



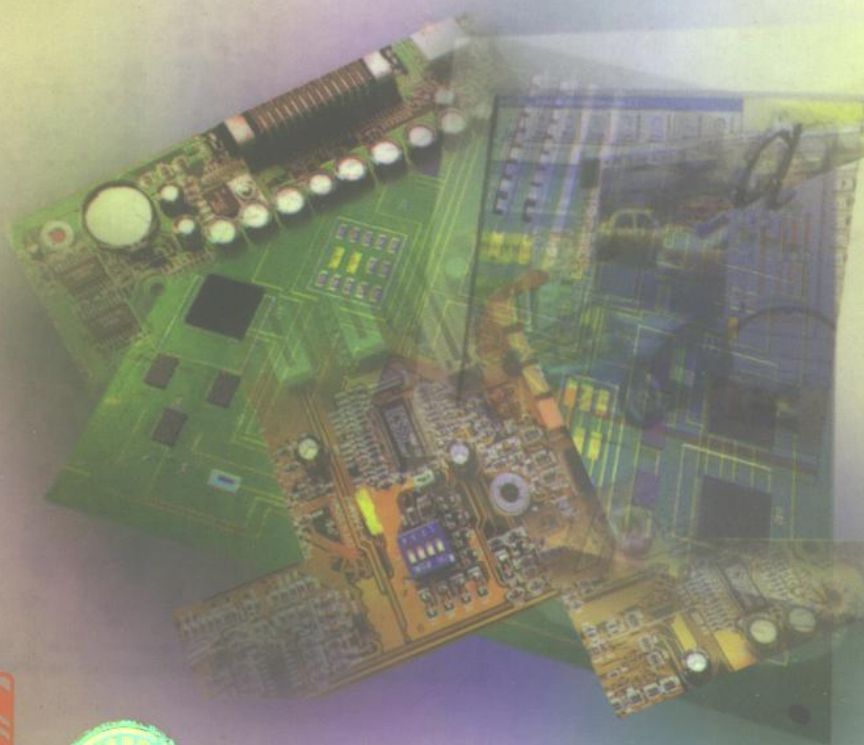
DIANZIKEJIDAXUECHUBANSHE
XILIEJIAOCAI

高等学校
电子信息类 系列教材

本科电子工程

电子设计自动化 (EDA) 教程

主编 王锁萍 主审 吴新余



电子科技大学出版社

UESTC PUBLISHING HOUSE

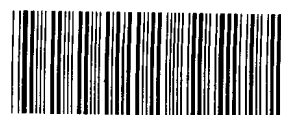
463778

电子设计自动化 (EDA) 教程

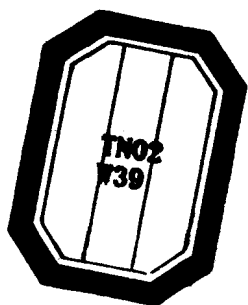
主编 王锁萍

副主编 龚建荣 张豫滇 卢庆利 王玉秀

主审 吴新余



00463778



电子科技大学出版社

内 容 提 要

3A1634 29

本书介绍电子设计自动化(EDA)的基础知识,内容包括硬件描述语言(VHDL)、可编程逻辑器件(PLD)、通用电路分析程序(PSPICE)、印刷电路板设计(PCB)和专用集成电路(ASIC)设计。

本书为 EDA 设计的入门教材,可供高等院校电类各专业本科学生或研究生使用,亦可供从事电子系统设计方面的科研、管理、技术人员参考。

声 明

本书无四川省版权防盗标识,不得销售;版权所有,违者必究,举报有奖。举报电话:(028) 6636481 6241146 3201496

电子设计自动化(EDA)教程

主编 王锁萍

副主编 龚建荣 张豫滇 卢庆利 王玉秀

主审 吴新余

出 版:电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号,邮编 610054)
责任编辑:朱 丹
发 行:新华书店经销
印 刷:四川建筑印刷厂
开 本:787×1092 1/16 印张 22 字数 534 千字
版 次:2000 年 2 月第一版
印 次:2000 年 2 月第一次印刷
书 号:ISBN 7—81065—199—4/TP·114
印 数:1—4000 册
定 价:25.50 元

前 言

半个世纪以来，电子系统的设计手段经历了手工设计、计算机辅助设计、电子系统设计自动化 3 个阶段。在面向 21 世纪的今天，电子类技术基础课的教学内容正面临着一场深刻的设计手段的变化。

在这世纪之交，电子类技术基础课程的教学也将顺应日新月异的电子信息类技术的发展势头，进行深刻的改革。我们拟将此类课程分为两个阶段进行：第一阶段学习电路、模拟电子电路、数字电子电路等课程，讲授相关领域的基本概念、基本定理和基本分析方法等内容，传授知识以分析为主；第二阶段则偏重在电子系统的设计、应用，介绍使用 EDA 工具进行电子系统的设计。后者就是我们编写本书的目的。

本教材系根据南京邮电学院开设的有关 EDA 技术的课程综合而成。在电子电路实验等课程中，我们已开设了许多 EDA 教学内容，并开设了电路系统设计、VHDL、PCB 设计、通用电路分析等专门内容的选修课程。自 1991 年开始，我们开设了 FPGA 技术选修课，稍后，将 PLD 技术作为电子类本科生和研究生的必选课。本教材的编著者都是长期从事 EDA 相关内容的教学与实验的一线教师，积累了丰富的教学与实践经验。

本书由王锁萍教授主编，并编写了第一、七章，第二章由张豫滇高工编写，第三章由卢庆利高工编写，第四章由龚建荣副教授编写，第五章由王玉秀高工编写，第六章由龚建荣、张豫滇合写。

本书由吴新余教授主审，在此对他提出的许多中肯而宝贵的意见表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，不当之处恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 6 月于南京邮电学院

目 录

第一章 电子设计自动化概论.....	1
1.1 计算机辅助设计与电子系统设计	1
1.2 EDA 教程简介	2
习题.....	10
参考文献.....	10
第二章 数字系统设计.....	11
2.1 数字系统设计概述	11
2.1.1 数字系统设计的流程.....	11
2.1.2 数字系统设计时应考虑的主要因素.....	13
2.2 数字系统模型.....	14
2.3 详细逻辑流程图	17
2.4 小型数字系统的算法分析	24
2.5 MDS 图	29
2.6 MDS 图的电路级设计	35
2.7 微程序设计.....	43
习题.....	47
参考文献.....	48
第三章 硬件描述语言 (VHDL)	49
3.1 概 述	49
3.2 VHDL 的模型结构	50
3.2.1 设计实体 (Design Entities)	50
3.2.2 结构体 (Architecture Bodies)	52
3.3 标识符、数据对象、数据类型及属性	54
3.3.1 标识符 (Identifiers)	54
3.3.2 数据对象 (Data Objects)	55
3.3.3 数据类型 (Data Types)	56
3.3.4 子类型 (Subtypes)	58
3.3.5 属性 (Attributes)	59
3.4 VHDL 最基本的描述方法	60
3.4.1 进程语句 (Process Statements)	60
3.4.2 并行 (并发) 语句 (Concurrent Statements)	61

3.4.3 顺序语句 (Sequential Statements)	64
3.4.4 断言语句 (Assert Statements)	69
3.5 组合逻辑设计 (Combinational Logic Design)	72
3.5.1 基本逻辑门的描述	72
3.5.2 编码器和译码器的描述	73
3.5.3 多路分配器	76
3.5.4 比较器	77
3.5.5 加法器的描述 (Adders)	78
3.6 时序逻辑设计 (Sequential Logic Design)	79
3.6.1 基本触发器和寄存器	80
3.6.2 计数器和移位寄存器	82
3.6.3 三态缓冲器和双向信号模型	85
3.7 状态机的设计 (State Machine Design)	88
3.7.1 序列检测器	88
3.7.2 简单的内存控制器的描述	90
3.8 设计举例	92
3.8.1 8×9 先进先出 (FIFO) 缓冲器	92
3.8.2 内存控制器	95
3.8.3 交通灯信号控制器	98
3.8.4 语音信箱控制系统	101
习题	104
参考文献	105
第四章 可编程逻辑器件及其开发工具	106
4.1 可编程逻辑器件概述	107
4.2 PAL 和 GAL 器件	112
4.2.1 PAL 器件的基本结构	112
4.2.2 PAL 器件的特点	114
4.2.3 GAL 器件的基本结构	114
4.2.4 GAL 器件的特点	117
4.2.5 几种通用的开发软件	118
4.2.6 设计电路的有关注意事项	127
4.3 复杂可编程逻辑器件 (CPLD)	129
4.3.1 CPLD 的基本结构	130
4.3.2 Altera 公司的器件产品	136
4.3.3 CPLD 开发环境简述	143
4.3.4 Altera 开发工具 (MAX+PLUS II)	145
4.4 FPGA 器件	151
4.4.1 FPGA 器件的结构	152

4.4.2	Xilinx 的 FPGA 开发系统简介.....	170
4.4.3	应用举例.....	178
4.5	在系统可编程 (ISP) 逻辑器件	182
4.5.1	ispLSI/pLSI 逻辑器件.....	183
4.5.2	ispLSI/pLSI 1000/E、2000 和 3000 系列逻辑器件.....	187
4.5.3	ispLSI 5000V、6000 和 8000 系列逻辑器件.....	189
4.5.4	ispGAL 器件.....	196
4.5.5	ispGDS 器件.....	198
4.5.6	ispLSI/pLSI 逻辑器件开发工具.....	199
4.6	PLD 应用比较	206
	习题.....	207
	参考文献.....	208
第五章	电路通用分析程序 PSPICE.....	209
5.1	PSPICE 概述.....	209
5.2	元器件模型.....	212
5.2.1	线性元件模型.....	213
5.2.2	二极管模型.....	216
5.2.3	双极型晶体管模型.....	217
5.2.4	宏模型.....	218
5.2.5	模型参数的提取.....	219
5.3	PSPICE 算法简介	220
5.4	PSPICE 文本描述方法	225
5.4.1	电路描述语言.....	225
5.4.2	元器件描述语句.....	229
5.4.3	电路特性分析描述语句.....	241
5.4.4	输出控制及其他功能语句.....	247
5.5	PSPICE 窗口版的功能应用及实例	249
5.5.1	原理图编辑器 (Schematics Editor)	250
5.5.2	电路模拟与分析 (Simulation)	258
5.5.3	PSPICE 应用实例.....	270
	习题.....	278
	参考文献.....	279
第六章	印刷电路板(PCB)的设计	281
6.1	印刷电路板的基本知识.....	281
6.2	原理图绘制.....	287
6.2.1	绘制原理图.....	288
6.2.2	原理图文件的管理.....	294

6.2.3 层次原理图的设计.....	298
6.2.4 元件和元件库.....	299
6.3 印刷电路板 (PCB) 设计.....	301
6.3.1 PCB 设计系统概述.....	301
6.3.2 双面板的设计.....	303
6.3.3 新建一个PCB 元件.....	309
6.4 印制电路技术.....	312
习题.....	314
参考文献.....	315
第七章 专用集成电路设计.....	316
7.1 概 述.....	316
7.2 集成电路工艺制造简介.....	317
7.3 ASIC 电路级设计.....	321
7.4 ASIC 版图级设计.....	325
7.5 ASIC 设计.....	331
习题.....	339
参考文献.....	339
附录 缩 略 语 表.....	340

第一章 电子设计自动化概论

1.1 计算机辅助设计与电子系统设计

一、计算机辅助设计技术

随着电子计算机技术的迅猛发展,计算机技术已深入人类经济生活的各个领域,在世界范围内开创了一门崭新的研究和应用计算机辅助设计技术(Computer Aided Design,简称 CAD)。CAD 技术的应用与发展,引发了一场工具设计与制造领域的革命。它不仅极大地改变了产品设计和制造的传统设计方式,还直接影响到企业生产管理模式以及商业对策,从而给企业带来了巨大的利益与商机。随着 CAD 技术的深入发展与普及,目前已被广泛应用于机械、电子、通信、航空、航天、建筑、化工、矿产、生物、医学等各个领域。

以计算机辅助设计为基础逐渐发展与延伸出新的分支,其中计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing,简称 CAM)是将产品的设计与制造有机地连接起来,可以反复使用系统的一次性输入及其处理后的二次信息,从而使计算机辅助渗透到设计与制造的全过程。如果将生产信息、管理信息等加以综合考虑,还可以进一步构成计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System,简称 CIMS),以实现整体效益的集成化和智能化制造系统,这个系统包含了从市场预测、产品设计、加工制造、检验、销售以及售后服务的整个过程。

计算机辅助工程(Computer Aided Engineering,简称 CAE)从产品的方案设计阶段起,在计算机上建立的不仅是元件、零部件,而且是产品整机整体的系统模型。在设计过程中按实际使用条件仿真,一方面确定其性能,一方面确定各部分的设计形式。计算机辅助测试(Computer Aided Test,简称 CAT)则是在产品开发、生产过程中对产品的成品、半成品进行测试、检验。

上述计算机辅助技术仍可称为 CAD 技术。

二、电子 CAD 技术向 EDA 技术过渡

电子 CAD 就是应用计算机辅助设计技术来进行电子产品的设计、开发、制造。

电子系统的设计,根据采用计算机辅助技术的介入程度,可以分为 3 类:第一类是人工设计方法,这是一种传统的设计方法,从方案的提出到验证和修改均采用人工手段完成,

尤其是系统的验证需要经过实际搭试电路来完成。因此这种方法花费大、效率低，制造周期长。第二类借助于计算机来完成数据处理、模拟评价、设计验证等部分工作，由人和计算机共同完成电子系统的设计，这就是早期的电子 CAD 方法。借助于计算机，人们可以设计规模稍大的电子系统，但是由于 CAD 软件的匮乏，设计阶段中的许多工作尚需人工来完成。第三类设计方法称为电子设计自动化（Electronic Design Automation，简称 EDA）。电子系统的整个设计过程或大部分设计均由计算机来完成。因此可以说 EDA 是电子 CAD 发展的必然趋势，是电子 CAD 的高级阶段。在本书中我们也沿用其他同类著作的做法，把 EDA 和电子 CAD 不作严格区分。

电子 CAD 技术起源于板图设计和计算机辅助分析（Computer Aided Analysis，简称 CAA）。

与其他领域 CAD 相似，电子 CAD 的初始发展源于计算机作图。在电子系统设计中，PCB 板图和集成电路板图的绘制随着系统的复杂和工艺精度要求的提高，促进了 CAD 技术的发展；而 CAD 技术的发展又有利于更复杂电子系统的商品化。今天的 CAD 技术已经向 EDA 大大迈进。电子 CAD 不仅最终完成板图设计，而且在板图设计过程中进行电气规则检查，自动布局布线，进行模拟仿真、检验、板图设计优化等工作。

CAA 则是电子 CAD 独有的技术，它从开始的对电路的直流分析、交流分析、瞬态分析，逐渐发展到可以实现容差分析、最坏情况分析、数字模拟和数模混合模拟等功能，其典型的代表作是 SPICE（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）软件。由于该软件对内存容量、运行速度要求较高，所以，SPICE 通常在工作站以及中、小型机上运行，80 年代中期出现微机上运行的 PSPICE（Personal SPICE）。

三、EDA 技术的发展促使了电子系统设计方法的革命

传统的设计方法是指自下而上（Bottom-Up）的设计方法。系统设计师们根据自己的实践经验，利用现有的通用元器件，先完成各个部件的设计、搭试、测量性能指标，再凑成整个系统，而后经调试、测量看整个系统是否达到规定的性能指标。当然，在设计过程中也可以尽量借助于 CAD 软件进行模拟和分析。

随着我们面对的电子系统的规模越来越大，自上而下（Top-Down）的设计方法给电子系统设计注入了新的活力。这种设计方法首先从系统设计入手，先从顶层进行功能方框图划分和结构设计着手，实现从设计、仿真、测试一体化。其方案的验证与设计、电路与 PCB 设计专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit，简称 ASIC）设计等都由电子系统设计师借助于 EDA 工具完成。

就 EDA 发展现状来看，数字系统的设计基本上实现了设计自动化的要求，模拟电路因其复杂性，全自动设计还需从事 EDA 技术的研究人员乃至从事集成电路工艺制造设计师们继续不懈地努力。

1.2 EDA 教程简介

本书着重介绍运用 EDA 技术进行电子系统设计的有关知识和相关 EDA 工具的应用，

了解如何应用 EDA 工具完成电路设计、印刷板板图设计、专用集成电路设计等主要方法，了解应用 EDA 工具对电路设计、板图设计进行模拟、仿真、分析等主要手段，从而对 EDA 技术有一个较全面的了解。

一、学习本书的安排

本书的先修课程为电路原理、数字电路、模拟电路。第二、三、四章为数字系统设计与应用，其中，第二章为准备知识，介绍数字系统的传统设计方法；第三章介绍硬件描述语言 VHDL，以及自上而下的设计方法；第四章介绍可编程逻辑器件，这是目前 EDA 最活跃的领域；第五章介绍通用电路分析语言 PSPICE，介绍模拟电路的分析方法；第六章介绍印刷电路板 PCB 设计；第七章介绍专用集成电路的设计。

二、数字系统设计方法

在第二章中介绍的小型数字系统的设计方法，作为第三、四章的基础。该章节涉及的部分，在有些高校的数字电路课程中已经讲述。数字系统的设计任务包括两个方面的内容，首先是用规范的统一形式对系统进行正确的逻辑功能描述，详细表达系统的逻辑进程和具体的逻辑操作；其次是设计出实现所描述数字系统功能的具体电路。

数字系统的设计方法又与数字系统的模型有关，模型不同，设计方法也不同。

经典的设计模型把数字系统分为控制器与受控器两部分，其他各类信号及输入、输出电路分别与上述两部分关联。

数字系统的逻辑进程和操作，可以用规范的形式来表达，逻辑流程图就可以达到目的，而 MDS 图 (Mnemonic Documented State Diagrams) 则是与硬件有直接对应关系的逻辑描述方法。第二章详细介绍了两种作图规则与方法，最后又介绍了微程序设计方法。

三、VHDL 语言

一个数字系统，当我们借助于 EDA 工具进行设计时，都需要对所设计系统的功能结构进行描述，也就是需要为 EDA 工具按规定格式提供输入数据。这种对数字系统在系统级至电路级进行设计描述的语言称为硬件描述语言 (Hardware Description Language，简称 HDL)。

70 年代以来，人们开始致力于研制能覆盖各个设计层次的公用描述语言，其基本思想是采用公用描述语言语法和开发公用语言处理系统，各个 EDA 软件从这个语言处理系统接受 (输入) 数据。

80 年代中期，在美国国防部支持下正式推出标准化的公用描述语言、超高速集成电路硬件描述语言 (VHSIC Hardware Description Language，简称 VHDL)。它源于美国国防部提出的超高速集成电路 (Very High Speed Integrated Circuit，简称 VHSIC) 计划，其最初的目的是为了在各承担订货的 VLSI 生产厂家之间有统一的设计数据和文档交换。

1986 年，IEEE 开始着手制订 VHDL 的文本和标准化工作，并于 1987 年 12 月公布了 VHDL 标准版本 (IEEE Std-1076/1987)，1993 年作了修订，形成 93 标准 (IEEE std-1076/1993)。

VHDL 语言描述硬件实体的基本单元是设计实体 (Design Entity)，设计实体可以嵌套。

复杂数字系统可以不断分解成简单的单元，例如，一个复杂的组合逻辑系统可以分解为一些触发器以及一些基本的门电路，而每个触发器又由一些门电路组成。VHDL 语言支持从系统级直至门级的各个层次设计描述。

VHDL 设计实体由接口描述和若干个程序体描述组成，其中，接口描述定义了该实体的外部特性，即输入、输出端口和类属参数（Generic），而程序体描述则表述该实体的内部特性。多个程序体可以用来以不同层次和设计方法描述同一个设计实体，支持自动逻辑综合、设计分析比较等 EDA 技术。

接口描述的主要任务包括两个方面，一方面定义逻辑模块与外界的输入、输出端口以及它们的电学属性；另一方面可根据需要定义电路的工作条件和电学特性参数。

程序体有两种：体系结构（Architecture）体和配置（Configuration）体。前者描述实体的内部结构和功能，后者描述实体数据的管理及内部元件的配置。

一个体系结构体的形式描述可以用结构描述、数据流描述和行为描述中的一种或三种形式的混合来描述。

结构描述表示实体的硬件模块结构，描述数字系统由哪些子元件组成以及它们之间关系，它与系统原理图设计很相似。

行为描述以输入、输出函数关系描述实体的数据处理，它是最相像的描述形式，它允许设计者从算法或函数关系的角度描述实体的功能，而暂时不必考虑实体的数据流以及结构等。它侧重在对功能的描述，主要使用函数、过程和进程语句，以算法形式描述数据的变换和传送。

数据流描述是以类似于寄存器传输级的方式描述数据的传输和变换，主要使用并行位号赋值语句，它既显示了设计实体的行为，也隐含了描述了该设计实体的结构。

四、可编程逻辑器件

可编程逻辑器件（Programmable Logic Devices，简称 PLD）是一种用户根据需要而自行构造逻辑功能的数字集成电路。它的基本设计方法是借助于 EDA 软件，用原理图、状态机、布尔表达式、硬件描述语言等方法，生成相应的目标文件，最后再由编程器或下载电缆，用目标器件来实现。

这种利用 PLD 内建逻辑结构、由用户配置来实现任何组合逻辑和时序逻辑功能的器件，最初被视为分立逻辑电路和中小规模集成电路的替代物，随着设计技术和制造工艺的完善，器件性能、集成度、工作频率等指标不断提高，PLD 的应用范围越来越广，目前它已成为数字 ASIC 设计的主流。

最早的可编程逻辑器件出现在 70 年代初，它的基本结构包含一个固定的“与”阵列和一个可编程“或”阵列，称为可编程只读存储器（Programmable Read Only Memory，简称 PROM）。此后出现新的 PLD 器件——可编程逻辑阵列（Programmable Logic Arrays，简称 PLA），它的“与”阵列和“或”阵列都是可编程的，且全部输入、输出都是可以控制的。70 年代末出现可编程阵列逻辑（Programmable Array Logic，简称 PAL），它既具有 PLA 的灵活性，又具有 PROM 的易编程特性。其基本特性包括一个可编程“与”阵列和一个固定“或”阵列，前者使输入项增多，而后者则使器件简化。

80 年代初，美国 Lattice 公司推出通用阵列逻辑（Generic Array Logic，简称 GAL）。

与 PAL 相比, GAL 具有输出逻辑宏单元 (Output Logic Macro Cell, 简称 OLMC), 这样使 GAL 设计更灵活, 能满足更多逻辑电路的要求。

80 年代中期, 美国 Xilinx 公司率先推出了现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, 即 FPGA) 器件, FPGA 器件采用逻辑单元阵列结构, 静态随机存取存储工艺, 设计灵活, 集成度高, 可重复编程, 并可现场模拟调试验证。

90 年代初, Lattice 公司又推出了在系统可编程大规模集成电路 (In System Programmable Large Scale Integration, 即 ISPLSI), 该器件采用先进的 E²CMOS 工艺, 结合传统的 PLD 器件的易用性、高性能和 FPGA 的灵活性、高密度等特点。

PLD 之所以发展迅速并被广泛应用, 不外乎两个原因: 其一是不不断涌现出新的品种, 以满足用户自己设计电路的需求; 其二是开发应用环境良好, 许多功能强、共用性好的 PLD 开发软件和硬件不断出现, 它使用户设计、开发极为方便。

PLD 开发工作中的硬件包括微型计算机 (或工作站)、编程器、装载电缆以及管座适配器等。

PLD 的开发软件种类很多, 其基本功能大致包括: ①输入方式也就是所设计系统的输入描述方法, 总的要求是简单、方便、直观、实用, 且希望方法多样地满足不同层次用户的要求。②编译功能, 它的主要任务是将用户输入的设计描述, 转换成 PLD 能接受的文件格式, 它既可接受用户提出的约束条件, 又能自动完成编译功能, 且对输入的设计具有逻辑优化、设计综合、检错和纠错或定位报告等能力。③模拟仿真, 它可向设计者报告所设计系统的逻辑错误和电路性能, 对于较复杂的设计还要求各种相位关系的正确。要保证设计的正确无误, 这对于一次可编程器件和大型复杂系统的设计来说是极为重要的。报告的形式要多样, 如波形显示、定时分析、故障定位、文本说明等等。④输出文件, 开发系统的输出文件要求通用性强, 具有可移植功能, 能满足多种应用环境的需要, 对设计的修改或更新方便。⑤测试验证, 对于设计文件已经“烧制”或配置到逻辑系统之后, 能对其功能或数据进行测试。

开发软件是随着 PLD 器件一同发展的, 最初的开发软件很不完善, 大多要手工编程, 并由器件生产厂家研制, 主要支持他们自己的产品。70 年代末出现了汇编语言, 较流行的汇编程序是 PALASMI, 它由 MMI 公司开发。虽然它的功能有限, 但由于它出现得早, 所以得到广泛应用。此后又有不少公司推出性能好、自动化程度高的开发软件, 如 Data I/O 的 ABEL 语言和 Logical Devices 公司的 CUPL 语言是其中的代表产品。这些软件具有自动逻辑简化、宏功能指令、真值表输入和状态机描述、自动生成输出文件等功能, 通用性强, 能开发多家制造厂生产的器件, 并不断更新版本, 从而满足开发不同器件的需求。到 80 年代中期, 出现了更为完善的开发工具, 主要特征是支持原理图输入及多种方式兼容和综合, 可采用硬件描述语言 (HDL), 进行与目标器件无关的设计等。具有代表性的软件或公司有 Viewlogic、Mentor、Graphics、Synopsys、LSI Logic、Intergraph Valid、ORCAD 等。

现在的一种流行趋势是器件生产厂家与软件制造公司合作, 其主要形式为生产厂家委托第三方公司开发或共同开发, 也就是器件生产厂家只研制适合自身器件要求的编译或转换程序, 而将设计输入、模拟验证和编程等软件由第三方工具来解决。

PLD 开发软件的输入方法也在不断发展, 下面对其作一简要介绍。

1. 布尔表达式输入法

这是早期的输入方法之一，目前仍被广泛采用。用户可用任何一种文本编辑程序编写源文件，写出对应每个输出引脚的布尔表达式，开发软件能将这些表达式自动转换成一个设计或设计中的一部分。

2. 真值表输入方法

与布尔表达式输入极为相似，这种方法一般用于规模不大的数字系统设计。

3. 状态机描述法

采用这种方法可以不必关心 PLD 内部的结构及每个输出引脚的布尔表达式，主要考虑各状态的转移及相互关系。现有的从 PALASM1、ABLE、CUPL 等通用软件到可以开发高密度器件的软件都支持状态机描述语言。最新的开发工具支持图形化的状态机描述。

4. 原理图输入法

这部分软件实际来自 VLSI 的 EDA 设计工具，它的功能很强。设计者可以根据相应的元器件库提供的单元模块，如各种门电路、寄存器、触发器、常用中小规模集成电路宏单元以及用户自定义的各种符号，按需要逐个调用，并用网络把各个“元器件”连接起来形成一张原理图。它既具有常规电子系统设计的特点，也兼有软件描述的各种功能。输入图形中所有信息可以为模拟、验证和测试提供信息。

5. 波形输入法

逻辑电路的运行总是以正确的输入波形来获得相应的输出波形为依据的，波形输入法是直接、简明、方便而有效的手段，并且容易查错。但由于这种编译程序结构复杂，当前只有少数 PLD 开发软件采用，而且只能编译较规则、也较简单的波形。

6. VHDL 方法

VHDL 语言作为 EDA 的工具，是专为描述硬件而设计的，当然也可以用来设计 FPGA 和 CPLD 等大规模可编程集成电路。现在国际标准规定，所有 PLD 开发工具都要能接受 VHDL 描述的设计。

第四章中将介绍各类 PLD 芯片的构造原理、PLD 开发工具以及应用开发工具设计数字系统的方法。

五、电路模拟软件

在电路设计中，模拟电路与数字电路的设计有很大的区别。数字电路可以很方便地抽象出逻辑门、寄存器、运算器等不同层次的逻辑单元，还可以用数据流图、有限状态模型等形式进行高层次描述，并将这些逻辑单元和高层次行为描述用于不同层次的电路设计。数字电路这种结构简单、规则化、易于抽象化的特点极大地促进了数字电路设计自动化。相反，模拟电路则要复杂得多，模拟电路种类繁多，性能通常与连续变化的变量有关。例如，放大器的输出幅度和增益不仅仅与电路的拓扑结构有关，而且与元件参数、工作频率有关。模拟电路的结构也千差万别，同样的电路特性可由不同的电路结构来实现，不同参数的同一结构会得到不同的电路性能。模拟电路还与设计工艺、工作环境等直接相关，甚至印刷板中或板图中位置相近的电路之间也可能有较大的干扰。模拟电路的特点使其性能和结构的抽象提取和表达都较为困难。

在进行传统的电路设计时，大致分为 3 步来进行电路分析：首先将电路中的有关器件

如二极管、三极管等用等效电路来替代, 然后根据克希霍夫定律, 建立节点方程和回路电压方程, 最后解方程组, 得到分析结果。但是, 传统的分析方法只能针对有限的小型电子系统, 而且方程组的求解也很复杂。随着电路规模的增大, 采用传统的人工计算的方法将无能为力, 而且分析精度也不能满足要求。

70 年代初, 人们开发了电路模拟软件, 根据电路的拓扑结构和元器件参数, 由计算机模拟软件电路的功能和特性参数, 这样不但可以方便、快速而精确地评价电路设计的正确性, 而且可以进行传统方法难以进行的容差分析、灵敏度分析、最坏情况分析、温度特性分析、电路优化设计等工作。其中比较著名而应用广泛的通用电路模拟程序 SPICE 是由美国加州大学伯克莱本校于 70 年代推出的, 以后不断推出修改版本, 1988 年初定为美国国家标准。由于 SPICE 程序很大, 计算量大而精度高, 因此用于中、小型计算机或功能较强的工作站上。1984 年美国 MicroSim 公司推出基于 SPICE 的微机版本 PSPICE (Personal SPICE), 1998 年推出 PSPICE 8.0 版本。高版本的 PSPICE 不仅可以分析模拟电路, 也能分析数字电路和数模混合电路, 支持文本文件输入和图形输入。

电路的计算机辅助分析的精度除了取决于软件本身采用的算法等因素以外, 还取决于描述电路的器件模型的精度与模型参数的精度。一般来说, 对分析精度要求越高, 所需模型就越复杂, 描写模型的参数也越多, 这样, 模型中的节点、网络就多, 计算机的分析时间就越长, 而且对计算机存储容量、计算速度的要求就越高, 所以在分析电路的不同特性时采用的模型精度也不同, 往往也会对一些模型及参数作一定的简化。

电路中的元器件大致分为线性与非线性两类, 线性元件有线性电阻、电容、电感、恒流源、恒压源等, 非线性元件有非线性电阻、电容、电感和晶体二极管、双极性三极管、结型场效应管、绝缘栅场效应管等, 通常, 前者的模型简单, 而后者的模型复杂得多。有关模型建立时涉及的许多半导体物理方面的知识, 本书不作介绍, 有兴趣的读者可参阅相关书籍。

获取准确的器件模型参数对于电路分析和设计人员就显得十分重要, 但有时又是相当困难的。为此不少厂商从事器件模型的参数提取工作, 并推出不少模型参数库, PSPICE 软件包配套提供的模拟电路和数字电路的器件模型参数库中已包含几千种器件。另外还有许多半导体生产厂商只提供测量参数, PSPICE 软件包中的模型参数提取程序 PARTS 可以进行相应器件模型的参数提取。

利用电路分析程序进行电路功能模拟时往往受计算机内存和花费时间的限制, 为此, PSPICE 对于用一些电路功能块构成的电路系统比如运算放大器等, 用宏模型的方法对这些功能块进行等效后再进行模拟。

六、印刷电路板设计

印刷电路板 (Printed Circuit Board, 简称 PCB) 设计是电子系统设计的一个重要部分, 也是电子设备中的重要组装部件。由于它在生产过程中采用了印刷业中的丝网漏印、照相制版和蚀刻等多种技术, 故称之为印刷电路板, 也有人称之为印制电路板。

印刷电路板有两个基本作用: 进行机械固定和完成电气连接。

印刷电路板制造技术起步于 40 年代中期, 当时电子业还处于电子管时代, 所用的印刷电路板大多为单面板。60 年代晶体管的广泛使用及集成电路的出现, 促使双面印刷电路板

普及, 并开始出现多层印刷电路板和能够扭曲伸缩的挠性印刷电路板。70 年代后, 由于大规模和超大规模集成电路的发展, 电子设备越来越小型化和微型化, 表面贴装技术迅速发展, 极大地提高了元器件的安装密度和系统的可靠性, 并有利于生产自动化。

早期的印刷电路板设计均由人工完成, 一般由电路设计人员提供草图, 由专业绘图员绘制黑白照相图, 再进行后期制作。人工设计是一件十分费事、费力且容易出差错的工作。随着计算机技术的飞速发展, 新型器件和集成电路的应用越来越广泛, 电路也越来越复杂、越来越精密, 使得原来可用手工完成的操作越来越多地依赖于由计算机来完成。因此, 计算机辅助电路设计成为设计制作电路板的必然趋势。

目前已有很多 CAD 软件来辅助我们进行印刷电路板的设计, 市场上可见到的有 SMARTWORK、ORCAD、ViewLogic、MenTor、Synopsys、AutoBoad、EESystem、TANGO、Protel 等产品, 这些软件的功能有强有弱, 又各具特色。

1982 年由美国 ACCEL Technology 公司推出的 TANGO 软件包, 在我国有广泛的应用基础。作为 TANGO 的升级版本, Protel Technology 公司推出了 Protel For DOS, 进入 90 年代以来, 又推出了 Protel For Windows 1.0、2.0 和 3.0, 直到最近推出的 Protel 2000。

计算机辅助设计印刷电路板大致分两个阶段进行, 即原理图的设计和印刷电路板的设计。

原理图的设计也就是原理图的输入。我们将在第六章介绍应用 Protel 软件绘制原理图的方法, 而在第七章介绍应用 ORCAD 软件进行电路设计的绘制原理图方法。这两种软件的绘图工具齐全, 编辑功能强大。绘制原理图需要用到电路符号图形库, Protel 软件称为元件库, 其中包含丰富的各种元器件以及电气符号, 用户也可以应用元件库编辑器改编成新增元器件符号。

电路图绘制的目的不是仅仅能打印一份精美的原理图, 而是自动生成网络表文件以及其他一些报表文件, 网络表文件可支持印刷电路的自动布线及电路仿真模拟。只有转换成各种网络表文件才可供 EDA 设计的后续工作作输入文件, 而且不仅是原理图输入, 其他文本文件的输入也可以通过转换成相应网络表文件供其他 EDA 软件作输入文件。

有了网络表文件, 我们就可以着手印刷电路板 (PCB) 的设计。PCB 设计可完成自动布局布线、优化布线进程、在线设计规则检查等功能。

对于较小的电子系统, 也可以采用人工布局布线方式。PCB 软件具备丰富的绘图工具和强大的编辑功能, 也备有 PCB 符号库, 供 PCB 设计时调用。完全人工布局布线甚至不用绘制原理图, 当然也就无法进行电路的仿真模拟了。

PCB 完成后, 可以利用打印机或绘图仪输出电路板的布线图, 也可以生成光绘文件交印刷电路板厂家制造。

七、专用集成电路设计

50 年代末, 世界上第一块集成电路诞生, 40 多年来集成电路技术的发展经历了小规模 (SSI)、中规模 (MSI)、大规模 (LSI) 和超大规模 (VLSI) 等阶段, 标志集成电路工艺水平的特征线宽也已从小规模集成电路阶段的几十微米发展到今天的亚微米量级。

随着集成的电子系统越来越复杂, 依靠设计板图的传统方法, 无论从费工费时、还是设计的正确性来说都是不可想象的。集成电路技术的发展不断对 EDA 技术提出新的要求,

从而促进了 EDA 技术的发展。

在 70 年代,完全面向集成电路芯片的版图设计,借助于图形显示终端,可以用来录入和处理几何图形及其尺寸数据。EDA 工具仅限于半导体厂使用。

在 70 年代末,EDA 工具开始走向市场,它不仅提供图形处理能力,而且具有电路图输入、逻辑模拟和电路模拟功能,开始具备集成电路层次设计的能力。

到 80 年代中期,开始引入 EDA 框架(Framework)的概念。在同一设计框架下,借助于多窗口界面,可以灵活完成集成电路的寄存器传输级(RTL)设计、逻辑设计、电路设计和版图设计。各层次的设计数据都在设计数据库的支持下得到统一管理。有的 EDA 工具还具备由逻辑图自动生成芯片板图的硅编译器、层次式电路测试码生成等功能。

近 10 年来,硬件描述语言等设计数据格式趋于标准化,不同软件开发商的 EDA 产品集成在一个软件包内。新的 EDA 系统不仅能实现高层次的自动逻辑综合、硅编译器和测试码生成等,而且可以灵活调用多个具有特色的模拟器对一个设计实体进行多层次模拟,进一步提高了 EDA 系统的工作效率和设计正确性。

所谓分层次设计,是将设计层次分成 5 级,即印刷系统级、寄存器传输级、门级、电路级和器件(版图)级。其中,系统级是最上一层,是最抽象的设计层次,它将电子系统看作由一些系统部件组成,而各部件之间的连接可以是抽象的,只要表达清楚系统的体系结构、数据处理功能、算法等即可;寄存器传输级则以具有内部状态的寄存器以及连接寄存器之间的逻辑单元作为部件,重点在于表达信号的运算、传输和状态的转移过程;门级设计也就是逻辑设计,它以电路或触发器作基本部件,表达各种逻辑关系;电路级设计则以可看作分立的元件为基本元件,具体表达电路在时域的伏安特性或频域的响应等性能;器件级又称为版图级,现代电路设计以版图级设计作为最低层次。

随着半导体制造工艺和集成技术水平的不断进步,已经制造出包含几千万只晶体管的集成电路,这些集成电路本身就是一个非常庞大的电子系统。EDA 技术的发展,使得原本只能由半导体工艺师们才能完成的集成电路设计,现在由普通的电子系统设计师们也能完成了,这就是专用集成电路 ASIC 设计。大批优秀的电子系统设计师的参与使 ASIC 产品的前景欣欣向荣,也有力地促进了从事 EDA 工具的开发工作。

ASIC 可以分为数字 ASIC 和模拟 ASIC,由于制造工艺上的原因,通常将数模混合的 ASIC 归入模拟 ASIC 类中。

数字 ASIC 设计可分为全定制(Full Custom)和半定制(Semi-Custom)两种,其中,全定制是由设计人员使用版图编辑工具,从晶体管的版图尺寸、位置以及连线开始设计,以期优化芯片性能、提高芯片的元件密度、降低功耗等;而半定制设计则在设计中有一定的借鉴,这样可以简化设计、提高芯片的成品率。半定制又分为门阵列(Gate Array)ASIC 和标准单元(Standard Cell)ASIC。其中,门阵列方式是由半导体厂家事先生产好了半成品芯片,根据用户设计的电路完成可编程下载或将电路转化成一定格式文件交 IC 厂去生产;标准单元法则是半导体厂家在芯片版图一级预先设计好一批具有一定逻辑功能的单元,这里的单元以库的形式由 EDA 工具提供,系统设计师在电路设计完成后可以利用自动布局布线软件再完成版图设计。

目前,完成数字 ASIC 设计的 EDA 工具相当完善,而为辅助半定制设计,厂家提供的标准单元库或半成品均相当丰富,所以,数字 ASIC 多数采用半定制方式进行设计。