



面向 21 世纪 课程 教材  
Textbook Series for 21st Century

# 计算机体系结构

张晨曦 王志英 张春元 戴葵 朱海滨



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 计算机体系结构

张晨曦 王志英 张春元 戴葵 朱海滨



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内容提要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果，是面向 21 世纪课程教材。本书的主要内容有：计算机体系结构的基本概念、计算机指令集结构设计、流水线技术、指令级并行技术、存储体系、输入/输出系统以及多处理机。本书比较全面和系统地接触了当今计算机体系结构的发展前沿，概念清晰，易于理解，并配有大量的实例分析。

本书可作为计算机专业本科生计算机体系结构课程的教材，也可作为计算机相关专业研究生教材，书中的内容对于从事计算机研究及相关人员亦有很好的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机体系结构/张晨曦等编著. —北京：高等教育出版社，2000

教育部面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-007495-8

I. 计... II. 张... 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(2000)第 17636 号

计算机体系结构

张晨曦 王志英 张春元 戴葵 朱海滨

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高塘纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 2000 年 6 月第 1 版

印 张 23.5

印 次 2000 年 6 月第 1 次印刷

字 数 430 000

定 价 19.90 元

---

凡购买高等教育出版社图书，如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

## 第一作者简介

张晨曦,男,1960年9月生,汉族,福建龙岩人,国防科技大学计算机学院教授,博士生导师。国家级“中青年有突出贡献专家”,中国电子学会理事,全国计算机辅助教育学会理事。主要成就有:先后主持了四项国家自然科学基金项目,曾获“国家杰出青年基金”资助。发表论文80篇,其中在国外发表论文20篇。有18篇被国际著名的八大检索工具收录。撰写专著两部(第二作者),其中《新一代计算机》由荷兰 North-Holland 出版社出版;另一部1992年获“国家教委优秀专著特等奖”,1993年获“全国优秀科技图书一等奖”。获部委级科技进步一等奖两项(排名第二),二等奖一项(排名第一);获部委级教学成果二、三等奖各一项。负责研制的新型 Internet 动画制作/演播系统“网动王”于1999年3月通过了专家鉴定,达到了国际先进水平,并已在远程教育和 CAI 中获得了较广泛的应用。1991年被国家教委授予“做出突出贡献的中国博士”光荣称号,并被评为湖南省科技青年“十佳”之一;1993年被评为“全军优秀教师”,1993年和1995年两次获“霍英东青年教师奖”;1995年获“中国青年科技奖”。从15岁起当中学教师,对教学方法和现代教育技术有深入的研究,提出了面向远程教育和 CAI 的教学方法多媒体图形解析教学法。

通讯地址:湖南长沙 国防科技大学 计算机学院

邮编:410073

网址:<http://www.GotoSchool.net>

E-mail:[czhang@public.cs.hn.cn](mailto:czhang@public.cs.hn.cn).

# 出版说明

计算机体系结构、计算机组成原理和微型计算机技术是计算机科学与技术专业的核心课程。长期以来,大家普遍感到这三门课程的教材体例和内容陈旧,彼此交叉重复过多,不能适应我国培养面向 21 世纪人才的需要,迫切希望能对它们统一规划,全盘考虑,各有侧重,避免简单重复。为此,在国家教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会主任孙钟秀院士的领导之下,在 1996 年 9 月上海会议上,经过反复认真讨论最后决定由教学指导委员会副主任陈国良教授负责统一策划,并根据“面向 21 世纪计算机专业内容和课程体系改革”的要求,以“体系结构——组成原理——微机技术”系列教材的形式,组织编写这套书。

按此决议精神,经过半年多的筹备,于 1997 年 3 月在长沙邀请国内著名大学中讲授该课程的一些资深教授,并参照了国际上的同类权威教材,对该系列教材的内容划分和所属重点进行了讨论,确定了统一的编写原则,即计算机体系结构应重点论述计算机系统的各种基本结构、设计技术和性能定量分析方法;计算机组成原理应侧重讨论计算机基本部件的构成和组成方式,基本运算的操作原理和单元的设计思想、操作方式及其实现;而微型计算机技术则应突出应用,详细讲述微处理器芯片、计算机主板、接口技术和应用编程方法。

根据上述确定的原则,经过专家推荐和多方面协商,在 1997 年 10 月的济南会议上,逐一落实了系列教材的作者与审者。其中,计算机体系结构由国防科学技术大学张晨曦教授等主编,复旦大学朱传琪教授主审;计算机组成原理由哈尔滨工业大学唐朔飞教授主编,中国科学技术大学陈国良教授主审;微型计算机技术由上海交通大学孙德文教授主编,西安交通大学鲍家元教授主审。

此后,在 1997 年 11 月的三亚会议上对各书的三级提纲进行了最终统一审定,并约定计算机体系结构、计算机组成原理和微型计算机技术的书稿分别于 1999 年 3 月、8 月和 10 月提交高等教育出版社。最后,在 1998 年 9 月合肥会议上,确定将三本书作为“面向 21 世纪课程教材”向国家教育部提出立项申请,并讨论了要为该系列教材配套 CAI 软件。

这套系列教材的出版,是计算机科学与技术教学指导委员会全体同志和参与编审系列教材的同志们们的共同努力、辛勤劳动的结果。我们非常感谢高等教育出版社的支持与鼓励,感谢全国广大读者对此套书的厚望。希望这套教材能为培养我国面向 21 世纪的科技人才发挥应有的作用。

国家教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会

1999 年 8 月 13 日

# 前 言

本书是高等学校计算机专业本科生及研究生计算机体系结构课程的通用教材。为了适应面向 21 世纪计算机类专业教学内容和课程体系改革的需要,国家教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会统一组织编写了计算机科学与技术专业九五规划教材。其中,《计算机体系结构》、《计算机组成原理》和《微型计算机技术》是重点组织的系列教材。本书是该系列教材之一。

在内容的选择上,本书不打算覆盖计算机体系结构的各个方面,不想成为大而全的参考手册,而是重点论述现代大多数计算机都采用的比较成熟的思想、结构和方法等,并且力求做到深入浅出,通俗易懂。

本书除了着重论述计算机体系结构的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法以外,还强调采用量化的分析方法。这种方法使我们能更具体、实际地分析和设计计算机体系结构。书中用了大量的例题说明如何进行量化分析。

本书共七章。第一章论述计算机体系结构的概念以及体系结构和并行性概念的发展,并简单地讨论影响计算机系统设计的成本和价格因素。第二章论述计算机指令集结构设计中的一些问题,包括寻址技术、指令集的功能设计、操作数的类型和大小、指令格式等,并且介绍一种指令集结构的实例——DLX。第三章为流水线技术,论述流水线的基本概念、分类以及性能计算方法,并对流水线中的相关问题以及向量计算机进行讨论。第四章为指令级并行,论述利用硬、软件技术开发程序中存在的指令间并行性的技术和方法,包括指令调度、超标量技术、分支处理技术和超长指令字技术。第五章为存储层次,论述 Cache 的基本知识、降低 Cache 失效率的方法、减少 Cache 失效开销的方法以及减少命中时间的方法,并对主存和虚拟存储器进行讨论。第六章为输入输出系统,论述存储设备、总线和通道,并讨论 I/O 与操作系统的关系以及 I/O 系统设计。第七章为多处理机,论述多处理机的存储器体系结构、互连网络以及同步与通信,并对并行化技术和多处理机实例进行讨论。

本书由国防科学技术大学计算机学院张晨曦教授编写第五章,王志英教授编写第七章,张春元博士编写第一章和第四章,戴葵博士编写第二章和第三章,朱海滨博士编写第六章。

本书由复旦大学朱传琪教授主审,提出了宝贵的修改意见。在本书编写过程中,得到了中国科学技术大学陈国良教授的大力支持,并得到了国防科学技术

大学计算机学院领导和有关师生的多方面帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

本书有配套的 CAI 课件和 PowerPoint 讲稿,详见

<http://www.GotoSchool.net>

作 者

1999年3月于长沙

责任编辑 刘 艳

封面设计 张 楠

责任校对 俞声佳

版式设计 马静如

责任印制 宋克学



# 第一章 计算机体系结构的基本概念

## 1.1 引 论

我们目前使用的数字电子计算机(通常称之为计算机)诞生于 1945 年。半个世纪以来,计算机技术一直处于发展和变革之中。今天,我们用 1 万元人民币购置的个人计算机(PC),其性能已经大大超过了在 20 世纪 60 年代用 1 百万美元购置的计算机。20 世纪 50 年代,人们认为在银行里用计算机来完成现金存取业务的想法是荒唐可笑的,因为当时最便宜的计算机也需要 50 万美元;60 年代时,人们认为用计算机控制汽车行驶是天方夜谭,因为当时计算机的体积就有轿车那么大;70 年代的人们做梦也不会想到计算机系统能随身携带,可带到咖啡屋、汽车或飞机上使用。人们曾经假设,如果汽车制造业能够按计算机产业的速度发展,那么今天人们从美国的东海岸到西海岸,只需花 0.5 美元,用时 5 秒。计算机性能如此高速增长,受益于电路技术和计算机体系结构技术的发展。

在计算机诞生的头 25 年中,计算机性能增长相对缓慢。在这个过程中,电路技术和体系结构同时发挥着作用,其间充满了尝试和创新。目前广泛使用的存储程序计算机的完整概念就是这个时期产生的,我们通常称之为冯·诺依曼(von Neumann)计算机结构。20 世纪 70 年代以后,由于集成电路的出现,计算机性能出现了极大的飞跃,产生了一系列著名的计算机系统,如 IBM 360/370 系列、DEC PDP 系列、CDC 6600/7600 系列等。70 年代计算机性能的增长速度达到每年 25%~30%,这种增长主要归功于以集成电路为代表的电路技术的发展。70 年代末期,出现了微处理器,这是一次计算机设计和制造技术的革命。从 70 年代末到 80 年代中期,采用微处理器的计算机性能增长达到每年 35%;与当时广泛使用的大、中、小型计算机相比,微处理器的性能增长,更多地依赖于集成电路技术的发展。进入 80 年代以后,计算机体系结构产生了一次重大变革,出现了我们现在称之为精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer,简称 RISC)的处理器设计技术。此后,计算机体系结构不断变革,在计算机体系结构技术发展的促进下,集成电路技术为计算机设计提供的技术空间得到了充分的发挥,计算机系统的性能以每年 50%以上的速度增长。90 年代中期以来,尤其是 Intel 公司的 Pentium Pro 的出现,基于 RISC 设计技术的微处理器大

批量上市,极大地推动了计算机产业的发展,计算机的系统性能得到全面提升。目前,计算机性能增长达到每年 50% 以上,其中包括器件技术在内的计算机制造技术提供其中约 8%,其余约 42% 的部分主要依靠计算机体系结构发展的支持。

微处理器出现以后,计算机系统设计、计算机市场和计算机应用都出现了较大的变化。首先,计算机用户是最直接的受益者。20 世纪 90 年代中期,采用 Digital 的 Alpha 微处理器构成的计算机系统,其性能已经大大超过 80 年代末期的向量巨型计算机,如 Cray Y-MP(可能是 88 年全世界最快的商用计算机)等,而价格仅仅只有巨型计算机的几十分之一。第二,对于市场而言,大批量的微处理器生产促成了计算机产品的批量化、标准化和市场化,这种变化促进了计算机设计、生产和应用的良性发展。微处理器的使用,使绝大多数计算机系统制造商无需再进行中央处理器的设计和制造了,计算机系统设计的复杂性和风险也大大下降。目前,甚至巨型计算机也采用微处理器来实现。第三,大量兼容的微处理器、标准化接口、高度兼容的计算机系统的出现,避免了系统程序和应用程序的重复开发;操作系统和计算机语言的标准化,降低了采用新型体系结构的费用和 risk;高级语言,例如 C/C++ 语言,成为计算机系统的必备语言,汇编语言的使用减少使应用开发的难度和 risk 都大大减少了。

计算机系统的这种变化对现实世界的影响是巨大的。当我们使用 80386 档次微处理器构成系统时,进行字处理大部分采用字符界面,多媒体和所见即所得的概念刚刚诞生,功能十分有限。一台具有基本配置的 80386 计算机系统价格在 2 万元人民币以上,只有极少数人能够购置计算机。32 位的 80386 微处理器,其性能相当于一台百万次计算机。我们目前广泛使用的基于 Pentium II 微处理器计算机系统,其性能相当于一台数千万次的 32 位计算机。多媒体功能已经十分普遍,字符界面几乎淘汰,家庭拥有计算机已经司空见惯,计算机已经可以为我们提供大量非常有用的功能,同时这些功能的使用也相对容易了,这些变化已经使我们的生活出现了更多的所谓数字化的成分。我们可以预计,在计算机系统设计和计算机应用领域中,基于微处理器的系统将在相当长的时间内占支配和统治地位。这种现状对计算机体系结构的研究影响巨大,本书中所研究的很多概念,都是基于这个出发点的。

## 1.2 计算机体系结构的概念

设计一种新型计算机系统首先必须面临的问题是什么呢?我们会列举出很多因素,其中最主要的有新型计算机的主要特点和性能。它们具体包括:指令集设计、功能组织、逻辑设计、实现技术等。实现技术包括集成电路设计、制造和封

装技术、系统制造、供电、冷却技术等。另外,我们往往要求在限定的造价范围内,使新型计算机具有最高的性能。如何采用先进的计算机体系结构和生产技术,制造出具有高性能价格比(performance cost rate)的计算机系统,是所有通用计算机设计的共同目标。

### 1.2.1 计算机系统中的层次概念

现代计算机系统是由软件和硬/固件组成的十分复杂的系统。为了对这个系统进行描述、分析、设计和使用,人们从不同的角度提出了观察计算机的观点和方法。本节从计算机语言的角度,把计算机系统按功能划分成多级层次结构。

随着计算机系统的发展,已设计出一系列语言。从面向机器的语言(如机器语言、汇编语言),到各种高级程序设计语言(如 Java、C/C++、FORTRAN、Pascal),到各种面向问题的语言或者叫应用语言(如面向数据库查询的 SQL 语言、面向数字系统设计的 VHDL 语言、面向人工智能的 PROLOG 语言)。计算机语言就是这样由低级向高级发展,高级语言的语句相对于低级语言功能更强,更便于应用,但又都是以低级语言为基础的。

计算机语言可分成一系列的层次(level)或级,最低层语言的功能最简单,最高层语言的功能最强。对于用某一层语言编写程序的程序员来说,他一般不管其程序在机器中是如何执行的,只要程序正确,他就能得到预期的结果。这样,对这层语言的程序员来说,他似乎有了一种新的机器,这层语言就是这种机器的机器语言,该机器能执行用该层语言编写的全部程序。因此计算机系统就可以按语言的功能划分成多级层次结构,每一层以一种不同的语言为特征。这样,可以把现代计算机系统画成如图 1.1 所示的层次结构。图中第 4 级以上完全由软件实现。我们称由软件实现的机器为虚拟机器(virtual machine),以区别于由硬件或固件实现的实际机器。

第 1 级是微程序机器级,这级的机器语言是微指令集,程序员用微指令编写的微程序一般是直接由硬件解释实现的。

第 2 级是传统机器级。这级的机器语言是该机的指令集,程序员用机器指令集编写的程序可以由微程序进行解释。这个解释程序运行在第 1 级上。由微程序解释指令集又称作仿真(emulation)。实际上,第 1 级可以有一个或数个能够在它上面运行的解释程序,每一个解释程序都定义了一种指令集。因此,可以通过仿真在一台机器上实现多种指令集。

计算机系统中也可以没有微程序机器级。在这些计算机系统中是用硬件直接实现传统机器的指令集,而不必由任何解释程序进行干预。我们目前使用的 RISC 技术就是采用这样的设计思想,处理器的指令集全部用硬件直接实现以提高指令的执行速度。

第3级是操作系统虚拟机。从操作系统的基本功能来看,一方面它要直接管理传统机器中的软硬件资源,另一方面它又是传统机器的引申。它提供了传统机器所没有的某些基本操作和数据结构,如文件结构与文件管理的基本操作、存储体系和多道程序以及多重处理所用的某些操作、设备管理等。

第4级是汇编语言虚拟机。这级的机器语言是汇编语言,用汇编语言编写的程序,首先翻译成第3级和第2级语言,然后再由相应的机器执行。完成汇编语言翻译的程序就称作汇编程序。

第4级上出现了一个重要变化。通常的第1、2和3级是用解释(interpretation)方法实现的,而第4级或更高级则经常是用翻译(translation)方法实现。

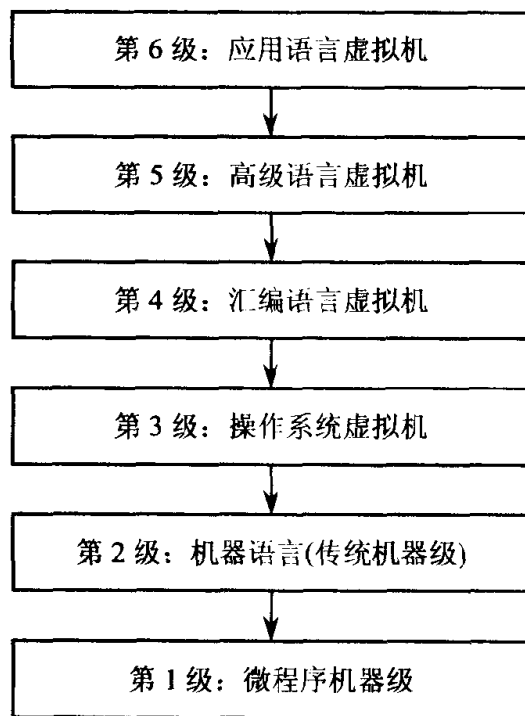


图 1.1 计算机系统的多级层次结构

翻译和解释是语言实现的两种基本技术。它们都是以执行一串  $N$  级指令来实现  $N+1$  级指令,但二者仍存在着差别:翻译技术是先把  $N+1$  级程序全部变换成  $N$  级程序后,再去执行新产生的  $N$  级程序,在执行过程中  $N+1$  级程序不再被访问。而解释技术是每当一条  $N+1$  级指令被译码后,就直接去执行一串等效的  $N$  级指令,然后再去取下一条  $N+1$  级的指令,依此重复进行。在这个过程中不产生翻译出来的程序,因此解释过程是边变换边执行的过程。在实现新的虚拟机器时,这两种技术都被广泛使用。一般来说,解释执行比翻译花的时间多,但存储空间占用较少。

第5级是高级语言虚拟机。这级的机器语言就是各种高级语言,目前高级

语言已达数百种。用这些语言所编写的程序一般是由称为编译程序的翻译程序翻译到第4级或第3级上,如C/C++、Pascal、FORTRAN等,个别的高级语言也用解释的方法实现,如绝大多数BASIC语言系统。

第6级是应用语言虚拟机。这一级是为使计算机满足某种用途而专门设计的,因此这一级语言就是各种面向问题的应用语言。可以设计专门用于人工智能、教育、行政管理和计算机设计等方面的虚拟机,这些虚拟机也是当代计算机应用领域的重要研究课题。应用语言编写的程序一般是由应用程序包翻译到第5级上。

### 1.2.2 计算机体系结构

计算机体系结构(computer architecture)这个词目前已被广泛使用。Architecture本来用在建筑方面,译为“建筑学”、“建筑术”、“建筑样式”、“构造”、“结构”等。这个词被引入计算机领域后,最初的译法也各有不同,以后趋向译为“体系结构”,但关于它的定义仍未统一。

经典的“计算机体系结构”定义是1964年C. M. Amdahl在介绍IBM 360系统时提出的:计算机体系结构是程序员所看到的计算机的属性,即概念性结构与功能特性。

按照计算机系统的多级层次结构,不同级程序员所看到的计算机具有不同的属性。例如,传统机器程序员所看到计算机的主要属性是该机指令集的功能特性。而高级语言虚拟机程序员所看到计算机的主要属性是该机所配置的高级语言所具有的功能特性。显然,不同的计算机系统,从传统机器级程序员或汇编语言程序员的角度来看,是具有不同属性的。但是,从高级语言(如Pascal)程序员看,它们就几乎没有什么差别,是具有相同属性的。或者说,这些传统机器级所存在的差别是高级语言程序员所“看不见”的,也是不需要他们知道的。在计算机技术中,对这种本来是存在的事物或属性,但从某种角度看又好像不存在的概念称为透明性(transparency)。通常,在一个计算机系统中,低层机器的属性对高层机器的程序员往往是透明的,如传统机器级的概念性结构和功能特性,对高级语言程序员来说是透明的。由此看出,在层次结构的各个级上都有它的体系结构。Amdahl提出的体系结构是指传统机器级的体系结构,即一般所说的机器语言程序员所看到的传统机器级所具有的属性。

这些属性是机器语言程序设计者(或者编译程序生成系统)为使其所设计(或生成)的程序能在机器上正确运行,所需遵循的计算机属性,包含其概念性结构和功能特性两个方面。目前,对于通用寄存器型机器来说,这些属性主要是指:

- (1) 数据表示(硬件能直接辨认和处理的数据类型);

- (2) 寻址规则(包括最小寻址单元、寻址方式及其表示);
- (3) 寄存器定义(包括各种寄存器的定义、数量和使用方式);
- (4) 指令集(包括机器指令的操作类型和格式、指令间的排序和控制机构等);
- (5) 中断系统(中断的类型和中断响应硬件的功能等);
- (6) 机器工作状态的定义和切换(如管态和目态等);
- (7) 存储系统(主存容量、程序员可用的最大存储容量等);
- (8) 信息保护(包括信息保护方式和硬件对信息保护的支持);
- (9) I/O 结构(包括 I/O 联结方式、处理机/存储器与 I/O 设备间数据传送的方式和格式以及 I/O 操作的状态等)。

这些属性是计算机系统中由硬件或固件完成的功能,程序员在了解这些属性后才能编出在传统机器上正确运行的程序。因此,经典计算机体系结构概念的实质是计算机系统中软硬件界面的确定,界面之上是软件的功能,界面之下是硬件和固件的功能。

这里比较全面地讨论了经典的计算机体系结构概念。随着计算机技术的发展,计算机体系结构所包含的内容是不断变化和发展的。目前经常使用的是广义的计算机体系结构概念,它既包括经典的计算机体系结构的概念范畴,还包括了对计算机组成和计算机实现技术的研究。

### 1.2.3 计算机组成和计算机实现技术

计算机组成是计算机体系结构的逻辑实现,而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,但又有紧密的关系。

我们以系列机(family machine)为例说明这些概念之间的关系。系列机的出现被认为是计算机发展史上的一个重要里程碑。直到现在,各计算机厂家仍按系列机的思想发展自己的计算机产品。现代计算机不但系统系列化,其构成部件也系列化,如 CPU、硬盘等。至今对计算机领域影响最大也是产量最大的系列计算机莫过于 IBM PC 及其兼容系列机和 Intel 的 80x86 系列微处理器。

所谓系列机,就是指在一个厂家内生产的具有相同的体系结构,但具有不同组成和实现的一系列不同型号的机器。如 IBM 370 系列有 370/115、125、135、145、158、168 等一系列从低速到高速的各种型号。它们各有不同的性能和价格,采用不同的组成和实现技术,但从程序设计者所看到的机器属性却是相同的。在中央处理机中,它们都执行相同的指令集,但在低档机上可以采用指令分

析和指令执行顺序进行的方式,而在高档机上则采用重叠、流水和其他并行处理方式等。

下面从处理器、处理器字宽、I/O 总线、地址空间、寻址方式和计算机结构等方面看一看 IBM PC 系列机。表 1.1 给出了处理器、处理器字宽、I/O 总线、地址空间和寻址方式的比较,图 1.2 为 PC 系列机典型结构的比较。ISA(Industry Standard Architecture)总线是 AT 总线标准化以后的名称。

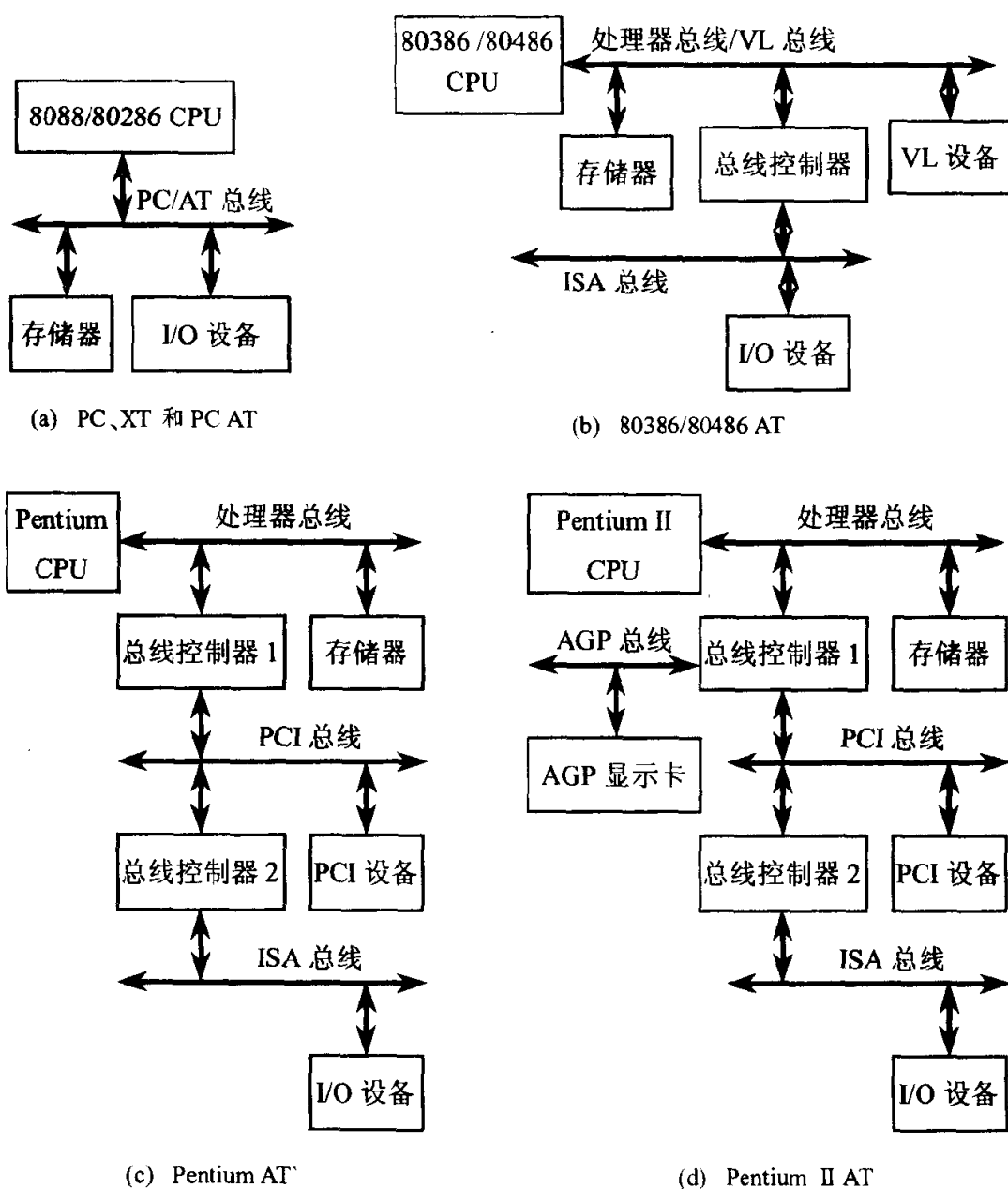


图 1.2 PC 系列机典型结构的发展和比较

表 1.1 PC 系列机特性比较

计算机型号	PC 和 XT	PC AT	80386 AT	80486 AT	Pentium AT	Pentium II AT
处理器型号	8088	80286	80386	80486	Pentium	Pentium II
处理器上市时间	1979	1982	1985	1989	1993	1997
处理器字宽	16 位	16 位	32 位	32 位	32 位	32 位
I/O 总线	PC 总线	AT(ISA)	ISA/ EISA	ISA + VL	ISA + PCI	ISA + PCI + AGP
地址空间	20 位	20/24 位	20/32 位	20/32 位	20/32 位	20/32(36)位
寻址方式	实地址	实/虚 地址	实/虚 地址	实/虚 地址	实/虚 地址	实/虚地址

从上述系列机的例子可见：一种体系结构可以有多种组成。同样，一种组成可以有多种物理实现。正因为系列机从程序设计者的角度看都具有相同的机器属性，因此按这个属性(体系结构)编制的机器语言程序及编译程序都能通用于各档机器，我们称这种情况下的各档机器是软件兼容的(software compatibility)，即同一个软件可以不加修改地运行于体系结构相同的各档机器上，而且它们所获得的结果一样，差别只在于运行时间不同。长期以来，软件工作者希望有一个稳定的环境，使他们编制出来的程序能得到广泛的应用，机器设计者又希望根据硬件技术和器件技术的进展不断地推出新的机器，而系列机的出现较好地解决了软件要求环境稳定和硬件、器件技术迅速发展之间的矛盾，对计算机的发展起到了重要的推动作用。有些计算机厂家为了能利用大计算机厂家的开发成果，也研制一些软件兼容的计算机产品。我们把不同厂家生产的具有相同体系结构的计算机称为兼容机(compatible machine)。兼容机一方面由于采用新的计算机组成和实现技术，因而具有较高的性能价格比；另一方面又可能对原有的体系结构进行某种扩充，从而具有更强的功能(如长城 0520 为 IBM PC 兼容机，但有较强的汉字处理功能)。因此，在市场上有较强的竞争能力。

早在 20 世纪 60 年代，以 Amdahl 公司为代表的接插兼容机 PCM(Plug-Compatible Mainframe)厂家，专门生产在功能上和电气性能上与 IBM 公司相同的主机和设备，它不但可以运行 IBM 公司的软件，而且又可以作为 IBM 产品的替换件插入 IBM 系统。由于采用了新的硬件和器件技术，提高了性能价格比，因而成为 IBM 公司强有力的竞争对手。这种竞争有力地推动了计算机技术和应用的发展。随着标准化技术的发展，目前这种技术已经成为推动计算机系统发展的重要技术之一，有一大批厂家专门生产符合各种标准的设备，这些设备可



以在拥有标准接口的各种计算机上使用,这些厂商称为独立设备生产厂商或者第三方生产厂商。

系列机为了保证软件的兼容,要求体系结构不改变,这无疑又妨碍了计算机体系结构的发展。实际上,系列机的软件兼容还有向上兼容、向下兼容、向前兼容和向后兼容之分。所谓向上(下)兼容指的是按某档机器编制的程序,不加修改就能运行于比它高(低)档的机器。所谓向前(后)兼容指的是按某个时期投入市场的某种型号机器编制的程序,不加修改就能运行于在它之前(后)投入市场的机器。图 1.3 形象地说明了这些概念。

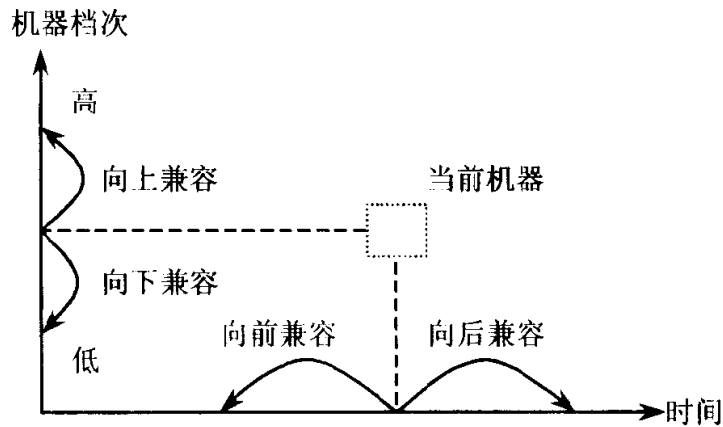


图 1.3 兼容性示意图

为了适应系列机中性能不断提高和应用领域不断扩大的要求,后续各档机器的体系结构也是可以改变的。如增加浮点运算指令以提高速度,或者增加事务处理指令以满足事务处理方面的需要等。但这种改变必须是原有体系结构的扩充,而不是任意地更改或缩小。这样,对系列机的软件向下和向前兼容可以不作要求,向上兼容在某种情况下可能做不到(如在低档机器上增加了面向事务处理的指令),但向后兼容却是肯定要做到的。因此,可以说向后兼容是软件兼容的根本特征,也是系列机的根本特征。一个系列机的体系结构设计的好坏,是否有生命力,就看是否能在保证向后兼容的前提下,不断地改进其组成和实现。Intel 公司的 80x86 系列微处理器在向后兼容方面是非常具有代表性的,从 1979 年的 8086 到 1999 年的 Pentium III,增加了保护方式指令集、MMX 指令集和 KNI 指令集,但它保持了极好的二进制代码级的向后兼容性。向后兼容虽然削弱了系列机对体系结构发展的约束,但仍然是体系结构发展的一个沉重包袱,这也是 RISC 微处理器在性能上很快超过传统的 CISC 微处理器的主要原因之一。

### 1.3 计算机体系结构的发展

计算机体系结构研究计算机系统中软、硬件的界面,即研究哪些功能由软件