

高等院校信息技术规划教材

计算机系统结构

秦杰 等 编著

INFORMATION TECHNOLOGY
INFORMATION TECHNOLOGY
INFORMATION TECHNOLOGY

清华大学出版社



高等院校信息技术规划教材

计算机系统结构

秦杰 等 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合计算机技术现状,系统地讲述现代计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法,并简要介绍当前系统结构领域的主要进展。

本书共8章:第1章介绍计算机系统结构的基础知识;第2章简要介绍冯·诺依曼体系结构中CPU、存储系统、输入输出系统以及系统总线的基本知识;第3章在介绍常用的数据表示方法和寻址方式的基础上,讲解指令系统的优化设计方法及其最新进展;第4章介绍虚拟存储系统、Cache存储系统以及Cache—主存—辅存三级存储系统的工作原理和相关的地址映像及变换方法;第5章介绍基本输入输出方式、总线控制方式以及中断方式的基本工作原理;第6章介绍标量流水线、非线性流水线的基本概念与工作原理和调度策略,并简要介绍指令级上高度并行的超标量处理机、超标量流水线处理机、超标量超流水线处理机和超长指令字处理机的工作原理;第7章是并行处理机技术,介绍SIMD计算机、MIMD计算机的基本组成原理、类型和特点,以及与它们相关的互连网络的工作原理;第8章介绍计算机系统结构进展。每一章的内容均包括内容简介、学习内容、本章小结和习题。

本书重点讲述现代主流计算机采用的比较成熟的设计思想、结构和方法等,力求内容重点突出、论述简洁、贴近实际。本书可以作为计算机专业本科生“计算机系统结构”课程的教材,或者相关专业本、专科学生“计算机组成与体系结构”课程的教材,也可以作为有关专业研究生和相关领域科技人员的参考书。

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

计算机系统结构/秦杰等编著. —北京:清华大学出版社,2009.7

(高等院校信息技术规划教材)

ISBN 978-7-302-19752-2

I. 计… II. 秦… 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039481号

责任编辑:战晓雷

责任校对:梁毅

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

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

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地址:北京清华大学学研大厦A座

邮编:100084

邮购:010-62786544

印装者:清华大学印刷厂

经销:全国新华书店

开本:185×260 印张:22

字数:519千字

版次:2009年7月第1版

印次:2009年7月第1次印刷

印数:1~4000

定价:29.50元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:031860-01

前言

foreword

计算机系统结构也称计算机体系结构,是计算机及相关专业的一门重要课程,在学科领域中,“计算机系统结构”是计算机学科中的一个二级学科。

计算机系统结构从外部研究计算机系统,是使用者所看到的物理计算机的抽象,是编写出能够在机器上正确运行的程序所必须了解到的计算机的属性。计算机系统结构主要研究计算机系统中软件、硬件功能分配和对软件、硬件界面的确定,即确定哪些功能由软件完成,哪些功能由硬件实现。它强调从总体结构、系统分析这一角度来研究计算机系统,对于培养系统地、自上而下地分析和解决问题的能力,以及培养抽象思维能力有非常重要的作用。通过学习本课程,能把在“计算机组成原理”、“操作系统”、“编译原理”、“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,学习针对计算机系统的分析方法和设计方法,掌握现代计算机系统的基本结构及工作原理。

近年来,由于流水线技术、高速缓存技术、并行处理技术、多核处理器技术、片上系统、网格计算等新技术的出现,使得计算机系统结构领域发生了重大变化。为适用这种变化,同时结合教学应用型大学的培养目标和学生特点,我们编写了本书。参加本书编写的人员来自不同本科院校,均为担任计算机系统结构课程的主讲教师。在本书的编写过程中,编写者充分考虑了讲授本课程的亲身体会,以及学生在学习本课程时遇到的普遍性问题。贴近实际是本书的最大特色。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,还强调量化的分析方法,这种方法使学生能够更具体、实际地分析和理解计算机体系结构。本书最后一章简要介绍系统结构当前的主要研究进展。为了便于因材施教和学生自学,对于偏难或者非基础性的内容,书中在相应的章节的标题前标注了“※”。教师可以根据具体学时,选择本书的教学内容进行讲授。针对这些内容的习题编号前则以“*”标注。

本书内容编排大体是按照计算机系统结构的发展历程:冯·诺依曼体系结构→改进的冯·诺依曼体系结构→非冯·诺依曼体系结构这条线索。以经典冯·诺依曼体系结构(第2章)为基础,介绍现代通用计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本结构和基本分析方法以及相关领域的最新研究成果,主要包括:数据表示与指令系统设计(第3章),存储系统(第4章),输入输出系统(第5章),流水线技术(第6章),并行处理机技术(第7章),以及计算机系统结构进展(第8章)。

本书由秦杰博士任主编,郑丽萍任副主编,第2章由周口师范学院乔蕊老师编写,第3、7章由河南工业大学郑丽萍老师编写,第4章由华北水利水电学院孙全红老师编写,第5章由河南农业大学孙昌霞老师编写,第6章由河南工业大学王献荣老师编写,秦杰完成第1、8章的编写,以及全书的统稿工作。限于作者的水平,错误和不当之处在所难免,请读者批评指正。

本书的内容参考了国内外有影响的相关书籍和教材,以及计算机系统结构方面最新的研究论文,在此向相关作者表示感谢!

本书的出版得到清华大学出版社领导以及战晓雷编辑等相关人员的大力支持,在此表示感谢!

秦 杰

2009年1月

目录

Contents

第 1 章 计算机系统结构导论	1
1.1 计算机系统结构的基本概念	1
1.1.1 计算机系统的层次结构	1
1.1.2 计算机系统结构、组成与实现	3
1.1.3 计算机系统结构的发展历程	7
1.1.4 计算机系统结构的分类	14
1.2 影响计算机系统结构的因素	16
1.2.1 应用对计算机系统结构的影响	16
1.2.2 算法对计算机系统结构发展的影响	17
1.2.3 软件对计算机系统结构的影响	18
1.2.4 器件对计算机系统结构发展的影响	20
1.3 计算机系统性能分析与系统结构的评价标准	21
1.3.1 计算机性能的分析与评价	21
1.3.2 系统结构的评测标准	22
1.4 定量分析技术基础	25
1.4.1 大概率事件优先原则	25
1.4.2 Amdahl 定律	26
1.4.3 CPU 性能公式	27
1.4.4 程序的局部性原理	30
1.5 本章小结	30
习题 1	31
第 2 章 现代计算机组成	33
2.1 中央处理机	34
2.1.1 CPU 的组成	34
2.1.2 数据表示	35
2.1.3 寻址方式概述	36

2.2	存储系统	37
2.2.1	存储系统概述	38
2.2.2	存储系统的层次结构	39
2.2.3	并行存储器	41
2.2.4	程序访问的局部性	43
2.3	输入输出系统	44
2.3.1	输入系统	45
2.3.2	输出系统	46
2.3.3	通道处理机和 I/O 处理机	47
2.4	总线	49
2.4.1	总线系统概述	50
2.4.2	总线基本工作原理	51
2.4.3	设备的连接	52
2.4.4	CPU 和 I/O 处理的匹配	52
2.5	本章小结	53
	习题 2	54
第 3 章	数据表示与指令系统设计	55
3.1	数据表示	55
3.1.1	数据表示与数据结构	55
3.1.2	定点数据表示	56
3.1.3	浮点数据表示	57
3.1.4	自定义数据表示	61
3.2	寻址技术	65
3.2.1	编址方式	65
3.2.2	常用寻址方式	65
3.2.3	寻址技术在指令中的指明	68
3.2.4	定位方式	68
3.3	指令格式的优化设计	68
3.3.1	指令格式的组成	69
3.3.2	操作码的优化	69
3.3.3	地址码优化设计	73
3.3.4	指令格式优化设计方法	75
3.3.5	DLX 指令格式设计	76
3.4	指令系统的功能设计	78
3.4.1	指令系统的发展	78
3.4.2	复杂指令系统	79
3.4.3	精简指令系统	82

3.5 本章小结	85
习题 3	85
第 4 章 存储系统	87
4.1 存储系统的技术指标	87
4.1.1 存储系统的基本要求	87
4.1.2 存储系统的性能指标	88
4.2 虚拟存储器	89
4.2.1 虚拟存储器的原理	89
4.2.2 虚拟存储器的管理方式	91
4.2.3 加快地址变换的方法	97
4.2.4 页面替换算法	101
4.2.5 堆栈型替换算法	104
4.2.6 虚拟存储器的性能分析	106
4.3 高速缓冲存储器	109
4.3.1 基本结构和工作原理	110
4.3.2 地址映像及变换方式	111
※4.3.3 替换算法	119
※4.3.4 Cache 性能分析	123
4.3.5 提高 Cache 性能的方法	127
4.4 Cache—主存—辅存三级存储系统	128
4.4.1 三级存储系统的组织方式	128
※4.4.2 虚拟地址 Cache	130
4.5 存储系统实例	131
4.5.1 主存保护	131
※4.5.2 主存保护实例	134
4.6 本章小结	134
习题 4	135
第 5 章 输入输出系统	139
5.1 输入输出工作原理	139
5.1.1 输入输出系统的特点	139
5.1.2 输入输出系统的组织方式	140
5.1.3 基本输入输出方式	141
5.2 总线系统	145
5.2.1 总线的分类	145
5.2.2 总线结构的特点	147

5.2.3	总线仲裁	148
5.2.4	总线的控制方式	148
5.2.5	总线的通信方式	150
5.2.6	总线标准及发展	152
5.2.7	总线的指标	154
5.3	中断系统	155
5.3.1	中断源	155
5.3.2	中断优先级	156
5.3.3	中断处理过程	157
5.3.4	中断系统的软硬功能分配	159
5.3.5	中断屏蔽	161
5.4	通道处理机	163
5.4.1	通道的工作过程	164
5.4.2	通道的种类及相应的数据宽度、数据传送过程	166
5.4.3	通道的流量分析	169
5.5	输入输出处理机	171
5.5.1	输入输出处理机的特点	172
※5.5.2	输入输出处理机的种类	172
5.6	本章小结	173
习题 5	173
第 6 章	流水线技术	178
6.1	指令重叠与先行控制	178
6.1.1	重叠方式	178
6.1.2	先行控制方式的结构	180
6.1.3	先行控制方式的原理	182
6.2	流水线处理机	183
6.2.1	流水线工作原理	183
6.2.2	流水线的分类	185
6.2.3	流水线的性能分析	186
6.3	标量流水线处理机中的相关	195
6.3.1	资源相关	195
6.3.2	数据相关	196
6.3.3	控制相关	200
6.4	非线性流水线的调度技术	207
6.4.1	非线性流水线的表示	207
6.4.2	非线性流水线的调度	209
6.5	多指令流水线技术	212

6.5.1	超标量处理机	212
6.5.2	超流水线处理机	215
6.5.3	超标量超流水线处理机	216
※6.5.4	超长指令字(VLIW)处理机	216
6.6	向量处理机	218
6.6.1	向量处理方式	218
6.6.2	向量处理机结构	219
6.6.3	向量计算机实例分析	222
6.7	本章小结	226
习题 6	227
第 7 章	并行处理机技术	231
7.1	互连网络	231
7.1.1	互连函数	231
7.1.2	互连网络的性能和特征	234
7.1.3	静态互连网络	235
7.1.4	动态互连网络	238
7.2	SIMD 计算机	244
7.2.1	SIMD 计算机模型与特点	244
7.2.2	SIMD 计算机结构	245
7.2.3	SIMD 计算机实例	247
7.2.4	SIMD 处理机的算法举例	253
7.3	MIMD 计算机	256
7.3.1	MIMD 计算机结构	256
7.3.2	MIMD 计算机的特点	257
7.3.3	多处理机的 Cache 一致性	259
7.4	本章小结	266
习题 7	267
第 8 章	计算机系统结构进展	269
8.1	计算机系统结构新发展概述	269
8.1.1	片上系统	270
8.1.2	网格化的高性能计算机系统结构	274
8.2	新一代处理器体系结构	280
8.2.1	多核处理器技术	281
8.2.2	同构多核处理器架构	284
8.2.3	异构多核处理器	290

8.2.4 新一代处理器体系结构的研究趋势	294
※8.3 几种专用的计算机系统结构介绍	299
8.3.1 脉动阵列机	300
8.3.2 数据流计算机	305
8.3.3 归约机	315
8.3.4 人工智能计算机	320
8.4 本章小结	333
习题8	334
参考文献	335

计算机系统结构导论

本章首先简要介绍与计算机系统结构相关的基本概念,包括:计算机系统的层次结构,计算机系统结构、组成和实现三者之间的区别与联系,计算机系统结构的发展历程;之后分析影响计算机系统结构的因素,并介绍计算机系统性能分析与系统结构的评价标准;最后介绍定量分析技术。本章重点是计算机系统的层次结构,计算机系统结构、组成与实现的区别和联系,定量分析技术中的 Amdahl 定律,以及 CPU 性能公式;难点是计算机系统的层次结构、系统结构的分类、系统结构的评价标准以及定量分析技术。

1.1 计算机系统结构的基本概念

1.1.1 计算机系统的层次结构

现代计算机系统由软件和硬件组成。随着软件技术的发展,人们可以从不同的层面上使用计算机语言编程,计算机语言可分成一系列的层(level)或级。从使用计算机语言的角度,可以把计算机系统按功能划分成多级层次结构,如图 1-1 所示。

第 1 级是微程序机器级。这一级的机器语言是微指令集,用微指令编写的程序称为微程序,微程序直接由硬件解释实现。微程序被固化在 ROM 中,通常将具有软件功能的硬件称为固件。

第 2 级是传统机器级。这一级的机器语言就是该机器的指令系统。用这一级的指令系统编写的程序通过第 1 级的微程序进行解释。

由微程序解释指令集又称作仿真(emulation)。在微程序机器级上面可以有一个或数个能够运行的解释程序,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,这类计算机系统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。精简指令集计算机(RISC, Reduced Instruction Set Computer)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,从而提高指令的执行速度。

第 3 级是操作系统机器级。这一级的机器语言中的多数指令是传统机器的指令,如

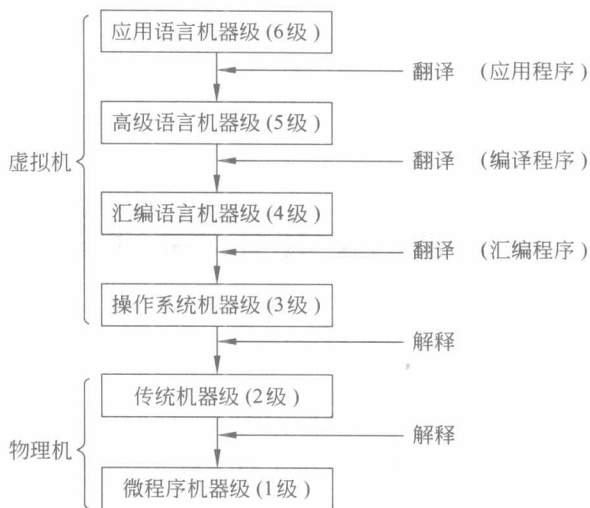


图 1-1 计算机系统的多级层次结构

算术运算、逻辑运算和移位等指令。此外，这一级还提供操作系统级指令，例如打开文件、读/写文件、关闭文件等指令。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延伸。它提供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 级是汇编语言机器级。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叫做汇编程序。

第 4 级上出现了一个重要变化。通常第 1、2 和 3 级功能是用解释(interpretation)方法实现的，而第 4 级或更高级功能则是用翻译(translation)方法实现。

翻译和解释是计算机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，二者的差别主要在于：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。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 级是高级语言机器级。这一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 BASIC 语言。

第 6 级是应用语言机器级。这一级的机器语言是应用语言。这种语言使非计算机专业人员也能直接使用计算机，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。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。

需要说明的是,这里所说的机器并非是指真正的一台有鼠标、键盘、显示器等的计算机实体,而是指能够存储和执行相应语言程序的算法和数据结构的集合体。这样,对于掌握某一级高级语言编程的程序员来说,只要他熟悉和遵守该级语言的规定,所编写的程序总能在这一机器上运行,得到结果,而不用管这个机器级是如何实现的。就好像该程序员有了可以直接使用这种语言作为机器语言的机器一样。实际上,只有二进制机器指令即通常所说的机器语言才与硬件直接对应,可以被硬件直接识别和执行。

图1-1中第3级以上完全由软件实现。通常称由软件实现的机器为虚拟机器(virtual machine),简称虚拟机,以区别于由硬件或固件实现的实际机器。

把计算机系统按功能划分成多级层次结构具有以下优点:

- 有利于正确地理解计算机系统的工作,明确软件、硬件和固件在计算机系统中的地位和作用。
- 有利于理解各种语言的实质及其实现。
- 有利于探索新的虚拟机的实现方法,设计新的计算机系统。
- 有利于理解计算机体系结构的定义,从而进行更合理的计算机系统结构设计。

1.1.2 计算机系统结构、组成与实现

1. 计算机系统结构的概念

计算机系统结构(Computer Architecture),也称计算机体系结构。在学科领域中,“计算机系统结构”已成为计算机学科中的一个二级学科。但对“计算机系统结构”一词的含义仍有多种说法,并无统一的定义。

计算机系统结构是安达尔(Amdahl)等人于1964年在设计IBM 360系统时引入的一个概念:(机器级)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,不同层次的计算机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计算机的主要属性是该机指令系统的功能特性。而高级语言级程序员看到的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。因此,Amdahl所说的计算机系统结构是指机器语言程序员所看到的计算机系统的属性,是计算机硬件子系统的概念性结构和功能特性。它不同于数据流程和控制的组织,不同于逻辑设计以及物理实现方法。上述经典计算机系统结构概念的实质是计算机系统中软硬件界面的确定,其界面之上的是软件的功能,界面之下的是硬件和固件的功能以及“指令集结构”。

通过上述分析,可以给出计算机系统结构的如下定义:计算机系统结构是指机器语言或编译程序设计者为了使其所编写的程序能在计算机上正确运行所必须了解和遵循的计算机属性,计算机属性包含概念性结构和功能特性两个方面。具体来说,这些属性主要包括:

- 机器内的数据表示,即硬件能直接辨认和处理的数据类型和格式。

- 寻址方式：包括寻址方式、表示方法、地址计算和最小寻址单元等。
- 寄存器定义：包括操作数寄存器、变址寄存器、控制寄存器及专用寄存器等的定义、数量和使用方式。
- 指令系统：机器指令的操作类型和格式、指令操作码优化和控制等。
- 中断机构：中断的类型、中断分级、中断处理功能和中断入口地址等。
- 机器工作状态的定义和切换：如管态和目态等。
- 存储系统：程序员可用的最大存储容量、最大可编址空间、最小编址单位、编址方式和主存容量等。
- 机器级的 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。
- 信息保护：信息保护方式和硬件对信息保护的支持等。

以上这些属性实际上也是计算机设计者(或者编译程序生成系统)为使其所设计(或生成)的程序在机器上正确运行所必须了解和遵循的计算机属性。

从上述定义可以看出：计算机系统结构研究的内容不仅涉及计算机硬件，也涉及计算机软件。计算机系统结构设计者的任务就是：在限定的造价范围内，使新型计算机系统具有最高的性能。即如何采用先进的计算机体系结构和生产技术，制造出具有较高性能价格比(performance cost ratio)的计算机系统。

在计算机技术中，一种本来存在的事物或属性从某种角度看似乎不存在，这种现象称为透明性。在一个计算机系统中，低层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。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。可以看出，在层次结构的各个级上都有它的系统结构。Amdahl 提出的系统结构是指传统机器级的系统结构，即一般所说的机器语言程序员所看到的传统机器级具有的属性。本书讨论的是经典的计算机系统结构的概念。即主要研究软件、硬件和固件的功能分配，并确定软件和硬件的分界面，即哪些功能由软件实现，哪些功能由硬件实现。

随着计算机技术的发展，计算机系统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(现代)的计算机系统结构概念，它除了包括经典的计算机系统结构的概念范畴(指令集结构)，还包括有关计算机组成和计算机实现技术的内容。

2. 计算机组成

计算机组成(Computer Organization)也称计算机组织，是在明确计算机系统结构分配给硬件的功能与概念性结构之后，研究硬件系统各组成部分的内部构造和相互联系，以实现机器语言级指令的功能与特性。计算机组成是计算机系统结构的逻辑实现，包括机器级内部数据流和控制流的组成及其逻辑设计等。它着眼于各功能部件的配置、功能、相互之间的连接与相互作用等。各功能部件的性能、参数以及相互之间的合理匹配是计算机组成的重要指标。例如，运算器的组成、功能、运算速度，存储器的层次结构、容量、存取周期、虚拟存储技术、通道技术或 I/O 处理机、先行控制、流水线技术、多功能部件、阵列机以及并行多处理机技术等。其目标是用最合理的方式将各种设备和部件连接

为计算机,以达到最优的性价比,从而实现所确定的系统结构。

目前,通用型计算机的组成设计主要包括如下内容:

- 数据通路宽度:数据总线上一次并行传送的信息位数。
- 专用部件的设置:选用哪些专用部件(如乘法专用部件、浮点运算部件、字符处理部件、地址运算部件等)以及每种专用部件的数量等等。这些都取决于所需达到的机器速度、专用部件的使用频率以及能承受的价格。
- 部件的共享程度:尽管许多操作在逻辑上互不相关,只能分时使用,但共享程度高,速度相应也会下降。设置多个部件降低共享程度,用提高操作并行度来提高速度,但价格会相应提高。
- 功能部件的并行度:采用顺序串行、重叠、流水或者分布式控制等技术提高并行度。
- 控制结构的组成方式:采用单机处理还是多机处理或者分布处理等。
- 缓冲和排队技术:如何设置适当的缓冲器来协调各部件之间的速度,以及采用随机、先进先出、优先级等措施安排事务的处理顺序。
- 预估、预判技术:为优化性能所采用的预测行为。
- 可靠性技术:为提高系统可靠性采取的措施,如冗余、容错等技术。

计算机组成的任务是研究硬件子系统各部分的内部结构和相互联系,以实现机器指令级的各种功能和特性。按所希望达到的性能价格比,最佳、最合理地把各种设备和部件组成计算机以实现机器指令级的各种功能和特性。对传统的机器程序员来说,计算机组成的设计内容一般是透明的。

3. 计算机实现

计算机实现(Computer Implementation)是计算机组成的物理实现。目前,计算机实现所涉及的主要内容包括:

- 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以及有关的制造工艺和技术等。

计算机实现侧重器件技术和微组装技术,其中器件技术在计算机实现技术中起主导作用。

通过上述定义可以看出,计算机系统结构、计算机组成和计算机实现是三个不同的概念。系统结构侧重研究指令系统及其执行模型,是计算机系统的软、硬件的界面;计算机组成是计算机系统结构的逻辑实现;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。

例如,对于计算机的指令系统来说,指令系统的确定是计算机系统结构的研究内容;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是计算机组成需要考虑的内容;实现这些功能的具体电路、器件设计及装配

技术则是计算机实现需要考虑的内容。进一步,对于乘法指令来说,是否设置乘法指令是系统结构需要考虑的内容;至于是采用高速乘法器,还是加法器移位器实现乘法指令则是计算机组成需要考虑的内容,而器件的类型、数量及组装技术的确定则属于计算机实现技术的范畴。又例如,对于计算机主存系统来说,主存容量与编址方式的确定是计算机系统结构的研究内容,主存速度的确定、逻辑结构的模式则属于计算机组成的研究内容,而器件的选定、电路的设计、组装技术属于计算机实现技术的范畴。

对于通常所说的由同一公司生产的系列机来说,不同系列机的系统结构可能不同,而同一系列机中不同型号的计算机则具有相同的系统结构,同一系列内的不同型号计算机的组织形式的差别则属于计算机组成研究的问题。

实际上,计算机系统结构、组成和实现所包含的具体内容是随不同机器而变化的。在有些计算机系统中作为系统结构研究的内容,在其他计算机系统中可能是作为组成和实现的内容。开始作为组成和实现提出来的设计思想,到后来就可能被引入系统结构中。例如高速缓冲存储器是作为组成提出来的,其中存放的信息全部由硬件自动管理,对程序员来说是透明的。然而,有的机器为了提高其使用效率,设置了高速缓冲存储器的管理指令,使程序员能参与高速缓冲存储器的管理。这样,高速缓冲存储器又成为系统结构的一部分,对程序员来说是不透明的。

具有相同系统结构的计算机可以采用不同的组成,如表 1-1 所示。一种计算机组成可以采用多种不同的计算机实现;采用不同的系统结构会使可以采用的组成技术产生差异,计算机组成也会影响系统结构;计算机组成的设计,其上决定于计算机系统结构,其下又受限于所用的实现技术,它的发展促进了实现技术的发展,也促进了结构的发展;计算机实现,特别是器件技术的发展是计算机系统结构和组成的基础,促进了组成与结构的发展;随着技术的发展,三者关系融合于一体,难以分开,在相互促进中发展。

表 1-1 一种计算机系统结构,可以采用不同的组成

一种计算机系统结构	可以采用不同的组成	性能与价格	考虑因素
1. 设计指令系统	1. 指令间顺序执行	速度慢、价格低	性能价格比
	2. 指令间重叠执行	速度快、价格高	
2. 乘法指令	1. 用加法器、移位器	速度慢、价格低	性能价格比、乘法指令使用频率
	2. 用专门乘法器	速度快、价格高	

在学习和理解计算机系统结构课程时有两点需要注意。

一是计算机系统结构、组成和实现之间的界限变得越来越模糊了,尤其是严格区分计算机系统结构和组成已不太可能,也没有太大的实际意义。计算机的系统结构和组成及实现是相互影响的。相同的系统结构,组成可以不同;即使相同的计算机组成,也可以有不同的实现,组成也会影响系统结构,如微程序控制。计算机实现是系统结构和组成的基础,特别是器件技术的发展对组成和结构有很大的影响。随着 VLSI 技术的进步,新器件的不断涌现,当今计算机系统结构的设计所面临的问题与 Amdahl 所处的时期大不相同,就是与 5 年前也大不相同。例如,20 世纪 80 年代在一个计算机系统中配置几十至