

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

计算机组成 与结构

程晓荣 翟学明 王晓霞 编 著
郑顾平 潘德锋



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

计算机组成 与结构

编 著 程晓荣 翟学明 王晓霞
郑顾平 潘德锋
主 审 王凤先



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书从计算机组成与系统结构的基本概念出发,较详细地论述计算机单机系统中各大部件的结构、工作原理、设计方法,并分析探讨了计算机系统结构的基本原理。全书共分 9 章,主要内容包括计算机系统概论、运算方法和运算器、存储系统、指令系统、中央处理器、总线系统、输入/输出系统、流水线技术、并行计算机系统。

本书可作为高等院校计算机各专业计算机组成原理课程或计算机组成与结构课程的本科教材,也可供高等院校其他相关专业师生以及从事计算机工作的工程技术人员学习或参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机组成与结构/程晓荣等编著. —北京:中国电力出版社, 2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5047 - 9

I. 计... II. 程... 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 (2006) 第 163027 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 471 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

本书为 21 世纪高等学校规划教材之一。为满足计算机科学与技术、计算机网络工程、网络信息安全各专业及理工科相关本、专科专业计算机组成原理或计算机原理与结构专业基础课程的教学需要,编者结合自己在教学和科研工作过程中积累的丰富经验编写了此书。本书以计算机组成与结构为主线。为使计算机科学与技术及相关专业的学生能够深入掌握计算机组成的基本原理与结构、建立计算机系统的整体概念、了解计算机技术的发展趋势,编者对国内外计算机组成与结构课程和教材进行了深入的调研。本书既有计算机组成原理又有计算机结构的知识,内容全面、系统,层次深入浅出,吸取了目前国内外面向本科生教学教材的精华,参考和借鉴了书后所列文献的部分成果,在此也对这些作者表示深深的谢意和敬意。

本书融合了计算机组成原理与计算机系统结构的主要知识,反映了计算机技术的成熟成果和最新的发展情况。全书共分 9 章,涵盖了计算机组成原理和计算机系统结构的内容,第 1 章到第 7 章主要介绍计算机系统的基本组成、运算器与运算方法、存储系统、指令系统、中央控制器、总线系统、输入输出系统,第 8 章和第 9 章内容为流水线技术,并行计算机系统结构。各章配备了不同难度的习题,以便学生对所学知识的理解和掌握。

本书在编写过程中得到了中国电力出版社的大力支持和协助。河北大学的王凤先教授认真仔细地审阅了初稿,改正了书中的不妥之处,提出了许多宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。华北电力大学的李莉、赵惠兰、史光丽老师,董超、李梅、阎爱梅、张秋亮、张艳同学对本书的图稿进行了编辑、校对等许多工作。在此对教材给予帮助和支持的老师、同学们一并表示诚挚的谢意。

由于各高校对学生的培养目标、教学要求和办学特色等尚有差别,因此希望大家在使用本书的过程中及时向我们提出批评和改进意见,以便对本书进一步修改和完善。由于水平所限,难免有错误出现,书中如有不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 11 月

目 录

前言	
第 1 章 计算机系统概论	1
1.1 计算机的发展	1
1.2 计算机系统的基本组成	5
1.3 计算机系统的层次结构	11
1.4 计算机系统的性能指标与评价标准	13
习题	16
第 2 章 运算方法和运算器	18
2.1 数据信息的表示方法	18
2.2 机器数的编码格式	22
2.3 定点数加减运算及实现	26
2.4 定点数乘法运算	29
2.5 定点数除法运算	39
2.6 浮点数运算方法	46
2.7 运算器部件及进位链结构	49
2.8 位片式运算器部件 Am2901	56
习题	61
第 3 章 存储系统	63
3.1 存储系统	63
3.2 半导体存储器	68
3.3 辅助存储器	86
3.4 高速缓冲存储器(Cache)	96
3.5 虚拟存储系统	103
3.6 相联存储器	107
3.7 存储保护	109
习题	111
第 4 章 指令系统	114
4.1 指令格式	114
4.2 寻址方式	117
4.3 指令的类型	125
4.4 CISC 和 RISC 的指令系统	129
习题	132
第 5 章 中央处理器	134
5.1 CPU 功能与组成	134
5.2 时序控制方式与时序系统	137

5.3	一台模型机的总体设计	143
5.4	模型机组合逻辑控制器原理与设计	151
5.5	微程序控制原理	165
5.6	模型机的微程序设计	173
	习题	178
第 6 章	总线系统	179
6.1	总线的基本概念	179
6.2	总线结构	184
6.3	总线控制	186
6.4	总线标准	196
	习题	203
第 7 章	输入/输出系统	205
7.1	输入/输出设备	205
7.2	输入/输出控制	207
7.3	直接程序传送方式	211
7.4	程序中断方式	214
7.5	DMA 方式	227
7.6	通道和 I/O 处理机方式	234
	习题	240
第 8 章	流水线技术	243
8.1	流水线原理	243
8.2	流水线中的相关及处理	253
8.3	流水线的性能分析	260
8.4	流水线的调度	264
8.5	超标量、超流水线处理机	269
8.6	向量流水处理技术	270
	习题	276
第 9 章	并行计算机系统	278
9.1	并行计算机系统发展	278
9.2	SIMD 阵列机	280
9.3	互连网络	283
9.4	多处理机系统	288
9.5	并行计算机访存模型	291
9.6	并行程序设计环境	293
	习题	298
	综合习题	299
	参考文献	301

第1章 计算机系统概论

本章简要介绍计算机的发展历史,概括地说明计算机的基本组成,层次结构以及它的工作过程和技术指标,使读者对计算机系统有一个系统的了解和认识,以期建立对计算机的整体概念。

1.1 计算机的发展

电子计算机的发展,从第一台计算机问世至今已经有 50 多年的历史。随着人类科学技术的进步,计算机技术得以迅速的发展,计算机已经深入到人类工作和生活的各个角落。计算机的发展之迅速,普及之广泛,对整个社会影响之深远是任何其他学科无法比拟的。其发展历史可以归结为如下几个阶段。

1.1.1 计算机的发展历史

1. 第一代计算机 (1945—1954)

特征是采用电子管作为逻辑元件;用阴极射线管或声汞延迟线做主存储器;数据表示是定点表示;用机器语言或汇编语言编写。有代表性的计算机是第一台用电子管组成的计算机,名字为 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer)。ENIAC 采用十进制运算,电路结构十分复杂,使用 18000 多个电子管,运行时耗电量达 150kW,体积庞大,重量达到吨级,占地面积为 1500 平方英尺,而且需用手工搬动开关和拔、插电缆来编制程序,使用极不方便,但它却比任何机械计算机快得多,每秒可进行 5000 多次加法运算。ENIAC 的出现不仅仅实现了制造一台通用计算机的目标,而且标志了计算工具进入了一个崭新的时代,是人类文明发展史中的一个里程碑。仅仅半个世纪,计算机已经使人类社会从制造业社会发展到了信息化社会。

美国数学家冯·诺依曼 (Von Neuman) 在 EDVAC (电子离散变量计算机) 所制定的计划中首次提出了存储程序的概念,即将程序和数据一起存放在存储器中,使编程更加方便,并设计了一台存储程序的计算机 IAS,形成了冯·诺依曼型计算机体系结构。

2. 第二代计算机 (1955—1964)

特征是采用晶体管代替电子管;用磁芯和磁盘作主存;采用变址寄存器和浮点运算部件;软件方面使用 FORTRAN, COBOL 等高级程序语言,建立了子程序库和批处理的管理程序。进入 20 世纪 50 年代后,晶体管替代电子管使计算机的性能有了很大的提高。晶体管机与电子管机相比主存容量增加了;存储周期缩短了几十倍;指令操作码数增加到 185;运算速度从每秒上万次提高到每秒 50 万次。而且有的计算机还采用了数据通道和多路转换器等在当时看来最新的技术。尽管用晶体管代替电子管已经使电子计算机的面貌焕然一新,但是随着对计算机性能越来越高的追求,新的计算机所包含的晶体管个数已从一万个左右骤增到数十万个,人们需要把晶体管、电阻、电容等一个个元件都焊接到一块电路板上,再由一块块电路板通过导线连接成一台计算机。其复杂的工艺不仅严重影响制造计算机的生产效

率，而且造成计算机工作的不可靠性。随着微电子学的深入研究，特别是新的光刻技术和设备的成熟，计算机的发展又进入了一个崭新时代——集成电路时代。

3. 第三代计算机 (1965—1974)

特征是采用集成电路代替了分立的晶体管；主存储器使用半导体存储器；使用微程序技术简化处理机的设计；引进了多道程序，并行处理等新技术；系统结构上开始突破冯·诺依曼体制；软件方面使用操作系统、多处理机、虚拟存储系统及面向用户的软件；结构化的程序设计，其代表是 1968 年问世的 Pascal 语言，它定义了一个真正的标准语言，按严谨的结构化程序编程，具有丰富的数据类型。

集成电路制作技术出现后，可以利用光刻技术把晶体管、电阻、电容等构成的单个电路制作在一块极小（如几个平方微米）的硅片上。进一步发展，实现了将成百上千个这样的门电路全部制作在一块极小（如几个平方毫米）的硅片上，并引出与外部连接的引线，这样，一次便能制作成成百上千个相同的门电路，又一次大大地缩小了计算机的体积，大幅度降低了耗电量，极大地提高了机器的可靠性。

4. 第四代计算机及其发展 (1975 至今)

特征是采用超大规模集成电路作为计算机的主要功能部件；使用集成度更高的半导体存储器作为主存储器；硬件技术对计算机更新换代起了决定性的影响。系统结构上使用了共享存储器、并行处理、分布式计算系统、计算机网络等。第四代计算机在系统结构方面较之前三代计算机有了很大的改进和发展；软件方面使用了分布式操作系统、数据库和知识库高效的编程语言；面向对象的程序设计，其代表语言是 C++。近年来随着网络技术的不断发展和应用，使用了更适应网络环境的面向对象的 Java 语言。

第四代计算机的时间跨度可以认为是 15 年，现在有相关文献认为已经进入了第五代计算机发展阶段，继第四代计算机之后没有达成定义第五代或新一代计算机的一致意见，许多新的技术和概念不断提出并且得到实现。尤其是进入到 20 世纪 70 年代后，把计算机当作高级计算工具的狭隘观念已被人们逐渐摒弃，计算机已成为一门独立的学科而迅猛发展着，并且正在影响并改变着人类的生活方式，这是由于微处理器的出现、采用大规模和超大规模集成电路、软件技术的完善及应用范围的不断拓宽所带来的必然结果，就是智能计算机的诞生和发展。一般要求智能计算机具有下列功能。

(1) 智能接口功能

有自动识别自然语言和图形、图像的能力。语音识别与理解、机器翻译等均属于自然语言处理的范畴。通过摄像机把图像输入计算机后，计算机能通过图像理解系统和景物感知系统得到信息，并对这些信息进行分析、认识和理解，这是智能计算机应具备的重要功能。军事侦察、地图摄制、字符识别，自动检索等领域内都有计算机视觉的功能。

(2) 理解和推理功能

能根据计算机内存储的信息（知识）进行推理，具有问题求解和学习的功能。

(3) 知识库管理功能

要求能完成知识获取、知识检索和知识更新等功能。

集成电路技术把计算机的控制单元和逻辑单元集成到一个芯片上，制成了微处理器芯片。微处理器经历了 4 位、8 位、16 位、32 位和 64 位几个阶段的发展，芯片的集成度和速度都有很大的提高，由于微处理器芯片和存储器芯片的出现，微型计算机也随之问世。微处理器芯片

经历了如 8080、8088、8086、80286、80386、80486、80586、Pentium pro (P64 位)、Pentium II、等产品出现的各个阶段,几乎每三年处理器的性能就能提高 4~6 倍。处理器和外设之间也存在大量的数据吞吐要求,可通过各种缓冲机制、加上高速互联总线以及更精致的总线结构来解决它们之间的不匹配问题。总之,计算机的设计者们必须不断平衡处理器、主存、I/O 设备和互连结构之间的数据吞吐率和数据处理的需要,使计算机的性能越来越好。

此外,随着大规模集成电路的飞速发展,也使得巨型机、工作站、计算机网络有了很大发展。随同计算机硬件发展的还有软件。在发挥计算机的作用,推广计算机的应用,改进计算机的设计以及简化计算机的操作,使它从供专家使用转变为面向大众的过程中,软件工作者起了决定性的作用。

1.1.2 计算机系统的应用

计算机系统是由硬件和软件组成的。所谓“硬件”即指计算机系统中实际存在的物理实体部分,它由看得见摸得着的各种电子元器件、各类光、电、机设备的实物组成,如主机、外设等等。所谓“软件”,是在计算机硬件的基础上,根据一定的算法而编制的一组程序,它是看不见摸不着的,由人们事先编制成具有各类特殊功能的信息组成。在整个计算机系统内,软件的地位和作用已经成为评价计算机系统性能好坏的重要标志。软件性能的发挥,也必须依托硬件的支撑。因此,计算机系统性能的好坏,取决于软、硬件功能的总和。

从计算机的发展历史来看,硬件和软件在各个阶段均随着计算机技术的发展而发展,计算机系统性能的不断提高主要靠器件变革、系统结构的改进、软件技术的发展而发展。从 1946 年 ENIAC 问世至今,60 多年来计算机技术的进步推动了计算机系统的发展和应用,使计算机在人类的全部活动领域里占有极为重要的地位。

20 世纪 70、80 年代,人工智能的研究曾一度出现过高潮。日本首先提出研究具有高度智能的计算机,但高度智能计算机的实现比早期创始者的想象要难得多,超级智能电脑不仅需要硬件支撑,而且还必须有软件支持。人们正在不懈地努力以期待着有超级智能计算机的出现。同时大型计算机系统也将获得巨大发展,将由低价、通用的多处理机组成的群机系统来替代单一的大型系统。在这个群机系统中,每个计算机通过快速的系统级网络(SAN)和其他计算机通信。群机系统可以扩展到上千个结点,对于数据库和实时事务处理(OLTP)的应用,群机能像单机一样地运转。群机能开发隐含在处理并行多用户中或在处理包含在多个存储设备的大型查询中的并行性。21 世纪计算机的发展将会更快,一些新概念计算机如光计算机、超导计算机、量子计算机和生物计算机等将会相继出现,它们的出现将给人类带来绚丽多彩的生活和科学技术的跨越式发展。

计算机的应用主要体现在以下几个方面。

1. 科学计算

科学计算一直是电子计算机的重要应用领域之一。除了国防及尖端科学技术以外,计算机在其他学科和工程设计方面,诸如数学、力学、固体结构分析、石油勘探、桥梁设计、建筑、土木工程设计等领域内也得到广泛的应用,促进了各门科学技术的发展。有些系统,要求计算机处理所得的结果立即反过来作用或影响正在被处理的事物本身。

2. 数据处理

计算机用于数据处理是其重要的应用领域之一。人们随之把大批复杂的事务数据交给了计算机处理。近年来获得迅速发展的 IC 卡(集成电路卡),将 CPU 和存储器安装在卡内芯

片中,作为信用卡,具有更高的保密性和安全性。

3. 计算机控制

在现代化工厂里,计算机普遍用于生产过程的自动控制。用于控制的计算机,其输入信息往往是电压、温度、机械位置等模拟量。要先将它们转换成数字量,称为模/数转换,然后计算机才能进行处理或计算。当从被控制对象测量到的信息是温度、位置等非电量时,要先将它们转换成电量,然后再转换成数字量。新型的工业自动控制系统以标准的工业计算机软、硬件平台构成集成系统,取代了传统的封闭式系统,具有更强的适应性及更好的开放性,更易于扩展、更经济、更短的开发周期等显著优点。可将控制过程和结果显示在屏幕上,以供观察和控制,特别是组态软件的出现,它使数据采集、过程控制变得十分简单,它为用户提供良好的开发界面和简捷的使用方法,用各种软件模块可以非常容易地实现和完成监控层的各种功能,这是组态开发的重要作用。就目前发展趋势而言,工业控制的应用已经向控管一体化方向发展,利用网络技术,通过传感技术和多媒体技术,操作者可以在控制室内通过大屏幕显示,使你领受到各车间、各工位、各部门的生产运行情况,并可直接由控制室发出各种控制命令指挥全厂正常工作。

4. 计算机辅助设计/计算机辅助制造/计算机集成制造系统 (CAD/CAM/CIMS)

计算机辅助设计 CAD (Computer Aided Design) 是按设计任务书的要求,进行各种设计方案的比较; CAM (Computer Aided Manufacturing)、CIMS (Computer Integrated Manufacturing Systems) 是使用已有的计算机辅助设计新的计算机,达到设计自动化或半自动化程度,从而减轻人的劳动强度并提高设计质量,这也是计算机辅助设计的一项重要内容。

5. 人工智能

人工智能是将人脑所进行演绎推理的思维过程、规则和所采取的策略、技巧等编成计算机程序,在计算机中存储一些公理和推理规则,然后让机器去自动探索解题的方法,所以这种程序不同于计算机的一般应用程序。

模式识别是指对某些感兴趣的客体作定量的或结构的描述,研究一种自动生成技术,由计算机自动地把待识别的模式分配到各自的模式类中去。由此技术派生的图像处理技术和图像识别技术已被广泛应用。

智能机器人是人工智能各种研究课题的综合产物,有感知和理解周围环境、进行推理和操纵工具的能力,并能通过感知与识别周围环境,完成某种动作。因此,在某些不允许人类进入的场所(如高温、有放射性物质等),使用机器人有特殊意义。

专家系统是指用计算机模拟专家行为的程序,它是人工智能的又一重要应用领域。它是利用计算机构成储存量极大的知识库,把各类专家丰富的知识和经验,以数据形式储存于知识库内,通过专用软件,根据用户输入查询的要求,向用户做出所要求的解答,这种系统早已被广泛应用在医学、工程、军事、法律等领域,尤其是近年来 Internet 的出现,更可以构成远程虚拟医疗、虚拟课堂、虚拟考试等。

6. 网络技术的应用

Internet 的发展规模和速度达到了惊人的速度,全球网络化不仅改变着商业经济、工业生产、科技发展,还必将影响人们的工作、娱乐和生活,它正在改变着整个世界。

网络应用主要涉及下列几方面。

(1) 电子商务

电子商务的含义是指任何一个组织机构都可利用 Internet 网络来与客户、供应商、业务伙伴和内部员工进行交流,也可以认为是消费者、销售者和结算部门之间利用 Internet 完成商品采购和支付收款的过程。

(2) 网络教育

网络教育突破传统学校教学方式的时空束缚,向人们展示了一个崭新的、广阔的学习世界,为任何愿意获取知识的人提供了学习的机会。只要有一台计算机和接入网络的设备,随时都可以进行学习与培训。与其他教育形式相比较,网络教育具有更加独特的作用。

(3) 敏捷制造

随着全球信息网络技术的发展,对工业制造业的制造模式和企业的组成和管理模式也产生了极大的影响,新的被称为 21 世纪的制造模式——敏捷制造由此而生。敏捷制造就是以“竞争—合作(协同)”的方式,提高企业竞争能力,实现对市场需求做出灵活快速反应的一种制造生产新模式,这种模式要求企业采用现代通信技术,以敏捷动态优化的形式组织新产品开发,通过动态联盟、先进柔性生产技术和高素质人员的全面集成,迅速响应客户需求,及时交付新产品并投入市场,从而赢得竞争优势。敏捷制造的内涵是指企业通过与用户、合作伙伴在更大范围、更高程度上的集成,来最大限度地满足市场的需求,适应竞争,获取长期的经济效益。敏捷制造的着眼点是快速响应市场的需求,要求企业不断提高自身能力,全面、协调地集成技术、管理和人员,强调“竞争—合作(协同)”,采用灵活多变的动态组织结构,单一的经营实体在完成所承接的产品或项目后即行解体,实体的参与人员立即各自转入其他项目。可见网络技术的发展对社会原来的固定企业结构形式构成了严峻的挑战。

7. 虚拟现实

虚拟现实的英文名称是“Virtual Reality”,简称为“VR”。虚拟现实(VR)是近几年来国内外科技界关注的一个热点,其发展也是日新月异。简单地说,VR 技术就是借助于计算机技术及硬件设备,实现一种人们可以通过视听触嗅等手段所感受到的虚拟幻境,故 VR 技术又称幻境或灵境技术。

8. 办公自动化和管理信息系统

顾名思义,办公自动化是利用计算机及自动化的办公设备来替代“笔、墨、纸、砚”及办公人员的部分脑、体力劳动,从而提高了办公的质量和效率。

与办公自动化相应的信息管理系统是企业管理信息系统。在企业建立一个管理信息系统,对内完成 Intranet 网的建立,对外实现与 Internet 相连。

9. 多媒体技术

多媒体计算机集声音、图像和文字于一体,集电视、录像、光盘存储、电子印刷和计算机通信技术之大成,它将把计算机应用引入一个无所不能的广阔领域,成为未来的主要技术之一。

1.2 计算机系统的基本组成

1.2.1 计算机系统的基本组成

计算机系统主要由硬件和软件两部分组成。计算机系统的硬件组成同时也是数字计算机的硬件组成,主要包括存储器、运算器、控制器、输入/输出设备。软件组成部分主要包括

系统软件和应用软件两大部分。计算机系统结构、计算机组成和计算机实现是三个不同的概念。系统结构是计算机系统的软硬件界面；计算机组成是计算机系统结构的逻辑实现；计算机实现是计算机组成的物理实现，它们各自包含不同的内容，但又有着紧密的关系。

1. 计算机的硬件组成

传统的计算机硬件组成主要包括 5 大部分，计算机的各个部件在控制器的统一指挥下，实现有条不紊地自动工作。

各个部件构成及主要工作和任务如下。

(1) 运算器。运算器用来完成算术运算和逻辑运算，位数越多所需的电子器件也越多，运算器长度就越长，计算精度就越高，运算的中间结果可暂存在运算器内。

(2) 存储器。存储器的功能是用来存放数据和程序。存储器由许多存储单元组成的，每个存储单元都有编号，称为“地址”；向存储器中存数和从存储器中取数，都要按给定的地址来寻找所选的存储单元。存储器所有存储单元的总数称为存储器的存储容量。存储器分为内存储器、外存储器和缓冲存储器。

(3) 控制器。控制器用来控制、指挥程序和数据的输入、运行以及处理运算结果，其基本任务是从存储器取出指令，对该指令的操作码进行分析判断，然后根据指令的性质执行这条指令，进行相应的操作，接着执行下一条指令，以此类推。

(4) 输入/输出设备。输入设备用来将人们熟悉的信息形式转换为机器能识别的信息形式，常见的有键盘、鼠标等；输出设备可将机器运算结果转换为人们熟悉的信息形式，如打印机输出、显示器输出等。

2. 几种典型的计算机组成结构

(1) 典型的冯·诺依曼计算机结构

如图 1-1 所示为典型的冯·诺依曼计算机结构，它以运算器为中心，其中，输入/输出设备与存储器之间的数据传送都需通过运算器。图中实线为数据线，虚线为控制线和反馈线。

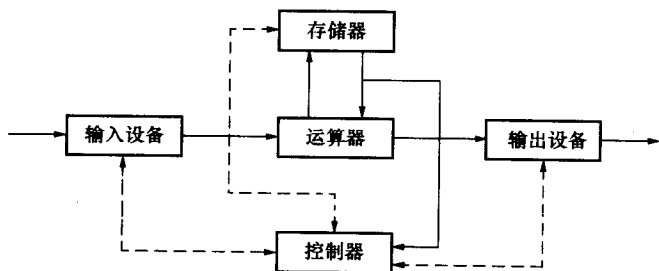


图 1-1 典型的冯·诺依曼计算机结构框图

1945 年数学家冯·诺依曼 (Von Neumann) 等人，在研究 EDVAC 机时，提出了“存储程序”的概念。以此概念为基础的各类计算机，统称为冯·诺依曼机。它的特点可归结为：

1) 计算机由运算器、存储器、控制器和输入设备、输出设备五大部件组成。

2) 指令和数据以同等地位存放于存储器内，并可按地址寻访。

3) 指令和数据均用二进制码表示。

4) 指令由操作码和地址码组成，操作码用来表示操作的性质，地址码用来表示操作数所在存储器中的位置。

5) 指令在存储器内按顺序存放。通常，指令是顺序执行的，在特定条件下，可根据运算结果或根据设定的条件改变执行顺序。

6) 机器以运算器为中心，输入/输出设备与存储器的数据传送通过运算器。

(2) 以存储器为中心的计算机组成结构

现代的计算机已转化为以存储器为中心,如图 1-2 所示。图中实线为控制线,虚线为反馈线,双线为数据线。

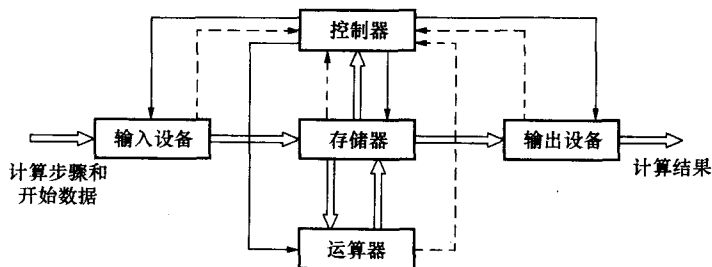


图 1-2 以存储器为中心的计算机结构框图

(3) 现代计算机的组成结构

由于运算器和控制器在逻辑关系和电路结构上联系十分紧密,尤其在大规模集成电路制作工艺出现后,这两大部件往往制作在同一芯片上,因此,通常将它们合起来统称为中央处理器 (Central Processing Unit),简称 CPU。ALU (Arithmetic Logic Unit) 叫做算术逻辑单元,主要完成算术运算,CU (Central Unit) 叫做控制单元,用来解释存储器中的指令,并发出各种命令。ALU 和 CU 是 CPU 的核心部件。把输入设备与输出设备简称为 I/O 设备 (Input/Output equipment)。

这样,现代计算机可认为由三大部分组成,即 CPU、I/O 设备及主存储器 M. M (Main Memory)。CPU 与 M. M 合起来又可称为主机,I/O 设备又可称为外部设备。

3. 计算机系统的软件组成

高级程序设计语言在第二代计算机时期趋向成熟并迅速普及。操作系统自动地管理计算机系统中各个设备以及多个程序的高效运行,是第三代计算机时期的重大成就,这些软件属于系统软件。系统软件又称为系统程序,主要用来管理整个计算机系统、监视服务,使系统资源得到合理调度,确保高效运行。它包括:标准程序库、语言处理程序(如将汇编语言翻译成机器语言的汇编程序、将高级语言翻译成机器语言的编译程序)、操作系统(如批处理系统、分时系统、实时系统)、服务性程序(如诊断程序、调试程序、连接程序等)、数据库管理系统、网络软件等等。

广泛应用计算机的结果就是在科学计算、数据处理、商业经营、经济管理、工业控制、工程设计等领域中开发出各自的程序,称为应用软件。应用软件又称为应用程序,它是用户根据任务需要所编制的各种程序。如科学计算程序、数据处理程序、过程控制程序、事务管理程序等等。应用软件种类繁多,它是用户在各自的行业中开发和使用的各种程序。如管理财务的各种财务软件、办公用的文字处理和排版软件、帮助管理日常业务工作和图文报表的电子表格和数据库软件、帮助工程设计的 CAD 软件以及各种实用的网络通信软件等等。计算机软件的发展与硬件一样经过了不同的发展阶段和演变。

计算机厂家向用户提供软件(系统软件和应用软件)时与硬件分别计价,从而并产生了专门从事软件研制、生产、销售工作的软件公司(例如美国微软公司)。但是软件的发展跟不上需要,致使软件费用急剧增长,这是因为硬件是工业化生产,价格不断下降,而软件为人工劳动,生产率低。一些科学家提出了软件工程的概念,对软件开发实行工程化管理,以期得到廉价、可靠、有效的软件。软件还具有容易复制的特点,软件成果容易被别人占有,因此影响了软件开发者进行软件开发及将软件投入市场的积极性。为了保护软件不被剽窃,可以采取加密等技术措施以及低价销售、随硬件提供等经营措施,发挥一定的保护作用,但

不能彻底解决问题。因此由国家来制订、实施对软件的保护法律是至关重要的。但是一个国家的法律只适用于国内，而软件很容易在国家之间传播，因此，国与国之间相互承担保护对方公民或法人软件义务已成为各国之间经济合作关系的一个重要组成部分。世界上科学技术发达的国家，十分重视鼓励创造性的脑力劳动，已经研究、制定并贯彻实施专利法、版权法、商标法等一系列保护公民知识产权的法律。很多发展中国家也开始重视这项工作，正纷纷开展保护知识产权的立法工作。1991年5月我国颁布了《计算机软件保护条例》。

1.2.2 计算机系统的分类

研究计算机系统的分类方法有助于人们认识计算机的系统结构和组成特点，理解系统的工作原理和性能。

通常把计算机系统按其性能与价格的综合指标分为巨型、大型、中型、小型、微型等。

但是，随着技术的不断进步，各种型号的计算机性能指标都在不断进步，以至于过去的一台大型计算机的性能甚至于还比不上今天的一台微型计算机，而用过去一台大型计算机的价钱，今天却能够买一台性能指标高许多倍的新式大型计算机，可见按巨、大、中、小、微来划分的绝对性能标准是随时间变化而变化的。

计算机系统还可以根据其面向应用领域的不同性质而进行分类。一般说计算机都是作为通用系统进行设计的，但是，在用户编写应用程序时，却都带有专用性质。为了解决这个矛盾，采取的办法有：灵活地改变系统配置，包括内存容量、外围设备品种和数量等；允许适应特殊环境的要求采取不同的物理安装；增加处理不同数据结构的能力，如浮点、字符串、快速傅立叶变换等；提供多种可用的语言和操作系统，以适应批处理、分时、实时、事务处理等不同需要。所以按用途分类可以分为科学计算、事务处理、实时控制、家用等计算机。

按处理机个数和种类分，计算机系统又可分为单处理机、多处理机、并行处理机、关联处理机、超标量处理机、超流水线处理机、SMP（对称多处理机）、MPP（大规模并行处理机）、机群系统等。下面从计算机组成和应用以及计算机系统结构两方面进行进一步的说明。

1. 计算机分类

由于计算机的迅猛发展和应用领域日益扩大，计算机产品的数量与种类在迅速增加。从本质上认识这些计算机并根据它们的不同特点，给与适当地分类是必要的。

(1) 按应用特点分类

按应用特点，计算机可分为两大类，即专用计算机和通用计算机。

专用计算机是针对某一特定应用领域或面向某种算法而研制的计算机。专用机的特点是它的系统结构和专用软件对于指定的应用领域是高效的，有较高的性能价格比；而对于其他应用领域则是低效的，性能价格比变坏。如空中交通管制专用机（STARAN），卫星图像处理用大型并行处理机（MMP）以及各种武器系统的专用控制机等。

通用计算机是针对多种应用领域或面向多种算法而研制的计算机。通用机的特点是它的系统结构和计算机软件能适应多种用户的要求。因此，它有较丰富的通用系统软件和应用程序包，有较复杂的系统结构和较强的系统功能。

计算机发展初期，硬件设备昂贵，多为专用计算机。随着技术发展，为充分发挥计算机的潜力，很快转向发展通用机、通用系列机，但在某一特殊领域，通用机不能满足要求时，又会发展专用机，如当前的巨型机多为专用机。然而，一旦技术发展到一定程度，专用机中应用成功的技术推广到通用机，继而发展巨型通用机。因此，专用机与通用机之间没有严格

的界限，它们是互相促进、相辅相成的。

(2) 按性能特点分类

计算机按性能高低可分为巨型机、大型机、中型机、小型机和微型机五大类。这是一种相对粗略的分类方法。计算机性能随计算技术发展而迅速变化提高，早期大型机的性能还不如今天微型机的性能高。因此，按性能分类，只能就某一时期而言。另外，按性能分类的标准也很难确定，我们只能粗略地划分。

巨型机是计算机中性能最高、功能最强、具有巨大数值计算能力和数据处理能力的计算机。具有高效的系统软件以发挥巨型机高性能潜力。例如，自 20 世纪 60、70 年代完成的 CRAY-1 巨型机（其向量运算速度达每秒 8000 万次）和 80 年代完成的 CYBER205 巨型机（每秒可进行 4 亿次浮点运算）以后，古德伊尔公司为美国宇航局研制了一台处理卫星图像的巨型机系统 MPP，它运用了 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向，称为小巨型机。又如，有数据表明，在过去的 10 年，工作站的性能每年改进 1.58 倍，即每三年翻两番。

大、中型机是计算机中通用性最强、功能较高的计算机。有丰富的外设与通信接口；有较强的 I/O 处理能力；有丰富的系统软件和应用程序包。

小型机是性能较好，价格便宜，应用面很广的一类计算机。有一定数量的外设与通信接口；配有几种高级语言和汇编语言，有功能较强的操作系统。

微型机是计算机性能价格比最好，价格最便宜，应用面最广的一类计算机。它是各类计算机中发展最快，人们最感兴趣的一个分支。其性能已达到甚至超过一般小型机水平，有的微机就是小型机微型化的产物。所谓小型机微型化是指机器系统结构和功能不变，用大规模集成电路技术将其主要功能部件作在一个芯片上。因此，从功能上很难区分小型机和微型机。微处理器芯片和存储器芯片的出现，推动了微型计算机的产生与发展，如 1971 年用专 4004 微处理器制成了 MCS-4 微型计算机。20 世纪 70 年代中期，8 位微处理器 8008、8080、R6502、M6800、Z80 等相继出现，并用 R6502 制成了 Apple II 微型计算机，用 Z80 制成了 CROMEMCO 微型计算机等。目前世界上第一大微处理器的制造商 Intel，其典型产品有以下几种。

- 1) 8080：世界上第一个 8 位通用的微处理器，1974 年问世。
- 2) 8088：集成度达 2.9 万管，主频 4.77MHz，字长 16 位（外部 8 位），又称准 16 位，地址 20 位，采用 4 个字节指令队列，被 IBM 首台微机（IBMPC）选用，1979 年问世。
- 3) 8086：16 位，2.9 万管，地址 20 位，采用 6 个字节指令队列，指令系统与 8088 完全兼容，1978 年问世。
- 4) 80286：16 位，13.4 万管，6MHz，地址 24 位，可用实际内存 16KB 和虚拟内存 1GB，1982 年问世。
- 5) 80386：32 位，27.5 万管，12.5、33、50MHz，地址 32 位，4GB 实际内存，64TB ($T=2^{40}$) 虚拟内存。其性能可与几年前推出的小型机和大型机相比，1985 年问世。
- 6) 80486：32 位，120 万管，25、33、50MHz、4GB 实际内存，64TB 虚拟内存，引用更加复杂的 Cache 技术和指令流水技术，速度比 80386 快一倍，性能指标高于 80386 四倍，1989 年问世。
- 7) Pentium pro (80586)：64 位，310 万管，66MHz、100MHz，采用超标量技术，使

多条指令可并行执行,速度比 80486 高出 6~8 倍,1993 年问世。

8) Pentium pro (P6): 64 位, 550 万管, 133、150、200MHz, 采用动态执行 RISC/CISC 技术、分支预测、指令流分析、推理性执行和二级 Cache 等技术, 1995 年问世。

9) Pentium II: 64 位, 550 万管以上, 233、300、400、450MHz, 1997 年问世。

10) Pentium III: 64 位, 800 万管以上, 450、500、550、600MHz, 1999 年问世。

自 1979 年 Intel 推出 X86 后, 几乎每三年处理器的性能就能提高 4~6 倍。但是计算机中的某些其他部件其性能的提高速度达不到这个发展速度和水平。因此, 必须不断调整计算机组成和结构, 以弥补不同部件性能不匹配问题。影响它们之间不匹配的主要因素是处理器与主存之间的接口和处理器与外设之间的接口。

处理器与主存间的接口是整个计算机最重要的通路, 因为它要负责主存与处理器之间指令和数据的传送, 如果主存或主存与处理器之间的传送跟不上处理器的要求, 就会使处理器处于等待的状态。对此, 可加宽数据总线的宽度、在主存和处理器之间设置高速缓冲存储器 Cache 并发展成片内 Cache 和分级 Cache, 采用高速总线和分层总线来缓冲和分流数据, 从而提高处理器和存储器之间的连接带宽。

处理器和外设之间也存在大量的数据吞吐要求, 可通过各种缓冲机制、加上高速互联总线以及更精致的总线结构来解决它们之间的不匹配问题。

总之, 计算机的设计者们必须不断平衡处理器: 主存、I/O 设备和互连结构之间的数据吞吐率 and 数据处理的需要, 使计算机的性能越来越好。

此外, 随着大规模集成电路的飞速发展, 也使巨型机、工作站、计算机网络都有了很大发展。计算机还可以按照处理数据的特点、处理功能的特点等进行分类, 这里就不再讨论了。

2. 计算机系统结构的分类

计算机系统结构的常用的分类方有 Flynn 分类法、冯氏分类法和 Handler 分类法。

冯氏分类法是由冯泽云于 1972 年提出用最大并行度对计算机系统结构进行分类, Handler 分类法是由 Wolfgang Handler 在 1977 年根据并行度和流水线提出的另一种分类法, 这种分类方法把计算机的硬件结构分成三个层次, 并考虑它们的可并行——流水处理程度; Flynn 分类法是由 M. J. Flynn 在 1966 年提出的分类法, 也是最主要的分类方法, 他进行了如下定义:

指令流: 机器执行的指令序列。

数据流: 由指令流调用的数据序列, 包括输入数据和中间结果。

多倍性: 在系统最受限制的元件上同时处于同一执行阶段的指令或数据的最大可能个数。

按照指令流和数据流的不同组织方式, 把计算机系统结构分为以下四类。

(1) 单指令流单数据流 SISD (Single Instruction stream Single Data stream);

(2) 单指令流多数据流 SIMD (Single Instruction Stream Multiple Data stream);

(3) 多指令流单数据流 MISD (Multiple Instruction Stream Single Data stream);

(4) 多指令流多数据流 MIMD (Multiple Instruction Stream Multiple Data stream)。

对应于这四类计算机的基本结构, SISD 是传统的顺序处理计算机; SIMD 以阵列处理机或并行处理机为代表; MISD 在实际上代表何种计算机, 也存在着不同的看法, 有的文献把流水线结构机器看作是 MISD 结构; 多处理机属于 MIMD 结构。

1.3 计算机系统的层次结构

计算机系统由软件和硬件组成,不能简单地认为是一种电子设备,而是一个十分复杂的硬软件结合的整体。按功能划分成多级层次结构,它通常由五个以上不同的级组成,每一级都对应一种“机器”能进行程序设计,这里的“机器”含义是广义上的,其功能是对相应的语言提供解释手段,如同一个解释器,作用在信息处理和制对象上。

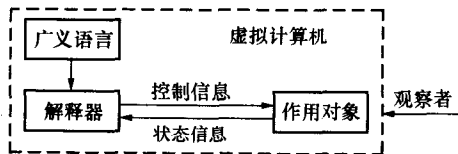


图 1-3 “机器”的作用和组成

“机器”的作用和组成如图 1-3 所示。计算机系统的层次结构如图 1-4 所示。

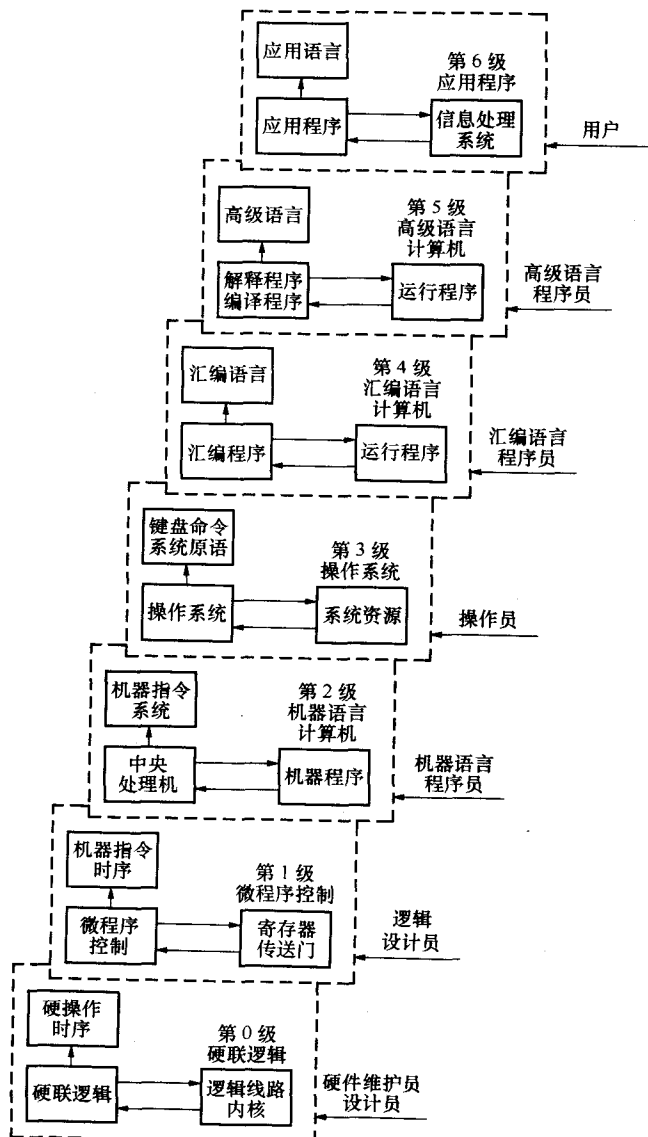


图 1-4 计算机系统层次结构