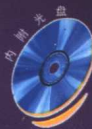


★ EDA 工程系列丛书之四

EDA



工程方法学

曾繁泰 陈美金 沈卫红 曾 鸣 著



清华大学出版社

EDA 工程系列丛书之四

EDA 工程方法学

曾繁泰 陈美金 著
沈卫红 曾 鸣

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

EDA 工程方法学, 即电子设计自动化方法学, 属于现代电子设计方法学的范畴。本书阐述了专用集成电路的功能设计、仿真设计、可测试设计、时序分析、逻辑综合、故障诊断、形式验证等 EDA 工程方法, 归纳出了 EDA 方法学的一些基本规律和设计原则, 阐述了深亚微米工艺下 EDA 工程方法学的发展方向。

本书是 EDA 工程系列丛书之四, 共分 12 章。第 1 章简要概述了 EDA 工程的基本概念; 第 2 章阐述了 EDA 工程方法学, 涉及行为描述、SoC 设计方法、IP 复用、ASIC 设计方法、虚拟机、测试平台设计方法、软硬件协同验证等内容; 第 3 章介绍了 EDA 工程建模方法; 第 4 章阐述了 EDA 工程的综合方法, 介绍了硬件语言和实现载体之间的关系; 第 5 章主要介绍了功能仿真和时序仿真, 阐述了模拟和仿真的概念、方法的不同之处; 第 6 章介绍了测试方法的演变、内建测试电路的设计方法、JTAG 接口标准及其应用; 第 7 章和第 8 章分别阐述了时序分析和故障测试方法; 第 9 章介绍了几种验证算法和验证工具; 第 10 章介绍 EDA 工程的设计流程, 是项目管理的基本方法之一; 第 11 章介绍了实现载体、多项目晶圆 MPW、Chipless、Fabless、Foundry 等概念; 第 12 章展望了 EDA 工程方法学的未来发展。

本书附带一张光盘, 内容为一些常用的 EDA 开发工具, 如 Quartus II、MAX+PLUS II 等, 还有一些器件的参数说明和开放的 IP 核示范动画。光盘内容由 ALTERA 公司提供, 并授权清华大学出版社出版。

本书适合作为高等院校电子、计算机、微电子、通信等相关专业的高年级学生的 EDA 工程专业教材, 也可以作为研究生的参考书, 同时还可以作为电子行业工程技术人员的参考读物。

版权所有, 翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售。

书 名: EDA 工程方法学

作 者: 曾繁泰 陈美金 沈卫红 曾 鸣 著

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦, 邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

策划编辑: 欧振旭

责任编辑: 马 丽

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 36.25 字数: 833 千字

版 次: 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-89494-063-1

印 数: 0001~4000

定 价: 53.00 元(附光盘)

代 序

EDA 工程方法学的研究、应用及教育问题

EDA 工程教育在全国高校刚刚起步。作为一门新兴的学科，它的理论基础、知识结构和应用方法等学术问题需要研究，教材建设、实验设计和工程实践等一系列问题需要解决。教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会筹备成立了“EDA 教育协作组”。它旨在协调、指导全国的 EDA 工程教学和科研工作，培养我国急需的、高素质的集成电路设计人才，解决 EDA 工具资源问题和教材编写、师资培训问题。

1. EDA 工程方法学研究与 EDA 工具软件开发

一门学科对另一门学科的贡献和影响，在历史上有很多的例子。比如数学上矩阵的产生，给理论物理学中的量子力学提供了研究工具；大型计算机的应用，促进了基因工程的发展，使基因图序排列能够顺利进行，同时也催生了“生物信息学”这门新的学科，为人类破译生命密码提供了可能。EDA 工程是计算机科学与技术高度发展衍生的一门崭新的电子设计自动化新学科。

科学研究的方法，如实验、分析、综合、归纳等，都在 EDA 工程方法学中得到体现。EDA 工程方法学是以计算机为硬件平台，以 EDA 工具为工作环境的现代电子设计方法学。EDA 工程研究分为 EDA 工具软件设计研究和 EDA 工具应用于集成电路的设计研究。EDA 工程研究，就是研究电子设计自动化的理论和方法，克服 EDA 工具的开发落后于半导体工艺发展的局面，改善深亚微米工艺条件下，元器件的数学建模落后于 EDA 工具研发的局面。

EDA 工具设计软件和开发需要计算机软件工程专家、半导体工艺专家、电路系统专家合作完成。EDA 工具的研发是知识密集型产业，需要完善的知识产权保护环境。EDA 工程研究的最终成果是大量的、功能丰富的设计软件被开发出来，提供集成电路设计的基础条件，改善 EDA 工具依赖进口的局面。目前，我国集成电路设计产业使用的 EDA 工具大部分依赖进口，昂贵的授权费使许多单位因经济压力而无法开展集成电路设计工作。“EDA 教育协作组”的成立，有望缓解部分困难。

2. 集成电路设计与 EDA 工程应用研究

集成电路设计是一门理论性和实践性非常强的技术，它的教学和研究工作是当前社会所急需的，它的发展在很大程度上决定了我国集成电路设计人才的培养。随着信息技术的发展，各种应用产品的开发越来越依赖于集成电路设计，越来越多的人已经开始从事集成

电路的设计工作。而作为集成电路设计重中之重的 EDA 技术,几乎成为电子工程师和电气工程师的一种必备技能。

EDA 工具种类繁多,不同的设计环节使用不同的设计工具。同一设计功能的 EDA 工具也有不同的 EDA 工具开发商提供,质量也有所不同。EDA 工具按设计阶段分为前端设计工具和后端设计工具;按设计电路的性质分为数字电路设计工具和模拟电路设计工具;按设计功能分为综合工具、仿真工具、时序分析工具、布局布线工具、电磁兼容分析工具、功耗分析工具等。前端设计有与制造工艺无关的 IP 库;后端设计有与设计规则有关的工艺库。这些形形色色的工具在集成电路设计中分别起到不同的作用。从根据市场进行设计的功能定义、设计输入、逻辑综合、设计编译、功能仿真、时序分析,到根据代工设计规则进行的版图设计,将这些设计步骤按设计顺序组织起来,构成了设计流程。将这些设计环节中所用到的设计工具组织起来,就构成了集成设计环境。在系统芯片设计时,基于平台的设计,或基于通信的设计,是说设计的基本单元功能更完善,是一个平台,设计时大量的工作是做基本功能单元间的通信。从这个侧面讲是基于通信的设计。

综上所述,EDA 工具的应用方法学是集成电路设计的主线,EDA 工具的研究开发是集成电路设计产业的灵魂,是信息产业的基础之一。“EDA 教育协作组”的建立,将推动我国 EDA 工程的科研、应用、教育工作健康有序地发展。

3. EDA 工程教育与 EDA 工程教材的编撰

目前,我国高校尚未开展完善的 EDA 工程教育。国内大学的半导体、微电子专业课程设置滞后于信息科技发展速度,在新兴的发展领域,如 EDA 工程方面介绍不够,目前我国缺乏高素质的集成电路设计人才。电子专业、计算机专业、通信专业、微电子专业、半导体专业,都从各自专业的特点,有选择地在部分大学生、研究生中开始涉及 EDA 工程的部分内容。但大都局限于某个 EDA 工具的使用,对 EDA 工程的深层次内容和完整的知识体系结构没有涉及。为此,本丛书的作者提出:为了完整地构筑 EDA 工程知识体系,有必要将这些理论、方法、工具、工艺、实践系统完整地组织起来,完善 EDA 工程的理论基础,研究 EDA 工程方法论,编写 EDA 工程教材,创建一门立论严谨、基础坚实、方法先进、对国民经济建设亟需的 EDA 工程学科,为我国集成电路设计产业培养高素质人才。

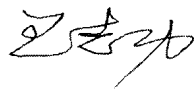
要解决人才培养问题,创建 EDA 工程学科,编写 EDA 工程教材,加快 EDA 工程方法论的基础研究就是当务之急。《EDA 工程系列丛书》就是在这样的环境和气候下酝酿出来的。当《EDA 工程系列丛书》编写过半时,国家《鼓励软件和集成电路产业发展的若干政策》颁布了。为了使得这套丛书的写作更具有意义,更适应当前形势的发展。当《EDA 工程系列丛书》编写即将全部完成时,全国“EDA 教育协作组”成立了。真是东风频吹,春雨润物。

编写 EDA 工程系列丛书的作者曾经向有关专家征求意见,让他们提出有建设性的写作指导。为了打牢理论基础,作者编写了《EDA 工程概论》、《VHDL 程序设计》、《EDA 工程方法学》三本书。因为 EDA 工程是一门实践性很强的学科,作者又编写了《可编程器件应用导论》、《EDA 工程实践》两本书。丛书基本涵盖了 EDA 工程的方方面面。考虑到 EDA 工程的快速发展,书中在每个技术专题后面都设立了技术发展趋势的章节,展望了

该项技术的未来发展潮流,使读者对未来发展空间有丰富的想象。综上所述,《EDA 工程的丛书》的编撰原则是:立足前沿、突出实践、基础扎实、理论严谨。本丛书奠定了 EDA 工程的学术基础,建立了 EDA 工程的知识体系。它的出版,对推动我国 EDA 工程教育的发展,加快更新传统电子设计方法,将起到积极作用。

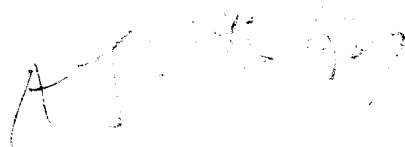
随着 EDA 工程教育的深入展开,在“EDA 教育协作组”的指导下,将会有很多优秀的 EDA 教材出版发行。今后,EDA 工程教材的编写定将进入一个新阶段,其作品的数量也会日益上升,其作品的内容也会日臻完善。

在祝贺《EDA 工程系列丛书》的出版发行和“EDA 教育协作组”的成立之际,与会的教育工作者积极交流了各自的 EDA 教学经验和研究成果,这为我们以后的研究和学习提供了很好的帮助。让我们共同筹划集成电路设计之伟业,畅谈 EDA 教育之大计,运筹帷幄,决胜千里。应作者之邀,我欣然命笔,书此短文,是为序。



东南大学射频与光电集成电路研究所所长
电路与系统学科首席教授
教育部长江学者特聘教授
国家 863 计划专家组成员

2003 年 1 月 15 日



前 言

电子产品随着设计、制造技术的进步，更新换代速度可谓日新月异。电子产品开发研制的动力源、加速器就是 EDA 工程，现代电子设计技术的核心也是 EDA 工程。EDA (Electronic Design Automation) 工程是指以计算机为工作平台，以 EDA 软件工具为开发环境，以硬件描述语言为设计语言，以可编程器件为实验载体，以 ASIC、SoC 芯片为目标器件，以电子系统设计为应用方向的电子产品自动化设计过程。

随着集成电路的应用日益广泛，它的重要性也日益显著，其功能已经达到足以影响并决定整机性能的程度。在集成电路设计中凝聚的系统方面的专业知识越来越多，集成电路的设计也越来越需要系统设计人员的参与。信息技术的发展，各种应用产品的开发，例如计算机、通信设备以及各种消费类电子产品等，也更加明显地依赖于集成电路的设计与开发；许多科研工作也越来越依赖于微电子技术的支持。因此，许多整机系统公司和各类研究机构，纷纷开始从事或者参与集成电路的设计。集成电路设计技术几乎成为各类电子工程师和电气工程师的一项必须掌握的技能。

电子领域的人士认识到集成电路设计技术的发展，在相当大的程度上决定于人才的培养。而设计技术又是一门实践性非常强的技术，集成电路设计的教学需要依靠“真刀真枪”的实践，不能仅仅限于“纸上谈兵”。此外对于集成电路设计人才的培养，除了要求掌握具体的设计技巧以外，更为重要的是培养设计人员的创新意识、创新的构思，尤其需要通过样品的制作来加以检验和证实。而集成电路的制作越来越复杂，加工设备，尤其是先进的加工设备价格十分昂贵，添置甚至维护这些设备的费用早已超过学校和研究所的承受能力。如今的集成电路加工，不但流程长、牵涉面广（包括晶圆加工、封装、测试分析），而且门槛费用高昂，不但学校、研究所承担不起，甚至中小型的设计企业也难于负担，这就需要用 MPW 方法来解决。

科学研究的方法（实验、分析、综合、归纳等），都在 EDA 工程方法学中得到体现。EDA 工程方法学是以计算机为硬件平台，以 EDA 工具为工作环境的现代电子设计方法学。

EDA 工程的理论基础是自动化理论、软件工程、编译原理、电路理论、微电子学、半导体工艺、集成电路设计等基础学科。EDA 工程发展迅速，已逐渐成为一门崭新的学科。它的知识体系结构为：

- EDA 工程方法学
- 硬件描述语言
- EDA 工具开发及应用
- 可编程器件原理、结构及应用
- EDA 工程应用及实践

EDA 工程广义的定义范围应包括半导体工艺设计自动化, 可编程器件设计自动化, 电子系统设计自动化, 印刷电路板设计自动化, 仿真、测试故障诊断、形式验证自动化。EDA 工程是指电子设计自动化工程, 不包含电子生产自动化。EDA 工程在我国尚未普及, 电子设计专业人员, 电子类、计算机类的大学生、研究生亟需掌握 EDA 工程。作者认为, 为了完整地构建 EDA 工程知识体系, 有必要将这些理论、方法、工具、工艺、实践, 系统完整地组织起来, 创建一门理论严谨、基础坚实、方法先进、国民经济建设亟需的 EDA 工程学科。EDA 工程属于电路理论、半导体物理、计算机软件的边缘学科。创建 EDA 工程专业, 这是作者的设想。北京清华大学出版社金地公司的朋友独具慧眼, 选题准确, 决策果断, 与作者协商, 计划出版一套 EDA 工程丛书, 初步计划如下:

- | | | |
|---------------|------|-----------------|
| □ 《EDA 工程概论》 | 丛书之一 | 曾繁泰 李冰 李晓林著 |
| □ 《VHDL 程序设计》 | 丛书之二 | 曾繁泰 陈美金著 |
| □ 《可编程器件应用导论》 | 丛书之三 | 曾繁泰 侯亚宁 崔元明著 |
| □ 《EDA 工程方法学》 | 丛书之四 | 曾繁泰 陈美金 沈卫红 曾鸣著 |
| □ 《EDA 工程实践》 | 丛书之五 | 曾繁泰 李冰 孙刚见著 |

《EDA 工程概论》阐述了 EDA 工程的知识体系、EDA 工程与传统电子设计方法的根本区别, 内容涉及 EDA 工程理论基础、EDA 软件工具开发、PLD 硬件结构、IC 设计实践等方面。

《可编程器件应用导论》从应用的角度阐述了可编程器件的三种基本形式: 数字, 模拟, 混合可编程器件的原理、结构、参数和最新进展。阐述了嵌入式 PLD、SoC 芯片等主流器件在深亚微米条件下的电路性质以及对电子设计人员提出的挑战。

《VHDL 程序设计》主要由两部分组成: 上篇阐述了 VHDL 语言的语法基础和程序结构; 下篇阐述了组合、时序逻辑、微处理器、总线接口模块的设计方法, 以及可测试设计、优化设计方法。上篇介绍 VHDL 语言基础, 力求概念清楚。下篇介绍 VHDL 程序设计, 力求实践丰富。书中实例都是作者从工程实践中精选出来的。通过这些实例, 读者可以做成 IP 模块, 建立自己的 IP 库, 以方便重复利用。本书力求能够讲清硬件描述语言的语法、程序结构、编程方法, 同时把大量的基础 IP 模块奉献给读者, 使之对设计工作有所帮助。

《EDA 工程方法学》阐述了在专用集成电路 (ASIC) 设计、系统集成 (SoC) 中的逻辑综合、器件实现、系统仿真、时序分析、故障诊断、形式验证、优化设计等专题。归纳了 EDA 方法学的一般规律, 建立了现代电子设计的理论基础。一些前沿课题正在研究和探索之中。本书的目的之一是让非半导体专业的电子工程师掌握集成电路的设计、综合、仿真、测试、验证的工程方法。探讨了无芯片 EDA 公司 (Chipless 从事 IP 模块生产)、无生产线集成电路设计公司 (Fabless) 的运作机制, 并介绍了 MPW 多项目晶圆服务。

《EDA 工程实践》通过实例阐述了利用 EDA 工程进行电子系统设计、ASIC 设计、SoC 设计的方法以及利用深亚微米工艺条件下的电路性质和计算机软件工程进行 EDA 工具软件设计、测试平台设计、软硬件协同验证环境设计的方法。

现代电子设计技术发生了深刻的变化: 由通用集成电路为设计载体过渡到利用专用集成电路为设计载体, 由电路图作为工程语言过渡到用硬件描述语言作为设计语言, 由电子

电路设计转变到 ASIC、SoC 集成电路设计。《EDA 工程系列丛书》正是反映这一变化的专业丛书。这是一套介绍现代电子设计理论和方法的书籍，旨在引导电子设计工程师采用新方法、新语言、新工具去设计电子新产品，力图使电子设计师参与到集成电路设计中来。这原本由半导体工艺师完成的工作，因为有了 EDA 工程，才使其有了可能。正是因为有了电子设计师的参与，才使得电子产业和半导体产业互相推动，才使得集成电路新品层出不穷，蓬勃发展。

该系列丛书系统地阐述了 EDA 工程的理论基础，适合于 EDA 工具的软件开发人员和电子系统设计的硬件开发人员阅读。软硬件工程人员可以在这里找到他们的结合点。计算机硬件的研究设计孕育了软件产业的发展。软件产业的发展，特别是操作系统、设计工具的发展，又加速了硬件设计的自动化。这种相互作用，使得电子产业以加速度发展。了解、学习、掌握 EDA 工程理论和方法，有利于我们在电子科学领域达到或超越世界先进水平。

这套专著的出版，就像五块奠基石，奠定了 EDA 工程的学术基础，建立了 EDA 工程的知识体系，对推动我国 EDA 工程的发展，加快更新传统电子设计方法，改变我国电子产业落后面貌，将起到积极作用。这套专著如果能对电子工程师们的设计工作有所帮助，对他们的设计思路有所启发，我们会感到十分欣慰。因为一切为读者着想，是作者的写作目的，也是出版者的责任。我们呼吁教育管理有关部门，加快更新陈旧教材，改变我国电子工程教育落后于科技发展的局面。

这套丛书的写作，是一项十分繁重而艰苦的劳动，它涉及面广、资料缺少、难度很大，十分具有挑战性。在浩繁的资料中，我们的参考文献不能一一尽录，在此向这些文献的作者表示歉意。出版界的朋友联络出版具体事务，给了我们大力支持；山东大学 EDA 中心的同志，分担了许多繁杂的工作，使我有精力，有时间最终完成这项工作。在此向支持帮助我们的各界朋友和同事们表示衷心的感谢。

本书主要由曾繁泰、陈美金、沈卫红、曾鸣执笔完成。参加本书编写工作的其他人员还有曾峰、李冰、孙刚健、侯亚宁、徐丽、陈国荣、曾波等。限于作者水平，书中若有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者于山东大学多屏幕微机研究所、EDA 工程研究中心

2003 年 5 月

目 录

第 1 章 EDA 工程概论	1
1.1 概论	1
1.2 EDA 工程发展历程	3
1.3 EDA 工程概念	5
1.3.1 EDA 工程的实现载体	6
1.3.2 EDA 工程的设计语言	7
1.3.3 EDA 系统的框架结构	8
1.4 EDA 工程的基本特征	8
1.5 集成电路设计方法	10
1.5.1 全定制设计方法	10
1.5.2 符号法版图设计	11
1.5.3 半定制设计方法	12
1.5.4 可编程器件设计方法	14
1.5.5 不同集成电路设计方法的比较	15
1.6 EDA 工程的范畴	15
1.6.1 EDA 工程的硬件产品设计方法学	15
1.6.2 EDA 工程的软件工具设计方法学	16
1.6.3 EDA 工程的应用范畴	17
1.7 EDA 工程的设计流程	18
1.8 EDA 工程和微电子技术	20
1.8.1 EDA 工程学科与微电子技术的关系	20
1.8.2 其他学科与微电子结合诞生新的技术	22
第 2 章 EDA 工程设计方法	24
2.1 IC 设计描述法	24
2.1.1 集成电路设计的描述方法	24
2.1.2 行为描述法	26
2.2 IP 复用方法	28
2.2.1 问题的提出	28
2.2.2 软 IP 核与硬 IP 核	31
2.2.3 设计复用方法	33

2.2.4	基于 IP 模块的设计技术.....	36
2.2.5	硬件参数提取提高 IP 利用率.....	40
2.3	ASIC 设计法.....	42
2.3.1	ASIC 设计概述.....	42
2.3.2	用可编程逻辑器件设计 ASIC	43
2.3.3	用门阵列设计 ASIC (半定制法)	46
2.3.4	用标准单元设计 ASIC (半定制法)	52
2.4	大规模集成电路 (VLSI) 设计方法	53
2.5	以集成平台为基础的设计方法	55
2.5.1	集成平台的概念.....	56
2.5.2	集成平台的结构.....	58
2.5.3	集成平台的发展.....	59
2.6	集成系统设计方法.....	60
2.6.1	片上系统概念.....	60
2.6.2	片上系统的一般设计方法	65
2.6.3	片上系统的分层设计方法	67
2.6.4	片上系统的集成设计方法	71
2.6.5	片上系统设计的关键问题.....	78
2.6.6	片上系统面向对象的设计方法	81
2.6.7	可编程系统级芯片的结构.....	83
2.6.8	可编程系统级芯片的设计方法	86
2.6.9	片上系统的测试方法.....	88
2.6.10	片上系统的设计实例 (一) —— 单片微处理器系统芯片.....	93
2.6.11	片上系统的设计实例 (二) —— 32 位微处理器系统芯片.....	97
2.6.12	片上系统的设计实例 (三) —— 多处理器系统芯片.....	98
2.6.13	系统芯片展望.....	101
2.7	EDA 工程集成设计环境 IDE	103
2.7.1	集成设计环境的概念.....	104
2.7.2	趋向集成化的 EDA 工具平台	105
2.7.3	EDA 工程的框架结构.....	111
2.8	虚拟器件协同设计环境.....	115
2.8.1	一个从系统到芯片的完整设计流程	116
2.8.2	设计流程.....	116
2.8.3	行为级虚拟器件建模.....	116
2.8.4	结构级虚拟器件建模.....	118
2.8.5	行为级到结构级映射.....	119
2.8.6	系统级设计和实现的无缝连接	119

2.9 软硬件协同设计方法	120
2.9.1 软硬件协同设计语言	120
2.9.2 软硬件划分的问题	121
2.9.3 软硬件协同设计的划分方法	122
2.9.4 限制满足性问题	122
2.9.5 软硬件协同设计工具	123
2.9.6 推导指令	124
2.9.7 统一的表述	125
2.9.8 设计指令的建立	125
2.10 EDA 工程的分层设计方法	128
2.11 e-DA 网上设计方法	138
2.11.1 网上设计环境	138
2.11.2 远程 IC 设计环境	139
2.12 EDA 工程的仿生学方法	141
2.12.1 概述	141
2.12.2 进化硬件	142
2.12.3 POE 模型	142
2.12.4 电子胚胎结构模型	143
2.12.5 仿生 SoC 芯片模型	144
第 3 章 EDA 工程建模方法	146
3.1 模型的概念	146
3.2 VHDL 建模	147
3.3 组合电路模型	148
3.3.1 编码器的设计	148
3.3.2 译码器的设计	150
3.3.3 选择器的设计	154
3.3.4 运算器的设计	155
3.4 时序电路建模	157
3.4.1 时钟边沿的描述	157
3.4.2 时序电路中复位信号 Reset 的 VHDL 描述方法	159
3.5 状态机模型	162
3.5.1 状态机建模	162
3.5.2 优化性能	164
3.5.3 资源利用	166
3.5.4 Std_match 函数	167
3.5.5 消除锁存器	168
3.6 微处理器模型	168

3.6.1	寄存器级模型特点	168
3.6.2	寄存器级数据流模型的特点	170
3.6.3	集成系统的划分	171
3.6.4	精简指令集计算机	173
3.6.5	URSIC 处理器级程序设计	176
3.7	PLD 的物理模型	180
3.7.1	互连引发的问题	181
3.7.2	高度可预测	183
3.8	数字电子系统模型	183
3.9	并行建模环境	185
3.10	深亚微米建模	189
第 4 章	EDA 工程综合方法	193
4.1	综合的概念	193
4.2	逻辑综合	194
4.2.1	单输出函数的综合	194
4.2.2	多输出函数的综合	195
4.3	时序电路逻辑综合	196
4.3.1	时序状态机的模型	197
4.3.2	时序电路的综合	198
4.3.3	时序电路状态机的最小化	198
4.3.4	时序电路状态划分	199
4.3.5	不完全确定的时序电路状态机的化简	201
4.3.6	时序电路的状态分配	203
4.4	用 EDA 工具进行自动综合	205
4.5	算法综合	206
4.6	调度技术	207
4.6.1	调度函数与时间变量和资源变量的关系	208
4.6.2	操作的调度类型	208
4.6.3	调度中控制结构的处理	209
4.6.4	调度算法的分类	210
4.6.5	调度中控制结构的处理	212
4.6.6	功能单元库	215
4.7	分配技术	216
4.7.1	分配问题	216
4.7.2	分配算法	217
4.8	设计规划综合方法	219
4.8.1	设计规划综合	220

4.8.2 模块设计方法.....	221
4.8.3 模块的实现.....	222
4.9 分层物理综合方法.....	223
4.9.1 物理综合边界.....	223
4.9.2 模块规模的影响.....	224
4.9.3 分层结构的优点.....	225
4.9.4 底层规划.....	225
第5章 EDA 工程仿真方法.....	228
5.1 概述.....	228
5.2 仿真方法.....	229
5.2.1 仿真的级别.....	229
5.2.2 仿真系统的基本组成.....	230
5.2.3 常用仿真方法.....	232
5.3 功能仿真.....	233
5.3.1 功能仿真的概念.....	233
5.3.2 功能仿真的模型.....	234
5.3.3 信号状态值.....	235
5.3.4 延迟模型.....	239
5.3.5 元件模型.....	242
5.4 逻辑仿真.....	245
5.4.1 仿真过程.....	245
5.4.2 事件表驱动仿真算法.....	247
5.4.3 三值仿真算法与竞争冒险检测.....	252
5.5 开关级仿真.....	254
5.5.1 开关级电路模型.....	254
5.5.2 计算节点信号状态的强度比较算法.....	256
5.5.3 等效阻容网络算法.....	260
5.5.4 信号延迟的计算.....	261
5.5.5 门、功能块级和开关级的混合仿真处理.....	266
5.6 高层次仿真.....	266
5.6.1 VHDL 仿真系统的组成.....	267
5.6.2 VHDL 内部模型的确立.....	269
5.7 VHDL 仿真算法.....	277
5.8 仿真工具实例——Saber.....	282
第6章 EDA 工程可测试设计方法.....	288
6.1 概述.....	288

6.1.1	可测试设计.....	288
6.1.2	内建自测试.....	290
6.1.3	可测试设计中的功耗优化问题	292
6.1.4	可测试设计技术的发展	292
6.2	测试方法的范畴.....	294
6.3	可测试性分析.....	295
6.4	测试矢量生成.....	296
6.4.1	组合电路测试	297
6.4.2	时序电路测试	298
6.5	可测试性结构设计.....	300
6.5.1	分块测试.....	300
6.5.2	扫描测试设计	301
6.5.3	内建自测试 (BIST)	306
6.6	测试 (平台) 程序的设计方法.....	310
6.6.1	测试平台的搭建	310
6.6.2	不同仿真目的对测试平台设计的要求	311
6.6.3	用子程序方式建立测试平台	312
6.7	测试程序设计.....	314
6.7.1	表格式测试程序设计	314
6.7.2	文件 I/O 式测试程序设计	318
6.8	测试方法应用 (一) ——片上存储器测试	325
6.9	测试方法应用 (二) ——ASIC 测试	326
6.10	测试方法应用 (三) ——嵌入式系统测试	331
6.10.1	测试方法.....	332
6.10.2	测试的步骤.....	333
6.10.3	UML 测试结构	335
6.10.4	测试的执行.....	336
6.10.5	测试方法的推广	337
6.11	可制造设计/可测试设计 (DFM/DFT)	338
6.11.1	面向制造的设计	339
6.11.2	实现 CIM (计算机集成制造)	340
6.11.3	集成化工序	340
6.11.4	测试和设计部门之间的沟通	341
第 7 章	EDA 工程时序分析方法	342
7.1	静态时序的分析 (STA) 方法.....	342
7.1.1	考虑分布参数的建模.....	343
7.1.2	耦合问题.....	343

7.1.3 分析邻线耦合	344
7.1.4 门级延迟问题	345
7.1.5 解决方案	346
7.2 关键路径的时序分析方法	347
7.2.1 静态时序分析工具的基本概念	348
7.2.2 时序分析工具的使用	349
7.2.3 注意事项	350
7.3 深亚微米工艺的时序分析方法	351
7.3.1 动态模型	352
7.3.2 行为模式	353
7.4 面向 ASIC 的时序分析方法	354
7.4.1 超级芯片建模结构	355
7.4.2 单元库的开发	356
7.5 通过噪声分析发现时序错误的方法	358
7.5.1 串扰效应	358
7.5.2 噪声时序分析方法的应用	360
第 8 章 EDA 工程故障测试方法	362
8.1 故障测试概述	362
8.2 故障模型	363
8.3 故障仿真	364
8.4 信号完整性分析	365
8.4.1 IBIS 模型	368
8.4.2 PSPICE 模型	369
8.4.3 SPICE 模型和 IBIS 模型比较	372
8.5 故障测试方法——JTAG 法	373
8.5.1 集成电路测试标准	375
8.5.2 标准模块描述	375
8.5.3 集成电路在系统编程标准	379
8.5.4 JTAG 接口应用于 PLD 器件编程	383
第 9 章 EDA 工程验证方法	384
9.1 概述	384
9.2 组合电路和时序电路的验证方法	385
9.2.1 组合电路的逻辑验证	386
9.2.2 时序电路的逻辑验证	387
9.3 基于符号处理的形式验证方法	387
9.4 基于时序逻辑的验证方法	390

9.5	用状态迁移表的验证方法	392
9.6	归纳断言法	393
9.6.1	工作原理	393
9.6.2	寄存器传输语言及其公理定义	396
9.6.3	验证实例	399
9.7	形式验证的 HDL 方法	400
9.8	用测试平台语言实现自动验证	406
9.9	在深亚微米设计中借助等效检验进行形式验证	409
9.10	硬/软件并行设计与 SoC 验证	413
9.11	深亚微米工艺条件下的验证工具	419
9.12	大型 FPGA 器件仿真验证	421
9.13	嵌入式处理器验证环境	425
9.14	验证工具应用实例和验证方法进展	430
9.14.1	应用实例	430
9.14.2	验证方法的进展	433
第 10 章	EDA 工程流程规划方法	434
10.1	流程的概念	434
10.1.1	EDA 工程方法与设计流程	434
10.1.2	集成电路产业流程	435
10.1.3	系统层与算法层设计流程	436
10.1.4	高层次综合设计流程	437
10.1.5	ASIC 设计流程	437
10.2	混合信号设计环境与开发流程	439
10.2.1	SPECTRE 电路仿真器	440
10.2.2	SPECTRE RF 电路仿真工具	441
10.2.3	其他模块的功能	443
10.3	自建系统级芯片验证流程 (COT)	444
10.4	基于模块的设计流程	449
10.4.1	设计环境	450
10.4.2	设计工具	452
10.4.3	设计流程	453
10.5	基于 FPGA 的硬宏 (IP) 设计流程	455
10.5.1	问题的提出	455
10.5.2	解决方法	456
10.5.3	进一步的讨论	458
10.6	设计流程应用实例	458
10.6.1	实现载体的选择	458