

计算机组成原理

(修订本)

俸远祯 阎慧娟 罗克露 编



电子工业出版社

J563/53

计算机组成原理

(修订本)

俸远祯 阎慧娟 罗克露 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍计算机的组成原理、逻辑实现、设计方法,以及相互连接构成整机系统的有关问题。全书共分七章:第一章概述计算机系统的基本组成、层次结构与硬件系统组织;第二章介绍数据信息的表示方法、运算方法及运算器组织;第三章介绍存储系统的工作原理与组织;第四章介绍指令格式、寻址方式与指令设置;第五章讨论CPU组织的有关问题,并通过一台模型机系统地介绍总体设计、指令流程,组合逻辑控制器与微程序控制器的原理与设计;第六章介绍基本的输入输出设备;第七章讨论输入/输出子系统的构成,即总线、接口、中断、DMA、通道与IOP等。

本书可作为高校计算机专业《计算机组成原理》课教材,也可供从事计算机专业的工程技术人员参考。

书 名:计算机组成原理(修订本)

编 者:俸远祯 阎慧娟 罗克露

责任编辑:吴明卒

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:北京市顺义县天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036 发行部电话:68279077

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:26.25 字数:638千字

版 次:1996年4月第1版 1999年9月第7次印刷

书 号: ISBN 7-5053-3356-9
TP·1289

定 价:28.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全国提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的；其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的；其三是经过质量调查，在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系由全国工科电子类专业教材《计算机》教材编审委员会评选择优，推荐出版，作为《计算机组成原理》（本科）课程的教材，编写与审定均按照计算机教材编审委员会审定的编写大纲进行。在拟定编写大纲时，参考了1990年全国《计算机组成原理》课程研讨会制定的推荐大纲。编写时参考了《IEEE/ACM 计算 91 教程》要求。

本书以1985年出版的《计算机组成原理》（俸远祯、阎慧娟编）为基础，修订而成。在文字上几乎全部重新编写，内容上也作了大幅度的修改与补充，进一步体现了以模型机为背景、建立整机概念、适当辐射到实用机型的编写方针。在CPU组织一章中，提出了一种较规整的模型机，系统地介绍了设计方法，重点讲解指令流程，以组合逻辑控制和微程序控制两种方式产生微操作命令序列，然后简要介绍几种典型CPU。在外存储器、I/O设备、中断、DMA、接口、总线等方面，以常用微机系统技术为背景，进行模型化，并结合介绍了磁盘适配器、显示器适配器、打印机适配卡、键盘接口等设备控制器与接口实例。在介绍存储系统组织、I/O子系统时，适当注意了整机系统的用户级、操作系统级、设备控制与操作级几个层次。全书力求突出两条基本线索：信息（数据、控制）的数字化表示，信息的传送及其控制方法。

本课程的参考教学时数为80~90学时。本书内容比教学时数所允许的份量稍多一些，可供选取或自学。以模型体现的基本原理，具有相对稳定性；所举的实例，则可根据技术发展适当更新。在教学顺序上，可按照编写顺序讲授，即计算机如何运算、如何存储信息、如何执行指令序列、如何连接I/O子系统以构成整机系统；也可将存储系统一章放在CPU组织之后讲授，即先建立CPU整机概念（运算器、控制器），再发展为主机与系统；或者将存储系统一章分为两部分，主存储器部分在CPU之前讲，外存部分在CPU之后讲，使外存储器与I/O子系统成为一体。

本书的第一章、第二章、第五章（5.9节除外）由俸远祯编写；第三章、第七章由阎慧娟编写；第四章、第五章的5.9节、第六章由罗克露编写；全书由俸远祯统稿。胡正家教授担任主审，他始终热情关心和指导了本书的编写过程，细致地审阅了书稿，提出了许多宝贵而重要的意见。责任编辑杨成忠教授对本书的编写给予了热情的指导和帮助。在编写过程中，还得到了电子科技大学计算机系有关领导和老师们的关怀和支持，谨向他们表示诚挚的感谢。

虽然编者从事《计算机组成原理》课教学工作多年，但我们深知自己的水平有限，而计算机技术日新月异，对书中的错误和不足，恳切希望广大读者批评指正。

编 者
1995年6月

第一章 概 论

学习《计算机组成原理》课程的目的之一，是建立对计算机系统的整机概念。在本章中，我们将分三步描述计算机系统的组成，并阐明三个重要的基本概念：即存储程序与诺依曼体制、信息的数字化表示、计算机系统的层次结构。

首先，通过一个简单框图说明计算机的基本组成，围绕存储程序工作方式这一核心，总结诺依曼体制的基本点。计算机是处理信息的系统，信息的数字化表示是计算机工作机制的基本出发点，由此派生出计算机的一系列特点。

计算机系统是一个硬件和软件的综合体，人们常采用层次结构观点去描述系统组成与功能，按层次结构去分析与设计计算机系统。本章在简要说明系统的硬、软件组成之后，将介绍两种较常用的层次结构模型。

对计算机系统的完整了解需要通过一系列专业课程才能完成，而本课程的任务则侧重于：以单机系统为对象，阐述计算机系统的硬件组成。在〈概论〉这一章中，我们先简要地描述常见的硬件系统结构，各主要部件的功能任务；在今后分别讨论各组成部件与设备时，能始终持有一个整机概念。

1.1 计算机系统的基本组成与特点

1.1.1 电子数字计算机的基本组成

图 1.1-1 以粗框图的形式表示出数字计算机的基本硬件组成，典型的数字计算机硬件由五大部分组成，即运算器、存储器、控制器、输入设备、输出设备。

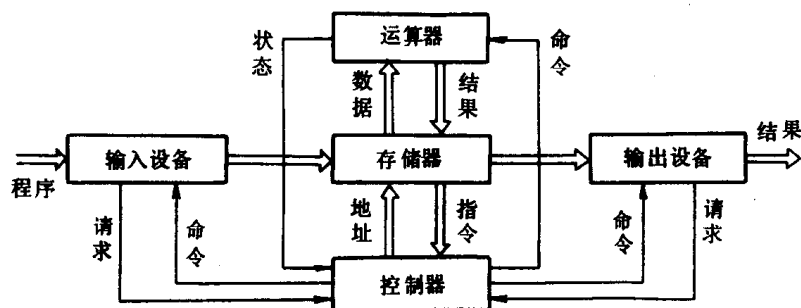


图 1.1-1 数字计算机的简单框图

要用计算机完成某一计算，或解决某一特定任务，必须事先编制程序。它告诉计算机需要做哪些事，按什么步骤去做，并提供所要处理的原始数据。一件事往往要分步去做，每一步要求计算机执行的操作命令称为一条指令。计算机最终执行的程序包含指令序列和相关的原始数据。

编好的程序需要通过输入设备送入计算机的存储器中。最常见也是最基本的输入设备

是键盘。使用键盘可将程序键入计算机，如同使用打字机一样。

存储器按一定顺序存放程序（指令与数据），计算处理所获得的中间结果与最终结果也作为数据放在存储器中。由于计算机需要分步地执行指令，相应地存放在存储器中的指令是逐条地被取出，予以分析、执行，所需的数据也是逐个地取出，予以运算处理。这就要求将存储器分成若干单元，并给每个单元命名一个地址，如同一栋大楼分成若干房间，每个房间有一个房号一样。最简单的做法是：一个单元用来存放一条指令，或用来存放一个数据。如果指令或数据比较长，就用相邻的几个单元来存放一条指令或数据。因此，存储器的一个重要特性是能按地址存入或读取内容。

启动运行后，计算机将自动地连续执行程序。控制器向存储器送出某个地址码，从指定的存储单元中读取一条指令，送入控制器识别，分析该指令要做什么操作，操作数在何处。根据该指令的含义，控制器发出相应的操作命令，例如将某存储单元中存放的操作数取出，送往运算器进行所指定的运算处理，再将运算结果送回存储器中指定单元。运算过程中的某些状态信息：如有无进位、结果是否为0、结果正负、是否溢出等，可送回控制器作为下一步操作的参考依据。

计算机执行完一段程序（即一组指令序列）后，将获得所需的解答即处理结果，再通过输出设备将结果送出。例如，通过显示器在屏幕上显示程序运行情况与结果，或用打印机将结果打印出来，以便长期保存。

信息的输入、输出、存储与运算，都必须在控制器的控制下有序地进行，控制器好像人的大脑神经系统，它控制着整个计算机的工作，决定在什么时候发出什么命令、做什么操作。例如向存储器发出读/写命令与单元地址码，向运算器发出做何种运算的操作命令，并取回有关的状态信息。输入/输出设备与控制器之间也常采取这样一种方式进行协调：当输入/输出设备作好相应准备之后，向中央控制器发出请求信号，然后控制器发出输入或输出命令。早期的计算机常设置一个专门的控制台，操作人员可以通过控制台启动或停止计算机的运行，或设置有关的运行参数，或在运行过程中进行某些必要的干预。现在的计算机则往往通过键盘实现上述操作，替代控制台的作用。

以上，我们以一个简单框图描述了计算机的基本组成，并沿着它的工作过程描述了它的工作方式与各组成部件的作用。当然这种描述还是非常粗浅的，我们可以从下述两个方面进一步深入。

1 组成

从以上的叙述可以看出，计算机系统实际上包含两大范畴或者说两种成分：可以触摸得到的硬件设备，如上述五大部件；不能直接触摸的软件，如程序。构造硬件的基本思想可以归结为一句话：处理功能逻辑化，即用逻辑电路构造各种功能部件，如存储器、运算器、控制器。在《数字电路与逻辑》课程中，已为此建立了有关的理论基础，介绍了有关的技术。在硬件的基础上，可以根据需要配置各种软件，这几乎没有什么限制。按照某种层次结构，硬件与软件组成了一个复杂的综合体，即计算机系统。

2 信息的表示与处理

计算机的基本功能就是对信息进行处理。首先要解决的一个问题是如何表示信息，我们可以归纳出又一个重要概念：信息表示数字化。这是了解计算机工作原理的基础。

(1) 信息如何表示

从硬件的角度，信息的表示问题涉及采用何种形式的信号。早期，常将编好的程序穿成穿孔纸带，用孔的有无表示数字 0 或 1。磁带与磁盘存储器采用磁记录信号形式，用磁化状态的不同或磁化状态变化规律的不同表示 0 或 1。在计算机内则采用数字型电信号表示各类信息，便于高速传送与处理加工。

从软件的角度，信息的表示问题涉及采用何种格式去表示数据或程序信息。例如，数的进位计数制，编码的码制，机器指令的指令格式，编写程序所用的程序设计语言等。

从更高的层次，信息表示还涉及到对复杂问题的描述，乃至对知识的表达。总之，你要解决一个问题，首先得设法对它进行描述，即信息的表示，然后设法让计算机能够理解并加以处理。因此，信息的表示是我们工作的基本出发点。

(2) 信息如何存储

从硬件方面，需要研究能够保存信息的各种物理机制，例如用特定的电路保存信息，或用磁化状态保存信息，就是两种最基本的方法。

众多的信息如何有机地保存以便于调用呢？这就涉及到在软件上如何确定被存储信息的组织结构，例如数据的记录、文件格式，以及它们的数据结构等。

(3) 信息的变换

输入设备将输入的程序与数据信息，变换为计算机所能识别的信息形式，输出设备则将计算机的处理结果或计算机保存的信息，变换为操作员或下一级计算机所能识别的信息形式，例如通过显示器或打印机将结果从代码变换为人们看得懂的字符或图形，或输出到磁盘中供下一级计算机处理。

在软件方面，信息变换包含数制转换、码制转换、语言编译等。

(4) 信息的传送

从宏观上观察计算机的工作，程序的输入，结果的输出，计算机系统内各部件间的通信，计算机与计算机之间的通信，都属于信息的传送。更深入一步，从微观上分析计算机内部究竟是怎样工作呢？计算机工作体现为执行程序，控制器依次取出指令序列，根据各指令的含义分时地发出操作命令序列，这就形成一种控制信息流，简称控制流。执行这些操作命令，从主存或寄存器中取出操作数据，送往运算器进行运算处理，再将运算器输出的处理结果送入某目的地，这就形成一种数据信息流，简称数据流。所以，计算机的操作可以归结为信息的传送，计算机内部存在着两大信息流：即控制流与数据流。

(5) 信息的加工处理

计算机的运算处理可分为算术运算与逻辑运算两大类型。一个复杂的数学问题，可以通过某种算法转化为一组四则运算一类的基本运算；一个复杂的逻辑问题，也可通过某种算法转化为一组基本逻辑运算。按照处理功能逻辑化的思想，算术运算也是通过基本逻辑运算得以实现的。因此，计算机的工作具有一个统一的逻辑基础，用各种逻辑部件实现其功能。

一般的作法是：在计算机设置一个或多个运算部件，它们能完成指令系统中所规定的基本运算功能；以这些基本的硬件为基础，通过软件的支持（编制各种程序），来实现各种可能更复杂的加工处理任务。

(6) 对上述过程的控制

在硬件方面，为了使计算机能按程序要求有序地实现上述功能及其有机组合，就需要

一个控制器。这就涉及到在计算机内以什么形式表示它的各种控制命令信息，以及如何根据指令的要求有序地发出这些控制命令，以便协调指挥各部分的工作，实现有关的操作。

在软件方面，为了使计算机系统的功能不断增强，要为其配置开发许多有用的程序，它们和硬件设备构成了可供我们使用的硬、软资源。因此，需要操作系统一类的管理程序，调度管理各种硬、软资源，以提高系统运行效率。

上面提到的这些问题，可以作为学习或分析计算机工作原理的一些线索。在本书中，我们将力求突出两条基线：信息如何表示、信息如何传送，请读者予以充分重视。

1.1.2 存储程序与冯·诺依曼体制

如前所述，计算机采取事先编制程序、存储程序、自动连续运行程序的工作方式，称作存储程序方式。对此作出重大贡献的是一位匈牙利出生的美国数学家冯·诺依曼（1903～1957）。绝大多数人认为：1946年制成的ENIAC是世界上第一台电子数字计算机。但ENIAC基本上是十进制而不是二进制，程序和数据分开存储，程序的进入与修改需通过人工设置开关（多达6000个）和拔插导线来设置，被称为台外程序式。

1945年，冯·诺依曼提出了一台新计算机EDVAC的设计方案，他通过一篇著名的论文概括了数字计算机的设计思想，被后人称为诺依曼思想。这是计算机发展史中一个里程碑。几十年来，计算机体系结构发生了许多演变，但存储程序的概念仍是普遍采用的结构原则。我们将诺依曼体制中仍广泛采用的要点归纳如下。

（1）采用二进制形式表示数据和指令

数据和指令在代码的外形上并无区别，都是由0和1组成的代码序列，只是各自约定的含义不同而已。采用二进制，使信息数字化容易实现，可以用二值逻辑工具进行处理。程序信息本身也可以作为被处理的对象，进行加工处理，例如对源程序进行编译，就是将源程序当作被加工处理的对象。

（2）采用存储程序方式

这是诺依曼思想的核心内容。如前所述，它意味着事先编制程序，事先将程序（包含指令和数据）存入主存储器中，计算机在运行程序时就能自动地、连续地从存储器中依次取出指令且执行。这是计算机能高速自动运行的基础。计算机的工作体现为执行程序，计算机功能的扩展在很大程度上体现为所存储程序的扩展。计算机的许多具体工作方式也是由此派生的。

诺依曼机的这种工作方式，可称为控制流（指令流）驱动方式。即按照指令的执行序列，依次读取指令；根据指令所含的控制信息，调用数据进行处理。因此在执行程序的过程中，始终以控制信息流为驱动工作的因素，而数据信息流则是被动地被调用处理。

为了控制指令序列的执行顺序，我们设置一个程序（指令）计数器PC（Program Counter），让它存放当前指令所在的存储单元的地址。如果程序现在是顺序执行的，每取出一条指令后PC内容加1，指示下一条指令该从何处取得。如果程序将转移到某处，就将转移后的地址送入PC，以便按新地址读取后继指令。所以，PC就像一个指针，一直指示着程序的执行进程，也就是指示控制流的形成。虽然程序与数据都采用二进制代码，仍可按照PC的内容作为地址读取指令，再按照指令给出的操作数地址去读取数据。由于多数情况下程序是顺序执行的，所以大多数指令需要依次地紧挨着存放，除了个别即将使用的数据可

以紧挨着指令存放外，一般将指令和数据分别存放在该程序区中的不同区域。

(3) 由运算器、存储器、控制器、输入装置和输出装置等五大部件组成计算机系统，并规定了这五部分的基本功能。

上述这些概念奠定了现代计算机的基本结构思想，并开创了程序设计的新时代。到目前为止，绝大多数计算机仍沿用这一体制，称为诺依曼机体制。学习计算机工作原理也就从诺依曼概念入门。

传统的诺依曼机从本质上讲是采取串行顺序处理的工作机制，即使有关数据已经准备好，也必须逐条执行指令序列。而提高计算机性能的根本方向之一是并行处理。因此，近年来人们在谋求突破传统诺依曼体制的束缚，这种努力被称为非诺依曼化。对所谓非诺依曼化的探讨仍在争议中，一般认为它表现在以下三个方面的努力。

(1) 在诺依曼体制范畴内，对传统诺依曼机进行改造，如采用多个处理部件形成流水处理，依靠时间上的重叠提高处理效率；又如组成阵列机结构，形成单指令流多数据流，提高处理速度。这些方向已比较成熟，成为标准结构。

(2) 用多个诺依曼机组成多机系统，支持并行算法结构。这方面的研究目前比较活跃。

(3) 从根本上改变诺依曼机的控制流驱动方式。例如，采用数据流驱动工作方式的数据流计算机，只要数据已经准备好，有关的指令就可并行地执行。这是真正非诺依曼化的计算机，它为并行处理开辟了新的前景，但由于控制的复杂性，仍处于实验探索之中。

1.1.3 信息的数字化表示

通常所讲的计算机，其全名是电子式数字计算机，许多人又将它称为电脑。“电子式”指计算机主要依靠电子部件工作，那么为什么叫做数字计算机呢？简单地讲它有两层含义：

(1) 在计算机中各种信息用数字代码表示，如指令、数值型数据、字符、图象等。

(2) 在物理机制上，数字代码以数字型信号表示。

这两点体现了一个非常重要的基本概念，即信息表示数字化。它是我们理解计算机工作原理的一个基本出发点。

有两种类型的电信号：模拟信号与数字信号。模拟信号是一种在时间上连续的信号，用信号的某些参数（例如幅值）去模拟信息（例如数值或物理量的大小），所以称为模拟信号或模拟量。当通过传感器将一些非电量转换为电信号时，最初获得的常常是模拟信号，例如受话器将声音转换为传统的电话信号，温度传感器将温度转换为相应的电压或电流信号等。可以用模拟信号表示数据的大小，但它有许多明显的缺点：精度低，表示范围小，抗干扰能力差，难于存储，难于表示如逻辑信息等其他类型的信息。因此，处理模拟信号的模拟计算机现在只应用于极个别的领域，在计算机技术中占绝对主流地位的是处理数字信号电子数字计算机。如果不加说明，通常所讲的计算机就是数字计算机。事实上，整个电子技术都呈现出采用数字化处理的趋势。

数字信号是一种在时间上或空间上断续的（离散的）信号；它的单个信号仅取有限的几种状态（目前常用的是二值逻辑，仅取0、1两种状态值，非0即1）；依靠彼此离散的多位信号的组合表示广泛的信息；处理时可逐位处理。由于这是数字计算机中最基本的信号形式，是了解计算机硬件工作原理的出发点，我们多举几个例子加以说明。

例1 用一串脉冲型数字信号表示一个四位数1101。

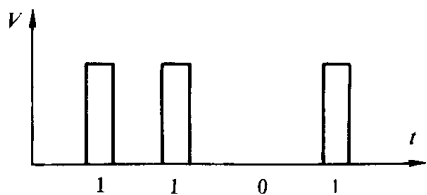


图 1.1-2 用一串脉冲表示数字代码

数字信号的一种形式是脉冲,如图 1.1-2 所示,它呈脉动形状,随时间的分布不是连续的。例如,脉冲未出现时信号为低电平 0 伏,脉冲出现时信号为高电平 +5 伏。我们可以用脉冲的有无来区分 1 或 0,如定义无脉冲为 0,有脉冲为 1。脉冲信号的特点是:信号电平向正方向(或负方向)跳变,并维持很短的时间,然后回到原来的状态。我们可以利用这种跳变(脉冲的上升边或下降边)表示某一时刻,起定时作用,或依据它识别脉冲的有无。

虽然单个信号本身的取值只有 0、1 两种,但是我们可以用多位彼此离散的数字信号去表示大于 1 的数。如图 1.1-2 示,在一根信号线上,在一段时间内发出一组脉冲,它们表示数字代码 1101。这是一组在时间上离散的电信号,因为几个脉冲之间存在间隔,脉冲的出现是断续的。让一个脉冲(有或无)表示一个数位,事先约定相邻两位信号之间的时间间隔为一个定值,先发高位后发低位,收到脉冲为 1,在约定的时刻没有脉冲则为 0。这种发送方式称为串行传送,增加脉冲序列的长度相当于增加位数,就可以扩大数的表示范围。

例 2 用一组电平型数字信号表示四位数 1101。

数字信号的另一种形式是电平信号,即利用信号电平的高低表示不同状态值,通常定义高电平(如 +5 伏)表示 1,低电平(如 0 伏)表示 0。由于是依据电平的高低起作用,所以电平信号维持某种电平的时间相对要长一些。

如图 1.1-3 所示,可用一组信号线表示多位数。每一根线输出一个电平信号,表示一位数,电平低为 0,电平高为 1。事先约定各位的高低顺序,则图 1.1-3 的四根线输出信号表示一个四位数 1101。显然,这是一组彼此在空间上离散的电信号,因为每一位分别占用一根信号线。在计算机内部广泛采用电平信号表示数字代码,如寄存器输出、内部数据传送等。如果用几根线同时传送若干位,则称为并行传送。

例 3 用一组数字代码表示字符。

字符本身不是数字,但是我们可以用数字代码去表示字符。在计算机中常用七位代码表示一个字符,

例如用 1000001 表示 A,又如用两组八位代码(两个字节)表示一个汉字。字符是文字的基础,而文字则是描述各种信息的最基本形式。因此,我们可用数字代码表示程序设计语言,也可表示一份文件,将它存储于计算机之中或对它加工处理。

例 4 用若干位(点)的组合表示图象。

与字符相比,图象信息是随机分布的,规律性差。但是我们可以将一幅图象细分为若干点,用这些点的组合逼近真实图象。如果分得足够细,即点数很多,则在人的视觉中,这幅由许多点组成的图象几乎是连续的。相应地,在计算机中应用一位数字信息表示一个象点,例如 1 表示亮点,而 0 表示暗点。再按照一定的扫描规律,将这些位(点)的信息以数字形式组织并存储起来,就可以对图象进行处理。通常的显示扫描顺序是:自左向右、自

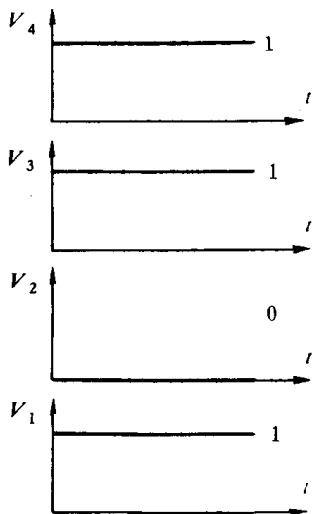


图 1.1-3 用一组电平信号表示数字代码

上而下。我们按这个顺序将每八位编为一组，称为字节。

例 5 用数字信号表示声音。

在传统的电话装置中，受话器将声波转换为模拟信号的电流波，也可将之数字化。按一定频率对电流波进行采样，即等时间间隔地对电流波进行测量，将每次测得的电流幅值用一个数字量表示。如果采样频率足够高，则所获得的数字信息能逼真地保持声波信息，还原后，发话器能逼真地再现原来的声音。采用数字化转换后，就可以用计算机对声音信息进行各种处理。

例 6 用数字代码表示命令与状态。

命令与状态属于逻辑型信息，而非数值，但也可用数字代码去表示。例如计算机中操作控制信息主要来自指令，指令中有一段操作码，用事先约定的数字代码表示不同的操作码，如规定 000 表示传送、001 表示加、010 表示减，……等。又如，某计算机系统配置了一台打印机，可将它的工作状态归纳为三种：打印机不工作（空闲），正在打印一行（忙），打印完一行等待计算机送出新的一行打印信息（完成）。为了向计算机提供当前的打印机工作状态，以供判断，我们可以用两位数字代码表示状态信息，如约定 00 表示空闲，01 表示忙，10 表示完成。

通过上面这一系列例子，大家会理解在本小节开始时提及的信息数字化概念：

(1) 计算机中的各种信息用数字代码表示，如表示数值大小的数字，非数值型的字符、图象、声音，逻辑型的命令、状态等；

(2) 数字代码中的每一位用脉冲或电平信号表示，即用数字信号表示。

请注意，善于用约定的数字代码去表示各种需要描述的信息，这是从事计算机技术工作的重要前提。

采用数字化方法表示信息，起码具有以下五个优点。

(1) 抗干扰能力强，可靠性高。因为单个数字信号只有两种状态：非 0 即 1，即使信号受到一定程度的干扰，仍能比较可靠地鉴别出它属于高电平范畴还是低电平范畴。当然为这一优点所付出的代价是限制每个信号的表示范围，但可依靠多位组合来克服这一限制。

(2) 位数增多则数的表示范围扩大。或从另一角度说：用较多位数去表示一个数时可以获得很高的精度。理论上位数的增加并无限制，取决于你愿意付出的硬件代价。

(3) 在物理上容易实现，并可存储。因为每一位只取其两种可能的极端状态，因而可有多种方法来实现，如开关的通断、晶体管的通导或截止、磁性材料的正向磁化或反向磁化、磁化状态的变与不变等等。相应地，可用双稳态触发器存储信息，或用电容上充、放电存储信息。

(4) 表示信息的类型与范围极其广泛。

(5) 能用逻辑代数等数字逻辑技术进行处理，这就形成了计算机硬件设计的基础。通过处理功能逻辑化这一思想，我们能用非常有限的几种逻辑电路构造出变化无穷的计算机系统及其他数字系统。

1.1.4 数字计算机的特点

现在我们可以为数字计算机给出一个定义：数字计算机是一种能存储程序，能自动连续地对各种数字化信息进行算术、逻辑运算的快速工具。基于数字化的信息表示方式与存

储程序工作方式，这样的计算机具有如下五个重要特点。

1 能在程序控制下自动连续地工作

由于采用存储程序工作方式，一旦输入所编制好的程序，只要给定运行程序的条件，如起始地址，启动计算机后就能自动连续地执行程序，直到完成预定的任务为止。除非工作本身要求采取人机对话方式，一般在运算处理过程中不需要人的直接干预。这是数字计算机的一个基本特点，也是它和其他计算工具最本质上的区别所在。

2 运算速度快

目前的计算机采用高速电子线路组成硬件，能以极高的速度工作。这不仅极大地提高了人类的工作效率，还使许多复杂问题得以实际解决。现在，普通的微型计算机每秒可执行数十万甚至数百万次加减运算，而巨型机每秒可完成数亿次甚至更高次数的基本运算。随着新的更高速器件的诞生，计算机可望在最近达到更高的运算速度。

3 运算精度高

数字计算机采用二进制数作为信息表示的基础，只要增加位数就能提高运算精度，这在理论上几乎没有限制。现在，普通的微型计算机能并行处理 32 位数，在软件上稍加变化便能处理多字长运算，从而获得更高的精度。

4 具有很强的信息存储能力

数字计算机设置有存储器，因而具有存储信息的能力，这是它的又一主要特点。计算机的许多功能与特点也是由此派生的。能存储程序，所以能自动连续工作；存储容量大，可存储的程序多，计算机的功能就强，而且可以继续扩充功能；能存储大量的数据，使许多信息处理得以实现。现在，一块存储器芯片可以存储几百页英文书籍的内容；一台普通的微型计算机，其主存储器大约可存储一百万个字符，而联机的外存储器可存储上亿个字符；至于巨型计算机系统，其存储能力更是高出成百上千倍。

5 通用性强

基于信息表示的数字化，数字计算机能够处理范围极其广泛的各类信息。基于数字信号的特点，可用逻辑代数作为硬件设计的基本数学工具。用数字逻辑部件处理数字信号，即处理功能逻辑化，这就使计算机具有一个统一的逻辑基础。在此基础上，计算机不仅能实现算术运算，也能实现逻辑运算；不仅能做数值计算，也能对各类信息作非数值计算性质的运算处理，如信息检索、图形处理、逻辑判断等。因此计算机具有极强的通用性，能应用于各个科学技术领域，并渗透到社会生活的各个方面。

1.2 计算机系统的层次结构

1.2.1 硬件系统

计算机的硬件是指系统中可触摸得到的设备实体。例如前述五大部件等物理装置，以及将它们组织成一个计算机系统的体系结构。按照这一概念，一个计算机系统应当具备哪些功能，包括哪些部件；这些部件又应具备哪些功能，采用什么样的器件和电路构成，工艺上如何组装；这些部件按什么结构方式相互连接成有机的整体等；都属于硬件设计的范畴。

运算器与控制器合称为中央处理机 CPU (Central Processing Unit)。在早期的结构中, 运算器与控制器曾是相对独立的两部分, 如经典诺依曼机体制所描述的那样。现今, 则常将它们组织成一个整体。它是执行指令功能的核心部件, 控制着数据流与控制信息流的操作; 此外, 它向计算机系统中的其它部件发出各种控制信息, 收集各部件的状态信息, 与其它部件间交换数据信息, 所以被称为中央处理机, 是计算机硬件系统的核心。在微型计算机与其它应用大规模集成电路技术的系统中, 常将 CPU 集成于一块芯片之中, 构成单片 CPU。

我们总是希望系统中的存储器容量大、存取速度高。但这往往是有矛盾的, 为此常将存储器分为几级。可由 CPU 按地址直接访问的, 称为主存储器 (Memory), 它速度较快而容量有一定限制, 目前多用半导体存储器构成。中央处理机和主存储器一起组成了所谓主机部分, 相应地又将主存储器叫作内存储器。作为主存后援的一级叫后援存储器, 或称为辅助存储器。由于它位于主机范畴之外, 又叫做外存储器。目前多采用磁盘或磁带构成外存, 容量可以很大, 但速度较主存为慢。

从信息传送角度看, 输入设备与输出设备可算作一类, 输入设备是将数据输入主机, 而输出设备是由主机向外输出数据, 仅传送方向不同而已。有一些设备既可以作为输入设备, 又可以作为输出设备, 因此常将输入与输出设备合称为 I/O 设备。由于它们在逻辑划分上也是位于主机之外, 又称为外围设备或外部设备。磁盘与磁带一类外存储器既属于存储系统的一部分, 又可看成属于 I/O 设备的范畴。

主机通过一组总线连接各种外围设备, 在总线与各种外围设备之间还往往有一些起缓冲、连接作用的部件, 称为外围接口或 I/O 接口。主机及系统总线常是通用的, 采用某种标准, 但所连接的外围设备在数量与种类上则是可变的。不同外围设备的功能与原理可能差别很大, 因此接口的变化较多。

至此, 我们描述了计算机硬件系统的组成大致有哪些部分, 在 1.3 节中再进一步介绍它的组织结构。

1.2.2 软件系统

计算机软件通常泛指各类程序和文件。它们实际上是由一些算法 (说明如何完成某任务的指令序列就是算法的程序体现) 以及它们在计算机中的表示所构成, 体现为一些触摸不到的二进制信息, 所以称为软件。软件的实体主要表现为程序, 因此有人简单地定义为: 软件即程序。有些则主张将软件的含义描述得更广泛一些, 把编制程序、维护运行程序所依赖的文件也归入软件范畴。按照这种概念, 在系统中除去硬件实体的其余部分都可称之为软件。

在计算机系统中, 各种软件的有机组合构成了软件系统。那么软件系统中包含哪些类型的软件呢?

1 系统软件

这是一组为保证计算机系统良好运行而设置的基础软件, 通常作为系统资源即软设备提供给用户使用。它负责系统的调度管理, 向用户提供服务。从配置的角度看, 它是用户所使用的计算机系统的一部分。例如:

(1) 操作系统类

操作系统是软件系统的核心。它是负责管理和控制计算机系统硬、软资源与运行程序的系统软件，是用户和计算机之间的接口，提供了软件的开发环境和运行环境。用户往往通过操作系统提供的各种功能来操作使用计算机，所以我们说它起到了一种接口的作用。操作系统的设计目标之一，是以尽可能优化的方式来调度管理系统的硬、软资源，合理地组织工作流程，提高系统的工作效率。当我们开发某种软件时，需要调用在操作系统管理下的有关资源，以获取操作系统的最大支持。所编制的软件往往作为操作系统管理下的文件，运行时有可能调用操作系统管理的其他资源，利用操作系统的有关功能。所以我们说，操作系统提供了软件的开发环境与运行环境。

(2) 语言处理程序

计算机硬件只能直接识别代码化的机器语言，即用数字代码表示的指令序列。但是，用户往往是用程序设计语言编写程序，相应地要通过语言处理程序来进行转换。这有两种基本的方式：一种是解释方式，即针对某种程序设计语言事先编制解释程序，使用时执行解释程序，对用程序设计语言编写的源程序边解释边执行。另一种更常用的是编译方式，即针对某种程序设计语言事先编制编译程序，使用时先执行编译程序，将源程序翻译为机器语言的目标程序，然后执行目标程序。这些解释程序和编译程序泛称为语言处理程序。

(3) 数据库管理系统

在计算机中，对数据的管理极为重要，特别在计算机信息管理系统中更为突出，为此出现了数据库技术。数据库是在计算机存储设备上合理存放的、相互关联的数据的集合，能提供所有可能的不同用户共享使用，独立维护。相应地，可在计算机中配置数据库管理系统软件，它负责装配数据、更新内容、查询检索、通信控制，对用数据库语言编写的程序进行翻译，控制有关的运行操作等。

(4) 各种服务性支撑软件

服务性程序是指：为了帮助用户使用与维护计算机，提供服务性手段，而编制的一类程序。这类程序可以包含很广泛的内容，一般指程序的输入与装配程序、编辑工具、调试工具、诊断程序、提示系统、窗口软件，以及一些可供调用的通用性应用软件，如文字处理软件、表格处理软件、图形处理软件等。由于操作系统的发展趋势是将内核做得精炼紧凑，因此这些服务程序往往作为操作系统可调用的文件存在，视需要而选取或扩充，也可将它们视为操作系统的可扩充的外壳。为了使用户能更好地操作计算机，趋向于为用户提供一个完善的集成环境，这种环境具有良好的人机界面和完善的服务支持。

(5) 各种标准程序库

系统可事先配置一些通用的、优化的标准子程序，供用户调用。例如，许多编译程序中就含有库文件，用户在用高级程序设计语言编写源程序时，只要给出调用名即可，编译时可有关的库文件调出装配。

2 应用软件

应用软件是指用户在各自应用领域中，为解决各类问题而编写的程序，也就是直接面向用户需要的一类软件。由于计算机的应用领域极其广泛，这类应用软件可以说是不胜枚举的，如：(1) 科学计算类程序；(2) 工程设计类程序；(3) 数据处理类程序；(4) 信息管理类程序；(5) 自动控制类程序；(6) 情报检索类程序；……。

当然，对系统程序与应用程序的划分并不是一成不变的，一些具有通用价值的应用程

序也可以纳入系统程序之中，作为一种资源提供给用户。

1.2.3 层次结构模型

如上所述，计算机系统以硬件为基础，通过配置软件扩充功能，形成一个可能是相当复杂的有机组合的系统。我们常采用一种层次结构观点去进行分析、设计，也就是将计算机系统从不同的角度分为若干级（层次），根据不同的工作需要，选择某一层次去观察分析计算机的组成、性能和工作机理，或进行设计。在构造一个完整的系统时，可以分层次地逐级实现，按这种结构化的设计策略实现的系统，易于建造、调试、维护和扩充。

有许多种划分层次的方法，以达到不同的目的。本节将列举两种常见的层次结构模型。

1 从硬软件组成角度划分层次结构

图 1.2-1 所示的层次结构模型，能表明一个计算机系统有哪些硬件与软件组成，以及它们之间的关系。

自下而上，反映了计算机系统的逐级生成过程。

(1) 拟定指令系统，制作能实现指令功能的硬核即硬件系统。在学习控制器的组成方法后读者将会了解到，许多计算机采用微程序控制方式，用一个微程序控制器来解释并执行指令。所以，常将硬件部分分为两级：最底层是硬连逻辑部件，即用连线连接的各种逻辑部件；

上面一层是微程序控制器，由它发出命令来控制部件的工作。

(2) 配置操作系统，这是系统软件的核心和基础。

(3) 配置所需的语言处理程序及各种软件资源，将它们置于操作系统的管理调度之下。

(4) 输入用户程序，处理执行。

自上而下，反映了应用计算机求解问题的过程。

(1) 用户根据对任务的需求分析，设计算法，构造数学模型。如果这部分的工作具有相当的份量与深度，就形成一个系统分析级，由具有较高水平的系统分析员来完成。然后，选择某种恰当的程序设计语言编制程序，称为用户程序级，可由高级程序员与程序员完成。

(2) 在操作系统的控制之下调用语言处理程序，如编译程序，将用户源程序翻译为用机器语言描述的目标程序。在输入、编辑修改、编译、调试源程序的过程中，可能要调用各种有关的软件资源。这一级的工作是在操作系统的支持与控制下完成的，可归为操作系统级。

(3) 所形成的目标程序是用机器语言描述的，机器语言是计算机硬件可以识别并执行的二进制代码，相应的目标程序是可执行文件，或称为可执行目标代码。因此，我们从这一级看到的程序与计算机工作属于机器语言级。

(4) 最后由硬件执行机器语言程序，一般用户所看到的计算机工作到此为止。但从硬件设计者与维护人员的角度，还需要了解硬核的工作，因此要涉及微程序级与逻辑部件级。对于集成电路制造者来说，还要细化到电路级乃至元器件级。

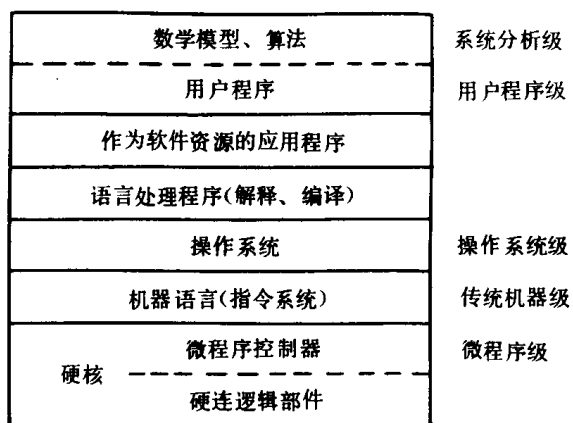


图 1.2-1 从组成角度划分的层次结构模型

2 从语言功能角度划分层次结构

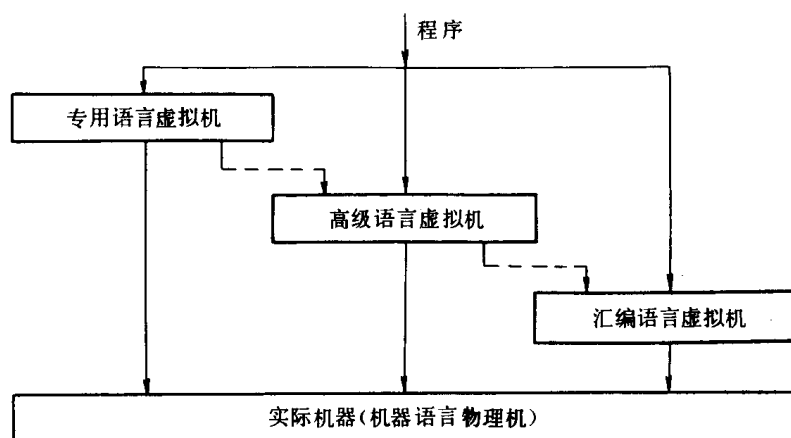


图 1.2-2 从语言角度划分的层次结构模型

如果将计算机功能简化为执行若干种语言编写的程序，那么用户看到的就是图 1.2-2 所示的一种语言功能层次模型。计算机硬核的物理功能只是执行机器语言，称为机器语言物理机（当然还可细分出一个微程序级），从这一级看到的是一台实际的机器。

用户基本上是用各种程序设计语言编程的。与机器语言最接近的是汇编语言，它的基本成分是与指令系统一一对应的助记符。与算法、数学模型甚至自然语言接近的，称为高级语言，在这一范畴内已推出许多种通用的高级程序设计语言。对某些特定的应用领域或特定用户，也可使用某种专用语言，例如某种 CAD（计算机辅助设计）语言。

大多数计算机都将程序设计语言写的程序先翻译为机器语言，然后才能理解与执行。一般是直接翻译为机器语言，少数高级语言也可能采取间接编译方式，即先翻译为层次低些的中间语言，如图中虚线所示，再将中间语言翻译为机器语言。

如图所示，用户看到的具有某种高级语言功能的计算机，是一台虚拟机。所谓虚拟机，通常是指通过配置软件扩充机器功能后，所形成的一台计算机，实际硬件在物理功能上并不具备这种语言功能。例如，用户看到计算机能接受并执行用 Pascal 语言编写的程序，实际上物理机只能执行其机器语言指令代码，它通过配置 Pascal 编译程序才能处理 Pascal 程序，所以用户看到的是一台能执行 Pascal 语言功能的虚拟机。

采用虚拟机概念是计算机设计中又一重要策略。它将提供给用户的功能抽象出来，使之脱离具体的物理机器，这有利于让用户摆脱真实机器细节的束缚。所以，在许多系统软件的层次结构中常分为虚拟层与物理层。这使虚拟层上开发的系统软件具有较强的通用性，只要改变其与物理层的接口，就能应用于不同物理机上。又如，在调度管理上分层，可将允许执行的与能够执行的分开；对允许执行的任务我们先分配给一个虚拟机，当获得物理机时才真正执行这个任务。一个系统中允许的虚拟机数目可以超过真实物理机数，这就从语言功能上的虚拟机概念引伸到调度管理上的虚拟机概念。

1.2.4 硬、软件界面与逻辑上的等价

计算机系统以硬件为基础，通过软件扩充其功能，并以执行程序方式体现其功能。一般来说，硬件只完成最基本的功能，而复杂的功能则通过软件实现。但是，硬件与软件之间的界面，如功能分配关系常随技术发展而变化。有许多功能既可以直接由硬件实现，也