

基于 ARM7 的电子凸轮技术实现方法研究

王吉岱, 梁存仙, 孙爱芹, 孙建

(山东科技大学, 青岛 266590)

摘要: **目的** 针对凸轮机构的运动特点和规律, 提出一种基于 ARM7 和伺服电机的电子凸轮系统, 用于代替机械凸轮实现凸轮运动。 **方法** 重点论述凸轮曲线的设计方法和电子凸轮的实现方法, 采用三次多项式插值方法建立凸轮运动的数学模型, 得到平滑的速度和加速度曲线。基于定步法原理得到电机的控制表格, 且使用查表法实现伺服电机的升降频控制, 同时给出软硬件设计方法。 **结果** 该系统输出的凸轮运动具有可调、定位精确、无冲击等特点。 **结论** 该系统成功地应用于包装机械中, 提高了包装机械的包装速度、精度、输出柔性和智能化程度, 具有明显的应用效果。

关键词: 电子凸轮; ARM7; 三次多项式插值; 定步法; 查表法

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0104-05

Implementation of Electronic CAM Based on ARM7

WANG Ji-dai, LIANG Cun-xian, SUN Ai-qin, SUN Jian

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: **Objective** According to the characteristics and laws of cam, this paper put forward an electronic cam system based on ARM7 and servo motor in order to realize cam motion instead of mechanical cam. **Methods** This article mainly discussed the methods of cam profile synthesis and implementation of electronic cam. The cam's mathematical model was established by cubic polynomial interpolation. The control table was obtained according to the principle of given-step method and the frequency raising-lowering control of the servo motor was realized by the method of table lookup, meanwhile a method of software and hardware design was provided. **Results** The motion based on this system was adjustable, accurate in positioning and non-impact. **Conclusion** Applying this system to packaging machinery could improve features such as package speed, package precision, output-flexibility and intelligent degree. It has been proven to provide benefits to the packaging machinery.

KEY WORDS: electronic cam; ARM7; cubic polynomial interpolation; given-step method; table lookup

凸轮机构广泛应用于自动机和自动控制装置^[1]中, 如内燃机的配气机构、自动机床的进刀机构以及包装机的封切机构等^[2]。对于机械凸轮, 只要适当地设计出凸轮的轮廓曲线, 就可以得到各种预期的运动规律, 而且其结构紧凑, 电气控制比较简单。但在实际应用中机械凸轮存在很多局限性: 高副点、线接触的特性使其容易磨损, 导致定位精度降低, 振动和噪声加剧; 机械部件制造和装配误差较大, 且不易调整; 一个凸轮只能实现一种运动规律, 输出运动缺乏柔性

等^[3]。

电子凸轮^[4-6]是在机械凸轮的基础上发展起来的, 电子凸轮的控制系統可由单片机、PLC 或 ARM 等控制器组成, 驱动装置主要由步进电机或伺服电机构成, 其主要利用控制器的高速运算性能和伺服系统的快速响应特性来实现机械凸轮的运动规律^[7]。由此电子凸轮不仅具有机械凸轮机构的功能特点, 而且克服了其不足。目前电子凸轮系统多集成于 PLC 中, 导致其成本过高、通用性较差, 及二次开发困难。由此,

文中提出基于 ARM7 和伺服电机的电子凸轮系统,以实现机械凸轮从动件的运动规律。

1 电子凸轮的曲线设计

1.1 电子凸轮运动规律分析

所谓电子凸轮是指一套数字控制系统在没有传统机械凸轮存在的情况下,通过编制控制程序,让该数控系统精密地模拟凸轮工作曲线,从而完成相应的机械动作,即由一套数字控制系统完成凸轮机构的运动规律^[8]。电子凸轮系统的本质是可实现机械凸轮运动规律的智能控制器,故可用图 1 所示的机械凸轮结构表示其物理模型。凸轮的轮廓由 AB, BC, CD 及 DA 4 段曲线组成,凸轮以等角速度 ω 转动, DA 段的速度为 v_a , BC 段的速度为 v_b , 凸轮由 A 运行到 B 的过程中其速度由 v_a 加速到 v_b , 凸轮由 C 运行到 D 的过程中其速度由 v_b 减速到 v_a 。

凸轮要求其运动规律既无刚性冲击也无柔性冲击^[2], 即其速度和加速度均无跳变。故实现电子凸轮的关键在于如何设计出平滑的速度曲线和加速度曲线^[9-10]。

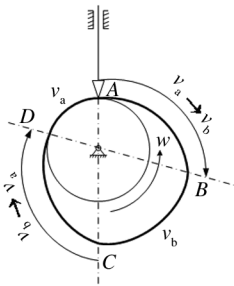


图 1 电子凸轮物理模型

Fig. 1 The physical model of electronic cam

1.2 电子凸轮数学模型的建立

根据电子凸轮的物理模型及其运动规律可得电子凸轮的速度-时间曲线,见图 2。

其数学表达式为:

$$\begin{cases} v = v_a & 0 < t < t_a, t_d < t < T \\ v = v_1(t) & t_a \leq t \leq t_b \\ v = v_b & t_b < t < t_c \\ v = v_2(t) & t_c \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v = v_1(t)$ 为加速区曲线方程; $v = v_2(t)$ 为减速区曲线方程。

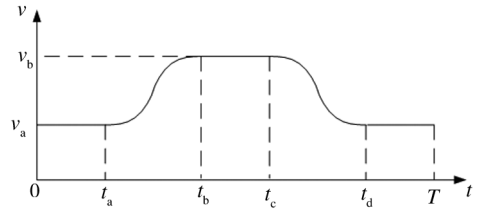


图 2 电子凸轮速度-时间曲线

Fig. 2 Velocity-time curve of electric cam

电子凸轮速度-时间曲线多采用梯形曲线,其加速减速区间方程为一次多项式^[11]。算法结构简单且可以避免凸轮运动过程中的刚性冲击,但由于 t_a, t_b, t_c, t_d 时刻加速度有突变,这一突变为有限值,会导致柔性冲击。为解决此问题,文中基于三次多项式构建加速减速区间的速度方程,即采用三次函数控制凸轮速度,二次函数控制凸轮加速度,可避免凸轮运动过程中的柔性和刚性冲击。由式(1)可知,边界条件为 $(t_a, v_a), (t_b, v_b)$ 和 $(t_a, 0), (t_b, 0)$, 故可使用过路经点的三次多项式插值^[12]法对方程 $v = v_1(t)$ 和 $v = v_2(t)$ 进行求解,具体过程如下所述。

设插值函数为:

$$v(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2)$$

求导得:

$$v'(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (3)$$

将边界条件 (t_a, v_a) 和 (t_b, v_b) 代入式(2), 将边界条件 $(t_a, 0)$ 和 $(t_b, 0)$ 代入式(3)可得方程组:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 t_a + a_2 t_a^2 + a_3 t_a^3 = v_a \\ a_0 + a_1 t_b + a_2 t_b^2 + a_3 t_b^3 = v_b \\ a_1 + 2a_2 t_a + 3a_3 t_a^2 = 0 \\ a_1 + 2a_2 t_b + 3a_3 t_b^2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

解方程组(4)可得加速区速度曲线方程为:

$$v(t) = \frac{2(v_b - v_a)}{(t_a - t_b)^3} t^3 - 3(v_b - v_a) \frac{t_a + t_b}{(t_a - t_b)^3} t^2 + 6(v_b - v_a) \frac{t_a t_b}{(t_a - t_b)^3} t + (v_b - v_a) \frac{t_a^3 - 3t_a^2 t_b}{(t_a - t_b)^3} + v_a \quad (5)$$

式(5)中 t_a, t_b, t_c, t_d 和 v_a, v_b 的求解方法如下所述。

设电子凸轮一个行程的周期为 T , 图 2 中的 t_a, t_b, t_c, t_d 可根据凸轮运动的具体形式进行设定, 假设:

$$k_1 t_a = k_2 t_b = k_3 t_c = k_4 t_d = T \quad (6)$$

设凸轮的基圆半径为 r , 则:

$$v_a = r\omega \tag{7}$$

设电子凸轮的行程为 h , 则将图 2 所示的速度-时间曲线在区间 $[0, T]$ 上积分可得:

$$h = 2v_a t_a + v_b(t_c - t_b) + 2\int_{t_a}^{t_b} v(t) dt \tag{8}$$

由式(8)可得:

$$v_b = k_0 v_a \tag{9}$$

按上述方法, 结合具体的参数即可求得曲线 $v = v_1(t)$ 的方程。同理, 可得 $v = v_2(t)$ 的方程。

2 电子凸轮的实现

2.1 电子凸轮曲线的离散化

伺服电机或步进电机作为电子凸轮系统的执行机构, 其功能是将电脉冲信号转换成相应的角位移, 即给一个电脉冲信号, 电机转过一个固定的角度^[13]。任意时刻电子凸轮的速度为 v , 伺服电机的旋转半径为 R , 则 ARM7 控制器所发电脉冲的频率为:

$$f = KZ \times \frac{v}{2\pi R} \tag{10}$$

式中: K 为伺服电机轴分辨率; Z 为机械传动比, 对于特定的凸轮系统, $\frac{KZ}{2\pi R}$ 为常数, 故任意时刻电脉冲频率与凸轮线速度成正比。

为便于控制, 需根据式(10)将上述速度-时间方程(1)转化为频率-时间方程, 同时将其离散化。文中采用定步法对其进行离散化处理^[7]。

1) 确定凸轮运动规律, 即凸轮曲线 $v = v(t)$ 及其对应的 $f = f(t)$, 频率-时间曲线见图 3。

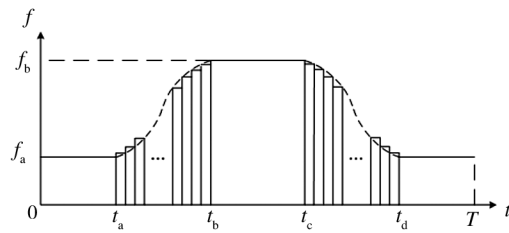


图 3 频率-时间曲线
Fig. 3 Frequency-time curve

2) 以升速段为例, n 等分升速段时间, 即 $\Delta t = \frac{t_b - t_a}{n}$, 然后求取每段 t_i 对应的频率值 f_i 。

3) 计算每个时间段内的脉冲数, 根据 $k_i = t_i \times f_i$ 可

得出每个时间段 t_i 对应的脉冲数 k_i , 则形成了一个关于时间段 t_i , 脉冲个数 k_i , 脉冲频率 f_i 的数据表, 见表 1。

表 1 脉冲频率与个数

Tab.1 The frequency and number of pulse		
时间区间/s	频率值/Hz	脉冲个数
$0 \sim t_a$	f_a	k_a
$t_a + \Delta t$	f_1	k_1
$t_a + 2\Delta t$	f_2	k_2
$t_a + 3\Delta t$	f_3	k_3
...	...	...
$t_a + (n-1)\Delta t$	f_{n-1}	k_{n-1}
$t_a + n\Delta t$	f_n	k_n
$t_b \sim t_c$	f_b	k_b

4) 编写控制程序, 程序流程见图 4。

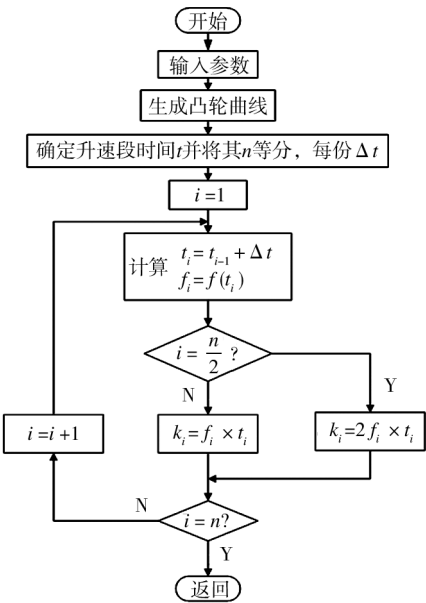


图 4 凸轮曲线离散化流程

Fig. 4 Program flow chart of discretization of the cam curve

2.2 控制系统硬件设计

控制系统由控制芯片、驱动部分和人机界面组成。控制芯片采用 ARM7 系列之 S3C44B0X, 凸轮曲线存放在 Flash 程序存储器中。PWM 定时器产生一定频率的脉冲信号, 用于控制伺服电机的速度。外部中断控制器接受各电机轴编码器反馈信号, 以确定各电机轴的位置^[14]。

驱动部分选用台达 ASDA-AB 系列伺服驱动器和伺服电机^[15], 伺服电机工作在位置模式下, 脉冲指令(包括速度和方向的输入)采用集极开路^[16]方式。

人机界面, 基于触摸屏搭建, 主要包括控制指令、

参数的输入、凸轮运行参数的实时显示、凸轮曲线的选择等,基于 MODBUS RTU 协议通过 RS232 电路与 ARM7 通信^[17]。

2.3 控制系统软件设计

该系统主要考虑伺服电机的控制。伺服电机具有快速的起停能力,且不易丢步或越步,故对伺服电机的控制可以采用查表法。

伺服电机的速度控制通过控制 ARM7 发出的步进脉冲频率来实现。通过中断定时器,在中断服务子程序中调整脉冲输出,包括脉冲频率和相应的脉冲个数,调整定时器的时间常数就可以实现调速。由表 1 可知,伺服电机由启动频率 f_a 开始运行,经加速区后达到最高频率 f_b ,匀速运行一段时间后进入减速区,减速过程是加速过程的逆过程,查表从 f_b 到 f_a 。当伺服电机在升降频过程中每走过 k_i 步后,改变一次时间常数,输出进给脉冲,以实现定步升降频。伺服电机的升降频控制流程见图 5。由于相邻两段脉冲处的频率跳变是由升降频曲线通过查表得到的,因而可以较好地实现凸轮运动。

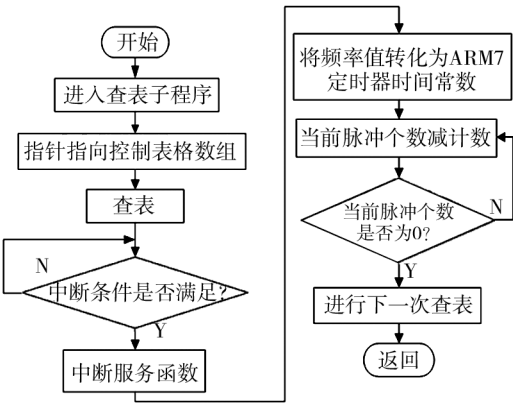


图 5 电机升降频控制流程

Fig. 5 Program flow chart of frequency raising-lowering control

3 电子凸轮的应用

电子凸轮可应用于许多工程实践中,其中包装机的封切机构是一个典型的应用实例^[18]。所谓包装机是指可以完成全部或部分包装过程的机械,包装过程包括成型、充填、封包等主要工序,以及与其相关的前后工序。由于包装机所加工产品的袋长在一定范围内是变化的,而对于特定型号的包装机来说,其封切机构旋转一周所走过的距离是固定的,所以为避免包装机加工过程中出现“划膜”、“扯膜”等现象,其封

切机构必须做凸轮运动。传统的包装机械多采用机械凸轮结构,受其应用局限性的影响,无法满足生产的需求,因此电子凸轮在包装机械中的应用越来越广泛。

该系统以某型号的枕式包装机为应用平台,去掉原有机凸轮机构及复杂的链传动机构,改由伺服电机直接驱动各轴,通过该系统的电子凸轮功能控制横封切刀实现柔性变速运转。现场运行效果表明,包装速度可达到 800 包/时;包装偏差可控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 之内,与传统包装机械相比,包装精度大大提高,具体数据见表 2;提高了输出柔性,可以根据生产要求实时调整凸轮运动曲线;提高了包装机的智能化程度,基于该系统可实现色标自动追踪、电子防切、人机交互等功能。

表 2 实验数据

Tab. 2 The experimental data table

设定包装长度 /mm	偏差量 (电子凸轮)	设定包装长度 /mm	偏差量 (电子凸轮)
100	+0.1	300	+0.1
125	-0.1	319	+0.2
150	-0.1	353	+0.2
175	+0.1	386	-0.1
200	-0.1	400	+0.1
220	+0.1	434	-0.2
249	-0.2	460	+0.1
277	-0.2		

4 结语

文中在分析电子凸轮运动规律的基础上,以凸轮的速度特性为重点研究对象,采用三次多项式插值法得到平滑的凸轮速度和加速度曲线,且算法结构简单,较容易实现,大大减少了开发周期。利用定步法得到了电机的控制表格,且使用查表法能较好地实现伺服电机的升降频控制。

ARM7 可靠性高,抗干扰能力强,与伺服电机结合能较好地模拟机械凸轮顶杆的运动规律,实现了机械凸轮的功能。该系统采用 ARM7 作为控制器,与采用 PLC 控制器的电子凸轮相比成本要低很多,且输出运动具有可调、定位精确、无冲击等特点,能够很好地满足实际工程应用中对凸轮的要求。将电子凸轮系统应用于包装机中,既可以提高包装效率又能保证较高的包装精度,同时便于调整凸轮曲线形式,在一定程度上提高了包装机械的智能化程度。包装机械一般由三轴协调运转完成包装,电子凸轮控制器的成

功应用对多轴控制^[19-20]具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王吉岱,张兆健,梁存仙,等. 包装机械电子凸轮关键技术研究与应用[J]. 包装工程,2013,34(7):48—51.
WANG Ji-dai,ZHANG Zhao-jian,LIANG Cun-xian,et al. Research and Application of Electronic Cam Key Technology in Packaging Machine[J]. Packaging Engineering,2013,34(7):48—51.
- [2] 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006:151—173.
SUN Huan,CHEN Zuo-mo,GE Wen-jie. Theory of Machines and Mechanism [M]. Beijing: Higher Education Press,2006:151—173.
- [3] 王安敏,鹿虎. 基于 C8051 单片机的电子凸轮的实现[J]. 机械传动,2010(10):84—87.
WANG An-min,LU Hu. The Implementation of Electronic Cam Based on C8051 MCU [J]. Journal of Mechanical Transmission,2010(10):84—87.
- [4] WOELFEL M. Introduction to Electronic Cam[J]. Assembly Automation,1999,19(1):17—24.
- [5] MAKINO H. Smart Cam Application to Robot[J]. Assembly Automation,1999,19(1):39—46.
- [6] LESLIE L. Using Electronic Cams for Motion Control[J]. Power Transmission Design,1996(6):39—41.
- [7] 刘永明. 可控凸轮机构的研究[D]. 天津:天津大学,2004.
LIU Yong-ming. Study on Programmable Cam Mechanism [D]. Tianjin:Tianjin University,2004.
- [8] 常军. 基于 DSP 的自动包装机运动控制软件设计[D]. 青岛:青岛科技大学,2010.
CHANG Jun. The Motion Control Software Design of Automatic Packing Machine Based on DSP[D]. Qingdao:Qingdao University of Science and Technology,2010.
- [9] LIAO Chung-shu,JENG Shyr-long,CHIENG Wei-hua. Electronic Cam Motion Generation with Special Reference to Constrained Velocity, Acceleration and Jerk [J]. ISA Transaction,2004,43:427—443.
- [10] XU Jia-zhong,ZHANG Lei,QIAO Ming. Research on Electronic Cam Based on Nurbs Interpolation Algorithm[C]//The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments,2009:669—674.
- [11] 卫军朝,张国渊,陈垚,等. 一种基于 DSP+FPGA 的电子凸轮控制方法[J]. 机电工程,2013,30(6):721—724.
WEI Jun-chao,ZHANG Cuo-yuan,CHEN Yao,et al. Control Method of Electronic Cam Based on DSP and FPGA [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(6):721—724.
- [12] 谭民,徐德,侯增广,等. 先进机器人控制[M]. 北京:高等教育出版社,2007:135—148.
TAN Min,XU De,HOU Zeng-guang. Advanced Robot Control[M]. Beijing:Higher Education Press,2007:135—148.
- [13] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012:184—214.
WANG Xiao-ming. Motor Control Based on Single Chip [M]. Beijing:Beihang University Press,2012:184—214.
- [14] 伍宗富,王立. 基于数字信号处理器的电子凸轮控制系统设计[J]. 电机与控制应用,2008(8):47—51.
WU Zong-fu,WANG Li. Design for Electronic Cam Control System Based on DSP[J]. Electric Machines & Control Application,2008(8):47—51.
- [15] 柏淑红. 采用伺服电机的电子凸轮控制系统设计[J]. 机电工程,2012,29(6):689—692.
BAI Shu-hong. Design of Electronic Cam Control System Based on Servo-motor[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering,2012,29(6):689—692.
- [16] 孙兴朋,王东兴,赵春峰. TMS320F28335 与交流永磁伺服驱动器的接口办法[J]. 机电产品开发与创新,2011,24(5):171—173.
SUN Xing-peng,WANG Dong-xing,ZHAO Chun-feng. Interface Circuit between TMS320F28335 and AC Permanent Magnet Servo Drives[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products,2011,24(5):171—173.
- [17] 杨剑,党学明,丁苏红. 基于 MODBUS 协议的单片机与触摸屏通信实现[J]. 仪器仪表用户,2011,18(6):79—81.
YANG Jian,DANG Xue-ming,DING Su-hong. Implementation of Communication between SCM and Touch-screen Based on Modbus Protocol [J]. Electronic Instrumentation Customer,2011,18(6):79—81.
- [18] 唐宗美,杨光友,马志艳,等. 包装设备控制系统综述[J]. 包装工程,2013,34(5):107—110.
TANG Zong-mei,YANG Guang-you,MA Zhi-yan,et al. Summarization of Packaging Equipment Control System[J]. Packaging Engineering,2013,34(5):107—110.
- [19] CHANG Yang-hung,CHIENG Wei-hua,LIAO Chung-shu,et al. A Novel Master Switching Method for Electronic Cam Control with Special Reference to Multi-axis Coordinated Trajectory Following[J]. Control Engineering Practice,2006,14:107—120.
- [20] PRIYANKA S,RISHI R S,CHATURI S. Development of a Microcontroller-based Multi-axis Motion Control System [J]. Journal of Instrument Society of India,2011,12(3):280—289.