

普通高等院校
计算机专业(本科)实用教程系列

计算机组成原理 实用教程 (第三版)

杨旭东 编著



清华大学出版社

普通高等院校计算机专业(本科)实用教程系列

计算机组成原理实用教程

(第三版)

杨旭东 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书在修订过程中,继承了原书前两版的特点,根据 CC2005 指导计划和教育部计算机科学与技术教学指导委员会制定的教学大纲,进行了内容的调整。全书共分 9 章,内容包括计算机系统概述、数码系统、运算方法与运算器、存储系统、指令系统、中央处理器、总线系统、输入输出设备以及输入输出系统,各章后均配有习题和思考题。

本书内容全面、概念清楚、选材适当、结构合理、深入浅出、循序渐进,具有科学性和启发性,是作者多年教学经验的精华。

本书可作为普通高校计算机等理工科专业学生的教材,也可供从事计算机工作的工程技术人员自学或参考。

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

计算机组成原理实用教程/杨旭东编著. —3 版. —北京:清华大学出版社,2009.9
(普通高等院校计算机专业(本科)实用教程系列)

ISBN 978-7-302-20409-1

I. 计… II. 杨… 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 103632 号

责任编辑:郑寅堃 赵晓宁

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

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:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:18.75 字 数:457 千字

版 次:2009 年 9 月第 3 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:27.00 元

清华大学出版社

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:022567-01

普通高等院校计算机专业(本科)实用教程系列

编 委 会

主 任 孙家广(清华大学教授,中国工程院院士)

成 员 (按姓氏笔画为序)

王玉龙(北方工业大学教授)

艾德才(天津大学教授)

刘 云(北京交通大学教授)

任爱华(北京航空航天大学教授)

杨旭东(北京邮电大学副教授)

张海藩(北京信息工程学院教授)

徐孝凯(中央广播电视大学教授)

耿祥义(大连交通大学教授)

徐培忠(清华大学出版社编审)

樊孝忠(北京理工大学教授)

丛书策划 徐培忠 徐孝凯

序 言

时光更迭、历史嬗递。中国经济以她足以令世人惊叹的持续高速发展驶入了一个新的世纪,一个新的千年。世纪之初,以微电子、计算机、软件和通信技术为主导的信息技术革命给我们生存的社会所带来的变化令人目不暇接。软件是优化我国产业结构、加速传统产业改造和用信息化带动工业化的基础产业,是体现国家竞争力的战略性产业,是从事知识的提炼、总结、深化和应用的高智型产业;软件关系到国家的安全,是保证我国政治独立、文化不受侵蚀的重要因素;软件也是促进其他学科发展和提升的基础学科;软件作为 20 世纪人类文明进步的最伟大成果之一,代表了先进文化的前进方向。美国政府早在 1992 年“国家关键技术”一文中提出“美国在软件开发和应用上所处的传统领先地位是信息技术及其他重要领域竞争能力的一个关键因素”,“一个成熟的软件制造业的发展是满足商业与国防对复杂程序日益增长的要求所必需的”,“在很多国家关键技术中,软件是关键的、起推动作用(或阻碍作用)的因素”。在 1999 年 1 月美国总统信息技术顾问委员会的报告“21 世纪的信息技术”中指出“从台式计算机、电话系统到股市,我们的经济与社会越来越依赖于软件”,“软件研究为基础研究方面最优先发展的领域”。而软件人才的缺乏和激烈竞争是当前国际的共性问题。各国、各企业都对培养、引进软件人才采取了特殊政策与措施。

为了满足社会对软件人才的需要,为了让更多的人可以更快地学到实用的软件理论、技术与方法,我们编著了《普通高等院校计算机专业(本科)实用教程系列》。本套丛书面向普通高等院校学生,以培养面向 21 世纪计算机专业应用人才(以软件工程师为主)为目标,以简明实用、便于自学、反映计算机技术最新发展和应用为特色,具体归纳为以下几点:

1. 讲透基本理论、基本原理、方法和技术,在写法上力求叙述详细,算法具体,通俗易懂,便于自学。
2. 理论结合实际。计算机是一门实践性很强的科学,丛书贯彻从实践中来到实践中去的原则,许多技术理论结合实例讲解,以便于学习理解。
3. 本丛书形成完整的体系,每本教材既有相对独立性,又有相互衔接和呼应,为总的培养目标服务。
4. 每本教材都配以习题和实验,在各教学阶段安排课程设计或大作业,培养学生的实战能力与创新精神。习题和实验可以制作成光盘。

为了适应计算机科学技术的发展,本系列教材将本着与时俱进的精神不断修订更新,及时推出第 2 版、第 3 版……

新世纪曙光激人向上,催人奋进。江泽民同志在十五届五中全会上的讲话:“大力推进国民经济和社会信息化,是覆盖现代化建设全局的战略举措。以信息化带动工业化,发挥后发优势,实现社会生产力的跨越式发展”,指明了我国信息界前进的方向。21 世纪日趋开放的国策与更加迅速发展的科技会托起祖国更加辉煌灿烂的明天。

孙家广
2004 年 1 月

第三版前言

“计算机组成原理”是计算机学科的专业基础课程,是建立计算机系统概念的核心课程,也是计算机硬件和软件的基础,已列为全国计算机科学与技术专业统考的主要课程,计算机专业课程总分 150 分,组成原理课程占 45 分。随着计算机应用范围越来越广,本教材也适用于电子工程、电气工程和通信工程等专业的计算机教学。

本书编写力求做到系统概念清晰、结构合理。一方面符合计算机发展规律的需要,另一方面满足 2009 年教育部考研大纲要求,通过典型实例讲清基本概念、整机原理。

本课程的主要内容是:通过计算机模型机,讲解计算机系统的工作原理与组成,在此基础上重点介绍冯·诺依曼体系结构的计算机系统工作原理以及 5 大部件(运算器、控制器、存储器、I/O)的工作原理。在此基础上,第一,从对中央处理器(控制器)功能需求出发,设计指令系统,然后根据指令系统设计控制器(中央处理器);第二,自动执行需要存储器子系统,通过具体实例讲解存储器子系统的设计过程;第三,保证高速 CPU 与慢速外部设备交互的高效性,输入输出设备与中央处理机之间常见信息交换方式;第四,各个部件之间的互连对计算机系统性能影响越来越大,总线方式是简单有效的方法,本书介绍了总线基本原理和一些常见总线标准。同时根据计算机发展,从体系结构上介绍如何提高计算机系统和主要部件的性能方法。

本课程的参考学时为 64~84 学时,根据专业需要可以适当调整。

为了配合上述理论教学外加 16 学时的实验课程,设置控制器、运算器、数据通路和存储器等子系统实验。实验环节,有些学校缺少实验设备,可以使用一些仿真软件代替,以利于学生掌握计算机系统的整体概念,有兴趣的老师可与作者联系。

为配合本课程的教学需要,本教材为教师还配有习题参考答案,可发 E-mail(ZhengYK@tup.tsinghua.edu.cn)联系索取。

本书是在作者和已故导师幸云辉教授承担的本系列教程前两版的基础上修订完成的。在此向幸老师表示致敬。此书再版得到清华大学出版社郑寅堃老师、北京邮电大学周锋教授的鼓励和大力支持,在此表示衷心感谢。

杨旭东

2009 年 1 月于北京

第二版前言

随着计算机技术和硬件的高速发展,基础技术显得特别重要。我们知道万丈高楼平地起,打好地基是很重要的。而“计算机组成原理”作为计算机技术最基础的课程,能为后续计算机软硬件课程打下坚实的基础是特别重要的,对于进一步学习和应用计算机的读者,需要概念特别清楚,结构掌握得更加扎实,思路也要清晰,也就是说,要给初学者更加明确的指导,这就是本书再版的宗旨。

再版与第1版不同之处有以下三个方面:

1. 对第1版内容不够充实之处,再版时适当地增加必要的内容。
2. 对有关“接口芯片”的内容进行了适当的删除,因其详细内容在“微机接口技术”教材中讨论。
3. 删除了第9章内容。因为本章内容属于高档次计算机中专用的一些高技术、高结构,有兴趣者在进一步学习“计算机系统结构”课程中会有所讨论。

本教材已发行2万册,由于读者对本书的信任和支持,提出了不少宝贵意见,这次再版时作者相应地做了初充和修改。作者特别感谢广大读者的建议和意见,书中倘有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2004年1月

前 言

“计算机组成原理”是计算机系各专业的必修课程之一,属于专业基础课,它为计算机系学生学好后续专业课程起着很重要的作用。

本书在编写过程中办求做到内容全面、概念清楚、选材恰当、结构合理,结合作者本人多年来从事这一课程的教学经验,征求和收集了部分教授、专家的意见和建议,也参考了国内外有关的教材和文献资料。力求符合认识论规律,由浅入深,循序渐进。按照作者本人的思路,深入浅出、图文并茂,具有科学性和启发性。鉴于计算机技术的飞速发展,不断地推出新概念、新技术、新机型和新结构。本教材注重内容的先进性与实用性,在讲授一般原理的同时,注意理论联系实际。

本课程要求在《数学逻辑电路》课程之后开设,因此本教材未再重复有关内容。全书共分9章。第1、2章介绍计算机基础知识,包括计算机的基本组成、主要技术指标、计算机中的数制与码制、数据的表示方法、对于计算机中的检错、纠错码也做了必要的探讨;第3章介绍运算方法与运算器的组成,包括定点数和浮点数的算术运算方法及其实现,结合当前流行的SN74181和SN74182芯片的介绍,对加法器的进位信号的形成做了较详细的论述;第4章介绍存储系统,从一般的半导体读写存储器和只读存储器入手,介绍了并行主存系统、Cache主存存储层次和虚拟存储系统的构成;第5章介绍指令系统,指令系统是计算机系统中软、硬件的交界面,主要讨论了指令格式的优化,介绍几种常用的典型寻址方式;第6章是中央处理器,主要对控制器进行了较深入的探讨,介绍典型的CPU结构,将运算器和控制器结合在一起,最后对计算机中的流水结构作了简要分析;第7章是输入输出设备,介绍几种常用的输入输出设备的基本结构;第8章是输入输出系统,主要介绍输入输出设备与主机交换信息的几种方式;第9章介绍计算机系统结构的新发展,简要介绍了RISC计算机、并行处理机和多处理机系统。最后在附录中列出了成熟开出的5个实验的实验指导书。

本课程的参考学时数为70~80学时,另外增加15学时的实验,打*的章节大专班可以不讲。

全部书稿由马桂祥教授审阅,提出了许多宝贵的修改意见;并征求了许多专家和教授的意见;张杰、靳秀国等同志提供了实验素材,在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,加上时间仓促,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正,我们将不胜感谢。

编 者

2004年1月

目 录

第 1 章 计算机系统概述	1
1.1 计算机的发展与应用	1
1.1.1 计算机发展概况	1
1.1.2 计算机的应用	3
1.2 计算机的系统组成	4
1.2.1 计算机硬件	5
1.2.2 计算机软件	6
1.3 计算机系统的层次结构	7
1.4 计算机的工作过程	8
1.5 计算机系统的主要技术指标	9
1.5.1 机器字长	10
1.5.2 运算速度	10
1.5.3 机器容量	11
1.5.4 吞吐量	11
1.5.5 响应时间	12
习题与思考题	12
第 2 章 数码系统	13
2.1 进位计数制及其相互转换	13
2.1.1 常用的进位计数制	13
2.1.2 数制转换	14
2.2 计算机中数据的表示	15
2.2.1 符号数据的表示方法	15
2.2.2 数值数据的表示方法	17
2.3 机器数的编码格式	20
2.3.1 原码表示法	20
2.3.2 补码表示法	21
2.3.3 反码表示法	24
2.3.4 浮点数的原码、反码和补码表示法	25
2.3.5 移码表示法	26
2.3.6 IEEE 754 标准	26
2.3.7 十进制数的编码格式	28

2.4	校验码	29
2.4.1	奇偶校验码	30
2.4.2	汉明码	31
2.4.3	循环校验码	34
	习题与思考题	37
第3章	运算方法与运算器	39
3.1	定点加、减法运算及其实现	39
3.1.1	补码加、减法运算方法	39
3.1.2	定点加、减法运算中的溢出问题	43
3.1.3	补码加、减法运算的实现	44
3.2	定点乘法运算及其实现	47
3.2.1	原码一位乘法	47
3.2.2	补码一位乘法	49
3.3	定点除法运算及其实现	55
3.3.1	原码除法运算	55
3.3.2	补码除法运算	62
3.4	浮点数的算术运算方法	66
3.4.1	浮点数的加、减法运算	66
3.4.2	浮点数的乘、除法运算	70
3.5	逻辑运算及其实现	73
3.6	运算器的分析与组成	75
3.6.1	并行进位方式的实现	75
3.6.2	两级分组“并一并”行进位方式的实现	79
3.6.3	多功能算术逻辑运算单元	82
3.6.4	组间并行进位逻辑	86
3.6.5	定点运算器的基本结构	87
	习题与思考题	91
第4章	存储系统	94
4.1	概述	94
4.1.1	主存储器的主要技术指标	94
4.1.2	存储器的层次结构	95
4.1.3	存储器的分类	96
4.2	半导体随机读写存储器	97
4.2.1	MOS存储器的存储元电路	97
4.2.2	半导体读写存储器的基本结构	100
4.2.3	静态MOS随机存储器芯片举例	102
4.2.4	动态MOS随机存储器芯片举例	103

4.2.5	动态存储器的刷新	107
4.3	半导体只读存储器	109
4.3.1	掩模式只读存储器	109
4.3.2	可编程只读存储器	110
4.3.3	可擦除可编程只读存储器	110
4.3.4	电可擦可编程只读存储器	112
4.3.5	闪速存储器	115
4.4	主存储器的组成与控制	117
4.4.1	主存储器容量的扩充	117
4.4.2	访存地址的译码方式	121
4.4.3	主存储器的编址方式	126
4.4.4	主存与 CPU 连接	126
4.5	提高主存储器性能的措施	131
4.5.1	并行主存系统	131
4.5.2	高速缓冲存储器	134
4.5.3	虚拟存储系统	138
	习题与思考题	143
第 5 章	指令系统	145
5.1	指令格式	145
5.1.1	操作码	145
5.1.2	地址码	145
5.2	指令格式的优化	146
5.2.1	哈夫曼压缩概念	147
5.2.2	指令操作码的压缩	148
5.2.3	扩展操作码法	151
5.3	寻址方式	152
5.3.1	直接寻址方式	152
5.3.2	寄存器寻址方式	153
5.3.3	间接寻址方式	153
5.3.4	基址寻址方式	155
5.3.5	变址寻址方式	155
5.3.6	块寻址方式(串寻址方式)	156
5.3.7	隐含寻址方式	157
5.3.8	立即寻址方式	157
5.3.9	相对寻找方式	157
5.4	堆栈结构及其寻址	158
5.4.1	硬堆栈	158
5.4.2	软堆栈	159

5.5	指令系统举例	160
5.5.1	指令的分类	160
5.5.2	指令系统举例	161
5.6	指令系统的发展	164
	习题与思考题	164
第6章	中央处理器	166
6.1	控制方式	166
6.2	指令的执行过程	167
6.2.1	指令周期	167
6.2.2	指令操作流程图	167
6.3	控制器的功能	169
6.4	控制器的组成	169
6.5	时序部件	171
6.5.1	脉冲源	172
6.5.2	节拍信号发生器	172
6.5.3	启停逻辑	174
6.6	微操作控制部件	175
6.6.1	组合逻辑控制器	175
6.6.2	微程序控制器	178
6.6.3	PLA 控制器	185
6.7	中断系统	187
6.7.1	中断系统的功能	188
6.7.2	中断的分类	188
6.7.3	中断的分级	189
6.7.4	中断排队的实现	190
6.7.5	中断向量的引入	192
6.7.6	一次中断处理的全过程	193
6.7.7	中断系统举例	194
6.8	CPU 中的流水结构	195
6.8.1	基本概念	195
6.8.2	流水结构的分类	196
6.9	CPU 结构举例	199
6.9.1	8086 CPU	199
6.9.2	80386/80486 CPU	200
6.9.3	Pentium 微处理器	201
	习题与思考题	202

第 7 章 总线系统	204
7.1 总线概述	204
7.1.1 总线的基本概念.....	204
7.1.2 总线的性能指标.....	206
7.2 总线控制方式	208
7.2.1 集中式.....	208
7.2.2 分布式.....	210
7.3 总线操作和定时	210
7.3.1 总线操作过程.....	210
7.3.2 同步方式.....	210
7.3.3 异步方式.....	211
7.4 总线信息传送方式	212
7.4.1 串行传送方式.....	212
7.4.2 并行传送方式.....	213
7.5 总线接口	213
7.5.1 接口的分类.....	214
7.5.2 接口的功能.....	214
7.5.3 接口芯片举例.....	215
7.6 总线实例	220
7.6.1 PCI	220
7.6.2 新一代革命性的 PCI-Express	222
7.6.3 EIA-RS-232D 和 RS-449 串行接口	223
7.6.4 USB	225
习题与思考题.....	226
第 8 章 输入输出设备	227
8.1 键盘输入设备	227
8.1.1 编码键盘.....	227
8.1.2 非编码键盘.....	230
8.1.3 IBM PC 中的键盘	231
8.2 鼠标	232
8.2.1 机械滚轮鼠标.....	232
8.2.2 光电式鼠标.....	232
8.3 显示输出设备	233
8.3.1 CRT 显示器	233
8.3.2 字符显示器的工作原理.....	234
8.3.3 图形显示器的工作原理.....	237
8.3.4 IBM PC 序列微型机中的显示系统	238

8.3.5	液晶显示器	239
8.4	打印输出设备	240
8.4.1	打印机的分类	240
8.4.2	点阵式打印机	241
8.4.3	行式打印机	242
8.4.4	激光打印机	243
8.5	汉字处理设备	245
8.5.1	汉字的编码与输入	246
8.5.2	汉字的存储	248
8.5.3	汉字的输出	250
8.5.4	汉字信息处理系统	250
8.6	磁表面存储器	251
8.6.1	磁表面存储器读写信息的原理	251
8.6.2	记录方式	252
8.6.3	磁盘存储器	253
8.6.4	磁带存储器	256
8.7	光盘存储器	258
8.7.1	光盘存储器的分类	258
8.7.2	光盘存储器的记录方式	258
8.7.3	光盘存储器的组成及其工作原理	259
8.8	磁盘阵列	261
	习题与思考题	263
第9章	输入输出系统	265
9.1	输入输出设备的编址方式	265
9.1.1	统一编址方式	265
9.1.2	独立编址方式	266
9.2	输入输出控制方式	266
9.2.1	程序查询方式	266
9.2.2	程序中断方式	267
9.2.3	直接存储器访问方式	268
9.2.4	通道方式和 IOP 方式	272
	习题与思考题	278
附录	新旧逻辑电路图图形符号对照表	279
参考文献		280

第1章 计算机系统概述

随着计算机技术的飞速发展,计算机基本原理越来越重要,本章利用程序执行过程来说明计算机的整体工作原理,主要讨论计算机系统技术发展趋势、工作原理、计算机系统框架层次结构和计算机系统的主要评价指标。

1.1 计算机的发展与应用

1.1.1 计算机发展概况

电子计算机是一个统称,实际上它被明确地分成两大类:“电子模拟计算机”和“电子数字计算机”。前者是使用连续变化的物理量(如电流、电压等)来表示数值的大小并参加机内运算,其运算结果自然也是连续变化的物理量;后者是将运算对象数字化成为离散的数字量,用数码进行运算,其运算结果也是离散的数字信息,它运算速度快、运算精度高,现在人们所说的“电子计算机”或“计算机”,通常是指“电子数字计算机”,也是本书讨论的对象。

世界上第一台电子数字计算机——电子数字积分计算机(Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC),简称“埃尼阿克”,如图 1.1 所示。它是在美国陆军部支持下,由美国宾夕法尼亚大学于 1946 年研制成功的。ENIAC 是一个庞然大物,它共用了 18 000 多个电子管,另加 1500 个继电器以及其他器件,其总体积约 90m^3 ,重达 30t,占地 170m^2 ,需要用一间 30 多米长的大房间才能存放,是个地地道道的庞然大物,其运算速度为 5000 次/秒左右。现在看来它性能并不高,但是在计算机发展史上它是一个重要的里程碑,奠定了电子数字计算机的基础,开创了电子数字计算机的新纪元。

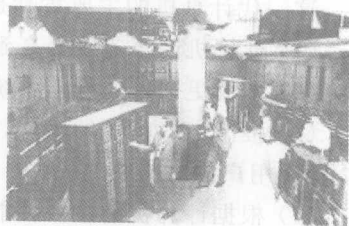


图 1.1 埃尼阿克

从第一台电子数字计算机问世至今只有 60 多年的历史,但其发展速度是世界上其他任何学科无法比拟的。通常根据其使用的主要电子器件,将电子数字计算机分成 4 个发展时代。

1. 第一代(1946 年至 20 世纪 50 年代末期)

这一发展时代的主要特点是使用电子管作为计算机的基本器件,利用磁鼓作为存储部件。因此,它必然是体积大、耗电多、速度慢、可靠性低。初期主要为军事或国防的需要研制计算机,ENIAC 就是典型机型代表,其运算速度一般在每秒运算几千次或上万次。

这一代计算机的主要贡献是:

- (1) 确立了模拟量可以转换成数字量进行计算,开创了数字化技术的新时代。

- (2) 确立了计算机的基本结构。
- (3) 确定了程序设计的基本方法。
- (4) 首创使用阴极射线管(CRT)作为计算机的字符显示器。

2. 第二代(20世纪50年代末期至60年代中期)

这一发展时代的主要特点是使用晶体管作为计算机的基本器件,此外附带了打印机、磁带、磁盘、内存和操作系统等现代计算机系统部件,使得计算机的体积缩小、耗电减少、重量减轻、可靠性提高。

这一代计算机的主要贡献是:

- (1) 计算机开始用到图形处理领域,开创了计算机处理文字和图形的阶段。
- (2) 鼠标问世,使计算机的输入方式发生了重大变化。
- (3) 开始有了通用机和专用机之分,而且通用机的发展势头很大。
- (4) 多种高级语言投入使用。

我国跳过了电子管计算机时代,从1958年开始研制使用晶体管的第二代电子数字计算机。

3. 第三代(20世纪60年代中期至70年代初期)

这一发展时代的主要特点是使用中、小规模集成电路(MSI和SSI)作为计算机的基本器件。

这一代计算机的主要贡献是:

- (1) 计算机运算速度提高到每秒运算百万次以上。
- (2) 多种更完善的操作系统推向使用。
- (3) 推出“系列机”的概念,较好地解决了计算机的硬件不断更新而软件相对稳定的矛盾,受到用户的普遍欢迎。
- (4) 根据计算机的主要性能(例如字长、运算速度和机器容量等)将计算机分成巨型机、大型机、中型机和小型机等不同型号。

4. 第四代(从20世纪70年代初期开始)

这一代计算机的主要特点是使用大规模或超大规模集成电路(LSI或VLSI)作为计算机的基本器件。作为第四代计算机的典型代表——“微型计算机”应运而生。

1971年,Intel公司的第一台微型计算机4004问世,应该说这是计算机发展史上的又一个里程碑。Intel公司的CEO戈登·摩尔提出了著名的摩尔定律——芯片的晶体管数量每一年半增加一倍,过去几十年里处理器发展不断验证了摩尔定律。从此,微型计算机字长从4位→8位→16位→32位→64位迅速升级,其性能已达到甚至超过70年代中、小型计算机的水平。微型计算机以其小巧玲珑、性能稳定、可靠性高、对环境无特殊要求为特点,尤其是价格便宜,吸引了越来越多的用户,显示出很强的生命力,到80年代微型计算机进入全盛时期,1989年由Intel公司推出的80486,其运算速度已经达到90MIPS(9000万次/秒),与同期的某些大型机不相上下。之后Intel相继又推出了Pentium系列处理器,机器字长已达到64位。至此,已经不能用运算速度或机器字长等性能来作为计算机分型的依据了。