

数字设计 系统方法

[美] 威廉 J. 达利 (William J. Dally) R. 柯蒂斯·哈廷 (R. Curtis Harting) 著
斯坦福大学 谷歌公司
韩德强 等译
北京工业大学

Digital Design
A Systems Approach

DIGITAL
DESIGN
a systems approach

WILLIAM J. DALLY
R. CURTIS HARTING



计 算 机 科 学 丛 书

数字设计

系统方法

[美] 威廉 J. 达利 (William J. Dally) R. 柯蒂斯·哈廷 (R. Curtis Harting) 著
斯坦福大学 谷歌公司

韩德强 等译
北京工业大学

Digital Design
A Systems Approach

**DIGITAL
DESIGN**
a systems approach

WILLIAM J. DALLY
R. CURTIS HARTING



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

数字设计：系统方法 / (美) 威廉 J. 达利 (William J. Dally), (美) R. 柯蒂斯·哈廷 (R. Curtis Harting) 著; 韩德强等译. —北京: 机械工业出版社, 2017.10
(计算机科学丛书)

书名原文: Digital Design: A Systems Approach

ISBN 978-7-111-57940-3

I. 数… II. ①威… ②R… ③韩… III. 数字电路—电路设计 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 218358 号

本书版权登记号: 图字 01-2015-0260

This is a Chinese simplified edition of the following title published by Cambridge University Press:

William J. Dally, R. Curtis Harting, Digital Design: A Systems Approach (ISBN 978-0-521-19950-6).

© Cambridge University Press 2012.

This Chinese simplified edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Machine Press in 2017.

This Chinese simplified edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Machine Press.

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书简体字中文版由剑桥大学出版社与机械工业出版社合作出版。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。

此版本仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。

本书从系统的视角, 通过准确、清晰的讲解以及示例和 Verilog 文件, 展示了如何使用简单的组合模块和时序模块来构建完整的系统。本书共分七部分, 不仅涵盖了组合逻辑电路、算术运算电路、时序逻辑电路和同步时序电路等基本的数字逻辑课程的内容, 还给出了有限状态机、流水线、接口规范、系统时序、存储系统等计算机组成原理课程的知识。

本书适合作为高等院校计算机及相关专业数字设计课程的本科生教材, 也可作为微处理器和 SoC 设计人员的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 朱秀英

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版次: 2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 29.25

书号: ISBN 978-7-111-57940-3

定价: 129.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
客服热线: (010) 88378991 88361066
购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604
读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson 等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专门为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近两百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



推荐语

Digital Design: A Systems Approach

“Dally 和 Harting 凭借在数字设计方面的杰出经验，以清晰和富有建设性的方式将电路和体系结构设计融为一体。

学生通过接触计算系统的不同抽象层次及观点，将发现一条了解数字设计基础知识的现代的、有效的途径。”

Giovanni De Micheli, 瑞士洛桑联邦理工学院

“Bill 和 Curt 结合几十年的学术和行业经验编写的这本教材，从非常实用的角度讲授数字系统设计，同时给出了未来工程师所需的理论。他们努力让学生明白正在设计什么，以及正在构建什么。通过介绍主要的高级主题，譬如综合、延迟和逻辑功效以及同步，本书在入门级提供了不可多得的实用建议。这样做，即使工艺、工具和技术在未来发生了改变，这本书也将帮助学生做好准备。”

David Black-Schaffer, 瑞典乌普萨拉大学

“你可以从 Dally 教授的数字设计一书中得到想要的一切。结合几十年的实践经验，Dally 教授提供了设计和组成完整的数字系统所必需的工具。本书同时涵盖了基础知识和系统级议题，对于未来的微处理器和 SoC 设计人员来说，是一个理想的起点！”

Robert Mullins, 剑桥大学和树莓派基金会

“这本书为如何给本科生讲授数字系统设计制定了一个新的标准。实用的方法和具体的实例为任何想要理解或设计现代复杂数字系统的人提供了坚实的基础。”

Steve Keckler, 得克萨斯大学奥斯汀分校

“这本书不仅介绍了如何做数字设计，更重要的是展示了如何做‘好的’设计。它强调了具有清晰接口的模块化的重要性，以及生产出不仅满足设计规格而且容易被他人理解的数字工件的重要性。它使用许多恰当的示例和 Verilog 代码来达到目的。

书中讨论了异步逻辑设计主题，由于能源消耗已经成为数字系统中的主要关注点，这个主题可能变得越来越重要。

本书最后关于 Verilog 编码风格的附录特别有用。这本书不仅对学生很有价值，而且对该领域的从业人员也很有价值。我强烈推荐它。”

Chuck Thacker, 微软公司

正如原书作者所言：“Digital systems are pervasive in modern society.”我们平时常用到的图像、音视频都已经被数字化，就连人的思维也在被数字化，AI（Artificial Intelligence，人工智能）已成为研究的热点。

本书从系统的视角介绍了数字系统设计的全过程，不仅涵盖了组合逻辑电路、算术运算电路、时序逻辑电路和同步时序电路等基本的数字逻辑课程的内容，还给出了有限状态机、流水线、接口规范、系统时序、存储系统等计算机组成原理课程的知识。William J. Dally 不仅是斯坦福大学的教授，还是英伟达（NVIDIA）公司的首席科学家。他不仅具有丰富的教学经验，还具有杰出的工程经验。

在本书的翻译过程中，我被书中的内容深深吸引，甚至到了不可自拔的地步。该书与国内同类教材有着本质的区别。首先，国内教材大多采用数学的方法讲述计算机，而本书采用的是计算机的方法讲授计算机。譬如，计算机运算本就是一个有限字长的运算，整数和小数的位数是约定的。因此，在数制转换时根本无须考虑整数部分的“除基取余”法、小数部分的“乘基取整”法，而采用权重法可以轻而易举地将十进制数转换成二进制数。我在讲授这部分时，经常问学生的一句话是：“你们是喜欢做加减法，还是喜欢做乘法？”这是一个将问题简单化还是复杂化的问题！其次，本书在讲述数字系统设计流程时，给出了国内教材很少涉及的风险评估以及缓解这些风险的方法，还给出了芯片和电路板设计中的一些工程方法。再次，本书给出了数字系统在实际工程中的巧妙应用之法，如在减色法中利用原色的逻辑或，可以正确得到间色和复色。诸如此类，举不胜举！

正如微软的 Chuck Thacker 所言：“这本书不仅介绍了如何做数字设计，更重要的是展示了如何做‘好的’设计。”我以近20年的计算机硬件和嵌入式系统教学、项目开发经验以及十几年的企业产品研发经验，强烈推荐这本教材！

本书由北京工业大学信息学部计算机学院的部分教师翻译。其中前言等文前内容和第1、2章由韩德强翻译；第3~7章由邵温翻译；第8、9章由高雪园翻译；第10~13章由杨淇善翻译；第14~19章由张丽艳翻译；第20~25章以及附录部分由鲁鹏程翻译；第26~29章由王宗侠翻译。全书的审校由韩德强完成。

本书在翻译过程中得到了机械工业出版社华章公司朱劼女士的大力支持，在此表示由衷的感谢！

限于译者的水平，翻译中难免有错误或不妥之处，真诚希望各位读者批评指正。

韩德强

2017年5月于北京工业大学

本书的目的是教大学生理解并设计数字系统。书中采用硬件描述语言（Verilog）和现代CAD工具讲授当前工业数字系统设计所需的技能；特别关注系统级的问题，其中包括数字系统的分解和划分、接口设计和接口时序；涵盖深入理解数字电路所需的主题，如时序分析、亚稳态和同步；还涉及手工设计组合逻辑电路和时序逻辑电路的内容。然而，对于数字系统设计而言，除了设计简单的模块之外还有很多内容，我们不会详述这些话题。

当完成了本书的相关课程后，学生就应该具备在企业中进行数字设计的能力了。尽管缺乏实践经验，但他们已经掌握了数字设计实践中所需的全部工具。经验会随着时间慢慢增长。

本书是在作者25年以上本科生数字设计课程的教学经验（加州理工学院的CS181、麻省理工学院的6.004以及斯坦福大学的EE121和EE108A），以及35年设计数字系统的经验（贝尔实验室、DEC公司、Cray公司、Avici公司、Velio通信、流处理器公司以及NVIDIA公司）基础上编著而成的。结合这两种经验，本书将教给学生实际工作中需要的有用知识，而所采用的方法已经被历届学生证明是有效的。

我们写这本书的初衷是市面上暂时找不到任何一本从系统级层面介绍数字设计的书。绝大部分同类教科书讲述的都是组合逻辑电路和时序的手工设计。虽然现今的很多教科书都采用了硬件描述语言，但绝大多数采用的都是古老的TTL类型的设计风格，它只适用于使用7400四与非门器件的年代（20世纪70年代），无法培养可以设计出具有30亿晶体管的GPU的学生。如今，学生需要掌握如何分解状态机、划分设计，并构建正确时序的接口。对于这些话题，我们会采用一种简单的方式介绍，而不会陷入细节。

本书概要

图1所示流程图给出了本书的组织结构及各个章节的依赖关系。本书分为绪论、5个主要部分以及关于风格和验证的章节。

第一部分 绪论

第1章介绍数字系统，涵盖了信息表现形式的数字信号、噪声容限以及数字逻辑在当今世界中的作用。第2章介绍数字设计在工业中的应用，包括设计流程、现代实现技术、计算机辅助设计工具和摩尔定律。

第二部分 组合逻辑

第3~9章论述了组合逻辑电路——输出值仅取决于当前输入值的数字电路。第3章介绍逻辑设计的理论基础——布尔代数。第4章介绍开关逻辑和CMOS门电路。第5章介绍用来计算CMOS电路延迟和功耗的简单模型。第6章介绍利用基础门电路手工设计组合电路的方法。第7章介绍利用Verilog硬件描述语言对组合逻辑的行为描述进行编码的自动设计过程。第8章介绍组合逻辑基础单元、解码器和多路选择器等。第9章给出了一些组合电路设计的实例。

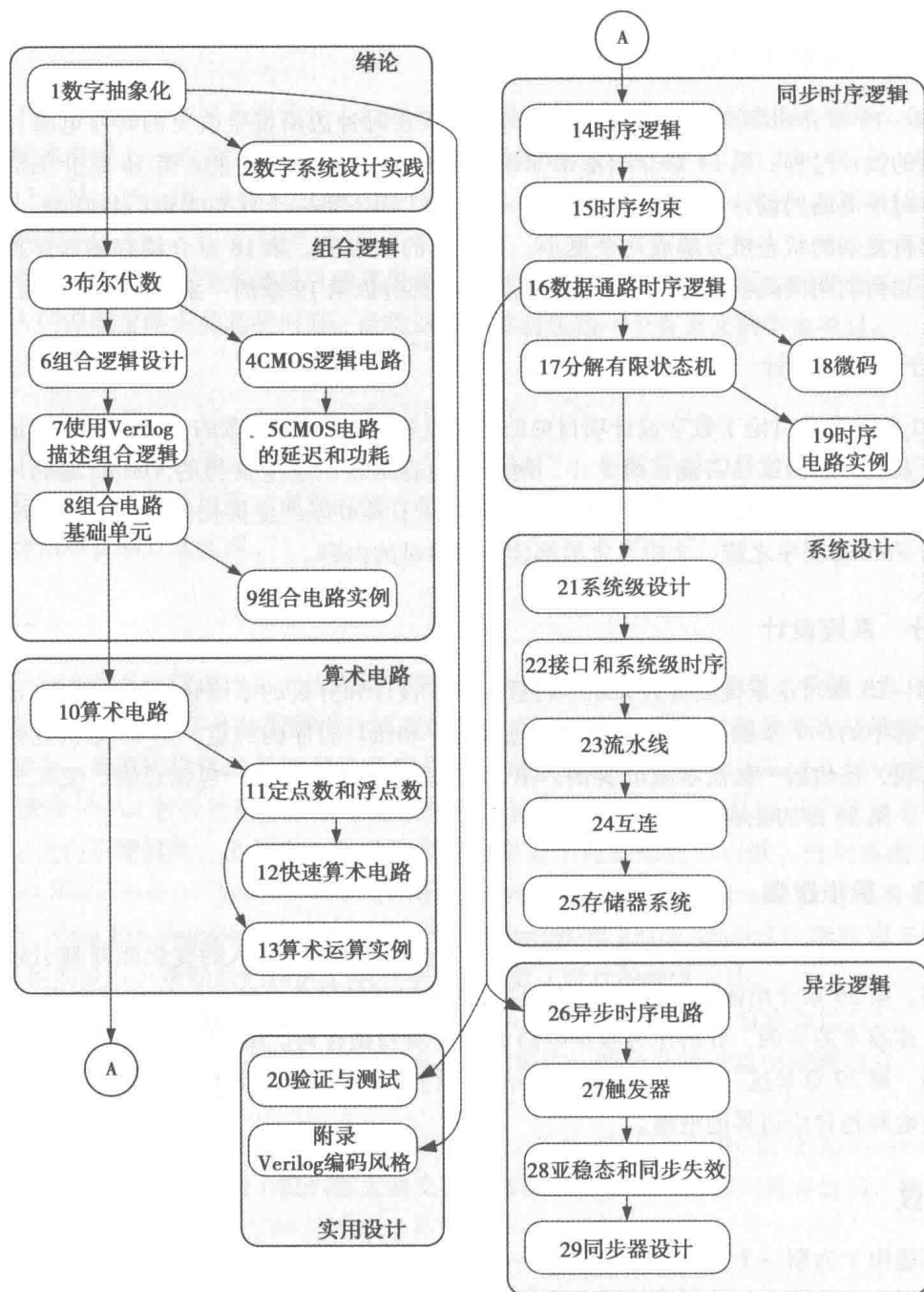


图1 本书的组织结构及各章节的相互关系

第三部分 算术电路

第10~13章介绍计数制(数制系统)和算术电路。第10章介绍数的基本表示法以及完成整数的 $+$ 、 $-$ 、 \times 、 \div 四则运算的算术电路。第11章介绍定点数和浮点数的表示方法及其精度,还包括对浮点单元设计的讨论。第12章介绍快速算术电路的构建方法,包括超前进位、华莱士树和布斯编码。第13章介绍算术电路和系统的实例。

第四部分 同步时序逻辑

第 14 ~ 19 章介绍同步时序逻辑电路（即状态仅在时钟边沿发生改变的时序电路）以及有限状态机的设计过程。第 14 章介绍基础知识。第 15 章介绍时序约束。第 16 章介绍的主题是数据通路时序电路的设计——其行为是由一个表达式而不是一个状态表进行描述的。第 17 章描述如何将复杂的状态机分解成几个更小、更简单的状态机。第 18 章介绍存储程序控制的概念，以及如何利用微码引擎建立有限状态机。这一部分以第 19 章的一系列实例作为结束。

第五部分 实用设计

第 20 章和附录讨论了数字设计项目中的两个重要方面。第 20 章的主要内容是验证逻辑的正确性以及生产后测试是否能正确工作。附录的内容是教给学生恰当的 Verilog 编码风格。这种风格令代码具有可读性、可维护性，并使得 CAD 工具可以产生优化的硬件。学生应该在编写自己的 Verilog 程序之前、之中及之后都读一读附录的内容。

第六部分 系统设计

第 21 ~ 25 章讨论系统设计并介绍一种数字系统设计和分析的系统化方法。第 21 章介绍系统设计过程中的 6 个步骤。第 22 章讨论系统级时序和接口时序的约定。第 23 章讲述模块和系统的流水线，还包括一些流水线的实例。第 24 章描述系统的互连，包括总线、交叉开关和网络等内容。第 25 章讨论存储器系统。

第七部分 异步逻辑

第 26 ~ 29 章讨论异步时序电路——无须等待时钟沿，任何输入的变化能即刻引起状态变化的电路。第 26 章介绍流表的分析与综合以及竞争问题等异步电路设计的基础知识。第 27 章给出了上述技术的实例，分析作为异步电路的触发器和锁存器。第 28 章介绍亚稳态和同步失效等问题。第 29 章是这一部分也是本书的结尾，讨论同步器的设计——如何设计出可以使得信号安全地跨越异步边界的电路。

教学建议

本书适用于为期一个季度（10 周）或一个学期（13 周）的数字系统设计的入门课程，也可以作为更高级的第二门数字系统课程的主教材。

使用本书不需要任何先修课程，只需要对高中数学有较好的理解即可。除了第 5 章和第 28 章外，其余章节仅涉及导数的内容，并且不需要微积分的知识。在斯坦福大学，虽然 E40（电气工程导论）是 EE108A（数字系统 I）的先修课程，但是学生即使没有学习这门先修课程，通常也可以学习 EE108A。

对于一个季度的数字系统设计入门课程，可以涵盖第 1、3、6、7、8、10、(11)、14、15、16、(17)、21、22、(23)、26、28 和 29 章的内容。对于一个季度的课程而言，可以省去 CMOS 电路（第 4 和 5 章）、微码（第 18 章）和高级系统（第 24 和 25 章）的内容。括号中的三章内容是可选的，当课程节奏较为缓慢时可以跳过这些内容。在斯坦福大学开设这门课程

时，我们通常会进行两次考试：第一次是在讲完第 11 章之后，第二次则是在讲完第 22 章之后。

对于一个学期的数字系统设计入门课程，可以利用增加的三周时间讲解 CMOS 电路和一些高级系统的内容。一般而言，一个学期的课程包含第 1、2、3、4、(5)、6、7、8、9、10、(11)、13、14、15、16、(17)、(18)、(19)、21、22、(23)、(24)、(25)、26、(27)、28 和 29 章的内容。

本书也可以用于数字系统设计的高级课程。此类课程更深入地介绍入门课程的内容，同时涵盖了入门课程里略去的高级内容。此类课程通常会包括一个有意义的学生项目。

素材

为了支撑本书的教学，课程网站提供了教学素材[⊖]，包括讲课幻灯片、一系列实验和部分习题的答案。实验旨在加强对课程内容的理解，可通过软件仿真，或是在 FPGA 上通过仿真和实际操作相结合的方式实现。

致谢

向那些为本书出版做出贡献的人致以最衷心的感谢。本书在麻省理工学院 (6.004) 和斯坦福大学 (EE108A) 多年的数字设计课程教学中不断完善。感谢那些参与这门课程早期版本的几代学生，是他们提供的反馈信息让我们不断地改进教学方法。Subhasish Mitra 教授、Phil Levis 教授和 My Le 教授使用早期版本的教材在斯坦福大学授课，并且提出了很多有价值的建议，引导我们不断提高。多年来，本书和课程也得益于很多助教的贡献。特别感谢 Paul Hartke、David Black-Shaffer、Frank Nothaft 和 David Schneider，还要感谢 Frank 对习题答案的贡献。Gill Pratt、Greg Papadopolous、Steve Ward、Bert Halstead 和 Anant Agarwal 在麻省理工学院讲授 6.004 课程的经历，帮助我们改进了本书中提到的数字设计的教学方法。

剑桥大学出版社的 Julie Lancashire 和 Kerry Cahill 在整个项目中一直在帮助我们。在此，感谢 Irene Pizzie 的文字编辑，感谢 Abigail Jones 从手稿中一些杂乱的段落中整理内容，并最终完成本书的出版工作。

最后，要感谢我们的家庭成员 Sharon、Jenny、Katie 和 Liza Dally 以及 Jacki Armiak、Eric Harting 和 Susanna Temkin 给予我们极大的支持并做出了有意义的牺牲，没有他们，我们无法专心投入写作。

[⊖] 关于本书教辅资源，只有使用本书作为教材的教师才可以申请，需要的教师可向剑桥大学出版社北京代表处申请，电子邮件：solutions@cambridge.org。——编辑注

目 录

Digital Design: A Systems Approach

出版者的话
推荐语
译者序
前言

第一部分 绪论

第 1 章 数字抽象化	2
1.1 数字信号	2
1.2 数字信号容忍噪声	3
1.3 数字信号表示复杂数据	6
1.3.1 表示一年中的某一天	7
1.3.2 表示减法	8
1.4 数字逻辑函数	8
1.5 数字电路和系统的 Verilog 描述	9
1.6 系统中的数字逻辑	11
小结	11
文献说明	12
习题	12
第 2 章 数字系统设计实践	15
2.1 设计流程	15
2.1.1 设计规格	15
2.1.2 概念开发与可行性	17
2.1.3 划分与详细设计	18
2.1.4 验证	19
2.2 数字系统由芯片和电路板构建	19
2.3 计算机辅助设计工具	22
2.4 摩尔定律和数字系统演变	23
小结	25
文献说明	25
习题	25

第二部分 组合逻辑

第 3 章 布尔代数	28
3.1 公理	28
3.2 性质	29
3.3 对偶函数	30

3.4 标准形式	31
3.5 从公式到门电路	31
3.6 用 Verilog 描述布尔表达式	33
小结	35
文献说明	35
习题	35
第 4 章 CMOS 逻辑电路	38
4.1 开关逻辑	38
4.2 MOS 晶体管的开关模型	41
4.3 CMOS 门电路	46
4.3.1 基本的 CMOS 门电路	46
4.3.2 反相器、与非门、或非门	47
4.3.3 复杂门	49
4.3.4 三态电路	50
4.3.5 应避免使用的电路	52
小结	52
文献说明	53
习题	53
第 5 章 CMOS 电路的延迟和功耗	56
5.1 静态 CMOS 门的延迟	56
5.2 扇出和驱动大电容负载	58
5.3 扇入和逻辑功效	59
5.4 延迟计算	61
5.5 延迟优化	63
5.6 连线延迟	64
5.7 CMOS 电路的功率损耗	67
5.7.1 动态功耗	67
5.7.2 静态功耗	68
5.7.3 功率调节	68
小结	69
文献说明	69
习题	70
第 6 章 组合逻辑设计	72
6.1 组合逻辑	72
6.2 闭合	73
6.3 真值表、最小项和标准形式	73

6.4	蕴涵项和立方体	75	第9章	组合电路实例	132
6.5	卡诺图	77	9.1	3的倍数电路	132
6.6	函数的覆盖	78	9.2	明天电路	135
6.7	由覆盖转化成门电路	79	9.3	优先级仲裁器	137
6.8	不完全确定函数	80	9.4	井字棋游戏	138
6.9	“和之积”形式的实现	81	小结		145
6.10	险象	83	习题		145
	小结	84	第三部分 算术电路		
	文献说明	85	第10章	算术电路	148
	习题	85	10.1	二进制数	148
第7章	使用 Verilog 描述组合逻辑	89	10.2	二进制加法	150
7.1	用 Verilog 描述素数电路	89	10.3	负数和减法	154
7.1.1	Verilog 模块	89	10.4	乘法	159
7.1.2	case 语句	90	10.5	除法	162
7.1.3	casex 语句	92	小结		165
7.1.4	assign 语句	93	习题		166
7.1.5	结构描述	94	第11章	定点数和浮点数	170
7.1.6	十进制素数函数	95	11.1	误差的表示方法: 准度、精度 和分辨率	170
7.2	素数电路的测试平台	95	11.2	定点数	172
7.3	实例: 七段译码器	98	11.2.1	表示方法	172
	小结	103	11.2.2	运算	173
	文献说明	104	11.3	浮点数	175
	习题	104	11.3.1	表示方法	175
第8章	组合电路基础单元	106	11.3.2	未规格化数和逐级下溢	176
8.1	多位信号的表示	106	11.3.3	浮点数乘法	176
8.2	译码器	106	11.3.4	浮点数加/减法	178
8.3	多路选择器	109	小结		180
8.4	编码器	115	文献说明		181
8.5	仲裁器和优先编码器	118	习题		181
8.6	比较器	121	第12章	快速算术电路	183
8.7	移位器	123	12.1	超前进位	183
8.8	只读存储器	123	12.2	布斯编码	188
8.9	读写存储器	126	12.3	华莱士树	191
8.10	可编程逻辑阵列	128	12.4	综合说明	195
8.11	数据手册	128	小结		195
8.12	知识产权	129	文献说明		196
	小结	130	习题		196
	文献说明	130			
	习题	131			

第 13 章 算术运算实例	198	16.2.3 通用移位器/计数器	246
13.1 复数乘法	198	16.3 控制和数据分区	248
13.2 定点和浮点格式之间的转换	200	16.3.1 实例: 自动售货机 FSM	249
13.2.1 浮点格式	200	16.3.2 实例: 密码锁	257
13.2.2 定点数到浮点数的转换	201	小结	260
13.2.3 浮点数到定点数的转换	202	习题	261
13.3 FIR 滤波器	203	第 17 章 分解有限状态机	263
小结	206	17.1 闪光信号灯	263
文献说明	206	17.2 交通灯控制器	271
习题	206	小结	278
第四部分 同步时序逻辑		习题	279
第 14 章 时序逻辑	210	第 18 章 微码	282
14.1 时序电路	210	18.1 简单的微编码 FSM	282
14.2 同步时序电路	211	18.2 指令序列	286
14.3 交通灯控制器	213	18.3 多路分支	291
14.4 状态分配	215	18.4 多种指令类型	292
14.5 实现有限状态机	216	18.5 微码子程序	296
14.6 Verilog 编程实现有限状态机	218	18.6 简单计算机	296
小结	222	小结	302
文献说明	223	文献说明	302
习题	223	习题	302
第 15 章 时序约束	226	第 19 章 时序电路实例	305
15.1 传播和污染延迟	226	19.1 3 分频计数器	305
15.2 D 触发器	228	19.2 SOS 探测器	306
15.3 设置和保持时序约束	229	19.3 井字棋游戏	309
15.4 时钟偏差的影响	231	19.4 赫夫曼编码/译码	311
15.5 时序实例	232	19.4.1 赫夫曼编码器	311
15.6 时序和逻辑综合	233	19.4.2 赫夫曼解码器	314
小结	235	小结	316
文献说明	235	文献说明	316
习题	236	习题	317
第 16 章 数据通路时序逻辑	239	第五部分 实用设计	
16.1 计数器	239	第 20 章 验证与测试	320
16.1.1 简单计数器	239	20.1 设计验证	320
16.1.2 加一/减一/载入计数器	240	20.1.1 覆盖率的验证	320
16.1.3 定时器	241	20.1.2 测试的类型	321
16.2 移位寄存器	244	20.1.3 静态时序分析	322
16.2.1 一个简单的移位寄存器	244	20.1.4 形式验证	322
16.2.2 左移/右移/载入移位寄存器	245	20.1.5 缺陷跟踪	322
		20.2 测试	322
		20.2.1 故障模型	322
		20.2.2 组合逻辑测试	323

20.2.3	测试冗余逻辑	323	23.5	双缓冲	359
20.2.4	扫描	324	23.6	负载均衡	363
20.2.5	内置自测试	325	23.7	可变负载	364
20.2.6	特性测试	326	23.8	资源共享	366
小结		326	小结		367
文献说明		327	文献说明		368
习题		327	习题		368
第六部分 系统设计					
第21章	系统级设计	330	第24章	互连	370
21.1	系统设计过程	330	24.1	互连简述	370
21.2	规格	330	24.2	总线	370
21.2.1	Pong	331	24.3	交叉开关	373
21.2.2	DES 破解器	332	24.4	互连网络	374
21.2.3	音乐播放器	333	小结		376
21.3	系统划分	334	文献说明		377
21.3.1	Pong	335	习题		377
21.3.2	DES 破解器	335	第25章	存储器系统	379
21.3.3	音乐合成器	335	25.1	存储器的基本存储体	379
小结		337	25.1.1	SRAM 阵列	379
文献说明		337	25.1.2	DRAM 芯片	380
习题		337	25.2	用位片和存储体构造存储器	382
第22章	接口和系统级时序	338	25.3	交叉存储器	383
22.1	接口时序	338	25.4	高速缓存	386
22.1.1	常有效时序	338	小结		389
22.1.2	周期性有效信号	338	文献说明		389
22.1.3	流控制	339	习题		389
22.2	接口划分与选择	341	第七部分 异步逻辑		
22.3	接口的串行化与分包	341	第26章	异步时序电路	392
22.4	同步时序	344	26.1	流表分析	392
22.5	时序表	344	26.2	流表综合: 触发电路	394
22.5.1	事件流	345	26.3	竞争与状态分配	397
22.5.2	流水线和时序预测	345	小结		400
22.6	接口与时序实例	345	文献说明		400
22.6.1	Pong	345	习题		400
22.6.2	DES 破解器	346	第27章	触发器	402
22.6.3	音乐播放器	348	27.1	锁存器的内部结构	402
小结		349	27.2	触发器的内部结构	404
习题		349	27.3	CMOS 锁存器与触发器	406
第23章	流水线	351	27.4	锁存器的流表推理	407
23.1	流水线基础	351	27.5	D 触发器的流表综合	408
23.2	流水线举例	353	小结		410
23.3	实例: 行波进位加法器流水线	355	文献说明		410
23.4	流水线停顿	357	习题		410
			第28章	亚稳态和同步失效	412
			28.1	同步失效	412

28.2 亚稳态	413	29.4 FIFO 同步器	423
28.3 进入和脱离非法状态的概率	415	小结	428
28.4 亚稳态的演示	416	文献说明	429
小结	418	习题	429
文献说明	419		
习题	419	附录 Verilog 编码风格	431
第 29 章 同步器设计	420	参考文献	439
29.1 何处使用同步器	420	Verilog 模块索引	444
29.2 蛮力同步器	421	主题词索引	447
29.3 多位信号的问题	422		

第一部分

Digital Design: A Systems Approach

绪 论

数字抽象化

在当今社会中，数字系统无处不在。有些采用数字技术比较明显，譬如个人计算机或是网络交换机。另外，还有很多其他的数字技术方面的应用。当你使用电话通话时，绝大多数情况下你的声音都经过数字化处理，并通过数字通信设备进行传输。当你聆听一个音频文件（数字格式录制的音乐）时，也是通过数字逻辑加工过的，用以纠正错误并提高音频质量。当你观看电视节目时，图像就是以数字格式进行传输并由数字电子技术进行处理的。如果你有一台 DVR (digital video recorder, 数字视频录像机)，其实就是在以数字格式录制视频。DVD 就是压缩过的数字录像制品。当你播放 DVD 或是观看流媒体时，其实就是在对视频进行数字解压及处理。大多数的无线电通信，譬如手机和无线网络，都是通过数字信号处理以实现调制解调的功能。这样的例子比比皆是。

大多数现代电子设备只在边缘位置使用模拟电路，即与物理传感器或执行部件连接。传感器（比如麦克风）的信号会以最快的速度转换成数字格式。所有的信息存储和传输的实际过程都是以数字形式完成的。信号仅在输出的时候才被转换回模拟形式，以便驱动执行部件（比如扬声器）或控制其他的模拟系统。

不久以前，世界并不是数字的。在 20 世纪 60 年代，数字逻辑仅仅出现在昂贵的计算机系统和一些特定的应用中。所有的电视、收音机、唱片和电话采用的都是模拟系统。

随着集成电路的规模化，数字化成为可能。由于集成电路变得越来越复杂，也使得处理更为复杂的信号成为可能。诸如调制、纠错和压缩等复杂的技术采用模拟技术是无法实现的，只有数字逻辑才有能力完成无噪声积累的计算，有能力表示任意精度的信号，并可以实现这些信号的处理算法。

在本书中，我们将会看到在日常生活中占有如此大部分的数字系统的功能，以及它们是如何设计的。

1.1 数字信号

数字系统以数字形式存储、处理和传输信息，数字信息可以表示为编码到一个物理量范围内的离散符号。通常来说，我们表示信息只用“0”和“1”两个符号，图 1-1 所示为在电压范围内编码这两个符号。在标记为“0”和“1”范围内的电压分别用符号“0”和“1”表示。在两个范围之间的电压，即标记为“?”的区域是未定义的，且不表示为两者之间的任一符号。在两个范围之外的电压，即小于“0”或者大于“1”的范围都是不允许的，如果出现了这部分电压，就有可能会对系统造成永久性损坏。我们称以图 1-1 所示的方式编码的信号为二进制信号，因为它具有两个有效的状态。

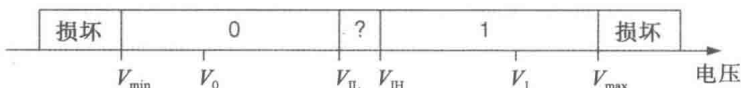


图 1-1 在电压范围内两个符号 (0 和 1) 的编码。在标记为 0 范围内的所有电压均视为符号 0，在标记为 1 范围内的所有电压均视为符号 1。在 0 和 1 之间（即“?”范围）的电压未定义，不表示为两者之间任一符号。在 0 和 1 范围之外的电压可能会对接收信号的设备造成永久性损坏