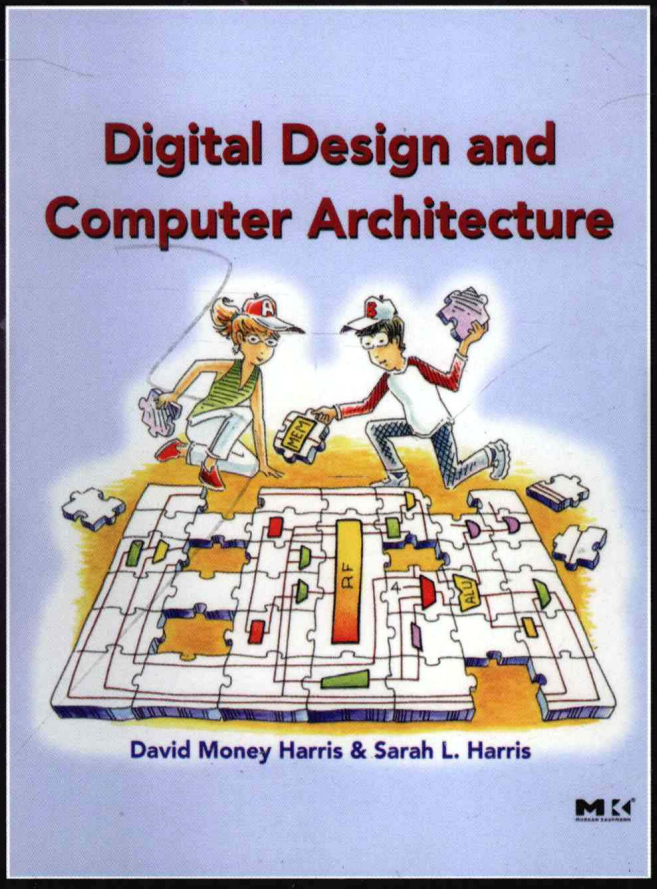
HZ BOOKS 华章教育
ELSEVIER
计 算 机 科 学 丛 书

数字设计和计算机体系结构

(美) David Money Harris Sarah L. Harris 著
哈维玛德学院
陈 虎 等译
华南理工大学



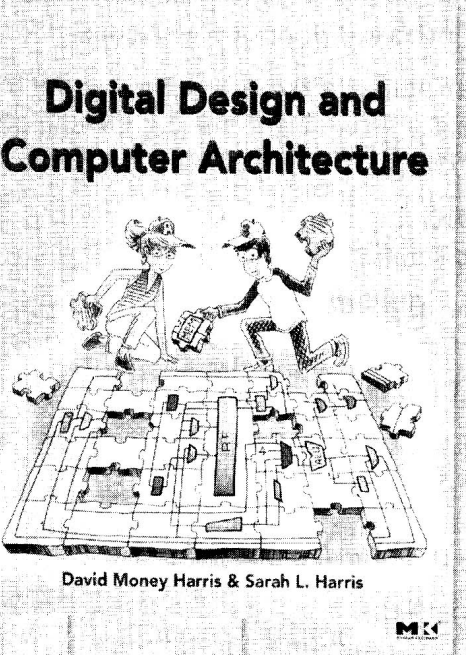
Digital Design and Computer Architecture

机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

数字设计和计算机体系结构

(美) David Money Harris Sarah L. Harris 著
哈维玛德学院
陈虎 等译
华南理工大学



Digital Design and
Computer Architecture

机械工业出版社
China Machine Press

本书以一种流行的方式介绍了从计算机组织和设计到更细节层次的内容，涵盖了数字逻辑设计的主要内容，展示了使用VHDL和Verilog这两种主要硬件描述语言设计MIPS处理器的技术细节，并通过MIPS微处理器的设计强化数字逻辑的概念。本书的典型特色是将数字逻辑和计算机体系结构融合，教学内容反映了当前数字电路设计的主流方法，并突出计算机体系结构的工程特点，书中的大量示例及习题设计也可以加强读者对基本概念和技术的理解和记忆。

本书不仅适合作为计算机、电子工程、电气与控制等专业的教材，同时也适合从事数字电路设计的工程师和技术人员参考。

David Money Harris and Sarah L. Harris: *Digital Design and Computer Architecture*.
ISBN-13:978-0-12-370497-9, ISBN-10:0-12-370497-9.

ISBN:978-981-259-987-2

图书在版编目（CIP）数据

数字设计和计算机体系结构/（美）哈里斯（Harris, D. M.）等著；陈虎等译. —北京：机械工业出版社，2009.5
（计算机科学丛书）
书名原文：Digital Design and Computer Architecture

ISBN 978-7-111-25459-1

I. 数… II. ① 哈… ② 陈… III. 数字电路-逻辑设计-教材 IV. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第059954号

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：刘立卿
北京瑞德印刷有限公司印刷
2009年5月第1版第1次印刷
184mm × 260mm · 25.75印张
标准书号：ISBN 978-7-111-25459-1
定价：58.00元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换
本社购书热线：（010）68326294

出版者的话

文艺复兴以降，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；也正是这样的传统，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分社较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，华章分社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，Brain W. Kernighan，Dennis Ritchie，Jim Gray，Afred 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襄助，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，有的还专程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。华章分社欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@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

相关评论

本书以一种易于接受的方式介绍了从计算机组织和设计到更细节层次的教学内容，展现了如何使用VHDL和Verilog语言设计MIPS处理器的技术细节。为学生提供在现代FPGA上实现大型数字系统设计的机会，书中提供的方法既向学生传授了知识又具有启发性。

——David A. Patterson，加州大学Berkeley分校

本书为传统的教学内容提供了新的视角。很多教科书看上去像繁杂的灌木丛，作者在这本书中将“枯枝”去除，同时保留了最基本的内容，并把这些内容放到了现代的环境中。正因为如此，他们提供的教材可以激发学生为未来挑战设计解决方案的兴趣。

——Jim Frenzel，爱达荷大学

Harris的写作风格引人入胜，而且能提供很多知识。他们对材料的运用水平很高，通过大量的图来引导学生进入计算机工程领域。组合逻辑、微结构和存储器系统等内容处理得非常好。

——James Pinter-Lucke, Claremont McKenna学院

Harris所写的这本书非常清晰而且易于理解。练习的设计非常好，同时也提供了很多现实案例。这本书避免了许多其他教材中冗长而费解的解释。很明显，作者花费了很多时间和努力来提高本书的可读性。本人强烈推荐这本书。

——Peiyi Zhao, Chapman大学

Harris撰写了一部成功融合数字逻辑和计算机体系结构的教材。这是一本很受欢迎的教科书，它介绍了很多数字系统设计的内容，同时详细解释了MIPS体系结构的细节。本人强烈推荐这本书。

——James E. Stine, Jr., 俄克拉何马州立大学

这是一本令人印象深刻的书。Harris将晶体管、电路、逻辑门、有限状态机、存储器、算术部件等微处理器设计中的所有重要元素完美地结合在一起，并最终引出计算机体系结构。这本书为理解如何完美地设计复杂系统提供了很好的指导。

——Jaeha Kim, Rambus公司

这是一本写得非常好的书，不仅适用于第一次学习这些领域的年轻工程师，而且可以为有经验的工程师提供参考。本人强烈推荐这本书。

——A. Utku Diril, Nvidia公司

译 者 序

当译者从书店里第一次看到Harris所著的《Digital Design and Computer Architecture》的影印版时就被它深深吸引。这本书的与众不同之处在于以下方面：

1) 将数字逻辑和计算机体系结构融合。计算机硬件课程体系自身应该是完整的，数字逻辑是微处理器的设计基础，而微处理器又为数字逻辑提供了广阔的应用和设计空间。但是，当前的主流课程设置将这两者分割，学生不能通过微处理器设计来进一步加强数字系统的实际设计能力，而且计算机组成原理和体系结构课程也变成了一门“理论”课，学生几乎没有机会独立设计一个完整的处理器系统，使得这些课程的效果大打折扣。本书所采用的新结构为解决计算机专业硬件课程的问题提供了新的方法和途径。

2) 教学内容反映了当前数字电路设计的主流方法。集成电路是发展最快的领域，一个合格的数字电路设计工程师必须能掌握当前主流的数字电路设计方法和工具。遗憾的是，当前主流的数字逻辑课程还是以74系列的小规模集成电路为教学内容，对现代数字设计中最常用的硬件描述语言、FPGA等关键技术介绍不足，教学内容与工程实践脱节。本书通过大量的实例说明基于硬件描述语言和FPGA的数字电路设计方法，使得学生可以采用当前主流的CAD工具完成多个实验，大大增强了学生数字设计的实际应用能力。

3) 突出计算机体系结构的工程特点。与纯理论课程不同的是，计算机体系结构本质上是面向复杂数字电路的设计工程，在设计过程中最重要的就是根据芯片面积、速度、功耗、成本等诸多约束条件，从多种可能的设计方案中做出合理的设计抉择和折中。这种工程化的设计思想对于学生未来从事大型系统设计具有重要意义，而这一点恰恰又是当前教学中所欠缺的一环。本书通过对多种设计方案的介绍和对比，在“一题多解”的基础上说明了大型工程设计中经常碰到的设计抉择问题。对学生建立工程化的设计方法和思想很有帮助。

4) 非常易于理解。本书内容清新，文字流畅，没有冗长的概念解释，而是配以丰富的实例和清晰易懂的电路图和时序图。这对于帮助初学者理解数字电路的结构和常用表示方法无疑非常重要，可以帮助读者很快地理解数字电路和微处理器的基本原理和设计方法。

本书不仅适合作为计算机、电子、电气与控制等专业的教材，而且对于从事数字电路设计的工程师和技术人员也可以作为参考手册。

本书译者在华南理工大学软件学院和计算机学院使用本书的英文版对2007级本科学生进行双语教学，收到了很好的效果。

本书由华南理工大学陈虎副教授主持翻译定稿。此外，杨涛、王俊和何健华等人也参加了本书的部分翻译工作，对于他们的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间和水平有限，书中难免仍存在错误，敬请读者指正。

译者

2008年8月

前　言

目前已经有很多优秀的数字逻辑设计书籍，也有一些很好的计算机体系结构教材（例如Patterson和Hennessy撰写的经典教材），为什么还需要再出版一本包含了数字逻辑设计和体系结构的书呢？这本书的独特之处在于从计算机体系结构的视角来讲解数字逻辑设计，内容从基本的二进制开始，直到引导学生完成MIPS处理器的设计。

多年来，我们曾在Harvey Mudd学院使用了多个版本的《Computer Organization and Design》一书（由Patterson和Hennessy撰写）。我们特别欣赏该书涵盖了MIPS处理器的体系结构和微结构这种风格，MIPS处理器是获得了商业成功的体系结构，而且它也非常简单，可以用作学生的引导课程，也可由学生自主设计和实现。由于我们的课程没有预修课程，前半个学期需要介绍数字逻辑设计，而这部分内容《Computer Organization and Design》没有包含。其他大学也表示需要一本能包含数字电路设计和体系结构的教材。于是，我们开始着手准备这样一本包含了数字逻辑设计和体系结构的书。

我们相信设计处理器对于电子工程和计算机专业的学生来说是一个特殊而重要的经历。对于外行而言，处理器内部的工作几乎像魔术一样，然而事实证明，如果详细解释的话，处理器的工作原理非常易于理解。数字逻辑设计本身是一个强有力且令人激动的主题。汇编语言程序揭示了处理器内部所用的语言。而微结构将两者联系在一起。

这本书适合作为在一个学期内完成教学的数字逻辑设计和计算体系结构的入门课程，也可以用于两个学期的教学，以便有更多的时间来消化和理解书中所讲的知识并在实验室中进行实践。唯一需要的预修内容是熟悉一种高级程序设计语言（例如C、C++或Java）。本教材一般在大学本科二年级或者三年级使用，也可以提供给有编程经验和基础较好的一年级学生学习。

特点

这本书有以下特点。

并列讲述Verilog和VHDL语言

硬件描述语言（Hardware Description Languages, HDL）是现代数字逻辑设计实践的中心，而设计者分成了Verilog语言和VHDL语言两个阵营。在介绍组合逻辑和时序逻辑设计后，这本书紧接着就在第4章中介绍硬件描述语言。硬件描述语言将在第5章和第7章用于设计处理器的模块和整个处理器。然而，如果不讲授硬件描述语言的话，第4章可以跳过去，后续章节仍然可以继续使用。

这本书的特色在于使用并列的方式讲述Verilog语言和VHDL语言，使得读者可以快速地对比两种语言。第4章描述了适用于这两种硬件描述语言的原则，而且并列给出了这两种语言的语法和示例。这种并列方法使得在教学中教师可以选择其中一种硬件描述语言讲述，也可以让读者在专业实践中很快地从一种描述语言转到另外一种描述语言。

经典的MIPS体系结构和微结构

本书的第6章和第7章主要介绍了MIPS体系结构。这部分内容主要改编自Patterson和

Hennessy的论著。MIPS是一个理想的体系结构，因为每年有上百万实际产品投入使用，而且高效和易于学习。同时，世界各地上百所的大学已经围绕MIPS体系结构开发了教学内容、实验和工具。

现实视角

本书的第6～8章列举了Intel公司IA-32系列处理器的体系结构、微结构和存储器层次。这些章节以现实视角揭示了书中所讲的概念如何应用到大多数PC内部芯片的设计中。

高级微结构概览

第7章中介绍了现代高性能微结构的特征，包括分支预测、超标量、乱序执行操作、多线程和多核处理器。这些内容即使对于第一次上体系结构课程的学生也比较易于理解，展示了微结构原理如何扩展到现代处理器设计中。

章末的练习和面试题目

学习数字设计的最佳方式是实践。每章的结束部分都有很多练习来实际应用所讲述的内容。练习后面是一组工业领域的同事向申请工作的学生提出的面试题目。这些问题可以让学生了解到面试过程中可能遇见的典型问题类型。练习的答案可以通过本书的配套网址和教师支持网址获得。

在线补充资料

补充材料可以通过textbook.elsevier.com/9780123704979获得。这个出版公司对所有读者开放的网站包括了以下内容：

- 奇数编号练习的答案；
- Xilinx® 和Synplicity®公司专业版计算机辅助设计工具的链接；
- PCSPIM（一个基于Windows的MIPS模拟器）的链接；
- MIPS处理器的硬件描述语言代码；
- Xilinx的Project Navigator工具的提示；
- PPT格式的电子教案；
- 简单的课程和实验素材；
- 勘误表。

教师网站（链接到出版公司网站，仅提供给经textbooks.elsevier.com注册的使用者）包括：

- 偶数编号练习的答案；
- Xilinx® 和Synplicity®公司专业版计算机辅助设计工具的链接；取得资格认证的大学教师可以获得免费的Synplicity工具，用于教学和实验。更详细的内容请参见教师网站；
- JPG格式和PPT格式的书中插图。

关于在课程中使用Xilinx、Synplicity和PCSPIM工具以及构建实验的更详细内容请参见下文介绍。

如何使用课程中的软件工具

Xilinx ISE WebPACK

Xilinx ISE WebPACK是Xilinx公司ISE Foundation FPGA设计工具的免费版本。基于此软

件，学生可以使用原理图或者硬件描述语言（Verilog或VHDL）完成数字逻辑设计。在完成设计后，学生可以使用Xilinx WebPACK中包含的ModelSim MXE III Starter工具模拟电路。Xilinx WebPACK中还包含了用于综合Verilog或者VHDL程序的XST工具。

WebPACK和Foundation两个软件的差异在于WebPACK仅仅支持Xilinx公司部分常用FPGA器件。ModelSim MXE III Starter和ModelSim商业版的区别在于Starter版本降低了10 000多行的硬件描述语言代码的模拟速度。

Synplify Pro

Synplify Pro® 是一个面向FPGA和CPLD的高性能专业逻辑综合引擎。Synplify Pro包含了HDL Analyst（一个图形接口工具），用于根据硬件描述语言产生电路原理图。我们发现这个工具对于学习和调试过程有极大的帮助。

Synplicity公司非常慷慨地向有资格的大学捐献Synplicity Pro软件，并提供许多许可证用于大学的实验室。教师可以访问教师网站获知如何申请Synplicify Pro的许可证。关于Synplicity更详细的信息可以访问www.synplicity.com/university网站。

PCSPIM

PCSPIM（又称为简单的SPIM）是一个基于Windows的可运行MIPS汇编代码的MIPS模拟器。学生可以在文本文件中输入MIPS汇编代码，通过PCSPIM进行模拟。PCSPIM显示了指令、存储器和寄存器的值。用户手册和示范文件的链接可以通过本书配套网站（textbooks.elsevier.com/9780123704979）访问。

实验

配套网站提供了从数字逻辑设计到计算机体系结构一系列实验的链接。这些实验教授学生如何使用Xilinx WebPACK或Foundation工具来输入、模拟、综合和实现他们的设计。这些实验也包含了使用PCSPIM模拟器完成汇编语言编程的内容。

经过综合设计后，学生可以在Digilent公司的Spartan 3 Starter开发板或者XUP-Virtex 2 Pro（V2Pro）开发板上实现自己的设计。这些功能强大而且具有价格优势的开发板可以通过www.digilent.com获得。我们提供的实验描述了如何使用WebPACK在Digilent公司的Spartan 3开发板上实现一些设计。但是，Xilinx WebPACK不支持V2Pro开发板上的大容量FPGA。有资格的学校可以联系Xilinx大学合作计划以申请免费的完整Foundation工具。

为了运行这些实验，学生需要下载并安装Xilinx WebPACK、PCSPIM和Synplify Pro（可选）。教师也需要选择软件安装在实验室的机器上。这些实验包括了如何在Digilent公司的Spartan 3 Starter开发板上实现项目的指导。这些实现步骤可以跳过，但是我们认为它有很大的价值。这些实验可以使用XST综合工具，但我们推荐使用Synplify Pro工具，因为电路的原理图将反馈给学生重要的信息。

我们在Windows平台上测试了所有的实验，当然这些工具也可以在Linux上使用。

错误

正如所有有经验的程序员所知，比较复杂的程序毫无疑问都有潜在错误。这本书也不例外。我们花费了大量的精力查找和消除这本书的错误。然而，错误仍然不可避免。我们将在这本书的网站上维护和更新勘误表。

请将你发现的错误发送到ddcabugs@onehotlogic.com。第一个报告实质性错误而且在后续版本中采用了其修改的读者可以得到1美元的奖励！（请确认包含了自己的邮件地址。）

致谢

首先，我们要感谢David Patterson和John Hennessy，他们在《Computer Organization and Design》一书中对MIPS处理器微结构进行了开创性的介绍。我们多年以来讲授了该书的多个版本。我们感谢他们对这本书慷慨的支持，以及允许在他们的微结构上进行设计。

我们喜爱的卡通画作家Duane Bibby花了很长时间和努力来说明数字电路设计中有趣的奇遇。我们也很感激Morgan Kaufamann公司的Denise Penrose、Nate McFadden以及团队的其他同事，没有他们的热情这本书将无法面世。Graphic World出版服务公司的Joff Somers在出版过程中也提供了大力指导。

很多审阅人也大大地提高了这本书的质量。他们包括：Ithaca学院的John Barr，Charleston Southern 大学的Jack V. Briner，SK通信公司的Andrew C. Brown，Harvey Mudd 学院的Carl Baumgaertner，Nvidia公司的A. Utku Diril，Idaho大学的Jim Frenzel，Rambus公司的Jaeha Kim，ShotSpotter公司的Phillip King，Claremont McKenna学院的James Pinter-Lucke，Connecticut大学的Amir Roth和Z. Jerry Shi，Oklahoma州立大学的James E. Stine，Chapman大学的Luke Teyssier和Peiyi Zhao，以及一位匿名评阅人。Simon Moore是作者David在剑桥大学进行学术休假时的东道主，而本书的大部分内容正是在此期间完成的。

我们也非常感谢Harvey Mudd学院上这个课程的学生们，他们对此书的草稿提供了有帮助的反馈。需要特别记住的是Casey Schilling、Alice Clifton、Chris Acon和Stephen Brawner。

本书作者David特别感谢他的妻子Jennifer。在这个项目开始的时候，他们的儿子Abraham降生。感谢她的耐心和生活最忙碌时对另一个项目的支持。

目　录

第1章 二 进 制

1.1 课程计划

在过去的三十年里，微处理器彻底变革了我们的世界。现在一台膝上笔记本电脑的计算能力都远远超过了过去一个房间大小的大型计算机。高级汽车上包含了大约50个微处理器。微处理器的进步使得移动电话和Internet成为可能，极大地促进了医学的进步，也改变了战争的式样。全球集成电路工业销售额从1985年的210亿美元发展到2005年的2270亿美元，其中微处理器占到了重要部分。我们相信微处理器对技术、经济和社会有重要意义，而且它也潜在地激发了人类的创造力。在读者学习完这本书后，将学会如何设计和构造一个属于自己的微处理器。这些基本技能将为读者设计其他数字系统奠定坚实的基础。

我们假设读者对电子学有基本的认识，有一定的编程经验和基础，同时对理解微处理器的内部运行原理有真正的兴趣。这本书将集中讨论基于0和1的数字系统的设计。我们从接收0和1作为输入，产生0和1作为输出的逻辑门开始本课程。接着，我们将研究如何利用这些逻辑门构成加法器、存储器等比较复杂的模块。随后，我们将学习使用以微处理器的语言——汇编语言进行程序设计。最后，我们将上述内容结合起来以构造一个能执行汇编程序的微处理器。

数字系统的一个重要特点是其构造模块相当简单：仅仅包括了0和1。它不需要繁杂的数学知识或高深的物理学知识。相反，设计者的最大挑战是如何将这些简单的部件组合起来构成复杂的系统。微处理器可能是读者构造的第一个复杂系统，其复杂性可能一下子难以全部接受。因此，如何控制复杂性是贯穿全书的一个重要主题。

1.2 控制复杂性的艺术

与非专业人员相比，计算机科学家或工程师的一个重要特征是掌握了控制复杂性的系统方法。现代数字系统由上百万，甚至数十亿的晶体管构成。没有人能通过为每个晶体管的电子运动建立并求解方程的方法来理解这样的系统。读者必须学会如何控制复杂性，从而理解如何构造微处理器系统，而不陷入繁琐的细节。

1.2.1 抽象

管理复杂性的关键技术在于抽象（abstraction）：隐蔽不重要的细节。一个系统可以从多个不同层面抽象。例如，美国的政治家将世界抽象为城市、县、州和国家。一个县包含了若干城市，而一个州则包含了若干县。当一个政治家竞选总统时，他对整个州的投票情况更有兴趣，而非单个县。因此，州在这个层次中的抽象更有益处。在另一方面，美国人口调查局需要统计每个城市的人口，必须考虑更低层次抽象的细节。

图1-1给出了一个电子计算机系统的抽象层次，其中在每个层次中都包含了典型的模块。最底层的抽象是物理层，即电子的运动。电子的特征由量子力学和麦克斯韦（Maxwell）方程描述。我们的系统由晶体管或先前的真空管等电子器件（device）构造。这些器件都有明确定

义的外部连接点，称为端子（terminal），并建立了每个端子上电压和电流之间的关系模型。通过器件级的抽象，我们可以忽略单个电子。更高一级抽象为模拟电路（analogy circuit）。在这一级中，器件组合在一起构造成放大器等组件。模拟电路的输入和输出都是连续的电压值。逻辑门等数字电路（digital circuit）则将电压控制在离散的范围内，以表示0和1。在逻辑设计中，我们将使用数字电路构造更复杂的组件，例如加法器或存储器。

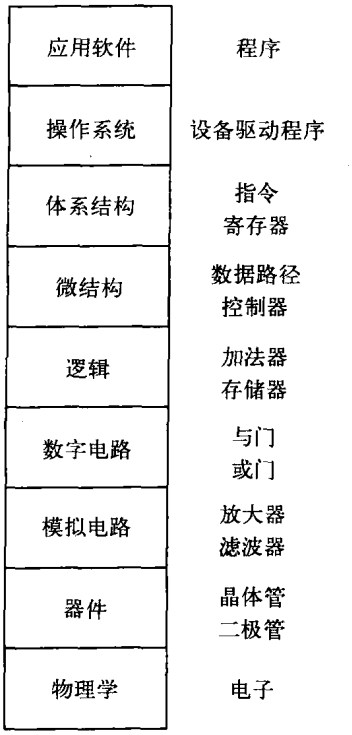


图1-1 电子计算机系统的抽象层次

微结构将逻辑和体系结构层次的抽象连接在一起。体系结构（architecture）层描述了程序员观点的计算机抽象。例如，目前广泛应用于个人计算机（Personal Computer，PC）的Intel公司的IA-32体系结构定义了一套指令系统和寄存器（用于存储临时变量的存储器），从而程序员可以使用这些指令和寄存器。微结构将逻辑组件组合在一起以实现体系结构中定义的指令。一个特定的体系结构可以有不同的微结构实现方式，以取得在价格、性能和功耗等方面的不同折中。例如，Intel公司的Core 2 Duo，80486和AMD公司的Athlon等都是IA-32体系结构的三种不同微结构实现。

进入软件层面后，操作系统负责处理底层的抽象，例如访问硬盘或管理存储器。最后，应用软件使用操作系统提供的这些功能以解决用户的问题。正是借助于抽象的威力，年迈的祖母可以通过计算机上网，而不用考虑电子的量子波动或计算机中的存储器组织问题。

这本书将主要讨论从数字电路到体系结构之间的抽象层次。当读者处于某个抽象层次时，最好能了解当前抽象层次之上和之下的层次。例如，计算机科学家不可能在不理解程序运行平台体系结构的情况下充分优化代码。在不了解晶体管具体用途的情况下，器件工程师也不能在设计晶体管时做出明智的设计选择。我们希望读者学习完本书后，能选择正确的层次以解决问题，同时评估自己的设计选择对其他抽象层次的影响。

1.2.2 约束

约束（discipline）是对设计选择的一种内在限制，通过这种限制可以更有效地在更高的抽象层次上工作。使用可互换部件是约束的一种常见应用，其典型例子是来复枪的制作。在19世纪早期，来复枪靠手工一支支地制作。来复枪的零件从很多不同的手工制作商那里买来，然后由一个技术熟练的做枪工人组装在一起。基于可互换部件的约束变革了这个产业：通过将零件限定为一个误差允许范围内的标准集合，就可以很快地组装和修复来复枪，而且不需要太熟练的技术。做枪工人不再需要考虑枪管和枪托形状等较低层次的抽象。

在本书中，对数字电路的约束非常重要。数字电路使用离散电压，而模拟电路使用连续电压。因此，数字电路是模拟电路的子集，而且在某种意义上其能力要弱于范围更广的模拟电路。然而数字电路的设计很简单。通过数字电路的约束规则，我们可以很容易地将元件组合成复杂的系统，而且这种数字系统在很多应用上都远远优于由模拟元件组成的系统。例如，数字化的电视、光盘（CD）以及移动电话正在取代以前的模拟设备。

1.2.3 三条原则

除了抽象和约束外，设计者还使用另外三条准则来处理系统的复杂性：层次化（hierarchy），模块化（modularity）和规整化（regularity）。这些原则对于软硬件的设计都是通用的。

- 层次化：将系统划分为若干模块，然后更进一步划分每个模块直到这些模块可以很容易理解。
- 模块化：所有模块有定义好的功能和接口，以便于它们之间可以很容易地相互连接而不会产生意想不到的副作用。
- 规整化：在模块之间寻求一致，通用的模块可以重新使用多次，以减少设计不同模块的数量。

我们回到制作来复枪的例子来解释这三条原则。在19世纪早期，来复枪是最复杂的常见物品之一。使用层次化原理，我们可以将它划分为图1-2所示的几个部件：枪机、枪托和枪管。

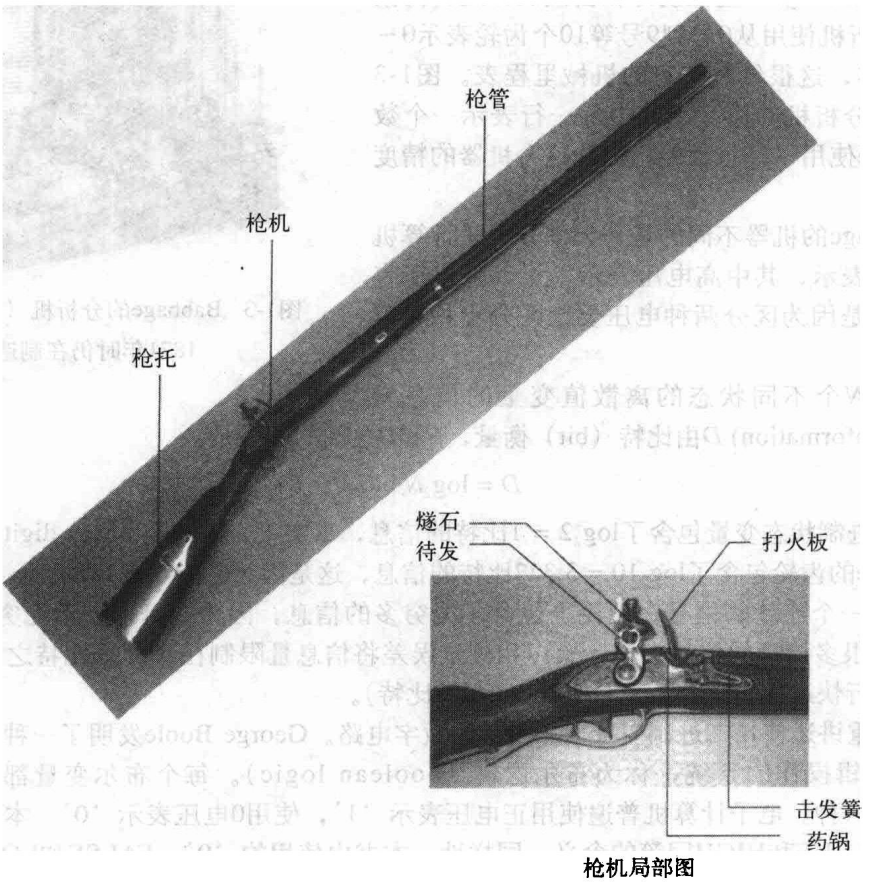


图1-2 燧石来复枪及其枪机的特写照片

枪管是一个长的金属管子，子弹就是通过这里射出；枪机是一种射击设备；而枪托是用木头制成的，它将各种部分连接起来并且为使用者提供牢固的握枪位置。然后，枪机包含扳机、击锤、燧石、扣簧和药锅。每种组件都可以用规则性来描述。

模块化使得每个模块都应有明确的功能和接口。枪托的功能是装配枪机和枪管，它的接口