



计算机普及丛书

计算机体系 结构

中国铁道出版社

马桂祥 编

计算机普及丛书

计算机体系结构

马桂祥 编

中国铁道出版社

1988年·北京

内 容 提 要

本书主要介绍计算机体系的构成方法和今后发展方向。使读者对计算机有一个全面了解并掌握系统内各部件间的相互关系、组成原则及应用范围。

全书分七部分，包括：体系结构基本概念；数据、指令及知识的表示方法，指令重迭及流水的控制；主存、辅存及高速缓存层次及地址映象、替换算法；输入输出信息传送、中断控制及通道工作过程；多机系统与并行处理指令流和数据流结构以及分布式计算机系统；第五代机的智能接口、知识库系统及问题求解推理机结构。

本书是计算机工作者自学丛书之一，可供计算机类、管理类院校师生学习参考。

计算机普及丛书

计算机体系结构

马桂祥 编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 崔滨九 封面设计 翟达

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：10.625 字数：242千

1988年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001-4,200册 定价：2.55元

前 言

为适应我国社会主义四化建设的需要，并满足已初步掌握计算机基础知识的广大科技、管理人员扩充新知识和提高业务水平的要求，我们组织编写这套计算机系列自学普及丛书。计划编写《计算机体系结构》、《软件基础》、《计算机应用》、《外部设备》等。

目前，各省市及高等院校已出版了一些各具特色的、不同层次的计算机类书籍，收到了从普及到提高的效果。随着科学技术的发展，很多已出版的图书，无论从技术上或者在应用方面都不适应发展的需要。电子计算机的外文书籍及杂志资料又浩如烟海，广大读者无法系统阅读。因此希望有一套技术先进、分量适当的系列书，便于自学或参考。为此，我们组织编写了这套丛书。

本书为丛书第一册，编写了计算机体系结构的内容。对于计算机体系结构 (*computer Architecture*) 的含义有不同的理解，所以各种书籍及刊物对于内容的取舍也不尽相同。本书是从软硬件的交界面出发，论述软硬件功能的分配，硬件结构的实现及分析方法。从软硬件有机配合的整体观点上，除宏观的介绍机器体系结构外，还从功能上说明机器动作原理，但不过细地论述机器的组成原理和工程技术上的问题。

编者曾在北方交通大学有关专业和夜大计算机应用专业试用过本稿。成书时，又参考了苏东庄主编《计算机系统结构》、金兰编的《并行处理计算机结构》、(美) 约翰 P.

海斯著《计算机结构与组织》、(日)萩原宏著《电子计算机软件基础》及第五代计算机的有关资料,充实和提高了本书。在此特向以上作者致谢。

限于编者水平,书中难免有错误之处,请读者批评指正。

丁艳同志为编写本书作了大量的工作。

编者

一九八六年

目 录

第一章 体系结构基本概念	1
第一节 计算机的类型	2
第二节 计算机的发展概况	4
第三节 计算机的特性	8
第四节 计算机的结构	12
第五节 计算机系统的层次结构	20
第六节 影响结构发展的因素	26
第二章 信息及知识表示法	33
第一节 信息与计算机	34
第二节 数据结构与数据表示	36
第三节 指令格式与类型	54
第四节 算术及逻辑运算	64
第五节 数据表示的确定与演进	81
第六节 知识表示	102
第三章 指令及其控制方式	107
第一节 指令格式的优化	108
第二节 指令系统分析	120
第三节 指令重迭控制方式	136
第四节 流水控制方式	141
第五节 相关处理及控制	150
第四章 存储体系	160
第一节 对存储器的要求	161
第二节 存储体系的形成与发展	167

第三节	地址映象	171
第四节	替换算法	178
第五节	高速缓冲存储器CACHE	183
第五章	输入输出系统	188
第一节	输入输出系统的发展	188
第二节	总线结构	192
第三节	中断系统	202
第四节	通道及其特点	212
第五节	通道的操作过程	222
第六章	并行处理与多机结构	229
第一节	并行性概念的发展	229
第二节	结构向并行处理演进	231
第三节	并行处理机	235
第四节	数据流驱动处理	254
第五节	多机系统	270
第六节	分布式计算机系统	283
第七章	第五代机体系结构	294
第一节	第五代机体系特点	294
第二节	体系层次及概念框图	298
第三节	核心语言及推理结构	305
第四节	知识库机的结构	315
第五节	人机智能接口机构	324
第六节	智能机的展望	326

第一章 体系结构基本概念

二十世纪科学技术的卓越成就之一就是电子计算机的出现和应用。

计算机技术是先导性技术，它是国民经济和国防建设进行技术改造并实现科学管理不可缺少的现代化手段。

计算机的技术水平、生产规模和应用程度已成为衡量国家生产力发展和现代化程度的重要标志。它是发展得最快的科学技术，并且迅速而又广泛地渗透到社会的各个领域。给生产、技术、管理甚至社会生活带来了巨大的变化。现有资料表明，在工业发达的国家，有四千多个行业普遍应用上了计算机技术。

我国正在进行四化建设，如果不实现计算机化，现代化是不能设想的。在国防上，不管是战略武器、战术装备，还是战略技术指挥，都离不开计算机；在经济建设上，大量的产品换代要实现数字化、集成化、智能化、需要计算机；产品的设计过程、生产过程、质量控制、管理改革，需要计算机；整个经济活动诸如计划、统计、综合、平衡、财政管理、资金周转等也都离不开计算机。上述种种，所以离不开计算机的原因，不外乎它的功能很强，它不仅能进行数值的计算及数据事务处理，还能用来进行实时控制。

研究开发、产品制造、应用服务、人才培养是计算机技术和计算机工业不可分割的四个重要部分。发展计算机技术和工业的目的全在于应用，而计算机的普及、推广和应用又是计算机技术和工业发展的一个强大的推动力。

计算机系统（体系）是由硬件和软件组成的。硬件是计算机系统实际中的实际装置，主要指的是机器指令系统及中央处理机、存储器 and 外部设备。它是计算机的基础。软件则是计算机系统中用户共同使用的一组程序和资料说明书等。这组程序有汇编程序、编译程序、操作系统、调试程序、数据库管理系统和应用程序包等，软件的作用是为了计算机的使用方便、提高计算机系统的效率、或是用于扩展硬件的功能。

计算机体系结构则是软、硬的交界面，它所要研究的是软、硬件的功能分配以及如何最佳、最合理地实现分配给硬件的功能。

研究它的目的是实现部件的标准化、品种的系列化、应用的系统化和结构的积木化。

第一节 计算机的类型

现有的计算机，可以分为两大类：即“模拟”计算机和“数字”计算机。这种分类是根据计算机进行运算中表示数的方法而决定的。

模拟方法，即数学上的相似（类比）方法，它是用连续变化的物理量，如电流、电压，旋转角度，长度等物理量来表示被运算的数值。计算尺是根据尺面上有限长度所划分的刻度表示数值和计算结果的，这个数值就是一个模拟量。

数字方法，是用离散（非连续）物理量，如算盘的算珠个数或电脉冲个数和编码来表示被运算的数值。

经常接触到的测量仪器有模拟式和数字式两种。

模拟式电压表是利用指针转动角度来描述电压的大小，其数值是通过刻度读出的，这个读出的数不是非常确切的一个值，而是由连续量中取出一个近似值，这个值当然叫做模拟量。

数字电压表直接用数字来表示被测到的电压数值，这个数值称为数字量。数字表示时，数值是确切的，标出多少就是多少。

具体到电子计算机，它的两大类型是：

电子模拟计算机，它是利用电子线路中的电压变化来模拟各种连续量的运算。例如计算三角正弦函数 $y = \sin(t)$ ，它是以时间的长短来替代自变量 t 的，而利用某个电路在这个时间 t 内的电压变化来模拟正弦函数值 y 。由此看出：模拟计算机的输入是连续变化的电压模拟量，而输出仍是连续变化的电压模拟量，但输入与输出之值是按函数关系得到的。这类计算机结构简单，运算方便，解题时间短，但通用性差，只能作某方面的数学计算。而且由于它的“数”是以时间、电压等物理量模拟的，加上电子元件本身物理特性的影响和显示仪表的读数误差、量程有限等原因，运算量的变化幅度不可能很大，计算的精度也不可能很高，因而大大限制了这种计算机的应用范围。

电子数字计算机，它是利用电脉冲进行编码，机器对电码进行运算和处理。这种运算是按算术法则和逻辑法则进行的。也就是说，任何要进行计算的数学方程式，都必须先化成算术四则运算的算法，计算机才能运算。我们仍以计算正弦函数 $y = \sin(t)$ 为例，送入计算机前要找出与此函数对应的计算方法，为此将函数换成等效的级数才能送入计算机运算，因为计算机只会做算术运算，或严格的说，计算机只会做加法。

正弦函数与级数对应关系如下：

$$y = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

上式应取几项，完全决定于精度的要求。数字计算机运

算速度快、精度高且通用性强。

目前，电子模拟计算机和电子数字计算机都在不断的发展着，而且两者溶合在一起成为模拟数字混合计算机，这样一来，联合功能就更大了。

当前，由于电子数字计算机功能多、通用性强，使用方便，容易实现高速度、高精度，还有大容量的记忆存储设备和辅助外围设备配套，再加上计算结果能用数字量表达，所以它得到了人们的重视，因此应用更为广泛。通常人们所说的和书中所谈到的“电子计算机”或“计算机”或“电脑”（相似于人脑的记忆及判断功能），都是指电子数字计算机而言的。

若以使用目的来划分，有通用机和专用机之分。

从用途上大致可分为科学工程计算计算机、数据处理计算机工业控制计算机和知识处理计算机。

从规模和功能上有巨型、大、中、小及微型计算机之分。

第二节 计算机的发展概况

人类在同自然界的斗争中产生了“数”的概念。随着数的发展，“计算”成了生产、生活中的一项重要活动，相应地产生了各式各样的计算工具。

最早的记数和计算工具是用算筹(如小木棍)来完成的。

算盘是我国古代劳动人民发明的，虽说发明年代尚待考证，但南宋时已有“九九歌诀”在民间流传。从此算盘成为千百年来人类主要的计算工具，至今仍广泛地应用着。

机械式加法计算机是由法国数学家帕斯卡尔 (B·Pascal) 于1642年制造成功的。

机电式计算机是由美国哈佛大学物理系在美国国际商业

机器公司（简称IBM公司）支持下，于1944年研制成功的。是部分使用继电器的数字计算机马克-Ⅰ（Mark-I），后来又制成全继电器的Mark-Ⅱ型计算机。

电子管计算机是在第二次世界大战中，为解决火炮弹道计算的需要，美国陆军弹道研究所与宾夕法尼亚大学合作于1946研制成功的。整个机器使用了1万8千多个电子管，7千个电阻，1万个电容和6千多只继电器，体积约为3千立方英尺，重30吨，机房面积170平方米。此机每秒可做加法5千次或乘法500次或除法50次。它比手摇计算机快千倍，比人工计算约快20万倍，该机工作一小时的计算量需要百人用手摇计算机计算二个月。这台计算机叫做“电子数值积分和计算机”（Electronic Numerical Integrator and Computer），简称ENIAC，它被认为是现代电子计算机的始祖。

第一台电子计算机ENIAC虽然取得了巨大的成功，但设计思想还有缺点，其一是没有存储器；其二是计算过程虽然是在程序控制下自动完成的，但程序本身是用线路连接的方式来实现的，每当改变题目和更换解题程序时需要重新连线，这就影响了计算的速度和机器的效率。与此同时，著名数学家美籍匈牙利人冯·诺依曼（Von·Neumann）等人于1945年6月发表了一个全新的程序储存式通用电子计算机方案EDVAC，该机在50年代初被美国完成。在1946年7月又提出一个更加完善的设计报告《初步探讨电子计算机的逻辑结构》。这个综合设计思想便是著名的“冯·诺依曼”型机器的基础。它的思想是：

1. 存储器顺序编址，按地址访问每个编址的单元；
2. 数据和指令都采用二进制码并存放于存储器中，指令按执行顺序存储；

3. 机器以运算器为中心等。

冯·诺依曼由于提出了电子计算机的一般原理而被称为现代电子计算机的奠基人。

从第一台机器诞生以后，近40年来，随着器件的发展，计算机经历了四次重大的技术换代。为此，有人从器件的角度将电子计算机划成下述几代：

第一代：从ENIAC开始为电子管计算机时代。这类机器主要用于科学计算，使用指令系统（也称机器语言）来编制程序。对于使用人员来说，不仅要了解本行业务，还要通晓计算机的指令系统及操作规程。而且每台机器的指令系统又各不相同，因此，当时使用计算机并不是一件容易的事情。

第二代：是以晶体管为主组成的计算机。这类机器的应用重点由科技领域转向经济管理领域。为了提高机器使用效率，机器采用管理程序和多道应用程序，同时还研制出不依赖于机器的高级语言（接近于数学公式的语言），如1956年的FORTRAN语言(FORmula TRANslation)，即公式翻译语言，1959—1960年的COBOL语言(COMmon BUSIness ORiented Language)，即面向商业的通用语言，1960年的ALGOL语言(ALGORithmic Language)，即算法语言。使用者根据这些语言规定的语法，用英文字母、数字与公式构成语句向计算机送达指令(程序)，从而简化了程序的编制，为计算机的推广使用创造了条件。

第三代：是集成电路计算机时代。集成电路就是将多个元件集合在一小块半导体芯片上，构成一个完整的功能电路。因此，大大提高了计算机的性能价格比和缩小了体积。外部设备又研制成图形显示和终端设备，方便了人同机器的联系。

第四代：是大规模集成电路计算机时代。所谓大规模集成

电路就是在一小块芯片上密集了成千上万个晶体管。由于体积进一步的缩小，而计算机的功能却在扩大，这就导致成本降低，于是廉价的微型计算机得到了迅速的发展，带来了计算机的大普及。

微型计算机开始与民用电器相结合就渗透到办公室和日常家庭的生活中来。

这四代的变化经历了由40年代中期到研制成大规模集成电路的70年代中期，共用了30年的光景，平均看来，每隔5至7年，电子计算机的速度、存储容量及可靠性方面相应提高10倍，而体积缩小10倍，成本则降低10倍。

未来第五代计算机是什么样的？目前许多国家的科学家都在研究和试制。可以预见，这种计算机不但在设计思想和系统结构将有革新突破外，组成的原器件也将采用前所未有的新技术和新材料。

不久前，在日本信息处理开发协会下设置了第五代计算机研究调查委员会。作为研究目标的计算机系统就是知识信息处理系统 KIPS (Knowledge Information Processing System)。

新的计算机研究的大方向，总是朝着尽可能多地模拟人类大脑的某些活动，使机器具有某种“智能”，提高学习、推理与判断的能力。同时在人和机器联系方面将更接近于自然方式的信息交换，使计算机具有语音识别、图象识别及处理功能。

我国的计算机事业起步于1956年。

1956年我国制订的“十二年科学技术发展远景规划纲要”中就把电子计算机技术列为国家五大重点之一。

1958年研制成功小型电子管103型计算机，

1959年研制成功大型电子管104型计算机，

1960年开始研制晶体管计算机，到1964年第一台晶体管109乙型计算机诞生；不久108乙机又投入批量生产；相继又有441B及121型的第二代机器批量生产。

1971年开始试制小规模集成电路150型计算机，到1973年已开始设计制造第三代系列化计算机，定型生产的有DJS-100系列、DJS-180系列、大型机DJS-200系列以及微型计算机的DJS-050系列、DJS-060系列等等。

1978年召开的全国科学大会把计算机列为八个重大影响全局的综合性科学技术之一，列入国家重点项目。

1983年底我国研制成757型向量流水机，相继又有巨型“银河”系列机宣告研制成功。

第三节 计算机的特性

前面已提到，计算机不仅是一种数值的计算工具，而且是能对文字、图象、语音等多种复杂形式的信息进行处理的工具。所以，就不能用单纯“计算”的观点来理解它，而应从普遍的广义上来认识它，即把它看成是能对任何形式的信息进行加工处理的工具。这样才能充分认识到在智力密集型结构的社会中，信息成为社会生产的一种重要资源条件下，计算机在代替人类部分脑力劳动方面所蕴藏的巨大潜力。它超出历史上出现过的任何一种计算工具的独到之处，就在于它汇集着许多别的工具所不能比拟的特性。

表1.1

计算机的内特性	表征出的外特性
信息处理高速化 信息编码数字化 逻辑判断与处理 存储程序与数据	快速性、通用性 准确性、通用性 逻辑性、通用性 快速、准确、逻辑、通用

表1.1表明了机器的内特性与表征出的外特性关系。内

特性是因，外特性是果。

内特性是基本，它有四个单独的特性。外特性是内特性所能完成功能的具体表现。

由表1.1中看出：单项的存储程序的内特性使得机器表现出全部四种外特性来，而外特性的通用性是由四种内特性综合而体现出来的。这两点就体现出电子计算机与一般计算工具所不同之处。

一、快速性

指计算机完成一次加法（或减、或乘、或除）运算所需的时间。计算机的运算速度是相当高的，它工作的单位时间是以ms、 μ s（百万分之一s）或ns来计算的。第一代计算机完成一次运算的速度是以ms计的。第二代的速度则以 μ s计，比第一代要快上千倍，第三代的速度以ns计，例如一台大型计算机完成一次乘法运算所需时间为50ns，即每个 μ s时间内完成20次乘法运算，或说每秒钟能完成2千万次乘法。例如，喷气式飞机在一微秒内可飞过0.025cm，当它飞过2.5cm时，计算机已完成了2千次乘法运算。

关于速度多少的规定是以加法为准、还是以乘法或以什么为标准，在以后章节中详细论述。

计算机的快速计算，为人们争得了时间。特别是计算量很大，时间性又很强的工作，使用计算机的意义就特别大。导弹或其它发射装置运行的计算就是其中的一例。

二、准确性

指的是计算结果的答案准确。因为一般计算工具没有很高的精度，且计算一个大题目时，由于误差积累太大而得不到正确的答案。通常计算尺、电压表等设备读出的数值精确度

只有三位有效数字。而目前生产和使用的电子计算机则可以得到十位以上的有效数字。数字计算机的精度取决于字长(表示数的位数)，而不是取决于计算机所用元件和器件的精确度。因此人们可根据计算的需要来设计计算机的字长。字长愈长则愈精确，从原理上讲，计算机的精度是可以不受限制的，但字长过大使设备太复杂也是做不到的。

三、通用性

计算机的通用性是由数学公式的通用性、逻辑表达式的通用性以及机器的快速、准确、存储程序(即自动计算)的能力所表现出来的。

计算机之所以能广泛地应用和服务于各个部门，概括起来就是应用于数值计算、事务数据处理、自动控制、辅助设计、逻辑关系加工判断和人工智能等方面。

① 数值计算，就是从某些已知的数量去求未知的数量。而将已知数量和未知数量的关系用数学形式表达出来，这就是数学方程。常见的有代数方程、微分方程、积分方程或者不是表示相等关系而是表示不相等关系的联立不等式等等。电子计算机在解上述各类方程时，都是将方程式改变成许多算术四则运算的步骤后再进行运算，研究对应的数学关系就叫做“计算方法”。运算后得到的方程式的数值解是离散量。

② 数据处理指的是需要进行处理的数据量很大、时间性强，要求短时间内得到结果，而包含的数学方法不一定比数值计算简单，但数学的计算却比较简单，也就是说应用逻辑判断比较多。用计算机对数据及时地加以记录、整理与计算，加工成人们所要求的数据形式或将一种表格形式变换成另一种格式的变换都属于数据处理。

数据处理是计算机一个最大的应用领域，据统计，在工