

# 第 3 章

## 计算机体系结构

### 3.1 计算机系统的组成

#### 3.1.1 图灵模型

1936年,阿兰·图灵提出了一种抽象的计算模型——图灵机(Turing Machine)。如图3-1所示。图灵的基本思想是用机器来模拟人们用纸笔进行数学运算的过程,他根据这样的过程构造出了一台假想的机器,该机器由以下几个部分组成。

(1) 一条无限长的纸带 TAPE。纸带被划分为一个接一个小格子,每个格子上包含一个来自有限字母表的符号,字母表中有一个特殊的符号□表示空白。纸带上的格子从左到右依次被编号为 $0, 1, 2, \dots$ ,纸带的右端可以无限延伸。

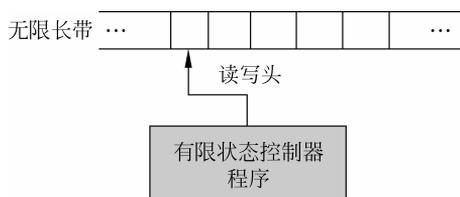


图 3-1 图灵模型

(2) 一个读写头 HEAD。该读写头可以在纸带上左右移动,它能读出当前所指的格子上的符号,并能改变当前格子上的符号。

(3) 一套控制规则 TABLE。它根据当前机器所处的状态以及当前读写头所指的格子上的符号来确定读写头下一步的动作,并改变状态寄存器的值,令机器进入一个新的状态。

(4) 一个状态寄存器。它用来保存图灵机当前所处的状态。图灵机的所有可能状态的数目是有限的,并且有一个特殊的状态称为停机状态。

这个机器的每一部分都是有限的,但它有一个潜在的无限长的纸带,因此这种机器只是一个理想的设备。图灵认为这样的一台机器就能模拟人类所能进行的任何计算过程。

#### 3.1.2 冯·诺依曼模型

20世纪30年代中期,美国科学家冯·诺依曼大胆地提出:抛弃十进制,采用二进制作为数字计算机的数制基础。同时,他还提出预先编制计算程序,然后由计算机来按照人们事前制定的计算顺序来执行数值计算工作。人们把冯·诺依曼的这个理论称为冯·诺依曼体系结构,也称做普林斯顿体系结构。从ENIAC到当前最先进的计算机都采用的是冯·诺依曼体系结构。所以冯·诺依曼是当之无愧的电子计算机之父。

冯·诺依曼结构处理器具有以下几个特点:

- ① 必须有一个存储器；
- ② 必须有一个控制器；
- ③ 必须有一个运算器，用于完成算术运算和逻辑运算；
- ④ 必须有输入设备和输出设备，用于进行人机通信。另外，程序和数据统一存储并在程序控制下自动工作。

为了完成上述的功能，计算机必须具备五大基本组成部件，包括：输入数据和程序的输入设备；记忆程序和数据的存储器；完成数据加工处理的运算器；控制程序执行的控制器；输出处理结果的输出设备。

### 3.1.3 计算机系统的工作原理

计算机系统包括硬件系统和软件系统两大部分。硬件是指组成计算机的各种物理设备，由五大功能部件组成，即运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备。这五大部分相互配合，协同工作，如图 3-2 所示。

计算机的工作原理为：首先由输入设备接收外界信息（程序和数），控制器发出指令将数据送入（内）存储器，然后向内存发出取指令命令；在取指令命令下，程序指令逐条送入控制器；控制器对指令进行译码，并根据指令的操作要求，向存储器和运算器发出取数、取数命令和运算命令，经过运算器计算并把计算结果存在存储器内；最后在控制器发出的取数和输出命令的作用下，通过输出设备输出计算结果。

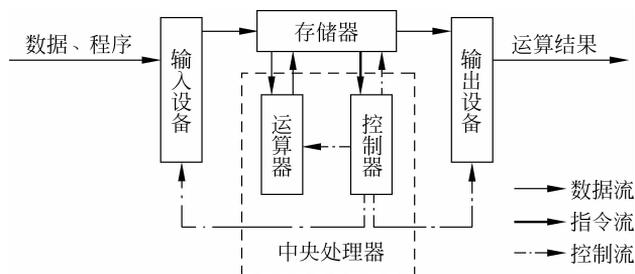


图 3-2 五大功能部件

### 3.1.4 微型计算机的结构

#### 1. 主机

主机指计算机用于放置主板及其他主要部件的容器（mainframe）。通常包括 CPU、内存、硬盘、光驱、电源以及其他输入输出控制器和接口，如 USB 控制器、显卡、网卡、声卡等。位于主机箱内的部件通常称为内设，而位于主机箱之外的通常称为外设（如显示器、键盘、鼠标、外接硬盘、外接光驱等）。计算机主机的结构如图 3-3 所示。

计算机主机的组成部分如下。

- (1) 机箱（装主机配件的箱子，没有机箱不影响使用）。



图 3-3 计算机主机

- (2) 电源(主机供电系统,没有电源不能使用主机)。
- (3) 主板(连接主机各个配件的主题,没有主板主机不能使用)。
- (4) CPU(主机的心脏,负责数据运算。不可缺少,属于重要设备)。
- (5) 内存(存储主机调用文件,不可缺少)。
- (6) 硬盘(主机的存储器,独立主机不可缺少)。
- (7) 声卡(某些主板集成)。
- (8) 显卡(某些主板集成,显示器控制)。
- (9) 网卡(某些主板集成,没有网卡计算机无法访问网络,是联络其他主机的渠道)。
- (10) 光驱(没有光驱,主机无法读取光碟上的文件)。
- (11) 一些不常用设备,如视频采集卡、电视卡、SCSI 卡等。

## 2. 外设

外部设备简称“外设”,是指连在计算机主机以外的硬件设备。对数据和信息起着传输、转送和存储的作用,是计算机系统中的重要组成部分。按照功能的不同,大致可以分为输入设备、显示设备、打印设备等,如图 3-4 所示。



图 3-4 计算机外设

(1) 键盘鼠标。它是人或外部与计算机进行交互的一种装置,用于把原始数据和处理这些数据的程序输入到计算机中。

(2) 显示器。它是计算机的输出设备之一,它可以显示用户的操作和计算结果。目前计算机显示设备主要有 CRT 显示器、LCD 显示器、等离子显示器和投影机。

(3) 打印机。打印机也是计算机的输出设备之一,它将计算机的运算结果或中间结果以人所能识别的数字、字母、符号和图形等,依照规定的格式印在纸上的设备。

## 3.2 计算机组成原理

### 3.2.1 系统总线

#### 1. 系统总线概述

系统总线,又称内总线或板级总线,用来连接微机各功能部件而构成一个完整微机系统。系统总线上传送的信息包括数据信息、地址信息、控制信息,因此,系统总线包含三种不同功能的总线,即数据总线(Data Bus, DB)、地址总线(Address Bus, AB)和控制总线(Control Bus, CB),如图 3-5 所示。

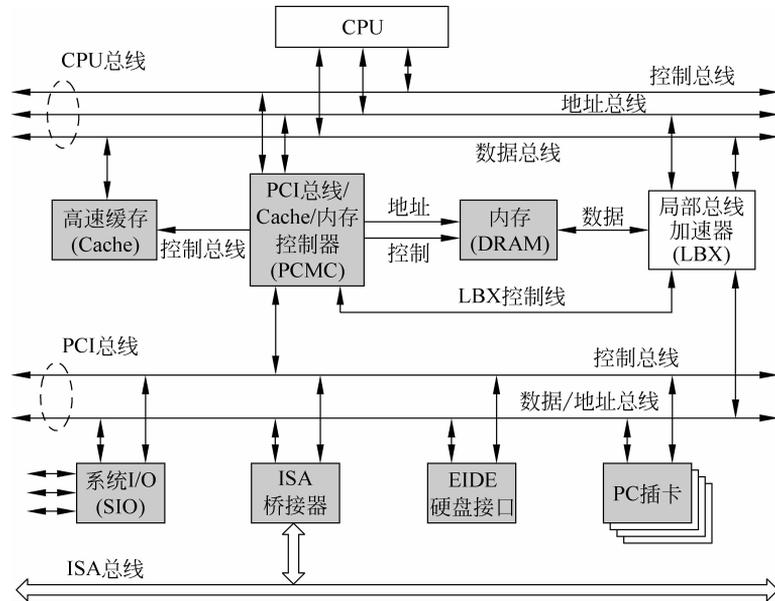


图 3-5 系统总线

## 2. 工作原理

CPU 通过系统总线对存储器的内容进行读写,同样通过总线,实现将 CPU 内数据写入外设或由外设读入 CPU 的功能。总线就是用来传送信息的一组通信线。微型计算机通过系统总线将各部件连接到一起,实现了微型计算机内部各部件间的信息交换。一般情况下,CPU 提供的信号需要经过总线。系统总线按照传递信息的功能来分,分为地址总线、数据总线和控制总线。这些总线提供了微处理器(CPU)与存储器、输入输出接口部件的连接线。可以认为,一台微型计算机就是以 CPU 为核心,其他部件全“挂载”在与 CPU 相连接的系统总线上的设备。

## 3. 功能分类

(1) 数据总线。用于传送数据信息。数据总线是双向三态形式的总线,既可以把 CPU 的数据传送到存储器或输入输出接口等其他部件,也可以将其他部件的数据传送到 CPU。数据总线的位数是微型计算机的一个重要指标,通常与微处理的字长相一致。例如 Intel 8086 微处理器字长 16 位,其数据总线宽度也是 16 位。需要指出的是,数据的含义是广义的,它可以是真正的数据,也可以是指令代码或状态信息,有时甚至是一个控制信息。因此,在实际工作中,数据总线上传送的并不一定仅仅是真正意义上的数据。

(2) 地址总线。是专门用来传送地址的,由于地址只能从 CPU 传向外部存储器或输入输出端口,所以地址总线总是单向三态的,这与数据总线不同。地址总线的位数决定了 CPU 可直接寻址的内存空间大小,比如 8 位微机的地址总线为 16 位,则其最大可寻址空间为  $2^{16} = 64\text{KB}$ 。16 位微型机的地址总线为 20 位,其可寻址空间为  $2^{20} = 1\text{MB}$ 。一般来说,若地址总线为  $n$  位,则可寻址空间为  $2^n\text{B}$ 。举例来说,一个 16 位元宽度的位址总线(通常在 1970 年和 1980 年早期的 8 位元处理器中使用)可以寻址的内存空间为  $2^{16} = 65536 = 64\text{KB}$

的地址,而一个 32 位元位址总线(通常在 2004 年的 PC 处理器中使用)可以寻址的内存空间为  $4\ 294\ 967\ 296=4\text{GB}$  的位址。

(3) 控制总线。用来传送控制信号和时序信号。控制信号中,有的是微处理器送往存储器 and 输入输出接口电路的,如读/写信号,片选信号、中断响应信号等;也有是其他部件反馈给 CPU 的,如中断申请信号、复位信号、总线请求信号、设备就绪信号等。因此,控制总线的传送方向由具体控制信号而定,一般是双向的。控制总线的位数要根据系统的实际控制需要而定。实际上控制总线的具体情况主要取决于 CPU。

## 3.2.2 CPU

### 1. CPU 定义

中央处理器(Central Processing Unit,CPU)是一台计算机的运算核心和控制核心。CPU、内部存储器和输入/输出设备是电子计算机三大核心部件。其功能主要是解释计算机指令以及处理计算机软件中的数据。CPU 由运算器、控制器、寄存器及实现它们之间联系的数据总线、控制总线及状态总线构成。差不多所有 CPU 的运作原理可分为 4 个阶段——提取(Fetch)、解码(Decode)、执行(Execute)和写回(Writeback),并执行指令。所谓的计算机的可编程性主要是指对 CPU 的编程。

### 2. 工作原理

它把指令分解成一系列的微操作,然后发出各种控制命令,执行微操作系列,从而完成一条指令的执行。指令是指计算机规定执行操作的类型和操作数的基本命令。指令是由一个字节或者多个字节组成,其中包括操作码字段、一个或多个有关操作数地址的字段以及一些表征机器状态的状态字和特征码。有的指令中也直接包含操作数本身。

### 3. 基本结构

CPU 包括运算逻辑部件、寄存器部件和控制部件,其基本结构如图 3-6 所示。

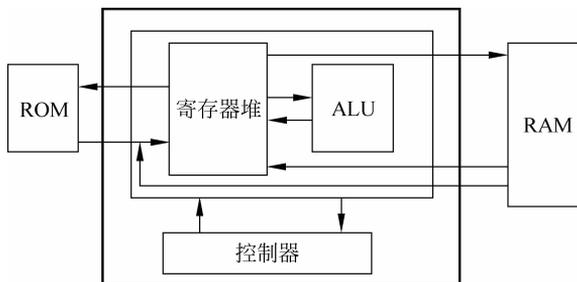


图 3-6 CPU 结构

(1) 运算逻辑部件:可以执行定点或浮点的算术运算操作、移位操作以及逻辑操作,也可执行地址的运算和转换。

(2) 寄存器部件:包括通用寄存器、专用寄存器和控制寄存器。

(3) 控制部件:主要负责对指令译码,并且发出为完成每条指令所要执行的各个操作

的控制信号。

### 3.2.3 存储器

#### 1. 存储器概述

存储器(Memory)是计算机系统中的记忆设备,用来存放程序和数据。计算机中的全部信息,包括输入的原始数据、计算机程序、中间运行结果和最终运行结果都保存在存储器中。它根据控制器指定的位置存入和取出信息。有了存储器,计算机才有记忆功能,才能保证正常工作。存储器按用途可分为主存储器(内存)和辅助存储器(外存),也有分为外部存储器和内部存储器的分类方法。外存通常是磁性介质或光盘等,能长期保存信息。内存指主板上的存储部件,用来存放当前正在执行的数据和程序,但仅用于暂时存放程序和数据,关闭电源或断电后,数据会丢失。

#### 2. 存储器的构成

构成存储器的存储介质,目前主要采用半导体器件和磁性材料。存储器中最小的存储单位就是一个双稳态半导体电路或一个 CMOS 晶体管或磁性材料的存储元,它可存储一个二进制代码。由若干个存储元组成一个存储单元,然后再由许多存储单元组成一个存储器。一个存储器包含许多存储单元,每个存储单元可存放一个字节(按字节编址)。每个存储单元的位置都有一个编号,即地址,一般用十六进制表示。一个存储器中所有存储单元可存放数据的总和称为它的存储容量。假设一个存储器的地址码由 20 位二进制数(即 5 位十六进制数)组成,则可表示  $2^{20}$ ,即 1M 个存储单元地址。每个存储单元存放一个字节,则该存储器的存储容量为 1MB。

存储器的主要功能是存储程序和各种数据,并能在计算机运行过程中高速、自动地完成程序或数据的存取。存储器是具有“记忆”功能的设备,它采用具有两种稳定状态的物理器件来存储信息。这些器件也称为记忆元件。在计算机中采用只有两个数码 0 和 1 的二进制来表示数据。记忆元件的两种稳定状态分别表示为 0 和 1。日常使用的十进制数必须转换成等值的二进制数才能存入存储器。计算机中处理的各种字符,例如英文字母、运算符号等,也要转换成二进制代码才能存储和操作。

#### 3. 存储器的用途

根据存储器在计算机系统中所起的作用,可分为主存储器、辅助存储器、高速缓冲存储器、控制存储器等。为了解决对存储器要求容量大、速度快、成本低三者之间的矛盾,目前通常采用多级存储器的体系结构,即使用高速缓冲存储器、主存储器和外存储器。如图 3-7 所示。

高速缓冲存储器:高速存取指令,数据存取速度快,但存储容量小。

主存储器:内存存放计算机运行期间的大量程序和数,存取速度较快,存储容量不大。

外存储器:外存存放系统程序和大型数据文

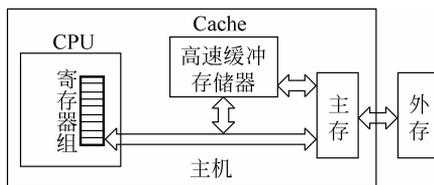


图 3-7 多级存储器体系结构

件及数据库,存储容量大,成本低。

按照与 CPU 的接近程度,存储器分为内存储器与外存储器,简称内存与外存。内存储器又常称为主存储器(简称主存),属于主机的组成部分;外存储器又常称为辅助存储器(简称辅存),属于外部设备。CPU 不能像访问内存那样直接访问外存,外存要与 CPU 或 I/O 设备进行数据传输,必须通过内存进行。在 80386 以上的高档微机中,还配置了高速缓冲存储器(Cache),这时内存包括主存与高速缓存两部分。对于低档微机,主存即内存。

#### 4. 常用存储器

##### 1) 硬盘

硬盘(Hard Disc Drive)是电脑主要的存储媒介之一,由一个或者多个铝制或者玻璃制的碟片组成。这些碟片外覆盖有铁磁性材料。绝大多数硬盘都是固定硬盘,被永久性地密封固定在硬盘驱动器中。硬盘的物理结构如下。

(1) 磁头:是读写合一的电磁感应式磁头。

(2) 磁道:当磁盘旋转时,磁头若保持在一个位置上,则每个磁头都会在磁盘表面划出一个圆形轨迹,这些圆形轨迹就叫做磁道。

(3) 扇区:磁盘上的每个磁道被等分为若干个弧段,这些弧段便是磁盘的扇区,每个扇区可以存放 512B 的信息,磁盘驱动器在向磁盘读取和写入数据时,要以扇区为单位。

(4) 柱面:硬盘通常由重叠的一组盘片构成,每个盘面都被划分为数目相等的磁道,并从外缘的 0 开始编号,具有相同编号的磁道形成一个圆柱,称之为磁盘的柱面。

##### 2) 光盘

光盘以光信息作为存储物的载体来存储数据,采用聚焦的氢离子激光束处理记录介质的方法来存储和再生信息。激光光盘分不可擦写光盘(如 CD-ROM, DVD-ROM 等)和可擦写光盘(如 CD-RW, DVD-RAM 等)。高密度光盘(Compact Disc)是近代发展起来不同于磁性载体的光学存储介质。常见的 CD 光盘非常薄,只有 1.2mm 厚,分为 5 层,包括基板、记录层、反射层、保护层、印刷层等。

##### 3) U 盘

U 盘,全称“USB 闪存盘”,英文名是 USB flash disk。它是一个 USB 接口的不需要物理驱动器的微型大容量移动存储产品,可以通过 USB 接口与电脑连接,实现即插即用。U 盘的称呼最早来源于朗科公司生产的一种新型存储设备,名曰“优盘”,它使用 USB 接口与电脑进行连接,之后,U 盘的资料即可与电脑进行交换。

U 盘最大的优点是小巧便于携带、存储容量大、价格便宜、性能可靠。闪存盘体积很小,仅大拇指般大小,重量极轻,一般在 15g 左右,特别适合随身携带。一般的 U 盘容量有 1GB、2GB、4GB、8GB、16GB、32GB、64GB 等,价格多为几十元。内存盘中无任何机械式装置,抗震性能极强。另外,闪存盘还具有防潮防磁、耐高低温等特性,安全可靠性能很好。

##### 4) ROM

ROM 是只读内存(Read-Only Memory)的简称,是一种只能读出事先所存数据的固态半导体存储器。其特性是一旦储存了资料就无法再将之改变或删除。ROM 通常用在不需要经常变更资料的电子或电脑系统中,并且资料不会因为电源关闭而消失。

### 5) RAM

RAM 是随机存取存储器(Random Access Memory)的简称。它是存储单元的内容可按需随意取出或存入,且存取的速度与存储单元的位置无关的存储器。这种存储器在断电时将丢失其存储的内容,故主要用于存储短时间使用的程序。按照存储信息的不同,随机存储器又分为静态随机存储器(Static RAM,SRAM)和动态随机存储器(Dynamic RAM,DRAM)。

## 3.2.4 输入输出系统

### 1. 输入输出系统控制方式

#### 1) 程序查询方式

这种方式是在程序控制下 CPU 与外设之间交换数据。CPU 通过 I/O 指令询问指定外设当前的状态,如果外设准备就绪,则进行数据的输入或输出,否则 CPU 就等待。重复上述过程进行循环查询。

程序查询方式是一种程序直接控制方式,这是主机与外设间进行信息交换的最简单的方式,输入和输出完全是通过 CPU 执行程序来完成的。一旦某一外设被选中并启动后,主机将查询这个外设的某些状态位,看其是否准备就绪。若外设未准备就绪,主机将再次查询;若外设已准备就绪,则执行一次 I/O 操作。

这种控制方式简单,但外设和主机不能同时工作,各外设之间也不能同时工作,系统效率很低。因此,它仅适用于外设的数目不多、对 I/O 处理的实时要求不那么高、CPU 的操作任务比较单一、并不很忙的情况。

这种方式的优点是结构简单,只需要少量的硬件电路即可实现。缺点是由于 CPU 的速度远远高于外设,因此通常处于等待状态,工作效率很低。

#### 2) 中断方式

中断是主机在执行程序过程中,遇到突发事件而中断程序的正常执行转而去对突发事件进行处理,待处理完成后返回原程序继续执行的方式。中断过程包括中断请求、中断响应、中断处理和中断返回。

计算机中有多个中断源,有可能在同一时刻有多个中断源向 CPU 发出中断请求,这种情况下 CPU 按中断源的中断优先级顺序进行中断响应。

中断处理方式的优点是显而易见的,它不但为 CPU 省去了查询外设状态和等待外设就绪所花费的时间,提高了 CPU 的工作效率,还满足了外设的实时要求。其缺点是对系统的性能要求较高。

#### 3) 直接存储器访问方式(DMA)

DMA 方式指高速外设与内存之间直接进行数据交换,不通过 CPU 并且 CPU 不参加数据交换的控制。工作过程如下:外设发出 DMA 请求,CPU 响应 DMA 请求,把总线让给 DMA 控制器,在 DMA 控制器的控制下通过总线实现外设与内存之间的数据交换,如图 3-8 所示。

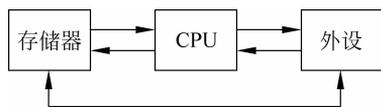


图 3-8 直接存储器访问方式

图 3-8 所示。

DMA 最明显的一个特点是它不是用软件而是采用一个专门的控制器来控制内存与外设之间的数据交流,无须 CPU 介入,大大提高了 CPU 的工作效率。

## 2. 输入输出设备

### 1) 输入设备

常用的输入设备有键盘、鼠标、扫描仪等。

(1) 键盘的分类。按键盘的键数分,键盘可分为 83 键、101 键盘、104 键盘、107 键盘等;按键盘的形式分,键盘可分为有线键盘、无线键盘、带托键盘和 USB 键盘等。

(2) 鼠标的分类。按照工作原理,鼠标器可分为机械式鼠标、光电式鼠标两类。按鼠标的形式分,鼠标可分为有线鼠标和无线鼠标。

(3) 扫描仪。扫描仪通过光源照射到被扫描的材料上来获得材料的图像。常用的扫描仪有台式、手持式和滚筒式三种。分辨率是扫描仪的很重要的特征,常见的扫描仪的分辨率有  $300 \times 600$ 、 $600 \times 1200$  等。

### 2) 输出设备

常用的输出设备有显示器、打印机等。

(1) 显示器:按使用的器件分类可分为阴极射线管显示器(CRT)、液晶显示器(LCD)和等离子显示器;按显示颜色可分为彩色显示器和单色显示器。显示器的主要性能指标有像素、分辨率、屏幕尺寸、点间距、灰度级、对比度、帧频、行频和扫描方式等。

(2) 打印机:打印机分为针式打印机、喷墨打印机、激光打印机、热敏打印机 4 种。

### 3) 其他输入输出设备

其他常用的输入输出设备有数码相机 DC、数码摄像机 DV、手写笔、投影机、扫描仪、绘图仪等。

## 3. I/O 接口

### 1) I/O 接口的功能

I/O 接口使主机和外设能够按照各自的形式传输信息,如图 3-9 所示。

### 2) 几种接口

(1) 显示卡:主机与显示器之间的接口。

(2) 硬盘接口:包括 IDE 接口、EIDE 接口、ULTRA 接口和 SCSI 接口等。

(3) 串行接口:COM 端口,也称串行通信接口。

(4) 并行接口:是一种打印机并行接口标准。

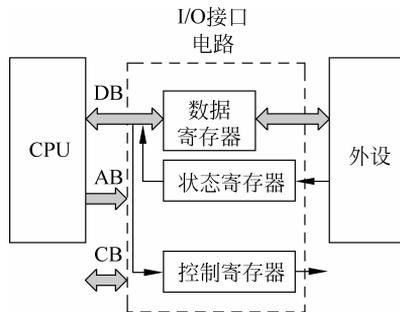


图 3-9 I/O 接口

## 3.3 计算机系统分类

### 3.3.1 超级计算机

#### 1. 定义

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。超级计

算机通常是指由数百数千甚至更多的处理器(机)组成的、能计算普通 PC 和服务器不能完成的大型复杂课题的计算机。

## 2. 发展历史

现代巨型机经历了如下三个发展阶段。

1) 第一阶段: 有美国的 ILLIAC—IV (1973 年)、STAR—100 (1974 年) 和 ASC (1972 年) 等巨型机。ILLIAC—IV 是一台采用 64 个处理单元在统一控制下进行处理的阵列机, 后两台都是采用向量流水处理的向量计算机。

2) 第二阶段: 1976 年研制成功的 CRAY—1 机标志着现代巨型机进入了第二阶段。这台计算机设有向量、标量、地址等通用寄存器, 有 12 个运算流水部件, 指令控制和数据存取也都流水线化; 机器主频达 80MHz, 每秒可获得 8000 万个浮点结果; 主存储器容量为 100~400 万字(每字 64 位), 外存储器容量达  $10^9 \sim 10^{11}$  字; 主机柜呈圆柱形, 功耗达数百千瓦; CRAY—1 采用氟里昂冷却。

3) 第三阶段: 20 世纪 80 年代以来, 采用多处理机(多指令流多数据流 MIMD) 结构、多向量阵列结构等技术的第三阶段的更高性能的巨型机相继问世。例如, 美国的 CRAY—XMP、CDC CYBER205, 日本的 S810/10 和 20、VP/100 和 200、S×1 和 S×2 等巨型机, 均采用超高速门阵列芯片烧结到多层陶瓷片上的微组装工艺, 主频高达 50~160MHz 以上, 最高速度有的可达每秒 5~10 亿次浮点计算, 主存储器容量为 400~3200 万字节, 外存储器容量达  $10^{12}$  字节以上。

## 3. 超级计算机技术

新一代的超级计算机采用涡轮式设计, 每个刀片就是一个服务器, 服务器间能实现协同工作, 并可根据应用需要随时增减。单个机柜的运算能力可达 460.8 千亿次/秒, 理论上协作式高性能超级计算机的浮点运算速度为 100 万亿次/秒, 实际高性能运算速度测试的效率高达理论值的 84.35%。通过先进的架构和设计, 它实现了存储和运算的分离, 确保了用户数据、资料在软件系统更新或 CPU 升级时不受任何影响, 保障了存储信息的安全, 真正实现了保持长时、高效、可靠的运算并易于升级和维护的优势。

2010 年 10 月世界超级计算机排名, 天津国家超级计算机中心的天河—1A 第一名, 速度为每秒 2.5 千万亿次。2011 年由日本政府出资、富士通制造的巨型计算机“K Computer”已经从中国手中夺回运算速度排行榜第一的宝座, 其当前运算速度为每秒 8 千万亿次, 而到 2012 年完全建成时, 其运算速度将达到每秒一万亿亿次。

## 4. 未来之争

中国首台千万亿次超级计算机“天河一号”2010 年荣登世界运转速度最快计算机的宝座后, 美国宣布将在 2012 年公布名为“巨人(Titan)”的超级计算机, 并以更快的运转速度超过中国“天河一号”。美国新一代“巨人”超级计算机的计算速度可达每秒 2 万万亿次。另外, IBM 公司也计划公布名为“红杉(Sequoia)”的超级计算机, 运行速度同样可达到每秒 2 万万亿次。新的世纪, 中国、日本和美国的超级计算机之争已经开始。