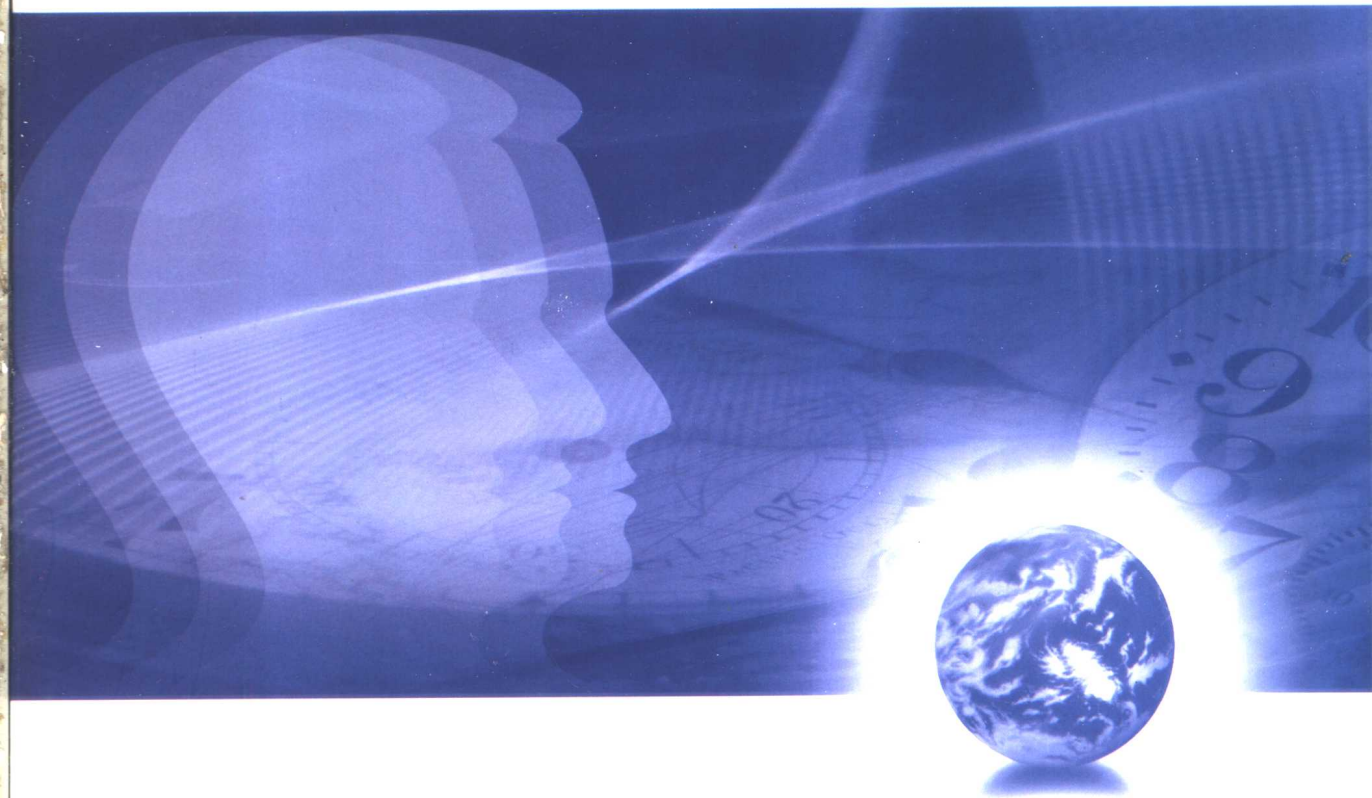




高等院校计算机科学与技术
“十五”规划教材

计算机组成与结构



刘卫东

等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等院校计算机科学与技术“十五”规划教材

计算机组成与结构

刘卫东 等编著



机械工业出版社

“计算机组成与结构”课程是计算机专业的核心课程之一，在课程体系中占有重要的位置。本书讲述计算机各组成部件的功能和实现原理。全书分6章，讨论了 Von Neumann 结构计算机各部件的组成和实现原理，包括运算器、控制器、存储器、输入/输出设备等，并系统地介绍了这些部件是如何协同工作，共同完成计算机功能的。

本书可作为理工科“计算机组成与结构”课程的教材，也可供从事计算机专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机组成与结构/刘卫东等编著. —北京: 机械工业出版社, 2003.8
高等院校计算机科学与技术“十五”规划教材
ISBN 7-111-12994-6

I. 计... II. 刘... 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 (2003) 第 076865 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策 划: 胡毓坚

责任编辑: 时 静

责任印制: 路 琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1 092mm $\frac{1}{16}$ ·12.5 印张·309 千字

0 001—5 000 册

定价: 18.00 元

凡购本图书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话: (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

出版说明

信息技术高度普及的今天,具备一定层次的信息技术素养成为社会素质教育的一个重要目标,由此对高等院校的计算机专业教育提出了更高更新的要求。教育水平提高的关键是教学质量,那么对教学质量有直接影响的教材建设就成为了计算机专业教育的根本,为重中之重。

适逢高等院校计算机专业教育改革的关键时期,为配合相关的教材建设,机械工业出版社会同全国在该领域内享誉盛名、具备雄厚师资和技术力量的高等院校,包括清华大学、上海交通大学、南京大学、成都电子科技大学、东南大学、西安电子科技大学、解放军理工大学、北京科技大学等重点名校,组织了多位长期从事教学工作的骨干教师,集思广益,对当前高等院校的教学现状开展了广泛而深入的研讨,继而紧密结合当前技术发展需要并针对教学改革所提出的问题,精心编写了这套面向普通高等院校计算机专业的系列教材,并陆续出版。

本套教材内容覆盖了普通高等院校计算机专业学生的必修课程,另外还恰如其分地添加了一些选修课程,总体上分为基础、软件、硬件、网络和多媒体五大类。在编写过程中,对教学改革力度比较大、内容新颖以及各院校急需的并且适应社会经济发展的新教材,优先选择出版。

本套教材注重系统性、普及性和实用性,力求达到专业基础课教材概念清晰、深度合理的标准,并且注意与专业课教学的衔接;专业课教材覆盖面广、深浅适中,在体现相关领域最新发展的同时注重理论联系实际。全套教材体现了教育改革的最新思想,可作为高等院校计算机科学与技术专业的教学用书,同时也是培训班和自学使用的最佳教材。

机械工业出版社

前 言

“计算机组成与结构”是计算机专业的核心课程之一。一般来说,计算机结构是指计算机硬件的特性,计算机组成则是指计算机硬件各功能部件的具体实现和运行原理。从这个意义上说,这门课程是计算机硬件和软件的接口。

半个多世纪来,计算机技术有了飞速的发展,尤其是在集成电路方面。统计数据表明,集成电路芯片中的晶体管数量每 18 个月翻一番,这就是著名的摩尔定律。伴随着技术的飞速发展,一些观点也在发生变化,但总体来说,计算机组成和系统结构的基本原理没有变化,现代计算机体系结构从根本上说还是 Von Neumann 结构,其运行的基本原理也没有改变。

基于上述情况,本书重点描述单台计算机的基本组成原理及有关硬件的结构,对本领域的一些新技术,如流水线技术、并行技术等也有一定的涉及。编写过程中,力图贯彻以下几个原则:

(1) 夯实基础,关注前沿。在计算机专业课程体系中,计算机组成与结构是一门重要的专业基础课。它的先修课程一般有数字电路和汇编语言,也是学习系统结构、操作系统等课程的基础,掌握计算机组成的基本原理和各功能部件的具体实现是学好计算机组成的关键。因此,本书着重介绍基本原理,同时也讲述了一些已广泛使用的新技术。

(2) 理论和实践相结合。计算机科学是实践性很强的学科,学习计算机理论知识离不开动手实践,对计算机组成原理课程来说更是如此。本书注意理论和实践相结合,全书贯穿始终地用教学计算机 TEC-2000 为实例,详细剖析了它的组成和实现机制。有条件的同学也可以使用 TEC-2000 教学计算机作为实验对象,通过亲自动手,加深对知识的理解。

(3) 精简内容,压缩篇幅。计算机组成涉及的知识面相当宽,传统的大部头教科书希望能包罗万象,这容易使读者抓不住重点。本书在这方面做了一些尝试,只介绍计算机组成和结构中最为基础的理论知识,使之能在一个学期内讲授完毕。而其他相关知识,希望有兴趣的读者参考其他教材。

本书所采用的逻辑符号部分是国外流行符号,其与国际标准的对照请参阅附录。

本书由刘卫东编写,宋佳兴老师提供了大量的习题,贾志红老师进行了文字整理和录入工作。王诚教授审阅了全书并提出了许多改进意见,在此表示诚挚的谢意。

参加编写的都是清华大学计算机科学与技术系计算机组成原理教学组的成员,本书是作者们多年教学经验的体现。希望广大读者和同行们不吝赐教。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 计算和计算机	1
1.1 计算	1
1.2 计算机发展简史	2
1.2.1 古代和近代计算工具	2
1.2.2 电子管计算机	4
1.2.3 晶体管计算机	6
1.2.4 集成电路计算机	7
1.2.5 超大规模集成电路计算机	8
1.2.6 计算机分类	9
1.3 计算机的层次结构	10
1.3.1 语言和虚拟机	11
1.3.2 多层计算机	12
1.4 本书概览	14
1.5 习题	14
第 2 章 基本逻辑部件	16
2.1 门和布尔代数	16
2.1.1 门	16
2.1.2 布尔函数及实现	17
2.2 基本逻辑电路	18
2.2.1 组合逻辑电路	19
2.2.2 时序逻辑电路	23
2.3 小结	27
2.4 习题	27
第 3 章 运算方法和运算部件	29
3.1 数据表示方法	29
3.1.1 信息编码	29
3.1.2 数值的进制表示及转换	30
3.1.3 定点数表示	32
3.1.4 浮点数表示	34
3.1.5 逻辑、字符数据表示	38
3.1.6 检错纠错码	40
3.2 定点数加减运算	44
3.2.1 加减运算	44
3.2.2 溢出处理	46

3.3 定点数乘除运算	47
3.3.1 原码一位乘法	47
3.3.2 布斯乘法	49
3.3.3 定点数除法	50
3.4 浮点数运算	51
3.4.1 浮点数加减运算	52
3.4.2 浮点数乘除运算	52
3.4.3 电路实现	53
3.5 运算器部件	54
3.5.1 运算器功能要求	54
3.5.2 运算部件设计	55
3.6 运算部件举例	55
3.6.1 Am2901 运算器	56
3.6.2 Pentium 运算器	62
3.7 小结	64
3.8 习题	64
第4章 指令系统和控制器部件	67
4.1 指令和指令系统	67
4.1.1 指令格式	67
4.1.2 寻址方式	69
4.1.3 指令系统	71
4.1.4 CISC 和 RISC	72
4.2 指令系统举例	73
4.2.1 Pentium 指令系统	73
4.2.2 TEC 2000 教学计算机指令系统	75
4.3 控制器的功能和组成	78
4.3.1 控制器功能和组成	79
4.3.2 指令执行步骤	80
4.4 微程序控制器	81
4.4.1 微程序控制器基本工作原理	81
4.4.2 组成和实现	83
4.4.3 设计技术	84
4.5 组合逻辑控制器	87
4.5.1 组成和实现原理	88
4.5.2 设计实现	89
4.5.3 与微程序控制器比较	90
4.6 流水线工作原理	91
4.7 控制器部件举例	93
4.7.1 TEC-2000 控制器	93

4.7.2 Pentium 控制器	110
4.8 小结	113
4.9 习题	113
第 5 章 层次存储系统	116
5.1 存储器概述	116
5.1.1 存储器分类	116
5.1.2 存储器系统设计目标	117
5.2 主存储器	119
5.2.1 主存储器与其他部件接口	119
5.2.2 静态存储器存储原理和读写时序	120
5.2.3 动态存储器存储原理和读写时序	121
5.2.4 提高主存储器性能	124
5.3 磁盘	125
5.3.1 磁记录原理与记录方式	126
5.3.2 硬磁盘的基本结构	128
5.3.3 磁盘阵列存储器	131
5.3.4 软磁盘存储器	134
5.4 光盘	134
5.4.1 光盘存储原理	134
5.4.2 光盘的发展	137
5.5 层次存储器系统	140
5.5.1 层次存储器系统概述	140
5.5.2 程序的局部性原理	140
5.6 高速缓存 Cache	141
5.6.1 Cache 的工作原理	141
5.6.2 Cache 的组织方式	142
5.6.3 提高 Cache 性能	147
5.6.4 用 Cache 提高主存性能	150
5.7 虚拟存储器	152
5.7.1 虚拟存储器概述	152
5.7.2 段式虚拟存储管理	153
5.7.3 页式虚拟存储管理	154
5.8 Pentium 的层次存储系统	155
5.8.1 Pentium 的 Cache 管理	156
5.8.2 Pentium 的存储器管理	158
5.9 TEC-2000 主存储器设计	161
5.10 小结	164
5.11 习题	165
第 6 章 总线和输入输出系统	167

6.1 总线	167
6.1.1 总线概述	167
6.1.2 总线设计	169
6.1.3 总线举例	174
6.2 输入输出系统	178
6.2.1 外部设备数据传送控制方式	178
6.2.2 外部设备接口	181
6.2.3 输入设备	183
6.2.4 输出设备	185
6.3 小结	189
6.4 习题	189
附录 逻辑符号对照表	191
参考文献	192

第 1 章 计算和计算机

数字计算机最初是人们用来帮助自己完成复杂计算工作的工具,但现在它已经深入到社会的各个方面。计算机是如何从计算工具成为信息社会的领潮儿,它为什么能完成如此复杂的工作呢?我们还得从它的内部组成和结构说起。

1.1 计算

计算产生于计数。远古时代,人们为了分配食物和其他生活必需品,必须统计猎物的数量,当时,人们使用身边的各种办法和手段来进行计数,包括手指、卵石甚至绳索上的结,都曾是人类计数的工具。也正是由于使用手指计数,产生了我们现在应用广泛的十进制数制。

产生计数后,自然而然就出现了计算的要求。数万年来,人类一直依靠大脑来进行计算工作,也就是说,人脑就是计算工具(计算机)。计算的过程,可以用下述手工计算的例子来说明:

来看一个使用纸和笔作为辅助工具进行手工四则运算计算的过程。在计算过程中,纸张起的作用是记录和存储计算的过程和中间结果,以及最后得到的最终结果。真正进行计算工作的是人脑,它理解纸张上题目的计算要求,按照正确的计算步骤,逐步求得每一步加、减、乘、除法的中间结果,最后得出整个表达式的结果。

显然,为完成算术运算,至少需要有能完成存储功能的部件(纸张),用于存放计算过程(程序)和中间结果;还需要能理解算术运算指令并完成运算功能的部件(人脑);当然,还需要有能看到表达式的部件(眼睛)和给出结果的部件(笔),如图 1-1 所示。只有这些部件齐全,才可能完成计算的过程。

随着社会的进步和人类对未知世界的无穷探索,计算的复杂度逐步提高,计算的工作量发生了巨大的变化。人们逐渐希望能有一种工具,像蒸汽机解放人的四肢并延伸了它们的功能一样,最大限度地减轻、替代和延伸人脑的功能,进行这些繁复的计算工作。这种想法直接促使了计算机的产生。

计算机的设计可以从模拟上述手工计算的过程开始。组成计算机的基本部件应该包括存储部件(存储程序和中间结果)、控制部件(理解程序)、执行部件(进行运算并得到结果)和输入部件以及输出部件。这些部件之间的关系如图 1-2 所示。

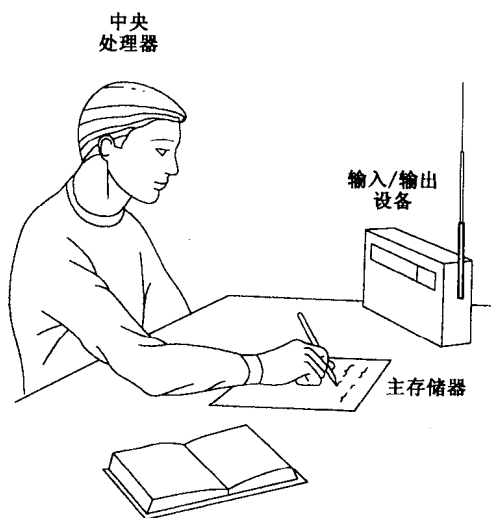


图 1-1 手工进行的算术运算

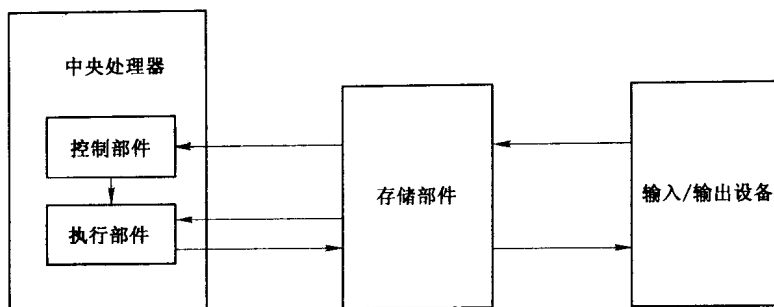


图 1-2 计算机器的基本组成

要使计算机能实现计算功能,首先应该有一种控制部件能够理解的语言,以其描述计算的过程,同时,也要有能实现计算功能的执行部件,完成算术运算;另外,还要找到合适的存储设备,用来存储程序和数据,最后,还需要合适的输入和输出部件,能够输入程序和数据,并输出计算结果。

解决了上述问题,还不是计算机设计的全部,更重要的一点是要使计算机能够按程序规定的顺序,自动地执行完整个程序,给出正确的结果。

采用计算机进行计算,问题的求解转换为用机器能理解的语言(程序)来描述求解过程。程序编制完成后,机器将根据程序指令自动完成繁复的计算工作,同时,程序容易复制的特性,将使许多复杂的、原来需要丰富的专业知识来进行的问题求解工作转换为一般人员就可以进行的计算机操作过程,极大减轻和替代人脑的工作。正是因为这些优势,人类开始了对能进行计算工作机器的艰苦探索。

1.2 计算机发展简史

在人类发展的历史长河中,人们一直没有停止对辅助计算工具的向往和追求。迄今为止,已经制造出千百种的计算工具,这些工具大部分已经被湮没在历史尘埃中,但是,还是有很多种杰出的发明,尽管尘封已久,却依然留下了自己的痕迹,有些甚至到今天还在应用。了解计算机的发展历程,对我们掌握计算机发展的脉搏,把握其前进的方向,是十分重要的。本节中我们将介绍在计算机发展历史上一些重要的里程碑以及它们对计算机发展的贡献。

1.2.1 古代和近代计算工具

说起古代计算工具,首先要提到的是灿烂的中华文明创造的奇迹——算盘。它也是我们目前还在使用的辅助计算工具。

算盘由并排的多串算珠和算盘架组成,如图 1-3 所示。算珠用来计数,每串算珠代表一位数。算盘采用的是一种混合数制,即逢 5 向本位的上半部分进 1,而逢 10 向高位进 1,这是为减小算盘的大小而设计的。算盘将位置计数法(Positional Notation)的概念引入到计算中,对后来的计算工具产生了很大的影响。

从现在的计算机组成的观点看,算盘已经起到了存储设备的作用,虽然在使用算盘的过程中,充当控制设备作用的还是人脑,但由于算盘参与了保存中间计算结果,也可以说具备了部

分现代计算机中处理器的功能。因此,它也被称为现代计算机的“祖先”。

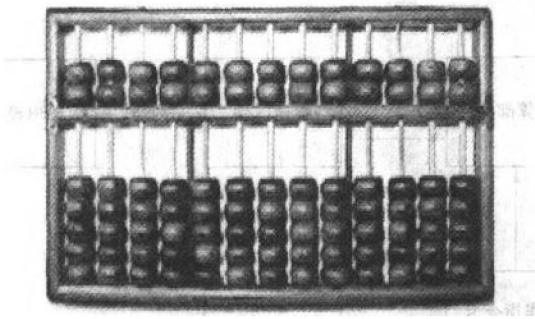


图 1-3 古老而现代的计算工具——算盘

作为“祖先”的算盘并没有逐渐衰落的迹象,相反,由于携带方便,无须用电,不产生辐射,也不会受到任何病毒的侵害这些优势,算盘在许多小规模计算的场合运用仍十分广泛。

另一个被广泛使用的计算工具是计算尺,它通过标记在尺上的刻度来表示数据,通过两个尺子之间的相对移动来进行算术运算,如图 1-4 所示。

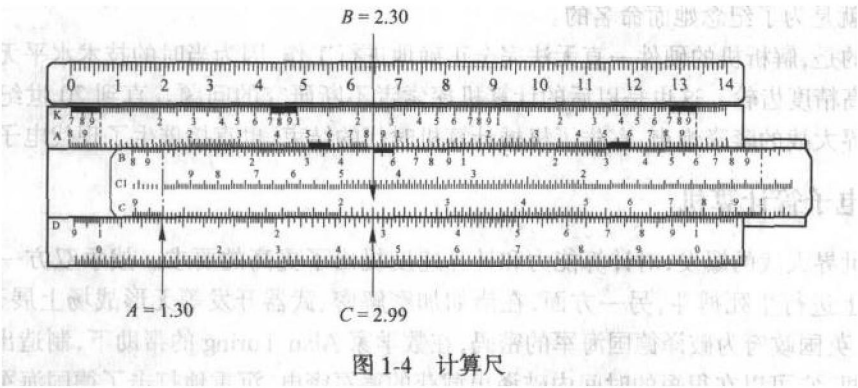


图 1-4 计算尺

算盘和计算尺在一定程度上减轻了人类的计算工作量,但总的来说,主要的计算工作还是由人脑完成的。这样,计算速度也就不可能提高很快,而且,计算中出现错误也在所难免。是否有能够自行进行计算,而不需要人进行太多干预的计算工具呢?

1642 年,年仅 19 岁的法国科学家 Blaise Pascal(1623—1662)制造出第一台能工作的计算机器。整台机器是纯机械设备,使用手柄驱动,用齿轮传动,能完成加法和减法。程序设计语言 Pascal 就是以他的名字命名的。

历史推进 150 年后,英国剑桥大学的教授 Charles Babbage(1792—1871)设计和制造了微分机,它能用多项式计算有限微分。这也是一台纯机械设备,值得一提的是它的输出方法,将运算结果用钢模子刻在铜表面上,很像我们现在使用的一次性写的存储介质,如打孔卡片和 CD-ROM。

Babbage 教授不满足于微分机只能做一种运算,他希望能设计出比较通用的计算机。1833 年,解析机问世了,它由存储部件、计算部件、输入/输出部件组成,如图 1-5 所示。计算部件从存储部件中取得操作数,进行加、减、乘、除运算后再送回到存储部件中。解析机实现了 Babbage 教授通用计算的梦想,它能从打孔卡片中读入指令,然后执行指令,除了运算指令外,

还包括逻辑转移指令,这些都是微分机无法实现的。可以说,从组成上看,解析机已经具备了现代计算机的基本元素。

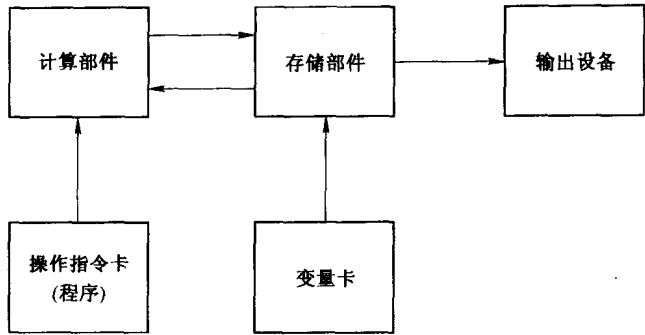


图 1-5 解析机的组成

解析机的运行需要软件。Babbage 雇佣了一位年轻的妇女 Ada Augusta Lovelace 来完成这项工作,她是英国著名诗人 Lord Byron 的女儿,Ada 也成了世界上第一位程序员。现代程序语言 Ada 就是为了纪念她而命名的。

遗憾的是,解析机的硬件一直无法完全正确地进行工作,因为当时的技术水平无法提供它所需要的高精度齿轮。这也是以后的计算机探索者不断研究的问题。直到 20 世纪 30 年代,第二次世界大战的隆隆炮声,宣告了机械计算机时代的结束,也直接催生了现代电子计算机。

1.2.2 电子管计算机

二次世界大战的爆发,对计算能力和计算速度提出了更高的要求。战争双方一方面在有形的战场上进行生死搏斗,另一方面,在诸如加密解密、武器开发等无形战场上展开了竞争。战争早期,英国政府为破译德国海军的密码,在数学家 Alan Turing 的帮助下,制造出 COLOS-SUS 计算机,它可以在很短的时间内破译出截获的德军密电,沉重地打击了德国海军的气焰。

战争也影响着美军计算手段的更新。军方为解除无法及时得到重炮弹道的计算表的烦扰,采纳了宾西法尼亚大学 John Mauchley 教授的建议,资助他于 1943 年开始研制电子计算机。经过 Mauchley 教授和他的研究生 J. Presper Eckert 的努力,世界上首台电子计算机 ENI-AC(Electronic Numerical Intergrator And Computer,电子数字积分器和计算机)终于在 1946 年诞生。

ENIAC 由 18000 个电子管和 1500 个继电器组成,重达 30 t,耗电量也达 140KW。它有 80ft 尺长,8.5 ft 高,运算速度为每秒 5000 次加法。在体系结构上,ENIAC 有 20 个寄存器,每个能存放一个 10 位的十进制数。对它的编程需要通过设置分布在各处的 6000 个开关和连接如森林般的插头和众多的插座来进行。

ENIAC 诞生时,大战已经结束。虽然无法直接为战争服务,但还是在后来的氢弹研制中发挥了重要的作用。为了向同行们介绍他们的工作,Macuchley 和 Eckert 还组织了一个暑期学校,正是这个暑期学校引发了许多科学家研制大型计算机的兴趣。后来,他们共同创建了现在的 Unisys 公司。

在制造计算机的实践之前,1937 年,英国数学家 Alan Turing(1912—1954)提出了通用计算机的模型,在理论上为现代计算机的体系结构奠定了基础。他提出的概念计算机——Turing 机的结构如图 1-6 所示。

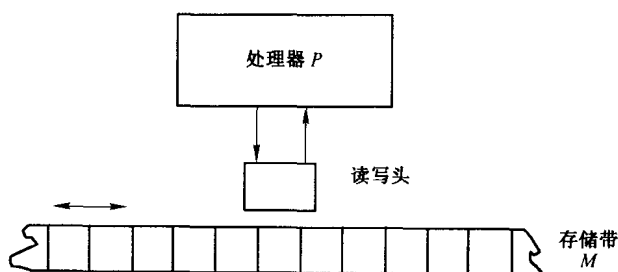


图 1-6 Turing 概念机

Turing 机由处理器和存储带两个主要部件构成。它的重要贡献在于它提出的“存储程序”概念,处理器对数据的运算是由存储在存储带上的程序来控制的,通过程序对算法的描述,Turing 机可以达到“通用”的目标。由于 Turing 对计算机科学的重要贡献,计算机科学的最高奖励以他的名字命名为 Turing 奖。

在 Turing 计算机的影响下,曾参加 ENIAC 研制的另一位科学家 John von Neumann 来到普林斯顿高级研究院,研制 IAS 计算机。他发现用大量的开关、插头来编程十分费时费力,又枯燥乏味,决定采用 Turing 机的方式,将程序和数据一起放在计算机存储器中表示。同时,对 ENIAC 采用的十进制数据表示法,他也提出用更适合计算机表示的二进制数据表示法来替代。

Von Neumann 描述的这些计算机基本设计,基本上是对 Turing 计算机的完善和具体实现,现在被命名为 Von Neumann 机。根据这些设计实现的 IAS 机,基本确立了现代计算机的体系结构。图 1-7 是 Von Neumann 计算机的体系结构示意图。

IAS 计算机由 5 个基本部分组成:存储器、运算器、控制器和输入设备、输出设备。它的存储器有 4096 个字,每个字长 40 位,能表示两条 20 位的指令或一个 40 位的有符号整数。每条指令的高 8 位用来区分指令类型,其余 12 位表示 4096 个存储单元中的一个地址。

指令和数据都是用二进制数表示的,均存放在存储器中。控制器解释指令,并将其提交给运算器执行指令规定的操作。运算器中有一个特殊的 40 位的内部寄存器——累加器。它一共有 21 条指令,包括数据传送指令、条件转移、无条件转移、算术运算和地址修改指令,因此,它能支持循环结构。IAS 计算机不支持浮点运算,因为 Von Neumann 认为,任何有能力的数学家都应该能在头脑中记住数据的小数点位置。

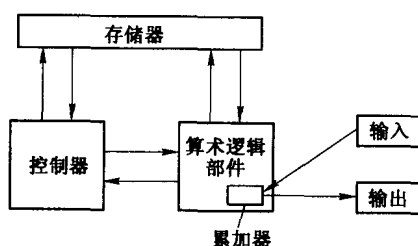


图 1-7 Von Neumann 计算机的体系结构

在大学实验室轰轰烈烈展开电子计算机研究工作的时候,企业界也逐渐显示了对计算机器的兴趣。蓝色巨人 IBM,虽然当时还是一家热衷于制造打孔卡的小公司,也在 1953 年制造出 701 计算机。该机有 2048 个字,每字 36 位,存放两条指令。三年后,它又推出了 704 机,有

4KB 核心内存,指令长 36 位,支持浮点运算。1958 年,IBM 推出最后一个电子管计算机 709。凭借这些计算机,IBM 在当时的科学计算领域开始崭露头角。

这一代的电子计算机,一般都是用电子管实现的,昂贵的硬件使得其结构大多采用基于累加器的结构,也只能实现极少的一些必须的指令。电子管的可靠性并不是很高,维护的成本比较大,也限制了计算机的规模化应用,使得当时很多的计算机只能用于继续研究。计算机科技对生产力的推动作用还没有明显的体现。

1.2.3 晶体管计算机

1948 年,贝尔实验室的 John Bardeen、Walter Brattain 和 William Shockley 发明了晶体管,他们也因此获得了 1956 年的诺贝尔物理奖。1953 年,麻省理工学院林肯实验室成功研制了第一台晶体管计算机 TX-0。实验室的工作人员 Kenneth Olsen 基于此创办了数字设备公司 DEC(Digital Equipment Corporation),并在 1961 年推出了 PDP-1。它配有 4KB 内存,18 位字长,机器周期为 $5\mu\text{s}$,性能是 IBM 7090 的一半。7090 是晶体管实现的 709,它是当时运行速度最快的计算机。DEC 以远低于 7090 的价格(DEC 的价格为 12 万美元,当时 7090 的销售价格是几百万美元)销售出数 10 台 PDP-1,开创了计算机产业。计算机对社会进步的推动作用初步显现出来。

1965 年,DEC 制造出 12 位字长的 PDP-8 计算机,价格由 12 万美元降低到 16000 美元。PDP-8 的主要革新是出现了总线,使用总线将计算机的各个部件连接在一起,如图 1-8 所示,在体系结构上对以内存为中心的 IAS 机进行了大胆的创新,PDP-8 的销售量达到 50000 台以上,建立起 DEC 在小型机市场上的领先地位。

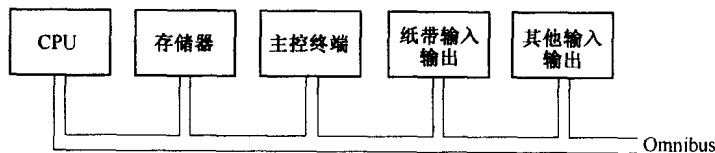


图 1-8 PDP-8 的总线

为和 DEC 公司抢占商业用计算机的市场,IBM 推出了面向商业计算的 1401 机,它的速度可以和面向科学计算的 7094 媲美,但价格却只有 7094 的几分之一。1401 的特殊之处在于它没有任何寄存器,甚至字长都不固定,其内存为 4KB,每个字节包含一个 6 位的字符,1 个管理位,还有 1 位用来标识字结束的标志位。

1964 年,数据控制公司 CDC(Control Data Corporation)也加入到竞争之中,推出 6600 机,比 7094 还快出一个数量级,CDC 公司也借此一举成名。6600 的高性能来自它的 CPU 的高度并行,有几个功能部件做加法,另外几个做乘法,还有一个除法部件,它们都能并行运行,虽然只有细心的编程才能达到较高程度的并行。而且,6600 还将外部设备交给其他小的计算机处理,使它的 CPU 能全时处理数据。从现在观点看,6600 领先了时代 10 年,现代计算机的许多关键技术都可以直接追溯到它的身上。

这一时代还有一台计算机值得一提,那就是 Burroughs 的 B5000。PDP-1、7094 和 6600 的设计者首要关注的是硬件,如何使硬件更便宜一些或性能更高一些,软件设计对他们来说只是细枝末节。B5000 的设计者采取的以软件为主的方案,把满足 Algol 60 语言编程需要作为设

计的首要目标,并在硬件上采取了许多办法来简化编译器的任务。B5000 是一台堆栈计算机,这种结构由于实现比较简单,在当时十分流行,但逐渐暴露出性能上的缺陷,很快就退出了历史舞台。

这个时代,我国也研制出了自己的晶体管计算机。清华大学计算机系于 1966 年研制成功晶体管小型通用计算机 112 机,后来由北京计算机三厂投产。

以晶体管为特征的第二代计算机,将计算机从实验室引入了产业,极大地推动了计算机技术的发展。总的来说,这一代计算机指令系统一般都比较简单,通过变址寄存器来辅助完成对数组的访问。计算机总体性能不太高,CPU 和存储器性能差距不大。编程语言已经普遍使用汇编语言,有少量计算机开始使用高级语言。

1.2.4 集成电路计算机

1958 年,Robert Noyce 发明的硅集成电路使得在单个芯片上可集成几十个晶体管,集成电路缩小了晶体管的体积,使研制比晶体管计算机更小、更快、更便宜的计算机成为可能。计算机时代进入集成电路时代。

晶体管计算机的设计者的主要精力在硬件的设计上,着力于提高硬件的性能和降低硬件的成本,对软件和指令系统关心不多。IBM 首先意识到硬软件的平衡发展的重要性,并在集成电路计算机中开始重视软、硬件的相互融合和权衡。

暴露问题的正是 IBM 引以自豪的两种型号的计算机,7094 和 1401。7094 主要面向科学计算领域,而 1401 面向的是商务计算,两台计算机完全无法兼容,一台是在 36 位寄存器组基础上用并行二进制算术实现的高速数据处理机,另一台是在内存的字长可变的基础上用串行十进制算术实现的大吞吐量输入输出的处理机。许多同时有两方面要求的客户只能是同时拥有这两种型号的计算机,不得不维持两支运行、维护和使用这两台计算机的技术队伍。

集成电路的出现为改变这种局面创造了条件,IBM 设计出新产品 System 360 来同时满足客户在科学计算和商务处理两方面的要求。它推出了五六种具有相同汇编语言,但配置和处理能力递增的型号,组成了系列机型。客户可以选择 30 型号的 360 机来替代 1401,而用 75 型号的 360 来替代 7094。75 型号配置高、速度快,但完全可以运行 30 型号编写的程序,这对原来的状况是很大的提高。表 1-1 列出了 System 360 各型号的初始配置。

表 1-1 IBM System 360 系列计算机的初始配置

特 性	型号 30	型号 40	型号 50	型号 65
相对性能	1	3.5	10	21
机器周期/ns	1000	625	500	250
最大内存 /KB	64	256	256	512
每个周期存取的字节数	1	2	4	16
数据通道数	3	3	4	6

系列机的产生,也创造出一个新的概念——系统结构,即程序员所看到的计算机。相同体系结构的计算机,即使其底层硬件实现上可能有不同,也能运行相同的软件。

为保持 360 机的向后兼容,它还有一个功能是可以模拟 1401 或 7094 计算机,客户原来的 1401 或 7094 的程序可以直接运行在新的 360 机上。能够实现这一点,是因为 360 机的控制

器是由微程序实现的。IBM 在 360 机的控制器中装入了三套微程序：一套用于解释 360 本身的指令系统，一套用于解释 1401 的指令系统，还有一套用来解释 7094 的指令。微程序控制器的灵活性和易扩展性使之迅速在控制器设计中流行开来。

此时，DEC 公司还是沿袭自己的传统，继续其低价格策略，推出了 PDP-8 的替代机型 PDP-11，它使 DEC 公司继续保持在小型计算机市场上的领先地位，尤其是在对大学市场的占领上。PDP-11 提供了许多应用程序，使得用户只需进行少量培训，就能在计算机上完成许多工作，这也扩大了 PDP-11 的应用范围。

可以说，20 世纪 60 年代是计算机理论和实践的一个大发展的年代，今天计算机中所应用的理论、关键技术以及体系结构，绝大多数在当时都已初露端倪。算法、计算理论、系统优化、信息处理等研究促进了计算机理论的提高。到 20 世纪 60 年代末，高级程序语言如 Fortran、COBOL、Algol 等已经出现，并得到了重视。操作系统使计算机用户已经不再局限于计算机科学家，而逐渐走向各行业的普通用户。同时，生产工艺、手段的不断进步，尤其是半导体技术和集成电路技术的发展，使我们能够生产出性能更高、更复杂的计算机系统；而计算机应用领域的不断拓宽，对计算机性能和功能要求不断提高，又为技术的发展提供了巨大的拉动作用。需求的拉动作用和技术进步的推动作用，使计算机技术迅速发展，从而，人类进入了信息时代。

1.2.5 超大规模集成电路计算机

20 世纪 80 年代，集成电路技术已经达到可以在一个芯片上集成上百万个晶体管。超大规模集成电路为计算机向小型化、高性能、低价格的方向发展提供了基础。最早的电子管计算机从体积、能耗、性能等方面都只能供实验室使用，而小型计算机的问世，使各部门都能使用计算机来处理自己的业务。到 1980 年后，计算机的各方面特征，尤其是价格已经降低到个人也可以承受的地步，计算机进入到个人计算机(PC)的时代。

显然，个人计算机的用途和大型机有很大差别，它主要用在字处理、电子表格以及大型计算机处理不好的高度交互的应用中，作为大型计算机和终端用户的交互界面。

Intel 公司于 1974 年推出了第一片通用的处理器芯片 8008，为 PC 机的出现提供了“心脏”。后来，Steve Jobs 和 Steve Wozniak 在车库中设计出了 Apple 和 Apple II，在家用和学校流行了很长的时间。

IBM 在继续其大型机的设计的同时，也注意到 PC 机的巨大市场，于 1981 年推出了 IBM PC，它采用 8088 做 CPU，其他组件全部从市场上采购。IBM PC 很快成为最畅销的机型，为方便其他厂商为 IBM PC 生产插件，IBM 做出了一个现在可能还在后悔的决定，毫无保留地公开了 IBM PC 的全部设计方案，包括所有的电路图。巨大的市场吸引了许多其他公司来克隆 PC 机，IBM 为自己创造出了竞争对手，但也促进了 PC 机的快速发展。

微软公司也看中了 PC 机市场，但并没有去生产 PC 机，而是为 PC 机开发了一个操作系统 DOS。凭借着 PC 机的巨大销售量和对 PC 机操作系统的垄断地位，微软迅速成长为世界上最著名的软件公司。

大规模集成电路技术不但催生了个人计算机，对小型机、大型机和巨型计算机的发展也有很大的推动作用。技术的进步已经逐渐弥合了这些机型间巨大的性能鸿沟，目前的小型计算机在性能上已超过早期的大型计算机，因此，很难再根据性能差异对计算机进行分类。

从 20 世纪 40 年代诞生的第一台电子计算机 ENIAC 到现代超级计算机，计算机的性能有