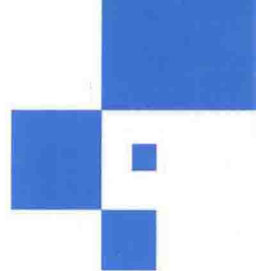




教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

华中科技大学教学改革建设教材



Experiments in Computer Organization and Interface Technology
Based on MIPS Architecture

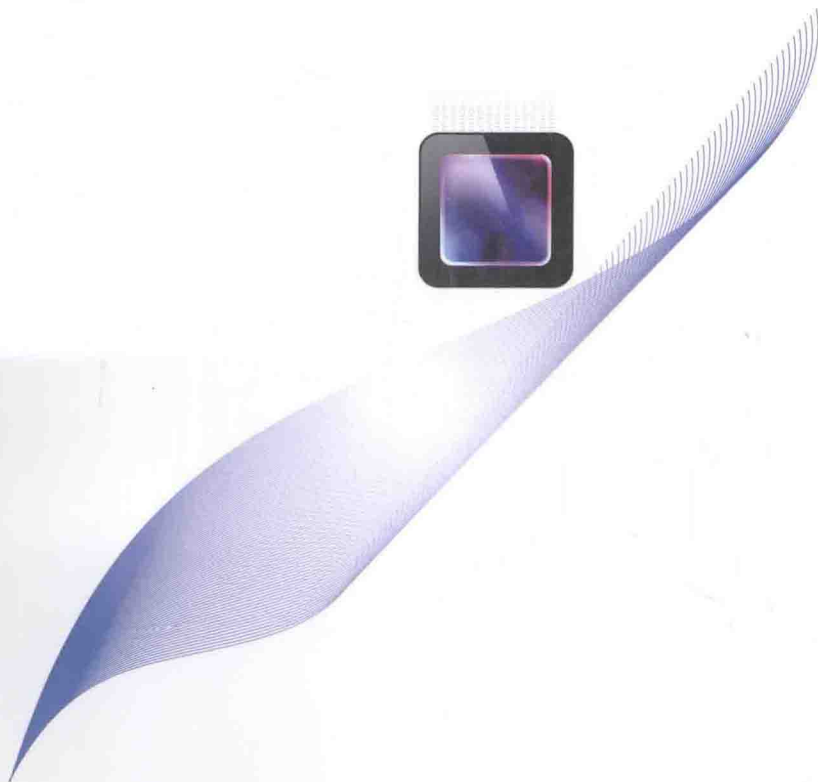
计算机组成原理与接口技术

——基于MIPS架构

实验教程

左冬红 编著

Zuo Donghong



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Experiments in Computer Organization and Interface Technology
Based on MIPS Architecture

计算机组成原理与接口技术 ——基于MIPS架构 实验教程

左冬红 编著

Zuo Donghong

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是与《计算机原理与接口技术——基于 MIPS 微处理器》配合使用的实验指导书,书中以实验为主线,在简要阐述基本原理的基础上,详细地描述了各个实验的具体过程。全书分为三部分:MIPS 汇编程序设计、基于 FPGA 的计算机原型系统设计和基于 FPGA 的嵌入式计算机系统设计。本书介绍了基于计算机平台的 MIPS 仿真器 QTSpm, Xilinx ISE FPGA 开发套件 ISE、EDK、SDK 等开发工具的使用,并通过大量具体的实验案例,帮助读者在掌握基本原理的基础上,动手实践计算机软硬件技术。此外,本书还在各类实验案例的基础上,设置了不同难易程度的实验任务,可以满足不同层次读者的学习需求。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成原理与接口技术——基于 MIPS 架构实验教程/左冬红编著. —北京:清华大学出版社,2014

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-35118-4

I. ①计… II. ①左… III. ①计算机组成原理—实验—教材 ②微处理器—接口设备—实验—教材 IV. ①TP332-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 094322 号



责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:白蕾

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.75

字 数:489 千字

版 次:2014 年 8 月第 1 版

印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:35.00 元

产品编号:054553-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	宋 峰	南开大学
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳 伟	香港理工大学

丛书责任编辑 盛东亮 清华大学出版社

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017 年)建设约 100 门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

随着计算机技术的迅速发展,“微机原理与接口技术”课程的教学内容,越来越不适合作为信息学科本科生的平台基础课教学的需要。在调研国内外“计算机组成原理及接口技术”相关课程教学内容组织以及教材建设的基础上,结合教育部高等学校计算机专业教学指导委员会提出的增强学生系统能力培养目标,并根据当前计算机类课程教学改革需要,配合非计算机专业理工类专业“微机原理与接口技术”课程改革需要,我们开设了“计算机组成原理与接口技术”课程。

本书作为“计算机组成原理与接口技术”课程实验指导书,配合《计算机组成原理与接口技术——基于 MIPS 微处理器》使用。本书的特点是以实验为主线,结合“计算机组成原理与接口技术”各部分的教学内容而组织了三部分的实验内容。在讲解各部分实验过程之前,首先介绍实验工具的使用,然后再介绍与各个实验相关的实验平台,最后才是具体的实验过程。并且在每个实验后面设计了不同难易程度的实验任务,可满足不同层次的教学需要。读者在掌握了全书各个具体的实验任务之后,可以深刻理解计算机系统的工作原理,并可实现从计算机零部件设计到完整计算机系统设计的飞跃。

全书内容分为三篇:

(1) MIPS 汇编程序设计。本篇包括第 1~4 章,介绍 QtSpim MIPS 仿真器、MIPS 汇编程序结构、QtSpim 系统功能调用以及汇编伪指令、宏汇编指令等,并且详细介绍了 QtSpim MIPS 仿真器调试汇编程序的过程。在此基础上详细介绍了常见的 C 语言语句 MIPS 汇编实现以及汇编子程序设计。完成这部分实验内容,可以帮助读者熟练地掌握 MIPS 汇编语言编程技术,为第二部分 MIPS 微处理器的汇编语言测试程序设计以及微处理器设计打下基础。

(2) 基于 FPGA 的计算机原型系统设计。本篇包括第 5~8 章,首先介绍 Xilinx ISE 开发工具,并以一个具体的实例,详细介绍了该工具的开发流程;然后在第 6 章以一个单周期简单指令集 MIPS 微处理器为例,介绍了微处理器的设计流程;第 7 章以第 6 章为基础为微处理器设计了存储器映像寻址方式的简单 I/O 接口,实现基本的输入/输出人机交互;第 8 章在前面两章基础上为微处理器设计了图形输出接口 VGA 接口,至此一个简单的原型计算机系统设计完成了,并且可以通过汇编程序控制图形输出到显示器。读者基于该计算机平台,可以实现简单的图形化游戏程序设计。

(3) 基于 FPGA 的嵌入式计算机系统设计。本篇包括第 9~18 章,首先介绍 Xilinx FPGA 嵌入式系统开发套件 EDK 和 SDK,然后再通过一个个具体的实验案例,逐步让读者掌握嵌入式系统开发流程、基于 FPGA IP 核的接口设计技术以及了解计算机硬件系统如何影响程序性能。接口设计包括以下内容:基于 Xilinx IP 核的并行 I/O 接口设计,自行设计

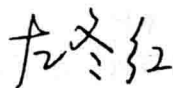
简单 I/O 接口 IP 核, 基于 Xilinx IP 核的并行存储器 I/O 接口设计, 基于 Xilinx IP 核的串行接口设计以及基于 Xilinx IP 核的人机接口设计。在程序性能方面主要设置了几个验证性实验: 不同字节序计算机系统中 C 语言数据的存放规律, 数据结构的内存分配以及 Cache 对不同数组访问方式的性能影响等。如果说第二部分实验内容完成的计算机系统只是一个原型设计, 那么在第三部分完成的基于 MicroBlaze 的计算机系统就是一个真实的嵌入式计算机系统, 它支持中断技术, DMA 技术, 也具有分级存储系统, 能够支持大型复杂的软件设计。

本书遵循从易到难的学习规律, 首先从 MIPS 汇编语言程序设计入手, 逐步深入到原型计算机系统设计以及嵌入式计算机系统设计, 以便读者循序渐进地掌握计算机系统原理以及接口设计技术, 并培养计算机系统设计能力以及软硬件协同设计能力。

本书是在华中科技大学电信系程文青教授主导的电路类课程改革的大潮下开始编写的, 参与该类课程改革的教师对本书的编写提供了大量的宝贵意见, 在此深表感谢! 张岩同学的毕业设计工作为本书提供了部分实验素材, 在此表示感谢! 本书还得到了赛灵思大学计划部、依元素大学计划部、德致伦公司多位工程师在实验验证上的帮助, 一并表示感谢。

对所有为本书进行审阅并提出宝贵意见以及在编写出版过程中给予热情帮助和支持的朋友们, 表示衷心的感谢。

由于编者水平有限, 时间比较仓促, 书中错误或不妥之处在所难免, 殷切希望使用本教材的师生及广大读者给予批评指正。来信地址: sixizuo@hust.edu.cn。



二〇一四年四月

于华中科技大学

目 录

CONTENTS

第一篇 MIPS 汇编程序设计

第 1 章 MIPS 汇编程序开发环境	3
1.1 QtSpim 简介	3
1.2 菜单栏简介	4
1.2.1 File 菜单	4
1.2.2 Simulator 菜单	5
1.2.3 其他菜单	6
第 2 章 MIPS 汇编程序	9
2.1 MIPS 汇编程序结构	9
2.2 QtSpim 系统功能调用	10
2.3 QtSpim 伪指令	10
2.4 QtSpim 常用宏汇编指令	13
第 3 章 QtSpim 汇编、调试程序示例	17
3.1 QtSpim 用户程序入口	17
3.2 QtSpim 汇编查错	17
3.3 QtSpim 查看程序内存映像	20
3.4 QtSpim 调试查错	24
第 4 章 MIPS 汇编程序示例	28
4.1 常用 C 语句汇编指令实现示例	28
4.1.1 if 语句	28
4.1.2 while 语句	28
4.1.3 for 语句	29
4.1.4 switch 语句	29
4.2 子程序设计示例	30
4.2.1 子程序结构	30
4.2.2 递归子程序设计	33
4.3 编程练习	35

第二篇 基于 FPGA 的计算机原型系统设计

第 5 章	FPGA 开发工具 Xilinx ISE	39
5.1	FPGA 设计流程	39
5.2	ISE 功能与应用	40
5.2.1	工程管理器	40
5.2.2	HDL 编辑器	42
5.2.3	IP 核生成工具	43
5.2.4	测试激励生成器	43
5.2.5	iSim 仿真工具	44
5.3	基于 ISE 开发 FPGA 的完整过程示例	45
5.3.1	启动 ISE	45
5.3.2	新建工程	46
5.3.3	代码输入	47
5.3.4	仿真	49
5.3.5	约束文件编写	52
5.3.6	综合	54
5.3.7	实现	55
5.3.8	编程文件产生	55
5.3.9	编程下载	55
第 6 章	单周期类 MIPS 微处理器设计	58
6.1	实验目的	58
6.2	实验环境	58
6.3	实验示例	58
6.4	示例设计原理	58
6.5	示例工程代码	62
6.5.1	新建工程	62
6.5.2	指令存储器 ROM 模块	63
6.5.3	数据存储器 RAM 模块	65
6.5.4	符号扩展模块	67
6.5.5	寄存器组模块	69
6.5.6	控制器模块	70
6.5.7	ALU 控制译码	72
6.5.8	ALU 模块	73
6.5.9	顶层模块	74
6.6	示例代码功能仿真	78
6.6.1	寄存器组仿真	78

6.6.2 控制器仿真	82
6.6.3 顶层仿真	82
6.7 实验任务	88
第 7 章 存储器映射 I/O 接口设计	89
7.1 实验目的	89
7.2 实验环境	90
7.3 实验示例	90
7.4 示例设计原理	90
7.4.1 存储器映像 I/O 寻址原理	90
7.4.2 I/O 接口原理	91
7.5 示例工程代码	92
7.5.1 增加 I/O 接口模块	92
7.5.2 实例化 I/O 模块	93
7.5.3 修改 DRAM 模块的连线	94
7.5.4 修改 IROM 测试指令	94
7.5.5 修改控制器模块和 ALU 模块	94
7.6 功能仿真	95
7.6.1 I/O 模块仿真	95
7.6.2 顶层仿真	97
7.7 综合、实现、生成 bit 流文件并下载检验	98
7.7.1 配置时序、引脚约束	98
7.7.2 综合、实现、生成 bit 流文件	102
7.7.3 安装开发板驱动	102
7.7.4 开发板编程	103
7.8 实验任务	106
第 8 章 简单 VGA 接口设计	107
8.1 实验目的	107
8.2 实验环境	107
8.3 实验示例	108
8.4 示例设计原理	108
8.5 示例工程代码	110
8.5.1 增加 25MHz 时钟产生模块	110
8.5.2 增加行列计数器模块	112
8.5.3 增加同步信号及地址产生器模块	112
8.5.4 增加显示存储器模块	112
8.5.5 合成 VGA 控制器	114
8.5.6 实例化 VGA 控制器	116

8.5.7	实例化显示存储器	117
8.5.8	实例化显示控制器时钟模块	117
8.5.9	修改指令	118
8.6	功能仿真	118
8.6.1	VGA 模块仿真	118
8.6.2	整体功能仿真	119
8.7	综合、实现、产生 bit 流文件以及下载测试	120
8.7.1	修改引脚约束文件	120
8.7.2	综合并产生 bit 流文件以及下载测试	121
8.8	实验任务	121

第三篇 基于 FPGA 的嵌入式计算机系统设计

第 9 章	Xilinx 嵌入式系统开发环境	125
9.1	Xilinx 嵌入式硬件开发环境 XPS	125
9.1.1	XPS 使用的特殊文件	125
9.1.2	XPS 的图形界面	128
9.1.3	XPS 的菜单	132
9.1.4	ChipScope 片内调试工具	134
9.2	Xilinx 嵌入式软件开发环境	138
9.2.1	SDK 软件库	138
9.2.2	SDK 图形界面	139
9.2.3	ELF 文件结构	141
9.2.4	lscript.ld 文件结构	142
9.2.5	SDK 菜单	144
9.2.6	编译和链接选项配置	146
9.2.7	SDK 软件调试图形界面	148
第 10 章	基于 MicroBlaze 的 Xilinx 嵌入式系统平台	149
10.1	MicroBlaze 软核微处理器	149
10.1.1	基本结构	149
10.1.2	中断系统	150
10.1.3	总线结构	152
10.2	Standalone 操作系统	157
10.2.1	中断操作类函数	158
10.2.2	异常操作类函数	158
10.2.3	指令缓存操作类函数	158
10.2.4	数据缓存操作类函数	159

第 11 章 最小系统建立流程	160
11.1 建立工程	160
11.2 工程结构分析	166
11.3 使用 SDK 设计程序	168
11.4 使用 SDK 下载程序	172
11.5 使用 SDK 调试程序	174
第 12 章 C 数据类型实验	176
12.1 实验目的	176
12.2 实验环境	176
12.3 实验要求	176
12.4 示例实验过程	176
12.4.1 修改 helloworld 程序	177
12.4.2 观察不同数据类型值	177
12.4.3 观察 foo 结构体的内存映像	181
12.5 实验任务	183
第 13 章 基于 IP 核的并行 I/O 接口实验	184
13.1 实验目的	184
13.2 实验环境	184
13.3 实验要求	185
13.4 相关 IP 核	185
13.4.1 AXI GPIO	185
13.4.2 AXI INTC	187
13.4.3 AXI Timer	188
13.5 示例实验过程	190
13.5.1 中断方式 button 按键以及 switch 输入	190
13.5.2 中断方式走马灯实验	208
13.5.3 7 段数码管实验	211
13.5.4 矩阵键盘输入实验	214
13.6 实验任务	219
第 14 章 定制 IP 核 I/O 接口实验	220
14.1 实验目的	220
14.2 实验环境	220
14.3 实验要求	220
14.4 实验原理	220
14.5 示例实验过程	223

14.5.1	定制并添加 AXI IP 到系统	223
14.5.2	连接 AXI 外设	230
14.5.3	导入硬件设计到 SDK 工具	231
14.5.4	添加定制 IP 核软件驱动	231
14.5.5	使用 SDK 编写 IP 核的应用程序	235
14.6	实验任务	236
第 15 章	并行存储器接口设计	237
15.1	实验目的	237
15.2	实验环境	237
15.3	实验要求	240
15.4	实验基本原理	240
15.5	示例实验过程	242
15.6	实验任务	248
第 16 章	DMA 技术实验	249
16.1	实验目的	249
16.2	实验环境	249
16.3	实验要求	249
16.4	实验原理	249
16.4.1	Xilinx XPS DMA 控制器	249
16.4.2	standalone 提供的 DMA API 函数	251
16.4.3	分级存储系统	251
16.5	示例实验过程	252
16.5.1	DMA 实验	252
16.5.2	Cache 实验	258
16.6	实验任务	262
第 17 章	串行接口实验	263
17.1	实验目的	263
17.2	实验环境	263
17.2.1	RS-232 模块(DCE)	263
17.2.2	D/A 模块	264
17.2.3	A/D 模块	267
17.3	实验基本原理	268
17.3.1	uart-lite IP 核	268
17.3.2	SPI IP 核	271
17.4	示例实验过程	273
17.4.1	RS-232 接口通信	273

17.4.2	SPI 接口 D/A 转换	275
17.4.3	SPI 接口 A/D 转换	277
17.5	实验任务	280
第 18 章	人机接口实验	282
18.1	实验目的	282
18.2	实验环境	282
18.2.1	VGA 接口	282
18.2.2	PS2 模块	283
18.2.3	图像数据转换工具	283
18.3	实验基本原理	284
18.3.1	TFT IP 核	284
18.3.2	PS2 IP 核	287
18.3.3	键盘工作原理	289
18.3.4	鼠标工作原理	290
18.4	示例实验过程	292
18.4.1	VGA 接口实验	292
18.4.2	PS2 键盘接口实验	300
18.4.3	PS2 鼠标接口实验	307
18.5	实验任务	309
附录	COE 文件制作过程示例	311
参考文献		314

第一篇

MIPS 汇编程序设计

