

关节片上位置伺服系统控制器的实现

倪风雷^{1,2}, 朱映远¹, 金明河¹, 邹继斌²

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150080, 哈尔滨;

2. 哈尔滨工业大学电气工程博士后流动站, 150080, 哈尔滨)

摘要: 提出了一种关节片上位置伺服系统控制器的设计方案, 并在一片可编程逻辑器件(FPGA)中得到了具体验证和实现. 该方案利用FPGA的硬件逻辑单元实现了关节内部所有传感器信息的采集、M/T法测速、电机的脉宽调制和矢量控制, 并在FPGA内嵌入了NIOS II软核处理器和控制器局域网CAN总线控制器, 实现了关节空间的轨迹规划、位置控制以及与控制计算机的CAN总线通讯. 通过SOPC Builder工具实现了硬件逻辑单元和软核控制器的集成. 实验结果表明, 设计的关节片上位置伺服系统可有效地提高关节控制器系统的集成度, 从而减小了电路板的尺寸, 增强了系统的抗干扰能力和关节控制性能.

关键词: 位置伺服系统; 关节; 控制器

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0070-05

Implementation of Joint Servo Controller on-Chip

NI Fenglei^{1,2}, ZHU Yingyuan¹, JIN Minghe¹, ZOU Jibin²

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 2. Electrical Engineering Post-Doctoral Research Station, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A design of joint position servo system controller on-chip is proposed, and a specific verification and implementation are achieved by one field programmable gate array (FPGA). All sensor information collection within the joints, speed detection with M/T method, motor PWM and vector control algorithm are obtained with FPGA hardware logic cells. The joint space trajectory planning, position control, and CAN bus communication with the host computer are obtained with the NIOS II soft-core processor and CAN bus controller, which are embedded in FPGA. The system integration of the logic cell and soft-core processor is achieved by the SOPC Builder tools. Experimental results show that the joint control system integration is improved, the size of the circuit board is reduced, and the anti-jamming capability and joint control performance are enhanced due to the design of the joint position servo system on-chip.

Keywords: position servo system; joint; controller

目前,具有质量轻、能耗小、控制精度高、集成度高、载荷自重比大的空间机器人,已成为机器人领域的重要研究方向之一. 关节内部的永磁同步电机和关节空间的位置伺服,一般采用数字信号处理器(DSP)控制芯片以软件方式^[1]实现,这种方法的优点是灵活,但占用CPU的时间较多,有时为了提高性能则需采用双DSP的方式^[2]. 随着微电子技

术的发展,采用可编程逻辑器件(FPGA)控制电机逐渐成为主流,由于它以纯硬件的方式进行处理,不占用CPU的资源,因此可以使系统达到很高的性能,并已成功应用在高性能的交流驱动控制器上. 例如,文献[3-4]采用FPGA设计了高性能的速度伺服控制器, Takahashi 利用FPGA提高了电流环的带宽^[5],其他一些学者也提出了基于FPGA的运动

控制方案。这些设计方案都获得了较高的控制性能,并有一个共同的特点,即仅用 FPGA 实现了电流控制器或速度控制器,而位置控制算法则由 DSP 主机来实现,同时没有将 FPGA 作为控制器延伸到机器人领域中。文献[6]利用 FPGA 实现了小型机器人的闭环控制系统,但它只实现了双通道或多通道的比例积分微分(PID)算法,没有构成完整的控制器。文献[7]基于 FPGA 建立了一个新的机器人控制器结构,但它没有实现电机的矢量控制,而且轨迹规划仍然由 DSP 产生。

本文以机器人关节为控制对象,针对表贴式永磁同步电机,利用FPGA实现了关节位置伺服控制的片上系统,不仅实现了电机电流的矢量控制,而且还实现了关节空间的轨迹规划、位置控制及与主控制计算机的控制器局域网络(CAN)总线通讯接口,从而提高了关节控制器系统的集成度.

1 关节伺服系统总体结构

由于机械臂的质量、体积和功耗的限制,每个关节均采用永磁同步电机加谐波减速器的结构. 电机为永磁同步电机、分体式结构,谐波减速器采用 Harmonic Drive 公司的产品. 为了便于关节系统走线,防止线缆缠绕,电机和谐波减速器具有大的中心孔,关节设计采用了机电一体化的设计理念,即关节的机械结构设计、电气系统设计以及感知系统设计需以交互、优化的方式并行进行. 关节的驱动控制系统由 FPGA 控制板、电机驱动板、电源板、传感器信号调理电路板以及接口电路板等组成,关节内的感知系统由温度传感器、关节位置传感器、关节力矩传感器、电机位置传感器、电机电流传感器等组成.

2 关节片上系统的实现

2.1 关节片上系统

如图 1 所示,关节片上系统是指采用一片 FPGA 芯片来实现关节内部所有传感器信息的采集,对电机的驱动、电机矢量控制、关节空间的轨迹规划、位置控制,以及与主控计算机的 CAN 总线通讯等控制器参数进行在线调整.利用 SOPC Builder 工具将 NIOS II 软核处理器、CAN 总线控制器以及编制的电机驱动接口、传感器信息采集接口等电路进行系统集成.

NIOS II 软核微处理器通过 Avalon 总线,实现与用户定制模块、CAN 总线 IP 核的信息交换,该处理器采用 C 语言编程,实现了关节空间的轨迹规

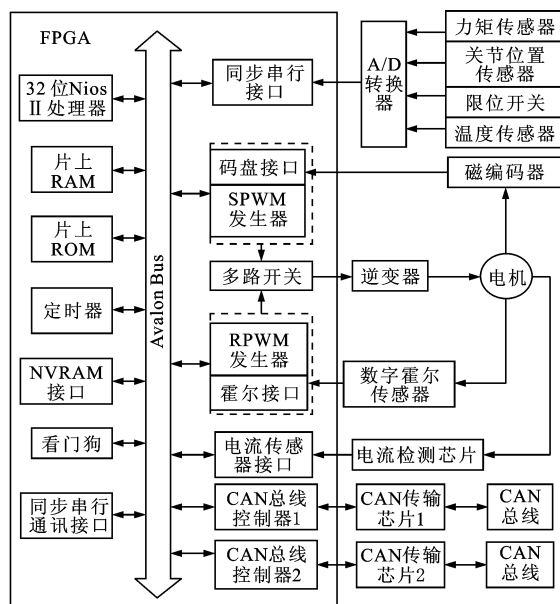
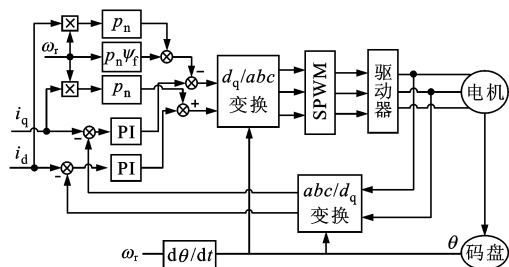


图 1 FPGA 软件结构框图

划、位置伺服控制以及 CAN 总线通讯协议及控制参数的在线调整. 编制的硬件接口电路, 如电机驱动接口电路、传感器采集接口电路、电机电流矢量控制电路等, 均采用 VHDL 语言实现.

2.2 磁场定向矢量控制的实现

如图 2 所示,机械臂关节采用表贴式永磁同步电机、磁场定向的矢量控制策略,为了消除反电动势对电流环性能的影响,采用前馈的方式进行补偿,用模块化的设计思想设计了电机电流采样、正弦脉宽调制(SPWM)产生模块,矢量坐标变换模块,码盘信息四倍频和 M/T 法测速模块,比例积分(PID)调节器模块,来实现电机的矢量控制。



θ : 电机转子的角度; ω_r : 电机转子的角速度; Ψ_l : 永磁体在绕组中产生的磁链; p_n : 电机极对数; i_q, i_d : 电机交、直轴参考电流; abc : 三相静止坐标系; d_{α} : 旋转坐标系

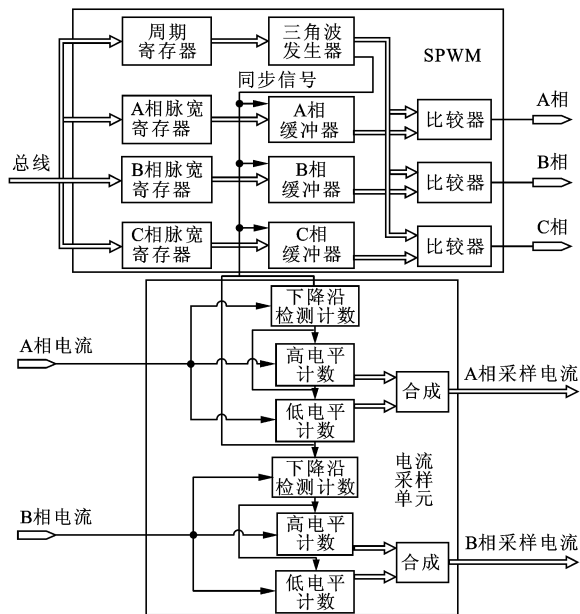
图 2 磁场定向矢量控制系统框图

2.2.1 电机电流采样、SPWM 生成模块设计 采用 IR 公司的电流检测芯片 IR2175 设计了电机相电流采样电路. IR2175 将采样电阻上的相电流信息,以脉宽调制(PWM)方式送给 FPGA 控制器,脉

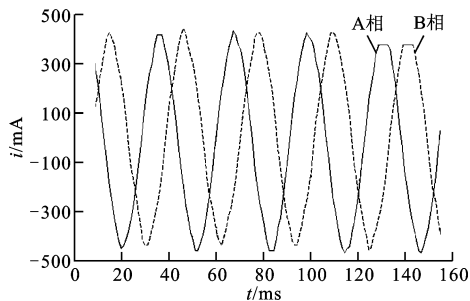
冲的宽度代表实际电流值. 为了克服电流采样时刻造成的误差, 本文设计了一个简单而有效的方法, 如图3所示, 即将SPWM模块和电流采样模块放在一个结构体中进行同步设计. 在实际关节伺服系统中, SPWM的信号频率为20 kHz, 而IR2175的载波信号频率为130 kHz左右. 在每次产生PWM信号时, 生成一个同步信号来控制电流的采集, 在同步信号之后, 当IR2175输出的第2个和第3个脉冲的上升沿到来时, 进行电流信号采集, 将2次采集的结果求平均值作为实际电流值, 以用于电流闭环控制.

2.2.2 矢量坐标变换模块的设计 矢量坐标变换包括由三相静止坐标系 abc 到旋转坐标系 d_q 的正变换和 d_q 到 abc 的反变换, 其中正变换时

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} i_a \cos\theta + 2^{1/2} (\sin\theta) (i_a + 2i_b)/2 \\ i_q &= -\left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} i_a \sin\theta + 2^{1/2} (\cos\theta) (i_a + 2i_b)/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



(a) 电流采样模块的电路结构



(b) 实际采集的电流波形

图3 电流采样模块及采集波形

由于式(1)中存在着以下的关系

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} \approx \frac{627}{512}; \quad 2^{1/2} \approx \frac{181}{128}$$

$$\sin\theta = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), \quad \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

因此, 在实现矢量坐标变换时只需利用存储的正弦表信息, 采用加法、乘法和移位操作即可实现, 坐标变换如图4所示.

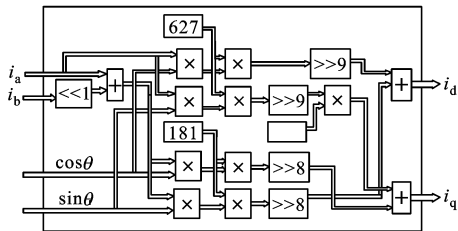
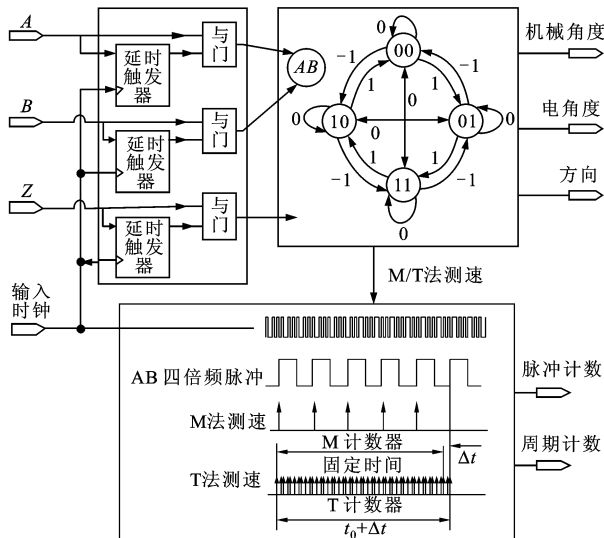


图4 坐标变换模块框图

2.2.3 电机位置检测和速度生成模块设计 采用数字霍尔和分辨率为1 200 每转脉冲数的磁式编码器测量电机的位置信息. 在上电复位的时候, 由数字霍尔传感器粗略检测电机的初始位置进行软启动, 当码盘Z脉冲出现后转为由磁式编码器提供电机的位置信息. 位置计数器按码盘正交信号A、B的四倍频进行计数, 同时提供了用以实现电机矢量控制的电角度信息计数器, 以及用于实现关节空间位置控制的机械角度信息计数器. 实现电路的主要构成部分为: ①为克服信号受到干扰而采用的滤波单元; ②利用A、B信号状态构成的四倍频单元和M/T法测速单元. 实现这部分电路的结构框图如图5所示.



A、B、Z: 分别为码盘输入信号的正交四倍频及清零脉冲

图5 电机位置信息处理框图

2.2.4 PI 调节器模块设计 电流环采用 PI 调节器进行调整,为防止积分饱和,对积分调节器进行抑制,实现 PI 调节器的硬件电路如图 6 所示. PI 调节器模块的具体设计参阅文献[8].

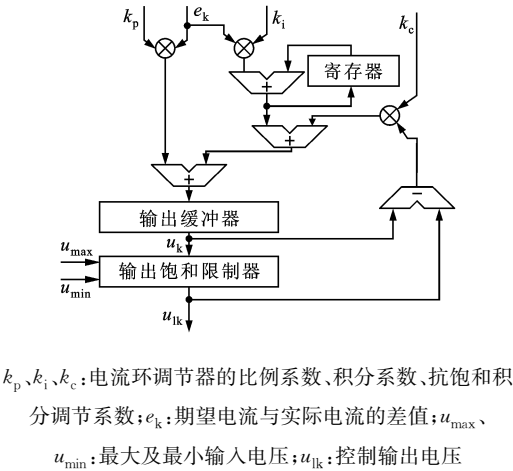


图 6 PI 调节器的实现框图

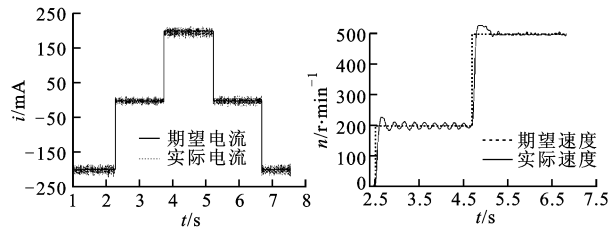
2.3 关节控制器的设计

由多个关节组成的机械臂是采用分布式控制策略、上位机来实现机械臂的运动学规划和动力学计算的. 将规划和计算的信息每隔 250 ms 发送给关节控制器,由关节控制器来实现关节空间的位置伺服控制和输入期望角度信息的细分. CAN 总线通讯协议的实现、期望角度的细分以及关节的位置伺服控制,均在 NIOS II 软核处理器中实现.

3 实 验

3.1 关节电机控制实验

将电流环、速度环的性能进行独立测试, i_q 在 $-200\sim200$ mA 之间变化,测试电流环的性能,得到的电流闭环跟踪曲线如图 7a 所示,其动态响应时间小于 1 ms,最大超调量为 10%. 图 7b 为转速指令,是 $0\sim200$ r/min 和 $200\sim500$ r/min 阶跃输入的动态响应曲线,最大超调量为 1.2%,稳态误差低于 0.5%.

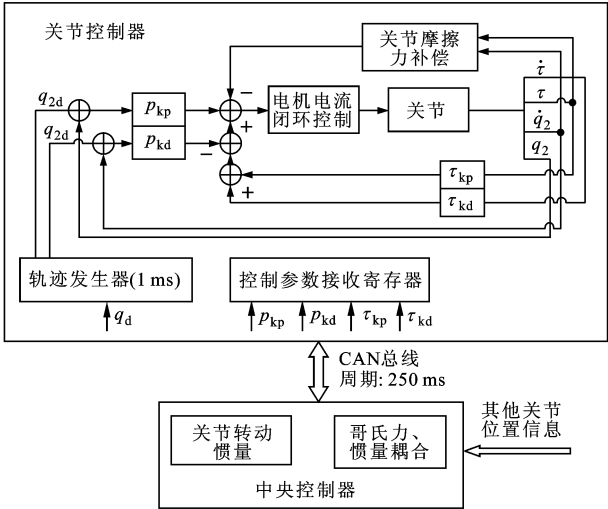


(a) 电流跟踪曲线 (b) 速度跟踪曲线

图 7 电机控制特性曲线

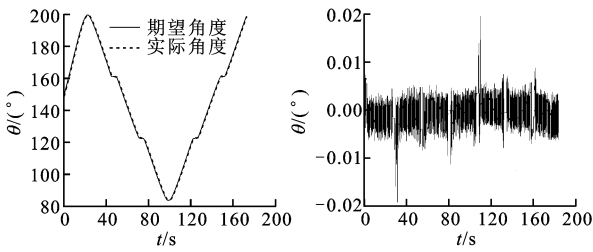
3.2 关节控制实验

为了抑制谐波减速器带来的柔性影响,关节控制采用四阶状态反馈控制器,电流环作为关节控制器的内环,外环由关节力矩传感器、微分信息和电机位置传感器以及微分信息并联构成,控制结构如图 8 所示. 从图 9 中可以看出关节的定位精度优于 0.01° ,并且通过控制参数的调整,可以实现关节空间的阻抗控制和力控制.



$q_2, \dot{q}_2, \tau, \dot{\tau}$: 分别为电机角度、电机角速度、关节力矩、力矩微分信息; p_{kp}, p_{kd} : 分别为位置控制器调节参数; τ_{kp}, τ_{kd} : 分别为力矩控制器调节参数; q_d : 中央控制器 250 ms 发送的期望关节角度信息; $q_{2d}, \dot{q}_{2d}$: 分别为关节内部轨迹规划器产生的期望角度和角速度信息

图 8 关节控制结构框图



(a) θ 跟踪曲线 (b) θ 误差曲线

图 9 关节位置控制曲线

4 结 论

本文设计的关节片上伺服系统控制器,不仅实现了关节内部所有传感器信息的采集,以及电机速度的测量、SPWM 调制和电流闭环矢量控制,而且还实现了关节空间的轨迹规划和位置控制. 通过在 FPGA 内部嵌入 32 位的 NIOS II 软核处理器和

CAN 总线控制器,提高了关节控制器系统的集成度,减小了电路板的尺寸,增强了系统的抗干扰能力和关节控制性能,实现了真正意义上的片上系统.

参考文献:

- [1] 王宏,于泳,徐殿国. 永磁同步电机位置伺服系统 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 151-155.
WANG Hong, YU Yong, XU Dianguo. The position servo system of PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 151-155.
- [2] TZOU Yingyu, TSAI Mingfa, LIN Y F, et al. Dual DSP based fully digital control of an AC induction motor [C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1996: 673-678.
- [3] 周兆勇,李铁才,高桥敏男. 基于矢量控制的高性能交流电机速度伺服控制器的 FPGA 实现 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 168-173.
ZHOU Zhaoyong, LI Tiecai, TOSHIO T. FPGA implementation of the high-performance vector-controlled speed servo controller for AC drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 168-173.
- [4] TZOU Y Y, KUO T S. Design and implementation of an FPGA-based motor control IC for permanent magnet AC servo motors [C] // The 23rd International Con-

ference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1997: 943-947.

- [5] TAKAHASHI T, GOETZ J. Implementation of complete AC servo control in a low cost FPGA and subsequent ASSP conversion [C] // The 19th Ann IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2004: 565-570.
- [6] ZHAO Wei, BYUNG H K, LARSON A C, et al. FPGA implementation of closed-loop control system for small-scale robot [C] // Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2005: 70-77.
- [7] SHAO Xiaoyin, SUN Dong. An FPGA based motion control IC and its application to robotic manipulators [C] // 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-6.
- [8] SAMET L, MASMOUDI N, KHAARRAT M W, et al. A digital PID controller for real time and multi loop control: a comparative study [C] // Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1998: 291-296.

(编辑 管咏梅)