

第 1 章 微型计算机概述

摘要 本章首先介绍微型计算机的发展概况，并从应用角度出发，介绍微型计算机中数的表示及编码方法，最后介绍微机系统的概念、组成和各部分的功能、特点。本章内容将对后续章节的学习打下良好的基础。

1.1 微型计算机发展简史

微型计算机是由大规模集成电路组成的、体积较小的电子计算机。而电子计算机又是一种能够按照事先存储的程序，自动、高速地进行大量数值计算和各种信息处理的现代化智能电子设备。微型计算机是电子计算机发展的一个分支。

1.1.1 微型计算机的硬件发展

1. 电子计算机的发展概况

电子计算机的诞生及发展，是科学技术和生产力发展的卓越成就之一，反过来，它也极大地促进了科学技术和生产力的发展。1946 年，在美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院诞生了世界上第一台电子计算机 ENIAC (electronic numerical integrator and computer)。它使用了 18 800 多个电子管和 1500 多个继电器，重达 30t，占地 150m²，耗电 150kW，每秒可以完成 5000 次加法运算。从此以后，电子计算机为世人瞩目，而且对它寄予了无限的厚望。自从第一台电子计算机问世以来，计算机科学与技术获得了日新月异的飞速发展。计算机的发展大致经历了以下 5 代。

(1) 第一代：电子管计算机

发展年代为 1946—1958 年。这一代计算机的主要逻辑元件采用电子管，存储器采用磁芯和磁鼓，软件主要使用机器语言。在此期间，形成了电子管计算机体系，确定了程序设计的基本方法，数据处理机（指专门用于数据处理的计算机）开始得到应用。此时的计算机运算速度一般为每秒几千至几万次，体积庞大，成本很高。虽然它的体积、速度、软件等方面都不能与今天的微型计算机相比，但它却奠定了计算机科学和技术的发展基础。这一代计算机主要应用于科学计算。

(2) 第二代：晶体管计算机

发展年代为 1958—1965 年。这一代计算机的主要逻辑元件为晶体管，主存储器仍采用磁芯，外存储器已开始使用磁盘，软件也有较大发展，出现了各种高级语言。在此期间，计算机的可靠性和速度均得到提高，速度一般为每秒几万次至几十万次，体积减小，成本降低。工业控制机（指专门用于工业生产过程控制的计算机）开始出现并得到应用。这一代计算机除用于科学计算外，也开始应用于各种事务的数据处理、工业控制等领域。

(3) 第三代：集成电路计算机

发展年代为 1965—1971 年。这一代计算机的主要逻辑元件采用中小规模集成电路。在此期间，计算机的可靠性和速度都有了进一步的提高，速度一般为每秒几十万至几百万次，体积

进一步减小，成本进一步降低。小型计算机（指规模小，结构简单，操作方便的计算机）开始出现并迅速发展，操作系统、会话式高级语言等软件发展迅速。机种多样化，生产系列化，结构积木化，使用系统化是这一阶段计算机发展的主要特点。

(4) 第四代：大规模集成电路计算机

发展年代为 20 世纪 70 年代初期。这一代计算机采用大规模集成电路 LSI (large scale integrator) 或超大规模集成电路 VLSI (very large scale integrator)。由于 LSI 和 VLSI 的体积小、耗电少、可靠性高，因此使这一阶段的计算机体积更小，可靠性和运算速度更高，成本更低。计算机的速度可达每秒运算几千万至上亿次。超大规模集成电路的发明，使电子计算机不断向着小型化、微型化、低功耗、智能化、系统化的方向更新换代。同时，以并行处理为特征的用于科学计算和尖端技术中的巨型机也得到了发展，由若干台计算机组成的计算机网络也已开始实际使用。

(5) 第五代：人工智能计算机

1981 年 10 月，日本首先向世界宣告开始研制第五代计算机。第五代计算机是把信息采集、存储、处理、通信同人工智能结合在一起的智能计算机系统。它能进行数值计算或处理一般的信息，主要能面向知识处理，具有形式化推理、联想、学习和解释的能力，能够帮助人们进行判断、决策、开拓未知领域和获得新的知识。人一机之间可以直接通过自然语言（声音、文字）或图形图像交换信息。

第五代计算机基本结构通常由问题求解与推理、知识库管理和智能化人机接口三个基本子系统组成。问题求解与推理子系统相当于传统计算机中的中央处理器。与该子系统打交道的程序语言称为核心语言，国际上都以逻辑型语言或函数型语言为基础进行这方面的研究，它是构成第五代计算机系统结构和各种超级软件的基础。知识库管理子系统相当于传统计算机主存储器、虚拟存储器和文体系统结合。与该子系统打交道的程序语言称为高级查询语言，用于知识的表达、存储、获取与更新。知识库包括通用知识库、系统知识库和应用知识库。通用知识库是第五代计算机系统基本软件的核心，包含日用词法、语法、语言字典和基本字库。系统知识库用于描述系统本身的技术规范。应用知识库是将某一应用领域（如超大规模集成电路设计）的技术知识集中在一起形成的知识库。智能化人一机接口子系统是使人能通过说话、文字、图形和图像等与计算机对话，用人类习惯的各种可能的方式交流信息。这里，自然语言是最高级的用户语言，它使非专业人员操作计算机，并为从中获取所需的知识信息提供可能。电子计算机的发展概况见表 1.1。

表 1.1 电子计算机的发展概况

计算机	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代
特征	采用电子管作为计算机的逻辑元件，运算速度每秒仅几千次，内存容量仅几 KB	采用晶体管作为计算机的逻辑元件，运算速度每秒达几十万次	采用集成电路作为计算机的逻辑元件，运算速度每秒达几十万至几百万次	采用大规模和超大规模集成电路作为计算机的逻辑元件，运算速度每秒达几千万次	采用超大规模集成电路作为计算机的逻辑元件，运算速度每秒达上亿次
时间	1946—1958 年	1958—1965 年	1965—1971 年	1971—2006 年	2006 年至今
代表机型	ENIAC	CDC7600	IBM360	Intel 80x86	Intel Core
应用	仅限于军事和科研中的科学计算	由科学计算扩展到数据处理和自动控制	开始广泛应用于各个领域	应用范围已渗透到各行各业，并进入了以网络为特征的时代	广泛应用于当今网络时代的各行各业及日常生活

2. 微型计算机的发展概况

微型计算机从 20 世纪 70 年代初发展至今，经历了以下几个发展阶段。

(1) 第一代：低档 8 位微处理器和微型计算机

发展年代为 1971—1973 年，是微型计算机的问世阶段。1971 年美国 Intel 公司生产出 4004 芯片，专为高级袖珍计算机设计。经过改进，于 1972 年生产出 8 位微处理器 8008。这一代微型计算机的特点是采用 PMOS (P-channel metal oxide semiconductor) 工艺，集成度为每个硅片上集成 2300 个晶体管，字长分别为 4 位和 8 位，运算速度较慢，指令系统不完整，存储器容量只有几百字节，没有操作系统，只有汇编语言，主要用于工业仪表和过程控制。

(2) 第二代：中档 8 位微处理器和微型计算机

发展年代为 1973—1977 年。这一代微型计算机采用 NMOS (N-channel metal oxide semiconductor) 工艺，集成度提高了 1~4 倍，每个硅片上集成了 8000 个晶体管，字长为 8 位。运算速度提高了 10~15 倍，基本指令执行时间为 2 μ s 左右，指令系统相对比较完善。典型的微处理器有 1973 年生产的 Intel 8085、Motorola 6800，以及 1976 年 Zilog 公司生产的 Z80。这些微处理器具有完整的接口电路，如可编程的并行接口电路、串行接口电路、定时/计数器接口电路，以及直接存储器存取接口电路等，并且已具有高级中断功能。软件除采用汇编语言外，还配有 BASIC、FORTRAN 和 PL/M 等高级语言及其相应的解释程序和编译程序，并在后期配上了操作系统。

(3) 第三代：16 位微处理器和微型计算机

发展年代为 1977—1984 年。1977 年前后，超大规模集成电路工艺的研制成功，使一个硅片上可以容纳 10 万个以上的晶体管，64K 位及 256K 位的存储器也相继诞生。这一代微型计算机采用 HMOS (high performance metal oxide semiconductor) 工艺，基本指令执行时间约为 0.5 μ s。代表产品是 Intel 的 8086、Zilog 的 Z8000 和 Motorola 的 MC68000。这类 16 位微处理器比 8 位微处理器有更大的寻址空间、更强的运算能力、更快的处理速度和更完善的指令系统。软件方面可以使用多种编程语言，有汇编程序、完整的操作系统、大型的数据库，并可构成多处理器系统。

(4) 第四代：32 位微处理器和微型计算机

发展年代为 1984—1993 年。20 世纪 80 年代初，在每个单片硅片上可集成几十万个晶体管，产生出第四代 32 位微处理器。典型产品有 Intel 的 80386、National Semiconductor 的 16032、Motorola 的 68020 等。在 32 位微处理器中，具有支持高级调度、调试及系统开发的专用指令。由于集成度高，系统的速度和性能大为提高，可靠性增加，成本降低。

(5) 第五代：64 位高档微处理器和微型计算机

发展年代为 1993 年至今。随着人们对图形图像、定时视频处理、语音识别、计算机辅助设计 CAD (computer-aided design)、计算机辅助工程 CAE (computer-aided engineering)、计算机辅助教学 CAI (computer-aided instruction)、大规模财务分析和大流量客户、服务器应用等的需求日益迫切，现有的微处理器已难以胜任此类任务。于是，在 1993 年 3 月，Intel 公司率先推出了统领 PC (personal computer) 达 10 余年之久的第五代微处理器体系结构产品——Pentium (奔腾)，代号为 P5，也称为 80586。从它的设计制造工艺到性能指标，都比第四代产品有了大幅度的提高。

2006 年，Intel 公司推出第一代 Core 酷睿微处理器，至 2017 年 8 月 22 日，Intel 公司正式发布了第八代酷睿微处理器，新一代处理器增强了对 4K 视频编辑以及虚拟现实应用的支持。第八代酷睿处理器最重要的升级是将处理器扩展到了 4 核 8 线程。由于架构的升级，第八代酷睿

睿处理器将使得笔记本电脑的厚度能够低于 19mm，能运行 4K 高清视频、虚拟现实应用以及混合显示应用，除此之外，新的 UHD Graphics (ultra high density) 核显可以支持到 4K 在线解码、多屏输出和 VR (virtual reality) 虚拟现实内容，另外还有 Windows Hello、指纹识别和 Thunderbolt 接口的支持，让笔记本电脑具备更强的生产力和多媒体娱乐能力。微型计算机的发展概况见表 1.2。

表 1.2 微型计算机的发展概况

微处理器	第一代 (8 位)	第二代 (8 位)	第三代 (16 位)	第四代 (32 位)	第五代 (64 位)
时间	1971—1973 年	1973—1977 年	1977—1984 年	1984—1993 年	1993 年至今
代表产品	Intel 8008	Intel 8085	Intel 8086	Intel 80386	Pentium、Core

3. Intel 微处理器的发展概况

80x86、Pentium 及 Core 微处理器是 Intel 公司的系列产品，微处理器芯片从低级向高级、从简单到复杂的发展过程，也可以看成个人计算机家族的进化史。其设计、制造和处理技术的不断更新换代，以及处理能力的不断增强，使微型计算机的应用领域越来越广泛。

(1) Intel 8086 微处理器

1978 年，Intel 公司生产的 8086 是第一个 16 位的微处理器。8086 微处理器最高主频速度为 8MHz，具有 16 位数据总线，内存寻址能力为 1MB。

(2) Intel 80286 微处理器

1982 年，Intel 公司在 8086 的基础上，研制出了 80286 微处理器，该微处理器的最大主频为 20MHz，内、外部数据传输均为 16 位，使用 24 位内存寻址，寻址能力为 16MB。80286 有两种工作方式，分别是实模式和保护方式。80286 在以下 4 个方面有显著的改进：支持更大的内存；能够模拟内存空间；能同时运行多个任务；提高了处理速度。最早，PC 的速度是 4MHz，第一台基于 80286 的 AT 机运行速度为 6~8MHz，一些制造商还自行提高速度，使 80286 达到了 20MHz，这意味着在性能上有了重大的进步。

(3) Intel 80386 微处理器

1985 年，Intel 公司研制开发出 Intel 80386 DX 微处理器，其内部包含 27.5 万个晶体管，时钟频率为 12.5MHz，每秒可执行 6 百万条指令，比 80286 快 2.2 倍。后来逐步提高到 20MHz、25MHz、33MHz，最后还有少量的 40MHz 产品。

80386 DX 的内部和外部数据总线是 32 位的，地址总线也是 32 位的，可以寻址 4GB 内存，并可以管理 64TB 的虚拟存储空间。它的运算模式除了具有实模式和保护模式外，还增加了一种“虚拟 8086”的工作方式，可以通过同时模拟多个 8086 微处理器来提供多任务处理能力。80386 还有较丰富的外围配件支持，如 82258 (DMA 控制器)、8259A (中断控制器)、8272 (磁盘控制器)、82385 (Cache 控制器)、82062 (硬盘控制器) 等。同时，针对内存的速度瓶颈，Intel 公司为 80386 设计了高速缓存 (Cache)，采取预读内存的方法来缓解速度瓶颈，从此，Cache 就成了 CPU 的标准配件。

(4) Intel 80486 微处理器

1989 年，Intel 推出 80486 芯片。这款芯片首次使用 1 μ m 的制造工艺，突破了 100 万个晶体管的界限，单个硅片上集成了 120 万个晶体管。80486 的时钟频率从 25MHz 逐步提高到 33MHz、40MHz、50MHz。80486 中集成的 80487 的运算速度是以前 80387 的两倍，内部缓存缩短了微处理器与慢速 DRAM 之间的等待时间。并且，在 80486 系列中首次采用了精简指令集 RISC (reduction instruction set computer) 技术，可以在一个时钟周期内执行一条指令。它还采

用了突发总线方式，大大提高了与内存的数据交换速度。由于这些改进，80486 的性能比 80386 DX 性能提高了 4 倍。

(5) Intel Pentium 系列微处理器

1) 1993 年，586 CPU 问世，被命名为 Pentium（奔腾）以区别于 AMD 和 Cyrix 的产品。最初的 Pentium 60 和 Pentium 66，工作频率分别为 60MHz 和 66MHz。早期的奔腾时钟频率为 75MHz~120MHz，使用 0.5 μ m 的制造工艺，后期 120MHz 频率以上的奔腾则改用 0.35 μ m 工艺。

2) Intel Pentium MMX 微处理器。

1996 年年底，Intel 公司发布了多能奔腾微处理器 Pentium MMX，采用多媒体扩展指令集 MMX (MultiMedia Extensions)，增加了片内 16KB 数据 L1 Cache，16KB 指令 L1 Cache，4 路写缓存以及分支预测单元和返回堆栈技术，64 位总线，528MB/s 的频宽，450 万个晶体管，功耗 17W。支持的工作频率有 133MHz、150MHz、166MHz、200MHz、233MHz。特别是新增加的 57 条 MMX 多媒体指令，比同主频的 Pentium CPU 要快得多。

3) Intel Pentium II 微处理器。

1997 年，Pentium II（奔腾二代）微处理器面世，它采用了双重独立总线结构，其中一条总线连通二级缓存，另一条负责内存。Pentium II 外部高速 L2 Cache，容量为 512KB，并以 CPU 主频的一半速度运行，同时 Pentium II 的 L1 Cache 从 16KB 增至 32KB。

4) Intel Pentium III 微处理器。

1999 年，Intel 公司发布 Pentium III 微处理器。它采用 0.25 μ m 工艺制造，内部集成了 950 万个晶体管，系统总线频率为 100MHz；采用 P6 微架构，针对 32 位应用程序进行优化，双重独立总线，一级缓存为 32KB（16KB 指令缓存加 16KB 数据缓存），二级缓存为 512KB，以 CPU 核心速度的一半运行；采用数据流单指令多数据扩展 SSE (streaming SIMD extensions) 指令集，增强了音频、视频和 3D 图形效果。

5) Intel Pentium 4 微处理器。

2000 年 6 月，Intel 公司推出了 Pentium 4 微处理器，其工作频率为 1.3GHz，工作电压为 1.565~1.700V。支持 Intel 超线程技术 HT (hyper threading) 技术，缩短了 CPU 的闲置时间，提高了 CPU 的运行效率。

(6) Intel Core 系列微处理器

Intel 公司继使用长达 12 年之久的“奔腾”处理器之后，于 2006 年 7 月 27 日，正式发布了基于 Core（酷睿）微架构 (core micro-architecture) 的全新双核心处理器，包括 Core 2 Duo 和 Core 2 Extreme。Core 微架构采用 65nm 制造工艺，L2 缓存容量提升到 4MB，晶体管数量达到 2.91 亿个，性能提升 40%，能耗降低 40%，主流产品的平均能耗为 65W。从此，酷睿正式成为 Intel 的主流架构。Intel 微处理器发展年鉴见表 1.3。

表 1.3 Intel 微处理器发展年鉴

微处理器	首批生产时间	性能 (MIPS) ^①	CPU 最高主频 (MHz)	集成度 (百万个) ^②	寄存器宽度	外部数据总线宽度	最大寻址空间	内含 (或捆绑) 高速缓存大小
8086	1978	0.8	8	0.029	16	16	1MB	无
80286	1982	2.7	12.5	0.134	16	16	16MB	无
80386 DX	1985	6.0	20	0.275	32	32	4GB	无
80486 DX	1989	20	25	1.2	32	32	4GB	8KB L1
Pentium	1993	100	200	3.1	32	64	4GB	16KB L1

(续表)

微处理器	首批生产时间	性能 (MIPS) ①	CPU 最高主频 (MHz)	集成度 (百万个) ②	寄存器宽度	外部数据总线宽度	最大寻址空间	内含 (或捆绑) 高速缓存大小
Pentium Pro (P6)	1995	440	266	5.5	32	64	64GB	16KB L1, 256KB 或 512KB L2 ^④
Pentium II	1997	466	450	7.5	32	64	64GB	32KB L1, 256KB 或 512KB L2
Pentium III	1999	1000	900	28.2	32 ^③	64	64GB	32KB L1, 256KB 或 512KB L2
Pentium 4	2000	3200	2800	42	32 ^③	64	64GB	32KB L1, 256KB 或 512KB L2
Core 2 Duo	2006		2640000	291	64	64	64GB	3M L1, 4M L2

注: ① MIPS (millions of instructions per second, 百万条指令每秒), 每秒执行的指令数。

② 芯片中所集成的晶体管数, 单位为百万个。

③ 用作通用目的寄存器时为 32 位, 用于单指令多数数据流 SIMD (single instruction multiple data) 处理时为 128 位。

④ L1 为一级高速缓存器, L2 为二级高速缓存器。

2010 年 1 月, Intel 公司推出了全新酷睿处理器 i7、i5 和 i3 系列产品。新产品的最大亮点就是采用 32nm 制造工艺, 而且内建图形核心, 另外还有 Intel 最新的睿频功能, 可以让 CPU 在实际应用中实现自动超频。从 2010 年至今, Intel 公司共推出八代酷睿微处理器, 处理器最高睿频为 4.5GHz, 光刻达到 14nm。酷睿处理器 i7 系列产品技术参数见表 1.4。

表 1.4 酷睿处理器 i7 系列产品技术参数^①

序号	微处理器	首批生产时间	CPU 架构	CPU 最高主频 (GHz) ②	制程 (nm)	核心数量	线程数量	最大内存 (GB)	高速缓存 (MB)	总线速度 (GT/s)	最低功耗 (W)
第一代	Core i7 880	2010	Lynnfield	3.06/3.77	45	4	8	16	8	2.5	95
第二代	Core i7 2600S	2011	Sandy Bridge	2.8/3.8	32	4	8	32	8	5	65
第三代	Core i7 3770K	2012	Ivy Bridge	3.5/3.9	22	4	8	32	8	5	77
第四代	Core i7 4770K	2013	Haswell	3.5/3.9	22	4	8	32	8	5	84
第五代	Core i7 5775R	2015	Broadwell	3.3/3.8	14	4	8	32	6	5	65
第六代	Core i7 6785R	2016	Skylake	3.3/3.9	14	4	8	64	8	8	65
第七代	Core i7 7700K	2017	Kaby Lake	4.2/4.5	14	4	8	64	8	8	91
第八代	Core i7 8550U	2017	Kaby Lake R	1.8/4.0	14	4	8	32	8	4	15

注: ① 表中技术参数来源 Intel 官网 <https://www.intel.cn>。

② “/” 前为基本频率, “/” 后为睿频后的频率。

1.1.2 微型计算机的软件发展

计算机软件是指计算机系统上的程序及其文档。程序是对计算任务的处理对象和处理规则的描述。文档是为了便于了解程序所需的阐明性资料。计算机软件总体分为系统软件和应用软件两大类。系统软件包括各类操作系统 (如 Windows、Linux、UNIX)、操作系统的补丁程序以及硬件驱动程序。应用软件是为了某种特定的用途而被开发的软件, 较常见的有文字处理软件、信息管理软件、辅助设计软件、实时控制软件、教育与娱乐软件等。

1. 操作系统

操作系统 (operating system, OS) 是管理和控制计算机硬件与软件资源的计算机程序, 是直接运行在“裸机”上的最基本的系统软件, 任何其他软件都必须在操作系统的支持下才能运

行。从 1946 年诞生第一台电子计算机以来，它的每一代进化都以减少成本、缩小体积、降低功耗、增大容量和提高性能为目标。随着计算机硬件的发展，同时也加速了操作系统的形成和发展。早期的计算机并没有操作系统，人们通过各种操作按钮来控制计算机，后来出现了汇编语言，操作人员通过有孔的纸带将程序输入计算机进行编译。这些将语言内置的计算机只能由操作人员自己编写程序来运行，不利于设备、程序的公用。为了解决这种问题，就出现了操作系统，实现了程序的公用，以及对计算机硬件资源的管理。

操作系统的发展经历了两个阶段。第一个阶段为单用户、单任务的操作系统，分别有 CP/M、DR-DOS、PC-DOS 和 MS-DOS 等磁盘操作系统。第二个阶段是多用户、多任务的分时操作系统，其典型代表有 UNIX、XENIX、OS/2 以及 Windows 操作系统。目前，计算机上常见的操作系统有 DOS、OS/2、UNIX、XENIX、Linux、Windows、Netware 等。

(1) DOS 操作系统

DOS (disk operation system) 硬盘操作系统主要包括 Shell (command.com 文件) 和 I/O 接口 (io.sys 文件) 两部分。Shell 是 DOS 的外壳，负责将用户输入的命令翻译成操作系统能够理解的语言。DOS 的 I/O 接口通常实现一组基于 INT 21H 的中断。

DOS 操作系统的代表是 MS-DOS，它是 1981 年基于 8086 微处理器而设计的单用户操作系统。后来，Microsoft 公司获得了该操作系统的专利权，配备在 IBM-PC 机上，并命名为 PC-DOS。1981 年，Microsoft 公司的 MS-DOS 1.0 版与 IBM 的 PC 机面世，这是第一个实际应用的 16 位操作系统。1987 年，Microsoft 公司发布 MS-DOS 3.3 版本，是非常成熟可靠的 DOS 版本，Microsoft 公司取得个人操作系统的霸主地位。

从 1981 年问世至 2000 年，MS-DOS 8.0 (MS-DOS 的最后一个版本)，DOS 经历了 8 次大的版本升级，不断改进和完善。但是，DOS 系统的单用户、单任务、字符界面和 16 位的大格局没有变化，因此它对于内存的管理也局限在 640KB 的范围内。DOS 的优点是快捷。熟练的用户可以通过创建 BAT 或 CMD 批处理文件完成一些烦琐的任务。因此，即使在 Windows XP 下，CMD 还是高手的最爱。MS-DOS 操作系统发展年鉴见表 1.5。

表 1.5 MS-DOS 操作系统发展年鉴

时间	版本	简介
1981 年	MS-DOS 1.0	作为 IBM PC 的操作系统进行捆绑发售，支持 16KB 内存及 160KB 的 5 寸软盘
1983 年	MS-DOS 2.0	随 IBM XT 的发布，MS-DOS 2.0 扩展了命令，开始支持 5M 硬盘。同年发布的 2.25 版本对 2.0 版本进行了一些 bug 修正
1984 年	MS-DOS 3.0	增加了对新的 IBM AT 的支持，并开始对部分局域网功能提供支持
1986 年	MS-DOS 3.2	支持 720KB 的 5 寸软盘
1987 年	MS-DOS 3.3	支持 IBM PS/2 设备及 1.44MB 的 3 寸软盘，并支持其他语言的字符集
1988 年	MS-DOS 4.0	增加了 DOS Shell 操作环境，增强功能及更新
1991 年	MS-DOS 5.0	增强了 DOS Shell 功能，增加了内存管理和宏功能
1993 年	MS-DOS 6.x	增加了 GUI 程序（如 Scandisk、Defrag 和 Msbackup 等）和磁盘压缩功能，增强了对 Windows 的支持
1995 年	MS-DOS 7.x	增加了长文件名和 LBA 大硬盘支持。全面支持 FAT32 分区、大硬盘、大内存等。特别是对 4 位年份支持，解决了千年虫问题
2000 年	MS-DOS 8.0	MS-DOS 的最后一个版本，由于微软看到了 Windows 的曙光，于是放弃了 DOS

(2) Windows 操作系统

Windows 操作系统是 Microsoft 公司在 1985 年 11 月发布的第一代窗口式多任务系统，它使 PC 开始进入了图形用户界面时代。它采用了 GUI 图形化操作模式，比 DOS 操作系统更为人性化。1987 年年底，Microsoft 公司又推出了 Windows 2.x 版本，它具有窗口重叠功能，窗口大

小也可以调整。1990年，Microsoft公司推出了Windows 3.0版本，它具有强大的内存管理功能，因此成为80386和80486微型计算机新的操作系统标准。需要指出的是，从1.0到3.0版本，Windows都是由DOS引导的，也就是说，它们还不是一个完全独立的系统。

1995年，Microsoft公司推出了Windows 95，它是一个完全独立的、全新的32位系统，集成了网络功能和即插即用功能。1998年，Microsoft公司推出了Windows 95的改进版Windows 98，Windows 98的一个最大特点就是把Microsoft公司的Internet浏览器技术整合到了Windows 95里面，使得访问Internet资源就像访问本地硬盘一样方便，从而更好地满足了人们越来越多的访问Internet资源的需要。2000年2月，Microsoft公司推出Windows 2000，它是32位图形商业性质的操作系统。

2003年3月28日，Microsoft公司发布了64位的Windows XP。字母XP代表英文单词的“体验”(experience)。2006年11月30日，Microsoft公司发布全新的Windows Vista操作系统，使PC正式进入双核、大内存、大硬盘时代。2009年10月22日，Microsoft公司发布Windows 7操作系统，它是除XP外第二经典的Windows系统，现在的网络工作者绝大多数在使用Windows 7。2012年10月26日，Windows 8在美国正式推出，它支持Intel、AMD和ARM芯片架构的微处理器，被应用于个人计算机和平板电脑上，尤其是移动触控电子设备，如触屏手机、平板电脑等。2015年7月29日，Microsoft公司发布Windows 10操作系统，采用全新的开始菜单，并且重新设计了多任务管理界面，任务栏中出现了一个全新的Taskview“查看任务”。桌面模式下可运多个应用和对话框，并且还能在不同桌面间自由切换。Windows 10添加了虚拟桌面功能，用户希望区分不同的使用场景时，可以新建多个虚拟桌面。Windows操作系统发展年鉴见表1.6

表 1.6 Windows 操作系统发展年鉴

时间	版本	简介
1985年	Windows 1.0	第一代窗口式多任务系统，它使PC开始进入了图形用户界面时代。但由于当时的硬件平台为PC/XT，速度很慢，所以Windows 1.x版本并未十分流行
1987年	Windows 2.0	对使用者界面做了改进，增强了键盘和鼠标界面，特别是加入了功能表和对话框
1990年	Windows 3.0	它将Win/286和Win/386结合到同一种产品中。Windows 3.0是第一个在家用和办公室市场上取得立足点的版本。但是Windows 3.x版本的操作系统都必须运行于MS DOS操作系统之上
1993年	Windows NT	Windows NT是第一个支持Intel386、486和Pentium CPU的32位保护模式的版本。同时，Windows NT还可以移植到非Intel平台上，并在几种使用RISC晶片的工作站上工作
1995年	Windows 95	缺少了Windows NT中某些功能，如高安全性和对RISC机器的可携性等，但是Windows 95具有需要较少硬件资源的优点，是一个全新的32位操作系统
1996年	Windows 98	具有许多加强功能，包括执行效能的提高、更好的硬件支持以及一国际网络和全球资讯网(www)更紧密的结合
2000年	Windows 2000	Windows 2000被誉为迄今最稳定的操作系统，从Windows 2000开始，正式抛弃了9X的内核
2003年	Windows XP	64位操作系统，易于用户操作。根据不同的微处理器架构，Windows XP分为两个不同版本，IA-64版和x86-64版。IA-64版的Windows XP是针对Intel IA-64架构的安腾2(Itanium2)纯64位微处理器的操作系统，称为Windows XP 64-Bit Edition Version 2003 for Itanium-based Systems
2006年	Windows Vista	PC正式进入双核、大(内存、硬盘)时代，但是由于Vista与XP的使用习惯有一定的差异，以及软/硬件的兼容问题，导致Vista普及率并不高，然而Vista华丽的界面和炫目的特效还是值得赞赏的
2009年	Windows 7	它是一个完美的桌面操作系统，具有五个特点：针对笔记本电脑的特有设计、基于应用服务的设计、用户的个性化、视听娱乐的优化和用户易用性的新引擎
2012年	Windows 8	针对触摸屏设备进行了诸多优化，在界面设计上，采用平面化设计。Windows8操作系统具有良好的续航能力，且启动速度更快、占用内存更少，并且兼容Windows 7所支持的软件和硬件
2015年	Windows 10	Windows 10贯彻了“移动为先，云为先”的设计思路，是跨平台最广的操作系统

(3) UNIX 操作系统

UNIX 操作系统是一个强大的多用户、多任务、多层次的操作系统，支持多种处理器架构，属于分时操作系统。UNIX 最早是由 Ken Thompson 和 Dennis Ritchie 于 1969 年在 AT&T (American Telephone & Telegraph) 公司的贝尔实验室开发的。经过长期的发展和完善，UNIX 成长为一种主流的操作系统技术和基于这种技术的产品大家族。由于 UNIX 具有技术成熟、结构简练、可靠性高、可移植性好、可操作性强、网络和数据库功能强、伸缩性突出和开放性好等特点，可满足各行各业的实际需要，特别能满足企业重要业务的需要，因此它已经成为主要的工作站平台和重要的企业操作平台。UNIX 主要安装在巨型计算机、大型机上作为网络操作系统使用，也可用于个人计算机和嵌入式系统。

最初的 UNIX 是用汇编语言编写的，后来也有用 B 语言和汇编语言混合编写的。因为 B 语言在进行系统编程时不够强大，所以 1973 年 Thompson 和 Ritchie 用 C 语言重写了 UNIX。用 C 语言编写的 UNIX 代码简洁紧凑、易移植、易读、易修改，为 UNIX 此后的发展奠定了坚实基础。

1975 年，UNIX 的 4、5、6 三个版本先后面世。1978 年，已经有大约 600 台计算机在运行 UNIX。1979 年，UNIX 版本 7 发布，这是最后一个广泛发布的研究型 UNIX 版本。20 世纪 80 年代相继发布的 8、9、10 版本只授权给了少数大学和研究所。1982 年，具有 UNIX 所有权的 AT&T 公司基于版本 7 开发了 UNIX System III 的第一个版本，为了解决混乱的 UNIX 版本情况，AT&T 综合了其他大学和公司开发的各种 UNIX，开发了 UNIX System V Release 1。这个 UNIX 商业发布版本不再包含源代码。所以加州大学 Berkeley 分校继续开发 BSD UNIX，作为 UNIX System III 和 V 的替代选择。BSD 对 UNIX 最重要的贡献之一是 TCP/IP。此后 AT&T 继续为 UNIX System V 增加了文件锁定、系统管理、作业控制、程序流和远程文件系统。从 1987 年到 1989 年，AT&T 决定将 Xenix、BSD、SunOS 和 System V 融合为 System V Release 4 (SVR4)。这一版本将多种特性融为一体，结束了混乱的竞争局面。1993 年以后，大多数商业 UNIX 发行商都基于 SVR4 开发自己的 UNIX 变体。

(4) Linux 操作系统

Linux 操作系统来源于 UNIX，是目前全球最大的一个自由软件，它是一个可与 UNIX 和 Windows 相媲美的操作系统，具有完备的网络功能。Linux 的基本思想有两点：第一，一切都是文件；第二，每个软件都有确定的用途。其中，第一点详细来讲就是系统中的所有都归结为一个文件，包括命令、硬件和软件设备、操作系统、进程等对于操作系统内核而言，都被视为拥有各自特性或类型的文件。

Linux 最初由芬兰赫尔辛基大学的学生 Linus Torvalds 开发，其源程序在 Internet 上公布以后，引起了全球计算机爱好者的青睐。1991 年 4 月发布了 Linux 0.01 版本，随后在 10 月发布了第 2 个版本 Linux 0.02 版。2001 年，Linux 2.4 版内核发布，它进一步地提升了 SMP 系统的扩展性，同时它也集成了 USB 接口和支持内置的即插即用等功能。2003 年，Linux 2.6 版内核发布。相对于 2.4 版内核，2.6 版在对系统的支持方面很大的变化：第一，更好地支持大型多处理器服务器，特别是采用 NUMA 设计的服务器；第二，更好地支持嵌入式设备，如手机、网络路由器或者视频录像机等；第三，对鼠标和键盘指令反应更加迅速；第四，对设备驱动程序做了彻底更新，例如，与硬盘和 CD 光驱通信的软件模块。

现在的 Linux 经过数次改版后已经发展成为一个纯 32 位多工操作系统，64 位版本也在开发之中。Linux 可以兼容大部分的 UNIX 系统，很多的 UNIX 程序不需要改动，或者进行很少的改变，就可以运行于 Linux 环境。Linux 内置了 TCP/IP 协议，可以直接连入 Internet，作为服务器或者终端使用。同时 Linux 也内置了 Java 解释器，可直接运行 Java 源代码，具备程序语言开发、文字编辑和排版、数据库处理等能力。Linux 还提供了 Windows 的图形界面，主要用于

80x86 系列的 PC，也有其他不同硬件平台的版本，支持现在流行的所有硬件设备。就性能来说，它并不弱于 Windows 和 UNIX，而且依靠仿真程序还可以运行 Windows 应用程序。

2. 程序设计语言

计算机程序都是用某种计算机所能识别的语言编写的。程序设计语言的发展经历了机器语言、汇编语言和高级语言三个阶段。

(1) 机器语言

机器语言是直接由二进制代码指令表达的计算机语言，指令是用 0 和 1 组成的一串代码，它们有一定的位数，并分成若干段，各段的编码表示不同的含义。一条指令就是机器语言的一条语句，包括操作码和地址码。操作码指明了指令的操作性质及功能，地址码则给出了操作数或操作数的地址。每台机器的指令，其格式和代码所代表的含义都是硬性规定的，故称之为面向机器的语言，也称为机器语言。

机器语言的特点是计算机可以直接识别，不需要进行任何翻译，执行速度较快。但是，由于机器语言由大量的二进制代码组成，不易学也不易掌握，可读性较差。同时它严重地依赖于具体的计算机，所以可移植性差、重用性差。机器语言是第一代计算机的编程语言，对不同型号的计算机来说一般是不同的。

(2) 汇编语言

汇编语言也是面向机器的程序设计语言。在汇编语言中，用助记符代替操作码，用地址符号或标号代替地址码。这样采用符号代替机器语言中的二进制代码，就把机器语言变成了汇编语言，所以汇编语言也称为符号语言。使用汇编语言编写的程序，机器不能直接识别，要由一种程序将汇编语言翻译成机器语言，这种起翻译作用的程序叫汇编程序，把汇编语言翻译成机器语言的过程称为汇编。

汇编语言的特点是能够直接访问与硬件相关的存储器或 I/O 端口，不受编译器的限制，对生成的二进制代码进行完全的控制，避免因线程共同访问或者硬件设备共享引起的死锁，能根据特定的应用对代码做最佳的优化，提高运行速度，最大限度地发挥硬件的功能。汇编语言比机器语言易于读/写、调试和修改，同时具有机器语言的全部优点。同时还应该认识到，汇编语言是一种层次非常低的语言，面向具体机型的，它离不开具体计算机的指令系统。因此，对于不同型号的计算机，有着不同的结构的汇编语言，而且，对于同一问题所编制的汇编语言程序在不同种类的计算机间是互不相通的，通用性也差。但是，用汇编语言编制的系统软件和过程控制软件，其目标程序占用内存空间少，运行速度快，有着高级语言不可替代的用途。例如，70%以上的系统软件，某些快速处理、位处理、访问硬件设备等高效程序，某些高级绘图程序，视频游戏程序都是用汇编语言编写的，它是理解整个计算机系统的最佳起点和最有效途径。

(3) 高级语言

不论机器语言还是汇编语言都是面向硬件的具体操作，由于它们对机器的过分依赖，要求使用者必须对硬件结构及其工作原理都十分熟悉。随着计算机事业的发展，促使人们去寻求一些与人类自然语言相接近且能为计算机所接受的语意确定、规则明确、自然直观和通用易学的计算机语言。这种与自然语言相近并为计算机所接受和执行的计算机语言称为高级语言。高级语言是面向用户的语言，无论何种机型的计算机，只要配备上相应的高级语言的编译或解释程序，采用该高级语言编写的程序就可以通用。

高级语言主要是相对于汇编语言而言的，它并不特指某一种具体的语言，而是包括了很多编程语言，例如，BASIC、Pascal、C/C++、COBOL、FORTRAN、LOGO 以及 VB、VC、VC++、Java 等。计算机并不能直接地接受和执行用高级语言编写的源程序，源程序在输入计算

机时，通过“翻译程序”翻译成机器语言形式的目标程序，计算机才能识别和执行。

3. 应用软件

应用软件是用户可以使用的各种程序设计语言，以及用各种程序设计语言编制的应用程序的集合，分为应用软件包和用户程序。应用软件包是利用计算机解决某类问题而设计的程序的集合，供多用户使用。常用的应用软件包括：办公软件、网络软件、多媒体软件、商务软件、数据库软件等。

(1) 办公软件

办公软件指可以进行文字处理、表格制作、幻灯片制作、简单数据库处理等方面工作的软件，包括微软 Office 系列和金山 WPS 系列等。办公软件的应用范围很广，大到社会统计，小到会议记录、数字化办公都离不开办公软件的鼎力协助。目前办公软件朝着操作简单化和功能细化等方向发展。

(2) 网络软件

网络软件指在计算机网络环境中，用于支持数据通信和各种网络活动的软件。网络软件包括通信软件、网络服务软件、网络应用软件、网络应用系统、网络管理系统以及用于特殊网络站点的软件等。

(3) 多媒体软件

多媒体软件包括字处理软件、绘图软件、图像处理软件、动画制作软件、声音编辑软件以及视频编辑软件，如 Flash、Photoshop、Powerplayer、Pplive 等。

(4) 商务软件

商务软件包括会计软件、企业工作流程分析、客户关系管理软件、企业资源计划软件、供应链管理软件、产品生命周期管理软件等。

(5) 数据库软件

数据库软件是指用于数据管理的软件系统，具有信息存储、检索、修改、共享和保护的功能。目前流行的数据库软件有 Access、Sybase、SQL server、ORACLE、Foxpro 等。

1.2 微型计算机运算基础

1.2.1 二进制数的运算方法

计算机具有强大的运算能力，它可以进行两种运算：算术运算和逻辑运算。

1. 二进制数的算术运算

二进制数的算术运算包括：加、减、乘、除四则运算，下面分别予以介绍。

(1) 二进制数的加法

根据“逢二进一”规则，二进制数加法的法则如下：

$$0+0=0, \quad 1+1=0 \quad (\text{进位为 } 1)$$

$$0+1=1+0=1, \quad 1+1+1=1 \quad (\text{进位为 } 1)$$

例如，1110 和 1011 相加过程如下：

$$\begin{array}{r} 1110 \text{ 被加数} \\ +) 1011 \text{ 加数} \\ \hline 11001 \end{array}$$

(2) 二进制数的减法

根据“借一有二”的规则，二进制数减法的法则如下：

$$\begin{array}{ll} 0-0=0, & 1-1=0 \\ 1-0=1, & 0-1=1 \quad (\text{借位为} 1) \end{array}$$

例如，1101 减去 1011 的过程如下：

$$\begin{array}{r} 1101 \text{ 被减数} \\ -) 1011 \text{ 减数} \\ \hline 0010 \end{array}$$

(3) 二进制数的乘法

二进制数乘法过程可仿照十进制数乘法进行。但由于二进制数只有 0 或 1 两种可能的乘数位，使得二进制数乘法更为简单。二进制数乘法的法则如下：

$$0 \times 0 = 0, \quad 0 \times 1 = 1 \times 0 = 0, \quad 1 \times 1 = 1$$

例如，1001 和 1010 相乘的过程如下：

$$\begin{array}{r} 1001 \text{ 被乘数} \\ \times) 1010 \text{ 乘数} \\ \hline 0000 \\ 1001 \text{ 部分积} \\ 0000 \\ +) 1001 \\ \hline 1011010 \text{ 乘积} \end{array}$$

由低位到高位，用乘数的每一位去乘被乘数，若乘数的某一位为 1，则该次部分积为被乘数；若乘数的某一位为 0，则该次部分积为 0。某次部分积的最低位必须和本位乘数对齐，所有部分积相加的结果则为相乘得到的乘积。

(4) 二进制数的除法

二进制数除法与十进制数除法类似。可先从被除数的最高位开始，将被除数（或中间余数）与除数相比较，若被除数（或中间余数）大于除数，则用被除数（或中间余数）减去除数，商为 1，并得到相减之后的中间余数，否则商为 0。再将被除数的下一位移下补充到中间余数的末位，重复以上过程，就可得到所要求的各位商数和最终的余数。

例如，100110 ÷ 110 的过程如下：

$$\begin{array}{r} 000110 \text{ 商} \\ 110 \overline{) 100110 \text{ 被除数}} \\ \underline{-) 110} \\ 111 \\ \underline{-) 110} \\ 10 \text{ 余数} \end{array}$$

所以，100110 ÷ 110 = 110 余 10。

2. 二进制数的逻辑运算

二进制数的逻辑运算包括逻辑加法（“或”运算）、逻辑乘法（“与”运算）、逻辑否定（“非”运算）和逻辑“异或”运算。

(1) 逻辑“或”运算

逻辑“或”运算又称为逻辑加，可用符号“+”或“∨”来表示，规则如下：

$$\begin{array}{ll} 0+0=0 \text{ 或 } 0 \vee 0=0, & 0+1=1 \text{ 或 } 0 \vee 1=1 \\ 1+0=1 \text{ 或 } 1 \vee 0=1, & 1+1=1 \text{ 或 } 1 \vee 1=1 \end{array}$$

可见，两个相“或”的逻辑变量中，只要有一个为1，“或”运算的结果就为1。仅当两个变量都为0时，“或”运算的结果才为0。计算时，要特别注意和算术运算的加法加以区别。

(2) 逻辑“与”运算

逻辑“与”运算又称为逻辑乘，常用符号“×”、“·”或“∧”表示，规则如下：

$$0 \times 1 = 0 \text{ 或 } 0 \cdot 1 = 0 \text{ 或 } 0 \wedge 1 = 0$$

$$1 \times 0 = 0 \text{ 或 } 1 \cdot 0 = 0 \text{ 或 } 1 \wedge 0 = 0$$

$$1 \times 1 = 1 \text{ 或 } 1 \cdot 1 = 1 \text{ 或 } 1 \wedge 1 = 1$$

可见，两个相“与”的逻辑变量，只要有一个为0，“与”运算的结果就为0。仅当两个变量都为1时，“与”运算的结果才为1。

(3) 逻辑“非”运算

逻辑“非”运算又称为逻辑否定，实际上就是将原逻辑变量的状态求反，规则如下：

$$\overline{0} = 1$$

$$\overline{1} = 0$$

可见，在变量的上方加一条横线表示“非”。当逻辑变量为0时，“非”运算的结果为1；当逻辑变量为1时，“非”运算的结果为0。

(4) 逻辑“异或”运算

逻辑“异或”运算，常用符号“⊕”或“∨”来表示，规则如下：

$$0 \oplus 0 = 0 \text{ 或 } 0 \vee 0 = 0, \quad 0 \oplus 1 = 1 \text{ 或 } 0 \vee 1 = 1$$

$$1 \oplus 0 = 1 \text{ 或 } 1 \vee 0 = 1, \quad 1 \oplus 1 = 0 \text{ 或 } 1 \vee 1 = 0$$

可见，当两个相“异或”的逻辑变量取值相同时，“异或”的结果为0；当取值相异时，“异或”的结果为1。

以上仅就逻辑变量只有1位的情况得到了逻辑“与”、“或”、“非”、“异或”运算的运算规则。当逻辑变量为多位时，可在两个逻辑变量对应位之间按上述规则进行运算。特别注意，所有的逻辑运算都是按位进行的，位与位之间没有任何联系，即不存在算术运算过程中的进位或借位关系。下面举例说明。

【例 1.1】 两个变量的取值为 $X=00FFH$, $Y=5555H$ ，分别求 $Z_1=X \wedge Y$, $Z_2=X \vee Y$, $Z_3=\overline{X}$, $Z_4=X \oplus Y$ 的值。

解： $X=0000\ 0000\ 1111\ 1111B$, $Y=0101\ 0101\ 0101\ 0101B$

则 $Z_1 = X \wedge Y = 0000\ 0000\ 0101\ 0101B = 0055H$

$$Z_2 = X \vee Y = 0101\ 0101\ 1111\ 1111B = 55FFH$$

$$Z_3 = \overline{X} = 1111\ 1111\ 0000\ 0000B = FF00H$$

$$Z_4 = X \oplus Y = 0101\ 0101\ 1010\ 1010B = 55AAH$$

计算机二进制数算术运算及逻辑运算规则见表 1.7。

表 1.7 二进制数运算规则一览表

加法	减法	乘法	除法	“与”运算	“或”运算	“非”运算	“异或”运算
0+0=0	0-0=0	0×0=0	与十进制数除法类似	按位进行“与”运算。当两位均为1时，其结果为1；否则为0。“与”运算用符号“∧”、“×”或“·”表示	按位进行“或”运算。当两位中有一位为1时，其结果为1；当两位均为0时，其结果为0。“或”运算用符号“∨”或“+”表示	当逻辑变量为0时，其结果为1；当逻辑变量为1时，其结果为0	按位进行“异或”运算。当两位不相同，其结果为1。当两位相同时，其结果为0。“异或”运算用符号“⊕”或“∨”表示
0+1=1	1-0=1	0×1=0					
1+1=10 有进位	1-1=0	1×0=0					
1+1+1=11 有进位	0-1=1 有借位	1×1=1					

1.2.2 数在计算机中的表示

在计算机中需要处理的数据包括无符号数和有符号数。这些数在计算机中是如何表示的？

1. 无符号数

所谓无符号数，通常表示一个数的绝对值，即数的各位都用来表示数值的大小。1 字节（8 位）二进制数只能表示 0~255 范围内的数。因此，要表示大于 255 的数，必须采用多字节来表示，它的长度可以为任意倍字节长，其数据格式如图 1.1 所示。

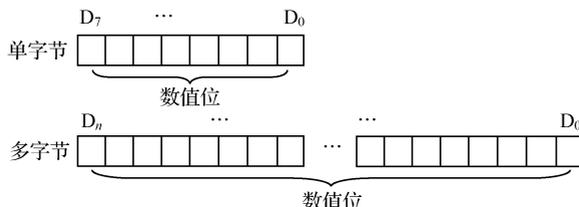


图 1.1 无符号二进制数表示格式

2. 有符号数

所谓有符号数，即用来表示一个任意位长的正数或负数。我们知道，在普通数字中，区分正负数是通过在数的绝对值前面加上符号来表示的，即“+”表示正数，“-”表示负数。在计算机中，数的符号也数码化了，一般用一个数的最高位作为符号位，用“0”表示正号，用“1”表示负号，而其余位为数值位。其数据格式如图 1.2 所示。

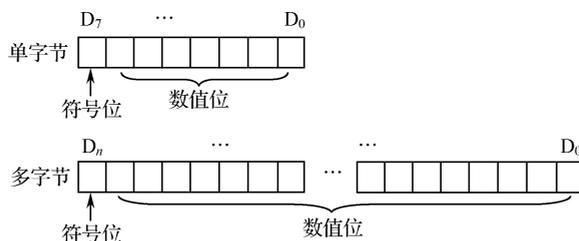


图 1.2 有符号二进制数表示格式

3. 有符号数的原码、反码、补码及补码运算

带正、负号的二进制数称为数的真值表示。

例如： $X = +1010110B$ ， $Y = -0110101B$

为了运算方便，计算机中的有符号数有三种表示方法，即原码、反码和补码，称为机器数。

(1) 原码

正数的符号位用“0”表示，负数的符号位用“1”表示，其余数字位表示数值本身，这种表示法称为原码。

前例 X 、 Y 可表示为：

$$[X]_{\text{原}} = 01010110B, [Y]_{\text{原}} = 10110101B$$

对于 0，可以认为它是+0，也可以认为它是-0。因此在原码中，0 有下列两种表示：

$$[+0]_{\text{原}} = 00000000B, [-0]_{\text{原}} = 10000000B$$

原码表示数的方法很简单，只需要在真值的基础上，将符号位用数码“0”和“1”表示即可。但采用原码表示的数在计算机中进行加、减运算时很麻烦。例如，遇到两个异号数相加或

两个同号数相减时，就要用减法运算。为了把减法运算转变成加法运算，引入了反码和补码。

(2) 反码

在原码表示的基础上很容易求得一个数的反码。正数的反码与原码相同，而负数的反码则是在原码的基础上，符号位不变（仍为1），其余数位按位求反，即 $0 \rightarrow 1$ ， $1 \rightarrow 0$ 。

前例 X 、 Y 可表示为：

$$[X]_{\text{反}} = 01010110\text{B}, [Y]_{\text{反}} = 11001010\text{B}$$

而 $[+0]_{\text{反}} = 00000000\text{B}$ ， $[-0]_{\text{反}} = 11111111\text{B}$

(3) 补码

一个数的补码也很容易求得。如果是正数，补码同原码也同反码，如果是负数，则在反码的基础上最末位加1。

前例 X 、 Y 可表示为：

$$[X]_{\text{补}} = 01010110\text{B} = [X]_{\text{反}} = [X]_{\text{原}}, [Y]_{\text{补}} = 11001011\text{B}$$

注：补码中0只有一种表示，无正负之分，即

$$[+0]_{\text{补}} = [-0]_{\text{补}} = 00000000\text{B}$$

不难证明，补码具有如下特性：

$$[[X]_{\text{补}}]_{\text{补}} = [X]_{\text{原}}$$

用8位二进制数来表示无符号数及有符号数的原码、反码、补码时的对应关系见表1.8。

表 1.8 用8位二进制数来表示无符号数及有符号数的原码、反码、补码时的对应关系

8位二进制数	无符号十进制数	原 码	反 码	补 码
0000 0000	0	+0	+0	+0
0000 0001	1	+1	+1	+1
0000 0010	2	+2	+2	+2
...
0111 1100	124	+124	+124	+124
0111 1101	125	+125	+125	+125
0111 1110	126	+126	+126	+126
0111 1111	127	+127	+127	+127
1000 0000	128	-0	-127	-128
1000 0001	129	-1	-126	-127
1000 0010	130	-2	-125	-126
...
1111 1100	252	-124	-3	-4
1111 1101	253	-125	-2	-3
1111 1110	254	-126	-1	-2
1111 1111	255	-127	-0	-1

由表1.8可知，用8位二进制数，表示无符号数的范围为0~255；表示原码的范围为-127~+127；表示反码的范围为-127~+127；表示补码的范围为-128~+127。

(4) 补码运算

两个用补码表示的有符号数进行加、减运算时，其特点是把符号位上表示正、负的“0”和“1”也看成数，与数值部分一同进行运算，所得的结果也为补码形式。即结果的符号位为“0”，表示正数；结果的符号位为“1”，表示负数。下面分加、减两种情况予以讨论。

两个有符号数 X 和 Y 进行相加时，先将两个数分别转换为补码的形式，然后进行补码加运算，所得的结果为和的补码形式，即：

$$[X+Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [Y]_{\text{补}}$$

【例 1.2】 用补码进行下列运算：

- ① $(+18)+(-15)$ ； ② $(-18)+(+15)$ ； ③ $(-18)+(-11)$ 。

解：

$$\begin{array}{r} \textcircled{1} \quad \quad \quad 00010010 \text{ B} \quad [+18]_{\text{补}} \\ +) \quad 11110001 \text{ B} \quad [-15]_{\text{补}} \\ \hline 1 \quad 00000011 \text{ B} \quad [+3]_{\text{补}} \end{array}$$

↑
符号位的进位自动丢失

$$\begin{array}{r} \textcircled{2} \quad \quad \quad 11101110 \text{ B} \quad [-18]_{\text{补}} \\ +) \quad 00001111 \text{ B} \quad [+15]_{\text{补}} \\ \hline 11111101 \text{ B} \quad [-3]_{\text{补}} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \textcircled{3} \quad \quad \quad 11101110 \text{ B} \quad [-18]_{\text{补}} \\ +) \quad 11110101 \text{ B} \quad [-11]_{\text{补}} \\ \hline 1 \quad 11100011 \text{ B} \quad [-29]_{\text{补}} \end{array}$$

↑
符号位的进位自动丢失

由例 1.2 可知，当带符号的数采用补码形式进行相加运算时，可把符号位也当作普通数字一样与数值部分一起进行加法运算。若符号位上产生进位时，则自动丢掉，所得的结果为两数之和的补码形式。如果想得到运算后原码的结果，可对运算结果再求一次补码即可。

两个有符号数相减，可通过下面的公式进行：

$$X-Y = X+(-Y)$$

则 $[X-Y]_{\text{补}} = [X+(-Y)]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [-Y]_{\text{补}}$

可见，求 $[X-Y]_{\text{补}}$ ，可以用 $[X]_{\text{补}}$ 和 $[-Y]_{\text{补}}$ 相加来实现。这里关键在于求 $[-Y]_{\text{补}}$ 。如果已知 $[Y]_{\text{补}}$ ，那么对 $[Y]_{\text{补}}$ 的每位（包括符号位）都按位求反，然后末位加 1，结果即为 $[-Y]_{\text{补}}$ （证明略）。一般称 $[-Y]_{\text{补}}$ 为对 $[Y]_{\text{补}}$ 的“变补”，即 $[[Y]_{\text{补}}]_{\text{变补}} = [-Y]_{\text{补}}$ ；已知 $[Y]_{\text{补}}$ 求 $[-Y]_{\text{补}}$ 的过程称为变补。

这样，求两个带符号的二进制数之差，可以用“减数（补码）变补与被减数（补码）相加”来实现。这是补码表示法的主要优点之一。

【例 1.3】 用补码进行下列运算：

- ① $96-19$ ； ② $(-56)-(-17)$ 。

解：① $X=96$ ， $Y=19$ ，则

$$[X]_{\text{补}} = 01100000$$

$$[Y]_{\text{补}} = 00010011$$

$$[-Y]_{\text{补}} = 11101101$$

故 $[X-Y]_{\text{补}} = [X-Y]_{\text{原}} = 01001101 = +77$

② $X=-56$ ， $Y=-17$ ，则

$$[X]_{\text{补}} = 11001000$$

$$[Y]_{\text{补}} = 11101111$$

$$[-Y]_{\text{补}} = 00010001$$

则 $[X-Y]_{\text{补}} = 11011001$

故 $[X-Y]_{\text{原}} = [[X-Y]_{\text{补}}]_{\text{补}} = 10100111 = -39$

$$\begin{array}{r} \quad \quad \quad 01100000 \text{ B} \quad [X]_{\text{补}} \\ +) \quad 11101101 \text{ B} \quad [-Y]_{\text{补}} \\ \hline 1 \quad 01001101 \text{ B} \quad [X-Y]_{\text{补}} \end{array}$$

↑
符号位的进位自动丢失

$$\begin{array}{r} \quad \quad \quad 11001000 \text{ B} \quad [X]_{\text{补}} \\ +) \quad 00010001 \text{ B} \quad [-Y]_{\text{补}} \\ \hline 11011001 \text{ B} \quad [X-Y]_{\text{补}} \end{array}$$

综上所述，对于补码的加、减运算可用下边一般公式表示：

$$[X \pm Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [\pm Y]_{\text{补}} \quad (|X|, |Y| \text{ 及 } |X \pm Y| \text{ 都小于 } 2^{n+1})$$

(5) 溢出判断

当两个有符号数进行补码运算时，若运算结果的绝对值超出运算装置容量，数值部分就会

发生溢出，占据符号位的位置，导致错误的结果。这种现象通常称为补码溢出，简称溢出。这和正常运算时符号位的进位自动丢失在性质上是不同的。下面举例说明。

【例 1.4】 某运算装置共有 5 位，除最高位表示符号位外，还有 4 位用来表示数值。先看下面两组运算。

① 计算 $13+7=?$

$$\begin{array}{r} +13 \\ +) +7 \\ \hline +20 \\ \text{十进制数运算} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 01101 \text{ B} \\ +) 00111 \text{ B} \\ \hline 10100 \text{ B} = -12 \\ \text{二进制数补码运算} \end{array}$$

② 计算 $(-4)+(-4)=?$

$$\begin{array}{r} -4 \\ +) -4 \\ \hline -8 \\ \text{十进制数运算} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 11100 \text{ B} \\ +) 11100 \text{ B} \\ \hline 111000 \text{ B} = -8 \\ \leftarrow \text{符号位的进位自动丢失} \\ \text{二进制补码运算} \end{array}$$

① 数的运算结果显然是错误的，因为两个正数相加不可能得到负数的结果，产生错误的原因是由于两个数相加后的数值超出了加法装置所允许位数（数值部分 4 位），因此从数值的最高位向符号位产生了进位，或者说这种现象是由于“溢出”而造成的。②的结果显然是正确的，由符号位产生的进位自动丢失。

为了保证运算结果的正确性，计算机必须能够判别出是正常进位还是发生了溢出错误。计算机中常用的溢出判别称为双高位判别法，并常用“异或”电路来实现溢出判别。其表达式为：

$$C_S \oplus C_P = 1 \quad (\text{表示发生了溢出错误})$$

式中，

C_S ——最高位（符号位）产生进位的情况。 $C_S=1$ ，有进位； $C_S=0$ ，无进位。

C_P ——次高位（数值部分最高位）向符号位产生进位的情况。 $C_P=1$ ，有进位； $C_P=0$ ，无进位。

由表达式可知，在运算结果中，当 C_S 和 C_P 状态不同（为 01 或 10）时，产生溢出；在运算结果中，当 C_S 和 C_P 状态相同（为 00 或 11）时，不产生溢出。

发生溢出时， $C_S C_P = 01$ 为正溢出，通常出现在两个正数相加时； $C_S C_P = 10$ 为负溢出，通常出现在两个负数相加时。考察上面的两例。当 $C_S \oplus C_P = 0 \oplus 1 = 1$ 时，有溢出，为正溢出。当 $C_S \oplus C_P = 1 \oplus 1 = 0$ 时，无溢出，从而可知，一个正数和一个负数相加时，它们的和肯定不会发生溢出。下面举例说明溢出判别。

【例 1.5】 计算 $64+65=?$

$$\begin{array}{r} 01000000 \text{ B} \quad [+64]_{\text{补}} \\ +) 01000001 \text{ B} \quad [+65]_{\text{补}} \\ \hline 10000001 \text{ B} \quad [-127]_{\text{补}} \end{array}$$

由于 $C_S \oplus C_P = 0 \oplus 1 = 1$ 产生溢出，并且是正溢出，导致运算结果出错。

【例 1.6】 计算 $-110-92=?$

$$\begin{array}{r} 10010010 \text{ B} \quad [-110]_{\text{补}} \\ +) 10100100 \text{ B} \quad [-92]_{\text{补}} \\ \hline 100110110 \text{ B} \quad [+54]_{\text{补}} \end{array}$$

由于 $C_S \oplus C_P = 1 \oplus 0 = 1$ ，产生溢出，并且是负溢出，结果出错。

【例 1.7】 计算 $-117+121=?$

$$\begin{array}{r} 10001011 \text{ B} \quad [-117]_{\text{补}} \\ +) 01111001 \text{ B} \quad [+121]_{\text{补}} \\ \hline 1\ 00000100 \text{ B} \quad [+4]_{\text{补}} \end{array}$$

一个负数和一个正数相加，结果不溢出。此时， $C_S \oplus C_P = 1 \oplus 1 = 0$ 。

1.2.3 数的编码方法

在计算机中，所有用到的数字、字母、符号、指令等都必须用特定的二进制码来表示，这就是二进制编码。

1. 二进制编码的十进制数

计算机只能识别二进制数，但人们熟悉的却是十进制数。所以在计算机输入和输出数据时，往往采用十进制数表示。不过，这样的十进制数是用二进制编码表示的，称为二进制编码的十进制数——BCD（binary code decimal）码。

用二进制数为十进制数编码，每位十进制数需要用 4 位二进制数来表示。4 位二进制数共有 16 种编码形式，由于十进制数只有 0~9 共 10 个数码，故有 6 个编码是多余的，放弃不用。而这种多余性便产生了多种不同的 BCD 码。在计算机中较常用的是 8421 BCD 码（在以后的章节中简称为 BCD 码）。这种 BCD 码用 4 位二进制数表示 1 位十进制数的数码 0~9，权值从高位到低位依次为 8，4，2，1。BCD 编码见表 1.9。

表 1.9 8421 BCD 码编码表

十进制数	8421 BCD 码	十进制数	8421 BCD 码
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	0001 0000
3	0011	11	0001 0001
4	0100	12	0001 0010
5	0101	13	0001 0011
6	0110	14	0001 0100
7	0111	15	0001 0101

例如： $(208)_{10} = (0010\ 0000\ 1000)_{8421\ \text{BCD}}$
 $(1001\ 0001\ 0111\ 0101)_{8421\ \text{BCD}} = (9175)_{10}$

2. 字母与符号的编码

在计算机中，字母和符号也必须用特定的二进制编码来表示。目前，在计算机、通信设备及仪器仪表中广泛采用的是美国标准信息交换码 ASCII（american standard code for information interchange）。它用 7 位二进制编码表示一个字母或符号，共能表示 $2^7=128$ 个不同的字符。其中包括数字 0~9、英文大写字母、英文小写字母、运算符、标点及其他的一些控制符号。常用的 7 位 ASCII 码见表 1.10。