第四章

异步电动机基本原理

4-1 三相异步电动机的结构及工作原理

教学目的：

1、了解异步电动机的结构

2、了解异步电动机的工作原理

3、掌握旋转磁场产生的条件

4、掌握转差率的定义

电动机内部结构什么样？

电动机怎么转起来的？

The Three-phase Asynchronous Electromotor

教学重点、难点：

教学重点：

1、异步电动机的结构

2、异步电动机的工作原理

教学难点：

旋转磁场产生的原因

The Three-phase Asynchronous Electromotor

4-1 三相异步电动机的结构及工作原理

一、概述

原理： 电磁感应原理

用途： 工农业生产、交通运输及各行各业，

优点：结构简单、运行可靠、制造容易、成本低

缺点：功率因数低，调速比直流电机复杂

The Three-phase Asynchronous Electromotor

异步电动机的种类很多，从不同的角度看，有不同的分类法，常见的有：

按定子相数分：

单相异步电动机 两相异步电动机 三相异步电动机

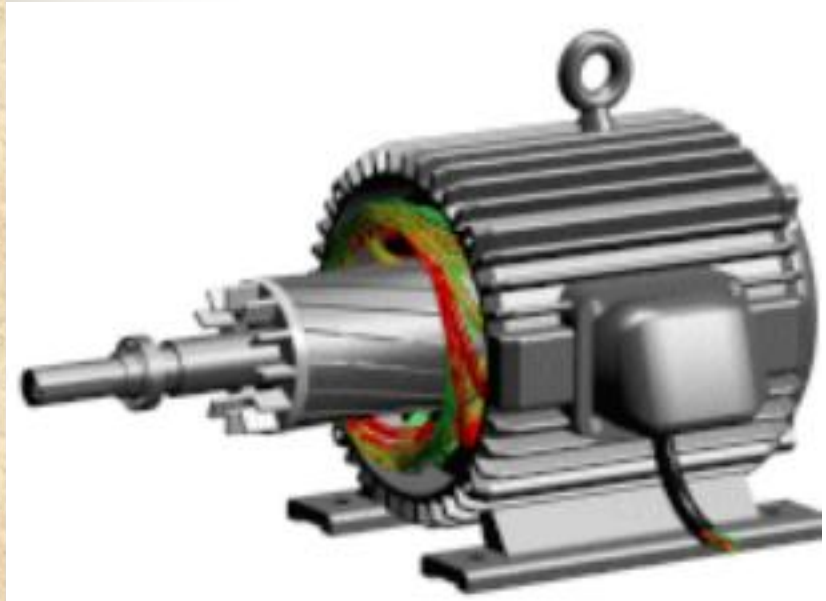
The

Three-phase Asynchronous

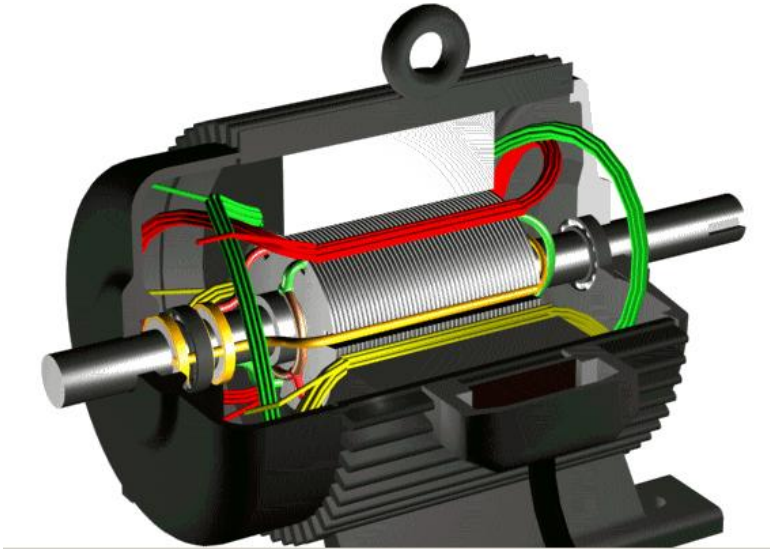
Electromotor

按转子结构分：

鼠笼型异步电动机

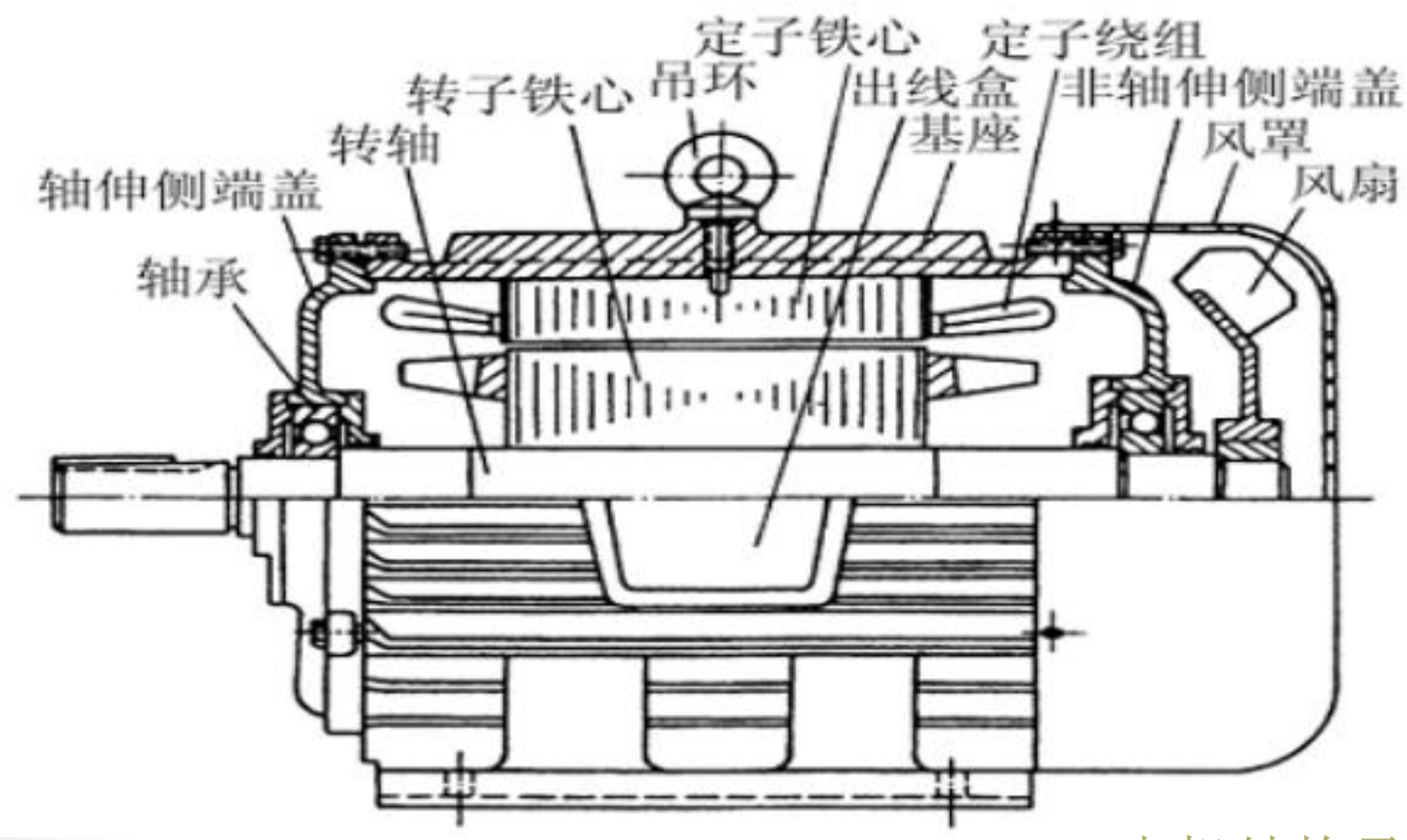


绕线型异步电动机



The Three-phase Asynchronous Electromotor

二、三相异步电动机的结构



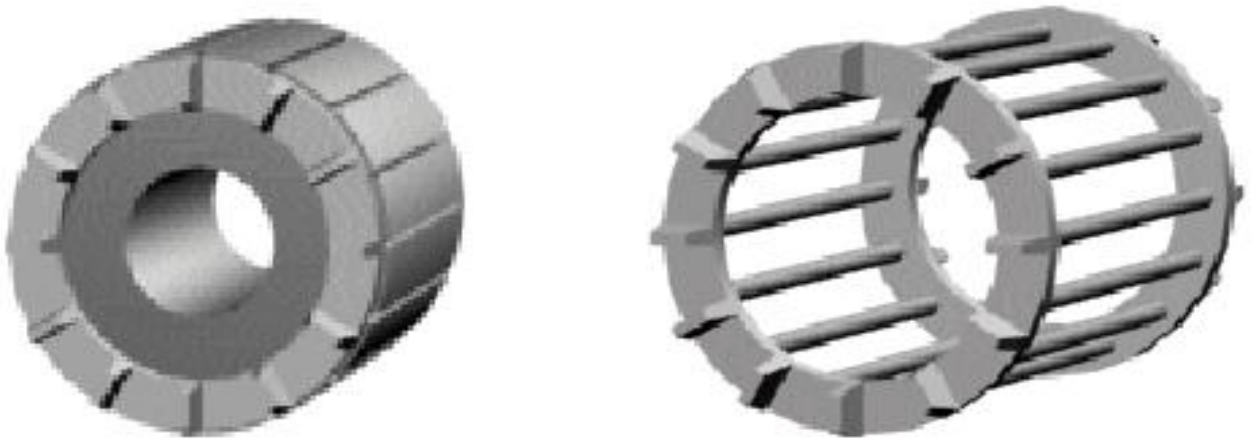
电机结构录象

The Three-phase Asynchronous Electromotor

鼠笼型异步电动机主要部件拆分图。

The Three-phase Asynchronous Electromotor

*鼠笼型转子*绕组由插入每个转子槽中的导条和两侧的短路端环构成，如果去掉转子铁心，剩余的转子绕组就像一个松鼠笼子。



鼠笼型转子铁心和绕组结构示意图

The Three-phase Asynchronous Electromotor

三相绕线型转子结构是绕组的三个出线端子接到固定在转轴上的三铜环上，通过电刷引出。

这种电机的特点是：可以在转子绕组中串入附加电阻，来改善电机的起动性能或作转速调节用。

The Three-phase Asynchronous Electromotor

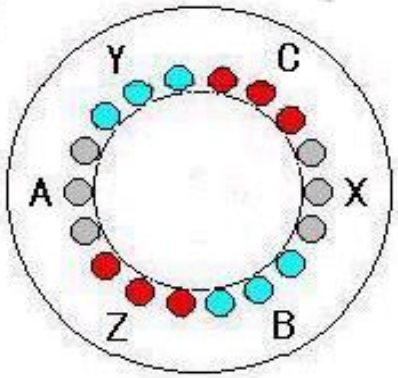
二、 三相异步电动机的工作原理

1、旋转磁场的产生：

问什么？

条件：对称三相绕组中通以对称三相电流

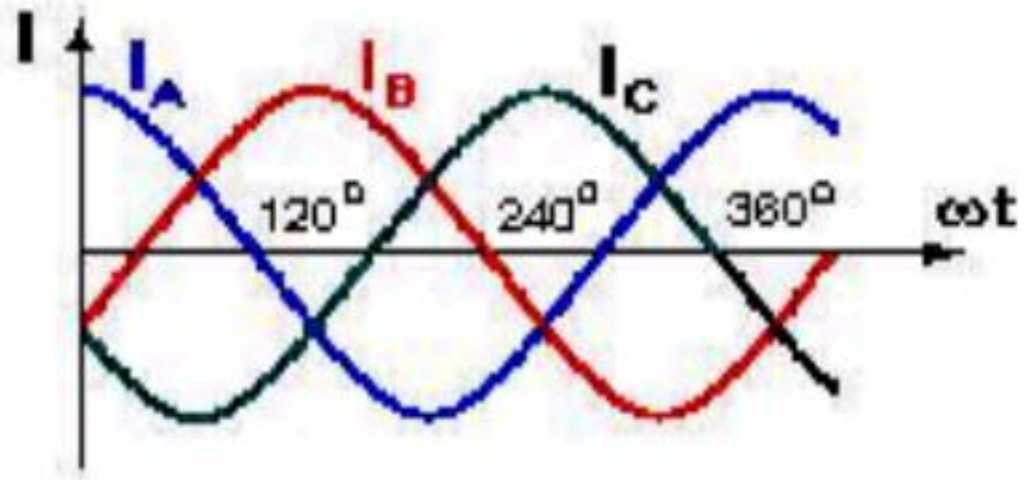
三相对称绕组



The Three-phase Asynchronous Electromotor

对称三相电流，可表示为

$$i_A = I_m \cos \omega t$$
$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$
$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$



The Three-phase Asynchronous Electromotor

旋转磁场的产生

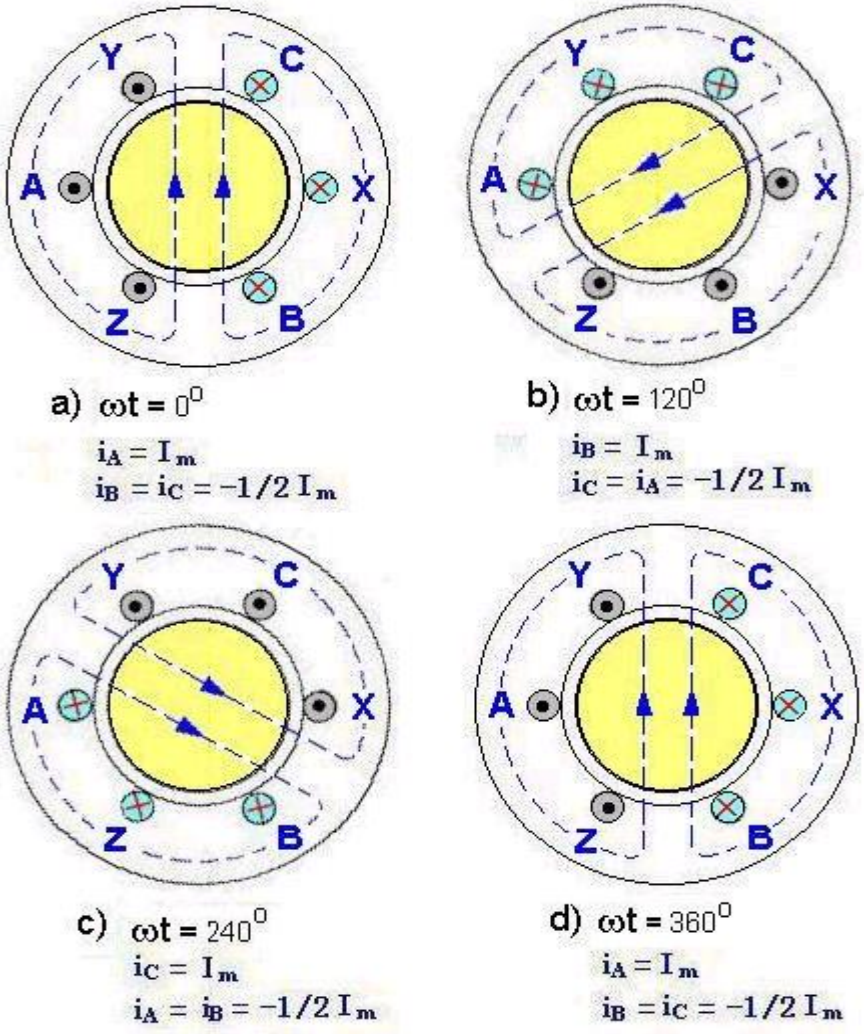
$\omega t = 0^\circ \ (t = 0)$

$\omega t = 120^\circ \ (t = T/3)$

$\omega t = 240^\circ \ (t = 2T/3)$

$\omega t = 360^\circ \ (t = T)$

旋转磁场动画



The Three-phase Asynchronous Electromotor

旋转磁场的特点：旋转磁场是一种极性和大小不变并以一定转速旋转的磁场。

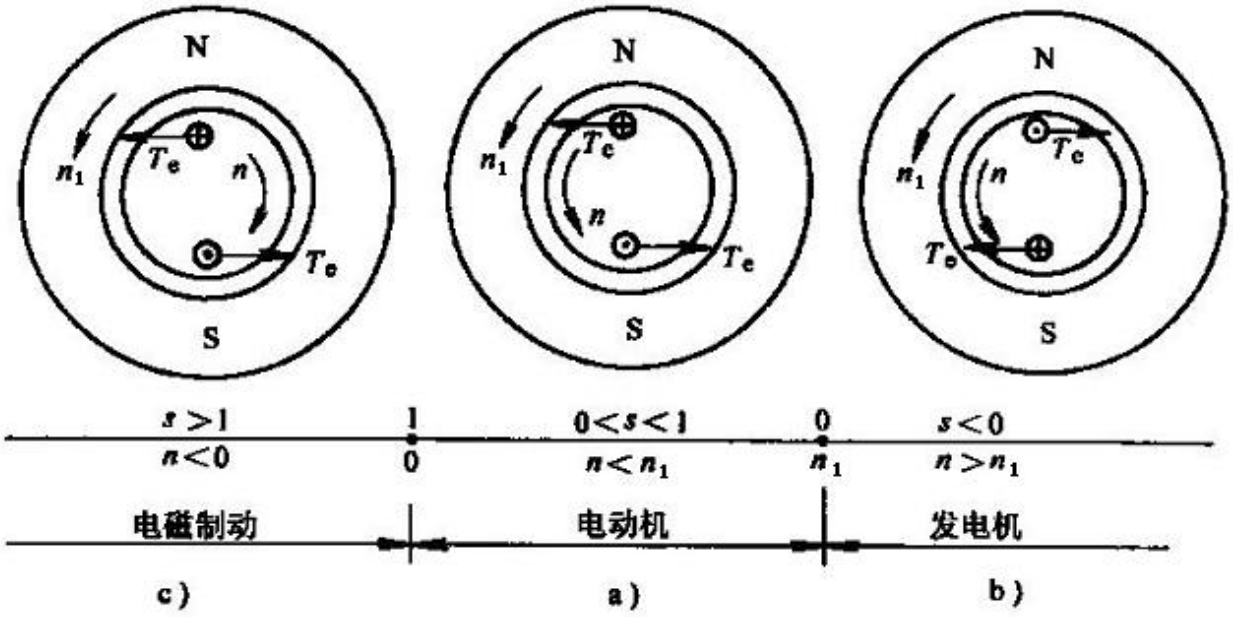
2、三相异步电动机的工作原理

转差率：S

异步电动机由此得名

The Three-phase Asynchronous Electromotor

三相异步电动机的转速与运行状态



The Three-phase Asynchronous Electromotor

三相异步电动机的转速与运行状态

状 态	电动机	发电机	电磁制动
n与s关系	$n<n_0$ $0<s<1$	$n>n_0$ $s<0$	n与n_1反向， $n<0$, $s>1$
E_1的性质	反电动势	电源电动势	反电动势
T的性质	电磁驱动力矩	电磁阻力矩	电磁阻力矩
能量转换	电能→机械能	原动机机械能→电能	电能+机械能→内部损耗（短路）

The Three-phase Asynchronous Electromotor

参考文献：

※<参考书目>：

《电机学》 许实章 机械工业出版社 2002.1

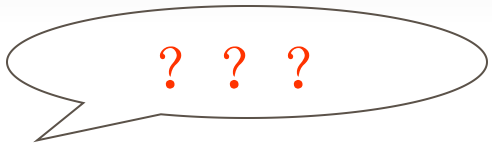
《电机学》第三版 李发海 科学出版社 2002.1

《电机学》 汤蕴缪，史乃编著 机械工业出版社 2001.

※<参考网站>

西安交通大学电机学教学主页：
http://unit.xjtu.edu.cn/unit/sspdj/index.html
2003年国家级《电机学》精品课程——沈阳工程学院：
http://www.sie.edu.cn/jpk/jpk2003/DJXjpk/home.asp

思考题：



1、三相异步电动机的定、转子铁心如用非铁磁材料制成，会出现什么后果？

2、旋转磁场的转速是多少？

The Three-phase Asynchronous Electromotor

返回

4-3 三相异步电动机的定子绕组

- 定子绕组的基本知识
- 三相单层绕组
- 三相双层绕组

一、定子绕组的基本知识

- 线圈、线圈组和绕组

  线圈是由一匝或多匝绝缘导线按一定形状绕制而成。多个线圈构成一组单元，称线圈组。由线圈组按一定的串、并联方式构成一相电路，称为绕组。

- 线圈节距y

$$y \approx \tau = \frac{Q_1}{2p}$$

- 电角度

  电角度＝p×机械角度= p360°

计量电磁关系的角度称为电角度（电气角度）。电机圆周在几何上占有角度为360°，称为机械角度。而从电磁方面看，一对磁极占有空间电角度为360°。一般而言，对于p对极电机，电角度=p机械角度。

- 每极每相槽数 （q） $q = \frac{Q_1}{2p} \cdot \frac{1}{m_1}$

- 槽距角 α ：相邻槽之间的电角度

- 相带

每极下每相绕组所占的宽度（用电角度表示）称相带。通常采用 $60°$ 相带 。

二、三相单层绕组

- 特点

由于每槽内只安置一层线圈边，故总线圈数等于总槽数的一半。线圈的组成应遵循相隔一个极距的两线圈边的电势相加的原则，即异极性下属于同一相的线圈边可以联成一个线圈。

返回

- 种类
  - 同芯式绕组
  - 链式绕组
  - 交叉式绕组

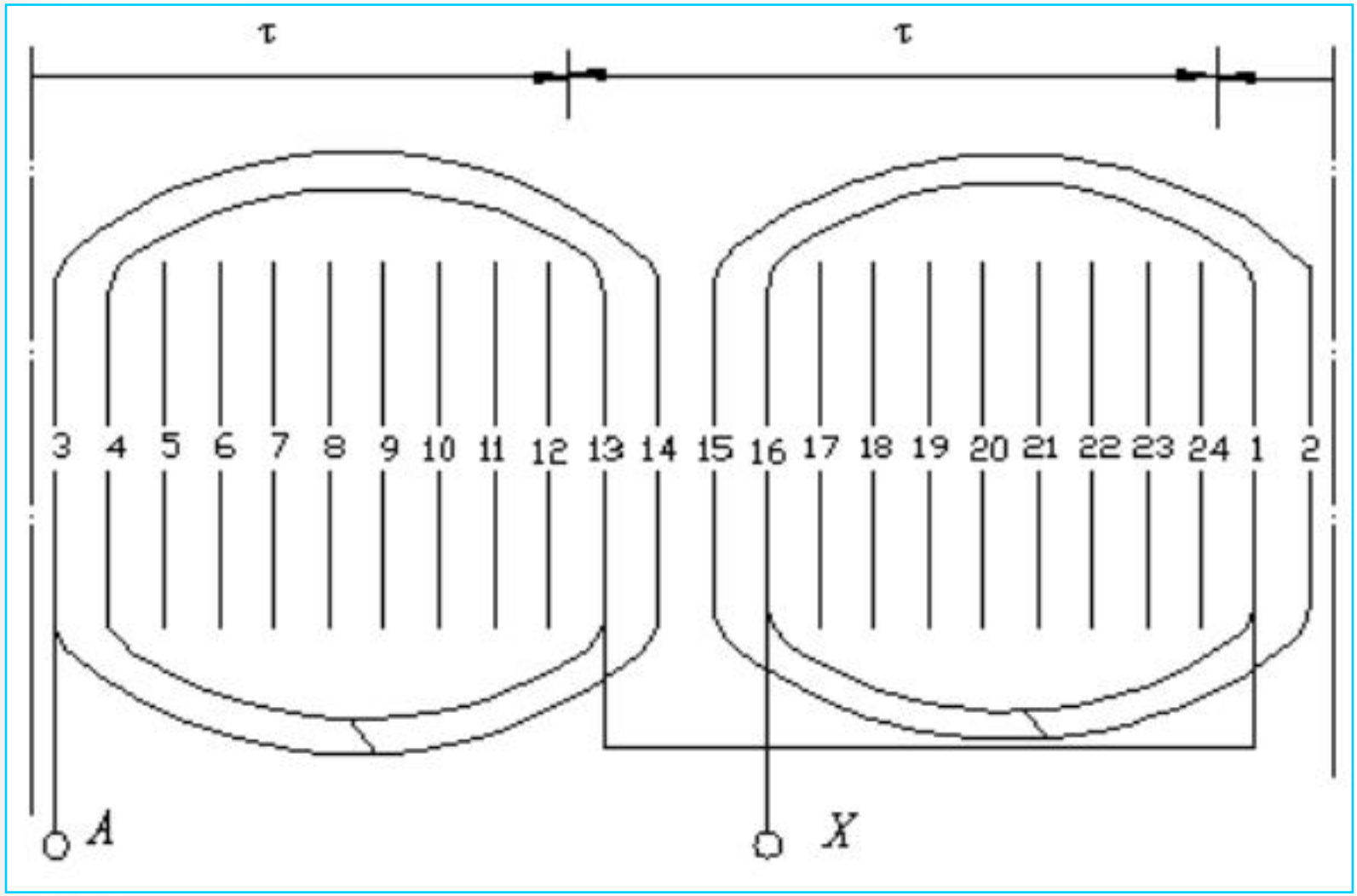
例：Q1=24，p=2，三相单层绕组，画绕组展开图。

$$y \approx \tau = \frac{Q_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

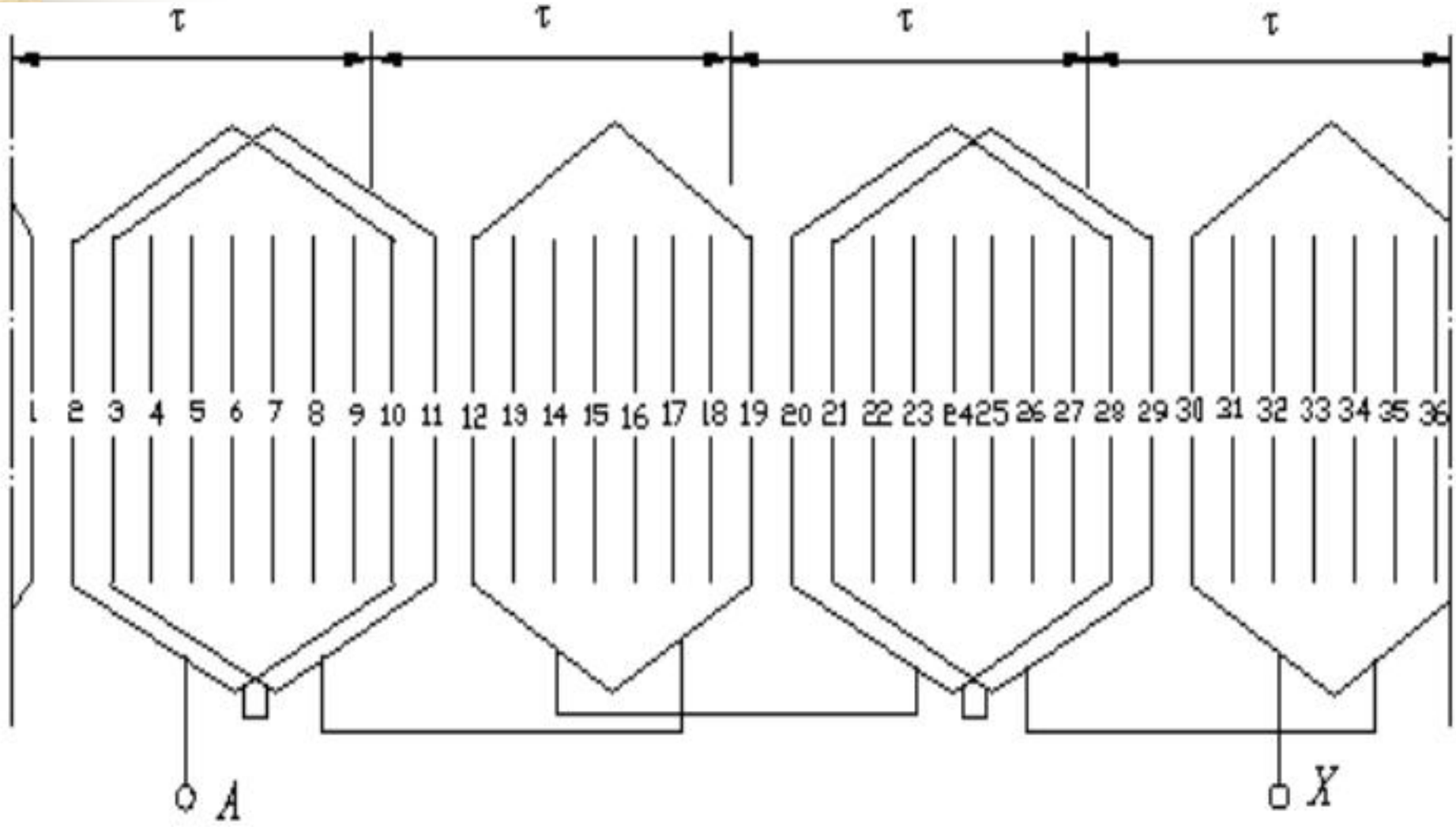
$$q = \frac{Q_1}{2p} \cdot \frac{1}{m_1} = 2$$

相带 极数	A	Z	B	X	C	Y
第一极数	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12
第二极数	13 14	15 16	17 18	19 20	21 22	23 24

三相单层同心式绕组展开图



三相单层交叉式绕组展开图



三、三相双层绕组

- 特点
  - 每个槽分上、下两层，分别嵌放两个线圈的各一条有效边，线圈数与总槽数相等；
  - 所有线圈都有相同的形状，易于制造、利于散热，端部整齐美观，机械强度高；
  - 可以选择最有利的线圈节距，改善磁势和电势波形，电气性能好。
  - 槽内上下层有效边之间须加层间绝缘、槽内的空间利用率较低些，嵌线较麻烦。
- 分类
  - 叠绕组
  - 波绕组

叠绕式：任何两个相邻的线圈都是后一个“紧叠”在另一个上面，故称为叠绕组。

双层叠绕组的主要优点在于：

1）可以灵活地选择线圈节距来改善电动势和磁 动势波形；

2）各线圈节距、形状相同，便于制造；

3）可以得到较多的并联支路数；

4）可采用短距线圈以节约端部用铜。

主要缺点在于：

1）嵌线较困难，特别是一台电机的最后几个线圈；

2）线圈组间连线较多，极数多时耗铜量较大。一般10KW以上的中、小型同步电机和异步电机及大型同步电机的定子绕组采用双层叠绕组。下面我们通过具体例子来说明叠绕组的绕制方法。

三相交流电机Z=24，2p=4，试绘制三相双层叠绕组展开图。

解：先计算：

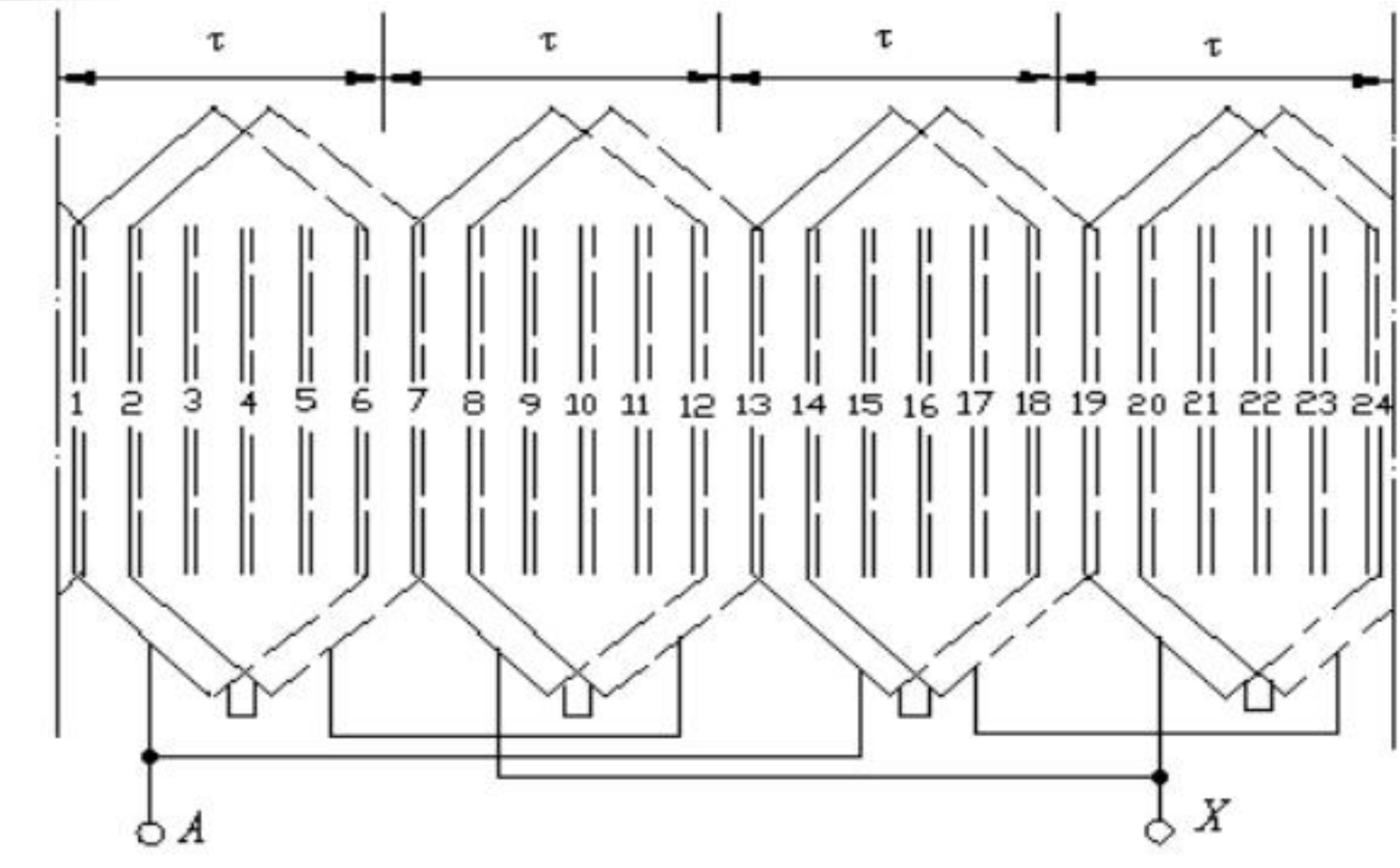
$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$

$$q = \frac{Z}{2\ pm} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \qquad \tau = \frac{Z}{2\ p} = \frac{24}{4} = 6，取\ \ y_1 = 5$$

（2）分相

（3）绘制绕组展开图：

将同一磁极下属于同一相带的线圈依次连成一个线圈组则A相可得四个线圈组，分别为1-2，7-8，13-14，19-20。同理B、C两相也各有4个线圈组。四个线圈组的电动势的大小相等，但同一相的两个相带中的线圈组电动势相位相反 .

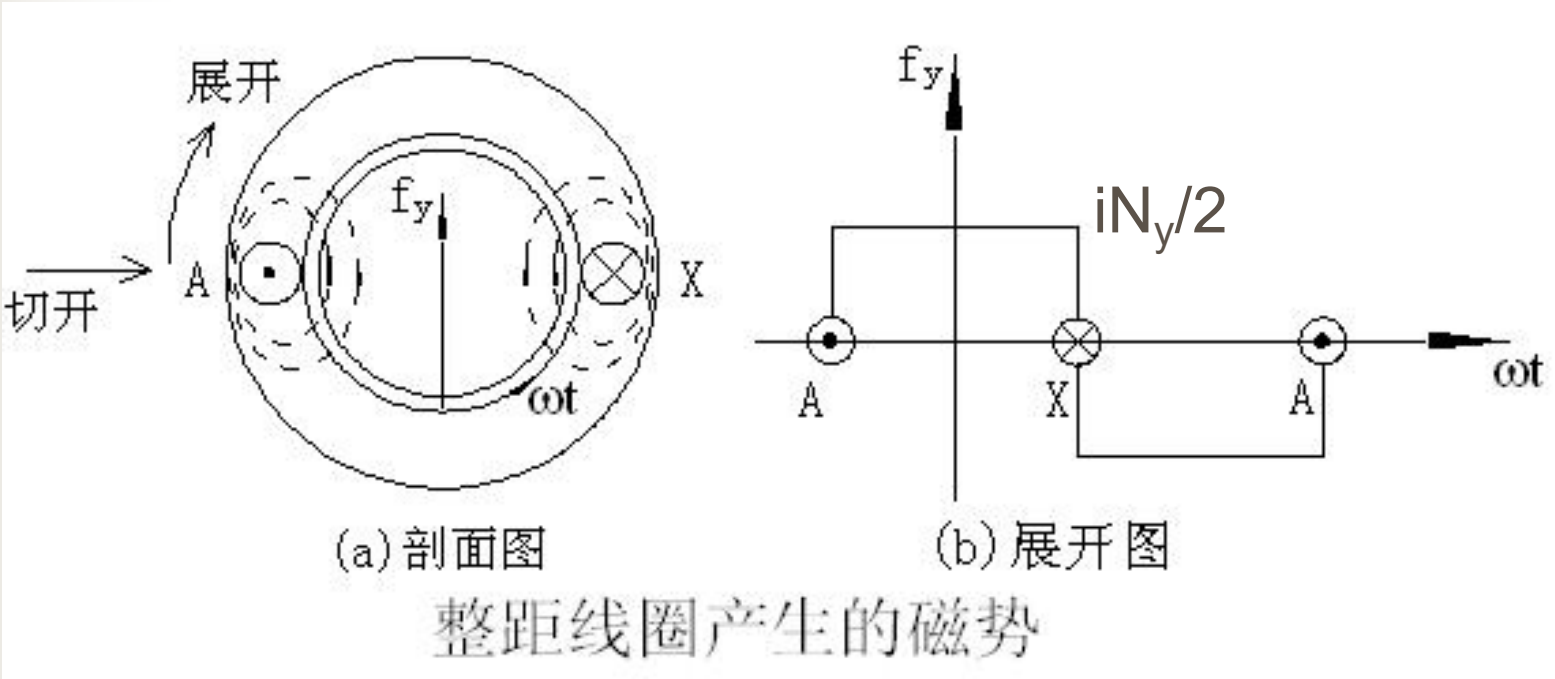

τ
τ
τ
τ
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
A
X

本次课程教学基本要求

- **内容：**
- 介绍旋转磁势。
- **要求：**
- 通过交流绕组通入电流以后产生磁势的分析，深刻理解脉振磁势、圆形旋转磁势的特点和产生的条件。
- **重点：**
- 掌握脉振磁势、圆形旋转磁势的特点和产生的条件。

一、单相绕组的磁动势-----脉振磁动势

由于空气隙的磁组远远大于定、转子铁芯中的磁组，可认为磁势全部降落在两个气隙上，即作用在每个空气隙的磁势为全部磁势的一半（$iN_y/2$）磁势波形为矩形波。



整距线圈产生的磁势

脉振磁场

设AX中通入交流电为：$i=\sqrt{2}I\cos\omega_1 t$(A)，则每极磁势表达式为：

$$f_y(\alpha,\omega t)=\frac{1}{2}iN_y=\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y\cos\omega_1 t$$

每极磁势的幅值是随时间按正弦规律变化，称这种空间位置固定，幅值随时间按正弦规律变化的磁势为脉振磁势，它的脉振频率就是通入线圈中电流的频率。

谐波分析

- 对周期性变化的矩形波分布的磁势，用傅氏级数进行谐波分析，可分解成为：

$$f_y(\alpha,\omega_1 t)=\sum_{\nu=1,3,5\cdots}^{\infty}C_\nu\cos\nu\alpha\cdot\cos\omega_1 t$$

- 式中υ=1，3，5…为谐波系数，系数C_υ为

$$C_\nu=\frac{1}{\nu}\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y\sin\nu\frac{\pi}{2}$$

- 基波磁势为：

$$f_{y1}=\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y\cos\alpha\cos\omega_1 t=F_{y1}\cos\alpha\cos\omega_1 t$$

- $F_{y1}=\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y=0.9IN_y$为基波磁势的最大幅值。
- 三次谐波磁势为：

$$f_{y3}=-\frac{1}{3}\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y\cos 3\alpha\cos\omega_1 t=-F_{y3}\cos 3\alpha\cos\omega_1 t$$

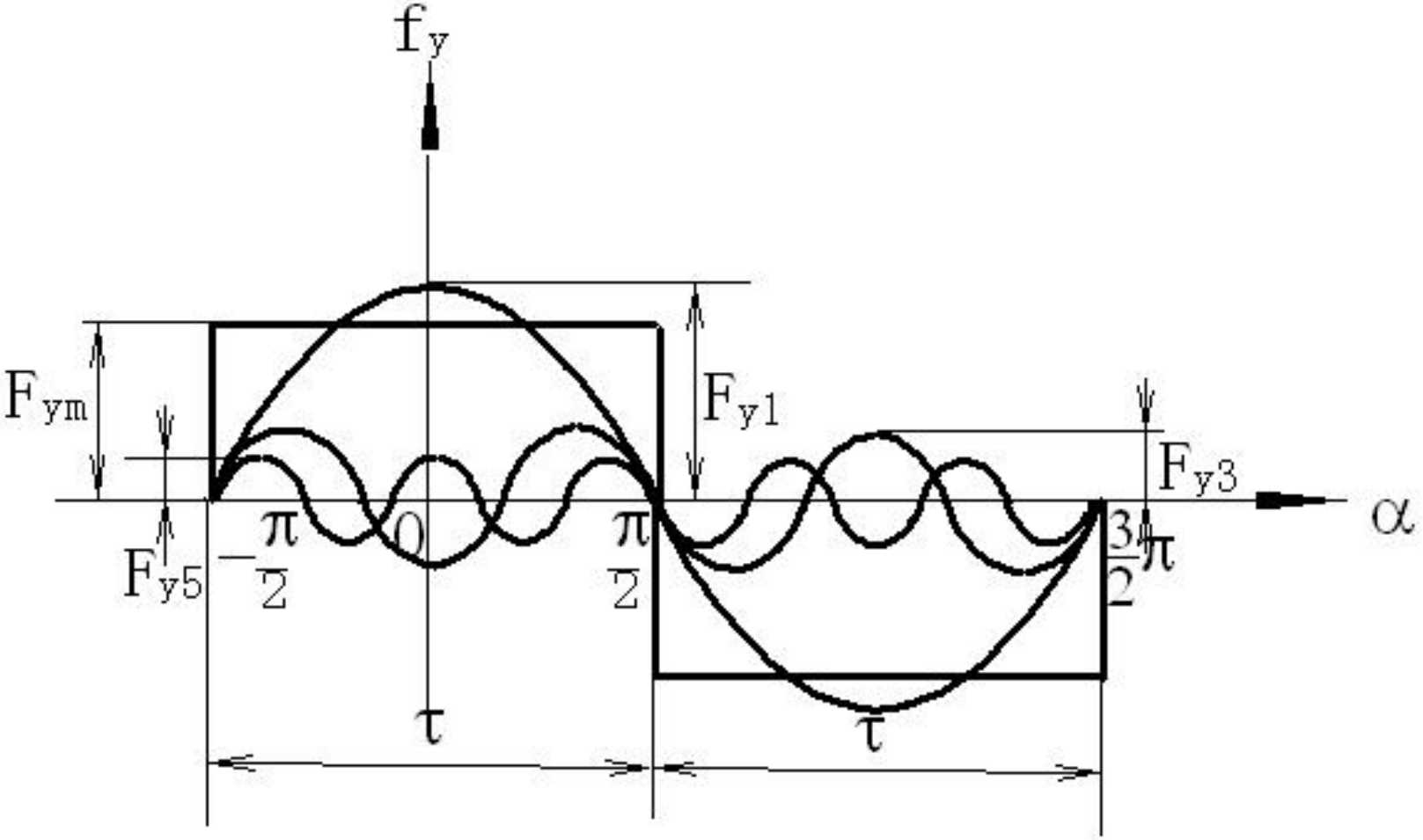
- $F_{y3}=\frac{1}{3}\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y=0.3IN_y$三次谐波磁势最大幅值。

五次谐波和高次谐波

- 五次谐波磁势为：

$$f_{y5}=\frac{1}{5}\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y\cos 5\alpha\cos\omega_1 t=F_{y5}\cos 5\alpha\cos\omega_1 t$$

- $F_{y5}=\frac{1}{5}\frac{4}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2}IN_y=0.18IN_y$ 五次谐波磁势最大幅值。
- 还有七次、九次、十一次等高次谐波磁势。



矩形波磁势的傅氏级数分解

分析：

- 谐波次数越高，其幅值就越小。
- 为了改善波形，除基波以外，考虑消除三、五、七次谐波，由于三次谐波及三的倍数次谐波在绕组连接成三相对称绕组时就已相互抵消，而五、七次谐波可通过短距和分布绕组来基本消除。因此当连成三相绕组后，只考虑基波磁势就可以了。

每相绕组产生的基波磁势幅值：

$$F_{\Phi 1}=0.9\frac{I_1}{p}N_1k_{w1}(\text{安匝/极})$$

I_1为相电流的有效值，

$k_{w1}=k_{q1}k_{y1}$称为基波绕组系数，

$$N_1=\frac{2pqN_y}{a}\ \text{双层}$$

基波分布系数为：

$$k_{q1}=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}$$

$$N_1=\frac{pqN_y}{a}\ \text{单层}$$

基波短距系数为：

$$k_{y1}=\sin\frac{y_1}{\tau}\frac{\pi}{2}$$

每相绕组产生的谐波磁势幅值为：

$$F_{\Phi\nu}=0.9\frac{1}{\nu}\frac{I_1}{p}N_1k_{w\nu}$$ （安匝/极）

$k_{wu}=k_{qu}k_{yu}$称为u次谐波绕组系数

u次谐波分布系数为：

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

u次谐波短距系数为：

$$k_{y\nu}=\sin\nu\frac{y_1}{\tau}\frac{\pi}{2}$$

单相绕组的磁动势性质：

- 单相绕组的磁动势是一种在空间位置固定、幅值随时间变化的脉振磁动势，基波及所有奇次谐波磁动势的幅值在时间上都以绕组中电流变化的频率脉振。
- 单相绕组基波磁动势幅值的位置与绕组的轴线相重合
- 单相绕组脉振磁动势中基波磁动势的幅值为 $F_{\Phi 1}=0.9\dfrac{N\,k_{w1}}{p}I$；

ν 次谐波磁动势的幅值 $F_{\Phi\nu}=\dfrac{1}{\nu}0.9\dfrac{N\,k_{w\nu}}{p}I$，$F_{\phi\nu}\propto\dfrac{1}{\nu}k_{w\nu}$

所以谐波次数愈高，幅值愈小。

二、三相绕组磁动势----旋转磁动势

- 三相对称绕组：各相绕组匝数、结构相同，在空间互差120°电角度。
- 三相对称交流电：

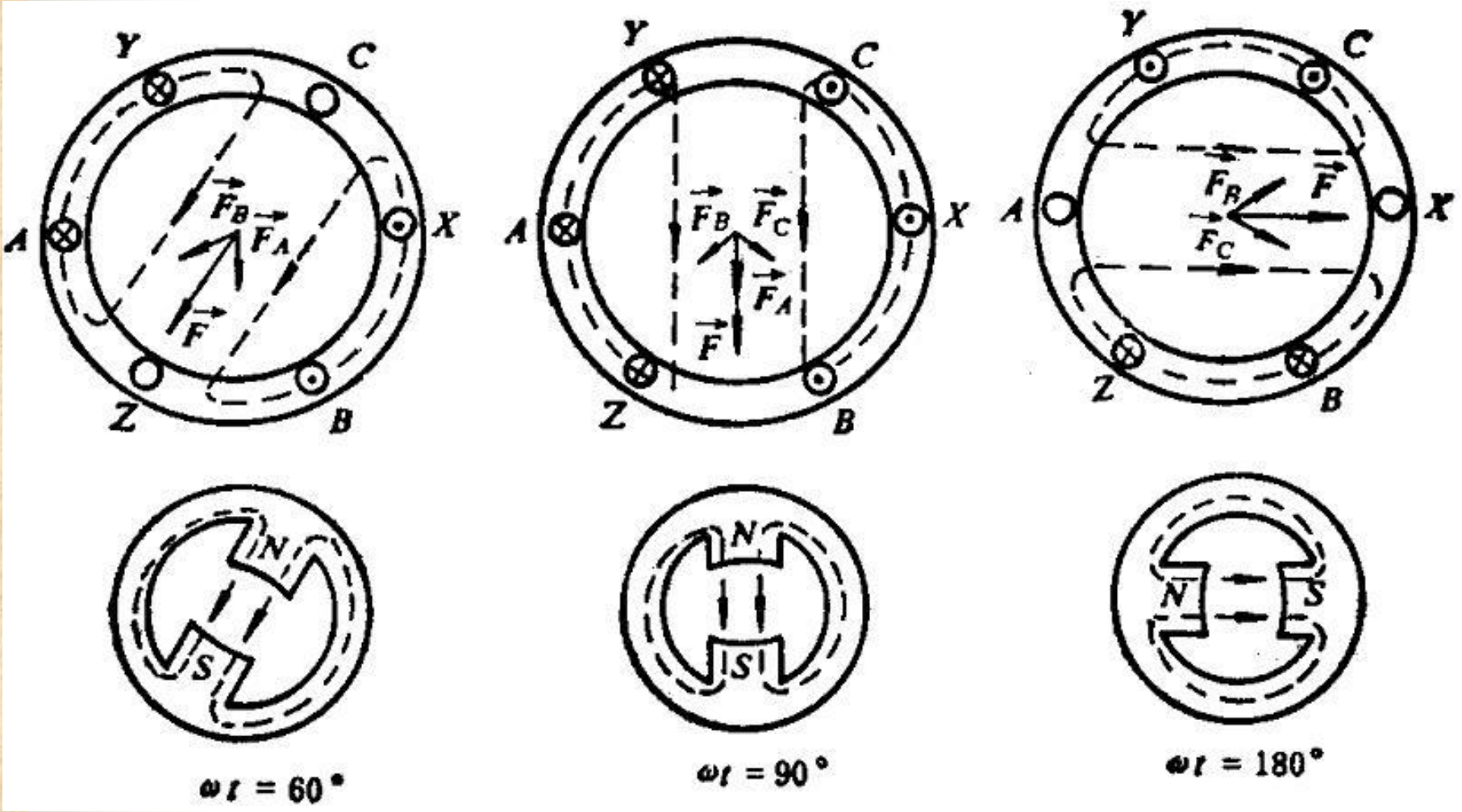
$$i_A = \sqrt{2} I \cos \omega_1 t$$

$$i_B = \sqrt{2} I \cos(\omega_1 t - 120°)$$

$$i_C = \sqrt{2} I \cos(\omega_1 t - 240°)$$

- 在三相对称绕组中通入三相对称交流电，每相绕组中都要产生单相脉振磁势，这三个脉振磁势在空间和时间上都互差120°电角度。

图示


Y
C
A
X
Z
B
$\vec{F}_B$
$\vec{F}_A$
$\vec{F}$
N
S
$\omega t = 60°$
$\vec{F}_C$
$\omega t = 90°$
$\omega t = 180°$

三个脉振磁势表达式

$$f_{\Phi A} = F_1 \cos\alpha \cos\omega_1 t$$

$$= \frac{F_1}{2}\cos(\alpha - \omega_1 t) + \frac{F_1}{2}\cos(\alpha + \omega_1 t)$$

$$f_{\Phi B} = F_1 \cos(\alpha - 120°)\cos(\omega_1 t - 120°)$$

$$= \frac{F_1}{2}\cos(\alpha - \omega_1 t) + \frac{\mathrm{F}_1}{2}\cos(\alpha + \omega_1 t - 240°)$$

$$f_{\Phi C} = F_1 \cos(\alpha - 240°)\cos(\omega_1 t - 240°)$$

$$= \frac{F_1}{2}\cos(\alpha - \omega_1 t) + \frac{F_1}{2}\cos(\alpha + \omega_1 t - 120°)$$

合成磁势

$$f_1(x,t) = f_{\Phi A} + f_{\Phi B} + f_{\Phi C}$$

$$= \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)$$

$$F_1 = \frac{3}{2} \mathrm{F}_{\phi 1} = 0.9 \frac{\mathrm{m}_1}{2} \frac{N\ k_{w1}}{p} I \ = 1.35 \frac{N k_{w1}}{p} I$$

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}$$

结论

在三相对称绕组通以三相对称交流电产生的旋转磁势具有以下特点：

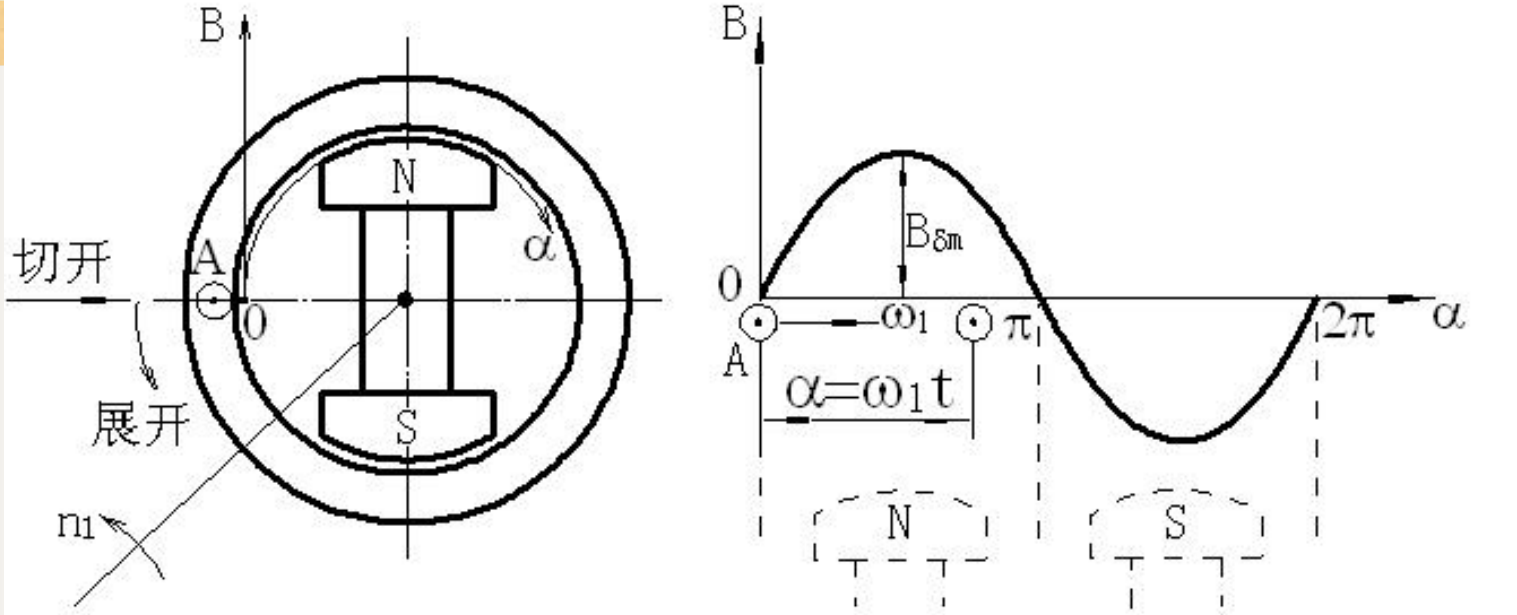
- ①旋转磁势的幅值为：$F_m = 1.35\frac{N_1 k_{w1}}{p} I$安匝/每极
- ②旋转磁势的转速为同步转速：$n_0 = \frac{60 f_1}{p}(r/\min)$
- ③旋转磁势的转向：由电流的相序决定（即电流达到最大值的顺序），它总是从电流领先的一相绕组向电流滞后的一相绕组方向转动。

一、线圈的感应电势

设定子内表面槽中嵌放导体A，有效长度为l（m），转子只有一对磁极，它由原动机拖动以恒定转速n_1（r/min）逆时针旋转，沿气隙圆周方向分布的基波磁密波形，大小为：

$$B_{\delta 1} = B_{1m} \sin \alpha$$

式中B_{1m}为基波气隙磁密幅值。



(a) 横截面示意图 (b) 沿气隙正弦分布的磁密波形

交流发电机模型

- 导体A切割磁力线产生感应电势大小为：

$$e_1 = b_{1x} \cdot l \cdot v = B_{\delta 1m} \cdot l \cdot v \sin\alpha$$

$$= E_{1m} \sin\omega_1 t = \sqrt{2} E_1 \sin\omega_1 t$$

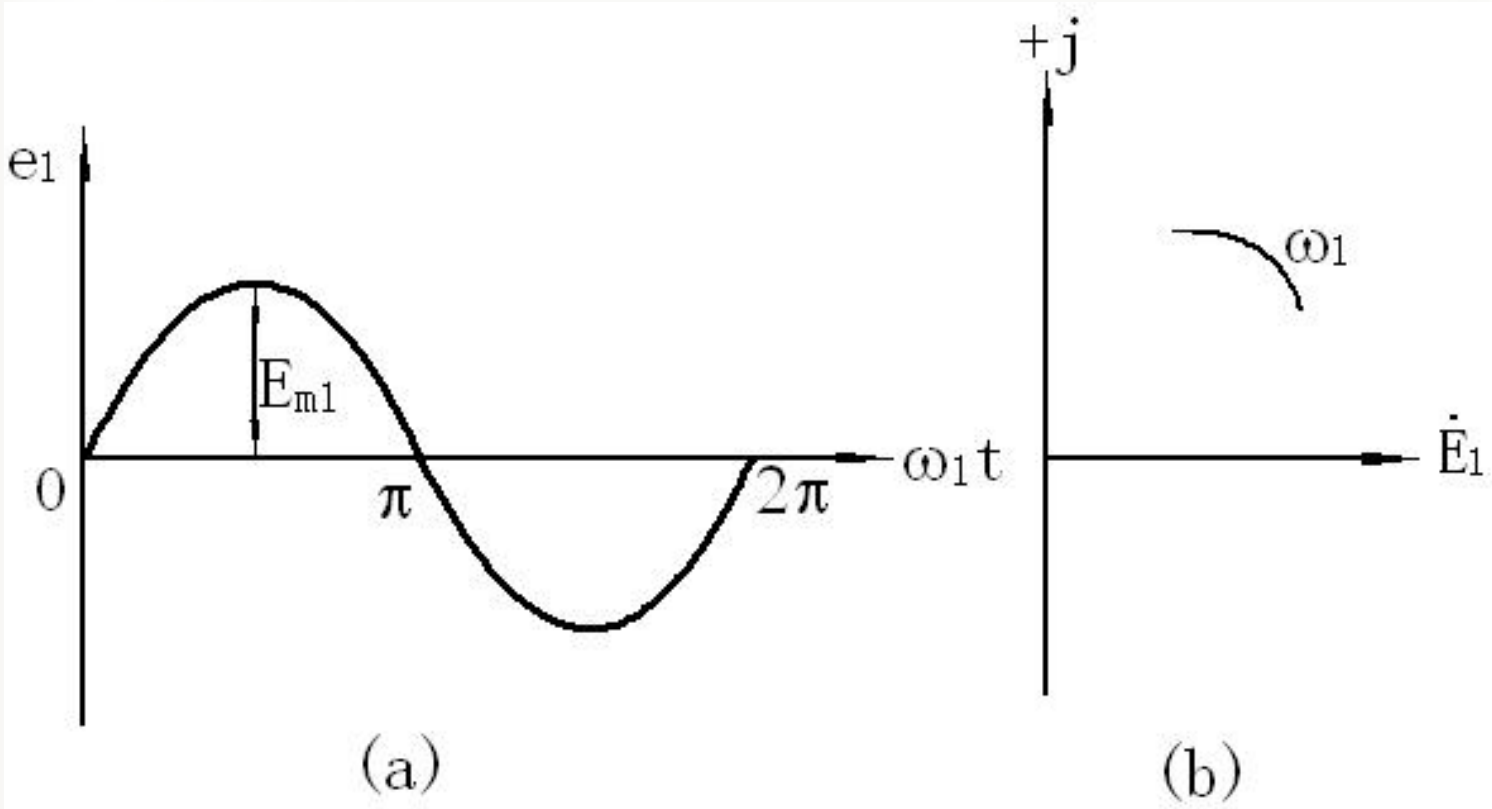
- 导体的基波感应电势最大值为：

$$E_{1m} = B_{\delta 1m} lv = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m} \cdot l \cdot 2\tau \cdot f_1$$

$$= \frac{\pi}{2} \cdot B_{\delta 1av} \cdot l \cdot 2\tau \cdot f_1 = \pi f_1 \Phi_1$$

$$E_1 = \frac{E_{\delta 1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi f_1 \Phi_1}{\sqrt{2}} = 2.22 f_1 \Phi_1 (V)$$

$$B_{\delta 1av} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 1m}$$



导体A中基波感应电势

- 在一对磁极情况下，导体A每经过一对主磁极，其中的感应电势经历一个周期。当电机转子上有p对主磁极，电机每旋转一圈，导体A中的基波感应电势变化p周，则导体A中的基波感应电势频率为：

$$= \frac{\quad}{\quad} (\quad)$$

- 当电机的极对数p和转速n_1一定时，f_1频率便为固定的数值。

整距线匝感应电势

- 两导体A、X就构成了整距线匝。它们中的感应电势总是大小相等，方向相反。整距线匝基波感应电势为：

$$= \quad -$$

- 用相量表示时：

$$\dot{} \quad \dot{} \quad \dot{} \quad \dot{}$$

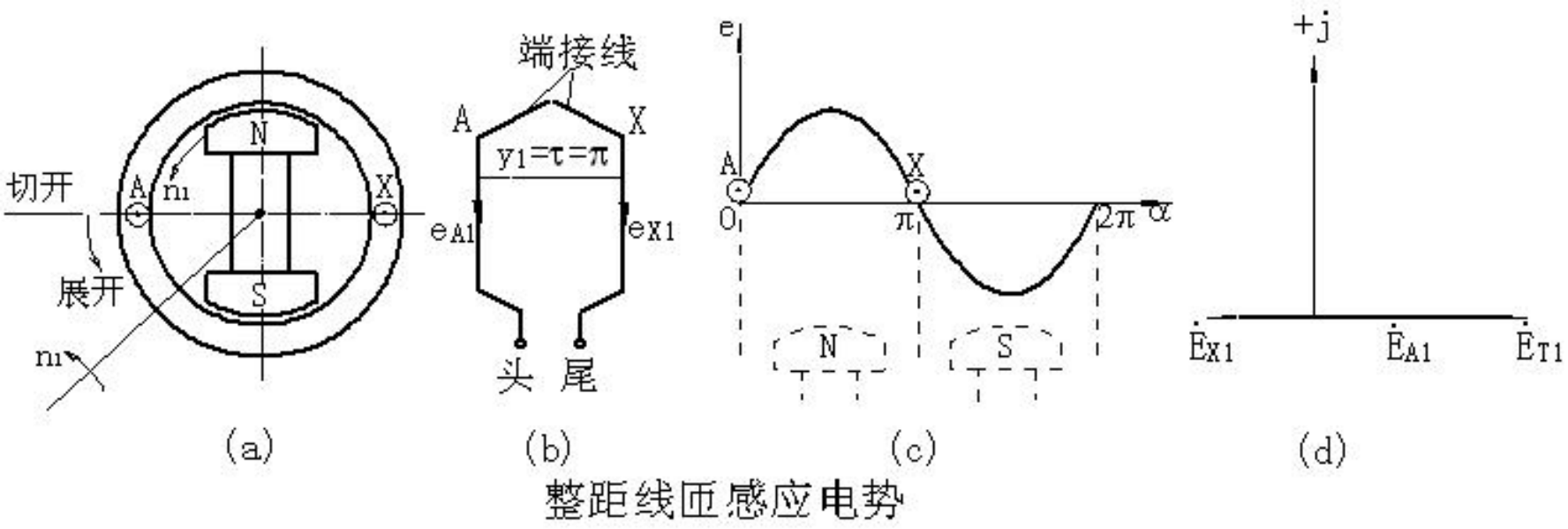
$$= \quad - \quad =$$

- 整距线匝基波感应电势瞬时表达式为：

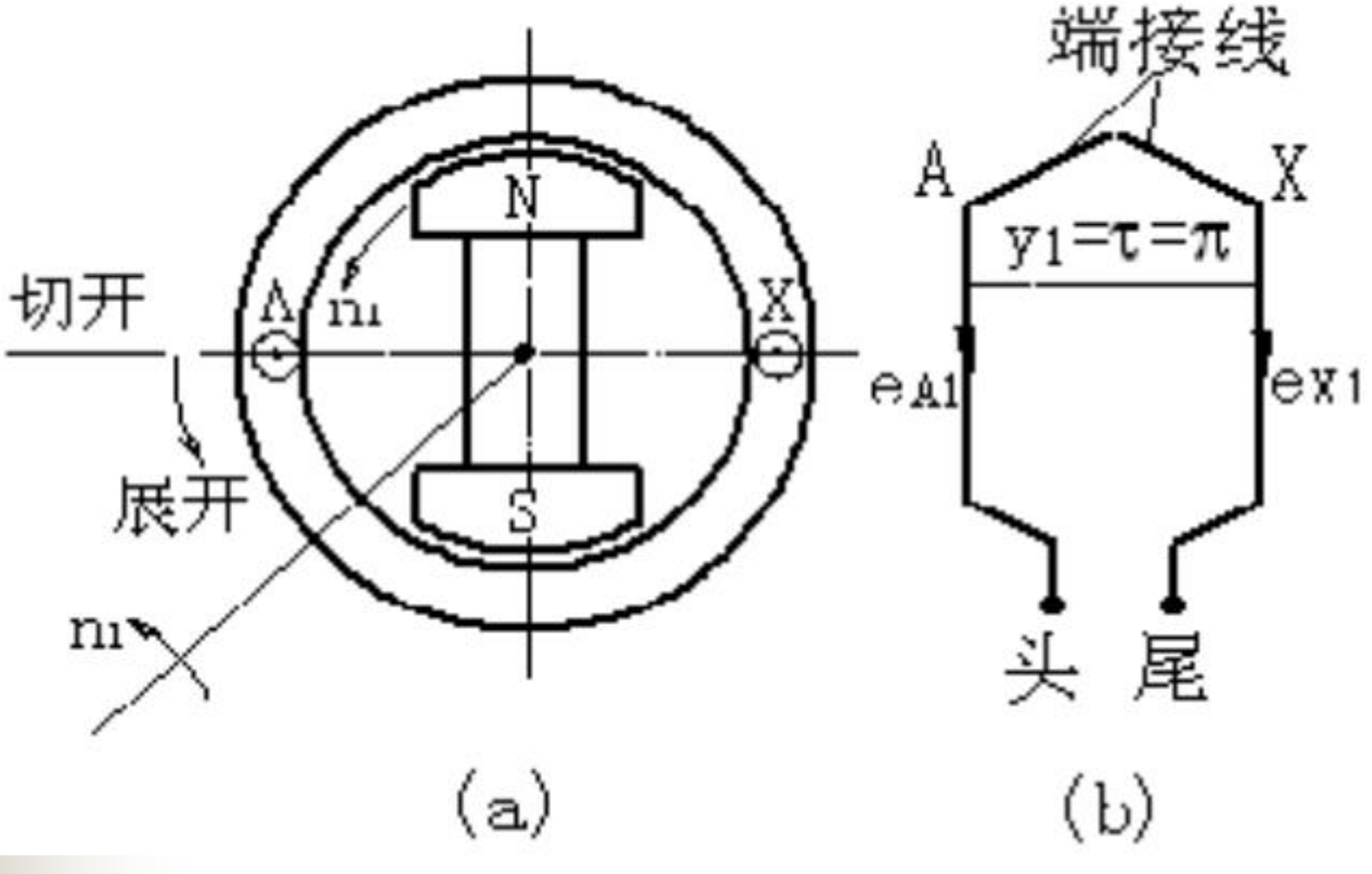
$$e_{T1} = E_{T1m}\sin\omega_1 t = \sqrt{2}E_{T1}\sin\omega_1 t$$

- 整距线匝基波感应电势有效值为：

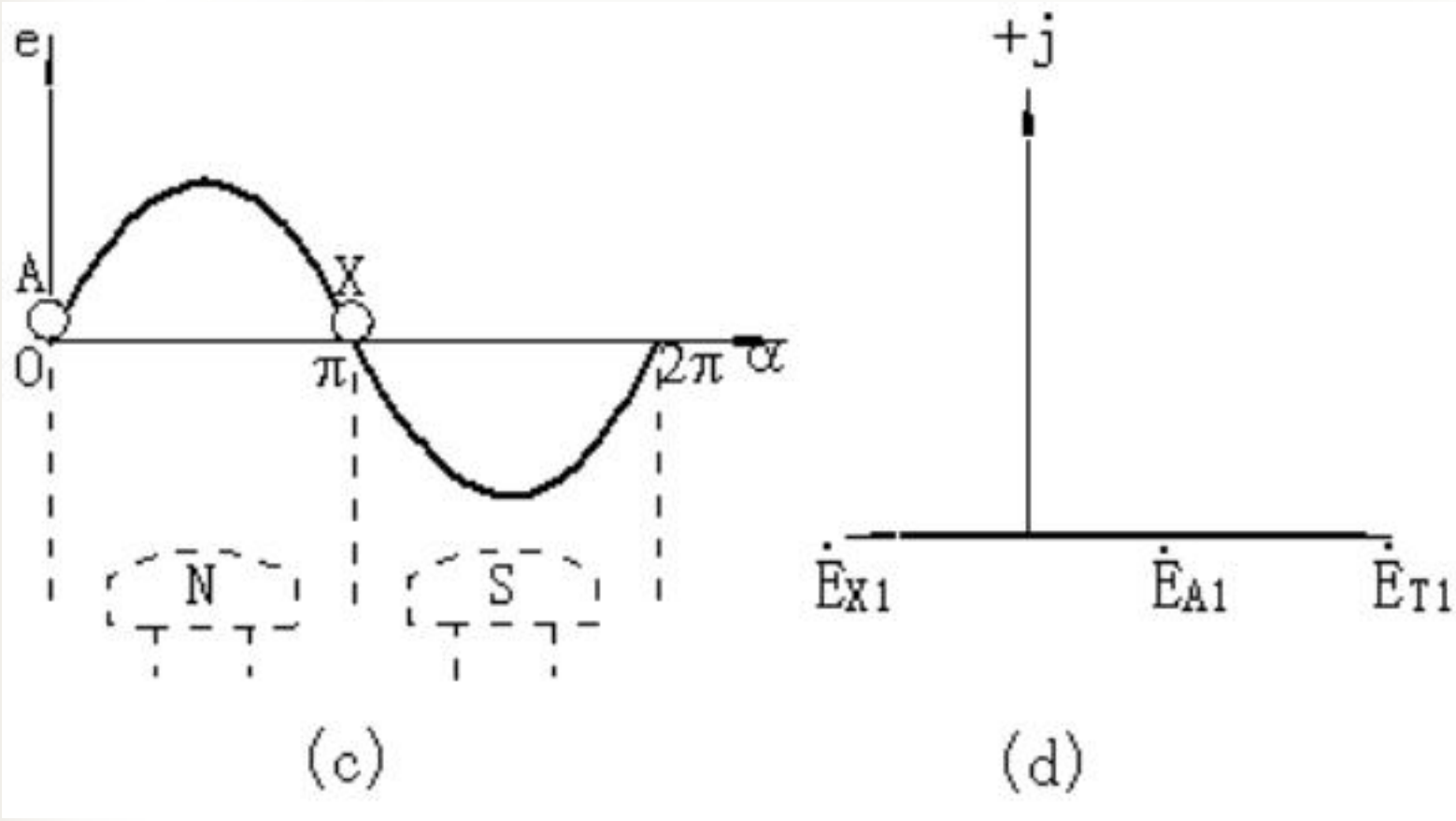
$$E_{T1} = 2E_{A1} = 2\times 2.22 f_1 \Phi_1 = 4.44 f_1 \Phi_1$$



整距线匝感应电势



整距线匝感应电势



整距线匝感应电势

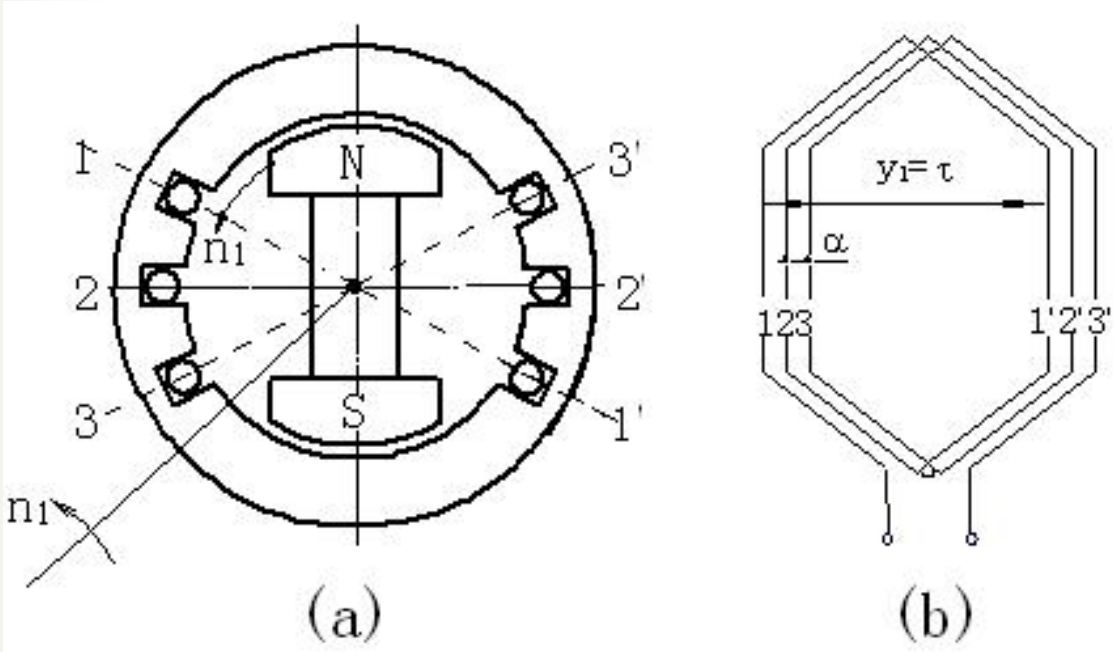
线圈是由N_y匝线匝串联而成，即匝数N_y整距线圈的基波感应电势瞬时值为：

$$e_{y1} = E_{y1m}\sin\omega_1 t = \sqrt{2}E_{y1}\sin\omega_1 t$$

$$E_{y1} = 4.44 f_1 N_y \Phi_1 (V)$$

整距分布线圈感应电势

- 如果在定子内圆表面槽中均匀嵌放三个匝数为N_y的整距线圈头尾连接，相互串联形成线圈组，称为整距分布线圈，相邻线圈的槽距角是α。

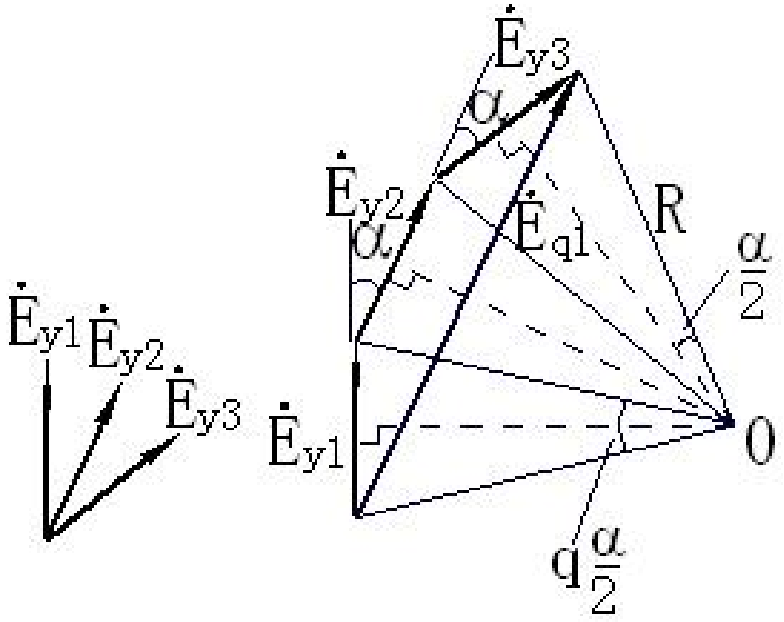


整距分布线圈的基波感应电势为：

$$E_{q1} = qE_{y1}k_{q1} = 4.44 f_1 q N_y k_{q1} \Phi_1$$

绕组的基波分布系数：

$$k_{q1} = \frac{\sin q\frac{\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}$$



基波分布系数含义

- 基波分布系数是一个小于1的数，其含义是：分布放置的线圈要比将各线圈集中放置在一个槽中的基波感应电势小。可以这样认为：把实际q个分布放置的整距线圈，看成是集中放置的，但它们的总等效匝数为qN_yk_{q1}，而不是qN_y。

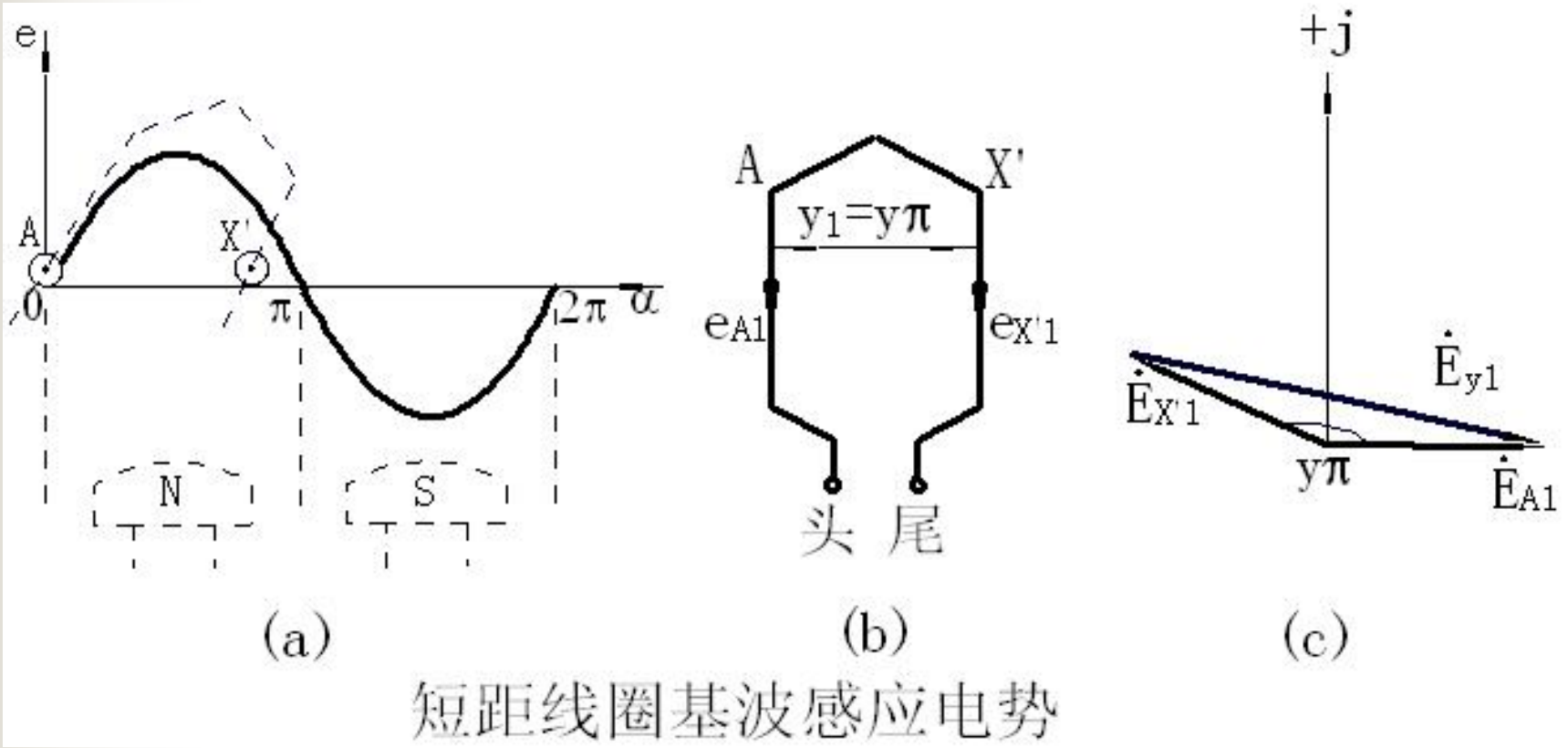
短距线圈感应电势

- 如果线圈的节距$y_1<\tau$，则为短距线圈，令短距线圈的节距$y_1=y\pi$，其中$0<y<1$，短距线圈的基波感应电势有效值为：

$$E_{y1}=2E_{A1}\sin y\frac{\pi}{2}=4.44f_1N_y\Phi_1\sin y\frac{\pi}{2}=4.44f_1N_yk_{y1}\Phi_1$$

- 绕组基波短距系数：

$$k_{y1}=\sin y\frac{\pi}{2}$$



(a) (b) (c)

短距线圈基波感应电势

基波短距系数含义

- 基波短距系数，它是一个小于1的数，其含义是：短距线圈要比整距线圈的基波感应电势小。可以这样认为：把实际的短距线圈看成是整距线圈，则它等效匝数为$N_y k_{y1}$，而不是N_y。

一相绕组感应电势

- 单层绕组：采用分布整距形式
- 每相绕组串联匝数为：$N_1 = \dfrac{pqN_y}{a}$
- 每相的基波感应电势有效值为：

$$E_{\Phi 1} = 4.44 f_1 N_1 k_{q1} \Phi_1$$

- 双层绕组：采用短距分布形式
- 每相绕组串联匝数为：$$N_1 = \frac{2pqN_y}{a}$$
- 每相的基波感应电势有效值为：

$$E_{\Phi 1} = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_1$$

- $k_{w1} = k_{q1} \cdot k_{y1}$ 为基波绕组系数。

- 绕组的谐波感应电势
- 绕组采用分布、短距后虽削弱些基波感应电势，但可使各次谐波电势大大削弱，使绕组感应电势接近正弦波。

- 三相交流绕组Y接或Δ接时，由于三次谐波以及三的倍数次谐波电势在时间相位上同相，故三相线电势中无三次或三的倍数次谐波。

- 设υ为谐波次数，则谐波感应电势频率为：

$$f_\upsilon = \upsilon \cdot f_1$$

- 每相绕组υ次感应电势有效值为：

$$E_\upsilon = 4.44 f_\upsilon N_1 k_{w\upsilon} \Phi_\upsilon$$

$k_{w\upsilon} = k_{q\upsilon} \cdot k_{y\upsilon}$ 为υ次谐波绕组系数

总结：

- 单层绕组为整距绕组，每相的基波感应电势有效值为：

$$E_{\Phi 1} = 4.44 f_1 N_1 k_{q1} \Phi_1 \quad N_1 = \frac{pqN_y}{a}$$

- 双层绕组为分布短距绕组，每相的基波感应电势有效值为：

$$E_{\Phi 1} = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_1 \quad N_1 = \frac{2pqN_y}{a}$$

$$k_{q1} = \frac{\sin q\frac{\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}} \qquad k_{y1} = \sin\frac{y_1}{\tau}\frac{\pi}{2}$$

课后复习要点：

- 1 .交流绕组类型、基本术语、联结规律
- 2. 分布、短距和绕组系数的含义及表达式
- 3.绕组感应电势的计算

本章小结

- 本章介绍了异步电动机的基本工作原理，从中可见定子都由定子铁芯和三相对称定子绕组组成。三相对称绕组通入三相对称电流，便会在气隙中产生圆形旋转磁场，其转速为$n_1=60f_1/p$，转向由通入的电流相序决定，只要任意调换二电源线，既可改变旋转磁场方向，从而改变电动机的运行方向。
- 同时还介绍了交流绕组联结规律以及推出了交流绕组中产生感应电势和磁势的计算公式。