

国外电子与通信教材系列

本书包含 Open Vera 和 e! 已经升级到 Verilog-2001!

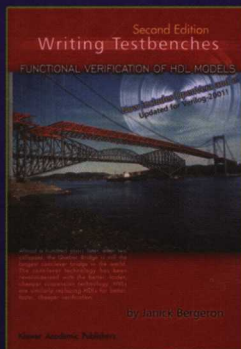
编写测试平台

——HDL模型的功能验证（第二版）

Writing Testbenches

Functional Verification of HDL Models

Second Edition



[美] Janick Bergeron 著

张春 陈新凯 李晓雯 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

编写测试平台

——HDL 模型的功能验证 (第二版)

Writing Testbenches

Functional Verification of HDL Models

Second Edition

[美] Janick Bergeron 著

张春 陈新凯 李晓雯 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

验证是制造出功能正确的芯片的必要步骤。本书介绍了验证的基本概念和各种工具,验证的重要性和代价,比较了不同的验证方法,以及测试和验证的区别。然后从方法学的角度探讨了验证的策略和层次,介绍了覆盖率模型和如何制定完整的验证计划。在验证方法和技术方面,本书引入了硬件验证语言(HVL),讨论了使用行为描述进行高层次建模的方法,介绍了施加激励和监视响应的技术,以及通过使用总线功能模型把物理层次的事务抽象为更高层次的过程,并结合各种测试语言讲解了仿真管理的各个要素。本书提出了覆盖率驱动的受约束的随机事务级自检验测试平台,并围绕这种结构对其中的原理及设计要素进行了系统的讨论,另外还介绍了如何编写自检验测试平台及设计基于总线功能模型的随机激励发生器。

本书适合于从事 ASIC、SoC 及系统设计与验证的人员阅读。

Translation from the English language edition: Writing Testbenches: Functional Verification of HDL Models, Second Edition by Janick Bergeron.

Copyright © 2003 by Kluwer Academic Publishers. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese language edition by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2006.

本书中文简体字翻译版由斯普林格出版公司授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2004-2715

图书在版编目(CIP)数据

编写测试平台: HDL 模型的功能验证: 第 2 版 / (美) 伯杰龙 (Bergeron, J.) 著. 张春等译.

北京: 电子工业出版社, 2006.8

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Writing Testbenches: Functional Verification of HDL Models, Second Edition

ISBN 7-121-03076-4

I. 编... II. ①伯... ②张... III. ①集成电路-芯片-验证 IV. ①TN407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 095824 号

责任编辑: 赵红燕

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 980 1/16 印张: 22.75 字数: 537 千字

印 次: 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn。服务热线: (010) 88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|------------------------------|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长, 中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事、博士生导师 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
清华大学深圳研究生院副院长 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
国务院学位委员会学科评议组成员 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员
中国电子学会常务理事 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长兼秘书长, 教授级高工
信息产业部通信科技委副主任 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长 | |
| 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 | |

译者序

十多年前，数字集成电路的设计还主要采用图形输入工具，HDL 的出现使电路设计能力有了质的飞跃。但验证手段和验证方法学却进展缓慢。随着集成电路的规模进入到千万门级，验证已经成为芯片设计的瓶颈，验证所需要的时间、人力、物力已经超过了芯片设计本身所耗费的精力。即使如此，70%以上的芯片失败的原因是验证的不充分。

HVL 的出现使验证工程师可以在更高的层次进行验证。本书以 HVL 为基础，介绍了覆盖率驱动的受约束的随机事务级自检验测试平台技术，这种方法学的进步大幅度地提高了验证的效率。

本书涵盖了验证的概念、工具、验证的方法、总线功能模型、产生激励、响应监视、验证平台的构造和仿真等内容。书中有大量的实例代码，要求读者熟悉 VHDL 或 Verilog 语言的基本知识，了解仿真器的工作机理，掌握 *e* 或 OpenVera 等硬件验证语言。如果读者有电路设计或验证方面的经验，对理解本书的内容会有很大的帮助。

译者在翻译的过程中，在忠实于原著的基础上，尽可能使译文符合中文读者的习惯。参加翻译工作的除张春外，还有陈新凯、李晓雯、李敏、林曦、刘中、李媛媛、张守洪、王宁等，在此一并致谢。全书由张春统稿。由于译者水平有限，本书的翻译难免会有不少问题，恳请广大读者批评指正。

序 言

Janick Bergeron 撰写的《编写测试平台》第一版无疑是当代最流行和最成功的验证手册。第一版的出版时机非常合适。大家知道验证从过去到现在一直是具有挑战性的工作。工业界的研究结果表明，目前设计芯片中的半数需要返工或多次返工。更重要的是，研究表明，74%的返工原因是由于功能错误。验证是制造出正确芯片的必需的过程，而在设计流程中验证比其他工作占用了更多的时间和人力。显然，验证是缩短项目、实现赢利所需的时间的瓶颈。

有很多因素会影响对验证工作的需求，例如用户对新产品功能的日益增长的需求（导致了更复杂的产品结构），不断增长的硅片容量以及在设计能力方面的突破。随着硅片容量继续按照摩尔定律的曲线提升（使我们可以设计出更复杂的系统），验证这些设计所需的努力正在以更快的速度增加——大约每六到九个月就翻一番。在硅片容量不断增加的同时，综合技术方面的突破令设计人员使用硅片的能力在过去的十年里增加了大约十倍。然而，验证大型设计的能力却没有跟上，准确地说，这期间的验证能力仅仅在线性增长。很明显，验证技术和方法需要一种类似综合技术方面的突破。

在本书的第二版中，Bergeron 引入了覆盖率驱动的受约束的随机事务级自检验测试平台和硬件验证语言（HVL），例如 Verisity 公司的 *e* 和 Synopsys 公司的 OpenVera，提升了抽象验证水平，从而解决了以上问题。本书中介绍的最新的验证方法就是验证技术中急需的技术突破，它等价于综合技术方面的突破。笔者不仅重点推荐本书，而且希望每个从事 ASIC、SoC 和系统设计及验证的人都阅读本书。

Harry Foster
Verplex 系统公司总设计师

前 言

如果研究一下硬件设计队伍，我们会发现他们的工作量中有 60% 到 80% 是进行验证。与编写可综合的代码不同，验证不需要特殊的编码和语言。验证可以使用任何仿真器接受的语言，可以使用各种语言的各种功能，这样就产生了大量的仿真技术和方法。由于缺少限制，缺少可用的专业知识和参考，导致了各种专用的验证方法的产生。不正规的验证的后果很多，例如设计的功能不正确以致需要多次返工、设计只能实现部分功能、产品的延期上市等。

本书的重要性

如果浏览一下市面上的 VHDL 和 Verilog 书籍，我们会发现大多数都解释了语言的一些细节。另外，其中的很多章节用大量的实例来强调可综合性，即 RTL 编码风格，甚至还有专门介绍 RTL 编码的书籍。

这些书中通常只用一到两章介绍验证，而且重点是介绍语法结构，仅仅介绍初级的、简单的、不可扩展的验证技术，在实际的大型设计中没有使用价值。

本书第一版是第一部硬件模型验证技术方面的专著。其后，又出现了若干面向验证的书籍。现在很多重要会议已包括验证专题，大学也和工业界合作设立了一些关于验证的课程。一些单纯进行验证工作的 EDA 公司提供了新的工具来提高产能和设计质量。所有这些都利于形成一个设计验证学科，推动验证方法学和产能的发展。

本书第二版介绍了最新的验证技术，这些技术成功地应用到了首次投片就保证功能正确的 ASIC、系统芯片（SoC）、板级电路和完整的系统。本书在第一版的基础，即事务级自检验测试平台上，引入了功能验证的革命性技术——覆盖率驱动的受约束的随机测试平台。

本书内容

本书首先介绍必要的验证概念和工具，然后介绍规划和实施有效的功能验证的过程，同时也会介绍覆盖率驱动的验证过程所用到的覆盖率模型。

首先我们必须了解那些过分突出语言的可综合性子集的书籍所忽视和简化的 VHDL 和 Verilog 语法。在编写一个好的、稳健的测试平台并实现必要的控制和监视功能时，这些不常用的语法就变得非常重要了。在用读者熟悉的语言介绍完语法后，将用新的面向验证的语言重新介绍这些语法。

本书还将介绍关于施加激励和监视响应的技术,这种技术通过使用总线功能模型把物理层次的事务抽象为更高层次的过程。基于总线功能模型的测试平台的结构对于产生与被验证的功能相关的抽象层是非常重要的,同样,这种结构对于降低开发和维护成本也非常重要。本书将介绍一些编写自检验测试平台的方法。

无论使用哪种语言建立随机测试平台,要做的事情不仅仅是调用random()函数。本书将告诉读者如何构建和设计基于总线功能模型的随机激励发生器,产生期望的激励模式。随机发生器应该易于从外部约束,以增加产生感兴趣的模式的可能性。

本书的另一个重要概念是行为模型,它可以使设计过程和验证过程并行进行,以及实现更有效的仿真。在很多情况下,行为模型等同于可综合模型或RTL模型。在本书中,术语“行为”指一种足以仿真一个设计的功能的模型,通常使用不可综合的语法和编码风格实现。

阅读本书前需要掌握的知识

本书的重点是使用VHDL、Verilog、*e*或OpenVera进行硬件设计的功能验证,因此我们希望读者至少掌握VHDL、Verilog、*e*或OpenVera的基本知识,最好有编写模型的经验、能够熟练使用现有的VHDL或Verilog仿真器进行仿真。本书不会详细介绍语言和语法,因此最好有一本专门介绍语言的教材作为参考书^①。本书不会讲述语言的可综合的子集,也不会将验证所用到的语言局限于可综合的子集。验证是一项非常复杂的任务,它将最大限度地发挥语言的力量。

我们希望读者了解数字系统的硬件设计。本书将使用各种领域的设计实例(射频、数据通信、计算等),确定这些设计的实际指标、结构和实现的方法不在本书的讨论范围之内,本书仅仅讲述验证这些设计的指标、结构和实现的方法。

阅读顺序

通常应按顺序阅读本书,但如果读者的时间有限,可以按下面的建议阅读。

如果本书作为大学的教材,那么应该重点阅读第4章到第6章和附录A;刚参与硬件设计的工程师可以跳过第3章和第7章,但掌握一定经验后应再阅读这两章。

① 对于Verilog语言,建议参考Thomas和Moorby撰写的《Verilog硬件描述语言》第三版或更新的版本,该书由Kluwer Academic Publisher出版。

对于VHDL语言,建议参考Ben Cohen撰写的《VHDL编码风格和方法》,该书由Kluwer Academic Publisher出版。
对于OpenVera语言,可以从<http://Open-Vera.com>获取OpenVera语言参考手册,Vera用户可以在\$VERA_HOME/doc/vum目录下找到Vera用户手册。

对于*e*语言,可以从<https://verificationva-ult.com>获取*e*语言参考手册,Specman Elite用户可以在HELP菜单下找到它。

负责定义项目测试策略的高级工程师可能会对第3章、第6章和附录A感兴趣；有经验的设计人员可以直接跳到第3章；有经验的VHDL或Verilog用户可以跳过第4章，但建议阅读第4章以确定是否属于本书定义的“有经验的”用户。

对于有软件背景的读者，第4章和附录A可能显得过于简单。对于有硬件设计和RTL编码经验的读者，第4章和第7章的内容可能已经了如指掌。

对于硬件验证项目的管理者，应该关注第3章、第6章和第7章。

语言的选择

设计小组面对的第一个决策通常是选择要使用的语言。作为本书的作者，笔者曾面对同样的问题。大多数情况下，各家公司已经选择了一种语言，并且在语言的授权、培训和知识产权方面进行了大量投入，因此不需要再做选择。但对小公司、处于过渡期的公司和没有公共CAD组的公司而言，这往往是由决策者的个人知识和喜好决定的。

VHDL 与 Verilog

笔者认为VHDL和Verilog都有不足之处，尤其是用于验证方面。两种语言都不利于描述综合性设计，一种语言在某些方面实现起来更容易些，另一种语言可以更好地映射某种特定模型的功能，总的来说二者不相上下。

某些功能只有Verilog才有。就笔者个人的经验而言，Verilog是一种被滥用的语言，它比VHDL更容易学习，它具有更平缓的学习曲线。这两种语言都具有同样的概念：顺序语句、并行语句、结构语句和并行机制。

无论使用哪种语言，必须学习这些概念。Verilog语言的要求比较简单，它容易给用户造成错觉。例如，在编译过程中没有语法错误或者仿真结果看上去是正确的，使用户误认为他们了解所使用的语言。然而，随着时间的流逝和设计复杂度的增加，设计会出现不稳定状态，代码的结构也越来越脆弱，最终使用户不得不重新学习这些重要的概念。这两种语言的学习曲线下的面积是相同的，VHDL的学习曲线相对更陡峭，换句话说，Verilog的学习时间更长。

硬件验证语言

硬件验证语言是专门用来有效地实现测试平台的语言。在编写本书时，已经有多种硬件验证语言可以选择。商业解决方案包括Verisity公司的*e*，Synopsys公司的OpenVera，Forte Design的RAVE；开放源代码的解决方案有Cadence公司的SystemC验证库(SCV)和Juniper Networks的Jeda；另外还有很多基于Perl、SystemC、C++、TCL的个人解决方案。Verilog语言针对验

证的扩展已经加入到 SystemVerilog 中。但并不是以上所有语言都能很好地支持覆盖率驱动的可约束的随机验证方法（见第 3 章的“覆盖率驱动的可约束的随机验证方法”一节），很多语言更适合直接测试方法（见第 3 章的“直接的测试平台方法”一节）。

从 VHDL 或 Verilog 语言转变到 HVL 不仅仅涉及到学习一种新的语法。尽管可以继续使用 HVL 实现类似 HDL 的直接测试方法，但 HVL 需要的是转变验证和测试平台实现的方式。使用 Verilog 或 VHDL 的直接验证方法相当于验证方法中的原理图输入法，而使用 HVL 的覆盖率驱动的可约束的随机验证方法相当于验证方法中的综合法。正确使用 HVL 可以产生令人难以置信的生产率（见图 2.17）。

如果本书是从零开始编写的，笔者就不会为那些 VHDL 和 Verilog 实例烦恼了。由于第一版已包含这些实例，并且它们对理解 HVL 的新概念有所帮助，所以笔者决定保留这些实例。另外，笔者已经把 Verilog 的内容按照 Verilog-2001 的标准做了更新。

哪一种语言更好

VHDL、Verilog、C++ 和 OpenVera 都是非常好的语言。笔者曾教授过这些语言。当有人问更喜欢哪一种语言时，笔者通常回答他们提错了问题。正确的问题应该是：“你对哪一种语言的反感程度更轻？”，答案是“我现在不在用的语言”。当使用一种语言时，你不会注意到用它完成一件事情有多容易。相反，你会发现它的缺点，发现用另一种语言做同样的事情是多么的轻而易举。

验证技术超越了它所用到的语言。VHDL、Verilog、*e* 和 OpenVera 仅仅是实现手段。本书使用了以上几种语言，但所有的实例都使用一种语言描述。虽然各种语言之间存在着微小的语法差异，但笔者认为仅仅懂得一种语言的读者也可以很容易地读懂用另一种语言编写的实例。在一些用不同语言描述需要使用不同方法的地方，笔者会使用不同的语言分别描述。本书是一本介绍方法学的书籍，不是语法手册，因此不会尝试介绍每种语言的特点。

之所以选择 *e* 和 OpenVera 语言，是因为对它们最了解，而且在本书写作期间，它们对覆盖率驱动的可约束的随机验证方法的支持最好。本书并不是为了对各种语言的特征或者实现某种功能的代码行数进行比较而编写的。选择一种语言的原则不仅仅是逐条比较语法及其特征。

所有实例中使用的语言、语法和工具的局限性、工具的输出和特点在本书写作时都是最新的和正确的^①。对于 VHDL 语言，本书使用了 VHDL-93 和 ModelSim 5.5.e。对于 Verilog 语言，本书使用了 VCSi 6.1 和 ModelSim 5.5.e。对于 OpenVera 语言，本书使用了 Vera 6.0.0。对于 *e* 语言，本书使用了 Specman Elite 4.1。

笔者收到的对第一版的最常见的意见是没有完整的实例。和第一版一样，在第二版中实例代码仍然以摘录的形式提供。笔者认为这更利于读者注意想要表达的重点。我们不想让读者面

^① 欢迎纠正本书的任何错误，请发电子邮件到：janick@bergeron.com。这些错误将发布在本书网站的勘误表上。

对完整但却枯燥的（并且基本上是不相关的）代码。所有实例的完整源代码可以在下列网站的“resource”部分找到：<http://janick.bergeron.com/wtb>。

获取更多的信息

如果想获取更多与本书内容相关的资料，可以在以下链接的网上书店找到相关资源：

<http://janick.bergeron.com/wtb>

读者可以在“resource”部分找到指向工具、文档和简化验证工作的软件的链接，也可以找到本书第二版的勘误表^①。

致谢

我的妻子Danielle为本书的出版提供了无私的帮助，编辑Kyle Smith多次把本书从混乱的草稿中解放出来，技术审校人Chris Macionski、Andrew Piziali、Chris Spear、Ben Cohen和Grant Martin也为本书的出版做出了贡献。另外，字处理软件FrameMaker多次展现了比Word更强大的功能。

还要感谢Mentor Graphics公司授权使用ModelSim HDL仿真器，Verisity Design公司授权使用Specman Elite环境，Synopsys公司授权使用VCS和Vera仿真器。

ModelSim是Mentor Graphics公司的注册商标，Specman Elite和eVC是Verisity Design公司的注册商标，VCS和Vera是Synopsys公司的注册商标。e语言是Verisity Design公司的财产，版权属Verisity Design公司所有。其他商标由其各自拥有者所有。

^① 如果读者发现网站上未曾列出的本书错误或掌握与验证相关的资源，请发电子邮件到：janick@bergeron.com。作者在此表示感谢。

每个人都知道调试的难度是编程的一倍。

“Elements of Programming Style” 一书作者 Brain Kernighan
于 1974 年

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 什么是验证	1
1.1 什么是测试平台	1
1.2 验证的重要性	1
1.3 恢复模型	3
1.4 人为因素	4
1.5 验证的对象是什么	6
1.6 功能验证的方法	8
1.7 测试与验证的比较	11
1.8 设计与验证的重用	13
1.9 验证的成本	15
1.10 小结	16
第 2 章 验证工具	17
2.1 lint 工具	17
2.2 仿真器	23
2.3 知识产权的验证	29
2.4 波形浏览器	31
2.5 代码覆盖	32
2.6 功能覆盖	39
2.7 验证语言	44
2.8 断言	46
2.9 版本控制	48
2.10 问题追踪	52
2.11 数据	55
2.12 小结	59
第 3 章 验证计划	60
3.1 验证计划的作用	60
3.2 验证的层次	62
3.3 验证策略	67

3.4	从设计规范到功能	68
3.5	直接的测试平台方法	74
3.6	覆盖率驱动的可约束的随机验证方法	77
3.7	小结	85
第 4 章	高层次建模	86
4.1	行为级与 RTL 级的思考	86
4.2	必须要有设计风格	89
4.3	行为级代码的结构	93
4.4	数据抽象	105
4.5	面向对象的编程	120
4.6	面向方面编程	132
4.7	并行仿真引擎	138
4.8	竞争状态	153
4.9	Verilog 可移植性问题	161
4.10	小结	167
第 5 章	激励与响应	168
5.1	参考信号	168
5.2	简单的激励	181
5.3	简单的输出	186
5.4	复杂的激励	195
5.5	总线功能模型	200
5.6	响应监测器	217
5.7	事务层接口	230
5.8	小结	237
第 6 章	测试平台的结构	238
6.1	测试接口	239
6.2	VHDL 测试接口	243
6.3	设计的配置	252
6.4	自检验的测试平台	256
6.5	直接激励	265
6.6	随机激励	267
6.7	小结	283