

1 绪 论

1.1 微型计算机概述

1.1.1 微型机发展概况

计算机的发展经历了从电子管、晶体管、集成电路到大规模集成电路共四个发展阶段，即所谓第一代计算机，第二代计算机，第三代计算机和第四代计算机。

微型计算机是大规模集成电路技术发展的直接产物，因此它属于第四代计算机。自从 1971 年微型机问世以来，随着大规模集成电路技术的不断发展，微型机主要向两个方向发展：

一个方向是向高速度、大容量、多媒体的高档方向发展：1971—1973 年是 4 位机与低档 8 位机 其代表产品为 Intel 公司的 4004 和 8008；1973—1988 年为中高档 8 位机 典型产品是 Intel8080/8085、MC6800、MC6809、Z80 等；1978—1981 年是 16 位机，代表产品是 Intel8086、Z8000、MC68000；1981—1993 年是 32 位机，代表产品为 Intel80386、MC32、MC68020 等；1993 年至今，其代表产品是 Intel80586、PII 等。最新型微机的基本性能相当于高档小型、中型计算机的水平，随着计算机网络的发展，其基本功能和应用正在向更高层次扩展。另一方面是向稳定可靠、体积小、功耗低、价格廉方向发展。在 20 世纪 70 年代中期出现了以一个大规模集成电路为主组成的微型计算机——单片微型计算机（Single Chip Micro-computer），简称单片机。由于单片机面向控制，特别适合于控制型应用领域，因而又名微控制器（Microcontroller）。

单片机的发展可分为三个阶段：第一阶段（1974—1976）为单片机的初级阶段，单片机采用双片形式，其代表为仙童公司的 F8 + 3851 微型机 第二阶段（1976—1978）为低性能单片机阶段 单片机由一块芯片构成 但性能低、品种少 其典型产品为 Intel 公司的 MCS-48 系列单片机；第三阶段（1979—至今）为高性能单片机发展阶段，出现了很多新型单片机，如 MCS-51 系列、MC6805 系列、COP800 系列以及以后的 16 位单片机和 32 位高性能单片机。

1.1.2 微型计算机应用

由于微型计算机具有体积小、重量轻、价格低、可靠性高、耗电少和灵活机动等许多优点，因此它的应用范围很广，应用前景十分美好。迄今为至，微型计算机不仅在工业、农业、国防、科学技术和国民经济各个领域发挥了巨大作用，而且在日常生活中也日益显示出它的强大生命力。归纳起来微机应用，主要有以下几方面：

1) 科学计算

在许多科技部门和工程设计单位，常常需要进行大量的数值计算，这些数值计算问题用人工方法是无法完成的，通常都要借助于价格昂贵的大、中型甚至巨型计算机才能完成。例如：18世纪英国数学家商克斯花了20年时间才把圆周率计算到小数点后707位，但在今天的大型机上仅用了6.8小时就使它超过了800万位小数。

今天，微型计算机的某些性能已经达到大、中型计算机的水平，并正在向巨型机方向迈进，而造价却比它们低得多。因此，采用微型计算机进行科学计算是最理想的选择。

2) 数据处理和信息管理

数据处理通常是指计算机对实时采集的和人工送入的大量数据进行加工处理、转换分析、反馈控制、显示打印和远距离传送的过程。这在航空、航天、邮电通信、军事科学和工业控制中的应用十分广泛，如地面卫星接收系统、防空警戒雷达系统、导弹和反导弹控制系统以及工矿实时控制系统，等等。

信息管理是指计算机对人工输入的信息的历史和信息进行分类检索、查找统计、绘图制表和输出打印的过程。信息管理在信息管理系统中进行。信息管理系统可以是单个的高档微型计算机，也可以是一种不同类型的计算机网络系统，如飞机订票系统、情报检索系统、气象预报系统、办公自动化系统、电子邮件系统和银行信贷系统等。

3) CAD、CAM、CAA 和 CAI 中的应用

CAD(Computer-Aided Design) 的中文含义是计算机辅助设计，是指工程设计人员借助于计算机进行新产品开发和设计的过程。CAM(Computer-Aided Manufacturing) 为计算机辅助制造，是指借助计算机来进行从毛坯到产品的制造过程。CAA(Computer Aided Assemble) 为计算机辅助装配，是计算机自动把零件装配成部件或把部件装配成整机的过程。CAI(Computer-Aided Instruction) 为计算机辅助教学，是指教师借助于计算机对学生进行形象化教学或学生借助于计算机进行形象化学习的过程。CAD、CAM、CAA、CAI 都要求有一台高性能的微型计算机或工程工作站微机，其运算速度要快、存储容量要大，并要有相应软件支持。目前我国的CAD使用已较为普遍，尤其在建筑、造船、机械制造和飞机制造业中使用更为广泛。

4) 过程控制和仪器仪表智能化

微型计算机对生产过程的控制是借助于传感器、A/D和D/A转换器以及执行机构进行的。在闭环过程控制中，过程的实时参数由传感器和A/D转换器实时采集，并由微型计算机自动记录、统计制表和监视报警，然后再通过D/A转换器和执行机构进行调节和控制。微型计算机用于过程控制的情况很普遍，例如高炉炉温的自动控制、化工厂液体流量的自动调节、电力系统自动装置的继电保护和自动化生产线的控制等。在这类应用中，微型计算机是过程控制的核心部件，也是实现工厂自动化FA(Factory Automation)的基础。

所谓仪器仪表智能化，实际上是要把微处理器、存储器和其它集成电路芯片作为元器件安装在仪器仪表中，使仪器仪表按照人的意愿工作。仪器仪表智能化不仅可以使它们体积小、重量轻和精度高，而且可使仪器仪表的功能齐全，应用前景十分诱人。例如：计算机网络中的智能终端、电子工业中用的逻辑分析仪、医用CT扫描仪和医用红外热像仪，等等，都是深受用户欢迎的智能化仪器设备。

5) 军事领域中的应用

微型计算机在军事领域中的应用虽然鲜为人知，但应用是十分广泛的，而且是越来越广泛。在军事上，微型计算机通常可用来帮助指挥和协调作战、进行军事通讯、搜集情报、信息管理，也可以直接用在坦克、火炮、军舰、潜艇、军用飞机、巡航导弹等武器中。

微型计算机在现代军事中具有重要的作用，美国国防部每年都要拨出巨款（1992年为395亿美元）用于军用计算机的研究和开发。在1991年的海湾战争中，以美国为首的多国部队通过军用机器人爆破、排雷获得成功，更加证明了计算机的作用和价值。目前，美国正在加紧部署C³战略——全球坐标网（Global Grid）。全球坐标网使战士和传感器、数据库及指挥中心联系起来，每个行动中的士兵只要携带一个大约1磅重的“士兵计算机系统”就可在士兵与士兵、士兵与指挥部之间进行声音、图像和数据的传送。该“士兵计算机系统”功能齐全，作用超凡。1994年已生产出样机。美国国防部另一最宏伟的目标是要建立一支机器人舰队，该计划打算分三个实施阶段，最终要实现无人指挥的全自动舰艇，舰上机器人指挥官可根据情况制订作战计划并指挥战斗。

6) 多媒体系统和信息高速公路

多媒体系统是一种集声音、动画、文字和图像等多种媒体于同一载体或平台的系统，以实现和外部世界进行多功能和多用途的信息交流。若把多媒体化的PC机挂接到互联网上，用户便能得到有声有色和图文并茂的屏幕服务。多媒体技术广泛用于工业生产、教育培训、医疗卫生、商业广告和娱乐生活等诸方面。

近几年来，“信息高速公路”的狂潮滚滚而来。美国、日本、西欧以及发展中国家和地区都在争先恐后地计划组织和实施“信息高速公路”的建设。“信息高速公路”是一种能够将人、家庭、学校、机关、团体、商店和图书馆联成一体 的庞大计算机系统，是一种集计算机技术、无线电技术、音像处理技术、文件传输和可视通信技术于一体的高新技术系统。目前全世界许多国家都在致力于“信息高速公路”的建设。“信息高速公路”已经在很多领域内发挥作用，对人类生活已产生巨大的影响。它可以使人们通过电信网坐在家中的电脑终端旁进行高效工作，以节省办公用房、缓解交通拥挤和减少城市污染；它可以给人们提供先进的社会服务和消灭城市和乡村之间实际存在的教育质量的差别；它还可以帮助人们把城市的高质量的医疗服务送到偏远的山区等等。总之，“信息高速公路”的建设和发展不仅可以给人们带来巨大的经济效益，而且将像19世纪的铁路和20世纪 的电子网络一样，给人类社会带来巨大的冲击和变革。

7) 家用电器和家庭自动化

微处理器在家用电器中应用很普遍，最常见的有微电脑洗衣机、微电脑冰箱、微电脑空调、微电脑音响系统和微电脑电视机等。此外，个人微型计算机、微电脑计时装置和微电脑报警系统等已经进入发达国家的家庭。微电脑盲人阅读机也为盲人提供了极大的方便。

微型计算机进入家庭的另一标志是全功能个人计算机的问世，该产品集收音、电视、电话答录和传真功能于一体，由帕尔德·贝尔（Packard Bell）公司采用Intel 80486芯片制成。此外，美国和西欧通过信息高速公路在家办公的雇员，1997年由原有的60万人猛增到530万人。这充分表明，一个以家用机器人为核心的家庭自动化HA（Home Automation）已为时不远了。

1.2 单片微型计算机概述

1.2.1 单片机的发展趋势

近几年来单片机的发展速度很快，纵观各个系列的单片机产品的特性，我们可以看出单片机正朝着高性能、多品种的方向发展。

1) 单片机性能不断改善

在单片机的内部包含有计算机的基本功能部件：中央处理器 CPU 存储器和输入输出接口电路。给单片机配上适当的外围设备和软件，便可构成一个单片机的应用系统。

(1) CPU 功能增强

单片机内部 CPU 功能的增强集中体现在数据处理速度和精度的提高。如 Intel 公司的 MCS-51 系列单片机的 CPU 增加了一个布尔处理机，使它的位处理功能特别强，输入输出的速度加快。MCS-96 系列单片机 CPU 字长扩大到 16 位 内部有乘、除法部件 采用流水线结构，数据运算的精度更高、速度更快。许多公司还以现有的 16 位微处理器 MC68000 作为 CPU。

(2) 内部资源增多

单片机性能的提高还体现在它的内部资源增多。内部程序存储器容量可达 32K 字节、数据存储器 RAM 的容量可达 1K 字节，还有可随机读写并且掉电后能保存信息的 E²PROM 存储器。同时还将一些常用的 I/O 接口电路集成到单片机内部，它们包括并行口和串行口、多路 8~10 位 A/D 转换器、定时器 / 计数器、定时输出和捕捉输入、系统故障监视器、DMA 通道以及 D/A 输出电路等。这样便大大地减少了单片机的外接电路，使大多数单片机应用系统为单片系统，体积小而可靠。

(3) 使用多功能引脚

单片机随着其内部资源的增多，所需的引脚也相应增加。为了减少引脚数量，提高应用的灵活性，单片机中普遍使用多功能引脚，即一个引脚具有几种功能供用户选择。

(4) 寻址范围大

许多高性能的单片机不但内部存储器容量增大了，而且扩大了 CPU 的寻址范围，存储空间达 64K~1M 字节以上，从而也提高了系统的扩展功能。

2) 单片机的种类不断增多

为了适应各个领域的应用需要，单片机的种类日益增多，正向多层次、多品种的纵深方向发展。

(1) 超微型化

单片机的内部一般采用模块式的结构，在内核 CPU 不变的情况下，根据应用目标的不同，增减一定的模块和引脚，就可以得到一个新的产品。于是便出现了一种超微型化的单片机。例如 Motorola 公司的 MC68HC705J2 单片机内部有 8 位 CPU、2K 字节 EPROM、112 字节 RAM、15 位定时器、系统监视器、14 位 I/O 线，其引脚为 20。Philip 公司的 8XC752 单片机片内有 8 位 CPU、2K 字节 ROM、64 字节 RAM、21 位 I/O 线、16 位定时器、5 路 8 位 A/D 其引脚为 28。这类超微型单片机的体积相当于一个 74 系列器件，价格又低，特别适用

于家电、玩具等领域的应用。

(2) 低功耗和低电压

普遍采用 CHMOS 制造工艺 同时增加软件激发的空闲 等待 方式和掉电(停机) 方式, 极大地降低了单片机的功耗。例如 80C51BH 单片机的工作电流为 20mA 空闲方式为 5mA 掉电方式时仅 5 μ A 许多单片机的工作电压范围大, 能在低压供电时正常工作。例如: MC68HC105C8 允许工作电压范围为 2.4 ~ 5.5V。这种低工作电压和低功耗的单片机能用电池供电, 这对于野外作业等领域中的应用具有特殊的意义。

1.2.2 典型的单片机产品

如果根据器件的制造厂商分类, 单片机主要有以下几种: 美国 Intel、Motorola、Zilog 三个公司的单片机, 荷兰的 Philips 公司单片机, 德国的 Siemens 公司单片机, 日本的 NEC 单片机。

1) Intel 单片机

Intel 公司有 MCS-48、MCS-51 和 MCS-196 这三个系列的单片机。

(1) MCS-48 系列单片机

MCS-48 系列单片机是 Intel 公司于 1976 年推出的 8 位单片机 其典型产品为 8048 它在一个 40 引脚的大规模集成电路内包含有 8 位 CPU、1K 字节 ROM 程序存储器、64 个字节 RAM 数据存储器、一个 13 位的定时器 / 计数器、27 根输入输出线。MCS-48 的主要单片机及其性能如表 1.1 所示。

表 1.1 MCS-48 单片机特性

型 号	CPU	ROM	RAM	定时器	I/O 线
8050AH	8	4K	256	1	27
8049AH	8	2K	128	1	27
8048AH	8	1K	64	1	27
8040AHL	8	无	256	1	15
8039AHL	8	无	128	1	15
8035AHL	8	无	64	1	15
P8749H	8	2K EPROM	128	1	27
P8748H	8	1K EPROM	64	1	27

(2) MCS-51 系列单片机

Intel 公司于 1980 年推出了 MCS-51 系列单片机, 这是一个高性能的 8 位单片机。与 MCS-48 相比 MCS-51 系列单片机无论在片内 RAM、ROM 容量, I/O 的功能 种类和数量还是在系统扩展能力、指令系统功能等方面都有很大加强。

MCS-51 的典型产品为 8051, 其内部资源有:

- * 8 位 CPU;
- * 4K 字节 ROM 程序存储器;

(3) MCS-96 系列单片机

Intel公司于1984年推出了16位高性能的MCS-96系列单片机。MCS-96采用多累加器和“流水线作业”的系统结构，它最著名的特点是运算精度高，速度快。它的典型产品为8397BH，其主要的资源和功能特性如下：

- * 16位CPU；
- * 232字节寄存器文件；
- * 具有采样保持的10位A/D转换器；
- * 五个8位输入/输出口；
- * 20个中断源；
- * 脉冲宽度调制输出；
- * 8K字节ROM程序存储器；
- * 全双工串行口；
- * 专用的串行口波特率发生器；
- * 两个16位定时器/计数器；
- * 四个16位软件定时器；
- * 高速输入/输出子系统；
- * 16位监视定时器；
- * 具有16×16乘法和32/16除法。

目前MCS-96系列单片机包含有许多型号产品，其最主要的产品如表1.3所示。其中8XC196功能最强，运算速度比提高2.5倍并具有HOLD/HLDA的总线规约。

表1.3 MCS-96 系列单片机

型	号	ROM	A/D	封 装
8094-90	8094BH	无	无	48
8394-90	8394BH	8K ROM	无	48
	8794BH	8K EPROM	无	48
8095-90	8095BH	无	4路	48
8095-90	8395BH	8K ROM	4路	48
	8795BH	8K EPROM	4路	48
8096-90	8096BH	无	无	64
8396-90	8396BH	8K ROM	无	64
	8796BH	8K EPROM	无	64
8097-90	8097BH	无	8路	64
8397-90	8397BH	8K ROM	8路	64
	8797BH	8K EPROM	8路	64
	8098BH	无	4路	48
	8398BH	8K ROM	4路	48
	80C196KB	无	8路	68
	87C196KB	8K ROM	8路	68

2) Motorola 公司单片机

Motorola公司生产8位和16位单片机，该公司的单片机自成体系，产品的种类很多。

(3) MC68HC11

MC68HC11 是功能很强的 8 位单片机，它采用 HCMOS 技术制造。MC68HC11 的 CPU 有两个 16 位变址寄存器和一个 16 位栈指针。内部总线对外开放，可以访问外部 64K 字节存储器。主要产品性能如表 1.6 所示。

表 1.6 MC68HC11 主要产品特性

型 号	引脚	ROM	EPROM	RAM	I/O	定时器	输入捕捉	输出比较	串行口	A/D	备 注
68HC11A0	18/52	无	无	256	38	16 位	3	5	SPI, SCI	8 × 8	
68HC11A1	48/52	无	无	256	38	16 位	3	5	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC11A8	48/52	3K	无	256	38	16 位	3	5	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC11D0	40/44	无	无	192	32	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	无	
68HC11D3	40/44	4K	无	192	32	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	无	
68HC11E1	52	无	无	512	38	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC11E9	52	12K	无	512	38	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC11F1	68	无	无	1K	54	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC711D3	40	无	4K	192	32	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	无	
68HC711E9	52	无	12K	512	38	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	8 × 8	512 EEPROM
68HC711E2	52	无	无	256	38	16 位	3/4	5/4	SPI, SCI	8 × 8	2K EEPROM

(4) MC68332

MC68332 是 16/32 位单片机，它采用 HCMOS 工艺制造，由 CPU、定时处理器单元、队列串行模块、系统控制模块和 RAM 等组成。它的基本功能如下：

- * 低功耗 最大 600mW 备用方式为 500 μ W；
- * 工作频率 :16.78MHz 可以由软件控制；
- * CPU:32 位 MC68000 与 MC68010 向上兼容)；
- * 智能 16 位定时器 :16 个独立的可编程的通道，任一个通道可以执行任何定时功能 (输入捕捉、输出比较、脉冲宽度调制输出等)；
- * 两个 16 位定时计数器，各具有 2 位可编程的预分频器，通道优先级可由程序选择；
- * 两个串行 I/O 子系统：增强型 MC68HC11 类型的串行通讯接口 (SCI) 具有奇偶校验功能 具有 I/O 队列的串行外围接口；
- * 片内有 2K 字节静态高速 RAM；
- * 片内可编程的片选逻辑，有几个输出，提供外部存储器的 I/O 的选片信号；
- * 系统出错保护：监视定时器 Watchdog 周期中断定时器 系统超时定时器等；
- * 具有 32 位 I/O 线。

1.2.3 单片机的应用

1) 单片机的应用特性

单片微机与一般的微型机 (它们有微处理器 μ P、存储器和 I/O 接口电路等芯片组成

我们称之为多片微机，如 Z80 的 TP801 单板机等）相比，具有如下特性：

(1) 体积小

由于单片机内部包含了计算机的基本功能部件，能满足很多应用领域对硬件的功能要求，因此由单片机组成的应用系统结构简单，体积特别小。

(2) 可靠性高

单片机内 CPU 访问存储器、I/O 接口的信息传输线（即总线——地址总线、数据总线和控制总线）大多数在芯片内部，因此不易受外界的干扰；另一方面，由于单片机体积小，在应用环境比较差的情况下，容易采取对系统进行电磁屏蔽等措施。所以单片机应用系统的可靠性比一般的微机系统高得多。

(3) 功能强

单片机面向控制，它的实时控制功能特别强，CPU 可以直接对 I/O 口进行各种操作（输入输出、位操作以及算术逻辑操作等）；运算速度高，时钟达 16MHz 以上；对实时事件的响应和处理速度快。

(4) 使用方便

由于单片机内部功能强，系统扩展方便，因此应用系统的硬件设计非常简单；又因为国内外提供多种多样的单片机开发工具，它们具有很强的软硬件调试功能和辅助设计的手段。这些使单片机的应用极为方便，大大地缩短了系统研制的周期。

(5) 性能价格比高

由于单片机功能强、价格便宜，其应用系统的印制板小、插件件少、安装调试简单等一系列原因，使单片机应用系统的性能价格比高于一般的微机系统。

(6) 容易产品化

由于单片机体积小、功耗低、性能价格比高，开发使用简便，因此大量用于各类新型仪器仪表及家电中，形成新产品。

单片机以上的特性，缩短了单片机应用系统样机至正式产品的过渡过程，使科研成果迅速转化成生产力。

2) 单片机的应用

单片机的应用具有面广量大的特点。国际上从 20 世纪 70 年代开始 国内从 20 世纪 80 年代以来，单片机在国民经济的各个领域里得到了广泛应用，对各个行业的技术改造和产品的更新换代起着重要的推动作用。

(1) 单片机在智能仪表中的应用

单片机广泛地应用于各种仪器仪表，使仪器仪表智能化，提高它们的测量速度和测量精度，加强控制功能，简化仪器仪表的硬件结构，便于使用、维修和改进。例如 MCS-51 系列单片机控制的“汽车发动机综合测试仪”、“烟叶水分测试仪”、“智能超声波测厚仪”等。

(2) 单片机在机电一体化中的应用

机电一体化是机械工业发展的方向。机电一体化产品是指集机械技术、微电子技术、自动化技术和计算机技术于一体，具有智能化特征的机电产品，例如微机控制的铣床、车床、钻床、磨床等等。单片微机的出现促进了机电一体化，它作为机电产品中的控制器，能充分发挥它的体积小、可靠性高、功能强、安装方便等特点，大大强化了机器的功能，提高了机器的自动化、智能化程度。

(3) 单片机在实时控制中的应用

单片机也广泛地应用于各种实时控制系统中，例如对工业上各种窑炉、锅炉的温度、酸度、化学成分的测量和控制。将测量技术、自动控制技术和单片机技术相结合，充分发挥其数据处理和实时控制功能，使系统工作于最佳状态，提高系统的生产效率和产品的质量。在航空航天、通讯、遥控、遥测等各种实时控制系统中都可以用单片机作为控制器。

(4) 单片机在分布式多机系统中的应用

分布式多机系统具有功能强可靠性高的特点，在比较复杂的系统中，都采用分布式多机系统。系统中有若干台功能各异的计算机，各自完成特定的任务，它们又通过通讯线路相互联系、协调工作。单片机在这种多机系统中，往往作为一个终端机，安装在系统的某些节点上，对现场信息进行实时的测量和控制。高档的单片机多机通讯（并行或串行）功能很强，它们在分布式多机系统中能发挥很大作用。

(5) 单片机在家用电器中的应用

家用电器涉及到千家万户，生产规模大。家用电器如洗衣机、音响设备、高级玩具等，配上微电脑后使其身价百倍，深受用户的欢迎。廉价的单片微机在家用电器中的应用前途也十分广阔。

习题与思考题

- P1.1 计算机分为哪些发展阶段，目前的主要发展方向是什么？
- P1.2 微型计算机有哪些方面的应用？
- P1.3 什么是单片机？单片机与一般的微型计算机相比有哪些特点？
- P1.4 单片机可以应用于那些领域？
- P1.5 你所熟悉的家用电器中有哪些已使用了单片机？

2 微型计算机基础

计算机是电子技术与计算数学相结合的产物。半导体基本元件及其集成电路形成计算机的硬件基础，而计算数学的计算方法与数据结构则为计算机的软件基础。

2.1 微型计算机中数据的表示

计算机工作时，信息在其内部不停地传送。在计算机内部传送的信息分为两种：一种是用于指挥计算机各部件工作的信息，称之为控制信息，另一种是计算机处理的对象，称之为数据信息。数据信息又分为两种：一种用于各种数值运算，称之为数值数据，另一种用于逻辑运算和输入输出，称之为非数值数据。

2.1.1 数值型数据

1) 进位计数制

数制是人们利用符号来计数的方法，数制可以有多种。由于数在机器中是以器件的物理状态来表示的，所以一个具有两种稳定状态且能相互转换的器件，就可以用来表示一位二进制数。二进制数的表示是最简单而且是最可靠的，另外二进制数的运算规则也是最简单的。因此，迄今为止，所有计算机都是以二进制形式进行算术运算和逻辑操作的。但是在使用二进制编写程序时既繁琐又容易出错，所以人们在编写程序时又经常使用十进制和十六进制。

任何一种数制都有两个要素，即基数和权。基数为数制中所使用的数码的个数。当基数为 R 时该数制可使用的数码为 $0 \sim R-1$ 。例如在二进制中基数 $R=2$ 可使用 0 和 1 两个数码。在进行运算时按逢 R 进 1 借 1 当 R 的规则进行。权是数制中某一数位上单位数的大小，它是一个指数，底是基数 R ，幂是数码的位置号，数码的位置号从 0 开始。将一个数中某一位的数码与该位的权相乘，即为该位数码的数值。

一般而言，对于用 R 进制的数 S ，可按权展开为：

$$S = k_n R^n + k_{n-1} R^{n-1} + \cdots + k_1 R^1 + k_0 R^0 + k_{-1} R^{-1} + \cdots + k_{-m} R^{-m} = \sum_{i=-m}^n k_i \times R^i$$

(1) 二进制

二进制数的基数是 2 ，它的特点是每个数位上的数码只有 0 和 1 两种，计数规则是“逢 2 进 1 借 1 当 2 ”，各位的权是以 2 为底的幂。一个任意二进制数 S 可以表达成：

$$S = k_n 2^n + k_{n-1} 2^{n-1} + \cdots + k_1 2^1 + k_0 2^0 + k_{-1} 2^{-1} + \cdots + k_{-m} 2^{-m} = \sum_{i=-m}^n k_i \times 2^i$$

(2) 十六进制

十六进制数的基数是 16 ，它的特点是每个数位上的数码共有 16 个，即 $0 \sim F$ ，其中 10

~15用 A~F表示。其计数规则是“逢 16 进 1 借 1 当 16”各位的权是以 16 为底的幂。一个任意的十六进制数 S 可以表达成：

$$S = k_n 16^n + k_{n-1} 16^{n-1} + \dots + k_1 16^1 + k_0 16^0 + k_{-1} 16^{-1} + \dots + k_{-m} 16^{-m} = \sum_{i=-m}^n k_i \times 16^i$$

(3) 十进制

十进制数的基数是 10，它的特点是每个数位上的数码共有 10 个，即 0~9 计数规则是“逢 10 进 1 借 1 当 10”各位的权是以 10 为底的幂。一个任意的十进制数可以表达成：

$$S = k_n 10^n + k_{n-1} 10^{n-1} + \dots + k_1 10^1 + k_0 10^0 + k_{-1} 10^{-1} + \dots + k_{-m} 10^{-m} = \sum_{i=-m}^n k_i \times 10^i$$

为了区别以上三种数制所表示的数，应在每种数的后面加 1 个字母进行区分。十进制数用 D 表示或省略，二进制数用 B 表示，十六进制数用 H 表示，当十六进制数以 A~F 开始时，则需在前面加 1 个 0。

在各种进位计数制中，十进制是人们最习惯的计数方式，但是计算机硬件不容易实现，为了表示十进制数，可采用 4 位二进制数编码来表示 1 位十进制数。这种方法称为二进制编码的十进制数，简称 BCD 码 (Binary Code Decimal Number)。常用的 BCD 码有几种，如 8421 码、2421 码、余 3 码等。8421 BCD 码是最常用的编码，它选取 4 位二进制数的前 10 个代码与十进制数字相对应（如表 2.1 所示）编码每位的权从左至右为 8、4、2、1 因此称为 8421 BCD 码。

表 2.1 十进制数与 8421 码对照表

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

2) 二进制、十六进制、十进制之间的转换

(1) 任意进制转换为十进制

把任意进制转换为十进制时，采用的方法是按权展开求和。

【例 2.1】把下列数转换为十进制数。

$$16FH = 1 \times 16^2 + 6 \times 16^1 + F \times 16^0 = 367$$

$$1011.1B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} = 11.5$$

(2) 十进制转换为任意进制

把十进制数转换为任意进制数时，整数部分和小数部分应分别进行。

整数部分的规则是除基数取余数直到商为 0 为止。由此可得到一个余数序列，该序

列的第 1 个余数为转换结果的最低位，最后 1 个余数为最高位。

【例 2.2】 把十进制数 18 转换为二进制数。

$$18/2 = 9 \quad \text{余数为 } 0$$

$$9/2 = 4 \quad \text{余数为 } 1$$

$$4/2 = 2 \quad \text{余数为 } 0$$

$$2/2 = 1 \quad \text{余数为 } 0$$

$$1/2 = 0 \quad \text{余数为 } 1$$

$$18 = 10010B$$

小数部分的转换规则是乘基数取整数进位，直到乘积的小数部分为 0 或精度满足要求为止。由此可得到一个进位序列，该序列的第 1 个进位是转换结果的最高位，最后 1 个进位是转换结果的最低位。

【例 2.3】 把十进制数 0.625 转换为二进制数。

$$0.625 \times 2 = 0.25 \quad \text{进位为 } 1$$

$$0.25 \times 2 = 0.5 \quad \text{进位为 } 0$$

$$0.5 \times 2 = 0 \quad \text{进位为 } 1$$

$$0.625 = 0.101B$$

如果需转换为十六进制时，则每次除或乘基数 16 即可。

(3) 二进制与十六进制之间的相互转换

a. 二进制转换为十六进制

二进制转换为十六进制时，以小数点为准，向左向右 4 位为一组，每一组转换为 1 位十六进制数。

【例 2.4】 把二进制数 10011.1011B 转换为十六制。

$$10011.1011B = 13.BH$$

b. 十六进制转换为二进制

十六进制转换为二进制时，只需把 1 位十六进制数写成 4 位二进制数即可。

【例 2.5】 把十六进制数 16A.84H 转换为二进制数。

$$16A.84B = 101101010.100001B$$

3) 带符号数的表示

前面所提到的二进制数，没有涉及到符号问题，是一种无符号数。但是在实际应用中，一个数显然还可以有正数和负数之分，那么符号在计算机中是怎样表示的呢？由于数的符号只有“正”或“负”两种情况，所以在计算机中把一个数的最高位当做符号位，用来表示数的正或负，用 0 表示“+”号，用 1 表示“-”号。这就是一个有符号数在计算机中的表示形式，称之为机器数，而它的数值就称为机器数的真值。在计算机中常用的机器数有原码、反码、补码三种形式，当真值为 X 时，其原码、反码、补码分别用 $[X]_{\text{原}}$ 、 $[X]_{\text{反}}$ 、 $[X]_{\text{补}}$ 表示。

(1) 原码

设真值为 X ，原码的数值部分与真值的绝对值相同，当 X 为正数时，符号位为 0，当 X 为负数时，符号位为 1。由原码的定义可以看出 X 的原码与真值的差别只是用 0 和 1 代替 + 号和 - 号，而数值位与真值相同。在原码中 0 有正 0 和负 0 之分。

【例 2.6】 求出下列数的原码，要求写成 8 位的形式。

$$[+1101]_{\text{原}} = 00001101\text{B}$$

$$[-1110111]_{\text{原}} = 11110111\text{B}$$

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

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

(2) 反码

设真值为 X 当 $X > 0$ 时 其反码与原码相同 当 $X < 0$ 时把原码的数值位各位取反即是反码。在反码中 0 同样有正负之分。

【例 2.7】 求出下列数的反码，要求写成 8 位的形式。

$$[+1101]_{\text{反}} = 00001101\text{B}$$

$$[-1110111]_{\text{反}} = 10001000\text{B}$$

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

$$[-0]_{\text{反}} = 11111111\text{B}$$

(3) 补码

计算机中表示有符号数时，都是采用补码进行。在介绍补码之前，首先介绍模的概念和性质。我们把一个计数系统可表示的数的个数称为计数系统的模，记为 M 或 $\text{MOD } M$ 。例如：一个 n 位二进制计数系统，它可以表示 2^n 个不同的数，它的模为 2^n 。又如钟表可以表示 12 个钟点 它的模为 12。

模具有这样的性质，当模为 2^n 时， 2^n 和 0 表示形式是相同的。例如一个 n 位二进制计数器 可以从 0 计数到 $2^n - 1$ 如果再加 1 计数器就变成了 0。所以 2^n 和 0 在 n 位二进制计数器中的表示形式是一样的，同样钟表的零点和 12 点的表示形式是相同的。由此也可以看出，当一个计数系统的计数值达到模时，模将会自动丢失。引入模的概念后，可以把减法转换成加法进行。例如：当前北京时间为下午 3 点，而您的手表停在上午 10 点，您可以顺时针拨 5 个小时，也可以逆时针拨 7 个小时。如果顺时针为加法，逆时针为减法，则可以得到下面两个表达式：

$$\text{顺时针} \quad 10 + 5 = 12 + 3 = 3 \quad (\text{MOD } 12)$$

$$\text{逆时针} \quad 10 - 7 = 3$$

比较以上两个表达式可以发现，当以 12 为模时， $10 + 5$ 和 $10 - 7$ 两种运算是等价的。在这里把 5 称为 -7 的补码。在计算机中， n 位加法器最高位的进位也会和钟表中的时针一样自动丢失模。它所丢失的模为 2^n 。

由以上论述可以给出补码的定义：设真值为 X 当 $X \geq 0$ 时，它的补码与原码相同。当 $X < 0$ 时，它的补码定义为：

$$[X]_{\text{补}} = 2^n + X$$

其中 n 为补码的位数。在补码中 0 没有正负之分，它的表示形式是唯一的。

【例 2.8】 求出下列数的补码，要求写成 8 位的形式。

$$[+1101]_{\text{补}} = 00001101\text{B}$$

$$[-1110111]_{\text{补}} = 10001001\text{B}$$

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

$$[-0]_{\text{补}} = 2^8 - 0 = 2^8 = 00000000\text{B}$$

由例 2.8 可以看出，在补码中 0 的表示形式是唯一的。

表 2.2 8 位二进制数的表示形式

二进制数码形式	无符号十进制数	原码	反码	补码
0000000B	0	+0	+0	+0
0000001B	1	+1	+1	+1
0000010B	2	+2	+2	+2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
01111110B	126	+126	+126	+126
01111111B	127	+127	+127	+127
10000000B	128	-0	-127	-128
10000001B	129	-1	-126	-127
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11111101B	253	-125	-2	-3
11111110B	254	-126	-1	-2
11111111B	255	-127	-0	-1

由以上所述可知 当真值为正数时 三种机器数的形式相同 真值为负数时 可由各自的定义求出其原码、反码和补码 其中最简单的是原码 最复杂的是补码 为了简化求解步骤 可先求出原码 保持原码的符号位不变 把数值位逐位取反得到的便是反码 反码的末位加 1 即可得到补码。

【例 2.9】已知 $X = -100111B$ ，求写出它的反码和补码。

先求出原码 $[X]_{原} = 10100111B$

数值位取反求出反码 $[X]_{反} = 11011000B$

反码末位加 1 求出补码 $[X]_{补} = 11011001B$

如果已知机器数，要求出相应的真值，应该如何进行？由于原码与真值最相近，所以只需要把各种机器数转换为原码，然后把原码的符号位用正负号替换即可。真值为正数时 原码、反码、补码相同 无需转换。真值为负数时 反码的数值位各位取反 可转换为原码，补码的数值位取反后末位加 1 可转换为原码。

4 计算机中带符号数的加减法运算

在微型计算机中，原码表示的数易于识别，但做加减法运算时比较复杂，符号位和数值位需要分别处理。首先做两个数绝对值的减法，用绝对值大数减去绝对值小的数，然后用绝对值大的数的符号作为结果的符号。采用补码做加减法运算时，符号位与数值位同时参加运算，减法也转换为加法运算，符号位无需单独处理。

(1) 补码加法运算

补码加法的运算规则是：

$$[X + Y]_{补} = [X]_{补} + [Y]_{补} \quad (\text{MOD } 2^n)$$

【例 2.10】已知 $X = 1100011B$, $Y = -00111B$ 求 $X + Y = ?$

$$[X]_{补} = 01100011B, [Y]_{补} = 11111001B$$

$$\begin{array}{r} [X]_{\text{补}} \quad 01100011\text{B} \\ +) [Y]_{\text{补}} \quad 11111001\text{B} \end{array}$$

$$\text{模溢出} \rightarrow \boxed{1} \quad 01011100\text{B}$$

所以 $[X + Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [Y]_{\text{补}} = 01011100\text{B}$, $X + Y = 1011100\text{B}$ 最高位进位自动丢失。

(2) 补码减法运算

在微型计算机中减法运算也通过补码转换为加法运算，减法运算的规则是：

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

其中 $[-Y]_{\text{补}}$ 可以由 $-Y$ 求出，也可以由 $[Y]_{\text{补}}$ 求出，把 $[Y]_{\text{补}}$ 的符号位与数值位一起取反，末位加 1 结果就等于 $[-Y]_{\text{补}}$ 。

【例 2.11】已知 $X = 1000111\text{B}$, $Y = 1001\text{B}$ 求 $X - Y = ?$

$$[X]_{\text{补}} = 01000111\text{B}, [Y]_{\text{补}} = 00001001\text{B}, [-Y]_{\text{补}} = 11110111\text{B}$$

$$\begin{array}{r} [X]_{\text{补}} \quad 01000111\text{B} \\ +) [-Y]_{\text{补}} \quad 11110111\text{B} \end{array}$$

$$\text{模溢出} \rightarrow \boxed{1} \quad 00111110\text{B}$$

$$[X - Y]_{\text{补}} = 00111110\text{B}, X - Y = 00111110\text{B}$$

5) 溢出判断

(1) 溢出的概念

在计算机内部表示数据与人工表示数据的情况不同，人工表示数据时，数据的值可以为任意大小，而在计算机内只能用有限位来表示数据。所以计算机中所能表示的数有一定的范围，对于绝对值太大而超过一定值的数，计算机无法表示，这时会造成数据的最高位丢失，数据产生错误，这种情况称为上溢出。出现上溢出时，应停止运算，进行错误处理。对于绝对值太小的数，在计算机中同样也表示不出来，此时计算机将这个数作为 0 处理，数据产生误差，这种情况称为下溢出。由于下溢出所带来的误差很小，在允许范围之内，不作为错误处理。所以，在以后提到的溢出指的是上溢出。

(2) 溢出的判断

当两个数作加减法运算时，如何判断运算结果是否有溢出呢？常用的方法有补码和变形补码两种方法。

a. 补码判断法

两个用补码表示的数作加减法运算时，如果是同号相减或异号相加，只能使数据的绝对值越来越小，运算结果不可能产生溢出；如果是同号相加或异号相减，则运算结果可能会出现溢出。此时，可以把运算结果的符号与参与运算的数据的符号相比较，如果出现正数加正数得负数或负数加负数得正数的情况，则可以断定运算结果出现了溢出。

【例 2.12】已知 $X = 1110010\text{B}$, $Y = 1001101\text{B}$ 求 $X + Y = ?$

$$[X]_{\text{补}} = 01110010\text{B} \quad [Y]_{\text{补}} = 01001101\text{B}$$

$$\begin{array}{r} [X]_{\text{补}} \quad 01110010\text{B} \\ +) [Y]_{\text{补}} \quad 01001101\text{B} \end{array}$$

$$10111111\text{B}$$

由运算结果可以看出，两个正数相加，结果为负数，可以断定是溢出造成的。出现溢