



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

国家、北京市、清华大学精品课程教材
北京市教育教学（高等教育）成果一等奖

清华大学计算机系列教材

清华大学信息科学技术学院教材
学院公共基础课程系列

计算机组成与设计 (第3版)

Computer Organization
and Design

● 王 诚 刘卫东 宋佳兴 编著
Wang Cheng Liu Weidong Song Jiaxing



清华大学出版社



北京高等教育
BEIJING GAODENG JIAOYU

北京市、清华大学精品课程教材
市教育教学（高等教育）成果一等奖

清华大学计算机系列教材

清华大学信息科学技术学院教材
学院公共基础课程系列

计算机组成与设计

(第3版)

Computer Organization and Design

● 王 诚 刘卫东 宋佳兴 编著

Wang Cheng Liu Weidong Song Jiaxing

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年从事“计算机组成原理”课程教学和有关科研成果的结晶,在完成国家精品课程建设的基础上对本书进行了重要修订,使教材内容更先进,学习难度也有所降低。本书简要地介绍了数字电路基础和逻辑设计的内容,全面而比较深入地讲解了计算机组成的原理知识和设计与实现的技术,包括数据表示和运算器、指令系统和控制器、三级结构的存储器系统、输入和输出设备与系统,最后简要地介绍了并行计算机体系结构的主要概念和基础知识。

本书既可作为高等院校计算机或相关专业“计算机组成原理”课程的教材,也可作为从事与计算机相关业务的生产、科研和工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与设计/王诚,刘卫东,宋佳兴编著.—3版.—北京:清华大学出版社,2008.7
(清华大学信息科学技术学院教材·学院公共基础课程系列)

ISBN 978-7-302-17595-7

I. 计… II. ①王… ②刘… ③宋… III. 计算机体系结构—高等学校—教材
IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 067180 号

责任编辑:薛 阳

责任校对:梁 毅

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62772015, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:北京市国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:24.75

字 数:506 千字

版 次:2008 年 7 月第 3 版

印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:
010-62770177 转 3103 产品编号:028562-01

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任: 郑大钟

副 主 任: 蔡鸿程 胡事民 任 勇 覃 征 王希勤

汪 惠 王 雄 余志平

编 委: 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵

萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里

郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书: 王 娜

责任编辑: 陈国新 马瑛珺 王一玲

出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想将成为我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及 6 个系列 14 个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系、所、院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材总体上将突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

第3版前言

Preface

本书的几名作者对第3版的修订效果的期望值比较高,希望本书在内容选择和知识层次等方面能体现出某些特色,对改革课程的教学内容和质量有所贡献。

本书在内容选择方面,首先期望能提供计算机组成方面更完整、更系统的知识,在以硬件知识为主的前提下,适当地添加监控程序和汇编语言程序设计这类底层的软件内容,把“计算机组成原理”课程架设在软硬件有一定完整性的系统平台之上,而不是局限于硬件裸机的框架之内。其次期望在计算机组成原理内容的基础上,进一步增加部分系统结构的基本概念、基础知识以及提高计算机系统性能的主要途径的有关内容,以适应一些院校在“计算机组成原理”课程之后不再开设“系统结构”课程的教学安排。最后期望通过简要介绍 ABEL、VHDL 硬件描述语言,选用高集成度的现场可编程器件 CPLD、FPGA 芯片设计实现 CPU,把计算机的最新设计手段和实现技术加入到教材中。引导学生在教师的指导下,自己动手设计并实现一台硬软件组成大体完整且简单的计算机系统,以适应实践教育的办学理念,增强学生的开创意识,提高动手能力,保证教学内容适度的先进性。

本书在知识层次方面,准备把主要的教学内容按照基本通用原理、简明原理示例、典型产品实用三个层次来逐层讲解。基本通用原理是基础,是学习与理解计算机组成与运行机制的核心知识,其特点是稳定性(不随时间的变迁而改变)和通用性(不随具体机型而变化),是学生一定要掌握的部分。值得庆幸的是,讲解这部分内容的文字并不是太多,理解也不是太难,是很容易掌握的。但出于性能价格比的考虑,没有一台计算机是完全遵照基本原理来设计实现的,换句话说,要把原理转换成

真实的计算机系统,还有许多技术、工程、工艺问题需要解决,这些问题很难在一门课程的教学过程中说得清楚。在**典型产品实用**层次,只能给出在成功的计算机系统中设计实现的结果及其外特性,可以体现用到的基本原理,了解计算机当前的技术水平和发展现状,而不能更深入地了解其具体组成与设计实现的技术细节。为此,在这两个层次之间增加了**简明原理示例**层次,该层次强调充分体现和运用学到的基本原理知识,并进一步引导学生学习、体验设计实现一台简单(易学、价廉)计算机系统的方法与过程,真正做到把学习知识和增长实践能力结合起来,体现学为所用、学有所用的教学理念,增强学生的创新意识和开创能力。

本版的内容相对于前一版教材有较大幅度的改动,主要体现在以下几个方面。

(1) 在“计算机系统概述”一章增加了“计算机系统主要的技术和性能指标”一节,使学生能够尽早地对计算机系统的组成有一个完整的认识,对计算机系统核心术语有初步的了解,为后面的学习提供比较清晰的系统知识框架。

(2) 对“数字电路基础和计算机中的逻辑部件”一章的内容进行了大量删减,只限于给出示例计算机中所用到的器件的功能及其使用方法,以能够理解示例计算机的各个部件的逻辑线路为基本要求,增加了现场可编程器件 CPLD、FPGA 芯片的内部组成与使用、编程等内容。

(3) 在计算机系统设计部分简化了传统手工设计的内容,增加了通过更现代化的工具软件完成 CPU 设计的实例,体现出计算机系统设计的最先进技术。考虑到兼顾指令串行执行和流水线执行两种模式,控制器改为以硬连线方式为主,而把微程序的控制器作为补充内容。

(4) 在 CPU 的功能和组成部分增强了对通用原理的讲解,并且通过文字讲解和 VHDL 语言描述的双重手段说明部件功能,进一步减少了计算机实现中的逻辑线路内容。注意处理好教学示例计算机和 MIPS 计算机两个实例系统的关系。本书较大幅度地压缩了原来的教学示例计算机实现的篇幅,增加了典型 RISC 结构的 MIPS 计算机的 CPU 系统介绍,使重点教学内容更加突出。

(5) 本版教材显著地增加了计算机系统结构的内容,包括指令流水线和并行计算机体系结构等两部分,以适应国内教学课程体系变革的要求,做到和国外知名院校的教学安排相接轨。

总之,本书重点介绍了计算机组成完整的知识和系统设计的相应技术,并在某些章节中专门讲解计算机体系结构的一些基础内容,作为预备性知识,简单介绍了数字电路与逻辑设计的有关内容。

选用本教材时,总的教学学时约为 60~90 时,我们将提供与本教材配套的教学课件和教师用书。各教学单位应该针对自己的教学要求,对教材中的内容做出选择,确定重点。不加区别地从头到尾都讲一遍是不可取的。若能在示例计算机系统中完成必要的教

学实验,可以明显改善教学效果。用软件模拟系统完成实验也是可选方案之一。

本书的第1~6章由王诚编写,第7章由刘卫东编写,第8章和第9章由宋佳兴编写,王诚对全书进行了统编。这几名作者有多年从事本专业教学和科研工作的经历,所授的“计算机组成原理”课程被评为清华大学、北京市和国家三个级别的精品课程。

由于时间和作者的水平有限,书中难免会存在不足或不当之处,敬请广大读者批评指正。

王 诚

2008年1月于清华大学

联系电话:(010)62781446

E-mail: wangch@tsinghua.edu.cn

目 录

Contents

1 计算机系统概述	1
1.1 计算机系统的基本组成和它的层次结构	1
1.2 计算机硬件系统的 5 个功能部件及其功能	5
1.3 计算机主要的技术与性能指标	8
1.4 计算机的体系结构、组成和实现概述	10
1.5 计算机发展进步、分类与拓展应用的进程	12
本章内容小结	15
习题与思考题	16
 2 数字电路基础和计算机中的逻辑部件	 17
2.1 数字电路(digital circuit)基础	17
2.1.1 半导体材料和晶体二极管简介	17
2.1.2 双极型三极管的结构及其伏安特性	20
2.1.3 MOS 管的结构和它的伏安特性	21
2.2 基本逻辑门和布尔代数知识基础	23
2.2.1 最基本的逻辑门电路	23
2.2.2 布尔代数知识基础及其应用	26
2.3 组合逻辑电路(combinational logic circuit)及其应用	29
2.3.1 基本逻辑门	29
2.3.2 三态门	30
2.3.3 多路选择器	32
2.3.4 编码器和译码器	32
2.3.5 应用案例	33

2.4	时序(sequential)逻辑电路及其应用	36
2.4.1	基本 R-S 触发器(flip flop)	36
2.4.2	D 型触发器与寄存器	37
2.4.3	存储器(memory)芯片(chip)简介	38
2.4.4	应用案例	38
2.5	现场可编程逻辑器件及其应用	40
2.5.1	现场可编程器件概述	40
2.5.2	现场可编程器件的编程和应用	42
2.5.3	应用案例	43
	本章内容小结	45
	习题与思考题	45
3	数据表示、数据运算算法及其线路实现	47
3.1	数字化信息编码的概念和二进制编码知识	47
3.1.1	数字化信息编码的概念	47
3.1.2	二进制编码和码制转换	48
3.1.3	检错纠错码	55
3.2	数据表示——常用的信息编码	59
3.2.1	逻辑类型数据的表示	60
3.2.2	字符类型数据的表示	60
3.2.3	数值类型数据的表示	62
3.3	二进制数值数据的编码方案与运算算法	68
3.3.1	原码、反码、补码的定义	68
3.3.2	补码加、减运算规则和电路实现	73
3.3.3	原码一位乘法、除法的实现方案	75
3.3.4	实现乘法、除法的其他方案	80
	习题与思考题	86
4	计算机的运算器部件	88
4.1	算术逻辑运算部件的功能设计与线路实现	89
4.2	计算机的定点运算器	92
4.2.1	定点运算器部件的功能、组成与控制	92
4.2.2	MIPS 计算机多周期 CPU 系统中的运算器部件的组成与实现	93
4.2.3	运算器芯片 Am2901 实例	97

4.3	基于 Am2901 芯片的运算器部件	101
4.3.1	用 4 片 Am2901 芯片构建 16 位的运算器部件	101
4.3.2	4 片 Am2901 芯片之外的线路设计	103
4.4	浮点运算与浮点运算器	105
4.4.1	浮点数的运算规则	105
4.4.2	浮点运算器举例	112
4.5	提高运算器部件处理能力的可行途径	113
4.5.1	计算机性能的演变和并行性发展概述	113
4.5.2	提高计算机运算器处理能力的可行途径	114
	本章内容小结	116
	习题与思考题	116
5	指令、指令系统和汇编语言程序设计	118
5.1	指令格式和指令系统概述	118
5.1.1	操作码的组织与编码	120
5.1.2	有关操作数的个数、来源、去向和地址的安排	121
5.1.3	指令的分类	122
5.2	寻址方式概述与应用实例	124
5.2.1	基本寻址方式概述	124
5.2.2	寻址方式应用举例	127
5.3	指令系统举例	130
5.3.1	Pentium II 计算机的指令系统	130
5.3.2	MIPS 指令系统和 MIPS16e 指令系统	132
5.3.3	TEC-2000A 和 TH-union 系列示例计算机的指令系统	135
5.4	示例计算机的汇编程序设计简介	137
5.4.1	汇编语言及其程序设计中的有关概念	137
5.4.2	示例计算机支持的语言和程序设计	140
	本章内容小结	144
	习题与思考题	144
6	计算机的控制器部件	146
6.1	控制器的功能、组成与指令执行步骤概述	147
6.1.1	控制器部件的功能、组成概述	147
6.1.2	指令的执行步骤概述	148

6.2 硬连线控制器部件	150
6.2.1 硬连线控制器的组成和运行原理简介	150
6.2.2 MIPS32 计算机的控制器简介	152
6.2.3 TEC 和 TH-union 系列示例计算机的硬连线控制器	161
6.3 微程序控制器部件	176
6.3.1 微程序控制器的基本组成和运行原理	176
6.3.2 微程序设计中的下地址形成逻辑的硬件技术	179
6.3.3 TEC 和 TH-union 系列示例计算机的微程序控制器	182
6.4 指令流水线的概念和实现技术	194
6.4.1 流水线的基本概念和主要性能指标	195
6.4.2 指令流水线中的相关问题及其解决方案	204
6.4.3 在示例计算机中实现指令流水线的解决方案	206
6.4.4 MIPS 计算机中的指令流水线技术	209
6.4.5 指令级并行技术	210
6.4.6 向量处理机	214
本章内容小结	219
习题与思考题	220
 7 多级结构的存储器系统	 223
7.1 存储器系统概述	224
7.1.1 存储器分类	225
7.1.2 存储器系统的设计目标和解决思路	226
7.2 主存储器	228
7.2.1 主存储器概述	228
7.2.2 动态存储器芯片的存储原理和读写过程	230
7.2.3 静态存储器的存储原理和内部结构	233
7.2.4 主存储器实现与应用中的几项技术	234
7.2.5 TEC-2000 教学计算机内存存储器的组成与设计	236
7.3 外存储设备与磁盘阵列技术	241
7.3.1 外存储设备概述	241
7.3.2 磁盘设备与磁盘阵列技术	245
7.3.3 光盘设备与技术	253
7.4 高速缓冲存储器 cache	260
7.4.1 层次存储器系统的运行原理和必须遵从的原则	260

7.4.2 高速缓冲存储器 cache 的工作原理和组织	262
7.4.3 Pentium 机的 cache 管理	272
7.5 虚拟存储器	276
7.5.1 虚拟存储器的概念	276
7.5.2 段式虚拟存储器	278
7.5.3 页式虚拟存储器	278
7.5.4 Pentium 机的存储器管理	280
7.6 提高存储器系统性能的可行途径	284
本章内容小结	286
习题与思考题	287
8 计算机的总线与输入输出系统	290
8.1 计算机的总线	290
8.1.1 总线概述	290
8.1.2 总线结构和总线宽度	293
8.1.3 总线时钟	295
8.1.4 总线仲裁和总线操作	298
8.1.5 总线举例	301
8.2 输入输出设备	308
8.2.1 常用输入设备	309
8.2.2 常用输出设备	311
8.2.3 计算机终端	321
8.3 输入输出接口	322
8.3.1 输入输出接口的功能	322
8.3.2 通用可编程接口组成	322
8.3.3 输入输出接口举例	323
8.4 输入输出方式	327
8.4.1 程序直接控制方式	327
8.4.2 程序中断传送方式	328
8.4.3 直接存储器访问方式	331
8.4.4 I/O 通道控制方式	334
8.4.5 外围处理机方式	334
本章内容小结	334
习题与思考题	334

9 并行计算机体系结构	336
9.1 片内并行	337
9.1.1 指令级并行	337
9.1.2 片内多线程	338
9.1.3 单片多处理器	343
9.2 协处理器	344
9.3 共享内存的多处理器系统	345
9.3.1 多处理器与多计算机的比较	345
9.3.2 UMA 对称多处理器体系结构	348
9.3.3 NUMA 多处理器系统	352
9.3.4 COMA 多处理器系统	357
9.4 消息传递的多计算机系统	358
9.4.1 MPP——大规模并行处理器	359
9.4.2 集群计算	367
9.5 网格计算	371
本章内容小结	374
习题与思考题	374
 参考文献	 376

1

计算机系统概述

本章首先介绍计算机系统的基本组成及其层次结构,使读者从层次的角度初步认识完整的计算机硬件与软件的基本组成,重点介绍计算机硬件的5个功能部件的功能及其相互的连接关系。接下来初步讨论计算机系统主要的性能和技术指标。然后对计算机硬件子系统的三部分知识,即计算机的体系结构、计算机组成和计算机实现进行说明,指明它们之间的联系与区别,帮助读者把握学习本门课程的主脉络。最后介绍计算机的发展过程、计算机系统的分类和推广应用的状况。本章作为学习计算机组成原理的引导性的提纲,讲解了计算机系统中的某些基本概念和常用术语,希望读者能够从硬件和软件、整机和部件、知识和能力等多种对应关系的角度提高自己的学习质量。

1.1 计算机系统的基本组成和它的层次结构

这里说的计算机系统(computer system)是指电子数字通用计算机系统,其中的三个定语各自表明了计算机系统某一个方面的特性。“电子”一词表明使用电子线路(不同于机械、继电器等)来实现计算机硬件的关键逻辑功能;“数字”一词表明使用的电子线路是数字式电路(不同于模拟电路),运算和处理的数据是二进制的离散数据(不同于连续的电压或电流);“通用”一词表明计算机本身的功能多样(不是专用于某种特定功能),具有完成各种运算或事务处理的能力。

完整的计算机系统由硬件(hardware)和软件(software)两大部分(两类资源)组成。计算机的硬件系统是计算机系统中看得见、摸得着的物理设备,是一种高度复杂的由多种电子线路、精密机械装置等构成的,能自动并且高速地完成数据计算的装置或者工具。计算机的软件系统是计算机系统程序和相关数据,包括完成计算机资源管理、

方便用户使用的系统软件(厂家提供)和完成用户对数据的预期处理功能的用户软件(用户设计并自己使用)两大部分。硬软件二者相互依存,分工互动,缺一不可。硬件是计算机系统中保存与运行软件程序的物质基础,软件则是指挥硬件完成预期功能的智力部分。正如同一个健全和健康的人一样,必须同时具备物质性的肉体和精神性的智力与思维。

若进一步深入分析,还可以通过六个层次来认识计算机硬件和软件系统的组成关系,如图 1.1 所示。最下面的两层属于硬件内容,最上面的三层属于软件内容,中间的指令系统层连接硬件和软件两部分,与两部分都有密切关系。

从图 1.1 可以看出,计算机系统具有六层结构。不同层次之间的关系表现为如下。

处在上面的一层是在下一层的基础上实现而来的,它实现的功能更强大,也就是说,更接近人类解决问题的思维方式和处理问题的具体过程,对使用人员更方便。使用这一层提供的功能时,不必关心下一层的实现细节。

处在下面的一层是实现上一层的基础,更接近计算机硬件实现的细节,它实现的功能相对简单,人们使用这些功能更感到困难。在实现这一层的功能时,可能无法了解其上一层的最终目标和将要解决的问题,也不必理解其更下一层实现中的有关细节问题,只要使用下一层所提供的功能来完成本层次的功能处理即可。



图 1.1 计算机系统的层次结构

采用这种分层次的方法来分析和解决某些问题有利于简化处理问题的难度,在某一段时间、处理某一层中的问题时,只需集中精力解决当前最需要关心的核心问题即可,而不必牵扯各上下层中的其他问题。例如,在用高级语言设计程序时,无须深入了解汇编及其各低层的内容。

第 0 个层次是数字逻辑层,着重体现实现计算机硬件最重要的物质材料是电子线路,能够直接处理离散的数字信号。设计计算机硬件的基础知识就是数字逻辑和数字门电路,解决的基本问题包括:使用何种线路和如何存储信息,使用何种线路和如何传送信息,使用何种线路和如何运算与加工信息等方面。这一部分属于计算机组成原理预备性的知识。

第 1 个层次是微体系结构(micro architecture)层,也称其为计算机裸机。前面已经说过,计算机的核心功能是执行程序,程序是按一定规则和顺序组织起来的指令序列。这个层次着重体现的是,为了执行指令,需要在计算机中设置哪些功能部件(例如存储、运算、输入和输出、接口和总线等部件,还有更复杂一点的控制器部件),每个部件具体如何组成和怎样运行,这些部件如何实现相互连接并协同工作等方面的知识和技术。计算机硬件系统通常由运算器部件(数据通路)、控制器部件、存储器部件、输入设备、输出设备这