

# 步进电机原理及使用说明

## 一、前言

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化的影响，即给电机加一个脉冲信号，电机则转过一个步距角。这一线性关系的存在，加上步进电机只有周期性的误差而无累积误差等特点。使得在速度、位置等控制领域用步进电机来控制变的非常的简单。

虽然步进电机已被广泛地应用，但步进电机并不能象普通的直流电机，交流电机在常规下使用。它必须由双环形脉冲信号、功率驱动电路等组成控制系统方可使用。因此用好步进电机却非易事，它涉及到机械、电机、电子及计算机等许多专业知识。

目前,生产步进电机的厂家的确不少,但具有专业技术人员,能够自行开发,研制的厂家却非常少,大部分的厂家只一、二十人,连最基本的设备都没有。仅仅处于一种盲目的仿制阶段。这就给用户在产品选型、使用中造成许多麻烦。步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的一种开环线性执行元件,具有无累积误差、成本低、控制简单特点。产品从相数上分有二、三、四、五相,从步距角上分有  $0.9^\circ/1.8^\circ$ 、 $0.36^\circ/0.72^\circ$ ,从规格上分有口  $42\sim\phi 130$ ,从静力矩上分有  $0.1N\cdot M\sim 40N\cdot M$ 。

鉴于上述情况,我们决定以广泛的感应子式步进电机为例。叙述其基本工作原理。望能对广大用户在选型、使用、及整机改进时有所帮助。

## 二、感应子式步进电机工作原理

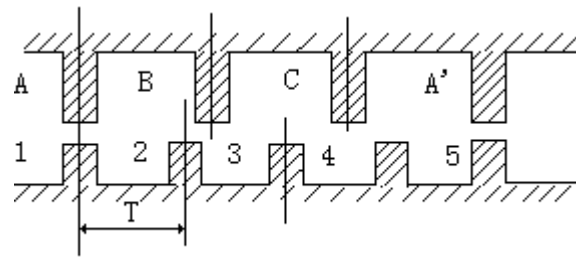
### (一) 反应式步进电机原理

由于反应式步进电机工作原理比较简单。下面先叙述三相反应式步进电机原理。

#### 1、结构:

电机转子均匀分布着很多小齿,定子齿有三个励磁绕组,其几何轴线依次分别与转子齿轴线错开。

$0$ 、 $1/3\tau$ 、 $2/3\tau$ , (相邻两转子齿轴线间的距离为齿距以 $\tau$ 表示), 即  $A$  与齿  $1$  相对齐,  $B$  与齿  $2$  向右错开  $1/3\tau$ ,  $C$  与齿  $3$  向右错开  $2/3\tau$ ,  $A'$  与齿  $5$  相对齐, ( $A'$  就是  $A$ , 齿  $5$  就是齿  $1$ ) 下面是定转子的展开图:



## 2、旋转：

如 A 相通电，B，C 相不通电时，由于磁场作用，齿 1 与 A 对齐，（转子不受任何力以下均同）。

如 B 相通电，A，C 相不通电时，齿 2 应与 B 对齐，此时转子向右移过  $1/3$  齿，此时齿 3 与 C 偏移为  $1/3$  齿，齿 4 与 A 偏移（ $-1/3$  齿） $=2/3$  齿。

如 C 相通电，A，B 相不通电，齿 3 应与 C 对齐，此时转子又向右移过  $1/3$  齿，此时齿 4 与 A 偏移为  $1/3$  齿对齐。

如 A 相通电，B，C 相不通电，齿 4 与 A 对齐，转子又向右移过  $1/3$  齿

这样经过 A、B、C、A 分别通电状态，齿 4（即齿 1 前一齿）移到 A 相，电机转子向右转过一个齿距，如果不断地按 A，B，C，A.....通电，电机就每步（每脉冲） $1/3$  齿，向右旋转。如按 A，C，B，A.....通电，电机就反转。

由此可见：电机的位置和速度由导电次数（脉冲数）和频率成一一对应关系。而方向由导电顺序决定。

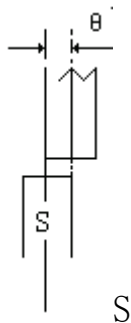
不过，出于对力矩、平稳、噪音及减少角度等方面考虑。往往采用 A-AB-B-BC-C-CA-A 这种导电状态，这样将原来每步  $1/3$  齿改变为  $1/6$  齿。甚至于通过二相电流不同的组合，使其  $1/3$  齿变为  $1/12$  齿， $1/24$  齿，这就是电机细分驱动的基本理论依据。

不难推出：电机定子上有  $m$  相励磁绕组，其轴线分别与转子齿轴线偏移  $1/m, 2/m, \dots, (m-1)/m, 1$ 。并且导电按一定的相序电机就能正反转被控制——这是步进电机旋转的物理条件。只要符合这一条件我们理论上可以制造任何相的步进电机，出于成本等多方面考虑，市场上一般以二、三、四、五相为多。

## 3、力矩：

电机一旦通电，在定转子间将产生磁场（磁通量  $\Phi$ ）当转子与定子错开一定角度产生力

$$F \text{ 与 } (d\Phi/d\theta) \text{ 成正比}$$



其磁通量  $\Phi = Br * S$

$Br$  为磁密， $S$  为导磁面积

$F$  与  $L * D * Br$  成正比

$L$  为铁芯有效长度， $D$  为转子直径

$Br = N \cdot I / R$

$N \cdot I$  为励磁绕阻安匝数（电流乘匝数） $R$  为磁阻。

力矩 = 力 \* 半径

力矩与电机有效体积 \* 安匝数 \* 磁密 成正比（只考虑线性状态）

因此，电机有效体积越大，励磁安匝数越大，定转子间气隙越小，电机力矩越大，反之亦然。

## （二）感应子式步进电机

### 1、特点：

感应子式步进电机与传统的反应式步进电机相比，结构上转子加有永磁体，以提供软磁材料的工作点，而定子激磁只需提供变化的磁场而不必提供磁材料工作点的耗能，因此该电机效率高，电流小，发热低。因永磁体的存在，该电机具有较强的反电势，其自身阻尼作用比较好，使其在运转过程中比较平稳、噪音低、低频振动小。

感应子式步进电机某种程度上可以看作是低速同步电机。一个四相电机可以作四相运行，也可以作二相运行。（必须采用双极电压驱动），而反应式电机则不能如此。例如：四相，八相运行（A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A）完全可以采用二相八拍运行方式，不难发现其条件为  $C = \bar{A}$  ,  $D = \bar{B}$  .

一个二相电机的内部绕组与四相电机完全一致，小功率电机一般直接接为二相，而功率大一点的电机，为了方便使用，灵活改变电机的动态特点，往往将其外部接线为八根引线（四相），这样使用时，既可以作四相电机使用，可以作二相电机绕组串联或并联使用。

## 2、分类

感应子式步进电机以相数可分为：二相电机、三相电机、四相电机、五相电机等。以机座号（电机外径）可分为：42BYG(BYG为感应子式步进电机代号)、57BYG、86BYG、110BYG、（国际标准），而像70BYG、90BYG、130BYG等均为国内标准。

## 3、步进电机的静态指标术语

相数：产生不同对极N、S磁场的激磁线圈对数。常用m表示。

拍数：完成一个磁场周期性变化所需脉冲数或导电状态用n表示，或指电机转过一个齿距角所需脉冲数，以四相电机为例，有四相四拍运行方式即AB-BC-CD-DA-AB，四相八拍运行方式即A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A。

步距角：对应一个脉冲信号，电机转子转过的角位移用 $\theta$ 表示。 $\theta=360$ 度（转子齿数J\*运行拍数），以常规二、四相，转子齿为50齿电机为例。四拍运行时步距角为 $\theta=360$ 度/（50\*4）=1.8度（俗称整步），八拍运行时步距角为 $\theta=360$ 度/（50\*8）=0.9度（俗称半步）。

定位转矩：电机在不通电状态下，电机转子自身的锁定力矩（由磁场齿形的谐波以及机械误差造成的）

静转矩：电机在额定静态电作用下，电机不作旋转运动时，电机转轴的锁定力矩。此力矩是衡量电机体积（几何尺寸）的标准，与驱动电压及驱动电源等无关。

虽然静转矩与电磁激磁安匝数成正比，与定齿转子间的气隙有关，但过份采用减小气隙，增加激磁安匝来提高静力矩是不可取的，这样会造成电机的发热及机械噪音。

## 4、步进电机动态指标及术语：

### 1、步距角精度：

步进电机每转过一个步距角的实际值与理论值的误差。用百分比表示：误差/步距角\*100%。不同运行拍数其值不同，四拍运行时应在5%之内，八拍运行时应在15%以内。

### 2、失步：

电机运转时运转的步数，不等于理论上的步数。称之为失步。

### 3、失调角：

转子齿轴线偏移定子齿轴线的角度，电机运转必存在失调角，由失调角产生的误差，采用细分驱动是不能解决的。

### 4、最大空载起动频率：

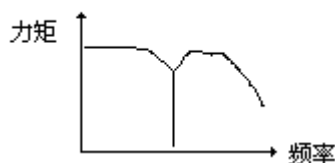
电机在某种驱动形式、电压及额定电流下，在不加负载的情况下，能够直接起动的最大频率。

### 5、最大空载的运行频率：

电机在某种驱动形式，电压及额定电流下，电机不带负载的最高转速频率。

## 6、运行矩频特性：

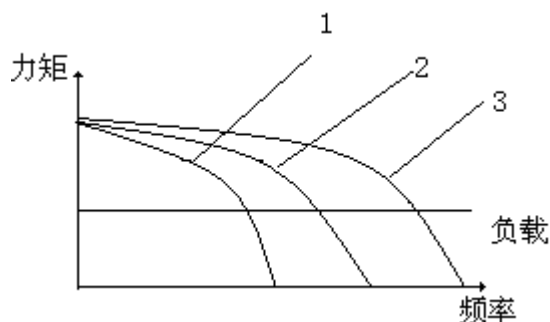
电机在某种测试条件下测得运行中输出力矩与频率关系的曲线称为运行矩频特性，这是电机诸多动态曲线中最重要的，也是电机选择的根本依据。如下图所示：



其它特性还有惯频特性、起动频率特性等。

电机一旦选定，电机的静力矩确定，而动态力矩却不然，电机的动态力矩取决于电机运行时的平均电流（而非静态电流），平均电流越大，电机输出力矩越大，即电机的频率特性越硬。

如下图所示：



其中，曲线 3 电流最大、或电压最高；曲线 1 电流最小、或电压最低，曲线与负载的交点为负载的最大速度点。

要使平均电流大，尽可能提高驱动电压，使采用小电感大电流的电机。

## 7、电机的共振点：

步进电机均有固定的共振区域，二、四相感应子式步进电机的共振区一般在 180-250pps 之间（步距角 1.8 度）或在 400pps 左右（步距角为 0.9 度），电机驱动电压越高，电机电流越大，负载越轻，电机体积越小，则共振区向上偏移，反之亦然，为使电机输出电矩大，不失步和整个系统的噪音降低，一般工作点均应偏移共振区较多。

## 8、电机正反转控制：

当电机绕组通电时序为 AB-BC-CD-DA 或  $(AB - \bar{A}\bar{B} - \bar{A}\bar{B} - A\bar{B})$  时为正转，通电时序为 DA-CA-BC-AB 或  $(A\bar{B} - \bar{A}\bar{B} - \bar{A}\bar{B} - AB)$  时为反转。

## 三、驱动控制系统组成

使用、控制步进电机必须由环形脉冲，功率放大等组成的控制系统，其方框图如下：



### 1、脉冲信号的产生。

脉冲信号一般由单片机或 CPU 产生，一般脉冲信号的占空比为 0.3-0.4 左右，电机转速越高，占空比则越大。

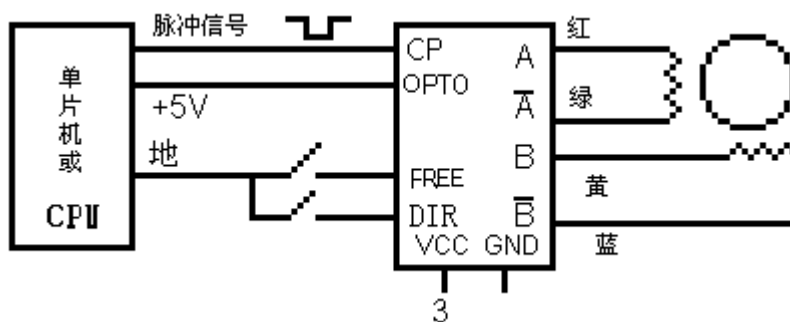
### 2、信号分配

我厂生产的感应子式步进电机以二、四相电机为主，二相电机工作方式有二相四拍和二相八拍二种，具体分配如下：二相四拍为  $AB - \bar{A}B - \bar{A}\bar{B} - A\bar{B}$ ，步距角为 1.8 度；二相八拍为  $AB-B-\bar{A}B-\bar{A}-\bar{A}\bar{B}-\bar{B}-A\bar{B}-A-AB$ ，步距角为 0.9 度。四相电机工作方式也有二种，四相四拍为  $AB-BC-CD-DA-AB$ ，步距角为 1.8 度；四相八拍为  $AB-B-BC-C-CD-D-AB$ ，(步距角为 0.9 度)。

### 3、功率放大

功率放大是驱动系统最为重要的部分。步进电机在一定转速下的转矩取决于它的动态平均电流而非静态电流（而样本上的电流均为静态电流）。平均电流越大电机力矩越大，要达到平均电流大这就需要驱动系统尽量克服电机的反电势。因而不同的场合采取不同的的驱动方式，到目前为止，驱动方式一般有以下几种：恒压、恒压串电阻、高低压驱动、恒流、细分数等。

为尽量提高电机的动态性能，将信号分配、功率放大组成步进电机的驱动电源。我厂生产的 SH 系列二相恒流斩波驱动电源与单片机及电机接线图如下：

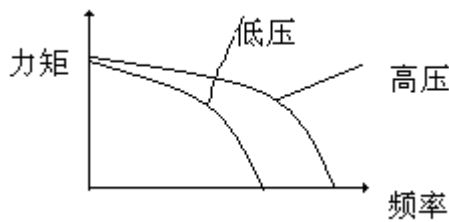


说明：

CP 接 CPU 脉冲信号（负信号，低电平有效）

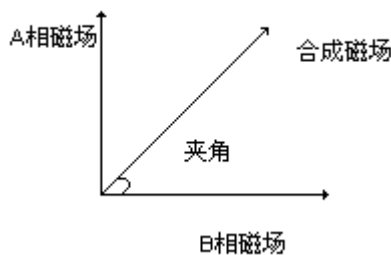
- OPTO 接 CPU+5V
- FREE 脱机，与 CPU 地线相接，驱动电源不工作
- DIR 方向控制，与 CPU 地线相接，电机反转
- VCC 直流电源正端
- GND 直流电源负端
- A 接电机引出线红线
- $\bar{A}$  接电机引出线绿线
- B 接电机引出线黄线
- $\bar{B}$  接电机引出线蓝线

步进电机一经定型，其性能取决于电机的驱动电源。步进电机转速越高，力距越大则要求电机的电流越大，驱动电源的电压越高。电压对力矩影响如下：



#### 4、细分驱动器

在步进电机步距角不能满足使用的条件下，可采用细分驱动器来驱动步进电机，细分驱动器的原理是通过改变相邻（A，B）电流的大小，以改变合成磁场的夹角来控制步进电机运转的。



## 四、步进电机的应用

### （一）步进电机的选择

步进电机有步距角（涉及到相数）、静转矩、及电流三大要素组成。一旦三大要素确定，步进电机的型号便确定下来了。

#### 1、步距角的选择

电机的步距角取决于负载精度的要求，将负载的最小分辨率（当量）换算到电机轴上，每个当量电机应走多少角度（包括减速）。电机的步距角应等于或小于此角度。目前市场上步进电机的步距角一般有 0.36 度/0.72 度（五相电机）、0.9 度/1.8 度（二、四相电机）、1.5 度/3 度（三相电机）等。

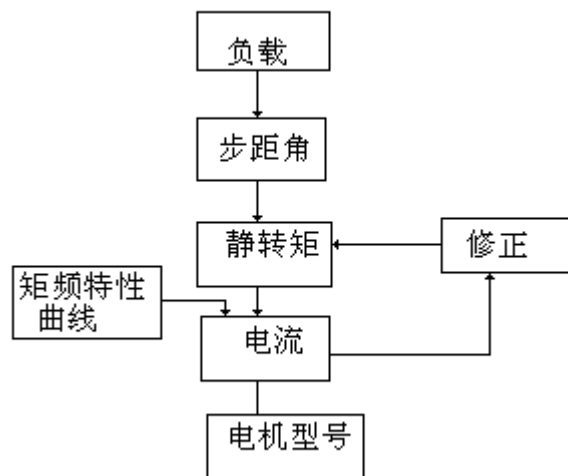
## 2、静力矩的选择

步进电机的动态力矩一下子很难确定，我们往往先确定电机的静力矩。静力矩选择的依据是电机工作的负载，而负载可分为惯性负载和摩擦负载二种。单一的惯性负载和单一的摩擦负载是不存在的。直接起动时（一般由低速）时二种负载均要考虑，加速起动时主要考虑惯性负载，恒速运行进只要考虑摩擦负载。一般情况下，静力矩应为摩擦负载的 2-3 倍内好，静力矩一旦选定，电机的机座及长度便能确定下来（几何尺寸）

## 3、电流的选择

静力矩一样的电机，由于电流参数不同，其运行特性差别很大，可依据矩频特性曲线图，判断电机的电流（参考驱动电源、及驱动电压）

综上所述选择电机一般应遵循以下步骤：



## 4、力矩与功率换算

步进电机一般在较大范围内调速使用、其功率是变化的，一般只用力矩来衡量，力矩与功率换算如下：

$$P = \Omega \cdot M$$

$$\Omega = 2\pi \cdot n/60$$

$$P = 2\pi nM/60$$



其 P 为功率单位为瓦， $\Omega$  为每秒角速度，单位为弧度，n 为每分钟转速，M 为力矩单位为牛顿·米

$$P=2\pi fM/400(\text{半步工作})$$

其中 f 为每秒脉冲数（简称 PPS）

## (二)、应用中的注意点

1、步进电机应用于低速场合---每分钟转速不超过 1000 转，(0.9 度时 6666PPS)，最好在 1000-3000PPS(0.9 度) 间使用，可通过减速装置使其在此间工作，此时电机工作效率高，噪音低。

2、步进电机最好不使用整步状态，整步状态时振动大。

3、由于历史原因，只有标称为 12V 电压的电机使用 12V 外，其他电机的电压值不是驱动电压伏值，可根据驱动器选择驱动电压（建议：57BYG 采用直流 24V-36V，86BYG 采用直流 50V，110BYG 采用高于直流 80V），当然 12 伏的电压除 12V 恒压驱动外也可以采用其他驱动电源，不过要考虑温升。

4、转动惯量大的负载应选择大机座号电机。

5、电机在较高速或大惯量负载时，一般不在工作速度起动，而采用逐渐升频提速，一电机不失步，二可以减少噪音同时可以提高停止的定位精度。

6、高精度时，应通过机械减速、提高电机速度，或采用高细分数的驱动器来解决，也可以采用 5 相电机，不过其整个系统的价格较贵，生产厂家少，其被淘汰的说法是外行话。

7、电机不应在振动区内工作，如若必须可通过改变电压、电流或加一些阻尼的解决。

8、电机在 600PPS（0.9 度）以下工作，应采用小电流、大电感、低电压来驱动。

9、应遵循先选电机后选驱动的原则。

## 五、其他说明

有关低频振动、升降速、机械共振、工作往复运动的误差、平面圆弧 X、Y 插补误差以及其他问题。具体解决办法恕不便在此叙述，我厂用户可来电咨询，可根据具体情况解决。

不同厂家的电机在设计、使用材料及加工工艺方面差别很大，选用步进电机应注重可靠性而轻性能、重品质而轻价格。

最好采用同一生产厂家的控制器、驱动器和电机。这样便于最终客户的维护。

## 步进电机的基本原理

**步进电机的基本原理:**步进电机作为执行元件,是机电一体化中的关键产品之一,广泛应用于各种自动化控制系统中。随着微电子和计算机技术的发展, **步进电机**的需求量与日俱增,在各个国民经济领域都有应用。步进电机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度(称为“步距角”),它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而达到调速的目的。步进电机可以作为一种控制用的特种电机,利用其没有积累误差(精度为100%)的特点,广泛应用于各种开环控制。现在比较常用的步进电机包括**反应式步进电机**(VR)、**永磁式步进电机**(PM)、**混合式步进电机**(HB)和**单相式步进电机**等。永磁式步进电机一般为两相,转矩和体积较小,步进角一般为7.5度或15度;反应式步进电机一般为三相,可实现大转矩输出,步进角一般为1.5度,但噪声和振动都很大。反应式步进电机的转子磁路由软磁材料制成,定子上有多相励磁绕组,利用磁导的变化产生转矩。混合式步进电机是指混合了永磁式和反应式的优点。它又分为两相和五相:两相步进角一般为1.8度而五相步进角一般为0.72度。这种步进电机的应用最为广泛,也是本次细分驱动方案所选用的步进电机。

**步进电机的一些基本参数:** **步进电机固有步距角:**它表示控制系统每发一个步进脉冲信号,电机所转动的角度。电机出厂时给出了一个步距角的值,如86BYG250A型电机给出的值为 $0.9^\circ / 1.8^\circ$ (表示半步工作时为 $0.9^\circ$ 、整步工作时为 $1.8^\circ$ ),这个步距角可以称之为‘**步进电机固有步距角**’,它不一定是**步进电机**实际工作时的真正步距角,真正的步距角和驱动器有关。

**步进电机的相数:**是指电机内部的线圈组数,目前常用的有二相、三相、四相、五相步进电机。电机相数不同,其步距角也不同,一般二相电机的步距角为 $0.9^\circ / 1.8^\circ$ 、三相的为 $0.75^\circ / 1.5^\circ$ 、五相的为 $0.36^\circ / 0.72^\circ$ 。在没有细分驱动器时,用户主要靠选择不同相数的步进电机来满足自己步距角的要求。如果使用细分驱动器,则‘**步进电机**’将变得没有意义,用户只需在驱动器上改变细分数,就可以改变步距角。**保持转矩(HOLDING TORQUE):**是指步进电机通电但没有转动时,定子锁住转子的力矩。它是步进电机最重要的参数之一,通常步进电机在低速时的力矩接近保持转矩。由于步进电机的输出力矩随速度的增大而不断衰减,输出功率也随速度的增大而变化,所以保持转矩就成为了衡量步进电机最重要的参数之一。比如,当人们说2N.m的步进电机,在没有特殊说明的情况下是指保持转矩为2N.m的

步进电机。DETENT TORQUE：是指步进电机没有通电的情况下，定子锁住转子的力矩。DETENT TORQUE 在国内没有统一的翻译方式，容易使大家产生误解；由于反应式步进电机的转子不是永磁材料，所以它没有 DETENT TORQUE。

**步进电机的一些特点：**1. 一般步进电机的精度为步进角的 3-5%，且不累积。2. 步进电机外表允许的最高温度。步进电机温度过高首先会使电机的磁性材料退磁，从而导致力矩下降乃至失步，因此电机外表允许的最高温度应取决于不同电机磁性材料的退磁点；一般来讲，磁性材料的退磁点都在摄氏 130 度以上，有的甚至高达摄氏 200 度以上，所以步进电机外表温度在摄氏 80-90 度完全正常。3. 步进电机的力矩会随转速的升高而下降。当步进电机转动时，电机各相绕组的电感将形成一个反向电动势；频率越高，反向电动势越大。在它的作用下，电机随频率（或速度）的增大而相电流减小，从而导致力矩下降。4. 步进电机低速时可以正常运转，但若高于一定速度就无法启动，并伴有啸叫声。步进电机有一个技术参数：空载启动频率，即步进电机在空载情况下能够正常启动的脉冲频率，如果脉冲频率高于该值，电机不能正常启动，可能发生丢步或堵转。在有负载的情况下，启动频率应更低。如果要使电机达到高速转动，脉冲频率应该有加速过程，即启动频率较低，然后按一定加速度升到所希望的高频（电机转速从低速升到高速）。步进电动机以其显著的特点，在数字化制造时代发挥着重大的用途。伴随着不同的数字化技术的发展以及步进电机本身技术的提高，步进电机将会在更多的领域得到应用。

## 步进电机 14 问

### 1.什么是步进电机？

步进电机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。通俗一点讲：当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度（及步进角）。您可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时您可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。

### 2.步进电机分哪几种？

步进电机分三种：永磁式（PM），反应式（VR）和混合式（HB）

永磁式步进一般为两相，转矩和体积较小，步进角一般为 7.5 度或 15 度；

反应式步进一般为三相，可实现大转矩输出，步进角一般为 1.5 度，但噪声和振动都很大。在欧美等发达国家 80 年代已被淘汰；混合式步进是指混合了永磁式和反应式的优点。它又分为两相和五相：两相步进角一般为 1.8 度而五相步进角一般为 0.72 度。这种步进电机的应用最为广泛。

### 3.什么是保持转矩（HOLDING TORQUE）？

保持转矩（HOLDING TORQUE）是指步进电机通电但没有转动时，定子锁住转子的力矩。它是步进电机最重要的参数之一，通常步进电机在低速时的力矩接近保持转矩。由于步进电机的输出力矩随速度的增大而不断衰减，输出功率也随速度的增大而变化，所以保持转矩就成为了衡量步进电机最重要的参数之一。比如，当人们说 2N.m 的步进电机，在没有特殊说明的情况下是指保持转矩为 2N.m 的步进电机。

### 4.什么是 DETENT TORQUE?

DETENT TORQUE 是指步进电机没有通电的情况下，定子锁住转子的力矩。DETENT TORQUE 在国内没有统一的翻译方式，容易使大家产生误解；由于反应式步进电机的转子不是永磁材料，所以它没有 DETENT TORQUE。

### 5.步进电机精度为多少？是否累积？

一般步进电机的精度为步进角的 3-5%，且不累积。

### 6.步进电机的外表温度允许达到多少？

步进电机温度过高首先会使电机的磁性材料退磁，从而导致力矩下降乃至失步，因此电机外表允许的最高温度应取决于不同电机磁性材料的退磁点；一般来讲，磁性材料的退磁点都在摄氏 130 度以上，有的甚至高达摄氏 200 度以上，所以步进电机外表温度在摄氏 80-90 度完全正常。

### 7.为什么步进电机的力矩会随转速的升高而下降？

当步进电机转动时，电机各相绕组的电感将形成一个反向电动势；频率越高，反向电动势越大。在它的作用下，电机随频率（或速度）的增大而相电流减小，从而导致力矩下降。

### 8.为什么步进电机低速时可以正常运转,但若高于一定速度就无法启动,并伴有啸叫声？

步进电机有一个技术参数：空载启动频率，即步进电机在空载情况下能够正常启动的脉冲频率，如果脉冲频率高于该值，电机不能正常启动，可能发生丢步或堵转。在有负载的情况下，启动频率应更低。如果要使电机达到高速转动，脉冲频率应该有加速过程，即启动频率较低，然后按一定加速度升到所希望的高频（电机转速从低速升到高速）。

### 9.如何克服两相混合式步进电机在低速运转时的振动和噪声？

步进电机低速转动时振动和噪声大是其固有的缺点，一般可采用以下方案来克服：

- A.如步进电机正好工作在共振区，可通过改变减速比等机械传动避开共振区；
- B.采用带有细分功能的驱动器，这是最常用的、最简便的方法；
- C.换成步距角更小的步进电机，如三相或五相步进电机；

D.换成交流伺服电机，几乎可以完全克服震动和噪声，但成本较高；

E.在电机轴上加磁性阻尼器，市场上已有这种产品，但机械结构改变较大。

#### 10.细分驱动器的细分数是否能代表精度？

步进电机的细分技术实质上是一种电子阻尼技术（请参考有关文献），其主要目的是减弱或消除步进电机的低频振动，提高电机的运转精度只是细分技术的一个附带功能。比如对于步进角为  $1.8^\circ$  的两相混合式步进电机，如果细分驱动器的细分数设置为 4，那么电机的运转分辨率为每个脉冲  $0.45^\circ$ ，电机的精度能否达到或接近  $0.45^\circ$ ，还取决于细分驱动器的细分电流控制精度等其它因素。不同厂家的细分驱动器精度可能差别很大；细分数越大精度越难控制。

#### 11.四相混合式步进电机与驱动器的串联接法和并联接法有什么区别？

四相混合式步进电机一般由两相驱动器来驱动，因此，连接时可以采用串联接法或并联接法将四相电机接成两相使用。串联接法一般在电机转速较的场合使用，此时需要的驱动器输出电流为电机相电流的 0.7 倍，因而电机发热小；并联接法一般在电机转速较高的场合使用（又称高速接法），所需要的驱动器输出电流为电机相电流的 1.4 倍，因而电机发热较大。

#### 12.如何确定步进电机驱动器的直流供电电源？

A.电压的确定：混合式步进电机驱动器的供电电源电压一般是一个较宽的范围（比如 IM483 的供电电压为  $12\sim 48\text{VDC}$ ），电源电压通常根据电机的工作转速和响应要求来选择。如果电机工作转速较高或响应要求较快，那么电压取值也高，但注意电源电压的纹波不能超过驱动器的最大输入电压，否则可能损坏驱动器。

B.电流的确定：供电电源电流一般根据驱动器的输出相电流  $I$  来确定。如果采用线性电源，电源电流一般可取  $I$  的 1.1~1.3 倍；如果采用开关电源，电源电流一般可取  $I$  的 1.5~2.0 倍。

#### 13.混合式步进电机驱动器的脱机信号 FREE 一般在什么情况下使用？

当脱机信号 FREE 为低电平时，驱动器输出到电机的电流被切断，电机转子处于自由状态（脱机状态）。在有些自动化设备中，如果在驱动器不断电的情况下要求直接转动电机轴（手动方式），就可以将 FREE 信号置低，使电机脱机，进行手动操作或调节。手动完成后，再将 FREE 信号置高，以继续自动控制。

#### 14.如果用简单的方法调整两相步进电机通电后的转动方向？

只需将电机与驱动器接线的 A+ 和 A-（或者 B+ 和 B-）对调即可。

关于驱动器的细分原理及一些相关说明（转载）

在国外，对于步进系统，主要采用二相混合式步进电机及相应的细分驱动器。

但在国内，广大用户对“细分”还不是特别了解，有的只是认为，细分是为了提高精度，其实不然，细分主要是改善电机的运行性能，现说明如下：步进电机的细分控制是由驱动器精确控制步进电机的相电流来实现的，以二相电机为例，假如电机的额定相电流为 **3A**，如果使用常规驱动器（如常用的恒流斩波方式）驱动该电机，电机每运行一步，其绕组内的电流将从 **0** 突变为 **3A** 或从 **3A** 突变到 **0**，相电流的巨大变化，必然会引起电机运行的振动和噪音。如果使用细分驱动器，在 **10** 细分的状态下驱动该电机，电机每运行一微步，其绕组内的电流变化只有 **0.3A** 而不是 **3A**，且电流是以正弦曲线规律变化，这样就大大的改善了电机的振动和噪音，因此，在性能上的优点才是细分的真正优点。由于细分驱动器要精确控制电机的相电流，所以对驱动器要有相当高的技术要求和工艺要求，成本亦会较高。注意，国内有一些驱动器采用“平滑”来取代细分，有的亦称为细分，但这不是真正的细分，望广大用户一定要分清两者的本质不同：

1. “平滑”并不精确控制电机的相电流，只是把电流的变化率变缓一些，所以“平滑”并不产生微步，而细分的微步是可以用来精确定位的。

2. 电机的相电流被平滑后，会引起电机力矩的下降，而细分控制不但不会引起电机力矩的下降，相反，力矩会有所增加。

## 步进电机多级细分驱动方法研究

步进电机作为电磁机械装置，其进给的分辨率取决于细分驱动技术。采用软件细分驱动方式，由于编程的灵活性、通用性，使得步进细分驱动的成本低、效率高，要修改方案也易办到。同时，还可解决步进电机在低速时易出现的低频振动和运行中的噪声等。但单一的软件细分驱动在精度与速度兼顾上会有矛盾，细分的步数越多，精度越高，但步进电机的转动速度却降低；要提高转动速度，细分的步数就得减少。为此，设计了多级细分驱动系统，通过不同的细分档位设定，实现不同步数的细分，同时保证了不同的转动速度。

### 1 细分驱动原理

步进电机控制中已蕴含了细分的机理。如三相步进电机按  $A \rightarrow B \rightarrow C \cdots$  的顺序轮流通电，步进电机为整步工作。而按  $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A \cdots$  的顺序通电，则步进电机为半步工作。以  $A \rightarrow B$  为例，若将各相电流看作是向量，则从整步到半步的变换，就是在  $I_A$  与  $I_B$  之间插入过渡向量  $I_{AB}$ ，因为电流向量的合成方向决定了步进电机合成磁势的方向，而合成磁势的转

动角度本身就是步进电机的步进角度。显然， $I_{AB}$  的插入改变了合成磁势的转动大小，使得步进电机的步进角度由  $\theta_b$  变为  $0.5 \theta_b$ ，从而也就实现了 2 步细分。由此可见，步进电机的细分原理就是通过等角度有规律的插入电流合成向量，从而减小合成磁势转动角度，达到步进电机细分控制的目的。

如图 1 所示，在三相步进电机的 A 相与 B 相之间插入合成向量  $I_{AB}$ ，则实现了 2 步细分。要实现 4 步细分，只需在 A 与  $I_{AB}$  之间插入 3 个向量  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ，使得合成磁势的转动角度  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ ，就实现了 4 步细分。但 4 步细分与 2 步细分是不同的，由于  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  3 个向量的插入是对电流向量  $I_B$  的分解，故控制脉冲已变成了阶梯波。细分程度越高，阶梯波越复杂。

### 图 1 步进细分原理

在三相步进电机整步工作时，实现 2 步细分合成磁势转动过程为  $I_A \rightarrow I_{AB} \rightarrow I_B$ ；实现 4 步细分转动过程为  $I_A \rightarrow I_2 \rightarrow I_{AB} \dots$ ；而实现 8 步细分则转动过程为  $I_A \rightarrow I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3 \rightarrow I_{AB} \dots$ 。可见，选择不同的细分步数，就要插入不同的电流合成向量。

## 2 多级细分驱动系统的实现

### 2.1 系统组成

如图 2 所示，系统由主机、键盘输入系统、步进显示系统、步进控制系统组成。主机采用 AT89C51 单片机，其为低功耗的 8 位单片机，片内有一个 4K 字节的 Flash 可编程、可擦除、只读存储器，故可简化系统构成，且可满足本系统数据存储空间的要求。主机接收串行口送来的步进控制数据，并对其进行处理，以实施步进控制。键盘输入系统是用来输入控制所需的细分档位。系统设计时，考虑到随着细分的精确化，如 128 步细分时，步距角达到足够小，能满足各种步进要求，故以 2 的整数次幂作为细分基准。步进显示系统由液晶显示器显示当前细分档位和细分后的步进角等参数。为了减少电路的复杂性，该显示器显示的最小单位规定为  $0.01^\circ$ 。步进控制系统由 D/A 转换部分和驱动系统组成。D/A 转换部分包括 3 片 DAC0830 集成芯片和数据锁存系统。DAC0830 转换分辨率是 8 位，该芯片具有与微处理器兼容、价格低廉、接口简单、转换控制容易等优点。D/A 转换部分的功能是将二进制代码表示的阶梯波数值转换为相应的电流值输出，经驱动系统放大，控制步进电机转动。驱动系统采用三级管实现电流放大。

### 图 2 多级细分驱动系统组成

### 2.2 细分阶梯波的产生

细分的实现过程，就是插入电流合成向量和转换电流合成向量的过程。电流合成向量转化的前提是合成向量的插入。在系统中，由主机根据设定的细分档位，计算出相关参数，经查表

生成相对应的阶梯波，即插入了电流合成向量。在正转或反转的控制信号下，阶梯波脉冲由输出端口经锁存系统送入 D/A 转换器件 DAC0830 进行电流合成向量的转化，输出对应的电流值，经驱动放大控制步进电机，从而实现了细分驱动。

电流合成向量的插入是实现细分的关键，而要得到电流合成向量，首先必须产生阶梯波。由图 1 知，在三相电机半步工作的情况下，要实现 4 步细分，就必须将 B 相电流分成 4 份，但不是等分，需保证  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ 。若  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  分别对应的电流向量是  $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$ 、 $I_{B3}$ 、 $I_{B4}$ ，则在  $\theta_1$  所对应的三角形内，设步进角为  $\theta_b$ ，则  $\alpha = 180^\circ - \theta_b$ ， $\beta = \theta_b - \theta_1$ ，由正弦定理得

考虑到一般情况，由于细分时步进电机控制脉冲波形是阶梯型，如对 B 相进行 4 步细分时，其电流输入依次为  $I_{B1}$ 、 $I_{B1} + I_{B2}$ 、 $I_{B1} + I_{B2} + I_{B3}$ 、 $I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}$ ，相应合成磁势转过的角度为  $\theta_1$ 、 $\theta_1 + \theta_2$ 、 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ 、 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$ ，此时设

$I_{Bk}$  即为电流合成向量中 B 相阶梯波中第 k 阶的电流值， $\theta_k$  即为此时合成磁势相应转过的角度。由此推出，对 B 相来讲，在步进电机的步进角度为  $\theta_b$  时，考虑到  $I_A = I_B$ ，则阶梯波型其任一阶的电流值为

同理，可求得 A 相和 C 相在细分时对应的阶梯波电流值。对 (1) 式求解，考虑 D/A 器件 DAC0830 的转换精度是 8 位，转换稳定时间是  $1 \mu s$ ，故最大进行了 128 步细分的运算，相应求得其对应的细分电流值，并进行了相应的转换，得到对应的二进制数值列表。此时，列表全部的数值就是在实现 128 步细分时，对应阶梯波各阶的电流值。

### 2.3 多级细分驱动的实现

要在细分的基础上实现多级细分，就必须针对不同的细分档位生成不同的阶梯波。为此，该系统采用了循环增量查表法。首先建立阶梯波数值存储表格，有两种方法，一种是针对每种细分方式建立相应的表格，其特点是细分种类多样，但表格所占空间较大；另外一种，也就是该系统采用的，以最大细分档位对应的步数仅建立一个表格，大大减少了所需的存储空间，并减少了程序运行中的不稳定因素。在具体控制中，该系统通过设定循环增量基数，使不同的细分档位对应不同的细分步数，实现了多级细分驱动。

循环增量基数是指针对不同的细分档位，实现等间隔寻址时相应跳跃的步数。循环增量基数是在细分档位设定后，由相应的计算公式得到。由于该系统最大细分步数为 128 步，即表格最大长度为 128 个字节，若细分步数为  $m$  步，则循环增量基数为  $LB = (128/m) - 1$ 。不同的档位对应不同的循环增量基数，同一表格就产生了多级细分所需的阶梯波。



另外，在整步控制的基础上，若细分为  $m$  步，对每  $m$  步运行中的各项电流值进行分析比较，可发现存在以下规律，即各相电流值的变化趋势，随着相位变化循环地出现，如表 1 所示。

表 1 细分控制中各相电流值变化规律

各相 A→B B→C C→A

A 相 高→递减 电流值=0 增加→高

B 相 增加→高 高→递减 电流值=0

C 相 电流值=0 增加→高 高→递减

在表 1 中，每一种保持或变化都是持续  $m/2$  步，且可看出其良好的循环性。依据以上规律，在具体控制中，该系统单独对由 A→B 控制时各相相应的电流值变化，实现子程序控制，而对整体控制则采用圆周移位的方式实现，即随着合成磁势在 A→B、B→C、C→A 的转动，对同一输出地址，相应每  $m$  步的控制数据循环出现。采用这种方式，简化了实际控制程序，提高了控制效率。