

RTEX 网络型嵌入式运动控制器设计

林世瑶*, 吴重阳, 李瑞峰

(机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150001)

(*通信作者电子邮箱 suiyingdeson@gmail.com)

摘要:针对松下 A5N 驱动器, 采用嵌入式构架以及网络通信模式, 提出了基于模块化控制核心 (ARM + FPGA) 适应新型实时性网络通信 RTEX 的多轴嵌入式运动控制器硬件平台的设计方案, 并移入实时多任务操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 。详述了控制器的功能设计、硬件设计和软件设计流程。截至目前, 运动控制器硬件平台搭建均已完成, 并进行了通信实验和基于 SCARA 机器人平台的速度、位置控制实验。结果表明, 控制器通信良好, 性能稳定, 能够较好完成伺服控制功能。

关键词:工业机器人; 嵌入式运动控制器; ARM; 现场可编程逻辑门阵列; RTEX

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A

Embedded motion controller design based on RTEX network

LIN Shiyao*, WU Chongyang, LI Ruifeng

(State Key Laboratory of Robotics and System (Harbin Institute of Technology), Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Adopting embedded framework and network communication mode, a kind of multi-axis embedded motion controller hardware platform design for Panasonic A5N drive was proposed, which was based on the modular control core (ARM + FPGA) and could adapt to the new real-time network communication named RTEX. It was transplanted in $\mu\text{C}/\text{OS-II}$. The processes of controller's functional design, hardware design and software design were explained in detail. Up to now, the motion controller's hardware platform had been completed and verified by communication experiments and position and velocity control experiments based on SCARA robot. The experimental results show that the controller has good communication function and stable performance, and can well accomplish the functions of servo control.

Key words: industrial robot; embedded motion controller; ARM; Field Programmable Gate Array (FPGA); RTEX

0 引言

工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的重要现代制造业自动化装备^[1]。工业机器人运动控制系统是工业机器人领域的技术关键和研究热点, 而运动控制器作为工业机器人运动控制的核心, 相当于工业机器人的大脑, 是最基本、最重要的一环^[2]。

目前机器人控制器主要有“PC/IPC + 运动控制卡”和嵌入式运动控制器两种模式。其中, “PC/IPC + 运动控制卡”模式的运动控制器技术成熟, 因其丰富的控制功能、良好的通用性以及易于开发等特点, 使用较为普遍。但随着工业控制要求越来越高, “PC/IPC + 运动控制卡”模式因其开放性受限、成本高、实时性差等问题, 往往不能满足要求。而基于嵌入式软硬件技术的机器人运动控制器则是一种具备开放体系结构的运动控制器, 能够提高工业机器人集成度, 降低成本, 在保证可靠、灵活、实时与稳定的同时, 具备良好开放性与人机界面^[3-7], 可以很好地解决“工控机 (IPC) + 运动控制卡”模式的不足。此外, 稳定快速的通信方式, 也是实现高速实时控制的必备条件。

本文采用嵌入式构架, 选择具有高度实时性、稳定性的新型网络通信 RTEX, 提出了基于模块化控制核心的网络型嵌入式运动控制器硬件平台设计方案。

1 控制器的功能设计

1.1 网络通信 RTEX

RTEX 是松下公司为实现高度实时性伺服控制而开发的以 100Base-TX 为基础的独立实时通信, 100 Mb/s 全双工, 通信周期最快为 0.083 ms (该模式下可实现最多 5 轴同步控制), 采用环形拓扑结构进行连接, 可实现最大轴数为 32 轴, 如图 1 所示。

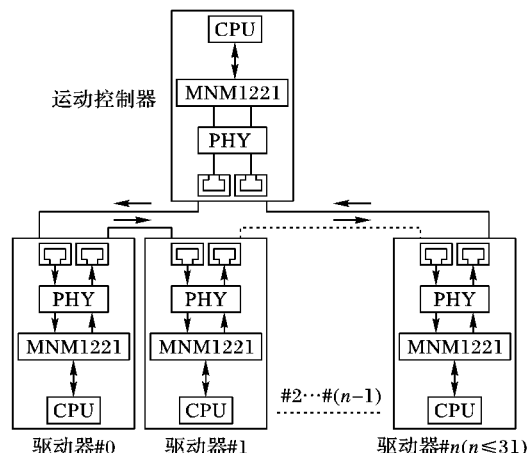


图1 环形拓扑结构

RTEX 通信与数字脉冲式连接相比, 具有运行和响应速度更快、连线更简洁、通信更稳定可靠、高抗噪性等优点。

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2013-06-14。 基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室自主研究课题 (SKLRS201201B)。

作者简介: 林世瑶 (1988 -), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业机器人; 吴重阳 (1976 -), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 主要研究方向: 工业机器人; 李瑞峰 (1965 -), 男, 山西大同人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 工业机器人。

RTEX 与 Ethernet 有相同的物理层,但相比之下,Ethernet 上层负载较大,RTEX 更适合实时伺服,通过高效简化的通信数据包,可以实现高速实时控制,如图2所示。

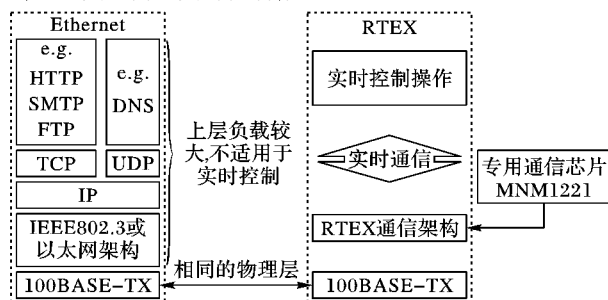


图2 RTEX 通信与 Ethernet 通信对比

1.2 控制器架构设计

结合 A5N 驱动器的接口特性以及控制对象四轴 SCARA 机器人的控制要求,采用基于“ARM + FPGA”的嵌入式处理

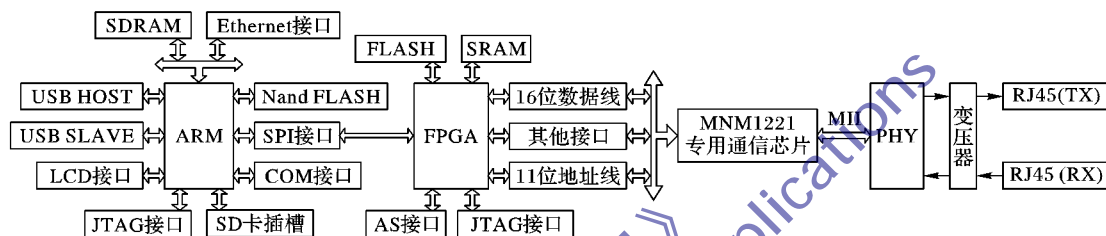


图3 运动控制器整体架构

FPGA 负责底层伺服控制,接收并分析上位机 ARM 的控制指令,然后周期性地输出相应的指令信号到伺服驱动器,并接收驱动器反馈回来的响应信号,构成闭环。SRAM 和 FLASH 作为 FPGA 的外扩存储器,JTAG 接口为在线编程调试接口,AS 接口则为程序烧录端口。

1.3 通信方式

FPGA 与 ARM 之间采用 SPI 串行总线进行通信。SPI 是一种高速全双工同步通信总线,由四根线路构成:MOSI(主设备输出,从设备输入)、MISO(主设备输入,从设备输出)、SCLK(数据传输控制时钟,由主设备产生,主从设备同步使用)、nSS(从设备片选信号,由主设备发出,低电平时从设备使能,一个片选信号对应一个从设备)。ARM 与 FPGA 之间的 SPI 通信连接方式如图4所示。

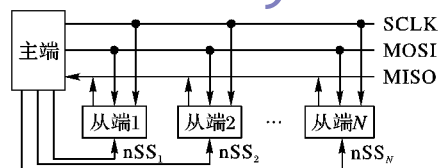


图4 ARM 与 FPGA 之间的 SPI 通信

FPGA 与驱动器之间的通信,采用松下专用通信芯片 MNM1221 实现。该芯片能够基于主从方式的环形拓扑结构,建立实时的通信系统,周期性地交换主模块的指令数据和从模块的响应数据。MNM1221 的发送和接收模块都是双缓存,这一功能可以使 CPU 更加高效地运行。MNM1221 采用 16 位数据总线和 11 位地址总线与上层 CPU(即 FPGA)进行数据的传递,连接方式如图5所示。

2 控制器硬件设计

嵌入式运动控制器的硬件设计主要包括运动控制核心设计和底板设计两部分。

2.1 运动控制器核心

ARM 核心板采用三星 S3C2416 CPU,扩展了存储容量为

器加实时操作系统的方案,利用 ARM 运行速度快、计算精度高、低能耗以及丰富的软硬件资源和 FPGA 内部逻辑在线可重构、设计周期短、逻辑资源丰富等特点^[8-10],以 ARM 作为控制核心,完成人机交互、运动规划、运动学解算等功能,而 FPGA 主要实现接收 ARM 控制指令、高速数据处理和网络通信以及底层伺服运动控制模块等功能。运动控制器整体架构如图3所示。

该运动控制器的设计采用模块化的设计思想,控制核心 ARM 和 FPGA 均采用核心板的方式嵌入到控制器底板上。

ARM 控制核心嵌入了实时操作系统,并连接触摸屏,实现人机交互,可以脱离 PC/IPC 实现对工业机器人的独立控制;此外,运动控制器设计了 USB 口,COM 口以及以太网口等接口,可以连接 PC/IPC 以及远端示教盒等,构成多种控制模式,从而使该运动控制器具有良好的可扩展性、适应性和兼容性。SRAM 用来存储数据,而 FLASH 为程序存储器;JTAG 接口的主要作用是便于程序的下载、调试以及程序代码固化写入。

128 MB Nand Flash 以及 64 MB 的 DDR2 SDRAM。S3C2416 基于 ARM926EJ 内核,16 KB 数据缓存,16 KB 指令缓存,400 MHz 主频,MMU 内存管理单元,Embedded ICE™ 调试单元,以及 64 KB 内嵌 SRAM(8 KB 用作 BOOT 启动)。采用 5 级流水线及增强性乘法器,是高性能、低成本的嵌入式微处理器。

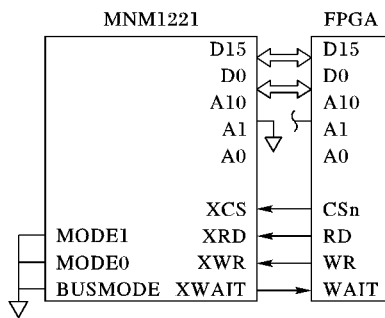


图5 MNM1221 与 FPGA 之间的通信连接

FPGA 核心板使用了 Altera Cyclone III 系列的一款 FPGA 芯片 EP3C10E144C8,采用存储容量为 16 MB 的 FPGA 串行程序配置芯片 EPCS16,并采用芯片 IS61LV51216 扩展了 1 MB 的 SRAM。EP3C10E144C8 具有 10320 个逻辑单元(LEs)、414 KB RAM、2 个 PLL、23 个乘法器,可满足本控制器系统设计要求。

2.2 运动控制器底板

运动控制器的控制核心 ARM 和 FPGA,均采用核心板的方式嵌入到运动控制器底板上,功能上更具灵活性和可扩展性。运动控制器的底板主要完成电源电压的转换和供给,以及实现各种接口和通信功能。运动控制器的底板上主要有:SD 卡插槽、LCD 接口、USB Host 接口、USB Slave 接口、以太网接口、COM 口以及 JTAG 接口和 SPI 引出接口等以及完成通信功能的线路。

根据 A5N 驱动器的特性,完成驱动器配电控制柜制作,结合已有四轴 SCARA 工业机器人,搭建完成运动控制器功能检测和伺服控制算法实验平台,如图6所示。

3 控制器程序设计

嵌入式运动控制器程序设计主要包括两部分:1) ARM 中操作系统移植和程序编写;2) FPGA 中通信和底层伺服控制程序编写。

3.1 ARM 中系统移植及程序编写

控制器中 ARM 控制核心主要完成机器人状态的显示、编辑机器人作业任务、对输入信息进行处理、规划机器人轨迹及插补运算并与运动控制器完成通信。考虑稳定性和实时性的要求,选择嵌入 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 系统。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 系统是一个源代码公开的、完整的、可移植、可固化、可剪裁、具有高稳定性与可靠性的占先式实时多任务操作系统^[11-12]。

首先将 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植到 ARM 微处理器上,然后对操作系统本身进行扩充。主要工作包括:建立文件系统、为外部设备建立驱动程序并规范相应的 API 函数、创建图形用户接口(GUI)函数、建立其他实用的应用程序接口(API)函数等。系统软件分为用户层、应用层、中间层和设备层。用户层实现人机交互、完成任务编辑;应用层完成数据处理、轨迹规划和插补等功能;中间层主要负责控制器系统内部的通信、任务调度和时钟管理等;设备层提供统一的驱动接口供上级组件调用。ARM 中软件架构如图 7 所示。

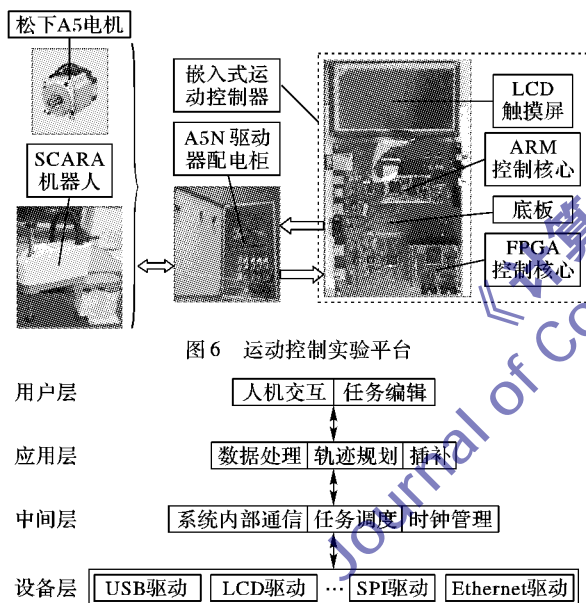


图6 运动控制实验平台

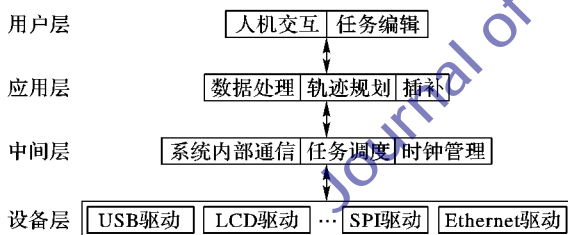


图7 ARM 中的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 系统示意图

3.2 FPGA 中通信和底层伺服控制程序编写

控制器中 FPGA 主要完成的功能包括实现与 ARM 和 A5N 驱动器的通信以及底层伺服控制,选择 NIOS II 进行 FPGA 中程序的编写。NIOS II 的程序编写包括硬件和软件两部分。硬件部分使用 Verilog HDL 语言在 Quartus II 和 SOPC builder 中建立所需功能的 IP 核。而软件部分则是在 NIOS IDE 中用 C 语言实现。

FPGA 中的 IP 核构建属于硬件编程,根据 FPGA 的硬件配置以及其要完成的功能,软核中应包括:处理器 CPU、FLASH、JTAG UART、SRAM、System ID、SPI 从端通信 IP 核、MNM1221 通信 IP 核、两个下降沿触发的输入中断(用于 MNM1221 通信)、一个内部定时中断(用于 FPGA 中伺服控制程序)、一个输入端口(用于检测 LINK 信号)、一个输出端口(用于复位 RESET)以及一个 PLL 提供系统时钟和通信时钟。结构图如图 8 所示。其中 SRAM 和 MNM1221 通信模块需要根据使用 Verilog HDL 语言编写 IP 核,其他模块可以使用 SOPC 提供的库文件进行定制。

C 语言控制程序主要分为四个部分功能模块:INTRX 初始化模块、MNM1221 控制模块、NC 数据处理模块和 SPI 通信模块。INTRX 初始化模块要完成的功能是通信状态的检测,在运行状态正常的情况下完成 MNM1221 中 RX 两个存储模块之间数据交换。MNM1221 控制模块则要实现 MNM1221 通信芯片的控制以及完成通信数据交换。NC 数据处理模块的主要功能就是在周期性运行状态下完成数据处理和控制指令的生成。SPI 通信模块主要实现的功能是接收上位控制器 ARM 的控制指令,如工作模式指令以及周期性的位置和速度值指令等,并将工作状态进行反馈。主要的控制程序流程如图 9 所示。

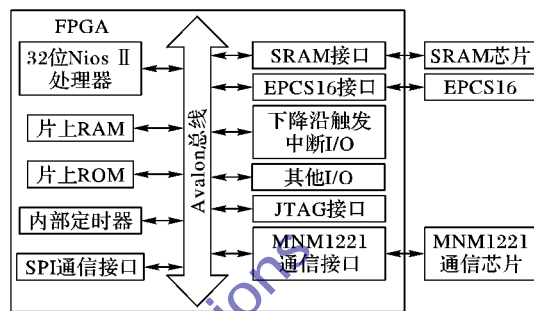


图8 FPGA 软件结构框图

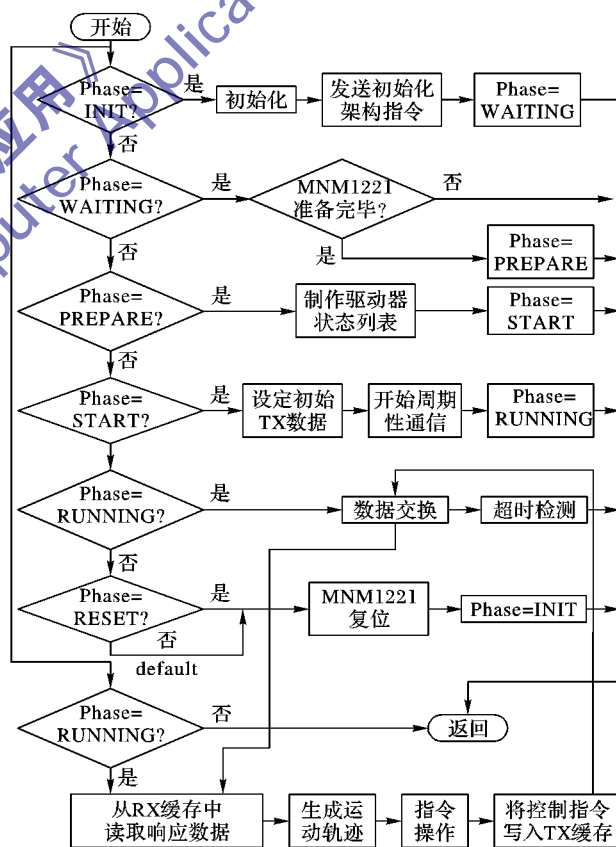


图9 主控程序流程

4 伺服控制实验

通过程序设定控制器的指令更新周期为 1 ms,通信周期为 0.5 ms,使驱动器分别工作在周期性位置模式和速度模式下,使用该控制器对 SCARA 机器人进行定位运动控制和速度控制实验。通过 PANATERM 软件对电机的工作状态进行检测,绘制所测项的波形曲线,从而对控制系统的通信功能和伺服控制性能进行验证和分析。

4.1 速度控制实验

SCARA 机器人一轴采用松下 A5 电机,型号为

MSMD042S1V,属于低惯量小型电机,额定输出容量为 0.4 kW,额定转速为 3000 r/min。相比之下其他三轴,一轴的负载惯量比最大,转速和精度要求高,因此控制难度最大。选定 SCARA 机器人一轴为控制对象,进行速度控制实验。

速度控制模式下,A5N 驱动器内部带有速度检测、滤波环节,以及扰动观测器等,可以对编码器检测信息进行处理,得到电机位置、速度和力矩信息,而后反馈回控制系统。

驱动器中的增益参数可自动调整,主要取决于系统刚度和惯量比。通过估算得出,在其他轴固定不动,二轴与一轴同一直线的情况下,刚度值为 19(可设定的最大值为 32),惯量比为 6。速度控制的输入参数为设定速度值 2000 r/min,加速度值 6 (r/min)/ms。

通过 PANATERM 软件对实际速度、速度控制指令以及转矩指令进行测试,可得到该速度下的波形曲线分别如图 10 所示。

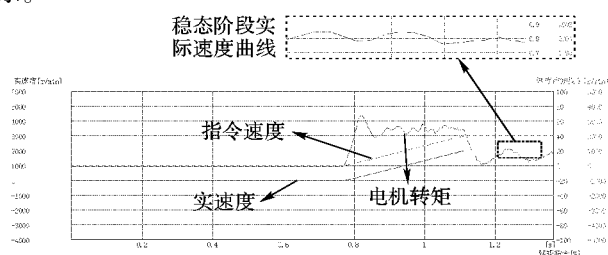


图 10 SCARA 机器人一轴速度控制波形曲线图($V=2000$ r/min)

由以上 SCARA 机器人的一轴速度曲线可以看出,电机按照所设定的加速度进行加速。整个过程中,实际速度对指令速度有较好的跟随性,两曲线吻合度很高。将以上两种转速下,电机达到稳定以后的转速波动情况作以比较后发现,电机的实际转速误差很小且不随转速的增加而变化,精度较高。电机的力矩输出随着电机转速的变化而变化,加速阶段力矩较大,达到预定速度后,力矩有所减小,达到平稳。由于传动环节存在柔性等因素,导致力矩的输出值存在一定范围内的波动,可通过改变增益值或增加滤波环节等加以改善。

4.2 位置控制实验

在周期性位置控制模式下,控制器通过 RTEX 网络通信与驱动器进行连接,然后周期性地发送位置指令到驱动器,从而实现 SCARA 机器人各轴的定位运动控制。

在位置控制模式下,A5N 驱动器内部可实现位置指令的平滑滤波、阻尼控制、位置环控制、速度前馈、速度环 PI 控制、力矩前馈控制、摩擦补偿、陷波滤波、力矩滤波以及电流控制等功能,并带有速度检测、滤波环节,以及扰动观测器,可以对编码器检测信息进行处理,而后反馈回控制系统,构成闭环。

定位运动控制实验中的输入参数为指令脉冲数 1200000,速度为 600 r/min 和 1200 r/min,加、减速度均为 2 (r/min)/ms。上电后,运动控制器通过 RTEX 网络向驱动器发出目标位置指令。

通过 PANATERM 软件进行检测,检测项为转矩指令、实际速度和指令脉冲累计值,得到波形曲线分别如图 11 和 12 所示。

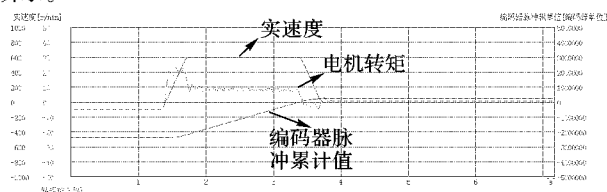


图 11 SCARA 机器人一轴位置控制波形曲线图($V=600$ r/min)

通过以上实验所得的波形曲线可以看出,控制系统较好地实现了 SCARA 机器人一轴的定位控制。通过指令脉冲累

计值可以看出,控制器实现了精确位置控制,且速度输出准确、力矩输出良好。速度按照所设定的加、减速度进行变化,平稳状态速度值波动很小。力矩指令输出则控制系统的整体性能,通过曲线可知,输出力矩在各个转速下的变化及时准确,但由于 SCARA 机器人一轴的减速器为谐波减速器,导致达到稳定转速时力矩输出会出现周期性的波动。通过不同加速度、速度以及位移下的定位控制实验,验证了控制系统在各转速下均具有优良工作性能,精度较高,运动平稳,能够实现高速、高精度的位置控制。

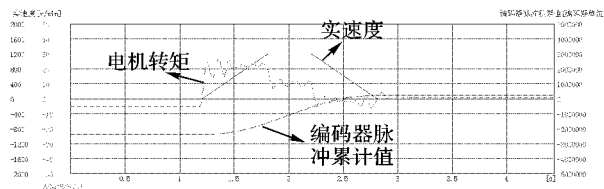


图 12 SCARA 机器人一轴位置控制波形曲线图($V=1200$ r/min)

5 结语

本文详细介绍了基于模块化控制核心(ARM + FPGA)适应新型网络通信 RTEX 的可扩展多轴嵌入式运动控制器硬件平台的设计过程以及控制系统的软件设计。设计中充分利用了 ARM 运行速度快、计算精度高、能耗低以及软硬件资源丰富和 FPGA 内部逻辑的在线可重构性等特点,并移植强实时性的操作系统 $\mu C/OS-II$,不仅降低了控制器的硬件设计成本,也提高了控制器的资源利用率。同时,控制器与驱动器的通信部分采用了具有高度实时性的新型网络通信 RTEX。基于以上的设计思路和配置方案,使控制器具有良好的可靠性和开放性。通过伺服控制实验验证,该控制器具有便捷可靠的通信方式,稳定快速的通信能力和较好的控制能力,能够实现预定伺服控制功能。

参考文献:

- [1] 徐方. 工业机器人产业现状与发展[J]. 机器人技术与应用, 2007(9): 2-4.
- [2] 李莉, 吴星明, 陈伟海. 基于 ARM 和 FPGA 的机器人运动控制器的实现[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(9): 1172-1173.
- [3] 曾毅, 皮佑国. 基于 ARM 和 DSP 的嵌入式运动控制器设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 962-965.
- [4] 万林, 唐厚君, 贺超, 等. 基于 ARM 与 FPGA 的嵌入式开放性运动控制器的设计与开发[J]. 电气自动化, 2011, 33(3): 59-61.
- [5] 罗伟涛, 张铁. 基于 ARM + DSP + FPGA 的机器人运动控制器研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(15): 55-58.
- [6] 曾祥宇, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 模块化机器人嵌入式多核主控制器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12(5): 20-23.
- [7] CHI S C, ZHAO M Y. Designing an embedded motion controller using a 16-bit microprocessor motion chip and ARM[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Clausthal-zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications, 2012, 468: 418-421.
- [8] LAI C K, LIAO C H, HO K L, et al. To develop an embedded controller for stepping motor drive system[C]// Proceedings of the 8th Asian Control Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 971-975.
- [9] LIU C, LIU J, WU J, et al. High precision embedded control of a high acceleration positioning system[M]. Berlin: Springer, 2012: 551-560.
- [10] 熊光泽, 詹瑾瑜. 嵌入式系统软/硬件协同设计技术综述[J]. 计算机应用, 2006, 26(4): 757-760.
- [11] 吴云, 徐建明, 俞立, 等. 嵌入式三轴运动控制系统的以太网通信实现[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(7): 1846-1848.
- [12] 赖晓丰, 刘敬猛, 李善锋. 基于 ARM 和运动控制器的嵌入式数控系统设计[J]. 机床与液压, 2011, 39(6): 86-88.