

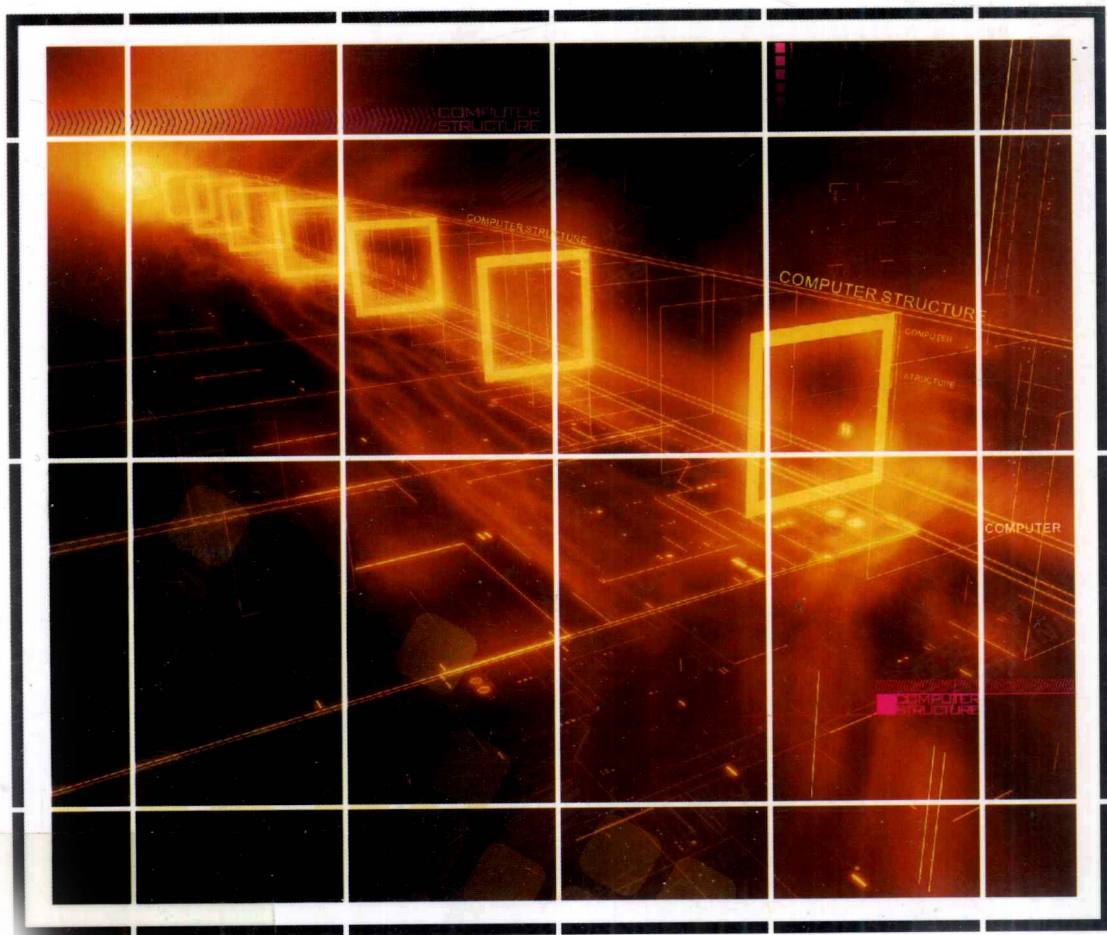


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机系统结构

(第四版)

李学干 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机系统结构

(第四版)

李学干 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书讲述计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本结构、基本分析方法以及近年来该领域的重要进展。

全书共分 8 章。第 1 章是计算机系统结构概论；第 2 章讲述数据表示、寻址方式和指令系统；第 3 章讲述存储、中断、总线与 I/O 系统；第 4 章讲述虚拟存储器、Cache 存储器和主存保护；第 5 章讲述重叠、流水、向量流水处理机和指令级高度并行的超级处理机；第 6 章讲述阵列处理机的原理、并行算法和互连网络；第 7 章讲述多处理机的硬件结构、多 Cache 的一致性、程序的并行性、性能、操作系统和多处理机的发展；第 8 章讲述数据流机和归约机。

本书内容丰富，取材适当，每章均有大量例题和习题，书末附有主要习题的参考答案。本书可作为计算机专业本科生和相关专业研究生的教材，也可作为相关领域科技人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机系统结构 / 李学干编著. —4 版.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.5 (2007.8 重印)

ISBN 978-7-5606-0139-7

I. 计… II. 李… 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 028895 号

责任编辑 王 瑛 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社 (西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2006 年 5 月第 4 版 2007 年 8 月第 32 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.75

字 数 481 千字

印 数 318 001~324 000 册

定 价 25.00 元

ISBN 978-7-5606-0139-7 / TP·0046

XDUP 0578084-32

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我们与各专指委、出版社协商后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、有特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、学生和其他广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

第四版前言

本书是计算机专业本科生和相关专业研究生的规划教材，其前身于1981年由国防工业出版社出版，作为全国统编教材在国内是最早较完整、系统地讲述计算机系统结构的教材。1984年经重新编写后，改由西北电讯工程学院出版社（西安电子科技大学出版社的前身）出版。1991年再由作者重新修改作为第二版发行。《计算机系统结构（第二版）》先后获全国第三届工科电子类专业优秀教材一等奖和国家级优秀教学成果二等奖。2000年出版的第三版是国家级重点本科系列教材之一。本次修编时，又对各章内容做了修改和增删，但作为教材的继承性，不宜在体系、内容和风格上做太大的变动。

本教材仍着眼于有关计算机系统结构和组成的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法的叙述。全书共分8章。第1章是计算机系统结构概论，讲述了计算机系统的多级层次结构，计算机系统结构、组成、实现的定义和相互关系，计算机系统的软硬取舍原则、性能评测及定量设计原理，软件、应用、器件对系统结构的影响，并行性发展和计算机系统的分类。第2章讲述数据表示，寻址方式，指令系统的设计、优化、发展和改进。第3章讲述存储、中断、总线和I/O系统（通道处理机和外围处理机）。第4章讲述存储体系，虚拟存储器，Cache存储器和主存保护。第5章讲述重叠，流水，向量流水处理机和指令级高度并行的超级处理机（超标量处理机、超长指令字处理机、超流水线处理机、超标量超流水线处理机）。第6章讲述阵列处理机的原理、并行算法、互连网络、并行存储器的无冲突访问和脉动阵列处理机。第7章讲述多处理机的硬件结构，多Cache的一致性，程序的并行性，性能，操作系统类型和多处理机的发展（分布式共享主存储器多处理机、对称多处理机、多向量多处理机、并行向量机、大规模并行处理机MPP、机群系统）。第8章讲述数据流机和归约机。

本书相应课程“计算机系统结构”应在“数字逻辑”、“计算机组成原理”、“汇编语言”、“高级程序设计语言”等课程之后开设，学生最好有“数据结构”方面的知识。本课程也可以在“操作系统”、“编译原理”等课程之后，或与它们同时开设。“计算机系统结构”的课程参考教学课时数为60学时左右，可以视情况适当增删。

本书内容丰富，取材适当，每章均有大量例题和习题，书末附有主要习题的参考答案。本书亦可作为计算机结构设计工作者的参考用书。

本书由西安电子科技大学教授兼西安欧亚学院信息工程学院副院长的李学干编著。西安电子科技大学出版社的领导和编辑为本书出版做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏误，恳请广大读者批评指正。

李学干

2006年2月

第三版前言

本教材系按原电子工业部的《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国高等院校计算机专业教学指导委员会编审并推荐出版。

本教材由西安交通大学郑守淇教授主审，钱德沛教授为责任编委。

本教材的前身作为计算机系统结构的全国统编教材是1981年由国防工业出版社出版的。它是国内最早较完整、系统地讲述计算机系统结构的教材。1984年经重新编写后，改由西北电讯工程学院出版社(西安电子科技大学出版社前身)出版。1991年再由作者重新修改作为第二版发行。《计算机系统结构(第二版)》先后曾获全国第三届工科电子类专业优秀教材一等奖和国家级优秀教学成果二等奖。这次在修编时，对各章内容又做了较大修改、增删，但作为教材的继承性，不宜在体系、内容和风格上做太大变动。

本教材仍着眼于有关计算机系统结构和组成的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法的叙述。全书共分8章。第1章讲述计算机系统的层次结构，计算机系统结构、组成、实现的定义和相互关系，软硬取舍原则与系统设计思路，软件移植手段，应用、器件对系统结构的影响，并行性发展与计算机系统分类。第2章讲述数据表示、寻址方式、指令系统的设计与改进、RISC技术。第3章讲述总线设计、中断系统、通道处理机和外围处理机。第4章讲述存储体系、虚拟存储器、Cache存储器和主存保护。第5章讲述重叠，流水，向量处理机，超标量、超长指令字、超流水线处理机。第6章讲述并行处理机和相联处理机。第7章讲述多处理机的硬件结构、程序并行性、性能分析及操作系统。第8章讲述脉动阵列机、数据流机、归约机、智能机、大规模并行处理机(MPP)和机群系统。本教材力求反映出近十几年来在系统结构上的重要进展和今后可能的发展。

本课程应在“数字逻辑”、“计算机(组成)原理”、“程序设计语言”等课程之后开设。学生最好有“数据结构”方面的知识。本课程可在“操作系统”、“编译原理”课程之后，或与它们同时开设。本教材也可作为其它相关专业的研究生或本科生的选修教材。本课程的参考教学时间为60~80学时，可根据情况作适当剪裁。

本书在编写过程中多次得到有关领导部门及不少兄弟院校、研究所的专家、教授和同行的热情鼓励和帮助。西安电子科技大学教材科及出版社为本书的出版也做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在错误和缺点，恳切希望广大读者批评指正。

李学干

1999年6月

第二版前言

《计算机系统结构》是高等院校工科电子类计算机专业统编教材之一，由计算机与自动控制教材编审委员会计算机编审小组评选审定，并推荐出版。经过多年的使用，由于计算机的飞速发展，我们觉得有必要做一次较大幅度的修改。许多院校的同志们也提出了这样的希望。

在这次重新编写后，变动较大的有如下几点：我们考虑到许多学校已设置有专门的“计算机可靠性技术”和“计算机系统性能与评价”课程，而且已出版了专门的教材，所以这部分内容就不再列入本教材中；新增加了有关 RISC 技术、外围处理机、相联处理机、基于面向对象程序设计的计算机、数据流机、归约机、智能机等内容；适当扩充向量处理机、并行处理机和多处理机的部分内容；对原有章节内容根据情况重新做了取舍、补充和内容更新，并对全书各章的内容编排上做了较大调整。

本教材仍按“研究软、硬件功能分配以及如何最佳、最合理地实现分配给硬件的功能”这个方向来编写，仍然着眼于叙述基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法。虽然列举了不少实际机器的例子，但并不是围绕这些机型或过多地从具体实现上的细节来讲述。本教材力求反映出近十几年来在系统结构上的重要进展和今后可能的发展。

本课程应在“计算机(组成)原理”、“程序设计语言”和“数字逻辑”等课程之后开设。学生最好有“数据结构”方面的知识。本课程可以在“操作系统”、“编译原理”课程之后，或与它们同时开设。本课程也可作为其它相关专业的研究生或本科生的选修课程。本课程的参考教学时数为 100~120 学时。

本书在编写过程中多次得到有关领导部门及不少兄弟院校、研究所的专家、教授和同志们们的热情鼓励和帮助，有的曾提出过宝贵的意见。西安电子科技大学出版社的同志们为本书的出版也做了大量工作，我们在此表示衷心的感谢。

应当说明的是，考虑到教材的继承性，不可能对原有教材在体系、内容和风格上做太大的变动，恳切希望读者对本书的缺点和错误予以指正。

编著者

1990 年 7 月

第一版前言

本教材是高等院校工科电子类计算机专业统编教材之一，由计算机与自动控制教材编审委员会计算机编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材是按计算机编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的，由西北电讯工程学院苏东庄主编，清华大学薛宏熙主审。

本教材是按“研究软、硬件功能分配以及如何最佳、最合理地实现分配给硬件的功能”这个方向来编写的，着重于基本概念、基本原理、基本结构和分析方法。虽然在讲述时联系了实际机器，但并不是围绕某种机型或过多地从具体实现上的细节来讲述。本教材力求反映近十几年来在系统结构上的重要进展以及今后可能的发展。

本课程应在“计算机(组成)原理”、“程序设计语言”和“数字逻辑”等课程之后开设。学生最好有“数据结构”方面的知识。本课程可以在“操作系统”、“编译原理”课程之后，或与它们同时开设。本书的第6、7、8章是按学生不选修“容错与诊断”、“纠错码”、“并行处理计算机结构”和“计算机系统性能评价”等课来写的。本课程的参考教学时数为80~100学时。

本教材是在国防工业出版社1981年出版的《计算机系统结构》的基础上修编而成的。参加当时编写的有：西北电讯工程学院的苏东庄、张志华、李学干、马玉珍；清华大学的金兰；华东师范大学的张东韩和唐培艺，由苏东庄主编。担任主审的是清华大学的房家国和薛宏熙。参加此次修编的除苏东庄外，还有李学干、金兰(第7章)、梁新来(第6章)、马玉珍(第8章)，李学干承担了全书的文稿整理工作。

这里特别要感谢本版主审人薛宏熙同志，他进行了认真细致的审稿，并提出了宝贵的修改意见。凡在本书编写和审阅过程中提出过意见和建议的同志，在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书在编写中得到了西北电讯工程学院教材科、图书馆的大力支持。有关领导部门、电子工业部教育局以及研究所和兄弟院校的很多领导、专家、教授和同志们对本书的编写曾给予了热情的鼓励，并提出过许多宝贵的意见。我们在此表示诚挚的感谢。

恳切希望读者继续对本书的缺点和错误予以指正。

编者
1984年

目 录

第 1 章 计算机系统结构概论	1
1.1 计算机系统的多级层次结构	1
1.2 计算机系统结构、组成与实现	2
1.2.1 计算机系统结构、组成、实现的定义和内涵	2
1.2.2 计算机系统结构、组成和实现的相互关系	6
1.3 计算机系统的软硬取舍、性能评测及定量设计原理	7
1.3.1 软、硬件取舍的基本原则	8
1.3.2 计算机系统的性能评测与定量设计原理	9
1.4 软件、应用、器件对系统结构的影响	14
1.4.1 软件对系统结构的影响	14
1.4.2 应用的发展对系统结构的影响	19
1.4.3 器件的发展对系统结构的影响	21
1.5 系统结构中的并行性发展和计算机系统的分类	22
1.5.1 并行性概念	22
1.5.2 计算机系统的分类	26
习题 1	28
第 2 章 数据表示、寻址方式与指令系统	31
2.1 数据表示	31
2.1.1 数据表示与数据结构	31
2.1.2 高级数据表示	32
2.1.3 引入数据表示的原则	38
2.1.4 浮点数尾数基值大小和下溢处理方法的选择	39
2.2 寻址方式	46
2.2.1 寻址方式的三种面向	46
2.2.2 寻址方式在指令中的指明	46
2.2.3 程序在主存中的定位技术	47
2.2.4 物理主存中信息的存储分布	49
2.3 指令系统的设计和优化	50
2.3.1 指令系统设计的基本原则	50
2.3.2 指令操作码的优化	51
2.3.3 指令字格式的优化	54
2.4 指令系统的发展和改进	57
2.4.1 CISC 和 RISC	57
2.4.2 按 CISC 方向发展和改进指令系统	57
2.4.3 按 RISC 方向发展和改进指令系统	62
习题 2	70

第 3 章 存储、中断、总线与 I/O 系统	73
3.1 存储系统的基本要求和并行主存系统	73
3.1.1 存储系统的基本要求	73
3.1.2 并行主存系统	74
3.2 中断系统	77
3.2.1 中断的分类和分级	78
3.2.2 中断的响应次序与处理次序	80
3.2.3 中断系统的软、硬件功能分配	83
3.3 总线系统	84
3.3.1 总线的分类	84
3.3.2 总线的控制方式	85
3.3.3 总线的通信技术	87
3.3.4 数据宽度与总线线数	88
3.4 输入/输出系统	90
3.4.1 输入/输出系统概述	90
3.4.2 通道处理机的工作原理和流量设计	91
3.4.3 外围处理机	97
习题 3	98
第 4 章 存储体系	101
4.1 存储体系的概念	101
4.1.1 存储体系及其分支	101
4.1.2 存储体系的构成依据	102
4.1.3 存储体系的性能参数	103
4.2 虚拟存储器	104
4.2.1 虚拟存储器的管理方式	104
4.2.2 页式虚拟存储器的构成	109
4.2.3 页式虚拟存储器实现中的问题	118
4.3 高速缓冲存储器	124
4.3.1 工作原理和基本结构	124
4.3.2 地址的映像与变换	126
4.3.3 Cache 存储器的 LRU 替换算法的硬件实现	132
4.3.4 Cache 存储器的透明性及性能分析	135
4.4 Cache—主存—辅存三级层次	139
4.5 主存保护	140
习题 4	142
第 5 章 流水和指令级高度并行的超级机	147
5.1 重叠方式	147
5.1.1 重叠原理与一次重叠	147
5.1.2 相关处理	150

5.2 流水方式	155
5.2.1 基本概念	155
5.2.2 标量流水线的主要性能	160
5.2.3 标量流水机的相关处理和控制机构	164
5.3 向量的流水处理与向量流水处理机	176
5.3.1 向量的处理和向量的流水处理	177
5.3.2 向量流水处理机的结构	178
5.3.3 提高向量流水处理性能的技术	180
5.4 指令级高度并行的超级处理机	185
5.4.1 超标量处理机	185
5.4.2 超长指令字处理机	186
5.4.3 超流水线处理机	188
5.4.4 超标量超流水线处理机	188
习题 5	189
第 6 章 阵列处理机	193
6.1 阵列处理机的原理	193
6.1.1 阵列处理机的构形和特点	193
6.1.2 ILLIAC IV 的处理单元阵列结构	195
6.1.3 ILLIAC IV 的并行算法举例	196
6.2 SIMD 计算机的互连网络	200
6.2.1 互连网络的设计目标与互连函数	200
6.2.2 互连网络应抉择的几个问题	201
6.2.3 基本的单级互连网络	202
6.2.4 基本的多级互连网络	205
6.2.5 全排列网络	213
6.3 共享主存构形阵列处理机中并行存储器的无冲突访问	214
6.4 脉动阵列处理机	216
6.4.1 脉动阵列结构的原理	217
6.4.2 通用脉动阵列结构	219
习题 6	220
第 7 章 多处理机	223
7.1 多处理机的概念、问题和硬件结构	223
7.1.1 多处理机的基本概念和要解决的技术问题	223
7.1.2 多处理机的硬件结构	224
7.2 紧耦合多处理机多 Cache 的一致性问题	236
7.2.1 多 Cache 的一致性问题的产生	236
7.2.2 多 Cache 的一致性问题的解决办法	236
7.3 多处理机的并行性和性能	238
7.3.1 并行算法	238
7.3.2 程序并行性分析	240
7.3.3 并行语言与并行编译	242

7.3.4 多处理机的性能	247
7.4 多处理机的操作系统	248
7.4.1 主从型操作系统	248
7.4.2 各自独立型操作系统	249
7.4.3 浮动型操作系统	249
7.5 多处理机的发展	249
7.5.1 分布式共享存储器多处理机	250
7.5.2 对称多处理机	250
7.5.3 多向量多处理机	250
7.5.4 并行向量处理机	251
7.5.5 大规模并行处理机	251
7.5.6 机群系统	252
习题 7	254
第 8 章 数据流机和归约机	256
8.1 数据流计算机	256
8.1.1 数据驱动的概念	256
8.1.2 数据流程图和语言	258
8.1.3 数据流计算机的结构	263
8.1.4 数据流机器存在的问题	264
8.2 归约机	264
习题 8	266
附录 习题参考答案	268
参考文献	316

第 1 章 计算机系统结构概论

本章先从多级层次结构观点定义计算机系统结构、组成、实现三者的含义和关系。然后讲述计算机系统软、硬件功能的分配原则、性能评测和定量设计原理，讨论软件移植、应用要求、器件发展对系统结构的影响。最后介绍计算机系统中并行性的概念，以及计算机系统的分类。

1.1 计算机系统的多级层次结构

现代通用的计算机系统是由紧密相关的硬件和软件组成的。从使用语言的角度，可以将系统看成是按功能划分的多层机器级组成的层次结构，如图 1-1 所示。层次结构由高到低分别为应用语言机器级、高级语言机器级、汇编语言机器级、操作系统机器级、传统机器语言机器级和微程序机器级。对于一个具体的计算机系统，层次的多少会有所不同。

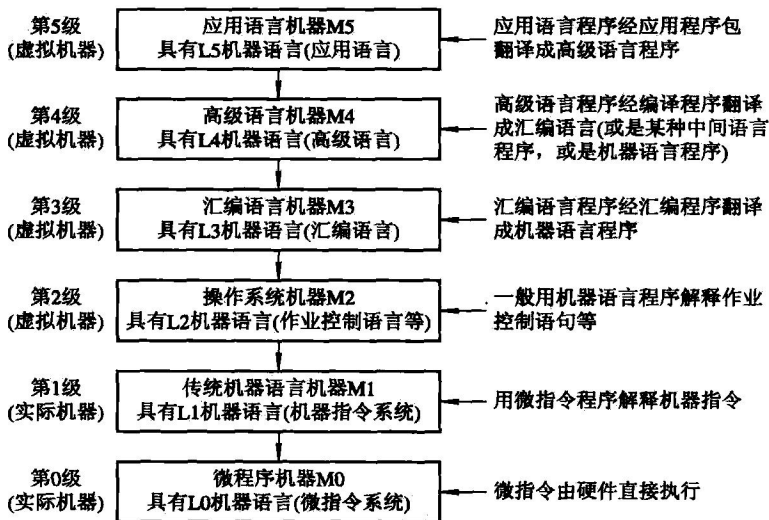


图 1-1 计算机系统的多级层次结构

对使用某一级语言编程的程序员来讲，只要熟悉和遵守该级语言的使用规定，所编程序总是能在此机器上运行并得到结果，而不用考虑这个机器级是如何实现的。就好像该程序员有了一台可以直接使用这种语言作为机器语言的机器一样。这里，“机器”被定义为是

能存储和执行相应语言程序的算法和数据结构的集合体。实际上，只有二进制机器指令即传统所讲的机器语言与机器硬件直接对应，方可直接被硬件识别和执行。

各机器级的实现主要靠翻译或解释，或者是这两者的结合。翻译(Translation)是先用转换程序将高一级的机器级上的程序整个地变换成低一级机器级上等价的程序，然后再在低一级机器级上实现的技术。解释(Interpretation)则是在低级机器级上用它的一串语句或指令来仿真高级机器级上的一条语句或指令的功能，是通过对高级的机器级语言程序中的每条语句或指令逐条解释来实现的技术。

应用语言虚拟机器级 M5 是为满足专门的应用设计的。使用面向某种应用的应用语言(L5)编写的程序一般是经应用程序包翻译成高级语言(L4)程序后，再逐级向下实现。高级语言机器级 M4 上的程序可以先用编译程序整个翻译成汇编语言(L3)程序或机器语言(L1)程序，再逐级或越级向下实现，也可以用汇编语言(L3)程序、机器语言(L1)程序，甚至微指令语言(L0)程序解释实现。汇编语言(L3)源程序则是先用汇编程序整个将它变换成等价的二进制机器语言(L1)目标程序，再在传统机器级 M1 上实现。操作系统程序虽然已经发展成用高级语言(如 C 语言)编写，但最终还是要用机器语言程序或微指令程序来解释。它提供了传统机器级 M1 所没有，但为汇编语言和高级语言使用和实现所用的基本操作、命令及数据结构，例如，文件管理、存储管理、进程管理、多道程序共行、多重处理、作业控制等所用到的操作命令、语句和数据结构等。因此，操作系统机器级 M2 放在传统机器级 M1 和汇编语言机器级 M3 之间是适宜的。传统机器级采用组合逻辑电路控制，其指令可直接用硬件来实现，也可以采用微程序控制，用微指令(L0)程序来解释实现。微指令直接控制硬件电路的动作。

就目前的状况来看，M0 用硬件实现，M1 用微程序(固件)实现，M2 到 M5 大多是用软件实现。所谓固件(Firmware)，是一种具有软件功能的硬件，例如将软件固化在只读存储器这种大规模集成电路的硬、器件上，就是一种固件。以软件为主实现的机器称为虚拟机器，以区别于由硬件或固件实现的实际机器。虚拟机器不一定全由软件实现，有些操作也可用固件或硬件实现。例如操作系统的某些命令可用微程序或硬件实现。

将计算机系统看成是多级机器构成的层次结构推动了计算机系统结构的发展。例如，可以重新调整软、硬件比例，为应用语言级、高级语言级、操作系统级提供更多更好的硬件支持，改善硬、器件迅速发展而软件日益复杂、开销过大的状况；或直接用硬件或固件实现，发展高级语言机器或操作系统计算机结构。由于层次中每一级都有其自己的用户、实现方法和指令系统，因此可让各虚拟机器级用真正的实处理机代替，摆脱以往各级功能都在同一台实际机器上实现的情况，发展多处理机、分布处理、计算机网络等系统结构。可以在一台宿主机上模拟或仿真另一台机器，推动自虚拟机、多种操作系统共行等技术的采用，从而促进软件移植、计算机系统性能评价、计算机设计自动化等技术的发展。

1.2 计算机系统结构、组成与实现

1.2.1 计算机系统结构、组成、实现的定义和内涵

从计算机系统的层次结构定义，系统结构(System Architecture)是对计算机系统中各级界面的划分、定义及其上下的功能分配。每级都有其自己的系统结构。客观存在的事物

或属性从某个角度看不到，简称透明(Transparent)。不同机器级程序员所看到的计算机属性是不同的，它就是计算机系统不同层次的界面。系统结构就是要研究对于某级，哪些属性应透明，哪些属性不应透明。透明可简化该级的设计，但因无法控制，也会带来不利影响。因此，要正确进行透明性取舍。

计算机系统结构也称计算机系统的体系结构(Computer Architecture)，它只是系统结构中的一部分，指的是传统机器级的系统结构。其界面之上包括操作系统级、汇编语言级、高级语言级和应用语言级中所有软件的功能，该界面之下包括所有硬件和固件的功能。因此，它是软件和硬件/固件的交界面，是机器语言、汇编语言程序设计者，或编译程序设计者看到的机器物理系统的抽象。所以，计算机系统结构研究的是软、硬件之间的功能分配以及对传统机器级界面的确定，提供机器语言、汇编语言程序设计者或编译程序生成系统为使其设计或生成的程序能在机器上正确运行应看到和遵循的计算机属性。

就目前的通用机来说，计算机系统结构的属性包括：

- (1) 硬件能直接识别和处理的数据类型及格式等的数据表示；
- (2) 最小可寻址单位、寻址种类、地址计算等的寻址方式；
- (3) 通用/专用寄存器的设置、数量、字长、使用约定等的寄存器组织；
- (4) 二进制或汇编级指令的操作类型、格式、排序方式、控制机构等的指令系统；
- (5) 内存的最小编址单位、编址方式、容量、最大可编址空间等的存储系统组织；
- (6) 中断的分类与分级、中断处理程序功能及入口地址等的中断机构；
- (7) 系统机器级的管态和用户态的定义与切换；
- (8) 输入/输出设备的连接、使用方式、流量、操作结束、出错指示等的机器级 I/O 结构；
- (9) 系统各部分的信息保护方式和保护机构等属性。

例如，IBM PC 系列和 VAX-11 系列的指令系统、寻址方式、寄存器组织、I/O 设备连接方式等都不一样，从传统机器语言程序员或汇编语言程序员看，概念性结构和功能特性差异很大。要使他们所编的程序能运行，应了解的计算机属性大不相同，但高级语言程序员却看不到。

同时可以看出，机器级内部的数据流和控制流的组成、逻辑设计和器件设计等都不包含在计算机系统结构中，也就是说，它们都对计算机系统结构设计是透明的。

计算机组成(Computer Organization)指的是计算机系统结构的逻辑实现，包括机器级内部的数据流和控制流的组成以及逻辑设计等。它着眼于机器级内部各事件的排序方式与控制机构、各部件的功能及各部件间的联系。计算机组成设计要解决的问题是在所希望达到的性能和价格下，怎样更好、更合理地把各种设备和部件组织成计算机，来实现所确定的系统结构。40 多年里，计算机组成设计主要是围绕提高速度，着重从提高操作的并行度、重叠度，以及功能的分散和设置专用功能部件来进行的。

计算机组成设计要确定的方面一般应包括如下几个部分。

- (1) 数据通路宽度：数据总线上一次并行传送的信息位数。
- (2) 专用部件的设置：是否设置乘除法、浮点运算、字符处理、地址运算等专用部件，设置的数量与机器要达到的速度、价格及专用部件的使用频度等有关。
- (3) 各种操作对部件的共享程度：分时共享使用程度高，虽限制了速度，但价格便宜。

设置部件多降低共享程度，因操作并行度提高，可提高速度，但价格也会提高。

(4) 功能部件的并行度：是用顺序串行，还是用重叠、流水或分布式控制和处理。

(5) 控制机构的组成方式：用硬联还是微程序控制，是单机处理还是多机或功能分布处理。

(6) 缓冲和排队技术：部件间如何设置及设置多大容量的缓冲器来协调它们的速度差；用随机、先进先出、先进后出、优先级，还是循环方式来安排事件处理的顺序。

(7) 预估、预判技术：为优化性能用什么原则预测未来行为。

(8) 可靠性技术：用什么冗余和容错技术来提高可靠性。

计算机实现(Computer Implementation)指的是计算机组成的物理实现，包括处理机、主存等部件的物理结构，器件的集成度和速度，器件、模块、插件、底板的划分与连接，专用器件的设计，微组装技术，信号传输，电源、冷却及整机装配技术等。它着眼于器件技术和微组装技术，其中，器件技术在实现技术中起着主导作用。

下面通过举例来说明什么是计算机系统结构、计算机组成和计算机实现。

指令系统的确定属于计算机系统结构。指令的实现，如取指令、指令操作码译码、计算操作数地址、取数、运算、送结果等的操作安排和排序属于计算机组成。实现这些指令功能的具体电路、器件的设计及装配技术属于计算机实现。

确定指令系统中是否要设乘法指令属于计算机系统结构。乘法指令是用专门的高速乘法器实现，还是靠用加法器和移位器经一连串时序信号控制其相加和右移来实现属于计算机组成。乘法器、加法-移位器的物理实现，如器件的类型、集成度、数量、价格，微组装技术的确定和选择属于计算机实现。

主存容量与编址方式(按位、按字节还是按字访问等)的确定属于计算机系统结构。为达到性能价格要求，主存速度应该为多少，逻辑结构是否采用多体交叉属于计算机组成。主存器件的选定、逻辑设计、微组装技术的使用属于计算机实现。

又如，IBM 370 系列有 115、125、135、145、158、168 等由低档到高档的多种型号机器。从汇编语言、机器语言程序设计者看的概念性结构都如图 1-2 所示。它们均是由中央处理机/主存—通道—设备控制器—外设 4 级构成的，以主存为中心，采用通道方式输入/输出。从层次结构看，IBM 370 系列中不同型号的机器从高级语言机器级、汇编语言机器级到传统机器语言机器级都是相同的，只是使用不同的组成和实现、不同的微程序机器级使机器性能价格不同。因此，设计何种系列机属于计算机系统结构，而系列内不同型号计算机的组织属于计算机组成。

IBM 370 系列的中央处理机都有相同的机器指令和汇编指令系统，只是指令的分析、执行在低档机上采用顺序进行，在高档机上则采用重叠、流水或其他并行处理方式。程序设计者编程时所看到的数据形式(即数据表示)都是相同的 32 位字长，定点数都是半字长 16 位或全字长 32 位，浮点数都是单字长 32 位、双字长 64 位或四字长 128 位，如图 1-3(a)所示。由于速度、价格的要求不同，在组成和实现时，数据通路宽度(数据总线线数)可以分别采用 8 位、16 位、32 位或 64 位，如图 1-3(b)所示。一个 64 位的字在 8 位数据通路宽度的机器上需分 8 次传送完，而在 64 位数据通路宽度的机器上却只需一次即可传送完，速度快了，但硬件多了，价格贵了。因此，数据总线宽度对程序员是透明的，是他不需要知道的。

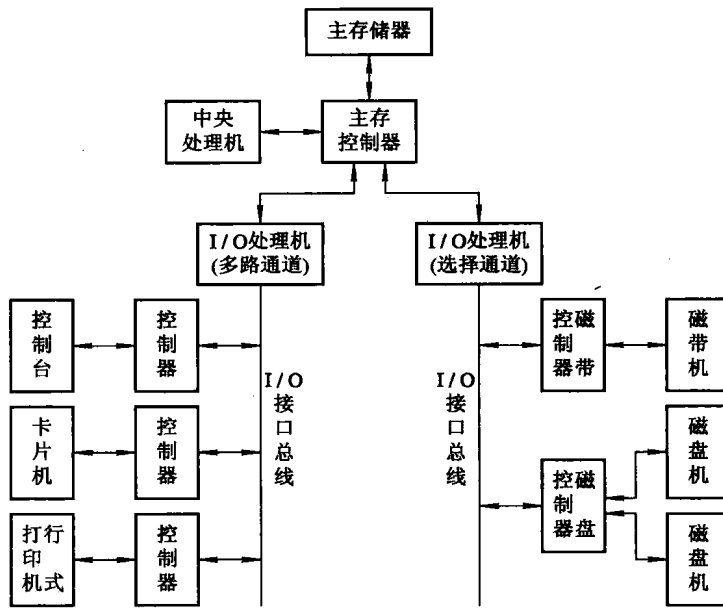


图 1-2 IBM 370 系列的概念性结构

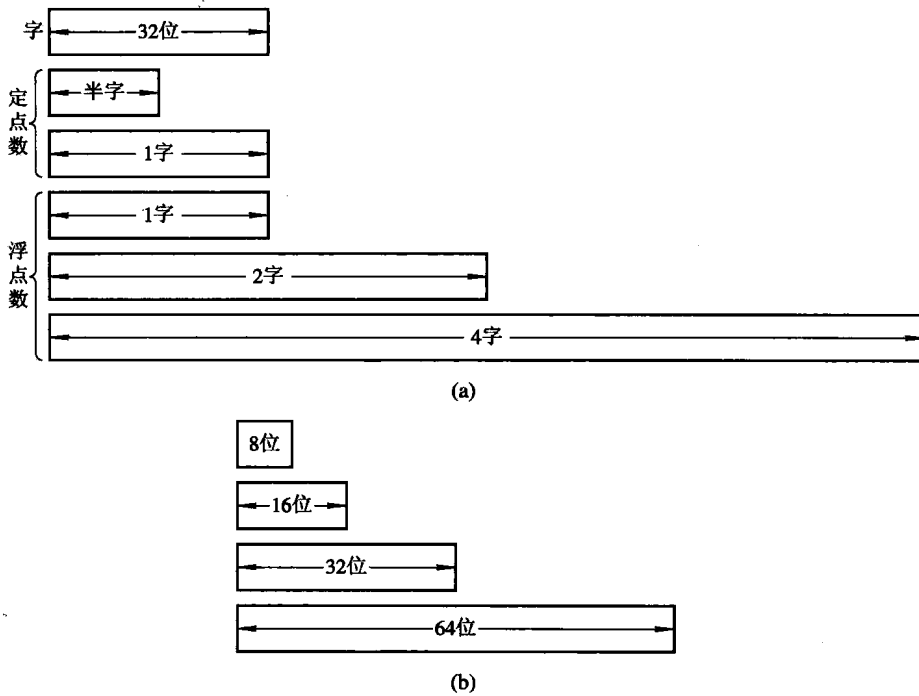


图 1-3 IBM 370 系列字长、数的表示和数据通路宽度
(a) 统一的字长与定、浮点数表示；(b) 不同的数据通路宽度