



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



21世纪大学本科  
计算机专业系列教材

王诚 宋佳兴 编著

# 计算机组成与体系结构 (第2版)

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

- 根据教育部“高等学校计算机科学与技术专业规范”组织编写
- 与美国 ACM 和 IEEE CS *Computing Curricula* 最新进展同步
- 国家精品课程教材



清华大学出版社



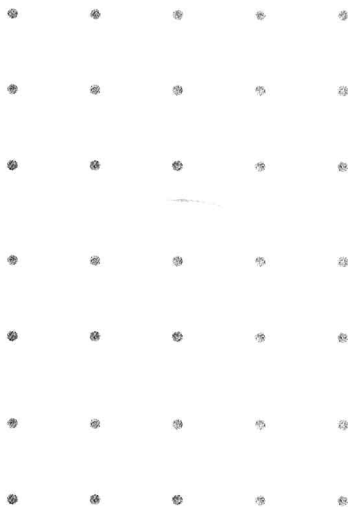
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪大学本科计算机专业系列教材

国家精品课程教材

# 计算机组成与体系结构 (第2版)

王诚 宋佳兴 编著



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书包括数字电路基础(先修部分)、计算机组成(主体部分)、计算机体系结构(提高部分)3个部分内容,共13章,重点讲解计算机系统的完整组成和提高性能的可行途径。作为教材,兼顾到计算机科学与技术专业中偏工程技术方向、偏软件方向的本科生,也可用于软件学院和计算机应用方向的学生。

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

计算机组成与体系结构 / 王诚,宋佳兴编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2011.6  
(21世纪大学本科计算机专业系列教材)

ISBN 978-7-302-26045-5

I. ①计… II. ①王… ②宋… 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(2011)第117279号

责任编辑:张瑞庆 李玮琪

责任校对:时翠兰

责任印制:李红英

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

字 数:508千字

版 次:2011年6月第2版

印 次:2011年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00元

---

产品编号:028721-01

## 21 世纪大学本科计算机专业系列教材编委会

名誉主任：陈火旺

主任：李晓明

副主任：钱德沛 焦金生

委员：（按姓氏笔画排序）

马殿富 王志英 王晓东 宁 洪 刘 辰

孙茂松 李大友 李仲麟 吴朝晖 何炎祥

宋方敏 张大方 张长海 周兴社 侯文永

袁开榜 钱乐秋 黄国兴 蒋宗礼 曾 明

廖明宏 樊孝忠

秘 书：张瑞庆

# 前 言

## FOREWORD

作为“21世纪大学本科计算机专业系列教材”，遵照本系列教材评审组专家的意见，本书包括了数字电路基础、计算机组成、计算机体系结构3个部分内容。本书读者对象主要是学习计算机课程的大学生，包括计算机系的学生、软件学院的学生和非计算机专业选修计算机课程的学生。可以根据不同的课程和教学要求，合理分配本教材中3部分内容的课时比例。全书共13章，其中第2章属于先修内容，约占教材总量的7%，若是学生课前未曾学习过数字电路与逻辑设计课程，还是应该用少量学时对教材第2章的内容进行适当讲解；第3~11章是课程的主体部分，约占教材总量的73%，主要是计算机组成方面的知识，重点围绕基本计算机硬件系统5个功能部件的功能和组成进行讲解分析；第12~13章是本课程的提高部分，约占教材总量的20%，主要是计算机体系结构方面的基础知识，重点介绍提高计算机系统性能的各种可行思路与基本途径。其中的指令流水线的浅显内容已经出现在计算机组成原理课程之中，但多数人还是愿意把较为具体深入的指令流水技术安排到计算机系统结构课程中讲授。

针对把计算机组成和系统结构合并成一门课程的情形，教材第3~13章的内容都属于必学知识，建议教学学时安排为70~90学时。若只是用于计算机组成原理课程，计算机体系结构的内容另外开课，则只需讲解第3~11章中的知识，建议教学学时安排为60~70学时。教材主体部分的内容是按照基本通用原理、简明原理示例、典型产品现状这样3个层次来处理的。

基本通用原理是基础，是学习与理解计算机组成与运行机制的核心知识。其特点是稳定性（不随时间变迁而改变）和通用性（不随具体机型而变化），是学生一定要掌握的部分。要把通用原理转化成真实的计算机系统，还有许多技术与工程、性能价格比的平衡关系等需要解决。

在简明原理示例这个层次，强调运用学习到的基本原理知识，学懂或者设计实现一台硬软件基本完整、实现简单（易懂、价廉）、但不一定是最理想（不追求更完备的性能、更好的实用价值）的计算机系统的技术与过程，增加对所学知识的理解深度和应用能力，力求把学习和增长实践能力结合起来。

在典型产品现状这个层次，将选择某些典型计算机系统实例，给出其设计实现的结果及其外特性，可以体现用到的基本原理，更强调让学生了解计算机当前的技术水平和发展现状。对三个层次的教学要求不尽相同，对优化学生的知识结构各自发挥不同的作用。

在讲解计算机组成和功能时,把通常的文字叙述和语言 VHDL 描述结合起来,体现计算机的最新设计手段和实现技术,保证教学内容的先进性,并尽量在提高授课质量,降低实验、学习的难度方面做出新的探索。

教材内容具体安排如下。

第1章是全书内容的概述部分,简要介绍计算机组成和体系结构的基本概念,从实现功能的角度来讲解计算机硬件系统的基本组成;从功能和层次的观点来讲解计算机组成和体系结构各自需要研究和解决的问题,并简要说明了本课程的教学目标和对学习方法的建议。

第2章简明讲解数字电路基础知识和几种常用的电路芯片,是为讲解计算机组成和体系结构作电子线路方面的准备,没有这些知识是很难学懂计算机硬件的组成和运行原理的。

第3章的数据表示和运算和第4章的运算器部件共同构成本书核心内容的第1个知识单元。主要围绕计算机硬件系统中承担数据运算功能的部件进行讲解,在给出通用的基本原理知识的同时,还给出运算器部件的具体例子,展示运算器部件的设计过程和实现方法,提升学生的实践能力。

第5章的指令系统和第6章的控制器部件共同构成本书核心内容的第2个知识单元。主要围绕计算机硬件系统中承担指挥控制功能的硬连线方案的控制器部件进行讲解,而对微程序控制器只作适当介绍。在给出通用的基本原理知识的同时,还给出控制器部件的具体例子,展示控制器部件的设计过程和实现方法,提升学生的实践能力。

第7章的主存、第8章的高速缓存和虚存以及第9章的辅助存储器设备共同构成本书核心内容的第3个知识单元。主要围绕计算机3级结构的存储器件系统和外存储器设备进行讲解,还给出了通过字、位扩展技术,用存储器芯片构建内存存储器的具体例子。

第10章的输入输出设备和第11章的输入输出系统共同构成本书核心内容的第4个知识单元。主要围绕承担计算机的输入输出功能的设备或者部件进行讲解,给出了用于连接计算机各个部件的总线构成的实际例子,具体介绍了串行接口的内部线路的组成和使用方法。

第12章的流水线技术和第13章的并行计算机体系结构共同构成本书核心内容的第5个知识单元。对应计算机体系结构课程的主要知识,针对提高计算机系统的性能,更多地强调基本概念、提出问题的思路和解决问题的方案,基本上止步于定性说明。

通过本教材,学生可以学到数字电路的基础知识,了解某些电路芯片的功能和用法,初步认识到某些逻辑功能是能够使用数字电路实现的;可以从层次的观点,掌握必要的基础知识,计算机组成和运行机制方面的知识,以及必要的专业知识基础,为下一步的学习和进一步提高实际工作能力做好准备;可以从系统的观点,了解计算机体系结构领域的基本知识,理解提高计算机的部件和整机硬件性能的各种可行途径,理解计算机系统中硬件、软件的功能划分和相互配合关系,能站在更高的层次上思考与解决学习、工作中遇到的问题。

为方便教学,本教材配有 PowerPoint 电子教案。除此之外,还有硬件实现的教学计算机设备,这个设备就是选用本教材第1~4个知识单元的实际例子组合而成的,确保课堂授课内容和教学实验项目能够完美结合。还有内容详尽的教学实验指导书和通过软件模拟实现的相同功能的模拟系统。良好的教学实践环境和实验条件,能够有效地加深对课堂教学内容的理解,并使得学生在一定程度上获得开展研究工作和计算机硬件系统设计的实际经

验,全面提高解决实际问题和创新思维的能力。

本书的第1~6章由王诚教授修订,第7~13章由宋佳兴副教授修订,作者有多年从事本专业教学和科研工作的经历。

由于时间和作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2011年4月于清华大学计算机科学与技术系

# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 计算机系统概述</b> .....	1
1.1 计算机系统的基本组成及其层次结构 .....	1
1.2 计算机硬件的 5 个功能部件及其功能 .....	4
1.3 计算机系统主要的技术与性能指标 .....	7
1.4 计算机的体系结构、组成和实现概述 .....	9
1.5 计算机发展进步、分类和拓展应用的进程 .....	10
本章内容小结和学习方法建议 .....	13
习题与思考题 .....	14
<b>第 2 章 数字电路基础和常用器件</b> .....	15
2.1 数字电路的基本元件 .....	15
2.1.1 晶体二极管与三极管 .....	15
2.1.2 应用案例 .....	16
2.2 数字电路基础及其相关处理方法 .....	18
2.2.1 3 种基本逻辑关系 .....	18
2.2.2 逻辑函数及其描述方法 .....	21
2.2.3 逻辑函数的特性、规则与应用 .....	22
2.3 组合逻辑电路及时序逻辑电路 .....	23
2.3.1 常用逻辑门器件 .....	23
2.3.2 时序逻辑电路 .....	26
2.3.3 存储器芯片简介 .....	30
2.3.4 几个专用功能器件和存储器芯片的引脚图 .....	30
2.4 现场可编程逻辑器件及其应用 .....	31
2.4.1 现场可编程器件概述 .....	31
2.4.2 CPLD 和 FPGA 的编程与应用 .....	34
本章内容小结和学习方法建议 .....	35
习题与思考题 .....	35



<b>第3章 数据表示、运算算法和线路实现</b> .....	37
3.1 数字化信息编码的概念和二进制编码知识 .....	37
3.1.1 数字化信息编码的概念 .....	37
3.1.2 二进制编码和码制转换 .....	38
3.1.3 检错纠错码 .....	44
3.2 数据表示 .....	48
3.2.1 逻辑类型数据的表示 .....	48
3.2.2 字符类型数据的表示 .....	48
3.2.3 多媒体信息编码 .....	51
3.2.4 数值类型数据的表示 .....	53
3.3 二进制数值数据的编码方案与运算算法 .....	58
3.3.1 原码、反码、补码的定义 .....	58
3.3.2 补码加、减运算规则和电路实现 .....	62
3.3.3 原码一位乘法、除法的实现方案 .....	64
3.3.4 实现乘法、除法的其他方案 .....	69
本章内容小结和学习方法建议 .....	74
习题与思考题 .....	75
<b>第4章 运算器部件</b> .....	77
4.1 算术逻辑运算单元的功能设计与线路实现 .....	77
4.2 定点运算器 .....	79
4.2.1 定点运算器部件的功能、组成与控制概述 .....	79
4.2.2 运算器芯片 Am2901 实例与使用 .....	80
4.2.3 MIPS 多指令周期 CPU 系统的运算器的组成及其功能 .....	84
4.2.4 简化 TEC-2000 计算机的运算器部件的功能、组成与设计 .....	85
4.3 浮点运算和浮点运算器 .....	91
4.3.1 浮点数的运算规则 .....	91
4.3.2 浮点运算器举例 .....	95
本章内容小结和学习方法建议 .....	97
习题与思考题 .....	98
<b>第5章 指令系统和汇编语言程序设计</b> .....	101
5.1 指令格式和指令系统概述 .....	101
5.1.1 指令的定义和指令格式 .....	101
5.1.2 操作码的组织与编码 .....	102
5.1.3 操作数的指定与使用 .....	103
5.1.4 指令的分类 .....	104
5.1.5 指令周期及其对计算机性能和硬件结构的影响 .....	105

5.2	基本寻址方式概述 .....	107
5.3	指令系统举例 .....	109
5.3.1	Pentium II 计算机的指令系统 .....	110
5.3.2	MIPS32 计算机的指令系统 .....	112
5.3.3	PDP-11 计算机的指令系统 .....	113
5.3.4	TEC-2000 计算机的指令系统 .....	115
5.4	TEC-2000 计算机的汇编语言程序设计 .....	118
5.4.1	汇编语言及其程序设计中的有关概念 .....	118
5.4.2	教学计算机的汇编程序设计举例 .....	120
	本章内容小结和学习方法建议 .....	125
	习题与思考题 .....	126
<b>第 6 章</b>	<b>控制器 .....</b>	<b>128</b>
6.1	控制器的功能与组成概述 .....	128
6.2	硬连线控制器 .....	129
6.2.1	硬连线控制器的组成和运行原理简介 .....	130
6.2.2	MIPS32 计算机的控制器简介 .....	131
6.2.3	TEC-2000 和 TH-FPGA 计算机控制器概述 .....	136
6.2.4	简化 TEC-2000 的 CPU 系统的设计 .....	146
6.3	微程序控制器部件 .....	157
6.3.1	微程序控制器的基本组成和运行原理 .....	157
6.3.2	微程序设计中的下地址形成逻辑和微程序设计 .....	160
	本章内容小结和学习方法建议 .....	163
	习题与思考题 .....	164
<b>第 7 章</b>	<b>多级结构存储器系统和主存储器 .....</b>	<b>168</b>
7.1	存储器系统概述 .....	168
7.1.1	存储器分类 .....	168
7.1.2	存储器系统目标 .....	169
7.1.3	多级结构存储器系统 .....	171
7.2	主存储器 .....	172
7.2.1	主存储器概述 .....	172
7.2.2	动态存储器的存储原理 .....	174
7.2.3	静态存储器的存储原理 .....	175
7.2.4	存储器容量扩展 .....	176
7.3	教学计算机的主存储器实例 .....	178
7.4	提高主存储器性能的途径 .....	181
	本章内容小结和学习方法建议 .....	183
	习题与思考题 .....	183

<b>第 8 章 高速缓冲存储器和虚拟存储器</b> .....	185
8.1 高速缓冲存储器 .....	185
8.1.1 Cache 的运行原理 .....	185
8.1.2 Cache 的 3 种映像方式 .....	187
8.1.3 Cache 实用中的问题 .....	189
8.2 虚拟存储器部件 .....	192
8.2.1 虚拟存储器的概念介绍 .....	192
8.2.2 段式存储管理 .....	192
8.2.3 页式存储管理 .....	193
本章内容小结和学习方法建议 .....	195
习题与思考题 .....	195
<b>第 9 章 外部存储器设备</b> .....	198
9.1 外存设备概述 .....	198
9.1.1 主要技术指标 .....	198
9.1.2 磁记录原理与记录方式 .....	199
9.2 磁盘设备 .....	201
9.2.1 磁记录介质 .....	201
9.2.2 磁盘驱动器 .....	202
9.2.3 磁盘控制器 .....	203
9.3 磁盘阵列 .....	204
9.4 光盘设备 .....	207
9.4.1 只读光盘 .....	207
9.4.2 可刻光盘 .....	208
9.4.3 可擦写光盘 .....	210
9.4.4 DVD .....	210
9.4.5 Blu-Ray .....	211
本章内容小结和学习方法建议 .....	211
习题与思考题 .....	211
<b>第 10 章 输入输出设备</b> .....	212
10.1 输入输出设备概述 .....	212
10.2 常用的输入设备 .....	213
10.3 常用的输出设备 .....	215
10.3.1 点阵式输出设备基本原理 .....	215
10.3.2 显示器的组成和运行原理 .....	216
10.3.3 打印机的组成和运行原理 .....	220
10.3.4 计算机终端 .....	223

本章内容小结和学习方法建议·····	224
习题与思考题·····	224
<b>第 11 章 输入输出系统</b> .....	<b>225</b>
11.1 计算机输入输出系统概述·····	225
11.2 计算机总线·····	226
11.2.1 总线概述·····	226
11.2.2 总线结构·····	228
11.2.3 总线宽度·····	229
11.2.4 总线时钟·····	230
11.2.5 总线仲裁·····	232
11.2.6 总线举例·····	234
11.3 输入输出接口·····	240
11.3.1 输入输出接口的功能·····	240
11.3.2 通用可编程接口组成·····	240
11.3.3 输入输出接口举例·····	241
11.4 输入输出方式·····	244
11.4.1 程序直接控制方式·····	244
11.4.2 程序中断传送方式·····	244
11.4.3 直接存储器访问方式·····	247
11.4.4 I/O 通道控制方式·····	249
11.4.5 外围处理机方式·····	249
本章内容小结和学习方法建议·····	249
习题与思考题·····	250
<b>第 12 章 流水线技术</b> .....	<b>252</b>
12.1 流水线的概念·····	252
12.1.1 流水线的概念·····	252
12.1.2 流水线的表示方法·····	254
12.1.3 流水线的特点·····	255
12.1.4 流水线的分类方法·····	256
12.2 流水线的性能指标·····	259
12.2.1 流水线的吞吐率·····	259
12.2.2 流水线的加速比·····	262
12.2.3 流水线的效率·····	262
12.2.4 流水线的最佳段数·····	263
12.3 DLX 指令集与 DLX 流水线·····	263
12.3.1 DLX 指令集结构介绍·····	263
12.3.2 DLX 的一种简单实现·····	268

12.3.3	DLX 流水线的实现原理 .....	270
12.4	流水线中的相关问题 .....	273
12.4.1	结构相关 .....	273
12.4.2	数据相关 .....	275
12.4.3	控制相关 .....	281
12.5	指令级并行技术 .....	285
12.5.1	基本概念 .....	285
12.5.2	多指令发射技术 .....	286
	本章内容小结和学习方法建议 .....	289
	习题与思考题 .....	289
<b>第 13 章</b>	<b>并行计算机体系结构 .....</b>	<b>291</b>
13.1	并行计算机体系结构概述 .....	291
13.1.1	计算机体系结构的发展 .....	291
13.1.2	计算机体系结构的分类 .....	292
13.1.3	并行计算机体系结构分类 .....	294
13.2	并行计算机系统的设计问题 .....	295
13.2.1	并行计算机系统的互联网络 .....	295
13.2.2	并行计算机系统的性能问题 .....	300
13.2.3	并行计算机系统的软件问题 .....	302
13.3	SIMD 计算机简介 .....	303
13.3.1	阵列处理机 .....	303
13.3.2	向量处理机 .....	304
13.4	共享内存的多处理机系统 .....	306
13.4.1	一致性内存访问的 UMA 多处理机系统 .....	307
13.4.2	非一致性内存访问的 NUMA 多处理机系统 .....	312
13.4.3	基于 Cache 内存访问的 COMA 多处理机系统 .....	314
13.5	基于消息传递的多计算机系统 .....	314
13.5.1	大规模并行处理机 .....	316
13.5.2	工作站集群 .....	316
	本章内容小结和学习方法建议 .....	317
	习题与思考题 .....	318
<b>主要参考书 .....</b>	<b>.....</b>	<b>319</b>

# 第 1 章

## 计算机系统概述

本章首先介绍计算机系统的基本组成和它的层次结构,使读者从层次的观点,初步认识完整计算机系统硬件与软件的基本组成,重点集中到计算机硬件的 5 个功能部件各自分担的功能及其相互的连接关系。接下来初步讨论计算机系统主要的性能和技术指标。之后对计算机硬件子系统的 3 部分知识,即计算机的体系结构、计算机组成和计算机实现进行说明,指明它们之间的联系与区别,帮助读者把握学习本门课程的主脉络。最后是计算机的发展过程,计算机系统的分类和推广应用的状况。

本章作为学习计算机组成原理和体系结构课程的引导性的提纲,介绍了计算机系统的一些基本概念和常用术语,希望读者能够从硬件和软件、整机和部件、知识和能力等多种对应关系的角度来提高自己的学习质量。

### 1.1 计算机系统的基本组成及其层次结构

计算机系统(Computer System)是指电子数字通用计算机系统,3 个定语各自表明了计算机系统的一个方面的特性。“电子”一词表明使用电子线路(不同于机械、继电器等)来实现计算机硬件的关键逻辑功能;“数字”一词表明使用的电子线路是数字式电路(不同于模拟电路),运算和处理的数据是二进制的离散数据(不同于连续的电压或电流量);“通用”一词表明计算机本身的功能多样性(不是专用于某种特定功能),具有完成各种运算或事物处理的能力。

完整的计算机系统是由硬件(Hardware)和软件(Software)两大部分(两类资源)组成的。计算机的硬件系统是计算机系统中看得见、摸得着的物理设备,是一种高度复杂的、由多种电子线路、精密机械装置等构成的、能自动并且高速地完成数据计算与处理的装置或者工具。计算机的软件系统是计算机系统内的程序和相关数据。其包括完成计算机资源管理、方便用户使用的系统软件(厂家提供)和完成用户对数据的预期处理功能的用户软件(用户设计并自己使用)这样两大部分。软硬件二者相互依存,分工互动,缺一不可,硬件是计算机系统中保存与运行软件程序的物质基础,软件则是指挥硬件完成预期功能的智力部分,正如一个健全和健康的人一样,必须同时具备物质性的肉体和精神性的智力与思维。

若进一步深入分析,还可以通过 6 个层次来认识计算机硬件和软件系统的组成关系,如图 1.1 所示。最下面的 2 层属于硬件内容,最上面的 3 层属于软件内容,中间的指令系统层

连接硬件和软件两部分,与两部分都有密切关系。

从图 1.1 中可以看出,计算机系统具有 6 层结构。在不同层次之间的关系表现为以下两个方面。

(1) 处在上面的一层是在下一层的基础上实现出来的,它实现的功能更强大,也就是说,更接近于人类解决问题的思维方式和处理问题的具体过程,对使用人员更方便,使用这一层提供的功能时,不必关心其下一层的实现细节。

(2) 处在下面的一层是实现上一层的基础,更接近计算机硬件实现的细节。它实现的功能相对简单,人们使用这些功能更感到困难。在实现这一层的功能时,可能尚无法了解其上一层的最终目标和将要解决的问题,也不必理解其更下一层实现中的有关细节问题,只要使用下一层所提供出来的功能来完成本层次的功能处理即可。

采用这种分层次的方法来分析 and 解决某些问题,有利于简化处理问题的难度。在某一段时间,在处理某一层中的问题时,只需集中精力解决当前最需要关心的核心问题即可,而不必牵扯各上下层中的其他问题。例如,在用高级语言设计程序时,无需深入了解各低层的内容。

(1) 第 0 个层次是数字逻辑层,着重体现实现计算机硬件的最重要的物质材料是电子线路,能够直接处理离散的数字信号。设计计算机硬件的基础知识就是数字逻辑和数字门电路,解决的基本问题包括:使用何种线路和如何存储信息,使用何种线路和如何传送信息,使用何种线路和如何运算与加工信息等方面。这一部分属于计算机组成原理预备性的知识。

(2) 第 1 个层次是微体系结构(Micro Architecture)层,也称其为计算机裸机。计算机的核心功能是执行程序,程序是按一定规则和顺序组织起来的指令序列。这个层次着重体现的是,为了执行指令,需要在计算机中设置哪些功能部件(例如存储、运算、输入和输出、接口和总线等部件,当然还有更复杂一点的控制器部件),每个部件具体如何组成和怎样运行,这些部件如何实现相互连接并协同工作等方面的知识和技术。计算机硬件系统通常由运算器部件(数据通路)、控制器部件、存储器部件、输入设备和输出设备这 5 个部分组成,这些部分是计算机组成原理的主要内容。

(3) 第 2 个层次是指令系统(Instruction Set)层,介于硬件和软件之间。它涉及需要确定使用哪些指令;指令能够处理的数据类型和对各种类型数据可以执行的运算;每一条指令的格式和实现的功能;如何指出想要对其执行读操作或者写操作的存储器的一个存储单元;如何指出想要执行输入或者输出操作的一个外围设备;对哪些数据进行运算,执行哪一种运算;如何保存计算结果等。指令系统是计算机硬件系统设计、实现的最基本和最重要的依据,与计算机硬件实现的复杂程度、设计程序的难易程度、程序占用硬件资源的多少、程序运行的效率等都直接相关。也就是说,硬件系统就是要实现每一条指令的功能,能够直接识别和执行由指令代码组成的程序。当然,指令系统与计算机软件的关系也十分密切。指令是用于设计软件程序的。节省硬件资源和有利于提高程序运行效率是对指令系统的主要要

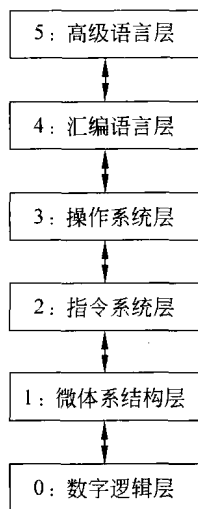


图 1.1 计算机系统层次结构

求。在计算机内部,全部的程序最终都由指令系统所提供的指令代码组成,计算机硬件能够直接识别和执行的只能是由指令代码组成的程序。一台计算机的指令系统对计算机厂家和用户来说都是很重要的事情,需要非常认真仔细地分析和对待。指令系统设计属于计算机系统结构的范围,合理选择可用的线路实现每一条指令的功能则是计算机组成的主要任务。

(4) 第 3 个层次是操作系统(Operating System)层。它是计算机系统最重要的软件。其主要负责计算机系统资源的管理与分配,以及向使用者和程序设计人员提供简单、方便、高效的服务。一套计算机系统中包含了大量高价的、管理和使用相当复杂的硬件资源和软件资源。不仅一般水平的使用人员,就是水平很高的专业人员都难以直接控制和操作,因此把资源管理和调度功能留给计算机系统本身来完成更可靠,这些功能是由操作系统来完成的。操作系统还为使用计算机的用户提供了许多支持。它与程序设计语言相结合,使得程序设计更简单,创建用户的应用程序和操作计算机也更方便。它是使用(直接或者间接)计算机指令系统所提供的指令设计出来的程序,并把一些常用功能以操作命令或者系统调用的方式提供给使用人员。也可以说,操作系统进一步扩展了原来的指令系统,提供了新的可用命令,从而构成一台比起纯硬件系统(计算机裸机)功能更加强大的计算机系统。操作系统不属于计算机组成的范围,在计算机专业的教学安排中应该设置这门软件课程。

(5) 第 4 个层次是汇编语言(Assembly Language)层。计算机是由人指挥控制,供人使用的电子设备。使用计算机的人员要有办法把自己的意图告知给计算机,为完成这种“对话”,就需要使用某种语言。遗憾的是,计算机还不能(至少目前尚不能低成本的实现)听懂人类的自然语言,更无法执行人类自然语言的全部命令。最简单的解决办法是让计算机使用它的硬件可以直接识别、理解的,用电子线路容易处理的一种语言,这就是计算机的机器语言,又称为二进制代码语言,也就是计算机的指令。一台计算机的全部指令构成该计算机的指令系统(Instruction Set)。由此可以看出,实质上计算机的基础硬件是在机器语言的层次上被设计与实现出来的,并且可以直接识别和执行的只能是由机器语言构成的程序。这样做的结果,计算机一方的矛盾是解决了,但是使用计算机的人员却很难接受并使用这种语言。为此,必须找出一种折中方案,使人员使用和计算机实现都更容易一点,这就要用到汇编语言和高级程序设计语言以及各种专用目的的语言。

汇编语言(Assembly Language)大体上是对计算机机器语言的符号化处理的结果,再增加一些为方便程序设计而实现的扩展功能。与机器语言相比,汇编语言至少有 2 大优点。首先实现用英文单词或其缩写形式替代二进制的指令代码,更容易为人们记忆和理解;其次是可以选用含义明确的英文单词来表示程序中用到的数据(常量和变量),并且避免程序设计人员亲自花费精力为这些数据分配存储单元,而是将这些工作留给汇编程序自己去安排,这样的语言就达到了实用的最基本的标准。如果在此基础上,再支持程序的不同结构特性(如循环和重复执行等结构),将子程序所用哑变元替换为真实参数等方面提供必要的支持,使用这个语言设计程序就更为方便。因此,汇编语言是面向计算机硬件本身的、程序设计人员可以使用的一种计算机语言。汇编语言的程序必须经过一个叫做汇编程序的系统软件的翻译,将其转换为计算机的机器语言后,才能在计算机的硬件系统上予以执行。由于汇编语言和机器语言存在十分紧密的对应关系,在教授和学习计算机组成原理课程时,通常应使用汇编语言来设计实例程序。



(6) 第5个层次是高级语言层,高级语言又称算法语言(Algorithm Language)。它的实现思路不再是过分地“靠拢”计算机硬件的指令系统,而是着重面向解决实际问题所用的算法,更多的是为方便程序设计人员写出自己解决问题的处理方案和解题过程的程序。目前常用的高级语言有C、C++、PASCAL、Java、BASIC等。用这些语言设计出来的程序通常需要经过一个叫做编译程序的软件将其编译成机器语言程序,或者首先编译成汇编程序后,再经过汇编操作后得到机器语言程序,才能在计算机的硬件系统上予以执行。也可以由一个叫做解释执行程序的软件逐条取来相应高级语言程序的每个语句并直接控制其执行过程,而不是把整个程序编译为机器语言程序之后再交给硬件系统加以执行。解释执行程序的最大缺点是运行效率比很低。高级语言不属于计算机组成课程的范围。

在高级语言层之上,还可以有应用层,由解决实际问题的处理程序组成,例如文字处理软件、数据库软件、网络软件、多媒体信息处理软件、办公自动化软件等。但这些内容已经超出了本书的讨论范围,不在这里赘述,换句话说,计算机是用于解决各种应用问题的系统,为有应用而存在,通过处理各种应用问题而体现出它的性能和价值。

在大部分的教材中,人们通常把没有配备软件的纯硬件系统称为“裸机”。这是计算机系统的根基或称“内核”。它的设计目标更多地集中到方便硬件实现和有利于降低成本两个方面,因此提供的功能相对较弱,只能执行由机器语言构成的程序,非常难以使用。为此,人们期望能开发出功能更强、更接近人的思维方式和使用习惯的语言。这是通过在裸机上配备适当的软件来完成的。每加一层软件就构成一个新的“虚拟计算机”,功能更强大,使用也更加方便。例如,配备了操作系统之后,就可以通过操作系统的命令(Command)或者窗口上的图标方便地操作使用这个新的虚拟机系统;再配备上汇编语言,用户就可以用它来编写用户程序,实现用户预期的处理功能;配备了高级语言之后,用户就可以用它来更方便高效地编写程序,解决处理规模更为庞大、逻辑关系更加复杂的问题。例如,可以把前面说明的计算机系统中的第1~5层分别称为裸机、 $L_1$ 虚拟机(支持机器语言)、 $L_2$ 虚拟机(增加了操作系统)、 $L_3$ 虚拟机(支持汇编语言)、 $L_4$ 虚拟机(支持高级语言)。

## 1.2 计算机硬件的5个功能部件及其功能

计算机系统的核心功能是执行程序。为此,首先必须有能力把要运行的程序和用到原始数据输入到计算机内部并存储起来,接下来应该有办法逐条执行这个程序中的指令以完成数据运算并得到运算结果,最后还要把运算结果输出以供人检查和使用。为此,一套计算机的硬件系统至少需要由下述几个相互连接在一起的部件和设备组成,如图1.2所示。

在图1.2中通过5个方框图给出了计算机硬件的5个基本功能部件。其中的4个部件所分担的功能,通过方框中的文字说明已经表示出来。例如,数据输入设备完成对程序和原始数据的输入功能;数据存储部件完成对程序和数据的存储功能;数据运算部件完成对数据的运算处理功能;结果输出部件完成对运算处理结果的输出功能。而控制器部件则是依照每条指令的运行功能的需要,向各个部件或设备提供它们协调运行所需要的控制信号,在整个硬件系统中起到指挥、协调和控制的作用。

可以把计算机想象为一个加工、处理数据的工厂,则数据运算部件就是数据加工车间;数据存储部件就是存放原材料、半成品和最终产品的库房;输入设备相当于运入原材料的运