

# 第 1 章 绪 论

本章对电子计算机的发展、基本组成、分类及特点做了概述，并对微型计算机的软硬件系统、特点及主要技术指标做了介绍，可帮助读者对计算机有一个总体了解。

## 1.1 计算机的产生和发展

### 1.1.1 计算机系统

计算机是用于信息处理的机器，它包括硬件系统和软件系统。硬件系统指计算机的实体，它由看得见、摸得着的线路板、元器件、机械设备等实物组成。硬件系统是计算机的物质基础。软件系统是各类程序的集合，用户通过软件管理、维护和使用计算机，使计算机很好地服务于用户。

### 1.1.2 计算机的产生

二战期间，美国陆军火炮公司出于军事目的，委托宾夕法尼亚州立大学的一批专家学者于 1946 年研制出了世界上第一台电子数字计算机，命名为“ENIAC”。这台 ENIAC 使用了 18000 个电子管，占地 1500 平方英尺，重 30 吨，耗电量为 150 千瓦，每秒可进行 5000 次的加运算。尽管现在看来这台计算机笨重、耗电、性能低下，但它确立了计算机发展的基础。

### 1.1.3 计算机的发展史

从第一台计算机 ENIAC 诞生至今，计算机的发展经历了四代。

#### 一、第一代计算机

1946 年至 1958 年，为第一代计算机的发展时期。其硬件特征是以电子管为基本电子器件；其软件特征是使用机器语言及汇编语言。这代计算机的特点是：运算速度低（3000 次/秒）、体积大、重量大、存储容量小（15 万字节）、功耗高、可靠性低、价格贵。其应用范围是军事、国防和科研等领域。这代计算机的代表产品是 ENIAC。

#### 二、第二代计算机

1958 年至 1964 年，为第二代计算机的发展时期。其硬件特征是以晶体管为基本电子器件、用磁芯作内存；其软件特征是使用了操作系统和高级语言（如 FORTRAN）。这代计算机的特点是：运算速度较高（12000 次/秒）、体积较小、重量较轻、存储容量较大（20 万字节）、可靠性较高、功耗较低。其应用范围是军事、国防、科研及商业等领域。这代计算机的代表机型是 IBM 1400。

#### 三、第三代计算机

1964 年至 1970 年，为第三代计算机的发展时期。其硬件特征是以小规模集成电路为基本电子器件、使用了半导体存储器作内存；其软件特征是使用了更加完善的操作系统和高级语言，使计算机的使用和维护更为方便。这代计算机的特点是：运算速度快（43000

次/秒)、体积小、重量轻、存储容量大(50 万字节)、可靠性高、功耗低。其应用范围是科学计算、数据处理和实时控制等领域。在此期间,产品的系列化和兼容性得以实现,并出现了计算机向大型化和微型化两极发展的趋势。这代计算机的代表机型是 IBM 370。

#### 四、第四代计算机

1970 年至今,为第四代计算机的发展时期。其硬件特征是以中、大规模或超大规模集成电路为基本电子器件,广泛使用了高速、高密度的半导体存储器作内存,外围设备性能优良;其软件特征是形成了完善的系统软件和应用软件,如各类操作系统、汇编程序、高级语言、可视化高级语言开发环境、数据库管理系统和字处理软件等。这代计算机的特点是:运算速度很高(240000 次/秒以上)、体积很小、重量很轻、存储容量很大(100 万字节以上)、可靠性很高、功耗很低。另外,网络计算机、微型计算机、巨型计算机和多媒体计算机等技术飞速发展。这代计算机的应用范围是科学计算、数据处理、实时控制、采集测量、信息处理、家用电器、文教卫生、人工智能和娱乐游戏等领域。这代计算机的代表机型是各种品牌的 286、386、486 和 586 微机。

有人把 80 年以后出现的、以人工智能为主要特点的计算机称为第五代计算机。

#### 1.1.4 计算机的发展动向

随着科学技术的发展,计算机将在运算速度、存储能力、处理能力、信息共享能力和人工智能等方面得以发展。就目前计算机技术的发展来看,计算机的发展动向有五个方面,即性能超级化(巨型机)、系统微型化(微型机)、通讯网络化(计算机网络)、功能智能化(人工智能计算机)和媒体多样化(多媒体计算机)。

##### 一、巨型计算机

巨型计算机是为了追求工作速度和存储能力超级化而设计的超大型计算机系统。它集最先进的微电子、高速存储、并行处理、磁盘及光盘存储等技术于一身,再配以高速、高效的外设和专用软件,使其性能超级化。巨型机是一个国家计算机技术研究和水平发展的象征。

巨型机的主要应用范围是:天气预报、航空航天和军事指挥等。

##### 二、微型计算机

微型计算机简称“微机”,它以大规模或超大规模集成电路芯片为基本电子器件,采用以 CPU(中央处理单元)为中心的总线结构,内存用高速、高密度的半导体或 MOS 存储器。微机的特点是体积小、重量轻、性能价格比高。

微机的应用已经渗透到了各个行业,正在逐步进入家庭。目前,微机中的笔记本电脑异军突起,发展迅速,应用广泛。

##### 三、计算机网络

计算机网络是利用现代数传技术,将分布在不同地点的计算机连接在一起,实现资源共享及信息通讯的计算机系统。计算机网络实现了通讯网络化,使这个世界变得越来越小,人与人之间的距离变得越来越短。

计算机网络的应用范围主要有:邮电、通讯、铁路、银行、教育等。

#### 四、多媒体计算机

多媒体计算机以微型机为主体，再配以声卡、解压卡（或解压软件）和音箱等部件，使用户能够以交互方式将文本、图像、图形、音频、视频等多种信息，经电脑的软硬件设备获取、操作、编辑、存储等处理后，以单独或合成的形态表现出来。多媒体计算机尤其以其可听性和可视性越来越得到人们的青睐。

多媒体计算机应用范围主要有：文化教育、家庭娱乐、音乐/声音/影片/图形处理等领域。

#### 五、人工智能计算机

人工智能计算机是一个拥有大量专门知识的计算机智能信息系统。它运用知识及推理来求解和模拟通常要由专家才能解决的复杂、具体的问题。

人工智能计算机的主要应用范围有：专家系统、机器人。

## 1.2 计算机系统组成

计算机系统包括硬件系统和软件系统。硬件和软件系统的完美结合，才能使计算机正常工作，并充分发挥作用。

### 1.2.1 冯·诺依曼计算机的硬件组成

ENIAC 计算机时代，在美国普林斯顿大学任教的匈牙利数学家冯·诺依曼也研制了一台名字叫 EDVAC 的计算机，人们普遍认为这台计算机就是现代计算机的原形。尽管计算机有大、中、微型三类之分，每类又有多种机型，各类、各型计算机的配置相差很大，但基本组成均与冯·诺依曼机相同，由五部分构成，即运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备，如图 1.1 所示。

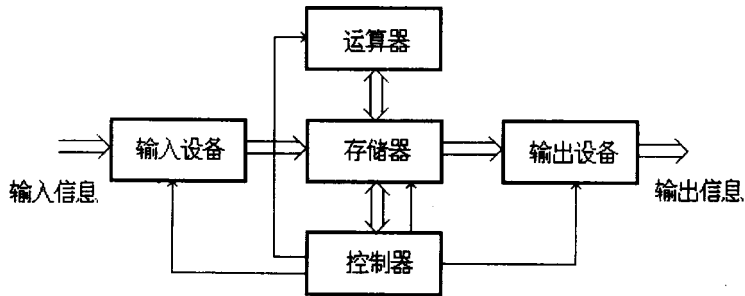


图 1.1 冯·诺依曼计算机的硬件组成框图

#### 一、运算器

运算器的功能是完成算术或逻辑运算，运算器又名算术逻辑部件 ALU(Arithmetic Logic Unit)。它由加法器、累加器、通用寄存器及计数器等组成。运算器在计算机中的作用类似于用算盘解题时的运算工具——算盘。

#### 二、存储器

存储器是计算机的记忆部件，其功能是保存数据及程序。数据包括输入数据、中间结果和输出数据等；程序是计算机工作过程的描述或操作的依据。不论是数据还是程序，在

计算机中都以二进制数据形式表示。

现代计算机的存储器通常是半导体或 MOS 存储器。微机存储器通常以字节为单位存储数据或程序，一个字节是一个存储单元，每个存储单元存储 8 位二进制数。每个存储单元有一个编码，称之为存储单元的地址。计算机给出存储器的单元地址后，可以在控制器控制下对相应存储单元进行数据的写入和读出操作。存储器所有存储单元的总数为存储器的存储容量。

半导体存储器的容量通常是有限的，所以计算机中通常配有存储容量更大的磁盘、磁带或光盘存储器，称之为外存。半导体存储器为内存或主存。存储器相当于用算盘解题时用于记录原始数据、算题步骤或计算结果的纸张。

### 三、控制器

控制器是计算机的控制中心，它使计算机各个部件自动协调工作。控制器工作的过程就是程序执行的过程。控制器对程序中的每条语句（指令）进行取指、翻译解释后，产生一串微操作命令，发向计算机各部件，控制整机有条不紊地工作。控制器相当于用算盘解题时人的大脑。

### 四、输入设备

输入设备的功能是输入数据或程序，它把人们熟悉的形如文字、字符、声音、图像等信息变换成计算机可以识别的信息形式，即二进制数或 ASCII（American Standard Code For Information Interchange，美国信息交换标准码）码。

常用的输入设备有键盘、鼠标、光笔、扫描仪和语音录入器等。

### 五、输出设备

输出设备的功能是将计算机处理结果的二进制信息转换成人或其它设备能够识别或接受的信息形式，如字符、图形、声音或文字等。

常用的输出设备有显示器、绘图仪、数码管和音箱等。

## 1.2.2 微型计算机的硬件组成

微型计算机在计算机中占有重要地位，由于它结构简单、操作方便、性能价格比高，很受人们的青睐。微型计算机的应用已渗透到了各个行业，正在逐步进入家庭。

微型计算机是以 CPU（Central Processing Unit，中央处理单元）为中心的总线结构，其组成包括 CPU、ROM（Read Only Memory，只读存储器）、RAM（Random Access Memory，随机存取存储器）输入/输出设备、输入/输出设备接口和总线等部件，如图 1.2 所示。

### 一、CPU（又名微处理器）

将计算机的运算器和控制器做在同一个芯片上，就是 CPU。CPU 的功能是完成运算和控制。CPU 是微型机的标志，CPU 的性能决定了整个微机的主要技术指标。

通常以 CPU 的字长作为微型计算机的分类标准，如 32 位微机是指其 CPU 的字长为 32 位。目前使用的微机多为 32 位。

最大的 CPU 生产商当数 Intel 公司，至今它仍占领着 CPU 市场的主要份额，Intel 公司的代表产品有 Intel 8086、Intel 286、Intel 486、Intel 586、Pentium、Pentium PRO、Pentium MMX、Pentium TWO 和 MERCED 等。另外两个较大的 CPU 生产厂商是 AMD（Advanced Micro Devices）和 CYRIX。AMD 除了生产 X86 CPU 外，其 K5 很有竞争实力。CYRIX

的代表产品是 M1。

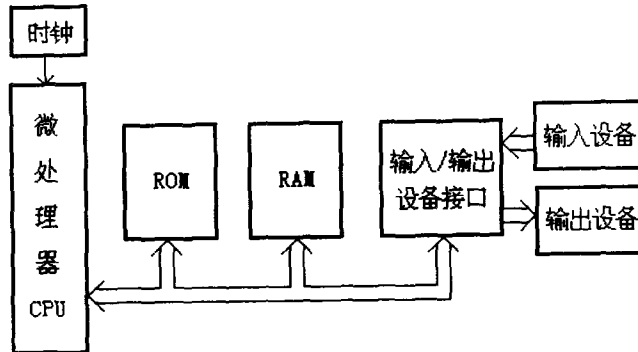


图 1.2 微型计算机硬件组成框图

## 二、只读存储器 ROM

只读存储器 ROM 是只能读出而用一般的方法不能写入的存储器，其特点是掉电后数据不丢失。ROM 用来存储一些关机后也不能消失的程序和数据，如 ROM-BIOS。ROM-BIOS 是最基本、最低级、用于控制和监督计算机操作的一组程序。

## 三、随机存取存储器 RAM

随机存取存储器就是我们通常所说的主存或内存。对于 RAM，我们可以随机写入或读出数据，RAM 的特点是掉电后信息全部丢失。RAM 在微型机中的作用是暂时存取正在执行的程序、原始数据、中间结果和最终结果。

## 四、输入 / 输出设备

输入 / 输出设备又名外部设备，简称外设。它们实现了 CPU 与外部世界的信息交换。

## 五、输入 / 输出设备接口

输入 / 输出设备接口是介于微机和外设之间的部件，它保证了两者在工作速度、数据格式、电平类型和极性的匹配。

## 六、总线

总线为 CPU 和其它部件之间提供数据、地址和控制信息的传输通路。总线分为数据总线、地址总线和控制总线三种。数据总线用来传送数据，它通常是双向的，在数据总线上传送的数据包括有效数据、指令代码和状态代码等。地址总线用来传送地址，地址总线是单向的，传送方向由 CPU 指向其它部件。控制总线用来传送控制信号，包括 CPU 送出的控制信号，如读信号、写信号等，还包括其它部件送到 CPU 的信号，如中断申请信号、时钟信号等。

### 1.2.3 计算机的软件系统

计算机各类程序的有机结合构成了软件系统。伴随着硬件的发展，计算机软件也得到了飞速发展，软件的发展自始至终围绕着有利于用户使用、维护计算机，有利于用户开发应用程序，有利于计算机硬件资源的充分发挥。当前，计算机的软件系统已经非常丰富，并已形成了产业。按功能软件系统可分为系统软件、程序设计语言和应用软件三类。系统

软件分类如图 1.3 所示。

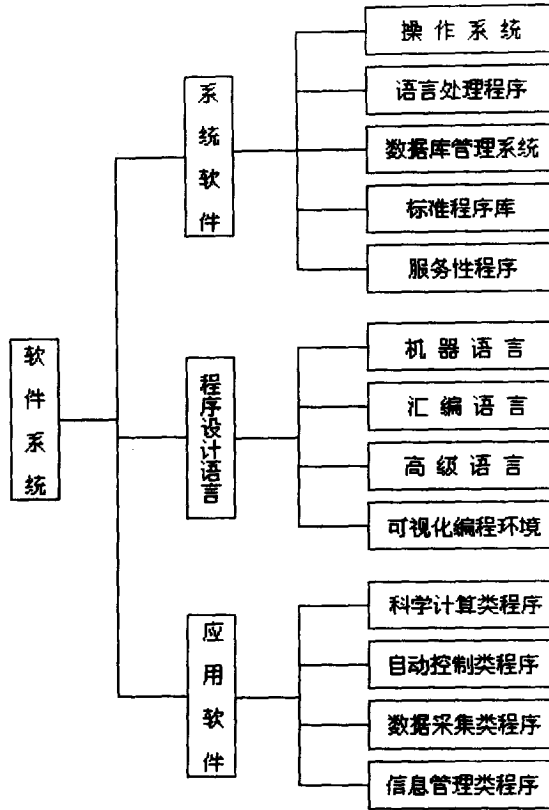


图 1.3 计算机软件系统分类

### 一、系统软件

系统软件是为了计算机系统的良好运行而开发的各种软件，这些软件实现了对计算机的管理、调度、监视和服务。系统软件包括操作系统、语言处理程序、数据库管理系统、标准程序库和各种服务性程序等。

#### 1. 操作系统

操作系统是系统软件的主要组成部分。它负责管理计算机的软硬件资源、为用户和计算机之间提供接口，使用户便于使用、管理和维护计算机。可以说，操作系统提供了软件的运行和开发环境。操作系统分三类：批处理操作系统、实时操作系统和分时操作系统。

微机常用的操作系统有 MS-DOS 6.22、UCDOS、Windows 95 和 Windows 98 等。常用的网络操作系统有 NetWare 和 Windows NT 等。

#### 2. 语言处理程序

计算机能识别的语言很多，如汇编语言、BASIC 语言、FORTRAN 语言、C 语言等，但计算机硬件能够执行的语言只有机器语言，即用二进制代码表示的指令序列。用各类语言编写的程序叫源程序，计算机可以执行的机器语言叫目标代码。我们正是借助于各类语言处理程序才能很方便地将源程序翻译为目标代码，以用计算机运行程序、解决问题。不同的语言对应有不同的语言处理程序。

语言处理程序，按其翻译的方法不同可分为解释程序和编译程序两大类。前者对源程

序采用边解释边执行的方式操作，它对源程序中的语句逐条解释并立即执行，不生成目标程序。后者先将源程序翻译为目标程序，然后机器通过执行目标程序给出结果。

### 3. 数据库管理系统

数据信息的管理和处理是计算机最为广泛的应用领域之一。简单地说，数据库是一个提供数据的基地，它在计算机存储设备上合理存放一组业务数据，并以最佳方式、最少数据重复为所有可能的用户所共享。数据库管理系统是管理和维护数据库中数据的系统软件，其功能是维持数据库系统的正常运行，为用户提供诸如录入数据、更新内容、检索查询等服务，并对用数据库语言编写的程序进行翻译和执行。数据库管理系统提供了用户和数据库之间的接口。

### 4. 标准程序库

将一些通用的、优化的子程序段按照标准的格式编写好，生成标准程序库。用户在编写程序时，可随时从标准程序库中调用相关的子程序。标准程序库提高了用户编写程序的效率。

### 5. 服务性程序

服务性程序是一些实用的计算机辅助软件，它帮助或方便于用户使用、维护计算机。例如，程序的输入与装配程序、实现程序连接的连接程序、编辑程序、调试程序、诊断程序、文字处理软件等。

## 二、程序设计语言

程序设计语言是为方便用户编写应用软件而设置的。程序设计语言经历了机器语言、汇编语言、高级语言和可视化编程环境的发展过程。

最早的程序设计语言是机器语言，用机器语言编写的程序计算机可以直接识别并执行。机器语言的特点是：面向机器、编写困难、运行速度快。由于机器语言是面向机器的低级语言，编程者需要有雄厚的计算机硬件知识，另外用机器语言编写程序是一件非常烦琐和苦恼的工作，费时费力又容易出错，这就限制了计算机的使用和推广。为解决这些问题，开发了汇编语言。

汇编语言是符号化的机器语言，它用一些助记符表示指令的操作码或操作数，可以用标号和符号代替地址、常量或变量。助记符通常是一个具体操作的英文名称的缩写，这就方便了用户记忆指令和编写程序。汇编语言仍然是面向机器的语言，属于低级语言。但用汇编语言编写的源程序毕竟不是机器语言，计算机不能执行，需要用汇编程序“翻译”和“连接”后方可执行。

为了进一步提高编写程序的效率，使并不熟悉计算机的人也能编写程序、使用计算机，人们又开发了面向对象、面向过程的高级语言。

高级语言是接近数学语言的算法语言，具有直观、通用、与机器硬件无关等特点。常用的高级语言有 BASIC、FORTRAN、PASCAL、C 等。每种高级语言各有优缺点，但相比之下，C语言较为优秀。

当前广泛使用的可视化编程环境 Visual BASIC 和 Visual C 更是为用户编写 Windows 应用程序提供了方便，它们将成为程序设计的重要环境。

## 三、应用软件

应用软件是用户为了解决某一问题，在一开发环境下用一程序设计语言编写的程序。

如科学计算类程序、自动控制类程序、数据采集类程序、信息管理类程序等。计算机的应用范围广泛，这类软件数不胜数。

### 1.3 计算机的技术指标

计算机有多种性能指标，不同用途的计算机对某些指标有所侧重。用户购买计算机时，要兼顾考虑性能和价格，在满足自己用途的前提下，力图使性能价格比最高。

#### 一、字长

字长指计算机能够直接处理的二进制数据的位数，它通常是计算机 CPU 中运算器或寄存器的位数。目前微机字长有 16 位、32 位和 64 位。字长指标直接决定了计算机的处理精度和功能，影响着它的用途和应用领域。

#### 二、速度

速度是计算机工作快慢的体现，通常从两个方面描述：主频和运算速度。

##### 1. 主频

主频指计算机的主时钟频率，它是加到 CPU 时钟端信号的频率。主频在很大程度上决定了计算机的运行速度。8086/8088 的主频为 4.77MHz，80286 的主频为 10MHz，80386 的主频在 16MHz 以上，80486 的主频在 25MHz 以上，高档 80586 的主频在 450MHz 以上。

##### 2. 运算速度

运算速度指计算机单位时间内执行的指令数，由于各条指令的执行时间并不相同，所以运算速度只是对计算机速度粗略的描述。80 年代微型机的运算速度是每秒 1~2 百万条指令，90 年代是每秒 3 亿条指令。

#### 三、内存容量

内存是 CPU 可以直接访问的存储器。内存容量指内存能存储信息的总字节数。内存容量大，说明计算机存入的信息量大、可运行更复杂的程序。为了提高计算机的处理能力，就要配备大容量的内存。8086 微机的内存存在 1MB 以内，80386 和 80486 微机可配备 16MB 内存，586 微机的内存高达 32MB 以上。

#### 四、外存容量

外存指计算机系统中联机运行的外部存储器。常见的外部存储器有硬盘、软盘、磁带和光盘存储器。对微型机，主要的外存是硬盘和光盘。近年来，硬盘的存储容量和速度指标不断增加，现代微型计算机通常配备 2.1GB (1GB=1KM) 以上的硬盘。光盘具有存储容量大的优点，它的应用为大型软件的保存和安装提供了方便。

#### 五、可靠性

可靠性指在给定的时间内，计算机能正常工作的概率，一般用平均无故障时间表示。平均无故障时间越长，表明计算机的可靠性越高。

#### 六、外设技术指标

计算机常用的外设显示器、打印机、扫描仪、绘图仪等，这些外设均有自己的技术指标，这些技术指标将在以后有关章节介绍。

## 习 题

1. 简述计算机的发展史和各代计算机的特点。
2. 叙述计算机的软硬件组成。
3. 微型计算机有哪些特点？其主要技术指标有哪些？

## 第 2 章 计算机的运算理论和实现方法

计算机的基本功能之一是进行算术和逻辑运算，这一功能是通过 CPU 中的运算器模块实现的。实现运算的基本指导思想是：将各个种类的运算转换为算术四则运算和基本的逻辑运算，最终通过多功能加法器来实现。为此，需要对参加运算的数据进行码制变换或其它处理。例如，借助补码运算可以将减法运算化为加法运算；乘法运算可以通过多步移位加实现；除法运算可以通过多步移位减实现；阶码和尾数的运算组合可以实现浮点数运算等。

本章学习数据、字符、汉字在计算机中的表示方法，学习基本的算术、逻辑运算理论和实现方法，学习浮点数的四则运算等内容，最后对 CPU 中运算模块的工作原理作一简单介绍。

### 2.1 数据、字符和汉字的表示方法

计算机不仅能完成数据的运算，还可以接受和处理字符或汉字。本节讨论数据、字符和汉字在计算机中的表示方法。

#### 2.1.1 进位计数制及其相互转换

日常生活中使用的是十进制数，计算机以二进制作为计数制，用汇编语言编写程序时则习惯用十六进制数表示地址或操作数。

##### 一、进位计数制

##### 1. 十进制(Decimal)

十进制计数是最基本的计数方法。十进制数 168 可以表示为：

$$168_D = 1 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 8 \times 10^0$$

这里的  $10^2$ 、 $10^1$  和  $10^0$  分别是百位、十位和个位的“位权”， $10$  叫做十进制计数制的“基值”。“位权”和“基值”是构成进位计数制的两个要素。任意十进制数  $N$  可表示为：

$$\begin{aligned} N_D &= k_{n-1} 10^{n-1} + k_{n-2} 10^{n-2} + \Lambda + k_1 10^1 + k_0 10^0 + k_{-1} 10^{-1} + \Lambda + k_{-m} 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 10^i \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中  $k_i$  可以是  $0 \sim 9$  中的任意一个数据； $n$  和  $m$  为正整数，分别是整数和小数部分的位数； $D$  是十进制的英文缩写，表示  $N$  是一个十进制数。 $k_i$ 、 $m$  和  $n$  均由  $N$  决定。

在十进制数中，各位允许使用的数码是  $0 \sim 9$  十个计数元素，进位规则是逢十进一。由于十进制数有十个计数元素，不容易用物理器件表示，所以计算机中并不采用十进制计数制。

##### 2. 二进制(Binary)

二进制是计算机或数字化设备使用的计数制。二进制数  $1011.11$  可以表示为：

$$1011.11_B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

其基值是 2，相应位的位权分别为  $2^3$ 、 $2^2$ 、 $2^1$ 、 $2^0$ 、 $2^{-1}$  和  $2^{-2}$ 。任意一个二进制数 N 可以表示为：

$$\begin{aligned} N_B &= k_{n-1} 2^{n-1} + k_{n-2} 2^{n-2} + \Lambda + k_1 2^1 + k_0 2^0 + k_{-1} 2^{-1} + \Lambda + k_{-m} 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 2^i \end{aligned} \quad (2.2)$$

式中  $k_i$  只有 0 和 1 两个状态；n 和 m 为正整数，分别是整数和小数部分的位数；B 是二进制的英文缩写，表示 N 是一个二进制数。 $k_i$ 、m 和 n 均由 N 决定。

在二进制数中，各位允许使用的数码是 0 和 1 两个计数元素，进位规则是逢二进一。

二进制计数制有三个突出的特点，它们是：容易用物理器件表示、算术运算简单和容易实现逻辑运算。

由于二进制数只有 0 和 1 两个计数元素，容易用物理器件的两个状态表示。例如开关的通与断、晶体管的饱和导通与截止、MOS 管的导通与夹断、触发器的 0 与 1 稳态。这一特点是计算机选用二进制计数的根本原因。

二进制的算术运算非常简单，如：

加法规则

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

乘法规则

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

逻辑运算的变量是“0”和“1”，正好与二进制的两个计数元素相对应，所以二进制数便于实现逻辑运算。基本的逻辑运算有与、或、非等。

### 3. 十六进制 (Hexadecimal)

十六进制数 73A 可以表示为：

$$73A_H = 7 \times 16^2 + 3 \times 16^1 + 10 \times 16^0$$

其基值是 16，相应位的位权分别为  $16^2$ 、 $16^1$ 、和  $16^0$ 。任意一个十六进制数 N 可以表示为：

$$\begin{aligned} N_H &= k_{n-1} 16^{n-1} + k_{n-2} 16^{n-2} + \Lambda + k_1 16^1 + k_0 16^0 + k_{-1} 16^{-1} + \Lambda + k_{-m} 16^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 16^i \end{aligned} \quad (2.3)$$

式中  $k_i$  可为 0~9、A、B、C、D、E、F 十六个元素之一；n 和 m 为正整数，分别是整数和小数部分的位数；H 是十六进制的英文缩写，表示 N 是一个十六进制数。 $k_i$ 、m 和 n

均由  $N$  决定。

在十六进制数中，各位允许用的数码是  $0 \sim 9$  和  $A \sim F$  十六个计数元素，进位规则是逢十六进一。十进制数、二进制数和十六进制数的对应关系如下：

十进制	二进制	十六进制
0	0 0 0 0	0
1	0 0 0 1	1
2	0 0 1 0	2
3	0 0 1 1	3
4	0 1 0 0	4
5	0 1 0 1	5
6	0 1 1 0	6
7	0 1 1 1	7
8	1 0 0 0	8
9	1 0 0 1	9
10	1 0 1 0	A
11	1 0 1 1	B
12	1 1 0 0	C
13	1 1 0 1	D
14	1 1 1 0	E
15	1 1 1 1	F

由此可见，每一位十六进制数总可以用四位二进制数表示 ( $2^4 = 16$ )，但用十六进制表示同一个数的书写长度缩短了，再者十六进制数和二进制数之间的转换非常简单，所以在有些场合用十六进制数计数，作为向二进制数的过渡。

## 二、各计数制间的相互转换

### 1. 各种进制转换为十进制

各种进制的数据转换为十进制数的方法是：按位权展开，逐项相加。

设有一  $R$  进制的数  $N$ ，则它总可以写成：

$$\begin{aligned}
 N_R &= k_{n-1}R^{n-1} + k_{n-2}R^{n-2} + \Lambda \Lambda + k_1R^1 + k_0R^0 + k_{-1}R^{-1} + \Lambda \Lambda + k_{-m}R^{-m} \\
 &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i R^i
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

所以，只要将任意进制数按式 (2.4) 展开，逐项相加，即可完成任意进制数向十进制数的转换，例如：

$$1010.01_B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 10.25_D$$

$$3B.8_H = 3 \times 16^1 + 11 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} = 59.5_D$$

### 2. 十进制转换为二进制

十进制数转换为二进制数时，应将整数部分和小数部分分别转换。整数部分的转换结果为二进制数的整数部分，小数部分的转换结果为二进制数的小数部分。

整数部分的转换原则是：除二取余。即用十进制数的整数部分除以 2，所得余数为对

应二进制数的最低位；继续用商除以 2，所得余数为对应二进制数的次低位；如此进行，直至商为 0 时止，最后一项余数为对应二进制数的最高位。

例 2.1  $156_{10} = 10011100_B$

2	156	
2	78	..... 余 0 (最低位)
2	39	..... 余 0
2	19	..... 余 1
2	9	..... 余 1
2	4	..... 余 1
2	2	..... 余 0
2	1	..... 余 0
	0	..... 余 1 (最高位)

小数部分的转换原则是：乘二取整。即用十进制数的小数部分乘以 2，所得乘积的整数部分为二进制小数的最高位；乘积的小数部分继续乘以 2，所得乘积的整数部分为二进制小数的次高位；如此进行，直至乘积的小数部分为 0，或达到所希望的精度要求为止，最后一项余数为对应二进制数最低位或在一定精度范围内的最低位。

例 2.2  $0.225_{10} \approx 0.00111_B$

	0.225	
×	2	
	0.450	..... 整数为 0 (小数最高位)
×	2	
	0.900	..... 整数为 0
×	2	
	1.800	..... 整数为 1
×	2	
	1.600	..... 整数为 1
×	2	
	1.200	..... 整数为 1 (小数最低位)

由以上两例可知，十进制数 156.225 对应的二进制数约等于 10011100.00111。

### 3. 二进制与十六进制之间的相互转换

我们知道，四位二进制数总可以用一位十六进制数表示，所以二进制数转换为十六进制数时，只要从小数点开始向两侧分组，每四位为一组，不够四位的沿分组方向补 0，然后将各组分别转换为相应的十六进制数即可。十六进制数转换为二进制数更为简单，只要分别将十六进制数的每一位转换为二进制数即可。

例 2.3

$$11001011011.10011_B = 0110 \ 0101 \ 1011.1001 \ 1000_B = 65B.98_H$$

$$3AF.3C_H = 0011 \ 1010 \ 1111.0011 \ 1100_B = 1110101111.001111_B$$

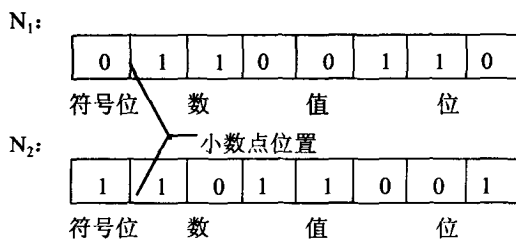
其它进制数之间的转换方法可参考以上方法进行。例如，十进制整数转换为十六进制数的方法是“除十六取余”；十进制小数转换为十六进制数的方法是“乘十六取整”。当

然，也可以先将十进制数转换为二进制数，再将二进制数转换为十六进制数。

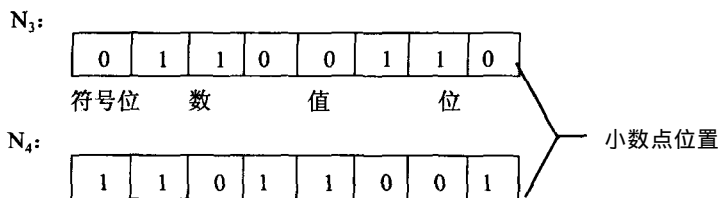
### 2.1.2 符号数的计算机表示

在日常生活和工作中，我们习惯上用“+”和“-”号表示正数和负数。在计算机中，数的符号也被数字化了，通常用“0”表示正数，用“1”表示负数，并且数字化了的符号位和数值部分一起参与编码。连同符号一起数字化了的数称为机器数，机器数所代表的真实数值称为真值。机器数有纯小数和纯整数之分。纯小数指绝对值小于1的数；纯整数指小数部分为0的数。当计算机是纯小数机时，其有效数据位的最高位用来表示数的符号，其余位用来表示数据，小数点默认为处于符号位和数据位之间，但小数点并不表示出来。当计算机是纯整数机时，其有效数据位的最高位用来表示数的符号，其余位用来表示数据，小数点默认为在最低有效位之后，小数点同样不表示出来。

设有两个纯小数  $N_1 = +0.1100110$ ， $N_2 = -0.1011001$ ，则它们在纯小数计算中分别表示为：



设有两个纯整数  $N_3 = +1100110$ ， $N_4 = -1011001$ ，则它们在纯整数计算中分别表示为：



对于不是纯小数或纯整数的数据，可通过调整比例因子，使之转换为纯小数或纯整数，以能够在纯小数或纯整数计算机中表示。

在计算机或数字化的机器中，机器数有三种编码方式，即原码、补码和反码。

#### 一、原码表示法

原码表示是一种最简单、最直观的数据表示形式。其符号位分别用“0”和“1”表示正数和负数，数值位与真值相同。“原码是带符号位的绝对值”是对原码表示法最朴素的描述。若纯小数  $x$  的原码形式是  $x_0 x_1 x_2 \dots x_n$ ，其中  $x_0$  是符号位，则原码的定义式是

$$[x]_{\text{原}} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 1 - x = 1 + |x| & 0 \geq x > -1 \end{cases} \quad (2.5)$$

例 2.4 设  $x = +0.1101$ , 则  $[x]_{原} = 0.1101$ 。

设  $x = -0.1010$ , 则  $[x]_{原} = 1.1010$ 。

若纯整数  $x$  的原码形式是  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其中  $x_0$  是符号位, 则原码的定义式是

$$[x]_{原} = \begin{cases} x & 2^n > x \geq 0 \\ 2^n - x = 2^n + |x| & 0 \geq x > -2^n \end{cases} \quad (2.6)$$

例 2.5 设  $x = +1101$ , 则  $[x]_{原} = 0, 1101$

设  $x = -1010$ , 则  $[x]_{原} = 2^4 - x = 1, 1010$

原码表示法有简单、直观和乘除法运算规则简单等优点, 但利用原码做加、减法运算却很困难。容易实现加、减法运算的是补码。

## 二、补码表示法

原码实现加减法运算时, 需要先判断两数的符号, 然后再确定具体的运算性质及方法, 最后确定运算结果的符号。按照这种方法设计的电路一定复杂, 计算机不用该方法。补码实现加减法运算就简单多了, 因为用补码做加减法运算时, 机器实际做的均是加法运算。补码运算方法单一、实现线路简单, 所以计算机选用补码表示法来设计运算电路。

### 1. 补数的概念

设想一钟表快了两个小时, 指在 8 点, 我们可以通过两种方法将钟表调准确: 一种方法是顺时针向前调 10 个小时, 另一种方法是逆时针向后调两个小时。假设顺时针为正, 逆时针为负, 调准方法可表示为

$$8 + 10 = 18 \quad \text{和} \quad 8 - 2 = 6$$

其中 18 和 6 是等价的, 这是因为钟表以 12 为进位单位,  $18 - 12 = 6$ 。我们通常称进位单位为“模”, 记做  $\text{mod}$ ; 而称 -2 和 10 互为以 12 为模的“补数”, 记做  $-2 = +10 \pmod{12}$ 。同理对  $\text{mod}12$  而言, -3 和 +9, -6 和 +6, -4 和 +8 等均互为补数。由此可见, 一个负数的补数等于模与该负数相加, 一个正数的补数是其本身 (正数的负补数是存在的, 但在运算中没有应用价值)。这一规律启示我们: 在模确定的前提下, 一个负数总有一个正数与之等价。这就为我们化减法运算为加法运算提供了可能。

例 2.6 已知:  $X = 8, Y = 4$ , 模为 12。求:  $X - Y = ?$

解: 在模为 12 的前提下, -4 的补数是 8, 所以

$$X - Y = 8 - 4 = 8 + 8 = 16$$

因模是 12, 即进位是 12, 所以 16 等价于 4。运算结果是 4。

### 2. 补码表示

在模确定的前提下, 一个数相对于这个模的补数就是这个数的补码。正数的补码是其本身, 负数的补码是模与该负数之和。

若纯小数  $x$  的补码形式是  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其中  $x_0$  是符号位, 则补码的定义式是

$$[x]_{补} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ 2 + x = 2 - |x| & 0 > x \geq -1 \end{cases} \quad (\text{mod}2) \quad (2.7)$$

例 2.7 设  $x = +0.1101$ , 则  $[x]_{补} = 0.1101$ .

设  $x = -0.1010$ , 则  $[x]_{补} = 10 - 0.1010 = 1.0110$ .

对于纯小数计算机, 其模为 2, 这是因为计算机不但把符号位数字化了, 而且符号位的数字还参与了运算。符号位本身是一位有效数字, 在运算过程中, 它是逢二进一的, 即计满 2 向高位进一。

若纯整数  $x$  的补码形式是  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其中  $x_0$  是符号位, 则补码的定义式是

$$[x]_{补} = \begin{cases} x & 2^n > x \geq 0 \\ 2^{n+1} + x = 2^{n+1} - |x| & 0 > x \geq -2^n \end{cases} \pmod{2^{n+1}} \quad (2.8)$$

例 2.8 设  $x = +1101$ , 则  $[x]_{补} = 0, 1101$ .

设  $x = -1010$ , 则  $[x]_{补} = 2^5 - 1010 = 1, 0110$ .

对于纯整数计算机讨论补码, 当其位数 (字长) 为  $n+1$  时, 其模为  $2^{n+1}$ , 这是因为在计算机中, 数字化了的符号位参与了运算, 符号位本身是一位有效数字。在运算过程中, 它是逢  $2^{n+1}$  进一的, 即记满  $2^{n+1}$  向高位进一。

采用补码表示法的目的是化减法运算为加法运算, 即加上一个负数 (减法运算) 等于加上这个负数的补码。求一个负数  $x$  的补码, 要用模减去  $|x|$ , 参考式 (2.7) 和式 (2.8)。这就造成在化减法运算为加法运算的过程中, 还得做一次减运算, 显然这并没有简化运算过程。那么为什么还要把补码引入到减法运算中呢? 实际上, 机器计算一个负数的补码是通过另一种方法实现的, 即对该负数的原码 (除符号位外), 逐位求反, 末尾位加 1 (这种方法读者可以通过举例验证) “逐位求反 末尾位加 1” 在电路上容易实现, 所以计算机容易实现补码的加减法运算。补码运算在运算理论中占有重要地位。

### 三、反码表示

研究反码的目的是为了计算补码。正数的反码是其本身, 即与原码相同。负数的反码, 符号位为 1, 数值部分是对其原码数值部分逐位求反, 即 0 变成 1, 1 变成 0。

若纯小数  $x$  的反码形式是  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其中  $x_0$  是符号位, 则反码的定义式是

$$[x]_{反} = \begin{cases} x & 1 > x \geq 0 \\ (2 - 2^{-n}) + x & 0 \geq x > -1 \end{cases} \quad (2.9)$$

例 2.9 设  $x = +0.1101$ , 则  $[x]_{反} = 0.1101$ .

设  $x = -0.1010$ , 则  $[x]_{反} = 1.0101$ .

纯整数  $x$  的反码形式是  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其中  $x_0$  是符号位, 则反码的定义式是

$$[x]_{反} = \begin{cases} x & 2^n > x \geq 0 \\ (2^{n+1} - 1) + x & 0 \geq x > -2^n \end{cases} \quad (2.10)$$

例 2.10 设  $x = +1101$ , 则  $[x]_{反} = 0, 1101$ .

设  $x = -1010$ , 则  $[x]_{反} = 1, 0101$ .

在计算机中，最基本的寄存器件是触发器。对于一个负数，若从触发器 Q 端输出的是原码，则从  $\bar{Q}$  端输出的就是其反码。在做加负数运算（减法运算）时，只要在加上这个负数反码的同时，再在末尾位加 1 即可。因此，补码运算算法单一、电路实现简单，而反码为求补运算提供了方便。

### 2.1.3 定点数和浮点数

符号的数字化，使计算机具有了处理正负数的能力。但对于小数，还需要解决小数点在计算机中的表示问题。计算机通常采用两种数据格式来解决小数点的表示问题，一种是定点数，另一种是浮点数。

#### 一、定点数

定点数就是小数点固定在数据某个位置上的小数。在大家认可的前提下，这个固定位置可以任意选取，但为了统一思想，小数点通常固定在两个位置，一个是机器所能表示的最高有效位之前，另一个是最低有效位之后。

定点数有三种类型，它们是无符号定点整数、带符号定点整数和带符号定点小数。

##### 1. 无符号定点整数

无符号定点整数就是正整数。在机器上表示正整数时，符号位可以省略，所有的有效位均用来表示数值的大小，小数点固定在最低有效位之后。

对于 16 位计算机，用来表示无符号定点整数的有效数位是 16 位，它可表示的最小整数是 0001H，最大整数是 FFFFH，表示数的范围是  $1 \sim 2^{16} - 1$ 。

##### 2. 带符号定点整数

对于符号数，数的符号位需要占用机器的一位有效数位，所以用于表示数值的有效位就少了一位。带符号定点整数的小数点仍然固定在机器最低有效位之后。

对于 16 位计算机，用来表示带符号定点整数的有效数位是 15 位。当用原码表示法表示数时，它能表示数的范围是  $-(2^{15}-1) \sim (2^{15}-1)$ ；当用补码表示法表示数时，它能表示数的范围是  $-2^{15} \sim (2^{15}-1)$ 。

##### 3. 带符号定点小数

机器的最高有效位表示符号，小数点固定在符号位和最高有效数据位之间，这是计算机对带符号定点小数的表示方法。这时，计算机所表示的数为纯小数。

对于 16 位计算机，用来表示带符号定点小数的有效位为 15 位。当用原码表示法表示数时，它能表示数的范围是  $-(1-2^{-15}) \sim (1-2^{-15})$ ；当用补码表示法表示数时，它能表示数的范围是  $-1 \sim (1-2^{-15})$ 。

#### 二、浮点数

定点数的运算方法简单直观，定点运算器成本低，低档计算机通常选用定点运算器作为运算部件。但定点数表示数的范围小、精度低，不能满足我们的需要，于是人们把浮点运算器引入到了计算机中。

浮点数指小数点位置可以移动的数。如：

$$X=1011 \times 2^{00}=101.1 \times 2^{01}=10.11 \times 2^{10}=1.011 \times 2^{11}=10110 \times 2^{-1}$$

对任意一个二进制数 N，其浮点数形式总可以用下列通式表示：

$$N=M \times 2^E \quad (2.11)$$