

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.020

# 一种基于DSP+FPGA的电子凸轮控制方法\*

卫军朝,张国渊\*,陈 焱,闫秀天  
(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对基于DSP+FPGA架构的控制卡中集成电子凸轮功能以及减轻DSP工作负担的需求,提出了一种基于DSP和FPGA的电子凸轮开环控制的方法。该方法以离散后的等加速度区间为凸轮运动控制的基本单元,并对DSP和FPGA进行了功能划分,将DSP作为主处理器,负责规划凸轮的运动规律,向FPGA发送各小区间上的运动命令并查询FPGA中电子凸轮模块对运动命令的执行情况,使凸轮运动与控制卡的其他任务相协调;将FPGA作为协处理器,负责实现小区间上的运动控制以及相关的接口功能。FPGA中的电子凸轮模块采用级联的两个DDA算法块生成进给脉冲。DDA算法的仿真实验结果表明,进给脉冲的频率变化平滑。现场应用结果表明,各个小区间内的运动速度变化平滑,相邻小区间的速度衔接是连续的,系统运行稳定可靠。

**关键词:** 电子凸轮; FPGA; DSP; DDA

中图分类号: TH132.47; TP23; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)06-0721-04

## Control method of electronic cam based on DSP and FPGA

WEI Jun-chao, ZHANG Guo-yuan, CHEN Yao, YAN Xiu-tian

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of integrating the electronic cam function into the DSP and FPGA-based controller card and reducing the burden of the DSP, an open-loop electronic cam control method based on the DSP and FPGA was presented. In this method, the discretion sub-range characterized by equal acceleration motion was used as the basic cam control element, and the assignment of the control system was functionally divided into the DSP and FPGA modules. The DSP as the master processor, was used to plan the trajectory of the electronic cam, send sub-range motion orders to the FPGA, inquire about the motion execution information about sub-ranges, and make the cam execution and other tasks of the control card well coordinated. The FPGA as the coprocessor, was used to fulfill the sub-range motion execution and related interface functions. In the FPGA's cam module, two cascaded DDA algorithm blocks were used for producing driving pulses. The simulation result shows that the frequency of the pulse train in the subrange changes smoothly, and the field application results indicate that the speed of the subrange changes smoothly, the speeds between two adjacent subranges are continuous, and the control system runs stably.

**Key words:** electronic cam; field programmable gate array(FPGA); digital signal processor(DSP); digital differeential analyzer(DDA)

## 0 引 言

机械凸轮机构在工程实际中存在一些局限性<sup>[1]</sup>,如凸轮各部件的制造、装配比较困难;凸轮机构存在较大的接触应力,易磨损;凸轮机构还存在压力角过大问题;凸轮机构的运动规律不易调整。而电子凸轮是根

据机械凸轮的特点,用一个驱动装置(如直线电机、步进电机+丝杠)驱动顶杆运动,而驱动装置又由控制系统控制,从而实现机械凸轮的功能<sup>[2]</sup>。电子凸轮的优点在于设计周期短、柔性好,而且电子凸轮不存在机械凸轮所具有的磨损,稳定性好。为此,电子凸轮系统在近年来使用越来越广泛。

收稿日期: 2013-01-09

基金项目: 航天科技创新基金资助项目(CASC201103)

作者简介: 卫军朝(1977-),男,山西运城人,博士研究生,主要从事机电系统建模与控制方面的研究。E-mail: weijunchao@mail.nwpu.edu.cn

通信联系人: 张国渊,男,博士后,副教授,硕士生导师。E-mail: gyzhang@nwpu.edu.cn

电子凸轮可以采用单片机,也可以采用PLC<sup>[3-4]</sup>或者DSP实现<sup>[5-6]</sup>。具体采用何种方式,视场合而定。近年来,基于DSP+FPGA的各种控制卡在装备制造业领域应用日益广泛。这类控制卡不仅仅需要实现多轴联动控制,而且需要同一些凸轮动作相配合,如激光调阻机中工作台的运动与探针运动的配合。对于控制系统而言,常常希望集成度越高越好,这样可以减少体积、降低成本和提高稳定度。本研究采用在基于DSP+FPGA的控制卡中嵌入电子凸轮控制模块的方式,实现了凸轮机构的控制功能,增加了系统的集成度;该控制方法对于进一步研发基于航天器主动可控性的密封单元具有重要的参考价值。

电子凸轮机构可以采用开环控制方式,也可以采用闭环控制方式,本研究采用开环控制方式实现对电子凸轮的控制。

## 1 电子凸轮控制算法的设计

在基于DSP+FPGA的架构中,DSP作为主处理器主要用来实现高速运算以及复杂的控制算法;而FPGA作为协处理器可以完成逻辑粘连功能,并且由于在FPGA上构建的各功能模块具有并行处理的能力,这便大大减轻了DSP的工作负担。对电子凸轮的控制,可以由DSP来实现,FPGA仅作逻辑粘连用,也可以采用DSP与FPGA相配合来实现。对于前一种方案,研究者常常采用定时器中断的方式来产生步进时钟脉冲,通过对定时常数的调整就可以实现调速,而在程序设计中,则采用查表的方式重载定时常数<sup>[7]</sup>。这种方式的缺点在于,在产生的加减速轨迹中,离散后的速度成阶梯形,而要改善这种情况,就必须将离散化的区间宽度减小,这便使得表格做得很大,配置凸轮运动规律变得很繁琐。该方案另一个缺点是凸轮模块加重了DSP的负担,而没能够充分发挥FPGA的功能。本研究将凸轮运动过程离散成许多速度线性变化的小区间,采用DSP与FPGA相配合的方式,由DSP向FPGA发送每个小区间的运动控制指令,而由FPGA具体完成每一个小区间的运动控制任务。

### 1.1 电子凸轮控制系统的硬件构成

本研究在基于DSP/FPGA架构的控制卡中嵌入电子凸轮功能模块,其硬件构成如图1所示。DSP将运动参数写入FPGA中相应的寄存器,也可以从FPGA中读取电子凸轮的运行状态;FPGA主要负责电子凸轮步进脉冲序列的产生以及提供驱动器的接口,其引出的3个信号作为驱动器的控制信号,即可实现对电子凸轮的控制。为了使电子凸轮的运动具有绝对位置,需要加入对从动件零点的检测。

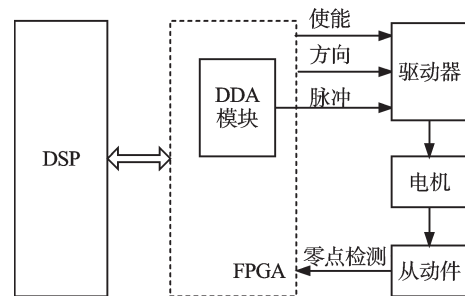


图1 电子凸轮系统硬件原理框图

### 1.2 DSP中电子凸轮控制函数的设计

为了描述凸轮从动件运动规律以及凸轮运动与控制卡其他任务相配合,可以将一个完整的运动过程离散为若干个小的小区。在该设计中,每一个小区间的运动曲线为等加速度曲线<sup>[8-10]</sup>,这里包含了加速度为0的情况,即等速度曲线。其表达式如下:

$$\begin{cases} v = v_0 + at \\ s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t$ —时间点, $a$ —加速度, $v$ — $t$ 时刻的速度, $v_0$ —初始速度, $s$ — $t$ 时刻的位移, $s_0$ —初始位移。

一个小区间的速度曲线如图2所示。图中的加速区间(如图2(a)所示)和减速区间(如图2(c)所示)可能会产生很小的一段恒速部分,这是由于当区间的终点速度到达时有可能该段所要移动的距离尚未走完,恒速部分需要将剩余的距离补上。鉴于同样的原因,减速段的终点速度避免设为零。对于从静止开始运动的区间,初始速度 $V_0$ 的设置不能大于步进电机的启动频率。

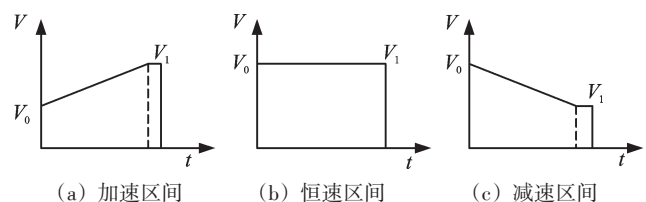


图2 运动区间的速度曲线

上述的3种运动区间,可以在DSP中封装为一个函数:

```
Void CamMov (long Dist, long V0, long V1, unsigned Acc)
```

其中:第1个参数Dist为该区间所需走的距离,第2个参数V0为该区间的初始速度,第3个参数V1为该区间的结束时速度,最后一个参数Acc为从V0变为V1的加速度绝对值。

通过该函数,DSP将这几个参数送到FPGA的相应寄存器,FPGA的电子凸轮模块根据这几个参数来完成该区间的步进脉冲序列控制。需要说明的是,这几个参数都是以脉冲个数的形式给出的,一般参数Dist的

设置应该略大于变速过程中所走过的距离,否则可能会发生位移走完时V1的速度还没有达到的情况。

为了能让DSP了解FPGA中的凸轮模块的运行状态,用以判断是否可以给FPGA传下一区间的参数或者该段运动是否结束,又设计了一个函数:

Unsigned int GetMotionSta(void)

该函数对FPGA的相关寄存器进行读操作。其返回值的Bit0位等于1,表示区间运动完成或者没有区间运动任务的存在,DSP借此可以实现凸轮与其他任务之间的配合;返回值的Bit1位等于1,则表示DSP可以写入下一区间的运动参数,这样DSP便可以在FPGA进行一个小区间的DDA算法的同时缓冲下一个小区间的参数,使相邻小区间连接处的运动无停顿。为了提高系统的灵活性,这些状态标志也可以作为DSP的中断源。

对于电子凸轮机构的运行方向的控制以及驱动器使能的控制,以DSP写通用输出口(GPO)的方式进行控制即可,封装为函数形式为:

Void CamDir(void)

Void CamEnable(void)

通过上述的函数便可以完成DSP端对一个凸轮运动的控制,使得凸轮的运动与其他的任务相配合。

### 1.3 FPGA中电子凸轮控制模块的设计

FPGA中对凸轮机构的运行方向的控制以及电机驱动器使能的控制,仅仅是接收DSP的端口设定值并输出,电子凸轮模块设计的关键是步进脉冲序列生成器。本研究采用数字积分法生成脉冲序列。

数字积分法<sup>[11-12]</sup>又称数字微分分析法DDA(Digital Differential Analyzer)。由于对加速度的积分可以得到速度增量,而对速度的积分可以得到位移增量,研究者可以将两个数字积分器级联起来,形成变速度的位移增量控制,积分器原理图如图3所示。当被积函数积分器中的设定值远小于累加器的容量,且迭代时钟 $\Delta t$ 的频率非常高时,脉冲序列频率的变化非常精细。

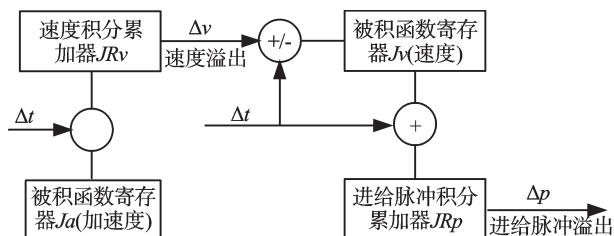


图3 数字积分器原理图

在FPGA中,DDA算法的实现可以采用有限状态机。 $\Delta t$ 的频率由状态机的驱动时钟频率以及一次循环迭代过程所需的状态数所决定。在一次循环过程中,各个状态分别完成步进脉冲个数计数以及运动完

成的判断、速度累加器的累加以及溢出处理、步进脉冲累加器的累加以及溢出处理,以及其他一些处理任务。其对应的流程图如图4所示。

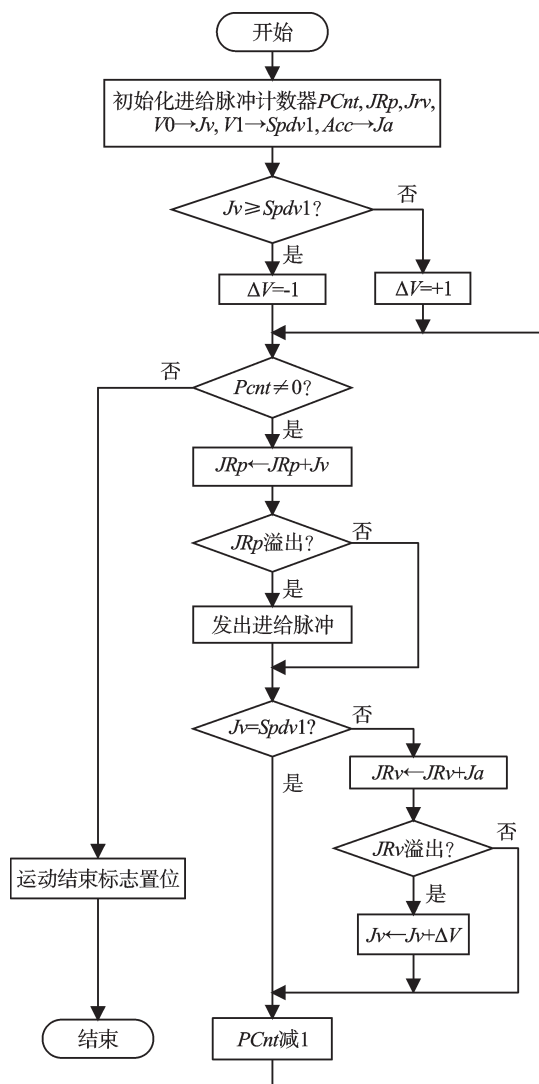


图4 DDA算法流程图

该DDA算法可以封装为如下模块:

```
module Cam_DDA(input clk, input En, input Dist,
input Spd_V0, input Spd_V1, input ACC, output Motion-
State, output pul);
```

其中:clk为驱动时钟;En为使能信号;Dist为需要送出的进给脉冲数;Spd\_V0,Spd\_V1为初始速度和终止时速度;ACC为从Spd\_V0到Spd\_V1的加速度绝对值;MotionState[0]为该运动区间结束的标志位;MotionState[2]为达到Spd\_V1的状态标志位。

## 2 仿真与验证

本研究将Cam\_DDA的驱动时钟频率设为50 MHz,累加器的容量设为23位,对DSP端调用函数CamMov(10,50,800,40 000)时FPGA所执行的DDA算法进行仿真,时序仿真图如图5所示。从仿真图可以看出,进



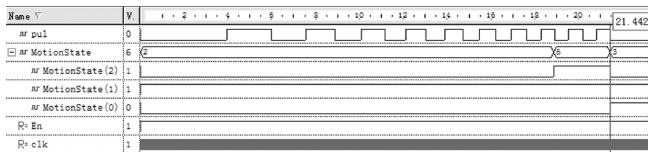


图5 DDA模块时序仿真图

给脉冲pul的前8个脉冲的频率是递增变化的,当送出第8个脉冲后, MotionState[2]置位,表示已经达到Spd\_V1。当第10个进给脉冲的下降沿发出时, MotionState[0]置1,表示该段运动已经完成。该运动区间的运动时间为21.442 ms,而理论运动时间为21.289 ms,这种情况是由于驱动时钟clk的频率不能调整到理想值所造成的。该情况在工程中是可以接受的,当然也可以在软件中对速度值和加速度值乘以一个修正系数来解决。

本研究将所设计的模块综合后下载到控制卡的FPGA芯片(Lattice公司的LFXP6C-3T144C)中,应用于垂直升降设备中,系统运行平稳可靠,各个小区间内的运动速度变化平滑,小区间之间速度衔接是连续的。

### 3 结束语

本研究将电子凸轮控制模块集成到控制卡中,采用DSP端对电子凸轮的运动规律进行离散配置并向FPGA发送离散后各区间的运动指令,而FPGA端通过级联的DDA算法实现各个离散区间的脉冲序列生成,使得区间离散无需很细密,而且速度衔接连续。这样

便大大减轻了电子凸轮配置的工作量,并且减轻了DSP的负担。这种设计方法也可以进一步应用于变加速度曲线的电子凸轮控制中。

### 参考文献(References):

- [1] 王程,贺炜. 基于单片机的电子凸轮系统研究[J]. 机械设计与制造,2006(11):4-6.
- [2] 王安敏,鹿虎. 基于C8051单片机的电子凸轮实现[J]. 机械传动,2010,34(10):84-87.
- [3] 胡超,宋春兰,刘呐. 基于PLC设计的电子凸轮[J]. 锻压装备与制造技术,2009,44(5):82-83.
- [4] 曾强. 基于PLC的电子凸轮控制器[J]. 流体传动与控制,2007,22(3):41-42.
- [5] 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,2008,35(8):47-51.
- [6] 梅彬运. 基于DSP的电子横移控制系统设计[J]. 电子技术,2008,45(2):21-23.
- [7] 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,2007:209.
- [8] 李丙才,胡静萍,魏泰,等. 可控凸轮机构与步进电机控制系统的集成设计[J]. 机械与电子,2011(1):17-19.
- [9] PREBEN W. Cam Design and Manufacture [M]. New York:Industrial Press,1965.
- [10] CHEN F Y. Mechanics and Design of Cam Mechanisms [M] New York:Pergamon Press,1982.
- [11] 刘杰,张任. 基于DSP2812的光伏MPPT控制系统[J]. 轻工机械,2012,30(3):58-61.
- [12] 王永章. 机床的数字控制技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1995.

[编辑:张翔]

(上接第695页)

### 4 结束语

基于超声波雾化的发动机燃油供给系统通过超声换能器使燃油颗粒达到微米级,有效增强了燃油与新鲜空气的混合,根据发动机不同的工况,通过调节气门的开度,实现了理想的空燃比的均匀混合气,使其燃烧更充分,降低了有效燃油消耗率,提高了燃油化学能的利用率。

通过理论与实验研究表明,超声波雾化技术能可靠地应用在化油器式摩托车发动机燃油供给系统中,有效地降低摩托车尾气污染物的排放量。同时,相比传统的燃油供给系统,该系统结构简单,制造成本低;放出更多的热量,提高了燃油化学能的利用率,降低了燃油消耗量,从而有效提高了发动机的燃油经济性,符合国家节能减排的经济发展模式,具有强大的市场竞争力和广泛的应用前景。

### 参考文献(References):

- [1] 朱中平. 汽车排气污染治理实用手册[M]. 北京:中国物资出版社,2001.
- [2] 崔心存,金国栋. 内燃机排气净化[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2008.
- [3] 蔡晓峰,何维庚,姜德星. 压电陶瓷超声雾化换能器的研制[J]. 佛山陶瓷,1994(3):18-20.
- [4] 冯若. 超声波手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999.
- [5] 周龙保. 内燃机原理[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [6] 连之伟. 热质交换原理与设备[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] 倪星元,沈军,张志华. 纳米材料理化特性与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [8] 袁义春. 摩托车尾气排放控制措施[J]. 内燃机,2009(4):37-39.

[编辑:李辉]