

基于 Proteus 的步进电动机控制仿真

150325 班 15031216 苗津毓

引言

在现代化工业控制系统中，最常见的是对电动机的控制。基于对电机的控制我们可以实现对物体姿态、位置、形状乃至性质等方面的控制。随着嵌入式系统的发展，电动机的数字控制也成为现代化工业中的主流，用单片机对电动机进行控制是实现电动机数字控制的最常用手段。

我们在自控元件课程中了解到了步进电动机的相关知识及其广泛的应用，例如在工业生产中，数控机床被广泛应用，数控机床主要由数控装置、伺服系统和机床本体三大部分组成，而伺服系统多用步进电机（执行元件）、驱动装置以及位置检测装置（部分机床具有）等组成。

为了更好的理解步进电机的原理及功能，也为了在之后的自动化专业学习研究中更熟练地应用步进电动机，我以 proteus 仿真软件为基础，用 AT89C51 单片机控制步进电动机完成一些特定的功能，例如启动、停止、正转、反转及转速控制。通过仿真增加对步进电动机原理及特性的理解，同时对自动控制元件课程内容做较深入的复习巩固。

一、步进电动机简介

步进电动机（如图 1）是将电脉冲激励信号转换成相应的角位移或线位移的离散值控制电动机，这种电动机每当输入一个电脉冲就动一步，所以又称脉冲电动机。步进电动机多用于数字式计算机的外部设备，以及打印机、绘图机和磁盘等装置。步进电动机的驱动电源由变频脉冲信号源、脉冲分配器及脉冲放大器组成，由此驱动电源向电机绕组提供脉冲电流。步进电动机的运行性能决定于电机与驱动电源间的良好配合。

步进电机的优点是没有累积误差，结构简单，使用维修方便，制造成本低，步进电动机带动负载惯量的能力大，适用于中小型机床和速度精度要求不高的地方，缺点是效率较低，发热大，有时会“失步”。



图 1 步进电动机

一个步进电机系统的组成如图 2 所示：

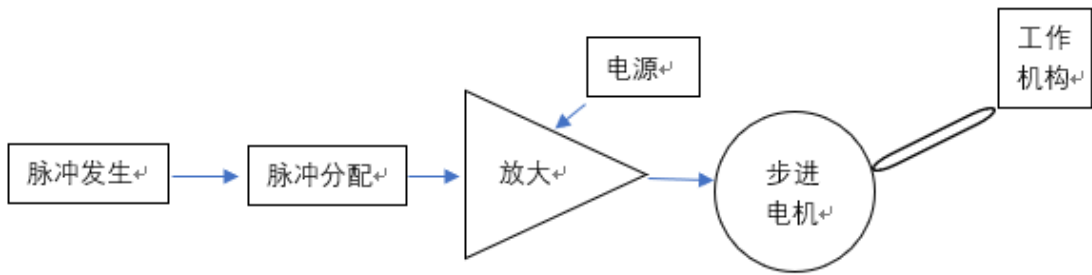


图 2 步进电机系统组成部分示意图

步进电动机同普通电机一样，也有转子、定子和定子绕组等。定子绕组分若干相，每相的磁极上有极齿，转子在轴上也有若干个齿。当某相定子绕组通电时，相应的两个磁极就分别形成 N-S 极，产生磁场，并与转子形成磁路。如果这时定子的小齿与转子的小齿没有对齐，则在磁场的作用下转子将转动一定的角度，使转子上的齿与定子的极齿对齐。因此，它是按电磁铁的作用原理进行工作的，在外加电脉冲信号作用下，逐步地运转，是一种将电脉冲信号转换成相应角位移的机电元件。

按结构分，步进电动机有反应式、永磁式及永磁感应子式三种。其中反应式步进电动机应用最广。

永磁式：永磁式步进电机的转子用永磁材料制成，转子的极数与定子的极数相同。其特点是动态性能好、输出力矩大，但这种电机精度差，步距角大（一般为 7.5° 或 15° ）。

混合式：混合式步进电机综合了反应式和永磁式的优点，其定子上有多相绕组、转子上采用永磁材料，转子和定子上均有多个小齿以提高步距精度。其特点是输出力矩大、动态性能好，步距角小，但结构复杂、成本相对较高。

反应式步进电动机如图 3 所示，转子是齿槽结构，既无绕组又无永磁体，和磁阻式同步电动机凸极转子结构相仿，图示为三相步进电动机，定子上有三相绕组。

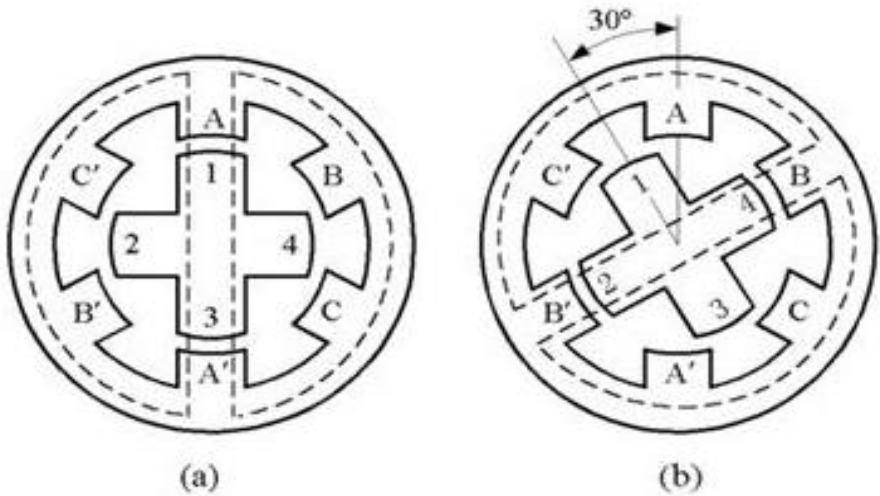


图 3 反应式步进电动机结构示意图

典型的控制方框图简示于图 4.

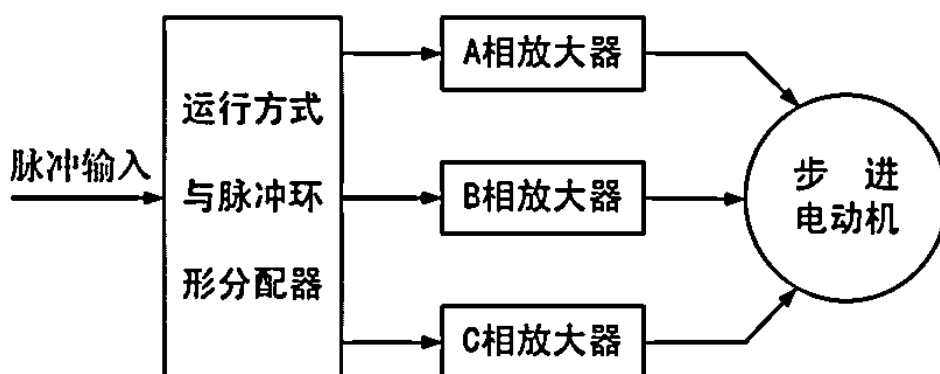


图 4 步进电动机控制方框图

当 A 相通电时，转子稳定于如图 2 (a) 所示位置，即转子齿与定子 A 相齿对齐，图中虚线表示磁通路径。之后改 B 相通电，则由于凸极效应，转子将转过一个角度，这里将逆时针转过 θ_b 角，以达到 B 相通电对应的稳定位置，如图 2 (b)，再换 C 相通电，转子又将逆时针转过 θ_b 角。这每一步转过的角度 θ_b 称为步距角。

一般情况定子有 m 相。因 m 相顺序轮流通电一周，转子转过一个齿距角 θ_t ，所以步距角 θ_b 为

$$\theta_b = \frac{1}{m} \theta_t = \frac{1}{m} \frac{360^\circ}{Z_2}$$

式中， Z_2 为转子齿数。

另外和步距角 θ_b 相对应的参数——每转步数 N ，也是步进电机常用的指标，即

$$N = \frac{360^\circ}{\theta_b} = mZ_2$$

大多数情况希望步进电动机的 θ_b 小、 N 大，以便实现精确的控制。这从以上两式可见，方法是增加转子齿数及电机相数，常用的相数位 3, 4, 5, 6 等几种，一般不宜过多，因此增加转子齿数是设计小步距角步进电机的有效途径。如图 5 所示电机： $m=4$ ， $Z_2=18$ ，因此 $\theta_b=5^\circ$ 及 $N=72$. 由图可见，转子齿数增加后，为避免定子相数增加，所以定子改为齿极，即每极上也开有同样齿距的齿槽，而相对转子而言，各相邻极上的齿槽对称错开一定角度，采用这样的结构就不难做成更小步距角的产品。例如我国研制成的特小步距角步进电机， θ_b 达 10 角分，成为精密分度和精密测试系统的重要元件。

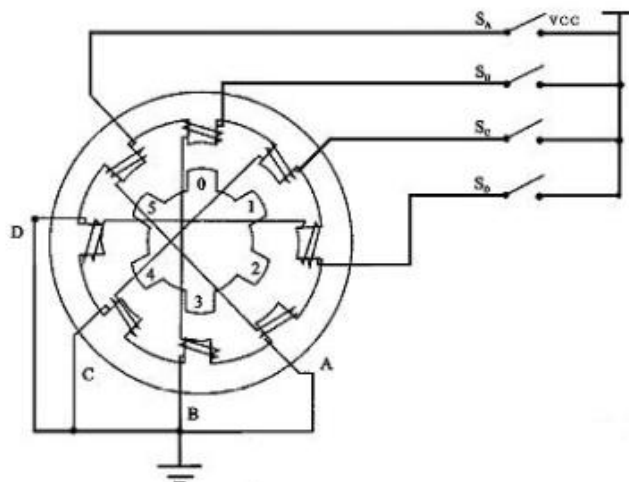


图 5 四相步进电动机

供电方式也影响电机的步距角。仍以图 2 所示步进电动机为例，若 A 相通电后改为 A、B 相两相同时通电，这时转子仅转过 15° ，相应稳定位置如图 6 所示，然后改为单独 B 相通电，又转过 15° 至图 2(b) 所示状态，这种供电顺序为：A-→(A,B)-→B-→(B,C)-→C-→(C,A)-→A，该顺序步距角减小一半，称为三相六拍制。所谓“拍”数，即在一个周期内定子绕组改变通电方式的次数。相应地，原顺序为 A-→B-→C-→A 的通电方式即为三相三拍制。



图 6 三相步进电动机 A、B 相同时通电

按同时通电的相数分，有单三拍和双三拍两种，每拍都是单独一相通电的情况称三相单三拍制。若每拍都为二相同时通电，即供电顺序为 AB-→BC-→CA-→AB，那么就称为三相双三拍制。单三拍工作情况是一相断电，另一相通电，这时易引起振荡和失步，运行稳定性比双三拍制差些，所以采用双三拍制为多。

m 相有 m 拍和 2m 拍两种工作制，对于 2m 拍制，有

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{2mZ_2} \text{ 及 } N = 2mZ_2$$

对步进电机每输入一个脉冲，输出轴就转过一个角度，其角位移量与输入脉冲数成正比，这是角度控制。也可以呼入连续脉冲，对各相绕组输入不断地按规则轮流导通，使步进电机连续运转，从而实现速度控制。显然速度控制时，每输入一个脉冲，转子转过 $1/N$ 转，所以转速为

$$n = 60f/N \quad (\text{r/min})$$

式中，f 为控制信号的脉冲频率，即每秒钟内控制绕组通电状态改变的次数。

步进电机的转向可以依靠供电相序来控制，如若 A->B->C 通电为逆时针步进运动，那么反相序后（A->C->B）即可得顺时针步进运动。

步进电动机有两个主要特性曲线。一个是反映静态电磁转矩与失调角函数关系的矩角特性，如图 7。另一个是反映动态稳定工作范围电磁转矩与频率关系的矩频特性，如图 8。

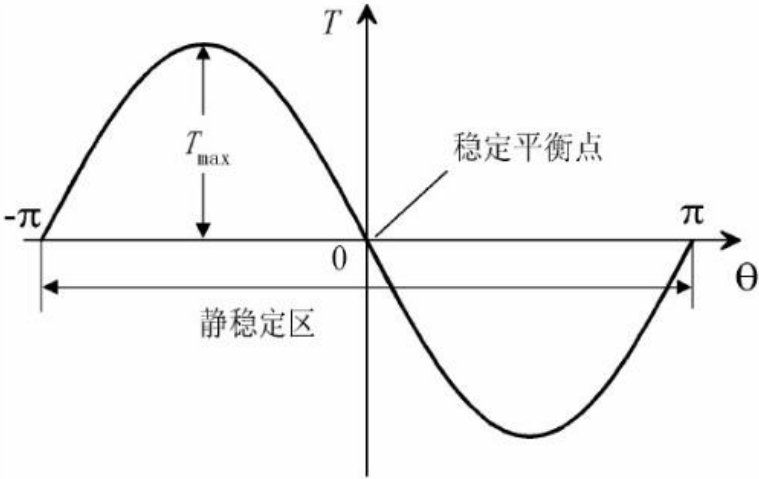


图 7 步进电动机矩角特性曲线

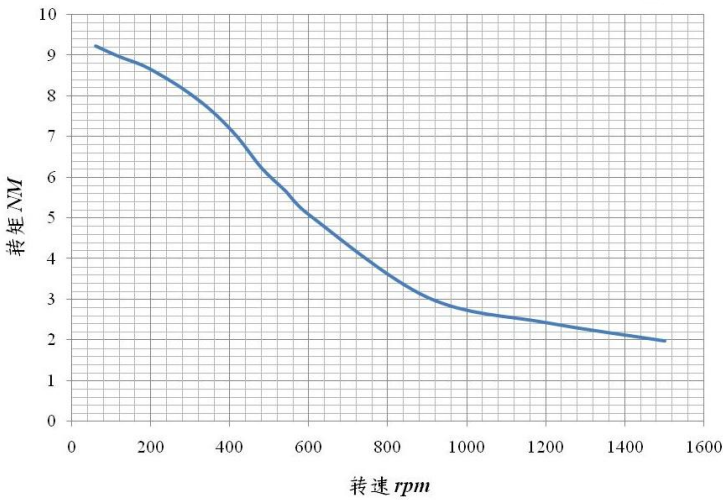


图 8 步进电动机矩频特性曲线

由图 6 可知，如步进电机为理想空载时，则转子处于初始稳定平衡位置，即矩角特性的零角。当外力使转子偏离零点，又未超过 $\theta = \pm 180^\circ$ 时，则一旦外力取消，在电磁转矩 T_{em} 的作用下，转子将回到初始稳定平衡位置。若超过 $\pm 180^\circ$ ，即使外力消失，转子也不会回到初始的稳定平衡位置，因为它此时受到相邻定子齿的磁拉力作用，所以转子趋向另一稳定平衡位置 $\pm 360^\circ$ 。步进电动机一周范围内稳定平衡位置的个数等于转子的齿数。

由图 7 所示，频率升高，步进电动机的转矩要下降，这主要是控制绕组电感的影响。由于控制回路有电感，所以控制绕组通、断电后，电流均要有一定的上升或下降时间。

二、步进电动机的单片机控制准备

如果利用单片机控制脉冲发生器产生一定频率的脉冲信号，脉冲分配器将产生一定规律的电脉冲输出给驱动器，就可以控制步进电动机的转动。步进电动机转动的角度大小与施加的脉冲数成正比，而转动方向则与脉冲的顺序有关。

小型步进电动机对电压和电流的要求不是很高，可采用简单的驱动电路，如图 9 所示。在实际应用中，驱动路数可以不止一路，若用分立电路体积大，因此很多场合采用现成的集成电路作为多路驱动。常用的小型步进电动机驱动电路可以用 ULN2003A 或 ULN2803。

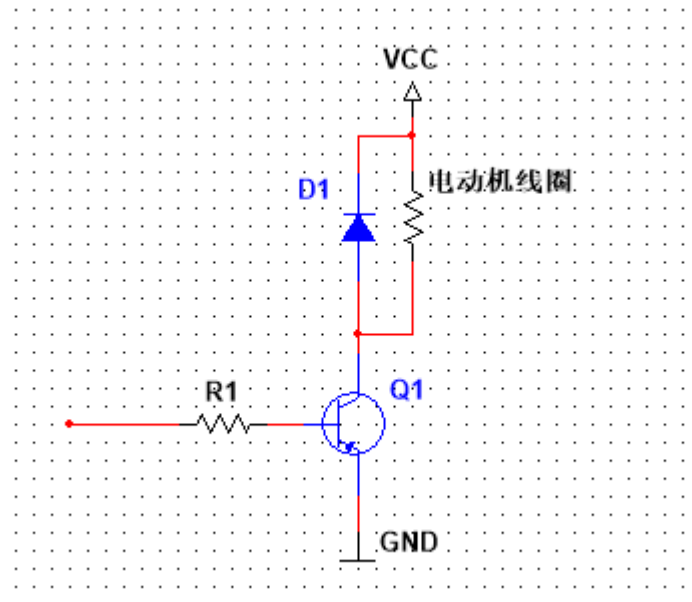


图 9 步进电动机驱动电路

ULN2003A 是高电压、大电流达林顿晶体管阵列系列产品，具有电流增益高（灌电流可达 500mA）、工作电压高（可承受 50V 的电压）、温度范围宽、带负载能力强等特点，适用于各类要求高速、大功率驱动的系统。

ULN2003A 的输出端允许通过 IC 的电流为 200 mA，饱和压降 U_{CE} 约为 1V，耐压 U_{CEO} 约为 36V。其内部结构如图 10。

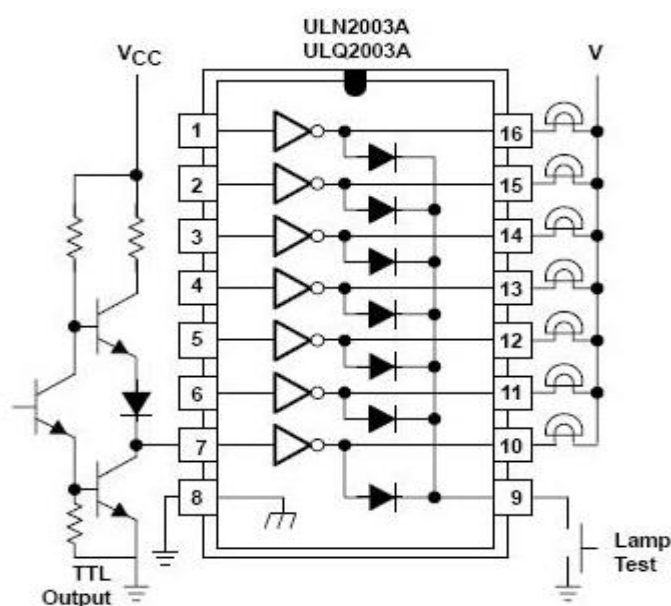


图 10 ULN2003A

三、步进电动机的单片机控制

（一）步进电动机的起动、停止控制

1. 仿真目的

利用单片机控制四相四拍步进电动机的启动、停止。

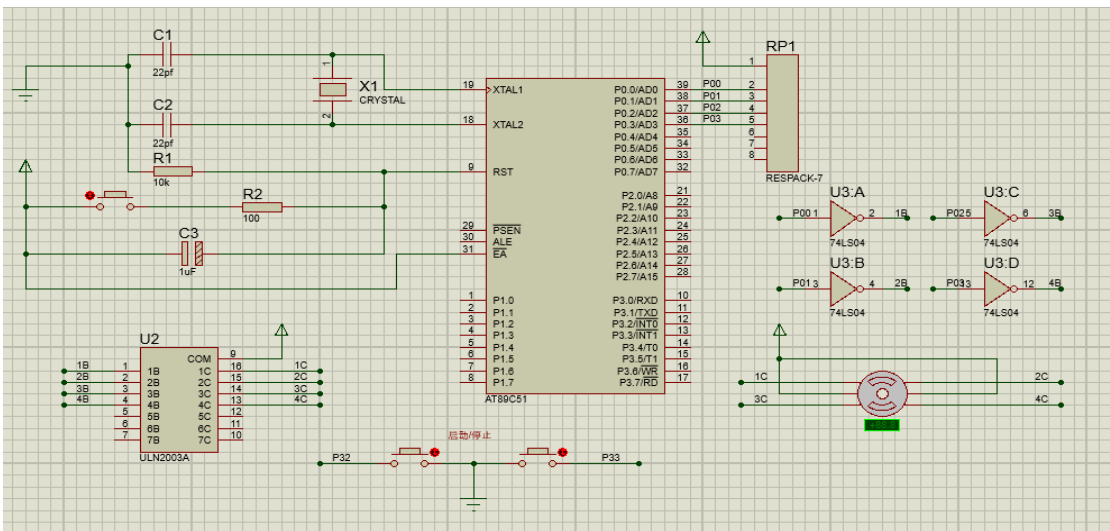
2. 硬件设计

单片机 AT89C51、电解电容 CAP-ELEC 10μF、瓷片电容 CAP 22pF、电阻 RES、晶振 CRYSTAL 11.0592MHZ、步进电动机驱动芯片 ULN2003A、步进电动机 MOTOR-STEPPER、反相器 74LS04、电阻排 RESPACK-7、按钮 BUTTON

3. 程序原理

使用四相四拍步进电动机时，正转的励磁顺序为 A->B->C->D->A。如果使用单片机的 P0 端口进行控制，可以理解为 t_0 时刻有 P0.0 控制 A 运行； t_1 时刻由 P0.1 控制 B 运行； t_2 时刻由 P0.2 控制 C 运行； t_3 时刻由 P0.3 控制 D 运行； t_4 时刻又由 P0.0 控制 A 运行……以此类推，在程序中使用两个外部中断来进行启动（ $\overline{INT0}$ ）、停止（ $\overline{INT1}$ ）的控制。

4. 仿真电路图（Proteus）



5. 控制源程序


```

1  #include"reg51.h"
2  #define uint unsigned int
3  #define uchar unsigned char
4
5  const tab1[] = {0x01,0x02,0x04,0x08}
6  uchar a,m;
7
8  void delay()
9  {
10     uchar i,j,k;
11     for (k=50;k>0;k--)
12         for(i=20;i>0;i--)
13             for(j=230;j>0;j--);
14 }
15
16 void int1() interrupt 0
17 {
18     a = 1;
19 }
20
21 void int2() interrupt 1
22 {
23     a = 0;
24 }
25
26 void int_init()
27 {
28     IE = 0x85;
29     TCON = 0x00;
30 }
31
32 void main()
33 {
34     a = 0;
35     int_init();
36     while(1)
37     {
38         if(a == 1)
39         {
40             for(m=0;m<4;m++)
41             {
42                 P0 = tab1[m];
43                 delay()
44             }
45         }
46         else if(a == 0)
47             P0 = 0x00;
48     }
49 }

```

6. 实现功能

若按下启动按钮 K1，步进电动机正转运行。若按下停止按钮 K2，步进电动机停止运行。

（二）步进电动机正反转

1. 仿真目的

使用单片机控制四相八拍制步进电动机的正、反转运行。

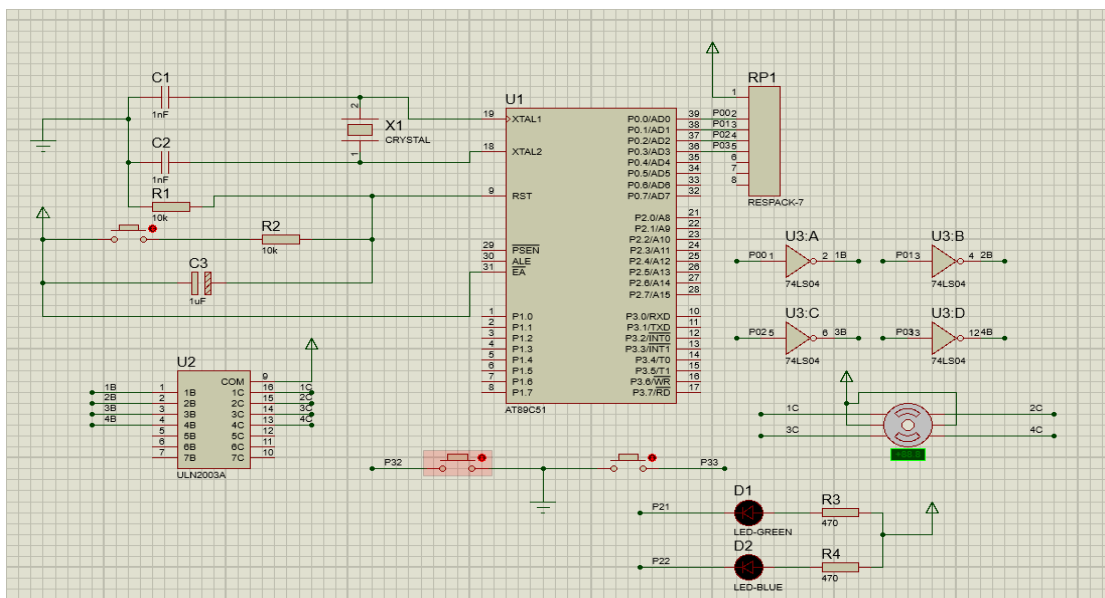
2. 硬件设计

单片机 AT89C51、电解电容 CAP-ELEC 10μF、瓷片电容 CAP 22pF、电阻 RES、晶振 CRYSTAL 11.0592MHZ、步进电动机驱动芯片 ULN2003A、步进电动机 MOTOR-STEPPER、反相器 74LS04、电阻排 RESPACK-7、按钮 BUTTON、发光二极管 LED-GREEN、发光二极管 LED-BLUE

3. 程序原理

四相八拍制电动机的正转励磁顺序为 A->AB->B->BC->C->CD->D->DA->A；反转励磁顺序为 A->DA->D->CD->C->BC->B->AB->A。在程序中用两个外部中断来进行正转（ $\overline{INT0}$ ），反转（ $\overline{INT1}$ ）的控制。

4. 仿真电路图（Proteus）



5. 控制源程序

```

1 #include"reg51.h"
2 #define uint unsigned int
3 #define uchar unsigned char
4
5 sbit FOR_LED = P2^1;
6 sbit REV_LED = P2^2;
7 const tab1[] = {0x02,0x06,0x04,0x0C,0x08,0x09,0x01,0x03};#forward
8 const tab2[] = {0x03,0x01,0x09,0x08,0x0C,0x04,0x06,0x02};#reverse
9 uchar a,m;
10
11 void delay()
12 {
13     uchar i,j,k;
14     for (k=50;k>0;k--)
15         for(i=20;i>0;i--)
16             for(j=230;j>0;j--);
17 }
18
19 void int1() interrupt 0
20 {
21     a = 1;
22 }
23
24 void int2() interrupt 1
25 {
26     a = 2;
27 }
28
29 void int_init()
30 {
31     IE = 0x85;
32     TCON = 0x00;
33 }
34
35 void main()
36 {
37     a = 0;
38     int_init();
39     while(1)
40     {
41         if(a == 1)
42         {
43             FOR_LED = 0;
44             REV_LED = 1;
45             for(m=0;m<8;m++)
46             {
47                 P0 = tab1[m];
48                 delay();
49             }
50         }
51         else if(a == 2)
52         {
53             FOR_LED = 1;
54             REV_LED = 0;
55             for(m=0;m<8;m++)
56             {
57                 P0 = tab2[m];
58                 delay();
59             }
60         }
61         else
62         {
63             P0 = 0x00;
64         }
65     }
66 }

```

6. 实现功能

在运行状态下，按下按钮 K1 后，步进电机正转运行；按下按钮 K2，步进电动机反转运行。

（三）步进电动机转速控制

1.仿真目的

使用单片机控制四相八拍制步进电动机的加速、减速运行。

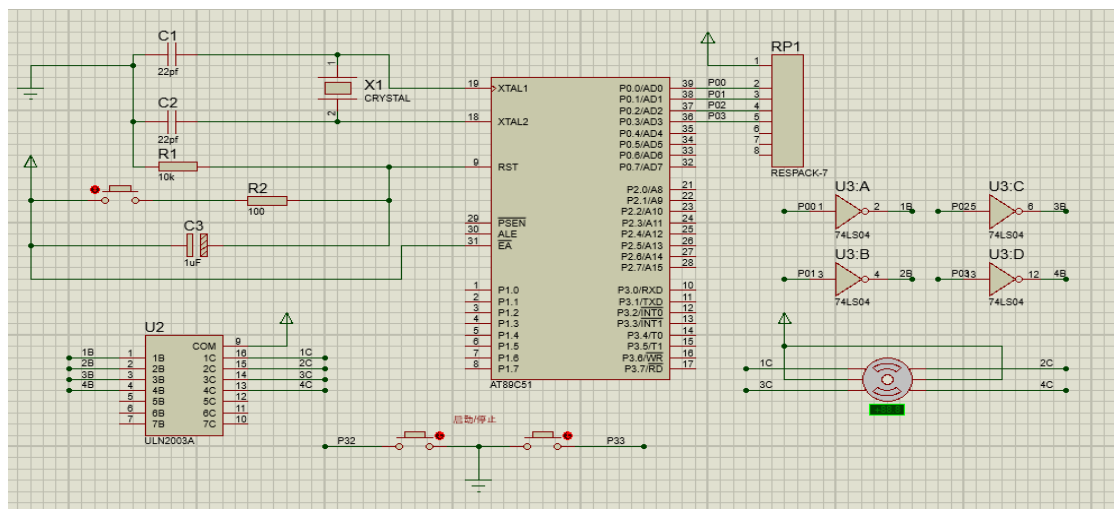
2.硬件设计

单片机 AT89C51、电解电容 CAP-ELEC 10μF、瓷片电容 CAP 22pF、电阻 RES、晶振 CRYSTAL 11.0592MHZ、步进电动机驱动芯片 ULN2003A、步进电动机 MOTOR-STEPPER、反相器 74LS04、电阻排 RESPACK-7、按钮 BUTTON

3.程序原理

通过改变程序中延时时间的长短，改版步进电机励磁电压的周期和占空比，从而改变步进电动机的转速。

4.仿真电路图 (Proteus)



5.控制源程序

```

1  #include "reg51.h"
2  #define uint unsigned int
3  #define uchar unsigned char
4
5  sbit FOR_LED = P2^1;
6  sbit REV_LED = P2^2;
7  const tab1[] = {0x02,0x06,0x04,0x0C,0x08,0x09,0x01,0x03};#forward
8  uchar a,n;
9
10 void delay(uchar m)
11 {
12     uchar i,j,k;
13     for (k=50;k>0;k--)
14         for(i=20;i>0;i--)
15             for(j=m;j>0;j--);
16 }
17
18 void int1() interrupt 0
19 {
20     a++;
21     if(a == 0xff)
22     {
23         a = 0xff;
24     }
25 }
26
27 void int2() interrupt 1
28 {
29     a--;
30     if(a == 0x02)
31     {
32         a = 0x02
33     }
34 }
35
36 void int_init()
37 {
38     IE = 0x85;
39     TCON = 0x00;
40 }
41
42 void main()
43 {
44     a = 0x7f;
45     int_init();
46     while(1)
47     {
48         for(n=0;n<8;n++)
49         {
50             P0 = tab1[n];
51             delay(a);
52         }
53     }
54 }

```

6.实现功能

在运行状态下,每按一下按钮 K1 后,则步进电动机加速运行;每按一次 K2,

步进电动机减速运行。

四、应用前景

随着现代化工业的发展,工业自动化和控制精细化已经成为不可阻挡的发展潮流,这样的发展大大减少了对人力的浪费,也极大的提高了工作效率和工作质量。步进电动机在现代工业中起着极为重要的作用,主要用于数字控制系统中,精度高,运行可靠。如采用位置检测和速度反馈,亦可实现闭环控制。步进电动机已广泛地应用于数字控制系统中,如数模转换装置、数控机床、计算机外围设备、自动记录仪、钟表等之中,另外在工业自动化生产线、印刷设备等中亦有应用。以下为现代工业中常见的步进电动机的应用。

1. 增量式数字阀控制的电液系统

增量式数字阀是一种利用步进电机作电—机械转换器的。它是在原有步数的基础上增加或减少一些步数,从而达到需要的幅值,以达到控制的目的,用这种方法控制的阀称为增量式数字阀。

图 11 是增量式数字阀控制的电液系统方框图。工作原理如下:由计算机发出需要的脉冲序列,经驱动电源放大后使步进电机按信号动作,每当电机得到一个脉冲时,它便沿着控制信号给定的方向转动一个固定的步距角。并带动凸轮或螺纹等结构,使旋转角度 $\Delta\theta$ 转换成位移量 Δx ,从而带动液压阀的阀芯(或挡板等)移动一定的位移,因此根据步进电机原有的位置 and 实际走的步数,可得到数字阀的开度(阀口开启的大小),计算机可按此要求控制液压缸(或马达)按需要的规律运动。



图 11 增量式数字阀控制的电液系统方框图

2. 数字程序控制系统

数控机床主要由数控装置、伺服系统和机床本体三大部分组成。伺服系统多用步进电机(执行元件)、驱动装置以及位置检测装置(部分机床具有)等组成。

现代数控机床采用计算机数控装置完成零件加工程序的读入、存储、输入信息的处理和计算,然后根据所得结果向各坐标轴(x,y,z 方向)分配指令脉冲。每来一个指令脉冲,步进电动机就旋转一个角度,它所拖动的工作台就对应地完成一个脉冲当量(对每一个脉冲,步进电动机带动负载所转的角度或直线位移,叫做脉冲当量)的位移。这样两个或三个坐标轴的联动就能加工出程序中记录的几何图形来,即完成加工过程的实时控制。

3. 软盘驱动系统

软盘储存装置是一个经济有效的计算机记忆储存器。经过读写磁头的磁带通

常是由一台与螺杆直接联接的步进电动机驱动（如图 12）

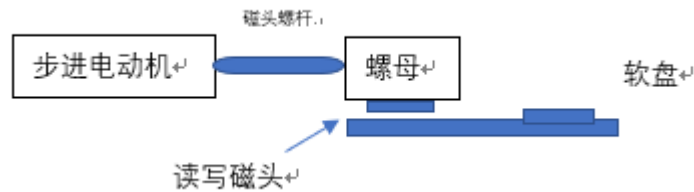


图 12 软盘驱动系统

步进电动机在该系统中用作驱动元件。此外它还用作字符处理机或打印机纸的进给机构。此时步进电动机可直接与卷筒联接，也可以通过皮带或齿轮系统与卷筒联接。

五、常用步进电动机控制策略

现代工业中对于步进电动机的控制越来越智能化、精细化，不光要求实现控制功能，还要求控制器结构简单、容错性好、可靠性高。以下为现在较为流行的几种步进电动机控制策略：

1. PID 控制

PID 控制作为一种简单而实用的控制方法,在步进电机驱动中获得了广泛的应用。它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差 $e(t)$,将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制。采用 PID 控制器具有结构简单、鲁棒性强、可靠性高等优点,但是它无法有效应对系统中的不确定信息。

目前, PID 控制更多的是与其他控制策略相结合,形成带有智能的新型复合控制。这种智能复合型控制具有自学习、自适应、自组织的能力,能够自动辨识被控过程参数,自动整定控制参数,适应被控过程参数的变化,同时又具有常规 PID 控制器的特点。

2. 自适应控制

自适应控制是在 20 世纪 50 年代发展起来的自动控制领域的一个分支。它是随着控制对象的复杂化,当动态特性不可知或发生不可预测的变化时,为得到高性能的控制器而产生的。其主要优点是容易实现和自适应速度快,能有效地克服电机模型参数的缓慢变化所引起的影响,是输出信号跟踪参考信号。

目前,很多学者将自适应控制与其他控制方法相结合,以解决单纯自适应控制的不足。

3. 矢量控制

矢量控制是现代电机高性能控制的理论基础,可以改善电机的转矩控制性能。它通过磁场定向将定子电流分为励磁分量和转矩分量分别加以控制,从而获得良好的解耦特性,因此,矢量控制既需要控制定子电流的幅值,又需要控制电流的相位。由于步进电机不仅存在主电磁转矩,还有由于双凸结构产生的磁阻转矩,且内部磁场结构复杂,非线性较一般电机严重得多,所以它的矢量控制也较为复杂。

4. 智能控制的应用

智能控制不依赖或不完全依赖控制对象的数学模型,只按实际效果进行控制,在控制中有能力考虑系统的不确定性和精确性,突破了传统控制必须基于数学模型的框。目前,智能控制在步进电机系统中应用较为成熟的是模糊逻辑控制、神

神经网络和智能控制的集成。

5. 模糊控制

模糊控制就是在被控制对象的模糊模型的基础上,运用模糊控制器的近似推理等手段,实现系统控制的方法。作为一种直接模拟人类思维结果的控制方式,模糊控制已广泛应用于工业控制领域。与常规控制相比,模糊控制无须精确的数学模型,具有较强的鲁棒性、自适应性,因此适用于非线性、时变、时滞系统的控制。

5. 神经网络控制

神经网络是利用大量的神经元按一定的拓扑结构和学习调整的方法。它可以充分逼近任意复杂的非线性系统,能够学习和自适应未知或不确定的系统,具有很强的鲁棒性和容错性,因而在步进电机系统中得到了广泛的应用。

五、课程总结

步进电动机是同步电动机的又一特殊应用,它把脉冲信号变换成位移运动。反应式步进电动机也是靠凸极效应产生电磁转矩而工作的。在我们的日常生活与工作学习中,步进电动机发挥着不可替代的作用,在之前的项目研究中,也对步进电动机有所接触,它能把脉冲信号转换成角位移或直线位移的特性,在运动控制中有着举足轻重的作用,通过这一学期的学习,我们学习了步进电动机的相关知识,对其特性有了很深刻的理解,在之后的项目中,相信再次使用步进电动机将会更加得心应手。

在本学期的自动控制元件学习中,我们不光学习了步进电动机,我们还学习了例如直流电机、变压器、异步电动机等在自动控制领域很常见的元件或系统。在学习过程中也遇到了因为难以很直观地想象内部构造而导致的理解不深的困难,最后通过多次复习课本,查找资料,最终对课本内容有了较深的理解。而且本次大作业也将所学知识运动到了项目制作中,加深了认识,也更清楚地认识到自动控制元件这门课程的重要性,认真学习过这门课程,将会对我们之后在自动控制领域的学习研究生活产生深远影响。

引用文献

- [1] 刘向群 自动控制元件 北京航空航天大学出版社
- [2] 陈忠平 基于 Proteus 的 51 系列单片机设计与仿真 电子工业出版社
- [3] 刘陵顺 自动控制元件 北京航空航天大学出版社
- [4] 姚季文 自动控制元件及其线路 国防工业出版社
- [5] 刘宝廷,陈树康 步进电动机及其驱动控制系统 哈尔滨工业大学出版社
- [6] 李忠杰,宁守信 步进电动机应用技术 机械工业出版社