基于 μc/os-Ⅱ嵌入式数控系统研制

王田苗 陈友东 孙 恺 魏洪兴

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 介绍了嵌入式数控系统的结构及其组成. 系统硬件平台采用嵌入式微控制器 ARM(Advanced RISC Machines)和现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Arrays),软件平台采用 μc/os-Ⅱ实时操作系统. 给出了该系统的硬件结构. 根据数控系统的软件需求,给出了系统的软件结构,系统的模块,任务以及任务的优先级和周期. 同时给出了实现系统的一些关键技术. 在嵌入式实时操作系统 μc/os-Ⅱ上实现了该系统,在数控机床上进行了加工试验、环境适应能力测试以及静电放电抗干扰试验,试验表明系统稳定可靠.

关 键 词: 数控系统; 嵌入式系统; 实时系统; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP 273; TP 301

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0471-04

Embedded CNC system with the μc/os-Ⅱ OS

Wang Tianmiao Chen Youdong Sun Kai Wei Hongxing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An embedded CNC(computer numerical control) system and its hardware and software platform are presented. The system hardware consists of microcontroller ARM(advanced RISC machines) and FPGA(field programmable gate arrays). The CNC system application runs on the ARM, while FPGA is used to connect IO and generate pulses. The software platform utilizes the μc/os-Ⅱ OS to provide hard real time capabilities. The CNC controller software architecture which applies a generic open architecture model with a software bus is presented. Some important methods for carrying out the implementing of the CNC controller are researched and demonstrated, including thread cutting. Finally, a real machining experiment on the system mentioned above is introduced. The result shows that it can be successfully used in real manufacturing environment.

Key words: computer numerical control; advanced RISC machines; real time system; field programmable gate arrays

近年来,为了提高数控系统的开放性,数控系统趋向于与 PC 体系兼容的多机互连系统,一般采用 PC-based 结构. 这些数控系统一般都是多 CPU 结构,其结构复杂,实现困难,同时由于 PC 的价格昂贵、可靠性低,所以很难适用于中低档数控系统. 目前国内的中低档数控系统采用一片或多片 8/16 位单片机和专用板卡,或者其它的单片机系统. 这些系统一般都采用汇编编写,没有操作系统在其上运行,软件结构复杂,修改和实现困难,升级和维护困难. 随着计算机和微电子科学与技术的发展,微处理性能的提高,以及嵌入式实时操作系统的使用,以及嵌入式系统专用性、可靠性、低成本、体积小等优点,嵌入式系统越来越多地用到工业控制领域.

μC/OS-Ⅱ是个源码公开的实时嵌入式操作系统. 它是个可移植、可固化、可裁减、占先式、多任务操作系统,被广泛用于工业控制和其他嵌入式产品中[1]. ARM(Advanced RISC Machines)系

收稿日期: 2005-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60404019)

作者简介: 陈友东(1973-),男,安徽庐江人,博士后, youdongchen@sohu.com.

列芯片采用 RISC(Reduced Instruction Set Computer)结构处理器,超低功耗、价格低廉,目前已被用于各种嵌入式系统中,手机、工业控制等领域[2].

国内制造业的快速发展,带动了机床控制系统的快速发展,随着市场的进一步扩大,在未来几年内,中低档数控机床,仍然会是市场的主流. 随着嵌入式软硬件的发展,在嵌入式软硬件平台上开发数控系统可以降低成本,另外可以更容易实现系统的集成. 因此开发基于 μC/OS-Ⅱ和 ARM 的嵌入式数控系统很有必要.

1 系统的软硬件划分

嵌入式系统有两种基本的实现方式:软件和硬件. 软件比硬件灵活,成本低,而硬件提供了更高的性能. 为了达到成本和性能的最佳结合,兼顾速度和灵活性,嵌入式系统采用软硬件协同设计的方法,实现系统功能,因此系统设计时主要考虑的问题是软硬件的划分. 软硬件划分是将系统行为描述分解为与实现有关的软件部分和硬件部分,即决定系统的功能哪一部分在硬件中实现,哪一部分在软件中实现. 主要采用性能原则、性价比原则和资源利用率原则对系统进行划分.

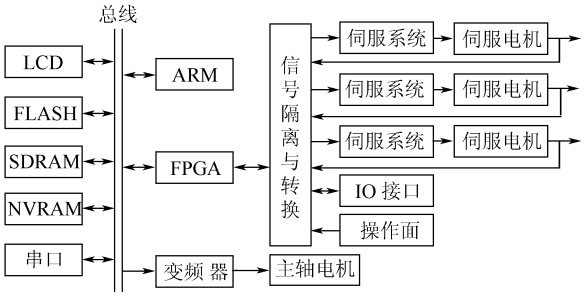
软硬件划分的方法很多[3,4],本文采用 Barros 提出的方法[5],使用簇算法把系统的描述划分为硬件和软件部件,该方法考虑了系统的多个实现. 在众多的实现中选择一个特殊的实现方法,簇就实现了.

根据 Barrons 方法,该系统采用"ARM+FPGA(Field Programmable Gate Arrays)"结构. 系统软件在 ARM 处理器上执行,FPGA 负责脉冲信号的产生、键盘的扫描和机床 IO 口控制. 具体的说就是 ARM 完成人机界面的管理、译码、刀补、粗插补、辅助控制等任务,FPGA 接受 ARM 的控制指令完成细插补功能和伺服更新,控制伺服电机的运动;扫描键盘,控制机床的 IO.

2 系统硬件

2.1 硬件结构

图 1 所示为数控系统硬件平台. ARM 选用三星公司的 44B0,该款 ARM 属于 32 位 ARM7 系列,它是系统的核心,负责系统的运行. FPGA 选用具有 10 000 门逻辑容量的 Acex 系列 ACEX1K,利用这么大逻辑容量的 FPGA 可以实现很多复杂的逻辑功能,它负责脉冲信号的产生、键盘的扫描和机床 IO 口控制,如机床冷却液接口、手摇脉冲发生器接口等.



LCD—液晶显示器;FLASH—快闪存储器;SDRAM—同步动态随机存储器;NVRAM—非易性随机访问存储器.

图 1 系统的硬件结构

2.2 FPGA 设计

FPGA 是一种可编程逻辑器件,它是在 PAL,GAL 等逻辑器件的基础之上发展起来的. 同以往的 PAL,GAL 等相比较,FPGA 的规模大的多,而单位逻辑门的成本却低的多. 大容量、低成本为 FPGA 在数控系统的应用创造了条件. 利用 FPGA 可以实现 IO 处理、脉冲发生、计数和数学运算等等功能. 这里分为以下几个模块:驱动器控制模块、IO 控制模块、操作面板扫描模块、中断控制模块、编码计数器、定时器和总线接口模块. 模块关系图如图 2 所示.

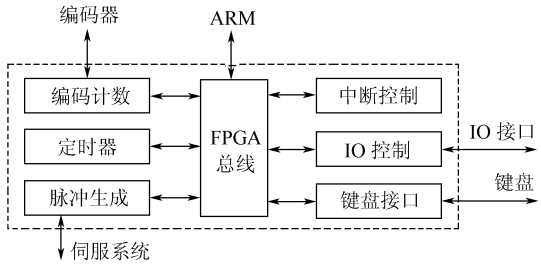


图 2 FPGA 内部结构

脉冲生成器模块主要完成精插补功能,以 CPU 指定的频率向伺服系统发送指定数量的脉冲和方向信号,周期性工作,在周期开始时读 ARM 向 FPGA 中写入的数据;

IO 控制模块实现系统的 IO 扩展,并完成一些 IO 的控制;

操作面板扫描模块主要完成操作面板的扫描工作,具有自动扫描、去抖、连续按键功能;

中断控制模块主要是将 FPGA 内部产生的中断信号进行解析,并送至 ARM 处理;

编码计数器主要是识别编码器输出的信号,并计数,将计数结果放在该模块的寄存器中,供 CPU 读取;

定时器模块为驱动器控制模块提供准确的时间;

总线接口模块提供 FPGA 中各个模块之间的通信以及它们和 ARM 之间的通信.

3　软件设计

3.1　系统软件需求

系统软件设计主要考虑并解决以下几个问题:

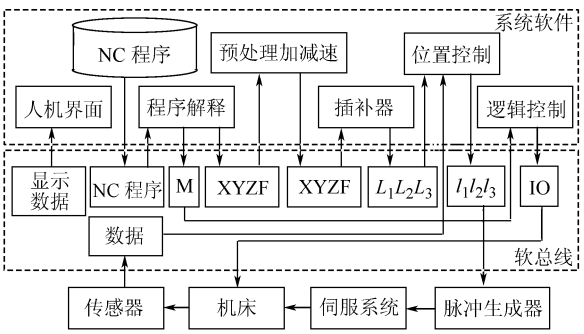
1) 软件模块化. 模块划分易于实现数控系统的集成化和标准化,根据不同的功能需求将基本模块,如译码、刀补、插补等模块,作为标准的系列化产品,通过积木方式进行功能裁减和模块数量的增减,构成不同档次的数控系统.

2) 体系结构开放化. 该数控系统应该允许模块的增减和置换,另外随着硬件和软件的变化,系统很容易地移植到别的硬件和软件平台上. 它是系统模块化的基础,也是实现系统集成、扩展、裁减的基础.

3) 实时性的保证. 数控系统是个实时多任务系统,本文采用 μc/os-Ⅱ实时操作系统作为系统的软件平台,在此基础上搭建数控系统. μc/os-Ⅱ采用基于优先级抢占调度算法,优先级算法采用查找表法,切换速度快;可以处理和调度最多 64 个任务,任务的优先级可以动态调整.

3.2　系统软件设计

根据以上的需求,设计的软件结构如图 3 所示. 它是个开放的体系,具有可置换和可裁减的功能,只要模块的接口相同,功能相同的模块可以相互置换,同时它可以根据系统的需要增减相应的功能模块.



L_1—X 轴移动距离;L_2—Y 轴移动距离;L_3—Z 轴移动距离;l_1—X 轴设置点;l_2—Y 轴设置点;l_3—Z 轴设置点.

图 3　系统软件结构

系统软件分为以下几个部分:人机界面、程序解释、预处理/加减速、位置控制、逻辑控制和传感器. 人机界面主要完成数控代码编辑,数控文件的管理,设置加工过程中的相关参数、设置刀具参数,提供系统诊断功能,为操作过程提供帮助. 采用视图和数据分离的原则进行设计,主要是为了满足不同客户对不同操作界面的需要,这样可以在只改变视图的情况下,提供不同的操作界面;程序解释主要完成数控代码的编译;预处理/加减速主要完成刀具补偿和前加减速处理;插补器主要把给定的运动轨迹按照一定的周期插补为若干个轮廓步长,使用机床结构的逆解将轮廓步长分解为各坐标轴的伺服周期进给量;位置控制把插补得到的各轴移动量给定值与通过传感器检测到的位置实际值进行比较,确定位置偏差,根据控制算法,把计算值发送到脉冲生成器;逻辑处理主要负责实现机床的离散控制逻辑,实现的逻辑任务有主轴、换刀等等;同时还负责从机床内置传感器和变换器中采集数据,根据采集的信息进行逻辑操作和变换.

由于数控系统是个实时多任务系统,为保证各个任务的协调执行,本文采用 μc/os-Ⅱ实时操作系统作为软件平台,由它完成系统的调度和任务的管理. 该实时系统的调度器采用基于优先级抢占调度算法. 数控系统中每个模块对应着系统中的一个周期性任务,每个任务都有一个优先级. 本文把周期相同优先级相同的模块归为同一个任务. 所以总共有 5 个任务:人机界面、数据处理(程序解释和预处理及加减速)、插补、位置控制和传感器、逻辑处理等任务. 位置伺服的优先级最高,周期为 4 ms;插补的任务优先级次之,周期为 8 ms,逻辑处理任务的优先级再次之,周期为 12 ms;数据处理(程序解释、预处理、加减速控制)的优先级再次之,周期为 16 ms,人机界面的优先级最低,周期为 40 ms..

软总线为模块之间通讯提供一个透明机制,并对外提供一致性接口规范,使每个模块可以做到即插即用,无缝结合地连接在总线上. 总线由数据传输层和控制层组成,数据传输层被用来进行模块之间数据传输,它是模块通信的基础. 控制层主要提供任务的协调和同步机制. 软总线的构造采用文献[6,7]所采用的方法.

4　关键技术

4.1　循环队列与中断的使用

机床的轨迹由 ARM 和 FPGA 共同完成. ARM 负责轨迹的细化,完成机床的粗插补功能,FPGA 负责控制脉冲的生成,完成机床的细插补功能. 由于 ARM 和 FPGA 的运算速度不同,有可能 FPGA 的数据处理完毕之后,ARM 尚未完成轨迹的细化工作,导致电机运动的间隙,速度不均匀,刀具运动的不连贯,工件表面不均匀,所以在 FPGA 中采

用缓冲机制-循环队列,即当FPGA在按照CPU给定的数据发送脉冲的时候,CPU可以向FPGA写入下一次要发送的脉冲的数据.这样可能引起另一个问题的出现,当ARM已发出控制指令,而FPGA缓冲区已满,造成数据的丢失;或者是ARM已发出控制指令,而FPGA仍然处理前面的数据,造成电机动作的滞后,如在进行手动和手轮操作时,其动作已经停止而机床仍在运行,所以本文采用中断作为FPGA和ARM的握手信号.当FPGA缓冲区只有一个数据时,向ARM发出中断请求,ARM接到中断请求信号,启动轨迹插补发送运动指令;当缓冲区满时ARM阻塞轨迹插补任务并停止运动指令的发送.采用缓冲区和中断机制有效地避免了数据的不足,提高了系统的实时性.

4.2 螺纹加工

螺纹加工是数控车床的一项基本加工功能.螺纹的切削速度是主轴速度和螺距的乘积.进行螺纹加工时,有两种测定主轴速度的方法:①假定主轴速度在加工过程中保持不变,只在开始加工螺纹时测定主轴速度;②在每个插补开始时测定主轴速度(采用的是脉冲采样插补).主轴的转速变化很大,所以采用第①种方法加工的螺纹质量差,本文采用后一种方法.由于主轴速度变化,每次插补的进给速度发生变化,螺纹的插补周期为4 ms,经过测算每次的进给速度变化不是很大,所以螺纹切削时的进给速度直接采用测量的主轴速度和螺距的乘积,而不需做加减速处理.

在进行螺纹加工时,每次切削时刀具的起刀点必须相同.本文是这样处理的:首先根据主轴编码器的Z相信号产生一个中断,在中断处理函数内设置标志位,插补任务检测该标志位后,等待一定的时间,这时候循环队列变为空.循环队列空时,插补任务设置一个标志位,再次进入主轴编码器的Z相信号中断的时,把FPGA的内部的定时器进行初始化.这样每次重新加工螺纹时脉冲发送的起始时间与主轴Z相信号中断的时间的差值就是固定的了,因此每次切削时起刀点相同.

5 实验及结果

采用以上方法在μc/os-Ⅱ和ARM上开发出一个数控系统如图4a所示.该数控系统做了切削加工试验和环境适应能力测试以及静电放电抗干扰试验.切削试验的工件如图4b所示,测试的主要目的是测试系统的加工精度以及尺寸的一致性,即重复加工若干零件,零件的尺寸精度依然保持在允许的范围内(在±0.03 mm).由表1可以看出,该系统的切削精度能够满足需求.



a 数控系统 b 加工的工件

图4 数控系统

表1 加工工件的尺寸

尺寸/mm	对比位置			
	1	2	3	4
图纸尺寸	15	20	30	40
实测尺寸	15.025	19.980	29.992	39.985
尺寸差	+0.025	−0.020	−0.008	−0.015

环境适应能力测试主要测试在高温允许和高温储存、恒定湿热的情况下系统的运行情况.本文试验的依据是JB/T 8832-2001机床数控系统通用技术条件中的A5.6.4,A5.6.5,A5.6.6试验条件,试验结果如表2.

表2 环境适应能力测试记录

项目	电压/V	时间/h	温度/℃	结果
高温运行	185~245	25	40	通过
高温储存	220	6	55	通过
恒定湿热	220	48	40	通过

表2表明该系统符合JB/T 8832-2001在高温运行、高温储存和恒定湿热方面的要求.该系统在静电放电抗干扰试验满足3级要求.试验表明该系统运行可靠,可以应用于工业生产实际中.

6 结 论

1)利用软硬件划分的原则,采用"ARM+FPGA"作为系统的硬件平台;

2)给出了系统硬件总体结构和FPGA实现;

3)给出了软件系统的需求,并根据这一需求给出了软件的总体结构;

4)采用循环队列和中断相结合的方法很好的解决了由于不同周期任务执行引起的数据不足,提高了系统的实时性;

5)采用每个采样周期检测主轴转速提高螺纹的加工质量,解决了螺纹加工起刀点的问题.

(下转第480页)