



# 哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



## 自动控制实践A

### 7.1- 交流电机概述



# 目 录

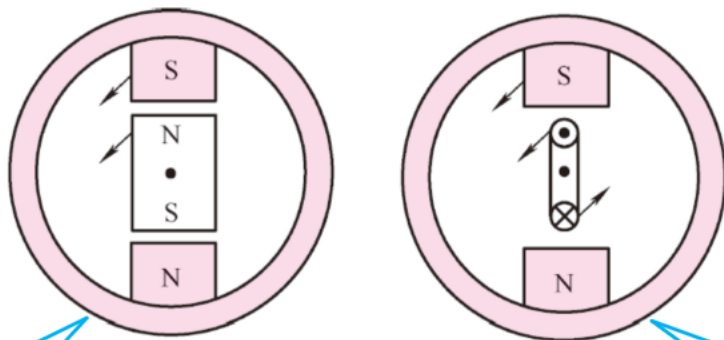
---

- 1、交流电机的基本工作原理
- 2、交流绕组的基本工作原理
- 3、交流绕组的基本参数



# 1. 交流电机的基本工作原理

## 1、交流电机的基本模型及工作原理



a) 同步电机模型

b) 感应电机模型

同性相斥  
异性相吸

基本模型

电磁感应定律  
电磁力定律



# 1. 交流电机的基本工作原理

---

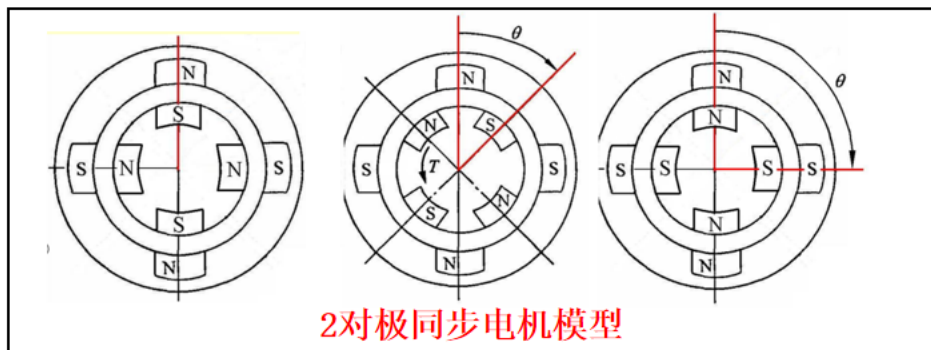
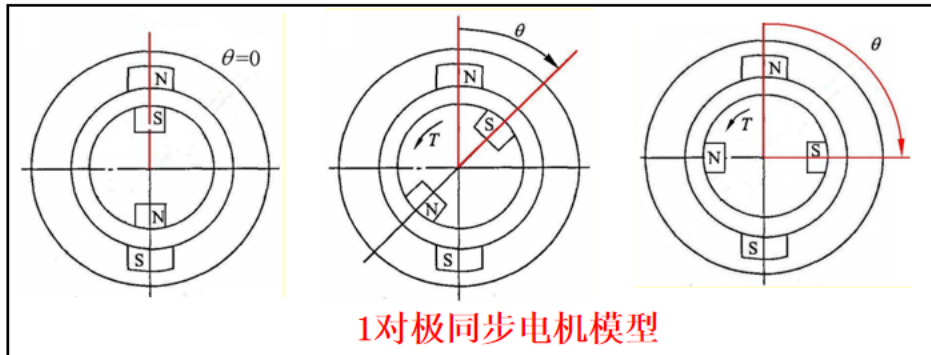
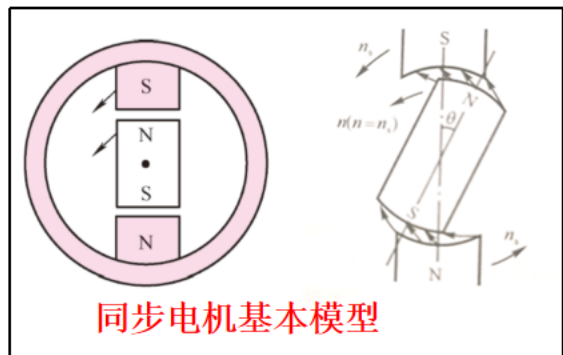
## 1.1、同步电机的基本工作原理

## 1.2、异步电机的基本工作原理



# 1.1 同步电机运行的基本原理

同步电机是交流旋转电机的一种，因其转速恒等于磁场同步转速而得名。



转矩与极对数之间的关系:

1对极磁场  $T_1 = K \sin \theta$

2对极磁场  $T_1 = K \sin 2\theta$

$p$ 对极磁场  $T_1 = K \sin p\theta$



# 1.1 同步电机运行的基本原理

## 磁阻式/反应式微型同步电动机

磁阻式同步电机的定子与永磁式同步电动机相同，转子不同，其转子由软磁钢片加非磁性金属片制成，在不同方向有不同的磁阻。

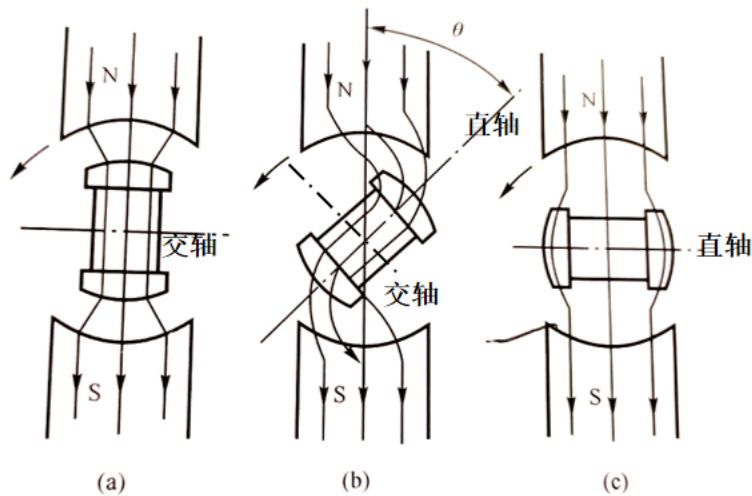


图 4-6 磁阻同步电动机



# 1. 交流电机的基本工作原理

---

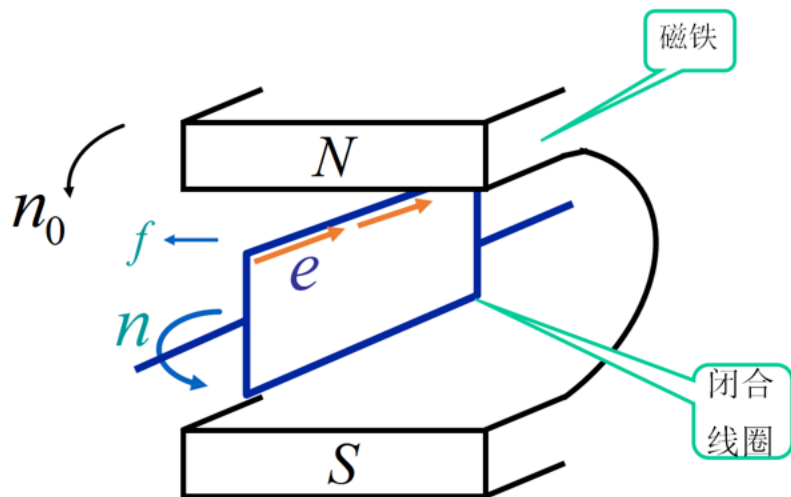
## 1.1、同步电机的基本工作原理

## 1.2、异步电机的基本工作原理



## 1.2. 异步电动机运行的基本原理

感应电机是利用电磁感应作用，在转子内感应电流以实现机电能量转换的电机，又称为异步电机。





## 1.2. 异步电动机运行的基本原理

磁极旋转  $\rightarrow$  导线切割磁力线产生感应电动势

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (\text{右手定则})$$

磁感应强度

导线长

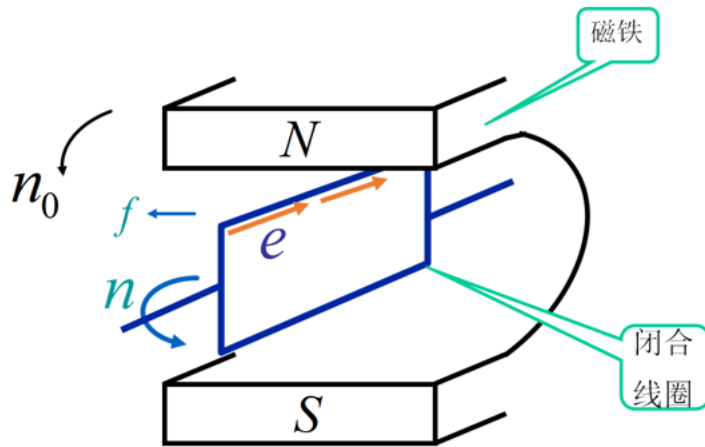
切割速度

闭合导线产生电流  $i$

通电导线在磁场中受力

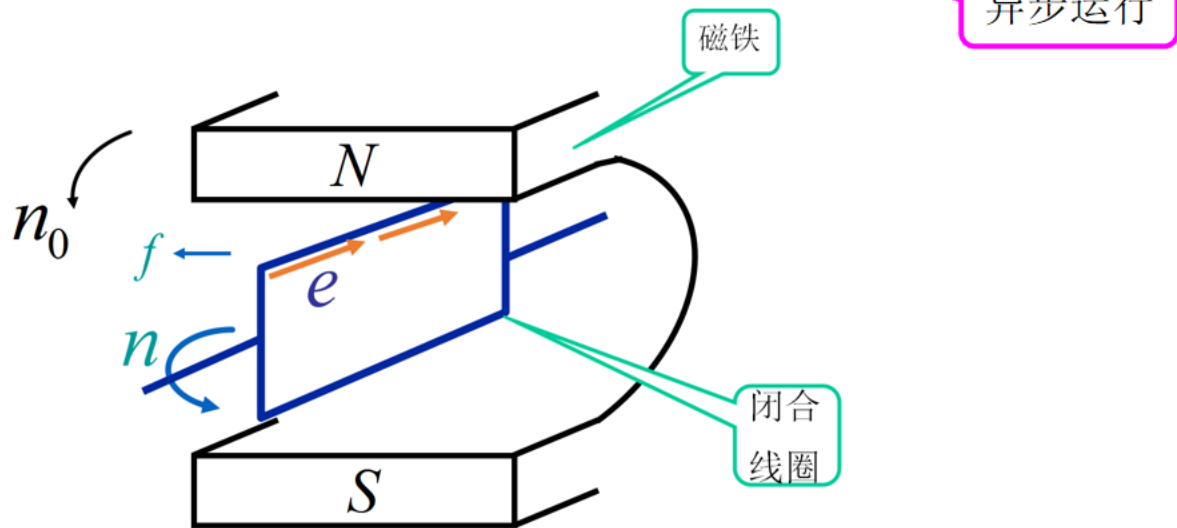
$$f = B \cdot l \cdot i$$

(左手定则)



## 1.2. 异步电动机运行的基本原理

- 结论：
1. 线圈跟着磁铁转→两者转动方向一致
  2. 线圈比磁铁转速慢  $n < n_0$



## 1.2. 异步电动机运行的基本原理

电动机转速和旋转磁场转速的关系

磁场转速:  $n_0$     电动机转速:  $n$

电机转子转动方向与磁场旋转的方向一致,

但  $n < n_0$

如果  $n = n_0$

→ 转子与旋转磁场间没有相对运动

→ 无转子电动势（转子导体不切割磁力线）

→ 无转子电流 → 无转矩



# 目 录

---

1、交流电机的基本工作原理

2、交流绕组的基本工作原理

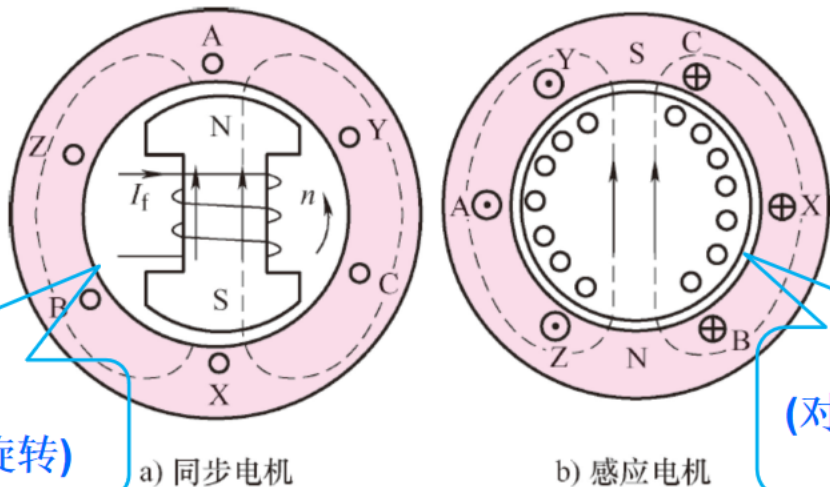
3、交流绕组的基本参数



## 2. 交流绕组的基本工作原理

**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)

a) 同步电机

电气旋转磁场  
(对称交流电流产生的  
旋转磁场)

b) 感应电机

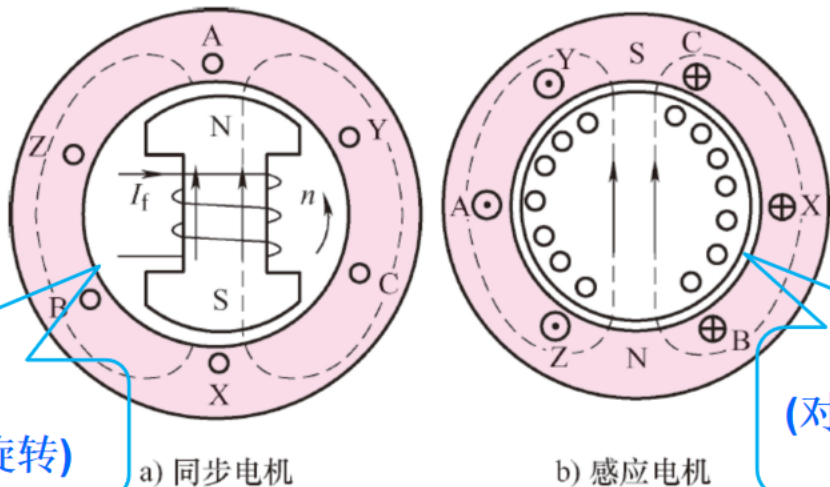
旋转磁场是交流电机工作的基础



## 2. 交流绕组的基本工作原理

**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

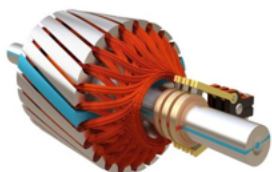
## 2. 交流绕组的基本工作原理

### 三相异步机原理

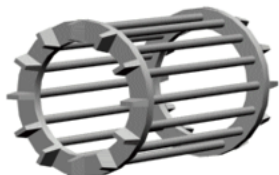
定子绕组：产生旋转磁场。

转子：在旋转磁场作用下，产生感应电动势或电流。

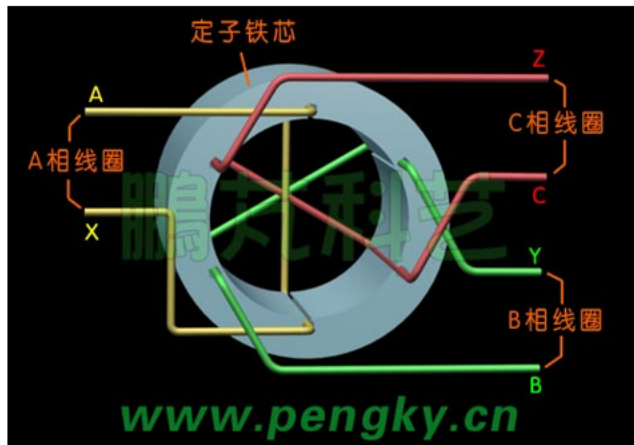
根据转子形式，一般分为**绕线式**和**鼠笼式**。



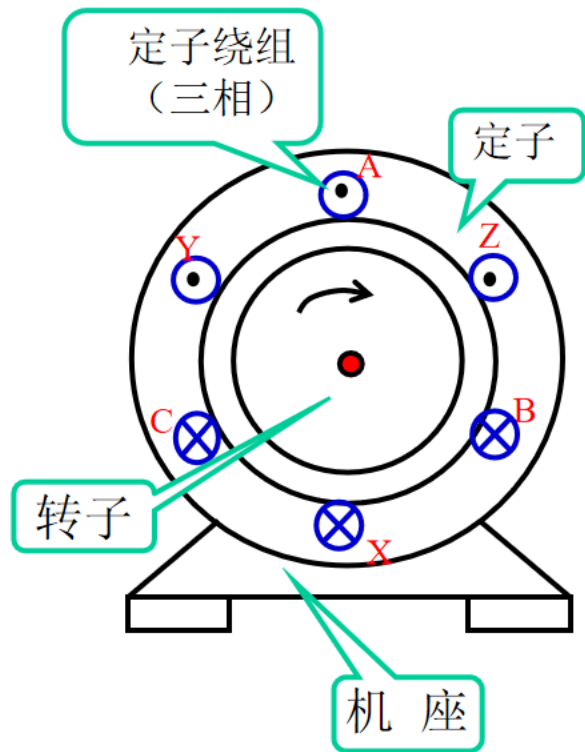
绕线转子



鼠笼转子

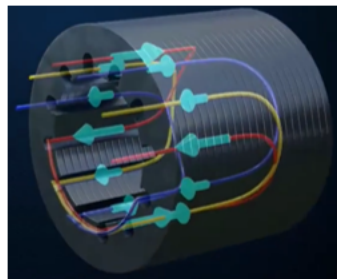
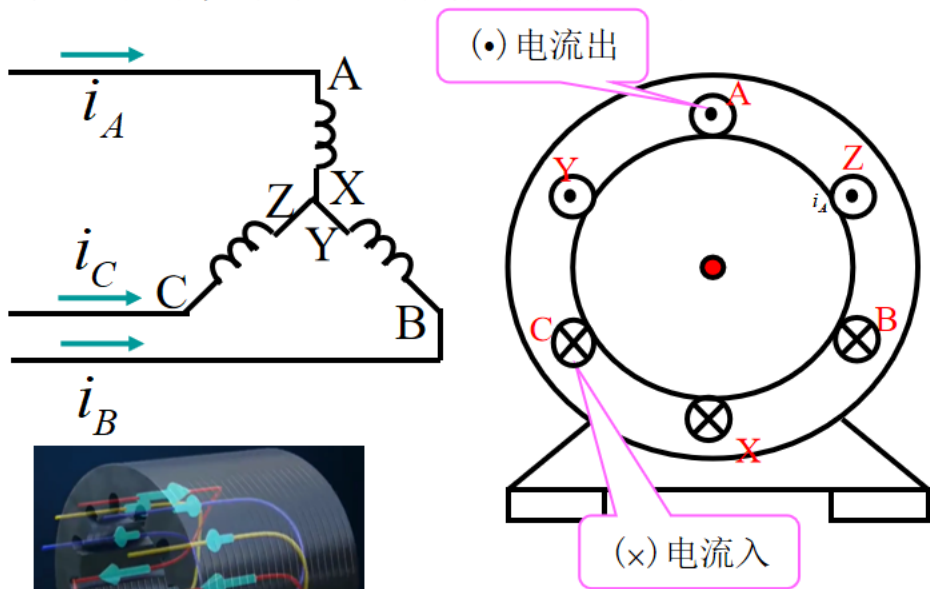


定子绕组



## 2. 交流绕组的基本工作原理

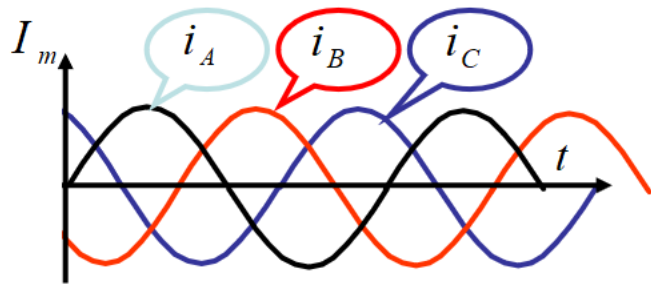
异步电机中，旋转磁场代替了旋转磁极



$i$ ：“+”代表首端流入，尾端流出。

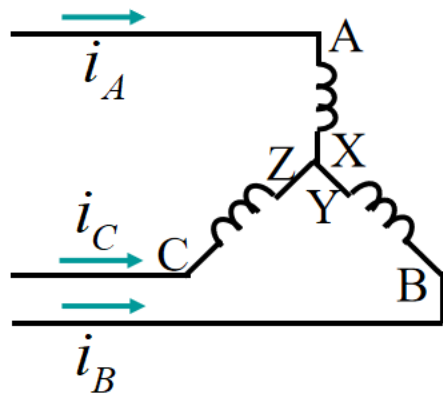
$i$ ：“-”代表尾端流入，首端流出。

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





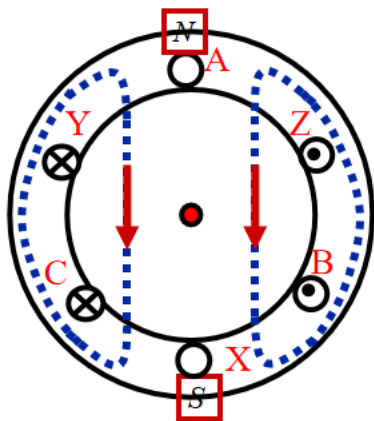
## 2. 交流绕组的基本工作原理



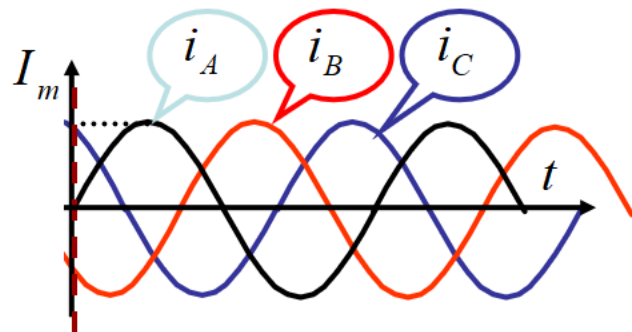
合成磁场方向：  
向下

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

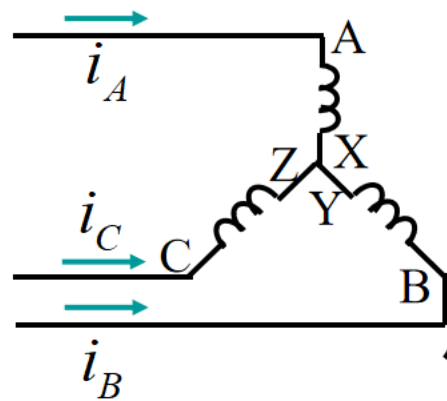
交流绕组产生的  
电气旋转磁场，  
等价成为磁钢产  
生的磁场，标出  
图中的N，S极



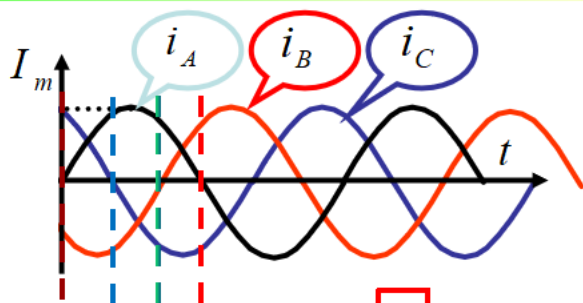
$$\omega t = 0$$



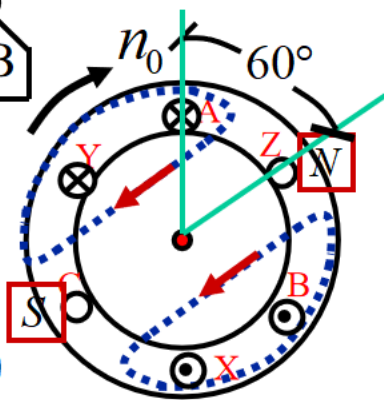
## 2. 交流绕组的基本工作原理



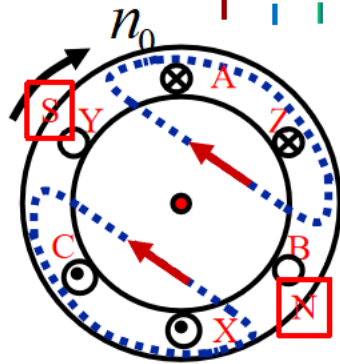
同理分析，可得其它电  
流角度下的磁场方向：



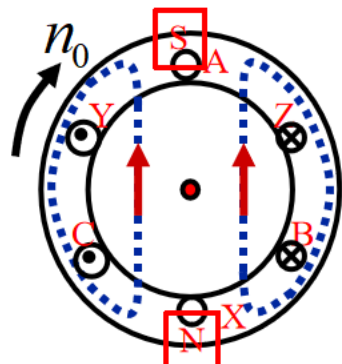
$$\begin{cases} i_A = I_m \sin \omega t \\ i_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



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



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

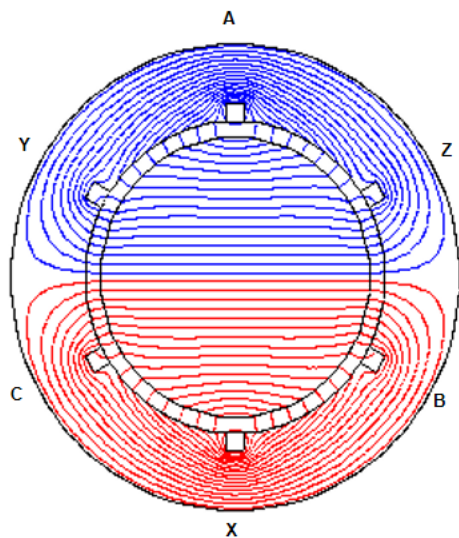


$$\omega t = 180^\circ$$



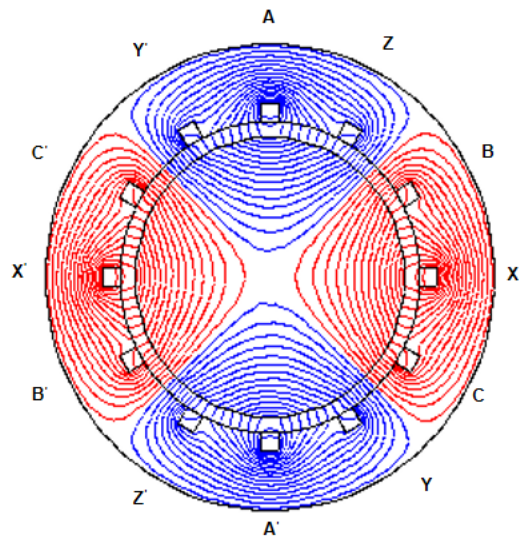
## 2. 交流绕组的基本工作原理

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。



极对数

$$p = 1$$



极对数

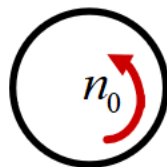
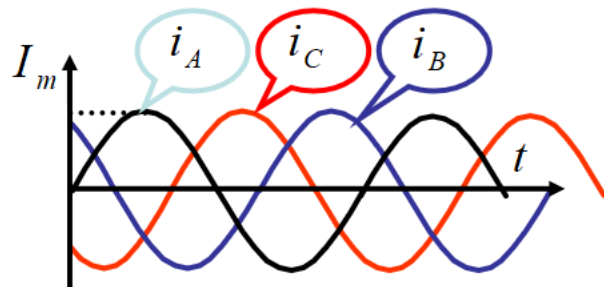
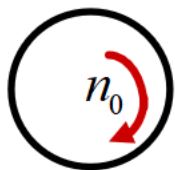
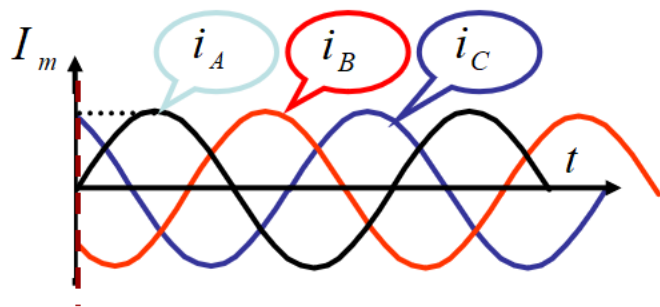
$$p = 2$$



## 2. 交流绕组的基本工作原理

旋转方向：取决于三相电流的相序。

改A/B/C绕组接线相序为A/C/B



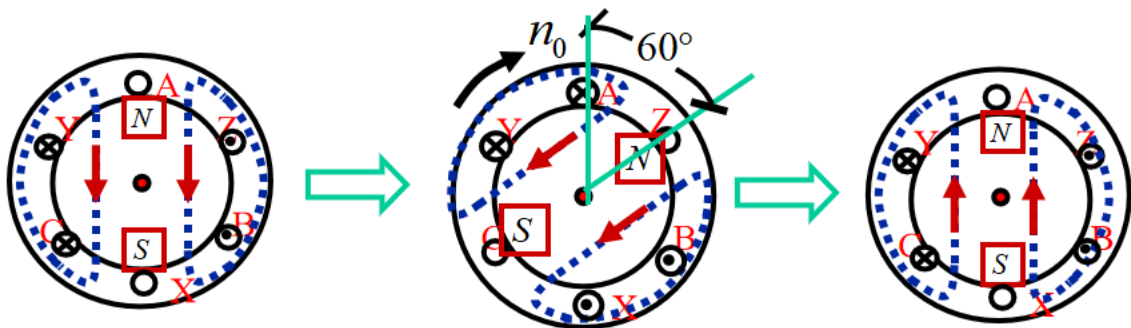
改变电机的旋转方向：换接其中两相



## 2. 交流绕组的基本工作原理

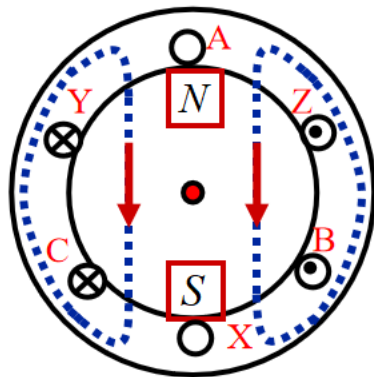
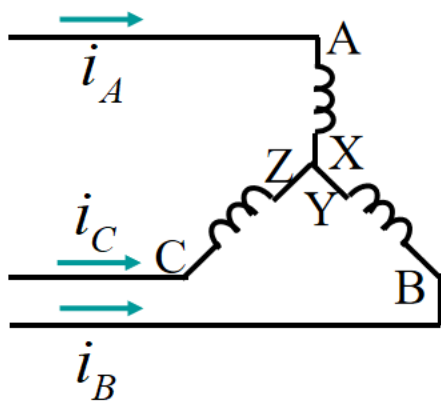
电流变化一周期，旋转磁场在空间转过 $360^\circ$ 。所以旋转磁场在每秒钟的转速，等于电流的频率，由于同步转速（旋转磁场的速度）通常是指每分钟的转速，因此转速为：

$$n_0 = 60 f (\text{转/分})$$



## 2. 交流绕组的基本工作原理

极对数 (P) 的概念



此种接法下，合成磁场只有一对磁极，则极对数为1。

即：  $p = 1$



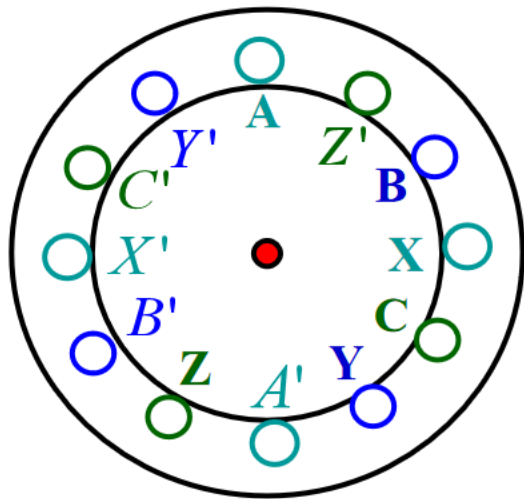
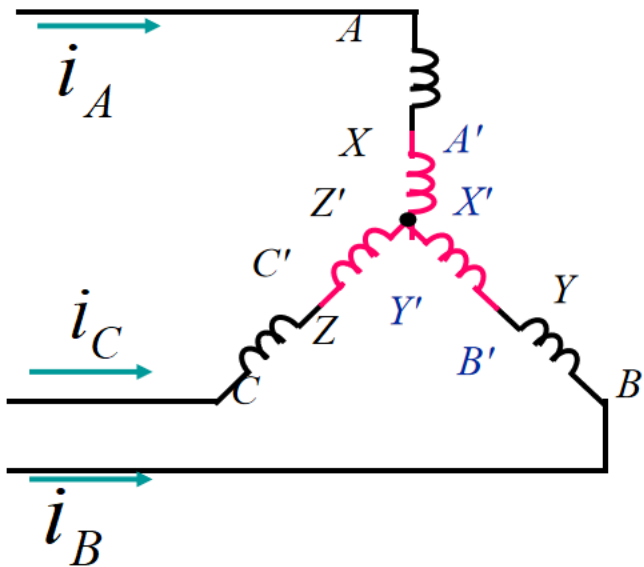
## 2. 交流绕组的基本工作原理

极对数 ( $P$ ) 增加

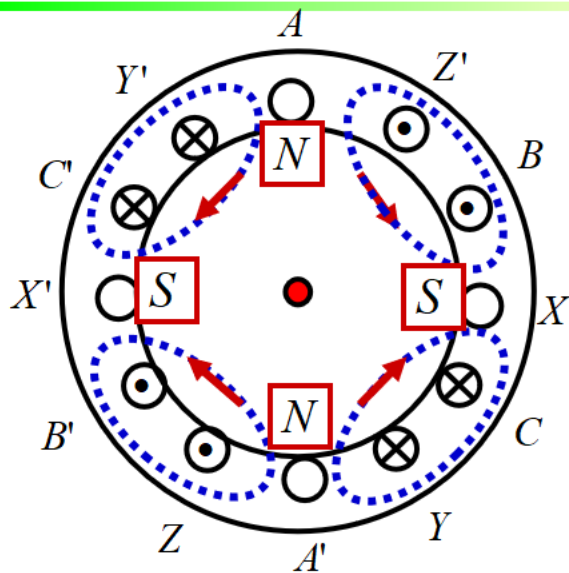
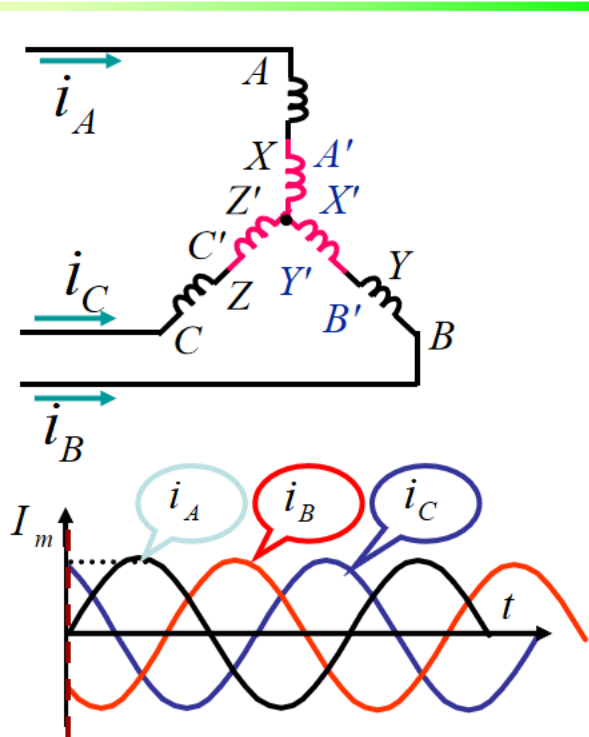
将每相绕组分成两段，按右下图放入定子槽内。绕组的始端互差60度，形成的磁场则是两对磁极。

极对数

$$p = 2$$



## 2. 交流绕组的基本工作原理



$\omega t = 0$

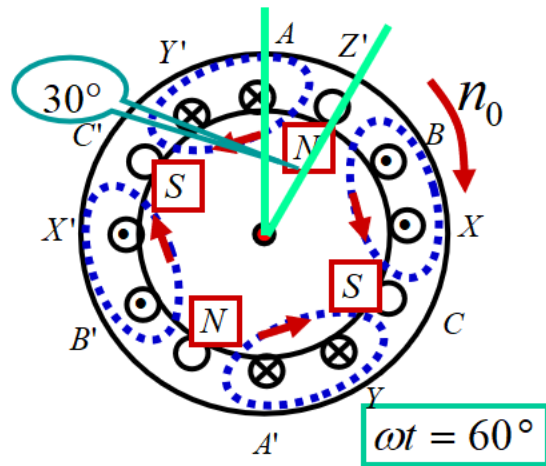
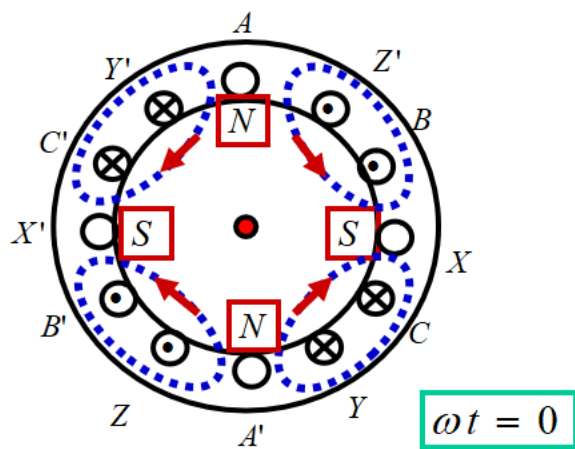
极对数

$p = 2$

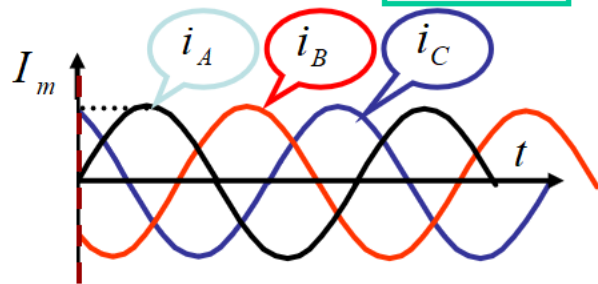




## 2. 交流绕组的基本工作原理

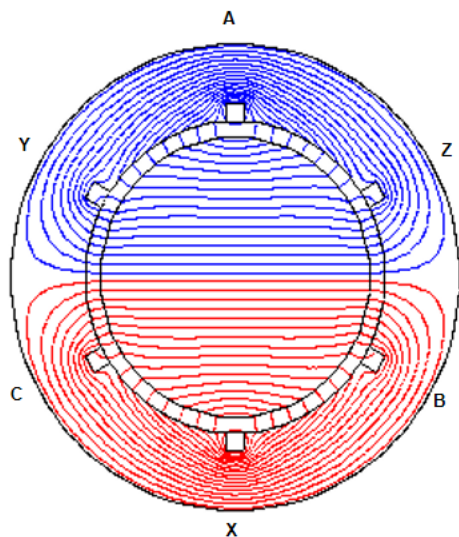


$$n_0 = \frac{60f}{p} \text{ (转/分)}$$



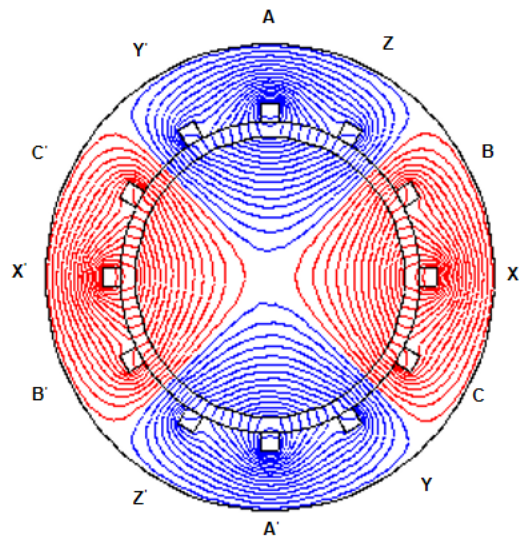
## 2. 交流绕组的基本工作原理

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。



极对数

$$p = 1$$



极对数

$$p = 2$$



## 2. 交流绕组的基本工作原理

三相交流电动机的同步转速  $n_0 = \frac{60f}{p}$  (rpm)

极对数	每个电流周期 磁场转过的空间角度	同步转速 $n_0$ ( $f = 50 \text{ Hz}$ )
$p = 1$	$360^\circ$	3000 (转/分)
$p = 2$	$180^\circ$	1500 (转/分)
$p = 3$	$120^\circ$	1000 (转/分)

旋转磁场转速与频率和极对数有关



# 目 录

---

- 1、交流电机的基本工作原理
- 2、交流绕组的基本工作原理
- 3、交流绕组的基本参数



## 3. 交流绕组

### 3.1、交流绕组的构成原则和分类

#### 1、交流绕组的构成原则：

- 1) 合成电动势和合成磁动势波形接近正弦波，幅值要大，谐波成分尽量小；
- 2) 各相的感应电动势和磁动势要对称，各相电阻、电抗要平衡；
- 3) 绕组的铜耗要小，节约用铜量；
- 4) 绝缘要可靠，机械强度要高，散热条件要好，制造与维修要方便。



### 3. 交流绕组

#### 2.1、交流绕组的构成原则和分类

2、交流绕组的分类：

按相数：单相，二相，三相，多相；

按槽内层数：单层，双层，单双层混合；

按每极每相槽数：整数槽绕组和分数槽绕组

按绕法：单层有同心式，交叉式和链式；

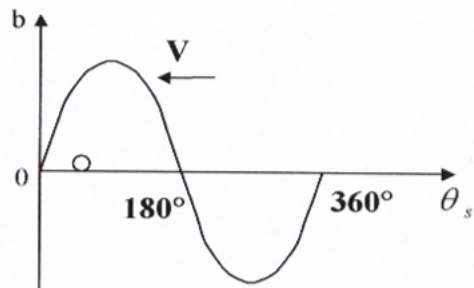
双层有叠绕组，波绕组



### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 1、电角度



气隙磁场分布

若转子每分钟转速为  $n$ ，  
则电动势频率为

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

单位为 Hz。

当  $p=1$ ，转子转一周，导体电动势交变一次；

空间  $360^\circ$

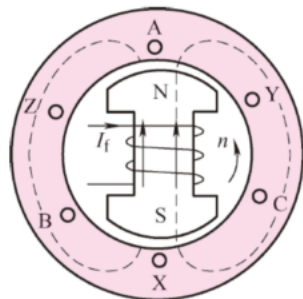
时间  $360^\circ$

当  $p$  对极，转子转一周，导体电动势交变  $p$  次；

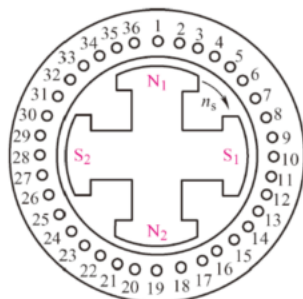
磁场转过的电角度与电动势变化的时间角度相同

电角度 =  $p \times$  机械角度

$p$  —— 极对数



$p=1$



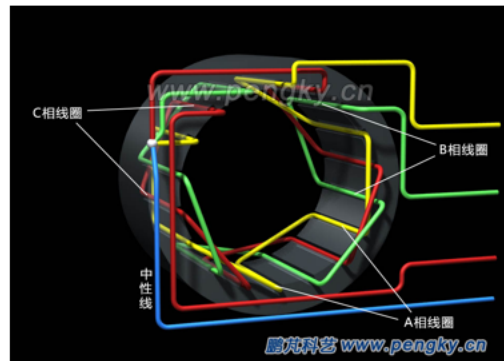
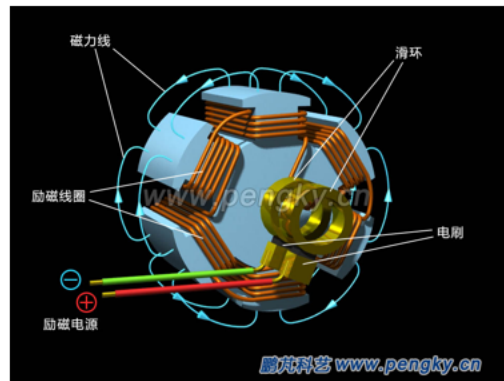
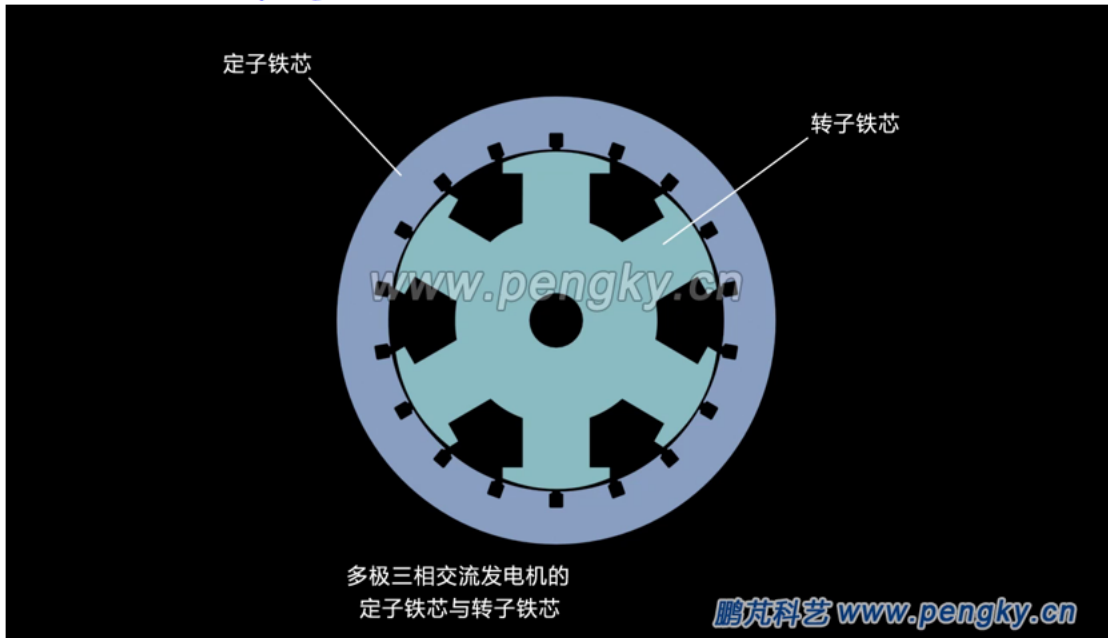
$p=2$



### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 1、电角度





### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 2、极距

相邻两个磁极轴线之间沿定子内圆周的弧长距离称为极距

用电角度表示

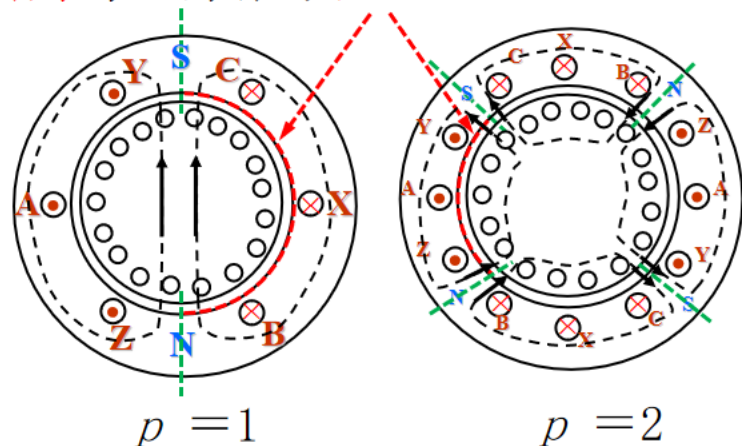
$\tau$ 为 $180^\circ$

用槽数表示

$$\tau = \frac{Q}{2p}$$

用长度表示

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$



$Q$ 为定子槽数

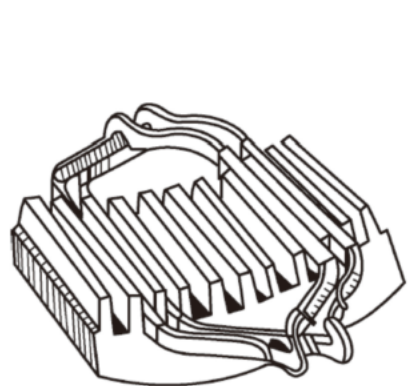


### 3. 交流绕组

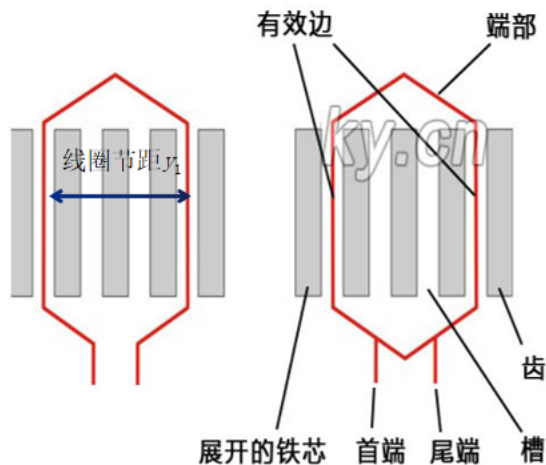
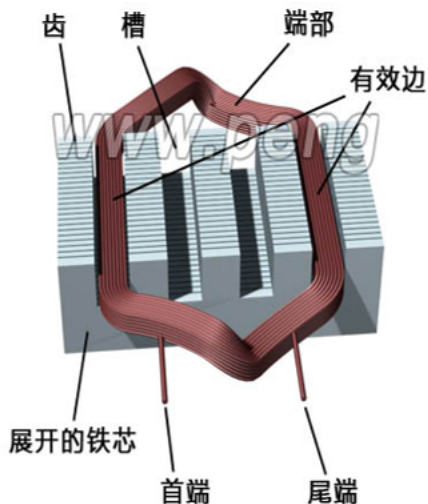
#### 3.2、交流绕组的基本概念

#### 3、线圈

构成交流绕组的基本单位是线圈，线圈可以分为单匝和多匝。



线圈绕组



展开图中的线圈线圈



### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

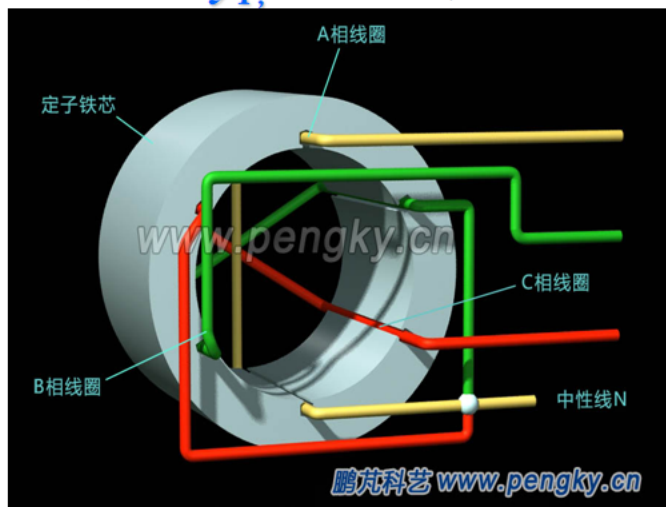
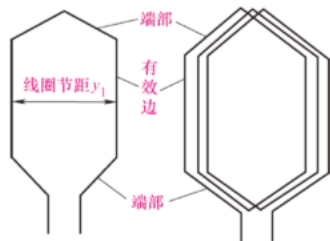
##### 4、线圈节距

同一个线圈的**两个有效边**之间的距离称为**线圈节距**( $y_1$ , 用槽数表示)

$y_1 = \tau$ , 整距;  $y_1 < \tau$ , 短距;  $y_1 > \tau$ , 长距

为了使每个线圈获得最大的电动势，线圈的节距应接近极距

长距绕组和短距绕组均能削弱谐波电动势或磁动势



一对极三相整距绕组示意图

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 交流绕组

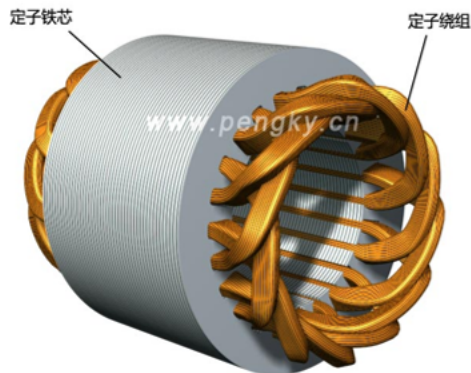
#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 5、槽距角

相邻两槽之间的电角度为槽距角( $\alpha$ )

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

$Q$ 为定子槽数



### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 6、每极每相槽数

每一个磁极下每一相绕组所占的平均槽数称为每极每相槽数( $q$ )

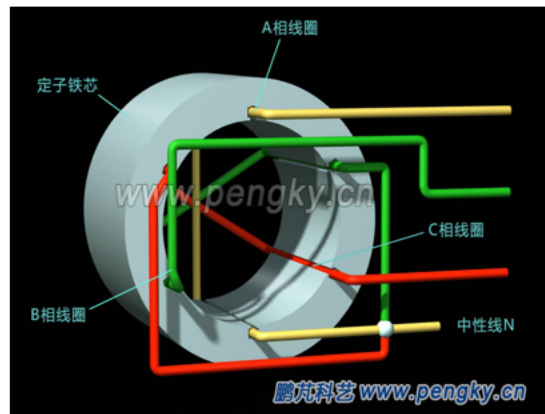
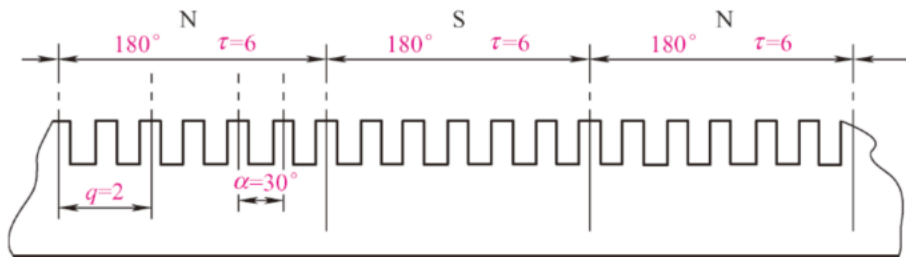
$$q = \frac{Q}{2pm}$$

$Q$ 为定子槽数，  $m$ 为相数

●  $q=1$ : 集中绕组

●  $q>1$ : 分布绕组

$m=3$



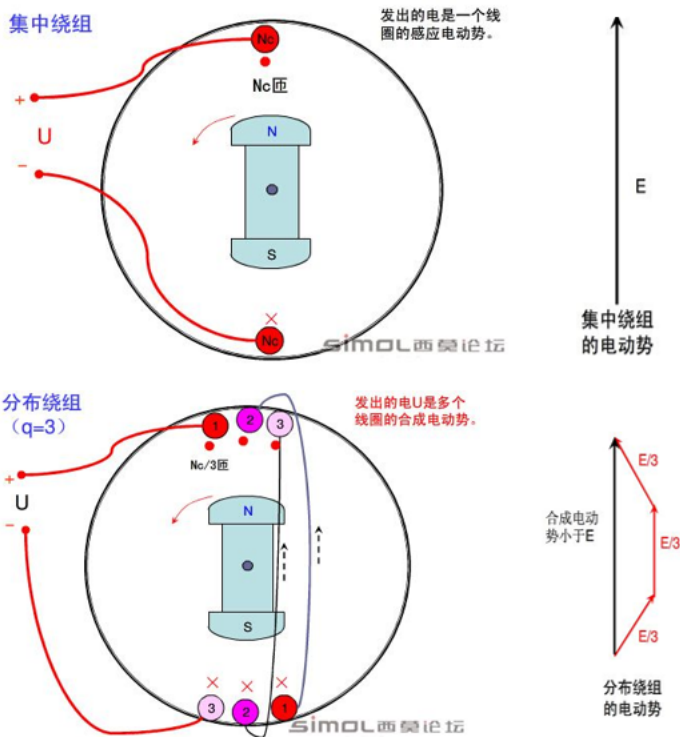
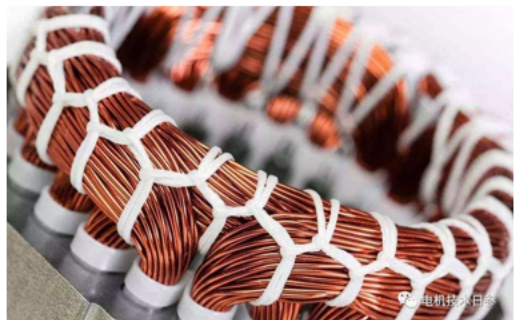
一对极三相整距集中绕组示意图



### 3. 交流绕组

#### 3.2、交流绕组的基本概念

##### 6、每极每相槽数



# 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部分内容，以刘慧娟教授在机械工业出版社网站上提供的第三章课件为主。

**[1] 刘慧娟主编，电机学[M]，北京：机械工业出版社，2021.**

