自动控制实践A笔记(4)、步进电机（书第5章）(共6个问题)　2023、12、24　V1.1

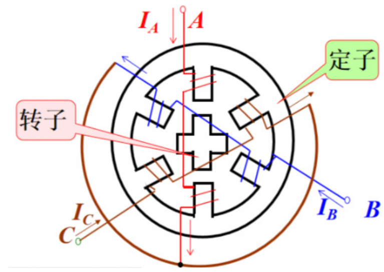
1、步进电机的工作原理　　错齿是使步进电机旋转的根本原因　　Lec 11

以三相步进电机为例，通电顺序有三种：

① 三相单三拍　$A \to B \to C$ / $A \to C \to B$

1 A相通电，产生的磁通经转子形成闭合回路。由于磁力线总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，直至定子、转子的齿对齐后停止转动

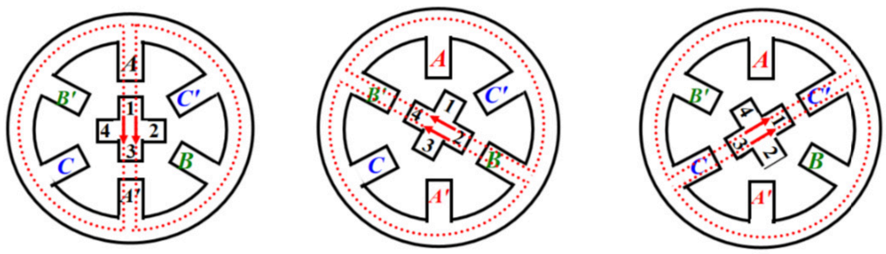
2 B相通电，转子2、4齿与B相轴线对齐、以此类推、



示例：齿数 $Z_r = 4$

齿距角 $360°/Z_r = 90°$

每两个相对磁极为一相，(一对) 通有相同电流、



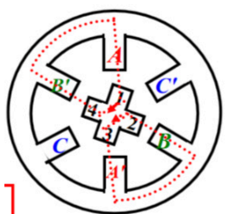
每来一个脉冲，转一个角度，称作步距角θ_b

改变通电顺序即改变转向　$\theta_b = \frac{齿距角}{N(拍数)}$

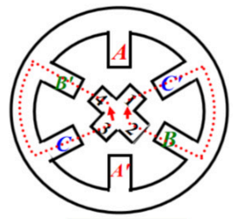
问题：容易引起在平衡位置振荡（失步）

② 三相双三拍　AB — BC — CA — AB

切换时，总是有最少一组定子绕组通电、



*AB*通电



*BC*通电

③ 三相单双六拍　A — AB — B — BC — C — CA — A　上述两种的组合而已、步距角减半。

每来一个电脉冲，就转一个步距角。通电转一圈，转子转过一个齿。

对于两相电机，正、反向通电，即：A — B — (-A) — (-B)

齿距角 $\theta_t = \frac{360°}{Z_r}$ (Z_r为齿数)
(转过一个齿所转过的角度)

步距角：$\theta_b = \frac{\theta_t}{N} = \frac{360°}{Z_r N}$
(每步所转过的角度)

$N = km$，$k=1$ 或 $k=2$　m为相数
单拍制　双拍制

转速　$n = \frac{60f}{Z_r N}$　60f → 每分钟脉冲数；$\frac{1}{Z_r N}$ → 每来个脉冲转过的圈数；f为脉冲频率

三组决定关系、接通次序 → 转向；脉冲频率 → 运行速度，脉冲数 → 角位移

- **优点**

1. 脉冲控制，适用于数字化计算机控制。脉冲—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

- **缺点**

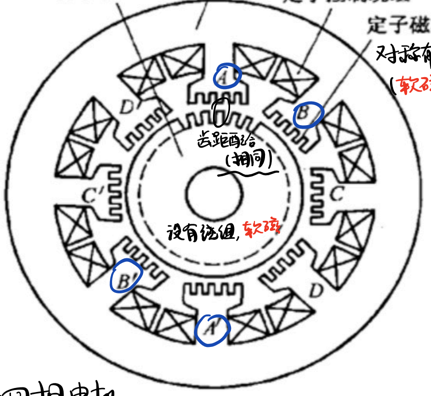
1. 固定步长（步距角）的增量式运动；
2. 效率低，电机过热（机壳可达90℃）；
3. 不能直接接切电网，需要专用驱动器；
4. 功率小，不宜驱动大的机械装置(惯量/阻力矩);
5. 响应速度低；
6. 定位有误差，只适于中/低精度要求的位置/速度伺服；
7. 在某些运行范围内发生振荡。

2、步进电机的分类与结构

Lec 11

1) 反应式（磁阻式）(VR)　[已被淘汰！]　m 相 p 对极　$2p=2m \Rightarrow p=m$

齿与齿对齐时磁阻最小，齿与槽对齐时磁阻最大。则某相通电的结果：该相下转子齿与定子齿完全对齐。



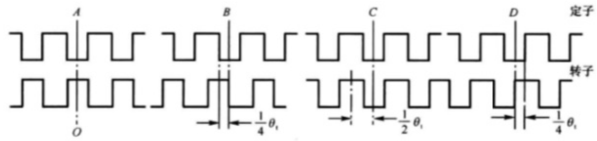
四相电机

齿数规定：

对齐 —— 某一相下定子磁极若与转子齿对齐，则一定是该相两个磁极都与转子齿对齐

错位 —— 相邻极下定、转子齿错开转子齿距的 $\frac{1}{m}$

（比如左图所示的四相电机，若A相的两个磁极与转子齿对齐，则B、C、D相定子与转子相差依次为转子齿距的 $\frac{1}{4}$、$\frac{1}{2}$、$\frac{3}{4}$）→ 从另一侧看，也可记作 $-\frac{1}{4}$



因此齿数需要满足：$\boxed{\dfrac{Z_r}{2p}} = K \pm \dfrac{1}{m}$

Z_r：总齿数

$2p$：磁极数（此处4倍为极对数×2）→ 每个极距下（相邻的定子磁极轴线间）的转子齿数

K：正整数，对齐部分

$\pm\frac{1}{m}$：错位部分，相邻极下的定、转子齿之间错开转子齿距的 $\frac{1}{m}$

由 $p=m \Rightarrow Z_r = 2pK \pm 2$

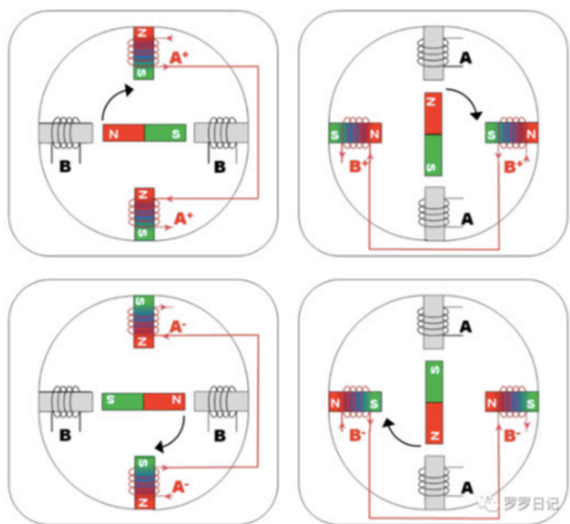
⇓

反应式电机的通用版本：每极下齿数 = 正整数 ± $\dfrac{1}{\text{相数}}$ $\Rightarrow \boxed{\dfrac{Z_r(\text{齿数})}{P(\text{极数})} = K \pm \dfrac{1}{m(\text{相数})}}$

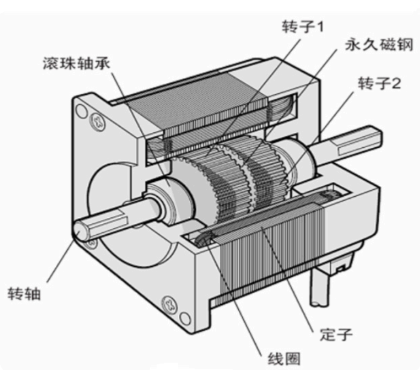
2) 永磁式 (PM)　[已被淘汰！]

转子自带磁极，有定位转矩（自锁），效率高，出力大，但齿距角大（不开齿）

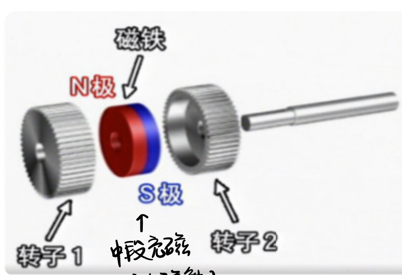
大致了解即可。



3) 混合式 (HB)



转子有三段：



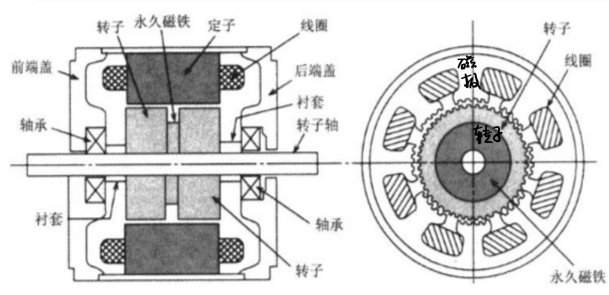


图 2.25 HB型步进电机的结构

以4个主极的两相步进电机说明原理、

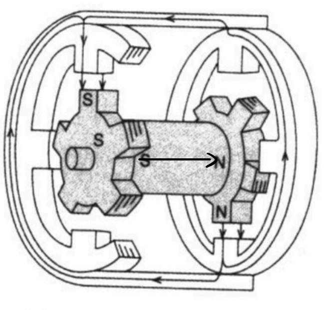
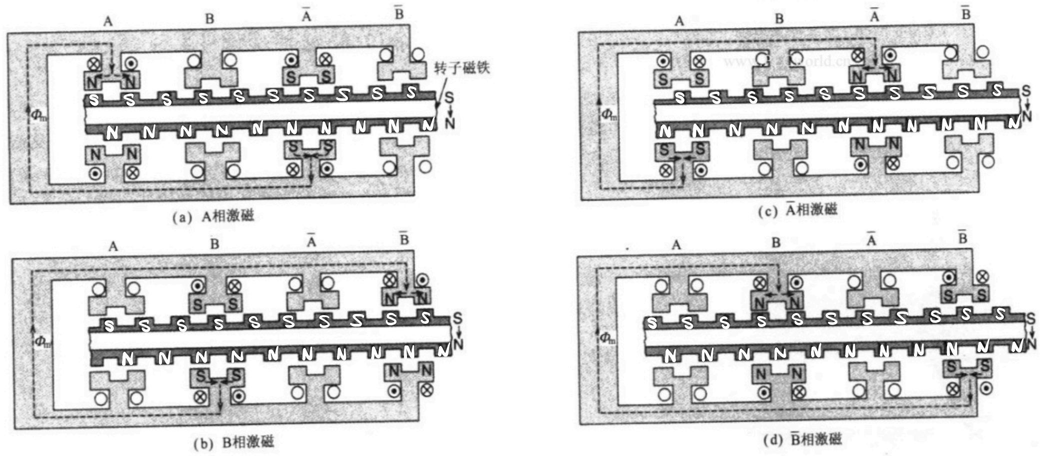


图 2.26 HB 型步进电机的磁路

磁力线从N走到S（磁体外部），
再从S走到N（磁体内部）

（未上电）



(a) A相激磁　(b) B相激磁　(c) $\bar{A}$相激磁　(d) $\bar{B}$相激磁

上电后（将圆周展平）

按A-B-(-A)-(-B)通电，则按上图(a)-(d)顺序依次对齐

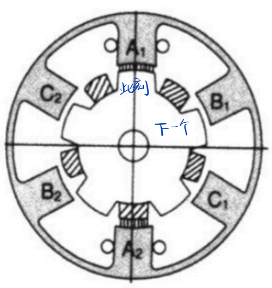
同性磁极下磁阻最大，齿与槽对齐（斥）

异性磁极下磁阻最小，齿与齿对齐（吸）

对混合式步进电机，磁路有相内磁路和相间磁路两种。齿数计算公式分别是：（都按正反向通电）

- 相内磁路（适用于两相或三相电机） $Z_r = P(Km \pm \frac{1}{2})$ 与课本中相同
- 相间磁路（适用于三相电机） $Z_r = P(mK \pm 1)$

m为相数　P为每相下的极数（与之前不同）　K为正整数



(a) 相内磁路 (6极)

相邻相间节距 $360°/mP$ 总极数

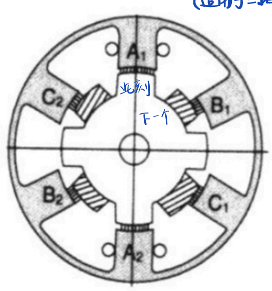
此时与A相相对的转子齿 与 接下来给B相通电时与B相相对的转子齿的节距为 $\frac{360°\times K}{Z_r}$（齿距的整数倍）

步距角 $\frac{180°}{Z_r m} = \pm\left[\frac{360°}{mP} - \frac{360°\times k}{Z_r}\right]$

[正反向通电] $\pm\frac{360°}{mP} = \frac{180°}{Z_r m} \pm \frac{360°\times k}{Z_r}$

可得结论　书上推导也容易理解

有阴影和无阴影分别代表转子不同极性的两端（参看上方图2.26，相当于该图的左视图）



(b) 相间磁路 (6极)

此图的磁路略显奇特。

相邻相间节距 $360°/mP$

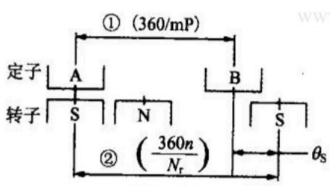
此时与A相相对的转子齿 与 接下来给B相通电时与B相相对的转子齿的节距为 $\frac{360°\times(K\pm\frac{1}{2})}{Z_r}$

步距角 $\frac{180°}{Z_r m} = \pm\left[\frac{360°}{mP} - \frac{360°\times(K\pm\frac{1}{2})}{Z_r}\right]$

[正反向通电] $\pm\frac{360°}{mP} = \frac{180°}{Z_r m} \pm \frac{360°\times(k\pm\frac{1}{2})}{Z_r}$

可得结论。

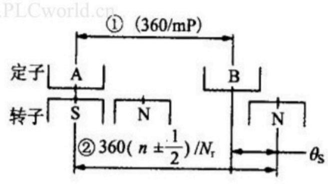
若k=1，看起来有点像反应式步进电机（?）



(a) 相内磁路

两相	8极 - 50齿	16极 - 100齿

常规极齿配合



(b) 相间磁路

三相	6极 - 40齿	12极 - 80齿
	9极 - 60齿	12极 - 100齿

四相	8极 - 50齿	16极 - 100齿

常规极齿配合

* 摘自《步进电机应用技术》（[日] 坂本正文 著）

[正反向通电] $\pm\frac{360°}{mP} = \frac{180°}{Z_r m} \pm \frac{360°\times k}{Z_r}$

可得结论　书上推导也容易理解

也可用类似方法推导反应式电机极齿配合公式。

单拍通电时　相邻相间节距 $360°/P$（此处P为总极数）

单拍制嘛，现在有个齿对A，接下来就是有齿对B

此时与A相相对的转子齿 与 接下来给B相通电时与B相相对的转子齿的节距为 $\frac{360°\times K}{Z_r}$（齿距的整数倍）

步距角 $\underbrace{\frac{360°}{Z_r m}}_{\text{[单拍制]}} = \pm\left[\frac{360°}{P} - \frac{360°\times k}{Z_r}\right] \Rightarrow \frac{1}{Z_r m} \pm \frac{k}{Z_r} = \pm\frac{1}{P} \Rightarrow Z_r = \frac{\frac{1}{m}\pm k}{\frac{1}{P}} \Rightarrow \frac{Z_r}{P} = k \pm \frac{1}{m}$

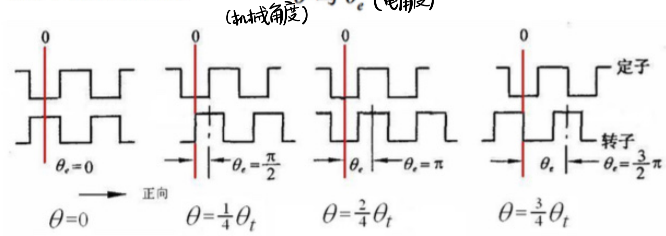
https://www.bilibili.com/video/BV1gp4y1b7cu，https://www.bilibili.com/video/BV1Qb411n7rp

3、步进电机的静特性

绕组通电状态不变，转子保持静止。

用电角度表示齿距角：$\theta_{te} = 2\pi$ rad 步距角：$\theta_{be} = \frac{\theta_{te}}{N} = \frac{2\pi}{N}$ rad 去掉与具体相数、齿数的关联

定子和转子齿轴线的夹角 θ 与 θ_e (电角度) (机械角度)



电角度改变 2π，转子转过一个齿

电磁转矩为0，有稳定平衡（偏离一点时自动回复）和不稳定平衡。

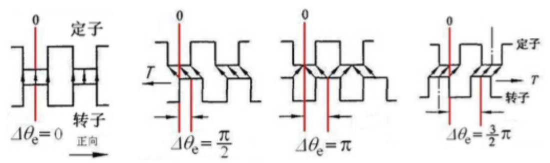
静态时，由于转子偏离平衡位置一角度，引起电磁转矩（称为静态转矩）。

→ 用失调角描述

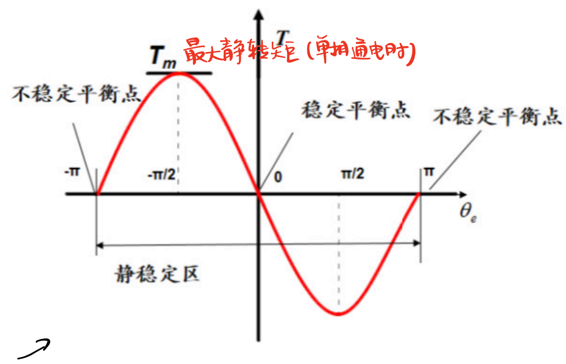
静特性主要指矩角特性：即静转矩与失调角的关系。静转矩在一定范围内使失调角趋于0。

定义失调角与电磁转矩同方向为正方向。

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



定性



单相通电时的矩角特性 定量 $T = -T_m \sin\Delta\theta_e$

不考虑阻转矩时

静稳定区：

$-\pi < \theta_e < \pi$

超出此区域，外加转矩去除后，将不能回到初始平衡状态

（会跑到别的平衡状态）

* 静转矩与电流的关系

I 小 $T_m \propto I^2$

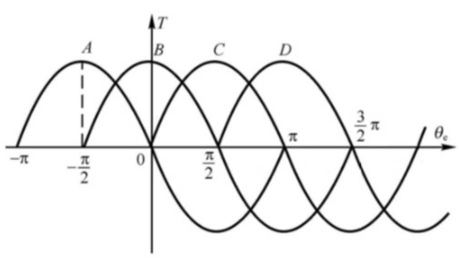
稍大 $T_m \propto I$

大 T_m 增加很小（磁路饱和）

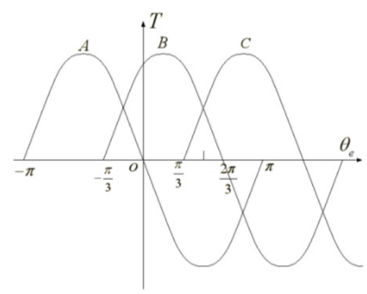
相邻两相绕组的平衡位置相距 θ_{be}.

（比如上图是A相绕组平衡位置，若要到B相绕组平衡位置，则转子需转动（图中为平移）θ_{be} 电角度相对齐）

结合此点，有单相通电时的矩角特性族：



↑四相步进电机↓



↑三相步进电机↓

注意区分多相和多拍。

单拍通电时也可有多相通电。例如三相电机就有三相单三拍和三相双三拍。

进而，多相通电时，将对应各相矩角特性曲线叠加，即可得多相通电时的矩角特性

计算公式：$T_{(n)} = -T_{m(n)} \sin(\theta_e - \theta_{eo})$

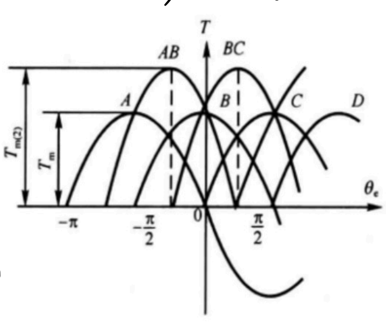
→ 从第1相叠加至第n相之结果

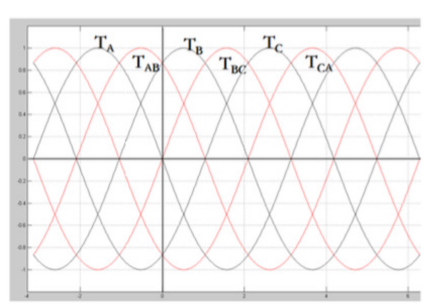
（n为同时通电的相数）$T_{m(n)} = \frac{\sin\frac{n\theta_{be}}{2}}{\sin\frac{\theta_{be}}{2}} T_m = \frac{\sin\frac{n\pi}{m}}{\sin\frac{\pi}{m}} T_m$

其他叠加情形 ← $\theta_{eo} = \frac{n-1}{2}\theta_{be} = \frac{n-1}{m}\pi$ （$\theta_{be} = \frac{2\pi}{m}$）

角度会有变化，但只要n相同，幅值就一样

三相 $T_{m(2)} = T_m$ 四相 $T_{m(2)} = \sqrt{2}\, T_m$ 五相 $T_{m(2)} = T_{m(3)} = 1.62\, T_m$



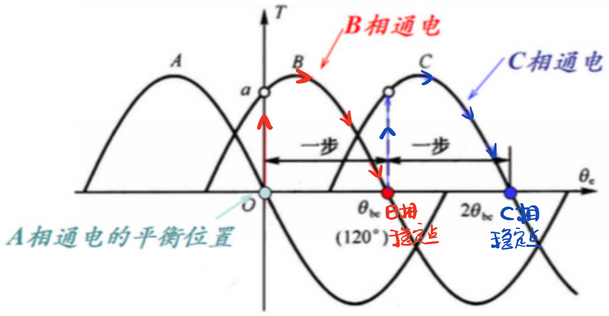


4、步进电机的运行特性（动态特性）

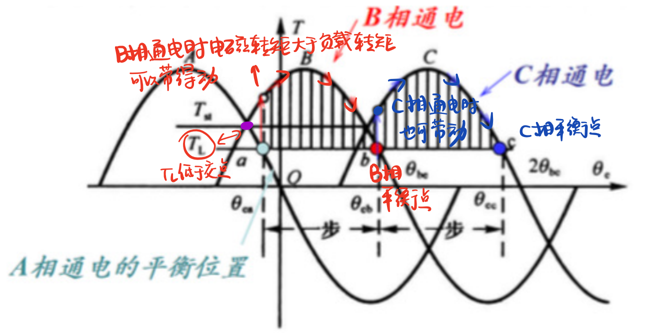
基本要求：不失步。
- 丢步：步数少于脉冲数，加速/高速
- 越步：步数多于脉冲数，减速/低速

(1) 单步运行（绕组通电持续时间大于步进电机的机电过度过程时间）

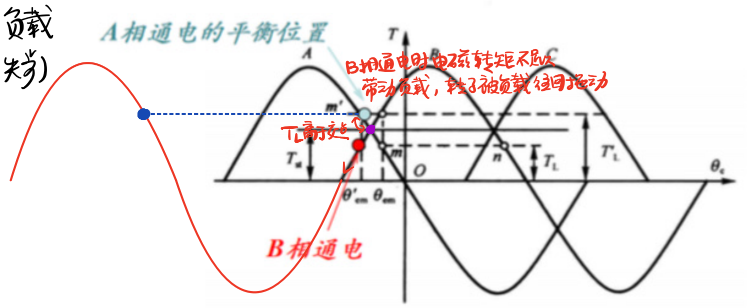
① 空载



② 负载（不失步）



③ 负载（失步）

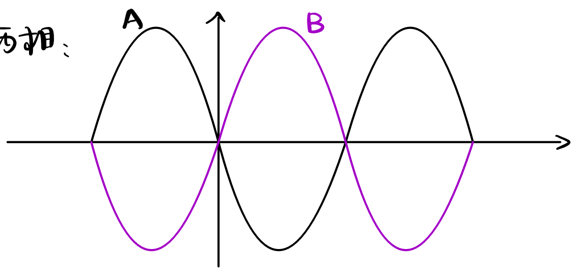


前后两通电状态的矩角特性曲线交点很重要。
称其纵坐标为起动转矩 T_{st}
则若 $T_L < T_{st}$ 则可正常起动。

* 定义：在一定的控制电源和负载转动惯量条件下突然起动并不失步运行，输出的最大转矩。

起动转矩与各通电状态最大静转矩最大值（记为 T_{m1}）的比值：
与之前 T_m 有差异，请区分

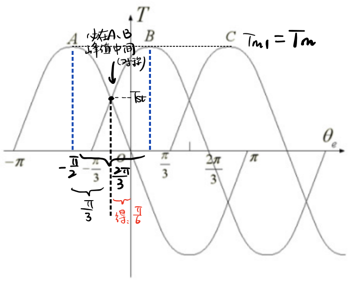
两相：



A、B相曲线交于原点，故两相通电时无起动转矩。$T_{st}=0$

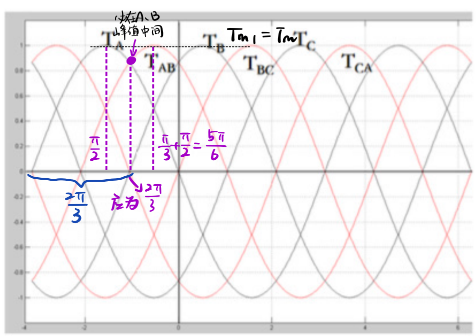
$$T_{AB} = -\underset{T_m}{T_{m(n)}} \sin(\theta_e - \underset{\frac{1}{3}\pi}{\theta_{e0}})$$

三相：（单拍）
↓
请注意单拍有单相通电和两相通电。两种情况下 $\frac{T_{st}}{T_m}$ 相同，且对应的 T_m 也相同。



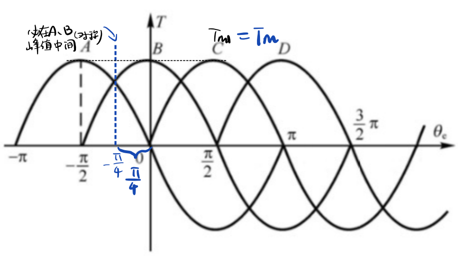
$$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}$$

（双拍）



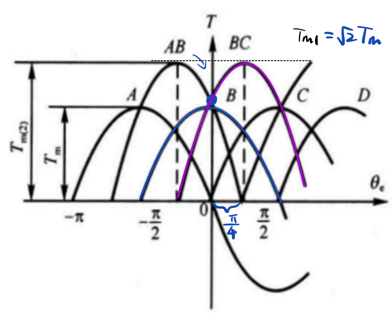
$$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{2\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

四相：（单拍）
↓
请注意单拍有单相通电和两相通电。两种情况下 $\frac{T_{st}}{T_m}$ 相同，但对应的 T_m 不同！



$$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

（双拍）

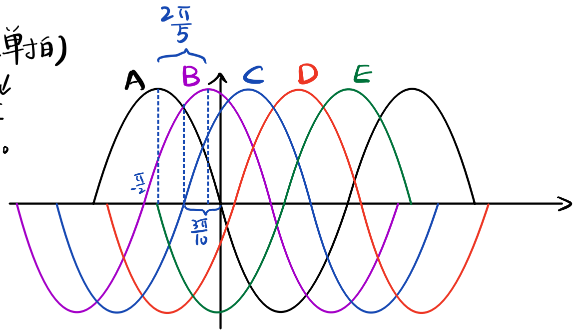


$$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

注意两边 T_{m1} 不同

五相： （单拍）

注意事项与上述三相电机相同。



$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{3\pi}{10} = 0.809 \qquad T_{m_1} = T_m$

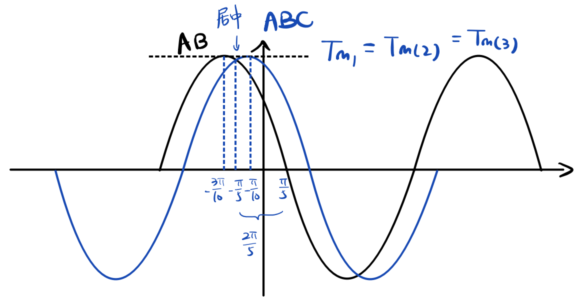
（双拍）

对五相为两相和三相交替通电

$T_{AB} = -\underset{1.62T_m}{T_{m(2)}} \sin(\theta_e - \underset{\pi/5}{\theta_{e0}})$

$T_{ABC} = -\underset{1.62T_m}{T_{m(3)}} \sin(\theta_e - \underset{2\pi/5}{\theta_{e0}})$

它们两的交点纵坐标就是起动转矩



$\frac{T_{st}}{T_{m1}} = \sin\frac{2\pi}{5} = 0.951$

六相： 相数太多不想画了 :)

单拍分析与之前都一样（对称） 得比值为 $\frac{\sqrt{3}}{2}$

双拍 因其合成的矩角特性曲线彼此错开同上，亦为60°（只是幅值变为√3倍），因此推得比值仍为 $\frac{\sqrt{3}}{2}$

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 $T=f(\theta_e)$ 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。

$T_{m(n)}$

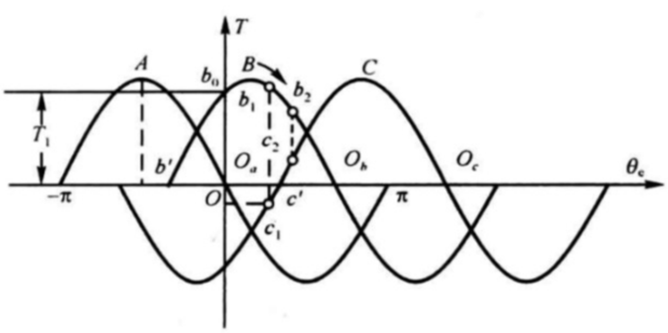
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

动态过程： 开始时假设转子在A相矩角特性平衡点， 当通电绕组换为B相时， B相有正转矩，转子向正方向运行。当转子齿正对定子齿时，电机的电磁转矩为0，但转子转速不为0 ⇒ 冲过对齐位置受到反向电磁转矩作用，转子又沿反方向往平衡位置运动。由于电机中存在阻尼，转子在平衡位置附近作衰减振荡，直至停下。 → 阻尼振荡角频率 ω_d 这会影响步进电机的连续运行。

(2) 连续运行 $n = \frac{60f}{Z_r N}$ f为控制频率 Z_r 齿数 $N=km$ 状态数

现在考虑上述动态过程中，当转子到B点后，转子来回振荡，或是转子在到达B点的途中，这时将通电绕组换为C相，可能有以下两种情形：

实际对应起动过程 Ⓐ Ⓑ

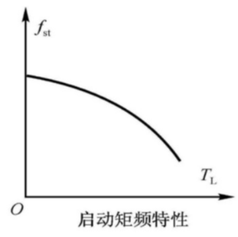


① 转子在 b_2 点、此时C相所提供转矩为正，转子能继续前进

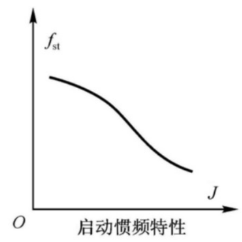
② 转子在 b_1 点、此时C相所提供转矩为负，转子变为反向运行。 ↓ 失步

Ⓑ情形中若产生失步，则知道是转子还没来得及转够，通电就切换了。

也就是控制频率太高。 引出下面概念：



其他条件不变时
启动频率随负载转矩的关系

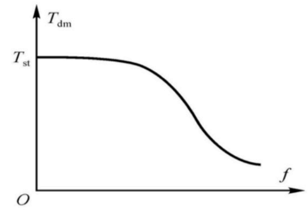


其他条件不变时
启动频率随负载转动惯量的关系

启动频率：步进电机能无失步起动和停转的最高频率
(起)

带载越重，允许起动频率越低。

此外，连续运转还有一个运行频率：在负载条件下能无失步运行的最高控制频率。

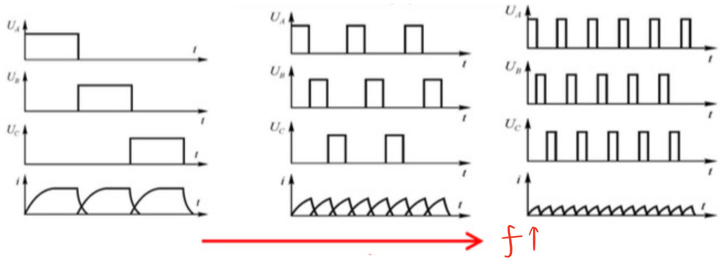


运行矩频特性图

动态转矩：步进电机连续运行时的输出转矩。

↓

下降原因：电机各相绕组电感形成反电动势。频率越高，反电动势越大。在其作用下电机相电流随频率增加而减小。



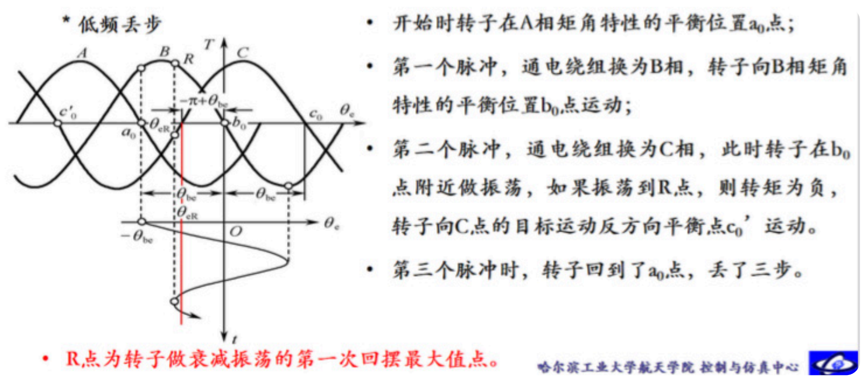
回到之前的讨论。

Ⓐ情形中若产生失步，一般是频率较低（接近或低于转子振荡频率，才能在振荡中切换通电相） 称为低频丢步

在转子振荡已衰减但还未充分衰减时，

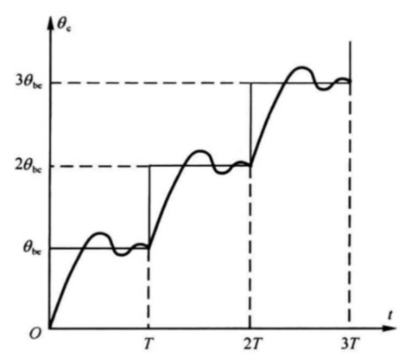
下一脉冲就来到。

(例)



解决措施 ① 避开电机振荡频率
（控制频率接近或高于电机
振荡频率2倍，电机运行比较平稳）
↓
② 增加阻尼 频率可变高，但不能太高

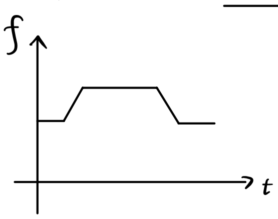
频率更低？ 极低频运行。



控制脉冲周期足够长，新脉冲到来时，转子已位于新平衡状态且不动

电机总从不动的状态开始运行，即单步运行。

运行频率优化？



发生失步时，一般是负载过大
或控制频率不合适
或供电不正常

5、步进电机的驱动

步进电机驱动器 = 脉冲分配器 + 功放

↓

控制脉冲按规定通电方式分配到每相绕组。

主要掌握细分驱动电路。

从整步驱动到半步驱动：电流不是一下子变为额定值或变为0，而是台阶式地逐级切除或增加。

以右图为例，原来只有1、3、5、7这些状态

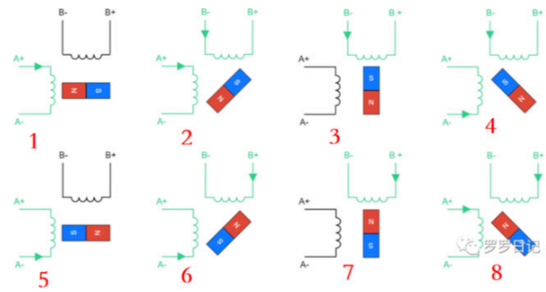
现给A、B相都通入电流 并使其幅值

皆为原最大值的0.707倍，即叠加后幅值

与原来相同且相位与单相通电时差45° 指电流矢量

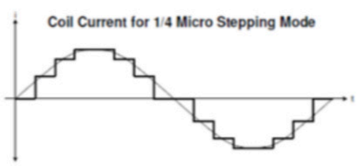
则增加了 2、4、6、8 这几个状态。

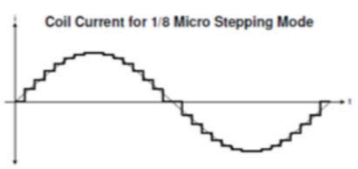
其方向决定平衡时转子指向

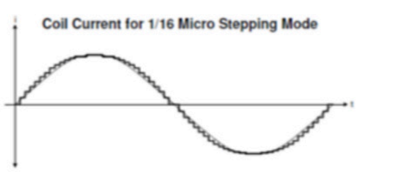


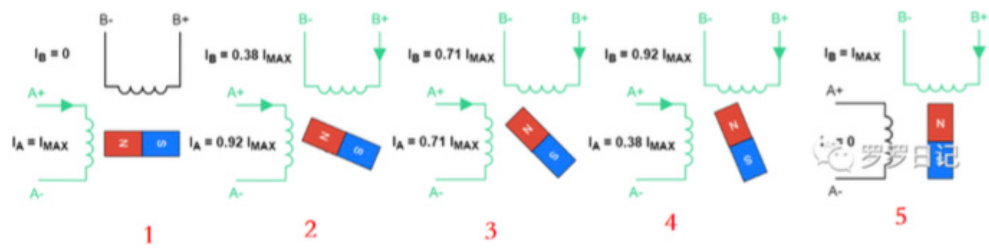
再到细分驱动：

电流分割愈加稠密，电流变化近乎正、余弦曲线。转子每一小步的转角也越来越小。 细分驱动步距角：$\frac{单拍步距角}{细分数}$









主要优点：① 消除低频振荡；② 提高输出转矩 （最大静转矩不能提升）

矩角特性曲线并没有变高，只是变密了

③ 提高运行分辨率

缺点：① 每步的增量扭矩大大减小 ② 不一定能带来更好的精度

（细分数越大，精度越难控制）

6、步进电机的选择

Lec 13

(1) 步距角θ_b：误差为θ_b 3%～5%，且不累积。 若输出轴要求的最小位移增量为θ_{min}，传动比为i，则选型时需满足 $\theta_b \le i\theta_{min}$

若 ～ 角度误差为$\Delta\theta_L$，则步距精度$\Delta\theta_b$需满足：$\Delta\theta_b \le i(\Delta\theta_L)$

(2) 保持转矩即静转矩。

(3) 定位转矩、各相绕组开路时，由于混合式或永磁式步进电机上有永磁材料产生磁场，从而产生的转矩。 反应式步进电机无定位转矩、

(4) 最大转矩 $T_{st} \ge KT_L$ T_L为折算至电机轴上的总负载转矩

K取 2～3.5

(5) 连续运行频率f_c 若要求负载轴的转速n_L，传动比为i

每转一圈的脉冲数 每秒转的圈数

则 $f_c > \underbrace{\frac{360^\circ}{\theta_b}\cdot\frac{n}{60}}_{每秒脉冲数，即控制频率} = \frac{6n}{\theta_b} = \frac{6in_L}{\theta_b}$.