

步进式电动机详解

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。

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阻，其几何轴线依次分别与转子齿轴线错开。 0 、 $1/3$ π 、 $2/3$ π ，（相邻两转子齿轴线间的距离为齿距以 π 表示），即 **A** 与齿 **1** 相对齐，**B** 与齿 **2** 向右错开 $1/3$ π ，**C** 与齿 **3** 向右错开 $2/3$ π ，**A'**与齿 **5** 相对齐，（**A'**就是 **A**，齿 **5** 就是齿 **1**）

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 $1/3$ π ，此时齿 **3**

与 C 偏移为 $1/3$ 度，齿 4 与 A 偏移（度 $-1/3$ 度） $=2/3$ 度。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 $1/3$ 度，此时齿 4 与 A 偏移为 $1/3$ 度对齐。如 A 相通电，B，C 相不通电，齿 4 与 A 对齐，转子又向右移过 $1/3$ 度这样经过 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） $1/3$ 度，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 $1/3$ 度改变为 $1/6$ 度。甚至于通过二相电流不同的组合，使其 $1/3$ 度变为 $1/12$ 度， $1/24$ 度，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 Φ ）当转子与定子错开一定角度产生力 F 与 $(d\Phi/d\theta)$ 成正比 S 其磁通量

$\Phi = Br \cdot S$ Br 为磁密, S 为导磁面积 F 与 $L \cdot D \cdot Br$ 成正比 L 为铁芯有效长度, D 为转子直径 $Br = N \cdot I / R$ $N \cdot I$ 为励磁绕组安匝数 (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, 而定子励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 $C=, D=$.

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

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,步距角为 **1.8** 度；二相八拍为,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

接电机引出线绿线

B 接电机引出线黄线

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，力矩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）

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：

$$P = \Omega \cdot M \quad \Omega = 2\pi \cdot n / 60 \quad P = 2\pi n M / 60$$

其 P 为功率单位为瓦， Ω 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

$$P = 2\pi f M / 400 \text{ (半步工作)}$$

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 50

V,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

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于失步，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° 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° ，电机的精度能否达到或接近 0.45° ，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 **12~48VDC**），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。

俺是步进不仅新手，俺也来贴。

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° 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° ，电机的精度能否达到或接近 0.45° ，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 **12~48VDC**），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。

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。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。

一、感应子式步进电机工作原理

1）、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阻，其几何轴线依次分别与转子齿轴线错开。

0、 $1/3$ て、 $2/3$ て，（相邻两转子齿轴线间的距离为齿距以て表示），即 A 与齿 1 相对齐，B 与齿 2 向右错开 $1/3$ て，C 与齿 3 向右错开 $2/3$ て，A'与齿 5 相对齐，（A'就是 A，齿 5 就是齿 1）

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 $1/3$ て，此时齿 3 与 C 偏移为 $1/3$ て，齿 4 与 A 偏移（て $-1/3$ て）= $2/3$ て。

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 $1/3$ て，此时齿 4 与 A 偏移为 $1/3$ て对齐。

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

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） $1/3$ 度, 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 $1/3$ 度改变为 $1/6$ 度。甚至于通过二相电流不同的组合，使其 $1/3$ 度变为 $1/12$ 度, $1/24$ 度, 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 Φ ）当转子与定子错开一定角度产生力 F 与 $(d\Phi/d\theta)$ 成正比

其磁通量 $\Phi = Br \cdot S$

Br 为磁密， S 为导磁面积

F 与 $L \cdot D \cdot Br$ 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。

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 θ 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： $\text{误差}/\text{步距角} \times 100\%$ 。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。

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** 时为正转，通电时序为 **DA-CA-BC-AB** 时为反转。

（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 $C=$, $D=$

？

？.

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 θ 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： $\text{误差} / \text{步距角} \times 100\%$ 。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。

其它特性还有惯频特性、起动频率特性等。

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** 时为正转，通电时序为 **DA-CA-BC-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

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-BC-CD-DA**，步距角为 **1.8** 度；二相八拍为 **AB-BC-CD-DA-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

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。

步进式电动机

步进式电动机原理