

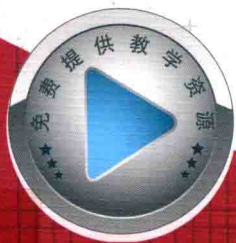


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

EDA技术实用教程

——Verilog HDL版(第六版)

黄继业 潘松 编著



- 讲技术，授技能，求职就业的帮手
- 布情景，述过程，教学改革的能手
- 举示例，重实践，能力培养的强手



科学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

EDA 技术实用教程

——Verilog HDL 版

(第六版)

黄继业 潘 松 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据课堂教学和实验操作的要求,以提高实际工程设计能力为目的,深入浅出地对 EDA 技术、Verilog HDL 硬件描述语言、FPGA 开发应用及相关知识做了系统和完整的介绍,使读者通过本书的学习并完成推荐的实验,能初步了解和掌握 EDA 的基本内容及实用技术。

本书包括 EDA 的基本知识、常用 EDA 工具的使用方法和目标器件的结构原理、以向导形式和实例为主的方法介绍的多种不同的设计输入方法、对 Verilog 的设计优化以及基于 EDA 技术的典型设计项目。各章都安排了习题或针对性较强的实验与设计。书中列举的大部分 Verilog 设计实例和实验示例实现的 EDA 工具平台是 Quartus II 13.1/16.1,硬件平台是 Cyclone 4E/LP 系列 FPGA,并在 EDA 实验系统上通过了硬件测试。

本书可作为高等院校电子工程、通信、工业自动化、计算机应用技术、电子对抗、仪器仪表、数字信号或图像处理等学科的本科生或研究生的电子设计、EDA 技术课程和 Verilog HDL 硬件描述语言的教材及实验指导书,同时也可作为相关专业技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

EDA 技术实用教程: Verilog HDL 版/黄继业,潘松编著. —6 版. —北京:科学出版社, 2018.8

(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-058559-2

I. ①E… II. ①黄… ②潘… III. ①电子电路-电路设计-计算机辅助设计-高等学校-教材 IV. ①TN702.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 191918 号

责任编辑: 赵卫江/责任校对: 马英菊

责任印制: 吕春珉/封面设计: 曹 来

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市良远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 10 月第 一 版	2018 年 8 月第 六 版
2005 年 2 月第 二 版	2018 年 8 月第一次印刷
2006 年 9 月第 三 版	开本: 787×1092 1/16
2010 年 6 月第 四 版	印张: 23 3/4
2013 年 8 月第 五 版	字数: 545 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈良远〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62138017 (HI01)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

《EDA 技术实用教程——Verilog HDL》第六版的变化主要表现在新版 EDA 软件和较新的 FPGA 的使用上：

(1) 考虑到 Quartus II 13.1 和 Quartus Prime Standard 16.1 版本的用法和功能基本相同，而 Quartus II 13.1 版本支持的早期器件系列较多，包括 Cyclone 3。所以第六版绝大部分内容中用 Quartus II 13.1 取代了旧版的 Quartus II 9.1，读者要注意有不少不同的用法。

(2) Quartus II 10.0 后不再支持内置的门级仿真器，即 Intel/Altera 已将 Quartus II 10.0 及此后版本的软件中曾经一贯内置的门级波形仿真器移除了，因此 Quartus 的使用者不得不使用接口于 Quartus II 的第三方仿真器 ModelSim-Altera，使得仿真技术能很好地融合于更一般的 EDA 技术，也更适用于工程实际的需要。然而这一举措对于多数初学者和相关的教学造成很大的不便。因为必须承认，Quartus II 9.x 及之前版本软件中一直内置的波形仿真器有着易学、高效和便捷的巨大优势，对于 EDA 教学和初学者的学习是十分重要的。为此，直到 Quartus II 13.1 及其以后的 16.1 版本，才借助 ModelSim ASE 构建了一个类似于波形仿真器的仿真工具。当然在用法上有少许不同之处，书中也做了介绍。

(3) 由于新版软件的波形仿真器是建立在第三方仿真软件 ModelSim ASE 上的，所以在安装软件时需要特别注意安装 ModelSim ASE，书中对具体使用做了必要提示。

(4) 考虑到较新的 Cyclone 4 型 FPGA 已经得到广泛使用，并兼顾目前多数学校仍然使用基于 Cyclone 3 系列 FPGA 的实验设备的现实，在新版教材中包含了这两种 FPGA 的使用示例，但以 Cyclone 4E 型为主，也介绍了 Cyclone 10LP 型 FPGA，其结构与 Cyclone 4E 型 FPGA 相同，只是需要较新的 Quartus 版本才支持。适用于 Cyclone 4E 型 FPGA 的实验示例也同样适用于 Cyclone 10LP 型 FPGA 的实验设备。

(5) 在 FPGA 和 CPLD 的结构介绍方面进行了一定更新，介绍了较新发展的 FPGA (Cyclone 4E/Cyclone 10LP) 和 CPLD (内嵌 Flash 的 FPGA 器件) 的结构特点。

(6) 由于现在 Verilog HDL 功能仿真与门级仿真越来越重要，本书将原来安排在最后一章的 Verilog HDL Test Bench 仿真的内容提前到了第 9 章，同时又进行了补充。

(7) 具体的示例和实验中的 FPGA 硬件平台已升级为 Cyclone 4E/10LP 系列器件，但也同样适用于 Cyclone 3 和 Cyclone 5 系列 FPGA。

本书以 Verilog HDL 作为基本硬件描述语言来介绍 EDA 技术。作为教科书，与科学出版社出版的《EDA 技术实用教程——VHDL 版》构成了姊妹篇。

为了适应 EDA 技术在高新技术行业就业中的需求和高校教学的要求，突出 EDA 技术的实用性，以及面向工程实际的特点和自主创新能力的培养，作者力图将 EDA 技术最新的发展成果、现代电子设计最前沿的理论和技術、国际业界普遍接受和认可的 EDA

软件开发平台的实用方法，通过本书合理地综合和萃取，奉献给广大读者。

随着 EDA 技术的发展和应用领域的扩大，EDA 技术在电子信息、通信、自动控制及计算机应用等领域的重要性日益突出。同时随着技术市场与人才市场对 EDA 技术需求的不断提高，产品的市场效率和技术要求也必然会反映到教学和科研领域中来。以最近几届全国大学生电子设计竞赛为例，涉及 EDA 技术的赛题从未缺席过。全国大学生电子设计竞赛的 Intel 嵌入式系统专题邀请赛与 TI 模拟系统设计专题邀请赛两大专题赛，在近年竞赛内容中都涉及了 FPGA 的应用。对诸如斯坦福大学、麻省理工学院等美国一些著名院校的电子与计算机实验室建设情况的调研也表明，其 EDA 技术的教学与实践的内容也十分密集，在其本科和研究生教学中有两个明显的特点：其一，各专业中 EDA 教学实验课程的普及率和渗透率极高；其二，几乎所有实验项目都部分或全部地融入了 EDA 技术，其中包括数字电路、计算机组成与设计、计算机接口技术、数字通信技术、嵌入式系统、DSP 等实验内容，并且更多地注重创新性实验。这显然是科技发展和市场需求双重影响下自然产生的结果。

基于工程领域中的 EDA 技术应用的巨大实用价值，以及重视 EDA 教学中实践能力和创新意识培养的极端重要性，我们对本书各章节做了相应的安排，其特点有以下三个。

1. 注重实践、实用和创新能力的培养

除在各章中安排了许多习题外，绝大部分章节还安排了针对性较强的实验与设计项目，使学生对每一章的课堂教学内容和教学效果能及时通过实验得以消化和强化，并尽可能地在学习一开始就有机会将理论知识与实践、自主设计紧密联系起来。

全书包含数十个实验及其相关的设计项目，这些项目涉及的技术领域宽，知识涉猎密集、针对性强，而且自主创新意识的启示性好。与本书的示例一样，所有的实验项目都通过了 EDA 工具的仿真测试并通过 FPGA 平台的硬件验证。每一个实验项目除给出详细的实验目的、实验原理和实验报告要求外，都含 2~5 个子项目或子任务。它们通常分为：第一（层次）实验任务是与该章某个阐述内容相关的验证性实验，通常提供详细的并被验证的设计源程序和实验方法，学生只需将提供的设计程序输入计算机，并按要求进行编译仿真，在实验系统上实现即可，使学生有一个初步的感性认识，这也提高了实验的效率；第二（层次）实验任务是要求在上一实验基础上做一些改进和发挥；第三个层次的实验通常是提出自主设计的要求和任务；第四、第五个实验层次则在仅给出一些提示的情况下提出自主创新性设计的要求。因此，教师可以根据学时数、教学实验的要求以及不同的学生对象，布置不同层次、含不同任务的实验项目。

2. 高效的教学模式成就速成

一般认为 EDA 技术的学习难点和费时的根源在于硬件描述语言。对此，全书做了有针对性的安排：根据专业特点，摒弃传统的计算机语言的教学模式，打破目前 HDL 教材通行的编排形式，而以电子线路设计为基点，从实例的介绍中引出 VHDL 语句语法内容。同时为了尽快进入 EDA 技术的实践阶段，熟悉 EDA 开发工具及其相关硬件的使用方法，及时安排了大量有针对性的实验项目，以便读者能尽早进入数字系统工程设计经验的积累和能力提高阶段，并能通过这些面向实际的实践和实验活动，快速深化对硬件描述语言的理解和掌握对应的设计技巧。

本书通过一些简单而典型的 Verilog HDL 设计示例和电路模型,从具体电路和实用背景下引出相关的 Verilog HDL 语言现象和语句规则,并加以深入浅出的说明,使得读者仅通过前期一些内容的学习便能迅速了解并掌握 Verilog HDL 描述与逻辑电路间的基本关系,从而极大地降低了 HDL 的学习难度,大幅提高了学习效率,快速实现了学以致用的目的。我们过去多年的教学实践已证明这是一种高效学习硬件描述语言和 EDA 技术的好方法。

3. 注重教学选材的灵活性和完整性相结合

本书的结构特点决定了授课课时数可十分灵活,即可长可短,视具体的专业特点、课程定位及学习者的前期教育力度等因素而定,在 20~50 学时之间选择。由于本书的特色和定位,加之 EDA 技术课程的特质,具体教学可以是粗放型的,其中多数内容,包括实践项目可直接放手于学生,更多地让他们自己去查阅资料、提出问题、解决问题,乃至创新与创造;而授课教师,甚至实验教师只需做一个启蒙者、引导者、鼓励者和学生成果的检验者和评判者。授课的过程多数只需点到为止,大可不必拘泥细节,面面俱到。但有一个原则,即实验学时数应多多益善。事实上,现在任何一门课程的学时数总是有限的,为了有效倍增学生的实践和自主设计的时间,可以借鉴清华大学的一项教改措施,即其电子系本科生从一入学就人手获得一块 FPGA 实验开发板,可从本科一年级一直用到研究生毕业。这是因为 EDA 技术本身就是一个可把全部实验和设计带回家的课程。我校对于这门课也基本采用了这一措施:借给每个上 EDA 课的学生一套 EDA 实验板,使他们能利用自己的计算机在课余时间完成自主设计项目,强化学习效果。实践表明,这种安排使得实验课时得到有效延长,教学成效非常明显。

本书的定位目标是,基于全书给出的完整的知识结构,注重实践第一的观念,强化创新意识的培养,通过课堂合理的教学安排,结合学生明晰的求知觉悟和踏实的实践精神,为了即将离开学校面向招聘者、面向研究生导师、面向社会、面向未来的学生能多一份自信、多一点信心和多一线希望。因此我们建议应该积极鼓励学生利用课余时间尽可能学完本书的全部内容,掌握本书介绍的所有 EDA 工具软件和相关开发手段,并尽可能多地完成本书配置的实验和设计任务。

还有一个问题有必要在此探讨,就是在前面曾提到的“本书的定位之说”。事实上,自主创新能力的提高绝非一朝一夕之事。多年的教学实践告诉我们,针对这一命题的教改必须从两方面入手,一是教学内容,二是设课时间。两者互为联系,不可偏废。

前者主要指建立一个内在相关性好、设课时间灵活,且易于将创新能力培养寓于知识传播之中的课程体系。

后者主要指在课程安排的时段上,将这一体系的课程尽可能地提前。这一举措是成功的关键,因为我们不可能想象到了本科三四年级才去关注能力培养会有奇迹发生,更不可能指望一两门课程就能解决问题。尤其是以卓越工程师为培养目标的工科高等教育,自主创新能力的培养本身就是一项教学双方必须投入密集实践和探索的创新活动。

我校的 EDA 技术国家级精品课程正是针对这一教改目标建立的课程体系,而数字电子技术基础是这一体系的组成部分和先导课程。它的提前设课是整个课程体系提前的必要条件。通过数年的试点性教学实践和经验总结,现已成功在部分本科学生中将此课

程的设课时间从原来的第 4 或第 5 学期提前到了第 1 或第 2 学期。而这一体系的其他相关课程,如 EDA 技术、单片机、SOC 片上系统、计算机接口、嵌入式系统和 DSP 等也相应提前,从而使学生到二年级时就具备了培养工程实践和自主开发能力的条件。

不可否认,数字电路课程的大幅提前必须要以改革其教学内容为前提,否则将传统的教学内容强行提前必将归于失败。为此,在总结了数字电路多年教改成果的基础上,我们推出了适应新需求的教材,即科学出版社出版的《数字电子技术基础》(第三版)一书,很好地满足了当前的教改要求。此书创新性地解决了传统教材中的手工数字技术与现代自动化数字技术间的关系,使两者能平稳过渡,且有机融合,在有效促进理论与实践紧密结合的同时,强化实践训练,突显了创新意识启蒙的良好效果,同时实现了与后续课程的良好衔接。我校的教学实践已清晰地展示了诸多颇具说服力的证明。例如,相比于其他同类情况(如同年级、同专业、同授业课程等),那些曾经参加这一课程体系的学生在大学生电子设计竞赛、NXP 智能车竞赛,以及一些国外企业主导的自主设计赛事中,都获得了更多的奖项和更好的成绩。而且这些学生的获奖比例逐年提高,例如,我校在 2011 年全国大学生电子设计竞赛获一、二等奖项(分别是 3 个和 6 个)的学生中,本科二年级学生的比例高达 80%(这年我校多数三年级学生选择考研复习,未参赛)。若按传统的工科本科教学流程,二年级就有能力获全国一等奖是不可想象的事!

其实,类似的教改活动和教改成绩,我校远非唯一。国内早有不少院校将数字电路放在第 1 或第 2 学期,其实践训练的内容包括超过数万至数十万逻辑门规模的数字系统自主设计训练,不少受益的学生在各类电子设计竞赛中也获得了好成绩。前面提到的清华大学的教改活动也说明,他们至少有部分学生于本科一年级就有数字系统设计方面的训练;后来的调研也证明了这一点,如该校计算机专业本科二年级学生就能自主设计出各种极具创新特色的数字系统,如语音处理及数字立体声播放、硬件超级玛丽游戏显示与控制系统等;又如东南大学在一次省级数字电路课程(尚未学 EDA)电子设计竞赛中,有一组同学完成了指纹识别数字锁的设计而获一等奖;再如美国密歇根大学本科一年级学生就能设计数字电子琴这样的复杂系统,其中包括用 FPGA 控制 VGA 显示五线谱,PS2 键盘作为琴键及数字立体声音乐播放等。

为了尽可能降低成本和售价,本书未配置光盘。与本书相关的教学资料,包括配套课件、实验示例源程序资料、相关设计项目的参考资料和附录中提到的 mif 文件编辑生成软件等都可免费索取;此外对于一些与本书相关的工具软件,如 Quartus Prime、ModelSim 和其他相关 EDA 软件(包括教学课件与实验课件、实验系统的 FPGA 引脚查询及对照表等)的安装使用问题都可索取或咨询:sunliangzhu@126.com,或与作者探讨 EDA 技术的教学和实践:hjynet@163.com;也可登录科学出版社网站(www.abook.cn)。

现代电子设计技术是发展的,相应的教学内容和教学方法也应不断地改进,还有许多问题值得深入探讨,我们真诚地欢迎读者对书中的错误与有失偏颇之处给予批评指正。

编者

2018 年 6 月

于杭州电子科技大学

目 录

第 1 章 EDA 技术概述	1
1.1 EDA 技术及其发展.....	1
1.2 EDA 技术实现目标.....	3
1.3 硬件描述语言.....	4
1.4 HDL 综合.....	6
1.5 自顶向下的设计技术.....	8
1.6 EDA 技术的优势.....	10
1.7 EDA 设计流程.....	11
1.7.1 设计输入（原理图/HDL 文本编辑）.....	12
1.7.2 综合.....	13
1.7.3 适配.....	13
1.7.4 时序仿真与功能仿真、静态时序分析.....	13
1.7.5 编程下载.....	14
1.7.6 硬件测试.....	14
1.8 ASIC 及其设计流程.....	15
1.8.1 ASIC 设计简介.....	15
1.8.2 ASIC 设计一般流程简述.....	17
1.9 常用 EDA 工具.....	18
1.9.1 设计输入编辑器.....	18
1.9.2 HDL 综合器.....	19
1.9.3 仿真器与时序分析器.....	20
1.9.4 适配器.....	21
1.9.5 下载器.....	21
1.10 Quartus 概述.....	21
1.11 IP 核.....	22
1.12 EDA 技术发展趋势管窥.....	24
习题.....	26
第 2 章 FPGA 与 CPLD 的结构原理	27
2.1 PLD 概述.....	27

2.1.1	PLD 的发展历程	27
2.1.2	PLD 分类	28
2.2	简单 PLD 结构原理	29
2.2.1	逻辑元件符号表示	29
2.2.2	PROM 结构原理	30
2.2.3	PLA 结构原理	32
2.2.4	PAL 结构原理	32
2.2.5	GAL 结构原理	34
2.3	CPLD 的结构原理	36
2.4	FPGA 的结构原理	39
2.4.1	查找表逻辑结构	39
2.4.2	Cyclone 4E/10LP 系列器件的结构	39
2.4.3	Cyclone 10GX 系列器件的结构	44
2.4.4	内嵌 Flash 的 FPGA 器件	44
2.5	硬件测试	44
2.5.1	内部逻辑测试	44
2.5.2	JTAG 边界扫描	45
2.6	PLD 产品概述	46
2.6.1	Intel (原 Altera) 公司的 PLD 器件	46
2.6.2	Lattice 公司的 PLD 器件	49
2.6.3	Xilinx 公司的 PLD 器件	49
2.6.4	MicroChip (原 MicroSemi) 公司的 PLD 器件	50
2.6.5	Intel 公司的 FPGA 配置方式与配置器件	50
2.6.6	国产 FPGA 器件	50
2.7	CPLD/FPGA 的编程与配置	51
2.7.1	CPLD 在系统编程	52
2.7.2	FPGA 配置方式	52
2.7.3	FPGA 专用配置器件	53
2.7.4	使用单片机配置 FPGA	54
	习题	55
第 3 章	组合电路的 Verilog 设计	56
3.1	半加器电路的 Verilog 描述	56
3.2	多路选择器的 Verilog 描述	61
3.2.1	4 选 1 多路选择器及 case 语句表述方式	61
3.2.2	4 选 1 多路选择器及 assign 语句表述方式	66
3.2.3	4 选 1 多路选择器及条件赋值语句表述方式	68
3.2.4	4 选 1 多路选择器及条件语句表述方式	69

3.3	Verilog 加法器设计	71
3.3.1	全加器设计及例化语句应用	71
3.3.2	8 位加法器设计及算术操作符应用	74
3.3.3	算术运算操作符	75
3.3.4	BCD 码加法器设计	76
3.4	组合逻辑乘法器设计	77
3.4.1	参数定义关键词 parameter 和 localparam	77
3.4.2	整数型寄存器类型定义	78
3.4.3	for 语句用法	79
3.4.4	移位操作符及其用法	79
3.4.5	两则乘法器设计示例	80
3.4.6	repeat 语句用法	80
3.4.7	while 语句用法	81
3.4.8	parameter 的参数传递功能	82
3.5	RTL 概念	84
	习题	85
第 4 章	时序仿真与硬件实现	87
4.1	Verilog 程序输入和编译	87
4.1.1	编辑和输入设计文件	87
4.1.2	创建工程	88
4.1.3	全程编译前约束项目设置	90
4.1.4	全程综合与编译	91
4.1.5	RTL 图观察器应用	92
4.2	仿真测试	93
4.3	引脚锁定与硬件测试	95
4.3.1	引脚锁定	95
4.3.2	编译文件下载	97
4.3.3	JTAG 间接编程模式	98
4.3.4	USB-Blaster 驱动程序安装方法	99
4.4	电路原理图设计流程	100
4.5	HDL 版本设置及 Analysis & Synthesis 功能	102
4.6	利用属性表述实现引脚锁定	103
4.7	keep 属性应用	104
4.8	SignalProbe 使用方法	105
	习题	107
	实验与设计	108
4-1	多路选择器设计实验	108

4-2	8 位加法器设计实验	108
4-3	8 位硬件乘法器设计实验	108
4-4	十六进制 7 段数码显示译码器设计	109
第 5 章	时序电路的 Verilog 设计	111
5.1	基本时序元件的 Verilog 表述	111
5.1.1	基本 D 触发器	111
5.1.2	含异步复位和时钟使能的 D 触发器	112
5.1.3	含同步复位控制的 D 触发器	113
5.1.4	基本锁存器	114
5.1.5	含清 0 控制的锁存器	115
5.1.6	异步时序电路的 Verilog 表述特点	116
5.1.7	时钟过程表述的特点和规律	117
5.2	二进制计数器的 Verilog 表述	118
5.2.1	简单加法计数器	118
5.2.2	实用加法计数器设计	120
5.3	移位寄存器的 Verilog 表述与设计	121
5.3.1	含同步预置功能的移位寄存器设计	121
5.3.2	使用移位操作符设计移位寄存器	122
5.4	自动预置型计数器设计	123
5.4.1	同步加载计数器	123
5.4.2	异步加载计数器	124
5.4.3	异步清 0 加载计数器	125
5.4.4	同步清 0 加载计数器	126
5.5	时序电路硬件设计与仿真示例	126
5.5.1	编辑电路、创建工程和仿真测试	127
5.5.2	FPGA 硬件测试	127
5.6	SignalTap II 的使用方法	128
5.7	编辑 SignalTap II 的触发信号	133
	习题	133
	实验与设计	134
5-1	计数器设计实验	134
5-2	数码扫描显示电路设计	135
5-3	高速硬件除法器设计	136
5-4	不同类型的移位寄存器设计	136
5-5	模可控计数器设计	136
5-6	移位相加型 8 位硬件乘法器设计	137
5-7	半整数与奇数分频器设计	138

5-8	基于 Verilog 代码的频率计设计	140
5-9	VGA 彩条信号显示控制电路设计	141
第 6 章	宏功能模块应用及相关语法	145
6.1	计数器 LPM 模块调用示例	145
6.1.1	计数器模块文本的调用	145
6.1.2	LPM 计数器代码与参数传递语句应用	146
6.1.3	创建工程与仿真测试	148
6.2	利用属性控制乘法器的构建	149
6.3	LPM 随机存储器的设置和调用	150
6.3.1	存储器初始化文件	150
6.3.2	LPM_RAM 的设置和调用	152
6.3.3	仿真测试 RAM 宏模块	154
6.3.4	存储器的 Verilog 代码描述	154
6.3.5	存储器设计的结构控制	157
6.4	LPM_ROM 的定制和使用示例	158
6.4.1	简易正弦信号发生器设计	159
6.4.2	正弦信号发生器硬件实现和测试	160
6.5	在系统存储器数据读写编辑器应用	161
6.6	LPM 嵌入式锁相环调用	163
6.6.1	建立嵌入式锁相环元件	163
6.6.2	测试锁相环	165
6.7	In-System Sources and Probes Editor 使用方法	166
6.8	NCO 核数控振荡器使用方法	168
6.9	FIR 核使用方法	171
6.10	DDS 实现原理与应用	172
6.10.1	DDS 原理	172
6.10.2	DDS 信号发生器设计示例	174
	习题	175
	实验与设计	176
6-1	查表式硬件运算器设计	176
6-2	正弦信号发生器设计	176
6-3	DDS 正弦信号发生器设计	177
6-4	简易数据采集系统设计	177
6-5	移相信号发生器设计	178
6-6	16 位×16 位高速硬件乘法器设计	178
6-7	乐曲硬件演奏电路设计	179

第 7 章 MCU 与 FPGA 片上系统开发	184
7.1 FPGA 扩展 MCU 开发技术	184
7.1.1 FPGA 扩展方案及其系统设计技术	185
7.1.2 基于单片机 IP 软核的 SOC 设计方案	188
7.2 基于单片机核的 FPGA 片上系统设计	190
实验与设计	194
7-1 脉宽/占空比/等精度频率多功能测试仪设计	194
第 8 章 Verilog HDL 深入	199
8.1 过程中的两类赋值语句	199
8.1.1 未指定延时的阻塞式赋值语句	199
8.1.2 指定了延时的阻塞式赋值	200
8.1.3 未指定延时的非阻塞式赋值	201
8.1.4 指定了延时的非阻塞式赋值	202
8.1.5 深入认识阻塞与非阻塞式赋值的特点	203
8.1.6 不同的赋初值方式导致不同综合结果的示例	205
8.2 过程语句归纳	207
8.2.1 过程语句应用总结	207
8.2.2 深入认识不完整条件语句与时序电路的关系	208
8.3 if 语句归纳	210
8.3.1 if 语句的一般表述形式	210
8.3.2 关注 if 语句中的条件指示	212
8.4 三态与双向端口设计	213
8.4.1 三态控制电路设计	213
8.4.2 双向端口设计	214
8.4.3 三态总线控制电路设计	216
8.5 Verilog 系统设计优化	218
8.5.1 资源共享	218
8.5.2 逻辑优化	219
8.5.3 串行化	220
8.5.4 流水线设计	221
8.5.5 乒乓操作法	223
8.5.6 寄存器配平法	224
8.5.7 关键路径法	224
习题	225
实验与设计	226
8-1 4×4 阵列键盘键信号检测电路设计	226
8-2 直流电机综合测控系统设计	228

8-3	采用流水线技术设计高速数字相关器	229
8-4	线性反馈移位寄存器设计	230
8-5	基于 UART 串口控制的模型电子琴设计	230
8-6	PS2 键盘控制模型电子琴电路设计	232
第 9 章	Verilog Test Bench 仿真与时序分析	236
9.1	Verilog HDL 仿真流程	237
9.2	Verilog HDL Test Bench 仿真	239
9.3	HDL 仿真实例	241
9.4	Verilog 系统任务和系统函数	245
9.4.1	系统任务和系统函数	245
9.4.2	预编译语句	251
9.5	延时模型	252
9.5.1	#延时和门延时	252
9.5.2	延时说明块	253
9.6	其他仿真语句	253
9.6.1	fork_join 块语句	254
9.6.2	wait 语句	255
9.6.3	force 语句和 release 语句	255
9.6.4	deassign 语句	256
9.7	仿真激励信号的产生	256
9.8	Verilog 数字系统仿真	257
	习题	258
	实验与设计	259
9-1	在 ModelSim 上对计数器的 Test Bench 进行仿真	259
9-2	在 ModelSim 上进行 16 位累加器设计仿真	259
第 10 章	Verilog 状态机设计技术	260
10.1	Verilog 状态机的一般形式	260
10.1.1	状态机的特点与优势	260
10.1.2	状态机的一般结构	261
10.1.3	初始控制与表述	265
10.2	Moore 型状态机及其设计	266
10.2.1	多过程结构状态机	266
10.2.2	序列检测器及其状态机设计	270
10.3	Mealy 型状态机设计	271
10.4	不同编码类型状态机	274
10.4.1	直接输出型编码	275
10.4.2	用宏定义语句定义状态编码	276

10.4.3	宏定义命令语句	278
10.4.4	顺序编码	278
10.4.5	一位热码编码	279
10.4.6	状态编码设置	279
10.5	异步有限状态机设计	281
10.6	安全状态机设计	283
10.6.1	状态导引法	284
10.6.2	状态编码监测法	285
10.6.3	借助 EDA 工具自动生成安全状态机	285
10.7	硬件数字技术排除毛刺	285
10.7.1	延时方式去毛刺	286
10.7.2	逻辑方式去毛刺	287
10.7.3	定时方式去毛刺	288
	习题	289
	实验与设计	290
10-1	序列检测器设计	290
10-2	ADC 采样控制电路设计	290
10-3	数据采集模块设计	291
10-4	五功能智能逻辑笔设计	294
10-5	通用异步收发器 UART 设计	295
10-6	硬件消抖动电路设计	297
第 11 章	16 位 CPU 创新设计	298
11.1	KX9016 的结构与特色	298
11.2	KX9016 基本硬件系统设计	301
11.2.1	单步节拍发生模块	301
11.2.2	ALU 模块	301
11.2.3	比较器模块	302
11.2.4	基本寄存器与寄存器阵列组	303
11.2.5	移位器模块	305
11.2.6	程序与数据存储器模块	306
11.3	KX9016v1 指令系统设计	306
11.3.1	指令格式	307
11.3.2	指令操作码	308
11.3.3	软件程序设计实例	309
11.3.4	KX9016v1 控制器设计	310
11.3.5	指令设计实例详解	314
11.4	KX9016 的时序仿真与硬件测试	315

11.4.1	仿真与指令执行波形时序分析	316
11.4.2	CPU 工作情况的硬件测试	318
11.5	KX9016 应用程序设计实例和系统优化	320
11.5.1	乘法算法及其硬件实现	320
11.5.2	除法算法及其硬件实现	321
11.5.3	KX9016v1 的硬件系统优化	322
习题		324
实验与设计		324
11-1	16 位 CPU 验证性设计综合实验	324
11-2	新指令设计及程序测试实验	324
11-3	16 位 CPU 的优化设计与创新	326
11-4	CPU 创新设计竞赛	327
第 12 章	Verilog 知识拾遗	328
12.1	Verilog 文字规则	328
12.2	数据类型	330
12.2.1	net 网线类型	330
12.2.2	register 寄存器类型	331
12.2.3	存储器类型	331
12.3	操作符	331
12.4	常用语句补充	332
12.4.1	initial 过程语句使用示例	332
12.4.2	forever 循环语句	333
12.4.3	编译指示语句	333
12.4.4	任务和函数语句	335
12.5	库元件和 UDP 用法介绍	338
12.5.1	Verilog 原语库元件与用法	338
12.5.2	用户自定义原语 UDP 及用法示例	339
12.5.3	利用 UDP 元件设计多路选择器	340
12.5.4	用 UDP 表述 D 触发器	341
12.6	其他仿真语句	342
12.6.1	fork_join 块语句	342
12.6.2	wait 语句	343
12.6.3	force 语句和 release 语句	343
12.6.4	deassign 语句	344
习题		344
实验与设计		344
12-1	SPWM 脉宽调制控制系统设计	344

12-2	数字彩色液晶显示控制电路设计	347
12-3	串行 ADC/DAC 控制电路设计	347
12-4	AM 幅度调制信号发生器设计	347
12-5	VGA 简单图像显示控制模块设计	348
附录 EDA 开发系统及相关软硬件		350
参考文献		364