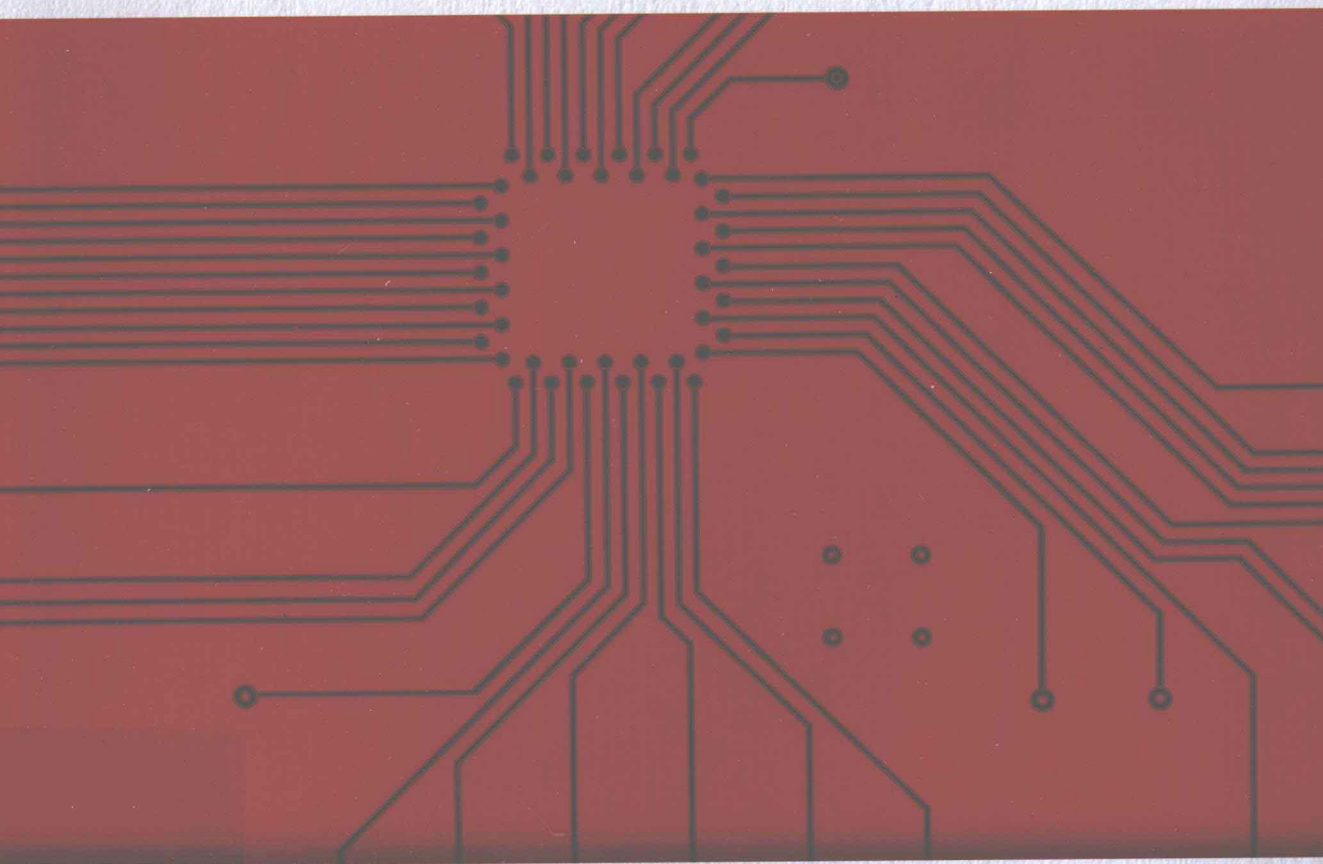


普通高等院校电子电气基础课程创新型系列教材

数字系统设计实验教程

屈民军 唐 奕 编著

李哲英 主审



科学出版社

普通高等院校电子电气基础课程创新型系列教材

数字系统设计实验教程

屈民军 唐 奕 编著

李哲英 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于浙江大学电子电气基础课程改革的成果编写而成,通过实例与实验详细介绍数字系统设计的原理与方法。全书共 7 章,第 1~3 章主要讲解 FPGA 的结构与原理、数字系统的结构化设计方法、设计验证和设计实现;第 4~7 章以培养综合设计和创新能力为原则,通过精选的 28 个实验来训练 ModelSim、ISE 和 ChipScope Pro 等专用开发工具的使用,以及各类典型数字单元、接口和系统的设计。

本书内容紧密联系教学与科研生产实践,实验内容强调基础性、实用性、系统性和趣味性,实验环境基于 Xilinx 公司的 XUP Virtex-II Pro 开发平台,并提供部分 Verilog HDL 程序和丰富的教学资源。

本书可作为普通高等院校电子电气相关专业的数字电路与系统实验课教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字系统设计实验教程/屈民军,唐奕编著. —北京:科学出版社, 2011.2

(普通高等院校电子电气基础课程创新型系列教材)

ISBN 978-7-03-030185-7

I. ①数… II. ①屈…②唐… III. ①数字系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 017953 号

丛书策划:张 濮 匡 敏/责任编辑:张 濮 张丽花/责任校对:张怡君
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 2 月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—4 000 字数:385 000

定价:35.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书评审委员会

主 任： 王志功 教授 东南大学

副主任： 于慧敏 教授 浙江大学

委 员（按姓氏笔画排序）：

王 萍 教授 天津大学

王成华 教授 南京航空航天大学

李哲英 教授 北京联合大学

吴镇扬 教授 东南大学

张晓林 教授 北京航空航天大学

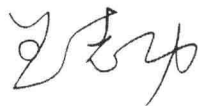
丛 书 序

纵观近代人类科学技术的发展历史,特别自 20 世纪 50 年代以来,电子与信息科学技术出现了从分立器件到集成电路、从模拟电路到数字电路、从数字集成电路到片上系统集成及数模混合片上系统集成的变迁与发展。近年来,又实现了从固定参数系统向可编程系统设计的渐进,形成了从经典电路方程描述的系统向由状态机、离散事件等描述的动态系统研究的新发展趋势。通信技术同样发展迅猛,从时分多路的电话系统,实现了向卫星通信、光纤通信、移动通信的飞跃,并且伴随着互联网的大发展,呈现出数字化、智能化、宽带化的发展趋势,信息技术与通信技术日益融合,相关理论体系和工程应用互相推进。电子信息科学技术的迅猛发展,对高等教育的教学理念、知识体系、课程设置和教学内容提出了巨大的挑战。目前,许多国际知名的大学正对此进行积极的探索与改革。我国的电子电气学科同样需要与时俱进、推陈出新。

浙江大学“信息与通信工程”专业的前身是浙江大学 1957 年成立的无线电专业,后在 20 世纪 90 年代发展为通信工程、信息工程、电子信息工程等专业。为了进一步适应我国信息与通信产业人才的需要,体现信息技术与通信技术相互融合的发展趋势,浙江大学进行了专业改革。经过与企业 and 用人单位的充分研讨,在企业的参与下,整合了浙江大学原通信工程、信息工程、电子信息工程等三个相近的优势专业,于 2006 年经教育部批准成立浙江大学“信息与通信工程”专业。

为了应对科技发展现状下传统教学方法与经验所面临的冲击和挑战,浙江大学信息与电子工程学系在总结特色专业建设经验和课程教学改革成果的基础上,编写了“普通高等院校电子电气基础课程创新型系列教材”。本套丛书以教育部《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》为指导,对照了国际知名大学电气电子与计算机专业的培养方案、课程体系和相关课程设计,同时参照了教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会起草的《电子信息科学与电气信息类基础课程教学基本要求》,以当代信息科学的成果审视和整合经典理论与经典的课程内容,提炼核心知识体系和知识内涵,并努力将最新科学技术引入到大学本科电子信息科学与电气信息类基础课程教学中,有效解决不断积累的新知识与有限的教学学时之间的矛盾,为培养未来科学家和卓越工程师奠定基础。

本套丛书的编写汇聚了浙江大学信息与电子工程学系的优势资源,凝结了一线教师多年的教学经验,突出了先进性与适应性、综合性与多样性、理论与实践的结合,相信会对推动我国电子电气学科基础课程的教学改革,提高教学质量和培养优秀人才起到积极的作用。



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员

东南大学信息科学与工程学院教授

2011 年 1 月

总 前 言

自 20 世纪 50 年代以来,电子与信息科学技术经历了快速而持续的发展,新理论、新技术、新器件不断涌现。在科学技术迅猛发展的同时,新知识的急剧膨胀与学校有限学时之间的矛盾成为高等教育的瓶颈,这对大学的教学理念、教学内容、教学方法提出了巨大的挑战。为此,许多国际知名大学都开展了重大而深入的教学改革,进行了积极的探索。

在国内,虽然为了适应电子与信息科学技术的发展,几十年来高校不间断地进行了专业改革,但是总体上电类基础课程的体系还基本保留着 20 世纪 80 年代的模式。例如,电路课程体系仍然基本沿用旧的知识体系,将电路模型与实际器件、线性与非线性、放大作用与开关、模拟与数字、分立与集成等知识点分开来讲授,分置于电路分析、模拟电子技术、数字电子技术、高频(射频)通信电路和数字逻辑设计等多门课程中,没有将它们相互融合和提炼,以统一、系统的观点帮助学生建立核心的知识体系。并且,原有高频电子线路的应用领域,已从传统的射频扩展到微波频率范围,从原先以广播通信应用为主发展到现代移动通信、卫星通信等应用,早期的数字逻辑电路已演变到以处理器、控制器为基础的可编程和可控的复杂数字系统。但是,我们的电路课程体系和课程内容没有很好地、及时地反映出上述发展现状和趋势,这也是国内大学普遍存在的问题。

浙江大学信息与电子工程学系具有五十余年的发展历史。为了进一步适应我国信息与通信产业人才的需要,体现信息技术与通信技术相互融合的发展趋势,我们进行了专业改革,在企业的参与下,整合了浙江大学原通信工程、信息工程、电子信息工程等三个相近的优势专业,并于 2006 年经教育批准成立浙江大学“信息与通信工程”专业。同时,我们也进行了配套的课程改革和教材改革,并规划了“普通高等院校电子电气基础课程创新型系列教材”,涉及电学、磁学、电子学、信息科学和计算机科学等领域的电路类基础课程,包括电路分析、模拟电子技术、数字电子技术、高频(射频)通信电路和微电子学的初步知识。本套丛书力图将最新技术引入到大学本科电子信息科学与电气信息类基础课程教学中,以当代信息科学的成果审视和整合经典理论与经典课程内容,提炼核心知识体系和知识内涵并贯彻到基础课程的教学,有效解决不断积累的新知识与有限的教学学时之间的矛盾,这也是编写本套丛书的主要指导思想。

本套丛书在编写过程中重点考虑了以下几方面:

(1) 体现特色专业建设经验和教学改革成果,贯彻专业规范和教学基本要求。浙江大学信息与电子工程学系依托国家首批第二类通信领域特色专业“信息与通信工程”和集成电路领域特色专业“电子信息工程”建设点,将特色专业建设的内容、国内外教学研究与改革的成果、高等学校电子信息科学与工程类本科指导性专业规范以及电子信息科学与电气信息类基础课程教学基本要求结合起来,并及时总结教学改革成果,形成本套丛书。教材内容围绕专业规范、基础课程教学基本要求,体现了核心知识体系和知识内涵,真正达到了培养“宽、专、交”人才的目的。

(2) 厚基础、宽口径，构造专业核心知识体系与核心课程。“信息与通信工程”专业知识体系是由信息的获取、表达、传输、处理和系统实现与应用等方面的知识点构建起来的，许多知识点在以上各知识领域呈现相互渗透和交叉的现象与趋势，传统的知识领域的界限已经变得越来越模糊。

例如，D 类音频功放已是目前主流的音频功放技术之一，其电路是由信号处理（变换）电路、开关状态的功率放大管、输出滤波器构成，信号处理电路是将模拟或数字音频输入信号转换成脉宽调制信号。如果要系统地解释清楚 D 类音频功放的原理、应用和设计，就需要掌握模拟电子技术、数字电子技术、系统理论和信号处理等课程的知识 and 相关的新技术。问题是，在我们现有的课程体系中，很难有一门课程或设计一门课程来放置以上的内容。如果能将电路模型与实际器件、线性与非线性、放大作用与开关、模拟与数字、分立与集成等知识点糅合起来，整合在一门基础课程中，从一开始就帮助学生建立电路与电子技术核心的知识体系与基本概念，那么就能从晶体管的开关工作状态和相关信号的特性入手，讲清楚 D 类音频功放的基本工作原理。又如，软件无线电技术、信息处理系统和射频功放中的线性化技术，涉及了电路、信号处理和 DSP 等技术；现代视频技术涉及了信号处理算法、DSP 技术和网络传输技术。类似的例子不胜枚举。专业知识呈现网状结构，所以对专业知识点的梳理不宜区分过细，应以基础和核心知识点入手抓住知识体系的主线，提炼核心知识，以此整合现有的课程，并体现专业的特色。鉴于以上思路，我们首先从信号获取与表达、交换与传输、处理与分析和系统实现等方面所包含的知识点与相互关系着手，将专业主要知识领域分为 3 个较为宏观的知识领域（不包括数理、计算机技术等通识知识领域）：

- ① 电子系统，研究系统实现技术与工程问题；
- ② 信号处理与系统，研究信号处理与系统理论；
- ③ 通信与网络，研究信号传播、通信技术、网络理论与技术。

这些知识领域的主干是比较明确清晰的，其枝干之间存在相互渗透和交叉，这种现象普遍存在于课程中。例如，“射频通信电路”课程与这三个知识领域都有关联，其应用是无线通信，但它可归属于电子系统领域；“DSP 技术”课程也可以归属于电子系统领域，但它的应用是信号处理，需要信号处理和系统的专门知识；“多媒体通信”课程的应用是针对多媒体信息领域，音视频压缩技术是其主要内容，它可以归属于信号处理与系统领域，也可以归属于通信与网络领域；“通信信号处理”课程同样可以属于信号处理与系统领域，也可以属于通信与网络领域，它的应用是通信，需要信号处理、信号调制技术和通信信道模型等知识。电子电路、场、信号处理、系统理论的相关知识点构成了这三个知识领域的基本元素，它们不是独立的，而是相互关联地分布在以上三个知识领域。这样的思路告诉我们，可以从电子电路、场、信号处理、系统理论等四个方面确立专业的基础知识和核心课程，如图 a 所示。

在上述知识框架下，我们确立了电子系统知识体系与核心课程，如图 b 所示。本套丛书的编写遵循了这一新的知识体系。电子系统领域侧重于信息处理和通信系统的物理实现技术和工程问题，应重点学习的基础知识是电路、电子学和数字系统，包括计算机应用技术，其核心课程是“电子电路基础”和“数字系统设计”两门课。其中，“电子电路基础”课程整合了电路分析、模拟电子技术、数字电子技术、高频电子线路等课程内容；“数字系统设计”课程整合了现有的数字电路、FPGA 设计基础、现代逻辑设计等课程，全面引入基于处理器的数字系统设计技术。在电子系统知识体系中，尽管“射频通信电路”是一门重点讲述通信

电路的课程, 但它的知识内涵覆盖了射频电路的设计原理、方法, 具有一定的基础性, 所以也将它纳入了本套丛书。信号处理与系统领域是关于信号与系统的理论, 侧重于信号与信息处理、系统分析与设计理论, 重点学习的核心课程是“信号与系统”和“数字信号处理”; 通信与网络领域是关于电信号的传播、通信系统与技术、网络理论与技术, 其基础核心课程是“电磁场与电磁波”和“通信原理”等。作为专业的基础, “电子电路基础”、“数字系统设计”、“信号与系统”和“电磁场与电磁波”等四门课程应是重点学习的专业基础核心课程, 它们构建电子电路、场、信号处理、系统理论等四个方面的基础知识, 是所有其他专业课程学习的基础。例如, “通信原理”是通信与网络知识领域的一门核心专业课程, 但它的许多基础知识来自于以上四门课程。

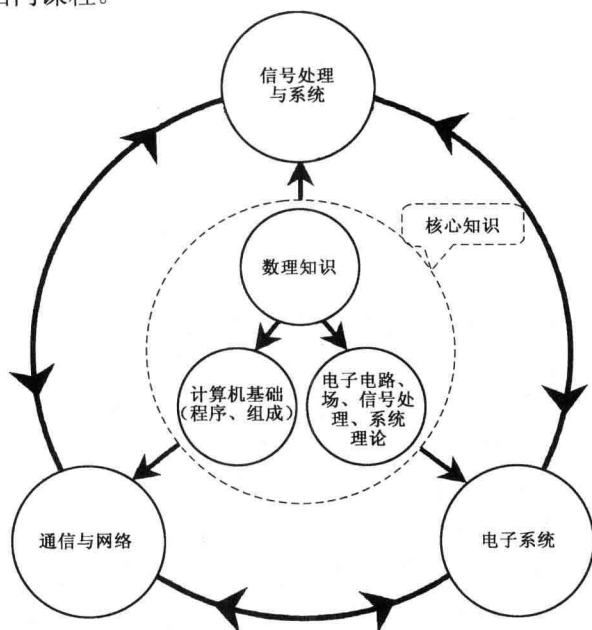


图 a 专业知识体系的构建

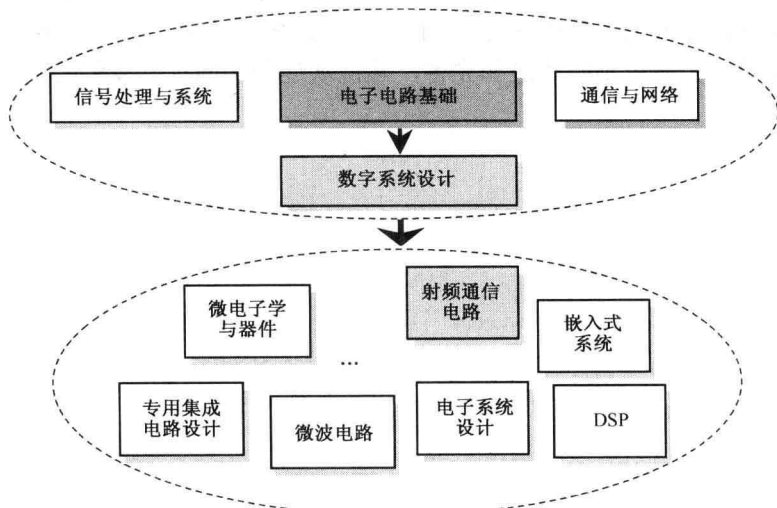


图 b 电子系统知识体系

(3) 借鉴现代教育理论成果, 指导教材内容的编排。根据布鲁斯的结构主义教学原理, 在课程教学中, 首先务必使学生理解该课程的基本结构、工程应用背景以及在专业课程体系中所处的地位, 使学生了解这门课的发展水平, 与其他专业课程的关系, 以及学什么、有什么用等等。因此, 在教材的第 1 章中, 首先给出一个尽量覆盖课程主要内容的系统实例或系统框架原理, 从知识体系、技术发展和应用等方面帮助学生建立起课程的宏观认识, 尽量给出日常生活中已获得应用的典型系统实例, 让学生对课程所要讲述的内容有直观的认识和体验。这种安排可以使学生比较容易接受课程内容的学习, 理解课程知识的工程应用价值, 有助于引导学生进行主动性的学习。

(4) 注重经典与现代技术的融合。本套丛书以当代电子与信息科学技术最新成果审视和整合经典理论与经典课程内容, 提炼核心知识体系与知识内涵, 并贯彻到教材的编写中。教材的编写充分利用现代信息技术的成果, 将 EDA 设计工具全面引入教材和课堂教学。

(5) 面向工程应用, 加强课程实践环节。本套丛书实践部分包括综合性、设计性、系统性实验和课程设计, 将单元性的实验融合在综合性、系统级的实验中, 增加实验的趣味性、设计性和应用性, 使学生获得完整系统级的设计体验和经历。课程实践内容的设计要求引入探究式、开放式、讨论式的教学方法, 加强学生对所学知识工程应用能力的培养, 切实提高学生的设计能力和学习兴趣。

(6) 注重知识体系的完整性, 着力于教材的立体化建设。本套丛书的每本教材都有自己完整的知识体系, 内容丰富, 有利于任课教师在教学中与相关课程衔接, 有利于学生的课前预习和课后复习, 同时也适合广大相关工程技术人员阅读和实际使用。本套丛书还将逐步提供配套的多媒体课件和学习辅导书等辅助教学材料, 为任课教师提供丰富的配套教学资源, 帮助学生自学和课后复习, 使教材更加易教易学。

在本套丛书的策划、编写、出版过程中, 东南大学王志功教授仔细审阅了编写大纲, 并与本套丛书编写组的教师进行了深入的研讨, 提供了许多宝贵的意见和建议, 在此表示衷心的感谢。浙江大学本科生院、浙江大学信息学部、浙江大学信息与工程学系、相关高校专家和科学出版社给予了大力支持与帮助, 在此也表示衷心的感谢。

根据电子与信息科学技术的发展以及国内信息与通信产业的人才要求, 我们将不断更新本套丛书, 以保持教材的先进性和适用性。由于作者的水平所限, 教材中存在一些不足之处, 还需要在今后的教学实践中不断改进和完善, 热忱欢迎全国同行对我们的工作提出宝贵意见和建议!

于慧敏

2010 年 12 月 于求是园

前 言

随着计算机技术和微电子技术的迅速发展, ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 设计和片上系统 (System on Chip, SoC) 设计已成为当前电路设计的主要方向。这就意味着由中、小规模集成电路构成的数字系统和用原理图描述数字系统的设计方法不再顺应当前的技术潮流。数字系统设计必须推向一个新的台阶, 即单片数字系统和用 HDL 语言描述数字系统的设计方法。为了适应这种新技术的发展, 适应新一代信息、通信人才培养的需要, 本书作者在总结多年教学经验的基础上, 查阅了大量国内外相关资料, 并根据教育部的《电子信息科学与电气信息类基础课程教学基本要求》, 编写了这本设计性的实验教材。本书以 Xilinx 公司的 XUP Virtex-II Pro 开发系统为硬件平台, 从系统角度出发, 介绍了利用 EDA 技术自顶而下地设计数字系统的基本方法和技巧。作者精心挑选了大量不同层次的实验内容, 以培养学生综合设计和创新能力为原则, 强调基础性、实用性、系统性和趣味性。希望通过由浅入深的实验进程来加强学生实验基本技能的综合训练, 培养和提高学生的工程设计能力与实际动手能力。

全书共 7 章: 第 1 章介绍 FPGA 器件的结构和工作原理, 并在此基础上讨论了基于 FPGA 的数字系统设计流程和数字系统的调试方法; 第 2 章介绍自顶而下的数字系统设计方法; 第 3 章介绍仿真中非常重要的环节——测试平台 (testbench); 第 4 章通过 6 个实验介绍 ModelSim、ISE、ChipScope Pro 等软件和 XUP Virtex-II Pro 开发系统的使用方法, 并介绍仿真技巧和调试技术; 第 5 章为数字系统设计的基础实验, 主要包括运算电路和输入/输出设备的接口电路等相关实验; 第 6 章为数字系统综合设计实验, 设置的实验强调知识的综合应用, 实验项目有机地综合了电子线路、电子测量、数字信号处理、通信和数字系统等相关学科知识; 第 7 章设置了 32 位多周期的 MIPS 微处理器和 32 位 5 级流水线架构的 MIPS 微处理器的两个设计实验。本书内容丰富, 要求较高, 实验设置符合由易到难、循序渐进的教学规律, 又能引起学生对数字系统设计的兴趣。

本书可作为电子电气相关专业 (电子信息、通信工程、自动化、计算机、测控技术与仪器等) 的数字电路与系统实验课教材, 也可供电子设计领域的工程技术人员参考。由于本书内容较多, 教师可选取一部分进行教学。本书建议授课学时为 54~96 学时。

本书第 3 章由唐奕编写, 其余各章由屈民军编写。在本书编写过程中我们参考了较多的书籍、论文和网络文献, 在此向其作者表示深深的谢意。

浙江大学的于慧敏教授、郑伟博士和陈智德博士给予我们很多良好的建议和帮助, 在此表示感谢。此外, 还特别感谢 Xilinx 公司中国区大学计划经理谢凯年博士为本书的编写提供了良好的实验环境。

本书由北京联合大学的李哲英教授担任主审工作，他在百忙中认真审阅了全书，提出了中肯、详细的修改意见，在此表示衷心的感谢。同时，也向热心支持和关心作者的科学出版社的领导、编辑及工作人员表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免会有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。欢迎读者与本书作者联系（quminjun@126.com）。

编 者

2010 年 11 月

目 录

丛书序

总前言

前言

第 1 章	FPGA 与数字系统设计	1
1.1	概述	1
1.2	可编程逻辑器件基础	1
1.2.1	可编程逻辑器件的发展历史	1
1.2.2	FPGA 芯片的结构	2
1.3	基于 FPGA 的数字系统设计流程	5
1.4	基于 FPGA 的数字系统调试	8
1.4.1	数字系统的调试	8
1.4.2	选择合适的 FPGA 调试方法	10
1.5	实验平台开发的选择	11
1.5.1	实验硬件平台的选择	11
1.5.2	EDA 软件的选择	12
1.6	小结	13
思考题 1		13
第 2 章	数字系统设计方法	14
2.1	数字系统的基本组成	14
2.2	数字系统的结构化设计方法	14
2.2.1	自顶而下的设计方法	14
2.2.2	用 ASM 图设计控制器	15
2.3	数字系统设计实例	16
2.3.1	频率测量系统控制器的设计	16
2.3.2	简易交通信号灯控制系统的设计	18
2.4	小结	25
思考题 2		26
第 3 章	testbench 的编写	27
3.1	概述	27
3.2	testbench 的结构形式	27
3.2.1	testbench 的基本结构	27
3.2.2	testbench 结构实例详解	28

3.3 常用的系统任务和系统函数	30
3.4 testbench 的激励和响应	33
3.4.1 testbench 的激励方式	33
3.4.2 仿真结果分析方式	34
3.5 常用激励信号的一些描述形式	34
3.6 testbench 实例	37
3.6.1 组合乘法器实例	37
3.6.2 PS2 键盘接口电路实例	39
3.6.3 SVGA 显示接口电路实例	42
3.7 小结	44
思考题 3	45
第 4 章 数字系统实验平台的使用	46
实验 1 ModelSim 仿真软件的使用	46
实验 2 ISE 软件的使用	52
实验 3 ChipScope Pro 的逻辑分析实验	62
实验 4 ChipScope Pro 的 VIO 实验	71
实验 5 IP 内核的使用实验	76
实验 6 ModelSim、ISE 的后仿真实验	86
第 5 章 数字系统设计的基础实验	91
实验 7 快速加法器的设计和应用	91
实验 8 浮点数加法器的设计	95
实验 9 乘法器的设计	99
实验 10 快速乘法器的设计	102
实验 11 异步输入的同步器和开关防颤动电路的设计	108
实验 12 SVGA 显示接口实验	112
实验 13 PS2 键盘接口实验	119
实验 14 PS2 鼠标接口实验	127
第 6 章 数字系统综合设计实验	134
实验 15 数字钟设计	134
实验 16 数字式秒表	138
实验 17 文本显示实验	141
实验 18 SVGA 动态显示实验	146
实验 19 点灯游戏的设计	151
实验 20 直接数字频率合成技术 (DDS) 的设计与实现	157
实验 21 音乐播放实验	163
实验 22 低频数字式相位测量仪的设计	173
实验 23 全数字锁相环的设计	178
实验 24 基于 FPGA 的 FIR 数字滤波器的设计	183

实验 25 数字下变频器 (DDC) 的设计	188
实验 26 I ² C 总线实验	192
第 7 章 CPU 设计	198
实验 27 多周期 MIPS 微处理器设计	198
实验 28 流水线 MIPS 微处理器设计	216
附录 A XUP Virtex-II Pro 开发系统的使用	230
A.1 Virtex-II Pro FPGA 主芯片介绍	231
A.2 电源供电模块	232
A.3 时钟电路	232
A.4 SVGA 视频模块	233
A.5 AC97 音频编解码系统	234
A.6 RS232 串行接口模块	235
A.7 PS2 接口模块	235
A.8 开关、按键和 LED 指示灯	236
A.9 下载配置模块	237
A.10 高速和低速的扩展连接器	238
附录 B DigitIO 型扩展板的使用	240
附录 C ASCII 码表	243
附录 D Xilinx 仿真库的建立	245
参考文献	247

1.1 概述

随着集成电路深亚微米工艺技术的发展，FPGA 器件及其应用获得了长足的发展，FPGA 器件的单片规模大大扩展，系统运行速度不断提高，功耗不断下降，价格大幅度调低。因此，与传统电路设计方法相比，利用 FPGA/CPLD 进行数字系统的开发具有功能强大、开发过程投资小、周期短、便于修改及开发工具智能化等特点。并且随着电子工艺不断改进，低成本高性能的 FPGA/CPLD 器件推陈出新，促使了 FPGA/CPLD 成为当今硬件设计的首选方式之一。熟练掌握 FPGA/CPLD 设计技术已经是电子设计工程师的基本要求。

电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）技术是以计算机为工作平台，融合了应用电子技术、计算机技术、智能化技术最新成果而开发出来的一套先进的电子系统设计的软件工具。集成电路设计技术的进步也对 EDA 技术提出了更高的要求，大大地促进了 EDA 技术的发展。以高级语言描述、系统仿真和综合技术为特征的 EDA 技术，代表了当今电子设计技术的最新发展方向。EDA 设计技术的基本流程是设计者按照“自顶而下”的设计方法，对整个系统进行方案设计和功能划分。电子系统的关键电路一般用一片或几片专用集成电路（ASIC）实现，采用硬件描述语言（HDL）完成系统行为级设计，最后通过综合器和适配器生成最终的目标器件。这种被称为高层次的电子设计方法，不仅极大地提高了系统的设计效率，而且使设计者摆脱了大量的辅助性工作，将精力集中于创造性的方案与概念的构思上。近年来的 EDA 技术主要有以下特点：

（1）采用行为级综合工具，设计层次由 RTL 级上升到了系统级；

（2）采用硬件描述语言描述大规模系统，使数字系统的描述进入抽象层次；

（3）采用布局规划（floor planning）技术，即在布局布线前对设计进行平面规划，使得复杂 IC 的描述规范化，做到在逻辑综合早期设计阶段就考虑到物理设计的影响。

从某种意义上讲，FPGA 和 EDA 技术的发展，将会进一步引起数字系统设计思想和方法的革命。正是在这样的技术发展背景下，为了配合数字系统设计课程教学，本书主要讨论基于 FPGA 器件来实现数字系统，所有设计实验课题在 Xilinx 公司的 XUP Virtex-II Pro 开发平台上实现，不过少量实验课题还需要读者自己制作扩展板。

1.2 可编程逻辑器件基础

1.2.1 可编程逻辑器件的发展历史

可编程逻辑器件（Programmable Logic Device, PLD）是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型逻辑器件，是当今数字系统设计的主要硬件平台。PLD 的应用和发展简化了电路设计，

缩短了系统设计的周期,提高了系统的可靠性并降低了成本,因此获得了广大硬件工程师的青睐,形成了巨大的 PLD 产业规模。

20 世纪 70 年代初到 70 年代中期为 PLD 的第 1 阶段,这个阶段只有简单的可编程只读存储器(PROM)、紫外线可擦除只读存储器(EPROM)和电可擦除只读存储器(EEPROM)3 种。由于结构的限制,它们只能完成简单的数字逻辑功能。

20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期为 PLD 的第 2 阶段,这个阶段出现了结构上稍微复杂的可编程阵列逻辑(PAL)和通用阵列逻辑(GAL)器件,正式被称为 PLD,能够完成各种逻辑运算功能。典型的 PLD 由“与”、“或”阵列组成,用“与或”表达式来实现任意组合逻辑,所以 PLD 能以乘积和形式完成大量的逻辑组合。

20 世纪 80 年代中期到 90 年代末为 PLD 的第 3 阶段,这个阶段 Xilinx 和 Altera 分别推出了与标准门阵列类似的 FPGA 和类似于 PAL 结构的扩展型 CPLD,提高了逻辑运算的速度,具有体系结构和逻辑单元灵活、集成度高和适用范围宽等特点,兼容了 PLD 和通用门阵列的优点,能够实现超大规模的电路,编程方式也很灵活,成为产品原型设计和中小规模(一般小于 10 000 门)产品生产的首选。在这个阶段,CPLD、FPGA 器件在制造工艺和产品性能上都获得长足的发展,达到了 $0.18\mu\text{m}$ 工艺和百万门的规模。

20 世纪 90 年代末到目前为 PLD 的第 4 阶段,这个阶段出现了 SoPC 和 SoC 技术,是 PLD 和 ASIC 技术融合的结果,涵盖了实时化数字信号处理技术、高速数据收发器、复杂计算和嵌入式系统设计技术的全部内容。Xilinx 和 Altera 也推出了相应的 SoC FPGA 产品,制造工艺达到 45nm 水平,系统门数也超过千万门。并且,这一阶段的逻辑器件内嵌了硬核高速乘法器、吉比特差分高速串行接口、时钟频率高达 500MHz 的 PowerPC 微处理器、软核 MicroBlaze、PicoBlaze、Nios 和 Nios II 等,不仅实现了软件需求和硬件设计的完美结合,还实现了高速与灵活性的完美结合。它已超越了 ASIC 器件的性能和规模,也超越了传统意义上 FPGA 的概念,使 PLD 的应用范围从单片扩展到系统级。目前,基于 PLD 片上可编程的概念仍在进一步向前发展。

1.2.2 FPGA 芯片的结构

如前所述,FPGA 是在 PAL、GAL、CPLD 等可编程器件的基础上进一步发展的产物。它是作为 ASIC 领域中的一种半定制电路而出现的,既解决了定制电路的不足,又克服了原有可编程器件门电路的缺点。

目前主流的 FPGA 仍是基于查找表(LUT)技术,并且整合了常用功能(如 DRAM、时钟管理和 DSP 等)的硬核模块,其内部结构示意图如图 1.1 所示。FPGA 芯片主要由 6 部分组成,分别为可编程输入输出单元(IOB)、基本可编程逻辑单元(CLB)、完整的时钟管理模块(DCM)、嵌入式块存储器模块(BRAM)、丰富的布线资源、内嵌的底层功能单元和内嵌专用硬件模块。

1. 基本可编程逻辑单元(CLB)

CLB 是 FPGA 内的基本逻辑单元,CLB 的实际数量和特性依器件的不同而不同。在 Xilinx 公司的 FPGA 器件中,CLB 是基于查找表结构的,每个 CLB 由多个(一般为 4 个或 2 个)相同的 Slice 和附加逻辑构成,如图 1.2 所示。

Slice 是 Xilinx 公司定义的基本逻辑单元,其内部结构如图 1.3 所示,一个 Slice 由两个 4 输入的函数发生器、进位逻辑、算术逻辑、存储逻辑和函数复用器组成。

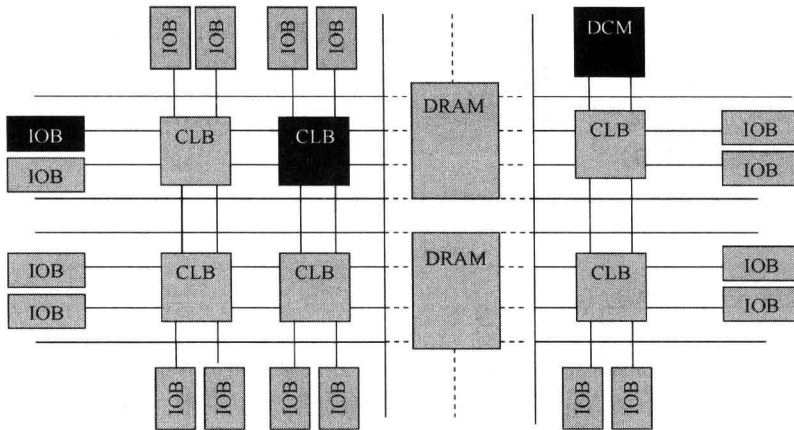


图 1.1 FPGA 芯片的内部结构

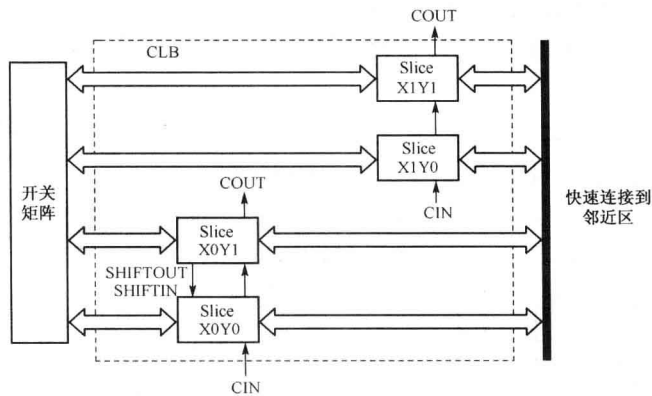


图 1.2 典型的 CLB 结构示意图

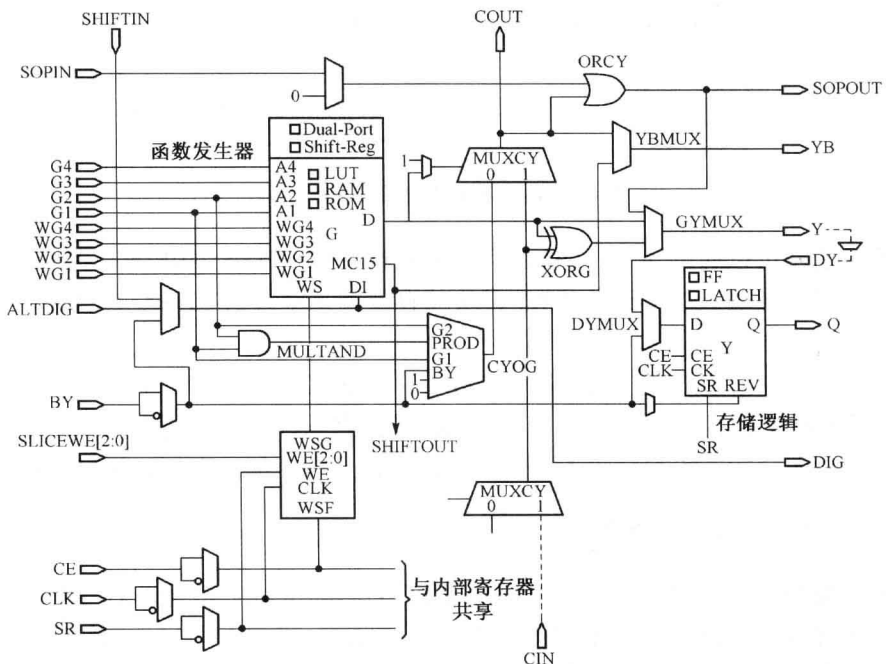


图 1.3 典型的 4 输入 Slice 结构示意图