



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

单片机技术及应用

——基于汇编及C51程序设计

◆ 方 红 杨加国 唐毅谦 编著

Electronic Information
Science and Engineering



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子信息科学与工程类专业规划教材

单片机技术及应用

——基于汇编及 C51 程序设计

方 红 杨加国 唐毅谦 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书以实用为宗旨,以 51 系列单片机为背景,结合 Keil、C51、Proteus 等单片机系统开发软件,通过实例讲解 MCS-51 单片机的原理和硬、软件开发技术,针对同一功能,同时提供单片机汇编源程序和单片机 C 语言源程序。主要内容包括计算机基础知识及微处理器、8051 单片机的结构体系、指令系统、8051 单片机程序设计基础、8051 单片机的中断系统、8051 单片机的定时/计数器、8051 单片机的串行接口及串行总线、8051 单片机的系统扩展与接口技术、单片机应用系统的开发实例、Proteus 仿真软件及 Keil 集成开发环境的使用。

本书可作为高等院校自动化、电子信息、计算机应用、机电一体化等专业的单片机课程本科教材,同时可作为工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作为教材的老师发邮件到 fanghong@cdu.edu.cn 索取。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

单片机技术及应用:基于汇编及 C51 程序设计 / 方红等编著. —北京:电子工业出版社, 2017.7

ISBN 978-7-121-31665-4

I. ①单… II. ①方… 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 120864 号

策划编辑:张小乐

责任编辑:张小乐 特约编辑:朱海云

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:北京京科印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:16.75 字数:429 千字

版 次:2017 年 7 月第 1 版

印 次:2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254462, zhxl@phei.com.cn。

前 言

单片机技术及应用是理工科类专业的重要课程之一，也是一门实践性非常强的课程。MCS-51 系列单片机的应用十分广泛，是学习单片机技术较好的系统平台，同时也是开发单片机应用系统的一个重要 CPU 系列。本书以实用为宗旨，以 51 系列单片机为背景，结合 Keil、C51、Proteus 等单片机系统开发软件，通过实例讲解 MCS-51 单片机的原理和硬、软件开发技术，针对同一功能，同时提供单片机汇编源程序和单片机 C 语言源程序，并免费提供所有源代码和电路图的资源下载，读者可以此作为进入单片机应用系统开发领域的首次尝试。

本教材突出工程特色，以工程教育为理念，围绕培养应用创新型工程人才这一目标，着重培养学生的独立研究能力、动手能力和解决实际问题的能力。本书与传统的单片机基本原理书籍相比，更面向实际开发；与单片机 C 语言程序设计书籍相比，兼顾了单片机原理和汇编语言的讲解，有利于初学者迅速掌握单片机技术，并且可以在未学习“微型计算机原理”的情况下直接学习“单片机原理及应用”。本书的实例分别用汇编语言和 C 语言来实现相同的功能，通过两种编程语言的对比，学生能够有选择地掌握一种语言并认识另一种语言。同时，为了提高学生应用设计的能力，本书还介绍了目前单片机接口常用的接口芯片，列举了几个简单的单片机应用系统开发实例。

全书共 11 章。第 1 章是微型计算机与单片机基础知识；第 2 章介绍了单片机的结构及工作原理；第 3 章介绍了指令系统及汇编程序设计；第 4 章介绍了 C51 语言及程序设计；第 5 章介绍了 MCS-51 单片机的中断系统及其应用方法；第 6 章介绍了 MCS-51 单片机定时/计数器的原理及使用方法；第 7 章介绍了 MCS-51 单片机的串行接口及串行通信技术；第 8 章介绍了 51 系统扩展及接口技术；第 9 章介绍了单片机应用系统设计及举例；第 10 章介绍 Keil C51 集成环境的使用；第 11 章介绍了 Proteus 软件的使用。

本书结构合理、内容翔实、实例丰富，突出了选取内容的实用性、典型性，书中的应用实例大多来自科研工作及教学实践。本书可作为高等院校自动化、电子信息、计算机应用、机电一体化等专业单片机课程的本科教材，同时可作为相关领域工程技术人员的参考书。

本书由成都大学方红、杨加国、唐毅谦等编著。书中参考并吸取了大量国内教材、论文的长处，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在缺漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017 年 4 月

目 录

第 1 章 微型计算机与单片机基础知识	1
1.1 微型计算机与单片机的感性认识	1
1.2 计算机硬件的基本组成	1
1.3 微型计算机的硬件构成	2
1.3.1 微型计算机的硬件结构	2
1.3.2 微处理器(CPU)	2
1.3.3 存储器	4
1.3.4 输入/输出(I/O)	4
1.3.5 总线(BUS)	5
1.4 计算机中信息的表示	5
1.4.1 计算机中无符号整数的表示	5
1.4.2 计算机中有符号数的表示	6
1.4.3 十进制数的表示	8
1.4.4 计算机中字符的表示	9
1.5 单片机概述	10
1.5.1 单片机的典型硬件结构	10
1.5.2 单片机与微型计算机的比较	10
1.5.3 主要的单片机产品	11
1.5.4 单片机的应用领域	14
1.5.5 单片机的发展过程与趋势	15
习题	16
第 2 章 单片机的结构及工作原理	18
2.1 MCS-51 系列单片机的内部结构	18
2.1.1 MCS-51 单片机的基本组成	18
2.1.2 中央处理器(CPU)	19
2.1.3 存储器	20
2.1.4 I/O 端口	21
2.2 8051 单片机的存储器组织	24
2.2.1 存储器组织	24
2.2.2 程序存储器	25
2.2.3 数据存储器	27
2.3 51 系列单片机的引脚及功能	31
2.3.1 51 单片机的引脚分类	31

2.3.2	三总线结构	33
2.4	时钟电路与 CPU 时序	33
2.4.1	振荡器和时钟电路	33
2.4.2	CPU 时序	33
2.5	单片机的工作方式	36
2.5.1	复位方式	36
2.5.2	程序执行方式	36
2.5.3	单步执行方式	37
2.5.4	掉电和节电方式	38
2.5.5	编程和校验方式	38
2.6	51 系列单片机最小系统	39
	习题	40
第 3 章	51 单片机指令系统及汇编程序设计	41
3.1	指令系统概述	41
3.1.1	51 单片机汇编指令格式	41
3.1.2	51 单片机汇编指令常用符号	42
3.2	51 单片机的寻址方式	42
3.2.1	立即寻址	42
3.2.2	寄存器寻址	43
3.2.3	直接寻址	43
3.2.4	寄存器间接寻址	43
3.2.5	变址寻址	44
3.2.6	指令寻址	45
3.2.7	位寻址	45
3.3	51 单片机的指令系统	45
3.3.1	数据传送类指令	46
3.3.2	算术运算类指令	49
3.3.3	逻辑操作类指令	52
3.3.4	控制转移类指令	54
3.3.5	位操作类指令	57
3.4	51 单片机汇编程序设计概述	59
3.4.1	51 单片机汇编程序设计过程	60
3.4.2	51 单片机汇编程序常用伪指令	60
3.5	51 单片机常用汇编程序设计	63
3.5.1	数据传送程序	63
3.5.2	运算程序	64
3.5.3	代码转换程序	66
3.5.4	分支程序	67
3.5.5	延时程序	69

习题	69
第 4 章 51 单片机 C 程序设计	71
4.1 C 语言与 51 单片机	71
4.1.1 C 语言的特点	71
4.1.2 C 语言程序的结构	72
4.1.3 C51 与标准 C 语言	73
4.2 C51 的数据类型	73
4.2.1 char 字符型	74
4.2.2 int 整型	74
4.2.3 long 长整型	74
4.2.4 float 浮点型	75
4.2.5 指针型	75
4.2.6 特殊功能寄存器型	75
4.2.7 位类型	76
4.3 C51 的变量与存储类型	76
4.3.1 C51 的普通变量及定义	76
4.3.2 特殊功能寄存器变量	79
4.3.3 位变量	79
4.3.4 指针变量	80
4.4 绝对地址的访问	81
4.4.1 使用 C51 运行库中预定义宏	81
4.4.2 通过指针访问	82
4.4.3 使用 C51 扩展关键字 <code>_at_</code>	83
4.5 C51 中的函数	83
4.5.1 C51 函数的参数传递	84
4.5.2 C51 函数的返回值	84
4.5.3 C51 函数的存储模式	85
4.5.4 C51 的中断函数	85
4.5.5 C51 函数的寄存器组	86
4.5.6 C51 的重入函数	87
习题	87
第 5 章 51 单片机中断系统	89
5.1 中断的基本概念	89
5.1.1 中断的概念	89
5.1.2 中断源及中断请求	90
5.1.3 中断优先权控制	90
5.1.4 中断允许与中断屏蔽	90
5.1.5 中断响应与中断返回	90
5.2 51 单片机的中断系统	90

5.2.1	51 单片机的中断系统总体结构	90
5.2.2	51 单片机的中断源	90
5.2.3	两级中断允许控制	92
5.2.4	两级优先级控制	92
5.2.5	中断响应	94
5.3	51 单片机中断系统的编程与应用	94
5.3.1	51 单片机中断系统的编程	94
5.3.2	51 单片机中断系统的应用	95
	习题	99
第 6 章	51 单片机定时/计数器	100
6.1	定时/计数器的结构及原理	100
6.1.1	主要特性	100
6.1.2	结构及工作原理	100
6.2	定时/计数器的方式和控制寄存器	101
6.2.1	方式寄存器 TMOD	101
6.2.2	控制寄存器 TCON	102
6.3	定时/计数器的工作方式	103
6.3.1	方式 0——13 位定时/计数器方式	103
6.3.2	方式 1——16 位定时/计数器方式	103
6.3.3	方式 2——8 位自动重置定时/计数器方式	104
6.3.4	方式 3——两个 8 位定时/计数器方式	104
6.4	定时/计数器的初始化编程及应用	105
6.4.1	定时/计数器的初始化编程	105
6.4.2	定时/计数器的应用	105
	习题	110
第 7 章	51 单片机串行接口	111
7.1	通信的基本概念	111
7.1.1	并行通信和串行通信	111
7.1.2	串行通信的基本过程	112
7.1.3	串行通信的通信方式	113
7.1.4	波特率	114
7.2	51 单片机串行口的功能与结构	114
7.2.1	串行口的功能	114
7.2.2	串行口的结构	114
7.2.3	串行口控制寄存器 SCON	115
7.2.4	电源控制寄存器 PCON	116
7.3	串行口的工作方式	117
7.3.1	方式 0——同步移位寄存器方式	117
7.3.2	方式 1——8 位异步通信方式	117

7.3.3	方式 2 和方式 3——9 位异步通信方式	118
7.4	串行口的应用	118
7.4.1	利用方式 0 扩展并行 I/O 接口	118
7.4.2	利用方式 1 实现点对点的双机通信	122
	习题	125
第 8 章	51 系统扩展及接口技术	126
8.1	51 单片机系统扩展概述	126
8.1.1	51 单片机系统扩展方法	126
8.1.2	单片机常用扩展芯片	127
8.2	存储器扩展	130
8.2.1	程序存储器扩展	130
8.2.2	数据存储器的扩展	131
8.3	I/O 口扩展设计	132
8.3.1	简单 I/O 口扩展	133
8.3.2	8255 可编程并行接口芯片	134
8.4	显示器接口扩展技术	140
8.4.1	LED 显示器及其接口	140
8.4.2	LCD 显示器及其接口	147
8.5	键盘接口设计	153
8.5.1	键盘工作原理	153
8.5.2	键盘接口设计	156
8.6	D/A、A/D 转换器与 51 单片机的接口	163
8.6.1	DAC0832 与 51 单片机的接口	163
8.6.2	ADC0809 与 8051 的接口	169
	习题	175
第 9 章	单片机应用系统设计及举例	177
9.1	单片机应用系统开发过程	177
9.1.1	单片机应用系统开发的基本过程	177
9.1.2	单片机应用系统的硬件系统设计	178
9.1.3	单片机应用系统的软件设计	180
9.1.4	单片机应用系统开发工具	182
9.2	单片机电子时钟的设计	182
9.2.1	功能要求	182
9.2.2	总体方案设计	182
9.2.3	主要器件介绍	183
9.2.4	硬件电路设计	188
9.2.5	软件程序设计	189
9.3	单片机数显温度计的设计	203
9.3.1	功能要求	203

9.3.2	总体方案设计	203
9.3.3	主要器件介绍	204
9.3.4	硬件电路设计	208
9.3.5	系统软件程序设计	209
习题		219
第 10 章	Keil C51 集成环境的使用	220
10.1	Keil C51 简介	220
10.1.1	Keil μ Vision4 IDE 的安装	220
10.1.2	Keil μ Vision4 IDE 界面	220
10.2	Keil μ Vision4 IDE 的使用方法	225
10.2.1	建立项目文件	226
10.2.2	给项目添加程序文件	227
10.2.3	编译、连接项目, 形成目标文件	229
10.2.4	运行调试观察结果	230
10.2.5	仿真环境的设置	230
习题		233
第 11 章	Proteus 软件的使用	234
11.1	Proteus 概述	234
11.1.1	Proteus 的启动	234
11.1.2	Proteus 的界面	235
11.2	Proteus 的基本操作	237
11.2.1	新建电路, 选择元件	237
11.2.2	放置元件, 调整元件	239
11.2.3	连接导线	240
11.2.4	给单片机加载程序	243
11.2.5	运行仿真查看结果	243
习题		244
附录 A	51 系列单片机指令表	245
附录 B	C51 的库函数	249

第 1 章

微型计算机与单片机基础知识

1.1 微型计算机与单片机的感性认识

1946 年人类第一台电子计算机 DNIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) 问世。在其后几十年的发展历史中, 计算机经历了电子管、晶体管、中小规模集成电路和大规模、超大规模集成电路几个阶段。

20 世纪 70 年代初期, 由于微电子技术和超大规模集成技术的发展, 导致了以微处理器为核心的微型计算机的诞生。微型计算机 (Microcomputer) 与其他计算机的区别在于它的中央处理器 CPU (Central Processing Unit) 是采用超大规模技术集成在一块硅片上的, 又称为微处理器 (Microprocessor)。微型计算机由微处理器 (CPU)、存储器和输入/输出接口组成。微型计算机系统由硬件 (微型计算机) 和软件两大部分组成。硬件指组成计算机的设备实体。软件是相对于硬件而言的, 指计算机运行所需的各种程序, 广义地讲还包括各种信息。

单片微型计算机 (Single Chip Micro Computer) 简称单片机, 它是把组成微型计算机的各功能部件, 如中央处理单元 CPU、一定容量的随机存储器 RAM 和只读存储器 ROM、I/O 接口电路、定时/计数器以及串行口等, 制作在一块芯片中的计算机。由于单片机的硬件结构与指令系统的功能都是按工业控制要求而设计的, 常用在工业检测、控制装置中, 因而也称为微控制器 (Micro-Controller)。它具有结构简单、控制功能强、可靠性高、体积小、价格低等特点, 从家用电器、智能化仪器、工业控制到火箭导航尖端技术领域都发挥着十分重要的作用。

1.2 计算机硬件的基本组成

1946 年美籍匈牙利数学家冯·诺依曼 (John Von Neuman) 等人在“关于电子计算仪器逻辑设计的初步探讨”的论文中, 第一次提出了计算机组成和工作方式的基本思想, 其主要内容是:

1. 计算机由运算器、控制器、存储器、输入和输出设备五部分组成。
2. 存储器不但能存放数据, 也能存放程序。数据和程序均以二进制数码形式在机器内存放。计算机能自动识别数据和程序。
3. 编好的程序事先存入存储器中, 计算机在指令计数器控制下, 自动高速执行。

目前, 虽然计算机已取得惊人的进步, 但究其本质, 仍属冯·诺依曼结构体系。

我们知道, 微型计算机系统由硬件和软件两大部分组成。硬件和软件系统本身还可细分为更多的子系统, 如图 1-1 所示。

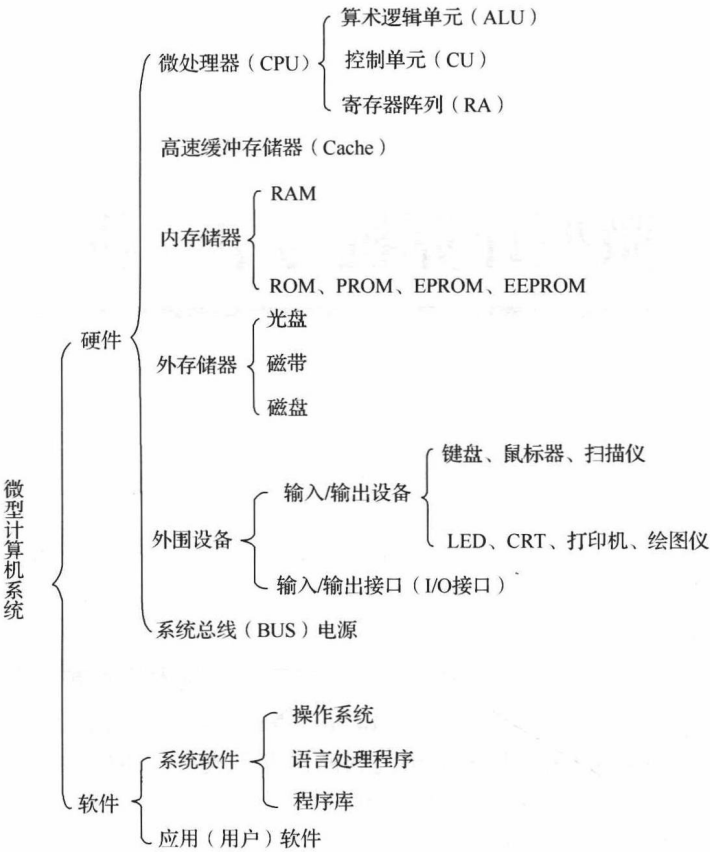


图 1-1 微型计算机系统组成

1.3 微型计算机的硬件构成

1.3.1 微型计算机的硬件结构

微型计算机的硬件主要由以下 5 个部分组成：①微处理器(CPU)，②内存存储器(RAM、ROM)，③外存储器(磁盘、磁带、光盘)，④输入、输出设备，⑤系统总线(BUS)电源。其系统结构如图 1-2 所示。

1.3.2 微处理器(CPU)

微处理器是整个微型计算机硬件控制指挥中心，不同型号的微型计算机性能的差别首先在于微处理器性能的不同。但无论哪种微处理器，其基本结构、基本部件的作用都是相同的。微处理器的基本组成如图 1-3 所示。

微处理器包括运算器和控制器两部分。

1. 运算器部分

(1) 算术逻辑单元(Arithmetic Logic Unit, ALU)

ALU 是微型计算机运算部分的核心，在控制信号作用下可完成加、减、乘、除四则运算，还可进行与、或、非、异或等逻辑运算。

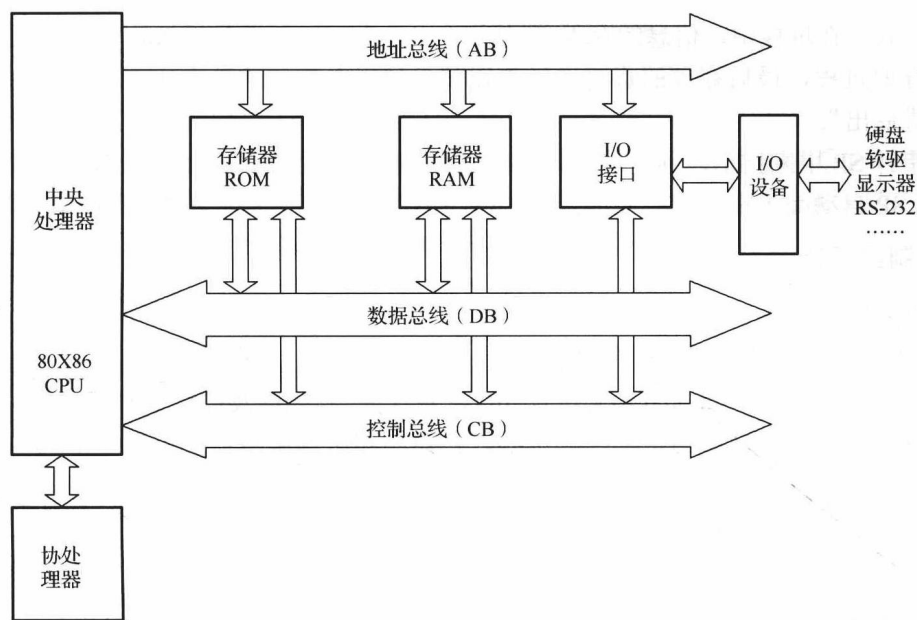


图 1-2 微型计算机硬件系统结构

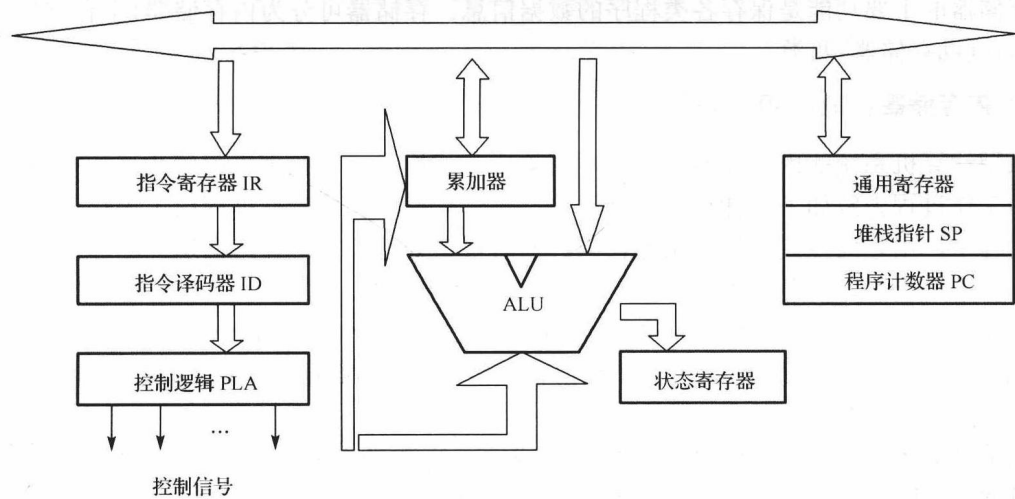


图 1-3 微处理器 CPU 内部组成

(2) 累加器 (Accumulator, ACC)

ACC 是通用寄存器中的一个，它提供送入 ALU 的两个操作数中的一个，而运算后的结果送回 ACC。因为它与 ALU 联系特别密切，故常把它划出，而不归在通用寄存器组中。

(3) 状态寄存器 (Flag Register, FR)

FR 用来记录计算机运行的某些重要状态，在必要时，根据这些状态控制 CPU 的运行。

(4) 寄存器组 (Resisters, RS)

RS 用来加快运算和处理速度。计算机访问存储器比访问寄存器要慢得多，因此在需要反复使用某些数据或中间结果时，可将其暂时存放在 RS 中，避免反复访问存储器，提高执行速度。

(5) 堆栈和堆栈指针寄存器 (SP)

堆栈是一组寄存器或存储器中某一指定区域，在计算机中广泛使用“堆栈”作为信息的

一种存取方式。在堆栈中,信息的存入(进栈“Push”)与取出(弹出“Pop”)过程类似于仓库中货物的存取过程,最后存放的货物堆放在顶部,最先取出。这种方式称为“后进先出”或称为“先进后出”。

堆栈指针 SP 用来指示栈顶地址,其初值由程序员设定。例如向下生长型堆栈,当数据压入堆栈时,SP 自动减 1 指向新的栈顶;当数据从栈中弹出时,SP 自动加 1 同样指向新的栈顶。

2. 控制器部分

(1) 程序计数器(Program Counter, PC)

PC 用来记住当前要执行的指令地址码。

(2) 指令寄存器(Instructional Register, IR)、指令译码器 ID 及控制信号发生电路

这部分是整个微处理器的指挥控制中心,它控制和协调微型计算机有序地工作。它根据用户预先编好的程序,在 PC 指导下,依次从存储器中取出各条指令,放在指令寄存器中,通过指令译码器确定应该进行什么操作,然后通过控制逻辑在确定的时间,向确定的地方发出控制信号。

1.3.3 存储器

存储器的主要功能是保存各类程序的数据信息。存储器可分为内存储器(主存储器)和外存储器(辅助存储器)两类。

1. 内存储器

微型计算机系统的内存储器由超大规模集成芯片构成,主要用来存储数据和程序。内存储器的工作过程大致如下:计算机在处理前,预先把程序和原始数据存放于内存储器中,在处理过程中,由它向控制器提供指令代码,然后根据处理需要,随时向运算器提供数据,并且把运算结果或中间结果存储起来。

内存储器一般分为随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)和只读存储器(Read Only Memory, ROM)。RAM 可以读出数据和重新写上新的数据,ROM 是事先把数据写入,使用时只能读出,不能改写。

无论是 ROM 还是 RAM,都是按字节组成的存储单元,每个字节有一个地址码与之相对应,通过给定地址码可以随意访问该地址所对应的单元。

计算机存储器系统大部分为 RAM。

2. 外存储器

内存储器工作速度较高,和 CPU 的速度基本相匹配,但由于价格的原因,内存储器容量不宜做得太大(通常小于 500MB);且内存储器上信息易丢失,为此引入了外存储器。外存储器一般属于外部设备,用来存储 CPU 不急用的信息,它不能直接和 CPU 交换数据,要通过接口电路将信息送到内存储器中,CPU 才能使用。

外存储器的种类很多,目前用得最多的是磁盘存储器(包括硬盘和软盘)、光盘存储器等。

1.3.4 输入/输出(I/O)

I/O 子系统一般包括 I/O 接口电路与 I/O 设备。I/O 接口电路是介于计算机和外部设备之间的电路,I/O 接口电路基本功能如下:

1. 缓存数据, 使各种速度的外部设备与计算机速度相匹配。
2. 信号变换, 使各种电气特性不同的外部设备与计算机相连接。
3. 联络作用, 使外部设备的输入/输出与计算机操作同步。

输入/输出设备通过接口与 CPU 相连接, 它是微型计算机与外界通信联系的渠道。常用的输入设备有键盘、卡片、输入机、条形码识别装置、扫描仪等; 输出设备有 LED 显示器、CRT、打印机、绘图仪等。输入/输出设备又称外围设备。

1.3.5 总线(BUS)

总线是一组公共的信息传输线, 用以连接计算机的各个部件。内部总线位于芯片内部, 外部总线把中央处理器、存储器和 I/O 设备连接起来, 用来传输各部件之间的通信信息。微型计算机总线按功能可分为地址总线、数据总线和控制总线, 三者特点分别如下。

1. 数据总线(data bus)

用于各部件之间传输数据信息, 数据可朝两个方向传送, 是双向总线。

2. 地址总线(address bus)

用于传输通信所需的地址, 用以指明数据的来源和目的, 是单向总线。

3. 控制总线(control bus)

用于传送 CPU 对存储器或 I/O 设备的控制命令和 I/O 设备对 CPU 的请求信号, 使微型计算机各部件能协调工作。

微型计算机采用标准总线结构, 使整个系统中各部件之间相互关系变为面向总线的单一关系。凡符合总线标准的功能部件和设备可以互换和互连, 提高了微型计算机系统的通用性和可扩充性。

1.4 计算机中信息的表示

计算机是能够对输入的信息进行加工处理、存储并能按要求输出结果的电子设备, 又称为电脑或信息处理机。计算机中处理的信息主要有数值信息和非数值信息两大类。数值信息是指日常生活中接触到的数字类数据, 主要用来表示数量的多少, 可以比较大小; 非数值信息有多种, 有用来表示文字信息的字符数据, 也有用来表示图形、图像和声音等其他信息的数据。不同的信息在计算机中的表示形式不一样。从计算机内部角度来说, 由于计算机内部只能识别二进制数, 因此所有信息在计算机内都通过二进制编码表示。

1.4.1 计算机中无符号整数的表示

无符号数不带符号, 表示时比较简单, 在计算机中一般直接用二进制数形式表示, 位数不足时前面加 0 补充。对一个 n 位二进制数, 它能表示的无符号数的范围是 $0 \sim 2^n - 1$ 。例如, 假设机器字长 8 位, 无符号数 156 在计算机中表示为 10011100B; 45 在计算机中表示为 00101101B。

1.4.2 计算机中有符号数的表示

有符号数带有正负号。数学上用正负号来表示数的正负。由于计算机只能识别二进制符号，不能识别正负号，因此计算机中只能将正负号数字化，用二进制符号表示。在计算机中表示有符号数时，一般用二进制数的最高位来表示符号，正数表示为 0，负数表示为 1，称为符号位；其余位用来表示有符号数的数值大小，称为数值位。通常，把一个数及其符号位在计算机中的二进制数表示形式称为“机器数”。机器数所表示的值称为该机器数的“真值”。机器数的表示如图 1-4 所示。

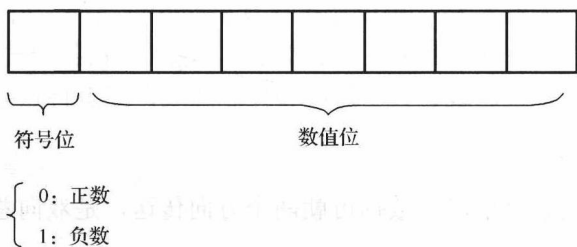


图 1-4 机器数的表示

机器数通常有 3 种表示方法：原码表示法、反码表示法和补码表示法。为了运算方便，计算机中通常用补码表示。为了研究补码表示法，首先了解原码表示法和反码表示法。

1. 原码

原码表示方法如下：最高位为符号位，用 0 表示正数，用 1 表示负数，数值位用数的绝对值表示，数值位如位数不足前面加 0 填充。由于正数的符号位为 0，因而正数的原码表示与相应的无符号数的表示相同。原码的表示如图 1-5 所示。

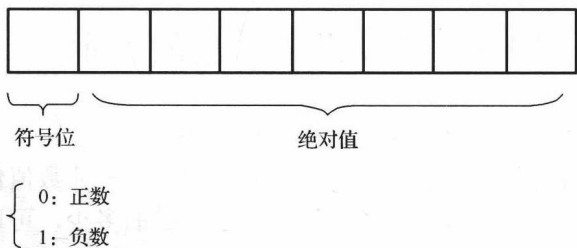


图 1-5 原码的表示

【例 1-1】求+78、-23 的原码(设机器字长为 8 位)。

因为

$$|+78| = 78 = 1001110B$$

$$|-23| = 23 = 10111B$$

所以

$$[+78]_{\text{原}} = 01001110B$$

$$[-23]_{\text{原}} = 10010111B$$

原码表示时, 如果机器字长为 n 位二进制数, 其原码表示的有符号数范围为 $-(2^{n-1}-1) \sim +(2^{n-1}-1)$ 。例如, 如果机器字长为 8 位二进制数, 则表示的有符号数范围为 $-127 \sim +127$ 。

另外, “0” 的原码表示有两个, -0 和 $+0$ 的编码不一样。假设机器字长为 8 位, -0 的编码为 10000000B, $+0$ 的编码为 00000000B。

2. 反码

反码是在原码的基础上发展而来的, 反码表示方法如下: 最高位为符号位, 用 0 表示正数, 用 1 表示负数, 对于数值位, 正数的反码数值位与原码相同, 而负数的反码数值位由原码的数值位取反得到。反码的表示如图 1-6 所示。

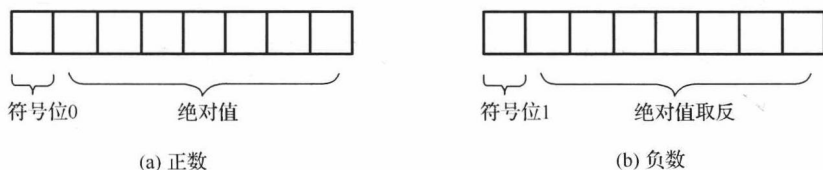


图 1-6 反码的表示

【例 1-2】 求 $+78$ 、 -23 的反码 (设机器字长为 8 位)。

因为

$$[+78]_{\text{原}} = 01001110\text{B}$$

$$[-23]_{\text{原}} = 10010111\text{B}$$

所以

$$[+78]_{\text{反}} = 01001110\text{B}$$

$$[-23]_{\text{反}} = 11101000\text{B}$$

反码的表示范围与原码相同, 如果机器字长为 n 位二进制数, 反码表示的有符号数范围为 $-(2^{n-1}-1) \sim +(2^{n-1}-1)$ 。例如, 如果机器字长为 8 位二进制数, 则表示的有符号数范围为 $-127 \sim +127$ 。

另外, “0” 的反码表示也有两个。假设机器字长为 8 位, -0 的反码编码为 11111111B, $+0$ 的反码编码为 00000000B。

3. 补码

补码表示时, 数的加减运算非常简单、方便, 因而现在的计算机有符号数都用补码表示。补码表示如下: 最高位为符号位, 正数用 0 表示, 负数用 1 表示。正数的补码与原码、反码相同, 而负数的补码可在反码的基础之上, 末位加 1 得到。对于一个负数 X , 其补码也可用 $2^n - |X|$ 得到, 其中 n 为计算机字长。补码的表示如图 1-7 所示。

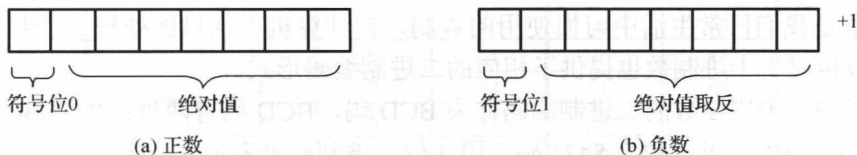


图 1-7 补码的表示