



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践(A)

9.1-交流电机的旋转磁场与感应电势

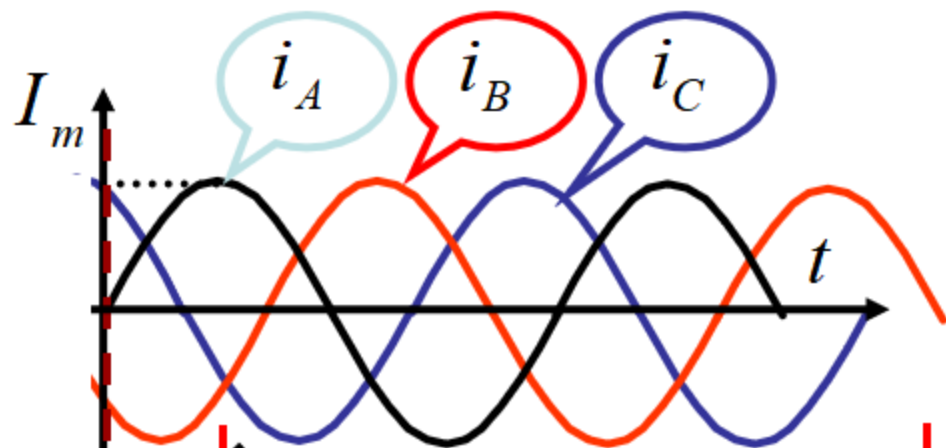
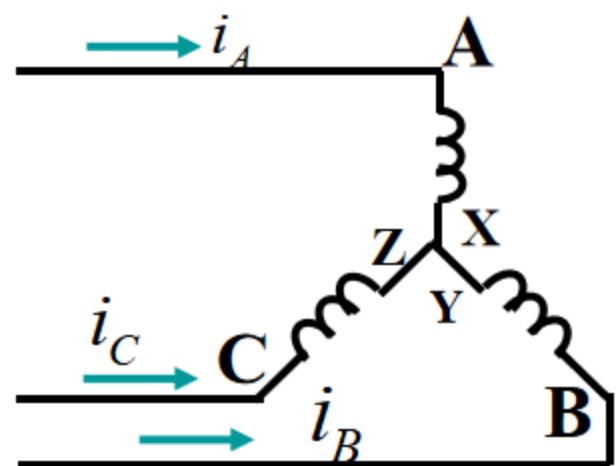


目 录

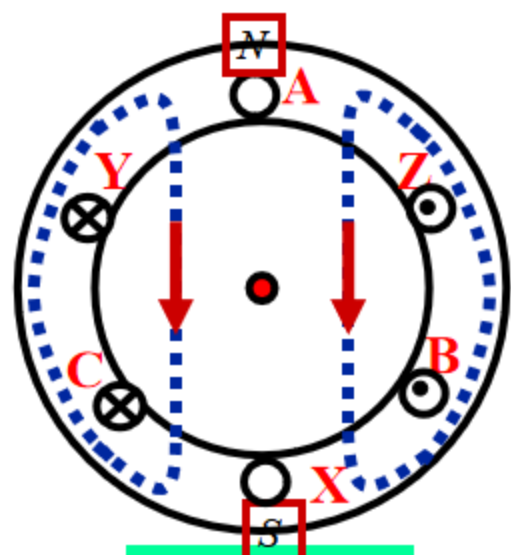
- 1、异步电机的基本原理回顾
- 2、异步电动机结构
- 3、多相对称绕组产生的旋转磁场
- 4、正弦磁场下交流绕组的磁感应电势



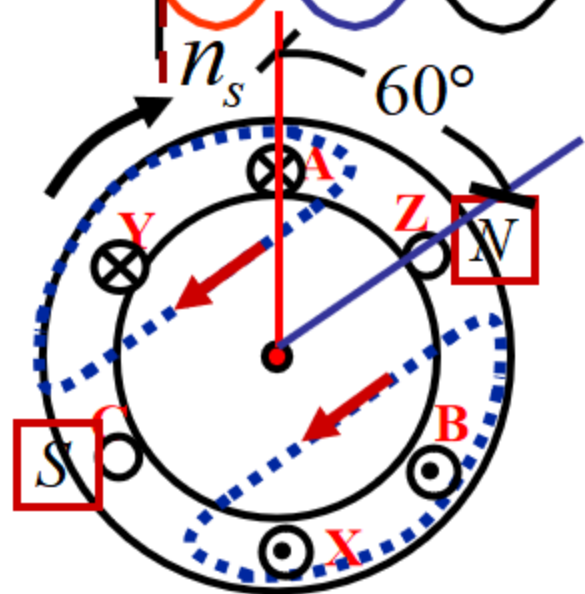
1. 异步电机的基本原理回顾



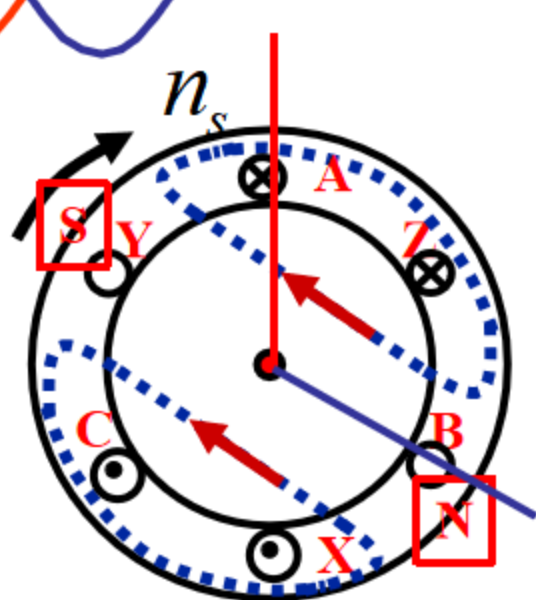
$$\begin{cases} i_A = I_m \sin \omega t \\ i_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



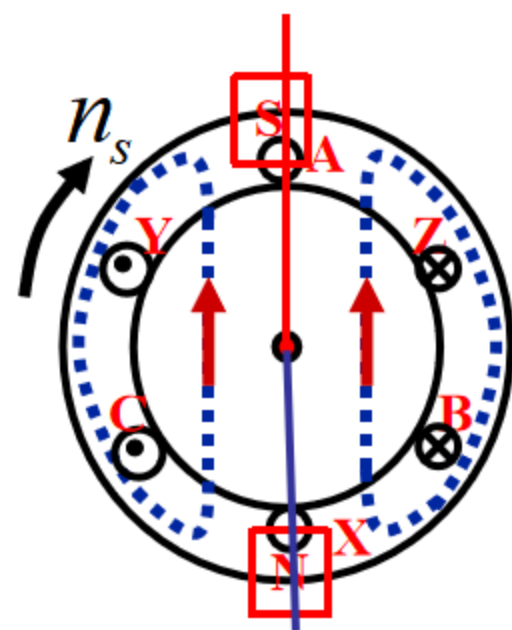
$$\omega t = 0$$



$$\omega t = 60^\circ$$



$$\omega t = 120^\circ$$



$$\omega t = 180^\circ$$



1. 异步电机的基本原理回顾

三相异步电动机的转动原理

→ 定子三相绕组通入三相交流电

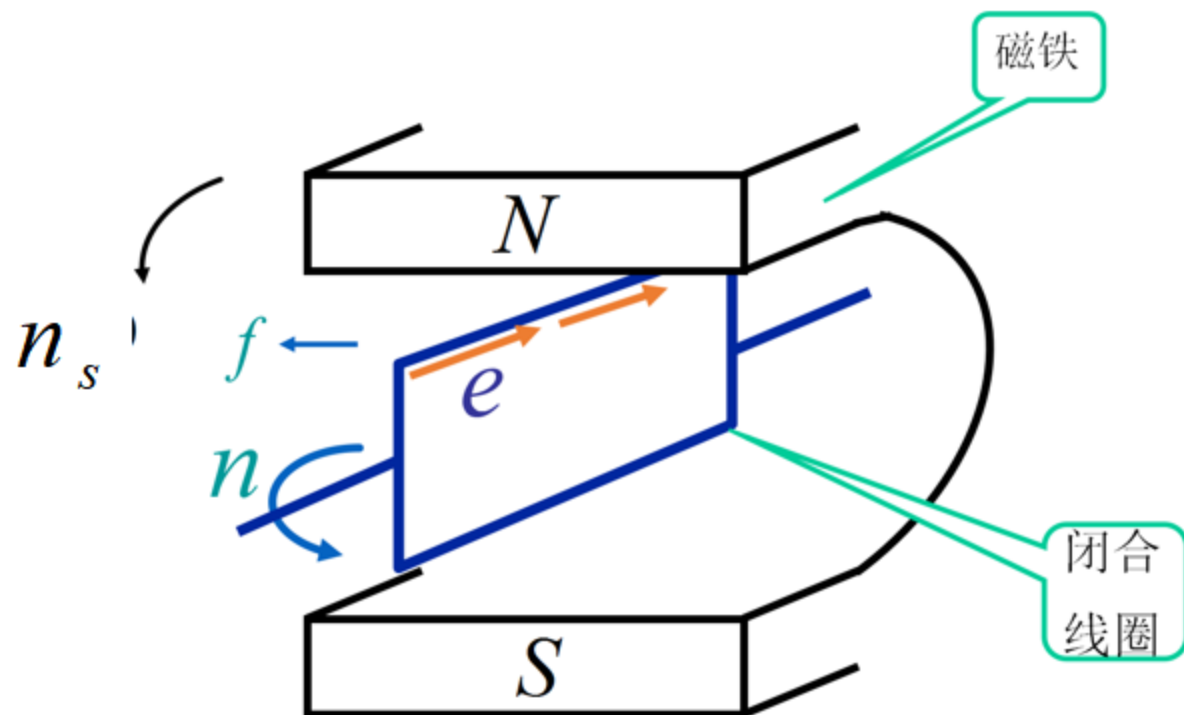
→ 产生旋转磁场 $n_s = \frac{60f}{p}$ (转/分)

→ 转子导线切割磁力线产生感应电动势
 $e = B \cdot l \cdot v$ (右手定则)

→ 转子闭合导线产生电流 i

→ 转子通电导线在磁场中受电磁力 $f = B \cdot l \cdot i$ (左手定则)

→ 电磁力在转子上形成电磁转矩 **转子转速 n**



1. 异步电机的基本原理回顾

电动机转子转动方向与定子所产生的同步磁场旋转的方向一致，但转子转速 n 不可能达到与旋转磁场的转速相等，即

$$n < n_s \quad \Rightarrow \quad \text{异步电动机}$$

因此，转子转速与旋转磁场转速间必须要有差别。而异步电动机之所以被冠以“异步”二字，是因为其转子的转速 n 永远也跟不上旋转磁场的转速 n_s 。两者存在转速差。



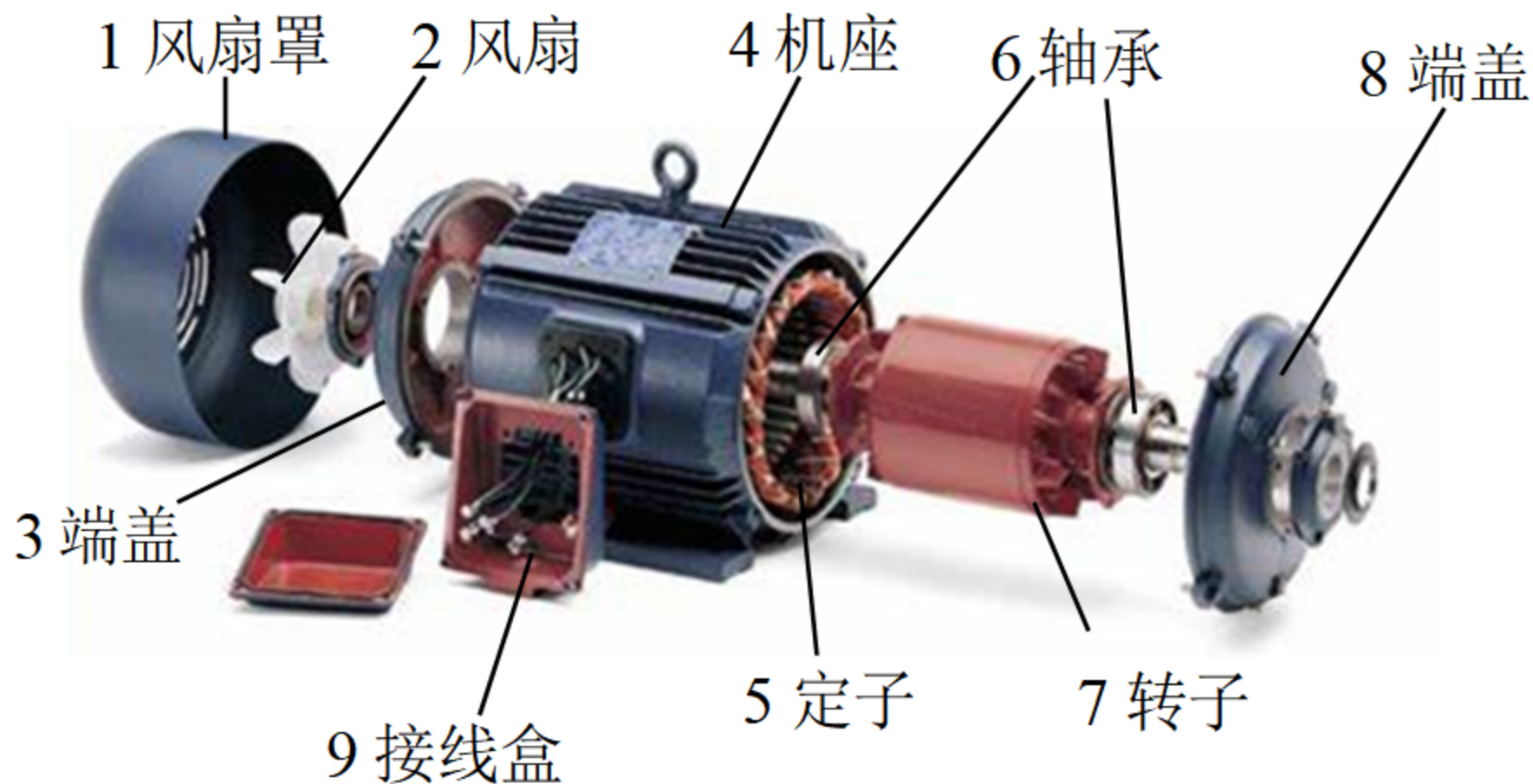
目 录

- 1、交流电机的基本工作原理
- 2、异步电动机结构
- 3、多相对称绕组产生的旋转磁场
- 4、正弦磁场下交流绕组的磁感应电势



2. 异步电动机结构

感应电机结构

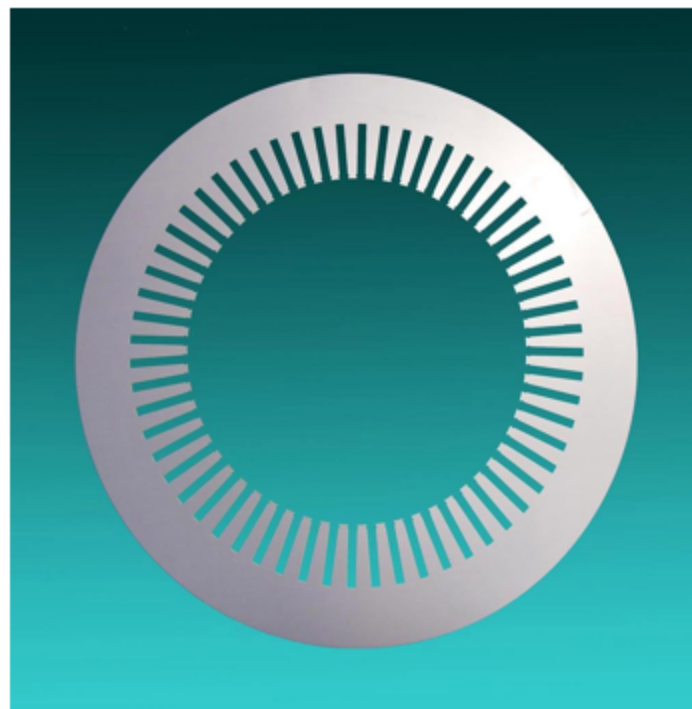
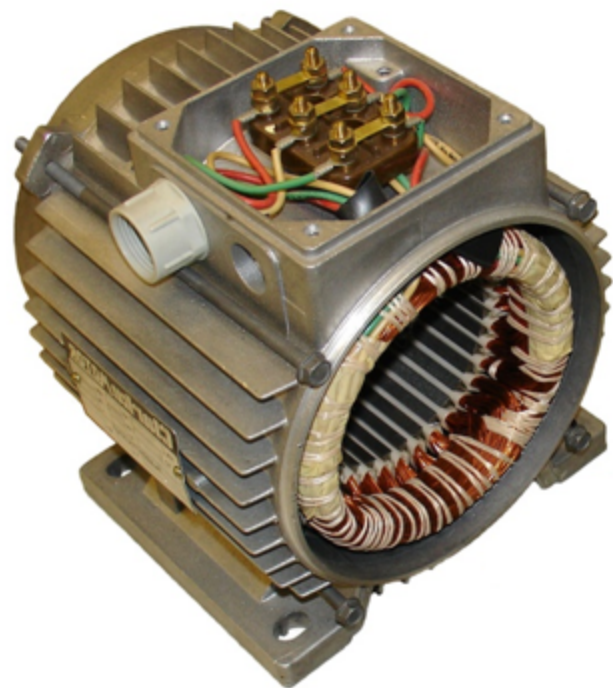


2. 异步电动机结构

感应电机定子

定子(stator): 定子铁芯、定子绕组和机座

- 定子铁芯作用：构成磁路的一部分；用于安放定子绕组。
- 构成：**0.3mm或0.5mm** 硅钢片叠成，导磁性能好，减小涡流损耗。
- 定子铁芯内圆开槽；



2. 异步电动机结构

感应电机定子

为了减小铁芯损耗，交流电机的定子铁芯必须用电阻系数大、磁滞回线面积小的**薄板材料——硅钢片**，**经冲制和绝缘处理后叠压而成**。电机工业大量使用厚度为**0.35~0.50 mm**的硅钢片。

硅钢片是铁硅合金钢片，按制造工艺不同**分为热轧和冷轧两大类**。冷轧又有各向同性(无取向)和各向异性(有取向)两种。

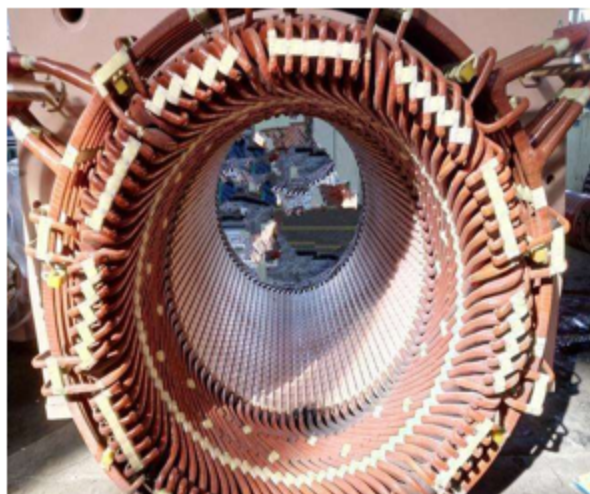
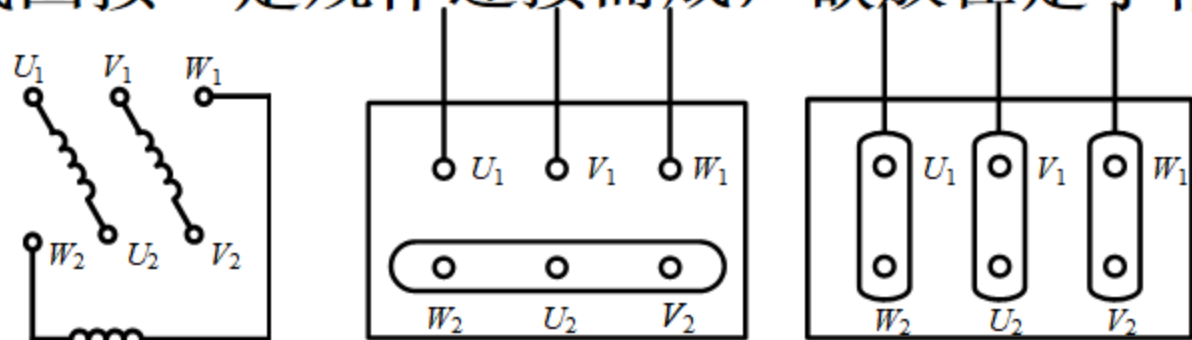
硅钢片是一种含碳极低的硅铁软磁合金，一般**含硅量为0.5~4.5%**。**加入硅可提高铁的电阻率和最大磁导率，降低矫顽力、铁芯损耗和磁时效**。世界硅钢片产量约占钢材总量的**1%**。



2. 异步电动机结构

感应电机定子绕组

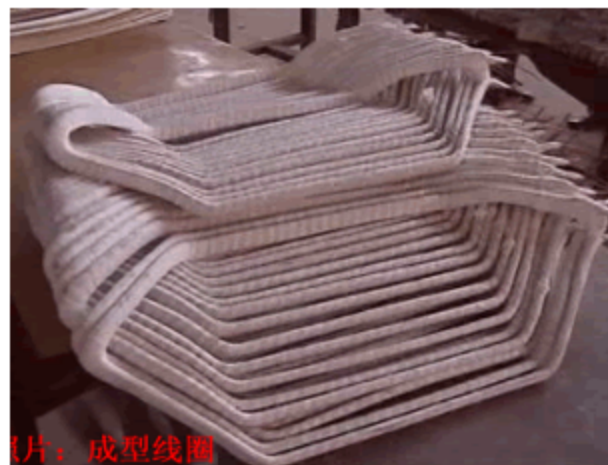
- 三相对称绕组，由许多线圈按一定规律连接而成，嵌放在定子槽中。
- 接法：星形或三角形
- 作用：电路部分



定子绕组形式



散嵌绕组



片：成型线圈

成型绕组

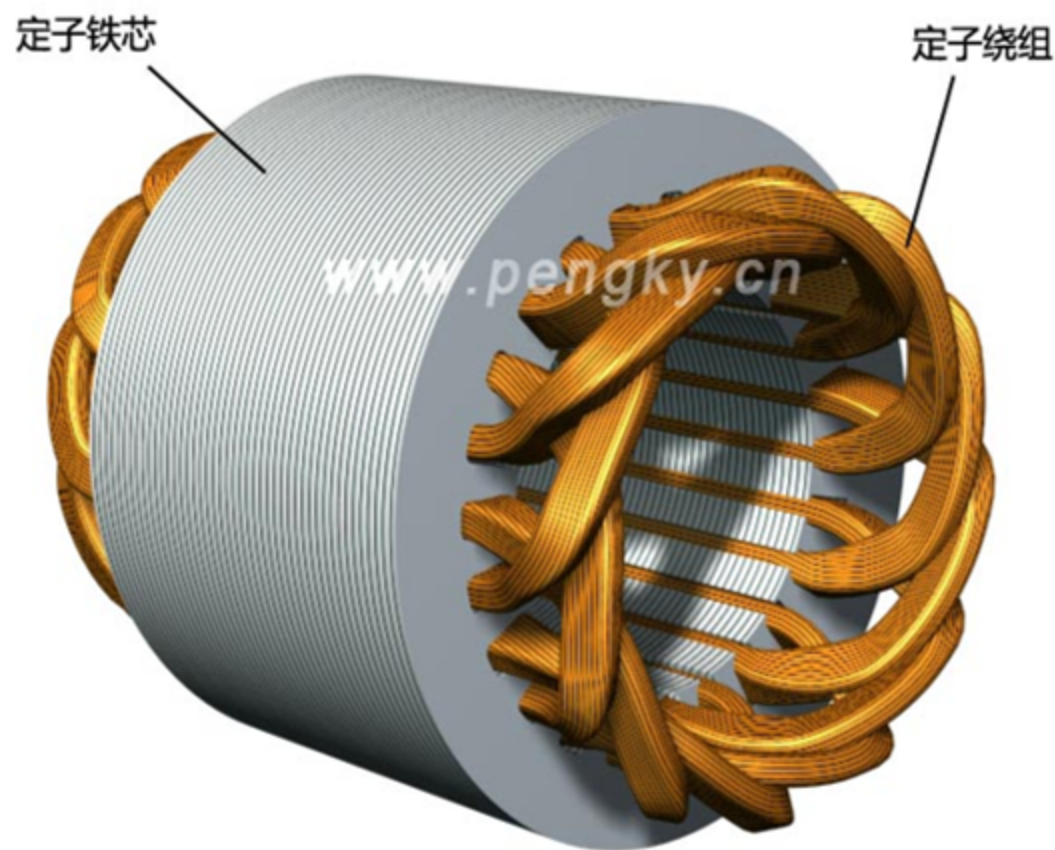


2. 异步电动机结构

交流绕组的构成原则和分类

交流绕组的分类

- ① **相数**：单相和多相绕组；
- ② 根据槽内**层数**：单层绕组和双层绕组；
- ③ 根据**绕法**：叠绕组和波绕组；



鹏芃科艺 www.pengky.cn



2. 异步电动机结构

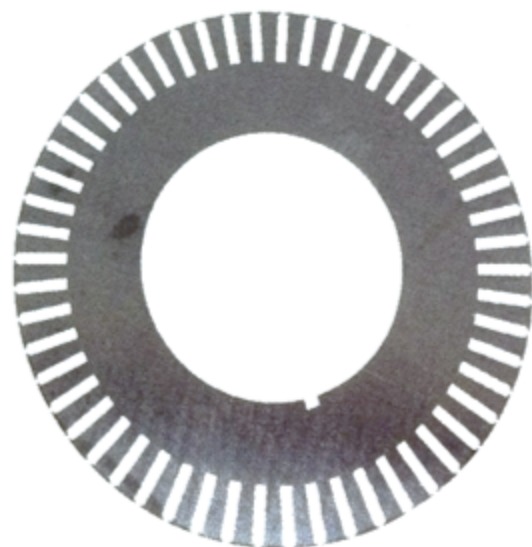
感应电机转子

转子：转子铁芯，转子绕组，转轴

- 转子铁芯：硅钢片叠压而成，外圆开槽，
- 作用：磁路的一部分；用来安放转子绕组。



转子铁心



转子冲片



2. 异步电动机结构

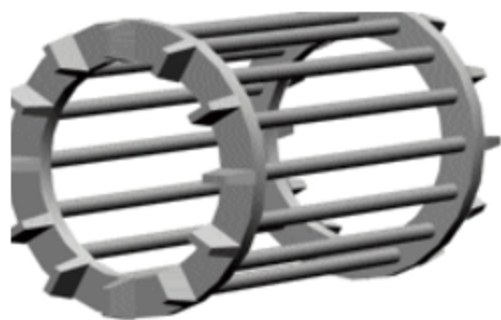
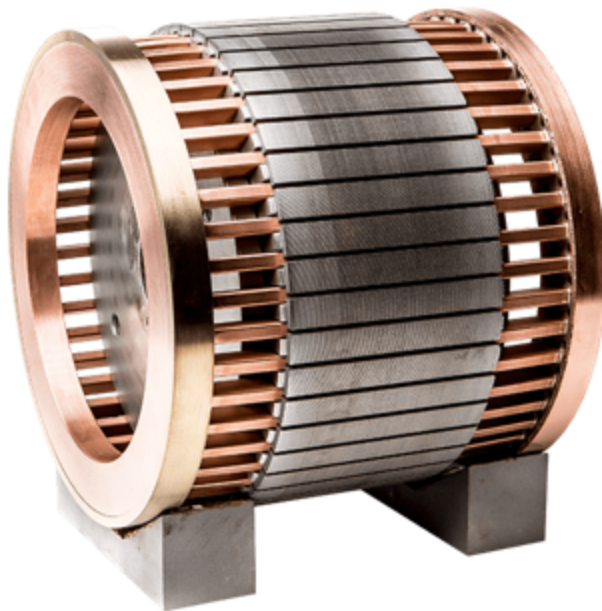
感应电机转子绕组

- 转子绕组：笼型和绕线型

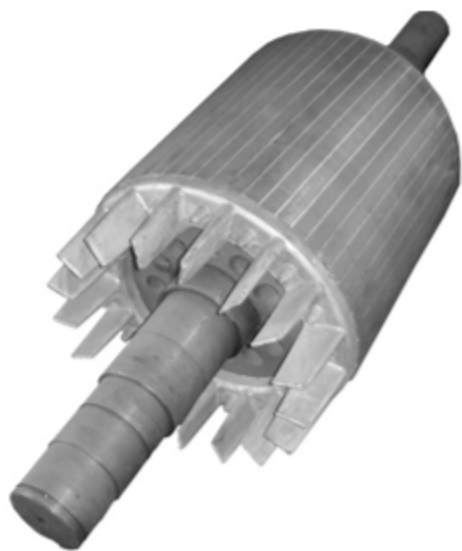
作用：转子的电路部分，产生感应电势，流过感应电流，产生电磁转矩。

笼形绕组：由转子槽内导条和两端的端环构成。

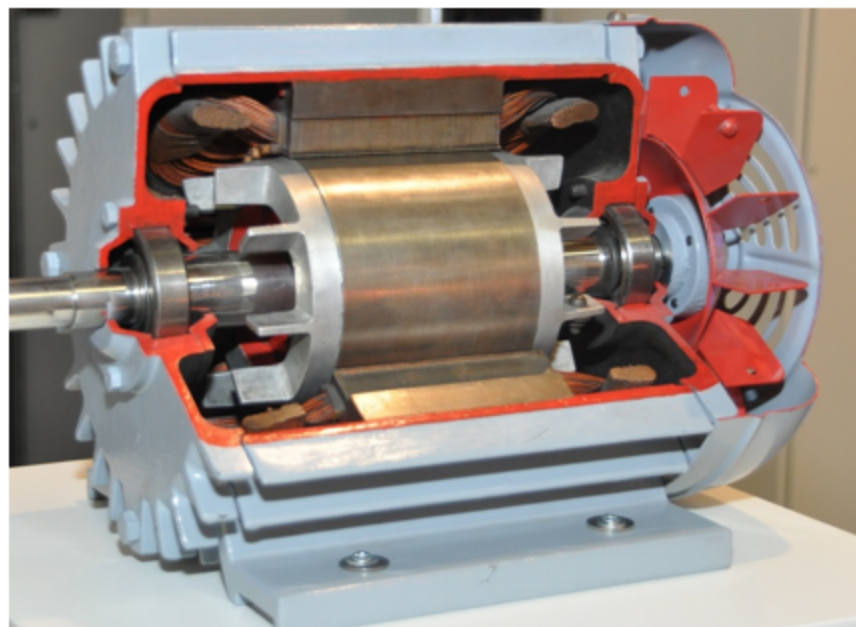
铜条转子



绕组自行闭合

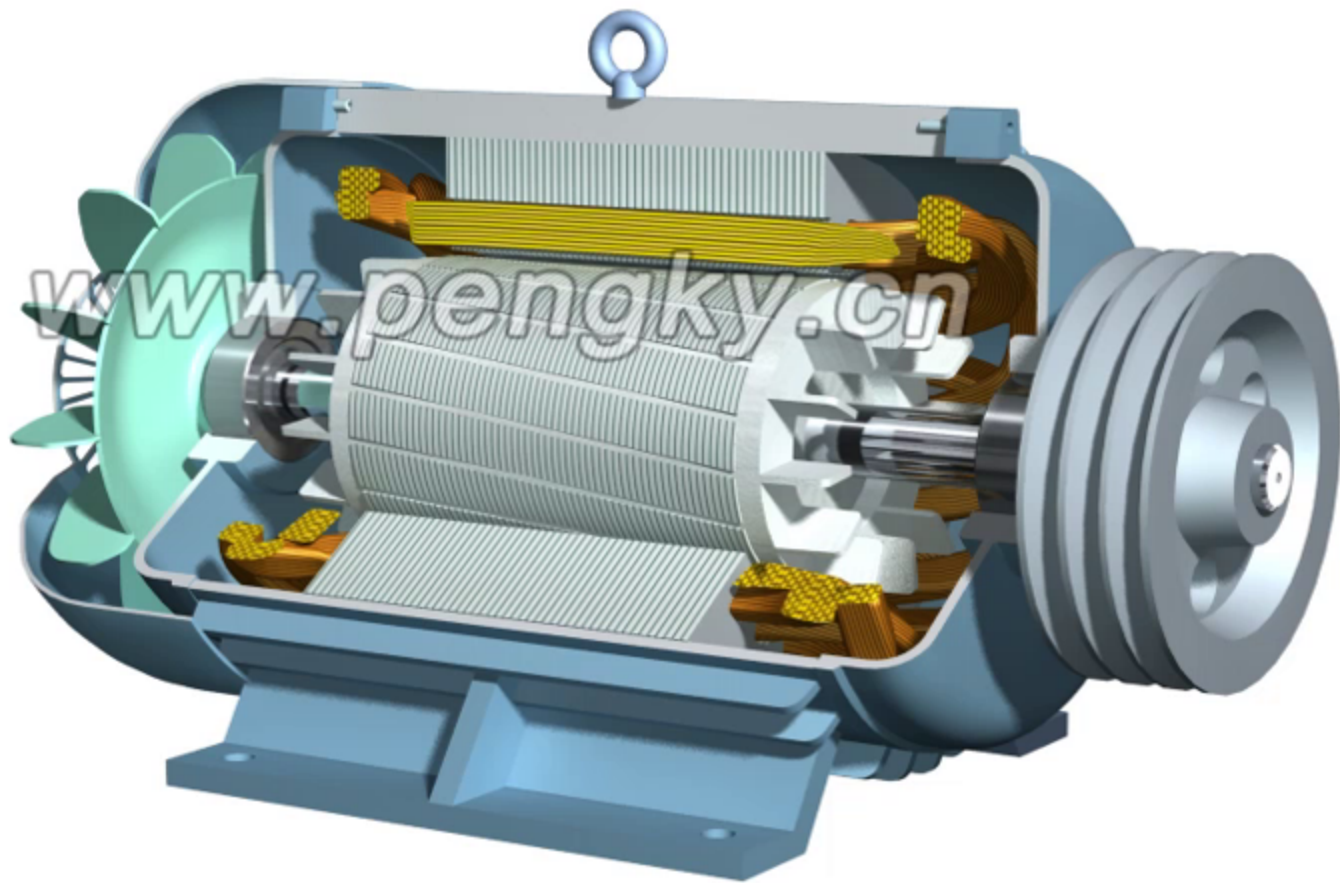
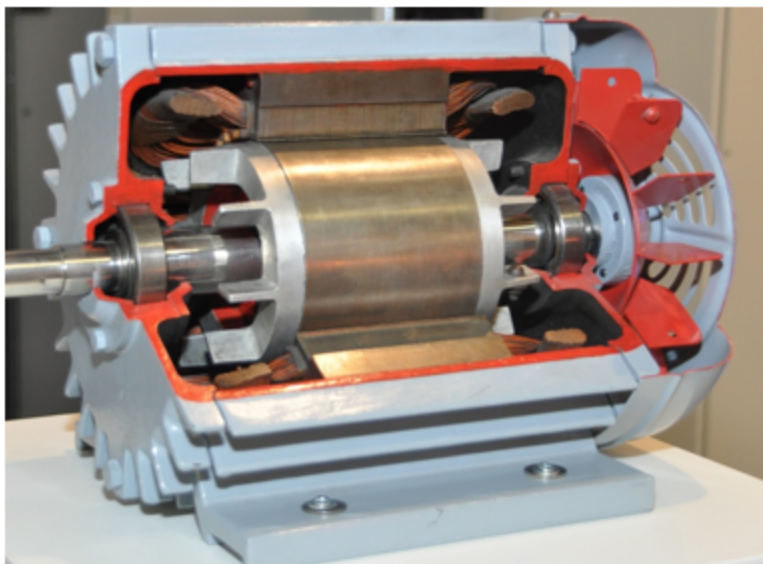


铸铝转子



2. 异步电动机结构

感应电动机结构



鹏芃科艺 www.pengky.cn

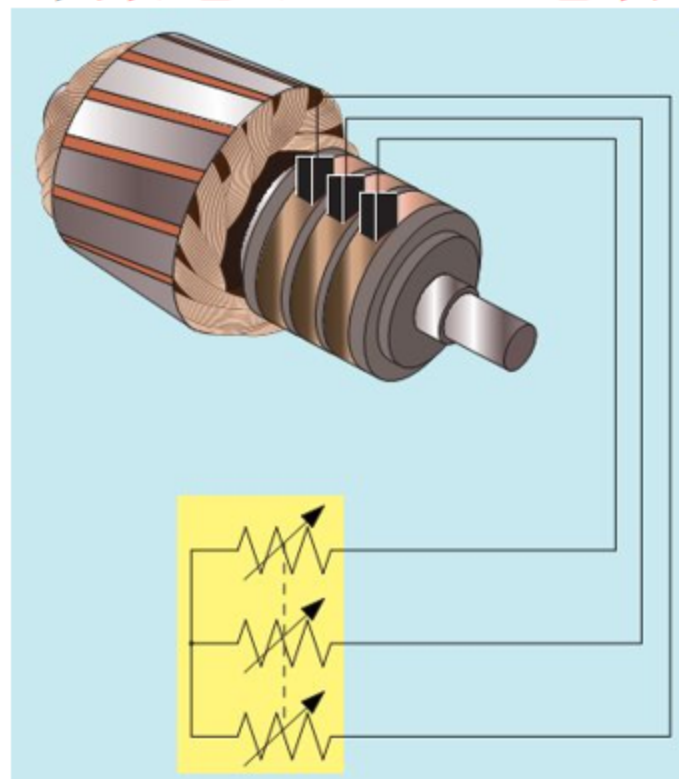
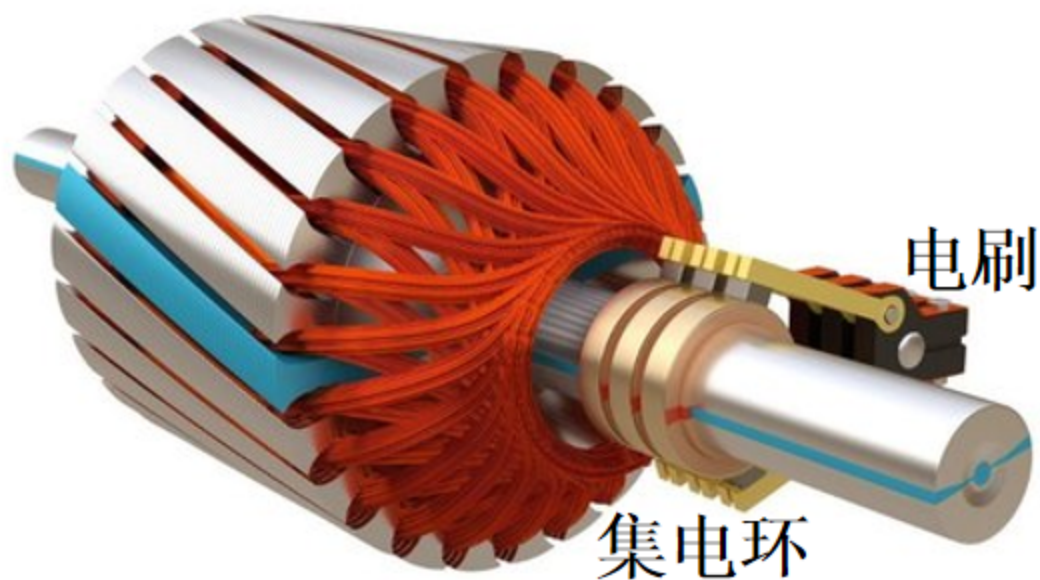


2. 异步电动机结构

感应电机转子绕组

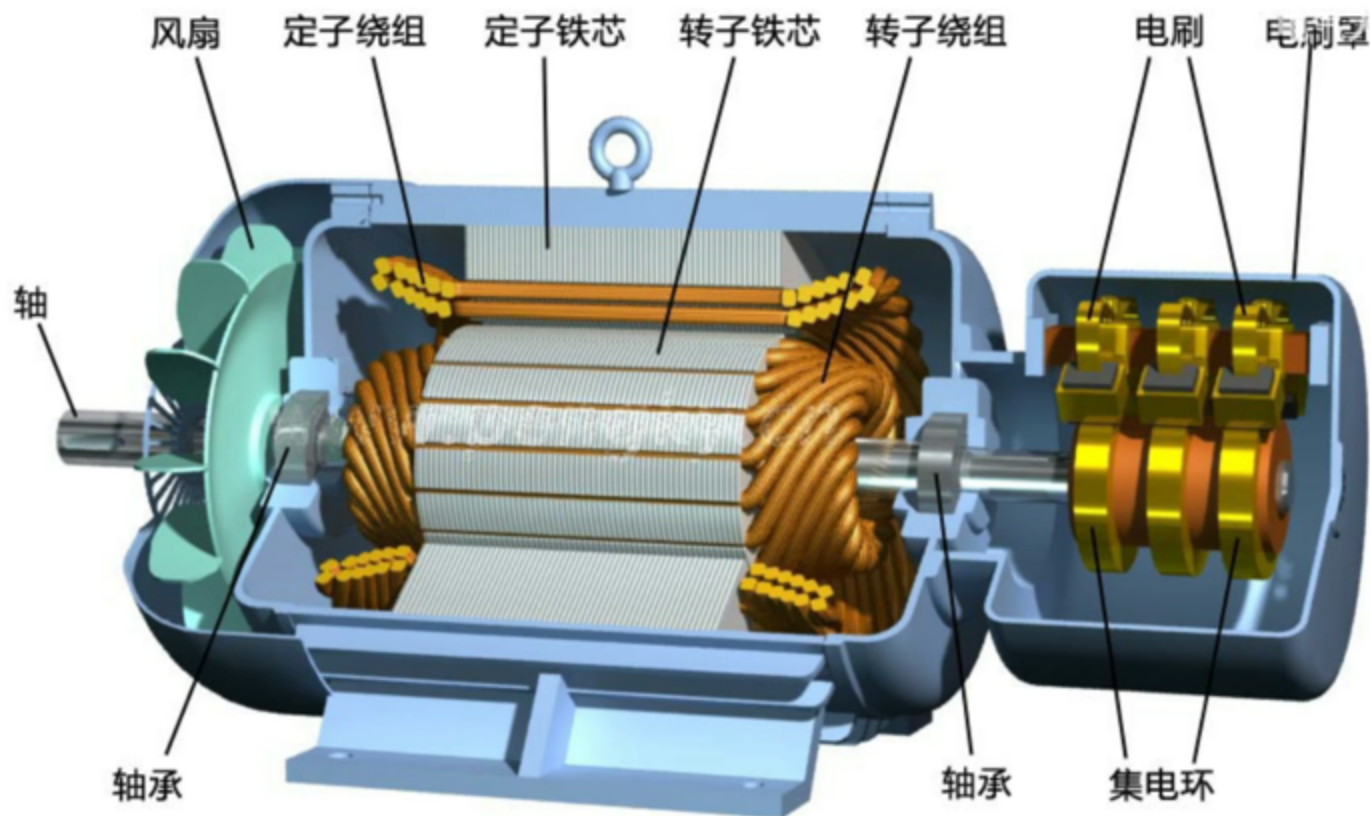
绕线型转子绕组

采用对称三相绕组，三个出线端通过导电杆接三个**集电环**，通过**电刷**与外电路连接。



2. 异步电动机结构

转子绕线式感应电机整体图

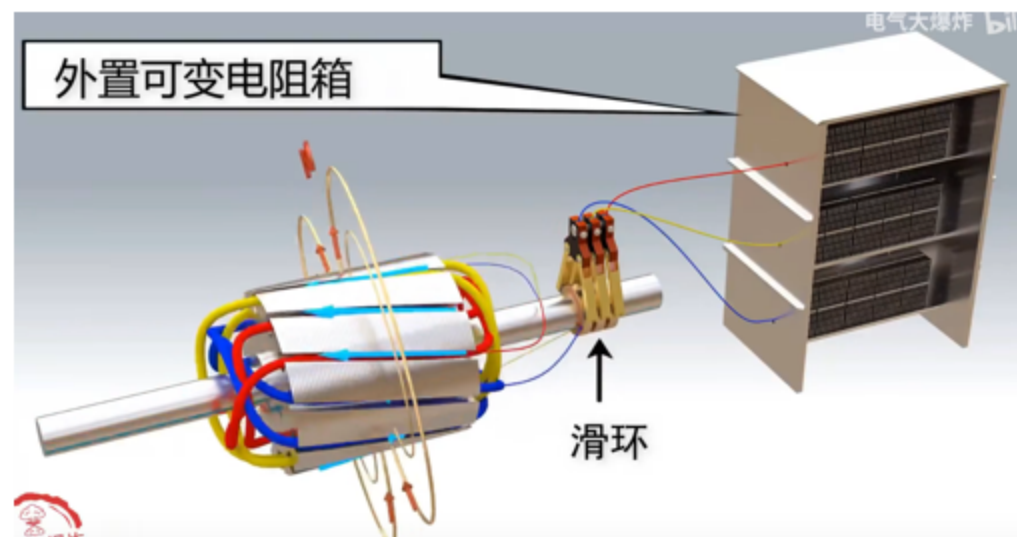


转子绕线式感应电机整体图



转子集电环

接线盒



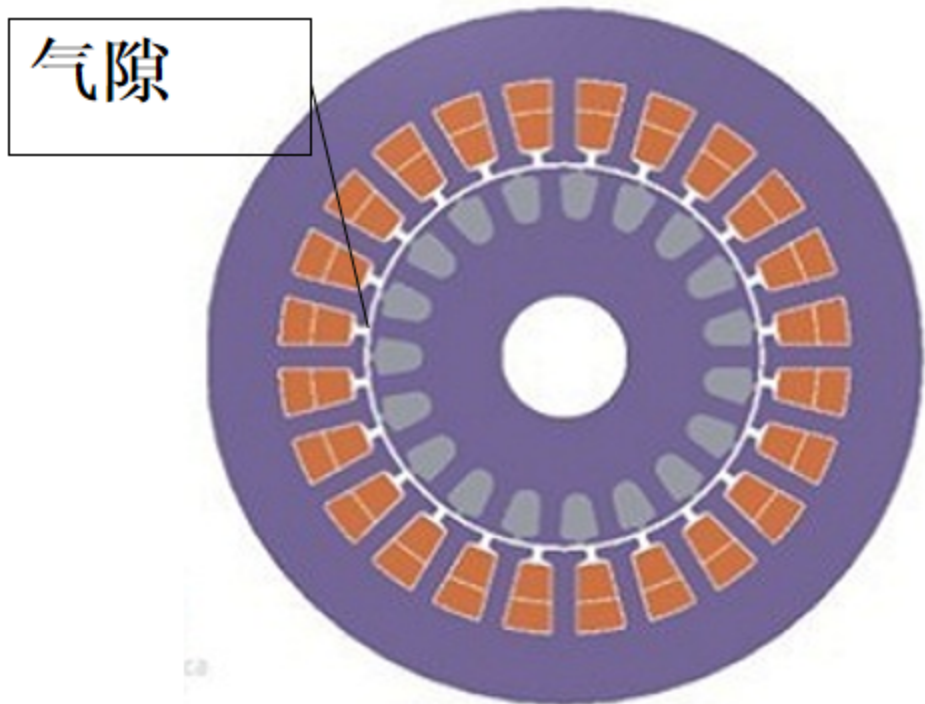
绕线式转子与外置可变电阻箱



2. 异步电动机结构

气隙

0.2mm~1.5mm



- 作用：磁路组成部分，耦合定、转子磁场，实现机电能量转换。
- 气隙小：减小电机主磁路的磁阻，降低电机的励磁电流，提高电机的功率因数；
- 但气隙太小，引起装配困难和运转不安全



目 录

- 1、交流电机的基本工作原理
- 2、异步电动机结构
- 3、多相对称绕组产生的旋转磁场
- 4、正弦磁场下交流绕组的磁感应电势



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.1 单相集中绕组的磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

3.4 多相电机的对称多相绕组

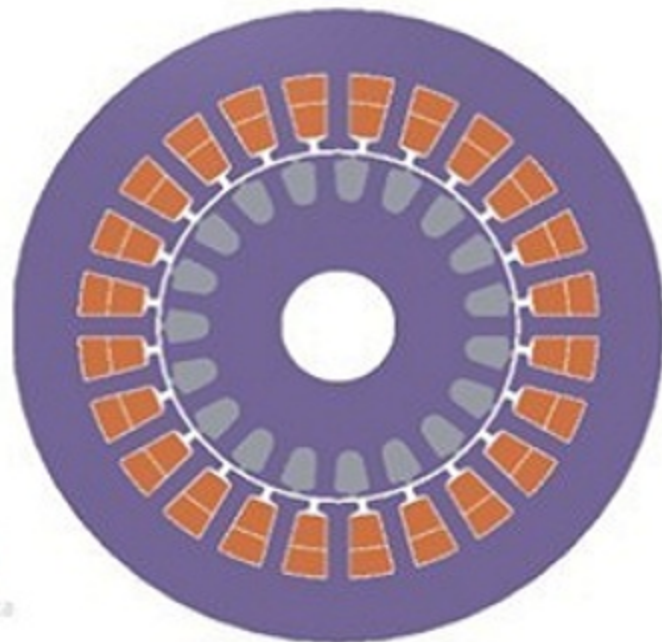


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.1 单相集中绕组的磁场:

假定

- 1) 绕组中的电流随时间按正弦规律变化
- 2) 槽内电流集中在槽中心处
- 3) 定、转子之间的气隙均匀, 忽略齿槽的影响
- 4) 定、转子铁心的磁导率为无穷大, 即铁心中的磁位降可忽略不计, 且磁路不饱和

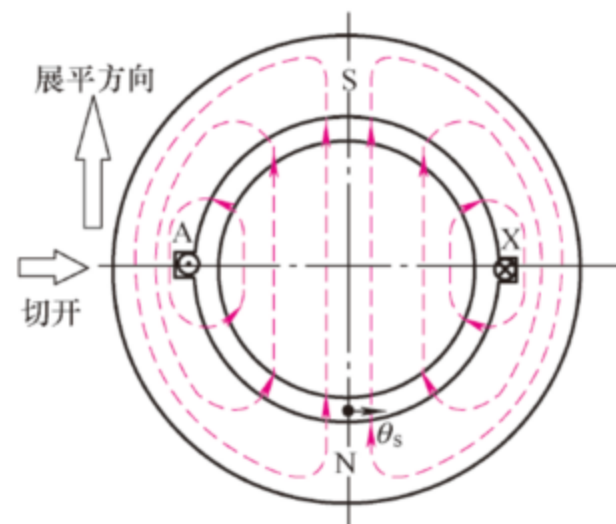


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

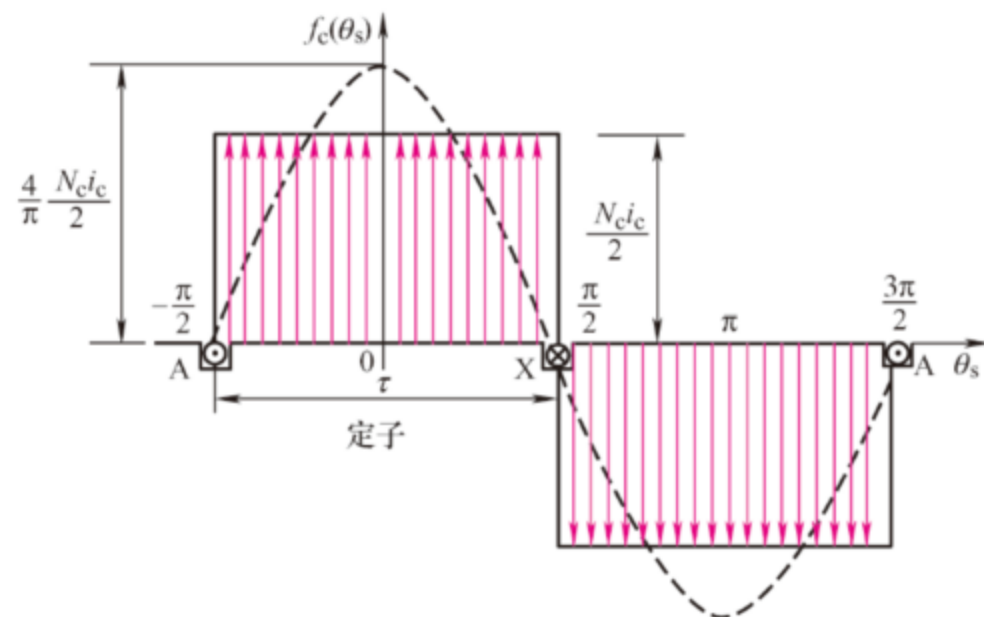
3.1 单相集中绕组的磁场:

线圈匝数为 N_c ，通以电流 $i_c = \sqrt{2}I_c \cos \omega t$ 。

设定磁动势正方向：
设磁力线由定子进入转子，磁动势为正；
而磁力线由转子进入定子，磁动势为负。



a) 整距线圈产生的磁场



b) 整距线圈磁动势沿气隙分布图

$$f_c = \frac{N_c i_c}{2} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2}$$

$$f_c = -\frac{N_c i_c}{2} \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{3\pi}{2}$$

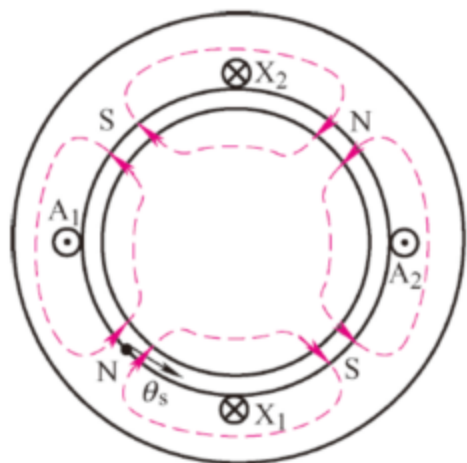
$$p = 1$$



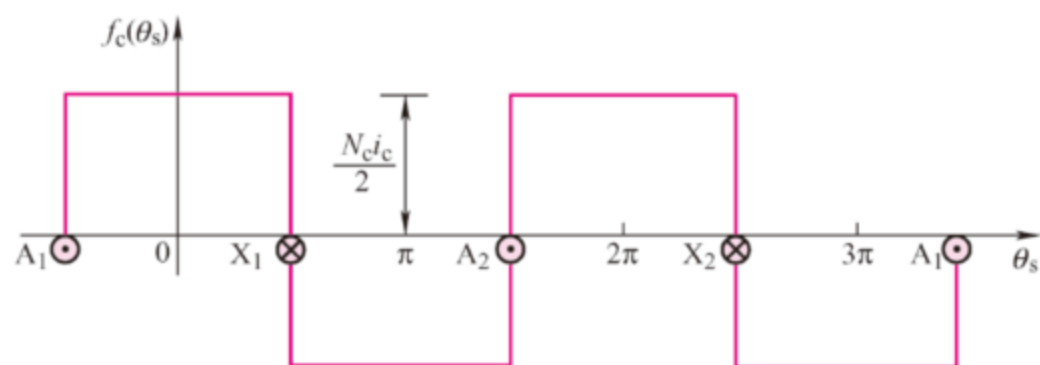
3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.1 单相集中绕组的磁场:

$$p = 2$$



a) 磁场分布



b) 磁动势沿气隙分布图

线圈产生的磁动势在空间的分布波形是矩形波，宽度等于线圈的宽度

一对极下的磁动势表达式为:

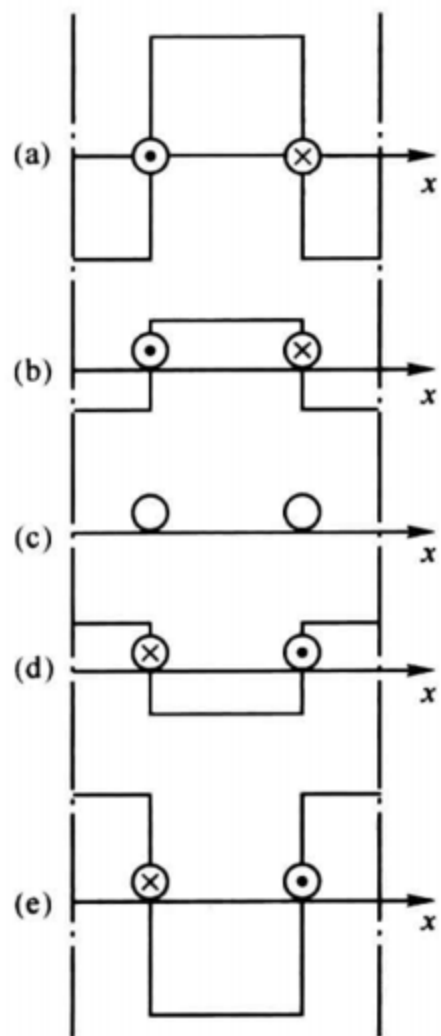
(θ_s 是空间电角度)

$$f_c(\theta_s, t) = \begin{cases} \frac{N_c i_c}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t & \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -\frac{N_c i_c}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t & \left(\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases}$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.1 单相集中绕组的磁场:



$$f_c(\theta_s, t) = \begin{cases} \frac{N_c i_c}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t & \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ -\frac{N_c i_c}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t & \left(\frac{\pi}{2} \leq \theta_s \leq \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases}$$

随时间按正弦规律变化的磁动势

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

空间位置固定不变，幅值大小和正负随时间变化的磁动势称为脉振磁动势，其脉振频率等于电流的频率



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.1 单相集中绕组的磁场:

整距线圈磁动势

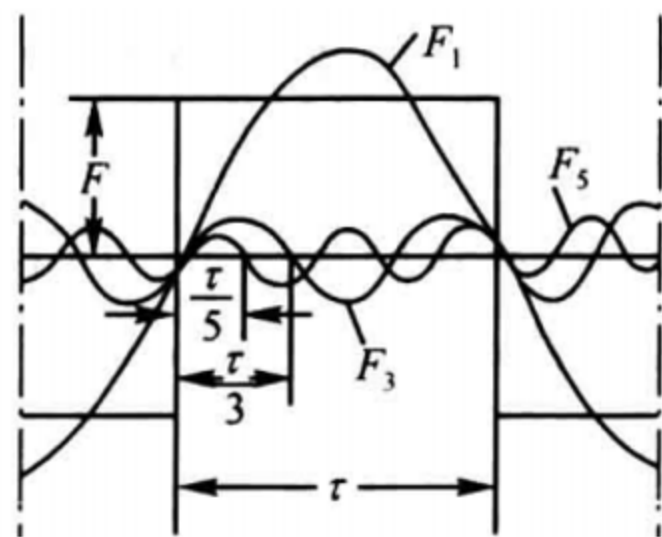
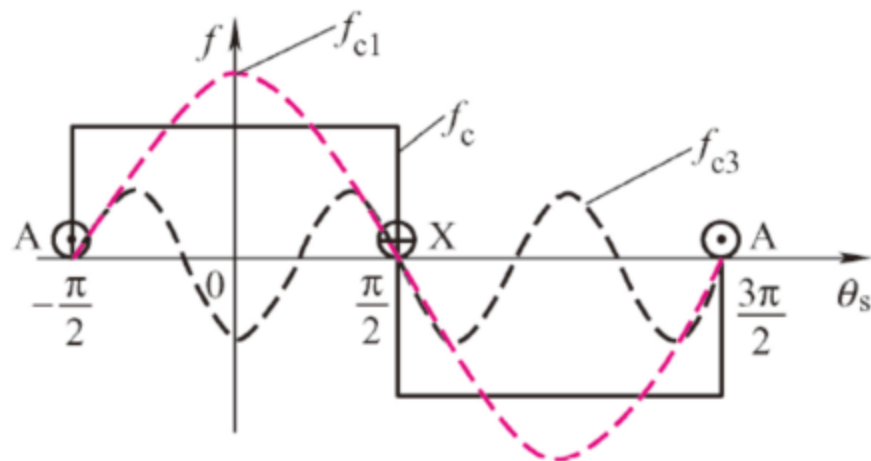


图3-15 矩形波磁势及其分解后的谐波曲线

$$\begin{aligned} f_c(\theta_s, t) &= f_{c1}(\theta_s, t) + f_{c3}(\theta_s, t) + f_{c5}(\theta_s, t) + \dots \\ &= F_{c1} \cos \theta_s \cos \omega t - F_{c3} \cos 3\theta_s \cos \omega t + F_{c5} \cos 5\theta_s \cos \omega t - \dots \end{aligned}$$

基波磁动势振幅

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

v 次谐波磁动势振幅

$$F_{cv} = \frac{1}{v} F_{c1}$$

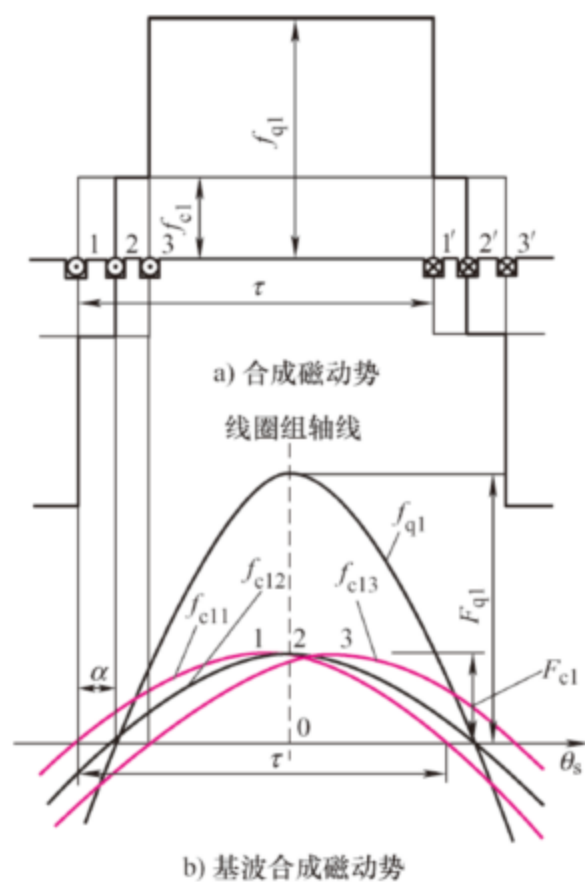
电流瞬时值达到最大值时每极基波磁动势的幅值。

电流瞬时值达到最大值时每极v次谐波磁动势的幅值。



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:



对于分布式绕组，构成线圈组的 q 个线圈的磁动势大小是完全相同的，只是在空间上错开一个槽距角 α 。将各个线圈的矩形波磁动势逐点相加，所得合成磁动势即为线圈组磁动势，它是一个阶梯形波。

将 q 个线圈的基波磁动势逐点相加，可得到线圈组的基波合成磁动势。

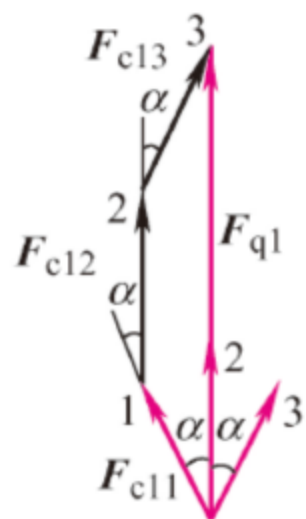


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

整距线圈组基波合成磁动势

$$\begin{aligned}
 f_{q1}(\theta_s, t) &= f_{c11}(\theta_s, t) + f_{c12}(\theta_s, t) + f_{c13}(\theta_s, t) \\
 &= (qf_{c11})k_{b1} = qF_{c1}k_{b1} \cos \theta_s \cos \omega t \\
 &= F_{q1} \cos \theta_s \cos \omega t
 \end{aligned}$$

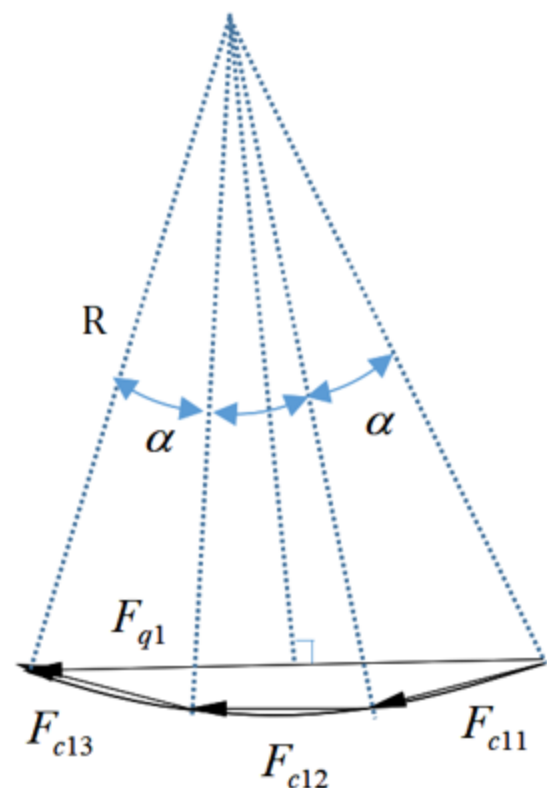


线圈组基波合成磁动势幅值

$$F_{q1} = qF_{c1}k_{b1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}qN_c I_c}{2} k_{b1} = 0.9qN_c I_c k_{b1}$$

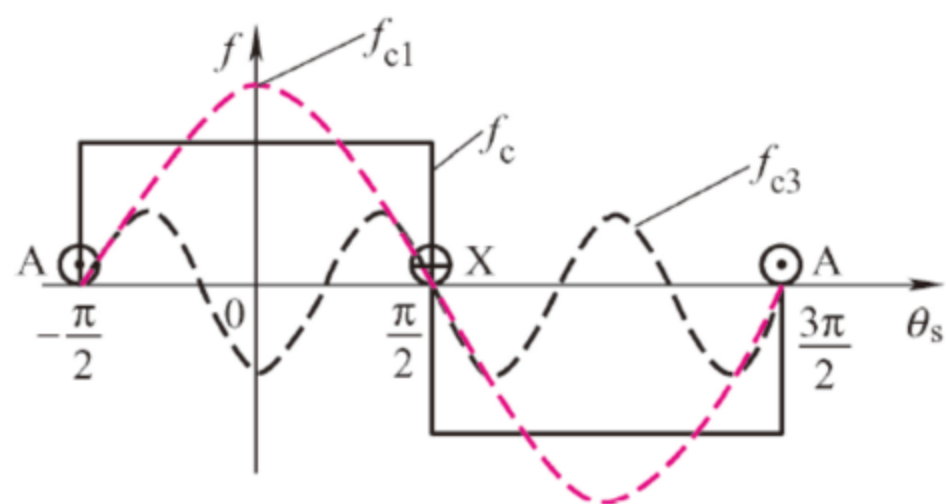
线圈基波磁动势的分布系数

$$k_{b1} = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:



线圈组每极谐波磁动势幅值

$$F_{qv} = qF_{cv}k_{bv} = \frac{1}{v} 0.9qN_c I_c k_{bv}$$

线圈组每次谐波磁动势的分布系数

$$k_{bv} = \frac{\sin qv \frac{\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}}$$

Sample:

$$q = 3, \alpha = 20^\circ; k_{b1} \approx 0.960$$

$$k_{b5} \approx 0.218; k_{b7} \approx -0.177$$

整距线圈组总磁动势

$$f_q(\theta_s, t) = (F_{q1} \cos \theta_s - F_{q3} \cos 3\theta_s + F_{q5} \cos 5\theta_s - \dots) \cos \omega t$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

$$N = pqN_c$$

N_c 单个线圈匝数
 N 一相绕组匝数,

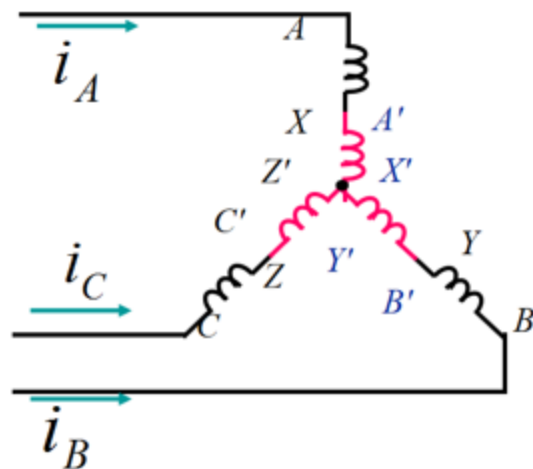
$$qN_c = \frac{N}{p}$$

用每相绕组匝数表示基波磁动势幅值:

$$F_{\phi 1} = F_{q1} = 0.9qN_c I_c k_{b1} = 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{b1}$$

用每相绕组匝数表示谐波磁动势幅值:

$$F_{\phi v} = F_{qv} = \frac{1}{v} 0.9qN_c I_c k_{bv} = \frac{1}{v} 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{bv}$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

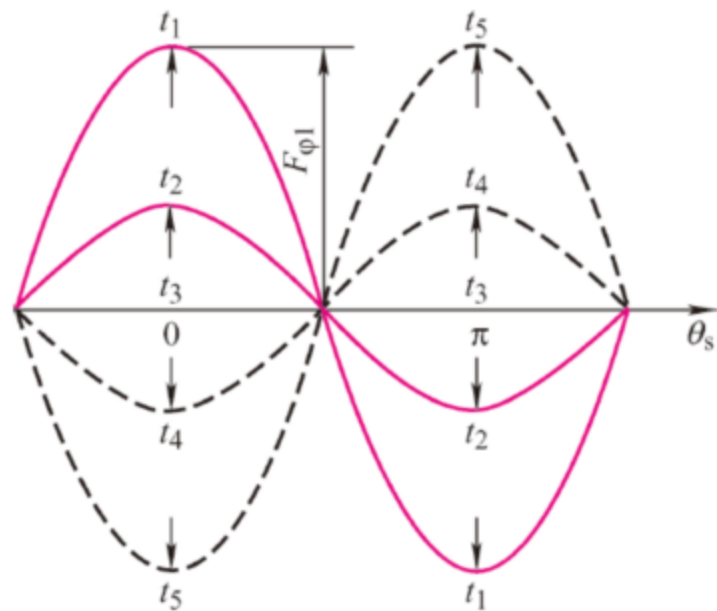
设电流 $i_c = \sqrt{2}I_c \cos \omega t$

$$f_1(\theta_s, t) = f_{q1}(\theta_s, t) = F_{\varphi 1} \cos \theta_s \cos \omega t$$

$F_{\varphi 1}$ —— 单相绕组基波磁动势的最大幅值。

$$F_{\varphi 1} = 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{b1}$$

单相绕组基波磁动势既是空间函数又是时间函数。
空间分布规律用空间电角度 θ_s 的余弦函数来表达；
随时间变化的规律用电角度 ωt 的余弦函数来表达。



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

单相绕组的谐波磁动势为:

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

$F_{\phi\nu}$ ——单相绕组 ν 次谐波磁动势的最大幅值。 $F_{\phi\nu} = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{b\nu}$

谐波次数越高，谐波磁动势的幅值越小。

通有正弦电流时单相绕组磁动势的完整表达式为:

$$f_c(\theta_s, t) = 0.9 \frac{N}{p} I_c (k_{b1} \cos \theta_s - \frac{1}{3} k_{b3} \cos 3\theta_s + \frac{1}{5} k_{b5} \cos 5\theta_s - \frac{1}{7} k_{b7} \cos 7\theta_s \dots) \cos \omega t$$



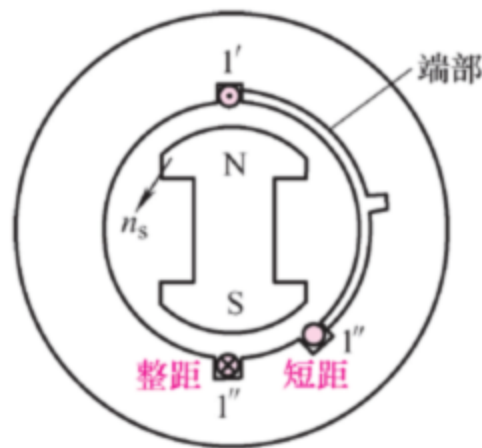
3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

线圈组短距对每极谐波磁动势幅值的影响

线圈节距指的是同一个线圈的两个有效边之间的距离。如果其值小于相邻两个磁极轴线之间沿定子内圆周的弧长（极距），则称为短距线圈。

磁动势的短距系数和磁动势的分布系数一样，对基波的影响较小，但可使高次谐波磁动势有很大的削弱。因此采用短距绕组也可以改善磁动势的波形。



短距系数

$$k_{p1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ\right)$$

$$k_{pv} = \sin\left(\frac{vy_1}{\tau} 90^\circ\right)$$

如果 $\frac{y_1}{\tau} = 0.9$

$$k_{p1} \approx 0.988; \quad k_{p3} \approx -0.81;$$

$$k_{p5} \approx 0.707; \quad k_{p7} \approx -0.454$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场: 考虑了短距、分布式的影响后, 磁动势幅值为:

$$F_{\phi 1} = 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{b1} k_{p1} = 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{w1}$$

$$F_{\phi \nu} = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{b\nu} k_{p\nu} = \frac{1}{\nu} 0.9 \frac{N}{p} I_c k_{w\nu}$$

线圈系数

$$k_{w1} = k_{b1} k_{p1}$$

$$k_{w\nu} = k_{b\nu} k_{p\nu}$$

通有正弦电流时单相绕组磁动势的完整表达式为:

$$f_c(\theta_s, t) = 0.9 \frac{N}{p} I_c (k_{w1} \cos \theta_s - \frac{1}{3} k_{w3} \cos 3\theta_s + \frac{1}{5} k_{w5} \cos 5\theta_s - \frac{1}{7} k_{w7} \cos 7\theta_s \dots) \cos \omega t$$

谐波次数越高, 谐波磁动势的幅值越小。

采用分布和短距绕组均能削弱谐波磁动势。



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.2 单相分布式绕组的磁场:

- 1) 单相绕组的磁动势是脉振磁动势，脉振的频率与电流的频率相同，该磁动势波沿气隙圆周按矩形波或者阶梯形分布；
- 2) 单相绕组的磁动势在空间上可分解为基波磁动势和一系列奇次谐波磁动势，且基波磁动势和谐波磁动势均为脉振磁动势，脉振的频率与电流的频率相同，空间上沿气隙圆周按正弦规律分布；
- 3) 基波磁动势的幅值位于相绕组轴线上，各次谐波磁动势的波幅亦在相绕组的轴线上；
- 4) 单相绕组采用短距和分布绕组，对基波磁动势的影响较小，而对各高次谐波磁动势有较大的削弱，从而改善了磁动势的波形。

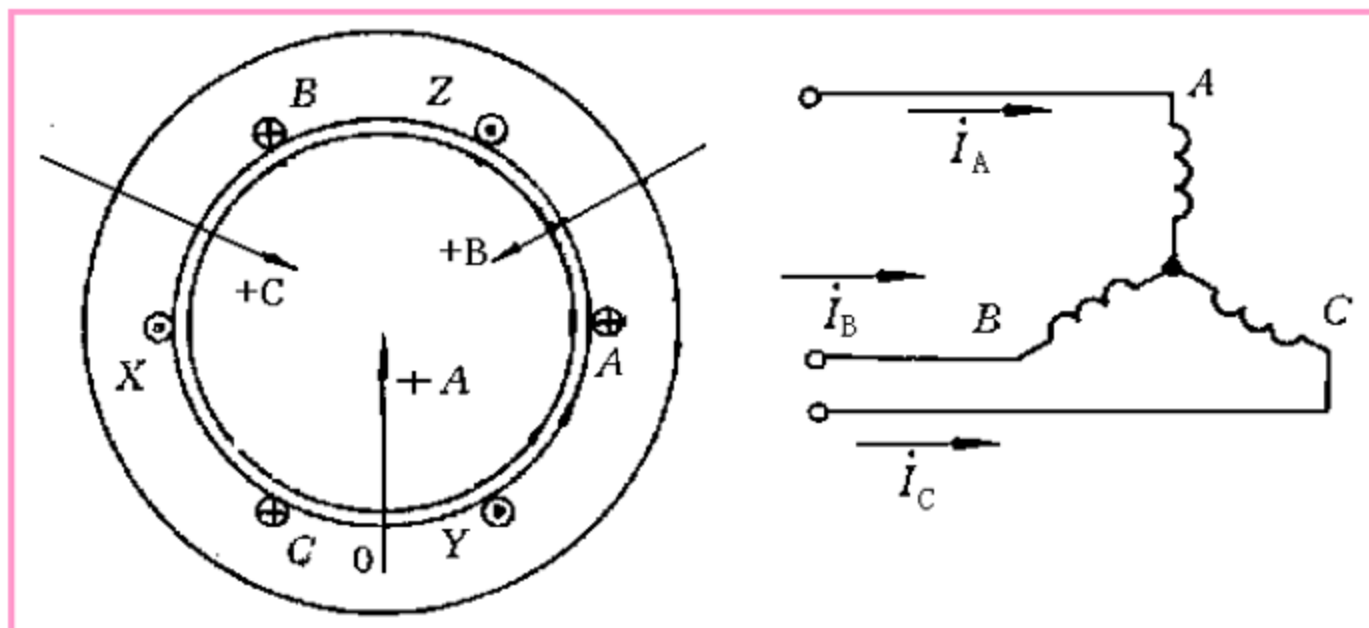


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

1. 三相交流绕组的基波合成磁动势

现代电力系统采用三相制，无论是同步电机还是异步电机大多采用三相绕组，分析三相绕组的合成磁动势是研究交流电机的基础。由于基波磁动势对电机的性能有决定性的影响，因此本节将首先分析基波磁动势。



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

1. 三相交流绕组的基波合成磁动势

1、解析法

当三相对称绕组中通入幅值为 I_m 的三相对称电流：

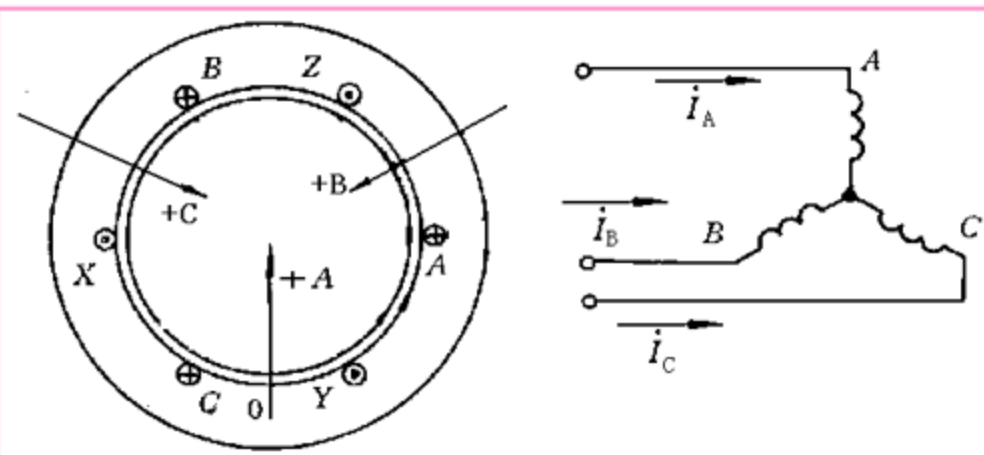
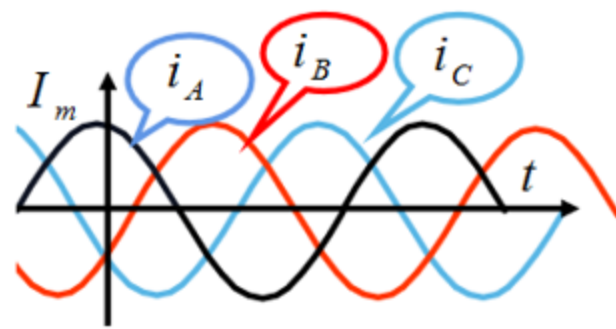
$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

三相绕组各自产生的基波磁动势为：

$$\begin{cases} f_{A1}(\theta_s, t) = F_{\phi 1} \cos \theta_s \cos \omega t \\ f_{B1}(\theta_s, t) = F_{\phi 1} \cos(\theta_s - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ f_{C1}(\theta_s, t) = F_{\phi 1} \cos(\theta_s - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

$$\cos a \cos b = 0.5 (\cos(a+b) + \cos(a-b))$$

1、解析法

利用三角公式可写成： $f_{A1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t)]$

$$f_{B1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t - 240^\circ)]$$

$$f_{C1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t - 120^\circ)]$$

三相基波合成磁动势为： $f_1(\theta_s, t) = f_{A1}(\theta_s, t) + f_{B1}(\theta_s, t) + f_{C1}(\theta_s, t)$
 $= \frac{3}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta_s) = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\varphi 1} = \frac{3}{2} \times 0.9 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{\varphi} = 1.35 \frac{Nk_{w1}}{p} I_{\varphi}$$

F_1 —— 三相绕组基波合成磁动势的幅值



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

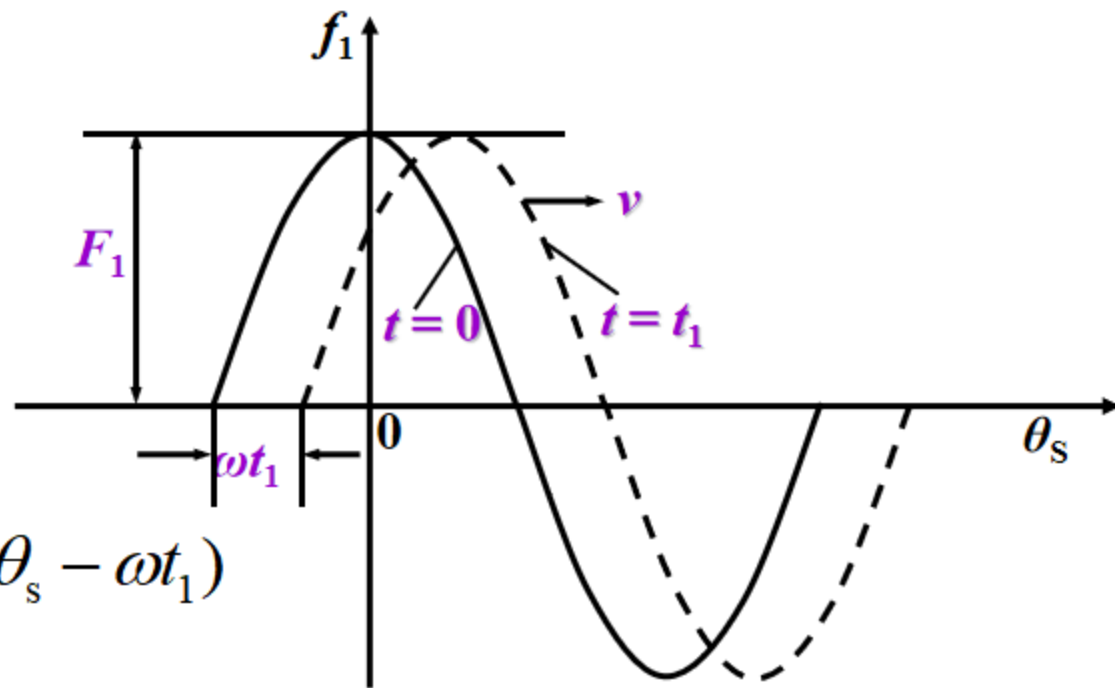
3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

1、解析法

$$f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

$$t = 0 \text{ 时, } f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(-\theta_s) = F_1 \cos \theta_s$$

$$t = t_1 \text{ 时, } f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\omega t_1 - \theta_s) = F_1 \cos(\theta_s - \omega t_1)$$



三相绕组的基波合成磁动势 $f_1(\theta_s, t)$ 是一个幅值恒定、空间正弦分布的**正向行波**

对于旋转电机, $f_1(\theta_s, t)$ 是一个沿气隙圆周 θ_s 不断向前推进的旋转磁动势波



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

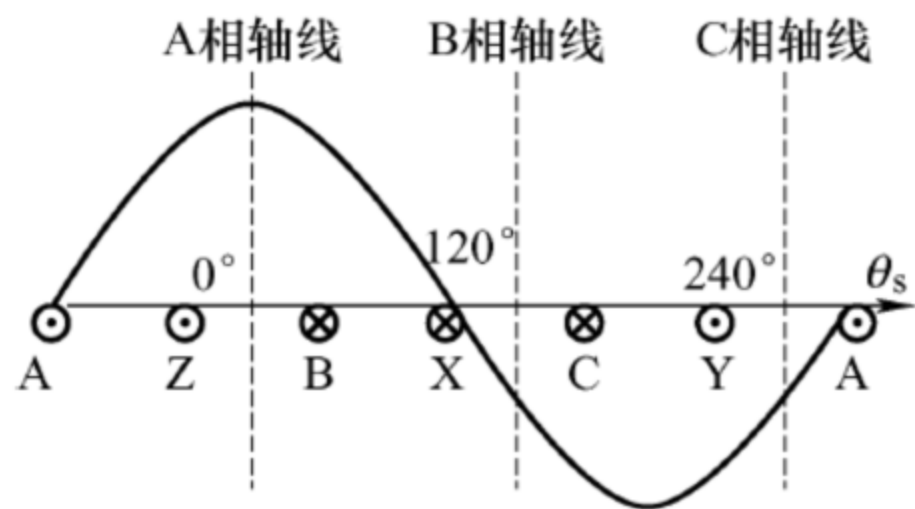
3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

1、解析法

$$f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

$$1) \omega t = 0^\circ \text{ 时, } i_A = I_m, \quad f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos \theta_s$$

磁动势幅值位于 $\theta_s = 0^\circ$ 处，即在A相绕组轴线处。



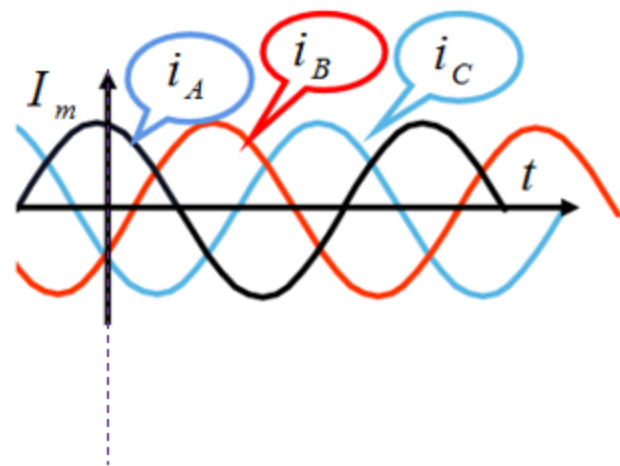
$$a) \omega t = 0^\circ, \quad f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos \theta_s$$

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

⊗ 为流入
⊙ 为流出
设电流尾进
首出为正



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

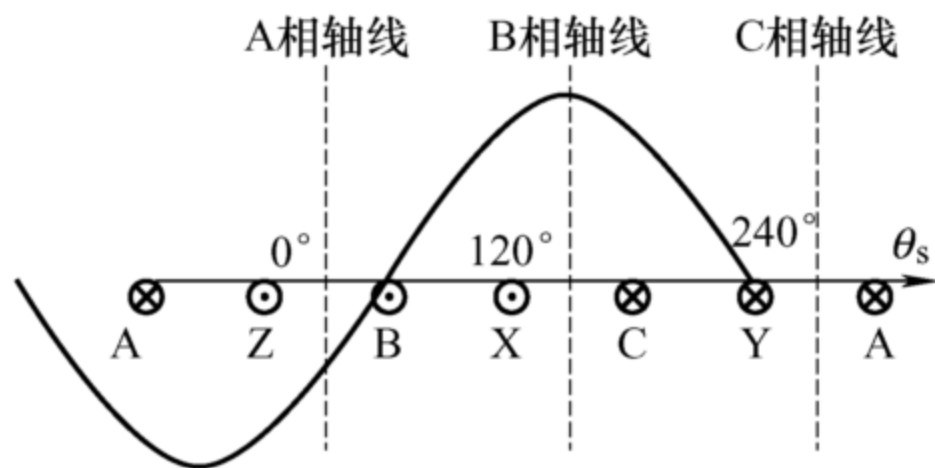
1、解析法

$$f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

2) $\omega t = 120^\circ$ 时, $i_B = I_m$, $f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\theta_s - 120^\circ)$

磁动势幅值位于 $\theta_s = 120^\circ$ 处, 即在**B**相绕组轴线处。

⊗ 为流入
⊙ 为流出
设电流尾进
首出为正

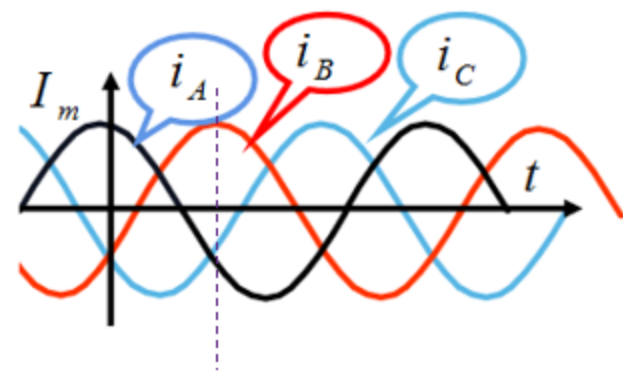


b) $\omega t = 120^\circ$, $f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\theta_s - 120^\circ)$

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

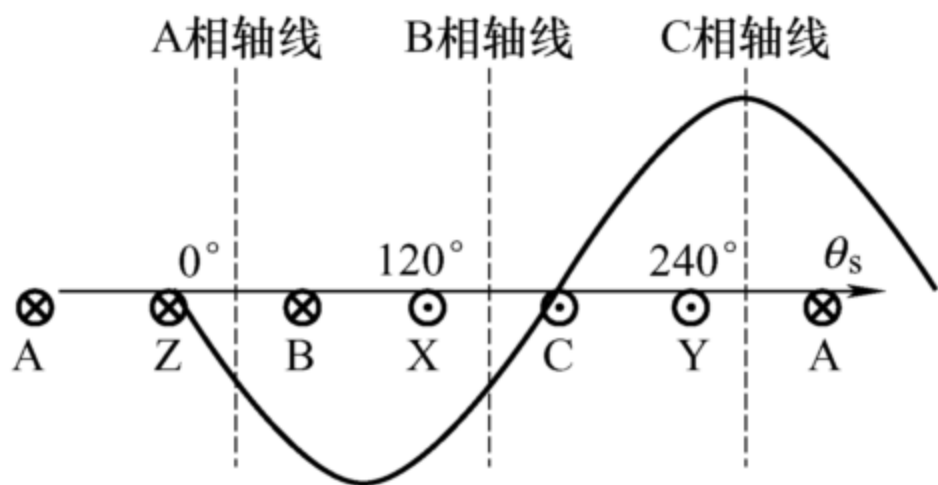
1、解析法

$$f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\omega t - \theta_s)$$

3) $\omega t = 240^\circ$ 时, $i_C = I_m$, $f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\theta_s - 240^\circ)$

磁动势幅值位于 $\theta_s = 240^\circ$ 处, 即在C相绕组轴线处。

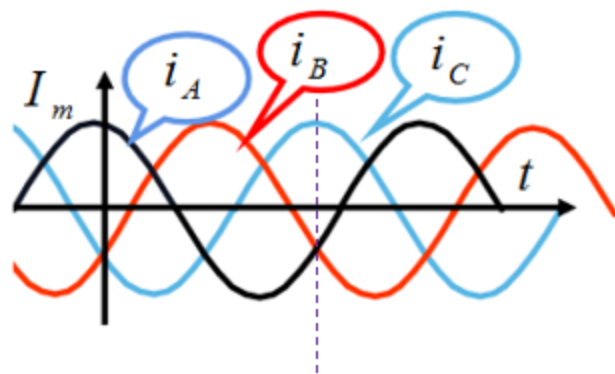
⊗ 为流入
⊙ 为流出
设电流尾进
首出为正



$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$



c) $\omega t = 240^\circ$, $f_1(\theta_s, t) = F_1 \cos(\theta_s - 240^\circ)$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

1、解析法

三相基波合成磁动势波幅点：

$$\cos(\omega t - \theta_s) = 1$$

$$\omega t - \theta_s = 0$$

$$\theta_s = \omega t$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{rad/s})$$

$$n_s = \frac{\omega}{2\pi \cdot p} = \frac{f}{p} (\text{r/s}) = \frac{60f}{p} (\text{r/min})$$

三相基波合成磁动势的转速：

$$n_s = \frac{60f}{p} (\text{r/min}), \text{ 为同步转速。}$$

磁动势波幅推移的角速度与交流电的角频率相等



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

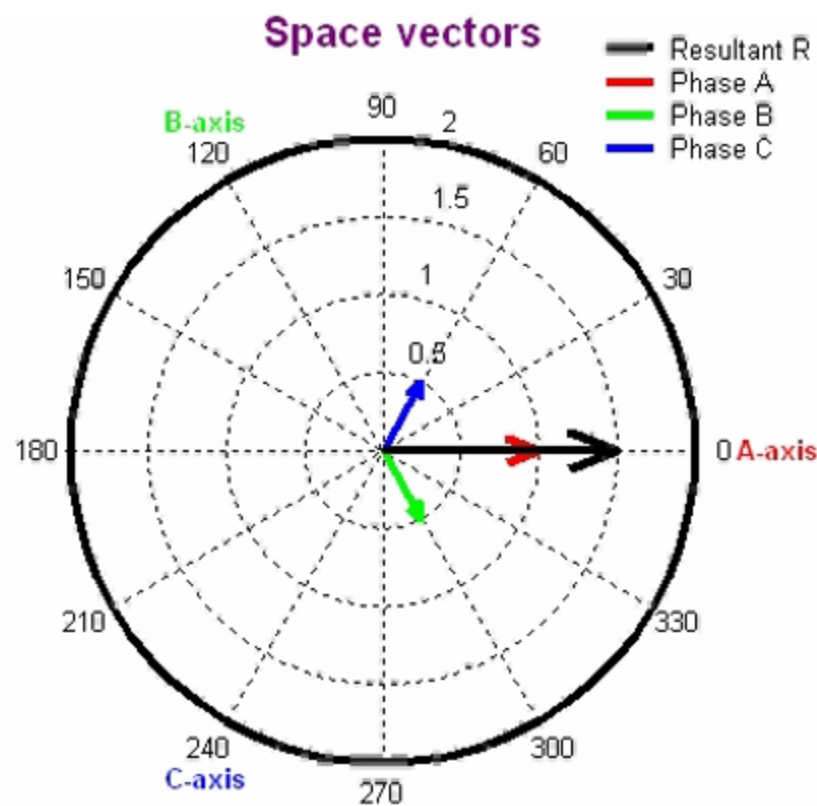
三相绕组基波合成磁动势随时间和空间的变化规律：

1) 三相基波合成磁动势的转速，为同步转速；

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

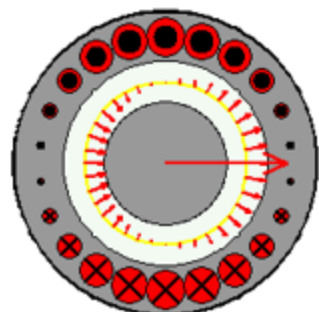
2) 当某相电流达最大值，基波合成磁动势的正波幅与该相绕组的轴线重合，因此磁动势的转向是从电流超前的相绕组轴线转向电流滞后的相绕组轴线，改变电流的相序即可改变磁动势的旋转方向；

3) 三相基波合成磁动势的幅值 F_1 恒定，为单相脉振基波磁动势幅值 $F_{\phi 1}$ 的 $3/2$ 倍

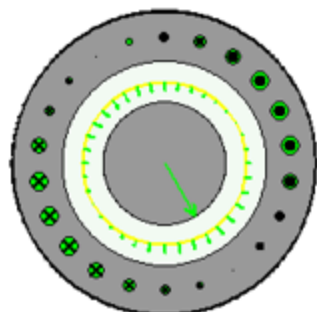


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

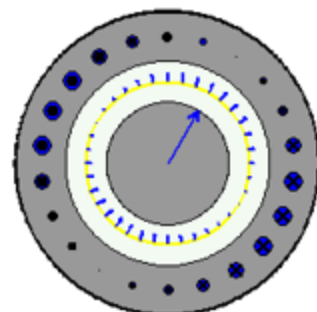
3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）



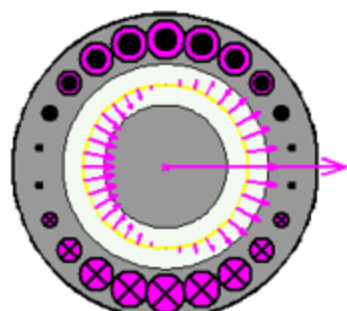
Phase A



Phase B

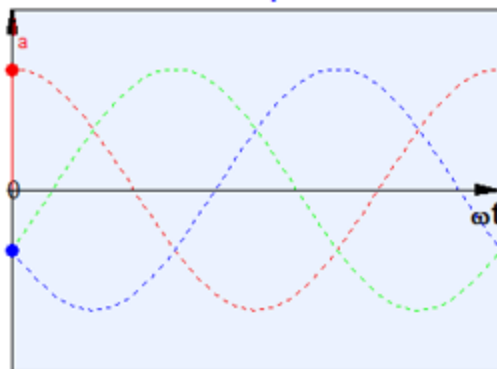


Phase C

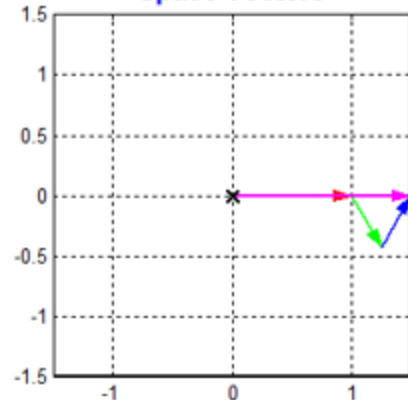


Resultant

Balanced three-phase currents



Space vectors

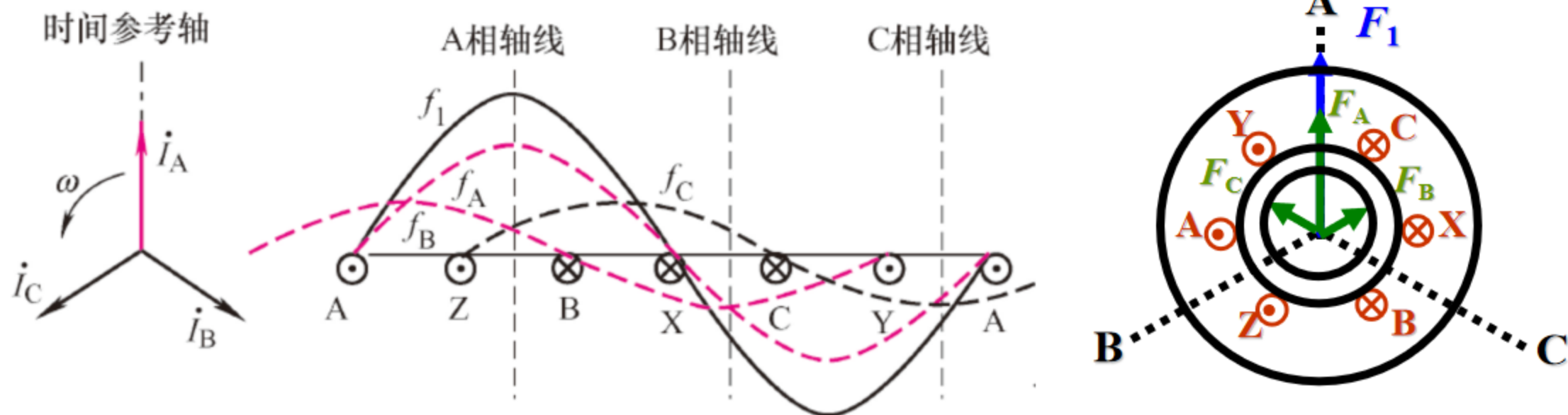


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

2、图解法

1) $\omega t = 0^\circ$ 时

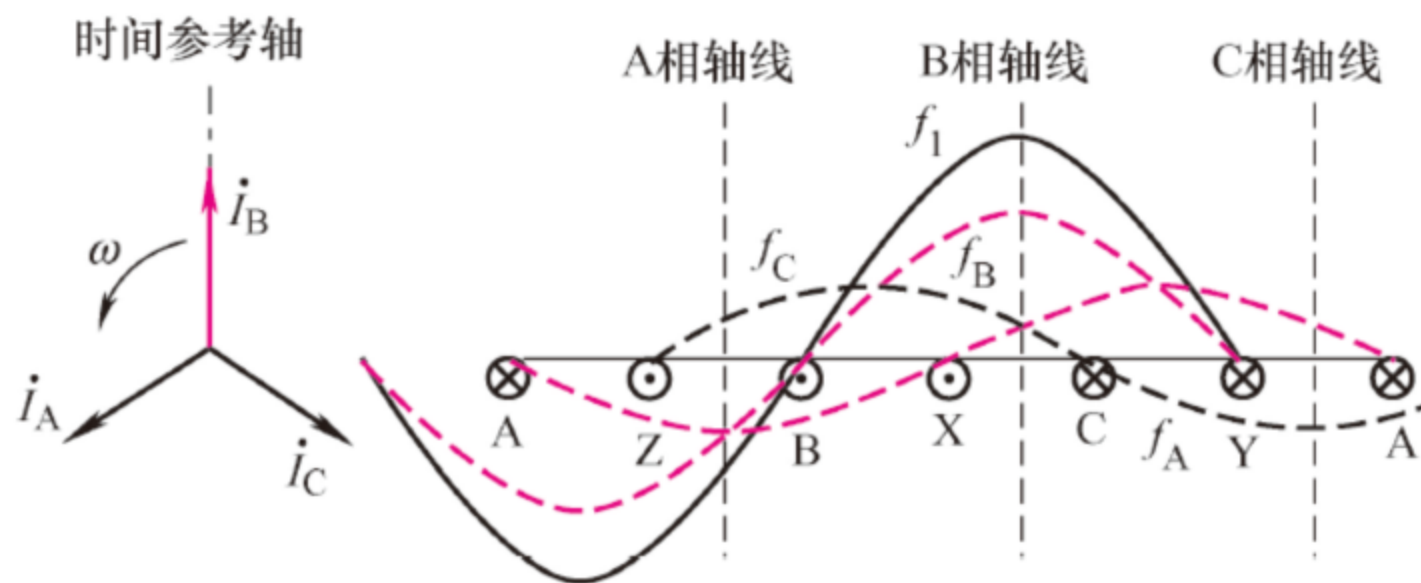


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

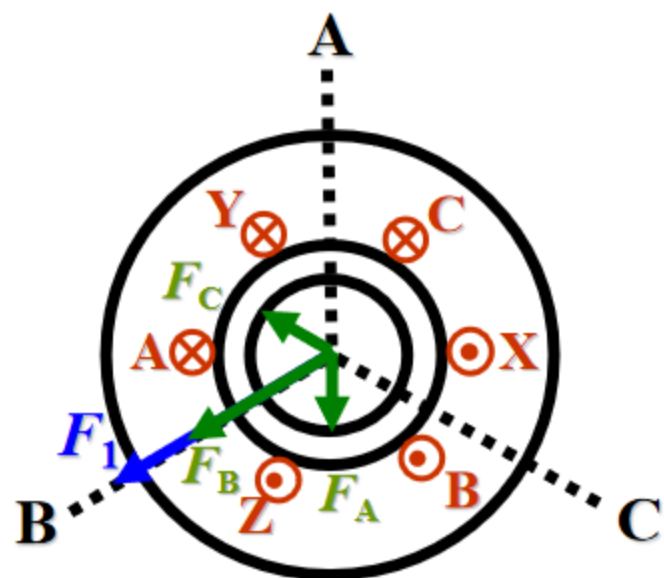
3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

2、图解法

2) $\omega t = 120^\circ$ 时



\otimes 为流入
 \odot 为流出
设电流尾进
首出为正

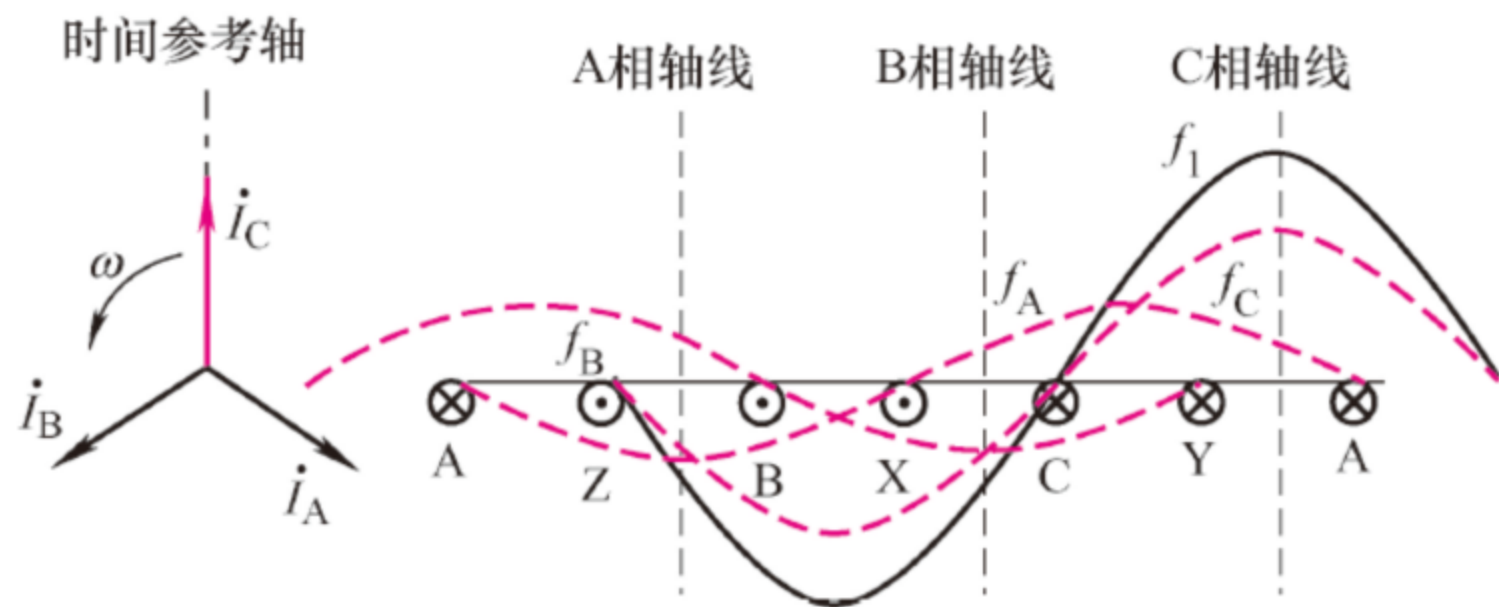


3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

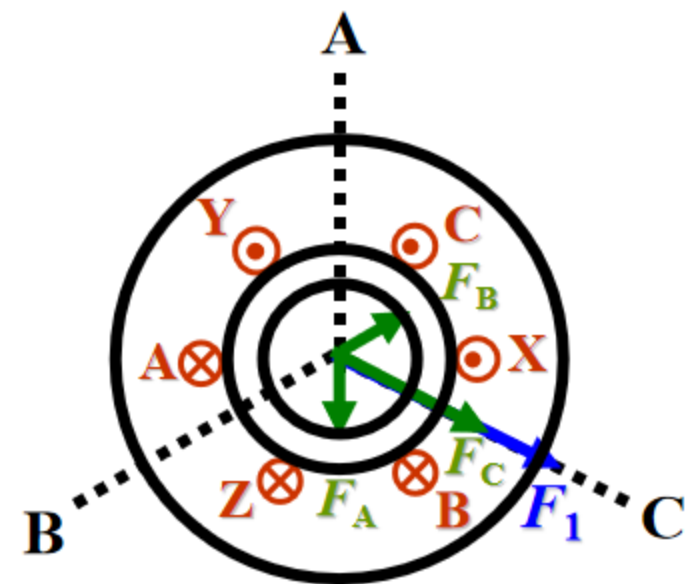
3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

2、图解法

3) $\omega t = 240^\circ$ 时



\otimes 为流入
 \odot 为流出
设电流尾进
首出为正



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.3 三相绕组合成磁场（电机气隙合成磁场）

$$\cos a \cos b = 0.5 (\cos(a+b) + \cos(a-b))$$

三相合成磁动势中的高次谐波磁动势

$$\begin{aligned} f_v(\theta_s, t) &= f_{Av}(\theta_s, t) + f_{Bv}(\theta_s, t) + f_{Cv}(\theta_s, t) \\ &= F_{\phi v} \cos(v\theta_s) \cos(\omega t) + F_{\phi v} \cos v(\theta_s - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) \\ &\quad + F_{\phi v} \cos v(\theta_s - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

1) $v=3k$ ($k=1,3,5\dots$)，即 $v=3, 9, 15, 21 \dots$ $f_v(\theta_s, t) = 0$

2) $v=6k-1$ ($k=1,2,3\dots$)，即 $v=5, 11, 17, 23 \dots$ 时

$f_v(\theta_s, t) = \frac{3}{2} F_{\phi v} \cos(\omega t + v\theta_s)$ 谐波磁动势为**转向与基波相反**， $n_v = n_s/v$

3) $v=6k+1$ ($k=1,2,3\dots$)，即 $v=7, 13, 19, 25 \dots$ 时

$f_v(\theta_s, t) = \frac{3}{2} F_{\phi v} \cos(\omega t - v\theta_s)$ 谐波磁动势为**转向与基波相同**， $n_v = n_s/v$



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.4 多相电机的对称多相绕组

旋转磁动势与脉振磁动势的关系

单相脉振磁动势分解

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

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

正向推移的
圆形旋转磁
动势波

负向推移的
圆形旋转磁
动势波

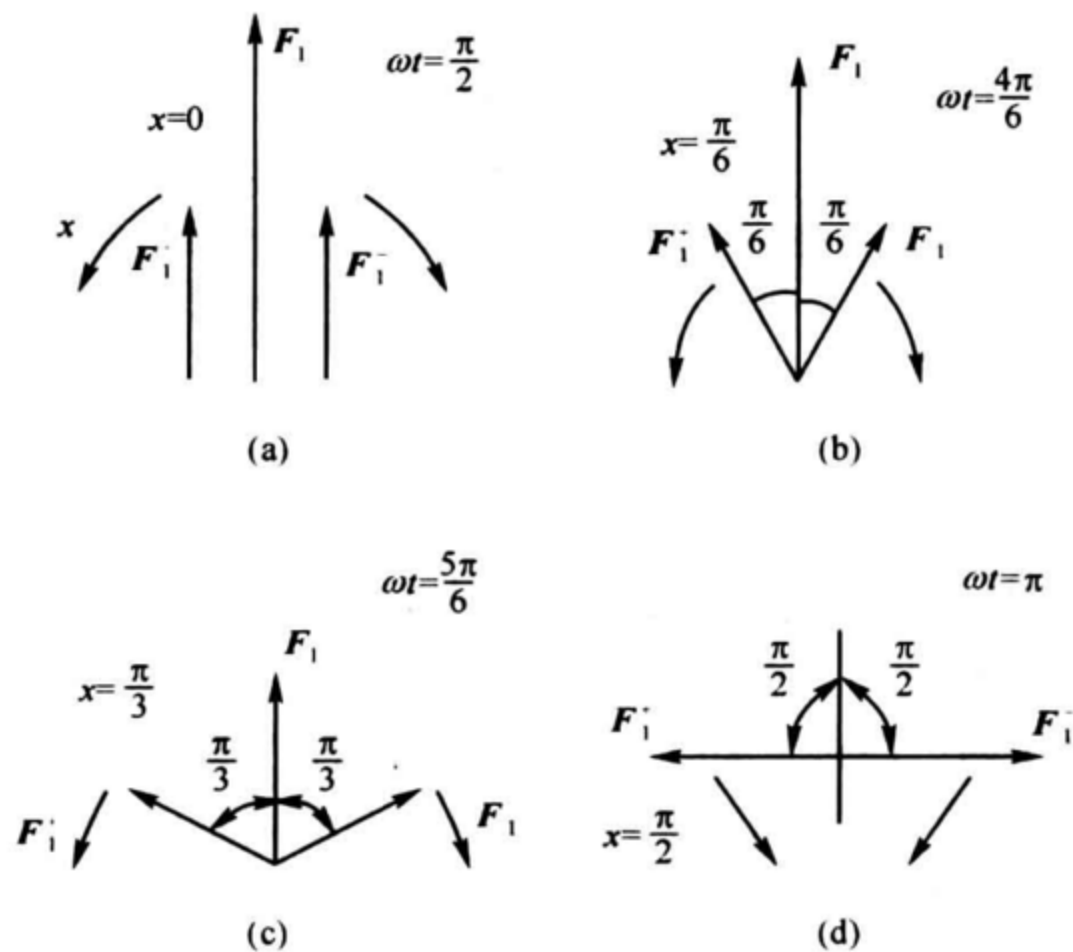


图 3-17 脉振向量与旋转向量



3. 多相对称绕组产生的旋转磁场

3.4 多相电机的对称多相绕组

旋转磁动势与脉振磁动势的关系

$$f_{A1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\phi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t)]$$

$$f_{B1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\phi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t - 240^\circ)]$$

$$f_{C1}(\theta_s, t) = \frac{1}{2} F_{\phi 1} [\cos(\theta_s - \omega t) + \cos(\theta_s + \omega t - 120^\circ)]$$

三相电流对称

正序电流：三个反向抵消，三相合成为正向推移的圆形磁场

负序电流：三个正向抵消，三相合成为反向推移的圆形磁场



旋转磁场自测题

例题：简答题（1）：异步电机中排布两相对称绕组c和f，其匝数都是 W ，分别通入两相对称电流，分别为 $i_c = \sqrt{2}I \sin \omega t$ ， $i_f = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 90^\circ)$

证明电机合成磁场是圆形旋转磁场。（提示 $2 \sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$ ）

填空题（1） 三相异步电动机通以对称的三相电流，每一个绕组线圈产生的磁场是：_____，单相分布绕组产生的磁场是：_____，对称三相绕组通以对称三相电流后生成的磁场是：_____。

选择题（1）： 两相对称绕组通入不同的电流时，可产生如下哪种磁场_____。

A. 恒定磁场

B. 脉振磁场

C. 圆形旋转磁场

D. 椭圆旋转磁场



目录

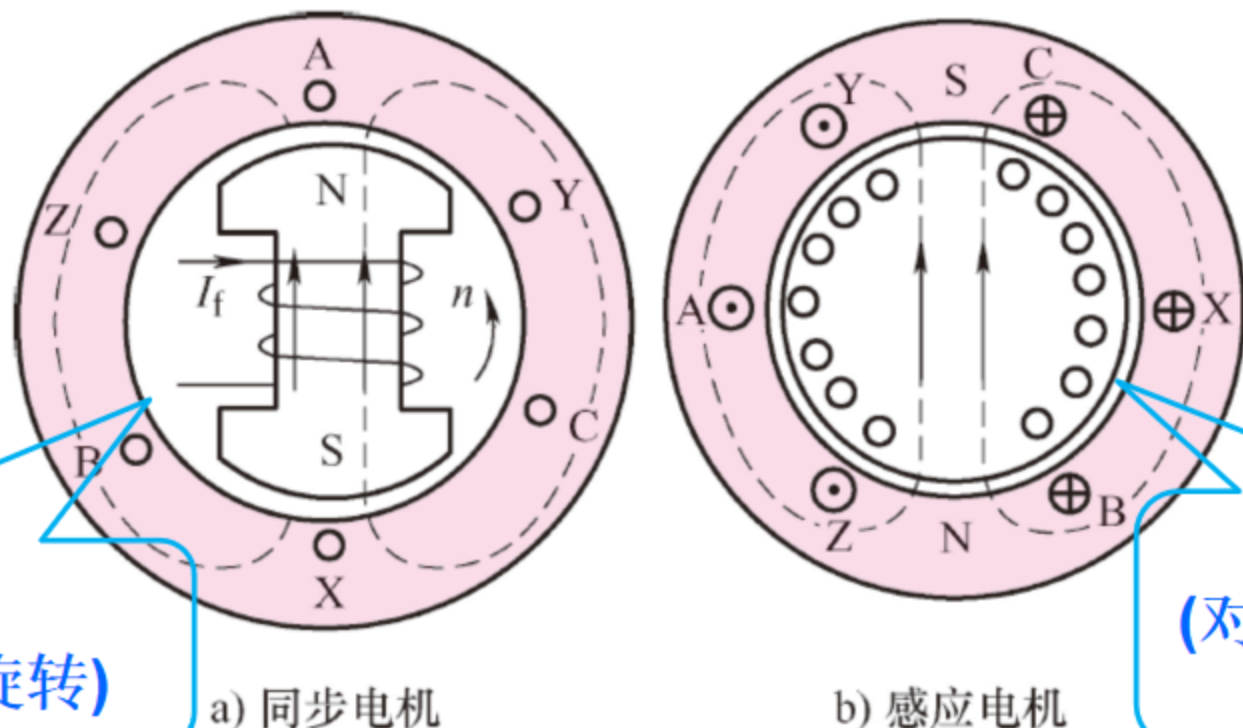
- 1、交流电机的基本工作原理
- 2、异步电动机结构
- 3、多相对称绕组产生的旋转磁场
- 4、正弦磁场下交流绕组的磁感应电势



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

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；

电气旋转磁场：多相对称的交流绕组通入多相对称的交流电流时，可在电机的气隙空间产生电气旋转磁场。



机械旋转磁场
(磁场本身恒定，磁极旋转)

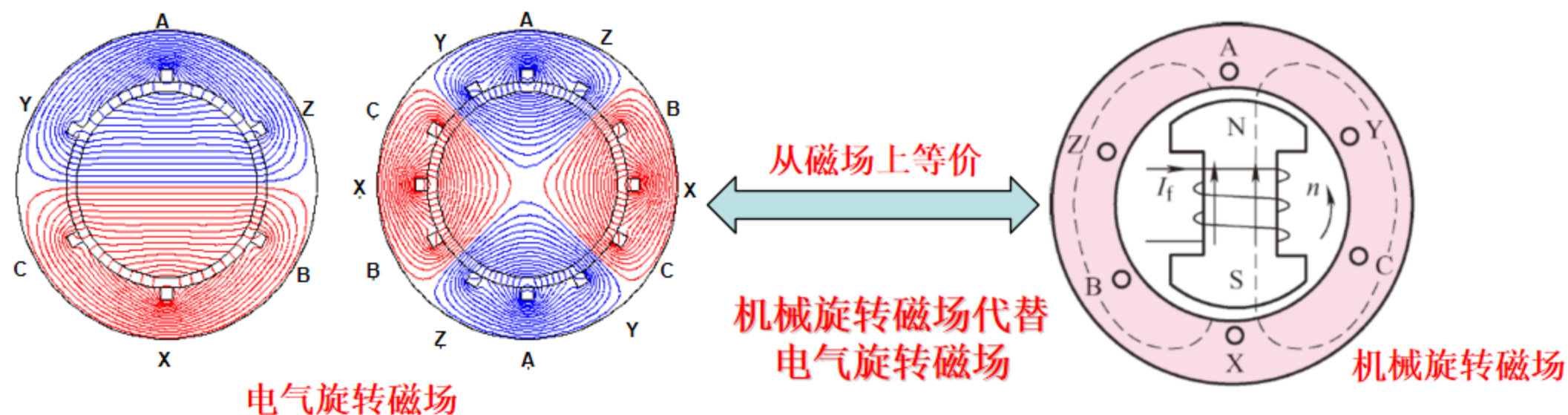
电气旋转磁场
(对称交流电流产生的
旋转磁场)

旋转磁场是交流电机工作的基础



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

正弦磁场



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

正弦磁场下交流绕组的磁感应电势同时适用于定子绕组和转子绕组

主极磁场的气隙磁密沿圆周按正弦规律分布:

$$B_x = B_1 \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

导体中的感应电动势随时间按正弦规律变化:

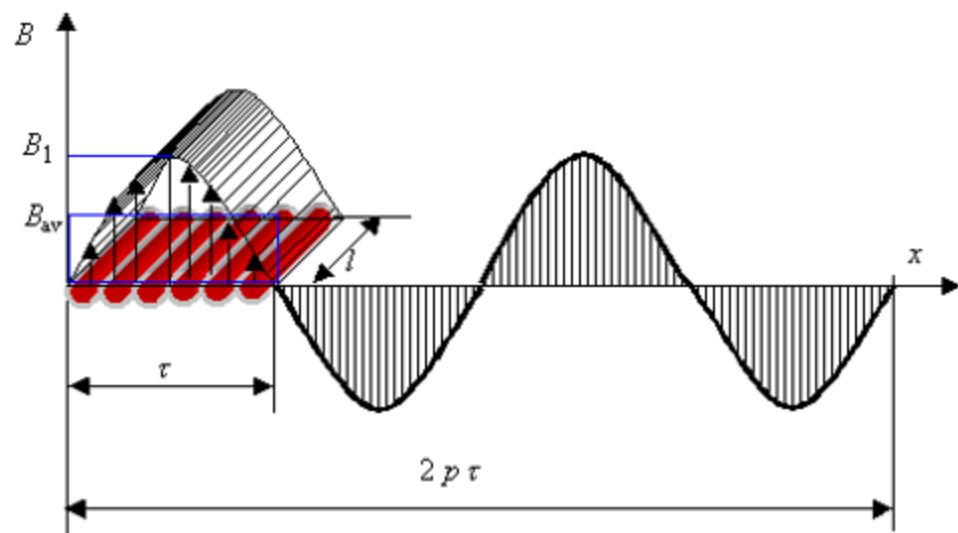
$$e_1 = B_x l v = B_1 l v \sin \frac{\pi}{\tau} x = E_{m1} \sin \frac{\pi}{\tau} x = \sqrt{2} E \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

导体感应电动势的最大值:

$$E_{m1} = B_1 l v$$

导体感应电动势有效值:

$$E = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{B_1 l v}{\sqrt{2}}$$



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

导体电动势的有效值

每极下磁密的平均值:

$$B_{av} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) dx = \frac{2}{\pi} B_1$$

每极磁通量:

$$\Phi_1 = B_{av} \tau l = \frac{2}{\pi} B_1 \tau l$$

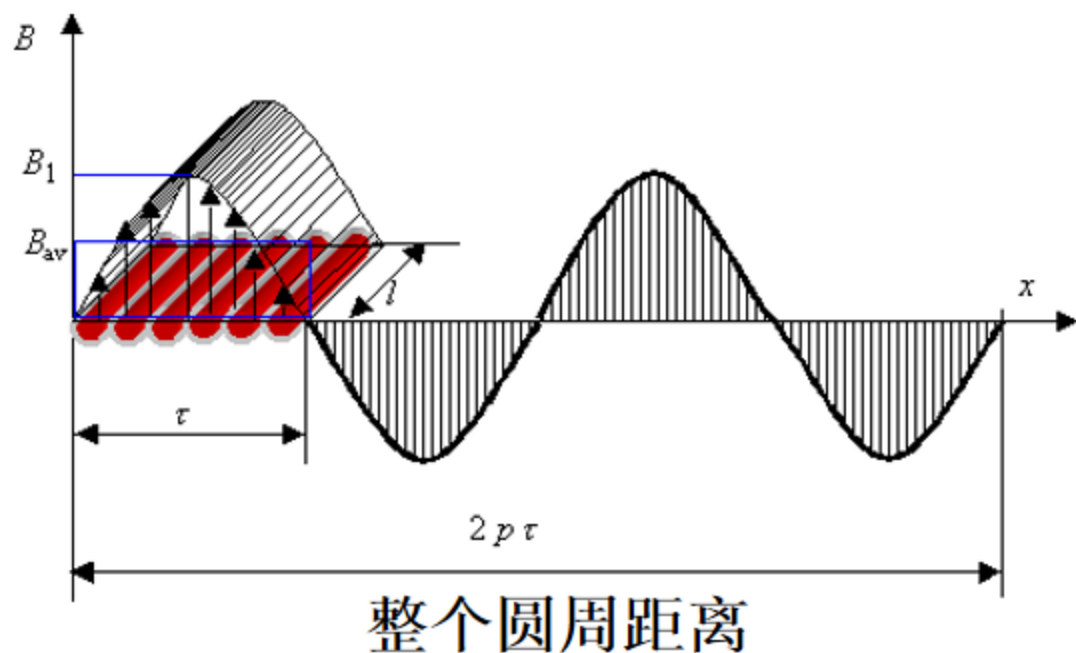
磁密幅值:

$$B_1 = \frac{\pi \Phi_1}{2 \tau l}$$

相对线速度:

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

n 磁场与导体相对转速



导体感应电动势有效值

$$E = \frac{B_1 l v}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi \Phi_1}{2 \tau l} \right) l (2 \tau f) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f \Phi_1 = 2.22 f \Phi_1$$



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

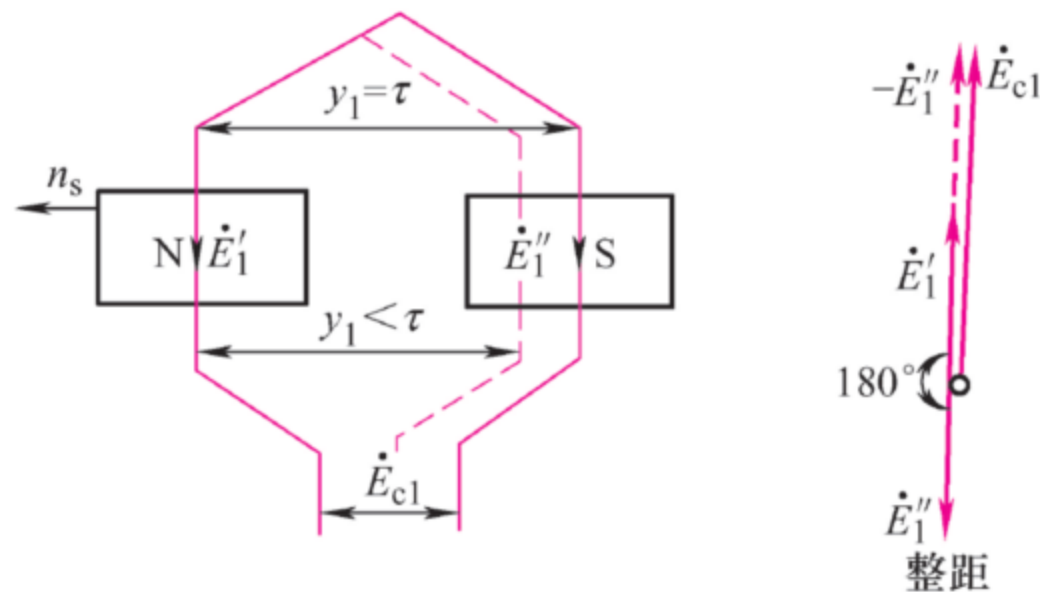
4.2 整距线圈的电动势

单匝线圈电动势的有效值（一个线圈有两个有效边）

$$E_{c1(N_c=1)} = 2E'_1 = 4.44 f\Phi_1$$

线圈有 N_c 匝，则线圈电动势为：

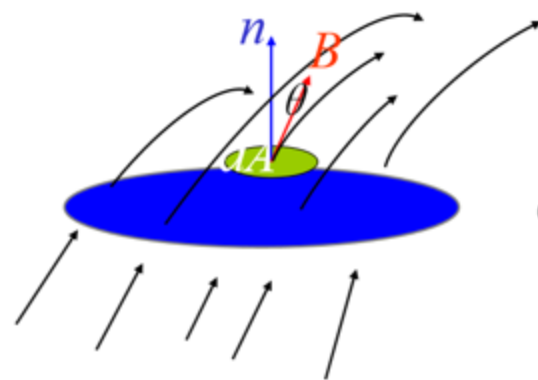
$$E_{c1} = 4.44 fN_c \Phi_1$$



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

4.2 整距线圈的电动势

从图上看，磁密最大的位置感应电势最大，两者应该是同相位的。为什么感应电势落后于磁通量90度？



$$\begin{aligned}\Phi &= \int_A B \cos \theta dA \\ &= \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}\end{aligned}$$

原因：反电动势最大时（**磁密最大位置**），与这相绕组交链的磁链等于零，反电动势与**磁通量**两者之间相位差**90度**。前面分析计算用的是导体动生电动势方法，比较容易理解。实际上反电动势本质公式是磁链对时间倒数。

磁密与磁通量定义不同!!!

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_m \sin \omega t \\ e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}$$

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

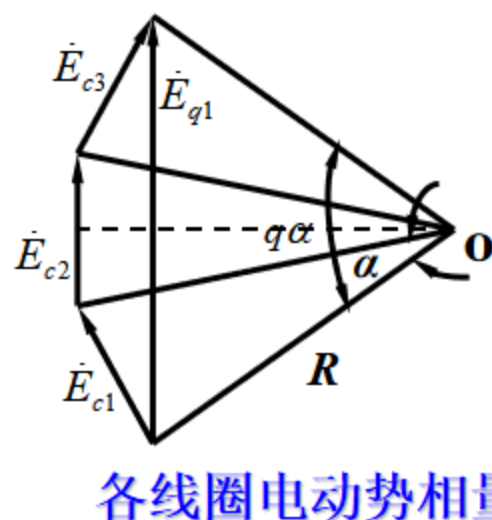
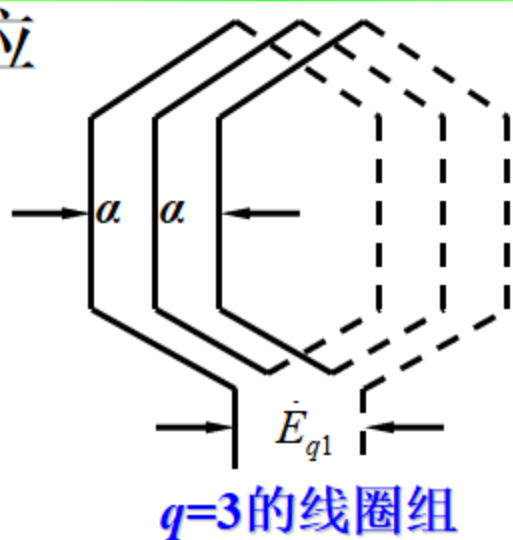


4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

4.3 分布绕组与短距绕组对感应电势的影响

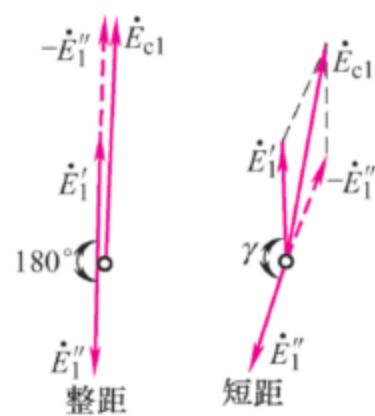
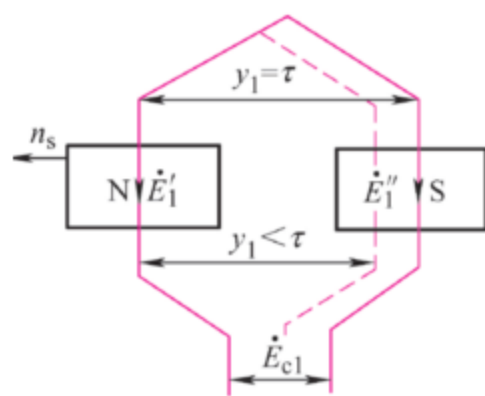
以分布系数 k_{b1} 表征分布绕组矢量合成的感应电势与其代数和的比值；

以短距系数 k_{p1} 表征短距绕组相对整距绕组感应电势的比值。



$$k_{b1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

--基波绕组分布因数



$$k_{p1} = \sin \left(\frac{y_1}{\tau} 90^\circ \right)$$

--基波绕组节距因数



4. 正弦磁场下交流绕组的磁感应电势

4.4 相电动势

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \Phi_1$$

N ：一相绕组的总串联匝数

$k_{w1} = k_{b1} k_{p1}$ 一绕组的基波绕组系数。

k_{w1} 的意义：既考虑绕组短距、又考虑绕组分布时，整个绕组的合成电动势所须的总折扣。



小结

要求掌握:

- 1) 多相对称绕组注入多相对称电流产生旋转磁场
- 2) 旋转磁场的特点
- 3) 交流电机的感应电势



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

本节PPT，以刘慧娟教授在机械工业出版社网站上提供的第三章第四章课件为主。

[1] 刘慧娟主编，电机学[M]，北京：机械工业出版社，2021.

