

步进电机基础

步进电机的简单定义：

步进电机是一种将电脉冲转化为不连续的机械运动的机电装置。

当施加适当的电脉冲指令时，电机转子的出轴或外转子将会以不连续的步进增量旋转。

电机的旋转与施加的脉冲之间有几个方面的直接关系：

首先所加脉冲的顺序直接决定着电机转轴旋转的方向。

其次电机转轴旋转的速度取决于所加脉冲的频率，而旋转的角度或者圈数和所加的脉冲数成正比。

步进电机的优缺点：

优点：

1. 电机旋转的角度正比于脉冲数；
2. 电机停转的时候具有最大的转矩（当绕组激磁时）；
3. 由于每步的精度在 3%-5%，而且不会将一步的误差积累到下一步因而有较好的位置精度和运动的重复性；
4. 优秀的起停和反转响应；
5. 由于没有电刷，可靠性较高，因此电机的寿命仅仅取决于轴承的寿命；
6. 电机的响应仅由数字输入脉冲确定，因而可以采用开环控制，这使得电机的结构可以比较简单而且控制成本较低；
7. 仅仅将负载直接连接到电机的转轴上也可以极低速的同步旋转。
8. 由于速度正比于脉冲频率，因而有比较宽的转速范围。

缺点：

1. 如果控制不当容易产生共振；
2. 难以运转到较高的转速。

开环控制：

步进电机最有意义的一个优点就是在开环系统里可以实现精确的控制。开环控制意味着不需要关于（转子）位置方面的反馈信息。这种控制避免了使用昂贵的传感器以及象光学编码器这样的反馈设备，因为只需要跟踪输入的步进脉冲就可以知道你（转子）的位置。

步进电机的种类

步进电机有三个基本类型，他们分别是：

磁阻变化式/反应式/感应式

永磁式

混合式/永磁感应子式

1. 反应式

这种类型的步进电机出现的时间较早，从结构方面讲，这也许是最容易理解的电机。如图 1。这种电机由带齿的软磁铁芯转子和带绕组的定子组成。当定子绕组直流电激磁时，相应的极就被磁化。当转子的齿被吸向激磁的定子极时，就产生了旋转。

2. 永磁式

永磁式步进电机是一种低成本、低分辨率形式的步进电机。该电机典型的步距角是从 7.5 度到 15 度（48-20 步/转）。顾名思义，永磁式样是在转子结构中增加了永磁体，和反应式相比其转子上不再有齿条，替代的是采用 N 极和 S 极（沿轴向）交替平行放置充磁磁条的转子结构形式。和反应式相比，永磁式显示了力矩较高的特点。

3. 混合式

混合式比永磁式要贵很多，而在每步的分辨率、力矩以及速度方面的性能也比永磁式好得多。一般情况下混合式步进电机的步距角是从 3.6 度到 0.9 度（100-400 步/转）。混合式集中了反应式和永磁式的优点。

他的转子除了和反应式样步进电机一样有齿条外，还包括和转轴同心的沿轴向充磁的磁钢。转子上的齿条为气隙磁通提供了较好的定位路径、保持转矩和动态力矩特性。

两种最常用的步进电机类型就是永磁式和混合式。如果设计者不能确认哪一种最为合适的话，那么可以先评估永磁式，因为他要比混合式便宜很多倍。如果实在不行，混合式才是正确的选择，另外还有一些特殊的步进电机类型。其中的一种就是碟形样步进电机。这种电机的稀土磁钢的转子采用了盘状设计。这种类型的步进电机有许多优点：例如他的转动惯量较低，还有不需要通过定子的两个极进行交链的优化磁路，而这些特点对某些应用来讲尤为重要。

机座号和功率

除了步距角进行分类外，步进电机还可以按方身尺寸（电机机体的直径）进行分类，例如 11 机座号的步进电机的机体直径大约为 1.1 英寸，23 机座号的电机的机体直径为 2.3 英寸（58mm），当然，即使是同一机座号的电机，其机身的长度也可以有长短，而且电机越长其输出力矩越大。

一般来讲，步进电机的驱动 IC 的功率范围是从 1 瓦以下到 10 或 20 瓦左右，他们分别对应极小的电机和较大的电机。生产商也很少给出电机最大功耗等级或发热上限方面的数据，为了确定这一点，我们必须应用公式： $P=V*I$ 。例如，一个 23 机座号的电机，其额定值可能为 6V /相，因此他两相激磁时的功耗就是 12W。实际上，当电机在空气环境中的温升为 65℃时的 ，被称为额定功耗。当然，如果给电装上散热装置，就可以增加他的允许功耗，这一点对于电机设计十分重要，因为从电机尺寸、输出功率以及成本的观点来看，应该有效地利用其最大功耗。

步进电机的应用

任何要求运动控制的场合，步进电机都是一个不错的选择，在诸如需要控制旋转角度、速度、位置以及保持同步之类的应用，步进电机的优势可以得到利用，正如前面所列举的内在优点，在许多不同的应用场合，都可以发现步进电机的身影，这些应用包括打印机、绘图仪、高端办公设备、硬盘驱动器、医疗设备、传真机以及自动化设备等等。

旋转磁场

当电机定子的一相绕组通以激磁电流时，就会产生磁通，磁通的方向可以用" 法则"，来确定。（用右手握住线圈，使大拇指和其余的四指垂直，如果其余的四指和电流的方向一致，那么大拇指所指的方向就是磁场的方向）。

图 5 显示了 B 相激磁时磁通的路径及对应的电流的方向，转子于是开始排列自己的位置，以使对磁通的阻抗最小，在这种情况下，电机将沿顺时针方向旋转，使得转子的南极和定子 B 相下的 极（位置 2）对齐，转子的北极和定子 B 相下的南极（位置 6）对齐，现在我们明白，要使电机旋转，必须对定子进行一系列的激磁，通过这种方式产生一个旋转的磁场，在磁吸力的作用下，转子将跟着这个磁场旋转。

转矩的产生

步进电机转矩的产生依赖于好几个因素：

- * 步进速率
- * 绕组中的驱动电流
- * 驱动的方案或类型

在步进电机中，当定子和转子的磁通相互交链时，就可以产生转矩。步进电机的定子铁芯是采用导磁高的材料制成的，和电子电路中电流集中在导体中的那种方式一样，由于这种高导磁材料的存在，使得磁通主要集中在定子铁芯结构所限定的磁路上，而这个结构就是确保磁通集中在定子极上。电磁通与磁密的基本关系定义如下：

这里 $N =$ 绕组匝数 $I =$ 电流 $H =$ 磁通 $L =$ 磁通路径的长度

这个关系式表示：磁通密度和相应的转矩是正比于绕组的匝数以及电流而反比于磁路长度的。从这个基本的关系式可以看出，仅仅通过改变电机绕组的参数，就可以使其转矩输出能力得到明显的变化。在一篇名为《驱动电路基础》的应用文章中，我们给出了关于绕组参数如何影响电机输出能力的更为详细的信息。

相、极和步距角

通常，步进电机是两相的，但也存在三相和五相的一个双极性电机有两相，每相有一个绕组，单极性的电机也有两相，每相一个绕组，只是每相绕组多了一个中心抽头，单极性步进电机有时被成为"四相电机"，尽管它只有两相。

也存在每相有两个单独绕组的电机，他即可以当作单极性，也可以当作双极性来驱动。

极可以定义为励磁体上磁密集中的区域。图 5 包含了这样一个两相步进电机的简化图例：定子每相有两极（一对极），转子有两极（一对极）。实际上，定转子结构中都会增加一些极，以增加电机每转的步数，换句话说，就是使电机的基本（整步）步距角更小，典型的 PM 进电机有 12 对极，即定子每相有 12 对极。混合式步进电机有一个带齿的转子，他的转子铁芯被分为两部分，由永久磁钢隔开，使一半的齿成为 S 极，而另外的一半为 N 极。而转子的极对数就等于任何一半转子的齿数。为了形成更多数目的等效极数，混合式步进电机的定子极上也有齿。（对于小极距，等效极数 = $360^\circ/\text{齿距}$ ）区别于等效极的是，基本的极上是绕有绕组的。一般来讲，4 个基本极适用于 3.6° 电机，而 8 个极适用于 1.8° 和 0.9° 电机。

下列转子的极数、定子的等效极数以及相数之间的关系式可以确定一个步进电机整步时的步距角。

$NPH = \text{每相有效极数} = \text{转子极数} \quad Ph = \text{相数} \quad N = \text{各相的极数之和}$

如果转子和定子的齿距不相等，那么将存在一个更为复杂的关系式。

步进方式

下列步进方式最为常规：

- * 单拍驱动（1 相通电）
- * 整步驱动（2 相通电）
- * 半步驱动（1&2 相通电）
- * 微步驱动（电机电流连续变化）

下列的讨论将以图 6 为参考

在单拍驱动情况下，在任何时候只有一个绕组励磁。当定子按照 A?B?A'?B' 的顺序励磁时，转子将按照 8?2?4?6 的位置步进。不论是单极性还是双极性绕法的电机，只要绕组参数相同，这种励磁模式将导致（转子运动到）相同的机械位置。这重驱动方式的缺点就是，绕组的利用率对于单极性只有 25%，对于双极性只有 50%，也就是说你没有获得该电机的最大输出力矩。

在整步驱动情况下，任何时候都有两相励磁。当定子按照 AB?A'B'?A'B'?AB' 顺序励磁时，转子将按照 1?3?5?7 的位置步进，整步驱动和单相通电有相联系的运动角度，只是机械位置上相差了半步。绕组参数相同时，单极性电机的输出力矩要比双极性的低，因为单极性电机只利用了绕组的一半，而双极性电机却利用了整个绕组。

半步驱动综合了单排和整步两种驱动方式（1&2 相通电）。在这种方式下，第二步只有一相通电，在另外一步，每极上都有一相通电。当定子按照 AB?A?A'B'?A'?A'B'?B'?AB'?A 的顺序励磁时，转子的步进位置依次为 1?2?3?4?5?6?7?8。

这种运动的角度只有一相或两相通电那种驱动方式下的步距角的一半。和一相或两相通电驱动方式相比半步运行还可以减低共振。

表 1 中，对上述驱动方式的励磁顺序作了归纳。

在细分驱动时，绕组中的电流是不断变化的，可以将一整步分成许多更为细小的微步。在微步这一章，可以找到关于微步驱动更为详细的信息。

矩角特性

步进电机的矩角特性是指当步时电机按额定电压（电流）励磁时，施加在转轴上的力矩与对应的偏移（角度）之间的关系。在理想状态下，步进电机的矩角特性是正弦曲线（图 7）。

当一个外加的负载作用在转轴上时，位置 A 和 C 就表示稳定平衡点。当你将一个外力 T_a 作用在电机的转轴上时，就会产生一个对应的偏移角度 α ，这个偏移角度 α 是超前角还是滞后角，取决于电机是加速还是

减速状态。在施加负载的作用下停止时，它将保持在一个被定义为偏移角的位置上。电机产生的力矩 T_a ，对应于所施加的外力以平衡负载。当负载增加时，偏移角也相应增加直到达到电机的最大保持转矩 T_h ，一旦超过电机将进入一个不稳定区域。在这个区域力矩产生反向，转子将越过不平衡点到达下一个平衡点。偏移角度由下列关系式确定：

$Z =$ 转子齿距角 $T_a =$ 负载转矩

$T_h =$ 电机额定转矩 $X =$ 偏移角度

因此，如果你对表示带负载电机的平衡位置的肯距角误差觉得有问题的话，可以通过改变电机的"刚性"来改善。这可以通过电机的额定转矩来实现，通过图 8 我们可以看到这一影响。对一个恒定负载，增加保持转矩可以使滞后角从 θ_2 偏移到 θ_1 。

步距角精度

步进电机作为一个定位装置如此流行的一个原因就是它的精度和重复性。典型的步进电机的步距角精度是一步的 3%-5%。这一误差在步与步之间不会积累。步进电机的精度主要由受其零部件精度及装配的影响。

a. 步距角误差 (Step Position Error)

当电机从一个保持位置旋转到下一步时产生的最大正向或反向位置误差。

b. 位置误差 (Positional Error)

电机从起始位置步进 N 次 ($N = 360^\circ/\text{步距角}$)，测量每一步到起始位置的角度。如果第 N 步的位置到起始位置之间的角度是 θ_N ，误差是 $D\theta_N$ ，这里：

$D\theta_N = \theta_N - (\text{步距角}) * N$

尽管位置误差是最大值和最小值之间的差异，但它通常用 \pm 号表示，就是：

重复位置误差 (Hysteresis Positional Error)

是指在两个方向测得的位置误差值。

机械参数、负载、磨擦力及惯量

步进电机系统 (驱动器及电机) 的性能高度依赖于负载的机械参数。而这个负载被定义为电机所驱动的，它一般是指磨擦、惯量或两者的综合。

磨擦力是由于表面的不均匀产生的相互磨擦对运动的阻力。在整个一步过程中，需要一个最小的力矩 (至少等于磨擦力) 来克服这个磨擦力。增加磨擦负载，将降低最大速度，减小加速度，增大位置误差，如果减小磨擦负载将得到相反的结果。

步进电机转子的振动将随磨擦和惯量负载的大小而变化，因此可以通过机械阻尼器的方式来降低转子振动。但是，通常采用更为简单的电子阻尼的方法来削弱这种不必要的转子振动，例如变整步驱动为半步驱动。

转矩、速度特性

对一个特定的应用，速度和力矩之间的关系特性是正确选择电机和驱动的关键。这些特性取决于电机，励磁模式，驱动器的类型或驱动的方法。典型的"速度--力矩曲线"如图 10 所示。

要更好地理解这一曲线，需要定义一些与之相关的概念。

保持转矩 (Holding Torque)

电机在锁定时能产生的最大力矩。

牵入曲线 (Pull-In Curve)

起动曲线定义的范围是一个被称为起停的区域。这是电机在带负载的情况下，能够瞬时起停且不失去同步的最大频率。

最大起动频率 (Maximum Start Rate)

指不加负载时的最大起动频率。

牵入曲线 (Pull-Out Curve)

牵出曲线定义的范围是一个被称为运转的区域。它是指电机能够不失步地运行到的最大频率。既然这个区域在牵入区域以外，那么电机必须通过一个阶段（rampe 加速或减速）才能进入这个区域。

最大运行频率（Maximum Slew Rate）

指电机不加负载时的最大运行频率。

牵入特性的变化取决于负载。负载惯量越大，牵入区域越小，从曲线的形状可以看出步进频率对步进电机转矩输出能力的影响。随着速度的增加，输出转矩将会减小，这是由于在高速时电机的电感成为电路的支配要素。

速度--力矩曲线形状的变化极大程度上所用驱动器的形式，对一个给定的电机，采用爱立信的芯片制成的双极性斩波驱动电路，可以达到最佳的速度--力矩特性。大部分电机生产商都为其电机提供了速度--力矩曲线。弄清楚电机生产厂商对所给的速度--力矩性能曲线所采用的驱动器的类型或方法是非常重要的，因为对于一个给定的电机，其矩频特性由于所用驱动方法的不同将有明显的变化。

单步响应和共振

步进电机的单步响应特性如图 11 所示。

给电机施加一个步进脉冲时，转子的动作方式如上述曲线所示，步进时间正是当第一个步进脉冲施加时，电机转轴转过一个步矩角所花费的时间。这个步进时间高度依赖与转矩与惯量（负载）的比值以及所采用的驱动器的类型。

既然力矩是偏移（角度）的函数，那么加速度同样也是。在转动的步进增量较大时，对应的力矩较大，因此加速度也比较大。这就会引起如图 11 所示的过冲和反复，经过设定时间后，这些振荡或反复将逐渐终止。而在某些应用中不希望有这种现象。通过电机的微步驱动，可以减弱甚至除这一特性。关于微步驱动的内容请参考微步驱动这一章节。

在某一特定频率，步进电机会出现共振现象。这可以看作是在某一速度下由于力矩丧失或降低而造成的丢步或失去同步。而这会发生在输入的步进脉冲频率和转子的自振频率一致时，通常共振的区域在 100-200pps 左右，在高频率段也有。共振现象是由步进电机的基本结构所决定的，不可能完全消除。不过它同样也取决于负载条件。可以通过半步或微步驱动模式来削弱（共振）。

关于驱动器的细分原理及一些相关说明

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，以三相电机为例，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，相电流的大变化，必须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。