



计算机组成原理



幸云辉 编著



北京邮电大学出版社



TP303
XYH/1

计算机组成原理

李云辉 编著

北京邮电大学出版社

034748

内 容 简 介

本书共分八章，内容如下：计算机系统概论；计算机中的数码系统；运算方法与运算器；存储系统；指令系统；中央处理器；输入输出设备；输入输出系统。各章后均附有适当数量的习题和思考题。附录中给出了经过多年实践成功开出的五个实验。

本书内容全面、概念清楚，选材适当、结构合理，深入浅出、循序渐进，具有科学性和启发性，反映出作者多年来的教学经验。

本书可作为大专院校计算机系各个专业的教材，也可供从事计算机工作的工程技术人员自学或参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机组成原理/幸云辉编著. 北京: 北京邮电大学
出版社, 1996. 10
ISBN 7-5635-0250-5

I. 计… II. 幸… III. 电子计算机-构造-理论 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96): 第 17292 号

JSS21/34/16

计算机组成原理

编 著 幸云辉

责任编辑 时友芬

*

北京邮电大学出版社出版

(北京市海淀区西土城路 10 号 100088)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北省高碑店市印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 1/16 印张 17.375 字数 442 千字

1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月第一次印刷

印数: 1—4000 册

ISBN 7-5635-0250-5/TN·110 定价: 20.00 元

前 言

《计算机组成原理》是计算机系各专业的必修课程之一，属于专业基础课。它为计算机系学生学好后续专业课程起着很重要的作用。

本书在编写过程中力求做到内容全面、概念清楚、选材恰当、结构合理，结合作者本人多年来从事这一课程的教学经验，征求和收集了部分教授专家的意见和建议，也参考了国内外有关的教材和文献资料。力求符合认识论规律，由浅入深，循序渐进。按照作者本人的思路，深入浅出，图文并茂，具有科学性和启发性。鉴于计算机技术的飞速发展，不断地推出新概念、新技术、新机型和新结构。本教材注重内容的先进性与实用性，在讲授一般原理的同时，注意理论联系实际。

本课程要求在《数字逻辑电路》课程之后开设，因此本教材未再重复有关内容。全书共分八章。第一、二章介绍计算机基础知识，包括计算机的基本组成，主要技术指标，计算机中的数制与码制，数据的表示方法，对于计算机中的检错、纠错码也作了必要的探讨；第三章介绍运算方法与运算器的组成，包括定点数和浮点数的算术运算方法及其实现，结合当前流行的 SN74181 和 SN74182 芯片的介绍，对加法器的进位信号的形成作了较详细的论述；第四章介绍存储系统，从一般的半导体读写存储器和只读存储器入手，介绍了并行主存系统、cache-主存存储层次和虚拟存储系统的形成；第五章介绍指令系统，指令系统是计算机系统中软、硬件的交界面，本章主要讨论指令格式的优化，介绍几种常用的典型的寻址方式；第六章是中央处理机，由于运算器已在第三章中讨论过了，本章主要对控制器进行较深入的探讨，介绍典型的 CPU 结构将运算器和控制器结合在一起，最后对计算机中的流水结构和 RISC 计算机作了简要分析，以适应当前计算机结构的新发展；第七章是输入输出设备，介绍几种常用的输入输出设备的基本结构；第八章是输入输出系统，主要介绍输入输出设备与主机交换信息的几种方式。最后在附录中给出了经过多次实践、已经比较成熟的五个实验的实验指导书。

本课程的参考学时数为 70~80 学时，其中包括 12 学时的实验。

本教材在编写过程中，得到杜岩民、陆冰松和柴卫同志的热心支持，帮助收集和整理了不少资料；靳秀国和张杰同志编写了实验指导书。在此一并向他们表示感谢。

由于作者水平所限，加上时间仓促，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正，本人将不胜感激。

作者 1996 年 5 月

目 录

前 言

第一章 绪 论

§ 1.1 计算机的发展概况及其应用	(1)
§ 1.2 计算机的组成——硬件和软件	(3)
§ 1.3 计算机系统的层次结构	(5)
§ 1.4 计算机系统的主要技术指标	(6)
习题与思考题	(8)

第二章 计算机中的数码系统

§ 2.1 计数制及其相互转换	(9)
§ 2.2 数据的表示方法	(13)
§ 2.3 机器数的编码格式	(17)
§ 2.4 错误检测码	(22)
习题与思考题	(27)

第三章 运算方法与运算器

§ 3.1 定点加减法运算方法及其实现	(29)
§ 3.2 定点乘法运算方法及其实现	(33)
§ 3.3 定点除法运算方法及其实现	(43)
§ 3.4 浮点数的算术运算方法及其实现	(51)
§ 3.5 计算机中的逻辑运算及其实现	(57)
§ 3.6 运算器的组成与分析	(59)
习题与思考题	(72)

第四章 存储系统

§ 4.1 概 述	(74)
§ 4.2 半导体读写存储器	(77)
§ 4.3 半导体只读存储器	(94)
§ 4.4 并行主存系统	(101)
§ 4.5 高速缓冲存储器	(103)
§ 4.6 虚拟存储系统	(107)
习题与思考题	(113)

第五章 指令系统

§ 5.1 指令格式	(115)
§ 5.2 指令格式的优化	(117)
§ 5.3 寻址方式	(122)
§ 5.4 堆栈结构及其寻址方式	(127)

§ 5.5 指令系统举例	(129)
习题与思考题	(133)
第六章 中央处理器	
§ 6.1 控制方式	(135)
§ 6.2 控制器的功能与组成	(136)
§ 6.3 指令的执行过程	(138)
§ 6.4 时序部件	(139)
§ 6.5 组合逻辑控制器	(143)
§ 6.6 微程序控制器	(145)
§ 6.7 PLA 控制器	(153)
§ 6.8 中断系统	(155)
§ 6.9 CPU 结构举例	(166)
§ 6.10 CPU 中的流水线结构	(170)
§ 6.11 RISC 计算机	(174)
习题与思考题	(186)
第七章 输入输出设备	
§ 7.1 键盘输入设备	(188)
§ 7.2 显示输出设备	(191)
§ 7.3 打印输出设备	(194)
§ 7.4 磁表面存储器	(199)
§ 7.5 光盘存储器	(205)
§ 7.6 汉字处理设备	(207)
习题与思考题	(211)
第八章 输入输出系统	
§ 8.1 输入输出设备的编址方式	(212)
§ 8.2 总线结构	(213)
§ 8.3 输入输出控制方式	(234)
§ 8.4 直接存储器访问方式	(237)
§ 8.5 通道方式	(245)
习题与思考题	(250)
附录 计算机组成原理实验	(251)
参考文献	(271)

第一章 绪 论

§ 1.1 计算机的发展概况及其应用

一、计算机的发展概况

电子计算机是一个统称，实际上它被明确地分成两大类：电子模拟计算机和电子数字计算机。前者是用连续的物理量(例如电流、电压等)来表示数值参加运算，运算结果自然也是连续的物理量。它运算速度快，但是运算精度低，其精度与电子数字计算机比较相形见绌。本书所讨论的是电子数字计算机，它是将运算对象数字化，用数码来表示数值，是不连续的离散信号，其运算结果当然也是不连续的数字信息。它不仅运算速度快，而且可达到很高的运算精度，其精度取决于计算机的字长。现代人们都将电子数字计算机简称为“电子计算机”或“计算机”。

世界上第一台电子数字计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) 可直译为电子数值积分与计算机。由美国宾夕法尼亚大学于 1946 年研制成功并投入使用。ENIAC 是一个庞然大物，它共用 18000 多个电子管，1500 多个继电器，耗电 150 千瓦，重达 30 吨，占地面积约 150 平方米，其运算速度为 5000 次/秒左右。现在看来它性能不高，但在科学发展史上它却是一个重要的里程碑，由它奠定了电子数字计算机的基础。虽然至今只有 50 年，但其发展速度是世界上任何其他学科无法比拟的。

根据组成电子计算机的电子器件，电子计算机已经历了四个发展时代：

第一代是从 1946 年开始的电子管计算机时代。其主要特点是用电子管作为计算机的基本器件，因此它必然是体积大、耗电多、价格高、速度慢，初期主要是为军事和国防技术的需要来研制计算机，其运算速度一般为每秒几千次或上万次，虽然性能不高，但形成了电子计算机的基本结构，确定了程序设计的基本方法。

第二代电子计算机是从 1958 年开始的晶体管计算机时代。由于用晶体管取代了电子管，电子计算机的体积缩小、成本降低、耗电减少，性能得以明显提高，运算速度可达到每秒十几万次甚至更高，计算机的应用范围由科学运算扩大到实时控制、数据处理等领域，高级语言也予以使用。

第三代电子计算机是从 1964 年开始的集成电路计算机时代。初期采用中、小规模集成电路(MSI 和 SSI)作为计算机的基本器件，体积进一步缩小，耗电更少，运算速度等性能进一步提高，成本继续下降。1964 年推出的 IBM360 系统作为最早推出的集成电路通用计算机，其运算速度达到每秒 100 万次，而且提出了由大型、中型、小型机构成的体系结构相同的系列机概念，它们能做到软件兼容。系列机的推出比较好地解决了硬件要求不断更新、而软件要求相对稳定的矛盾，受到广大计算机用户的普遍欢迎。软件技术的迅速发展、操作系统的推出和不断完善对于方便计算机的使用和维护、扩大计算机的应用范围起到了很好的作用。

第四代电子计算机是从70年代初期开始采用的大规模集成电路的计算机时代。采用大规模、超大规模集成电路(LSI、VLSI)作为计算机的基本器件,其集成度可达到每个芯片上集成几万个、十几万个甚至几十万个晶体管,作为第四代计算机的典型代表(微型计算机)应运而生。微处理器从4位、8位、16位、32位到64位迅速发展,就其性能已经达到甚至超过60年代小型机乃至中型机的水平。

目前正处于向第五代计算机过渡的阶段。早在80年代初期,日本已开始了第五代计算机的研究,相继有许多国家加入了这个行列。第五代计算机系统将是具有智能的知识信息处理系统,它能识别自然语言、图形和图像,能积累知识、总结经验,具有再学习的能力。

计算机技术的进一步发展,将计算机技术与通信技术结合起来形成各种规模的计算机网络,随着计算机网络的形成与发展,必然大大加速社会信息化的进程,成为信息时代的重要工具、信息高速公路上的主控者,前途无量。

二、计算机的应用

随着计算机技术的迅猛发展,计算机的应用范围不断扩大,小到儿童玩具,大到导弹、卫星的发射,可以说已渗透到国民经济的各个部门,计算机进入家庭已成为现实,计算机的推广和普及应用已成为技术发展水平的重要标志,下面从几个方面简述计算机的应用领域。

1. 科学计算方面

从计算机问世以来,科学计算就是计算机的主要应用领域。在科学计算和工程设计中,常常会有大量的运算问题。例如导弹或卫星的发射,必须精确地计算其运行轨道和目标;24小时天气预报,如果用手摇计算器则需要算几个星期,改用高速计算机则只需几个小时或更短时间;生命科学中为测定胰岛素的晶体结构,需要大量高精度的复杂运算,只有采用高速计算机才成为可能。总之,在科学研究和工程设计中,离不开用高速计算机来完成复杂、精密的数值计算。或者说,计算机的高速度、高精度的计算改变了科学研究和工程设计的面貌,使计算机成为广大科学工作者和工程设计人员不可缺少的重要工具。

2. 数据处理方面

与科学计算不同,数据处理的主要对象是大量的数据,它不涉及复杂的数值计算,而是对数据进行变换、加工、分析和综合处理。目前我国有大量的计算机应用于银行管理、财会统计、市场预测、销售分析、统计报表等各个领域;另外在图书、资料管理,情报检索以及飞机和火车的自动订票系统等都属于数据处理范畴。一般来说用于数据处理的计算机应有足够大的存储容量。

3. 实时控制方面

在各种实时控制系统中,计算机可根据收集到的数据实时地对生产过程实现自动化控制,因此这一控制又称作过程控制。根据这一原理制成的程控机床不仅可大大减轻工人的劳动强度,还可大大提高生产效率和加工精度,对于提高产品的质量和产品合格率无疑是有效的。现代化养殖场中对室内温度的自动化调节、化工产品中的自动配料、炼钢炼铁过程中的炉温控制等都是实时控制系统;通信系统中的程控交换机更为典型,它随时响应各用户的呼叫并进行处理,完成自动接续等一系列控制功能。

4. 企业管理方面

企业管理的范畴非常广泛,一般来说应包含人事管理、工资管理、物资管理、商务管理、

生产管理、经营管理、情报收集、市场预测等等。近年来方兴未艾的各种办公自动化系统可用来完成这些功能,再加上领导决策与监督系统,一般都是用多台计算机连成网络来实现。随着我国由计划经济向市场经济转变,用计算机来实现企业管理不仅是可能的,而且是必要的,竞争中的企业需要尽快获得各种信息,以便及时作出正确的决策,有效地提高企业管理水平,企业才能适应形势、高速发展,这将成为企业生存和发展的重要保证。因此,许多企业家已经认识到,使用计算机实现企业管理,不是权宜之计,而是百年大计,不是赔本买卖,而是一本万利。

5. 计算机辅助设计

计算机辅助设计(Computer Aided Design 简称CAD)是近年来迅速发展的一新的计算机应用领域。各行各业的设计师们都认识到:为了加快设计速度,提高设计质量,采用计算机进行辅助设计是正确的选择。众所周知,设计飞机周期是很长的,一架飞机从方案设计到产生全部图纸,大约需要两年甚至更长的时间,而采用CAD以后,一架飞机的设计周期可缩短为3个月左右。采用计算机生成的图纸不仅速度快、质量高,而且修改起来非常方便,尤其有利于设计方案的比较。根据不同的设计要求,计算机可产生多种不同的设计方案,然后对各项指标进行比较,选出性能价格比最高的方案,其效率可提高几倍、十几倍甚至更高,我们何乐而不为呢。

采用CAD技术也包含设计计算机本身,采用传统的设计方法,一台计算机的设计周期往往是很长的,用CAD技术采用模拟或仿真办法可有效地加快设计进度、缩短设计周期,使计算机的设计过程进入半自动或全自动的水平。

近些年来,伴随着CAD技术的推广应用,出现了许多新的分支,例如,计算机辅助制造(CAM),计算机辅助测试(CAT),计算机辅助教学(CAI)等等都属于计算机辅助设计的范畴。国家教委明确提出,学校里要将CAI引入教学领域,促进教学内容、教学体制、教学思想和教学方法的改革,要改变传统的“一支粉笔一块黑板”的教学模式,把教学水平推上一个新的台阶,努力实现教学手段的现代化。

除此之外,人工智能、专家系统、机器人等都是计算机应用的领域,多媒体技术的发展更加扩大了计算机的使用范围。计算机技术与通信技术相结合形成的各种类型的计算机网络的飞速发展,加速了社会信息化的进程,它必将成为我国四个现代化建设的重要工具。

§ 1.2 计算机的组成——硬件和软件

任何一个计算机系统都是由密切相关的硬件和软件组成,硬件是计算机的物质基础,软件是发挥和扩大计算机功能的程序,两者相辅相成,缺一不可,没有硬件,计算机便不存在,软件无法运行;没有软件,只有由硬件构成的“裸机”,是无法提供给用户使用的。

一、计算机硬件的组成

计算机硬件由运算器、控制器、主存储器、输入设备和输出设备等五部分组成,如图1-1所示。

从图中可以看出,控制器是全机的指挥中心,由它向其他四个部件发出各种控制信号,使它们构成一个有机的整体;运算器是计算机的核心,由它完成所有的算术和逻辑运算功能;主

存储器用来存放要求机器执行的指令和参加运算的操作数及其运算结果；输入设备用来输入要求机器执行的程序和原始数据；输出设备用来输出运算结果和机内存放的其他信息。通常将运算器和控制器合起来称作中央处理机（Central Processing Unit 简称 CPU），将 CPU 和主存储器合起来称作主机。因此任何一台计算机都是由主机和输入输出设备构成。

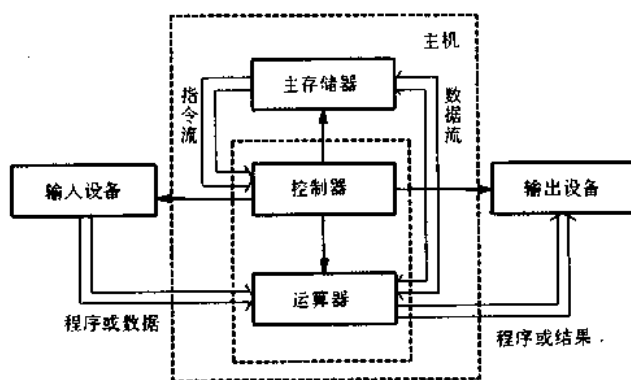


图 1-1 计算机硬件的组成

由于这种硬件结构是由冯·诺依曼等人于 40 年代推出第一台计算机时提出来的，因此通常将其称为冯·诺依曼结构，至今仍有许多计算机保持着这种结构。采用冯·诺依曼结构的计算机具有以下特点：

(1) 指令和数据一样存放在主存储器中，对主存储器来说，两者没有区别，指令和数据都可以被修改。

(2) 指令由操作码和地址码组成。操作码用来表明本指令的功能，地址码用来指定操作数所在的地址，能完成一定功能的一序列指令构成机器可执行的程序。

(3) 主存储器由许多存储单元构成，每个存储单元有一个唯一的地址，所以称主存储器是按地址访问的一维线性空间，每个存储单元中可存储一定位数的二进制信息。有人把它比作一栋大楼，每个存储单元相当于大楼里的一个房间，各个存储单元中存储的信息位数相当于各个房间里住的人数；读取某个存储单元中的信息时只需要给出其地址，相当于到大楼中去找人时只需给出被找人所在的房间号。

(4) 机器以中央处理机(CPU)为中心，输入的信息必须在 CPU 控制下才能写入主存储器中，主存储器中存放的信息也必须在 CPU 控制下才能从输出设备输出。

二、计算机的软件组成

软件是计算机系统的灵魂。可以这么认为，没有配备任何软件的“裸机”无法投入使用，没有配备足够的软件，计算机的功能就不能很好地发挥，计算机的应用范围也将因此而大大缩小。

组成计算机的软件可分成系统软件和应用软件两大类。所有软件都是使用某种语言编写的可完成各种特定功能的程序。计算机语言有机器语言、汇编语言和高级语言之分。机器语言是计算机硬件可直接识别的最初级的语言，它要求使用者不仅要了解机器的硬件结构而且还要掌握各条机器指令的二进制编码格式，这是很难做到的，一般只能用查表的方法来解决，因

此利用机器语言编制程序非常困难。汇编语言是只能由汇编程序识别的语言，用汇编语言编写的源程序必须由汇编程序将其翻译成机器语言程序才能被执行，汇编语言与机器的硬件结构有一定的关系，能较好地发挥机器硬件的功能，因此也要求使用者对机器硬件有一定的了解。在系统结构相同的系列机内部可实现汇编语言级的软件兼容。高级语言是完全脱离机器的硬件结构，根据应用领域的不同要求，它的品种繁多，大体上可分成两大类：一是会话型的高级语言，例如 BASIC 语言，它不但必须由 BASIC 解释程序将其翻译成机器语言程序，而且是翻译一条语句就执行一条语句，以达到人机会话的要求。二是编译型的高级语言，例如 FORTRAN 语言、COBOL 语言和 PASCAL 语言等，它们必须由各自的编译程序将其翻译成机器语言程序后才能被执行。由于高级语言与机器硬件无关，因此具有很好的通用性和可移植性，可在各种不同类型、不同规模的机器上实现软件兼容，也就是说，用高级语言编写的程序可不加修改地在各种机器上运行，这显然是高级语言的最大优点和可取之处。换句话说，完全不了解计算机内部机制的人，同样可使用高级语言编写可执行的源程序。

系统软件通常包括用来管理机器的操作系统，各种高级语言的编译或解释程序、汇编程序以及故障诊断程序、系统调试程序、机器检测程序等等，它们是由系统程序员编写，一般不允许修改，可固定存放在机内的只读存储器中，或者存放在外部存储器中，需要时调入主存储器去执行。

应用软件是应用程序员根据自己的要求，采用各种语言编写的源程序，也包括各种应用系统的应用软件包，例如银行管理软件包、飞机订票系统软件包等等。

计算机系统中软件的组成可概括为如图 1-2 所示

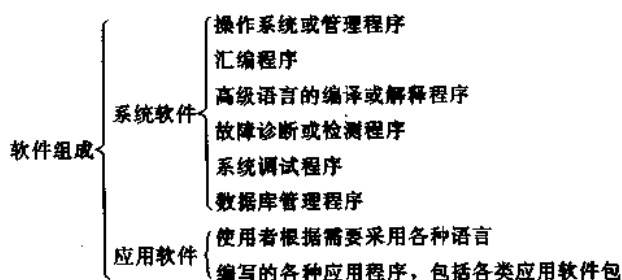


图 1-2 计算机软件的组成

§ 1.3 计算机系统的层次结构

计算机系统中软件和硬件密切相关，它们之间的介面模糊不清而且可动态地改变，这是因为计算机的软件和硬件在逻辑功能上是等效的。也就是说，由硬件完成的一些功能可以由软件来完成，同样由软件完成的一些功能也可以由硬件来完成。通常将前者称作硬件的软化，而称后者为软件的硬化。那么在设计计算机的过程中，如何最佳、最合理地实现软、硬件的功能分配就成为计算机设计者们最关心、最值得研讨的问题之一。

计算机系统的层次结构被认为是描述计算机系统的一种比较好的方法，通常将计算机系统分成六个层次，如图 1-3 所示

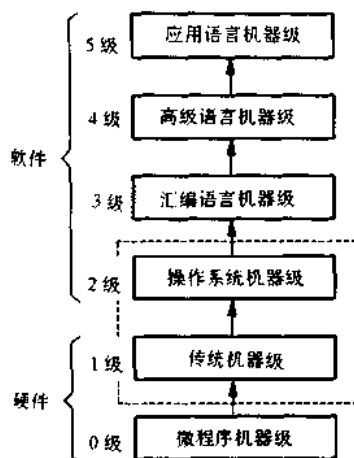


图 1-3 计算机的层次结构

图中，传统机器级是由硬件实体构成的“裸机”。它只能识别机器语言，使用起来非常困难。

操作系统机器级由管理机器的系统软件构成，在一些小系统中被称作管理程序或监控程序，它给用户方便的使用和维护环境。随着软件技术的发展，操作系统的功能越来越强，成为系统软件的核心。在操作系统的管理之下，能更好地发挥机器硬件的功能，有效地扩大计算机的使用范围。早期的操作系统用汇编语言编写、设计的工作量很大，现代许多机器的操作系统用高级语言编写。从早期的实时操作系统(RTOS)、微机中广泛采用的磁盘操作系统(MS-DOS 或 PC-DOS)到国际公认的交互式分时操作系统(UNIX)等都是非常成功的操作系统版本。

汇编语言机器级由汇编程序支持，用户使用汇编语言编写的源程序由汇编程序翻译成机器语言后才能由机器执行，但是对用户来说，他们所看到的似乎是能识别汇编语言源程序的汇编语言机器级。

高级语言机器级由各种高级语言的编译程序或解释程序支持，允许用户使用各种高级语言编写源程序，经各自的编译或解释程序翻译成机器语言后才能由机器执行，但是对用户来说，他们所看到的似乎是能识别高级语言源程序的高级语言机器级。

应用语言机器级是为各种特定的应用环境编制的专用程序，通常称之为“应用软件包”。它们可采用各种高级语言编写。编写这样的应用软件，例如银行管理系统软件包，飞机订票系统软件包等，需要对应用现场的业务非常熟悉。

除此之外，在传统机器级之下还有一级微程序机器级，它是用微程序去解释机器指令，每一条机器指令都对应一个微程序，任何一条机器指令的执行过程成为一个微程序的执行过程。确切地说，它是将解释各条机器指令的微程序事先写入由只读存储器构成的控制存储器中，区别于软件(software)和硬件(hardware)，可称它为固件(firmware)。虽然不是所有机器都必须设置这一级，但是一般来说，除了超高速的计算机不宜采用这种控制方式之外，其他机器均可采用这种微程序控制方式，因为它使得计算机的控制部分更规整、更便于设计，可有效地缩短计算机的设计周期，因此受到计算机设计者们的青睐。

总之，在构成计算机系统的六个层次中，后二级属于硬件；前四级属于软件，它在一定程度上反映了软件的发展过程，可认为它们构成的是虚拟机级。由于软件的支持，使其展现在用户面前的是具有各种不同功能的虚拟机器。

§ 1.4 计算机系统的主要技术指标

描述计算机系统的性能通常有如下几个主要技术指标。

一、机器字长

机器字长是指计算机能进行多少位二进制数的并行运算，实际上机器字长是指运算器所

具有的位数。显然，机器字长越长，运算精度就越高。由于参加运算的操作数和运算结果均可存放在主存储器中，因此机器字长和主存储器字长一般是一致的。衡量机器字长的单位一般用“位”(bit)，位是计算机内的最小信息单位，8位构成一个“字节”(Byte)，现代计算机的机器字长一般都取“8”的整数倍，因此也可用字节来表示机器字长。

机器字长与机器规模有一定的关系。早期，根据机器字长的不同，将计算机分成不同的型号，例如将字长为8~16位的机器称作小型机，16~32位的机器称作中型机，32~64位的机器称作大型机，64位以上的机器为巨型机。随着计算机技术的飞速发展，“性能下移”现象非常明显，许多过去只在中、大型以上机器上使用的技术逐步下移到小型机甚至微型机中使用。众所周知，从70年代初期微型计算机问世以来，其发展速度惊人，几乎每2~3年推出一种新的产品，机器字长从1位、4位、8位、16位到32位，以至于目前64位字长的微处理机已成为商品。因此计算机技术发展到现在，机器字长已经不能成为计算机分型的标准，只是机器字长越长，运算精度越高。

二、机器运算速度

长期以来，“运算速度”被认为是评价计算机性能的重要指标之一。使用者认为机器运算速度越高越好，但是如何正确地衡量计算机的运算速度，这也有一个发展过程。

早期的计算机结构大体相同，实现方式也相差甚少，中央处理机是其核心部件，因此可用机器主频来描述机器的运算速度，这就是说机器主频越高运算速度也就越高。

随着计算机技术的发展，可采用的机器结构各不相同，即使结构相同的机器还可采用不同的实现方式，同样主频的机器，它们的运算速度可不相同。因此人们进而认为机器的运算速度应该用指令的执行速度来衡量，但是指令系统中各条机器指令的执行速度差别也很大，因此有人提出用每秒能执行加法指令的条数来衡量机器的运算速度，或者用每秒能执行最短指令的条数来衡量机器的运算速度，单位可采用 KIPS (Kilo Instructions Per Second; 译作千条指令/秒) 或 MIPS (Million of Instructions Per Second; 译作百万条指令/秒)。但有人认为用单一指令的执行速度来描述机器运算速度也不很确切，因为一个指令系统中往往包含几十条甚至几百条指令，这些指令的使用频度各不相同，任何一条机器指令的执行速度都不能确切地描述机器的运算速度。因此后来又有人提出了“等效指令速度描述法”，具体来说就是从大量的典型程序中统计出各条机器指令的使用频度(f_i)，再根据它们的执行时间(T_i)可计算出等效的指令执行时间(T):

$$T = \sum f_i \cdot T_i$$

显然其执行速度应为 $V = \frac{1}{T}$ 。

假定在某台机器上统计结果如表 1-1 所示，那么等效的指令执行速度 V 应为:

$$V = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.3t_{加} + 0.2t_{减} + 0.1t_{乘} + 0.05t_{除} + 0.25t_{逻辑} + 0.15t_{其他}}$$

表 1-1

指令种类	加法指令	减法指令	乘法指令	除法指令	逻辑运算指令	其他指令
使用频度	30%	20%	10%	5%	25%	15%

显然，这是一种比较严格的描述机器运算速度的方式，但是实现起来比较困难，因为要准确地统计各类指令的使用频度是一件很困难的事情。因此在现代机器中，有的分别用各类指令的运算速度来说明，比如某台机器的加法运算速度是 1000 万次/秒，乘法运算速度为 200 万次/秒，逻辑运算指令的运算速度是 1500 万次/秒，等等，供用户购置机器时参考。

三、机器的容量

计算机的容量是任何使用者都非常关心的重要指标，因为计算机除了速度快之外，还必须容量大，否则将无法充分发挥计算机高速运算的性能。计算机的容量实际上是指机内主存储器的容量，有关主存储器的性能指标将在后面第四章中详细讨论。除此之外，还有系统的可靠性、软件的可维护性、可配备的外部设备的数量以及系统使用是否方便等等都可用来描述计算机系统的性能，在此不再一一赘述。

习题与思考题

1. 电子数字计算机与电子模拟计算机的主要区别是什么？它们各有什么特点？
2. 简单描述电子数字计算机的发展过程，各个发展阶段的主要特点是什么？
3. 计算机的应用范围是什么？
4. 冯·诺依曼结构的主要特点是什么？
5. 简单描述计算机软件的组成。
6. 简单描述计算机的层次结构，说明各层次的主要特点。
7. 计算机系统的主要技术指标有哪些？

第二章 计算机中的数码系统

§ 2.1 计数制及其相互转换

一、进位计数制

人们在日常生活中的最常用的是十进制,它有两个主要特点:逢10向高位进1和共有10个数码(0~9)用来表示数值。

计算机中如果直接采用十进制,那么需要有十个稳定状态的存储器件和逻辑部件,这样实现起来有困难。通过分析和比较,发现二进制是计算机中最好实现的计数制,只是读写起来不方便,为此又推出八进制和十六进制。它们具有共同的特点:各种计数制都有一个基数(r),逢 r 向高位进“1”,共有 r 个不同的数码(0~ $r-1$)来表示数值。具有 n 位整数、 m 位小数的 r 进制的数值 X 可写成按权展开式如下所示:

$$\begin{aligned} X &= X_{n-1}X_{n-2}\cdots X_1X_0.X_{-1}X_{-2}\cdots X_{-m} \\ &= X_{n-1} \cdot (r)^{n-1} + X_{n-2} (r)^{n-2} + \cdots + X_1 (r)^1 + X_0 (r)^0 + X_{-1} (r)^{-1} \\ &\quad + X_{-2} (r)^{-2} + \cdots + X_{-m} (r)^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} X_i (r)^i \end{aligned}$$

式中: X_i 为各位数码,可有 r 种不同取值(0, 1, 2, ..., $r-1$);

$(r)^i$ 为各位数码所具有的权值,由它们所处的位置来确定;

r 为基数,逢 r 向高位进“1”。

如果 $r=2$,则为二进制数,逢2向高位进“1”,只用两个不同的数码(0和1)表示数值。

例如:

$$\begin{aligned} (111\ 001.101)_2 &= 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (57.625)_{10} \end{aligned}$$

如果 $r=8$,则为八进制数,逢8向高位进“1”,可有8个不同的数码(0, 1, 2, ...,

7)表示数值。例如:

$$\begin{aligned} (71.5)_8 &= 7 \times 8^1 + 1 \times 8^0 + 5 \times 8^{-1} \\ &= (57.625)_{10} \end{aligned}$$

如果 $r=16$,则为十六进制数,逢16向高位进1。可有16个不同的数码(0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F)表示数值。例如:

$$\begin{aligned} (39.A)_{16} &= 3 \times 16^1 + 9 \times 16^0 + A \times 16^{-1} \\ &= (57.625)_{10} \end{aligned}$$

以上用三种不同的计数制表示的是同一个十进制数,说明任何一个数值都可用不同的计数制表示成不同的形式。可以看出,使用八进制和十六进制进行读/写比用二进制方便得多。由

于 $2^3=8$, 因此任何 1 位八进制数都可用 3 位二进制数来表示。同样由于 $2^4=16$, 因此任何 1 位十六进制数都可用 4 位二进制数来表示。

如果要在计算机中表示十进制数, 那么只能采用十进制数的二进制编码, 可称作“二—十”进制数, 通常称之为 BCD 码 (Binary Coded Decimal)。BCD 码是用 4 位二进制数来表示 1 位十进制数, 而 4 位二进制数可有 16 种编码, 表示十进制数时只需要选用其中的 10 种编码, 因此 BCD 码可有多种不同的构成方式, 通常用各位二进制数的权值来定义。常用的有“8421 码”、“5421 码”、“2421 码”和“余 3 代码”等, 它们是从 16 种编码中取出不同的 10 种编码来表示十进制数的 0~9, 如表 2-1 所示。

表 2-1

序号	16 种编码	8421 码				5421 码				2421 码				余 3 代码						
		“+”	BCD 码			“+”	BCD 码			“+”	BCD 码			“+”	BCD 码					
0	0 0 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	无效						
1	0 0 0 1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0					0	0	1
2	0 0 1 0	2	0	0	1	0	2	0	0	1	0	2	0					0	1	0
3	0 0 1 1	3	0	0	1	1	3	0	0	1	1	3	0					0	1	1
4	0 1 0 0	4	0	1	0	0	4	0	1	0	0	4	0	1	0	0	0	0	1	1
5	0 1 0 1	5	0	1	0	1	无效				无效				2	0	1	0	1	
6	0 1 1 0	6	0	1	1	0									3	0	1	1	0	
7	0 1 1 1	7	0	1	1	1	无效								4	0	1	1	1	
8	1 0 0 0	8	1	0	0	0									5	1	0	0	0	5
9	1 0 0 1	9	1	0	0	1	6	1	0	0	1	6	1	0	0	1	0	1	0	
10	1 0 1 0	无效				7	1	0	1	0	7	1	0	1	0					
11	1 0 1 1					8	1	0	1	1	5	1	0	1	1	8	1	0	1	1
12	1 1 0 0					9	1	1	0	0	6	1	1	0	0	9	1	1	0	0
13	1 1 0 1					无效				7	1	1	0	1	无效					
14	1 1 1 0									8	1	1	1	0						
15	1 1 1 1									9	1	1	1	1						

表 2-1 中, 前面三种 BCD 码 (8421 码、5421 码和 2421 码) 称作有权码; “8421 码” 从高位到低位各位的权值顺序为 8, 4, 2, 1; “5421 码” 从高位到低位各位的权值顺序为 5, 4, 2, 1; “2421 码” 从高位到低位各位的权值顺序为 2, 4, 2, 1; 它们因此而得名。“余 3 代码” 是无权码, 又称作偏权码, 它所表示的数值是用 8421 码的权值计算后再减 3 才是所表示的十进制数, “余 3 代码” 因此而得名。

上述编码中, 8421 码是最常用的 BCD 码, 它的 10 种编码与十六进制数的前面 10 种编码完全相同, 本书中如果不加说明, BCD 码就是指 8421 码。

二、各种计数制之间的相互转换

1. 二进制、八进制、十六进制数之间的相互转换

因为二进制数与八进制和十六进制数的基值之间成整数幂的关系: $2^3=8$, $2^4=16$, 使得它们之间的转换非常简单, 基本上一一对应。

(1) 将二进制数转换为八进制数

转换方法: 以小数点为界, 分别向左、右每 3 位二进制数直接写成 1 位八进制数。前边

或后边不满3位时补“0”。例如：

$$(10,110,011.101)_2 = (263.5)_8$$

(2) 将二进制数转换为十六进制数

转换方法：以小数点为界，分别向左、右每4位二进制数直接写成1位十六进制数。前边或后边不满4位时补“0”。例如：

$$(1011,0011.101)_2 = (B3.A)_{16}$$

(3) 将八进制数或十六进制数转换成二进制数

转换方法：将各位八进制(或十六进制)数直接写成3位(或4位)二进制数，小数点位置不变。例如：

$$(472.45)_8 = (100,111,010.100101)_2$$

$$(8AC.9)_{16} = (1000,1010,1100.1001)_2$$

2. 二进制、八进制、十六进制数与十进制数之间的相互转换

(1) 二进制、八进制、十六进制数转换为十进制数

① 将二进制数转换为十进制数

转换方法：利用二进制数的按权展开式。例如：

$$\begin{aligned}(101101.101)_2 &= 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\&= 32 + 8 + 4 + 1 + 0.5 + 0.125 \\&= (45.625)_{10}\end{aligned}$$

② 将八进制数转换为十进制数

转换方法：利用八进制数的按权展开式。例如：

$$\begin{aligned}(257.2)_8 &= 2 \times 8^2 + 5 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 2 \times 8^{-1} \\&= 128 + 40 + 7 + 0.25 \\&= (175.25)_{10}\end{aligned}$$

③ 将十六进制数转换为十进制数

转换方法：利用十六进制数的按权展开式。例如：

$$\begin{aligned}(9A.C)_{16} &= 9 \times (16)^1 + 10 \times (16)^0 + 12 \times (16)^{-1} \\&= 144 + 10 + 0.75 \\&= (154.75)_{10}\end{aligned}$$

(2) 将十进制数转换成二进制、八进制和十六进制数

将十进制数转换成r进制数，需要对整数部分和小数部分分别进行转换。

① 将十进制整数转换成二进制整数，采用“除2取余法”。例如：

$$(105)_{10} = (1101001)_2$$

其转换过程如下：

2	105	余数为1—— k_0
2	52	余数为0—— k_1
2	26	余数为0—— k_2
2	13	余数为1—— k_3
2	6	余数为0—— k_4
2	3	余数为1—— k_5
	1	余数为1—— k_6