



21st CENTURY
规划教材

高等院校信息与电子技术类规划教材

University Textbooks of Information Technology

单片机原理及应用技术

Principles and Applications of Single-Chip Microcomputer

吴黎明 主编



21st CENTURY



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校信息与电子技术类规划教材

单片机原理及应用技术

吴黎明 主编

王桂棠 洪添胜 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地讲解了单片机的原理及其应用技术。读者可从中掌握微型计算机的软硬件知识,完成计算机工程的基础训练,同时可有效结合工程实际需要去初步应用单片机开发技术,并提高综合开发能力。

本书既可作为高校信息技术类专业学生学习单片机的教材,以及工程技术类专业学生学习微机原理的教材和参考书,还可作为工程技术人员学习 MCS-51 单片机和应用计算机技术的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

单片机原理及应用技术/吴黎明主编. —北京:科学出版社, 2005

(高等院校信息与电子技术类规划教材)

ISBN 7-03-016078-9

I. 单… II. 吴… III. 单片微型计算机, MSC-51 -高等学校-教材
IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 088641 号

责任编辑:李 伟 陈砾川/责任校对:郝 岚

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2005 年 8 月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 1—3 000 字数: 425 000

定价: 24.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8001 (H101)

高等院校信息与电子技术类规划教材

编 委 会

主 任 吴黎明 (广东工业大学信息工程学院副院长、教授)

副主任 贺前华 (华南理工大学电子与信息学院副院长、教授)

委 员 (按姓氏笔画排序)

马文华 (广东外语外贸大学信息学院副教授)

汤 庸 (中山大学信息科学与技术学院副院长、教授)

杨振野 (广东技术师范学院电子系教授)

吴正光 (广州大学实验中心副主任、高级工程师)

周美娟 (湛江海洋大学信息学院院长、教授)

洪添胜 (华南农业大学信息学院院长、教授)

徐 杜 (广东工业大学信息工程学院院长、教授)

颜国正 (上海交通大学电子信息与电气工程学院测控系主任、
教授)

前 言

随着计算机技术的迅速发展,单片微机的应用不断深入,各种新颖的单片机层出不穷,单片机技术的更新换代带来了新的技术革命。单片机以其高可靠性、高性能价格比,在工业控制系统、数据采集系统、智能化仪器仪表、现代通信设备、嵌入式系统以及测控系统等领域得到了广泛的应用。通过系统学习单片微机的原理,可以掌握微型计算机的软硬件知识,并完成计算机工程的基础训练,同时可以有效结合工程实际需要去初步应用单片机开发技术,进而深化、提高综合开发能力。为了解决人们在学习单片机中碰到的技术问题,我们总结了多年的教学和工程应用实践经验,编写了此书。

全书分为12章。第1章介绍了单片机的发展趋势,讲述了计算机和单片机基本原理。第2章介绍了单片机系统组成原理,对MCS-51系列单片机的组成结构、复位电路设计以及存储器配置进行了详细叙述。第3章和第4章分别介绍了MCS-51单片机的指令系统和程序设计。第5~7章详细剖析了单片机系统设计技术,介绍了单片机的定时器/计数器与中断系统、单片机应用系统扩展以及键盘显示的接口设计的原理和技术。第8章介绍了测控系统常用元器件性能和硬件接口设计。第9~11章分别介绍了A/D和D/A接口、串行通信接口和单片机测控系统设计,给出实际应用例子,提供了详细的电路和程序代码。第12章介绍了AVR、ARM和凌阳等几种新型的单片机性能和结构原理。全书内容全面,结构清晰,说理透彻。本书既可作为高等院校信息与电子技术类专业单片机课程的教材,以及工程技术类专业微机原理课程的教材和参考书,还可作为工程技术人员学习MCS-51单片机和应用计算机技术的参考书。

本书由吴黎明教授担任主编,王桂棠副教授、洪添胜教授担任副主编,吴正光高级工程师担任主审。本书由广东工业大学信息工程学院和华南农业大学信息学院的从事单片机技术的相关老师共同编写。吴黎明、唐露新编写了第1、2、5、12章,邓耀华编写了第3、4章以及第9章的部分内容,王桂棠编写了第6、7、10、11章,洪添胜、吴黎明编写了第8、9章,参加编写和上机实验验证的还有汤秀春老师。全书由吴黎明统稿。研究生朱妙贤、伍冯洁、何仲凯、薛向东和李伟东为本书的编写做了大量文字工作和上机实验验证。习题和电路图由关建和、刘文豪、刘志远、郭中华和谢斌编制。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

第1章 计算机技术基础	1
1.1 计算机的发展与分类	1
1.2 计算机的应用概况	2
1.3 计算机中数码的表示	3
1.3.1 常用数制	3
1.3.2 数值的表示方法	4
1.3.3 常用编码	8
1.4 单片机概况及应用	10
1.4.1 单片微型计算机概述	10
1.4.2 单片机的特点	11
1.4.3 单片机的应用范围	12
1.5 单片机的组成结构及指令执行过程	12
1.5.1 单片机结构	12
1.5.2 微机指令执行过程	14
习题	14
第2章 单片机组成原理	16
2.1 MCS-51 单片机结构	16
2.1.1 MCS-51 单片机的组成	16
2.1.2 MCS-51 单片机的结构	17
2.1.3 MCS-51 时序	18
2.1.4 MCS-51 单片机的引脚和 I/O 端口	19
2.2 单片机复位电路设计	21
2.2.1 单片机复位原理	21
2.2.2 复位电路	21
2.3 MCS-51 存储器配置	22
2.3.1 程序存储器	22
2.3.2 内部数据存储器	23
习题	27
第3章 单片机指令系统	28
3.1 MCS-51 指令简介	28
3.1.1 MCS-51 系列单片机指令系统分类	28
3.1.2 指令格式	28
3.1.3 指令中常用符号说明	29

3.2 指令系统	29
3.2.1 数据传送指令	29
3.2.2 算术运算指令	32
3.2.3 逻辑运算指令	34
3.2.4 控制转移类指令	36
3.2.5 位操作指令	39
习题	40
第4章 汇编语言程序设计	42
4.1 汇编语言概述	42
4.1.1 汇编语言程序设计过程	42
4.1.2 伪指令	43
4.2 简单程序设计	44
4.3 分支程序设计	46
4.4 循环程序设计	48
4.5 查表程序设计	52
4.6 散转程序设计	54
4.7 子程序设计	57
4.8 浮点数及其程序设计	59
4.8.1 浮点数的概念	59
4.8.2 规格化浮点数	60
4.8.3 浮点数运算	60
4.8.4 浮点数运算子程序	62
习题	68
第5章 定时器/计数器和中断系统	69
5.1 定时器/计数器	69
5.1.1 定时器/计数器的结构	69
5.1.2 工作方式	70
5.1.3 定时器初始化	73
5.1.4 应用程序设计	74
5.2 中断系统	75
5.2.1 输入/输出传送方式	75
5.2.2 8051 中断系统结构	76
5.2.3 8051 中断控制寄存器	77
5.2.4 中断响应条件及响应过程	80
5.2.5 中断程序设计思想	81
5.2.6 中断应用程序设计举例	82
习题	84
第6章 单片机应用系统扩展设计	85
6.1 存储器的扩展	85
6.1.1 程序存储器的扩展	85



6.1.2 数据存储器扩展	87
6.1.3 扩展数据和程序存储器综合举例	88
6.1.4 扩展电路工作原理	91
6.2 I/O 接口扩展电路设计	92
6.2.1 简单 I/O 接口扩展	93
6.2.2 8255 可编程并行 I/O 接口扩展与电路设计	94
6.2.3 8255 扩展电路及地址设置	97
6.2.4 8155 可编程 I/O 接口扩展设计	98
6.2.5 串行口扩展 I/O 接口	103
习题	105
第 7 章 键盘、显示接口技术	106
7.1 键盘与计算机接口	106
7.2 独立式按键接口设计	106
7.3 矩阵式键盘接口设计	107
7.3.1 矩阵式键盘工作原理	107
7.3.2 矩阵式键盘工作方式	108
7.4 LED 显示器及接口设计	112
7.4.1 LED 显示器结构	112
7.4.2 显示字型 and 字段码关系	112
7.4.3 LED 与单片机接口	112
7.5 LCD 液晶显示器	116
7.5.1 LCD 的原理	116
7.5.2 LCD 显示器的分类	116
7.5.3 LCD 字符型液晶显示接口技术	117
7.5.4 内置式 T6963C 液晶显示驱动控制器	121
7.5.5 图形点阵液晶显示器 TG12864A	138
习题	148
第 8 章 测控系统常用元器件	149
8.1 集成运算放大器应用要点	149
8.2 集成电压比较器	153
8.2.1 CJ111/211/311 集成电压比较器	154
8.2.2 CJ193/293/393 集成电压比较器	155
8.2.3 CJ139 系列集成电压比较器	155
8.3 采样保持放大器	155
8.3.1 采样保持放大器的工作原理	155
8.3.2 集成采样保持芯片	156
8.4 变压器耦合隔离放大器	158
8.4.1 变压器耦合隔离放大器的工作原理	158
8.4.2 变压器耦合隔离放大器的应用	160
8.5 光电耦合器和光电耦合放大器	160



8.5.1 光电耦合器	160
8.5.2 光电耦合放大器	164
8.6 集成监控电路 MAX703	165
8.6.1 电路组成及功能	166
8.6.2 典型应用	168
习题	170
第9章 A/D和D/A接口技术	171
9.1 模拟量输入通道	171
9.1.1 模拟量输入通道的构成特点	171
9.1.2 模拟量输入通道的组成	171
9.2 A/D转换接口技术	177
9.2.1 A/D转换硬件设计要考虑的问题	178
9.2.2 MCS-51单片机与8位A/D转换器接口	181
9.2.3 MCS-51单片机与12位A/D转换器接口	184
9.2.4 数据采集系统举例	189
9.3 D/A转换接口技术	192
9.3.1 D/A转换选用要考虑的两个重要参数	193
9.3.2 MCS-51单片机与DAC0832接口	193
9.3.3 MCS-51单片机与AD7520接口	200
9.3.4 12位D/A转换的典型应用举例	202
习题	206
第10章 串行通信接口技术	207
10.1 串行口通信方式	207
10.1.1 串行通信基础知识	207
10.1.2 串行口控制寄存器	208
10.1.3 波特率的设计	210
10.1.4 串行口工作方式	211
10.1.5 串行口应用举例	212
10.2 PC机与单片机的通信	214
10.2.1 异步通信适配器	214
10.2.2 PC机与8051双机通信技术	223
10.2.3 PC机与8051多机通信技术	227
习题	235
第11章 工业控制单片机应用实例	236
11.1 步进电机控制接口技术	236
11.1.1 步进电机的工作原理	236
11.1.2 步进电机控制系统	237
11.1.3 步进电机控制程序的设计	242
11.1.4 步进电机的变速控制	245
11.2 PC机和8051实现渗碳过程集散控制系统	256

11.2.1 渗碳工艺	256
11.2.2 计算机控制系统硬件	257
11.2.3 系统软件设计	258
11.2.4 系统抗干扰措施	267
习题	268
第 12 章 其他常用单片机	269
12.1 AVR 单片机	269
12.1.1 ATMEL 单片机简介	269
12.1.2 AVR 单片机系统结构	271
12.1.3 AVR 单片机指令系统	274
12.2 ARM 单片机	274
12.2.1 ARM 简介	274
12.2.2 产品介绍	275
12.2.3 ARM 芯片 CL-PS7111 的主要特点	276
12.2.4 调试工具及调试方法	276
12.3 凌阳单片机	277
12.3.1 凌阳单片机简介	277
12.3.2 凌阳 8 位单片机	278
12.3.3 凌阳 16 位单片机	279
习题	282
附录 MCS-51 指令表	283
主要参考文献	287

第1章 计算机技术基础

1.1 计算机的发展与分类

1946年,美国宾夕法尼亚大学研制出世界上第一台可以用程序控制的计算机,被称为电子数字积分器与计算器 (electronic numerical integrator and calculator),简称ENIAC。这台计算机的字长为12位,主存储器只有17K字节,运算速度为每秒5000次加法运算,共使用18800个电子管,1500个继电器,占地面积为170m²,重30t,耗电150kW,造价为100多万美元。在今天看来,这台计算机既价格昂贵且体积笨重,运算速度低,字长不够长,而且耗电量多。但它正是今天大小不一、花样繁多的各种类型电子计算机的先驱,为计算机技术的发展奠定了基础。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。

第一代 (1946~1957年),电子管数字计算机。

计算机的逻辑元件采用电子管,主存储器采用磁鼓、磁芯,外存储器已开始采用磁带,软件主要用机器语言编制,后期逐步发展了汇编语言。主要用于科学计算。

第二代 (1958~1964年),晶体管数字计算机。

计算机的逻辑元件采用晶体管,主存储器采用磁芯,外存储器已开始使用磁盘;软件已开始有很大的发展,出现了各种高级语言及编译程序。此时,计算机速度明显提高,耗电量下降,寿命提高。计算机已发展至应用于各种事务处理,并开始用于工业控制。

第三代 (1965~1970年),集成电路计算机。

计算机的逻辑元件采用小规模和中规模集成电路,即所谓的SSI和MSI;软件发展更快,已有分时操作系统,应用范围日益扩大。

第四代 (1971年以后),大规模和超大规模集成电路计算机。

计算机的逻辑元件采用大规模集成电路 (LSI),在单片硅片上可集成1000~20000个晶体管的集成电路。而超大规模集成电路目前可集成多达5000万个晶体管。

目前计算机技术发展迅速,发展方向主要一是朝着大型、巨型化发展,二是向小型、微型化发展。

1. 大型、巨型计算机

为了适应现代科学技术发展的需要,要求计算机提高运算速度,加大主存储容量,为此出现了大型和巨型计算机。如美国的克雷公司生产的Cray-1、Cray-2和Cray-3巨型计算机比较著名。我国的银河I就是每秒10亿次并行巨型计算机。巨型计算机象征着一个国家的科技实力,目前只有少数几个国家有能力生产。大型机速度快,容量大,

解决了过去无法计算的实时及复杂的数学问题，但设备庞大，价格昂贵。

2. 小型、微型计算机

小型、微型机具有体积小、造价低、可靠性高的特点。

微型计算机 (microcomputer) 的心脏——中央处理器 (CPU) 集成在一小块芯片上，被称为微处理器 MPU (micro processing unit)，以区别大、中、小型计算机的 CPU。微型计算机除有 MPU 外，还有以大规模集成电路制成的主存储器和输入输出接口电路，三者之间采用总线结构联系起来。如果再配上相应的外围设备，如显示器 (CRT)、键盘及打印机等，这就成为微型计算机系统 (microcomputer system)。目前，微型计算机功能已经很强，比如“奔腾 4” (Pentium 4) CPU 的集成度已达到 4000 多万只晶体管，时钟频率高达 3000MHz。由于结构简单、通用性强、价格便宜，微型计算机已成为现代计算机领域中一个极为重要的分支，发展突飞猛进。

1.2 计算机的应用概况

现代科学的发展使计算机应用的领域已极其广泛，概括起来，可以归纳为以下几个主要方面。

1. 科学计算

计算机被广泛地应用于科学计算，这是计算机应用的一个基本方面，也是我们比较熟悉的方面。如人造卫星轨迹计算，导弹发射的各项参数的计算，房屋抗震强度的计算，24 小时的天气预报等，通常要求解几十阶微分方程组，进行大型矩阵运算。

2. 数据处理

用计算机对数据加以记录、整理和计算，加工成人们所要求的形式，称为数据处理。通常在生产组织、企业管理、市场预测、情报检索等方面，存在着大量的数据需要进行搜集、归纳、分类、整理、存储、检索、统计、分析、列表、绘图等。这类问题数据量大，而运算又比较简单，包含大量的逻辑运算与判断，其处理结果往往以表格或文件形式存储或输出。

3. 自动控制

自动控制也是计算机应用的一个重要方面。在生产过程中，采用计算机进行自动控制，可以大大提高产品的数量和质量，提高劳动生产率，改善人们的工作条件，减少原材料的消耗，降低生产成本。如航天飞行、火星探测、宇航空间站的发射、对接、测控，代替人类进行有害危险工序的现场操作、控制等。

4. 辅助设计和制造

计算机辅助设计 (computer aided design, CAD)，是指用计算机辅助人们进行设计

工作,如设计飞机、汽车、房屋、服装、集成电路等,使设计工作自动化。

由于CAD技术的迅速发展,应用范围不断扩大,又派生出许多新的技术分支,如计算机辅助制造(computer aided manufacture, CAM)、计算机辅助教学(computer aided instruction, CAI)等,这些技术的应用及发展提高了机械、电子等行业的设计水平和自动化水平。

5. 系统仿真

计算机仿真是指应用计算机来模仿实际的系统,是近年来新兴的应用领域,有着广泛的应用前景。如大型电站仿真、航天飞机的仿真、火箭的仿真、汽车的仿真等等。在计算机仿真系统上进行实验、研究,可以节约大量资金,并且实验安全。目前像飞机、汽车的驾驶培训,已经开始使用飞机、汽车驾驶仿真系统,学员可以在仿真系统上进行各种训练。

6. 智能模拟

智能模拟是用计算机软硬件系统模拟人类某些智能行为,如感知、思维、推理、学习、理解等理论和技术。它是在计算机科学、控制论、仿生学和心理学等学科的基础上发展起来的边缘学科。也正是国内外争先研究的人工智能技术,它包括专家系统、模式(声、图、文)识别、问题求解、定理证明、机器翻译、自然语言理解等。

7. 计算机网络与信息高速公路

计算机网络是计算机技术和数字通信技术发展并相融合的产物,它把多个独立的计算机系统通过电话线路、专用电缆、微波卫星、光导纤维等各种通信介质进行数据通信、资源共享(软件、硬件、数据库等),构成具有多种功能的网络系统。

信息高速公路(information highway)的含义是建设新世纪的“信息国道”,“建设全国性的信息网络”,可将全国的研究机构、学校、办公室、图书馆、家庭等都连在一起,使每个人都能享受公共信息资源。

1.3 计算机中数码的表示

计算机是一个自动化的信息加工工具,其指令与被处理的数据都是采用二进制数字系统。和我们日常生活中所用的十进制数的表示方法不同,计算机采用二进制数对数值、字母、符号等进行编码表示和处理,构成二进制数的运算系统,并便于电路实现。本节介绍计算机采用的数制及码制的有关概念。

1.3.1 常用数制

1. 十进制数

人们最常用的数是十进制数,十进制数的特点如下:

- 1) 数值部分用 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 这十个不同的数码来表示。
- 2) 十进制数中的 10, 称为基数, 采用“逢十进一”的原则。
- 3) 每个位数的位值, 或称“权”, 均是基数 10 的某次幂。例如 689.52 这个十进制数, 小数点左边第一位是个位, 表示 9×10^0 , 小数点左边第二位是十位, 表示 8×10^1 等, 689.52 可以写成:

$$689.52 = 6 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 9 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2}$$

上面的写法叫做“按权展开”, 每一位表示的数值不仅取决于该位的数码本身, 还取决于所在位的位值——权。我们把按进位的原则进行计数的方法, 称为进位计数制。

“位权”和“基数”是进位计数制中的两个要素。

2. 二进制数

在计算机内部, 一切信息包括数值、字符、指令等的存放、处理和传送均采用二进制数的形式。二进制数的特点如下:

- 1) 只有 0 和 1 两个数码。
- 2) 基数为 2, 采用“逢二进一”的原则。
- 3) 各位上的权均是 2 的某次幂。例如 1101.11 可写成按权展开式:

$$(1101.11)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (13.75)_{10}$$

在二进制数的运算过程中, 除了“逢二进一、借一当二”, 采用 0, 1 计数之外, 其他运算规律与十进制运算相同。

3. 十六进制数

十六进制数的特点如下:

- 1) 十六进制数中可能出现的数码为 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F 共 16 个。

- 2) 基数为 16, 采用“逢十六进一”的原则。

- 3) 每一位上的权均是 16 的某次幂, 例如

$$(3AB.11)_{16} = 3 \times 16^2 + A \times 16^1 + B \times 16^0 + 1 \times 16^{-1} + 1 \times 16^{-2} = (939.066406)_{10}$$

在十六进制数的运算过程中, 除了“逢十六进一、借一当十六”, 采用 0~F 计数之外, 运算规律与十进制运算相同。

十六进制数和二进制数有简单的对应关系, 人们用 1 位十六进制数来表示 4 位二进制数。

1.3.2 数值的表示方法

1. 真值与机器数

一个数在机器 (即计算机) 中的表示形式称为机器数。机器数有如下几个特点。

- (1) 机器数可以是只用正数, 也就是无符号数

实际上, 以前大家所接触的二进制数就是只有正数。如 8 位二进制数 10001000 就

相当于十进制数 136，而二进制数 01001000 相当于十进制数 72。在这种情况下，所有的二进制数位都代表一定的数值，或者说都有一定的“权”。

(2) 机器数所能表示的数的范围受机器字长的限制

在计算机中，作为数据传送、存储和运算基本单位的一组二进制字符称为一个字 (word)，一个字中的二进制字符的数目称为字长 (word length)。计算机的字长确定以后，机器数所表示的数值范围大小也就确定了。如对于 8 位字长的计算机来说，机器数的范围为 (00000000) ~ (11111111)，即对应于十进制数 0~255。而如果字长是 16 位的机器，可表示正数的最大值将扩大到相当于十进制数 65535。

为了扩大机器数表示的范围，有时可以用两个字甚至多个字表示一个数。例如对于 8 位机来说，若用两个字来表示一个正数，其数值范围就可以扩大到 65535。但应注意，这种多字表示方法是在计算机应用中的一种处理方式。

(3) 机器数可以用符号位来表示数的正负

如果要用机器数表示正数和负数，则应将数的最高位作为符号位来表示数的正负：最高位为 0 表示正数，最高位为 1 表示负数。这样的机器数也叫带符号数。

例如 +105 的 8 位机器数表示应该是 01101001。而 -105 的 8 位机器数表示则是 11101001。带符号数由于要用最高位来表示数的正负，因此其可表示的数的范围有所变化：8 位带符号正数的最大值是 01111111，相当于十进制数的 127。

带符号数也可以用两个或多个字来表示一个数，此时不论数的大小，符号位仍定为整个机器数的最高位。

(4) 机器数所表示的数值称为机器数的真值

机器数的真值可以用二进制数表示，也可以用十进制数表示，但根据一般的习惯，常用十进制数表示。例如机器数 10110110 的真值为 -54。

2. 数的定点和浮点表示方法

用机器数来表示带小数点的数通常有两种表示方法：定点表示法和浮点表示法。在定点表示法中，小数点在数中的位置是固定不变的。对于任意一个二进制数 N 总可以表示为纯整数（或纯小数）和一个 2 的整数次幂的乘积： $N = 2^P \times S$ 。其中 S 称为 N 的尾数， P 称为 N 的阶码，2 称为阶码的底。通常定点表示法中 P 的值是固定的，而在浮点表示法中， P 的值是在一定的范围内可变的。

阶码和尾数都可以是正数，也可以是负数，从而可以表示正的小数或者负的小数。一般为了扩大数的表示范围，在机器中都采用浮点表示法。这时阶码和尾数要分别表示，并且各自都有自己的符号位，如图 1.1 所示。

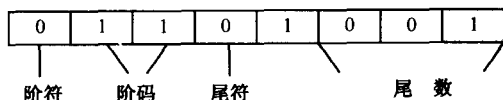


图 1.1 浮点数在机器中的表示

为了尽可能精确地表示数, 要对尾数进行规格化, 就是使尾数都是小数点后第一位为 1 的纯小数, 然后再来确定阶码的值。

假定用 4 个字节来表示一个浮点数: 其中阶码和阶符为一个字节, 尾数和尾符为 3 个字节。当然, 阶符和尾符各占 1 位。现在要用这个浮点数来表示十进制数 256.8125:

256.8125 直接表示为二进制数结果是 100000000.1101 (注意十进制整数和小数分别转换为二进制数)。

尾数规格化的结果是 0.1000000001101。

$0.1000000001101 \times 2^9$ (实际是乘 2^{1001}) 才得 100000000.1101。由此可以确定阶码值应该是 9, 即二进制数 1001。

所以 256.8125 表示为 4 字节浮点数是 00001001 01000000 00110100 00000000。

那么, 25.68125 表示为 4 字节浮点数应该等于什么呢?

3. 原码、反码、补码

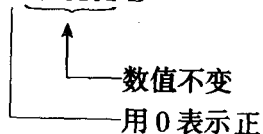
机器数有原码、反码、补码三种表示方法, 现分述如下。

(1) 原码

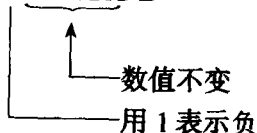
定义: 在二进制数的原码表示法中, 正负数的符号位放在数值部分前面。正数的符号为“0”表示其后的数值是正数; 负数的符号为“1”表示其后的数值是负数。数值部分仍用原二进制的数码表示。数的原码记作 $[\pm x]_{\text{原}}$ 。

【例 1.1】 设 $+x_1 = +0010101$, $-x_2 = -0010101$, 试写出它们的原码表示形式。

解: 1) $[+x_1]_{\text{原}} = 00010101 \text{ B}$



2) $[+x_2]_{\text{原}} = 100010101 \text{ B}$



【例 1.2】 写出 +13、-13、+127、-127、+0、-0 的原码 (用 8 位二进制数表示, 下同)

解: $[+13]_{\text{原}} = 00001101$

$[-13]_{\text{原}} = 10001101$

$[+127]_{\text{原}} = 01111111$

$[-127]_{\text{原}} = 11111111$

$[+0]_{\text{原}} = 00000000$

$[-0]_{\text{原}} = 10000000$

由上面两个例子可以看出, 用原码表示带符号数相当简便、直观, 适于做乘法、除法或同符号数相加。但在不同符号的数作加、减法时就变得复杂了。例如在进行加法运算时, 机器首先要判断两数的符号是否相同, 若相同则做加法, 若不同则做减法。在做

减法时还要判断两数绝对值的大小，以便用大者减去小者，然后再根据绝对值大的数做决定差值的符号。计算机做的工作就显得复杂、麻烦了。

因此，人们在实践中引入了反码和补码的概念，解决了上述困难，使运算简化。

(2) 反码

定义：一个二进制数若是正数，则其反码与原码相同；若为负数则除符号位外其余各位都取“反相”便得到其反码。即对负数而言除符号位仍保持“1”外，其余各位码中凡是“1”都换成“0”，凡是“0”都换成“1”，便得其反码。数的反码记作 $[\pm x]_{\text{反}}$ 。

【例 1.3】 求 +13、-13 的反码。

解： $[+13]_{\text{反}} = [+13]_{\text{原}} = 00001101 \text{ B}$

$[-13]_{\text{原}} = 10001101 \text{ B}$

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

$[-13]_{\text{反}} = 11110010 \text{ B}$

↑ ↑
——数值按位取反
——符号位不变

即 $[-13]_{\text{反}} = 11110010 \text{ B}$

【例 1.4】 求 $[+0]_{\text{反}}$ 、 $[-0]_{\text{反}}$ 及 $[[-0]_{\text{反}}]_{\text{反}}$ 。

解： $[+0]_{\text{反}} = [+0]_{\text{原}} = 00000000 \text{ B}$

$[-0]_{\text{原}} = 10000000 \text{ B}$ 符号位不变，数值位保留

$[-0]_{\text{反}} = 11111111 \text{ B}$ 符号不变，数值按位取反

$[[-0]_{\text{反}}]_{\text{反}} = 10000000 \text{ B}$

可见， $[[-0]_{\text{反}}]_{\text{反}} = [-0]_{\text{原}}$ 也就是 0 的反码的反码等于原码。这个结论可以推广为

$$[[-x]_{\text{反}}]_{\text{反}} = [-x]_{\text{原}}$$

(3) 补码

定义：一个二进制数若为正数，则其补码与原码相同；若为负数则其补码为反码“+1”。也就是先求得负数原码的反码，再在反码的最低位加 1。数的补码记作 $[\pm x]_{\text{补}}$ 。

【例 1.5】 求 +13、-13、+127、-127 的补码。

解：一般采用先由原码求反码，再由反码求补码的办法。

1) $[+13]_{\text{补}} = [+13]_{\text{原}} = 00001101$

2) $[-13]_{\text{原}} = 10001101$

$[-13]_{\text{反}} = 11110010$ 符号位不变，数值按位取反加 1

$[-13]_{\text{补}} = 11110011$

3) $[+127]_{\text{补}} = [+127]_{\text{原}} = 01111111$

$[-127]_{\text{原}} = 11111111$

$[-127]_{\text{反}} = 10000000$ 符号位不变，数值按位取反加 1

$[-127]_{\text{补}} = 10000001$