

计算机组成与结构

王爱英 主编

第二版

清华大学出版社



清华大学计算机系列教材

计算机组成与结构

(第二版)

王爱英 主编

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书共分 12 章。第一章到第十章主要论述计算机的基本组成原理和机器结构。内容包括数制和码制;基本逻辑部件;构成整个计算机系统的中央处理器(CPU)、存储器系统和输入/输出(I/O)系统等。书中的举例力求与当代计算机结合。

为了使读者对计算机系统有一个比较全面的了解,并扩充知识面,本书第十一章介绍了在计算机中广泛采用的几项技术与硬件结构。第十二章介绍了计算机的硬件设计以及专用集成电路 ASIC 的设计和实现。

本书可作为理工科大学学生学习《计算机组成与结构》课程或《计算机组成原理》课程的教科书,也可供从事计算机事业的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与结构/王爱英等编著. —2 版. —北京:清华大学出版社,1995

ISBN 7-302-01788-3

I. 计… II. 王… III. 电子计算机-计算机体系结构-构造-基础理论 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02295 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑:贾仲良

印刷者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:30.75 字数:727 千字

版 次:1979 年 7 月第 2 版 1995 年 9 月第 2 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01788-3/TP·793

印 数:8001—18000

定 价:21.00 元

第二版前言

本书自第一版出版以来,承蒙各界厚爱,在短短4年多时间内已印刷7次。被不少学校选为教材,由此我们倍感责任重大。在倾听各界意见和总结本校教学实践经验的基础上,决定对原书进行修改,出版此第二版,使之更符合读者的需要。在修订中本书主要考虑以下原则:

1. 继承与改进相结合

鉴于采用本书第一版作为教材的教师,为备课已付出了大量精力和时间,同时也为了更好地提高教学质量,本书第二版基本上保持原来的体系结构,全书仍分为12章,充分体现了学科的承前继后性。但在内容上尽量进行充实和调整,例如将第三章的读/写存储器调整到第七章的主存储器中;第四章增加了有关提高运算速度方法的内容;将第十一章的流水线组织作为计算机的基本内容调整到第六章等。

2. 适应计算机技术的发展

最近几年来,计算机硬件技术发展很快,例如主存储器、磁盘驱动器、磁带机、光盘等都朝着提高容量、提高存储速度和小型化、低功耗方向发展,有关这些内容在第二版中得到了反映。并对当前已实际应用的多媒体技术、文字识别、条码技术以及快擦型(Flush)存储器等方面的基本工作原理或关键技术等都进行了介绍。同时删去已经陈旧的技术及相关内容。

3. 补充了习题以适应教学的需要

4. 改善了可读性和易懂性

5. 处理好了教学计划与课程的衔接

如第十一章前半部分简单扼要地阐明了开放系统和单机系统(微机、便携机、工作站以及RISC等方面)的进展、技术和结构。这是将本书前10章与当前计算机实际相结合的典型范例。第十一章的后半部分指出了当前计算机最主要的发展方向:并行处理和计算机网络。第十二章论述了计算机硬件设计概貌与专用集成电路ASIC的设计与实现。以上这些内容应是与计算机有关的专业学生所必备的基础知识。如在后续课程中已有安排,则在此仅供参考;如某些学校没有设置相应的后续课程,则建议安排一些时间,结合本校特点进行学习,因限于篇幅,这部分写得比较简单、扼要,希望能取得抛砖引玉的作用。

原书作者王尔乾、王诚负责修改本人原稿。蔡月茹编写了大部分习题,并参加了部分审稿工作。王爱英对本书的其余部分进行了修订,并对全书进行了统编和总审。参加这次修订工作的还有赵青、周继群和孙军等。

感谢清华大学出版社对本书的支持。感谢对本书提出各种意见的专家、教师、学者以及广大读者。

编者

1994年3月

• 1 •

第一版前言

本书是为计算机专业的学生以及从事计算机科学与技术工作的工程技术人员编写的,也适合于非计算机专业的学生使用。本书从基本原理讲起,力图贯彻少而精的原则。

在本书中,我们把计算机结构定义为系统程序员(包括用汇编语言编写程序的程序员)所能见到的计算机硬件特性,计算机组成则是指计算机硬件的具体实现。

本书的第一章到第十章是基本部分,着重阐述构成一台计算机的基本原理,举例力求与当前广泛使用的计算机结合。由于计算机的发展很快,某些观点将会随着计算机的发展而产生一些变化,因此,希望读者着重于基本原理的理解。例如,对于计算机的各个功能部件,应着重了解它们在整机中的作用以及由此而分配给各部件所要完成的任务,从而正确选用(或设计)硬件,而不致被众多的、风格各异的计算机结构及组成所迷惑。第三章概括了计算机中所用的逻辑电路,在后面的章节中要用到这些电路,对于已经学过数字电路课程的学生,这一章可自学;对于没有学过数字电路的学生,可由教师选择一部分讲解。

第十一章讨论的四个内容(流水线组织、精简指令系统计算机 RISC、并行处理和计算机网络)是当代一般计算机中正在广泛采用的结构。由于篇幅及学时的限制,只能对它们作原理性介绍,目的是给学生指出方向,认识其重要性,以便进一步自学或在后续课程(例如计算机系统结构、并行处理等课程)中深入学习。

第十二章简单地讲述了计算机硬件设计的过程及若干问题,目的是扩充知识面。现代计算机广泛采用超大规模集成电路,但是目前开这门课的学校不多,作为必修课的更少,为了弥补这一严重不足,本书的最后列入了计算机部件的 VLSI 实现这一节。

综上所述,本书的重点是计算机(单机)的基本组成原理及有关的硬件结构,并对计算机的发展与实现提供了必要的也是最基本的知识。

本书的第一章、第六章(6.5节除外)、第十一章、第十二章的 12.1 节由王爱英编写,第二章、第四章由王诚编写;第三章、第十二章的 12.2 节由王尔乾编写;第五章及第六章的 6.5 节由张忠英编写;第七章、第十章由相士俊编写;第八章、第九章由杨士强编写。王爱英对全书进行了统编与审查。周继群等对本书的图、稿进行了审查及校对。

参加本书编写的都是清华大学计算机系的教师,作者在不同程度上(或不同方面)从事过多年有关计算机的教学、设计、研制和推广工作。希望同行们和广大读者以及使用本教科书的教师和学生给我们提出中肯的意见。

编者

1989年7月

目 录

第一章 计算机系统概论	1
1.1 计算机与语言	1
1.2 计算机的硬件	3
1.3 计算机系统的层次结构	4
1.4 电子计算机的发展简史	6
1.5 计算机的应用.....	11
第二章 数字化信息编码与数据表示	15
2.1 数字化信息编码的概念.....	15
2.2 常用的信息编码.....	15
2.3 计算机中数值数据的表示、转换和运算	18
2.4 数据校验码.....	37
第三章 计算机的逻辑部件	48
3.1 三种基本逻辑操作及布尔代数的基本公式.....	48
3.2 逻辑函数的化简.....	49
3.3 逻辑门的实现.....	52
3.4 计算机中常用的组合逻辑电路.....	53
3.5 时序逻辑电路.....	64
3.6 阵列逻辑电路.....	74
第四章 运算器	88
4.1 定点运算器的基本组成与实现.....	88
4.2 加速乘除法运算的技术	107
4.3 浮点运算器	114
第五章 指令系统	128
5.1 指令系统的发展	128
5.2 指令格式	129
5.3 数据表示	133
5.4 寻址方式(编址方式)	134
5.5 指令类型	138
5.6 指令系统的兼容性	146

5.7	指令系统举例	147
5.8	机器语言、汇编语言与高级语言	158
第六章	中央处理部件 CPU	161
6.1	计算机的硬件系统	162
6.2	控制器的组成	168
6.3	微程序控制计算机的基本工作原理	174
6.4	微程序设计技术	184
6.5	微程序设计举例	201
6.6	硬布线控制的计算机	209
6.7	控制器的控制方式	218
6.8	流水线工作原理	220
6.9	计算机的加电及控制过程	225
第七章	存储系统	231
7.1	存储器与存储系统概述	231
7.2	主存储器	234
7.3	并行主存储器	257
7.4	高速缓冲存储器(Cache)	260
7.5	虚拟存储器	269
7.6	相联存储器	277
7.7	存储保护	279
第八章	辅助存储器	284
8.1	辅助存储器的种类与技术指标	284
8.2	磁记录原理与记录方式	286
8.3	硬磁盘存储器	295
8.4	软磁盘存储器	306
8.5	磁带存储器	313
8.6	光盘存储器	324
8.7	硬盘、软盘、磁带和光盘存储器的综合比较	327
第九章	输入输出(I/O)设备	331
9.1	外部设备概述	331
9.2	显示设备	332
9.3	输入设备	346
9.4	打印设备	352
9.5	汉字处理设备	359

9.6	多媒体技术	363
第十章	输入输出系统	368
10.1	输入输出(I/O)系统概述	368
10.2	程序中断输入输出方式.....	371
10.3	DMA 输入输出方式	380
10.4	通道控制方式和外围处理机方式.....	384
10.5	总线结构.....	388
10.6	并行接口和串行接口举例.....	395
第十一章	计算机系统	400
11.1	计算机系统概述.....	400
11.2	微机系统和工作站.....	403
11.3	精简指令系统计算机 RISC	407
11.4	超级标量处理机、超级流水线处理机和超长指令字处理机	427
11.5	向量处理机.....	431
11.6	阵列处理机和多处理机系统.....	433
11.7	计算机网络.....	439
第十二章	计算机硬件设计和实现导论	444
12.1	计算机硬件的总体设计.....	444
12.2	专用集成电路 ASIC 设计概述	450
12.3	ASIC 实现简介	460

第一章 计算机系统概论

1.1 计算机与语言

科学技术的高度发展,导致了计算机的诞生。在现代化社会中,计算机已深入到人类工作与生活的各个角落。计算机与其它机器一样,是人类和自然作斗争以及从事各项社会活动的工具。由于它具有计算、模拟、分析问题、操纵机器、处理事务等能力,所以被看作是人脑的延伸,是一种有“思维”能力的机器,从这点出发,计算机又被称为“电脑”。但是一切机器,包括计算机在内,都是人类智慧的结晶,都是人创造的,同时又受人的操纵与控制。

人们经常用语言(或文字)来表达思想、交流经验、互通信息。其中汉语、英语、法语等是使用人数最多的语种。人类相互交流信息所用的语言称为自然语言,但是当前的计算机还不具备理解自然语言的能力,于是人们希望找到一种和自然语言接近,并能为计算机接受的语言,这种语言被称为计算机的高级语言。从计算机的发展历史来看,最初在计算机中使用的不是高级语言,由于它难以理解,使用困难,因而需要改进,这样才导致了高级语言的诞生。

常用于科学计算和数据处理的高级语言有: BASIC、FORTRAN、ALGOL、PASCAL、COBOL 和 Ada 等。常用于人工智能的语言有 LISP 和 PROLOG 等。用这些语言编写的程序是由英文字母、数字、运算符号等按照一定的语法规则组成的。然而目前的通用计算机不会直接执行用高级语言编写的程序,而是先将其翻译成机器能执行的语言,称为机器语言(由二进制代码表示的指令组成),再在机器上运行,因此解题的过程可归结为

- (1) 程序员用高级语言编写程序;
- (2) 将程序与数据输入计算机,并由计算机将程序翻译成机器语言程序,保存在计算机的存储器中;
- (3) 运行程序,输出结果。

存储器是计算机中用以存放原始数据、程序以及中间运算结果的设备,最后的处理结果也往往先暂时存放在存储器中,然后再输送出去。存储器分成一个个单元,每个单元有自己的编号,称为该单元的地址。数据或指令以二进制代码形式存放在存储器中。

在计算机中能执行的程序是由指令组成的,因此计算机执行程序的过程,实际上就是按照给定次序执行一组指令的过程。

一条指令通常分成两部分:

- (1) 操作码 规定该指令执行什么样的运算(或操作),因此被命名为操作码。
- (2) 地址码 规定对哪些数据进行运算,通常表示的是数据地址,因此被称为地址码。当前,计算机指令类型很多,各条指令的功能差异很大,并不局限于对数据进行运算,甚至有的指令不需要地址,因此地址码的含义是灵活多变的。我们将在第五章指令系统专门讨论这个问题。

由于二进制码不易辨认,因此往往用符号来表示一条指令,例如加法运算指令可用符号表示如下:

ADD A, B

其中 ADD 为指令的操作码, A、B 为两个操作数的地址码,并隐含指定将运算结果送到地址 A 或 B 中。假如 A 中已存放有十进制数 2, B 中为 3,并默认运算结果送 A,那么执行本条指令以后, A 中的内容将更换成 5, B 中的内容保持不变,仍为 3。

用机器语言编写程序,比用高级语言麻烦得多,那是因为一条机器指令的功能比一条高级语言的语句功能弱很多而造成的,例如用 BASIC 语言编写的程序,执行语句

LET d=b*b-4*a*c

即可得到 $d=b^2-4ac$ 的值,而用机器语言则需要五条指令才能实现。当用符号来表示指令时,其程序如下:

程序	注释(运算结果)
1. MUL B B	b^2 送入 B
2. MUL A E	4a 送入 A
3. MUL A C	4ac 送入 A
4. SUB B A	b^2-4ac 送入 B
5. MOV D B	b^2-4ac 从 B 传送到 D
A	a
B	b
C	c
D	d
E	4

其中 1~5 为指令, MUL 为乘法指令的操作码, SUB 为减法指令, MOV 为传送指令。A、B、C、D、E 分别表示存储数 a、b、c、d 及常数 4 的地址,上述这些指令统称为算述逻辑运算指令。

指令前面的序号有示指令的执行顺序,也表示该指令在存储器中的相对位置,必须按此顺序将指令存放在相邻的存储单元中。

例如,第 1 条指令存放在地址为 n 的存储单元中,则其后继的指令依次存放在 $n+1$ 、 $n+2$ 、 $n+3$ 和 $n+4$ 的存储单元中。编制程序时还需考虑求得 d 值后机器如何运行问题。如果此时已不再需要进行其它工作,则在 $n+5$ 可安排一条停机指令或动态停机指令(等待指令)。动态停机指令不完成任何有效的具体操作,仅使计算机处于“空转”状态,待有某些特定信号(如中断信号,见本书第十章)来到时,才转到相应的程序入口继续运行。如果此时还需要进行其它工作,则从 $n+5$ 开始继续编制程序,或者安排一条转移指令,将程序转到需执行处。

数据地址 A、B、C、D 和 E,从原则上讲,相互之间不受约束,即可存放在主存储器任何有空闲的地方。但习惯上经常也是顺序安放的。于是可将程序改写如下:

n	MUL	$n+7$	$n+7$	$n+6$	a
$n+1$	MUL	$n+6$	$n+10$	$n+7$	b
$n+2$	MUL	$n+6$	$n+8$	$n+8$	c
$n+3$	SUB	$n+7$	$n+6$	$n+9$	d
$n+4$	MOV	$n+9$	$n+7$	$n+10$	4
$n+5$	HLT				

HLT 为停机指令。

1.2 计算机的硬件

组成计算机的基本部件有中央处理器 CPU(运算器和控制器)、存储器和输入/输出设备。

输入设备用来输入原始数据和处理这些数据的程序。输入的信息有数字、字母和控制符等,人们经常用 8 位二进制码来表示一个数字(0~9)、一个字母(A、B、C, ..., X, Y, Z)或其它符号,当前通用的是 ASCII 码,它用七位二进制码来表示一个字符,最高的一位可用于奇偶校验或作其它用处。在计算机中,一般把 8 位二进制码称为一个字节。在我国使用的计算机,一般有处理汉字的能力,在本书第九章作进一步说明。

输出设备用来输出计算机的处理结果,可以是数字、字母、表格、图形等。最常用的输入输出设备是显示终端和打印机,终端设备采用键盘作为输入工具,处理结果显示在屏幕上,而打印机则将结果打印在纸上,除此以外,为了监视人工输入信息的正确性,在用键盘输入信息时,将刚输入的信息显示在屏幕上,如有错误,可及时纠正。

存储器用来存放程序和数据,是计算机各种信息的存储和交流中心。存储器可与 CPU、输入输出设备交换信息,起存储、缓冲、传递信息的作用,在这里,我们要注意把存储单元的地址和存储单元里存放的内容(数据或指令)区分开。

存储器又有主存储器和辅助存储器之分。当前在计算机上运行的程序和数据是存放在主存储器中的。

中央处理器又叫 CPU,在早期的计算机中分成运算器和控制器两部分,由于电路集成度的提高,现在已把它们集成在一个芯片中。

运算器是对信息或数据进行处理和运算的部件,经常进行的是算术运算和逻辑运算,所以在其内部有一个算术及逻辑运算部件(ALU)。算术运算是按照算术规则进行的运算,例如加、减、乘、除、求绝对值、求负值等。逻辑运算一般是指非算术性质的运算,例如比较大小、移位、逻辑乘、逻辑加等。在计算机中,一些复杂的运算往往被分解成一系列算术运算和逻辑运算。

当 CPU 处理的数据局限于整数时,这个 CPU 有时被称为整数运算部件 IU。为了快速而有效地对实数进行处理,在某些计算机中专门设置了浮点运算部件。

控制器主要用来实现计算机本身运行过程的自动化,即实现程序的自动执行。在控制器控制之下,从输入设备输入程序和数据,并自动存放在存储器中,然后由控制器指挥各部件(运算器、存储器……)协同工作以执行程序,最后将结果打印输出。作为控制用的计

算机则直接控制对象。

在计算机中,各部件间来往的信号可分成三种类型,它们是:地址、数据和控制信号。通常这些信号是通过总线传送的,如图 1.1 所示。CPU 发出的控制信号,经控制总线送到存储器和输入输出设备,控制这些部件完成指定的操作。与此同时,CPU(或其它设备)经地址总线向存储器或输入输出设备发送地址,使得计算机各个部件中的数据能根据需要互相传送。输入输出设备和存储器有时也向 CPU 送回一些信号,CPU 可根据这些信号来调整本身发出的控制信号。现代计算机还允许输入输出设备直接向存储器提出读写要求,控制数据传送。

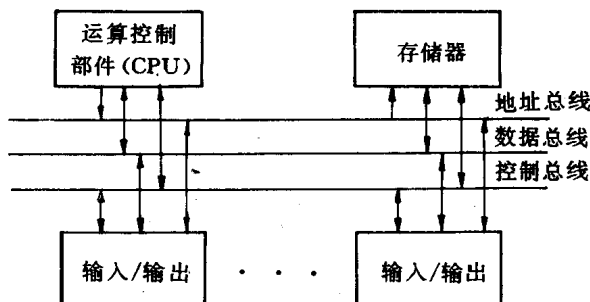


图 1.1 以总线连接的计算机框图

1.3 计算机系统的层次结构

现代计算机解题的一般过程:用户用高级语言编写程序,连同数据一起送入计算机(用户程序一般称为源程序),然后由计算机将其翻译成机器语言程序(称为目标程序),在计算机上运行后输出结果,其过程如图 1.2 所示。

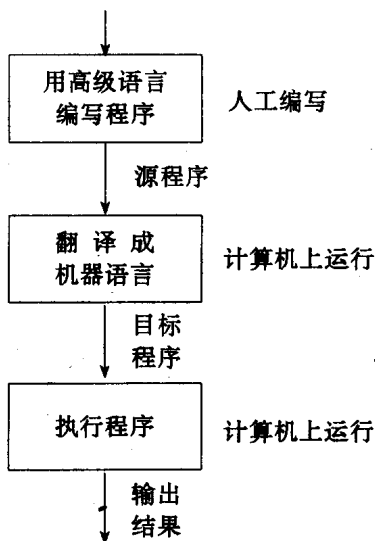


图 1.2 计算机的解题过程

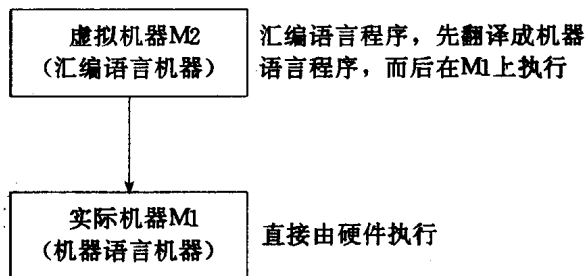


图 1.3 汇编语言虚拟机的层次结构

早期的计算机只有机器语言,用户必须用二进制码表示的机器语言编写程序(用八进制或十六进制书写),因此工作量大,容易出错,而且对程序员的要求很高,要求他们计算机的硬件和指令系统有正确和深入的理解,并有熟练的编程技巧,只有少数专家才能达到此要求,于是在50年代,出现了符号式程序设计语言,称为汇编语言,对此,程序员可用ADD, SUB, MUL, DIV等符号分别表示加法、减法、乘法、除法的操作码,并用符号来表示指令和数据的地址。汇编语言程序的大部分语句是和机器指令一一对应的。用户用汇编语言编写程序后,依靠计算机将它翻译成机器语言(二进制代码),然后再在计算机上运行。这个翻译过程是由汇编程序实现的。

我们可以把一台具有汇编程序的计算机看作是在实际机器级(硬件)之上出现的一台虚拟机器,该机允许使用汇编语言编程。我们称它为虚拟机器的原因是因为它依靠了软件(汇编程序)才存在。图1.3表示这台机器的层次结构,对用户来讲,他所看到的机器已不是实际机器M1,而是虚拟机器M2。

由于汇编语言的语法、语义结构仍然和机器语言基本一样,而与人的传统解题方法相差甚远,因而经过了人们的努力又出现了面向题目的高级语言。随同研制出来的是这些语言的翻译程序,因此我们可以设想在汇编语言级之上又出现了高级语言级,它的实现是先把高级语言程序翻译成汇编语言程序或中间语言程序,尔后再翻译成机器语言程序。有的计算机则将高级语言程序直接翻译成机器语言程序。图1.4(a)和(b)分别表示这两种情况。

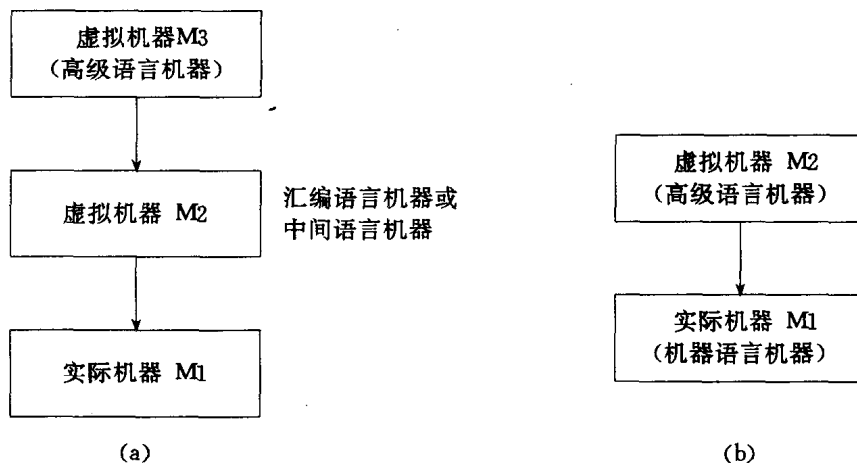


图 1.4 高级语言虚拟机器的层次结构

翻译程序有编译程序和解释程序两种。

编译程序是将用户编写的源程序中全部语句翻译成机器语言程序后,再执行机器语言程序。假如一个题目需要重复计算几遍,那末一旦翻译以后,只要源程序不变,不需要再次进行翻译。但源程序若有任何修改,都要重新经过编译。

解释程序则是在将源程序的一条语句翻译成机器语言以后立即执行它(而且不再保存刚执行完的机器语言程序),然后再翻译执行下一条语句。如此重复,直到程序结束。它的特点是翻译一次只能执行一次,当第二次重复执行该语句时,又要重新翻译,因而效率

较低。当前,ALGOL、FORTRAN、PASCAL 等语言是用编译程序进行翻译的,而 BASIC 语言则有解释和编译两种。

在上述虚拟机器 M2 与实际机器 M1 之间还存在一种称为操作系统的软件。操作系统是从管理程序发展而来的,它提供了实际机器所没有的但在汇编语言和高级语言的使用和实现过程中所需的某些基本操作和数据结构。

操作系统的功能(命令)是通过操作系统的指令系统(或称为控制语言)实现的,在一般计算机上操作系统的指令是经过用机器语言编写的解释程序实现的,因此操作系统可看作实际机器的扩充,在计算机系统的多级层次结构中应占有一个席位,它的位置应在实际机器之上、汇编语言机器级之下。图 1.5 是计算机系统的多级层次结构。

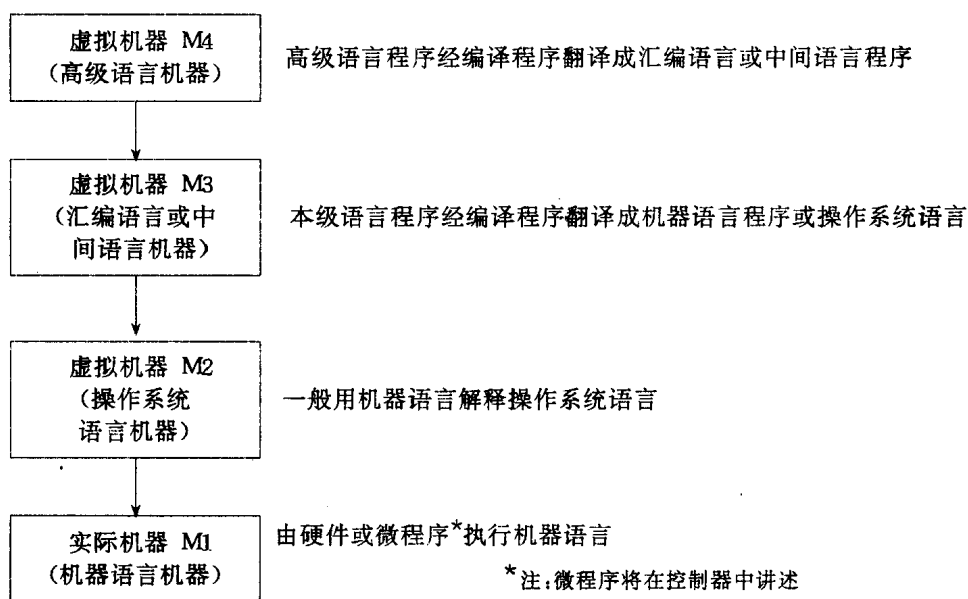


图 1.5 计算机系统的多级层次结构

不同计算机系统之间的多级层次结构的划分与实现方法是有差别的,一般来说,相邻级语言的语法结构的差别不要太大,这样才便于编译或解释,但最后总是要翻译成能在机器上执行的机器语言程序。

1.4 电子计算机的发展简史

电子计算机的发展,如果从第一台计算机的问世算起,到现在才 40 余年,在人类科技史上还没有一种学科可以与电子计算机的发展之快相提并论。

20 世纪四十年代,无线电技术和无线电工业的发展为电子计算机的研制准备了物质基础,1943 年—1946 年美国宾夕法尼亚大学研制的电子数字积分和计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer)是世界上第一台电子计算机。当时第二次世界大战正在进行,为了进行新武器的弹道问题中许多复杂的计算,在美国陆军部的资助下开展了这项研究工作,ENIAC 计算机于 1945 年年底完成,1946 年 2 月正式交付使

用,因为它是最早问世的一台电子数字计算机,所以一般人认为它是现代计算机的始祖。

ENIAC 计算机共用 18000 多个电子管,1500 个继电器,重达 30 吨,占地 170 平方米,耗电 140kW,每秒钟能计算 5000 次加法,领导研制的是埃克特(J. P. Eckert)和莫克利(J. W. Mauchly)。ENIAC 计算机存在两个主要缺点,一是存储容量太小,只能存 20 个字长为 10 位的十进制数,二是用线路连接的方法来编排程序,因此每次解题都要依靠人工改接连线,准备时间大大超过实际计算时间。

与 ENIAC 计算机研制的同时,冯·诺依曼(Von Neumann)与莫尔小组合作研制 EDVAC 计算机,采用了存储程序方案,其后开发的计算机都采用这种方式,称为冯·诺依曼计算机。一般认为冯·诺依曼机具有如下基本特点:

- (1) 计算机由运算器、控制器、存储器和输入设备和输出设备五部分组成。
- (2) 采用存储程序的方式,程序和数据放在同一个存储器中,指令和数据一样可以送到运算器运算,即由指令组成的程序是可以修改的。
- (3) 数据以二进制码表示。
- (4) 指令由操作码和地址码组成。
- (5) 指令在存储器中按执行顺序存放,由指令计数器(即程序计数器 PC)指明要执行的指令所在的单元地址,一般按顺序递增,但可按运算结果或外界条件而改变。
- (6) 机器以运算器为中心,输入输出设备与存储器间的数据传送都通过运算器

四十多年来,随着技术的发展和 new 应用领域的开拓,对冯·诺依曼机作了很多改革,使计算机系统结构有了很大新发展,如某些机器程序与数据分开存放在不同的存储器中,程序不允许修改,机器不再以运算器为中心,而是以存储器为中心等等,虽然有以上这些突破,但原则变化不大,习惯上称之为冯·诺依曼机。

四十年来,根据电子计算机所采用的物理器件的发展,一般把电子计算机的发展分成四个阶段,习惯上称为四代。两代计算机之间时间上有重叠。

第一代:电子管计算机时代(从 1946 年第一台计算机研制成功到五十年代后期),其主要特点是采用电子管作为基本器件。在这一时期,主要为军事与国防尖端技术的需要而研制计算机,并进行有关的研究工作,为计算机技术的发展奠定了基础,其研究成果扩展到民用,又转为工业产品,形成了计算机工业。

五十年代中期,美国 IBM 公司在计算机行业中崛起,1954 年 12 月推出的 IBM650(小型机)是第一代计算机中行销最广的机器,销售量超过一千台。1958 年 11 月问世的 IBM709(大型机)是 IBM 公司性能最高的最后一个电子管计算机产品。

第二代:晶体管计算机时代(从五十年代中期到六十年代后期),这时期计算机的主要器件逐步由电子管改为晶体管,因而缩小了体积,降低了功耗,提高了速度和可靠性。而且价格不断下降。后来又采用了磁心存储器,使速度得到进一步提高。不仅使计算机在军事与尖端技术上的应用范围进一步扩大,而且在气象、工程设计、数据处理以及其它科学研究等领域内也应用起来。在这一时期开始重视计算机产品的继承性,形成了适应一定应用范围的计算机“族”,这是系列化思想的萌芽。从而缩短了新机器的研制周期,降低了生产成本,实现了程序兼容,方便了新机器的使用。

1960 年控制数据公司(CDC)研制高速大型计算机系统 CDC6600,于 1964 年完成,取

得了巨大成功,深受美国和西欧各原子能、航空与宇航、气象研究机构和大学的欢迎,使该公司在研究和生产科学计算高速大型机方面处于领先地位。1969年1月,水平更高的超大型机 CDC7600 研制成功,平均速度达到每秒千万次浮点运算,成为六十年代末、七十年代初性能最高的计算机。

第三代:集成电路计算机时代(从六十年代中期到七十年代前期),这时期的计算机采用集成电路作为基本器件,因此功耗、体积、价格等进一步下降,而速度及可靠性相应地提高,这就促使了计算机的应用范围进一步扩大。正是由于集成电路成本的迅速下降,产生了成本低而功能不是太强的小型计算机供应市场。占领了许多数据处理的应用领域。

IBM360 系统是最早采用集成电路的通用计算机,也是影响最大的第三代计算机。在1964年宣布 IBM360 系统时就有大、中、小型等 6 个计算机型号,平均运算速度从每秒几千次到一百万次,它的主要特点是通用化、系列化、标准化。

通用化:指令系统丰富,兼顾科学计算、数据处理、实时控制三个方面。

系列化:IBM360 各档机器采用相同的系统结构,即在指令系统、数据格式、字符编码、中断系统、控制方式、输入/输出操作方式等方面保持统一,从而保证了程序兼容,当用户更新机器时原来在低档机上编写的程序可以不作修改就使用在高档机中。IBM360 系统后来陆续增加的几种型号仍保持与前面的产品兼容。后来,西欧与日本的一些通用计算机也保持与 IBM360 系统兼容。苏联和东欧国家联合制造的“统一系统”也是与 IBM360 系统兼容的。

标准化:采用标准的输入/输出接口,因而各个机型的外部设备是通用的。采用积木式结构设计,除了各个型号的 CPU 独立设计以外,存储器、外部设备都采用标准部件组装。

第四代:大规模集成电路计算机时代,七十年代初,半导体存储器问世,迅速取代了磁心存储器,并不断向大容量、高速度发展,此后,存储器芯片集成度大体上每三年翻两番(1971年每片 1K 位,到 1984 年达到每片 256K 位,1992 年 16M 位动态随机存储器芯片上市),价格平均每年下降 30%。逻辑电路也得到相应的发展。

随着大规模集成电路的迅速发展,计算机进入大发展时期,通用机、巨型机、小型机、微型机以及工作站都得到了发展。

(1) 通用机

通用机是计算机工业中价值比重最大的产品,其中以 IBM370 系统影响最大,它是在与 IBM360 系统兼容的前提下进行了改进。IBM 公司为开发 360 系统的软件耗费了巨大的人力和财力,据估算,IBM 用户在应用程序、培训等方面耗费了两千亿美元,是硬件投资的三至五倍,如此丰富的软件不能抛弃、只能继承,这已成为用户与计算机厂家共同遵守的原则,但也成了计算机发展的制约。继 IBM370 以后,IBM303X 大型机系列仍与 IBM370 系统兼容,但具有更强的科学计算处理能力;IBM4300 系列取代了 IBM370 系统的低档机,但仍与 IBM370 兼容。1982 年宣布的 IBM3084K 大型通用机速度达到每秒 2500 万次,主存容量为 64 兆字节。

其它计算机厂家在发展新机种时也遵循兼容的原则。某些计算机厂家走上与 IBM 计算机兼容的道路,称之为 PCM: Plug Compatible Mainframe(插接兼容主机硬件完全兼容)或 Program Compatible Mainframe(程序兼容主机——软件兼容),制造与 IBM 兼容

的计算机,它们按 IBM 系列机的系统结构制造主机,并直接引用 IBM 计算机的软件,因而使产品的性能价格比优于 IBM 原装机,以争夺市场。

(2) 巨型机

现代科学技术,尤其是国防技术的发展,需要有很高运算速度、很大存储容量的计算机,一般的大型通用计算机不能满足要求。集成电路的进展,为制造巨型机提供了条件。从六十年代到七十年代相继完成了一些巨型机,其中取得最高成绩的要推 Cray-1 计算机。针对天气预报、飞行器的设计和核物理研究中存在大量向量运算的特点,Cray-1 计算机的向量运算速度达每秒 8000 万次,并兼顾了一般的标量运算。1983 年研制成功的 Cray X-MP 机向量运算速度达每秒 4 亿次。与此同时,CDC 公司的 CYBER203 和 205 先后完成,CYBER205 每秒可进行 4 亿次浮点运算。这些是八十年代初期的水平最高的巨型机。但是这些成就还不能满足一些复杂问题的需要,所以不少单位开展了性能更高的巨型机的研究工作。近年来微处理器的发展为阵列结构的巨型机发展带来了希望,例如古德伊尔公司为美国宇航局(NASA)研制了一台处理卫星图象的巨型计算机系统 MPP,该机由 16384 个微处理器组成 128×128 方阵。这种采用并行处理技术的多处理器系统是巨型机发展的一个重要方面,称为小巨型机。

日本、英国、苏联、法国也先后开始研制巨型机。

(3) 小型机

小型机规模小、结构简单所以设计试制周期短,便于及时采用先进工艺,生产量大,硬件成本低;同时由于软件比大型机简单,所以软件成本也低。再加上容易操作、容易维护和可靠性高等特点,使得管理机器和编制程序都比较简单,因而得以迅速推广,掀起一个计算机普及应用的浪潮。DEC 公司的 PDP-11 系列是 16 位小型机的代表,到七十年代中期 32 位高档小型机开始兴起,DEC 公司的 VAX11/780 于 1978 年开始生产,应用极为广泛。VAX11 系列与 PDP11 系列是兼容的。

小型机的出现打开了在控制领域应用计算机的局面,许多大型分析仪器、测量仪器、医疗仪器使用小型机进行数据采集、整理、分析、计算等。应用于工业生产上的计算机除了进行上述工作外还可进行自动控制。

(4) 微型机

微型机的出现与发展,掀起计算机大普及的浪潮,利用 4 位微处理器 Intel4004 组成的 MCS-4 是世界上第一台微型机,它于 1971 年问世。Intel8086 是最早开发成功的 16 位微处理器(1978 年),以后开发的 Intel80286、80386 与 8086 兼容。1981 年以后 32 位微处理器相继问世,比较著名的 32 位微处理器有 Intel80386、Motorola 的 68020 和 68030 等。Intel80386 片内集成了 27.6 万个晶体管、Motorola68030 片内集成了 30 万个晶体管。1990 年 Intel80486 和 Motorola68040 推向市场,其集成度达到 120 万个晶体管,与原来的产品相比较,除了提高主频速度外,还将原属片外的有关电路集成到片内。

32 位微处理器采用过去大中型计算机中所采用的技术,因此用它构成的微型机系统的性能可以达到七十年代大中型计算机的水平。

七十年代后期,兴起个人计算机(一种独立微型机系统)热潮,最早出现的是 Apple 公司的 Apple II 型微机(1977 年),此后各种型号的个人计算机纷纷出现。1981 年一向以