

步进马达步距角细分方法及其控制



一. 步进电机的基本原理

步进电机作为执行元件，是机电一体化的关键产品之一，广泛应用在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：

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° 、整步工作时为 1.8°)，这个步距角可以称之为‘电机固有步距角’，它不一定是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‘相数’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. 1. 一般步进电机的精度为步进角的 3-5%，且不累积。

2. 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. 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。

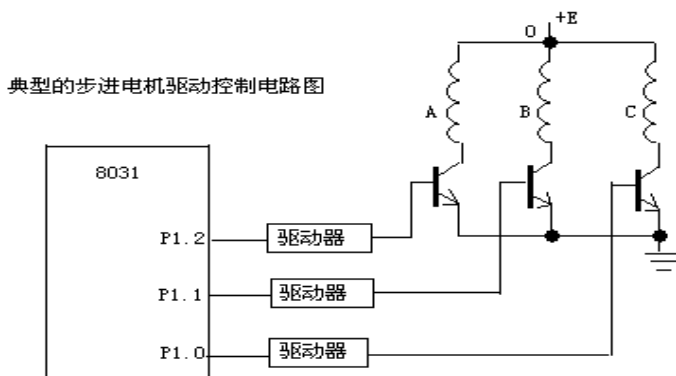
二. 步进电机驱动器的原理

步进电机的运行要有一电子装置进行驱动，这种装置就是步进电机驱动器，它是把控制系统发出的脉冲信号，加以放大以驱动步进电机。步进电机的转速与脉冲信号的频率成正比，控制步进脉冲信号的频率，可以对电机精确调速；控制步进脉冲的个数，可以对电机精确定位。

典型的步进电机驱动控制系统主要由三部分组成：

1. 步进控制器，由单片机实现。
2. 驱动器，把单片机输出的脉冲加以放大，以驱动步进电机。
3. 步进电机。

典型的步进电机驱动控制电路图如下：



图中单片机的 I/O 口一位控制一相绕组，根据所选定的步进及控制方式可写出相应的控制方式的数学模型，如三相单三拍、三相双三拍、三相六拍。

现以三相六拍为例：

步序	控 制 位								控制模型
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
A	1	1	1	1	1	0	0	1	F9H
AB	1	1	1	1	1	0	1	1	FBH
B	1	1	1	1	1	0	1	0	FAH
BC	1	1	1	1	1	1	1	0	FEH
C	1	1	1	1	1	1	0	0	FCH
CA	1	1	1	1	1	1	0	1	FDH

以上为步进电机正转时的控制顺序及数学模型。因此，步进驱动控制器实际上就是按上述的控制方式所规定的顺序送脉冲序列，即可实现驱动步进电机三相六拍方式的转动。输入顺序脉冲序列的速率就是步进电机的速率。

这种典型的步进电机驱动控制方法及其电路，只能实现步进电机步距角为原来固定步距角的一半。当要求实现步距角细分时，该方法就不能达到要求了，所以在这里就要引入步进电机细分技术方案的探讨。

三. 细分技术方案

细分的基本概念为：步进电机通过细分驱动器的驱动，其步距角变小了。如驱动器工作在 10 细分状态时，其步距角只为‘电机固有步距角’的十分之一，也就是：当驱动器工作在不细分的整步状态时，控制系统每发一个步进脉冲，电机转动 1.8°；而用细分驱动器工作在 10 细分状态时，电机只转动了 0.18°。细分功能完全是由驱动器靠精确控制电机的相电流所产生的，与电机无关。

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），其主要目的是提高电机的运转精度，实现步进电机步距角的高精度细分。其次，细分技术的附带功能是减弱或消除步进电机的低频振动，低频振荡是步进电机（尤其是反应式电机）的固有特性，而细分是消除它的唯一途径，如果步进电机有时要在共振区工作（如走圆弧），选择细分驱动器是唯一的选择。

驱动器细分后的主要优点为：完全消除了电机的低频振荡；提高了电机的输出转矩，尤其是对三相反应式电机，其力矩比不细分时提高约 30-40%；提高了电机的分辨率，由于减小了步距角、提高了步距的均匀度，‘提高电机的分辨率’是不言而喻的。

以上这些优点，尤其是在性能上的优点，并不是一个量的变化，而是质的飞跃。

因此，在性能上的优点是细分的真正优点。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。

目前，国内外的步进电动机细分技术的最高微步距细分水平为 25.5”，而随着科学和工业技术发展，这一细分水平对于目前很多要求 5”以下的微步距角来说，仍远远不能满足要求。为什么长期以来步进电动机的细分技术停留在 25.5”的水平上而不能再细分？

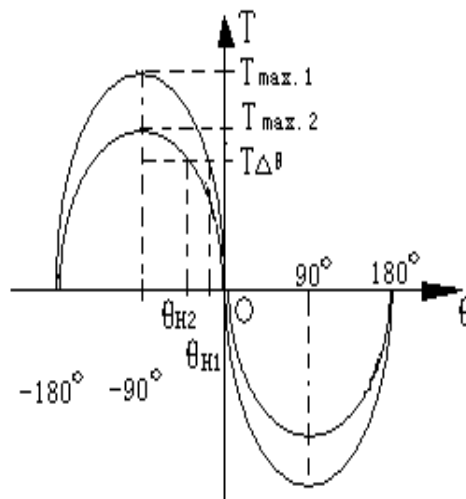
对这一问题的研究表明，现有技术大多采用以下两种细分方法：

方法一：

首次获得较高分辨率的细分方法采用的是一种称为：半拍步进的方法，即在对步进电动机的步距角进行细分时，将步进电动机的控制位置数（以四相混合式步进电动机为例）的四拍通电逻辑顺序变为八拍通电逻辑顺序，从而将步进角降为原来的一半。以后在这种方法的基础上继续改进为电流合成矢量 i_h ，使 i_h 不是一下变动 45 个电角度，而是一次变化一个较小的角度 θ_f ，这样就将步距角由原来的 45° 变为后来较小的微步距角 θ_f 。当通电时，电流合成矢量在 0~45° 范围内，仅让一相绕组的电流在变化，即只有 i_a 在变化， i_b 不变；在 45°~90° 范围内，仅让 i_b 一组绕组的电流变化， i_a 不变。这种细分驱动方法的优点是只需要改变某一相的电流值，因此在硬件电路的设计上就比较容易实现。但这种方法却带来了一个不可克服的缺陷，即电流合成矢量 i_h 在旋转过程中的幅值是处在不断变化中，从而引起滞后角的不断变化。当细分数很大、微步距角非常小时，滞后角变化的差值 $\Delta\theta$ 已大于所要求细分的微步距角，使得微步距角的继续细分实际上失去了意义。采用现有技术细分方法的电流矢量旋转示意图如图 1。

现有技术的距角特性曲线中反映的滞后角 $\Delta\theta$ 对细分的影响如下图：

(纵轴 T 表示转距，横轴 θ 表示转子的位置转角)



方法二：

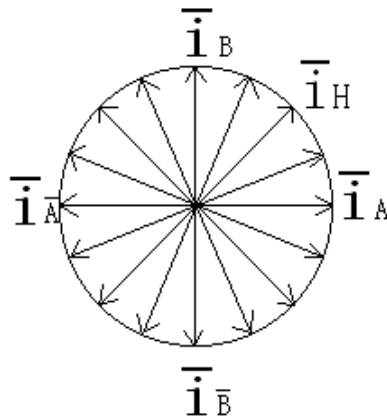
利用单片机的脉冲宽度可调波 (PWM), 使原来的一个矩形脉冲波分解成一个阶梯波形, 若设原来阶梯波角度为 θ , 则按阶梯波的步距角应为 θ/n , 其中 n 为阶梯波的个数。其优点是在阶梯波驱动步进电机的时候, 虽然能通过单片机产生的 PWM 波很灵活地改变输出脉冲的高低和长短, 从而实现步进电机的柔性控制和实现驱动大功率的步进电动机。但由于驱动电路复杂和在定位的时候可能会产生振动, 若其振动的角度超过了细分的最小角度, 则不适合高精密仪器的定位要求。

另外, 步进电机按运行频率工作时, 启动和停止都需要有一个缓慢的升频和降频的过程。启动时, 可在启动频率之下启动步进电机, 然后逐渐上升到运行频率; 停止时, 先将频率逐渐降低到启动频率以下才能停止。特别是负载转动惯性比较大时, 该现象很明显以致严重地影响到细分步进转角的非线性和均匀旋转的控制。

这就是现有细分技术方案不能达到超高分辨的根本原因。为解决这个问题, 很多资料都曾经提出对细分电流进行修正的方法, 但一直未见一个实用、统一的数学模型及可行的细分

采用该方法时，电流合成矢量的旋转示意图如下：

图中得 \bar{i}_a 、 \bar{i}_b 、 \bar{i}_h 分别表示 A、B 两相电流矢量及两相电流合成矢量。



本电路的细分方法其特征在于：

步骤一：建立一种可消除滞后角变化影响的步进电动机的细分控制函数数学模型：

$$i_a = i_m \cdot \cos X$$

$$i_b = i_m \cdot \sin X$$

式中： i_a —A 相绕组电流

i_b —B 相绕组电流

x —控制参数

i_m —电流幅值

$\cos x$ —控制参数余弦值

$\sin x$ —控制参数正弦值

步骤二：对运行于交流同步电机状态的步进电机所受控的交流模拟信号在一个周期内细分，每个细分点对应一个交流值。

步骤三：按照细分控制数学模型对 A、B 两相绕组电流通过步距角细分控制电路实施控制，控制过程为：

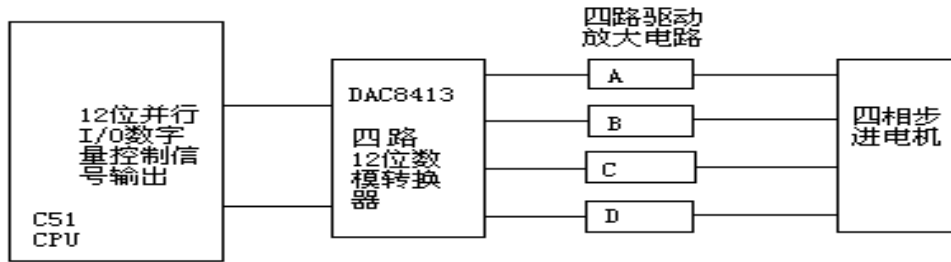
由单片机送来的数字量电压控制信号，经 D/A 转换器转换为模拟量的电压信号，再送到放大驱动电路上，经放大后直接送到步进电动机的四相绕组，并在四相绕组上加上电压负反馈以保证电压放大的稳定性。四相绕组分别取得正、余弦变化电流和零电平，通过电流合成矢量的驱动方式，驱动电动机的旋转，这样每输入一个数字量，电机转子就步进一个微步距角 θ_f 。

步骤四：对影响细分控制精度的非线性，通过细分控制修正表和相应的单片机修正程序对细分正、余弦表实施修正。

基于以上细分方法及其特征，本论文的步进电机控制系统是在原有典型的步进电机驱动控制电路基础上建立起来的，驱动控制电路利用 MCS51 系列单片机与 12 位 D/A 转换器（DAC8413）构成高精度细分的开环自动定位系统，通过“电流矢量恒幅均匀旋转”细分驱动方法实现高精度定位，大大提高步进电机的分辨率和改善步进电机在动态运转时的特性。

使用上述原理建立的系统框图如下：

步进电机高精度细分控制电路框图



2. D/A 芯片的选择

D/A 转换器把单片机的数字控制量转换为模拟的电压信号，经放大后直接控制电机。所以，D/A 芯片的选择关系到细分技术的方案要求。

我选用的 D/A 芯片是 AD 公司的 DAC8413。它的概述为：

DAC8413 是在单片电路芯片上集成四个 12 位电压输出数模变换器（DAC）。每一 DAC 都有一个双重缓冲的输入锁存结构，并有回读功能。全部 DAC 都通过一个 12 位并行 I/O 口与微处理发生读写操作。容许用户同时将 DAC 输出复位到零，而不考虑输入锁存器的内容。任一 DAC 和全部 DAC 都可以被置于透明模式，使输出能根据输入数据立即响应。

DAC8413 的特性：

1. +5 伏到+/-15 伏工作电压
2. 单极性或双极性输出
3. 实际的电压输出
4. 双重缓冲的输入锁存结构
5. 复位到零或复位到中点的干预
6. 高速总线存取时间
7. 回读功能

DAC8413 的应用：

可用于自动测量设备，数字控制校准系统，控制伺服系统，过程控制系统。

使用 DAC8413 的原因：

1. 利用数模转换器的 12 位并行 I/O 口，把四分之一的四相驱动电流周期即一个步距分成 4096 级，也就是 2 的 12 次方，达到电压高精度的细分要求。

2. DAC8413 四个完整的电压输出数模转换器，能直接输出 0-10V 的电压，再经 1.2 倍放大后达到 0-12V 的电压范围，以控制电机的四相绕组，减少电路复杂性。

3. 芯片能使用一组或两组电压供电，减少驱动电源的复杂性。使用外部参考电压，用高精度参考电压保证输出细分电压的稳定性。

4. “复位到零”干预，达到电机 0-12V 的电压控制范围，使电机在半步工作时能达到 0-1.8° 的步进范围。

5. 利用双重缓冲的输入锁存结构和高速总线存取时间，四路 DAC 能分别写入和输出数据，并能同时一次性写出，达到高速并行输入和并行输出的数模转换要求。

6. 芯片性价比方面的考虑。

3. 驱动电路的设计

在驱动电路的设计中，把驱动电路分成四个部分：电源部分、单片机部分、D/A 转换部分、放大驱动部分。

电源部分以数字电路和模拟电路分别供电的思想为纲，分为三组直流稳压电源：单片机电源+5V, 电动机电源+15V, D/A 及运放电源+/-15V。

在提供给 D/A 芯片外部参考电压时，使用高精度的 10V 参考电压电路，以保证细分的电压输出不出现漂移。

单片机部分以单片机 (W77E58) 为核心，集数据传输、控制为一体，实现自动控制功能。W77E58 是一个与 MCS-51 系列兼容的 8-bit CMOS 微处理。其指令运行速度却是普通单片机的 1.5-3 倍/机器周期，时钟输入可上到 40MHz。利用它输出 12 位数字量控制信号。

D/A 转换部分用 DAC8413 芯片，把 12 位的数字量控制信号转换为四路模拟电压输出。

放大驱动部分用超低偏移电压放大器 OP-07 作一级电压放大，把 D/A 输出的 10V 模拟电压信号放大 1.2 倍，然后再加上一级以 OP-07 为器件的跟随器，达到步进电动机 0-12V 的工作电压要求。经放大的电压信号，直接送到功率场效应晶体管 IRF540, 以场效应管作为驱动管。并在每个线圈绕组上接上二极管抑制反向电动势，保护有关元件。

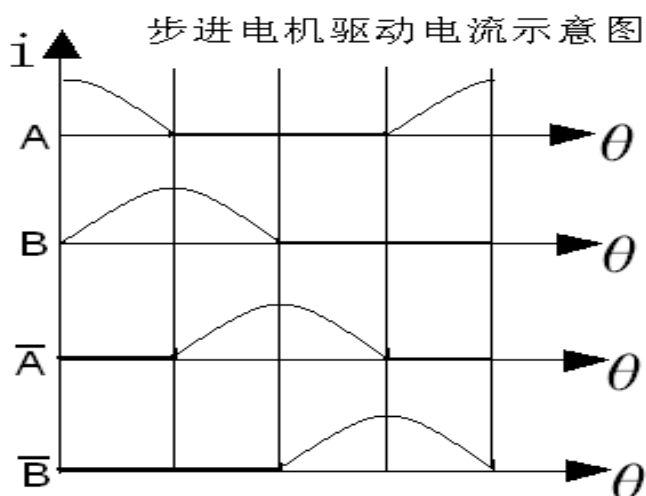
步进电机的选用：24BYG4022-1 DC12V 0.25A

注：本驱动电路图在附录上。

4. 驱动程序的设计

步进电动机的半步工作时为 1.8° ，驱动程序的设计目的是编写一个 4096 级查正、余弦表功能的程序，产生大小正比于控制函数 X 的正、余弦函数的两路电压 V_a 、 V_b 输出，作为电机 A、B 两相绕组电流的控制电压。并根据细分控制函数数学模型，编写四相电流控制驱动方式。

采用该数学模型时，四相电流一个周期的变化示意图如下：



程序的设计在步进电动机的细分软件技术上，实现了“电流矢量恒幅均匀旋转”的细分方法，从原理上解决了实现了高精度细分方法的技术问题。

对影响细分控制精度的非线性,通过细分控制修正表和相应的单片机修正程序对细分正弦、余弦表实施修正。

驱动程序中的正弦表为 4096 级,而步进角度一步要求为 128 级,上述程序中的查表步距为固定值,但实测中的实验数据和它的曲线表明,仍然未能达到步进角度线性变化的要求。针对这个问题,提出了在较高精度的数表中查表时,使用非固定查表步距代替原来的固定步距,从而达到修正细分控制精度非线性的问题。

注:本驱动程序和程序框图在附录上。

五. 方案设计

由于椭偏仪的要求是步进电动机在一个步距上进行细分,也就是半步角度 1.8° 细分 128 份等于 0.0140625° , 以此设计了一套检查步进角度细分情况的系统。

让步进电动机带上一个半径为 150mm 长的转臂,并在转臂上用头发丝作刻度。然后,用分辨率为 0.01mm 的显微镜观察转臂末端上刻度的变化。

注:检验装置平面图在附录上。

因为,每次步进转过的角度距离为:

$$\text{SIN}(1.8^\circ / 128) * 150\text{mm} = 0.03682\text{mm};$$

约等于步进转臂转过的弧长:

$$2 * \pi * 150 / 200 / 128 = 0.03680\text{mm};$$

所以,能用分辨率为 0.01mm 的显微镜观察转臂步进角度刻度的变化,而且还可以在半步范围内用转过的角度距离近似代替转臂转过的弧长。

检测过程中,让步进电机每次只走一步,然后微调显微镜的细调刻度,用显微镜中十字刻度的垂直刻度对准转臂刻度的右侧,记录每次细调刻度的变化,就能得出反映步进电动机细分步进的角度变化数据,根据这些数据就能绘制出步进角度变化的曲线图。

另外,还通过步进电机的正反转实现电机重复性的检验,以及通过电机定点偏移的测量检验电路的稳定性问题,从而分析电路能否达到分辨率的要求。

根据理论推测试验曲线和理想曲线如下:

