



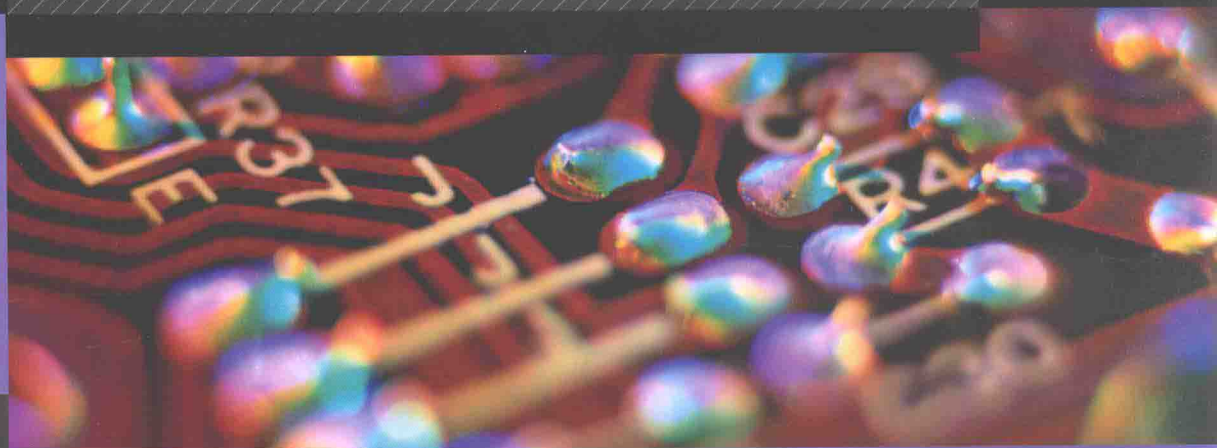
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Microcontroller Principle and Applications
—C Programming (2nd Edition)

单片机原理及应用 ——C 语言程序设计与实现 (第 2 版)

王长涛 韩忠华 夏兴华 编著
马斌 主审



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Microcontroller Principle and Applications
—C Programming (2nd Edition)

单片机原理及应用 ——C 语言程序设计与实现 (第 2 版)

王长涛 韩忠华 夏兴华 编著

马斌 主审

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

单片机原理及应用 : C语言程序设计与实现 / 王长涛, 韩忠华, 夏兴华编著. — 2版. — 北京 : 人民邮电出版社, 2014. 1

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

ISBN 978-7-115-33498-5

I. ①单… II. ①王… ②韩… ③夏… III. ①单片机—计算机—C语言—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP368.1②TP312

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267498号

内 容 提 要

本书介绍 51 系列单片机的结构、基本原理、指令系统和硬件资源, 重点介绍 C51 编程技术及其应用。本书的特点是通过实例以及练习使读者掌握相应知识点, 读者能够通过完整的实例, 快速、有效地掌握用 C51 语言开发 51 单片机的流程, 并通过各章的习题掌握各章重点和难点, 真正对相关知识做到融会贯通。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、自动化、电子信息、机械工程等相关专业的教材, 也可以作为相关专业人员的培训教材。

◆ 编 著 王长涛 韩忠华 夏兴华

主 审 马 斌

责任编辑 李海涛

责任印制 彭志环 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 22.75

2014 年 1 月第 2 版

字数: 573 千字

2014 年 1 月河北第 1 次印刷

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



随着计算机应用技术的不断发展,单片机在工业测量控制领域内的应用越来越广泛。同时,随着超大规模集成电路工艺和集成制造技术的不断完善,单片机的硬件集成度也在不断提高,出现了能满足各种不同需求的具有各种特殊功能的单片机。就 8051 系列单片机而言,由于 Intel 公司将 8051 CPU 内核向全世界各大半导体公司的扩散,目前已有 Philips、Siemens、Dallas、OKI、Advance Micro Device、Atmel 等多家公司生产了 100 多种型号的 51 系列单片机。这类单片机具有集成度高、性能价格比优良的特点,在工业测量控制领域内获得了极为广泛的应用,预计在今后的相当一个时期内,51 单片机仍将是主流机种。

在开发一个单片机应用系统时,系统程序的编写效率在很大程度上决定了目标系统的研制成效。早期在研制单片机应用系统时,大多以汇编语言作为软件工具。汇编语言程序能够直接操作机器硬件,指令的执行速度快。但由于汇编语言不是一种结构化的程序设计语言,相对较难编写和调试,程序本身的编写效率较低。随着单片机硬件性能的提高,其工作速度越来越快,目前 51 单片机的时钟频率可达 40MHz 以上。因此在编写单片机应用系统程序时,更着重于程序本身的编写效率。为了适应这种要求,现在的单片机系统在开发过程中,除了采用汇编语言之外,经常采用高级语言,如 C51、PLM51 来编程实现。

在全国高等工科院校中,已普遍开设单片机及相关课程。51 系列单片机奠定了 8 位单片机的基础,形成了单片机的经典体系结构。随着 51 单片机的发展,应用 C 语言开发 51 单片机成为一种流行的趋势,这是因为它具有使用方便、编程效率高及仿真调试容易等突出特点。

本书在介绍 51 系列单片机的硬件结构、汇编语言及单片机扩展技术的同时,着重介绍 C51 编程技术及其应用。C51 语言是专门用于 51 系列单片机编程的 C 语言,除了一些基于描述单片机硬件的特殊部分外,可以说与标准 C 语言完全相同。所以以 C51 语言实现单片机系统更有利于系统的修改及扩展。为了体现汇编语言实现与 C51 编程实现的不同,本书在相关章节提供了上述两种实现方法的源程序,并进行了相关的讲解。根据各学校对本书使用意见的反馈,改版后增加一章单片机应用实例,提供了大量实际程序与应用。希望通过改版能够对提高学生实践能力有进一步帮助,使本书更加完善。

本书由王长涛、韩忠华、夏兴华共同编写,由马斌教授主审。参与本书编写工作与提

供帮助的还有阚凤龙、李界家、李孟歆、栾方军、张颖、张锐、黄宽、毛永明、陈楠、王鑫、华海荣、左传文、郭会、张黎明、杨显利。此外，程娟对相关外文资料进行了翻译与整理工作，在此一并表示诚挚的谢意。

读者如果需要本书中的源程序，可通过电子邮件与编者联系：542736170@qq.com。

编 者

2013 年 10 月于沈阳

目 录

第1章 51 单片机结构及工作原理1

1.1 微型计算机基础1

1.1.1 单片机及其发展概况1

1.1.2 计算机中的数制及相互转换3

1.1.3 二进制数的运算8

1.1.4 计算机中数的表示方法10

1.2 51 单片机的基本组成和功能13

1.2.1 51 系列单片机的主要功能13

1.2.2 51 系列单片机基本结构14

1.2.3 51 系列单片机外部引脚15

1.3 51 单片机的内部结构19

1.3.1 中央处理单元19

1.3.2 存储器22

1.3.3 定时器/计数器26

1.3.4 I/O 口26

1.3.5 中断系统27

1.4 51 系列单片机的工作方式30

1.4.1 时钟和时钟电路30

1.4.2 CPU 时序30

1.4.3 复位状态和复位电路31

本章小结33

习题与思考33

第2章 51 单片机指令系统及汇编语言 程序设计基础34

2.1 51 单片机指令格式34

2.1.1 指令格式34

2.1.2 指令的字节数35

2.1.3 指令的分类36

2.2 51 单片机寻址方式37

2.2.1 立即寻址38

2.2.2 直接寻址38

2.2.3 寄存器寻址39

2.2.4 寄存器间接寻址39

2.2.5 变址寻址40

2.2.6 相对寻址40

2.2.7 位寻址41

2.3 51 单片机指令41

2.3.1 数据传送类指令41

2.3.2 算术运算类指令45

2.3.3 逻辑运算及移位指令48

2.3.4 控制转移类指令52

2.3.5 位操作类指令58

2.3.6 伪指令60

2.4 汇编语言程序设计基础62

2.4.1 汇编语言程序的格式63

2.4.2 汇编语言程序的基本结构64

2.4.3 顺序结构程序设计64

2.4.4 分支程序设计65

2.4.5 循环程序设计68

2.4.6 查表程序设计73

2.4.7 子程序设计75

本章小结80

习题与思考80

第3章 51 单片机的硬件资源82

3.1 51 单片机并行 I/O 口82

3.1.1 I/O 口的作用82

3.1.2 内部并行 I/O 口83

3.1.3 内部并行 I/O 口的应用86

3.2 51 单片机中断系统86

3.2.1 中断的定义87

3.2.2 中断源87

3.2.3 中断控制89

3.2.4 中断优先级结构91

3.2.5 中断响应91

3.2.6 中断响应时间92

3.2.7 中断请求的撤除93

3.2.8 中断系统的初始化94

3.2.9 外部中断源的扩展95

3.3 51 单片机定时器/计数器96

3.3.1 定时器/计数器的结构及工作 原理.....	96	5.1.1 数组的定义和引用	139
3.3.2 控制定时器/计数器的 寄存器.....	97	5.1.2 字符数组	139
3.3.3 定时器/计数器的初始化.....	98	5.1.3 数组元素赋初值	140
3.3.4 定时器/计数器的工作方式	100	5.1.4 数组作为函数的参数	140
3.4 51 单片机串行通信	106	5.2 指针	141
3.4.1 串行通信	106	5.2.1 指针与地址	141
3.4.2 51 单片机串行接口	108	5.2.2 指针变量	141
3.4.3 51 单片机串行通信的 工作方式.....	110	5.3 结构	142
本章小结	113	5.3.1 结构说明和结构变量定义.....	142
习题与思考	113	5.3.2 结构变量的使用	143
第 4 章 C51 程序设计基础	115	5.3.3 结构数组和结构指针	143
4.1 C51 语言的符号类型	115	5.4 联合	144
4.1.1 标识符	115	5.5 枚举	145
4.1.2 关键字	115	本章小结	146
4.1.3 运算符	117	习题与思考	146
4.1.4 分隔符	119	第 6 章 C51 编译器及简介	147
4.2 常量与变量	121	6.1 KEIL C51 编译器简介	147
4.2.1 基本数据类型	121	6.1.1 KEIL C51 开发套件	147
4.2.2 常量	122	6.1.2 KEIL C51 的安装	147
4.2.3 变量	123	6.1.3 KEIL C51 开发实例	148
4.2.4 变量的作用范围	124	6.2 C51 库函数概述	150
4.3 C51 语句	125	6.2.1 本征库函数和非本征库 函数	150
4.3.1 说明语句与空语句	125	6.2.2 几类重要库函数	151
4.3.2 表达式语句	127	6.2.3 C51 库函数原型列表	151
4.3.3 条件语句	128	本章小结	153
4.3.4 开关、跳转语句	129	习题与思考	153
4.3.5 循环语句	130	第 7 章 51 单片机人机交互	154
4.3.6 复合语句	133	7.1 外部显示元件设计	154
4.3.7 函数调用语句	133	7.1.1 LED 数码管	154
4.3.8 预处理	134	7.1.2 16 × 2 字符型液晶 显示器编程	161
本章小结	138	7.2 键盘输入设计	168
习题与思考	138	7.2.1 键盘接口类型	169
第 5 章 C51 数据结构	139	7.2.2 键盘的防抖技术	171
5.1 数组	139	7.2.3 键盘扫描方式编程	172
		7.2.4 键盘中断方式编程	174

7.3 外接打印机接口设计	177	9.1.2 单片机串行通信电路设计	220
7.3.1 打印机接口信号	177	9.1.3 单片机串行通信软件编程	221
7.3.2 字符和汉字编码	178	*9.2 Windows.NET 环境下计算机与 单片机串行通信程序设计	230
7.3.3 打印命令	178	9.2.1 Windows.NET 串行类介绍	230
7.3.4 外接打印机接口电路设计	180	9.2.2 计算机与下位机通信协议	232
7.3.5 外接打印机驱动程序设计	182	9.2.3 计算机的串行通信程序的 设计	239
本章小结	184	9.2.4 单片机串行通信程序的 设计	241
习题与思考	184	本章小结	249
第 8 章 51 单片机数据采集	185	习题与思考	249
8.1 传感器技术概述	185	第 10 章 51 单片机外部存储器扩展	251
8.1.1 传感器的组成	185	10.1 外部 I/O 的扩展	251
8.1.2 传感器的基本特性	186	10.1.1 I/O 口扩展概述	251
8.2 常用的 A/D 转换元件	187	10.1.2 I/O 地址译码技术	252
8.2.1 A/D 转换元件的结构和 工作原理	187	10.2 存储器概述	253
8.2.2 A/D 转换元件的接口电路	192	10.2.1 存储器的类型	254
8.2.3 单片机 A/D 转换软件编程	192	10.2.2 常用的存储器	255
8.3 温度数据采集元件设计	194	10.2.3 存储器扩展电路的 工作方式	258
8.3.1 温度数据采集元件的 结构和工作原理	194	10.3 外部存储器扩展	259
8.3.2 温度数据采集元件的 接口电路	198	10.3.1 扩展程序存储器	259
8.3.3 单片机温度数据采集 软件编程	199	10.3.2 扩展数据存储器及编程	261
8.4 压力数据采集元件设计	205	10.3.3 程序存储器与数据存储器 同时扩展	266
8.4.1 压力数据采集元件的 结构和工作原理	205	本章小结	267
8.4.2 压力数据采集元件 接口电路	210	习题与思考	268
8.4.3 单片机压力数据采集 软件编程	211	第 11 章 51 单片机输出控制	269
本章小结	212	11.1 常用输出接口电路	269
习题与思考	212	11.1.1 单片机与光电隔离元件的 接口电路	269
第 9 章 51 单片机串行通信	214	11.1.2 单片机与模拟开关元件的 接口电路	271
9.1 单片机串行通信设计	214	11.1.3 单片机与继电器的接口 电路	273
9.1.1 常用接口芯片结构和 工作原理	214	11.2 常用 D/A 转换器设计	279

11.2.1 D/A 转换器的结构和 工作原理	280	12.2.3 速度检测模块	308
11.2.2 D/A 转换器的接口电路	281	12.2.4 舵机驱动模块	310
11.2.3 D/A 转换器的单片机 编程	282	12.2.5 直流电机驱动模块	310
*11.3 直流电动机的控制设计	284	12.2.6 无线数据传输模块	312
11.3.1 直流电动机驱动电路的 基本工作原理	284	12.2.7 无线视频发射模块	314
11.3.2 采用单片机的直流电动机 控制电路设计	291	12.2.8 上位机接口部分	314
11.3.3 直流电动机驱动的编程	292	12.3 智能车软件系统设计	316
本章小结	293	12.3.1 系统软件总体架构	317
习题与思考	293	12.3.2 视频图像采集及 处理算法	317
第 12 章 51 单片机智能车设计实例	295	12.3.3 图像信息处理	323
12.1 智能车总体方案设计	295	12.3.4 速度控制和舵机 控制算法	326
12.1.1 系统总体设计思路	295	12.3.5 主驱动电机的 PD 控制	329
12.1.2 系统总体方案的选定	296	12.3.6 速度检测算法	334
12.1.3 系统总体方案设计	299	12.3.7 无线数据传输	337
12.2 智能车硬件电路设计	301	12.3.8 人机交互界面	343
12.2.1 电源模块	301	本章小结	345
12.2.2 视频图像采集及 处理模块	302	附录 A 51 单片机指令系统表	346
		附录 B C51 语言的库函数	350
		参考文献	355

1975 年, 美国 Texas Instruments 公司成功研制了世界上第一台单片机, 它的出现是计算机技术发展史上的一个里程碑, 从此, 计算机技术不仅在数值处理方面得到了进一步的发展, 而且在智能化控制领域里也得到了迅猛的发展, 并占有越来越重要的地位。51 系列单片机是目前应用最广泛的单片机, 该系列单片机简单易学, 具有丰富的指令系统和高级语言编译系统。本章重点介绍单片机的基本概念、特点、结构、工作方式等。

1.1 微型计算机基础

1.1.1 单片机及其发展概况

1. 单片机的发展

单片机的全称为单片微型计算机 (Single Chip Microcomputer), 它是将组成微型计算机的各个功能部件, 如中央处理器 (CPU)、随机存储器 (RAM)、只读存储器 (ROM)、基本输入/输出接口 (I/O 接口)、定时器/计数器以及串行通信接口等部件有机地结合在一块集成芯片中, 构成一台完整的微型计算机, 因此单片机又可以称为微处理器 (Microcontroller Unit)。一个完整的单片机组成框图如图 1-1 所示。

随着技术的发展, 单片机的功能不断完善。目前, 单片机产品已达 50 多个系列、300 多种型号, 其综合性能、成本、体系结构、开发环境等都取得了显著的进步。单片机就其字长而言, 可以分为 4 位机、8 位机、16 位机和 32 位机, 其中, 8 位机长期以来都是主流机型。

单片机的发展史大体上可以分为以下 4 个阶段。

第一阶段: 单片机初级阶段。单片机的发展始于 1974 年, 由于工艺限制, 此阶段的单片机采用双片形式, 而且功能较为简单。到了 1976 年, Intel 公司推出了 MCS-48 系列单片机, 将 CPU、存储器、I/O 接口、定时器/计数器集成在一块芯片上, 使计算机完成了单芯片化。但此系列单片机无串行接口, 存储器数量较少, 中断处理功能也较为简单。同时期的产品还有 Motorola 公司的 MC680/6800+/6875 系列, Rokwell 公司的 6502/RG500 系列, GI 公司的 PIC1650 系列等。

第二阶段: 单片机完善阶段。此阶段单片机的功能及体系结构得到了不断的完善。1980

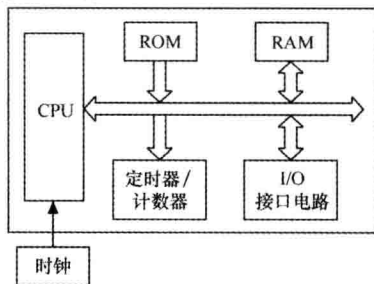


图 1-1 单片机组成框图

年，Intel 公司在 MCS-48 系列单片机的基础上增加了 I/O 串行口，增大了存储器容量，完善了终端系统（设置了 5 个中断源和 2 个优先级），定时器/计数器为 16 位，在内部存储器上设置了位地址空间，提供位操作指令，推出了高性能的 MCS-51 系列单片机，并且成为了事实上的单片机结构标准。除了 MCS-51 单片机外，Motorola 公司推出的 M6800 系列单片机、Zilog 公司推出的 Z8 系列单片机都是这一时期的产品。

第三阶段：微控制器形成阶段。为了满足更高的测控应用要求，需要对单片机的外围接口电路进行增强与完善，如数/模（D/A）转换器、模/数（A/D）转换器、高速 I/O 接口、程序监视定时器（WDT）等，尽量将外围功能集成在芯片内部。集成了外围电路的单片机又称为微控制器，实际上，国际上已经将微控制器作为单片机的标准名称。这一时期以 51 系列单片机为代表。

第四阶段：微控制器技术成熟阶段。随着技术的不断成熟，国内外对单片机的开发和研制竞争异常激烈，极大地丰富了微控制器的类型，功能不断完善，成本不断降低，外围电路不断减少，可靠性不断提高。

2. 单片机的特点

单片机是在一块芯片上集成了中央处理器（CPU）、随机存储器（RAM）、只读存储器（ROM）、基本输入/输出接口（I/O 接口）、定时器/计数器等部件，使其具备了一台微型计算机的特征。但是由于单片机的应用领域主要集中在控制领域，因此与通用计算机相比，单片机有如下一些特点。

（1）采用哈佛结构体系

一般通用计算机采用冯·诺依曼体系结构，其特点是计算机中的程序和数据使用共同的存储空间，而单片机一般是面向工业控制领域，要求较大的运算量和较高的运算速度。为了提高数据吞吐量，单片机采用哈佛体系结构，其特点是：①使用两个独立的存储器模块，分别存储指令和数据，每个存储模块都不允许指令和数据并存；②使用独立的两条总线，分别作为 CPU 与每个存储器之间的专用通信路径。

（2）采用面向控制的指令系统

单片机指令系统中有丰富的位操作指令，逻辑功能强大，大量使用单字节指令，处理速度快，效率高。

（3）引脚功能复用

受制造工艺水平的限制，单片机的引脚数量有限，存在所需要的信号线数多而实际引脚数量少的矛盾，而单片机采用引脚功能复用就可以很好地解决这个矛盾。

（4）片内随机存储器做寄存器

单片机所使用的寄存器（除了程序计数器 PC 以外）都是片内 RAM 的某一对应单元。这样可以使寄存器的数量多，并且容易设计和集成。另外，CPU 直接存取这些寄存器，可以大大提高单片机的响应速度。

（5）类型齐全

单片机发展至今，由于各公司不断地研制、改进，使得单片机产品品种繁多，系列齐全。用户可以根据不同的应用，选择功能好、性价比高的产品。

（6）功能通用

虽说单片机主要应用于控制领域，面向测控对象，但它的功能仍然是通用的，配上适当的外围设备/电路就可以作为一般的微处理器来使用。

3. 单片机的发展趋势

单片机的发展趋势正在向高性能、大容量、微型化、集成化等方面发展。

(1) CPU 的改进

采用双 CPU 或者多 CPU 结构,以提高数据的处理能力和速度;增加数据总线线宽,以提高数据处理速度和能力;采用流水线结构,CPU 中的指令以队列形式排列,以提高运算速度;采用串行总线结构,从而可以减少单片机的引线,降低单片机的成本。

(2) 存储器的改进

增大存储器容量,以简化外围电路,提高系统稳定性,降低产品成本;片内采用 E²PROM,以简化系统结构,提高系统稳定性;采用 KEPROM (Keyed Access EPROM),以提高程序的保密性。

(3) 片内 I/O 的改进

提高并行口的驱动能力,以减少外围驱动电路;增加 I/O 接口的逻辑控制功能;增加特殊的串行接口功能。

(4) 外围电路的集成

随着集成电路的技术不断提高,一些外围电路可以集成到单片机芯片内,如 A/D 转换器、D/A 转换器、DMA 控制器、中断控制器、锁相环、频率合成器、字符发生器、声音发生器、CRT 控制器、译码驱动器等。

(5) 低功耗

随着世界性的能源危机已经越来越受到人们的重视,单片机系统中也应考虑功耗问题,由于 CMOS 电路具有功耗小的优点,目前 8 位单片机的产品中已有半数 CMOS 化,为了充分发挥低功耗特点,这类单片机普遍设置了空闲和掉电两种工作模式,如 89C51 单片机在正常工作状态时(即 5V, 12MHz),其工作电流为 16mA;而在同样条件下,空闲模式下其工作电流仅为 3.7mA;在掉电模式下,其工作电流只有 50nA。

1.1.2 计算机中的数制及相互转换

1. 数制

所谓的数制,是指数的制式,是人们利用符号计数的一种科学方法。数制有很多种,微型计算机中常用的数制有十进制、二进制、八进制和十六进制 4 种。

进位计数的特征可以概括如下。

① 有一个固定的基数 r , 数的每一位只能取大于等于 0、小于 r 的数字,即符号集为 $\{0, 1, 2, \dots, r-1\}$ 。

② 逢 r 进位, 它的第 i 个数位对应于一个固定的值 r^i , r^i 称为该位的“权”。小数点左边各位的权是基数 r 的正次幂,依次为 0, 1, 2, $\dots$, m 次幂,小数点右边各位的权是基数 r 的负次幂,依次为 $-1, -2, \dots, -n$ 次幂。 r 进制数在技术过程中,当它的某位计满 r 时就向它邻近的高位进 1。

一般用括号和基数(即 $(\)_r$)的形式来表示 r 进制数,也可以在数的后面加后缀表示,二进制数以后缀 B 表示,八进制数以后缀 O 表示,十进制数以后缀 D 表示,十六进制数以后缀 H 表示。将 r 进制数按权展开,其表达式为

$$\begin{aligned} & a_m \times r^m + a_{m-1} \times r^{m-1} + \dots + a_1 \times r^1 + a_0 \times r^0 + a_{-1} \times r^{-1} + a_{-2} \times r^{-2} + \dots + a_{-n} \times r^{-n} \\ &= \sum_{i=-n}^m a_i \times r^i \end{aligned}$$

(1) 十进制

十进制 (Decimal) 是人类最常用的数的制式, 其基数 $r=10$, 逢十进位, 符号集为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0\}$, 其权为: $\dots, 10^2, 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, \dots$

对于十进制, 因为人们已经习惯, 一般不用括号和基数来表示。例如, 十进制数 $(123.456)_{10}$ 一般写成 123.456 或 123.456D。若按权展开为

$$(123.456)_{10} = 123.546D \\ = 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2} + 6 \times 10^{-3}$$

(2) 二进制

二进制 (Binary) 数的基数 $r=2$, 符号集为 $\{0, 1\}$, 其权为: $\dots, 2^2, 2^1, 2^0, 2^{-1}, 2^{-2}, \dots$

例如, 二进制数 $(1101.011)_2$ 按权展开为

$$(1101.011)_2 = 1101.011B \\ = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

(3) 八进制

八进制 (Octal) 数的基数 $r=8$, 符号集为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, 其权为: $\dots, 8^2, 8^1, 8^0, 8^{-1}, 8^{-2}, \dots$

例如, 八进制数 $(654.123)_8$ 按权展开为

$$(654.123)_8 = 654.123O \\ = 6 \times 8^2 + 5 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 1 \times 8^{-1} + 2 \times 8^{-2} + 3 \times 8^{-3}$$

(4) 十六进制

十六进制 (Hexadecimal) 数的基数 $r=16$, 符号集为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F\}$, 其权为: $\dots, 16^2, 16^1, 16^0, 16^{-1}, 16^{-2}, \dots$

例如, 十六进制数 $(89EF.1D)_{16}$ 按权展开为

$$(89EF.1D)_{16} = 89EF.1DH \\ = 8 \times 16^3 + 9 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 15 \times 16^0 + 1 \times 16^{-1} + 13 \times 16^{-2}$$

2. 数制间的相互转换

计算机是采用二进制数操作的, 但是人们已经习惯使用十进制数, 因此需要这几种常用的数制之间能够互相转换。图 1-2 所示为不同数制之间相互转换的法则。

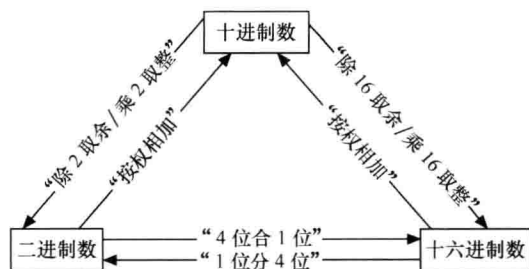


图 1-2 不同数制之间的相互转换

(1) 二进制数和十进制数间的转换

① 二进制数转换成十进制数。

要将二进制数转换成十进制数, 只要把要转换的数按权展开后相加即可。例如:

$$11010.01B = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 26.25D$$

② 十进制数转换成二进制数。

十进制整数和十进制小数转换成二进制数的方法有所不同。

- 十进制整数转换成二进制数

十进制整数转换成二进制整数的方法有很多，最常用的是“除 2 取余法”，其法则为：用要转换的十进制数连续除以 2，直到商小于 2 为止，然后将各次余数按最后得到的为最高位和最早得到的为最低位的顺序依次排列，所得到的数便是所求的二进制数。

【例 1-1】 试求出十进制数 215 的二进制数。

解：按照“除 2 取余法”，将 215 连续除以 2，直到商数小于 2 为止，即

2	215	余数 1	最低位 ↑ ↓ 最高位
2	107	余数 1	
2	53	余数 1	
2	26	余数 0	
2	13	余数 1	
2	6	余数 0	
2	3	余数 1	
2	1	余数 1	

把所得的余数由高位到低位排列起来，得到十进制数 215 的二进制，即

$$215D = 11010111B$$

- 十进制小数转换成二进制数

十进制小数转换成二进制数通常采用“乘 2 取整法”，法则为用 2 连续乘以要转换的十进制小数，直到所得积的小数部分为 0 或满足所需要的精度为止，然后将各次整数按先得到的为最高位和最后得到的为最低位的顺序依次排列，所对应的数便是所求的二进制数。

【例 1-2】 试求出十进制小数 0.6879 的二进制数。

解：将 0.6879 不断地乘以 2，取每次所得到乘积的整数部分，直到乘积的小数部分满足所需要的精度，即

0.6879			最高位 ↓ ↑ 最低位
× 2	1.3758	取整数 1	
	0.3758		
× 2	0.7516	取整数 0	
	0.7516		
× 2	1.5032	取整数 1	
	0.5032		
× 2	1.0064	取整数 1	

把所有得到的整数按照由高到低位排列得到

$$0.6879D = 0.1011B$$

对同时有整数和小数两部分的十进制数转换成二进制数的时候，可以分别用上述方法对整数部分和小数部分进行转换，然后再进行合并。例如，求 215.6879D 的二进制数，则

$$215.6879D = 11010111.1011B$$



任何十进制整数都可以精确地转换成一个二进制整数，但十进制小数却不一定可以精确地转换成一个二进制数。

(2) 十六进制数和十进制数间的转换

① 十六进制数转换成十进制数。

十六进制数转换成十进制数的方法和二进制数转换成十进制数的方法类似，将十六进制数按权展开后相加即可以得到十进制数，只不过这里的“权”为 16。例如：

$$5E6AH = 5 \times 16^3 + 14 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 10 \times 16^0 = 24266$$

② 十进制数转换成十六进制数。

• 十进制整数转换成十六进制整数

与十进制整数转换成二进制整数方法类似，采用“除 16 取余法”，其法则为：用要转换的十进制整数连续除以 16，直到商数小于 16 为止，然后将各次余数由高位到低位排列，所得到的数即为十六进制数。

【例 1-3】 求十进制整数 3901 所对应的十六进制整数。

解：按照“除 16 取余法”，即

16	3901	余数 13，记作 D	最低位
16	243	余数 3，记作 3	↑
	15	余数 15，记作 F	最高位

将所得的余数按照由高位到低位的顺序排列，得到

$$3901D = F3DH$$

• 十进制小数转换成十六进制小数

十进制小数转换成十六进制小数的方法与十进制小数转换成十六进制小数的方法类似，采用“乘 16 取整法”，法则同上。

【例 1-4】 求十进制小数 0.76171875 所对应的十六进制小数。

解：将十进制小数 0.76171875 连续乘以 16，直到所得乘积的小数部分为 0 或满足一定的精度为止，即

0.76171875			
× 16			
12.18750000	取整数 12，记作 C	最高位	
0.18750000			
× 16			
3.00000000	取整数 3，记作 3	最低位	

将所得到的整数按照由高位到低位的顺序排列，得到

$$0.76171875D = 0.C3H$$

(3) 二进制数和十六进制数间的转换

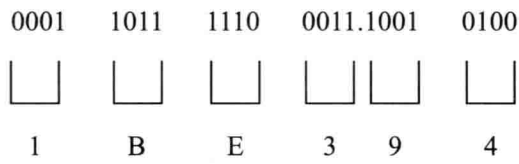
十六进制是计算机中经常采用的一种数制，如指令机器码都是采用十六进制表示的，所以必须对二进制数和十六进制数进行相互转换。

① 二进制数转换成十六进制数。

二进制数转换成十六进制数可以采用“4 位合 1 位法”，其法则为：从二进制数的小数点开始，或左位或右位每 4 位一组，不足 4 位以 0 补足，然后分别把每组用十六进制数码进行表示，并按序相连即可。

【例 1-5】 将二进制数 1101111100011.10010100 转换成十六进制数。

解：按照“4 位合 1 位”法则，得到



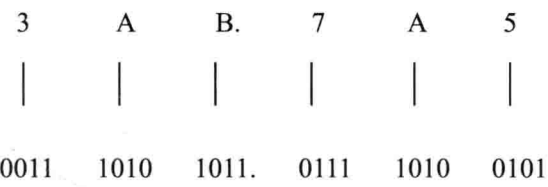
所以，1101111100011.10010100B = 1BE3.94H。

② 十六进制数转换成二进制数。

十六进制数转换成二进制数采用“1 位分 4 位法”，其法则为：将十六进制数中的每一位分别用 4 位二进制数来表示，然后将其按顺序排列起来即可。

【例 1-6】 将十六进制数 3AB.7A5 转换为二进制数。

解：按照“1 位分 4 位”法则，得到



所以，3AB.7A5H = 001110101011.01110100101B。

二进制数、八进制数、十进制数和十六进制数之间的对应关系如表 1-1 所示。

表 1-1 二进制数、八进制数、十进制数和十六进制数之间的对应关系

整 数				小 数			
二进制	八进制	十进制	十六进制	二进制	八进制	十进制	十六进制
0000B	00O	0	0H	0B	0O	0	0H
0001B	01O	1	1H	0.1B	0.4O	0.5	0.8H
0010B	02O	2	2H	0.01B	0.2O	0.25	0.4H
0011B	03O	3	3H	0.001B	0.1O	0.125	0.2H
0100B	04O	4	4H	0.0001B	0.04O	0.0625	0.1H
0101B	05O	5	5H	0.00001B	0.02O	0.03125	0.08H
0110B	06O	6	6H	0.000001B	0.01O	0.015625	0.04H
0111B	07O	7	7H	...	...	...	...
1000B	10O	8	8H				
1001B	11O	9	9H				
1010B	12O	10	AH				
1011B	13O	11	BH				
1100B	14O	12	CH				

续表

整 数				小 数			
二进制	八进制	十进制	十六进制	二进制	八进制	十进制	十六进制
1101B	15O	13	DH				
1110B	16O	14	EH				
1111B	17O	15	FH				

1.1.3 二进制数的运算

1. 算术运算

(1) 加法运算

二进制数的加法运算法则为

- 0 + 0 = 0
- 1 + 0 = 0 + 1 = 1
- 1 + 1 = 10（向近邻高位有进位）
- 1 + 1 + 1 = 11（向近邻高位有进位）

【例 1-7】 设有两个二进制数 $X=10110110$ ， $Y=11011001$ ，试求 $X+Y$ 的结果。

解：按照二进制数的加法运算法则，得到

10110110B

+

11011001B

$X+Y=$

110001111B



在进行二进制数的相加时，应注意低位向高位的进位。

(2) 减法运算

二进制数的减法运算法则为

- 0 - 0 = 0
- 1 - 0 = 1
- 1 - 1 = 0
- 0 - 1 = 1（向近邻高位借位 1）

【例 1-8】 设有两个二进制数 $X=11011001$ ， $Y=10010111$ ，试求 $X-Y$ 的结果。

解：按照二进制数的减法运算法则，得到

11011001B

-

10010111B

$X-Y=$

01000010B

(3) 乘法运算

二进制数的乘法运算法则为

- 1 × 0 = 0 × 1 = 0
- 1 × 1 = 1