

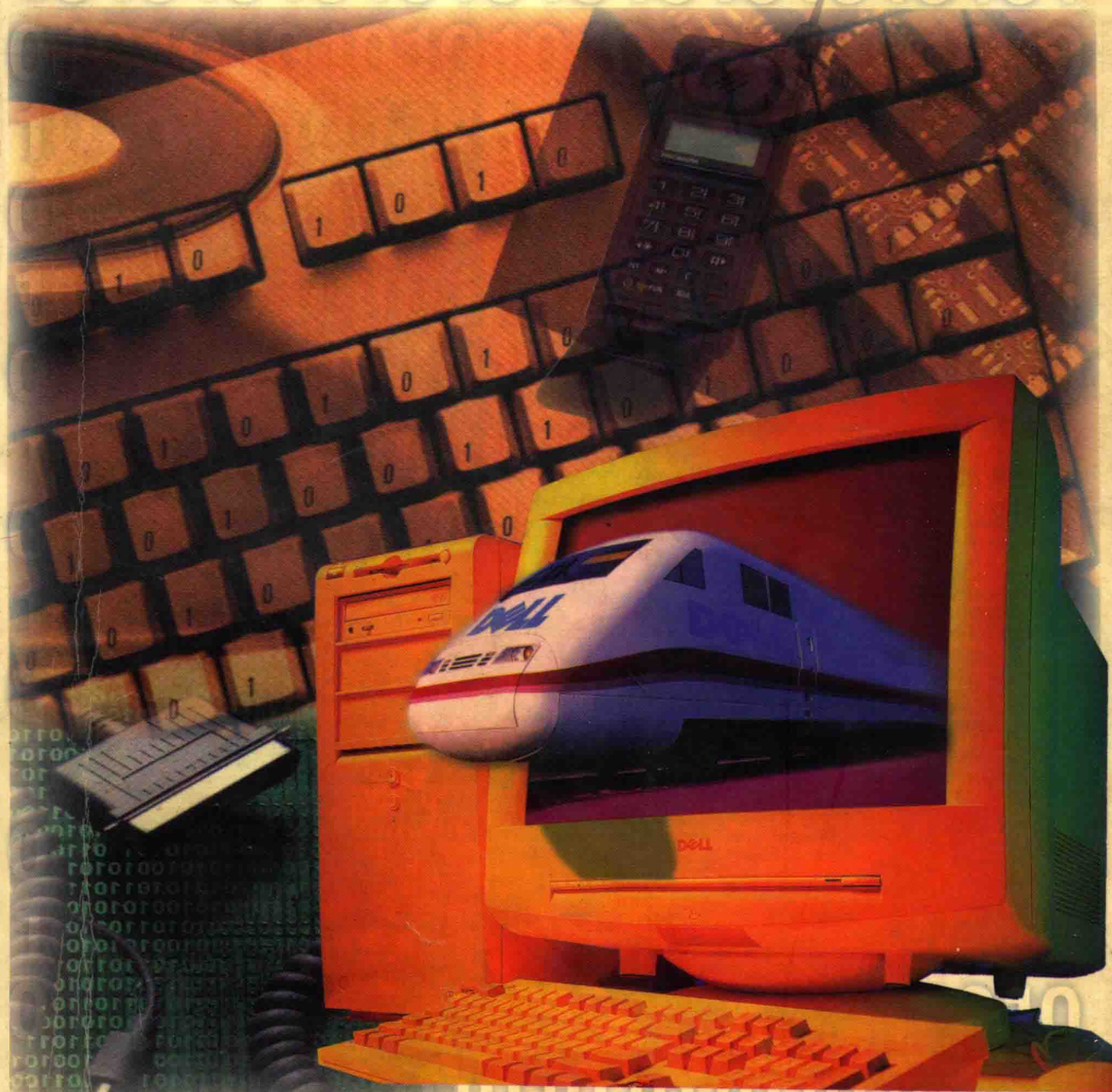
编著

杨向萍 王 跃

# 单片微型计算机原理

*Micro Computer*

## 及应用技术



中国纺织大学出版社

本书出版由上海发展汽车工业教育基金会资助

# 单片微型计算机原理及应用技术

杨向萍 王 跃 编著

中国纺织大学出版社

# 内容提要

本书是针对高等院校非计算机类专业微机原理及应用课程而编写的教材。它从计算机基本知识入手,介绍了微型计算机的基本组成电路和模型计算机的工作原理,详尽地介绍了 MCS-51 单片微型计算机的结构、指令系统、系统扩展技术及应用系统的设计。

与本书的教学实践环节相配套,同时研制开发了价廉、实用的教学实验装置,并配有相应的实验指导书。

## 图书在版编目(CIP)数据

单片微型计算机原理及应用技术/杨向萍,王跃编著,一上海:中国纺织大学出版社, 1999.7

ISBN 7-81038-233-0

I. 单… II. ①杨…②王… III. 单片微型计算机-基本知识 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 20478 号

责任编辑 冯珂

封面设计 张煜

## 单片微型计算机原理及应用技术

杨向萍 王跃 编著

中国纺织大学出版社出版

(上海市延安西路 1882 号 邮政编码:200051)

新华书店上海发行所发行 上海长阳印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:420 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数:0001-3 000

ISBN 7-81038-233-0/TP·368

定价:26.00 元

# 前 言

近年来,随着科学技术的飞速发展,微型计算机开发和应用技术越来越受到重视。单片微型计算机作为微型计算机的一个重要分支,由于其具有功能强、体积小、价格低、性能稳定可靠、容易开发等优点,在工业、农业、国防、交通、民用家电产品等各个领域都得到了广泛的应用。随着各种机—电—仪智能化产品的出现,单片机的应用将会更加广泛,并导致传统的控制检测技术有更大的飞跃。

过去,微机原理课程多以 Z80 微处理器为中心来安排和组织。随着单片机应用的日益推广,越来越多的院校对微型计算机原理课程进行了改革,将课程内容转为单片机。为适应这种形势,同时也为了使计算机知识较浅的读者能比较顺利地掌握单片机应用技术,本书将微机原理的基础知识和单片微型计算机的知识有机地结合起来。同时,与教学配合,研制了与之相应的、价廉实用的教学实验装置和配套实验指导书,使本书既可作为高等院校微机原理及应用的教材,也可作为单片机应用技术培训教材,还可供广大科技人员参考。

本书主要内容如下:第一章讲述计算机的发展概况,计算机中的数及运算,以及数字逻辑电路,用有限的篇幅介绍学习本书以后各章所必备的基础知识。第二章介绍微型计算机的基本组成电路,主要讲述计算机的运算器、计算机的记忆单元、计算机的总线结构方式以及计算机的信息流通过程。第三章以模型式计算机为例剖析微型计算机的工作原理,其中包括主要硬件结构、指令系统、程序设计、指令执行过程以及计算机控制器的构成。第四章以 MCS-51 单片机为主体,介绍其基本结构和性能。第五章重点介绍 MCS-51 的指令系统和程序设计基础,通过对本章的学习,使读者能更透彻地了解 MCS-51 的功能,同时为编程应用打下基础。第六章介绍 MCS-51 的中断系统、定时器/计数器的功能和应用。第七章介绍 MCS-51 系统的扩展技术,包括扩展 ROM、RAM 和并行 I/O 口,同时介绍典型的单片机应用系统——SCB-1 单片单板机的结构,使读者能将理论和实际相结合。第八章介绍了 MCS-51 系统的人机接口技术,包括显示器和键盘接口。第九章介绍 A/D 及 D/A 转换器的原理及与 MCS-51 单片机的接口方法。第十章主要介绍串行通信的基础知识和 MCS-51 的串行口及其通信技术。第十一章介绍单片机应用系统的设计方法,并列举了几个单片机应用的实例。

每章均附有习题,在附录中还给出了指令系统表、常用芯片的引脚图及 SCB-1 单片单板机的系统原理图,使读者不必再到处翻阅参考资料就可以方便地进行学习。

本书的出版得到了上海发展汽车工业教育基金会的资助。李恩光参加了本书编写的组织工作,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

在本书的编写过程中引用了书后有关材料或思想,谨向这些文献的作者表示谢忱。

由于作者水平和实际经验的限制,书中难免存在错误和不足之处,殷切希望广大读者批评指正。

编著者

1999 年 3 月

# 目 录

第一章 微型计算机基础知识	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 计算机中的数	(5)
§ 1.3 数字逻辑电路	(12)
习题一	(18)
第二章 微型计算机的基本组成电路	(19)
§ 2.1 算术逻辑部件	(19)
§ 2.2 触发器	(19)
§ 2.3 寄存器	(23)
§ 2.4 三态输出电路(三稳态电路)	(28)
§ 2.5 寄存器之间的数据传输——总线结构	(29)
§ 2.6 存储器概论	(30)
习题二	(35)
第三章 模型式计算机的工作原理	(36)
§ 3.1 模型式计算机的硬件组成	(36)
§ 3.2 指令系统	(38)
§ 3.3 程序设计	(39)
§ 3.4 执行指令的例行程序	(42)
§ 3.5 控制部件	(46)
习题三	(50)
第四章 MCS-51 系列单片机的结构	(51)
§ 4.1 MCS-51 单片机内部结构	(51)
§ 4.2 微处理器	(54)
§ 4.3 存储器结构和位处理器	(58)
§ 4.4 并行 I/O 口	(64)
习题四	(67)
第五章 MCS-51 单片机的指令系统	(68)
§ 5.1 指令格式及寻址方式	(68)
§ 5.2 指令系统	(76)
§ 5.3 程序设计举例	(102)
习题五	(112)
第六章 中断系统及定时器/计数器	(116)
§ 6.1 微型计算机中断技术概述	(116)
§ 6.2 MCS-51 单片机中断系统	(118)

§ 6.3 定时器/计数器	(131)
习题六	(141)
<b>第七章 系统扩展及单片单板机简介</b>	(142)
§ 7.1 MCS-51 扩展系统	(142)
§ 7.2 程序存储器扩展	(146)
§ 7.3 数据存储器的扩展	(150)
§ 7.4 并行 I/O 的扩展	(156)
§ 7.5 SCB-1 单片单板机简介	(162)
习题七	(165)
<b>第八章 人机接口技术</b>	(166)
§ 8.1 单片机应用系统中的人机通道	(166)
§ 8.2 键盘及其接口技术	(167)
§ 8.3 显示器接口设计	(175)
§ 8.4 SCB-1 单片单板机的键盘、显示器接口电路	(180)
习题八	(182)
<b>第九章 单片机与数模(D/A)及模数(A/D)转换器的接口</b>	(183)
§ 9.1 D/A 转换器	(183)
§ 9.2 MCS-51 单片机与 D/A 转换器的接口	(185)
§ 9.3 A/D 转换器	(194)
§ 9.4 MCS-51 单片机与 A/D 转换器的接口	(199)
§ 9.5 数据采集和处理系统	(204)
习题九	(206)
<b>第十章 串行通信接口技术</b>	(208)
§ 10.1 串行通信基础	(208)
§ 10.2 MCS-51 的串行接口	(215)
§ 10.3 MCS-51 串行口的应用	(220)
§ 10.4 MCS-51 串行口的多机通信	(230)
习题十	(235)
<b>第十一章 单片机应用系统的开发及实例</b>	(236)
§ 11.1 单片机应用系统开发方法	(236)
§ 11.2 单片机应用实例	(241)
习题十一	(253)
<b>参考文献</b>	(254)
<b>附 录</b>	(255)
附录一 MCS-51 指令系统操作码索引表	(255)
附录二 ASCII(美国标准信息交换码)表	(256)
附录三 MCS-51 单片机指令表	(257)
附录四 常用集成电路引脚图	(263)

# 第一章 微型计算机基础知识

## § 1.1 概 述

### 一、计算机的发展概况

电子计算机是一种能对信息进行加工处理的机器,它具有记忆、判断和运算能力,能仿效人类的思维活动,代替人的部分脑力劳动,并能对生产过程实施某种控制。世界上第一台可以由程序控制的计算机称为电子数字积分器与计算器(Electronic Numerical Integrator and Calculator),简称ENIAC。它是在1946年为了弹道设计的需要而由美国宾夕法尼亚大学研制出来的。这台计算机的字长只有12位,运算速度为每秒5000次加法运算,但它却是庞然大物,使用18800个电子管,1500个继电器,占地面积为150平方米,重达30吨,耗电150千瓦。其造价为100多万美元,而其性能只相当于一个可编程的计算器。在今天看来,这个计算机既贵且重,字长不够长而耗电又很多。不过,它的出现,正是今天大小不一、花样繁多的各种类型计算机的先驱,为发展至今的电子计算机奠定了技术基础。此后的三十多年,计算机的发展日新月异。如果将ENIAC称为第一代电子计算机的话,至今已发展至第四代的超大规模集成电路计算机,并且第五代计算机也正在研制中。

第一代电子管数字计算机,其发展年代大约为1946年到1958年。此时,计算机的逻辑元件采用电子管。主存储器采用磁芯、磁鼓,外存储器已开始采用磁带。运算速度为每秒几千次到几万次。用途则主要用于科学计算。编写程序主要采用机器语言,后期逐渐发展了汇编语言。

第二代是晶体管计算机,其发展年代大致为1958年至1964年。由晶体管代替电子管作为计算机的逻辑元件。主存储器仍为磁芯,外存储器开始使用磁盘。计算机软件也有了很大发展,高级语言和编译程序已很普遍。计算机运算速度提高到每秒几万次到几十万次。其应用也已扩展到各种事务的数据处理,并开始用于工业控制。

第三代是集成电路计算机,其发展年代为1964年至1971年。此时的计算机,其逻辑元件已开始采用小规模集成电路,即所谓SSI和MSI。主存储器仍以磁芯为主。软件发展更快,已有分时操作系统。会话式的高级语言也已出现并有相当的发展。小型计算机也随着集成电路规模的增大而很快地发展起来。应用的范围也日益扩大,企事业管理与工业控制都逐步引入小型计算机。

第四代计算机是指全面采用大规模集成电路的计算机,这是从1971年之后发展起来的。所谓大规模集成电路(LSI)是指在单片硅片上可以集成1000至20000个晶体管的集成电路。由于LSI的体积小,耗电很少,可靠性很高,因而促使微型计算机以很快的速度发展。现在

微型计算机的类型已很多,体积越来越小,已有单板微型计算机、单片微型计算机出现。在工业上已有很普遍的应用,在商业上的应用更是五花八门,有些便携式微型计算机更为有利于办公自动化以至家庭自动化的发展。

70年代以来,是第四代机兴盛和第五代机萌芽的时代。第五代计算机将是智能计算机。这种计算机从功能上看,不但能模拟人类的神经(听、视觉甚至大脑的思维活动能力),而且具有学习机能,软件方面将采用自然语言。

计算机的发展趋势,一是大型、巨型化,二是小型、微型化。与此同时,计算机网络和智能模拟也正在兴起和发展。

### (1) 大型、巨型化

为适应现代科学技术发展的需要,要求计算机提高运算速度,加大主存容量,以此为目的出现了大型和巨型计算机。例如我国研制的每秒运算一亿次的银河巨型机。每秒十亿次甚至百亿次的巨型机也正在出现和研制。

### (2) 小型、微型化

大型机速度快、容量大,解决了过去无法计算的实时和复杂的数学问题。但是,由于设备庞大、价格昂贵,给普及和应用带来了一定困难。另一方面,为适应宇航、导弹技术以及一般应用的要求,体积小、造价低、高可靠性就成了问题的关键。小型机,特别是微型计算机的出现,有效地解决了这个问题。

一般来说,计算机应用于以下几个方面:

(1) 科学计算 利用计算机高速、高精度地进行大量的复杂的数学运算,如导弹飞行轨迹运算、天气数值预报等。

(2) 数据与信息处理 利用计算机对大批量数据进行排序、插入、修改、删除、检索等基本操作,如资料的统计分析、计划的编制、企业的成本核算、情报的检索等。

(3) 实时控制 计算机实时采集生产、交通等现场的信息并加以处理,然后输出命令控制现场,使现场达到较佳的状态。如数控机床、化工自动控制、自动灭火系统、智能仪器等。

(4) 辅助设计 利用计算机部分帮助人进行机械、电路、房屋、服装等方面的工程设计。

(5) 人工智能的应用 人工智能就是用计算机模拟人类的智能,使计算机具有听、看、说和“思维”的能力。人工智能包括的内容有:图形与语言的识别、语言的翻译、专家系统、机器人、自动程序设计等。

本书侧重于讨论计算机的实时控制应用。

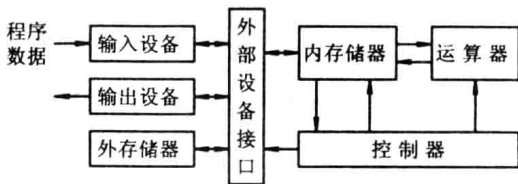


图 1-1 电子计算机的组成

## 二、微型计算机的概念

### 1. 计算机基本结构

电子计算机的结构框图如图 1-1 所示。它由运算器、控制器、存储器、输入设备及输出设备五大部分组成。

运算器(ALU—Arithmetic Logic Unit)是计算机处理信息的主要部件。

控制器(Control Unit)产生一系列控制命令,控制计算机各部件自动地、协调一致地工作。

存储器(Memory)是存放数据与程序的部件。存储器包括内存器和外存储器,内存器



又分只读存储器 ROM(Read Only Memory)和读写存储器 RAM(Random Access Memory)。

输入设备(Input Device)用来输入数据与程序。常用的输入设备有键盘、光电输入机等。

输出设备(Output Device)将计算机的处理结果用数字、图形等形式表示出来。常用的输出设备有显示终端、数码管、打印机等。

通常把运算器、控制器、存储器连同一些配件装在一个外壳内,称为计算机主机。而输入、输出设备则称为计算机的外围设备(简称“外设”)。由于运算器、控制器是计算机处理信息的关键部件,所以常将它们合称为中央处理单元 CPU(Central Processing Unit)。

## 2. 微型计算机结构

随着大规模集成电路技术的发展,已经把运算器、控制器集成在一块芯片上,成为独立的器件。该芯片称为微处理器(Microprocessor),也称为中央处理单元 CPU,或称为 MPU(Micro Processing Unit)。它与其他计算机 CPU 的最显著的区别就是它是集成在一块 LSI(Large Scale Integration)或 VLSI(Very Large Scale Integration)芯片上。微处理器是构成微型计算机、微型计算机系统的核心部件,但它本身还不能当计算机用。

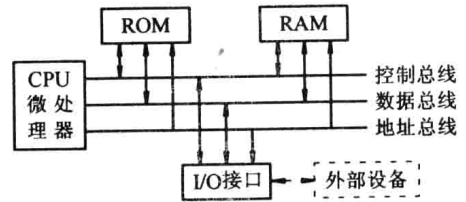


图 1-2 微型计算机结构框图

微型计算机(Microcomputer)是由微处理器、存储器与输入/输出接口电路(简称 I/O)等芯片构成,各芯片之间由总线(Bus)相连接。如图 1-2 所示。

微型计算机系统是指以微型计算机为中心,再配上所需的外部设备(如键盘、显示器等)、电源以及足够的软件而构成的系统。

微处理器、微型计算机和微型计算机系统是三个不同的概念。它们之间的关系如图 1-3 所示。

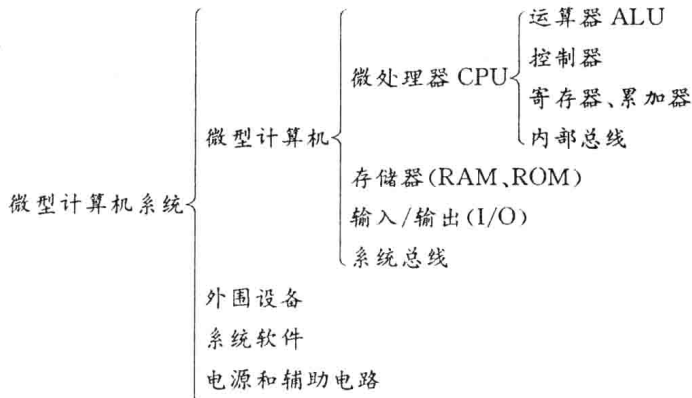


图 1-3 微型计算机系统的组成框图

通常所指的单板微型计算机(Single Board Microcomputer)是指将微处理器、存储器和输入/输出接口电路等组装在一块印刷电路板上。因此,又简称为单板机。而单片微型计算机(Single Chip Microcomputer)是指将这些部分集成在一块芯片上,又简称为单片机。单板机和单片机同属微型计算机的范畴,它们通常是某些特定的应用而专门设计的一类结构简单、价格便宜、使用灵活方便但功能有限的微型计算机。单板机在教学中使用非常广泛,但正逐渐被单片机取代,因为单片机特别适合于智能仪器仪表、自动控制和家用电器的控制与应用。

### 三、单片机的发展、特点及应用

自从 1975 年美国德克萨斯仪器公司的第一台单片微型计算机(简称单片机)TMS-100 问世以来,迄今为止,仅十余年的历史,单片机技术已成为计算机技术的一个独特分支。单片机的应用领域也越来越广泛,特别是在工业控制和仪器仪表智能化中扮演着极其重要的角色。

#### 1. 单片机的发展历史

单片机的历史非常短暂,然而发展十分迅猛。自 1971 年美国 Intel 公司首先研制出 4 位单片机 4004 以来,它的发展可粗略划分为四个阶段:

第一阶段 1971~1976 年,属萌芽阶段。发展了各种 4 位单片机,多用于家用电器、计算器、高级玩具。

第二阶段 1976~1980 年,为初级 8 位机阶段。发展了各种中、低档 8 位单片机,典型的如 MCS-48 系列单片机,片内含多个 8 位并行 I/O 接口、一个 8 位定时器/计数器,不带串行 I/O 接口,其功能可满足一般工业控制和智能化仪器仪表等的需要。

第三阶段 1980~1983 年,高级 8 位机阶段。发展了高性能的 8 位单片机,例如 MCS-51 系列单片机,它带有串行 I/O 接口和多个 16 位定时器/计数器,具有多级中断功能。这一阶段进一步拓宽了单片机的应用范围,使之能用于智能终端、局部网络的接口,并挤入了个人计算机领域。

第四阶段 1983 年以后,16 位单片机阶段。发展了 MCS-96 系列等 16 位单片机,功能强大,价格却与原来的 4 位机相差不大,片内有 A/D 转换器,提高了网络通信能力,且可用于高速的控制系统。

在国际市场上,单片机产品的类型众多。其中 Intel 公司的产品技术比较领先和占有较大的市场份额。在我国,Intel 公司 MCS-48 系列、MCS-51 系列、MCS-96 系列的各种机型应用广泛,占据主流地位。

随着大规模集成电路技术的演进,单片机的性能仍在快速提高,其表现为并继续提高集成度,增大 RAM、ROM 容量,提高速度,降低功耗。其生产工艺经历了 PMOS、NMOS、HMOS、CMOS 等各个阶段,正朝改进型 CMOS 工艺的方向发展。

#### 2. 单片机的特点

单片机芯片的集成度很高,将微型计算机的主要部件都集成在一块芯片上,它具有下列特点:

(1) 体积小、重量轻、价格便宜、耗电少。

(2) 根据工业控制环境要求设计,且许多功能部件集成在芯片内部,其信号通道受外界影响小,故可靠性高,抗干扰性能优于采用一般的 CPU。

(3) 控制功能强,运行速度快。其结构组成与指令系统都着重满足工业控制要求,有极丰富的条件分支转移指令,有很强的位处理功能和 I/O 口逻辑操作功能。

(4) 片内存储器的容量不可能很大,一般片内 RAM 少于 256 个字节、片内 ROM 少于 8KB,但存储器和 I/O 接口都易于扩展。

### 3. 单片机的应用

由上述单片机特点,可推知其应用最多的领域为:

(1) 因它具有“小、轻、廉、省”的特点,尤其耗电少,又可使供电电源的体积小、重量轻,所以特别适用于“电脑型产品”,在家用电器、玩具、游戏机、声像设备、电子秤、收银机、办公设备、厨房设备等许多产品上得到应用。

(2) 适用于仪器、仪表,不仅能完成测量,还具有处理(运算、误差修正、线性化、零漂处理)、监控等功能,易于实现数字化和智能化。

(3) 有利于“机电一体化”技术的发展,多用于数控机床、缝纫机械、医疗设备、汽车等。

(4) 广泛应用于打印机、绘图机等许多计算机外围设备,特别是用于智能终端,可大大减轻主机负担。

(5) 用于各种不太复杂的工业控制,如一般温度控制、液面控制、电镀生产线顺序控制等。

(6) 宜于多机应用。例如多机控制的加工中心机床,上级主机负责统管、协调,其各种功能可分散由下级各个单片机分别完成。又如要求较高的数据检测采集系统,每一采集通道如是一个单片机子系统,可实现多点同时快速采集和预处理,然后再由主机进行集中处理和控制在构成大型的实时测控系统。

上面的归纳还不够完整,但可知单片机的应用已渗透到国民经济的各个领域,极大地推动了计算机技术的普及。而且可以预期,随着单片机性能的进一步提高,它的应用将更趋广泛。它对我国许多产品的升级换代、工厂企业的设备更新都将起着十分巨大的作用。

## § 1.2 计算机中的数

### 一、进位计数制

计算机最基本的功能是进行数的计算和处理。数在计算机中是以器件的物理状态来表示的,比如灯的亮与暗、开关的开与关等。为了使表示更为方便和可靠,在计算机中采用两个数字来表示这两个物理状态,如用 1 来表示开关的开,用 0 表示开关的关。这就使数字和计算机联系起来,计算机才能进行数字运算。“0”和“1”这两个数码就组成了通常所称的二进制数。或者说,计算机只认得二进制数,也即计算机要处理的数,都要用二进制数字系统来表示,所有的字母、符号亦都要用二进制编码来表示。所以,我们的分析是从二进制数字系统着手进行的。

#### 1. 二进制数

二进制(Binary)数码只有 0 和 1。它是按“逢二进一”的原则进行计数的。因此,不同的数码在不同的位置代表不同的数值,例如:

$$(1001)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^0 = (9)_{10}$$

$$(10011.101)_2 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-3} = (19.625)_{10}$$

一般地说,任意一个二进制数都可以表示为:

$$B = B_{n-1} \times 2^{n-1} + B_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + B_1 \times 2^1 + B_0 \times 2^0 + B_{-1} \times 2^{-1} + B_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + B_{-m} \times$$

$$2^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} B_i \times 2^i \quad (1-1)$$

其中  $n$  为整数部分的位数,  $m$  为小数部分的位数。  $n, m$  均为正整数。  $B_i$  的取值只能是 0 或 1, 具体是何值取决于  $B$  的数值。

“二”是二进制数的基数, 故称为二进制数。

## 2. 十六进制数

十六进制 (Hexadecimal) 数码有 0~9, A, B, C, D, E, F, 其中 A~F 分别等于十进制数的 10~15。它是按“逢十六进一”的原则进行计数的。同样, 不同的数码在不同的位置代表不同的数值, 例如:

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

所以, 任意一个十六进制数都可以表示为:

$$\begin{aligned} H &= H_{n-1} \times 16^{n-1} + H_{n-2} \times 16^{n-2} + \dots + H_0 \times 16^0 + H_{-1} \times 16^{-1} + \dots + H_{-m} \times 16^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} H_i \times 16^i \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中  $n$  为整数部分的位数,  $m$  为小数部分的位数。  $n, m$  均为正整数。  $H_i$  可取 0~F 之间的值, 由具体的数  $H$  确定。

“十六”是十六进制数的基数, 故称为十六进制数。

表 1-1 二进制、十进制、十六进制数码对照表

十进制	二进制	十六进制	十进制	二进制	十六进制
0	0000	0	8	1000	8
1	0001	1	9	1001	9
2	0010	2	10	1010	A
3	0011	3	11	1011	B
4	0100	4	12	1100	C
5	0101	5	13	1101	D
6	0110	6	14	1110	E
7	0111	7	15	1111	F

综合几种计数制, 可以把它们的特点概括为:

(1) 每一种计数制都有一个固定的基数  $J$ , 它的每一位可能取  $J$  个不同的数值。

(2) 它是逢“ $J$ ”进位的。它的每一个数位  $i$ , 对应一个固定的值  $J^i$ ,  $J^i$  就称为该位的“权”, 小数点左面各位的权依次是基数  $J$  的正次幂; 而小数点右面各位的权依次是基数  $J$  的负次幂。

## 二、数制的转换

### 1. 二进制数转换成十进制数

由二进制数转换为十进制数 (Decimal) 可以采用式 (1-1), 将它按权展开相加就可以了。

例

$$(101101.01)_2 = 1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} = 32 + 8 + 4 + 1 + 0.25 = (45.25)_{10}$$

## 2. 十进制整数转换成二进制整数

如果要将十进制数 215 转换成二进制数,则可采用如下的方法:

$$(215)_{10} = (B_{n-1}B_{n-2}\cdots B_0)_2 = B_{n-1} \times 2^{n-1} + B_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + B_1 \times 2^1 + B_0 \times 2^0$$

如何确定  $B_{n-1} \sim B_0$ ? 显然,等式右边,除了最后一项  $B_0$  以外,都包含有 2 的因子,它们都能被 2 除尽,故用 2 去除十进制数,则它的余数即为  $B_0$ 。写成竖式为:

$$\begin{array}{r} 2 \overline{)215 \cdots B_0 = 1} \\ \underline{210} \\ 5 \cdots B_1 = 1 \\ 2 \overline{)53 \cdots B_2 = 1} \\ \underline{52} \\ 1 \cdots B_3 = 0 \\ 2 \overline{)13 \cdots B_4 = 1} \\ \underline{12} \\ 1 \cdots B_5 = 1 \\ 2 \overline{)6 \cdots B_6 = 1} \\ \underline{6} \\ 0 \cdots B_7 = 1 \end{array}$$

所以  $(215)_{10} = (11010111)_2$

由此,可以概括出把十进制整数反复地除以 2,直至商为 0。每次的余数即为二进制数码,最初得到的为整数的最低位有效值,最后得到的为最高位有效值。

## 3. 十进制小数转换成二进制小数

若要将十进制小数 0.6875 转换为二进制小数,则有:

$$(0.6875)_{10} = (0.B_{-1}B_{-2}\cdots B_{-m+1}B_{-m})_2 = B_{-1} \times 2^{-1} + B_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + B_{-m+1} \times 2^{-m+1} + B_{-m} \times 2^{-m}$$

若两边都乘以 2,得

$$(1.375)_{10} = B_{-1} + B_{-2} \times 2^{-1} + \cdots + B_{-m+1} \times 2^{-m+2} + B_{-m} \times 2^{-m+1}$$

显然等式两边的两个小数相等,则整数部分和小数部分应分别相等,所以  $B_{-1} = 1$ 。反复用 2 去乘要转换的十进制小数,将每次所得的整数(0 或 1),依次记为  $B_{-1}, B_{-2}, \cdots$ 。若乘积的小数部分最后能为 0,则乘积的整数部分记为  $B_{-m}$ 。

所以  $(0.6875)_{10} = 0.B_{-1}B_{-2}\cdots B_{-m} = (0.1011)_2$

若反复用 2 去乘而不能使尾数部分等于零,则可根据精度要求,取足够的  $m$  位就可以了。

## 4. 任意进制数与十进制数之间的转换

任意进制数与十进制数之间的转换的方法,和二进制数与十进制数之间的转换方法相类似。如十六进制数转换成十进制数时,只要将它按权展开相加即可。对于十进制整数转换成十六进制数,只要连续用 16 除要转换的十进制数,直至商为 0。然后,再将每次除得的余数按后至前的顺序排列起来。对于十进制小数转换成十六进制小数,只要连续用 16 乘以要转换的十进制数,直至尾数为零或取有效位数,然后,再将每次乘得的整数按前至后的顺序排列起来。

## 5. 十六进制数与二进制数之间的转换

由于二进制数与十六进制数之间存在着一种特殊关系,即  $2^4 = 16$ ,它们的关系简单而又

直接,用四位二进制数就可表示一位十六进制数,所以十六进制数在微型计算机中应用十分普遍。同时,只要熟悉这个关系,十六进制数与二进制数之间的转换也是十分方便的。

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十六进制数代替,即可转换成十六进制数。

例如:(1110101011.011100110101)<sub>2</sub>转换成十六进制为:

$$\frac{0011}{3} \quad \frac{1010}{A} \quad \frac{1011}{B} \quad \frac{0111}{7} \quad \frac{0011}{3} \quad \frac{0101}{5}$$

所以 (1110101011.011100110101)<sub>2</sub>=(3AB.735)<sub>16</sub>

无论是十六进制的整数或小数,只要将每一位十六进制的数用相应的四位二进制数代替,就可转换成二进制数。

例如:(AB3.537)<sub>16</sub>可转换为:

$$\begin{array}{cccccc} A & B & 3. & 5 & 3 & 7 \\ 1010 & 1011 & 0011. & 0101 & 0011 & 0111 \end{array}$$

所以 (AB3.537)<sub>16</sub>=(101010110011.010100110111)<sub>2</sub>

为了便于书写和计算,本书用数字后面加字母B表示为二进制数;以字母D或不加字母表示为十进制数;以字母H表示为十六进制数。

### 三、二进制编码

计算机中只能接受和处理二进制数,而实际要求计算机处理的信息有数、字母、符号等等。这些信息都要采用二进制数以特定的编码方式来表示,以供微型计算机识别、存储和处理,这就是二进制的编码。

#### 1. 十进制数的二进制编码

十进制数的二进制编码,简称BCD(Binary Code Decimal)码。由于人们熟悉十进制数,而计算机只能识别二进制数,故在计算机输入输出数据时,通常还是用十进制数表示。

一位十进制数采用四位二进制数来表示的,最常用的是8421BCD码。表1-2中列出了部分编码关系。这种编码有如下特点:

(1) 它是一种有权码,从高位到低位每位的权分别为 $2^3$ 、 $2^2$ 、 $2^1$ 、 $2^0$ ,即为8、4、2、1。

表 1-2 8421 BCD 编码表

十进制	8421BCD 码	十进制	8421BCD 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

(2) 编码简单直观。每个代码与它所代表的十进制数之间符合二进制数和十进制数相互转换的规则。

(3) 不允许出现 1010~1111。这 6 个二进制数在 8421BCD 码中是非法码。

要注意的是 BCD 码与二进制数之间的转换是不直接的,要先转换成十进制数,然后再转换成二进制数,反之亦然。

## 2. 字母与字符的编码

字母与字符也必须按特定的规则用二进制编码才能在计算机中表示。目前应用最广泛的为 ASCII 码,即美国标准信息码(American Standard Code for Information Interchange),它的编码见附录二。ASCII 码诞生于 1963 年,是一种比较完整的字符编码,已成为国际通用的标准编码,现已广泛用于微型计算机中。

ASCII 码是用 7 位二进制数编码的,故它可表示 128 个不同的字符,其中包括数字 0~9,英文大小写字母,标点符号及控制代码等。

## 四、二进制数的运算

二进制数只有 0 和 1 两个数码,它的加、减、乘、除运算规则与十进制数相似,但比十进制数简单得多。

加法规则  $0+0=0$   $0+1=1$   $1+0=1$   $1+1=0$  及进位为 1

减法规则  $0-0=0$   $1-0=1$   $1-1=0$   $0-1=1$  及借位为 1

乘法规则  $0\times 0=0$   $1\times 0=0$   $0\times 1=0$   $1\times 1=1$

两个二进制数的加法、减法、乘法和除法的过程和十进制数的运算过程相类似,现以加法、减法举例加以说明。

例如:有两个八位二进制数  $X=10110110B$ ,  $Y=11011001B$ ,试求出  $X+Y$ 、 $X-Y$  的值。

解:  $X+Y$  可写成如下竖式:

$$\begin{array}{r} \text{被加数 } X \quad 10110110B \\ \text{加数 } Y \quad \quad 11011001B \\ \hline \text{和 } X+Y \quad 110001111B \end{array}$$

所以  $X+Y=10110110B+11011001B=110001111B$

两个二进制数相加时要注意低位的进位,且两个八位二进制数的和最大不会超过 9 位。

由于  $Y>X$ ,故有  $X-Y=-(Y-X)$ ,相应竖式为:

$$\begin{array}{r} \text{被减数 } Y \quad 11011001B \\ \text{减数 } X \quad \quad 10110110B \\ \hline \text{差数 } Y-X \quad 00100011B \end{array}$$

所以  $X-Y=-00100011B$

两个二进制数相减时,要先判断它们的大小,把大数作为被减数,小数作为减数,差的符号由两数关系决定。此外,在减法过程中还要注意低位向高位借 1 应看作 2。

两个二进制数相乘,可以用乘数的每一位分别去乘被乘数,所得结果的最低位与相应乘数

位对齐,最后把所有结果总加起来,便得到积,这些中间结果又称为部分积。但在计算机中,手工算法不适合,因为它的硬件和软件开销太大。“部分积左移法”是微型计算机中常用的一种乘法算法。

在微型计算机内部没有专门的乘法器,乘法是由加法、移位和判断操作完成的。同样,在微型计算机内部也没有专门的除法器,除法是由减法、移位和判断操作完成的。

## 五、带符号数的表示法

为了运算的方便,在计算机里的有符号数有三种表示方法:原码、反码和补码,统称为机器数。

### 1. 机器数与真值

在数学中,带符号数的正、负分别用符号“+”、“-”来表示。而在计算机里的电子器件一般只有0和1两种状态,因此,数的符号也可以用这两个数来表示,一般用数的最高位作为符号位,“0”表示正数,“1”表示负数。像这样连同符号位一起作为能被计算机识别的一个数,称为机器数,而它所代表的数值称为机器数的真值。

如:  $X=01011011B=+91$

$X=11011011B=-91$

机器数是微型计算机中数的基本形式。为了运算方便起见,机器数通常有原码、反码和补码三种形式。

### 2. 原码

微型计算机数的原码(True Form)形式就是机器数形式。两者完全相同。它们的最高位为符号位,“0”表示正数,“1”表示负数。

如上述两个数可写成:

$X=01011011B=+91$        $[X]_{原}=0\ 1011011$

$X=11011011B=-91$        $[X]_{原}=1\ 1011011$

原码的0有两种表示方法:

$[+0]_{原}=00000000$        $[-0]_{原}=10000000$

8位二进制的原码表示范围为 $-127\sim+127$ 。

原码表达简单、直观,与真值的转换方便。但若是两个异号数相加(或同号数相减),就要做减法运算。为了把减法运算转换为加法运算就引进了反码和补码。

### 3. 反码

正数的反码(One's Complement)表示与原码相同,而负数的反码则是它所对应的正数按位取反(连同符号位)而形成的。

如:  $X=(+4)_{10}=00000100$        $[X]_{反}=[X]_{原}=00000100$

$X=(+127)_{10}=01111111$        $[X]_{反}=[X]_{原}=01111111$

$X=(-4)_{10}=10000100$        $[X]_{反}=11111011$

$X=(-127)_{10}=11111111$        $[X]_{反}=10000000$



反码的 0 也有两种表示方法:

$$[0]_{\text{反}} = 00000000 \quad [-0]_{\text{原}} = 11111111$$

8 位二进制的反码表示范围为  $-127 \sim +127$ 。

带符号数用反码表示时,最高位是符号位。当符号位为 0(正数)时,后面的 7 位与原码相同;当符号位为 1(负数)时,后面 7 位与原码不同,只有将它们逐位求反后才能求得原码。

#### 4. 补码

正数的补码(Two's Complement)表示与原码相同,而负数的补码表示为其反码在最低位加 1。如:

$$X = (-4)_{10} = 10000100, \quad [X]_{\text{反}} = 11111011, \quad [X]_{\text{补}} = 11111100$$

$$X = (-127)_{10} = 11111111, \quad [X]_{\text{反}} = 10000000, \quad [X]_{\text{补}} = 10000001$$

补码的 0 只有一种表示方法:

$$[+0]_{\text{补}} = [-0]_{\text{补}} = 00000000$$

8 位二进制的补码表示范围为  $-128 \sim +127$ ,  $[-128]_{\text{补}} = 10000000$ 。

对于一个数的补码再求补,就等于该数的原码,但是  $-128$  例外,因为它已超出了原码的表示范围。

采用补码表示后,就可以用加法器进行减法运算。运算的性质如下:

$$[X+Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [Y]_{\text{补}}$$

$$[X-Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [-Y]_{\text{补}}$$

例如:利用补码求  $64-10$  的结果。

$$[64-10]_{\text{补}} = [64]_{\text{补}} + [-10]_{\text{补}}$$

$$[64]_{\text{补}} = 01000000$$

$$[-10]_{\text{补}} = 11110110$$

于是:

$$01000000$$

$$11110110$$

---

$$00110110$$

则

$$[64-10]_{\text{补}} = 00110110$$

由于作为符号位的最高位等于 0,说明结果是正数。因此

$$64-10 = [64-10]_{\text{补}} = (00110110)_2 = 54$$

例如:

$$[64-65]_{\text{补}} = [64]_{\text{补}} + [-65]_{\text{补}} = 01000000 + 10111111 = 11111111$$

由于作为符号位的最高位等于 1,说明结果是负数。因此算出的结果再求补,得出运算结果的原码。由于在字长为 8 位的机器中,从第 7 位的进位是自然丢失的,故做减法与用补码做加法的结果是相同的。

$$64-65 = (10000001)_2 = -1$$

求补码的另一种比较简单的方法,是从负数原码的最低位开始向左检查,当遇到第一个 1