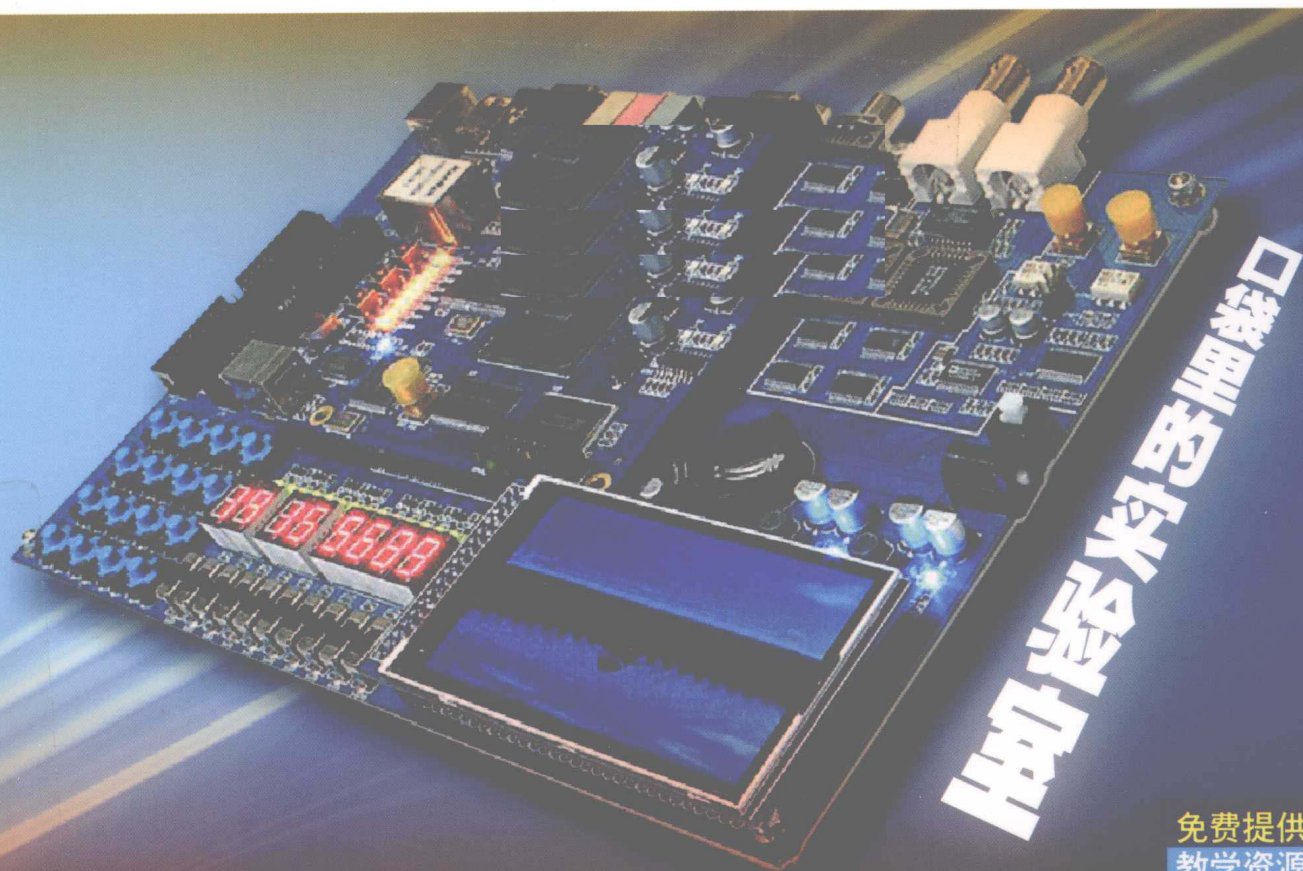


普通高等教育“十二五”规划教材
信息与电子技术类系列教材

数字电路与系统 教学实验教程

周祖成 程晓军 马卓钊 编著



数字电路与系统

免费提供
教学资源



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十二五”规划教材

信息与电子技术类系列教材

数字电路与系统教学实验教程

周祖成 程晓军 马卓钊 编 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了 EDA 和 FPGA 的相关基础知识,重点介绍了在宽带无线多媒体教学平台上如何用 Altera 的工具做电路与系统的设计。全书提供了近 20 个教学实验的例子,引领读者一步一步、由浅入深地使用 FPGA 实现电路与系统的设计。为了方便教学,随教学平台提供配套光盘。

本书可以作为通信、信息、计算机、人工智能、光机电一体化、图像和工业自动化类专业专、本科生及研究生数字电路与系统、信号处理、计算机接口和程序设计语言、多媒体、通信及 IC 设计等课程的教学实验用书,还可以作为电子技能大赛的指导用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电路与系统教学实验教程/周祖成,程晓军,马卓钊主编. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-028637-6

I. ①数… II. ①周… ②程… ③马… III. ①数字电路-实验-高等学校-教材 IV. ①TN79-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 158524 号

责任编辑:赵丽欣 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

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>

百善印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版

开本:787×1092 1/16

2010 年 8 月第一次印刷

印张:16 1/2

印数:1—3 000

字数:373 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈百善〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135120-8009 (SF02)

版权所有,侵权必究

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

前 言

自 1985 年问世以来, 经过 25 年的历程, FPGA 在电子设计领域扮演着越来越重要的角色, 越来越多的电子系统设计师不得不对它刮目相看。这是因为它的确具有很多不可替代的优点。

1) FPGA 的可编程性是与生俱来的, 它推动了可重配置的电子设计, 使硬件设计编程化, 导致了电子设计的软、硬件协调和并行, 极大地提高了设计效率并减少了资源占用。

2) 和 ASIC 相比, FPGA 在开发成本、工具成本和开发效率方面具有绝对的优势, 其开发时间比 ASIC 平均少 55%, 所以近三年用 ASIC 设计的电子系统下降了 50%。从只用于原型设计, 到代替定制芯片, FPGA 市场更多转向 ASIC 的传统市场 (消费电子、汽车电子、数据处理和工业产品)。很多系统设计都以 FPGA 为中心来进行, FPGA 已经从配角成为了主角。

3) 从 1990 到 2010 年, FPGA 的价格下降为原先的 0.04%, 集成度提高了 1000 倍, 功耗降低为原先的 0.4%, 速度提高了 200 倍。

在全球市场, Altera 公司和 Xilinx 公司的 FPGA 出货量占了总出货量的 80%。而在欧洲、亚洲尤其是中国市场, Altera 的 FPGA 占了主导地位。从 2000 年 Altera 在中国加速推进“大学计划”以来, Altera 在高校成立了近 100 所联合实验室, 促成了 Altera 的 FPGA 和相关开发工具的普及。这种形势下, 为了帮助更多的大学生、研究生和工程技术人员更普遍地使用 Altera 的 FGPA 和相关工具做电子设计, 我们开发了一款宽带无线多媒体教学平台。

宽带无线多媒体教学平台是针对大学和研究机构推出的用于教学与科研的 FPGA 开发平台。灵活、可靠的外围接口为用户提供丰富、方便的外设连接, 帮助用户迅速地理解和掌握数字电路及 SoC 设计的基础知识。高速数字、模拟接口和触摸彩屏的输出, 为无线宽带多媒体通信系统的验证和手机与数字电视的研发人员提供了一个基础的设计平台。

平台设计成两部分: 核心板和扩展板。核心板由网口和 USB 接口和计算机连接, 可以独立使用。它使用起来比较方便 (可以放在衣服口袋里), 为用户提供了一个不受实验室时间和空间约束的“口袋里的实验室”。通过插座核心板可靠地连接到扩展板, 利用扩展板上丰富的接口和输入、输出设施, 构建了一个无线宽带多媒体的教学实验和科研开发平台。

该平台既可以作为通信、信息、计算机、人工智能、光机电一体化、图像和工业自动化类专业本科生及研究生数字电路、信号处理、计算机接口和程序设计语言、多媒体、通信及 IC 设计等课程的教学平台, 也可以作为 IT 企业及 IC 设计领域科研院所的设计及验证平台。

本书介绍了一些 EDA 和 FPGA 的知识,着重介绍在宽带无线多媒体教学平台上如何使用 Altera 的工具做电路与系统的设计,提供了近 20 个教学实验,引领读者一步一步、由浅入深地使用 FPGA 实现电路与系统的设计。这是本书的特色,也是目前国内开发同类工具中最成功之处。随平台配套了本书的教学光盘(EDA 工具、硬件描述语言和近 20 个教学实验),是教师教学和科研技术人员、企业开发工程师自学提高的好帮手。

在本书的编写过程中,Altera 的中国区大学项目经理徐平波先生从资料、平台设计到教学实验的安排都给予了具体的指导,在此表示感谢。

目 录

基 础 篇

第 1 章 EDA 技术及其发展	3
1.1 集成电路产业基本规律	3
1.2 EDA 产业的历史	3
1.2.1 计算机辅助设计阶段	4
1.2.2 计算机辅助工程阶段	4
1.2.3 电子设计自动化阶段	4
1.3 EDA 工具的分类	4
1.3.1 电路设计与仿真工具	5
1.3.2 PCB 设计软件	6
1.3.3 IC 设计软件	6
1.3.4 FPGA 设计工具	7
1.4 主要硬件描述语言	8
1.4.1 VHDL	8
1.4.2 Verilog HDL	9
1.4.3 System Verilog	9
1.4.4 SystemC	10
1.4.5 VHDL 和 Verilog HDL 的比较	10
1.4.6 SystemC 和 System Verilog 的比较	11
1.5 集成电路设计方法学	12
1.5.1 片上系统的概念	12
1.5.2 可编程片上系统的概念	12
1.5.3 片上系统设计方法学的概念	12
1.5.4 软硬件协同设计方法	14
1.5.5 基于虚拟原型的设计方法	15
1.5.6 IP 核及 IP 复用	16
小结	17
第 2 章 可编程逻辑器件的发展及原理	18
2.1 可编程逻辑器件结构剖析	19
2.1.1 简单 PLD 的“与”阵列、“或”阵列平面结构	19

2.1.2	带宏单元的复杂可编程逻辑器件	21
2.1.3	FPGA	28
2.2	可编程逻辑器件的编程原理	29
2.2.1	熔丝型编程	29
2.2.2	反熔丝型编程	30
2.2.3	SRAM 编程	30
2.2.4	EPROM 编程	31
2.2.5	E ² PROM 编程	31
2.2.6	FPGA 的发展趋势	32
2.3	Altera Cyclone II 简介	33
2.3.1	Altera 公司的可编程逻辑器件	33
2.3.2	Cyclone II 的总体结构	34
2.3.3	LE 结构	35
2.3.4	LAB 结构	36
2.3.5	全局时钟网络	37
2.3.6	DSP 结构	38
	小结	40
第 3 章	综合工具 Quartus II 的使用	41
3.1	工程建立	41
3.2	建立设计	43
3.3	分析与综合	46
3.4	引脚分配	46
3.5	程序下载	47
3.6	SignalTap II 的使用	48
	小结	50
第 4 章	仿真工具 ModelSim 的使用	
4.1	ModelSim 仿真过程	51
4.2	加入 Altera 器件的仿真库	54
	小结	56
第 5 章	TE3 无线多媒体教学平台简介	57
5.1	概述	57
5.2	核心板	57
5.2.1	主要特性	58
5.2.2	核心板的主要器件	58
5.2.3	应用领域	59
5.3	扩展板	59
5.3.1	主要特性	60
5.3.2	主要器件及接口	60
5.3.3	应用领域	61

实 验 篇

第 6 章 LED 实验	65
6.1 实验内容	65
6.2 实验原理	65
6.3 程序设计	66
6.4 仿真结果	67
6.5 演示程序文件说明	68
6.6 演示程序使用	68
第 7 章 脉冲发生器实验	69
7.1 实验内容	69
7.2 实验原理	69
7.3 程序设计	70
7.4 仿真结果	71
7.5 运行结果	72
7.6 演示程序文件说明	72
7.7 演示程序使用	72
第 8 章 脉宽调制 (PWM) 实验	73
8.1 实验内容	73
8.2 实验原理	73
8.3 程序设计	74
8.3.1 总体架构	74
8.3.2 PWM_Basic 模块	75
8.3.3 PWM_Controller 模块	75
8.4 程序仿真	77
8.5 演示程序文件说明	77
8.6 演示程序使用	78
8.7 实验中注意的问题	78
第 9 章 波形发生器实验	79
9.1 实验内容	79
9.2 实验原理	79
9.3 实验设计	80
9.3.1 程序架构	80
9.3.2 sine_wave 模块	81
9.4 运行结果	85
9.5 演示程序文件说明	86
9.6 演示程序使用	86

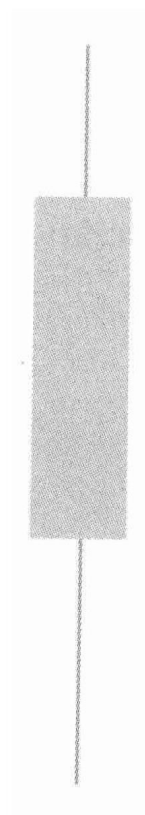
第 10 章 键盘扫描及数码管显示实验	87
10.1 实验内容	87
10.2 实验原理	87
10.2.1 4×4 扫描键盘原理	87
10.2.2 八段数码管显示原理	88
10.3 程序设计	90
10.3.1 总体架构	90
10.3.2 key_scan 模块	90
10.3.3 scan_clk 模块	90
10.3.4 scan 模块	91
10.3.5 data_2_disp 模块	93
10.3.6 disp_scan 模块	94
10.4 仿真结果	95
10.5 运行结果	96
10.6 演示程序文件说明	96
10.7 演示程序使用	96
第 11 章 计算器实验	97
11.1 实验内容	97
11.2 实验原理	97
11.3 实验设计	97
11.3.1 总体架构	97
11.3.2 datain 模块	98
11.3.3 calculate 模块	102
11.4 仿真结果	102
11.5 演示程序文件说明	104
11.6 演示程序使用	104
第 12 章 数字钟实验	105
12.1 实验内容	105
12.2 实验原理	105
12.3 实验设计	106
12.3.1 总体架构	106
12.3.2 digital_clk 模块	106
12.3.3 one_sec 模块	106
12.3.4 time_set 模块	107
12.3.5 time 模块	107
12.4 仿真结果	109
12.5 演示程序文件说明	110
12.6 演示程序使用	111

第 13 章	SRAM 接口实验	112
13.1	实验内容	112
13.2	实验原理	112
13.3	程序设计	115
13.3.1	总体架构	115
13.3.2	SRAM_IF 模块	116
13.3.3	SRAM_Tester 模块	119
13.3.4	LED_indicator 模块	122
13.4	程序仿真	122
13.5	运行结果	123
13.6	演示程序文件说明	124
13.7	演示程序使用	124
第 14 章	串行接口实验	125
14.1	实验内容	125
14.2	实验原理	125
14.3	程序设计	126
14.3.1	总体架构	126
14.3.2	mini_UART 模块	127
14.3.3	clk_Unit 模块	127
14.3.4	Rx_Unit 模块	128
14.3.5	Rx_Unit 模块	133
14.4	程序使用及设置要求	135
14.5	演示程序文件说明	136
14.6	注意事项	136
第 15 章	I ² C 接口实验	137
15.1	实验内容	137
15.2	实验原理	137
15.2.1	I ² C 总线的特点	137
15.2.2	I ² C 总线协议	137
15.2.3	从设备 ADV7181 的 I ² C 接口	138
15.3	程序设计	139
15.3.1	总体架构	139
15.3.2	顶层模块 I2C	139
15.3.3	INS_SDL 和 INS_SCL 模块	140
15.3.4	I2C_config 模块	140
15.3.5	Register_operation 模块	141
15.3.6	I2C_access_control 模块	141
15.3.7	I2C_Master 模块	142
15.4	运行结果	150

15.5	演示程序文件说明	151
15.6	演示程序使用	152
第 16 章	BCH 编码实验	153
16.1	实验内容	153
16.2	实验原理	153
16.3	实验设计	154
16.3.1	总体架构	154
16.3.2	m_serial 模块	155
16.3.3	encoder 模块	156
16.3.4	channel 模块	158
16.3.5	decoder 模块	158
16.4	仿真结果	160
16.5	运行结果	161
16.6	演示程序文件说明	161
16.7	演示程序使用	162
第 17 章	音频接口实验	163
17.1	实验内容	163
17.2	实验原理	163
17.2.1	音频芯片与 FPGA 的连接	163
17.2.2	音频芯片 UDA1341TS 的基本工作流程	165
17.2.3	UDA1341TS 的控制接口时序	166
17.3	程序设计	167
17.3.1	总体架构	167
17.3.2	sound 模块	168
17.3.3	L3_AUD_Control 模块	169
17.3.4	L3_Control 模块	170
17.4	运行结果	173
17.5	演示程序文件说明	173
17.6	演示程序使用	174
第 18 章	VGA 接口实验	175
18.1	实验内容	175
18.2	实验原理	175
18.2.1	VGA 接口电路原理图	175
18.2.2	VGA 接口	175
18.2.3	VGA 时序分析	175
18.2.4	VGA 时序实现	178
18.3	程序设计	178
18.3.1	总体架构	178

18.3.2	TE3_Default 模块	179
18.3.3	Reset_Delay 模块	179
18.3.4	VGA_Controller 模块	179
18.3.5	VGA_OSD_RAM 模块	181
18.4	运行结果	183
18.5	演示程序文件说明	183
18.6	演示程序使用	183
第 19 章	视频接口实验	184
19.1	实验内容	184
19.2	实验原理	184
19.2.1	CVBS 复合视频广播信号	184
19.2.2	ITU-R 601 和 ITU-R 656 数字电视标准	185
19.3	程序设计	187
19.3.1	总结架构	187
19.3.2	TE3_DVD2VGA 模块	188
19.3.3	I2C_AV_Config 模块	189
19.3.4	TV_to_VGA 模块	189
19.3.5	itu_r656_decoder 模块	191
19.3.6	dul_port_c1024 模块	192
19.3.7	YCbCr2RGB 模块	194
19.4	演示程序文件说明	194
19.5	演示程序使用	194
第 20 章	液晶屏和触摸屏实验	195
20.1	实验内容	195
20.2	液晶屏和触摸屏的原理	195
20.2.1	液晶屏的基本原理	195
20.2.2	触摸屏的基本原理	196
20.3	程序设计	198
20.3.1	总体架构	198
20.3.2	液晶显示模块 Ping	199
20.3.3	touch 模块	202
20.4	运行结果	204
20.5	演示程序文件说明	205
20.6	演示程序使用	205
第 21 章	Nios II 系统入门实验	206
21.1	实验内容	206
21.2	实验步骤	206
21.3	实验结果	209

第 22 章 μ Clinux 实验	210
22.1 实验内容	210
22.2 实验步骤	210
22.2.1 Nios II 硬件设置	210
22.2.2 软件环境配置	216
22.2.3 建立 μ Clinux 应用程序	224
22.3 注意事项	226
附录 TE3 无线多媒体教学平台使用简介	228
A 计算机软硬件要求	228
A.1 硬件要求	228
A.2 软件要求	228
B 硬件连接及使用	228
B.1 核心板连接及使用方法	228
B.2 扩展板使用说明	232
C 核心板外设	232
C.1 时钟	232
C.2 SRAM	233
C.3 FLASH	233
C.4 SDRAM	234
C.5 串口	235
C.6 以太网口	235
C.7 70×6 高速连接器	236
C.8 LED	237
C.9 按钮	237
D 扩展板外设	238
D.1 A/D	238
D.2 D/A	238
D.3 4×4 扫描按键	239
D.4 拨动开关	241
D.5 LED	241
D.6 扩展接口	243
D.7 3 寸 TFT 液晶彩色显示屏、触摸屏	244
D.8 USB 接口	245
D.9 RS-232C 串口	246
D.10 VGA 输出接口	247
D.11 AV 输入接口	248
D.12 数码管	248
D.13 音频接口	250

$$E_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}, x_{27}, x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}, x_{39}, x_{40}, x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{46}, x_{47}, x_{48}, x_{49}, x_{50}, x_{51}, x_{52}, x_{53}, x_{54}, x_{55}, x_{56}, x_{57}, x_{58}, x_{59}, x_{60}, x_{61}, x_{62}, x_{63}, x_{64}, x_{65}, x_{66}, x_{67}, x_{68}, x_{69}, x_{70}, x_{71}, x_{72}, x_{73}, x_{74}, x_{75}, x_{76}, x_{77}, x_{78}, x_{79}, x_{80}, x_{81}, x_{82}, x_{83}, x_{84}, x_{85}, x_{86}, x_{87}, x_{88}, x_{89}, x_{90}, x_{91}, x_{92}, x_{93}, x_{94}, x_{95}, x_{96}, x_{97}, x_{98}, x_{99}, x_{100}\}$$


第1章

EDA技术及其发展

1.1 集成电路产业基本规律

集成电路产业的发展受两大技术发展规律和两大经济矛盾的制约。

两大技术发展规律之一是著名的摩尔定律。按照摩尔定律，集成电路的集成密度每18个月翻一番。截至2010年，单芯片集成度为300亿个晶体管。根据预测，摩尔定律还可望延续至少10年。2009年，3D集成电路技术初步商业化，仅这一项技术就可以使集成密度提高10倍。2008年，实验室研制成功了1nm晶体管，如果该种晶体管实现商业化，可以使集成密度再提高几十倍。两大技术发展规律之二是牧村定律。根据牧村定律，半导体技术每10年完成一次定制化和通用化的回归。2007~2017年是半导体特征循环的第五个回归。在这个回归中，将实现CPU中融入可重构技术，可重构技术中融入CPU。

两大经济矛盾其一是产品复杂度日益上升与产品价格日益下降的矛盾，其二是应用市场日益分散与产品开发费用日益增大的矛盾。这两大经济矛盾反映了半导体“用”与“造”的对立统一。它们相互作用的结果，是专用集成电路日趋减少，其市场会越来越地被通用集成电路和以FPGA（Field Programmable Gate Array，现场可编程门阵列）为代表的可重构计算系统所取代。

1.2 EDA产业的历史

20世纪后半期，随着集成电路制造技术的发展，集成电路设计技术面临着严峻的挑战。由于集成电路设计和使用周期不断缩短，集成电路尤其是专用集成电路（Application Specific IC，ASIC）的设计面临着难度不断提高与设计周期不断缩短的矛盾。为了解决这个问题，我们必须采用新的设计方法和使用高级设计工具。在此情况下，EDA（Electronic Design Automation，电子设计自动化）技术应运而生。随着电子技术的发展及缩短电子系统设计周期的要求，EDA技术得到了迅猛发展。

EDA技术的发展始于20世纪70年代，至今经历了三个阶段，即计算机辅助设计阶段、计算机辅助工程阶段和电子设计自动化阶段。

1.2.1 计算机辅助设计阶段

20 世纪 70 年代是 EDA 发展的初级阶段。在这个阶段,工程师要利用计算机的图形编辑、分析和存储等能力,协助设计电子系统的电路图、印制电路板和集成电路版图;采用二维图形编辑与分析,主要解决电子线路设计后期的大量重复性工作,可以减少设计人员的繁琐重复劳动,但自动化程度低,需要人工干预整个设计过程。这类专用软件大多以微机为工作平台,易学易用,设计中小规模电子系统可靠有效,现仍有很多这类专用软件被广泛应用于工程设计,如 SPICE。这一阶段的 EDA 称作计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)。

1.2.2 计算机辅助工程阶段

20 世纪 80 年代初期,EDA 技术开始设计过程的技术分析,推出了以仿真(逻辑模拟、定时分析和故障仿真)和自动布局与布线为核心的 EDA 产品,这一阶段的 EDA 已把三维图形技术、窗口技术、计算机操作系统、网络数据交换、数据库与进程管理等一系列计算机学科的最新成果引入电子设计,形成了所谓的 EDA 技术中级阶段。其主要特征是具备了自动布局布线和电路的计算机仿真、分析和验证功能。其作用已不仅仅是辅助设计,而且可以代替人进行某种思维。CAE 这种以原理图为基础的 EDA 系统,虽然直观且易于理解,但对复杂的电子设计很难达到要求,也不利于设计的优化。这一阶段的 EDA 被称作计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)。

1.2.3 电子设计自动化阶段

真正的电子设计自动化开始于 20 世纪 80 年代晚期。过去传统的电子系统电子产品的设计方法是采用自底而上(Bottom-UP)的程式,设计者先对系统结构分块,直接进行电路级的设计。EDA 技术高级阶段采用一种新的设计概念——自顶而下(TOP-Down)的设计程式和并行工程(Concurrent Engineering)的设计方法,设计者的精力主要集中在所设计电子产品的准确定义上,EDA 系统去完成电子产品的系统级至物理级的设计。此阶段 EDA 技术的主要特征是支持高级语言对系统进行描述,可进行系统级的仿真和综合。

1.3 EDA 工具的分类

利用 EDA 工具,电子设计师可以从概念、算法、协议等开始设计电子系统,大量工作可以通过计算机完成,并可以将电子产品从电路设计、性能分析到设计出 IC 版图或 PCB 图的整个过程在计算机上自动处理完成。

一般意义上的 EDA 概念范畴很宽。在机械、电子、通信、航空航天、化工、矿产、生物、医学、军事等各个领域,都有 EDA 的应用。目前 EDA 技术已在各大公司、企事