



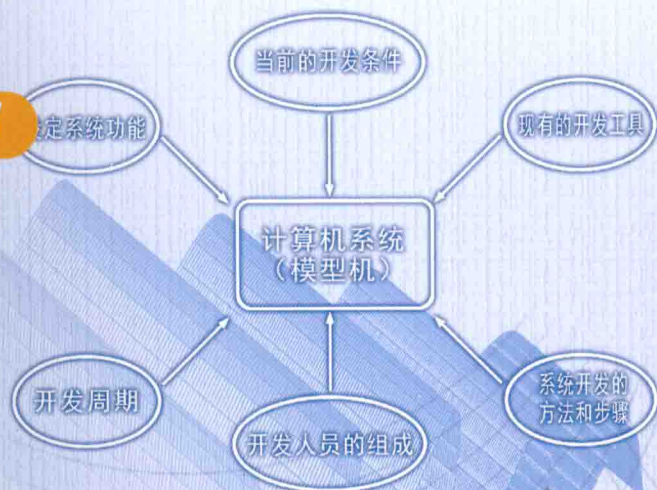
西安交通大学

本科“十二五”规划教材
“985”工程三期重点建设实验系列教材

“计算机组成与设计”实验教材

—— 基于设计方法、VHDL及例程

姜欣宁 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

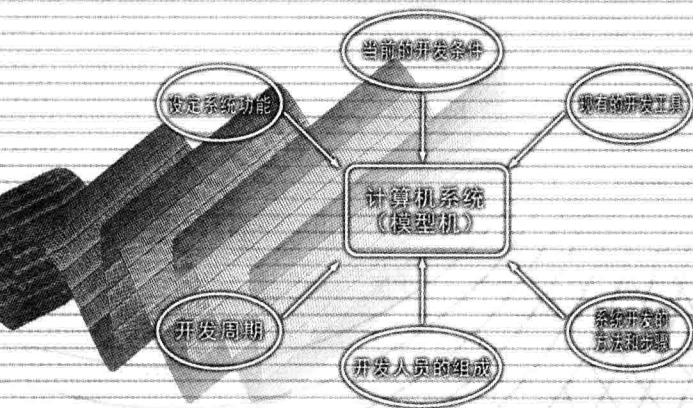


西安交通大学 本科“十二
“985”工程三期

“计算机组成与设计”实验教材

——基于设计方法、VHDL及例程

姜欣宁 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是为“计算机组成原理”课而编写的实验教材。第一篇通过两个完整的计算机模型机的设计过程,详细地说明了系统的设计思路 and 实现方法;包括各功能部件的实现、指令集的设计和系统的集成;第二篇介绍了硬件描述语言 VHDL 的基本用法;包括 VHDL 程序的基本构成、描述方法、常用语句、层次结构设计等;第三篇介绍计算机组成实验例程;帮助同学们理解计算机底层的数据通路、层次结构和时序等概念和提高实用编程技能。附录 1 介绍了最新版 Xilinx ISE14.4 开发软件的使用方法。附录 2 介绍了 XJECA 实验教学系统的构成及例程,它是基于 Xilinx 最新的 ZYNQ-7000 平台,学习 Xilinx PlanAhead 等软件的入门教材。附录 3 介绍了 TEC-CA 机的使用方法和 QuartusII 开发平台的使用。

本书重点突出、内容丰富、简明实用;可作为高等院校计算机、电子、通讯和自动控制各专业本科生相关课程的教材和参考书,也可作为硬件设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

“计算机组成与设计”实验教材:基于设计方法、VHDL 及例程/姜欣宁编著. —西安:西安交通大学出版社,2014.1
西安交通大学“十二五”实验系列教材
ISBN 978-7-5605-4028-3

I. ①计… II. ①姜… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材②VHDL 语言—程序设计—高等学校—教材
IV. ①TP303②TP301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 014663 号

策 划 程光旭 成永红 徐忠锋

书 名 “计算机组成与设计”实验教材——基于设计方法、VHDL 及例程
编 著 姜欣宁
责任编辑 刘雅洁

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西彩云印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 16.125 字数 293 千字
版次印次 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-4028-3/TP·605
定 价 30.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdly@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

编审委员会

主 任 冯博琴

委 员 （按姓氏笔画排序）

邓建国 何茂刚 张建保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠锋 黄 辰

Preface 序

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高〔2012〕4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

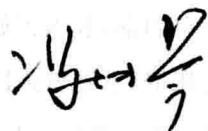
目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,经精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

我很高兴地看到这次立项教材有几个优点：一是覆盖面较宽，能确实解决实验教学的一些问题，系列实验教材涉及全校 12 个学院和一批重要的课程；二是质量有保证，90%的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的，教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师，新教材贴近教学实际；三是按西安交大《2010 版本科培养方案》编写，紧密结合学校当前教学方案，符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后，我要向这些作者表示感谢，对他们的奉献表示敬意，并期望这些书能受到学生欢迎，同时希望作者不断改版，形成精品，为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授
国家级教学名师



2013 年 6 月 1 日

Foreword 前言

“计算机组成原理”课程是计算机专业的一门核心课程,是计算机学科的基础,非常重要;而要掌握该课程的核心内容要求学生经过实践环节的训练。当今,硬件描述语言、现场可编程门阵列(FPGA)及相关的 EDA 软件平台已经被广泛应用到 IT 行业的各个领域;而利用这些技术来开发实验教学中复杂、系统性的实验项目,可以大幅度提升教学层次和效果;同时,掌握这些技术进行硬件电路的设计,是对计算机、电子、通讯和自动控制等专业学生的一个基本的要求。

6 年前,本书作者将 FPGA、VHDL 及 EDA 开发软件这些技术应用到计算机组成课程的教学实践中,让学生完成一台计算机(模型机)及数字系统的设计项目;以此真正掌握一个计算机系统的内在运行机制及它的设计和实现过程。在实践中,深感让学生在有限的课时内独立完成一个系统的设计及调试,有较大的困难和挑战,且缺少合适的教材;为此,作者根据多年教学、科研的经验开发出了一个实用的“系统的设计方法”,以期让学生按照此思路进行设计,达到“事半功倍”之效;经过几年的实践证明方案可行。作者将几年来的教学实践的基本思路、设计方法和实践经验总结成书。

本书第一篇通过两个完整的计算机设计过程来详细说明了设计思路和实现方法;其中一个偏重“硬件”的设计,采用组合逻辑设计方案,系统的集成通过“硬件”实现;另一个偏重“软件”设计;采用微程序设计方案,系统部件和系统的集成都用“软件”实现。第二篇介绍了硬件描述语言 VHDL 的基本用法;第三篇介绍计算机

组成实验例程;它提供一些功能部件的例程,引导学生一步一步的“进入”系统的设计。

在编写书的过程中,获益于作者多年的教学实践,也得益于与学生的教学互动中,从他们身上收获的灵感和具体操作上的测试结果,在此表示我衷心的感谢。另外,还得到了西安交通大学计算机系主管教学的桂小林教授的支持和指导、教学组赵青萍和王焕招副教授的建设性意见及张克旺博士参与“XJECA 实验教学系统”的研制工作;在此表示衷心的感谢。对姜维周同学所做的电路调试及文字编辑工作;王峥续、潘雨彤同学在 XJECA 设备上,进行项目开发所做的探索性工作,均在此表示感谢。还要感谢北京威视锐公司姚远总经理在研发设备中给予的支持及所提供的 Xilinx ZYNQ 系列产品的资料,任会洁工程师在产品的开发调试中提供的及时帮助。感谢清华科教仪器厂杨春武先生提供的 TEC-CA 机的使用手册及资料。感谢 Xilinx 中文网站(<http://www.Xilinx.china.com.cn>)提供的丰富的资料。

编 者

2013.3

Contents 目录

第一篇 计算机系统(模型机)的设计方法介绍

第 1 章 概述	(001)
1.1 背景	(001)
1.2 课程的设计思路	(001)
1.2.1 设计定位	(001)
1.2.2 开发方法的设计	(002)
1.3 技术要求和实施平台	(003)
第 2 章 计算机系统设计方法的描述	(004)
2.1 系统开发的整体规划(见图 2-1)	(004)
2.2 系统的体系结构描述(三种)	(004)
2.3 系统的初步划分	(006)
2.4 系统内部模块的关联	(006)
2.5 系统的详细设计流程图	(007)
第 3 章 计算机系统的设计与实现(组合逻辑设计方案)	(010)
3.1 构建数据流的路径	(010)
3.2 配置数据流路径(数据通路)的基本部件	(011)
3.3 取指周期的分析	(011)
3.4 数据通路的构建举例	(012)
3.4.1 取指令数据通路的构建(见图 3-2)	(012)
3.4.2 各类指令数据通路的构建	(012)

3.4.3	总的通路形成	(014)
3.4.4	通路中控制信号的确定	(014)
3.5	指令集设计	(015)
3.5.1	指令系统设计概述	(015)
3.5.2	指令类型的设计	(016)
3.5.3	指令格式的设计	(016)
3.5.4	寻址方式的确定	(017)
3.5.5	各条指令的描述与功能部件的配置	(017)
3.5.6	写出“指令系统对照表”	(017)
3.6	控制器的设计	(018)
3.6.1	控制器的设计概述	(018)
3.6.2	控制器的基本逻辑模块组成	(019)
3.6.3	微操作与各种信号之间的关系	(019)
3.6.4	“时序”设计要点	(020)
3.6.5	时序电路模块的设计	(020)
3.6.6	组合逻辑控制器的一般设计方法和步骤	(022)
3.6.7	一个控制器设计方法(CU 的状态图描述法)的描述	(023)
3.6.7.1	设计思路和步骤	(023)
3.6.7.2	分析指令执行过程	(023)
3.6.7.3	控制器微操作序列的设计	(024)
3.6.7.4	控制器微命令的设计	(024)
3.6.7.5	控制器的状态机图的设计	(024)
3.6.7.6	描述信号(微命令)和状态之间的关系	(025)
3.7	控制器和系统的实现(“组合逻辑”的设计方案)	(027)
3.7.1	控制信号产生电路的硬件实现方法	(027)
3.7.2	系统各级电路的硬件实现	(027)
3.8	控制器的仿真测试	(031)
3.9	存储器的设计要点	(031)

3.10 系统的调试	(032)
第4章 计算机系统设计方法和步骤(微程序设计方案)	(033)
4.1 设计思路和步骤	(033)
4.2 指令集的设计	(033)
4.2.1 指令类型	(033)
4.2.2 指令的格式及其实现的操作	(034)
4.3 系统硬件电路的设计	(035)
4.3.1 系统电路图的设计	(035)
4.3.3 各微命令信号的含义及功能如下	(035)
4.3.4 主要部件的描述	(037)
4.4 指令流程图及数据通路图的描述	(039)
4.5 控制器的设计	(042)
4.5.1 控制器的设计思路	(042)
4.5.2 控制器 ASM 图的设计	(043)
4.5.3 微程序的设计	(043)
4.5.4 画出微程序代码表	(045)
4.6 计算机系统的实现	(045)
4.6.1 系统实现(集成)方法的选择	(045)
4.6.2 设计计算机(主机)系统	(045)
4.6.3 编写测试程序	(045)
4.7 总线和外设接口的设计	(046)
第5章 实践总结	(047)
5.1 结果分析	(047)
5.2 经验分析	(047)

第二篇 VHDL 语言基础及实例

6.1 VHDL 程序的结构	(049)
6.2 VHDL 的基本词汇元素	(058)

6.3 VHDL 的对象	(062)
6.4 VHDL 的数据类型	(064)
6.5 运算符.....	(071)
6.6 VHDL 的顺序语句	(073)
6.7 VHDL 的并行语句	(080)
6.8 子程序语句.....	(085)
6.9 系统的层次结构设计.....	(090)
6.10 程序包及应用	(090)

第三篇 实验项目

实验一 串并型加法器的设计	(093)
实验二 层次结构的设计与实现	(102)
实验三 逻辑单元的设计与实现	(108)
实验四 寄存器组的设计与实现	(110)
实验五 时序部件的设计	(117)
实验六 寻址电路的设计和实现	(126)
实验七 内部存储器的设计与实现	(131)
实验八 数据通路的设计和实现	(134)
实验九 三级时序电路模块的设计和仿真分析	(136)
实验十 指令译码器(硬连线控制器)电路的设计和实现	(141)
实验十一 多模块并行执行的设计	(145)
实验十二 程序包的使用	(147)
附 录 1 Xilinx LSE 开发平台的应用	(150)
附 录 2 XJECA 实验教学系统使用介绍	(170)
附 录 3 Quartus II 基本使用方法及 TEC-CA 设备的介绍.....	(191)

第一篇

计算机系统(模型机)的设计方法介绍

第 1 章 概 述

1.1 背景

为什么要开设“计算机组成与设计”的设计课程?

(1)该课程是计算机专业的一门核心课程,比较抽象,必须经过实践环节,才能去除一些似是而非的概念,真正掌握一个计算机系统的内在运行机制,并且为后续课程打下一个坚实的基础;

(2)让学生学习和掌握一个计算机系统(模型机)的设计方法及相关技术;

(3)培养学生自主创新能力 (作为计算机专业的学生应该不仅会使用计算机,而且还要学会和掌握设计一台计算机的方法)。

1.2 课程的设计思路

1.2.1 设计定位

● 以教科书上的基本概念为基础,反映国际上先进的设计理念和技术,参考其他信息来源及实际经验;

● 根据学生以往实践过程中的情况来设计实验;

● 学习和掌握构建一台计算机主机(模型机)的方法为主,编程技巧为辅;

● 学习和掌握实现一台计算机主机系统(模型机)为主要内容,不强调技术上的复杂性;

● 本实验以体现“硬件”实验特征为主,弥补学生这一方面的不足;

● 将计算机系统抽象(理解)为:

“功能部件加总线”(顶层)或“寄存器加信号线”(底层),加上控制器(信号)的模式加以理解 and 设计;

- 学生重点掌握设计“过程”(它是由“0”到“1”跳变的过程);
- 强调设计过程的“完整性”、“简洁性”、“有效性”、“易读性”;
- 概念和方法从多个角度重复叙述;
- 把握宏观(设计方法),专注细节(实现)。

1.2.2 开发方法的设计

(1) 整个开发进程:

因为使用“自顶向下设计”方法要求对底层部件非常熟悉,学生没有进行过系统的设计培训,而用“自底向上设计”方法,学生难以全面的把握,所以这里采取“自顶向下”和“自底向上”开发方法的结合,即:

- 先打基础(设计底层部件或给出例程),再执行“自顶向下设计”;
- 或先规划系统顶层布局(实验指导老师提供系统顶层设计图),再“自底向上设计”;
- 设计过程偏重于自顶向下,实现过程偏重于自底向上。

(2) 关键的开发方法

引入状态图进行控制系统的描述、分析、设计和调试。

(3) 设计过程的描述

- 上下结合(顶层描述(行为描述,用于方案的设计,框图为主),底层描述(结构描述,电路为主));
- 动静结合(流程图,状态图,数据表,电路图)

特别是状态图的描述可以将比较复杂的关系清晰地表现出来(实践中体会);循序渐进,概念的重复、逐步深入,不断完善。

通过以上环节,可使同学由“新手”较快地变成“有经验”的人,培养同学们自主创新的能力、严谨的工作作风、克服浮躁心理。

(4) 整体实现过程的安排

- a) 完成验证性的部件实验 熟悉硬件描述语言(底层设计的掌握)
- b) 方案的设计

对系统的设计思路、结构和分工有一个清晰的认识,也为后续调试提供依据;实践证明这一步很有必要。

c) 项目的实现

利用 EDA 开发平台,硬件描述语言等工具来实现仿真、下载和调试,完善设

计方案。

1.3 技术要求和实施平台

● 开发环境:使用 EDA 软件(如 QUARTUSII、ISE)、FPGA(现场可编程门阵列)和硬件描述语言(如 VHDL)为开发工具进行系统的设计、综合、下载及调试。

Xilinx 公司的开发环境:ISE、PlanAhead 等。

● 设计工具:选用硬件描述语言进行项目的描述,因为它功能非常强大,对于构建一个大的系统,不仅适合对其行为/结构进行描述,也易于形成相关的硬件电路。

● 实现过程:在 QUARTUSII 或 ISE 平台上完成以下过程:编辑→综合→仿真→编程(下载)→调试等。

完整的开发流程,即,自然语言说明→VHDL 的系统行为描述→系统的分解→RTL 模型的递交→门级模型产生→最终(物理布线)实现的底层电路。

[注]:在本书的叙述中,计算机模型机也简称为计算机系统或系统。

第2章 计算机系统设计方法的描述

一个计算机系统的设计过程可以由以下图形直观地描述出来。

2.1 系统开发的整体规划(见图 2-1)

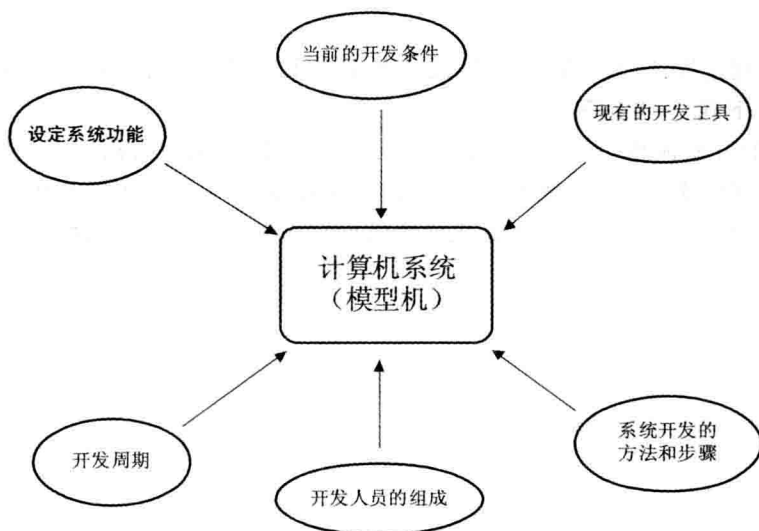


图 2-1 系统开发的整体规划图

说明：这一步，指引学生通过调研查找资料，使头脑中有一个总体的概念和规划，主要解决如何“准备”设计的问题，即解决“入手”难的问题。

要求学生对于每一个框的任务进行调研和思考，包括：设定系统的功能、目前的开发条件、现有的开发工具、系统的开发方法、人员（团队）的组合及开发周期等。

2.2 系统的体系结构描述(三种)

系统结构可以从不同的角度来分析，下面是它的三种结构框图(见图 2-2)

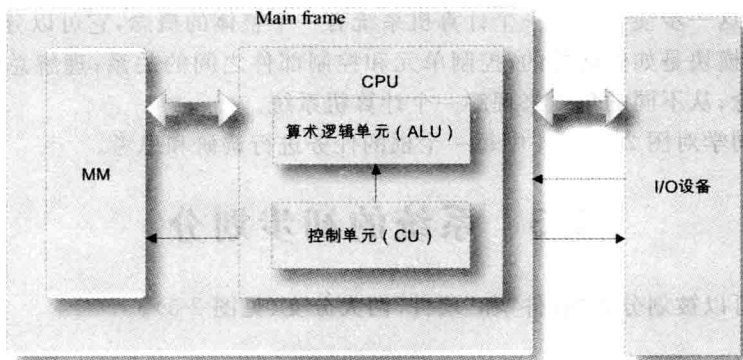


图 2-2 计算机系统结构框图(模块结构)

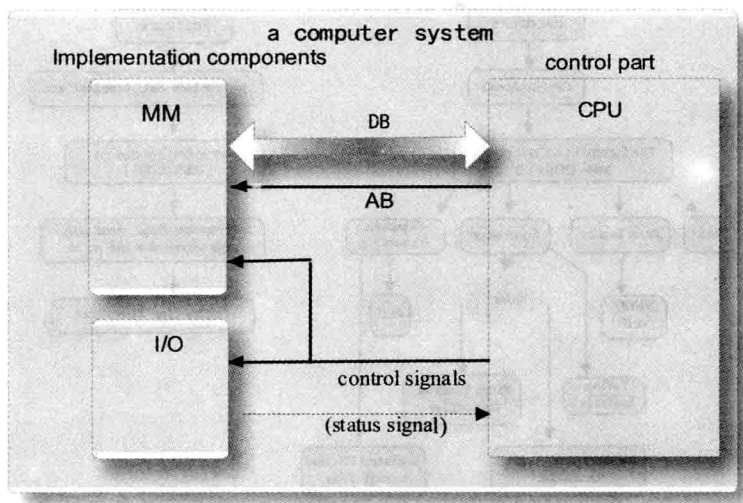


图 2-3 计算机系统结构框图(控制结构)

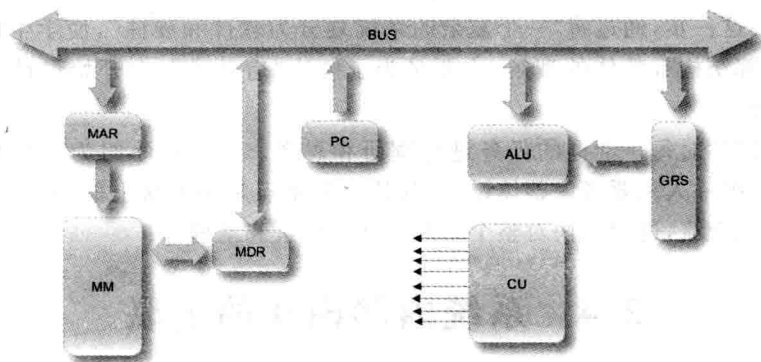


图 2-4 计算机系统结构框图(总线结构)