

文章编号: 1671-7848(2008)05-0576-04

步进电机升降速曲线控制系统设计及其应用

王 勇, 王 伟, 杨文涛
(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116023)



摘 要: 使用 PLC 模块搭建步进电机控制系统时, 系统灵活性差、造价高。针对此问题, 提出基于 ARM7 微处理器的步进电机的嵌入式控制系统, 并进行了两种步进电机升降速曲线的设计与实现, 给出了这两种曲线在工业定长嵌入式控制系统中的应用对比。实际运行表明, 采用提出的升降速曲线策略的步进电机控制系统在未增加成本的情况下, 有效抑制了失步和过冲现象, 避免了机械柔性冲击, 延长了系统寿命, 提高了生产效率。

关 键 词: 步进电机; 升降速曲线; 嵌入式系统; ARM7 微处理器
中图分类号: TP 202 **文献标识码:** A

Control System Design of Acceleration and Deceleration Curves of Stepping Motor and Its Application

WANG Yong, WANG Wei, YANG Wen-tao
(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The step motor is a kind of electric actuator that transfers electrical pulses into angular displacement. It is widely used in all kinds of open-loop control systems because of its no cumulative error and easy control. To the problem that PLC used in the control of step motor has disadvantages of high price and being unhandy in the system structure, an ARM7 processor based embedded control system is proposed for step motor and two kinds of acceleration and deceleration curves are designed and implemented. An application comparison is given in the industrial constant length control. The results show that the proposed methods improve the out-of-step and overshoot performance of step motor system and prolong the system life without more cost.

Key words: step motor; acceleration/deceleration curve; embedded system; ARM7 processor

1 引 言

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。通常的步进电机控制系统设计是使用 PLC 模块搭建系统。这种设计方案简单, 硬件可选范围广, 并且软件编程容易, 直接通过梯形图编程即可完成相应功能。但 PLC 系统造价高, 系统灵活性差, 针对某个具体应用场合, 很难选择出一套完全与应用吻合的系统, 往往造成系统资源浪费。并且在某些特殊应用的情况下, 有些技术细节很难实现。

针对上述问题, 本文提出基于 ARM7 微处理器的步进电机的嵌入式控制系统。在简要介绍使用 ARM7 对步进电机实现控制的基础上, 进行了两种步进电机升降速曲线, 即分段线性加速^[1]和 S 型曲线加速^[2]的设计与实现, 并且给出这两种曲线在工业定长系统中的应用对比。

2 升降速曲线控制系统结构

升降速曲线控制系统结构, 如图 1 所示。

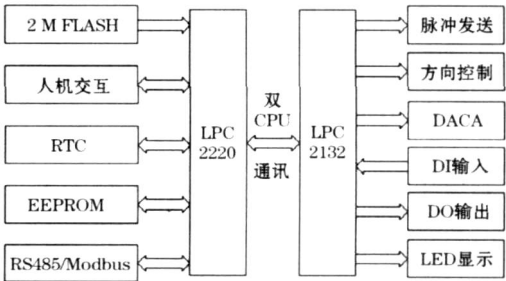


图 1 升降速曲线控制系统结构

Fig. 1 Control system frame for acceleration/deceleration curve

ARM 系列微处理器是 32 位高性能处理器的主要产品之一。其他的类似产品主要有 PowerPC, 68K, MIPS 等系列。而这其中 ARM 控制器则是凭

收稿日期: 2007-05-31; 收修定稿日期: 2007-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534010)

作者简介: 王 勇(1977-), 男, 辽宁大连人, 博士, 主要研究方向为电动机伺服控制等; 王 伟(1955-), 男, (满族), 教授, 博士生导师。

借其功耗低、性价比高、代码密度高 3 大特色成为行业公认的嵌入式 RISC 处理器标准^[3]。ARM7 系列微处理器的主要应用领域为工业控制、Internet 设备、网络和调制解调器设备、移动电话等多种多媒体和嵌入式应用。

控制系统中使用了两片 ARM7 控制器, LPC2220 专门负责人机交互和参数存储等操作, LPC2132 则专注于运动控制和运动曲线生成。这样选取主要有以下两个原因:

目前,最常用的单色 LCD 控制器 SED1335 的数据传输速度相对于 ARM7 控制器来讲显得十分缓慢,经过初期计算和实际测量,刷新全屏 320 * 240 点的图片最快需 130 ms 左右,所以在显示任务繁重的时候其他任务的实时性很难保证, LCD 屏显示的速度成了整个系统的瓶颈。可以选择一款片内集成 LCD 控制器的微控制器,或使用两片微控制器分别负责人机交互和控制来解决这个问题。集成 LCD 控制器的微控制器价格普遍偏高,因此采取了第二种解决方法,并且通过职责分开, LPC2132 专门负责控制,大大提高了系统的实时性,可以满足更为苛刻的系统需求。通过职责分开,增加了系统设计的并行性和修改的灵活性。在设计控制程序的同时,其他模块的设计工作可以同时进行,并且两个部分可以单独调试,互不影响。同时,当需要修改系统功能时,可以只对相关的控制器一侧进行改动,不会影响另一侧的控制器功能,从而使功能修改变得简单易行。

步进电机脉冲输出的硬件平台采用的是 Lpc2132 控制器自身集成的脉宽调制(PWM)模块,而不是采用运动控制芯片。

Lpc2132^[4]为 6/32 位 ARM7TDMI-S 核心控制器,超小 LQFP64 封装;具有 16 kB 的片内静态 RAM 和 64 kB 的片内 Flash 程序存储器;通过片内 boot 装载程序实现在系统编程(ISP)和在应用编程(IAP);EmbeddedICE RT 和嵌入式跟踪接口;两个 32 位定时器/外部事件计数器;PWM 单元(6 路输出);看门狗等。

控制器分别从 Lpc2132 的引脚 P1.24 和 P1.25 输出两路脉冲(应用 PWM2 通道),分别控制两台步进电机,步进电机方向信号由引脚 P1.8 输出,高电平时,步进电机顺时针旋转,低电平时步进电机逆时针旋转。

3 升降速曲线的设计

1) 常见的加减速曲线 实际应用中常用的升降速曲线包括阶梯加减速曲线,分段线性加速曲线,指数加减速曲线,及 S 形加减速曲线,如图 2 所示。

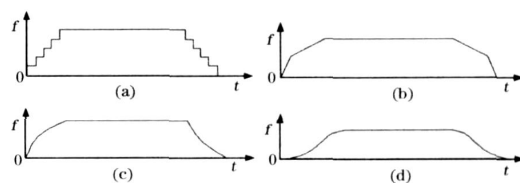


图 2 步进电机常见加减速曲线

Fig. 2 Step motor acceleration and deceleration curves

阶梯加减速曲线见图 2 (a), 步进电机的转速每跃升一个台阶后将恒速运转一段时间。这种方法的缺点是在恒速阶段没有加速,未充分利用步进电机的加速性能,而且在高频段加速台阶高,步进电机在速度阶跃时会发生失步。

分段直线加减速曲线见图 2 (b), 步进电机的加速度在每段直线内是恒定的,这种算法的优点是算法简单,占用机时少,响应快,效率高。但也存在缺点,从图中可以看出,在加减速阶段的起点、终点和每两端直线的衔接处加速度有突变,电机运动存在柔性冲击。这种加减速方法一般用于运动比较简单情况。

指数加减速曲线见图 2 (c), 指数加减速和直线加减速相比,平滑性好,运动精度高,但算法复杂,占用机时长,而且加减速的起点和终点还是存在加速度突变,具有柔性冲击。并且加速段脉冲数与减速段脉冲数在理论上不相等,必须经过调整处理后才能实际应用,整个调速控制过程完成的时间比理论计算要长。

S 形加减速曲线见图 2 (d), S 曲线加减速的称谓是由系统在加减速阶段的速度曲线形状呈 S 形而得来的,采用降速与升速对称的曲线来实现升降速控制。正常情况下的 S 曲线运行过程可分为加加速段、匀加速段、减加速段、匀速段、加减速段、匀减速段和减减速段 7 段。在变加减速区,加速度的导数为恒值;恒加减速区,加速度为恒值;匀速段的速度为恒值,加速度为零。S 形加减速在任何一点的加速度都是连续变化的,从而避免了柔性冲击,速度的平滑性很好,运动精度高。但是算法较复杂,一般用于高速、高精度加工中。

2) 两种升降速曲线的实现

步进曲线线性加速 设步进电机以 f_1 (Hz) 步进频率启动,以 (步/ s^2) 加速,直到恒速运行的频率 f_s 。于是,连续变化的步进频率 f 可表示为

$$f = g + t \quad (1)$$

式中, g 为低于启动频率 f_1 的某一频率。

脉冲定时为 $t_1 = 0, t_2, t_3, \dots, t_m, \dots$ 。从第 m 个脉冲到第 $(m+1)$ 个脉冲的每个时间间隔里,旋转的角度等于一个步距角,所以每个四边形 A, B, C, D, ..的面积都等于一步。令脉冲时间间隔为

t_m , $t_m = t_{m+1} - t_m$ 。与 t_m 所对应的脉冲频率或步进频率为 $f_m = 1/t_m$, 这个值和式(1)在 $t = t_m + t_m/2$ 或每个脉冲间隔中点的 f 值相同。

线性加速中的脉冲定时, 如图 3 所示。

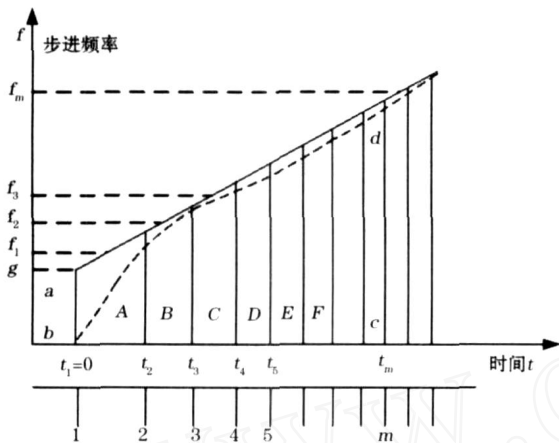


图 3 线性加速中的脉冲定时

Fig. 3 Pulse timing in linear acceleration

图中用实线表示 f_0 实际的速度曲线可能趋于用虚线表示的曲线。

以 $t = t_1/2$ 时, $f = f_1$ 这个条件决定式(1)中的 g 。因为 $t_1 = 1/f_1$, 所以, 式(1)成为

$$f_1 = g + t_1/2 = g + (1/(2f_1)) \quad (2)$$

$$g = f_1 - (1/(2f_1)) \quad (3)$$

图 3 中, $abcd$ 所包围面积为 $(m - 1)$ 步, 即:

$$\{(g + (g + t_m))/2\} t_m = (m - 1)$$

即为二次方程 $t_m^2 + 2gt_m - 2(m - 1) = 0$ 。

因此, 可求得脉冲定时 t_m :

$$t_m = [(g^2 + 2(m - 1))]^{1/2} - g \quad (4)$$

脉冲时间间隔 t_m 为

$$t_m = t_{m+1} - t_m = [(g^2 + 2m)^{1/2} - (g^2 + 2(m - 1))^{1/2}] \quad (5)$$

每个脉冲间隔所表示的步进频率为

$$f_m = 1/t_m = [(g^2 + 2m)^{1/2} + (g^2 + 2(m - 1))^{1/2}]/2 \quad (6)$$

对于 $m = 1, 2, 3, \dots$ 时的 t_m , t_m 和 f_m 值可以分别用式(4)、式(5)和式(6)计算。

根据现场工艺要求生成一组分段线性加速曲线脉冲序列, 计算各步脉冲定时和时间间隔, 见表 1。

表 1 步进脉冲时间间隔(分段线性加速)

Table 1 Pulse interval (linear acceleration curve)

M	T/ μ s	F/Hz	M	T/ μ s	F/Hz
1	2 500.0	400.0	8	1 639.4	610.1
2	2 325.4	430.1	9	1 562.3	640.1
3	2 174.5	460.0	10	1 492.5	670.0
4	2 041.3	490.0	11	1 428.7	699.9
5	1 923.4	519.9	12	1 370.5	729.7
6	1 818.4	549.9
7	1 724.3	579.9			

步进曲线 S 形加速

a) 步进电机的特性 步进电动力学方程为

$$Jd^2/dt^2 + d/dt + k + T_z = T_d \quad (7)$$

式中, J 为系统总转动惯量; θ 为转子转角; d 为转子阻尼系数; k 为与成某种函数关系的比例因子; T_z 为摩擦阻力矩及其他的与无关的阻力矩之和; T_d 为步进电机产生的电磁转矩。

步进电机的矩频特性及升速运行时的加速度曲线, 由图 4 所示。

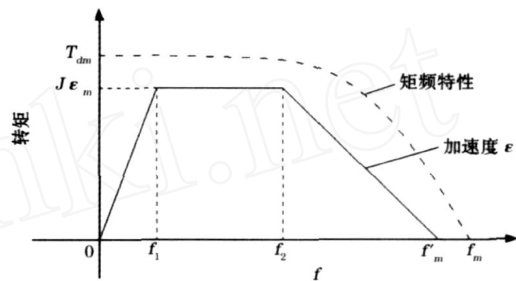


图 4 步进电机的矩频特性曲线及升速运行时的加速度曲线

Fig. 4 The character of torque-frequency and acceleration curve of step motor

在驱动脉冲的频率较低时, 步进电机的转矩比较大; 随着频率的上升, 转矩近似于线性下降。

由式(7), 系统的惯性扭矩为

$$J = Jd^2/dt^2 = T_d - d/dt - k - T_z \quad (8)$$

显然, 惯性扭矩 J 应小于最大电磁扭矩 T_{dm} 。在升速阶段, 角加速度 ϵ 应尽可能大些, 以提高系统的快速性。但为了减小对系统的冲击, 不应突变。从 0 到 f_1 是线性增加到 ϵ_m 的, 然后等加速度增速到 f_2 , 接着以线性递减, 在速度达到 f_m 时减到 0。

b) S 形升降速曲线 由于驱动脉冲的频率 f 与转子的速度 $d\theta/dt$ 成正比关系, 故在步进电机不失步的前提下, 转子的角加速度 ϵ 正比于驱动频率 f 对时间 t 的微分, 对于图 4 中加速度曲线的每一段直线, 其方程都是一次方程:

$$\epsilon = df/dt = A - Bf \quad (9)$$

式中, A, B 为两待定常数。

假定变速是从某频率 f_0 开始向 f_1 变化, 那么对方程式(9)两边进行拉氏变换后得到:

$$sF(s) - f_0 + BF(s) - A/s = 0 \quad (10)$$

即:

$$F(s) = A/[s(s + B)] + f_0/(s + B)$$

拉氏反变换并整理后得到:

$$f(t) = A/B + (f_0 - A/B)\exp(-Bt)$$

改写为

$$f(t) = f_0 + C(1 - \exp(-Bt)) \quad (11)$$

式中， $C = A/B - f_0$ 。

由式(11)可知，常数 B 决定驱动脉冲频率 f 随 t 变化的规律。 $B < 0$ 是升速加速度曲线第一段，速度曲线下凹； $B = 0$ 是升速加速度曲线第二段，速度曲线为直线； $B > 0$ 是升速加速度曲线第三段，速度曲线上凸。

$1/B$ 是决定升速快慢的时间常数，其值的大小由具体的驱动系统所决定。从上面的分析可知，符合步进电机的矩频特性的升速曲线，如图 5 所示。

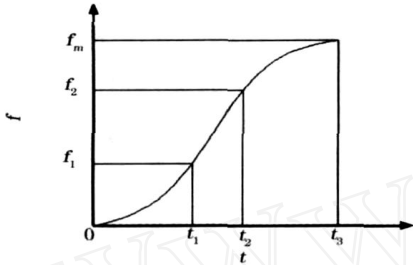


图 5 步进电机升速曲线
Fig. 5 Step motor acceleration curve

c) S 形曲线的离散化 由于步进电机的运行方式是步进的，所以必须对式(11)进行离散化处理，即步进电机驱动器应当按此式发生一频率变化规律如图 5 所示的驱动脉冲序列。

设 t 时刻，步进电机控制器发出第 N 个脉冲：

$$N(t) = \int_0^t f(t) dt$$

所以：

$$N(t) = \int_0^t (f_0 + C(1 - \exp(-Bt))) dt = (f_0 + C) - C/B(1 - \exp(-Bt)) \tag{12}$$

式(12)是一个超越方程，可用牛顿迭代法来求解控制器发出第 N 个脉冲的时刻，用公式表示为

$$t_{k+1} = t_k - [(f_0 + C) t_k - C/B(1 - \exp(-Bt_k)) - N]/[f_0 + C(1 - \exp(-Bt_k))] \tag{13}$$

将式(13)迭代若干次，就能够求出足够精确的 $t(N)$ ，然后将其代入式(11)，便可求出每个 N 所对应的 $f(N)$ ，倒数后便可求出 $T(N)$ 。

根据现场工艺要求生成一组 S 形加速曲线脉冲序列，计算出各步脉冲定时和时间间隔，见表 2。

表 2 步进脉冲时间间隔(S 形曲线加速)

Table 2 Pulse interval (S acceleration curve)

<i>N</i>	<i>T</i> /μs	<i>F</i> /Hz	<i>N</i>	<i>T</i> /μs	<i>F</i> /Hz
1	2 500.0	400.0	8	1 980.3	505.0
2	2 410.4	414.9	9	1 923.5	519.9
3	2 326.5	429.8	10	1 869.7	534.8
4	2 247.3	445.0	11	1 818.3	550.0
5	2 174.0	460.0	12	1 770.4	564.8
6	2 105.3	475.0	13	1 724.5	579.9
7	2 041.3	489.9

4 两种加速曲线在工业定长控制中的应用对比

本文提出的基于 ARM7 微处理器的步进电机的嵌入式控制系统及步进电机升降速曲线的设计，已应用于包装机行业的制袋控制定长剪切控制。控制系统主要完成将原始物料切割成一定规格的成品袋的功能。技术上主要是利用步进电机控制送料电机启停和脱料电机启停等。本文设计的两种加速曲线在生产实际中的制袋个数对比，见表 3。

表 3 分段线性加速和 S 形加速曲线的制袋个数对比

Table 3 The number contrast of the bag making of subsection linear acceleration and S acceleration

<i>L</i> /mm	<i>P</i>	
	分段线性加速	S 形加速
10	620	675
50	220	228
500	70	76

表中， L 为制袋长度， P 为加速曲线种类；其中的数据为每分钟系统制袋个数。从表中数据对比可以看出，在同等制袋长度和制袋时间内，采用 S 形加速曲线的系统比采用分段线性加速曲线的系统所制袋数多，生产效率更高。

5 结 语

使用 ARM7 微处理器实现的步进电机的控制方法以及两种升降速曲线的设计方法均在工业定长系统中得到了很好的应用，控制系统最终完全达到或超过了设计要求。从应用实际中可以看出，一方面，S 形升降速曲线可以防止步进电机失步和过冲现象，有效地提高了生产效率，且避免了机械柔性冲击；另一方面，由于采用了基于 ARM7 微处理器的嵌入式控制技术，使得控制系统的成本大大降低，更适合中小型控制系统低成本的要求。

参考文献 (References) :

[1] 王鸿钰. 步进电机控制技术入门[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990. (Wang Hongyu. Basic techniques of step motor[M]. Shanghai: Tongji University Publishing Company, 1990.)
[2] 陈爱国, 黄文玲, 杨红红. 步进电机升降速曲线的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2003, 48(2): 47-49. (Chen Aiguo, Huang Wenling, Yang Honghong. Study on acceleration and deceleration curve of step motor[J]. Development and Innovation of Machine and Electrical Product, 2003, 48(2): 47-49.)
[3] 杜春雷. ARM 体系结构与编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (Du Chunlei. ARM system structure and programming[J]. Beijing: Qinghua University Publishing Company, 2003.)
[4] 周立功, 张华. 深入浅出 ARM7 - LPC213x/LPC214X(上册)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005. (Zhou Ligong, Zhang Hua. Explain the ARM7 - LPC 213x/LPC214x profoundly in a simple way (Volume 1) [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2005.)
[5] 周立功, 张华. 深入浅出 ARM7 - LPC213x/LPC214X(下册)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. (Zhou Ligong, Zhang Hua. Explain the ARM7 - LPC 213x/LPC214x profoundly in a simple way (Volume 2) [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006.)