



国际信息工程先进技术译丛



全面的功能验证： 完整的工业流程

**Comprehensive Functional Verification:
The Complete Industry Cycle**

Bruce Wile
(美) John C. Goss 著
Wolfgang Roesner

沈海华 乐翔 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

全面的功能验证： 完整的工业流程

Bruce Wile

(美) John C. Goss 著

Wolfgang Roesner

沈海华 乐翔 译



机械工业出版社

本书分为 5 个部分。第 1 部分的内容是功能验证概述,包括概念背景、验证计划、验证策略和一些基本练习。第 1 部分还介绍了验证周期的概念和层次化验证的概念,以及在实践中怎样将巨型设计分解为可验证的单元。第 2 部分和第 3 部分关注两个最主要的功能验证方法:基于模拟的验证方法和形式验证方法。第 4 部分把注意力集中在验证周期的后期阶段,包括回归测试和“逃逸”错误分析,以及一些高级的验证技术。第 5 部分,是一些验证实例研究的集合,进一步强调了验证周期和验证过程中的相关概念。

本书既可作为科研院所、高等工科院校计算机、电子、微电子等专业的教材或教学参考书,也可作为集成电路验证领域的工程师的技术指南或工具书。

Authorized simplified Chinese translation edition jointly published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. & China Machine Press.

Copyright©by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. & China Machine Press.

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由机械工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾地区)出版及标价销售。未经许可的出口,视为违反著作权法,将受法律制裁。

本书封底须贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2009-3281 号。

图书在版编目(CIP)数据

全面的功能验证:完整的工业流程/(美)威立(Wile, B.)等著;沈海华,乐翔译. —北京:机械工业出版社,2009.2

(国际信息工程先进技术译丛)

Comprehensive Functional Verification: The Complete Industry Cycle

ISBN 978-7-111-29641-6

I. 全… II. ①威…②沈…③乐… III. 集成电路-芯片-设计
IV. TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 018412 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘星宁 版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 32 印张 · 702 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-29641-6

定价:98.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

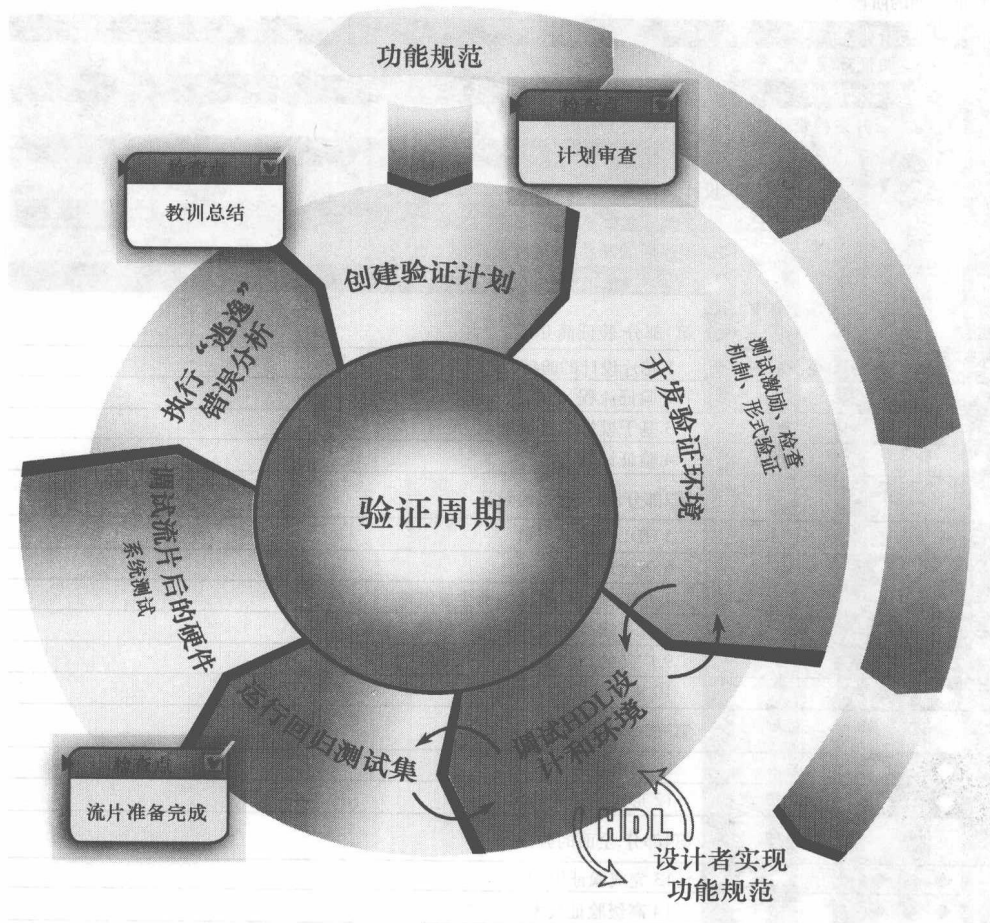
销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

功能验证的周期



验证周期各阶段的覆盖情况



注:白色的菱形表示深度覆盖。

译者序

近年来,我国集成电路产业方兴未艾,越来越多的人选择投身这个产业,并以此作为自己的职业方向。纵观国际集成电路产业的发展,在20世纪90年代,人们主要把精力投入在集成电路设计方面,在工程师们看来,无论是结构设计还是物理设计都是值得花大力气去追求的,而验证只是各种设计工程师附加的工作。进入2000年以后,随着制造工艺的改进,集成电路设计的复杂度越来越高,面对可能高达上亿个晶体管的集成电路设计复杂度,曾经对设计结构了然于胸的设计者们变得茫然了,因为现代复杂的集成电路设计结构和庞杂的功能规范已经超出了设计工程师能够轻易掌握的范畴。

事实上,当前集成电路验证已成为集成电路设计流程中的瓶颈,从流程到方法都亟待专门的研究。无论是芯片设计公司还是电子设计自动化(EDA)工具提供商都对集成电路验证领域给予了高度的重视。越来越多的EDA工具提供商投入精力开发大量新的集成电路验证工具以应对市场需求,而越来越多的芯片公司组织了专门的验证队伍,甚至不惜高薪聘请经验丰富的验证工程师投入芯片研制流程,以期缩短验证周期,进而缩短整个产品的开发周期。2009年全球性经济不景气,外资企业纷纷裁员,我的一个从外资企业刚刚跳到龙芯工作的新同事对我说:“天哪,你是做验证的,公司裁员的时候,最好找工作的就是验证工程师啦”,同事羡慕的眼神至今令人难忘。

被人羡慕是幸福的,但多数情况下,这种幸福感在面对大量庞杂、琐碎、纷乱的集成电路验证工作时会降低、甚至消失无踪,这种情况在刚刚切入这一领域的新人身上表现得更为明显。这是因为集成电路验证是一个工程实践性很强的领域,过于强调经验的积累,而缺乏系统的方法学研究。目前大多数公司的验证队伍都是从设计队伍中剥离出来的,经过逐渐摸索,成为领域的专门人才。而集成电路验证方面的课程在国内外大学中都较少开设,属于最近两年才出现的新生事物。对于大多数本科、硕士、甚至博士毕业生来说,工作后进入集成电路验证领域等同于进入一个全新的领域,难免茫然失措。我本人博士毕业于体系结构专业,毕业后先是从事龙芯处理器结构设计工作,龙芯成立专门的验证团队时,我也从设计工作中抽离出来专门从事处理器验证工作,这期间,我和我的同事们亲身体会了进入新的工作领域的艰难,也常常感受到进入验证组的新同事对这个研究领域的迷茫和困惑。在积累了一定的实践经验后,我从两年前开始在中国科学院研究生院开设《集成电路验证》课程,希望能让更多的人面对集成电路验证领域时不再是一片迷茫和空白。在工作和教学的过程中,我常常在想,如果能

VI 全面的功能验证：完整的工业流程

有这样一本集成电路验证方面的参考书——既能帮助有志投身集成电路验证领域的大学生、研究生以及新入行的工程师入门，又能给有经验的工程师更多的启发，那该多好。值得庆幸的是，经过几年的寻觅，终于被我找到了这样一本好书。

要想写一本验证方面的好书，首先要求作者具有丰富的工程实践经验。本书的三位作者都是 IBM 资深验证工程师，先后领导过 IBM 的验证团队，拥有十几年甚至二十多年的大型验证项目的工程经验，这在业界也是不可多得的。同时，本书的内容全面，组织结构非常合理。从验证的基础知识到全面的功能验证技术，从模拟验证到形式验证，本书覆盖了方方面面的验证知识，并且按照验证的流程周期把这些验证知识组织起来，配合实践和练习，深入浅出地给读者描述了模拟真实世界的验证过程。通过本书的阅读，读者可以熟悉集成电路验证领域的基础知识，掌握验证的基本流程和工作方法，为集成电路等相关领域的工作打下基础。本书对于集成电路验证领域的工程师，以及计算机、电子、微电子类相关专业的本科生和研究生都是一本很好的参考书。

本书的翻译工作历时两年，期间许多的业内专家、同行、同事、朋友、同学付出了艰苦的努力，在此深表感谢。

感谢我的领导和老师胡伟武研究员长期以来的指导、支持和帮助。

感谢中科院计算所第一届、第二届集成电路验证班的全体同学，他们是张宇宾、成元庆、单娜、沈煌辉、喻言、刘动、申祥军、张颖、方运谭、陈飞、段勃、段玮、高燕萍、何子键、孟海波、裴松伟、孙文钦、王达伟、王焕东、王茹、王凯、杨梁、张科、靳松、高健良、陈伟、徐亮、杜金秀，正是他们的工作为本书的翻译打下了基础。

感谢中科院计算所龙芯验证测试组我的同事、好友和学生，他们是张珩、陈云霁、齐子初、王朋宇、李晓钰、王玲、郭崎、陈博文、黄静、李玲、钱程、孙国庆、张尧、吴瑞阳、李磊、尹一笑、刘慧，在本书的翻译过程中，和他们的讨论使我获益匪浅。

感谢中科院软件所的张文辉研究员在百忙之中审阅了本书全部形式验证相关内容。

在本书的翻译过程中，从学术界到出版界很多人付出了心血和努力，限于篇幅无法一一列举他们的名字，在此致以深深的谢意。

在本书翻译的过程中，我们力求精确严谨，但由于译者水平有限，难免会有疏漏之处，请读者不吝批评指正。

沈海华

2010. 1. 16

于中科院计算所

对本书的评论

随着芯片设计复杂度的不断提高，功能验证日渐成为开发过程中的决定性任务。本书在描述功能验证基础方面做了极为出色的工作。读者可以从本书中了解验证周期的细节，学习验证工程师所采用的各种方法，以确保完成一个无错的设计版本。

——Fadi A. Aloul, American University of Sharjah, UAE

本书提供了至今为止最为广泛深入的功能验证策略。作者依赖深厚的经验，对验证工程师可能面对的各种问题和挑战提供了一个工业级的透视图。本书对于新手和有经验的验证工程师都很有价值。

——Baback Izadi, State University of New York—New Paltz

本书是对工业化验证流程的全面浏览。作者特别关注了该领域中覆盖率方面的最新进展，并将它们串成组织严谨的章节链来介绍。此外，本书还伴有丰富的说明举例和研究实例，使之成为一本大学功能验证课程的理想教科书。

——Nazanin Mansouri, Syracuse University

本书对验证原则和技术做了一个全面的浏览。广泛使用的例子和对实际验证挑战的洞彻深入的透视，使得本书成为向计算机工程专业领域的本科生介绍硬件验证概念的理想书籍。

——Vijaykrishnan Narayanan and Mary Jane Irwin, The Pennsylvania State University

在各个项目组都力求高效地保证系统工作正确的今天，验证已经成为整个数字电路设计流程的主宰。尽管验证极其重要，过去却没有书籍能充分涵盖需要的各种素材来确保复杂电子系统的品质。Wile、Goss 和 Roesner 深入介绍了功能验证技术——包括理论观点和实践技术。这本优秀的教科书承诺让在校学生和实践中的工程师都能从中获益，使他们在应对现代验证挑战时变得更有效率。

——Greg Peterson, University of Tennessee

本书对于那些需要深入地探索功能验证实践的人来说是一本优秀的参考书，同时更是一本急需的、关注功能验证这一复杂而困难的主题的课程教科书。与通常功能验证覆盖的主题相比，本书增加了两章形式验证的内容，这些内容在其它教科书中常常被忽略或很少提及。在近来的设计自动化会议（DAC）上常常听到“验证是个艰巨的任务”这样的信息，本书正是对这一重要信息的有力响应。

——Hardy J. Pottinger, University of Missouri—Rolla

原 书 序

现代生活的各方面都充斥着复杂的电子设计，手机、防抱死制动（Antilock Brake）、医疗成像设备、个人计算机在我们的生活中无处不在，作为消费者，我们理所当然地认为这些电子设计的功能应该正确，若存在没有被发现的功能错误的电子设计产品，轻则令人烦躁恼怒，重则会导致重大灾难，付出的代价——无论对个人、公司还是整个社会——都将是无法估量的。

半导体技术的飞速发展，使我们可以设计越来越复杂的电子产品，相应地设计中出现错误的风险也会越来越高。同时，市场竞争导致电子产品面临急于面世的压力，需要缩短设计周期，验证往往成为整个设计制造过程中的关键路径。2003 年国际半导体技术路线图的作者深有感触地称验证已经“由原来的瓶颈转化成了危机”。

仅凭上述原因，本书的出版就会深受欢迎，更不用说本书还具有其它的优点。本书的作者同时具有丰富的验证实践经验和深厚的学术背景——这在业界并不多见。作者所关注的将验证周期作为一个演进的过程的观点特别重要，给出了验证的合适定位，正如作者指出的，“当前项目的验证成果和取得的经验教训会成为下一个项目验证计划制定和实施过程中最好的养分”。要想牢牢地把握住复杂设计的前沿，必须不断地学习和改进，使得验证成为一个系统的可持续的过程。

本书还有一个独一无二的特点，就是本书的设计编排与一套实际操作的功能验证练习相配套。本书作者曾经与多家主要的 EDA 公司合作制作培训练习——基于四操作计算器的寄存器传输级（RTL）设计与实现，这些设计实现充斥着各种功能错误。学生可以使用工业级验证环境来查错，和实际工作中一样，计算器的实现一步步不断增加复杂度和额外的验证挑战。通过这些练习，学生不仅学会怎样在这些设计中寻找和发现错误，还学会了使用工具来完成这一过程，这些工具也正是他们自己未来在实际工作中处理验证问题所要使用的，不幸的是，未来实际工作不可能像这些练习一样提供如此便捷易获得的解决方案。

本书第 2 部分覆盖了基于模拟的验证的三个主要部分：测试、检查和覆盖率。一个好的仿真环境，或者称为“测试平台”，会提供一套采用定向和随机测试用例混合的设计激励机制；会提供语言和工具，以便在设计各个合适的层次上创建检查机制；还会提供覆盖率数据采集和分析的手段，便于验证工程师判断哪些部分已经测试过了，更重要的是，哪些部分还没有被测试。

我要特别推荐 6.2 节关于覆盖率的讨论。覆盖率是验证周期中重要又很容易

被人误解的一环。我的一个在本领域内经验很丰富的同事曾经总结他的观点如下：“覆盖率的价值就在于不断分析和提高它的过程”。覆盖率分析常常带来很多惊讶——复杂设计本身的性质决定其难于被完全把握，我们的直觉对于复杂设计仿真过程中的交互起不到什么指导和帮助作用，而覆盖率分析，如果做得好，会挑战我们的假设，促使我们停下来思考那些我们可能曾经认为理所当然的东西。没有覆盖率的测试过程像蒙着眼睛开车，你可能自认为自己知道正在向何处行驶，但最终到达的却不是你原来计划的目的地。

本书第9章关于“广义的功能验证”的讨论是作者和我们分享他们做面向市场的实际产品的实践经验的另一个好例子。在真实的世界中，只验证产品功能主体的正确性是不够的，尽管这些确实是人们最关注的部分。一个产品还需要测试、制造、调试和维护，而往往这些只涉及一些和设计的其它部分并不相关的机制，毕竟即使这部分机制复位后无法启动也不会影响功能单元的逻辑正确性。

我特别欣喜地看到作者在第3部分中对形式验证的着重强调。尽管形式验证并非什么情况下都能够应用，但在其能够应用时，形式验证能够提供通常动态模拟所不能提供的一定程度上的确定性和可信性——正如作者所说，“形式化证明是验证一个属性的最理想方式”。在过去的10年中，形式验证已经从主要以学术兴趣为主的研究发展为应对某些类型的问题的不可或缺的工具。例如，形式验证是保证 IEEE754 浮点标准所规范的巨大数据空间实现的正确性的唯一现实可行的方法。验证工程师的工具箱中应该同时存放着形式验证和动态（仿真）验证的工具，还应该知道何时应用合适的工具以及怎样应用这些工具来解决身边的问题。

第15章的实例研究针对极少在公众场合讨论的各种类型的问题提供了罕见的“惊鸿一瞥”，每一个资深的验证人员都能够引述一系列相似的例子，每一个新手也都能够从这些例子中得到学习和提高。作者值得称赞的正是他们愿意讨论和分享他们曾经的成功与失败，从而使整个验证界都能从中获益。

本书不仅是新手的“必读”，即使最资深的业内专家也会发现本书将成为他们书架上最优秀的补充读物。因此，我给予本书最强烈的推荐。

Bob Bentley[⊙]
Intel 公司

⊙ Bob Bentley 是 Intel 公司首席验证专家，拥有 35 年业界经验，负责组建和领导 X86 系列处理器的验证团队，成功验证了包括 Pentium Pro、Pentium 4 和 Core i7 等系列处理器。他还是许多业界顶级技术会议的特邀演讲者、论文作者和审稿人。——译者注

前 言

在芯片设计流程中存在着多种验证工作，这些验证工作包括功能验证、时序验证、测试验证和等价性检查，其中花费时间最多的就是功能验证。功能验证保证芯片和系统在任何状况下都能够按照设计规范的规定正确地执行操作。功能验证工程师的工作对象是芯片制造前的硬件设计的软件模型，而衡量他们的工作成功与否的标准在于制造后的硬件功能是否能一次通过。

没有一个保证功能验证成功的通用的规则，也不存在适用于所有设计的黄金代码，每一个硬件设计都有自己独特精妙之处。像一个雕刻家那样，从一块原木开始工作，并不断想象它最终的样子，验证工程师也需要经验和洞察力来雕琢精确的环境，以满足探索和验证设计的需要。

经验对于成功的验证来说非常重要，也是各种验证理论、策略和方法的基础。在过去的 20 年中，拥有一个很强大的验证团队对于硬件开发来说至关重要，而在验证领域雇用工程（或编程）方面的大学毕业生一直是一个挑战。在 20 世纪 90 年代早期，大部分工科大学的毕业生对验证的了解程度仅限于在设计课程实验中写过几天的简单的测试平台。事实上，在他们有机会在重要的硬件设计任务中工作之前，大部分工科大学的毕业生从未听说过验证这个职业途径。

为了应对新工程师基本验证知识缺乏的问题，我们开发了一个两周的课程，讲授功能验证的基本知识，课程内容包括验证介绍和若干节的基于模拟的验证和形式验证。这个课程已经成为新验证工程师教育和有经验的验证工程师提升技术的重要途径。

我们向接触的各个大学提供基本的验证教育包时间并不长，很快，我们的材料就扩散到许多本科功能验证教育的课堂，我们甚至发现我们的课程练习——Calc1、Calc2、Calc3 在大学的实验环境中运行良好。我们和大学合作，提供特殊验证主题的客座讲师，把工业化验证的挑战带到课堂。能够提供课堂教育非常令人鼓舞，而来自大学合作伙伴的最有价值的回报是看到顶尖的拥有相关技术的工程天才出现，并愿意投身于功能验证的职业生涯。

课堂教育的课程提纲为本书——《全面的功能验证：完整的工业流程》提供了初始的大纲，许多基础内容保留在本书中，包括 Calc 练习。此外，我们添加了大量的深层次内容，包括验证计划、模拟环境剖析、模拟引擎的内部工作原理、形式验证潜在的实际应用、系统级以及更广泛的验证、验证项目管理等。为了对真实的问题和挑战提供一个工业化的视角，我们给验证理论配备了各种实践的例子，并增加了真实世界的实例研究。这所有的一切组成了我们这本全面的功

能验证的教科书。

1. 验证周期

贯穿全书的统一的主题就是验证周期的概念。功能验证是一个结构化的、周期性的过程，而本书也秉承了这一理念。验证过程的周期性在于当前项目中取得的成果和经验教训可以应用在下一个项目的验证计划制定和实现的过程中。本书按照验证周期描述了从验证计划到实现的过程，中间穿插了回归测试和反馈环节——称为“逃逸”错误分析。像功能验证工作本身一样，我们把大部分的注意力放在了验证周期的实现环节。

2. 本书的结构

本书分为5个部分。第1部分的内容是功能验证概述，包括概念背景、验证计划、验证策略和一些基本练习。第1部分还介绍了验证周期的概念和层次化验证的概念，以及在实践中怎样将巨型设计分解为可验证的单元。第2部分和第3部分关注两个最主要的功能验证方法：基于模拟的验证方法和形式验证方法。第4部分把注意力集中在验证周期的后期阶段，包括回归测试和“逃逸”错误分析，以及一些高级的验证技术。本书第5部分是一些验证实例研究的集合，进一步强调了验证周期和验证过程中的相关概念。

3. 本书需要的基本知识

本书的讨论和练习需要读者具备了解基本的计算机工程概念的基础。贯穿本书，我们使用两种标准的硬件设计语言——Verilog 和 VHDL，适当地熟悉一下这些语言对于阅读本书是有帮助的。读者还需要理解逻辑设计结构和系统结构。最后，很重要的一点是，读者应具备一定的编程背景知识，因为大部分的验证环境依赖于编程架构。

4. 练习和支撑材料

本书应该与功能验证实践练习配合使用，为了支持这些实践，我们和一些主要的EDA公司展开合作，建立了基于四操作计算器 Calc1 和 Calc2 RTL 设计实现的各种练习，这两个 Calc 计算器的实现一直伴随着各种功能错误，可供读者使用自己的验证环境去寻找和发现。Calc2 是一个比 Calc1 更复杂的设计，是第一个 Calc1 练习的扩展。练习的进程遵循标准工业实践，每一次设计的更新换代都会增加复杂度，当然，伴随而来的是验证挑战的升级！

Calc1 和 Calc2 练习的实现，甚至更具挑战性的第三个 Calc3 练习都可以在线访问，访问这些练习和其它相关资料，包括练习答案以及本书的图表，可以登录 www.mkp.com/companions/0127518037。

作者简介

Bruce Wile 是 IBM 杰出工程师。他是 IBM 系统与技术组 ASIC 首席工程师，在这个岗位上，他领导开发了当前和下一代的服务器芯片组。自从 1985 年从宾夕法尼亚州立大学毕业并开始职业生涯，Wile 先生在功能验证领域工作了 18 年。他曾先后担任许多芯片和系统的验证工程师，包括开始的 IBM S/390 ES/9000 系列缓存和存储控制器单元，进而是处理器、I/O 设备以及整个系统。在验证生涯中，他还担任着验证组领导和管理岗位。2000 年，Wile 先生被任命为 IBM 服务器芯片验证组长，负责整个 IBM 服务器全线产品的验证技术开发和执行。Wile 先生拥有一系列论文和专利，他对于工程、科学和数学教育都怀有极大的热情，在多所高中和大学参与工作。

John C. Goss 是顾问工程师，IBM 系统和技术组验证分组组长。在这个岗位上，他领导了当前和下一代的服务器处理器芯片的系统模拟仿真工作。从 1993 年开始，Goss 先生一直从事功能验证领域的工作。他于宾夕法尼亚州立大学获得计算机工程学士学位，并辅修计算机科学。加盟 IBM 不久，他进入北卡罗来纳州立大学读研究生，并于 1996 年毕业并获得计算机工程硕士学位。从 IBM 网络分部开始，他先后担任许多芯片和系统的验证工程师。他曾经在 IBM 网关中使用的一系列 ASIC 中从事验证工作，其中包括一款网络处理器。2002 年，他被任命负责一款 IBM 下一代服务器处理器芯片的系统验证工作。Goss 先生同时还是北卡罗来纳州立大学的副教授，从 2001 年开始给研究生讲授功能验证课程。

Wolfgang Roesner 是 IBM 杰出工程师，IBM 系统和技术组验证组长。他目前同时领导着 IBM 下一代服务器芯片和系统的验证技术组和验证执行组。Roesner 博士在 IBM 的职业生涯始于德国的 Boeblingen，工作是开发 HDL 编译器和模拟器。在短暂地从事第一款 POWER 处理器芯片的部分开发工作后，他决定留在德克萨斯奥斯汀从事基础研究。在过去 15 年中，他的验证工具被广泛应用于每一款 CMOS 微处理器系统，包括 POWER 和 PowerPC 系统，以及 IBM 巨型 z 系列服务器，IBM 的验证技术覆盖了从基于软件和硬件的模拟引擎到测试平台语言以及形式和半形式验证工具。2003 年，Roesner 博士开始负责下一代服务器芯片的验证组。他发表过大量的论文，还是多种技术会议的应邀报告人。

致 谢

我们在此要感谢在本书完成过程中提供过帮助的人们。

首先要感谢那些为我们提供了许多宝贵的反馈意见的审稿人，他们是 Hardy J. Pottinger (Missouri-Rolla 大学)、Nazanin Mansouri (Syracuse 大学)、Fadi A. Aloul (Sharjah UAE 大学)、Vijaykrishnan Narayanan (Pennsylvania 州立大学)、Baback Izadi (New York-New Paltz 州立大学)、Yuval Caspi (Yuval Caspi 咨询公司)、Steven P. Levitan (Pittsburgh 大学)、Sean Smith (Denali 软件公司)、Scott Taylor (Intel 公司)。

我们还要把特别的感谢给予 Nazanin Mansouri 和 Yuval Caspi 教授，感谢他们对习题材料的贡献。

我们花费了若干年来建立本书中描述的 Calc 练习，在此过程中，许多用户基于自身经验对设计和规范的更新提出了建议。特别是，为了保证 Calc3 相关的教学任务按时完成，Lance Hehenberger 提供了极为宝贵的帮助——完成了部分 Calc3 原始设计。

最后，我们想感谢我们的合作伙伴 Mentor Graphics 公司、Synopsys 公司和 Verisity Design 公司在建立和实现 Calc1 和 Calc2 练习的过程中做的大量工作，他们从项目开始之初就提供了大力支持，在此对他们的慷慨帮助深表谢意。

目 录

译者序	
对本书的评论	
原书序	
前言	

第1部分 验证简介

第1章 芯片设计的验证	5
1.1 功能验证简介	5
1.2 验证面临的挑战	9
1.2.1 状态空间爆炸的挑战	9
1.2.2 查找不正确行为的挑战	10
1.3 验证的任务和目标	12
1.4 验证的开销	15
1.4.1 工程开销和对独立验证团队的需求	16
1.4.2 设计自动化工具	17
1.4.3 时间	17
1.5 本书范畴以外的验证领域	18
1.6 验证周期：一个结构化的流程	18
1.6.1 功能规范	20
1.6.2 建立验证计划	20
1.6.3 开发环境	20
1.6.4 调试硬件描述语言和环境	21
1.6.5 回归测试	21
1.6.6 硬件制造	22
1.6.7 调试流片后的硬件（系统测试）	22
1.6.8 “逃逸”错误分析	22
1.6.9 常见的中断验证周期的情况	23
1.7 本章小结	23
1.8 习题	24
第2章 验证流程	26
2.1 验证层次	26

2.1.1 验证等级	26
2.1.2 怎样选择验证等级	30
2.2 验证策略	34
2.2.1 驱动原理	34
2.2.2 检查策略	37
2.2.3 检查黑盒设计	41
2.2.4 验证策略汇总	44
2.2.5 通用的模拟验证环境	46
2.2.6 验证方法学的进展	46
2.3 本章小结	51
2.4 习题	52
第3章 基于模拟的验证基础	55
3.1 基本验证环境：测试平台	55
3.1.1 激励模块	56
3.1.2 监视器	60
3.1.3 检查器	62
3.1.4 记分板	62
3.1.5 待验证设计	64
3.2 观察点：黑盒、白盒和灰盒验证	65
3.2.1 黑盒	65
3.2.2 白盒	65
3.2.3 灰盒	66
3.3 基于断言的验证概述	67
3.3.1 断言的重要性	68
3.3.2 断言表达设计意图	69
3.3.3 断言的分类	69
3.4 测试平台和测试策略	71
3.4.1 确定性的测试平台	72
3.4.2 自检查的测试平台	73
3.5 本章小结	76
3.6 习题	76
第4章 验证计划	78
4.1 功能规范	78
4.2 验证计划的演进	79
4.3 验证计划的内容	80

4.3.1	验证层次的描述	81
4.3.2	必需的工具	81
4.3.3	风险和依赖	82
4.3.4	待验证的功能	83
4.3.5	细节测试及方法：环境	84
4.3.6	覆盖率要求	88
4.3.7	测试用例场景：矩阵	88
4.3.8	资源需求	89
4.3.9	进度细节	90
4.4	验证实例：Calc1	91
4.4.1	设计描述	91
4.4.2	为 Calc1 建立验证计划	94
4.4.3	Calc1 设计的确定性验证	99
4.5	本章小结	102
4.6	习题	103

第2部分 基于模拟的验证

第5章	硬件描述语言和模拟引擎	107
5.1	硬件描述语言	108
5.1.1	硬件描述语言建模层次	108
5.1.2	硬件描述语言在验证方面的应用	115
5.2	模拟引擎介绍	119
5.2.1	速度与精度	120
5.2.2	选择正确的方法	121
5.3	事件驱动模拟	122
5.3.1	层次化模型网络	122
5.3.2	随时间变化进行的模型评估	124
5.3.3	模型评估中的事件驱动控制	125
5.3.4	实现一个事件驱动的模拟引擎框架	129
5.4	改善模拟吞吐量	134
5.5	基于周期的模拟	137
5.5.1	同步设计	138
5.5.2	基于周期的模拟算法	139
5.5.3	对基本的基于周期的模拟引擎进行扩展	141
5.6	波形观察器	144
5.7	本章小结	147