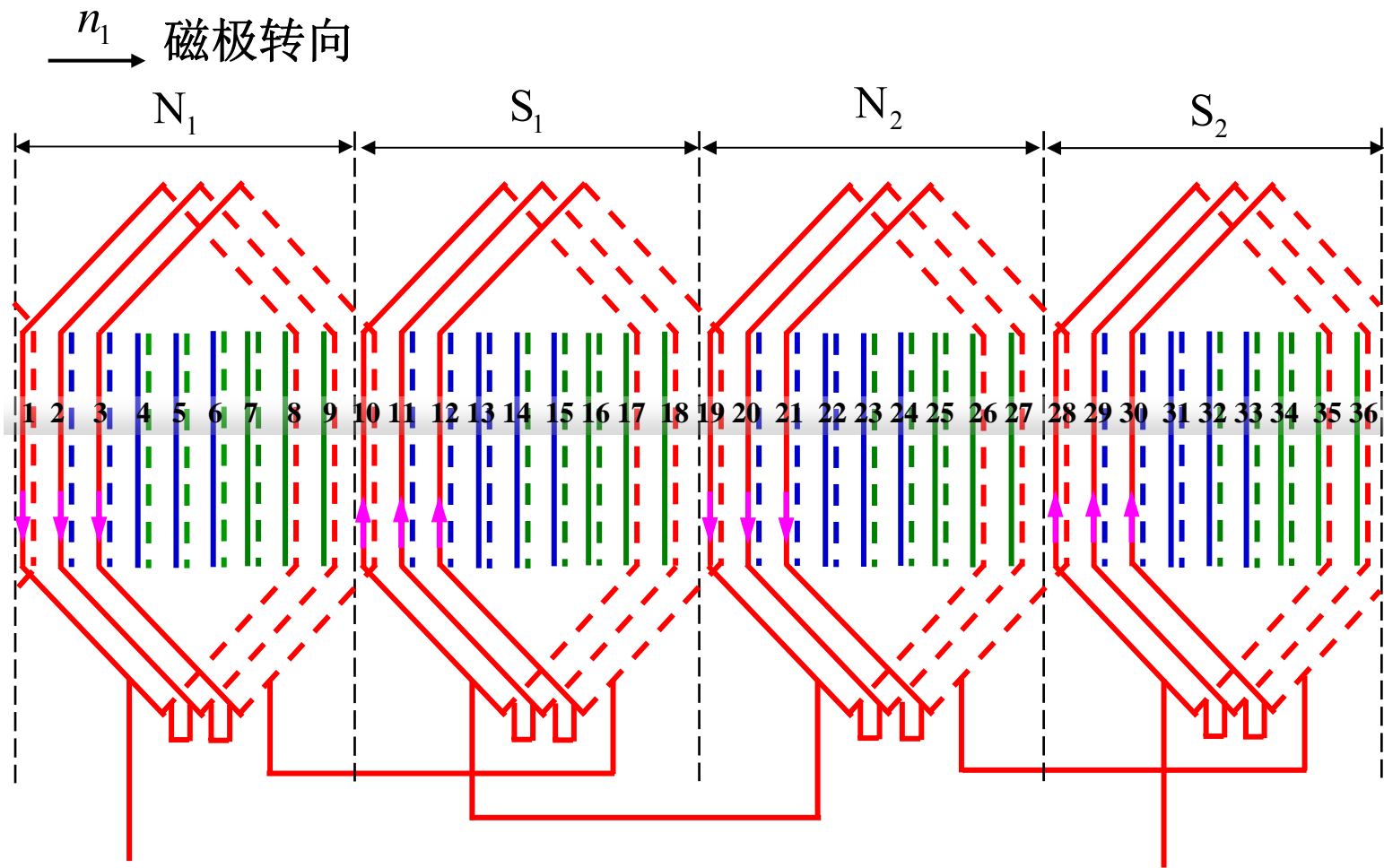
$y_1=7$ A相带: 线圈1, 2, 3; 19, 20, 21
X相带: 线圈10, 11, 12; 28, 29, 30



■ **双层绕组**: 每相在每个极下属于同一相带的 q 个线圈串联起来组成一个线圈组（**极相组**）。每相共有 $2p$ 个线圈组。

4. 绘制绕组展开图

最大并联支路数 $a_{\max} = 2p$



每相并联支路数 $a=1$ ，属于A相的 $2p$ 个线圈组按电动势相加的原则串联，即按“**头接头、尾接尾**”的方法相连。

5. 双层叠绕组的特点

- 每个槽内放置上下两个线圈边，线圈数等于槽数 Q ；
- 每相有 $2p$ 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成；
- 最大并联支路数 $a_{\max}=2p$ ；
- 每相串联匝数 $N_1 = \frac{2pqN_k}{a}$ 。

10-5 交流绕组的感应电动势

1.导体的基波电动势

2.整距线圈的基波电动势

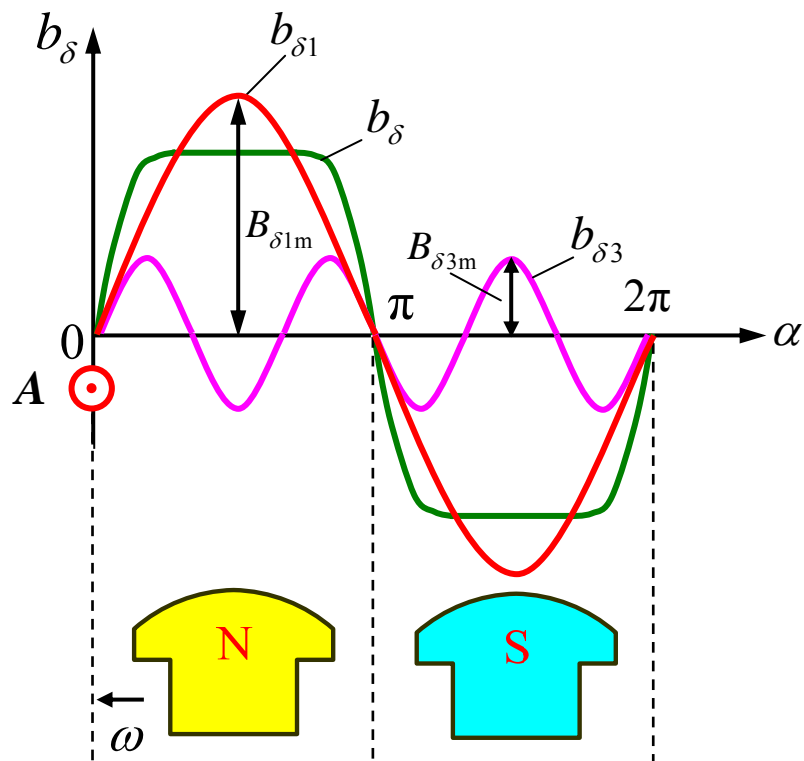
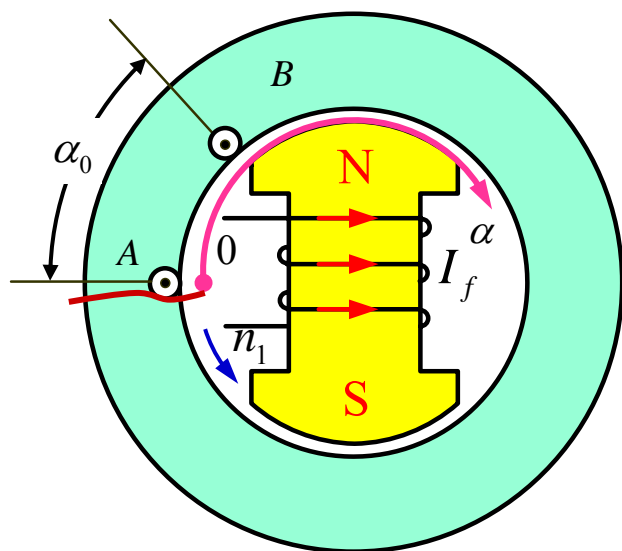
3.短距线圈的基波电动势和基波节距因数

4.线圈组的基波电动势和基波分布因数

5.相电动势和线电动势

6.感应电动势中的高次谐波

1. 导体的基波电动势

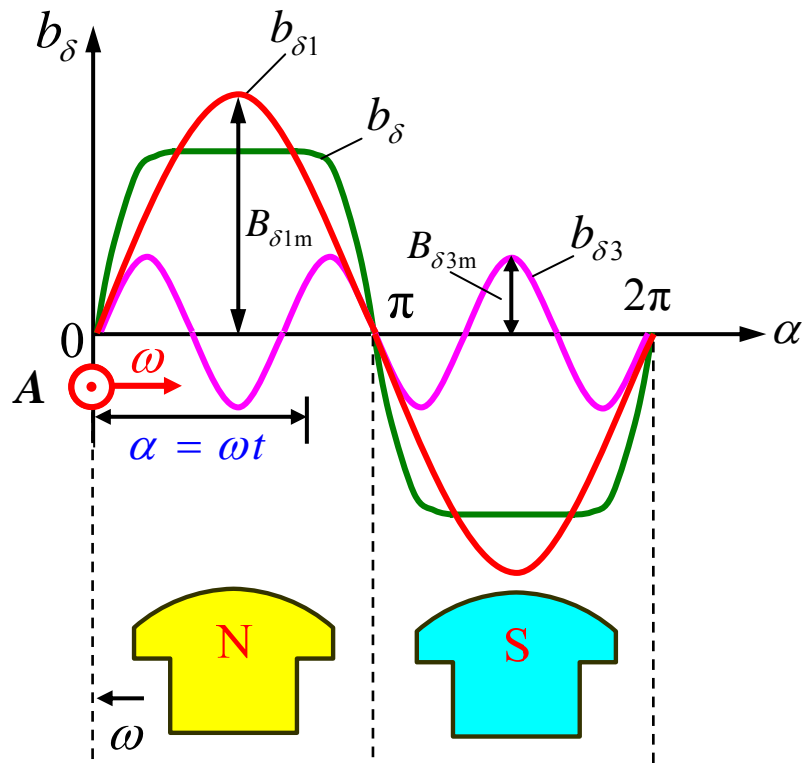
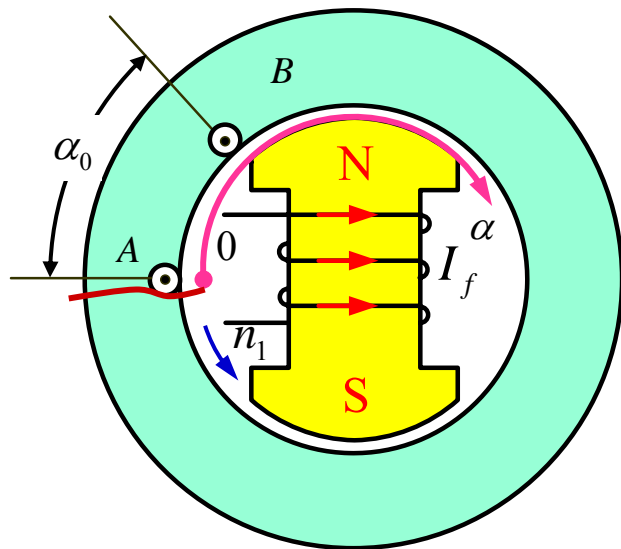


在转子表面建立直角坐标系，坐标原点取在相邻两主磁极的中间，纵坐标代表气隙磁密 b_δ 的大小，横坐标 α 表示磁极表面各点距坐标原点的距离。

规定：气隙磁通出转子进定子的方向为正，对应的磁通密度也为正；导体电动势出纸面为正。

$$b_\delta = b_{\delta 1} + b_{\delta 3} + \dots = B_{\delta 1m} \sin \alpha + B_{\delta 3m} \sin 3\alpha + \dots$$

1.导体的基波电动势



1) 基波电动势的波形

基波气隙磁密 $b_{\delta 1} = B_{\delta 1m} \sin \alpha$

假设 $t=0$ 时，导体A位于 $\alpha=0$ 处，则当时间为 t 时，导体A位于 $\alpha=\omega t$ 处，

$$e_{A1} = b_{\delta 1} l v = B_{\delta 1m} l v \sin \omega t = E_{A1m} \sin \omega t = \sqrt{2} E_{A1} \sin \omega t$$

2) 基波电动势的频率

$$f = \frac{pn_1}{60}$$

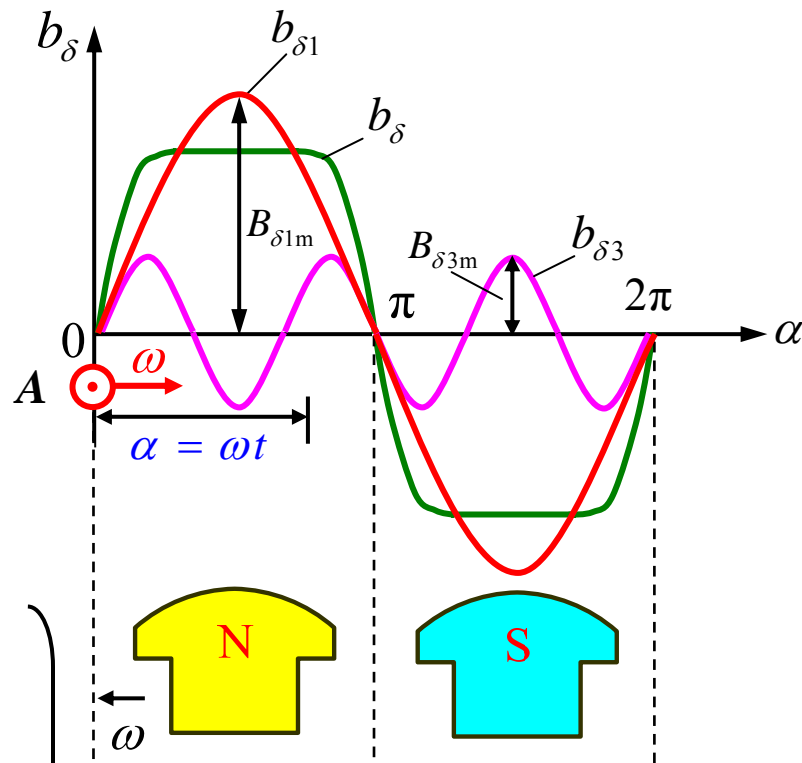
3) 基波电动势的有效值

$$E_{A1} = \frac{E_{A1m}}{\sqrt{2}} = \frac{B_{\delta 1m} lv}{\sqrt{2}}$$

$$\Phi_1 = B_{1av} \tau l$$

$$B_{1av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_{\delta 1m} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m}$$

$$v = \frac{2p\tau n_1}{60} = 2\tau f$$



$$E_{A1} = \frac{\pi f \Phi_1}{\sqrt{2}} = 2.22 f \Phi_1$$

2. 整距线圈的基波电动势

线匝基波电动势的正方向：由尾端指向首端为正。

整距线匝的基波电动势相量为

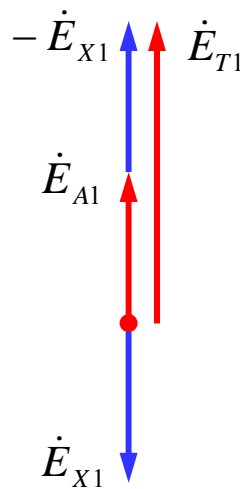
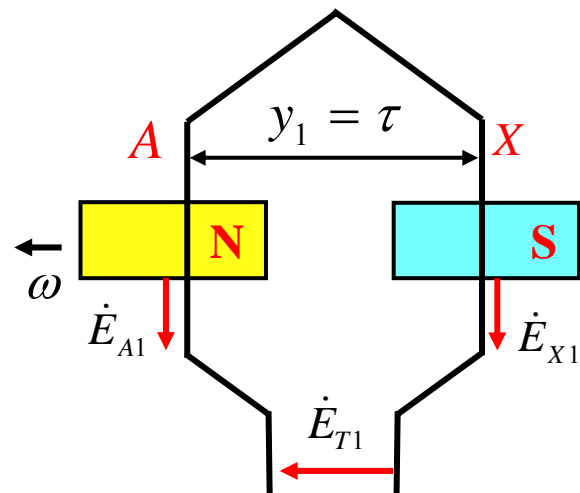
$$\dot{E}_{T1} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1} = 2\dot{E}_{A1}$$

整距线匝基波电动势的有效值为

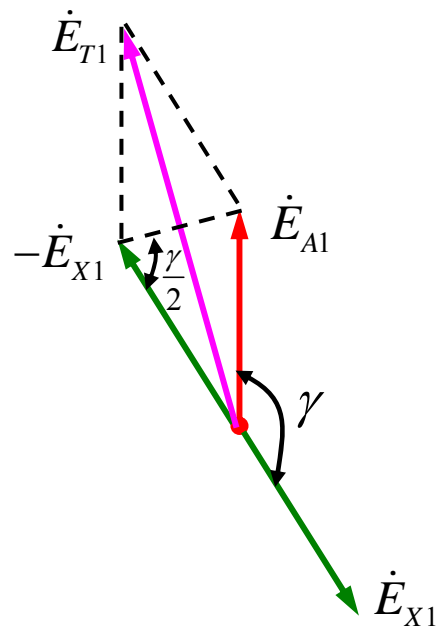
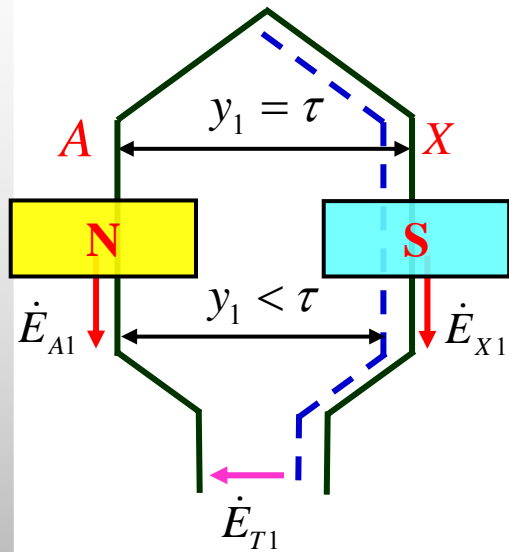
$$E_{T1(y_1=\tau)} = 2E_{A1} = 4.44 f \Phi_1$$

线圈有 N_K 匝，则整距线圈基波电动势的有效值为

$$E_{K1(y_1=\tau)} = 4.44 f N_K \Phi_1$$



3.短距线圈的基波电动势及基波节距因数



短距线圈的节距用电角度 γ 表示时, 为

$$\gamma = \frac{y_1}{\tau} 180^\circ$$

短距线圈的基波电动势为

$$\dot{E}_{T1(y_1 < \tau)} = \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{X1}$$

$$= \dot{E}_{A1} - \dot{E}_{A1} \angle -\gamma$$

短距线圈基波电动势的有效值为

$$E_{T1(y_1 < \tau)} = 2E_{A1} \sin \frac{\gamma}{2} = 2E_{A1} \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = 2E_{A1} k_{p1} = 4.44 f k_{p1} \Phi_1$$

$$E_{T1(y_1 < \tau)} = 2E_{A1} k_{p1} = 4.44 f k_{p1} \Phi_1$$

式中, $k_{p1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$ 称为基波节距因数。

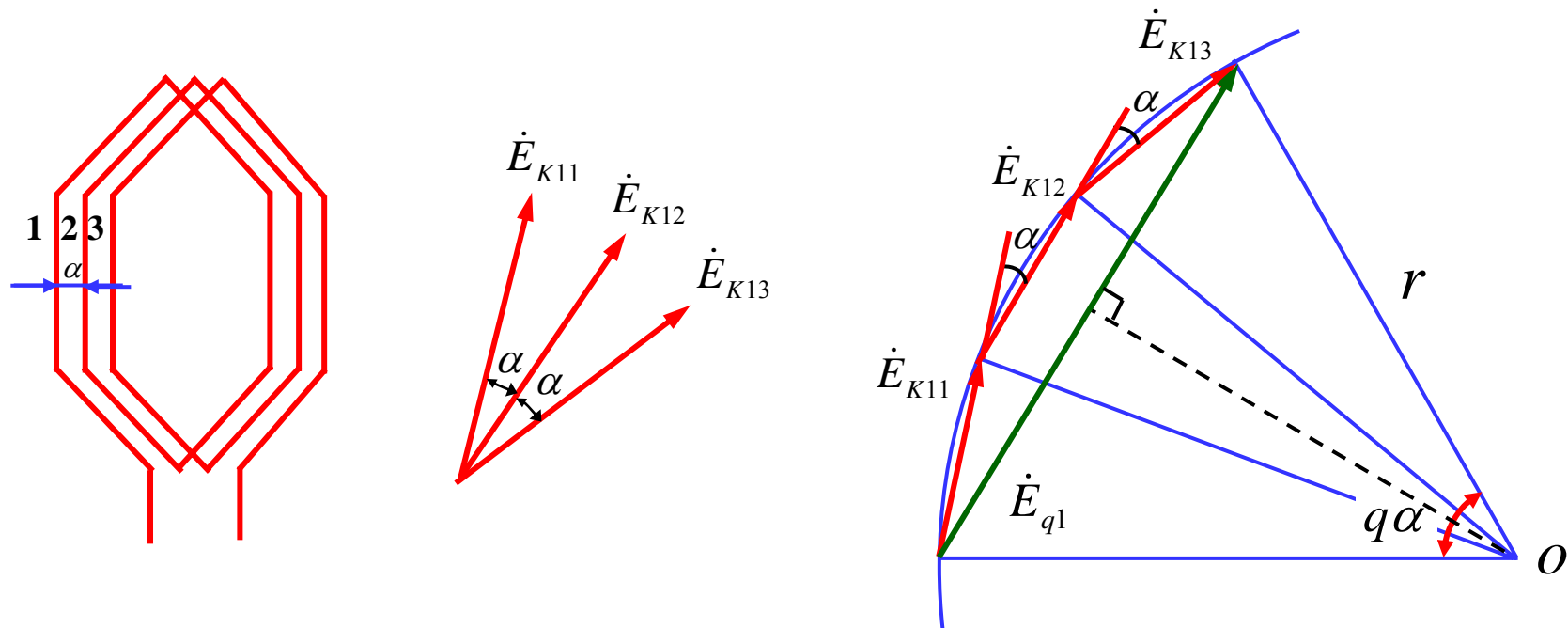
$$k_{p1} = \frac{E_{T1(y_1 < \tau)}}{E_{T1(y_1 = \tau)}} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

k_{p1} 的物理意义: 线圈采用短距时, 基波电动势比整距时应打的折扣。

线圈有 N_K 匝, 则线圈的基波电动势为

$$E_{K1} = N_K E_{T1} = 4.44 f N_K k_{p1} \Phi_1$$

4.线圈组的基波电动势及基波分布因数



每个线圈组都由 q 个在空间互差一个槽距角 α 的线圈串联组成，线圈组的基波电动势有效值为

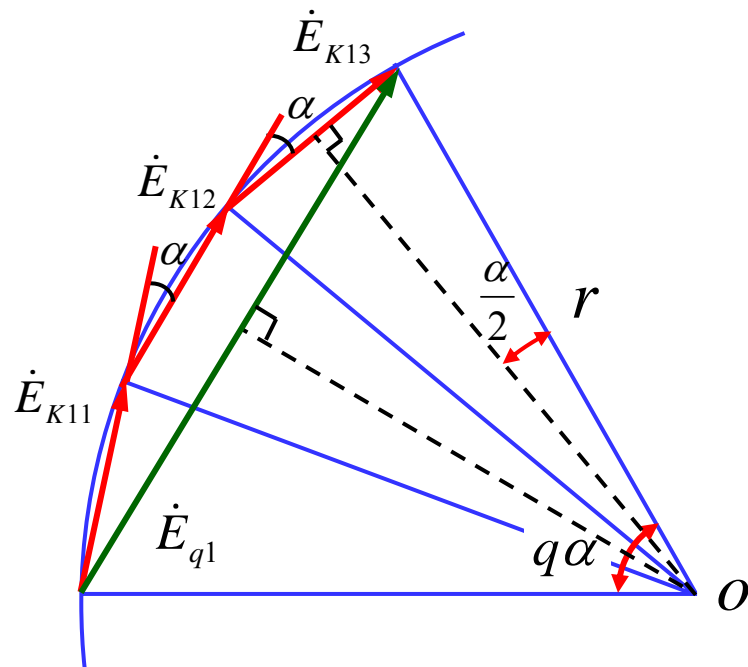
$$E_{q1} = 2r \sin q \frac{\alpha}{2}$$

式中， r 为外接圆的半径。

线圈的基波电动势有效值为

$$E_{K1} = 2r \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$E_{q1} = qE_{K1} \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = qE_{K1} k_{d1}$$



式中， $k_{d1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$ 称为基波分布因数。

$$k_{d1} = \frac{E_{q1}}{qE_{K1}}$$

k_{d1} 的物理意义：绕组采用分布线圈时，基波电动势比采用集中线圈时应打的折扣。

线圈组的基波电动势为

$$\begin{aligned} E_{q1} &= qE_{K1}k_{d1} = q(4.44fN_Kk_{p1}\Phi_1)k_{d1} \\ &= 4.44fqN_Kk_{d1}k_{p1}\Phi_1 = 4.44fqN_Kk_{dp1}\Phi_1 \end{aligned}$$

式中， qN_K — q 个线圈的总匝数；

$k_{dp1} = k_{d1}k_{p1}$ —基波绕组因数。

k_{dp1} 的物理意义：考虑绕组的短距和分布影响时，绕组的基波电动势与整距集中绕组比较应打的总折扣。

5.相电动势和线电动势

1) 单层绕组

每相有 p 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成，若并联支路数为 a ，则一相绕组基波电动势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{\phi 1} &= \frac{p}{a} E_{q1} = \frac{p}{a} (4.44 f q N_K k_{d1} \Phi_1) \\ &= 4.44 f \frac{p q N_K}{a} k_{d1} \Phi_1 = 4.44 f N_1 k_{d1} \Phi_1 \end{aligned}$$

式中， $N_1 = \frac{p q N_K}{a}$ 为单层绕组的每相串联匝数。

2) 双层绕组

每相有 $2p$ 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成，若并联支路数为 a ，则一相绕组基波电动势的有效值为

$$\begin{aligned} E_{\phi 1} &= \frac{2p}{a} E_{q1} = \frac{2p}{a} (4.44 f q N_K k_{dp1} \Phi_1) \\ &= 4.44 f \frac{2pq N_K}{a} k_{dp1} \Phi_1 = 4.44 f N_1 k_{dp1} \Phi_1 \end{aligned}$$

式中， $N_1 = \frac{2pq N_K}{a}$ 为双层绕组的每相串联匝数。

一相绕组基波电动势的有效值为

通用电动势表
达式

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N_1 k_{d p 1} \Phi_1$$

式中， N_1 为绕组的每相串联匝数。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单层绕组: } N_1 = \frac{pqN_K}{a} \\ \text{双层绕组: } N_1 = \frac{2pqN_K}{a} \end{array} \right.$$

4) 线电动势

星形连接: $E_{L1} = \sqrt{3} E_{\phi 1}$

三角形连接: $E_{L1} = E_{\phi 1}$

例10-3 一台三相交流电机，定子绕组为双层叠绕组，已知定子槽数 $Q=30$ ，极数 $2p=2$ ，节距 $y_1=12$ ，并联支路数 $a=1$ ，频率 $f=50\text{Hz}$ ，每个线圈的匝数 $N_K=2$ ，气隙基波每极磁通量 $\Phi_1=1.56\text{Wb}$ ，试求：基波绕组因数和基波相电动势。

解：极距 $\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{30}{2} = 15$

槽距角 $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{1 \times 360^\circ}{30} = 12^\circ$

每极每相槽数 $q = \frac{Q}{2pm} = \frac{30}{2 \times 3} = 5$

每相串联匝数 $N_1 = \frac{2pqN_K}{a} = \frac{2 \times 5 \times 2}{1} = 20$

$$\tau = 15, \alpha = 12^\circ, q = 5, y_1 = 12$$

基波节距因数 $k_{p1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \sin \frac{12}{15} \cdot 90^\circ = 0.9511$

基波分布因数 $k_{d1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 5 \times \frac{12^\circ}{2}}{5 \sin \frac{12^\circ}{2}} = 0.9567$

基波绕组因数 $k_{dp1} = k_{d1} k_{p1} = 0.9567 \times 0.9511 = 0.91$

绕组的基波相电动势

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N_1 k_{dp1} \Phi_1 = 4.44 \times 50 \times 20 \times 0.91 \times 1.56 = 6303(\text{V})$$

6. 感应电动势中的高次谐波

1) 高次谐波电动势

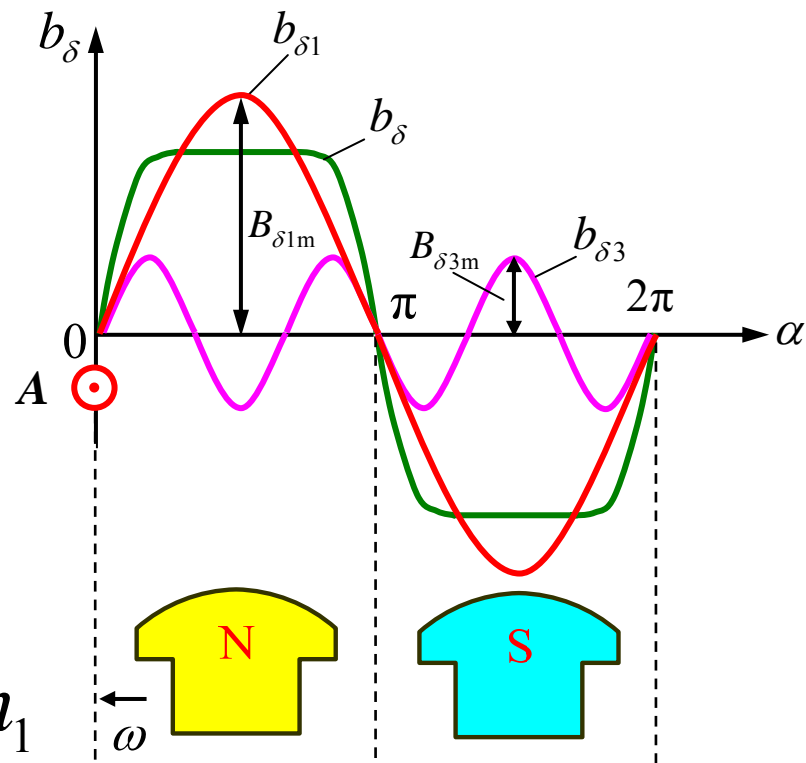
- 谐波磁场的特点

极对数 $p_v = vp$ 极距 $\tau_v = \frac{\tau}{v}$

槽距角 $\alpha_v = v\alpha$ 转速 $n_v = n_1$

- 谐波电动势的频率

$$f_v = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{vp n_1}{60} = vf$$



凸极同步电机的主极磁场

• 谐波电动势的有效值 $E_{\phi v} = 4.44 f_v N_1 k_{d pv} \Phi_v$

式中， $k_{d pv} = k_{dv} k_{pv}$ 为 v 次谐波绕组因数； Φ_v 为 v 次谐波每极磁通量。

$$k_{pv} = \sin v \frac{y_1}{\tau} 90^\circ, \quad k_{dv} = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}}$$

2) 考虑谐波电动势时相电动势的有效值

$$E_\phi = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots} = E_{\phi 1} \sqrt{1 + \left(\frac{E_{\phi 3}}{E_{\phi 1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{\phi 5}}{E_{\phi 1}}\right)^2 + \dots}$$

计算表明： $\left(\frac{E_{\phi 3}}{E_{\phi 1}}\right)^2 \ll 1 \quad \left(\frac{E_{\phi 5}}{E_{\phi 1}}\right)^2 \ll 1 \quad \dots \rightarrow E_\phi \approx E_{\phi 1}$

3) 谐波电动势的危害

- 使发电机电动势波形变坏，降低供电质量，影响用电设备的运行性能；
- 使发电机本身的附加损耗增大，效率下降，温升增加；
- 输电线中的高次谐波所产生的电磁场，会对附近的通信线路产生干扰。

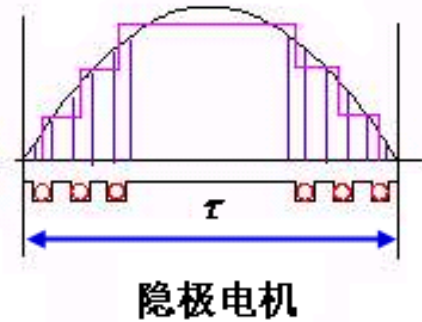
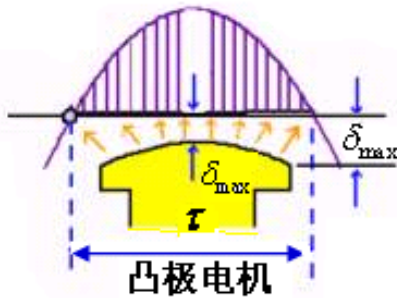
4) 谐波电动势的削弱方法

$$E_{\phi v} = 4.44 f_v N_1 k_{d p v} \Phi_v$$

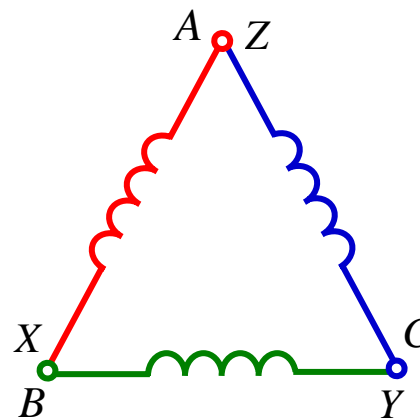
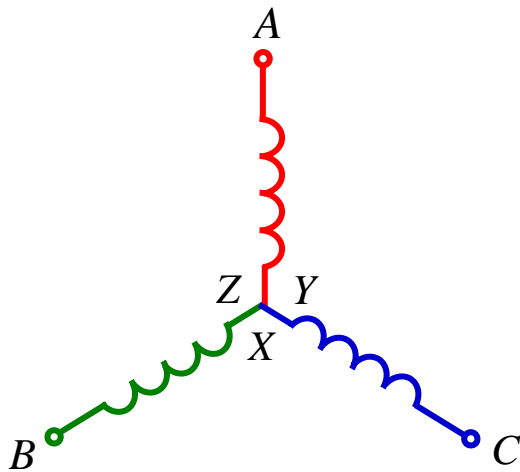
通过减小 $k_{d p v}$ 或 Φ_v 可降低 $E_{\phi v}$ 。

4) 谐波电动势的削弱方法

① 改善主磁场的分布



② 利用三相对称绕组的联结来消除线电动势中的3次及其倍数次谐波



■三相对称绕组为星形联结

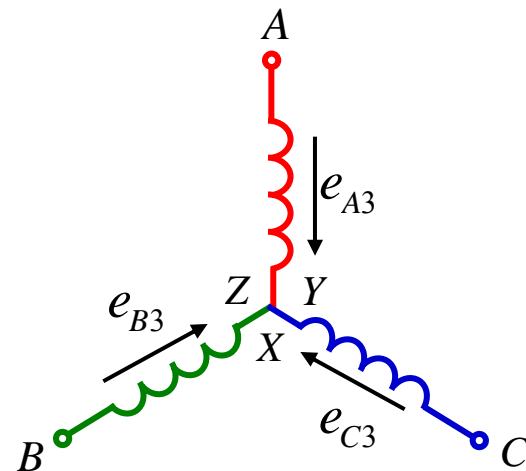
各相绕组的3次谐波电动势瞬时值分别为

$$e_{A3} = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3\omega t$$

$$e_{B3} = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3\omega t$$

$$e_{C3} = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3\omega t$$

➡ $e_{AB3} = e_{BC3} = e_{CA3} = 0$



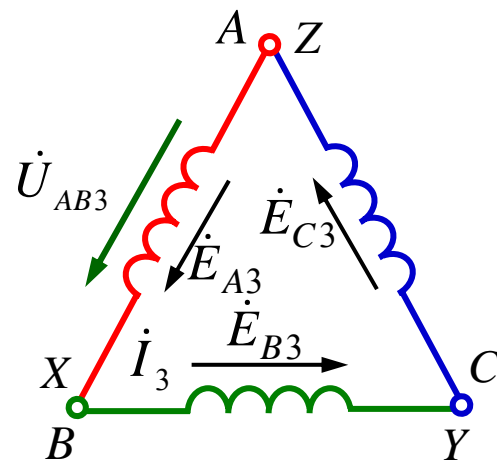
星形联结时，线电动势中不含3次或3的倍数次谐波电动势。

■三相对称绕组为三角形联结

$$e_{A3} = e_{B3} = e_{C3} = \sqrt{2}E_{\phi 3} \sin 3\omega t$$

$$\dot{E}_{A3} = \dot{E}_{B3} = \dot{E}_{C3} = \dot{E}_3$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_{A3} + \dot{E}_{B3} + \dot{E}_{C3}}{Z_{A3} + Z_{B3} + Z_{C3}} = \frac{3\dot{E}_3}{3Z_3} = \frac{\dot{E}_3}{Z_3}$$



式中， $Z_3 = Z_{A3} = Z_{B3} = Z_{C3}$ 是各相的3次谐波阻抗。

3次谐波线电压 \dot{U}_{AB3} 为

$$\dot{U}_{AB3} = -\dot{E}_{A3} + \dot{I}_3 Z_3 = -\dot{E}_3 + \dot{I}_3 Z_3 = 0$$

三角形联结时，线电动势中不含3次或3的倍数次谐波电动势，但有循环电流，会产生损耗。

现代大型同步发电机定子绕组一般采用星形联结。

③采用短距绕组

$$k_{pv} = \sin v \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = 0 \rightarrow v \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = K \cdot 180^\circ \rightarrow y_1 = \frac{2K}{v} \tau$$

$$\text{取 } 2K=v-1, \text{ 则 } y_1 = \frac{v-1}{v} \tau = \left(1 - \frac{1}{v}\right) \tau \quad (K=1,2,3\dots)$$

采用节距 $y_1 = \left(1 - \frac{1}{v}\right) \tau$ 可消除 v 次谐波。

④采用分布绕组

一般取 $2 \leq q \leq 6$ 。

当 $q=6$ 时, $k_{q1}=0.9561$, $k_{q3}=0.6440$, $k_{q5}=0.1927$ 。

例10-4 一台三相交流电机，定子绕组为双层绕组，定子槽数 $Q=36$ ，极数 $2p=4$ ，节距 $y_1=8$ ，计算： k_{dp1} 、 k_{dp3} 、 k_{dp5} 、 k_{dp7} 。

解： $\tau = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9$ $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

$$k_{dp1} = k_{d1} k_{p1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \frac{\sin 3 \times \frac{20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{20^\circ}{2}} \sin \frac{8}{9} \times 90^\circ$$

$$= 0.9598 \times 0.9848 = 0.9542$$

$$\alpha = 20^\circ, q = 3$$

$$k_{dp3} = k_{d3}k_{p3} = \frac{\sin q \frac{3\alpha}{2}}{q \sin \frac{3\alpha}{2}} \sin 3 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \frac{\sin 3 \times \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}} \sin 3 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ$$

$$= 0.6667 \times (-0.866) = -0.577$$

$$k_{dp5} = k_{d5}k_{p5} = \frac{\sin q \frac{5\alpha}{2}}{q \sin \frac{5\alpha}{2}} \sin 5 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \frac{\sin 3 \times \frac{5 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{5 \times 20^\circ}{2}} \sin 5 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ$$

$$= 0.2176 \times 0.6428 = 0.1399$$

$$\alpha = 20^\circ, q = 3$$

$$k_{dp7} = k_{d7}k_{p7} = \frac{\sin q \frac{7\alpha}{2}}{q \sin \frac{7\alpha}{2}} \sin 7 \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \frac{\sin 3 \times \frac{7 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{7 \times 20^\circ}{2}} \sin 7 \times \frac{8}{9} \times 90^\circ$$

$$= -0.1774 \times (-0.342) = 0.0606$$

小结

1. 对交流绕组的基本要求是在导体数一定时能获得较大的基波电动势(磁动势), 电动势(磁动势)接近正弦波, 三相绕组的电动势(磁动势)对称。

2. 电动势星形相量图是分析交流绕组最基本的一种方法, 先利用它分相, 然后按电动势相加的原则连接绕组。

■绕组的基本参数:

极距 $\tau = \frac{Q}{2p}$

槽距角 $\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Q}$

每极每相槽数 $q = \frac{Q}{2pm}$

3.交流绕组的形式很多，通常小功率交流电机多采用单层绕组，功率较大的交流电机多采用双层短距绕组，以削弱高次谐波，改善电动势和磁动势的波形。

■**单层分布绕组的特点：**每个槽内只有一个线圈边，线圈数等于槽数的一半；每相有 p 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成；最大并联支路数 $a_{max}=p$ ；每相串联匝数 $N_1 = \frac{pqN_k}{a}$ 。

■**双层分布绕组的特点：**每个槽内有两个线圈边，线圈数等于槽数；每相有 $2p$ 个线圈组，每个线圈组由 q 个线圈串联而成；最大并联支路数 $a_{max}=2p$ ；每相串联匝数 $N_1 = \frac{2pqN_k}{a}$ 。

4.在正弦分布磁场下交流绕组的相电动势为

$$E_{\phi_1} = 4.44 f N_1 k_{dp1} \Phi_1$$

式中， N_1 为绕组的每相串联匝数。

$$N_1 = \begin{cases} \frac{pqN_K}{a} & \text{单层绕组} \\ \frac{2pqN_K}{a} & \text{双层绕组} \end{cases}$$

基波绕组因数 $k_{dp1} = k_{p1} k_{d1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$