

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术

# 计算机组成原理

谷赫 邹凤华 李念峰 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术

# 计算机组成原理

谷赫 邹凤华 李念峰 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机各组成部件的工作原理、逻辑实现、设计方法,以及相互连接构成整机系统的相关问题。全书共分为8章:计算机系统概论,运算方法和运算器,内部存储器,指令系统,中央处理器,总线系统,外围设备,输入输出系统。

本书概念清晰、深入浅出、通俗易懂,同时又具有一定的理论高度,贴近当前的新技术和新思想,内容安排符合教学规律,具有广泛的适应层面。书中例题由浅入深,具有实用性、典型性,并力求与当代计算机技术紧密结合。

本书可作为工科院校专科生、本科生计算机专业教材,也可作为其他科技人员的参考书。

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

计算机组成原理/谷赫等编著.--北京:清华大学出版社,2012

21世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术

ISBN 978-7-302-29675-1

I. ①计… II. ①谷… III. ①计算机组成原理—高等学校—教材 IV. ①TP301

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第184705号

责任编辑:郑寅堃 薛 阳

封面设计:傅瑞学

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

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.5 字 数:451千字

版 次:2013年1月第1版 印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:29.50元

# 编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学

周立柱 教授  
覃 征 教授  
王建民 教授  
冯建华 教授  
刘 强 副教授

北京大学

杨冬青 教授  
陈 钟 教授  
陈立军 副教授

北京航空航天大学

马殿富 教授  
吴超英 副教授  
姚淑珍 教授

中国人民大学

王 珊 教授  
孟小峰 教授  
陈 红 教授

北京师范大学

周明全 教授

北京交通大学

阮秋琦 教授

北京信息工程学院

赵 宏 副教授

北京科技大学

孟庆昌 教授

石油大学

杨炳儒 教授

天津大学

陈 明 教授

复旦大学

艾德才 教授

吴立德 教授

吴百锋 教授

杨卫东 副教授

同济大学

苗夺谦 教授

华东理工大学

徐 安 教授

华东师范大学

邵志清 教授

杨宗源 教授

东华大学

应吉康 教授

乐嘉锦 教授

孙 莉 副教授

浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
扬州大学	李 云	教授
南京大学	骆 斌	教授
	黄 强	副教授
南京航空航天大学	黄志球	教授
	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授
南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	王宜怀	教授
	陈建明	副教授
江苏大学	鲍可进	教授
中国矿业大学	张 艳	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	叶俊民	教授
	郑世珏	教授
	陈 利	教授
江汉大学	颜 彬	教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	邹北骥	教授
中南大学	刘卫国	教授
湖南大学	林亚平	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
长安大学	巨永锋	教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
厦门大学	冯少荣	教授
厦门大学嘉庚学院	张思民	教授
云南大学	刘惟一	教授
电子科技大学	刘乃琦	教授
	罗 蕾	教授
成都理工大学	蔡 淮	教授
	于 春	副教授
西南交通大学	曾华燊	教授

# 出版说明

---

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

- (1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。
- (2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。
- (3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。
- (4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。
- (5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。
- (6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。
- (7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。
- (8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: [weijj@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:weijj@tup.tsinghua.edu.cn)

“计算机组成原理”是高等学校计算机科学与技术专业及其他相关专业的一门核心专业基础课程,也是非计算机专业的学生学习和掌握计算机应用技术的一门专业基础课程。从课程地位来说,它在先导课和后继课之间起着承上启下的作用。2009年起,“计算机组成原理”成为计算机类专业研究生入学考试的全国统考课程,更加奠定了该课程的核心地位。为适应人才培养和研究生入学考试的需要,本书以全国硕士研究生入学统一考试中“计算机组成原理”综合考试大纲为依据,在参考国内外高校使用的教材和文献的基础上,结合作者多年教学经验编写而成。该教材着力于提高大学生的学习能力、实践能力和创新能力,培养造就具有较强综合能力的人才,通过本教材的学习,学生能够比较系统地掌握计算机的组成结构和工作原理,能够运用所学的基本原理和方法分析、判断和解决相关理论和实际问题。

本教材共分为8章,各章内容如下。

第1章 计算机系统概论,介绍了计算机的分类、发展及层次结构,并对冯·诺依曼机硬件结构中的各组成部分进行了概要介绍,为以后章节的学习打下了基础。

第2章 运算方法和运算器,从数的表示格式出发,详细介绍了机器码的表现形式,定点数与浮点数的表示,二进制的运算法则以及运算器的组成。

第3章 内部存储器,介绍了存储器的分类、层次结构和技术指标,主存储器工作原理,存储器与CPU的连接方法,并行存储器,高速缓冲存储器,以及由各种存储器组成多级存储系统的工作原理。

第4章 指令系统,主要介绍了指令格式及指令的寻址方式,常见指令的分类、CISC和RISC指令的特点。

第5章 中央处理器,CPU设计是计算机组成原理课程中的重要组成部分,本章介绍了中央处理器CPU的组成及其功能、指令的执行过程、时序及微操作信号的产生,并对控制器的组合逻辑实现方法和微程序实现方法进行了说明,通过这一章的学习,读者可以形成CPU的完整概念和设计方法。

第6章 总线系统,介绍了总线的概念与分类、输入输出的基本控制方式、计算机总线、主机与外围设备之间的连接方式。

第7章 外围设备,介绍了除CPU与存储器以外的常用外围设备的工作原理。

第8章 输入输出系统,介绍了输入输出的基本控制方式,各方式的特点及逻辑实现方法。

本课程的参考教学时数为60~70学时。在教学顺序上,可按编写顺序教授,即计算机如何运算、如何存储信息、如何执行指令、如何连接I/O子系统以构成整机系统;也可将内部存储器一章放在CPU之后讲授,即先建立CPU整机概念,再构造主机与系统的连接。目录中带星号(\*)的部分可根据各高校实际学时情况安排。



本书的第1章、第2章、第4章、第8章由谷赫编写,第3章、第5章由邹凤华编写,第6章、第7章由李念峰编写;全书由谷赫统稿。本书在编写过程中,戴银飞、楚叶峰、邵丹、赵耀红、王艳柏等老师也提出了许多建设性意见并给予了很大帮助,在此表示衷心感谢。

限于时间和编者水平有限,本书在选材和对理论及先进技术的理解上可能有不妥之处,敬请读者批评指正。衷心希望本教材能够为我国高等院校计算机科学与技术等专业的教学做出贡献,欢迎广大读者广为选用。

编 者

2012年6月



# 目 录

<b>第 1 章 计算机系统概论</b> .....	1
1.1 计算机的分类 .....	1
1.2 计算机的发展 .....	3
1.3 计算机的组成 .....	5
1.3.1 冯·诺依曼计算机的特点 .....	5
1.3.2 计算机的硬件系统 .....	6
1.3.3 计算机的软件系统 .....	9
1.3.4 非冯·诺依曼计算机 .....	10
1.3.5 计算机的性能指标 .....	10
1.4 计算机系统的层次结构 .....	12
1.4.1 多级组成的计算机系统 .....	12
1.4.2 软件与硬件的逻辑等价性 .....	12
本章小结 .....	13
习题 .....	13
<b>第 2 章 运算方法和运算器</b> .....	15
2.1 数据与文字的表达方式 .....	15
2.1.1 无符号数和有符号数 .....	15
2.1.2 数据格式 .....	15
2.1.3 数的机器码表示 .....	19
2.1.4 十进制数串的表达方法 .....	22
2.1.5 字符与字符串的表达方法 .....	22
2.1.6 汉字的表达方法 .....	23
2.1.7 校验码 .....	24
2.2 定点运算 .....	25
2.2.1 定点加减运算 .....	25
2.2.2 定点乘法运算 .....	29
2.2.3 定点除法运算 .....	35
2.3 浮点数运算 .....	38
2.3.1 浮点加、减法运算 .....	38
2.3.2 浮点乘、除法运算 .....	42
2.4 运算器 .....	43

2.4.1	基本的二进制加减法器 .....	43
2.4.2	多功能算术逻辑运算单元 .....	45
	本章小结 .....	51
	习题 .....	51
<b>第3章</b>	<b>内部存储器 .....</b>	<b>54</b>
3.1	存储器概述 .....	54
3.1.1	存储器的分类 .....	54
3.1.2	存储器的分级 .....	56
3.1.3	存储单元地址的分配 .....	57
3.1.4	主存储器的技术指标 .....	57
3.2	随机存取存储器 .....	58
3.2.1	静态 RAM .....	58
3.2.2	动态 RAM .....	61
3.3	只读存储器 .....	65
3.4	存储器与 CPU 的连接 .....	72
3.5	并行存储器 .....	79
3.5.1	双端口存储器 .....	79
3.5.2	多模块交叉存储器 .....	82
3.6	高速缓冲存储器 Cache .....	85
3.6.1	Cache 基本原理 .....	85
3.6.2	主存与 Cache 的地址映射 .....	88
3.6.3	替换策略 .....	92
3.6.4	Cache 的写操作策略 .....	92
*3.6.5	Pentium 4 的 Cache 组织 .....	93
	本章小结 .....	94
	习题 .....	95
<b>第4章</b>	<b>指令系统 .....</b>	<b>97</b>
4.1	指令系统的发展与性能要求 .....	97
4.1.1	指令系统的发展 .....	97
4.1.2	对指令系统性能的要求 .....	98
4.1.3	低级语言与硬件结构的关系 .....	99
4.2	指令格式 .....	99
4.2.1	操作码 .....	100
4.2.2	地址码 .....	100
4.2.3	指令字长度 .....	103
4.2.4	指令助记符 .....	103
4.2.5	操作数类型 .....	104

4.2.6 指令格式举例	104
4.3 指令和数据的寻址方式	107
4.3.1 指令的寻址方式	107
4.3.2 操作数基本寻址方式	109
4.4 典型指令	120
4.4.1 指令的分类	120
4.4.2 基本指令系统的操作	122
4.4.3 精简指令系统	123
4.4.4 RISC 和 CISC 的比较	123
本章小结	125
习题	125
<b>第 5 章 中央处理器</b>	<b>128</b>
5.1 CPU 的功能和组成	128
5.1.1 CPU 的功能	128
5.1.2 CPU 的基本组成	129
5.1.3 CPU 中的主要寄存器	130
5.1.4 寄存器组织举例	131
5.2 指令周期	133
5.2.1 指令周期的基本概念	133
5.2.2 MOV 指令的指令周期	135
5.2.3 LAD 指令的指令周期	136
5.2.4 ADD 指令的指令周期	138
5.2.5 STO 指令的指令周期	139
5.2.6 JMP 指令的指令周期	141
5.2.7 用方框图语言表示指令周期	141
5.3 时序产生器和控制方式	144
5.3.1 时序信号的作用和体制	144
5.3.2 时序信号产生器	145
5.3.3 控制方式	147
5.4 微程序控制器	148
5.4.1 微程序控制原理	148
5.4.2 微程序设计技术	155
5.5 硬布线控制器	158
5.6 指令流水	162
5.6.1 指令流水原理	162
5.6.2 影响流水线性能的因素	164
5.6.3 流水线性能	168
5.6.4 流水线中的多发技术	170

5.6.5	流水线结构	172
*5.6.6	奔腾 CPU	173
*5.7	RISC CPU	178
5.7.1	RISC 的特点	178
5.7.2	RISC CPU 实例	179
	本章小结	182
	习题	183
<b>第 6 章</b>	<b>总线系统</b>	<b>185</b>
6.1	总线的概念和结构形态	185
6.1.1	总线的基本概念	185
6.1.2	总线的分类	186
6.1.3	总线的结构	188
6.1.4	总线的内部结构	190
6.1.5	总线的性能指标	192
6.2	总线接口	193
6.2.1	信息传送方式	193
6.2.2	总线接口的基本概念	195
6.3	总线的仲裁	197
6.3.1	集中式仲裁	197
6.3.2	分布式仲裁	199
6.4	总线的定时和数据传送模式	200
6.4.1	总线的定时	200
6.4.2	总线数据传送模式	202
*6.5	HOST 总线和 PCI 总线	203
6.5.1	多总线结构	203
6.5.2	PCI 总线信号	204
6.5.3	总线周期类型	205
6.5.4	总线周期操作	207
6.5.5	总线仲裁	208
*6.6	InfiniBand 标准	208
6.6.1	InfiniBand 的体系结构	208
6.6.2	InfiniBand 的通信协议	210
	本章小结	211
	习题	212
<b>第 7 章</b>	<b>外围设备</b>	<b>214</b>
7.1	外围设备概述	214
7.1.1	外围设备的一般功能	214

7.1.2	外围设备的分类	215
7.2	硬磁盘存储器	216
7.2.1	磁记录原理	216
7.2.2	磁盘的组成和分类	221
7.2.3	磁盘驱动器和控制器	222
7.2.4	磁盘上信息的分布	223
7.2.5	磁盘存储器的技术指标	224
7.2.6	磁盘存储设备的技术发展	226
7.2.7	磁盘阵列 RAID	227
7.3	软磁盘存储器	228
7.3.1	概述	228
7.3.2	软磁盘盘片	228
7.3.3	软磁盘的记录格式	230
7.3.4	软磁盘驱动器和控制器	231
7.4	磁带存储设备	232
7.4.1	概述	232
7.4.2	数据流磁带机	233
7.4.3	磁带的记录格式	233
7.5	光盘和磁光盘存储设备	234
7.5.1	光盘存储设备	234
7.5.2	磁光盘存储设备	236
7.6	显示设备	237
7.6.1	显示设备的分类与有关概念	237
7.6.2	字符/图形显示器	238
7.6.3	图像显示设备	240
7.6.4	VESA 显示标准	241
7.7	输入设备和打印设备	243
7.7.1	输入设备	243
7.7.2	打印设备	246
	本章小结	248
	习题	249
<b>第 8 章</b>	<b>输入输出系统</b>	<b>251</b>
8.1	外围设备的速度分级与信息交换方式	251
8.1.1	外围设备的速度分级	251
8.1.2	信息交换方式	253
8.2	程序查询方式	254
8.3	程序中断方式	258
8.3.1	中断的基本概念	258

8.3.2	程序中断方式的基本 I/O 接口 .....	259
8.3.3	单级中断 .....	261
8.3.4	多级中断 .....	263
8.3.5	中断控制器 .....	265
8.4	DMA 方式 .....	266
8.4.1	DMA 的基本概念 .....	266
8.4.2	DMA 传送方式 .....	267
8.4.3	基本的 DMA 控制器 .....	269
8.4.4	选择型和多路型 DMA 控制器 .....	271
8.5	通道方式 .....	274
8.5.1	通道的功能 .....	274
8.5.2	通道的类型 .....	276
8.5.3	通道结构的发展 .....	277
	本章小结 .....	277
	习题 .....	277
	参考文献 .....	280

# 第 1 章

## 计算机系统概论

《计算机组成原理》这门课程的主要教学目的是建立对计算机系统的整机概念,以及各部分的基本组成。计算机系统不同于一般的电子设备,它是一个由硬件、软件组成的复杂的自动化设备。本章首先介绍计算机的分类及发展过程,然后阐明冯·诺依曼计算机的体系结构,最后指出衡量计算机性能的主要技术指标及计算机系统的层次结构。

### 1.1 计算机的分类

电子计算机按照处理的数据类型可以分为“模拟计算机”和“数字计算机”。

电子模拟计算机所处理的电信号在时间上是连续的(称为模拟量),采用的是模拟技术。“模拟”就是相似的意思,例如计算尺是用长度来标识数值;时钟是用指针在表盘上转动来表示时间;电表是用角度来反映电量大小,这些都是模拟计算装置。模拟计算机的特点是数值由连续量来表示,运算过程也是连续的。

电子数字计算机所处理的电信号在时间上是离散的(称为数字量),采用的是数字技术。它是在算盘的基础上发展起来的,用数字来表示数量的大小。数字计算机的主要特点是按位运算,并且不连续地跳动计算。计算机将信息数字化之后具有易保存、易表示、易计算、方便硬件实现等优点,所以数字计算机已成为信息处理的主流。表 1.1 列出了电子数字计算机与电子模拟计算机的主要区别。

表 1.1 数字计算机与模拟计算机的主要区别

比较内容	数字计算机	模拟计算机
数据表示方式	数字 0 和 1	电压
计算方式	数字计算	电压组合和测量值
控制方式	程序控制	盘上连线
精度	高	低
数据存储量	大	小
逻辑判断能力	强	无

电子模拟计算机由于精度和解题能力都有限,所以应用范围较小。电子数字计算机则与模拟计算机不同,它是以近似于人类的“思维过程”来进行工作的,所以有人把它叫做电脑。它的发明和发展是 20 世纪人类最伟大的科学技术成就之一,也是现代科学技术发展水平的主要标志。习惯上所称的电子计算机,一般是指现在广泛应用的电子数字计算机。



数字计算机按其用途又可分为专用计算机和通用计算机。专用和通用是根据计算机的效率、速度、价格、运行的经济性和适应性来划分的。通用计算机具有功能强、兼容性强、应用面广、操作方便等优点,通常使用的计算机都是通用计算机。专用计算机一般功能单一,操作复杂,用于完成特定的工作任务。专用机是最有效、最经济和最快速的计算机,但是它的适应性很差。通用计算机适应范围很广,但是牺牲了效率、速度和经济性。

按照 1980 年由 IEEE 科学巨型计算机委员会提出的运算速度分类法,通用计算机又可分为巨型计算机、大型计算机、中型计算机、小型计算机、工作站和微型计算机 6 类,它们的区别在于体积、简易性、功率损耗、性能指标、数据存储容量、指令系统规模和机器价格,它们之间的关系如图 1.1 所示。

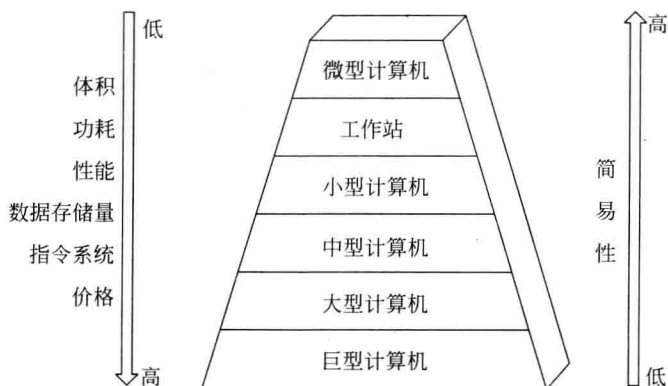


图 1.1 6 类计算机的区别

### 1. 巨型计算机

研究巨型计算机是现代科学技术,尤其是国防尖端技术发展的需要。巨型计算机的特点是运算速度快、存储容量大。目前世界上只有少数几个国家能生产巨型计算机。我国自主研发的银河 I 型亿次计算机和银河 II 型十亿次计算机都是巨型计算机,主要用于核武器、空间技术、大范围天气预报、石油勘探等领域。

### 2. 大型计算机

大型计算机的特点表现在通用性强、具有很强的综合处理能力、性能覆盖面广,主要应用在公司、银行、政府部门、社会管理机构和制造厂家等,通常人们称大型计算机为企业计算机。大型计算机在未来将被赋予更多的使命,如大型事务处理、企业内部的信息管理与安全保护、科学计算等。

### 3. 中型计算机

中型计算机是介于大型计算机和小型计算机之间的一种机型。

### 4. 小型计算机

小型计算机规模小,结构简单,设计周期短,便于及时采用先进工艺。这类机器可靠性高,对运行环境要求低,易于操作且便于维护。小型计算机符合部门性的要求,为中小型企