步进电机原理应用及程序详解

1、步进电机实物图片

图 1 普通步进电机

图 2 减速步进电机

图 3 直线步进电机

图 4 微型步进电机

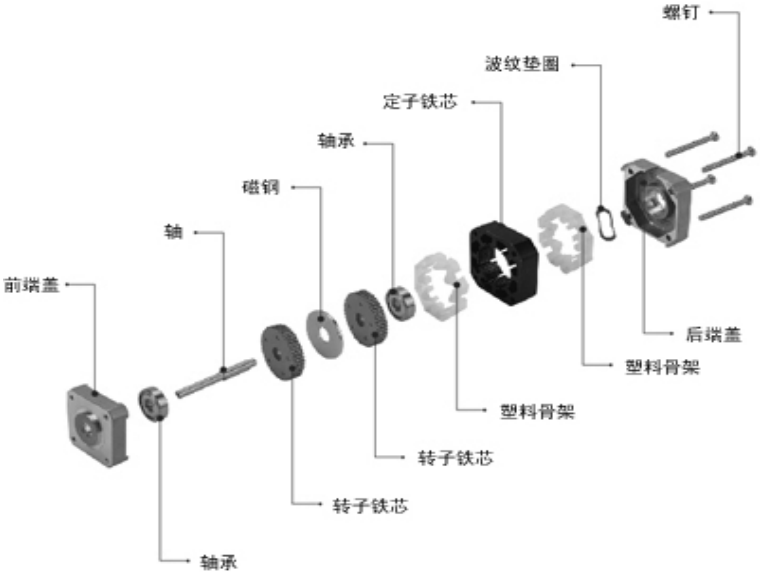


图 5 步进电机解剖图

2、步进电机介绍

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。因此用好步进电机也非易事，它涉及到机械、电机、电子及计算机等许多专业知识。

3、步进电机分类

- 永磁式（PM）

  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（VR）

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。在欧美等发达国家 80 年代已被淘汰。
- 混合式（HB）

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。

4、技术指标

（1）步进电机的静态指标

- 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°/1.8°、三相的为 0.75°/1.5°、五相的为 0.36°/0.72° 。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。
- 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°/1.8°（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。
- 拍数：

完成一个磁场周期性变化所需脉冲数或导电状态，或指电机转过一个步距角所需脉冲数，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。
- 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）。
- 保持转矩：

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。

（2）步进电机的动态指标

- 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。

- 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。

- 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。

- 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。

- 最大空载运行频率：

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。

- 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。如图 6 所示。

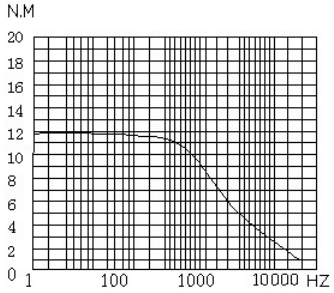


图 6 力矩与频率关系曲线

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。如图 7 所示。

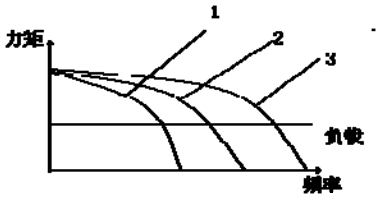


图 7 力矩与频率关系曲线

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，或采用小电感大电流的电机。

- 电机的共振点：

步进电机均有固定的共振区域，步进电机的共振区一般在 50 转/分至 80 转/

分之间或在 180 转/分左右，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。因此，在使用步进电机时应避开此共振区。

5、步进电机工作原理

步进电机是一种将电脉冲转换成相应角位移或线位移的电磁机械装置。它具有快速启停能力，在电机的负荷不超过它能提供的动态转矩时，可以通过输入脉冲来控制它在一瞬间启动或停止。步进电机的步距角和转速只和输入的脉冲频率有关，和环境温度、气压、振动无关，也不受电网电压的波动和负载变化的影响。因此，步进电机多应用在需要精确定位的场合。

（1）步进电机的工作原理

步进电机有三线式、五线式和六线式，但其控制方式均相同。都要以脉冲信号电流来驱动。假设每旋转一圈需要 200 个脉冲信号来励磁，可以计算出每个励磁信号能使步进电机前进 1.8°，其旋转角度与脉冲的个数成正比。步进电动机的正、反转由励磁脉冲产生的顺序来控制。六线式四相步进电动机是比较常见的，它的控制等效电路如图 8 所示。它有 4 条励磁信号引线 A、$\overline{A}$、B、$\overline{B}$，通过控制这 4 条引线上励磁脉冲产生的时刻，即可控制步进电机的转动。每出现一个脉冲信号，步进电机只走一步。因此，只要依序不断送出脉冲信号，步进电机就能实现连续转动。

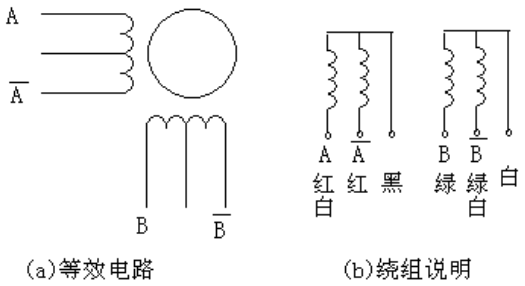


图 8 步进电机的控制等效电路

（2）步进电机的励磁方式

步进电机的励磁方式分为全步励磁和半步励磁两种。其中全步励磁又有 1 相励磁和 2 相励磁之分；半步励磁又称 1-2 相励磁。假设每旋转一圈需要 200 个脉冲信号来励磁，可以计算出每个励磁信号能使步进电动机前进 1.8°，简要介绍如下。

- **1 相励磁：**

在每一瞬间，步进电机只有一个线圈导通。每送一个励磁信号，步进电机能旋转 1.8°，这是 3 种励磁方式中最简单的一种。

其特点是：精确度好、消耗电力小，但输出转矩最小，振动较大。如果以该方式控制步进电机正转，对应的励磁顺序如表 1 所示。若励磁信号反向传送，则步进电机反转。表中的 1 和 0 表示送给电机的高电平和低电平。

表 1 1 相励磁顺序表

STEP	A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0

3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

励磁顺序说明：1→2→3→4

- **2 相励磁：**

在每一瞬间，步进电动机有 2 个线圈同时导通。每送一个励磁信号，步进电动机能旋转 1.8°。

其特点是:输出转矩大，振动小。因而成为目前使用最多的励磁方式。如果以该方式控制步进电机正转，对应的励磁顺序见表 2。若励磁信号反向传送，则步进电机反转。

表 2 2 相励磁顺序表

STEP	A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

励磁顺序说明：1→2→3→4

- **1-2 相励磁**

为 1 相励磁与 2 相励磁交替导通的方式。每送一个励磁信号，步进电机能旋转 0.9°。

其特点是:分辨率高，运转平滑，故应用也很广泛。如果以该方式控制步进电机正转，对应的励磁顺序见表 3。若励磁信号反向传送，则步进电机反转。

表 3 1-2 相励磁顺序表

STEP	A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

励磁顺序说明：1→2→3→4→5→6→7→8

6. 步进电机的驱动

步进电机的驱动可以选用专用的电机驱动模块,比如 L298、FT5754 等，这类驱动模块接口简单，操作方便，它们既可以驱动步进电机，同时也可以驱动直流电机。除此之外我们还可以用三极管自己搭建驱动电路，不过这样会使电路非常

麻烦，而且可靠性也会降低。另外还有一种方法就是使用达林顿驱动器 ULN2803，该芯片单只最多可一次驱动 8 线步进电机，当然如果只有 4 线或 6 线制的也是没有问题的，下面我们就该芯片与 TX-1C 实验板共同驱动步进电机的方法做介绍。

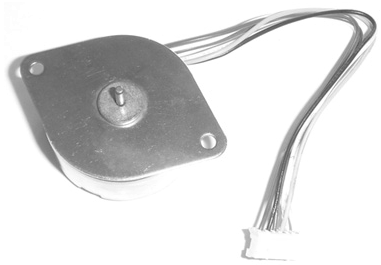


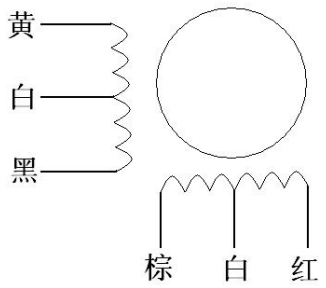
图 9 本实验使用的步进电机

供电电压：5-12V，步距角：7.5 度，相数：4 相，线数：6 线，每相电流：0.86A，每相阻抗：10.5 欧，最大频率：600Hz，静转矩：420g.cm，定位转矩：50g.cm，电机直径：35mm，电机高度：15mm，定位孔距：42mm。

操作方式：

引脚顺序	颜色	步	1	2	3	4
3	黄	A	-	-		
4	棕	B		-	-	
5	黑	C			-	-
6	红	D	-			-
1	白	M	+	+	+	+
2	白	O	+	+	+	+

线序：



7. 步进电机与单片机连接原理图分析

本实验采用 6 线制 4 相步进电机，其电机与 ULN2803 连接如图 10 所示，JP1 为电机 6 线接口，其中 JP1 的第 1、2 引脚连接在一起与电机的公共端相连，对应图 8 中两根白线，JP1 的 3 脚对应步进电机的 A，JP1 的 4 脚对应步进电机的 B，JP1 的 5 脚对应步进电机的 $\overline{A}$，JP1 的 6 脚对应步进电机的 $\overline{B}$。这四根驱动线通过 ULN2803 后与单片机的 P1.0～P1.3 相连。

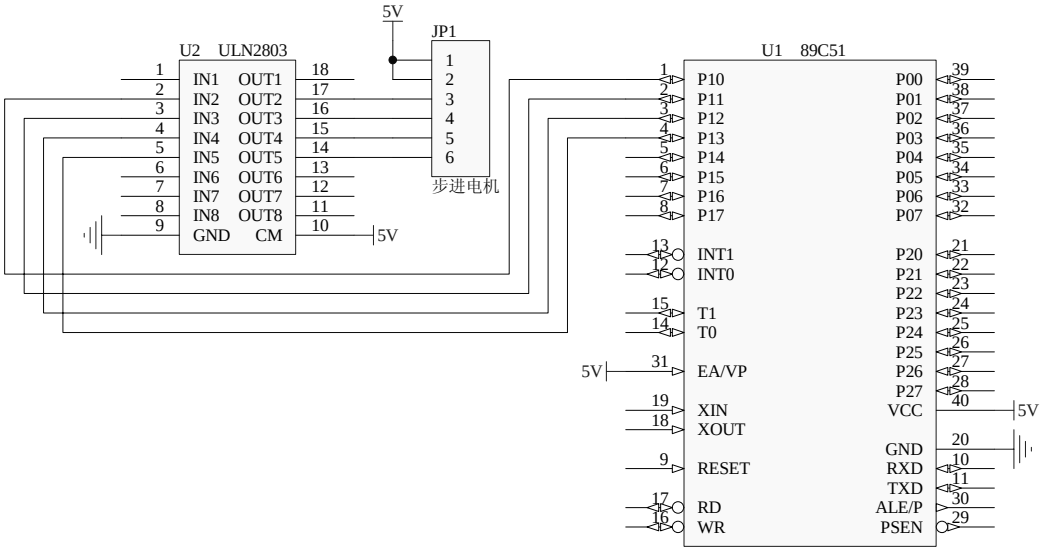


图 10 步进电机和单片机连接原理图

8、步进电机 C 语言程序实例

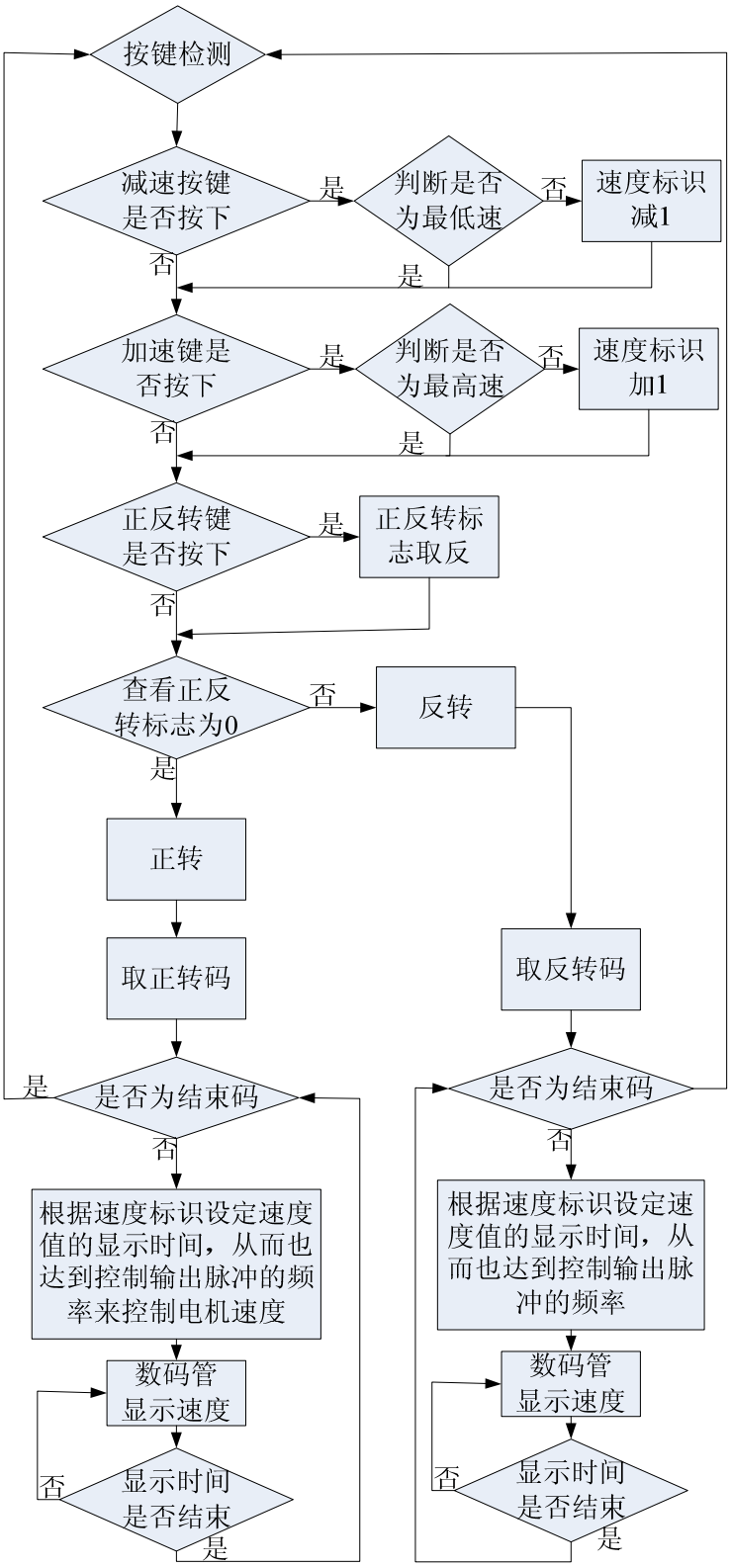


图 11 程序流程图

实验说明:用 TX-1C 实验板上的独立铵键控制步进电机正转、反转、加速、

减速，驱动方式采用 1 相励磁，也即 4 个信号线每次只有一个为高电平，在实验板上数码管上象征性显示出转速，注意，数码管显示的速度并不代表电机实际速度，只是给大家感性的认识。

```
#include <reg52.h>
#define uchar unsigned char
sbit dula=P2^6;                    //数码管显示段选 IO 口定义
sbit wela=P2^7;                    //数码管显示位选 IO 口定义
sbit jia_key=P3^6;                 //电机加速 IO 口定义
sbit jian_key=P3^7;                //电机减速 IO 口定义
sbit zf_key=P3^5;                  //电机正反转 IO 口定义
bit flag=0;                        //电机正反转标志位
uchar num=0,show_num=2,maichong=4,table_begin=0;
uchar code table1[]={0x01,0x02,0x04,0x08,0x08,0x04,0x02,0x01};
                                   //电机正反转 IO 口的高低电平对应表
uchar code table[]={0x3f,0x06,0x5b,0x4f,0x66,0x6d,0x7d,
0x07,0x7f,0x6f,0x77,0x7c,0x39,0x5e,0x79,0x71};//数码管显示 IO 口对应表
void delay(uchar i)                //延时函数
{
  uchar j,k;
  for(j=i;j>0;j--)
    for(k=125;k>0;k--);
}
void display()                     //显示函数
{
   dula=0;
   P0=table[show_num];
   dula=1;
   dula=0;
   wela=0;
   P0=0xfe;
   wela=1;
   wela=0;
   delay(5);
   P0=table[0];
   dula=1;
   dula=0;
   P0=0xfd;
   wela=1;
   wela=0;
   delay(5);
}
void key ()                        //按键检测处理函数
{
   if(jia_key==0)
```

```
        {
          delay(5);                    //加速键按下，消抖
           if(jia_key==0)
           {
              num++;                    //速度标示加 1
              if(num==4)
                   num=3;               //达到最大 3 则保持
                   while(jia_key==0);   //等待松开按键
           }
        }
        if(jian_key==0)
        {
          delay(5);                    //减速键按下
           if(jian_key==0)
           {
              if(num!=0)
                      num--;            //速度标示减 1
              else
                      num=0;            //达到最小 0 则保持
                      while(jian_key==0);
           }
        }
        if(zf_key==0)
        {
          delay(5);                    //正反转按键按下
          if(zf_key==0)
           {
              flag=~flag;              //正反转标识取反
              while(zf_key==0);
           }
        }
      }
      void dispose()                   //根据速度标识进行数据处理
      {
        switch(num)
        {
          case 0:
                show_num=2;            //数码管第一位显示的数字
                maichong=5;            //利用 maichong 数据控制送给电机脉冲的频率，控制速度
                  break;
           case 1:
                show_num=4;
                maichong=4;
                break;
```

```
        case 2:
            show_num=6;
            maichong=3;
            break;
        case 3:
            show_num=8;
            maichong=2;
            break;
    }
    if(flag==0)
    {
        table_begin=0;              //flag 为 0，正转
    }
    else
        table_begin=4;              //flag 为 1，反转
}
void qudong()                       //电机速度，和正反转控制
{
    uchar i,j;
    for(j=0+table_begin;j<4+table_begin;j++)
    {
        P1=table1[j];               //读取控制电机转动 IO 口表
        for(i=0;i<maichong;i++)
        {
            display();              //利用显示函数起延时作用，控制电机速度
                                    //这样也不影响数码管显示，一举两得
        }
    }
}

void main()
    {
        while(1)
            {
                key();
                dispose();
                qudong();
            }
    }
```

9、步进电机使用常见问题

（1）二相与四相混合式的区别？

二相步进电机内部只有二组线圈，外部有 4 根引出接线，标记为 A、$\overline{A}$、B、

www.txmcu.com

$\overline{B}$。四相步进电机内部线圈有两种形式：二组带中间抽头的有 6 根引出接线，独立四组线圈的有 8 根引出接线。

（2）步进电机与驱动器怎样选型？

因为步进电机的输出功率与运转速度成反比例，所以选型时必须了解以下的参数：

负载：单位为 kg•cm 或者 N•M（例：1cm 半径 1kg 力拉动时为 1kg•cm）。

速度：速度越高电机输出力矩越小。参照电机输出曲线选择相应速度时，输出得达到负载能力的电机。表 4 给出一些参考。

表 4 电机选择参考

	高速性能	低速振动	适配驱动器
电机电压高电流小	差	小	价格低
电机电压低电流大	好	大	价格高

（3）步进电机使用时振动大、失步或有声不转动等现象为什么？

步进电机与普通交流电机有很大的差别，振动大或失步现象是常见的现象。分析原因或解决方法有以下几点：

控制脉冲：频率低速时是否处在共振点上（每个型号电机不同），高速时是否采用梯形或其他曲线加速，控制脉冲频率有无跳动（部分 PLC 机型）。

解决方法：调整控制脉冲频率或采用步进伺服专用控制器。

驱动器：电机低速时，振动或失步，高速时正常；驱动电压过高。电机低速时正常，高速时失步；驱动电压过低。电机长时间低速运转无发热现象（电机正常工作时可高达 80 至 90 度）驱动电流过小时。电机工作时过热；驱动电流过大。

解决方法：调节驱动器电流、驱动电压或更换驱动器。

（4）步进电机控制为什么要采用梯形或其他加速方法？

步进电机起步速度根据电机不同一般在 150 至 250RPM 左右，如果希望高与此速运转就必须先用起步以下速度起步，逐渐加速直至最高速度运行一定距离后逐渐减速，至起步速度以下时方可停止，否则有高速上不去或失步的现象。常见加速方法有分级加速、梯形加速、S 字加速等。

（5）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。

（6）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。

（7）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，可能发生失步或堵转。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）。
（8）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。
（9）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。
（10）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低的场合使用，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。
（11）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（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。
（12）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。
（13）如何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。
（14）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：

A.“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。

B．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。

www.txmcu.com