



# 哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



## 自动控制实践A

### 6 步进电机及其控制



# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用

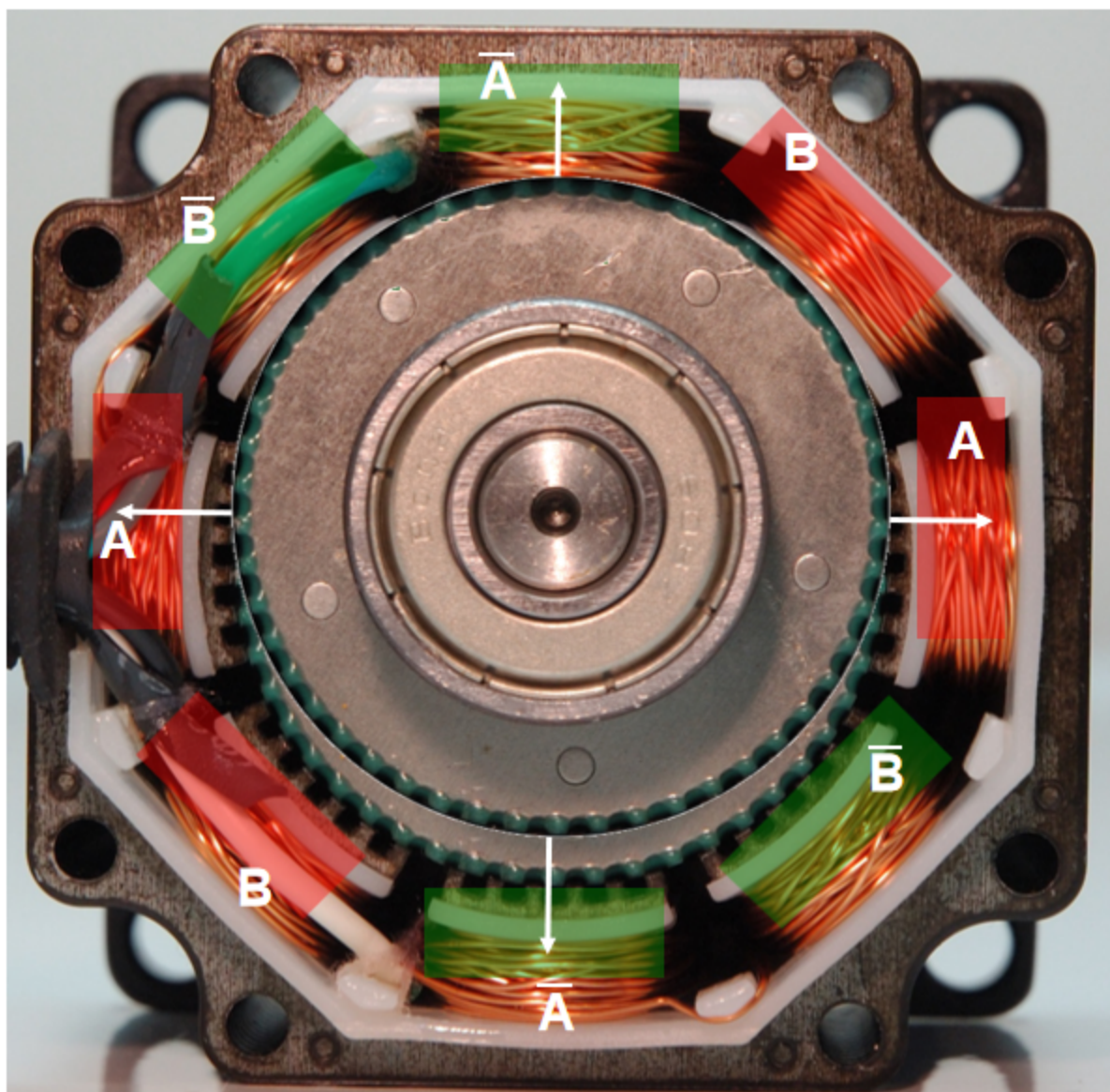




# 1、步进电动机工作原理

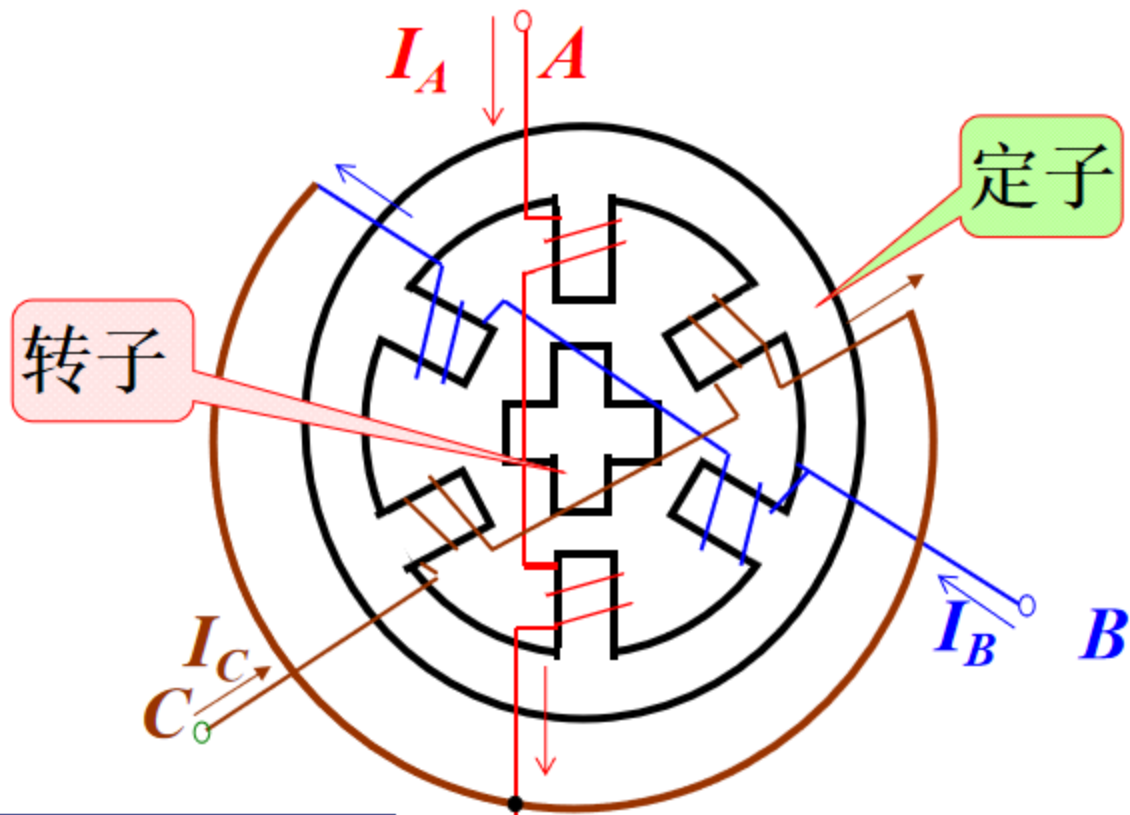
## 什么是步进电机：

步进电机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。通俗一点讲：当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度（及步进角）。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。



# 1、步进电动机工作原理

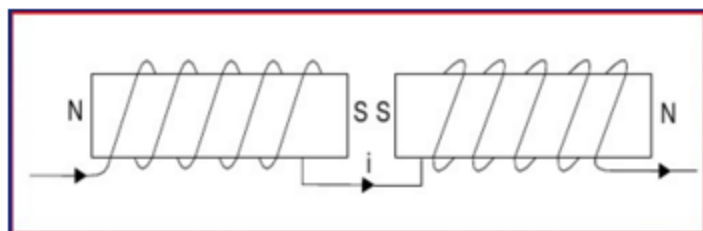
以三相反应式步进电动机为例，其原理示意图如下：



定子内圆周均匀分布着六个磁极，磁极上有励磁绕组，每两个相对的绕组组成一相。转子有四个齿。

齿距角：
$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_r}$$

每两个相对的绕组组成一相





# 1、步进电动机工作原理

为连续旋转，三相步进电机可以按照三相单三拍、三相双三拍、三相单双六拍的方式工作。

## 一、三相单三拍

三相绕组中的通电顺序为：

$A \text{ 相} \rightarrow B \text{ 相} \rightarrow C \text{ 相}$



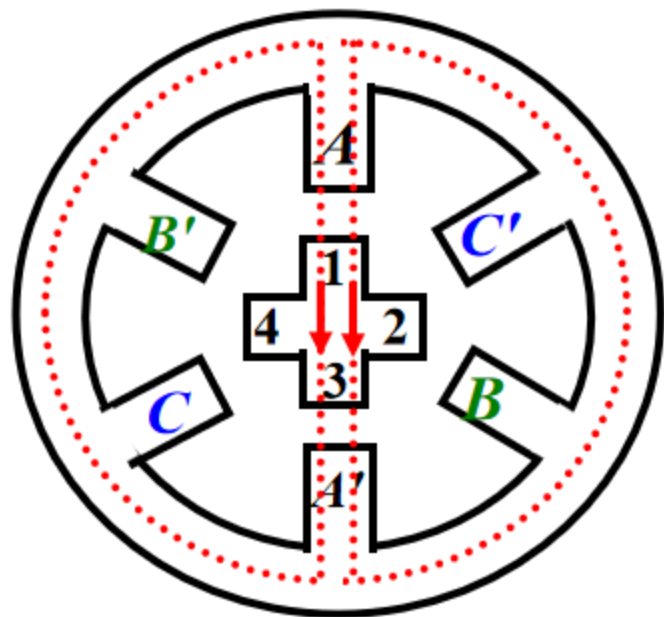
通电顺序也可以为：

$A \text{ 相} \rightarrow C \text{ 相} \rightarrow B \text{ 相}$



# 1、步进电动机工作原理

## 一、三相单三拍



A 相通电，产生的磁通经转子形成闭合回路。若转子和磁场轴线方向原有一定角度，则在磁场作用下，转子被磁化，被吸引与定子对齐。

由于磁力线总是要通过磁阻最小的路径闭合，因此会在磁力线扭曲时产生切向力而形成磁阻转矩，使转子转动，使转、定子的齿对齐后停止转动。

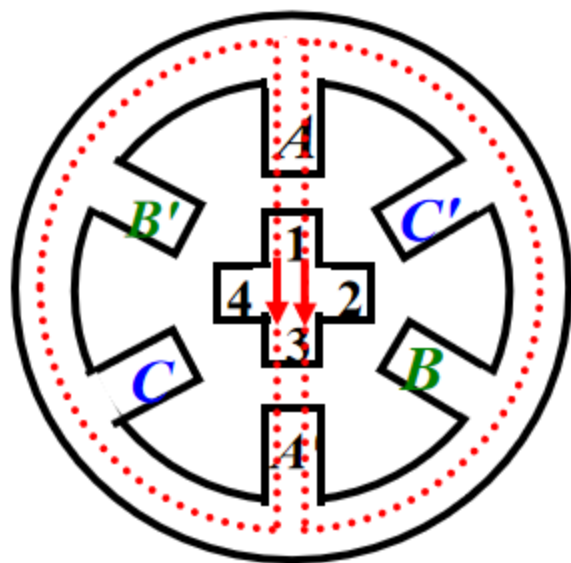
A 相通电使转子1、3齿和 AA' 对齐。



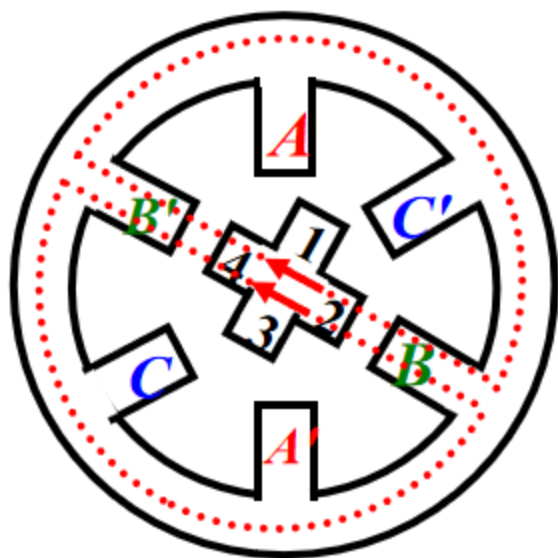
# 1、步进电动机工作原理

## 一、三相单三拍

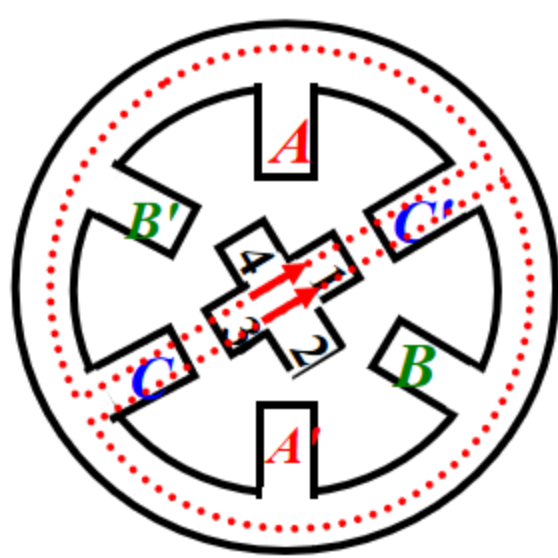
A相 → B相 → C相



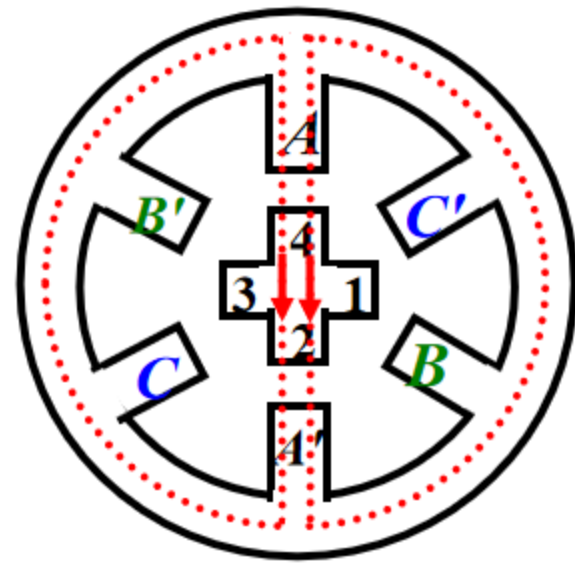
A相通电使转子1、3齿和AA'对齐。



B相通电，转子2、4齿和B相轴线对齐，相对A相通电位置转30°；



C相通电，转子1、3齿和C相轴线对齐，相对B相通电位置转30°



A相再通电，转子2、4齿和A相轴线对齐，相对C相通电位置转30°；





# 1、步进电动机工作原理

## 一、三相单三拍

这种工作方式，三相绕组中每次只有一相通电，而且，一个循环周期共包括三个脉冲，所以称三相单三拍。

### 三相单三拍的特点：

- (1) 每来一个电脉冲，转子转过  $30^\circ$ 。此角称为步距角，用  $\theta_b$  表示。
- (2) 转子的旋转方向取决于三相线圈通电的顺序，改变通电顺序即可改变转向。
- (3) 单三拍在切换时容易引起失步，容易引起在平衡位置振荡。

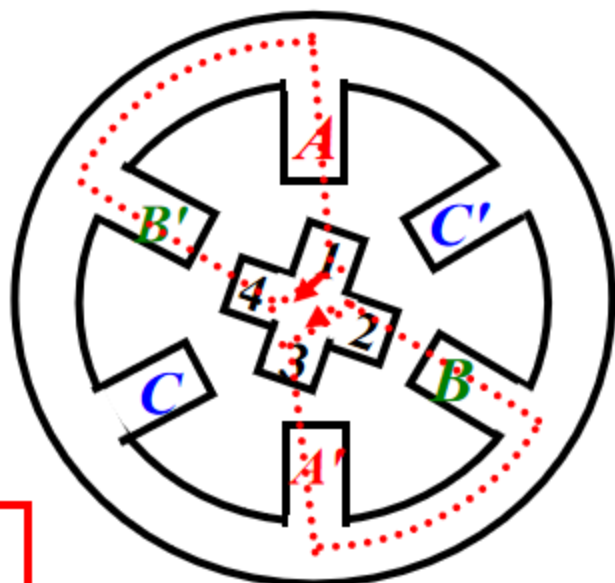


# 1、步进电动机工作原理

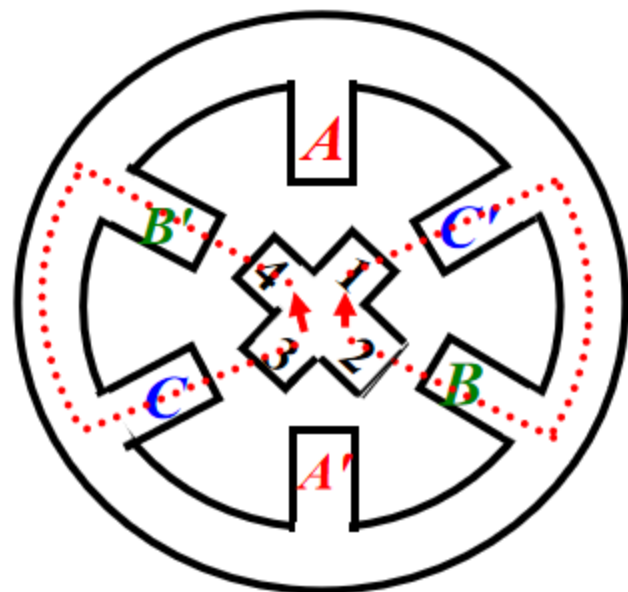
## 二、三相双三拍

三相绕组的通电顺序为：

$AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB$  共三拍，每拍转子旋转 $30^\circ$ 。



$AB$ 通电



$BC$ 通电

这种模式在切换时，  
总是有最少一组定子  
绕组通电。



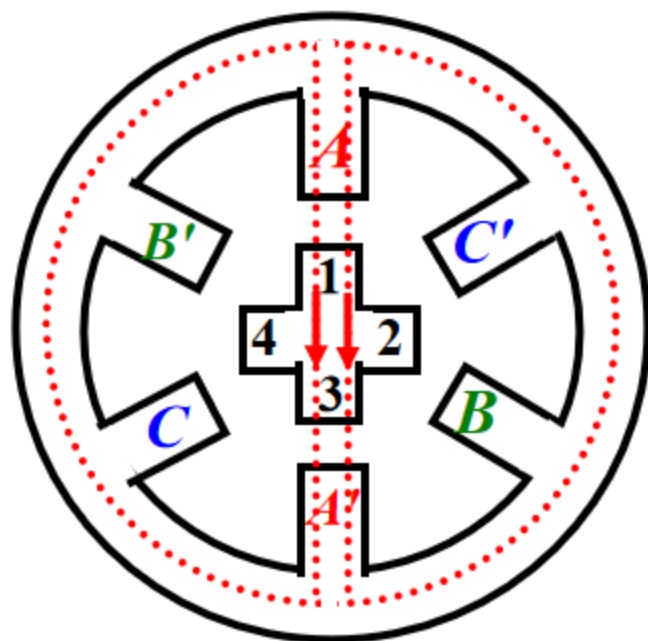
# 1、步进电动机工作原理

## 三、三相单双六拍

三相绕组的通电顺序为：

$A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$  共六拍。

A相通电：

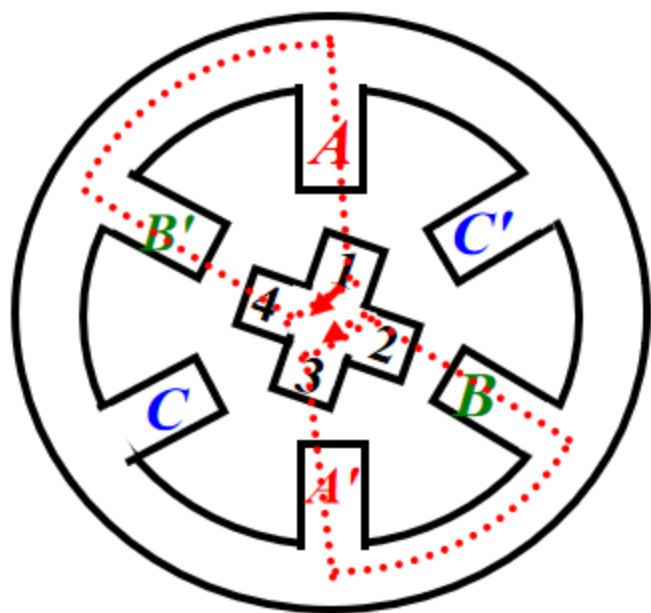




# 1、步进电动机工作原理

## 三、三相单双六拍

$A$ 、 $B$  相同时通电:



(1)  $BB'$  磁场对 2、4 齿有磁拉力，该拉力使转子顺时针方向转动。

(2)  $AA'$  磁场继续对1、3齿有拉力。所以转子转到两磁拉力平衡的位置上。相对 $AA'$  通电，转子转了 $15^\circ$



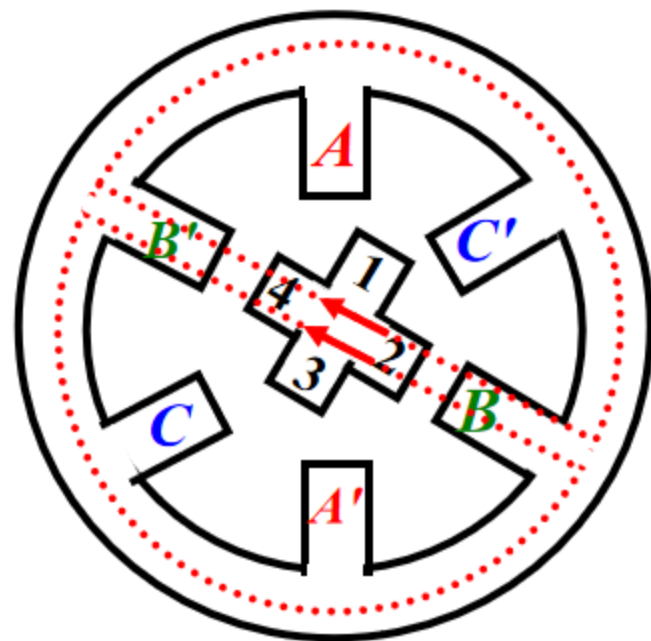
# 1、步进电动机工作原理

## 三、三相单双六拍

B 相通电:

转子2、4齿和B相对齐，又转了 $15^\circ$ 。

每个循环周期，有六种通电状态，  
所以称为三相六拍，步距角为 $15^\circ$ 。

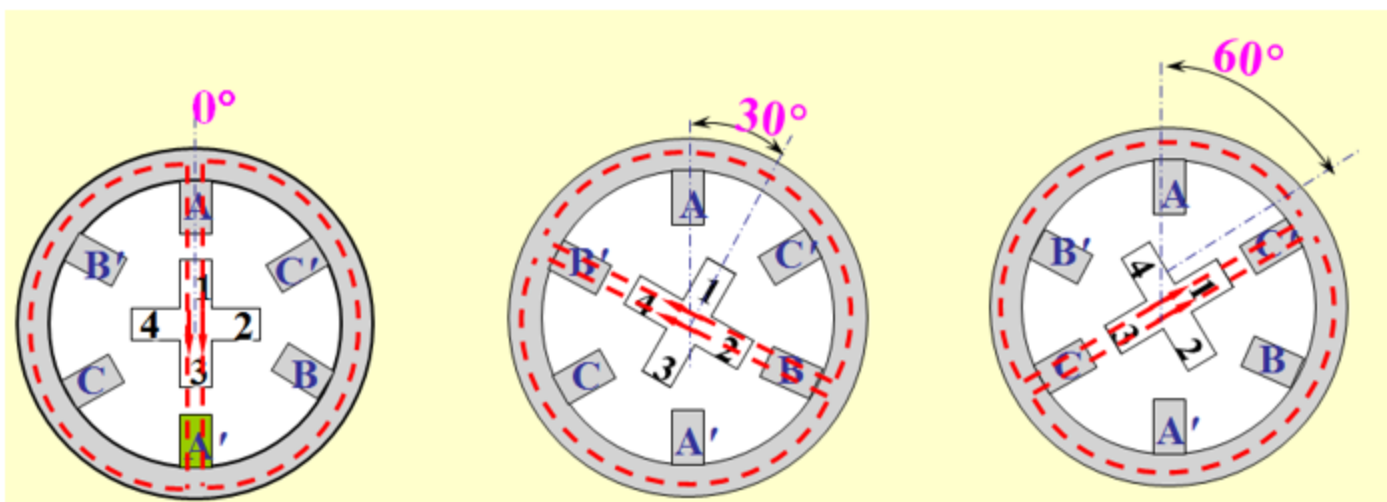


以上三种工作方式，三相双三拍和三相单双六拍较三相单三拍稳定，因此较常采用。



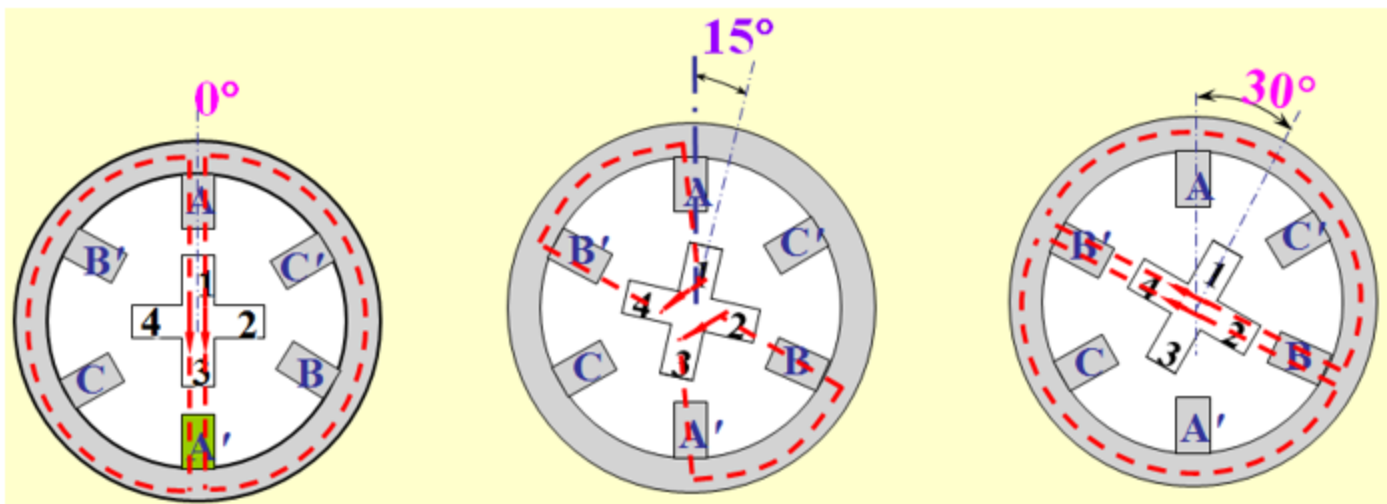
# 1、步进电动机工作原理

## 步进电机



三相单三拍

错齿是使步进电机旋转的根本原因



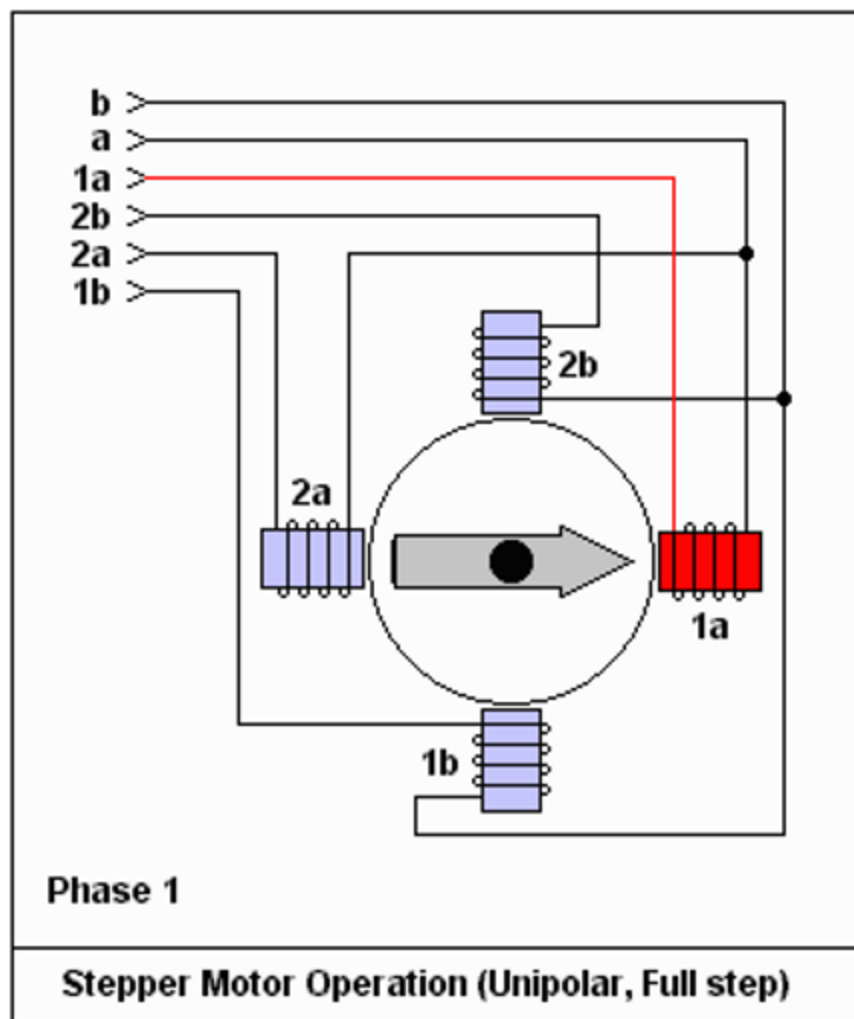
三相单双六拍





# 1、步进电动机工作原理

## 步进电机



Clockwise Rotation ↓

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
8	0	0	0	1

图1.6 步进电机动态图单拍



# 1、步进电动机工作原理

## 步进电机

Clockwise Rotation ↘

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	1	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

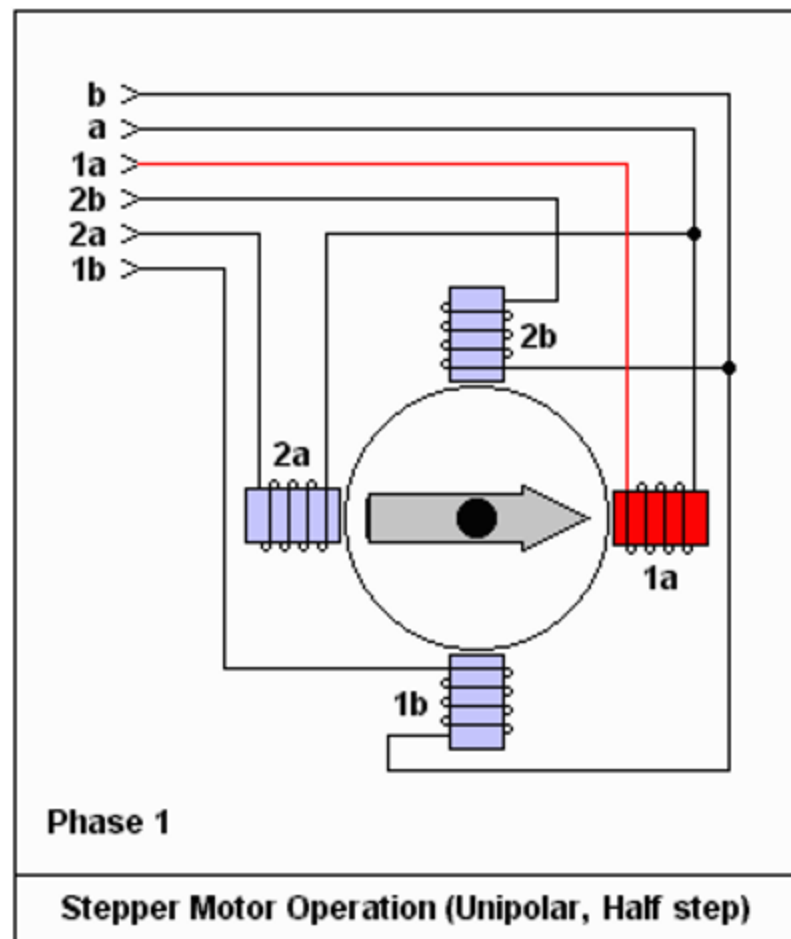


图1.7 步进电机动态图单双拍



# 1、步进电动机工作原理

## 步进电机原理:

步进电机是将脉冲信号转换成线位移或角位移的电机。每来一个电脉冲，电机转动一个角度，带动机械移动一小段距离。

特点： (1) 来一个脉冲，转一个步距角。

(2) 控制脉冲频率，可控制电机转速。

(3) 改变脉冲顺序，改变转动方向。

(4) 角位移量或线位移量与电脉冲数成正比。





# 1、步进电动机工作原理

步进电机的运行特性由下列条件决定：

- \* 电动机各相绕组的接通次序  $\longrightarrow$  运动方向
- \* 输入脉冲数  $\longrightarrow$  角位移
- \* 脉冲频率  $\longrightarrow$  运行速度

步进电机系统广泛用于数字控制系统，如数控机床，家庭、办公室自动化等领域。在小功率、适于位置开环控制的场合因其简单、低成本而具有优势。



# 1、步进电动机工作原理

## • 优点

1. 脉冲控制，适用于数字化计算机控制。脉冲一位移，脉冲频率—转速；
2. 不用电刷和换向器，结构简单, 坚固耐用，免维护；
3. 无累积定位误差（一般步进电机的精度为步进角的3-5%，且不累积）；
4. 控制原理和控制方法简单，构成低成本的开环位置/速率伺服系统；



# 1、步进电动机工作原理

- 缺点

1. 固定步长（步距角）的增量式运动；
2. 效率低，电机过热（机壳可达90℃）；
3. 不能直接投切电网，需要专用驱动器；
4. 功率小，不宜驱动大的机械装置（惯量/阻力矩）；
5. 响应速度低；
6. 定位有误差，只适于中/低精度要求的位置/速度伺服；
7. 在某些运行范围内发生振荡。





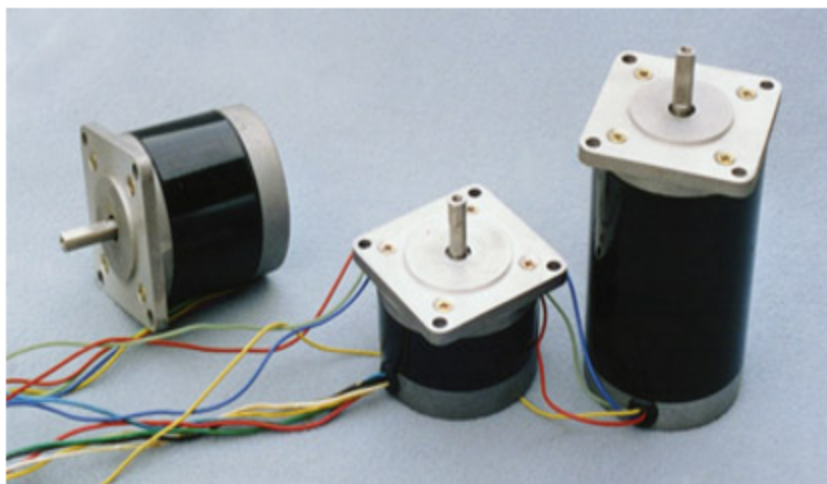
# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用



## 2、步进电动机的分类与结构

输入脉冲相序  $\longrightarrow$  运动方向  
输入脉冲个数  $\longrightarrow$  角位移  
输入脉冲频率  $\longrightarrow$  运行速度



步进电动机的分类:

工作原理 { 反应式 (已经被淘汰)  
          { 永磁式 (已经被淘汰)  
          { 混合式

输出转矩大小 { 伺服步进电机  
                  { 功率步进电机

励磁相数 二、三、四、五、六、八相等



## 2、步进电动机的分类与结构

按照结构特征和工作原理，步进电机主要分类为

- 反应式/磁阻式 (VR-variable reluctance)
- 永磁式 (PM-permanent magnet)
- 混合式 (HB-hybrid)



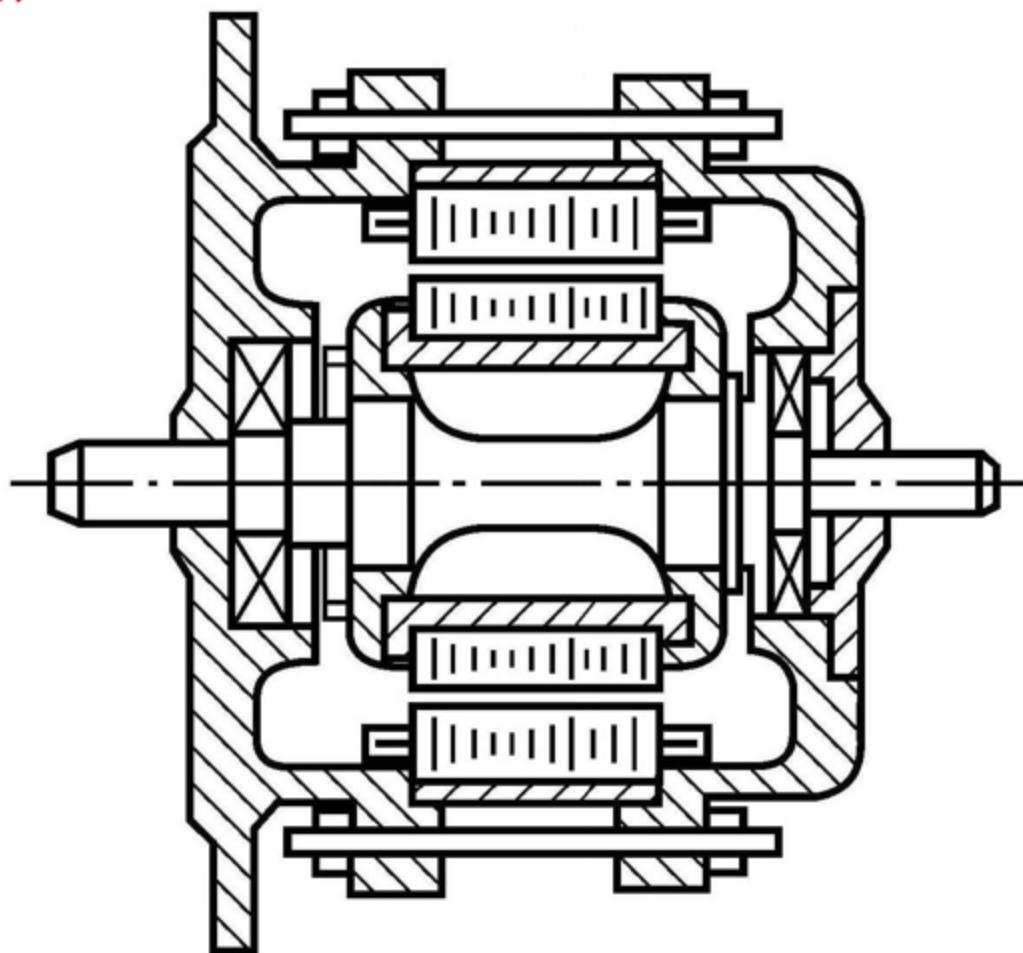
## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

### 磁阻式步进电动机的结构特点

#### 1. 单段式

##### 基本结构

- 定子：铁心，绕组，端盖，外壳。
- 转子：铁心，轴。



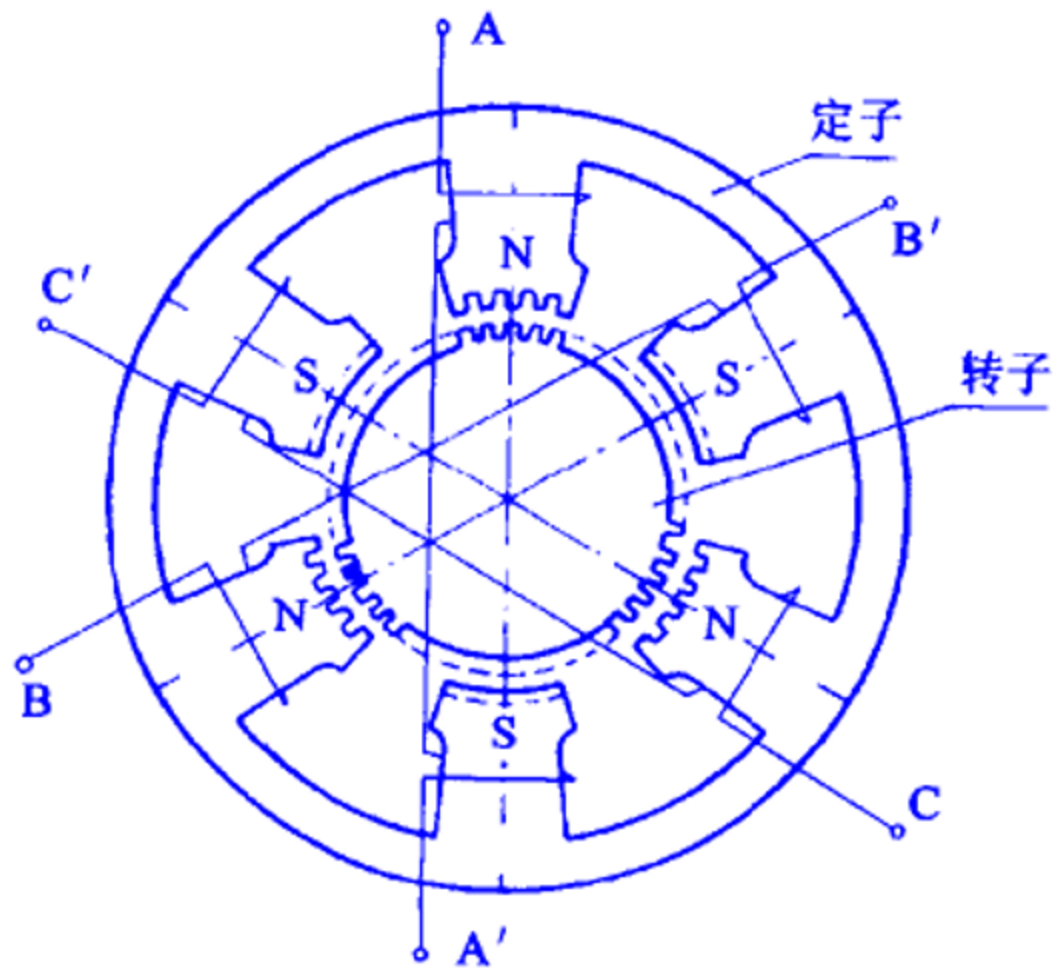


## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

实用反应式步进电机的结构为：

定、转子铁心由软磁材料或硅钢片叠成凸极结构，定、转子磁极上均有小齿，定、转子的齿距角相等。

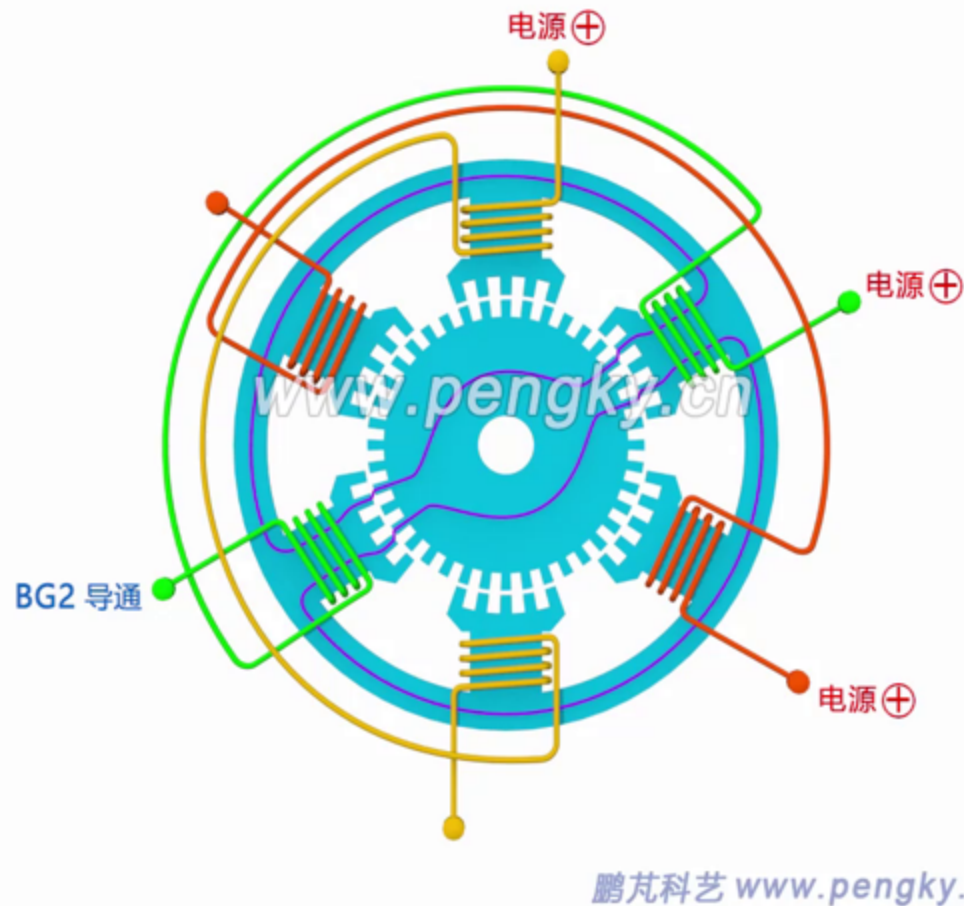
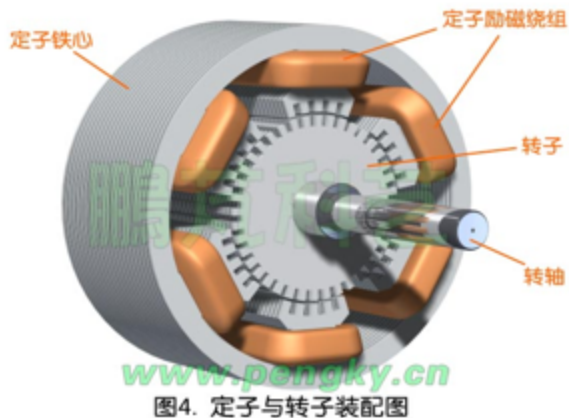
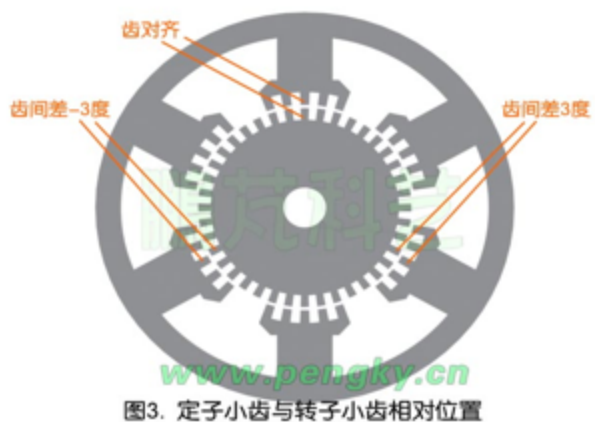
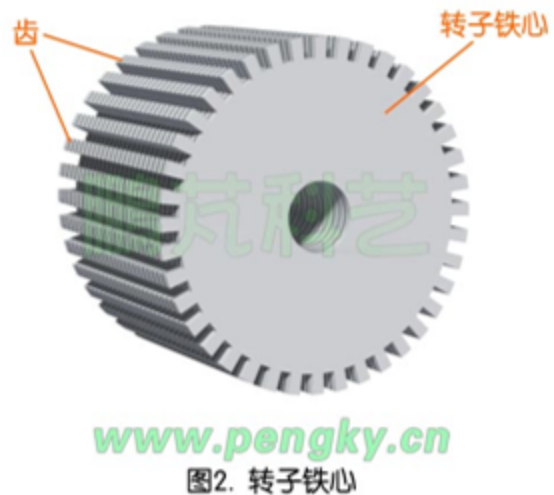
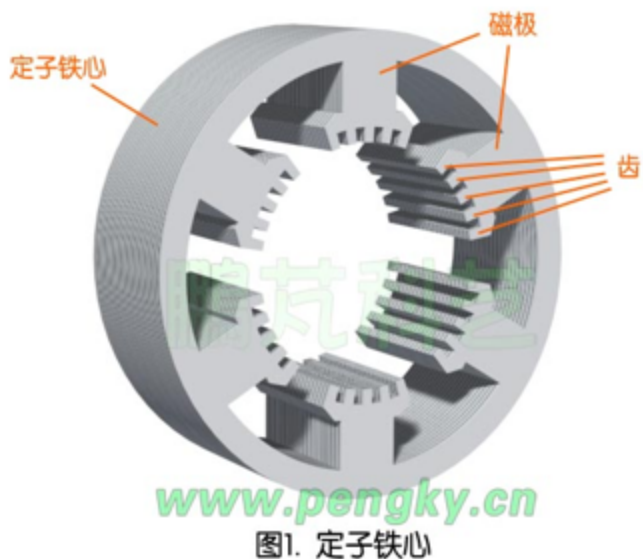
如图：定子六个磁极，磁极上套有三相控制绕组，每两个相对的磁极为一相，组成一相绕组，转子上没有绕组。



错齿是使步进电机旋转的根本原因



## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式



## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

### 定子详细结构

- 软磁磁极，磁极有绕组。
- 绕组对称布置，电磁转矩是力偶矩；

绕组数=磁极数。

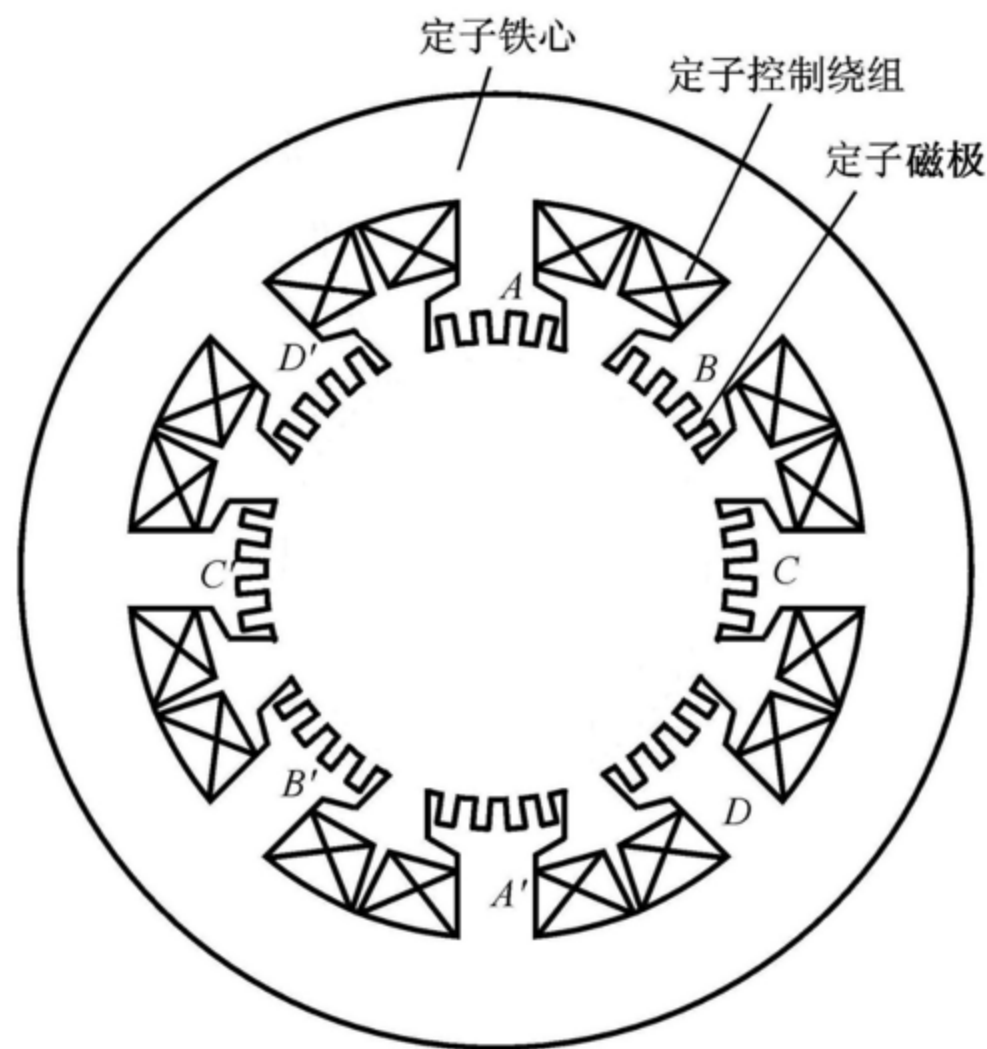
8个磁极，8个绕组。

- 绕组 $m$ 相，每相两个绕组，

串联于一条直径两端。

- 则： $2p=2m \Rightarrow p=m$

- 磁极表面有均布的小齿。



## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

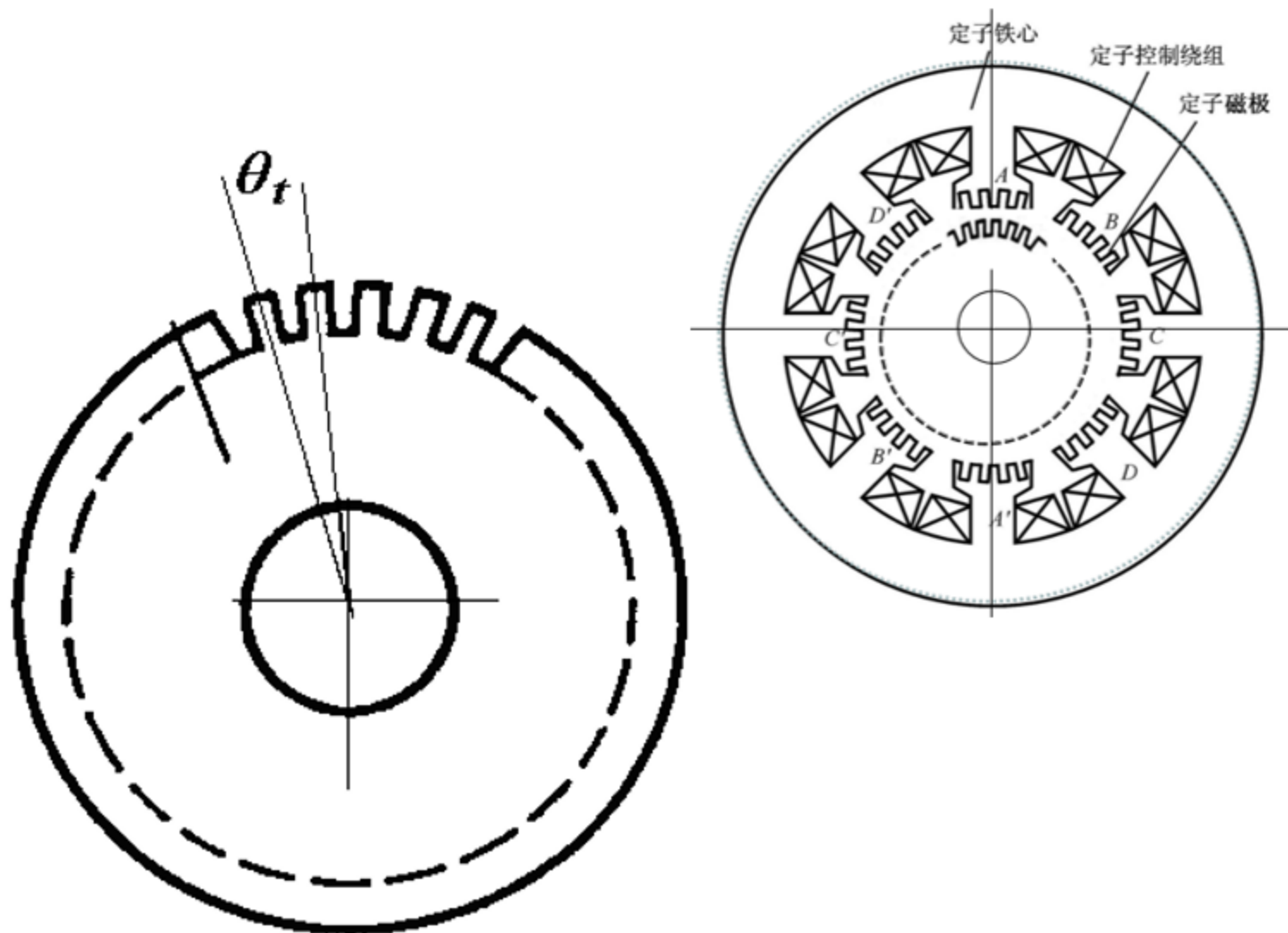
### 转子详细结构

- 没有绕组。
- 软磁铁心，
- 外圆上有小齿，  
与定子小齿齿距完全相同。

- 齿距角：

两齿中心线的夹角

$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_r}$$





## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

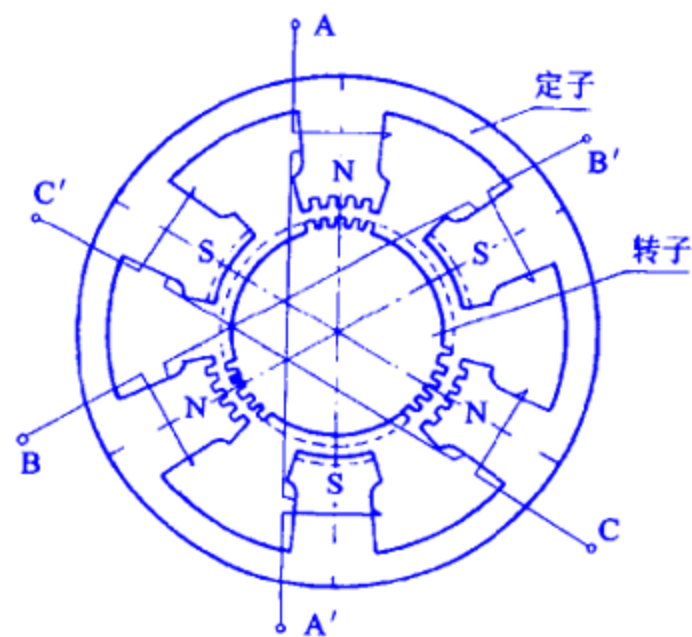
定、转子齿距相等，且齿数配合要恰当。实际步进电机的步距角较小( $0.36-3^\circ$ )，所以其转子齿数较多。一般两相电机转子50个齿，三相电机40或80个齿。

如：三相电机转子齿数  $Z_r = 40$ ，

$$\text{齿距角} \frac{360^\circ}{Z_r} = \frac{360^\circ}{40} = 9^\circ$$

$$\text{步距角} \frac{9^\circ}{N}, \quad \frac{9^\circ}{3} = 3^\circ$$

$$\frac{9^\circ}{6} = 1.5^\circ$$



$Z_r$  电机转子齿数

$N$  拍数，一个周期的通电状态数量



## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

### 对转子齿数的规定

- 若某一磁极下定、转子的齿对齐，则同一相的另一个磁极下的定、转子的齿也是对齐的。
- 相邻极下的定、转子齿之间错开转子齿距的 $1/m$ 。

$$\frac{Z_r}{2p} = K \pm \frac{1}{m} \Rightarrow Z_r = 2pK \pm 2$$

其中  $K$  为正整数

$Z_r/2p$  为磁阻式步进电动机每一个极距下(即相邻的定子磁极轴线间)的转子齿数

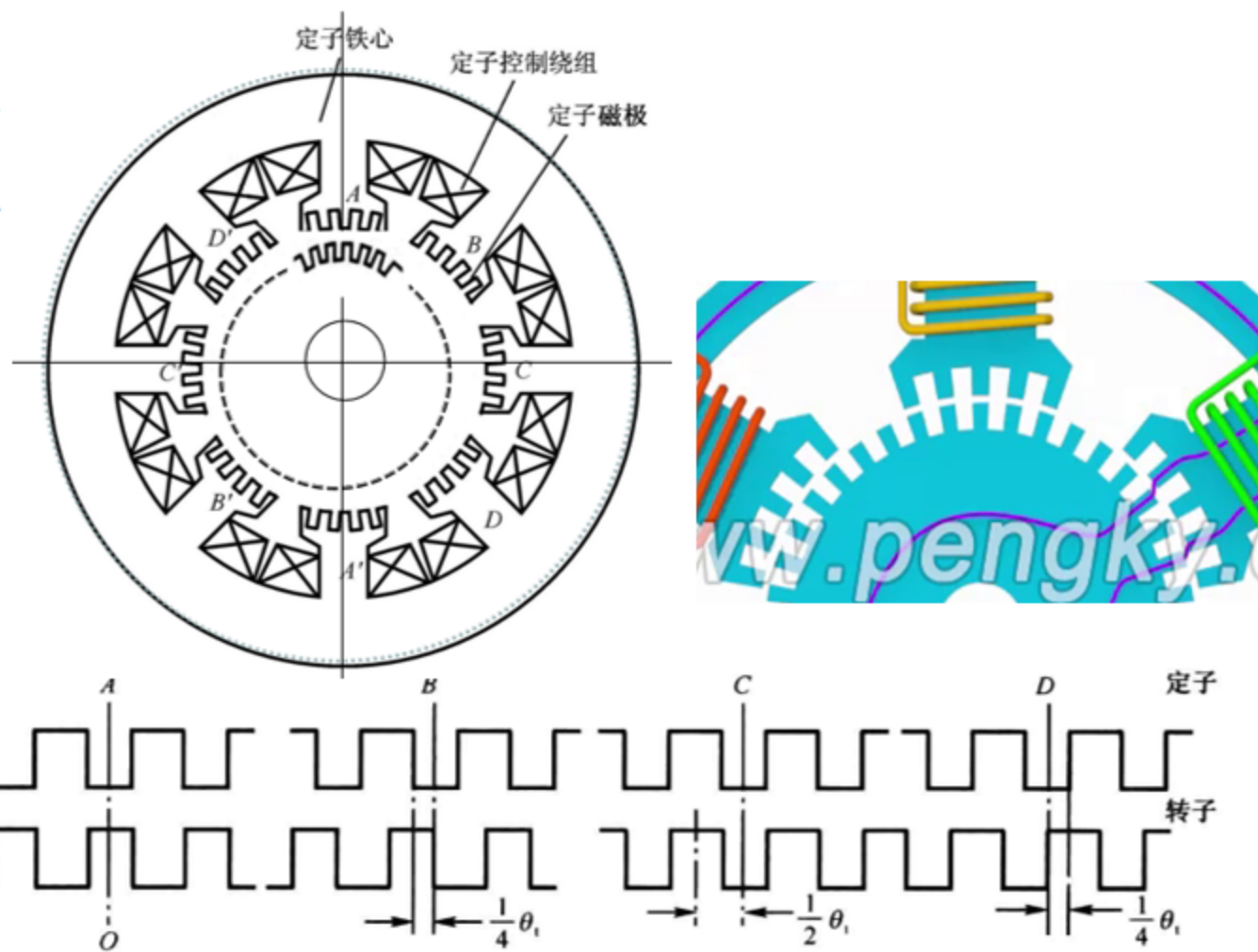


图 5-5 A 相通电时定、转子齿的相对位置



## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

步距角:

$$\theta_b = \frac{\theta_t}{N} = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

其中  $N$  为每个通电周期拍数,  $N=km$ ,  $k=1$  单拍制 或  $k=2$  双拍制。

$k=1$  是对应的步距角称为整步距角,  $k=2$  是对应的步距角称为半步距角

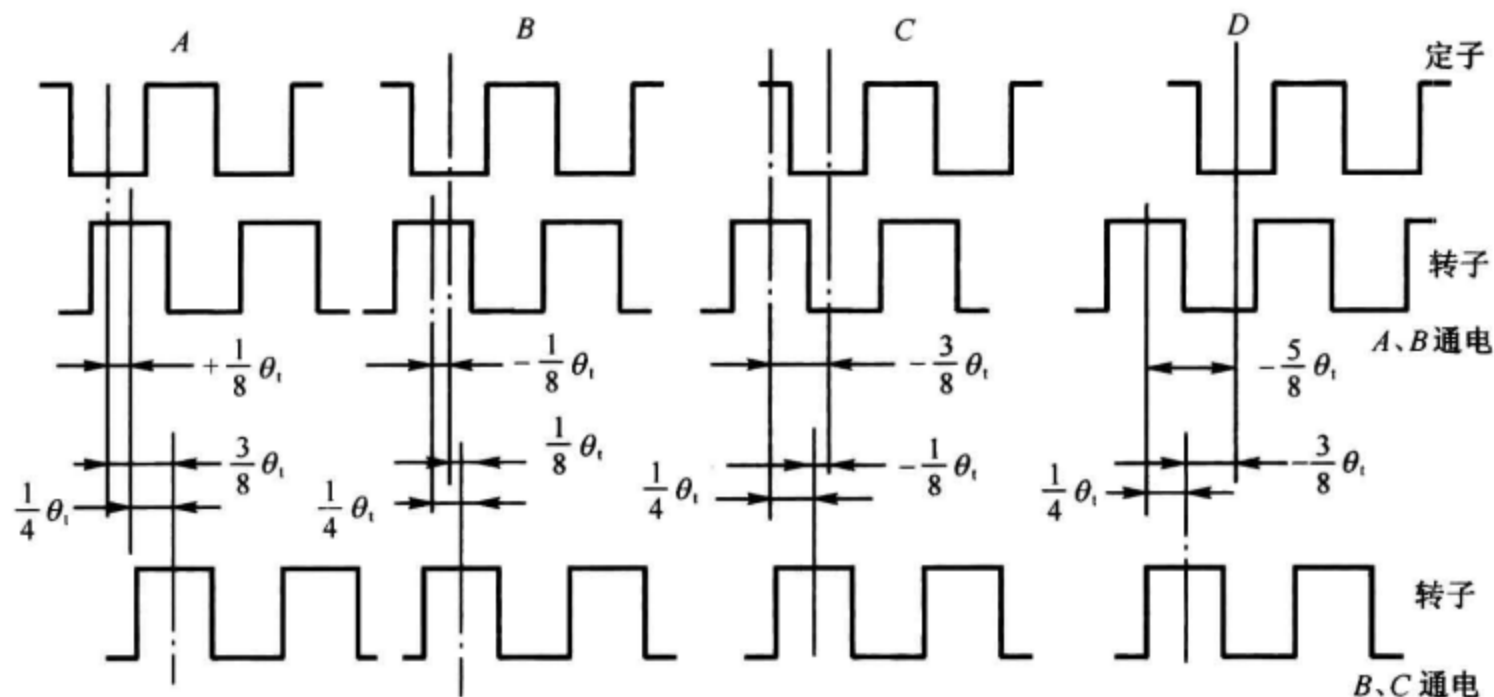


## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

双向通电下的平衡位置

四相绕组的通电顺序为：

**$AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DA \rightarrow AB$**  共四拍。



每次运行一个步距角 $\theta_b$

图 5-6 双相通电时的平衡位置





## 2、步进电动机的分类与结构-磁阻式

### 2. 多段式

多段式又称为轴向分相式。绕组按所属相序分段放。按其磁路的特点不同，又可分为轴向磁路多段式和径向磁路多段式两种。多段式结构复杂，转子可细长，减小惯量。

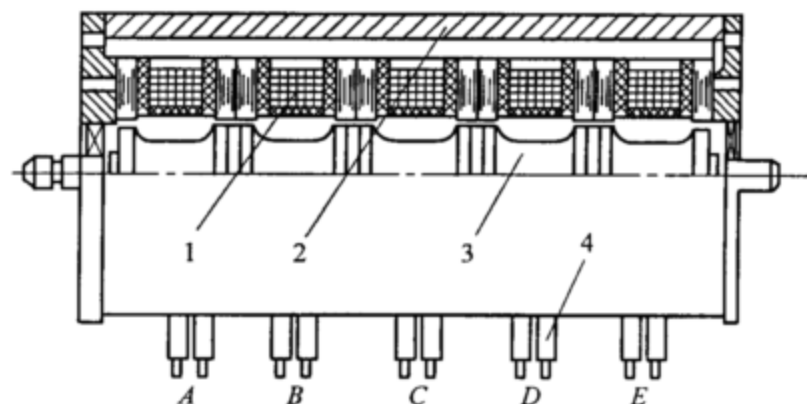
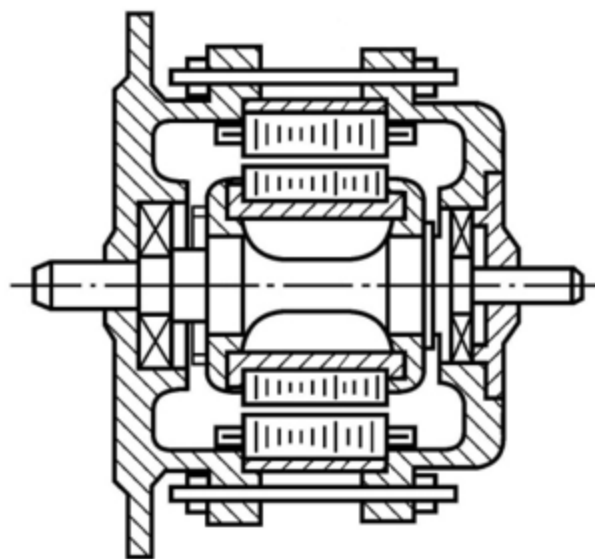
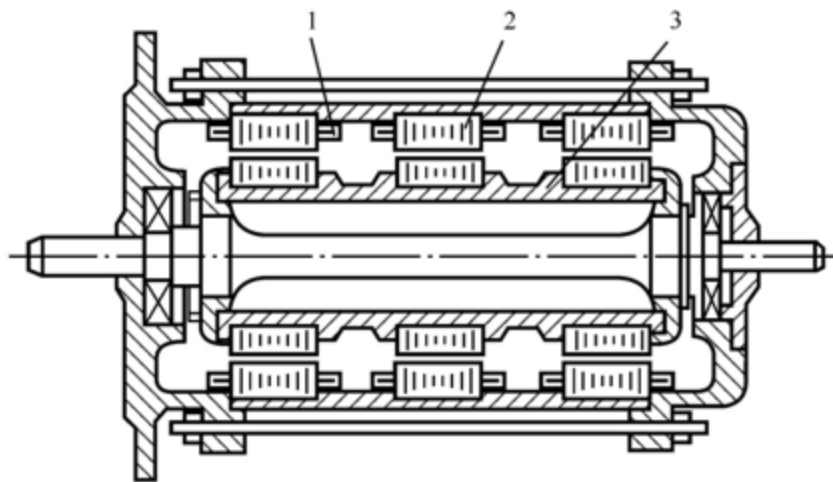


图 5-2 多段式轴向磁路磁阻式步进电动机  
1-线圈 2-定子 3-转子 4-引线

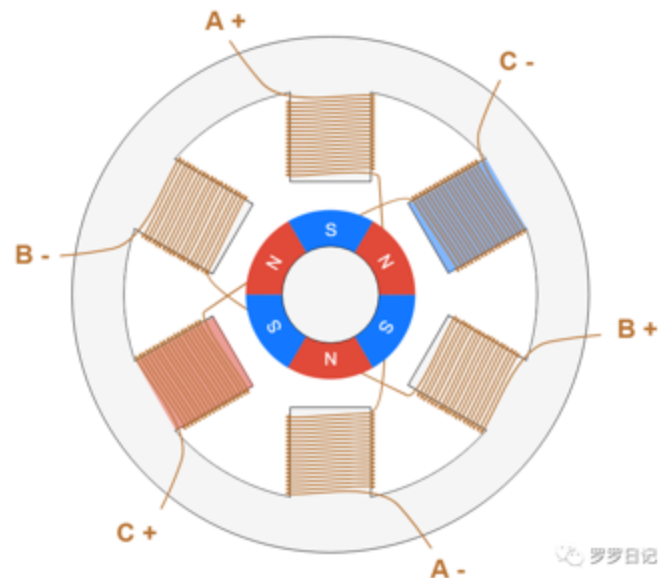
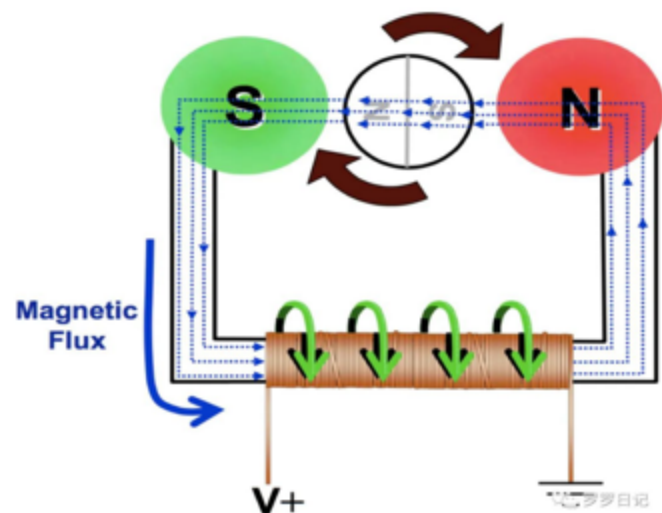
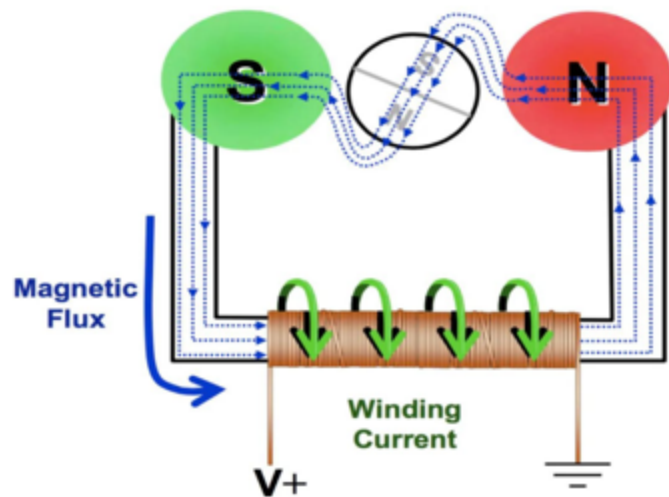
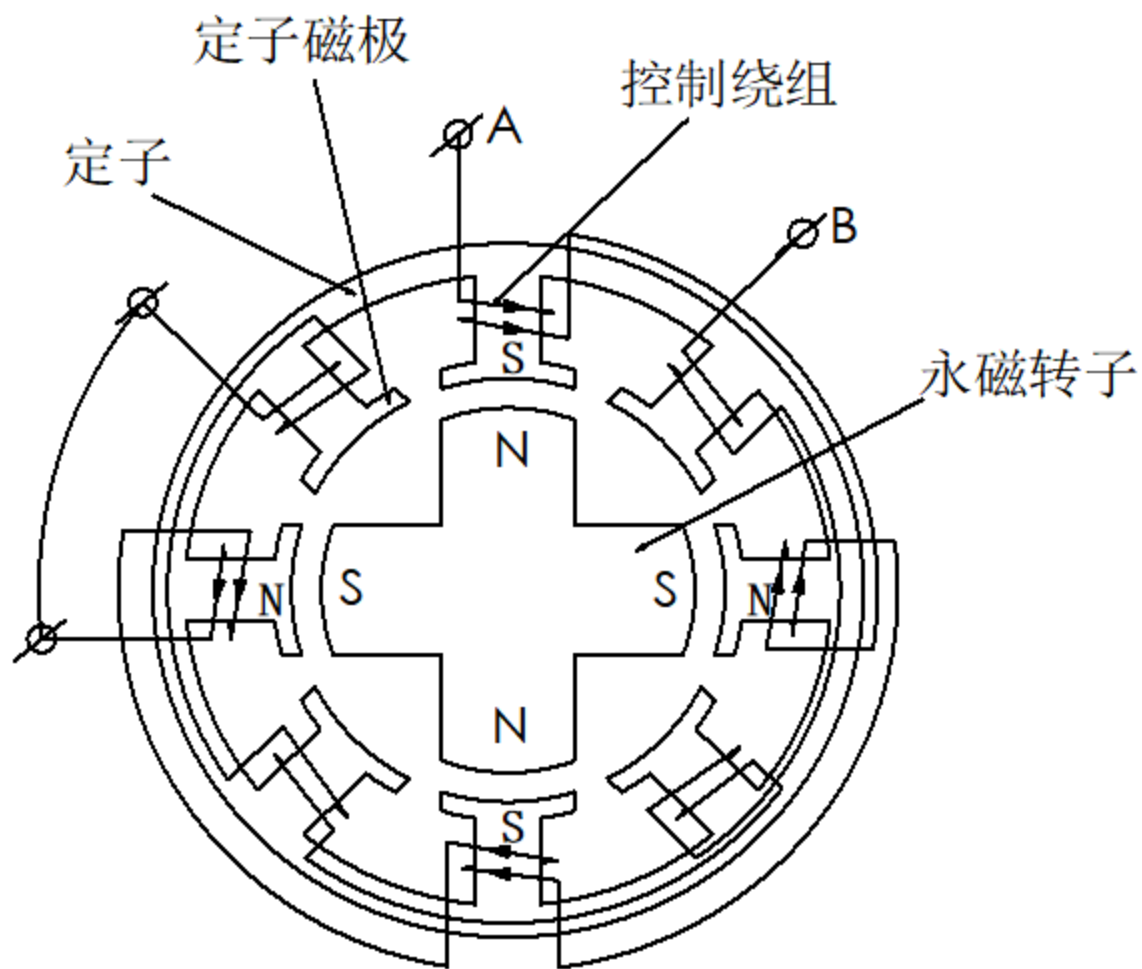
反应式步进电机力矩小，动态性能差。





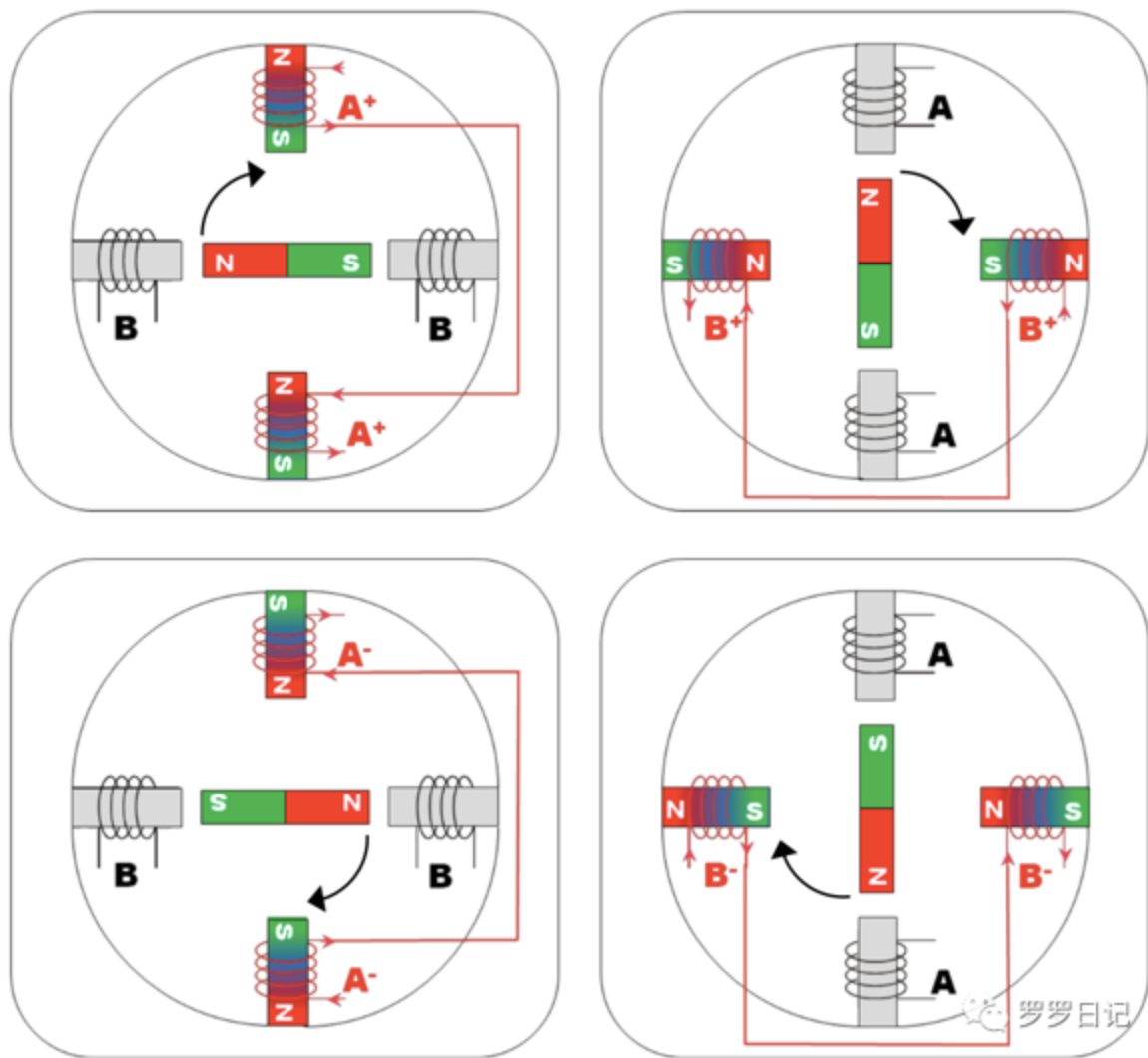
## 2、步进电动机的分类与结构-永磁式

### 永磁式步进电机



## 2、步进电动机的分类与结构-永磁式

### 永磁式步进电机



### • 永磁式步进电机的特点:

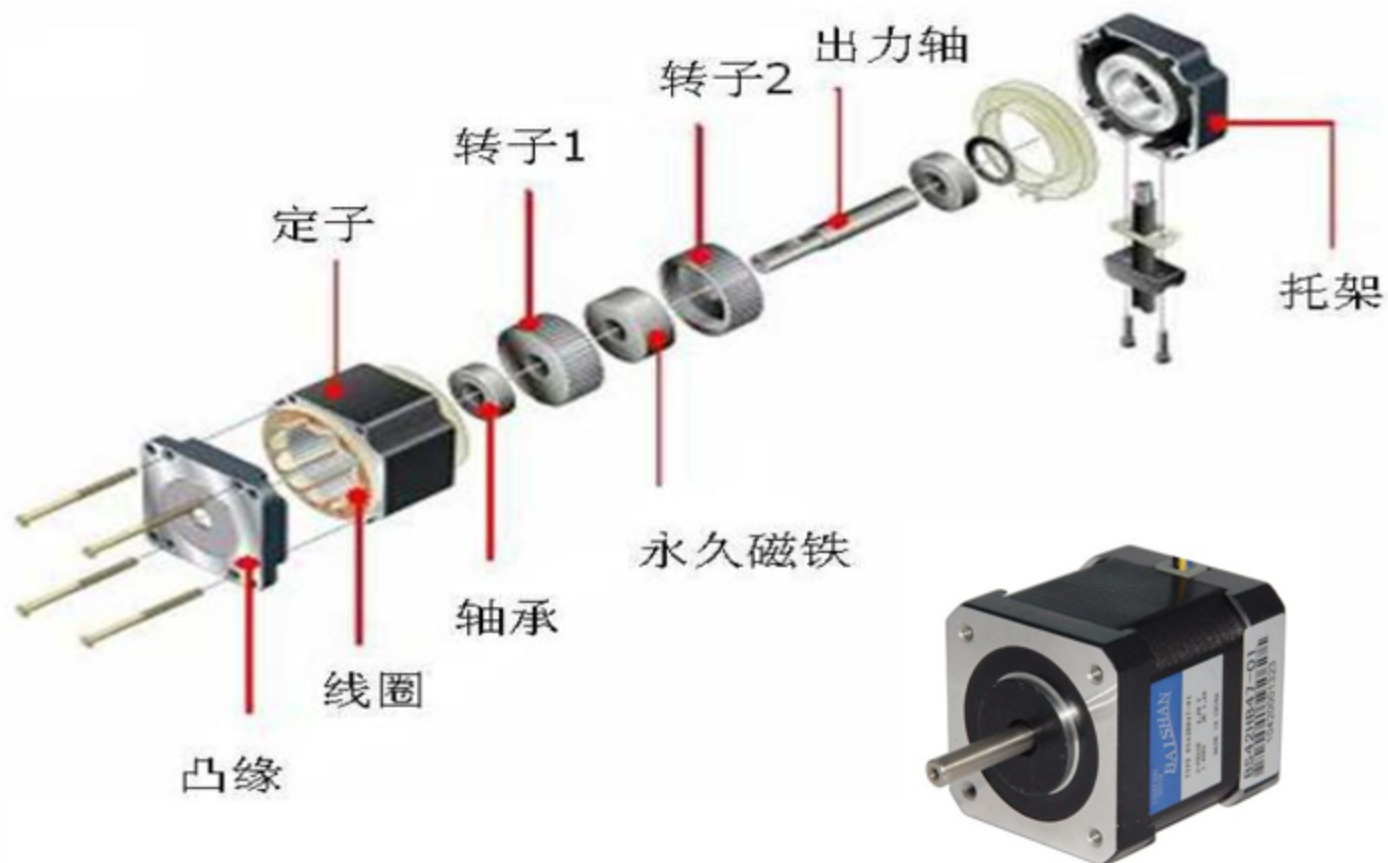
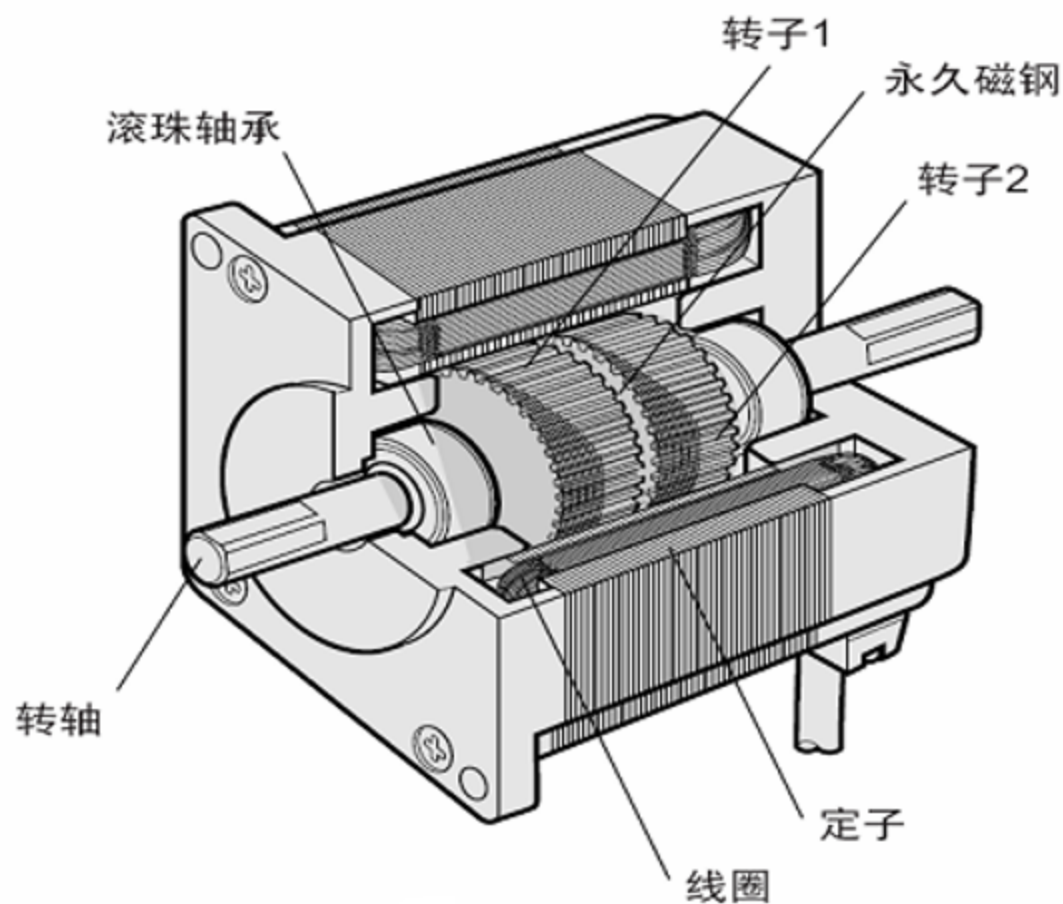
- 1) 齿距角大，导致步距角大；
- 2) 效率高；
- 3) 阻尼特性好；
- 4) 断电时自锁/定位转矩；
- 5) 启动频率低

永磁式步进电机现在已经不常用了，  
这里有一个大致了解，不需要掌握。



## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

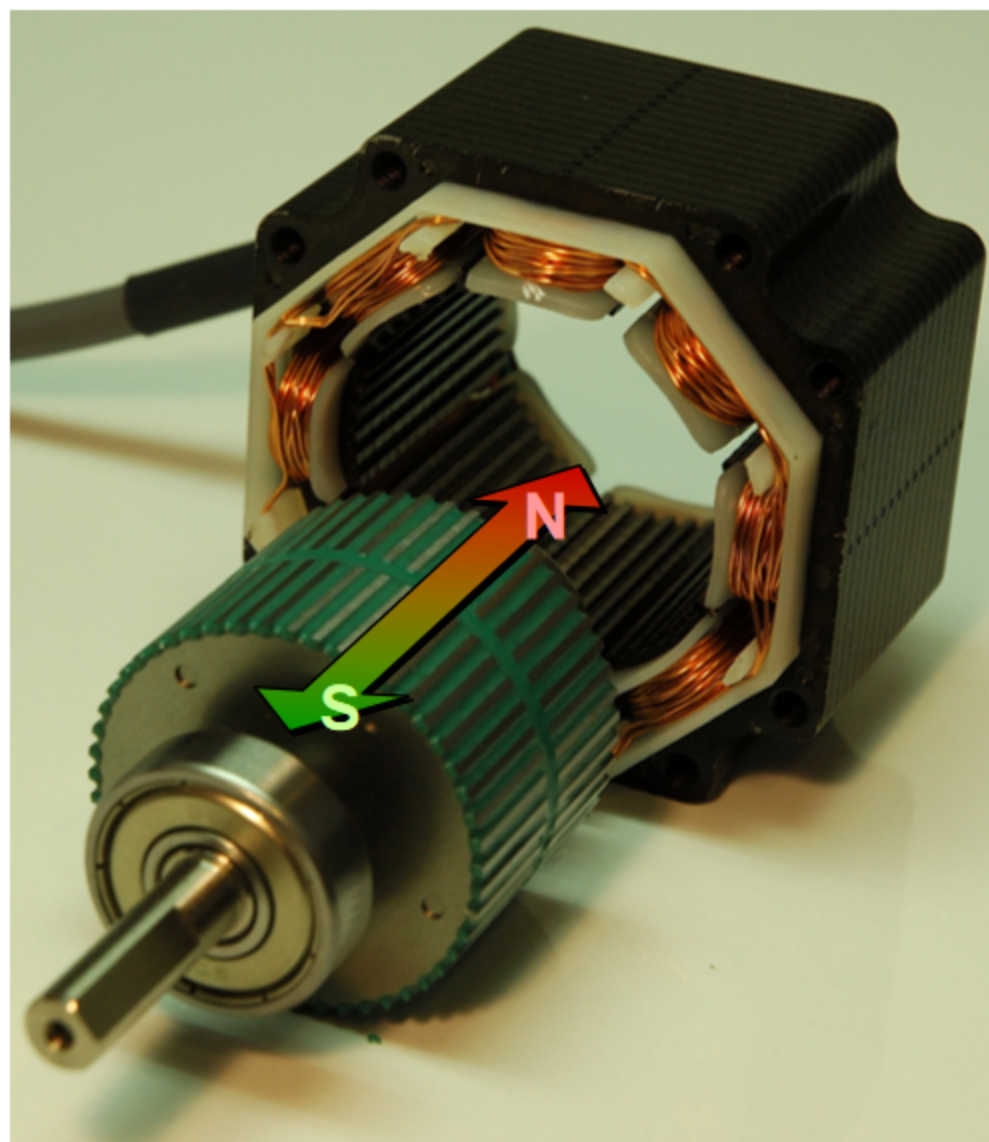
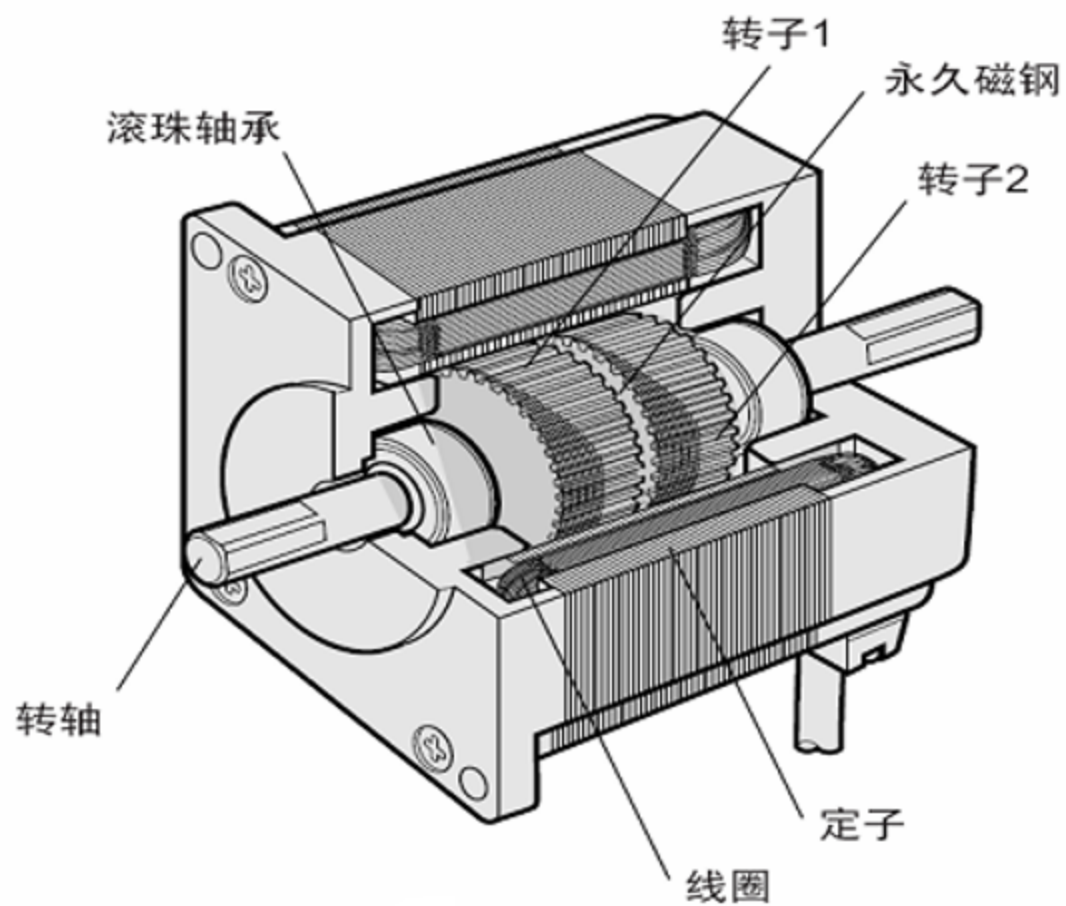
### 混合式步进电机





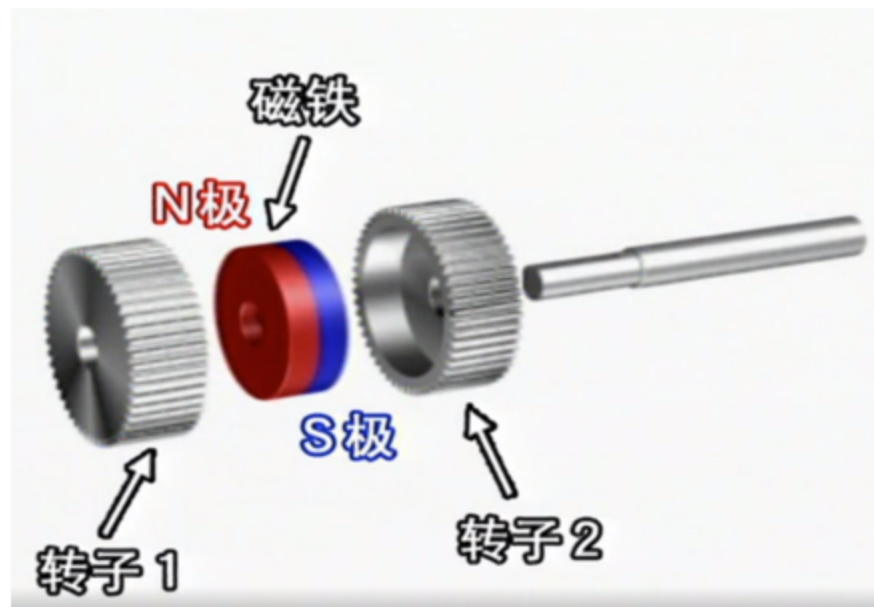
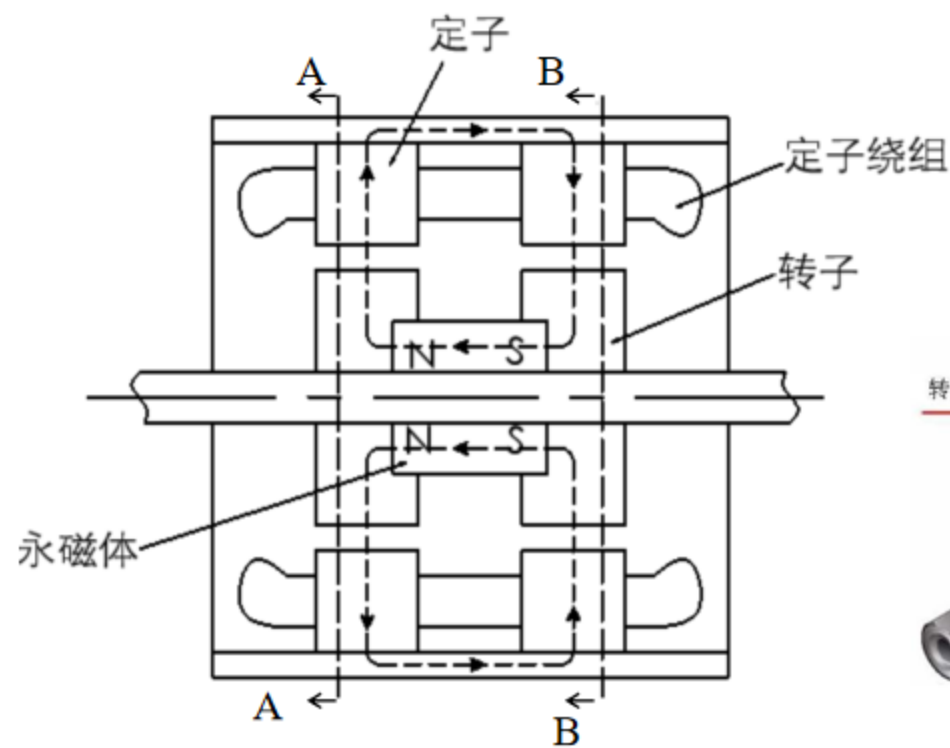
## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

### 混合式步进电机



## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

### 混合式步进电机



**转子**沿轴向分为三段，中间一段是永磁体，轴向充磁。两端是软磁铁心，如钢作为磁轭套在前后位置，并做出小齿。

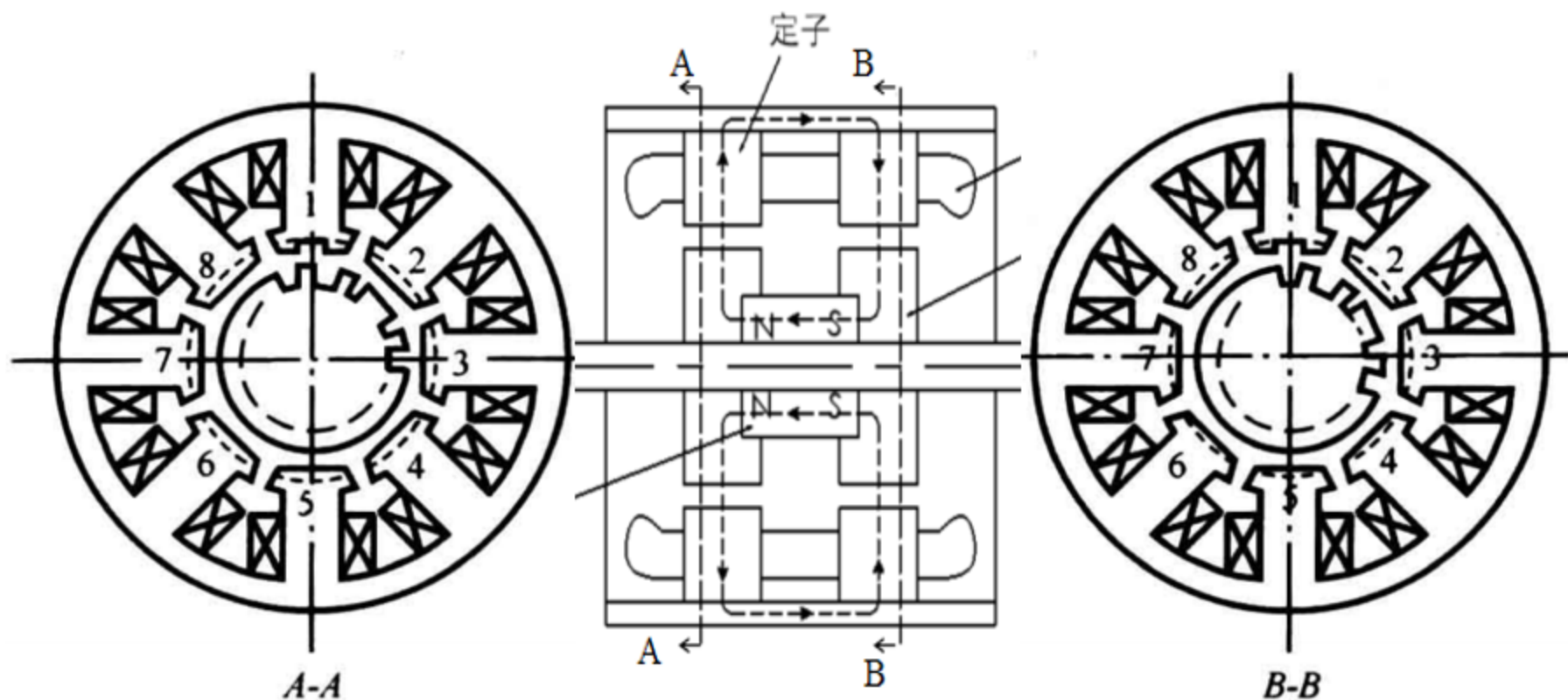
加工中**前后错开齿和槽**，工作时，磁轭上的小齿起作用，步距角小，出力大，综合了磁阻式与永磁体的优点。





## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

### 混合式步进电机



转子前后两端由软磁材料如钢作为磁轭套在中间永磁体段前后位置，并做出小齿。加工中前后错开齿和槽。

图 5-29 混合式步进电动机的结构



## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

### 混合式步进电机

转子轴向两端是固定的异性磁极。定子磁极极性由绕组通电方向决定，定子一个磁极轴向两端是同性磁极。定子同相绕组相邻磁极是异性磁极。例如，图5-30是图5-29中A-A、B-B剖面展开成直线的图形。定子A相有1、3、5、7四个磁极。A相通电，磁极1两端都是N极，3是S极，5是N极，7是S极。转子左端始终是N极，右端是S极。

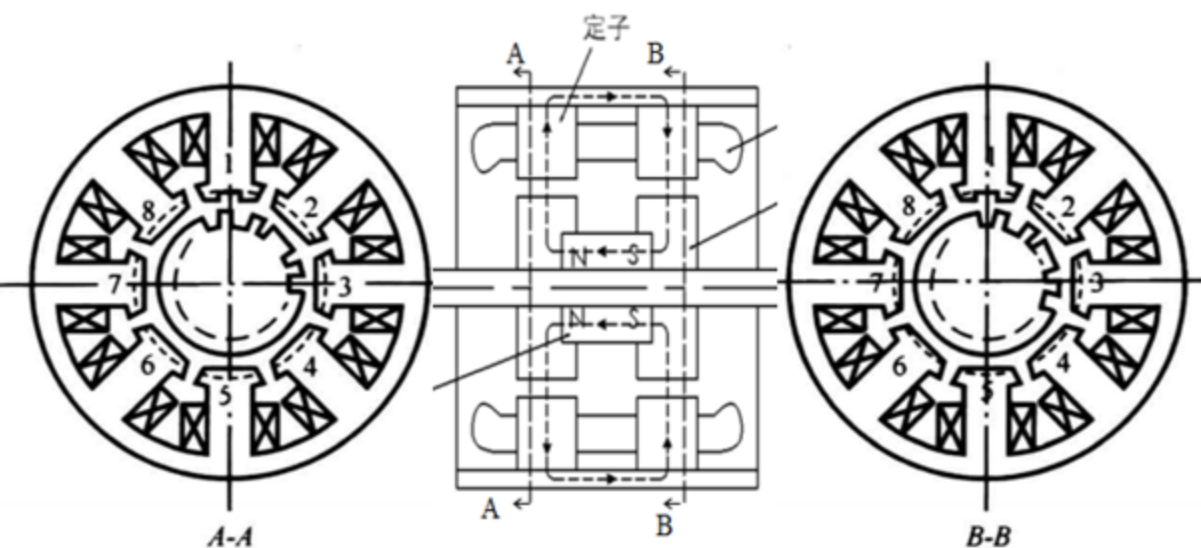


图 5-29 混合式步进电机的结构

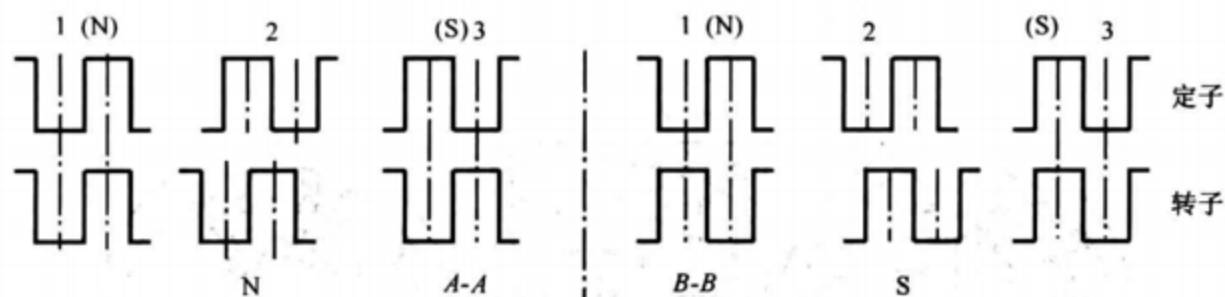


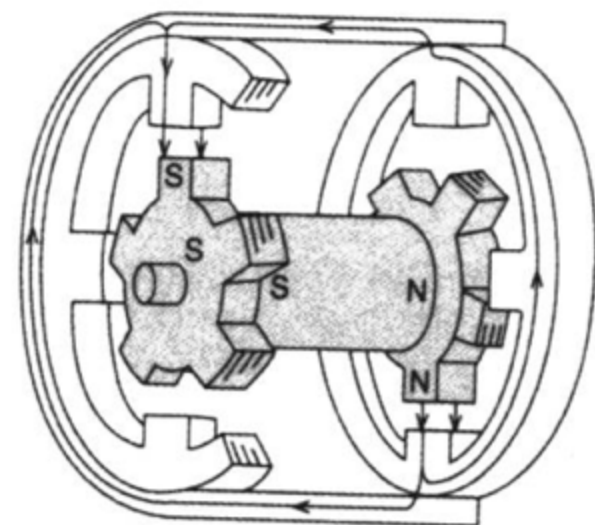
图 5-30 混合式步进电机的平衡位置

转子槽和定子槽对齐

(转子为N极)

转子齿和定子槽对齐

(转子为S极)



## 2、步进电动机的分类与结构-混合式

### 混合式步进电机

验证常见步进电机的极齿配合

( $P=km$ ,  $k$ 为正整数):

两相/四相步进电机:            8极-50齿  
(计算时用 $m=4$ )                16极-100齿

三相步进电机:            6极-40齿  
                                  9极-60齿  
                                  12极-80齿  
                                  12极-100齿

- 若某一磁极下定、转子的齿对齐
- 相邻极下的定、转子齿之间错开转子齿距的 $1/m$ 。

齿数关系 
$$\frac{Z_r}{P} = K \pm \frac{1}{m}$$

$P$  为磁极数

齿距角 
$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_r}$$

步距角 
$$\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

分析上述极齿配合，计算相应步进电机步距角。



## 2、步进电动机的分类与结构-基本概念

### 转速

每输入一个脉冲，电机转过  $\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$

即转过整个圆周的 $1/(Z_r N)$ ，也就是 $1/(Z_r N)$ 转，所以：

$$n = \frac{60 f}{Z_r N} \quad (rpm)$$

步距角一定，通电状态的切换频率越高，即脉冲频率越高，步进电动机的转速越高。脉冲频率一定，步距角越大、步进电动机的转速越高。



# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用





## 3、步进电动机的静特性

- 3.1 步进电机静特性分析的几个概念
- 3.2 单相通电时的矩角特性
- 3.3 单相通电时的矩角特性曲线族
- 3.4 多相通电时的矩角特性



### 3、步进电动机的静特性

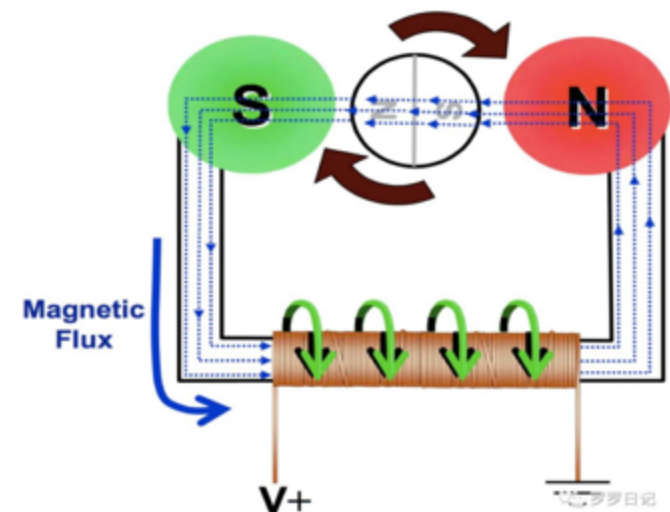
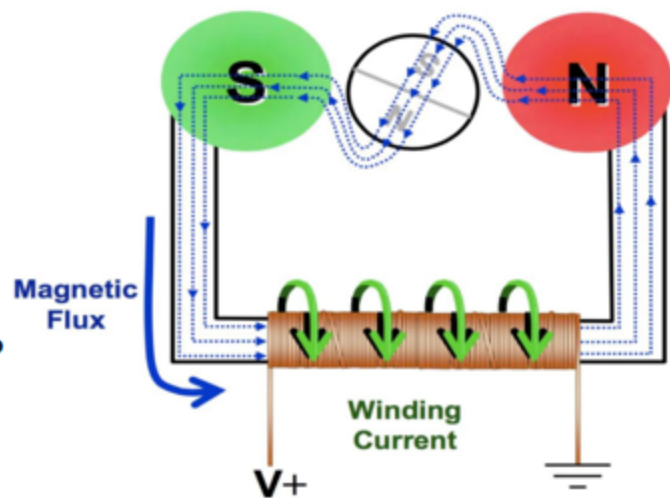
#### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

##### 1. 静态

绕组通电状态**保持不变**，并且转子保持静止的状态。

##### 2. 静转矩

步进电机静态时产生的电磁转矩。



## 2、步进电动机的分类与结构-基本概念

### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

#### 3. 电角度

齿距角:  $\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_r}$  电角度  $\theta_{te} = 360^\circ$

步距角:  $\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$  电角度  $\theta_{be} = \frac{360^\circ}{N}$

拍数:  $N=km$   $m$ :相数

$$k = \begin{cases} 1 & \text{单拍制} \\ 2 & \text{双拍制} \end{cases}$$



## 3、步进电动机的静特性

### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

#### 3. 电角度

- 用电角度表示齿距角

$$\theta_{te} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

- 用电角度表示的步距角为

$$\theta_{be} = \frac{\theta_{te}}{N} = \frac{360^\circ}{N} = \frac{2\pi}{N} \text{ rad}$$

以电角度表示的齿距角和步距角来分析电机转矩特性，剥离了电机具体相数、齿数的关联，更具通用性。



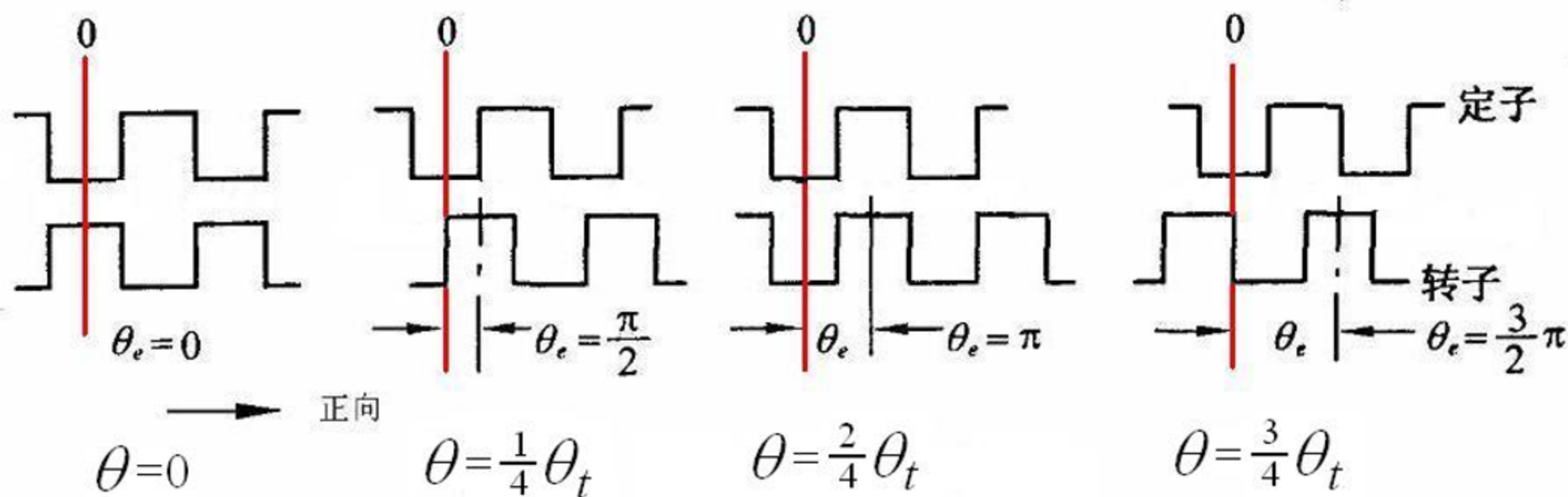
### 3、步进电动机的静特性

#### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

- 以定子齿轴线为零位的电角度

定子和转子齿轴线的夹角

$\theta$  与  $\theta_e$





# 3、步进电动机的静特性

## 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

### 4. 平衡位置

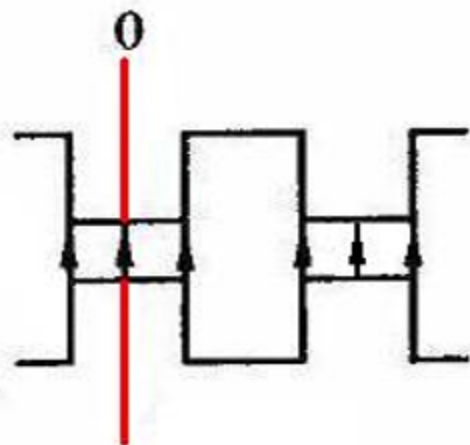
电磁转矩为零，静止不动。

- 单相通电时的平衡位置：

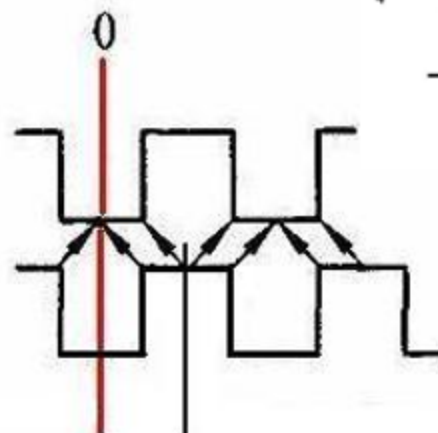
通电极下：

齿与齿对齐。

齿与槽对齐。



稳定平衡



不稳定平衡

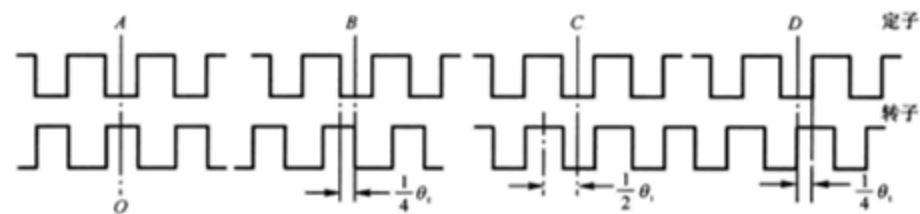


图 5-5 A 相通电时定、转子齿的相对位置

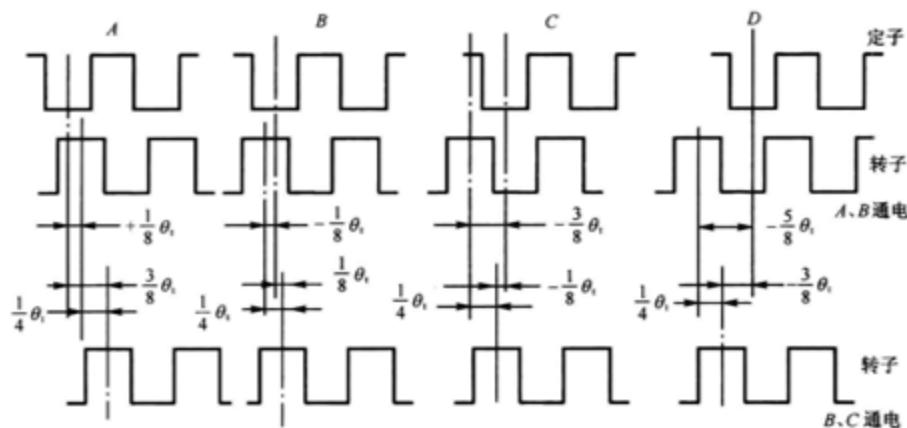


图 5-6 双相通电时的平衡位置



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

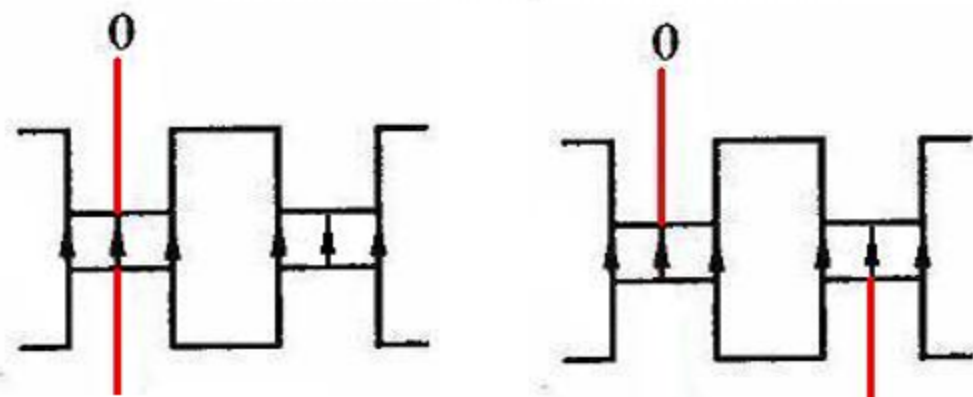
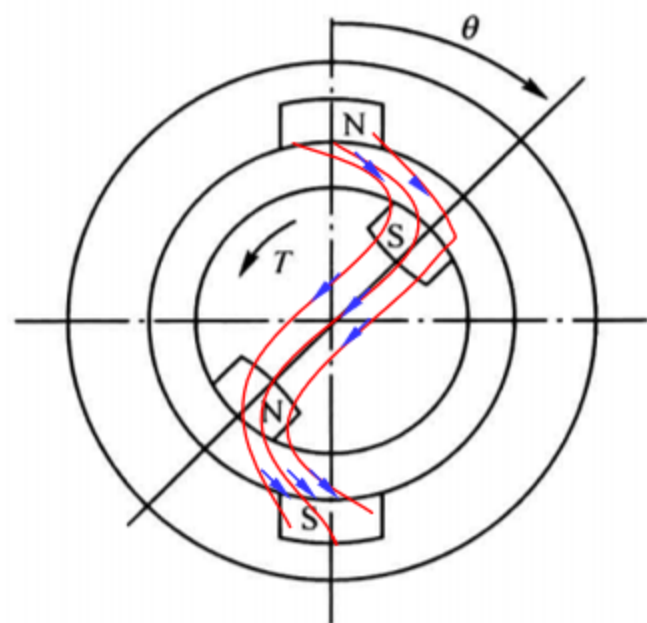
##### 5. 失调角 $\Delta\theta_e$ :

- 转子偏离稳定平衡位置的角度。
- 实际角度  $\theta_e$  减去 稳定平衡点的角度  $\theta_{e0}$

$$\Delta\theta_e = \theta_e - \theta_{e0}$$

- 单相通电时的稳定平衡点,

$$\theta_{e0} = 0, 2\pi, \dots$$



稳定平衡

稳定平衡



## 3、步进电动机的静特性

### 3.1 、步进电机静特性分析的几个概念

#### 6. 矩角特性：

表示的是静转矩与失调角的关系。

步进电机转子静止且绕组通以直流电时，由于失调角存在而引起的电磁转矩称为静态转矩，静转矩在一定范围内使失调角趋于零。

#### 7. 静态特性：

步进电机的静态特性主要指矩角特性。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.2 、单相通电时的矩角特性

定义：失调角与电磁转矩同方向为正方向

$\Delta\theta_e$	$0$	$\sim$	$\frac{\pi}{2}$	$\sim$	$\pi$	$\sim$	$\frac{3\pi}{2}$	$\sim$	$2\pi$
$T$	$0$	$-$	$-$	$-$	$0$	$+$	$+$	$+$	$0$

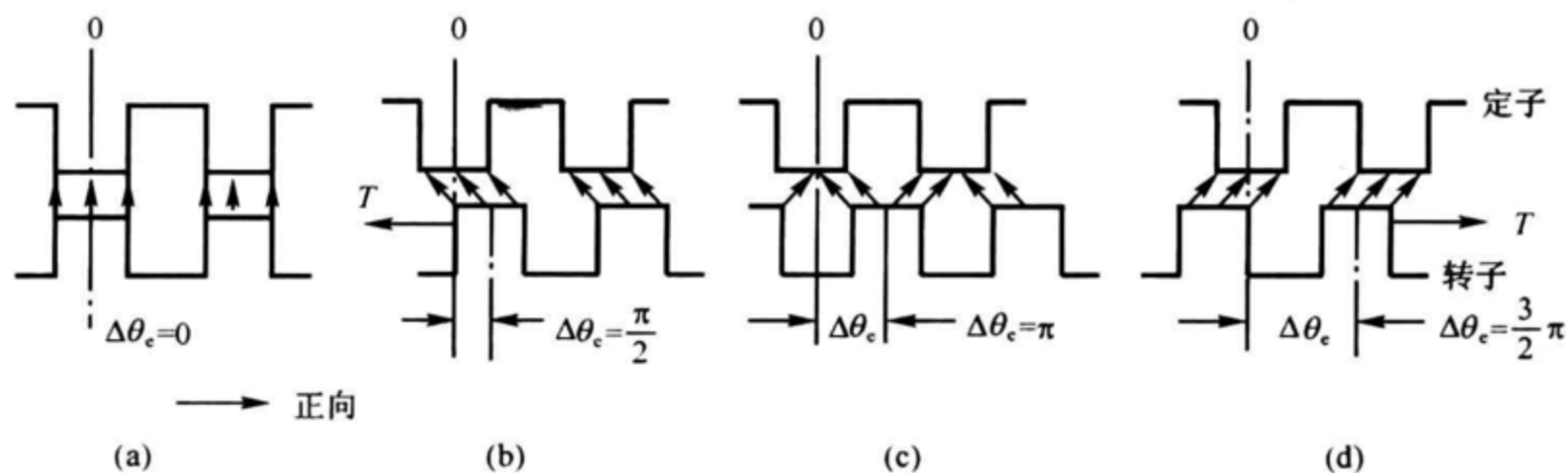


图 5-7 定、转子间的作用力



### 3、步进电动机的静特性

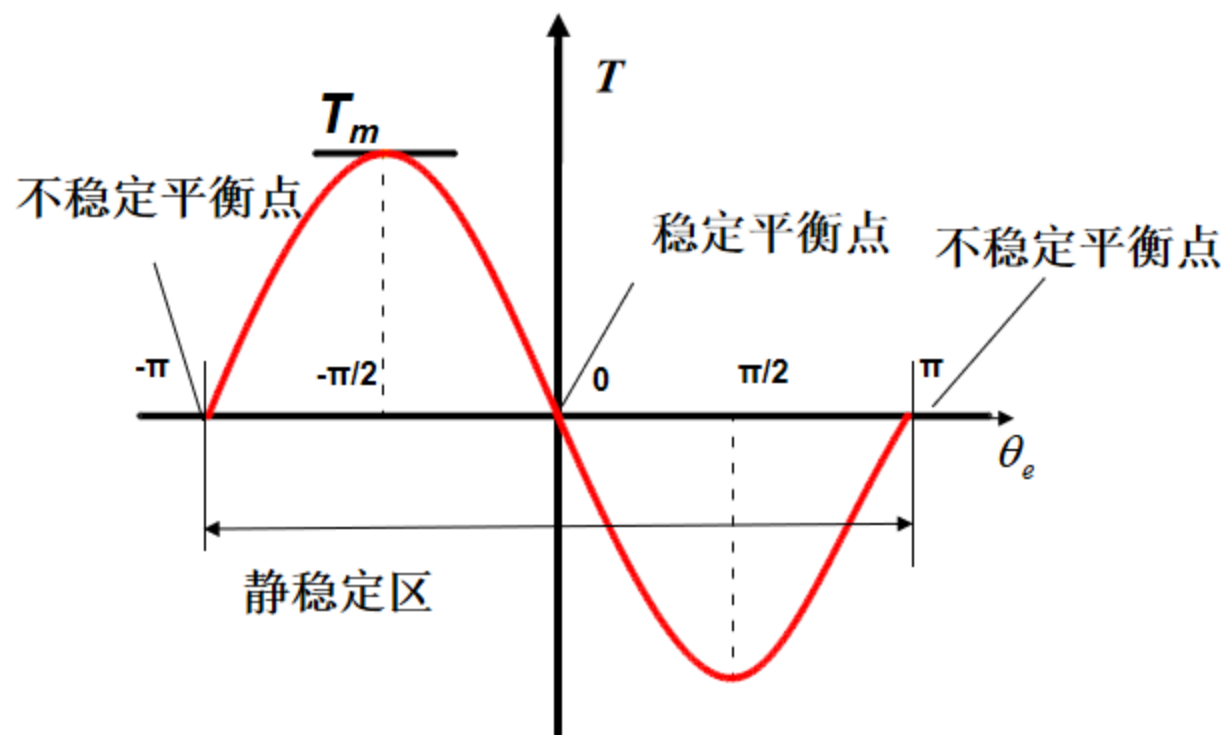
#### 3.2 、单相通电时的矩角特性

**静态：**当步进电动机不改变通电状态时，转子处在不动状态。

**静态转矩：**如果在电动机轴上外加一个负载转矩，使转子转过一个角度 $\theta_e$ ，这时转子受的电磁转矩 $T$ 。

**矩角特性：**描述静态时电磁转矩 $T$ 与 $\theta_e$ 之间的关系曲线。

在静态稳定区内，当外加转矩去除时，转子在电磁转矩作用下，仍能回到稳定平衡点位置( $\theta_e=0$ )。





### 3、步进电动机的静特性

#### 3.2 、单相通电时的矩角特性

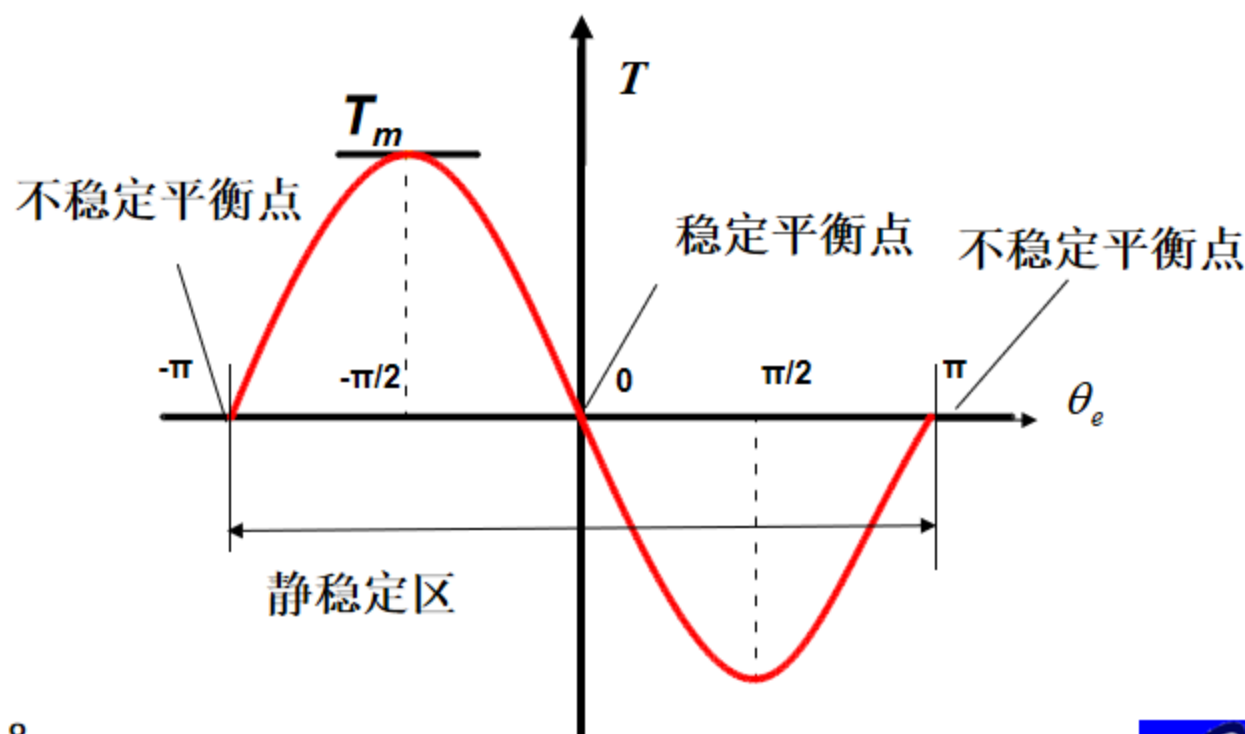
$\Delta\theta_e$	0	~	$\frac{\pi}{2}$	~	$\pi$	~	$\frac{3\pi}{2}$	~	$2\pi$
$T$	0	-	-	-	0	+	+	+	0

- 转矩是失调角的周期函数，周期为  $2\pi$  rad（电角）。

$$T = -T_m \sin \Delta\theta_e$$

$$T = -T_m \sin \theta_e \quad (\theta_{e0} = 0)$$

$T_m$  是最大静转矩，由气隙磁导和电流决定。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.2 、单相通电时的矩角特性

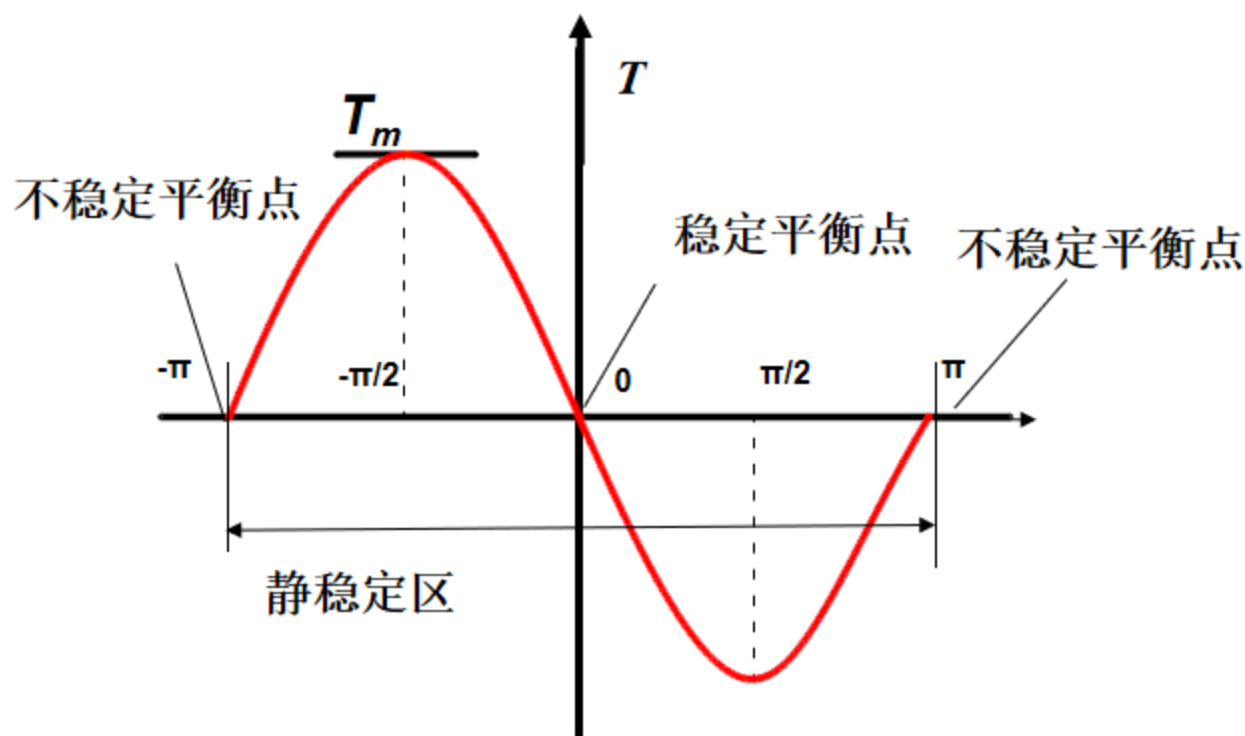
单相通电的静转矩特性-矩角特性

$$T = -T_m \sin \theta_e \quad -\pi < \theta_e < \pi$$

静稳定区（不考虑阻转矩）：

$$-\pi < \theta_e < \pi$$

如果上电前转子所在位置（失调角）在静稳定区，一通电后，电磁转矩就会把转子拉动到稳定平衡点位置。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.2 、单相通电时的矩角特性

最大静转矩  $T_m$  和绕组电流  $I$  之间关系

- 1、当电流小时， $T_m$  与  $I$  的平方成正比；
- 2、当电流稍大时，受磁路饱和影响， $T_m$  与  $I$  成线性；
- 3、当电流再增加时， $T_m$  增加很小。

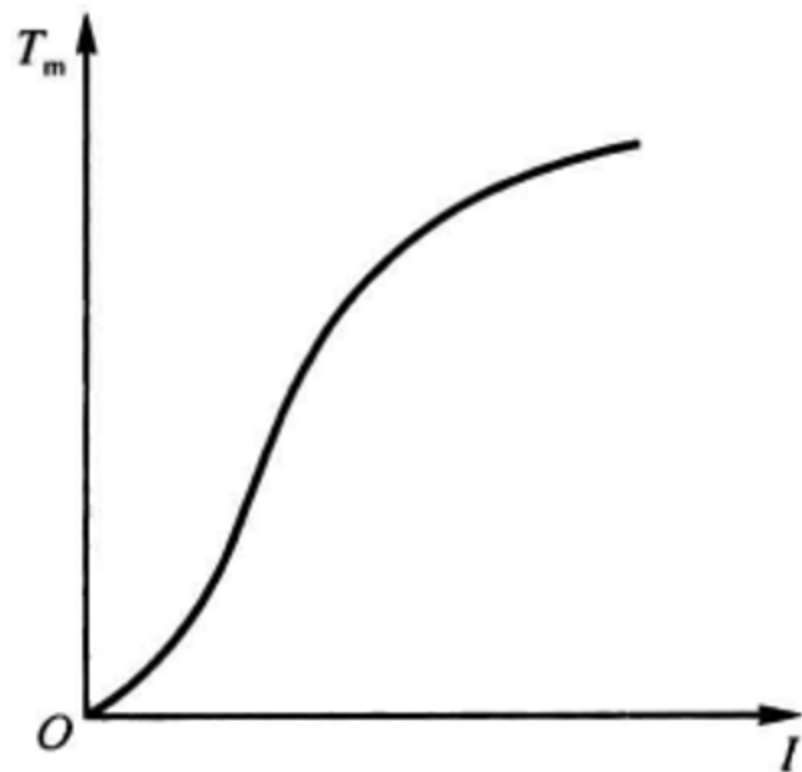


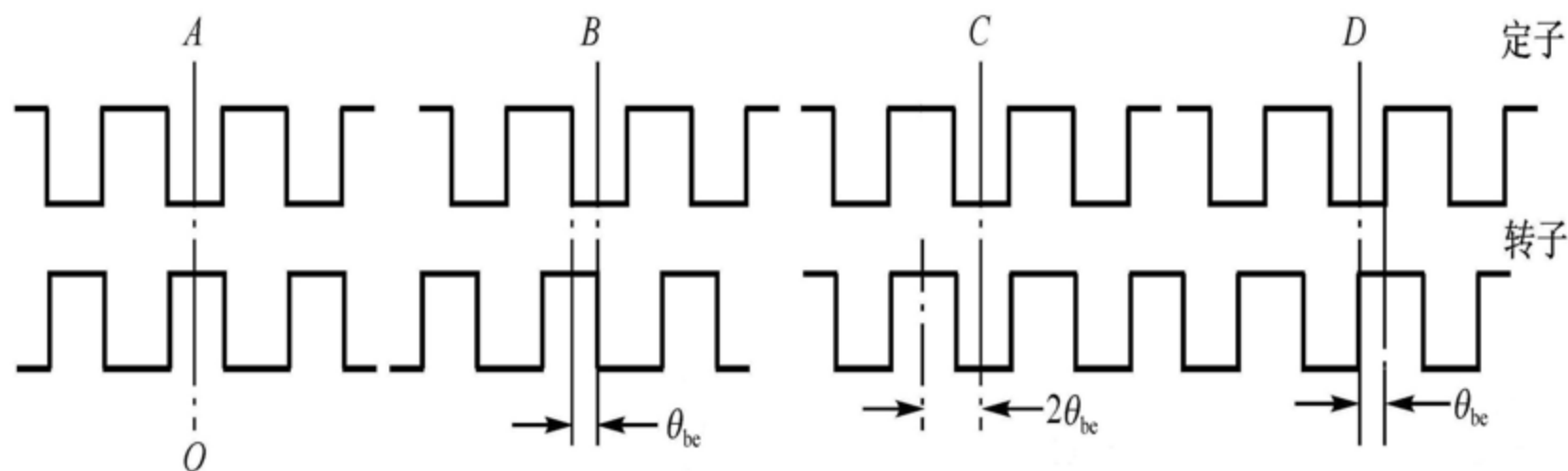
图 5-9 转矩  $T_m$  与电流  $I$  的关系



## 3、步进电动机的静特性

### 3.3 、单相通电时的矩角特性曲线族

- 矩角特性曲线族：  
各相绕组矩角特性的总和。
- 单相通电，走一步到下一个平衡位置。
- 相邻两相绕组的平衡位置相隔  $\theta_{be}$  。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.3 、单相通电时的矩角特性曲线族

曲线族表达式（以四相电机为例）

以  $A$  的轴线为零位，平衡位置依次为

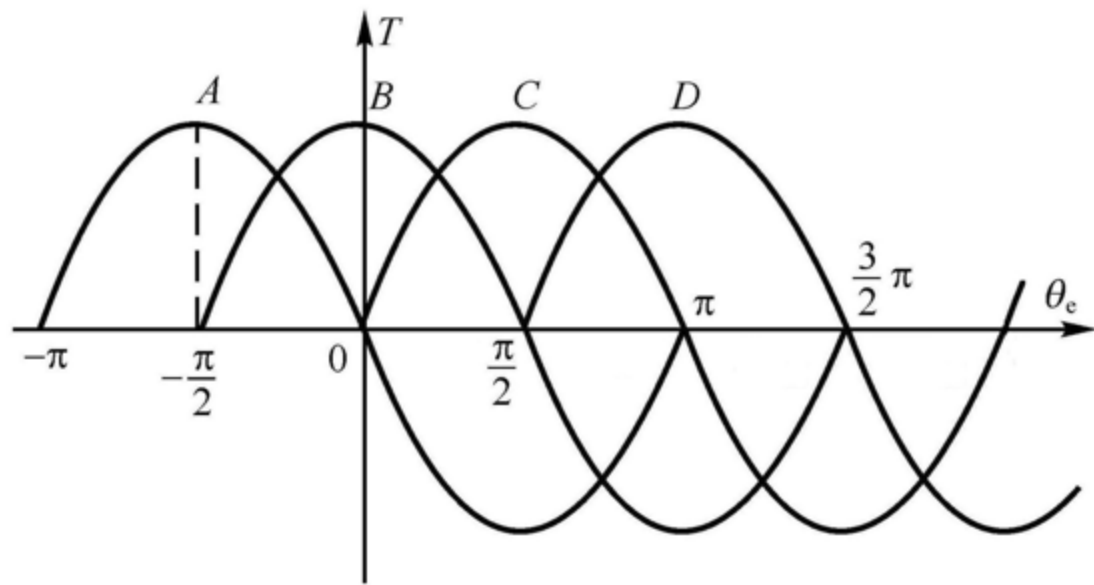
$$0, \theta_{be}, 2\theta_{be}, 3\theta_{be} \quad \theta_{be} = \frac{\pi}{2}$$

$$A : (\theta_{e0} = 0) \quad T = -T_m \sin\theta_e$$

$$B : (\theta_{e0} = \theta_{be}) \quad T = -T_m \sin(\theta_e - \theta_{be})$$

$$C : (\theta_{e0} = 2\theta_{be}) \quad T = -T_m \sin(\theta_e - 2\theta_{be})$$

$$D : (\theta_{e0} = 3\theta_{be}) \quad T = -T_m \sin(\theta_e - 3\theta_{be})$$

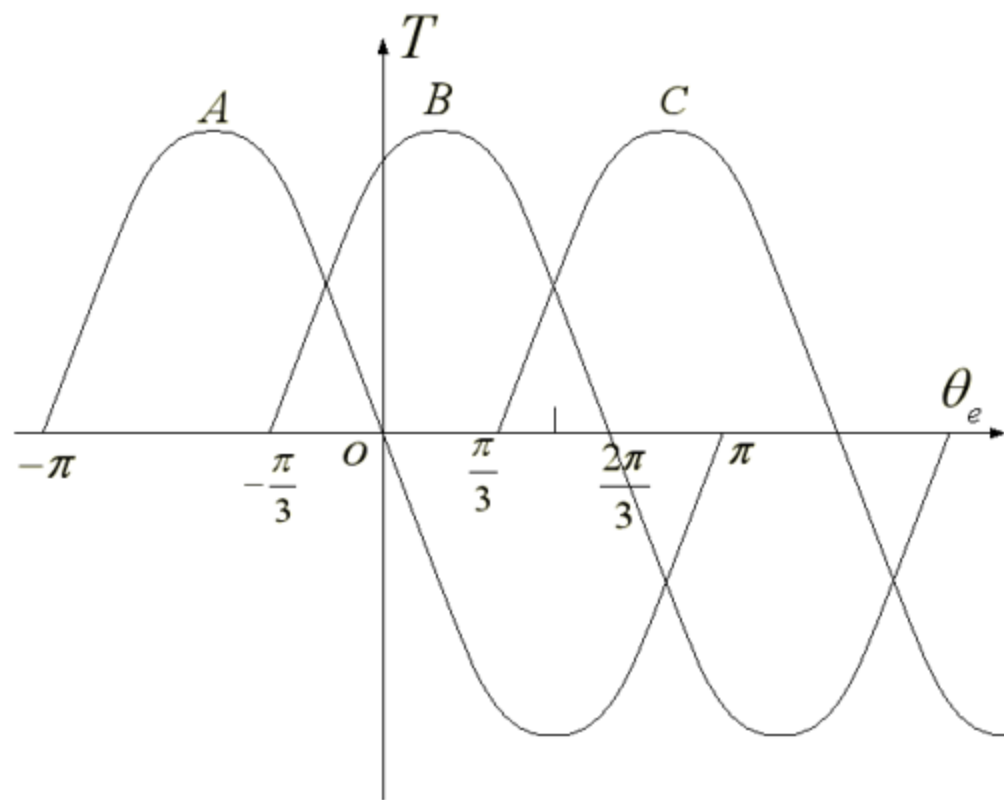




## 3、步进电动机的静特性

### 3.3 、单相通电时的矩角特性曲线族

三相步进电机的矩角特性



$$T_{emA} = -T_{j\max} \sin \theta_e$$

$$T_{emB} = -T_{j\max} \sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi)$$

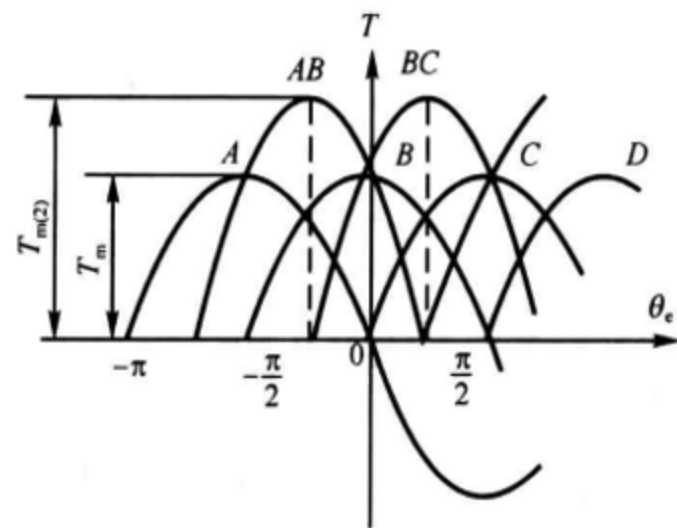
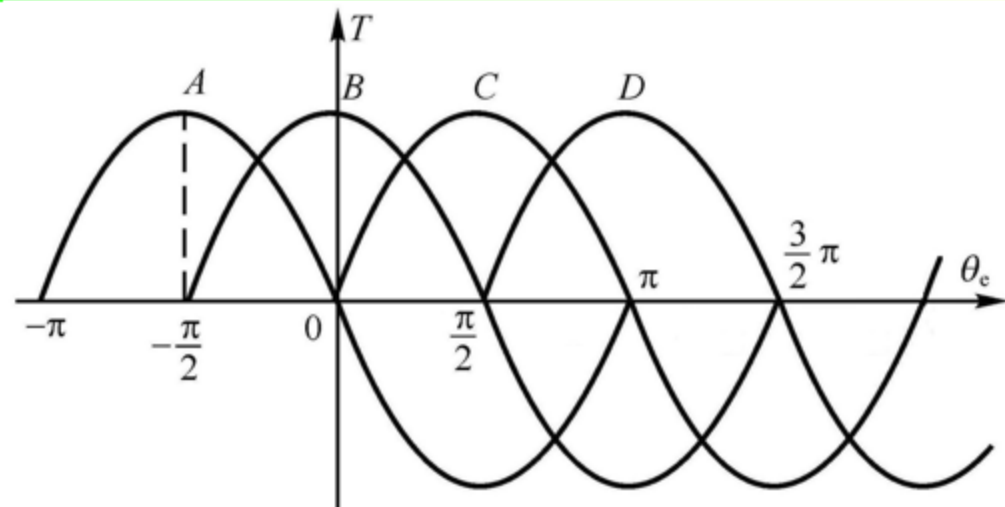
$$T_{emC} = -T_{j\max} \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi)$$



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

两相或两相以上的控制绕组同时通电,利用叠加原理,由单相通电的矩角特性,可求得多相通电时的矩角特性:



$$\begin{aligned} T_{1-n} &= T_1 + T_2 + \dots + T_n \\ &= -T_m \{ \sin\theta_e + \sin(\theta_e - \theta_{be}) + \dots + \sin[\theta_e - (n-1)\theta_{be}] \} \\ &= -T_m \frac{\sin \frac{n\theta_{be}}{2}}{\sin \frac{\theta_{be}}{2}} \sin\left(\theta_e - \frac{n-1}{2}\theta_{be}\right) \end{aligned}$$

式中,  $T_m$  为单相通电时的最大静转矩;  $\theta_{be}$  为单拍制的步距角(电角)。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

化简可得：

$$T = -T_{m(n)} \sin \Delta \theta_e = -T_{m(n)} \sin(\theta_e - \theta_{e0})$$

也可由转矩是失调角的周期函数求得。

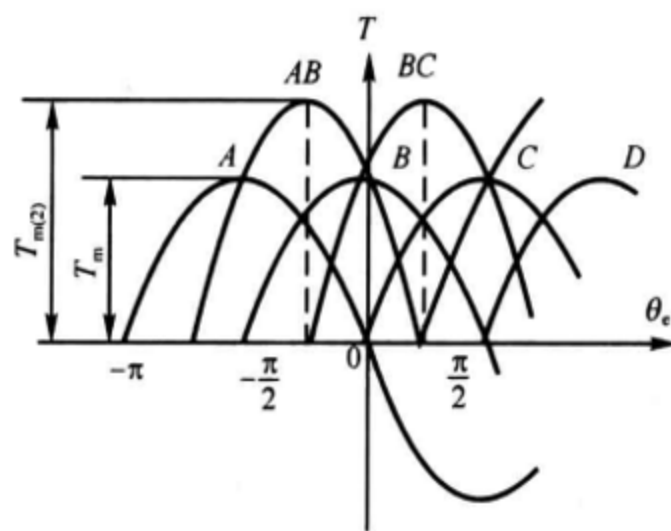
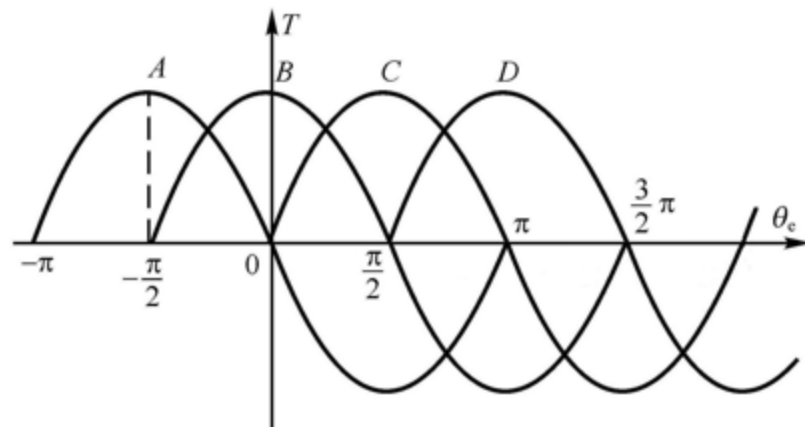
$\theta_{e0}$  稳定平衡位置的角度。  $\theta_{e0} = \frac{n-1}{m} \pi$

$T_{m(n)}$   $m$  相电机  $n$  相同时通电时的最大转矩

$\Delta \theta_e$   $m$  相电机  $n$  相同时通电时的失调角

$$T_{m(n)} = \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} T_m$$

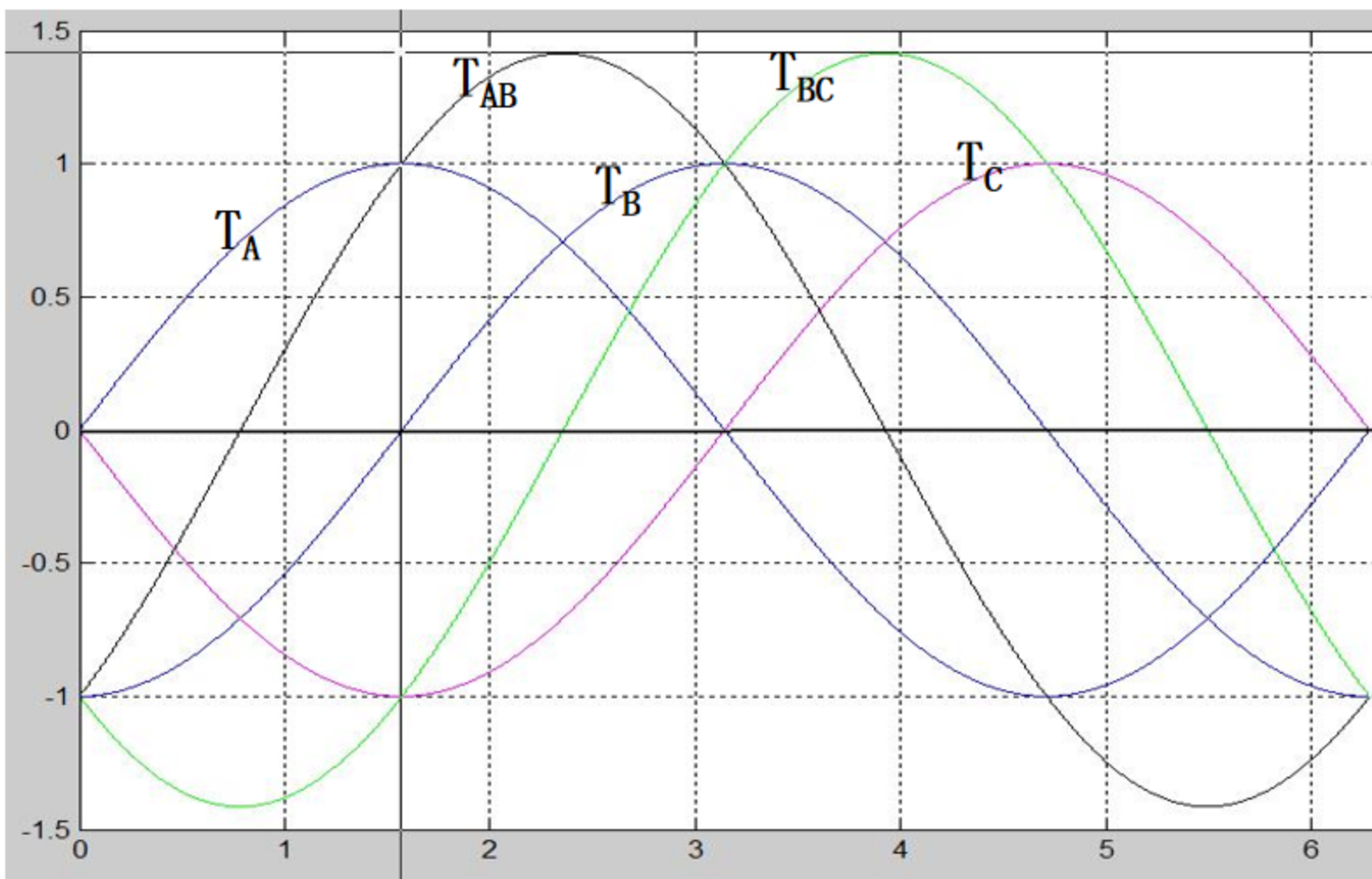
$$\frac{T_{m(n)}}{T_m} = \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}}$$



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

- 四相双拍步进电机的矩角特性曲线族



$$m = 4, n = 2$$

$$\theta_{e0} = \frac{n-1}{m} \pi = \frac{1}{4} \pi$$

$$\frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\sin \frac{2}{4} \pi}{\sin \frac{1}{4} \pi} = \sqrt{2}$$

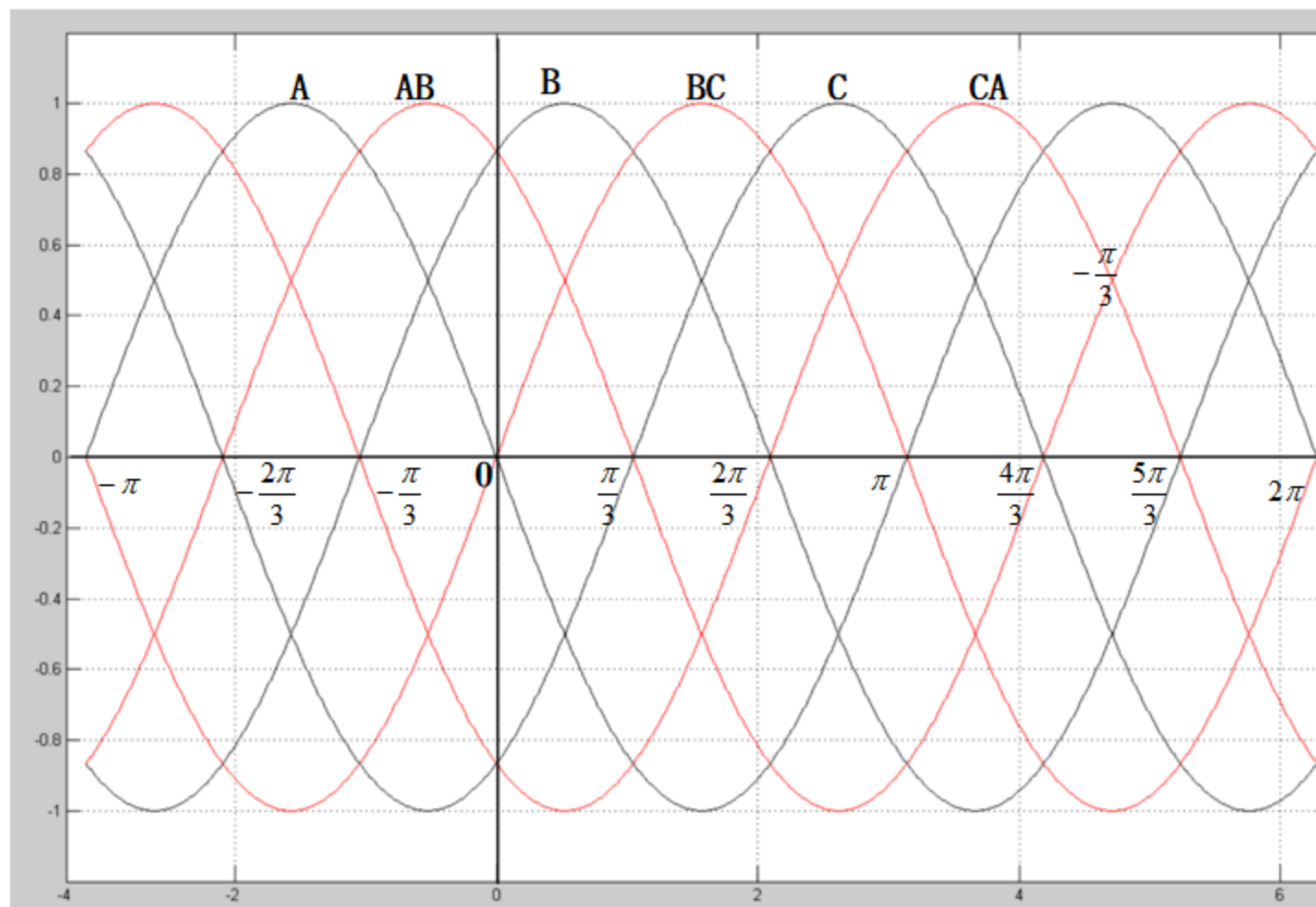
$$T = -\sqrt{2} T_m \sin\left(\theta_e - \frac{1}{4} \pi\right)$$



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

- 三相双拍步进电机的矩角特性曲线族



$$m = 3, n = 2$$

$$\theta_{e0} = \frac{n-1}{m} \pi = \frac{1}{3} \pi$$

$$\frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\sin \frac{2}{3} \pi}{\sin \frac{1}{3} \pi} = 1$$

$$T = -T_m \sin\left(\theta_e - \frac{1}{3} \pi\right)$$

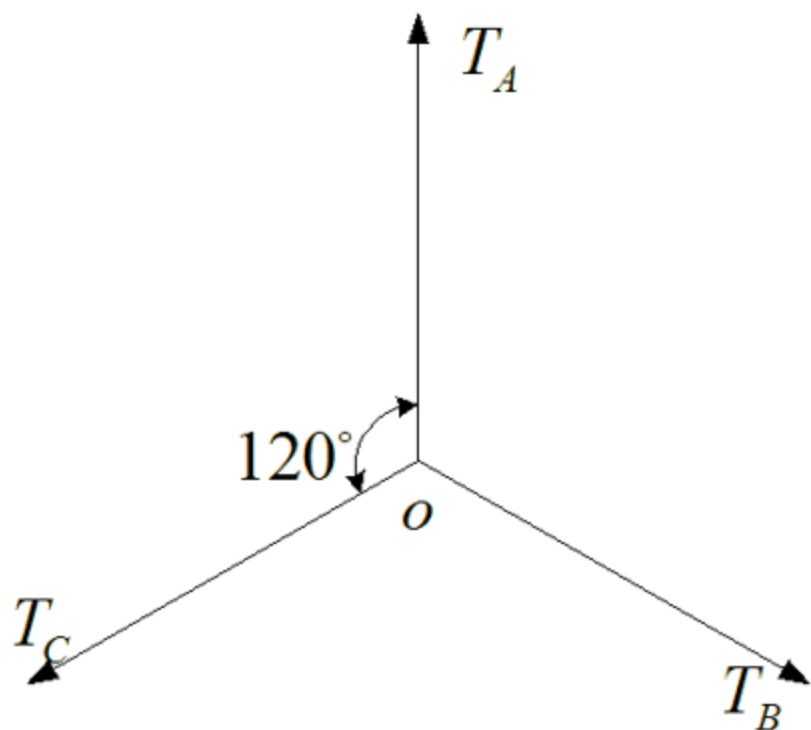




### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

- 步进电机转矩也常用转矩星形图来分析



$$T_{emA} = -T_{j\max} \sin \theta_e$$

$$T_{emB} = -T_{j\max} \sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$T_{emC} = -T_{j\max} \sin\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right)$$

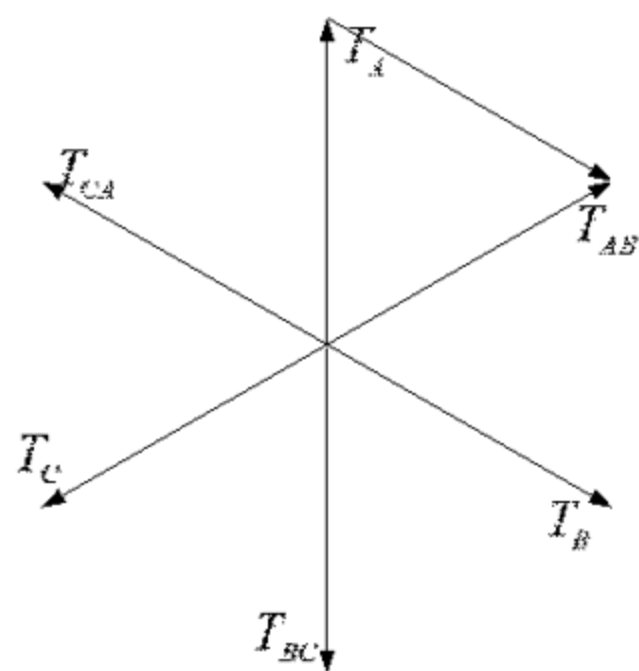
这里的角度指的是电角度，不是各相在定子圆周物理分布角度。通电一个周期是电角度360度。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

- 三相步进电机绕组通电方式



双三拍

$AB - BC - CA$

单双六拍

$A - AB - B - BC - C - CA$

这里的角度指的是电角度，不是转子各极物理分布角度。通电一个周期是电角度360度。



### 3、步进电动机的静特性

#### 3.4 、多相通电时的矩角特性

- 多相通电时的矩角特性

$T_{m(n)}$ : 多相通电的最大静转矩  $T = -T_{m(n)} \sin \Delta \theta_e$

利用三角函数可推得

$$\frac{T_{m(n)}}{T_m} = \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}}$$

三相电机  $T_{m(2)} = T_m$

四相电机  $T_{m(2)} = 1.41T_m$

五相电机  $T_{m(2)} = 1.62T_m$      $T_{m(3)} = 1.62T_m$

三相以上的步进电机，多相通电能提高最大静转矩。



# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用



## 4、步进电动机的运行特性

### 步进电机的运行要求

控制频率：步进电机输入脉冲信号的频率。

失步：步进电动机运动的步数与输入脉冲数不相等。

- 丢步：步数少于脉冲数，发生在加速时。
- 越步：步数多于脉冲数，发生在减速时。

**对步进电机的基本要求：不失步。**





## 4、步进电动机的运行特性

4.1 步进电机的单步运行

4.2 步进电机的连续运行

4.3 步进电机不同控制频率下的连续运行



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

绕组通电的持续时间大于步进电动机的机电过渡过程时间

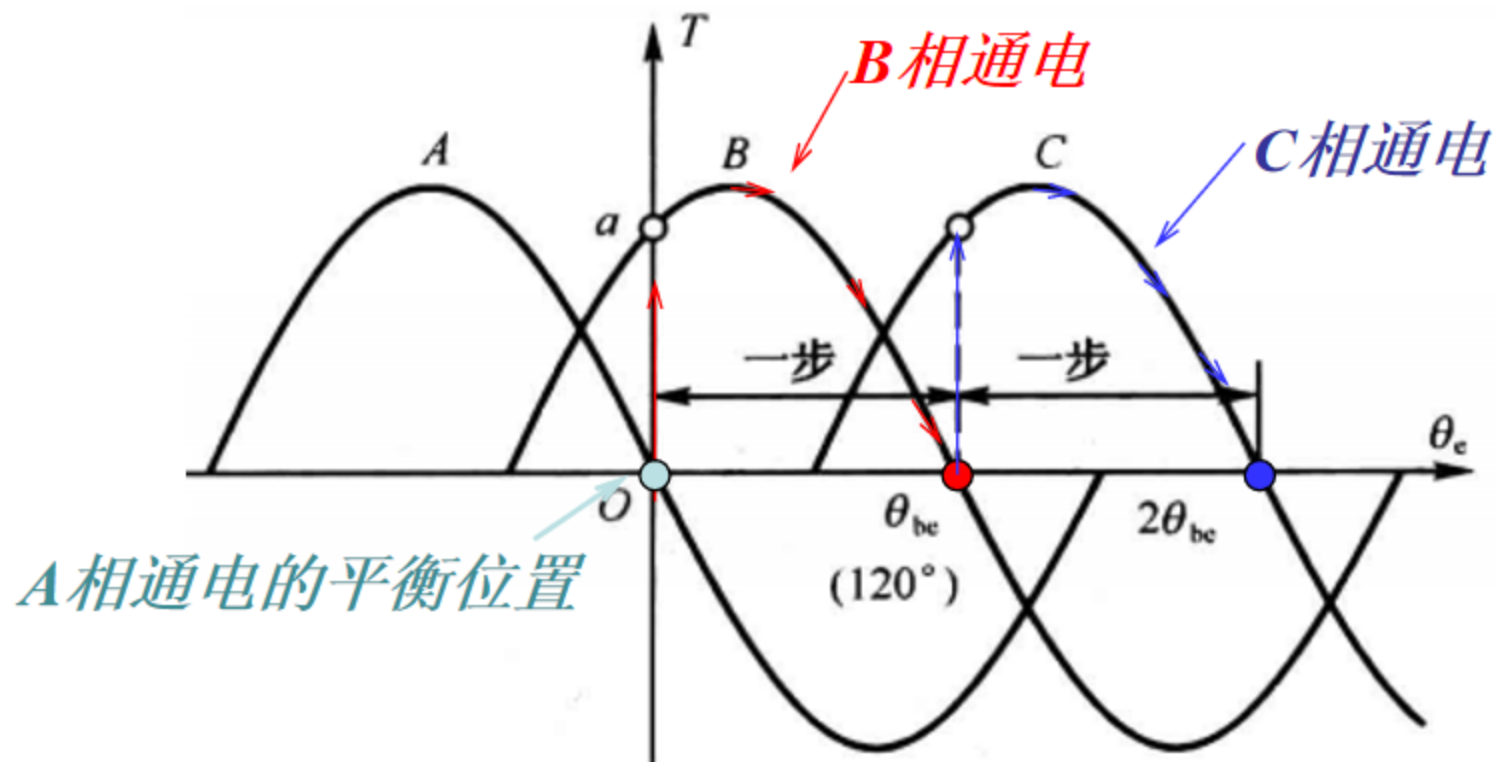


图 5-13 空载时步进电动机的单步运行



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

绕组通电的持续时间大于步进电动机的机电过渡过程时间

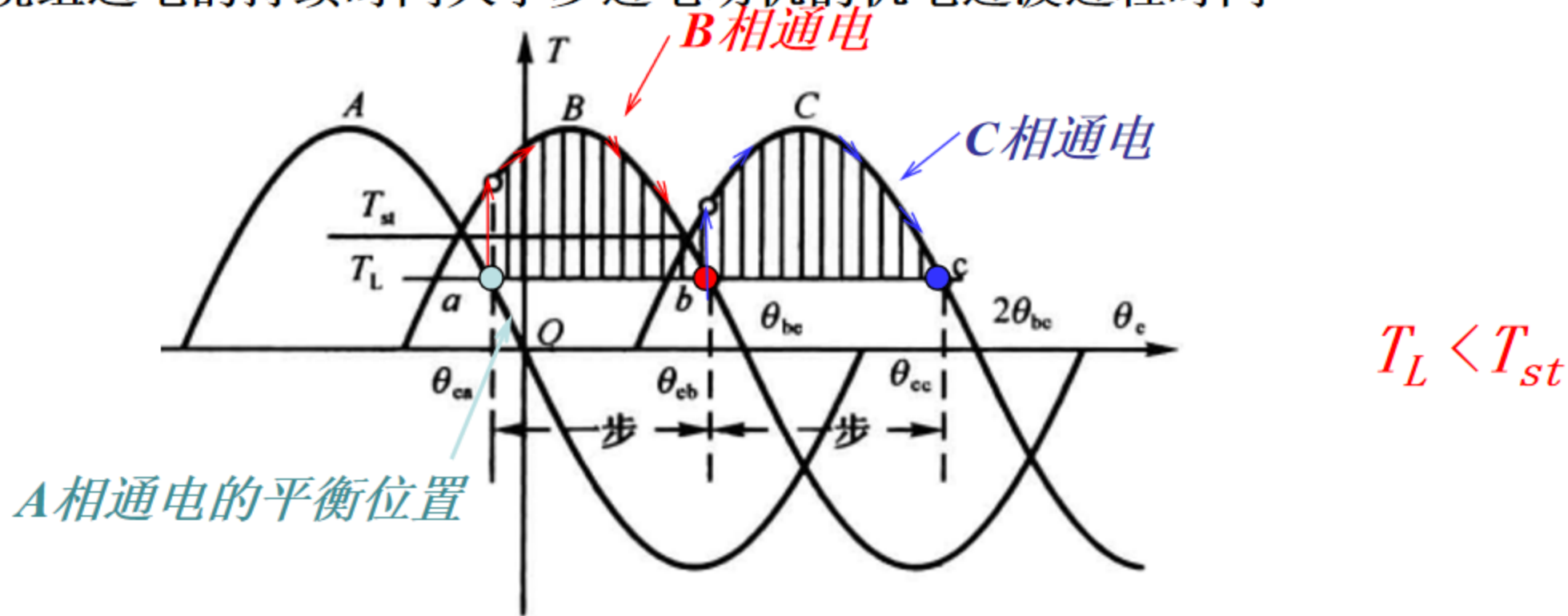


图 5-14 负载时步进电动机的单步运行

$T_{st}$  相邻矩角特性交点对应的电磁转矩,  $T_L$  负载转矩

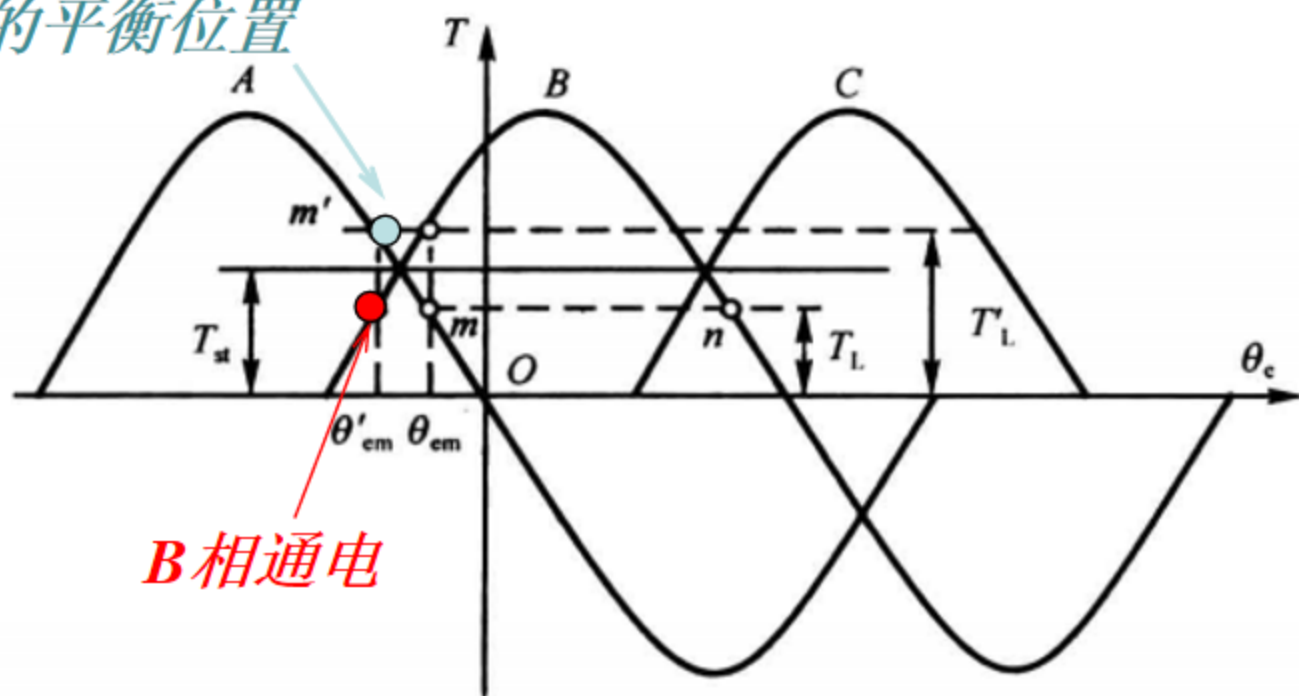


## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1、步进电机的单步运行

不失步的基本条件  $T_L < T_{st}$

A相通电的平衡位置



B相通电

$T_L > T_{st}$

图 5-15 最大负载能力的确定

$T_{st}$  相邻矩角特性交点对应的电磁转矩,  $T_L$  负载转矩



## 4、步进电动机的运行特性

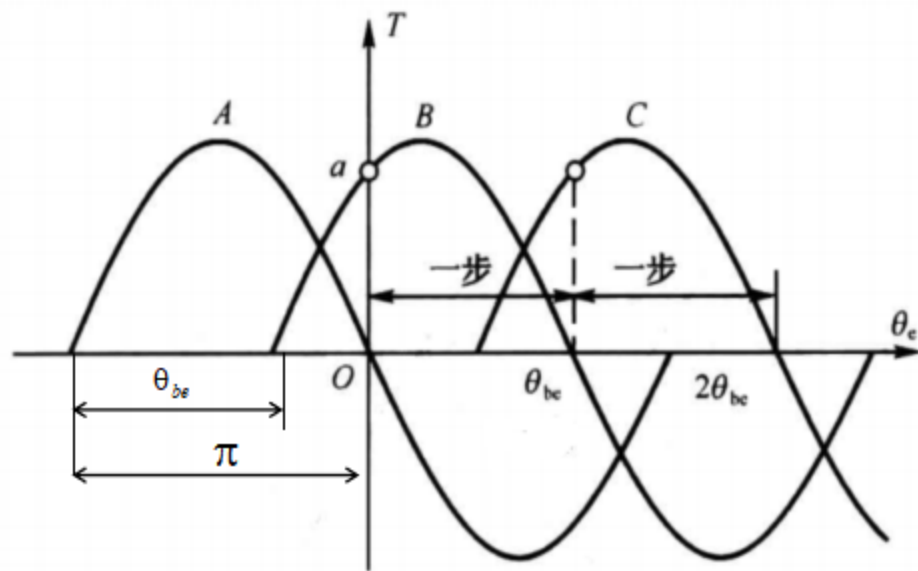
### 4.1 、步进电机的单步运行

步进电动机在一定的控制电源和负载转动惯量条件下突然启动并能不失步运行所输出的最大转矩称为**启动转矩**  $T_{st}$ 。

单步运行时的启动转矩就是各相邻矩角特性交点所对应的转矩。如果每拍矩角特性为**正弦且等幅值**时,两个相邻矩角特性交点的横坐标为 $(\theta_{be} - \pi)/2$ ,交点所对应的转矩即启动转矩为

$$T_{st} = -T_m \sin \frac{1}{2}(\theta_{be} - \pi) = T_m \cos \frac{\theta_{be}}{2} = T_m \cos \frac{\pi}{N}$$

- \* 拍数越多,启动转矩越接近最大静转矩
- \* 实际应用时,  $3T_L < T_{st}$
- \* **两相磁阻式步进电机没有启动转矩**





## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

$T_{st}$  相邻矩角特性交点对应的电磁转矩，也是单步运行的启动转矩。

从式(5-27)可知，拍数越多，启动转矩  $T_{st}$  越接近最大静转矩  $T_m$ 。式(5-26)、(5-27)只适用于各矩角特性曲线幅值相同、形状相同的情况。有些双拍制中矩角特性的幅值不相同，这时就不能套用上两式。几种分配方式下的比值  $T_{st}/T_m$  如表 5-1 所示。

表 5-1 各种分配方式的  $T_{st}/T_m$  值

分配 方式	相数	3	3	4	4	5	5	6	6
	拍数	3	6	4	8	5	10	6	12
$T_{st}/T_m$		0.5	0.866	0.707	0.707	0.809	0.951	0.866	0.866

注：假定  $T=f(\theta_c)$  为正弦曲线，其中  $T_m$  为各状态中最大静转矩的最大值。5 相电机双拍指 2 相绕组和 3 相绕组轮流通电的状态。

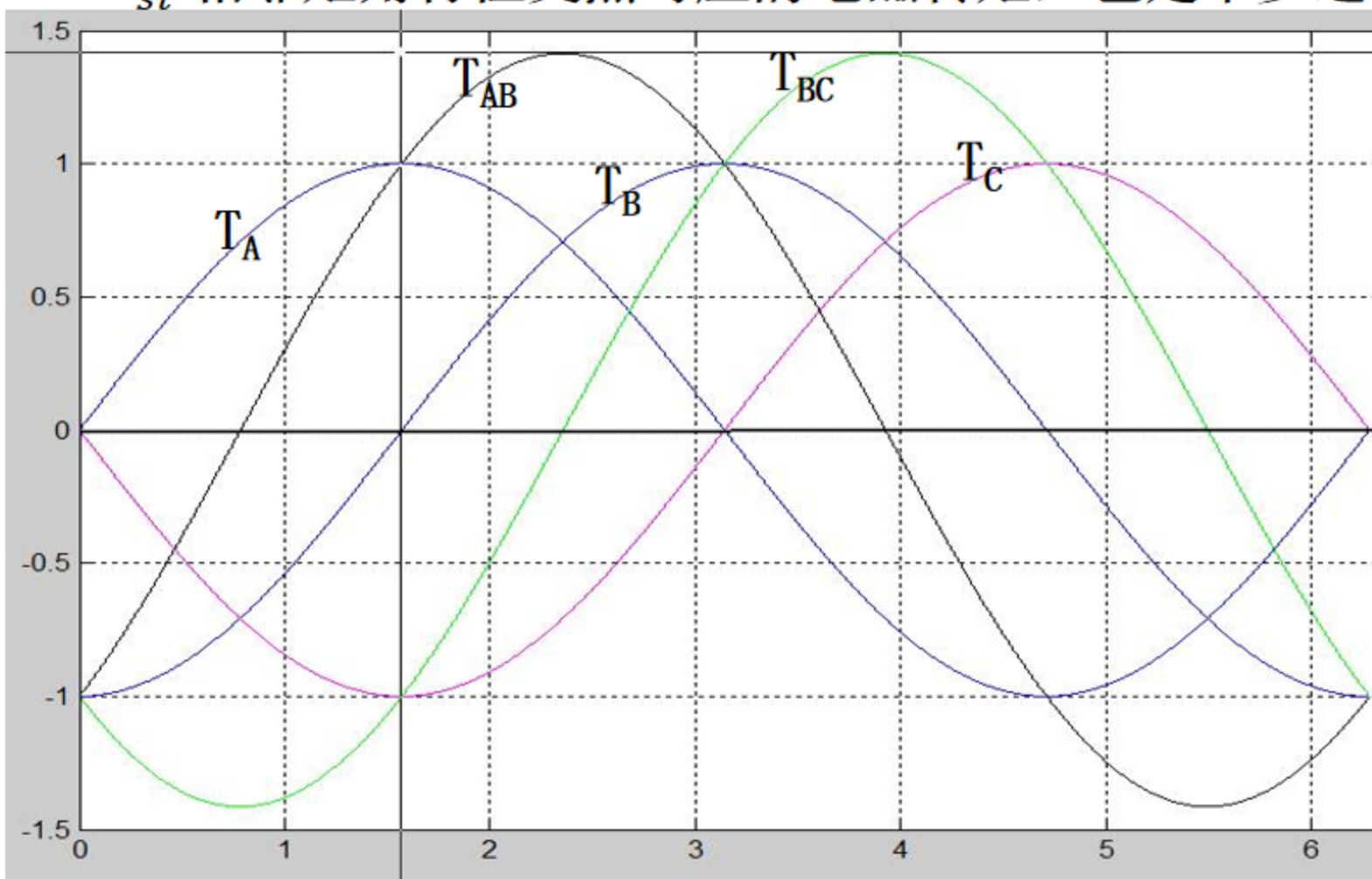
↓  
 $T_{m(n)}$



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

$T_{st}$  相邻矩角特性交点对应的电磁转矩，也是单步运行的启动转矩。



四相电机单相单拍

四相电机双相单拍

四相电机双拍



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

$T_{st}$  相邻矩角特性交点对应的电磁转矩，也是单步运行的启动转矩。

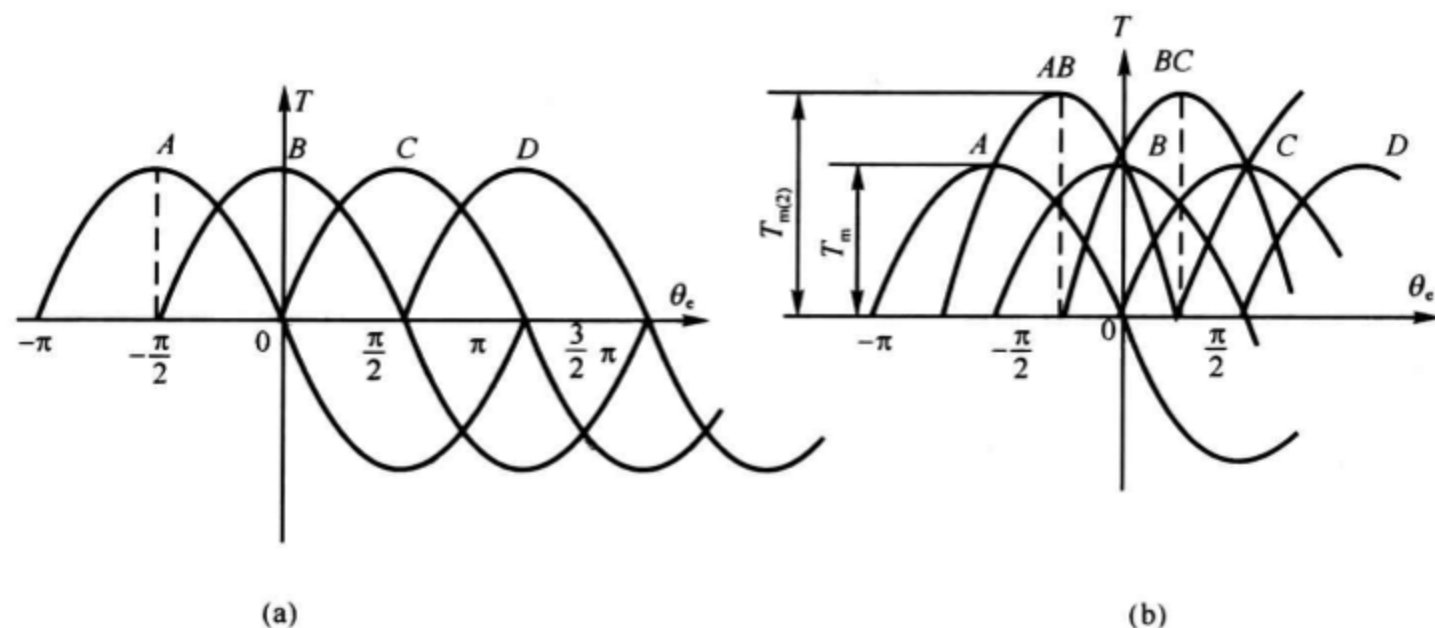


图 5-12 四相步进电动机矩角特性曲线族

如果用表格5-1系数计算  $T_{st}$ ， $T_m$ 单相单拍和双拍应该用图中那一个？



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.1 、步进电机的单步运行

#### 步进电机的自由振荡过程

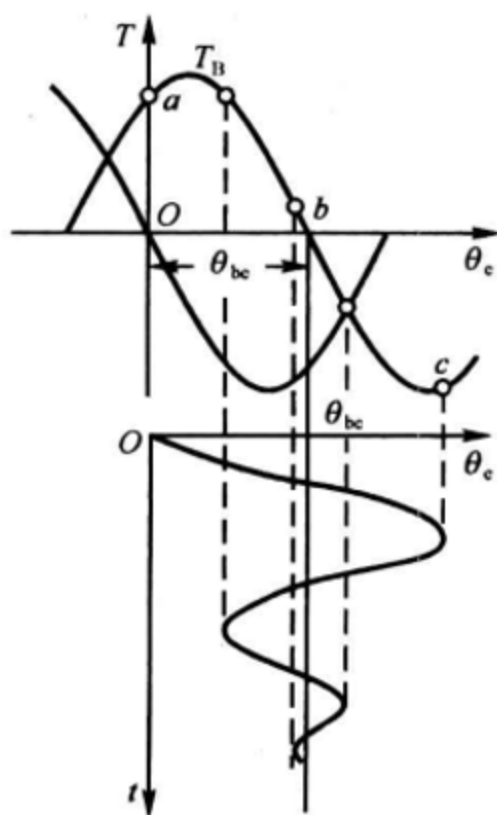


图 5-16 有阻尼时转子的衰减振荡

- 开始时转子在A相矩角特性的平衡位置O点；
- 通电绕组换为B相，B相转矩为正，转子按照指令向正方向运行。当转子齿正对定子齿时，电机的电磁转矩为零，但因转子转速并不为零；
- 转子将继续沿着正方向运动超过对齐位置，进而受到反向电磁转矩作用而减速直到为零；
- 在反向电磁转矩作用下，转子又开始沿着反方向向平衡位置运动。
- 电机中因为存在阻尼及其他能量损耗，转子在平衡位置衰减振荡。

$\omega_d$  为步进电机有阻尼振荡角频率





## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

步进电动机的输入脉冲信号频率称为控制频率(拍/秒或脉冲数/秒)。

$$n = \frac{60f}{Z_r N} \quad (rpm)$$

控制频率提高时，相应的每个绕组通电的持续时间就减少。当绕组通电的持续时间小于机电过渡过程时间时，步进电动机就处于连续运行状态。步进电动机运动的步数应与输入电脉冲相等。步进电动机运动的步数与输入电脉冲数不相等，动态过程结束后也不能自行消除的现象称为失步。失步包括丢步和越步。丢步是指转子前进的步数少于脉冲数；越步是指转子前进的步数多于脉冲数。对步进电机的基本要求就是不失步。





## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

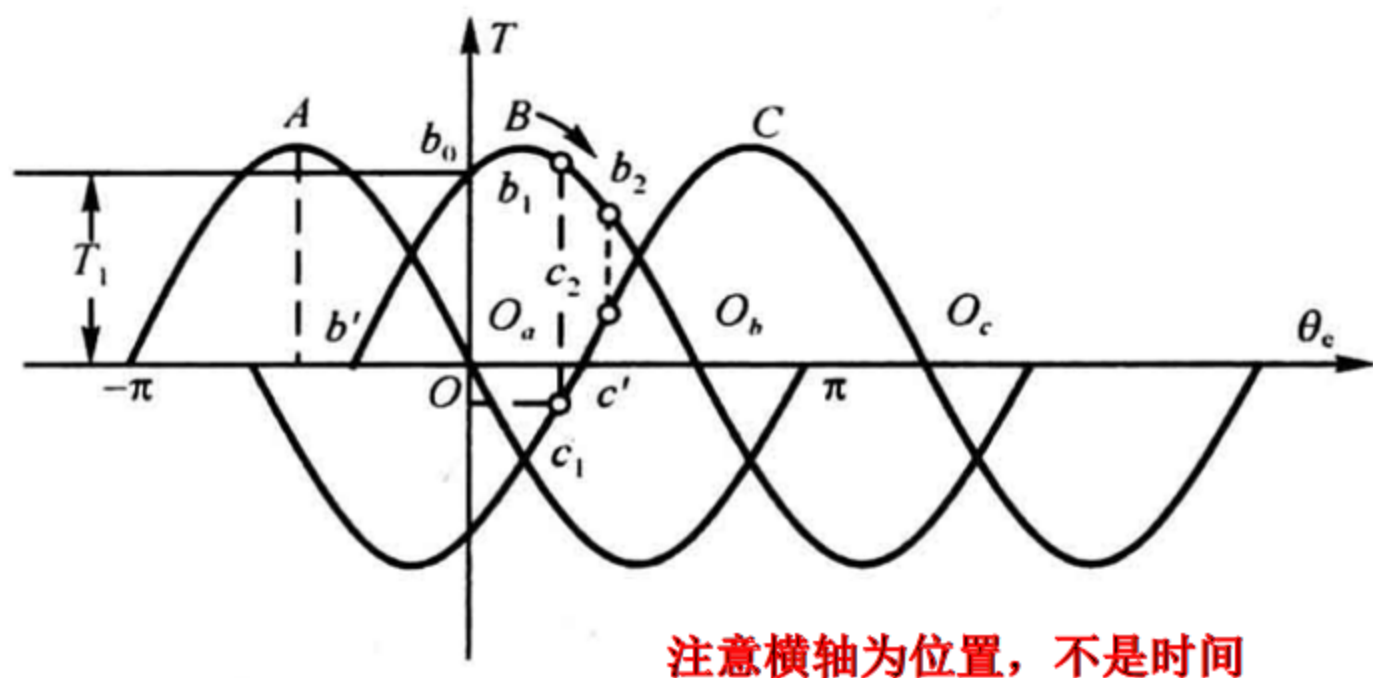


图 5-17 步进电动机的启动过程分析

- **开始时**转子在A相矩角特性的平衡位置O点；
- **第一个脉冲**，通电绕组换为B相，B相转矩为正，转子按照指令方向运行；
- **第二个脉冲**，通电绕组换为C相，如果此时转子在b<sub>2</sub>点，则C相转矩为正，转子按照指令方向运行；如果此时转子在b<sub>1</sub>点，则C相转矩为负，转子反着指令方向运行。

步进电动机的启动除了必须满足最大负载转矩要小于启动转矩T之外，**控制频率必须小于某一值。**



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

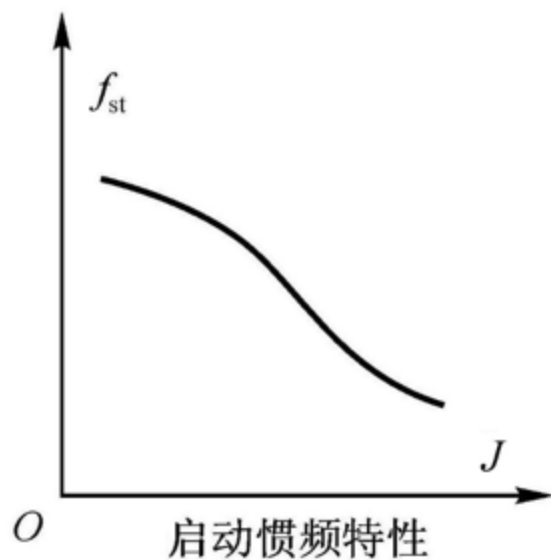
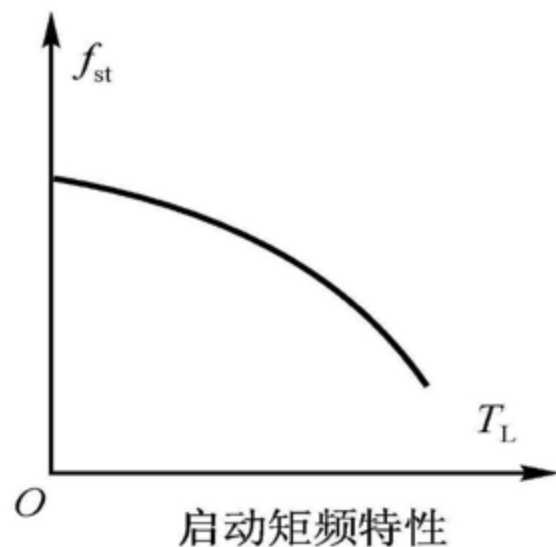
**启动频率：**步进电动机能无失步启动和停转的最高频率

启动频率不仅与负载转矩的大小有关，而且负载的转动惯量对其也有影响。

决定启动性能的两个特性：

**启动矩频特性：**步进电动机在负载转动惯量及其他条件不变的情况下，启动频率与负载转矩的关系；

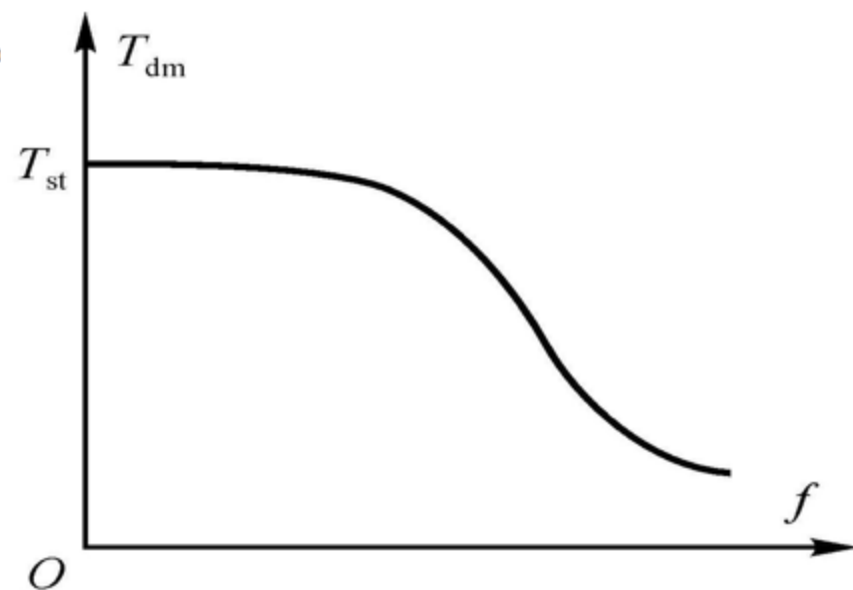
**启动惯频特性：**步进电动机在负载转矩及其他条件不变的情况下，启动频率与负载转动惯量的关系。



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

- \* 运行频率：在负载条件下能无失步运行的最高控制频率。
- \* 动态转矩：步进电动机连续运行时的输出转矩。
- \* 运行矩频特性：动态最大输出转矩与运行频率的关系。
- \* 动态转矩从启动转矩开始，随控制频率的升高而减小。



运行矩频特性图

步进电机工作频率，要在矩频特性的平台区域。



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

**动态转矩下降的原因：**步进电机转动时，电机各相绕组的电感将形成一个反向电动势；**频率越高，反向电动势越大。**在它的作用下，电机随频率（或速度）的增大而相电流减小，从而导致转矩下降。

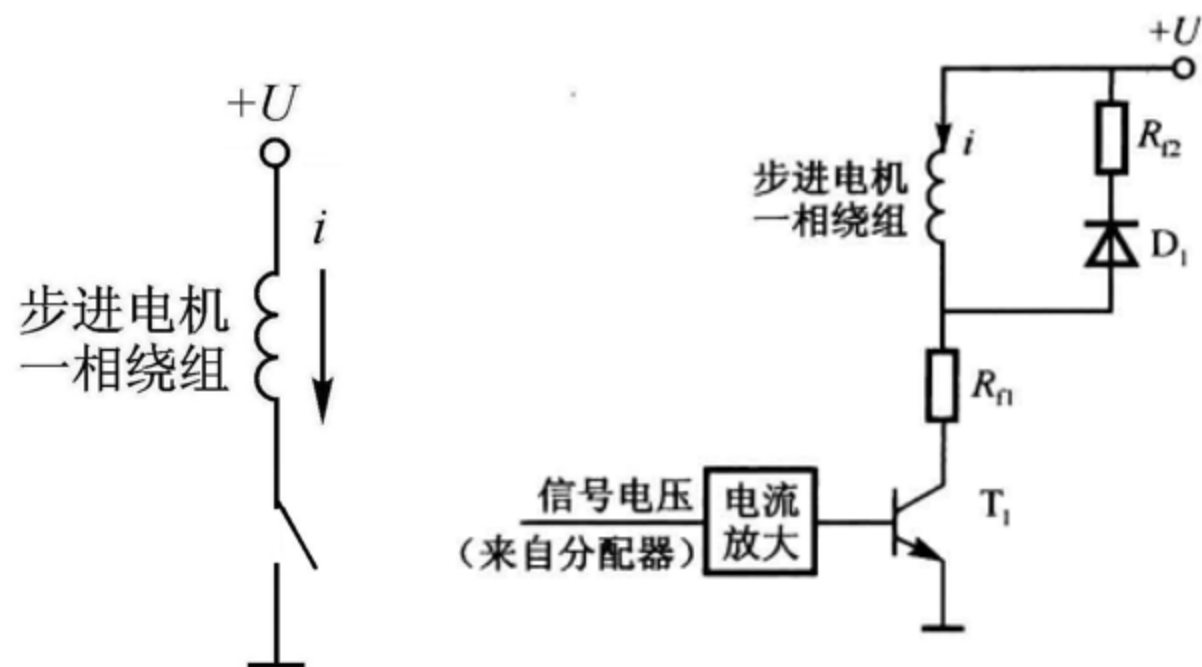
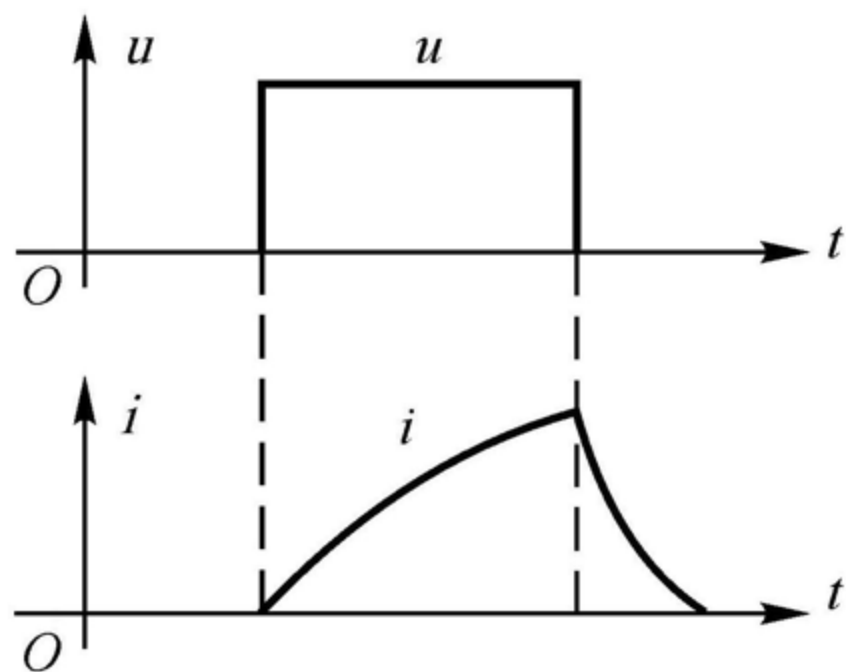


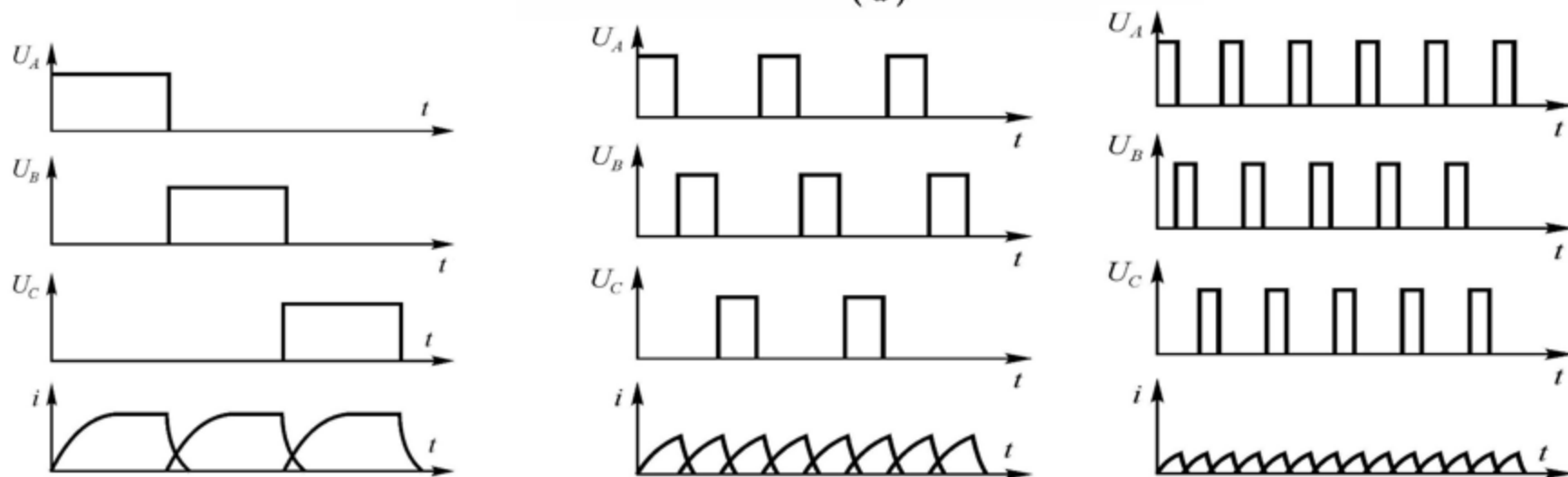
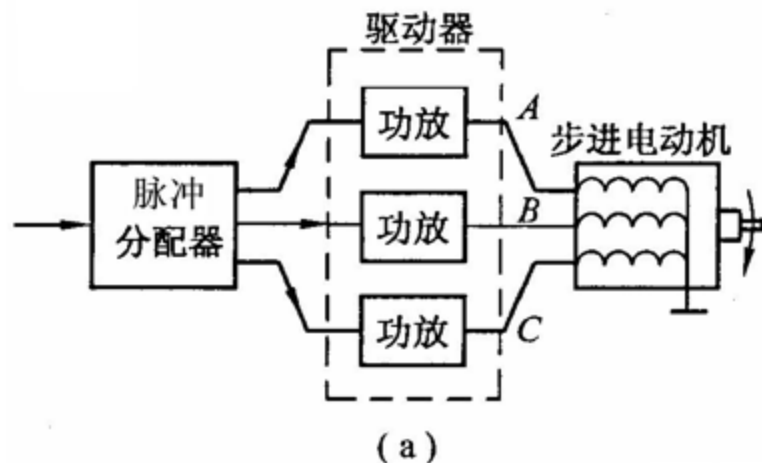
图 5-20 单电压电路



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.2 、步进电机的连续运行

动态转矩随频率增加下降





## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

#### 1) 极低频下运行

控制脉冲的周期足够长，新脉冲到来时，转子处于平衡位置不动，电机总是从不动的状态开始运行，即单步运行。

\* 不会出现丢步、越步现象。

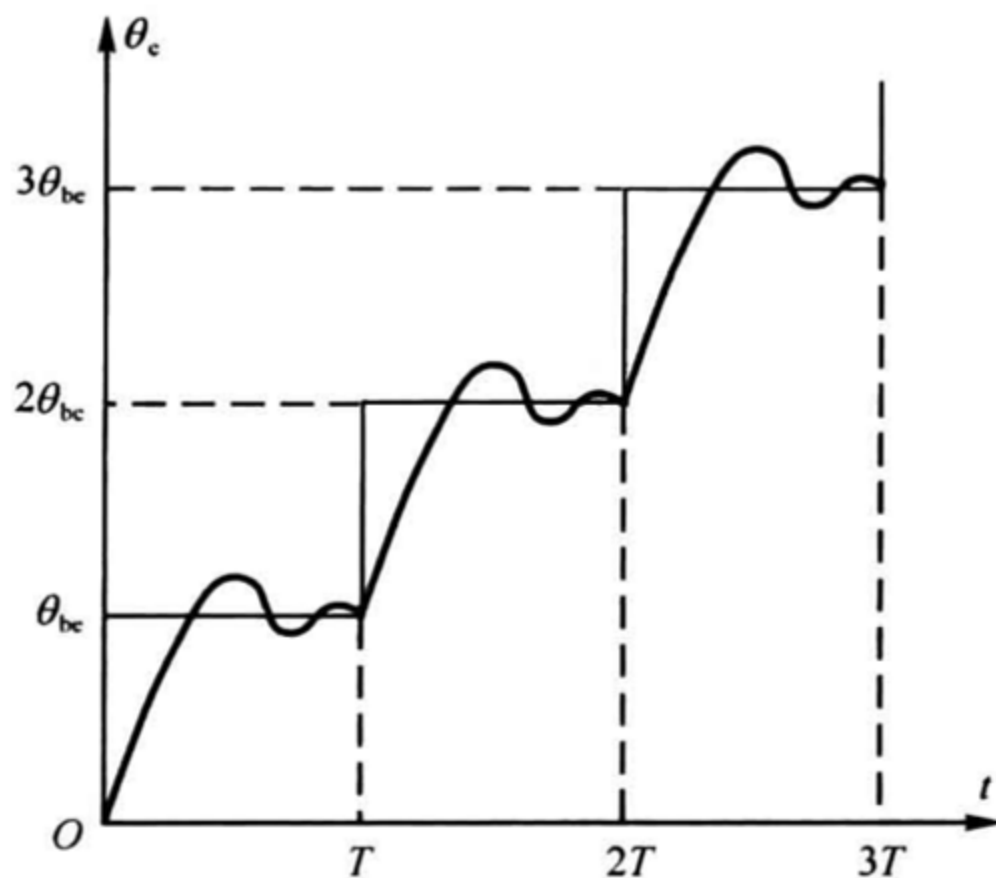


图 5-23 具有步进特征的运行

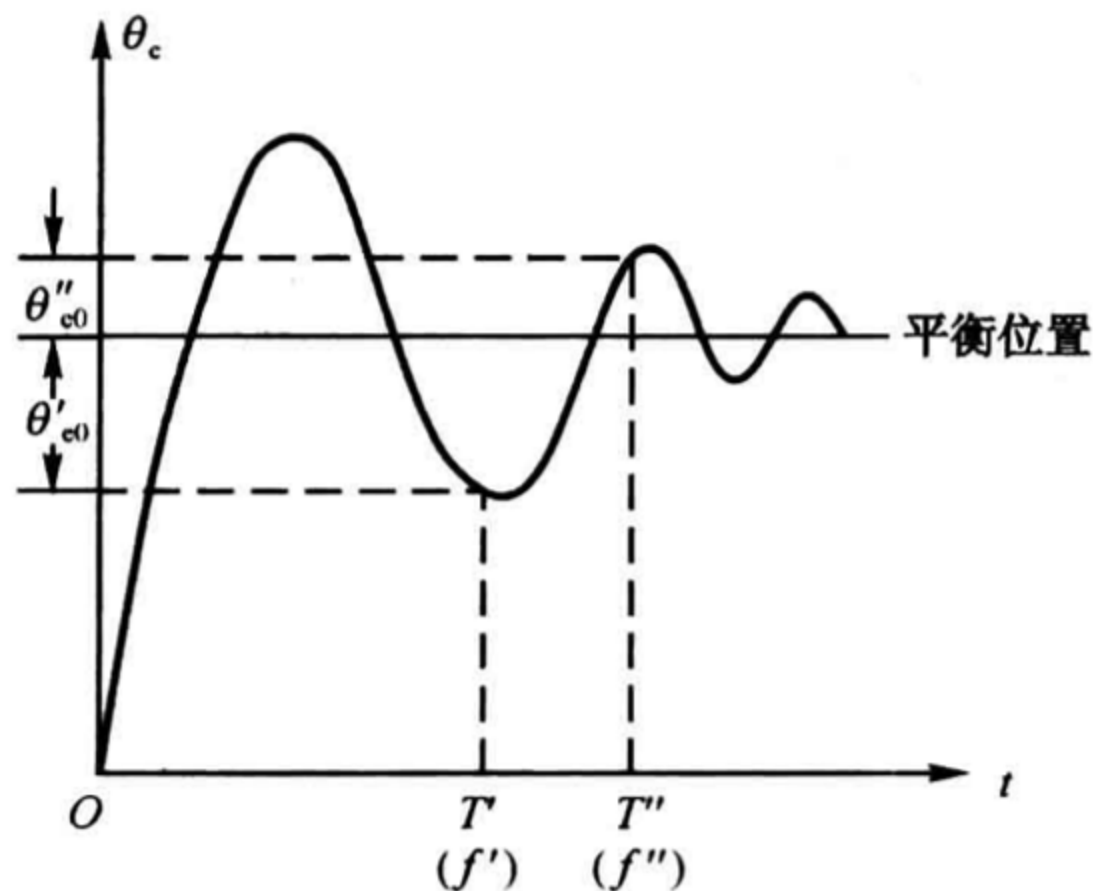


## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

#### 2) 低频运行，低频丢步和低频共振

- 控制频率比极低频高，接近或低于转子振荡频率，在转子振荡已衰减，但还未充分衰减时，下一个脉冲就来到。



注意横轴为时间

图 5-24 不同脉冲周期的转子位置

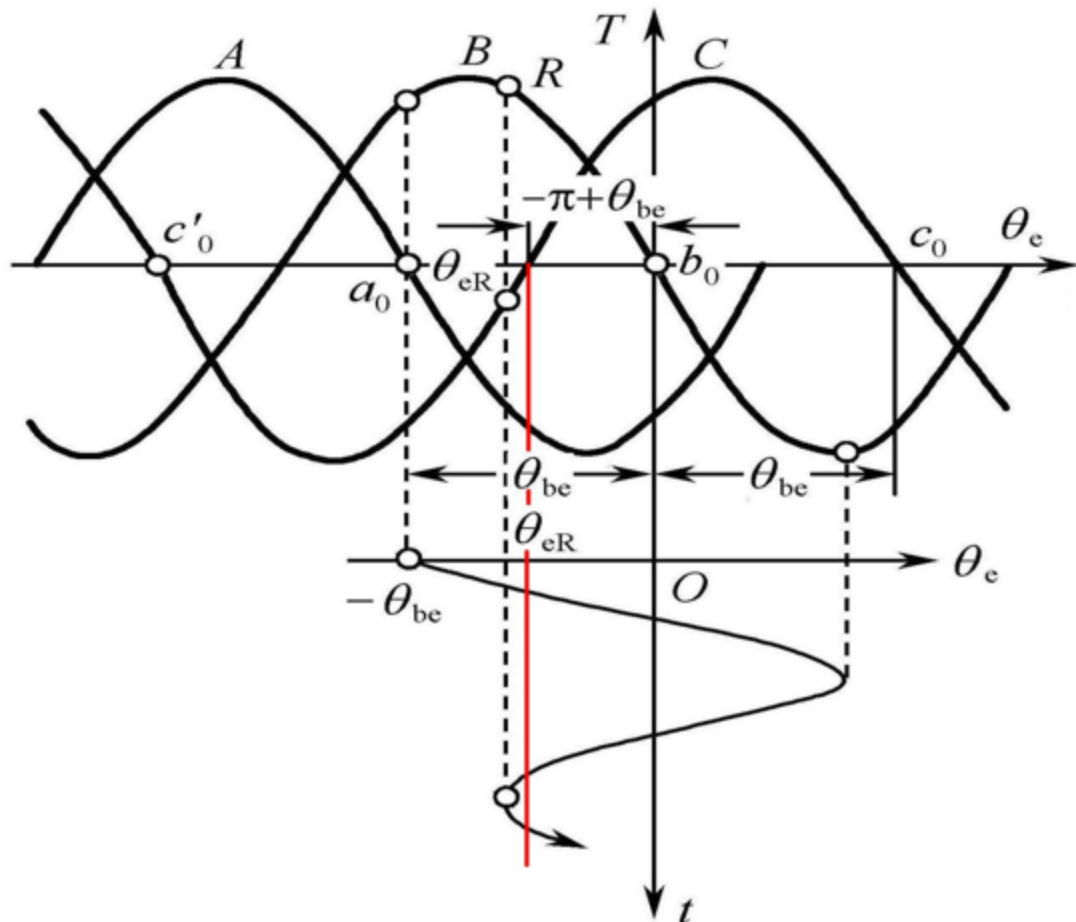


## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

2) 低频运行，低频丢步和低频共振

- 开始时转子在A相矩角特性的平衡位置 $a_0$ 点；
- 第一个脉冲，通电绕组换为B相，转子向B相矩角特性的平衡位置 $b_0$ 点运动；
- 第二个脉冲，通电绕组换为C相，此时转子在 $b_0$ 点附近做振荡，如果振荡到R点，则转矩为负，转子向C点的目标运动反方向平衡点 $c_0'$ 运动。
- 第三个脉冲时，转子回到了 $a_0$ 点，丢了三步。



• R点为转子做衰减振荡的第一次回摆最大值点。



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

#### 2) 低频运行，低频丢步和低频共振

- 当控制脉冲的频率等于或接近步进电动机振荡频率的 $1/k$ 倍， $k = 1, 2, 3, \dots$ ，电机可能出现强烈振动甚至失步，**低频共振，低频丢步**。不能正常工作。

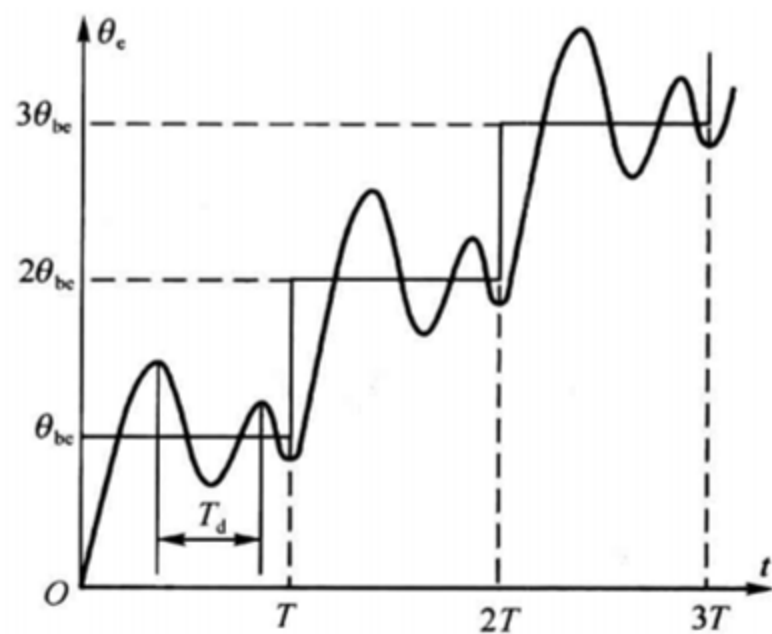
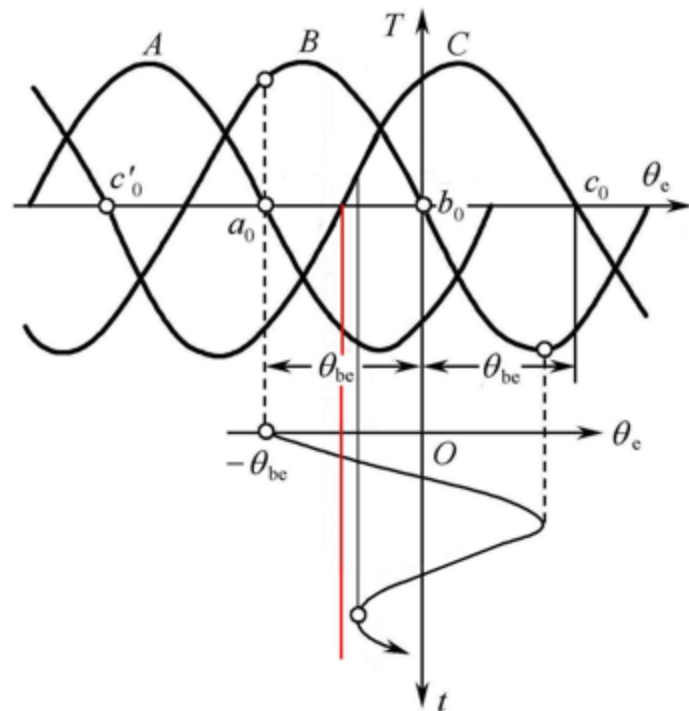


图 5-26 低频共振时的转子运动规律



## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

#### 3) 连续脉冲作用下的平稳运行

当控制频率增加，接近或高于电机振荡频率的2倍，即脉冲周期小于电机振荡周期的一半时，在电机前一步振荡的最大值附近或前一步振荡尚未达到峰值之前，下一个脉冲就到来了，此时电机的运行比较平稳，如图5-27所示。

- 避开电机振荡频率。
- 增加阻尼。

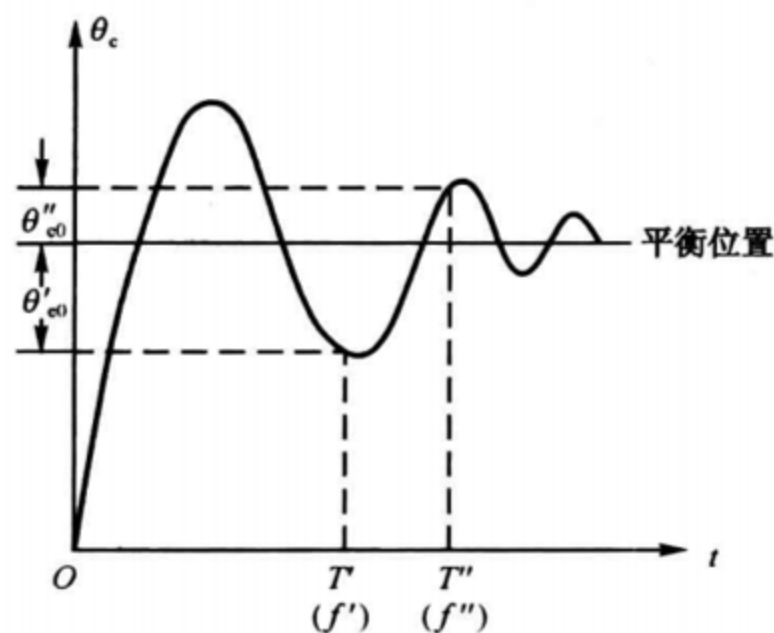


图 5-24 不同脉冲周期的转子位置

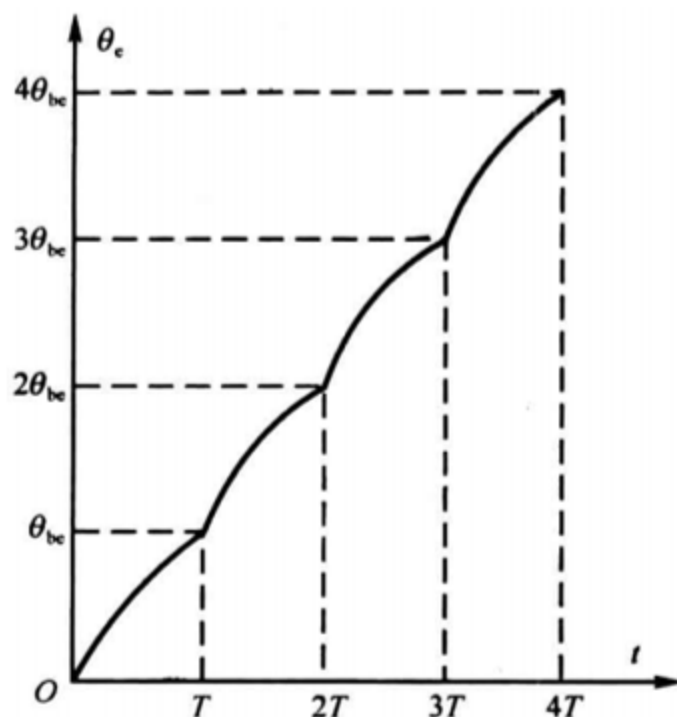


图 5-27 具有较稳定转速的运行

**控制频率接近或者高于电机振荡频率2倍，电机运行比较平稳。**



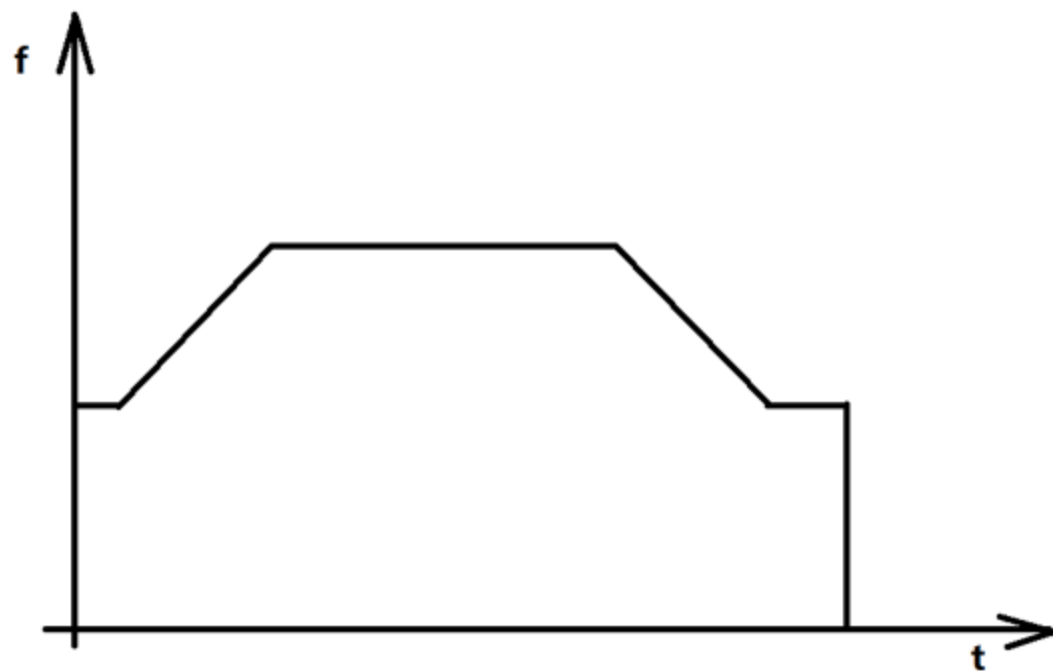


## 4、步进电动机的运行特性

### 4.3 、步进电机不同控制频率下的连续运行

#### 4) 步进电机运行频率的优化

考虑步进电机特性，在启动、运行和停止三个阶段的频率优化。



# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用



## 5、步进电机的驱动

5.1 步进电机驱动概述

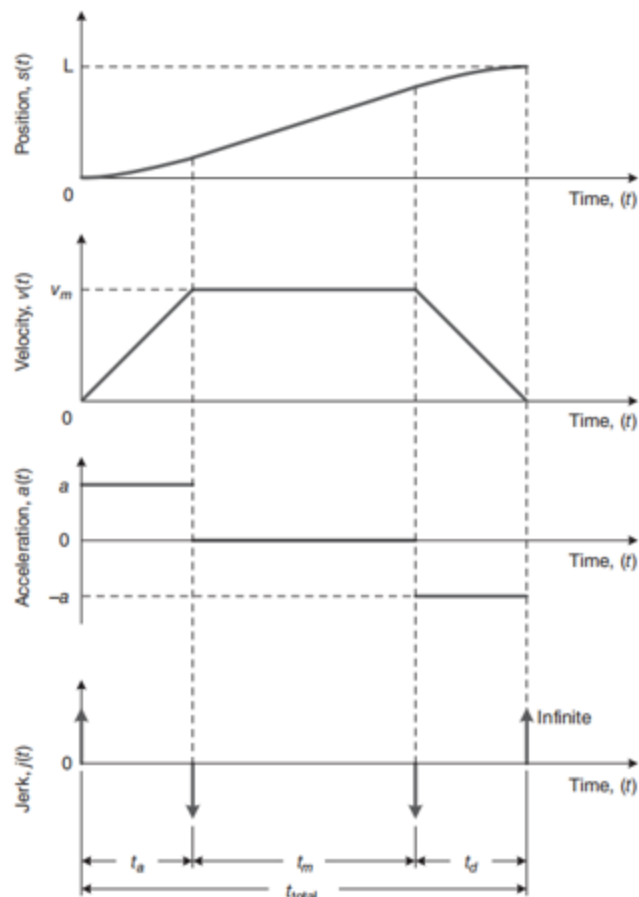
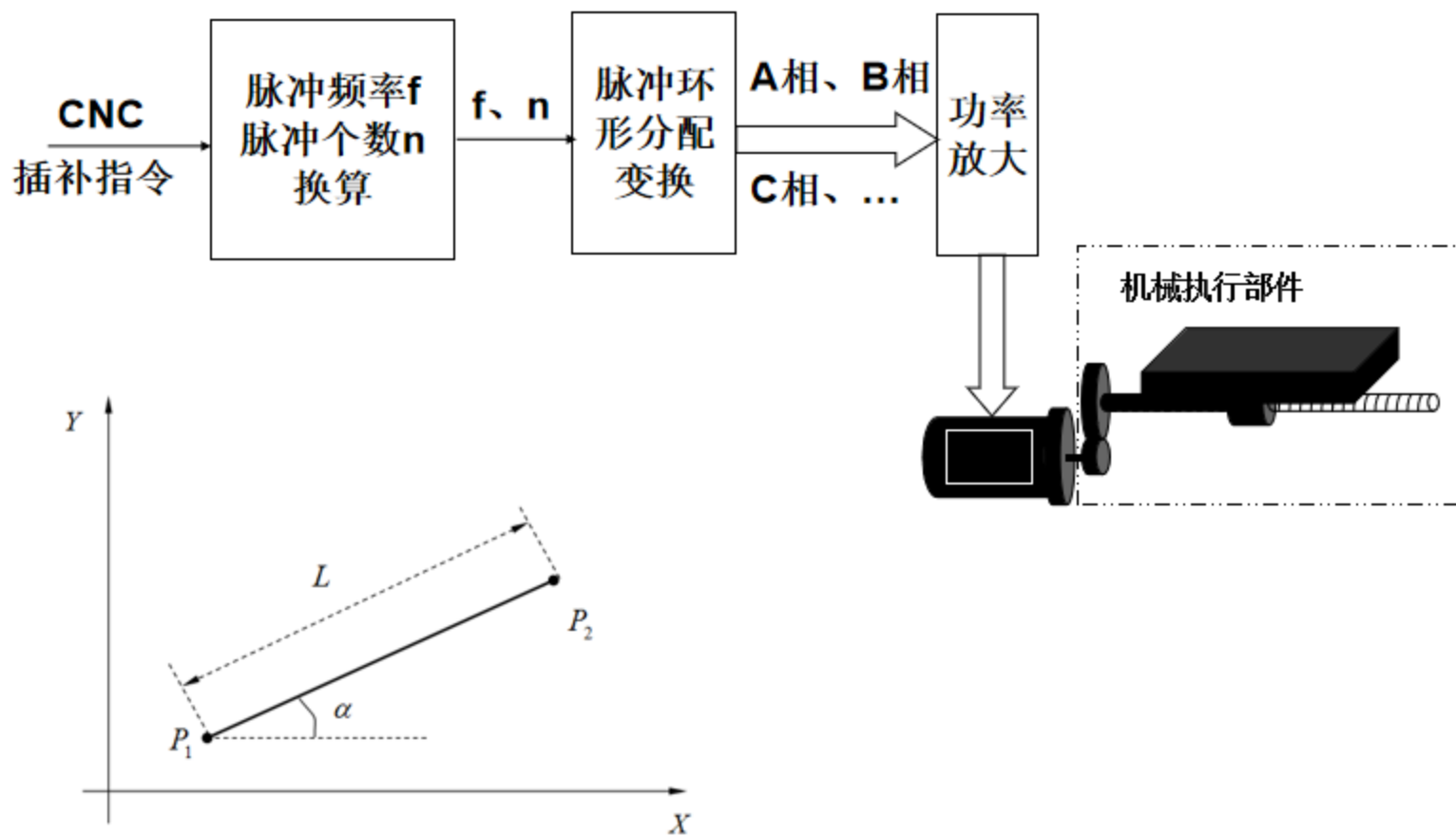
5.2 功率输出级放大电路



# 5、步进电机的驱动

## 5.1 、步进电机驱动概述

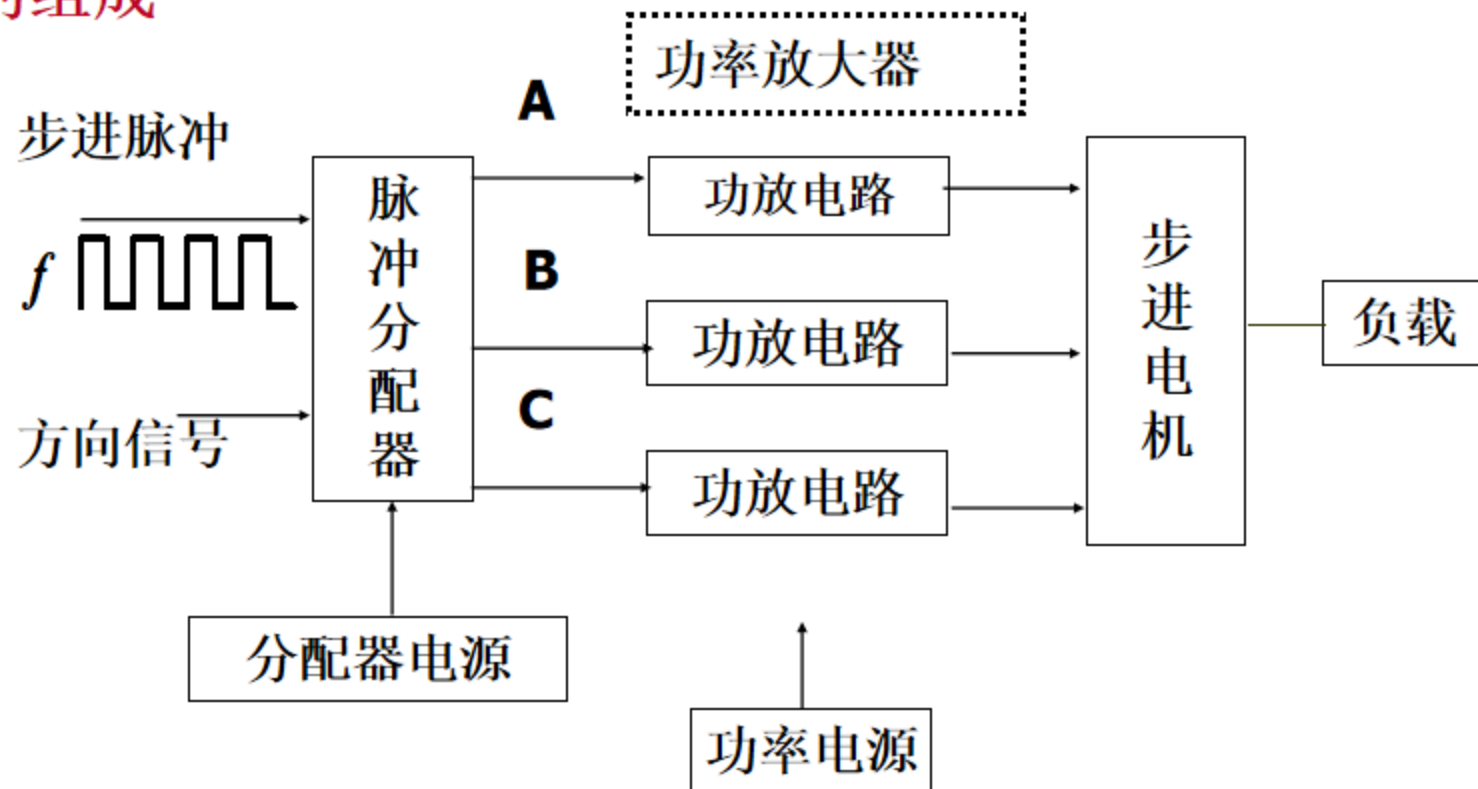
### 步进电机的使用



## 5、步进电机的驱动

### 5.1 、步进电机驱动概述

#### 步进电机驱动器的组成



步进电机驱动器 = 脉冲分配器+功率放大电路



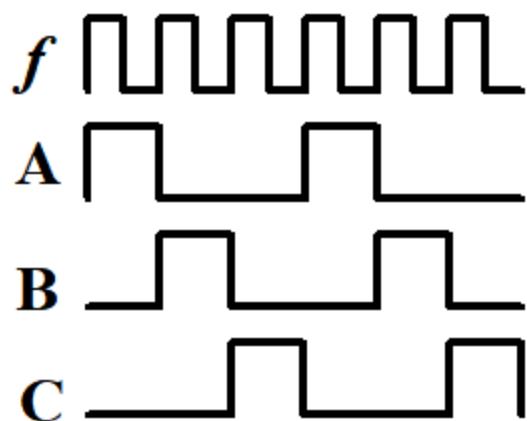


## 5、步进电机的驱动

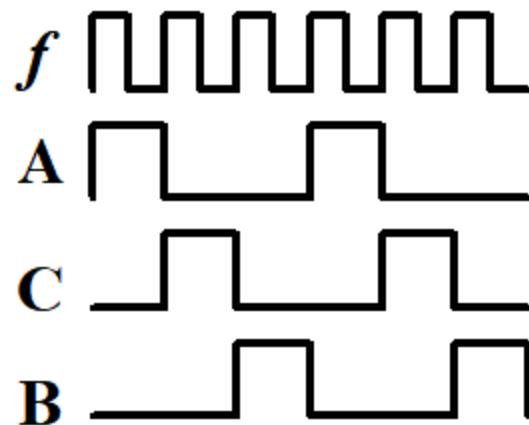
### 5.1 、步进电机驱动概述

#### 1. 脉冲分配器

当方向电平为低时，脉冲分配器的输出按A-B-C的顺序循环产生脉冲。



当方向电平为高时，脉冲分配器的输出按A-C-B的顺序循环产生脉冲。



#### 2. 功率放大器

将脉冲分配器的输出信号进行电流放大后给电动机的定子绕组供电，使电动机的转子产生输出转矩。



## 5、步进电机的驱动

### 5.1 、步进电机驱动概述

#### 脉冲分配器功能

1. 控制脉冲按规定的通电方式分配到每相绕组。
2. 实现脉冲分配的硬件逻辑电路，称为环形分配。
3. 可采用软件实现脉冲分配，这种方式称为软件环分（如：计算机数字控制系统）。
4. 分配器输出的脉冲需进行功率放大，才能驱动步进电动机。



## 5、步进电机的驱动

### 5.1 、步进电机驱动概述

#### 功率放大器功能

将控制脉冲进行电压和电流放大，使脉冲具有一定的功率驱动能力。

#### 要求：

- ① 提高步进电动机的**快速性**；
- ② 提高步进电动机的**平稳性**。



## 5、步进电机的驱动

### 5.2、功率输出放大电路

#### 1. 单电压限流型驱动电路

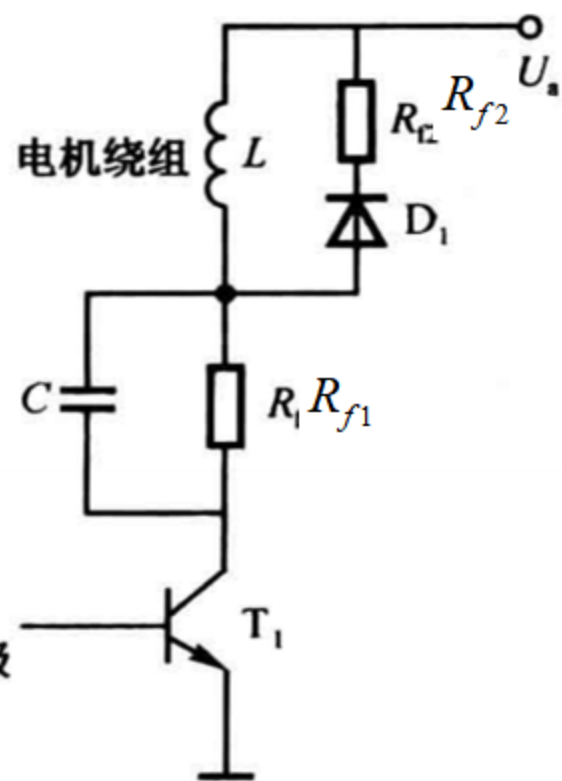


图 5-32 单电压功放电路

a)  $T_1$ ——功率开关。

b)  $L$  (电动机绕组) ——  $L$  中电流不能突变, 经  $T_a$  (时间常数  $T_a = \frac{L}{R_a}$ ) 时间后达到稳态电流 ( $L$ —绕组电感,  $R_a$ —绕组电阻)。  $T_a$  较大时, 严重影响启动频率。

c)  $R_{f1}$  (串联电阻) —  $T_a = \frac{L}{R + R_{f1}} \downarrow\downarrow$  缩短上升的过渡时间, 提高工作速度。

d)  $C$  (并联电容或加速电容) ——  $C$  上的电压不能突变, 在截止到导通的瞬间, 电源电压全落在绕组上,  $i \uparrow\uparrow$ 。

e)  $D_1$  (二极管) ——  $T_1$  截止时起续流和保护作用, 以防绕组产生的反电势击穿。

f)  $R_{f2}$  (串联电阻) —— 使  $i$  波形后沿变陡,  $i \downarrow\downarrow$ 。



## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

#### 1. 单电压限流型驱动电路

单电压驱动电路的优点是线路简单，缺点是电流上升不够快，高频时带负载能力低。

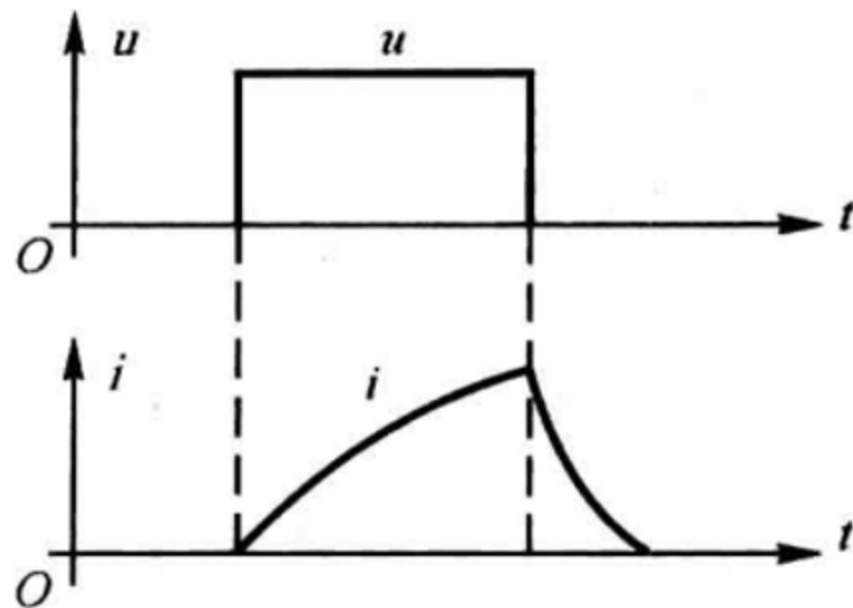


图 5-21 绕组的电压和电流





## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

#### 2. 高低压切换型驱动电路

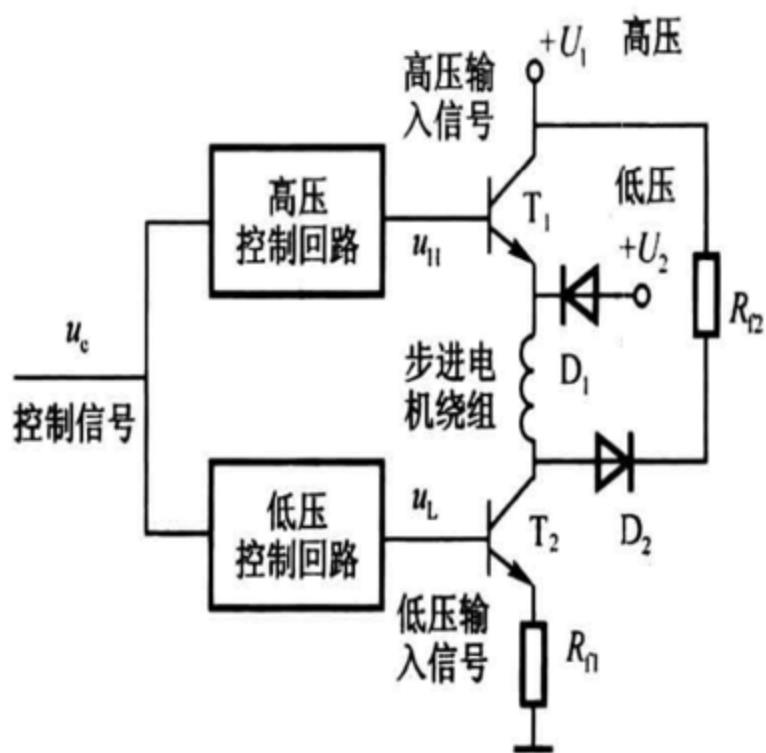


图 5-33 高低压切换型功放电路

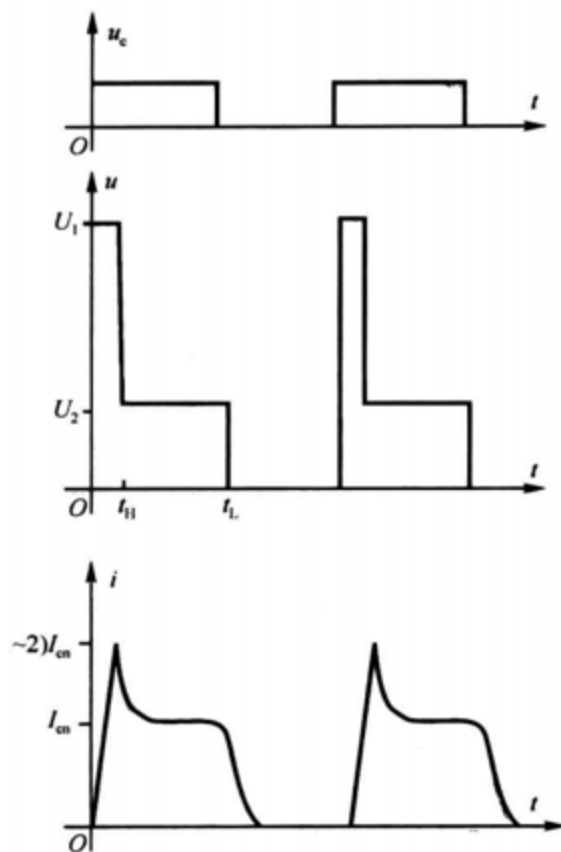


图 5-34 高低压功放的电压和电流波形

- 采用高压和低压两种电压供电。
- $0-t_H$  时间,  $T_1$  和  $T_2$  饱和导通, 高电压  $U_H$  经过  $T_1$  和  $T_2$  加到  $L$  上,  $i$  大幅上升。
- 到  $t_H$  时 (定时方式) 或  $i$  上升到某一数值 (定流方式),  $u_H$  为低电平,  $T_1$  截止,  $L$  的电流由低电压  $U_L$  电源经  $T_2$  维持,  $i$  下降到  $I_{\text{额}}$ 。
- 到  $t_L$  时,  $u_L$  为低电平,  $T_2$  截止,  $i$  下降,  $I=0$ 。
- $u_L$  由脉冲分配器经基极电流放大获得,  $u_H$  由单稳定时或定流装置再经脉冲变压器获得。



## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

#### 2. 高低压切换型驱动电路

该电路的**优点**是在较宽的频率范围有较大的平均电流，能产生较大且稳定的平均转矩，其**缺点**是电流波顶有凹陷，电路较复杂。

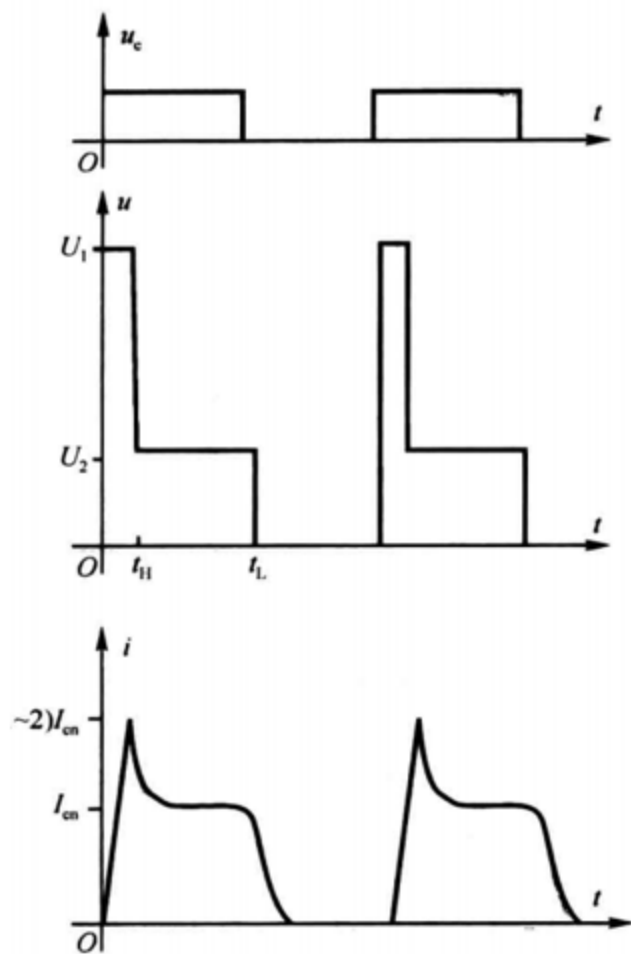


图 5-34 高低压功放的电压和电流波形

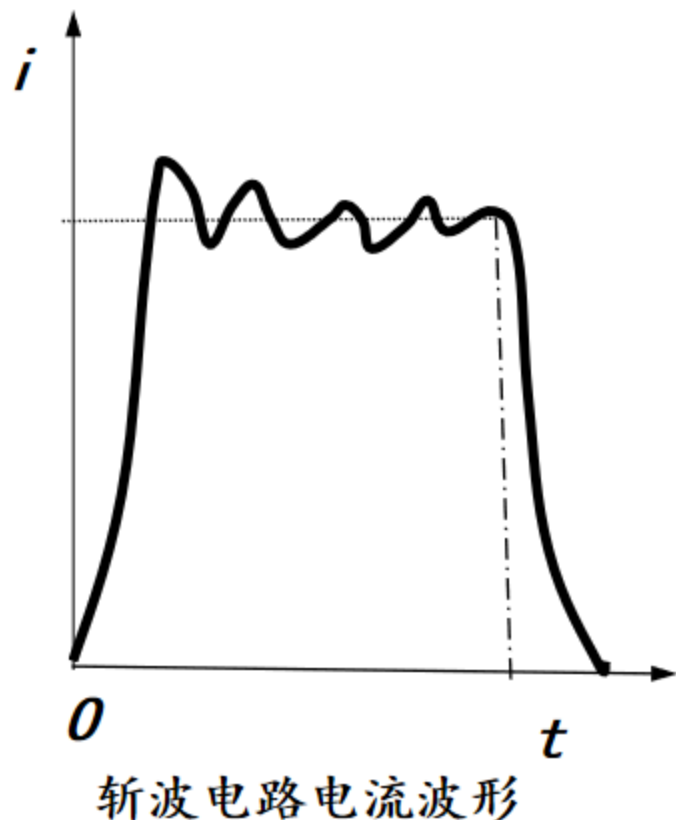
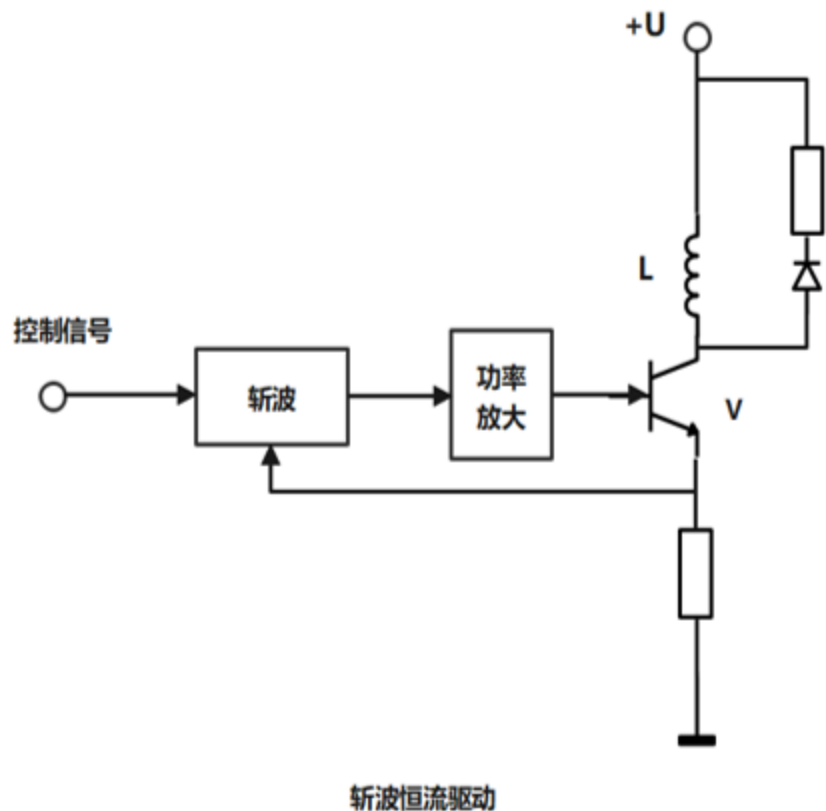


## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

#### 3. 恒流斩波型驱动电路

控制信号为高电平时， $V$ 导通，绕组中电流迅速上升；上升到上限预定值时，通过 $R$ 反馈使 $V$ 截止，绕组中电流迅速下降；下降到下限预定值，通过 $R$ 反馈使 $V$ 导通，绕组电流又上升。反复进行，形成一个在上下预定值间波动的电流波形，近似恒流。功耗小，效率高，运行特性好。



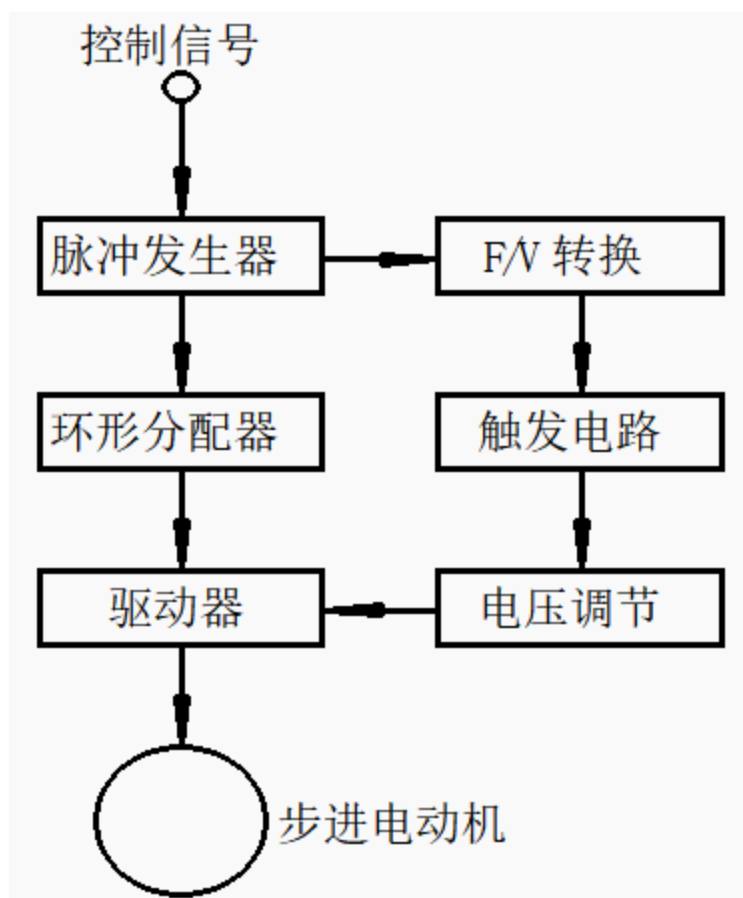
## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

#### 4. 分频段（调频）调压驱动电路

低频时，节拍脉冲较宽，只需较低电源电压，即可达到额定电流；高频时，节拍脉冲变窄，需较高电源电压，使绕组电流迅速上升，以提高步进电机的负载能力。

把输入脉冲频率分为几个频段，每段工作电压不同，高频段采用较高电压，低频段采用较低电压。

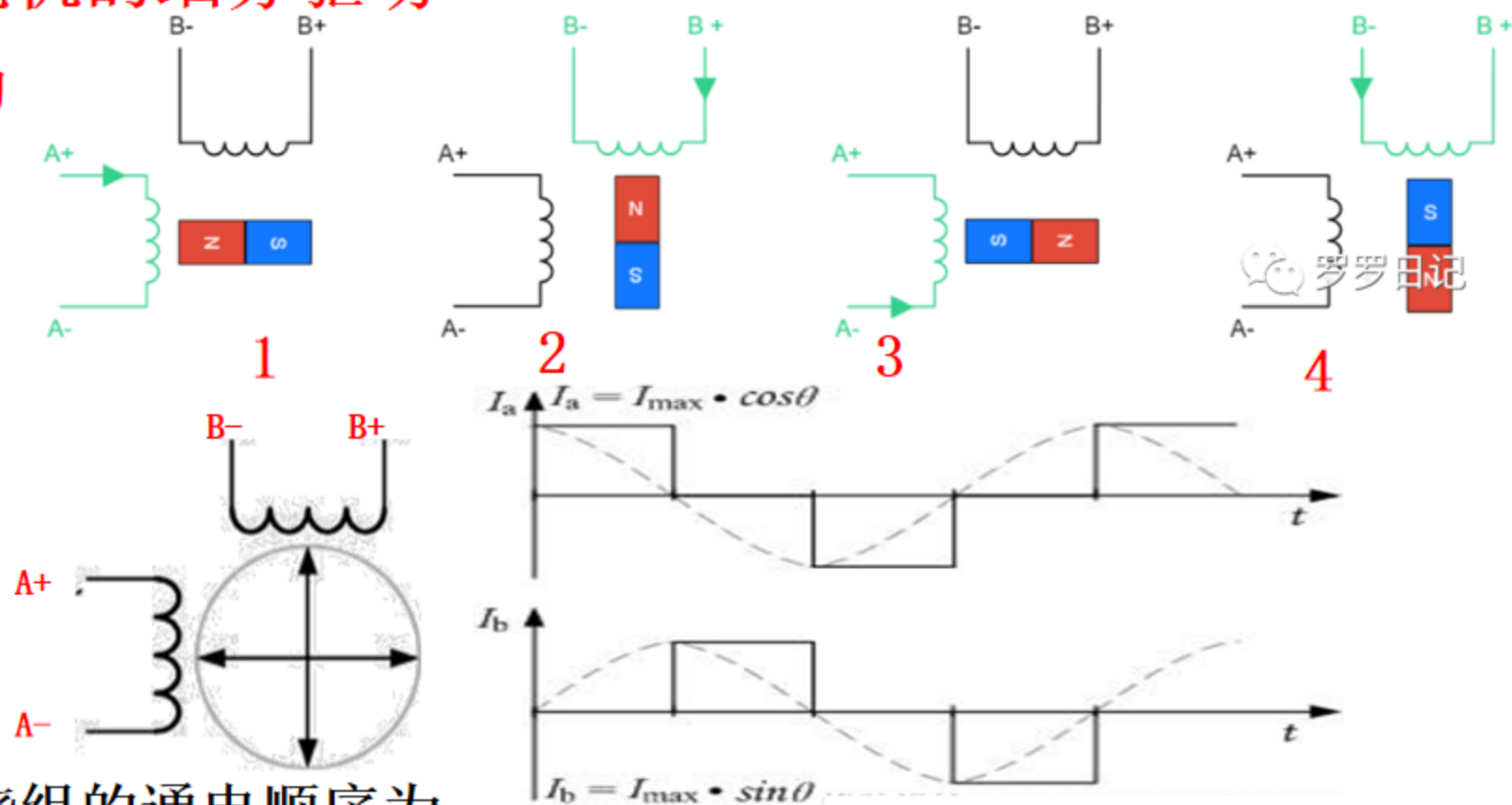


## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

整步驱动



两相绕组的通电顺序为：

**$AA' \rightarrow BB' \rightarrow A'A \rightarrow B'B \rightarrow AA'$**  共四拍。

整步驱动描述出的正弦波非常粗糙，低速电机会抖动，噪声很大。只是软硬件实现简单。



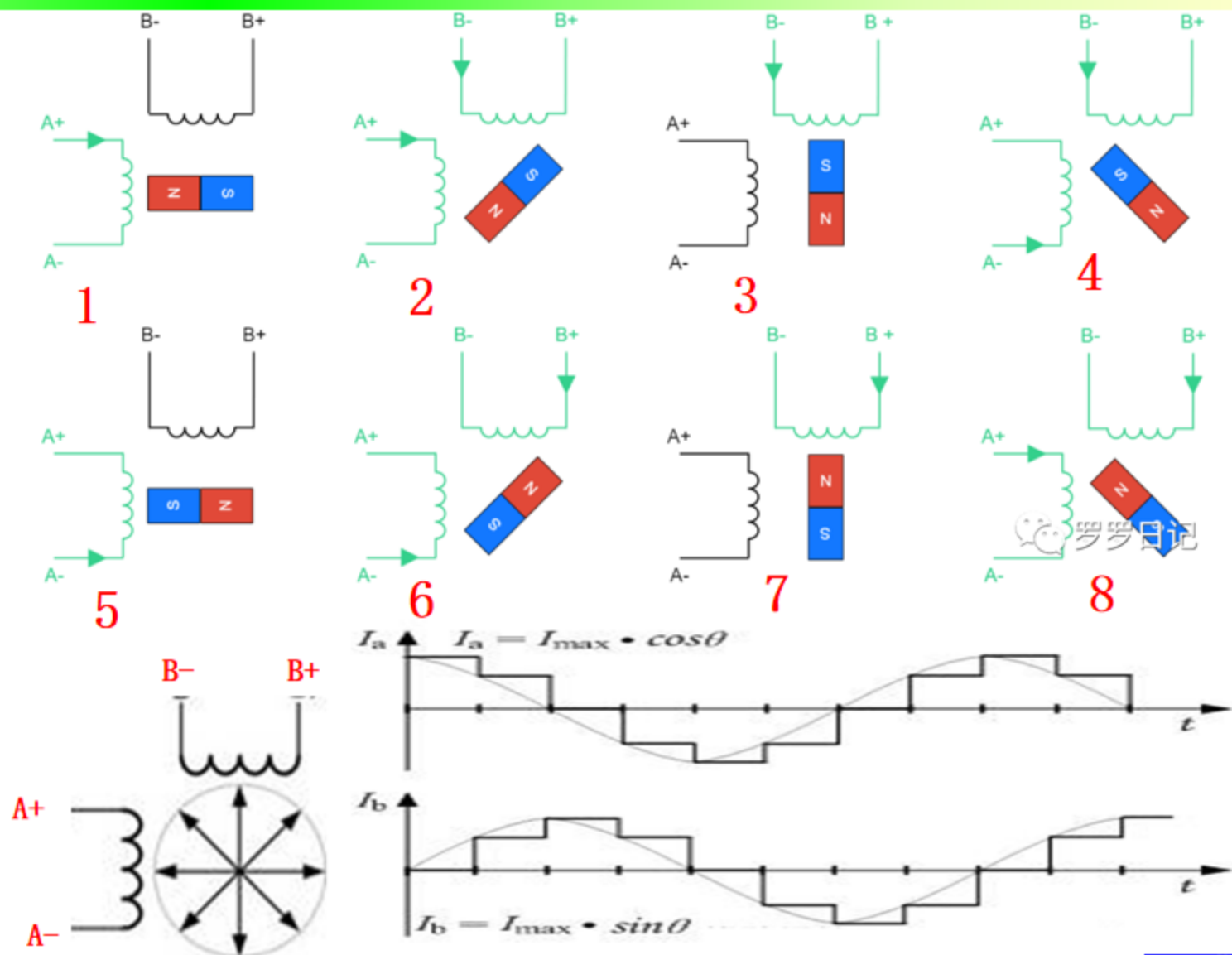


## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

**半步驱动:**绕组中的电流是台阶式地逐渐增加至额定值，切除电流时也是从额定值开始台阶式地逐渐切除。电流波形不是方波，而是阶梯波。相同时通电时，通电电流应该为单相通电电流的0.707倍。

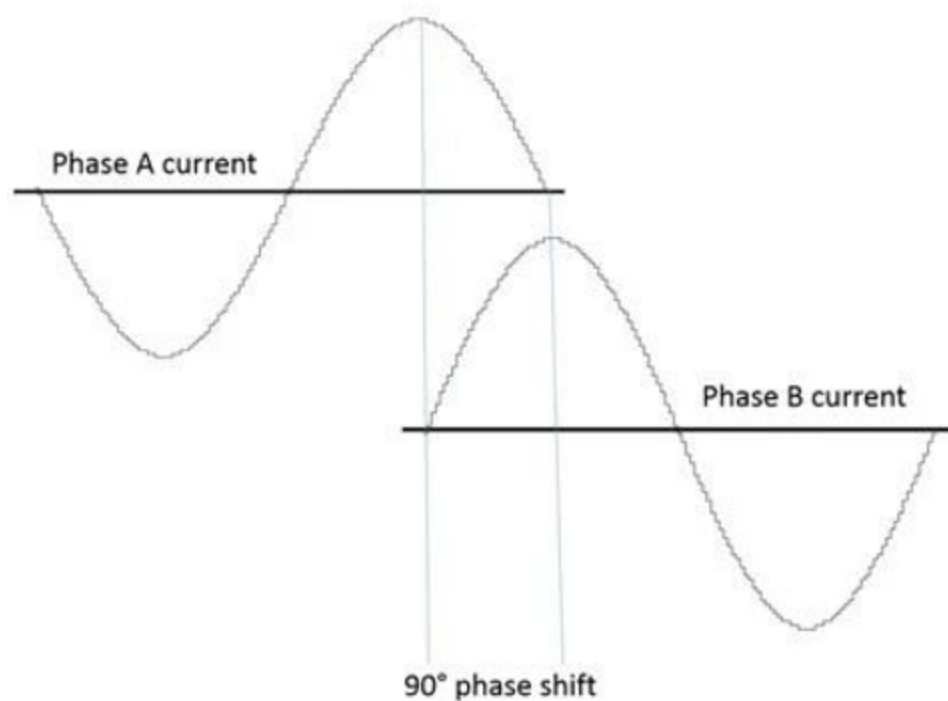
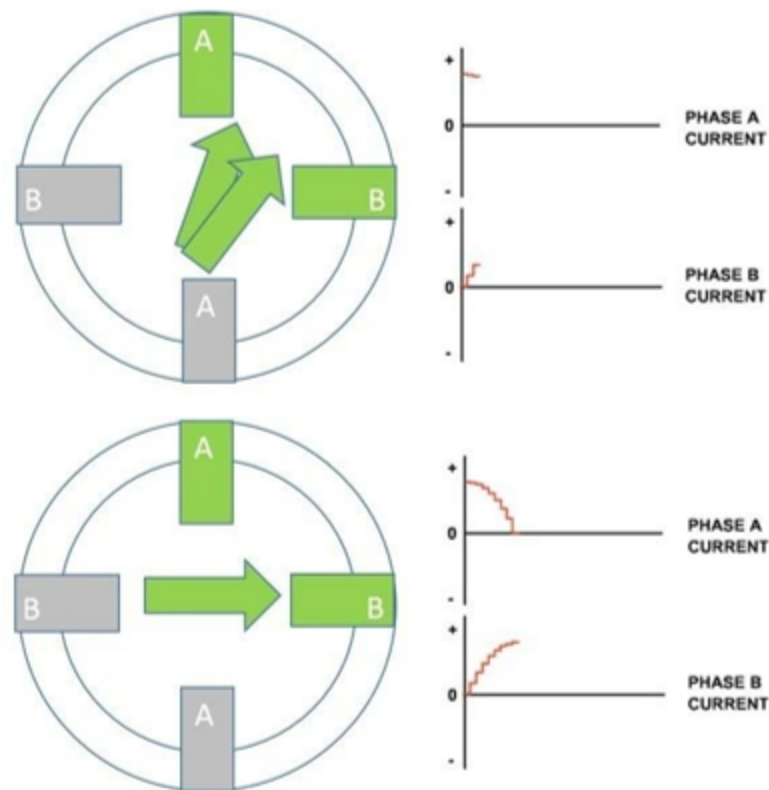


# 5、步进电机的驱动

## 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

A线圈最开始有最大电流，而B线圈此时电流为零，定子指向A线圈。A线圈慢慢减小电流， B线圈慢慢增加电流，因为磁场平衡位置的变化，定子慢步向B线圈转动。宏观来看，A线圈中电流变化接近Cos曲线，B线圈电流变化接近Sin曲线，直到A线圈电流减为零，而B线圈电流达到最大值，定子指向B线圈。



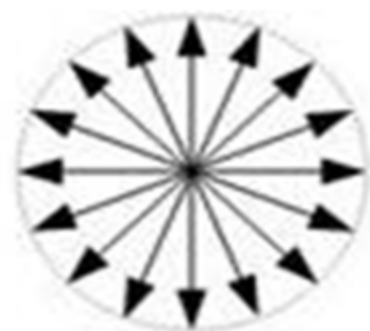
## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

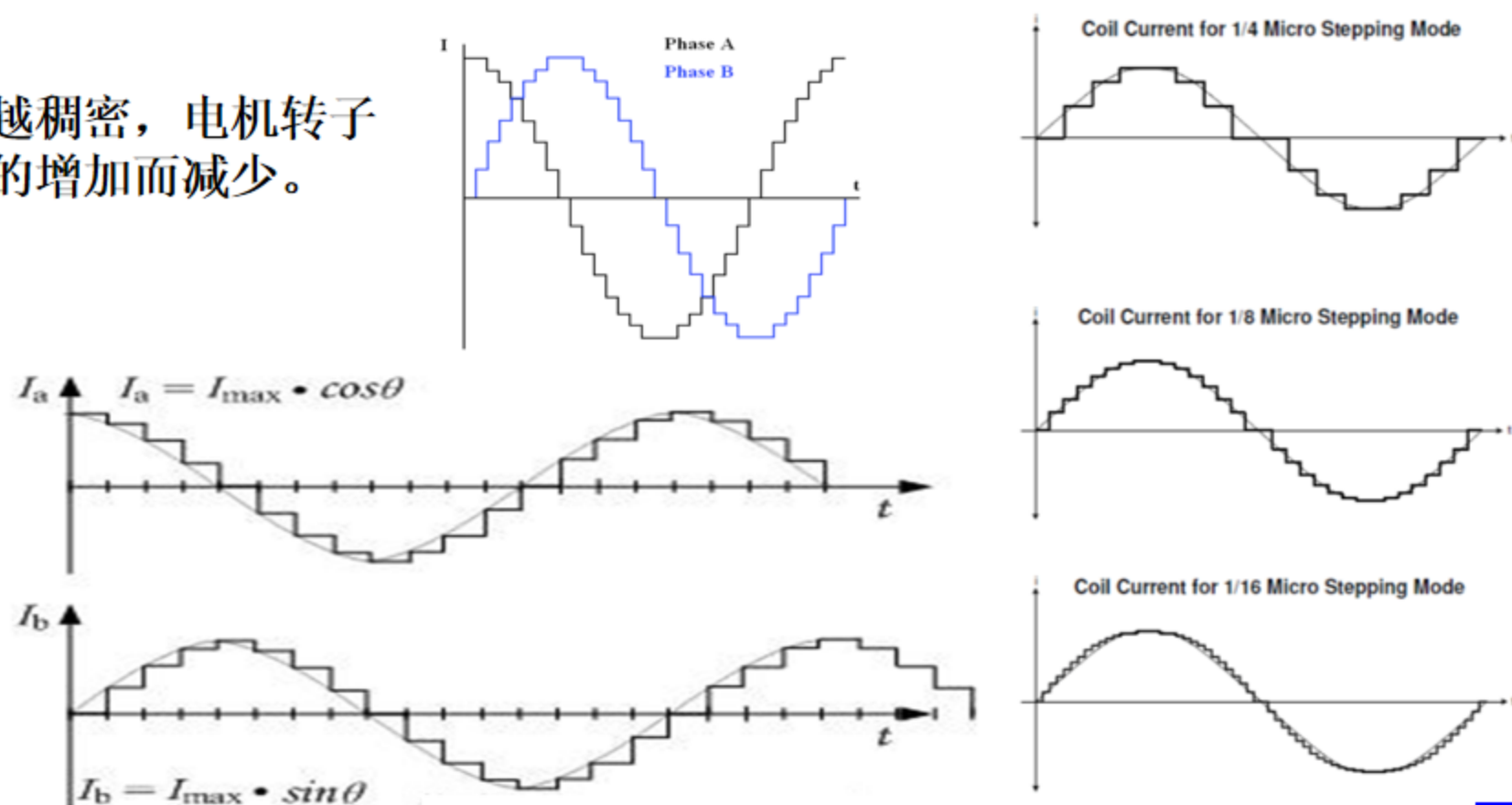
### 5. 步进电机的细分驱动

微步驱动电流示意图：电流每一步的变化的大小，决定了微步运动的大小，上图是1/4，1/8，1/16微步电流变化示意图。

**细分驱动：**电流矢量分割圆越来越稠密，电机转子每走一步的角度将会随着细分数的增加而减少。



细分驱动  
(4细分)

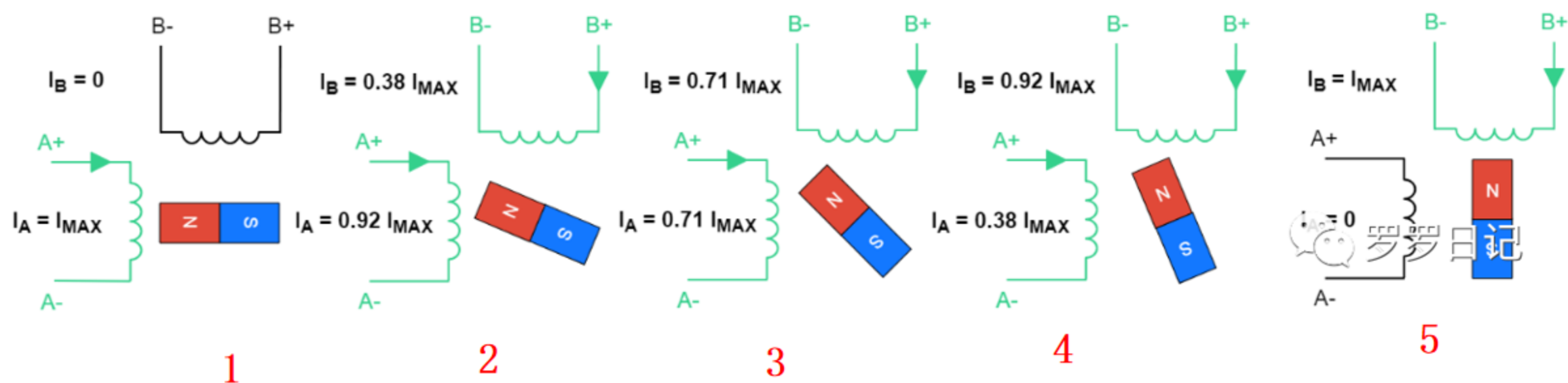


## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

微步运动举例：在图1中，A线圈通满电流，图2中A线圈通最大电流的0.92倍，而B线圈通最大电流的0.38倍，实现 $22.5^\circ$  旋转。同理，图3中，A和B线圈同时通最大电流的0.71倍，可以实现 $45^\circ$  旋转。



# 5、步进电机的驱动

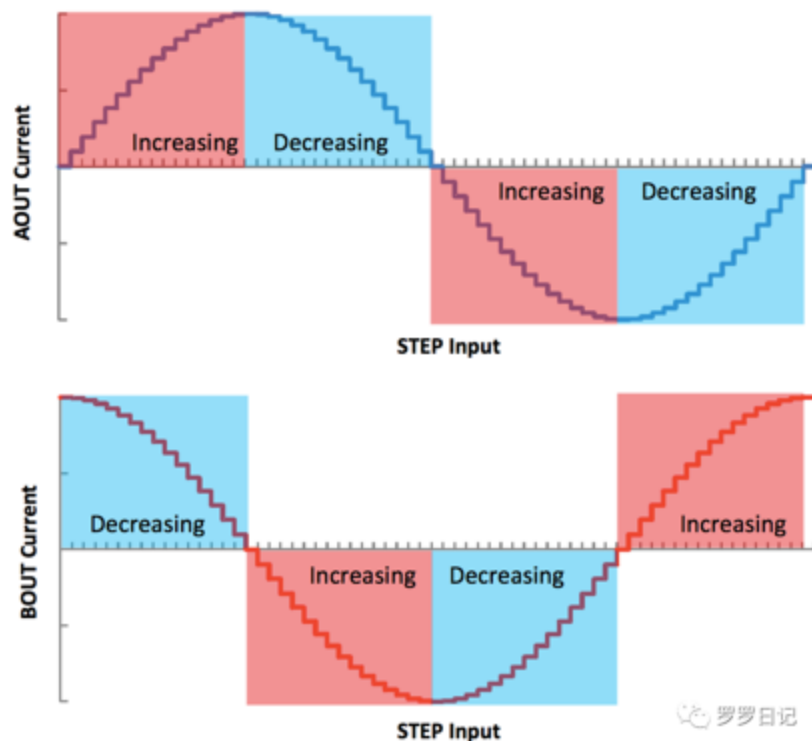
## 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

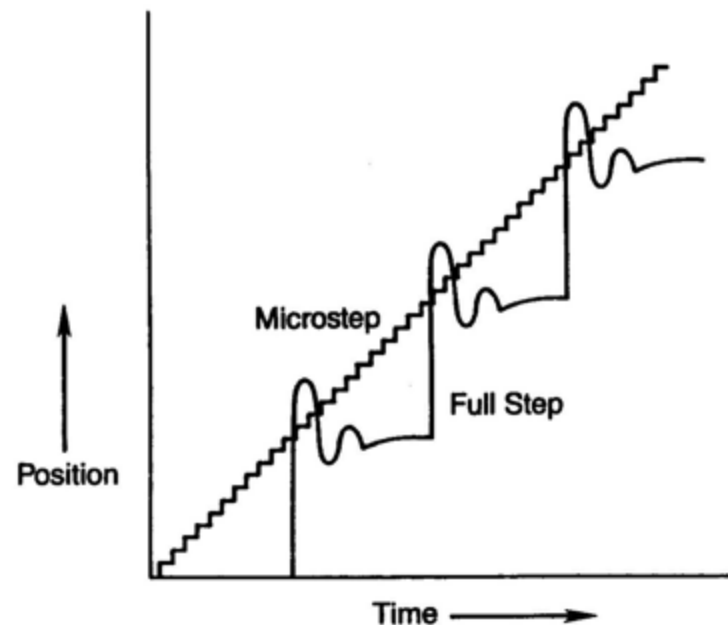
细分驱动通过改变相电流的大小，以改变合成磁场的夹角来控制步进电机运转。

驱动器细分后的主要优点：

- (1) 消除了电机的低频振荡。
- (2) 同时也提高了电机的输出转矩。
- (3) 提高了电机步进运行的分辨率。



Microstepped Phase Currents



Step Response



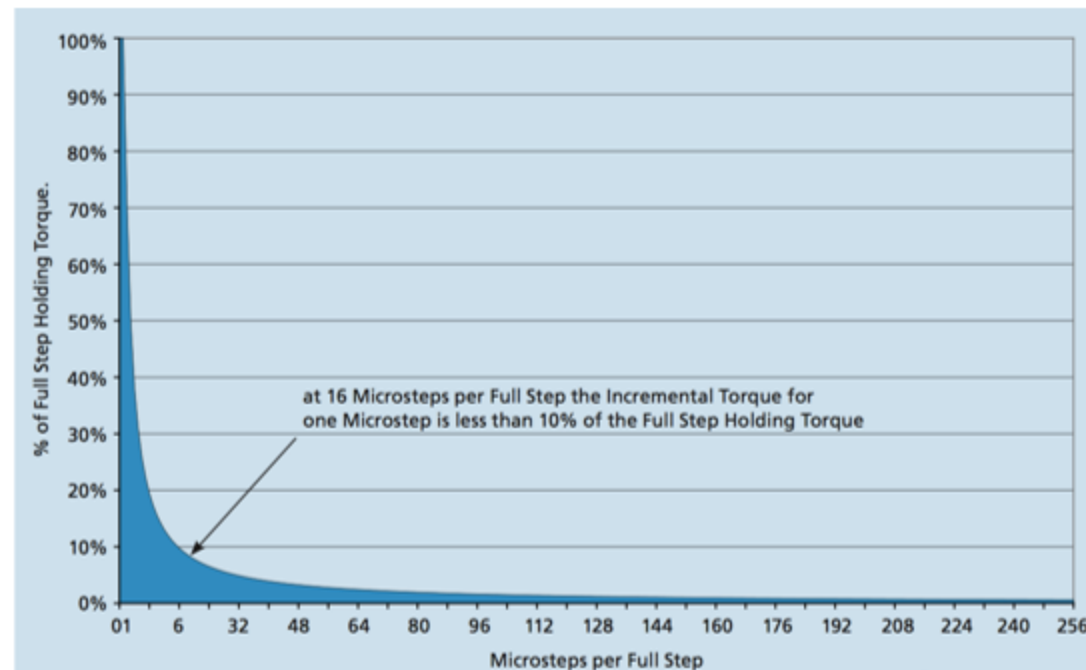
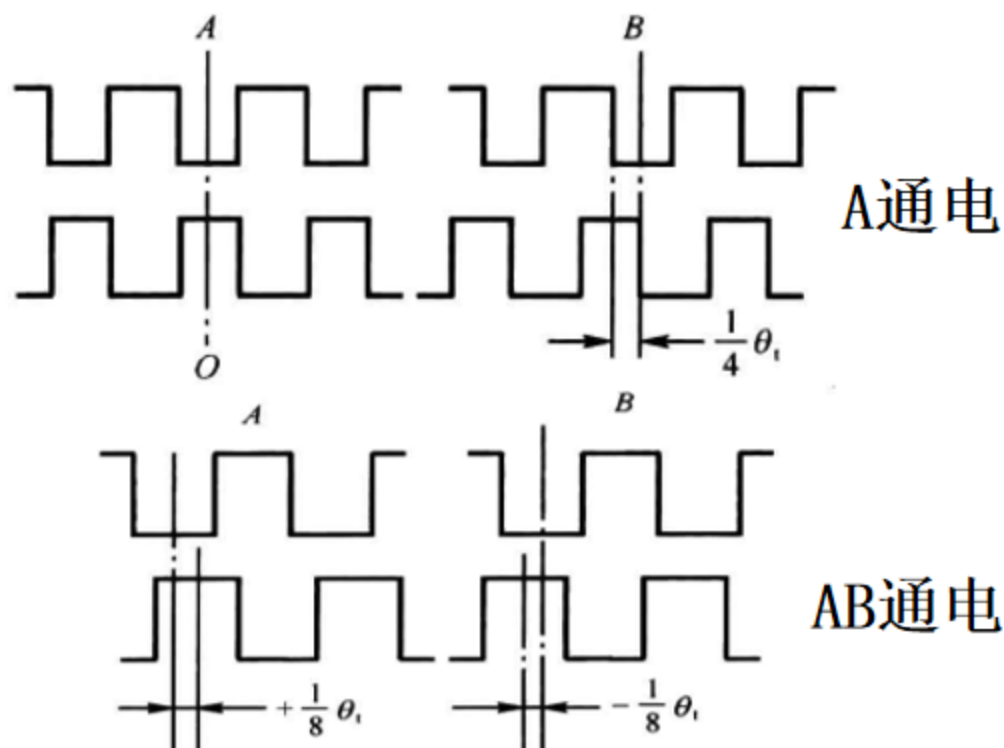


# 5、步进电机的驱动

## 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

采用细分功放电路不仅可以使步进电动机获得更小的步距角(角分级), 更高的分辨率, 更小的脉冲当量(一个脉冲对应的位移), 也可以明显减小电机的振动、噪声, 改善步进电机的低频性能。但是代价就是, 每一微步的**增量扭矩**大大减小。



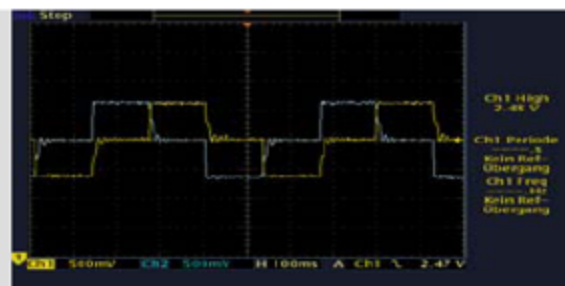
# 5、步进电机的驱动

## 5.2 、功率输出放大电路

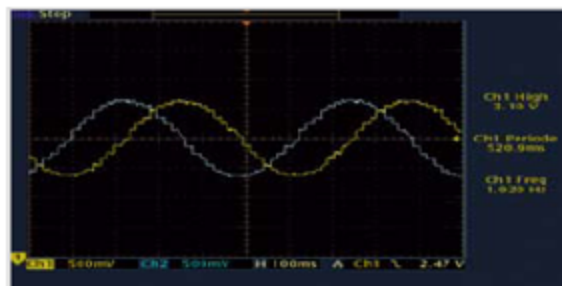
### 5. 步进电机的细分驱动

电流波形

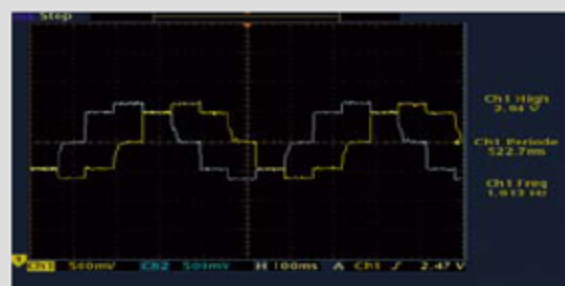
无细分



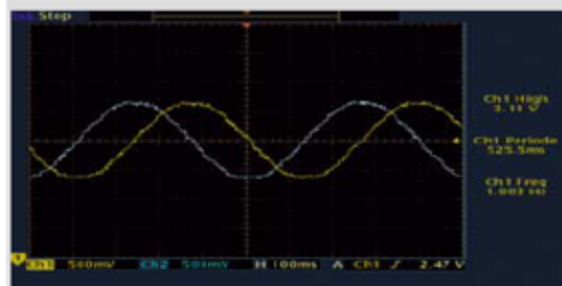
8 细分



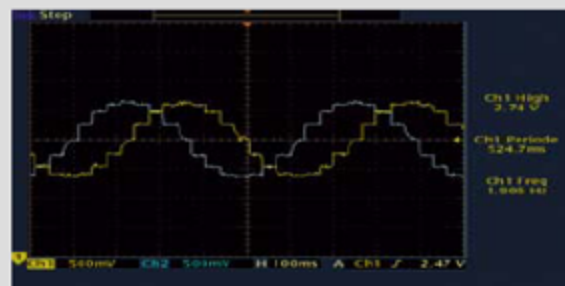
2 细分



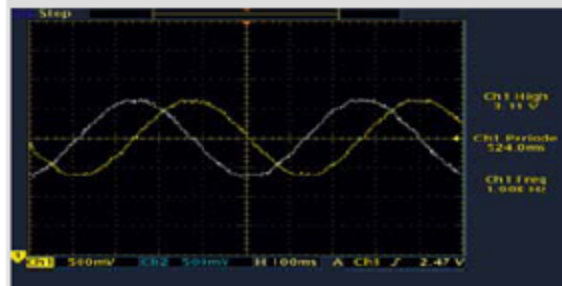
16 细分



4 细分



32 细分



1、在工程应用中，低速可增大细分数，速度增加时，减少细分数。细分后每一步的步距角不一定相等。

2、实际步进电机应用中，由于电机制造的精度限制和电流控制的精度限制，超过16倍以上的细分驱动，已不能更进一步改善驱动性能。



## 5、步进电机的驱动

### 5.2 、功率输出放大电路

### 5. 步进电机的细分驱动

步进角为 $1.8^\circ$  的两相混合式步进电机，如果细分驱动器的细分数设置为4，那么电机的运转分辨率为每个脉冲 $0.45^\circ$ ，电机的精度能否达到或接近 $0.45^\circ$ ，还取决于细分驱动器的细分电流控制精度等其它因素。不同厂家的细分驱动器精度可能差别很大，细分数越大精度越难控制。**虽然微步可以实现更高的分辨率，但是并不一定能带来更好的精度。**

微步驱动的主要作用在于减小机械噪声，减小共振，减小机械传动结构的磨损，实现更平滑的运动。

有研究表明，只有当载荷非常轻，微细步的扭矩足以驱动负载时，才可以提高精度。



# 目 录

- 1、步进电动机原理
- 2、步进电机的分类与结构
- 3、步进电机的静特性
- 4、步进电机的运行特性
- 5、步进电机的驱动
- 6、步进电机系统的应用



## 6、步进电机系统的应用

接线方式：两相电机--**两相四线**；

三相电机—三相六线、三相四线、**三相三线**；

四相电机—四相八线、**四相六线**、四相五线；

五相电机—五相五线、**五相十线**

**工作温度**：步进电机外表允许的最高温度取决于不同电机磁性材料的退磁点。

步进电机一般外表温度在摄氏80-90度完全正常。





## 6、步进电机系统的应用



### General Specifications (通用技术参数) 混合式步进电机

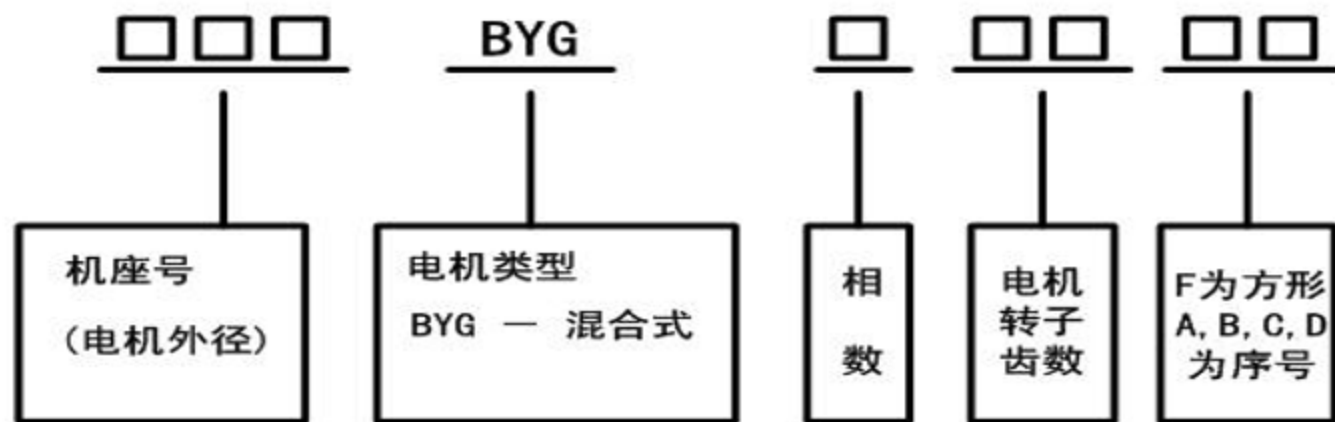
步距角 Step Angle	-----	1.8°±5%
绝缘电阻 Insulation Resistant	-----	500V DC 100MΩ Min
绝缘强度 Insulation Strength	-----	50Hz 1Minute 500V Min
环境温度 Ambient Temperature	-----	-20℃~+50℃
温升 Temperature Rise	-----	80℃ Max.
径向跳动 Radial Play	-----	0.02mm Max
轴向跳动 End Play	-----	0.1-0.3mm

步距角	相数	电压	电流/相	电阻	电感	定位转矩	转动惯量	最大静转矩	重量	外形尺寸	接线图	外形图
Step Angle	No.of phase	Voltage	Phase Current	Phase Resistance	Phase Inductance	Detent Torque	Rotor Inertia	Holding Torque	Weight	Size	Wire	
(°)		(VDC)	(A)	(Ω)	(mH)	g.cm	g.cm <sup>2</sup>	(kg.cm)	(kg)	L0(mm) L1(mm)	Diagram	Fig



## 6、步进电机系统的应用

### 步进电机型号说明



规格型号	相数	步距角 (°)	静态相电流 (A)	相电阻 (Ω)	相电感 (mH)	保持转矩 (N.m)	定位转矩 (N.m)	空载启动频率 (半步方式) (KHz)	重量 (Kg)	转动惯量 (g.cm <sup>2</sup> )	外形图	接线图
86BYG250A-SAFRBC-0202	2	0.9/1.8	2	1.7	9.0	2.5	0.2	1.7	2.0	1540	1	a
86BYG250A-SAFRBL-0402	2	0.9/1.8	4	0.43	2.3	2.5	0.2	1.7	2.0	1540	1	b
86BYG250B-SAFRBC-0202	2	0.9/1.8	2	2.6	16.0	5.0	0.2	1.7	3.2	3000	1	a
86BYG250B-SAFRBL-0402	2	0.9/1.8	4	0.65	4.0	5.0	0.2	1.7	3.2	3000	1	b



## 6、步进电机系统的应用

**步距角 $\theta_b$** ：对应一个脉冲信号，电机转子转过的角位移用 $\theta_b$ 表示。一般步进电机的精度为步距角的**3-5%**，**且不累积**。（步进电机不失步，只有这个精度误差，不累计。失步那就是负载或者频率设置出现问题了）

目前常用的有两相、三相、四相、五相步进电机。电机相数不同，其步距角也不同。一般两相电机的步距角为 $0.9^\circ / 1.8^\circ$ ；三相、五相的步距角的为 $0.75^\circ / 1.5^\circ$ 。



## 6、步进电机系统的应用

**保持转矩**（HOLDING TORQUE）：或静转矩，是指电机通以额定电流，且处于静态锁定状态时，电机所能输出的最大转矩。是电机选型时最重要的参数之一。通常步进电机低速时可输出的最大转矩接近保持转矩。

**定位转矩**（DETENT TORQUE）：电机各相绕组开路时，由于混合式电机转子上有永磁材料产生磁场，从而产生的转矩。一般定位转矩远小于保持转矩。是否存在定位转矩是混合式步进电机区别于反应式步进电机的重要标志。



## 6、步进电机系统的应用

	步进电机系统	伺服电机系统
力矩范围	中小力矩（一般在 20Nm 以下）	小中大，全范围
速度范围	低（一般在 2000RPM 以下，大力矩电机小于 1000RPM）	高（可达 5000RPM），直流伺服电机更可达 1~2 万转/分
控制方式	主要是位置控制	多样化智能化的控制方式，位置/转速/转矩方式
平滑性	低速时有振动（但用细分型驱动器则可明显改善）	好，运行平滑
精度	一般较低，细分型驱动时较高	高（具体要看反馈装置的分辨率）
矩频特性	高速时，力矩下降快	力矩特性好，特性较硬
过载特性	过载时会失步	可 3 倍过载（短时）
反馈方式	大多数为开环控制，也可接编码器，防止失步	闭环方式，编码器反馈
编码器类型	-	光电型旋转编码器（增量型/绝对值型），旋转变压器型
响应速度	一般	快
耐振动	好	一般（旋转变压器型可耐振动）
温升	运行温度高	一般
维护性	基本可以免维护	较好
价格	低	高





## 6、步进电机系统的应用

工作时的步数或转速（角度控制或速度控制）只与控制脉冲同步，而与电压、负载、温度、冲击（环境条件）等因素相对无关。

1、步距角  $\theta_b$  —— 步进电动机的主要性能指标，也直接影响启动和运行频率。 $\theta_b \leq i\theta_{\min}$

式中： $i$  —— 传动比（电机转速/负载转速）；

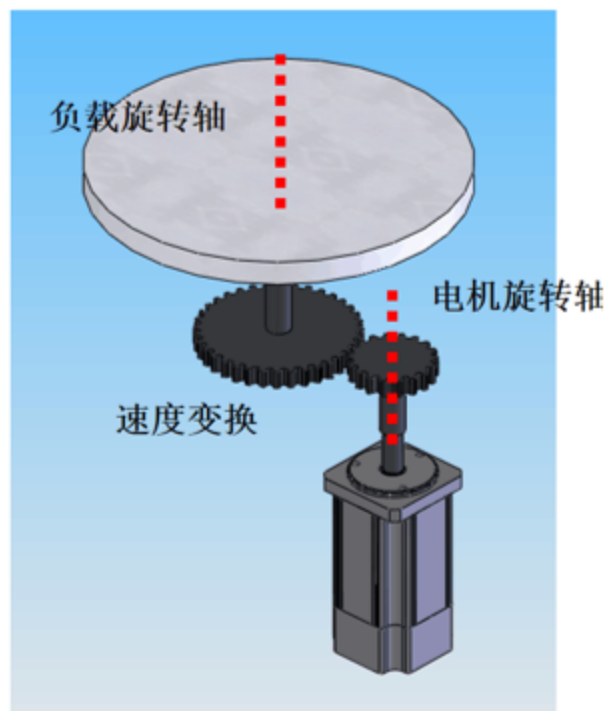
$\theta_{\min}$  —— 负载轴要求的最小位移增量（或称脉冲当量）。

2、步距精度——用一周内最大的步距角误差值表示。

步距精度

$$\Delta\theta_b \leq i(\Delta\theta_L)$$

式中： $\Delta\theta_L$  —— 负载轴上所允许的角度误差。



## 6、步进电机系统的应用

3、最大负载转矩限制，要求：

$$T_{st} \geq KT_L$$

式中： $T_{st}$  ——步进电动机启动转矩；

$K$  ——为系数，一般取**2-3.5**；

$T_L$  ——为折算到电机轴上的总负载转矩  
包括负载的阻转矩和加速转矩



## 6、步进电机系统的应用

### 4、脉冲信号频率对运行的影响

- 空载启动频率  $f_{0st}$  —— 步进电动机在空载情况下，不失步启动所允许的最高频率。

在负载情况下，不失步启动所允许的最高频率随负载的增加而显著下降。

- 连续运行频率  $f_c$  —— 当步进电动机运行频率连续上升时，电动机不失步运行的最高频率。

$$f_c > f = \frac{360}{\theta_b} \cdot \frac{n}{60} = \frac{6n}{\theta_b} = \frac{6in_L}{\theta_b}$$

$f$  为所要求的电机运行控制频率

$n$  为所要求的电机轴的转速 (r/min);  $n_L$  为负载轴的转速

$\theta_b$  —— 步距角 (度);

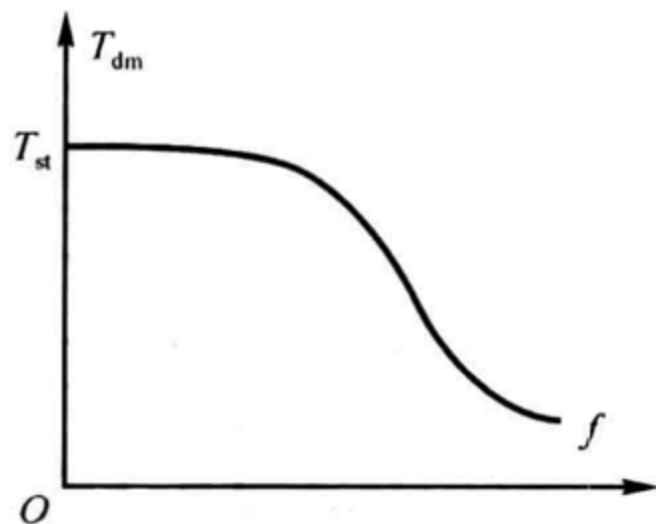


图 5-19 运行矩频特性



## 6、步进电机系统的应用

### 步进电机系统应用的注意事项

- 1) 驱动电源的优劣对控制系统的运行影响很大。
- 2) 若负载转动惯量较大，则在低频下启动，再上升到工作频率；停车时从工作频率下降到适当频率再停车。
- 3) 在工作过程中，避免由负载突变而引起的误差。
- 4) 在工作中若发生失步现象，一般先检查负载（是否过大）、电源电压（是否正常），再检查驱动电流波形（是否正常）。



## 6、步进电机系统的应用

### 步进电机系统应用的注意事项

- 5) 步进电机是增量运动，上电初始不确定转子在什么位置，在许多应用场合需要配置寻零传感器，进行寻零运动后，获得绝对位置，进行绝对位置伺服运动。
- 6) 细分驱动的步进电动机系统也有配装位置传感器，构成位置闭环控制系统应用的方案。

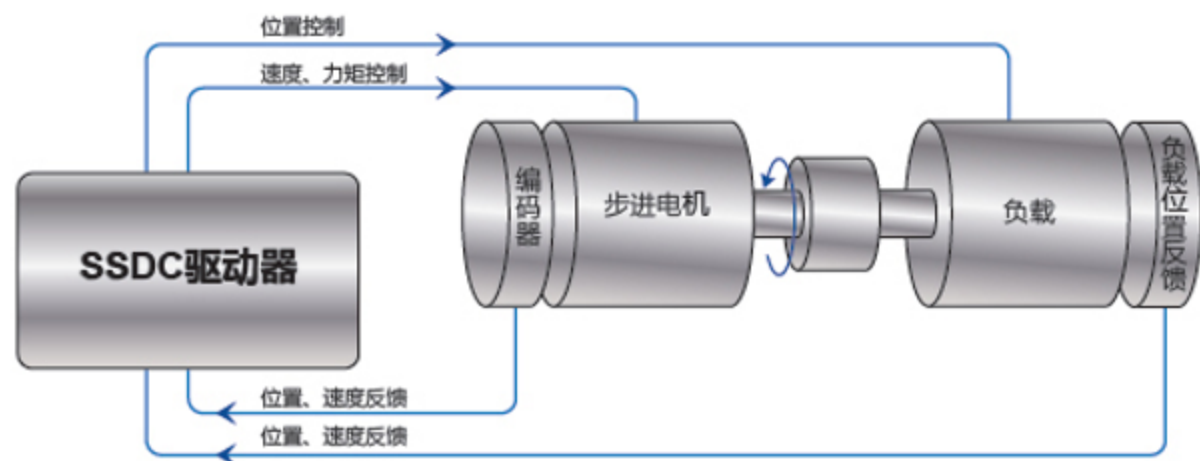




## 6、步进电机系统的应用

### 闭环控制的步进电机系统

步进伺服电机是步进电机领域的一项创新革命，本体是步进电机，增加位置反馈器件(光电编码器或磁编码器)，运用类似伺服电机的控制方法形成的闭环控制系统。它通过伺服技术提高步进电机的性能，创造出具有优异特性和广泛功能的产品，是紧凑电机+驱动+编码器+控制器全合一解决方案。



## 6、步进电机系统的应用

### 闭环控制的步进电机系统

闭环步进电机驱动器适合各种转矩要求较大的自动化设备和仪器，例如：雕刻机、剥线机、打标机、切割机、激光照排、绘图仪、数控机床、自动装配设备等。在用户期望小噪声、高速度、低振动的设备中应用效果特佳。

- 精确的位置及速度控制以满足苛刻的应用要求；
- 高鲁棒性的伺服控制可适应宽范围的惯性负载和摩擦负载变化；
- 内置高分辨率编码器，提供了精确的位置精度，最小定位误差仅为 $\pm 1$ 脉冲。



## 6、步进电机系统的应用

### 步进电机的优缺点

优点	1	电机的旋转角度与输入脉冲数成正比。
	2	电机在静止状态下具有满转矩，(需要绕组通电),而且中低速有很高的速度扭矩特性。
	3	误差不累积:精确的定位和可重复性。好的步进电机的精度为每步角度的3%-5%,并且误差从一步到下一步是不累积的。
	4	对启动/停止/反转的响应出色。
	5	非常可靠,因为电动机中没有接触刷,因此,电机的寿命取决于电机中轴承的寿命。
	6	电机对输入脉冲响应,无需反馈,可以实现开环控制,使电机及驱动系统更简单,更省钱。
	7	带负载情况时,可以实现极低速的同步旋转。
	8	由于转速与输入频率成正比,因此可以实现多种转速。
缺点	1	如果控制不当,可能会产生共振,丢步。
	2	扭矩随速度提高快速下降,所以不适用于极高的运行速度



# 步进电机自测题

填空题：

1) 步进电动机转角的大小取决于控制脉冲的个数（数量），转速大小取决于控制脉冲的频率。  
三相混合式步进电动机转子80齿，其齿距角是4.5度，单拍步距角是1.5度；若采用8  
细分驱动电路，上述三相步进电动机步距角变为0.1875度。

简答题：

1、步进电机的转速和负载大小有关系吗？怎样改变步进电机的转向？

答：转速与负载大小无关，转速是人为输入量。

改变绕组通电顺序改变步进电机转向

2、有一工作在步距角为 $1.8^\circ$ 模式的步进电机，给电机发100个正转脉冲后，电机正向旋转了 $147.6^\circ$ ，分析产生问题的可能原因，并给出可能的解决方法。

答：原因为 1、指令速度太高或者速度变化太快；2、负载过大。

解决方法，调整速度大小和变化到合适，减少负载。



# 步进电机自测题

选择题：

1) 一步进电机正常运行时步距误差不大于 $0.1^\circ$ 。若该步进电机正常（未发生丢步或过冲）运行500步，最大误差角的范围是 D。

A. 不大于 $10^\circ$

B. 不大于 $5^\circ$

C. 大于 $5^\circ$

D. 不大于 $0.1^\circ$

2) 三相步进电动机合理的极齿配合关系是 BD。

A. 4极50齿

B. 6极40齿

C. 8极100齿

D. 3极80齿





## 步进电机自测题

3) 对步进电动机采用细分驱动, 可以: AB。

A. 获得更小的步距角

B. 减小步进电机的振动与噪声

C. 提高步进电机的最大静转矩

D. 提高步进电机的最高转速

4) 磁阻式步进电机的定、转子铁芯均采用B。

A. 硬磁材料

B. 软磁材料

C. 顺磁材料

D. 抗磁



# 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。

