



自动控制实践I 步进电动机

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

目 录

- 1 步进电动机概述
- 2 磁阻式步进电动机的原理
- 3 磁阻式步进电机的静特性
- 4 磁阻式步进电机的运行特性
- 5 永磁式步进电动机
- 6 混合式步进电动机
- 7 步进电动机的驱动
- 8 步进电动机的应用

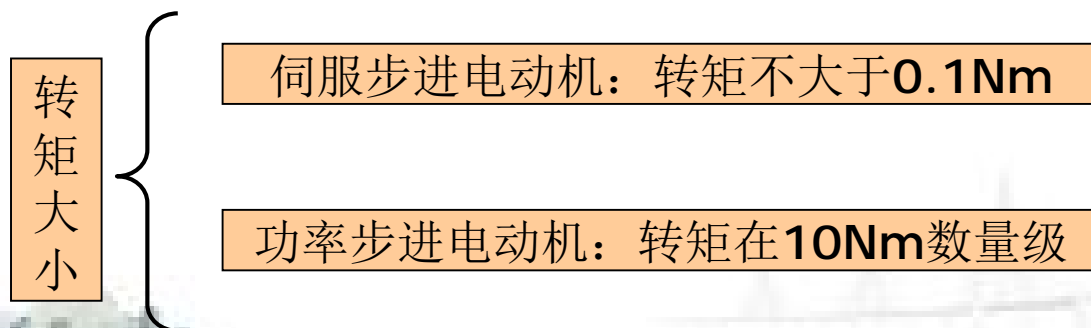
1 步进电动机概述

- 步进电动机的转角受输入的数字脉冲信号控制，一个脉冲可使电动机前进一步，所以称为**步进电动机**。
- 步进电动机输入的常常是脉冲电流，所以又称为**脉冲电动机**。
- 粗略的看，步进电动机转子的转动与磁场的转动是一致的，所以也可以把步进电机看成是同步电机的一种。
- 步进电动机能随供给的电源脉冲数转动相应步数，而每一步的角度是固定的，所以步进电动机能按控制转动所需的圈数、角度，广泛应用在数控机床、自动化设备、仪器仪表等行业。
- 步进电动机主要用在**开环**位置控制系统中。采用步进电动机的开环系统具有结构简单、调试方便，工作可靠、成本低等优点。

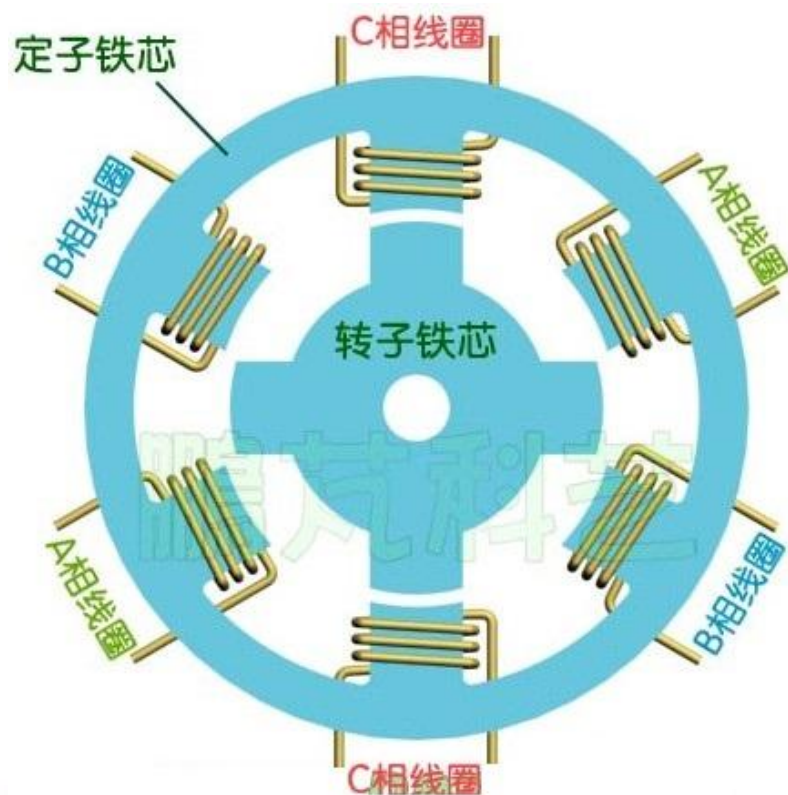


1 步进电动机概述

○ 步进电动机的分类



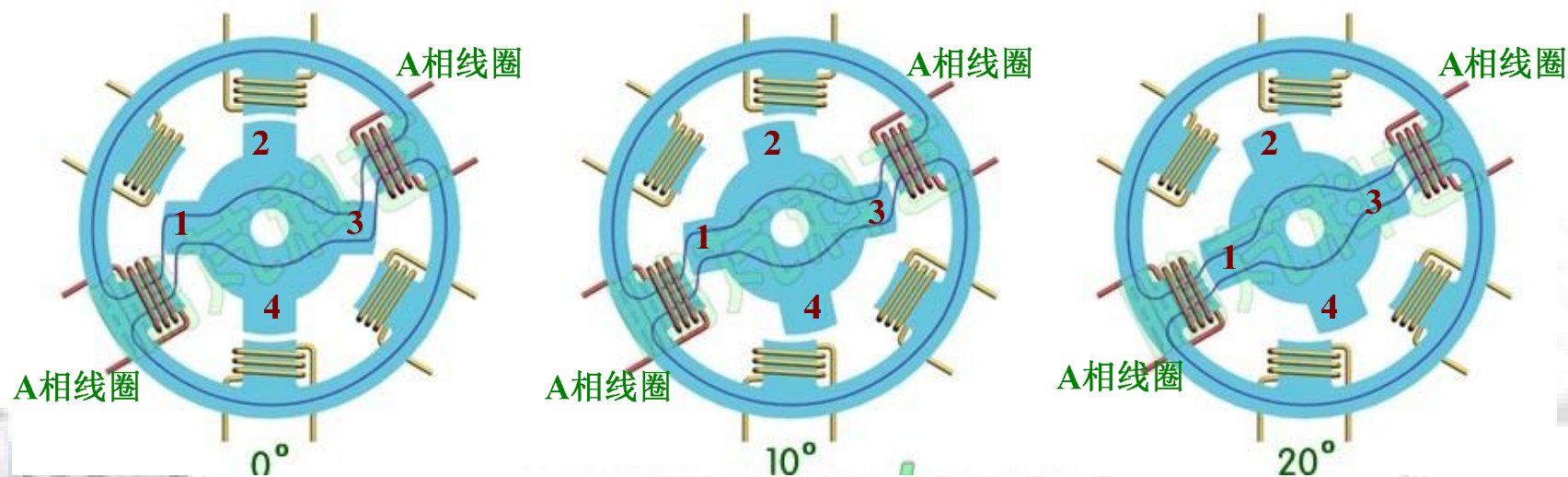
2 磁阻式步进电动机的原理



- n 定子铁心有六个齿极
- n 定子六个齿极上绕有线圈，径向相对的两个线圈连接在一起
- n 转子铁心有四个齿极
- n 工作原理：利用磁阻最小原理，也就是磁通总是沿磁阻最小的路径闭合，利用齿极间的吸引力拉动转子旋转

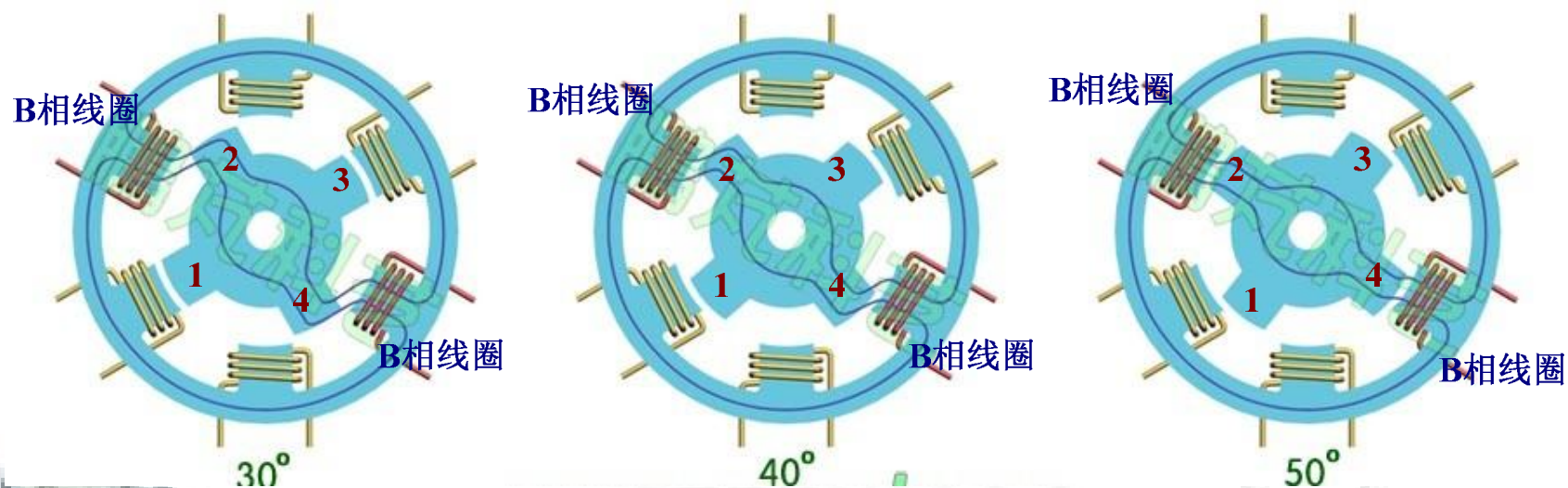
2 磁阻式步进电动机的原理

- n A相线圈接通电源产生磁通，磁力线从最近的转子齿极通过转子铁芯，磁力线可看成有弹力的线，在磁力的牵引下转子开始拟时针转动；磁力一直牵引转子转到30度为止，到了30度转子不再转动，此时磁路最短



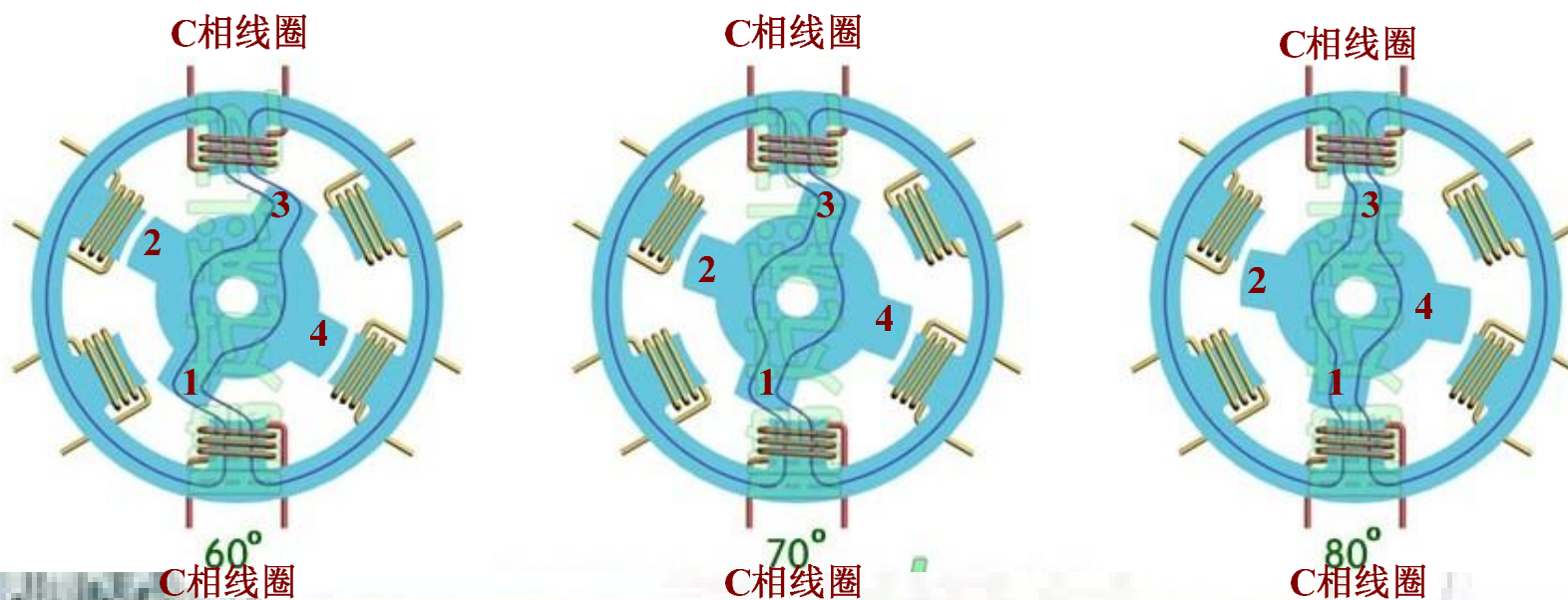
2 磁阻式步进电动机的原理

- n 为了使转子继续转动，在转子转到30度时，切断A相电源并接通B相电源，磁通从最近的转子齿极通过转子铁芯，于是转子继续转动。磁力一直牵引转子转到60度为止



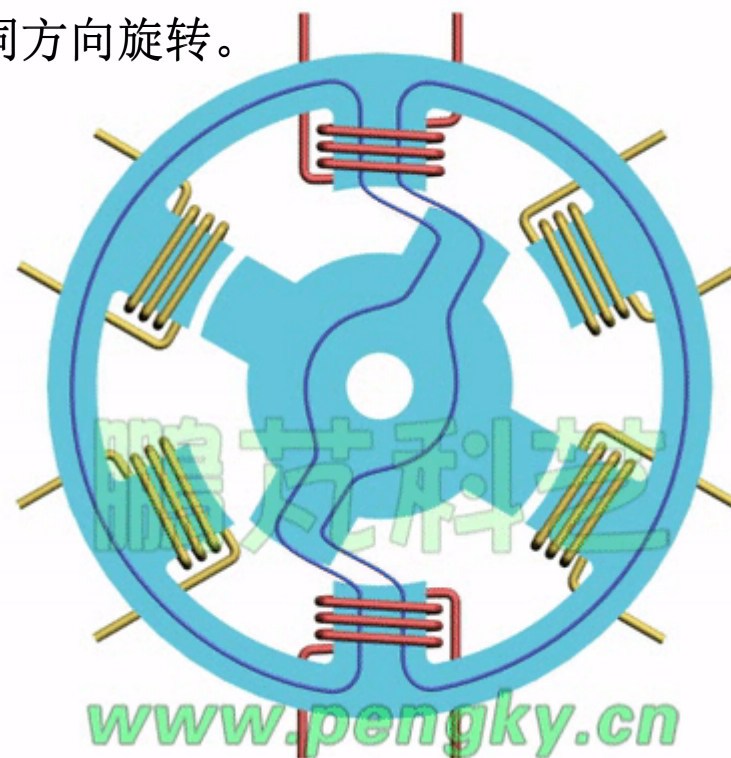
2 磁阻式步进电动机的原理

- n 为了使转子继续转动，在转子转到60度时，切断B相电源并接通C相电源，磁通从最近的转子齿极通过转子铁芯，于是转子继续转动。磁力一直牵引转子转到90度为止



2 磁阻式步进电动机的原理

- n 按**A-B-C-A**的顺序，周期性接通和断开定子绕组，气隙中的磁场轴线步进式的旋转。
- n 磁场轴线步进旋转，转子一步一步相同方向旋转。
- n 若按**A-C-B-A**的顺序通电，气隙中磁场轴线旋转方向相反，转子旋转的方向也相反
- n 电机转动方向取决于通电顺序
- n 电机转动的位置取决于通电脉冲的个数
- n 电机转动速度取决于通断电的频率



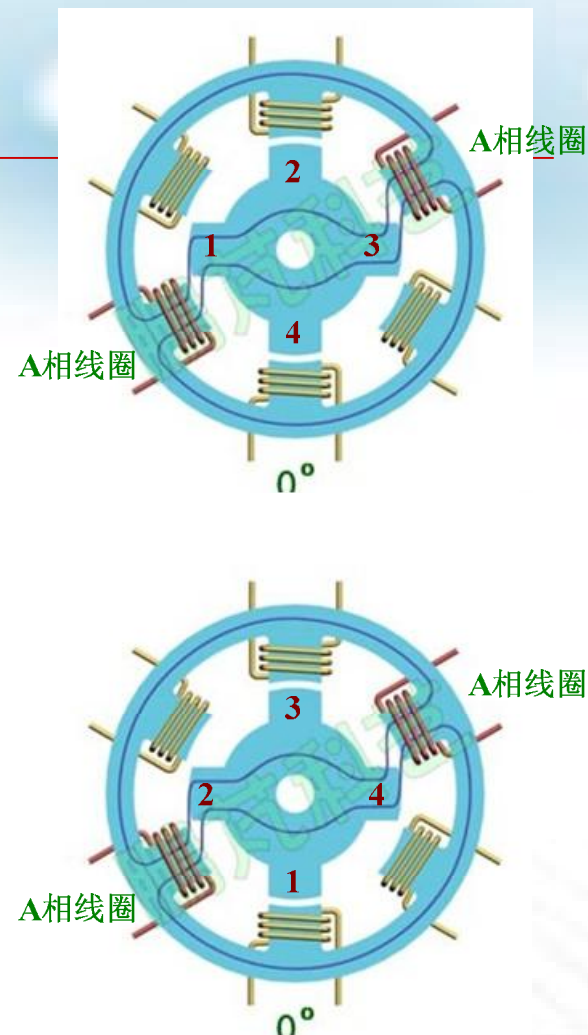
2 磁阻式步进电动机的原理

- n **齿距**是相邻两齿中心线的夹角，又称**齿距角**，设 Z_r 为转子齿数，则转子齿距角

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

- n 当通电状态完成一个周期时，转子转过一个齿距角
- n 步进电动机各绕组通电的不同状态数称为**拍数**，在通断电的一个周期内，绕组通电状态改变的次数也就是拍数，记为**N**。
- n 步进电动机每改变一次通电状态，转子转过相应的一个角位移，这个角位移称为**步距角**

$$q_b = \frac{q_t}{N} = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

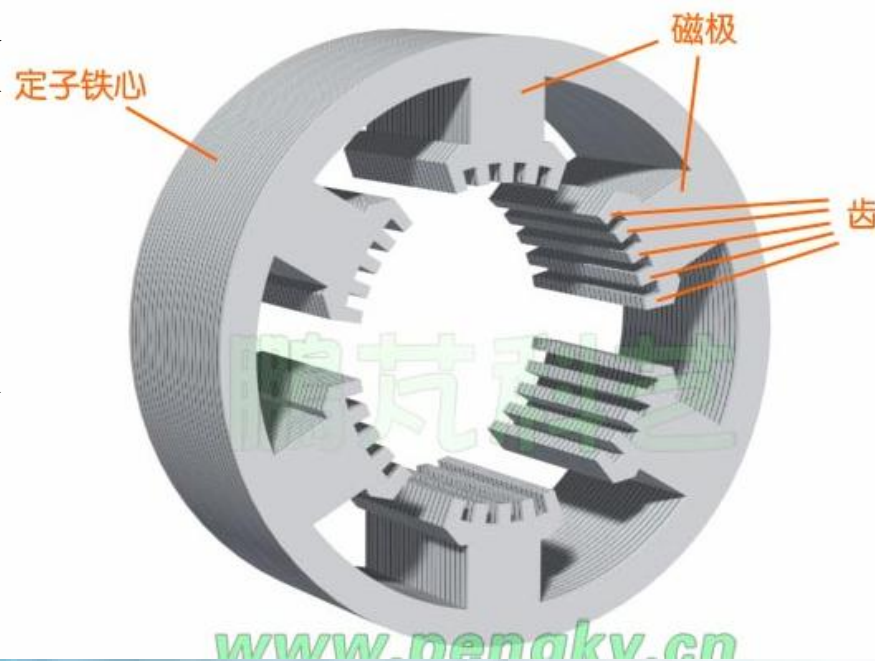


步距角太大

2 磁阻式步进电动机的原理

○ 磁阻式步进电动机的结构

- n 定子铁心由硅钢片叠压而成。
- n 定子铁心内圆上分布着若干大齿，每个大齿称为一个**磁极**。
- n 定子的每个磁极上都装有绕组，称为**控制绕组**。
- n 每一相绕组包括两个磁极绕组，分别在一条直径的两端，即径向相对的两个磁极上的绕组为一相。
- n 磁阻步进电机极数 $2p$ 和相数 m 关系
$$2p = 2m = \text{齿数}$$
- n 在定子磁极的极弧上开有一些均布的小齿。



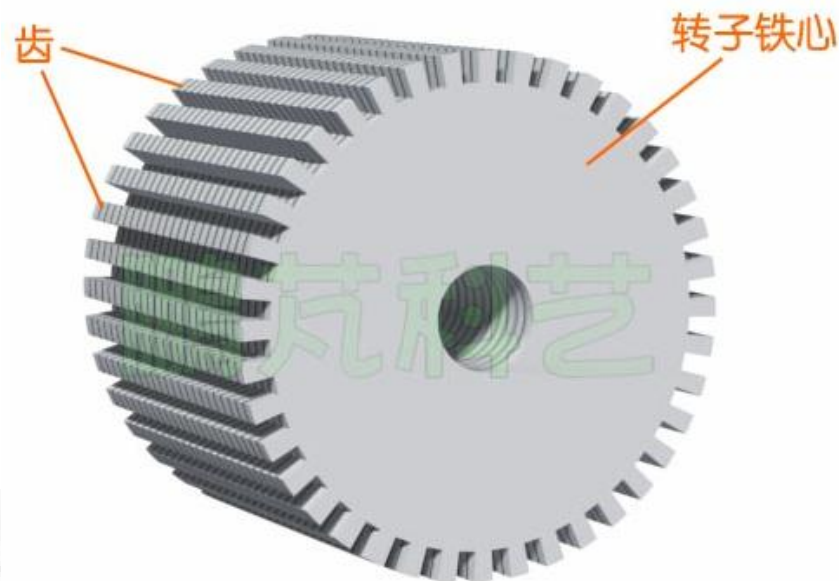
2 磁阻式步进电动机的原理

○ 磁阻式步进电动机的结构

- n 转子铁心由硅钢片叠压而成，转子铁心上没有绕组
- n 转子的外圆周上也均布的小齿，转子的齿宽和齿距与定子极弧上的小齿完全相同
- n 转子齿的大小用齿距来衡量。**齿距**是相邻两齿中心线(或称齿轴线)的夹角，又称**齿距角**

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

Z_r 为转子齿数



2 磁阻式步进电动机的原理

○ 磁阻式步进电动机的结构

n 磁阻式步进电动机的转子齿数 Z_r 必须满足：在某一极下，若定、转子的齿对齐时，则要求在相邻定子极下的定、转子齿之间错开转子齿距的 $1/m$ 倍，即他们之间在空间位置上错开 $360^\circ / (mZ_r)$

n 为了满足上述要求，转子齿数需要满足

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

即

$$Z_r = 2pK \pm 2$$

其中， K 为正整数， p 为极对数， m 为相数，且 $p=m$



图 5-1 四相磁阻式步进电动机

2 磁阻式步进电动机的原理

○ 磁阻式步进电动机的结构

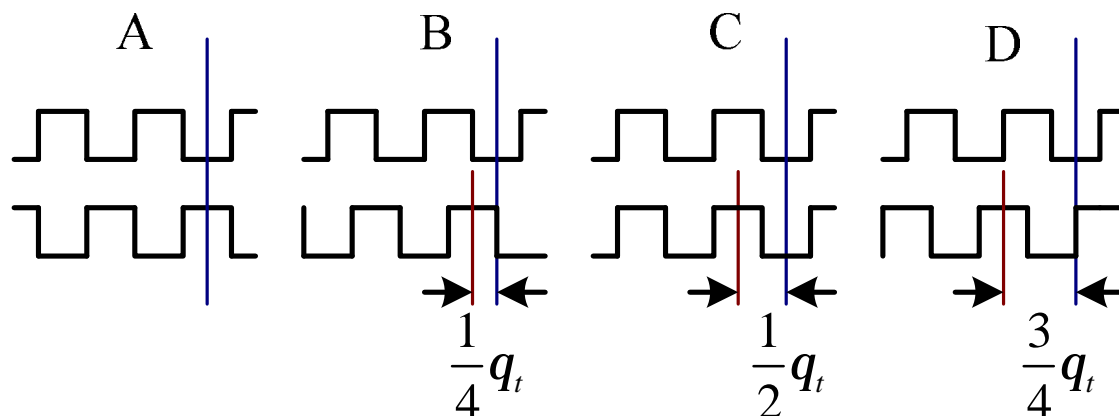
- n 若定子的一个磁极下的定、转子的齿对齐时，在定子相同相的另一个磁极下的定、转子的小齿也是对其的。
- n 从磁路磁阻角度看，齿与齿对齐时，磁路磁阻最小，齿与槽对齐时磁阻最大。
- n 电机的磁阻与转角有关，随着转角变化而变化。



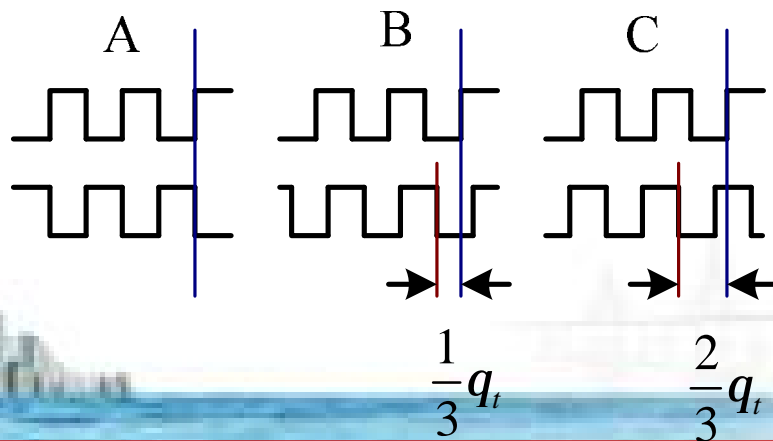
图 5-1 四相磁阻式步进电动机

2 磁阻式步进电动机的原理

○ 磁阻式步进电动机的结构



4相
电机



3相
电机

2 磁阻式步进电动机的原理

○ 以四相电机为例

n 定子有**8**个磁极，**4**相定子绕组，径向相对的两个磁极上的绕组为一相

n 取**K=6**，并取+号，则转子齿数为：

$$Z_r = 2pK \pm 2 = 50$$

n 转子的齿距角为

$$q_t = 360^\circ / Z_r = 7.2^\circ$$

n 定子一个极距所包含的齿数为：

$$Z'_r = \frac{360^\circ}{2pq_t} = \frac{Z_r}{2p} = 6\frac{1}{4}$$

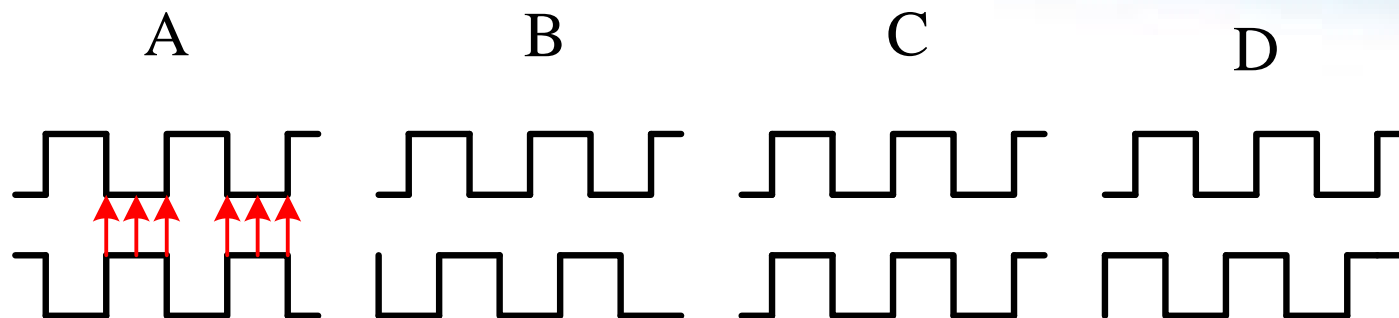


图 5-1 四相磁阻式步进电动机

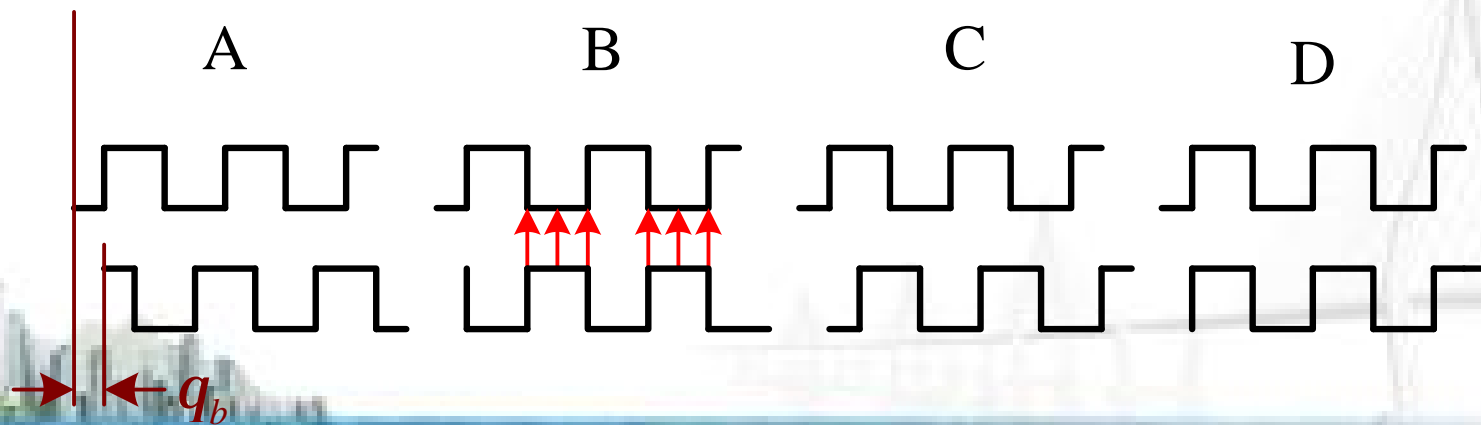
2 磁阻式步进电动机的原理

步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 1.8^\circ$

○ A相通电时



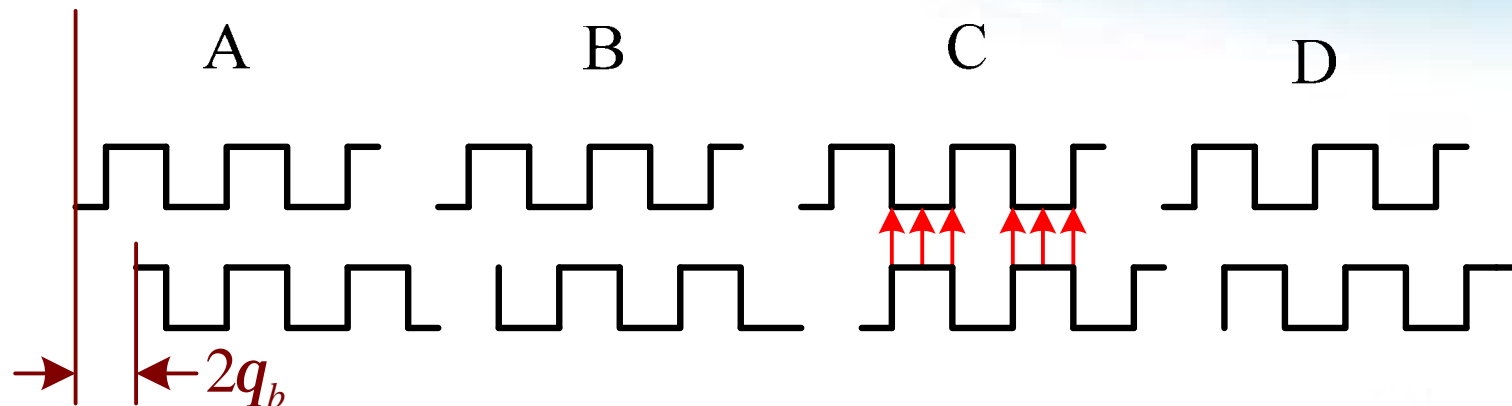
○ B相通电时，顺时针移动一个步距角 1.8°



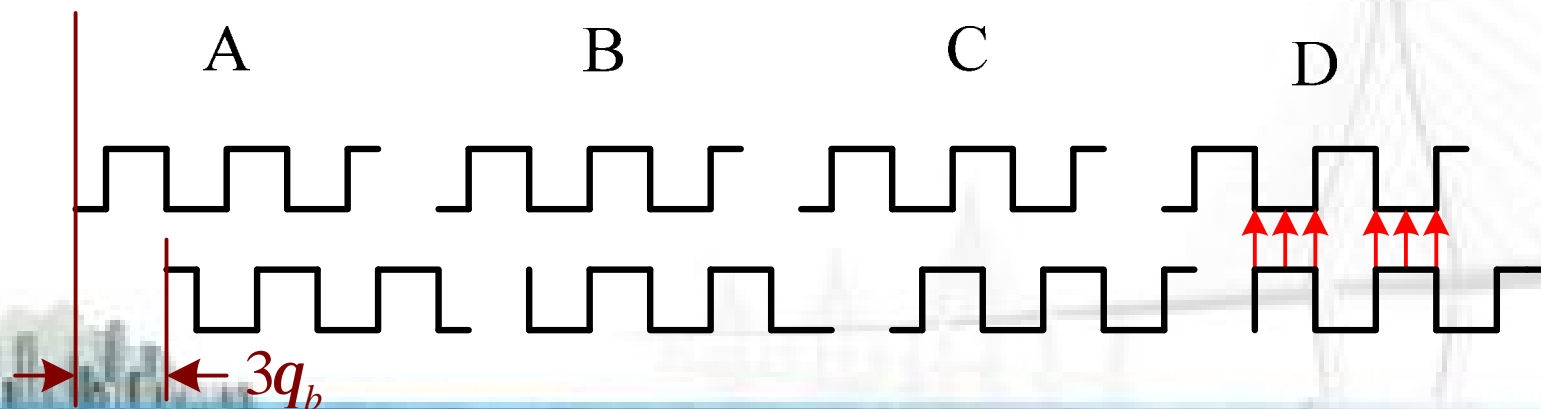
2 磁阻式步进电动机的原理

步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 1.8^\circ$

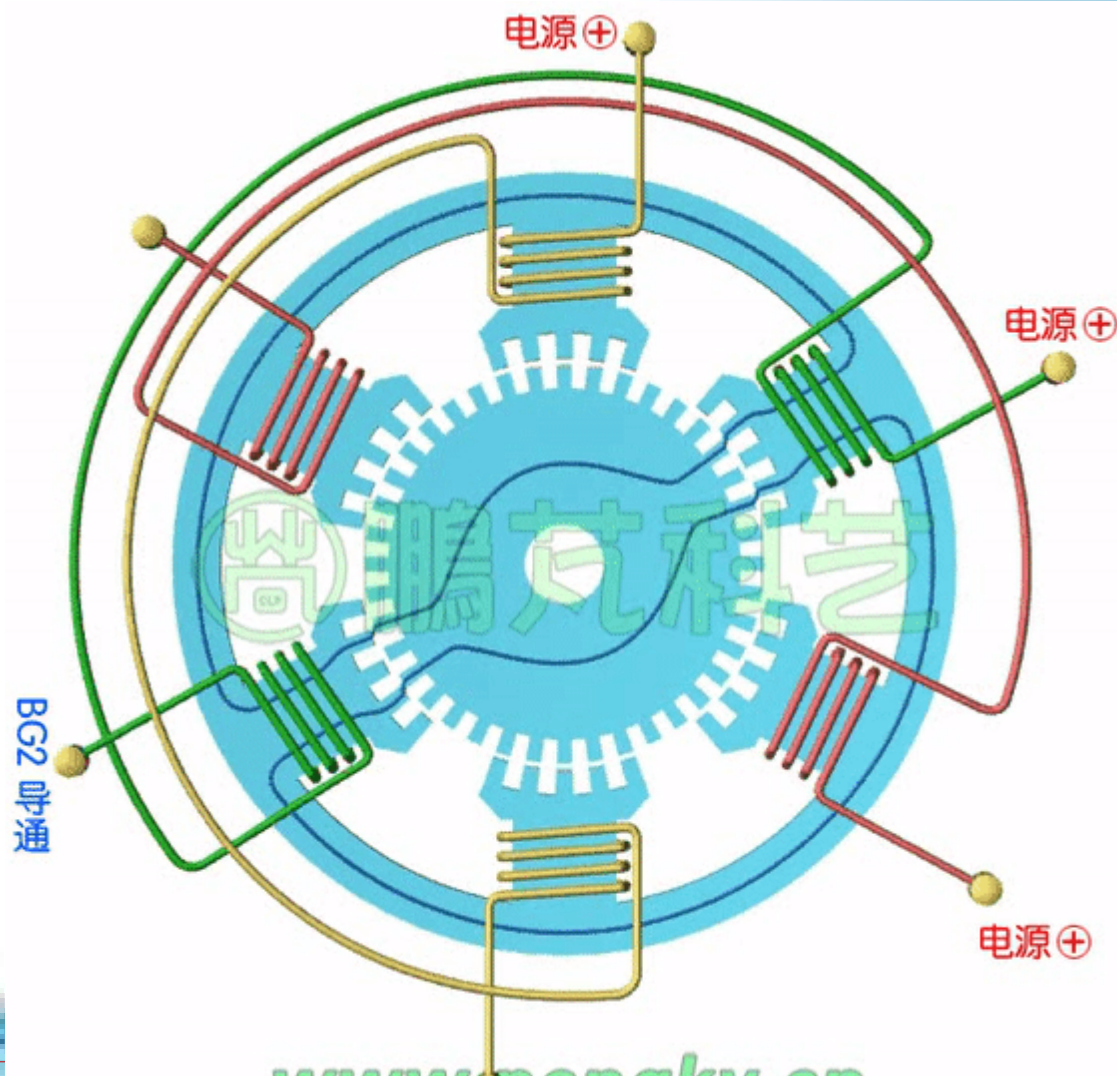
- C相通电时，继续顺时针移动一个步距角 1.8°



- D相通电时，继续顺时针移动一个步距角 1.8°

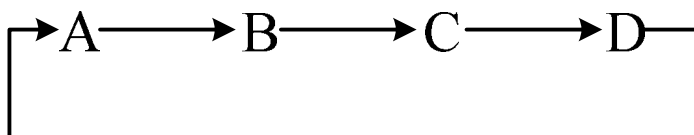


2 磁阻式步进电动机的原理

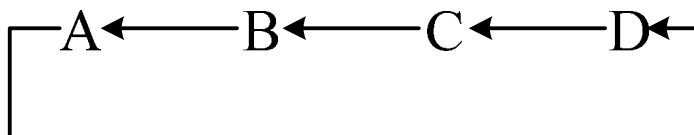


2 磁阻式步进电动机的原理

- n 按如下通电顺序轮流通电，转子按顺时针方向一步一步转动，每转动一次，转过 $1/4$ 齿距角。改变4次通电状态，完成一次通电周期，转过一个齿距角



- n 按如下通电顺序轮流通电，则转子按逆时针方向一步一步转动



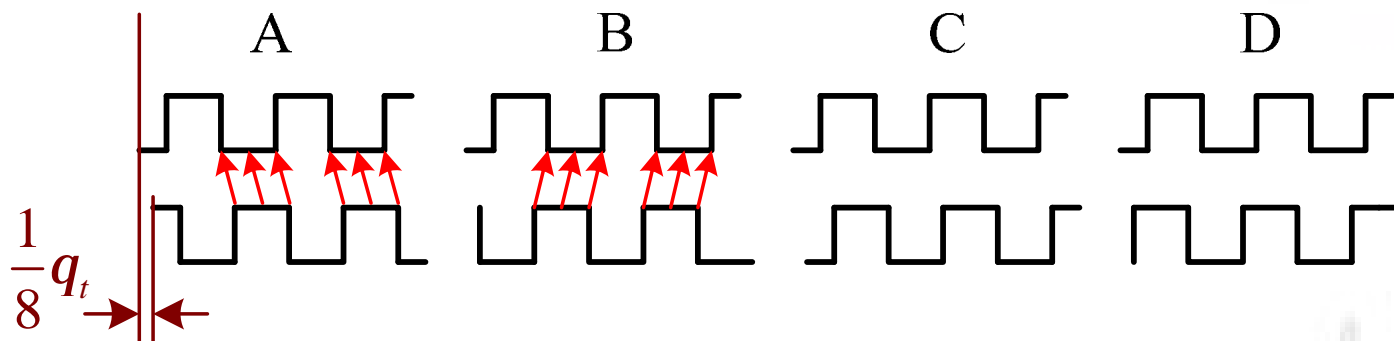
- n 上述通电方式称为四相单四拍。其中“四相”表示电机的相数，“单”表示每种通电状态只有一相绕组通电，“四拍”表示电机拍数是4。
- n 该方式的缺点是，状态切换过程中，可能瞬时所有定子绕组都不通电，电磁转矩为零，使得电磁转矩在电机运行中波动很大。

2 磁阻式步进电动机的原理

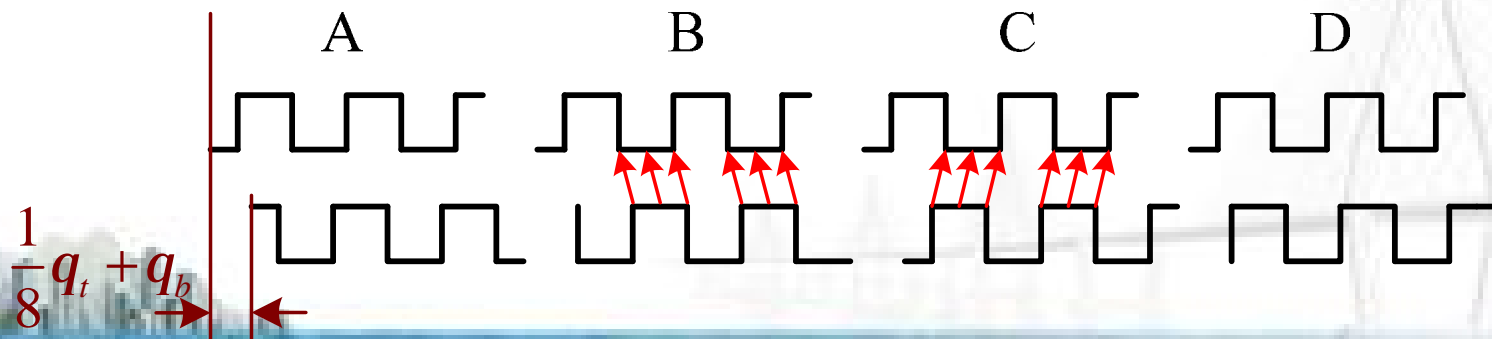
步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 1.8^\circ$

○ 四相双四拍

n AB相通电，平衡位置错开 $1/8$ 齿距角



n BC相通电，顺时针移动一个步距角 1.8°

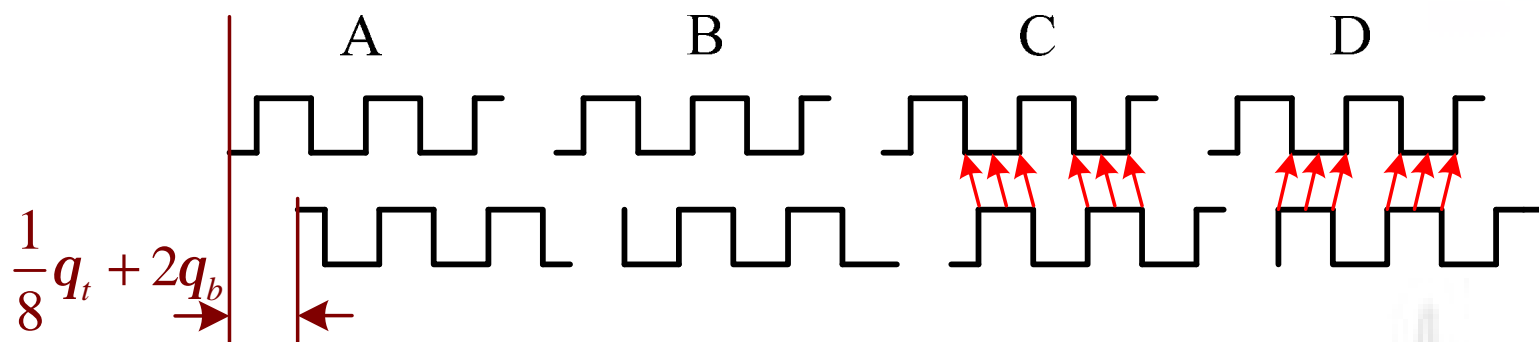


2 磁阻式步进电动机的原理

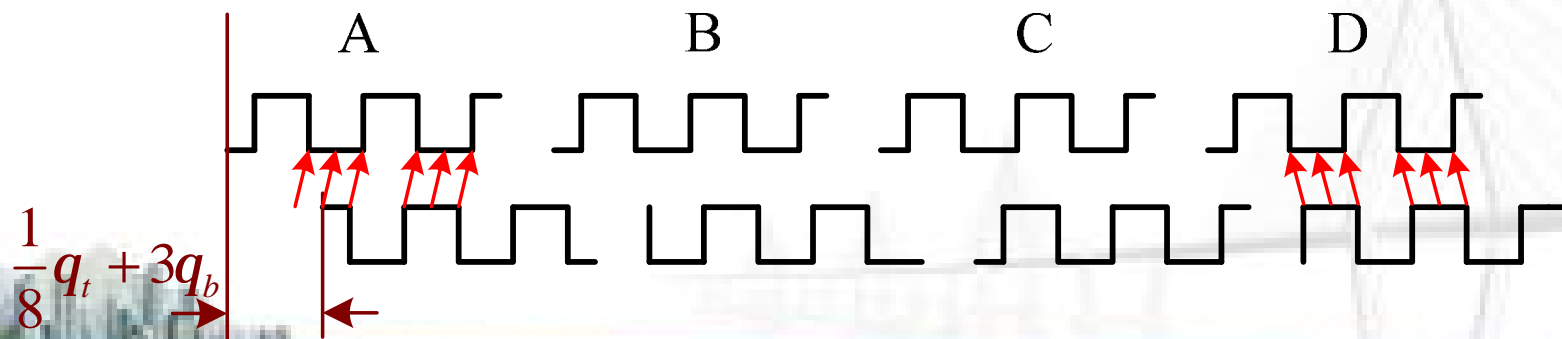
步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 1.8^\circ$

○ 四相双四拍

n CD相通电，继续顺时针移动一个步距角 1.8°



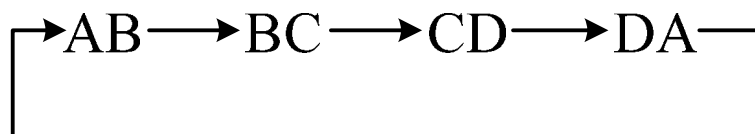
n DA相通电，继续顺时针移动一个步距角 1.8°



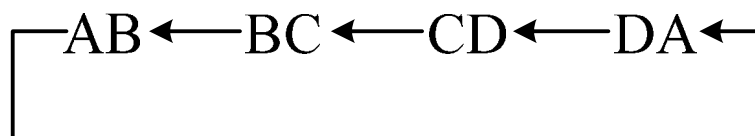
2 磁阻式步进电动机的原理

○ 四相双四拍

- n 按如下通电顺序轮流通电，转子按顺时针方向一步一步转动，每转动一次，转过 $1/4$ 齿距角。改变4次通电状态，完成一次通电周期，转过一个齿距角



- n 按如下通电顺序轮流通电，则转子按逆时针方向一步一步转动



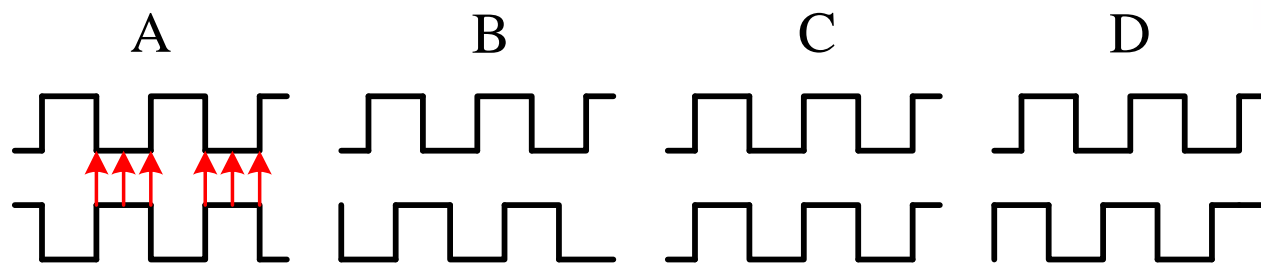
- n 上述通电方式称为四相双四拍。其中“四相”表示电机的相数，“双”表示每种通电状态有两相绕组同时通电，“四拍”表示电机拍数是4。
- n 每次改变通电状态时，总有一相绕组始终通电，消除了单相绕组通电方式所存在的各绕组可能都不通电的问题。

2 磁阻式步进电动机的原理

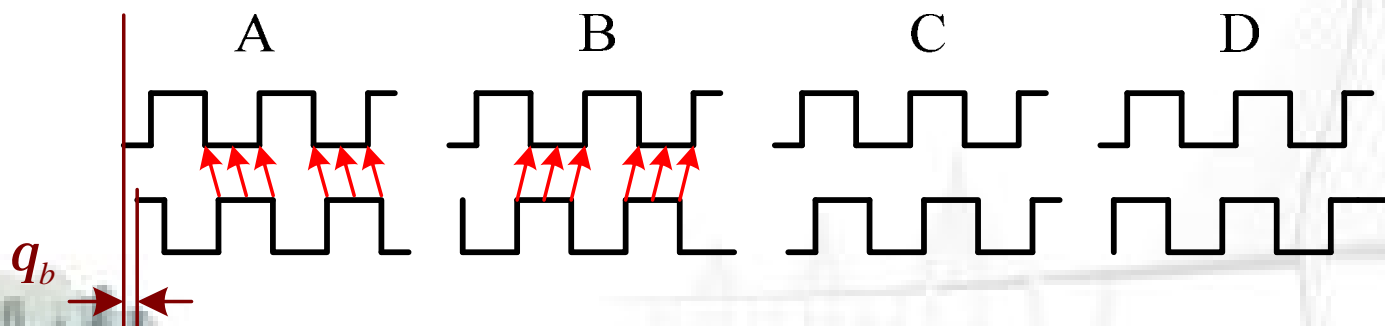
步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 0.9^\circ$

○ 四相八拍

n A相通电



n AB相通电，顺时针移动一个步距角 0.9°

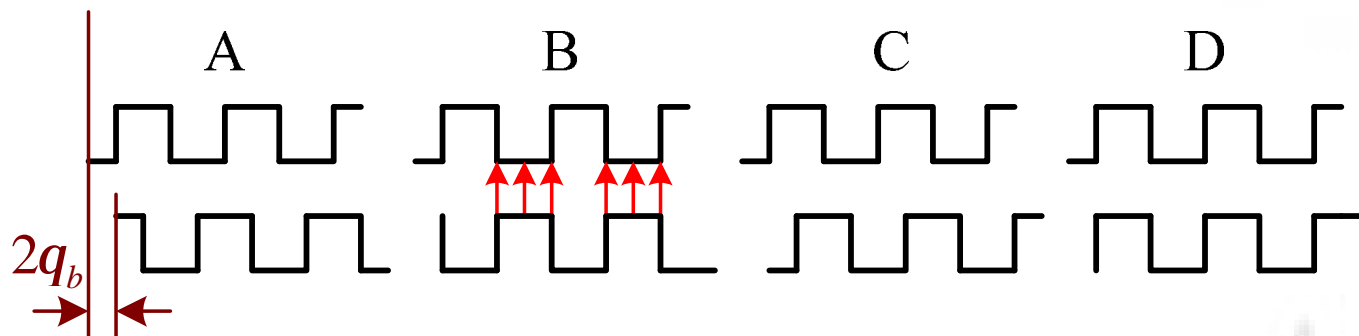


2 磁阻式步进电动机的原理

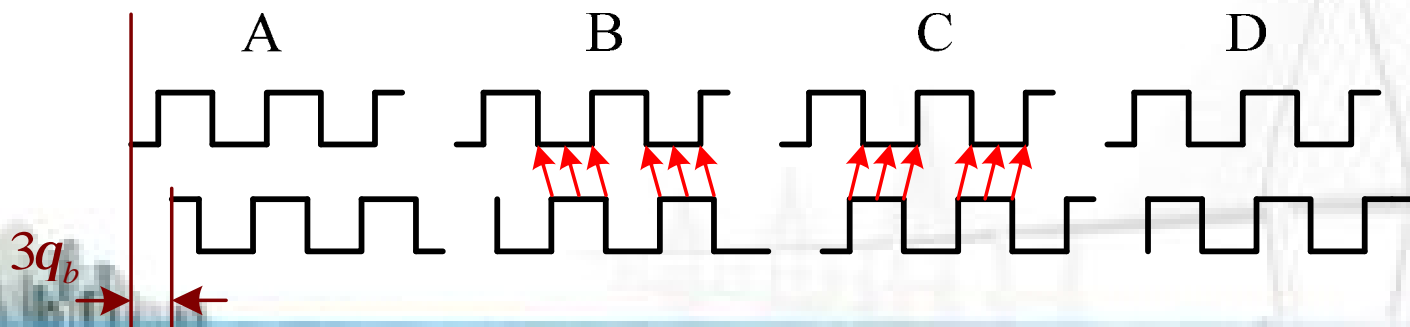
步距角: $q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} = 0.9^\circ$

○ 四相八拍

n B相通电，顺时针移动一个步距角 0.9°



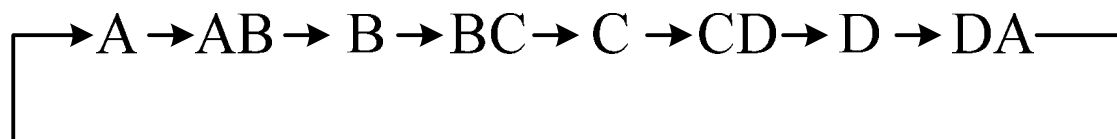
n BC相通电，顺时针移动一个步距角 0.9°



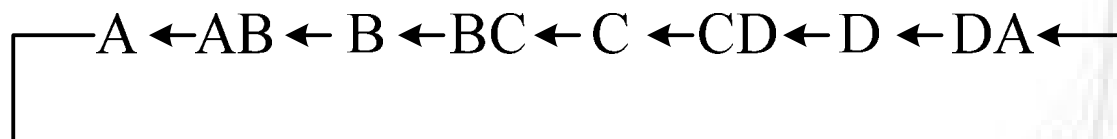
2 磁阻式步进电动机的原理

○ 四相八拍

- n 按如下通电顺序轮流通电，转子按顺时针方向一步一步转动，每转动一次，转过 $1/8$ 齿距角。改变8次通电状态，完成一次通电周期，转过一个齿距角



- n 按如下通电顺序轮流通电，则转子按逆时针方向一步一步转动



- n 该方式的优点是，每次改变一次通电状态时，转子转过的角度较小，同时能保证任何时刻至少有一相绕组通电。

2 磁阻式步进电动机的原理

- 步进电动机的拍数和相数的关系为：

$$N = km$$

其中， m 为相数。 $k=1$ 称为**单拍制**， $k=2$ 称为**双拍制**。 $k=1$ 时对应的步距角称为**整步距角**， $k=2$ 时对应的步距角称为**半步距角**。

- 步进电动机产品说明书有时候给出两个步距角，如 $1.5^\circ / 0.75^\circ$ 、 $1.2^\circ / 0.6^\circ$ 等，指的就是整步距角和半步距角。

2 磁阻式步进电动机的原理

- 步进电动机的控制输入信号一般是脉冲信号，来一个脉冲，绕组改变一次通电状态。
 - n 一个脉冲对应一个步距角
 - n 电动机角位移与输入脉冲数成正比
 - n 电动机转速与脉冲频率成正比

$$q_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$



$$n = \frac{60f}{Z_r N} (r/min)$$

- 在不“丢步”的情况下，步进电机的位置误差不累积，与运动时间和运动角位移无关。

3 磁阻式步进电动机的静态特性

- 步进电动机绕组通电状态保持不变而转子静止时的状态称为**静态**。
- 步进电动机在静态时所具有的性能称为**静态特性**。静态特性主要指转矩和转角的关系
- 在步进电机中，定义电角 θ_e 等于转子齿数 Z_r 乘以机械角 θ

$$q_e = Z_r q$$

- 步进电机的齿距角为

$$q_{te} = Z_r q_t = Z_r \frac{360^\circ}{Z_r} = 360^\circ$$

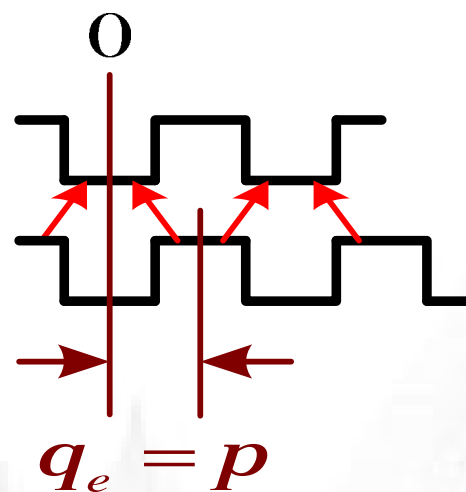
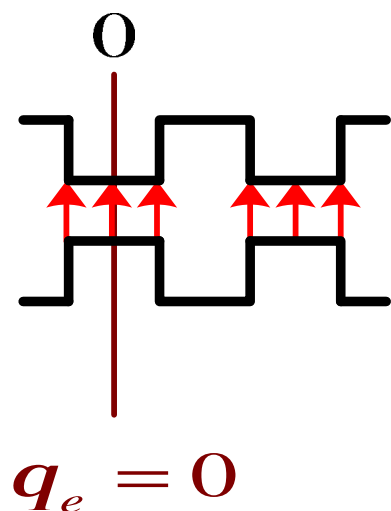
- 步进电机的步距角为

$$q_{be} = Z_r q_b = Z_r \frac{360^\circ}{Z_r N} = \frac{360^\circ}{N}$$

以电角表示齿距角和步距角与齿数无关，更具通用性

3 磁阻式步进电机的静态特性

- 步进电机能静止不动的位置是**平衡位置**。
 - n 当外力矩为零且步进电机单相通电，齿与齿对齐的位置是稳定平衡位置
 - n 当外力矩为零且步进电机单相通电，齿与槽对齐的位置是不稳定平衡位置



3 磁阻式步进电动机的静态特性

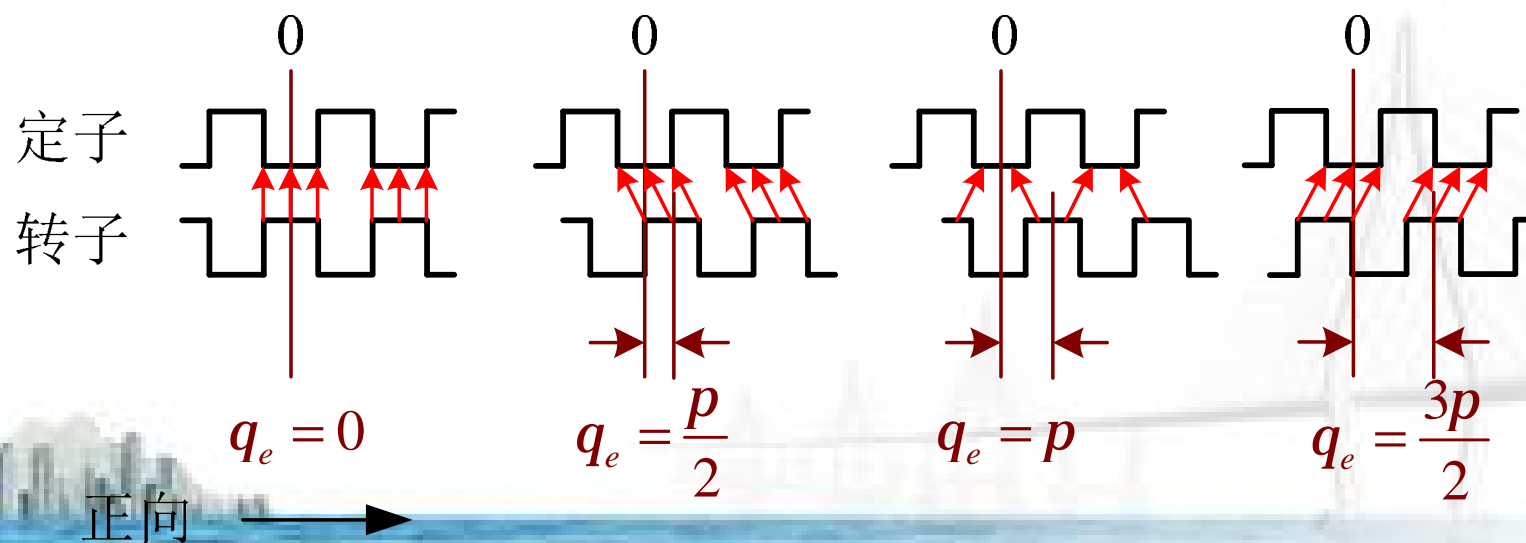
- 步进电机偏离稳定平衡位置的角度称为**失调角**。用电角表示时记为 $\Delta \theta_e$
- 设步进电机角位移是 θ_e ，稳定平衡点的角位移是 θ_{e0} ，则失调角为
$$\Delta q_e = q_e - q_{e0}$$
- 步进电动机转子静止且绕组通以直流电时，由于失调角存在而引起的电磁转矩称为**静转矩**。静转矩在一定范围内使失调角趋于零。
- 步进电动机静转矩与失调角的关系称为步进电动机的**矩角特性**。
- 步进电动机的静特性主要是指矩角特性。

3 磁阻式步进电动机的静态特性

○ 单相通电时的矩角特性

■ 令失调角和电磁转矩取同一方向为正方向

失调角 Δq_e	0	~	$p/2$	~	p	~	$3p/2$	~	$2p$
电磁转矩 T	0	-	-	-	0	+	+	+	0



3 磁阻式步进电动机的静态特性

- 单相通电时的矩角特性

- n 磁阻式步进电动机的转矩 T 是失调角 $\Delta \theta_e$ 的周期函数

- n 磁阻式步进电动机的转矩 T 的基波分量

$$T = -T_m \sin \Delta q_e = -T_m \sin(q_e - q_{e0})$$

- n 当 $\theta_{e0}=0$ 时

$$T = -T_m \sin q_e = -T_m \sin Z_r q$$

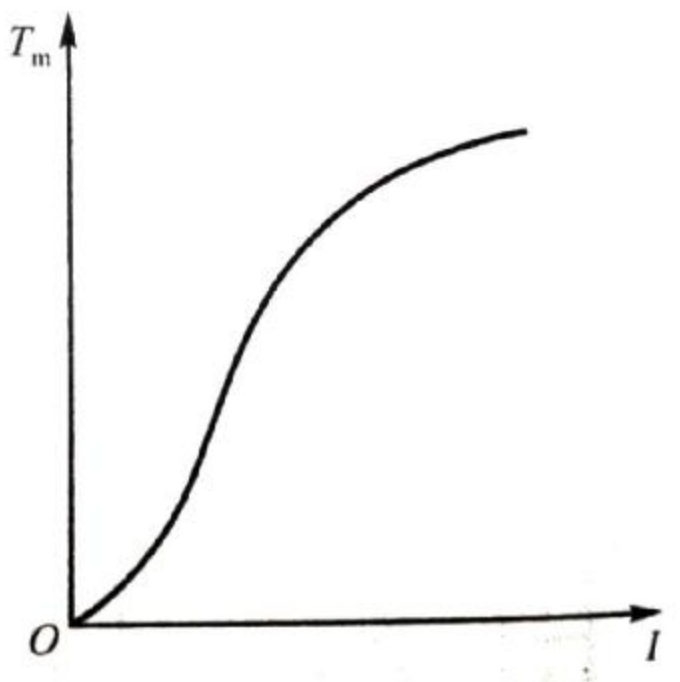
- n 负号表示步进电动机产生的是一种恢复转矩，在一定范围内总是反抗转子偏离平衡位置，这也就是步进电动机的自锁能力。

3 磁阻式步进电动机的静态特性

○ 单相通电时的矩角特性

$$T = -T_m \sin q_e = -T_m \sin Z_r q$$

n T_m 为电磁转矩最大值，其与绕组电流的关系曲线：

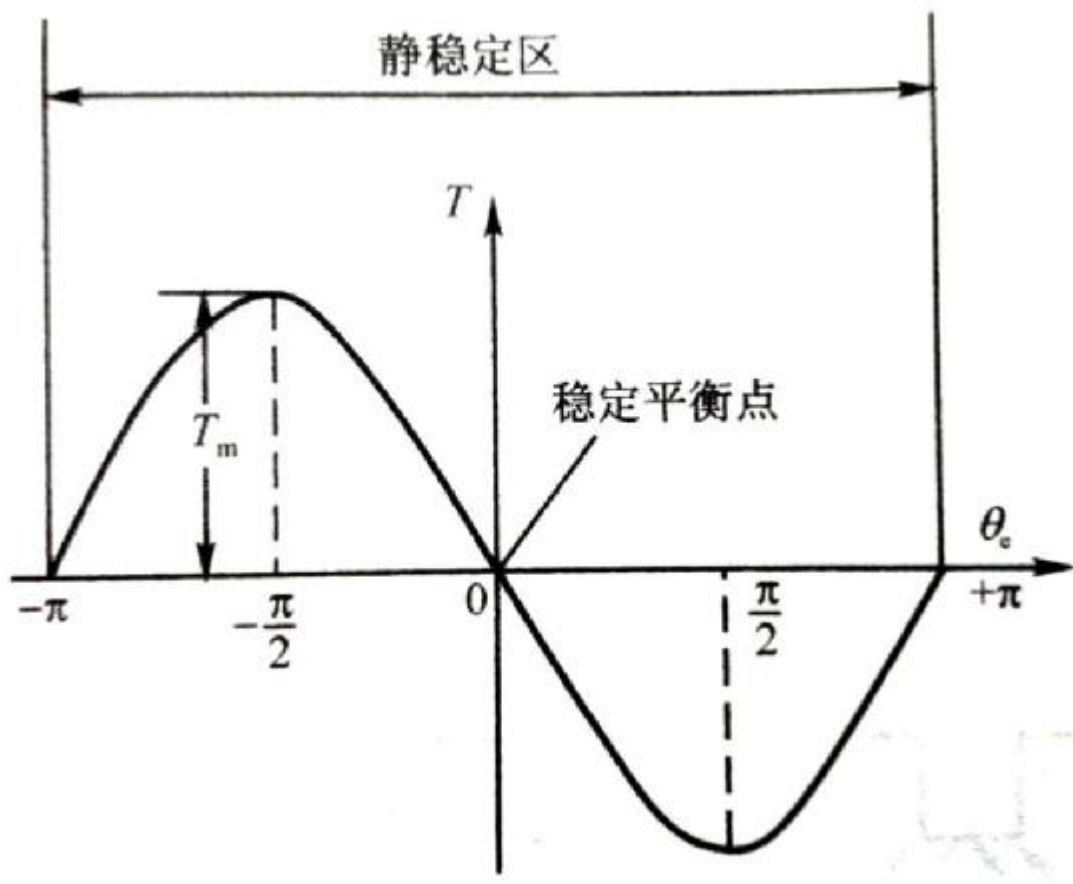


- n 当电流很小时， T_m 为与 I 的平方成正比；
- n 当电流稍大时，受磁路饱和的影响， T_m 上升速度减慢，与 I 近似成线性关系；
- n 当电流大时，即使电流增加很多，最大电磁转矩 T_m 却增加很少。

3 磁阻式步进电动机的静态特性

○ 单相通电时的矩角特性

$$T = -T_m \sin q_e = -T_m \sin Z_r q$$

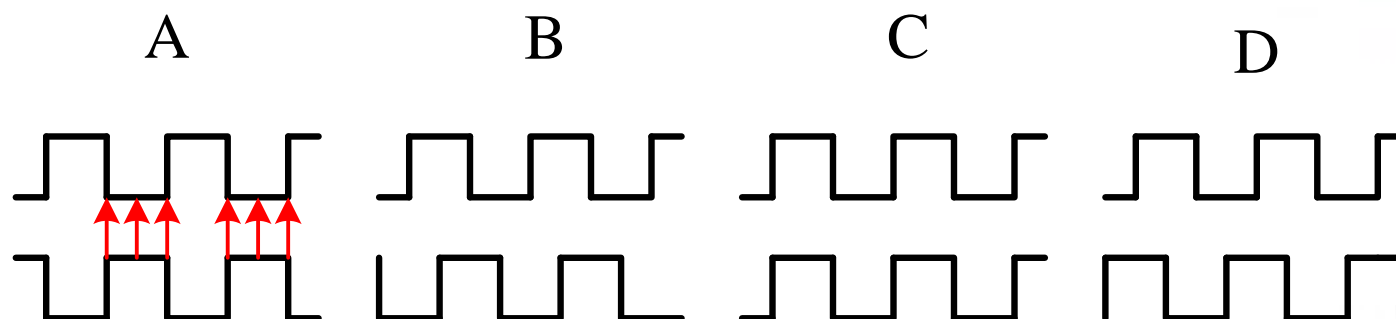


n 当 $-\pi < \theta_e < \pi$ 时，去掉外转矩后，在电磁转矩的作用下将回到初始平衡位置；因此把 $-\pi < \theta_e < \pi$ 区间称为此时的**静稳定区**。

n 当 $\theta_e < -\pi$ 或 $\theta_e > \pi$ 时，去掉外转矩后，转子就趋于前一个或后一个稳定平衡位置，不能自动恢复到初始平衡位置。

3 磁阻式步进电动机的静态特性

- 单相通电时的矩角特性曲线族



- 单相通电，改变绕组通电状态，步进电动机将走到下一个平衡位置；

- 相邻两相绕组的平衡位置相间隔一个步距角 θ_{be} ；

3 磁阻式步进电动机的静态特性

○ 单相通电时的矩角特性曲线族

n 以4相步进电动机为例，给出曲线族表达式：

A相通电平衡位置： 0 矩角特性： $T_A = -T_m \sin q_e$

B相通电平衡位置： q_{be} 矩角特性： $T_B = -T_m \sin(q_e - q_{be})$

C相通电平衡位置： $2q_{be}$ 矩角特性： $T_C = -T_m \sin(q_e - 2q_{be})$

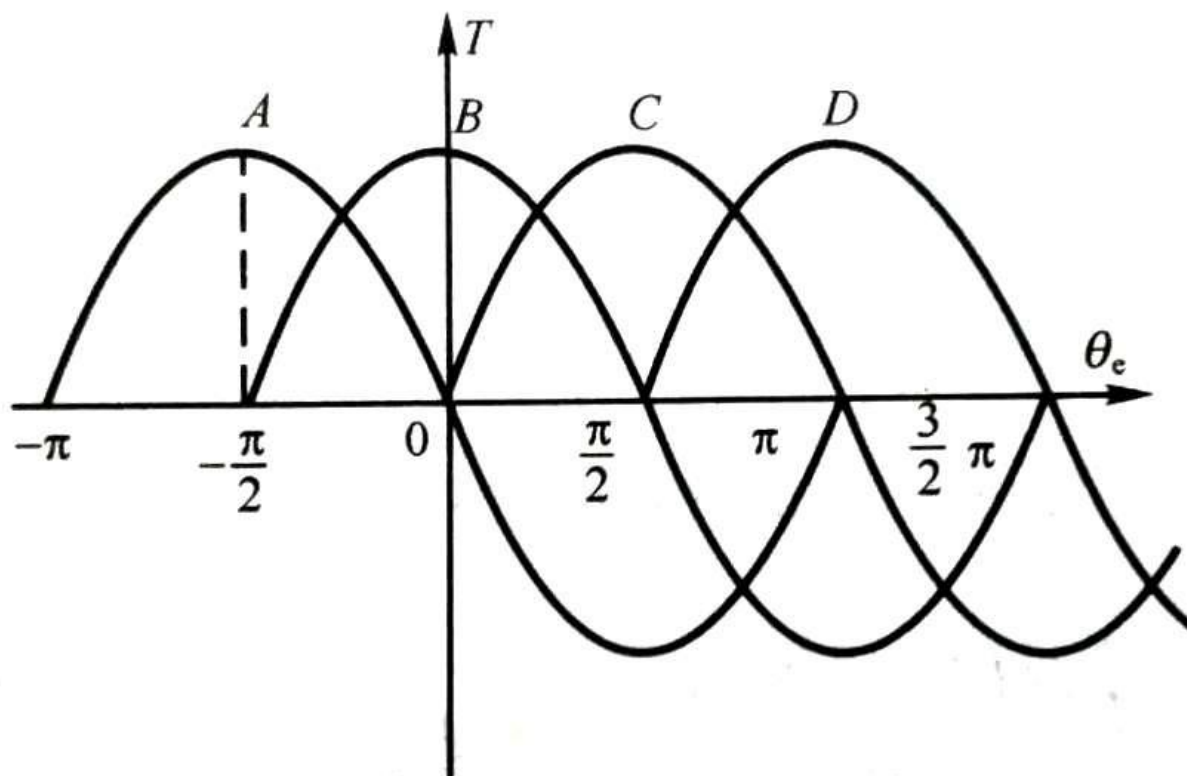
D相通电平衡位置： $3q_{be}$ 矩角特性： $T_D = -T_m \sin(q_e - 3q_{be})$

$$q_{be} = Z_r q_b = Z_r \frac{360^\circ}{Z_r N} = \frac{360^\circ}{N}$$

3 磁阻式步进电动机的静态特性

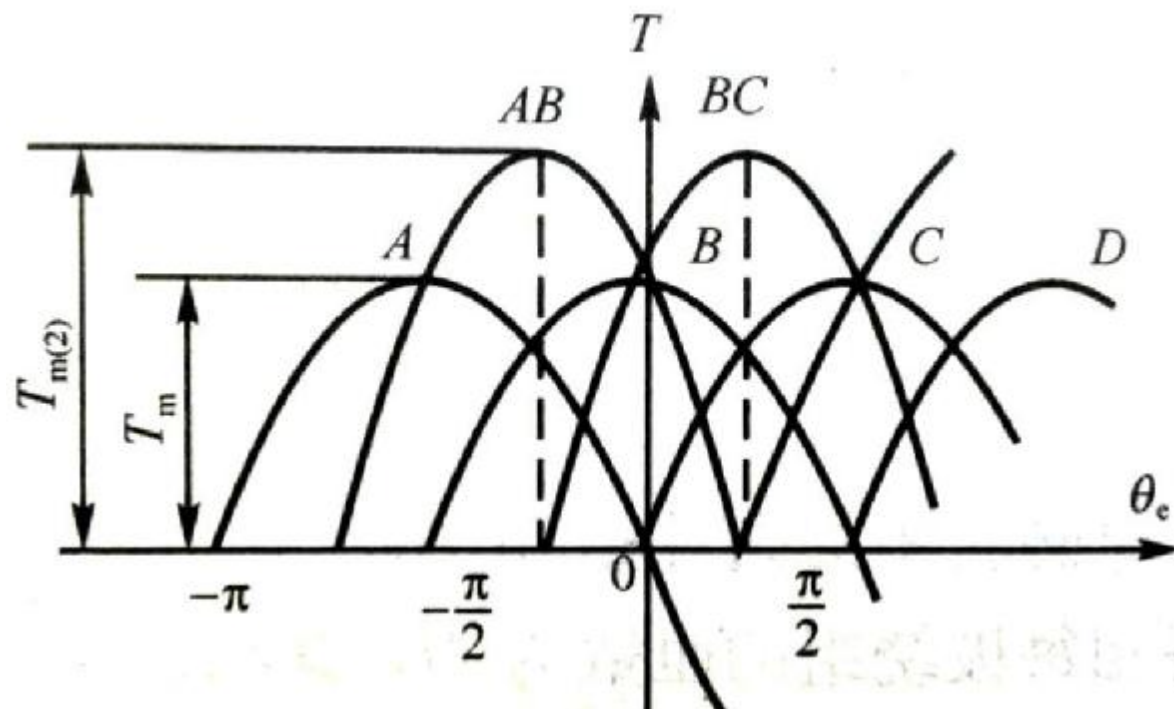
○ 单相通电时的矩角特性曲线族

n 以4相步进电动机为例



3 磁阻式步进电动机的静态特性

- 多相通电时的矩角特性曲线族



n 多相步进电机多相通电能提高最大静转矩，故一般功率较大的步进电机采用多相通电的分配方式

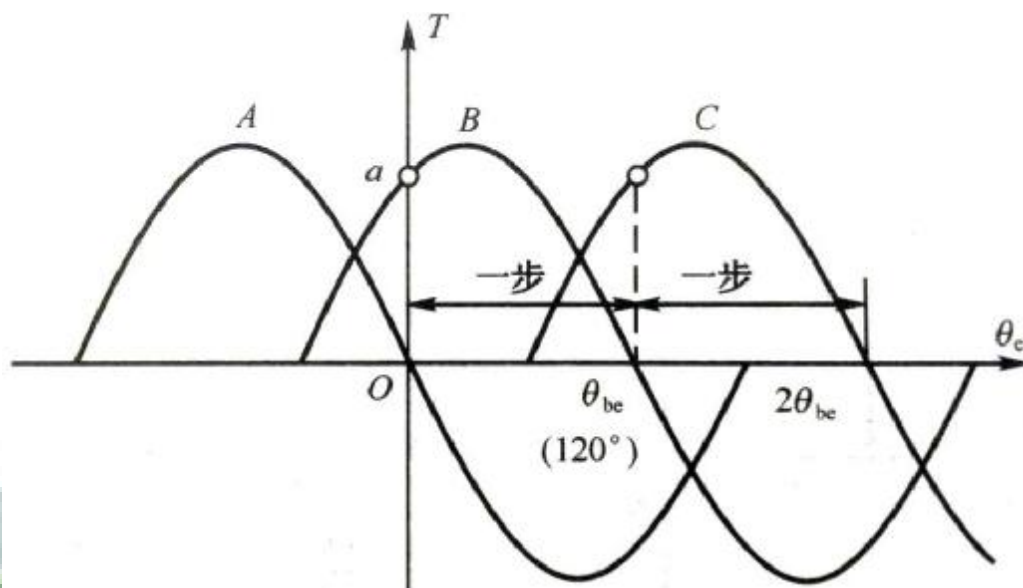
4 磁阻式步进电动机的运行特性

- 基本特点：脉冲电压按照一定的分配方式加到各绕组上，产生电磁过程的跃变，形成磁极轴线的步进式旋转。
- 步进电机的基本要求：不失步
- 失步：步进电动机运动的步数与输入脉冲数不相等。
 - n 丢步：步数少于脉冲数。发生在加速时。
 - n 越步：步数多于脉冲数。发生在减速时。

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 单步运行状态

- n 绕组通电时间大于步进电动机的机电过渡过程
- n 假设绕组中的电流是瞬时建立和消除的
- n 三相电机，**无负载转矩**



A相通电



转子位于
 $\theta_e = 0$

B相通电



转子位于
 $\theta_e = 120^\circ$

C相通电



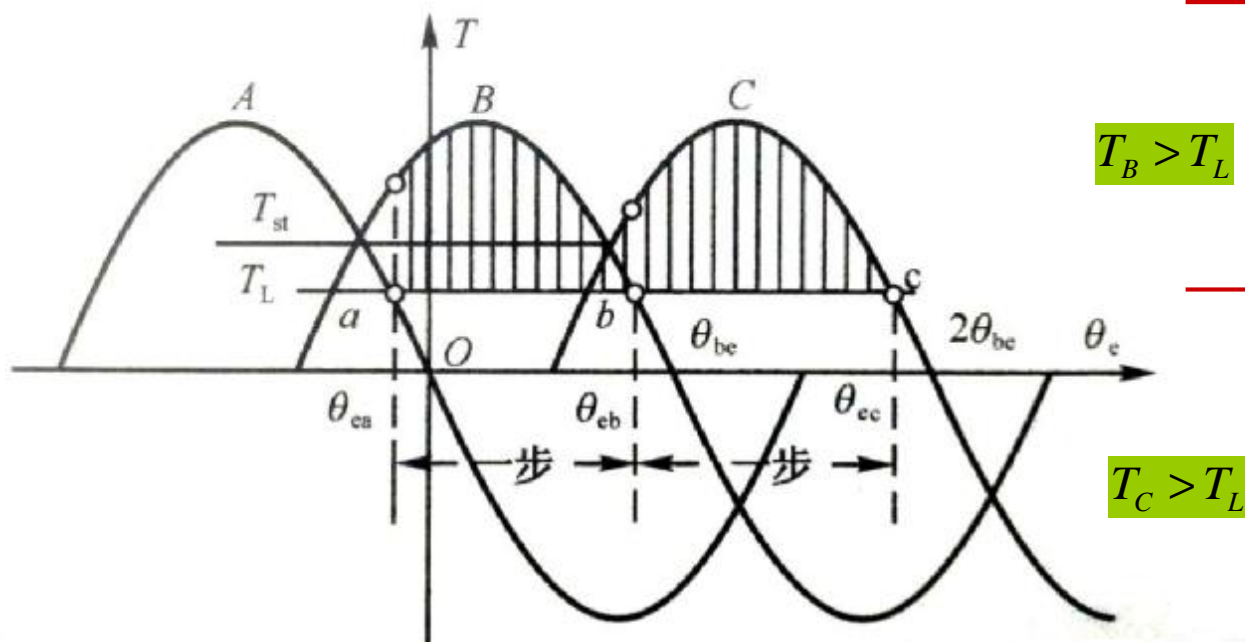
转子位于
 $\theta_e = 240^\circ$



4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 单步运行状态

■ 恒定转矩负载，且 $T_L < T_{st}$



A相通电



转子位于a

B相通电



转子位于b

C相通电

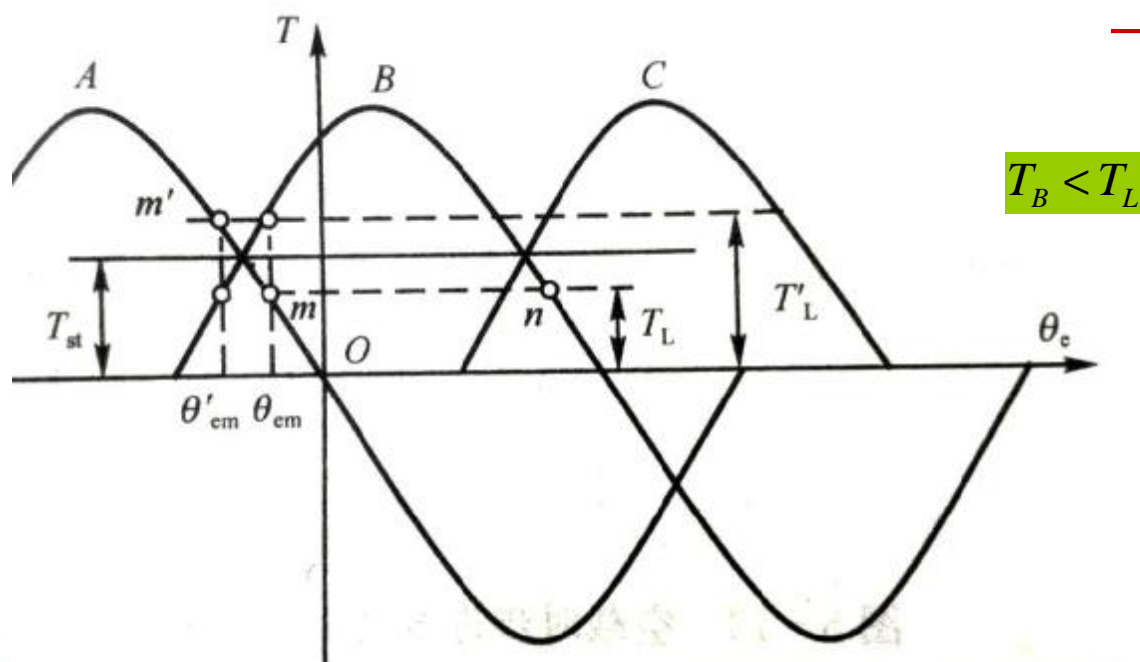


转子位于c

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 单步运行状态

■ 恒定转矩负载，且 $T'_L > T_{st}$



A相通电



转子位于 m'

B相通电



转子不能
向前运动



单步运行时正常运转
条件: $T_L < T_{st}$

4 磁阻式步进电动机的运行特性

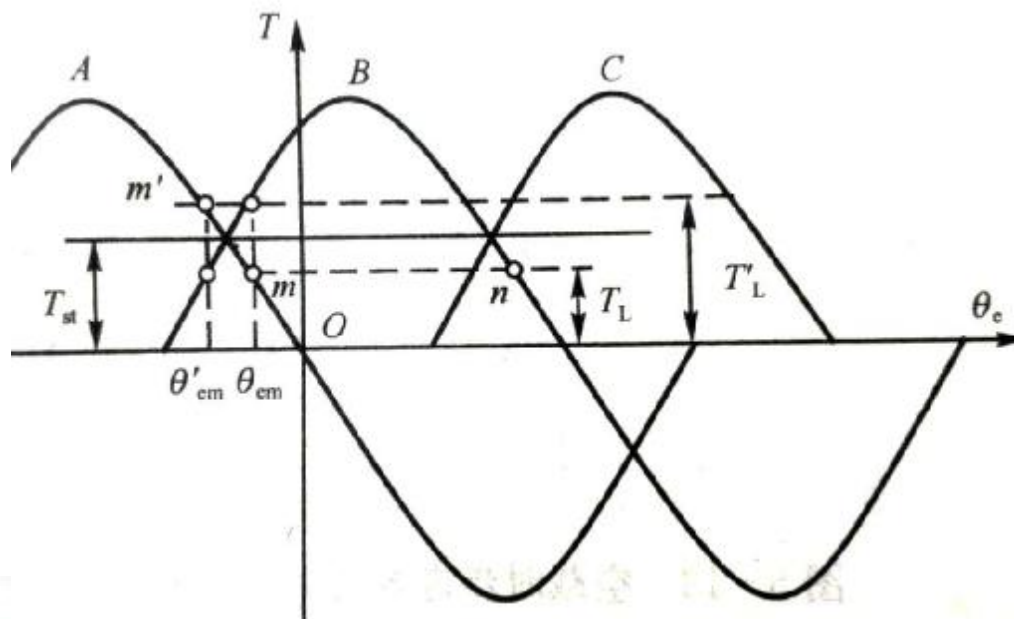
○ 单步运行状态

- n 步进电动机在一定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**。
- n 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。
- n 交点的恒坐标为：

$$\frac{q_{be} - p}{2}$$

- n 启动转矩为：

$$\begin{aligned} T_{st} &= -T_m \sin \frac{1}{2}(q_{be} - p) \\ &= T_m \cos \frac{q_{be}}{2} = T_m \cos \frac{p}{N} \end{aligned}$$



4 磁阻式步进电动机的运行特性

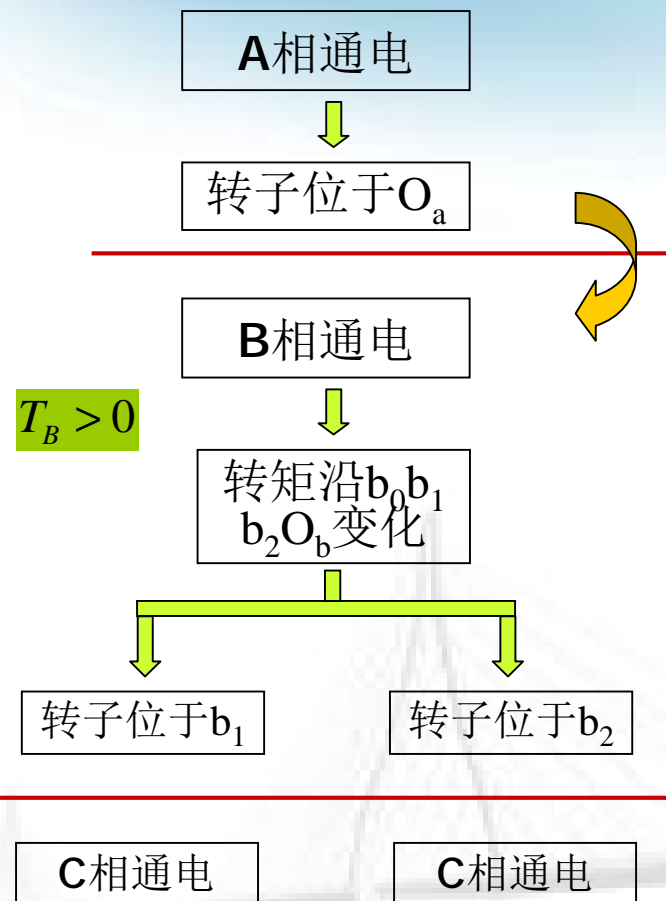
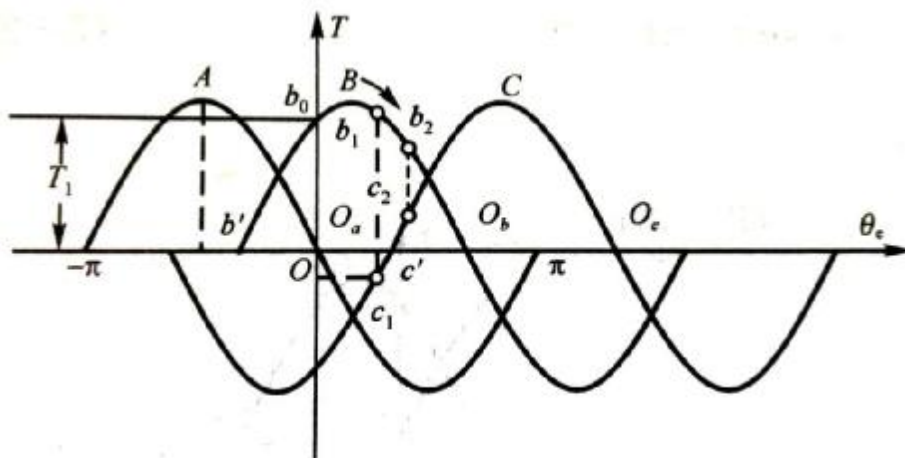
○ 连续运行状态

- n 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 控制频率提高时，相应的每个绕组通电的持续时间减少，当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**。
- n 步进电动机的工作频率是指电动机按照指令要求进行正常工作时的最高控制频率。
- n 工作频率通常分为：**启动频率**，**制动频率**和**运行频率**。其中运行频率又称**连续工作频率**。
- n 对同样的负载来说，正、反向的启动频率和制动频率都是一样的，而运行频率要高得多。所以一般步进电动机的技术数据中只给出启动频率和运行频率。

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 步进电动机的启动过程和启动频率

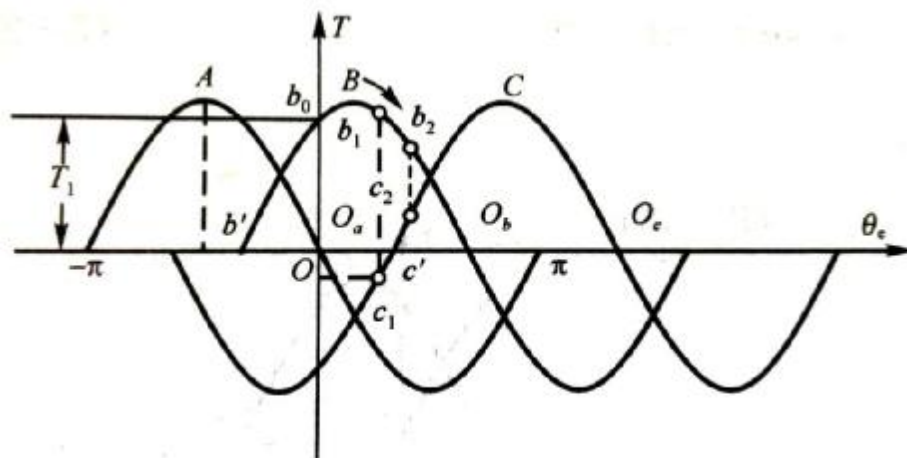
n 假设负载转矩为零。



4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 步进电动机的启动过程和启动频率

n 假设负载转矩为零。



转子位于 b_1

转子位于 b_2

C相通电

C相通电

$T_c < 0$

$T_c > 0$

减速

电机继续加速，**能启动**

依靠初始速度未使转子超过 c' 点

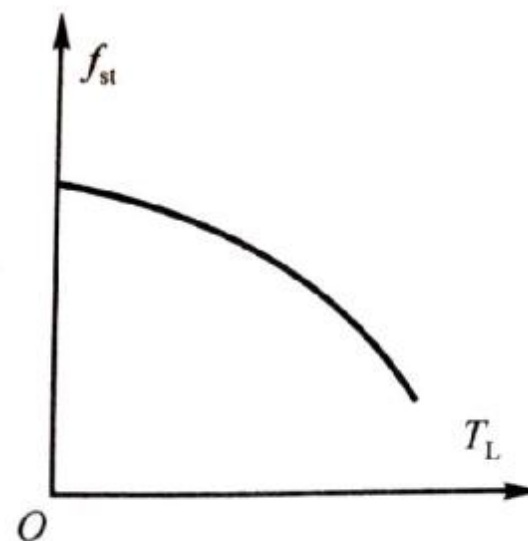
电机反转，
A相通电时
又回到 O_a ，
不能启动

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 步进电动机的启动过程和启动频率

- n 步进电动机能够成功启动不仅与负载转矩有关，还与控制频率和负载转动惯量有关。
- n 步进电动机能无失步启动和停转的最高频率称为**启动频率**。
- n **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

负载转矩越大，启动频率越低



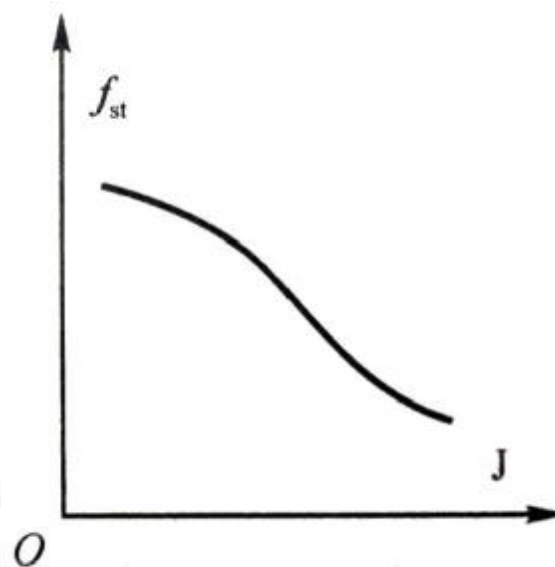
(a)启动矩频特性

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 步进电动机的启动过程和启动频率

- n 步进电动机能够成功启动不仅与负载转矩有关，还与控制频率和负载转动惯量有关。
- n 步进电动机能无失步启动和停转的最高频率称为**启动频率**。
- n **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

负载转动惯量越大，启动频率越低



(b)启动惯频特性

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 运行频率、动态转矩与运行矩频特性

n 步进电动机在负载条件下能无失步运行的最高控制频率称为**运行频率**。

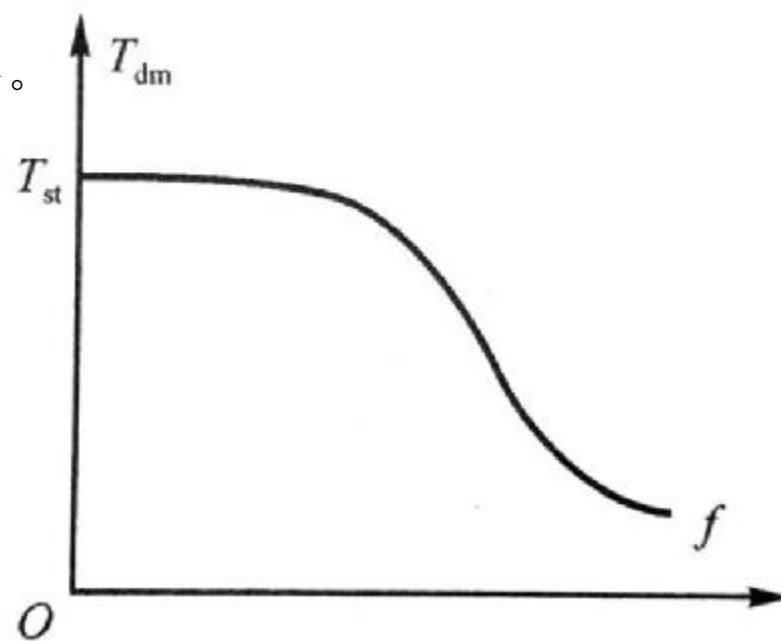
n 影响运行频率的主要因素是负载转矩。

n 步进电机的运行频率比启动频率高得多。

n 步进电动机转动时所产生的转矩称为**动态转矩**。动态转矩也就是步进电机连续运行时的输出转矩。

n **运行矩频特性**：步进电动机在负载转动惯量及其他条件不变的情况下，最大输出转矩与运行频率的关系称为步进电动机的运行矩频特性。

n 随着运行频率的升高，动态最大输出转矩下降。

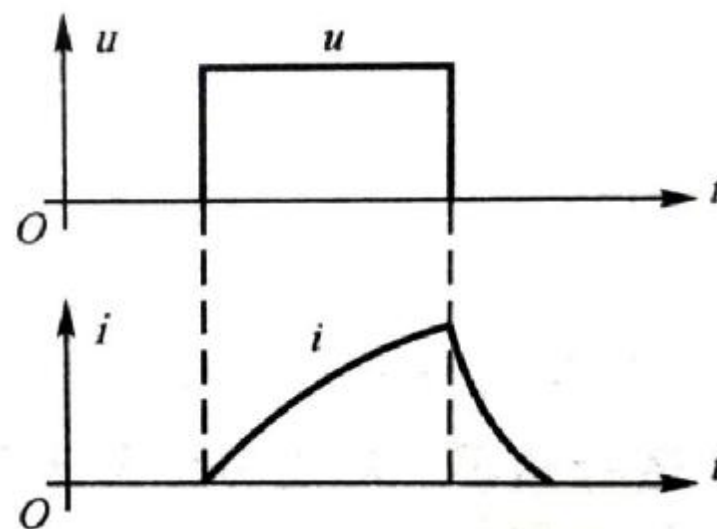
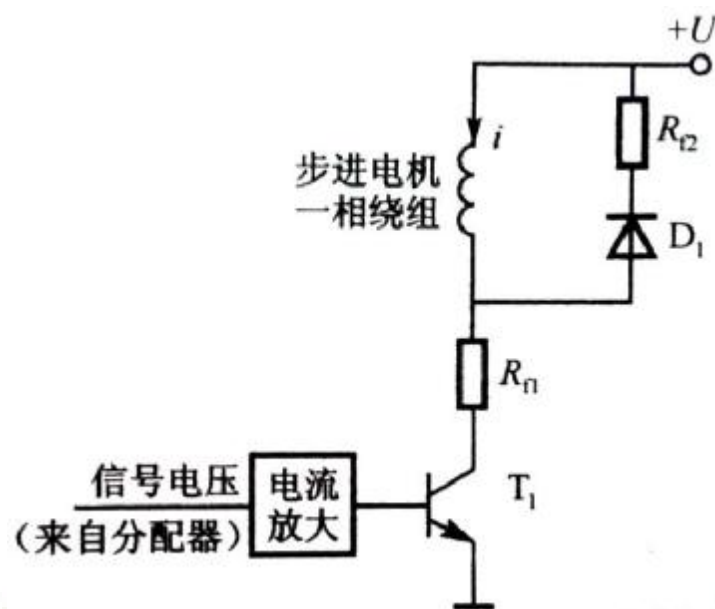


运行矩频特性

4 磁阻式步进电动机的运行特性

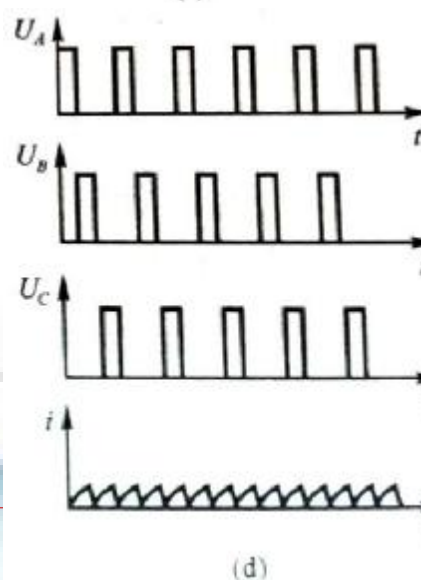
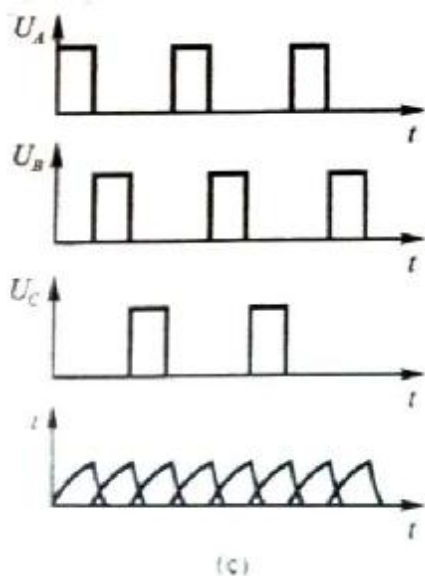
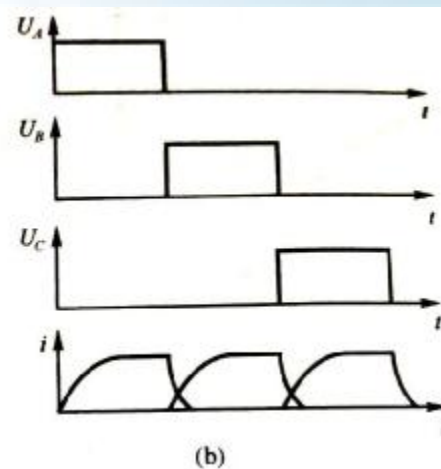
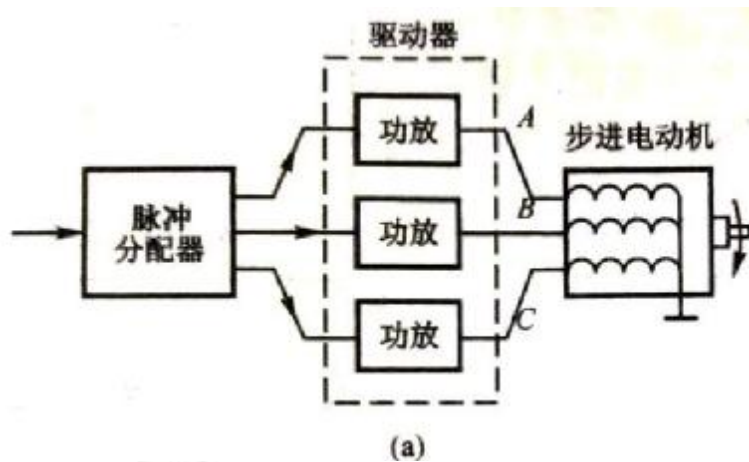
运行频率、动态转矩与运行矩频特性

负载能力下降的一个主要原因是绕组电感的影响，电流达不到规定值。



4 磁阻式步进电动机的运行特性

n 负载能力下降的一个主要原因是绕组电感的影响，电流达不到规定值。



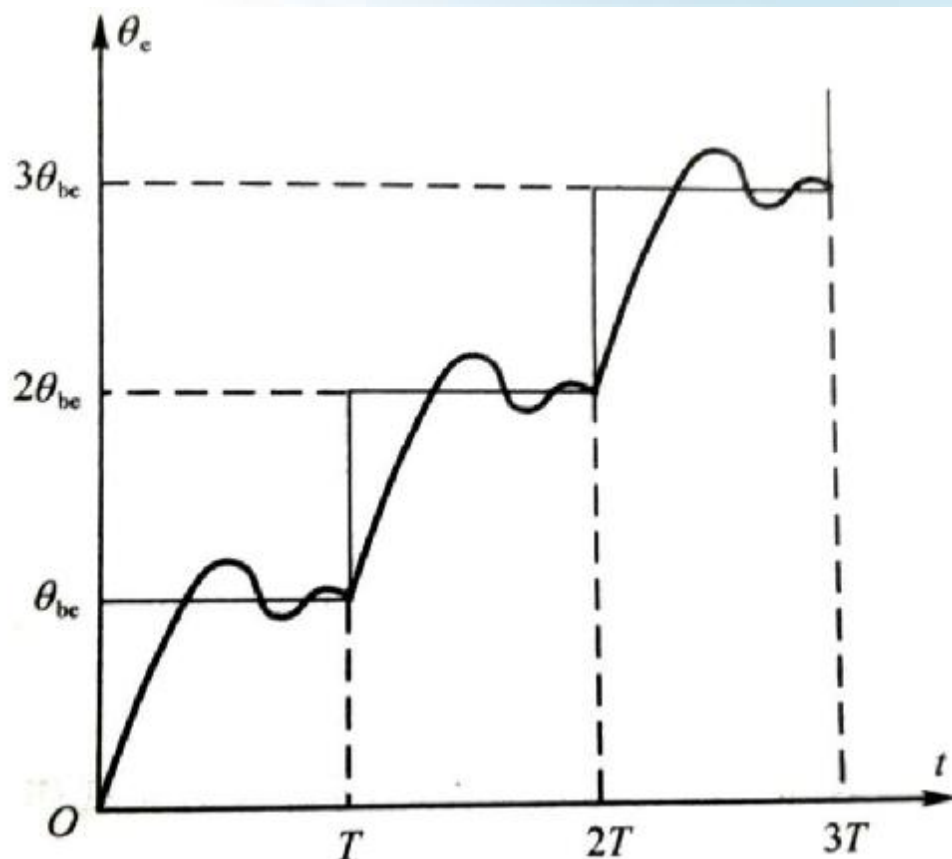
4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 不同控制频率下的运行

n 极低频下运行

n 特点：控制脉冲的周期足够长，一个周期内转子的振荡衰减到很小的程度，新的脉冲到来时，转子处于平衡位置附近，电机从不动开始运行，同单步运行相同。

n 不会出现丢步、越步。



4 磁阻式步进电动机的运行特性

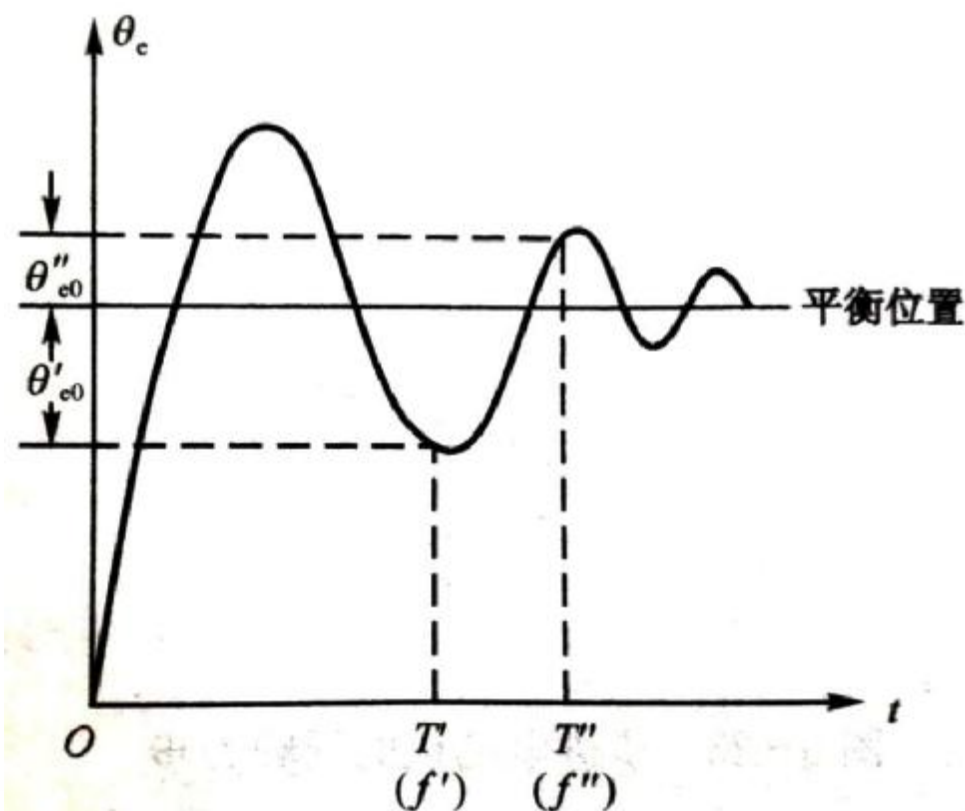
○ 不同控制频率下的运行

n 低频下运行

n 控制频率增加，控制周期缩短，转子振荡周期还没衰减完，下一个脉冲就来到。

n 转子的运行情况与脉冲到来时转子位置有关，与控制频率有关。

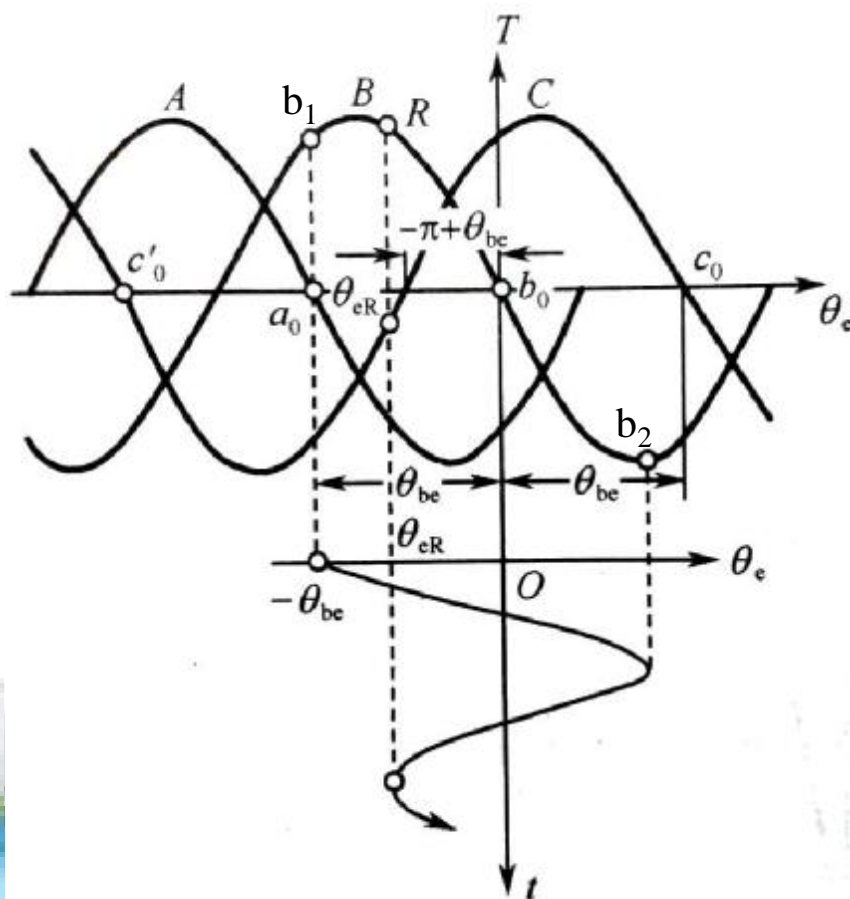
n 控制脉冲频率等于或接近步进电动机振荡频率的 $1/k$ 倍而又高于极低频率时，电机可能出现强烈的振动至失步和无法工作。



4 磁阻式步进电动机的运行特性

不同控制频率下的运行

低频下运行——失步现象



A相通电

转子位于 a_0

B相通电

$T_B > 0$

转矩沿 $b_1R b_0 b_2 b_0 R \dots$ 变化

当转子位于 θ_{eR} 点时

C相通电

$T_C < 0$

转子向 c'_0 运动

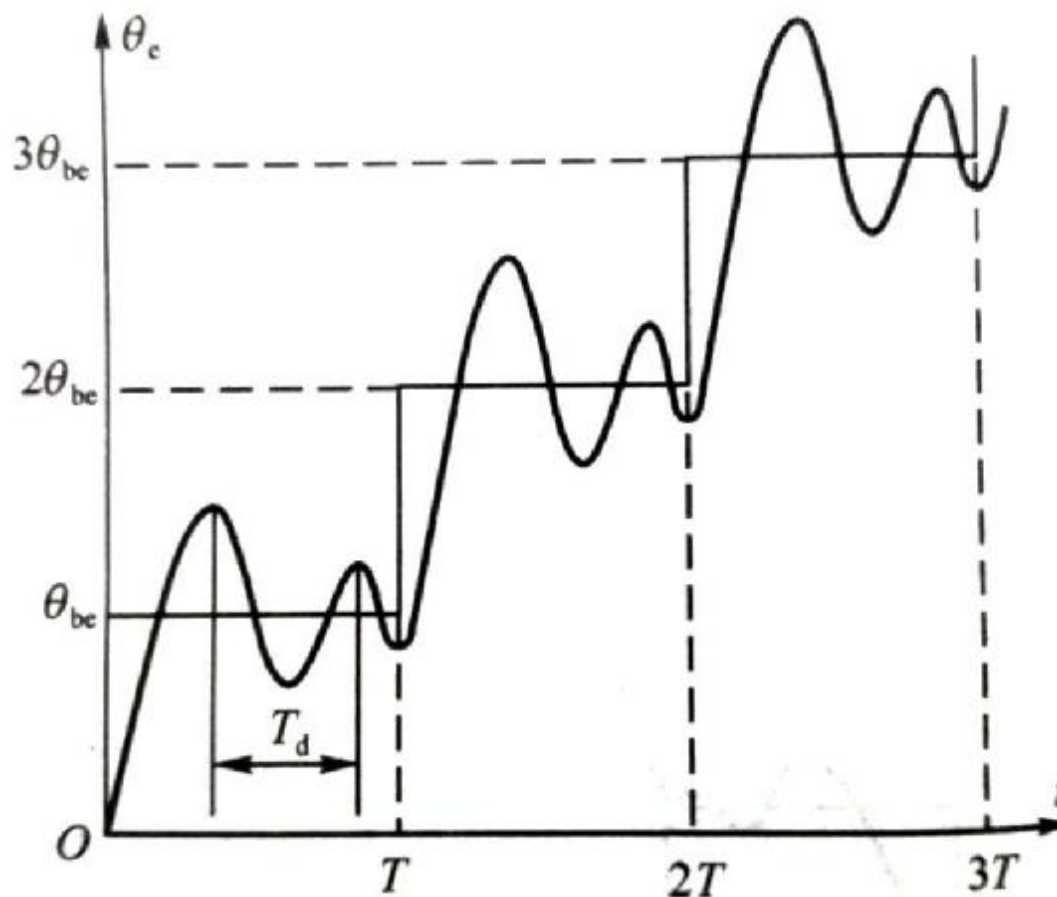
A相通电

转子向 a_0 运动

4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 不同控制频率下的运行

■ 低频下运行——低频共振现象

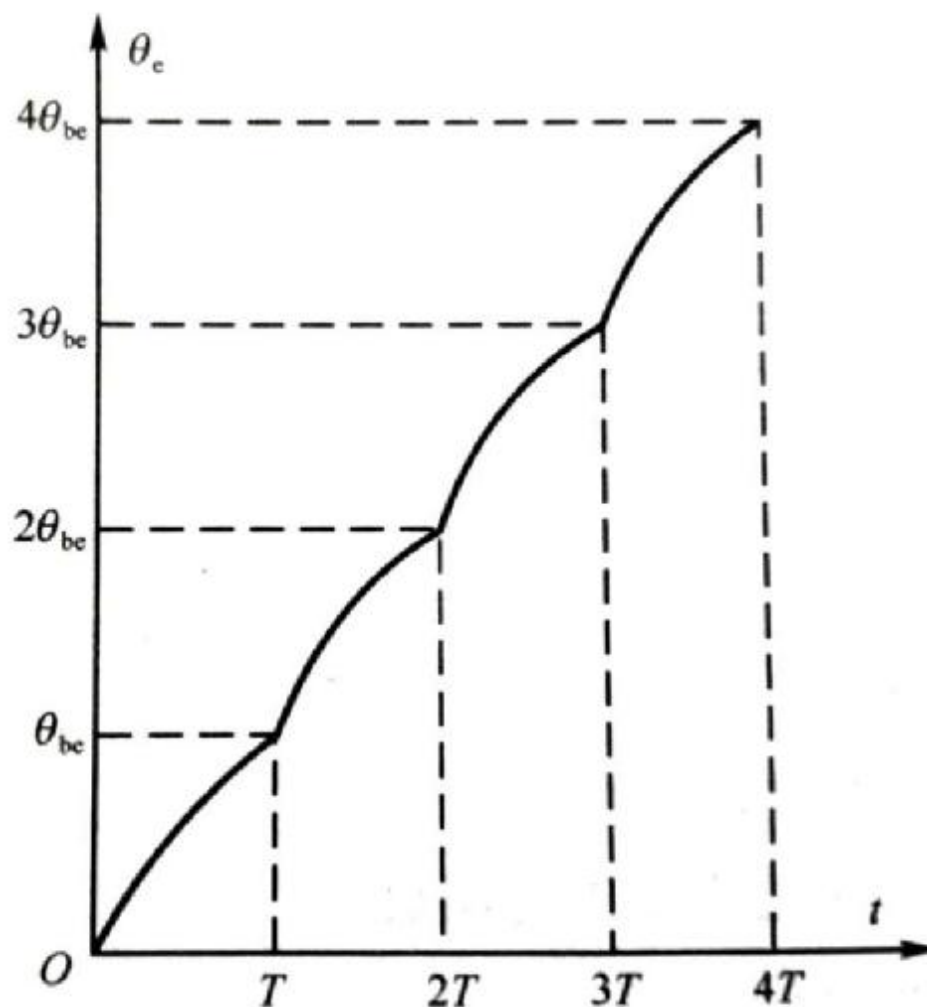


4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 不同控制频率下的运行

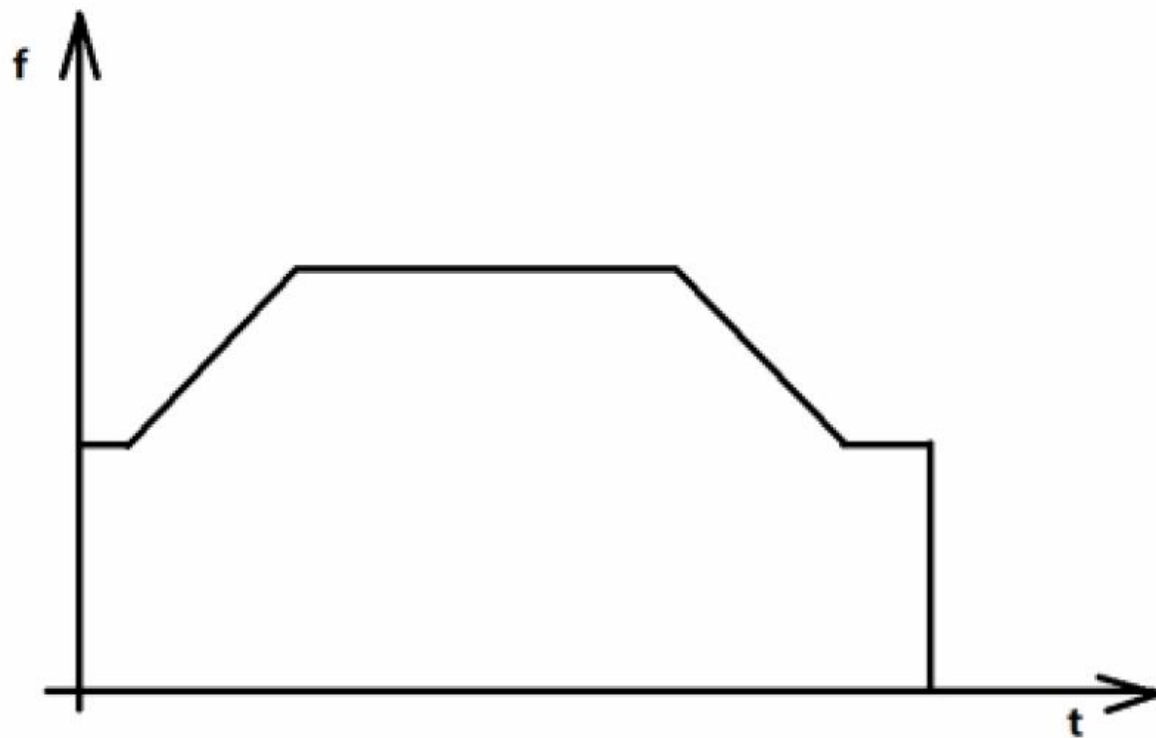
n 连续脉冲作用下的平稳运行

n 当控制频率增加，接近或高于电机振荡周期的**2**倍，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，此时电机的运行比较平稳。



4 磁阻式步进电动机的运行特性

○ 步进电机的优化运行



5 永磁式步进电动机

○ 永磁式步进电动机结构

- n 转子由永磁体组成。 $2p$ 极电机转子的磁极数为：

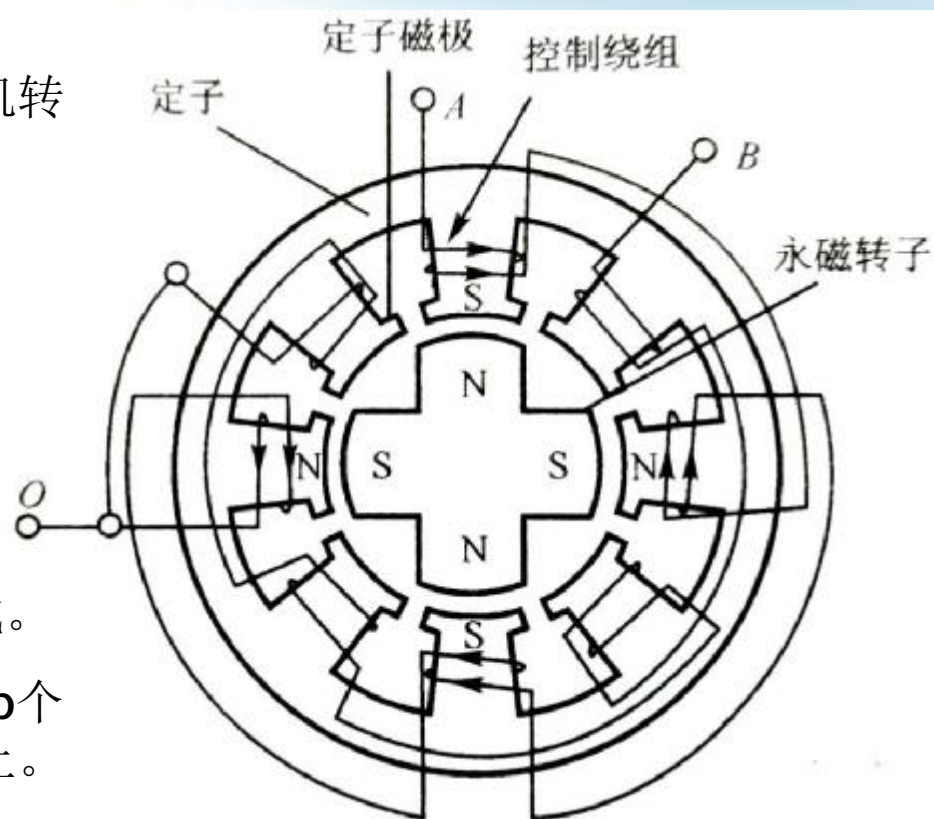
$$2p = Z_r$$

- n 相邻磁极轴线夹角(极距角)：

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

- n 定子铁心由软磁钢片叠压而成。

- n 定子上有 m 相绕组，每相有 $2p$ 个线圈，放置在 $2p$ 个定子磁极上。



磁阻式步进电机的极数指什么？

5 永磁式步进电动机

○ 永磁式步进电动机结构

n 定子磁极总数为:

$$Z_s = 2mp$$

n 定子磁极轴线夹角(极距角):

$$q_s = \frac{360^\circ}{2mp} = \frac{1}{m} q_r$$

n 对于图示的电机有:

$$Z_r = 2p = 4$$

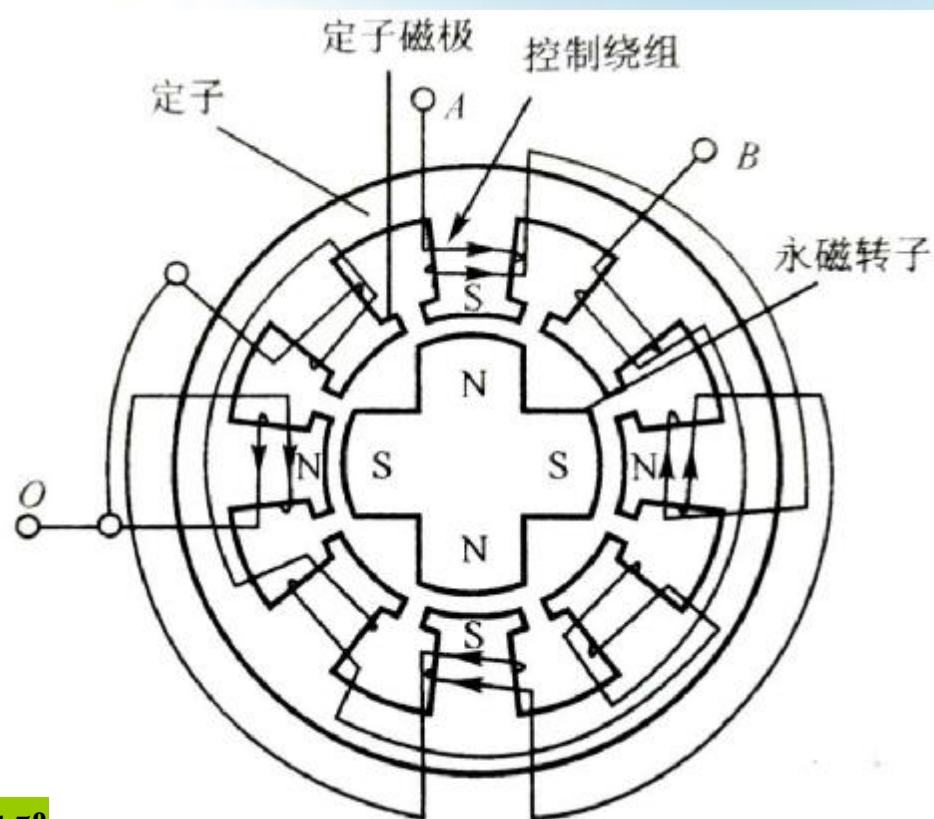
$$m = 2$$

$$p = 2$$

$$q_r = 90^\circ$$

$$Z_s = 8$$

$$q_s = 45^\circ$$

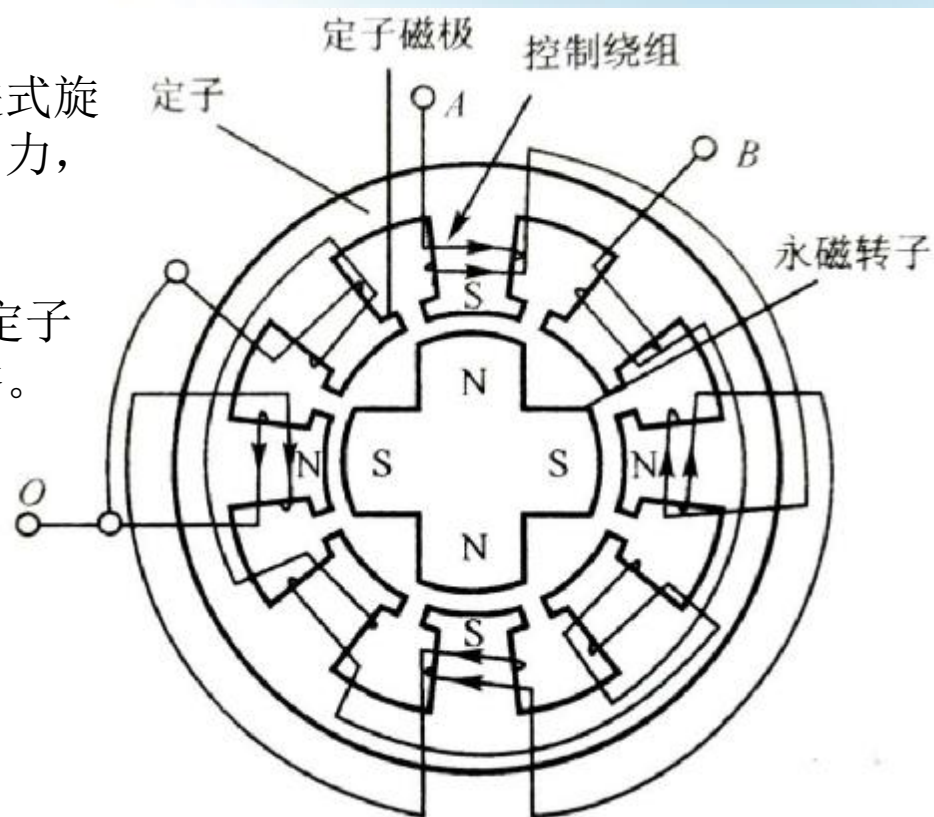


5 永磁式步进电动机

○ 工作原理

- n 定子绕组周期通电，形成步进式旋转磁场，依靠磁极间相互作用力，带动永磁转子转动。
- n 由于转子具有N、S极，所以定子绕组具有正、反两种通电状态。
- n 电机的通电状态也称为拍数。若m相电机的拍数N为：

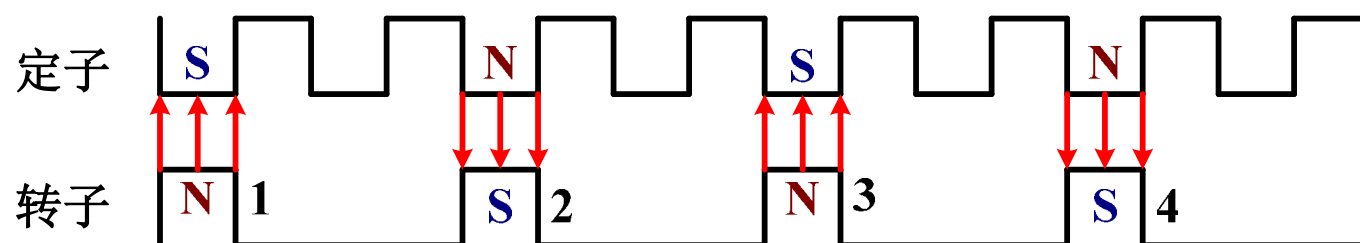
$$N = 2m$$



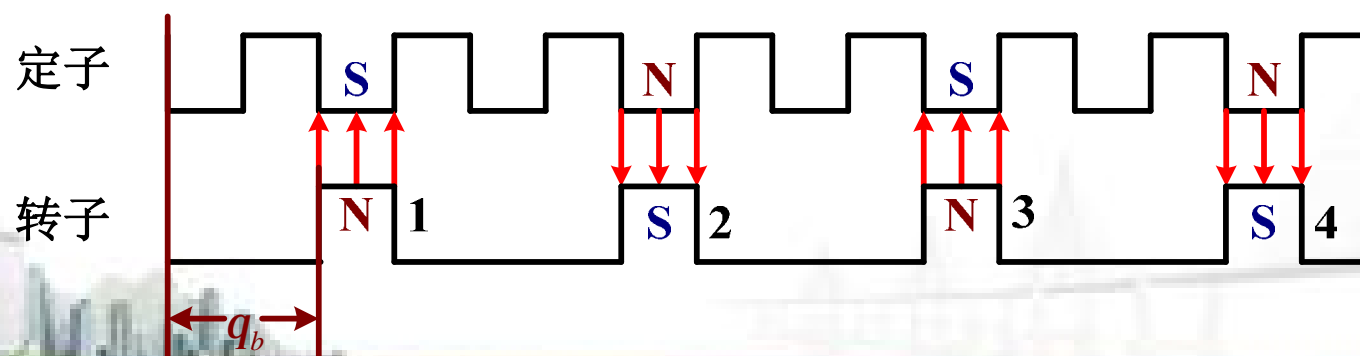
5 永磁式步进电动机

步距角: $q_b = q_s = \frac{360^\circ}{N_p} = 45^\circ$

○ A相正向通电时



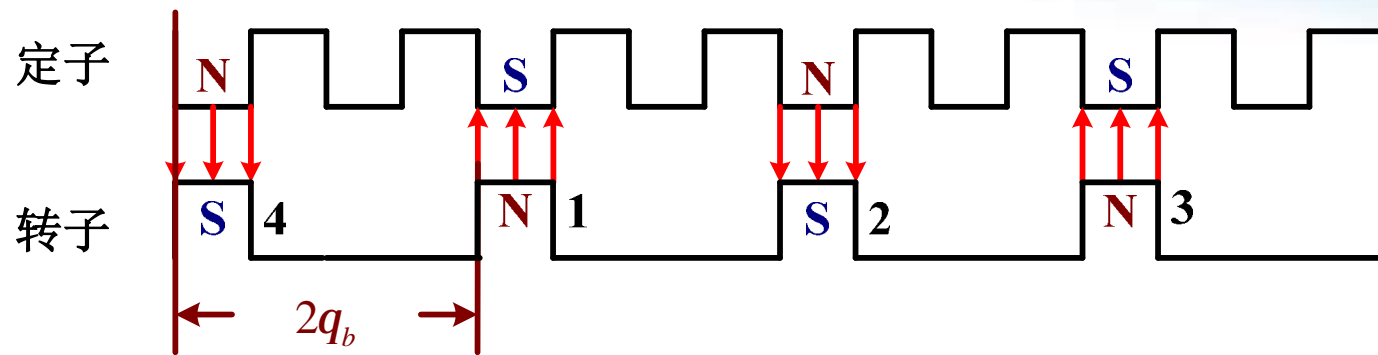
○ B相正向通电时，顺时针移动一个步距角 45°



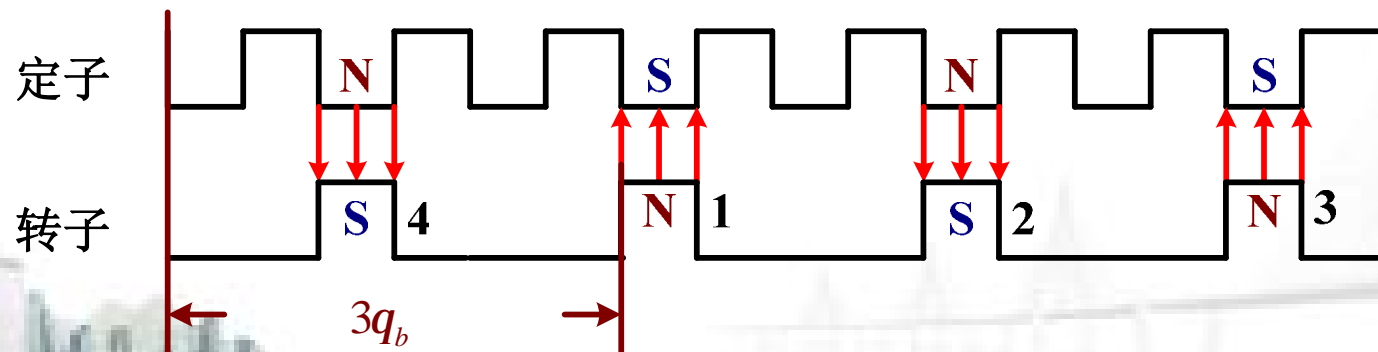
5 永磁式步进电动机

步距角: $q_b = q_s = \frac{360^\circ}{2mp} = 45^\circ$

- A相反向通电时，顺时针移动一个步距角 45°

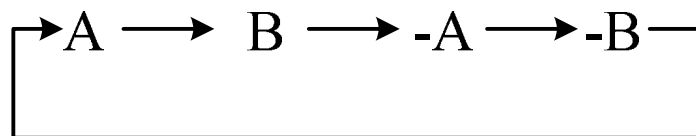


- B相反向通电时，顺时针移动一个步距角 45°

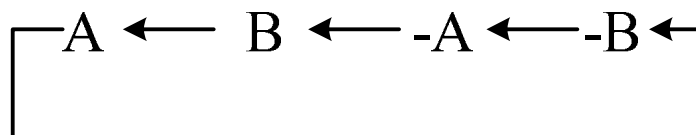


5 永磁式步进电动机

- n 按如下通电顺序轮流通电，转子按顺时针方向一步一步转动，每转动一次，转过一个步距角(定子极距角)



- n 按如下通电顺序轮流通电，则转子按逆时针方向一步一步转动



- n 完成一个通电周期应走**2m**步，转动角度为：

$$2mq_b = 360^\circ / p$$

5 永磁式步进电动机

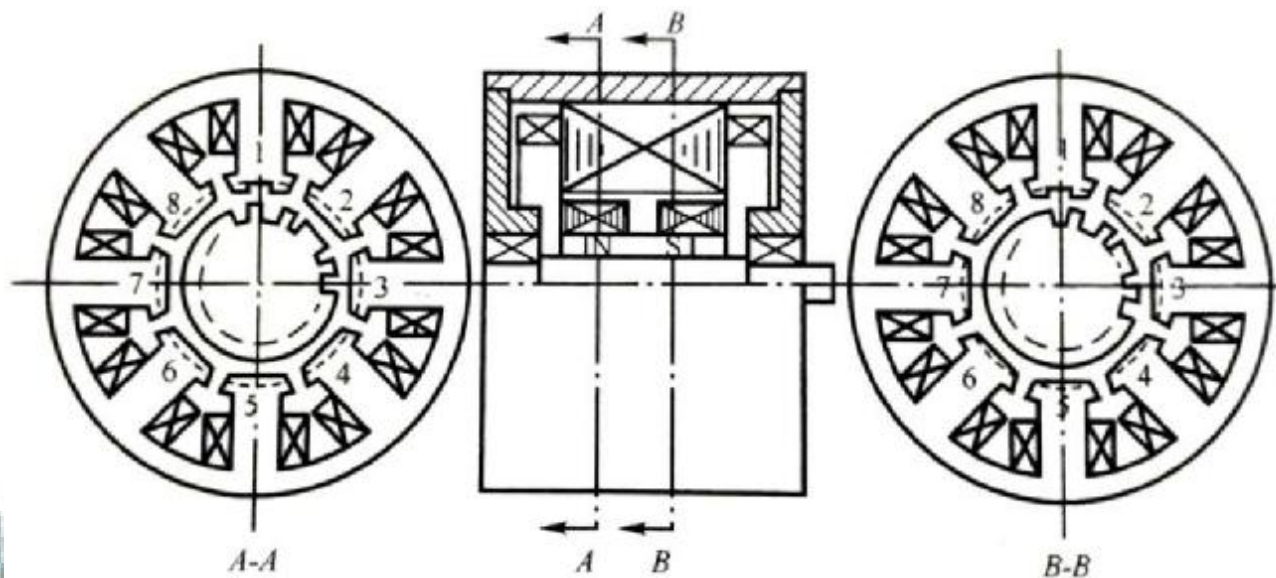
- n 绕组通电状态不变时，转矩是转角的周期函数，周期是转子一对磁极的角度，取平衡位置为转角的零位，则距角特性为：

$$T = -T_m \sin pq$$

- n 永磁步进电机的距角特性，运行特性与磁阻式步进电机相似。
- o 永磁式步进电机的特点：
 - n 步距角大，例如 15° 、 22.5° 、 45° 等
 - n 启动频率低，通常为几十到几百赫兹(但转速不一定低)
 - n 由于用永磁转子，控制功率小，力矩大
 - n 断电时有定位转矩

6 混合式步进电动机

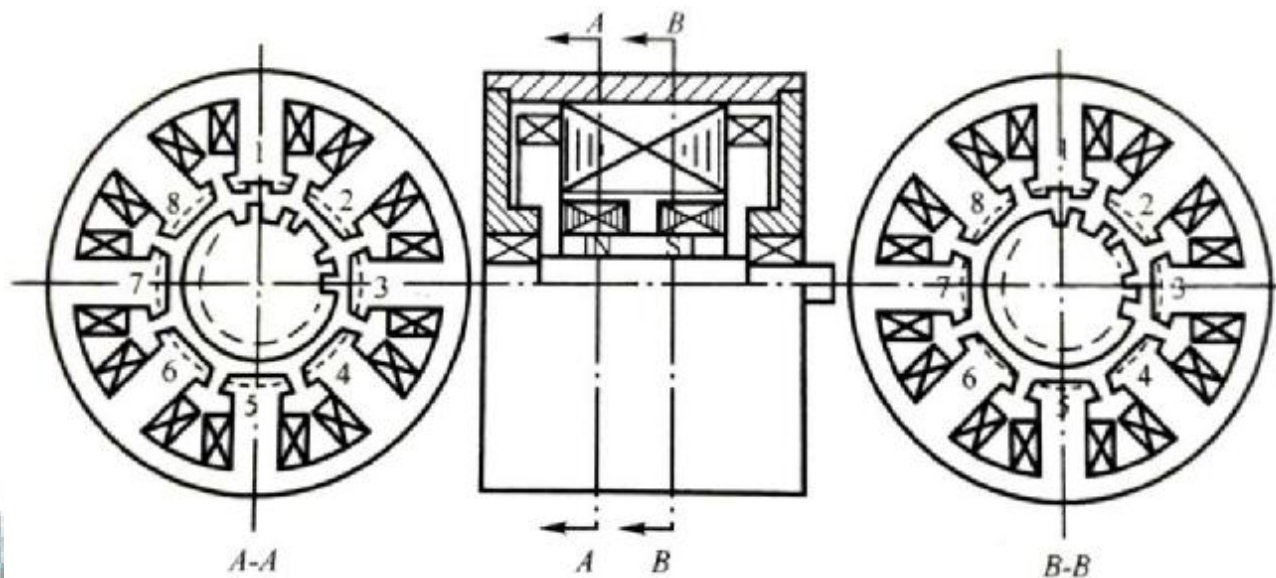
- 混合式步进电动机又称为感应子式永磁步进电动机。其具有磁阻式和永磁式两种步进电动机的特点，应用广。
- 混合式步进电动机结构
 - 定子铁心结构与磁阻式步进电动机相同，由软磁薄片叠压而成



6 混合式步进电动机

混合式步进电动机结构

- 定子磁极为凸极，磁极表面具有小齿结构。
- 转子沿轴向分成三段：中间一段是永磁体沿轴线充磁；两端是软磁铁心，铁心外表有小齿，与定子小齿相同，但转子两端小齿错开半个齿距。



6 混合式步进电动机

o 混合式步进电动机结构

n 设定子绕组为 m 相，正、反通电，一个通电周期有 N 个状态，拍数 N 为：

$$N = 2m$$

n $2p$ 极电机，定子铁心大齿数为：

$$Z_s = 2pm$$

n 设转子齿数为 Z_r ，则齿距角为

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

n 某个定子磁极下定、转子小齿对齐，相邻的定子极下定、转子齿错开 $1/N$ 个齿距

$$\frac{Z_r}{2mp} = K \pm \frac{1}{N} = K \pm \frac{1}{2m}$$

或

$$Z_r = 2Kmp \pm p$$

其中 K 为正整数

6 混合式步进电动机

混合式步进电动机结构

定、转子磁极情况

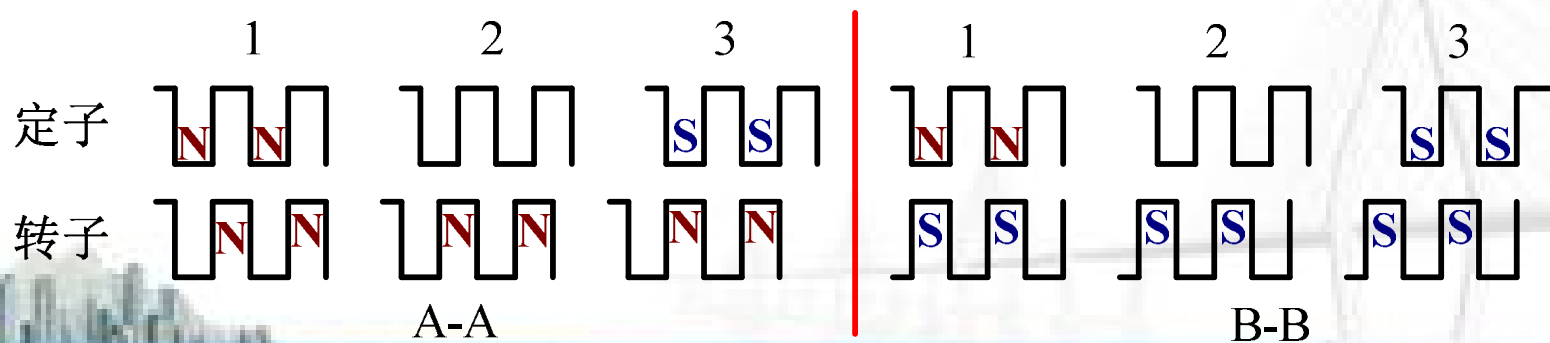
4极电机 $p=2$ ；A和B两相绕组 $m=2$ ；定子大齿数为 $Z_s=2mp=8$ ；

A相供电，则定子1、5磁极为N极，3、7磁极为S极，2、4、6、8磁极无极性

A-A端转子小齿与B-B端转子小齿相差半个齿距

相邻定子磁极下，定、转子小齿相差 $1/N$ 齿距

下图为A相供电时的平衡位置

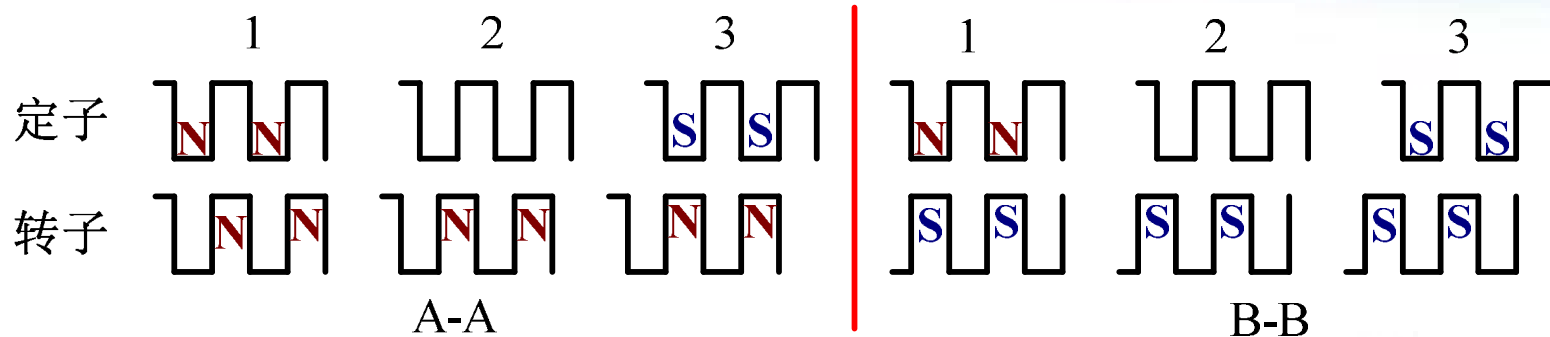


6 混合式步进电动机

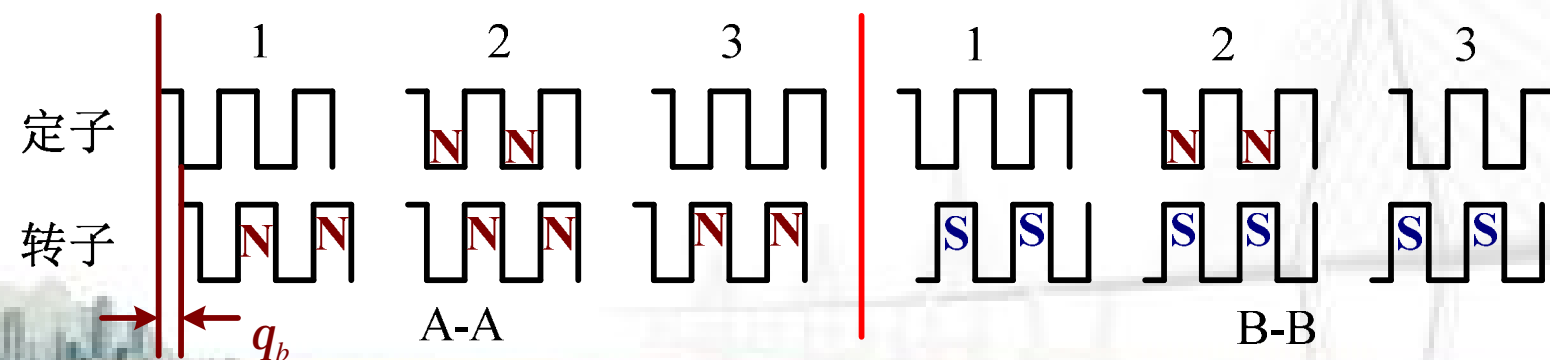
步距角: $q_b = \frac{q_t}{N} = \frac{360^\circ}{NZ_r}$

○ 原理

■ A相正向供电



■ B相正向供电，电机顺时针转动一个步距角

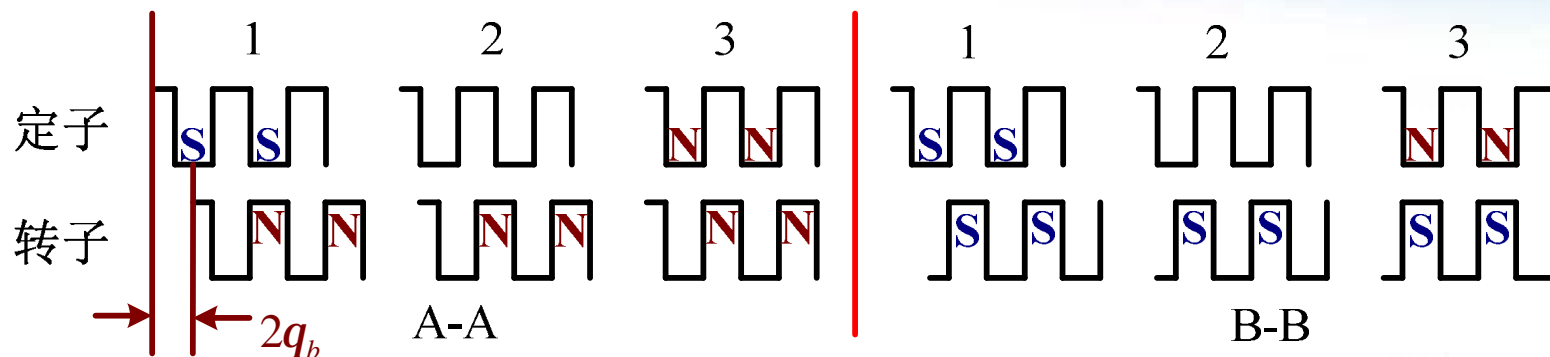


6 混合式步进电动机

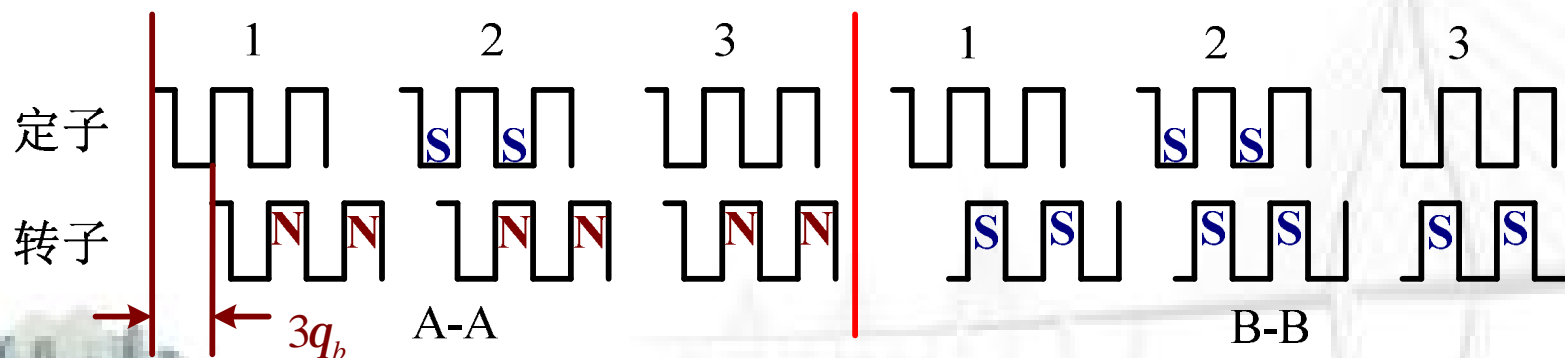
步距角: $q_b = \frac{q_t}{N} = \frac{360^\circ}{NZ_r}$

○ 原理

■ A相反向供电，电机顺时针转动一个步距角

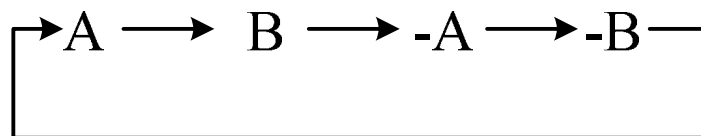


■ B相反向供电，电机顺时针转动一个步距角

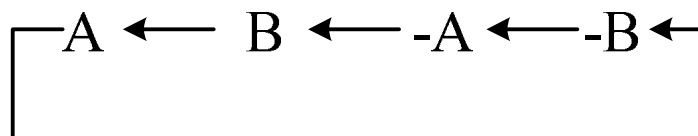


6 混合式步进电动机

- n 按如下通电顺序轮流通电，转子按顺时针方向一步一步转动，每转动一次，转过一个步距角



- n 按如下通电顺序轮流通电，则转子按逆时针方向一步一步转动



- n 绕组通电状态不变时，转矩是转角的周期函数，周期是转子的一个齿距角，与磁阻式步进电机完全相同。
- n 混合式步进电机的矩角特性、运动特性与磁阻式步进电机相同。

6 混合式步进电动机

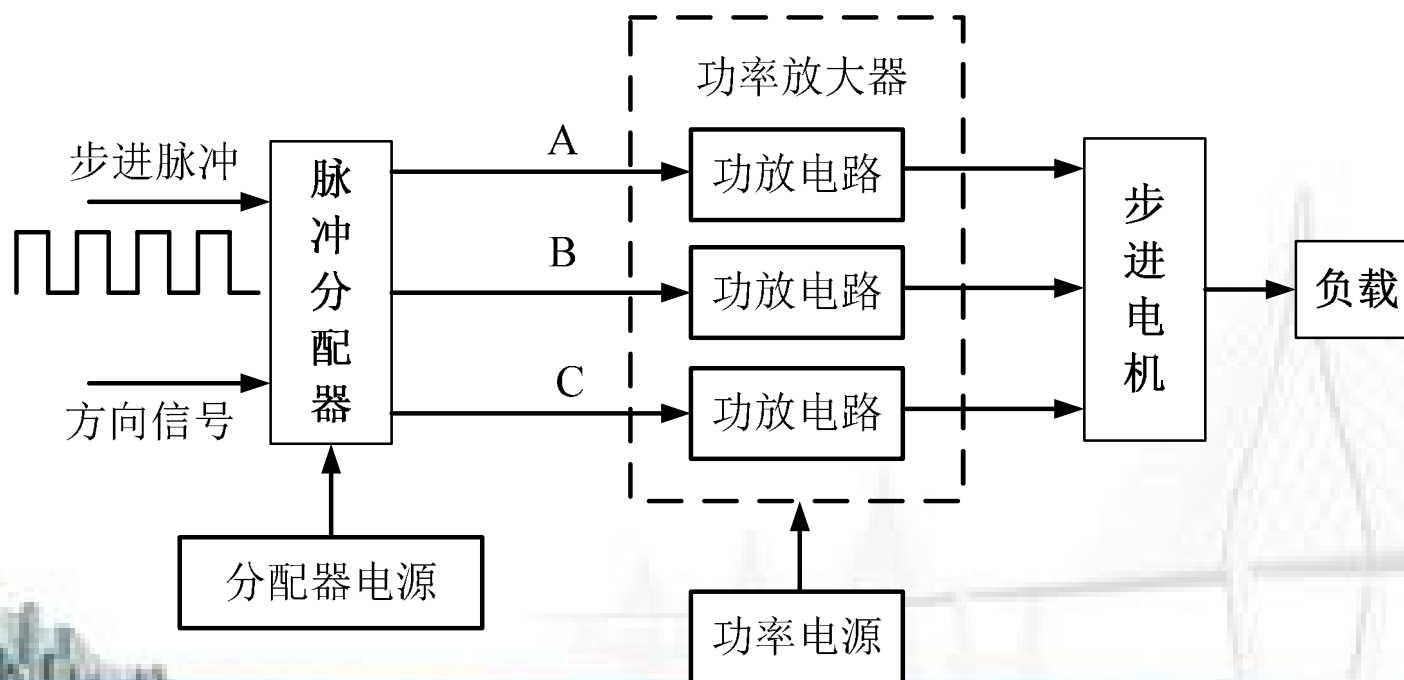
○ 混合式步进电动机特点:

- n 混合式步进电动机可以像磁阻式步进电动机一样，可以做成小步距角
- n 混合式步进电动机具有较高的启动频率和运行频率
- n 混合式步进电动机控制功率小、力矩较大(同永磁步进电动机)
- n 混合式步进电动机定子断电后有定位转矩
- n 混合式步进电动机转子结构和工艺复杂，绕组正、反向通电，驱动器或绕组复杂。

7 步进电动机的驱动

○ 步进电动机驱动的组成

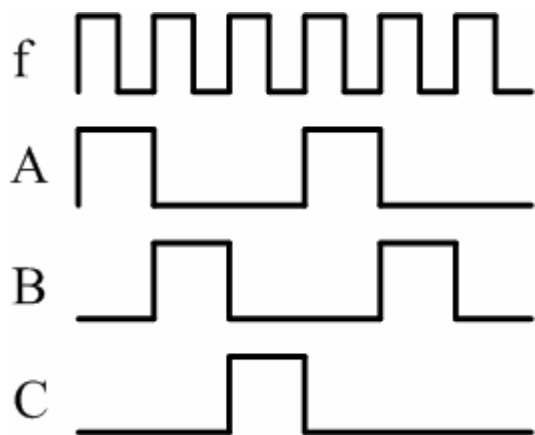
- n 步进电动机必须与控制器和驱动器配用
- n 驱动器一般包含脉冲分配器和功率放大器



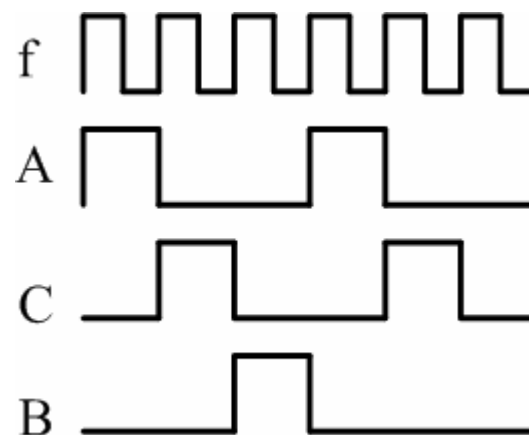
7 步进电动机的驱动

○ 脉冲分配器

n 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



n 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



○ 功率放大器：将脉冲分配器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

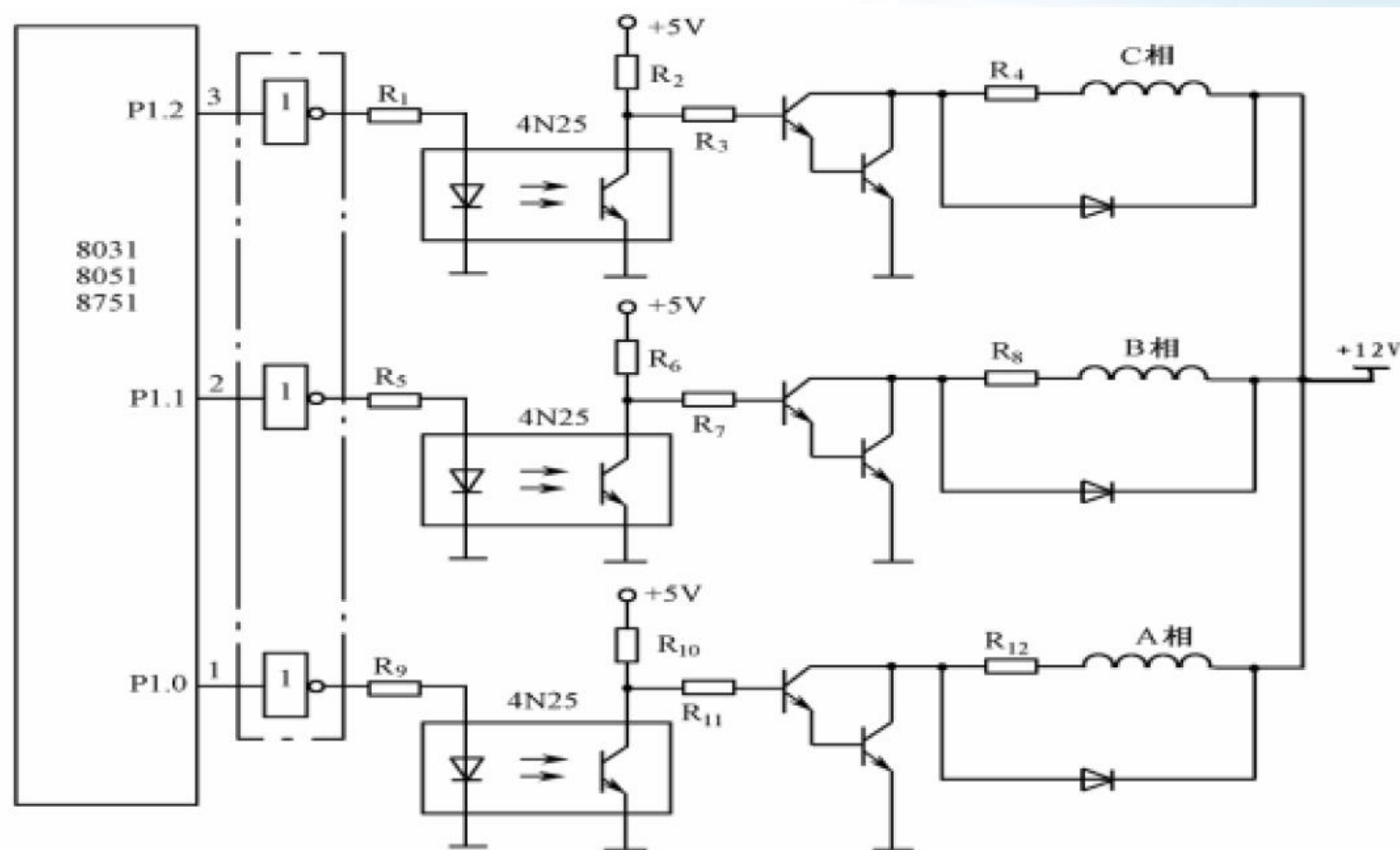
7 步进电动机的驱动

○ 步进电动机驱动器的功能

- n 控制脉冲按规定的通电方式分配到每相绕组
- n 实现脉冲分配的硬件逻辑电路，称为环形分配器
- n 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)
- n 分配器输出的脉冲需要进行功率放大，才能驱动步进电动机。

7 步进电动机的驱动

○ 单片机控制三相步进电机控制原理图



7 步进电动机的驱动

- 步进电机可以采用配套细分电路的驱动器，此时步距角：

$$q_{bx} = \frac{q_b}{K}$$

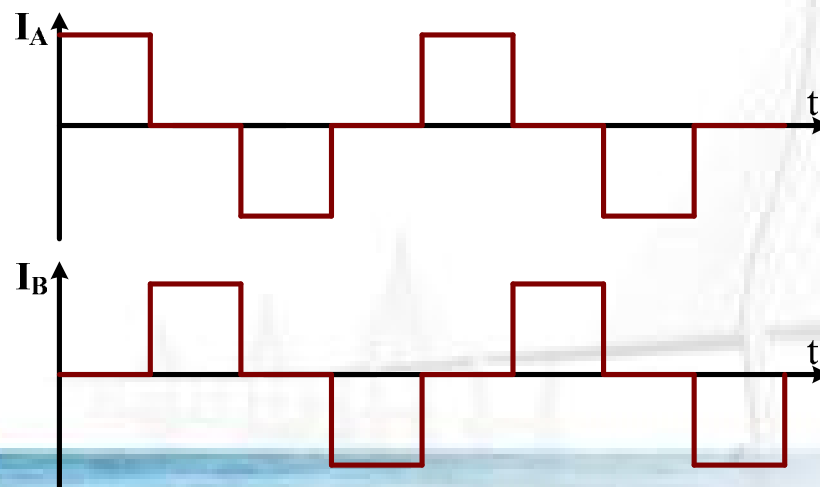
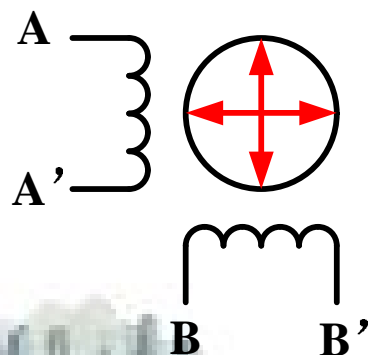
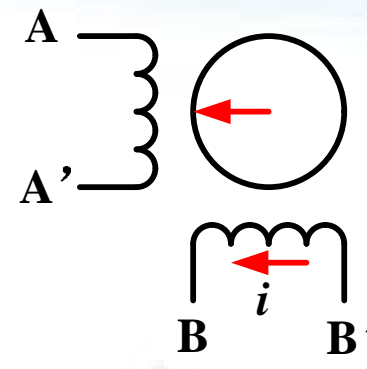
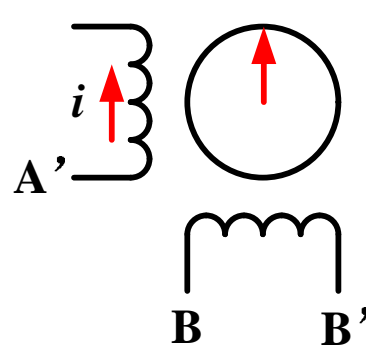
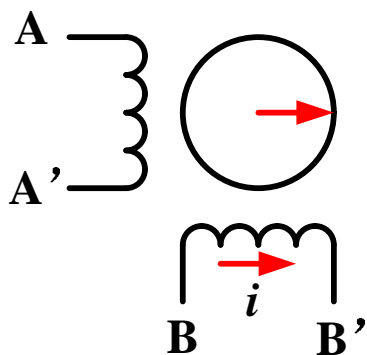
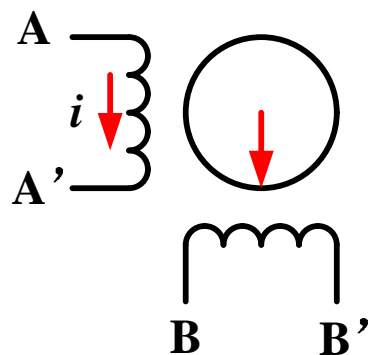
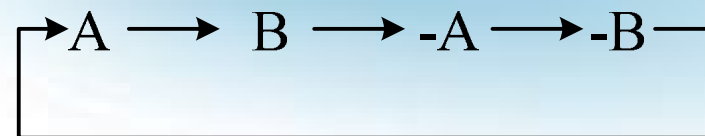
其中 θ_b 是产品说明书给出的步距角，也就是不用细分电路是的步距角

K 是细分数，是2的整数次幂，如2,4,6,8等。

- n 正常驱动电路特点：输入脉冲对绕组进行切换，使绕组完全导通至额定电流或使绕组完全截止。
- n 细分驱动电路特点：输入脉冲对绕组进行切换，每次改变的电流数值只是额定电流数值的一部分。绕组中的电流是台阶式地逐渐增加到额定值或逐渐减少至零。
- n 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的运转。

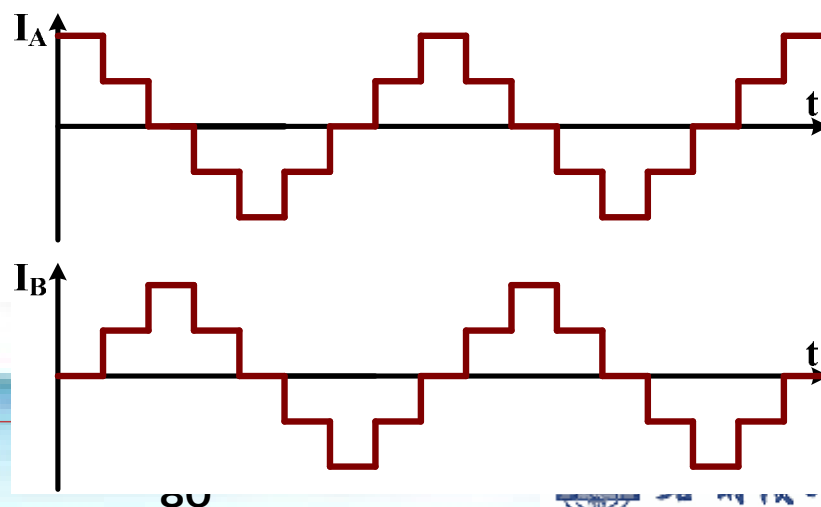
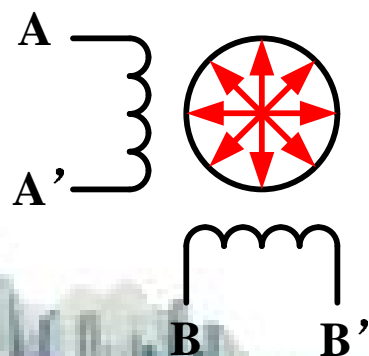
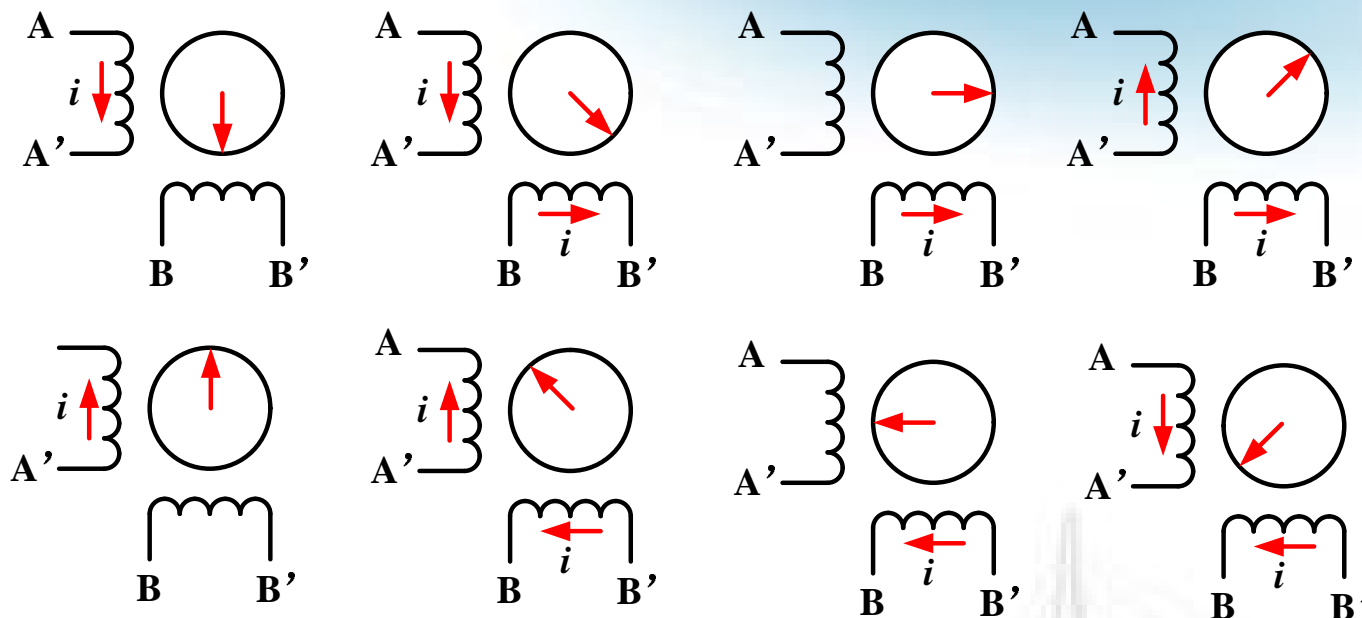
7 步进电动机的驱动

○ 整步距控制



7 步进电动机的驱动

○ 半步距控制



14:35:41

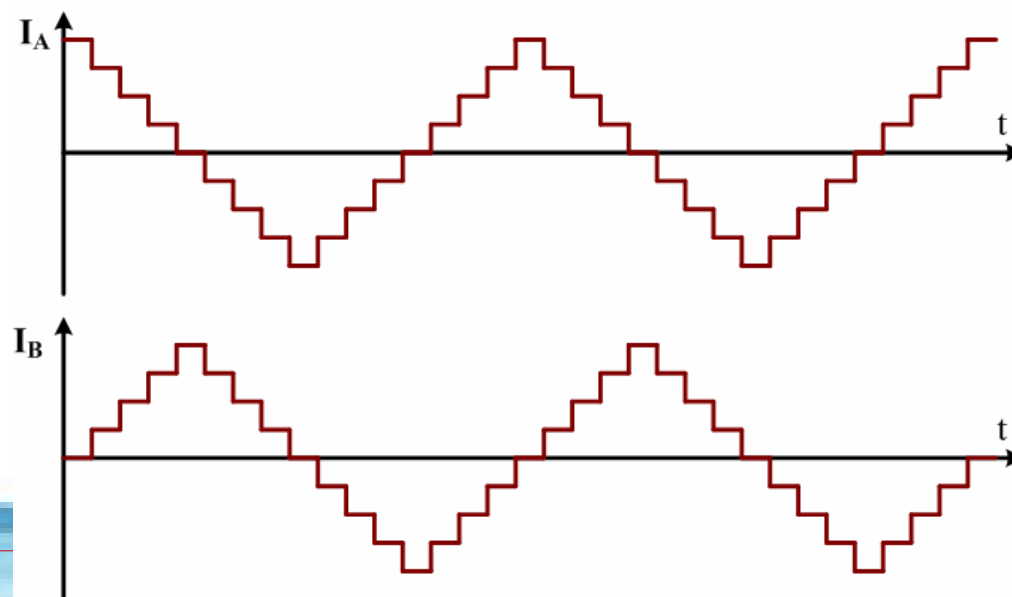
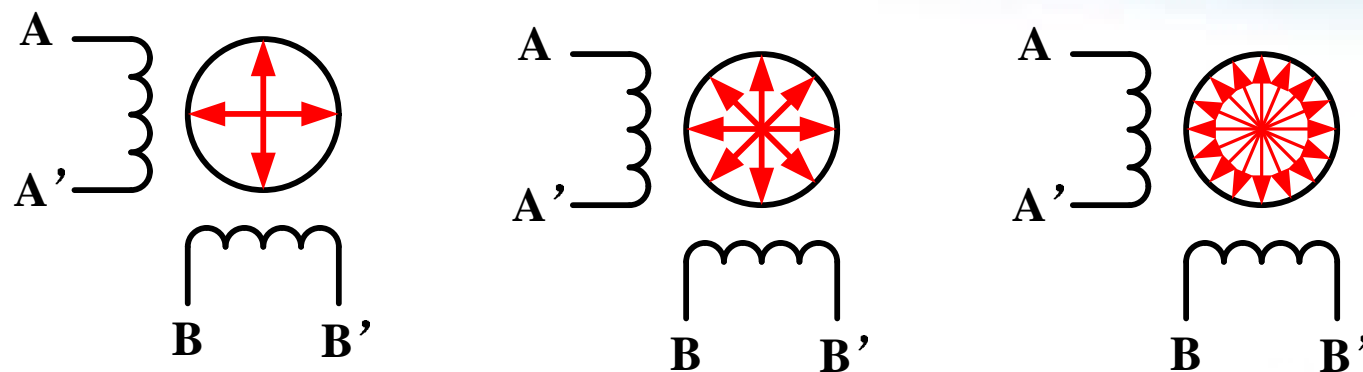


HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

哈尔滨工业大学

7 步进电动机的驱动

○ 四分之一步距控制

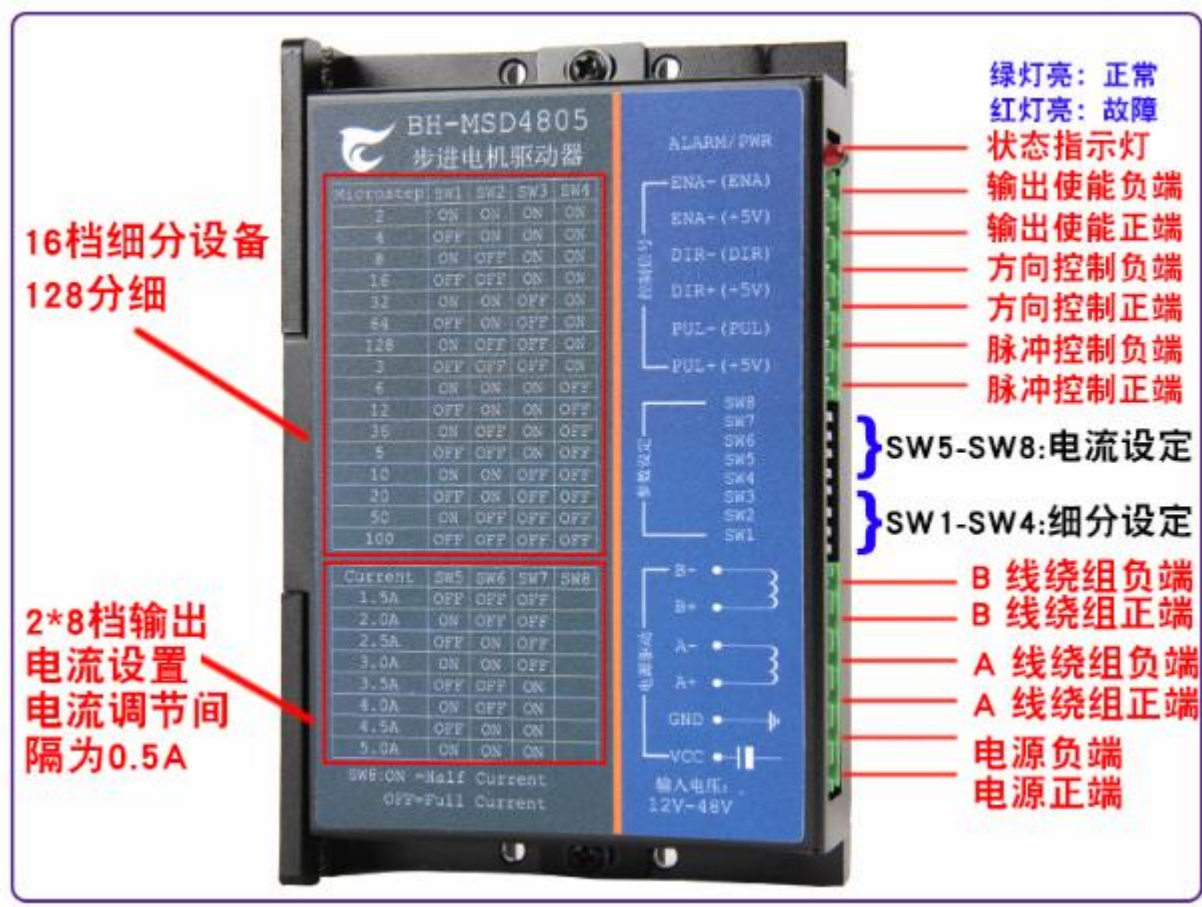


7 步进电动机的驱动

- 电流分成多少个台阶，转子转一个原步距角就需要多少个脉冲，因此一个脉冲所对应的电机的步距角要比正常驱动小很多。
- 细分电路形成的步距角又称微步距。
- 不细分时，步进电动机每步的步距角理论上是相等的，单细分后每一步的步距角不一定相等。
- 如果要使细分后步距角仍然一致，则通电的台阶可能是不均匀的。
- 在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，已不能进一步改善驱动性能。

7 步进电动机的驱动

集成步进电动机驱动器



8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的主要优点

- n 能直接实现数字控制，数字脉冲信号经处理和功率放大后可直接控制步进电机，无需转换。
- n 控制原理简单，可实现开环控制，位置量与脉冲数成正比，速度与脉冲频率成正比。
- n 机械结构简单，坚固耐用。



8 步进电动机的应用

- 步进电动机的主要缺点
 - n 运动增量或步距角是固定的
 - n 采用普通驱动器时效率低，大部分输入功率转为热能耗散掉
 - n 承受惯性负载的能力较差
 - n 输出功率小
 - n 运行时有时发生振荡现象，需要加入阻尼机构或采取其他措施
 - n 目前主要用于开环系统，闭环控制时所用元件和线路比较复杂
 - n 不能把步进电动机直接接到普通交流电压上运行，必须配备驱动器。

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的类型选择

- n 磁阻步进电动机制造简单，精度容易保证，步距角为 $0.36^\circ \sim 7.5^\circ$ ，启动和运行频率较高，但损耗大，效率低，相绕组不通电时没有定位转矩。
- n 永磁式步进电动机步距角大，为 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ ，消耗功率小，相绕组不通电时具有一定的定位转矩，启动、运行频率较低。
- n 混合式步进电动机具有上述两种类型步进电动机的优点，即步距角小，具有较高的启动和运行频率，相绕组不通电时具有一定的定位转矩，消耗功率小，但要求使用双极性功放电路。目前混合式步进电动机应用较广泛。

8 步进电动机的应用

o 步进电动机的参数选择

n 选择步进电动机的步距角 θ_b

$$q_b \leq iq_{\min}$$

i ——系统传动比

θ_{\min} ——负载轴要求的最小位移增量(或称脉冲当量)

n 选择步进电动机的精度等级

$$\Delta q_b \leq i(\Delta q_L)$$

$\Delta \theta_b$ ——步进电机的误差

i ——系统传动比

$\Delta \theta_L$ ——负载轴上允许的最小误差

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的参数选择

n 选择步进电动机的最大静转矩 T_m

$$T_m \geq KT_L$$

T_L ——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

K ——系数，一般取2~3.5

n 步进电动机运行时还需考虑步进电动机的启动矩频特性和运行矩频特性

运行频率：步进电动机在负载条件下能无失步运行的最高控制频率。
所选步进电机的运行频率应高于系统要求最高转速对应的控制频率 f

$$f = \frac{6n}{q_b} = \frac{6in_L}{q_b} (\text{步/秒})$$

n ——电机轴的转速(rpm)

n_L ——负载轴的转速(rpm)

θ_b ——步距角($^\circ$ /步)

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的举例

n 北京和利时电机技术有限公司生产的步进电机



绝缘电阻 —— 500VDC 100M Ω Min
轴向间隙 —— 1mm Max
径向跳动 —— 0.02mm Max
温升 —— 65K Max
绝缘强度 —— 500VAC 1Min
绝缘等级 —— B 级
使用环境温度 —— -25 $^{\circ}$ C ~ +40 $^{\circ}$ C
使用环境湿度 —— <85%RH
贮存环境温度 —— -5 $^{\circ}$ C ~ +30 $^{\circ}$ C
贮存环境湿度 —— <75%RH

8 步进电机的应用

○ 步进电机的举例

型号说明

56 BYG 2 50 C K-S A S S B L-024 1

56	BYG	2	50	C	K-S	A	S	S	B	L-024	1	设计代码		
												相电流	024: 2.4A	
												接线形式	L: 引出线, 2 相 4 线	C: 引出线, 2 相 8 线
												尺寸制式	M: 公制	B: 英制
												机壳形状	R: 圆形	S: 方形
												轴键形式	F: 铣扁	S: 光轴
												轴伸长度	A: 标准	B: 加长
												轴伸形式	S: 单	B: 双
												设计版本	缺省: 第一版本	
												机身长度		
												转子齿数	50: 50 齿	
												相数	2: 两相	
												结构形式	BYG: 混合式	
												机座号		

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的举例

规格型号	相数	步距角 ($^{\circ}$)	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 ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)
56BYG250BK-SASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	0.95	2.4	0.65	0.03	2.7	0.48	180
56BYG250BK-BASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	0.95	2.4	0.65	0.03	2.7	0.48	180
56BYG250CK-SASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	1.2	4.0	1.04	0.04	2.8	0.6	260
56BYG250CK-BASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	1.2	4.0	1.04	0.04	2.8	0.6	260
56BYG250DK-SASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	1.5	5.4	1.72	0.07	3.0	1	460
56BYG250DK-BASSBL-0241	2	0.9/1.8	2.4	1.5	5.4	1.72	0.07	3.0	1	460
56BYG250DK-SASSHL-0241	2	0.9/1.8	2.4	1.5	5.4	1.72	0.07	3.0	1	460
56BYG250EK-SASSBL-0601	2	0.9/1.8	6.0	0.5	1.8	2.5	0.12	3.1	1.5	750

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的举例

- n **静态相电流**：步进电动机输出保持转矩时所需的相电流。步进电动机转矩与相电流为非线性关系。
- n **保持转矩**：或称静转矩，是指步进电动机通以静态相电流，且处于静态锁定状态时，电机所能输出的最大转矩。是步进电动机选型时最重要的参数之一。通常步进电动机低速时刻输出的最大力矩接近保持转矩。
- n **定位转矩**：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动机区别于反应式步进电动机的重要标志。
- n **空载启动频率**：步进电动机在空载情况下能够正常启动的脉冲频率，如果脉冲频率高于该值，电机不能正常启动，可能发生丢步或堵转。在有负载的情况下，启动频率应该更低。

8 步进电动机的应用

○ 步进电动机的举例

n 矩频特性

