



# 交流电机的电枢绕组 及磁场特性





# 目录

CONTENTS

**01 交流电机的绕组**

**02 交流绕组的基本概念**

**03 三相单层绕组**

**04 三相双层绕组**

**05 正弦磁场下绕组的感应电势**

**06 交流绕组的磁势**

01

# 交流电机的绕组

---

# 一、交流电机的绕组

交流电机：产生或使用交流电能的旋转电机。

两大类：

同步电机——速度等于同步速

异步电机——速度不等于同步速

**同步速——旋转磁场的转速**

# 一、交流电机的绕组

## 1.1 例：三相同步电机 (磁极对数 $p=1$ )

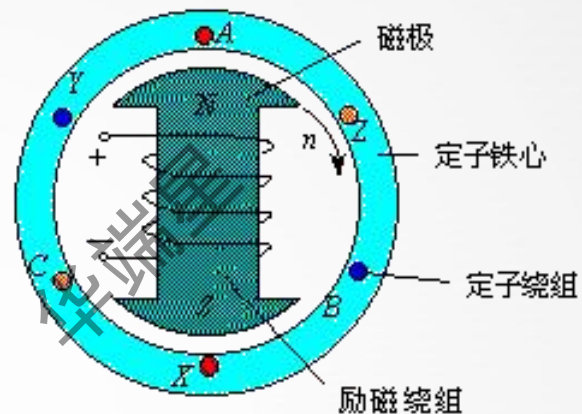
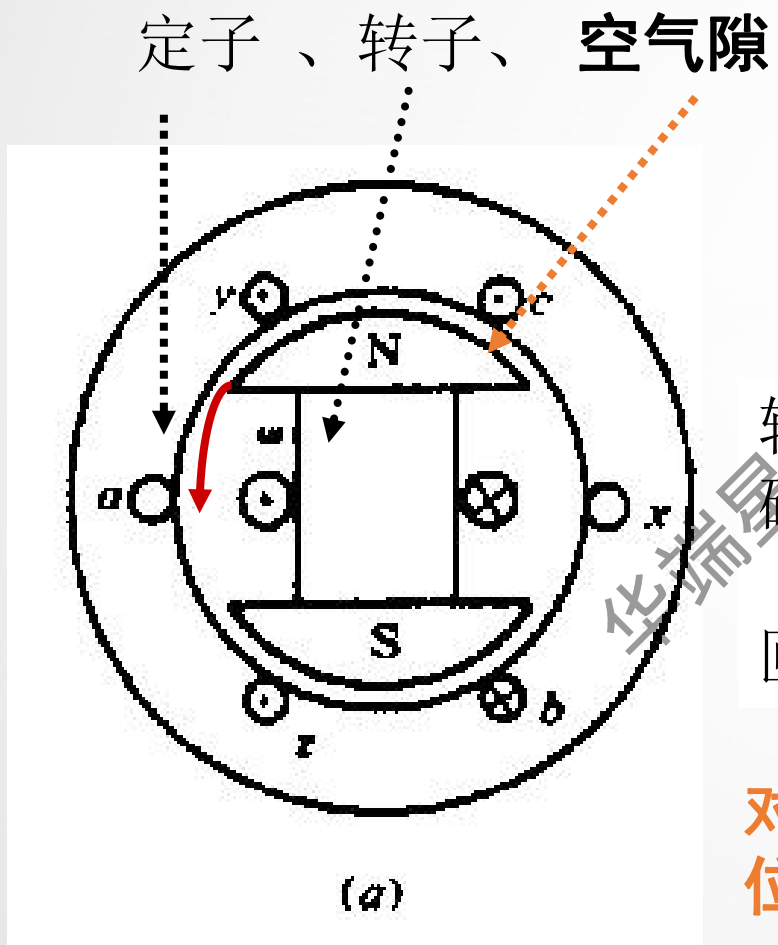


图 15.1 同步电机结构模型

转子绕组通以直流电流形成分布磁场，

匝链定子上的各相绕组

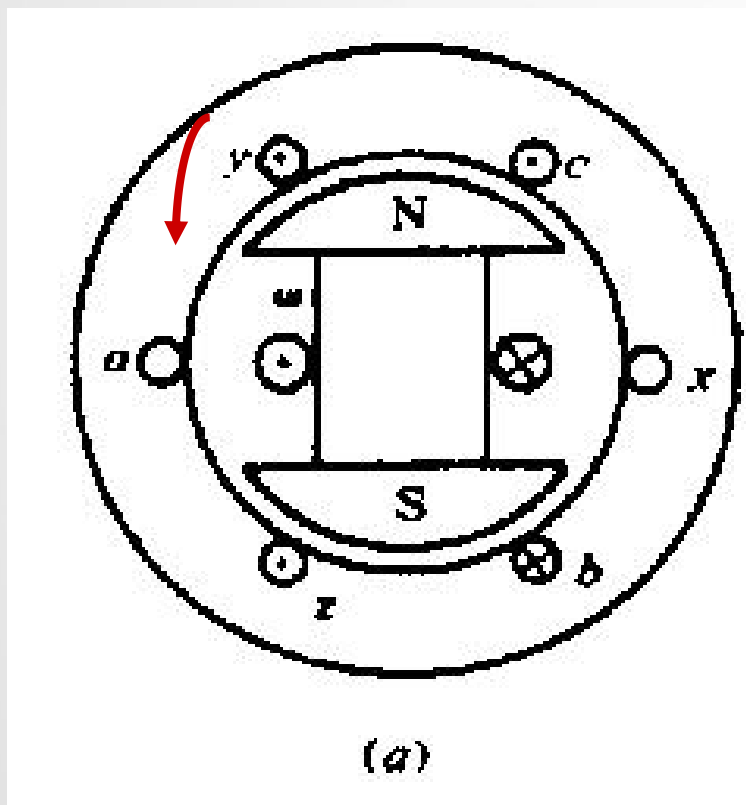
↓

**对称是指各相绕组的匝数相等，空间位置彼此相距 $120^\circ$**

# 一、交流电机的绕组

## 1.1 例：三相同步电机（磁极对数 $p=1$ ）

设磁场在气隙中按正弦分布



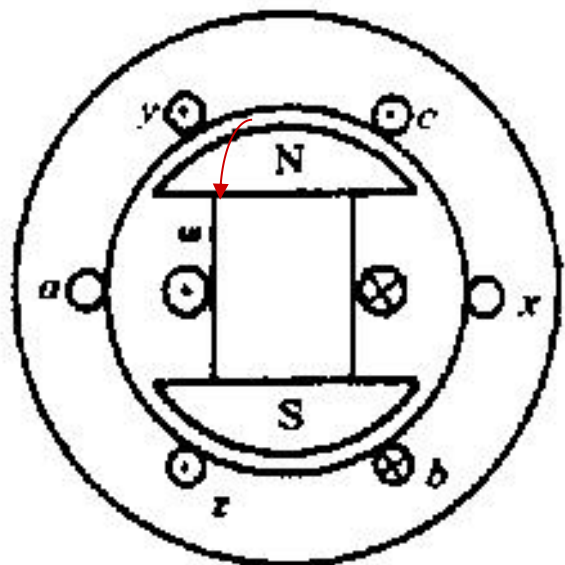
设转子以恒定速度旋转

定子绕组中所匝链的磁通按正弦规律变化，其感应电势按正弦规律变化。

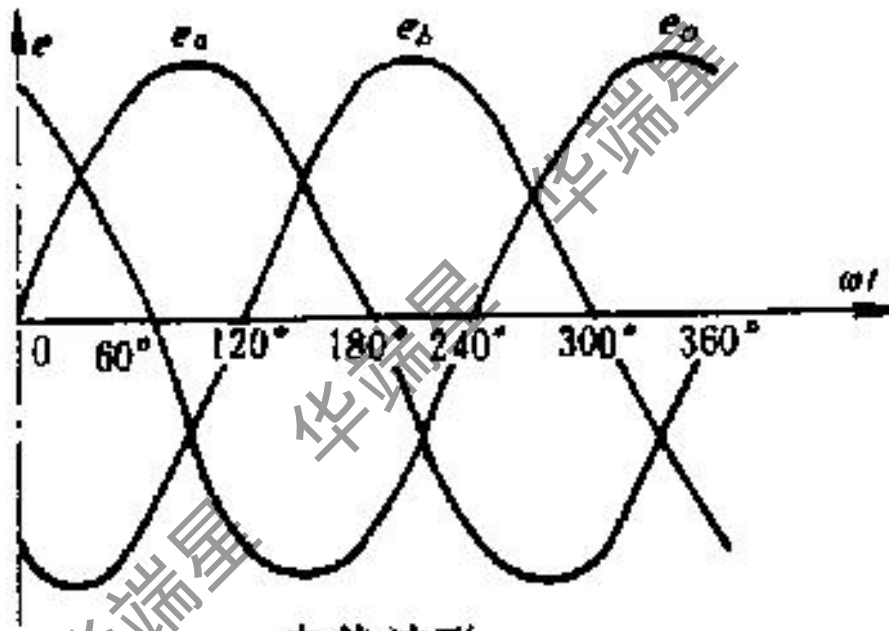
由于各相匝数相等，从而各相电势的大小相等，由于各相绕组空间分布彼此相距 $120^\circ$ ，从而三相电势时间相位差 $120^\circ$ ——满足了三相电势对称要求。

# 一、交流电机的绕组

## 1.1 例：三相同步电机（磁极对数 $p=1$ ）

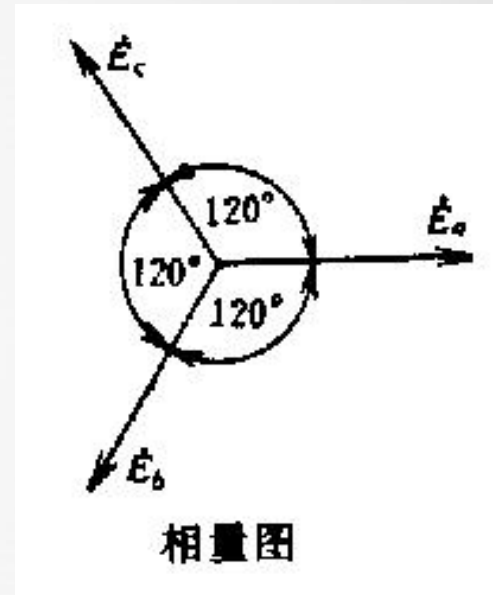


结构示意图



电势波形

三相同步电机模型 ( $p=1$ )



相量图

三相电势对称



## 一、交流电机的绕组

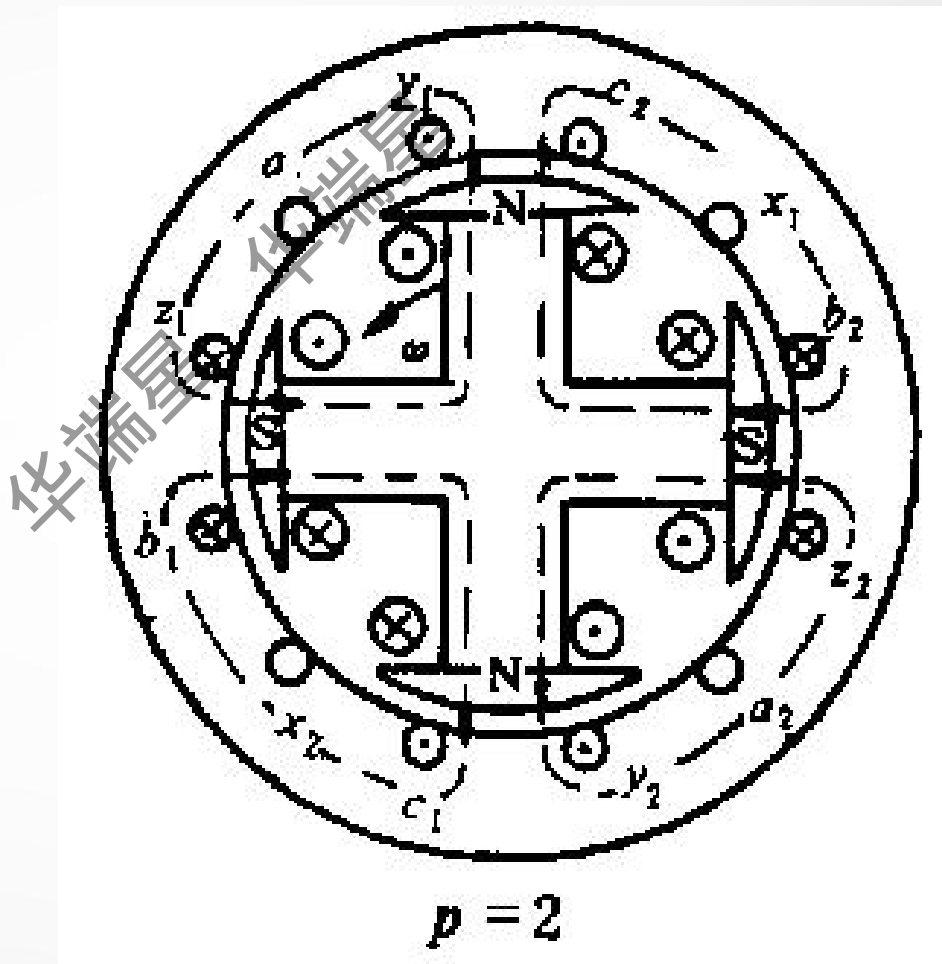
### 1.2 例： $p=2$

- 每相两个线圈， $a_1-x_1$ 、 $a_2-x_2$ 属于a相， $b_1-y_1$ 、 $b_2-y_2$ 属于b相， $c_1-z_1$ 、 $c_2-z_2$ 属于c相。

- 各相的两个线圈的分布：

**空间上**——相距一对磁极

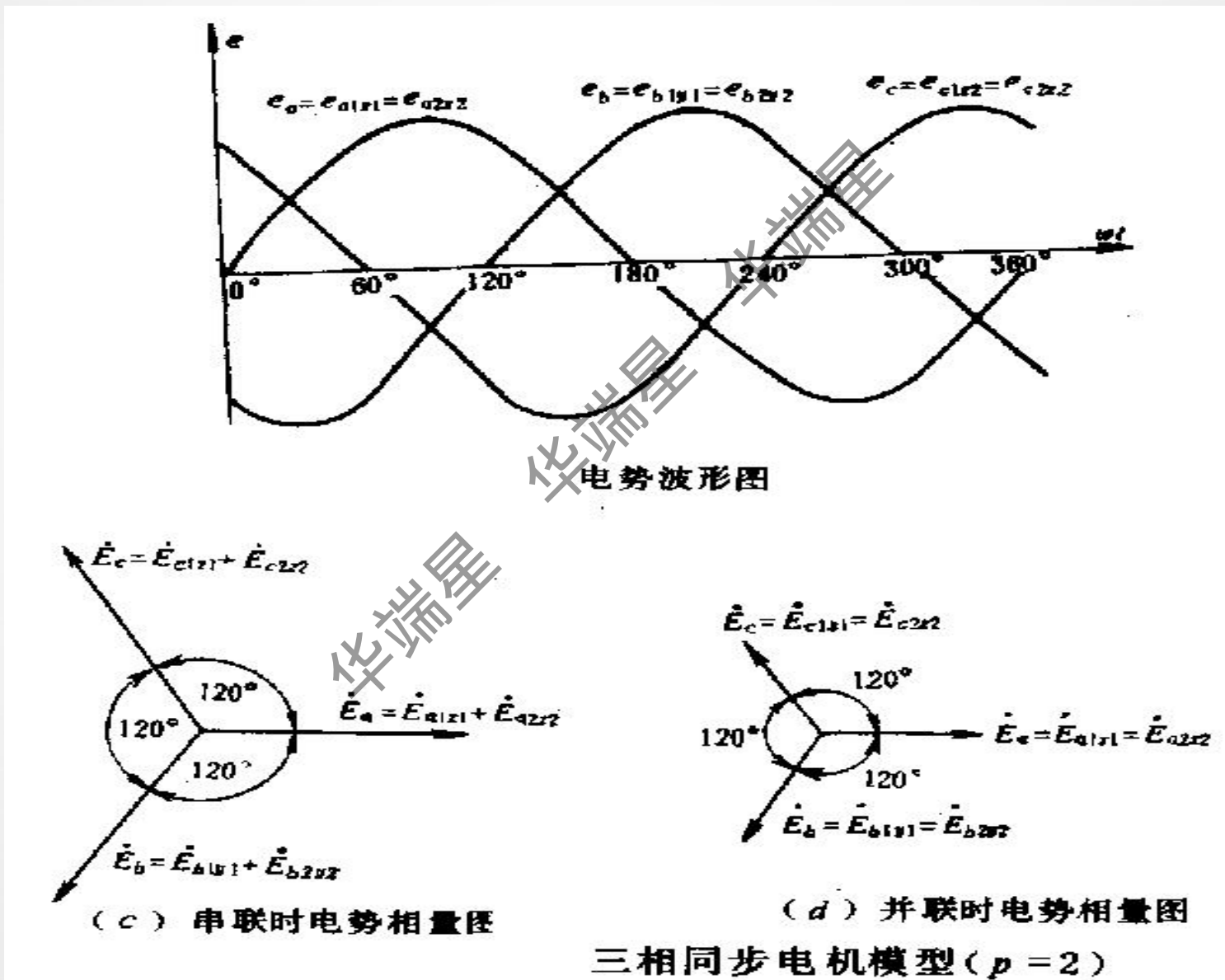
**电势看**——两个线圈交链的磁通变化规律完全相同，因而感应电势完全相同（幅值一致，时间上同相位）。





## 一、交流电机的绕组

1.2 例：  $p=2$



## 1.3 三相异步电机

### 电磁过程

- 异步电动机定子上有三相对称的交流绕组；
- 三相对称交流绕组通入三相对称交流电流时，将在电机气隙空间产生旋转磁场；
- 转子绕组的导体处于旋转磁场中；
- 转子导体切割磁力线，并产生感应电势，判断感应电势方向。
- 转子导体通过端环自成闭路，并通过感应电流。
- 感应电流与旋转磁场相互作用产生电磁力，判断电磁力的方向。
- 电磁力作用在转子上将产生电磁转矩，并驱动转子旋转。
- 根据以上电磁感应原理，异步电动机也叫感应电动机。

02

## 交流绕组的基本概念

---

## 二、交流绕组的基本概念

### 2.1 交流绕组

#### 2.1.1 交流绕组

- 绕组：按一定规律排列和连接的线圈的总称
  - ①要求**磁势和电势的波形为正弦波形**；
  - ②要求磁势和电势三相对称，**三相电压对称**；
  - ③电力系统都**有统一的标准频率**，我国规定工业标准频率为50Hz。

在一定的导体数下，获得较大的基波电势和基波磁势。

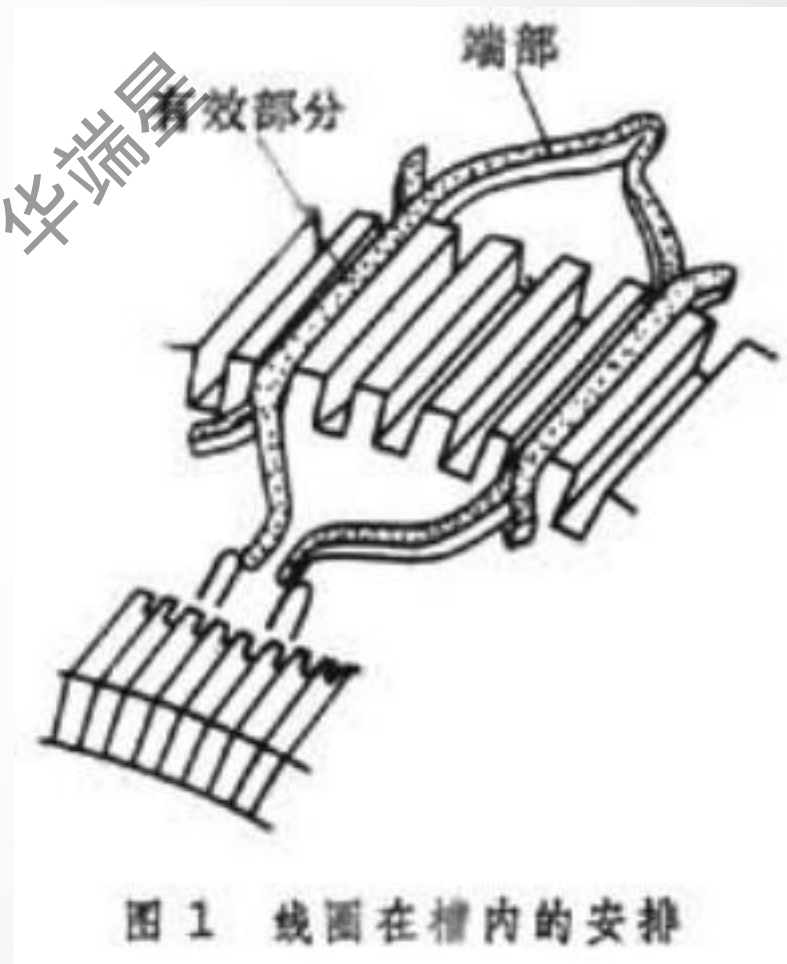
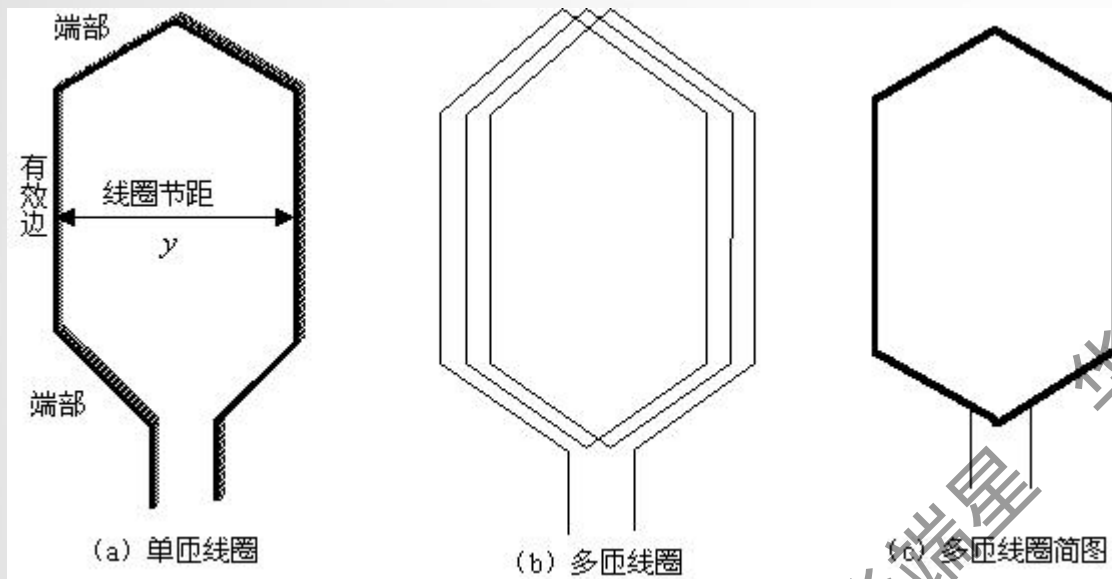
#### 2.1.2 交流绕组的构成原则

- **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 $\tau$ 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 $\alpha$ ，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。

## 二、交流绕组的基本概念

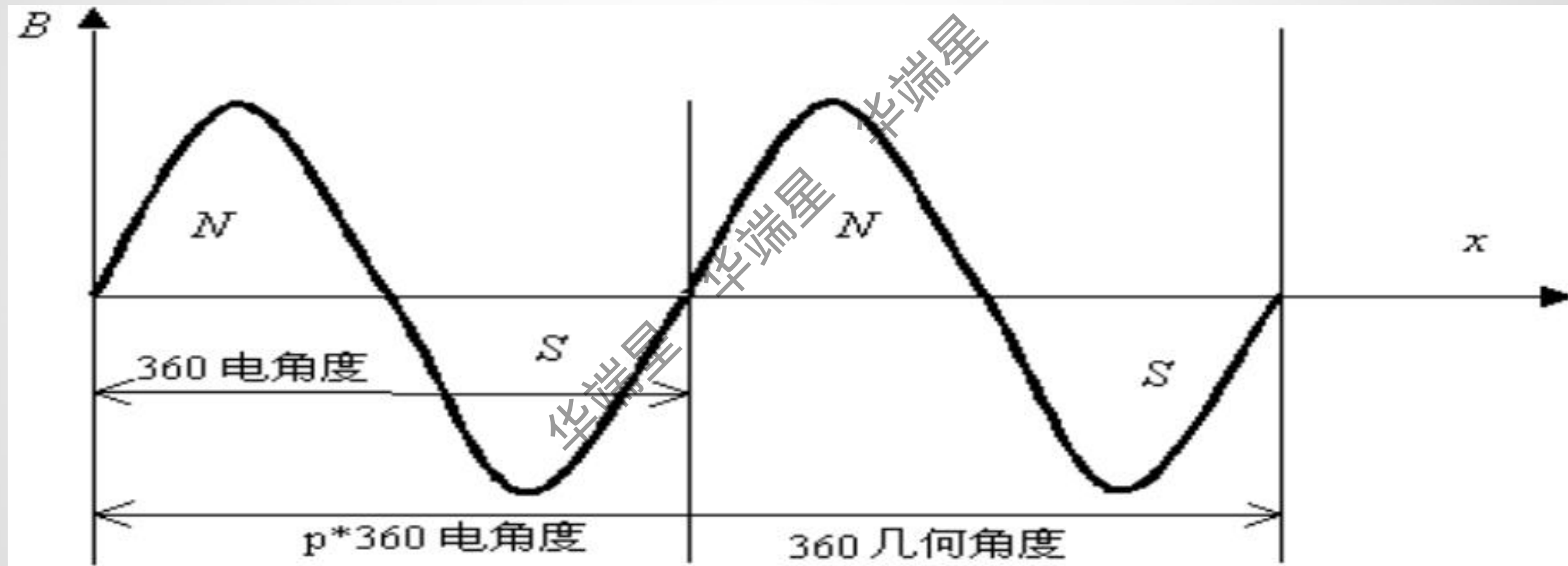
### 2.1 概念、术语

#### 元件（线圈）



## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.1 术语1：电角度

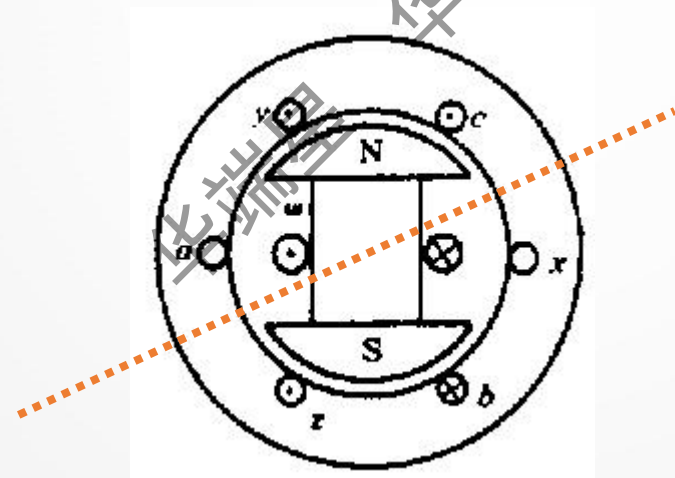


## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.2 术语2：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 $180^\circ$ 电角度，如电机有 $m$ 相，则每个相带占有 $\frac{180^\circ}{m}$ 电角度。三相电机 $m=3$ ，其相带为 $60^\circ$ ，按 $60^\circ$ 相带排列的绕组称为 $60^\circ$ 相带绕组。

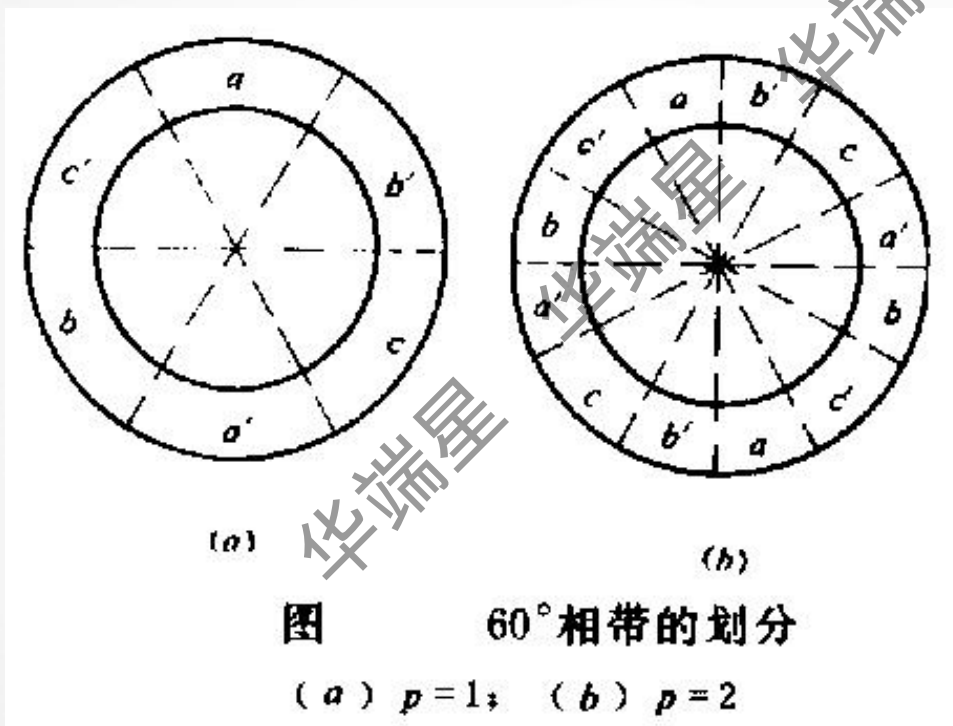




## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.2 术语2：相带-60°相带绕组

- 把**每对极**所对应的定子槽等分为六个等分。依次称为a、c'、b、a'、c、b'相带，各相绕组放在各自的相带范围内



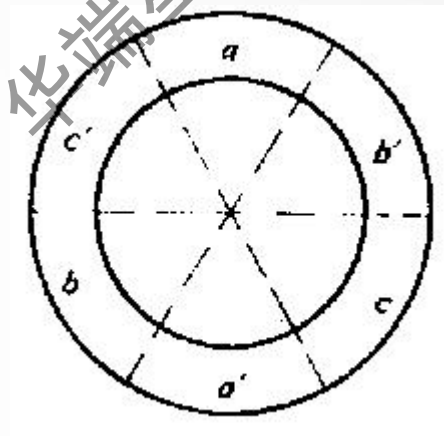
## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.3 术语3：每极每相槽数 $q$

- **每个极面下每相占有的槽数**。已知总槽数 $Z$ 、极对数 $p$ 和相数 $m$ 为，则

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

- $q > 1$  —— 分布绕组
- 整数槽绕组 ——  $q$  为整数
- 分数槽绕组 ——  $q$  为分数



### 2.2.4 术语4：槽距角 $\alpha$

相邻两槽之间的**电角度**

已知总槽数 $Z$ 、极对数 $p$

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

← 圆周的电角度

## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.5 术语5：极距 $\tau$

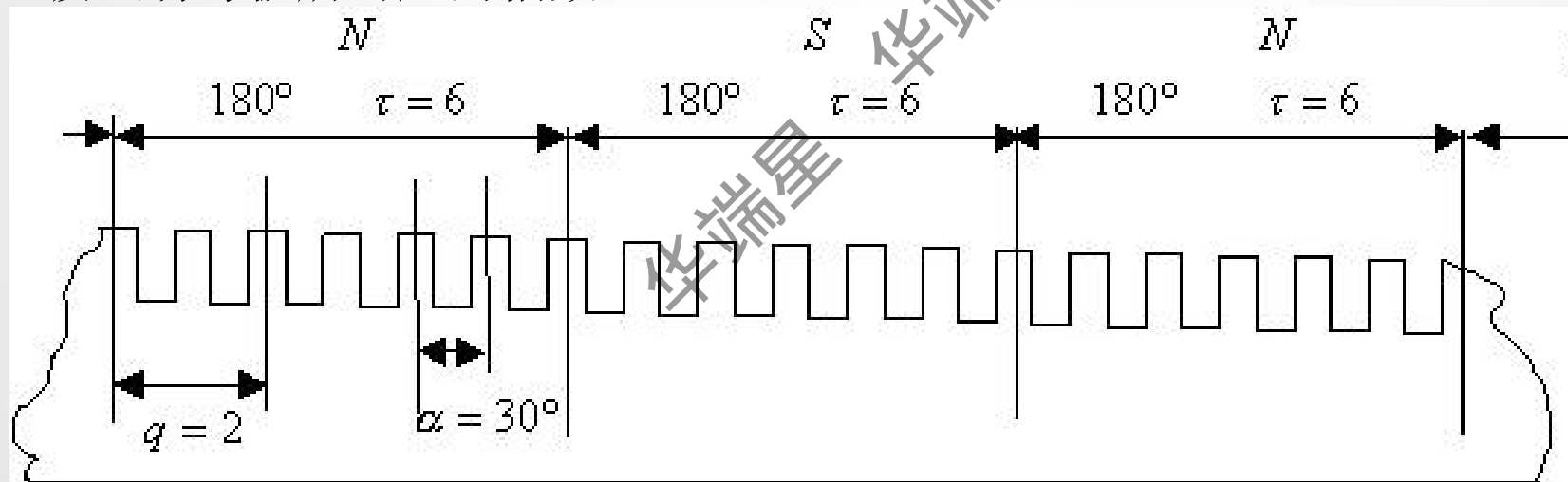
- 相邻两磁极对应位置两点之间的圆周距离 几何尺寸——每极所对应的定子内圆弧长

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

设 $D$ 为定子内圆直径。

- 槽数表示极距： $\tau = \frac{Z}{2p}$

即基波磁场每极所对应的槽数

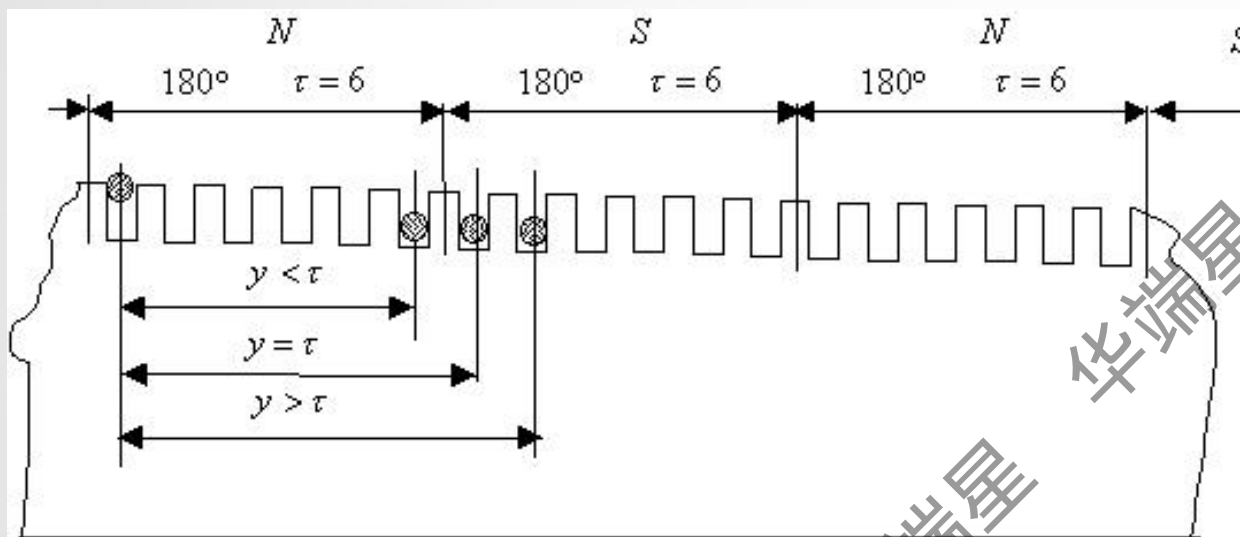


图：极距，每极每相槽数，槽距角的概念

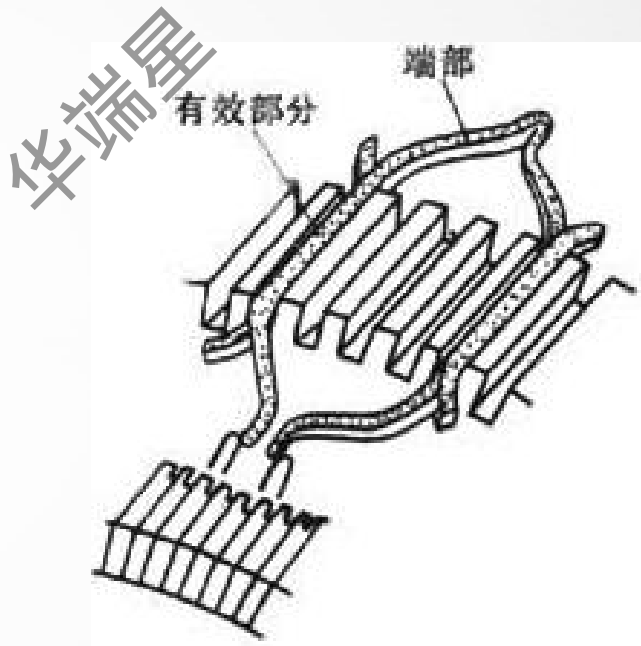
## 二、交流绕组的基本概念

### 2.2.6 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



03

## 三相单层绕组

---

## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组

- 单层——每槽中只放置一层元件边，**元件数等于槽数的一半**，无需层间绝缘，结构和嵌线较简单
- 单层绕组只适用于10kW以下的小型异步电动机，其极对数通常是 $p=1,2,3,4$
- 单层绕组通常有链式、交叉式和同心式等三种不同排列方式

#### 单层绕组：构造方法和步骤

##### •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。

将每个极的槽数按三相均匀分开。三相在空间错开120电角度。

##### •连线圈和线圈组:

将一对极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈

将一对极域内属于同一相的 $q$ 个线圈连成一个线圈组

##### •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。

##### •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。△接法或者Y接法。

## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组

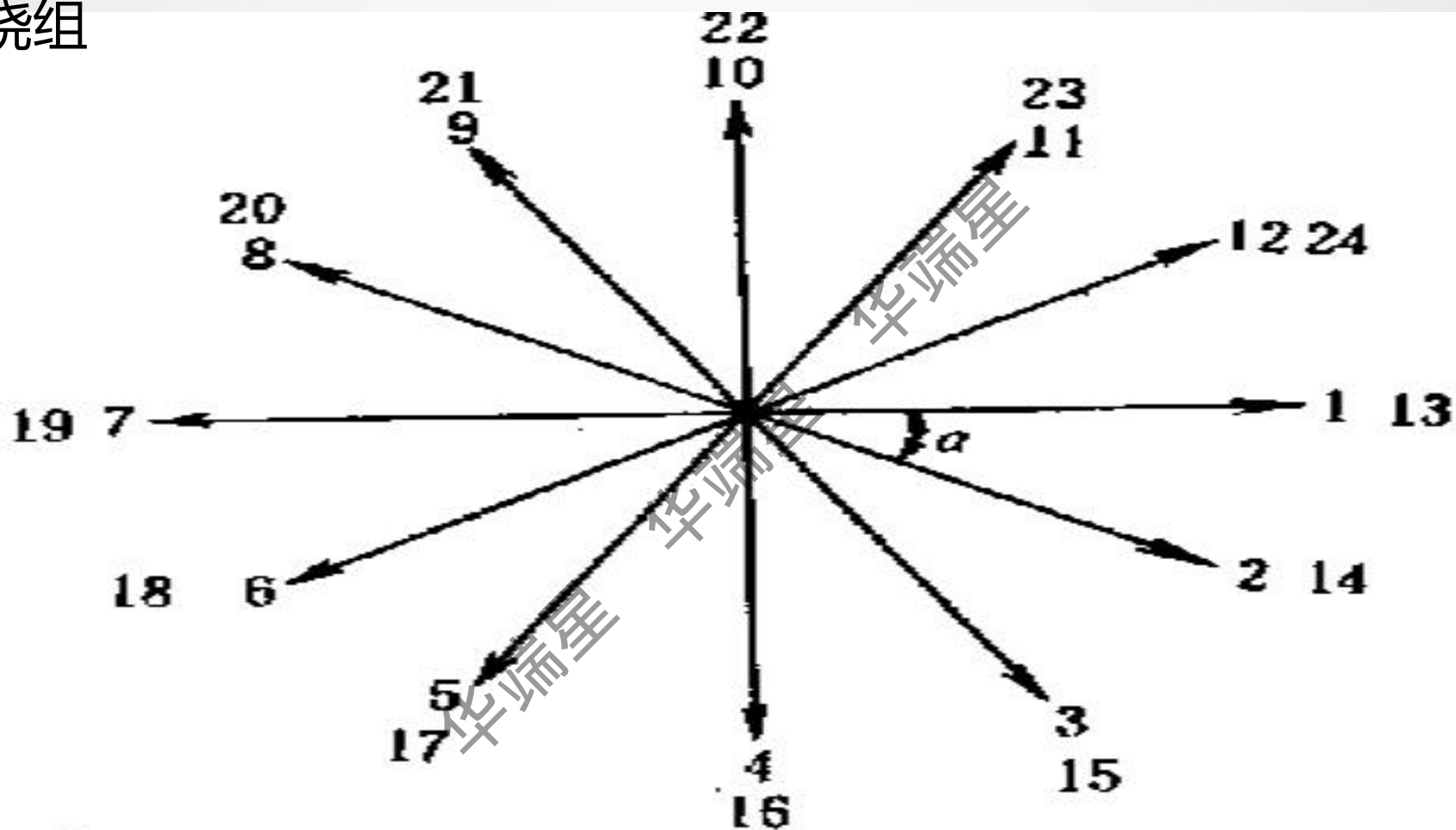


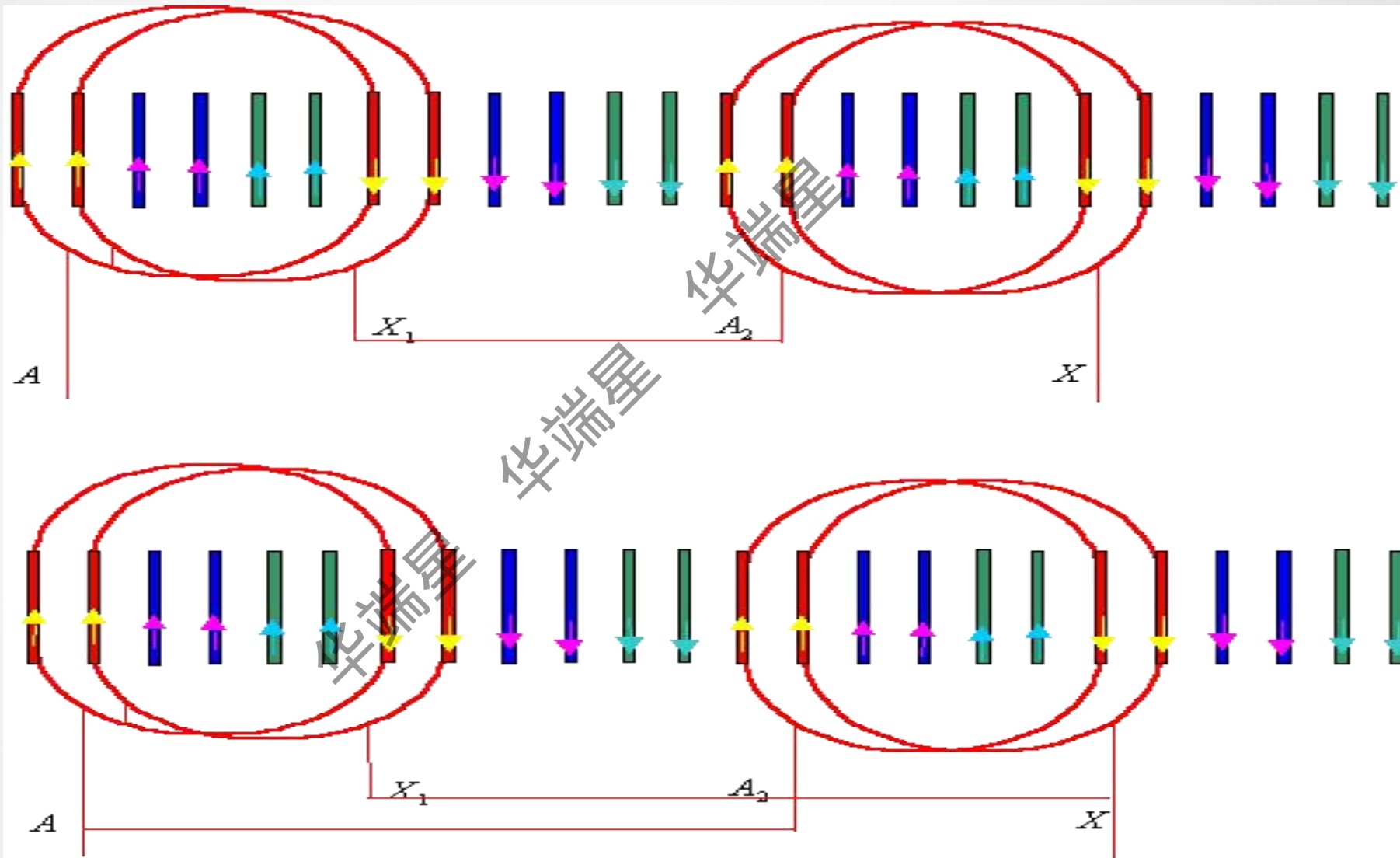
图 槽导体电势星形图

( $Z = 24, 2p = 4, \alpha = 30^\circ$ )



### 三、三相单层绕组

#### 3.1 三相单层绕组



图：单层绕组排列步骤 3，连相绕组，串联与并联

## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组

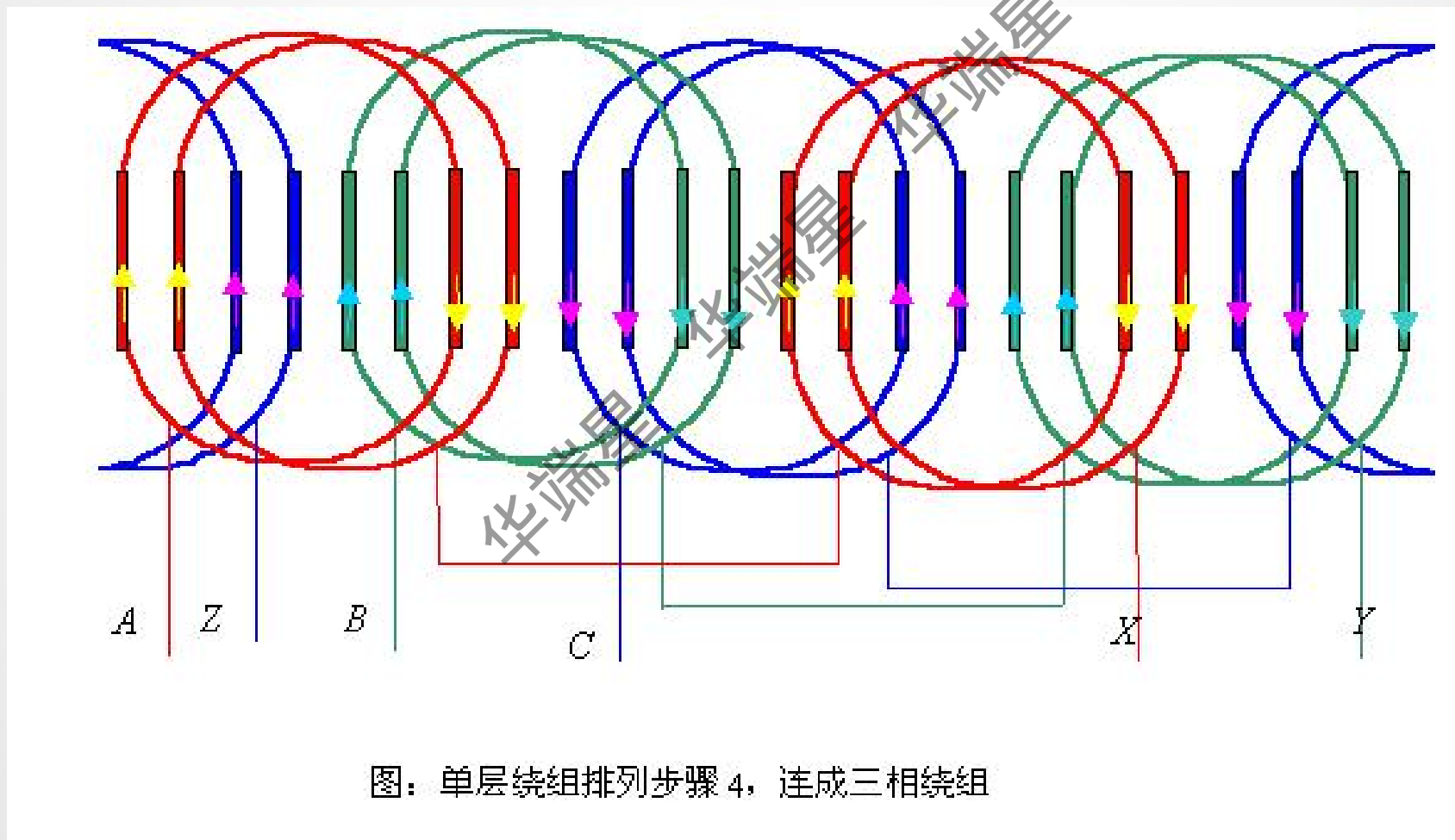
说明：

- 属于a相8个槽，即1、2、7、8、13、14、19、20
- 根据槽导体电势星形图，按电势相加原则构成元件，每个元件都是整距， $y=\tau=6$ 槽，即每元件的跨距为6个槽，同为单层，每相每对极可以连接成一个元件组。
- 2对极，每相2个元件组，1—7—2—8，13—19—14—20。
- 元件组之间可串联或并联形成不同并联支路数。
- **单层绕组每相有p个元件组，如串联方式连接，则并联支路 $a=1$ ，相电势 $E=pE_q$ ，相电流 $I=I_c$ 。每相功率 $P=EI=pEqI_c$ 。**

# 三、三相单层绕组

## 3.1 三相单层绕组

连成三相绕组

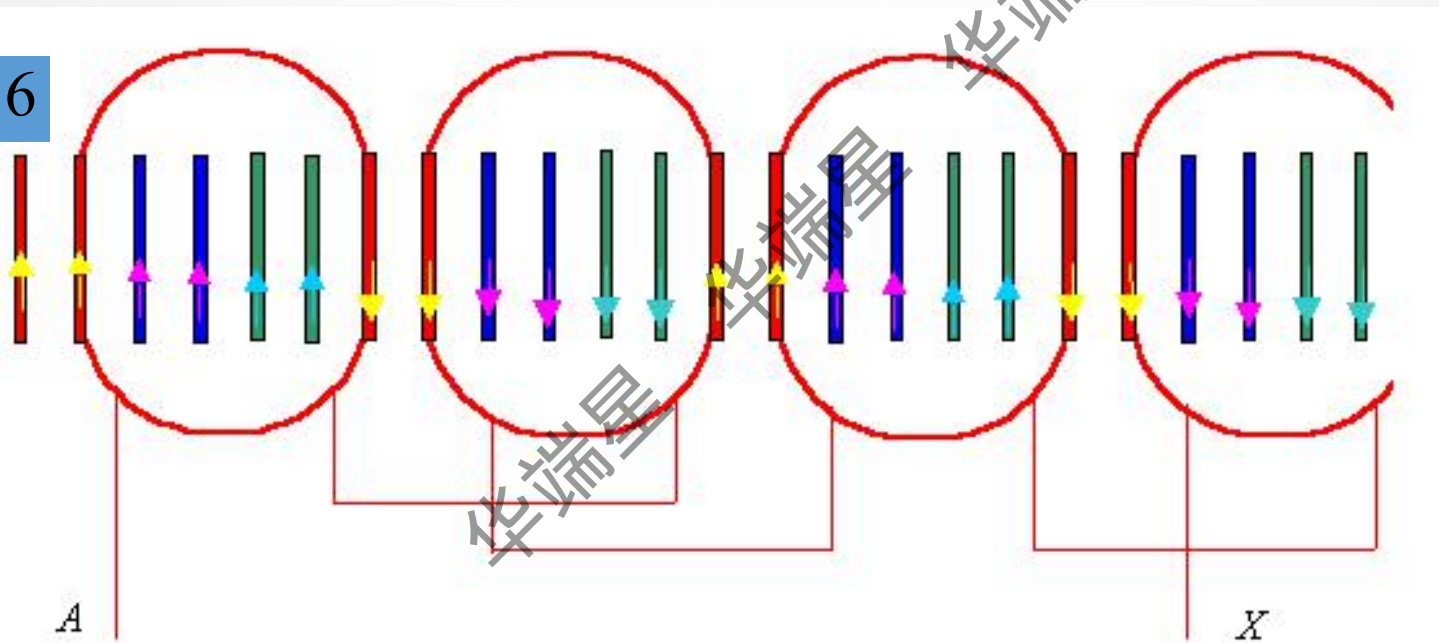


## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组-链式绕组

- 链式绕组适用于 $q=2$ ,  $p>1$ 的小型异步电机。例如 $m=3$ ,  $p=2$ ,  $Z=24$ ,  $q=2$ ,  $a=30^\circ$

$$y = 5 < \tau = 6$$

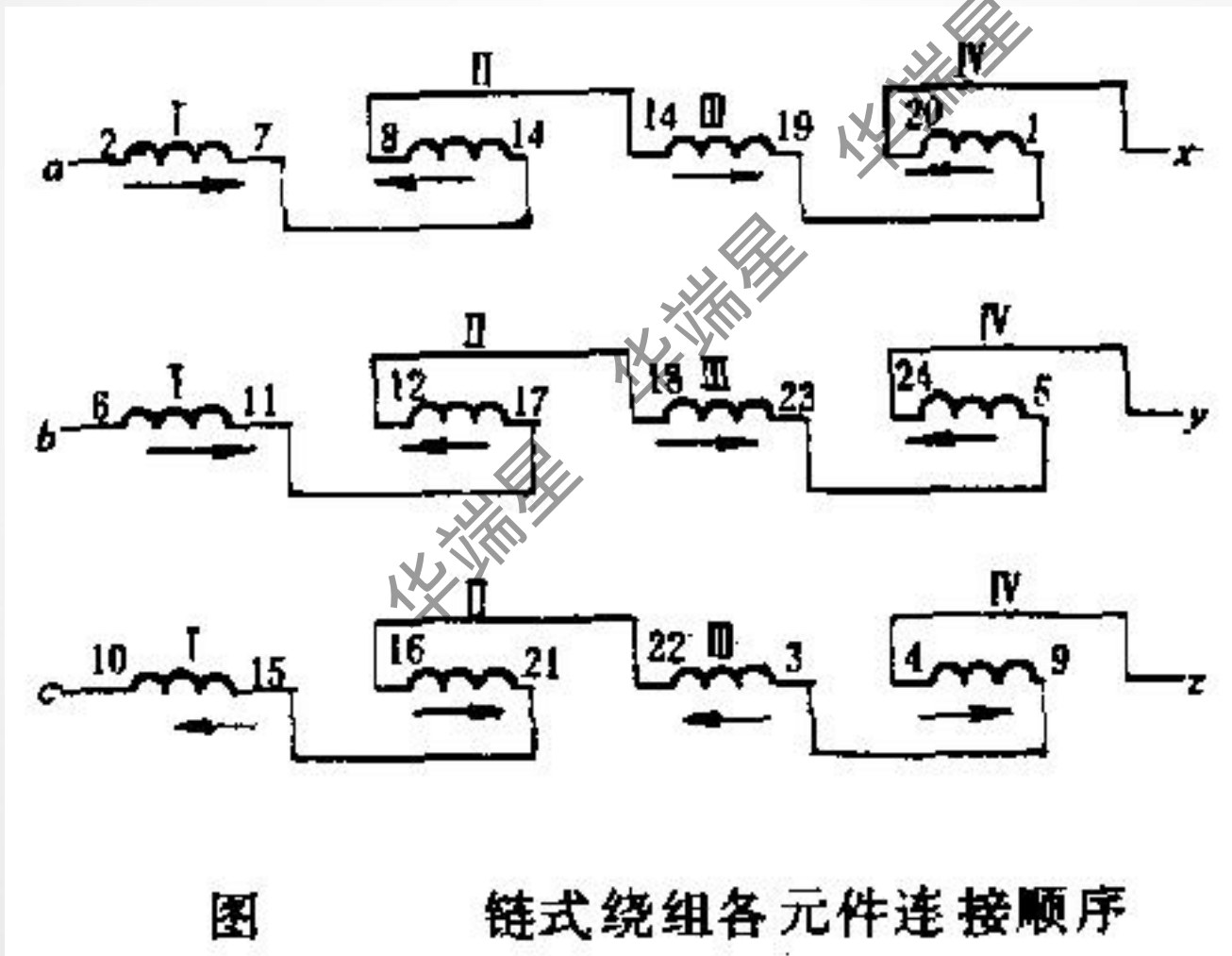


图：单层链式绕组

### 三、三相单层绕组

#### 3.1 三相单层绕组-链式绕组

- 链式绕组的每个元件都是短距。从相电势和磁势角度看——**具有整距性质**

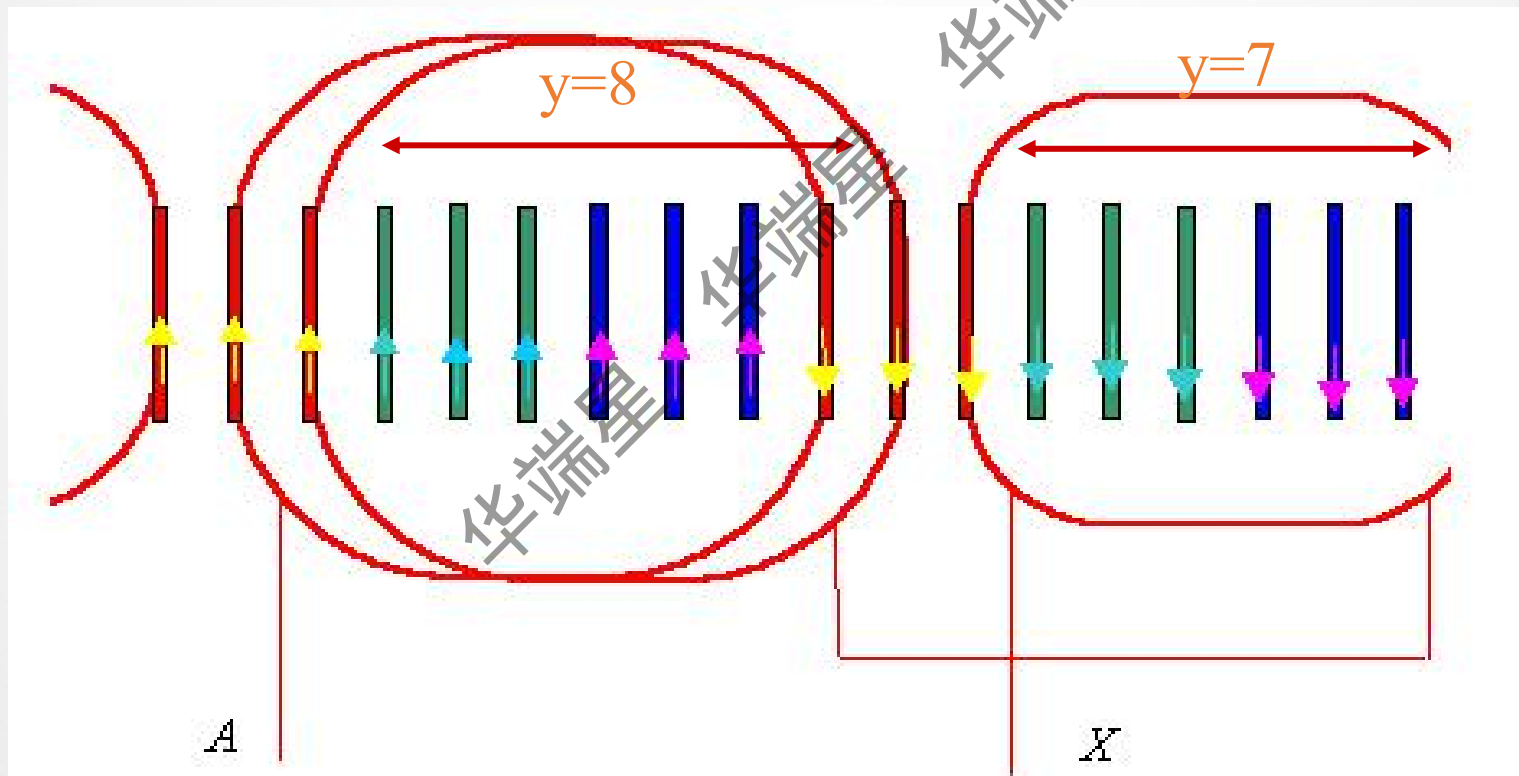


# 三、三相单层绕组

## 3.1 三相单层绕组-交叉式绕组

交叉式绕组适用于 $q=3$ 的小型异步电机。例如： $m=3$ ， $p=2$ ， $q=3$ 。定子槽数 $Z=2mpq=2*3*2*3=36$ 。槽距角 $\alpha=p*360/Z=20^\circ$

属于a相的元件有1、2、3、10、11、12、19、20、21、28、29、30共12个元件边



图：单层交叉链式绕组

## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组-交叉式绕组

- 2—10，3—11相连，是节距为8的（大）线圈
- 12—19相连，节距为7的（小）线圈
- 20—28，21—29相连，节距为8的大线圈
- 30—1相连，节距为7的小线圈。

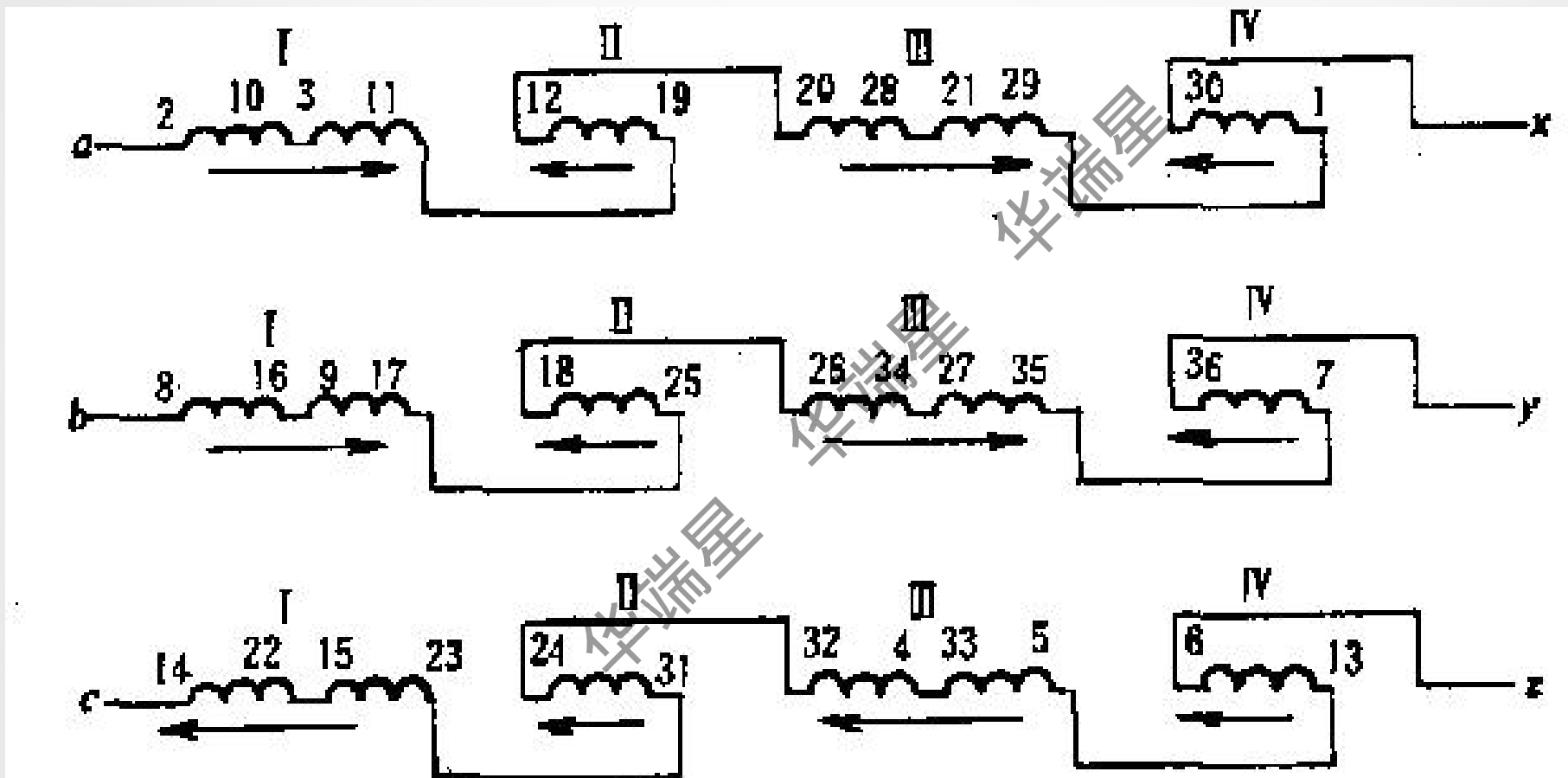
依次二大一小交叉布置为交叉式绕组

- b相和c相的连接规律与a相完全一样， $\alpha=20^\circ$ ，相间相差6个槽。如第2槽为a相首端，则b相首端是第8槽，c相首端是第14槽。



## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组-交叉式绕组



图

交叉绕组各元件连接次序

## 三、三相单层绕组

### 3.1 三相单层绕组-同心式绕组

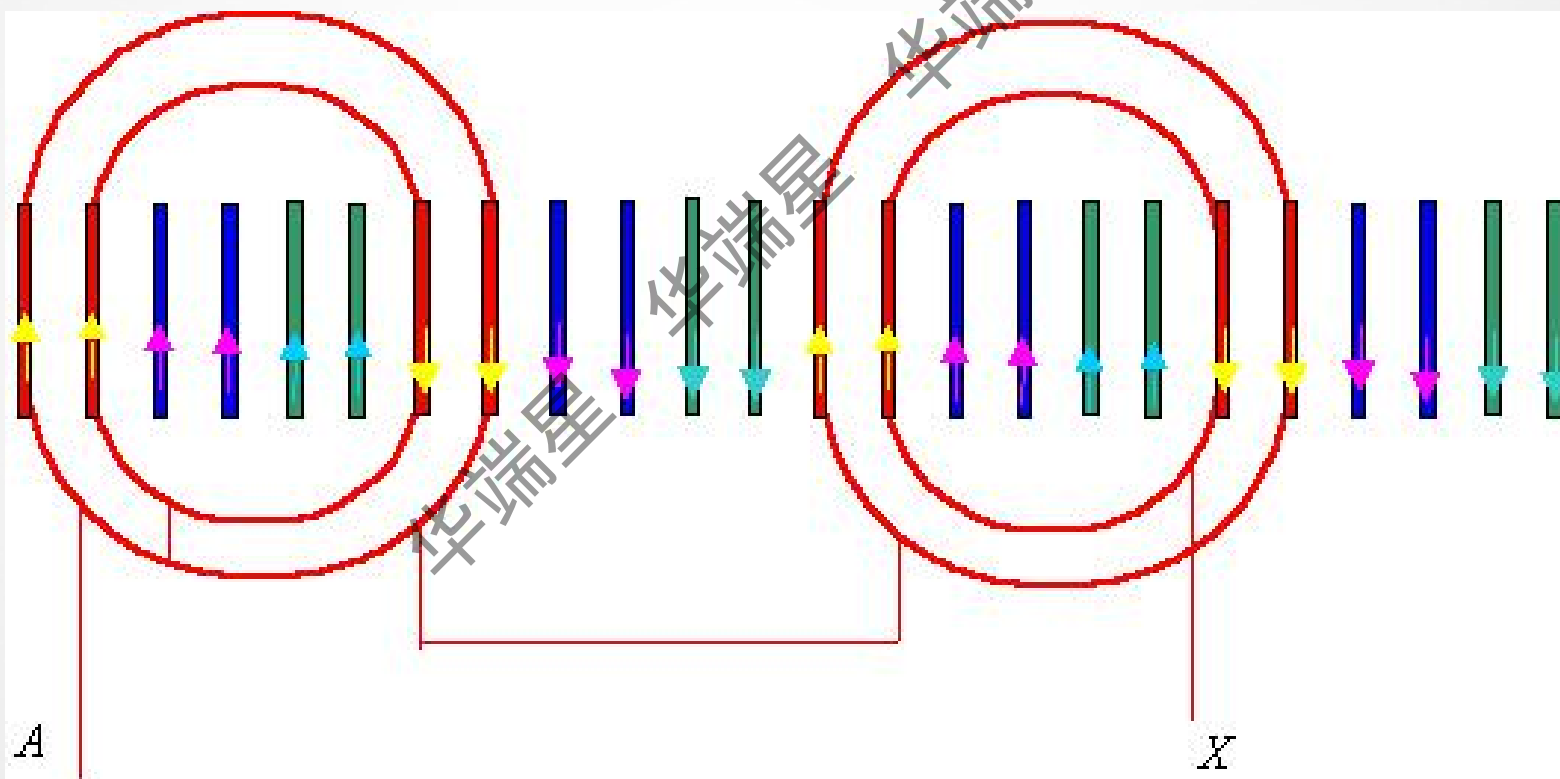
- 对于 $p=1$ 的小型三相异步电动机和单相异步电动机，每极每相槽数 $q$ 较大，采用同心式绕组嵌线
- 例如： $m=3$ ， $p=1$ ， $q=4$ 。则定子槽数 $Z=2mpq=2*3*1*4=24$ ，槽距角 $\alpha=15^\circ$

极 对	相 带					
	a	c'	b	a'	c	b'
第一对极	23,24,1,2	3,4,5,6	7,8,9,10	11,12,13,14	15,16,17,18	19,20,21,22

- 属于a相的有8个元件边，把1与12相连构成一个大线圈，2与11相连构成一个小线圈。这一大一小组成一个同心式线圈组。13与24相连，14与23相连组成另一同心式线圈组。然后把两个线圈组反向串联，以保证电势相加。

## 3.1 三相单层绕组-同心式绕组

属于a相的有8个元件边，把1与12相连构成一个大线圈，2与11相连构成一个小线圈。这一大一小组成一个同心式线圈组。13与24相连，14与23相连组成另一同心式线圈组。然后把两个线圈组反向串联，以保证电势相加。



图：单层同心式绕组

### 三、三相单层绕组

#### 3.1 三相单层绕组-同心式绕组

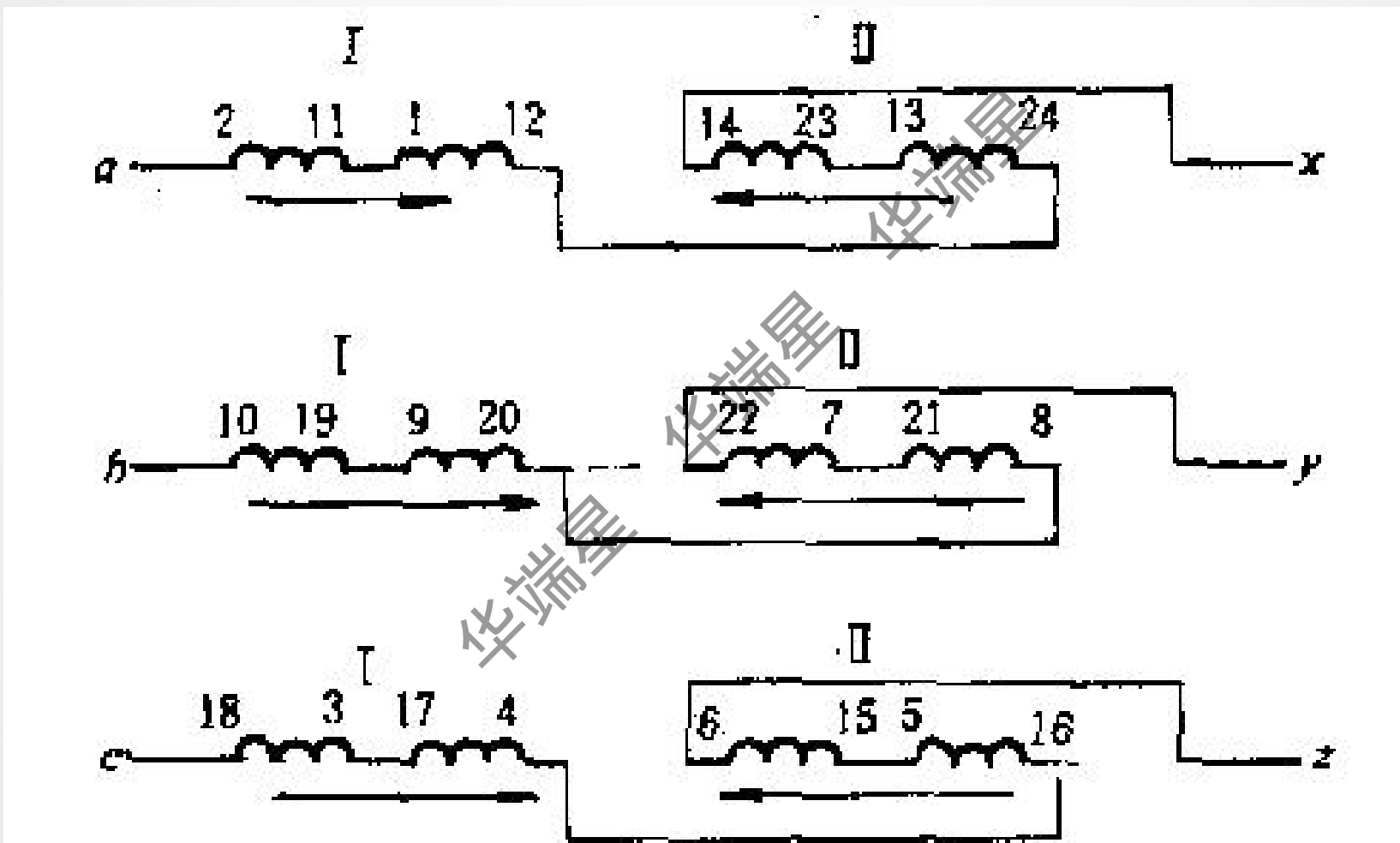


图 同心式绕组各元件连接顺序

### 小结：三相单层绕组

- 在外形上有多种绕组型式：元件节距可以整距、短矩或长短，合理选用绕组型式，可以节省铜线，简化工艺。
- **分析相电势**：采用槽电势星形图。绕组型式不同只不过是元件构成方式不同、导体连接先后次序不同，而构成绕组的导体所占的槽号是相同的，都在属两个相差 $180^\circ$ 电角度的相带内，**三相单层绕组的节距因数均为1，具有整距绕组性质。**
- 优点：绕组因数中只有分布因数，基波绕组因数较高，无层间绝缘，槽利用率高。
- 缺点：对削弱高次谐波不利，无法改善电势波形和磁势波形，漏电抗较大。
- 使用：一般用于10kW以下小功率电机。（功率较大或对波形要求较高的电机，通常采用双层绕组。）

04

## 三相双层绕组

## 四、三相双层绕组

### 4.1 三相双层绕组

- 双层——每槽中有两个元件边，分为上下两层放置。靠近槽口的为上层，靠近槽底部为下层。每个元件均有一个边放在上层，一个边放在另一槽的下层，相隔距离取决于节距。
- 元件的总数等于槽数，每相元件数即为槽数的三分之一。

构造方法和步骤（举例： $Z_1=24, 2p=4, \text{整距}, m=3$ ）

#### •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 $120^\circ$ 电角度。

#### •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。将同一极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈。将同一极域内属于同一相的 $q$ 个线圈连成一个线圈组

#### •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，电势相加原则。按照同样的方法构造其他两相。

#### •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。  $\Delta$ 接法或者Y接法



## 四、三相双层绕组

### 4.1 三相双层绕组

例：设相数 $m=3$ ，极数 $2p=4$ ，槽数 $Z=24$ ，则每极每相槽数 $q=2$ ，槽距角 $\alpha=30^\circ$

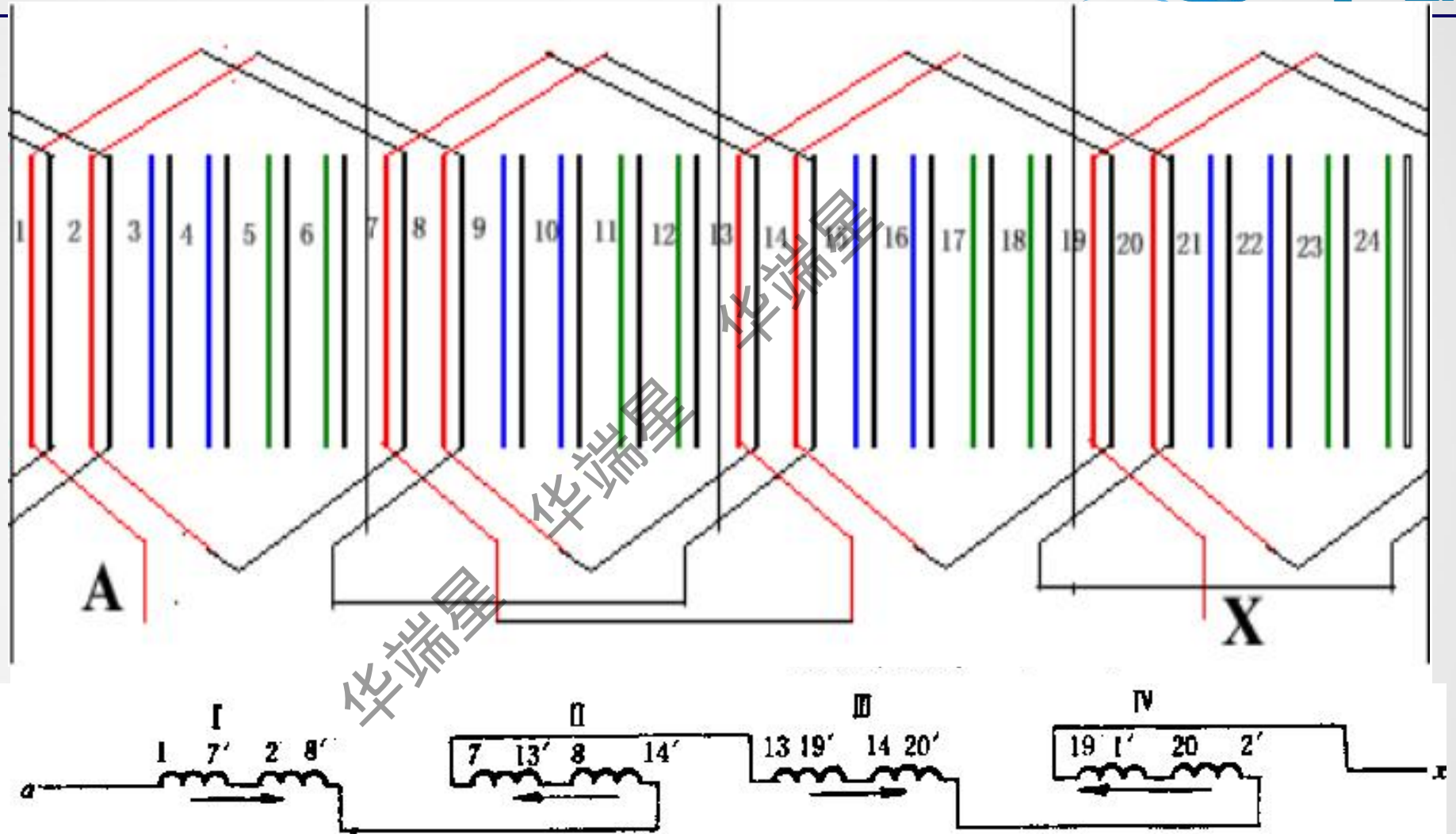
#### 步骤：

- 绘槽电势星形图
- 分相——使各相电势最大，且三相电势对称
- 绘绕组元件平面展开图

首先画出等距离的24根平行线段以表示槽号——表示各元件的上层边。在实线近旁画出虚线以表示下层元件边。把各槽按顺序编号，取槽号作为上层边的代号，取槽号加注上标'作为下层边代号。

# 四、三相双层绕组

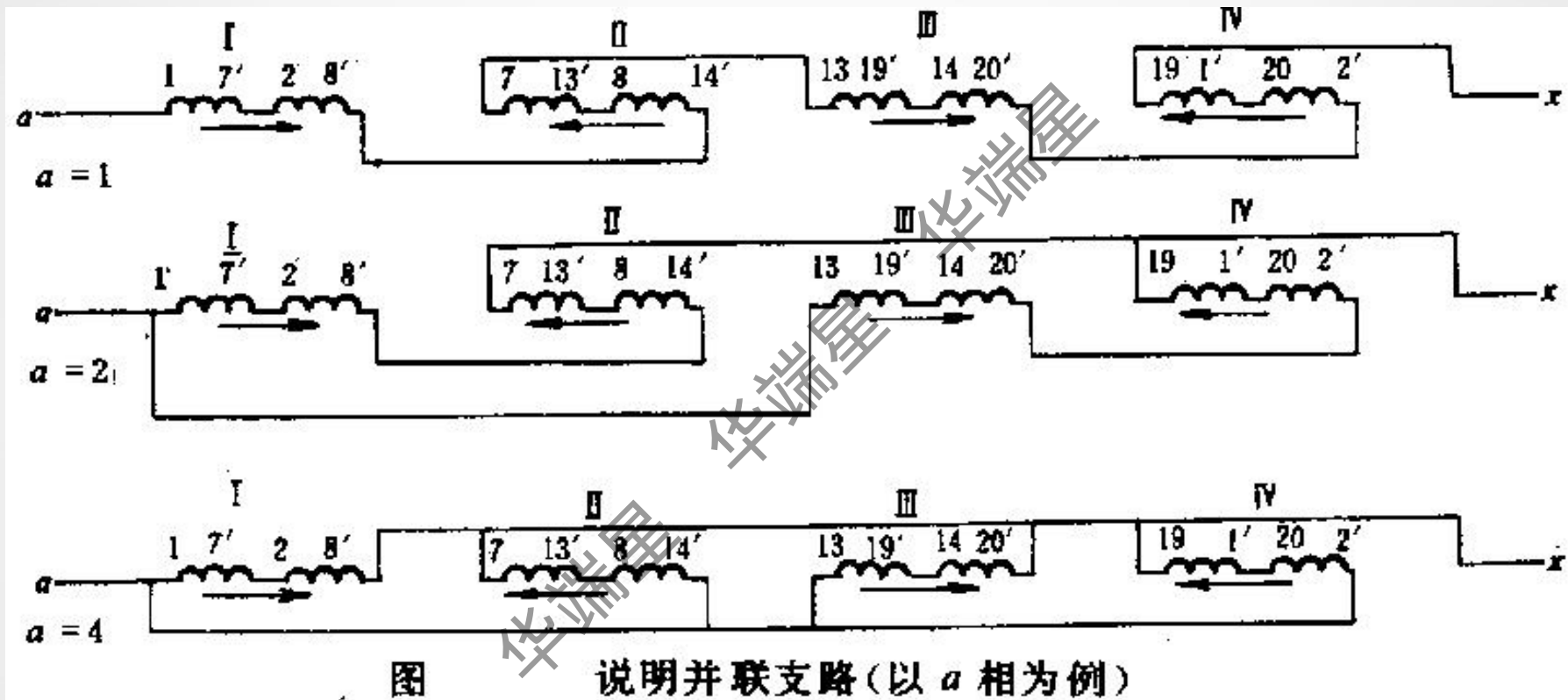
## 4.1 三相双层绕组



a相8个元件分成4个元件组，各元件组的连接规律为1-7'-2-8'，7-13'-8-14'，13-19'-14-20'，19-1'-20-2'，分别用I、II、III、IV表示。

## 四、三相双层绕组

### 4.1三相双层绕组

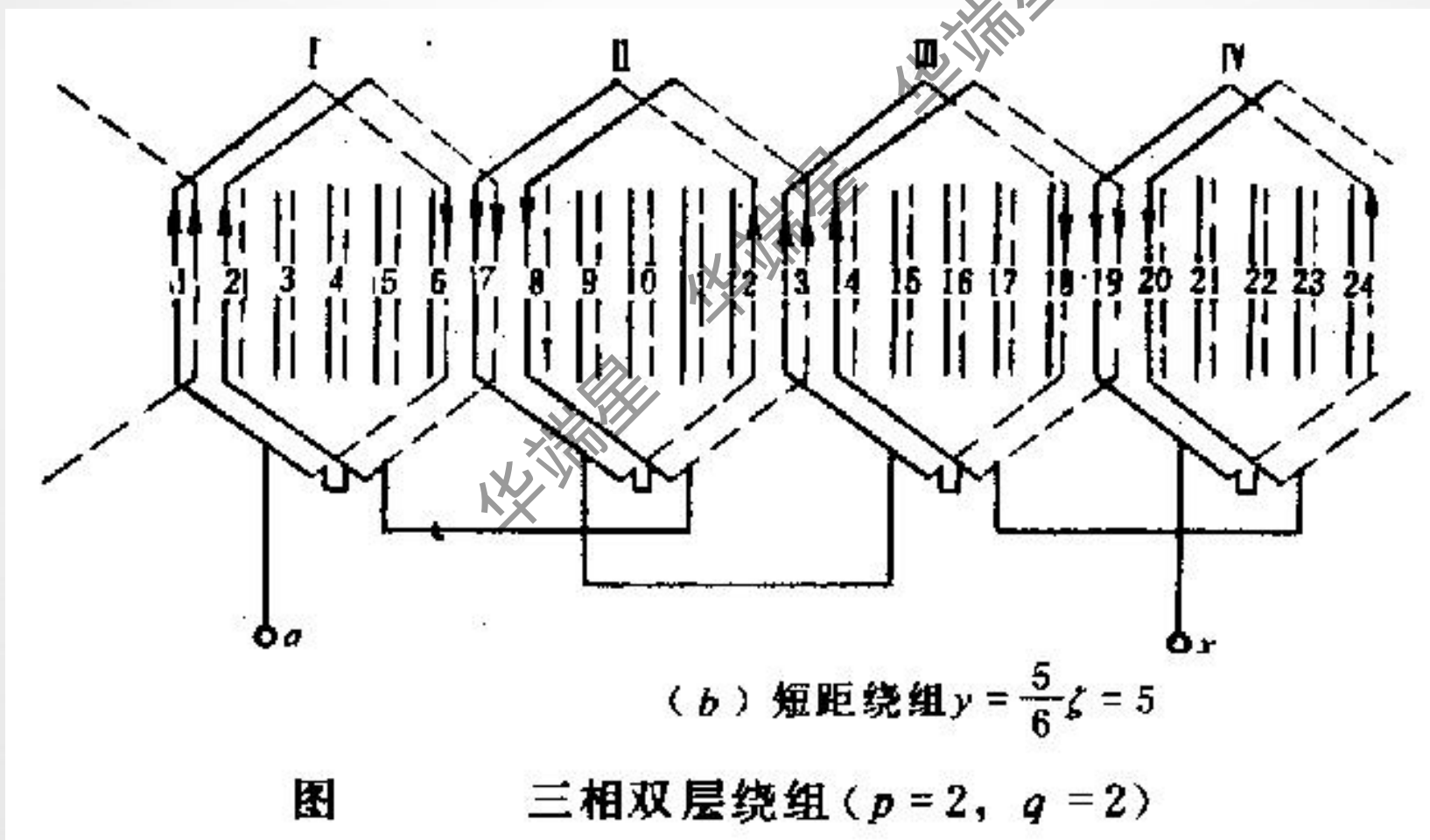


- 当磁场切割绕组时，该四个元件组的电势大小相等，I、III组电势时间上同相，II、IV组电势与I、III组电势反相。
- 各元件组可以串联、并联、或一半串联后再并联。相绕组可以有不同连接方式，**当通以电流形成4极磁场。**

## 四、三相双层绕组

### 4.1三相双层绕组-短距绕组

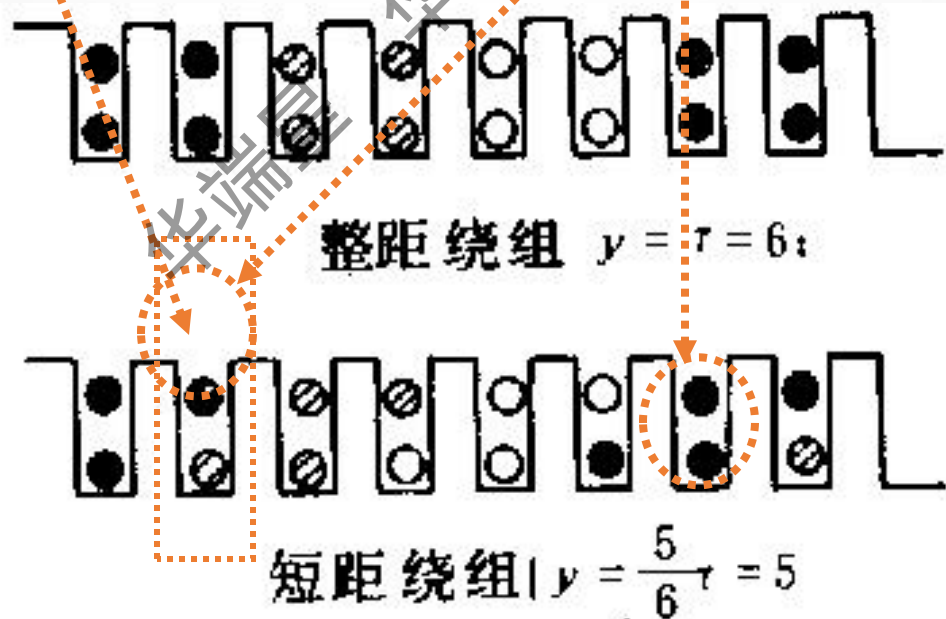
- 取  $y=5$ ，每个元件跨5个槽，a相的4个元件组，分别是 I-6'-2-7'，7-12'-8-13'，13-18'-14-19'，19-24'-20-1'



## 四、三相双层绕组

### 4.1三相双层绕组-短距绕组

- 短距时，在某些槽中，其上层元件边与下层元件边可能不属一相，在这些槽中，上层与下层之间有较大电位差，应加强层间绝缘。
- 短距时，同一相的上、下层导体错开了一个距离，用短距角  $\beta$  表示，表示一个元件的上层导体电势和下层导体电势的相位差是  $180^\circ - \beta$  电角度，合成电势时应计及节距因数  $k_p$ 。



05

## 正弦磁场下绕组的感应电势

---

- 元件电势
- 元件组电势
- 绕组相电势
  1. 单层绕组
  2. 双层绕组

华端星

华端星

华端星



### 5.1 元件的电势

- 电势决定于磁场的大小与分布以及磁场与元件间的相对运动

设气隙磁场按正弦规律分布，则每极磁通

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} B_m l \tau$$

气隙磁场每转过一对磁极，线圈中的电势便经历一个周期。电势的频率用每秒转过的磁极对数表示。

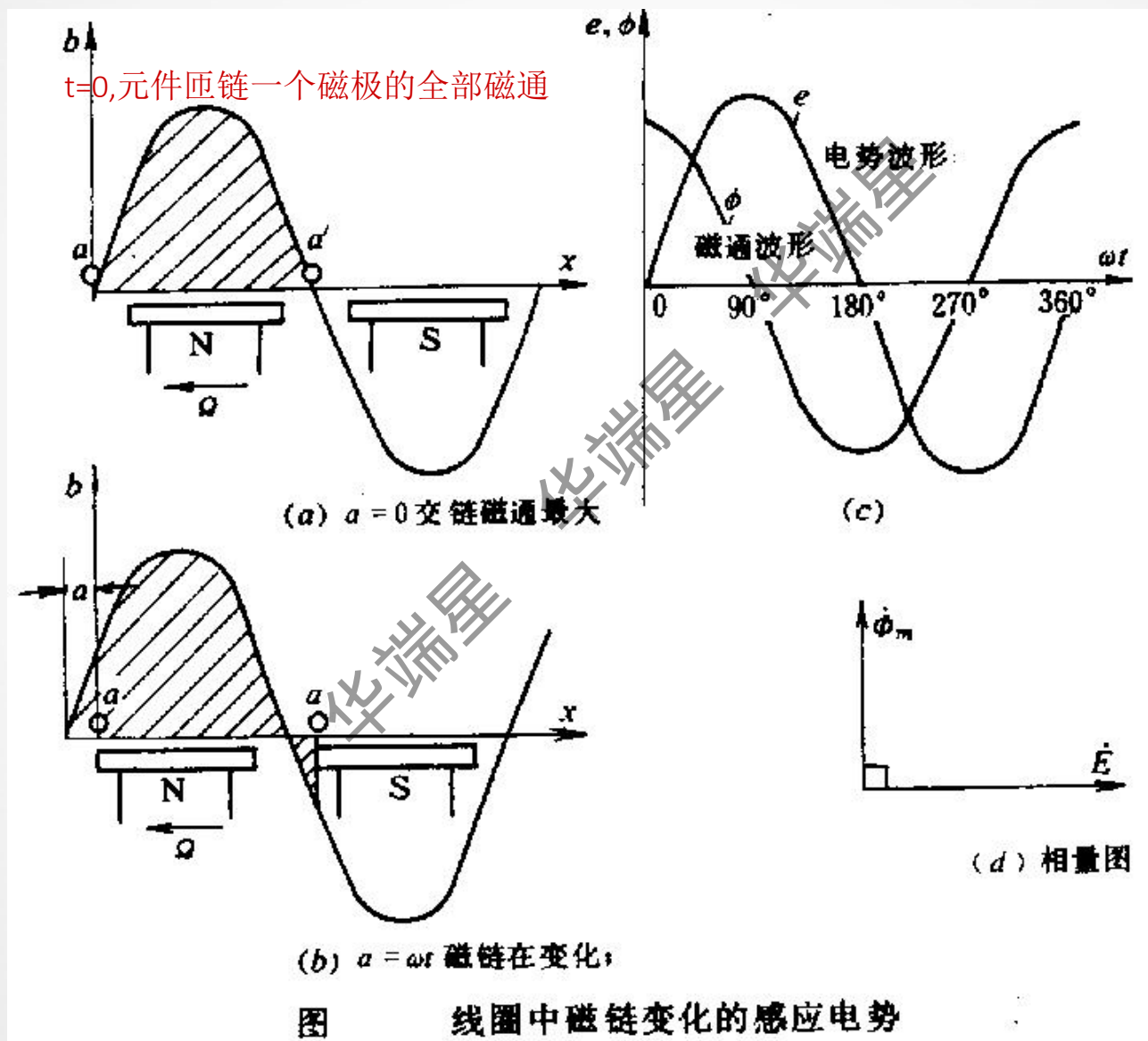
极对数 $p$ ，转速 $n$  (r/min)，则频率

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



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.1 元件的电势



$$\phi = \phi_m \cos \omega t$$

# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.1 元件的电势

元件中的感应电势

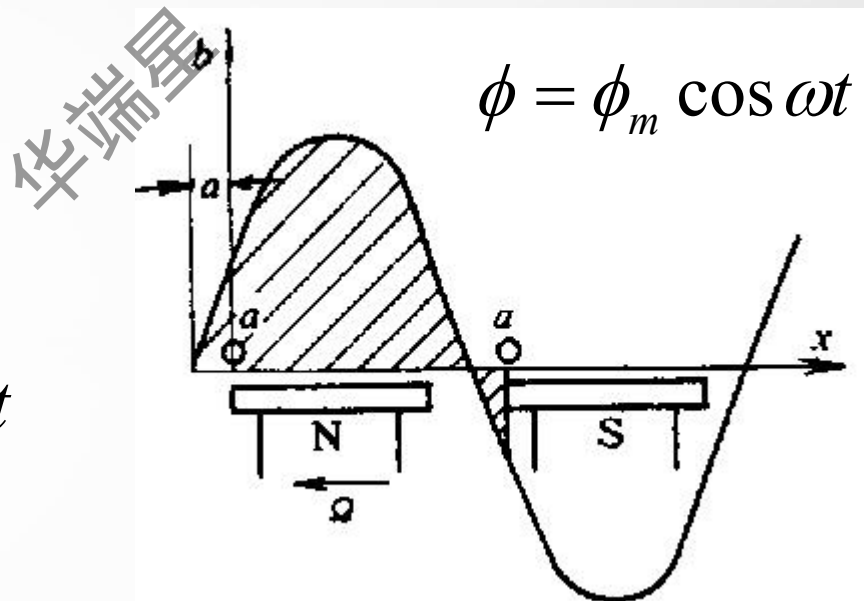
$$e = -N d\Phi / dt$$

- 设元件匝数为  $N_c$ ，感应电势的瞬时值为

$$e_c = -N_c \frac{d\phi}{dt} = \omega N_c \phi_m \sin \omega t$$

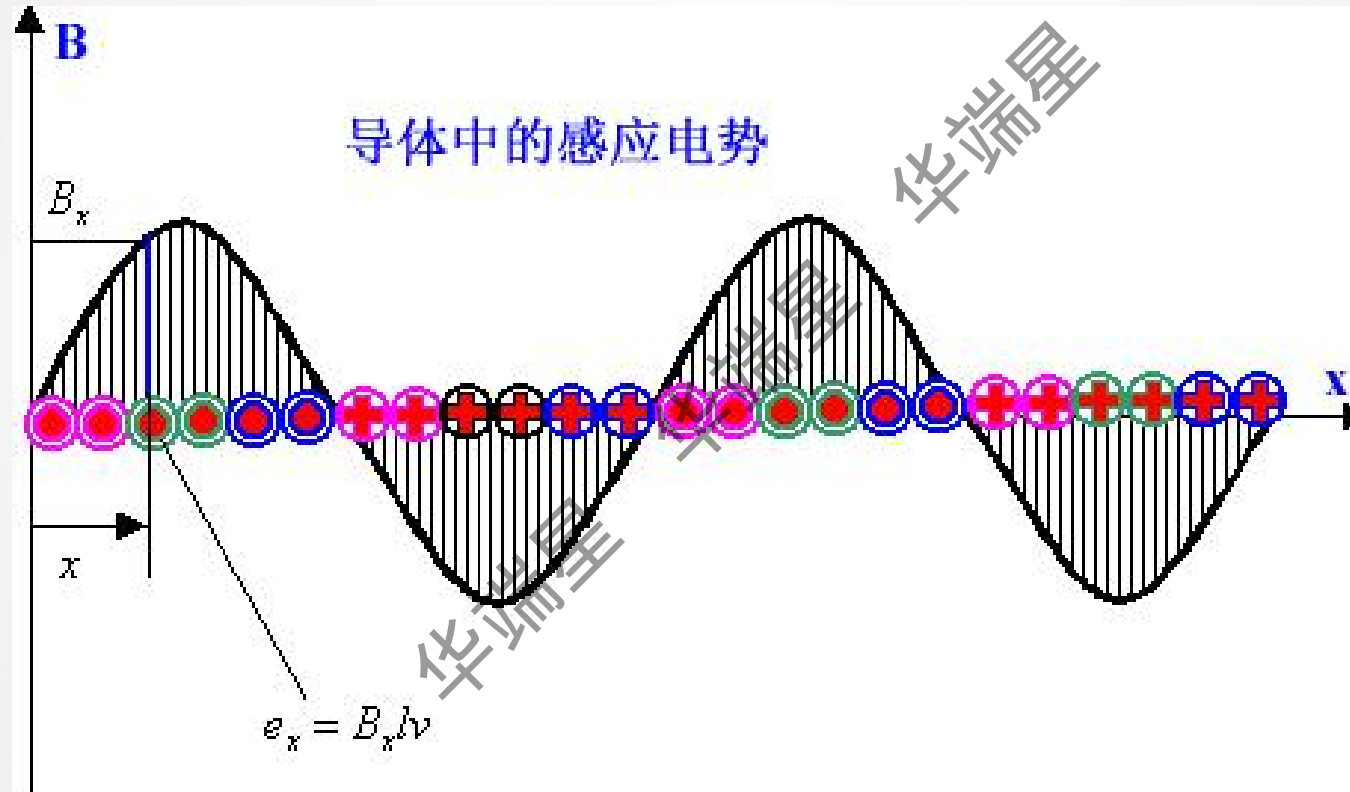
- 有效值

$$E_c = \frac{\omega N_c \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_c \phi_m$$



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.1 元件的电势



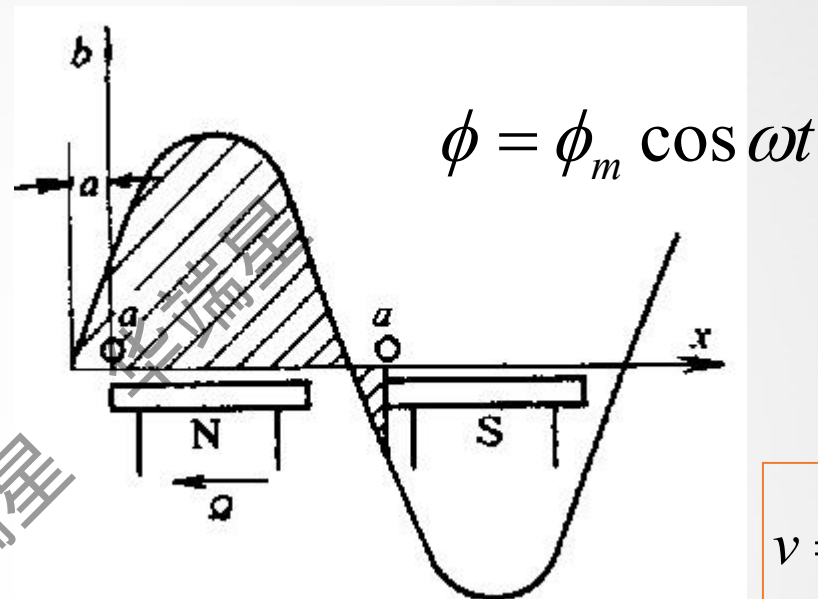
# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.1 元件的电势

元件中的感应电势  $e=Blv$

- 设原点在转子上 $B=0$ 处，  
即 $t=0$ 时， $B=0$
- 分析导体 $a$   
 $t=0$ 时， $B_a=0$ ， $e_a=B_a lv$   
经过时间 $t$ ，转动了 $\omega t$ ， $B_a=B_m \sin \omega t$ ，  
 $e_a=B_a lv= B_m l v \sin \omega t$

有效值 
$$E_a = \frac{B_m l v}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} B_m l \tau \frac{pn}{60} = 2.22 f \phi_m$$



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

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} B_m l \tau$$

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

# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.1 元件的电势

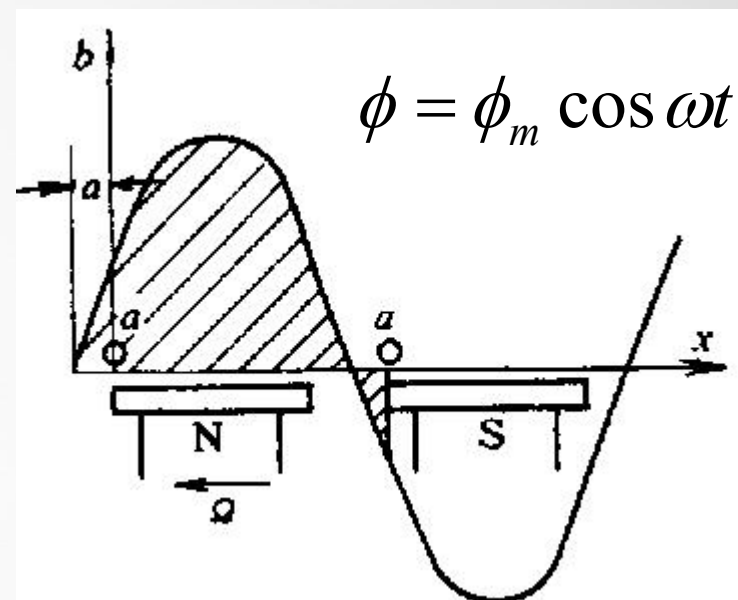
$$e_a = B_a l v = B_m l v \sin \omega t$$

- 整距线圈

导体 $a'$ 与导体 $a$ 相距一个极距，即 $180^\circ$ 电角度，

元件电势为  $e_{a'} = B_m l v \sin(\omega t - 180^\circ)$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{aa'(y=\tau)} &= \dot{E}_a - \dot{E}_{a'} = [2.22 f \phi_m] \angle 0^\circ - [2.22 f \phi_m] \angle -180^\circ \\ &= [4.44 f \phi_m] \angle 0^\circ \end{aligned}$$



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

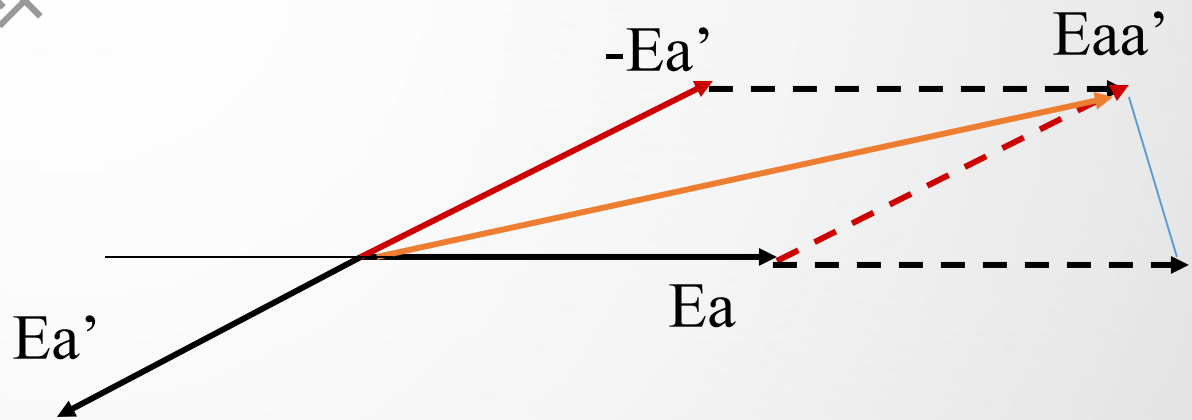
## 5.1 元件的电势

- 短距线圈

导体a'与导体a相距非一个极距（差一短距角 $\beta$ ）

元件电势为

$$\begin{aligned} \dot{E}_{aa'(y<\tau)} &= \dot{E}_a - \dot{E}_{a'} = [2.22 f \phi_m] \angle 0^\circ - [2.22 f \phi_m] \angle -(180^\circ - \beta) \\ &= [4.44 f \phi_m \cos \frac{\beta}{2}] \angle \frac{\beta}{2} \end{aligned}$$



## 五、正弦磁场下绕组的感应电势

### 5.1 元件的电势-短距元件电势

- 短距元件的电势小于整距元件的电势  
设短距角为 $\beta$ 电角度

- 节距因数  $k_p = \frac{E_{aa'(y<\tau)}}{E_{aa'(y=\tau)}} = \frac{4.44 f \phi_m \cos \frac{\beta}{2}}{4.44 f \phi_m} = \cos \frac{\beta}{2}$

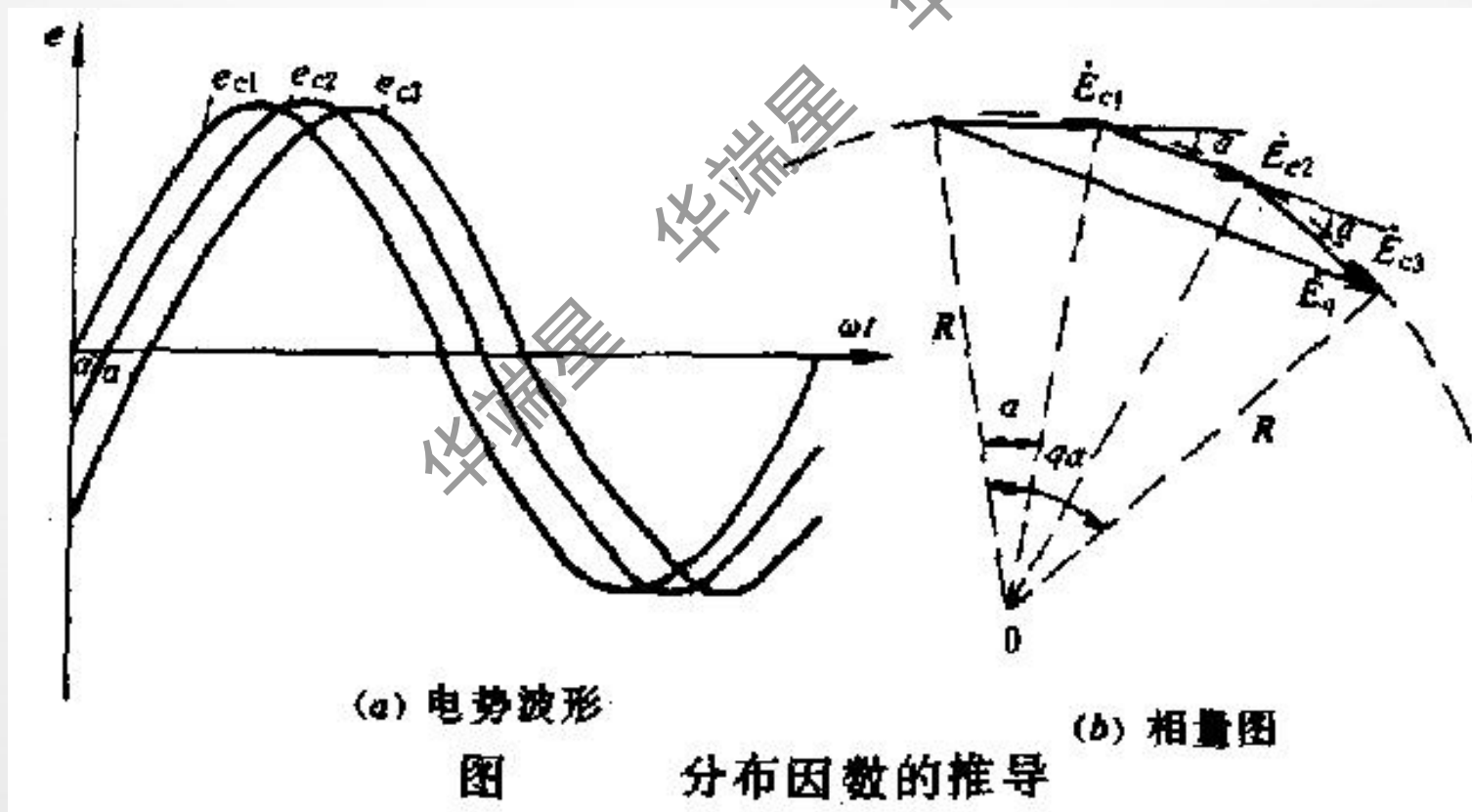
$$E_c = N_c E_{aa'(y<\tau)} = 4.44 f N_c k_p \phi_m$$

# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.2 元件组电势

- 电机采用分布绕组，每元件组有 $q$ 个元件，元件组电势即为 $q$ 个元件的电势之和。
- 通常各元件匝数相等，所以各元件电势的幅值相等，由于各元件空间位置依次相位差 $\alpha$ 电角度，各元件电势的时间相位差也为 $\alpha$ 角度。

### 5.2.1 $p=3$ 的元件组



$$E_q = 2R \sin \frac{q\alpha}{2}$$

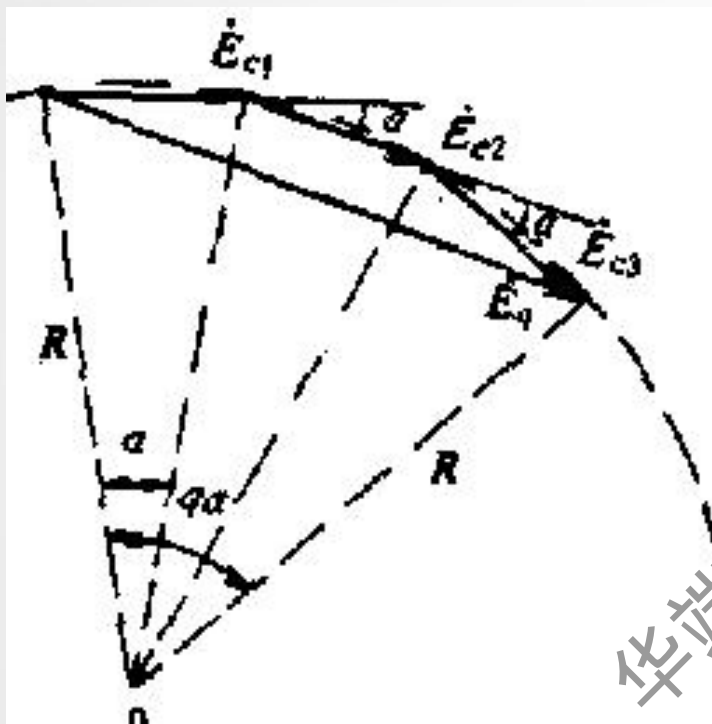
$$E_c = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.2 元件组电势

### 5.2.2 分布因数 $k_d$



- 元件组各电势的相量和与代数和的比值

$$k_d = \frac{E_q}{qE_c} = \frac{\sin \frac{qa}{2}}{q \sin \frac{a}{2}}$$

$$E_q = 2R \sin \frac{qa}{2}$$

$$E_c = 2R \sin \frac{a}{2}$$

## 五、正弦磁场下绕组的感应电势

### 5.2 元件组电势

- 绕组因数  $k_N = k_d k_p$ ，反映分布和短距对电势的影响

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad k_p = \cos \frac{\beta}{2}$$

---

$$E_q = k_d q E_c = 4.44 f N_c q k_p k_d \phi_m = 4.44 f N_c q k_N \phi_m$$

$N_c q$  为一个元件组串联匝数

## 5.3 绕组的相电势

### 1. 单层绕组

- 每对极每相有一个元件组
- p对极电机，每相有p个元件组，可以串联、并联或混合连接。如有a条并联支路，则每相电势为

$$E_{\phi} = \frac{p}{a} E_q = 4.44 f \frac{pqN_c}{a} k_N \phi_m = 4.44 f N k_N \phi_m$$

单层绕组每相串联匝数  $N = \frac{pqN_c}{a}$

## 5.3绕组的相电势

### 2. 双层绕组

- 每对极每相有2个元件组
- p对极电机，每相有2p个元件组，可以串联、并连或混合连接。有a条并联支路

$$E_{\phi} = \frac{2pE_q}{a} = 4.44 f \frac{2pqN_c}{a} k_N \phi_m = 4.44 f N k_N \phi_m$$

双层绕组每相串联匝数

$$N = \frac{2pqN_c}{a}$$

## 5.3 绕组的相电势

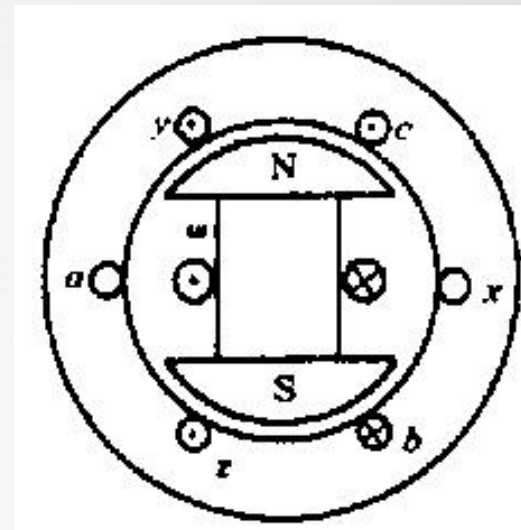
感应电势与绕组匝链磁通的相位关系

- $e = -N_c \frac{d\phi}{dt}$  即感应电势在时间上滞后磁通  $90^\circ$ 。
- 变压器：主磁通本身随时间变化
- 旋转电机：气隙磁密波大小不变，随时间绕绕组而旋转

# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

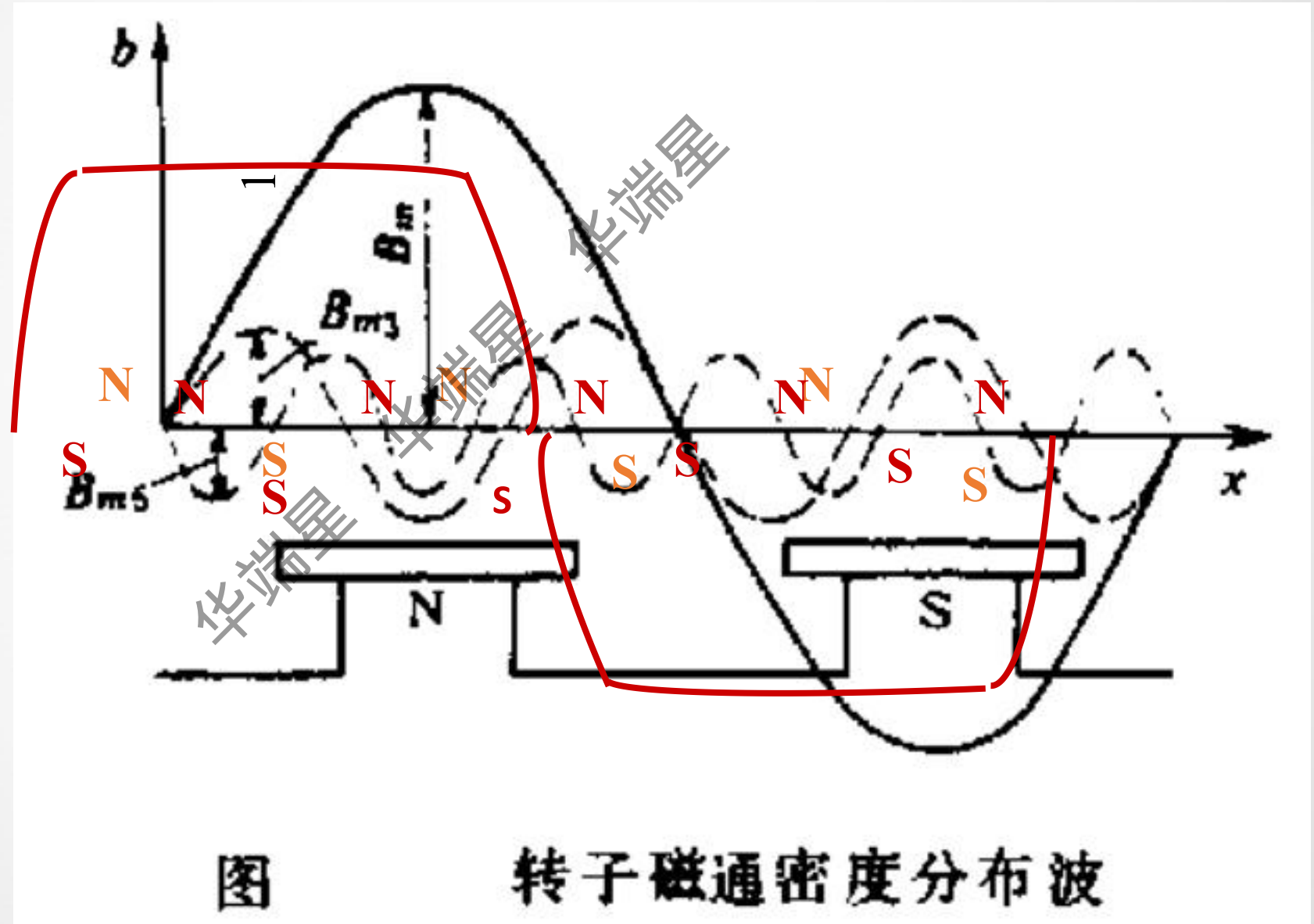
## 5.4非正弦磁场下绕组的感应电势

- 以三相凸极同步电机为例  
磁场是由转子电流激励产生的  
气隙磁通密度实际是一个平顶波，可分解出基波和各奇次谐波(由于对称性)  
基波磁场和各次谐波磁场均随转子而旋转
- 在定子绕组中不仅感应基波电势，还感应有各次谐波电势。



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.4非正弦磁场下绕组的感应电势



# 五、正弦磁场下绕组的感应电势

## 5.5 谐波电势

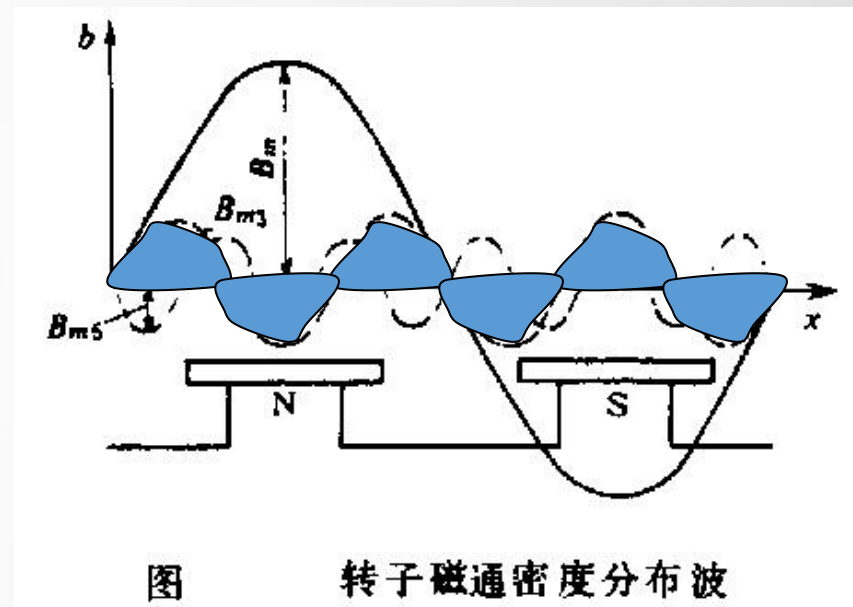
$$E_v = 4.44 f_v N k_{Nv} \phi_{mv}$$

$$p_v = vp \quad \tau_v = \frac{\tau}{v}$$

$$f_v = p_v \frac{n_1}{60} = v \frac{pn_1}{60} = v f_1$$

$$\phi_{mv} = \frac{2}{\pi} B_{mv} l \frac{\tau}{v}$$

$$k_{Nv} = k_{dv} \cdot k_{pv} = \frac{\sin q \frac{v\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \cos \frac{v\beta}{2}$$





### 5.5谐波电势-谐波电势的影响

$$E_v = 4.44 f_v N k_{Nv} \phi_{mv}$$

- 高次谐波电势对电势大小影响较小

- **主要影响电势的波形**

在基波电势上叠加有高次谐波电势使波形变坏。

引起发电机损耗增加，温升增高、效率降低。

在输电线路路上，谐波电势产生高频干扰，使输电线路附近的通信设备不能正常工作。

输电线路自身有电感和电容，在某一高频条件下，将产生自激振荡而产生过电压。

在异步电机中产生有害的附加转矩和损耗。

## 五、正弦磁场下绕组的感应电势

### 5.5谐波电势-消除和减小高次谐波电势的方法

- **从谐波性质**：当接成星形连接时，在线电势中不可能出现3次及其3的倍数次谐波电势。
- **从磁场角度**：使气隙磁场接近正弦分布，如采用适当的极靴宽度和不均匀的气隙长度(磁极中心气隙较小，磁极边缘的气隙较大)、励磁绕组的分布范围
- **从绕组方面**：采用短距、分布绕组

### 小结

- 交流绕组的组成原则——获得较大的基波电势，尽量减少谐波电势，且保持三相电势对称，同时考虑节约铜线和具有良好的工艺性。
- 分析绕组的基本方法——槽导体电势星形图，通过槽电势相量的分析可以了解三相绕组的形成和特性。
- 交流绕组的型式很多，应该掌握几种常用三相单层、双层绕组的构成方式和特点。通常小功率电机多采用单层绕组，功率较大的多为双层短距绕组，以削弱高次谐波、改善电势和磁势波形。
- 绕组电势的计算公式与变压器线圈电势的相类似。由于绕组型式不同，相电势计算时必须考虑分布因数和节距因数。
- 由于气隙磁场并不完全按正弦规律分布，存在谐波电势，对电机运行不利。

06

## 交流绕组的磁势

## 六、交流绕组的磁势

- 流经异步电机定子绕组与转子绕组的电流以及同步电机定子绕组的电流是交流电流，其所产生的磁势不仅是空间函数，且是时间函数。
- 研究磁势的空间分布规律；
- 研究磁势的时间变化规律。

### 研究步骤

- ①单相绕组的磁势；
- ②对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势；
- ③不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势；
- ④磁势的高次谐波分量。

### 假设

- 绕组中的电流随时间按正弦规律变化，不考虑高次谐波电流；
- 槽内电流集中在槽中心处；
- 定、转子间气隙均匀，不考虑由于齿槽引起的气隙磁阻变化，即气隙磁阻是常数；
- 铁芯不饱和，忽略定、转子铁芯的磁压降。

### 6.1 整距元件的磁势

- 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,铁芯消耗的磁势降可以忽略不计

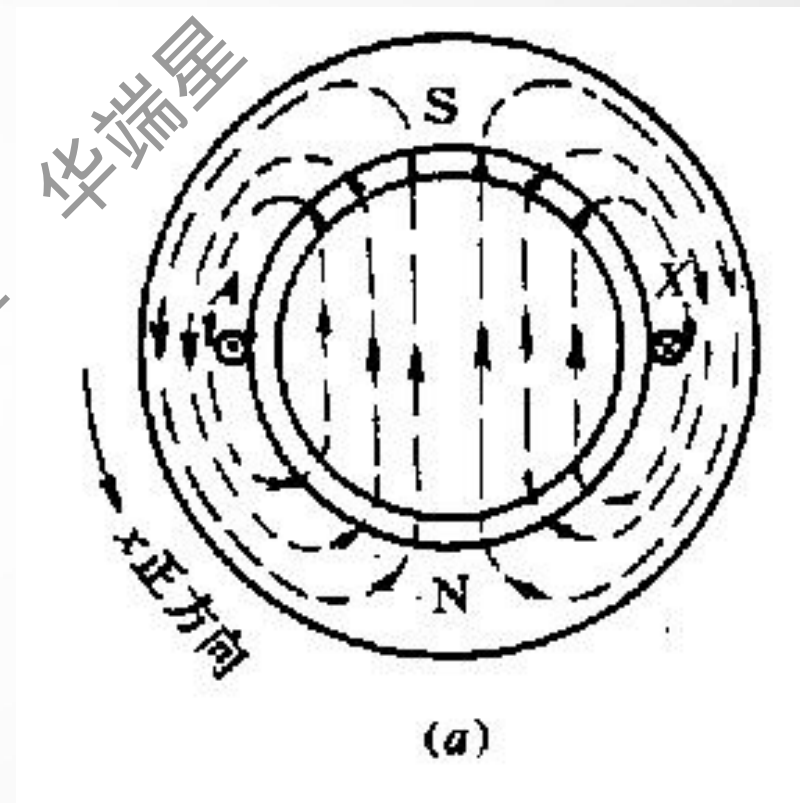
- 一个气隙上消耗的磁势为:

$$f_c = N_c i_c / 2$$

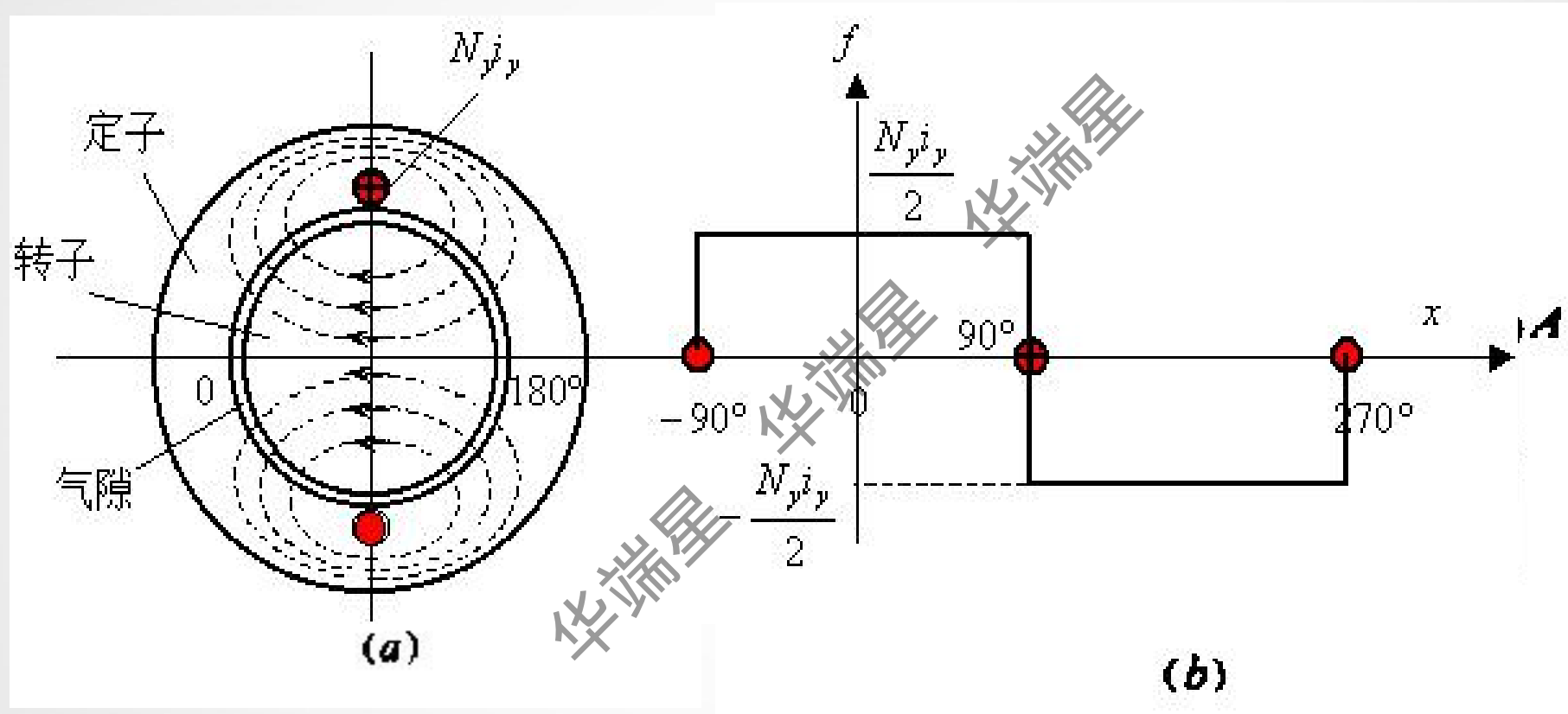
- 如果通过线圈的电流为正弦波:

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

则矩形波的高度也按正弦变化。



## 6.1 整距元件的磁势

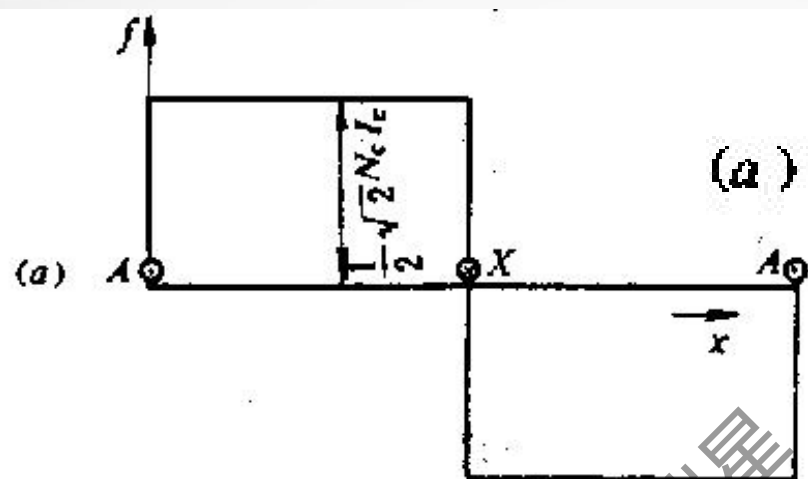


整距元件的磁势

(a) 两极磁势 (b) 磁势分布波

# 六、交流绕组的磁势

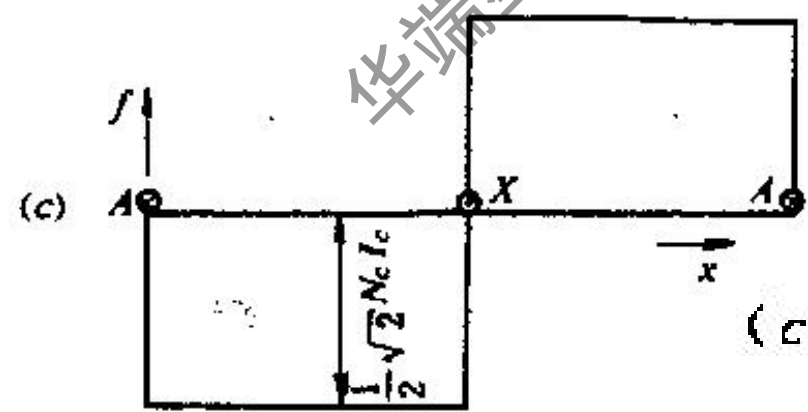
## 6.1 整距元件的磁势



(a)  $\omega t = 2k\pi + \frac{\pi}{2}, i_c = \sqrt{2} I_c$



(b)  $\omega t = k\pi, i_c = 0$



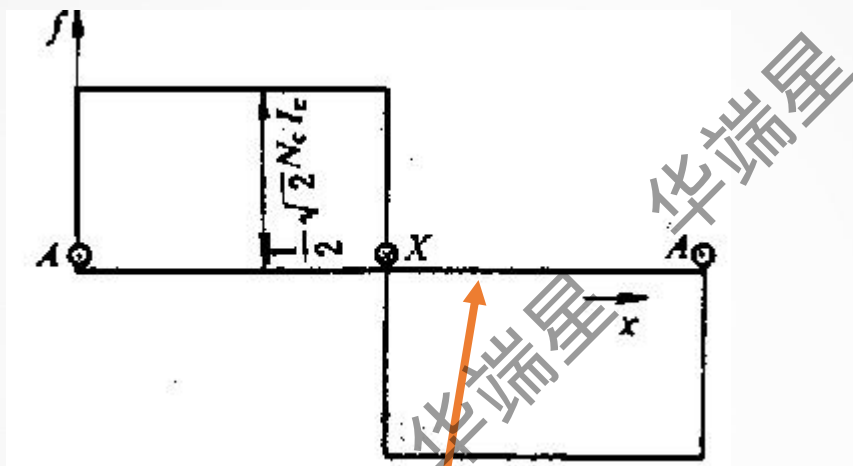
(c)  $\omega t = 2k\pi - \frac{\pi}{2}, i_c = -\sqrt{2} I_c$

说明磁势随时间而交替变化



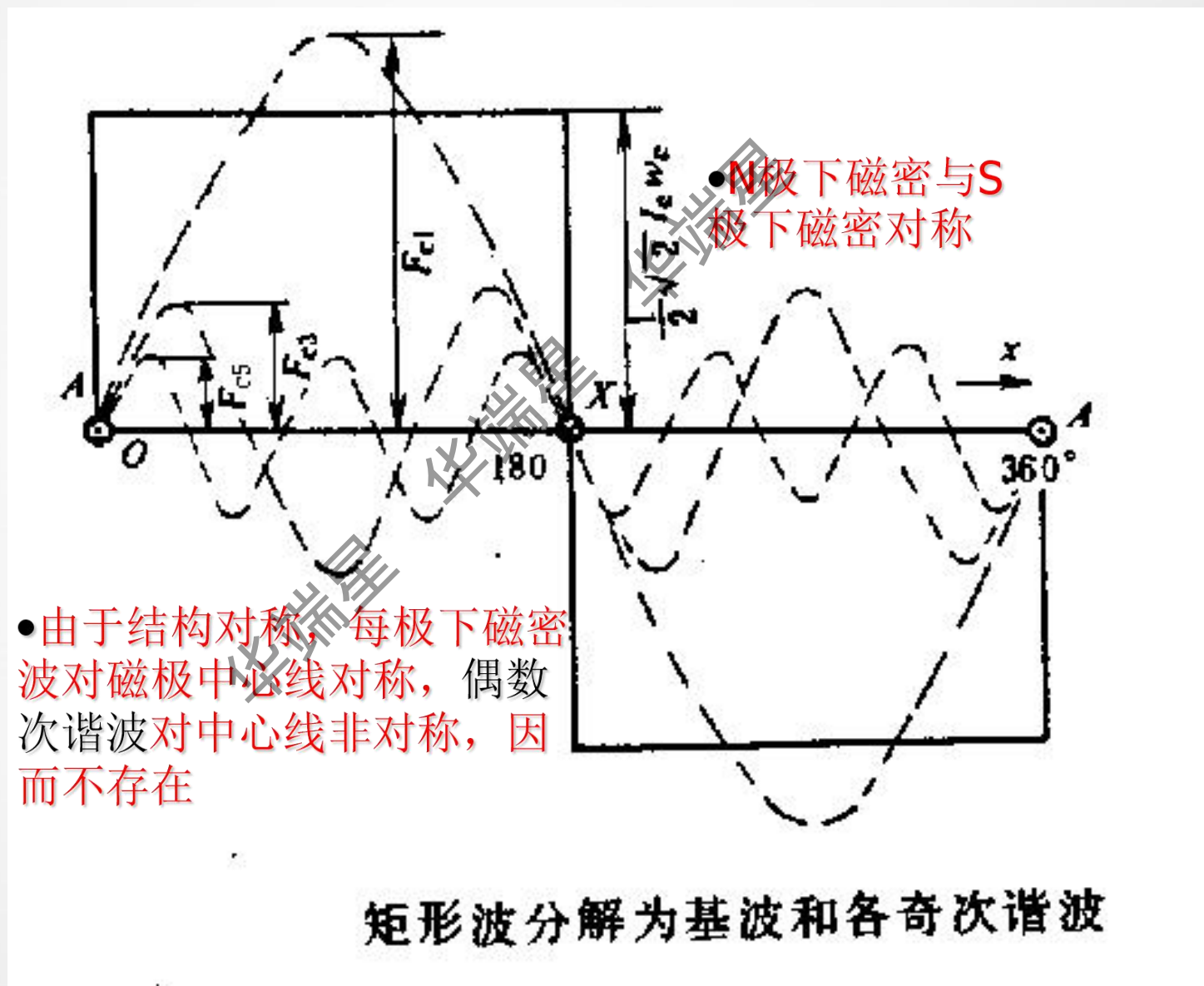
## 6.1 整距元件的磁势

性质：脉动磁势 脉动磁势



- 每极磁势沿气隙分布呈矩形波，纵坐标的正负表示极性。
- 由于电流随时间按正弦规律变化，所以磁势波的高度也随时间按正弦规律变化，但空间位置固定不变（磁轴不变）。
- 脉动的频率决定于电流的频率。
- 矩形波可分解为基波及各次谐波。

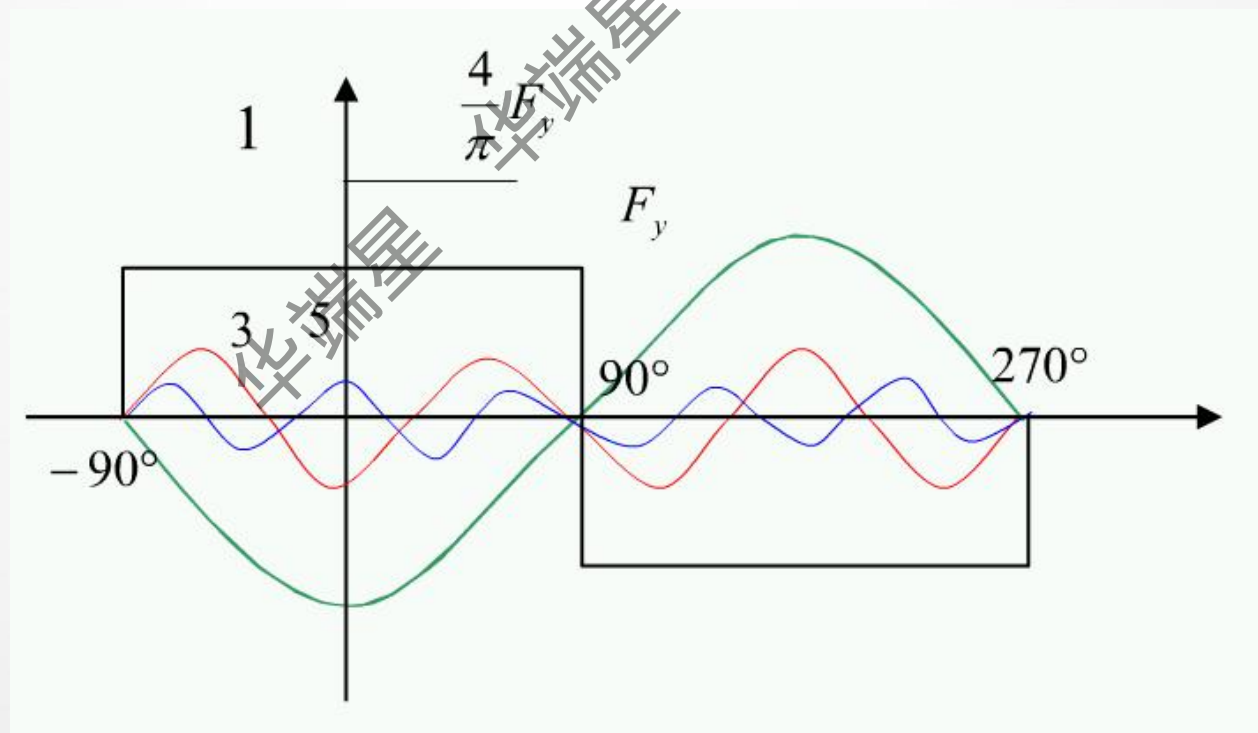
## 6.1 整距元件的磁势



## 6.1 整距元件的磁势

基波也是脉动的

- 基波在空间按正弦分布；在时间上，任何一个位置的磁势都按正弦变化。所以基波是一个正弦分布的正弦脉振磁势。



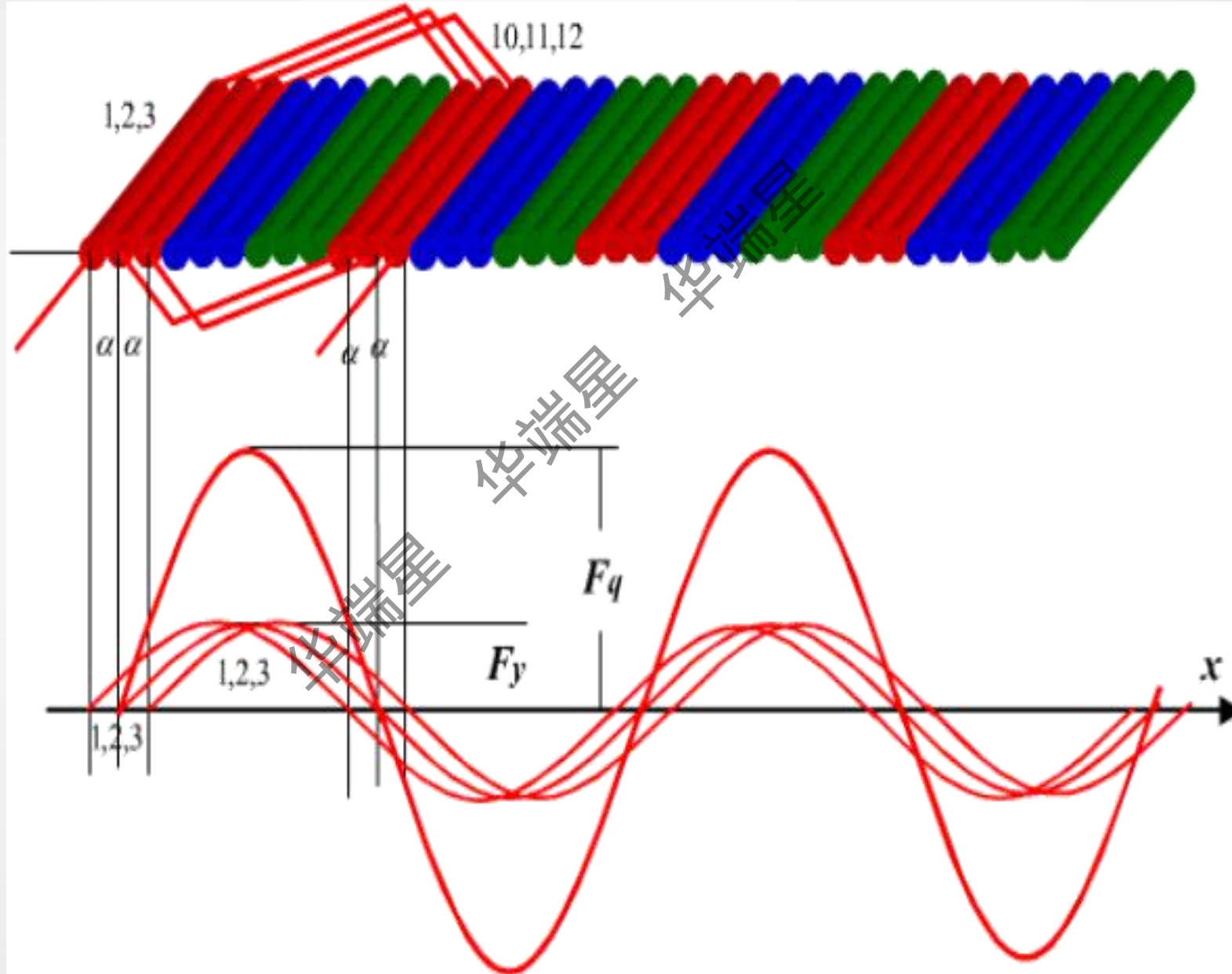
### 6.2 单层绕组的磁势

- 单层绕组：每对极下由 $q$ 个元件组成元件组，各元件在空间依次相距 $\alpha$ 电角度，设各元件的匝数相等，当流过电流，便产生 $q$ 个振幅相等、空间依次相距 $\alpha$ 电角度的矩形磁势波。
- 把每个矩形波分别进行分解，都含有基波分量 and 一系列高次谐波分量。

华端星

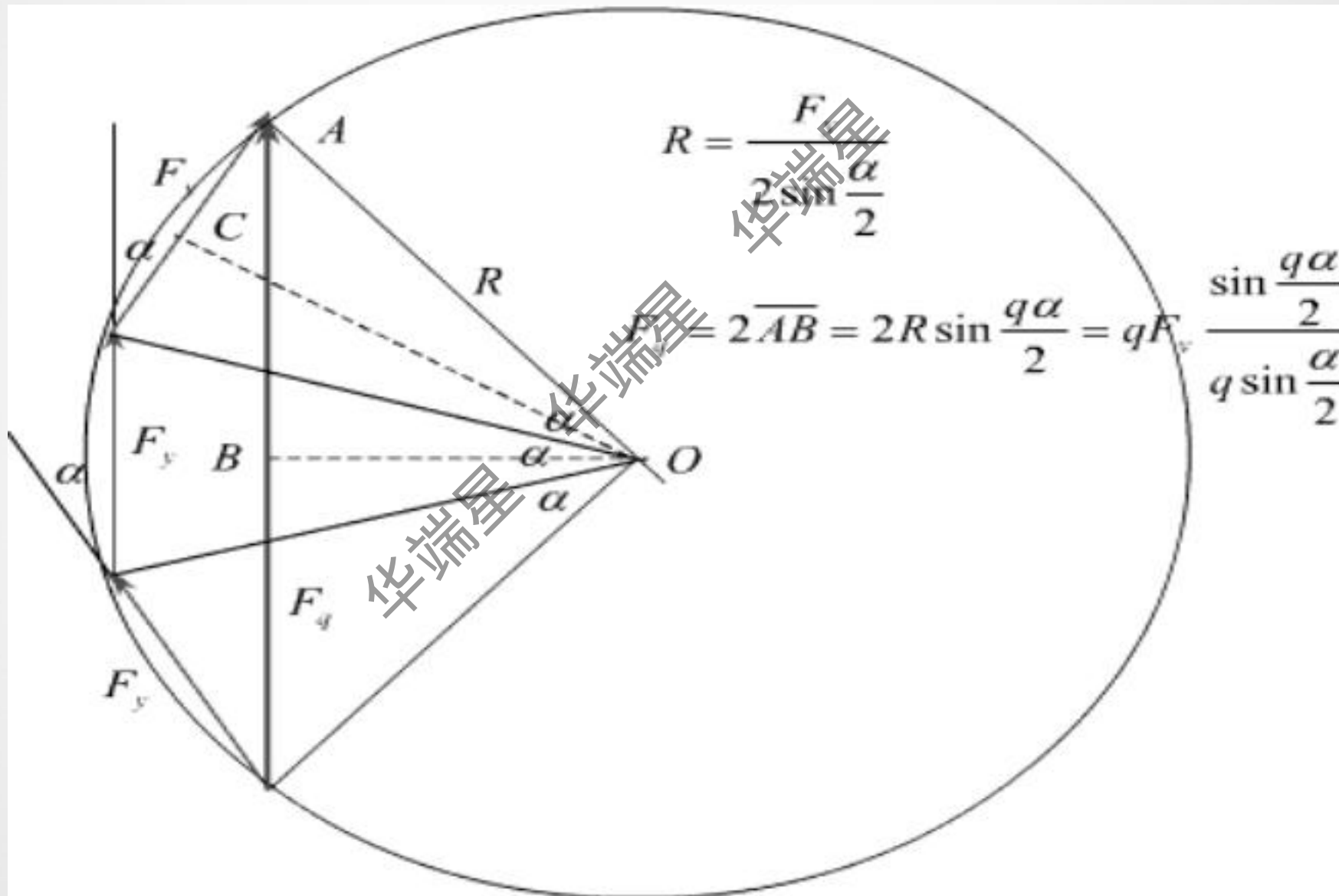
# 六、交流绕组的磁势

## 6.2 单层绕组的磁势



# 六、交流绕组的磁势

## 6.2 单层绕组的磁势



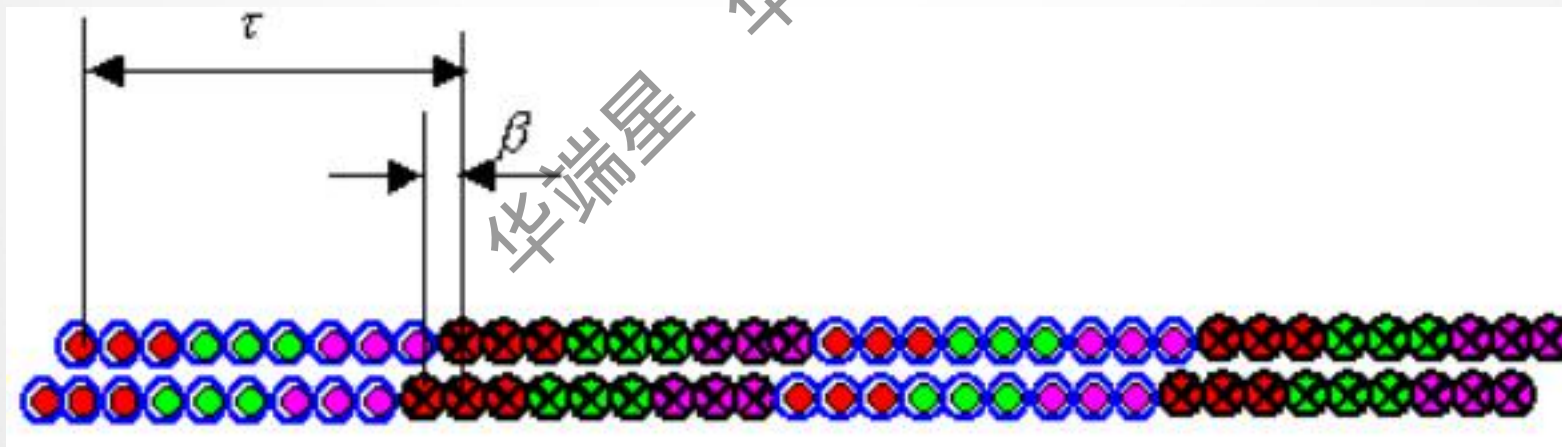


### 6.3 双层绕组的磁势

- 双层绕组：每对极有两个元件组，把两个元件组的磁势叠加，便得到双层绕组的磁势。
- 双层绕组通常是短矩绕组，从产生磁场的观点来看，磁势只决定于槽内导体电流的大小和方向，与元件的组成次序无关。
- 把实际的短距绕组所产生的磁势，等效地看成由上、下层整距绕组产生的磁势之和。

#### 6.3.1 双层短距绕组的磁势

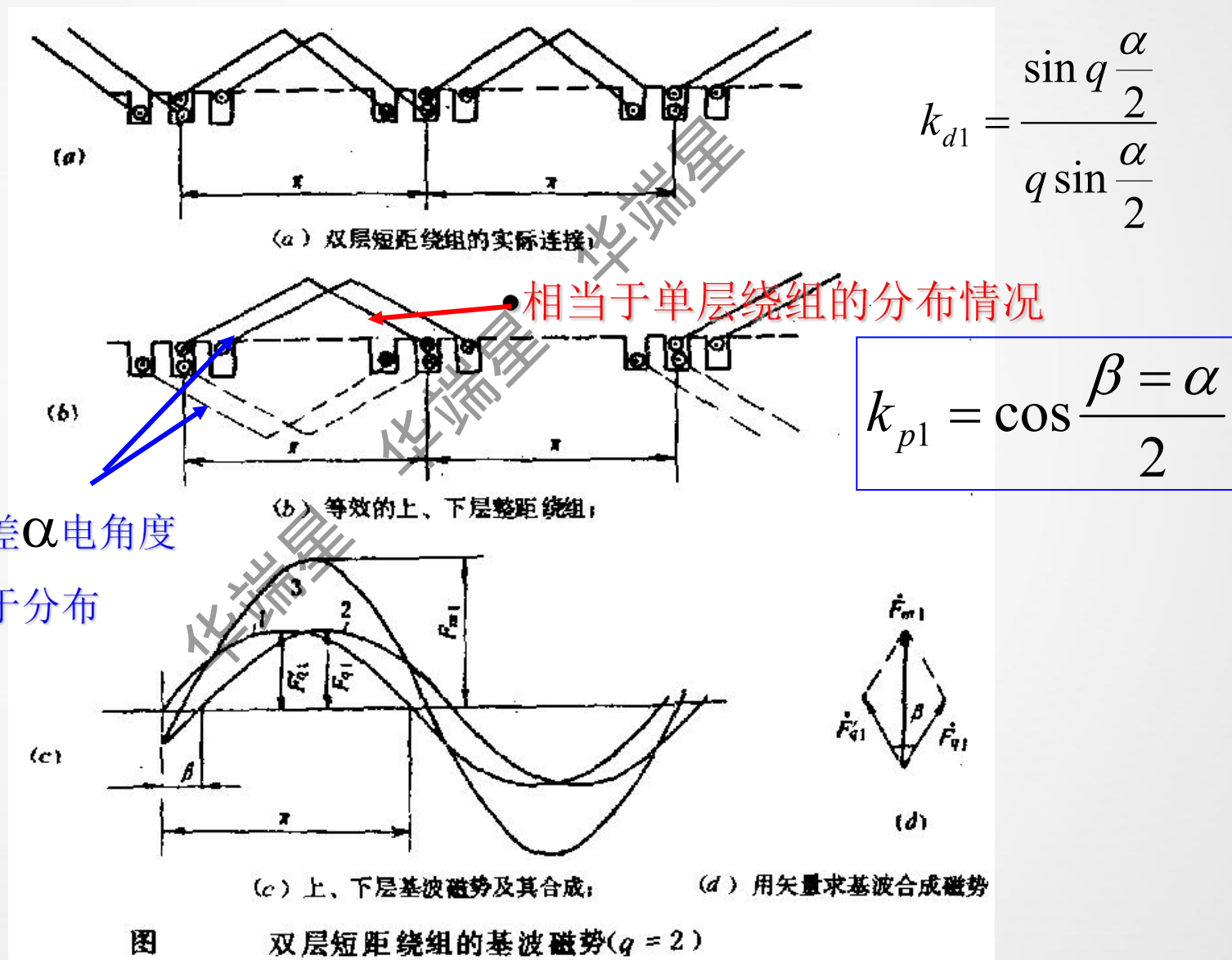
- 在分析磁场分布时，双层绕组可以等效为两个整距单层绕组



- 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

# 六、交流绕组的磁势

## 6.3 双层绕组的磁势

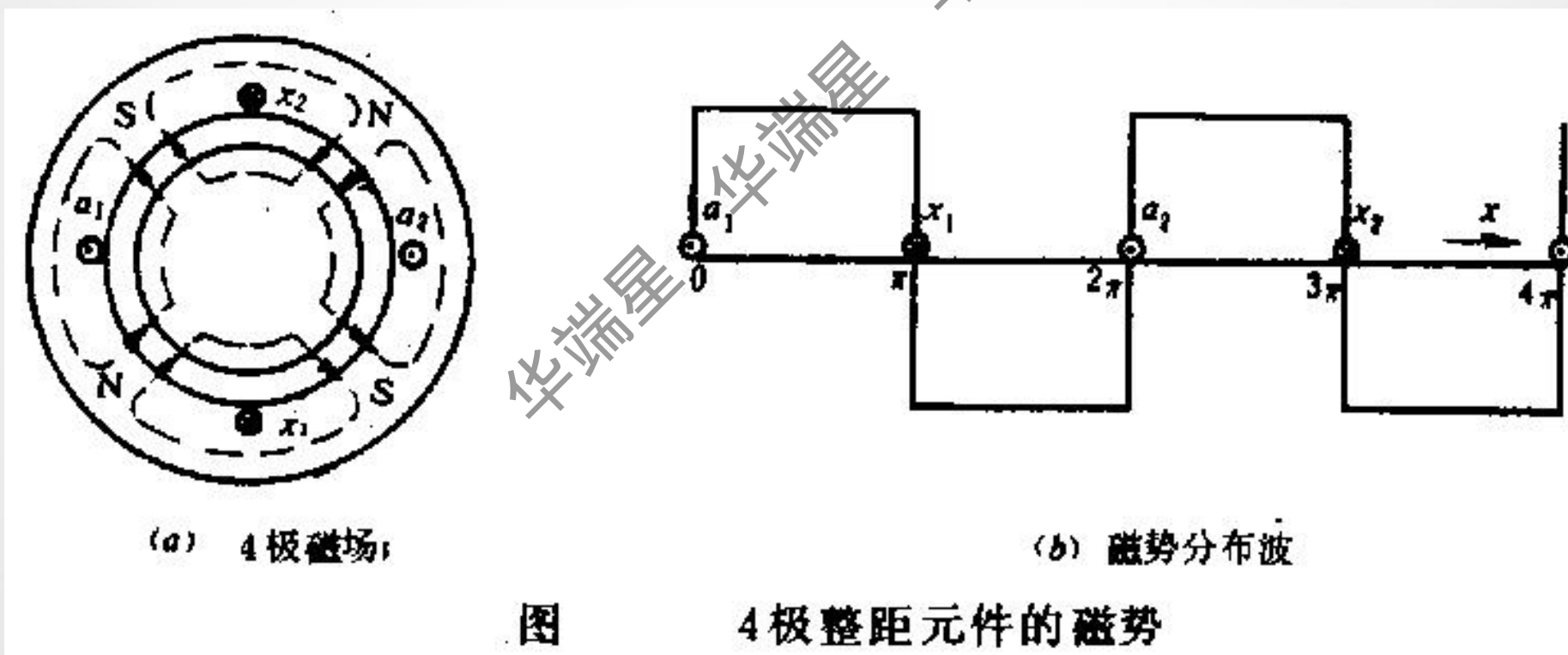




## 6.4 磁势的相关性质

### 6.4.2 磁势函数

- 磁势是时间函数，呈空间分布，各对磁极分别有各自的磁路，不能合并不同空间的各对磁极的磁势。



### 6.4 磁势的相关性质

#### 6.4.2 脉动磁势分解成两个旋转磁势

脉动磁势波的节点和幅值的位置是固定不变的。

#### 基波分量

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

---

- 在空间按正弦规律分布随时间按正弦规律变化的脉动磁势可以分解为**两个旋转磁势分量**
- 每个旋转磁势：振幅为脉动磁势振幅的一半，旋转速度相同，旋转方向相反。

# 六、交流绕组的磁势

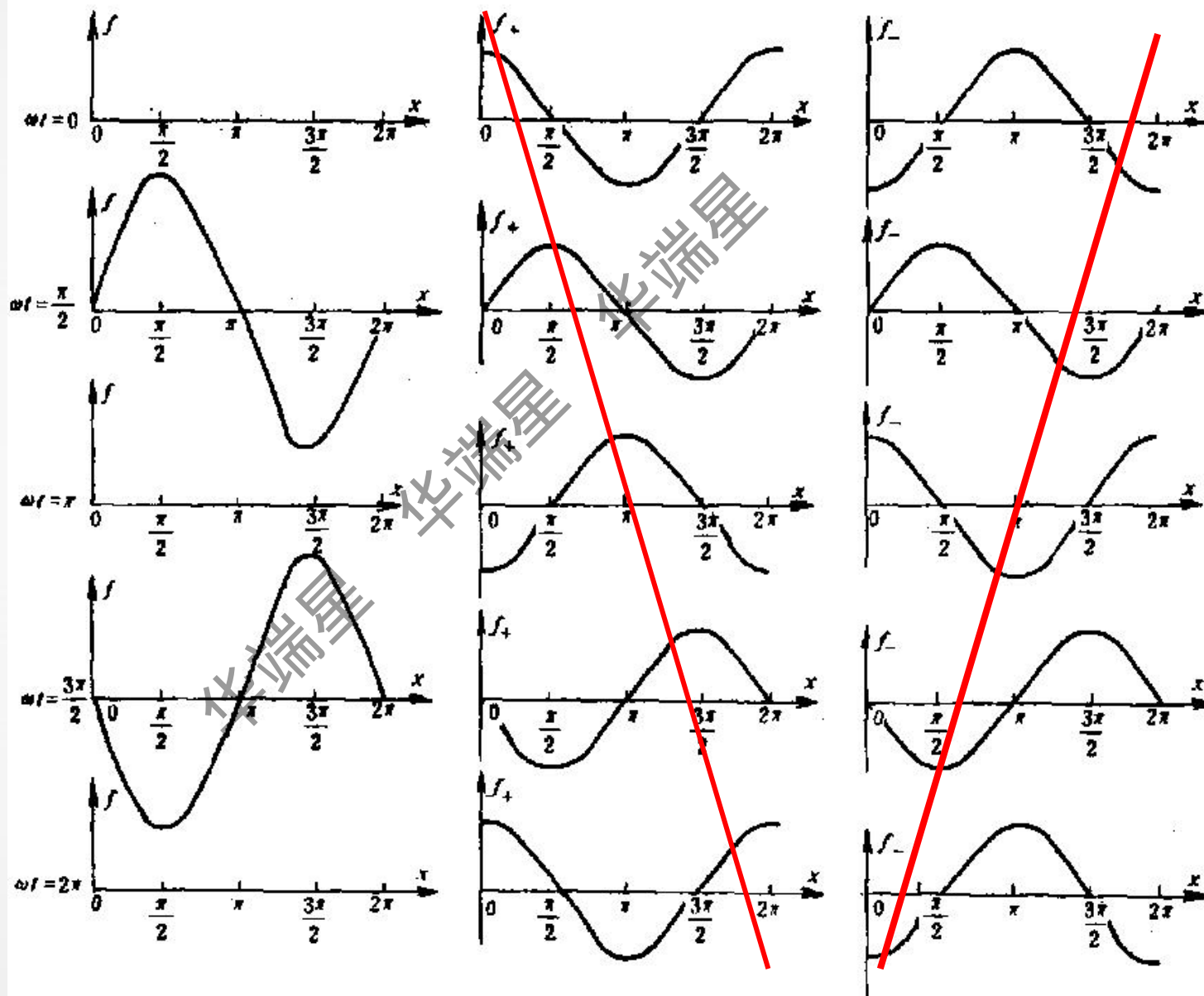
## 6.4 磁势的相关性质

### 6.4.2 脉动磁势分解成两个旋转磁势

- 两矢量以相同角速度向相反方向旋转，任何瞬间合成磁势的空间位置固定不变——在该绕组的轴线处（绕组的轴线为磁轴或定义为相轴），但大小随时间变化。
- 脉动磁势的振幅的空间位置在相轴上。

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

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



(a) 脉动磁势波；

(b) 正向旋转磁势波；

(c) 反向旋转磁势波

## 6.5 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 设各相的电流瞬时值为 $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ ，各相磁势的基波分量分别：

$$f_A = \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{Nk_{N1}}{p} i_A \sin x$$

$$f_B = \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{Nk_{N1}}{p} i_B \sin(x - 120^\circ)$$

$$f_C = \frac{1}{2} \times \frac{4}{\pi} \frac{Nk_{N1}}{p} i_C \sin(x + 120^\circ)$$

- 三个相绕组有三个磁轴。
- 不论 $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 是否对称，就每相绕组而言，均产生一脉动磁势，作用在各自的磁轴上。



### 6.5 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 对称的情况下，由于各相电流的有效值相等，各相脉动磁势的最大幅值也相等。各相脉动磁势均分解成两个相反方向旋转的旋转磁势：

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

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

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

- 各相电流所产生的正向旋转磁势在空间均为同相，所产生的负向旋转磁势空间相位差 $120^\circ$ 。合成后，正向旋转磁势直接相加，负向旋转磁势相互抵消

$$f = f_A + f_B + f_C = \frac{3}{2} F_{m1} \cos(\omega t - x)$$

**结论：** 当对称的三相电流流过对称的三相绕组时，合成磁势为一旋转磁势

### 6.5 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

1. 极数            基波旋转磁势的极数与绕组的极数相同。
2. 振幅            合成磁势的振幅为每相脉动磁势振幅的 $3/2$ 倍。
3. 转速            角速度  $\omega = 2\pi f$  (电弧度/s)  
 $n_1 = f/p$  (r/s) =  $60f/p$  (r/min) 同步转速, **基波转速**。
4. 幅值位置      合成磁势的振幅的位置随时间而变化, 出现在  $\omega t - x = 0$  处。  
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
5. 旋转方向      由超前电流的相转向滞后电流的相  
改变旋转磁场转向的方法: 调换任意两相电源线 (改变相序)

#### 圆形旋转磁势

- 当电流为一对称的三相电流时, 合成磁势仅有正序旋转磁势  $F$ 。
- 当矢量  $F$  旋转时, 端点轨迹为圆。



### 6.6 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 将不对称的三相系统分解为三个对称的系统，即正序系统、负序系统和零序系统。
- 每相电流分解为三个分量，每相磁势也可分解为三个分量。
- 当正序电流流过三相绕组时，产生正向旋转磁势——正序旋转磁势。
- 当负序电流流过三相绕组时，产生负向旋转磁势。

#### 零序电流的磁势：

- 当绕组为星形联接时，各相零序电流为零，不存在零序磁场。
- 当绕组按三角形连接时，各相零序电流为同相位，由零序电流所产生的各相零序磁势在空间相位差 $120^\circ$ 电角度，适相抵消，也不产生旋转磁场。

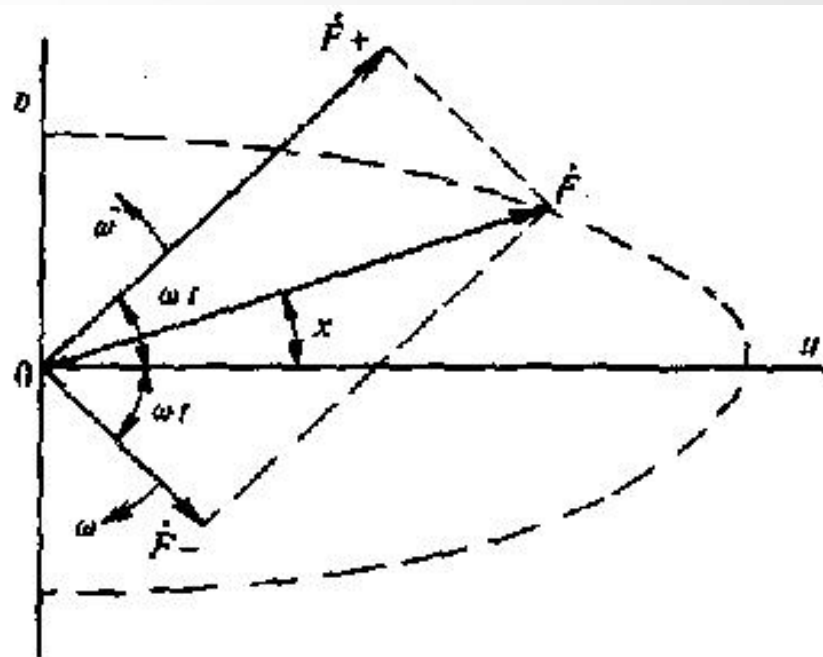
## 六、交流绕组的磁势

### 6.6 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

#### 椭圆形旋转磁势

- 当电流为一不对称的三相电流，合成磁势将有两个分量：正序分量和负序分量，各以同步速向相反方向旋转。在任一瞬间的合成磁势仍按正弦分布，用旋转矢量表示为空间矢量和，不同时刻，有不同的振幅，其端点轨迹为一椭圆

$$F = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{F_+^2 + F_-^2 + 2F_+F_- \cos 2\omega t}$$



图

椭圆形旋转磁势



### 6.7谐波磁场的不良影响

- 1. 产生谐波感应电势。谐波电势所产生的附加损耗不仅降低效率，而且降低功率因数。
- 2. 谐波磁势产生的附加力矩。将会影响电动机的起动力矩和过载能力。
- 设计时应当尽量设法削弱磁势的高次谐波分量，特别要削弱其中影响最大的5次谐波和7次谐波。与削弱谐波电势一样，通常采用适当短距的分布绕组来削弱空间谐波磁势以改善磁势的波形，使其接近于正弦分布波。



谢谢!

