

第 1 章 计算机基础知识

本章首先介绍计算机的发展、分类、技术指标及应用等方面的知识，然后讨论计算机中的信息表示与信息运算问题。

计算机系统内部的信息编码采用二进制，但符号式计算机语言（如汇编语言）支持二进制、八进制、十进制以及十六进制的数据表达，因此涉及到不同进制数据之间的转换问题；在计算机中数值数据的定点数和浮点数表达问题，机器数的原码、反码及补码表示问题；十进制数在机器中通常采用 BCD 码表示，而字符及字符串通常用 ASCII 码表示。以上这些问题都将在本章介绍。

1.1 计算机的发展及应用

1.1.1 计算机的发展

20 世纪 40 年代，无线电技术和无线电工业的发展为电子计算机的研制准备了物质基础。1946 年，美国宾夕法尼亚大学研制成功了世界上第一台电子数字计算机 ENIAC（Electronic Numerical Integrator and Computer），它的名称可直译为“电子数字积分计算机”。ENIAC 是一个庞然大物，它共用了 18000 多个电子管，耗电功率达 150kW，重量达 30 吨，占地 170 平方米，其运算速度约为 5000 次/秒，现在看来它性能不高，但是在计算机发展史上它则成为一个重要的里程碑，是它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。

从第一台电子数字计算机问世至今只有五十多年的历史，但其发展速度是世界上其他任何学科都无法比拟的。通常根据电子数字计算机使用的主要电子器件，将其分成四个发展时代。

第一代 电子管计算机时代（从 1946 年第一台计算机研制成功到 20 世纪 50 年代后期），其主要特点是采用电子管作为基本器件。在这一时期，主要为军事与国防尖端技术的需要而研制计算机，并进行有关的研究工作，为计算机技术的发展奠定了基础，其研究成果扩展到民用，又转为工业产品，形成了计算机工业。

这一代计算机的主要贡献是：

- (1) 确立了模拟量可以变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。

第二代：晶体管计算机时代（从 20 世纪 50 年代中期到 60 年代后期）这时期计算机的主要器件逐步由电子管改为晶体管，因而缩小了体积，降低了功耗，提高了速度和可靠

性。而且价格不断下降。后来又采用了磁芯存储器，使速度得到进一步提高。不仅使计算机在军事与尖端技术上的应用范围进一步扩大，而且在气象、工程设计、数据处理以及其他科学研究等领域内也应用起来。在这一时期开始重视计算机产品的继承性，形成了适应一定应用范围的计算机“族”，这是系列化思想的萌芽。从而缩短了新机器的研制周期，降低了生产成本，实现了程序兼容，方便了新机器的使用。

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) 鼠标器问世，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。

第三代：集成电路计算机时代（从 20 世纪 60 年代中期到 70 年代前期）这时期的计算机采用集成电路作为基本器件，因此功耗、体积、价格等进一步下降，而速度及可靠性相应地提高，这就促使了计算机的应用范围进一步扩大。正是由于集成电路成本的迅速下降，产生了成本低而功能不是太强的小型计算机供应市场。占领了许多数据处理的应用领域。

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硬件不断更新而软件相对稳定的矛盾。
- (4) 根据计算机的主要性能（字长、速度、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。

第四代：大规模集成电路计算机时代（从 20 世纪 70 年代初开始）半导体存储器问世，迅速取代了磁芯存储器，并不断向大容量、高速度发展，此后，存储器芯片集成度大体上每三年翻两番，这就是著名的摩尔定律，从 1971 年内含 2300 个晶体管的 Intel 4004 芯片问世，到 1999 年包含了 750 万个晶体管的 Pentium II 处理器，都证实了摩尔定律的正确性。

20 世纪 90 年代以来，计算机是否应该进入一个更新的时期，目前还没有权威性的说法。有人说应该是多媒体计算机时代、网络计算机时代，计算机集文字、图形、声音、图像于一体。1993 年信息高速公路的提出，促进计算机与通信结合形成了各种规模的计算机网络，从局域网、城域网、广域网到因特网，使得计算机的发展永无止境，前途无量。

1.1.2 计算机的分类

按照计算机的规模大小及相应功能，我们可以将计算机分成巨型机、大型机、小型机、微型机、工作站以及计算机网络系统。

1. 巨型机

巨型机主要用于大规模的科学计算，如原子能、弹道导弹技术、航天飞机、天气预报、石油勘探等领域。它的研制集中反映了一个国家科学技术的发展水平。集成电路的进展，

为制造巨型机提供了条件。从 20 世纪 60 年代到 70 年代相继完成了一些巨型机，其中取得最高成绩的要算 Cray-1 计算机。1983 年研制成功的 Cray X-MP 机向量运算速度达每秒 4 亿次。与此同时，CDC 公司的 CYBER203 和 205 先后完成，CYBER205 每秒可进行 4 亿次浮点运算这些是 80 年代初期的水平最高的巨型机。但是这些成就还不能满足一些复杂问题的需要，所以不少单位开展了性能更高的巨型机的研究工作。后来处理器的发展为阵列结构的巨型机发展带来了希望。例如，古德伊尔公司为美国宇航局（NASA）研制了一台处理卫星图像的计算机系统 MPP，该机由 16384 个微处理器组成 128×128 的方阵。这种采用并行处理技术的多处理器系统是巨型机发展的一个重要方面，称为小巨型机。

我国在 1997 年研制成功的“银河 III”巨型机的运算速度已达到每秒 130 亿次浮点运算，内存容量为 9.15GB。今后，超级计算机的发展方向将是采用新的硬件结构，并以新的软件和处理问题的算法将计算机的处理速度提高到一个新的台阶。

2. 大型机

大型计算机也称为主机。一些高层的企业或研究机构需要功能强大的大型机来存储和处理大量的数据和信息，因此，大型机被许多部门广泛应用。大型机具有通用性强、运算速度快、存储容量大、I/O 通道类型多、网络功能完善等特点，采用对称多处理器、并行处理体系结构。如 IBM 公司的 IBM370 曾占领了 20 世纪 70 年代和 80 年代的大部分大型机市场。

进入 20 世纪 80 年代以后，随着微机性能的极大提高和网络技术的普及，客户机/服务器技术得以飞速发展，使得人们不得不重新考虑大型机的作用。进入 20 世纪 90 年代后，随着企业规模的扩大与信息技术的发展，很多采用客户机/服务器的分散式运算模式的用户发现，这种系统的管理极为复杂，运算营运成本高，安全可靠难以保证。于是大型机获得东山再起的机会，企业需要一个开放的、安全的大型服务器作为计算平台，因为只有大型机才具有高可靠性、安全性、高吞吐能力、高可扩展性、防病毒以及防黑客的能力。与此同时，大型机的性能在不断提高，成本不断下降，20 世纪 90 年代 IBM 推出的大型机系列为 IBMS/390 系列，并不断推出新产品。

3. 小型机

小型机规模小、结构简单，所以设计试制周期短，便于及时采用先进工艺，生产量大，硬件成本低；同时由于软件比大型机的简单，所以软件成本也低。再加上容易操作、容易维护和可靠性高等特点，使得管理机器和编制程序都比较简单，因而得以迅速推广，掀起一个计算机普及应用的浪潮。DEC 公司的 PDP-11 系列是 16 位小型机的代表，到 20 世纪 70 年代中期 32 位高档小型机开始兴起，DEC 公司的 VAX11/780 于 1978 年开始生产，应用极为广泛。VAX11 系列与 PDP11 系列是兼容的。20 世纪 80 年代以后，精简指令系统计算机（RISC）问世，导致小型机性能大幅度提高。

小型机的出现打开了在控制领域应用计算机的局面，许多大型分析仪器、测量仪器、医疗仪器使用小型机进行数据采集、整理、分析、计算等。应用于工业生产上的计算机除了进行上述工作外还可以进行自动控制。小型机还广泛应用于工程设计、科学计算、信号处理、图像处理、企业管理以及在客户/服务器结构中用作服务器等。

4. 微型机

微型机的出现与发展，掀起计算机大普及的浪潮，利用 4 位微处理器 Intel 4004 组成的 MCS-4 是世界上第一台微型机，它于 1971 年问世。Intel 8086 是最早开发成功的 16 位微处理器（1978 年）。1981 年 32 位微处理器 Intel 80386 问世，与原来的产品相比较，除了提高了主频速度外，还将原属于片外的有关电路集成到片内。

32 位微处理器采用过去大中型计算机中所采用的技术，因此用它构成的微型机系统的性能可以达到 70 年代大中型计算机的水平。

20 世纪 70 年代后期，兴起个人计算机热潮，1981 年一向以生产大中型通用机为主的 IBM 公司推出了 IBM PC，该机采用 Intel 8086 微处理器和 Microsoft 公司的 MS-DOS 操作系统，并公布了 IBM PC 的总线结构，这些开放措施为微型机的大规模生产打下了基础。后来又推出扩充了性能的 IBM PC/XT，IBM PC/AT 以及 80286、80386、80486 和 Pentium 等多种机型。由于具有设计先进、软件丰富、功能齐全、价格便宜和开放性等特点，很快成为微型机市场的主流。国内外有不少厂家相继生产了与 IBM 兼容的个人计算机及其配套的板级产品和外部设备。

微型机向小型化发展出现了便携机（膝上型、笔记本型和掌上型），在 20 世纪 90 年代获得迅速发展。与此同时，个人计算机走进家庭，并向多媒体方向发展，这就是家用电脑和多媒体电脑。

5. 工作站

工作站是 20 世纪 80 年代兴起的面向广大工程技术人员的计算机系统，一般具有高分辨率显示器、交互式的用户界面和功能齐全的图形软件。开始集中应用于各种工程方面的计算机辅助设计，如集成电路设计、机械设计、土木建筑设计等。1980 年成立的 Apollo 公司和 1982 年成立的 Sun 微系统公司主要从事工作站的研制与生产工作。开始都采用 Motorola 的微处理器芯片，后来改用 RISC（精简指令系统计算机）微处理器。1987 年以后，工作站普遍采用 32 位/64 位 RISC 微处理器，不仅处理速度快，而且具有强大的图形处理功能和友好的窗口界面，后来又向多处理器系统和分布式处理系统发展。典型的产品有 Sun 公司的 SPARC 系列、DEC 公司的 Alpha 系列以及 SGI 公司和 HP 公司的工作站系列。

由于工作站出现得比较晚，一般都带有网络接口，并采用开放式系统结构，即将机器的软、硬件接口公开，以鼓励其他厂商、用户围绕工作站开发软、硬件产品。同时尽量遵守国际工业界流行的标准。

6. 计算机网络系统

由于计算机技术和通信技术的迅速发展，为适应高度社会化生产和科技发展的需要，出现了由单个计算中心通过通信线路和若干个远程终端连接起来的联机系统（或称为面向终端的网络）。例如，库存管理系统、生产管理系统、银行业务系统、飞机订票系统、情报检索系统、气象观测系统等，使分散在各处的信息通过终端能很快集中于计算机中，同时各处的工作人员可通过终端进行查询、获取资料。

随着计算机的广泛应用，特别是小型机和微型机的普及，一个单位在一幢大楼或一个

建筑群内安装多台计算机的情况日益普遍，将这些计算机连接在一起的网络称为局域网。计算机网络的蓬勃发展，加速了社会信息化的进程。

1.1.3 计算机的应用

随着计算机技术的迅速发展，计算机的应用范围在不断地扩大，小到电子手表、儿童玩具，大到卫星、导弹的发射，应该说计算机已经渗透到国民经济的各个部门，是否使用计算机已经成为各单位或部门技术应用水平高低的重要标志。下面从几个方面简述计算机的应用领域。

1. 科学计算

科学计算是计算机最为原始的应用，也是计算机应用最广泛的领域之一。在科学研究和工程设计过程中，常常会有大量的数值计算问题，这些问题往往十分复杂，计算工作量大，时间性强。例如导弹或卫星的发射，必须精确地计算其运行轨道和目标；24小时天气预报，用手摇计算器进行计算需要几个星期，改用高速计算机则只需要几个小时或更短时间；生命科学中为测定胰岛素的晶体结构，需要进行大量的、高精度的复杂运算，只有采用高速计算机才成为可能。

实践证明，计算机的高速度、高精度的计算改变了科学研究和工程设计的面貌，使得计算机已经成为广大科学工作者和工程设计人员不可缺少的重要工具。

2. 数据处理

在工业生产、企事业管理、商业及金融等方面，存在着大量的数据需要及时地进行搜集、整理、归纳、分类、存储、检索、统计、分析、列表、绘图等处理。这类问题涉及数据量大，运算难度相对较小，有大量的逻辑运算和判断分析，处理的结果往往以图表的形式输出。据统计，在目前的计算机应用中，数据处理所占的比例最大。为了使人们从大量繁杂的数据统计和事务管理中解脱出来，使用计算机是最有效的方法，大大提高了工作效率、管理水平和数据处理质量。

3. 计算机控制

在现代化工厂里，计算机普遍用于生产过程的自动控制。使用计算机对工业生产过程进行控制，称为工业控制。利用计算机进行工业生产过程控制，可以节省劳动力，减轻劳动强度，提高生产效率，同时还可以减少材料消耗，降低生产成本，改进产品质量，缩短生产周期，特别是对生产过程的监控，可以避免生产出不合格的产品，以及出现重大设备事故或人身事故。因此用于生产过程自动控制的计算机，一般都是实时控制，它们对计算机的速度要求不高，但可靠性要求很高。

例如，在化工厂中用计算机来控制配料、温度、阀门的开闭等；在炼钢车间用计算机控制加料、炉温、冶炼时间等；各种类型的程控机床的推出，对于提高产品精度和合格率是任何人工所不可能达到的。

4. 计算机辅助设计

计算机辅助设计 (CAD) 是近年来迅速发展的一新的计算机应用领域。各行各业的设计师们都体会到, 为了加快设计速度, 提高设计精度, 采用计算机进行辅助设计是正确的选择。众所周知, 飞机的设计周期是很长的, 一般一架飞机从方案设计到产生全部图纸, 大约需要两年甚至更长的时间, 而采用 CAD 后, 一架飞机的设计周期可缩短为三个月左右, 采用计算机生成图纸不仅速度快、质量高, 而且修改起来非常方便, 尤其是有利于设计方案的比较, 最终选出性能价格比最高的设计方案, 其效率可提高几倍、几十倍甚至更高。

CAD 技术的应用领域越来越广, 从而派生出了许多新的技术分支, 如计算机辅助制造 (CAM)、计算机辅助教学 (CAI)、计算机辅助测试 (CAT)、计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 以及柔性 (Flexible) 制造技术等。

5. 人工智能

人类的许多脑力劳动, 诸如证明数学定理、进行常识性推理、理解自然语言、诊断疾病、下棋游戏、破译密码等都需要“智能”。人工智能学科研究的主要内容包括: 知识表达、自动推理机和搜索方法, 机器学习和知识获取, 知识处理系统, 自然语言理解, 计算机视觉, 智能机器人等。

知识表达是人工智能的基本问题之一, 其中的常识是研究的重点之一, 常识是指人们直觉的、日常使用的那些非专业性知识。自动推理与知识表达方法密切相关, 是知识的使用过程。搜索是人工智能的一种问题求解方法, 搜索策略决定着问题求解的推理过程中知识被使用的优先关系。

机器学习是人工智能另一重要课题。机器学习是指在一定的知识表达意义下获取新知识的过程。

知识处理系统主要由知识库和推理机组成。知识库的功能是存储系统所需要的知识 (如专家系统)。推理机则定义使用知识的方法和策略。

人与机器进行对话, 利用能为计算机所接受的自然语言描述现实世界, 一直是人工智能的研究目标之一。自然语言的理解过程包括语法分析和语义分析, 已经研制的一些自然语言理解系统都只能处理自然语言的子集。其中人机接口和机器翻译系统已有商品, 但要让机器像人一样运用自然语言, 还是一项长远而艰巨的任务。

6. 企业管理

企业管理的范畴非常广泛, 一般来说应包括人事管理、工资管理、物资管理、商务管理、生产经营管理、市场预测、统计报表以及领导决策等, 近年来方兴未艾的办公自动化系统可用来完成这些功能, 一般都是由多台计算机连成网络来实现。随着我国由计划经济向市场经济转变, 用计算机来实现企业管理不仅是可能的, 而且是必要的, 竞争中的各类企业需要尽快获得信息, 及时做出正确决策, 企业才能适应形式, 高速发展。许多企业家已经认识到, 使用计算机实现企业管理不是权宜之计, 而是百年大计。

除此之外, 多媒体技术的发展更加扩大了计算机的应用范围。计算机技术与通信技术相结合形成的各种类型计算机网络的飞速发展, 加快了社会信息化的进程。

1.2 计算机的特点与主要技术指标

1.2.1 计算机的主要特点

电子计算机的产生、发展和应用，是 20 世纪重大的科技成就之一，它标志着人类文明已进入了一个新的历史阶段。电子计算机自 1946 年 2 月诞生以来，在五十多年的时间里得到了迅速的发展。作为 20 世纪一项伟大的发明，其应用已广泛而深入地渗透到社会的各个领域，成为信息化社会的基础。

五十多年来，虽然计算机制造技术发生了很大的变化，其性能有了极大的提高，计算机取得了科学史上最惊人的发展速度，但计算机的基本组成原理仍遵循着五十多年前美籍匈牙利数学家冯·诺依曼提出的基本计算机的工作原理。冯·诺依曼机应具有以下几点基本功能：

- 计算机由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备 5 个部分组成。
- 用二进制形式表示数据和指令。
- 采用存储程序的方式，程序和数据可以在机器中长期记忆保存。
- 机器的工作应当在指令的控制下协调进行，指令由操作码和地址码组成。
- 机器具有数据的运算和处理功能。
- 可进行数据的输入、输出。

随着构造计算机的主要电子元件从电子管、晶体管、中小规模集成电路发展到大规模集成电路，计算机也经历了 4 个发展阶段。计算机的应用领域也由单纯的数值计算发展到科研、工业、农业、国防和社会生活的各个领域。如实时控制系统、数据库管理系统、计算机辅助设计、智能模拟与人工智能系统等等。

计算机具有如下特点：

- 运算速度快 计算机具有极高的运算速度，世界上第一台计算机的运算速度为每秒 5000 次，目前普通的微型计算机每秒就可以执行上亿条指令。
- 运算精度高 计算机的运算精度随着数字运算设备的技术发展而提高，加上先进的算法，可得到很高的运算精度。例如 π 的计算，在计算机诞生前的 1500 多年的时间里，虽经人们不懈努力，也仅计算到其小数点后 500 位。而使用计算机后，目前已达到小数点后上亿位。
- 具有记忆能力 计算机的存储器具有存储、记忆大量信息的功能。不但可以存放计算的原始数据、中间数据以及最后结果，还能存放人们事先编好的各种程序，这是计算机能进行自动处理的原因之一。
- 极高的准确性 由于采用了数字化信息编码，使计算机的运算、控制及信息处理具有极大的准确性。在计算机中，所有的数值和符号、文字、图形、图像、语音等非数值信息均采用数字化的编码形式表示，从而保证了准确性。
- 高度自动化 由于程序和数据存储在计算机中，一旦向计算机发出指令，它就能自动按规定的步骤完成指定的任务。计算机不但具有计算能力，还具有逻辑判断

能力。能在程序的指引下，根据比较的结果，自动地确定下一步该做什么，表现出初步的智能化。

- 极强的通用性 计算机采用存储程序原理，程序可以是各个领域中的用户自己编写的应用程序，也可以是厂家提供的供众多用户共享的程序，丰富的软件，多样的信息，使计算机具有相当大的通用性。

1.2.2 计算机的主要性能指标

通常根据计算机的机器字长、速度、主频大小、存储器的容量、存储器的存取周期、可靠性及带宽等指标来衡量一台计算机的性能。

1. 机器字长

机器字长是指该计算机能进行多少位二进制数的并行运算，实际上是指该计算机中的运算器有多少位，例如，某机器字长 16 位，表示该机器中，每次能完成两个 16 位二进制数的运算。由于参加运算的操作数和运算结果既可存放在处理器内部的寄存器中，也可存放在主存储器中。因此，机器字长既是运算器的长度，也是寄存器的长度，一般情况下，它也是存储器的字长。显然，字长的实质是指 CPU 内部寄存器、运算器、内部数据总线等部件的宽度。通常，机器字长越长，计算机的运算能力越强，其运算精度也越高。衡量机器字长的单位可用“位 bit”，位是计算机内最小的信息单位，8 位构成一个“字节 byte”，现代计算机的机器字长一般都是 8 位的整数倍，如 8 位、16 位、32 位、64 位和 128 位等，即字长由一个字节、2 个字节、4 个字节、8 个字节或 16 个字节组成。所以也可用“字节”来表示机器字长。

2. 速度

长期以来，“速度”被认为是评价计算机性能的重要指标之一，使用计算机的人希望计算机的运算速度越快越好，这是无可非议的，但是应该如何正确地描述计算机的运算速度，也是一个值得探讨的问题。

CPU 速度是指单位时间（秒）内能够执行指令的条数。速度的计算单位不一，若以单字长定点指令的平均执行时间计算，用 MIPs (Million Instructions Per Second) 作为单位；若以单字长浮点指令的平均执行时间计算，则用 MFLOps (Million Floating Instructions Per Second) 表示。现在，采用计算机中各种指令的平均执行时间和相应的指令运行权重的加权平均法求出等效速度作为计算机运算速度的标准。

3. 主频

主频又称为主时钟频率，是指 CPU 在单位时间（秒）内产生的时钟脉冲数，以 MHz (兆赫兹) 为单位。如 486DX/66 的主频为 66MHz, Pentium II/350 的主频为 350MHz, Pentium III/550 的主频为 550MHz 等。计算机 CPU 的时钟频率越高，运算速度越快，尤其是对于机器结构相同或相近的计算机。主频可用来比较运算速度的高低。

4. 存储器的容量

存储器容量的大小不仅影响着存储程序和数据的数量，而且也影响着运行这些程序的速度。这是人们在购买计算机时关心的又一个关键问题。

内存储器中能够存储的总字节数称为内存（一般指 RAM）的容量。度量计算机内存容量的单位有 B（字节）、KB（千字节）、MB（兆字节）等。对于外存储器，除了以上度量单位外还用到 GB（千兆字节）和 TB（兆兆字节）它们之间的换算关系为：

bit	Byte	KiloByte	MegaByte	GigaByte	TeraByte
位	→ 字节	→ 千字节	→ 兆字节	→ 千兆字节	→ 兆兆字节
8bit	1024B	1024KB	1024MB	1024GB	
		$2^{10}B$	$2^{20}B$	$2^{30}B$	$2^{40}B$

现代计算机的内存容量已达几十兆字节至数千兆字节。

由于存储器的种类很多，所以关心存储器容量也不限于内存的大小，寄存器、高速缓存的大小，还有磁盘、光盘、磁带的容量，以及分散在显示卡、图形卡、视频卡、网络卡等上面的存储器容量都需要关心。

另外，对于磁盘存储器，除考虑它的存储容量外，还要考虑一些特殊的指标，如平均寻道时间、平均等待时间和数据传输速率等。所谓平均寻道时间是指磁头沿着盘径移动到需要读写的那个磁道花费的平均时间。所谓平均等待时间是指需要读写的扇区旋转到磁头下面花费的平均时间。所谓数据传输速率是指磁头找到所需要读写的扇区后，每秒钟可以读出或写入磁盘的字节数。

5. 存取周期

存储器完成一次数据的读（取）或写（存）操作数所需要的时间称为存储器的存取（或访问）时间。存储器执行一次完整的读 / 写操作所需要的时间称为存取周期，即从存储器中连续取（读）或存（写）两个字所用的最小时间间隔。内存大都由大规模集成电路制成，其存取周期目前为几十纳秒（ns）。

6. 可靠性

系统的可靠性通常用平均无故障时间 MTBF 和平均故障修复时间 MTTR 来表示。这里的故障主要指硬件故障，不是指软件误操作引起的暂时失败。MTBF 是 Mean Time Between Failures 的缩写，指多长时间系统发生一次故障。MTTR 是 Mean Time To Repair 的缩写，指修复一次故障所需要的时间。显然，如果系统的 MTBF 时间很长、MTTR 时间很短，那么该系统的可靠性就很高。

提高系统可靠性的有效措施是冗余技术和预防性维护。冗余技术既可以是硬件冗余，也可以是软件冗余，或者两者兼有。它主要是采用同样或不同的双份或多份设备，其中一份接入系统，另一份来承担全部任务。例如，目前在实时应用系统或监控系统中采用的“双机热备份”就是整机冗余措施。预防性维护是为了使系统的性能和可靠性满足要求，应定期检测、保养和调整，一旦出现故障，应立即修复，以提高平均无故障时间和降低平均维修时间。

7. 带宽

计算机的数据传输率还常用带宽表示，它反映计算机的通信能力。当然，与通信相关的设备、线路都有带宽指标。

数据传输率的单位是 bps 习惯缩写用 b 表示 bit，因此，bps 代表每秒传输一位或一比特 (bits per second)。由于 bps 太小 所以常用 Kbps 表示每秒一千比特，Mbps 表示每秒一兆比特，Gbps 表示每秒一吉比特。例如网络卡的速率为 10~100Mbps，调制解调器速率为 56Kbps 等。

1.3 计算机中的信息表示与运算

计算机所处理的信息，必须先经过信息数字化处理，即数据、文字符号、图形等各种信息都要经过编码，成为计算机可以识别和处理的数字信息。因此，计算机选择哪种数字系统，如何表示数据，将直接影响机器的性能和结构。数字在机器内部是用电子器件的物理状态表示的，故在工艺条件允许情况下，应尽量选择简单的数据表示形式，以提高机器效率和通用性。第一台计算机奠定了二进制数系基础并沿用至今，就是因为二进制数只有“0”与“1”两个数码，不仅易于物理实现，数据存储、传送和处理简便可靠，而且运算规则简单，节省设备，特别是采用二进制后，能方便地使用逻辑代数这一数学工具进行逻辑电路的设计、分析、综合，并使计算机具有逻辑性。因此有必要了解二进制表示及二进制与其他常用进位计数制间的转换方法。

1.3.1 进位计数制及数制转换

人类在长期的生产劳动实践中创造了我们最熟悉的十进制，而生活中还有十二和十六进制等多种数系，其共同之处是采用进位计数制。

1. 进位计数制

进位计数制是采用位置表示法，即处于不同位置的同一个数字符号，所表示的数值不同。一般说来，如果数制只采用 R 个基本符号，则称为基 R 数制， R 称为数制的“基数”，或简称“基”(Radix)；而数制中每一固定位置对应的单位值称为“权”(Weight)。

进位计数制的编码符合“逢 R 进位”的规则，各位的权是以 R 为底的幂，一个数可按权展开成多项式，例如“逢十进一”的十进制数 1983.3 可写为：

$$1983.3 = 1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1}$$

对 R 进制数 N ，若用 $n + m$ 个代码 D_i ($-m \leq i \leq n-1$) 表示，从 D_{n-1} 到 D_{-m} 自左至右排列，其按权展开多项式为：

$$\begin{aligned} N &= D_{n-1}R^{n-1} + D_{n-2}R^{n-2} + \cdots + D_0R^0 + D_{-1}R^{-1} + \cdots + D_{-m}R^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} D_i R^i \end{aligned}$$

其中 D_i 为第 i 位代码，它可取 $0 \sim (R-1)$ 之间的任何数字符号； m 和 n 均为正整数，

n 表示整数部分的位数, m 表示小数部分的位数; W_i 表示 D_i 位的权, 它是以 R 为底的幂。

由于二进制书写长, 难读难懂, 为书写方便, 计算机中经常使用八进制或十六进制。人们又习惯于十进制, 而计算机内必须采用二进制, 故上面 4 种进制是经常要用到的。为识别起见, 二进制数尾加 B 作标识; 十进制加 D 或省略; 八进制加 Q; 十六进制则加 H。使用 4 种进制必然产生各种数制间的相互转换问题。

下面定义计算机中常用的进位计数制:

二进制 $R=2$ 基本符号 0, 1

八进制 $R=8$ 基本符号 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

十进制 $R=10$ 基本符号 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

十六进制 $R=16$ 基本符号 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F

其中, 十六进制中的数符 A ~ F 字母, 分别对应十进制的 10 ~ 15, 例如一个十六进制数 3A12 可写成:

$$3A12H = 3 \times 16^3 + 10 \times 16^2 + 1 \times 16^1 + 2 \times 16^0$$

在数 3A12 后加 H 是为了识别十六进制数而加的标识字母。

二进制数、八进制数、十六进制数和十进制数之间的关系见表 1-1。

表 1-1 二、八、十六和十进制数的对应关系

二进制数	八进制数	十六进制数	十进制数
0000	00	0	0
0001	01	1	1
0010	02	2	2
0011	03	3	3
0100	04	4	4
0101	05	5	5
0110	06	6	6
0111	07	7	7
1000	10	8	8
1001	11	9	9
1010	12	A	10
1011	13	B	11
1100	14	C	12
1101	15	D	13
1110	16	E	14
1111	17	F	15

2. 进位计数制间的相互转换

不同进位计数制之间的数据转换, 其实质是进行基数的转换, 转换原则是根据两个有理数相等, 其整数部分与小数部分分别相等。故整数部分和小数部分要分别进行转换。

(1) 二进制、八进制、十六进制数转换为十进制数

二进制、八进制或十六进制数转换成十进制数的方法是将被转换的数按权展开后, 将各乘积项相加, 即转换规则为“按权相加”。

例 1-1 将 11001010.11B 转换为十进制数。

$$\begin{aligned} 11001010.11B &= 2^7 + 2^6 + 2^3 + 2^1 + 2^{-1} + 2^{-2} \\ &= 128 + 64 + 8 + 2 + 0.5 + 0.25 \\ &= 202.75D \end{aligned}$$

例 1-2 将 621Q 转换为十进制数。

$$\begin{aligned} 621Q &= 6 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 1 \times 8^0 \\ &= 6 \times 64 + 16 + 1 \\ &= 401D \end{aligned}$$

例 1-3 将 4E.1AH 转换为十进制数。

$$\begin{aligned} 4E.1AH &= 4 \times 16^1 + E \times 16^0 + 1 \times 16^{-1} + A \times 16^{-2} \\ &= 64 + 14 + 0.0625 + 0.039 \\ &= 78.1015D \end{aligned}$$

(2) 十进制数转换为二进制、八进制或十六进制数

整数部分转换的方法为将十进制数连续用基数 R 去除，直到商数到零为止，每次除得的余数依次为二进制数由低到高的各位值，简称“除 R 取余”法。

例 1-4 将 37D 转换为二进制数。

方法：把要转换的十进制数的整数部分不断除以 2，并记下余数，直到商为 0 为止。

$$\begin{array}{ll} 37 / 2 = 18 & (a_0 = 1) \\ 18 / 2 = 9 & (a_1 = 0) \\ 9 / 2 = 4 & (a_2 = 1) \\ 4 / 2 = 2 & (a_3 = 0) \\ 2 / 2 = 1 & (a_4 = 0) \\ 1 / 2 = 0 & (a_5 = 1) \end{array}$$

所以 37D = 100101B。

例 1-5 将十进制数 100 转换成八进制数。

方法：把要转换的十进制数的整数部分不断除以 8，并记下余数，直到商为 0 为止。

$$\begin{array}{ll} 100 / 8 = 12 & (a_0 = 4) \\ 12 / 8 = 1 & (a_1 = 4) \\ 1 / 16 = 0 & (a_2 = 1) \end{array}$$

所以 100D = 144Q。

例 1-6 将十进制数 31218 转换成十六进制数。

方法：把要转换的十进制数的整数部分不断除以 16，并记下余数，直到商为 0 为止。

$$\begin{array}{ll} 31218 / 16 = 1951 & (a_0 = 2) \\ 1951 / 16 = 121 & (a_1 = 15) \\ 121 / 16 = 7 & (a_2 = 9) \\ 7 / 16 = 0 & (a_3 = 7) \end{array}$$

所以 31218D = 79F2H。

(3) 二进制数与八进制、十六进制数之间的转换

由于八进制数和十六进制数是从二进制数演变而来的，由 3 位二进制数组成一位八进

制数，4 位二进制数组成一位十六进制数。因此，转换时将二进制数分组（转换成八进制时 3 位为一组，转换成十六进制数时 4 位为一组），然后按数之间的对应关系直接转换。值得注意的是，分组时应遵循如下规则：整数部分应从最低（最右）位开始，小数部分应从最高（最左）位开始分组；最后一组若位数不足，整数部分在左边补 0，小数部分在右边补 0。

例 1-7 把 10101101.1011B 转换为八进制数。

$$10101101.1011B = (010)(101)(101)(101)(100)B$$

2 5 5 5 4

$$\text{即 } 10101101.1011B = 255.54Q.$$

例 1-8 把 11001010.01011B 转换为十六进制数。

$$11001010.01011B = (1100)(1010).(0101)(1000)B$$

C A 5 8

$$\text{所以 } 11001010.01011B = CA.58H.$$

例 1-9 把 3765Q 转换为二进制数。

$$3765Q = (011)(111)(110)(101)B$$

$$= 1111110101B$$

例 1-10 把 6A.4CH 转换为二进制数

$$6A.4CH = (0110)(1010).(0100)(1100)B$$

$$= 1101010.010011B$$

1.3.2 定点数与浮点数

实际处理的数既有整数部分又有小数部分，如何表示小数点的位置？根据小数点位置是否固定，有两种数据表示格式：定点数格式和浮点数格式。

1. 定点数

定点数就是约定小数点的位置固定不变。小数点可以约定在数中的任何位置上，但通常将小数点固定在符号位之后或整个数据的末位之后。因此定点数有两种特殊的形式，一种是定点整数；小数点在数的最右方，即为纯整数；另一种是定点小数：小数点在符号位之后，即为纯小数。小数点都是隐含的，不作单独的信息存放在某一位中。

定点数表示范围受其所采用的码制限制，不同的码制，定点数的表示范围不同。假设定点小数为 $X_0.X_1X_2\cdots X_n$ ，定点整数为 $Y_0Y_1Y_2\cdots Y_n$ ，其中 X_0, Y_0 分别为定点小数和定点整数的符号位， $X_1X_2\cdots X_n, Y_1Y_2\cdots Y_n$ 分别为定点小数和定点整数的尾数，则它们的表示范围如表 1-2 所示。

表 1-2 定点小数和定点整数的表示范围

码制	定点小数		定点整数	
	最大数	最小数	最大数	最小数
原码	$1-2^{-n}$	$-(1-2^{-n})$	2^n-1	$-(2^n-1)$
补码	$1-2^{-n}$	-1	2^n-1	-2^n

如果计算机采用定点整数表示，则参与运算的数必须都是整数，若参与运算的数是小数，就要在运算前乘以一个比例因子，将小数放大为整数；如果计算机采用定点小数表示，则参与运算的数必须都是小数，若参与运算的数是整数，则也需要在运算前乘以一个比例因子，将整数缩小为小数。同样，对处理后所得到的结果再按此比例因子还原。定点整数与定点小数的格式如图 1-1 所示。

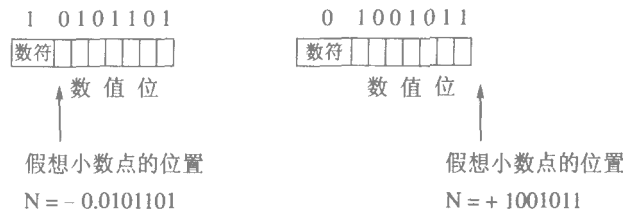


图 1-1 定点整数与定点小数的格式

以上两种定点数的表示，计算机均可采用，目前微型机中，多采用定点整数形式。这里须强调的是，小数点位置为假想位置，当机器设计时将表示形式约定好，则各种部件及运算线路均按约定形式进行设计。

由于在定点数表示中，将小数点的位置固定在两个特殊位置上，但是实际要处理的数不一定是纯小数或纯整数，为此需要设计一个比例因子。若比例因子选择不当，则会产生溢出或降低运算速度，为此产生了另一种表示方法——浮点数表示法。

2. 浮点数

浮点数表示法就是小数点的位置不固定，可以根据需要左右浮动。

在计算机中一个任意进制数 N ，其浮点数的真值为：

$$N = \pm R^E \cdot M$$

其中， M 称为浮点数的尾数，一般为定点小数，常用补码或原码表示； E 是比例因子的指数，称为浮点数的阶码，一般为定点整数，常用补码或移码表示；比例因子的基数 R 对于已确定了计数制的机器而言是一个常数，一般为 2, 8 或 16, R 不直接表示在浮点数代码中。典型的浮点数格式如图 1-2 所示：

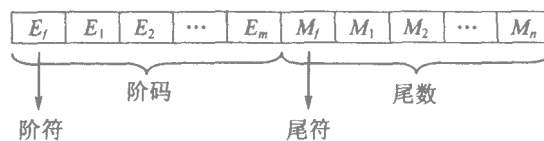


图 1-2 浮点数的格式

尾数部分给出有效数字的位数，因而决定了浮点数的精度；阶码指明小数点在数据中的位置，因而决定了浮点数的表示范围。

如不对浮点数的表示做出明确规定，同一个浮点数就不是惟一的。例如 0.01 可以表示成 0.001×2^1 ，也可以表示成 0.1×2^{-1} (二进制运算)，为了提高数据的表示精度，一般采取规格化表示。规格化尾数的含义是满足条件： $1/2 \leq |M| \leq 1$ ，不同的码制，其特征不同，

如下所示：

$$\text{规格化数} \begin{cases} M \text{ 为原码表示, 则 } M_1=1 \\ M \text{ 为补码表示} \begin{cases} N \text{ 为正数, 则 } M_1=1 \\ N \text{ 为负数, 则 } M_1=0 \end{cases} \end{cases}$$

假设阶码部分连阶符共 $m+1$ 位，补码表示，以 2 为底；尾数共 $n+1$ 位，含一位数符，补码表示，规格化，则该浮点数的表示范围为： $-2^{2m-1} \sim (2^{2m-1})(1-2^{-n})$ 。

一台计算机究竟采用定点数表示还是采用浮点数表示，要根据计算机的使用条件来确定。定点数表示与浮点数表示的比较见表 1-3。

表 1-3 定点数表示与浮点数表示的比较

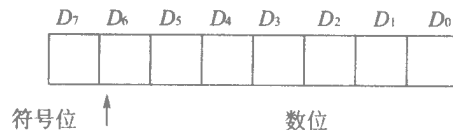
指标	定点数	浮点数
表示范围	较小	比定点数范围大
精度	决定于数的位数	规格化时比定点高
运算规则	简单	运算步骤多
运算速度	快	慢
控制电路	简单，易于维护	复杂，难于维护
成本	低	高
程序编制	选比例因子，不方便	方便
溢出处理	由数值部分决定	由阶码大小判断

1.3.3 机器数的编码表示

在这一节我们要研究如何在机器中表示二进制的符号数即正负数的问题。显然，在机器中正号或负号需用 0 或 1 表示，通常约定数的最高位为符号位，0 表示该数为正，1 表示该数为负，这种在机器中使用的连同数符一起数码化的二进制数就称为机器数。常采用的机器数有原码、反码、补码三种码制。若 X 为一符号数，则 X 的原码、反码、补码分别记作 $[X]_{\text{原}}$ 、 $[X]_{\text{反}}$ 、 $[X]_{\text{补}}$ ，相应 X 就称为真值即机器数本身所表示的数值。

1. 原码

所谓原码，就是用数的最高位表示符号位，而其余各位表示真值的绝对值，符号位为“0”表示该数为正数，符号位为“1”表示该数为负数。例如一个 8 位二进制数 D_7 表示符号位， $D_6 \sim D_0$ 表示数码，其格式如下：



$$\text{则 } X_1 = +1100110\text{B} \quad [X_1]_{\text{原}} = 01100110\text{B}$$

$$X_2 = -1100110\text{B} \quad [X_2]_{\text{原}} = 11100110\text{B}$$

原码是一种比较直观的机器数表示方法，原码和它的真值是极其相似的，只是以符号

位的 0、1 来表示真值的正负，其余各位和真值完全一样，故称为原码。需注意的是真值 0 在原码表示中有两种形式，即：

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

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

数的原码与真值之间的关系比较简单，其算术运算规则与大家已经熟悉的十进制运算规则类似，当运算结果不超出机器能表示的范围时，运算结果仍以原码表示。它的最大缺点是在机器中进行加减法运算时比较复杂。例如，当两数相加时，先要判别两数的符号，如果两数是同号，则相加；两数是异号，则相减。而进行减法运算又要先比较两数绝对值的大小，再用大绝对值减去小绝对值，最后还要确定运算结果的正负号。后面介绍的用补码表示的数在进行加减法运算时可避免这些缺点。

2. 反码

正数的反码与原码相同，而负数的反码，符号位仍用 1 表示，其余数值位按位取反即成。

例： $X_1 = +1101110\text{B}$

$$[X_1]_{\text{反}} = 01101110\text{B} = [X_1]_{\text{原}}$$

$X_2 = -1101110\text{B}$

$$[X_2]_{\text{原}} = 11101110\text{B} \quad [X_2]_{\text{反}} = 10010001\text{B}$$

在反码中，零的表示也不惟一，这是需注意的地方。

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

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

反码在机器中很容易得到（经过一反相器），因而它常用在求补码的场合。

3. 补码

为了解决减法转化为加法的问题，以简化计算机的运算线路，就产生了补码表示法。

如果想把十进制减法变成加法，那么，减一个十进制数可采用加该数的（相对于 10 的）补数，然后丢掉其进位就得到相减的结果。在日常生活中使用的模数系统很多，例如时钟是以 12 为模数的系统，假设表针指向 9 点，现在要拨到 6 点，可以有两种方法，一是逆时针倒拨 3 小时，相当于做减法 $9-3=6$ ，我们也可以顺时针拨 9 个小时，相当于做加法， $9+9=12+6=6$ 其中减去进位 12。这里 12 是模数，3、9 是相对模 12 互为补数的。

正数的补码与其原码相同，负数的补码求法很多，我们这里介绍一种比较简单的办法来写出一个负数的补码表示：即先写出与该负数相对应的正数的原码表示，然后将其按位取反（即 0 变为 1，1 变为 0），最后在末位加 1，就可以得到该负数的补码表示了。

例 1-11 求 $X = -1001101\text{B}$ 的补码。

$$[X]_{\text{原}} = 11001101\text{B}$$

$$[X]_{\text{反}} = 10110010\text{B}$$

$$[X]_{\text{补}} = 10110011\text{B}$$

例 1-12 机器字长为 16 位，写出 $N = -106\text{D}$ 的补码表示。

$+106\text{D}$ 可表示为 0000 0000 0110 1010

按位取反后为 1111 1111 1001 0101
 末位加 1 后为 1111 1111 1001 0110
 用十六进制数表示为 F F 9 6
 即 $[-106]_{16} = FF96H$

例 1-13 如机器字长为 8 位，写出 $-104D$ 的补码。

+104D 的原码为 0110 1000
 按位取反后为 1001 0111
 末位加 1 后为 1001 1000
 用十六进制表示 9 8
 即 $[-104]_{16} = 98H$

1.3.4 BCD 码与 ASCII 码

1. BCD 码

一位十进制数用 4 位二进制编码来表示，可以有多种表示方法，较常用的是 8421BCD 码，表 1-4 列出了一部分编码关系。

8421BCD 码有十个不同的数字符号，且它是逢“十”进位的，所以，它是十进制数；但它的每一位是用 4 位二进制编码来表示的，因此，称为二进制编码的十进制数（BCD, Binary Coded Decimal）。

BCD 码是比较直观的，只要熟悉了 BCD 的 10 个编码，立即可以实现十进制与 BCD 码之间的转换。如 3218.59 的 BCD 码为：

0011 0010 0001 1000.0101 1001

但是 BCD 码与二进制数之间的转换是不直接的，要先经过十进制数。即：BCD 码先转换为十进制码然后再转换为二进制数，反之亦然。

表 1-4 BCD 编码表

十进制数	8421BCD 码	十进制数	8421BCD 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

2. BCD 码的运算

IBM PC 可以进行 BCD 码的加、减、乘、除运算。运算分两步：第一步先按二进制进行运算；第二步进行适当的 BCD 码修正。下面通过加法运算说明非压缩 BCD 码运算的一