

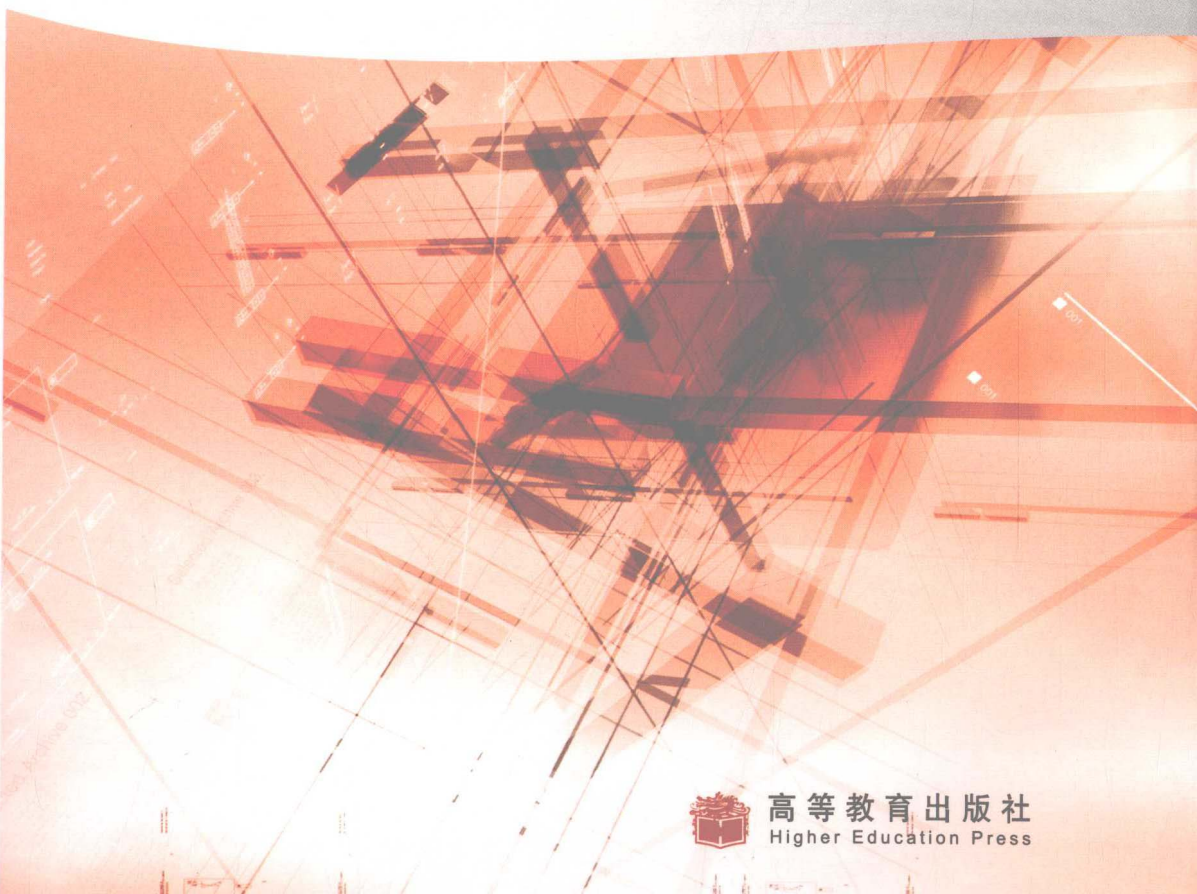


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 计算机组成与结构

Computer Organization and Architecture

张晨曦 刘依 张硕 李江峰



高等教育出版社  
Higher Education Press

# 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第四版

# 计算机组成与结构

张晨曦 刘依 张硕 李江峰

高等教育出版社

010-88380000

## 内容提要

本书系统、深入地论述了计算机组成原理与系统结构。全书共有 12 章,分为两大部分。前 9 章是第一部分,后 3 章为第二部分。第一部分属计算机组成方面的内容,包括计算机系统概论、计算机中数的表示方法、指令系统、中央处理器、微程序控制器、运算方法与运算器、存储器、总线、输入/输出系统。第二部分属系统结构方面的内容,包括流水线技术、存储层次、多处理机。

本书内容全面,层次性好,语言简练,通俗易懂。可作为高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生的教学用书,也可供相关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与结构/张晨曦等. —北京:高等教育出版社,2009.11

ISBN 978-7-04-027888-0

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(2009)第 160467 号

策划编辑 倪文慧 责任编辑 张海波 封面设计 李卫青 责任绘图 尹 莉  
版式设计 王艳红 责任校对 金 辉 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 河北省财政厅票证文印中心

开 本 787×1092 1/16  
印 张 22  
字 数 490 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrace.com>  
<http://www.landrace.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 11 月第 1 版  
印 次 2009 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 28.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27888-00

北京出版集团

# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。适用于高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生。

“计算机组成原理”(Computer Organization)是计算机专业的一门核心主干课程。它主要讲授计算机的主要功能部件及其相互连接,详细介绍这些功能部件的功能与设计。近年来,随着计算机技术的飞速发展,计算机系统结构(Computer Architecture)的内容越来越多地被“下移”到“计算机组成原理”课程中,例如流水线技术、Cache和存储层次、多处理机等,这使得这两种教材的内容有了越来越多的重复。实际上,计算机组成与结构是密不可分的,因此把其内容有机地结合起来,编写到同一本教材中,也是一种很好的选择。本书就是这样一种教材,很适合作为“计算机组成原理”、“计算机组成与结构”以及“计算机组成与系统结构”等课程的教材。

本书共有12章。第1章为“计算机系统概论”,简单介绍了计算机系统的硬件组成、多级层次结构以及计算机的性能指标等;第2章讲述了计算机中数的表示方法;第3章论述了指令系统,首先介绍了计算机指令系统的基本知识,然后讨论了指令系统设计的有关问题,最后介绍了两个典型的RISC处理器的指令系统实例——MIPS和UltraSPARC的指令系统。

第4章讲述了中央处理器,以一个类MIPS的模型机为例,详细讲解了数据通路的建立以及控制器的设计;第5章讨论了微程序控制器;第6章是“运算方法与运算器”,论述了运算方法、运算器的组成以及设计;第7章讲述了存储器系统,包括各种类型存储器的基本工作原理、并行存储器、磁表面存储器以及廉价磁盘冗余阵列RAID等;第8章讲述了总线的工作原理及典型的总线实例,包括PCI总线、SCSI总线、USB总线等;第9章是“输入/输出系统”,讲述了各种输入/输出方式以及中断系统。

第10章为“流水线技术”,讲述了流水线的概念和性能分析,介绍了流水线中的相关问题及其解决方法,并以MIPS为例讨论了流水线的实现。第11章为“存储层次”,讲述了存储层次与Cache的基本知识以及提高性能的方法;第12章为“多处理机”,讲述了多处理机的系统结构、多Cache一致性、同步、MPP以及机群,并介绍了一个多处理机实例——Sun的T1。

本书借鉴了国内外最经典的相关教材,吸取了它们各自的优点。在内容选取上,既重点论述了经典的内容,又充分反映了计算机系统的新发展。在编写方式上,本书力求去繁求简,用最简单的语言来阐述所有内容。这使得本书通俗易懂,可读性非常好。本书的另一个重要特点,是以MIPS的一个简单实现为例,逐步、系统地讲述了中央处理器的设计以及如何将其改造为流水实现。另外,本书还具有内容充实、结构合理、概念清晰、重点突出的优点。

本书按层次和模块化结构组织教学内容,授课教师可以根据需要及课时的多少,对内容进行灵活的取舍。教学课时可以安排为48~60学时。

本书主要由张晨曦教授、刘依、张硕、李江峰编写，孙太一和程志强也参加了部分编写工作。本书直接或间接地引用了许多专家和学者的文献或著作，在此向他们表示衷心的感谢。

本书配套的 PPT 讲稿可以从 [www.GotoSchool.net](http://www.GotoSchool.net) 或中国高校计算机课程网 <http://computer.cncourse.com> 下载。

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。请把相关的信息发送到：[xzhang2000@sohu.com](mailto:xzhang2000@sohu.com)。

编者

2009年1月于上海

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010)82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

# 目 录

<b>第 1 章 计算机系统概论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 计算机系统的硬件组成 .....	1
1.3 计算机的软件系统 .....	4
1.3.1 系统软件 .....	4
1.3.2 应用软件 .....	5
1.4 计算机系统的多级层次结构 .....	5
1.5 计算机系统结构、组成和实现 .....	7
1.6 计算机的性能指标 .....	8
1.6.1 基本性能指标 .....	8
1.6.2 Amdahl 定律 .....	10
1.7 计算机的发展简史 .....	11
1.8 计算机的分类与应用 .....	13
1.8.1 计算机的分类 .....	13
1.8.2 计算机的应用 .....	14
习题 1 .....	15
<b>第 2 章 计算机中数的表示方法</b> .....	17
2.1 带符号数的表示方法 .....	17
2.1.1 原码表示法 .....	17
2.1.2 补码表示法 .....	18
2.1.3 反码表示法 .....	20
2.1.4 移码表示法 .....	21
2.2 数的定点表示与浮点表示 .....	22
2.2.1 数的定点表示 .....	22
2.2.2 数的浮点表示 .....	23
2.3 十进制数串的表示 .....	26
2.4 数据校验码 .....	28
2.4.1 奇偶校验码 .....	28
2.4.2 汉明检验码 .....	29
2.4.3 循环冗余校验码 .....	32

习题 2 .....	34
<b>第 3 章 指令系统</b> .....	36
3.1 指令格式 .....	36
3.1.1 指令的地址码 .....	36
3.1.2 指令的操作码 .....	38
3.1.3 指令长度 .....	40
3.2 数据类型 .....	40
3.3 寻址方式 .....	41
3.4 指令类型与功能 .....	44
3.5 指令系统的设计 .....	45
3.5.1 对指令系统的基本要求 .....	45
3.5.2 指令格式的设计 .....	46
3.6 指令系统的发展和改进 .....	47
3.6.1 沿 CISC 方向发展和改进指令系统 .....	47
3.6.2 沿 RISC 方向发展和改进指令系统 .....	49
3.7 指令系统实例 1: MIPS 的指令系统 .....	50
3.8 指令系统实例 2: UltraSPARC 的指令系统 .....	55
3.8.1 UltraSPARC 的寄存器 .....	56
3.8.2 UltraSPARC 的数据表示 .....	59
3.8.3 UltraSPARC 的数据寻址方式 .....	59
3.8.4 UltraSPARC 的指令格式 .....	59
3.8.5 UltraSPARC 的部分指令介绍 .....	60
习题 3 .....	65
<b>第 4 章 中央处理器</b> .....	67
4.1 CPU 的功能和组成 .....	67
4.1.1 CPU 的功能 .....	67
4.1.2 CPU 的基本组成 .....	68

4.1.3 指令执行的基本步骤 .....	68	6.2.2 补码加减法运算的硬件实现 .....	116
4.2 关于模型机 .....	68	6.2.3 溢出的判断 .....	116
4.3 逻辑设计的约定和定时方法 .....	70	6.3 定点数的乘除法运算 .....	118
4.3.1 逻辑设计的约定 .....	70	6.3.1 原码乘法运算 .....	118
4.3.2 定时方法 .....	70	6.3.2 补码一位乘法 .....	121
4.4 实现 MIPS 的一个基本方案 .....	71	6.3.3 阵列乘法器 .....	123
4.4.1 构建基本的数据通路 .....	71	6.3.4 原码一位除法 .....	123
4.4.2 ALU 控制器 .....	75	6.3.5 阵列除法器 .....	131
4.4.3 单周期数据通路的控制器 .....	77	6.4 定点运算器的构成 .....	133
4.5 多周期实现方案 .....	80	6.4.1 算术逻辑部件 .....	133
4.5.1 为什么要采用多周期 .....	80	6.4.2 寄存器组 .....	134
4.5.2 指令分步执行过程 (按周期分步) .....	80	6.4.3 运算器的基本结构 .....	135
4.6 控制器的设计 .....	85	6.5 浮点运算 .....	136
4.6.1 控制器的组成 .....	86	6.5.1 浮点加减运算 .....	136
4.6.2 控制方式与时序系统 .....	87	6.5.2 浮点乘除法运算 .....	138
4.6.3 模型机控制器的设计 .....	88	习题 6 .....	139
习题 4 .....	91	<b>第 7 章 存储器</b> .....	141
<b>第 5 章 微程序控制器</b> .....	93	7.1 存储器概述 .....	141
5.1 微程序控制的基本原理 .....	93	7.1.1 存储器的分类 .....	141
5.2 微程序控制器的组成与工作过程 .....	94	7.1.2 主存储器的组成 .....	142
5.3 微程序设计技术 .....	95	7.1.3 主存储器的主要技术指标 .....	143
5.3.1 微指令的编码方法 .....	95	7.2 随机存储器 .....	143
5.3.2 微指令格式 .....	97	7.2.1 静态随机存储器 .....	143
5.3.3 微程序的顺序控制 .....	98	7.2.2 动态随机存储器 .....	144
5.3.4 微指令的执行方式 .....	102	7.2.3 RAM 芯片 .....	145
5.4 模型机的微程序控制器 .....	103	7.2.4 动态 RAM 的刷新 .....	149
5.4.1 模型机的微指令格式 .....	103	7.3 只读存储器和闪速存储器 .....	151
5.4.2 构造微程序 .....	106	7.3.1 只读存储器 .....	151
习题 5 .....	108	7.3.2 闪速存储器 .....	154
<b>第 6 章 运算方法与运算器</b> .....	109	7.4 存储器的组成 .....	155
6.1 逻辑运算与移位运算 .....	109	7.4.1 存储器组成 .....	155
6.1.1 逻辑运算 .....	109	7.4.2 信息在存储器中的存放方式 .....	156
6.1.2 移位运算 .....	110	7.5 并行主存系统 .....	158
6.2 定点数的加减法运算 .....	113	7.5.1 单体多字存储器 .....	158
6.2.1 补码加减法运算规则 .....	115	7.5.2 多体交叉存储器 .....	159
		7.5.3 避免存储体冲突 .....	164



7.6	辅助存储器	165	8.4.7	USB 总线	203
7.6.1	磁表面存储器	165	8.4.8	IEEE 1394 总线	204
7.6.2	磁盘存储器	167	8.4.9	EIA-RS-232-D 总线	207
7.6.3	光盘存储器	169	习题 8		208
7.7	廉价磁盘冗余阵列	170	<b>第 9 章 输入/输出系统</b>		210
7.7.1	RAID0	172	9.1 I/O 系统概述		210
7.7.2	RAID1	173	9.1.1 主机与外设之间的连接方式		210
7.7.3	RAID2	174	9.1.2 I/O 设备的编址方式		212
7.7.4	RAID3	174	9.1.3 数据传送控制方式		213
7.7.5	RAID4	175	9.2 I/O 接口		214
7.7.6	RAID5	176	9.3 程序查询方式		216
7.7.7	RAID6	176	9.4 中断系统		216
7.7.8	RAID10 与 RAID01	177	9.4.1 中断的基本概念		217
7.7.9	RAID 的实现与发展	178	9.4.2 中断请求信号的建立、屏蔽与 传送		218
习题 7		178	9.4.3 中断源的识别与判优		219
<b>第 8 章 总线系统</b>		180	9.4.4 中断响应与中断处理		225
8.1 总线的概念		180	9.4.5 多重中断与中断屏蔽		226
8.1.1 总线的基本概念		180	9.5 程序中中断 I/O 控制方式		229
8.1.2 总线的分类		183	9.6 直接存储器访问 DMA 方式		230
8.1.3 总线的连接方式		183	9.6.1 DMA 的基本概念		230
8.2 总线系统的工作原理		186	9.6.2 DMA 的传送方式		230
8.2.1 主设备/从设备		186	9.6.3 DMA 控制器的组成		232
8.2.2 总线控制器		186	9.6.4 DMA 的数据传送过程		233
8.2.3 总线的工作过程		187	9.7 通道方式		235
8.2.4 总线接口		187	9.7.1 通道的作用和功能		235
8.3 总线的仲裁、定时和数据传送		188	9.7.2 通道的工作过程		236
8.3.1 总线的仲裁		188	9.7.3 通道的种类		239
8.3.2 总线的定时		191	9.7.4 通道中的数据传送过程与流量 分析		241
8.3.3 总线的数据传送方式		193	习题 9		243
8.4 总线实例		194	<b>第 10 章 流水线技术</b>		246
8.4.1 总线的标准化		194	10.1 流水线的基本概念		246
8.4.2 PCI 总线		195	10.1.1 什么是流水线		246
8.4.3 ISA 总线		200	10.1.2 流水线的分类		247
8.4.4 EISA 总线		201	10.2 流水线的性能指标		251
8.4.5 VESA 总线(VL 总线)		201			
8.4.6 SCSI 总线		202			

10.2.1	流水线的吞吐率	251
10.2.2	流水线的加速比	254
10.2.3	流水线的效率	254
10.2.4	流水线性能分析举例	255
10.2.5	流水线设计中的若干问题	257
<b>10.3</b>	<b>流水线的相关与冲突</b>	<b>258</b>
10.3.1	一条经典的5段流水线	258
10.3.2	相关与流水线冲突	259
<b>10.4</b>	<b>流水线的实现</b>	<b>271</b>
<b>习题 10</b>		<b>275</b>
<b>第 11 章</b>	<b>存储层次</b>	<b>277</b>
<b>11.1</b>	<b>存储系统的层次结构</b>	<b>277</b>
11.1.1	存储系统的层次结构	277
11.1.2	存储系统的性能参数	278
11.1.3	三级存储系统	279
11.1.4	存储层次的四个问题	281
<b>11.2</b>	<b>Cache 基本知识</b>	<b>281</b>
11.2.1	基本结构和原理	281
11.2.2	映像规则	282
11.2.3	查找方法	284
11.2.4	Cache 的工作过程	286
11.2.5	替换算法	288
11.2.6	写策略	289
11.2.7	Cache 性能分析	290
11.2.8	改进 Cache 性能	293
<b>11.3</b>	<b>降低 Cache 不命中率</b>	<b>293</b>
11.3.1	编译器控制的预取	295
11.3.2	编译优化	295
11.3.3	“牺牲”Cache	296
<b>11.4</b>	<b>减少 Cache 不命中开销</b>	<b>297</b>
11.4.1	采用两级 Cache	297
11.4.2	让读不命中优先于写	298
11.4.3	写缓冲合并	298
11.4.4	请求字处理技术	299
11.4.5	非阻塞 Cache 技术	299

<b>11.5</b>	<b>减少命中时间</b>	<b>299</b>
11.5.1	容量小、结构简单的 Cache	300
11.5.2	虚拟 Cache	300
11.5.3	Cache 访问流水化	301
11.5.4	踪迹 Cache	301
<b>习题 11</b>		<b>302</b>
<b>第 12 章</b>	<b>多处理机</b>	<b>304</b>
<b>12.1</b>	<b>引言</b>	<b>304</b>
12.1.1	并行计算机系统结构的分类	304
12.1.2	存储器系统结构和通信机制	306
12.1.3	并行处理面临的挑战	308
<b>12.2</b>	<b>对称式共享存储器系统结构</b>	<b>310</b>
12.2.1	多处理机 Cache 一致性	310
12.2.2	实现一致性的基本方案	311
12.2.3	监听协议的基本实现技术	314
<b>12.3</b>	<b>分布式共享存储器系统结构</b>	<b>316</b>
12.3.1	目录协议的基本思想	316
12.3.2	目录协议的实现	318
<b>12.4</b>	<b>同步</b>	<b>319</b>
<b>12.5</b>	<b>同时多线程</b>	<b>321</b>
12.5.1	将线程级并行转换为指令级并行	322
12.5.2	同时多线程处理器的设计	324
12.5.3	同时多线程的性能	325
<b>12.6</b>	<b>多处理机实例:T1</b>	<b>326</b>
12.6.1	T1 的结构	326
12.6.2	T1 的性能	328
12.6.3	多核处理器的性能对比	329
<b>12.7</b>	<b>MPP 和机群</b>	<b>331</b>
12.7.1	并行计算机系统结构	331
12.7.2	大规模并行处理机	333
12.7.3	机群系统	335
<b>习题 12</b>		<b>339</b>
<b>参考文献</b>		<b>340</b>

# 第1章 计算机系统概论

## 1.1 引言

计算机在当今世界中已经是无处不在,而且几乎无所不能。我们的日常生活和工作,都离不开计算机。当你用手机打电话、用 MP3 听音乐、用 PSP 玩游戏、自驾车出游、到银行取钱、乘飞机旅行时,不知不觉地,计算机都在默默地为你工作着。它让我们生活充满色彩,让我们的工作多出成果。它对于人类社会发展的影响是广泛而又极其深远的。

计算机系统由硬件和软件两大部分组成。这两部分密切配合,计算机才能正常工作和发挥作用,两者缺一不可。硬件是计算机系统的物质基础,少了它,再好的软件也无法运行;软件则像是计算机系统的灵魂,少了它,再好的硬件也毫无用途。它们只有并驾齐驱,才能充分发挥计算机的作用和效率。

从理论上讲,对于计算机的某一具体功能来说,既可以用硬件实现,也可以用软件实现,即硬件和软件在逻辑功能上是等效的。但其实现成本和速度则会有比较大的差别。在设计一个计算机系统时,必须根据设计要求、现有的技术和条件,确定哪些功能由硬件实现,哪些功能由软件实现,即确定硬件和软件的功能分配。而这个软件和硬件的交界面则称为计算机的系统结构,如图 1.1 所示。

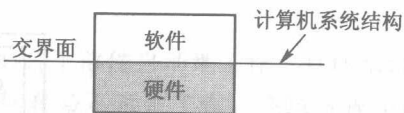


图 1.1 硬件和软件的功能分配

自第一台通用电子计算机诞生以来的 60 多年中,计算机技术得到了飞速的发展,其速度之快,实在是令人赞叹。今天,用不到 5 000 元人民币购买的个人计算机,其性能、主存和硬盘容量都已经超过 20 年前用 100 万美元购买的大机器。对于许多应用来说,现在的高性能微处理器的性能已经超过了 10 年前的超级计算机。在过去的十几年中,计算机的性能是每 18 个月就翻一番(尽管近几年有所放缓)。这种惊人的发展一方面是得益于计算机硬件制造技术的发展,另一方面则是因为计算机系统结构的创新。本书除了系统地介绍计算机系统的硬件组成技术,还论述了计算机系统结构方面的重点知识。

## 1.2 计算机系统的硬件组成

现代计算机系统的硬件结构如图 1.2(a)所示,它由 5 个部件构成:运算器,存储器,控制器,输入设备,输出设备。运算器用于实现对数据的加工,包括算术运算和逻辑运算;存储器用于存

储数据和程序;控制器是计算机的指挥控制中心,控制计算机各部件有序、协调地工作;输入设备和输出设备实现外部世界与计算机之间的数据交换。

由于运算器和控制器在逻辑关系上联系紧密,而且往往又制作在同一块芯片上,构成了众所周知的 CPU(Central Processing Unit,中央处理器),所以有时也称计算机系统是由 3 个部件构成的,即 CPU、存储器、输入/输出设备(也称 I/O 设备),如图 1.2(b)所示。

存储器主要由两部分构成:内存储器(简称内存)和外存储器(简称外存)。内存有时也称为主存(主存储器)。

有时,把“CPU+内存”称为主机系统,而把输入/输出设备及其相关的接口称为 I/O 系统,如图 1.2(c)所示。

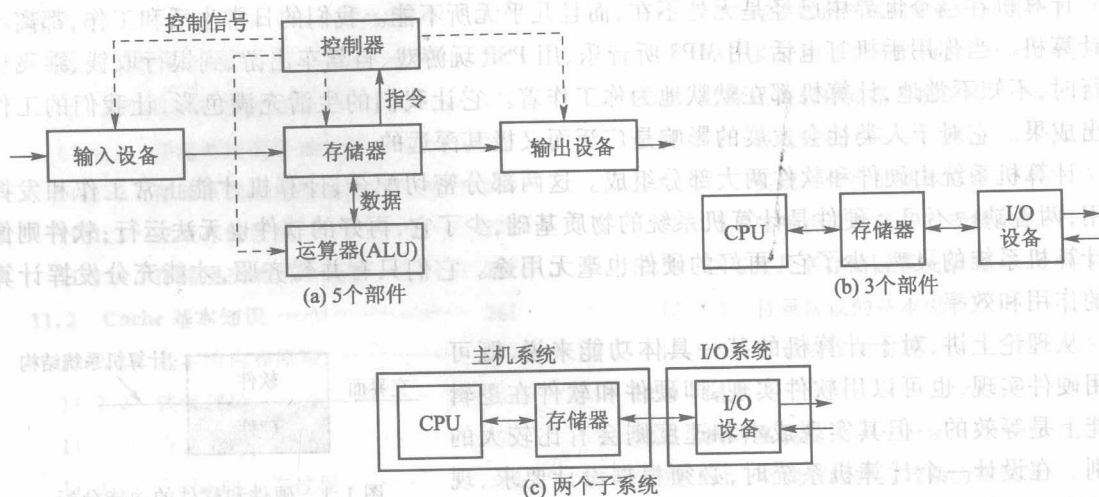


图 1.2 现代计算机系统的硬件结构

早期的计算机采用的是如图 1.3 所示的结构。与图 1.2(a)相比,主要的区别是该结构以运算器为中心。这种结构是匈牙利数学家冯·诺依曼于 1946 年提出的,所以称为冯·诺依曼结构。虽然现代计算机在结构上已经有了很大的变化,但都可以看成是冯·诺依曼结构的改进,而且仍然采用冯·诺依曼当时提出的存储程序原理。存储程序原理是指在计算机解题之前,要事

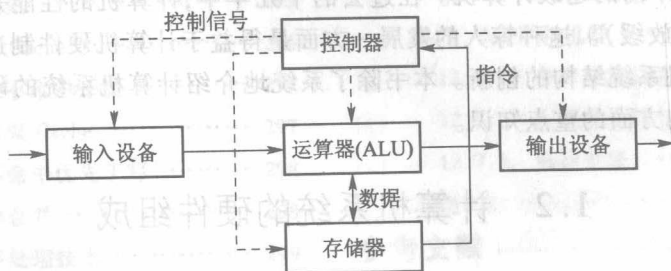


图 1.3 冯·诺依曼结构

先编制好程序,并与所需要的数据一起预先存入主存中。当程序开始执行后,由控制器按照该程序自动地、连续地从存储器中取出指令并执行,直到获得所要求的结果为止。

### 1. 运算器

运算器是计算机的执行部件,用于对数据的加工处理,完成算术运算和逻辑运算。算术运算包括加、减、乘、除以及它们的复合运算。逻辑运算则包括与、或、非、异或、比较、移位等。

运算器的核心是算术逻辑部件,简称 ALU(Arithmetic and Logical Unit)。运算器还包括一组寄存器,用于暂存运算数据和中间结果。由于这些寄存器往往兼有多种用途,所以通常称之为通用寄存器组。

### 2. 内存

存储器是计算机的存储部件,除了存储程序,还用于存储数据。

存储器有内存和外存之分。现在的内存一般用半导体技术实现,外存则往往是采用磁记录方式实现。

内存是按地址访问的一维线性空间,由大量的存储单元组成,每个存储单元有一个唯一的编号,就像街道门牌号那样。这个编号称为该存储单元的地址,用这个地址可以唯一地访问该单元。

每个存储单元可以存放多个二进制位,其位数一般与计算机的字长相同,一般是字节的整数倍。对存储器可以进行的操作包括“读”和“写”两种。

### 3. 控制器

控制器是计算机的管理机构和指挥中心,它协调计算机的各个部件自动地工作。具体来说,就是按照程序中事先设计好的解题步骤,控制计算机各个部件有条不紊地工作。在执行程序的过程中,控制器每次从存储器中读取一条指令,经过译码,产生相应的控制信号,发往各个部件以控制它们的操作。然后再取下一条指令,……,如此反复。当前正在执行的指令的地址由控制器中的程序计数器 PC(Program Counter)指出。每当取出一条指令后,就把它加 4(假设每条指令占 4 个字节),指向下一条指令。

在控制器中,定时部件和微操作控制部件是两个主要的部件。定时部件也称为时序部件,由时钟 CP(Clock Pulse)和时序信号发生器组成。CP 是协调计算机各部件进行操作的同步信号,其工作频率称为计算机的主频。时序信号发生器的功能是按时间顺序周而复始地发出节拍信号。定时部件就是根据机器的时钟脉冲,发出整台机器所需要的节拍信号和脉冲(参见 4.6.2 节)。

微操作是指计算机各部件在一个节拍内完成的基本操作。任意一条指令的执行往往都要分解成许多微操作,这些微操作需按先后次序分配到各个节拍中去完成。微操作控制部件根据指令的译码结果以及时序部件给出的节拍信号和脉冲,产生该指令执行过程中各节拍所需要的微操作控制信号,并将它们发送给包括控制器本身在内的各部件。

### 4. 输入/输出设备

计算机的输入/输出设备是计算机与外界联系的重要桥梁,是计算机系统中的一个不可或缺的组成部分。

输入设备的作用是将程序和数据以计算机所能识别的形式输入到计算机内。常见的输入设备有键盘、鼠标、扫描仪、摄像机等。

输出设备的作用是将计算机处理的结果以人们所能接受或其他系统所要求的形式输出到外部世界(相对于该计算机而言)。常见的输出设备有显示器、打印机等。

冯·诺依曼结构的主要特点如下:

(1) 计算机以运算器为中心。输入/输出设备与存储器之间的数据传送都经过运算器;存储器、输入/输出设备的操作以及它们之间的联系都由控制器集中控制。

(2) 在存储器中,指令和数据同等对待。指令和数据一样可以进行运算,即由指令组成的程序是可以修改的。

(3) 存储器是按地址访问、按顺序线性编址的一维结构,每个单元的位数是固定的。

(4) 指令的执行是顺序的,即一般是按照指令在存储器中存放的顺序执行。程序的分支由转移指令实现。由程序计数器 PC 指明当前正在执行的指令在存储器中的地址。

(5) 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,地址码指明操作数地址和存放运算结果的地址。操作数的类型由操作码决定,操作数本身不能判定是何种数据类型。

(6) 指令和数据均以二进制编码表示,采用二进制运算。

## 1.3 计算机的软件系统

在计算机系统中,各种软件的有机组合构成了软件系统。计算机软件一般可分为系统软件与应用软件两大类。图 1.4 列出了常用的一些软件。

### 1.3.1 系统软件

系统软件是一组保证计算机系统高效、正确运行的基础软件,通常作为系统资源提供给用户使用。主要有以下几类:

#### 1. 操作系统

操作系统是最主要的系统软件。它负责管理系统资源,为应用程序提供运行环境,为用户提供操作界面。操作系统的主要功能包括:存储管理,处理机的进程/线程调度,设备管理,文件管理,网络通信管理,命令处理,等等。

#### 2. 语言处理程序

计算机硬件只能识别和处理以二进制形式表示的机器代码,因此用任何其他语言编制的程序(称为源程序)都必须转换为机器语言程序后,才能由计算机硬件去执行和处理。完成这种转换的程序称为语言处理程序。通常有两种处理方式:解释和翻译。解释是用解释程序对源程序

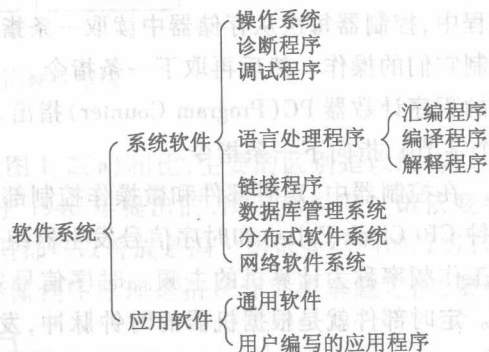


图 1.4 计算机软件系统的组成

逐行进行处理,边分析边执行。而翻译则是用编译程序或汇编程序将源程序全部翻译成目标程序(机器代码)后,再去执行目标程序。

### 3. 数据库管理系统

在信息处理、情报检索以及各种管理系统中,用户经常需要建立数据库,查询、显示、修改数据库的内容,输出打印各种表格等。因此需要有一个数据库管理系统来专门为这方面的应用提供支持。数据库管理系统既可以认为是一个系统软件,也可以认为是一个通用的应用软件,用于实现对数据库的描述、管理和维护等。

### 4. 分布式软件系统

分布式软件主要用于建立分布式计算环境,管理分布式计算资源,控制分布程序的运行,提供分布式程序开发与设计工具等。它包括分布式操作系统、分布式编译系统、分布式数据库系统、分布式软件包等。

### 5. 网络软件系统

随着计算机网络,特别是互联网的广泛普及,上网已成了人们生活的一部分,如收发电子邮件、上博客、网上购物等。所以,提供接入计算机网络的功能几乎是现在每台计算机都必须具备的。网络软件系统就是用于支持这些网络活动和数据通信的系统软件。它包括网络操作系统、通信软件、网络协议软件、网络应用系统等。

### 6. 服务程序

一个完善的计算机系统往往配置许多服务性的程序,为用户使用和维护计算机提供服务。这类程序可以包含很广泛的内容,如装入程序、编辑程序、调试程序、诊断程序等。这些程序或者被包含在操作系统之内,或者被操作系统调用。

## 1.3.2 应用软件

应用软件是指计算机系统的用户为解决某个应用领域中的各类问题而编制的程序。由于计算机已应用到各种领域,因而应用程序是多种多样、极其丰富的,如各种科学计算类程序、工程设计类程序、数据统计与处理程序、情报检索程序、企业管理程序、生产过程控制程序等。

这些程序可以是用户自己开发的,也可以是由他人(个人或组织)开发好并以应用软件包提供的。应用软件正向标准化、集成化方向发展。

还有一些具有通用性的应用软件,如文字处理软件、表格处理软件、图形处理软件等,也是非常重要的应用软件。

## 1.4 计算机系统的多级层次结构

如上所述,现代计算机是由硬件和软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。其中常用的一种方法,是从计算机语言的角度出发,把计算机系统按功能划分成多级层次结构,每一层以一种语言为特征,如图 1.5 所示。

一台计算机所提供的编程语言一般有多种,构成一系列的层次级别。按照从低级到高级的次序,这些语言是:微程序语言(仅供硬件设计者使用),机器语言,汇编语言,高级语言,应用语言(如 SQL)等。对于用某一层语言来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,对这一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,该机器能执行用这层语言编写的全部程序。

在图 1.5 中, L1 是微程序机器级,这一级的机器语言是微指令集,其使用者是计算机硬件的设计人员,他们用微指令编写的微程序直接由固件/硬件来解释实现(关于微程序,请参阅第 5 章)。

L2 是传统机器级。这一级的机器语言就是传统的机器指令系统。程序员用该指令系统编写的程序由 L1 级上的微程序进行解释执行。

由微程序解释实现指令系统又称作仿真。实际上,在 L1 级上可以有多个能够在它上面运行的解释程序,每一个解释程序定义了一种指令系统。因此,可以通过仿真在一台机器上实现多种指令系统。有的计算机中没有采用微程序技术,因此没有微程序机器级(L1)。这时, L2 的指令系统是由硬连逻辑直接解释执行的。硬连逻辑的优点是速度快。

L3 级是操作系统虚拟机。所谓虚拟机,是指由软件实现的机器,以区别于由硬件实现的物理机器。这一级的机器语言由两部分构成,一部分就是传统机器级指令,另一部分是操作系统级指令。后者用于实现对操作系统功能的调用,例如打开/关闭文件、读/写文件等。用这一级语言编写的程序是由 L3 和 L2 来共同执行的,只有操作系统级指令是由操作系统进行解释执行。

L4 级是汇编语言虚拟机。这一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 L3 级和 L2 级语言,然后再由相应的机器执行。完成这个翻译的程序称为汇编程序。

L5 级是高级语言虚拟机。这级的机器语言就是各种高级语言,目前高级语言已有上百种,常用的有 C/C++、Pascal、FORTRAN 等。用高级语言编写的程序一般由编译器翻译到 L4 或 L3 上。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。

L6 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,因此这一级的语言就是各种面向具体应用问题的应用语言。可以设计专门用于人工智能、教育、行政管理、计算机设计等领域的虚拟机。应用语言编写的程序一般是由应用程序包翻译到 L5 级上。

在上述 6 级中,通常 L1 ~ L3 级是用解释的方法实现,而 L4 ~ L6 则经常是用翻译方法实现。

翻译和解释是语言实现的两种基本技术。其共同点是:都是以执行一串 L 级指令来实现 L+1 级指令;其不同点是:翻译技术是先把 L+1 级程序全部转换成 L 级程序后,再去执行新产生的 L 级程序,在执行过程中 L+1 级程序不再被访问;而解释技术则是每当一条 L+1 级指令被译码后,就直

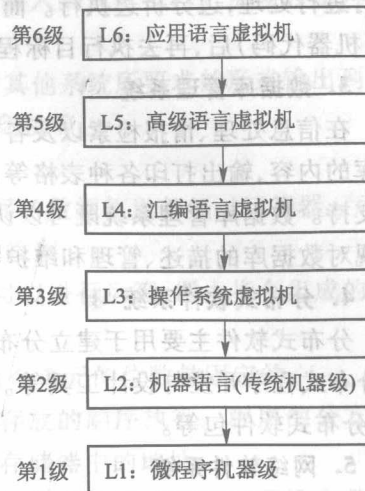


图 1.5 计算机系统的多级层次结构



接去执行一串等效的 L 级指令,然后再去取下一条 L+1 级的指令,以此反复进行。这两种技术都被广泛使用。一般来说,解释执行比编译后再执行所花的时间多,但占用的存储空间较少。

## 1.5 计算机系统结构、组成和实现

计算机系统结构的经典定义是 1964 年 Amdahl 在介绍 IBM 360 系统时提出的:计算机系统结构是指传统机器程序员所看到的计算机属性,即概念性结构与功能属性。

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,传统机器级程序员所看到的主要属性是该机器指令系统的功能特性,而高级语言虚拟机程序员所看到的主要属性则是该机器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,从传统机器级或汇编语言程序员的角度来看,具有不同的属性。但是从高级语言(如 C 语言)程序员的角度来看,它们几乎没有什么差别,具有相同的属性。换句话说,这些传统机器级所存在的差别对于高级语言程序员来讲是“看不见”的,也是不需要知道的。在计算机技术中,把这种本来存在的事物或属性,但从某种角度看又好像不存在的概念称为透明性。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。可以看出,在计算机层次结构的各个级上都有它的系统结构。Amdahl 提出的系统结构实际上是指传统机器语言级程序员所看见的计算机属性。

在 Amdahl 的传统定义中,系统结构所包含的属性是指机器语言程序设计员(或者编译程序代码生成系统)为使其设计(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。对于通用寄存器型机器来说,这些属性主要是指:

- (1) 指令系统(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)。
- (2) 数据表示(硬件能直接识别和处理的数据类型)。
- (3) 寻址规则(包括最小寻址单元、寻址方式及其表示)。
- (4) 寄存器定义(包括各种寄存器的定义、数量和使用方式)。
- (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 连接方式、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)。

以上属性是计算机系统中由硬件完成的功能,程序员在了解这些属性后才能编出在传统机器级上可正确运行的程序。因此,计算机系统结构概念的实质是确定计算机系统中软硬件的界面,界面之上是软件实现的功能,界面之下是硬件实现的功能。

计算机组成指的是计算机系统结构的逻辑实现,包含物理机器级中的数据流和控制流的组成以及逻辑设计等。它着眼于物理机器级内各事件的排序方式与控制方式、各部件的功能以及各部件之间的联系。