



自动控制实践I-17

步进电机原理与静特性



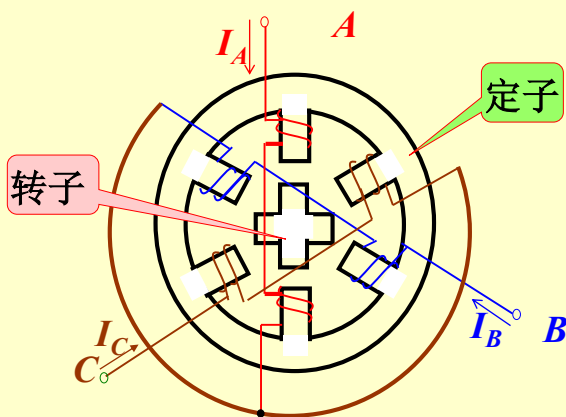
目 录

1. 步进电动机原理
2. 步进电机的分类与结构
3. 步进电机运行的基本关系
4. 步进电机的静特性



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。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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：

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

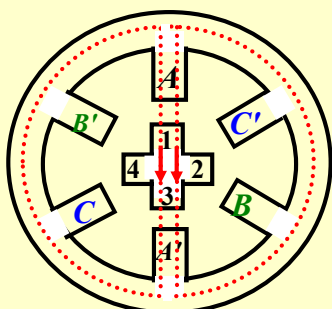
通电顺序也可以为：

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理



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。

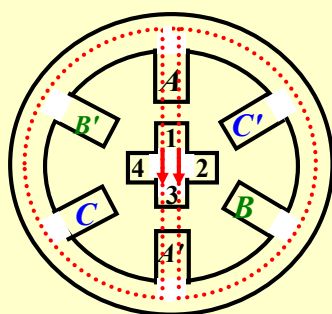
由于磁力线总是要通过磁阻最小的路径闭合，因此会在磁力线扭曲时产生切向力而形成磁阻转矩，使转子转动，使转、定子的齿对齐后停止转动。

A 相通电使转子1、3齿和 AA' 对齐。

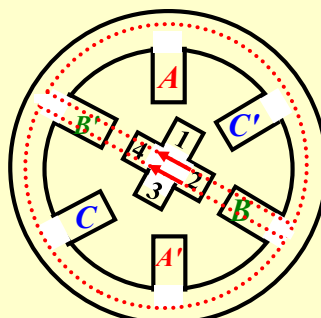
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理



A 相通电使转子1、3齿和 AA' 对齐。

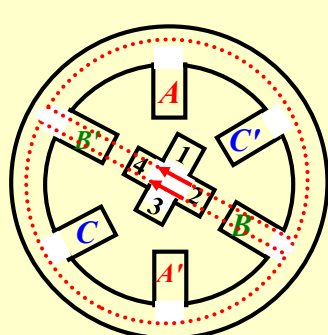


B相通电，转子2、4齿和B相轴线对齐，相对A相通电位置转30°；

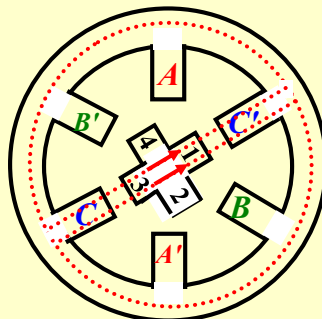
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理



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，继续按照顺时针方向，再旋转30°



1. 步进电动机工作原理

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°。此角称为步距角，用 θ_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。

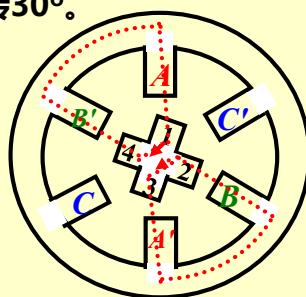


1. 步进电动机工作原理

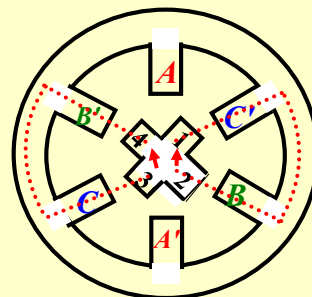
二、三相双三拍

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° 。



AB通电



BC通电

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



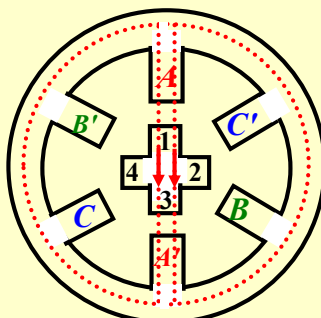
1. 步进电动机工作原理

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：

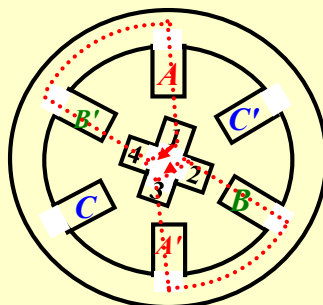


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理

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°

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

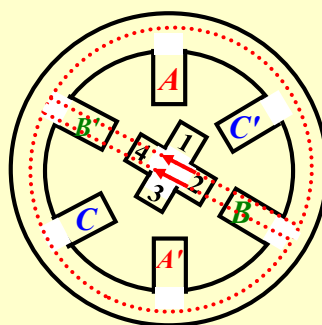


1. 步进电动机工作原理

B 相通电:

转子 2、4 齿和 B 相对齐，又转了 15° 。

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° 。

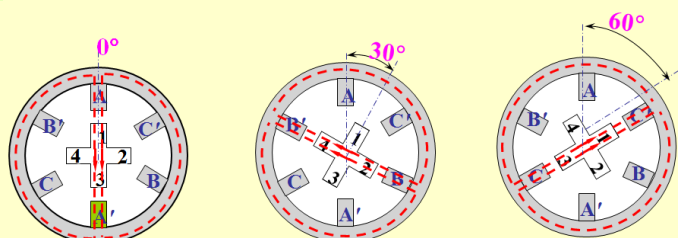


以上三种工作方式，三相双三拍和三相单双六拍较三相单三拍稳定，因此较常采用。

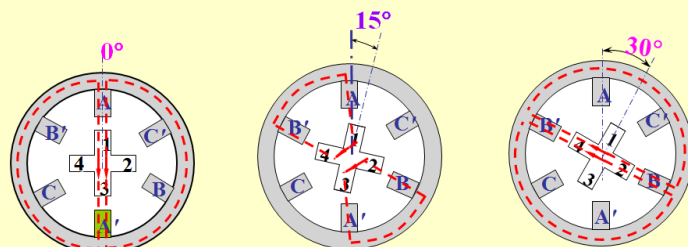
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理



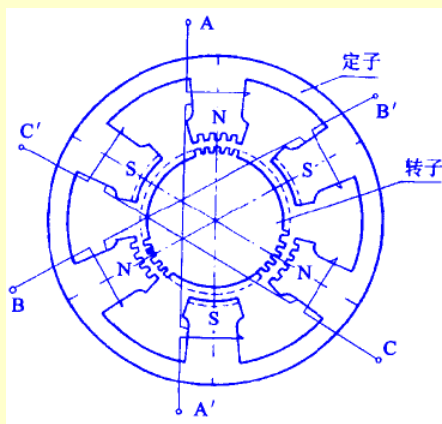
错齿是使步进电机旋转的根本原因



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理



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—相，组成—相绕组,转子上没有绕组。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



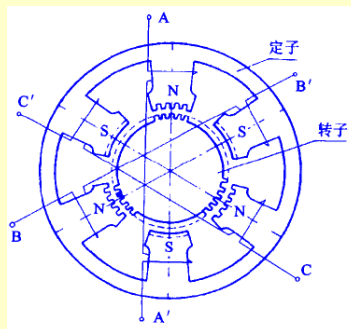
1. 步进电动机工作原理

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 $Z = 40$ ，

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

$$\text{步距角 } \frac{9^\circ}{N}, \quad \frac{9^\circ}{3} = 3^\circ$$
$$\frac{9^\circ}{6} = 1.5^\circ$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 步进电动机工作原理

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。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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 → 运动方向
- * 输入脉冲数 → 角位移
- * 脉冲频率 → 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；
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；
3. 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. 步进电机运行的基本关系
4. 步进电机的静特性

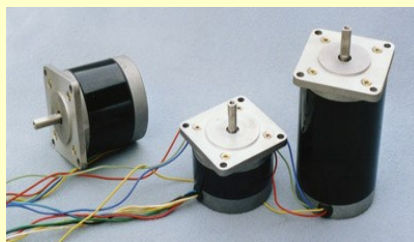


2. 步进电动机的分类与结构

输入脉冲相序 → 运动方向

输入脉冲个数 → 角位移

输入脉冲频率 → 运行速度



步进电动机的分类:

工作原理 { 反应式
永磁式
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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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)



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



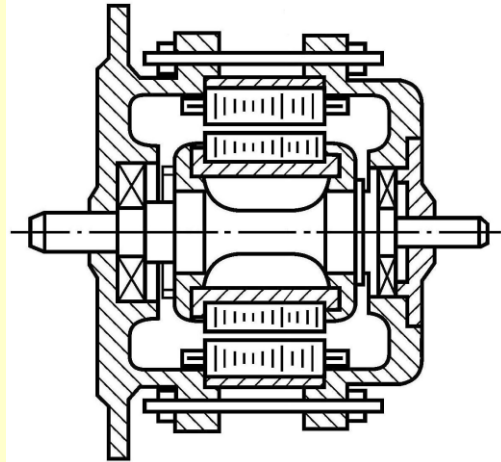
2. 步进电动机的分类与结构-磁阻式

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。



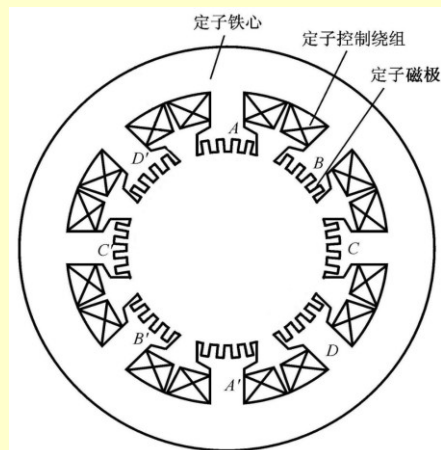
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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

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

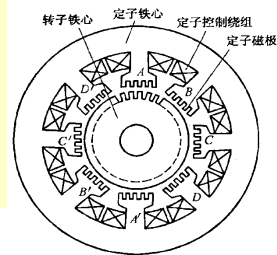
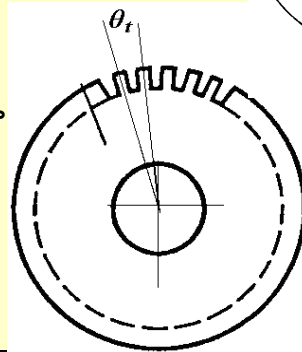


图 5-1 四相磁阻式步进电动机



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、转子的小齿也是对齐的。
- 相邻极下的定、转子齿之间错开

转子齿距的 $1/m$ 。

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

$$z_r = 2pK \pm 2$$



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。

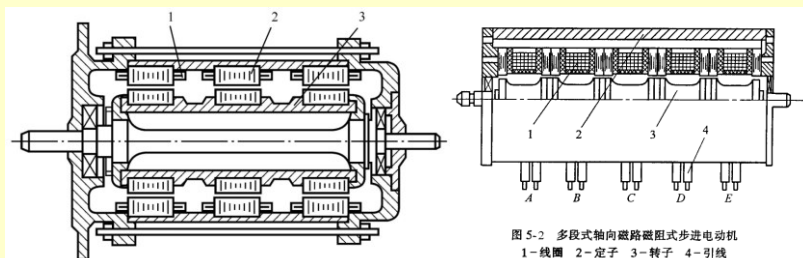
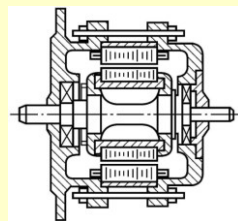


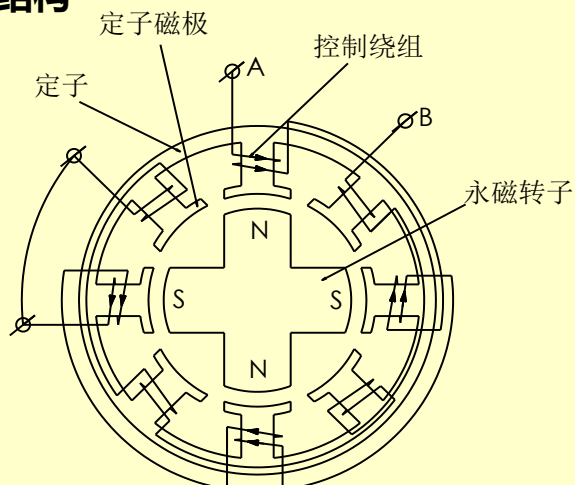
图 5-2 多段式轴向磁路磁阻式步进电动机
1-线圈 2-定子 3-转子 4-引线

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构-永磁式

永磁式步进电机结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构-永磁式

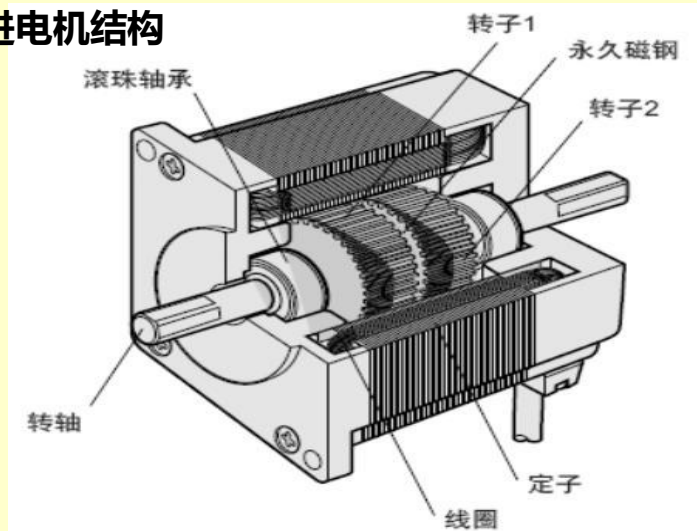
- 永磁式步进电机的特点：

- 1) 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



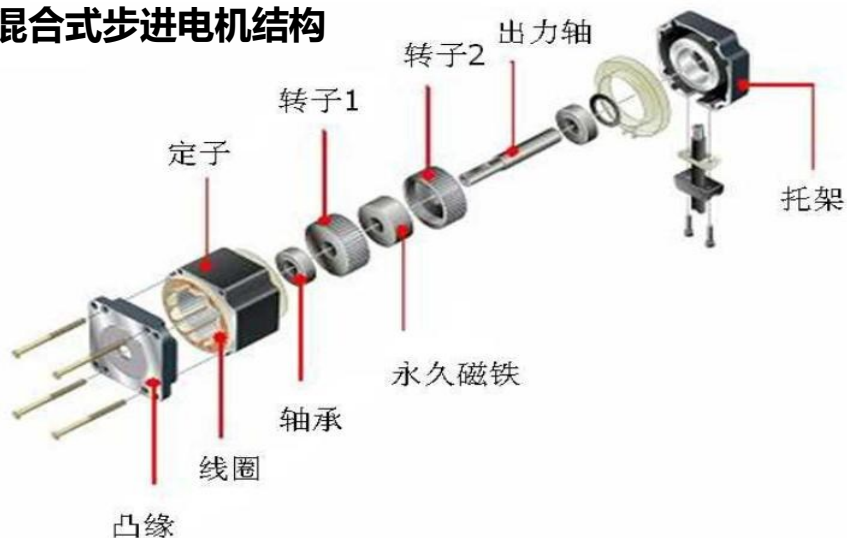
2. 步进电动机的分类与结构-混合式

混合式步进电机结构



2. 步进电动机的分类与结构-混合式

混合式步进电机结构

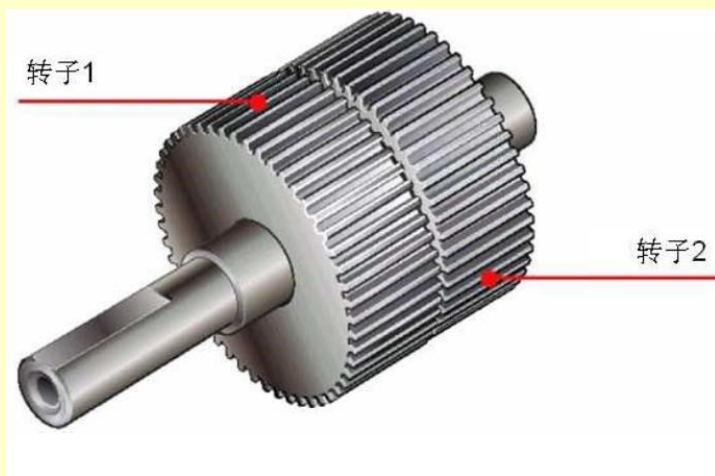


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构-混合式

混合式步进电机结构

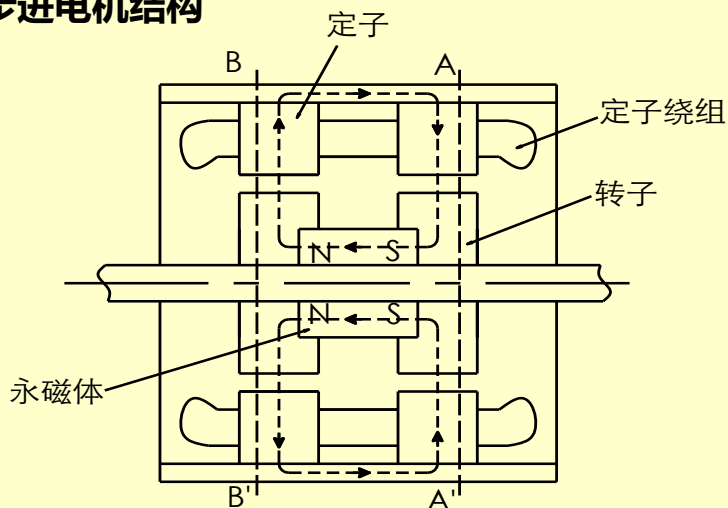


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构-混合式

混合式步进电机结构

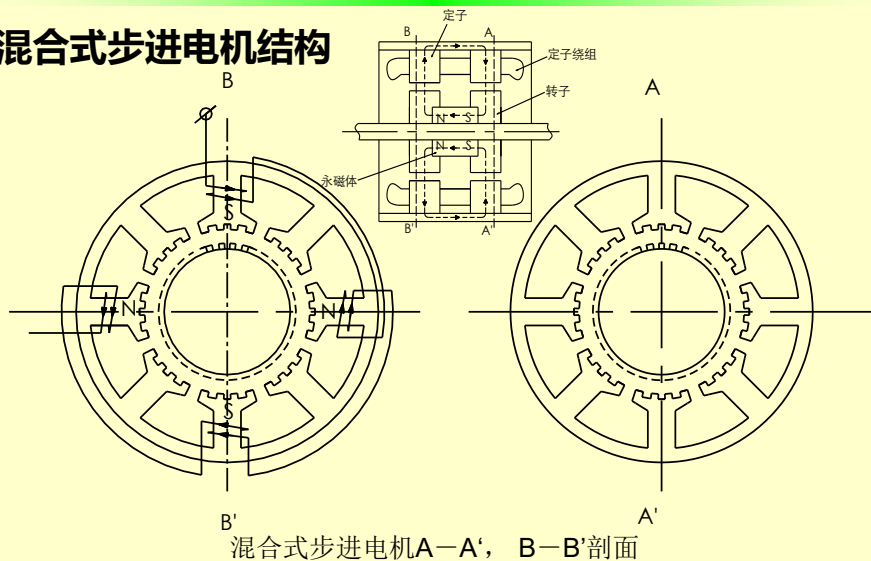


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构-混合式

混合式步进电机结构



混合式步进电机A-A', B-B'剖面

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 步进电动机的分类与结构

三种步进电机：

反应式/磁阻式/VR (variable reluctance)：定转子开小齿,转子无绕组，结构简单，生产成本低，步距角小;但性能差。80年代后期已逐渐被淘汰。

永磁式PM (permanent magnet)：转子的极数=每相定子极数，不开小齿；出力大，动态性能好；但步距角大，一般为7.5 度-45度。

混合式HB (hybrid)：混合了永磁式和反应式的优点，步距角小，出力大，动态性能好。混合式步进电机应用最为广



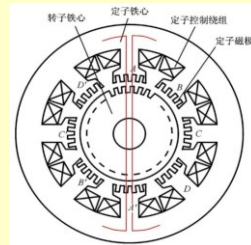
目 录

1. 步进电动机原理
2. 步进电机的分类与结构
- 3. 步进电机运行的基本关系**
4. 步进电机的静特性



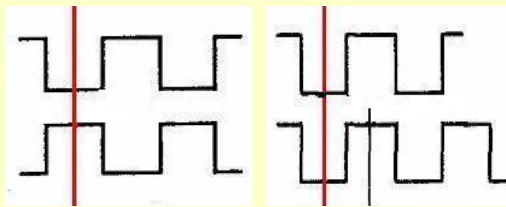
3. 步进电动机运行基本关系

- 1) 定子和转子磁路由软磁材料组成，只有定子有绕组。
- 2) 转子有齿，齿数应满足规定。



磁路磁阻特点 (1相极下)

- 齿与齿对齐，磁阻最小，
- 齿与槽对齐，磁阻最大。
- 磁阻与转角有关，
随转角变化而变化。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 步进电动机运行基本关系

步距角

步进电机通过一个电脉冲转子转过的角度,称为**步距角**。

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

N : 一个周期的运行拍数,即通电状态
循环一周需要改变的次数
 Z_r : 转子齿数

拍数: $N = km$ m : 相数

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

如: $Z_r = 40$, $N = 3$ 时

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{40 \times 3} = 3^\circ$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 步进电动机运行基本关系

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. 步进电机运行的基本关系
4. 步进电机的静特性



4. 步进电动机的静特性

一. 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。



4. 步进电动机的静特性

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力矩特性，剥离了电机具体相数、齿数的关联，更具通用性。

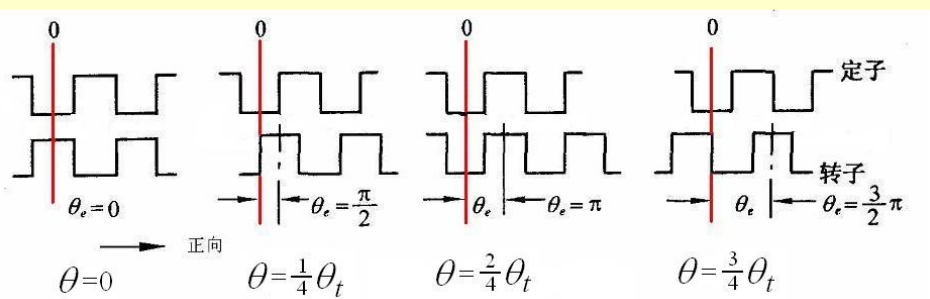


4. 步进电动机的静特性

- 以定子齿轴线为零位。

定子和转子齿轴线的夹角

θ 与 θ_e



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

4. 平衡位置

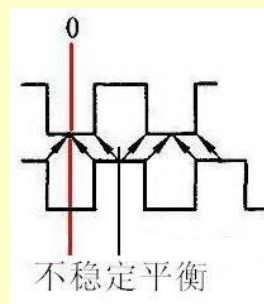
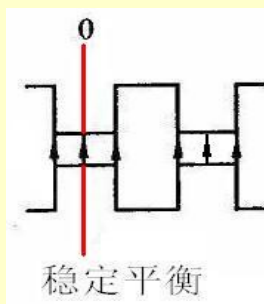
电磁转矩为零，静止不动。

- 单相通电时的平衡位置：

通电极下：

齿与齿对齐。

齿与槽对齐。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

5. 失调角 $\Delta\theta_e$:

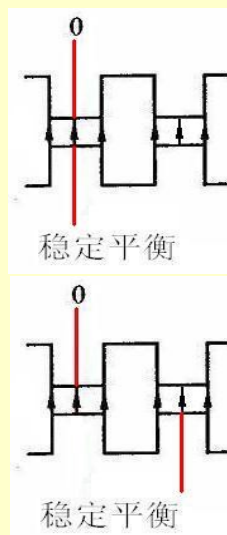
- 转子偏离稳定平衡位置的角度。
- 实际角度 θ_e 减去

稳定平衡点的角度 θ_{e0}

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

- 单相通电时的稳定平衡点,

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



4. 步进电动机的静特性

6. 矩角特性:

静转矩与失调角的关系。

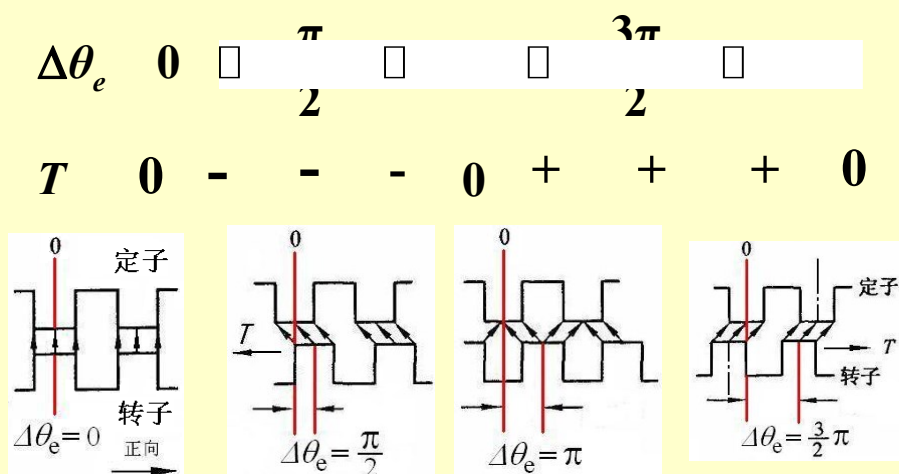
7. 静态特性:

步进电机的静态特性主要指矩角特性。



4. 步进电动机的静特性

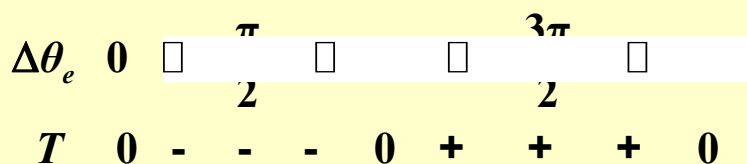
二. 单相通电时的矩角特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

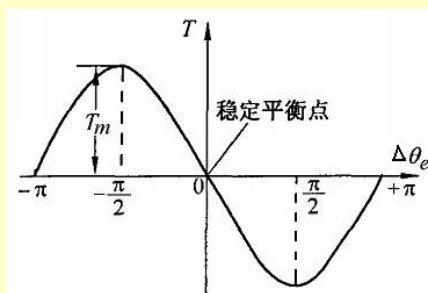


- 转矩是失调角的周期函数，周期为 $2\pi \text{ rad}$ (电角)。

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

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

- 转矩是失调角的正弦函数。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

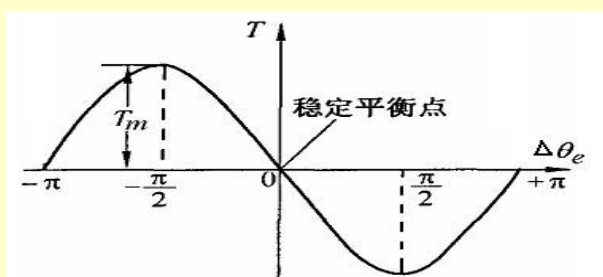


4. 步进电动机的静特性

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

- T_m : 最大静转矩, 与电流有关。
- 静稳定区: 电磁转矩使转子回到原平衡位置。

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



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

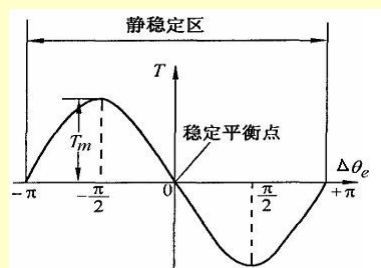


4. 步进电动机的静特性

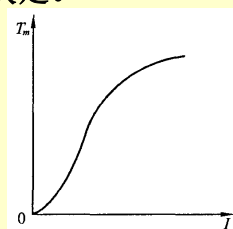
单相通电的静转矩特性-矩角特性

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

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



- T_m : 最大静转矩, 由气隙磁导和电流决定。
- 静稳定区: 无外力矩条件下, 转子可回到平衡位置所对应的失调角范围。 $-\pi < \theta_e < \pi$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

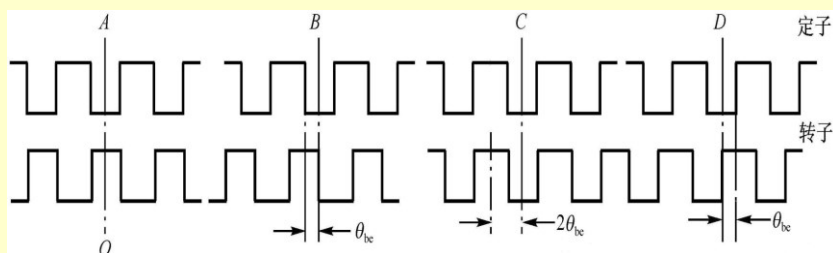
三、单相通电时的矩角特性曲线族

- 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 θ_{be} 。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

曲线族表达式 以4相电机为例

以 A 的轴线为零位，平衡位置依次为

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

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

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

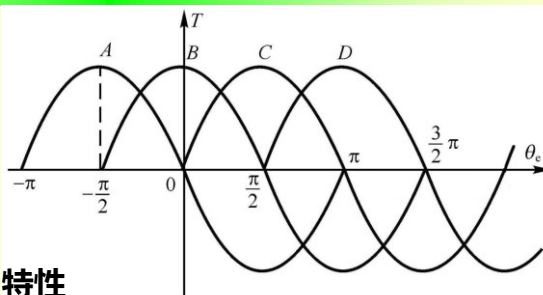
$$C : (\theta_{e0} = 2\theta_{be}) \quad T = -T_m \sin(\theta_e - 2\theta_{be})$$

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性



四相/两相步进电机的矩角特性

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

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

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

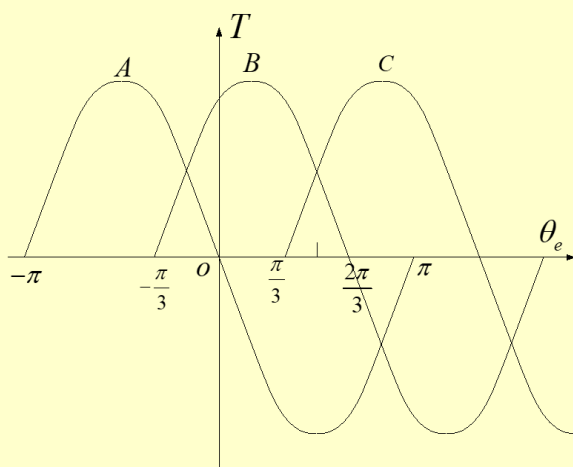
$$D : (\theta_{e0} = 3\theta_{be}) \quad T = -T_m \sin(\theta_e - 3\theta_{be})$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

三相步进电机的矩角特性



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

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

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

四、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:

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

也可由转矩是失调角的周期函数求得。

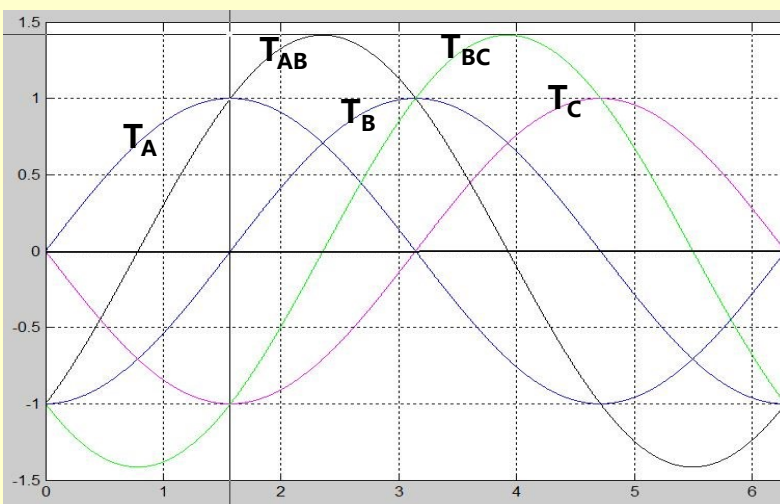
θ_{e0} : 稳定平衡位置的角度。

$T_{m(n)}$: m 相电机 m 相同时通电时的最大转矩



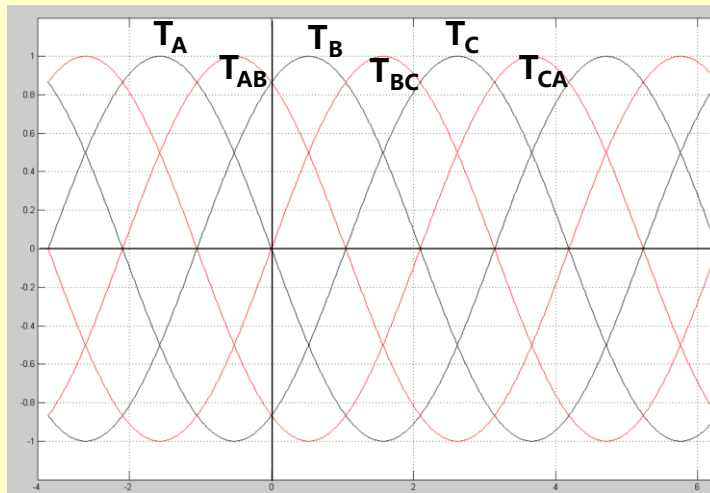
4. 步进电动机的静特性

• 四相双拍步进电机的矩角特性曲线族



4. 步进电动机的静特性

- 三相双拍步进电机的矩角特性曲线族

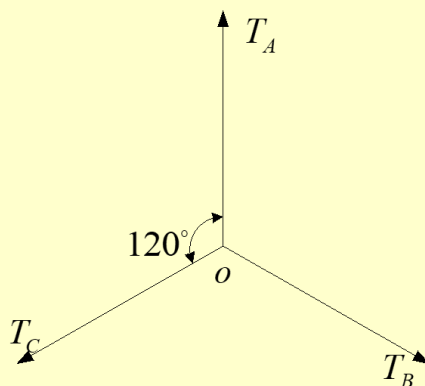


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

- 步进电机转矩也常用转矩星形图来分析



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

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

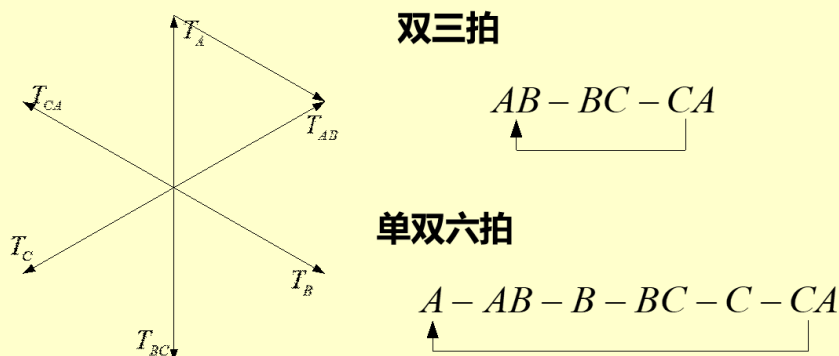
$$T_{emC} = -T_{j\max} \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi)$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

• 三相步进电机绕组通电方式



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



4. 步进电动机的静特性

• 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。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



小结

步进电机基本原理

$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_r} \quad \text{电角度} \quad \theta_{te} = 360^\circ$$
$$\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} \quad \text{电角度} \quad \theta_{be} = \frac{360^\circ}{N}$$

拍数: $N = k m$: 相数

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



思考

验证常见步进电机的极齿配合:

两相/四相步进电机: 8极-50齿

16极-100齿

三相步进电机: 6极-40齿

12极-80齿

9极-60齿

12极-100齿

分析上述极齿配合, 计算相应步进电机步距角。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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。

