

# 计算机组成原理

白中英 主编

科学出版社

# 计算机组成原理

白中英 主编

J584/30

7

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

本书是在国家级优秀教材《计算机组成原理教程》一书基础上修订的新版教材。内容分如下九章：计算机系统概论；运算方法和运算器；存储系统；指令系统；中央处理器；系统总线；外围设备；输入输出系统；实验与课程设计。

本书内容安排与中国计算机学会教育委员会、全国高等学校计算机教育研究会联合推荐的《计算机学科教学计划1993》相一致。

本书内容全面，概念清楚，系统性强，注重实践环节与能力培养，形成了主教材、辅教材（CAI、试题库）、实验、课程设计等环节综合配套的体系。全书文字流畅，便于自学，有广泛的适应面，是大专院校计算机系各类专业的教材，也可作为全国计算机等级考试的辅导培训教材。

本教材获'97 国家级教学成果二等奖。

## 计算机组成原理

白中英 主编

责任编辑 张建荣 留霞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1988年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1994年6月第 二 版 印张：24 1/2

2000年1月第十五次印刷 字数：569 000

印数：120 123—140 122

ISBN 7-03-004141-0/TP·365

定价：28.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉）

# 前 言

“计算机组成原理”是计算机科学与工程系所有专业的一门核心课程，从课程地位来说，它在先导课和后续课之间起着承上启下和继往开来的作用。

“计算机组成原理”教学具有知识面广、内容多、难度大、更新快等特点，另外，体现课程特点的教材对于提高教学水平，促进计算机科学发展起着十分重要的作用。我们认为，一本好的“计算机组成原理”教材主要应具备：

- (1) 内容全面，基本概念清楚；
- (2) 系统性强，使学生能建立计算机整机概念；
- (3) 有合理的知识结构，为进一步深入学习有关计算机后续课程打下良好基础；
- (4) 理论教学与实践教学结合，注重学生的智力开发和能力的培养；
- (5) 有较广的适应面，以适应学生在各类计算机上从事开发和应用的需要；
- (6) 力图反映新技术、新动向，以适应计算机技术发展和变化的需要。

本书第一版《计算机组成原理教程》(科学出版社出版)自1988年首次发行以来，先后共印刷四次，发行29 000余册，全国70余所院校将其用作本科生教材，在计算机人才培养中发挥了一定的作用，因而获得了1992年国家级优秀教材奖。然而，计算机科学技术的发展是日新月异的，一部分教材内容逐渐过时，需要吐故纳新。为此，我们决定重新编写，推出新版的《计算机组成原理》教材。本书内容安排与中国计算机学会教育委员会、全国高等学校计算机教育研究会联合推荐的《计算机学科教学计划1993》相一致。

根据作者多年从事“计算机组成原理”课程理论教学和实践教学的经验，从传授基础知识和培养能力的目标出发，并结合本课程教学的特点、难点和要点，作者在这次新版中贯彻了“厚基础、薄型号、重能力”的九字方针。所谓“厚基础”，是指教材必须具有合理的知识结构，学生必须掌握宽厚的硬件基础知识和整机概念；所谓“薄型号”，是指型号仅作为例子，不作为教材主体；所谓“重能力”，是指培养学生的硬件分析、设计和调试能力。同时，新版教材继续贯彻了主教材、辅教材(CAI、试题库)、实验、课程设计等环节综合配套的教学体系。

本教材总学时为85—95学时，其中理论教学70—80学时，实验教学15学时。第九章的“课程设计”单独安排4周时间，可放在实习期间集中进行。

本教材第一版是原航空航天工业部教材编审室招标审定的教材，由清华大学计算机科学与技术系刘风云先生、杨士强先生主审。这次新版吸取了兄弟院校教师提出的宝贵意见，并得到西安交通大学计算机科学与工程系胡正家先生的热忱帮助。在此，作者一并向他们表示衷心感谢。

本教材由白中英主编，韩兆轩、李伟华、林树根、齐承军、宋立等参加了本教材新版的编写工作。欢迎读者批评指正。

编者

1994年1月

# 第一章 计算机系统概论

## 1.1 计算机的分类和应用

### 一、计算机的分类

电子计算机从总体上来说可分为两大类。一类是电子模拟计算机。“模拟”就是相似的意思，例如计算尺是用长度来标示数值；时钟是用指针在表盘上转动来表示时间；电表是用角度来反映电量大小，这些都是模拟计算装置。模拟计算机的特点是数值由连续量来表示，运算过程也是连续的。

另一类是电子数字计算机，它是在算盘的基础上发展起来的，是用数目字来表示数量的大小。数字计算机的主要特点是按位运算，并且不连续地跳动计算。表 1.1 列出了电子数字计算机与电子模拟计算机的主要区别。

表 1.1 数字计算机与模拟计算机的主要区别

比较内容	数字计算机	模拟计算机
数据表示方式	数字 0 和 1	电压
计算方式	数字计数	电压组合和测量值
控制方式	程序控制	盘上连线
精度	高	低
数据存储量	大	小
逻辑判断能力	强	无

电子模拟计算机由于精度和解题能力都有限，所以应用范围较小。电子数字计算机则与模拟计算机不同，它是以近似于人类的“思维过程”来进行工作的，所以有人把它叫做“电脑”。它的发明和发展是 20 世纪人类最伟大的科学技术成就之一，也是现代科学技术发展水平的主要标志。习惯上所称为“电子计算机”，一般是指现在广泛应用的电子数字计算机。本书中我们也只介绍数字计算机。

数字计算机进一步又可分为专用计算机和通用计算机。专用和通用是根据计算机的效率、速度、价格、运行的经济性和适应性来划分的。专用机是最有效、最经济和最快速的计算机，但是它的适应性很差。通用计算机适应性很大，但是牺牲了效率、速度和经济性。

通用计算机又可分巨型机、大型机、中型机、小型机、微型机和单片机六类，它们的区别在于体积、简易性、功率损耗、性能指标、数据存储容量、指令系统规模和机器价格，见图 1.1。一般来说，巨型计算机主要用于科学计算，其运算速度在每秒一亿次以上，数据存储容量很大，结构复杂，价格昂贵。而单片计算机是只用一片集成电路做成的计算机，体积小，结构简单，性能指标较低，价格便宜。介于巨型机和单片机之间的是大型机、中型机、小型机和微型机，它们的结构规模和性能指标依次递减。但是随着

超大规模集成电路的迅速发展，微型机、小型机和中型机彼此之间的概念也在发生变化，因为今天的中型机可能就是明天的小型机，今天的小型机可能就是明天的微型机，而今天的微型机可能就是明天的单片机。

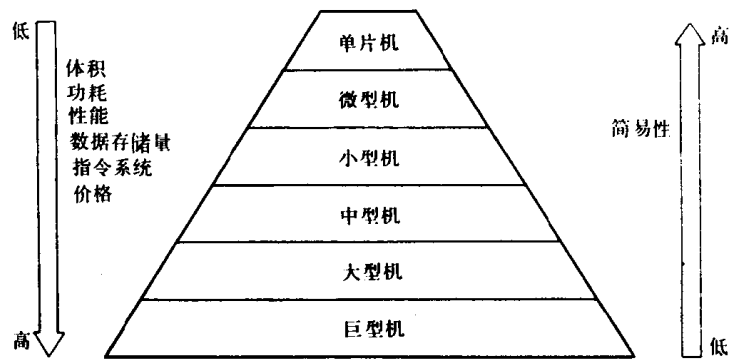


图 1.1 单片机、微型机、小型机、中型机、大型机、巨型机之间的区别

专用计算机是针对某一任务设计的计算机，一般来说，其结构要比通用机简单。目前已经出现了多种型号的单片专用机，用于测试或控制。

## 二、计算机的应用

计算机所以迅速发展，其生命力在于它的广泛应用。目前，计算机的应用范围几乎涉及人类社会的所有领域：从国民经济各部门到个人家庭生活，从军事部门到民用部门，从科学教育到文化艺术，从生产领域到消费娱乐，无一不是计算机应用的天下。对于这么多的应用，这里不可能一一介绍，下面归纳成七个方面来叙述。

### 1. 科学计算

科学研究和工程技术计算领域，是计算机应用最早的领域，也是应用得较广泛的领域。例如，数学、化学、原子能、天文学、地球物理学、生物学等基础科学的研究，以及航天飞行、飞机设计、桥梁设计、水力发电、地质探矿等方面的大量计算都要用到计算机。利用计算机进行数值计算，可以节省大量时间、人力和物力。

人们曾遇到这样一类问题，即计算这些问题的方法并不很复杂，但计算的工作量实在太太大，以致于根本无法计算。例如 19 世纪中叶，数学上提出了地图着色的“四色定理”问题。意思是说，画一张地图要使相邻的两国不用同一种颜色，只要用四种颜色就够了。但这一定理在数学上长期得不到精确的证明，成为一大难题。一百多年后，直到 1976 年科学家们才利用高速电子计算机作出了证明，轰动了世界。它在高速电子计算机上共算了 1200 小时才完成，若用人工来算，一个人日夜不停地算，要算十几万年！

还有一类问题，人工计算太慢，算出来也失去了实际意义。例如，大范围地区的日气象预报，采用计算机计算，不到十分钟就可算出结果。若用手摇计算机计算，就得几个星期，那么“日预报”就毫无价值了。

还有一类问题，用人工计算不一定能选出最佳方案。现代技术工程往往投资大、周期长，因此设计方案的选择非常关键。为了选择一个理想的方案，往往需要详细地计算

几十个乃至几百个方案，然后从中选优。如果没有计算机帮助，仅计算一个方案就要花费大量人力和时间，而要计算出很多方案来选优，谈何容易！即使有个选择，所选方案也不一定是最佳的。

总之，计算机在科学计算和工程设计中的应用，不仅减轻了大量繁琐的计算工作量，更重要的是，一些以往无法解决、无法及时解决或无法精确解决的问题得到了圆满的解决。

## 2. 自动控制

自动控制是涉及面极广的一门学科，应用于工业、农业、科学技术、国防以至我们日常生活等各个领域。特别是有了体积小，价廉可靠的微型计算机后，自动控制就有了强有力的工具，使自动控制进入了以计算机为主要控制设备的新阶段。

据统计，目前国外大约 20% 的微型机用于生产过程的自动控制，应用于冶金、化工、电力、交通、机械、军事等部门。

用计算机控制各种加工机床，不仅可以减轻工人的劳动强度，而且生产效率高，加工精度高。例如，微型机控制的铣床可以加工形状复杂的涡轮叶片，加工精度可以提高到 0.013 毫米，加工时间从原来的三星期缩短至四小时。

更进一步发展，用一台或多台计算机控制很多台设备组成的生产线，还可以控制一个车间以至整个工厂的生产，其经济和技术效果更为显著。例如，第二次世界大战后兴建的年产 500 万吨的钢厂需要生产人员 15 000 人，而 70 年代新建的年产 1000 万吨的钢厂，由于采用计算机控制，只需要生产人员 2500 人。也就是说，由于采用了计算机控制，平均每个生产人员的产量提高了 12 倍。70 年代初，一台年产 200 万吨的标准带钢热轧机，如用人工控制，每周产量 500 吨就很不简单了。采用计算机控制后，大大提高了轧机速度，每周可达 5 万吨，产量提高了 100 倍。有人说“计算机是提高生产力最简便的办法”，这是很有道理的。

计算机在自动控制领域中的应用，例子不胜枚举，不再赘述。表 1.2 列出了近几年国内各部门研制的计算机控制系统部分实例。

## 3. 测量和测试

据统计，计算机在测量和测试领域中的应用所占的比例也相当大，大约占 20%。在这个领域中，计算机主要起两个作用：第一，对测量和测试设备本身进行控制；第二，采集数据并进行数据处理。

实现测量和测试的自动化，是人们向往已久的事，它不仅可以大大提高测量精度，而且可以成倍、成十倍地提高工作效率。例如，用国产微型机对液压元件性能进行自动测试和数据处理，使元件性能测试精度提高了一个数量级，工作效率提高了 20 倍。另一方面，有些领域的测量和测试实在非人力所能完成。例如，高温、低温、有毒、辐射环境的测量和测试，核爆炸时的数据采集等等，必须使用自动化手段才能得到数据。自从微型机问世以后，由于它具有物美价廉、小巧玲珑的特点，正好满足了控制和测试领域的需要。各种自动测量、测试系统如雨后春笋，应运而生；各种智能化的测量、测试仪器也纷纷问世，并在生产、科研、教学中发挥了巨大的作用。表 1.3 列出了近几年国内各

部门在测量、测试领域中进行计算机应用的部分实例。

表 1.2 计算机控制系统实例

机械	线切割机控制, 五坐标铣床控制, 自动磨床控制, 印制电路板钻床控制, 六角车床控制, 多头钻床控制, LSI 引线焊接缝合装置控制, 锻造水压机控制, 弯管机控制, 激光加工控制, 印制板加工控制, 随动系统定时定位控制, 200 千瓦汽轮机启停控制, 电镀生产线, 加工控制中心
冶金	高炉配料上料控制, 铝板轧制机控制, 环形加热炉温度控制, 钛还原炉温度控制, 电炉温度控制, 转炉副轮控制, 均热炉控制, 冲天炉熔炼过程最优控制, 平炉节能控制, 电解炉自动控制, 轧钢飞剪自动控制, 粒子炉生产过程控制
石油化工	合成塔温度、压力、流量控制, 玻璃窑炉料道温度控制, 石油裂解和煤气生产炉控制, 炼油厂装油台控制, 水泥生产过程控制, 液体流量、混合比控制
轻工纺织	五色提花织机控制, 32 台化纤织袜机群控制, 塑料轮转印刷套色控制, 纺棉机纱锭监控, 高温高压染色机监控, 喷液印花控制, 双头注塑机控制, 圆纬机控制, 地毯织机提花控制, 味精发酵过程控制, 照相制版控制
交通邮电	船舶导航, 大型车站自动化调度, 城市交通控制, 惯性导航, 自动转报, 自动电话交换系统控制, 光导纤维拉丝控制, 包裹自动分拣
水利电力	城市供水过程控制, 水纯化系统控制, 自来水厂生产过程控制, 水位控制系统, 电站监测控制, 电站远动控制, 发电厂程序控制, 变电所实时监控

表 1.3 测量和测试领域中计算机应用实例

测量、测试系统	锅炉参数巡回检测, 钢样光谱分析, 磨粉机自动检测, 织布机检测, 印染过程检测, 液压元件性能测试, 油田实验室油水分析自动计量, 石油外输自动计量, 输油管道自动计量, 矽钢片初轧温度检测, 工业加热炉热工参数测量, 地震预报前兆信号综合测试, 弹道测量, 电机机械特性测量, 电缆综合参数测试, 无线电遥测, 多路数据采集处理, 远距离数据采集处理, 煤炭地质多点测量, 电机测试
测量、测试仪器	集成电路测试仪, 大规模集成电路测试仪, 微型机芯片自动测试仪, 存储器功能测试仪, 薄膜参数测试仪, 手表综合测试仪, 存储取样示波器, 逻辑分析仪, 光栅测量仪, 高频 Q 值测定仪, 静态应变仪, 数字电压表, 自动万能电桥, 振动分析仪, 传动链误差测试仪, 焊接图象分析仪, 粉末粒度图象分析仪, 水泵测试仪, 气体分析仪, 生化分析仪, 气相色谱仪, 液相色谱分析仪, 激光散射仪, 原子分光光度计, 红外光度计, 直读光谱仪, 医疗分析仪

#### 4. 信息处理

信息, 是我们人类赖以生存和交际的媒介。通过五官和皮肤, 我们可以看到文字图象, 听到唱歌说话, 闻到香臭气味, 尝到酸甜苦辣, 感到冷热变化。文字图象、唱歌说话、香臭气味、酸甜苦辣、冷热变化, 这些都是信息。人本身就是一个非常高级的信息处理系统。

计算机发展初期, 它仅仅用于数值计算。但是后来应用范围逐渐发展到非数值计算领域, 可用来处理文字、表格、图象、声音等各类问题。因此, 确切地讲, 计算机应当称为信息机, 或叫信息处理机。



信息处理的范围相当广泛。正因为如此，这一领域中目前计算机应用数量最多，应用所占的比例也最大（超过计算机总数的50%），带来的各种效益也十分明显。下面仅以事务处理和管理应用来说明。

(1) 事务处理

在商业业务上，近年来广泛应用的项目有：办公室计算机，数据处理机，数据收集机，发票处理机，销售额清单机，零售终端，会计终端，出纳终端，等等。

在银行业务上，广泛采用金融终端、销售点终端、现金出纳机。银行间利用计算机进行的资金转移正式代替了传统的支票。个人存款也使用“电子存款”法，不用支票。据报道，美国政府退休金总数的20%就是用电子存款法付入收款者手中，大部分雇员的薪金开始用计算机转账。

在邮政业务上，大量的商业信件，现在开始用传真系统传送。甲地寄出的信件可以自动拆开，用电子传真系统传送到乙地，然后用人送到收信者手中，或在收件者的印字机上印出。预计未来的邮政局将一般邮件都用“电子邮件”方法办理。

事务处理方面的例子还很多，像飞机与火车订票、选票统计、税收业务等等，不再一一列举。

(2) 管理应用

自有人类社会以来，各种组织就有各种不同的信息处理系统。因为有社会活动，就必须有组织，有组织就必须有管理，要管理就必须收集、处理各种信息。长期以来，人们都是用手工来收集、处理各种信息。但是随着社会的发展，组织日益复杂，管理职能越来越强，对信息处理的要求也越来越高。原来那种手工收集、处理信息的方式越来越不适用。

以物资管理为例，目前全国的物资库存，包括生产物资、商业物资和外贸物资，一共3000亿元，品种规格繁多，信息量很大。仅就钢材一项，品种已超过10万，要人工把全国钢材汇总起来，需要3000人年！以滚珠轴承来说，目前库存是6000多种，3.7亿套，年产量只有2亿套左右，库存几乎比年产量大一倍，这6000多种、3.7亿套轴承分散在全国各地，简直无法查对。

计算机的引入，使信息处理系统获得了强有力的存储和处理手段。上述的物资管理，如用计算机进行，情况就大不一样：可以随时掌握各类物资库存情况，合理调剂，减少库存。一个企业，只要花1万元引入一台微型机，至少可以减少库存50万元。又如全国人口普查，用计算机对120万人按年龄、性别、职业等14个项目进行统计分析，总共只

表 1.4 计算机管理系统实例

库存管理	仓库管理系统，农机站物资管理系统，小型仓库管理数据库，生产仓库财务管理系统，汽车零件管理系统，立体仓库管理系统，钢材库存管理系统
企业管理	进口器材订货单据管理系统，科研计划管理系统，橡胶厂企业管理系统，材料生产计划管理系统，计划统计管理系统，企业计划管理系统，旅馆管理系统
资料管理	科研课题文件管理系统，科研档案管理系统，图书情报资料检索系统，港口情报资料检索系统，外文资料管理系统，统计数据管理系统，建筑管理数据库
人事管理	工资管理系统，人事档案管理系统，科技人员文件管理系统，高校教师文件管理系统

需 3 个小时。

总之，企业管理、物资管理、资料图书管理、人事管理、业务管理等等，都是计算机能发挥作用的领域。表 1.4 列出了近几年国内各部门研制的计算机管理系统实例。

## 5. 教育和卫生

创立学校、应用书面语言、发明印刷术，被称为教育史上的三次革命。目前，计算机广泛应用于教育，被誉为“教育史上的第四次革命”。

较多的应用是“计算机辅助教学”。上课时，学生们坐在“学习终端”前，学习班组长通过键盘向计算机送去学习班组代号，计算机根据学校排好的课表，选出这个班组所需的教材，并将存储这个教材的磁带机与教室中的学习终端接通。于是，教室的荧光屏（或银幕）上显示出文字或图象，喇叭里放出教师讲课的声音。假如有一班没有听懂，通过键盘输入，计算机就会控制磁带机重放一遍。假如还听不懂，计算机就会控制磁带机送出原先准备好的补充讲解内容。用这种设备进行教学，学生可以生动活泼地进行学习，教师也可以减少大量重复的课堂讲授，而把精力放在提高教材质量和研究教学方法上。

还有其他一些不同的辅助教学系统，如国内研制的辅助 BASIC 语言自学系统、网络型计算机教学系统等，不仅可以辅导学生学习，而且可以测验评分，为提高教学质量发挥了很大作用。

计算机辅助教学既用于普通教育，又用于专业训练方面。例如通过计算机管理的“飞行模拟器”来训练飞机驾驶员，可以收到多快好省的效果。飞行员坐在地面上的飞行模拟器中进行训练，其环境犹如真实飞机在空中飞行一样。

有人预言，到 2000 年，在教学过程中将广泛采用计算机教学和电视教学，学校的教学、分班、教员上课等主要活动都将结束。这时人们可坐在家，通过计算机终端，按照自己的才能确定自己的学习计划和进度。

计算机的问世，同样为人类健康长寿带来了福音。一方面，使用计算机的各种医疗设备应运而生，如 CT 图象处理设备、身体诊断设备、心脑电图分析仪、血液分析仪、医疗车系统等等，无疑，这些较先进的设备和仪器为及早发现疾病提供了强有力的手段。另一方面，集专家经验之大成，利用计算机建成了各种各样的专家系统，如中医专家诊疗系统、肝病电脑诊治系统、肺癌电脑诊断系统、黄疸病诊疗系统等等。事实表明，这些专家系统行之有效，为诊治疾病发挥了很大作用。

对人类健康有直接或间接影响的其他领域，像环境保护、水质检测等，应用计算机的实例也很多，限于篇幅，不再赘述。

## 6. 家用电器

计算机不仅在国民经济各部门发挥越来越大的作用，而且已渗入到个人生活，特别是家用电器中。例如彩色电视的调谐器，就是把微型机和锁环频率合成器结合起来构成的，从而使电视机增加了数字选台、自动选台、预约节目、遥控等多种功能。目前，不仅出现了各种类型的个人计算机，而且将微型机广泛应用于微波炉、磁带录音机、自动洗衣机、煤气用定时器、家用空调设备控制器、电子式缝纫机、电子玩具、游戏机和教学机等。

未来的家用电脑将指挥机器人扫地，清洁地毯，控制炉灶的烹煮时间，调节室内温度，执行守护房屋和防火工作，还可以接受主人的电话命令，开启暖炉或冷气机。预计到2000年，计算机和计算机控制的设备将广泛地应用于办公室、工厂和家庭。通过家庭计算机终端，可以传递多种多样有益的信息，如新闻时事、商业行情等等。

## 7. 人工智能

“人工智能”又称“智能模拟”，简单地说，就是要使计算机能够模仿人的高级思维活动。影片《未来世界》中所描绘的机器人，就是在人工智能研究成果基础上所设想的未来世界的情景。不管影片中所描绘的那种几乎与真人差不多的机器人是否能够实现，或者到什么时候才能实现，但现在确实在人工智能研究方面进行着大量的工作。

人工智能的研究课题是多种多样的，诸如计算机学习、计算机证明、景物分析、模拟人的思维过程、机器人等等，内容很多。

拿下棋为例，如果程序人员把走棋子的法则编成程序存入计算机，计算机就可以按规则走动棋子，与人对奕。下棋的结果，计算机可能输了，第二次再下，当人的走法不变时，计算机就再输一次。但是如果我们从方法和程序上研究一种新的手段，使计算机下棋输了一次以后它能进行自学习、自组织、自积累经验，那么下次再下棋时就不会重犯上次的错误，这就是人工智能所研究的课题。

人类可以直接利用各种自然形式的信息，如文字、图象、颜色、自然景物、声音、语言等，但是计算机目前还不能直接利用自然形式的信息。直接利用自然形式的信息，这正是当前模式识别研究的奋斗目标。目前，在文字识别、图形识别景物分析以及语言理解等方面都已取得了不少成就。例如语言理解方面，国外已达到能解几千个单词，上百个句子的水平。在文字识别方面，虽然对任意的书写体的识别还未很好解决，但是对规定的印刷体和严格的手写体的识别，已经达到了较好的水平。

人工智能研究中最有成就的要算“机器人”。目前世界上有数万台“工业机器人”在一些生产线上工作，或在高温、有毒、辐射、深水等环境下工作。尽管它们只做一些非常简单的事情，但是任务完成得非常出色。现在，又出现了比“工业机器人”更高明的“智能机器人”，它会自己识别控制对象和工作环境，作出判断和决策，直接领会人的口令和意图，能避开障碍物，适应环境条件的变化，灵活机动地完成控制任务与信息处理任务。

## 1.2 计算机的硬件

### 一、数字计算机的硬件组成

要了解数字计算机的主要组成和工作原理，可从打算盘说起。假设给了一个算盘、一张带有横格的纸和一支笔，要求我们计算  $y=ax+b-c$  这样一个题目。为了和下面讲到的内容做比较，我们不妨按以下方法把使用算盘进行解题的过程步骤事先用笔详细地记录在带横格的纸上。

首先，将横格纸编上序号，每一行占一个序号，如1, 2, 3, ...,  $n$ ，如表1.5所示。其次，把计算式中给定的四个数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  和  $x$  分别写到横格纸的第9, 10, 11, 12行上，

每一行只写一个数。接着详细列出给定题目的解题步骤，而解题步骤也需要记在横格纸上，每一步也只写一行。第一步写到横格纸的第1行，第二步写到第2行，……依次类推，如表1.5所示。

根据表1.5所列的解题步骤，我们从第1行开始，一步一步进行计算，最后可得出所要求的结果。

表 1.5 解题步骤和数据记录在横格纸上

行数	解题步骤和数据	说 明
1	取数 (9) → 算盘	(9) 表示第 9 行的数 $a$ ，下同
2	乘法 (12) → 算盘	完成 $a \cdot x$ ，结果在算盘上
3	加法 (10) → 算盘	完成 $ax+b$ ，结果在算盘上
4	减法 (11) → 算盘	完成 $y=ax+b-c$ ，结果在算盘上
5	存数 $y \rightarrow 13$	算盘上的 $y$ 值记到第 13 行
6	输出	把算盘上的 $y$ 值写出给人看
7	停止	运算完毕，暂停
8		
9	$a$	数据
10	$b$	数据
11	$c$	数据
12	$x$	数据
13	$y$	数据

在完成  $y=ax+b-c$  的计算过程中，我们用到了些什么东西呢？

首先，用到了带横格且编有序号的纸，我们把原始的数据以及解题步骤记录在纸上，即纸“存储”了算题的原始信息；其次，用到了算盘，它用来对数据进行加、减、乘、除等算术运算。再次，用到了笔，利用笔把原始数据和解题步骤记录到纸上，还可把计算结果写出来告诉人；最后，用到了我们人本身，这主要是人的脑和手。在人的控制下，按照解题步骤一步一步进行操作，直到完成全部运算。

电子数字计算机进行解题的过程也完全和我们人用算盘解题的情况相似，也必须有运算工具、解题步骤和原始数据的输入与存储、运算结果的输出以及整个计算过程的调度控制。和打算盘不同的是，以上这些部分都是由电子线路和其他设备自动进行的。在电子计算机里，相当于算盘功能的部件，我们称之为**运算器**；相当于纸那样具有“记忆”功能的部件，我们称之为**存储器**；相当于笔那样把原始解题信息送到计算机或把运算结果显示出来的设备，我们称之为**输入设备或输出设备**；而相当于我们人的大脑，能够自动控制整个计算过程的部件，我们称之为**控制器**。图1.2示出了数字计算机的主要组成部分，其中双线及其箭头表示数据代码传送通路。

### 1. 运算器

运算器就好像是一个由电子线路构成的算盘，图1.3是它的示意图。它的主要功能

是进行加、减、乘、除等算术运算。除此以外，还可以进行逻辑运算。

人们习惯于十进制数的运算，但是考虑到方便性和经济性，计算机中通常采用二进制数。二进制的数是以 2 为基数来计数，也就是“逢二进一”。在二进制数中，只有 0 和 1 两个数目字。1 和 0 可以用电压的高低、脉冲的有无来表示。这种电压的高低，脉冲的有无，在电子线路中很容易实现，而且设备也最省。

二进制数的运算规律非常简单。例如加法： $0+0=0$ ， $0+1=1$ ， $1+0=1$ ， $1+1=10$ ，最后一个加式中等号右边的“1”表示向上一位的进位。又如乘法： $0\times 0=0$ ， $0\times 1=0$ ， $1\times 0=0$ ， $1\times 1=1$ 。正是由于二进制数运算规律简单，在电子线路中比较容易实现，因此，在电子数字计算机中广泛采用二进制数。

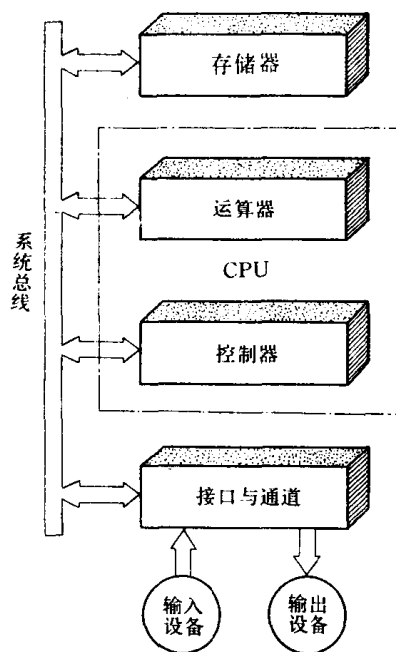


图 1.2 数字计算机的主要组成结构

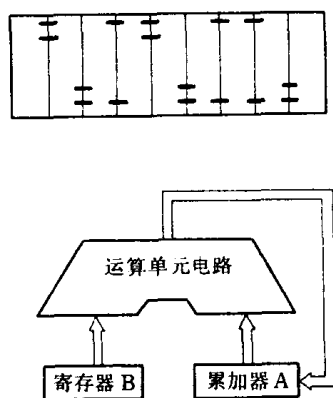


图 1.3 运算器结构示意图

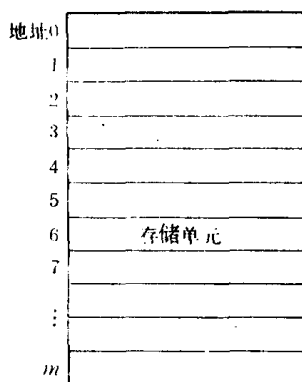


图 1.4 存储器结构示意图

二进制数和十进制数一样，在运算中，当数的位数越多时，计算的精度就越高。理论上讲，数的位数可以任意多。但是位数越多，所费的电子器件也越多，因此目前计算机的运算器长度一般是 8 位、16 位、32 位或 64 位。

## 2. 存储器

存储器的功能是保存或“记忆”解题的原始数据和解题步骤。为此，在运算前需要把参加运算的数据和解题步骤通过输入设备送到存储器中保存起来。

注意，不论是数据，还是解题步骤，在存放到存储器以前，它们全已变成 0 或 1 表示的二进制数码。因此，存储器存储的也全是 0 或 1 表示的二进制数码。那么大批的 0、1 数码在存储器中如何保存呢？

目前通常采用半导体器件来担当此任务。我们知道，一个半导体触发器由于有 0 和 1 两个状态，可以记忆一个二进制代码。一个数假定用 16 位二进制代码来表示，那么就需要有 16 个触发器来保存这些代码。通常，在存储器中把保存一个数的 16 个触发器称为一个**存储单元**。存储器是由许多存储单元组成的。每个存储单元都有编号，称为**地址**。向存储器中存数或者从存储器中取数，都要按给定的地址来寻找所选的存储单元，这相当于上面所讲的横格纸每一行存放一个数一样。图 1.4 为存储器的结构示意图。

存储器所有存储单元的总数称为存储器的**存储容量**，通常用单位“K”来表示，如 64K，128K。1K 表示 1024 个存储单元，因此 64K 就是  $64 \times 1024$  个存储单元。存储容量越大，表示计算机记忆储存的信息就越多。

半导体存储器的存储容量毕竟有限，因此计算机中又配备了存储容量更大的磁盘存储器，称为**外存储器**。相对而言，半导体存储器称为**内存储器**，简称内存或主存。

### 3. 控制器

控制器是计算机中发号施令的部件，它控制计算机的各部件有条不紊地进行工作。更具体地讲，控制器的任务是从内存中取出解题步骤加以分析，然后执行某种操作。

#### (1) 计算程序

运算器只能完成加、减、乘、除四则运算及其他一些辅助操作。对于比较复杂的算题，计算机在运算前必须化成一步一步简单的加、减、乘、除等基本操作来做。每一个基本操作就叫做一条**指令**，而解算某一问题的一串指令序列，叫做该问题的**计算程序**，简称为程序。

表 1.6 计算  $y=ax+b-c$  的程序

指令地址	指令		指令操作内容	说明
	操作码	地址码		
1	取数	9	(9) → A	存储器 9 号地址的数 $a$ 送到运算器 A
2	乘法	12	(A) × (12) → A	完成 $a \cdot x$ ，结果保留在运算器 A
3	加法	10	(A) + (10) → A	完成 $ax+b$ ，结果保留在运算器 A
4	减法	11	(A) - (11) → A	完成 $y=ax+b-c$ ，结果保留在 A
5	存数	13	A → 13	运算器 A 中的结果 $y$ 送入存储器 13 号地址
6	打印		A → Print	将 A 中的结果经打印机打印出来
7	停止		Stop	机器停止工作
8				

数据地址	数据	说明
9	$a$	数据 $a$ 存放在 9 号单元
10	$b$	数据 $b$ 存放在 10 号单元
11	$c$	数据 $c$ 存放在 11 号单元
12	$x$	数据 $x$ 存放在 12 号单元
13	$y$	运算结果 $y$ 存放在 13 号单元

例如在前述求解  $y=ax+b-c$  的例子中，我们在横格纸上列出了它的解题步骤。解

题步骤的每一步，只完成一种基本操作，所以就是一条指令，而整个解题步骤就是一个简单的计算程序。

正如我们在横格纸上按行的序号记下解题步骤一样，计算机中为了顺利运算，也必须事先把程序和数据按地址安排到存储器里去。注意，程序中的指令通常是按顺序执行的，所以这些指令是顺次放在存储器里。这就相当于我们把表 1.5 所示的横格纸的内容原封不动地搬到存储器，因而所编的程序如表 1.6 所示。

### (2) 指令的形式

由表 1.6 可知，每条指令应当明确告诉控制器，从存储器的哪个单元取数，并进行何种操作。这样一来，可知指令的内容由两部分组成，即操作的性质和操作数的地址。前者称为**操作码**，后者称为**地址码**。因而上述指令的形式如下：

操作码	地址码
-----	-----

其中操作码指出指令所进行的操作，如加、减、乘、除、取数、存数等等；而地址码表示参加运算的数据应从存储器的哪个单元中取来，或运算的结果应该存到哪个单元中去。

指令的操作码和地址码是用二进制代码来表示的，其中地址码部分和数据一样，是二进制数的数码，而操作码部分则是二进制代码的编码。假定我们只有 8 种基本指令，那么这 8 种指令的操作码可用 3 位二进制代码来定义，如表 1.7 所示。

表 1.7 指令的操作码定义

指令	操作码
加法	001
减法	010
乘法	011
除法	100
取数	101
存数	110
打印	111
停机	000

存储器	
地址 1	101 1001
2	011 1100
3	001 1010
4	010 1011
5	110 1101
6	111 ××××
7	000 ××××
8	
9	<i>a</i> (二进制数)
10	<i>b</i>
11	<i>c</i>
12	<i>x</i>
13	<i>y</i>
⋮	

图 1.5 指令和数据在存储器中用二进制码存储

这样一来，表 1.7 中指令的操作码部分就可以变成二进制代码。假如把地址码部分和数据也换成二进制数，那么整个存储器的内容全部变成了二进制的代码和数码，如图 1.5 所示。

由图 1.5 可知，指令数码化以后，就可以和数据一样放入存储器。存储器的任何位置既以可存放数据也可以存放指令，不过一般是将指令和数据分开存放。将解题的程序（指令序列）存放在存储器中称为**存储程序**，而控制器依据存储的程序来控制全机协调地完成计算任务叫做**程序控制**。存储程序并按地址顺序执行，这就是冯·诺依曼型计算机的设计思想，也是机器自动化工作的关键。

一台计算机通常有几十种甚至上百种基本指令，从而构成了这台计算机的**指令系统**。指令系统不仅是硬件设计的依据，而且是软件设计的基础。因此，指令系统是衡量计算

机性能的一个重要标志。

### (3) 控制器的基本任务

由表 1.6 可知, 计算机进行计算时, 指令必须是按一定的顺序一条接一条地进行。控制器的基本任务, 就是按照计算程序所排的指令序列, 先从存储器取出一条指令放到控制器中, 对该指令的操作码由译码器进行分析判别, 然后根据指令性质, 执行这条指令, 进行相应的操作。接着从存储器取出第二条指令, 再执行这第二条指令。依次类推。通常把取指令的一段时间叫做**取指周期**, 而把执行指令的一段时间叫做**执行周期**。因此, 控制器反复交替地处在取指周期与执行周期之中。每取出一条指令, 控制器中的指令计数器就加 1, 从而为取下一条指令做好准备, 这也就是指令为什么在存储器中顺序存放的原因。

在计算机术语中, 通常把运算器和控制器合在一起称为**中央处理器**, 简称 CPU, 而将 CPU 和存储器合在一起称为**主机**。

### (4) 指令流和数据流

由于计算机仅使用 0 和 1 两个二进制数字, 所以使用“位”(bit) 作为数字计算机的最小信息单位。当 CPU 向存储器送入或从存储器取出信息时, 不能存取单个的“位”, 而用“字节”和“字”等较大的信息单位来工作。一个“字节”由 8 位二进制信息组成, 而一个“字”则至少由一个以上的字节组成。通常把组成一个字的二进制位数叫做**字长**。例如微型机的字长可以少至 8 位, 而大型机的字长可以达到 36 位甚至 64 位。

由于计算机使用的信息既有指令又有数据, 所以计算机字既可以代表指令, 也可以代表数据。如果某字代表要处理的数据, 则称为**数据字**; 如果某字为一条指令, 则称为**指令字**。

我们已经看到, 指令和数据统统放在内存中, 从形式上看, 它们都是二进制数码, 似乎很难分清哪些是指令字, 哪些是数据字。然而控制器完全可以区分开哪些是指令字, 哪些是数据字。一般来讲, 取指周期中从内存读出的信息流是**指令流**, 它流向控制器; 而在执行周期中从内存读出或送入内存的信息流是**数据流**, 它由内存流向运算器, 或者由运算器流向内存。例如图 1.5 中从地址 1—7 号单元读出的信息流是指令流, 而从地址 9—12 号单元读出或送向地址 13 号单元的信息流是数据流。显然, 某些指令进行过程中需要两次访问内存, 一次是取指令, 另一次是取数据, 例如表 1.6 中取数、乘法、加法、减法、存数指令就是如此。

## 4. 接口通道与输入输出设备

理想的计算机输入设备应该是“会看”和“会听”, 即能够把人们用文字或语言所表达的问题直接送到计算机内部进行处理。但是现在这种理想的输入设备还处于研制阶段。目前常用的输入设备是键盘、鼠标器、光笔图形显示器、数字扫描仪以及模数转换器等, 它们的作用是把人们所熟悉的某种信息形式变换为机器内部所能接收和识别的二进制信息形式。

输出设备的作用是把计算机处理的结果变换为人或其他机器设备所能接收和识别的信息形式。理想的输出设备应该是“会写”和“会讲”。“会写”已经做到, 如目前广为使用的行式打印机、激光印字机、绘图仪、CRT 显示器等。这些设备不仅能输出文字符



号,而且还能画图作曲线.至于“会讲”即输出语言的设备,目前已有初级产品问世.

计算机的输入/输出设备通常称为外围设备.这些外围设备有高速的也有低速的,有机电结构的,也有全电子式的.由于种类繁多且速度各异,因而它们不是直接地同高速工作的主机相连接,而是通过“接口”或“通道”部件与主机相联系.接口的作用相当于一个转换器.而通道的功能更强一些,相当于一个专用的外围设备处理机.它们可以保证外围设备用计算机系统特性所要求的形式发送或接收信息.

一个典型的计算机系统具有各种类型的外围设备,因而有各种类型的接口或通道.接口或通道使得被连接的外围设备通过系统总线与主机进行联系,以便使主机和外围设备并行协调地工作.

除了上述各部件外,计算机系统中还必须有总线,系统总线是构成计算机系统的骨架,是多个系统部件之间进行数据传送的公共通路.借助系统总线连接,计算机在各系统部件之间实现传送地址、数据和控制信息的操作.

以上是我们对一台计算机硬件组成的概貌了解,其目的在于使读者对现代计算机的整体先有一个粗略的印象,以便在讲授后面各章时提供某些方便.

## 二、计算机系统结构的过去和未来

世界上第一台电子数字计算机是1946年制成的.这台机器用了18 000多个电子管,占用长度超过30米的房间,重量达30吨,而运算速度只有5000次/秒.从今天的眼光来看,这台计算机耗费既大又不完善,但却是科学史上一次划时代的创新,它奠定了电子计算机的基础.自从这台计算机问世以来,计算机的发展大致经历了四代的变化:

第一代为1946年开始的电子管计算机.计算机运算速度一般为每秒几千次至几万次,体积庞大,成本很高,可靠性较低.在此期间,形成了计算机的基本体系,确定了程序设计的基本方法,“数据处理机”开始得到应用.

第二代为1958年开始的晶体管计算机.运算速度提高到几万次至几十万次,可靠性提高,体积缩小,成本降低.在此期间,“工业控制机”开始得到应用.

第三代为1965年开始的集成电路计算机.可靠性进一步提高,体积进一步缩小,成本进一步下降,运算速度提高到几十万次至几百万次.在此期间形成机种多样化、生产系列化、使用系统化,“小型计算机”开始出现.

第四代为1971年开始的大规模集成电路计算机,可靠性更进一步提高,体积更进一步缩小,成本更进一步降低,速度提高到每秒几百万次至几千万次.由几片大规模集成电路组成的“微型计算机”开始出现.

总之,从1946年计算机诞生以来,大约每隔五年运算速度提高10倍,可靠性提高10倍,成本降低10倍,体积缩小10倍.而70年代以来,计算机的生产数量每年以25%的速度递增.

正是由于生产、科研、应用的飞速发展,促使计算机的系统组织结构也不断完善,形成了当代计算机的体系结构形式.四十多年来计算机体系结构的发展过程,是在冯·诺依曼型结构的基础上,围绕如何提高速度、扩大存储容量、降低成本、提高系统可靠性和方便用户使用为目的,不断采用新的器件和研制新的软件的过程.就系统结构本身来说,主要是指令系统、微程序设计、多级存储器体系结构、输入/输出系统结构、分布式