

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604003



采用 S 型控制算法的步进电机控制器

王粟, 张威亚

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为了改善步进电机的启动特性,将 S 型算法应用到步进电机的启动过程中,设计一种基于 S3FN41F 微处理器的步进电机嵌入式控制系统,并将其应用于液晶屏(LCD)压合器中.对该算法进行实现与验证,结果表明:采用 S 型控制算法的步进电机控制器能够更好地控制步进电机的运行,具有失步率低、振荡小、生产效率高优点,能更好地应用于高速、高精度的压合系统中.

关键词: 步进电机; 启动特性; S 型算法; 控制系统; 压合器

中图分类号: TP 202 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0406-05

Stepper Motor Controller Using S-Shaped Control Algorithm

WANG Su, ZHANG Weiya

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to improve the starting characteristics of stepper motors, a S-shaped algorithm was utilized to their start-up controllers. A stepper motor control system based on S3FN41F microprocessor was designed and applied in the lamination device of liquid crystal display (LCD). The algorithm was implemented and verified in the control system mentioned above. The results indicated that the stepper motor controller using S-shaped algorithm can control stepper motor to achieve excellent characteristics including low rate of out-of-step, small oscillation and high production efficiency, which is of practical importance for the development of lamination systems with high speed and high precision.

Keywords: stepper motor; starting characteristic; S-shaped algorithm; control system; lamination device

步进电机是一种将电脉冲信号转变为角位移或线位移的控制元件,被广泛应用于计算机外围设备、数控机床及其他自动控制系统中^[1].在实际应用中,保证步进电机在启动过程中不发生失步、堵转和无法启动等现象成为关键^[2].没有涉及控制算法的传统步进电机显然无法满足要求,因此,研究步进电机的控制算法具有重要意义^[3].目前,步进电机控制算法主要有阶梯加减速算法、分段直线加减速算法、指数型加减速算法等^[4].阶梯加减速算法虽然容易编程,但速度平滑性较差,且高频运行时,阶梯转变时电机易失步.分段直线加减速控制算法虽然算法简单,但在加减速的起点、终点和每两段直线的衔接处,加速度存在突变,电机运行伴有柔性冲击.指数加减速控制算法较前两种算法,具有平滑性好、精度高等优点,但启动瞬间、加速变匀速瞬间及停止瞬间加速度均发生跳变,导致转轴伴有轻微性冲击力^[5].因此,本文将 S 型加速控制算法应用到步进电机的启动过程中,设计了一种基于 S3FN41F 微处理器的步进电机嵌入式控制系统,并应用于液晶屏压合器中.

收稿日期: 2015-11-03

通信作者: 王粟(1964-),女,教授,主要从事计算机控制技术、智能控制技术的研究. E-mail: Wang. su. 2007@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473116);湖北省教育厅青年科研基金资助项目(Q20141405)

1 步进电机的矩频特性

步进电机运行过程中,输出转矩和驱动频率之间的关系称为矩频特性,转矩随着频率的上升而呈下降趋势^[6-9]. 步进电机的矩频特性曲线图,如图 1 所示. 图 1 中: f 为步进电机启动时的频率; f_{st} 为刚好使步进电机启动的起始频率; T_d 为启动力矩; T_{st} 为起始启动力矩.

步进电机的矩频特性可以通过动力学模型(二阶微分方程)描述,表示为

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \beta \frac{d \theta}{dt} + K \theta + T_z = T_d. \tag{1}$$

式(1)中: J 为步进电机经过某种折算后的总转动惯量; β 为电机阻尼系数; θ 为步进电机转动角度; K 是与 θ 成某种函数关系的比例系数; T_z 为摩擦阻力矩及与 θ 无关的阻力矩之和; T_d 为步进电机产生的电磁转矩^[4-5].

由式(1)可得

$$J \epsilon = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_d - \beta \frac{d \theta}{dt} - K \theta - T_z. \tag{2}$$

式(2)中: $J \epsilon$ 为系统的惯性扭矩.

由式(2)可以看出:惯性扭矩 $J \epsilon$ 比最大电磁转矩小,为提高系统的快速性,角加速度 ϵ 在升速阶段应该取较大的值,但取值不应过大,否则,步进电机容易发生失步;同时, ϵ 取值不应过小,否则,系统会出现快速性太差. 因此,为了满足系统的不失步、快速且冲击力小,角加速度 ϵ 不应发生大的突变.

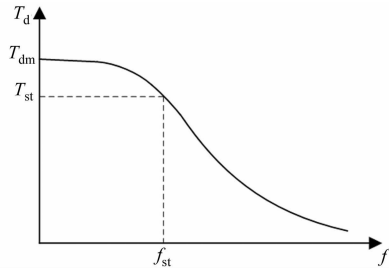


图 1 步进电机的矩频特性
Fig. 1 Character of torque frequency of step motor

2 控制系统设计及应用

2.1 控制系统结构

步进电机控制器系统原理图,如图 2 所示. S3FN41F 是一款以 ARM Cortex-M0 为内核的 32 位高性能处理器,具有串行通信(SPI)、通用串行总线(USB)、控制器局域网(CAN)接口,可直接与计算机、控制芯片、驱动芯片进行通信. TMC4210 是步进电机控制芯片,主要控制驱动芯片的运行. TMC2660 是步进电机驱动芯片,内设有存储器和寄存器,通过 SPI 通信进行配置参数,同时,其还具有失步保护的功能,一旦发生失步会通过 SPI 传送信息给单片机进行调整. 系统工作时,步进电机采用专用开关电源供电.

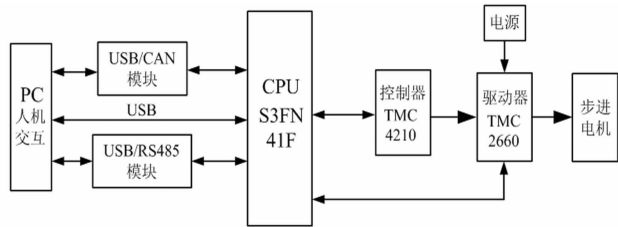


图 2 步进电机控制器系统原理
Fig. 2 Principle of the stepper motor controller system

2.2 液晶屏压合器原理

液晶屏压合器是一种将液晶屏幕与机体母体压合或拼接的设备. 液晶屏压合器的原理,如图 3 所示. 由人工将机体后壳(机体母体)固定于预压合目标位置,传动装置带动由吸合装置吸起的液晶屏移动至目标位置,与机体母体拼接,完成后原路返回,继续带动液晶屏,如此往返,完成大批量的流水线工作. 吸合装置由专用压力泵产生压强差,负责将液晶屏吸起. 传动装置由步进电机负责传动.

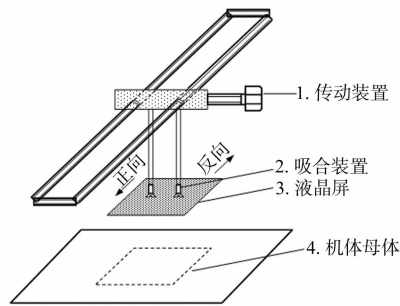


图 3 压合器原理
Fig. 3 Principle of lamination device

2.3 生产线装置的原理

将提出的步进电机控制器作为控制压合器的传动装置,应用到某液晶电视生产线上. 液晶电视生产线的工作原理,如图 4 所示.

图 4 中:半机线主要用于装配电视机后壳的各部件,该生产线速度由人工控制;液晶屏(LCD)线负责液晶屏的质量检查及相应排线配件,液晶屏 B 旁装设有红外传感器,液晶屏流到 B 处 LCD 线自动停止流动;整机线负责将完成压合后的液晶电视流动下去.

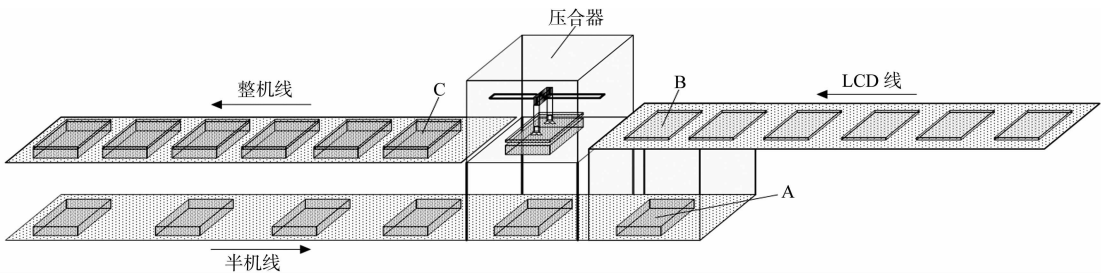


图 4 生产线原理

Fig. 4 Principle of assembly line

3 启动控制算法

3.1 常见的加减速控制算法

阶梯加减速控制算法、直线型加减速控制算法、分段直线加减速控制算法及指数加减速算法对应的曲线模型,如图 5 所示.

阶梯加减速控制算法的缺点表现为步进电机在每个台阶速度大小的改变存在阶跃性的跳变,使得电机运行存在很强的冲击^[10].图 5(b)中,步进电机受恒定角加速度控制,速度随时间的改变成线性关系^[11],这种方法在加速变匀速和匀速变减速过程中存在加速度的跳变,加速度对时间的函数呈非连续性,按此方法长时间运行将影响步进电机的使用寿命.分段直线加减速控制算法的加速度只在两段直线的交点处发生跳变,与直线型算法相比较平滑,但加速度的跳变仍会对步进电机的转轴产生轻微的振荡^[5].指数加减速控制算法虽然平滑性好^[12],但加速度仍然存在跳变,导致转轴伴有轻微性冲击力,一般在加速段与减速段的曲线并非对称,电机整个调速过程的时间相比其他三者较长.

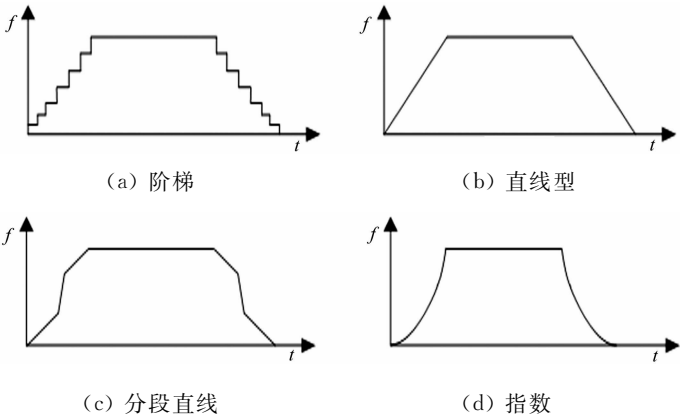


图 5 步进电机常见的加减速算法曲线

Fig. 5 Step motor acceleration and deceleration curves

3.2 S 型控制算法及实现

S 型加速控制算法的速度曲线,如图 6 所示.图 6 中,因系统在加减速阶段的速度曲线形状呈 S,而称之为 S 型加速曲线,采用升速与降速曲线的对称实现加减速的控制^[13].S 型曲线运行过程由加加速段、加速段、减加速段、匀速段、减减速段、减速段和加减速段 7 段组成.其中,在升速或降速阶段的加速度都是连续变化的,这就避免了柔性冲击,速度具有很好的平滑性,运动精度也很高,一般用于高速且高精度的场合.

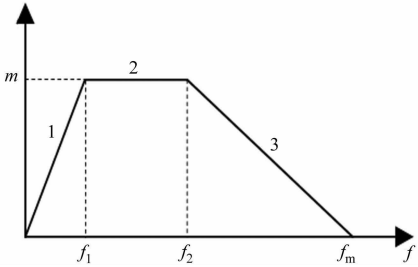


图 6 S 型速度曲线

Fig. 6 S-shaped velocity curve

S 型加速控制算法在启动过程中的加速度变化曲线,如图 7 所示.由于驱动脉冲频率 f 与转子速度 ω 成正比例关系,因此,为确保步进电机不发生失步,转子的角加速度 ϵ 应该与 $\frac{df}{dt}$ 成正比^[14].图 7 中,每一段直线表示的方程均为 f 的一次函数,即

$$\epsilon = \frac{df}{dt} = C - Df. \tag{3}$$

式(3)中: C, D 为常数.

如果设初始脉冲频率为 f_0 ,将式(3)进行拉普拉斯变换,得

$$sF(s) - f_0 + DF(s) - C/s = 0. \tag{4}$$

解得

$$F(s) = \frac{C}{s(s+D)} + \frac{f_0}{s+D}. \tag{5}$$

由拉氏反变换整理可得

$$f(t) = f_0 + E(1 - \exp(-Dt)). \tag{6}$$

式(6)中: $E=C/D-f_0$. 由式(6)可知, 驱动脉冲的频率 f 随时间 t 改变的规律由系数 D 决定^[4-5]. $D<0$ 表示升速过程中加速度曲线的第一段, 速度曲线为凹线; $D=0$ 表示升速过程中加速度曲线的第二段, 速度曲线为直线; $D>0$ 表示升速过程中加速度曲线的第三段, 速度曲线为凸线, 如图 7 对应于图 6 的升速(启动)曲线.

假设 t 时刻, 步进电机接收第 N 个脉冲, 则

$$N(t) = \int_0^t f(t)dt = \int_0^t [f_0 + E(1 - \exp(-Dt))]dt = (f_0 + E) - \frac{E}{D}(1 - \exp(-Dt)). \tag{7}$$

使用牛顿迭代法求解第 N 个脉冲的时刻, 即

$$t_{k+1} = t_k - [(f_0 + E)t_k - \frac{E}{D}(1 - \exp(-Dt_k)) - N]/[f_0 + E(1 - \exp(-Dt_k))]. \tag{8}$$

为求出更加精确的 $t(N)$ 值, 可以采用牛顿迭代法, 即将式(8)经过反复迭代, 就能求得 $t(N)$ 值. 然后, 将 $t(N)$ 代入式(6)求出每个 N 对应的 $f(N)$. 在程序编写过程中, 根据式(6)~(8)可计算出一组加速度变化曲线的各分段直线的脉冲序列, 从而求出各段驱动脉冲的定时时间.

4 S 型控制算法在压合器控制器中的实现

将提出的步进电机控制器及步进电机升降速控制算法应用到某液晶电视生产线中. 压合器中, 传动装置采用单轴步进电机控制方式, 电机选用两相步进电机, 额定相电流为 1 A, 额定脉冲电压为 5 V, 步距角为 1.8° . 步进电机通过传动链带动传动装置上齿轮往返运动. 该机器传动液晶屏起始位置到母体放置位置距离 S_0 为 0.58 m, 电机转子所带齿轮换算半径 r 为 0.05 m, 步进电机步距角 θ 为 1.8° . 则总体步数为

$$N = \frac{360 \times S_0}{2\pi r\theta} = \frac{360 \times 0.58}{2 \times \pi \times 0.05 \times 1.8} \approx 369. \tag{9}$$

为更好地验证 S 型控制算法对步进电机启动特性的改善, 将其与指数型控制算法进行了对比. 根据总体步数及已知条件完成指数和 S 型两种算法的程序编程. 设计的人机交换软件界面, 如图 8 所示. 运行 PC 上的人机交换界面软件, 通过 CAN 通信对单片机、TMC4210 和 TMC2660 进行参数的配置, 具体可设置目标位置、目标速度、最小速度、最大速度、最大加速度等. 图 8 中: 左下角 Ramp Mode 可以选择工作模式, 本次选择为指数和 S 型模式.

通过调整不同的生产线速度, 得到了应用指数控制算法和 S 型控制算法时, 单位时间内生产液晶电视(60 寸)的台数, 并将其进行对比, 结果如表 1 所示. 根据不同的生产线速, 通过大量的实验, 对应用 S 型控制算法时, 步进电机产生的失步现象和振荡现

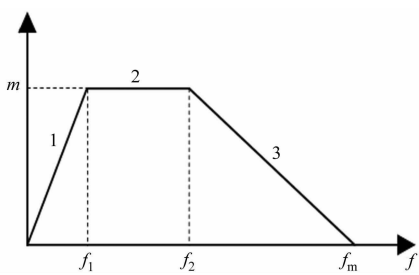


图 7 启动过程中的加速度变化曲线
Fig. 7 Acceleration curve during process of startup

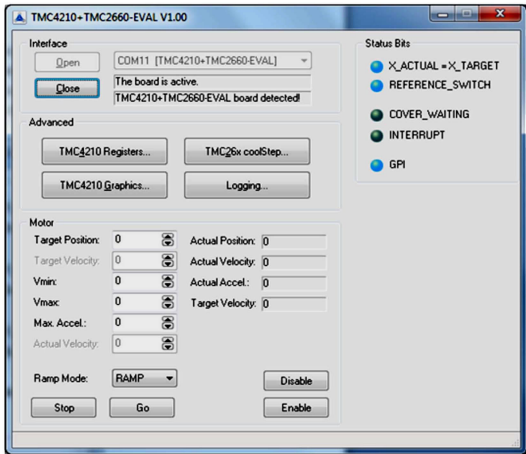


图 8 人机交换界面

Fig. 8 Exchange interface of man and machine

象进行对比,如表 2 所示.表 1,2 中:线速 v 是图 4 中半机流水线的速度,通过专有仪器进行测速; n 为每小时压合器拼接的液晶电视台数.

表 1 两种控制算法下液晶电视生产的台数				表 2 S 型控制算法的失步现象和冲击现象			
Tab.1 Production number of LCD TV				Tab.2 Out-of-step and oscillation			
in both control algorithms				phenomena of S-shaped algorithm			
序号	$v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$n/\text{台}$		序号	$v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	S 型加减速控制算法	
		指数加减速算法	S 型加减速算法			失步现象	振荡现象
1	83	164	180	1	83	时有失步	轻微振荡
2	71	144	160	2	71		
3	63	129	138	3	63		
4	56	116	124	4	56	轻有失步	很少有振荡
5	50	106	112	1	50	几乎无失步	几乎无振荡
6	45	97	102	6	45		

通过人机交换界面可以更方便地完成试验中各个参数的调试,无需专业工程人员就能完成工作,具有人员适应性强的特点.由表 1 可知:在相同的线速和时间内,采用 S 型控制算法比采用指数控制算法的系统压合的电视台数更多,生产效率更高,且线速越快,表现更明显.由表 2 可知:线速越小,单位时间内步进电机的启停次数就越少,采用 S 型控制算法的步进电机具有失步少、振荡小的优点,且单位时间内步进电机启停次数越少,失步和振荡发生率就越低.

5 结束语

在液晶屏压合器的步进电机控制系统中,应用了指数和 S 型加减速控制算法,根据在同等线速和同等时间内压合液晶电视的数量,验证了 S 型控制算法的高效性.通过试验得出,S 型加减速控制算法具有启动失步率低、振荡小、生产效率高等优点,能更好地应用于高速、高精度的控制系统中.

参考文献:

[1] 马文斌,杨延,洪运.步进电机控制系统的设计及应用[J].电子技术应用,2015,41(11):11-13.

[2] 崔洁,杨凯,肖雅静,等.步进电机加减速曲线的算法研究[J].电子工业专用设备,2013(8):45-49.

[3] 张晓莉,孙立斌.步进电机精确控制算法在电力控制系统中应用[J].科技通报,2014,30(2):86-89.

[4] 王邦继,刘庆想,周磊,等.步进电机速度曲线的设计与 FPGA 实现[J].微电机,2012,45(8):67-71.

[5] 王勇,王伟,杨文涛.步进电机升降速曲线控制系统设计及其应用[J].控制工程,2008,15(5):576-579.

[6] 李汉.一种步进电机最佳升降速的控制方法[J].电气传动,2012,34(5):32-34.

[7] 坂本正文.步进电机应用技术[M].王自强,译.北京:科学出版社,2010:1-15.

[8] 杨玉龙,龚时华,虞洋.频繁启停下步进电机运动规划及振动抑制[J].电气传动,2014,44(10):35-39.

[9] 李茂军,刘鼎邦.步进电机细分驱动电磁转矩分析[J].控制工程,2013,20(2):243-245,253.

[10] ARANJO B,SOORI P K,TALUKDER P. Stepper motor driver for robotic applications[C]// International Power Engineering and Optimization Conference. Melaka:IEEE Press,2012:361-366.

[11] DIVIC J,DURIC J,VRANCIC K. Microcontroller implementation of dynamically adaptable control of stepper motor with continuous second derivative of speed curve[C]// 37th International Convention on International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics. Opatija:IEEE Press,2014:146-149.

[12] 曾康玲,杨向宇,赵世伟,等.步进电机指数型加速曲线优化与实现[J].微电机,2014,47(6):36-40.

[13] 刘筱,吴文江,郑颺默.柔性 S 型加减速控制算法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2014(3):66-68,72.

[14] 龙艳,李同宾.步进电机转速控制技术研究[J].微电机,2013,46(11):79-80,83.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)