

基于 TMS320C32 的数字控制器设计

李安伏,王庆飞,李晓红
(安阳工学院,河南 安阳 455000)

摘要: 数字信号处理器(DSP)芯片 TMS320C32 具有高效的数值运算能力,并能提供良好的开发环境,通过 TMS320C32 浮点 DSP 和可编程逻辑器件(FPGA)的组合构成 SH-2000 TH 数控系统的高速、高精度运动控制器。介绍了 TMS320C32 的性能、原理及基于此的 SH-2000 TH 数控系统的硬、软件设计。该系统运用离散 PID 算法对运动过程加以控制以及通过 B 样条插值算法对运动曲线进行平滑处理,控制效果接近于连续系统。

关键词: 数控系统; 数字信号处理器; 可编程逻辑器件; PID; B 样条插值

中图分类号: TP 273+.5;TP 368.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0055-03

基于单片机的运动控制器在数控机床、工业机器人等领域得到了广泛应用,控制效果良好。但由于单片机缺乏灵活性,且运算能力有限,难以胜任高要求运作环境。目前,将 DSP 技术与计算机的各自优势相结合成为高性能数控系统的发展趋势^[1]。本文采用美国 TI 公司推出的 DSP 芯片 TMS320C32^{①②},结合可编程逻辑器件(FPGA),构成 SH-2000 TH 数控系统的高速、高精度运动控制器。

该系统运用 PID 算法对运动过程加以控制,采用 B 样条插值算法对运动曲线进行平滑处理。通过 ISA 接口与 PC 机协调并进行数据交换,以 PC 机作为基本平台,以 DSP 高速运动控制器作为细插补、伺服控制的核心,对直线电机的运动进行控制,结果表明,控制效果接近于连续系统。

1 TMS320C32 简介

TMS320C3x 系列芯片是美国 TI 公司推出的第一代浮点 DSP 芯片,具有丰富的指令集、很高的运算速度、较大的地址空间和较高的性价比,在各领域得到了广泛的应用。TMS320C3x 包括 TMS320C30, TMS320C31, TMS320C32 和 TMS320C33,其中 TMS320C32 是 TMS320 系列浮点数字信号处理器的新产品,在 TMS320C30 和 TMS320C31 基础上作了简化和改进,其在结构上的改进主要包括可变宽度的存储器接口、更快速的指令周期时间、可设置优先级的双通道 DMA 处理器、灵活的引导程序装入方式、可重新定位的中断向量表及可选的边缘/电平触发中断方式等。图 1 是 TMS320C32 系统原理框图。

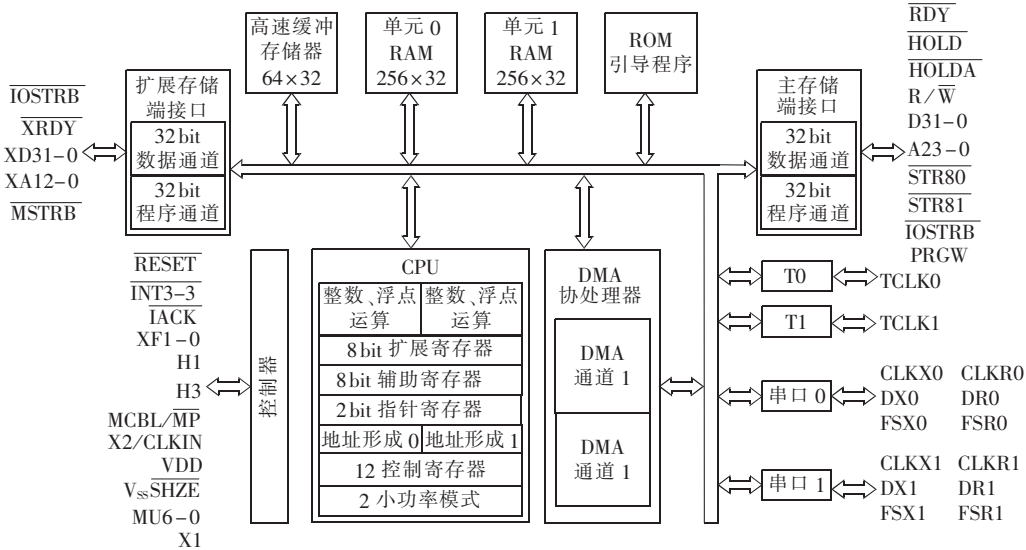


图 1 TMS320C32 系统原理
Fig.1 Principle diagram of TMS320C32

收稿日期: 2005-05-31; 修回日期: 2005-12-02
① TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments, 2002.
② TMS320C3x General-Purpose Applications, Texas Instruments, 2003.

TMS320C32 可用汇编语言开发,也可以用 C 语言。使用汇编语言的优点在于运行速度快、可以充分利用芯片的硬件特性,但开发速度较慢,程序的可读性差。而 C 语言的优势在于编程容易、调试快速、可读性好,可以大大缩短开发周期^[2],但 C 语言对于其片内没有映射地址的特殊功能寄存器不能操作。

2 SH-2000 TH 运动控制器硬件设计

SH-2000 TH 运动控制系统的任务是控制直线电机的运动,要求如下:

- a. 4 轴输入和 4 轴输出;
- b. 采用光栅尺对输入记数;
- c. 16 bit 并行高速 DA 输出;
- d. 运动定位精度达到 10 nm,响应时间 < 100 ns,加速度 $a > 10 \text{ mm/s}^2$,运动速度 $v > 300 \text{ mm/s}$ 。

因此,系统核心 CPU 的处理能力及运算能力必须满足高速要求。直线电机运动定位的核心是高精度的反馈控制装置,直线电机的反馈控制装置是光栅尺和高精度脉冲计数器,光栅尺发出与运动距离成线性关系的脉冲数,脉冲计数器的计数值表示直线电机当前的运动位置。计数长度为 28 bit 的计数器能够满足定位的精度要求,且计数频率很高。为方便设置目标点的运动参数,使运动控制卡具有良好的人机交互功能,系统必须具有与 PC 机通信的功能。

综合考虑上述要求,SH-2000 TH 系统的设计采用 DSP+FPGA 的形式^[3],由 DSP 主控芯片作为中央处理模块,FPGA 作为反馈计数模块且承担板上的部分逻辑译码工作,PC 通信接口模块采用双口 RAM,输出模块用 D/A 转换器实现,SH-2000 TH 系统结构如图 2 所示。

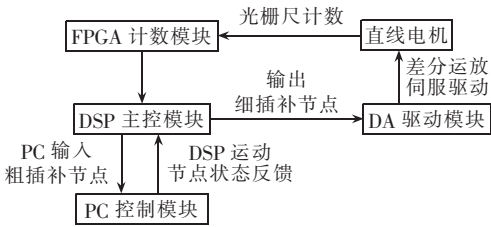


图 2 控制系统 SH-2000TH 方框图
Fig.2 Block diagram of SH-2000TH control system

2.1 FPGA 计数模块

FPGA 模块主要由 1 个 4 通道的针对光栅尺的脉冲计数器组成,其主要功能为计数和部分地址译码,由于脉冲计数频率高,计数量大,所以必须选择高容量、高性能的可编程逻辑器件^[1]。ALTERA 公司的 FLEX(Flexible Logic Element Matrix)10K10 系列 FPGA,可提供 5 000 个触发器、2000 bit RAM 及 40 ns 的速率等级,可适应 18~105 MHz 的信号处理速率。其主要由输入、输出单元(IOE)、掩埋阵列(EAB)、逻辑阵列(LAB)及内部连线组成。EAB 是在输入和输出端口加有寄存器的 RAM 块,其容量可灵活变化,当用于 RAM 时,可配制成多种形式的字宽和容量。

另外,还可事先写入查表值用它构成如乘法器、纠错逻辑等电路。LAB 主要用于逻辑电路设计,包括 8 个逻辑单元(LE),可提供 4 个控制信号及其反相信号,其中 2 个可用于时钟信号。每个 LE 包括组合逻辑及 1 个可编程触发器。IOE 提供全局的时钟及清零信号输入端口,还提供具有可编程的各种输入输出端口,如低噪声端口、高速端口等。

2.2 PC 通信接口模块^[4]

PC 通信接口模块选用 16 bit 的 ISA 总线与 PC 相连,系统与 PC 接口如图 3 所示。

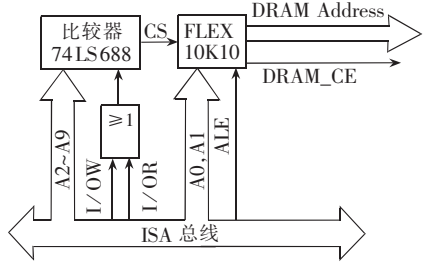


图 3 系统与 PC 接口
Fig.3 Interfacing between system and PC

ISA 地址线 A2~A9 接到地址比较器 74LS688,与设定好的地址作比较,74LS688 的片选信号由 ISA 的 I/OR 和 I/OW 的“或”提供(I/OR 和 I/OW 在 ISA 总线访问端口时低电平有效),A0,A1 接到 FPGA,用于选择 FPGA 内部 4 个功能不同的寄存器,ISA 的 ALE 用于触发 FPGA 内部逻辑功能,锁存 ISA 总线传输的信号。当访问地址清零寄存器时,地址计数值清零;当访问地址增加寄存器时,地址计数值加“1”,访问不同的寄存器就对地址计数值完成不同的操作,把地址计数值直接作为地址送给双口 RAM,即可实现 ISA 总线访问双口 RAM。

ISA 总线的使用十分灵活、方便,而且 I/O 操作比较简单,常用的总线信号有 I/O,I/OR,I/OW,ALE 及数据线和地址线等。由于 ISA 总线上大部分地址都已被 PC 系统分配好,直接把 2 kB 的双口 RAM 数据空间映射到 ISA 总线上并不现实;而且控制系统与 PC 交换的数据基本上是一系列加工点的坐标参数,采用顺序访问对性能没有影响,因此,本系统中双口 RAM 的 PC 端地址线并没有直接采用 ISA 地址线,而是由 FPGA 内部地址计数器给定。采用地址计数器方式的顺序访问,完全能够达到设计要求。

2.3 存储模块和输出模块

存储模块用于存储系统程序和数据,主要由 SRAM(2 片 CY7C1021)和 FLASH(AM29F400B)组成。外围存储电路如图 4 所示。

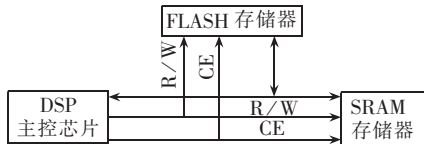


图 4 外围存储电路
Fig.4 Peripheral memories

输出模块采用模拟输出,经外部放大驱动电机。D/A 转换芯片选择 DAC7744,它是高性能的 4 通道 16 bit 高速 D/A,有以下特点:

- a. 独立 4 路输出通道;
- b. 输出信号范围 0~5 V,0~10 V,±5 V,±10 V;
- c. D/A 转换分辨率 16bit;
- d. D/A 转换时间 ≤1μs;
- e. D/A 转换综合误差 ≤0.02 %;
- f. 输出阻抗 ≤2 Ω。

3 软件设计

SH-2000 TH 运动控制器应用时插在工控机的 ISA 槽上,与上位机配合工作。首先,在上位 NC 机输入加工曲线,由上位机做粗插补,然后把数据通过 ISA 接口传递给控制器。控制器对接收到的数据再做细插补——采用 3 次 B 样条插值,然后发送给 DA,驱动电机运动。DSP 通过 FPGA 进行脉冲计数,读出直线电机光栅尺的反馈信息后用离散 PID 控制算法调整,以便于电机运动控制的最优化。

控制系统程序流程如图 5 所示。

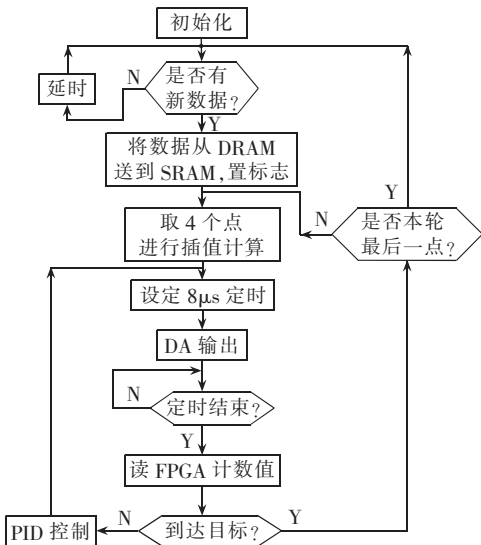


图 5 系统软件流程图

Fig.5 Flowchart of system software

运动控制算法核心是先用 B 样条插值法把目标点进一步细化,使运动曲线更平滑,然后在运动过程中采用 PID 算法调整,最终达到高速、高精的设计要求。

3.1 B 样条插值

目前,许多先进的 CAD/CAM 系统都采用了 B 样条曲线^[5]。其特点是:可用统一的数学形式精确表示分析曲线(如直线、圆锥曲线等)和自由曲线(如均匀 B 样条曲线等),因而便于用统一的数据库管理、存储,程序量可以大大减少;非均匀 B 样条曲线定义中的权因子使外形设计更加灵活方便,设计人员通过调整具有直观几何意义的点、线、面元素即可达到预期的效果。

本系统采用 3 次 B 样条曲线作为精插补算法,

该算法应用在控制器中可以得到比较满意的效果。计算过程中只需要相邻 4 个点的位置数据 $(x_0,y_0)(x_1,y_1)(x_2,y_2)(x_3,y_3)$,就可以构造出平滑的曲线。公式以坐标分量形式表示为

$$x = \frac{x_0 + 4x_1 + x_2}{6} + \frac{-x_0 + x_2}{2}t + \frac{x_0 - 2x_1 + x_2}{2}t^2 + \frac{-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3}{6}t^3$$
$$y = \frac{y_0 + 4y_1 + y_2}{6} + \frac{-y_0 + y_2}{2}t + \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{2}t^2 + \frac{-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3}{6}t^3$$
$$0 \leq t \leq 1$$

3.2 PID 控制

PID 合理的参数估计、比较,可以通过 Matlab 的传递函数模型仿真得到^[6]。由于该系统采用的都是数字量,因此必须把 PID 算法离散化才能使用。又因系统的存储空间有限,算法的存储空间开销不能太大,因此采用了离散化的增量式 PID 算法^[7]。该算法在运算过程中只需要保留最近 3 次的误差数据,就能够推导出下一次的输出量,节省了大量的数据空间、提高了运算速度,有很强实用价值。公式如下:

$$u(k) = u(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{\tau}{\tau_i}e(k) + \frac{\tau_d}{\tau} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \}$$

式中 $u(k), u(k-1)$ 分别是 k 和 $k-1$ 时刻的输出量,系统中体现为 DA 的输出量; $e(k), e(k-1), e(k-2)$ 分别是 $k, k-1, k-2$ 时刻的偏差值,在系统中体现为该时刻实际位置与目标位置的偏差; $\tau, \tau_d, \tau_i, K_p$ 是 PID 公式的常量,不同的数值代表着 PID 系统的微分、积分、比例调节作用的强度和效果。

4 结语

在开放式数控系统中应用基于 DSP 和 FPGA 的运动控制器,其中 DSP 承担了系统中实时性要求较高的模块功能^[8],利用 DSP 高速运算能力和实时信号处理能力,采用先进的 B-Spline 插补算法,使该 DSP 运动控制器具有高速、高精度的性能结合 FPGA 芯片的先进技术,又使该运动控制器的集成性、可靠性大幅提高。本运动控制器目前是基于 ISA 总线设计的,今后考虑把该系统移植到 PCI 总线上,将会进一步提高系统的处理速度,适应更高的要求。

参考文献:

[1] 叶伯生. 数控原理及应用[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2004.

[2] 来晓岚,赵佳明,卢焕章. DSP+FPGA 实时信号处理系统[J]. 电子技术应用,2002(7):53-54.

LAI Xiao-lan, ZHAO Jia-ming, LU Huan-zhang. Real-time signal processing system on DSP+FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2002(7):53-54.

(上接第 57 页 continued from page 57)

[3] WANG Jian - wei, CHANG Chein - i, CAO Mang. FPGA design for constrained energy minimization [C]// **Conference on Chemical and Biological Standoff Detection**. Providence, Rhode Island, USA; [s.n], 2003; 28-30.

[4] 刘红玲. 微机接口实用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[5] 潘日红, 潘日晶. 周期 B 样条曲线的快速递推升阶方法 [J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2001 (4): 27-28.
PAN Ri-hong, PAN Ri-jing. A fast recurrent approach for degree elevation of periodic B-Spline curves [J]. **Journal of Fujian Normal University: Natural Science**, 2001 (4): 27-28.

[6] 楼顺天, 张伟. 基于 Matlab 的系统分析与设计模糊系统

[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.

[7] 熊静琪. 计算机控制技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[8] 彭启琮, 李玉柏, 管庆. DSP 技术的发展与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

(责任编辑: 戴绪云)

作者简介:

李安伏 (1966-), 男, 河南林州人, 高级工程师, 研究方向为控制理论与控制工程 (**E-mail**: aylaf@sina.com);
王庆飞 (1964-), 男, 河南汤阴人, 副教授, 研究方向为物理和计算物理;
李晓红 (1967-), 女, 河南安阳人, 工程师, 研究方向为控制科学。

Design of digital controller based on TMS320 C32

LI An-fu, WANG Qing-fei, LI Xiao-hong

(Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

Abstract: Since digital signal processor TMS 320 C32 processes high efficient computation ability and is supported with favorable development environment, a high-speed and high-precision digital controller for SH-2000 TH digital control system is designed based on TMS 320C32 and FPGA. The performance and principle of TMS 320C32 are described, as well as the HW and SW of SH2000 TH. It controls motional process by means of PID and smoothes motional curve with algorithm of B-Spline interpolation. The control effect is close to continued systems.

Key words: digital control system; DSP; PLD; PID; B-Spline