

高等教育国家级教学成果二等奖

清华大学计算机基础教育课程系列教材

微型计算机系统 原理及应用

(第3版)

杨素行 等 编著



清华大学出版社

高等工程教育国家级规划教材

内容简介

本书主要面向高等院校工科非计算机专业的学生。本次修订注意强化计算机近年来的最新发展和应用的内容,同时删减比较陈旧的内容和非教学重点的内容,进一步加强实用性和教学适用性。全书正文包括6章,内容分别是微型计算机基础、微型计算机指令系统、汇编语言程序设计、半导体存储器、数字量输入输出以及模拟量输入输出。

本书结合大量实例来讲述微型计算机的系统原理和应用,内容简明扼要,深入浅出,循序渐进,便于学生自学,可以作为高等院校的教材,也可作为工程技术人员自学计算机知识的参考书。

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

微型计算机系统原理及应用/杨素行等编著. —3版. —北京:清华大学出版社,2009.4
(清华大学计算机基础教育课程系列教材)

ISBN 978-7-302-19352-4

I. 微… II. 杨… III. 微型计算机—理论—高等学校—教材 IV. TP36

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第010849号

责任编辑:谢琛 林都嘉

责任校对:白蕾

责任印制:何芊

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

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:26.25

版次:2009年4月第3版

印数:1~5000

定 价:37.00元

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

字 数:630千字

印 次:2009年4月第1次印刷

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:028528-01

清华大学出版社
北京

清华大学计算机基础教育课程系列教材

序

计算机科学技术的发展不仅极大地促进了整个科学技术的发展,而且明显地加快了经济信息化和社会信息化的进程。因此,计算机教育在各国备受重视,计算机知识与能力已成为 21 世纪人才素质的基本要素之一。

清华大学自 1990 年开始将计算机教学纳入基础课的范畴,作为校重点课程进行建设和管理,并按照“计算机文化基础”、“计算机技术基础”和“计算机应用基础”三个层次的课程体系组织教学:

第一层次“计算机文化基础”的教学目的是培养学生掌握在未来信息化社会里更好地学习、工作和生活所必须具备的计算机基础知识和基本操作技能,并进行计算机文化道德规范教育。

第二层次“计算机技术基础”是讲授计算机软硬件的基础知识、基本技术与方法,从而为学生进一步学习计算机的后续课程,并利用计算机解决本专业及相关领域中的问题打下必要的基础。

第三层次“计算机应用基础”则是讲解计算机应用中带有基础性、普遍性的知识,讲解计算机应用与开发中的基本技术、工具与环境。

以上述课程体系为依据,设计了计算机基础教育系列课程。随着计算机技术的飞速发展,计算机教学的内容与方法也在不断更新。近几年来,清华大学不断丰富和完善教学内容,在有关课程中先后引入了面向对象技术、多媒体技术、Internet 与互联网技术等。与此同时,在教材与 CAI 课件建设、网络化的教学环境建设等方面也正在大力开展工作,并积极探索适应 21 世纪人才培养的教学模式。

为进一步加强计算机基础教学工作,适应高校正在开展的课程体系与教学内容的改革,及时反映清华大学计算机基础教学的成果,加强与兄弟院校的交流,清华大学在原有工作的基础上,重新规划了“清华大学计算机基础教育课程系列教材”。

该系列教材有如下几个特色:

1. 自成体系: 该系列教材覆盖了计算机基础教学三个层次的教学内容。其中既包括所有大学生都必须掌握的计算机文化基础,又包括适用于各专业的软、硬件基础知识;既包括基本概念、方法与规范,又包括计算机应用开发的工具与环境。

2. 内容先进: 该系列教材注重将计算机技术的最新发展适当地引入教学中来,保持了教学内容的先进性。例如,系列教材中包括了面向对象与可视化编程、多媒体技术与应用、Internet 与互联网技术、大型数据库技术等。

3. 适应面广: 该系列教材照顾了理、工、文等各种类型专业的教学要求。

4. 立体配套: 为适应教学模式、教学方法和手段的改革, 该系列教材中多数都配有习题集和实验指导、多媒体电子教案, 有的还配有 CAI 课件以及相应的网络教学资源。

本系列教材源于清华大学计算机基础教育的教学实践, 凝聚了工作在第一线的任课教师的教学经验与科研成果。我希望本系列教材不断完善, 不断更新, 为我国高校计算机基础教育做出新的贡献。

1999年12月

注: 周远清, 曾任教育部副部长, 原清华大学副校长、计算机专业教授。

第3版前言

《微型计算机系统原理及应用》一书,自1995年出版,并于2003年修订第2版以来,一直受到广大读者的欢迎,被许多高等院校选为相关课程的教材或参考书,至今已共计重印将近30次。在此期间,微型计算机技术以及高等学校的微型计算机课程建设都有了迅速的发展。为了适应新的形势,我们编写了本书的第3版。

编写第3版的指导思想是,首先,既要保证基础,又要面向更新,加强新技术。一方面注意培养学生掌握计算机软硬件基本知识,为今后在专业中应用计算机打下牢固基础;另一方面要适应计算机技术飞速发展的形势,加强介绍计算机近年来的最新发展和应用。其次,删减比较陈旧的内容和非教学重点的内容,进一步加强实用性和教学适用性。第三,力求简明扼要,深入浅出,循序渐进,便于学生自学,适当减少全书的篇幅,防止教材“越编越厚”的倾向。例如,加强Intel公司近几年研制的新型微处理器以及相应的指令系统的介绍,进一步介绍新一代的存储器,如DDR内存和Flash存储器,介绍比较实用的RS-485接口、USB接口和SPI接口,增加新推出的高精度D/A和A/D芯片的介绍等。进一步删减比较低档的微处理器的介绍,删减了汇编语言部分的篇幅,特别是汇编语言的机器码。此外,存储器I/O接口和A/D、D/A部分也删减了比较陈旧的内容。

本教材主要面向高等院校非计算机专业的本科生和研究生。同时,本书不仅可以作为高等院校的教材,也可作为工程技术人员自学计算机知识的参考书。

第3版的修订工作由以下几位老师承担:刘慧银负责修订第1章和第3章的3.4节,杨素行负责修订第2章和第3章的3.1节、3.2节、3.3节和3.5节,赵长德负责修订第4章,唐光荣负责修订第5章,黄益庄负责修订第6章。

清华大学自动化系罗予频教授,作为使用本书的在第一线进行微型计算机教学工作的教师,参加了第3版的修订工作,对修订大纲和书中许多内容提出了宝贵的意见,在此表示深深的感谢。

由于作者水平有限,本书的第3版中一定存在有错误或不妥之处,敬请广大读者给予批评指正,以便今后不断改进。

编者

2008年12月

目 录

1	第 1 章 微型计算机基础	1
1	1.1 概述	1
3	1.2 计算机中的数制和编码	3
3	1.2.1 无符号数的表示及运算	3
7	1.2.2 带符号数的表示及运算	7
11	1.2.3 二进制编码	11
12	1.2.4 计算机中数的定点表示和浮点表示	12
14	1.3 微型计算机系统的组成、分类和配置	14
14	1.3.1 微型计算机系统的组成	14
16	1.3.2 微型计算机的分类	16
16	1.3.3 IBM PC 及 PC/XT 的配置	16
18	1.4 微处理器	18
18	1.4.1 Intel 8086/8088	18
26	1.4.2 Intel 80286	26
27	1.4.3 Intel 80386	27
28	1.4.4 Intel 80486	28
29	1.4.5 Pentium 系列微处理器	29
34	1.4.6 Core 及 Core2——酷睿及酷睿 2 微处理器	34
38	1.4.7 核心类型	38
39	1.4.8 移动计算技术——迅驰	39
41	1.4.9 Intel Celeron 赛扬	41
41	1.4.10 AMD 微处理器	41
43	习题 1	43
44	第 2 章 微型计算机指令系统	44
44	2.1 寻址方式	44
44	2.1.1 立即寻址	44
44	2.1.2 寄存器寻址	44
45	2.1.3 直接寻址	45
46	2.1.4 寄存器间接寻址	46
47	2.1.5 变址寻址	47
48	2.1.6 基址寻址	48

2.1.7	基址-变址寻址	48
2.2	8086 指令系统	52
2.2.1	数据传送指令	53
2.2.2	算术运算指令	64
2.2.3	逻辑运算和移位指令	79
2.2.4	串操作指令	88
2.2.5	控制转移指令	94
2.2.6	处理器控制指令	103
2.3	80486 扩充及增加的指令	105
2.3.1	80486 扩充功能的指令	105
2.3.2	80486 增加的指令	107
	习题 2	114
第 3 章 汇编语言程序设计 119		
3.1	汇编语言源程序的格式	120
3.2	汇编语言语句的组成	121
3.2.1	名字	121
3.2.2	助记符和伪操作	122
3.2.3	操作数	122
3.2.4	注释	127
3.3	伪操作命令	127
3.3.1	处理器方式伪操作	128
3.3.2	数据定义伪操作	128
3.3.3	符号定义伪操作	130
3.3.4	段定义伪操作	132
3.3.5	过程定义伪操作	135
3.3.6	模块定义与连接伪操作	136
3.3.7	宏处理伪操作	137
3.3.8	条件伪操作	142
3.4	DOS 和 BIOS 调用	145
3.4.1	概述	145
3.4.2	DOS 软中断及系统功能调用	147
3.4.3	BIOS 调用	156
3.5	汇编语言程序设计举例	170
	习题 3	185
第 4 章 半导体存储器 188		
4.1	概述	188
4.1.1	存储器的分类	188

4.1.2	半导体存储器的分类	188
4.1.3	半导体存储器的主要指标	190
4.2	随机读写存储器	190
4.2.1	静态 RAM	191
4.2.2	动态 RAM	192
4.2.3	双口 RAM	198
4.3	只读存储器	200
4.3.1	掩膜 ROM	201
4.3.2	可擦可编程只读存储器	201
4.3.3	电可擦可编程 ROM	204
4.3.4	闪速存储器	208
4.4	CPU 与存储器的连接	212
4.4.1	连接时应注意的问题	212
4.4.2	典型 CPU 与存储器的连接	213
4.4.3	IBM PC/XT 中的存储器	215
4.5	微型计算机的扩展存储器及其管理	218
4.5.1	存储器体系的分级结构	218
4.5.2	高速缓冲存储器	219
4.5.3	微型计算机的内存配置	222
4.5.4	存储器管理	223
习题 4		224
第 5 章 数字量输入输出 228		
5.1	概述	228
5.1.1	I/O 信号的形式	228
5.1.2	I/O 接口	229
5.1.3	I/O 编址	231
5.1.4	I/O 的控制方式	232
5.2	系统总线及接口	234
5.2.1	总线概述	234
5.2.2	系统总线标准	235
5.2.3	总线信号与接口的连接	243
5.3	中断控制系统	249
5.3.1	中断的基本概念	249
5.3.2	可编程中断控制电路	252
5.3.3	Intel 8259A 的应用	260
5.3.4	高档微机的中断系统	263
5.4	计数定时接口	264

881	5.4.1	基本概念	264
091	5.4.2	可编程计数/定时电路	265
001	5.4.3	Intel 8253 的应用	272
101	5.4.4	其他可编程计数/定时电路	275
501	5.5	并行输入输出接口	275
801	5.5.1	可编程并行接口 Intel 8255A	275
005	5.5.2	Intel 8255A 的应用	281
105	5.6	串行输入输出接口	282
105	5.6.1	基本概念	282
405	5.6.2	可编程串行接口电路 Ins 8250	286
805	5.6.3	Ins 8250 的应用举例	296
515	5.6.4	其他串行接口	298
515	5.7	直接存储器存取 DMA	300
515	5.7.1	DMA 控制器基本功能	300
515	5.7.2	可编程 DMA 控制器 Intel 8237	301
815	5.7.3	Intel 8237 的应用	310
815	5.8	高档微机中的 I/O 接口电路	311
015	5.8.1	82380 的结构	311
555	5.8.2	82380 的 DMA 功能	312
555	5.8.3	82380 的中断功能	313
455	5.8.4	82380 的定时器	313
		习题 5	314
855			314
	第 6 章	模拟量输入输出	318
855	6.1	模拟量的输入与输出通道	318
055	6.1.1	模拟量输入通道的组成	318
155	6.1.2	模拟量输出通道的组成	319
555	6.2	D/A 转换器	320
555	6.2.1	D/A 转换器的工作原理	320
555	6.2.2	D/A 转换器的主要技术参数	323
555	6.2.3	典型的 D/A 转换器芯片	324
555	6.2.4	D/A 转换器与微处理器的接口	329
055	6.3	A/D 转换器	332
555	6.3.1	A/D 转换器的工作原理	332
555	6.3.2	A/D 转换器的主要技术性能	336
055	6.3.3	典型的 A/D 转换器芯片	337
505	6.3.4	A/D 转换器与 CPU 的接口	343
405	6.3.5	V/F 转换器	346

6.4	多路转换器	349
6.4.1	多路转换器的作用和要求	349
6.4.2	几种常用的多路开关集成电路芯片	349
6.4.3	多路开关的主要技术参数	351
6.5	采样保持器	352
6.5.1	采样保持器的工作原理	353
6.5.2	常用的采样保持器集成芯片	354
6.5.3	采样保持电路主要技术参数的含义	355
6.6	数据采集系统	356
6.6.1	模拟量输入通道的技术要求	356
6.6.2	高集成度的数据采集系统	356
6.7	采样定理	358
	习题 6	359
	附录	362
	附录 1 IBM PC ASCII 码字符表	362
	附录 2 8086 指令系统	363
	附录 3 MASM 伪操作命令表	384
	附录 4 DOS 系统功能调用(INT 21H)	387
	附录 5 BIOS 调用	391
	附录 6 IBM PC 键盘扫描码	396
	附录 7 字符的扩充码	396
	附录 8 IBM PC/XT 的中断矢量表	397
	附录 9 部分习题参考答案	398
	参考文献	404

第 1 章

微型计算机基础

1.1 概述

自 1946 年世界上第一台电子计算机问世以来,计算机技术得到了突飞猛进的发展。短短 60 多年的时间,已经历了四代的更替:电子管计算机、晶体管计算机、集成电路计算机和大规模、超大规模集成电路计算机。20 世纪 80 年代初,日本和美国又分别宣布了第五代“非冯·诺依曼”计算机和第六代“神经”计算机的研制计划。

计算机按其性能、价格和体积的不同,一般分为巨型机、大型机、中型机、小型机和微型计算机 5 类。

微型计算机是 20 世纪 70 年代初研制成功的。一方面,由于军事、空间及自动化技术的发展需要体积小、功耗低、可靠性高的计算机;另一方面,大规模集成电路技术的不断发展也为微型计算机的产生打下了坚实的物质基础。

微处理器是微型计算机的核心芯片,通常简称为 μP 或 MP (Micro Processor),它是将计算机中的运算器和控制器集成在一片硅片上制成的集成电路。这样的芯片也被称为中央处理单元(Central Processing Unit, CPU)。

微型计算机简称为 μC 或 MC (Micro Computer),它是由微处理器、适量内存和 I/O 接口电路组成的计算机。

30 多年来,微处理器和微型计算机获得了极快的发展,几乎每两年微处理器的集成度翻一番,每 2~4 年更新换代一次,现已进入第六代。

1. 第一代(1971—1973 年): 4 位或低档 8 位微处理器

1971 年,美国 Intel 公司研制成功的 4004 是集成度为 2000 个晶体管/片的 4 位微处理器。1972 年,Intel 公司推出的低档 8 位的 8008 也属于第一代微处理器产品。

第一代微处理器的指令系统比较简单,运算能力差,速度慢(基本指令的执行时间为 10~20 μs),但价格低廉。软件主要使用机器语言及简单的汇编语言。

2. 第二代(1974—1978 年): 中高档 8 位微处理器

微处理器问世后,众多公司纷纷研制微处理器,逐步形成以 Intel 公司、Motorola 公司和 Zilog 公司产品为代表的三大系列微处理器。1973—1975 年,中档微处理器以 Intel 8080、Motorola 的 MC6800 为代表。1976—1978 年,出现高档 8 位微处理器,典型产品为 Intel 8085、Z80 和 MC6809。

第二代微处理器比第一代有了较多改进,集成度提高 1~4 倍,运算速度提高 10~15 倍,指令系统相对比较完善,已具有典型的计算机体系结构以及中断、存储器直接存取(Direct Memory Access, DMA)功能。软件除汇编语言外,还可使用 BASIC、FORTRAN

以及 PL/M 等高级语言。后期开始配上操作系统,如 CP/M(Control Program/Monitor)操作系统,它运用于以 8080A/8085A、Z80、MC6502 为 CPU,带有磁盘及各种外设的微型计算机系统。

3. 第三代(1978—1981年): 16 位微处理器

1977 年左右,超大规模集成电路工艺研制成功,一片硅片上可集成一万个以上的晶体管,16Kb 和 64Kb 半导体存储器也已出现。微处理器及微型计算机从第二代发展到第三代。三大公司陆续推出 16 位微处理器芯片,如 Intel 8086 的集成度为 29 000 晶体管/片,Z8000 为 17 500 晶体管/片,MC68000 为 68 000 晶体管/片。这些微处理器的基本指令执行时间约为 $0.15\mu\text{s}$ 。以各项性能指标看,比第二代微处理器提高了很多,已达到或超过原来中、低档小型机的水平。用这些芯片组成的微型计算机有丰富的指令系统、多级中断系统、多处理机系统、段式存储器管理以及硬件乘除运算等。除此以外,还配备了功能较强的系统软件。为方便原 8 位机用户,Intel 公司很快推出 8088,其指令系统完全与 8086 兼容,内部结构仍为 16 位,但外部数据总线是 8 位。并以 8088 为 CPU 组成了 IBM PC、PC/XT 等准 16 位机。由于其性能价格比高,很快占领了世界市场。与此同时,Intel 公司在 8086 基础上研制出性能更优越的 16 位微处理器芯片 80286,以 80286 为 CPU 组成 IBM PC/AT 高档 16 位机。

以上介绍的是 16 位微型计算机发展的一条途径,即在原 8 位机的基础上发展而来。另一条途径是将已流行的 16 位小型计算机微型化,例如美国 DEC 公司将 PDP-11/20 微型化为 LSI-11,将中档 PDP-11/34 微型化为 LSI-23,又如 NOVA 机微型化为 Micro NOVA 等。

4. 第四代(1985年后): 32 位高档微处理器

1985 年,Intel 公司推出了 32 位微处理器芯片 80386。80386 有两种结构:80386SX 和 80386DX。这两者的关系类似于 8088 和 8086 的关系。80386SX 内部结构为 32 位,外部数据总线为 16 位,采用 80287 作协处理器,指令系统与 80286 兼容。80386DX 内部结构、外部数据总线皆为 32 位,采用 80387 作为协处理器。

1990 年,Intel 公司在 80386 基础上研制出新一代 32 位微处理器芯片 80486。它相当于把 80386、80387 及 8KB($2^3 \times 2^{10}$ Byte)高速缓冲存储器集成在一块芯片上,性能比 80386 大大提高。

5. 第五代(1993年后): 64 位高档微处理器

1993 年 3 月,Intel 公司推出 64 位微处理器芯片 Pentium(80586,P5),它的外部数据总线为 64 位,地址总线为 32 位,内存寻址空间为 $2^{32} \text{B} = 4\text{GB}$,工作频率为 66MHz,以它为 CPU 的 Pentium 机是一种 64 位高档微机。IBM、Apple 和 Motorola 三公司合作生产的 Power PC 芯片是又一种优异的 64 位微处理器芯片,以它为 CPU 的微型计算机型号为 Macintosh。

6. 第六代(1995年后): 64 位高档微处理器

1995 年,Intel 公司推出第六代微处理器 Pentium Pro(P6)。它采用了 $0.6\mu\text{m}$ 工艺,集成了 550 万只晶体管。它有数据线 64 位,地址线 36 位,寻址范围为 $2^{36} \text{B} = 64\text{GB}$ 。工作频率达 200MHz。随后,Intel 公司陆续推出了 P6 的系列产品,如 Pentium II、Pentium III 和 Pentium 4 等。这些产品采用了多项先进技术,如 RISC 技术、超级流水线技术、超标量结

构技术(每个时钟周期可启动并执行多条指令)、MMX 技术、动态分支预测技术、超顺序执行技术、双独立总线 DIB 技术;一级高速缓冲存储器(L1)采用双 cache 结构(独立的指令 cache 和数据 cache)、二级高速缓冲存储器(L2)达 256KB 或 512KB;支持多微处理器等。

第六代微处理器性能优异,适应当前对多媒体、网络和通信等多方面的要求。随着科学技术的发展,将会不断地对微处理器提出新的需求,新型、新概念的微处理器定会层出不穷。

1.2 计算机中的数制和编码

日常生活中,人们使用各种进制来表示数,如二进制、八进制、十进制和十六进制等。由于用电子器件表示两种状态比较容易实现,所以,电子计算机中一般采用二进制。但人们又习惯于使用十进制数,因此在学习和掌握计算机的原理之前,需要了解二进制、十进制、十六进制等表示法及其相互关系和转换。

计算机中的数有两种表示法,即定点表示和浮点表示,相应地有定点数和浮点数之分,本节将对这些内容作简单介绍。

另外,人们经常使用的字母、符号、图形以及汉字,在计算机中也一律用二进制编码来表示,这些编码也是本节介绍的内容。

1.2.1 无符号数的表示及运算

1. 无符号数的表示法

(1) 十进制数的表示法

十进制计数法的特点是:

- 以 10 为底,逢 10 进位。
- 需要 10 个数字符号 0,1,2,⋯,9。

任何一个十进制数 N_D 可以表示为:

$$N_D = \sum_{i=-m}^{n-1} D_i \times 10^i \quad (1.1)$$

其中, m 表示小数位的位数, n 表示整数位的位数, D_i 为十进制数字符号 0~9。例如: $135.7D = 1 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 7 \times 10^{-1}$ 。

上式中的后缀 D 表示十进制数(Decimal),但 D 可以省略。

(2) 二进制数的表示法

二进制计数法的特点是:

- 以 2 为底,逢 2 进位。
- 需要两个数字符号 0,1。

一个二进制数可以表示为如下形式:

$$N_B = \sum_{i=-m}^{n-1} B_i \times 2^i \quad (1.2)$$

例如: $1101.1B = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1}$ 。

上式中后缀 B 表示二进制数(Binary)。

(3) 十六进制数的表示法

十六进制计数法的特点是:

- 以 16 为底,逢 16 进位。
- 需要 16 个数字符号 0,1,2,⋯,9,A,B,C,D,E,F。其中,A~F 依次表示 10~15。

一个十六进制数可表示为如下形式:

$$N_H = \sum_{i=-m}^{n-1} H_i \times 16^i \quad (1.3)$$

例如: E5AD.BFH = $14 \times 16^3 + 5 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 13 \times 16^0 + 11 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2}$ 。
 上式中后缀 H 表示十六进制数(Hexadecimal)。

2. 数制转换

(1) 任意进制数转换为十进制数

二进制、十六进制,以至任意进制的数转换为十进制数的方法简单,可按式(1.2)、式(1.3)等展开求和即可。

(2) 十进制数转换为二进制数

① 十进制整数转换为二进制整数。

任何一个十进制数转换为二进制数后,都可以表示成为式(1.2)的形式。问题的核心在于求出 n 及 B_i 。

下面通过一个简单的例子分析一下转换的方法。例如,已知

$$13D = 1101B = \underset{\substack{\uparrow \\ B_3}}{1} \times 2^3 + \underset{\substack{\uparrow \\ B_2}}{1} \times 2^2 + \underset{\substack{\uparrow \\ B_1}}{0} \times 2^1 + \underset{\substack{\uparrow \\ B_0}}{1} \times 2^0$$

上式也可以表示为:

$$13D = 1101B = (1 \times 2^2 + 1 \times 2) \times 2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\ = ((1 \times 2 + 1) \times 2 + 0) \times 2 + 1$$

可见,要确定 13D 对应的二进制数,只需从右到左分别确定 B_0 、 B_1 、 B_2 和 B_3 即可。显然,从上式可以归纳出以下转换方法,用 2 连续去除十进制数,直至商等于 0 为止。逆序排列余数便是与该十进制相应的二进制数各位的数值。过程如下:

$$\begin{array}{r} 2 \overline{) 13} \\ \underline{2} \\ 2 \overline{) 6} \quad \dots 1(\text{商 } 6 \text{ 余 } 1) \rightarrow B_0 \\ \underline{2} \\ 2 \overline{) 3} \quad \dots 0(\text{商 } 3 \text{ 余 } 0) \rightarrow B_1 \\ \underline{2} \\ 2 \overline{) 1} \quad \dots 1(\text{商 } 1 \text{ 余 } 1) \rightarrow B_2 \\ \underline{2} \\ 0 \quad \dots 1(\text{商 } 0 \text{ 余 } 1) \rightarrow B_3 \end{array}$$

所以, $13D = 1101B$ 。

用与此类似的方法可以完成十进制数至十六进制数的转换,不同的是用 16 连续去除而已。

② 十进制小数转换为二进制小数。

根据式(1.2),有:

$$0.8125D = B_{-1} \times 2^{-1} + B_{-2} \times 2^{-2} + B_{-3} \times 2^{-3} + B_{-4} \times 2^{-4} \quad (2)$$

$$= 2^{-1} (B_{-1} + 2^{-1} (B_{-2} + 2^{-1} (B_{-3} + 2^{-1} \times B_{-4}))) \quad (3)$$

由上式可以看出,十进制小数转换为二进制小数的方法是,连续用 2 去乘十进制小数,直至乘积的小数部分等于 0。顺序排列每次乘积的整数部分,便得到二进制小数各位的系数 $B_{-1}, B_{-2}, B_{-3}, \dots$ 。若乘积的小数部分永不为 0,则根据精度的要求截取一定的位数即可。0.8125D 的转换过程如下:

$$\begin{aligned} 0.8125D \times 2 &= 1.625 && \text{得出 } B_{-1} = 1 \\ 0.625D \times 2 &= 1.25 && \text{得出 } B_{-2} = 1 \\ 0.25D \times 2 &= 0.5 && \text{得出 } B_{-3} = 0 \\ 0.50D \times 2 &= 1.0 && \text{得出 } B_{-4} = 1 \end{aligned}$$

所以, $0.8125D = 0.1101B$ 。

(3) 二进制数与十六进制数之间的转换

因为 $2^4 = 16$,故二进制数转换为十六进制数只需以小数点为起点,向两端每 4 位二进制用 1 位十六进制数表示即可。例如:

$$1101110.01011B = \underline{0110} \underline{1110}.\underline{0101} \underline{1000} B = 6E.58H$$

二进制数书写冗长易错,因此一般用十六进制表示数,这样比较简洁、方便。

3. 二进制数的运算

(1) 二进制数的算术运算

① 二进制加法。

二进制加法运算规则为:

$$\begin{aligned} 0+0 &= 0 \\ 0+1 &= 1 \\ 1+0 &= 1 \\ 1+1 &= 0(\text{进位 } 1) \end{aligned}$$

② 二进制减法。

二进制减法运算规则为:

$$\begin{aligned} 0-0 &= 0 \\ 1-1 &= 0 \\ 1-0 &= 1 \\ 0-1 &= 1(\text{有借位}) \end{aligned}$$

③ 二进制乘法。

二进制乘法运算规则为:

$$\begin{aligned} 0 \times 0 &= 1 \times 0 = 0 \times 1 = 0 \\ 1 \times 1 &= 1 \end{aligned}$$

④ 二进制除法。

二进制除法是乘法的逆运算。

(2) 二进制数的逻辑运算

① “与”运算(AND)。

“与”运算又称为逻辑乘,可用符号“·”或“∧”表示。A、B两个逻辑变量进行“与”运算的规则如下:

A	B	$A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

由上可知,只有当 A、B 两变量皆为 1 时,“与”的结果才为 1。

② “或”运算(OR)。

“或”运算又称为逻辑加,可用符号“+”或“∨”表示。A、B 两个逻辑变量进行“或”运算的规则如下:

A	B	$A \vee B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

由上可知,A、B 两变量中,只要有 1 个为 1,“或”运算的结果就是 1。

③ “非”运算(NOT)。

变量 A 的“非”运算的结果用 \bar{A} 表示,“非”运算的规则如下:

A	\bar{A}
0	1
1	0

④ “异或”运算(XOR)。

“异或”运算用“ \oplus ”表示,逻辑变量 A、B 进行“异或”运算的规则如下:

A	B	$A \oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

由上可知,A、B 两变量取值相同时,“异或”结果为 0;取值相异时,“异或”结果为 1。换句话说,一个逻辑变量和 0 异或结果不变,和 1 异或则取反。

以上 4 种逻辑运算都是按位进行的,任何时候都不发生进位。下面举一个逻辑运算的例子,已知 $A=11110101B, B=00110000B$,则: