

■ 计算机应用与教学系列

计算机系统结构

孙强南 孙昱东 编著

科学出版社

03

V/1

计算机应用与教学系列

计 算 机 系 统 结 构

孙强南 孙昱东 编著

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机系统结构的概念及组成,全书共七章,由局部到全局顺序介绍了存贮系统、输入输出系统、指令系统的系统结构、单指令流单数据流单处理机系统,以及单指令流多数据流和多指令流多数据流多处理机系统,最后介绍了作为发展方向的几种新的系统结构技术。

为适应科技人员和管理人员深入学习高档微型计算机的需要,本书把巨、大、中、小、微型计算机结合在一起,并尽量以小型机和微型机为例,参照高等学校统编教材编写而成。它既可以作为大学计算机系本科教材,也可供从事计算机硬件工作及从事计算机应用和软件开发的科技人员参考。

计算机应用与教学系列

计 算 机 系 统 结 构

孙强南 孙昱东 编著

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京市怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年10月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

1992年10月第一次印刷 印张: 17

印数: 1-4 700 字数: 368 000

ISBN 7-03-000904-5/TP·59

定价: 12.00元

序

电子计算机诞生以来,至今已经40多年了。从60年代起,集成电路技术的迅速发展和外存贮器性能的持续改善,推进了计算机的高速度发展。同时,巨型机的性能大幅度地提高,计算机的尺寸跨度急剧向下扩展。目前,电子计算机已经有了巨、大、中、小、微(PC)、亚微(膝上和笔记本型)等型,甚至还有微微型(掌上计算机),形成了完整的系列。这也推动了电子计算机的广泛应用,它不但被用于解决繁难的复杂计算和人工智能问题,而且进入了个人工作和生活中。

从应用的角度看,对计算机性能的要求几乎是无止境的。巨型、大型计算机仍在不断地提高性能,微型、小型机的性能也在大踏步地提高。在七八十年代,巨型机中采用了许多新的系统结构要素,如虚存、缓存、流水线、向量运算等,而且已有少量高性能的并行处理计算机投入使用。现在上述原属于巨型、大型机独具的要素已经纳入了微型机中,立足于微型机-微处理机基础之上的巨型、大型机的高度并行化已经开始,并行原理也已在一定程度上延伸到小型、微型计算机中。从另一个方面看,在小型机上首先出现的缩小指令集(RISC)系统结构也正在向巨型、大型机和微型机方向扩展。因此,就系统结构而言,可以说尺寸大小的界线已经泯灭。这种新局面是在最近三五年内才形成的,非常引人注目。

面对这个新局面,不管是作为有关技术工作者所需的工具书或参考书,还是作为教师与学生所需的教材,都迫切要求有一本新书,能够系统地、相对完整地阐明计算机系统结构的新面貌。就本人所知,当前这样的书还是很缺少的。孙强南和孙昱东同志编写的《计算机系统结构》一书恰是一本能满足这一要求的书籍。这是该书的特色之一。

这本书集中讨论最新的系统结构技术,既着重物理概念的叙述,又注意理论联系实际。作者在绪论中概括地叙述了计算机系统结构的总体概念以后,转入具体讲述组成计算机总体的各子系统,然后再回到系统综合,最后讲述正处于研究发展中的系统结构新方案。采取了“合→分→合→远景”的结构安排,便于读者掌握全面知识。这是该书的另一个特点。

该书的内容安排繁约适当,文字简练而流畅。它尽量地与现有的关于计算机组成的书籍的内容相衔接而避免不必要的重复。因此能够以不多的篇幅覆盖这样大的跨度,相当完整地包括了系统结构的所有要素,并把巨、大、中、小、微型机融汇在一起。这是该书的又一个特点。这正反映了强南同志在多年的工程实践和长期教学中的执着追求,以及他所积累的大量经验和自己的独到见解。

在计算机硬设备发展的同时,软件技术被确认,并成长壮大起来。目前软件技术仍在不断扩充发展之中。大家知道,在电子计算机还未出现之前就有了编程的概念并进行过尝试,然而只有在电子计算机出现后,才真正出现了编程工作,其目的就是要解决计算机应用与计算机的“硬设备”间的衔接问题。随着高级语言的出现,从五六十年代起有了编译器,开始了应用软件与系统软件的分工。以后又从简单的管理程序发展为操作系

统，逐渐地形成了更完整的编程环境，成为应用软件和计算机“硬设备”之间的衔接部分。当前计算机得到巨大的发展，正是为其广泛的应用所驱动的，如果没有极大量的应用软件，计算机是无法发挥作用的。

正是在这种情况下，社会也需要培养大量的系统软件编制工作者和应用软件工作者。应用软件工作者一定要理解编程环境，也需要理解系统结构。不理解系统结构，则对于编程环境——系统软件也不可能深入理解。系统软件编制者更必须深入理解系统结构。该书作者写这本书，也正是想满足这个要求。因此在这本书里，在一定意义上作者是把系统结构当作软硬件统一的整体对待的。这个观点，对于所有在计算机方面工作的科技人员都是需要很好理解的。该书的编写确实为实现这一个任务作了很有成效的工作。

读了本书的稿本以后，有耳目一新之感，特为作序。

罗沛霖

1992年1月14日

前 言

近年来,在集成电路技术的发展和计算机应用需要的推动下,计算机系统结构发展迅速,新的系统结构技术不断涌现,并迅速用于高性能的计算机产品。同时,随着超大规模集成电路技术的长足进步,一度曾为巨型机、大型机所特有的计算机系统结构技术也正在迅速下移到小型计算机和微型计算机中,成为计算机专业人员必须掌握的基本知识。本书就是在这种新的系统结构技术不断涌现并迅速下移的形势下,为适应各方面的需要而编写的。它参照了统编教材的教学大纲,内容更加充实和新颖。因而,本书不仅适合于作大学计算机系本科生的教材,也可以作为有关专业研究生的参考书。对于从事计算机应用系统开发和软件开发的科技人员,对于想对高档微型计算机了解得较为深入的其它专业的科技人员,它也是一本适用的参考书。

本书在编写中力求反映出计算机系统结构的最新发展。书中增加了简化指令系统计算机、超级标量机、超长指令字计算机、脉动阵列结构等内容,并加强了多处理机部分,以便读者能掌握一些最新计算机产品中的新技术。最后还介绍了一些系统结构的新发展,如数据流机、人工智能机、归约机等,以扩大读者的视野和思路。

本书在编写中还力求做到理论与实际相结合,注意加强基础,注重联系实际,照顾到深入学习高档微型计算机的人员的需要,并把巨、大、中、小、微型计算机的系统结构有机地结合在一起。凡在小型计算机、微型计算机中已采用的技术,尽量以小型机或微型机为例叙述,并尽量以我国应用较多的主流机种为例。

计算机系统结构的内容不仅涉及硬件,而且涉及到很多软件技术。在系统结构研究的问题中,很多是关于硬软件间的关系和硬软件间功能分配的问题,因而它不仅是计算机总体设计人员和硬件设计人员所必须掌握的,也应是高层次的应用系统开发人员和系统软件开发人员所必须掌握的专业基础知识。因此在考虑读者对象方面,本书照顾到了计算机应用和软件专业的需要,把计算机系统结构作为一门联接软件和硬件的课程来对待。

在一些新型的计算机系统中,编译程序同系统结构的关系已变得十分密切。计算机硬件功能的发挥在很大程度上取决于优化的编译程序。因此,在本书中增加了一些在硬软件结合点上的问题,如指令调度、软件流水线等。

本书力求做到内容精练,重点突出,概念清晰。重点问题力求讲透,一般问题也要使读者能建立完整概念。全书可在50—70学时内讲授完毕。

本书的章节布局采取“由里到外”,即由部件到系统的编写顺序。先讲两个相对独立的分系统(存贮系统和输入输出系统),然后再讲对计算机系统起全局作用的指令系统的系统结构和处理机系统。对处理机系统,先讲SISD(单指令流单数据流)单处理机系统,再讲SIMD(单指令流多数据流)和MIMD(多指令流多数据流)多处理机系统。最后介绍系统结构的新发展方向。这种由局部到全局的讲授方法容易为读者接受,并使读者在学习中能逐步增加对计算机系统的概括能力和想象能力。

根据这一原则,全书共分七章,其基本内容和学习重点如下:

第一章 绪论。使读者了解计算机系统结构的含义、发展历史、促进发展的因素。**重点学习**计算机系统结构的发展和了解改革冯·诺依曼计算机的必要性。

第二章 存贮系统。使读者建立存贮系统的层次结构、存贮管理和存贮保护的完整概念。**重点学习**虚拟存贮器和高速缓冲存贮器。

第三章 输入输出系统。使读者建立输入输出系统发展过程中出现的几种输入输出方式的完整概念。**重点学习**输入输出通道。

第四章 指令系统的系统结构 (ISA)。使读者对计算机的指令系统和中断系统的一般情况建立全面的概念。**重点学习**指令系统对高级语言和操作系统的支持, 以及中断系统的作用。

第五章 处理机系统。使读者对各种主要的单处理机机种的系统结构有全面了解, 建立起完整的概念。**重点学习**流水线和 RISC 机。

第六章 多处理机系统。使读者建立起 SIMD 和 MIMD 计算机的一般概念。**重点学习**紧耦合多处理机和作联机事务处理用的容错计算机。

第七章 计算机系统结构的新发展。介绍非冯·诺依曼型的数据流、归约机, 面向科学计算的脉动阵列结构, 以及人工智能计算机。

本书格局和内容由孙强南规划。第一、二、三、四章由孙强南编写, 第七章由孙昱东编写, 第五、六章由两人合写, 最后由孙强南加工润色。

本书的编写得到了计算机世界报社、中国长城计算机集团公司和华北计算技术研究所的鼎力相助。在写作中得到中国科学院学部委员、原电子工业部科技委副主任罗沛霖教授的勉励和指教, 罗老还亲自命笔为本书作序。清华大学房家驹教授仔细审阅了全稿, 并提出宝贵意见。我们还得到许多同事和朋友们的帮助。在这里谨向他们致以深深的谢意。

我投身于我国计算机事业不觉已进入第三十五个年头。愿将我长期以来从事计算机设计和教学的一得之见奉献给读者, 如能对我国的计算机事业有所裨益, 则将是我本人莫大的幸事。

孙强南

1992年5月15日于北京

目 录

第一章 绪论	1
1.1 计算机系统结构的含义	1
1.2 促进计算机系统结构发展的因素	2
1.2.1 冯·诺依曼计算机	2
1.2.2 改革冯·诺依曼机的必要性	3
1.3 计算机系统结构的发展	4
1.3.1 计算机系统的发展	4
1.3.2 计算机系统结构的发展	6
1.4 硬件与软件的功能分配	8
第二章 存贮系统	11
2.1 存贮系统基本概念	11
2.1.1 存贮器在计算机中的地位	11
2.1.2 存贮系统的层次结构	11
2.1.3 存贮器访问的局部性	13
2.1.4 层次结构中的命中率	14
2.2 并行主存系统	15
2.3 高速缓冲存贮器	18
2.3.1 高速缓冲存贮器的结构	18
2.3.2 地址映象	20
2.3.3 替换算法	25
2.3.4 写入策略	25
2.3.5 长城386计算机的高速缓冲存贮器	27
2.4 存贮管理	32
2.4.1 主存贮器分区管理的基本概念	33
2.4.2 页式管理	35
2.4.3 段式管理	36
2.4.4 段页式管理	38
2.5 虚拟存贮器	38
2.5.1 IBM 370系统的虚拟存贮器	39
2.5.2 VAX-11计算机的虚拟存贮器	41
2.5.3 加快地址变换速度的硬件	46
2.5.4 长城386计算机的虚拟存贮器	48
2.5.5 缺页及其处理	51
2.5.6 虚拟存贮器工作过程	53
2.6 高速缓冲存贮器-主存-辅存三级层次	55
2.7 存贮保护	55

2.7.1 存贮保护的必要性	55
2.7.2 工作状态的保护	57
2.7.3 存贮区域的保护	57
2.7.4 访问方式的保护	59
2.8 相联存贮器	59
2.8.1 信息访问方式	59
2.8.2 相联存贮器	61
第三章 输入输出系统	64
3.1 输入输出系统基本概念	64
3.2 程序控制输入输出	66
3.3 中断驱动输入输出	66
3.4 直接存贮器访问	68
3.4.1 基本原理	68
3.4.2 直接存贮器访问的输入输出工作过程	69
3.4.3 直接存贮器访问部件在计算机系统布局	69
3.4.4 80386微处理机的DMA	70
3.5 输入输出通道	73
3.5.1 基本原理	73
3.5.2 分类	77
3.5.3 工作过程举例	78
3.6 总线系统	81
3.6.1 基本概念	81
3.6.2 总线的定时	82
3.6.3 总线的判优	84
第四章 指令系统的系统结构	89
4.1 引言	89
4.2 指令格式和寻址方式	90
4.2.1 指令格式和编码	90
4.2.2 指令格式举例	91
4.2.3 寻址方式	93
4.3 数据表示	96
4.3.1 浮点数表示	97
4.3.2 带标志符的数据表示	98
4.4 指令系统的设计	101
4.4.1 指令系统设计过程	101
4.4.2 对指令系统的要求	101
4.5 指令系统对高级语言的支持	103
4.5.1 冯·诺依曼语义差距	103
4.5.2 加强对高级语言支持能力的途径	103
4.6 指令系统对操作系统的支持	106
4.7 中断系统	108

4.7.1	中断的分类	108
4.7.2	中断响应的优先级	109
4.7.3	中断的屏蔽和中断处理次序	110
4.7.4	中断处理过程和硬软件功能分担	111
4.7.5	中断的断点	114
4.8	状态控制	115
第五章	处理机系统	117
5.1	计算机系统的分类	117
5.2	流水方式	118
5.2.1	指令流水线	118
5.2.2	长城386计算机的指令流水线	123
5.2.3	相关对指令流水线效率的影响	124
5.2.4	先行控制处理机	128
5.2.5	指令调度和循环展开	130
5.2.6	运算流水线	134
5.2.7	运算流水线分类	138
5.3	多功能部件处理机	137
5.4	向量处理机	139
5.4.1	向量的流水处理	139
5.4.2	向量处理机的组成	140
5.4.3	提高运算速度的技术	142
5.4.4	向量化编译程序	145
5.5	附加式数组处理机	146
5.5.1	数组处理机的组成	146
5.5.2	数组处理机的应用	149
5.6	简化指令系统计算机	150
5.6.1	产生的背景	150
5.6.2	主要特点	152
5.6.3	发展和应用	155
5.6.4	简化指令系统计算机的例子: RISC II	155
5.6.5	简化指令系统计算机系统结构中的一些技术	159
5.6.6	SUN SPARC	164
5.6.7	MIPS R2000	166
5.7	超级标量计算机、超长指令字计算机和超级流水线计算机	171
5.7.1	概述	171
5.7.2	超级标量计算机	173
5.7.3	超长指令字计算机	174
第六章	多处理机系统	183
6.1	引言	183
6.1.1	高度并行的计算机系统	183
6.1.2	多处理机系统的优点	184

6.2	SIMD并行处理机	186
6.2.1	Illiacy IV	186
6.2.2	Illiacy IV的应用	188
6.2.3	MPP	193
6.3	松耦合多处理机系统(多计算机系统)	194
6.4	紧耦合多处理机系统(多处理机系统)	195
6.4.1	同构型和异构型多处理机	197
6.4.2	cache一致性	198
6.5	互连网络	201
6.5.1	互连网络的特征	201
6.5.2	多计算机的互连网络	201
6.5.3	紧耦合多处理机的互连网络	204
6.6	通用计算机构成共享存贮器的多处理机系统	210
6.6.1	IBM370系列多处理机	210
6.6.2	IBM3033多处理机	213
6.7	容错计算机	213
6.7.1	松耦合多处理机构成的容错计算机	214
6.7.2	紧耦合多处理机构成的容错计算机	215
6.7.3	Tandem“不停顿”系统	216
6.7.4	Stratus容错计算机	217
6.8	多处理机的操作系统	220
第七章	计算机系统结构的新发展	222
7.1	引言	222
7.2	脉动阵列结构	222
7.2.1	脉动阵列结构的基本原理	222
7.2.2	面向特定算法的脉动阵列结构	223
7.2.3	通用的脉动阵列结构	228
7.3	数据流计算机	230
7.3.1	数据流计算机基本原理	230
7.3.2	数据流图与数据流程序	231
7.3.3	数据流语言	233
7.3.4	数据流计算机的分类	236
7.4	Lisp机	240
7.4.1	智能机概述	240
7.4.2	Lisp语言的主要特性	241
7.4.3	Symbolics 3600系列机	246
7.5	归约机	251
7.5.1	函数式语言	252
7.5.2	归约模型	254
7.5.3	归约机	255
附录		257

第一章 绪 论

1.1 计算机系统结构的含义

“计算机系统结构”这个名词来源于英文computer architecture, 我国也有译成“计算机体系结构”的。architecture 这个字原来用于建筑领域, 其意义是“建筑学”、“建筑术”或者是“建筑物的设计或式样”。60年代这个名词被引入计算机领域。近30年来, “计算机系统结构”一词已经得到普遍应用, 它研究的内容不但涉及计算机硬件, 也涉及计算机软件, 已成为连接硬件和软件的一门学科。但对“计算机系统结构”一词的含义仍是说法颇多^[1-12], 并无统一定义。

早在1964年, Amdahl等人在IBM期刊上著文介绍IBM 360系统时开始采用“系统结构”一词^[13], 他们还它为它下了个定义, 认为计算机系统结构是“程序员所看到的系统的一些属性: 概念性的结构和功能上的表现, 这些属性既不同于数据流和控制的组织, 也不同于逻辑设计和物理实现”。当时的这个定义所包含的内容比较窄, 仅仅把系统结构作为从使用计算机机器语言或汇编语言的程序设计人员的角度所看到的计算机系统的属性。这些属性只包括指令系统和实现指令系统的硬件, 像通用寄存器、数据表示、程序状态字、存储器的组成和寻址技术、中断、输入输出机制等等, 这些内容对于使用高级语言的人来说是看不到的, 是“透明的”。

随着计算机技术的发展, 出现了一系列对计算机系统有着重要影响的硬件技术, 例如高速缓冲存储器(cache)技术, 这些都是软件设计人员所看不到的, 但研究计算机系统结构的人却不能不研究这些硬件技术。同时, 现代计算机中硬件与软件的结合越来越紧密, 例如超长指令字(VLIW)计算机的并行操作功能的发挥同优化编译程序的效能密切相关。因而, 研究系统结构也就越来越需要把硬件同软件结合起来研究, 也就是说系统结构已经向硬件和软件两个方向扩大了它的研究范围。现在的计算机系统结构的含义, 已经比Amdahl等人的定义宽得多了。

计算机系统结构除了包含前述的从软件开发人员(指使用机器语言或汇编语言的软件设计人员)角度看到的系统属性外, 还要包含那些从计算机设计人员角度看到的系统属性。计算机设计人员所看到的属性是把软件开发人员所看到的属性加以具体实现的属性, 是计算机中的各个部件及它们之间的相互连接关系, 也就是部件的逻辑设计和物理实现。这些属性都是软件开发人员所看不到的。为了区别从两个不同角度看到的系统属性, 人们把从计算机设计人员角度看到的计算机系统属性叫做“物理实现的系统结构(implementation architecture)”, 也有称为“微系统结构”的, 而把从软件开发人员角度看到的计算机系统属性叫做“系统的系统结构(system architecture)”, 或称之为“宏系统结构”。有的著作中又把前者叫做“计算机组成”, 与之对应地把后者称作“计算机系统结构”。

“系统的系统结构”同“物理实现的系统结构”所关心的问题是不同的, 前者关心的是怎样合理地进行硬软件功能的分配, 为软件设计人员提供更适用的机器; 后者关心的是怎

样合理地实现分配给硬件的功能和指标,提高性能价格比。例如,对于乘法,系统的系统结构考虑的是“是否设乘法指令”,而物理实现的系统结构考虑的则是“是设专门的乘法器还是通过反复使用加法器来实现乘法”。这两者的差别可以IBM系列机为例来说明(图1.1)^[14]。

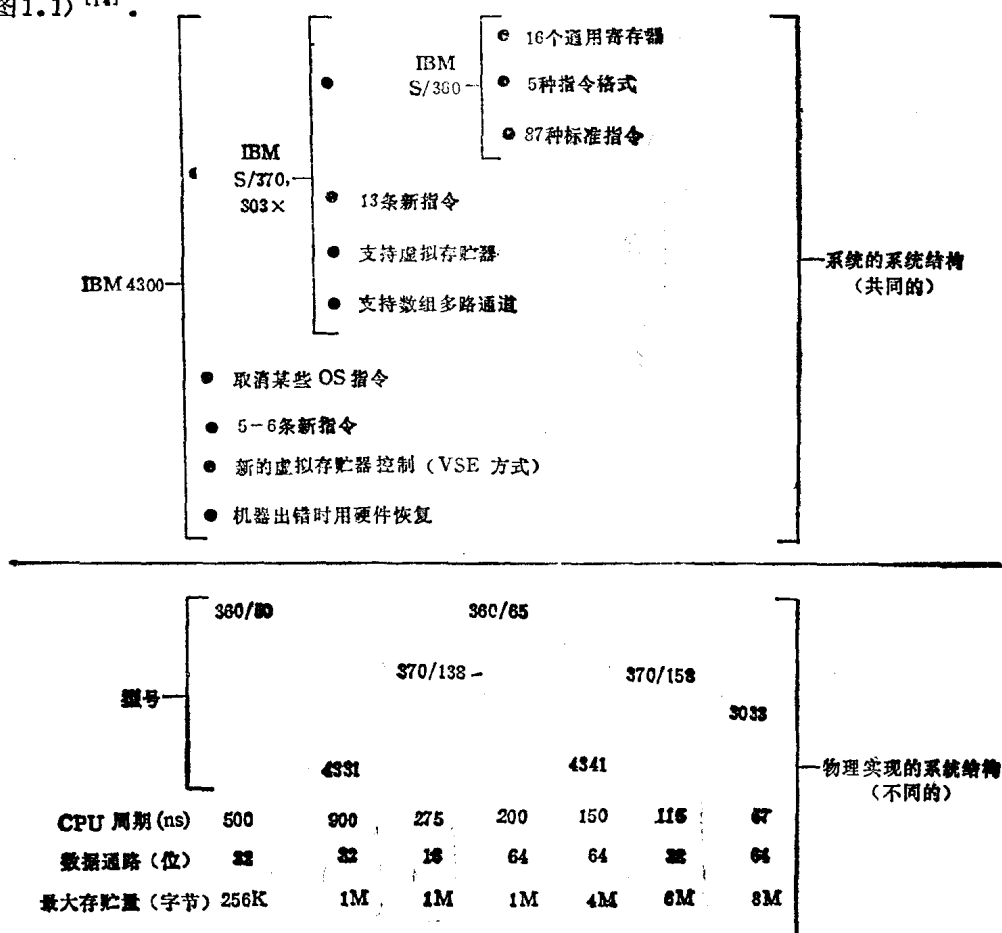


图 1.1 系统的系统结构同物理实现的系统结构的差别

从系统的系统结构来看,图1.1中所示的IBM 360, 370或4300系列都是相同的,但从物理实现的系统结构来看,各种机器都不同。在同一个计算机系列中,各个机种由于采用的技术和工艺不同,性能可以相差100倍以上。

一种计算机系列,从开始设计最初的机种到最后全部被淘汰,往往要持续10年以上,在此期间系列机的系统的系统结构是不能任意改变的,这样才能保持其兼容性,也就是要使同一个系列中的所有机种间能够做到“向上兼容”(为某档机种编制的软件应能不加修改地运行于比它高的档次的机种上)和“向后兼容”(为某个时期投入市场的机种编制的软件应能不加修改地运行于在它之后投入市场的机种上)。

1.2 促进计算机系统结构发展的因素

1.2.1 冯·诺依曼计算机

1945年冯·诺依曼等人发明了IAS计算机^[4],提出了存储程序计算机方案,其后开发

的计算机基本上都采用这种方式，称为冯·诺依曼计算机或冯·诺依曼机。冯·诺依曼机由运算器、控制器、存贮器和输入输出设备四部分组成，如图1.2所示。

一般认为，冯·诺依曼机的基本特点如下^[10]：

(1) 采用存贮程序方式，程序和数据放在同一个存贮器中，两者没有区别，指令同数据一样可以送到运算器进行运算，即由指令组成的程序是可以修改的。

(2) 存贮器是按地址访问的线性编址的一维结构，每个单元的位数是固定的。

(3) 指令由操作码和地址码组成。操作码指明本指令的操作类型，地址码指明操作数的地址。操作数本身无数据类型的标志，它的数据类型由操作码确定。

(4) 通过执行指令直接发出控制信号控制计算机的操作。指令在存贮器中按其执行顺序存放，由指令计数器指明要执行的指令所在的单元地址。指令计数器只有一个，一般按顺序递增，但执行顺序可按运算结果或当时的外界条件而改变。

(5) 机器以运算器为中心，输入输出设备与存贮器间的数据传送都经过运算器。

(6) 数据以二进制表示。

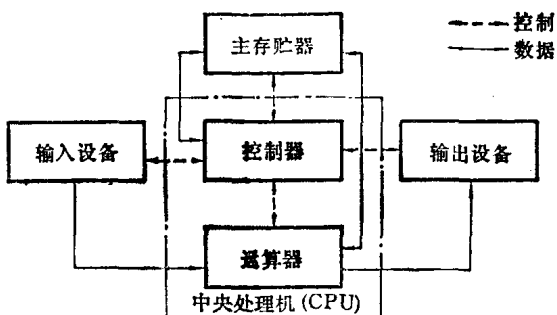


图 1.2 冯·诺依曼机结构

1.2.2 改革冯·诺依曼机的必要性

冯·诺依曼机是在1945年的技术水平和当时的环境下提出的，专为解决弹道等科学计算用。当时硬件价格昂贵，可靠性低。40多年来，随着器件、软件技术的发展，以及非数值处理等新应用领域的开拓，对冯·诺依曼机作了很多改革，使计算机系统结构有了很多新发展。促使系统结构发展的主要因素如下^[9]：

(1) 要求增大处理能力。计算机应用领域的扩大对提高处理能力，降低机器价格提出了迫切要求。从50年代以来，计算机性能价格比每10年提高约100倍（见表1.1）。

表 1.1 计算机发展趋势

	1955年	1965年	1975年	1985年
工业生产	1	20	80	320
性能价格比	1	10^2	10^4	10^6
程序员生产率	1	2.4	5.6	13.8
系统可靠性	1	5	24	120

(2) 要求提高软件生产率。从表1.1还可看到^[12]，50年代以来，计算机程序开发的生产率每10年仅提高两倍多一点，因而随着计算机应用领域的扩大，也要求有能大大提高软件生产率的系统结构。

(3) 要求适应新的应用领域。冯·诺依曼机是针对数值计算设计的，在此之后出

现了以文字处理为代表的非数值处理,以及图形、语音、图象等模式处理,近年来又兴起了基于知识库的机器推理、自然语言处理等人工智能应用研究,显然,冯·诺依曼机已不能适应这些新的应用领域。

(4) 要求改进人-机接口。早期的计算机在进行数值计算时,人、机间的信息交换量同计算量相比是极少的,但现代的计算机往往以人、机交互的方式进行工作,因而产生了使用智能接口以及人们易于理解的声音和图形输入输出的要求,甚至要求能进行远程人、机信息交换。

(5) 要求实现高可靠性。现在的计算机的可靠性已相当高(见表1.1),但有很多应用领域仍要求有更高的可靠性,因而要求在系统结构技术中考虑加强可靠性。

对于前面提到的冯·诺依曼机的六条基本特点,有的计算机系统结构中早已突破。举例来说,对于第一条,有的机器(如B5 500)有数据描述符,它可以指明数据的属性,区分指令和数据而按内容访问的相联存储器和不需地址的堆栈也突破了第二条的限制。对于第四条,现在的多处理机系统可以有多个指令计数器,同时执行多条指令。用数据驱动的数据流计算器更突破了按指令计数器指明地址的指令执行框框。对于第五条,现代计算机基本上都已以存储器为中心,存储器有多个端口可直接接受来自输入输出设备和运算器的读写数据。对于第六条,采用十进制数运算就是个突破。

1.3 计算机系统结构的发展

1.3.1 计算机系统的发展

图1.3反映了30年来计算机系统发展的情况^[15]。图中示出了1960, 1970, 1977, 1982和1987年这五年计算机系统的发展情况。图中 x 方向是每个计算机系统的成本, y 方向是全世界总销售额(金额为美元), z 方向是应用领域(科学计算用或商业用)。

从50年代到60年代初,硬件十分昂贵,计算机系统的发展中把很大的注意力放在尽量降低计算机的价格上,这样,计算机就不可能做得太复杂,因而分别发展了两种类型的计算机来满足两种市场的需要。一种是科学计算用计算机,采用二进制,有浮点运算;另一种是商业用计算机,用定点十进制运算。

到60年代中期,硬件价格有很大降低,软件开发工作日益繁重,软件开发所需的人力和费用已很突出。在此情况下,IBM公司率先开发了系列机IBM 360。在这类大中型系列机的系统结构中,把包括前述两类市场在内的各方面对计算机功能的需要都结合在一台计算机中,使之兼有浮点运算和十进制运算的功能。在一个系列中,有大小不同的机种,但各个机种都采用统一的操作系统,可以配备各种不同的高级语言和应用软件来满足各种市场的特殊需要。经过70年代和80年代的发展,这种系列机已发展成为可以满足各方面需求的通用计算机,现在把这类机器叫做大中型机(mainframe)¹⁾。很多新的系统结构技术都是在大中型机中首先使用的,例如在60年代末就开始采用的高速缓冲存储器和虚拟存储器技术。

1) 按原文似可译作“主机”,这里仍按我国习惯称为“大中型机”。

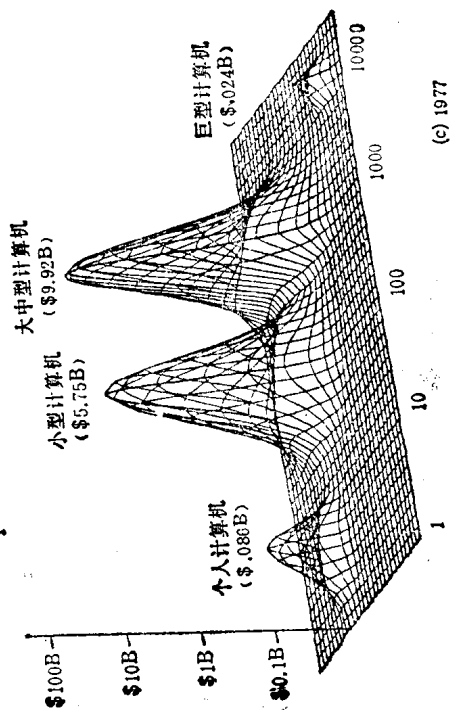
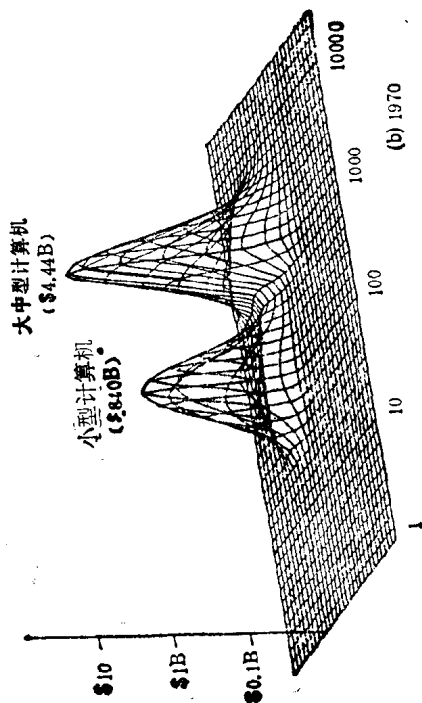
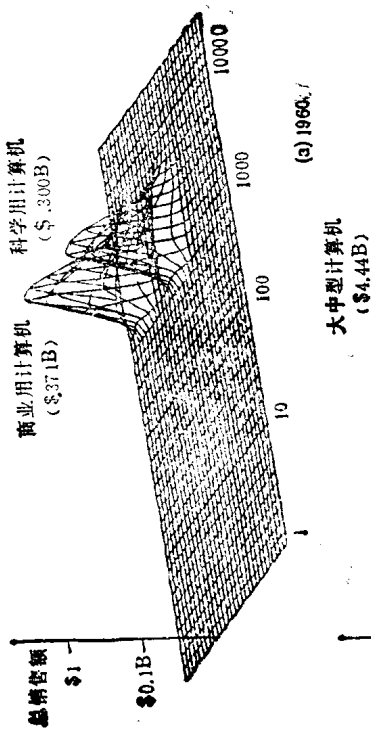
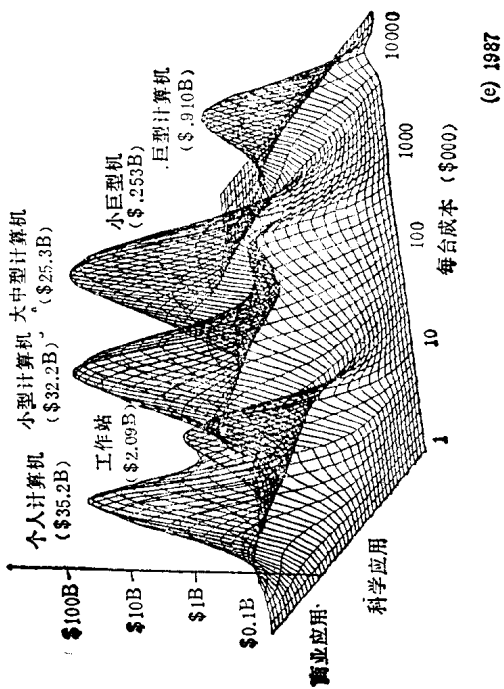
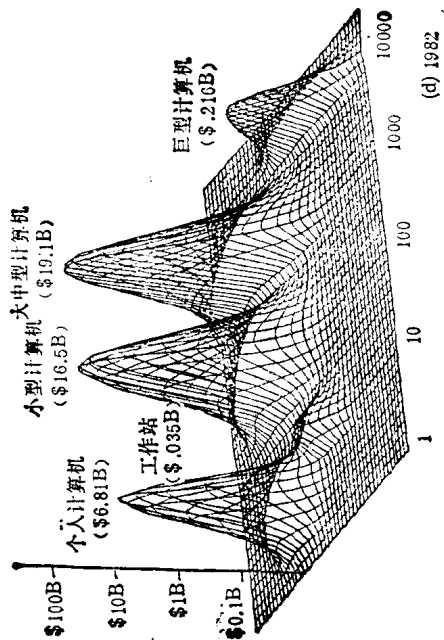


图 1.3 30年来计算机系统发展情况

60年代出现大中型机时, 它的价格还是比较昂贵的, 这也限制了它的广泛应用。因而当时又出现了早期的小型计算机。最初的小型计算机字长短、存储容量较小、指令系统比较简单, 计算速度虽不及大中型机, 但也相当快, 最主要的是价格低廉。小型计算机也是以系列机的方式出现的, 根据市场需要, 小型计算机系列又发展了各种档次的机种。70年代末出现了各种超级小型计算机, 其性能已进入低档大中型机的范围。

由于尖端技术、气象、地质等领域要进行大量计算的需要, 在60年代末70年代初出现了一类最高档次的机种——巨型计算机, 这种计算机具有很高的运算速度、极大的存储容量。巨型计算机一出现就有两种类型的系统结构: 向量处理机和并行处理机(阵列处理机)。首先用于商品化的巨型机是向量处理机。这种机器发展较快, 从70年代到80年代, 通过对系统结构、工艺和软件的不断改进, 它的单机性能已经很高。另一种采用并行处理机技术的巨型机也在不断发展中。这些年来, 巨型机的性能价格比虽在不断提高, 但因为它的功能也在不断提高, 所以它的价格一直十分昂贵。由于价格昂贵, 到1989年3月, 全世界的巨型机只有400台左右^[6]。

80年代中期又出现了一种很有竞争力的机种——小巨型计算机, 它的性能接近巨型机, 但相对于不惜工本一味追求高性能的巨型机来说, 它的价格要便宜得多。最早的小巨型机是用高性能单处理机组成的系统, 其后又出现用多处理机系统的小巨型机。在新一代的小巨型机上开始采用两种技术: 并行处理结构和微处理机, 也就是把微处理机结合到并行处理系统结构中, 构成价格低廉、性能适度的并行处理系统。这种系统结构是小巨型机市场中有力的竞争者。

最小的一种计算机是微型计算机。70年代初出现了微处理器, 但还不是一个完整的计算机, 还要加上存储器、接口、外部设备等。1977年Apple公司推出“用户友好”的个人计算机是微型计算机发展的一个里程碑。微型计算机随着VLSI(超大规模集成电路)技术的发展而迅速发展。高档的个人计算机功能已非常强, 称为工程工作站, 其功能已进入小型机和低档大中型机的范畴, 其系统结构中也开始采用过去为大中型机开发的技术。

1.3.2 计算机系统结构的发展

40多年来, 由于应用的需要和器件的发展, 对于冯·诺依曼机的系统结构已经进行了很多改进^[4]。这些改进有的是为了支持高级语言, 有的是为了便利操作数地址计算, 有的是为了提高处理速度, 也有的是为了其它原因。有的改进是在冯·诺依曼机基本概念范围内的发展, 也有的已超出了冯·诺依曼机的基本概念范围。以下是一些改进的例子, 其中(1)到(10)项是在冯·诺依曼机基本概念范围内的发展, (11)和(12)项则已超出这个范围:

- (1) 增加新的数据类型, 包括浮点数、字符串、位串和十进制数等。
- (2) 采用堆栈, 用来支持过程的调用、递归、表达式的计算等。
- (3) 采用虚拟存储器。
- (4) 采用变址寄存器。
- (5) 增加间接寻址。
- (6) 增设CPU内的通用寄存器和cache存储器。
- (7) 采用存储器交叉。