

信息与电子学科百本精品教材工程

新编电气与电子信息类本科规划教材

EDA技术 与数字系统设计

邹彦 庄严 邹宁 王宇鸿 编著

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

内 容 简 介

本书主要阐述 EDA 技术和数字系统设计方法,按照“编程器件→设计语言→开发软件→系统设计”的顺序,系统地介绍 PLD 器件、VHDL 设计语言、流行的 EDA 设计软件和数字系统设计方法等内容,力求涵盖数字系统开发设计中所涉及的主要方面,并在内容上进行精心编排,以着眼于综合开发能力的提高。

全书共分为 10 章。内容包括系统阐述大规模可编程逻辑器件的基本结构、工作原理及性能特点;介绍 VHDL 硬件描述语言;介绍 EDA 设计的开发软件,主要有 ispDesignEXPERT、MAX+Plus II 和 ISE;详细阐述数字系统设计方法,包括数字系统的组成、硬件描述方法,基于 PLD 的现代数字系统设计,并列举设计实例,提供设计选题。

本书取材广泛、内容新颖、重点突出,注重实用性,并提供丰富的实例,所有的实例均经过仿真和验证。

本书可作为高等院校电子信息、通信工程、测控技术与仪器、自动化和计算机应用等信息工程类,以及相近专业的本科教学用书,也可作为从事电子设计工程技术人员参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

EDA 技术与数字系统设计/邹彦等编著.—北京:电子工业出版社,2007.4

(新编电气与电子信息类本科规划教材)

ISBN 978-7-121-04144-0

I. E… II. 邹… III. ①电子电路—电路设计:计算机辅助设计—高等学校—教材②数字系统—系统设计—高等学校—教材 IV. TN702 TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 041959 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:北京市李史山胶印厂
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:569.6 千字

印 次:2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着微电子技术和计算机技术的飞速发展,现代电子系统的设计和应用已进入一个全新的阶段。基于 EDA 技术的现代电子系统设计正逐步取代人工设计方法,传统的“固定功能模块+连线”的设计方法已逐步退出历史舞台,而基于芯片的设计现已成为电子系统设计的主流。PLD 和 EDA 技术的结合使得电子系统设计变得更加方便、快速、灵活,深受广大电子工程技术人员的青睐,已成为电子系统设计的主要设计手段。因此,掌握 EDA 技术是电子信息类学生、工程技术人员的一项重要设计手段和技能。

EDA (Electronic Design Automation) 即电子设计自动化,是现代电子信息工程领域中的一门新技术,它提供了一种基于计算机和信息技术为一体的电子系统设计方法。EDA 技术起源于 20 世纪 90 年代,经历了计算机辅助设计 (CAD, Computer Aided Design)、计算机辅助工程设计 (CAED, Computer Aided Engineering Design) 和电子系统设计自动化 (ESDA, Electronic System Design Automation) 三个发展阶段。如今的 EDA 技术早已超越了 EDA 初期的电路版图设计自动化的概念,其内容主要指的是电子系统设计自动化,即以大规模可编程逻辑器件为设计载体,以硬件描述语言为系统逻辑描述的主要表达方式,以计算机和 PLD 实验开发系统为设计工具,通过相关的开发软件,自动完成电子系统的设计,最终形成集成电子系统或专用集成芯片。

基于 PLD 芯片设计的 EDA 技术给电子系统设计带来了极大的方便,现已成为设计人员进行硬件设计的强有力工具。设计人员只要拥有一台计算机、一套相应的 EDA 开发工具和 PLD 器件,就能进行电子系统的设计操作。设计人员可以利用 EDA 工具,通过系统设计来定制芯片内部的电路功能,形成设计人员自己开发的专用集成电路芯片。这样可以缩短系统的设计周期、降低设计成本,以适应当今品种多、批量小的电子市场的需求状况,提高产品的竞争力。

为了适应电子系统设计技术的发展,培养 21 世纪所需的、参与市场竞争的电子技术人员,提高学生利用计算机等先进设备进行电子设计的能力,我们编写了这本教材,希望通过本教材的学习,使学生在最短的时间内,以最快的速度掌握 EDA 技术和现代电子系统设计的基本方法,并在有限的时间内完成数字系统设计的课题。

本书共分十章,其内容可分五个部分,按照“编程器件→设计语言→开发软件→系统设计”的顺序,系统地介绍大规模 PLD 器件、VHDL 设计语言、流行的 EDA 设计软件和数字系统设计方法等。

第一部分为绪论,主要对 EDA 技术、可编程逻辑器件 PLD、硬件描述语言 HDL 和数字系统进行简要的介绍。

第二部分为大规模可编程逻辑器件,由第 2 章和第 3 章构成,主要选择国际上主流公司(如 Xilinx、Lattice、Altera 三家公司)的 CPLD 产品和 FPGA 产品,详细介绍器件的结构原理及性能特点。其中,第 2 章主要介绍 Lattice 公司的在系统可编程逻辑器件 ispLSI1016 和 Altera 公司的复杂可编程逻辑器件 MAX7000S 的结构原理;第 3 章以 Xilinx 公司生产的 XC4000 系列器件和 Altera 公司的 FLEX 10K 器件为例,介绍 FPGA 器件的结构和工作原理,

并对这两家公司的其他 FPGA 系列产品的性能特点进行简要介绍。

第三部分为硬件描述语言 HDL, 由第 4 章构成, 主要介绍 VHDL 语言的语言要素、设计实体的基本结构、结构体的描述方式、逻辑描述语句等, 并通过设计实例, 介绍典型数字逻辑电路的描述方法。

第四部分为 EDA 开发软件, 由第 5~7 章构成, 主要介绍 Lattice 公司、Altera 公司和 Xilinx 公司开发的 EDA 工具。其中, 第 5 章介绍 ispDesignEXPERT 工具软件的使用方法, 包括设计文件的编辑、编译、综合、仿真、适配、编程/下载等操作; 第 6 章介绍 MAX+Plus II 开发软件设计源文件的输入、编译、仿真、适配和编程/下载等常规操作; 第 7 章介绍 ISE 集成开发软件的设计输入、功能仿真、设计约束、设计实现和器件的编程配置。

第五部分为数字系统设计, 由第 8~10 章组成, 主要介绍数字系统的设计方法。其中, 第 8 章介绍数字系统的基本概念和描述方法, 包括数字系统的组成、算法流程图、ASM 图和 MDS 图等, 并通过实例介绍数字系统的描述方法; 第 9 章介绍基于 PLD 的现代数字系统设计, 包括设计方法和设计流程, 并通过两个设计实例介绍现代数字系统的设计过程; 第 10 章为数字系统设计选题, 精选了 10 个设计题目。

本书由邹彦等编著。邹彦编写第 1、4、10 章, 庄严编写第 3、6 章, 邹宁编写第 2、5 章, 王宇鸿编写第 8、9 章, 魏永旺和张炜共同编写第 7 章。全书由邹彦统编定稿。

本教材是在电子工业出版社的大力支持下得以出版的, 韩同平编辑为此付出了艰辛的劳动, 在此对他的敬业精神和出色工作表示由衷的敬意和感谢!

由于作者水平有限, 编写时间仓促, 虽然做了很大的努力, 但书中错误、疏漏和不妥之处仍在所难免, 真诚地希望同行专家和读者给予批评指正。

本书配有免费电子课件, 可登录电子工业出版社华信教育资源网 www.huaxin.edu.cn 下载。

作 者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 EDA 技术简介	(1)
1.1.1 EDA 技术	(1)
1.1.2 EDA 技术的发展和展望	(2)
1.1.3 EDA 集成开发工具	(4)
1.2 可编程逻辑器件简介	(5)
1.2.1 可编程逻辑器件的发展概况	(6)
1.2.2 可编程逻辑器件的分类	(7)
1.2.3 PLD 的基本结构和表示方法	(10)
1.3 硬件描述语言简介	(13)
1.4 数字系统简介	(15)
1.4.1 数字系统	(15)
1.4.2 数字系统的组成	(16)
1.4.3 数字系统的实现方式	(17)
1.4.4 数字系统设计方法	(20)
思考题与习题	(21)
第 2 章 复杂可编程逻辑器件	(23)
2.1 CPLD 概述	(23)
2.2 Lattice 公司的 CPLD	(24)
2.2.1 ispLSI 器件简介	(24)
2.2.2 ispLSI 器件的结构	(25)
2.3 Altera 公司的 CPLD	(33)
2.3.1 MAX 器件简介	(33)
2.3.2 MAX7000S 器件的结构和原理	(34)
思考题与习题	(39)
第 3 章 现场可编程门阵列	(41)
3.1 FPGA 概述	(41)
3.2 Xilinx 公司的 FPGA	(43)
3.2.1 XC4000 系列器件的结构原理	(43)
3.2.2 Xilinx 公司的其他系列 FPGA	(51)
3.3 Altera 公司的 FPGA	(52)
3.3.1 FLEX10K 系列的 FPGA	(53)

3.3.2 Altera 公司的其他系列 FPGA	(66)
思考题与习题	(68)
第 4 章 VHDL 硬件描述语言	(69)
4.1 概述	(69)
4.1.1 VHDL 语言简介	(69)
4.1.2 VHDL 语言特点	(70)
4.2 VHDL 语言设计实体的基本结构	(72)
4.2.1 VHDL 语言设计实体的组成	(72)
4.2.2 VHDL 语言的实体说明	(73)
4.2.3 VHDL 语言的结构体	(76)
4.3 VHDL 语言结构体的描述方式	(78)
4.3.1 结构体的行为描述	(78)
4.3.2 结构体的数据流描述	(79)
4.3.3 结构体的结构描述	(80)
4.3.4 结构体的混合描述	(81)
4.4 VHDL 语言的库、程序包及配置	(81)
4.4.1 VHDL 库	(82)
4.4.2 VHDL 程序包	(84)
4.4.3 配置	(86)
4.5 VHDL 语言的语言要素	(88)
4.5.1 VHDL 语言的文字规则	(88)
4.5.2 VHDL 语言的数据对象	(91)
4.5.3 VHDL 语言的数据类型	(93)
4.5.4 VHDL 语言的运算符	(100)
4.5.5 VHDL 语言的属性	(105)
4.6 VHDL 语言的描述语句	(107)
4.6.1 VHDL 语言的顺序描述语句	(107)
4.6.2 VHDL 语言的并行描述语句	(117)
4.6.3 VHDL 语言的子程序	(126)
4.7 VHDL 语言设计实例	(129)
4.7.1 组合逻辑电路的设计	(129)
4.7.2 时序逻辑电路的设计	(142)
4.7.3 状态机的设计	(153)
思考题与习题	(159)
第 5 章 ispDesignEXPERT 开发软件	(163)
5.1 ispDesignEXPERT 简介	(163)
5.2 工程项目的的基本操作	(163)
5.2.1 工程项目管理器	(164)

5.2.2	工程项目的操作	(167)
5.2.3	设计文件的操作	(169)
5.3	原理图设计文件的操作	(172)
5.3.1	原理图编辑器	(172)
5.3.2	原理图设计文件的输入	(177)
5.3.3	原理图设计文件的仿真	(182)
5.3.4	原理图设计文件的编译	(187)
5.4	HDL 设计文件的操作	(187)
5.4.1	VHDL 设计文件的输入	(187)
5.4.2	VHDL 设计文件的编译和综合	(189)
5.4.3	VHDL 设计文件的仿真	(189)
5.5	HDL 与原理图的混合设计	(192)
5.5.1	顶层原理图设计	(192)
5.5.2	底层 HDL 文件设计	(193)
5.5.3	混合设计的编译与仿真	(196)
5.5.4	适配和下载	(197)
5.5.5	层次化操作	(199)
	思考题与习题	(199)
第 6 章	MAX+Plus II 开发软件	(200)
6.1	MAX+Plus II 开发软件简介	(200)
6.1.1	MAX+Plus II 开发软件的特点	(200)
6.1.2	MAX+Plus II 开发软件的主要功能	(201)
6.1.3	MAX+Plus II 开发软件的配置要求和版本	(202)
6.2	MAX+Plus II 开发软件的基本操作	(202)
6.2.1	MAX+Plus II 开发软件的安装	(202)
6.2.2	MAX+Plus II 工具按钮的使用	(205)
6.3	MAX+Plus II 设计文件的输入	(206)
6.3.1	基于原理图设计文件的输入	(206)
6.3.2	基于 HDL 设计文件的输入	(211)
6.3.3	基于波形图设计文件的输入	(212)
6.3.4	MAX+Plus II 的层次化设计	(214)
6.4	MAX+Plus II 设计项目的编译	(215)
6.4.1	编译选项设置	(216)
6.4.2	设计项目的编译	(219)
6.5	MAX+Plus II 设计项目的校验	(222)
6.5.1	设计仿真	(222)
6.5.2	定时分析	(225)
6.6	MAX+Plus II 的器件编程	(228)
	思考题与习题	(230)

第7章 ISE 开发软件	(231)
7.1 ISE 开发软件简介	(231)
7.1.1 ISE6.1i 开发软件的特点	(231)
7.1.2 ISE6.1i 开发软件的集成工具和主要功能	(232)
7.2 ISE 和 ModelSim 的安装及运行	(234)
7.2.1 系统要求	(234)
7.2.2 ISE6.1i 的安装	(235)
7.2.3 ModelSim 的安装	(236)
7.2.4 ISE 与 ModelSim 的关联	(237)
7.2.5 ISE 的运行	(238)
7.3 ISE 的设计输入	(245)
7.3.1 创建工程	(245)
7.3.2 原理图设计输入	(246)
7.3.3 HDL 设计输入	(250)
7.3.4 状态机设计输入	(252)
7.3.5 顶层文件的设计	(259)
7.4 ISE 的功能仿真	(260)
7.4.1 测试激励文件的生成	(260)
7.4.2 ModelSim 的功能仿真	(266)
7.5 ISE 的设计约束	(268)
7.5.1 用户约束文件的建立	(269)
7.5.2 约束文件编辑工具的设定	(269)
7.5.3 使用约束编辑器编写约束文件	(269)
7.5.4 使用 PACE 附加 I/O 引脚约束	(273)
7.5.5 使用文本编辑器设置 I/O 引脚约束	(274)
7.6 ISE 的设计实现	(274)
7.6.1 ISE 的设计综合	(274)
7.6.2 ISE 的设计实现	(278)
7.7 ISE 的编程配置	(279)
思考题与习题	(280)
第8章 数字系统的描述方法	(282)
8.1 数字系统模型	(282)
8.1.1 数字系统模型结构	(282)
8.1.2 数据处理器	(283)
8.1.3 控制器	(285)
8.2 数字系统的硬件描述	(288)
8.2.1 系统方框图	(288)
8.2.2 算法流程图	(288)

8.2.3 算法状态机 ASM	(291)
8.2.4 备有记忆文件的状态图 MDS	(298)
思考题与习题	(305)
第 9 章 基于 PLD 的现代数字系统设计	(307)
9.1 现代数字系统设计概述	(307)
9.2 现代数字系统设计方法	(309)
9.3 现代数字系统设计流程	(310)
9.4 基于 PLD 的数字系统设计实例	(312)
9.4.1 交通灯控制器	(312)
9.4.2 智力抢答器	(321)
思考题与习题	(328)
第 10 章 数字系统设计选题	(329)
10.1 报时式数字钟的设计	(329)
10.2 钟控定时电路的设计	(329)
10.3 智力竞赛抢答器的设计	(330)
10.4 交通灯控制器的设计	(331)
10.5 数字频率计的设计	(332)
10.6 彩灯控制器的设计	(333)
10.7 电梯控制器的设计	(334)
10.8 乒乓球游戏控制器的设计	(335)
10.9 电子密码锁的设计	(336)
10.10 汽车尾灯控制器的设计	(337)
缩略语与相关术语	(338)
参考文献	(343)

第1章 绪 论

集成电路技术和计算机技术的发展,使得数字系统的设计理论、设计方法和设计手段发生了很大的变化。数字系统所使用的逻辑器件由20世纪六七十年代的标准逻辑功能部件,发展到目前的专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit)和系统芯片(SOC, System On a Chip),以及可编程系统芯片(SOPC, System On a Programmable Chip)。尤其是进入21世纪以来,电子设计自动化(EDA, Electronic Design Automation)和电子系统设计自动化(ESDA, Electronic System Design Automation)已成为现代电子系统设计和制造的主要技术手段。

本章作为本书的绪论,简要介绍EDA技术、可编程逻辑器件、硬件描述语言和数字系统的基本概念。

知识要点 EDA技术;可编程逻辑器件;硬件描述语言;数字系统。

教学建议 本章教学安排2~3学时。通过本章的学习,使读者对EDA技术和数字系统的组成有一定的了解。

1.1 EDA技术简介

随着电子技术和计算机技术的发展,数字系统设计已经从使用中、小规模集成逻辑部件,发展到使用大规模、超大规模,以及专用集成电路。设计方法也从传统的单纯硬件设计演变为借助计算机软、硬件的EDA设计。目前,在现代数字系统设计中,EDA已成为一种普遍使用的主要技术手段。

1.1.1 EDA技术

EDA技术是现代电子信息工程领域中一门新技术,它提供了一种基于计算机和信息技术为一体的电子系统设计方法,它的发展和推广极大地推动了电子工业的发展,已成为电子工业中不可缺少的一项主要技术。

EDA技术涉及面广,内容丰富,在不同的时期有着不同的内容。而当今的EDA技术,其含义已经超越了EDA初期的电路版图设计自动化的概念,主要指的是基于可编程逻辑器件的电子系统设计自动化,即以大规模可编程逻辑器件为设计载体,以硬件描述语言为系统逻辑描述的主要表达方式,以计算机和PLD实验开发系统为设计工具,通过相关的开发软件,自动完成电子系统的设计,最终形成集成电子系统或专用集成芯片。

利用EDA技术进行数字系统设计,具有以下几个特点:

- ① 用软件的方式对系统进行硬件设计,如采用硬件描述语言进行系统描述;
- ② 用软件方式设计的系统到硬件系统的转换是由开发软件自动完成的;
- ③ 设计过程中可用有关软件进行各种仿真;
- ④ 现代EDA工具具有高层综合和优化的功能,能在系统级对系统进行综合、优化和仿真,这样可以缩短设计周期、提高工作效率;

⑤ 采用大规模可编程器件实现系统, 整个系统可集成在一个芯片上, 体积小、功耗低、可靠性高;

⑥ 所设计的系统可现场编程, 在线升级;

⑦ 提供开放性和标准化的操作环境, 可实现资源共享, 设计的移植;

⑧ 采用平面规划技术, 可对逻辑综合和物理版图设计进行联合管理;

⑨ 带有嵌入 IP 核的 ASIC 设计, 提供软、硬件协同设计工具;

⑩ 支持多人的并行设计, 适合团队协作, 分工设计。

虽然采用 EDA 技术进行电子设计的目标是硬件系统, 但是综观整个设计过程, 其设计如同完成软件设计一样方便和高效。目前, 基于可编程逻辑器件的 EDA 技术主要包括以下四个要素:

① 大规模可编程逻辑器件。它是应用 EDA 技术完成电子系统设计的载体。

② 硬件描述语言。在设计过程中, 用来描述系统的结构和功能, 是 EDA 技术的主要表达手段。

③ 软件开发工具。它是利用 EDA 技术进行电子设计的智能化设计工具。

④ 实验开发系统。在整个电子系统的 EDA 设计中, 实验开发系统是实现 PLD 编程下载和硬件验证的工具。

综上所述, 采用 EDA 技术进行电子系统设计, 可以缩短设计周期、降低设计成本、提高设计质量、实现资源共享。因此, EDA 技术是现代电子设计的发展趋势。

1.1.2 EDA 技术的发展和展望

EDA 技术是现代电子设计的核心。它的发展以计算机科学、微电子技术的发展为基础, 并融合了应用电子技术、智能技术及计算机图形学、拓扑学、计算数学等众多学科的最新成果, 现已成为现代电子设计的主要技术手段, 无论是电子系统的设计还是集成芯片的设计, 都需要 EDA 技术的支持, 否则将难以完成。

1. EDA 技术的发展历程

EDA 技术是 20 世纪 90 年代初从计算机辅助设计、计算机辅助制造、计算机辅助测试和计算机辅助工程等概念发展而来的。随着计算机技术、集成技术和电子系统设计的发展, EDA 技术经历了计算机辅助设计 (CAD, Computer Aided Design)、计算机辅助工程设计 (CAED, Computer Aided Engineering Design) 和电子系统设计自动化 (ESDA, Electronic System Design Automation) 三个发展阶段。

(1) CAD 阶段 (20 世纪 70 年代至 20 世纪 80 年代中期)

CAD 阶段是 EDA 技术发展的初期, 由于受计算机性能和工作平台的制约, EDA 技术所能支持的设计工作有限且性能较差。设计人员主要借助于计算机完成 PCB 板的布局布线设计、简单版图的绘制, 以及电路性能的模拟、逻辑仿真和预测。

这个时期的开发软件主要是针对产品的开发, 分为设计、分析、生产、测试等多个独立软件包。例如, 用于 PCB 制作的布线软件 TANGO (美国 ACCEL 公司开发)、用于电路模拟的 SPICE 软件, 以及产品化的 IC 版图编辑和设计规则检查系统等。

(2) CAED 阶段 (20 世纪 80 年代中期至 20 世纪 90 年代初期)

随着计算机技术的发展, 集成电路规模的扩大, 电子系统复杂程度的增加, 促进了 CAD

工具的逐步完善和发展,尤其是在设计方法学、设计工具的集成化方面取得了长足的进步,使得 EDA 技术进入 CAED 阶段。其主要特征是进行系统的设计描述、综合与优化、设计结果的验证,以及自动布局布线等。

这个阶段的 EDA 技术主要以逻辑模拟、定时分析、故障仿真、自动布局布线为核心,重点解决电路设计完成之前的功能测试等问题。使设计者在产品制作之前预知产品的功能和性能。

CAED 阶段的 EDA 工具不仅为成功开发电子产品创造了有利的条件,而且为设计人员的创造性劳动提供了方便。但还不能满足复杂电子系统的设计要求。

(3) ESDA 阶段(20 世纪 90 年代以来)

20 世纪 90 年代后,微电子技术有了惊人的发展,工艺制造水平已经达到了深亚微米级,甚至达到超深亚微米级。在一个芯片中已经可以集成上百万只乃至上亿只晶体管,芯片的工作速度也达到了 Gb/s 的数量级,百万门以上的 PLD 器件陆续问世。这些成果对电子设计工具提出了更高的要求,同时也为电子设计自动化提供了广阔的发展空间,有力地促进了 EDA 技术的形成和发展。

ESDA 工具是以系统级设计为核心,包括系统的行为级描述与结构综合,系统仿真与测试验证,系统划分与指标分配,系统决策与文件生成等一整套的电子系统设计自动化工具。它不仅具有电子系统设计的能力,而且还具有高级抽象的设计构思手段。例如,提供方框图、状态图和流程图的编辑能力,具有适合层次描述和混合信号描述的硬件描述语言,同时含有各种工艺的标准元件库。这样就可以使设计人员在不熟悉各种器件厂商和工艺的情况下,完成电子系统的设计。

2. EDA 技术的展望

目前,集成制造工艺已经进入超深亚微米阶段,正在向 $0.05\ \mu\text{m}$ 发展。可编程逻辑器件在其等效逻辑门数、工作电压和时钟频率等方面也有了突破性发展。随着芯片集成度的增大,在单个芯片中集成通用微控制器/微处理器核(MCU/MPU Core)、专用数字信号处理器核(DSP Core)、存储器核(Memory Core)、嵌入式软件/硬件、数字和模拟混合器件已经实现。这些成果的出现,使得 EDA 技术向多个方面发展:向模拟电路和数模混合电路设计的方向发展;向智能性更高、功能更强、高层综合的方向发展;向支持软、硬件协同设计方向发展。

从 EDA 技术的综合应用所构成的硬件系统来看,有些专家和学者认为,EDA 技术的应用发展将表现在以下几种形式:

① 基于 CPLD/FPGA 实现的系统。采用 EDA 技术,对 CPLD/FPGA 进行开发设计,使其作为电子系统、控制系统、信息处理系统的主体。

② 基于 CPLD/FPGA+MCU 实现的系统。将 EDA 技术和单片机技术进行综合应用,开发 CPLD/FPGA+MCU 系统作为电子系统、控制系统和信息处理系统的主体。

③ 基于 CPLD/FPGA+专用 DSP 处理器实现的 DSP 系统。用 EDA 技术开发的 CPLD/FPGA 与专用 DSP 处理器配合使用,组成 CPLD/FPGA+专用 DSP 系统,作为数字信号处理系统的整体,构成 DSP 系统。

④ 基于 FPGA 实现的现代 DSP 系统。采用 SOPC 技术、EDA 技术和 FPGA,来实现现代 DSP 系统。

⑤ 基于 FPGA 实现片上系统(SOC)。使用超大规模的 FPGA 进行 EDA 开发,来实现

能完成复杂功能、含有一个或多个嵌入式 CPU 或 DSP 的单一芯片系统。

⑥ 基于 CPLD/FPGA 实现的嵌入式系统。采用 EDA 技术和 SOPC 技术,使用 CPLD/FPGA 来实现内含嵌入式处理器,能满足对象系统要求的特殊功能,能嵌入到主系统的专用计算机应用系统。

综上所述,随着 EDA 技术的深入发展和软硬件性能价格比的不断提高,EDA 技术的应用将向广度和深度两个方向发展。EDA 技术将会超越电子设计的范畴,进入其他领域。随着基于 EDA 的 SOC 技术和 SOPC 技术的发展、软硬核功能库的建立、IP 核复用,以及基于 VHDL 设计理念的确定,未来电子系统的设计与规划将不再是电子工程师的专利。有专家认为,21 世纪将是 EDA 技术快速发展时期,并且是对 21 世纪产生重大影响的十大技术之一。

1.1.3 EDA 集成开发工具

目前比较流行的、基于可编程逻辑器件的 EDA 集成开发工具主要有:Altera 公司的 MAX+Plus II 和 Quartus II、Lattice 公司的 ispDesignEXPERT 和 ispLEVER、Xilinx 公司的 Foundation 和 ISE 等。

1. Altera 公司的 EDA 集成开发工具

由 Altera 公司开发的 EDA 集成开发工具,现已经历了四代产品。分别为第一代的 A+Plus;第二代的 MAX+Plus;第三代的 MAX+Plus II;第四代的 Quartus II。

MAX+Plus II 提供了与结构无关的设计环境,是一个完全集成化、易学易用的 EDA 开发软件,它支持原理图、VHDL 和 Verilog HDL 语言文本文件,以及以波形与 EDIF 等格式的文件作为设计输入,并支持这些文件的混合设计。配有编辑、编译、仿真、综合及芯片编程下载等功能。

Quartus II 是 Altera 公司的最新一代集成开发软件,支持百万门级的设计,适合大规模 FPGA 的开发,可完成从设计输入、综合适配、仿真到编程下载整个过程的设计。Quartus II 提供了更优化的综合和适配功能,改善了对第三方仿真和时序分析工具的支持,可以直接调用 Synplify Pro (Synplicity 公司)、Leonardo Spectrum (Mentor 公司),以及 ModelSim (Mentor 公司的 Model Technology 子公司)等第三方 EDA 工具来完成设计任务的综合和仿真。另外,Quartus II 包含了 SOPC Builder,可自动添加、参数化和链接 IP 核,包括嵌入处理器、协处理器、外设和用户定义等。它不仅可以与 MATLAB 和 DSP Builder 结合进行基于 FPGA 的 DSP 系统开发,而且还可以实现可编程系统 SOPC 的开发。

2. Lattice 公司的 EDA 集成开发工具

Lattice 公司推出的 EDA 集成开发工具主要有 pDS、ispSynario、ispExpert、ispDesign EXPERT 和 ispLEVER。

ispDesignEXPERT 是 Lattice 公司的第四代产品,它是一套完整的 EDA 开发软件,可以用原理图、硬件描述语言 (VHDL、Verilog 和 ABEL 语言)进行设计输入,以及混合输入。配有编辑、编译、综合、适配、仿真和编程下载等功能。具有界面友好、操作方便、功能强大、与第三方 EDA 工具能有良好的兼容等优点。

ispLEVER 是 Lattice 公司最新推出的集成开发工具,除了支持 Lattice 公司原有的器

件外,还支持最新的 ispMACH、ispXPLD、ispXPGA、ispGDX2 等器件。该软件同时集成了许多第三方专业工具,如综合工具 Synplify Pro、Leonardo Spectrum 和仿真工具 ModelSim 等。

3. Xilinx 公司的 EDA 集成开发工具

Xilinx 公司的 EDA 集成开发工具主要有 Foundation Series 和 ISE。

Foundation Series 集成开发工具采用自动化的、完整的集成设计环境。所有的设计输入、实现和仿真都是在项目管理器中完成的,能够提供多层次原理图设计流程、HDL 设计流程和状态图设计流程,并能进行真正的混合语言综合和优化。另外,该软件包括了强大的 FPGA Express 综合系统(Synopsys 公司),并将它们完美地集成到 Foundation Series 统一的项目管理器中,从而为支持使用第三方的 IP 核提供了有利的条件。因此,该软件成为 IC 制造业最强大的 EDA 设计工具之一。

ISE 是 Xilinx 公司最新推出的基于 CPLD/FPGA 的集成开发软件,它提供给用户一个从设计到综合、布线、仿真、下载的全套解决方案,可以很方便地与其他 EDA 工具接口。其中,设计输入可以使用原理图编辑器 ECS(原理图设计)、文本编辑器 HDL Editor(HDL 语言设计)和状态机编辑器 State CAD(状态图设计);HDL 综合可以使用本公司自己开发的 XST,也可以使用 Synplicity 公司的 Synplify/Synplify Pro 或 Mentor Graphics 公司的 Leonardo Spectrum 等第三方综合系统;设计仿真可以使用图形化的测试激励生成器(HDL Bench),以及 Model Tech 公司的仿真工具 ModelSim XE 或 ModelSim SE。

除了上述介绍的几种用于开发 PLD 的软件外,许多 EDA 公司还提供了各种专业软件,用以进行更复杂和更高效的设计。这些软件分为:用于帮助用户完成原理图和 HDL 文本编辑输入的设计输入工具;用于对设计输入文件进行编译、优化和转换的逻辑综合器;对设计进行模拟仿真的仿真器;用于 IC 版图设计的版图设计工具。在这些软件中,有些具有良好的兼容性和互操作性,可以组合使用。

近年来,由于 DSP 芯片的广泛应用,有些 EDA 公司加大了对这方面工具的开发力度,推出了支持 DSP 开发的软件,如 Altera 公司的 DSP Builder 工具,它允许设计人员在 MATLAB 中设计算法,在 Simulink 中运行系统集成,自动导出 HDL 设计文本到 Quartus II 软件中进行实现,完成从常用的 DSP 开发工具到 EDA 工具的无缝连接。Xilinx 公司也推出了能完成类似功能的开发软件 System Generator。该软件可以将建立的 DSP 系统抽象算法综合成可靠的硬件系统。

1.2 可编程逻辑器件简介

可编程逻辑器件(PLD, Programmable Logic Device)是一种由用户借助计算机编程,来实现某一逻辑功能的器件。自 20 世纪 70 年代问世以来,随着电子技术和计算机技术的发展,PLD 得到了迅速发展,其集成度、速度不断提高,功能不断增强,结构更加合理,使用更加灵活方便。到目前为止,PLD 已从 PROM、PLA、PAL、GAL 等低密度、小规模器件,发展到 EPLD、CPLD、FPGA 等高密度、大规模器件。PLD 的出现,打破了由通用集成电路和其他专用集成电路垄断的局面。与中小规模通用逻辑器件相比,PLD 具有集成度高、速度快、功耗低、可靠性高等优点。与其他专用集成电路相比,PLD 具有产品开发周

期短、用户投资风险小、小批量生产成本低等优势。

可编程逻辑器件是电子设计领域中最具活力和最有发展前景的一种器件。它的出现,改变了传统的数字系统设计方法,为 EDA 技术开创了广阔的发展空间,其影响不亚于 20 世纪 70 年代单片机的发明和使用。可编程逻辑器件可以完成任何数字器件的功能,上至高性能的微处理器 (CPU),下至通用的逻辑门电路,都能用 PLD 来实现。使用 PLD 来开发数字电路或数字系统,不仅可以大大减小系统设计的工作量和难度、缩短设计周期、提高设计效率,而且还可以减少所需芯片的数量、缩小系统的体积、降低系统功耗、提高系统的稳定性和可靠性。

1.2.1 可编程逻辑器件的发展概况

可编程逻辑器件 (PLD) 是一种半定制专用集成电路,与全定制、其他半定制专用集成电路不同,它是一种已完成了全部工艺制造、可以在市场上直接购买到的 ASIC 产品,用户可以通过 EDA 开发工具对器件进行编程,来改变 PLD 内部电路的逻辑关系或连线方式,从而实现所需要的电路功能,所以这种器件又称为可编程 ASIC。

可编程逻辑器件经历了从 PROM、PLA、PAL、GAL 到 EPLD、CPLD、FPGA 的发展过程,不仅在结构、工艺、集成度、功能、速度等方面有了很大的改进,而且在稳定性、可靠性、灵活性上也有了显著的提高。

早期的可编程逻辑器件主要是指能进行编程的只读存储器,包括可编程只读存储器 (PROM)、光擦除可编程只读存储器 (EPROM) 和电擦除可编程只读存储器 (E²PROM) 三种。这些器件由全译码的与阵列和可编程的或阵列组成,由于阵列规模较大,速度低,主要用作程序存储器。

20 世纪 70 年代中期,出现了一种采用熔丝编程、结构稍复杂的可编程芯片,称为可编程逻辑阵列 (PLA, Programmable Logic Array)。这种器件是由可编程的与阵列和可编程的或阵列组成。与 PROM 相比,阵列规模有了很大的减小,提高了芯片的利用率。由于编程复杂,支持 PLA 的开发软件存在一定的难度,因此这种器件没有得到广泛的应用。

20 世纪 70 年代末,美国 AMD 公司推出了可编程阵列逻辑 (PAL, Programmable Array Logic)。PAL 采用熔丝编程方式,双极型工艺制造,由可编程的与阵列和固定的或阵列构成。虽然 PAL 器件在工作速度、输出结构种类上比 PLA 有了很大的进步,但仍然存在只能一次性编程的缺点。另外,器件的输出方式固定,不能重新组态,编程的灵活性较差。

20 世纪 80 年代初,美国的 Lattice 公司和 Altera 公司先后推出了通用阵列逻辑 (GAL, Generic Array Logic)。GAL 由可编程的与阵列和固定的或阵列构成,采用 UVC MOS 或 E²CMOS 工艺,可重复编程,通常芯片可重复擦写上百次,甚至上千次。GAL 器件与 PAL 器件相比,增加了一个可编程的逻辑宏单元 (OLMC),通过对 OLMC 的编程配置,可实现多种形式的输出和反馈。因此, GAL 具有很强的灵活性,在 20 世纪 80 年代得到了广泛的应用。

PROM、PLA、PAL 和 GAL 都属于低密度的 PLD,具有结构简单,对开发软件要求低等优点。但规模小,难以实现复杂的逻辑功能。

20 世纪 80 年代中期,美国的 Altera 公司推出了一种新型的可擦除、可编程逻辑器件 (EPLD, Erasable Programmable Logic Device)。它是一种基于 CMOS 和 UVEPROM 技术的 PLD,集成度远远高于 PAL 和 GAL。由于 EPLD 增加了大量的输出宏单元,提供了更大的

与阵列,使设计的灵活性比 GAL 有了较大的改善,但内部的互连能力比较弱。

20 世纪 80 年代中期, Xilinx 公司提出了现场可编程的概念,并于 1985 年率先推出现场可编程门阵列器件——FPGA (Field Programmable Gate Array)。FPGA 是一种新型的高密度 PLD,采用 CMOS 和 SRAM 技术工艺制造,其结构是由可配置逻辑块 (CLB, Configurable Logic Block)、可编程输入/输出模块 (IOB, I/O Block) 和可编程互连资源 (PI, Programmable Interconnection) 三部分组成。通过 PI 对 CLB 和 IOB 的连接来实现逻辑功能。FPGA 具有密度高、编程速度快、设计灵活和可重新配置等优点。因此,它的出现受到世界范围内电子工程师的普遍欢迎,得到了广泛的应用和迅速的发展,现已成为主流的 PLD 器件之一。

20 世纪 80 年代末, Altera 公司推出了复杂可编程逻辑器件 (CPLD, Complex Programmable Logic Device)。它是在 EPLD 的基础上改进而发展起来的,采用 E²CMOS 工艺制作。与 EPLD 相比, CPLD 增加了内部连线,对逻辑宏单元和 I/O 单元做了重大改进,使其性能更好,使用更方便,设计更灵活,发展也非常迅速。目前, CPLD 是当今另一种主流 PLD 器件。

20 世纪 90 年代初, Lattice 公司推出了在系统编程技术 (ISP, In System Programmable),并相继制作出一系列大规模在系统可编程器件 ispLSI,但仍属于复杂可编程逻辑器件。

20 世纪 90 年代,高密度 PLD 在生产工艺、器件的编程和测试技术等方面都有了飞速的发展。有资料表明, Xilinx 公司推出的低电压 FPGA XCV1000 芯片最大门数可达到 100 万个等效 PLD 门; Actel 公司第二代 Anti-fuse FPGA 的集成度也已达 2 万个等效 PLD 门; Altera 公司的 FLEX10K250 的集成度为 25 万个等效 PLD 门。Xilinx 公司和 Altera 公司开发的带有 IP 核的 FPGA,使得 FPGA 在数字系统设计和 DSP 技术领域的应用更加方便。

进入 21 世纪以来,以 FPGA 为核心的 SOPC 有了显著的发展,单片 FPGA 芯片的集成规模已经达到几亿个晶体管,在结构上已经实现了复杂系统所需要的主要功能,并将多种功能集成在一片 FPGA 器件中,如嵌入式存储器、嵌入式乘法器、嵌入式处理器、高速 I/O 缓冲器、外置存储器接口和实现数字信号处理的 DSP 等功能。

Altera 公司率先提出并成功实现了 FPGA 的系统级解决方案,推出了一系列可编程系统芯片,主要器件有 Cyclone、Cyclone II、Stratix、Stratix II、Stratix GX、HardCopy Stratix、APEX、APEX II 等。

Virtex 系列 FPGA 是 Xilinx 公司推出的另一款用于 SOPC 的可编程芯片,包括 Virtex、Virtex-E、Virtex-II、Virtex-II Pro,以及最新推出的 Virtex-4 等系列。目前,前两种系列已被以高性价比著称的 Virtex-II 和 Virtex-II E 所取代,并逐渐退出市场。

目前,世界各著名半导体器件公司,如 Xilinx、Altera、Lattice 和 AMD 等公司,均提供不同类型的 CPLD 产品和 FPGA 产品。众多公司的竞争,促进了 PLD 技术的提高和发展,使器件的性能不断完善,产品日益丰富。可以预计, PLD 将在结构、密度、功能、速度和性能等方面得到进一步的发展,并在现代电子系统设计中得到更广泛的应用。

1.2.2 可编程逻辑器件的分类

随着电子技术的飞速发展, PLD 经历了从低密度的 PROM、PLA、PAL、GAL 到 EPLD、FPGA 和 CPLD 等高密度 PLD 的发展过程,其结构、集成度和制造工艺都有了很大的变化。目前,可编程逻辑器件有许多种类型,不同厂商生产的 PLD,其结构和特点也有所不同。至今为止尚无严格和统一的分类标准。设计人员经常按照 PLD 的集成度、编程工艺、基本结构和逻辑单元进行分类。下面介绍几种较为通用的分类方法。