

电子电气技术课程设计指导丛书

- EDA技术与VHDL的基础知识
- 基本数字电路的VHDL实现方法
- 15个实用数字系统的VHDL设计方案

EDA技术与 VHDL

电路开发 应用实践

刘欲晓 方强 黄宛宁 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子电气技术课程设计指导丛书

EDA 技术与 VHDL 电路开发 应用实践

刘欲晓 方 强 黄宛宁 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电子设计自动化 (Electronic Design Automation, 即 EDA) 技术是指包括电路系统设计、系统仿真、设计综合、PCB 版图设计和制版的一整套自动化流程。随着计算机、集成电路和电子设计技术的高速发展, EDA 技术已经渗透到百姓生活的各个角落, 日益成为电子信息类产品的支柱产业。

本书介绍了 EDA 技术和硬件描述语言 VHDL 的基础知识, 通过对工程实例的系统分析、程序设计和仿真, 深入细致地讨论了它们在数字系统设计中的广泛应用。

本书共 23 章, 第 1 章到第 8 章讲解了 EDA 技术的发展历史和主要内容、数字系统的设计方法、VHDL 程序结构、VHDL 语言要素、VHDL 顺序语句、并行语句、Quartus II 数字系统设计和仿真方法以及基本电路的 VHDL 实现方法。第 9 章到第 23 章通过交通灯控制器、秒表、彩灯控制器、抢答器、电梯控制器、出租车计费器、微波炉控制器、FIR 滤波器、I2C 控制器、DDS、序列检测器、自动售货机、函数发生器、调制解调器和 UART 等 15 个数字系统的 VHDL 设计范例, 给用户演示了数字电路的设计方法和思路。

本书体系结构严谨, 内容由浅入深, 案例取材广泛, 书中所有示例均给出了设计源程序和仿真验证结果。本书既可供高等院校的电子、通信、自动化、计算机等信息工程类相关专业的本科生或研究生使用, 也适合于立志自学成才的读者和从事 EDA 技术应用与研究的专业技术人员。使用本书将引领所有读者走进 EDA 技术和 VHDL 电路开发应用的精彩世界。

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 VHDL 电路开发应用实践 / 刘欲晓等编著. —北京: 电子工业出版社, 2009.4

(电子电气技术课程设计指导)

ISBN 978-7-121-08497-3

I. E… II. 刘… III. ①电子电路—电路设计: 计算机辅助设计②硬件描述语言, VHDL—程序设计
IV. TN702 TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 036443 号

策划编辑: 谭佩香

责任编辑: 陆伯雄

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 21 字数: 538 千字

印 次: 2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 35.00 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, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@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

电子设计自动化 (Electronic Design Automation, 即 EDA) 技术是指包括电路系统设计、系统仿真、设计综合、PCB 版图设计和制版的一整套自动化流程。随着计算机、集成电路和电子设计技术的高速发展, EDA 技术历经计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助制造 (CAM)、计算机辅助测试 (CAT) 和计算机辅助工程设计 (CAE) 等发展历程, 已经渗透到百姓生活的各个角落, 日益成为电子信息类产品的支柱产业。

EDA 技术主要包括大规模可编程逻辑、硬件描述语言、软件开发工具等内容。目前, 应用最为广泛的大规模可编程逻辑是复杂可编程逻辑器件 CPLD 和现场可编程门阵列 FPGA, 硬件描述语言 HDL 主要有 VHDL、Verilog HDL、ABEL、AHDL、System Verilog 和 SystemC 等, 主流的 EDA 软件工具则有 MAX+plus II、Quartus II、ispDesignExpERT、Foundation Series、ISE/ISE-WebPACK Series 等。本书采用 IEEE 标准硬件描述语言 VHDL 对数字电路和系统进行性能描述, 以 Altera 公司的 Quartus II 软件为集成开发环境, 对 EDA 技术进行了深入、详尽的阐述。

全书分为两个部分: 第一部分从第 1 章到第 8 章, 首先阐述了 EDA 技术的发展历史和主要内容、数字系统的设计方法等基础知识, 然后通过简单的程序示例向读者展示了 VHDL 程序设计的特点, 并进一步介绍了 VHDL 语言的语法知识, 包括 VHDL 程序结构 (如实体、结构体、块语句、库、程序包等)、VHDL 语言要素 (如文字规则、数据变量、数据类型、操作符等)、VHDL 顺序语句和并行语句 (如赋值语句、流程控制语句、子程序调用语句、进程语句、并行信号赋值语句等), 接着对使用 EDA 软件工具 Quartus II 进行数字系统设计和仿真的方法做了相关说明, 最后讨论了基本电路 (如组合逻辑里的加法器、译码器等, 时序逻辑里的触发器、寄存器等, 以及 Mealy 和 Moore 型状态机) 的 VHDL 实现方法。

第二部分为第 9 章到第 23 章, 介绍了 15 个实用数字系统的 VHDL 设计案例, 包括交通灯控制器、秒表、彩灯控制器、抢答器、电梯控制器、出租车计费器、微波炉控制器、FIR 滤波器、I2C 控制器、DDS、序列检测器、自动售货机、函数发生器、调制解调器和 UART 等, 涉及日常生活、通信、数字信号处理等多个方面。我们首先根据设计要求对所要设计的数字电路进行详细的系统和模块分析, 给出合理的系统设计方案, 然后以设计方案为

基础进行 VHDL 程序设计，最后对设计的模块和系统的正确性、完备性都进行详细的功能仿真和验证，确保每个案例的源程序都可以通过编译和仿真得到正确的结果。

为了便于学习和借鉴，15 个实用数字系统的 VHDL 程序设计的源程序，读者可从 <http://www.tqxbook.com> 中的相应书名的资源中下载。

本书全面系统地介绍了 EDA 技术和 VHDL 硬件描述语言，读者既能从理论上掌握数字系统设计的各种设计思路和方法，又能从各个应用实例的设计、调试、仿真实践中学会吸收和消化，实现改进和创新。本书可作为高等院校电子、通信、自动化、计算机等信息工程类相关专业学生的参考书，也适合立志自学成才的读者和从事 EDA 技术应用与研究的专业技术人员使用。

本书由刘欲晓、方强和黄宛宁等编著。在本书编写过程中，参考了相关领域专家学者的著作和文献，在此向他们表示真诚的谢意。EDA 技术日新月异地发展着，VHDL 电路开发也涌现出许多新的应用领域。由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不当之处，恳请广大读者批评和指正。

作 者

2009 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 EDA 概述.....	1
1.1.1 EDA 的含义.....	1
1.1.2 EDA 历史发展回顾.....	1
1.2 EDA 主要内容.....	2
1.2.1 大规模可编程逻辑.....	2
1.2.2 硬件描述语言.....	3
1.2.3 软件开发工具.....	4
1.2.4 实验室开发系统.....	5
1.3 数字系统的设计.....	5
1.3.1 数字系统的设计模型.....	5
1.3.2 数字系统的设计方法.....	6
1.4 VHDL 在 EDA 中的应用.....	7
1.5 EDA 前景展望.....	9
1.6 本章小结.....	9
1.7 课后习题.....	10
1.7.1 填空题.....	10
1.7.2 选择题.....	10
1.7.3 问答题.....	10
第 2 章 VHDL 入门.....	11
2.1 关于 VHDL.....	11
2.1.1 什么是 VHDL.....	11
2.1.2 VHDL 的特点.....	12
2.2 VHDL 程序示例.....	13
2.3 本章小结.....	15
2.4 课后习题.....	16

2.4.1 填空题	16
2.4.2 选择题	16
2.4.3 问答题	16
2.4.4 上机题	16
第 3 章 VHDL 程序结构	17
3.1 实体	17
3.1.1 实体语句结构	17
3.1.2 类属说明语句	18
3.1.3 PORT 端口说明	19
3.2 结构体	20
3.2.1 结构体语句格式	21
3.2.2 结构体说明语句	21
3.2.3 结构体功能描述语句	22
3.3 块语句结构	22
3.3.1 块语句格式	23
3.3.2 块语句的应用	23
3.3.3 块语句在综合中的体现	24
3.3.4 块语句和结构体	24
3.4 子程序	26
3.4.1 过程	26
3.4.2 函数	29
3.4.3 重载	30
3.5 库 (Library)	32
3.5.1 库的种类	33
3.5.2 库的使用	34
3.6 程序包 (Package)	35
3.7 配置 (Configuration)	36
3.8 本章小结	39
3.9 课后习题	39
3.9.1 填空题	39
3.9.2 选择题	39
3.9.3 问答题	40
3.9.4 上机题	40

第 4 章 VHDL 语言要素	41
4.1 VHDL 文字规则	41
4.1.1 数值型文字	41
4.1.2 字符串型文字	42
4.1.3 标识符	42
4.1.4 下标和下标段名	43
4.2 VHDL 数据对象	44
4.2.1 常量 (CONSTANT)	44
4.2.2 变量 (VARIABLE)	44
4.2.3 信号 (SIGNAL)	45
4.2.4 数据对象的比较	46
4.3 VHDL 数据类型	46
4.3.1 VHDL 预定义数据类型	47
4.3.2 IEEE 预定义标准逻辑位与矢量	49
4.3.3 其他预定义标准数据类型	50
4.3.4 用户自定义数据类型方式	51
4.3.5 枚举类型	52
4.3.6 数组类型	52
4.3.7 记录类型	54
4.3.8 数据类型转换	55
4.4 VHDL 操作符	56
4.4.1 操作符的种类	56
4.4.2 算术操作符	57
4.4.3 关系操作符	59
4.4.4 逻辑操作符	59
4.4.5 重载操作符	60
4.5 本章小结	60
4.6 课后习题	61
4.6.1 填空题	61
4.6.2 选择题	61
4.6.3 问答题	62
4.6.4 上机题	62

第 5 章 VHDL 顺序语句	63
5.1 赋值语句.....	63
5.1.1 信号赋值和变量赋值	63
5.1.2 赋值目标	64
5.2 流程控制语句.....	65
5.2.1 IF 语句.....	65
5.2.2 CASE 语句	67
5.2.3 LOOP 语句.....	69
5.2.4 NEXT 语句.....	70
5.2.5 EXIT 语句	71
5.3 WAIT 语句	72
5.3.1 WAIT 语句.....	73
5.3.2 WAIT ON 语句	73
5.3.3 WAIT UNTIL 语句	74
5.3.4 WAIT FOR 语句	74
5.4 子程序调用语句	75
5.4.1 过程调用	75
5.4.2 函数调用	76
5.5 返回语句 (RETURN)	76
5.6 空操作语句 (NULL)	77
5.7 报告语句 (REPORT)	78
5.8 断言语句 (ASSERT)	78
5.9 本章小结.....	79
5.10 课后习题.....	79
5.10.1 填空题	79
5.10.2 选择题	79
5.10.3 问答题	80
5.10.4 上机题	80
第 6 章 VHDL 并行语句	81
6.1 进程语句 (PROCESS)	81
6.2 并行信号赋值语句.....	83
6.2.1 简单信号赋值语句	83

6.2.2	条件信号赋值语句	84
6.2.3	选择信号赋值语句	85
6.3	并行过程调用语句	86
6.4	元件例化语句	88
6.5	类属映射语句	90
6.6	生成语句	91
6.7	本章小结	93
6.8	课后习题	94
6.8.1	填空题	94
6.8.2	选择题	94
6.8.3	问答题	94
6.8.4	上机题	94
第 7 章	Quartus II 基本使用方法	95
7.1	Quartus II 设计流程	95
7.2	应用 Quartus II 的 VHDL 设计	95
7.2.1	创建工程和编辑设计文件	95
7.2.2	创建工程	97
7.2.3	编译前设置	99
7.2.4	全程编译	100
7.2.5	仿真	101
7.2.6	观察 RTL 电路	104
7.3	本章小结	105
7.4	课后习题	105
7.4.1	填空题	105
7.4.2	选择题	106
7.4.3	问答题	106
第 8 章	基本电路的 VHDL 实现	107
8.1	组合逻辑的 VHDL 实现	107
8.1.1	译码器、编码器	107
8.1.2	加法器、乘法器和除法器	112
8.2	时序电路的 VHDL 实现	115
8.2.1	触发器	115

8.2.2 寄存器	117
8.2.3 计数器	118
8.3 状态机的 VHDL 实现	120
8.3.1 Mealy 状态机	121
8.3.2 Moore 状态机	123
8.4 本章小结	125
8.5 课后习题	126
8.5.1 填空题	126
8.5.2 选择题	126
8.5.3 问答题	126
8.5.4 上机题	126
第 9 章 交通灯控制器	127
9.1 系统设计要求	127
9.2 系统设计方案	127
9.3 主要模块设计	128
9.4 VHDL 编程	128
9.5 系统仿真与分析	131
9.6 本章小结	132
第 10 章 数字秒表	133
10.1 系统设计要求	133
10.2 系统设计方案	133
10.3 主要模块设计	134
10.4 VHDL 编程	134
10.5 系统仿真与分析	137
10.6 本章小结	140
第 11 章 多路彩灯控制器	141
11.1 系统设计要求	141
11.2 系统设计方案	141
11.3 主要模块设计	141
11.4 VHDL 源程序	142
11.5 系统仿真与分析	145

11.6 本章小结	148
第 12 章 数字式竞赛抢答器	149
12.1 系统设计要求	149
12.2 系统设计方案	149
12.3 主要模块设计	150
12.3.1 第一判断电路	150
12.3.2 计分电路	150
12.3.3 显示电路	150
12.4 VHDL 源程序	151
12.5 系统仿真与分析	158
12.6 本章小结	160
第 13 章 电梯控制器	161
13.1 系统设计要求	161
13.2 系统设计方案	161
13.3 主要模块设计	162
13.4 VHDL 源程序	163
13.5 仿真结果与分析	172
13.6 本章小结	174
第 14 章 出租车计费器	175
14.1 系统设计要求	175
14.2 系统设计方案	175
14.3 主要模块设计	176
14.3.1 速度模块	176
14.3.2 计程模块	176
14.3.3 计时模块	176
14.3.4 计费模块	176
14.4 VHDL 源程序	177
14.5 仿真结果与分析	184
14.6 本章小结	186
第 15 章 微波炉控制器	187
15.1 系统设计要求	187

15.2	系统设计方案	187
15.3	主要模块分析	188
15.3.1	状态控制电路	188
15.3.2	数据装载电路	189
15.3.3	计时电路模块	189
15.4	VHDL 源程序	190
15.5	系统仿真与分析	198
15.6	本章小结	200
第 16 章	FIR 滤波器	201
16.1	系统设计要求	201
16.2	系统设计方案	201
16.3	主要模块设计	204
16.3.1	寄存器	204
16.3.2	加法器	204
16.3.3	减法器	204
16.3.4	乘法器	204
16.4	VHDL 编程	205
16.5	系统仿真与分析	219
16.6	本章小结	220
第 17 章	I2C 总线控制器	221
17.1	系统设计要求	221
17.1.1	I2C 总线术语的定义	221
17.1.2	I2C 数据传输时序	222
17.2	系统设计方案	223
17.2.1	时钟分频模块	223
17.2.2	指令译码模块	223
17.2.3	数据移位寄存模块	225
17.2.4	双向数据总线 SCL 和 SDA 的连接	225
17.3	主要模块设计	225
17.4	VHDL 编程	226
17.5	仿真结果与分析	240
17.6	本章小结	240

第 18 章 直接数字频率合成器	241
18.1 系统设计要求	241
18.2 系统设计方案	241
18.3 主要模块设计	242
18.3.1 相位累加器	242
18.3.2 脉冲产生模块	243
18.3.3 ROM 查找表模块	243
18.4 VHDL 编程	249
18.5 系统仿真与分析	256
18.6 本章小结	260
第 19 章 序列检测器	261
19.1 设计要求	261
19.2 模块分析	261
19.3 源程序和仿真	262
19.4 本章小结	264
第 20 章 自动售货机	265
20.1 设计要求	265
20.2 模块分析	265
20.3 源程序和仿真	266
20.4 本章小结	272
第 21 章 智能函数发生器	273
21.1 设计要求	273
21.2 模块分析	273
21.3 源程序和仿真	274
21.4 本章小结	287
第 22 章 多功能调制解调器	289
22.1 设计要求	289
22.2 模块分析	289
22.2.1 ASK 调制与解调	289
22.2.2 FSK 调制与解调	290

22.2.3 PSK 调制与解调	290
22.3 源程序和仿真	292
22.4 本章小结	304
第 23 章 通用异步收发器	305
23.1 设计要求	305
23.2 模块分析	305
23.3 源程序与仿真	308
23.4 本章小结	316
附录 A 习题答案	317

第 1 章 绪 论

伴随着计算机、集成电路和电子系统设计的发展，融合了计算数学、优化理论、图论和拓扑学等多学科精髓发展起来的电子设计自动化（EDA）技术，正在成为现代电子设计技术的核心。EDA 技术涉及面广，内容丰富，以其为基础的数字系统设计，已经具备完整的、成熟的设计方法和设计流程，为现代电子设计的进步和发展做出了巨大的贡献。

1.1 EDA 概述

伴随着计算机、集成电路和电子设计技术的发展，EDA 技术在过去的几十年里取得了巨大的进步。EDA 技术使得设计者的工作仅限于利用软件的方式，即利用硬件描述语言和 EDA 软件便可完成对系统硬件功能的实现。如今，EDA 软件工具已经成为电子信息类产品的支柱产业。

1.1.1 EDA 的含义

随着数字电子技术的飞速发展，信息化得到了有力的推动和促进，从与普通百姓生活息息相关的手机、计算机、数字电视，到关系到国家安定社会和谐的军用设备、航天技术，都采用了数字电子技术，它的应用已经渗透到人们生活的方方面面。现代电子设计技术的核心已逐步转向基于计算机的电子设计自动化技术，即 EDA（Electronic Design Automation）。

所谓 EDA 技术，就是以功能强大的计算机为平台，以 EDA 软件为工具，对用硬件描述语言 HDL（Hardware Description Language）的系统逻辑设计文件，自动地完成逻辑编译、简化、分割、综合、布局布线及逻辑优化和仿真测试的电子产品自动化设计过程。当然，随着 EDA 技术的逐渐成熟，也包括了如 PSPICE、EWB、MATLAB 等计算机辅助分析 CAA 技术，如 PROTEL、ORCAD 等印刷制版计算机辅助设计，等等。

利用 EDA 技术进行电子系统的设计，具有以下几个特点：

- （1） 用软件的方式设计硬件；
- （2） 用软件方式设计的系统到硬件系统的转换是由相关的开发软件自动完成的；
- （3） 设计过程中可用相关软件进行各种仿真；
- （4） 系统可现场编程，在线升级；
- （5） 整个系统可集成在一个芯片上，使之具有体积小、功耗低及可靠性高的特点。

1.1.2 EDA 历史发展回顾

早在 20 世纪 60 年代中期，人们就开始着眼于开发出各种计算机辅助设计工具来帮助设计人员进行集成电路和电子系统的设计，集成电路技术的发展不断地对 EDA 技术提出新的要求，并促进了 EDA 技术的发展。在过去的三十多年里，计算机技术迅猛发展，也给 EDA 行业带来了巨大的变化。进入 20 世纪 90 年代后，电子系统已经从电路级系统集成发展成为包括 ASIC、FPGA 和嵌入式系统的多种模式，EDA 产业已经成为电子信息类产品的支柱产业

业。EDA 的蓬勃发展离不开设计方法学的进步，回顾过去几十年电子技术的发展历程，可大致将 EDA 技术的发展分为 3 个阶段。

20 世纪 70 年代，是 EDA 技术发展初期，我们称之为计算机辅助设计 CAD (Computer Aided Design) 阶段。随着集成电路的出现和应用，硬件设计开始大量选用中小规模的标准集成电路，这也使得传统的手工布线方法很难满足产品复杂性和工作效率的要求。CAD 的概念已见雏形，人们开始利用计算机替代产品设计过程中的高度重复性的复杂劳动，如利用二维图形编辑与分析工具，辅助进行集成电路版图编辑、PCB 布局布线等工作。最具代表性的产品当属美国 ACCEL 公司的 Tango 布线软件。

20 世纪 80 年代，随着集成电路设计进入 COMS 时代，EDA 技术也进入到了计算机辅助工程设计 CAE (Computer Assist Engineering Design) 阶段。PAL、GAL 和 FPGA 等一系列复杂可编程逻辑器件都为电子系统的设计提供新的平台。较之 70 年代的自动布局布线的 CAD 工具能够替代设计中绘图的重度劳动而言，80 年代出现的具有自动综合能力的 CAE 工具则代替了设计师的部分工作，它在 PCB 设计方面的原理图输入、自动布局布线及 PCB 分析，以及逻辑设计、逻辑仿真、布尔方程综合和简化等方面都担任了重要角色。

20 世纪 90 年代，以在设计前期将设计师从事的许多高层次设计交由工具来完成为目的，EDA 技术开始从以单个电子产品开发为对象转向针对系统级电子产品的设计。EDA 工具以系统级设计为核心，包括了系统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及系统决策与文件生成等一系列完整的功能。随着硬件描述语言标准的进一步确立，此时的 EDA 工具还具有高级抽象的设计构思手段，各 EDA 公司也致力于推出兼容各种硬件方案和支持标准硬件描述语言的 EDA 软件的研究。

进入 21 世纪以来，EDA 技术得到了更大的发展。高速 DSP、嵌入式处理器软核的成熟令 EDA 软件的功能日益强大。电子领域各学科全方位融入 EDA 技术，除了成熟的数字技术外，模拟电路系统硬件描述语言的表达和设计的标准化、系统可编程模拟器件的出现、数字信号处理和图像处理的全硬件实现方案等，使得 EDA 工具不论是在广度上还是深度上都取得了长足的发展。

1.2 EDA 主要内容

作为一门发展迅速、有着广阔应用前景的新技术，EDA 技术涉及面广，内容丰富。要系统、全面的掌握 EDA 技术，必须掌握一系列的相关知识和理论，如作为载体的大规模可编程逻辑器件，作为主要表达手段的硬件描述语言，作为智能化设计工具的软件开发环境和作为下载和硬件验证工具的实验室开发系统等。

1.2.1 大规模可编程逻辑

可编程逻辑阵列 PLD (Programmable Logic Device) 是一种通过用户编程来实现某种逻辑功能的新型逻辑器件。经过近三十年的发展，可编程逻辑器件已经从最初简单 PLA、PAL、GAL 发展到目前应用最为广泛的 CPLD/FPGA (Complex Programmable Logic Device 复杂的可编程逻辑器件以及 Field Programmable Gate Array 现场可编程门阵列)。

FPGA 是一种基于查找表 LUT (Look Up Table) 的可编程逻辑器件，在结构上主要分为可编程逻辑单元、可编程输入/输出单元和可编程连线三个部分。FPGA 内部阵列块之间采用