

第四章 步进电动机

§ 4-1 概 述

步进电动机 (stepping motor) 是将电脉冲信号转换为相应的角位移或直线位移的一种特殊电机。每输入一个电脉冲信号, 电机就转动一个角度, 它的运动形式是步进式的, 所以称为步进电动机。又由于它输入的是脉冲电流, 所以也叫脉冲电动机。

步进电动机在不需要变换的情况下, 能直接将数字脉冲信号转换成角位移或线位移, 因此它很适合作为数字控制系统的伺服元件。此外, 它还具有一系列的优点, 一是输出角位移量或线位移量与其输入的脉冲数成正比, 而转速或线速度与脉冲的频率成正比, 在负载能力范围内, 这些关系不受电压的大小、负载的大小、环境条件等外界各种因素的干扰。二是它每转一周都有固定的步数, 所以步进电动机在不失步的情况下运行, 其步距误差不会长期积累。三是控制性能好, 它可以在开环系统中在很宽的范围内通过改变脉冲的频率来调节电机的转速, 并且能够快速启动、制动和反转。四是有些型式的步进电动机在停止供电的状态下还有定位转矩, 有些型式在停机后某些相绕组仍保持通电状态, 具有自锁能力, 不需要机械制动装置等。当采用速度和位置检测装置后, 它可构成闭环控制系统。

计算机技术、电力电子技术和微电子技术的发展, 给步进电动机的应用开辟了广阔的前景, 应用非常广泛。如数控机床、绘图机、自动记录仪表、遥控装置和航空系统等等, 都大量使用步进电动机。

步进电动机的主要缺点是效率较低, 并且需要专用电源供给电脉冲信号, 带负载惯量的能力不强, 在运行中会出现共振和振荡问题。

步进电动机的种类很多, 主要有反应式、永磁式和混合式。近年来又发展有直线步进电动机和平面步进电动机等。其中反应式步进电动机结构较简单应用比较普遍, 而且其他类型步进电动机的基本原理与它基本相似, 所以本章着重分析反应式步进电动机。

§ 4-2 反应式步进电动机的结构及工作原理

一、反应式步进电动机的结构

反应式步进电动机的结构形式很多, 按定转子铁芯的段数分为单段式和多段式两种。

1. 单段式

单段式是定转子为一段铁芯。由于各相绕组沿圆周方向均匀排列, 所以又称为径向分相式。它是步进电动机中使用最多的一种结构形式。如图 4-1 为三相反应式步进电动机的径向截面图。定转子铁芯由硅钢片叠压而成, 定子磁极为凸极式, 磁极的极面上开有小齿。定子上有三套控制绕组, 每一套有两个串联的集中控制绕组分别绕在径向相对的两个磁极上。每套绕组叫一相, 三相绕组接成星形, 所以定子磁极数通常为相数的两倍, 即 $2p=2m$ (p 为极对数, m 为相数)。转子上没有绕组, 沿圆周也有均匀的小齿, 其齿距和定子磁极上小齿的齿距必须相等, 而且转子的齿数有一定的限制。这种结构形式的优点是制造简便, 精度易于保证, 步距角可以做得较小, 容易得到较高的启动和运行频率。其缺点是在电机的直径较小而相数又较多时, 沿径向分相较为困

难，消耗功率大，断电时无定位转矩。

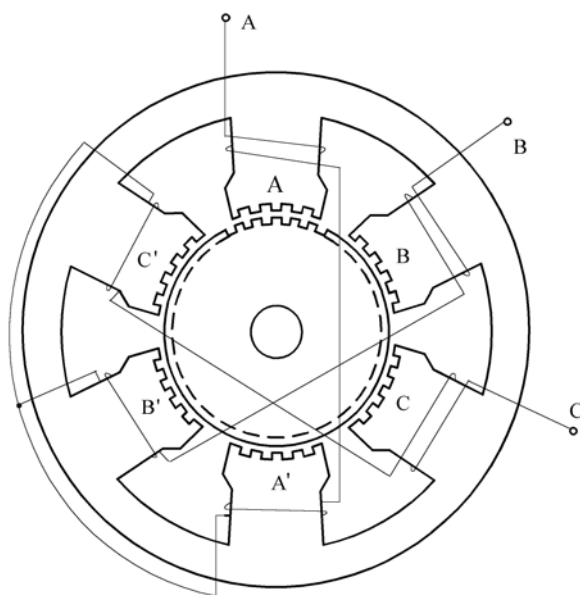


图 4-1 三相反应式步进电动机的结构

2. 多段式

多段式是定转子铁芯沿电机轴向按相数分成 m 段。由于各相绕组沿着轴向分布，所以又称为轴向分相式。按其磁路的结构特点有两种，一种是主磁路仍为径向，另一种是主磁路包含有轴向部分。

多段式径向磁路步进电动机的结构如图 4-2 所示，每一段的结构和单段式径向分相结构相似。通常每一相绕组在一段定子铁芯的各个磁极上。定子的磁极数从结构合理考虑决定，最多可以和转子齿数相等。定转子铁芯的圆周上都有齿形相近和齿距相同的均匀小齿，转子齿数通常为定子极数的倍数。定子铁芯（或转子铁芯）每相邻两段沿圆周错开 $1/m$ 齿距。此外，也可以在一段铁芯上放置两相或三相绕组，定子铁芯（或转子铁芯）每相邻两段要错开相应的齿距。这样，可增加电机制造的灵活性。

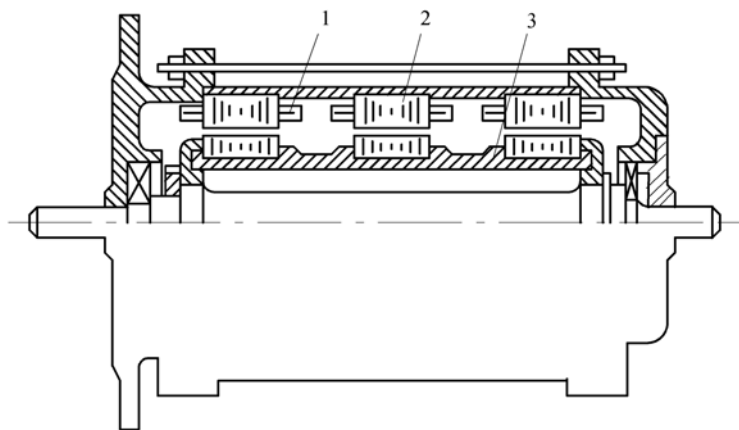


图 4-2 多段式径向磁路反应式步进电动机

1—线圈；2—定子；3—转子

多段式轴向磁路步进电动机的结构如图 4-3 所示，每段定子铁芯为 Π 字形，在中间放置环形控制绕组。定转子铁芯上均有齿形相近和齿数相等的小齿。定子铁芯（或转子铁芯）每相邻两段沿圆周错开 $1/m$ 齿距。

多段式结构的共同特点是铁芯分段和错位装配工艺比较复杂，精度不易保证，特别对步距角较

小的电机更是困难。但步距角可以做的很小，启动和运行频率较高。对轴向磁路的结构，定子空间利用率高，环形控制绕组绕制方便，转子的惯量较低。

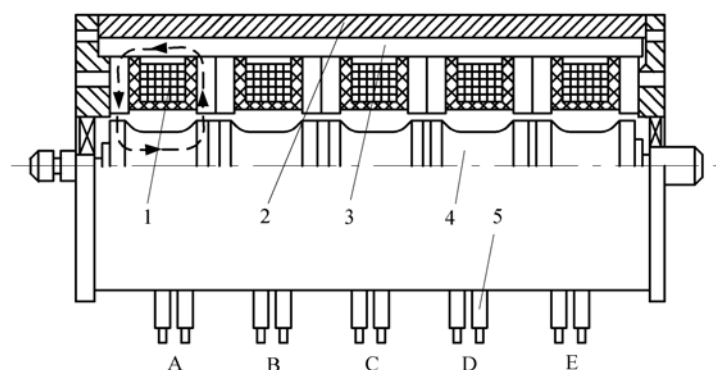


图 4-3 多段式轴向磁路反应式步进电动机

1—线圈；2—定子；3—磁轭；4—转子；5—引出线

二、反应式步进电动机的工作原理

反应式步进电动机是利用凸极转子交轴磁阻与直轴磁阻之差所产生的反应转矩而转动的，所以也称为磁阻式步进电动机。现以一个最简单的三相反应式步进电动机为例，说明其工作原理。

图 4-4 是一台三相反应式步进电动机的原理图。定子铁芯为凸极式，共有三对（六个）磁极，每两个相对的磁极上绕有一相控制绕组。转子用软磁性材料制成，也是凸极结构，只有四个齿，齿宽等于定子的极靴宽。下面通过几种基本的控制方式来说明其工作原理。

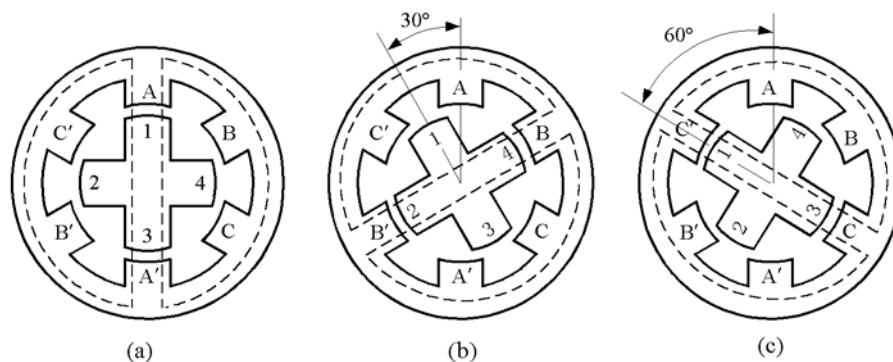


图 4-4 三相反应式步进电动机的原理图

1. 三相单三拍通电方式

当 A 相控制绕组通电，其余两相均不通电，电机内建立以定子 A 相极为轴线的磁场。由于磁通具有力图走磁阻最小路径的特点，使转子齿 1、3 的轴线与定子 A 相极轴线对齐，如图 4-4 (a) 所示。若 A 相控制绕组断电，B 相控制绕组通电时，转子在反应转矩的作用下，逆时针方向转过 30° ，使转子齿 2、4 的轴线与定子 B 相极轴线对齐，即转子走了一步，如图 4-4 (b) 所示。若再断开 B 相，使 C 相控制绕组通电，转子又转过 30° ，使转子齿 1、3 的轴线与定子 C 相极轴线对齐，如图 4-4 (c) 所示。如此按 A—B—C—A 的顺序轮流通电，转子就会一步一步地按逆时针方向转动。其转速取决于各相控制绕组通电与断电的频率，旋转方向取决于控制绕组轮流通电的顺序。若按 A—C—B—A 的顺序通电，则电机按顺时针反方向转动。

上述通电方式称为三相单三拍运行。“三相”是指三相步进电动机；“单”是指每次只有一相控制绕组通电；控制绕组每改变一次通电方式称为一拍，“三拍”是指经过三次改变通电方式为一个

循环。我们称每一拍转子转过的角度为步距角，常用 θ_s 来表示。三相单三拍运行时 $\theta_s = 30^\circ$ 。

2. 三相双三拍通电方式

控制绕组的通电方式为 $AB-BC-CA-AB$ 或 $AB-CA-BC-AB$ 。每拍同时有两相绕组通电，三拍为一个循环。当 A、B 两相控制绕组同时通电时，转子齿的位置应同时考虑到两对定子极的作用，只有 A 相极和 B 相极对转子齿所产生的磁拉力相平衡，才是转子的平衡位置，如图 4-5 (a) 所示。若下一拍为 B、C 两相同时通电时，则转子按逆时针转过 30° 到达新的平衡位置，如图 4-5 (b) 所示。可见，双三拍运行时的步距角仍是 30° 。但双三拍运行时，每一拍总有一相绕组持续通电，例如由 A、B 两相通电变为 B、C 两相通电时，B 相保持持续通电状态。C 相磁拉力力图使转子逆时针方向转动，而 B 相磁拉力却起有阻止转子继续向前转动的作用，即起到一定的电磁阻尼作用，所以电机工作比较平稳。而在三相单三拍运行时，由于没有这种阻尼作用，所以转子达到新的平衡位置容易产生振荡，稳定性不如双三拍运行方式。

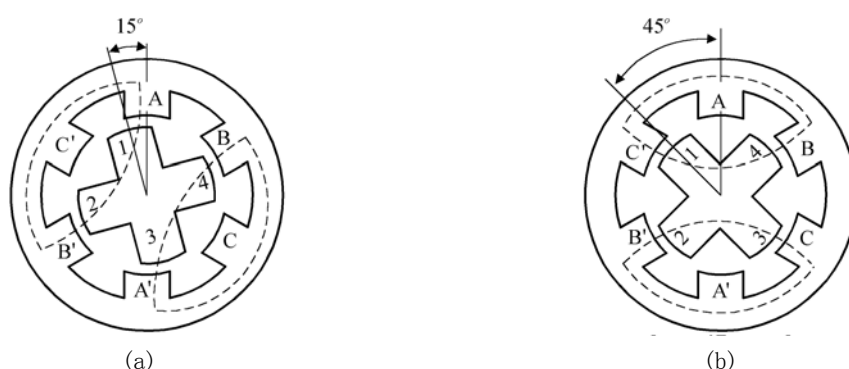


图 4-5 三相双三拍运行方式
(a) AB 相导通；(b) BC 相导通

3. 三相单、双六拍通电方式

控制绕组的通电方式为 $A-AB-B-BC-C-CA-A$ 或 $A-AC-C-CB-B-BA-A$ ，即一相通电和两相通电间隔地轮流进行，完成一个循环需要经过六次改变通电状态。当 A 相控制绕组通电时和单三拍运行的情况相同，如图 4-4 (a) 所示。当 A、B 两相同时通电时和双三拍运行的情况相同，转子只能按逆时针方向转过 15° ，如图 4-5 (a) 所示。当断开 A 相使 B 相单独接通，转子继续按逆时针方向，又转过 15° ，如图 4-4 (b) 所示。依次类推，若继续按 $BC-C-CA-A$ 的顺序通电，步进电动机就一步一步地按逆时针方向转动。若通电顺序变为 $A-AC-C-CB-B-BA-A$ 时，步进电动机将按顺时针反方向旋转。可见单、双六拍运行时，步距角为 15° ，比三拍通电方式时减小一半。因此，同一台步进电动机，采用不同的通电方式，可以有不同的拍数，对应运行时的步距角也不同。

此外，六拍运行方式每一拍也总有一相控制绕组持续通电，也具有电磁阻尼作用，电机工作也比较平稳。

以上这种结构形式的反应式步进电动机，它的步距角较大，常常满足不了系统精度的要求。所以，大多数采用如图 4-1 所示的定子磁极上带有小齿，转子齿数很多的反应式结构，其步距角可以做得很小。下面进一步说明它的工作原理。

图 4-1 所示的是最常见的一种小步距角的三相反应式步进电动机。定子每个极面上有 5 个齿，转子上均匀分布 40 个齿，定转子的齿宽和齿距都相同。当 A 相控制绕组通电时，转子受到反应转矩的作用，使转子齿的轴线和定子 A、A' 极下齿的轴线对齐。因转子上共有 40 个齿，其齿距角为

$360^\circ/40=9^\circ$ ，定子每个极距所占的齿数为 $\frac{40}{6}=6\frac{2}{3}$ ，不是整数，如图 4-6 所示。因此，当定子 A 相极下定转子齿对齐时，定子 B 相极和 C 相极下的齿和转子齿依次有 $1/3$ 齿距的错位，即 3° ；同样，当 A 相断电，B 相控制绕组通电时，在反应转矩的作用下，转子按逆时针方向转过 3° ，使转子齿的轴线和定子 B 相极下齿的轴线对齐。这时，定子 C 相极和 A 相极下的齿和转子齿又依次错开 $1/3$ 齿距。依次类推，若继续按单三拍的顺序通电，转子就按逆时针方向一步一步地转动，步距角为 3° 。当然改变通电顺序，即按 A—C—B—A，电机按顺时针方向反转。

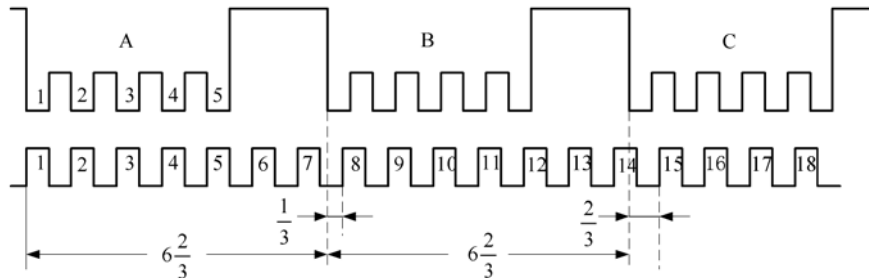


图 4-6 定、转子展开图 (A 相绕组通电)

若采用三相单、双六拍的通电方式运行时，和前面分析的道理完全一样，步距角也减小一半为 1.5° 。

通过以上分析可知，转子的齿数不能任意选取。因为在同一相的几个磁极下，定转子齿应同时对齐或同时错开，才能使几个磁极的作用相加，产生足够的反应转矩，所以转子齿数应是定子磁极的偶数倍。另外，在不同相的磁极下，定转子相对位置应依次错开 $1/m$ 齿距，这样才能在连续改变通电状态下，获得连续不断的运动。否则，当某一相控制绕组通电时，转子齿都将处于磁路的磁阻最小的位置上，各相绕组轮流通电时，转子将一直处于静止状态，电动机不能正常运行。为此，要求两相邻相磁极轴线之间转子的齿数应为整数加或减 $1/m$ ，即

$$\frac{Z_r}{2mp} = K \pm \frac{1}{m} \quad (4-1)$$

式中： K 为正整数； Z_r 为转子的齿数； $2p$ 为一相绕组通电时在圆周上形成的磁极数。

如果以 N 表示步进电动机运行的拍数，则转子经过 N 步，将转过一个齿距。每转一圈（即 360° 机械角），需要走 NZ_r 步，步距角为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{NZ_r} \quad (4-2)$$

$$N = Cm$$

式中： C 为通电状态系数。当采用单拍或双拍方式时， $C=1$ ；而采用单、双拍方式时， $C=2$ 。

由此可见，增加拍数和转子的齿数可以减小步距角，有利于提高控制精度。增加电机的相数可以增加拍数，也可以减小步距角。但相数越多，电源及电机的结构越复杂，造价也越高。反应式步进电动机一般做到六相，个别的也有八相或更多相。增加转子的齿数是减小步进电动机步距角的一个有效途径，目前所使用的步进电动机转子的齿数一般很多。对相同相数的步进电动机既可采用单拍方式，也可采用单、双拍方式。所以同一台电机可有两个步距角，如 $3^\circ/1.5^\circ$ 、 $1.5^\circ/0.75^\circ$ 、 $1.2^\circ/0.6^\circ$ 等。

当通电脉冲的频率为 f 时，由于转子每经过 NZ_r 个脉冲旋转一周，故步进电动机每分钟转速为

$$n = \frac{60f}{NZ_r} \quad (4-3)$$

式中：\$f\$ 的单位为 Hz。

可见，反应式步进电动机的转速与拍数 \$N\$、转子齿数 \$Z_r\$ 及脉冲的频率有关。当转子齿数一定，转速与输入脉冲的频率成正比，改变脉冲的频率可以改变电机的转速。

§ 4-3 反应式步进电动机的静态特性

一、矩角特性 (Torque-angle characteristic)

步进电动机的一相或几相控制绕组通入直流电流，且不改变它的通电状态，这时转子将固定于某一平衡位置上保持不动，称为静止状态（简称静态）。在空载情况下，转子的平衡位置称为初始稳定平衡位置。静态时的反应转矩叫静转矩，在理想空载时静转矩为零。当有扰动作用时，转子偏离初始稳定平衡位置，偏离的电角度 \$\theta\$ 称为失调角。静转矩与转子失调角的关系，即 \$T = f(\theta)\$，称为矩角特性。

反应式步进电动机转子转过一个齿距，从磁路情况来看，变化了一个周期。因此，转子一个齿距所对应的电角度为 \$2\pi\$ 弧度或 \$360^\circ\$ 电角度。

设静转矩 \$T\$ 和失调角 \$\theta\$ 从右向左为正。当失调角 \$\theta=0\$ 时，定子齿的轴线重合，静转矩 \$T=0\$，如图 4-7 (a) 所示；当 \$\theta>0\$ 时，切向磁拉力使转子向右移动，静转矩 \$T<0\$，如图 4-7 (b) 所示；当 \$\theta<0\$ 时，切向磁拉力使转子向左移动，静转矩 \$T>0\$，如图 4-7 (c) 所示；当 \$\theta=\pi\$ 时，定子齿与转子槽正好相对，转子齿受到定子相邻两个齿磁拉力作用，但大小相等、方向相反，产生的静转矩为零，即 \$T=0\$，如图 4-7 (d) 所示。

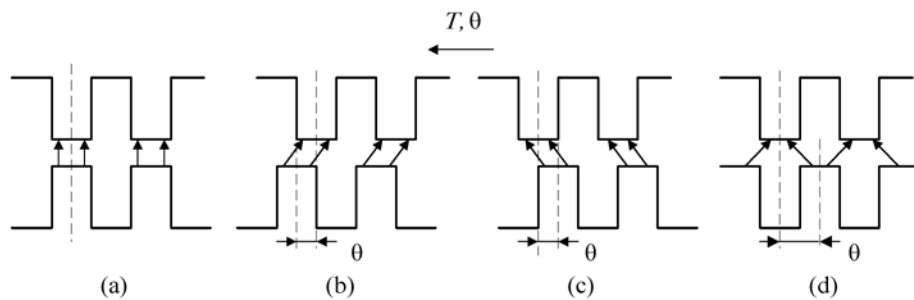


图 4-7 静转矩与转子位置的关系

(a) \$\theta=0\$; (b) \$\theta>0\$; (c) \$\theta<0\$; (d) \$\theta=\pi\$

反应式步进电动机的静转矩，由机电能量转换原理可推导出数学表达式。

若不计电机磁路铁芯部分中磁场能量或磁共能变化的影响，当只有一相绕组通电时，储存在电机气隙中的磁场能量为

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4-4)$$

式中：\$L\$ 为每相控制绕组的自感；\$I\$ 为通入控制绕组中的电流。

当磁链保持不变，静转矩的大小等于磁场能量对机械角位移的变化率，即

$$T = \frac{dW_m}{d\beta} \quad (4-5)$$

式中：\$\beta\$ 为电机转子的机械角位移，用失调角（电角度）表示，则 \$\theta = Z_r \beta\$。

相绕组的自感

$$L = \frac{w\Phi}{I} = W^2 \Lambda \quad (4-6)$$

式中：\$W\$ 为每相控制绕组的匝数；\$\Phi\$ 为每相控制绕组的磁通；\$\Lambda\$ 为每相控制绕组对应的磁导。

如果略去磁导中高次谐波的影响，步进电动机的磁导近似地绘出如图 4-8 所示的曲线，当定转子的齿正好对齐时，气隙磁导最大，用直轴磁导 \$\Lambda_d\$ 表示；当定子齿和转子槽相对时，气隙磁导最小，用交轴磁导 \$\Lambda_q\$ 表示，其数学关系式为

$$\Lambda = \frac{1}{2}(\Lambda_d + \Lambda_q) + \frac{1}{2}(\Lambda_d - \Lambda_q)\cos\theta \quad (4-7)$$

静转矩为

$$\begin{aligned} T &= \frac{dW_m}{d\beta} = \frac{1}{2}I^2 \frac{dL}{d\beta} = \frac{1}{2}(WI)^2 \frac{d\Lambda}{d\beta} = -\frac{Z_r}{4}(WI)^2(\Lambda_d - \Lambda_q)\sin(Z_r\beta) \\ &= -T_{\max} \sin(Z_r\beta) = -T_{\max} \sin\theta \end{aligned} \quad (4-8)$$

式中：\$T_{\max} = \frac{Z_r(WI)^2(\Lambda_d - \Lambda_q)}{4}\$ 称为最大静转矩。

步进电动机的矩角特性，如图 4-9 所示。理想的矩角特性是一个正弦波。

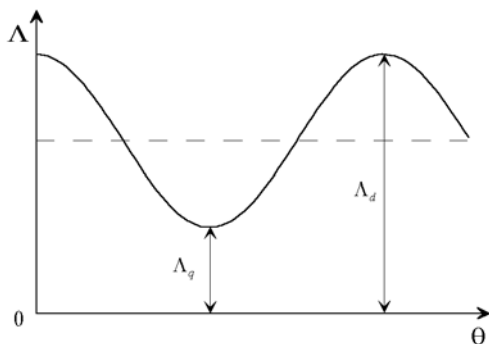


图 4-8 磁导变化曲线

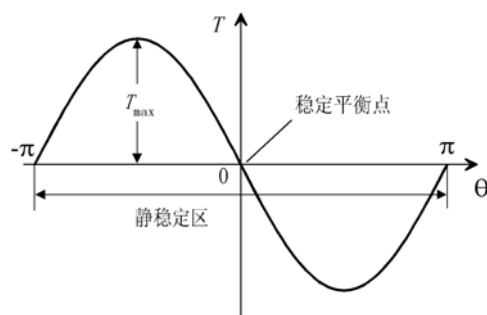


图 4-9 步进电动机的矩角特性

在矩角特性上，\$\theta=0\$ 是理想的稳定平衡位置。因为此时若有外力矩干扰使转子偏离它的稳定平衡位置，只要偏离的角度在\$-\pi \sim +\pi\$之间，一旦干扰消失，电机的转子在静转矩的作用下，将自动恢复到\$\theta=0\$ 这一位置，从而消除失调角。当\$\theta=\pm\pi\$时，虽然此时 \$T\$ 也等于零，但是如果有外力矩的干扰使转子偏离该位置，当干扰消失时，转子回不到原来的位置，而是在静转矩的作用下，转子将稳定到\$\theta=0\$ 或 \$2\pi\$的位置上，所以\$\theta=\pm\pi\$为不稳定平衡位置。\$-\pi < \theta < \pi\$之间的区域称为静稳定区。在这一区域内，当转子转轴上的负载转矩与静转矩相平衡时，转子能稳定在某一位置；当负载转矩消失，转子又能回到初始稳定平衡位置。

二、最大静转矩

当一相绕组通电时，在\$\theta=\pm 90^\circ\$有最大静转矩 \$T_{\max}\$。若有多相绕组同时通电时，最大静转矩为

$$T_{\max} = K \frac{Z_r(WI)^2(\Lambda_d - \Lambda_q)}{4} \quad (4-9)$$

式中：\$K\$ 为多相控制绕组同时通电时的转矩增大系数。当两相控制绕组同时通电时，\$K = 2 \cos \frac{\pi}{m}\$；

当三相控制绕组同时通电时 \$K = 1 + 2 \cos \frac{2\pi}{m}\$。

在一定通电状态下，最大静转矩与控制绕组中电流的关系，即 \$T_{\max} = f(I)\$，称为最大静转矩特

性，如图 4-10 所示。

由于铁磁材料的非线性， T_{\max} 与 I 之间也呈非线性关系。当控制绕组中电流较小，电机磁路不饱和时，最大静转矩 T_{\max} 与控制绕组中电流 I 的平方成正比；当电流较大时，由于磁饱和的影响，最大静转矩 T_{\max} 的增加变缓。

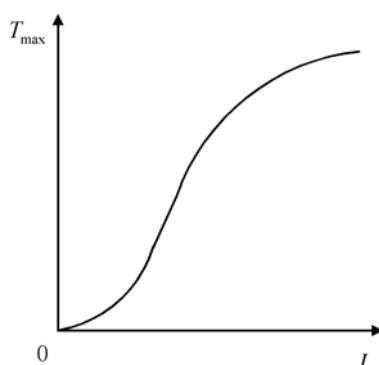


图 4-10 最大静转矩特性

三、矩角特性族

在分析步进电动机动态运行时，不仅要知道某一相控制绕组通电时的矩角特性，而且要知道整个运行过程中，各相控制绕组通电状态下的矩角特性，即所谓矩角特性族。以三相单三拍的通电方式为例，若将失调角 θ 的坐标轴统一取在 A 相磁极的轴线上，显然 A 相通电时矩角特性如图 4-11 中曲线 A 所示，稳定平衡点为 O_A 点；B 相通电时，转子转过 1/3 齿距，相当于转过 $2\pi/3$ 电角度，它的稳定平衡点应为 O_B 点，矩角特性如图 4-11 中曲线 B 所示；同理，C 相通电时矩角特性如图 4-11 中曲线 C，这三条曲线就构成了三相单三拍通电方式时的矩角特性族。总之，矩角特性族中的每一条曲线依次错开一个用电角度表示的步矩角 θ_{se}

$$\theta_{se} = Z_r \theta_s = \frac{2\pi}{N} \quad (4-10)$$

同理，可得到三相单、双六拍通电方式时的矩角特性族，如图 4-12 所示。

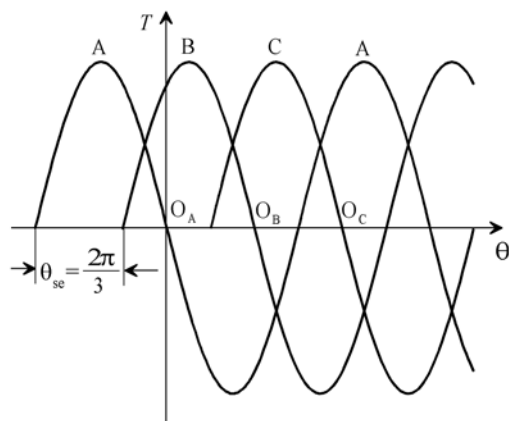


图 4-11 三拍时的矩角特性族

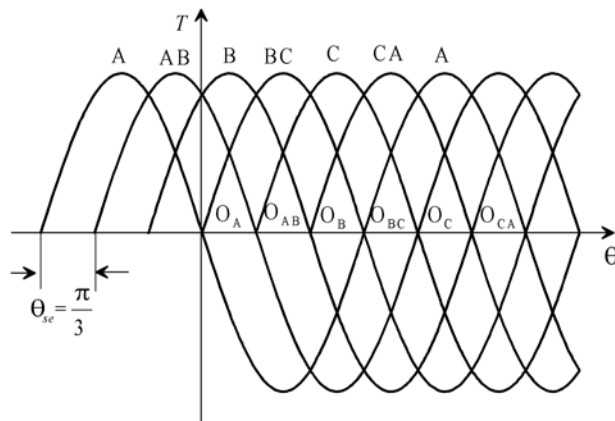


图 4-12 六拍时的矩角特性族

§ 4-4 反应式步进电动机的动态特性

动态特性是指步进电动机在运行过程中的特性。它直接影响系统工作的可靠性和系统的快速反应。

一、单步运行状态

单步运行状态是指步进电动机在一相或多相控制绕组通电状态下，仅改变一次通电状态时的运行方式。

(一) 动稳定区

当 A 相控制绕组通电时，矩角特性如图 4-13 中的曲线 A 所示。若步进电动机为理想空载，则转子处于稳定平衡点 O_A 处。如果将 A 相通电改变为 B 相通电，那么矩角特性应向前移动一个步距角 θ_{se} 变为曲线 B， O_B 点为新的稳定平衡点。由于在改变通电状态的初瞬转子位置来不及改变还处于 $\theta=0$ 的位置，对应的电磁转矩却由 0 突变为 T_c （曲线 B 上的 C 点）。电机在该转矩的作用下，转子向新的稳定平衡位置移动，直至到达 O_B 点为止。对应它的静稳定区为 $(-\pi + \theta_{se}) < \theta < (\pi + \theta_{se})$ ，即改变通电状态的瞬间，只要转子在这个区域内，就能趋向新的稳定平衡位置。因此，把后一个通电相的静稳定区称为前一个通电相的动稳定区。把初始稳定平衡点 O_A 与动稳定区的边界点 a 之间的距离称为稳定裕度。拍数越多，步距角越小，动稳定区就越接近静稳定区，稳定裕度越大，运行的稳定性越好，转子从原来的稳定平衡点到达新的稳定平衡点的时间越短，能够响应的频率也就越高。

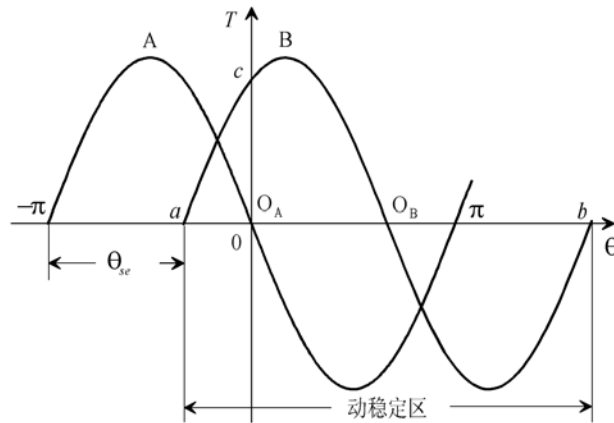


图 4-13 动稳定区

(二) 最大负载能力

步进电动机带恒定负载时，负载转矩为 T_{L1} ，且 $T_{L1} < T_{st}$ 。若 A 相控制绕组通电，则转子的稳定平衡位置为图 4-14 (a) 中曲线 A 上的 O'_A 点，这一点的电磁转矩正好与负载转矩相平衡。当输入一个控制脉冲信号，通电状态由 A 相改变为 B 相，矩角特性变为曲线 B。在改变通电状态的瞬间电机产生的电磁转矩 T'_a 大于负载转矩 T_{L1} ，电机在该转矩的作用下，转过一个步距角，到达新的稳定平衡点 O'_B 。

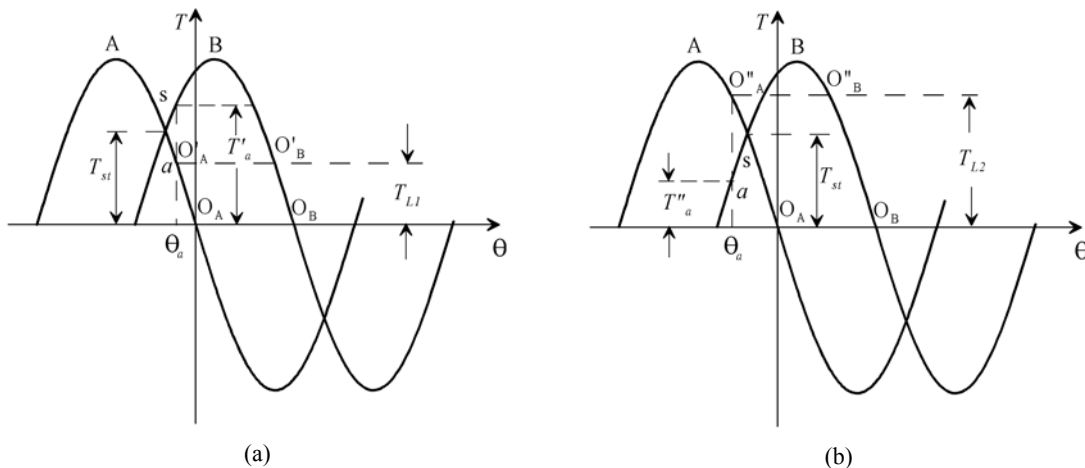


图 4-14 最大负载转矩的确定

$$(a) T_{st} > T_{L1}; (b) T_{st} < T_{L2}$$

如果负载转矩增大为 T_{L2} ，且 $T_{L2} > T_{st}$ ，如图 4-14 (b)，则初始平衡位置为 O_A'' 点。但在改变通电状态的瞬间电机产生电磁转矩为 T_a'' ，由于 $T_a'' < T_{L2}$ ，所以转子不能到达新的稳定平衡位置 O_B'' 点，而是向失调角 θ 减小的方向滑动，电机不能带动负载作步进运行，这时步进电动机实际上是处于失控状态。

由此可见，只有负载转矩小于相邻两个矩角特性交点 S 所对应的电磁转矩 T_{st} ，才能保证电机正常的步进运行，把 T_{st} 称为最大负载转矩，也称为启动转矩。当然它比最大静转矩 T_{max} 要小。由图 4-14 可求得启动转矩

$$T_{st} = T_{max} \sin\left(\frac{\pi - \theta_{se}}{2}\right) = T_{max} \cos \frac{\theta_{se}}{2} \quad (4-11)$$

将式 (4-10) 代入式 (4-11) 可得

$$T_{st} = T_{max} \cos \frac{\pi}{N} = T_{max} \cos \frac{\pi}{mC} \quad (4-12)$$

由式 (4-12) 可知，当 T_{max} 一定，增加运行拍数可以增大启动转矩。当通电状态系数 $C=1$ 时，正常结构的反应式步进电动机最少的相数必须是三。如果电机的相数增多，通电状态系数较大时，最大负载转矩也随之增大。

此外，矩角特性的波形对电动机带负载的能力也有较大影响。当矩角特性为平顶波时， T_{st} 值接近于 T_{max} 值，电机带负载能力较大。因此，步进电动机理想的矩角特性应是矩形波。

T_{st} 是步进电动机作单步运行时的负载转矩极限值。由于负载可能发生变化，电机还要具有一定的转速。因而实际应用时，最大负载转矩比 T_{st} 要小，通常 $T_L = (0.3 \sim 0.5) T_{max}$ 。

(三) 转子振荡现象

上面分析认为当控制绕组改变通电状态后，转子单调地趋向平衡位置。但实际上由于转子有惯性，它要经过一个振荡过程。通过图 4-13 加以说明。

步进电动机空载，开始时 A 相控制绕组通电，转子处在失调角 $\theta=0$ 的位置。当改变为 B 相绕组通电时，在电磁转矩的作用下，转子将加速趋向新的平衡位置 O_B ，到达 O_B 时，电磁转矩为零，但速度并不为零。在惯性的作用下，转子将继续转动越过新的平衡位置 O_B ，此时电磁转矩变为负值，即反方向作用在转子上，因而电机开始减速。随着失调角 θ 增大，反向转矩也随之增大，若不考虑电机的阻尼作用，则转子将一直转到 $\theta=2\theta_{se}$ 的位置。转子转速减为零。之后电机在反向转矩的作用下，转子向反方向转动，又越过平衡位置 O_B ，直至 $\theta=0$ 。这样，转子就以 O_B 为中心，在 $0 \sim 2\theta_{se}$ 的区域内来回作不衰减的振荡，称为无阻尼的自由振荡，如图 4-15 所示。

图 4-13 中矩角特性 B 的数学表达式为

$$T = -T_{max} \sin(\theta - \theta_{se}) \quad (4-13)$$

当电动机的负载转矩为零，且不计阻尼作用，其运动方程式为

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -T_{max} \sin(\theta - \theta_{se}) \quad (4-14)$$

式中： J 为转动部分的转动惯量。

当步距角 θ_{se} 不太大时，偏转角变动的范围就较小，近似认为

$$\sin(\theta - \theta_{se}) \approx \theta - \theta_{se} = Z_r \beta - \theta_{se} \quad (4-15)$$

式 (4-15) 代入式 (4-14) 整理得

$$\frac{J}{Z_r T_{\max}} \frac{d\Omega}{dt} = -(\beta - \theta_s) \quad (4-16)$$

若初始条件 $t=0$ 时, $\beta=0$, $\Omega=0$, 则解式 (4-16) 可得自由振荡的角频率为

$$\Omega_o = \sqrt{\frac{Z_r T_{\max}}{J}} \quad (4-17)$$

自由振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Z_r T_{\max}}{J}} \quad (4-18)$$

实际上, 由于轴承的摩擦和风阻等的阻尼作用, 转子在平衡位置的振荡过程总是衰减的, 如图 4-16 所示。阻尼作用越大, 衰减的越快, 这也是我们所希望的。

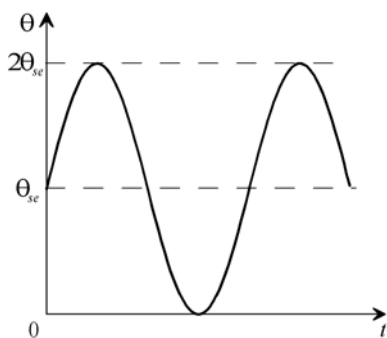


图 4-15 无阻尼时转子自由振荡

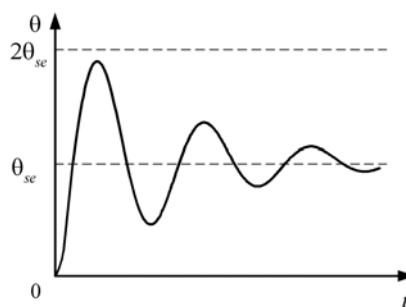


图 4-16 有阻尼时转子的衰减振荡

二、连续脉冲运行状态

步进电动机在实际应用中, 一般均工作于连续脉冲运行状态。

(一) 脉冲频率对电动机工作的影响

步进电动机控制脉冲的频率往往会在很大范围内变化。脉冲频率不同, 脉冲持续的时间也不同, 步进电动机的工作情况也截然不同。下面分三个频率区段进行讨论。

1. 频率极低时的连续步进运行

当控制脉冲频率极低时, 脉冲持续的时间很长, 并且大于转子衰减振荡的时间。也就是说在下一个控制脉冲尚未到来时, 转子已经处在某稳定平衡位置。故其每一步都和单步运行一样, 电机具有明显的步进特征, 如图 4-17 所示。

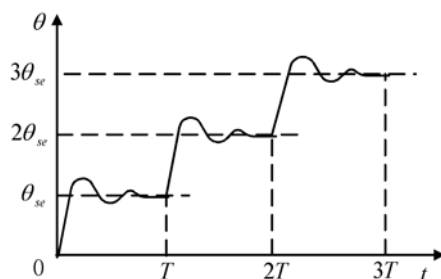


图 4-17 具有步进特征的运行

2. 频率很低时的低频共振

当控制脉冲的频率比前一种高, 脉冲持续的时间比转子衰减振荡的时间短, 这时转子还未稳定在平衡位置, 下一个控制脉冲就到来。当控制脉冲的频率等于或接近步进电动机的振荡频率 f_0 的 $1/K$ 时 ($K=1, 2, 3, \dots$), 电机就会出现强烈振动, 甚至失步和无法工作。

步进电动机在空载的情况下, 且不考虑阻尼作用, 在控制脉冲的频率 $f=f_0$ 时, 电动机将完全

失去控制作用。以三相单三拍为例加以说明，如图 4-18 所示。

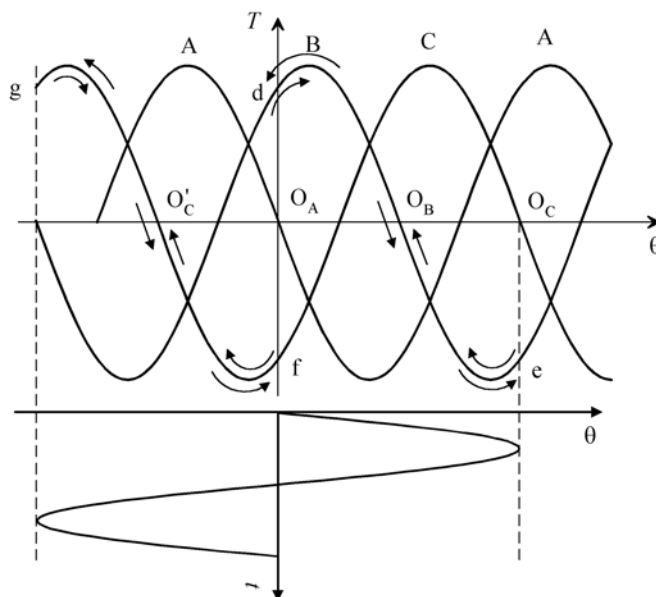


图 4-18 低频共振现象

开始时转子处于 A 相矩角特性的平衡位置 O_A 点，第一个脉冲到来时，通电绕组换为 B 相，则转子应向 B 相的平衡位置 O_B 点转动。当转子振荡了一个周期，恰好回到起始稳定平衡位置时，相当于转子工作点位置在矩角特性 B 上由 $O_A \rightarrow d \rightarrow O_B \rightarrow e \rightarrow O_B \rightarrow d$ ，这时第二个脉冲到来，通电绕组又换为 C 相，工作点由矩角特性 B 上的 d 点转移到矩角特性 C 上的 f 点。这时转子受到的电磁转矩为负值，所以转子不向平衡位置 O_C 点转动，而是向 O'_C 点转动，相当于转子在矩角特性 C 上由 $f \rightarrow O'_C \rightarrow g \rightarrow O'_C \rightarrow f$ ，即转子反方向振荡，这时第三个脉冲到来，转子由 f 点移到 O_A 点，此时的电磁转矩等于零，转子不再转动。以后重复上述过程。这样，无论经过几个通电循环，转子始终处在原来的位置 O_A ，此时电动机完全失控，这个现象叫低频共振。可见，在无阻尼低频共振时步进电动机发生了失步。一般情况下，一次失步的步数是运行拍数的整数倍。失步严重时，转子停留在某一位置上或围绕某一位置振荡。

步进电动机在实际运行时，总存在有阻尼作用，尤其在带负载或外加阻尼器时，阻尼的作用较强，转子振荡衰减的较快，振荡的幅度也较小。只要振荡的最大幅值处在动稳定区之内，尽管转子有振荡，电机也能保持不失步。另外，拍数越多，步距角越小，动稳定区就越接近静稳定区，这样也可消除低频失步。

当控制脉冲的频率等于 $1/K$ 转子振荡频率时，也有产生共振的可能。图 4-19 表示转子振荡两个周期时，下一个脉冲到来的转子运动规律。可见，在改变通电状态时，它的振荡幅度明显比第一个周期要小得多，这些共振现象往往不太明显，一般也不会造成失步。

振荡频率是客观存在的，它是由系统的电磁参数和机械参数所决定。因此，在实际运行时应避免在共振频率下运行。有时为了削弱低频共振，常常采用阻尼的方法来满足，阻尼可分为机械阻尼和电气阻尼。机械阻尼是增加电机转子的干摩擦阻力或增加粘性阻力；电气阻尼有多相励磁和延迟断开两种方法，它们都是利用有一相绕组在两拍间的通电，所产生的磁场在转子运动过程中起阻尼作用。还应指出，低频共振现象不只是一个特定的脉冲频率值，而是在它附近的一个频率区间。只是在 $f=f_0$ 时，共振现象最为明显。

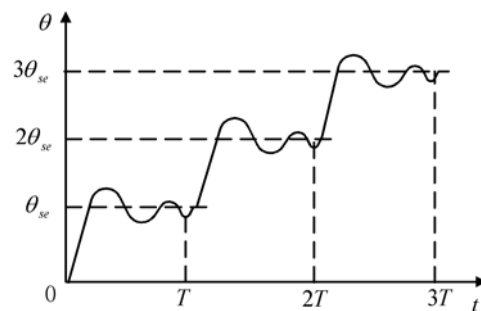


图 4-19 具有振荡特征的运行

3. 频率很高时的连续运行

当控制脉冲的频率很高时，脉冲间隔的时间很短，电机转子尚未到达第一次振荡的幅值，甚至还没有到达新的稳定平衡位置，下一个脉冲就到来。此时电机的运行已由步进变成了连续平滑的转动，转速也比较稳定，如图 4-20 所示。当频率太高时，也会产生失步，甚至还会产生高频振荡。请读者自行分析。

（二）矩频特性（torque-frequency characteristic）

步进电动机作单步运行时的最大允许负载转矩为 T_{st} ，但当控制脉冲的频率逐渐增加，步进电动机的转速逐渐升高时，步进电动机所能带的负载使转矩值将逐步下降。这就是说，电机转动时所产生的电磁转矩是随频率的升高而减小的。把电磁转矩和脉冲频率的关系称为矩频特性，它是一条随频率增加电磁转矩下降的曲线，如图 4-21 所示。

控制脉冲频率升高，电磁转矩下降的主要原因是控制绕组呈电感性，因为它具有延缓电流变化的作用。通常外加脉冲电压都是矩形波，当控制脉冲频率较低时，每相绕组通电和断电的时间较长，绕组中电流的上升和下降均能达到稳定值，其波形接近于矩形波。在通电时间内电流的平均值较大，电机产生的平均转矩也较大，如图 4-22（a）所示。当脉冲频率升高，由于电路的时间常数不变，电流的波形与矩形波差别较大，通电时间内电流的平均值下降，电机产生的平均转矩降低，如图 4-22（b）所示。当脉冲的频率进一步升高，电流的平均值进一步下降，使平均转矩大大减小，如图 4-22（c）所示。

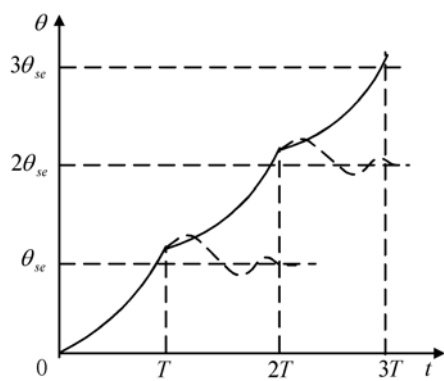


图 4-20 连续运行状态

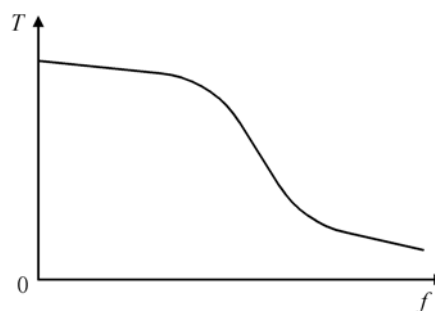


图 4-21 步进电动机的矩频特性

此外，随着脉冲频率上升，转子转速升高，在控制绕组中将产生附加旋转电动势，并形成附加电流，使电机受到电磁阻尼作用，致使电机的电磁转矩进一步减小。当脉冲频率上升到一定数值后，电机便带不动任何负载，轻则电机失步，重则停转。

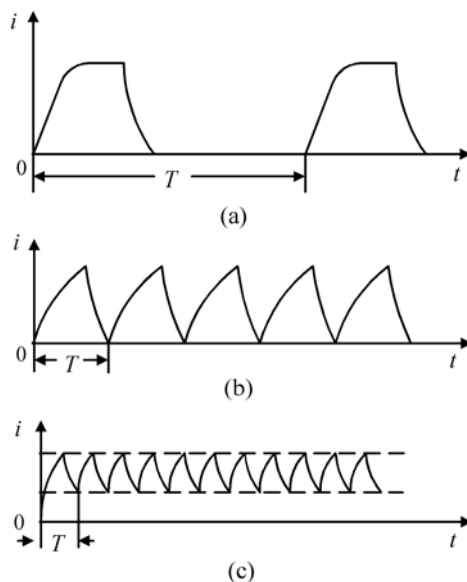


图 4-22 电流与频率的关系

(三) 连续运行频率

步进电动机在一定负载转矩下，不失步连续运行的最高频率称为电机的连续运行频率。其值越高电机转速越高，这是步进电动机的一个重要技术指标。连续运行频率不仅随负载转矩的增加而下降，而且更主要的是受控制绕组时间常数的影响。在负载转矩一定时，为了提高连续运行频率通常采用的方法是：第一，在控制绕组中串入电阻，并相应提高电源电压。这样可以减小电路的时间常数，使控制绕组的电流迅速上升。第二，采用高、低压驱动电路，提高脉冲起始部分的电压，改善电流波形的前沿，使控制绕组中的电流快速上升。此外，转动惯量对连续运行频率也有一定的影响。因为随着转动惯量的增加摩擦力矩也相应增大，转子就会跟不上磁场变化的速度，最后因超出动稳定区而失步或产生振荡，从而限制连续运行的频率。

(四) 启动频率和启动特性

在一定负载转矩下，电机不失步地正常启动所能加的最高控制脉冲的频率，称为启动频率（也称突跳频率）。它的大小与电机本身的参数、负载转矩、转动惯量及电源条件等因素有关，它是衡量步进电动机快速性的重要技术指标。

步进电动机在启动时，转子要从静止状态开始加速，电机的电磁转矩除了克服负载转矩之外，还要克服轴上的惯性转矩 $J \frac{d\Omega}{dt}$ 。所以启动时电机的负担比连续运转时要重。当启动时脉冲频率过高，转子的运动速度跟不上定子磁场的变化，转子就要落后稳定平衡位置一个角度。当落后的角度使转子的位置在动稳定区之外，步进电动机就要失步或振荡，电动机就不能启动。为此，对启动频率就要有一定的限制。但电机一旦启动后，如果再逐渐升高脉冲频率，由于这时转子的角加速度 $d\Omega/dt$ 较小，惯性转矩不大，因此电机仍能升速。显然，连续运行频率要比启动频率高。

当电机带着一定的负载转矩启动时，作用在电机转子上的加速转矩为电磁转矩与负载转矩之差。负载转矩越大，加速转矩就越小，电机就越不容易启动，其启动的脉冲频率就应该越低。在转动惯量 J 为常数时，启动频率 f_{st} 和负载转矩 T_L 之间的关系，即 $f_{st} = f(T_L)$ ，称为启动矩频特性，如图 4-23 所示。

另外，在负载转矩一定时，转动惯量越大，转子速度的增加越慢，启动频率也越低。启动频率 f_{st} 和转动惯量 J 之间的关系，即 $f_{st} = f(J)$ ，称为启动惯频特性，如图 4-24 所示。

要提高启动频率，可从以下几方面考虑：①增加电机的相数、运行的拍数和转子的齿数；②增

大最大静转矩；③减小电机的负载和转动惯量；④减小电路的时间常数；⑤减小电机内部或外部的阻尼转矩等。

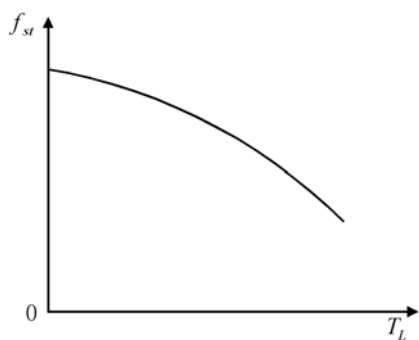


图 4-23 起动矩频特性

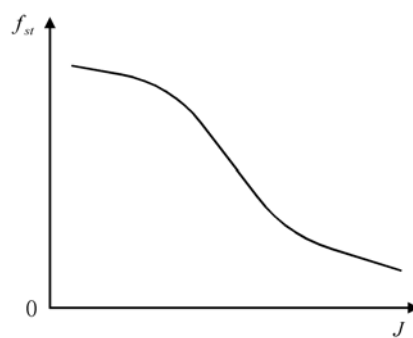


图 4-24 起动惯频特性

§ 4-5 其他型式的步进电动机

一、永磁式步进电动机

图 4-25 是永磁式步进电动机的结构原理图。定子为凸极式，装有两相（或多相）绕组。转子为凸极式星形磁钢，其极对数与定子每相绕组的极对数相同。图中定子为两相集中绕组（A、B），每相为两对极，所以转子也是两对极，即 $p=2$ 。

当定子绕组按 $A-B-(-A)^*-(-B)-A$ 的次序轮流通电时，转子将按顺时针方向每次转过 45° ，即步距角为 45° 。

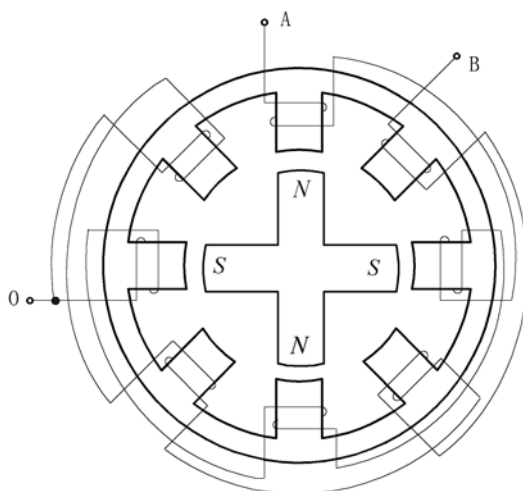
永磁式步进电动机的步距角

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{Np} \quad (4-19)$$

用电弧度表示则有

$$\theta_{se} = \frac{2\pi}{N} = \frac{\pi}{m} \quad (4-20)$$

式中： p 为转子极对数。



* A 为正脉冲，-A 为负脉冲。

图 4-25 永磁式步进电动机的结构原理图

上述这种通电方式为两相单四拍，要求控制电路既能输出正脉冲，也能输出负脉冲，电源较复杂。若每个定子磁极上绕两套绕向相反的绕组，则电源只发正脉冲即可，简化电源电路，但电机的用铜量和尺寸等均要增加。

此外，还有两相双四拍通电方式，即 $AB-B(-A)-(-A)(-B)-(-B)A-AB$ 。

永磁式步进电动机的特点是，步距角大，启动和运行频率较低；但它所需的控制功率较小，效率高，且在断电情况下具有定位转矩。主要用于新型自动化仪表。

二、混合式步进电动机

混合式步进电动机也称为感应子式步进电动机，这是一种十分流行的步进电动机。它既有反应式步进电动机小步距角的特点，又有永磁式步进电动机的高效率、绕组电感比较小的特点。常常也作为低速同步电动机运行。

（一）两相混合式步进电动机的结构

图 4-26 为两相混合式步进电动机的轴向剖视图。定子的结构与反应式步进电动机基本相同，沿着圆周有若干个凸出的磁极，极面上有小齿，极身上有控制绕组。控制绕组的接线如图 4-27 所示。转子由环形磁钢和两段铁芯组成，环形磁钢在转子中部，轴向充磁，两段铁芯分别装在磁钢的两端。转子铁芯上也有小齿，两段铁芯上的小齿相互错开半个齿距。定转子的齿距和齿宽相同，齿数的配合与单段反应式步进电动机相同。

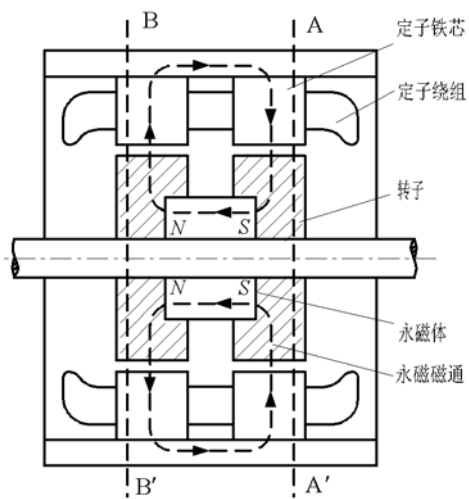


图 4-26 磁路混合式步进电动机轴向剖视图

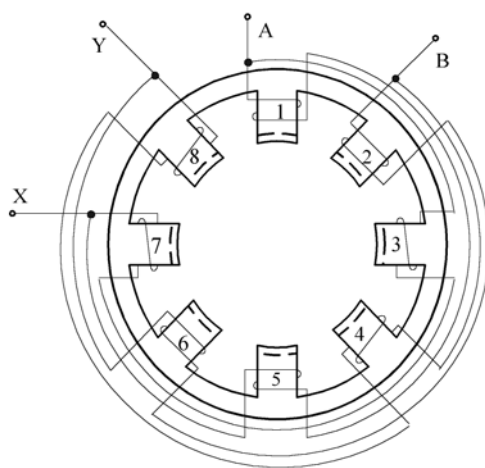


图 4-27 磁路混合式步进电动机绕组接线图

图 4-28 为转子段横截面图。定子上均匀分布有 8 个磁极，每个磁极下有 5 个小齿。转子上均匀分布着 50 个齿。当磁极 1 下是齿对齿时，磁极 5 下也是齿对齿，气隙磁阻最小；磁极 3 和 7 下是齿对槽，磁阻最大，如图 4-28 (a) 所示。此时，磁极 1' 和 5' 正好是齿对槽，磁极 3' 和 7' 是齿对齿，如图 4-28 (b) 所示。

（二）两相混合式步进电动机的工作原理

混合式步进电动机作用在气隙上的磁动势有两个，一个是由永久磁钢产生的磁动势，另一个是由控制绕组产生的磁动势。这两个磁动势有时是相加的，有时是相减的，视控制绕组中电流方向而定。这种步进电动机的特点是混入了永久磁钢的磁动势，故称为混合式步进电动机。

1. 零电流时工作状态

各相控制绕组中没有电流通过，这时气隙中的磁动势仅由永久磁钢的磁动势决定。如果电机的

结构完全对称，各个定子磁极下的气隙磁动势将完全相等，电动机无电磁转矩。因为永磁磁路是轴向的，从转子B端到定子的B端，轴向到定子的A端、转子的A端、经磁钢闭合。在这个磁路上，总的磁导与转子位置无关。这一方面由于转子不论处于什么位置，每一端的不同极下，磁导有的大有的小，但总和不变；另一方面由于两段转子的齿错开了半个齿距，所以即使在一个极的范围内看，当B端磁导增大时，A端必然减小，也使总磁导在转子位置不同时保持不变。

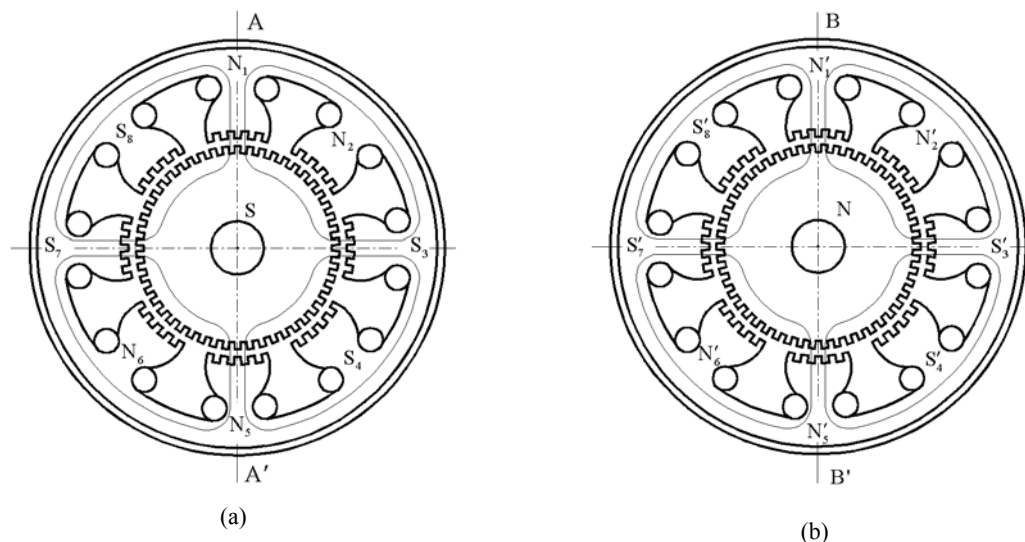


图 4-28 磁极转子段的横截面图
(a) S 极转子段截面图 (b) N 极转子段截面图

2. 绕组通电时工作状态

当控制绕组有电流通过时，便产生磁动势。它与永久磁钢产生的磁动势相互作用，产生电磁转矩，使转子产生步进运动。当 A 相绕组通电时，转子的稳定平衡位置如图 4-29 (a) 所示。若使转子偏离这一位置，如转子向右偏离了一个角度，则定转子齿的相对位置及作用转矩的方向如图 4-29 (b) 所示。可以看出，在不同端不同极的作用转矩都是同方向的，都是使转子回到稳定平衡位置的方向。可见，两相混合式步进电动机的稳定平衡位置是：定转子异极性的极面下磁导最大，而同极性的极面下磁导最小的位置。

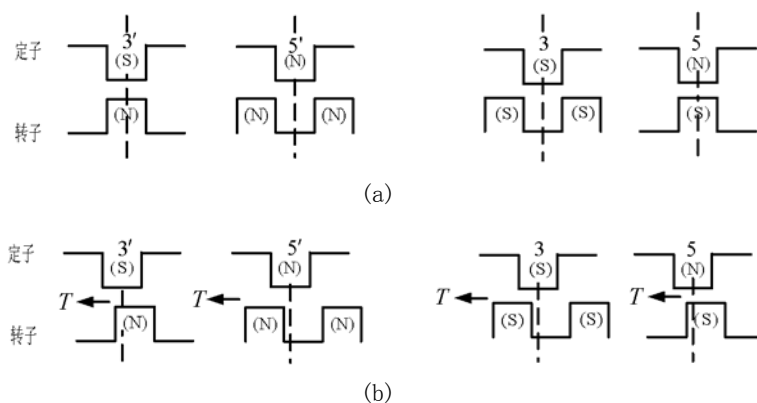


图 4-29 稳定平衡位置及偏离时的作用转矩方向

与 A 相相邻的 B 相磁极下，定转子齿的相对位置错开 $1/m$ 齿距，所以当由 A 相通电改变为 B 相通电时，转子的稳定平衡位置将移动 $1/m$ 齿距，即步距角为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{2mZ_r} \quad (4-21)$$

用电弧度表则为

$$\theta_{se} = \frac{2\pi}{2m} = \frac{\pi}{m} \quad (4-22)$$

(三) 通电方式

1. 单四拍通电方式

每拍只有一相绕组通电，四拍构成一个循环，两相控制绕组按 A—B—(-A)—(-B)—A 的次序轮流通电。每拍转子转动 1/4 转子齿距，每转的步数 $4Z_r$ 。若转子齿数为 50，每转为 200 步。

2. 双四拍通电方式

每拍有两相绕组同时通电，两相控制绕组按 AB—B(-A)—(-A)(-B)—(-B)A—AB 的次序轮流通电。若转子齿数也为 50，则每转也是 200 步，和单四拍相同，但二者的空间定位不重合。

3. 单、双八拍通电方式

前面两种通电方式的循环拍数都等于四，称为满步通电方式。若通电循环拍数为八，称为半步通电方式，即按 A—AB—B—B(-A)—(-A)—(-A)(-B)—(-B)—(-B)A—A 的次序轮流通电，每拍转子转动 1/8 转子齿距。若 $Z_r=50$ ，则每转为 400 步。

4. 细分通电方式

若调整两相绕组中电流分配的比例和方向，使相应的合成转矩在空间处于任意位置上，则循环拍数可为任意值，称为细分通电方式。实质上就是把步距角减小，如前面八拍通电方式已经将单四拍或双四拍细分了一半。采用细分通电方式可使步进电动机的运行更平稳，定位分辨率更加提高，负载能力也有所增加，并且步进电动机可作低速同步运行。

除了两相混合式步进电动机之外，还有伯格五相混合式步进电动机。它们的结构原理基本相同，不同的只是相数增多，使定子磁极数由 8 个增加为 10 个，每个极面下的小齿由 5 个减少为 4 个。

步进电动机除了以上叙述的几种常用型式外，还有很多型式，如单相式、滚切式、交流感应等。这里就不一一介绍了。

§ 4-6 驱动电源

步进电动机需要由专门的驱动电源供电，驱动电源和步进电动机是一个有机的整体，步进电动机的运行性能是电动机及其驱动电源二者配合所反映的综合效果。

驱动电源的形式很多，分类方法也很多。按配套的步进电动机容量大小，可分为功率步进电动机驱动电源和伺服电动机驱动电源两大类；按输出脉冲的极性可分为单向脉冲电源和正、负双极性脉冲电源两种；按功率放大器的型式分为单一电压型、高低压切换型、电流控制高低压切换型、细分电路电源和定电流斩波升频升压等。

无论那一种电源，它应满足以下基本要求：

(1)驱动电源的相数、通电方式和电压、电流都要与所驱动的步进电动机相匹配；(2)要满足步进电动机起动频率和连续运行频率的要求；

(3)能最大限度地抑制步进电动机的振荡；

(4)工作可靠，抗干扰能力强；

(5)成本低、效率高，安装维护方便。

一、驱动电源的组成

步进电动机的驱动电源由变频信号源、脉冲分配器和脉冲放大器三部分组成，如图 4-30 所示。

变频信号源是一个脉冲信号发生器，脉冲的频率可以由几赫兹到几十千赫兹连续变化。实现这一功能的电子线路很多，最常见的有多谐振荡器和单晶体管构成的张弛振荡器两种。

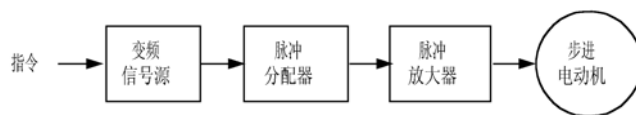


图 4-30 驱动电源方框图

脉冲分配器（也称环形分配器）是一个数字逻辑单元，它接收一个单相的脉冲信号，根据运行指令把脉冲信号按一定的逻辑关系加到脉冲放大器上，使步进电动机按选定的运行方式工作。它可以由双稳态触发器和门电路组成，也可用可编程逻辑器件组成。目前已有专用的集成电路，如三、四相步进电动机脉冲分配器 PMM8713 就是其中一种。为说明脉冲分配器的工作原理，图 4-31 给出了一种三相单三拍脉冲分配器的电路图及脉冲波形图，该脉冲分配器由二个 JK 触发器和三个与门组成，JK 触发器的真值表如表 4-1 所示。开始工作时，加上预置脉冲信号使触发器置“0”，即 $Q_1 = Q_2 = 0$ ，于是有 $A = \overline{Q_1} \overline{Q_2} = 1 \cdot 1 = 1$ ，表示 A 相输入一控制脉冲，而 $B = Q_1 \overline{Q_2} = 0 \cdot 1 = 0$ ， $C = Q_2 = 0$ ，即 B、C 相无控制信号。当在 CP 端输入第一个步进脉冲信号，第一个 JK 触发器 $J_1 = \overline{Q_2} = 1$ ， $K_1 = 1$ ， $Q_1(t) = 0$ 。由表 4-1 知，此时为“求补”，所以， $Q_1(t+1) = 1$ ；第二个 JK 触发器 $J_2 = Q_1 = 0$ ， $K_2 = \overline{Q_1} = 1$ ， $Q_2(t) = 0$ ，由表 4-1 知此时为置“0”，所以 $Q_2(t+1) = 0$ ，与门给出 $A = \overline{Q_1}(t+1) \cdot \overline{Q_2}(t+1) = 0$ ， $B = Q_1(t+1) \cdot \overline{Q_2}(t+1) = 1$ ， $C = Q_2(t+1) = 0$ ，只有 B 相有控制脉冲。余类推，读者可自行分析。

表 4-1 JK 触发器真值表

J	K	$Q(t+1)$	说 明
1	0	1	置“1”
0	1	0	置“0”
0	0	$Q(t)$	不变
1	1	$\overline{Q}(t)$	求补

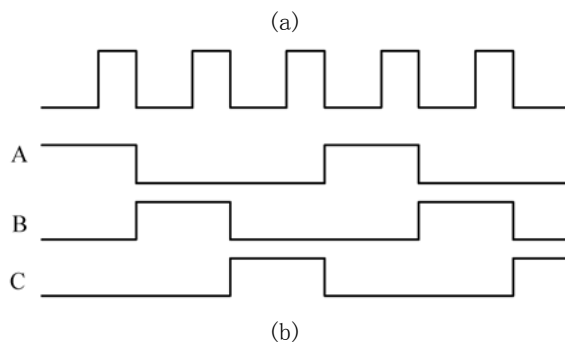
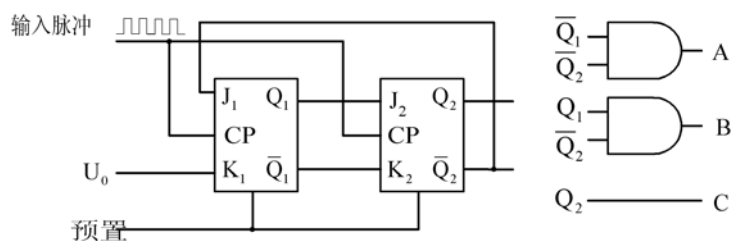


图 4-31 三相单三拍脉冲分配器

脉冲放大器是要进行脉冲功率的放大。因为从脉冲分配器能够输出的电流很小（毫安级），而步进电动机工作时需要的电流较大（一般几安到几十安）。因此，需要进行功率放大。功率放大电路的种类很多，它们对电机性能的影响也各不相同。脉冲放大器是每相绕组一套。

二、步进电动机的典型驱动方式

（一）单极性驱动

1. 单电压驱动方式

图 4-32 所示为一相控制绕组驱动电路的原理图。当有控制脉冲信号输入时，功率管 V 导通，控制绕组中有电流流过；否则，功率管 V 关断，控制绕组中没有电流流过。

为了减小控制绕组电路的时间常数，提高步进电动机的动态转矩，改善运行性能，在控制绕组中串联电阻 R_{f1} ，同时也起限流作用。电阻两端并联电容 C 的作用是改善注入步进电机控制绕组中电流脉冲的前沿。在功率管 V 导通的瞬间，由于电容上的电压不能跃变，电容 C 相当于将电阻 R 短接，使控制绕组中的电流迅速上升，这样就使得电流波形的前沿明显变陡。但是，如果电容 C 选择不当，在低频段会使振荡有所增加，引起低频性能变差。

由于功率管 V 由导通突然变为关断状态时，在控制绕组中会产生很高的电动势，其极性与电源的极性一致，二者叠加在一起作用到功率管 V 的集电极上，很容易使功率管击穿。为此，并联一个二极管 D 及其串联电阻 R_{f2} ，形成放电回路，限制功率管 V 集电极上的电压，保护功率管 V 。

单电压驱动方式的最大特点是线路简单、功率元件少、成本低。但它的缺点是由于电阻 R_{f1} 要消耗能量，使得工作效率低。所以这种驱动方式只适用小功率步进电动机的驱动。

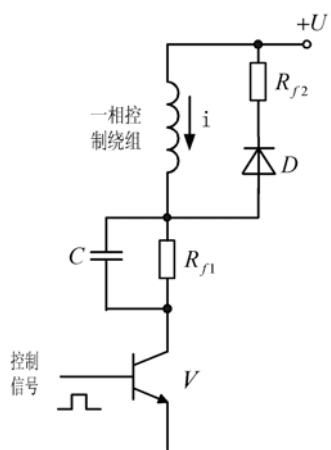


图 4-32 单电压驱动电路原理图

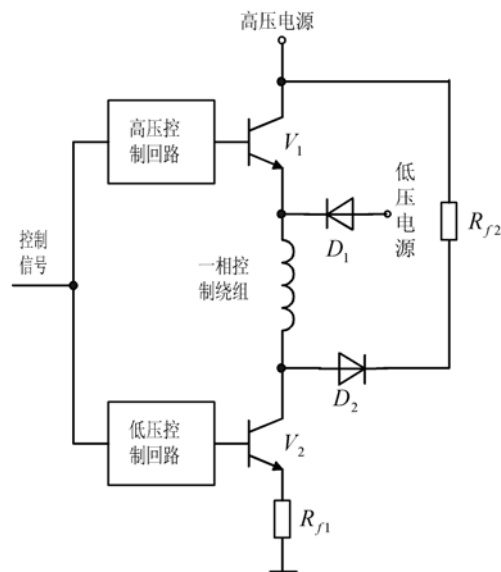


图 4-33 高低电压驱动电路原理图

2. 高低电压驱动方式（双电压驱动方式）

高低压驱动电路原理如图 4-33 所示。当输入控制脉冲信号时，功率管 V_1 、 V_2 导通，低压电源由于二极管 D_1 承受反向电压处于截止状态不起作用，高压电源加在控制绕组上，控制绕组中的电流迅速上升，使电流波形的前沿很陡。当电流上升到额定值或稍比额定值高时，利用定时电路或电流检测电路，使功率管 V_1 关断， V_2 仍然导通，二极管 D_1 也由截止变为导通，控制绕组由低压电源供电，维持其额定稳态电流。当输入信号为零时，功率管 V_2 截止，控制绕组中的电流通过二极管 D_2 的续流作用向高压电源放电，绕组中的电流迅速减小。电阻 R_{f1} 的阻值很小，目的是为了调节控制绕组中的电流，使各相电流平衡。这种驱动方式的特点是电源功耗比较小，效率比较高。由于电

流的波形得到了很大的改善，所以电机的矩频特性好，启动和运行频率得到了很大的提高。它的主要缺点是在低频运行时输入能量过大，造成电机低频振荡加重；同时也增大了电源的容量，由于电源电压的提高，也提高了对功率管性能参数的要求。这种驱动方式常用于大功率步进电动机的驱动。

3. 定电流斩波驱动方式

步进电动机在运行过程中，经常会出现控制绕组中电流波顶下凹的现象，如图 4-34 所示。这主要是由于电机在转动时，磁导的变化在绕组中产生感应电动势以及相间的互感等原因而造成的。这一现象会引起电机转矩下降，动态性能变差，甚至使电机失步。为了消除这一现象，通常采用定电流斩波驱动方式。它是在高低压驱动电路的基础上，根据控制绕组中电流的变化情况，反复地接通和断开高压电源，使绕组中的电流始终维持在要求的范围内，如图 4-35 所示。

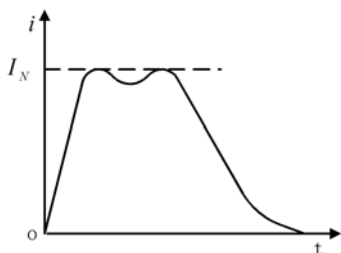


图 4-34 电流波顶下凹现象

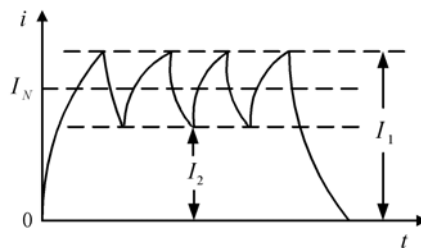


图 4-35 定电流斩波驱动控制绕组的电流波形

图 4-36 是定电流斩波驱动电路原理图。当有控制脉冲信号输入时，功率管 V_1 、 V_2 导通，控制绕组中的电流在高压电源作用下迅速上升。当上升到电流 I_1 时，电流检测信号使功率管 V_1 关断，高压电源被切除，低压电源对绕组供电。倘若由于某种原因使电流下降到 I_2 时，电流检测装置再次发出信号，使 V_1 导通，电流再次上升。这样如此反复进行，就可使电流维持在要求值的附近。

这种驱动方式不仅具有高低压驱动方式的优点，而且由于电流的波形得到了补偿，使电机的运行性能得到显著提高。它的缺点是线路相对较复杂，而且要求功率管的开关速度高。

另外，对于小功率的步进电动机，也可以把功率管 V_2 去掉，成为单电压定电流斩波驱动电路，读者自行分析。

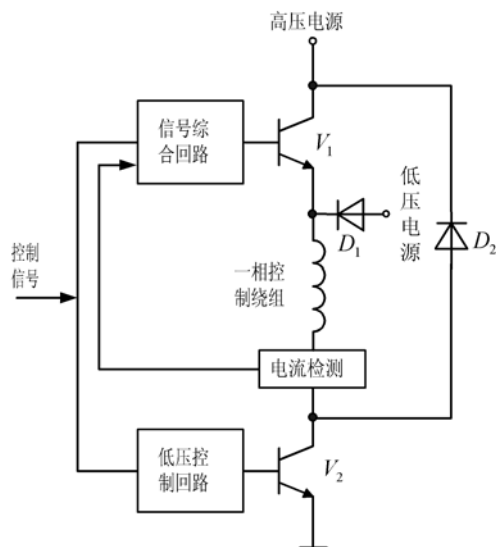


图 4-36 定电流斩波驱动电路原理图

4. 调频调压驱动方式

从本质上来说，步进电动机控制绕组中的电流对运行性能起着决定性的作用。一般希望在低速

时绕组电流上升缓慢一些，使转子向新的稳定平衡位置移动时不要严重的过冲，避免产生明显的振荡；而在高速运行时希望电流波形的前沿较陡，以建立足够的绕组电流，提高带负载能力。然而前几种驱动电路都不能很好满足这一要求。因此，可采用调频调压驱动方式。

调频调压驱动方式的电路原理如图 4-37 所示。电压调整器用脉冲调宽（PWM）实现调压，输出电压随脉冲频率的上升而上升；积分器对脉冲进行积分，其输出电压与锯齿波发生器产生的锯齿波在比较器中进行比较，产生脉宽随频率变化的控制脉冲信号，用该信号控制电压调整器，即可控制 U_2 的大小，达到随输入控制脉冲频率的变化自动调整控制绕组电源电压的目的，从而调节控制绕组中的电流。即输入控制脉冲频率低，绕组所加电压低，电流上升较缓；输入控制脉冲频率高，绕组所加电压高，电流上升较快，电流波形如图 4-38（a）、（b）所示。

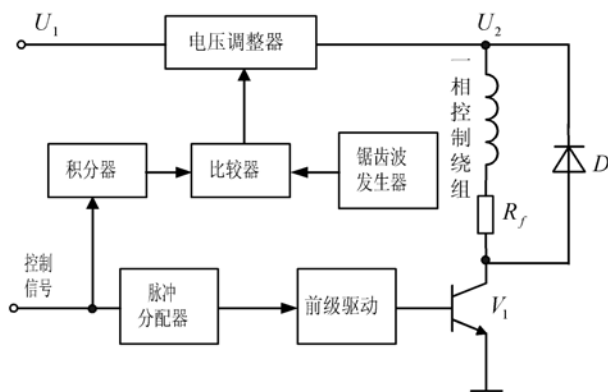


图 4-37 调频调压驱动电路原理图

这种驱动方式不仅线路比较复杂，而且在实际运行时针对不同参数的电机，还要相应调整电压 U_2 与输入控制脉冲频率的特性。

5. 细分驱动方式

一般步进电动机受制造工艺的限制，它的步距角是有限的。而实际中的某些系统往往要求步进电动机的步距角必须很小，才能完成加工工艺要求。如数控机床为了提高加工精度，要求脉冲当量为 0.01mm/脉冲左右，甚至要求达到 0.001mm/脉冲左右。这时一般的驱动方式是无能为力的。为此，常采用细分驱动方式。所谓细分驱动方式，就是把原来的一步再细分成若干步，使步进电动机的转动近似为匀速运动，并能在任何位置停步。为达到这一目的，可将原来的矩形脉冲电流改为阶梯波电流，如图 4-39 所示。这样在输入电流的每个阶梯，电机转动一步，步距角减小了很多，从而提高了运行的平滑性，改善了低频特性，负载能力也有所增加。

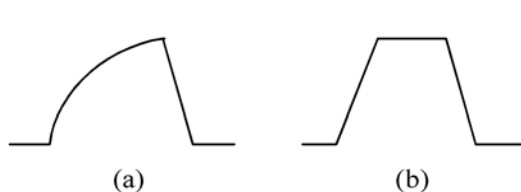


图 4-38 调频调压电流波形
(a) 低频低压；(b) 高频高压

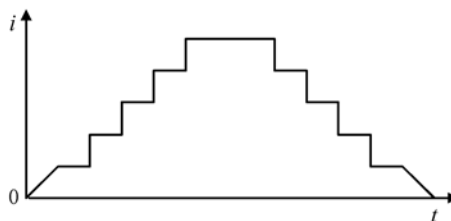


图 4-39 阶梯电流波形

实现阶梯波形电流通常有两种方法：第一种是通过顺序脉冲形成器所形成的各个等幅等宽的脉冲，用几个完全相同的开关放大器分别进行功率放大，最后在电机的绕组中将这此脉冲电流进行叠加，形成阶梯波电流，如图 4-40（a）所示。这种方法是功放元件成倍增加，但元件的容量成倍降低，且结构简单，容易调整。它适用于中、大功率

步进电动机的驱动。第二种是把顺序脉冲形成器所形成的等幅等宽的脉冲，先合成阶梯波，然后对阶梯波进行放大去驱动步进电动机，如图 4-40 (b) 所示。这种方法是功率元件少，但元件的容量较大，它适用于微小功率步进电动机的驱动。

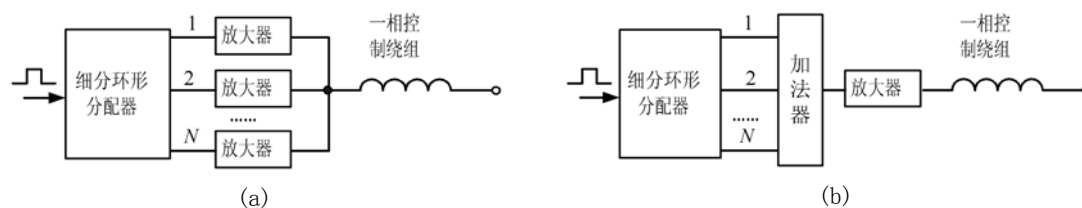


图 4-40 阶梯波形电流合成的原理图

(a) 先放大后合成；(b) 先合成后放大

(二) 双极性驱动

以上介绍的各种驱动电路只能使控制绕组中的电流向一个方向流动，适用于反应式步进电动机，而对于永磁式或混合式步进电动机，工作时要求定子磁极的极性交变，通常要求其绕组由双极性驱动电路驱动，即绕组电流能正、反方向流动。这样可以提高绕组利用率，增大低速时的转矩。

如果系统能提供合适的正负功率电源，则双极性驱动电路将相当简单，如图 4-41 (a) 所示。若 V_1 导通能提供正向电流，则 V_2 导通就能提供反向电流。然而大多数系统只有单极性的功率电源，这时就要采用全桥式驱动电路，如图 4-41 (b) 所示。若 V_2 和 V_3 导通提供正向电流，则 V_1 、 V_4 导通提供反向电流。

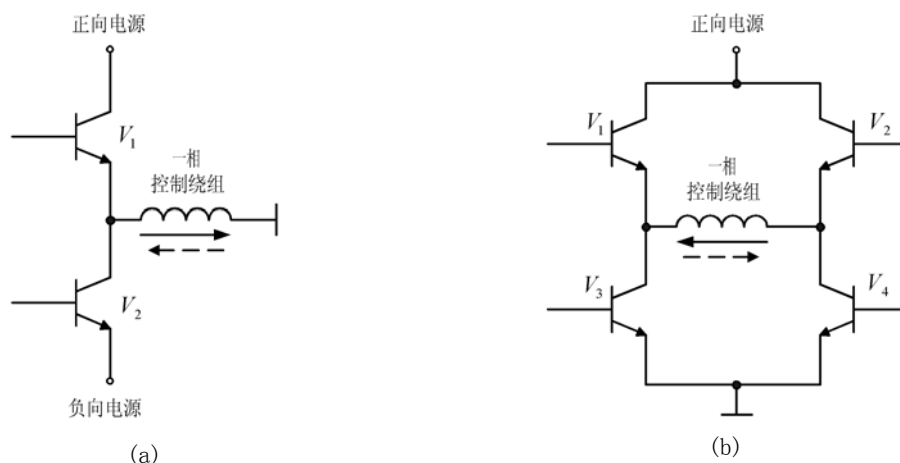


图 4-41 双极性驱动电源原理图

由于双极性驱动电路较为复杂，过去仅用于大功率步进电动机。但近年来出现了集成化的双极性驱动芯片，使它能方便地应用于对效率和体积要求较高的产品中。

下面以 L298 双 H 桥驱动器和 L297 步进电动机恒流斩波驱动器组成的双极性恒流斩波驱动电路为例，介绍集成化驱动电路的应用。

L297 是 ST 公司推出的一种步进电动机斩波驱动控制器，适用于双极性两相步进电动机或单极性四相步进电动机的控制。图 4-42 是它的原理框图。它主要包含下列三部分：

(1) 译码器（即脉冲分配器） 它将输入的走步时钟脉冲 (CP)、正/反转方向信号 (CW/CCW)、半步/全步信号 (HALF/FULL) 综合以后，产生合乎要求的各相通断信号。

(2) 斩波器 由比较器、触发器和振荡器组成。用于检测电流采样值和参考电压值，并进行比较，由比较器输出信号来开通触发器，再通过振荡器按一定频率形成斩波信号。

[illegible]

L298 双 H 桥驱动器,可接收标准 TTL 逻辑电平信号,H 桥可承受 46V 电源电压,相电流可达 2.5A,可驱动电感性负载。它的逻辑电路使用 5V 电源,功放级使用 5~46V 电压。下桥臂晶体管的发射极单独引出,并联在一起,以便接入电流取样电阻,形成电流传感信号。内部结构如图 4-43 所示。

与 L298 类似的电路还有 TSR 公司的 3717, 它是单 H 桥电路。SGS 公司的 SG3635 是单桥臂电路, IR 公司的 IR2130 则是三相桥电路。

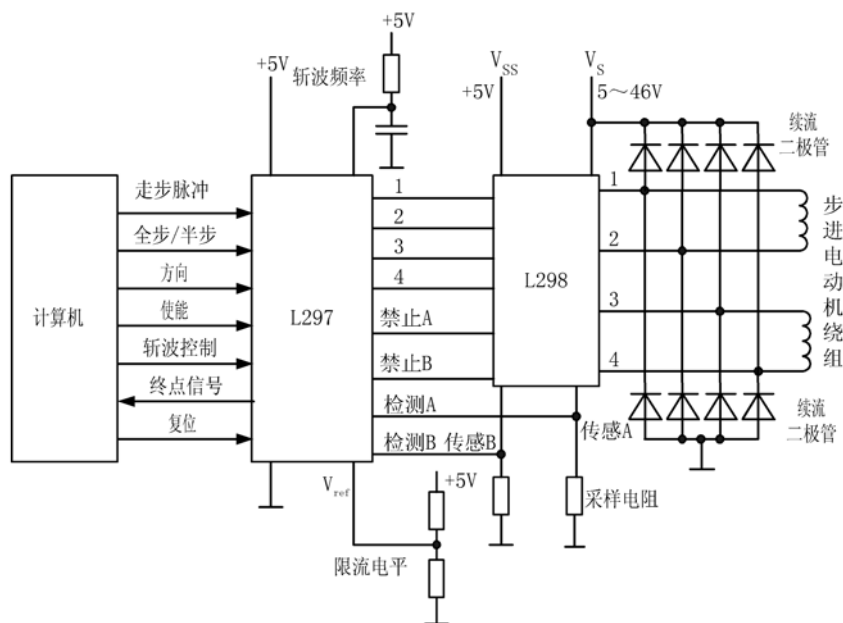


图 4-44 专用芯片构成的双极性斩波驱动电路

§ 4-7 步进电动机的控制与应用

一、步进电动机的控制

由于步进电动机能直接接收数字量信号，所以被广泛应用于数字控制系统中。较简单的控制电路是利用一些数字逻辑单元组成，即采用硬件的方式。但要改变系统的控制功能，一般都要重新设计硬件电路，灵活性较差。以微型计算机为核心的计算机控制系统为步进电动机的控制开辟了新的途径，利用计算机的软件或软、硬件相结合的方法，能使系统的功能大大增强，同时也提高了系统的灵活性和可靠性。

以步进电动机作为执行元件的数字控制系统，有开环和闭环两种形式。

1. 开环控制

步进电动机系统的主要特点是能实现精确位移、精确定位，且无积累误差。这是因为步进电动机的运动受输入脉冲控制，其位移量是断续的，总的位移量严格等于输入的指令脉冲数或其平均转速严格正比于输入指令脉冲的频率；若能准确控制输入指令脉冲的数量或频率，就能够完成精确的位置或速度控制，无需系统的反馈，形成所谓的开环控制系统。

步进电机的开环控制系统，由控制器（包括变频信号源）、脉冲分配器、驱动电路及步进电动机四部分组成，如图 4-45 所示。

开环控制系统的精度，主要取决于步距角的精度和负载状况。

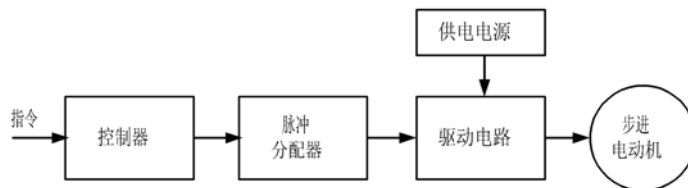


图 4-45 步进电动机开环控制原理框图

开环控制常常采用加减定位控制方式。因为步进电动机的启动频率要比连续运行频率小，所以开环控制的脉冲指令频率，只有小于电机的最大启动频率，电机才能成功启动。若电动机的工作频

率总是低于最高启动频率，当然不会失步，但没有充分发挥电机的潜力，工作速度太低。为此，常用加减速定位控制。电机开始以低于最高启动频率的某一频率启动，然后再逐步提高频率，使电机逐步加速，到达最高运行频率，电机高速转动。在到达终点前，降频使电机减速。这样就可以既快又稳地准确定位，如图 4-46 所示。由于步进电动机的电磁转矩受频率影响较大，所以负载的加减速控制不能像普通电机那样。为了实现加减速的最佳控制，往往是分段设计加速转矩和加速时间，采用微机控制来实现。

由于开环控制系统不需要反馈元件，结构比较简单、工作可靠、成本低。因而在数字控制系统中得到广泛的应用。

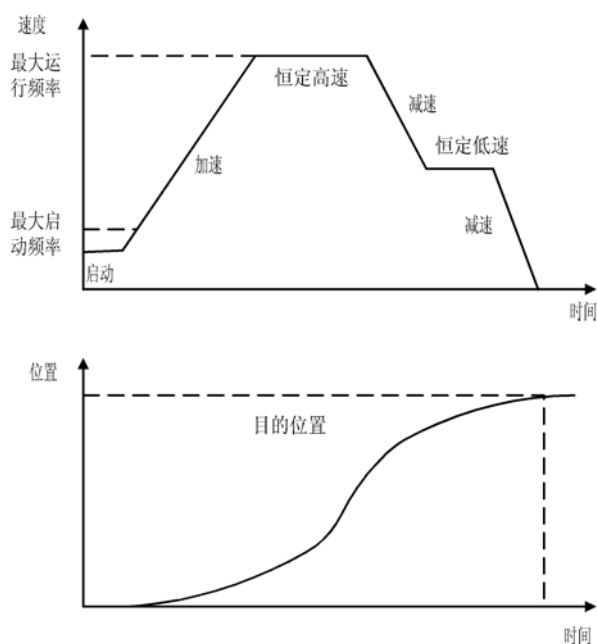


图 4-46 加减速定位过程

2. 闭环控制系统

在开环控制系统中，电机响应控制指令后的实际运行情况，控制系统是无法预测和监视的。在某些运行速度范围宽、负载大小变化频繁的场所，步进电动机很容易失步，使整个系统趋于失控。另外，对于高精度的控制系统，采用开环控制往往满足不了精度的要求。因此必须在控制回路中增加反馈环节，构成闭环控制系统，如图 4-47 所示。与开环系统相比多了一个由位置传感器组成的反馈环节。将位置传感器测出的负载实际位置与位置指令值相比较，用比较信号进行控制，不仅可防止失步，还能够消除位置误差，提高系统的精度。

闭环控制系统的精度与步进电动机有关，但主要是取决于位置传感器的精度。在数字位置随动系统中，为了提高系统的工作速度和稳定性，还有速度反馈内环。

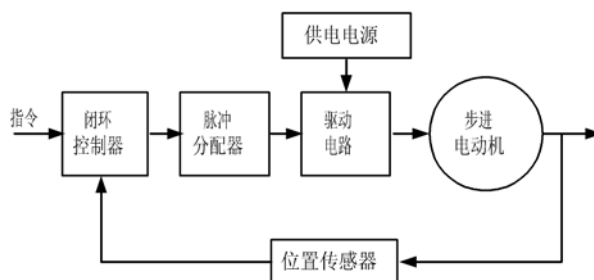


图 4-47 步进电动机闭环系统原理框图

二、步进电动机的应用

步进电动机的应用十分广泛，如机械加工、绘图机、机器人、计算机的外部设备、自动记录仪等等。它主要用于工作难度大、要求的速度快、精度高等场合。尤其是电力电子技术和微电子技术的发展为步进电动机的应用开辟了广阔的前景。下面举几个实例简单说明步进电动机的一些典型应用。

1. 数控机床

数控机床是数字程序控制机床的简称。它具有通用性、灵活性及高度自动化的特点。主要适用于加工零件精度要求高，形状比较复杂的生产中。它的工作过程是，首先应按照零件加工的要求和加工的工序，编制加工程序，并将该程序送入微型计算机中，计算机根据程序中的数据和指令进行大量计算和控制；然后根据所得的结果向各个方向的步进电动机发出相应的控制脉冲信号，使步进电动机带动工作机构按加工的要求依次完成各种动作，如转速变化、正反转、起停等等。这样就能自动地加工出程序所要求的零件。图 4-48 为数控机床方框图，图中实线所示的系统为开环控制系统，在开环系统的基础上，再加上虚线所示的测量装置，即构成闭环控制系统。

2. 软磁盘驱动系统

软磁盘存贮器是一种十分简便的外部信息存贮装置。当软磁盘插入驱动器后，驱动电机带动主轴旋转，使盘片在盘套内转动。磁头安装在磁头小车上，步进电动机通过传动机构驱动磁头小车，步进电动机的步矩角变换成磁头的位移。步进电动机每行进一步，磁头移动一个磁道。如图 4-49 所示。

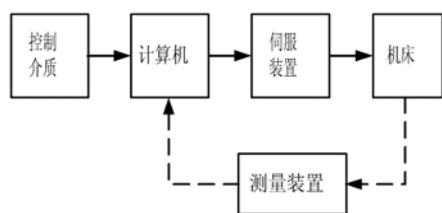


图 4-48 数控机床方框图

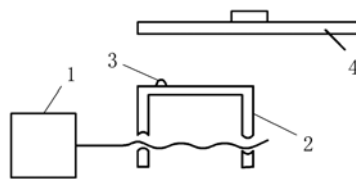


图 4-49 软磁盘驱动系统

1-步进电动机 2-磁头小车 3-磁头 4-软磁盘

3. 针式打印机

一般针式打印机的字车电机和走纸电机都采用步进电动机，如 LQ-1600K 打印机。在逻辑控制电路（CPU 和门阵列）的控制下，走纸步进电动机通过传动机构带动纸滚转动，每转一步使纸移动一定的距离。字车步进电动机可以加速或减速，使字车停在任意指定位置，或返回到打印起始位置。字车电机的步进速度是由一单元时间内多个驱动脉冲所决定的，改变步进速度可产生不同的打印模式中的字距。

小 结

步进电动机是将控制脉冲信号变换为角位移或直线位移的一种微特电机。反应式步进电动机的工作原理是建立在磁力线力图通过磁阻最小的路径，产生磁阻转矩来驱动转子转动。输出的角位移或线位移量与脉冲数成正比，转速与脉冲的频率成正比，转向取决于控制绕组中的通电顺序。它能按照控制脉冲的要求，快速启动、反转、制动和无级调速。正常工作时能够不失步，步距精度高，每步停止转动时具有自锁能力。因此，被广泛应用于数字控制系统中作执行元件用。

步进电动机每相绕组中的通电是脉冲式的，每输入一个控制脉冲信号，转子转过的角度称为步距角，步距角的大小由转子齿数和运行拍数所决定。由于同一台步进电动机既可用单相通电方式也

可用双相通电方式运行，所以它有两个步距角。

步进电动机静转矩与失调角间的关系称为矩角特性，在 $\theta=\pm 90^\circ$ 时有最大静转矩，它是步进电动机的主要性能指标之一，一般增加通电相数能提高它的数值。

动态性能直接影响系统工作的可靠性和快速性。步距角越小，运行的稳定性越好。只有负载转矩小于最大负载转矩，电机才能带负载作步进运行；运行拍数和矩角特性的波形对最大负载转矩有很大影响。由于控制绕组中电感的影响，绕组中的电流不能突变，致使步进电动机的转矩随频率增高而减小。在动态时的主要特性和性能指标有：启动矩频特性和运行矩频特性，启动频率和运行频率。尽可能提高电机转矩，减小电机和负载的惯量，是改善动态性能的有效途径。

当脉冲频率等于振荡频率的 $1/K$ 时，惯性转子会发生振荡甚至失步，所以在使用时应避免在共振频率下运行。为了消弱振荡现象，一般都装有机机械阻尼器。

步进电动机除常用的反应式外还有永磁式和混合式步进电机，尤其是混合式步进电机近几年发展较快。它们的原理大致和反应式相似，所不同的是转子也有磁极，工作时两个磁动势共同作用在磁路上。

步进电动机需要有一个专门电源来驱动，驱动电源对电机的运行性能有很大的影响。要改善运行性能，必须从电机和电源两方面着手。按绕组中电流的流向分为单极性和双极性驱动两种，使用时要选择能满足系统要求的电源驱动电动机。

步进电动机系统有开环和闭环控制两种。开环系统因为结构简单、成本低应用较多；闭环系统通常用于高精度的场合。

思考题与习题

1. 如何控制步进电动机输出的角位移或线位移量？步进电机有哪些可贵的特点？
2. 怎样确定步进电动机转速的大小？与负载转矩大小有关系吗？怎样改变步进电动机的转向？
3. 何为反应式步进电动机的步距角？它与哪些因素有关？六相 12 极步进电动机，若在单六拍、双六拍及单双十二拍通电方式下，步距角的电角度各为多少？
4. 有一台四相反应式步进电动机，其步距角 $1.8^\circ/0.9^\circ$ ，试问①转子齿数为多少？②写出四相八拍方式的一个通电顺序，并画出各相控制电压波形图；③在 A 相绕组测得电源频率为 400Hz 时，其每分钟的转速为多少？
5. 什么是反应式步进电动机的静稳定区和初始稳定平衡位置？最大静转矩与哪些物理量有关？
6. 步进电动机的负载转矩小于最大静转矩时，电机能否正常步进运行，为什么？
7. 反应式步进电动机的启动频率和运行频率为什么不同？连续运行频率和负载转矩有怎样的关系？为什么？
8. 一台四相步进电动机，若单相通电时矩角特性为正弦波，其幅值为 T_{\max} ，请问
(1) 两相同时通电时的最大静转矩；
(2) 分别作出单相及两相通电时的矩角特性；
(3) 求四相八拍运行方式时的极限启动转矩。
9. 设步进电动机工作在三相单三拍运行方式，其通电顺序为 A—B—C—A，相应的矩角特性如图 4-50 所示。

- (1) 指出理想空载时 B 相静稳定区和动稳定区；
- (2) 若步进电动机的负载转矩为 T_L ，分析由 B 相通电改变为 C 相通电时，步进电动机的运动情况，并指出 B 相的静稳定区和动稳定区。

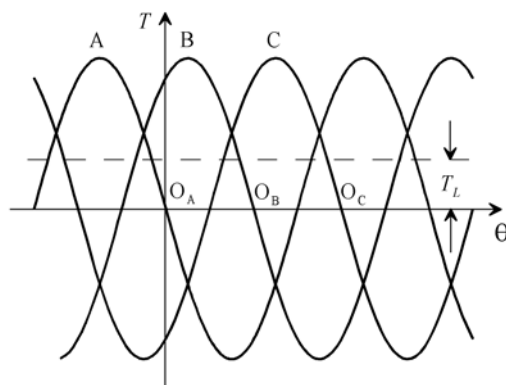


图 4-50 三相单三拍运行矩角特性

10. 简要说明影响反应式步进电动机启动频率的主要因素。
11. 一台三相反应式步进电动机，步矩角 $\theta_s = 3^\circ/1.5^\circ$ ，已知它的最大静转矩为 $0.685\text{N}\cdot\text{m}$ ，系统总的转动惯量为 $1.725 \times 10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，试求该电机的自由振荡频率和周期。
12. 简要说明步进电动机的低频共振现象。
13. 反应式步进电动机与混合式步进电动机在作用原理上有什么相同和不同之处？