

# 单片机原理与 应用系统设计



(第二版)

DANPIANJI YUANLI YU  
YINGYONG XITONG SHEJI

主 编 / 高 博 董海棠  
副主编 / 张金敏 卫晓娟

层次递进 任务驱动  
案例经典 图文并茂

# 单片机原理与 应用系统设计

(第二版)

DANPIANJI YUANLI YU  
YINGYONG XITONG SHEJI

主 编 / 高 博 董海棠  
副主编 / 张金敏 卫晓娟

图书在版编目 ( C I P ) 数据

单片机原理与应用系统设计 / 高博, 董海棠主编.  
—2 版. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.2  
ISBN 978-7-5643-5286-8

I. ①单… II. ①高… ②董… III. ①单片微型计算机—高等学校—教材 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 027674 号

---

单片机原理与应用系统设计  
(第二版)

主 编 高 博 董 海 棠

责 任 编 辑 穆 丰

封 面 设 计 墨 创 文 化

---

出 版 发 行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533

邮 政 编 码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

---

印 刷 成都勤德印务有限公司

成 品 尺 寸 185 mm × 260 mm

印 张 17.75

字 数 443 千

版 次 2017 年 2 月 第 2 版

印 次 2017 年 2 月 第 4 次

书 号 ISBN 978-7-5643-5286-8

定 价 29.80 元

---

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 第二版前言

在第一版的基础上，融入近几年编者最新教学与科研方面的经验，经过反复修改、总结，精心编写并出版了《单片机原理与应用系统设计（第二版）》，改进了部分内容的叙述方式和部分例题的解题方法。在突出主要概念的同时，更加贴近实用，力求做到符合教学规律和认知特点，增强学生对所学知识的系统性、规律性的认识。该教材既可用作普通高等学校的自动化、电气工程及其自动化、计算机应用、电子信息工程、机械工程以及机电一体化等专业的教学用书，也可供院校师生和从事单片机应用与产品开发相关工作的工程技术人员参考用书。

全书共有 9 章内容。其中前 4 章内容是单片机基础知识部分，主要讲述了微型计算机基础、51 单片机芯片内部结构、汇编语言程序设计等。后 5 章内容为单片机系统的扩展与应用部分，主要讲述了单片机的存储器扩展、I/O 接口扩展、A/D、D/A 转换技术等。同时，讲述了单片机的 C 语言开发环境，并列举了作者近年来的科研项目实例及单片机在机车车辆上的应用技术实例等，较详细地介绍了单片机系统设计中应注意的关键问题。本书选材广泛、图文并茂，涉及的技术全面新颖，反映了现代微机技术发展的最新水平和趋势。

本书由高博、董海棠任主编，张金敏、卫晓娟任副主编。全书内容丰富，结构完整，其中第 2、7、9 章由高博编写（共 15 万字）；第 5、6、8 章由董海棠编写（共 11 万字）；张金敏编写了第 1、3 章（共 12 万字），卫晓娟编写了第 4 章及附录（共 5 万字）。全书由兰州交通大学自动化与电气工程学院王思明教授任主审，高博、张金敏负责整理和统稿。

本书（第二版）在编写过程中得到了兰州交通大学机电学院机电系全体老师的全力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。同时特别感谢本书编辑的辛勤劳动。正是大家付出的艰辛与努力，终于使本书的第二版能与读者见面。

全书参考教学 32~64 学时，实验 6~10 学时。学时可以根据实际情况，对各章讲授的内容进行适当取舍。

本书的出版工作得到了西南交通大学出版社的全额资金资助支持，在此表示衷心的感谢。

由于本书涉及的知识点较多，尽管在编写中做了许多努力，难免有不足和疏漏之处，欢迎广大读者提出宝贵意见和建议，以便进一步改进和提高，使之满足实际教学的需要。

编者

2017 年 1 月

# 第一版前言

为适应单片机技术的迅速发展和教学改革形势的需要,在总结多年来教学和科研方面的经验,吸收国内外的许多先进技术及应用成果、许多优秀论著和教材的编写方法和应用实例的基础上,经过反复修改、总结、精心编写而出版了该教材。本书即可作为普通高等学校相关课程的教材,也可作为单片机原理及系统设计的自学读本。

在本教材的编写中,我们的指导思想主要体现在以下几点:

1. 注重内容的更新和有限篇幅之间的矛盾,在保留基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,突出了单片机课程的实践性。在讨论具体芯片应用时,突出构成该电路的思路、电路特点、实际应用方式等,并结合实例进行介绍。同时,还较大篇幅地对单片机的 C 语言开发环境等作了介绍,并融入了作者多年来科研项目的系统设计实例。

2. 在选材的编排上,力求做到:深入浅出、条理清楚、重点突出、便于自学。从实际出发,在讲解重点、难点内容时,精选例题,引导学生运用基本概念、基本原理和基本方法来分析问题,培养学生解决实际问题的能力。

3. 各章均附有“本章导读”和精选的习题,简单阐明各章的学习内容,以利于学生预习、复习和巩固所学的知识。

全书共有 9 章内容。其中前 6 章内容是单片机基础知识部分,主要讲述了微型计算机基础、51 单片机芯片内部结构、汇编语言程序设计、串行口工作方式等内容。后 3 章内容为单片机系统配置部分,主要讲述了单片机人-机接口技术、A/D、D/A 转换技术。同时讲述了单片机的 C 语言开发环境,并列举了作者近年来的科研项目实例及单片机在机车车辆上的应用技术实例等,较详细地介绍了单片机系统设计中应注意的关键问题。

本书的参编者都是相关课程的一线优秀教师,具有丰富的教学经验和科研经历。其中,张金敏副教授编写第 1, 3, 8 章(共 15 万字),董海棠副教授编写第 5, 6, 9 章及附录(共 14 万字),高博博士编写第 2, 7 章(共 9.5 万字),卫晓娟副教授编写第 4 章(共 5.3 万字)。全书由兰州交通大学自动化与电气工程学院王思明教授任主审,由张金敏负责整理、统稿。

本书参考了国内外许多作者的论著、先进技术及应用成果,在此谨致谢意。

感谢测控技术与仪器教研室的全体老师对本书的支持和帮助,特别感谢系主任彭真瑞博士的大力支持和帮助,同时特别感谢本书的编辑。感谢卢衍伟、黄银花、孟萍、晏启恒、袁超等研究生所做的文字录入、校对和绘图工作。本书编写过程中我系祁文哲教授提出了很好的修改意见,在此一并表示感谢。正是大家付出的艰辛与努力,终于使本书能与读者见面。

本书的出版工作得到了西南交通大学出版社的全额资金资助支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2010 年 5 月

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 微型计算机概述	1
1.2 单片机概述	2
1.3 单片机应用系统与开发系统	4
1.4 含 51 内核的常用单片机	5
1.5 数制与码制	6
第 2 章 51 单片机芯片的硬件结构	13
2.1 单片机的内部结构及引脚	13
2.2 单片机的存储器配置	18
2.3 数据存储器	19
2.4 程序存储器	25
2.5 单片机的堆栈操作	26
2.6 51 单片机时钟电路与时序	29
2.7 51 单片机的复位	31
第 3 章 指令系统与汇编语言程序设计	34
3.1 指令格式与寻址方式	34
3.2 51 单片机指令系统	41
3.3 51 单片机汇编语言程序设计	76
3.4 汇编语言程序的基本结构形式	80
第 4 章 单片机中断系统与定时器	95
4.1 中断系统概述	95
4.2 中断的概念与功能	96
4.3 51 单片机中断系统	98
4.4 51 单片机定时器/计数器	108
第 5 章 单片机串行数据通信	125
5.1 计算机数据通信基础知识	125
5.2 51 单片机串行口及控制寄存器	131
5.3 51 单片机串行口工作方式及应用	134

5.4	PC 机与单片机的串行通信	142
<b>第 6 章</b>	<b>单片机外部存储器扩展</b>	<b>147</b>
6.1	单片机系统扩展概述	147
6.2	存储器的扩展	150
6.3	程序存储器扩展	155
6.4	数据存储器扩展	160
6.5	51 系列单片机存储器系统的特点和使用	165
<b>第 7 章</b>	<b>单片机 I/O 口扩展及应用</b>	<b>169</b>
7.1	I/O 口扩展概述	169
7.2	可编程并行 I/O 接口芯片 8255A	175
7.3	人-机接口技术	188
<b>第 8 章</b>	<b>数模及模数转换器接口技术</b>	<b>209</b>
8.1	单片机与 D/A 转换器接口	209
8.2	单片机与 A/D 转换器接口	219
<b>第 9 章</b>	<b>单片机的 Keil C51 开发语言与应用系统研制</b>	<b>232</b>
9.1	51 系列单片机的 Keil C51 开发语言	232
9.2	Keil C51 的数据结构	236
9.3	单片机汇编语言与 C 语言程序设计对照	245
9.4	C51 与汇编语言的混合编程	246
9.5	单片机应用系统调试	253
9.6	单片机应用系统设计举例	258
9.7	单片机应用系统设计总结	272
<b>附录</b>	<b>51 单片机指令表</b>	<b>272</b>
<b>参考文献</b>		<b>277</b>



# 第1章 绪论

## 【本章导读】

- 微型计算机的基本概念
- 单片机概述
- 单片机应用系统与开发系统
- 含 51 内核的常用单片机
- 单片机的发展趋势
- 数制与码制

## 1.1 微型计算机概述

### 1.1.1 微型计算机的基本概念

微型计算机 (Microcomputer) 是指由中央处理器 CPU、存储器、输入/输出接口电路和中断系统等集装在同一块或数块印刷电路板上所构成的计算机。它们不仅在科学计算、数据与信息处理方面有着卓越的应用,而且在实时控制、人工智能方面更有着广泛的用途。

1971 年,美国 Intel 公司研究并制造了 I4004 微处理器芯片。该芯片能同时处理 4 位二进制数,集成了 2300 个晶体管,每秒可进行 6 万次运算,成本约为 200 美元。它是世界上第一个微处理器芯片,以它为核心组成的 MCS-4 计算机,标志了世界第一台微型计算机的诞生。微型计算机是以大规模、超大规模构成的微处理器作为核心,配以存储器、输入/输出接口电路及系统总线所制造出的计算机。

### 1.1.2 微型计算机的分类

随着微型计算机的高速发展,单片微型计算机、单板微型计算机、微型计算机系统和微型计算机开发系统等机种不断涌现。为了学习掌握好单片机,从概念上弄清单片计算机和其他机种之间的异同是十分重要的。

从应用对象角度,微型计算机可分为:

(1) 单片机:又称单片微控制器,它不是完成某一个逻辑功能的芯片,而是把一个计算机系统集成到一个芯片上。概括的讲,它主要是将微处理器、部分存储器、输入/输出接口电路都集成在一块集成电路芯片上,一块芯片就成为一台计算机。

单片机的形态只是一块芯片,但是它已具有微型计算机的组成结构和功能。由于单片机的结构特点,单片机主要用于控制。在实际应用中常常将它完全融入应用系统之中,所以又称为微控制器 (Microcontroller Unit) 或嵌入式控制器 (Embedded Controller),如图 1-1 所示。



据统计,目前我国单片机的年产量已达1亿~3亿片,且每年以大约16%的速度增长。单片机在民用和工业测控领域的应用最为广泛。彩电、冰箱、洗衣机、空调、录像机、VCD、遥控器、游戏机等,处处可见单片机发挥的巨大作用,单片机早已深深地融入我们每个人的生活之中。所以,在我国乃至全世界,单片机的应用有着广阔的发展空间。

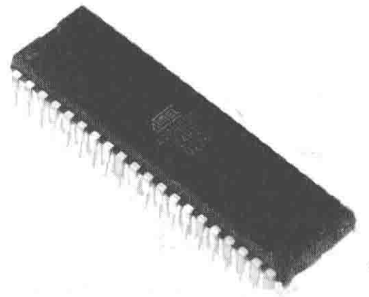


图 1-1 单片机外形图

(2) 单板机: 将计算机的各个部分都组装在一块印制电路板上, 包括微处理器、存储器、输入/输出接口(如七段发光二极管显示器、小键盘、插座)等。功能比单片机强大, 适于进行生产过程的控制; 也可以直接在实验板上操作, 适用于教学与现场专用。

(3) PC机(Personal Computer): 面向个人单独使用的一类微型计算机, 实现各种计算、数据处理及信息管理等。

## 1.2 单片机概述

### 1.2.1 单片机的一般结构及特点

一般单片机有两种基本结构形式: 一种是在通用微型计算机中广泛采用的将程序存储器和数据存储器合用一个存储空间的结构, 称为普林斯顿(Princeton)结构或称冯·诺依曼结构; 另一种是将程序存储器和数据存储器截然分开, 分别寻址的结构, 称为哈佛(Harvard)结构。51系列单片机采用的是哈佛结构。目前单片机以采用程序存储器和数据存储器截然分开的结构较多。

如图1-2所示, 单片机的中央处理器(CPU)和通用微处理器基本相同, 但单片机在结构、指令设置上有其独特之处, 主要特点如下:

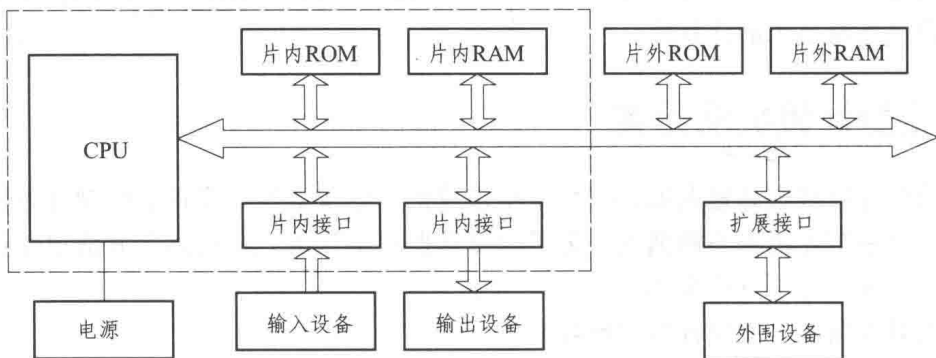


图 1-2 单片机系统结构框图

(1) 单片机的存储器 ROM 和 RAM 是严格区分的。ROM 称为程序存储器, 只存放程序、固定常数及数据表格。RAM 则为数据存储器, 用作工作区及存放用户数据。

(2) 采用面向控制的指令系统。为满足控制的需要, 增设了“面向控制”的处理功能。使单片机具有很强的位逻辑处理能力。例如, 位处理、查表、多种跳转、乘除法运算、状态检测、中断处理等功能, 增强了控制的实用性和灵活性。

(3) 单片机的 I/O 引脚通常是多功能的。由于单片机芯片上引脚数目有限,为了解决实际引脚数和需要的信号线的矛盾,采用了引脚功能复用的方法,引脚处于何种功能,由指令来设置或由机器状态来区分。

(4) 单片机的外部扩展能力很强。在内部的各种功能部件不能满足应用需求时,均可在外部进行扩展(如扩展 ROM、RAM、I/O 接口、定时器/计数器、中断系统等),与许多通用的微机接口芯片兼容,给应用系统设计带来极大的方便。

## 1.2.2 单片机的分类

单片机按其用途可分为两大类:通用型单片机和专用型单片机。

通用型单片机内部资源比较丰富,性能全面,适应性强,能满足多种应用需求,而且它将可开发资源全部提供给使用者,使用者可以根据需要,通过进一步设计,组建成一个以通用型单片机芯片为核心,再配以其他外围电路的单片机应用系统。

专用型单片机其硬件结构和指令系统是按照某个特定的用途设计的,但是无论其在应用上有多么专业,其原理和结构却仍然是建立在通用单片机的基础之上的。

单片机按其基本操作处理的位数可分为:1 位单片机、4 位单片机、8 位单片机、16 位单片机、32 位单片机、64 位单片机。相对来说,8 位单片机目前仍为单片机应用系统设计中的主流系列,如图 1-3 所示。

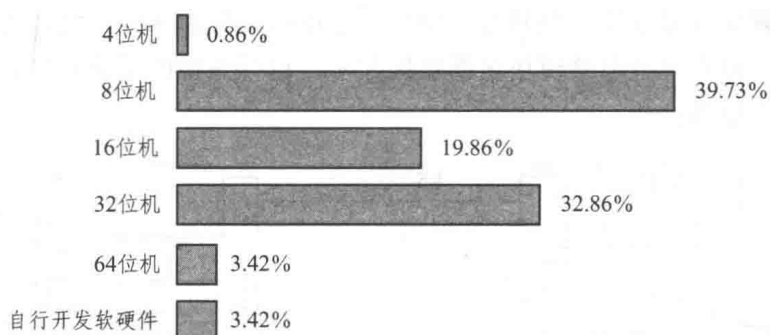


图 1-3 单片机选型市场调查

尽管各类单片机很多,但无论是从世界范围或是从全国范围来看,使用最为广泛的应属 51 系列单片机。MCS-51 单片机系列共有十几种芯片,如表 1-1 所示。

表 1-1 51 系列单片机分类表

子系统	片内 ROM 形式			片内 ROM 容量	片内 RAM 容量	寻址范围	I/O 特性			中断源
	无	ROM	EPROM				计数器	并行口	串行口	
51 子系统	8031	8051	8751	4 KB	128 B	2×64 KB	2×16	4×8	1	5
	80C31	80C51	87C51	4 KB	128 B	2×64 KB	2×16	4×8	1	5
52 子系统	8032	8052	8752	8 KB	256 B	2×64 KB	3×16	4×8	1	6
	80C32	80C52	87C52	8 KB	256 B	2×64 KB	3×16	4×8	1	6

## 1.3 单片机应用系统与开发系统

### 1.3.1 单片机应用系统

单片机与微型计算机的区别在于单片机通常是应用系统而设计的, 本身一般不具有自我开发和编程的能力, 因此必须借助于开发工具来开发。单片机最突出的特点是其本身就是一个完整的应用系统, 可以通过对单片机的选型和多个联用来满足不同要求。若无特殊需要, 不必进行扩展 (如 ROM、RAM、I/O、A/D 等扩展)。

### 1.3.2 单片机开发系统

单片机开发系统 (见图 1-4) 是单片机应用系统开发调试的工具。通常有两种开发方式: 一种对于复杂的单片机系统, 可使用微机来进行应用开发, 人们把能开发单片机的微机称为微型计算机开发系统 MDS (Microcomputer Development System); 另一种是有专门的单片机开发系统, 称为在线仿真器 ICE (In Circuit Emulator), 通过它可以进行单片机应用系统的软硬件开发和 EPROM 程序写入。

单片机应用系统的开发特点是: 选用合适机型, 开发实用软件。在该过程中, 系统硬件设计是指设计电路原理图、设计印制电路板或用万用板直接焊出实验板; 硬件、软件分模块调试是指测试、调整部分电路模块和程序模块; 系统联调是指在独立测试各部分电路模块、程序模块正确后, 将系统各电路模块全部连接起来, 运行完整的系统程序, 测试各个模块的配合情况以及系统整体性能。

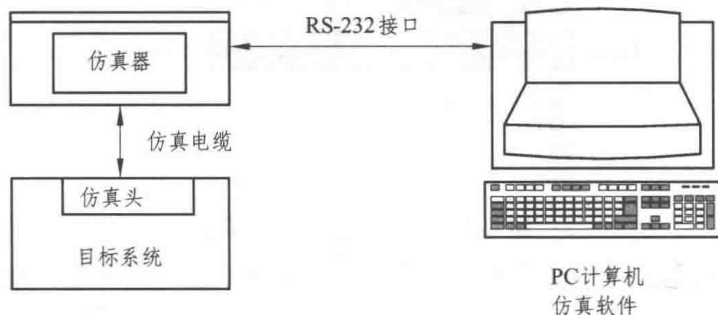


图 1-4 单片机开发系统组成框图

### 1.3.3 单片机的应用领域

单片机具有体积小、可靠性高、功能强、灵活方便等许多优点, 故可以广泛应用于各个领域, 对各行各业的技术改造和产品更新换代起到了重要的推动作用。单片机的应用范围很广, 主要用于以下几个方面:

#### 1. 测试与控制系统

用单片机可以构成各种工业控制系统、自适应控制系统、数据采集系统等。例如, 数控

机床、水闸自动控制、电镀生产线自动控制、车辆检测系统、机器人处理器、电机控制、温度控制等。

## 2. 智能仪表

用单片机改造原有的测量和控制仪表，能促进仪表向数字化、智能化、多功能化、综合化、柔性化发展。如温度、压力、流量、浓度显示、控制等仪表仪器。通过采用单片机软件编程技术，使长期以来测量仪表中的误差修正、线性化处理等难题迎刃而解。

## 3. 机电一体化产品

单片机与传统的机械产品结合，使传统机械产品结构简化、控制智能化，从而构成新一代的机电一体化产品。例如，在电传打字机的设计中由于采用了单片机，从而取代了近千个机械部件；在数控机床简易控制机中，采用单片机可提高可靠性及增强功能，降低控制机床成本。还有自动取款机 ATM、自动售货机、电子收款机、电子秤等。

## 4. 计算机外部设备与智能接口

在较大型的工业测控系统中，经常采用单片机进行前端数据采集、信号处理，而系统主机承担数据处理、人机界面、数据库、网络通信等工作。单片机与系统主机通过串行通信传递数据，这样就大大提高了系统的运行速度。如图形终端机、传真机、复印机、打印机、绘图仪、智能终端机等。

## 5. 家用电器

家用电器中单片机的应用更多。如手机、电视机、空调、洗衣机、电冰箱、微波炉、录像机、饮水机、音响设备等。

# 1.4 含 51 内核的常用单片机

目前已投放市场与 51 兼容的单片机产品多达 70 多个系列，500 多个品种。这其中还不包括那些系统或整机厂商定制的专用单片机，及针对专门业务、专门市场的单片机品种。

## 1. ATMEL 单片机

ATMEL 公司的 8 位单片机有 AT89C、AT90 两个系列，AT89C 系列是 8 位 Flash 单片机，与 8051 系列单片机相兼容，静态时钟模式；AT90 系列单片机是增强 RISC 结构、全静态工作方式、内载在线可编程 Flash 的单片机，也叫 AVR 单片机。

## 2. PHILIPS 单片机

PHILIPS 公司的增强型 8 位 80C51 单片机系列提供了完整的产品类型，可满足各个应用

领域的需求。其产品类型包括通用型、Flash 型、OTP 型和低成本经济型。其主要产品系列包括 P80、P87、P89、LPC76、LPC900 等,有 50 多种产品。

在同一时钟频率下这类单片机的运行速度是 8051 的 6 倍,应用编程(IAP)和在线编程(ICP)允许用户 EPROM 实现简单的串行代码编程,使得程序存储器可用于非易失性数据的存储,配有模拟比较器、WDT、复位电路等。

### 3. SST89 系列单片机

SST89 系列单片机为 MCS-51 标准系列单片机,包括 SST89E/V52RD2, SST89E/V54RD2, SST89E/V58RD2, SST89E/V554RC, SST89E/V564RD 等。

SST 单片机是在目前所有的 51 单片机产品中 IAP 技术最强的单片机,单片机内部 FLASH 扇区小(128 字节)、速度快、功耗低、稳定性高,为客户的在线升级和加密技术提供强有力的技术保障。

### 4. SM 系列单片机

SM 系列单片机是 SYNCMOS 半导体公司推出的与 MCS-51 系列产品兼容的 8 位单片机,SM 系列产品克服其他产品的不足,可替代 PHILIPS、WINBOND、ATMEL、HYNIX (HYUNDAI/LG)、ISSI、SST 单片机,性价比极高。同以上厂家 51 系列单片机不同的是不可解密,保护您的知识产品,让用户节省更多的空间与成本,成品更可靠,内带 Watchdog Timer 电路。如:SM8951A 替代 AT89C51, SM8952A 替代 AT89C52, SM8958A 替代 AT89C55 和 W78E58, SM89516A 替代 W78E516B 等。

## 1.5 数制与码制

迄今为止,所有计算机都是以二进制形式进行算术运算和逻辑运算的,微型计算机也不例外。因此,对于用户在键盘上输入的十进制数字和符号命令,微型计算机必须先把它们转换成二进制形式,然后才能进行识别、运算和处理,最后再把运算结果还原成十进制数字和符号通过输出终端显示出来。

虽然上述过程十分烦琐,但这些工作都是由微型计算机在后台完成的。为了使读者清楚地了解计算机的这一工作原理,下面首先对微型计算机中常用的数制、数制之间的转换以及编码进行介绍。

### 1.5.1 基本概念与常用术语

(1) 位(bit): 位是计算机中构成信息的最小单位,表示二进制数中的某个数位“0”或“1”。Bit 是 Binary Digit 的缩写。

(2) 字(Word): 字是 CPU 与输入/输出设备和存储器之间传送数据的单位,由若干位组成。它与数据总线的宽度(根数)一致。

(3) 字节(Byte): 一个字节包含 8 位(Bit)二进制数,是计算机数据的基本存储单位。

## 1.5.2 计算机中常用的进制数

所谓数制是指数的制式，是人们利用符号表示数的一种科学方法。数制是人类在长期的社会实践中逐步形成的。数制有很多种，最常用的数制有二进制、八进制、十进制和十六进制等，如表 1-2 所示。

表 1-2 各种进制换算表

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

### 1. 十进制数

十进制 (Decimal) 是大家很熟悉的进位计数制，它的主要特点有：

- (1) 它有 0~9 十个不同的数码，构成所有十进制数的基本符号。
- (2) 它的进位规则是“逢十进一”。在十进制数计数过程中，当某位计数满十时就要向它邻近高位进一，借位规则是“借一当十”。

### 2. 二进制表示法

二进制 (Binary) 是计算机技术中采用的数制。基数为 2 的计数制叫做二进制。它有以下两个主要特点：

- (1) 它共有 0 和 1 两个数码，任何二进制数都是由这两个数码组成的。
- (2) 它的基数为 2，进位规则是“逢二进一”，借位规则是“借一当二”。

### 3. 八进制表示法

八进制数有两个主要特点：

(1) 它有 0, 1, 2, ..., 7 共 8 个数码, 任何一个八进制数都是由其中的部分或全部数码构成。

(2) 它的基数为 8, 进位规则是“逢八进一”, 借位规则是“借一当八”。

### 4. 十六进制表示法

十六进制 (Hexadecimal) 是人们学习和研究计算机中二进制数的一种工具, 十六进制数有两个主要特点:

(1) 它有 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F 共 16 个数码, 任何一个十六进制数都是由其中的部分或全部数码构成的。

(2) 它的基数为 16, 进位规则是“逢十六进一”, 借位规则是“借一当十六”。

## 1.5.3 进制间的转换

### 1. 二进制数和十进制数之间的转换

(1) 二进制数转换为十进制数。

方法: 按二进制数的位权进行展开并且相加求和即可。

例:  $11101.101$

$$= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

$$= 16 + 8 + 4 + 0 + 1 + 0.5 + 0 + 0.125 = 29.675$$

其他进制的数据转换成十进制的方法同上。

(2) 十进制数转换为二进制数 (或其他进制)。

方法:

① 将整数部分和小数部分分别进行转换, 然后再把转换结果进行相加。

② 整数转换采用除 2 取余法: 用 2 不断地去除要转换的数, 直到商为 0。再将每一步所得的余数, 按逆序排列, 便可得转换结果。

③ 小数转换采用乘 2 取整法: 每次用 2 与小数部分相乘, 取乘积的整数部分, 再取其小数部分乘 2 直到小数部分为 0。将所取整数顺序放在小数点后即为转换结果。

【例 1-1】将十进制数 136 转换为二进制数。

基数	十进制数	余数
2	136	0 最低位
2	68	0
2	34	0
2	17	1
2	8	0
2	4	0
2	2	0
2	1	1
	0	最高位

转换结果:  $(136)_D = (10001000)_B$ 。

【例 1-2】将十进制数 0.625 转换为二进制数。



$$\begin{array}{r}
 0.625 \\
 \times 2 \\
 \hline
 1.25 \dots\dots\dots \text{取整} 1 \quad \text{高位} \\
 0.25 \\
 \times 2 \\
 \hline
 0.5 \dots\dots\dots \text{取整} 0 \\
 0.5 \\
 \times 2 \\
 \hline
 1.0 \dots\dots\dots \text{取整} 1 \quad \text{低位}
 \end{array}$$

转换结果： $(0.625)_D = (0.101)_B$ 。

对于小数转换取乘积的整数部分，再取其小数部分乘 2 的算法，如果小数部分无法为 0。则根据数据精度确定数据位数。

## 2. 二进制数和八进制数、十六进制数间的转换

(1) 二进制数到八进制数转换采用“三位化一位”的方法。从小数点开始向两边分别进行，每三位分一组，向左不足三位的，从左边补 0；向右不足三位的，从右边补 0。

(2) 二进制数到十六进制数的转换采用“四位化一位”的方法。从小数点开始向两边分别进行，每四位分一组，向左不足四位的，从左边补 0；向右不足四位的，从右边补 0。

【例 1-3】将  $(1000110.01)_B$  转换为八进制数和十六进制数。

$$(1000110.01)_B = (106.2)_O = (46.4)_H$$

### 1.5.4 带符号二进制数的表示与运算

数有正负之分，这时的数就是带符号数。在计算机中符号用 1 位二进制数表示。8 位微型计算机中约定，最高位 D7 表示符号，其他 7 位表示数值，如图 1-5 所示。D7 = 1 表示负数，D7 = 0 表示正数。

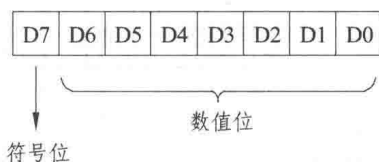


图 1-5 8 位微机中的带符号数

带符号数在计算机中可以分别用原码、反码、补码 3 种方法表示，习惯上把计算机中存放的数称作机器数。原码、反码、补码都是机器数。其中，负数采用反码或补码表示的目的是将负数转化为正数，使减法操作转变为单纯的加法操作。目前，在计算机系统中，均采用补码表示负数。下面对计算机中的原码、反码、补码作一介绍。

注意：正数的三码是相同的，只有负数才有三码的表示形式。

(1) 原码表示法：规定用最高位表示符号，正数的符号位用“0”表示，负数的符号位用“1”表示，其他位表示数值的绝对值。一个 8 位的二进制表示一个带符号数，最高有效位 D7 位为符号位。其余表示数值。如：

+ 1 表示为: 00000001B      + 127 表示为: 01111111B  
 - 1 表示为: 10000001B      - 127 表示为: 11111111B

(2) 反码表示法: 除符号外, 其余数据位各位求反。如:

[+ 0]<sub>反</sub> = 00000000      [- 0]<sub>反</sub> = 11111111  
 [+ 1100111]<sub>反</sub> = 01100111      [- 1100111]<sub>反</sub> = 10011000

(3) 补码表示法: 仍然规定最高位定为符号位, 对于正数, 其余各位表示数值。对于负数, 除符号位外, 其余按原码的各位值, 逐位取反, 取反后再加 1, 简称为反码加 1, 即: 负数的补码 = 反码 + 1。

【例 1-4】求 0.1011 和 - 0.1011 的补码 (8 位)。

[+ 0.1011]<sub>补</sub> = [+ 0.1011]<sub>原</sub> = [+ 0.1011]<sub>反</sub> = [+ 0.1011]<sub>补</sub> = 01011000B  
 [- 0.1011]<sub>补</sub> = [11011000]<sub>反</sub> + 1 = 10100111B + 1 = 10101000B  
 [0]<sub>补</sub> = [+ 0]<sub>补</sub> = [- 0]<sub>补</sub> = 00000000

【例 1-5】带符号二进制数表示方法举例 (见表 1-3)。

表 1-3 带符号二进制数表示方法

真 值	原 码	反 码	补 码
+ 1010101B	01010101B	01010101B	01010101B
- 1010101B	11010101B	10101010B	10101011B

可见正数的反码、补码与原码的数值完全相同。

- 注释: ① 正数的真值就是该数本身。  
 ② 8 位二进制负数真值 = 负数的补码 - 100H。  
 ③ 8 位二进制的补码范围是 + 127 ~ 128。

例如: 补码 E7H 对应的真值 = E7H - 100H = - 19H。

在计算机中, 对一个负数求其补码, 可采用对其相应正的二进制数的每位求反再加 1, 即可得在机器中表示的该数的负数, 称 2 的补码表示法。在这种编码方式中, 正数的补码就是该正数。以 8 位二进制为例 (见表 1-4)。

表 1-4 带符号数的补码值表 (8 位)

十进制	十六进制 (H)	二进制补码值(B)
127	7F	01111111
64	40	01000000
3	3	00000011
2	2	00000010
1	1	00000001
0	0	00000000
- 1	FF	11111111
- 2	FE	11111110
- 100	9C	10011100
- 128	80	10000000