

普通高校本科计算机专业 **特色** 教材精选

# 计算机系统的体系结构

李学干 编著

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



清华大学出版社

普通高校本科计算机专业**特色**教材精选

# 计算机系统的体系结构

李学干 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统地讲述计算机系统的体系结构的基本概念、基本原理、基本结构、基本分析方法以及近年来的重要进展。

全书共分9章。第1章讲述计算机系统结构的基础知识;第2章讲述数据表示、寻址方式与指令系统;第3章讲述总线、中断与输入输出系统;第4章讲述并行主存与存储体系;第5章讲述重叠、流水和向量流水处理机;第6章讲述阵列处理机和相联处理机;第7章讲述多处理机;第8章讲述并行处理系统的发展;第9章讲述数据流机、归约机和智能机。

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,可作为计算机专业本科生和有关专业研究生的教材,也可作为科技人员的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机系统的体系结构/李学干编著. —北京:清华大学出版社,2006.1

(普通高校本科计算机专业特色教材精选)

ISBN 7-302-11362-9

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(2005)第077535号

出版者:清华大学出版社

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

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:张 民

文稿编辑:张为民

印刷者:北京密云胶印厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:22 字数:510千字

版 次:2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11362-9/TP·7478

印 数:1~5000

定 价:29.00元

## 编审委员会

主任：蒋宗礼

副主任：李仲麟 何炎祥

委员：(排名不分先后)

王向东 宁 洪 朱庆生 吴功宜 吴 跃

张 虹 张 钢 张为群 余雪丽 陈志国

武 波 孟祥旭 孟小峰 胡金初 姚放吾

原福永 黄刘生 廖明宏 薛永生

秘书长：王听讲

# 出版说明

INTRODUCTION

在我国高等教育逐步实现大众化后，越来越多的高等学校将会面向国民经济发展的第一线，为行业、企业培养各级各类高级应用型专门人才。为此，教育部已经启动了“高等学校教学质量和教学改革工程”，强调要以信息技术为手段，深化教学改革和人才培养模式改革。如何根据社会的实际需要，根据各行各业的具体人才需求，培养具有特色显著的人才，是我们共同面临的重大问题。具体地，培养具有一定专业特色的和特定能力强的计算机专业应用型人才则是计算机教育要解决的问题。

为了适应 21 世纪人才培养的需要，培养具有特色的计算机人才，急需一批适合各种人才培养特点的计算机专业教材。目前，一些高校在计算机专业教学和教材改革方面已经做了大量工作，许多教师在计算机专业教学和科研方面已经积累了许多宝贵经验。将他们的教研成果转化为教材的形式，向全国其他学校推广，对于深化我国高等学校的教学改革是一件十分有意义的事。

清华大学出版社在经过大量调查研究的基础上，决定编写出版一套“普通高校本科计算机专业特色教材精选”。本套教材是针对当前高等教育改革的新形势，以社会对人才的需求为导向，主要以培养应用型计算机人才为目标，立足课程改革和教材创新，广泛吸纳全国各地的高等院校计算机优秀教师参与编写，从中精选出版确实反映计算机专业教学方向的特色教材，供普通高等院校计算机专业学生使用。

本套教材具有以下特点：

## 1. 编写目的明确

本套教材是深入研究各地各学校办学特色的基础上，面向普通高校的计算机专业学生编写的。学生通过本套教材，主要学习计算机科学与技术专业的基本理论和基本知识，接受利用计算机解决实际问题的基本训练，培养研究和开发计算机系统，特别是应用系统的基本能力。

## 2. 理论知识与实践训练相结合

根据计算学科的三个学科形态及其关系,本套教材力求突出学科的理论与实践紧密结合的特征,结合实例讲解理论,使理论来源于实践,又进一步指导实践,学生通过实践深化对理论的理解,更重要的是使学生学会理论方法的实际运用。在编写教材时突出实用性,并做到通俗易懂,易教易学,使学生不仅知其然,知其所以然,还要会其如何然。

## 3. 注意培养学生的动手能力

每种教材都增加了能力训练部分的内容,学生通过学习和练习,能比较熟练地应用计算机知识解决实际问题。既注重培养学生分析问题的能力,也注重培养学生解决问题的能力,以适应新经济时代对人才的需要,满足就业要求。

## 4. 注重教材的立体化配套

大多数教材都将陆续配套教师用课件、习题及其解答提示,学生上机实验指导等辅助教学资源,有些教材还提供能用于网上下载的文件,以方便教学。

由于各地区各学校的培养目标、教学要求和办学特色均有所不同,所以对特色教学的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用教材的过程中,及时地给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。

我们相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也希望通过本套教材的编写出版,为“高等学校教学质量和教学改革工程”作出贡献。

清华大学出版社

# 前 言

PREFACE

计算机系统的体系结构简称为计算机系统结构，本书可作为计算机专业本科生和有关专业研究生的教材，也可作为计算机科学工作者的参考书。

本书系统地讲述计算机系统的体系结构的基本概念、基本原理、基本结构、基本分析方法以及近年来在这方面的重大进展。

全书共分 9 章。第 1 章讲述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，计算机系统的软硬件功能分配、性能评测与设计思路，软件、应用、器件的发展对系统结构的影响，系统结构中的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、优化和改进，RISC 技术。第 3 章讲述输入输出系统，总线、中断系统、通道处理机原理和流量分析，以及外围处理机。第 4 章讲述存储体系的概念和并行主存系统、虚拟存储器、Cache 存储器、主存保护。第 5 章讲述重叠、流水、向量流水机。第 6 章讲述阵列处理机的原理、并行算法、互连网络，脉动阵列机的原理和结构，相联处理机的组成、特点、结构和相联检索算法。第 7 章讲述多处理机的基本概念，要解决的技术问题（包括硬件结构、多 Cache 的一致性、并行算法、程序并行性分析、性能模型和操作系统等）。第 8 章讲述指令级高度并行的超标量处理机、超长指令字（VLIW）处理机、超流水线处理机以及超标量超流水线处理机的原理，并介绍了多向量多处理机、并行向量机、分布共享存储器多处理机、对称多处理机、大规模并行处理机（MPP）、机群系统等大型并行计算机的发展。第 9 章讲述数据流机、归约机和智能机。

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”的参考教学课时数为 60 学时，也可视情况适当增删。

本书由西安电子科技大学和西安欧亚学院李学干教授编著。清华大学出版社为本书的出版做了大量工作，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，恳切希望广大读者批评指正。

李学干

2005 年 9 月



# 目 录

CONTENTS

<b>第 1 章 计算机系统结构的基础知识</b> .....	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 .....	3
1.2.1 计算机系统结构、组成、实现的定义和内涵 .....	3
1.2.2 计算机系统结构、组成和实现的相互关系 .....	6
1.3 计算机系统的软硬件功能分配、性能评测与设计思路 .....	8
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
1.3.3 计算机系统的设计思路 .....	14
1.4 软件、应用、器件对系统结构的影响 .....	15
1.4.1 软件对系统结构的影响 .....	16
1.4.2 应用的发展对系统结构的影响 .....	20
1.4.3 器件的发展对系统结构的影响 .....	22
1.5 系统结构中的并行性发展和计算机系统的分类 .....	24
1.5.1 并行性概念 .....	24
1.5.2 计算机系统的分类 .....	29
习题 1 .....	32
<b>第 2 章 数据表示、寻址方式与指令系统</b> .....	35
2.1 数据表示 .....	35
2.1.1 数据表示与数据结构 .....	35
2.1.2 高级数据表示 .....	36
2.1.3 引入数据表示的原则 .....	42
2.1.4 浮点数尾数基值大小和下溢处理方法的选择 .....	43
2.2 寻址方式 .....	50
2.2.1 寻址方式分析 .....	50
2.2.2 程序在主存中的定位技术 .....	51

2.3 指令系统的设计和优化	54
2.3.1 指令系统设计的基本原则	54
2.3.2 指令操作码的优化	55
2.3.3 指令字格式的优化	58
2.4 指令系统的发展和改进	61
2.4.1 CISC 和 RISC	61
2.4.2 按 CISC 方向发展和改进指令系统	62
2.4.3 按 RISC 方向发展和改进指令系统	67
习题 2	74
<b>第 3 章 总线、中断与输入输出系统</b>	<b>77</b>
3.1 输入输出系统概述	77
3.2 总线设计	78
3.2.1 总线分类	78
3.2.2 总线的控制方式	79
3.2.3 总线的通信技术	81
3.2.4 数据宽度与总线线数	83
3.3 中断系统	85
3.3.1 中断的分类和分级	85
3.3.2 中断的响应次序与处理次序	87
3.3.3 中断系统的软硬件功能分配	90
3.4 通道处理机	91
3.4.1 工作原理	91
3.4.2 通道流量的分析	94
3.5 外围处理机	97
习题 3	98
<b>第 4 章 并行主存与存储体系</b>	<b>101</b>
4.1 存储体系的概念和并行主存系统	101
4.1.1 存储体系的引出	101
4.1.2 并行主存系统	102
4.1.3 存储体系的分支及构成依据	105
4.1.4 存储体系的性能参数	107
4.2 虚拟存储器	108
4.2.1 虚拟存储器的管理方式	108
4.2.2 页式虚拟存储器的构成	114
4.2.3 页式虚拟存储器实现中的问题	124
4.3 高速缓冲存储器	130

4.3.1	工作原理和基本结构	130
4.3.2	地址的映像与变换	132
4.3.3	Cache 存储器的 LRU 替换算法的硬件实现	137
4.3.4	Cache 存储器的透明性及性能分析	140
4.4	Cache—主存—辅存三级层次	145
4.5	主存保护	145
习题 4		148
<b>第 5 章</b>	<b>重叠、流水和向量流水处理机</b>	153
5.1	重叠方式	153
5.1.1	重叠原理与一次重叠	153
5.1.2	相关处理	156
5.2	流水方式	162
5.2.1	基本概念	162
5.2.2	标量流水线的主要性能	166
5.2.3	标量流水机的相关处理和控制机构	171
5.3	向量的流水处理与向量流水处理机	183
5.3.1	向量的处理和向量的流水处理	183
5.3.2	向量流水处理机的结构	185
5.3.3	提高向量流水处理性能的技术	186
习题 5		192
<b>第 6 章</b>	<b>阵列处理机和相联处理机</b>	195
6.1	阵列处理机的原理	195
6.1.1	阵列处理机的构形和特点	195
6.1.2	ILLIAC IV 的处理单元阵列结构	198
6.1.3	ILLIAC IV 的并行算法举例	198
6.2	SIMD 计算机的互连网络	202
6.2.1	互连网络的设计目标与互连函数	202
6.2.2	互连网络应抉择的几个问题	203
6.2.3	基本的单级互连网络	204
6.2.4	基本的多级互连网络	207
6.2.5	全排列网络	213
6.3	共享主存构形阵列机中并行存储器的无冲突访问	215
6.4	脉动阵列机	217
6.4.1	脉动阵列结构的原理	218
6.4.2	通用脉动阵列结构	220
6.5	相联处理机	221

6.5.1	相联处理机和相联存储器的组成	221
6.5.2	相联检索算法	224
习题 6		226
<b>第 7 章</b>	<b>多处理机</b>	229
7.1	多处理机的概念、问题和硬件结构	229
7.1.1	多处理机的基本概念和要解决的技术问题	229
7.1.2	多处理机的硬件结构	230
7.2	紧耦合多处理机多 Cache 的一致性问题的产生	241
7.2.1	多 Cache 的一致性问题的产生	241
7.2.2	多 Cache 的一致性问题的解决办法	242
7.3	多处理机的并行性	243
7.3.1	并行算法	243
7.3.2	程序并行性分析	246
7.3.3	并行语言与并行编译	248
7.4	多处理机的性能	253
7.4.1	任务粒度与系统性能	253
7.4.2	性能模型与分析	253
7.5	多处理机的操作系统	258
7.5.1	多处理机操作系统的难度和特点	258
7.5.2	多处理机操作系统的类型	260
习题 7		262
<b>第 8 章</b>	<b>并行处理系统的发展</b>	265
8.1	指令级高度并行的超级处理机	265
8.1.1	超标量处理机	265
8.1.2	超长指令字处理机	266
8.1.3	超流水线处理机	267
8.1.4	超标量超流水线处理机	268
8.2	大型并行计算机的发展	269
8.2.1	多向量多处理机	269
8.2.2	并行向量机	270
8.2.3	分布式共享存储器多处理机	270
8.2.4	对称多处理机	270
8.2.5	大规模并行处理机	271
8.2.6	机群系统	272
习题 8		273

<b>第 9 章 数据流机、归约机和智能机</b> .....	275
9.1 数据流计算机 .....	275
9.1.1 数据驱动的概念 .....	275
9.1.2 数据流程图和语言 .....	277
9.1.3 数据流计算机的结构 .....	282
9.1.4 数据流机器存在的问题 .....	283
9.2 归约机 .....	283
9.3 智能机 .....	286
9.3.1 智能信息处理与智能机 .....	286
9.3.2 智能机的结构 .....	286
9.3.3 逻辑程序设计语言 .....	288
9.3.4 智能计算机的进展 .....	289
习题 9 .....	290
<b>附录 A 各章习题的参考答案</b> .....	291
A1 习题 1 的参考答案 .....	291
A2 习题 2 的参考答案 .....	293
A3 习题 3 的参考答案 .....	300
A4 习题 4 的参考答案 .....	305
A5 习题 5 的参考答案 .....	313
A6 习题 6 的参考答案 .....	321
A7 习题 7 的参考答案 .....	325
A8 习题 8 的参考答案 .....	330
A9 习题 9 的参考答案 .....	332
<b>参考文献</b> .....	335

# 第 1 章

## 计算机系统结构的基础知识

CHAPTER

本章先从多级层次结构观点定义计算机系统结构,并说明结构、组成、实现三者的含义和关系。然后讲述计算机系统软、硬件功能分配原则、性能评测与设计思路,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和发展,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。

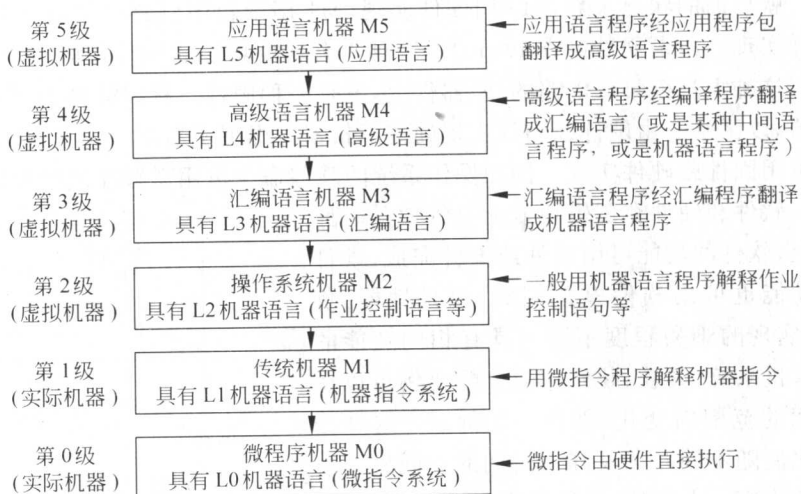


图 1-1 计算机系统的多级层次结构

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,可以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级机器级上的程序整个地转换成低级机器级上等效的程序,然后再在低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转换成等效的二进制机器语言(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、命令和数据结构,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。称以软件为主实现的机器为虚拟机器,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。

软件和硬件在逻辑功能上是等效的。原理上,软件的功能可用硬件或固件完成,硬件的功能也可用软件模拟完成,只是性能、价格、实现的难易程度不同。具有相同功能的计算机系统,其软、硬件功能分配比例可以在很宽的范围内变化,如图 1-2 所示。这种分配比例随不同时期及同一时期的不同机器动态地改变。由于软、硬件紧密相关,软硬界面常常是模糊不清的。例如,很难分清中断处理、存储管理等功能中哪些是硬件完成的,哪些是软件完成的。在满足应用的前提下,软、硬件功能分配的比例主要看能否充分利用

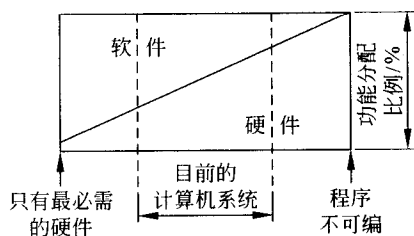


图 1-2 计算机系统的软、硬件功能分配比例



硬、器件技术的进展,使系统有高的性能价格比。因此,采用何种方式实现,应从系统的应用、效率、速度、造价、资源状况等多个方面综合考虑,对软件、硬件、固件取舍进行综合平衡。

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。既然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。IBM PC系列和VAX-11系列的指令、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很不相同,但高级语言程序员却看不到。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。系统结构设计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和格式等的表示;
- (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。

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和价格、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。