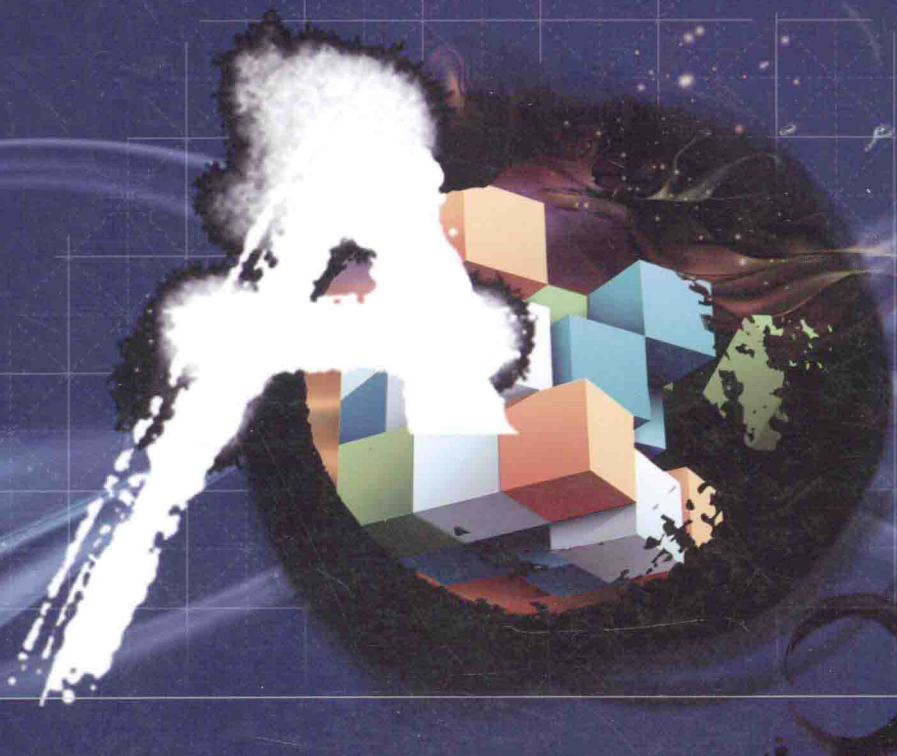




工业和信息化部“十二五”规划教材



高等学校规划教材

大学计算机组成原理教程

(第2版)

◎李东 柏军 主编 ◎张策 程丹松 张英涛 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

工业和信息化部“十二五”规划教材

高等学校规划教材

哈尔滨工业大学国家优秀教学团队教学成果

大学计算机组成原理 教 程 (第2版)

李 东 柏 军 主编

张 策 程丹松 张英涛 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书是工业和信息化部“十二五”规划教材,是哈尔滨工业大学国家级优秀教学团队的教学成果,全书共9章,内容包括绪论(含冯·诺依曼计算机模型、计算机的基本结构、计算机系统的分类和性能评价等),计算机中信息的表示与运算(含算术逻辑单元ALU),处理器,控制器,总线技术,存储系统(含Cache和虚拟存储器),8086/8088汇编语言程序设计,计算机外部设备,输入/输出接口(含中断系统)。图灵机模型、数制及其转换、相联存储器等内容以附录形式给出,涵盖了计算机组成与汇编程序设计的主要内容。本书的内容深度适宜,与技术发展保持同步;行文流畅,深入浅出,文理兼容。例题涵盖了从2009年到2013年五年的计算机专业硕士研究生入学全国统一考试全部试题的详尽解答,实用性强。并为任课老师免费提供教学课件等资源。

本书可作为计算机科学与技术、软件工程、物联网工程、信息与计算科学等理工科专业的“计算机组成原理”、“微机原理”、“计算机组成原理与汇编语言程序设计”等课程的教材,也可供准备参加计算机专业硕士研究生入学全国统一考试的考生和计算机/软件相关行业的工程技术人员以及其他自学者学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学计算机组成原理教程 / 李东, 柏军主编. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2014.12
高等学校规划教材

ISBN 978-7-121-24617-3

I. ①大… II. ①李… ②柏… III. ①计算机组成原理—高等学校—教材 IV. ①TP301

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第245313号

策划编辑: 袁 玺

责任编辑: 郝黎明 特约编辑: 张燕虹

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23 字数: 634千字

版 次: 2012年7月第1版

2014年12月第2版

印 次: 2014年12月第1次印刷

定 价: 42.00元

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

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

再 版 前 言

《大学计算机组成原理教程》自 2012 年 7 月出版以来,受到了广大读者,特别是高校教师 and 学生的广泛好评。国内几十所高校将其选为计算机科学与技术、软件工程、物联网工程、信息安全、网络工程、教育技术、信息管理与信息系统等专业必修课教材,产生了非常好的社会影响。本教材也因此入选“工业和信息化部‘十二五’规划教材”。

“计算机组成原理”的教学内容主要包括:电子计算机的发展历程,电子计算机的基本组成与工作原理,电子计算机的分类与性能评价,多核处理器;信息在计算机中的表示与运算方法,计算机指令与指令集, CISC 与 RISC, 处理器的基本组成,控制器的组成与工作原理,存储器与存储系统,总线系统,汇编语言程序设计,输入/输出系统, CPU 和主存储器的内部组成和工作原理,辅助存储器和外部设备(如键盘、鼠标、显示器、硬盘、光盘)等。

通过本书的学习,读者不仅可以了解和掌握电子计算机的工作原理以及汇编语言程序设计的基本方法,更重要的是,通过了解计算机科学与技术两方面的发展过程和内在规律,培养读者解决问题的能力、计算思维和创新意识。

本书内容新颖、全面,实用性强。其特点如下:

(1) **内容全面,深度适宜,与技术发展保持同步。**本书内容包括:电子计算机的发展历程,计算机的基本结构,计算机中信息的表示与运算,处理器,总线技术,存储系统,控制器,输入/输出接口与中断系统, 8086/8088 汇编语言程序设计,计算机外部设备。涵盖了计算机组成原理与汇编语言程序设计的全部内容,其中 Unicode 字符集、多核处理器和铁电存储器等都属于前沿的计算机技术。事实上,本书吸收了截至 2014 年 7 月的计算机技术的最新成果。

(2) **提高解决问题能力,培养工程素养、计算思维和创新意识。**本书对计算机的结构与组成技术进行了深入分析,引出“计算思维是指运用计算机科学的基础概念进行问题求解、系统设计及人类行为理解等涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动。计算思维的核心是抽象和自动化”的概念和“计算思维就在我们身边”的结论,从而帮助学生克服计算机的神秘感,透过现象看本质,把握计算机技术发展的规律,提高解决问题的能力,培养工程素养、计算思维和创新意识。

(3) **论述流畅,形式灵活,深入浅出。**本书倾注了作者 10 多年的教学经验,逐句逐字亲自撰写、反复修改而成。内容的展开符合学生的认知习惯,行文通俗易懂,技术主线明确,课程要求的核心内容、主要内容以正文的形式出现,一些非核心内容以课后习题的形式出现,让学生“在做中学”。

(4) **习题丰富,形式多样。**每章都提供了丰富的习题,题型有:简答题、填空题、选择题、

设计题。更有特色的是提供了学习型习题。读者可以通过阅读习题掌握新的知识，并应用这些知识独立解决问题。

(5) 内容实用性强。本书例题涵盖了从 2009 年到 2013 年的计算机专业硕士研究生入学全国统一考试全部试题。读者不仅可以从本书中得到对这些试题的详尽解答，而且可以根据不同章节试题或例题的多少来了解考试的重点和难点。

本次修订，根据读者的反馈意见和教育部考试中心颁布的《全国硕士研究生入学统一考试计算机科学与技术学科联考计算机学科专业基础综合考试大纲》，在第 1 版的基础上，进行了全面的修改，其中重点修订工作如下：① 在第 2 章的“算术逻辑单元 ALU”部分，增加了“串行加法器和并行加法器”以及“ALU 举例：SN74181 和 SN74182”；② 将第 2.5 节“字符的表示”改进为“字符与字符串”，增加了“字符串”的相关内容；③ 在第 8 章“计算机外部设备”中，细化了“磁盘阵列 RAID”的内容，增加了“U 盘和固态硬盘”的内容；④ 将“控制器”一章调整到“处理器”这一章的后边，使两章连接在一起，便于教与学的连续进行；⑤ 增加了“2013 年全国硕士研究生入学统一考试计算机科学与技术学科联考计算机学科专业基础综合考试试题”的解答与分析；⑥ 增加或重新绘制了许多插图，有针对性地增加了一些例题和习题。

本书由李东和柏军负责统稿，第 1~3 章和全部附录由李东编写，第 4 章由程丹松编写，第 5、6 章和第 9 章由柏军编写，第 7 章由张策编写，第 8 章由张英涛编写，何辉和石代锋参与了部分章节的编写。哈尔滨工业大学的史先俊、刘松波、宋颖慧、徐冰、黄庆成、王伟、吴锐、张宇、孙春奇、舒燕君等参与了书中例题和习题的编撰工作。吉帅、聂建宏、王文邦、郑钰、范晟铭、潘辉等协助完成了书中图、表的绘制以及书稿的校对工作。

东北林业大学的赵更寅老师为本书的再版特地提供了书面改进意见，在此深表感谢！

在本书编写过程中，得到了哈工大软件学院和计算机学院的领导、同事的大力帮助和积极鼓励。哈工大计算机学院刘宏伟副院长、哈工大（威海）计算机学院季振洲副院长和李斌教授对本书的编写给予了大力支持，在此深表感谢！

本书的授课学时建议为 48 学时，并为任课老师免费提供教学课件，免费注册下载地址是华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn>。

本书有大量的算法语句、程序语句及计算公式，对于其中的变量，为了方便读者阅读，避免歧义，不再区分正、斜体，而是统一采用正体，特此说明。

由于编者水平有限，书中疏漏和错误在所难免，恳请读者批评指正。读者有反馈意见或同行教师有教学心得与体会交流，欢迎联系我们：Lee@hit.edu.cn。

编者
于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机的发展历程	1
1.2 冯·诺依曼计算机模型	6
1.3 计算机的组成结构	8
1.3.1 计算机的基本组成	8
1.3.2 计算机体系结构、计算机组成与计算机实现	10
1.3.3 计算机系统的层次结构	13
1.4 计算机系统的分类	16
1.4.1 综述	16
1.4.2 弗林分类法	16
1.5 计算机的性能评价指标	18
1.6 微处理器与微型计算机	23
1.6.1 微处理器与微型计算机的产生与发展	23
1.6.2 多核微处理器	25
1.7 中国计算机事业的发展历程	28
1.8 计算机的特点及应用	31
1.8.1 计算机的特点	31
1.8.2 计算机的应用	32
1.9 计算机的发展	35
1.9.1 计算机发展的动力	35
1.9.2 计算机的发展趋势	37
习题 1	38
第 2 章 计算机中信息的表示与运算	45
2.1 数据的表示	45
2.1.1 定点数的表示	45
2.1.2 浮点数的表示	48
2.2 定点数的运算	54
2.2.1 逻辑运算	54
2.2.2 移位运算	55
2.2.3 加法与减法运算	57
2.2.4 乘法运算	61
2.2.5 除法运算	67
2.2.6 算术逻辑单元 ALU	71
2.3 浮点数的运算	75
2.3.1 浮点数加、减运算	75
2.3.2 浮点数乘、除运算	78
2.4 面向错误检测与纠错的数据编码	78

2.5 字符与字符串	83
2.6 面向存储与传输的数据编码	88
习题 2	90
第 3 章 处理器	93
3.1 处理器的指令集	93
3.1.1 概述	93
3.1.2 指令的操作码与操作数	94
3.1.3 寻址方式	95
3.1.4 指令的基本功能与指令集设计	99
3.1.5 指令的格式	104
3.1.6 面向多媒体处理的增强指令	107
3.2 处理器的组成与工作过程	109
3.2.1 处理器的基本功能和基本组成	109
3.2.2 计算机的工作过程	113
3.2.3 采用流水线技术的处理器	114
3.3 从 CISC 到 RISC	120
3.3.1 RISC 产生的背景	120
3.3.2 RISC 的定义	122
3.3.3 指令级并行 ILP 技术	123
3.4 Intel 80x86 系列微处理器	131
3.4.1 Intel 8086/8088 微处理器	131
3.4.2 Intel 80286、80386 和 80486 微处理器	139
3.4.3 Intel Pentium 系列微处理器	142
3.5 ARM 系列微处理器	145
3.5.1 概述	145
3.5.2 ARM 微处理器的模式、工作状态和寄存器组成	146
3.5.3 ARM 微处理器的存储器组成和寻址方式	149
3.5.4 ARM 微处理器的指令集	152
习题 3	158
第 4 章 控制器	160
4.1 控制器概述	160
4.2 硬布线控制器	166
4.3 微程序控制器	168
习题 4	174
第 5 章 总线技术	175
5.1 概述	175
5.2 总线的设计与实现	178
5.3 总线控制	180
5.3.1 总线仲裁	180
5.3.2 总线通信控制	185
5.4 总线的性能指标	188

5.5 总线标准	190
5.5.1 微型计算机系统总线标准	190
5.5.2 微型计算机局部总线标准	193
5.5.3 I/O 总线标准举例	195
习题 5	197
第 6 章 存储系统	199
6.1 存储器的分类与性能评价	199
6.1.1 存储器的分类	199
6.1.2 存储器的性能评价	200
6.2 存储器访问的局部性原理与层次结构的存储系统	200
6.2.1 存储器访问的局部性原理	200
6.2.2 层次结构的存储系统	201
6.3 半导体存储器	202
6.3.1 随机访问半导体存储器 RAM	203
6.3.2 只读存储器 ROM	210
6.4 主存储器	213
6.4.1 主存储器组成	213
6.4.2 提高主存储器访问带宽的方法	216
6.4.3 奔腾微机主存储器组成	219
6.4.4 存储芯片的发展	220
6.5 高速缓冲存储器 Cache	223
6.5.1 Cache 的工作原理	223
6.5.2 地址映像与变换	226
6.5.3 替换算法	233
6.5.4 写入策略	234
6.5.5 两级 Cache 与分裂型 Cache	236
6.5.6 Cache 的性能评价	236
6.6 虚拟存储器	239
6.6.1 多道程序下的内存管理	239
6.6.2 段式存储管理	242
6.6.3 页式存储管理	243
6.6.4 页式虚拟存储器	244
习题 6	252
第 7 章 8086/8088 汇编语言程序设计	255
7.1 引言	255
7.2 顺序程序设计	260
7.3 分支结构程序设计	272
7.4 循环结构程序设计	276
7.5 字符串操作程序设计	283
7.6 宏、条件汇编与重复汇编	286
7.7 子程序设计	293
7.8 8086/8088 微处理器的其他指令与应用	300

习题 7	305
第 8 章 计算机外部设备	308
8.1 输入设备	308
8.1.1 键盘	308
8.1.2 鼠标	310
8.2 输出设备	311
8.2.1 阴极射线管显示器	311
8.2.2 平板显示器	316
8.2.3 打印机	317
8.3 辅存设备	319
8.3.1 硬盘	319
8.3.2 光盘	322
8.3.3 U 盘和固态硬盘	323
习题 8	324
第 9 章 输入/输出接口	326
9.1 I/O 技术的发展	326
9.2 I/O 接口的组成与工作原理	328
9.3 中断系统	332
9.3.1 中断的处理过程	332
9.3.2 中断屏蔽	336
9.3.3 中断控制器 8259A	338
9.3.4 8086/8088 微处理器的中断系统	340
9.4 DMA 技术	341
9.5 通道技术	344
习题 9	346
附录 A 图灵机模型	347
附录 B 历年图灵奖获得者	348
附录 C 数制及其转换	351
附录 D EBCDIC 码	354
附录 E 8086/8088 指令格式	355
附录 F 相联存储器	357
参考文献	359

第1章 绪 论

计算思维 (Computational Thinking) 是指运用计算机科学的基础概念进行问题求解、系统设计及人类行为理解等涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动。计算思维的核心是抽象 (Abstraction) 和自动化 (Automation)。其中,“抽象”是指用符号 (例如数字) 来表示客观事物,“自动化”是指让计算机解决问题而不需要人的干预。

——周以真 (Jeannette M. Wing) 教授,美国卡内基·梅隆大学

1.1 计算机的发展历程

利用工具来放大大脑力和体力是人类具有智慧的象征,也是人类不懈追求的目标。如果说机械的发明是扩展了人手的功能,交通工具的使用是扩大了人腿的功能,望远镜和显微镜极大地开阔了人们的视野,那么计算工具的发明与利用就是扩展和提高了人脑的功能。

在电子计算机出现以前,人类就曾发明和使用了许多辅助计算工具。例如在远古时期,人们用石头、木棒、刻痕或结绳来延长自己的记忆。在公元前 7 世纪,算筹开始用于辅助计算。公元 8 世纪,我们的祖先又发明了算盘,并提出了基于算盘的珠算。

算盘及珠算的发明是人类计算工具史上的一大飞跃,它的科学性和实用性经受住了长期实践的考验。时至今日,珠算仍在被使用,这是中华民族对人类文明的一大贡献。15 世纪后,算盘及珠算传至日本,并影响欧洲,激励了各国对计算工具的研究。

在电子计算器或电子计算机普及之前,计算尺也是工程技术人员广泛使用的一种计算工具。计算尺是在木质的尺子形状的材料上,印上各种刻度和数字标记,通过拉动中间可移动的部分,找出不同位置上刻度 (数字标记) 的对应关系,来完成一次计算过程。

在 1642 年,年仅 19 岁的法国科学家帕斯卡 (Blaise Pascal, 1623—1662 年) 发明了第一台机械计算器 *Pascaline*。这台手摇转动的齿轮进位式计算机是帕斯卡为他担任税收官员的父亲设计的,能够完成 6 位数字的加减法运算。*Pascaline* 的最大贡献就是解决了自动进位这个关键问题,体现了计算思维的核心概念——自动化。

德国科学家莱布尼茨 (Baron Gottfried Wilhelm von Leibnitz, 1646—1716 年) 对 *Pascaline* 进行了改进,于 1673 年研制出具有加、减、乘、除功能的手摇式机械计算器,并提出了“可以用机械代替人进行烦琐重复的计算工作”这一重要思想。遗憾的是,由于当时技术水平的限制,还不能提供大量廉价而精密的机械零件,使得两个世纪后才出现商品化的手摇计算机。

上述计算工具的特点是:机器要由人按照一定的步骤来操作,每一步运算都要由操作者供给操作数,决定进行什么样的操作并安排计算结果。人们常说的“算盘珠子不拨不动”就是这类计算工具的生动写照。计算工程中频繁的人工干预极大地限制了计算速度的提高,并将人束缚于机器之上。人们期待着一种能够实现自动运算的计算工具,将人从计算过程中解放出来。

最早研究自动计算工具的科学家是英国剑桥大学教授巴贝奇 (Charles Babbage, 1792—1871 年)。1822 年,他首先设计制造出“差分机 (Difference Engine)”。 “差分机”是为计算航

海数据表而设计的，只能运行一个算法，即用多项式计算有限差分。有趣的是它的数据输出方法是用钢锥将结果刻在铜板上，这可以看作一次性写存储介质（如穿孔卡片和光盘）的雏形。

虽然“差分机”运行得很好，但巴贝奇还是对它只能完成一种算法很不满意。1833年，巴贝奇开始了研制“差分机”的更新换代产品，并将其命名为“分析机（Analytical Engine）”。按照巴贝奇的设计，“分析机”由“存储部分”、“计算部分”、“输入与控制部分”和“输出部分”4部分组成。“存储部分”为1000排、每排50个的齿轮阵列。用这些齿轮的不同位置来表示不同十进制数的数据。

当时用于提花机上编织复杂图案的穿孔卡片略加修改后被用来向“分析机”输入计算步骤和数据。巴贝奇的这个妙想就属于计算思维的核心概念——抽象。

“分析机”设计蓝图的最大亮点是，将自动计算装置在组成上划分成存储部件、计算部件、输入部件（卡片穿孔设备）、控制部件（穿孔卡片及其阅读设备）、输出部件。

“分析机”的另一个亮点是通用性——从穿孔卡片上读取指令，依据指令进行运算。这样人们就可以通过在穿孔卡片上编制不同的指令来在同一台计算机上完成不同的运算。

尽管由于种种原因，“分析机”没有能够最终研制出来，但它奠定了现代计算机的基本组成结构和主要功能。因此，巴贝奇被誉为“计算机之父”。

1854年，英国数学家布尔（George Boole）出版了《布尔代数》，为计算机采用二进制来进行信息的表示与运算奠定了理论基础。19世纪末20世纪初，一批基于上述研究成果的手摇计算机、电动计算机和卡片式计算机被相继发明出来，如美国国际商业机器 IBM（International Business Machine）公司推出的“插销继电器计算机”。这些辅助计算工具，为人们解决烦琐的数据处理问题提供了很大的帮助。

但是，这些辅助计算工具还是存在诸多不足，难以满足科技发展对计算能力的需求。

第一，它们的计算速度慢，只有大约3000次运算/小时。例如，要准确预报24小时的天气情况，大约需要200多万次的运算。若使用上述辅助计算工具，要费时5个多月，这就失去预报的意义了。在地球物理勘探中，测量数据的处理往往需要上亿次的计算，上述辅助计算工具更是无法胜任。

第二，运行可靠性差，容易出现计算错误。这是因为在使用这些辅助计算工具时，操作者要参与整个计算过程，人的主观因素直接影响了计算的正确性。

第三，这些辅助计算工具只具有计算功能，而人们在生产实践、科学研究和社会生活中大量需要的是机械控制、信息处理等工作，上述辅助计算工具在这些任务面前就无能为力了。

1937年，致力于研究数学机械化的英国数学家图灵（Alan Mathison Turing，1912—1954年）在《关于可计算的数及其对判定问题的应用》学术论文中提出了一个被后人称为“图灵机（Turing Machine）”的计算模型（参见附录A），这就是现代计算机的理论模型。

鉴于图灵对计算科学的杰出贡献，美国计算机协会（Associative of Computing Machine，ACM）于1966年设立了“图灵奖（A.M. Turing Award）”，以纪念这位杰出的科学巨匠。至今已有50多位科学家荣获了“图灵奖”，这些获奖者的工作代表了计算科学在各个时期最重要的成果，影响着计算科学发展的方向（参见附录B）。第一位华裔“图灵奖”获得者是美国普林斯顿大学的姚期智（Andrew Chi-Chih Yao）博士，他荣获了2000年度的“图灵奖”。

1938年，德国大学生朱斯（Konrad Zuse）成功地制造出第一台二进制计算机Z-1。此后，他又继续研制Z系列计算机，其中Z-3型计算机是世界上第一台通用程序控制机电式计算机，

它的开关元件为继电器,采用浮点计数法和带数字存储地址的指令形式。

1944年,美国哈佛大学的研究生艾肯(H. Aiken)成功地研制了一台机电式计算机 Mark-I。

至此,计算机走过两条技术道路:一条是机械式(Mechanical),另一条是机电式(Electro-mechanical)。后来,电子(Electrical)计算机都从这两条道路上汲取了很多思想。

1946年2月14日,世界上第一台通用电子计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) 诞生了。这是人类文明史上的一个重要里程碑。从此,电子计算机把人类从繁重的脑力计算和烦琐的数据处理工作中解放出来,使人们能够将更多的时间和精力投入到具有创造性的工作中去。电子计算机的发明是20世纪最杰出的科学成就之一。

从第一台电子计算机的诞生算起,至今仅60多年的时间,但是就在这短短的60多年的时间里,电子计算机得到了迅速的发展和普及。目前,电子计算机已经深入到我们社会生活的每一个角落,它不仅改变了人类工作和学习的方式,而且还改变着人类的观念和思维。

电子计算机的发展经历了四代,目前正在向着第五代计算机发展。

(1) 第一代电子计算机(1946—1958年)是电子管(Vacuum Tube)计算机。它的特征是采用电子管作为逻辑元件,能够处理的数据类型只有定点数,用机器语言或汇编语言来编制程序。第一代电子计算机的应用仅仅局限于科学计算。

第一台电子计算机 ENIAC 是由美国宾夕法尼亚大学莫尔学院的物理教授莫克利(J. W. Mauchley)和工程师埃克特(J. P. Eckert)领导的科研小组研制成功的。它使用了约18800只电子管和1500个继电器,几十万枚电阻和电容,体积为 460m^3 ,自重30t,功耗为140kW,占地面积约为 170m^2 。计算速度约5000次加减运算/秒。然而,ENIAC在1946年2月正式试算时就创造了奇迹:用短于炮弹实际飞行的时间,求出了16英寸海军炮的弹道。

1946年,莫克利和埃克特开始研究“离散变量自动电子计算机 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)”,但是最终没有研制出来。与此同时,ENIAC项目的顾问、美籍匈牙利科学家冯·诺依曼(von Neumann)与他的同事在普林斯顿大学高等研究院 IAS (Institute of Advanced Study) 设计他们自己的 EDVAC (IAS 机)。为了实现自动连续地工作,冯·诺依曼在 IAS 机的设计中提出了“存储程序(Stored Program)”的思想。这个设计思想对后来计算机的发展产生了深远的影响。后人称采用该机结构的计算机为“冯·诺依曼计算机”,目前绝大多数电子计算机都是“冯·诺依曼计算机”。因此,冯·诺依曼被誉为“现代计算机之父”。

1946年,莫克利和埃克特离开莫尔学院,创办了电子控制公司 ECC(Electric Control Corp.),这是世界上第一家计算机公司。1947年,ECC 开始研制 UNIVAC-I (UNIVersal Automatic Computer-I) 计算机。这台计算机首次采用磁带(Magnetic Tape)作为外存储器,采用奇偶校验和双重运算线路来提高系统可靠性。但是,UNIVAC-I 的重要意义更在于它是第一款批量生产的计算机,是计算机产业的起点。UNIVAC-I 当时的售价为25万美元,共生产了48套系统。从此,计算机的研究不再只是学术机构的技术行为,产业和市场的需求越来越成为计算机技术发展的主要动力。

1954年,第一个高级程序设计语言 Fortran 问世了。Fortran 语言的问世一举奠定了高级程序设计语言在程序设计中的地位,并成为世界上应用最广泛、最有生命力的高级程序设计语言。Fortran 语言的设计者巴克斯(John Backus)也因此荣获了1977年度的图灵奖。

(2) 第二代电子计算机(1958—1965年)是晶体管(Transistor)计算机。它的特征是采用晶

体管代替电子管作为逻辑元件;用磁芯(Magnetic Core)作为主存储器;采用磁带、磁鼓(Magnetic Drums)、纸带(Paper Tape)、卡片穿孔机和阅读机(Card Punch and Readers)作为输入/输出设备;在软件方面有了很大的发展,相继出现了Algol、COBOL等一系列高级程序设计语言。其中,Algol 60 语言的诞生更是标志着对计算机程序设计语言的研究正式成为一门专门的学科,它的设计者诺尔(Peter Naur)荣获了 2005 年度的“图灵奖”。

为了提高计算机系统的利用率、吞吐率,人们开发了管理程序(Monitor)和批处理系统(Batch System),这就是操作系统(Operating System, OS)的雏形。

除了科学计算之外,第二代电子计算机开始应用于数据处理和工业过程控制。

在第二代电子计算机中,代表性的机器有 IBM 公司生产的 36 位计算机 IBM 7094 和美国数字设备公司 DEC(Digital Equipment Company)生产的 18 位计算机 PDP-1。与第一代电子计算机相比,第二代电子计算机具有体积小、重量轻、耗电低、可靠性高等优点,计算速度可达几万到几十万次运算/秒。

(3) 第三代电子计算机(1965—1970 年)是集成电路(Integrated Circuits, IC)计算机。它的特征是采用集成电路代替分立的晶体管元件;半导体存储器逐渐取代磁芯存储器;控制单元设计开始采用微程序控制技术。在软件方面,操作系统日益成熟和功能逐渐强化,也是第三代电子计算机一个显著的特点。多道程序、并行处理、多处理机、虚拟存储器(Virtual Memory)、系列计算机(Family of Computers)以及图形用户界面 GUI(Graphical User Interface)等技术的提出,大大推动了计算机科学与技术的发展。

具有代表性的第三代计算机有 IBM 公司的大型计算机(Mainframe) System 360 系列,美国控制数据公司 CDC(Control Data Corporation)的超级计算机(Supercomputer) CDC-6600、CDC-6700。它们的计算速度可达几百万次每秒,甚至几千万次每秒。

20 世纪 60 年代中期,计算机技术出现了一个引人注目的新方向——低成本的小型计算机(Mini-Computer)。当 32 位计算机大行其道时,美国 DEC 公司推出了比 PDP-1 更便宜的 8 位的小型计算机 PDP-8。出人意料地是,这款计算机在市场上深受欢迎。其后,DEC 公司又推出了 16 位的小型计算机 PDP-11。从此,小型计算机以其成本低廉、适用面广、性能价格比高,成为计算机市场的重要角色。

(4) 第四代电子计算机(1971 年以后)的特征是采用大规模集成电路和半导体存储器,UNIX 操作系统逐渐成为主流。在这一时代,计算机的性能有了快速提高,由美国人西蒙·克雷(Seymour Cray)创办的克雷(CRAY)公司于 1976 年推出了世界上首台计算速度超过 1 亿次/秒的超级计算机 Cray-1。

第四代计算机的另外一个重要代表是微处理器(Microprocessor)与微型计算机(Microcomputer)/个人计算机 PC(Personal Computer),它们推动了电子计算机的普及。

第三代以后的电子计算机从本质上使用的都是集成电路,只不过是集成度越来越高,所以有人就将集成电路的集成度作为划分第三代以后电子计算机代次的依据。把由集成度为 1~10 个等效逻辑门的小规模集成电路 SSI(Small Scale Integration)和集成度为 10~100 个等效逻辑门的中规模集成电路 MSI(Medium Scale Integration)构成的电子计算机称为第三代电子计算机;把由集成度为 100~10000 个等效逻辑门的大规模集成电路 LSI(Large Scale Integration)和集成度为 10000 个以上等效逻辑门的超大规模集成电路 VLSI(Very Large Scale Integration)构成的电子计算机称为第四代电子计算机。

(5) 那么,什么是第五代电子计算机呢?

沿用按集成度划分的思路,有人提出在超大规模集成电路 VLSI 量纲中,进一步将由集成度为 1 万~100 万个等效逻辑门的超大规模集成电路 VLSI 构成的电子计算机称为第四代电子计算机;将集成度为 100 万~1 亿个等效逻辑门的集成电路定义为巨大规模集成电路 ULSI (Ultra Large Scale Integration),称基于 ULSI 的电子计算机为第五代电子计算机。

但是这种“第五代电子计算机”的定义并没有得到广泛的认同,更多的人认为第五代电子计算机应该是具有广泛知识、能推理、会学习的智能计算机。理想的智能计算机拥有由各种类型专家系统组成的知识库,具有理解、联想、推理、学习、判断和决策的能力。智能计算机能够理解人类的自然语言,能直接接收语言、文字、图形或图像等输入信息,在经过相应处理后,利用知识库中的知识和规则进行推理,从而使问题得到解决。在解决问题的同时,智能计算机的知识库也将自动更新或补充。

人类一直在努力地进行对自身智能的研究。1949 年,美国科学家维纳(N. Wiener)采用开关网络来模拟动物神经系统。20 世纪 80 年代,该思想发展成为所谓的“神经网络计算机”。但是这种计算机与人的大脑毫无相似之处,所以它只是在有限的应用领域(例如非程序化和自适应的数据处理)收到了一些效果。美国科学家西蒙(Herbert A. Simon)在 20 世纪 50 年代提出了“物理符号系统假说 PSSH (Physics Symbol System Hypothesis)”:人的大脑是一个物理符号系统,计算机也是一个物理符号系统,所以可以用计算机来模拟人的大脑。按照 PSSH,人们研制出了棋艺水平接近国际大师的国际象棋机器人,例如 1998 年由 IBM 公司研制的“深蓝(Deep Blue)”就战胜了国际象棋世界冠军卡斯帕罗夫。但是“深蓝”的智能仍然是有限的,它与人类的较量还是负多胜少,它的胜利主要得益于计算机处理能力的提高。

IBM 公司研制“深蓝”的团队是由出生于中国台湾省的许峰雄博士领导的,许博士也因此被誉为“深蓝之父”。

日本曾于 20 世纪 80 年代初提出了一个“第五代计算机系统 FGCS (Fifth Generation Computer System)”计划,并于 1982 年 4 月成立了“新一代计算机技术研究所(Institute for New Generation Computer Technology)”。该研究所当时制订了一个为期 10 年(1982—1991 年)的“智能计算机研究计划”,但是该计划并没有取得预期的成果。

在 1992 年,日本又提出了一个“RWC (Real World Computing)”计划,后来还研制出当时世界上计算速度最快的计算机——地球模拟器(Earth Simulator)。美国自然也不会甘居人后,也提出了对“更新一代计算机”的研究设想。所谓“更新一代计算机”将不再只是采用传统的电子器件,而是更多地采用光电子器件、超导器件、生物电子器件、量子器件。

2011 年 2 月 16 日,IBM 公司推出的人工智能计算机“华生(Watson)”在美国著名的益智节目“Jeopardy (危险边缘)!”中,战胜了两位前冠军参赛者,以绝对优势赢得了历史上第一次人机智力问答比赛的胜利,这标志着智能计算机达到了一个新的水平。

在长达 4 年的研发过程中,共有来自 IBM 美国研究院、中国研究院、日本研究院、以色列研究院的 30 位研究员参与了“华生”的研发。

在第五代计算机的研究中,中国也应该占有一席之地,有志于计算机事业的中国青年,应该积极投身到这一领域中去。

1.2 冯·诺依曼计算机模型

在 ENIAC 设计与研制的过程中，他们的设计者曾向冯·诺依曼进行过咨询。ENIAC 投入使用后，冯·诺依曼曾亲自到现场参观，对 ENIAC 表现出强烈的兴趣。在对 ENIAC 存在的不足（ENIAC 是专用计算机，它的功能是由电路连线来决定的，改变功能需要人为地改变电路连线）进行深入思考的基础上，冯·诺依曼等人于 1946 年 6 月发表了一篇旨在构建一台通用计算机的技术报告《关于电子计算装置逻辑结构初探》。这份报告提出了基于“存储程序”控制的 EDVAC 的设计方案。

“存储程序”的思想是：计算机的用途和硬件完全分离。硬件采用固定性逻辑，提供某些固定不变的功能。通过编制不同的程序（Program）来满足不同用户对计算机的应用需求。

依照这个思想，在计算机上求解一个问题，需要将求解该问题的过程分解成一系列简单、有序的计算步骤，一个步骤由计算机提供的一条计算机指令（Instruction）完成。然后将这些有序的计算步骤——对应计算机能够识别并可执行的指令——汇总在一起，就形成所谓的程序，并存储在计算机中。计算机通过逐条、顺序执行程序中的指令来完成问题的求解。“存储程序”思想体现了计算思维的核心概念——自动化。

根据《关于电子计算装置逻辑结构初探》设计的“冯·诺依曼计算机”的特点如下。

（1）具备五大功能：数据存储、操作判断与控制、数据处理、数据输入与输出。对应五个功能部件：存储器（Memory）、控制单元 CU（Control Unit）、算术逻辑运算单元 ALU（Arithmetic Logic Unit）、输入单元（Input Unit）和输出单元（Output Unit），如图 1-1 所示。图中，有两股信息在流动。一股是控制流（操作命令），它从 CU 发出，分散流向各部件；另一股是数据流（包括指令和地址），它在 CU 的控制下，从一个部件流到另一个部件。

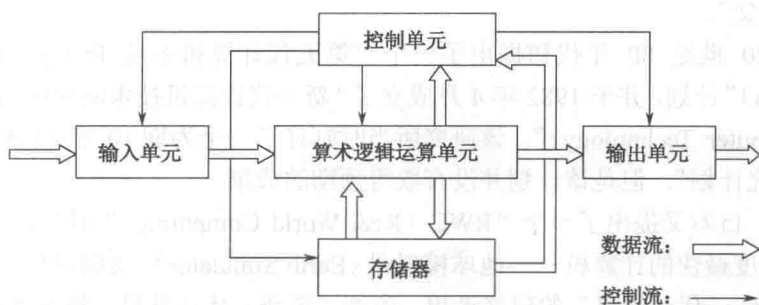


图 1-1 冯·诺依曼计算机结构

（2）存储器由一组一维排列、线性编址的存储单元组成，每个存储单元的位数是相等且固定的，存储单元按地址访问。这是最简单、最易于实现的信息存储与查找方案，就如同一排平房，房间大小都是一样的，按照房间号查找房间，房间号逐间递增。

（3）“程序”由一条一条的指令有序排列而成，而指令由操作码和地址码两部分组成。操作码规定了该指令的操作类型（功能），地址码指示存储操作数和运算结果的存储单元地址。操作数的数据类型由操作码来规定，操作数可能是定点数、浮点数、双精度浮点数、十进制数、逻辑数、字符或字符串等。

（4）指令和数据均采用二进制表示，并以二进制形式进行运算。二进制的计算规则是最简

单的, 加法仅有 4 种: $0+0=0$, $0+1=1$, $1+0=1$, $1+1=10$ 。

把纷繁复杂的信息抽象成 0/1, 这是计算机的根, 是计算机的哲学, 是计算思维的核心概念“抽象”的具体体现——信息符号化, 符号数字化。

(5) 为了简化计算机的控制与组成, 程序(指令)与数据是同等地、不加区分地存储在同一个存储器中。但可以从时间和空间上, 将它们区分开。在取指周期, 从存储器流向控制器的是指令; 在执行周期, 存储器与运算器交换的是数据。

(6) 为了实现“逐条、顺序执行程序中指令”, 冯·诺依曼提出了一个极易实现的解决方案: 设置一个“程序计数器 PC (Program Counter)”来指示下一条将要执行的指令的地址。在一般情况下, 每执行完一条指令, PC 就自动加 1, 指向下一条指令的存储单元。

当然, 为了赋予计算机更多的“灵性”, PC 的值也可以通过执行特殊的指令来修改, 从而达到改变指令执行顺序的目的。这样, 执行指令的顺序就不受限于指令存储的顺序了。

不过, 尽管冯·诺依曼非常聪明, 冯·诺依曼计算机的结构还是存在一些问题, 后来人们对它进行了改进和发展。

例如, 由于以 ALU (算术逻辑运算单元) 为中心, 输入/输出单元与存储器之间的数据传送都要经由 ALU, 这使得 ALU 无法专注于运算, 低速的输入/输出和高速的运算不得不相互等待, 串行工作。因此, 很快“冯·诺依曼计算机”就被改进成以存储器为中心(如图 1-2 所示)。这样, 输入/输出设备就可以与运算器并行工作, 输入设备也可与输出设备并行工作, 提高了设备的效率和利用率。同时这使得计算机五个功能单元的互连更加简单。

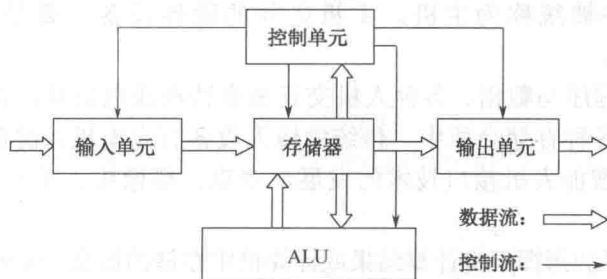


图 1-2 现代冯·诺依曼计算机结构图

时至今日, 冯·诺依曼计算机结构经历近 70 年, 依然占据统治地位。这是为什么呢?

说到底, 冯·诺依曼的最大贡献就是确定了计算机五个部件的互连结构。在考虑到 ALU 既需要从存储器中读取数据又需要将运算结果写回到存储器, 请读者自行设计一个计算机五个部件的互连结构。看看能否比图 1-2 更简单。

抽象地看, “冯·诺依曼计算机结构”就是“以一个部件为中心, 实现五个部件互连的星形结构”。这样实现的“五个部件互连”是最简单的、连接链路是最少的。由于外围的四个部件只能与中心部件进行数据通信, 而且有些数据通路还是单向的, 所以冯·诺依曼计算机所需要的数据传送功能也是最少的、最简单的。

综上所述, “冯·诺依曼计算机”可以概括为: 用最简单、最易于实现的思想(二进制及其运算规则)来表示数据并实现运算, 用最简单的互连结构来组成一台计算机。

这不仅体现了计算思维, 还很好地体现了“简单就是美”的工程哲学理念!

1.3 计算机的组成结构

1.3.1 计算机的基本组成

1. 概述

从组成的角度看，计算机由 CU、ALU、存储器、输入单元和输出单元组成。在具体实现时，通常将 CU 和 ALU 集成在一起，构成“处理单元 PU (Processing Unit)”。处理单元也被称为“处理器 (Processor)”。

一台计算机通常只拥有一个 PU，而这个 PU 又是计算机的核心部件，所以这样的处理单元又称为“中央处理单元或中央处理器 CPU (Central Processing Unit)”。事实上，一台计算机可以拥有多个 PU，这样的计算机称为“并行计算机 (Parallel Computer)”或“高性能计算机 (High Performance Computer)”。追求更高的计算性能，是科学研究的永恒主题。

2. 硬件 (Hardware)

从功能的实现载体看，计算机由硬件和软件 (Software) 两部分组成。

硬件指的是构成计算机的物理实体，例如处理器、存储器、输入/输出控制器等芯片及其集成这些芯片的印制电路板——主板 (Mainboard)。其中，主板上的存储器是可以被处理器直接访问的，被称为“主存储器 (Main Memory，简称主存)”。其他硬件还包括软盘驱动器、硬盘驱动器、光盘驱动器及连接它们的线缆。上述硬件一般都安装在一个机箱内部的机架上，这个机箱及其中的硬件被统称为主机。主机之外的硬件设备主要是各种输入/输出设备 (Input/Output Devices)。

输入设备用以将程序与数据、各种人机交互命令转换成电信号，并在控制器的指挥下，按一定的地址存储在各种存储介质中。传统的输入设备有光电机、键盘、鼠标、触摸屏等。近年来，随着声图文智能人机接口技术的发展，麦克、摄像头、手写板逐渐成为受人欢迎的输入设备。

输出设备在控制器的指挥下将计算结果或计算机中存储的信息，转换成人们能够识别的形式呈现给用户。常见的输出设备有显示器、打印机、绘图仪、音箱等。

计算机系统中还有一个重要的硬件就是辅助存储器 (Secondary Memory，简称辅存)。

辅存是计算机系统不可或缺的存储介质。在计算机系统关机（或断电）后，存储在主存储器中的信息将消失。这样的存储器被称为“易失性存储器 (Volatile Memory)”。所以需要长久保存的程序和数据必须存储在“非易失的存储器 (Non-volatile Memory)”——辅存里。

常见的辅存有：硬盘 (Hard Disk, HD)、软盘 (Floppy Disk, FD)、光盘 (Optical Disk Memory, ODM)、磁带等。辅存的容量比主存的容量要大得多，每位的平均价格也要低得多，但是它的访问速度却明显慢于主存。所以，为了保证速度很快的处理器有较高的工作效率，计算机的设计者规定处理器只与速度较快的主存交换信息，而不直接访问辅存，辅存中的信息要装入到主存后才能供处理器使用。

由于辅存位于机箱外部，故又称为“外存 (External Memory)”。相应地，位于机箱内部的主存也称为“内存 (Internal Memory)”。

在有些场合，除主板及其上芯片之外的硬件器件称为外部设备（简称外设）。外设包括：输入设备、输出设备、辅存。