

第3章 计算机硬件系统组成及工作原理

3.1 图灵机模型与冯·诺依曼计算机模型

计算机是一种能够接收信息，按照事先存储在其内部的程序对输入信息进行加工处理，并产生输出结果的高度自动化的数字电子设备。半个多世纪以来，计算机已经发展成为一个庞大的家族，尽管各种类型的计算机在性能、规模和应用等方面都存在着较大的差异，但是它们的基本组成结构和工作原理却是相同的。要认识计算机，追根溯源，就不得不提及两大计算机基础模型：图灵机和冯·诺伊曼计算机。

3.1.1 图灵机——计算机的理想模型

什么是通用计算机？通用计算机（即自动计算系统）又是如何工作的？20世纪30年代，英国数学家阿兰·麦席森·图灵在伦敦权威的数学杂志上发表了一篇划时代的重要论文《可计算数字及其在判断性问题中的应用》。在文中，图灵超出了一般数学家的思维范畴，完全抛开数学上定义新概念的传统方式，独辟蹊径，构造出一台完全属于想象之中的“计算机”，数学家们把它称为“图灵机”（见图3-1）。图灵机奠定了计算机的理论基础，正是因为有了图灵机模型，才发明了人类有史以来最伟大的工具——计算机。因此，图灵被称为计算机科学之父。为了纪念这位伟大的科学家，计算机界最高荣誉奖被定名为图灵奖。

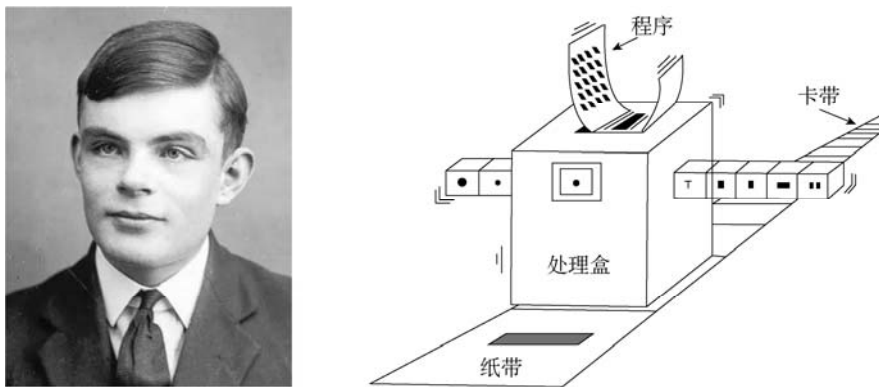


图3-1 阿兰·麦席森·图灵（左）和图灵机（右）

图灵机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。图灵认为，计算就是计算者（人或机器）对一条两端可无限延长的纸带上的一串0或1，执行指令，一步一步

地改变纸带上的 0 或 1，经过有限步骤，最后得到一个满足预先规定的符号串的变换过程。

图 3-2 非常简明且形象地阐释了图灵机中指令、程序及自动执行的基本思想。

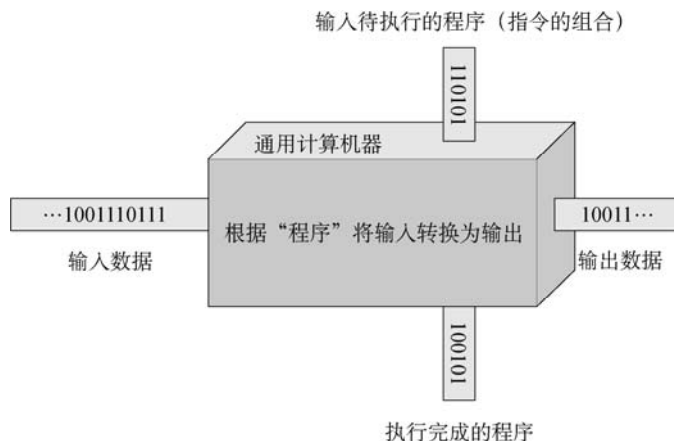


图 3-2 图灵机原理示意图

指令、程序及其执行的概念及示例说明如下。

(1) 数据被制成一串 0 和 1 的纸带，输入到计算机中，如数据“1110111001…”。

(2) 机器可对输入纸带执行一些基本动作，如“翻转 0 为 1”“翻转 1 为 0”“前移一位”“停止”。

(3) 机器对基本动作的执行是由指令来控制的，机器按照指令的控制选择执行哪一个动作，指令也可以用 0 和 1 来表示。例如，01 表示“翻转 0 为 1”（当输入为 1 时不变）；10 表示“翻转 1 为 0”（当输入为 0 时不变）；11 表示“前移一位”；00 表示“停止”。

(4) 关于输入如何变为输出的控制，可以用指令编写一个程序来完成，如“10, 11, 01, 11, 01, 11, 10, 11, 00…”（请注意，为便于阅读，程序的两条指令中间增加了逗号以示区分，实际上是不存在的）。

(5) 机器能够按程序中的指令顺序读取指令，读一条指令执行一条指令，然后再读指令执行指令，直到程序结束，由此实现自动计算。这段程序的执行过程描述为“10 表示翻转 1 为 0；11 表示前移一位；01 表示翻转 0 为 1；11 表示前移一位；01 表示翻转 0 为 1；11 表示前移一位；10 表示翻转 1 为 0；11 表示前移一位；00 表示停止。不管纸带上是什么，其都将输出 0110”。

可以看出，这就是一个最简单的计算机模型，它将控制输入转换为输出的规则（程序与指令）用 0 和 1 表达，将待处理的数据（输入）及处理结果（输出）也用 0 和 1 表达。所谓的处理，即是对 0 和 1 的变换，它可以用机械系统实现，也可以用电子系统实现，当然也可由人来实现。

图灵机给我们的一个启示是，让我们思考一个复杂系统是怎样实现的。系统可被认为是由基本动作（注：基本动作是容易实现的）及基本动作的各种组合所构成（注：多变的、复杂的动作可由基本动作的各种组合来实现）。因此实现一个系统仅需实现这些基本动作及实现一个控制基本动作组合与执行次序的机构。对基本动作的控制就是指令；而指令的各种组合及其次序就是程序。系统可以按照“程序”控制“基本动作”的执行以实现复杂的功能。图灵又把程序看作将输入数据转换为输出数据的一种变换函数，这种变换函数可以一步一步



地来实现。进一步，数据、指令和程序都可以用 0 和 1 表达，因此也就都能被计算。

图灵机被公认为是现代计算机的理论原型，所以可以说，图灵启发和影响了他之后的整个计算机发展史。

3.1.2 冯·诺依曼计算机——现代计算机的结构框架

依据图灵机的思想，美籍匈牙利数学家冯·诺依曼（见图 3-3）设计并制造出了历史上第一台电子计算机。其设计计算机的思想对现代计算机的发展产生了重要影响，以至于人们称其为“现代计算机之父”，现在的普通计算机被称为“冯·诺依曼体系结构”计算机。

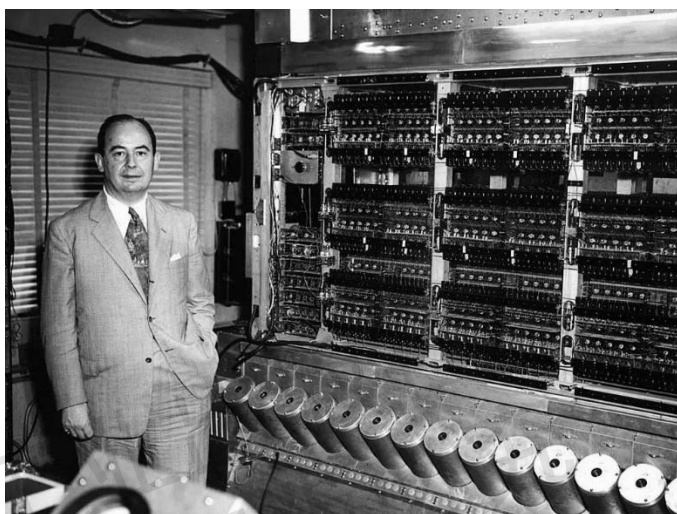


图 3-3 冯·诺依曼

“冯·诺依曼体系结构”计算机的基本思想是存储程序，即“将指令和数据以同等地位事先存于存储器中，可按地址寻访，机器可从存储器中自动读取指令和数据，并实现连续自动执行”。它将存储和执行分别进行实现，解决了执行速度（快）与输入/输出速度（慢）的匹配问题，即如果“输入一条指令执行一条指令，边输入边执行”，则计算机的速度就提升不了，而如果将“大批指令/程序事先存于存储器中，由机器自动读取并执行”，则计算机可在短时间内执行大量的程序。

基于该基本思想，“冯·诺依曼体系结构”计算机具有以下几个特点：

- 必须有一个存储器，用于存储数据和程序；数据和程序以二进制形式存储。
- 必须有一个控制器，用于实现程序的控制。
- 必须有一个运算器，用于完成算术和逻辑运算。
- 必须有输入和输出设备，用于进行人机通信。

因此，“冯·诺依曼体系结构”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、记忆数据和程序的存储器、完成数据加工处理的运算器、控制程序执行的控制器及输出处理结果的输出设备。

3.2 认识计算机硬件系统

计算机硬件系统是计算机系统中由电子类、机械类和光电类器件组成的各种计算机部件和设备的总称，是看得见、摸得着的一些实实在在的物体，是组成计算机的物理实体，是计算机完成各项工作的物质基础。计算机的硬件系统一直沿袭着冯·诺依曼的框架结构，即由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备这五大部分组成，其中运算器和控制器共同组成了中央处理器（CPU）。其基本结构如图3-4所示。

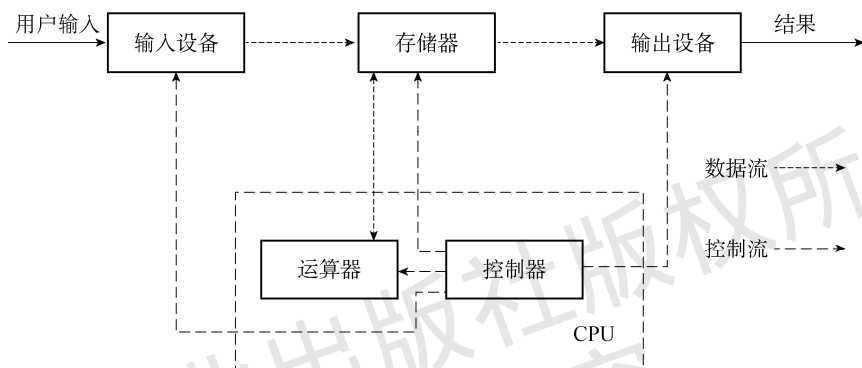


图 3-4 计算机硬件系统的基本结构

3.2.1 中央处理器

中央处理器（Central Processing Unit, CPU）是计算机进行运算和控制的核心部件，由运算器和控制器组成。

（1）运算器

运算器又称算术逻辑单元（Arithmetic Logic Unit, ALU），是计算机处理数据形成信息的加工厂，它的主要功能是对二进制数码进行算术或逻辑运算。运算器主要由一个加法器、若干个寄存器和一些控制线路组成，其性能指标的优劣是衡量整个计算机性能指标的重要因素之一。计算机所完成的全部运算都是在运算器中进行的，根据指令规定的寻址方式，运算器从存储器或寄存器中取得需要进行运算的数据（也称为操作数），进行计算后，送回到指令所指定的寄存器中。运算器的核心部件是加法器和若干个寄存器，加法器用于进行运算，寄存器用于存储参加运算的各种数据及运算后的结果。

各种计算机的运算器的结构可能有所不同，但它们最基本的逻辑构件是相同的，即都由算术逻辑单元、通用寄存器、累加寄存器、数据缓冲寄存器、程序状态字寄存器等组成。

（2）控制器

控制器是计算机的神经中枢，其负责从存储器中取出指令，并对指令进行译码，根据指令的要求，按时间的先后顺序，负责向其他各部件发出控制信号，保证各部件协调一致地工作，逐步有序完成各项任务。控制器指挥整个系统的各个部件自动、协调地工作，主要由指



令寄存器、译码器、程序计数器、操作控制器和时序节拍发生器组成。

中央处理器是计算机系统的核心部件，对整个计算机系统的运行极为重要，它主要有以下 4 个方面的功能。

① 指令控制。若要计算机解决某个问题，程序员要编制解题程序，而程序是指令的有序集合。程序执行的顺序不能任意颠倒，必须按程序规定的顺序执行。因此，严格控制程序的执行顺序是 CPU 的首要任务。

② 操作控制。一条指令的执行要涉及计算机中的若干个部件，控制这些部件协同工作要靠各种操作信号组合起来工作。因此，CPU 将操作信号传送给被控部件，并能检测其他部件发送来的信号，是协调各工作部件按指令要求完成规定任务的基础。

③ 时序控制。要使计算机有条不紊地工作，对各种操作信号的产生时间、稳定时间、撤销时间及相互之间的关系都应有严格的要求。对操作信号施加时间上的控制，称为时序控制。只有进行严格的时序控制，才能保证各功能组合构成有机的计算机系统。

④ 数据处理。要完成具体的任务，就要进行数值数据的算术运算、逻辑变量的逻辑运算及其他非数值数据（如字符、字符串）的处理。这些运算和处理称为数据处理。数据处理是完成程序功能的基础，因此它是 CPU 的根本任务。

3.2.2 存储器

在计算机存储体系中，性能、速度、价格三者之间要实现平衡，即存储速度越快，价格就会越贵。因为价格的限制，在存储器中，就得有个恰当的搭配，以达到价格与性能的平衡。因此，计算机内部构建了四级分级存储结构，如图 3-5 所示。存储器是计算机记忆或暂存数据的部件，是计算机的记忆装置。计算机中的全部信息，包括原始的输入数据、经过初步加工的中间数据及最后处理完成的有用数据都要存放在存储器中。

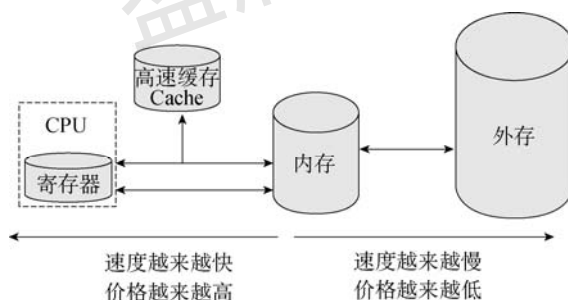


图 3-5 计算机系统的四级分级存储结构

(1) 寄存器

寄存器是中央处理器内的组成部分，是有限存储容量的高速存储部件，其读写速度跟 CPU 的运行速度基本匹配，但因为性能优越，所以造价昂贵，数量有限。它们可用来暂存指令、数据和地址。在中央处理器的控制部件中，包含的寄存器有指令寄存器（IR）和程序计数器（PC）。在中央处理器的算术及逻辑部件中，寄存器有累加器（ACC）。

(2) 高速缓存 Cache

高速缓冲 Cache 存在于内存与 CPU 之间，是数据交换的缓冲区，也是 RAM [Random-Access Memory，随机访问存储器，由静态存储芯片（SRAM）组成，容量比较小但速度比

内存快得多，接近于 CPU 的速度]。

为什么需要高速缓存呢？由于 CPU 和内存访问性能的差距非常大。为了弥补两者之间的性能差异，充分利用 CPU，现代 CPU 中引入了高速缓存（CPU Cache）。当需要读取数据时，会首先从高速缓存中查找需要的数据，如果找到了则直接执行，找不到的话则从内存中找。由于高速缓存的运行速度比内存快得多，故缓存的作用就是帮助硬件更快地运行。

（3）内存储器

内存储器简称内存或主存。内存可以和 CPU 直接交换信息，用来存放当前运行的数据和程序。按存储器的读写功能，内存可分为两类：随机存取存储器（Random Access Memory, RAM）和只读存储器（Read Only Memory, ROM）。

随机存取存储器既允许读取也允许写入信息，用于存放用户程序和数据。但是 RAM 只能在电源电压正常时工作，其中的信息可以随时改写，一旦断电，记录的信息将全部自动消失。通常所说的内存主要是指 RAM。

只读存储器是一种只能读出、不能写入的存储器，用于存放那些固定不变的、不需要修改的程序。ROM 也必须在电源电压正常时工作，但是断电后，其中存储的信息不会消失。

（4）外存储器

外存储器简称外存或辅存。外存一般只与内存进行信息交换，用来长期存放暂时不用的文件和数据，计算机系统绝大多数信息存储在外存中。

内存的特点是存取速度快，但容量小、价格高；外存的特点是容量大、价格低，但存取速度慢。

3.2.3 输入/输出系统

输入/输出系统（Input and Output System, I/O）是完成信息输入和输出过程的系统，包括多种类型的输入/输出设备（Peripheral Equipment, 外围设备）及连接这些设备与 CPU、存储器进行通信的接口电路，是计算机硬件系统的重要组成部分。其中，输出设备是实现计算机系统与人（或其他系统）之间进行信息交换的设备。通过输入设备可以把程序、数据、图像甚至语音送入计算机中，通过输出设备可以把计算机的处理结果显示或打印出来呈现给用户。输入/输出设备是通过其接口（Interface）实现与主机交换信息的，输入/输出设备的接口接收来自 CPU 的命令，发出执行该命令的控制信号，以控制输入/输出设备完成输入或输出操作。输入或输出操作的实现可有多种控制策略，如程序查询方式、中断控制方式、直接存储器存取方式及外部处理机方式等。

3.2.4 微型计算机硬件系统组成及主要性能指标

微型计算机简称“微机”，也通常称为“个人计算机（Personal Computer, PC）”，是由大规模集成电路组成的、体积较小的电子计算机。它是以微处理器为基础，配以内存储器及输入/输出（I/O）接口电路和相应的辅助电路而构成的裸机，特点是体积小、灵活性大、价格便宜、使用方便。

自 1981 年美国 IBM 公司推出第一代微型计算机 IBM-PC 以来，微机以其执行结果精确、处理速度快、性价比高、轻便小巧等特点迅速进入社会各个领域，且技术不断更新、产



品快速换代，从单纯的计算工具发展成为能够处理数字、符号、文字、语言、图形、图像、音频、视频等多种信息的强大多媒体工具。如今的微机产品无论从运算速度、多媒体功能、软硬件支持还是易用性等方面都比早期产品有了很大飞跃。便携机更是以使用便捷、无线联网等优势越来越多地受到移动办公人士的喜爱，一直保持着高速发展的态势。

1. 微型计算机的硬件组成

微型计算机在系统结构和基本工作原理上与其他计算机没有本质区别（见图 3-6）。根据外观特征及功能的不同，微型计算机可分为主机和外部设备两大部分。主机安装在主机箱内，在主机箱内有主板、CPU、内存条、显卡、声卡、网卡和电源等。外部设备就是用电缆线通过主板与计算机相连的那些设备，包括键盘、鼠标、扫描仪等输入设备及显示器、打印机、音箱等输出设备。

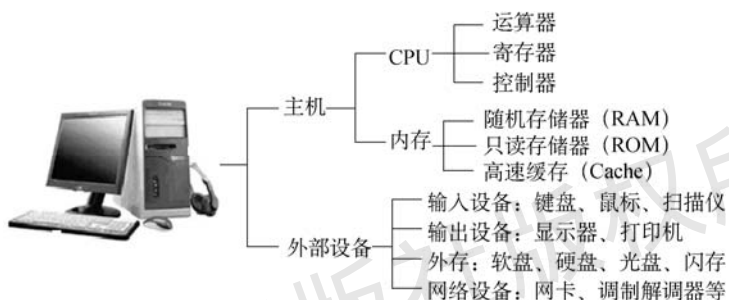


图 3-6 微型计算机硬件系统构成

(1) 主机

主机包括 CPU 和内存，连接在主板上，由主机箱来容纳。主机箱内包括了微型计算机中大部分的硬件设备，一般都有主板、CPU、内存、硬盘、显卡等部件，如图 3-7 所示。



图 3-7 微机的机箱内部结构

① 主板：主板是 PC 中各个部件工作的一个平台，它把 PC 的各个部件紧密连接在一起，各个部件通过主板进行数据传输。也就是说，PC 中重要的“交通枢纽”都在主板上，它工作的稳定性影响着整机工作的稳定性。主板一般为矩形电路板，上面安装了组成计算机的主要电路系统，微机在正常运行时对系统内、外存储设备和其他 I/O 设备的操控都必须通

过主板来完成。因此，微机的整体运行速度在相当程度上取决于主板的性能。图 3-8 展示了一块主板的物理结构。

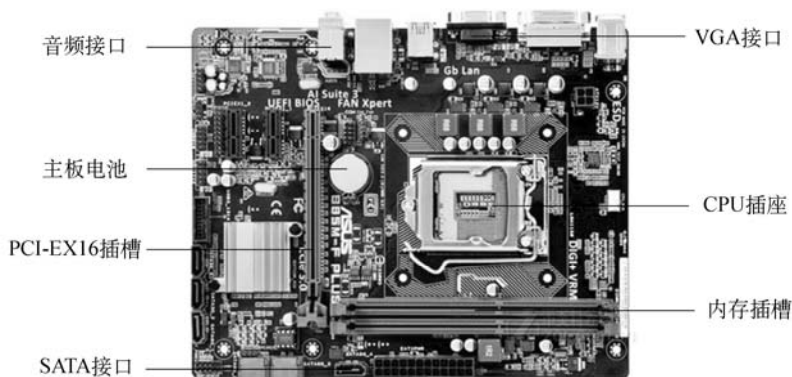


图 3-8 主板

② CPU：CPU（Central Processing Unit）即中央处理器，是一台计算机的运算核心和控制核心。其功能主要是解释计算机指令及处理计算机软件中的数据。作为整个系统的核心，CPU 也是整个系统最高的执行单元，因此 CPU 已成为决定 PC 性能的核心部件，很多用户都以它为标准来判断 PC 的档次，图 3-9 所示为 CPU 市场两大芯片厂商 Intel（英特尔）和 AMD（超威半导体）公司生产的酷睿系列和锐龙系列中央处理器。



图 3-9 AMD 锐龙系列（左）和 Intel 酷睿系列（右）中央处理器

③ 内存：内存又叫内部存储器（RAM），属于电子式存储设备，它由电路板和芯片组成，特点是体积小、速度快、有电可存、无电清空，即 PC 在开机状态时内存中可存储数据，关机后将自动清空其中的所有数据。

微机的内存与 CPU 一起被安装在计算机的主板上。内存芯片被做成插件形式，即内存条，可以方便地插到主板上的内存插槽中。用户可以根据自己的需要组合不同容量的内存空间。图 3-10 展示了一块内存条的物理结构，内存条上的内存颗粒用于存储数据，直接关系到内存的性能。内存条下方黄褐色的触点被称为金手指。在工作时，该区域会与内存插槽内部的触点接触。若发生接触不良情况，则极有可能导致计算机无法开机、蓝屏或死机。金手指中间部分的缺口为防呆口，主要用于内存安装时的方向校对，内存条只有按照唯一的方向才能全部插入内存插槽中，这种设计被用于微机系统许多连接装置上，使得非专业人士在扩展自己的系统时非常容易操作而不会导致安装错误。

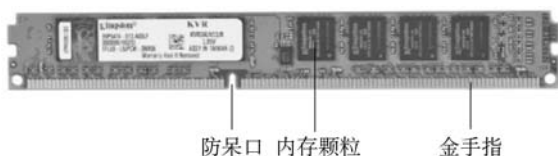


图 3-10 内存条

④ 硬盘：硬盘属于外部存储器，存放着操作系统、用户程序和数据。硬盘容量的大小决定着微型计算机存储数据的能力。微型计算机启动后，操作系统与用户的程序就不断地存取其中的内容，所以其性能优劣与微型计算机的性能息息相关。早期在微型计算机上使用的硬盘的接口主要为 IDE 接口，后来逐渐转变为 SATA 接口，并且容量也大大增加。图 3-11 所示为市场上常见的机械硬盘和固态硬盘。



图 3-11 机械硬盘（左）和固态硬盘（右）

⑤ 显卡：显卡（见图 3-12）又叫显示适配器或图形加速卡，主要负责在工作时与显示器配合输出图形和文字，是连接显示器和个人 PC 主板的重要元件，是“人机对话”的重要设备之一。显卡的作用是在显示驱动的控制下，负责接收 CPU 输出的显示数据，按照显示格式进行变换并存储在显示存储器中，然后把显示存储器中的数据以显示器所要求的方式输出到显示器。显卡的生产厂家和型号繁多，区分显卡的依据是其上的显示芯片，即图形处理器（Graphic Processing Unit, GPU）。目前，主流的 GPU 制造商为美国的 NVIDIA 公司和加拿大的 ATI 公司。

⑥ 声卡：声卡是组成多媒体计算机必不可少的一个组成部分，是实现声波/数字信号相互转换的一种硬件设备，如图 3-13 所示。声卡的基本功能是把来自话筒、磁带、光盘的原始声音信号加以转换，输出到耳机、扬声器、扩音机、录音机等设备，或通过音乐设备数字接口（MIDI）使乐器发出美妙的声音。



图 3-12 显卡

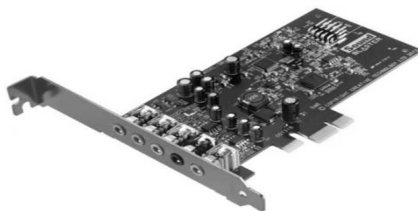


图 3-13 声卡

⑦ 网卡：网卡（见图 3-14）是工作在数据链路层的网络组件，是局域网中连接计算机和传输介质的接口，不仅能实现与局域网传输介质之间的物理连接和电信号匹配，还涉及帧的发送与接收、帧的封装与拆封、介质访问控制、数据的编码与解码及数据缓存的功能等。网卡的作用是充当 PC 与网线之间的桥梁，它是用来建立局域网并连接到 Internet 的重要设备之一。

⑧ 电源：电源（见图 3-15）是 PC 中不可缺少的供电设备，属于微机系统的功率部件。计算机中每个部件的电能源都依靠电源，它是保证计算机硬件正常工作的前提。电源的作用是将 220V 交流电转换为 PC 中使用的 5V、12V、3.3V 直流电，其性能的好坏，直接影响其他设备工作的稳定性，进而会影响整机的稳定性。



图 3-14 网卡



图 3-15 电源

（2）外部设备

外部设备就是用电缆线通过主板与计算机相连的其他设备，主要包括键盘、鼠标、扫描仪等输入设备和显示器、打印机等输出设备。

① 键盘：键盘（Keyboard）是最常用也是最主要的输入设备，如图 3-16 所示。通过键盘，我们可以将英文字母、数字、标点符号等输入到计算机中，从而向计算机发出命令、输入数据等。键盘由一组按阵列方式装配在一起的按键开关组成，每按下一个键相当于接通了相应的开关电路，把该键的代码通过接口电路送入计算机中。当快速大量输入字符，主机来不及处理时，先将这些字符的代码送往内存的键盘缓冲区，再从该缓冲区中取出进行分析处理。键盘接口电路多采用单片微处理器来控制整个键盘的工作，如上电时对键盘的自检、键盘扫描、按键代码的产生、发送及与主机的通信等。目前，键盘与主机连接的接口类型主要有两种：PS/2 和 USB。



图 3-16 键盘

② 鼠标：鼠标（见图 3-17）是计算机显示系统纵横坐标定位的指示器，因形似老鼠而得名“鼠标”，英文名“Mouse”。当人们移动鼠标时，PC 屏幕上就会有一个箭头指针跟着移



动，并可以很准确地指到想指的位置，快速地在屏幕上定位，它是人们使用 PC 不可缺少的部件之一。按照接口划分，鼠标分为两大类：有线鼠标和无线鼠标，有线鼠标一般有 3 种接口，分别是 RS232 串接口、PS/2 接口和 USB 接口；无线鼠标主要为红外线和蓝牙（Bluetooth）鼠标。



图 3-17 有线鼠标（左）和无线鼠标（右）

③ 扫描仪：扫描仪（Scanner）是一种高精度的光电一体化的高科技产品，是将各种形式的图像信息输入计算机的重要工具，如图 3-18 所示。图片、照片、胶片到各类图纸图形及文稿资料都可以用扫描仪输入到计算机中，进而实现对这些图像形式的信息的处理、管理、使用、存储、输出等。配合文字识别软件，扫描仪还可以将扫描后的文稿转换成文本信息。目前，扫描仪已广泛应用于各类图形图像处理、出版、印刷、广告制作、办公自动化、多媒体、图文数据库、图文通信、工程图纸输入等众多领域。



图 3-18 扫描仪



图 3-19 显示器

④ 显示器：显示器（见图 3-19）又叫监视器（Monitor），是计算机最主要的输出设备，是人与计算机交流的主要渠道。显示器有两根电缆线，一根是电源线，用于为显示器供电；另一根是信号线，与主机中的显卡或图形加速卡相连接，用于传输主机送来的信息。显示器的种类有很多，如阴极射线显示器（Cathode Ray Tube, CRT）、液晶显示器（Liquid Crystal Display, LCD）、等离子显示器（Plasma Display Panel, PDP）、发光二极管显示器（Light Emitting Diode, LED）等，如今最具实用与商品化的是 CRT 和 LCD。

尺寸和分辨率是显示器的两项重要指标。显示器的尺寸为屏幕从左上到右下的对角线的长度，常用英寸来表示，一般有 19、21、23、27、32 英寸等。分辨率是指显示器屏幕能够

显示的像素数目，分辨率越高，显示的图像越细腻。常见的显示器分辨率为 1920×1080 、 2560×1440 、 3840×2160 等。

⑤ 打印机：打印机（Printer）是计算机的输出设备之一，用于将计算机处理结果打印在相关介质上。与显示器输出相比，打印输出可产生永久性记录，因此打印设备又称为硬复制设备。衡量打印机好坏的指标有3项：打印分辨率、打印速度和噪声。按照工作方式，打印机可分为点阵打印机、针式打印机、喷墨式打印机、激光打印机等，图3-20展示了常见的喷墨式打印机和激光打印机。



图 3-20 喷墨式打印机（左）和激光打印机（右）

2. 微型计算机的主要性能指标

对于一台个人计算机来说，其性能的好坏不是由一项指标决定的，而是由各部分总体配置决定的。衡量微机的性能，主要看以下几个性能指标。

① CPU 主频：CPU 主频即处理器的时钟频率，是处理器内核电路的实际运行频率，一般称为处理器运算时的工作频率，简称主频。主频越高，单位时间内完成的指令数也越多。主频的度量单位为兆赫（MHz）、吉赫（GHz）。

② 外频和倍频：外频是 CPU 的基准频率，单位是 MHz。外频是 CPU 与主板之间同步运行的速度。由于 CPU 工作频率不断提高，一些其他设备（如插卡、硬盘等）受到工艺的限制，不能承受更高的频率，因此限制了 CPU 频率的进一步提高，于是出现了倍频技术。该技术能够使 CPU 内部工作频率变为外部频率的倍数，通过提升倍频而达到提升主频的目的。倍频技术就是使外部设备可以工作在一个较低外频上，CPU 主频是外频的倍数，即主频=外频×倍频。

③ 字长：字长是指处理器一次能够完成二进制运算的位数，如 8 位、16 位、32 位、64 位。它直接关系计算机的计算精度、功能和速度。字长越长，计算精度越高，处理能力越强。为了兼顾精度和硬件代价，许多计算机允许变字长运算，如支持半字长、全字长、双倍字长或多倍字长运算等。

④ 缓存：内部缓存，即通常所说的一级缓存（L1 Cache），是与 CPU 共同封装于芯片内部的高速缓存，也是为了解决 CPU 与主存之间的速度不匹配而采用的一项重要技术。当然，现在很多 CPU 上还有二级缓存（L2 Cache）、三级缓存（L3 Cache），其作用与一级缓存类似。

⑤ 内存容量：内存是 CPU 直接访问的存储器，微机中所有需要执行的程序与需要处理的数据都要先读到内存中。内存容量反映了微机即时存储信息的能力，随着操作系统的升级和应用软件功能的不断增多，对内存的需求容量越来越大。



3.3 计算机的工作原理

计算机的工作方式取决于它的两个基本能力：一是能够存储程序，二是能够自动执行程序。计算机利用存储器（内存）来存放所要执行的程序，CPU 依次从存储器中取出程序中的每一条指令并加以分析和执行，直至完成全部指令任务。这就是计算机的“存储程序”工作原理。下面主要介绍指令的概念及其执行过程。

3.3.1 指令及指令系统

要让计算机完成某个特定任务，则必须运行相应的程序。在计算机内部，程序由一系列指令组成，指令是构成程序的基本单位。

操作码	操作数
-----	-----

图 3-21 指令的格式

指令是能够被计算机识别并执行的二进制编码（也称“机器语言”），它规定了计算机要执行的操作及操作对象所在的位置。在计算机中，每条指令表示一个简单的功能，许多条指令实现了计算机的复杂功能。通常一条指令由两部分组成（见图 3-21）。

操作码是用来指出计算机应当执行何种操作的一串二进制数。例如，加法、减法、乘法、除法、取数、存数等操作，均有相应的二进制编码。操作码的位数决定了操作指令的条数。

操作数用于指出该指令所要操作（处理）的数据或者数据所在的寄存器的地址。如果操作数给出的是地址信息，那么这部分也被称为“地址码”。地址码可以给出若干个地址，如所要处理数据的地址（源操作数地址）、操作结果的存放地址（目的地址）等。地址码可以是 CPU 某个寄存器的地址，也可以是内存存储器的某个单元的地址。

例如，某条 16 位的指令，如图 3-22 所示。

位数	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
指令	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

图 3-22 16 位指令

第 15~12 位为操作码，0110 表示“加”操作。

第 11~6 位为操作数之一地址码，000010 表示寄存器“B”。

第 5~0 位为目标操作数地址码，000100 表示寄存器“A”。

该指令要求进行加法操作，将寄存器 A 中的内容与寄存器 B 中的内容相加，结果存放在寄存器 A 中。

至于一条指令的长度为多少位，哪些位数表示操作类型，哪些位数表示数据信息，哪些位数表示目的地址，不同类型的 CPU 有自己的约定。每种 CPU 有自己能识别的一组指令，一种 CPU 所能识别并执行的全部指令的集合称为该 CPU 的指令系统（Instruction Set）。不同类的 CPU，其指令系统的指令条数有所不同。为了保证 CPU 的兼容性，同一生产厂家在

CPU 更新换代时，都注意保留原来的指令系统，并使数据格式、I/O 系统保持不变，从而确保了软件的向下兼容性。指令系统通常应包含具有以下功能的指令。

- 数据传送指令：在存储器和 CPU 内的寄存器之间传送数据的指令。
- 数据处理指令：包括算术运算指令、逻辑运算指令、浮点运算指令、位（位串）运算指令等。算术运算指令包括加、减、乘、除等指令；逻辑运算指令包括与、或、非、异或等指令；浮点运算指令用于对浮点数进行算术、逻辑、跳转等运算，因为 CPU 对浮点运算的处理大大复杂于整数运算，所以 CPU 中一般会有专门负责浮点运算的浮点运算单元，其运算能力的强弱也是关系到 CPU 的多媒体、3D 图形处理能力的一个重要指标；位运算指令，如左移一位、右移一位，可以改变数据的值，位运算也可以对某一特定的位进行屏蔽和设置等。
- 程序控制指令：包括各种转移指令、子程序调用指令、子程序返回指令、比较指令等。
- 输入/输出指令：在主机和外设之间传递数据的指令，控制外设的工作，读取外设的状态。
- 其他指令：对计算机的硬件进行管理的指令，如堆栈操作指令、多处理器控制指令及停机、空操作等系统指令。

3.3.2 指令的执行过程

在计算机的工作过程中，一条指令的执行过程可以分为 3 个阶段：取指令阶段、分析指令阶段和执行指令阶段。其中部分功能需要由控制器中的程序计数器、指令寄存器及指令译码器等基本组成部分来完成。

（1）取指令阶段

取指令阶段的任务是将指令从内存中取出来并送至指令寄存器保存。

执行过程可简单地描述为：读取程序计数器中的内容（程序计数器中保存的值是将要执行的指令的地址），读取完成后向存储器发出读命令，从与其对应的存储单元中取出指令，通过数据总线送到指令寄存器中，同时程序计数器中的值自动加 1，指向下一个将要执行的指令的地址，为取下一条指令做好准备。

以上操作对任何一条指令来说都是必须要执行的，也称为公共操作。完成取指令阶段任务的时间称为取指周期。

（2）分析指令阶段

取出指令后，机器立即进入分析指令阶段，该阶段由指令译码器完成。指令译码器可以识别和区分不同的指令类型。由于各条指令功能不同，分析阶段的操作也各不相同。如果指令没有操作数，只要根据操作码识别出是哪一条具体的指令即可进入执行阶段。对于带操作数的指令就需要读取操作数。

（3）执行指令阶段

执行指令阶段要完成指令规定的操作，形成运算结果，并将其存储起来。

计算机工作时，CPU 从内存中读取一条指令到 CPU 内执行，执行完后，再从内存中读取下一条指令到 CPU 内执行。CPU 不断地取指令、分析指令、执行指令……直至遇到停机指令或外来的干预为止，如图 3-23 所示。计算机完成一条指令所需要的时间称为一个指令



周期，指令周期越短，指令执行得越快。

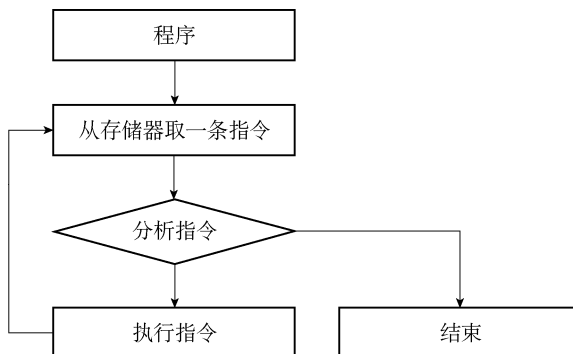


图 3-23 程序执行过程

3.3.3 计算机的基本工作原理

要想实现机器的自动计算，必须先根据题目的要求，编制出求解该问题的计算程序，并通过输入设备将该程序存入计算机的存储器中，再进行后续的程序执行。

本节将通过一个简单的算题实例来说明计算机实现自动计算的基本过程，以便帮助读者理解计算机的基本工作原理。

例如，要求在计算机中计算“ $3+2=?$ ”。要解决这一简单算题，必须先编写出完成这一算题的计算步骤，如表 3-1 所示。我们把该表称为文字形式的计算程序，表中的每一个计算步骤完成一个基本操作（如取数、加法、存数、打印输出等）。为了使计算机能够存储、识别和执行该程序，在输入之前我们需要将其转化为指令形式。转化过程分为两步：

① 根据 3.3.1 节中对指令的介绍可知，每条指令都必须向计算机提供两个信息：一是执行什么操作，二是参与这一操作的数据是什么。相应地，我们按此形式将表 3-1 所示的计算程序进行简化。例如，表 3-1 中的第 1 个计算步骤，该步骤要执行的操作是“取数”，从存储器取到运算器的数据是“3”。简化结果如表 3-2 所示。

表 3-1 计算 $3+2$ 的程序（文字形式）

计算步骤	解题命令
1	从存储器中取出 3 到运算器的 1 号寄存器中
2	从存储器中取出 2 到运算器的 2 号寄存器中
3	在运算器中将 1 号和 2 号寄存器中的数据相加，得到和为 5
4	将结果 5 存入存储器中
5	通过输出设备将结果 5 打印输出
6	停机

表 3-2 简化程序（文字形式）

指令顺序	指令内容	
	执行的操作	操作数
1	取数	3
2	取数	2
3	加法	3, 2
4	存数	5
5	打印	5
6	停机	

② 在计算机中，所有的“操作”都是用二进制代码进行编码的，若假定前述 5 种基本操作的编码如表 3-3 所示，则称“0100”为“取数”操作的操作码，其他 4 个操作码分别为“0010”（加法操作）、“0101”（存数操作）、“1000”（打印操作）、“1111”（停机操作）。在计算机中，数据是以二进制代码表示的，并存放在存储器的预定地址的存储单元中。若假定本题的原始数据 3（等值二进制代码为 0011）、2（等值二进制代码为 0010）及计算结果存放在第 1 至第 3 号存储单元中，如表 3-4 所示，那么表 3-2 所示的计算程序可以改写为如表 3-5 所示程序。该表中已假定 6 条指令分别存放在第 5 至第 10 号存储单元中，且每条指令的内容由操作码（Operation Code）和地址码（Address Code）组成，其中地址码包含存储单元地址（用 D_i 表示）及运算器中寄存器编号（用 R_i 表示）。表 3-5 给出了计算 3+2 的真正计算程序，其含义与表 3-1 给出的最原始的计算程序完全一样，但它能为计算机所存储、识别和执行。

表 3-3 指令操作码表

操作名称	操作码
取数	0100
加法	0010
存数	0101
打印	1000
停机	1111

表 3-4 操作数的存放单元

数的存放地址	存放的数
0001	0011（3）
0010	0010（2）
0011	计算结果



表 3-5 用二进制代码表示的计算程序

指令地址	指令内容		所完成的操作 (用符号表示)
	操作码	地址码	
0101	0100	0001	$R0 \leftarrow (D1)$
0110	0100	0010	$R1 \leftarrow (D2)$
0111	0010	0001	$R0 \leftarrow (R0) + (R1)$
1000	0101	0011	$D3 \leftarrow (R0)$
1001	1000	0011	打印机 $\leftarrow (D3)$
1010	1111		停机

根据上述对数据和指令在存储器中存放地址的假定,可以得到图 3-24 所示的存储器布局。由图 3-24 可知,地址为 0001 至 0011 的存储单元中存放数据(假定用 8 位二进制代码表示),地址为 0101 至 1010 的存储单元中存放指令,第 0100 号存储单元为空。

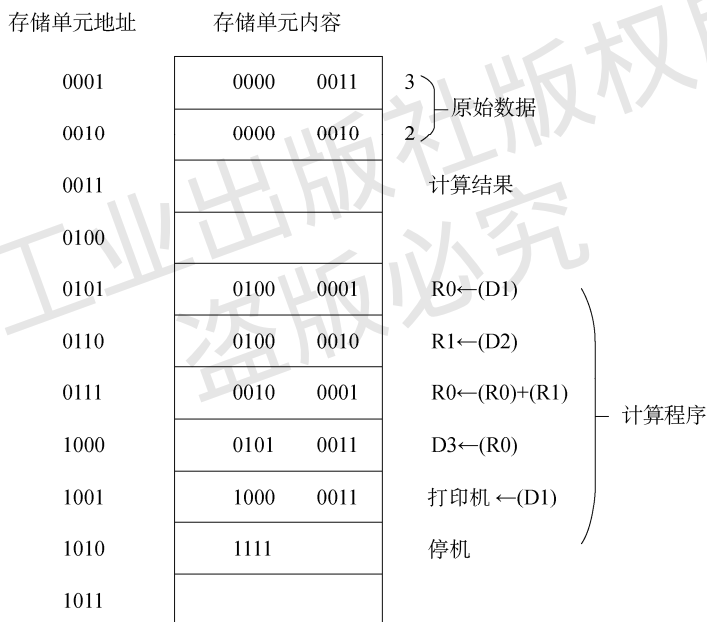


图 3-24 存储器布局

下面结合图 3-24 所示的计算程序,简要说明计算机的基本工作原理。

(1) 根据给定的算式(如 $3+2=?$)编制计算程序,并分配计算程序及数据在存储器中的存放地址(见表 3-4 和表 3-5)。

(2) 用输入设备将计算程序和原始数据输入到存储器的指定地址的存储单元中(见图 3-24)。

(3) 从计算程序的首地址(0101)启动计算机工作,在控制器的控制下完成下列操作:

① 从地址为 0101 的存储单元中,取出第 1 条指令(01000001)送入控制器。控制器识别该指令的操作码(0100),确认它为“取数”指令。

② 控制器根据第1条指令中给出的地址码(0001),发出“读”命令,便从地址为0001(D1)的存储单元中取出数据00000011(十进制数3)送入运算器的R0寄存器中。

至此,第1条指令执行完毕,控制器自动形成下一条指令在存储器中的存放地址,并按此地址从存储器中取出第2条指令,在控制器中分析该条指令要执行的是什么操作,并发出执行该操作所需要的控制信号,直至完成该条指令所规定的操作。以此类推,直到计算程序中的全部指令执行完毕。

由上可知,计算机的基本工作原理可概括如下:

① 计算机的自动计算(或自动处理)过程就是执行一段预先编制好的计算程序的过程。

② 计算程序是指令的有序集合。因此,执行计算程序的过程实际上是逐条执行指令的过程。

③ 指令的逐条执行是由计算机硬件实现的,可顺序完成取指令、分析指令、执行指令所规定的操作,并为取下一条指令准备好指令地址。如此重复操作,直至执行到停机指令。

需指出的是,现代计算机系统提供了强有力的系统软件,计算机的使用者无须再用指令的二进制代码(称为机器语言)进行编程,计算程序在存储器中的存放位置都由计算机的操作系统自动安排。

3.4 计算机硬件构造中的计算思维

计算机的硬件构造中一般都蕴含着许多计算思维的思想。

① 在计算机中的数据和程序均以二进制形式进行存储。二进制的思维即0和1的思维,其中蕴含着以下几个方面的计算思维思想:数值信息和非数值信息均可用0和1表示,均能够被计算;物理世界中的任何事物只要可以通过符号化和数字化转换为0和1,也就能被计算。

② 冯·诺依曼计算机的结构体现了计算思维中的抽象思维:冯·诺依曼计算机由输入设备、存储器、运算器、控制器及输出设备5个部分组成。这一体系结构屏蔽了实现上的诸多细节,明确了现代计算机应该具备的重要组成部分及各部分之间的关系,是计算机系统的抽象模型,为现代计算机的研制奠定了基础。类似的还有图灵机的构造思想。

③ 中央处理器中的“多核处理器”技术体现了计算思维中的并行思维,该技术可以从空间的角度,通过硬件的冗余让不同的处理器并发执行不同的任务,提高系统的运行效率。

3.5 本章小结

计算机是一种用于计算的电子计算机器。经过多年的发展,计算机的功能不断增强,应用不断扩展,系统也变得越来越复杂,但是其基本硬件组成及工作原理却变化不大。



本章首先从计算机的两大基础模型入手，简要介绍了计算机的构造思想及基本组成框架，接着详细介绍了计算机的硬件组成及功能。在此基础上，通过指令系统和指令执行过程的学习，再结合实际算例解读计算机实现自动计算的基本过程，从而使读者能够更好地理解计算机的“存储程序”工作原理。最后，通过计算机硬件构造中的计算思维案例来进一步加深读者对计算思维的认识。

思考题

1. 冯·诺依曼机的主要特征是什么？是否有局限性？
2. 简述计算机的基本工作原理。
3. 计算机的主要性能指标有哪些？
4. 列举常见的输入/输出设备。
5. 以你对计算机的理解，简述现代的计算机能做什么和不能做什么。
6. 描述一下你对未来计算机的设想。
7. 计算机硬件构造中的计算思维还有哪些？
8. 请简述计算机系统分级存储器机制，这样做的目的是什么？