

高等学校
电子信息类 规划教材

微型计算机原理

00101011

杨吉祥 编著



01001010
10010101
01001011



电子科技大学出版社

0100101011

内容简介

本书以Intel 8086/8088微处理器为核心，详细讲解了微型计算机的组成、工作原理、指令系统、总线系统、I/O系统、中断系统、系统总线、系统软件、系统应用等。本书可作为高等院校计算机专业及相关专业的教材，也可供从事计算机工作的工程技术人员参考。

微型计算机原理

图灵社区 (TIP) 出版

杨吉祥 编著

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书系全国高等学校电子信息类专业“九五”规划教材。书中重点讲述16/32位微处理器原理及微机接口技术。具体内容包括：8086/8088微处理器原理、汇编语言程序设计、80486/Pentium微处理原理、半导体存储器原理及微机中存储器系统的构成、微型计算机系统的构成、微机接口技术、常用的微型计算机总线、CRT显示器适配器原理及编程技术、打印机适配器原理、异步串行通信适配器原理及编程技术。本书在讲清微机基本工作原理的同时，还着重介绍了编程方法与应用技术，在讲述时注重深入浅出。

本书可用作高等学校微型计算机原理课程的本科生和研究生教材，亦可用作从事微机生产、科研的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微型计算机原理/杨吉祥编著，—成都：电子科技大学出版社，2000.12
ISBN 7-81065-594-9

I. 微... II. 杨... III. 微型计算机—基本知识 IV. TP36

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第84795号

微型计算机原理

杨吉祥 编著

出版：电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号，邮编：610054)

责任编辑：罗雅

发行：新华书店

印刷：四川导向印务有限公司

开本：787×1092 1/16 印张 24.375 字数 593.19千字

版次：2001年1月第一版

印次：2001年1月第一次

书号：ISBN 7-81065-594-9/TP·393

印数：1—3000册

定价：28.00元

前 言

本教材系按原电子工业部的《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》由电子仪器与检测技术专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由东南大学杨吉祥编写,主审梅杓春、孙力娟,责任编委梅杓春。

本教材的参考学时数为 60~80 学时。其主要内容包括 8086/8088 微处理器原理、汇编语言程序设计、80486/Pentium 微处理器原理、半导体存储器原理及微机中存储器系统的构成、微型计算机系统的构成、微机接口技术、常用的微型计算机总线、CRT 显示器适配器原理及编程技术、打印机适配器原理、异步串行通信适配器原理及编程技术。本书在着重讨论微机的基本工作原理的同时,也注意讨论了编程与应用技术。Intel、Pentium 系列是应用最广泛、最具代表性的微处理器系列,本书重点讨论了 80486/Pentium 微处理器。Intel 微处理器系列的功能在不断发展,但其基本功能却具有相似性,读者一旦掌握了基本的 8086/8088 微处理器原理,就能较容易地理解复杂的高档微处理器。因此,本着由浅入深的精神,本书先讨论了 8086/8088 微处理器。本书的另一个重点是讨论微机接口技术。随着微电子技术的发展,各类微机接口芯片的规模在不断扩大,新品种不断涌现,使初学者难以跟踪学习。但在这些复杂的接口芯片中仍包含了在 8/16 位微机中采用的通用接口芯片的类似功能,掌握了后者,也就不难学习前者。因此本着讲清基础的原则,本书仍以讨论这些基本的接口芯片为主。

使用本教材时应注意加强实践性环节。在本教材的教学过程中,必须开设相应的实验,包括编程和接口等实验,同时还必须完成一定数量的习题。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望读者批评指正。

编 者

2000 年 8 月

目 录

第一章 绪论

1.1 微处理器的发展概况	(1)
1.2 计算机的组成及工作概述	(4)
1.3 电子计算机中的数	(7)
习题	(19)

第二章 8086/8088 微处理器原理

2.1 8086/8088 微处理器的内部结构	(21)
2.2 8086/8088 微处理器的引脚信号	(27)
2.3 8086/8088 的工作时序	(34)
2.4 8086/8088 中断	(37)
习题	(42)

第三章 汇编语言程序设计

3.1 8086/8088 的寻址方式	(43)
3.2 8086/8088 指令系统	(48)
3.3 宏汇编语言	(76)
3.4 BIOS 和 DOS 功能调用	(93)
习题	(97)

第四章 80486/Pentium 微处理器原理

4.1 80486/Pentium 微处理器的内部构成	(101)
4.2 存储器的分段管理	(108)
4.3 特权级及保护	(119)
4.4 中断和异常	(126)
4.5 进入/退出保护模式及编程技术	(133)
4.6 存储器分页管理	(137)
4.7 多任务系统	(143)
4.8 高速缓冲存储器	(151)
4.9 调试功能	(157)
4.10 虚拟 8086 模式	(159)
4.11 80X86 微处理器指令	(164)
4.12 测试功能	(175)
附 4.1 进入/退出保护模式的示例程序	(178)
习题	(187)

第五章 微型计算机中的存储器

5.1 概述	(189)
5.2 随机存取存储器	(191)
5.3 只读存储器	(198)
5.4 快擦写存储器	(202)

5.5 微机系统中的存储器电路	(205)
习题	(213)
第六章 微型计算机系统的构成	
6.1 微机系统的构成	(214)
6.2 系统板	(214)
6.3 PC/XT 微机及其系统板的构成	(217)
6.4 PC/AT 微机系统板的构成	(231)
6.5 采用 EISA 总线的 386/486 微机	(234)
6.6 采用 PCI 总线的 Pentium 微机	(235)
习题	(238)
第七章 微机接口技术	
7.1 概述	(239)
7.2 简单的并行接口	(240)
7.3 8255A 并行接口原理及应用	(240)
7.4 键盘接口	(249)
7.5 定时器/计数器	(255)
7.6 中断控制器及编程技术	(268)
7.7 DMA 传送和 DMA 控制器	(293)
习题	(309)
第八章 微型计算机总线	
8.1 概述	(311)
8.2 PC/XT (8 位 ISA) 总线及应用	(313)
8.3 PC/AT (16 位 ISA) 总线	(321)
8.4 PCI 总线	(325)
习题	(340)
第九章 CRT 显示器适配器	
9.1 CRT 显示器原理	(341)
9.2 MC6845 控制器	(346)
9.3 彩色字符/图形显示器适配器 (CGA)	(350)
9.4 EGA/VGA 的显示方式	(365)
习题	(371)
第十章 打印机适配器	
10.1 打印机适配器	(373)
10.2 打印机适配器的编程及使用	(377)
习题	(382)
主要参考文献	(383)

第一章 绪论

1.1 微处理器的发展概况

1971年问世的微处理器由于具有体积小、重量轻、价格低、工作灵活可靠及使用方便等特点,得到了广泛的应用。它不仅引起了数字电子学的革新,而且对人类社会各领域产生了巨大的影响,微处理器及微型计算机本身的发展也日新月异,势不可挡,每隔两三年就会出现一种新型微处理器。

在20世纪70年代早期(1971~1972年)出现了第一代4位和低档8位微处理器。美国Intel公司首次于1971年11月推出了4004型微处理器。4004是四位微处理器,由2000个晶体管组成,寻址空间仅为4096个4位宽的存储单元,指令执行速度为50kI/s(千条指令/秒),有45条指令,适用于计算器,只能进行串行的十进制运算。这个微处理器虽然功能简单,结构上也不完善,但它的出现却标志着计算机进入一个崭新的发展阶段。

Intel公司与Computer Terminals公司合作,在1972年1月推出了第一批8位微处理器8008。8008只有48条指令,地址空间为16KB(千字节),每秒执行5万条指令,采用仅有18条引脚的小型封装,但仍引起用户的很大兴趣。

这一时期微处理器的特点是采用PMOS工艺,速度较慢,指令系统简单,运算功能也较差。

70年代中期(1973~1978年)是中、高档8位微处理器的鼎盛时代。其间又可分为两个阶段:1973~1975年推出了以Intel公司的8080和Motorola公司的MC6800为代表的中档8位微处理器,集成度提高1~2倍,运算速度提高一个数量级。8080在性能上虽然不是最好的,但由于它问世早,首先投放市场,加上Intel公司配合8080生产了种类齐全的外围芯片,因而竞争力强,一度销量很大。1976~1978年为高档8位微处理器阶段,代表产品是美国Zilog公司的Z80和Intel公司的8085。Z80是8位微处理器中的佼佼者,在我国曾得到广泛应用。这一时期单片微处理器以Intel8048/8748、MC6801和Z8等为代表,在工业控制、智能仪器仪表等系统中得到应用。由于单片微处理器把多种功能部件集成在一块芯片上,具有性能价格比高、结构紧凑及使用方便等特点,应用越来越广泛,发展也越来越快。

这一时期的微处理器采用NMOS工艺,集成度比PMOS产品提高1~4倍,地址空间为64KB,运算速度提高10~15倍(8085每秒执行76万条指令),指令系统较完善。

在70年代后期至80年代早期是16位微处理器的时代。1978年Intel公司推出了8086型微处理器,以后又相继出现了Zilog公司的Z8000、Motorola公司的MC68000。这些微处理器采用HMOS高密度工艺,集成度比NMOS工艺提高了两倍。8086在芯片上集成了2.9万个晶体管。MC68000集成了6.8万个晶体管。运算速度有较大提高,基本指令执行时间为

0.5 μ s,最短指令执行时间在0.2 μ s以下,8086的指令执行速度为2.5MI/s(百万条指令/秒),比典型的8位微处理器快2~5倍。地址空间为1MB。这一时期Intel公司还制成了8088微处理器,其内部数据通路为16位,对外数据总线为8位。在单片微机方面,Intel公司继1980年推出了高档的8位MCS—51后又在1983年推出了16位MCS96系列。

在单任务、单用户系统中,8086等16微处理器已能满足要求,但在多任务系统中,8086却难以满足要求。为此,Intel公司在1982年推出了高性能的80286型16位微处理器。80286有68条引脚,具有虚拟存储、特权保护和任务管理等功能,时钟速度为8MHz或10MHz,指令执行速度为4MI/s。80286有实模式和保护模式两种工作方式。80286工作在实模式时,与8086保持兼容,但工作速度更快,寻址能力达16MB。当80286工作在保护模式时,寻址能力达1GB(千兆字节)。80286的整体功能比8086强6倍。

80年代中期进入了32位微处理器的时代。1985年Intel公司推出了32位微处理器80386,集成了27.5万个晶体管,采用CHMOS工艺,有132条引脚,时钟速度达32MHz,性能达10MI/s。80386除保护模式、实模式之外又增加了虚拟8086模式,使得在保护模式的环境下也能执行8086的指令。80386有32位地址总线,能寻址4GB物理空间和64TB(太字节,为 10^{12})虚拟地址空间,运行速度比80286快3倍。80386是Intel公司第一个实用的32位微处理器。

1989年Intel公司推出了集成100万个晶体管的32位高性能微处理器80486。80486与80386在本质上无差别,只不过使80386高速化,把多种不同功能的电路集成在一个芯片上,把一部分指令改成接线逻辑译码,另外还采取了提高工作频率、缩短指令周期等措施。80486把80386(微处理器)、80387FPU(浮点运算处理器)、82385(高速暂存控制器)和8KB的高速缓冲存储器集成在一个芯片上,当时钟频率为25MHz时达到15MI/s,时钟频率为33MHz时达到19MI/s。在这一时期,Motorola公司也相继推出了32位微处理器68030和68040。68040的功能与80486相当,能寻址4GB物理空间,集成了120万个晶体管,高速缓存容量为8KB,内含FPU,部分指令只用一个时钟周期便可执行,当时钟频率为25MHz时达到13.5MI/s。

1993年Intel公司推出了Pentium(奔腾)微处理器。该处理器芯片集成了310万个晶体管。最初推出的两种Pentium处理器,一种钟频为60/66MHz,指令执行速度为110MI/s;另一种钟频为100MHz,指令执行速度为150MI/s。双时钟Pentium的运行速度为120MHz、133MHz,更高级的为200MHz。Pentium内部有16KB高速缓冲存储器,分成两个,一个是8KB的指令缓冲存储器,另一个是8KB的数据缓冲存储器,数据总线由32位增加到64位。Pentium采用双整数处理器技术,可以同时独立执行两条指令,内部有两个独立的整数处理器,这种技术称为超标量技术。Pentium内部也有一个浮点运算协处理器,处理浮点型数据的速度比80486高5倍。

1995年Intel公司推出了Pentium Pro(高能奔腾)微处理器,内含550万个晶体管,有3个整数处理单元和一个浮点运算单元。另外,内部除第一级(L1)16KB的高速缓冲存储器外,还有一个256KB的第二级(L2)高速缓冲存储器。Pentium Pro采用3路超标量技术,内部有3个指令执行部件,能同时执行三条指令。它既能寻址4GB地址空间,也能寻址64GB地址空间,后者采用36条地址总线。时钟频率为150MHz、166MHz和200MHz。在Pentium Pro中采用了双重独立总线和动态执行新技术。所谓双重独立总线是CPU与二级高速缓冲

存储器(L2)间及CPU与主存间各自有独立的总线,从而增加了并发传输功能,使处理器与高速缓冲存储器以及与内存之间的通信速度大为提高。采用动态执行技术使CPU在给定的时间内能处理更多的数据,提高了工作效率。Pentium和80x86处理器是按照指令在程序中的顺序执行的,任何引起延时的指令都会影响速度。Pentium Pro能以优化的顺序预测执行指令,不必等到慢吞吞的指令执行完成,再去执行另一条指令,从而将处理器的停滞时间限制到最小。

Intel公司在1997年1月推出了Pentium MMX微处理器。MMX(MultiMedia eXtention)原意是多媒体扩展技术。该处理器是在Pentium的基础上增加了57条多媒体指令,用于音频、视频、图形图像数据处理,使多媒体、通信处理的能力得到了很大提高。1997年5月Intel公司推出了Pentium II(PⅡ)微处理器,实际上是Pentium Pro级的MMX处理器,内含750万个晶体管,时钟频率高达450MHz,二级高速缓冲存储器达到512KB。PⅡ与Pentium Pro一样采用双独立总线和动态执行技术。

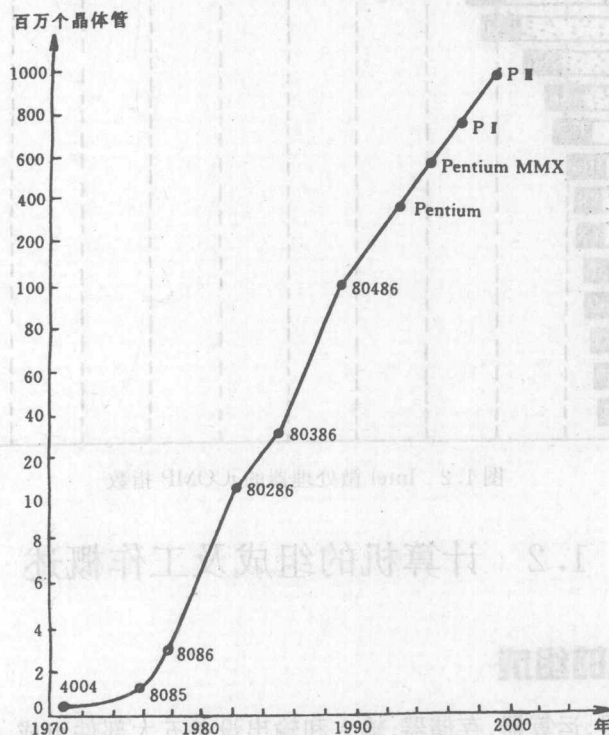


图 1.1 Intel 微处理器集成度的增长

1999年2月Intel公司推出了Pentium III(PⅢ)微处理器。PⅢ内含950万个晶体管,在PⅡ的基础上增加了70多条提高多媒体性能和浮点运算能力的新指令。最初推出的PⅢ芯片的时钟频率为450MHz和500MHz。PⅢ将250KB的二级高速缓冲存储器与CPU集成在同一块芯片上。PⅡ512KB高速缓冲存储器不与处理器集成在同一块芯片上(但封装在一起),因而PⅢ访问高速缓冲存储器的速度比PⅡ提高了一倍。

图1.1表示了Intel微处理器集成度的增长。图1.2是评价Intel32位微处理器性能的iCOMP指数图。每一横条代表Intel处理器的性能。处理器的iCOMP指数是根据处理器的

的各种性能指标在微型计算机中的重要性来确定的。iCOMP 指数包含的性能有整数运算、浮点数运算、图形处理和视频处理等。由图 1.2 可见,80386SX—20 的 iCOMP 仅为 32,而 Pentium 133MHz 的 iCOMP 已达 1110。

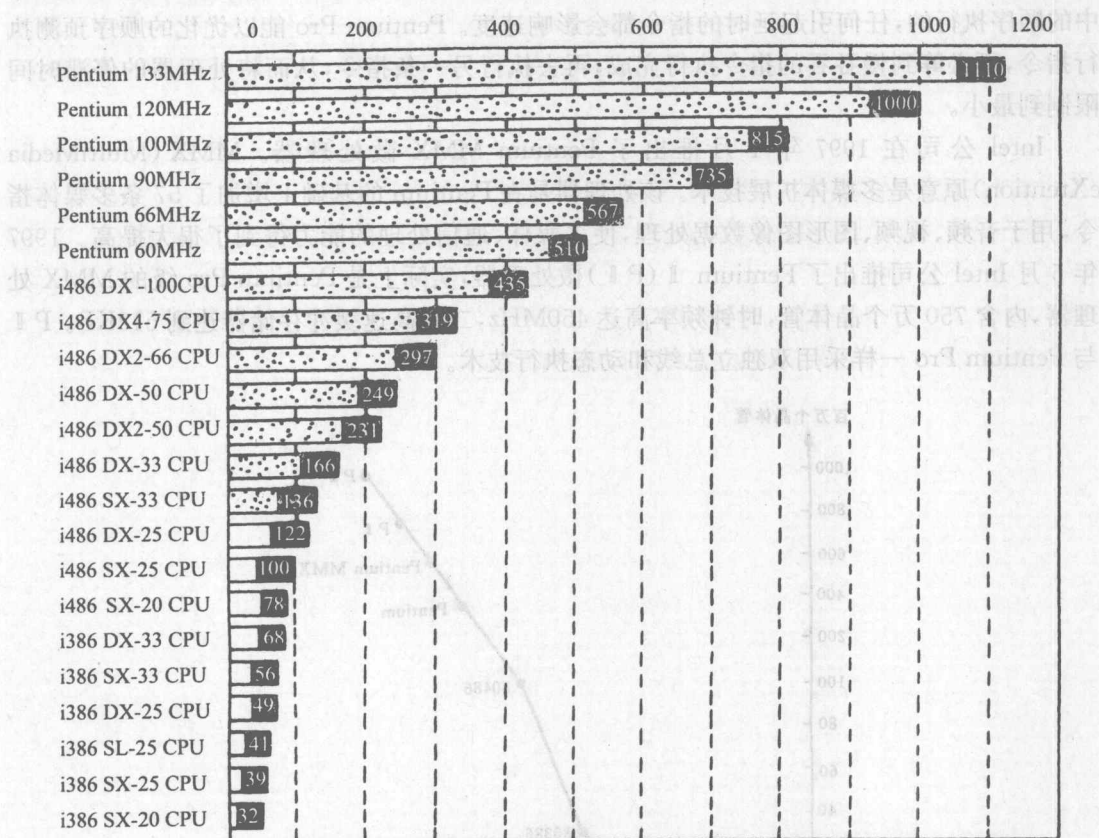


图 1.2 Intel 微处理器的 iCOMP 指数

1.2 计算机的组成及工作概述

1.2.1 计算机的组成

计算机由控制器、运算器、存储器、输入和输出设备五大部件组成,相互由总线连接着,如图 1.3 所示。

运算器对数据进行基本的算术和逻辑运算,如加、减、乘、除、与、或、异或、移位及比较等。控制器是机器的控制中心,它读取、分析并执行指令。控制器和运算器两者在一起称为中央处理器,简称 CPU(Central Processing Unit)。集成在一块大规模集成电路芯片上的中央处理器称为微处理器(Microprocessor),简称 μP 。由微处理器作为中央处理器的计算机称为微型计算机(Microcomputer),简称 μC 。如果在芯片上除中央处理器外,还集成了 I/O 接口及部分存储器等电路,则称为单片微型计算机。

存储器是存储程序和数据的器件。按所处位置和功能分,存储器可分为内存储器和外存

存储器。内存储器在主机内部,处理器能直接对它进行访问。微型计算机内大多采用半导体存储器作为内存储器。外存储器与主机分开,以计算机能接受的形式存储信息,在微型计算机系统中常用磁盘驱动器、光盘驱动器等作为外存储器。

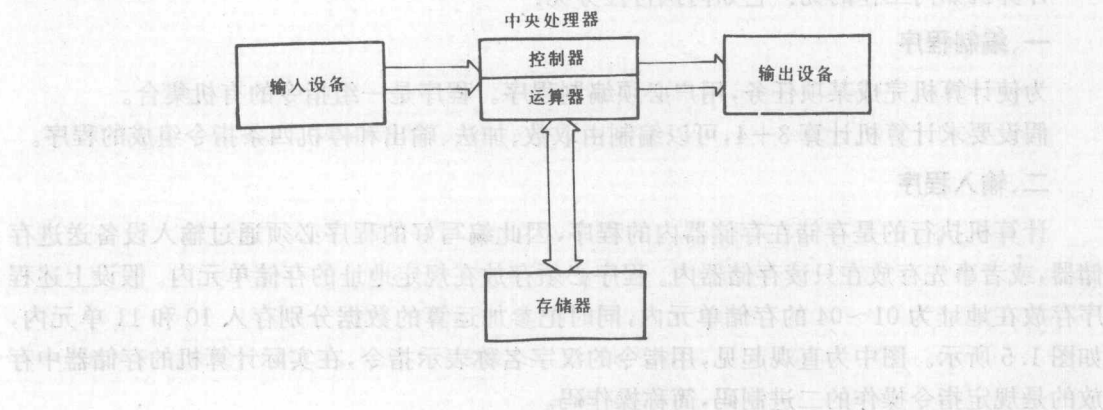


图 1.3 计算机的基本组成

内存储器按功能又可分为随机存取存储器和只读存储器两种。随机存取存储器简称 RAM,可随时读出或写入信息。只读存储器简称 ROM,由器件制造厂或用户采用专用设备写入信息,在使用时只能读出而不能写入信息。其中有一类称为 EPROM 的只读存储器,用紫外线灯照射 20 分钟后即可抹去信息,需要时用 EPROM 编程器写入信息;还有一类称为 E²PROM,用电擦除信息,使用起来更为方便。

在一个存储器内有许多存储单元,为便于寻找,每个存储单元都编了号码,称为存储单元的地址。CPU 按地址对存储单元进行访问。一个 8 位的存储单元称为一字节(Byte),一个 16 位的存储单元称为一个字(Word)。

输入设备用于输入信息,最常用的输入设备有键盘、鼠标等。

输出设备用于输出信息,最常用的输出设备有各种显示器、打印机及绘图仪等。

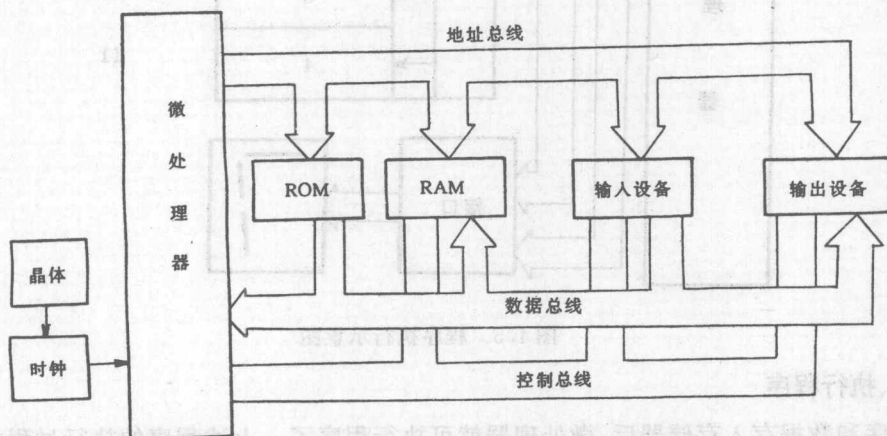


图 1.4 微机系统的总线

微机系统的各部件通过三条总线相连接,如图 1.4 所示,数据总线在各部件间传输数

据,是双向工作的。地址总线传输由微处理器发出的地址码,控制总线传输各种控制和状态信息。

1.2.2 计算机的工作

计算机如何工作的呢?它如何执行任务呢?

一、编制程序

为使计算机完成某项任务,用户必须编制程序。程序是一组指令的有机集合。

假设要求计算机计算 $3+4$,可以编制由取数、加法、输出和停机四条指令组成的程序。

二、输入程序

计算机执行的是存储在存储器内的程序,因此编写好的程序必须通过输入设备送进存储器,或者事先存放在只读存储器内。程序必须存放在规定地址的存储单元内。假设上述程序存放在地址为 01~04 的存储单元内,同时把参加运算的数据分别存入 10 和 11 单元内,如图 1.5 所示。图中为直观起见,用指令的汉字名称表示指令,在实际计算机的存储器中存放的是规定指令操作的二进制码,简称操作码。

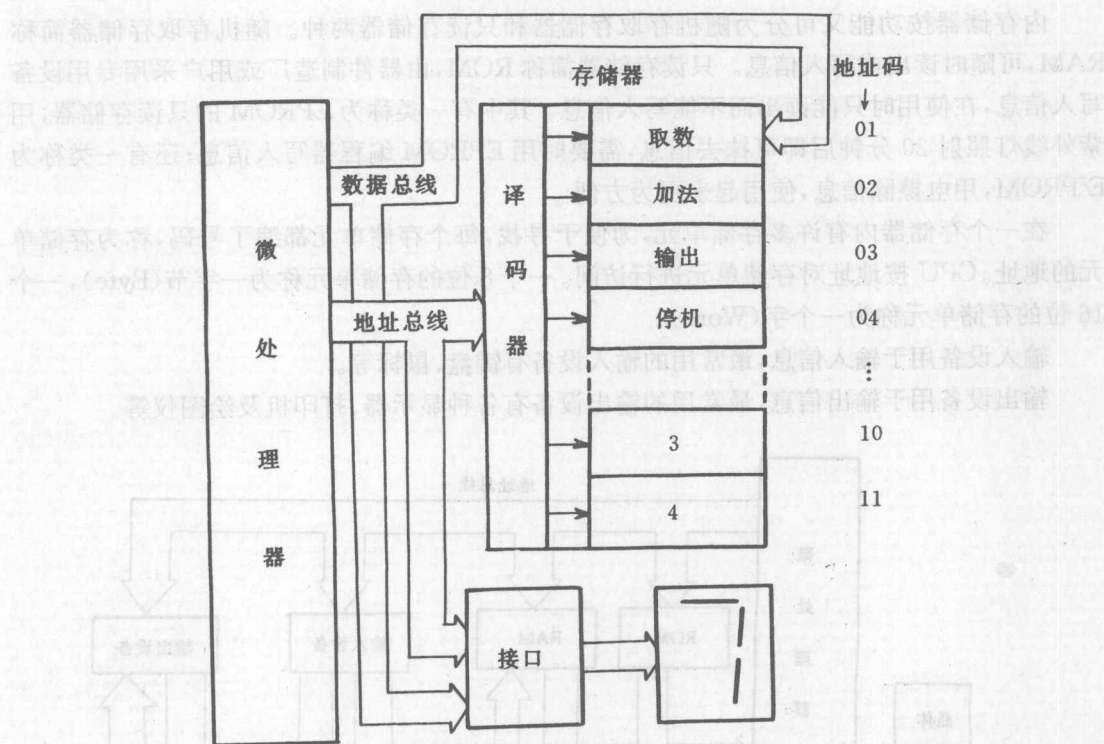


图 1.5 程序执行示意图

三、执行程序

程序和数据存入存储器后,微处理器就可执行程序了。上述程序的执行过程如下:

1. CPU 经地址总线发出地址码 1,经译码后找到存储单元 1,将该单元内的取数指令送上数据总线。

2. CPU 从数据总线读取取数指令, 并进行译码后执行指令, 把由该指令规定的存储单元 10 内的数据 3 读回 CPU。

3. CPU 经地址总线发出地址码 2, 存储单元 2 内的加法指令送上数据总线。

4. CPU 从数据总线读取并执行加法指令, 把已经读回的数据 3 和存储单元 11 内的数据 4 相加, 结果 7 保存在 CPU 内。

5. CPU 经地址总线发出地址码 3, 存储单元 3 内的输出指令送上数据总线。

6. CPU 从数据总线读取输出指令并执行, 把相加结果经接口送到七段发光二极管 (LED) 显示。接口是 CPU 与外部设备的交接部件, 通常由锁存器及三态门等组成。

7. CPU 经地址总线发出地址码 4, 存储单元 4 内的停机指令送上数据总线。

8. CPU 读取并执行停机指令, 暂停工作。

以上形象地描述了程序的执行过程。但如果深入考虑一下, 或许会提出问题。例如, CPU 是如何按递增次序一次次发出地址码以有序地读取指令的? 从存储器读取的数据放在何处? 等等。为回答这些问题, 需要在以后各章进一步了解微处理器的原理。

1.3 电子计算机中的数

本节介绍有关数的知识, 这是熟悉电子计算机的基础。

1.3.1 计数制

在日常生活中, 通常采用十进制数, 但是在电子数字计算机中, 却采用二进制数。有时为了表示或使用方便, 还引入八进制、十六进制及二十进制等数。

假设有一个数 N , 写作 $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0 \cdot a_{-1} a_{-2} \cdots a_{-m}$, 它可表示为

$$N = a_n b^n + a_{n-1} b^{n-1} + \cdots + a_1 b^1 + a_0 b^0 + a_{-1} b^{-1} + a_{-2} b^{-2} \cdots a_{-m} b^{-m} = \sum_{i=-m}^n a_i \times b^i \quad (1.1)$$

上式中, b 称作计数制的基数, a 称作数码, m 为小数点后位数, n 为小数点前的位数减 1。

1. 十进制

在十进制中基数 b 等于 10, 数码 a_i 可取 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个符号中的任何一个, 逢十进一。

2. 二进制

二进制逢二进一, 基数 b 等于 2, 数码 a_i 取为 0 与 1。对于一个 n 位的二进制整数, 最大表示范围为 $(2^n - 1)$ 。例如, 8 位二进制数的表示范围为 $0 \sim (2^8 - 1) = 0 \sim 255$ 。

3. 八进制

八进制逢八进一, 基数 b 等于 8, 数码 a_i 可取 0、1、2、3、4、5、6、7 中任何一个。

4. 十六进制

十六进制逢十六进一, 基数 b 等 16, 数码 a_i 可取 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 中任何一个。符号 A~F 分别代表十进制数 10~15。

5. 二十进制

二进制对计算机是最方便的,但是人们却习惯于十进制。为解决这个矛盾可采用二-十进制。所谓二-十进制,实际上就是用二进制编码来表示十进制数,它属于十进制,通常称为BCD码。4个二进制代码能列出16个状态,从中取出10个状态来表示0~9。BCD码可有多种表示方法,在计算机中最常用的是8421码。

对于8位微处理器,每个字节可包含两个BCD码。如0101,1001=59。每字节可表示BCD码0~99。右边4位称作低半字节,左边4位称作高半字节。有时仅包含低半字节,高半字节始终为零,如00001001=9,称作非压缩的(unpacked)BCD码。这时每字节仅能代表0~9BCD码。

1.3.2 计数制的转换

一、八、十六进制→十进制

各种计数制转换成十进制可采用按“权”展开法,即按公式(1.1)展开并进行计算。举例如下:

1. 二进制→十进制

$$1011.1101_2 = [(1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0) + (1 \times 2^{-1}) + (1 \times 2^{-2}) + (0 \times 2^{-3}) + (1 \times 2^{-4})]_{10} = 11.8125_{10}$$

2. 八进制→十进制

$$673.12_8 = [(6 \times 8^2) + (7 \times 8^1) + (3 \times 8^0) + (1 \times 8^{-1}) + (2 \times 8^{-2})]_{10} = 443.15625_{10}$$

3. 十六进制→十进制

$$F3D.C8_{16} = [(15 \times 16^2) + (3 \times 16^1) + (13 \times 16^0) + (12 \times 16^{-1}) + (8 \times 16^{-2})]_{10} = 3901.78125_{10}$$

注意在表达式中采用下标2、8、10、16来表明数的数制。

二、十进制→二、八、十六进制

十进制转换到其他计数制,常把整数与小数部分分开进行转换,然后把两部分加起来。

1. 整数部分

整数部分的转换法则是除基数、取余数,直到商为零为止,即把十进制数的整数部分连续用所要求的计数制的基数去除,取各次余数,直到商为零为止。第一次得到的余数为最低位数,最后得到的余数为最高位数。举例如下:

(1) 十进制→二进制

把11₁₀转换成二进制数

		余 数	
2	11	1	最低位
2	5	1	
2	2	0	
2	1	1	最高位
0			

结果 11₁₀ = 1011₂

(2) 十进制→八进制

		余 数	
8	443	3	最低位
8	55	7	
8	6	6	最高位
	0		

结果 $443_{10}=673_8$

(3) 十进制→十六进制

		余 数	
16	3901	D	最低位
16	243	3	
16	15	F	最高位
	0		

结果 $3901_{10}=F3D_{16}$

2. 小数部分

小数部分的转换法则是用所要求的计数制的基数连续乘小数部分,每次取整数,直到小数部分为零为止。第一次得到的整数为最高位,最后一次得到的整数部分为最低位。举例如下:

(1) 十进制→二进制

把 0.8125_{10} 转换成二进制数

整数部分
 $0.8125 \times 2 = 1.6250 \cdots \cdots 1 \cdots \cdots$ 最高位
 $0.6250 \times 2 = 1.2500 \cdots \cdots 1$
 $0.2500 \times 2 = 0.5000 \cdots \cdots 0$

$0.5000 \times 2 = 1.000 \cdots \cdots 1 \cdots \cdots$ 最高位

结果 $0.8125_{10}=0.1101_2$

(2) 十进制→八进制

把 0.15625_{10} 转换成八进制数

整 数
 $0.15625 \times 8 = 1.2500 \cdots \cdots 1 \cdots \cdots$ 最高位
 $0.2500 \times 8 = 2.0000 \cdots \cdots 2 \cdots \cdots$ 最低位

结果 $0.15625_{10}=0.12_8$

(3) 十进制→十六进制

把 0.78125_{10} 转换成十六进制数

整 数

$$0.78125 \times 16 = 12.5 \cdots \cdots C \cdots \cdots \text{最高位}$$

$$0.5 \times 16 = 8.0 \cdots \cdots 8 \cdots \cdots \text{最低位}$$

$$\text{结果 } 0.78125_{10} = 0.C8_{16}$$

3. 若十进制数同时包括整数与小数两部分,则把两部分分别转换后再加起来。如

$$11.8125_{10} = 11_{10} + 0.8125_{10} = 1011_2 + 0.1101_2 = 1011.1101_2$$

$$\text{同样, } 443.15625_{10} = 673.12_8$$

$$3901.78125_{10} = F3D.C8_{16}$$

三、二进制 $\longleftrightarrow$ 八、十六制

1. 八进制 $\rightarrow$ 二进制规则,分别将每位八进制数用3位二进制数表示。

例:把 70.521_8 转换成二进制形式:

$$\begin{array}{ccccccc} 7 & 0 & \cdot & 5 & 2 & 1 & \\ \hline 111 & 000 & \cdot & 101 & 010 & 001 & \end{array}$$

$$\text{结果: } 70.521_8 = 111000.101010001_2$$

2. 二进制 $\rightarrow$ 八进制规则:从小数点向左右两边,每3位一组,不满3位者添0,然后每3位写成一个八进制数。

$$\begin{array}{ccccccc} \text{例: } 11 & 101 & 110 & 100 & \cdot & 001 & 111 & 01 \\ (011) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & (010) \\ 3 & 5 & 6 & 4 & \cdot & 1 & 7 & 2 \end{array}$$

$$\text{结果 } 11101110100.00111101_2 = 3564.172_8$$

注意:在高位或低位不满3位者必须添0,如上述低位01不是八进制1而是2,或010₂。

3. 十六进制 $\rightarrow$ 二进制规则,将每位十六进制数用4位二进制数表示:

例:把 $F0A.C1_{16}$ 转换成二进制

$$\begin{array}{ccccccc} F & 0 & A & \cdot & C & 1 & \\ \hline 1111 & 0000 & 1010 & \cdot & 1100 & 0001 & \end{array}$$

$$\text{结果: } F0A.C1_{16} = 111100001010.11000001_2$$

4. 二进制 $\rightarrow$ 十六进制规则:从小数点向左右两边,每4位一组,不满4位者添0,然后每4位写成一个十六进制数。

$$\begin{array}{ccccccc} \text{例: } 110 & 1010 & 1000 & \cdot & 1111 & 0101 & 11 \\ (0110) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 6 & A & 8 & \cdot & F & 5 & C \end{array}$$

$$\text{结果: } 11010101000.111101011_2 = 6A8.F5C_{16}$$

注意,低位11不是3,而是1100,即C。

1.3.3 带符号的数

在所有的数制中都可能出现正数与负数。通常我们在数的前面加“+”或“-”来表示数的正和负,这种表示叫做带符号的数。计算机是由二进制电路构成的,用“0”和“1”表示每位

的两个状态,因此也只能用“0”和“1”来表示数之正负。一般在二进制数的前面有一符号位,“0”是正数符号,“1”是负数符号。有时把带有“0”或“1”的二进制数称作机器数。下面讨论三种带有符号的数,即:原码、1 的补数、2 的补数。

一、原码

数的原码表示,就是在数的绝对值之前加上符号位 0 或 1。原码有时称为带符号的二进制数。一个包含 $(n-1)$ 位整数、 m 位小数的二进制数 x 可表示为

$$x = \pm a_{n-2}a_{n-3}\cdots a_1a_0 \cdot a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m} \quad (1.2)$$

这时最高数值位是 (a_{n-2}) ,它是小数点向左第 $(n-1)$ 位。该数的原码为

$$\left. \begin{aligned} S(x) &= 0 \times 2^{n-1} + x = 0x & x \geq 0 \\ S(x) &= 1 \times 2^{n-1} + |x| = 1|x| & x \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

↑ 符号位 ↑ 符号位

一个 n 位整数的原码,最高位是符号位,其余 $(n-1)$ 位是二进制数值位。因此,它的表示范围是 $\pm(2^{n-1}-1)$ 。例如 $n=8$,则表示范围为 $\pm(2^{8-1}-1)=\pm 127$ 。

二、1 的补数(1'S Complement)

1 的补数有时称作反码。对于式(1.2)表示的包含 $(n-1)$ 位整数、 m 位小数的二进制数 x ,1 的补数可表示为

$$\left. \begin{aligned} N(x) &= 0 \times 2^{n-1} + x = 0x & x \geq 0 \\ N(x) &= 1 \times 2^n - 2^{-m} - |x| & x \leq 0 \\ &= 1[(2^{n-1} - 2^{-m}) - |x|] \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

↑ 符号位 ↑ 符号位

对于仅包含 $(n-1)$ 位整数的数 x ,相当于 $m=0$,其 1 的补数表示为

$$\left. \begin{aligned} N(x) &= 0x & x \geq 0 \\ N(x) &= 2^n - 1 - |x| & x \leq 0 \\ &= 1[(2^{n-1} - 1) - |x|] \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

↑ 符号位 ↑ 符号位

对于仅包含 m 位小数的数 x ,相当于 $n-1=0$,1 的补数表示为:

$$\left. \begin{aligned} N(x) &= 0x & x \geq 0 \\ N(x) &= 2 - 2^{-m} - |x| & x \leq 0 \\ &= 1 \cdot (1 - 2^{-m} - |x|) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

↑ 符号位 ↑ 符号位

实际上求一个二进制数的 1 的补数很简单,对于正数,与原码相同;对于负数,符号位为 1,数值位每位取原码的反码。

1 的补数的表示范围与原码相同。 n 位整数的 1 的补数表示为 $\pm(2^{n-1}-1)$ 。