

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

电子设计自动化 (EDA) 技术

主 编 葛红宇
副主编 陈 桂

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电气工程及其自动化

电子设计自动化(EDA)技术

主 编 葛红宇

副主编 陈 桂

参 编 盛国良 潘清明 张建华

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍电子设计自动化基础知识及面向工控等领域的集成电路设计方法,内容包括电子设计自动化简介、可编程逻辑器件、VHDL 程序设计、EDA 开发工具、典型逻辑电路设计、常用接口控制电路及工业控制专用集成电路等。

本书内容密切结合自动化、仪器仪表等专业的实际需求,力图帮助学生对相关专用电路的结构、开发流程、分析方法等形成系统的认识,同时得到全面、系统的训练。本书通过相关领域常用电路、实用系统等的设计、分析,实现学校学习与工程实践的无缝连接,体现工程应用型人才的培养特色。

本书实例丰富,便于教学、自学与工程应用,可作为高等学校自动化、仪器仪表、机电工程等专业的本科生教材,也可供相关工程技术人员或研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子设计自动化(EDA)技术 / 葛红宇主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2017.6

应用型本科 电气工程及其自动化专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4481-3

I. ① 电… II. ① 葛… III. ① 电子电路—电路设计—计算机辅助设计 IV. ① TN 702.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 104992 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张 欣 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029) 88242885 88201467

邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 21

字 数 499 字

印 数 1~3000 册

定 价 39.00 元

ISBN 978-7-5606-4481-3/TN

XDUP 4773001-1

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前言

电子设计自动化(EDA)是自动化、测控技术与仪器、机电控制、仪器仪表等多个专业领域的核心课程,其相关技术也是现代工业装备、高性能仪器仪表等工业领域的重要技术之一。结合学科专业领域的最新发展并充分交叉融合,提供面向生产实际特定对象的专用集成电路乃至专用片上系统(SOC),满足工业现场对现代装备在精度、速度、可靠性、实时性、低功耗、复杂环境适应能力等方面的严苛要求,是电子设计自动化本身,同时也是前述各学科领域的重要发展方向与迫切需求。

应用型本科人才是面向工业生产实践、实际工业现场一线亟需的,具备系统分析、设计、工程安装、调试维护等能力的高级应用型人才,如何更好地培养这类人才是现代高等教育的新课题。

综合上述现状,编写组借鉴传统电子设计自动化教材的优势,结合应用型人才的培养特点及要求,结合专业特点与发展情况,将上述专业领域的典型工程对象、典型应用、典型系统以及典型电路引入本书中,力求编写出一本贴合专业、承前启后、详略得当,能体现出工程应用型人才培养特色的电子设计自动化教材。

本书内容按照理论基础、基础实践、综合专业实践三个层次展开,由浅入深、循序渐进地帮助学生获取相关知识并培养相关的系统设计分析能力。本书以数字系统及设计流程方法与实现技术为主要讲述对象,结合自动化、测控技术与仪器、机电控制、通信等学科,全面系统地介绍了电子设计自动化的基本概念、工作流程、设计方法,结合专业与工程实际,全面探讨自动化、仪器科学等领域常用集成电路的结构、描述方法与实现过程。

全书共分7章,内容涵盖电子设计自动化基础、可编程逻辑器件、VHDL 程序设计、EDA 开发工具、典型逻辑电路设计、常用接口控制电路、工业控制专用集成电路等。

电子设计自动化基础重点介绍数字系统的基本结构、设计原则与流程,帮助学生树立相关专业数字系统的基本观念与基础理论;可编程逻辑器件主要分类介绍器件结构、特点、主流器件及选用原则;VHDL 程序设计主要介绍程序基本结构、语言对象与数据类型、电路描述方法、VHDL 常用语法等,培养学生良好的编程基础;EDA 开发工具结合开发工具介绍 EDA 的开发流程、常用分析方法与分析工具,帮助学生掌握基于 EDA 的数字系统设计方法,培养学生初步的设计、分析能力;典型逻辑电路设计结合前序的数字电路课程介绍数字系统的常用电路,帮助学生加深对常用器件功能、结构、数字系统设计流程等的理解,强化学生对常用电路的硬件描述语言的描述能力;常用接口控制电路结合微机原理等课程介绍典型接口电路的 VHDL 描述与实现,帮助学生深入理解 EDA 的流程与分析设计方法,加深对计算机原理与时序的理解,使学生学会用响应时序来设计计算机接口器件,建立系统的概念;工业控制专用集成电路结合运动控制、高速数据采集等工程实例,全面论述相关系统结构、接口电路、存储电路等的设计方法与系统综合分析方法,为学生

提供全面综合的训练，帮助学生全方位地了解相关领域自动化系统的系统构成、规划设计调试方法，形成相对完整、深入的相关专业数字系统认识。

本书由葛红宇副教授担任主编，陈桂教授担任副主编。第1章、第2章由陈桂编写；第3章由盛国良编写；第4章由潘清明编写；第5章由葛红宇、张建华编写；第6章、第7章由葛红宇编写。葛红宇与陈桂负责全书的统稿工作。

在本书的编写过程中我们得到了南京工程学院自动化学院与高教研究所的大力支持与帮助，在此一并表示感谢！

衷心感谢西安电子科技大学出版社的马乐惠等老师对本书出版给予的支持、关心与帮助，是他们无私的关爱与辛勤的汗水使本书得以顺利完成并出版。

鉴于电子设计自动化技术与本书涉及内容的广泛性，以及编者自身知识水平的局限性，书中可能还存在一些不足之处，恳请广大读者及同行不吝指正，在此先行谢过！

编 者
2017年2月

目 录

第 1 章 电子设计自动化(EDA)基础..... 1	3.1.3 结构体设计 37
1.1 基本概念..... 1	3.1.4 复杂结构体的描述方法 42
1.1.1 EDA 的定义..... 1	3.2 VHDL 语言的对象..... 50
1.1.2 EDA 的技术特点..... 2	3.2.1 VHDL 的命名规则 50
1.1.3 EDA 的主要内容..... 3	3.2.2 VHDL 的基本对象 50
1.2 EDA 的发展及其工业应用..... 5	3.2.3 数据类型 52
1.2.1 EDA 的发展阶段及特点..... 5	3.2.4 数据类型转换 56
1.2.2 EDA 技术的工业应用 6	3.2.5 词法单元 58
1.3 基于 EDA 的数字系统设计..... 9	3.2.6 运算操作符 59
1.3.1 数字系统的基本框架 9	3.3 VHDL 的并行语句..... 63
1.3.2 数字系统设计方法 9	3.3.1 进程语句(PROCESS) 63
1.3.3 EDA 设计流程..... 10	3.3.2 WAIT 语句 66
习题与思考 12	3.3.3 BLOCK 语句..... 68
第 2 章 可编程逻辑器件..... 13	3.3.4 子程序和子程序调用语句..... 69
2.1 可编程逻辑器件基础..... 13	3.3.5 并行断言语句 72
2.1.1 基本概念 13	3.3.6 并行赋值语句 73
2.1.2 PLD 器件的发展..... 14	3.3.7 通用模块与元件 77
2.1.3 PLD 的结构特点与分类..... 15	3.3.8 生成语句(GENERATE)..... 80
2.2 典型 CPLD 器件 17	3.4 顺序语句..... 84
2.2.1 MAX7000S 系列器件..... 17	3.4.1 IF 语句 84
2.2.2 ISP 系列器件 20	3.4.2 CASE 语句 87
2.2.3 MAX II 系列器件..... 23	3.4.3 LOOP 语句 89
2.3 典型 FPGA 器件 26	3.4.4 其他顺序语句..... 93
2.3.1 Cyclone III 系列器件..... 26	3.5 VHDL 的程序组织..... 94
2.3.2 Lattice XP2 系列器件 29	3.5.1 子程序重载..... 94
习题与思考 32	3.5.2 程序库及设计 96
第 3 章 VHDL 程序设计..... 33	3.6 元件配置..... 99
3.1 VHDL 程序结构..... 33	3.6.1 体内配置 99
3.1.1 程序基本结构 33	3.6.2 体外配置 101
3.1.2 实体设计 34	3.6.3 直接例化 102
	习题与思考..... 103

第4章 EDA 开发工具	105	5.2.5 并串转换电路	210
4.1 EDA 设计过程	105	5.2.6 JK 触发器电路	215
4.1.1 功能与需求分析	105	5.2.7 D 触发器电路	218
4.1.2 框架设计	105	习题与思考	221
4.1.3 构成模块设计	106	第6章 常用接口控制电路	222
4.1.4 系统实现及分析	106	6.1 可编程并行接口电路	222
4.2 典型 EDA 工具 Quartus II	107	6.1.1 逻辑功能与分析	222
4.2.1 主界面	107	6.1.2 电路的 VHDL 描述	223
4.2.2 项目创建	108	6.1.3 电路实现	228
4.2.3 图形及文本编辑	111	6.1.4 电路测试及分析	229
4.2.4 设计编译	125	6.2 可编程定时/计数电路	232
4.2.5 设计仿真	126	6.2.1 逻辑功能与分析	232
4.2.6 器件及引脚分配	131	6.2.2 电路的 VHDL 描述	237
4.3 基于 Quartus II 的专用集成电路设计	133	6.2.3 电路实现	244
4.3.1 设计分析	133	6.2.4 电路测试及分析	246
4.3.2 项目创建	134	6.3 SPI 总线接口器件	251
4.3.3 设计输入	135	6.3.1 逻辑功能与分析	251
4.3.4 项目编译与仿真设置	144	6.3.2 电路的 VHDL 描述	252
4.3.5 仿真分析	145	6.3.3 电路实现	255
4.3.6 器件与引脚分配	147	6.3.4 电路功能测试及分析	257
4.3.7 器件编程	149	6.4 堆栈(STACK)电路	259
习题与思考	150	6.4.1 逻辑功能与分析	259
第5章 典型逻辑电路设计	151	6.4.2 电路的 VHDL 描述	260
5.1 典型组合逻辑电路设计	151	6.4.3 电路实现	263
5.1.1 译码电路	151	6.4.4 电路功能测试及分析	264
5.1.2 编码电路	156	6.5 先入先出(FIFO)电路	267
5.1.3 比较电路	162	6.5.1 逻辑功能与分析	267
5.1.4 多路选择电路	166	6.5.2 电路的 VHDL 描述	269
5.1.5 加法电路	170	6.5.3 电路实现	271
5.1.6 减法电路	176	6.5.4 电路功能测试及分析	272
5.1.7 乘法电路	182	习题与思考	275
5.1.8 除法电路	186	第7章 工业控制专用集成电路	277
5.2 典型时序逻辑电路设计	191	7.1 单轴交流伺服驱动控制	277
5.2.1 二进制计数电路	191	7.1.1 控制原理与功能分析	277
5.2.2 十进制计数电路	196	7.1.2 电路的 VHDL 描述	280
5.2.3 脉冲发生电路	201	7.1.3 电路实现	289
5.2.4 串并转换电路	206	7.1.4 电路测试及分析	291

第1章 电子设计自动化(EDA)基础

本章介绍电子设计自动化的基本概念,包括 EDA 的含义、技术特点、主要研究内容,EDA 的主要发展阶段及其特点、发展趋势与应用状况,基于 EDA 的工业控制系统,以及基于 EDA 技术的数字系统设计方法、设计流程与设计过程等。

1.1 基本概念

集成电路技术是 20 世纪人类最重要的发明之一,集成电路、大规模集成电路与超大规模集成电路的出现,导致了计算机、数控机床、机器人、Internet、数字化音乐、数字化图像等的发明,极大地推动了网络技术、人工智能、数字化技术、自动控制等领域的发展,甚至催生了一大批新兴的科学技术领域。集成电路技术直接促使制造技术、航空航天、航海、汽车工业乃至食品、医疗甚至文化、艺术行业发生了巨大变化并取得了长足进步,不仅引起了人类社会生产方式的变革,更是引导了人们生活方式、生活习惯的剧烈变化,使人类从辛苦、繁重的生产活动中解脱出来,开启了自我、个性化、愉悦自身的生活方式。从某种程度上说,集成电路技术的进步是现代文明进步与发展的巨大推动力。

数字系统设计或者说电子系统设计,尤其是电子设计自动化,是集成电路技术的重要研究内容与核心发展方向。

1.1.1 EDA 的定义

电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)是指采用大规模可编程逻辑器件作为电路设计载体,利用硬件描述语言作为电路系统控制逻辑的主要描述工具,使用计算机、面向大规模可编程逻辑器件的软件开发工具以及实验开发系统作为开发工具完成的,具有用户指定专有控制功能的单芯片电子系统或集成电路的设计技术。

EDA 全过程通过相关的专用工具软件实现,由软件工具自动完成电路描述程序的逻辑编译、逻辑化简、逻辑分割、逻辑综合及优化、逻辑布局布线、逻辑仿真,最后对特定目标芯片进行适配编译、逻辑映射、编程下载等工作,形成最终的集成电子系统或专用集成电路芯片。根据 EDA 的上述定义与过程描述,可以按照以下的理解来诠释 EDA 技术。

(1) EDA 利用大规模可编程逻辑器件作为设计载体。

EDA 通过大规模编程逻辑器件来实现集成电路。在编程之前,可编程逻辑器件并不具备任何逻辑功能,通过 EDA 技术对可编程逻辑器件写入适当程序,即所谓的编程(Program)或者配置(Configure),可以使可编程逻辑器件具有程序规定的特定功能,实现具体的电子系统。

(2) EDA 采用硬件描述语言描述电路或系统的具体逻辑关系。

传统的电路系统设计中,设计人员往往需要绘制电路的构成元器件、子电路等构成单元,而后绘制元器件、子电路等电气对象之间的连接线,形成不同电路单元相互之间特定的逻辑关系,最后附上必要的说明、注释等非电气对象,完成电路系统的设计。

不同于传统的电路系统,EDA 利用硬件描述语言表述电路系统各组成单元结构、功能、数据处理过程以及相互间的逻辑关系,从而实现对整个电路的规划与设计。

(3) EDA 采用计算机、大规模可编程逻辑器件的专用开发软件与系统作为设计工具。

传统的集成电路行业通过专业厂商完成电路设计、制造,最后给最终用户提供终端产品。与此相对,通过 EDA 开发研制专用电路无需专业制造商的参与,用户可以通过 PC、运行于 PC 上的专用设计软件以及连接在 PC 上、受 PC 控制的试验系统或编程电缆,自行完成电路开发,研制具有自身特点的个性化电路系统。

(4) EDA 的电子系统设计过程是一个由专用软件完成的全自动过程。

EDA 是一个由专用软件与试验系统完成的全自动智能过程,用户可以通过事先设定的软件设置来定制设计原则或设计方法,但其完成过程无需用户干预,开发系统能够根据用户的指定条件,结合固化在开发系统中的专业规则与经验,自行实现电路描述程序到硬件电路的全过程。

(5) EDA 过程包含了电路设计与实现的全过程。

虽然 EDA 不同于传统的电路设计实现方法,但其过程与传统电路设计仍然具有较大的相似性,实现过程仍然包括逻辑化简、逻辑分割、逻辑综合及优化、逻辑布局布线、逻辑仿真等过程,只不过适应硬件描述语言,相应增加了程序输入、编辑编译以及针对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射、编程下载等内容。

(6) EDA 最终形成集成电子系统或专用集成芯片。

EDA 设计的最终结果是一个高度集成的电子系统,整个电路集成在一片具有设计人员指定的专用特定功能的集成芯片中,而不是像传统电路系统的设计,最终得到一块包含多个集成电路模块与模块之间相互连线的控制电路板卡。换言之,EDA 设计实现的是一个集成了多个电路功能的单芯片。

1.1.2 EDA 的技术特点

根据 EDA 的基本概念与实现过程,对比与其功能相似的传统电路设计与软件系统程序设计,可以将 EDA 的技术特点归纳为以下几点:

(1) 采用软件方式的硬件设计。EDA 是一种软件方式的硬件设计过程,具有与传统程序设计一样的代码编辑、编译过程,EDA 的集成开发环境同样可以为程序设计者提供查错、纠错功能。同时,描述硬件的程序代码不仅可以描述集成电路的组成结构与连接关系,还可以描述集成电路的功能行为与输入/输出对应关系。

EDA 的上述特点为非专业集成电路的工程设计人员研制自身专业领域的专用电子系统或集成电路提供了有效途径,掌握硬件描述语言的工程设计人员可以方便地将本专业的工程方法固化到集成电路中,从而形成专业性更强的专用电子系统或集成电路。

(2) 软件到硬件的转换由开发软件自动完成。如前所述,EDA 通过其软件工具实现硬

件描述语言到硬件集成电路的转换,转换过程由工具软件自主完成,设计人员可以通过修改器件设置、引脚分配、配置模式等达到修改设计的目的。

(3) 设计过程中可用软件仿真。EDA 开发系统多带有软件仿真模块或第三方的软件仿真工具,借助工具,设计人员可以实现对当前电路的功能、时序、行为仿真,评价设计效果并根据效果及时修正电路设计。

(4) 线上可编程。现代的大多数可编程逻辑器件具备在线编程(也称在线配置)功能,借助 EDA 工具软件与编程电缆等编程硬件,设计人员可以将改好的程序即时下载(烧录)至目标器件,无需使用第三方的专用烧录器或编程器。在线编程也为现有系统升级与更新换代提供了方便,用户可以在不改变硬件的情况下实现新的系统,增强功能。

(5) 单芯片集成系统,具有高集成度与可靠性、低功耗。不同于传统的硬件电路设计,EDA 最终实现的是电子系统的集成芯片,避免了传统电路中大量使用的分立元件、中小规模集成电路及必需的焊接、连线,因此能够实现较高的集成度、可靠性,实现系统的低功耗。

1.1.3 EDA 的主要内容

EDA 的基本内容主要包括大规模可编程逻辑器件、硬件描述语言与开发工具。三者各司其职,其中硬件描述语言用于系统描述,说明电子系统的功能、组成结构或动作行为;开发工具负责程序输入、程序编译,将硬件描述语言转换为实际电路并下载至可编程逻辑器件;大规模可编程逻辑器件则负责接收生成的最终电路,在开发工具控制下实现集成系统。

1. 大规模可编程逻辑器件

大规模可编程逻辑器件 PLD 是一种内部集成大量逻辑电路与可编程连接线的半成品集成电路,它一般由专业集成电路厂商制造,可编程配置实现用户需要的任意功能。目前常用的可编程逻辑器件主要有复杂可编程逻辑器件 CPLD 与现场可编程逻辑门阵列 FPGA 两类。相关的器件制造商有很多,代表性的厂家包括 Xilinx、Altera 和 Lattice 半导体、Microsemi 等。

(1) Altera。Altera 是国际上最知名的 PLD 器件制造商之一,也是 CPLD 器件的发明者。目前应用较广的 Altera PLD 器件主要包括 MAX3000、MAX7000、MAX II 系列的 CPLD 器件以及 Arria GX、Arria II GX、Cyclone、Cyclone II、Cyclone III、Cyclone IV GX、Stratix、Stratix II、Stratix II GX、Stratix III 等系列的 FPGA 器件。

(2) Xilinx。Xilinx 是 FPGA 器件的发明者,目前的 PLD 器件主要有 XC9500、Coolrunner-II 等系列的 CPLD 器件与 Spartan、Vertex、Artix、Kintex 等系列的 FPGA 器件,Vertex-II Pro 器件的容量可达到 800 万门。

(3) Lattice 半导体。Lattice 半导体是在线可编程 ISP 技术的发明者。迄今为止,ISP 技术已经被广泛应用于各类集成电路,不再仅仅局限于 PLD 器件。Lattice 半导体的可编程逻辑器件主要包括 ispLSI1000、ispLSI2000、ispLSI5000、ispLSI8000、ispXPLD、ispMACH 等系列的 CPLD 器件,以及 LatticeXP2、ICE40、ECP 等系列的 FPGA 器件。

PLD 适合于新品研制或小批量产品开发,在开发周期、上市速度上具有优势,同时 PLD 转掩膜 ASIC 方便,开发风险大为降低,是现代电子设计方法的重要载体。与传统电路相比,PLD 在集成度、速度、可靠性方面具有明显的优势,因而使其在工业、消费类电

子等领域得到了广泛应用。

同样作为可编程逻辑器件, CPLD 与 FPGA 具有各自不同的特点。一般而言, 相对于 FPGA, CPLD 无需外部 FLASH 存储器, 具有较快的速度与较小的规模, 内部硬件资源小于 FPGA。因此, 在实际选用时, 针对复杂逻辑、复杂算法或者多功能系统、单片系统等场合, 多选用 FPGA; 针对速度要求高、逻辑相对简单、功能相对单一的场合, 多选用普通规模 CPLD。然而, 随着技术进步, CPLD 的密度也在不断扩大, 逻辑资源不断增多, FPGA 也在借鉴 CPLD 的器件优势, 出现了内部带有 FLASH 的器件, CPLD 与 FPGA 之间的界限有模糊化的趋势。

2. 硬件描述语言(HDL)

EDA 中, 硬件描述语言用于描述电子系统的逻辑功能行为、电路结构与连接形式, 它尤其适合大规模系统的设计。目前的 EDA 设计中应用最为广泛的硬件描述语言主要有 VHDL、Verilog HDL、ABEL 等。

1) VHDL

VHDL 的全称 Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language, 是 IEEE 与美国国防部共同确认的标准硬件描述语言, 也是支持工具最多的硬件描述语言之一。

VHDL 具有较强的硬件描述能力, 是一种全方位的 HDL, 包括系统行为级、寄存器传输级和逻辑门级等多个设计层次。VHDL 支持硬件的结构描述、数据流描述、行为描述以及三种形式的混合描述方法, 自顶向下或自底向上的电路设计方法都可以用 VHDL 实现。同时, VHDL 较宽范围的描述能力使设计人员能够专注于系统功能, 而在物理实现上只需花费较少的精力。

VHDL 代码简洁明确, 适于复杂控制逻辑的描述; 描述方式灵活方便, 且便于设计交流与重用; 作为一种标准语言, VHDL 不依赖于特定器件, 被众多 EDA 工具所支持, 移植性好。

2) Verilog HDL

Verilog HDL 也是一种 IEEE 的标准硬件描述语言, 由 Gateway Design Automation 公司于 1983 年提出。Verilog HDL 采用文本描述数字系统的硬件结构与行为, 可以描述逻辑电路图、逻辑表达式以及数字系统的逻辑功能。

Verilog 以模块为基础实现设计, 具有与 C 语言类似的风格, 形式自由、灵活, 容易掌握, 对其提供支持的 EDA 工具也较多, 综合过程较 VHDL 稍简单, 高级描述方面不如 VHDL。

3) ABEL

ABEL 支持不同输入方式的 HDL, 输入方式包括布尔方程、高级语言方程、状态图与真值表等。ABEL 广泛用于各种可编程逻辑器件的逻辑功能设计, 由于其语言描述的独立性, 以及上至系统、下至门级电路的宽口径描述功能, 因而适用于各种不同规模的可编程器件的设计。ABEL-HDL 还能对所设计的逻辑系统进行功能仿真而无需估计实际芯片的结构。

与 VHDL、Verilog 等语言相比, ABEL 适用面宽、使用灵活、格式简洁、编译要求宽松, 适于速成或初学者学习, 但综合工具较少。

3. 开发工具

不同于传统的软件开发工具,EDA 开发工具直接面向特定的一类或几类 PLD 器件。自 20 世纪 70 年代可编程逻辑器件出现以来,可编程逻辑器件一直处在持续的高速成长期,要求相应的开发工具必须不断地更新换代,以适应 PLD 技术的飞速发展。因此,EDA 的开发工具主要由器件生产厂家研制,或者与专门的软件厂商共同开发。结合所生产的 PLD 器件,Altera、Xilinx、Lattice 半导体等厂商均推出了面向自身器件的专用开发工具。

(1) Altera 的开发工具。Altera 的 EDA 工具主要包括 MAXPLUS II、Quartus II 等系列软件,Quartus II 系列平台是当前 Altera 的主流开发平台。Altera 的系列开发平台具有友好的人机界面,能够清晰地体现 EDA 的设计流程,在 EDA 的教学及工程实践中都有广泛的应用,其中 MAXPLUS II 也是高校早期 EDA 教学的重要内容。

Altera 的系列开发工具采用集成开发环境,支持原理图、文本、波形、EDIF 以及多种方式混合的设计输入模式,支持 VHDL、verilog 等描述工具,具备较强的功能。其中 MAXPLUS II 只支持 MAX7000/3000、Flex 等较早系列的器件。

(2) Lattice 半导体的开发工具。Lattice 半导体是全球最主要的知名 PLD 器件厂商之一,ISP 及具有独特技术与结构的 CPLD、FPGA 器件使其在可编程器件领域占有重要的地位。自 21 世纪以来,Lattice 的 PLD 器件受到越来越多的青睐,Lattice XP2 等系列的器件被包括中国大陆在内的大量通信、工控企业选用。

Lattice 半导体的 PLD 开发工具主要包括早期的 ispEXPERT 系列以及当前主流的 ispLever 系列开发平台。Lattice 半导体的开发工具面向自己的 CPLD 与 FPGA 器件,支持 VHDL、ABEL、Verilog 等多种语言的设计、综合、适配、仿真及在线下载。

(3) Xilinx 的开发工具。Xilinx 是原来全球最大的 PLD 制造商,其开发软件有 Foundation 和 ISE 系列的集成工具,其中 ISE 系列工具为当前主流的设计平台,它采用自动化的、完整的 IDE 集成设计环境。Xilinx 在欧美、日本及亚太地区具有广阔的用户群。

除了上述的集成工具,针对 EDA 过程中的设计输入、逻辑综合等操作,还有大量的第三方工具,例如 HDL 的专用文本编辑器 UltraEdit、HDL Turbo Writer,可视化 HDL/Verilog 编辑工具 Visial HDL/Visial Verilog, HDL 逻辑综合工具 Synplicity 等。

1.2 EDA 的发展及其工业应用

1.2.1 EDA 的发展阶段及特点

EDA 产生于 20 世纪 70 年代,迄今为止经过了 40 年的发展历程,根据不同时期的技术特点,可以将其发展过程划分为各具特色的三个阶段。

1. 早期计算机辅助设计阶段

受到软件技术、计算机硬件以及集成电路技术的发展制约,20 世纪 70 年代的早期 EDA 技术尚处在萌芽阶段,其应用主要局限在计算机辅助绘图(Computer Aided Design, CAD),设计人员借助计算机与相关软件实现 IC 版图的编辑、PCB 的布局布线,以取代部分手工

操作,此时的 EDA 主要有以下特点:

- (1) 基本局限在面向板级电路的电子系统设计,系统构成采用中小规模集成电路或者分立元件。
- (2) 通过 CAD 的两维图形编辑与分析工具替代设计中的繁杂劳动,如布线、布局、布图等。
- (3) 整个电子系统在焊接组装好的 PCB 上进行调试。

2. 计算机辅助工程设计阶段

20 世纪 80 年代,EDA 进入计算机辅助工程设计阶段(Computer Aided Engineering Design, CAE)。除了图形绘制,EDA 工具备有电路功能设计与结构设计功能,同时通过网络表将两者联系在一起。此时的 EDA 主要有以下特点:

- (1) 相对于早期的 CAD 阶段,该阶段的 EDA 工具备有原理图输入、逻辑模拟、定时分析、故障仿真、自动布局布线等强大功能。
- (2) 该阶段 EDA 技术发展的重点是解决设计完成之前的功能检测与模拟分析等问题。
- (3) 出现了具有自动综合能力的 EDA 工具。
- (4) 该阶段 EDA 技术的问题在于大部分使用原理图完成设计的 EDA 工具在复杂控制逻辑描述或复杂系统设计方面存在较大困难。

3. 电子设计自动化阶段

20 世纪 90 年代开始,随着超大规模集成电路技术、计算机软件、高性能计算机等的高速发展,以及电子系统设计理论的进一步完善,电子系统设计进入真正的电子设计自动化阶段。此时的 EDA 主要有以下特点:

- (1) EDA 技术进入物理校验、布局、逻辑综合、设计模拟与软硬件协同设计阶段。
- (2) EDA 开发平台自主实现 HDL 语言描述到门级电路网表的全过程,将电路映射到特定器件的专用结构中。
- (3) 微电子工艺达到深亚微米级,器件集成度提高到百万甚至千万门级,相应的电路也由使用集成电路转向设计集成电路、片上集成系统与单片系统 SOC。
- (4) 开发工具具有抽象设计能力,具有框图、状态图与流程图编辑功能,具有硬件描述语言(VHDL, ABEL, AHDL)标准元件库。
- (5) EDA 超越电子设计进入其他领域,与其他领域充分融合,产生大量基于 EDA 的单片专用系统 SOC;基于 VHDL 自顶向下的设计理念以及软硬核功能库在 EDA 设计中得到广泛应用。

1.2.2 EDA 技术的工业应用

目前,EDA 已经广泛应用到通信、汽车、地铁、航空航天、机床设备等领域中。结合生产现场的特定需求,EDA 为多个工业领域的生产现场控制提供低功耗、高集成、高运算速度的专用集成电路,能够有效解决困扰工业控制的实时性、抗干扰、并行处理以及多变量复杂控制要求等问题。

在当前技术条件下,EDA 技术多采用嵌入式结合大规模可编程逻辑器件的硬件结构应用于工业控制现场,充分发挥嵌入式处理器片上资源丰富的优势以及可编程器件运算速度

快、集成度高、并行处理等特点。高性能嵌入式处理器一般提供片上的 SPI、I²C、并行接口、多路 AD、DA、PWM 控制、液晶显示接口等资源,且技术成熟、使用方便,在系统中通常负责人机接口(包括键盘控制、液晶显示等)、常规的数据采集与转换等工作;大规模可编程逻辑器件主要负责高实时的信号采集、高速数据运算与处理、高频信号控制逻辑等任务。二者的有效结合,能够充分发挥专用集成电路与 PLD 的优势,降低开发难度,缩短开发周期,同时系统的功耗和集成度等与 SOC 或 SOPC 相差不大,是目前工业控制领域中一种较优的解决方案。

1. 汽车领域的应用

汽车工业是国家经济的重要支柱,也是关系到国计民生的重要产业,EDA 技术在汽车领域已经有了很多成功的应用实例,PLD 制造商甚至专门针对汽车行业开发了标准的可编程逻辑器件。

(1) 汽车系统实时控制方面。华南理工大学在大功率电动汽车充电电源研究中,采用嵌入式处理器 DSP 结合 CPLD 的控制结构,通过 CPLD 实现故障信号的逻辑运算,实时响应故障信息,DSP 实现数据采集和运算处理,保证了电源的高效、可靠;桂林电子科技大学充分利用 FPGA 的高速度与高集成度,实现了一种基于 FPGA 的毫米波汽车防撞雷达实时控制算法与车载防撞雷达实时系统。

(2) 汽车系统实时数据处理方面。东北大学采用 FPGA 实现红外图像系统的视频格式转换、快速中值滤波、自适应平台直方图双向均衡化,满足了汽车夜视系统图像处理的速度与效果要求;桂林电子科技大学利用 FPGA 实现视频流的实时采集与处理,包括图像的灰度化、滤波、边缘检测、膨胀、腐蚀、车牌定位与大小检测、液晶显示等功能,实现了车载的单目视觉实时测距系统。

随着汽车工业的进一步发展,EDA 技术的进步,EDA 会在汽车控制的通信、安全、动力等领域发挥更为重要的作用。

2. 机床设备的控制

机床设备是一个多变量的复杂控制对象,一般包括多达几十路、甚至上百路的开关量输入输出、多个电机的速度、位移、加速度高速协调动作、多个模拟量的输入输出、程序编辑、指令编译等过程的操作与控制。高速复杂运算、强实时、多指标与并行处理是该机床设备控制的典型特征,控制系统一般采用多 CPU 分级处理的控制方式,处理器之间、任务之间通信繁琐,实时性、可靠性与集成度是该领域长期面临的难题之一,EDA 能够为其提供的有效的手段。

西南交通大学针对多轴步进电机的控制,研制了高性能步进电机 IP 核,结合 Nios II 处理器软核,实现了多轴步进电机高精度度控制的可编程片上系统(SOPC);大连理工大学通过 FPGA 实现直流电机的速度和位置编码检测,DSP 获取电机运动参数并完成 PID 控制,开发了基于 DSP 与 FPGA 的多路微特电机的嵌入式控制系统;长春光学精密机械与物理研究所在交流永磁同步电机驱动的大型望远镜伺服控制系统研究中,通过 FPGA 实现了 PWM 波的发生、电流实时采集、速度在线实时检测等功能,研制了 DSP 结合 FPGA 的大型望远镜伺服控制系统,很好地解决了大型望远镜运行中遇到的高精度、低速平稳性等问题。

3. 通信领域的应用

大规模可编程逻辑器件在运算速度、数据处理功能、抗干扰以及集成度等方面展现出来的巨大优势,说明了 EDA 技术特别适合通信领域的高频信号处理、传输、以及高频通信控制逻辑的实现,EDA 应用于通信领域具备天然的优势。同时,通信领域也是 EDA 技术应用最早、最为广泛的领域之一。

国家数字交换系统工程技术研究中心在海量数据库研究中,利用 FPGA 控制对电路交换域的数据采集,实现数据从电路交换域到分组交换域的高效、自动转换,研制了基于 FPGA 的电路交换域数据采集片上系统(SOC);中国科学技术大学针对阵列天线卫星移动通信抗干扰能力差、传播损耗大等问题,利用 VxWorks 计算基于递归最小均方算法(RLS)的解扩重扩盲自适应波束形成算法权值,通过 FPGA 实现波束形成与直接序列扩频,实现了数字波束形成技术(DBF)和扩频技术相结合的、低信噪比抗干扰卫星移动通信数字接收系统。

4. 航空领域的应用

航空应用也是 EDA 技术应用的一个重要领域,由于飞行控制具有多变量、强实时、复杂运算、并行处理、非线性等特点,大容量、超大容量的可编程逻辑器件在飞行控制方面能够发挥重要的作用。

南京航空航天大学通过 FPGA 实现内嵌处理器、硬件协处理器及同步数据总线,实现了航空发动机电子控制器原理样机与相应的 SOPC 片上系统;武汉大学将 EDA 应用于航拍云台姿态控制,通过 FPGA 实现航拍云台姿态的数据采集控制与 Kalman 滤波的浮点数运算,实现了一种基于硬件 Kalman 滤波器的航拍云台姿态获取方法;四川大学利用直接频率合成技术通过 FPGA 实现了中心频率 1080Hz,频率范围为 1075 ± 1085 Hz,步进为 0.1 Hz 的某型航空发动机电子调节器综合测试系统信号源。

5. 机器人控制

机器人目前是国内外多个工业领域最为活跃的一个行业,随着我国由制造业大国向制造业强国发展,国家与各级地方政府对机器人行业也给予了极大的关注与支持,机器人行业成为我国下一个经济增长的重要支柱。多关节、多运动的高速、实时、协调控制是机器人控制的关键问题,EDA 技术与大规模可编程逻辑器件有望为其提供完美的解决方案。

河海大学采用 32 位嵌入式控制器结合 FPGA 的硬件电路结构,通过 FPGA 器件实现各 CPU 之间的高速、实时数据交换,实现了四足步行机器人控制;中科院自动化研究所通过 FPGA 实现 Nios II 双核,分别完成控制任务管理与多电机的同步协调运动控制,包括 PWM 信号生成、编码器信号处理以及多电机同步伺服运算等,并提出了基于 FPGA 的机器人的可重构嵌入式控制结构,并研制了微小型爬壁机器人的片上控制系统(SOC);华南理工大学通过 RS232 获取焊枪高度位置信号,利用 FPGA 作为控制主机,通过定时采样插补实现了焊枪高度位置的自动调整,保证导电嘴与工件距离的精确控制,实现了爬行式焊接机器人控制系统。

EDA 技术也应用于其他工业领域,包括城轨、地铁、建筑、能源等领域。总体而言,结合特定行业并与行业领域充分融合,解决困扰工业领域难题,不仅是各工业领域的重要发展方向,也是 EDA 技术未来发展的重要方向。结合特定应用,研制具有行业特色的专用集成电路、专用片上系统是目前也是未来 10~20 年 EDA 技术的重要研究内容。

1.3 基于 EDA 的数字系统设计

1.3.1 数字系统的基本框架

数字系统的典型结构框架如图 1.1 所示。系统的基本构成主要包括数据采集与处理、系统调度与控制模块。其中，数据采集与处理模块实现外部数据采集、转换、存储、传输以及运算处理等功能；系统调度与控制模块接受外部指令、时钟与约束条件信号，控制系统各构成单元的有序协调动作。

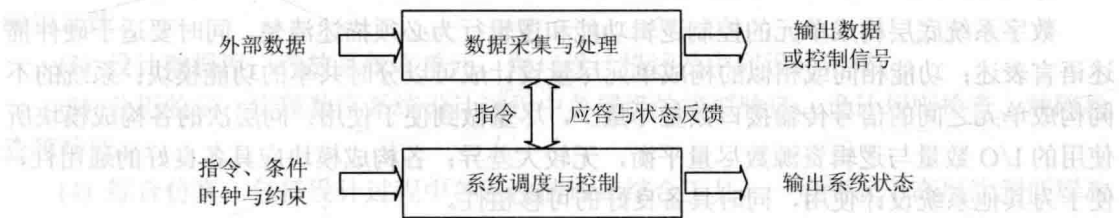


图 1.1 数字系统基本结构

系统运行过程中，系统调度与控制模块响应外部指令，结合系统基准时钟与约束条件状况，向数据采集与处理模块发出动作指令；同时，调度与控制模块接受来自数据采集与处理模块的应答与状态数据，结合约束条件信息，经适当处理后输出系统状态信息。

数据采集与处理模块响应来自系统调度与控制模块的指令，完成系统指定的采集及一系列处理操作(包括相关的系统动作控制算法)，将处理后得到的数据结果或控制信号送出数字系统，完成系统功能。执行上述操作的同时，数据采集与处理模块向系统调度与控制模块返回回答信号或状态数据。

1.3.2 数字系统设计方法

常用的数字系统设计方法主要包括模块设计法、自底向上的设计方法与自顶向下的设计方法。其中，自顶向下的设计方法是 EDA 中最为常用的一种设计方法，具有符合人脑的思维习惯、效率高等特点。

1. 自顶向下的设计方法

自顶向下的设计方法是指在数字系统描述过程中，由高到低、由粗到精、层层深入、逐步细化、渐次求精的一种设计方法。在设计过程中，将数字系统根据功能要求或者组织结构关系，逐层分解为层次明晰、层级与层内关系清楚合理、便于逻辑描述与逻辑设计实现的功能或结构子系统与模块。

自顶向下所使用的分层级设计、逐层细化的过程符合人们思考事物、描述事物的习惯，使设计人员在系统层面上分析把握系统，减少失误；同时，自顶向下的设计方法把整个系统模块化，不同模块可交由不同的设计人员或团体实现，便于现代大型复杂系统的设计且易于实现设计的并行化，提高效率。