

第 5 章 步进电动机

(Stepping Motor)

5.1 概述

5.1.1 步进电动机的发展历程

步进电动机是一种将数字式电脉冲信号转换成机械位移(角位移或线位移)的机电元件,它的机械位移与输入的数字脉冲信号有着严格的对应关系,即一个脉冲信号可以使步进电动机前进一步,所以称为步进电动机。这种电机输入的常常是脉冲电流,所以又称为脉冲电动机。步进电动机的特点主要就在于其脉冲驱动的形式,正是这个特点,步进电动机可以和现代的数字控制技术相结合,成为比较理想的执行元件。

最早的步进电动机问世于 19 世纪 30 年代,其原理是基于电磁铁的作用。早期的步进电动机由于性能较差,没有得到很好的利用。1920 年英国海军将反应式(磁阻式)步进电动机用作定位控制。20 世纪 50 年代后期晶体管的发明也逐渐应用在步进电机上,使数字化的控制变得更为容易。步进电动机在工业上应用获得大发展始于 1970 年左右,步进电动机由反应式(磁阻式)步进电动机逐步发展到永磁式步进电动机、混合式步进电动机。

随着电子技术、精密机械加工,特别是数字计算机的高速发展和数字控制系统的需要,使步进电动机获得了飞速的发展。20 世纪 60 年代美国 GE 公司发明了两相混合式步进电机,德国百格拉公司(Berger Lahr)于 1973 年发明了五相混合式步进电机,克服了两相步进电机振动噪音大、只能用于简单应用场合的缺点。由于五相步进电机技术较为复杂,百格拉公司把交流伺服原理应用到步进电机系统中,于 1993 年又推出了性能更加优越的三相混合式步进电机。目前,步进电动机在数控机床、计算机外围设备、钟表、包装机械、食品机械中得到广泛应用。从发展趋势来讲,步进电动机已经与直流电动机、异步电动机以及同步电动机并列,成为电动机的一种基本类型。

5.1.2 步进电动机的分类及特点

步进电动机的种类很多,从工作原理上主要分为三大类:反应式步进电动机,永磁式步进电动机和混合式(感应子式)步进电动机。步进电动机还可按控制绕组的相数分为两相、三相、四相、五相等;按输出转矩大小,步进电动机又可以分为伺服式步进电动机(输出转矩小)和功率式步进电动机(输出转矩大)。

步进电动机按控制原理可分为以下三类:

(1) 反应式步进电动机(Variable Reluctance)。

又称磁阻式步进电动机,是步进电动机中结构最为简单、最先发展的一种。其结构

特点是定子有若干对(至少三对)磁极,其上装有控制绕组,极靴处带有均匀分布的小齿,转子则是周向上有均布小齿而无任何绕组,无论定子磁极,还是转子铁芯,均由软磁材料的冲片叠制而成。如图 5-1 所示是三相反应式步进电动机的结构。这种类型国外已经淘汰。

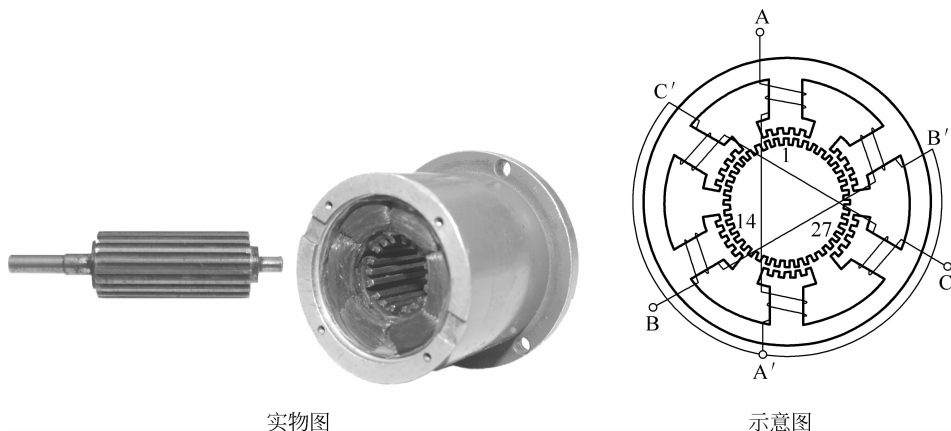


图 5-1 三相反应式步进电动机

(2) 永磁式步进电动机(Permanent Magnet)。

永磁式步进电动机的特点是转子由一对或多对极的星型永久磁铁组成,定子上相应有二相或多相控制绕组。转子永久磁铁磁极数与定子每相控制绕组的极数对应相等,且通常两者的极宽也相同,典型的结构如图 5-2 所示。

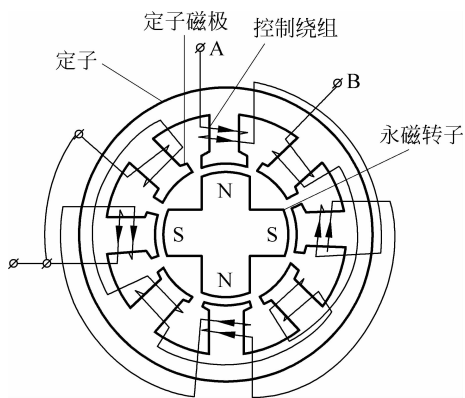


图 5-2 永磁式步进电动机

通常这类电动机的定子极冲制成爪形,因此又称为爪极式步进电动机。它是把绕满漆包线的注塑骨架套在定子爪极板上,再把极板和冲制而成的机壳点焊在一起,即形成一台电动机。这种结构充分体现微特电机加工中的少切削、无切削化,因而具有结构简单、工艺性好、生产效率高,成本低廉等优点。对市场而言,“够用为止”是个基本准则,在够用的前提下,追求最低廉的价格。而爪极式步进电动机正符合这个市场准则。因而一经面世就得到广泛的应用,甚至取代了一部分混合式步进电动机,被用于打印机、复印机、传真机以及空调器等各个领域。

(3) 混合式步进电动机(Hybrid, HB)。

这种步进电动机无论是从结构,还是从运行原理来看,都具有反应式和永磁式的综合特点。它的结构形式是定子具有与反应式步进电动机类似的结构,即带小齿的磁极上装有集中的控制绕组;转子则由环形永久磁铁且两端罩上二段帽式铁芯构成。这两段铁芯像反应式步进电动机那样,也带有均布小齿,但两者装配位置的特点是从轴向看去彼此相互错开半个齿距。定子常制成四相八极,典型结构如图 5-3 所示。

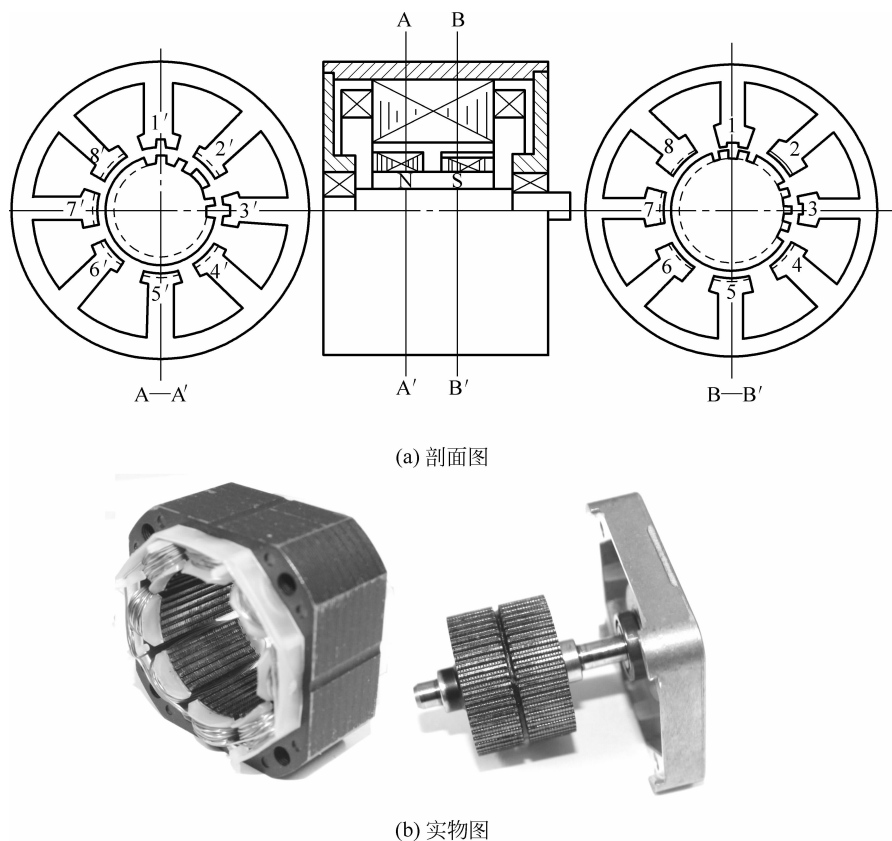


图 5-3 永磁感应子式步进电动机

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,结构简单,调试方便,工作可靠,成本低。当然采取一定的相应措施后步进电动机也可以用到闭环控制系统。

步进电动机的主要优点包括:

① 直接实现数字控制,数字脉冲信号经脉冲分配器和功率放大后可直接控制步进电动机,无须任何中间转换。

② 控制性能好、控制原理简单。速度与脉冲频率成正比,通过改变脉冲频率可在较宽的范围内实现均匀的调速,并能快速而方便地启动、反转和制动;位移量与脉冲数成正比,可用开环方式控制位移。

③ 无接触式,没有电刷和换向器也是步进电动机的一个关键性优点。

④ 抗干扰能力强,在步进电动机的负载能力范围内,步距角不受电压、负载以及周围温度变化等各种干扰的影响,保持运行的精度。

⑤ 误差不会长期积累,步进电动机每运行一步所转过的角度与理论步距角之间总有一定的误差,在一转之内从某一步到任何一步将会产生一定的积累误差,但每转一圈的积累误差为零。

⑥ 具有自锁能力(反应式)和保持转矩(永磁式)。

步进电动机的缺点是:

- ① 运动增量或步距角是固定的。
 - ② 采用普通驱动器(如单一电压型功放)时效率低,相当大一部分输入功率转为热能耗散掉。
 - ③ 承受惯性负载的能力较差。
 - ④ 输出功率较小。因为步进电动机在每一步运行期间都要将电流输入或引出电动机,所以对于需要大电流的大功率电机来说,控制装置和功率放大器都会变得十分复杂、笨重和不经济。所以步进电动机的尺寸和功率都不大。
 - ⑤ 在低速运行时有时发生振荡现象,需要加入阻尼机构或采取其他特殊措施。
 - ⑥ 目前主要用于开环系统中,闭环控制时所用元件和线路比较复杂。
- 与交流电动机不同,步进电动机不能直接用直流或交流电源来驱动,需要专门的电源和驱动器,使定子磁极上的控制绕组按顺序依次通电,在定子和转子的气隙空间里形成步进式磁极轴旋转,转子则在电磁转矩作用下实现步进式旋转。

5.2 反应式步进电动机的工作原理

使电动机转动的电磁转矩可以由两种方式产生:一种是基于电磁作用产生,另一种是由磁阻原理产生。在直流电动机中,定子是电磁(或永磁)体,转子绕组则有电流通过产生磁场;交流同步电动机则是定子由电流通过定子绕组产生旋转磁场,转子由电磁(或永磁)体做成。这两种电动机的电磁转矩是定子、转子两个磁场相互作用产生的结果,它们属于第一种形式。在第二种形式中,电磁转矩则是由定子、转子间气隙磁阻的变化产生的,当定子绕组通电时,产生一个单相磁场作用于转子,由于磁场在转子与定子之间的分布要遵循磁阻最小原则(或磁导最大),即磁通要沿着磁阻最小(或磁导最大)的路径闭合。因此,当转子产生的磁场的磁极轴线与定子磁极轴线不重合时,便会有磁阻力作用在转子上并产生转矩使其趋于磁阻最小的位置,即两轴线重合的位置。

5.2.1 反应式步进电动机的结构特点

反应式步进电动机又称为磁阻式步进电动机,是步进电动机中结构最简单的一种。永磁式和混合式步进电动机的基本原理与反应式步进电动机相似,因此首先介绍反应式步进电动机,其结构特点是定子有若干对磁极,其上装有控制绕组,极靴处带有均匀分布的小齿,转子则是周向上有均步小齿而无任何绕组。无论定子磁极,还是转子铁芯,均由软磁材料的冲片叠制而成。

反应式步进电机利用转子上两个方向的磁阻不同而产生的磁阻转矩(反应转矩),使转子转动。按结构不同可分为单段式和多段式两种。

1. 单段式

单段式又称为径向分相式,由定子和转子两大部分组成。定子由铁芯、绕组、外壳、端盖等部分组成。定子铁芯内圆上分布着若干个大齿,每个大齿称为一个磁极。定子的每个磁

极上都装有绕组,称为控制绕组。所有的控制绕组接成 m 相。每一相控制绕组包括两个磁极绕组,分别装在同一直径的相对两个磁极上。以如图5-1所示的三相反应式步进电动机为例,定子铁芯内圆上分布着三对磁极,AA'相为一相控制绕组,所有控制绕组共组成三相。因此,步进电动机的磁极对数 p 与相数 m 相等,即 $2p=2m$ 。在定子磁极的极靴上开有一些均匀分布的小齿,转子上没有绕组,转子的齿宽和齿距与定子上的小齿完全相同。

齿距是相邻两齿中心线(或称齿轴线)的夹角,又称为齿距角,按下式计算:

$$\theta_{\text{ch}} = \frac{360^\circ}{Z_r} \quad (5-1)$$

式中, θ_{ch} ——齿距角; Z_r ——转子齿数。

反应式步进电动机的转子齿数 Z_r 必须满足下述条件,在某一极下若定子、转子的齿对齐时,则要求在相邻极下的定子、转子齿之间错开转子齿距的 $1/m$ 倍,即它们之间在空间位置上错开 $360^\circ/(mZ_r)$ 角。因此,若定子的一个磁极下的定子、转子的齿对齐时,在定子同一相的另一个磁极下的定子、转子的小齿也是对齐的。为满足上述要求,转子齿数 Z_r 必须满足下式

$$\frac{Z_r}{2p} = K \pm \frac{1}{m} \quad (5-2)$$

即

$$Z_r = 2p \left(K \pm \frac{1}{m} \right) = 2pK \pm 2 \quad (5-3)$$

式中, K 为正整数; p 为极对数, m 为相数, $p=m$ 。

由式5-2可知,这种反应式步进电动机在每一个极距下(即相邻的定子磁极轴线之间)的转子齿数不是整数,与整数差 $1/m$ 。

2. 多段式

多段式又称为轴向分相式结构。定子和转子铁芯均沿轴向按相数分成三段或三段以上,每相各自为独立的一段,在磁路上彼此绝缘。如图5-4所示,转子铁芯分成三段,即三相步进电动机的典型定子、转子模型,每段的结构与单段式径向分相电动机结构类似。为使电动机能够旋转,定子各段依次错开 $1/m$ 齿距,转子各段铁芯的齿完全对齐。这种结构使电机的定子空间利用率较好,环形控制绕组绕制较方便。由于转子可做成细长型,转子的惯量较低。步距角也可以做得较小,启动和运行频率较高。但是在制造时,铁芯分段和错位工艺较复杂,精度不易保证。

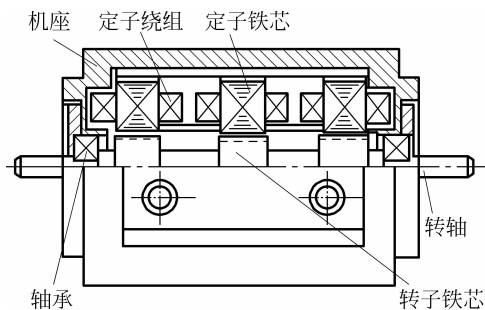


图 5-4 多段式轴向磁路步进电动机

5.2.2 反应式步进电动机工作原理

反应式步进电动机是由通电相控制绕组使该相磁极建立磁场,由于转子齿和槽的磁阻(磁导)的差异,当定子齿轴线与转子齿轴线不一致时,磁极对转子齿将产生吸力,进而形成

电磁转矩——反应转矩(磁阻转矩),并最终使转子齿轴线转到与定子磁极齿轴线一致的位置,使磁路的磁导最大而磁阻最小。如果按照一定的顺序给各相控制绕组轮流通电,将在定转子气隙空间形成步进式磁极轴旋转,转子在反应式电磁转矩的作用下,随之做步进式转动。

步进电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,即转子每一步所转过的角度,记为 θ_b 。

每个通电周期走 N 步,转过一个齿距角 θ_{ch} , Z_r 是转子齿数,故有

$$\theta_b = \frac{\theta_{ch}}{N} = \frac{360^\circ}{Z_r N} \quad (5-4)$$

图 5-5 给出了四相反应式步进电动机局部展开图。为了直观,把步进电机的定子和转子展开成直线,它有 8 个控制磁极(图中仅画 5 个)。定子每个磁极上的小齿数是 5 个,利用式(5-3),取 $K=6$ 并取十号,可得转子齿数 Z_r 是 50,每相邻两磁极中心线夹角——极距 $\alpha_\tau = 360^\circ/8 = 45^\circ$,转子齿距角

$$\theta_{ch} = \frac{360^\circ}{Z_r} = \frac{360^\circ}{50} = 7.2^\circ$$

定子相邻极距间所含转子齿数为

$$Z_\tau = \frac{\alpha_\tau}{\theta_{ch}} = 6 \frac{1}{4}$$

其不是整数。如图 5-5 所示,A 相处于通电状态时,建立以 A—A' 为轴线的磁场,转子齿轴线与定子齿轴线一一对齐,而 B 相定子齿轴线顺时针超前转子齿轴线 $1/4$ 齿距(1.8°); C 相则超前 $1/4 \times 2$ 齿距(3.6°); D 相则超前 $3/4$ 齿距,也即逆时针超前转子齿轴线 $1/4$ 齿距。

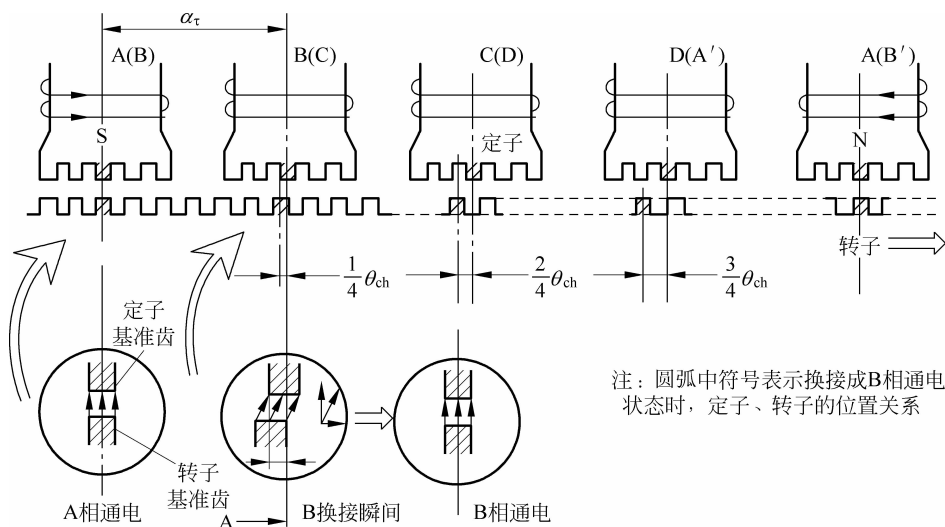
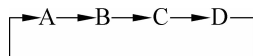


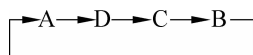
图 5-5 四相反应式步进电动机的工作原理

当 A 相断电,换接 B 相通电时,转子将在 B 相控制磁场产生的磁阻转矩作用下顺时针转过 $1/4$ 齿距,而与 B 相下定子齿一一对齐,这时 C 相磁极下的定子齿轴线顺时针超前转子齿轴线 $1/4$ 齿距(1.8°)。如此,依次按 C 相、D 相、A 相……继续不断地换接,即按



的顺序轮流循环给各相通电时,转子将沿顺时针方向一步一步不停地转动起来。每一步转过的角度是 $1/4$ 齿距(1.8°)。

显然经过 4 次换接通电状态,就完成了—个循环。每完成一个循环,转子将沿 ABCD 方向转过一个齿距角,如果当 A 相断电,不是换接 B 通电,而是换接 D 相通电,并依次换接 C 相、B 相……即按



的规律循环通电,则步进电动机转子将反向旋转。显然,改变通电状态的相序可改变步进电动机的转向。

称每一次通电状态的换接为拍,把完成一个通电状态循环绕组换接的通电状态次数称做拍数,记为 N 。在通断电的一个循环(周期)内,改变一次通电状态也称为 1 拍。上面这种每次改变通电状态时只有一相控制绕组通电的方式称为四相单四拍。其中“四相”表示电机的相数,“单”表示每种通电状态时只有一相控制绕组通电,“四拍”表示电机拍数是 4。从图 5-6 可以看出,步进电动机的定子磁场做步进式旋转。

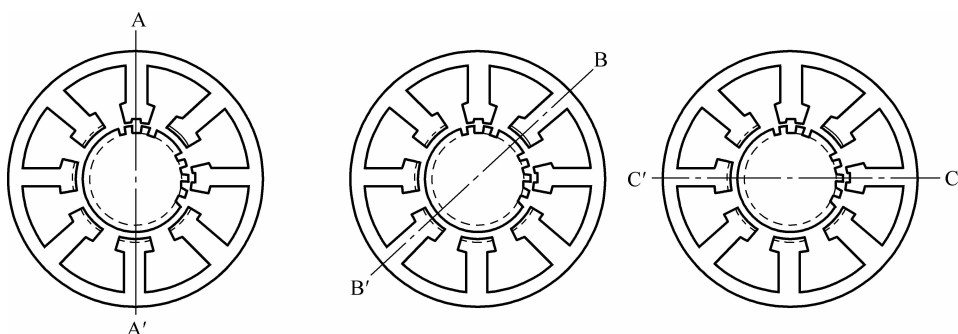
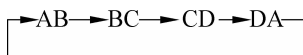


图 5-6 一相通电时的磁场情况(D 相未画出)

上面这种只有一相绕组通电的运行方式有一个缺点,在电流切换过程即通电状态改变过程中,有一瞬间可能所有的定子控制绕组都不通电,电磁转矩瞬间为零,这就使得电磁转矩在电机运行中波动很大。为了解决这个问题,可以使步进电动机控制绕组两相或多相同时通电。

两个控制绕组同时通电,即 A、B 绕组同时建立磁场,然后换接 B、C 绕组同时通电,以此类推,通电状态的变化规律为



这种每次都有两相控制绕组同时通电的循环方式称为四相双四拍。“双”字表示每次都有两相绕组同时通电。从图 5-7 可见当 A、B 两相同时通电时,转子稳定平衡位置的特点是转子齿既不与 A 相磁极齿对齐,也不与 B 相的磁极齿对齐,而是与 A、B 两相的磁极齿分别错开 $\pm 1/8$ 齿距角。当换接为 B、C 两相同时通电时,转子齿相对 B、C 相也错开 $\pm \theta_{ch}/8$,显

然步距角仍为 $\theta_{ch}/4$ 。控制绕组改变 4 次通电状态时,完成一个通电循环,转子转过一个齿距角,这些和单相通电状态时相同。

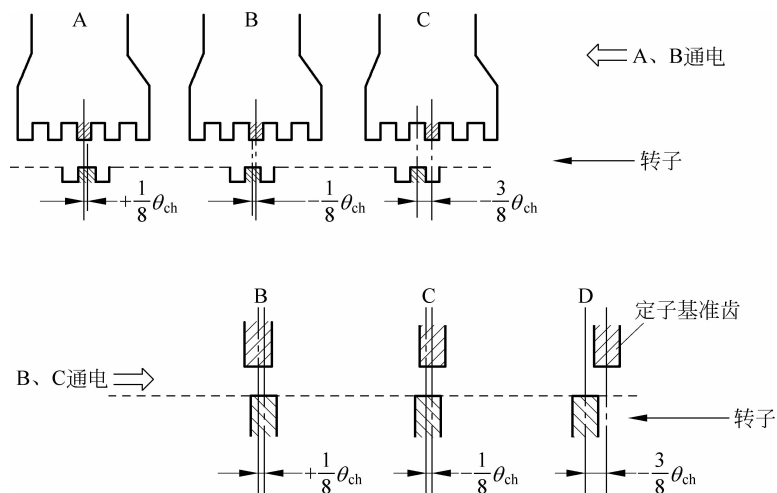
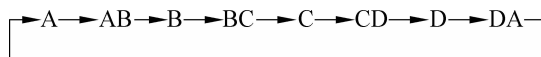


图 5-7 四相双四拍运行时的平衡位置

另外,四相步进电动机还可采用四相八拍的通电方式,即按



的顺序通电,这是四相单四拍和四相双四拍通电方式的结合,不难看出,它的每一拍,例如 A 相通电换接成 A、B 相通电状态,步进电动机仅转过 $\theta_{ch}/8$ (见图 5-5 和图 5-7)。同样,A、B 相通电状态换接成 B 相通电状态也将如此。继续按上面的次序轮流通电,经过八拍将完成一个循环。显然,步距角仅是四相单四拍或四相双四拍的一半。

步进电动机控制绕组同时通电的相数及通断电的转换规律称为分配方式。一般步进电动机可按两种基本方式运行:其一,运行拍数等于相数,称为单拍制($N=m$);其二,运行拍数等于相数的 2 倍($N=2m$),称为双拍制。

增加拍数和转子齿数可以减小步距角,有利于提高控制精度。拍数 N 随着相数 m 的增加而增加,但相数越多,电源及电机的结构也越复杂,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。对同一相数既可以采用单拍制,也可以采用双拍制。采用双拍制时步距角为单拍制时的一半。所以一台步进电动机可有两个步距角,如 $1.2^\circ/0.6^\circ$ 、 $1.5^\circ/0.75^\circ$ 、 $3^\circ/1.5^\circ$ 等。减小步距角的另一种方法是采用目前广泛使用的细分电路,见 5.6 节。

步进电动机既可以做单步运行(或者说按控制指令转过一定角度),也可以连续不断地旋转,进行角速度控制。当外加一个控制脉冲时,即每一拍,转子将转过一个步距角,这相当于整个圆周角的 $\frac{1}{NZ_r}$,也就是 $\frac{1}{NZ_r}$ 转。如果控制脉冲的频率为 f ,转子的转速将是

$$n = \frac{60f}{NZ_r} (\text{r/min}) \quad (5-5)$$

可见,步进电动机的转速将由控制脉冲频率(f)、运行拍数(N)和转子齿数(Z_r)决定。改变脉冲频率可对步进电动机实现调速、快速启动、反转和制动也可由控制脉冲的频率变化灵活地实现。

5.3 反应式步进电动机的静态特性

对运行中的步进电动机停止输入控制脉冲,并保持最后一拍的控制绕组继续通入恒定不变的电流——直流电时,通电相磁极的径向电磁吸力将保持转子固定在某一位置上不动,这就是反应式步进电动机所特有的自锁能力。称这种通电状态不变条件下,自锁能力所保持的步进电动机工作状态为静止工作状态。静态特性主要指转矩和偏转角的关系。下面就来讨论步进电动机的静态特性。

5.3.1 电角度

从步进电动机的工作原理可看出,无论以何种方式——单拍制或双拍制通电,完成一个通电循环,转子将转过一个齿距角。再经过一个循环,转子将重复刚才的运动,继续转过一个齿距。因此步进电动机的特性完全可由一个齿距范围(一个齿与一个槽)内的特性来代表。定义电角度 θ_e 等于机械角度与转子齿数乘积。

$$\theta_e = \theta Z_r \quad (5-6)$$

则用电角度表示的齿距角 θ_{che} 为

$$\theta_{che} = 360^\circ(\text{电角度}) = 2\pi(\text{电弧度}) \quad (5-7)$$

于是电角度表示的步距角为

$$\theta_{be} = \frac{\theta_{che}}{N} = \frac{360^\circ}{N}(\text{电角度}) = \frac{2\pi}{N}(\text{电弧度}) \quad (5-8)$$

这样无论转子齿有多少个,以电角度表示的齿距角和步距角与齿数无关。

由于步进电动机转子与定子的相对位置可以用一个定子齿和一个转子齿的相对位置来描述,今后,将用定子、转子齿轴线(或称齿中心线)的相对位置来表示转子的相对位置,称转子齿轴线 θ_{z0} 和定子齿轴线 θ_{d0} 的夹角为转子的偏转角,用电角 θ_e 来表示,如图5-8所示。

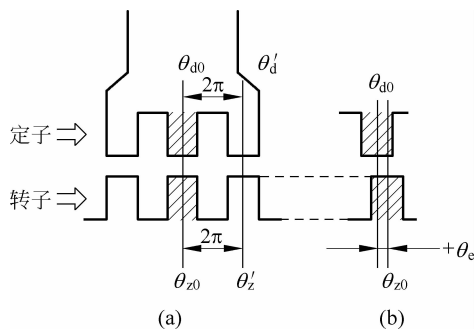


图 5-8 用电角度表示的齿距角

5.3.2 能量关系

反应式步进电动机定子对转子的径向吸力和切向反应力矩都是由控制相绕组通电建立的磁场产生的。当对一相控制绕组开始通电时,有

$$U_a = i_a r_a + \frac{d\Psi}{dt} \quad (5-9)$$

式中, U_a ——单相控制绕组所加控制电压;

i_a ——控制电流;

r_a ——控制绕组电阻;

Ψ ——控制绕组产生的磁链。

在上式两边各乘以 $i_a dt$, 并在时间 t 内积分, 就可得到能量平衡方程。

$$\int_0^t U_a i_a dt = \int_0^t i_a^2 r_a dt + \int_0^t i_a d\Psi \quad (5-10)$$

因为在时间 t 内磁链是从 0 变到 Ψ , 故上式可写成

$$\int_0^t U_a i_a dt = \int_0^t i_a^2 r_a dt + \int_0^\Psi i_a d\Psi$$

可见, 控制绕组通电提供的电能一部分转换为电阻发热损耗 $\int_0^t i_a^2 r_a dt$, 另一部分则为控制极磁场储备了电磁能 $\int_0^\Psi i_a d\Psi$ 。它是反应力矩的能源, 步进电动机转子齿相对定子齿偏转所做的机械功正是依靠上述储备的电磁能。

由于通电状态不变, 故设控制绕组电流为一稳态值不变 $I_a = \frac{U_a}{r_a}$, 则转子运动之前控制磁极所储存的磁能为

$$W_1 = \int_0^{\Psi_1} i_a d\Psi = \int_0^{\Psi_1} \frac{I_a}{\Psi_1} \Psi d\Psi = \frac{1}{2} I_a \Psi_1 \quad (5-11)$$

设转子在平衡位置角处转动了一个微小角度 $\Delta\theta$, 则定子控制磁极与转子之间的耦合气隙面积减小, 气隙磁阻增加, 气隙磁链及气隙磁能均减小。设气隙磁链减少为 Ψ_2 , 磁能减小为 W_2 , 按能量守恒定律, 转子转动时变成机械功的磁能和实际所做的机械功相等, 有

$$W_1 = T_{em} \Delta\theta + W_2$$

从式(5-11)可得

$$T_{em} \Delta\theta = W_1 - W_2 = \frac{1}{2} I_a (\Psi_1 - \Psi_2) = \frac{1}{2} I_a \Delta\Psi \quad (5-12)$$

由上式可知, 在电磁力矩的作用下, 转子总是趋向于使磁场能量增加, 并达到最大。

从式(5-12)可得反应转矩为

$$T_{em} = \frac{1}{2} I_a \frac{\Delta\Psi}{\Delta\theta}$$

取极限值

$$T_{em} = \frac{1}{2} I_a \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (5-13)$$

设每相控制绕组的匝数为 W_k , 绕组电流 I_a 不变, 则

$$T_{em} d\theta = \frac{1}{2} W_k I_a d\Phi_k = \frac{1}{2} F_k d\Phi_k \quad (5-14)$$

式中, Φ_k ——气隙磁通;

F_k ——气隙磁势。

又 $\Phi_k = \frac{F_k}{\Lambda_k}$, Λ_k ——气隙磁导。

则

$$T_{em} = \frac{1}{2} F_k^2 \frac{d\Lambda_k}{d\theta} = \frac{1}{2} Z_r F_k^2 \frac{d\Lambda_k}{d\theta_e} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (5-15)$$

式中, Z_r 是转子齿数; $d\Lambda_k/d\theta_e$ ——气隙磁导对转子偏转电角度的变化率。

上式表明, 步进电动机的静态转矩与控制磁势的平方和磁导变化率有关。当转子齿相对定子齿处于不同位置时, 气隙磁导值是不同的。这种步进电动机产生转矩的条件是 $d\Lambda_k/d\theta_e \neq 0$, 如转子齿与定子齿对齐时(见图 5-8(a)), 气隙磁导最大, 静转矩为 0; 转子齿与定子槽对齐时, 磁导最小, 静转矩最大, 其他位置介于两者之间, 显然, 气隙磁导是转子位置角 θ_e 的函数, 欲提高静态转矩, 可以设法提高控制磁势 F_k 和磁导变化率 $d\Lambda_k/d\theta_e$ 。

5.3.3 矩角特性

步进电动机的静态运行性能可以由矩角特性来描述, 矩角特性是不改变控制绕组的通电状态, 也就是保持一相或几相控制绕组通直流电时, 电磁转矩与偏转角的关系, 即 $T_{em} = f(\theta_e)$ 。下面分别讨论单相和多相控制的矩角特性。

1. 单相控制的矩角特性

单相控制的矩角特性是在单相控制绕组通电状态不变的条件下, 控制磁极对转子作用的电磁转矩与转子偏转角的关系。

现以步进电动机的 A 相控制绕组通电为例(见图 5-9), 实验分析矩角特性。当转子不受任何外转矩的作用时转子基准齿轴线 θ_{z0} 与定子基准齿轴线 θ_{d0} 重合, 即偏转角 $\theta_e = 0$ 。根据力学原理, 转子所受切向电磁转矩 $T_{emA} = 0$ ($T_{em} = f_q \cdot r$, r 为转子半径, 而 f_q 则为图 5-9(c) 中的静态电磁力), 这是理想空载情况下的平衡位置, 称为零位或初始稳定平衡位置(见图 5-9(a) 和图 5-9(c) 之 2)。

如果顺时针方向对转子施加外转矩, 转子将偏转, 使转子至 θ_e 角时停止并保持平衡, 同样, 依据力学平衡原理, 此刻步进电动机产生了与外转矩大小相等、方向相反的电磁转矩(见图 5-9(c) 之 3), 当撤去外转矩后, 转子将在电磁转矩 T_{emA} 作用下向恢复初始平衡位置方向旋转。实验表明, 继续增大外转矩, 可在 $\theta_e = \pi/2$ 时, 获得电磁转矩的最大值, 称之为最大静态转矩(T_{jmax})。再继续使转子偏转($\theta_e > \pi/2$), 逐渐减小外力矩也可使步进电动机处于新的平衡, 这说明对应的电磁转矩也逐渐减小了。而且, 当转子偏转至 $\theta_e = \pi$ 时, 即使外转矩为零, 步进电动机也可以处于平衡状态, 这就是转子齿与定子槽对应的位置(见图 5-9(c) 之 6)。此时转子受到相邻两个定子齿相同的拉力, 总的转矩为零。实践表明, 这是一种很难得到的状态——不稳定平衡。继续增大 θ_e , 则转子齿将受到另一个定子齿的作用, 转矩将使转子齿与下一个定子齿对齐。因此 $\theta_e > \pi$ 时电机转矩改变了方向。如果逆时针向转子施加外转矩, 重复上述的实验, 也将得到类似的结果。

于是可以得到如图 5-9(b) 所示的步进电动机电磁转矩 T_{em} 与偏转角 θ_e 的函数规律。显然, 静态电磁转矩 T_{em} 与偏转角 θ_e 有近似正弦关系, 可以解析地表示为

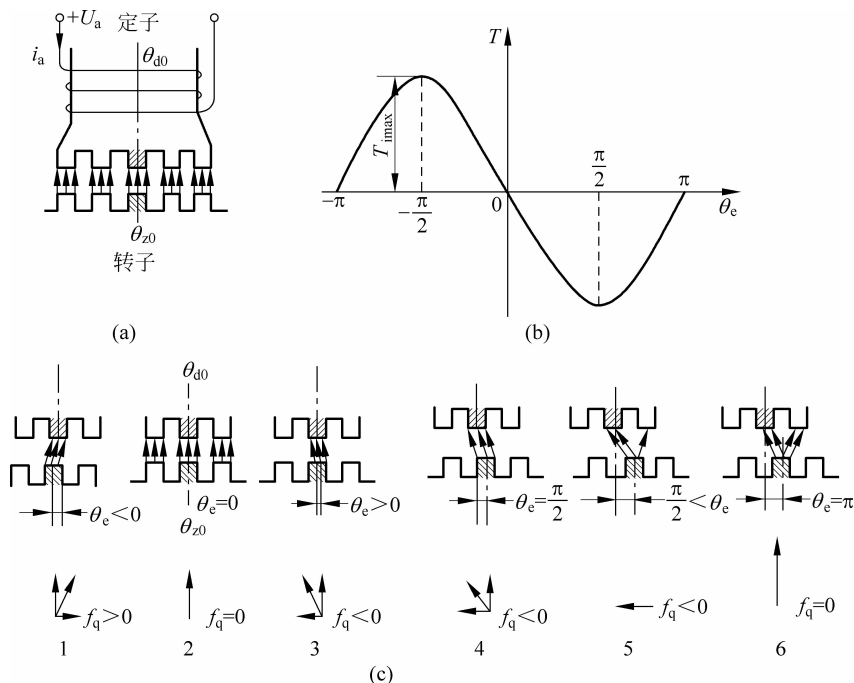


图 5-9 A 相通电时的矩角特性

$$T_{em} = -T_{jmax} \sin \theta_e \quad (5-16)$$

式中,负号表示步进电动机产生的电磁转矩是一种恢复性转矩,在一定范围内总是反抗转子偏离初始平衡位置,也可以说,具有正弹性力矩的性质。矩角特性是以 2π 为周期的函数, $\theta_e = 0$ 的位置是稳定平衡位置, $\theta_e = \pi$ 是不稳定平衡位置。

最大静态转矩表示了步进电动机所能承受的负载能力,它直接影响着步进电动机的性能,是步进电动机最重要的性能指标之一。

实验和式(5-16)都告诉我们,当 $\theta_e = \pm\pi$ 时,静态电磁转矩 T_{em} 均等于零,属平衡状态。然后,当偏转角一旦出现 $\theta_e < -\pi$ 或 $\theta_e > \pi$ 的情况,转子基准齿将立刻转向定子基准齿的左右相邻齿,并进入新的稳定平衡位置。而且,再也不可能自动地恢复到定子、转子基准齿所对应的初始稳定平衡位置。

把在通电状态不变的情况下,当转子去掉外转矩后,能回到初始稳定平衡位置的转子偏转角范围,即 $-\pi < \theta_e < \pi$ 称做步进电动机的静稳定区。

2. 多相控制时的矩角特性

步进电动机的多相控制就是二相或三相以上控制绕组同时通电的控制状态。按照叠加原理,多相通电控制的矩角特性可近似地由单相通电控制时的矩角特性叠加得到。

下面以三相步进电动机为例展开讨论。当三相步进电动机单相控制,且 A 相控制绕组通电时,则 A 相控制的矩角特性可解析地表示为

$$T_{emA} = -T_{jmax} \sin \theta_e \quad (5-17)$$

当 $\theta_e = 0$ 时, B 相定子齿轴线与转子齿轴线将错开一个步距角,即 $\theta_{be} = \theta_{che} / 3 = 2\pi / 3$ 。若相

邻控制相轴线间所含转子齿距数为正整数加 $1/3$ 个齿距, 则定子齿轴线将超前转子齿轴线 $1/3$ 齿距, 见图 5-10(a)。因此, B 相通电时的矩角特性是

$$T_{\text{emB}} = -T_{\text{jmax}} \sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (5-18)$$

如果 A 相控制的矩角特性是通过 0 点的一条正弦曲线, 则 B 相控制的矩角特性是相对右移 $2\pi/3$ 的一条正弦曲线, 如图 5-10(b) 所示。

当 A 与 B 两相控制绕组同时通电时, 根据叠加原理, 静态电磁转矩可解析地表示为

$$T_{\text{AB}} = T_{\text{emA}} + T_{\text{emB}} \quad (5-19)$$

将式(5-17)和式(5-18)代入上式, 并解得

$$T_{\text{AB}} = -T_{\text{jmax}} \sin\left(\theta_e - \frac{1}{3}\pi\right) \quad (5-20)$$

可见, 两相同时控制的矩角特性曲线是相对 A 相矩角特性曲线右移 $\pi/3$, 且幅值不变(即有相等的最大静态转矩)的正弦曲线, 见图 5-10(c)。

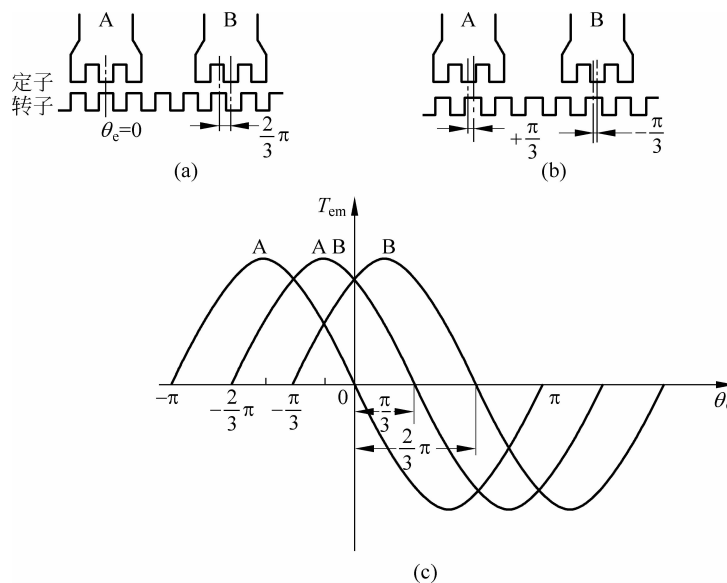


图 5-10 三相步进电动机的多相控制

从以上分析看出, 三相步进电动机不论是采用单相控制, 还是两相控制, 其最大静态转矩都是一样的。因此, 三相步进电动机不可能利用增加通电控制相数的方法提高静态电磁转矩, 而仅仅可能改善其动态品质, 这是它一个很大的缺点。因此, 人们可以利用四相、五相、甚至六相反应式步进电动机的多相控制, 以增大静态电磁转矩, 改善运行性能。然而, 随着相数的增多, 带来了步进电动机本身结构的复杂化, 以及增大设计制造驱动电源的难度。

现在, 再以四相步进电动机为例, 分析多相步进电动机静态转矩的变化规律。同三相步进电动机一样, 当以 A 相控制为初始状态(基准), 采用四相单四拍运行方式时, 四相步进电动机的各相控制绕组单独通电的矩角特性可解析地表示为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{emA}} &= -T_{\text{jmax}} \sin \theta_e \\
 T_{\text{emB}} &= -T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{\pi}{2} \right) \\
 T_{\text{emC}} &= -T_{\text{jmax}} \sin (\theta_e - \pi) \\
 T_{\text{emD}} &= -T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{3\pi}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{5-21}$$

还可用 4 条依次错开一个步距角 θ_{be} 的正弦曲线来描述, 见图 5-11(a)。称上述矩角特性曲线的组合为矩角特性曲线簇。这是研究步进电动机性能的重要工具。

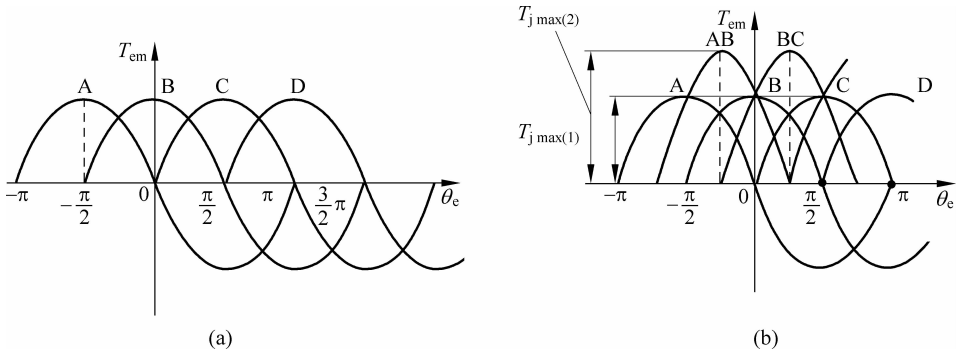


图 5-11 四相步进电动机矩角特性曲线簇

应用叠加原理, 可以方便地得到四相双四拍的矩角特性曲线簇(见图 5-11(b))和它的解析表达式:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{AB}} &= -\sqrt{2} T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{\pi}{4} \right) \\
 T_{\text{BC}} &= -\sqrt{2} T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{3\pi}{4} \right) \\
 T_{\text{CD}} &= -\sqrt{2} T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{5\pi}{4} \right) \\
 T_{\text{DA}} &= -\sqrt{2} T_{\text{jmax}} \sin \left(\theta_e - \frac{7\pi}{4} \right)
 \end{aligned} \tag{5-22}$$

式中, $\sqrt{2} T_{\text{jmax}}$ ——两相通电控制时的最大静态转矩, $\sqrt{2} T_{\text{jmax}} = T_{\text{jmax}(2)}$;

$T_{\text{jmax}(1)}$ ——单相通电控制时的最大静态转矩, $T_{\text{jmax}(1)} = T_{\text{jmax}}$ 。

显然, 两相同时通电的四相双四拍最大静态转矩是四相单四拍的 $\sqrt{2}$ 倍。一般地说, 三相以上的步进电动机采用多相同时通电的控制方式, 都可以得到提高最大静态转矩的效果。

如果 m 相步进电动机的矩角特性解析地表示为

$$\begin{aligned}
 T_1 &= -T_{\text{jmax}} \sin \theta_e \\
 T_1 &= -T_{\text{jmax}} \sin (\theta_e - \theta_{\text{be}}) \\
 &\vdots \\
 T_m &= -T_{\text{jmax}} \sin [\theta_e - (m-1)\theta_{\text{be}}]
 \end{aligned} \tag{5-23}$$

按叠加原理, n 相($n < m$)同时通电控制的静态电磁转矩是

$$\begin{aligned}
T_{1-n} &= T_1 + T_2 + \cdots + T_n \\
&= -T_{j\max} \{ \sin\theta_e + \sin(\theta_e - \theta_{be}) + \cdots + \sin[\theta_e - (n-1)\theta_{be}] \} \\
&= -T_{j\max} \frac{\sin \frac{n\theta_{be}}{2}}{\sin \frac{\theta_{be}}{2}} \sin\left(\theta_e - \frac{n-1}{2}\theta_{be}\right)
\end{aligned} \tag{5-24}$$

式中, T_{1-n} —— n 相同时通电控制的静态转矩;

θ_{be} ——单拍制运行时的步距角;

$T_{j\max}$ ——单相通电控制时的最大静态转矩。

因为单拍制运行时的步距角 $\theta_{be} = \frac{2\pi}{m}$, 式(5-24)可变为

$$T_{1-n} = -T_{j\max} \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} \sin\left(\theta_e - \frac{n-1}{m}\pi\right)$$

因此, m 相步进电动机单拍制运行, n 相同时通电控制的最大静态转矩和单相通电控制的最大静态转矩之比是

$$\frac{T_{j\max(1-n)}}{T_{j\max}} = \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} \tag{5-25}$$

例如, 四相步进电动机两相同时通电控制时,

$$T_{j\max(2)} = \frac{\sin \frac{2}{4}\pi}{\sin \frac{\pi}{4}} T_{j\max} = 1.41 T_{j\max}$$

式中, $T_{j\max(2)}$ ——两相同时通电控制的最大静态转矩。

五相步进电动机两相同时通电时,

$$T_{j\max(2)} = \frac{\sin \frac{2}{5}\pi}{\sin \frac{\pi}{5}} T_{j\max} = 1.62 T_{j\max}$$

可见, 多相步进电动机采用多相同时通电控制都能提高最大静态转矩, 因而增大了输出转矩。所以一般功率较大的步进电动机多采用高于三相的步进电动机, 并选择多相通电的控制方式。

5.4 反应式步进电动机的动态特性

步进电动机运行的基本特点就是脉冲电压按照一定的分配方式加到各控制绕组上, 产生电磁过程的跃变, 形成磁极轴旋转, 以反应式电磁转矩带动转子做步进式转动, 电动机内磁极轴在空间的旋转运动是不均匀的。由于机械系统具有一定的转动惯量(J), 步进电动机转子的运动在大部分情况下都或多或少地具有振荡的性质。当加单脉冲时, 转子运动是

衰减的自由振荡；在连续脉冲作用下，运动则为强迫振荡。所以步进电动机的运转总是在电气和机械的过渡过程中进行的。

5.4.1 单脉冲作用下的运行

1. 空载状态

单脉冲作用下的运行又称单步运行。这是指按一定的分配方式对控制绕组进行单脉冲换接，即在带电不动的初始状态下，切换一次脉冲电压。例如，A 相控制绕组通电换接成 B 相控制绕组通电，则转子将随之转过一个步距角，并有足够的时间稳定下来。此时通电的持续时间大于步进电动机的机电过渡过程时间。下面以三相步进电动机为例，运用矩角特性分析单脉冲作用下的运行特点。讨论中，认为绕组中的电流是瞬时建立和消除的。

图 5-12 中矩角特性曲线 A 表示 A 相通电时的矩角特性。如果步进电动机带电不动的初始状态是 A 相控制绕组通电，且 A 相定子齿轴线与转子齿轴线重合，即偏转角 $\theta_e = 0$ ，就称其为初始平衡位置(a_0)。若此刻给一电脉冲信号，使 A 相控制绕组断电，B 相控制绕组通电，则步进电动机的工作状态可由图 5-12(a)中矩角特性曲线 B 来描述。显然，步进电动机转子将受电磁转矩 $T_{emb} = -T_{jmax} \sin(-120^\circ)$ (据式(5-18))的作用，转向新的平衡位置(b_0)，在旋转过程中，转子所受的电磁转矩将随 θ_e 角的改变按曲线 B 的规律变化，并最终趋于零，即 $T_{emb} = 0$ 。这时，转子将停止在新的平衡位置 $\theta_e = 2\pi/3$ 处，使转子转向新平衡位置的转矩称为同步(电磁)转矩，即

$$T_{emt} = -T_{jmax} \sin(\theta_e - \gamma) \quad (5-26)$$

式中， γ ——通电相换接瞬间转子与定子磁场轴线相对初始平衡位置的跃变角。若 A 相通电时，对应 $\gamma = 0$ ，换接 B 相通电瞬间， $\gamma = \theta_{be}$ ；换接 C 相通电瞬间， $\gamma = 2\theta_{be}$ ，用电角度表示；

$\theta_e - \gamma$ ——失调角，它等于通电控制相定子齿轴线与转子齿轴线间的夹角，用电角度表示；

T_{emt} ——对应于失调角的同步(电磁)转矩。

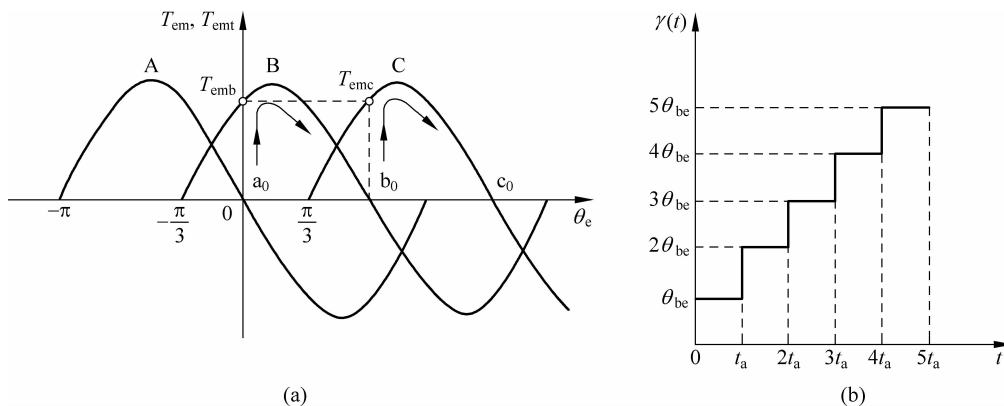


图 5-12 空载状态时的单步运行

可见,步进电动机在一个控制脉冲的作用下前进了一个步距角($\theta_{be}=2\pi/3$)。从图 5-12 可以看出,通过新稳定平衡位置 b_0 的矩角特性曲线 B 相当于通过初始平衡位置 a_0 的矩角特性曲线 A 右移了一个步距角。十分明显,矩角特性曲线的移动规律形象而确切地描述了步进电动机转子的运动规律,也代表了控制相磁极轴旋转的特点,还体现了同步(电磁)转矩变化的过程。如果控制脉冲一个一个不断地送入,控制绕组按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 循环方式换接,步进电动机将一步一步转动,且每走一步转过一个步距角。这就是步进电动机在单脉冲作用下的单步运行状态,见图 5-12(b)。

2. 负载状态

若负载为 T'_L (见图 5-13),在单脉冲作用下,步进电动机的运行特性如何呢? 当 A 相通电时,步进电动机一定要产生一电磁转矩与负载转矩相平衡,即

$$T_{emA} = T'_L = -T_{jmax} \sin \theta_{ea} \quad (5-27)$$

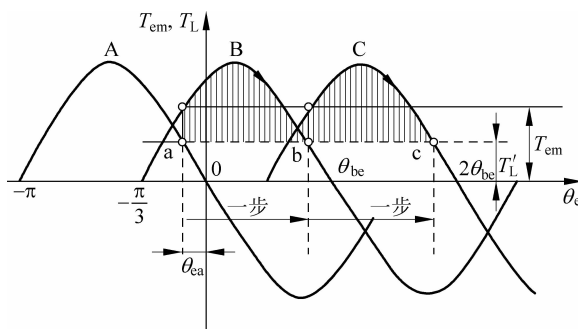


图 5-13 负载情况下的单脉冲运行

显然,步进电动机转子将有初偏转角 θ_{ea} 。这就是负载时 A 相控制绕组通电状态的初始平衡位置 a。当换接为 B 相通电瞬间,同步转矩将是

$$T_{emt} = -T_{jmax} \sin(\theta_{ea} - \gamma) \quad (5-28)$$

式中, $\gamma = \theta_{be} = \frac{2}{3}\pi$ 。

此刻,由于同步转矩 $T_{emt} > T'_L$ (图 5-13),步进电动机将在合成转矩($T_{emt} - T'_L$)的作用下转向新的平衡位置 b。继续换接 C 相控制绕组通电,转子又受图 5-13 中阴影部分变化着的同步转矩的作用,转向新的平衡位置 c,每换接一次通电状态,步进电动机都转过一个步距角。

在此,引入步进电动机的步距精度的概念。根据公式 $\theta_b = 360^\circ / (Z_r N)$,计算出的步距角是理论步距值,而实际旋转的步距角与理论步距角之间是有偏差的。这个偏差以角分或理论步距角的百分数来衡量,称之为静态步距角误差($\Delta\theta_b$)。它的值越小,说明精度越高,是步进电动机的一项重要性能指标。现按静态步距角误差,把步进电动机的精度分成两级(见表 5-1)。

3. 步进电动机的负载能力

步进电动机所能带动的最大负载(T_{Lmax})可由矩角特性曲线中相邻两矩角特性曲线的

交点确定,从图 5-14 可见,相邻之 A、B 矩角特性曲线交于 q 点,对应的坐标是偏转角 θ_{eq} ,静态转矩为 T_{emq} 。

表 5-1 步进电动机的精度等级

步 距 角	1 级 精 度	2 级 精 度
$\theta_b < 1.5^\circ$	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$
$1.5^\circ \leq \theta_b \leq 7.5^\circ$	$\pm 15\%$	$\pm 25\%$
$7.5^\circ \leq \theta_b \leq 15^\circ$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$

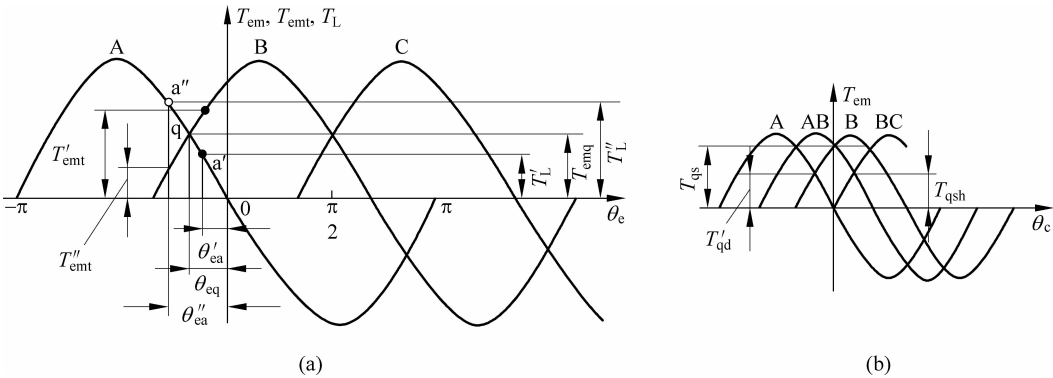


图 5-14 步进电动机的启动转矩

若负载阻转矩为 T'_L ,且 $T'_L < T_{emq}$,对应的偏转角为 θ'_{ea} (图 5-14 中工作点 a')。当换接 B 相通电瞬间,将有同步电磁转矩 $T'_{emt} > T'_L$,步进电动机转子将启动,并转向新的平衡位置。然而,当负载阻转矩为 T''_L ,且 $T''_L > T_{emq}$,对应的偏转角为 θ''_{ea} (图 5-14 中工作点 a'')。在换接 B 相通电时,则有同步(电磁)转矩

$$T'_{emt} < T''_L$$

步进电动机转子将不能启动。因此,各相矩角特性曲线的交点——曲线族包络线的最低点——代表的同步(电磁)转矩值 T_{emq} 乃是步进电动机单步运行所能带动的最大负载转矩,称为启动转矩,实际电机所带的负载 T_L 必须小于这个转矩才能正常运转,即

$$T_L < T_{emq} \tag{5-29}$$

对于不同的运行方式,由于步距角和最大静态转矩的不同,矩角特性曲线的交点位置也将不同。因此,对应的步进电动机的启动转矩 T_{emq} 也必将不同,利用三相步进电动机相应运行方式的矩角特性,可分别求得启动转矩,即

三相单三拍

$$T_{emq} = \frac{1}{2} T_{jmax}$$

三相双三拍

$$T_{emq} = \frac{1}{2} T_{jmax}$$

三相六拍

$$T_{\text{emq}} = \frac{\sqrt{3}}{2} T_{\text{jmax}}$$

可见,由于三相单拍制两种运行方式步距角和最大静转矩均相等,所以也有相同的启动转矩,即 $T'_{\text{qd}} = T_{\text{qsh}}$ 。而双拍制时尽管最大静转矩未变,但步距角缩小了,矩角特性曲线簇包络线的最低点升高了,因此,启动转矩变大了,即 $T_{\text{qs}} > T'_{\text{qd}}$,见图 5-14(b)。

在采用单拍制运行方式时,无论是几相步进电动机,各相都具有相等的最大静态转矩。这样,可利用两相邻相矩角特性公式联立求解启动转矩,即

$$\begin{aligned} T_{\text{A}} &= -T_{\text{jmax}} \sin \theta_{\text{e}} \\ T_{\text{B}} &= -T_{\text{jmax}} \sin(\theta_{\text{e}} - \theta_{\text{be}}) \end{aligned}$$

解得矩角特性交点 ($T_{\text{A}} = T_{\text{B}} = T_{\text{emq}}$) 的横坐标

$$\theta_{\text{eq}} = \frac{1}{2}(\theta_{\text{be}} - \pi)$$

所以

$$T_{\text{emq}} = T_{\text{jmax}} \cos \frac{\theta_{\text{be}}}{2} \quad (5-30)$$

因为用电弧度表示的步距角 $\theta_{\text{be}} = 2\pi/N$, 式(5-30)可改写为

$$T_{\text{q}} = T_{\text{jmax}} \cos \frac{\pi}{N} \quad (5-31)$$

可见,拍数 N 越多,启动转矩 T_{q} 越接近最大静态转矩值 T_{jmax} 。

注意式(5-30)和式(5-31)均是在单拍制或最大静态转矩相等的条件下建立的。因此,式(5-31)对双拍制运行中具有不等的最大静态转矩值的情况是不适用的。

4. 单脉冲作用下电动机的震荡现象

实际上,步进电动机的转动,或多或少地具有振荡的性质。为了研究步进电动机的动态特性,首先分析单步运行时的动态微分方程式。

若电动机的负载转矩为零,在一相控制绕组通电的条件下,转子处在静态稳定平衡位置。设 θ 为偏转角(机械角度),考虑黏性摩擦产生的阻转矩 $B \frac{d\theta}{dt}$, 在单脉冲作用下,转子的运动方程为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_{\text{emt}} \quad (5-32)$$

式中, B ——黏性摩擦系数;

J ——转子的转动惯量。

当从 A 相通电换接为 B 相通电时,矩角特性曲线跃变了一个步距角 $\gamma = \theta_{\text{be}}$ 。

因为 $T_{\text{emt}} = -T_{\text{jmax}} \sin(\theta_{\text{e}} - \gamma) = -T_{\text{jmax}} \sin(Z_r \theta - \gamma)$,

所以式(5-32)变为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_{\text{jmax}} \sin(Z_r \theta - \gamma) = 0$$

或

$$\frac{J}{Z_r} \frac{d^2 \theta_e}{dt^2} + \frac{B}{Z_r} \frac{d\theta_e}{dt} + T_{j\max} \sin(\theta_e - \gamma) = 0 \quad (5-33)$$

转子将在图 5-15 中 a 点的同步转矩 $T_{\text{emt}} = -T_{j\max} \sin(-\gamma)$ 作用下开始运动。这是一个非线性方程,在平衡点附件可进行线性化处理,当 θ 变化很小时,有 $\sin\theta \approx \theta$,则上式变为

$$\frac{d^2 \theta_e}{dt^2} + \frac{B}{J} \frac{d\theta_e}{dt} + \frac{T_{j\max} Z_r}{J} \theta_e = \frac{T_{j\max} Z_r}{J} \gamma \quad (5-34)$$

这是二阶常系数微分方程,它的齐次方程所对应的特征方程为

$$r^2 + \frac{B}{J}r + \frac{T_{j\max} Z_r}{J} = 0 \quad (5-35)$$

其根为

$$r_{1,2} = \frac{-\frac{B}{J} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{J}\right)^2 - \frac{4T_{j\max} Z_r}{J}}}{2} \quad (5-36)$$

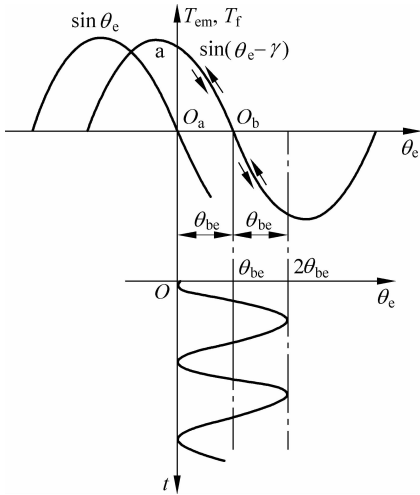


图 5-15 步进电动机的自由振荡

根据高等数学的知识可知:

(1) 当 $B=0$, 步进电动机处于无阻尼状态时,

式(5-36)是一对共轭纯虚根,应用初始条件

$$\theta_e |_{t=0} = 0$$

$$\dot{\theta}_e |_{t=0} = 0$$

解出式(5-34)可得运动规律

$$\theta_e = \theta_{be}(1 - \cos\omega_n t) \quad (5-37)$$

转子围绕新的平衡位置 O_b 做不衰减的自由振荡,振幅等于步距角 θ_{be} ,振荡角频率为 ω_n ,如图 5-15 所示。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{T_{j\max} Z_r}{J}} \quad (5-38)$$

ω_n 称为无阻尼自然振荡角频率(或固有振荡角频率)。

(2) 当式(5-36)的根中

$$\left(\frac{B}{J}\right)^2 < \frac{4T_{j\max} Z_r}{J} \quad \text{即} \quad B < 2 \sqrt{JT_{j\max} Z_r}$$

时,阻尼较小,特征方程的根是一对共轭复根,可解出 $\theta_e(t)$ 是幅值不断衰减的振荡曲线,随着时间 t 的增长,步进电动机趋于新的平衡位置 $\theta_e = \theta_{be}$,如图 5-16 所示。振荡角频率 ω_d

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \frac{B^2}{4JT_{j\max} Z_r}} \quad (5-39)$$

ω_d 称为有阻尼振荡角频率。

(3) 当 $B = 2 \sqrt{JT_{j\max} Z_r}$ 时,特征方程(5-35)的根是两个相等的实根,步进电动机处于临界阻

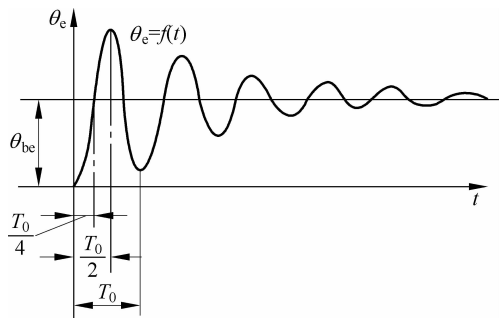


图 5-16 有阻尼作用的单步运行

尼状态; 当 $B > 2 \sqrt{TJ_{\max} Z_r}$ 时, 特征方程(5-35)的根是两个不相等的实根, 阻尼较大。这两种情况下 $\theta_e(t)$ 都是单调上升的曲线, 步进电动机转子的运动不出现振荡现象。随着时间 t 的增大而趋于平衡位置。

需要指出的是, 步进电动机的振荡现象引起了系统精度的降低, 带来了震动和噪声。严重时甚至使转子失步。为了使这种运行中的振荡现象加速衰减, 步进电动机有专门设计的阻尼器。

例 题

对于某四相步进电动机, 单相通电时的最大静态转矩为 $0.44 \text{ N} \cdot \text{m}$, 而负载为 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 分析该电机在单拍制和双拍制下是否能够带负载运行。

解: 四相单四拍: $T_q = T_{j\max} \cos \frac{\pi}{N} = 0.44 \cos \frac{\pi}{4} = 0.311 (\text{N} \cdot \text{m}) > 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 能起动;

四相双四拍: $T_q = \sqrt{2} T_{j\max} \cos \frac{\pi}{N} = \sqrt{2} \times 0.44 \cos \frac{\pi}{4} = 0.44 (\text{N} \cdot \text{m}) > 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 能起动;

四相八拍: $\begin{cases} T_A = -T_{j\max} \sin \theta_e \\ T_{AB} = -\sqrt{2} T_{j\max} \sin \left(\theta_e - \frac{\pi}{4} \right) \end{cases} \Rightarrow T_q = T_{j\max} = 0.44 (\text{N} \cdot \text{m}) > 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

可以带规定负载运行。

5.4.2 连续运行时步进电动机的动态特性

从现在开始, 将在单步运行状态的基础上, 讨论在各种频率的控制脉冲作用下, 考虑阻尼等因素存在的步进电动机的动态特性。

1. 动稳定区和稳定裕度

前面已经引入了控制绕组通电状态不变条件下的静稳定区概念。在图 5-17 中, 空载时矩角特性 n 所对应的静稳定区就是 $-\pi < \theta_e < +\pi$, 下面将建立在通电状态换接瞬间条件下的动稳定区概念。

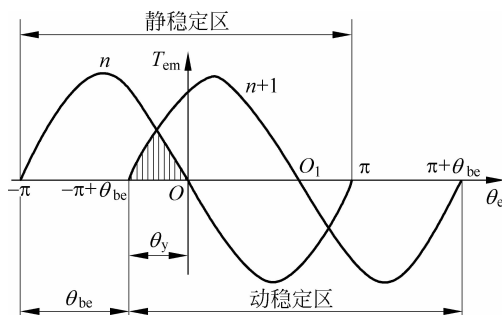


图 5-17 静稳定区和动稳定区

若步进电动机处于矩角特性曲线 n 所对应的稳定状态时, 给一个控制脉冲, 使其控制绕组改变通电状态, 矩角特性将移动一个步距角 θ_{be} , 如图 5-17 的 $n+1$ 曲线所示, 新的稳定平衡点为 O_1 , 对应于它的静稳定区是 $(-\pi + \theta_{be}) < \theta_e < (\pi + \theta_{be})$ 。如果在第 n 相控制绕组通电状态换接为第 $n+1$ 相控制绕组通电状态瞬间, 转子位置只要在这个区间内, 它就能转向新的稳定平衡点 O_1 , 且不越过不稳定平衡点, 把这个区域 $(-\pi + \theta_{be}) < \theta_e < (\pi + \theta_{be})$ 称做动稳定区。显然, 运行拍数越多, 步距角 θ_{be} 越小, 动稳定区就越接近静稳定区。需要指出的是, 实际的动稳定区与转子的角速度有关, 可以稍大于上述区域。

另外, 还将矩角特性曲线 n 的稳定平衡点 O 离开 $(n+1)$ 相矩角特性曲线的不稳定平衡点 $(-\pi + \theta_{be})$ 的距离, 即 $(-\pi + \theta_{be}) < \theta_e < 0$ 的范围叫做“稳定裕度”, 如图 5-17 的 θ_y 所示。显然, 步距角 θ_{be} 越小, 稳定裕度将越大。稳定裕度越大意味着新、旧稳定平衡点越靠近。

2. 步进电动机的启动过程和启动频率

首先, 粗略地描述一下步进电动机的启动过程。如果步进电动机负载转矩为零, 在一相控制绕组恒定通电的情况下, 转子位于稳定平衡点 O_a 处, 图 5-18 中矩角特性曲线 A 表示了这一初始状态。

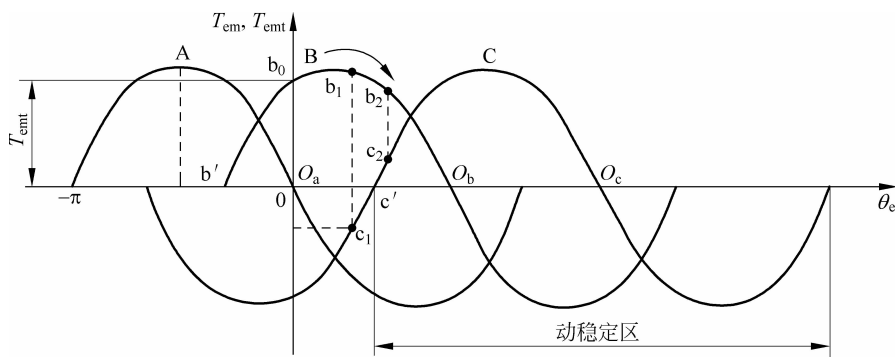


图 5-18 步进电动机的启动过程分析

当把第一个控制脉冲加给步进电动机, 换接通电状态, 在忽略控制电路时间常数的条件下, 矩角特性曲线 A 跃变为 B。在 $t=0$ 瞬间, 同步转矩 (T_{emt}) 作用在转子上, 并使之开始加速。角加速度的大小由同步转矩与转动部分的转动惯量之比 (T_{emt}/J) 决定。同步(电磁)转矩将沿着 $b_0 b_1 b_2$ 的方向变化。在第一拍末加第二个脉冲给步进电动机时, 转子的位置取决于第一拍过程中, 即 $t=0 \sim t_a$ 之间(脉冲周期)转子的角位移, 可能有两种情况:

(1) 转子的角位移不大, 第一拍末在 b_1 点, 当换接到第二拍时, 同步转矩由矩角特性曲线 C 上的 c_1 点决定, 且为负值, 转子将开始减速, 如果依靠第二拍开始时转子的初速度不能使其超过 c' 点而进入 C 相的动稳定区, 那么, 转子将肯定不能进入新稳定平衡点 O_c 。继续改变为第三拍控制时, 条件将更加不利, 一般来说, 在这种情况下, 步进电动机将不易启动起来。

(2) 转子角位移较大, 第一拍末在 b_2 点, 当加第二个控制脉冲时, 转矩由矩角特性曲线 C 上之 c_2 点决定, 并为正值, 步进电动机将继续加速。由于第一拍末转子已具有一定的角速度, 第二拍过程中转子的角位移将超过第一拍的情况, 将使接近甚至超过新平衡点。因

此,这后一种情况的步进电动机就可能启动起来。

上述启动过程的分析告诉我们,步进电动机的启动除了与普通直流伺服电动机、异步电动机有相似之处,即必须满足最大负载要小于启动转矩 T_{emq} 之外,还有其特殊之处,那就是无论是空载,还是负载,都将有一个启动控制脉冲频率。定义步进电动机正常启动(不失步)所能加的最高控制脉冲频率为启动频率或突跳频率。它是衡量步进电动机快速性能的重要技术数据。启动频率不仅与负载转矩的大小有关,而且负载的转动惯量对它也影响显著,同时还与步进电动机本身的参数以及驱动电源的条件有关。因此,步进电动机的启动性能不能简单地用启动转矩值标定,而是需要一系列启动特性来体现,这主要包括:

启动矩频特性——在给定的驱动电源的条件下,负载转动惯量一定时,启动频率与负载转矩的关系称做启动矩频特性;

启动惯频特性——在给定的驱动电源的条件下,负载转矩不变时,启动频率与负载转动惯量的关系,称做启动惯频特性。

当步进电动机带着一定的负载启动时,同步转矩与负载阻转矩之差作为加速转矩使转子启动并加速。负载阻转矩越大,加速转矩就越小,步进电动机就不易转起来。只有当每步有较长的加速周期——较低的控制脉冲频率时,步进电动机才能启动。因此,随着负载的增加,其相对加速周期要长,即启动频率是下降的(见图 5-19(a))。

同样,随着步进电动机转动惯量的增大,在一定脉冲周期内转子加速过程将变慢,趋向新平衡位置需要的时间也就变长。所以要使步进电动机启动,就需要较长的脉冲周期使它加速,即要求控制脉冲的频率低(见图 5-19(b))。

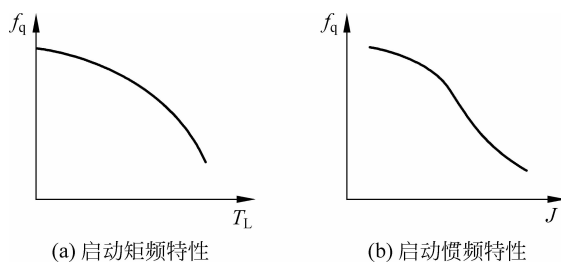


图 5-19 启动时的矩频和惯频特性

3. 不同控制脉冲频率下的连续运行

步进电动机启动后,继续不断地送入控制脉冲,电机将连续运行,由于控制脉冲频率不同,电动机的连续运行可能出现许多复杂的情况,下面就来分析这些情况。

1) 极低频下运行

所谓极低频是指控制脉冲具有这样的周期(t_a),它使一拍的时间足够长,以至转子的振荡过程来得及完全衰减,使其进入新的稳定平衡位置,且角速度也变为零,像图 5-20 中所描述的那样,步进电动机将一步一步地转向新的平衡位置,具有步进式的特征,在欠阻尼的情况下,这是一个衰减的振荡过程,最大振幅不超过

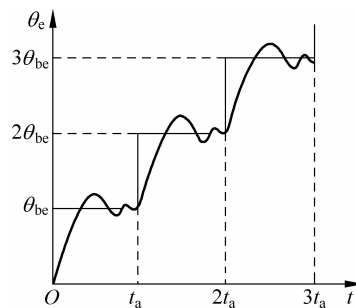


图 5-20 极低频作用下的步进式运行

步距角 θ_{be} , 因此, 不会出现丢步、越步现象。显然, 在极低频控制脉冲作用下, 步进电动机可以稳定地连续运行。

2) 低频丢步和低频共振

低频是指控制脉冲的频率 f 低于步进电动机振荡频率 f_0 的 2 倍即 $(T > \frac{T_0}{2})$, 但高于极低频的频带, 由图 5-16 可知, 此时, 转子振荡还未衰减完时, 下一个脉冲就来到, 电机容易出现低频丢步和低频共振现象。下面以三相步进电动机为例说明。

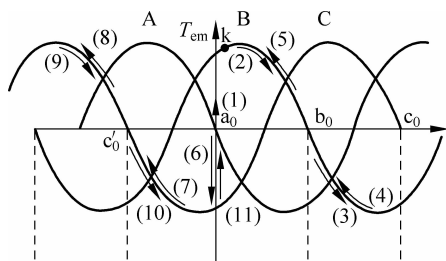


图 5-21 低频丢步现象

低频丢步的物理过程如图 5-21 所示, 设开始时转子处于 A 相稳定平衡位置 a_0 点, 第一拍通电相换为 B 相, 矩角特性移动一个步距角 θ_{be} , 则转子向 B 相平衡位置 b_0 点运动。如果阻尼较小, 则转子将在 b_0 点附近做衰减的振荡。当第一步转过的角度达到 $2\theta_e$ 之后, θ_e 开始减小, 当转子振荡回摆, 位于 b_0 点的动稳定区之外 (如 k 点) 时, 第二拍控制脉冲到来, 换接为 C 相控制绕组通电, 转子受到的电磁转矩为负值, 即转矩方向不是使转子

向 c_0 点位置运动, 而是向 c'_0 点运动, 第三拍时转子由 c'_0 点附近向 a_0 点位置运动。转子回到了原来位置 a_0 点, 也就是丢了三步, 此为低频丢步。

当控制脉冲频率等于电机振荡频率时, 如果阻尼作用不强, 即使电机不发生低频丢步, 也会发生强烈振动, 这就是低频共振现象。

一般不容许步进电动机在共振频率下运行。但是如果采用较多拍数, 再加上一定的阻尼和干摩擦负载, 步进电动机振荡的振幅可以减小并能稳定运行。为了减小低频共振现象, 步进电动机专门设置了阻尼器, 依靠阻尼器消耗振荡的能量, 限制振荡的振幅, 从而改善步进电动机的运行性能。

3) 连续控制脉冲作用下的稳定运行

继续提高控制脉冲的频率, 当脉冲频率 f 接近或高于振荡频率的 2 倍的脉冲作用下运行, 这时, 步进电动机转子前一步振荡尚未到达第一次振摆的最大值, 下一个控制脉冲就来到了, 转子将能稳定地连续运行。当 $f = 2f_0$, 控制脉冲周期 $t_a = \frac{T_0}{2}$ 的运行规律描绘在图 5-22 中, 在忽略衰减的情况下, 第一拍末转子刚好转过 $2\theta_{be}$, 第二拍控制脉冲到来时, 转子已处于它的稳定平衡点了。而且, 此刻转子的角速度也恰好为零。在第二拍整个控制过程中, 转子将不动, 而在第三拍控制时, 又将重复第一拍过程, 尽管转子运动有不均匀的情况, 但其动态误差在任何时候都不会超过 $\pm\theta_{be}$ 。显然, 步进电动机将能稳定地运行。更高的运行频率, 甚至转子的前一步振荡刚好

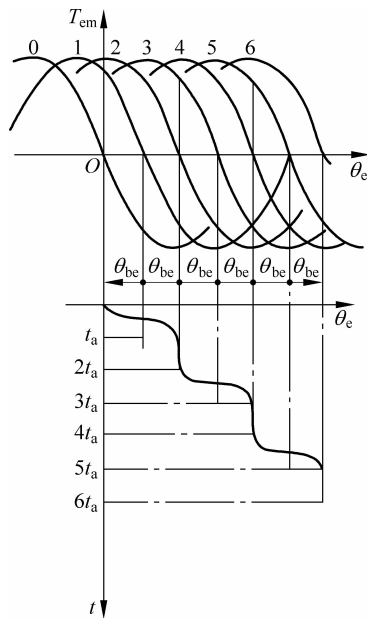


图 5-22 控制脉冲频率 $f = 2f_0$ 的运行规律

转过一个步距角,到达新的平衡位置,换接的第二个控制脉冲就接踵而来,此刻,位置角的初始状态与第一拍相似,但转子已具有一定的初速了,因此,第二拍转过的角度将超过一个步距,产生超前的动态误差,动态误差增大到一定程度后就将减小,最大不可能超过 θ_{be} ,显然,在这种情况下,步进电动机转子的运行也具有衰减振荡的特点。然而,运行的转速是平滑而稳定的。图 5-23 示出了一种理想的步进电动机平稳运行情况,但这几乎是不可能的,或多或少地具有衰减振荡的形式是步进电动机运行的特点。

4) 动态转矩、矩频特性和最高连续运行频率

控制脉冲频率的升高是有限度的。随着输入控制脉冲频率的增加,步进电动机转速也将逐步升高。然而其带动负载的能力却逐步下降。这是因为运行中的同步(电磁)转矩——动态转矩随着控制脉冲频率的升高有下降的趋势,以致频率高到某一定值时,步进电动机已带不动任何负载。而且只要受到一个很小的扰动,就会振荡、失步,直致停转。步进电动机正常连续运行时(不丢步、不失步)所能加至的最高控制脉冲频率称为最高连续运行频率或最高跟踪频率,它是步进电动机的重要技术数据。最大连续运行频率可以在 10 000 步/秒以上。

那么,为什么控制脉冲频率的升高会使动态转矩下降,因而使步进电动机负载能力降低呢? 主要的原因就是步进电动机每相控制绕组电感的影响。每当控制脉冲的作用使一相控制绕组换接通电时(见图 5-24(b)),尽管由于晶体管 T_1 导通,控制电压可瞬间加到控制绕组上,但其中的控制电流,却因为绕组电感 L_k 的存在,不可能立刻上升至额定值,而是按指数规律上升(见图 5-24(c))。同样,当控制脉冲使其换接而使 T_1 管截止时,控制电压可立刻去掉,而绕组中的电流却只能按指数规律下降。控制电流 i_k 上升或下降的快慢是通过相应的时间常数 τ_{sh} 和 τ_j 衡量的,即

$$\tau_{sh} = \frac{L_k}{R_{sh}} \quad (5-40)$$

和

$$\tau_j = \frac{L_k}{R_j} \quad (5-41)$$

式中,

τ_{sh} ——电流 i_k 上升的时间常数。

τ_j ——电流 i_k 下降的时间常数。

L_k ——控制绕组的电感。

R_{sh} ——通电回路的总电阻。包括绕组本身的电阻、串联电阻 R_{t1} 及三极管内阻等。

R_j ——放电回路的总电阻。包括绕组本身的电阻、串联电阻 R_{t2} 及二极管 D_1 内阻等。

当输入的控制脉冲频率比较低时,每相绕组通电的时间 T_{tf} 较长,即 $T_{tf} > T_{sh}$, 电流 i_k 有足够的时间可以升到额定值,波形接近矩形(见图 5-24(c))。当频率升高后,通电时间变短(如 $T'_{tf} < T_{tf}$), 电流的波形就变成如图 5-24(d) 所示的情形。频率再提高,将导致通电时间进一步缩短,即 $T''_{tf} \ll T_{tf}$, 如图 5-24(e) 所示, 电流的波形变成锯齿状,幅值也很低。控制脉

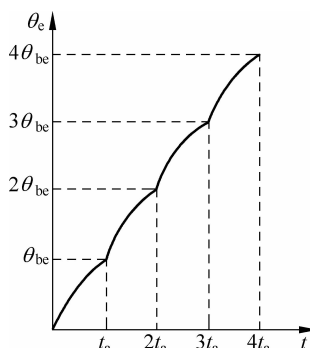


图 5-23 步进电动机连续
稳定运行

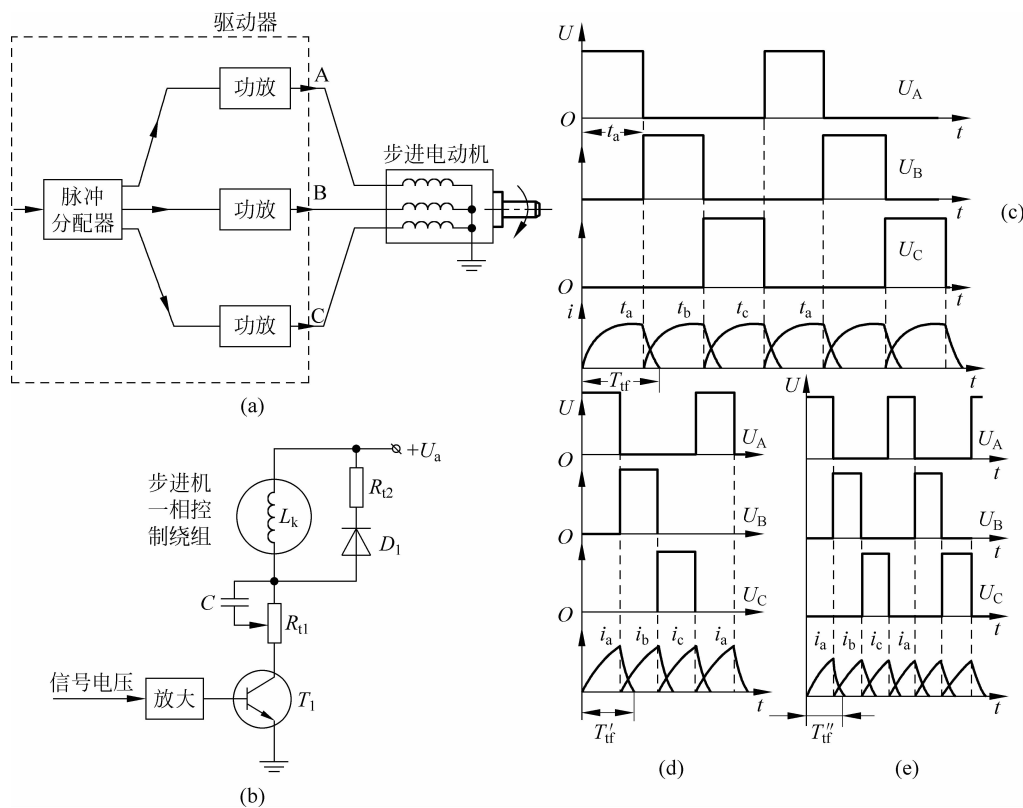


图 5-24 步进电动机控制回路及其在不同脉冲频率下的回路电流

冲频率越高,电流波形与矩形相差也越大,而其幅值则越来越小。这样,在控制绕组通电的时间内,电流将升不起来,因而产生的电磁转矩也变小;而在控制绕组断电后,电流又不能立刻降下来,必将产生阻碍旋转的反相转矩。最终使步进电动机的同步电磁转矩——动态转矩下降,负载能力降低。动态转矩随控制脉冲频率升高而下降的规律称做运行矩频特性,如图 5-25 所示。

另外,由于控制频率升高,步进电动机铁芯中的涡流损耗也随之迅速增大,这也是使输出功率和动态转矩下降的因素之一。总之,控制脉冲频率的升高是获得步进电动机连续运行稳定和高效率所必需的,然而必须注意运行矩频特性的规律。

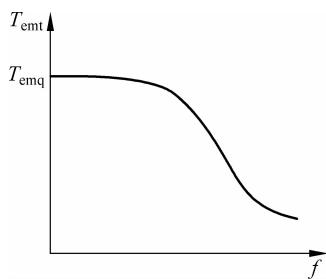


图 5-25 运行矩频特性

5.5 永磁式和混合式步进电动机

由于反应式步进电动机的转子上没有绕组,只是靠定子励磁,因此电动机的功率及效率比较低。以后出现了永磁式和混合式步进电机。

5.5.1 永磁式步进电动机

1. 结构

永磁式步进电动机的特点是转子由一对或多对极的星型永久磁铁组成,定子上相应有二相或多相控制绕组。转子永久磁铁磁极数与定子每相控制绕组的极数对应相等,且通常两者的极宽也相同,永磁式步进电动机的典型结构如图 5-26 所示。定子上有两相或多相绕组,转子由永磁体组成 $2p$ 个磁极,多数是隐极形式。转子磁极数 Z_r 为

$$Z_r = 2p \quad (5-42)$$

转子相邻磁极轴线夹角(极距角) θ_r 为

$$\theta_r = \frac{360^\circ}{Z_r} \quad (5-43)$$

定子铁芯由软磁钢片叠压而成。定子上有 m 相绕组。每相绕组有 $2p$ 个线圈,放在 $2p$ 个定子磁极上,定子为显极形式,定子磁极数 Z_s 为

$$Z_s = 2mp \quad (5-44)$$

定子磁极轴线夹角(极距角) θ_s 为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{2mp} = \frac{1}{m}\theta_r \quad (5-45)$$

某个定子磁极和转子磁极对齐时,相邻定子磁极轴线和转子磁极轴线的夹角就是 θ_s 。

对于如图 5-26 所示的电机, $Z_r = 2p = 4$, $m = 2$,由此可得 $p = 2$, $\theta_r = 90^\circ$, $Z_s = 8$, $\theta_s = 45^\circ$ 。

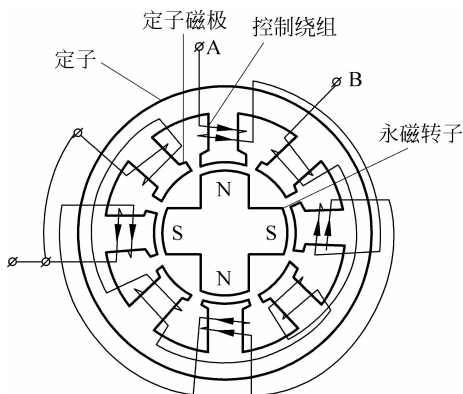


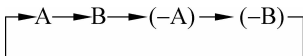
图 5-26 永磁式步进电动机

2. 工作原理

每相绕组都有正、反两种通电状态,电机共有 $2m$ 个通电状态。拍数 N 为

$$N = 2m \quad (5-46)$$

例如图 5-26 的两相电机有 4 种通电状态。以 A 和 $(-A)$ 表示 A 相绕组正、反向通电,该电机通电顺序为



当 A 相通电,A 相极下定、转子磁极对齐时,相邻的 B 相极下定子、转子磁极轴线夹角为 θ_s 。当 A 断 B 通,B 相极下定子、转子磁极对齐时,转子转过定子的一个极距角 θ_s 。故转子每步转角(步距角) θ_b 为

$$\theta_b = \theta_s = \frac{360^\circ}{2mp} \quad (5-47)$$

完成一个通电循环应走 $2m$ 步,转动角度为 $2m\theta_b = 360^\circ/p$,转过转子的一对磁极的距离。

对于如图 5-26 所示的电机, $\theta_b = \theta_s = 45^\circ$ 一个通电循环有 4 步,转过 180° ,正是转子一对磁极的距离。

永磁式步进电动机的特点是：①大步距角，例如 15° 、 22.5° 、 30° 、 45° 、 90° 等；②启动频率较低，通常为几十到几百赫兹（但转速不一定低）；③控制功率小；④在断电情况下有定位转矩；⑤由于用永磁转子，阻尼特性较好。

5.5.2 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，这种步进电动机无论是从结构，还是从运行原理来看，它既有反应式步进电动机小步矩角的特点，又有永磁式步进电动机高效率、绕组电感比较小的特点，常常作为低速同步电动机运行。它是在永磁和变磁阻原理共同作用下运转的，总体性能优于其他步进电动机，是目前工业应用最为广泛的步进电动机品种。它的结构形式是定子具有与反应式步进电动机类似的结构，即带小齿的磁极上装有集中的控制绕组；转子则由环形永久磁铁且两端罩上二段帽式铁芯构成。这两段铁芯像反应式步进电动机那样，也带有均布小齿，但两者装配位置的特点是从轴向上看彼此相互错开半个齿距。

最典型的两相混合式步进电机的定子有 8 个大齿，40 个小齿，转子有 50 个小齿；三相电机的定子有 9 个大齿，45 个小齿，转子有 50 个小齿。这里以两相八极的混合式步进电动机为例，典型结构如图 5-3 所示。

1. 两相混合式步进电动机的结构

如图 5-27 所示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 5-28 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。定子、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。

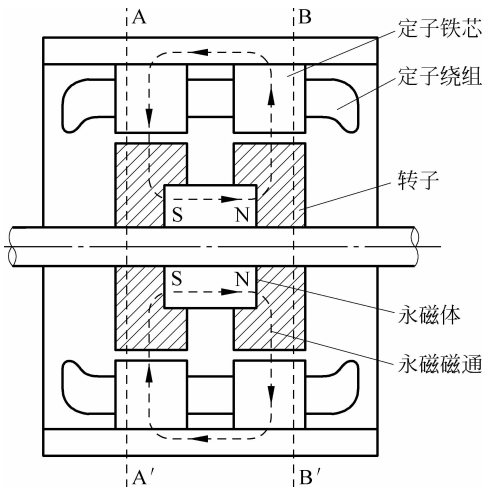


图 5-27 混合式步进电动机轴向剖视图

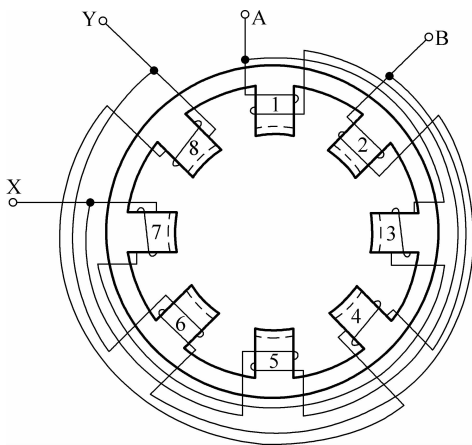


图 5-28 混合式步进电动机绕组接线图

图 5-29 所示为铁芯段横截面图。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。如图 5-29(a)所示为 S 极铁芯段的横截面(即图 5-27 中的 A—A' 截面)。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 和磁极 7 下是齿对槽,磁阻最大。此时,N 极铁芯段的磁极 1' 和磁极 5' 下正好是齿对槽,磁极 3' 和磁极 7' 是齿对齿,如图 5-29(b)所示。

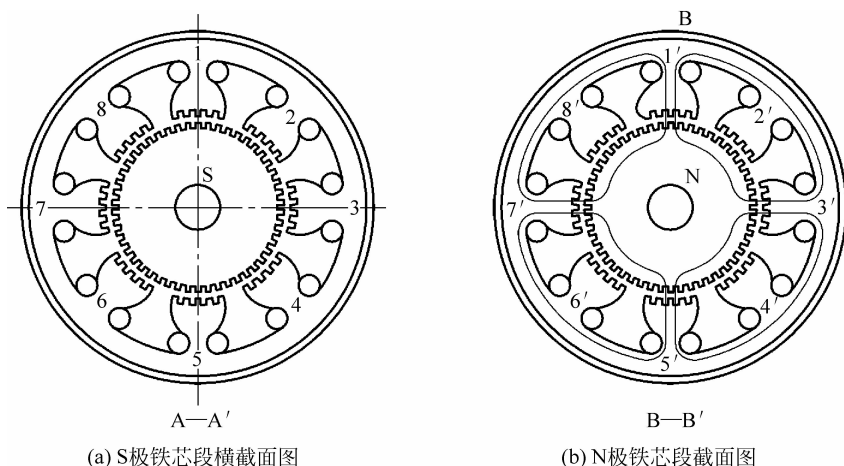


图 5-29 铁芯段的横截面图

2. 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电流产生的磁动势。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) 零电流时的工作状态

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,如图 5-27 所示。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,在每一端的不同极下,磁导有的大的有的小,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 端磁导必然减小,也使总磁导在不同转子位置时保持不变。

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 5-30(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 5-30(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。

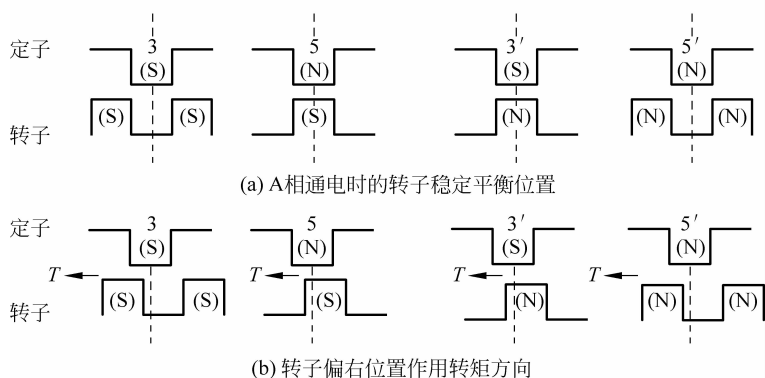


图 5-30 稳定平衡位置及偏离时的作用转矩方向

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

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{2mZ_r} \quad (5-48)$$

3. 通电方式

1) 单四拍通电方式

每次只有一相绕组通电,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 $4Z_r$ 。若转子的齿数为 50,每转为 200 步。

2) 双四拍通电方式

每次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。

5.6 步进电动机的驱动电路

步进电动机系统由步进电动机及其驱动电路构成。步进电动机的运动由一系列电脉冲控制,脉冲发生器所产生的电脉冲信号,通过脉冲分配器按一定的顺序加到电动机的各相绕

组上。为了使电动机能够输出足够的功率,经过脉冲分配器产生的脉冲信号还需要进行功率放大。脉冲分配器、功率放大器以及其他辅助电路统称为步进电机的驱动器。步进电动机系统的性能和运行品质在很大程度上取决于其驱动电路的结构与性能,同一台电动机配以不同类型的驱动电路,其性能会有较大差异。抛开驱动电路来谈步进电动机的性能是不完全的。

目前市场上已有多种类型的步进电动机用集成模块或驱动器出售。它们可向步进电动机输出单极性脉冲,有的还可输出双极性脉冲。

控制器和驱动器的结构示意图见图 5-31,控制器主要指脉冲发生器。脉冲发生器过去多由电子电路做成,其中包括脉冲发生电路、门电路、整形反相电路、脉冲放大器、计数器等。近年来,控制脉冲已逐渐改由单片机或 DSP 等微控制器产生,或在微机上用运动控制卡产生。

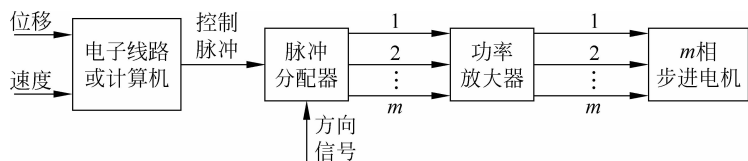


图 5-31 步进电机控制器与驱动器

步进电动机的驱动器一般包括脉冲分配器和功率放大器。

脉冲分配器旧称为环形分配器,它接收控制脉冲信号和方向信号,并按步进电动机的分配方式(状态转换表)要求的状态顺序产生各相控制绕组导通或截止信号。脉冲分配器输出的信号数目与电机相数相同。每来一个控制脉冲,脉冲分配器的输出信号中至少有一个发生变化,它的输出状态就转换一次。输入的方向信号决定了输出的状态转换是按正序还是反序,从而决定了电动机的转向。

功率放大器包括信号放大与处理电路、保护电路、推动放大级电路和功放输出级电路。功率放大器输出级电路直接与步进电动机各相绕组连接。步进电动机的每一相绕组都要使用一个单独的功放输出电路供电。功率放大器按输出脉冲的极性可分为单极性脉冲功放和双极性功放,后者能提供正、负脉冲,使控制绕组通正向电流或反向电流。

1. 单一电压型驱动电路

图 5-24(b)给出了单一电压型驱动电源的一相驱动电路, m 相步进电动机将有 m 个类似的功放电路。经过几级放大的脉冲信号加到晶体管 T_1 的基极上,控制其导通和截止。 T_1 是功放电路的末级功放管,它与步进电动机的控制绕组串联。它们之中通过的电流波形如图 5-24(c)、图 5-24(d)、图 5-24(e)所示,从上节的分析已经知道,这样随频率改变而变化的电流使步进电动机动态转矩变小,以至动态特性变坏。为了提高动态转矩,应尽量缩短控制绕组中电流上升的时间常数 τ_{sh} ,使电流波形的前沿变陡,且最好接近矩形。从式(5-40)可知,欲减小 τ_{sh} 就要求在设计步进电动机时尽量减小控制绕组电感 L_k ,也可以增大串联电阻 R_{c1} 。但增大电阻 R_{c1} 之后,为了达到原来的稳态控制电流值(稳态电流 $I_{kw} = U_k / R_{c1}$),电源电压 U_k 一定要相应提高。

图 5-24(b)中与电阻 R_{c1} 并联一个电容 C ,可强迫控制电流加快上升,改善其波形前沿,使之更陡些。这是因为电容两端电压不能突变,当控制绕组通电瞬间将 R_{c1} 短路,使电源电

压全部加在控制绕组上的缘故。

在晶体管 T_1 截止时电流的变化将使绕组中产生很大的自感电势,使其发生击穿,为此在绕组两端并联一个二极管 D_1 和电阻 R_{t2} 组成的续流回路,为 T_1 截止时的绕组电流提供一个释放回路。电阻 R_{t2} 的作用是减少续流回路的时间常数。为保证晶体管不被击穿, R_{t2} 应满足

$$R_{t2} < R_a \left(\frac{V_{cer}}{U_a} - 1 \right) \quad (5-49)$$

式中, U_a 为电源电压; R_a 为电机绕组电阻; V_{cer} 为晶体管击穿电压。这种电路的特点是线路简单,成本低,低频时响应较好;缺点是效率低,尤其在高频工作的电动机效率更低,在实际中较少使用。

2. 高低压切换型功放电路

这种电路的特点是电动机绕组主电路中采用高压和低压两种电压供电,一般高压为低压的数倍。适用于大功率和高频工作的步进电动机,优点是功耗小,启动力矩大,突跳频率和工作频率高,缺点是低频振荡加剧,波形呈凹形,输出转矩下降;大功率管的数量多用一倍,增加了驱动电源。

高低压切换型驱动电源的原理线路如图 5-32 所示。每相控制绕组将串联两个功放元件,即 T_1 和 T_2 。分别由高压(U_{gu})和低压(U_t)两个电源供电。当来自分配器的输出控制信号 U_k 指令控制绕组通电时,功放管 T_1 和 T_2 的基极均有信号电压输入,使 T_1 和 T_2 饱和导通。于是,在高压电源电压 U_{gu} 的作用下(这时二极管 D_1 两端承受的是反向电压,处于截止状态,可使低压电源得到隔离),控制电流将迅速上升(见图 5-33),电源波形的前沿很陡。经过确定的短时间(高压脉冲宽度)或电流上升到一定值,即利用定时电路或电流检测等方法,使 T_1 基极上的信号消失,功放管 T_1 截止。但此时 T_2 管仍然是导通的,于是,低压电源将立即经二极管 D_1 向控制绕组供电。而当控制信号 U_k 消失时,功放管 T_2 也将截止。控制绕组中的电流将经过二极管 D_2 和 R_{t2} ,并与低压电源构成通路,向高压电源放电,电流将迅速下降。总之,由于利用了高低压切换型电源,高压电源用来加速控制电流的增长;低压

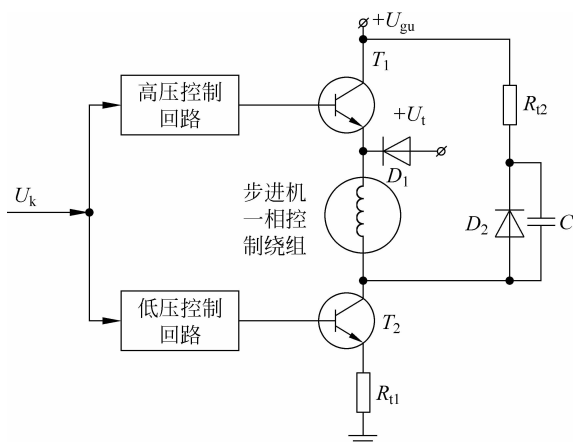


图 5-32 高低压切换型驱动电源

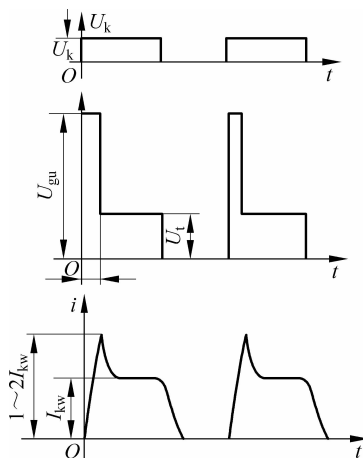


图 5-33 高低压电源的电压和电流波形

电源用来维持额定稳态电流 I_{kw} , 控制电流的波形得到改善, 矩频特性也很好。并且, 启动和运行频率也相应地提高了。控制回路中为平衡各相电流, 控制绕组所串联的电阻 R_{c1} 也可以很小, 约为 $0.1 \sim 0.5 \Omega$ 。因而降低了电源功耗, 提高了控制效率。

3. 斩波恒流功放电路

斩波恒流功放电路的优点是, 无论步进电动机处于锁定、低频或高频工作状态, 都可以使绕组电流保持在额定值附近。这种电路属单一电压型, 通过电流反馈到斩波回路, 使控制绕组电流维持在额定值附近(见图 5-34)。线路串联电阻 R_{c1} 很小, 运行性能好, 效率高。

4. 调频调压驱动电路

这种电源的特点是随着脉冲频率的变化, 控制回路的输入电压按一定的函数关系变化。在步进电机处于低频运行时, 为了减小低频振动, 应使低速时绕组电流上升的前沿较平缓, 这样才能使转子在到达新的稳定平衡位置时不产生过冲, 避免产生明显的振荡, 这时驱动电源用较低的电压供电; 而在步进电机高速运行时希望电流波形的前沿较陡, 以产生足够的绕组电流, 才能提高步进电动机的带载能力。这时驱动电源用较高的电压供电(见图 5-35)。

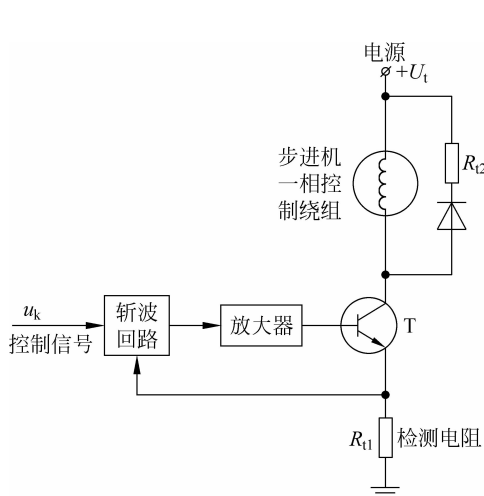


图 5-34 斩波恒流型驱动电源

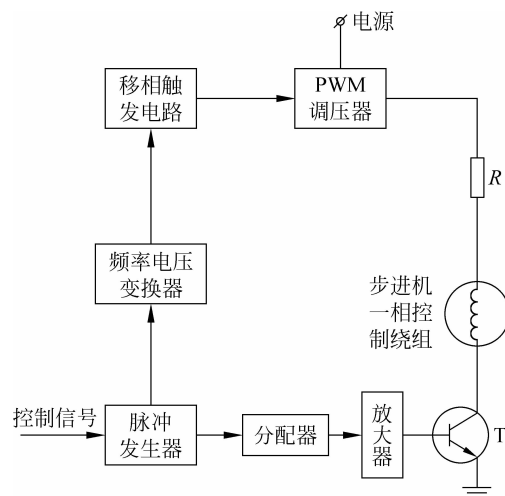


图 5-35 调频调压型驱动电源原理

5. 细分驱动电路

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。在转子齿数一定的条件下, 增加相数能提高电动机的分辨率。在不改变电动机结构的前提下, 如何获得更小的步距角呢? 这可以通过改进驱动电路中对绕组电流的控制方式来实现, 也就是微步驱动技术。所采用的电路称为细分功放电路。其基本思想是控制每相绕组电流的波形, 使其阶梯上升或下降, 即在 0 和最大值之间给出多个稳定的中间状态, 定子磁场的旋转过程中也就有了多个稳定

的中间状态,对应于电动机转子旋转的步数增多、步距角减小。

细分功放电路的特点是:在每次输入脉冲对绕组进行切换时,并不是将绕组额定电流全部加入或完全切除,而每次改变的电流数值只是额定电流数值的一部分。这样绕组中的电流是台阶式地逐渐增加至额定值,切除电流时也是从额定值开始台阶式地逐渐切除。电流波形不是方波,而是阶梯波,如图 5-36 所示。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小得多。

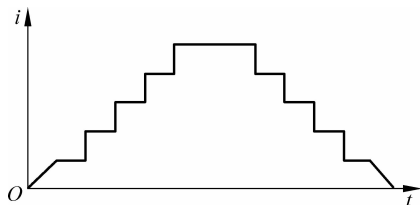


图 5-36 阶梯电流波形

采用电流波形控制技术后,可以方便地实现微步驱动,即使相数少的电动机,也可以提高分辨率。采用细分功放电路不仅可以使步进电动机获得更小的步距角(角分级),更高的分辨率,更小的脉冲当量(一个脉冲对应的位移),也可以明显减小电机的振动、噪声,改善步进电机的低频性能。采用细分电路是步进电机稳定运行的必需选择。

目前步进电动机细分驱动控制,多采用量化的梯形波、正弦波作为细分驱动的电流波形,但实际上这些电流波形一般在步进电动机上均不能得到满意的细分精度。

步进电动机的细分控制,从本质上讲是通过对步进电机的励磁绕组中的电流控制,使步进电动机内部的合成磁场为均匀的圆形旋转磁场,从而实现步进电动机步距角的细分。一般情况下,合成磁场矢量的幅值决定了步进电动机旋转力矩的大小,相邻两个合成磁场矢量之间的夹角大小决定了步距角的大小。因此,想要实现对步进电机的恒力矩均匀细分控制,必须合理控制步进电机绕组中的电流,使电动机内部合成磁场的幅值恒定,而且每个进给脉冲所引起的合成磁场的角度变化也要均匀。在空间彼此相差 $2\pi/m$ 的 m 相绕组,分别通以相位上差 $2\pi/m$ 而幅值相同的正弦电流,则合成的电流矢量便在空间做旋转运动,且幅值保持不变。将绕组电流根据细分倍数均匀量化后,所得细分步距角也是均匀的。为了进一步得到更加均匀的细分步距角,可以通过实验测取一组在通入量化电流波形时,步进电动机细分步距的数据,然后对其误差进行插值补偿,求得实际的补偿电流曲线,这些工作大部分可以由计算机来完成。在取得矫正后的量化电流波形之后,以相应的数字量储存于 E^2 PROM 中的不同区域,量化的程度决定了细分驱动的分辨率。

5.7 步进电动机的选择

首先根据系统的特点选择步进电动机的类型。反应式步进电动机已被淘汰,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。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,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。目前混合式步进电机的应用最广泛。

步进电动机系统往往要采用减速器,其主要原因是:

- (1) 根据系统所要求的脉冲当量 $\theta_{\min}$ (一个脉冲对应的位移量)选择合适的步距角。
- (2) 折算到电机轴上的负载转矩和负载惯量应满足启动矩频特性、运行矩频特性和启

动惯频特性对转矩和惯量的要求。

初步确定减速比 i (电机转速/负载转速) 之后, 可按下述步骤选择和校核步进电动机的规格:

(1) 根据系统所要求的脉冲当量 $\theta_{\min}$ 和可能选择的传动比 i , 选择步进电动机的步距角 θ_b 。

$$\theta_b \leq i\theta_{\min} \quad (5-50)$$

(2) 根据系统允许的最小角(或位移)误差($\Delta\theta_L$) 确定步进电动机的精度等级。所选步进电动机的累计误差 $\Delta\theta_m$

$$\Delta\theta_m \leq i(\Delta\theta_L) \quad (5-51)$$

式中, $\Delta\theta_L$ ——负载轴上所允许的最小的误差。

(3) 根据系统负载的阻力矩, 考虑到初步选定的传动比和传动效率, 求出负载折算到步进电动机轴上的等效负载转矩 T_{Li} 。于是可按下式计算步进电动机的最大静转矩 $T_{j\max}$, 即

$$T_{j\max} \geq \frac{T_{Li}}{0.3 \sim 0.5}$$

或

$$T_{j\max} \geq \frac{T_{Li}}{(0.3 \sim 0.5)i\eta} \quad (5-52)$$

式中, T_{Li} ——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。

η ——传动效率。

(4) 校核电机轴上的惯量是否满足启动矩频特性的要求。

(5) 所选步进电动机的运行频率应大于要求的控制频率 f (步/秒)。

$$f = \frac{6^\circ n}{\theta_b} = \frac{6^\circ i n_L}{\theta_b} \text{ (步/秒)} \quad (5-53)$$

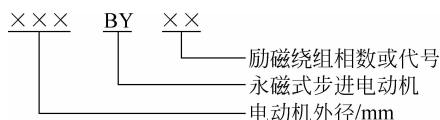
式中, n 为所要求的电机轴的转速 r/min; n_L 为负载轴的转速。

步进电动机的型号表示方法举例如下(不同生产厂家其表示方法也有所不同), 各技术指标见表 5-2~表 5-4。

① 反应式步进电动机



② 永磁式步进电动机



③ 混合式步进电动机

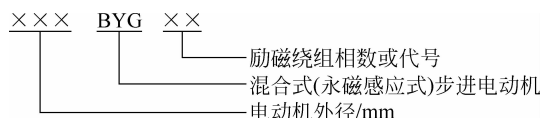


表 5-2 BF 系列磁阻式步进电动机技术数据

型号	相数	额定电压/V	静态电流/A	步距角/°	保持转矩/(mN·m)	空载启动频率/(pulse/s)	外形尺寸/mm			质量/kg
							总长	外径	轴径	
28BF001	3	27	0.2	3/6	17.6	1400	30	28	3	0.075
36BF003	3	27	1.5	1.5/3	70.8	3100	50	42	4.7	0.24
45BF006	3	27	2.5	1.875/3.7	196	2500	56	45	4	0.4
55BF009	4	27	3	0.9/1.8	784	2500	70	55	6	0.83
70BF001	5	60	3.5	1.5/3	784	4000	88	70	6	1.6

表 5-3 BY 系列永磁式步进电动机技术数据

型号	相数	额定电压/V	静态电流/A	步距角/°	保持转矩/(mN·m)	空载启动频率/(pulse/s)	外形尺寸/mm			质量/kg
							总长	外径	轴径	
25BY001	4	12	0.17	18	3.9	400	13	25	3.5	0.03
32BYJ001	4	15	0.12	90	7	150	36	32	3	0.05
42BY002	4	24	0.5	7.5	63	500	22	42	3	0.06
42BY003	4	24	0.6	7.5	34	500	22	42	3	0.06
55BY001	4	24	0.17	7.5	117	250	24	55	6	0.07

表 5-4 BYG 系列混合式步进电动机技术数据

型号	相数	额定电压/V	静态电流/A	步距角/°	保持转矩/(mN·m)	空载启动频率/(pulse/s)	外形尺寸/mm			质量/kg
							总长	外径	轴径	
42BYG008	4	32	0.38	1.8	76	1400	70	56	4.7	0.24
42BYG012	2	12	0.52	1.8	172	600	50	42	4.7	0.24
57BYG007	4	12	0.38	1.8	30	650	41	57	6	0.45
86BYG017	5	70	1.25	0.36/0.72	1200	2400	105	86	9.5	1.5
110BYG007	5	130	5	0.36/0.72	6800	2400	194	110	16	7.5

5.8 步进电动机的应用实例——直角坐标机器人控制系统

直角坐标机器人是工业应用中,能够实现可重复编程多运动自由度构成空间直角关系、多用途的工业自动化设备。

直角坐标机器人结构简单,定位精度高,空间轨迹易于求解;但其动作范围相对较小,设备的空间因数较低,实现相同的动作空间要求时,机体本身的体积较大。随着机器人技术的发展,直角坐标机器人已广泛应用于汽车及汽车零部件制造、机械加工、电子电气制造、食品加工等许多领域,成为柔性制造系统(FMS)、工厂自动化(FA)、计算机集成制造系统(CIMS)的先进自动化工具,几乎能胜任所有的工业自动化任务。

5.8.1 系统的组成及工作原理

直角坐标机器人主要由机器人本体,驱动系统,控制系统和末端执行装置组成。系统的实物图如图 5-37 所示,图 b 中 1、2、3 为步进电机。系统的结构框图如图 5-38 所示。

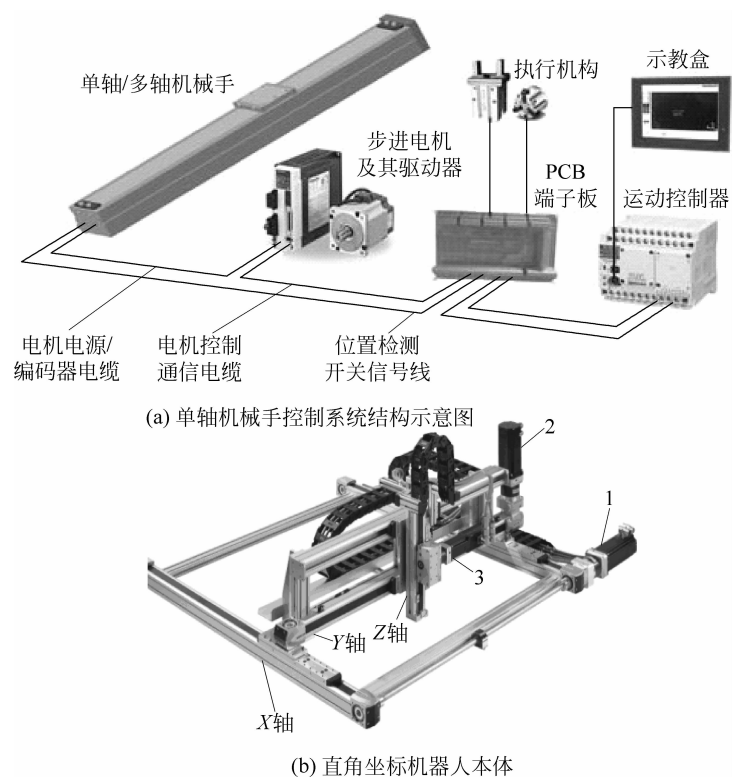


图 5-37 直角坐标机器人实物图

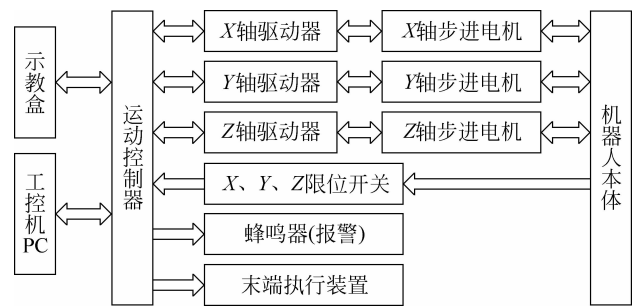


图 5-38 直角坐标机器人结构框图

1. 机器人本体

直线运动单元是直角坐标机器人本体最基本的组成部分,主要由支撑载体的铝型材或钢型材和被安装在型材内部的直线导轨、运动滑块以及作为带动滑块做高速运动的齿型带组成。

2. 运动轴的驱动系统

直角坐标机器人的传动主要是通过步进电机的转动带动同步带运动,同步带带动直线导轨上的滑块运动。根据直线定位单元驱动轴的最高转速来选择驱动电机。当驱动轴的最高转速低于 600 转/分时通常选用步进电机,否则要选用交流伺服电机。

3. 运动控制器

机器人要在一定时间内完成特定的任务,抓取,加速运动,高速运动,减速运动,释放工件等,运动控制器应实现 1-4 轴的组运动控制,实现在步进电机驱动下的直线、平面、三维、三维加旋转的精确定位运动及轨迹运行,实现轨迹运行和电机运动控制(电机变速运行)、I/O 控制的有机集成和逻辑设计。

4. 示教盒

即运动轨迹的录入、编辑、储存,完成插补计算,数据存储。通过 I/O 通信的方式实现多机位联动,如统一生产节拍、报警急停等。

5. 末端操作器

根据其具体应用情况,其末端操作器可能是吸盘、手爪、焊枪、胶枪、专用工具和检测仪器等。因末端操作工具的不同,直角坐标机器人可以非常方便地用作各种自动化设备,完成如焊接、搬运、检测、装配、贴标、喷涂等工作。

5.8.2 步进电机系统组成及工作原理

步进电动机系统是由步进电动机及其驱动控制电路构成的,如图 5-39 所示。步进电动机系统的性能和运行品质在很大程度上取决于其驱动电路的结构与性能,同一台电动机配以不同类型的驱动电路,其性能会有较大差异。步进电动机的控制方式经过多年的发展,形成了调频调压控制、恒流斩波控制、细分控制、矢量控制以及位置、速度反馈控制等控制方式。

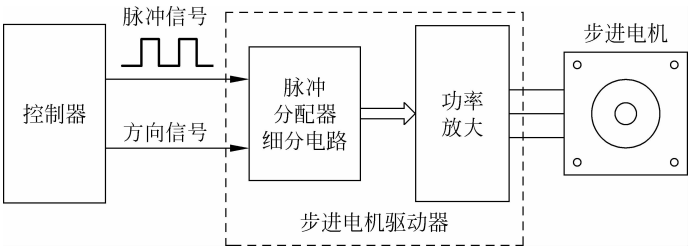


图 5-39 步进电机控制系统结构图

细分控制实质上是通过对步进电机相电流的精确控制达到减小步距角,使电机转动连续平稳的一种电机驱动方式,是跟踪给定电流波形的相绕组电流闭环控制。

对于三相步进电机,采用三拍通电方式时,步距角为 120° 电角度,如果采用六拍通电方式通电,则步距角为 60° 电角度。步进电机的转子在定子合成磁势作用下步进旋转,两种通电方式转子分别转过 120° 和 60° 电角度。若将绕组中的电流波形分成 N 个台阶的阶梯波 (N 为正整数),则电流每升或降一个台阶,转子转过一小步。当转子按照这样的规律转过 N 小步时,相当于它转过一个步距角。通过细分驱动技术将绕组电流波形变化为如图 5-40 所示的波形,并通过绕组电流的闭环控制使其如图 5-40 所示的波形阶梯上升或下降,定子磁场的合成磁势大致如图 5-41 所示。

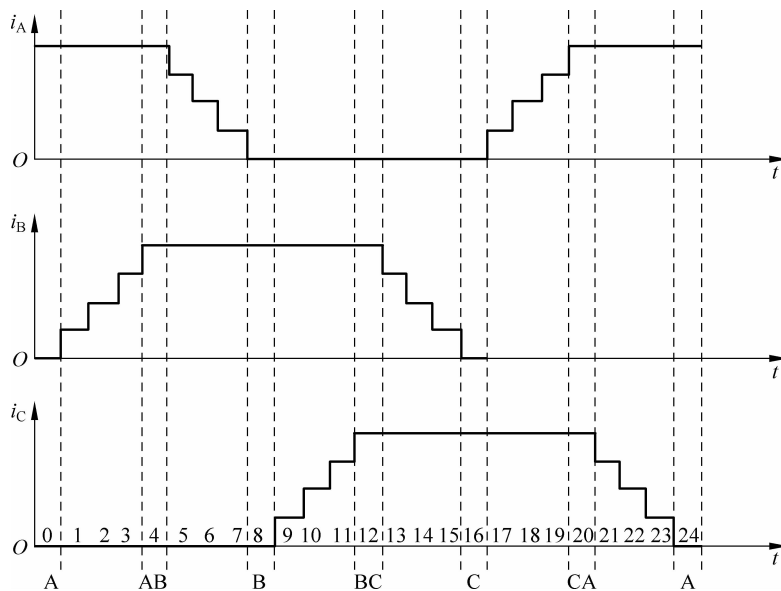


图 5-40 三相步进电机四细分的电流波形图

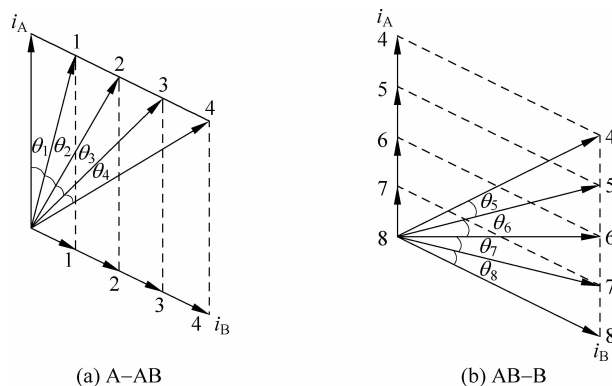


图 5-41 三相步进电机四细分的合成磁势图

步进电机细分驱动的控制结构原理如图 5-42 所示。步进电机的电流细分控制由控制器软件来完成,主要采用数字 PI 调节,同时对输入电压进行补偿。对电压的补偿,可使得细分驱动器在宽电压范围内均能正常工作。根据控制器预先存储的电流给定波形(正弦波)和输入控制脉冲序列的状态,实时给出当前步各相绕组电流的给定值与电流反馈值比较,改变

主电路 MOSFET 驱动脉冲宽度,控制相绕组电流为给定值。

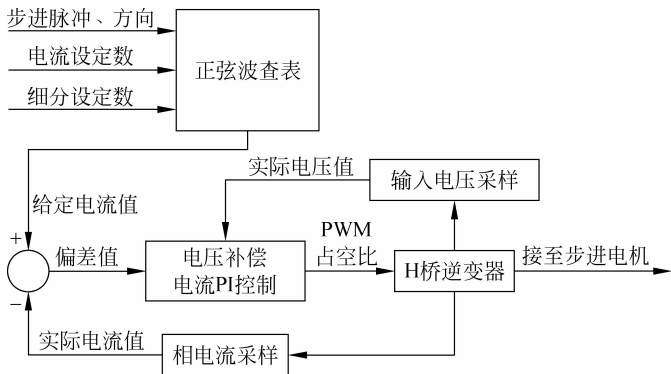


图 5-42 步进电机细分驱动器控制框图

5.8.3 步进电机控制系统中元件的工作原理

1. 步进电机驱动器

百格拉公司将交流伺服控制原理应用到三相混合式步进电机驱动系统中,输入的 220VAC 经整流后变为 325VDC,再经脉宽调制变为三路 325V 阶梯式正弦波形电流,它们按固定时序分别流过三路绕组,其每个阶梯对应电机转动一步。通过改变驱动器输出正弦电流的频率来改变电机转速,而每转输出的阶梯数确定了每步转过的角度。按目前的电子技术,正弦电流的阶梯数可以分得很多,理论上电机每转的步数可以很高,这就是细分技术,但经过理论分析及大量的实验证明:如果细分数超过 10,电机带负载后,就会产生跳步和失步现象。目前仅仅三相正弦电流细分技术能保证细分后电机输出扭矩不下降,而且每一步都能精确定位。三相混合式步进电机驱动器如图 5-43 所示。

(1) 百格拉驱动器的种类很多,常用的三种型号: D921、WD3-007、WD3-008,其共同特点如下。

① 交流伺服工作原理,交流伺服运行特性,三相正弦电流驱动输出。

② 高速启动电机(空载突跳速度达 4.7~6.3 转/秒)。

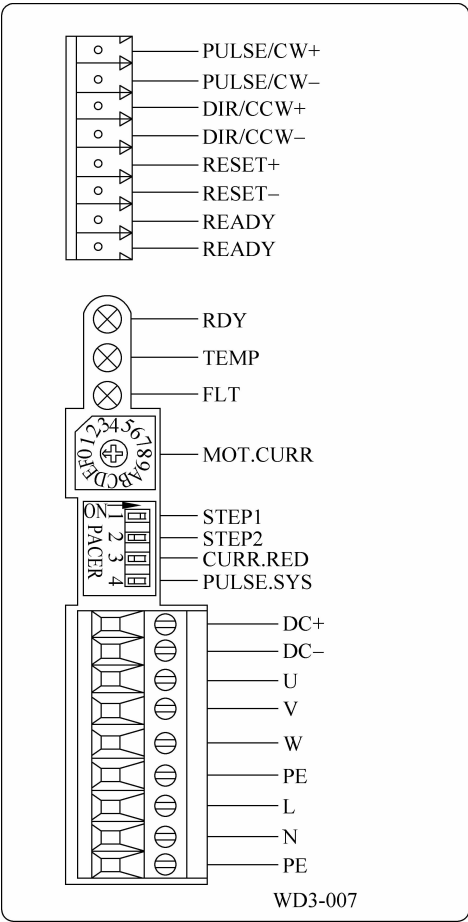


图 5-43 三相混合式步进电机驱动器

- ③ 高电压、小电流驱动,电流随转速增高而变大、增大高速扭矩、减小电机发热。
- ④ 电路板采取三防处理,有过压、欠压、过流、相间短路、过热保护功能。
- ⑤ 十细分和半流功能。
- ⑥ 输出相电流可设置(满足不同电机要求)。
- ⑦ WD3-007 具有相位记忆功能,电机上下电时,输出轴位置不变,给工作带来很大方便。

- ⑧ 可设定为两相和五相电机步/转,替代两相和五相电机。
- ⑨ 定位精度更高,在 10 000 步/转时每步都能精确运动和定位,而且输出扭矩不下降。
- ⑩ 电机和驱动器间仅用三根线,同交流异步电机一样,减少连线出错的可能性。
- ⑪ 驱动器与上位机间连线简单,都是三根线,可高电平或低电平有效。
- ⑫ 低速无爬行、噪音小、几乎无共振、低速性能可与高档伺服的性能相媲美。
- ⑬ 高速扭矩提高近 40%,最高转速为 3600 转/分,几乎无共振区。
- ⑭ 比同样尺寸的反应式步进电机所产生的功率大 20%左右。
- ⑮ 电机的扭矩与它的转速有关,而与电机每转的步数无关。

(2) 驱动器的接口。

信号接口: PULSE+——电机输入控制脉冲信号。

DIR+——电机转动方向控制信号。

RESET+——复位信号,用于封锁输入信号。

READY+——报警信号;

PULSE-、DIR-、RESET-和 READY-短接为公共地。

状态指示: RDY 灯亮表示驱动器正常工作。

TEMP 灯亮表示驱动器超温。

FLT 灯亮表示驱动器故障。

功能选择: MOT. CURR——设置电机相电流。

STEP1、STEP2——设置电机每转的步数。

PULSE. SYS——可设置成“脉冲和方向”控制方式;也可设置成“正转和反转”控制方式。

CURR. RED——用于设置半流功能。

功率接口: DC+和 DC-接制动电容(用户使用时请与代理商联系)。

U、V、W 接电机动力线,PE 是地。

L、N 接供电电源。

(3) 百格拉步进电机驱动器原理。

百格拉步进电机驱动器原理如图 5-44 所示。

2. 步进电机驱动电路

恒相流控制的基本思想是通过控制主电路中 MOSFET 的导通时间,即调节 MOSFET 触发信号的脉冲宽度,来达到控制输出驱动电压进而控制电机绕组电流的目的。具体来说,对每一相定子绕组电流进行采样,得到当前绕组电流值,该值经过适当处理后与电流给定值比较;若当前电流值偏大,则减小该相绕组驱动电压的作用时间;反之,则增加该相绕组驱

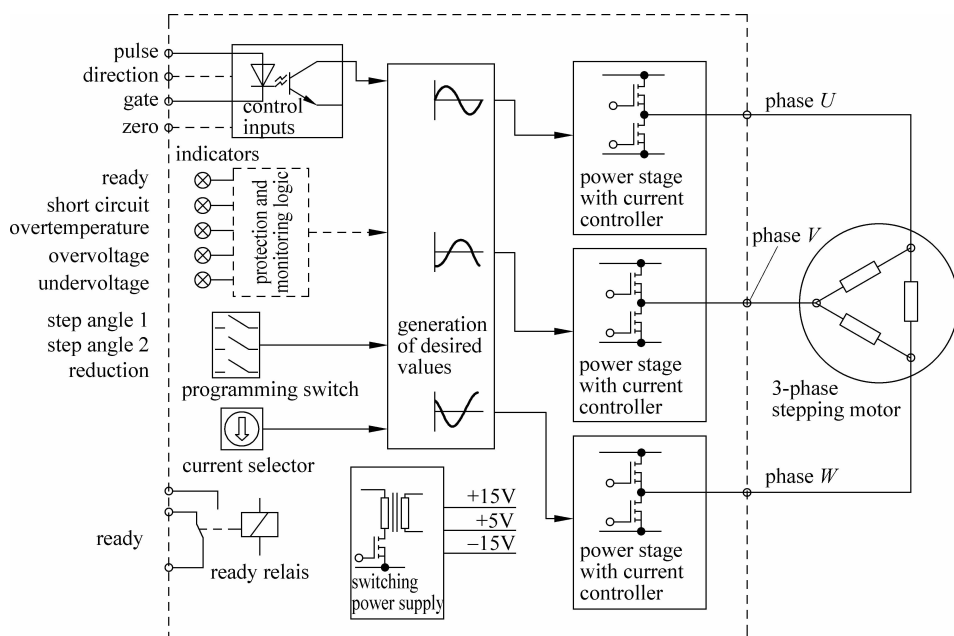


图 5-44 百格拉步进电机驱动器原理图

动电压的作用时间。

图 5-45 给出了一相 H 桥恒频斩波恒相流驱动电路原理框图。主电路为 H 桥结构, 电流检测电阻 R_0 对地串接在每相主电路中, R_0 上的压降与绕组电流值成正比。该压降经电位器 VR_1 分压后作为电流反馈值与由 R_2 、 R_3 分压得到的电流给定值比较。若电流反馈值大于给定值, 比较器 $U1A$ 输出高电平, D 触发器 $U3A$ 被强制复位, 其输出端 Q 为低电平, 通过与门 $U2A$ 的作用关断 MOSFET 栅极驱动信号, MOSFET 关断, 相电流通过与 MOSFET 反并联的续流二极管续流, 幅值逐渐减小。恒频脉冲发生器发出恒定频率的脉冲序列作为 D 触发器 $U3A$ 的 CLK 时钟输入。当下一个 CLK 脉冲上升沿到来时, 如果绕组电流值已经小于给定值, D 触发器 RESET 控制端信号为低电平, 则 D 触发器受 CLK 脉冲上升沿触发翻转, 输出端 Q 由低电平跃变为高电平, 环形分配器给出的相绕组通电状态信

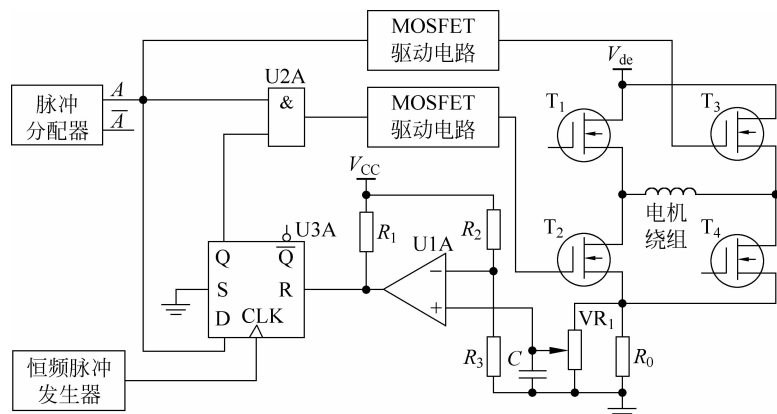


图 5-45 H 桥恒频斩波恒相流驱动电路原理框图

号通过或门 U2A,控制相应的 MOSFET 正常导通,相电流幅值逐渐增大。当相电流幅值增大到大于给定值时,如前所述,比较器 U1A 输出高电平,D 触发器 U3A 被强制复位,其输出端 Q 变为低电平,通过与门 U2A 的作用关断 MOSFET 栅极驱动信号,相电流开始续流,幅值逐渐减小。

3. 步进电机

百格拉三相步进电机采用了比五相和两相步进电机更多的磁极对数,并在齿形及其排列方式,增大转子直径,减小气隙,采用优良的材质和先进的制造工艺,电机定转子间气隙仅为 50 μ m。转子定子直径比提高到 59%,大大提高了电机的工作扭矩。几乎无共振区、无爬行、无噪音。电机的扭矩与电机步数无关,空载启动速度 4.7~8.0 转/秒,高转速 3600 转/分。所用磁钢能耐 180 $^{\circ}$ C 高温,而国产磁钢能耐 150 $^{\circ}$ C 高温。满负荷、10 000 步/转时能平稳运行和精确定位,性能指标如表 5-5 所示。

表 5-5 步进电机参数表

电机型号		步数/ (步/转)	相电压 /V	相电流 /A	额定 扭矩 /(N· m)	保持 扭矩 /(N· m)	最高 启动 速度 /(r/s)	转动 惯量 /(kg· cm ²)	重量 /kg	接线 方式 /(线 数)	配套驱 动器
57 型	VRDM364/LHA	200/ 400/ 500/ 1000/ 2000/ 4000/ 5000/ 10 000	40VDC	5.2	0.45	0.51	6.3	0.1	0.45	6	D921
	VRDM366/LHA			0.9	1.02	0.22		0.72			
	VRDM368/LHA			1.5	1.74	0.38		1.1			
90 型	VRDM397/LHA			1.7	1.92	1.1		1.65			
	VRDM3910/LHA			3.7	4.18	2.2		2.7			
	VRDM397/LHA			325VAC	1.75	2		2.26	5.3		
	VRDM397/LWB	2	4		4.52	2.2	2.05	2.7			
	VRDM3910/LWA						3.1	3.8			
	VRDM3910/LWB						4.2				
VRDM3913/LWA	2.25						6	6.78		3.3	
VRDM3913/LWB	2.5	12	13.92	4.7	10.5	8	3	WD3-008 WDM3-008			
110 型	VRDM31117/LSB	4.1									
	VRDM31117/LWB	4.75	16.5		19.14	16			11		
	VRDM31122/LWB										

思考题

- 5-1 为什么说步进电机是基于旋转磁场运动的?
- 5-2 提高步进电动机驱动器电源电压是否会提升转矩?
- 5-3 为什么改圆形电动机为方形电动机?
- 5-4 为什么要向三相步进电机发展?
- 5-5 在混合式步进电机中,为什么两相的定子为 8 个主极而不是 4 个?

5-6 在混合式步进电机中,假如转子上没有磁钢,只是在定子的控制绕组通电,电机是否会和反应式步进电机一样产生转矩?

习题

- 5-1 步进电动机的主要优点、缺点是什么?
- 5-2 反应式步进电动机的结构特点和基本工作原理是什么?
- 5-3 什么叫做步矩角?它有几种表示方法?其关系如何?
- 5-4 什么叫做拍、单拍制和双拍制?步进电动机技术数据中标的步矩角有时有两个数,如果步矩角为 $1.5^\circ/3^\circ$,这是什么意思?
- 5-5 什么叫做矩角特性?
- 5-6 何谓静稳定区、动稳定区及裕量角?它与矩角特性有什么关系?
- 5-7 何谓最大静转矩、启动转矩?它们与相数、运行方式有什么联系?
- 5-8 何谓运行矩频特性,启动矩频特性和启动惯频特性?什么是运行频率?
- 5-9 某五相步进电动机转子有 48 个齿,计算其单拍制和双拍制的步矩角,并画出它们的矩角特性曲线簇。
- 5-10 题 5-9 中,已知单拍运行时的最大静转矩为 $0.2\text{N}\cdot\text{m}$,负载为 $0.18\text{N}\cdot\text{m}$ 时,上述运行方式中哪一种能使该步进电动机正常运行?
- 5-11 步进电动机的驱动电路包括哪些主要部分?它们的主要功能是什么?
- 5-12 步进电动机驱动电路的驱动级有哪几种常用线路?这些线路各有什么特点?

参考文献

- [1] (日)坂本正文著. 步进电机应用技术. 王自强译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 蔡耀成. 步进电动机国内外近期发展展望. 微特电机, 2000(5): 28-30.
- [3] 刘宝廷, 程树康. 步进电动机及其驱动控制系统. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [4] 李刚, 周文宝. 直角坐标机器人简述及其应用介绍. 伺服控制, 2008(09): 72-75.
- [5] 史敬灼, 王宗培. 步进电动机驱动控制技术的发展. 微特电机, 2007(07): 50-54.
- [6] 陈建进, 管兴勇. 两相混合式步进电机细分驱动器研制. 微型机与应用, 2014(4): 71-73.
- [7] 朱武, 涂祥存等. 基于 L6506/L298 芯片细分步进电机驱动系统设计. 电气自动化, 2011(1): 10-12.
- [8] 王宗培. 步进电动机. 北京: 科学出版社, 1979.
- [9] <http://bbs.gongkong.com/>.