

微型计算机硬件软件及其应用

(修订版)

周明德 编著

内 容 简 介

本书共分十一章,首先由一个简单的模型机入手,由浅入深阐明计算机的概念和原理;然后详细地介绍和分析Z80的指令系统,通过例子着重讲解汇编语言进一步分析Z80的时序,介绍各种类型半导体存储器的工作原理以及与CPU接口有关的问题,Z的输入输出指令、CPU与外设交换信息的几种方法,着重讲述中断的概念和Z80的中断方式及特点还介绍了有关并行接口片子及其应用、串行通信技术和串行接口电路、计数器和定时器电路、数/和模/数转换,并以Z80 STARTER KIT单板机为例分析和介绍微型机的监控和调试程序,最详细介绍8位机的典型操作系统CP/M。

本书是作为教材编写的,既注意了先进性、理论性和系统性又引进了大量应用实例,突出了实用性,适合做高等院校的教材和计算机科技人员的自学或培训教材。

微型计算机硬件软件及其应用

(修订版)

周明德 张淑玲 编著

责任编辑 贾仲良

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 37.5 字数: 880千字

1988年7月第2版 1988年7月第1次印刷

印数: 000001—55000 定价: 平6.50元 精9.50元

平 ISBN 7-302-00237-1/TP·92

精 ISBN 7-302-00238-X/TP·93

再 版 前 言

《微型计算机硬件软件及其应用》一书自83年初版发行以来,得到了广大读者的关心和支持。不少高等院校选为教材。不少同志在使用过程中提出了宝贵的意见,作者深表感谢。根据形势发展的需要,作者对初版本作了许多重大的修改和补充,现把再版本奉献给广大读者。

几年来,微型计算机发展十分迅速,我国微型计算机的科研、生产和应用也有了极其迅速的发展。微型计算机的生产从4位、8位到16位已经形成了一个系列,个人计算机的装机台数已达到了20万台。微型计算机在信息的检测、采集,过程控制,自动化、智能化仪器仪表中广泛应用;微型计算机也已经广泛应用于数据处理、事务管理,管理信息系统和办公自动化系统中;微机的计算机辅助设计(CAD),计算机辅助制造(CAM)、辅助测试(CAT)、辅助教育(CAI)系统也得到了广泛应用。

在广阔的微机应用领域中,4位、8位、16位、32位芯片各显其能、各放异彩。在信息量很大的管理信息系统或办公自动化系统中,大量使用16位(如IBM PC/XT、长城0520系列等)或32位(正在迅速发展)微机。但是,在教育系统,在信息检测、采集,在工业控制领域,在自动化、智能化的仪器、仪表中,大量使用4位和8位微机。作为学习微机原理的实验机——TP801仍在大量生产;作为工业控制机的主流机型——STD总线单板系列,国内生产的主要是以Z80为CPU的系列;国家十分重视的微机对传统产业的改造,例如机床改造、窑炉改造中,主要使用8位微机。在美国年产的近亿块CPU中,数量最大的仍然是4位与8位CPU芯片。

从学习微机来说,不论是学习微型机的基本原理,微型机的结构、指令,汇编语言的程序设计,微型机的信息、总线与时序,微型机的接口等等都必须以8位微机为基础,从8位机着手。

综合以上因素,本修订本仍以Z80 CPU为核心,但删除了过时的、陈旧的内容,补充了一些新开发的片子,如在存储器中补充了64K×1位的动态RAM片子,16K×8位的ROM片子等;在中断和接口部分补充了许多长城0520系列(IBM PC系列)中的接口片和DMA控制器,如8259、8237、8253和SIO等片子,使其更为完整和系统;在最后一章较详细地介绍了8位机的典型操作系统——CP/M,从而使全书更具有先进性、系统性和实用性。

读者在学习了本书以后,如希望学习和掌握IBM PC/XT(或长城0520系列),可学习由作者主编的《微型计算机IBM PC(0520)原理与应用》一书。作者另外编写的《高档微机》一书,上册详细介绍了MC68000、MC68010和MC68020,重点是介绍Motorola的32位微机MC68020;下册详细介绍了Intel 8086、80286、80386,重点是介绍80386,可供读者学习和掌握16位、32位微机。本书的DMA部分和SIO一节由张淑玲编写。

本书在修改过程中,吸收了广大读者所提的宝贵意见,但限于作者的水平,书中仍会有缺点和错误,恳请广大读者不吝施教。

周明德

1986.12.于北京

8910098

前 言

近年来, 计算机技术已取得惊人的迅猛发展, 使得计算机渗透到国防尖端、工业、农业、企业管理、日常生活的各个领域, 其作用和成就正日益卓著, 成了工业发展水平的标志之一, 是发展新技术、改造老技术的强有力武器。计算机的生产、推广和应用已成为我国四个现代化的战略产业。

自1946年第一台电子计算机设计和运行以后, 计算机主要是朝着大型和快速的方向发展。但是, 70年代以来, 由于大规模集成电路技术的发展, 微型计算机异军突起, 发展更为迅速。其CPU集成度几乎是每两年翻一翻, 且性能增长一个数量级。例如: 1971—1972出现的Intel4004和4040(4位), 其集成度为2000晶体管/片; 在1976年生产的8085(8位), 集成度为9000晶体管/片; 而1980年生产的iAPX43201(32位), 集成度则为100000晶体管/片。各种微型机的年产量达到了几十万台。

如果说大型计算机在国防尖端和科学研究中起过巨大的作用的话, 那么微型计算机(简称微型机)由于它成本低、体积小才真正使计算机能渗透和占领各个技术领域, 为计算机应用的普及和推广开创了现实的可能性。

例如, 在工业控制中, 60年代发展起来的各种类型的数控机床, 数控部分的成本往往要比机床的成本高一个数量级, 而且体积庞大。因而只有在某些不用数控机床无法加工的情况下才得到了应用和发展。而现在就可采用微型机——通常可用一个单板微型计算机(简称单板机)来实现控制, 成本只要几千元, 因而大大扩大了其应用范围, 不光在国防工业、重工业、在许多轻纺工业中, 例如织袜机, 织帽机, 编织毛衣机等控制中已得到了应用。而且出现微型机后, 就可以利用单板机来实现单机控制; 用功能强一点的微型机做上一级的控制; 管理和控制各个单板机以及它们之间的通讯。这样的分级分布控制系统就性能好、成本低, 为生产线以及整个车间的自动化提供了较现实的可能性。

把微型计算机与测量仪器、仪表联接起来, 可以存储测量的信息, 可以对测量结果进行分析、综合和作各种处理, 大大提高测量效率, 实现测量的自动化。

利用微型机实现仓库管理、旅馆管理、飞行订票等等信息处理和管理工作, 为计算机在管理中的应用开创了非常广阔的前景……。

微型机本身仍在迅速发展, 日新月异。现在一台微型机的功能, 不仅超过了50年代初期占地上百平方米, 功耗上百千瓦的庞大的电子管计算机, 而且也赶上和超过了60年代的小型机的功能。国外还在大力研究微型机网络, 企望在功能上能与大型机和巨型机相匹敌, 而成本却要便宜得多。所以, 微型计算机是计算机发展的一个重要的方面军。

引进、推广和应用微型计算机, 开展微型计算机的科研和生产工作, 是我国技术改造的一个经济而有效的途径。近年来, 我国微型机的科研、生产和应用也有了迅速的发展。因此, 在各个技术领域的科技人员中普及和提高微型计算机的知识, 使微型机在各个行业中得到广泛应用和充分发挥它的效用就成了当务之急。

本书是作者在清华大学自动化系讲授“计算机原理”课和“微型计算机”课的教材, 今

也是为顾及具有数字电路基础的工程科技人员学习和应用微型计算机而编写的。在编写时我们立足于适应一般科技人员，即是从具有一定的数字电路的基础知识，但还不了解计算机而需要学习和掌握计算机，或要把计算机引入、应用到各个工程科技领域的科技人员的角度出发，通过微型计算机介绍计算机的原理、结构和特点，着重对微型计算机的原理、硬件和软件作了全面和系统的分析。

本书在编写时是着重从应用的角度来分析和解决问题的。在硬件部分，本书不是注重于对计算机内部电路的分析和设计，而着重于了解和掌握这些电路的功能，着重于它们的应用。着重介绍利用微型机解决各种工程技术问题所需掌握的知识，所需解决的接口技术和接口电路。在软件部分，本书着重介绍了掌握和应用微型机的基本工具——汇编语言，掌握和应用微型机所需要的系统软件，特别是介绍了大量的经过检验的应用程序。

本书是一本教材，所以对大量的国外资料、手册和近几年出版的微型机的书籍进行了提炼、概括、归纳和整理。注意了选材上的先进性、系统性和完整性。同时从认识规律出发，尽可能做到深入浅出，循序渐进。所以，本书也可作为具有数字电路基础的工程科技人员学习和应用微型机的自学教材，也可作为各种为工程科技人员举办的微型机训练班的教材。

本书承蒙清华大学计算机系朱家维同志进行了全面而详细的审核与校对，提出了大量极其宝贵的意见；计算机学院的林定基同志也对本书提出了许多宝贵的意见。在此，表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，时间又很仓促，书中一定存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

周明德写于清华大学

1981年9月

目 录

再版前言

前言

第一章 概述	1
第一节 引言	1
第二节 计算机中的数和编码系统	2
一、计算机中的数制	2
二、二进制编码	4
三、二进制数的运算	5
四、带符号数的表示法	8
第三节 计算机基础	13
一、计算机的基本结构	13
二、指令程序和指令系统	14
三、初级计算机	15
四、简单程序举例	18
五、寻址方式	22
六、分支	27
七、程序举例	31
第四节 计算机的硬件和软件	35
一、系统软件	35
二、应用软件	36
三、数据库及数据库管理系统	36
第五节 微型计算机的结构特点	36
一、微型机的外部结构特点	37
二、微型机的内部结构特点	37
第六节 Z80的CPU结构	38
一、Z80的内部结构	39
二、Z80的引脚及其功能	41
第二章 Z80 的指令系统和汇编语言程序设计	44
第一节 Z80的寻址方式	44
一、立即寻址	44
二、立即扩展寻址	44
三、寄存器寻址	45
四、扩展寻址	45
五、寄存器间接寻址	46
六、变址寻址	46
七、零页寻址	46
八、相对寻址	47

九、空寻址	48
十、隐含寻址	48
第二节 Z80的指令系统	48
一、数的传送和互换	49
二、数据块传送和搜索指令	59
三、算术和逻辑指令	62
四、循环和移位指令	72
五、位操作指令	77
六、转移指令	78
七、子程序调用和返回指令	81
第三节 汇编语言程序设计和实例	84
一、机器语言、汇编语言和高级语言	84
二、汇编语言源程序的格式	87
三、伪指令	88
四、汇编语言的程序设计	91
第四节 宏指令和条件汇编	111
一、宏定义和宏调用	111
二、条件汇编	118
第五节 汇编程序	122
一、概述	122
二、两次扫描的汇编程序	127
第三章 Z80-CPU的时序	132
第一节 概述	132
一、指令周期、机器周期和T周期	132
二、CPU的时序和存储器以及外设的时序	133
三、学习CPU时序的目的	134
第二节 Z80的典型时序分析	135
一、取指令码(M ₁ 周期)	135
二、存储器读或写周期	138
三、输入或输出周期	138
四、总线请求和响应周期	140
五、中断请求和响应周期	141
六、非屏蔽中断响应	142
七、暂停状态的脱离	143
第四章 半导体存储器	145
第一节 半导体存储器的分类	145
一、RAM的种类	145
二、ROM的种类	146
第二节 读写存储器RAM	147
一、基本存储电路	147
二、RAM的结构	148

三、RAM与CPU的连接	151
四、64K位动态RAM存储器	166
第三节 只读存储器 (ROM)	174
一、掩模只读存储器	174
二、可擦除的可编程只读存储器	176
第五章 输入和输出	184
第一节 输入输出的寻址方式	184
第二节 Z80的输入输出指令和时序	185
一、直接寻址的I/O指令	185
二、用寄存器C间接寻址的I/O指令	185
三、数据块输入输出指令	186
四、Z80-CPU I/O时序	187
第三节 CPU与外设数据传送的方式	188
一、CPU与I/O之间的接口信号	188
二、无条件传送方式 (又称同步方式)	189
三、查询传送方式 (或称条件传送——异步传送)	190
四、中断传送方式	194
五、直接数据通道传送 (DMA)	194
第四节 用8212作为一个输入输出接口	197
一、8212介绍	197
二、8212的工作模式	197
三、用8212作为CPU与纸带读入机 (PTR) 的接口	199
第五节 DMA控制器	201
一、主要功能	201
二、8237的结构	202
三、8237的工作周期	203
四、8237的引线	203
五、8237的工作模式	206
六、8237的寄存器组和编程	207
七、8237的时序	214
第六章 中断	216
第一节 引言	216
一、为什么要用中断	216
二、中断源	216
三、中断系统的功能	217
第二节 最简单的中断情况	217
一、CPU响应中断的条件	217
二、CPU对中断的响应	219
第三节 矢量中断	220
一、RST p指令	220
二、Z80-CPU中断方式0的中断响应时序	221

三、RST指令的形成	222
第四节 中断优先权	223
一、用软件确定中断优先权	223
二、硬件优先权排队电路	224
三、一个例子——可编程中断控制器Intel 8259A	226
第五节 Z80的中断方式	240
一、非屏蔽中断和屏蔽中断	240
二、屏蔽中断模式0	242
三、屏蔽中断模式1	242
四、屏蔽中断模式2	243
第六节 Z80中的优先权排队电路	245
一、链形优先权结构	245
二、屏蔽中断时序	246
三、中断嵌套	249
四、Z80中断控制逻辑	252
第七章 并行接口片子	254
第一节 Z80-PIO	254
一、概述	254
二、PIO编程	260
三、PIO时序	263
四、应用举例	268
第二节 可编程的输入输出接口8255A	271
一、8255A的结构	272
二、方式选择	273
三、方式0的功能和应用举例	277
四、方式1的功能和应用举例	284
五、方式2的功能和应用举例	294
第八章 串行通讯及接口电路	305
第一节 串行通讯	305
一、概述	305
二、串行传送中的几个问题	307
三、串行I/O的实现	313
四、串行通讯的校验方法	316
五、串行通讯规程	318
第二节 Intel 8251A	321
一、串行接口电路概述	321
二、Intel 8251A可编程通讯接口	322
第三节 Z80-SIO	332
一、概述	332
二、SIO的写寄存器和读寄存器	334
三、Z80-SIO的操作方式	347

四、SIO的初始化编程	352
五、SIO应用举例	357
第四节 串行通讯应用举例	367
一、磁带记录的标准	365
二、接口电路	366
三、信息由CPU写入磁带的软件	367
四、从磁带读入数据的软件	374
第九章 计数器和定时器电路	378
第一节 Z80-CTC	378
一、概述	378
二、CTC工作方式和编程	381
三、CTC时序	383
四、CTC中断	385
五、CTC使用中的几个问题	387
六、CTC应用举例	388
第二节 Intel 8253-PIT	391
一、概述	391
二、8253-PIT的控制字	394
三、8253-PIT的工作方式	395
四、8253-PIT的编程	404
五、8254-PIT	405
第三节 TMS 5501多功能输入输出控制器	406
一、TMS 5501的功能	406
二、TMS 5501的使用	408
三、TMS 5501的中断功能	412
第十章 数/模 (D/A) 和模/数 (A/D) 转换	415
第一节 D/A转换	415
一、CPU与8位D/A片子的接口	415
二、CPU与10位D/A转换器的接口	423
第二节 A/D转换	432
一、概述	432
二、用软件实现A/D转换	435
三、A/D转换片子介绍	437
四、A/D转换片子与CPU的接口	441
第三节 用A/D转换构成的数据采集系统	444
一、数据的采集	444
二、定时	445
三、数据的输出	448
四、闭环控制	454
第十一章 单板机及其监控调试程序	456
第一节 STARTER KIT (TP-801A) 介绍	456

第二节 监控调试程序简介	461
第三节 ZBUG的几个主要程序分析	463
一、键盘输入程序	463
二、显示程序	471
三、初始引导程序	474
四、检查和修改存储器内容	474
五、显示和修改寄存器内容	477
六、设置断点	481
七、单步程序	481
八、非屏蔽中断服务程序	484
九、执行键 (EXEC) 处理	487
第十二章 微型计算机系统及CP/M操作系统	490
第一节 微型计算机系统	490
一、以Z80为CPU的CROMEMCO系统Ⅲ的组成	490
二、IBM-PC系统	491
第二节 CP/M操作系统的使用	493
一、磁盘、磁盘存储器	493
二、文件、文件名、文件目录	499
三、CP/M操作系统的命令	503
四、建立和运行汇编语言源程序的过程	503
五、文本编辑程序ED	511
六、调试程序	518
七、CP/M操作系统的系统调用	529
第三节 CP/M操作系统的结构简析	540
一、CP/M的分层	540
二、CP/M的内存分配	540
三、设备驱动程序	541
四、BDOS	543
五、命令处理程序CCP	548
附录	552
附录1	552
附录2	554
附录3	564
附录4	584

第一章 概 述

第一节 引 言

随着计算机应用的推广和普及,随着大规模集成电路技术的飞速发展,70年代初诞生了一代新型的电子计算机——微型计算机(Microcomputer)。它利用大规模集成电路技术把计算机的中央处理单元(CPU——Central Processing Unit)即计算机的运算器和控制器集成在一个芯片上称为微处理器(Microprocessor)。在1975、1976年先后生产了三大8位微处理器系列,即Intel公司的8080、8085, Motorola公司的M6800和 Zilog公司的Z80;在1978至1980年先后生产8086、Z8000和M68000等16位微处理器;近年又推出了80386和68020等32位微处理器,片上的集成度已超过20万个晶体管。同样利用大规模集成电路技术制造了容量相当大的内存储器(Memory)芯片,如16K×4位的静态存储器和64K×1位、256K×1位的动态读写存储器(或称为随机存取存储器)RAM(Random Access Memory)和32K×8位的只读存储器ROM(Read Only Memory);同时又把各种通用的或专用的,可编程序的接口电路(与外部设备相连接的电路)集成在一个片子上。这样,把CPU配上一定容量的RAM,ROM以及接口电路(例如并行接口电路PIO,串行接口电路SIO等)和必要的外设(通常包括CRT终端,打印机,软盘或硬盘(温盘)驱动器等)就形成了一个微型计算机。

在有些专用的场合,还把CPU,一定容量的RAM和ROM以及输入输出接口电路集成在一个芯片上,形成单片计算机(Single Chip Computer)。或把CPU, RAM和ROM,输入输出接口装在一块印刷电路板上,成为单板计算机(Single Board Computer)。

总之,微型计算机以利用大规模和超大规模集成电路技术为特征,大大缩小了计算机的体积,同时也大大降低了成本。例如,国内推广的微型机优选系列的低档机——紫金Ⅱ(与AppleⅡ兼容),具有64K字节内存,两个5 $\frac{1}{4}$ "软盘驱动器,彩色显示器以及80列打印机,售价约为6000元。高档机——0520CH(与IBM-PC/XT兼容)具有512K字节RAM,固化的二级汉字字库,高分辨显示器(可显示28行40列汉字),20兆温盘,两个5 $\frac{1}{4}$ "软盘驱动器,24针打印机,售价约为32000元。而以Z80为CPU,具有4—8K字节RAM的单板计算机约为500元。因而发展极为迅速,应用极为广泛,已经深入到工农业生产、国防、文教、科研以及日常生活等各个领域。

在我国,微型计算机的科研和生产已有相当发展,应用也已开始深入到各个领域。

本书从应用的角度,较全面系统地分析和论述了微型计算机系统的硬件和软件。硬件方面着重于分析CPU的结构和时序;分析半导体存储器的选用及与CPU的接口;各种外设与CPU的接口技术以及各种并行的、串行的接口片子,定时器与计数器电路;中断功能和D/A、A/D转换片子及与CPU的接口等。在软件方面,重点介绍了汇编语言的程序设计;介绍了汇编程序,监控和调试程序;8位机的典型操作系统CP/M。在书中介绍了大量的各种应用程序的例子。所有这些都是从工程技术人员如何利用微型计算机来解决各种工程问题,如何编应用程序的角度来分析、论述问题的。

第二节 计算机中的数和编码系统

一、计算机中的数制

计算机最早是做为一种计算工具出现的,所以它的最基本的功能是对数进行加工和处理。数在机器中是以器件的物理状态来表示的,一个具有两种不同的稳定状态且能相互转换的器件,就可以用来表示一位二进制数。所以,二进制数的表示是最简单而且可靠的;另外,二进制的运算规则也是最简单的。因此,目前在计算机中,数几乎全是用二进制表示的。

(一) 二进制数

一个二进制数,具有以下两个基本特点:

1. 具有两个不同的数字符号,即0和1;
2. 逢二进位。

由于是逢二进位的,所以同一个数字符号在不同的数位所表示的值是不同的。例如

111.11

小数点左边第一位的“1”代表的值就是它本身;小数点左边第二位的“1”,是由第一位逢二进上来的,所以它的值为 1×2^1 ;则左边第三位的“1”的值为 1×2^2 ;小数点右面第一位的“1”代表 1×2^{-1} ;右面第二位的“1”代表 1×2^{-2} ……。

可见,每一个数位有一个基值与之相对应,这个基值称为权。小数点左面各数位的权是2的正次幂,小数点右面各数位的权是2的负次幂。

一个二进制数的值可以用它的按权展开式来表示,即

$$(111.11)_2 = 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (7.75)_{10}$$

$$(1011.101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-3} = (11.625)_{10}$$

于是,一个任意的二进制数可以表示为

$$\begin{aligned} (B)_2 &= B_{n-1} \times 2^{n-1} + B_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + B_1 \times 2^1 + B_0 \times 2^0 + B_{-1} \times 2^{-1} \\ &\quad + B_{-2} \times 2^{-2} + \dots + B_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} B_i \times 2^i \end{aligned}$$

其中n为整数部分的位数,m为小数部分的位数; B_i 的值为0或1取决于一个具体的数。

(二) 十六进制数

目前,大部分微型机的字长是4的整数倍,所以广泛地采用十六进制数来表示。一个十六进制数的特点为:

1. 具有十六个数字符号,采用0—9和A—F。这16个数字符号与十进制数和二进制数之间的关系如表1-1所示。

2. 逢16进位

由于是逢16进位,所以同一个数字符号,在不同的数位所代表的值是不同的,即每一个数位有一个权与之相对应。小数点左边各数位的权是16的正次幂,小数点右边各数位的权是16的负次幂。一个十六进制数的值可以用它的按权展开式来表示,即

表 1-1 二进制、十进制、十六进制数码对照表

十 进 制	十 六 进 制	二 进 制
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111
8	8	1000
9	9	1001
10	A	1010
11	B	1011
12	C	1100
13	D	1101
14	E	1110
15	F	1111
16	10	10000

$$(32)_{16} = 3 \times 16^1 + 2 \times 16^0 = (50)_{10}$$

$$(FF)_{16} = 15 \times 16^1 + 15 \times 16^0 = (255)_{10}$$

$$(3AB.11)_{16} = 3 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 11 \times 16^0 + 1 \times 16^{-1} + 1 \times 16^{-2} = (939.0664)_{10}$$

于是，一个任意的16进制数D可以表示为

$$\begin{aligned}
 (D)_{16} &= D_{n-1} \times 16^{n-1} + D_{n-2} \times 16^{n-2} + \cdots + D_1 \times 16^{-1} + D_0 \times 16^0 \\
 &\quad + D_{-1} \times 16^{-1} + D_{-2} \times 16^{-2} + \cdots + D_{-m} \times 16^{-m} \\
 &= \sum_{i=n-m}^{n-1} D_i \times 16^i
 \end{aligned}$$

其中，n是整数部分的位数，m是小数部分的位数； D_i 的值在范围0—9和A—F中。

但是，在机器中，数并不是用16进制表示的，由于一开始提到的理由，在机器中数仍是用二进制表示的。由于二进制和十六进制之间存在着一种特殊关系，即 $2^4 = 16$ 。

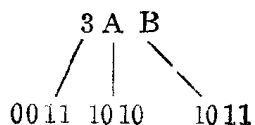
于是，一位十六进制数可以用四位二进制数表示，它们之间存在着直接的而又是唯一的对应关系，如表1-1所示。

因此，二进制数和十六进制数之间的转换是十分简捷而又方便的。

1. 16进制转换为二进制

不论是16进制的整数或小数，只要把每一位16进制的数用相应的四位二进制数代替，就可以转换为二进制数。

例： $(3AB)_{16}$ 可转换为



$$\therefore (3AB)_{16} = (0011\ 1010\ 1011)_2 = (11\ 1010\ 1011)_2$$

$(0.7A53)_{16}$ 可转换为

$$\begin{array}{cccc} 0.7 & A & 5 & 3 \\ \swarrow & | & | & \searrow \\ 0111 & 1010 & 0101 & 0011 \end{array}$$

$$\therefore (0.7A53)_{16} = (0.0111\ 101001010011)_2$$

2. 二进制转换为16进制

二进制的整数部分由小数点向左，每四位一分，最后不足四位的前面补0；小数部分由小数点向右，每四位一分，最后不足四位的后面补0。然后把每四位二进制数用相应的16进制数代替，即可转换为16进制数。

例： $(11011\ 1110\ 0011.1001\ 01111)_2$ 可转换为

$$\begin{array}{ccccccc} 0001, & 1011, & 1110, & 0011, & 1001 & 0111 & 1000 \\ | & | & | & | & | & | & | \\ 1 & B & E & 3 & 9 & 7 & 8 \end{array}$$

$$\therefore (11011\ 1110\ 0011.1001\ 01111)_2 = (1BE3.978)_{16}$$

总之，数在机器中是用二进制表示的。但是，一个二进制数书写起来太长，容易出错。而目前大部分微型机的字长是四位、八位、十六位或三十二位的，都是四的整数倍，故在书写时可用十六进制表示。一个字节（八位）可用两位十六进制数表示，两个字节（十六位）可用四位十六进制数表示等，书写方便且不容易出错。

二、二进制编码

如上所述，在计算机中，数是用二进制表示的。而计算机又应能识别和处理各种字符，如大小写的英文字母，标点符号，运算号等等。这些字符应如何表示呢？由于计算机中的基本物理器件是具有两个状态的器件，所以各种字符只能用若干位的二进制码的组合来表示，这就是二进制编码。

（一）二进制编码的十进制数

因为二进制数实现容易、可靠，二进制的运算规律十分简单，所以，在计算机中采用二进制。但是，二进制数不直观，于是在计算机的输入和输出时通常还是采用十进制数表示。不过这样的十进制数要用二进制编码来表示。

一位十进制数用四位二进制编码来表示。表示的方法极多，较常用的是8421 BCD码，表1-2列出了一部分编码关系。

8421 BCD码有十个不同的数字符号，且它是逢“十”进位的，所以，它是十进制数；但它的每一位是用四位二进制编码来表示的，因此，称为二进制编码的十进制数（BCD-Binary Coded Decimal）。

BCD码是比较直观的。

例： $(0100\ 1001\ 0111\ 1000.0001\ 0100\ 1001)_{BCD}$

可以很方便地认出为：

$$4978.149$$

所以，只要熟悉了BCD的十位编码，立即可以很容易地实现十进制与BCD码之间的转换。

表 1-2 BCD 编码表

十进制数	8421 BCD码	十进制数	8421 BCD码
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	0001 0000
3	0011	11	0001 0001
4	0100	12	0001 0010
5	0101	13	0001 0011
6	0110	14	0001 0100
7	0111	15	0001 0101

但是, BCD 码与二进制之间的转换是不直接的, 要先经过十进制。即: BCD 码先转换为十进制码, 然后再转换为二进制; 反之亦然。

(二) 字母与字符的编码

如上所述, 字母和各种字符也必须按特定的规则用二进制编码才能在机中表示。编码也可以有各种方式——即规定。目前在微型机中最普遍的是采用 ASCII (American Standard Code for Information Interchange 美国标准信息交换码) 码, 编码表见附录 1。

它是用七位二进制编码, 故可表示 128 个字符, 其中包括数码(0—9), 以及英文字母等可打印的字符。从表中可看到, 数码 0—9 相应应用 0110000—0111001 来表示。因微型机通常字长为 8 位, 所以 bit7 通常用作奇偶校验位, 但在机中表示时常认其为零, 故用一个字长 (即一个字节) 来表示一个 ASCII 字符。于是, 0—9 的 ASCII 码为 30H—39H, 大写字母 A—Z 的 ASCII 码为 41H—5AH。

三、二进制数的运算

一种数字系统可进行两种基本的算术运算: 加法和减法。利用加法和减法, 就可以进行乘法、除法以及其他数值运算。

(一) 二进制加法

二进制加法的规则为:

- ① $0 + 0 = 0$
- ② $0 + 1 = 1 + 0 = 1$
- ③ $1 + 1 = 0$ 进位 1
- ④ $1 + 1 + 1 = 1$ 进位 1

若有两数 1101 和 1011 相加, 则加法过程如下:

$$\begin{array}{r}
 \text{进位} \quad 1 \ 1 \ 1 \\
 \text{被加数} \quad 1 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \text{加数} \quad + \quad 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\
 \hline
 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0
 \end{array}$$

可见, 两个二进制数相加时, 每一位有三个数——即相加的两个数和低位的进位参加运算, 用二进制的加法规则得到本位的和以及向高位的进位。

微型机中通常字长为 8 位。例：两个八位数相加

$$\begin{array}{r}
 \text{进 位} \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \text{被加数} \quad 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \text{加 数} \quad + \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \hline
 \text{和} \quad 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0
 \end{array}$$

(二) 二进制减法

二进制减法的运算规则为：

- ① $0 - 0 = 0$
- ② $1 - 1 = 0$
- ③ $1 - 0 = 1$
- ④ $0 - 1 = 1$ 有借位

例：11000100 - 001100101，列出式为：

$$\begin{array}{r}
 \text{借 位} \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \text{借位以后的被减数} \quad 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \text{被 减 数} \quad 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \\
 \text{减 数} \quad - \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \hline
 \text{差} \quad 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1
 \end{array}$$

与加法类似，每一位有三个数——本位的被减数、减数和低位的借位参加运算。为便于计算，式中列出了低位向高位的借位，在运算时先用被减数和借位相运算，得到考虑了借位以后的被减数，然后再减去减数，最后得到每一位的差以及所产生的借位。下面再举一个例子说明这样的运算过程。

例：11101110 - 10111010，式为：

$$\begin{array}{r}
 \text{借 位} \quad 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 \text{借位后的被减数} \quad 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \text{被 减 数} \quad 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \\
 \text{减 数} \quad - \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \\
 \hline
 \quad 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0
 \end{array}$$

(三) 二进制乘法

二进制乘法的运算规则为：

- ① $0 \times 0 = 0$
- ② $0 \times 1 = 0$
- ③ $1 \times 0 = 0$
- ④ $1 \times 1 = 1$

规则是十分简单的：只有当两个 1 相乘时积才为 1，否则积为 0。

二进制的乘法也与十进制的类似：

$$\begin{array}{r}
 \text{被乘数} \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \text{乘 数} \quad \times 1 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 \hline
 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \quad 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \quad 1 \ 1 \ 1 \ 1 \\
 \hline
 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1
 \end{array}$$