

基于 FPGA 的刚体调姿系统逻辑控制器开发

何丹青, 李江雄*

(浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决大部件刚体调姿系统中各数控设备驱动电路的可靠性、各辅助工装设备的稳定性、系统的容差保护与报错等问题, 设计并开发了基于现场可编程门阵列(FPGA)的逻辑控制器。重点从处理器模块、I/O 模块、电源模块等方面对逻辑控制器进行了硬件结构设计, 同时给出了基于硬件描述语言(VHDL)的软件实现方法。应用实践结果表明, 该逻辑控制器可靠性高, 维护方便, 有很强的可扩展性, 适用于逻辑关系复杂的数字电控系统。

关键词:调姿系统; 逻辑控制器; 现场可编程门阵列; 硬件描述语言

中图分类号: TN431.2; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)04-0453-04

Development of FPGA-based logic controller for a kind of posture aligning system of rigid bodies

HE Dan-qing, LI Jiang-xiong

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of logic controlling in large components posture alignment system, such as the reliability of drive circuit, the stability of hydraulic and pneumatic, the error handling of the system, the logic controller based on field programmable gate array (FPGA) was designed and realized. The configuration design of the controller's hardware including processor module, input-and-output module, power module was focused on. Meanwhile, logical control programming was also realized using VHSIC hardware description language (VHDL). The application result shows that the logic controller is reliable, easy to maintain, suitable for digital electronic control system of complex logical relationship.

Key words: posture alignment system; logic controller; field programmable gate array(FPGA); VHSIC hardware description language(VHDL)

0 引言

刚体数字化调姿对接技术是国内外飞机装配的发展趋势, 刚体部件的位姿调整精度直接决定了飞机的装配质量。为此, 笔者实验室研制并开发出了基于三坐标数控定位器的数字化调姿对接系统, 并对其中的若干关键问题进行了深入研究。由于刚体部件尺寸大、形状复杂, 因而数控定位器上设计了很多辅助工装设备用于装夹刚体部件, 它们相互之间存在着一定的工艺与逻辑关系。系统中各数控设备驱动电路的可靠性、各辅助工装设备液压气动的稳定性、系统的容差保

护与报错功能等, 都通过逻辑控制保护电路来实现, 它们对系统的可靠性起决定性的作用。传统逻辑控制保护电路多用 PLC 控制系统, 其体系复杂、占用空间大、维修不便、价格昂贵, 不能满足数字化调姿系统在空间、可靠性和性价比等方面的要求。

本研究针对某刚体数字化调姿对接系统, 开发出一套小型具有极强适应性和拓展性的逻辑控制器。该控制器以 FPGA(现场可编程门阵列)为处理器, 通过配置不同外围电路实现对多个设备的复杂逻辑控制。该逻辑控制器可靠性高、结构简单、编程简单、灵活性强、易于维护检修。

1 调姿系统的逻辑控制需求

刚体调姿系统(如图 1 所示)中配备的工装有 15 个三坐标数控定位器、3 个大型移动平台、5 个柔性工装、5 个柔性托架和 2 个移动夹紧装置。该系统需要逻辑控制的机构及其任务有:各数控定位器的 Z 轴导轨锁紧机构、X/Y/Z 轴球头锁紧机构;各移动平台的 1 个导轨锁紧机构;各柔性托架的 1 个液压锁紧机构、1 个气动升降机构和 1 个真空吸附机构;各柔性工装的 1 个液压锁紧机构、6 个气动伸缩机构和 6 个真空吸附机构;各移动夹紧装置的 1 个液压锁紧机构、2 个压紧缸气动机构和 1 个底座锁紧启动机构。主要的功能有:液压系统中,液压泵站压力调节及液路压力的实时监控与补偿;气动系统中,气缸托持力的检测与报警;各驱动电路之间为防止各工装设备之间碰撞冲突的监测与保护。这些任务与功能主要通过逻辑控制器控制大量的接触器、继电器、液压阀、气阀、真空阀、气泵来实现。

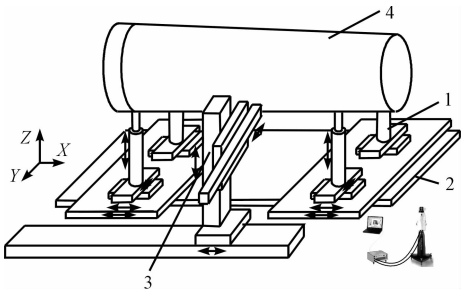


图 1 刚体调姿系统局部示意图

1—三坐标数控定位器;2—大型移动平台;3—移动夹紧装置;4—刚体

该系统的逻辑控制不仅要使受控设备按预定工艺进行作业,而且必须保证受控设备安全运行,并且需要考虑到异常情况时的处理措施,确保该系统安全生产,避免人身伤害及设备损坏事故。本研究开发出一套基于 FPGA 的逻辑控制器,完全快速、安全地实现上述逻辑控制任务。

2 刚体调姿系统控制结构

常用的控制系统中可以用 1 台 PC 机为主站,多台 PLC 为从站;也可以用 1 台 PLC 为主站,多台 PLC 为从站,组成 DCS(分散控制系统)的结构^[1-2]。此外,SIEMENS SIMOTION 将运动控制、逻辑控制及工艺控制功能集成于一体,为生产机械提供了完整的解决方案。

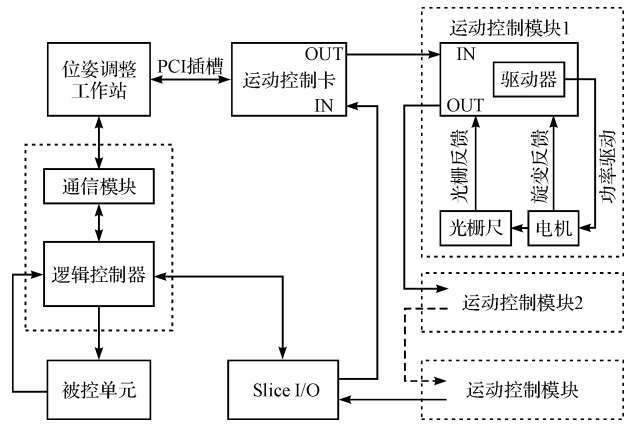


图 2 刚体调姿系统控制结构图

基于三坐标数控定位器的数字化调姿对接系统是多轴控制系统。考虑刚体调姿系统的实际情况,综合上述几种控制系统的设计理念,该刚体调姿系统控制结构如图 2 所示,位姿调整工作站构建了控制卡和节点之间的环形拓扑关系,通过 SynqNet 现场总线技术对 45 个 Danaher 电机实现多轴同步运动控制。逻辑控制器通过通信模块与位姿调整工作站交互来实现对液压系统、气动系统的监测与控制,通过 Slice I/O 模块实现对各驱动电路的监测与保护。

3 逻辑控制器的设计与实现

3.1 逻辑控制器的硬件结构设计

FPGA 是一种集成度很高的可编程逻辑器件,它的现场可编程性使得硬件能够像软件一样容易更改,以实现不同的功能^[3-4]。它不仅编程简单,能同时实现逻辑控制功能和数据处理功能,而且克服了 PLC 程序容易跑飞、抗干扰性能差等缺点^[5]。笔者开发的逻辑控制器充分保证了逻辑控制的实时性和准确性,满足了刚体调姿系统的设计需求,其逻辑控制器硬件结构如图 3 所示。该逻辑控制器包括 FPGA 芯片、电源模块、输入/输出单元、存储器、通信接口模块和时钟控制模块。

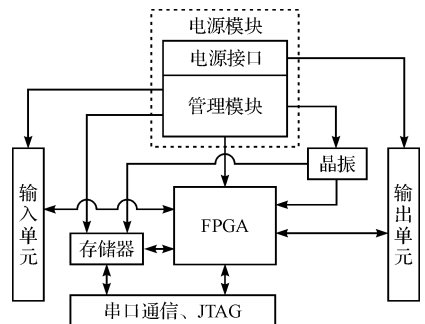


图 3 逻辑控制器硬件结构

3.2 各功能模块的选型

上节给出了逻辑控制器的硬件结构图,根据调姿系统的逻辑控制需求,对各个模块进行具体选型。

3.2.1 主控制器和存储器

由于该控制器主要进行大量的逻辑运算,主控制器选择 Xilinx 公司生产的侧重于高性能应用的 Virtex 5 系列的 FPGA 芯片。考虑到受控对象数量及 I/O 口数量、使用环境温度和封装条件,选用 324 针脚的 XC5VLX30-1FF324I。

虽然 FPGA 在自身逻辑块中配置了高速存储器,可以支持真正的双端口操作;但是没有掉电保护功能,在断电之后程序就会丢失,所以必须另外配置一个 PROM 来存储控制器的逻辑程序。这样每次工作时,FPGA 就会调用配置 PROM 中的程序,实现了程序的固化,大大提高了程序的安全性。XCF08P 的 N_{PE} (Program/erase cycles) 达到了 20 000 次,能有效保存数据 20 年,满足系统生产周期的要求。根据已选定的 FPGA 的型号,考虑封装和温度条件,采用 XCF08PFS-48C 作为逻辑控制器的 PROM。

3.2.2 电源模块

系统控制柜中已配备有 24 V、5 V 开关电源。为了避免外部设备对逻辑控制器造成影响,采用电源管理芯片给 FPGA 和 PROM 提供高稳定性和高可靠性的电源。

XC5VLX30-1FF324I 的 I/O 供电为 3.3 VD,考虑提供的电源为 24 V,采用 IT 的 PWB2403CS-1W6 电源管理芯片。内核供电为 1 VD,端口辅助供电为 2.5 VD,选用高效可调降压模块 TPS62040 来实现。

XCF08PFS48C 供电为 1.8 VD,选用高精度线性稳压管理模块 TPS79318。

3.2.3 I/O(输入/输出)模块

FPGA 输入/输出模块为逻辑控制器和外部环境通信的动态信息提供通道。这些端口有不同的通信模式,设计实体中输入/输出信号都有对应的通信模式,需要进行设定,并反映在 VHDL 程序中。值得注意的是,在分配作为端口的管脚时,一定要区分一般 I/O 口与特殊管脚(如电源、地、时钟)的不同^[6]。

输入单元接收指令信号和传感器信号,这些信号经过输入电路之后,变成 FPGA 能够识别的信号。为了有效地隔离外部设备对逻辑控制器造成的干扰,输入单元采用光耦器件 TLP521。

输出单元的作用是将 FPGA 的输出信号控制受控对象。逻辑控制器的受控对象多为电磁阀、继电器等器件,这里选用接口管理芯片 TPS1101PWR。

3.2.4 通信模块

通信模块实现了逻辑控制器和 PC 机之间的信息交换和数据传输。采用性能稳定的 CY68013A 芯片实现了 USB 高速数据接口的扩展,其出色的数据传递性能克服了常用的 RS-232 通信接口传输速率慢、传输距离短等缺点。

同时,XC5VLX30-1FF324I 采用了 JTAG 嵌入式调试技术,内部封装了专门的测试访问口 TAP(Test Access Port),通过 JTAG 测试工具对内部节点进行测试。JTAG 接口测试是开发逻辑控制器的简单高效的手段。

3.2.5 数字时钟模块

该模块在 FPGA 中起到了数字时钟管理的作用,就是消除全局信号进入 FPGA 之后的歪斜等其他问题。根据调姿系统的控制需求,选用 OSC 系列、频率为 20 MHz 的晶振。

3.3 逻辑控制的软件实现

该系统的逻辑控制器除了让受控工装按预定逻辑作业之外,还必须考虑到异常状况,这需要工作站实时掌握系统监控对象的工作状态和相关数据。具体的内容包括温度监测、湿度监测、气阀工作压力、真空阀工作压力、液压阀工作压力、工装的位置信息和传感器的读数等。

控制软件根据接收到的各种条件参数,对工装状态进行判断,然后根据操作指令,结合逻辑要求和实时监控的传感器状态,给出工装的动作指令。当出现报警制动提示时,软件将进行故障代码档案记录,以辨识故障类型,只有当故障排除之后控制软件才能继续正常运行。按照调姿系统工装逻辑控制的实际情况及要求,其控制软件实现原理如图 4 所示。

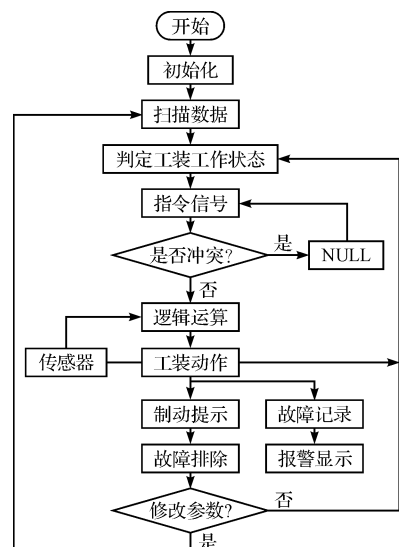


图4 逻辑控制软件程序流程图

逻辑控制程序用 VHDL(VHSIC Hardware Description Language) 语言来实现。VHDL 语言是超高速集成电路硬件描述语言的简称,是一种广泛的应用标准硬件描述语言,其优势在于:可实现独立于器件的设计,具有程序移植能力,拥有强大的性能测估能力,语法严谨、规范性强,易于共享和复用^[7]。刚体调姿系统逻辑控制器的设计主要是逻辑电路的设计,用 VHDL 语言设计控制程序的基本流程如下^[8-9]:抽象出各功能模块,并定义 I/O;根据硬件系统的具体功能,抽象出结构体进行描述;对程序进行前仿真,根据逻辑功能实现的情况修改、优化程序;程序的综合优化和布局布线;对程序进行后仿真,排除设计功能异常;程序固化,将设计好的 VHDL 程序下载到 PROM 中。

4 仿真与实验

本节以该系统中移动夹紧工装的液压系统锁紧、解锁及保压逻辑为例来说明逻辑控制器的功能。液压系统主要通过控制液压油的输入压紧楔块,从而产生摩擦力抱紧移动夹紧工装的升降柱;也可通过控制液压油的换向输入放松楔块,从而消除升降柱和楔块之间的摩擦力使之解锁。该液压回路工作原理如下:异步电动机带动叶片泵给系统供油,当压力达到设定值时,压力继电器接通,相应的电磁换向阀工作,抱紧升降柱;液压回路中设有溢流阀,防止系统压力过大,在锁紧机构处于工作状态后,单向阀的设计可以使得换向阀换向,从而导致叶片泵卸荷。

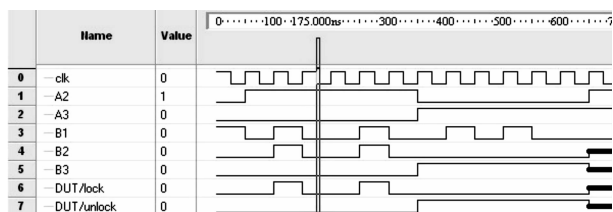


图 5 移动夹紧工装液压系统逻辑仿真

clk—时钟信号;A2—液压锁紧指令信号;A3—解锁指令信号;B1—压力传感器反馈信号;B2—电磁阀锁紧控制信号;B3—电磁阀解锁控制信号

移动夹紧工装的夹紧过程如下:部件在三坐标定位器的调整下到达预定位置之后,工作站给出气动指令使气泵工作推动气缸压紧部件,然后使真空阀工作吸附部件,再通过液压系统锁紧气缸。其液压阀工作压力由传感器监测,由于液压系统不可避免地存在泄漏,控制器中设计保压逻辑来对液压阀工作压力进行补偿。仿真可以通过调试、检查、测试或模式运行,来检验所设计的控制程序是否满足监控系统的功能需求,以保证逻辑控

制的正确性^[10]。其逻辑仿真结果如图 5 所示。

依据上述几节研究的逻辑控制器硬、软件的设计与实现、移动夹紧工装的系统组成及工作过程,开发出基于 FPGA 的逻辑控制器的硬件结构、软件,并将其应用于刚体调姿系统中。

5 结束语

本研究针对某刚体数字化调姿对接系统,设计了包含逻辑和运动控制的控制体系结构,开发出基于 FPGA 的逻辑控制器,着重论述了该逻辑控制器的硬件结构设计和基于 VHDL 的软件实现方法。通过长期使用发现该系统中基于 FPGA 的逻辑控制器具有以下优点:①在实际使用时,占空间小,易于管理,便于实现集中控制;②具有极强的适应性和拓展性;③逻辑控制电路在 FPGA 芯片内部实现,减少了外围电路的复杂性,降低了设计开发成本、维护成本,同时缩短了设计开发周期;④有效地完成逻辑控制任务,具有很高的可靠性。

参考文献 (References):

- [1] SUN Kang, SONG Yan-min, FENG Guo-chuan. The Application of the Fuzzy Controller based on PLC in Sewage Disposal System[C]//2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Shanghai: [s. n.], 2009:154-158.
- [2] 谭晓东,李忠,李宝良.基于 PLC 控制技术的铁路起重机电气控制系统[J].大连交通大学学报,2009,30(5):15-18.
- [3] HU Hao-ren, WU Jia-ni, ZHANG Fei. Hardware Design of Independent Experimental Platform based on FPGA[C]//2010 2nd International Conference on Communication Systems, Networks and Applications. Hongkong: [s. n.], 2010:44-47.
- [4] ABU-KHUDHAIR A, MURESAN R, YANG S X. FPGA based Real-time Adaptive Fuzzy Logic Controller[C]//2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Hongkong: [s. n.], 2010:539-544.
- [5] 王利,李向华.基于 FPGA 的模糊逻辑控制器的硬件实现[J].控制工程,2004,11(1):34-35.
- [6] 王玮,冯永茂,丁铁夫.基于 FPGA 的高速数据传输芯片控制器设计[J].电子器件,2008,31(3):845-848.
- [7] 罗力凡,常春藤.基于 VHDL 的 FPGA 开发快速[M].北京:人民邮电出版社,2009.
- [8] ZHANG Nian, KAMDEM R, OSOSANYA E, et al. VHDL Implementation of the Hybrid Fuzzy Logic Controllers with FPGA[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Dalian: [s. n.], 2010:5-10.
- [9] 张义和,张显盛. Altium Designer 完全电路设计—FPGA 篇[M].北京:人民邮电出版社,2009.
- [10] 吴宁,葛芬.可编程逻辑控制器通用开发平台的设计与实现[J].仪器仪表学报,2007,28(8):1486-1491.