

第 1 章 概 论

“计算机组成原理”课程的主要内容是以单机系统为对象，阐述计算机系统的硬件组成，其核心是建立一个计算机系统的整机概念。这里提到的“整机概念”包括两层面，即 CPU 级的整机和硬件系统级的整机，且每个层面都涉及硬件的逻辑组成及其工作原理机制。本书将从这两层面逐步建立前述的整机概念。为此，本章首先阐明三个重要的基本概念：信息的数字化表示、存储程序工作方式和计算机系统的层次结构，并将这些概念作为了解计算机的逻辑组成结构和硬件系统工作原理的基本出发点。

1.1 计算机的基本概念

计算机是 20 世纪人类最伟大的发明之一，它是一种能够存储程序，通过执行程序指令，自动、高速、精确地对各种信息进行复杂的运算处理，并输出结果的一种电子设备。计算机是人类进入信息化时代的重要标志，也是最基本的信息处理工具。

计算机系统通常由硬件和软件两大部分组成。硬件是指看得见、摸得着且物理存在的设备实体，如运算器、控制器、存储器和输入/输出设备等，如图 1-1 所示；软件是指不能直接触摸但又确实在逻辑上存在的对象，如程序和文档等。设计计算机硬件系统的基本原则是功能部件的逻辑化，即用逻辑电路构造各种部件，如用基本的门电路、触发器来构造运算器、控制器、存储器等。在硬件基础之上，根据应用需要配置各种软件，如操作系统、编程语言以及各种支撑软件等。硬件和软件按层次结构组成一个复杂的计算机系统。

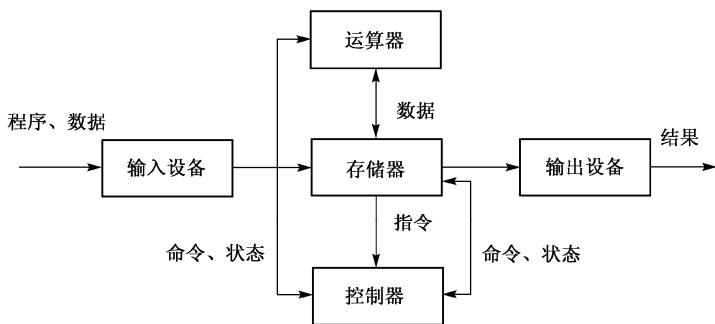


图 1-1 计算机组成示意

计算机系统是如何工作的呢？不管是做复杂的数学计算，还是对大量的数据进行处理，或者对一个过程进行自动控制，用户都应先按照处理的步骤，用编程语言编写程序，然后通过输入设备（如键盘），将程序和需处理的数据送入计算机并存放在存储器中。用户编写的程序称为源程序，是不能被计算机直接执行的。计算机只能执行机器指令，即要求计算机完成某种操作的命令，如执行加法操作的加法指令、执行乘法操作的乘法指令、执行传送操作的传送指令等。因此，计算机在运行程序之前，必须将源程序编译转换为机器指令，并将这些指令按一定顺序存放在存储器的若干单元中。每个单元对应一个称为地址的固定编号，只要给出确定的地址，就能访问相应的存储单元，对该单元的内容进行读/写操作。

当计算机启动运行后，控制器将某个地址送往存储器，从该地址单元取回一条指令。控制器根据这条指令的含义，发出相应的操作命令，控制该指令的执行。比如，执行一条加法指令，先要从存储单元或寄存器取出操作数，送入运算器，再将两个操作数相加，并将运算处理的结果送回存储单元或寄存器存放。如果用户要了解处理结果，则计算机可通过输出设备（如显示器、打印机等），将结果显示在屏幕或打印在纸上。图 1-2 给出了计算机的简单工作流程。

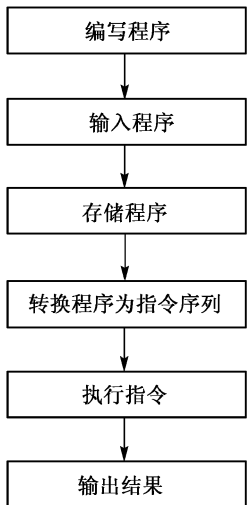


图 1-2 计算机工作流程

从以上描述可看出，计算机作为一个能够自动处理信息的智能工具，它的设计过程必须考虑很多因素。首先，信息如何表示才能方便计算机进行识别和处理。其次，计算机硬件系统应该由哪些部件组成，每部分的相互关系是怎样的，以及如何控制它们协同工作。再次，采用什么样的工作方式才能使计算机能够自动地对信息进行处理。最后，应该提供怎样的人机交互接口才能方便操作和使用计算机。

纵观计算机的诞生和发展历程可以看出，上述几个核心问题自始至终贯穿于计算机发展的各阶段中。不同时代对计算机有特定的应用需求，而基于这些需求提出的解决思路完美地回答了这些问题，从而促进了计算机由弱到强、从低级到高级发展。

1.1.1 信息的数字化表示

计算机是通过执行程序（指令序列）来实现对数据的加工处理的。因此，计算机中的信息可以分为两大类：控制信息和数据信息。控制信息用来控制计算机的工作。计算机执行指令时，用指令产生的控制命令（称为微命令）控制有关操作，所以指令序列和微命令序列属于控制信息类。数据信息是计算机加工处理的对象。计算机根据指令要求取出的操作数以及对操作数处理的结果等，都属于数据信息类。数据信息又分为数值型数据和非数值型数据两类。数值型数据有数值大小与正负之分，如 6、-15 等。非数值型数据则无数值大小，也不分正负，如字符、文字、图像、声音等人们能够识别的信息，以及条件、状态、命令等用于判定的逻辑信息。那么，在计算机中如何表示这些信息呢？

前面讲过，计算机的主要部件是用逻辑电路即电子电路构成的，所以，在电子数字计算机中传输和处理的信息都采用数字化表示方法。信息的数字化表示包含了两层含义：① 用数字代码表示各种信息；② 用数字信号表示数字代码。信息表示数字化的概念是我们理解计算机工作原理的一个基本出发点。下面通过几个例子对这两层含义加以说明。

1. 在计算机中用数字代码表示各类信息

数字代码是指一组数字的集合，这里的数字代码通常指二进制数字代码。我们可以根据描述的信息（某类控制信息或某类数据信息），用一约定了含义的数字代码来表示它。

【例 1-1】 用数字代码表示数值型数据。

6 和 -7 是两个数值型数据。可以约定，用一位二进制代码表示每个数的符号，如用 0 表示正数，用 1 表示负数；再用 4 位二进制代码表示每个数的大小。这样，代码 00110 表示 6（左边第一个 0 代表正号），代码 10111 表示 -7（左边第一个 1 代表负号）。

当然，也可以用 8 位二进制代码表示一个数的大小。代码位数增多，数的表示范围将扩大。例如，用 4 位二进制代码不能表示 200 这个数，但用 8 位二进制代码可以表示它。

【例 1-2】 用数字代码表示字符。

字符本身没有大小和正负之分，但仍然可以用数字代码来表示它。计算机中常约定用 7 位代码表示一个西文字符，如用 1000001 表示字符 A，用 1000010 表示字符 B；或用 7 位代码表示一个控制字符，如用 0001100 表示换页（FF），用 0001101 表示回车（CR）。字符的这种编码称为 ASCII，是国际上广泛采用的一种字符表示方法。另外，可以约定用两组 8 位二进制代码表示一个中文字符，如用 01010110 01010000 表示“中”，用 00111001 01111010 表示“国”等。总之，用数字代码可以表示各种字符，以字符为基础又可以表示范围广泛的各种文字。

【例 1-3】 用数字代码表示图像。

字符的种类总是有限的，因而可以用若干位编码来表示。图像则不然，其变化是无穷无尽的，那么，如何用数字代码来表示这些随机分布的图像信息呢？实际上，一幅图像可以被细分为若干个点，这些点称为像素。也就是说，可以用像素的组合来逼近真实的图像。图像划分得越细，像素越多，组成的图像也就越真实。按照信息表示数字化的思想，可以用数字代码表示像素。例如，用一位代码表示一个像素，若像素是亮的，则用代码 1 表示；若像素是暗的，则用代码 0 表示。再将表示一幅图像所有像素的代码按照像素在图像中的位置进行组织，就可以实现用数字代码来表示图像了。

【例 1-4】 用数字代码表示声音。

为了对声音信息数字化，首先将声波转换为电流波，再按一定频率对电流波进行采样，即在长度相同的时间间隔内分别对电流波的幅值进行测量，每次测到的电流幅值都用一个数字量来表示。只要采样频率足够高，得到的数字信息就能逼真地保持声波信息，还原后，真实地再现原来的声音。

【例 1-5】 用数字代码表示指令。

指令属于控制信息。通常，一条指令需提供要求计算机做什么操作，以及如何获取操作数等信息。因此，可以用一段数字代码表示操作类型，这段代码称为操作码；用另一段代码表示获取操作数的途径，这段代码称为地址码。将操作码和地址码组合在一起，就形成了机器指令代码。例如，操作码取 4 位，可以约定，0000 表示传送操作，0001 表示加法操作，0010 表示减法操作……地址码取 12 位，用 6 位表示一个操作数的来源，用其余 6 位表示另一个操作数的来源。例如，约定 000000 表示操作数来自 0#寄存器，000001 表示另一操作数来自 1#寄存器。这样，16 位代码 0001000000000001 表示一条加法指令，其含义是将 0#寄存器的内容与 1#寄存器的内容相加，结果存放在 1#寄存器中。

【例 1-6】 用数字代码表示设备状态。

计算机在工作时往往需要了解外部设备的状态，根据外设状态决定做什么操作。不同的外部设备可能有不同的工作状态，如打印机将字符打印在纸上，显示器则将字符显示在屏幕上。这些设备的状态可以归纳为三种：空闲（设备没有工作）、忙（设备正在工作）、完成（设备做完一次操作）。相应地，可以用约定的数字代码表示这三种状态，如用 00 表示空闲，01 表示忙，10 表示完成。

2. 在物理机制上用数字信号表示数字代码

为什么能用数字代码来表示各种信息呢？这就涉及计算机的物理机制。计算机是一种复杂的电子线路，传送和处理的实际对象是电信号。电信号又分为模拟信号和数字信号两种。

模拟信号是一种随时间连续变化的电信号，如电流信号、电压信号等。我们可以用电流或电压的幅值来模拟数值或物理量的大小，如模拟温度的高低、压力的大小等。处理模拟信号的计算

机称为模拟计算机，只应用在极特殊的领域中。用模拟信号表示数据的大小有许多缺点，如表示的精度低、表示的范围小、抗干扰能力弱、不便于存储等。如果用数字信号表示信息，则可以克服以上缺点。

数字信号是一种在时间上或空间上断续变化的电信号，如电平信号和脉冲信号。单个电信号一般只取两种状态，如电平的高或低、脉冲的有或无，这样可以用这两种状态分别表示数字代码 1 和 0，称为二值逻辑。比如，用高电平状态表示 1，低电平状态表示 0；或者用有脉冲的状态表示 1，无脉冲的状态表示 0。用一位数字信号表示 1 位数字代码，用多位数字信号的组合可以表示多位数字代码。处理数字信号的计算机称为数字计算机，电平信号和脉冲信号是数字计算机中最基本的电信号形式。用数字信号可以表示数字代码，用数字代码又可以表示各种信息，因而数字计算机能用于各行各业，处理广泛的信息。下面通过两个例子说明如何用多位电信号的组合来表示多位数字代码。

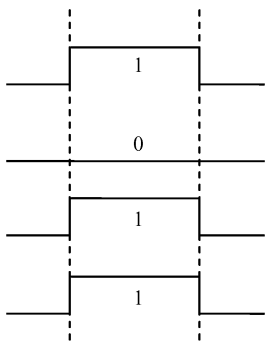


图 1-3 用一组电平信号表示多位数字代码

【例 1-7】 用一组电平信号表示 4 位数字代码。

电平信号利用信号电平的高、低状态表示不同的代码，所以电平信号通常需要一段有效维持时间。可以用 4 根信号线分别输出 4 个电平信号，每个电平信号表示 1 位代码。我们约定，+5 V 为高电平，表示 1；0 V 为低电平，表示 0。如图 1-3 所示，4 位电平信号表示 4 位数字代码 1011，它们可能表示一个 4 位的二进制数，也可能表示一个命令或一种状态的编码。

每个信号各占用一根信号线，因而这一组电平信号在空间上的分布是离散的。在计算机中，常用电平信号表示并行传送的信息，如用若干信号线同时传输的数据、地址或其他信息的编码。

【例 1-8】 用一串脉冲信号表示 4 位数字代码。

与电平信号不同，脉冲信号的电平维持时间很短，如信号电平从 0 V 向 +5 V（或 -5 V）跳变，维持极短时间后再回到原来的 0 V 状态。因此，信号出现时，其电平为 +5 V（或 -5 V），信号未出现时，其电平为 0 V，如图 1-4 所示。由于脉冲信号在时间上的分布是离散的，因此可以用一根信号线发出一串脉冲信号，在约定的时间内有脉冲表示 1，无脉冲表示 0。图 1-4 中的脉冲串表示 4 位数字代码 1011。

可以用脉冲信号的上升边沿或下降边沿表示某一时刻，对某些操作定时。例如，在计算机中，在脉冲上升边沿将数据送入某个寄存器中，常用脉冲信号表示串行传输的数据。

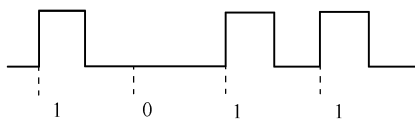


图 1-4 用一串脉冲信号来表示多位数字代码

3. 用数字化方法表示信息的主要优点

(1) 在物理上容易实现信息的表示与存储

每个信号只取两种可能的状态表示 1 或 0，因此在物理上可以用多种方法来实现，如开关的接通或断开、晶体管的导通或截止、电容上有电荷或无电荷、磁性材料的正向磁化或反向磁化、磁化状态的变化或不变等。凡是具有两种稳定状态的物理介质均可用来存储信息，如用双稳态触发器存储信息，利用电容上存储的电荷来存储信息，还可以用磁性材料记录信息，或者用激光照射过的介质记录信息。

(2) 抗干扰能力强，可靠性高

由于单个数字信号的两种状态（高电平与低电平，或者有脉冲与无脉冲）差别较大，即使信号受到一定程度的干扰，仍能比较可靠地鉴别出电平的高低或信号的有无。例如，高电平 +5 V 表

示 1，低电平 0 V 表示 0，假设信号处于 0 状态，如果出现了 2 V 的干扰信号，也不会将原来信号的 0 状态改变到 1 状态。

(3) 数值的表示范围大，表示精度高

一位数字信号的表示范围很窄，用多位数字信号的组合表示一个数时，可以获得很大的表示范围和很高的精度。例如，用 4 位电平信号表示一个 4 位的二进制整数时（不考虑符号），能够表示的最大数值是 15。若要表示一个 4 位的二进制小数，同样不考虑符号，则数的精度为 2^{-4} 。位数越多，数的表示范围越大，或者数的表示精度越高。从理论上讲，位数的增加是没有限制的，但位数增多，花费的硬件开销也相应增大。

(4) 可表示的信息类型极其广泛

各种非电量类型的信息可以先转换为电信号，模拟电信号又可以转换为数字电信号，因此表示的信息类型和范围几乎没有限制。

(5) 能用数字逻辑技术进行信息处理

根据处理功能逻辑化的思想，计算机的所有操作最终是用数字逻辑电路来实现的。因此，用逻辑代数对信息进行处理就形成了计算机硬件设计的基础，可以用非常有限的几种逻辑单元（如与门、或门、非门等）构造出变化无穷的计算机系统和其他数字系统。

从事计算机技术工作的重要基础是善于用约定的数字代码表示各种需要描述的信息。这里再次强调“信息数字化”的概念：① 计算机中的各种信息都用数字代码表示，这些信息包括数值型的数字、非数值型的字符、图像、声音以及逻辑型的命令、状态等；② 数字代码中的每一位都用数字信号来表示，数字信号可以是电平信号或脉冲信号。

1.1.2 存储程序工作方式

存储程序是计算机的核心内容，表明了计算机的工作方式，包含三个要点：事先编制程序，存储程序，自动、连续地执行程序。这三点体现了用计算机求解问题的过程，下面分别加以说明。

(1) 根据求解问题事先编制程序

计算机处理任何复杂的问题都是通过执行程序来实现的。因此，在求解某一问题时，用户要根据解决这个问题所采用的算法事先编制程序，规定计算机需要做哪些事情，按什么步骤去做。程序中还应提供需要处理的数据，或者规定计算机在什么时候、什么情况下从输入设备取得数据或向输出设备输出数据。

(2) 事先将程序存入计算机中

如前所述，用户用某种编程语言编写的程序称为源程序，它是由字符组成的，计算机不能识别。因此，需要通过编译器将源程序转换为二进制代码，保存在存储器中。这时的程序还不是指令代码，不能被计算机执行，需进一步被转换为机器指令序列。所以，事先编写的程序最终将变为指令序列和原始数据，并被保存在存储器中，提供给计算机执行。

(3) 计算机自动、连续地执行程序

程序已经存储在计算机内部，计算机被启动后，不需要人工干预，就能自动、连续地从存储器中逐条读取指令，按指令要求完成相应操作，直到整个程序执行完。当然，在某些采用人机对话方式工作的场合，也允许用户以外部请求方式干预程序的运行。

指令和数据都是以二进制代码的形式存放在存储器中的，那么计算机如何区分它们？又如何自动地从存储器中读取指令呢？首先，将指令和数据分开存放。由于在多数情况下，程序是顺序执行的，因此大多数指令需要依次相邻存放，而将数据放在该程序区中不同的区间。其次，可以

设置一个程序计数器 (Program Counter, PC), 用它存放当前指令所在的存储单元的地址。如果程序顺序执行, 则在读取当前指令后将 PC 的内容加 1 (当前指令只占用一个存储单元), 指示下一条指令的地址。如果程序要进行转移, 则将转移目标地址送入 PC, 以便按照转移地址读取后续指令。所以, 依靠 PC 的指示, 计算机就能自动地从存储器中读取指令, 再根据指令提供的操作数地址读取数据。

对于传统的冯·诺依曼机而言, 存储程序工作方式是一种控制流驱动方式, 即按照指令的执行序列依次读取指令, 再根据指令所含的控制信息调用数据进行处理。这里的控制流也称为指令流, 是指在程序执行过程中, 各条指令逐步发出的控制信息, 它们始终驱动计算机工作。而依次被处理的数据信息称为数据流, 它们是被驱动的对象。

1.1.3 计算机的分类

计算机的种类有多种多样, 从不同的角度出发, 可以将它们分成不同的种类。

首先, 按计算机中处理信息的制式, 计算机可以分为数字计算机和模拟计算机。

数字计算机是通过信号的两种不同状态来表示数字信息 (1 和 0) 的, 可以方便地对数字信号进行算术和逻辑运算, 具有速度快、精度高、便于存储等优点。目前, 通常讲的计算机一般是指数字计算机。

模拟计算机一般只能处理模拟信号, 如连续变化的电压、电流和温度等, 主要由模拟信号运算器件组成, 适合求解微分方程等。这种计算机在模拟计算和实时控制系统中有应用, 但通用性不强, 信息不易表示和存储, 精度也不高, 因此它的应用范围很窄。

其次, 如果按照计算机通用性的差异, 计算机可以分为专用计算机和通用计算机。

专用计算机, 即专门为解决某一特定问题而设计制造的计算机。它一般只具有为实现某一个特定任务而定制的最小软硬件结构, 也拥有相对固定的存储程序。专用计算机具有执行速度快、可靠性高、结构简单和价格便宜等优点, 但它的功能单一, 对应用环境的适应性很差。例如, 控制轧钢过程的轧钢控制计算机、计算导弹弹道的专用计算机等, 都属于专用计算机的范畴。

通用计算机指各行业和各种工作环境都能使用的计算机, 一般具有较高的运算速度、较大的存储容量、配备了比较齐全的外部设备及软件。与专用计算机相比, 为了实现其通用性, 通用计算机的结构比专用计算机更复杂、价格也更昂贵。

通用计算机的适应能力很强, 其应用范围也很广。它的运行效率、速度和经济性等指标在不同的应用场景下表现会有很大差别。我们平常使用的个人台式计算机等都属于通用计算机。

如果按照计算机系统的规模和处理能力等技术指标, 从小到大、从弱到强地进行区分, 典型的通用计算机可以分为如下几类。

(1) 微型机

微型机, 也俗称微机, 是计算机领域中目前发展得最快、应用也最广泛的一种计算机。第一台典型意义上的微机 MCS-4, 是由美国的 Intel 公司在 1971 年以自主研发的 4 位微处理器 (Intel 4004) 为基础, 扩展并增加存储系统和输入/输出接口等后形成。从那以后, Intel、MITS 和 IBM 等公司又陆续推出了更新型的微机产品。

常见的微型机有个人台式计算机、笔记本电脑、一体机和 workstation 等。

微型计算机和与其他类型计算机的主要区别在于, 微型计算机广泛采用了集成度相当高的电子元件和独特的总线 (Bus) 结构。除此之外, 微型计算机具有轻便、小巧、价格低、操作和使用方便等特点, 其应用范围最广, 发展普及也最快, 已经成为大众化的信息处理和数字娱乐工具。

（2）小型机

小型计算机是相对于大型计算机而言的，小型计算机的软件、硬件系统规模比较小，但价格低、可靠性高、便于维护和使用。

小型机最初是在 20 世纪 70 年代由美国 DEC 公司首先开发的一种高性能计算产品，曾经风行一时。小型计算机也曾用来表示一种多用户、采用主机/终端模式的计算机，它的规模和性能介于大型计算机和微型计算机之间。目前，主流小型机的内部一般集成了几十或上百个 CPU，且采用不同版本的 UNIX 操作系统，常作为中高端的专业服务器。国内的服务器领域还习惯性地 will 各类 UNIX 服务器简称为小型机。

小型机采用的是主机/终端模式，并且各家厂商均有各自的体系结构，如处理器架构、I/O 通道和操作系统软件等都是特别设计的，一般彼此之间互不兼容。与普通服务器相比，小型机还具有高 RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 特性，即：① 高可靠性，计算机可以 7×24 持续工作永不停机；② 高可用性，重要资源都有备份，能检测到潜在异常，能转移任务到其他资源以减少停机时间保持持续运行，且具备实时在线维护和延迟性维护等功能；③ 高服务性，能够实时在线诊断，精确定位发生的故障，并能做到准确无误的快速修复。

（3）大型机

大型计算机简称大型机，一般作为大型的高性能商业服务器，因其具有较大的体积（通常占地面积几十平方米）而得名。

大型机通常使用专用的处理器指令集（如 IBM 公司的 Z/Architecture 架构 CISC 指令集）、专用的操作系统（如 Z/OS）和专用的应用软件（如 IBM DB2 数据库系统），通常具有较高的运算速度，一般为每秒钟数亿次级别，还具有较大的存储容量，具备较好的通用性，功能也比较完备，能支持大量用户同时使用计算机数据和程序，具有强大的数据处理能力，但大型机的价格也比较昂贵。

大型机除了像小型机那样要求高 RAS 性能外，还特别强调了 I/O 数据的吞吐率和处理器指令架构的兼容性。大型机一般通过专用处理器来控制通道进行 I/O 处理，一个 I/O 通道能同时处理多个 I/O 操作、控制上千个 I/O 设备，因此能同时处理上千个数据流，还能保证每个数据流高速运转。大型机的高 RAS、分区和负载能力、I/O 性能优势是其他类型服务器不能匹敌的。大型机处理复杂的多任务时能表现出超强的处理能力，其宕机时间远远低于其他类型的服务器。大型机 I/O 能力强，擅长超大型数据库的访问，采取动态分区管理，根据不同应用负载量的大小，灵活地分配系统资源；从底层防止入侵的设计策略使大型机安全性提高。

目前，能生产大型机的企业主要有美国的 IBM 和 UNISYS 等公司，其中 IBM 公司生产的大型机系列产品几乎占据了全球 90% 以上的市场份额，曾于 2005 年与电子科技大学签署合作协议，并提供一台 IBM eServer Z900 大型机用于教学和培训。大型机通常应用在银行、证券和航空等大型企业，对大数据处理能力和系统的安全性、稳定性等都有极为苛刻要求的应用场合。我国仅有中科院计算所、国防科学技术大学和浪潮等单位能设计和生产大型计算机。

（4）超级计算机

超级计算机，早期叫巨型机，现在常简称为“超算”。与大型机相比，超级计算机通常由成千上万个计算节点和服务节点组成，具有强大的计算和处理数据的能力，主要特点表现为超高的计算速度和超大的存储容量，并配有多种外部和外围设备及功能丰富的软件系统。

超级计算机是计算机中功能最强、运算速度最快、存储容量最大的一类计算机，多用于国家高科技领域和尖端技术研究，是一个国家科研实力的体现，它对国家安全，经济和社会发展具有

举足轻重的意义，是国家科技发展水平和综合国力的重要标志。

超级计算机与大型机的主要区别如下。

① 大型机使用专用指令系统和操作系统，而超级计算机使用通用处理器及 UNIX 或类 UNIX 操作系统，如 Linux 等。

② 大型机擅长非数值计算（数据处理），而超级计算机擅长数值计算（科学计算）。

③ 大型机主要用于商业领域，如银行和电信等，而超级计算机常用于尖端科学领域，特别是国防和天气预报等领域。

④ 大型机大量使用冗余等技术确保其安全性及稳定性，所以内部结构通常会有备份。而超级计算机使用大量的处理器，通常由数十个机柜组成，体积比大型机更大。

超级计算机主要由高速运算部件和大容量主存等部件构成，一般还需半导体快速扩充存储器和海量（磁盘）存储子系统的支持。超级计算机的主机一般不直接管理低速 I/O 设备，而是通过 I/O 接口连接前端机，一般是小型机，由前端机处理 I/O 任务。此外，I/O 的另一种途径是通过网络，联网用户借助其终端机（微型、小型或大型机）与超级计算机交互，I/O 均由用户终端机来完成，这种方式可大大提高超级计算机的利用率。

为提高系统性能，现代的超级计算机都在系统结构、硬件、软件、工艺和电路等方面采取各种支持并行处理的技术。例如，一般都采用多处理机结构，且处理器除了支持传统的标量数据外，还增加了向量或数组类型数据；硬件方面大多采用流水线、多功能部件、阵列结构或多处理机、向量寄存器、标量运算、并行存储器等多种先进技术。

我国的超级计算机研制开始于 20 世纪 60 年代，由国防科学技术大学慈云桂教授主持研发的国内首台超级计算机“银河-I”于 1983 年 12 月 22 日诞生，使我国继美国、日本之后成为第三个高性能计算机研制生产国。中国现阶段超级计算机的拥有量超过 60 台，代表性的有国防科学技术大学近年研制成功的“天河”系列以及中科院研制的“曙光”系列超级计算机。无论是拥有量还是运算速度，我国在世界上都处于领先的地位。

注意，计算机领域中对于微型机、小型机、大型机和超级计算机的划分都是一个相对的概念，其划分标准也会随着技术的不断发展而发生动态变化。正因为如此，目前的微型机，其计算性能或许相当于数十年前的小型机，又或者现在的小型机，若干年之后，说不定它还赶不上那时微型机的综合性能指标。

1.2 计算机的诞生和发展

1.2.1 冯·诺依曼体系

计算机系统作为一个能够自动地处理信息的智能化工具，必须解决好两个最基本的问题：第一，信息如何表示才能方便地让计算机识别和处理；第二，采用什么工作方式才能使计算机能自动地对信息进行处理。



图 1-5 冯·诺依曼

对上述两个问题的解决方案做出杰出贡献并产生深远影响的是一位美籍匈牙利科学家约翰·冯·诺依曼（John von Neumann，1903—1957），如图 1-5 所示。冯·诺依曼在 1944 年加入了美国军方 ENIAC（Electronic Numerical Integrator And Computer，电子数字积分器与计算机）计算机的研制项目。在此研制基础上，他在 1945 年提出并发表了一个全新的“存储程序通用电子计算机”方案——EDVAC（Electronic Discrete Variable Automatic

Computer)。在这份方案中，冯·诺依曼具体介绍了制造电子计算机和程序设计的新思想，这份方案是计算机发展史上一个划时代的文献，它向世界宣告了电子计算机时代的来临。

在 EDVAC 技术方案中，冯·诺依曼明确提出新型计算机的结构应由五大部分组成：运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备，并且阐述了这五大部分的功能和相互之间的逻辑关系。此外，他还对 EDVAC 的两大设计思想做了进一步的论证，为新型电子计算机的设计指明了方向、树立了一座里程碑，具有划时代的意义。

设计思想之一是信息采用二进制来表示。他根据电子元件的双稳态工作特点，建议在电子计算机中采用二进制来表示信息，他还分析了二进制的优点，并预言二进制的采用将大大简化计算机硬件系统的逻辑结构。

设计思想之二是程序存储的思想。把运算程序存在计算机的存储器中，程序设计员只需在存储器中寻找运算指令，计算机就能自行计算，这样就不必对每个问题重新编程，从而大大加快了运算的进程。程序存储的思想标志着计算机期望的自动运算的实现，同时标志着电子计算机设计思想的成熟，且已成为电子计算机设计的基本原则。

总体上，冯·诺依曼体系的主要思想可概括为：① 计算机硬件系统由五大部件（存储器、运算器、控制器、输入设备和输出设备）组成；② 计算机中采用二进制形式表示信息（数据、指令）；③ 采用存储程序的工作方式，这也是冯·诺依曼体系最为核心的思想。

冯·诺依曼针对 EDVAC 提出的新型电子计算机体系结构及设计思想，奠定了现代电子计算机设计的理论基础，并开创了程序设计的新时代。因此，他提出的这些计算机设计思想也被称为冯·诺依曼思想，相应的计算机体系结构也被称为冯·诺依曼体系结构，也正是因为对计算机的这种划时代贡献，他被后世尊称为“计算机之父”。

采用冯·诺依曼思想体制的计算机就称为冯·诺依曼计算机。几十年来，尽管计算机的体系结构已经发生了许多演变，但它们总体上仍然没有脱离冯·诺依曼体制的核心思想原则，现在的绝大多数计算机仍然属于冯·诺依曼体系结构的计算机。当然，从本质上讲，传统的冯·诺依曼机采用的是串行处理的工作机制、逐条执行指令序列。要想提高计算机的性能，其根本方向之一是采取并行处理机制，如用多个处理部件形成流水线，依靠时间上的重叠来提高处理效率，或者用多个冯·诺依曼机组成多机系统，以支持并行算法等。

1.2.2 计算机发展历程

1946年2月14日，在美国的宾夕法尼亚大学，世界上第一台严格意义上的电子数字计算机 ENIAC 诞生了，它标志着电子计算机时代的到来。这台计算机由美国军方定制，专门为了计算导弹的弹道和射击特性而研制。承担开发任务的“莫尔小组”主要由四位科学家和工程师埃克特、莫克利、戈尔斯坦、博克斯组成，后来冯·诺依曼作为技术顾问也加入了该小组。ENIAC 的主要元器件采用的是电子管，共使用了 1500 个继电器，18800 个电子管，占地约 170 m²，重达 30 多吨，耗电 150 kW，造价高达 48 万美元，每秒能完成 5000 次加法运算，400 次乘法运算，比当时最快的计算工具快 300 倍，是继电器计算机的 1000 倍、手工计算的 20 万倍。

第一台电子计算机于 1946 年诞生后，发展到现在已经历了几十年，也经历了不同的技术发展阶段，且每个阶段各具特色。

1. 第一代，电子管计算机（1946—1957）

这一阶段计算机的主要特征是采用电子管元件作基本器件，一般使用光屏管或汞延时电路作

为存储器，输入或者输出主要采用穿孔卡片或纸带等，通常体积比较大、功耗较高、计算速度较慢、存储容量较小、可靠性比较差、维护很困难而且价格昂贵。在程序设计上，通常使用机器语言或者汇编语言来编写程序，这一代计算机主要用于军事科学计算。

电子计算机在我国的研制起步较晚。1957年4月，我国购买了M-3计算机的技术资料，在这些技术资料的基础上开始研制。以中科院计算所研究员张梓昌和莫根生为主，组织了M-3（代号为103）计算机工程组。通过与北京有线电厂的密切配合，工程组于1958年8月1日成功研制（实为在苏联专家指导下仿制）我国第一台小型电子管数字计算机——103型机（定点32位，最初的平均运算速度仅为每秒30次），填补了国内电子计算机的空白。后经技术改进，其平均速度提高到每秒1800次，定名为DJS-1型计算机。

1959年10月，以B Θ CM-II机为蓝本，我国宣布研制成功了第一台大型电子管数字通用计算机（浮点40位，平均每秒1万次）即104型机，后定名为DJS-2型计算机，该机的技术指标在当时不亚于英国和日本的水平。

103机和104机属于我国的第一代电子管计算机，它们的相继推出标志着我国的计算机事业终于蹒跚起步，为我国解决了大量过去无法计算的经济和国防等领域中的计算难题，填补了我国计算机技术的空白，是我国计算机工业发展史上的第一块里程碑。

在研制104机的同时，中科院计算所夏培肃研究员领导的小组首次自行设计并于1960年4月研制成功一台小型的串行通用电子管数字计算机107机（定点32位，平均每秒250次）。1964年，中国科学院计算所吴几康研究员等主持的我国第一台自行设计的大型通用电子管计算机119机（浮点44位，平均每秒5万次）也研制成功。

2. 第二代，晶体管计算机（1958—1964）

20世纪50年代中期，晶体管的出现使计算机生产技术得到了根本性的发展，晶体管代替了电子管作为计算机的基础器件，普遍采用磁芯和磁鼓作为存储器。在整体性能上，它比第一代计算机有了很大的提高，速度更快、寿命更长、体积更小、重量更轻且功耗更低。同时，许多专用的计算机程序设计的高级语言也相应出现了，如FORTRAN、COBOL和Algo160等。在此阶段，晶体管计算机在被用于科学计算的同时，也开始在数据处理、过程控制等领域得到了广泛应用。

我国的晶体管计算机发展也远落后于世界发达国家，在研制电子管计算机的同时，也在着手晶体管计算机的研制。国内在1963年开始才出现晶体管计算机，如“109原型机”和“441B”等。直到1965年，我国第一台独立设计研制的大型晶体管计算机“109乙”（浮点32位，每秒6万次）才由中科院计算所正式研制成功，标志着我国才开始正式进入了第二代（晶体管）计算机时代。此时，国外已在大力研制第三代计算机了。经过对“109乙”历时两年的技术改进，又成功推出了“109丙”计算机，该机为“两弹一星”实验做出了卓越贡献，因此被誉为“功勋计算机”。国内其他科研院所陆续推出了108机、121机和320机等型号的晶体管计算机。

3. 第三代，中小规模集成电路计算机（1965—1971）

20世纪60年代中期，随着半导体工艺的发展，集成电路开始出现。在此阶段，中小规模集成电路逐渐成为计算机的主要逻辑部件，半导体存储器也开始采用，这些改进使计算机体积更小、功耗更低，计算速度和可靠性更高。在软件方面，有了标准化的程序设计语言和人机会话式的BASIC语言，程序设计方法上也出现了结构化程序设计的思想，为编制更复杂的软件提供了技术保证。与此同时，逐渐出现了分时操作系统，多用户可共享计算机软件、硬件资源，这些变化都导致计算机的应用领域进一步扩大。

我国对第三代计算机的研制受到“文革”的巨大冲击，整体上落后国外一代。1964年，美国IBM公司就推出了360系列大型机，那时我国尚在研制第二代计算机，第三代计算机的研制尚在规划阶段。1972年，我国才研制成功运算速度达到每秒11万次的大型集成电路通用计算机。1973年，北京大学与北京有线电厂合作，研制成功了我国第一台运算速度在百万次级的大型集成电路通用计算机“150机”（支持浮点48位运算，计算速度达到每秒100万次）。

进入20世纪80年代，我国的高速计算机特别是向量计算机技术有了新的发展。1983年，中科院计算所研制完成我国第一台大型向量计算机“757机”问世，其计算速度可达每秒1000万次，这一记录同年11月又被国防科学技术大学研制的巨型计算机“银河-I”打破，其计算速度可达每秒1亿次。银河-I巨型机是我国高速计算机研制的一个重要里程碑，它的研制成功表明中国成了继美、日等国之后，能够独立设计和制造巨型机的国家。

4. 第四代，大规模和超大规模集成电路计算机（1971年至今）

大规模和超大规模集成电路（VLSI）技术逐渐成熟，因此在计算机中普遍采用大规模和超大规模集成电路作为核心逻辑部件，这使得计算机的体积、功耗和成本等更进一步降低，微型计算机也随之出现。除此此外，半导体存储器的集成度越来越高，容量也越来越大，还发展出了并行技术和多机系统，出现了精简指令集计算机（RISC），软件系统工程化、理论化和程序设计自动化也得到充分发展。软盘、硬盘和光盘及U盘等辅助存储器也相继出现，各种新颖的输入、输出设备不断推陈出新，软件产业也高速发展，各类应用软件层出不穷，计算机与通信技术相结合的典范——计算机网络也得到了迅猛发展，多媒体技术也在这个阶段异军突起。微型计算机在社会上的应用和普及范围进一步扩大，几乎所有领域都能看到计算机的存在。

与国外一样，我国的超大规模集成电路计算机的研制也是从微机开始的，只不过从20世纪80年代中期才开始。20世纪80年代初期，国内很多单位开始采用Z80、X86和M6800等芯片研制微机。1985年，原电子部六所研制成功能与IBM PC（1981年）兼容的DJS-0520CH微机，随后在1987年第一台国产286微机长城286问世。

1995年，曙光1000大型机通过鉴定，其峰值可达每秒25亿次。曙光1000与美国Intel公司1990年推出的大规模并行机体系结构与实现技术相近，此时与国外先进技术之间的差距缩小到5年左右。2000年，我国自行研制成功高性能计算机“神威I”，其主要技术指标和性能达到国际先进水平。我国成为继美国、日本之后成为世界上第三个具备自行研制高性能计算机能力的国家。

2001年，中科院计算所研制成功我国第一款通用CPU芯片“龙芯”。2002年，曙光公司推出完全自主知识产权的“龙腾”服务器，龙腾服务器采用了“龙芯-1”CPU，采用了曙光公司和中科院计算所联合研发的服务器专用主板，采用曙光Linux操作系统，该服务器是国内第一台完全实现自有产权的计算机产品，在国防等部门发挥了重大作用。2009年，国防科学技术大学研制成功“天河一号”超级计算机，峰值速度达到1.206 PFLOPS，实测563.1 TFLOPS，为国内首台达到千万亿次运行速度的超级计算机，其改进版本“天河一号A”上搭载了2048颗国产FT-1000处理器（8核64线程），在架构设计上采用了基于TH Express-2主干网的集群式“胖树”拓扑互连结构，使其达到了很快的计算速度，其最终的实测速度高达2.566 PFLOPS。

目前，在高性能计算机领域，无论是超级计算机的拥有量还是运算速度，我国都处于世界领先地位，最具代表性的是国防科学技术大学研制的“天河”系列和中科院研制的“曙光”系列超级计算机，其最高速度已突破每秒千万亿次。“天河二号”（部署在广州超算中心，中山大学）内置4096颗国产FT-1500处理器（16核SPARC V9架构，40nm制程，主频1.8GHz），持续计算速度高达33.86 PFLOPS，使其在“国际TOP500组织”排行榜中夺取三连冠。

1.2.3 未来的发展趋势

自从 1946 年诞生后，计算机经历了四个发展阶段，核心器件从最初的电子管、晶体管再发展到集成电路和超大规模集成电路，功能和性能越来越强大，应用范围也越来越广，涉及社会的方方面面。随着科学技术的发展，计算机也继续在向前发展。从总体上看，计算机的发展发展趋势可以简单地用五个字来加以概括，即“巨”、“微”、“多”、“网”和“智”。

1. 巨型化

计算机的巨型化是指发展运算高速、大容量存储和功能强大的超大型计算机。这既是军事、天文、气象、原子和核反应等尖端科学领域发展的迫切需要，也是人类进一步探索新兴科学领域，诸如宇宙工程、生物生命工程等的需要，也是为了让计算机具有像人脑一样高度发达的学习和推理等复杂功能。尤其是在信息爆炸性增长的时代背景之下，海量数据的记忆、存储和处理是必要的，这也会促进未来的计算机朝巨型化的方向发展。

2. 微型化

与巨型化发展趋势相比，计算机的微型化是相反的发展趋势。半导体技术、工艺的不断发展，计算机部件的集成度越来越高、性能也越来越强，计算机的体积和功耗也越来越低。尤其是在互联网时代中，各种移动应用正蓬勃发展，各种各样的移动式、便携式、手持式精巧计算设备也越来越受到用户青睐，这就促使计算机向微型化方向持续发展。比如，现在几乎人手一个的智能手机，以及各种小巧的一体机、笔记本电脑、平板电脑等，这些都可以看成计算机朝微型化方向发展的典型产品，未来甚至可能出现微型得几乎难以目视的计算机产品。

3. 多媒体化

计算机的多媒体化是指计算机与以数字技术为核心的图文声像和通信技术融合在一起发展。计算机多媒体化的目标是：无论何时何地，只需要简单的设备，就能自由地以交互和对话的方式交流信息，其实质是让人们利用计算机以更加自然、简单的方式进行交流，提供更直观的交互方式、更好的用户体验。

4. 网络化

计算机网络是计算机技术发展中崛起的又一重要分支，是现代通信技术与计算机技术结合的产物。从单机走向联网，是计算机应用发展的必然结果。在一定的地理区域内，将分布在不同地点、不同机型的计算机和设备由通信网络互连，组成规模更大、功能强的网络系统，共享信息、共享软件、硬件和数据。

计算机的网络化既指计算机系统的发展必然要能支持多种网络协议和网络接口，也强调了通过网络把数量众多的计算机和各类终端设备整合在一起，形成一台虚拟的超级计算机，从而实现对计算资源、存储资源、数据资源、信息资源、知识资源、专家资源的深度共享。

5. 智能化

智能化是指让计算机模拟人的感觉、行为和思维等过程，从而使计算机具备和人一样的思维和行为能力，形成智能型和超智能型的计算机。智能化的研究包括模式识别、物形分析、自然语言的生成和理解、定理的自动证明、自动程序设计、专家系统、学习系统、智能机器人等。人工智能的研究使计算机远远突破了“计算”的最初含义，从本质上拓宽了计算机的能力，可以更好

地代替或超越人的脑力劳动，如神经网络计算机。

计算机的发展趋势除了向巨型化、微型化、多媒体化、网络化和智能化方向发展外，目前处于研制阶段的采用光器件的光子计算机和生物器件的生物计算机是很新的一代计算机，这些计算机从本质上已经超越了“电子计算机”的含义。生物计算机的存储能力巨大，处理速度极快，能量消耗极微，总体具有模拟人脑的能力。光子计算机利用光子代替电子，利用光互连代替导线互连，以光器件代替电子器件，以光运算代替电子运算，理论上比传统的电子计算机具有更高的计算速度、更低的功耗以及更好的可靠性。

电子计算机，作为人类文明发展进程中的一种重要工具，既然有它的发生和发展，也必然有它的衰落直至消亡，这是任何事物的规律。或许，也仅仅是或许，下一代的新型计算机就是生物计算机或者光子计算机。

1.3 计算机系统的组织

1.3.1 硬件系统

在冯·诺依曼体制中，计算机硬件系统是由存储器、运算器、控制器、输入设备和输出设备五大部件组成的。随着计算机技术的发展，计算机硬件系统的组织结构已发生了许多重大变化，如运算器和控制器已组合成一个整体，称为中央处理器（Central Processing Unit, CPU），存储器已成为多级存储器体系，包含主存、高速缓存和外存三个层次。下面先以目前常见的计算机硬件系统组成为例，讨论系统中各部件应该具有哪些功能，以及这些部件通过什么方式相互连接构成整机等硬件设计方面的问题，然后简单介绍典型的硬件系统结构。

1. 计算机硬件系统基本组成

图 1-6 是一种计算机硬件系统的简化结构模型示意图，其中包含 CPU、存储器、输入/输出(I/O)设备和接口等部件，各部件之间通过系统总线相连接。

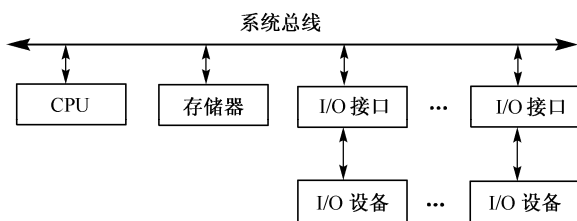


图 1-6 计算机硬件系统的结构模型

(1) CPU

CPU 是计算机硬件系统的核心部件，在微型计算机系统或其他应用大规模集成电路技术的系统中，它被集成在一块芯片上，构成微处理器。CPU 的主要功能是读取并执行指令，在执行指令的过程中，它向系统中的各部件发出各种控制信息，收集各部件的状态信息，与各部件交换数据信息。

CPU 由运算部件、寄存器组和控制器组成，它们通过 CPU 内部的总线相互交换信息。运算部件完成算术运算（定点数运算、浮点数运算）和逻辑运算。寄存器组用来存放数据信息和控制信息。控制器提供整个系统工作所需的各种微命令，这些微命令可以通过组合逻辑电路产生，也可以通过执行微程序产生，分别被称为组合逻辑和微程序控制方式。

(2) 存储器

存储器用来存储信息，包括程序、数据、文档等。如果存储器的存储容量越大、存取速度越快，那么系统的处理能力就越强，工作速度就越高。但是一个存储器很难同时满足大容量、高速度的要求，因此常将存储器分为主存、外存和缓存三级存储体系。

主存用来存放 CPU 需要使用的程序和数据。主存的每个存储单元都有固定的地址，CPU 可以按地址直接访问它们。因此，要求主存的存取速度很快，但目前因技术条件的限制其容量有限，一般仅为几 GB。主存通常用半导体材料构成。此外，通常将 CPU 和主存合称为主机，因主存位于主机之内，故主存又常被称为内存。

外存位于主机之外，用来存放大量的需要联机保存但 CPU 暂不使用的程序和数据。需要时，CPU 并不直接按地址访问它们，而是按文件名将它们从外存调入主存。因此，外存的容量很大，但存取速度比主存慢，如磁盘、光盘和 U 盘等都是常用的外存。

高速缓存 (Cache) 是为了提高 CPU 的访存速度，在 CPU 和主存之间设置的存取速度很快的存储器，容量较小，用来存放 CPU 当前正在使用的程序和数据。高速缓存的地址总是与主存某一区间的地址相映射，工作时 CPU 首先访问高速缓存，如果未找到所需的内容，再访问主存。高速缓存由高速的半导体存储器构成。在现代计算机中，缓存是集成在 CPU 内部的，一般集成了两级 Cache，高端芯片（如多核处理器）甚至集成了第三级 Cache。早期的计算机中常在 CPU 外部设置片外 Cache，但这种方式已经被淘汰很多年了。

(3) 输入/输出设备

输入设备将各种形式的外部信息转换为计算机能够识别的代码形式送入主机。常见的输入设备有键盘、鼠标等。输出设备将计算机处理的结果转换为人们所能识别的形式输出。常见的输出设备有显示器、打印机等。

从信息传送的角度来看，输入设备和输出设备都与主机之间传输数据，只是传输方向不同，因此常将输入设备和输出设备合称为输入/输出 (Input/Output, I/O) 设备。它们在逻辑划分上位于主机之外，又称为外围设备或外部设备，简称外设。磁盘、光盘等外存既可看成存储系统的一部分，也可看成具有存储能力的输入/输出设备。

(4) 总线

总线是一组能为多个部件分时共享的信息传输线。现代计算机普遍采用总线结构，用一组系统总线将 CPU、存储器和 I/O 设备连接起来，各部件通过这组总线交换信息。注意：任意时刻只能允许一个部件或设备通过总线发送信息，否则会引起信息的碰撞；但允许多个部件同时从总线上接收信息。

根据系统总线上传送的信息类型，系统总线可分为地址总线、数据总线和控制总线。地址总线用来传输 CPU 或外设发向主存的地址码。数据总线用来传输 CPU、主存以及外设之间需要交换的数据。控制总线用来传输控制信号，如时钟信号、CPU 发向主存或外设的读/写命令和外设送往 CPU 的请求信号等。

(5) 接口

在图 1-6 中，为什么在系统总线与 I/O 设备之间设置了接口部件，如 USB 接口、SATA 接口和 PCI-E 接口等？这是因为计算机通常采用确定的总线标准，每种总线标准都规定了其地址线和数据线的位数、控制信号线的种类和数量等。但计算机系统连接的各种外部设备并不是标准的，在种类与数量上都是可变的。因此，为了将标准的系统总线与各具特色的 I/O 设备连接起来，需要在系统总线与 I/O 设备之间设置一些接口部件，它们具有缓冲、转换、连接等功能，这些部件

经常就被统称为 I/O 接口。

计算机的各种操作都可以归结为信息的传输。信息在计算机中沿着什么途径传输将直接影响硬件系统结构。我们将信息在计算机中的传送途径称为数据通路结构。因此，硬件系统结构的核心是数据通路结构。不同类型的计算机，如传统的微型机、小型机和大、中型机，其功能侧重点不同，因而它们的数据通路结构是有区别的。下面介绍几种典型的计算机硬件系统结构及其特点。

2. 典型的硬件系统结构及其特点

(1) 微型计算机的“南—北”桥经典架构

图 1-7 是一个典型的微型计算机硬件系统架构模型示意。该模型基于 Intel 平台经典的“南—北”桥布局结构，广泛流行多年。在这种架构模型中，CPU、存储器、输入/输出设备和接口等部件通过各类总线实现互连互通。

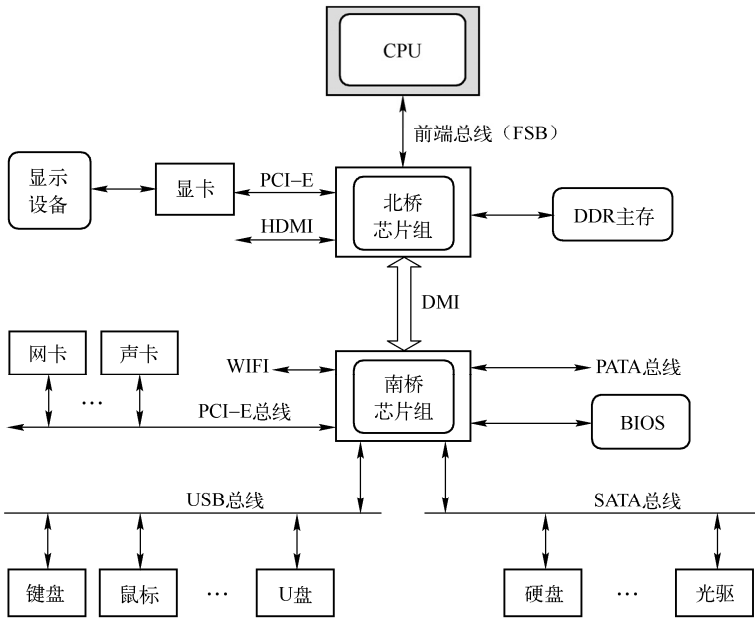


图 1-7 典型的微机硬件系统架构模型

从总体架构上看，图示的微机采用的是南-北桥架构：北桥芯片组（North Bridge Chipset）主要承担内存控制、视频控制与 CPU 的交互；南桥芯片组（South Bridge Chipset）负责控制外部设备的输入/输出，如键盘、鼠标、硬盘、网络设备等，还承担 BIOS（Basic Input/Output System）的管理任务。北桥（有的资料上也称为主桥）与南桥之间通过 DMI（Direct Media Interface）即直接媒体接口标准的总线相互连接，形成“CPU—北桥—南桥—外设”模式的信息传输与控制架构。

因此，图 1-7 中的体系结构模型中就存在了不同的总线，不再是单总线模式，如包括了 FSB、DMI、PATA、PCI-E、USB 和 SATA 等。

(2) 小型计算机的硬件体系架构

微型机和小型机系统往往侧重于以较低的硬件代价实现较强的系统功能，因此常用多组系统总线作为系统中各部件互连的基础，如连接 CPU、存储器和 I/O 接口，再通过接口连接外部设备。图 1-8 展示了惠普公司的一款名为 ProLiant DL300 系列的双处理器小型机（服务器）的硬件系统架构模型。该系列的小型计算机主要特征是：采用双 CPU 模式和 Intel C600 系列芯片组构成单桥体系架构，不再采用微型机中经典的“南-北”桥架构布局。与微型计算机经典的“南—北”桥体

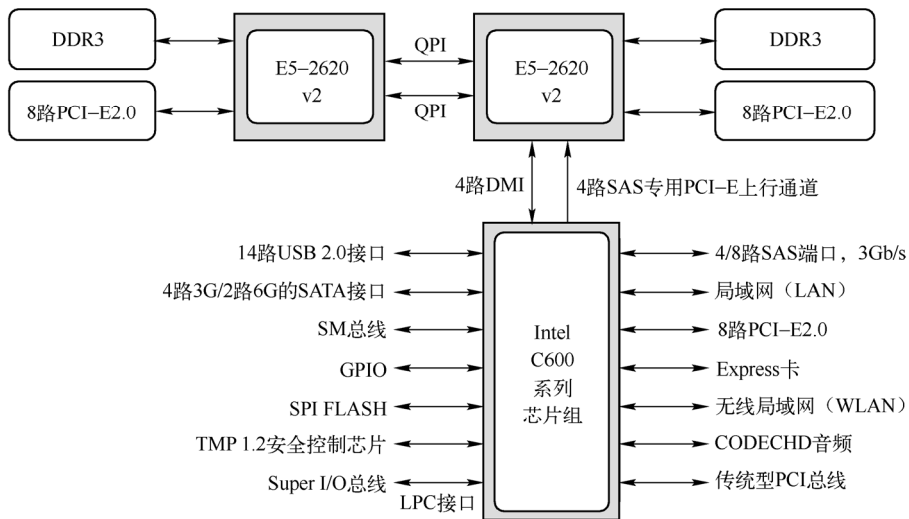


图 1-8 惠普 ProLiant DL300 系列小型机的硬件架构

系架构布局相比，该小型机仅使用了一个芯片组，这是因为其使用的处理器（E5-2620 v2）已集成了绝大多数北桥芯片的功能，如内存控制和显示核心等，因此只需保留类似于南桥芯片组（Intel C600 芯片组）的功能即可。实际上在服务器中这种架构非常具有代表性。

在这种双处理器机架式服务器中，两个处理器（Intel Xeon E5-2620 v2，22 nm 工艺，64 位 Ivy Bridge 微架构，6 核 12 线程，2.1 GHz 主频，共享 15 MB 三级缓存）之间通过 QPI（Quick Path Interconnect）总线互连。主处理器通过 DMI 总线与 Intel C600 系列芯片组互连。此外，芯片组提供 14 路 USB 2.0 接口、SM（系统管理）总线、GPIO（General Purpose Input Output，通用输入/输出端口）、TMP 安全控制芯片、Super I/O 总线、普通 PCI 总线、4/8 路带宽为 3 Gbps 的 SAS（Serial attached SCSI）磁盘接口，以及 8 路 PCI-E 2.0 总线和 PCI Express 卡插槽、无线局域网接口和传统的音频输出接口等。

Intel C600 系列芯片组提供的接口、插槽、总线能对存储系统和外围设备等进行扩展，构建一个高性能的企业级专用小型计算机服务器。这种体系架构中设置了 2 个处理器，因此也可以看成一个多处理器系统，且两个处理器都有自己的专有存储器，共享主存。这种模式也可以看成一种紧密耦合型多处理器系统。

（3）超级计算机的硬件体系架构

对于计算机的硬件体系架构，除了微型计算机的单处理器、南-北桥架构和小型计算机的多处理器、单桥架构外，常见的还有一种采用多处理器分布式架构的超级计算机体系架构。图 1-9 展示了中国国防科学技术大学研制的 TH-2（天河二号）超级计算机的系统架构模型。

总体架构模式上，天河二号分成 4 个集群：管理集群、计算集群、存储集群和通信集群。各功能集群间通过基于 TH Express-2 的通信主干网络形成“胖树”拓扑互连结构，网络中的数据通过光电混合传输及专有网络协议（Proprietary Network Protocol, PNP）进行高速的可靠传输。通信集群由 13 个通信机构成，每个机柜安装一台 576 端口大型路由器和各级交换机若干，各计算节点通过 PCI-E 2.0 标准协议接入通信集群。用于前端处理器的管理集群共 8 个大型机柜，各节点包含 4096 颗 FT-1500 处理器（国防科学技术大学研制，16 核 SPARC V9 架构，40 nm 工艺，1.8 GHz 主频，峰值性能 144 GFLOPS）。管理集群的主要功能是管理整个计算机系统，包括故障诊断、大型计算任务在计算节点上的分配和调度，以及权限和通信资源的分配、管理。

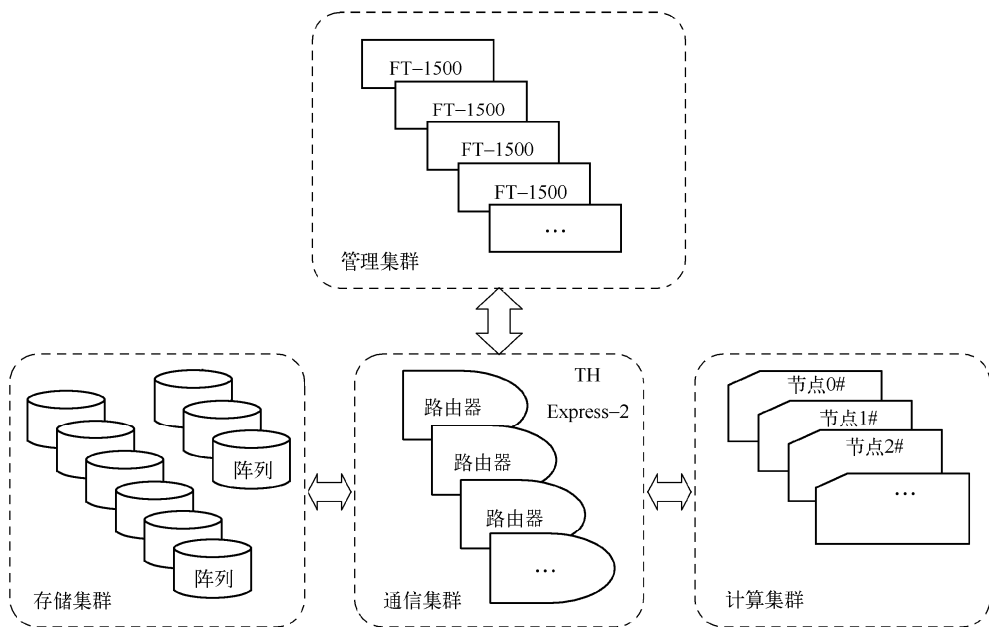


图 1-9 天河二号超级计算机的系统架构

存储集群包括 24 个存储机柜，采用磁盘阵列技术，总容量高达 12.4 PB。

计算集群是整个系统的计算核心，由 125 个机柜组成，每个机柜容纳 4 个机框，每个机框容纳 16 块主板，每个主板部署有 2 个计算节点，共计 16000 个计算节点，每个节点拥有独立的 64 GB 内存，节点使用中央处理器及协处理器的架构布局。单块主板上包含 APU 和 CPM 两个模块，APU 承载 5 块 Xeon Phi 31S1P(61 核，使用时屏蔽掉 4 核)协处理器，CPM 部分承载 1 块 Xeon Phi 31S1P +4 颗 Xeon E5-2692 v2 (12 核)，APU 和 CPM 之间以 CPU 集成的 PCI-E 3.0 16X 接口进行连接，但受 Xeon Phi31S1P 限制，实际仅支持 PCI-E 2.0 16x，单通道传输率可高达 10 Gbps。

天河二号内部计算节点的结构如图 1-10 所示。天河二号的每个计算节点由 2 个 Xeon E5-2692 主处理器和 3 个 Xeon Phi 31S1P 协处理器组成，主处理器之间通过 QPI 标准互连。每个主处理器因集成了内存控制器，所以可连接 32 GB 容量的 DDR3 内存。第一主处理器与 PCH 芯片组之间仍然通过 DMI 标准互连，主处理器与协处理器之间通过 PCI-E 2.0 16x 标准进行连接。

此外，主处理器通过终端网络接口控制器 (NIC) 与其他计算节点互连。管理节点通过主板上的千兆以太网接口和 PCH 芯片组对各主处理器进行管理，同时通过 PCH 芯片组、可编程逻辑器件 (CPLD) 利用智能平台管理总线 (IPMB) 实现对各协处理器的管理。

2013 年 6 月，天河二号以其峰值计算速度 54.9 PFLOPS (千万亿次浮点运算，Linpack 实测) 和持续速度 33.86 PFLOPS 超越美国的泰坦超级计算机(峰值 27.11 PFLOPS, 持续 17.59 PFLOPS)，成为当年世界上计算能力最快的超级计算机，并一举跃登 TOP 500 榜首。

天河二号由 16000 个计算节点组成，各节点之间通过网络连接。各节点具备一个完整计算机的功能，有自己的处理器和内存，且各节点共享同一个外存集群。此外，各节点是同级对等的，任何一个节点发生故障都不会影响到其他节点的正常运行，系统和管理集群的控制下，可以实现自动重构。

松散耦合型多处理机系统的特点是，用通信网络连接各节点，节点之间以中断方式传输信息包。每个节点内有一个 CPU、一个局部存储器，可能还有独自的外存或其他外设。通信网络的连

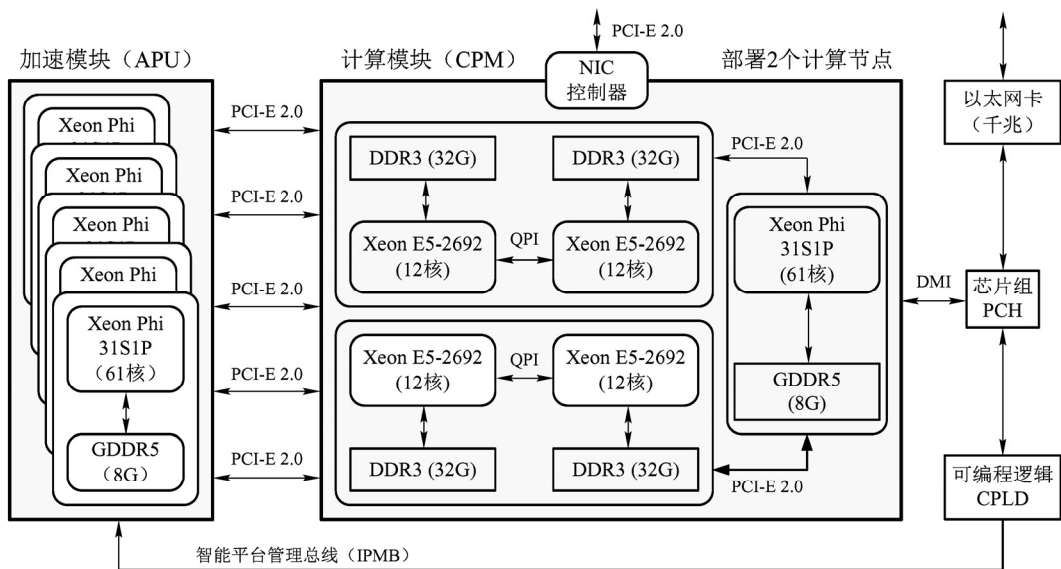


图 1-10 天河二号超级计算机的计算节点

接可以有星型、总线型、环型等模式。每个节点是一个计算机模块，模块内用局部总线连接了一个处理器 CPU、局部存储器 LM、一些 I/O 设备等。消息传送系统 (Message Transfer System, MTS) 将若干这样的节点连接成多机系统。MTS 可以是比较简单的通信总线，也可以是比较复杂的互连网络，每个节点通过通信接口 CAS 与 MTS 相连。天河二号超级计算机是一种典型的松散耦合型多处理机系统。

1.3.2 软件系统

计算机软件通常包含各类程序和文件。一般来讲，程序是用字符和符号描述的某种算法的实现过程，最终体现为机器指令序列，要被计算机硬件执行。文件则是对编制程序和运行、维护程序所作的说明，如对编程工具与运行环境的说明、帮助提示信息及其他参考信息等。在计算机系统中，各种软件有机地组合起来，构成了软件系统。从软件的功能和配置的角度出发，软件可以分为系统软件、应用软件两大类。

1. 系统软件

系统软件作为计算机系统的一种基础软件，其承载的主要功能是负责系统任务的调度和管理，提供程序的运行环境和开发环境，向用户提供各种系统级服务，以保证计算机系统能够正常、状态良好地运行。从软件配置的角度来看，系统软件是用户所使用的计算机系统的一部分，通常它也作为系统资源（软设备）提供给用户使用。常见的系统软件如下：

(1) 操作系统 (Operation System, OS)

操作系统是软件系统的核心，负责管理和控制计算机系统的硬件资源、软件资源和运行的程序。操作系统是用户和计算机之间的接口，为用户提供了软件的开发环境和运行环境。

操作系统一般由处理机调度、存储管理、设备管理、文件系统、作业调度等模块组成。这些模块相互配合，以尽可能优化的方式来调度管理系统的硬件、软件资源，合理地组织工作流程，提高系统效率。例如，在具备多道程序运行环境的计算机系统中，需要任务调度模块对处理机的分配和运行进行有效管理；需要存储管理模块为各程序分配内存资源、提供存储保护等；需要设