

葛本修编著

计 算 机 组织与结构

JISUANJI
ZUZHI YU JIEGOU

北京航空航天大学
出版社

03

1

计算机组织与结构

葛本修 编著

北京航空航天大学出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

主要内容有：概论、数的表示、基本微操作及其实现、运算方法及运算器、指令系统、存储系统、控制器、微程序技术、输入输出系统、整机实例介绍等。每部分附有练习题。本书为高等院校计算机专业的教学大纲及长期教学实践经验对单机系统的组成与结构进行了全面、详细的论述，并结合各种典型结构与技术阐述了设计的思想与工程实现。本书为大专院校计算机专业教材，也可供有关科研、工程技术人员参考。

计 算 机 组 织 与 结 构

JISUANJI ZUZHI YU JIEGOU

葛本修 编著

责任编辑 郭学廉 郑忠妹 许传安

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地书店经售

北京农业工程大学印刷厂印装

787×1092 1/16 印张：20.5 字数：525千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷 印数：5000册

ISBN 7-81012-304-1/TP·003 定价：5.30元

前 言

《计算机组织与结构》课程，是计算机科学与工程学科中各专业必修的核心课程之一。其目的在于使学生了解计算机单机系统的基本组成、工作原理以及其工程实现。培养学生从事计算机硬件结构的分析、应用、设计、开发的能力，并为其他有关课程打下基础。

《计算机组织与结构》课程的有关先修课是《计算机概论》和《数字逻辑》。后继课有《汇编语言》，《微型机应用》，《计算机系统结构》等。

该课程学习的难点是建立起空间上、时间上的整机概念。为解决此问题，本书作为教材在编写中注意了下列几点：

1. 在介绍计算机及其各部件的各种结构与各种技术时，着重介绍其设计思想及其实现的手段，从而启发学生独立思考及开拓新思路的精神和能力。

2. 书中在介绍计算机结构之前，增加了“寄存器微操作”一章，其目的是使学生将前修课与本课能够紧密联系起来，以提高学生对各种组成予以工程实现的能力。同时，可将课程中的难点分散。在了解了微操作的时间、空间的关系后，对整机控制的概念就比较容易建立了。

3. 每章之后附有较多的练习题。习题的选择上除了一些巩固所学知识的基本题外，力求增加一些较深入的、应用性的题目。

4. 为增强学生的实践能力，与课程同时进行的有实验课，其内容是以运算部件，各种数据通路，微程序控制，存储器测试等为主。拟定题目要求，由学生自行设计、安装、调整。在课程结束后，设置硬件课程设计。内容是完成一个小型机主机的设计与实现。

本书按照少而精的原则进行讲授，课堂着重讲解重点、难点、思路。留有较多的内容由学生自学。总的教学参考学时为68学时。其中第二章内容已在前修课中讲过，此处不再占用课堂时间，只为提供给读者学习中参考的方便。第十章可作为学生自学。其他各章学时的分配大致如下：

第一章 2学时； 第三章 6学时； 习题课 2学时； 第四章 8学时；
第五章 6学时； 第六章 12学时； 第七章 8学时； 习题课 2学时；
第八章 8学时； 第九章 10学时； 资料阅读 2学时； 机动 2学时。

本书由航空航天部教材编审室审定。在编写过程中得到了北京航空航天大学胡建平教授的支持与帮助。北京理工大学副教授张前焜老师进行了认真、细致的审核，提出了十分宝贵的意见。在此一并表示诚挚的感谢。由于作者水平所限，书中难免存在一些缺陷、错误，真诚地希望读者提出批评指正。

编者 1991年元月

目 录

第一章 概 论

- § 1-1 计算机的组成 (2)
- § 1-2 计算机的工作原理 (7)
- § 1-3 计算机的分类 (9)
- § 1-4 计算机系统的层次结构
..... (10)
- § 1-5 计算机的过去、现在和将来
..... (11)
- 练习题..... (14)

第二章 数的表示

- § 2-1 数制 (16)
- § 2-2 定点数及其机器中的代码
..... (21)
- § 2-3 浮点数及其机器表示
..... (30)
- § 2-4 十进制数在机器中的表示
..... (37)
- § 2-5 字符代码 (40)
- 练习题..... (43)

第三章 基本微操作及其实现

- § 3-1 寄存器传送级的描述
..... (47)
- § 3-2 寄存器传送微操作 (49)
- § 3-3 算术微操作 (56)
- § 3-4 逻辑微操作 (60)
- § 3-5 移位微操作 (64)
- § 3-6 微操作的控制 (67)
- § 3-7 微操作序列及其实现
..... (70)
- 练习题..... (73)

第四章 运算方法与运算器

- § 4-1 概述 (75)
- § 4-2 加减法的实现 (75)
- § 4-3 乘法算法及其实现 (81)
- § 4-4 除法算法及其实现 (98)
- § 4-5 浮点数的运算及其实现
..... (108)
- § 4-6 十进制数的运算..... (113)
- § 4-7 运算器结构实例介绍
..... (118)
- 练习题..... (123)

第五章 指令系统

- § 5-1 指令与指令系统..... (126)
- § 5-2 指令种类..... (129)
- § 5-3 寻址方式..... (131)
- § 5-4 PDP-11 指令系统介绍
..... (137)
- § 5-5 IBM360/370指令系统简介
..... (145)
- § 5-6 INTEL8086指令系统简介
..... (146)
- 练习题..... (147)
- 附表 I PDP-11 指令表 (部分)
..... (149)
- 附表 II IBM360/370 指令表
..... (151)

第六章 存储系统

- § 6-1 概述..... (155)
- § 6-2 主存储器..... (159)
- § 6-3 辅助存储器..... (182)

§ 6-4 多体存储器	(190)
§ 6-5 高速缓冲存储器	(193)
§ 6-6 虚拟存储器	(199)
§ 6-7 主存储器保护	(205)
练习题	(206)

第七章 控制器

§ 7-1 概述	(208)
§ 7-2 指令执行的过程	(209)
§ 7-3 控制方式与时序部件	(212)
§ 7-4 微操作控制部件	(215)
§ 7-5 重叠控制与流水控制	(220)
§ 7-6 中断系统	(222)
练习题	(228)

第八章 微程序技术

§ 8-1 概述	(231)
§ 8-2 微指令格式	(233)
§ 8-3 微指令地址的形成	(234)
§ 8-4 微指令的执行时序与控制	(236)
§ 8-5 微程序设计举例	(238)

§ 8-6 毫微程序设计	(244)
§ 8-7 微程序的应用	(245)
练习题	(247)

第九章 输入输出系统

§ 9-1 概述	(249)
§ 9-2 输入输出设备简介	(253)
§ 9-3 总线	(258)
§ 9-4 程序查询输入输出方式	(266)
§ 9-5 程序中断输入输出方式	(269)
§ 9-6 存储器直接传送 (DMA) 输入输出方式	(272)
§ 9-7 通道输入输出方式	(275)
练习题	(283)

第十章 整机实例介绍

§ 10-1 VAX-11/780介绍	(285)
§ 10-2 INTEL80386介绍	(307)
练习题	(317)

附录 A 常用英文缩写解释	(318)
参考文献	(319)

第一章 概 论

本章主要是对电子数字计算机予以简要地但比较全面的介绍。其目的：一是为了在深入地学习计算机的各部分之前，能够对它有一个整体的、粗浅的认识。以便在学习过程中能更好地理解各部件的原理及性能，在进行设计和选择结构形式时，具有全面的观点。二是为了对计算机中常用的一些名词术语有所了解，以便在以后的章节中能够使用这些名词术语，更明确、更简炼的阐明问题。由此带来的好处是，在学习本书以后章节之前，大家就已具备了一些起码的知识，可以参阅有关的资料，以丰富知识，扩大眼界，更好地掌握本书的内容。

本书所要研究的是电子数字计算机的组织与结构。电子数字计算机只是计算机中的一种。所谓计算机，是人类进行计算的一种工具。在历史上很早就出现了计算机，如算盘就是一种。后来又出现了机械的、电动的等等。随后又向电子化、自动化发展，出现了当今世界上普遍使用的电子计算机。而电子计算机一般又包括有三种形式：模拟计算机、数字计算机和数字模拟混合计算机。

模拟计算机是用电路中电量之间的关系来模拟其他物理量的计算。如在电路中欧姆定律为：

$$U = IR$$

其中 U ——电阻两端的电压； I ——电阻上的电流； R ——电阻

而其他物理系统中也有一些类似的关系，如速度、距离、时间的关系为：

$$S(\text{距离}) = u(\text{速度})t(\text{时间})$$

如果使电阻 R 的大小与时间 t 成一定的比例；使 I 与 u 也成正比，那么 U 与 S 之间也一定是成比例的。通过 $U = IR$ ，也可以求得距离 S 。又如电路中的叠加原理，可以用来作为求和的计算电路。根据这种模拟的原理组成了一些模拟基本部件。如加法器、乘法器、积分器等。按照研究对象的数学方程所确定的关系连接起来，即可达到解题的目的。

例如：求解下例一阶微分方程

$$y' + y = x$$

其中 x ——输入变量； y —— x 的函数， y' —— y 对 x 的一阶导数。

用模拟计算机求解时，将选择所要用到的模拟部件，如加法器、积分器等，按照图1-1所示的方式连接起来，就可以根据输入量 x 求得其函数 y 。这种用基本模拟运算部件按研究对象的数学方程连接起来的方法，称之为模拟计算机的排队。排队工作是实现模拟计算的主要技术工作。

电子模拟计算机的工作过程不是“计算”，而是模拟，所以它具有以下几个特点：①其输入量与输出量是连续变化的。例如通常都是用电压信号来表示。所以模

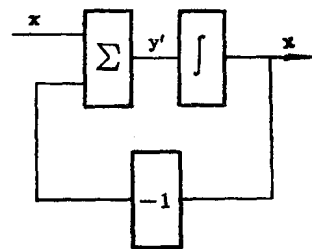


图1-1 求解 $y' + y = x$ 的模拟计算框图

拟计算机也称为连续作用机。②由于它的运算框图是按求解的方程连接起来的，而且它的输出电压信号可以直接由示波器或绘图仪显示出来，所以比较直观。③在模拟计算的过程中，一种基本的运算是通过电子线路的输入与输出关系来实现的，从输入反映到输出所需的时间只是该部件的电路延迟。同时求解各项还有可能并行处理，所以它的又一个特点是响应速度快。④除了以上的优点外，其严重缺点就是计算精度低。主要原因是受到部件精度的限制。目前模拟运算部件的精度是0.1%到0.05%，当运算框图的级数愈多，其精度将按方次下降。⑤另外一个缺点是计算的过程与结果在机器中都不能记忆和存储。

数字计算机的解题过程是对数值进行计算。在机器中对数字进行加、减、乘、除的四则运算和其他的一些处理。它的特点是：①输入与输出都是数字量、离散量。例如 $y = f(x)$ ， y 是变量 x 的函数。 x 作为输入量是一些离散的数字量 $x_0, x_1, x_2, \dots$ ，相应得到的输出也是 $y_0, y_1, y_2, \dots$ 。②数字机的计算精度高。因为它的精度主要取决于数字量所采取的位数。而位数的多少可以根据精度的要求确定，在机器的结构上只是增加一些设备而已，并无太大困难，因而精度可以达到很高。③具有记忆和逻辑判断的能力。因为数字机中有存储信息的部件和逻辑判断的手段，因此可以使整个计算过程全部自动化。由于有了这两个突出的优点，也就使得它通用性很强，能够进行各种各样的处理，从而使得数字计算机在现今世界中得到了广泛的应用。④与模拟机比较，它的缺点是响应速度比较低。但这一缺点也随着数字计算机性能的不断f提高，变得不明显了。

除了以上两种形式外，还有一种数字模拟混合计算机。在某些场合，如飞行器的动态模拟，不论是数字计算机还是模拟计算机都各因自己的缺点难以满足要求，从而产生了在模拟机的基础上，加上一些数字部件作为辅助计算、控制、存储之用，形成了现在的混合机。

图1-2是一种组合式混合机，它是由一台模拟机和一台数字机联合组成，经过模-数、数-模变换器的中间接口连成一个系统。

随着科学技术的发展，这三种类型的机器都在迅速的发展，以满足不同的需要。本书是介绍电子数字计算机的组成与结构，所以在以后所提到的电子计算机或计算机，都是指数字机而言，不涉及其他两种形式的机器。

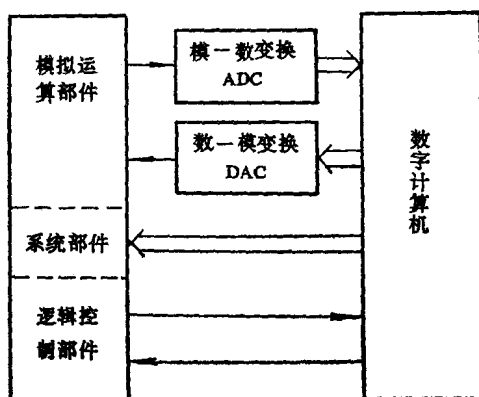


图1-2 混合计算机的组合框图

§ 1-1 计算机的组成

由前所述，可以给电子数字计算机一个较为明确的定义。它是一种自动的能对离散量进行算术运算与逻辑运算的电子式的工具。作为一个计算机系统，它由硬件和软件两大部分组成。所谓硬件就是指计算机所具有的各种设备；所谓软件则是指使用这些设备的手段。举例来说，一台电话机是一个设备，也就是一个硬件。但是只有一台电话机并不能完成通话的功能，还必须有一个电话号码。只有按规定拨完了电话号码后，电话机才能工作，电话号码则

是软件。硬件和软件是相互依存的两个部分，离开了一方，另一方就失去了存在的意义。随着计算机的发展，软硬件的关系也越加密切。如某些功能要求，可以由硬件实现，也可以由软件实现，而各具不同的优点。甚至还可以软硬结合实现。

一般计算机的硬件结构可以分为以下几部分：运算器、控制器、存储器、输入输出设备。这4大部件之间可以通过不同方式联系起来，或是直接通路的联接方法，如图1-3(a)所示，或是用总线的联接方法，如图1-3(b)所示。

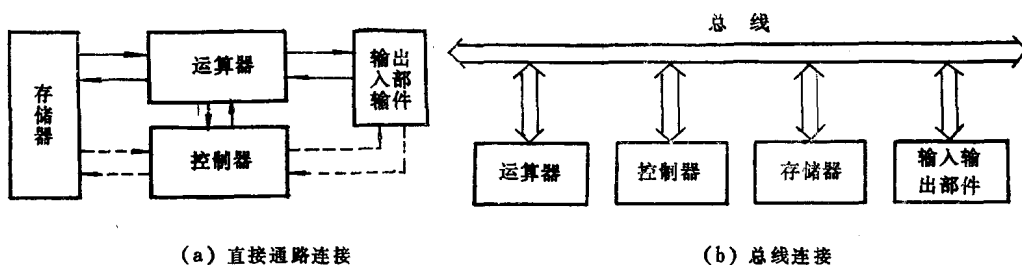


图1-3 部件间的连接

1. 运算器

运算器是对数据进行处理的部件。不管计算机具有多强的功能，能处理多么复杂的问题，但运算器本身进行数据处理的功能，只有最基本的二进制算术运算和逻辑运算。如加、减、乘、除四则运算；及与、或、非逻辑运算。

运算器的硬件结构由两部分组成。一部分是算术逻辑运算部件。这是运算器的核心，它主要由并行加法器及其他逻辑运算部件和各种数据通路组成。由于计算机中的信息都是由二进制的代码形式表示。所以所有的部件都是完成二进制运算，寄存，传送的电子线路。如全加器，各种门电路等。运算器的另一部分是寄存器部件。用以寄存参加运算的数据，其基本结构示意图如图1-4所示。被处理的数据分别寄存在A、B寄存器中，参加运算时，两者同时传送至算术逻辑运算部件ALU。其结果则送到指定的存放单元。

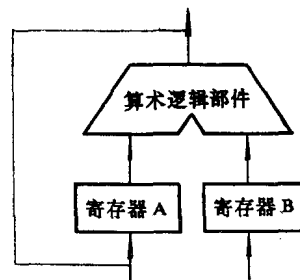


图1-4 运算器结构示意图

运算器主要的性能是影响整个计算机系统性能的重要因素。运算器所能并行处理二进制代码的位数通常称为机器字长。位数的多少影响了计算机的精度，位数越多，所能处理的数据范围就越大，精度就越高。运算器进行基本运算的速度，将直接影响系统的速度，如早期的计算机通常用每秒进行加法的次数，或是四则运算的平均次数作为机器的速度参数，所以精度和速度就成了运算器的重要性能参数。

2. 存储器

存储器的主要功能是用来存放程序和数据。程序、数据都是用二进制代码形式存放的，可以统称之为信息。所以存储器也就是存储二进制代码的部件。为此希望存储器具有可靠的保存性能。也就是说信息存放其中，在不使用时能长期稳定的存储，不易丢失，不易改变。在使用时，能方便的取出、存入和修改。一个存储器的结构框图如图1-5所示。

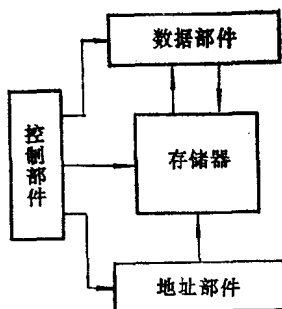


图1-5 存储器结构框图

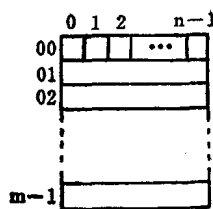


图1-6 存储体示意图

① 存储体：是存放信息的地方，是存储器的核心部分。它是由具有两种物理状态的介质，或是具有两个输出状态的电路来寄存一位二进制代码。如触发器的两种工作状态，磁性物质的两种磁通方向等。用多个二进制代码的记忆线路，按并行读出、存入的功能组成一个存储单元。而一个存储体是许许多多存储单元的集合。为了能有有效的存、取，每个存储单元编有一个地址。其结构示意图如1-6所示。每一个存储单元为 n 位。共有 M 个存储单元，其地址由 $00 \rightarrow M-1$ 。对于每个信息的存入和读取都可以按地址进行。为此则必须有第二个部件即地址部件。

② 地址部件：地址是由多位二进制数来表示，称为地址码。地址部件的功能是按指定的地址码来控制某一个存储单元，使其进行读取和写入。如某信息 X 指定存放在地址为 02 号的存储单元中，那么当存入、或读取 X 时，则将 02 号地址码送入地址部件，地址部件就可产生控制信息控制 02 号存储单元进行接收或是发送操作。

③ 数据部件：数据部件的功能就是暂存存储体读出或写入的信息。一方面完成读写信息的放大、整形、同步的作用；一方面成为存储器与其他部件进行数据交换的缓冲寄存器。

④ 控制逻辑：根据控制器发出的控制命令和时序，产生其他各部分所需的控制信号。

存储器的主要性能指标有两个：容量与速度。存储容量是指一个存储体中有多少个存储单元。也就是能存放多少个信息。目前最常用的编址格式是按字节编址。所谓字节是指 8 位二进制代码的长度称为一个字节，每一个字节对应一个地址码，因此容量的衡量单位也就是指存放字节数的多少。如 4kB ， 64kB ， 1MB 等。 $\text{kB} = \text{千字节数}$ 、 $\text{MB} = \text{兆字节数}$ 、 $\text{GB} = \text{千兆字节数}$ 。存储容量越大，计算机的功能越强，处理问题的能力及范围也就越大，这是用户所希望的。存储器的速度是衡量存储器性能的又一个重要指标。一般用存储周期（也称读写周期）来说明，它是指两次访问（读取或写入）存储器之间的最小时间间隔。存储周期是很重要的一个参数，在计算机工作过程中，信息是不断的在存储器与运算器之间进行传送，因此速度的大小直接影响了机器的速度。存储器的速度主要取决于存储器记忆元件的性质和存储器的结构。

3. 控制器

控制器的功能是控制整个计算机各个部件按照要求协调的工作。也就是说控制器必须自

动的按照给定的命令要求，发出一系列控制信号，供给各个部件，使他们顺序地、相互严密配合地完成指定的功能。为此，控制信号本身应体现两方面的性能，它应向各部件指明：①应该执行什么操作？②什么时间做？这就要求控制器的基本构成应包括指令部件，定时部件。图 1-7 给出了其结构框图。

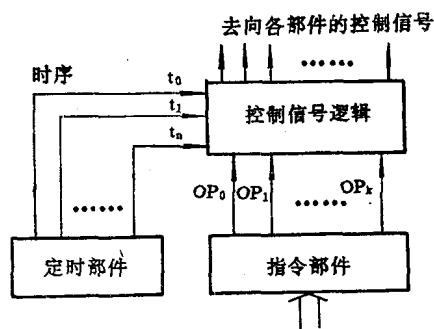


图 1-7 控制器结构框图

① 指令部件：所谓指令，即一组二进制代码，它指出了计算机所能执行的基本操作。这是面向机器的命令，也称为机器语言。每个计算机在系统设计时都已指明机器所能完成的操作，如加法指令、传送指令、转移指令等等。用户可以根据自己解题的要求，运用指令编写程序。控制器的指令部件，就应对用户所用的指令进行解释，并转变为各个部件所需的控制信号。

② 定时部件：计算机是严格按照规定的时间进行操作的。一条指令的执行是通过许多部件按照先后次序进行指定的操作来完成的，对于这种严格的时间关系，我们称之为定时。定时是由机器的时钟脉冲来保证的，定时部件就是根据机器的时钟脉冲发出全机所需的具有先后次序的定时信号。各个部件即可在各个不同定时信号控制下工作。

③ 控制信号逻辑：它根据指令的操作要求，和时序先后的要求，将“做什么”“什么时间做”两个参数进行综合，产生出所需的控制信号，送往各个部件。

控制器、运算器是两个主要的部件，它的性能往往决定了计算机系统的性能。又因为两者之间的联系最为密切，所以也往往将两者统称为中央处理器 CPU。目前广泛应用的微型计算机系统的特点之一就是 CPU 集成在一块芯片上。CPU 的结构、性能是计算机系统设计师最关注的问题之一。

控制器、运算器是两个主要的部件，它的性能往往决定了计算机系统的性能。又因为两者之间的联系最为密切，所以也往往将两者统称为中央处理器 CPU。目前广泛应用的微型计算机系统的特点之一就是 CPU 集成在一块芯片上。CPU 的结构、性能是计算机系统设计师最关注的问题之一。

4. 输入输出部件

输入输出是完成人、机联系的部件。把人们解决问题的步骤与数据通过输入设备送入机器；又要把机器计算的结果通过各种人们希望的形式送出来。完成输入输出的设备多是电气、机械、声、光的设备，如打印机、显示器、键盘、读卡机等等。这些设备各具有自己的结构特点、工作速度、信息形式、信息传送方式等。它们与计算机之间的联系必须通过一个接口部件进行匹配。所以输入输出部件中应包括两部分：一部分是设备本身；另一部分是接口部件。

随着计算机应用的发展，用户关心的除了计算机精度、速度、容量等主要性能外，就是其输入输出部件。人们要求机器能使用更加方便，更加有效，更加实用、美观。目前可以与计算机联接的外部设备是多种多样的，旧的不断淘汰，新的不断出现，这是计算机工业中发展十分活跃的一个方面。

5. 总线

以上说明了计算机组成的 4 大部件。它们之间的联系方式，目前广泛应用的的就是总线联

结方式,所谓总线就是指信息传送的一组公共通路。各部件都只与总线联接,参见图1-3(b)。它们的信息发送和接收也就只与总线有关。如运算器的结果要发送给存储器,它可以将结果送到总线上,以后再发出控制信号,这时在总线上的所有部件都有可能收到这个运算结果,但因为控制信号只发给了存储器,所以也只有存储器来接收。这种总线的方式使部件之间的联系比较规整,减少了接线,同时也使部件的增减变得容易了。例如当需要再增加一些部件时,只要求这些部件的信息发送与接收能满足总线的规定要求就可以了。这给计算机的生产、应用带来了极大的方便。与直接联接相比,总线联接方式的缺点是速度低,并增加了一些总线的控制逻辑。

计算机硬件结构只是组成的一半,另一半是软件。所谓软件就是指各种各样的程序,这些程序是解决各种问题的步骤,用指定的语言格式把它写出来,就称之为程序。当计算机装备上各种程序后,它就具有了十分奇妙的功能。计算机所具有的软件主要有以下几种:

1. 程序语言

人们利用程序语言,把自己需要解决的问题步骤写出来,这就叫编制程序。对于人们来说,最希望的是自然语言,或是所习惯的专业语言。但是程序是需要由机器执行的,那么这些语言就必须让机器能够识别并执行,这就产生了极大的矛盾,因而也就产生出各种各样的程序语言。

① 机器语言:即机器的指令系统,各条语句都是用二进制编码书写的,是机器能够识别的。然而人们应用起来却十分困难。对冗长的二进制编码难以记忆,难以识别。

② 汇编语言:基于机器语言,用符号代替二进制编码,这大大改善了用户使用的条件,给用户提供了方便。如用ADD表示加操作;MOV表示传送操作等等。把指令中所要表达的含义,用各种不同的、但是便于人们记忆的符号表示出来。但是它还是与机器指令系统一一对应,是一种面向机器的语言,使用起来还是比较麻烦。

③ 高级语言:是一种面向问题的语言,人们可以很容易接受这种语言格式。利用它可以方便的书写自己的程序。因为要解决的问题类型是多种多样的,高级语言的种类也是很多的。如BASIC, FORTRAN, COBOL, PASCAL, C 等等。语言的发展十分迅速,具有新的功能,优点更突出的语言不断出现。其发展方向:一个是要更有利于发挥机器的性能,一个是更有利于用户编制程序。

不管是高级语言,还是汇编语言,机器都不能直接识别。用这种语言编写的程序,称为源程序。必须将高级语言转换成机器语言,计算机才能识别和执行。这种机器语言的程序称为目的程序。执行高级语言的方式有两种。一是将源程序通过一个编译程序,将其翻译、编辑成机器语言的目的程序。将此目的程序提供给机器执行。高级语言的编译程序也称编译器(Compiler)。编译汇编语言的称程序汇编器(Assembler)。每一种语言都有它自己编译程序。第二种方式是不生成目的程序,只是根据高级语言的语句逐条解释,机器逐条执行。如汇编、BASIC都可以解释执行。完成这种功能的程序称解释程序或解释器。语言的处理程序,是系统软件之一。

2. 操作系统

操作系统是一组软件，它们的功能是用来控制和管理计算机所具有的各种资源。主要分为两部分：一是对计算机所有的资源进行调度、管理、监督。使它们尽可能的充分发挥其作用，彼此之间能保持协调、高效。所谓资源，是指计算系统中的处理机，主存储器，各种外部设备，各种配置的软件等。二是为用户使用计算机提供监控手段和服务的条件。使用户能很方便的使用机器的各种功能，并能有效的监督和控制机器的工作。操作系统本身的性能直接影响了机器性能的发挥。一台机器性能很好的硬件结构，如果配置了一个不良的操作系统。用户使用起来也将感到困难、别扭，甚至感到速度很慢。在发展中，优秀的操作系统不断出现，为广大用户所欢迎，并被许多机器中普遍采用的有DOS系统、UNIX系统CP/M等等。

3. 检测、诊断程序

这是机器的又一系统软件。它的主要功能是用来检验和定位机器中的故障。计算机是一种组成十分复杂的电子设备，必须定期的进行检测与维护，以保证其正确可靠的工作。当全部检测程序都能正确执行时，则说明机器是完好的。一旦出现错误，利用诊断程序应能找到故障的位置。检验和诊断从理论到实现都是计算机系统中独立的一部分。将有专门的书籍予以论述。

以上三种程序是计算机系统本身配置的，所以称为系统软件。在用户使用时还要输入用户的源程序，称为应用程序。当前为给用户方便，许多常用的通用软件已形成商品，或组成一个软件包，随计算机系统一起出售。如工资管理，财务管理，人事档案管理等软件。

§ 1-2 计算机的工作原理

计算机的硬件结构所完成的功能，只是一些最基本的操作，如加、减、与、或、传送、比较等等。而需要计算机处理的问题却是多种多样，十分复杂的，如科学计算，数据处理，事务管理，实时控制等。这样就必须把需要解决的问题转换为机器所能识别的操作。首先要对问题进行算法分析，将其转换成计算机所能解决的形式，根据这个分析制定好解决问题的步骤，将这些步骤利用高级语言编写成源程序，通过机器中的编译或解释变成机器指令，这样计算机就可以识别和执行了，其过程可由图 1-8 表示。本书只是说明机器执行目的程序的过程。

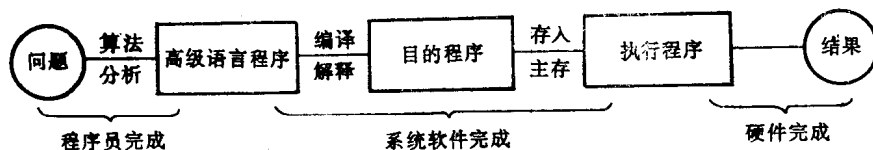


图1-8 计算机解题过程示意

每个机器都有自己的指令系统。指令系统就是指所有指令的集合。说明了指令的格式与

种类。一般的指令格式为：

操作码	地址码
-----	-----

操作码：它指出操作的性质，用二进制编码表示，如加、减、移位、转移等等。

地址码：指明参加操作的数据存放的位置。

假设某一机器具有下列一些指令：

操作	操作码	操 作 说 明
加法	000	地址码所指出的数与运算器中的数进行加法，结果放在运算器中。
除法	010	地址码所指出的数除以运算器中的数，结果放在运算器中。
取数	101	将地址码所指定的数取到运算器。
送数	110	将运算器的数送到地址码所指定的存储单元中。
减法	001	其操作类似加法。
乘法	011	其操作类似除法。

如果要在该计算机上进行下列运算：

$$f = a + b/c$$

需要按照人们解题的步骤编写程序，解题步骤应该是：

- 第1步：取b数，
- 第2步：取c数来与b数相除，并记录结果；
- 第3步：取a数；
- 第4步：取b/c的结果与a相加；
- 第5步：送结果。

把上述步骤用指令表达出来就是程序。在写程序之前，要先将所涉及的数据存到内存的已知存储单元中，如：

内存地址	数据
0 0 1 0	a
0 0 1 1	b
0 1 0 0	c
0 1 0 1	f(b/c)

程序如下：

	操作码	地址码	指令地址
① 取数 b→	101	0011	1000
② 除法 c→	010	0100	1001
③ 存数 b/c→	110	0101	1010
④ 取数 a→	101	0010	1011
⑤ 加法 b/c→	000	0101	1100
⑥ 存数 f→	110	0101	1101

程序编写好后也要存放在存储器中，如放在以1000为首的地址区域中。之后，可以启动机

器，在计算机控制器的控制下逐条按顺序的执行这段程序，从而得到结果。

从以上说明来看，计算机具有几个主要特点：

① 计算机的工作是存储程序，顺序执行。以此保证处理信息过程的自动化。在存储器中不仅存放了数据，也存放了程序，即解题的步骤。只要启动机器工作，它就可以按照指定的步骤顺序的，自动的，一条一条的指令执行下去。这种存储程序的概念是冯·诺依曼提出的，他奠定了迄今为止占有主导地位的计算机的结构形式。

② 计算机中都是二进制编码的数字化信息。不管是指令、数据还是地址，都是用二进制的编码来表示。目前所能处理的各种形式的信息，如语言、文字、图形、声音等都可以用二进制编码表示，也统称为数据。数据和指令在计算机中，形式上没有什么不同，只能以存放的地址不同来识别它，因而存储器中有指令区和数据区之分。

③ 计算机具有运算、逻辑判断、记忆的基本功能。不管是什么类型的问题，不管是简单还是复杂的问题，都可以通过成千上万次地重复这些简单的、基本的功能来完成。

④ 计算机是由高速高集成度的电子器件组成，从而保证了基本操作的高速度；保证了计算机结构的可行性和实用性。

因为有了以上四个特点，则使计算机具有通用性强，精度高，速度快的优点。从而能广泛的应用于社会建设的各个方面。

§ 1-3 计算机的分类

计算机按不同的原则可以有多种分类的方法，在此只介绍以结构形式的分类法。

在程序执行的过程中，计算机中只有两种类型的信息在流动，即控制指令和被处理的数据，形成了指令流(Instruction Stream)和数据流(Data Stream)。指令流是指处理机执行的指令序列；数据流是在指令流控制下被存、取、处理的数据序列。指令流和数据流是一个动态的概念。在1966年FLYNN（费林）提出了一种按指令流和数据流的分类法，见图1-9。

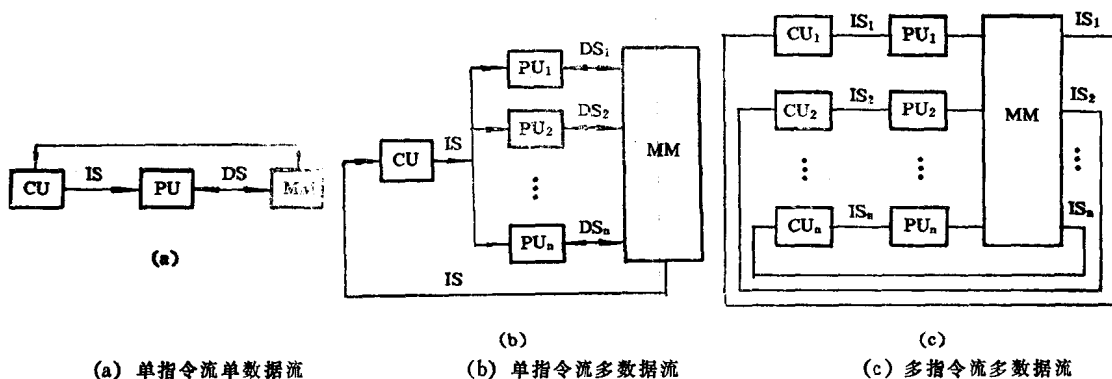


图1-9 FLYNN分类图

① 单指令流、单数据流 SISD 结构(Single Instruction Single Data)：即传统的单处理机。它的指令部件一次只对一条指令译码，并只对一个操作部件分配数据。现在通常用的都属此类，如PDP-11，IBM360/370，以及各种微处理机。

② 单指令流、多数据流SIMD结构(Single Instruction Multiple Data):其典型代表是阵列处理机或并行处理机,它的并行性存在于指令一级。其指令部件根据同一条指令的要求,在同一个控制器的控制下,同时向多个处理部件分配不同的数据。各个数据流的流速应该是相同的,如ILLACIV(64个单元)和BELL实验室的PEPE(16单元)都是阵列机。

③ 多指令流、单数据流MISD结构:此种形式是多个指令部件,并行发出多个指令流到不同的处理器,对同一个数据流进行处理。

④ 多指令流、多数据流MIMD结构:是一个多处理机系统,是实现全面并行的理想结构。每个处理器都分别执行系统分配给它的程序段,同时执行多个指令流对多个数据流不同的处理,如IBM3081/3084, Univac 1100/80, Cray-2等均属这一类型。

本书讨论的主要对象是SISD。

§ 1-4 计算机系统的层次结构

最早期的计算机只能提供用户机器语言,使用者必须用二进制编码的语言详细地编写程序,当然这是十分不方便的。随着第二代、第三代的发展,出现了汇编语言,各种高级语言;形成了操作系统,组成了一个软硬件不可分割的整体。它们相互渗透,相互贯通,相互促进,使计算机不断改善,不断满足用户新的需要,提供更好的服务。根据计算机所体现语言的功能不同,可以将计算机系统看成是由多级虚拟计算机组成。从内向外,层层相套,形成了所谓“洋葱”式的功能结构模型,如图1-10所示。

图中第2层次是最早计算机的结构,机器语言是可以由硬件直接实现的,所以其0~1层称为计算机层次的硬件内核。随着器件的发展,一条指令的功能可以由硬件执行一段微指令的序列,也就是一段微程序来完成。微程序的执行是基于第0层硬接线的逻辑电路,它可以直接完成一条条的微指令。所以第0、1两层是具体实现机器运算,存储,控制各个基本操作的实体。从第2层向外发展,就可以看出计算机的不同功能的层次。第3,4级为汇编语言与操作系统级和高级语言级,用户可以不了解机器的硬件结构和机器语言,而直接用所指定的语言和操作系统来使用机器。对这一级的用户来说,他所面对的是一个能够执行高级语言,并具有许多方便功能的机器。实际上,它只是在原有硬核的基础上提供了必须的系统软件,使机器呈现出新的功能,因而我们称它是虚拟机。再向外发展,就到了应用语言级的范围,计算机提供了这样的软件服务,对于各个不同的应用范围,可以具有自己的语言,使各行各业的人都能直接方便地使用计算机。

计算机层次结构的概念对以后深入学习计算机的有关知识时是非常有用的。因为现代的计算机是一个复杂的系统,面对着各种不同的应用。由于软、硬件设计者和使用者从各自不

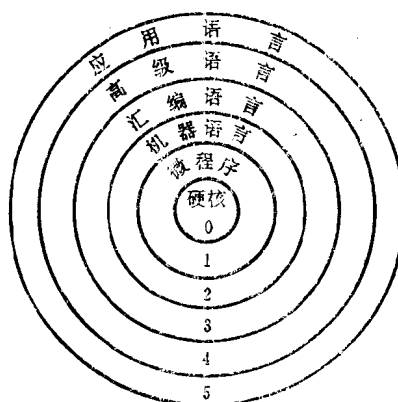


图1-10 计算机系统的层次结构

同的角度看,所看到的计算机的属性也各不相同。那么对计算机提出的要求,作出的改进,应用的方法也就可能各不相同。为了能更好的研究上述从不同角度所看到的机器之间的联系,分清相互的界面,明确各自的要求,以便实现软、硬件的密切配合,构成最有效的计算机系统。在计算机的发展过程中,逐渐形成了上述的多层结构的概念。对于多层次的分层方式,目前并不统一,上面只介绍了常用的一种。

通过以上说明可以看出,多层次中,每层机器都有自己的语言,而每一层语言都要通过翻译或解释由低一层次的机器实现。因次,只要明确了层次的界面,功能的分担与约定,那么对各层的设计者、使用者来说,所面对的机器就很清楚了。

在当前,0~2层的机器是一个实际的机器,是由硬件组成的。而从第3层以上则是在软件的支持下,形成的一层新的机器性能,是虚拟机,所以软硬件的界面定在第2,3层之间。但是随着计算机工业的发展,集成电路技术的发展,软硬件的界面不是很明确,因为任何操作可以由软件来完成,也可以由硬件来完成。同样,任何一种机器的功能也可以由硬件或软件来实现。究竟采用何种方式,则需要权衡利弊,决定取舍。

§ 1-5 计算机的过去、现在和将来

在第一台电子数字计算机出现以前,数字式的计算工具已有几百年的发展历史了。从最早的中国的算盘开始经历了手动的、木制的、机械的、电动的、机电的多种发展形式,给后来数字计算机的迅速发展奠定了理论上和工程技术上的基础。在这一阶段中,有许多著名的人物做出了卓著的贡献。

1642年法国数学家巴斯噶(Pascal B 1623~1662年)设计了一台能实现加减法的、机械式的计数器。

约于1671年德国数学家莱布尼兹(Leibniz GW 1646~1716年)在巴斯噶机器的基础上制造了一台能自动实现乘法、除法的计算器。Leibniz机器是现在四种基本功能的计算器的先驱。莱布尼兹系统地提出了二进制算术运算的法则,并指出世界上最早使用二进制的是中国的八卦。

在计算机发展史上最卓越的人物之一是英国数学家巴比吉(Charles Babbage 1791~1871)。他设计了一台差分机(1823年)和一台分析机(1834年),这两台计算机虽然由于种种原因没有实现,但他的设计思想奠定了现代电子数字计算机的基础。分析机由以下几部分组成:

- ① 保存数字信息的齿轮式寄存器,巴比吉称之为“堆栈”,包含有100个寄存器。
- ② 从寄存器取出数据进行各种运算的装置,巴比吉称之为“工场”。
- ③ 控制操作顺序,选择所需处理的数据以及输出结果的装置。

显然,这个时期的数字计算机是机械式的,用的是字轮和齿轮传动装置,称为数字计算机的机械时期。

自巴比吉制造分析机的尝试失败以后,数字计算机研制工作大约停顿了近一个世纪。直到19世纪末和20世纪前半期,数字计算机的发展进入了一个不寻常的时代。

1943年德国工程师朱斯(Komrad Zuse)的Z3机是第一台通用程序控制计算机。Z3的运