

变频与调速

步进电机的速度调节方法

王玉琳¹, 王 强²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230069;

2. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 提出了步进电机的几种速度调节方法。脉冲频率的调节采用软件延时或硬件定时。升降频采用直线升降法、指数曲线升降法或抛物线升降法。给出了脉冲频率调节的实用程序, 通过对步进电机矩频特性曲线的分析, 得出了步进电机的升频表格, 并提供了一个完整的软件升降频流程图。几种调速方法应用在多种数控机床上, 提高了步进电机的定位精度, 改善了电机转动的平稳性, 加速了电机的升降过程。

关键词: 步进电机; 速度控制; 升降频

中图分类号: TM301.2 TM383.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8085(2006)01-0053-04

Methods of Speed Regulation for Stepper Motor

WANG Yu-lin, WANG Qiang

(1. School of Mechanical & Automotive Eng., Hefei Technology Univ., Hefei 230069, China;

2. School of Material Science & Eng., Hefei Technology Univ., Hefei 230009, China)

Abstract: Several kinds of methods of speed regulation for stepper motor are presented in the paper. The frequency of feeding pulses is regulated by software's delaying or hardware's timing. The frequency-rising and frequency-falling use linear method, exponential curve method and parabolic curve method. The practical programs are given for the regulating of pulses' frequency. The frequency-rising table of the stepper motor is got by analyzing the characteristics of the torque-frequency curve of the motor and a complete software flow chart of frequency-rising and frequency-falling is presented. Several kinds of speed-regulating methods have been used in many CNC machine-tools and the positioning accuracy of the stepper motor is raised, the rotation of the motor becomes more smooth and the speed-rising and speed-falling of the motor are accelerated.

Key words: stepper motor; speed control; frequency-rising and frequency-falling

0 引 言

步进电机是一种数字电机, 在经济型数控机床及自动化设备中应用广泛。控制步进电机的转动需要 3 个要素: 方向、转角和转速^[1,2]。对于含有硬件的驱动电源, 方向取决于控制器送出的方向电平的高或低。转角取决于控制器送出的步进脉冲的个数。而转速则取决于控制器发出的步进脉冲之间的时间间隔^[3,4]。在步进电机的控制中, 方向和转角控制简单, 而转速控制则比较复杂。步进电机工作时, 失步或过冲直接影响其定位精度。在设计系统的时候, 除了应正确选择步进电机和驱动电源^[5,6]之外, 还必须对步进电机

控制脉冲的频率进行调节。由于步进电机的转速正比于控制脉冲的频率, 所以调节步进电机脉冲频率, 实质上就是调节步进电机速度^[3,7]。

本文将具体讨论步进电机的速度调节问题, 并结合实例给出软件实现的方法。

1 步进脉冲的调频方法

对步进电机控制的一个中心问题就是速度调节。即产生一系列频率可调的步进脉冲序列, 送到驱动电源, 控制电机绕组的轮流通电, 实现电机的转动。脉冲序列的产生用微处理器实现, 有软件延时和硬件定时两种方法。

(1) 软件延时: 通过调用标准的延时子程序

来实现。假定控制器基于 AT89S52 单片机^[8], 晶振频率为 12 MHz, 那么可以编制一个标准的延时子程序如下:

```

DELAY: MOV  A, 0DH      DEL2: NOP
        JZ    DEL2      NOP
        CLR  C          NOP
        RRC  A          DEL3: NOP
        JZ    DEL3      NOP
        MOV  0DH, A      NOP
        DJNZ 0DH, $      DEL6: MOV  A, 0EH
        JMP  DEL6        JZ    DEL5
D252:   MOV  R0, #53H    DEL4: CALL D252
D253:   NOP              DJNZ 0EH, DEL4
        DJNZ R0, D253    DEL5: RET
        RET

```

该子程序的入口为 (0E) (0D) 两个字节, 若需要 20 000 μ s 的延时, 则给 (0E) (0D) 两个字节赋值 4E20H, 即执行下面程序:

```

MOV  0EH, #4EH ; 20 000 的十六进制码为 4E20。
MOV  0DH, #20H
CALL DELAY ; 调用标准延时子程序 DELAY。

```

若要控制步进电机走 100 步, 每两步之间延时 20 000 μ s, 则汇编程序为:

```

MOV  0FH, #100D ; 准备走 100 步。
CONT: CALL I_STEP ; 电机走一步 (调用电机的
                  脉冲分配子程序)
MOV  0EH, #4EH ; 20 000 的十六进制码为
                4E20。
MOV  0DH, #20H
CALL DELAY ; 相邻步之间的延时 (决定电机的转速)。
DJNZ 0FH, CONT ; 循环次数减 1 后, 若不
                为 0 则继续, 循环 100 次。

```

可以看出, 采用软件延时方法实现速度调节的优点是程序简单, 思路清晰, 不占用硬件资源。缺点是浪费 CPU 的宝贵时间, 在控制电机转动的过程中, CPU 不能做其它事。

(2) 硬件定时: 假定控制器仍为 AT89S52 单片机, 晶振频率为 12 MHz, 将 AT89S52 的 T0 作为定时器使用, 设定 T0 工作在模式 1 (16 位定时/计数器)。今要求它能定时地发出步进脉冲, 其定时中断产生的脉冲序列的周期 (即步进电机的脉冲间隔) 假定为 20 000 μ s, 则可算出 T0 所对应的定时常数为 B1E0H^[8], CPU 相应的程序如下:

主程序:

```

MOV  TMOD, #01H ; 设 T0 取工作模式 1。
MOV  TH0, #0B1H ; 装入定时常数高 8 位。
MOV  TL0, #0E0H ; 装入定时常数低 8 位。
SETB TR0 ; 启动 T0 定时。
SETB ET0 ; 允许 T0 中断。
SETB EA ; 允许 CPU 中断。
$ ; CPU 等待 T0 的定时到。

```

中断服务程序:

```

CLR  ET0 ; 关 T0 中断。
CALL I_STEP ; 控制电机走一步 (调用电机的脉冲分配子程序)。
RETI ; T0 中断返回。

```

本例中, 只要改变 T0 的定时常数, 就可实现步进电机的调速。这种方法既需要硬件 (T0 定时器) 又需要软件来确定脉冲序列的频率, 所以是一种软硬件相结合的方法。它的缺点是占用了一个定时器。在比较复杂的控制系统中常采用定时中断的方法, 这样可以提高 CPU 的利用率。

2 升降频方法及其实现

2.1 升降频方法

当步进电机的运行频率低于它本身的起动频率时, 步进电机可以用运行频率直接起动, 并以该频率连续运行, 需要停止的时候, 可以从运行频率直接降到零速。此时, 电机运行于恒速状态, 无需升降频控制。当步进电机的运行频率 $f_b > f_a$ (f_a 为步进电机有载起动时的起动频率) 时, 若直接用 f_b 起动, 由于频率太高, 步进电机可能会丢步, 甚至产生堵转。同样, 在 f_b 频率下突然停止, 步进电机可能会超程。因此, 当要求步进电机在运行频率 f_b 下正常工作时, 就需要采用升降频控制, 以使步进

电机从启动频率 f_a 开始,逐渐加速升到运行频率 f_b ,然后进入匀速运行,最后的降频可以看作是升频的逆过程^[2,7]。

步进电机常用的升降频控制方法有 3 种:

(1) 直线升降频。如图 1 所示。这种方法是以恒定的加速度进行升降,平稳性好,适用于速度变化较大的快速定位方式。加速时间虽然长,但软件实现比较简单。

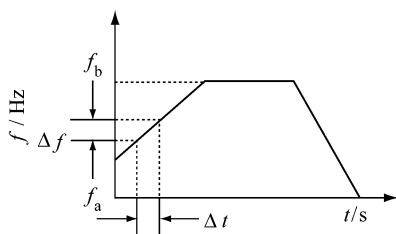


图 1 直线升降频

(2) 指数曲线升降频。如图 2 所示,这种方法是从步进电机的矩频特性出发,根据转矩随频率的变化规律推导出来的。它符合步进电机加速过程的运动规律,能充分利用步进电机的有效转矩,快速响应性能较好,升降时间短。指数升降控制具有较强的跟踪能力,但当速度变化较大时平衡性较差,一般适用于跟踪响应要求较高的切削加工中^[1,9]。

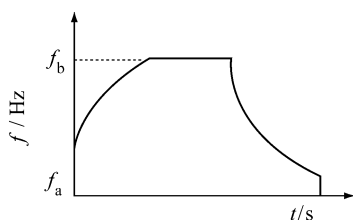


图 2 指数曲线升降频

(3) 抛物线升降频。如图 3 所示,抛物线升降频将直线升降频和指数曲线升降频融为一体,充分利用步进电机低速时的有效转矩,使升降速的时间大大缩短,同时又具有较强的跟踪能力,这是一种比较好的方法^[9]。

2.2 软件实现

步进电机在升降频过程中,脉冲序列的产生,即两个脉冲时间间隔的软件确定,有 2 种方法:

(1) 递增/递减一定值^[10]。如线性升降频,

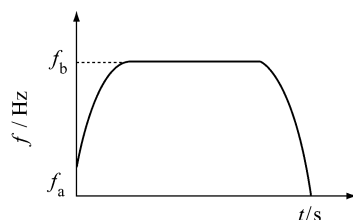


图 3 抛物线升降频

两脉冲频率的差值 $f = |f_i - f_{i-1}|$ 是相等的,其对应的时间增量 Δt 也是相等。时间的计算若采用软件延时的方法,可先设置一个基本的延时单元 T_e ,不同频率的脉冲序列可由 T_e 的不同倍数产生。设起动时所用频率对应的时间常数为 t_{ke} ,以后逐次递减 t (设 $t = t_{ke}$),直到等于运行频率 f_b 所对应的时间 (t_{ke}) 为止。这种方法编程简单,节省内存。时间计算也可采用定时中断的方法,可将定时常数逐次递增/递减一定值,实现升降频控制。因其定时不是连续的,所以升降速曲线不是一条直线,而是折线,但可近似看成直线。

(2) 查表法^[10]。为了对步进电机实现最佳升降频控制,缩短电机的升降频时间,可从步进电机矩频特性出发进行分析。由步进电机的矩频特性 (见图 4, 130BC3100A 电机) 可知,转矩 M 是频率 f 的函数 (即角加速度 $d/dt = M(f)/J$, J 为电机的转动惯量),它随着 f 的上升而下降,所以它呈软的特性。当频率较低时,转矩 M 较大,对应的角加速度 d/dt 也较大,所以升频的脉冲频率增加率 df/dt 应取得大一些;当频率较高时, M 较小, d/dt 也较小,此时,升频的脉冲频率增加率 df/dt 应取小一些,否则,会由于无足够的转矩而失步。因此,根据步进电机的矩频特性,可以看出:在步进电机的升频过程中,应遵循“先快后慢”的原则。按此要求,从开始升频到升至 f_b 之间,按最佳升频要求的频率取出 f_1, f_2, \dots, f_n ,并将它们所对应的脉冲间隔时间 t_1, t_2, \dots, t_n ,依次存

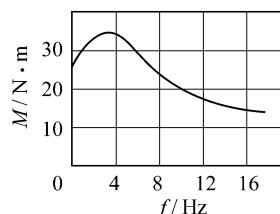


图 4 步进电机的矩频特性曲线

于内存的一个数据区,如表 1 所示(称阶梯频率表)。

表 1 阶梯频率表

序号	频率(时间)	备 注
K_1	$f_a(t_a)$	最低频率
K_1+1	$f_1(t_1)$	
K_1+2	$f_2(t_2)$	升 降
...	...	频 频
K_1+n	$f_n(t_n)$	最高频率

考虑到步进电机的惯性作用。在升速过程中,如果速率变化太大,电机响应将跟不上频率的变化,出现失步现象。因此,每改变一次频率,要求电机持续运行一定步数(称阶梯步长),使步进电机慢慢适应变化的频率,从而进入稳定的运行状态。根据最佳升降频控制规律^[9],可推出步进电机的“频率-步长”关系曲线如图 5 所示。

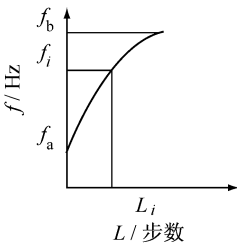


图 5 频率-步长曲线

这样,升频时除需将阶梯频率表存于内存的一个数据区外,还需建立另一个数据区,用来存放阶梯步长(如表 2 所示)。在升频过程中,可用查表的方法,分别得到 $f_i(t_i)$ 和所对应的 L_i ,实现升降频控制。软件上的具体做法是:将 $f_i(t_i)$ 和 L_i 在 EPROM 中交替存放(如表 3 所示),程序执行时按顺序取数,每次取出一个频率和该频率对应的步长。

表 2 阶梯步长表

序号	步长(脉冲)
K_2	L_a
K_2+1	L_1
K_2+2	L_2
...	...
K_2+n	L_n

表 3 频率-步长表

K	$f_a(t_a)$
$K+1$	L_a
$K+2$	$f_1(t_1)$
$K+3$	L_1
$K+4$	$f_2(t_2)$
$K+5$	L_2
...	...

详细的步进电机升降频软件流程如图 6 所示。

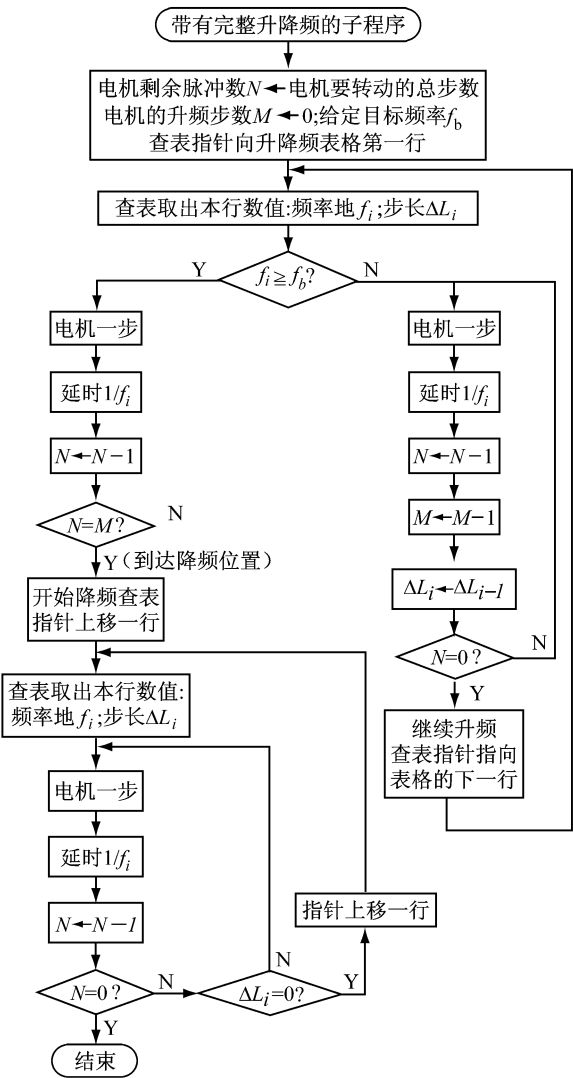


图 6 升降频的软件流程图

(下转第 64 页)

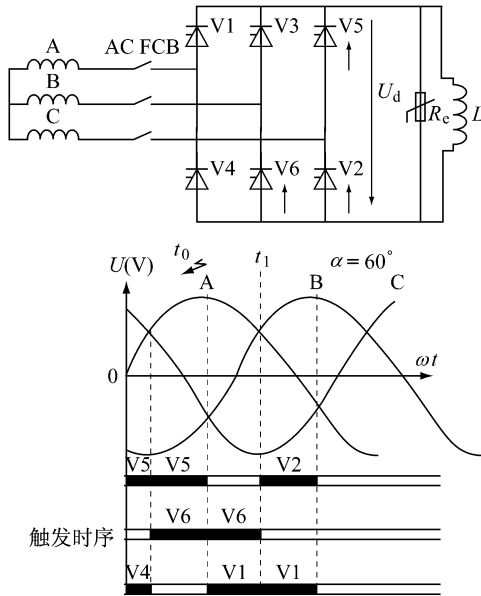


图 6 采用 AC FCB 时的自然灭磁

V6 继续导通 60° ; 当 t_1 时刻触发 V2 时, 由于此时 V2 两端承受正向电压 $U_b - U_c$ 而导通, 一旦 V2 导通后 AC FCB 立刻熄弧, 转子通过 V2、V5 及自身的电阻进行灭磁 (灭磁电阻不起作用)。由此看来, AC FCB 的电弧持续时间 ($t_1 \sim t_0$) 最长为 120° 电角度 (在自然换相点开始燃弧时)。而且, 该电弧靠电流自然过零而熄灭, 不象 DC FCB 那样, 靠绝缘介质强度熄灭, 这对开关触头的寿命有利。当然, 自然灭磁的时间较长, 对于 300 MW 的机组, $L = 0.87 \text{ H}$, $R_f = 0.125 \Omega$, 时间约为 7 s 。

【参考文献】

- [1] UN IROL 5000 Operation and Maintenance Manual [S]. ABB Industrie AG, 2001.
- [2] UN IROL 5000 Excitation System for Medium and Large Synchronous Machine [S]. ABB Industrie AG, 2001.

收稿日期: 2005-11-14

(上接第 56 页)

3 结 语

本文提出的步进电机的速度调节方法, 成功地应用在多种经济型数控机床上^[11~13], 包括 2 坐标车床、4 坐标铣床、高速冲床、中频淬火机床等。实践表明: 只要选用了适当的升降频便可提高机床的定位精度、改善运动部件的平稳性、缩短步进电机的升降时间、提高劳动生产率。

【参考文献】

- [1] 王宗培. 步进电动机及其控制系统 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986.
- [2] 陈理壁. 步进电机及其应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
- [3] 张建民. 机电一体化系统设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [4] 邓星钟, 周祖德. 机电传动控制 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.

- [5] 王玉琳. 步进电动机可变细分驱动器 [J]. 微特电机, 2005 (4).
- [6] 王玉琳. 三相反应式步进电机的一种实用驱动电路 [J]. 电力电子技术, 2005 (6).
- [7] 陈隆昌, 陈筱艳. 控制电机 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [8] 李 华. MCS-51 系列单片机应用接口技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.
- [9] 李明泉. 功率步进电机升降频过程的最优控制 [J]. 微电机, 1988 (4).
- [10] 王玉琳. CK-型车床闭环控制系统的应用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 1991.
- [11] 王玉琳. 基于 DS80C320 单片机的 LCD 显示数控系统 [J]. 机械与电子, 2004 (3).
- [12] 王玉琳. 经济型数控车床的闭环控制 [J]. 机械制造, 2004 (12).
- [13] 王玉琳. 一种经济实用的四坐标铣床数控系统 [J]. 机电一体化, 2004 (3).

收稿日期: 2005-03-17