



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材
国家精品课程主讲教材

计算机体系结构

王志英 张春元 沈立 肖晓强 姜晶菲 编著

清华大学出版社



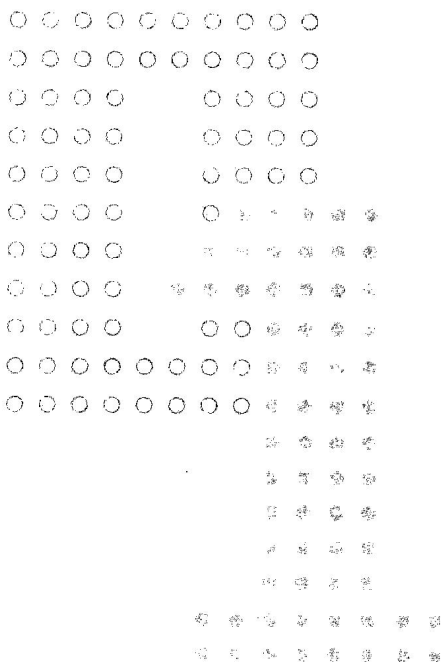


普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材

国家精品课程主讲教材

王志英 张春元 沈立 肖晓强 姜晶菲 编著

计算机体系结构



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书参考国内外最经典的教材,重点论述现代大多数计算机体系结构都采用的比较成熟的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法,并特别强调采用量化的分析方法。主要内容:计算机体系结构和并行性等基本概念;计算机指令集结构设计中的一些问题;流水线的基本概念和性能分析,向量处理机的结构及特点、关键技术以及性能评价;指令级并行,包括利用软、硬件技术开发程序中存在的指令间并行性的技术和方法;存储层次,包括 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;输入输出系统,包括外部存储设备、I/O 设备与 CPU 和存储器的连接、廉价磁盘冗余阵列 RAID, I/O 系统性能分析;多处理机,包括多处理机的存储器体系结构、互连网络、同步机制以及同时多线程技术;机群计算机,包括机群的结构、软件模型以及机群的分类,并介绍 4 个典型的机群系统。

本书内容的可读性好,语言简练,深入浅出,通俗易懂。适合作为高等院校计算机科学与技术学科各专业以及自动化、电子工程等相关专业本科生、研究生的教材,也可作为计算机领域工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机体系结构/王志英等编著. —北京:清华大学出版社,2010.10

(计算机系列教材)

ISBN 978-7-302-23130-1

I. ①计… II. ①王… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 114442 号

责任编辑:张瑞庆 薛 阳

责任校对:白 蕾

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954,jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015,zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:21.5 字 数:499 千字

版 次:2010 年 10 月第 1 版 印 次:2010 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.80 元

产品编号:037626-01

第一作者简介

王志英，男，1956年8月生，汉族，山西沁县人，1988年在国防科学技术大学计算机系获博士学位。现任国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师，国家精品课程“计算机体系结构”负责人。1992年成为国家级突出贡献中青年专家并享受政府特殊津贴，全国高等院校优秀骨干教师，人事部百千万跨世纪优秀人才库一二层次人选，中国计算机学会开放系统专委会副主任委员、中国计算机学会教育专业委员会副主任委员、全国计算机教育研究会副理事长、湖南省计算机学会理事长、教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会副主任、IEEE会员。主要研究方向为计算机系统结构和微处理器设计等。20多年来作为项目负责人参加的各类项目包括国家自然科学基金、国家973重大基础研究、国家863高技术研究、型号工程和对外合作等共计20多项。已获国家科技进步二等奖1项，国家教学成果一等奖1项，国家教学成果二等奖1项，部委级教学成果一等奖2项，部委级科技进步一等奖2项、二等奖6项、三等奖6项，部委级自然科学三等奖1项，获国家发明专利15项，出版专著和教材8部，其中《计算机体系结构》获2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖。

通信地址：湖南长沙国防科学技术大学计算机学院 410073

E-mail: zywang@nudt.edu.cn

第二作者简介

张春元，男，1963年生，汉族，黑龙江巴彦人，1996年在国防科学技术大学计算机系获工学博士学位。现任国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师，国家精品课程“计算机体系结构”主讲人之一。IEEE/ACM会员，享有国务院颁发的政府特殊津贴。现担任中国学位与研究生教育学会信息管理委员会副主任委员、《学位与研究生教育》杂志编辑，长期从事计算机体系结构、计算机应用等专业研究和教学工作。主持国家自然科学基金、国家自然科学基金重点项目、国家863高技术研究项目、国家973安全重大基础研究项目、国家重点型号项目及企业合作等20多项，近5年发表科研论文50余篇，出版学术专著1部，已获授权专利10项。指导博士获全国百篇优秀博士论文提名1人。主讲过10多门本科生和研究生课程，参与撰写教材3本，其中《计算机体系结构》获2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖，发表教学研究文章10余篇，主编出版《学位与研究生教育信息管理实践与探索》。获得国家科技进步二等奖1次、军队或省部级科技进步一等奖2次、二等奖2次、三等奖2次，军队教学优秀一等奖1项，湖南省教学成果三等奖1项。

通信地址：湖南长沙国防科学技术大学计算机学院 410073

E-mail: cyzhang@nudt.edu.cn

主 任: 周立柱

副 主 任: 王志英 李晓明

编委委员: (按姓氏笔画为序)

汤志忠 孙吉贵 杨 波

岳丽华 钱德沛 谢长生

蒋宗礼 廖明宏 樊晓桢

责任编辑: 马瑛珺 张瑞庆

本书是国家精品课程“计算机体系结构”的指定教材，同时也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。在内容的选择上，本书重点论述了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。同时借鉴了国际上公认的计算机系统结构高水平教材。

计算机体系结构是计算机科学与技术学科的重要二级学科，它强调从总体结构、系统分析的角度来研究计算机系统，因此本书特别强调从系统层次上学习和了解计算机。通过本书的学习，读者能把在“计算机组成原理”、“数据结构”、“操作系统”、“汇编语言程序设计”等课程中所学的软、硬件知识有机地结合起来，从而建立起计算机系统的完整概念。

本书除了着重论述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，还特别强调了采用量化的分析方法。这种方法能更具体、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。在本书中，体系结构的概念用于描述计算机系统设计的技術、方法和理论。主要包括计算机指令系统、计算机组成和计算机硬件实现 3 个方面。涵盖了处理器和多处理器、存储器、输入输出系统、互连与通信等计算机系统设计的主要内容，同时还涉及性能评价、编译和操作系统技术。

本书可读性好，语言简练，深入浅出，通俗易懂。

本书共分 8 章。第 1 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，讨论影响计算机系统设计的成本和价格因素，并介绍定量分析技术基础。第 2 章论述计算机指令集结构设计中的—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 RISC 指令集结构的实例。第 3 章论述流水线的—基本概念和性能分析、典型 RISC 流水线、流水线中的—些相关问题，并对向量处理机的结构及特点、关键技术及性能评价进行讨论。第 4 章讨论指令级并行，论述了利用软、硬件技术开发程序中存在的指令间并行性的技术和方法，包括指令动态调度、超标量技术、分支处理技术和超长指令字技术等。第 5 章讨论存储层次，论述了 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，并对虚拟存储器进行深入讨论。第 6 章讨论输入输出系统，论述了外部存储设备、I/O 设备与 CPU 和存储器的连接、廉价磁盘冗余阵列 RAID，并讨论 I/O 系统性能分析。第 7 章讨论多处理机，论述了多处理机的存储器体系结构、互连网络、同步机制以及同时多线程技术，并讨论了多处理机实例。第 8 章讨论机群计算机，讲述机群的结构、软件模型以及机群的分类，并介绍了 4 个典型的机群系统。

作为教材，使用者可以根据自己的需求，选取相应的内容。全部内容可以安排 60~70 个教学课时。如果去掉难度较大的第 4 章“指令级并行”和第 8 章“机群计算机”的内容，可以安排 50 个左右的教学课时。

本书由国防科技大学计算机学院王志英教授完成全书的统稿并编写了第 7 章，张春元教授编写了第 1、4 章和第 3 章的部分内容，沈立副教授编写了第 2、8 章和第 3 章的部分内容，肖晓强副教授编写了第 6 章，姜晶菲副教授编写了第 5 章。

本书有配套的教辅材料，包括《计算机体系结构教学指导与习题解答》(张春元主编)，《计算机体系结构实验》(沈立主编)，PPT 讲稿和实验模拟程序等。

本书适合作为高等院校计算机科学与技术学科各专业以及自动化、电子工程等相关专业本科生、研究生的教材。

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。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2010 年 8 月于长沙
国防科技大学计算机学院

F O R E W O R D

第 1 章 计算机体系结构的基本概念 /1

- 1.1 计算机体系结构的概念 /1
 - 1.1.1 存储程序计算机 /1
 - 1.1.2 计算机体系结构、组成和实现 /3
 - 1.1.3 计算机系统中的层次概念 /5
 - 1.1.4 系列机和兼容 /7
- 1.2 计算机体系结构的发展 /10
 - 1.2.1 计算机分代、分型与分类 /10
 - 1.2.2 软件的发展 /11
 - 1.2.3 应用的发展 /13
 - 1.2.4 集成电路的发展 /13
 - 1.2.5 计算机体系结构的发展 /15
 - 1.2.6 并行处理技术的发展 /18
- 1.3 计算机系统设计和分析 /23
 - 1.3.1 成本与价格 /23
 - 1.3.2 基准测试程序 /26
 - 1.3.3 量化设计的基本原则 /28
- 1.4 小结 /32
- 习题 1 /32

第 2 章 指令系统 /35

- 2.1 指令系统结构的分类 /35
- 2.2 寻址方式 /37
- 2.3 指令系统的设计和优化 /40
 - 2.3.1 指令系统设计的基本原则 /40
 - 2.3.2 控制指令 /41
 - 2.3.3 指令操作码的优化 /42
- 2.4 指令系统的发展和改进 /43
 - 2.4.1 沿 CISC 方向发展和改进指令系统 /43
 - 2.4.2 沿 RISC 方向发展和改进指令系统 /45
- 2.5 操作数的类型和大小 /47
- 2.6 MIPS 指令系统结构 /49
 - 2.6.1 MIPS 的寄存器 /49

2.6.2	MIPS 的数据表示	/49
2.6.3	MIPS 的数据寻址方式	/49
2.6.4	MIPS 的指令格式	/50
2.6.5	MIPS 的操作	/51
2.6.6	MIPS 的控制指令	/52
2.6.7	MIPS 的浮点操作	/53
2.7	小结	/54
	习题 2	/54
第 3 章	流水线技术	/56
3.1	流水线概述	/56
3.1.1	流水线的基本概念	/56
3.1.2	流水线的分类	/58
3.2	MIPS 的基本流水线	/61
3.2.1	MIPS 的一种简单实现	/61
3.2.2	基本的 MIPS 流水线	/64
3.2.3	流水线性能分析	/68
3.3	流水线中的相关	/74
3.3.1	流水线的结构相关	/74
3.3.2	流水线的的数据相关	/77
3.3.3	流水线的控制相关	/86
3.4	流水线计算机实例分析 (MIPS R4000)	/93
3.4.1	MIPS R4000 整型流水线	/93
3.4.2	MIPS R4000 浮点流水线	/95
3.4.3	MIPS R4000 流水线的性能分析	/96
3.5	向量处理机	/97
3.5.1	向量处理方式和向量处理机	/97
3.5.2	向量处理机实例分析	/99
3.6	小结	/102
	习题 3	/103
第 4 章	指令级并行	/104
4.1	指令级并行的概念	/104
4.1.1	循环展开调度的基本方法	/105

- 4.1.2 相关性 /109
- 4.2 指令的动态调度 /113
 - 4.2.1 动态调度的原理 /113
 - 4.2.2 动态调度算法之一：记分牌 /114
 - 4.2.3 动态调度算法之二：Tomasulo 算法 /122
- 4.3 控制相关的动态解决技术 /132
 - 4.3.1 分支预测缓冲 /132
 - 4.3.2 分支目标缓冲 /135
 - 4.3.3 基于硬件的前瞻执行 /137
- 4.4 多指令流出技术 /141
 - 4.4.1 静态超标量技术 /142
 - 4.4.2 动态多指令流出技术 /144
 - 4.4.3 超长指令字技术 /146
 - 4.4.4 多流出处理器受到的限制 /148
- 4.5 小结 /149
- 习题 4 /150
- 第 5 章 存储层次 /153**
 - 5.1 存储器的层次结构 /153
 - 5.1.1 多级存储层次 /153
 - 5.1.2 存储层次的性能参数 /154
 - 5.1.3 两种存储层次关系 /155
 - 5.1.4 存储层次的 4 个问题 /156
 - 5.2 Cache 基本知识 /156
 - 5.2.1 映像规则 /157
 - 5.2.2 查找方法 /159
 - 5.2.3 替换算法 /160
 - 5.2.4 写策略 /161
 - 5.2.5 Cache 结构 /163
 - 5.2.6 Cache 性能分析 /165
 - 5.2.7 改进 Cache 性能 /169
 - 5.3 降低 Cache 失效率的方法 /169
 - 5.3.1 调节 Cache 块大小 /171

- 5.3.2 提高相联度 /173
- 5.3.3 Victim Cache /175
- 5.3.4 硬件预取 /176
- 5.3.5 编译器控制的预取 /177
- 5.3.6 编译器优化 /179
- 5.4 减少 Cache 失效开销 /182
 - 5.4.1 写缓冲及写合并 /182
 - 5.4.2 让读失效优先于写 /184
 - 5.4.3 请求字处理 /184
 - 5.4.4 多级 Cache /185
 - 5.4.5 非阻塞 Cache /188
- 5.5 减少命中时间 /190
 - 5.5.1 容量小、结构简单的 Cache /190
 - 5.5.2 虚拟 Cache /190
 - 5.5.3 访问流水化 /193
 - 5.5.4 多体 Cache /193
 - 5.5.5 路预测 /194
 - 5.5.6 Trace Cache /194
 - 5.5.7 Cache 优化技术总结 /194
- 5.6 主存 /195
 - 5.6.1 存储器组织技术 /196
 - 5.6.2 存储器芯片技术 /200
- 5.7 虚拟存储器 /203
 - 5.7.1 虚拟存储器基本原理 /203
 - 5.7.2 快表 /205
 - 5.7.3 虚存和 Cache 关系的例子 /206
- 5.8 虚存保护和虚存实例 /207
 - 5.8.1 进程保护技术 /207
 - 5.8.2 页式虚存举例：64 位 Opteron /208
 - 5.8.3 虚拟机保护 /210
- 5.9 综合实例：AMD Opteron 存储层次 /215
- 5.10 小结 /217

习题 5 /219

第 6 章 输入输出系统 /221

6.1 引言 /221

6.1.1 I/O 处理对计算机总体性能的影响 /221

6.1.2 I/O 系统的可靠性 /222

6.2 外部存储设备 /222

6.2.1 磁盘设备 /223

6.2.2 Flash 存储器与固态硬盘 SSD /227

6.2.3 磁带设备 /228

6.2.4 光盘设备 /231

6.3 I/O 系统性能分析与评测 /232

6.3.1 I/O 性能与系统响应时间 /233

6.3.2 Little 定律 /234

6.3.3 M/M/1 排队系统 /235

6.3.4 M/M/m 排队系统 /237

6.3.5 I/O 基准测试程序 /238

6.4 I/O 系统的可靠性、可用性和可信性 /240

6.5 廉价磁盘冗余阵列 RAID /242

6.5.1 RAID0 /244

6.5.2 RAID1 /245

6.5.3 RAID2 /246

6.5.4 RAID3 /247

6.5.5 RAID4 /248

6.5.6 RAID5 /249

6.5.7 RAID6 /251

6.5.8 RAID 的实现与发展 /252

6.6 I/O 设备与 CPU/存储器的连接——总线 /252

6.6.1 总线设计应考虑的因素 /253

6.6.2 总线标准和实例 /254

6.6.3 设备的总线连接 /256

6.7 通道 /257

6.7.1 通道的功能 /257

6.7.2	通道的工作过程	/258
6.7.3	通道的种类	/260
6.8	I/O与操作系统	/260
6.8.1	DMA和虚拟存储器	/260
6.8.2	I/O和Cache数据一致性	/261
6.8.3	异步I/O	/262
6.8.4	文件信息的维护	/263
6.9	小结	/263
	习题6	/264
第7章	多处理机	/266
7.1	引言	/266
7.1.1	并行计算机体系结构的分类	/266
7.1.2	通信模型和存储器的结构模型	/268
7.1.3	并行处理面临的挑战	/270
7.2	对称式共享存储器体系结构	/272
7.2.1	多处理机Cache一致性	/272
7.2.2	实现一致性的基本方案	/273
7.2.3	监听协议及其实现	/275
7.3	分布式共享存储器体系结构	/277
7.3.1	基于目录的Cache一致性	/277
7.3.2	目录协议及其实现	/279
7.4	互连网络	/281
7.4.1	互连网络的性能参数	/281
7.4.2	静态连接网络	/284
7.4.3	动态连接网络	/288
7.5	同步	/292
7.5.1	基本硬件原语	/293
7.5.2	用一致性实现锁	/294
7.5.3	同步性能问题	/296
7.5.4	大规模机器的同步	/298
7.6	同时多线程	/301
7.6.1	将线程级并行转换为指令级并行	/302

7.6.2	同时多线程处理器的设计	/304
7.6.3	同时多线程的性能	/305
7.7	并行处理器的性能评测	/306
7.8	多处理机实例	/307
7.8.1	实例 1: T1 处理器	/307
7.8.2	实例 2: Origin 2000	/311
7.9	小结	/314
	习题 7	/314
第 8 章	机群计算机	/316
8.1	机群的基本概念和结构	/316
8.1.1	机群的基本结构	/316
8.1.2	机群的软件模型	/317
8.2	机群的特点	/319
8.3	机群的分类	/319
8.4	典型机群系统简介	/321
8.4.1	Berkeley NOW	/321
8.4.2	Beowulf	/321
8.4.3	LAMP	/322
8.4.4	IBM SP2	/322
8.5	小结	/324
	习题 8	/324
	参考文献	/325

第 1 章 计算机体系结构的基本概念

1.1 计算机体系结构的概念

在目前得到大多数人认可的历史中，人们最早使用的电子数字计算机（通常称之为计算机）是 1945 年诞生于美国宾夕法尼亚大学的 ENIAC，用于计算火炮的弹道。1946 年，生于匈牙利的美国数学家冯·诺依曼（John von Neumann，1903 年 12 月 28 日—1957 年 2 月 8 日）等人在总结当时计算机研究成果的基础上，明确提出了存储程序计算机（stored-program computer），因此又称存储程序计算机为冯·诺依曼结构计算机，它奠定了现代电子数字计算机的结构基础，成为计算机的标准结构。六十多年来，虽然计算机技术一直处于飞速发展和变革之中，但是存储程序计算机的概念和基本结构一直沿用至今，没有发生根本性的变化，是计算机体系结构研究的基础。

1.1.1 存储程序计算机

存储程序计算机是一种计算机系统设计模型，实现了一种通用图灵机（Universal Turing Machine）。冯·诺依曼描述的计算机由以下 4 个部分组成：

- （1）运算器。用于完成数值运算。
- （2）存储器。用于存储数据和程序。
- （3）输入输出设备。用于完成计算机和外部的信息交换。
- （4）控制器。根据程序形成控制（指令、命令）序列，完成对数据的运算。

控制器根据程序指令序列，分解形成对计算机 4 个部分操作的控制信号序列，称为控制流。例如，从存储器某个特定单元取一条指令，把运算器的计算结果送到存储器某个特定单元，启动运算器完成加法运算，等等。计算机在控制流的操作下，计算机 4 个部分之间形成数据和指令的传送序列，称为数据/指令流。存储程序计算机 4 个部分的结构如图 1.1 所示，为了更加直观，图中将输入设备和输出设备分成了两个独立的部件。

存储程序计算机在体系结构上的主要特点如下：

- （1）机器以运算器为中心。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）采用存储程序原理。程序（指令）和数据放在同一存储器中，且没有对两者加以区分。指令和数据一样可以送到运算器进行运算，即由指令组成的程序自身是可以修改的。
- （3）存储器是按地址访问的、线性编址的空间。每个单元的位数是相同且固定的，称为存储器编址单位。

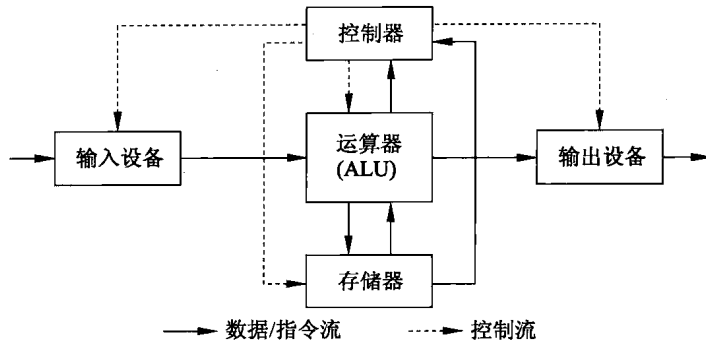


图 1.1 存储程序计算机的结构

(4) 控制流由指令流产生。指令在存储器中是按其执行顺序存储，由指令计数器指明每条指令所在单元的地址。每执行完一条指令，程序计数器一般是顺序递增。虽然执行顺序可以根据运算结果改变，但是解题算法仍然是也只能是顺序型的。

(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，地址码指明操作数和操作结果的地址。操作数的类型（定点、浮点或十进制数）由操作码决定，操作数本身不能判定是何种数据类型。

(6) 数据以二进制编码表示，采用二进制运算。它主要面向数值计算和数据处理。

存储程序计算机体系结构的这些特点奠定了现代计算机发展的基础。

在存储程序计算机中，程序执行的过程就是对程序指令进行分解，形成控制计算机 4 个部分工作的控制流，对数据进行加工（运算），周而复始地产生数据/指令流，并最终得到数据结果的过程。计算机对每条指令从取指令到得到结果的工作周期，称为一个机器周期。机器周期可以按照设计者的思路，进一步分解为一系列操作，例如分解为两个部分：指令周期和数据周期；还可以按照访问存储器分解为 3 个部分：从存储器取指令、从存储器取操作数和将计算结果写回到存储器。在本教材中，将一条指令的操作分解为 5 个部分：取指令、指令译码、指令执行、访问存储部件和写结果，如图 1.2 所示。

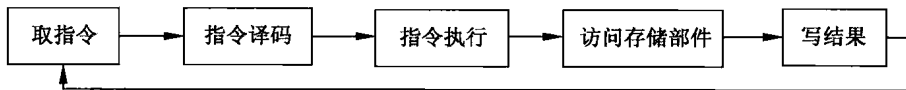


图 1.2 分解为 5 个部分的存储程序计算机的机器周期

在图 1.2 所示的机器周期中，第一，计算机从存储器中取出一条指令；第二，对这条指令进行译码，由硬件分解并确定这条指令所指示的操作，同时确定该指令操作对象（操作数）所在的位置，这个位置可以是寄存器单元、存储器的特定单元或者某个输入设备；第三，根据译码确定的位置去取操作数并送到运算器；第四，运算器按照译码确定的操作进行运算；第五，运算结束后，将结果送到指定的位置，这个位置可以是寄存器单元、存储器的特定单元或者某个输出设备，至此计算机就将一条指令执行完了，并准备执行下一条指令。这就是对一个存储程序计算机的处理器在一个机器周期里面安排的操作序列。

1.1.2 计算机体系结构、组成和实现

虽然计算机体系结构 (computer architecture) 的概念目前已被广泛使用, 但是这个概念所包含的研究内容一直在发生变化。Architecture 本来用在建筑方面, 译为“建筑学、建筑术、建筑样式”等。这个词被引入计算机领域后, 最初的译法也各有不同, 其包含的主要内容有“系统”、“体系”、“方法”、“结构”、“组织”等, 以后趋向译为“体系结构”或“系统结构”。

1964年4月, 阿姆道尔 (C. M. Amdahl) 等在 IBM Journal of Research and Development 杂志上, 发表了题为 Architecture of the IBM System/360 的文章, 首次明确提出了“计算机体系结构”的概念, 并且将计算机体系结构定义为: 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。这就是计算机体系结构概念的经典定义。

程序员所看到的计算机的属性, 是指程序 (机器语言、汇编语言或者编译程序生成系统) 设计者为使其所设计 (或生成) 的程序能在机器上正确运行, 必须掌握和遵循的计算机属性, 这些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, 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。
- (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。

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计算机上正确运行的程序。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, 也就是指令系统的设计。在体系结构界面之上, 更多是软件研究领域关注的功能和内容, 体系结构界面之下的是硬件和固件等实现方面研究的功能和内容。

随着计算机技术的发展, 计算机体系结构所研究的内容不断发生变化和发展。表 1.1 给出了从电子数字计算机产生到现在计算机体系结构研究关注的一些典型内容。

阿姆道尔提出计算机体系结构的概念是在 20 世纪 60 年代, 当时指令系统的研究和设计正处在发展时期, 是设计计算机系统时必须研究、权衡、取舍的重要内容, 影响系统设计目标的实现和成本, 所以他们定义的计算机体系结构概念更多地体现出当时的时代特点。