

步进电机的种类、结构及工作原理

步进式伺服驱动系统是典型的开环控制系统。在此系统中，执行元件是步进电机。它受驱动控制线路的控制，将代表进给脉冲的电平信号直接变换为具有一定方向、大小和速度的机械转角位移，并通过齿轮和丝杠带动工作台移动。由于该系统没有反馈检测环节，它的精度较差，速度也受到步进电机性能的限制。但它的结构和控制简单、容易调整，故在速度和精度要求不太高的场合具有一定的使用价值。

1. 步进电机的种类

步进电机的分类方式很多，常见的分类方式有按产生力矩的原理、按输出力矩的大小以及按定子和转子的数量进行分类等。根据不同的分类方式，可将步进电机分为多种类型，如表 5-1 所示。

表 5-1 步进电机的分类

分类方式	具体类型
按力矩产生的原理	(1) 反应式：转子无绕组，由被激磁的定子绕组产生反应力矩实现步进运行 (2) 激磁式：定、转子均有激磁绕组（或转子用永久磁钢），由电磁力矩实现步进运行
按输出力矩大小	(1) 伺服式：输出力矩在百分之几至十分之几（ $N \cdot m$ ）只能驱动较小的负载，要与液压扭矩放大器配用，才能驱动机床工作台等较大的负载 (2) 功率式：输出力矩在 $5-50 N \cdot m$ 以上，可以直接驱动机床工作台等较大的负载
按定子数	(1) 单定子式 (2) 双定子式 (3) 三定子式 (4) 多定子式
按各相绕组分布	(1) 径向分布式：电机各相按圆周依次排列 (2) 轴向分布式：电机各相按轴向依次排列

2. 步进电机的结构

目前，我国使用的步进电机多为反应式步进电机。在反应式步进电机中，有轴向分相和径向分相两种，如表 5--1 所述。

图 5--2 是一典型的单定子、径向分相、反应式伺服步进电机的结构原理图。它与普通电机一样，分为定子和转子两部分，其中定子又分为定子铁心和定子绕组。定子铁心由电工钢片叠压而成，其形状如图中所示。定子绕组是绕置在定子铁心 6 个均匀分布的齿上的线圈，在直径方向上相对的两个齿上的线圈串联在一起，构成一相控制绕组。图 5--2 所示的步进电机可构成三相控制绕组，故也称三相步进电机。若任一相绕组通电，便形成一组定子磁极，其方向即图中所示的 NS 极。在定子的每个磁极上，即定子铁心上的每个齿上又开了 5 个小齿，齿槽等宽，齿间夹角为 9° ，转子上没有绕组，只有均匀分布的 40 个小齿，齿槽也是等宽的，齿间夹角也是 9° ，与磁极上的小齿一致。此外，三相定子磁极上的小齿在空间位置上依次错开 $1/3$ 齿距，如图 5--3 所示。当 A 相磁极上的小齿与转子上小齿对齐时，B 相磁极上的齿刚好超前(或滞后)转子齿 $1/3$ 齿距角，C 相磁极齿超前(或滞后)转子齿 $2/3$ 齿距角。

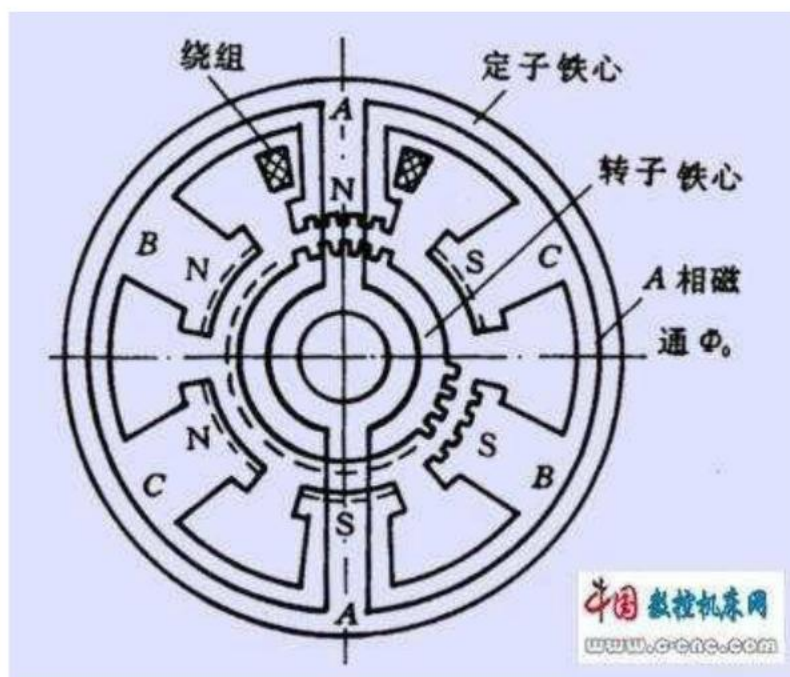


图 5-2 单定子径向分相反应式伺服步进电机结构原理图

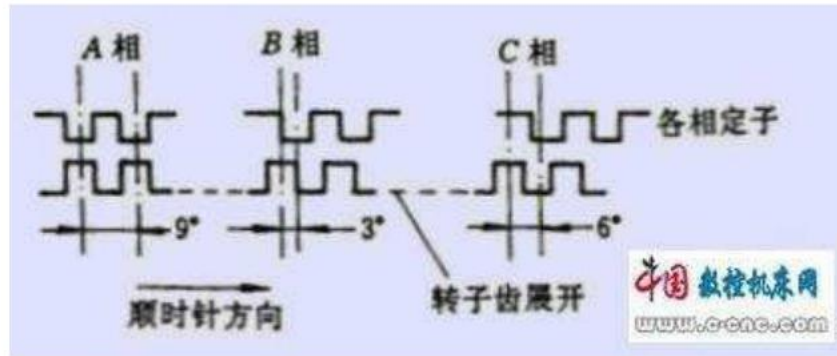


图 5-3 步进电机的齿距

图 5-4 是一个五定子、轴向分相、反应式伺服步进电机的结构原理图。从图中可以看出，步进电机的定子和转子在轴向分为五段，每一段都形成独立的一相定子铁心、定子绕组和转子，图 5-5 所示的是其中的一段。各段定子铁心形如内齿轮，由硅钢片叠成。转子形如外齿轮，也由硅钢片制成。各段定子上的齿在圆周方向均匀分布，彼此之间错开 $1/5$ 齿距，其转子齿彼此不错位。当设置在定子铁心环形槽内的定子绕组通电时，形成一相环形绕组，构成图中所示的磁力线。

除上面介绍的两种形式的反应式步进电机之外，常见的步进电机还有永磁式步进电机和永磁反应式步进电机，它们的结构虽不相同，但工作原理相同。

3. 步进电机的工作原理

步进电机的工作原理实际上是电磁铁的作用原理。图 5-6 是一种最简单的反应式步进电机，下面以它为例来说明步进电机的工作原理。

图 5-6(a)中，当 A 相绕组通以直流电流时，根据电磁学原理，便会在 AA 方向上产生一磁场，在磁场电磁力的作用下，吸引转子，使转子的齿与定子 AA 磁极上的齿对齐。若 A 相断电，B 相通电，这时新的磁场其电磁力又吸引转子的两极与 BB 磁极齿对齐，转子沿顺时针转过 60° 。通常，步进电机绕组的通断电状态每改变一次，其转子转过的角度 α 称为步距角。因此，图 5-6(a)所示步进电机的步距角 α 等于 60° 。如果控制线路不停地按 A→B→C→A... 的顺序控制步进电机绕组的通断电，步进电机的转子便不停地顺时针转动。若通电顺序改为 A→C→B→A...，同理，步进电机的转子将逆时针不停地转动。

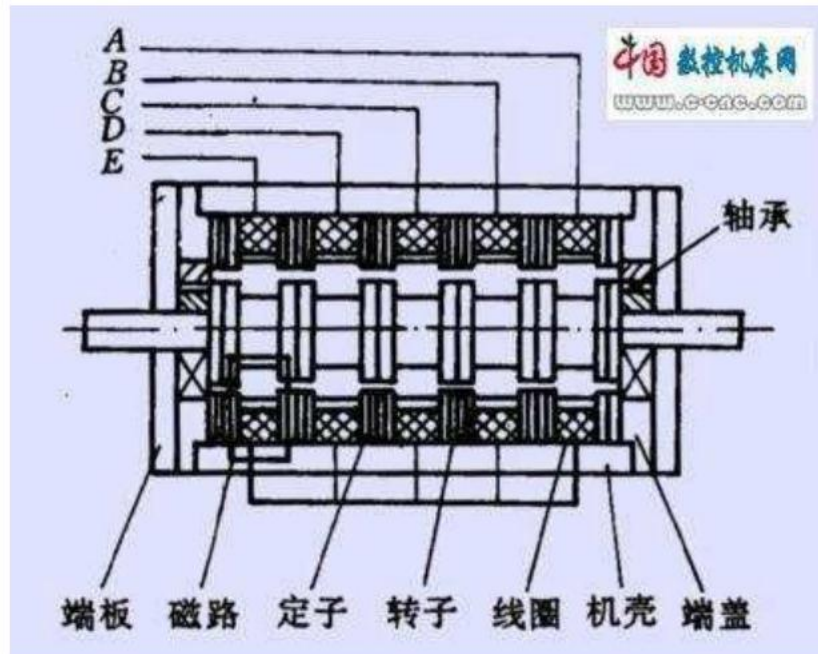


图 5-4 五定子径向分相反应式伺服步进电机结构原理图

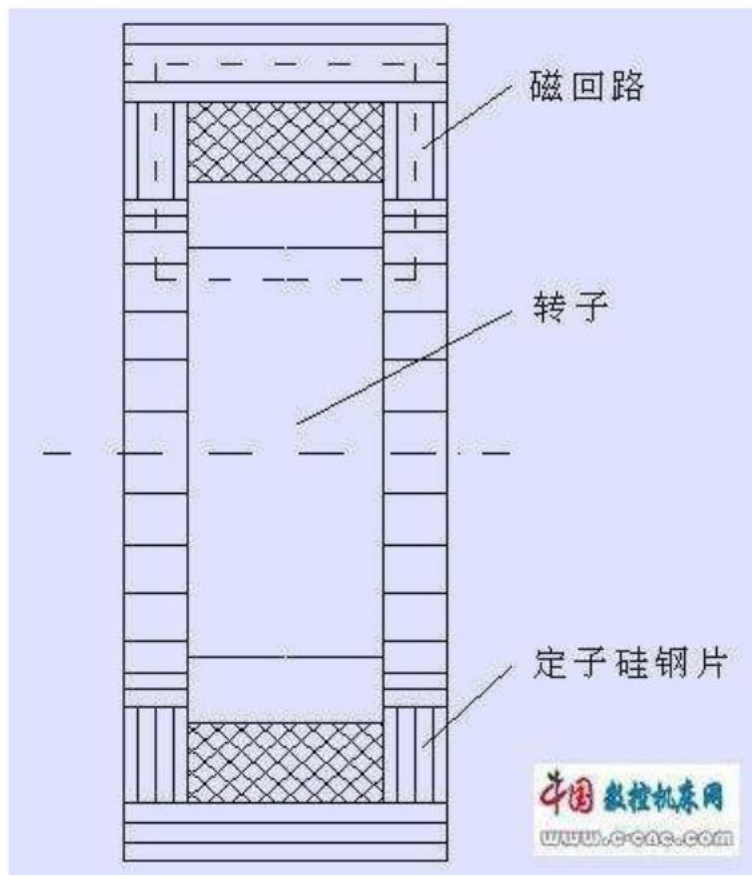


图 5-5 一段定子、转子及磁回路

上面所述的这种通电方式称为三相三拍。还有一种三相六拍的通电方式，它的通电顺序是：顺时针为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \dots$ ；逆时针为 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A \dots$ 。

若以三相六拍通电方式工作，当 A 相通电转为 A 和 B 同时通电时，转子的磁极将同时受到 A 相绕组产生的磁场和 B 相绕组产生的磁场的共同吸引，转子的磁极只好停在 A 和 B 两相磁极之间，这时它的步距角 α 等于 30° 。当由 A 和 B 两相同时通电转为 B 相通电时，转子磁极再沿顺时针旋转 30° ，与 B 相磁极对齐。其余依此类推。采用三相六拍通电方式，可使步距角 α 缩小一半。

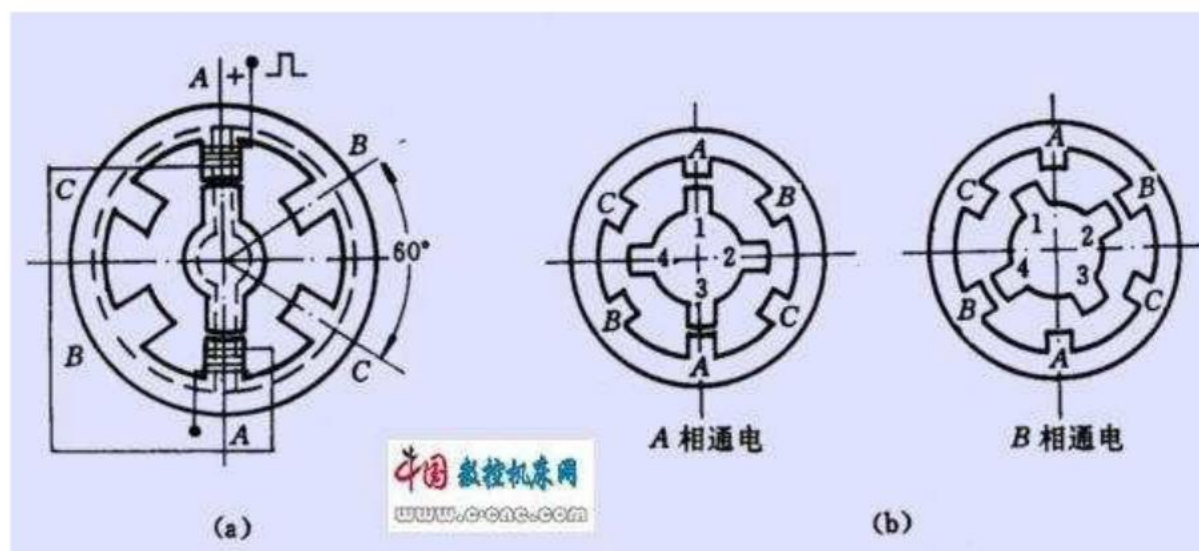


图 5-6 步进电机工作原理图

图 5--6(b)中的步进电机，定子仍是 A，B，C 三相，每相两极，但转子不是两个磁极而是四个。当 A 相通电时，是 1 和 3 极与 A 相的两极对齐，很明显，当 A 相断电、B 相通电时，2 和 4 极将与 B 相两极对齐。这样，在三相三拍的通电方式中，步距角 α 等于 30° ，在三相六拍通电方式中，步距角 α 则为 15° 。

综上所述，可以得到如下结论：

(1) 步进电机定子绕组的通电状态每改变一次，它的转子便转过一个确定的角度，即步进电机的步距角 α ；

(2) 改变步进电机定子绕组的通电顺序，转子的旋转方向随之改变；

(3) 步进电机定子绕组通电状态的改变速度越快，其转子旋转的速度越快，即通电状态的变化频率越高，转子的转速越高；

(4) 步进电机步距角 α 与定子绕组的相数 m 、转子的齿数 z 、通电方式 k 有关，可用下式表示：

$$\alpha = 360^{\circ} / (mzk) \quad (5-1)$$

式中 m 相 m 拍时， $k=1$ ； m 相 $2m$ 拍时， $k=2$ ；依此类推。

对于图 5--2 所示的单定子、径向分相、反应式伺服步进电机，当它以三相三拍通电方式工作时，其步距角为

$$\alpha = 360^{\circ} / (mzk) = 360^{\circ} / (3 \times 40 \times 1) = 3^{\circ}$$

若按三相六拍通电方式工作，则步距角为

$$\alpha = 360^{\circ} / (mzk) = 360^{\circ} / (3 \times 40 \times 2) = 1.5^{\circ}$$

4. 步进电机的主要特性

(1) 步距角。步进电机的步距角 是反映步进电机定子绕组的通电状态每改变一次，转子转过的角度。它是决定步进伺服系统脉冲当量的重要参数。数控机床中常见的反应式步进电机的步距角一般为 。步距角越小，数控机床的控制精度越高。

(2) 矩角特性、最大静态转矩 $M_{j\max}$ 和启动转矩 M_q 。矩角特性是步进电机的一个重要特性，它是指步进电机产生的静态转矩 与失调角 的变化规律。

(3) 启动频率 f_q 。空载时，步进电机由静止突然启动，并进入不丢步的正常运行所允许的最高频率，称为启动频率或突跳频率。若启动时频率大于突跳频率，步进电机就不能正常启动。空载启动时，步进电机定子绕组通电状态变化的频率不能高于该突跳频率。

(4) 连续运行的最高工作频率 f_{\max} 。步进电机连续运行时，它所能接受的，即保证不丢步运行的极限频率，称为最高工作频率。它是决定定子绕组通电状态最高变化频率的参数，它决定了步进电机的最高转速。

(5) 加减速特性。步进电机的加减速特性是描述步进电机由静止到工作频率和由工作频率到静止的加减速过程中，定子绕组通电状态的变化频率与时间的关系。当要求步进电机启动到大于突跳频率的工作频率时，变化速度必须逐渐上升；同样，从最高工作频率或高于突跳频率的工作频率停止时，变化速度必须逐渐下降。逐渐上升和下降的加速时间、减速时间不能过小，否则会出现失步或超步。我们用加速时间常数 T_a 和减速时间常数 T_d 来描述步进电机的升速和降速特性，如图 5-8 所示。

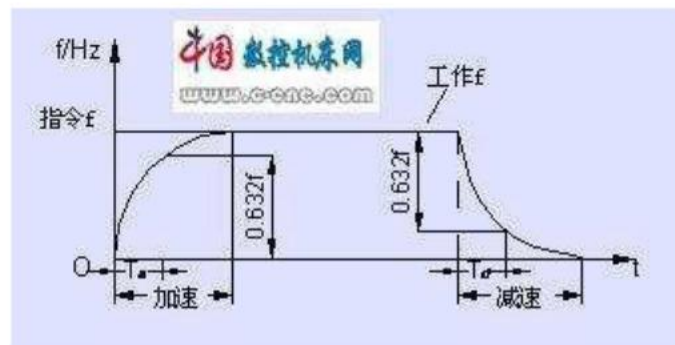


图 5-8 加减速特性曲线