

多轴联动电火花加工数控系统实时技术研究

黄海鹏, 迟关心, 王振龙

(哈尔滨工业大学, 机电工程学院, 哈尔滨 150001, haipengh@sohu.com)

摘要: 为了解决多轴联动电火花加工数控系统在开发过程中实时技术的处理问题, 将 RT-Linux 技术应用于数控系统开发之中. 将数控系统的体系结构宏观上分为实时部分和非实时部分两大部分, 微观上分为用户管理模块、实时控制模块和驱动模块 3 大模块; 构建 3 个模块中所有涉及到实时任务的部分, 包括实时控制模块的构建、驱动模块的构建、用户管理模块和实时控制模块间通信方式的构建、实时控制模块和驱动模块间通信方式的构建; 开发了五轴联动电火花加工数控系统, 并应用于整体式涡轮盘加工实验, 实验表明, 整个系统实时性强、稳定、高效.

关键词: 电火花加工; 数控系统; RT-Linux

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0064-05

Real-time technology of multi-axis EDM-CNC system

HUANG Hai-peng, CHI Guan-xin, WANG Zhen-long

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, haipengh@sohu.com)

Abstract: To deal with the real-time technology in developing a multi-axis EDM-CNC system, RT-Linux was adopted. Based on RT-Linux, the system was macroscopically divided into a time-sharing part and a real-time part, and microscopically into user management module, real-time control module and driving module. All the real-time parts of the three modules were constructed, including the construction of real-time control module, driving module, the communication between user management module and real-time control module, and the communication between real-time control module and driving module. A five-axis EDM-CNC system is developed and then applied to the machining experiment of rimmed turbine blisk. It is concluded that the system is real-time, stable and efficient.

Key words: EDM; CNC; RT-Linux

伴随着电火花加工方法在军事、航空、航天等领域的广泛应用, 多轴联动电火花加工已经成为加工具有复杂几何结构或者难加工材料的零件的主要方法^[1]. 多轴联动电火花加工数控系统必须具有很强的实时性能, 实时性能比较差的系统会频繁的造成放电状态的不稳定, 比如短路和拉弧, 会相应地降低放电效率, 影响加工质量, 甚至毁坏工件或电极^[2-3].

RT-Linux 作为 Linux 的实时性扩展, 支持多

线程操作并具有硬实时性能^[4], 已被应用于许多对实时性能要求非常严格的场合, 如美国 Alabama 大学应用其开发了无人驾驶飞行器, 清华大学应用其开发了 VACS (Virtual Axes Control System) 系统, 华中科技大学、北京航空航天大学和华南理工大学也分别提出了基于 RT-Linux 的开放式软件数控系统模型^[5].

目前, 国内尚无自主开发的多轴联动电火花加工数控系统产品, 国际上也没有应用 RT-Linux 开发出的产品. 将 RT-Linux 技术应用于多轴联动电火花加工数控系统的开发, 能够很好地解决系统在实时技术方面的问题, 提高系统的实时性能, 增强系统的稳定性与可靠性.

收稿日期: 2008-11-04.

基金项目: 国家重点高技术研究发展计划资助项目 (2009AA044201).

作者简介: 黄海鹏 (1981—), 男, 博士研究生;

王振龙 (1963—), 男, 教授, 博士生导师.

1 基于 RT-Linux 的多轴联动电火花加工数控系统体系结构构建

1.1 RT-Linux 简介

RT-Linux 是新墨西哥科技大学的研究成果. 作为 Linux 的硬实时扩展, RT-Linux 修改了 Linux 系统内核工作环境, 实现了对硬件的直接控制, 如图 1 所示. RT-Linux 系统通过在 Linux 内核和硬件之间加入一个 RT-Linux 内核, 使原来处于主控制地位的 Linux 内核成为 RT-Linux 内核的控制对象, 即作为实时内核下的一个随时可被实时进程抢占的优先级最低的进程^[6].

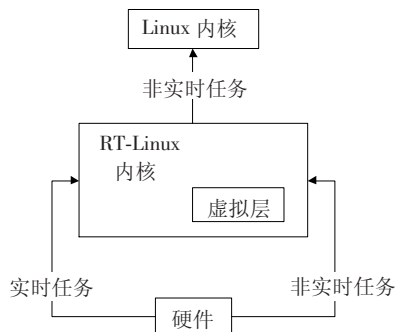


图 1 RT-Linux 内核结构

RT-Linux 内核中引入虚拟层, 实现虚拟中断机制, 分割 Linux 内核与硬件中断之间的直接联系. RT-Linux 内核先于 Linux 内核拦截硬件中断, 这样 Linux 内核就不能真正禁止硬件中断, 亦不能延长实时系统的中断响应时间. 当 RT-Linux 虚拟层收到与实时处理有关的硬中断时, 立即执行相应的实时中断服务程序; 而收到与实时处理无关的中断时, 保存相应的信息, 直到 RT-Linux 内核空闲时通过软中断传递给 Linux 内核处理^[7]. 这就保证了实时任务能在第一时间被系统所响应进而得到处理, 并且不被其他非实时任务所干扰.

1.2 数控系统体系结构

基于 RT-Linux 的多轴联动电火花加工数控系统, 其体系结构宏观上分为两大部分: 实时部分和非实时部分. 实时部分由 RT-Linux 内核控制, 非实时部分由 Linux 内核控制. 体系结构微观上又分为 3 大模块: 用户管理模块, 实时控制模块和驱动模块, 如图 2 所示.

用户管理模块为人机交互提供一致无二性的接口, 以图形用户界面的形式面向用户, 用户可以通过界面上所提供的各个功能模块来完成人机交互; 实时控制模块由对实时性要求比较苛刻的实时任务和各種控制策略所组成, 以软件形式实现了数控控制器的功能, 并实现对数控机床的运动控制; 驱动模块相当于设备驱动层, 由电火花加

工数控机床各种专用硬件 (如伺服控制卡、脉冲电源等) 的驱动程序组成.

系统在运行时, 当用户管理模块发送一个任务命令, 数控系统首先判断这个任务是实时的还是非实时的. 如果该任务是实时任务, 系统将其交与实时控制模块进行处理; 若此任务需要和外部硬件进行交互, 则由实时控制模块与驱动模块进行通信来完成. 如果该任务是非实时的, 系统将其交与 Linux 内核, 由 Linux 内核寻找相应的方式进行处理. 实时任务的优先级大于任何非实时任务.

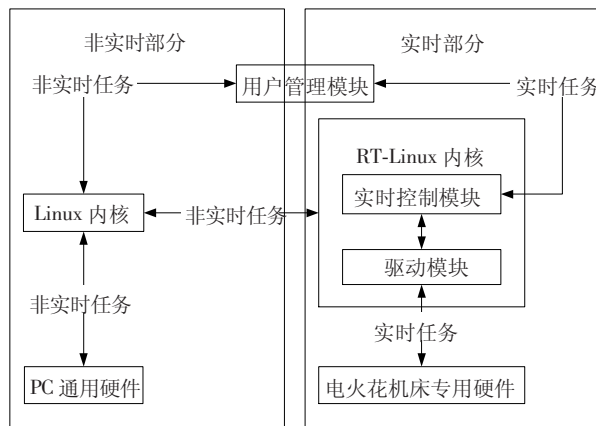


图 2 数控系统体系结构

2 基于 RT-Linux 的多轴联动电火花加工数控系统实时部分构建

数控系统的实时部分包括实时控制模块、驱动模块、用户管理模块与实时控制模块间的实时通信、实时控制模块与驱动模块间的实时通信 4 个部分. 整个数控系统的实时部分构建如图 3 所示.

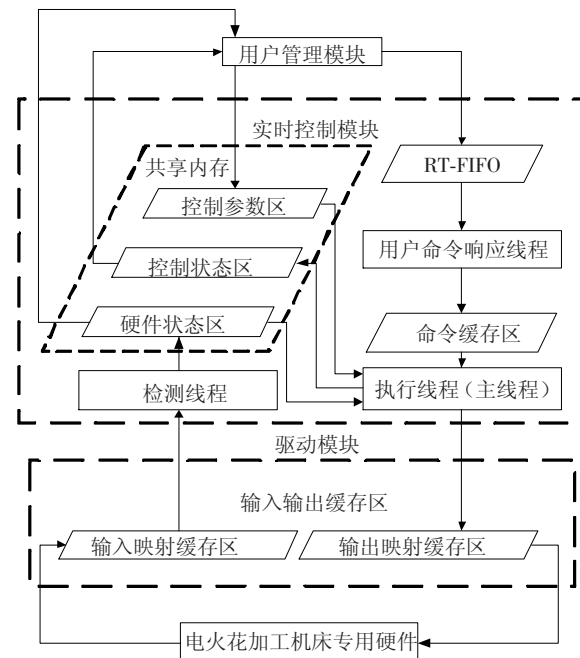


图 3 数控系统实时部分构建

2.1 实时控制模块构建

2.1.1 实时控制模块包含的实时任务

实时控制模块主要包括以下一些对实时性要求比较苛刻的实时任务:用户命令接收任务、命令读取任务、加工任务、原轨迹回退任务、快速移动任务、接触感知任务、极限移动任务、机床回零任务、手控盒处理任务和检测任务。

用户命令接收任务接收用户管理模块向实时控制模块传递的实时任务命令并保存在指定区域;命令读取任务循环读取命令保存区域,判断是否有任务命令到来;加工任务接收用户加工信号,执行数控加工任务;原轨迹回退任务使机床严格按照加工轨迹反方向回退;快速移动任务驱动机床高速运行到用户指定的位置;接触感知任务在指定方向上进行接触感知;极限移动任务驱动机床运行到指定轴的极限位置;机床回零任务驱动机床运行到各轴的机械零点;手控盒任务响应手控盒发出的指令信号;检测任务实时的检测和收集外部硬件通过驱动模块传递给实时控制模块的输入状态。

2.1.2 实时线程数目及优先级

根据实时任务各自的性质和所完成的功能,可将众多任务划分为3类,每类创建一个实时线程作为载体来执行。创建单任务线程用户命令响应线程来执行用户命令接收任务;创建单任务线程检测线程来执行检测任务;创建多任务线程执行线程,即整个实时控制模块的主线程,来执行其它任务。3个线程中,执行线程的优先级最高,检测线程的优先级次之,用户命令响应线程的优先级最低。

2.1.3 执行线程多任务执行逻辑

由于执行线程负责多个实时任务的执行工作,为了保证实时任务命令能够迅速地唤醒相应的实时任务进行工作,并且该任务在工作过程中不受其他任务的干扰,采用循环选择的方式构建多任务的执行逻辑,如图4所示。

执行线程首先执行命令读取任务,如果没有实时任务命令到来,则执行手控盒处理任务,该任务执行完毕后,返回继续执行命令读取任务,循环往复,直到接收到实时任务命令。此时,线程依次判断该命令是否为加工命令、原轨迹回退命令、快速移动命令、接触感知命令、极限移动命令、机床回零命令;如果是其中之一,则执行相应的实时任务,该任务执行完毕后,直接返回开始处重新执行命令读取任务,如果均不是,则视该命令为无效命令,返回开始处重新执行命令读取任务。

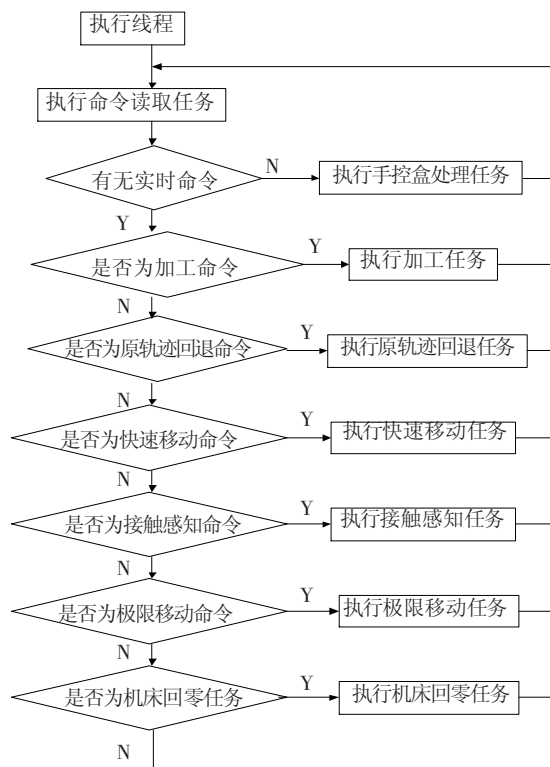


图4 执行线程任务执行逻辑

2.1.4 实时线程间通信方式

3个线程中,用户命令响应线程和执行线程之间,检测线程和执行线程之间,需要进行线程间的通信,以保证用户实时任务命令能够得到及时、准确、稳定、可靠的执行。

用户命令响应线程接与执行线程进行点对点通信,故在内存区间内开辟一个命令缓存区,将命令以链表的数据形式保存在其中。执行线程循环读取命令缓存区,读到命令后便依照命令进行下一步工作,同时将该命令在缓存区中删除。执行完该命令以后,执行线程继续读取命令缓存区,如果缓存区中还有命令存在,则执行这些命令中最早进入缓存区的那个,如果缓存区中没有命令,则进行循环读取等待下一个命令的到来。

检测线程和执行线程之间,采用 RT-Linux 提供的共享内存机制进行线程间通信。共享内存是一块特殊的内存区域,可以被多个线程映射到自身的地址空间,允许多个线程共享,适用于大批量数据传递,效率较高。此外,共享内存不是点对点的通信通道,可以支持多生产者、多消费者的使用模式,能够被多个线程同时访问^[8-9]。检测模块收集到外部硬件的输入状态后,将其以结构体的数据形式保存到共享内存中。执行线程在运行过程中,在需要对外部硬件输入状态进行判断时,便从共享内存中读取状态信息,指导自己进行下一步的工作。

2.2 驱动模块构建

构建驱动模块,实际上就是构建外部硬件的实时驱动方式.驱动模块需要把外部硬件状态信息实时地输入给实时控制模块,比如进给信号、回退信号、抬刀信号、限位状态和热保护状态等;同时还需要把实时控制模块的驱动信息实时地输出给外部硬件,如轴号、运行方向和脉冲信号等.

由于外部硬件都有自己固定的物理内存地址,无论输入还是输出都需要通过该物理内存地址进行传输,故在驱动模块中采用内存映射机制构建硬件实时驱动方式.内存映射机制就是在内存中按照外部硬件物理内存的大小开辟一块缓存区,并将缓存区和外部硬件物理内存建立起一一对应的映射关系,这样对缓存区的输入和输出操作,实际上就相当于对外部硬件物理内存进行直接操作.这就使整个数控系统和外围硬件的交互具有非常强的实时性.

2.3 模块间通信构建

2.3.1 用户管理模块与实时控制模块间的实时通信

用户管理模块与实时控制模块之间的通信分为两类,一类是参数通信,一类是命令通信.其中,参数通信是双向的,用户管理模块向实时控制模块传递控制参数,如高速运行速度、加工速度、抬刀速度和软限位等;实时控制模块向用户管理模块传递状态参数,如运行状态、加工效率、加工进程和外部硬件输入状态等;命令通信是单向的,用户管理模块向实时控制模块传递实时任务命令.

由于参数通信是双向的,故采用上文所提到的共享内存机制来进行通信.共享内存划分为3个区:控制参数区、控制状态区和硬件状态区.用户管理模块直接将控制参数写入控制参数区.实时控制模块中的执行线程在运行过程中,从控制参数区中读取控制参数,指导其执行实时任务,同时将实时控制模块的状态参数写入控制状态区.实时控制模块中的检测线程在运行过程中实时地将外部硬件的输入状态参数保存在硬件状态区.用户管理模块内部的非实时线程定时从控制状态区和硬件状态区读取参数,指导其执行非实时任务.

由于命令通信是单向的,故采用 RT-Linux 提供的 RT_FIFO 机制来进行通信. RT_FIFO 是一种基于先进先出数据结构的字符设备, FIFO 队列中的数据传送采用数据流形式,具备完善的同步机制. RT_FIFO 是一种点对点的单向通信设备,一般用于两个线程之间的通讯^[10].用户管理模块将实时任务命令以数据流的形式输入到 RT_

FIFO 当中,实时控制模块中的用户命令响应线程实时的监测 FIFO 队列,当 FIFO 队列中有命令数据输入时,立刻将数据写入命令缓存区,以供执行线程读取,并同时在 FIFO 队列中将该命令数据删除.

2.3.2 实时控制模块与驱动模块间的实时通信

在驱动模块中,利用内存映射机制开辟一个输入输出缓存区.输入输出缓存区分为两部分:输入映射缓存区和输出映射缓存区.输入映射缓存区是外部硬件物理内存中负责输入的部分在缓存区中的映射位置,输出映射缓存区是外部硬件物理内存中负责输出的部分在缓存区中的映射位置.实时控制模块中的检测线程实时读取输入映射缓存区,即可读取到外部硬件的输入状态,并将其保存在共享内存的硬件状态区,以供其他线程读取.实时控制模块中的执行线程在运行过程中,需要向外部硬件发送驱动信息时,只需实时地将信息输出到输出映射缓存区,即相当于直接驱动了外部硬件.

3 基于 RT-Linux 的多轴联动电火花加工数控系统开发实例

运用 RT-Linux 技术,开发出了五轴联动电火花加工数控系统,并运用该系统在五轴联动电火花加工数控机床上进行了整体式涡轮盘的加工实验.

整个加工过程非常稳定,没有出现拉弧、短路和死机等现象;加工效率较高,在同等条件下,运用日本沙迪克公司生产的 AM65 型电火花加工机床进行加工,完成一个叶片通道的加工需要 90 min 左右,而在本加工中只需要 50 min 左右.图 5 为加工后的涡轮盘叶片.可以看出叶片叶型一致性好,形状清晰,边缘完整,没有积碳现象.表明本系统的控制具有很强的实时性,能够在第一时间根据具体的加工状况进行控制调整.

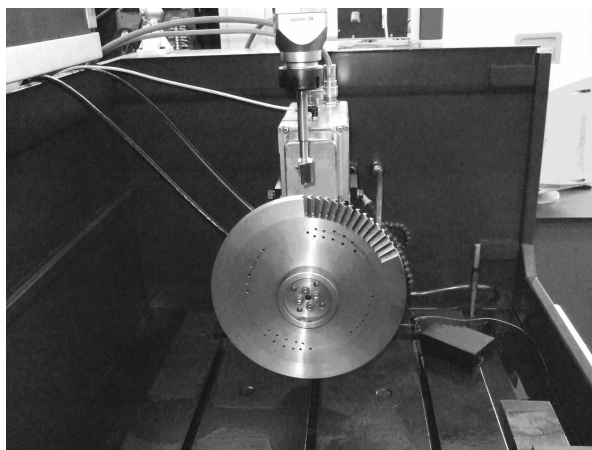


图 5 加工后的涡轮盘叶片

4 结 论

1) 基于 RT-Linux 平台, 多轴联动电火花加工数控系统的体系结构宏观上分为实时部分和非实时部分, 微观上分为用户管理模块, 实时控制模块和驱动模块 3 大模块。

2) 实时控制模块中, 构建执行线程, 检测线程, 用户命令响应线程 3 个实时线程, 优先级依次降低。检测线程中采用循环选择的逻辑方式来执行多个实时任务。检测线程和执行线程之间通过共享内存进行线程间通信, 用户命令响应线程和执行线程之间通过命令缓存区进行线程间通信。

3) 用户管理模块与实时控制模块间, 通过共享内存进行参数通信, 通过 RT - FIFO 进行命令通信。实时控制模块与驱动模块之间, 通过内存映射机制开辟输入输出缓存区进行通信。

4) 五轴联动电火花加工数控机床上进行的整体式涡轮盘实验表明, 系统具有实时性强, 稳定性好和加工效率高等特点。

参考文献:

[1] 李论. 基于实时 Linux 的六轴联动电火花加工数控系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

- [2] HO K H, NEWMAN S T. State of the art electrical discharge machining (EDM) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(2): 1287 - 1300.
- [3] HOUSE S, NIEHAUS D. KURT-Linux support for synchronous fine-grained distributed computations [C]//The 6th IEEE Real Time Technology and Applications Symposium. Washington DC: IEEE, 2000: 23 - 25.
- [4] FSMLabs Inc. RT-Linux case studies, 2004 - 05 - 01. http://www.fsmlabs.com/case_studies/cases.html.
- [5] ZHENG Jun-min. Open EDMCNC system based on RT-Linux[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(8): 1179 - 1184.
- [6] 卞玉萍, 康宇. RT-Linux 的原理分析及其应用研究[J]. 福建电脑, 2008, 6(2): 104 - 105.
- [7] 王永青, 刘晓梅. RT-Linux 在开放式数控系统中的应用[J]. 机床与液压, 2006, 10(3): 70 - 73.
- [8] 陈莉君. Linux 操作系统内核分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000: 318 - 319.
- [9] 赵敏哲. 64 位 Linux 操作系统与应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 68 - 71.
- [10] TERRASA A. A Flexible Hard Real-time Environment [J]. Real-time System, 2002, 22(3): 151 - 173.

(编辑 杨 波)

(上接第 63 页)

- [2] NEWMAN D J, SCHMIDT P B, RAHN D, *et al.* Modeling the Extravehicular Mobility Unit (EMU) Space Suit: Physiological Implications for Extravehicular Activity (EVA) [C]//SAE Technical Paper. 30th International Conference on Environmental Systems. Toulouse: [s. n.], 2000: 1 - 9.
- [3] REINHARDT. Results and applications of a space suit range-of-motion study[C]//19th Intersociety Conference on Environmental Systems. San Diego: [s. n.], 1989: 1 - 13.
- [4] SCHMIDT P. An Investigation of Space Suit Mobility with Applications to EVA Operations[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [5] WANG H, GAO X H, JIN M H, *et al.* A passive robot system for measuring spacesuit Joint damping parameters [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei, China: [s. n.], 2003: 3249 - 3253.
- [6] WANG Hao, GAO Xiao-hui, JIN Ming-he, *et al.* Research on Robot Measuring System for Spacesuit Joint

Mobility[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 13(05): 626 - 631.

- [7] DU Li-bin, GAO Xiao-hui, WANG Hao, *et al.* A 3D digitizing measurement system based on novel passive robot [C]//Europe-Asia Symposium on advanced Engineering Design and manufacture for globalisation. Xi'an, China: [s. n.], 2004: 569 - 576.
- [8] COVER T M, HART P E. Nearest neighbor pattern classification [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, 13: 21 - 27.
- [9] YANG Y, LIU X. A re-examination of test categorization methods [C]//Proceeding of 22nd Annual International ASCMSIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. Berkeley: [s. n.], 1999: 42 - 49.
- [10] 高志强. 舱外航天服手臂关节阻尼力矩测试[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(编辑 杨 波)