



面向21世纪大学计算机基础课程规划教材


BASIC COMPUTER COURSES FOR UNDERGRADUATE EDUCATION

单片机原理与应用

SINGLE-CHIP MICROCOMPUTERS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS

陈建铎 主编



 科学出版社
www.sciencep.com



面向21世纪大学计算机基础课程规划教材

BASIC COMPUTER COURSES FOR UNDERGRADUATE EDUCATION

单片机原理与应用

陈建铎 主编

宋彩利 康 磊 冷冬梅 副主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机的基础知识、存储器、MCS-51 单片机的组成原理、指令系统、汇编语言程序设计、单片机的开发使用、模拟通道技术及单片机应用系统设计；同时，还介绍了 8098 和 16 位 DSP 处理机的组成原理。本书内容丰富，应用性强，采用模块化结构，以满足不同专业、不同层次的教学要求。

本书不仅讲述单片机的组成原理，而且介绍其开发使用的方法。学习全部内容后，可使学生结合自己专业设计各种单片机应用系统。因此，本书既可作为大学计算机专业的教材，又可供理工类非计算机专业使用，还可作为各类工程技术人员的培训教材及自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

单片机原理与应用/陈建铎主编. —北京：科学出版社，2005.2
(面向 21 世纪大学计算机基础课程规划教材)

ISBN 7-03-014792-8

I. 单… II. 陈… III. 单片微型计算机-高等学校：技术学校-教材
IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 136590 号

责任编辑：万国清 孙露露/责任校对：耿 耘

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 2 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2005 年 2 月第一次印刷 印张：19 3/4

印数：1—3 000 字数：449 000

定价：27.00 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 010-62138978-8004

面向 21 世纪大学计算机基础课程规划教材

编 委 会

主 任

冯博琴 西安交通大学

副主任

崔杜武 西安理工大学

编 委（以姓氏笔画为序）

王长元 王会燃 刘天时

张毅坤 郝 平 蒋 林

前 言

目前,包括计算机专业在内的各类理工类专业所开设的“微型计算机原理与应用”课程的教学内容大体上分为两种类型。一类是以 Intel 8086/80486 微处理器为教学机,讲述微机系统的组成原理与应用;另一类是以单片机为教学机,在讲述基本组成原理之后,着重讲述它的开发与应用。二者相比,各有特色。单片机是在微处理器的基础上增添了 I/O 接口电路、定时器/计数器、串行通信接口电路、A/D 与 D/A 转换器,扩大了内部寄存器和存储器的容量。尤其是近年来新推出的一些高档单片机又增添了调制解调器、通信控制器、锁相环、DMA 控制器以及浮点运算单元等功能部件。对于这些单片机,只要外加一些扩展电路和必要的接口通道,就可构成各种应用系统,用于数据采集、工业自动控制、智能仪器仪表、智能终端、机器人、图像处理以及家用电器中。尤其是 DSP 处理器推出以后,促进了多媒体技术的发展。由于单片机集多种功能于一体,体积小,功能强,外部连线少,且具有很高的性价比,因此使过去计算机控制中的许多难题都得以解决。可以说,各类高性能单片机的出现,是计算机工程史上又一重要的里程碑。

为此,我们根据国家教育部工科计算机基础课教学指导委员会提供的《计算机硬件技术基础》课程的教学要求,结合自己多年来的教学与科研实践,编写了《单片机原理与应用》一书,供理工科各类专业使用。主要特点概括如下:

1. 在前两章适度增加计算机硬件基础知识,为后续各章节的学习做必要的准备。第 1 章首先介绍计算机的产生与发展、计算机中的数制码制与运算、逻辑代数、基本逻辑电路,然后讲述计算机的基本组成与工作过程。第 2 章讲述存储器的单元电路、地址译码方式、存储器体系结构、磁表面存储器及光盘存储器的组成与工作原理。虽然,该门课程是以单片机为教学机,但是在讲述计算机的组成与工作原理时,仍不脱离五大块结构,即运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备,体现了冯·诺依曼的程序存储思想。这些,对于非计算机专业非常重要。因为许多非计算机专业在讲授微机原理之前没有开设“数字逻辑”与“计算机组成原理”课程,这样,通过前两章的学习,可使学生对计算机的硬件基础、基本组成与工作原理有一定的了解,以利于后续各章的学习。当然,对于计算机专业来说,这两章可以略去。

2. 把单片机的组成原理与汇编语言程序设计结合起来。第 3 章讲述 MCS-51 单片机的组成原理,第 4 章和第 5 章讲述指令系统与汇编语言程序设计,尤其是在汇编语言程序设计中,通过大量的例题,讲述汇编语言程序的结构、算法和技巧。这样,有利于把“微机原理”与“汇编语言程序设计”结合起来。对于计算机专业,这些内容一般分为两门课程讲授。而对于非计算机专业,由于学时数的限制,这些内容往往合成一门课程。这样处理,正适应了非计算机专业教学的需要。

3. 在介绍单片机基本组成原理与程序设计的基础上,讲述单片机外部扩展的方法和步骤。第 6 章首先介绍常用外围接口电路,然后讲述外部数据/程序存储器扩展、数

据输入/输出方式、键盘/显示器接口电路及串行多机通信。这些, 可使学生初步掌握单片机外部扩展的方法, 从而构成单片机基本应用系统。

4. 突出单片机应用系统的设计思想与方法。第7章主要讲述传感器、采样保持器、多路转换开关的基本工作原理、模拟信号采集与处理、模拟信号输出通道与光电隔离技术。这些是设计单片机应用系统时必不可少的内容, 包括智能仪器仪表和各种测控装置。第8章首先讲述多路巡回采集系统设计、单片机控制系统接口技术和常用总线。然后, 通过实例讲述单片机控制系统的设计思想和方法。

5. 在讲述8位单片机的组成与开发应用之后, 适度介绍单片机的最新发展。第9章简要介绍高性能16位8098单片机的组成与特点, 第10章简要介绍16位DSP 56800单片机的组成与特点。这些内容可满足学生对新知识、新技术的需求, 有利于扩大学生的知识面, 提高学生学好用好该门课程的信心。

6. 本书内容丰富, 应用性强, 采用模块化结构, 对于标有“*”的章节, 教师可灵活取舍, 以满足不同专业的教学需要。如果全部学习, 可使学生既学会微型计算机的组成原理与程序设计, 又掌握10多种常用外围接口电路的组成原理、模拟信号输入输出通道的设计方法以及单片机的开发使用。同时, 配以足够的软硬件实验, 可培养学生的编程能力, 提高硬件设计水平, 使学生结合自身专业, 设计出各种单片机应用系统。因此, 该书是一部应用性很强的教材。对于非计算机专业, 参考学时数为72学时; 对于计算机专业, 参考学时数为54学时。

通过该书的教学, 既可使学生掌握计算机的硬件基础、单片机的组成原理、汇编语言程序设计, 还可使学生学习单片机应用系统的设计方法与步骤。全书共10章, 其中第1、2章由冷冬梅编写, 第3~5章由宋彩利编写, 第6、7章由康磊编写, 第8~10章由陈建铎编写, 陈建铎还负责了统稿工作。在编写过程中, 我们力求理论联系实际, 由浅入深, 文字流畅, 通俗易懂, 以满足不同专业不同层次的教学要求。本书课件可到科学出版社网站 (www.sciencep.com) 下载。

由于作者水平有限, 书中难免存在谬误之处, 诚请广大读者批评指正。

编 者

2004年12月

目 录

第 1 章 计算机基础*	1
1.1 概述	1
1.2 计算机中的数制、码制及运算	2
1.2.1 进位计数制	2
1.2.2 二进制数的表示与基本运算	3
1.2.3 八进制与十六进制数的表示	5
1.2.4 不同进位计数制之间的转换	5
1.2.5 十进制数与字符的二进制数表示法	9
1.2.6 原码、补码、反码及运算法则	10
1.2.7 定点数与浮点数	14
1.3 逻辑代数与数字电路	14
1.3.1 逻辑代数	15
1.3.2 门电路	17
1.3.3 触发器	20
1.3.4 组合逻辑电路	21
1.3.5 时序逻辑电路	24
1.4 计算机的基本组成与工作过程	26
1.4.1 计算机的基本组成原理	26
1.4.2 指令与程序	31
1.4.3 程序执行过程	32
1.4.4 中断与中断处理过程	35
1.4.5 微型计算机系统组成	37
习题	37
第 2 章 存储器*	39
2.1 半导体存储器的分类与性能指标	39
2.1.1 半导体存储器的分类	39
2.1.2 半导体存储器的性能指标	40
2.2 随机存取存储器	41
2.2.1 基本存储元	41
2.2.2 地址译码方式	43
2.2.3 随机存取存储器应用举例	44
2.3 只读存储器	47
2.3.1 固定只读存储器 ROM	47
2.3.2 可编程只读存储器 PROM	48
2.3.3 可改写只读存储器 EPROM	49
2.3.4 电擦除与 Flash 快闪只读存储器	50

2.3.5 只读存储器举例	50
2.4 磁记录存储器	54
2.4.1 磁表面存储器的工作原理	54
2.4.2 磁记录方式	55
2.4.3 磁带存储器	57
2.4.4 磁盘存储器	58
2.5 光盘存储器	60
2.5.1 概述	60
2.5.2 光盘存储器的基本组成与工作原理	61
习题	62
第3章 MCS-51 单片机的组成原理	63
3.1 概述	63
3.2 中央处理器	64
3.2.1 运算器	64
3.2.2 控制器	64
3.2.3 时钟与定时	65
3.3 存储器	65
3.3.1 程序存储器	66
3.3.2 数据存储器	66
3.4 布尔处理机	68
3.5 并行 I/O 接口	70
3.5.1 P0 口与 P2 口	71
3.5.2 P1 口与 P3 口	71
3.6 定时器/计数器	71
3.6.1 定时器/计数器的组成	71
3.6.2 定时器/计数器的工作方式	72
3.6.3 定时器/计数器的使用	74
3.7 串行 I/O 接口	75
3.7.1 串行通信基本方式	75
3.7.2 串行通信接口的组成与特点	76
3.7.3 串行通信接口的工作方式	77
3.7.4 数据发送与接收	78
3.8 中断控制系统	79
3.8.1 中断源与中断请求标志	79
3.8.2 中断控制	80
3.9 MCS-51 单片机外部特性	82
3.9.1 引脚功能	82
3.9.2 复位与掉电保护	83
3.10 EPROM 的编程、检查与擦除	85
3.10.1 EPROM 编程	85
3.10.2 程序检查与擦除	85

3.11 89C51 单片机的组成与特点	86
习题	90
第4章 指令系统	91
4.1 概述	91
4.2 寻址方式	91
4.3 指令系统	95
4.3.1 数据传送类指令	95
4.3.2 算术运算类指令	98
4.3.3 逻辑运算类指令	101
4.3.4 移位类指令	103
4.3.5 控制转移类指令	104
4.3.6 调用/返回类指令	107
4.3.7 位操作类指令	109
习题	110
第5章 汇编语言程序设计	112
5.1 机器语言、汇编语言与高级语言	112
5.2 汇编语言语句格式与伪指令	113
5.2.1 汇编语言语句格式	113
5.2.2 汇编语言伪指令	113
5.3 汇编与编译	115
5.3.1 汇编过程	115
5.3.2 C51 程序的使用	116
5.3.3 仿真与固化	117
5.4 汇编语言程序设计	118
5.4.1 简单程序设计	118
5.4.2 分支程序设计	119
5.4.3 循环程序设计	122
5.4.4 查表程序	124
5.4.5 子程序	124
5.4.6 程序设计举例	127
习题	149
第6章 单片机的开发使用	150
6.1 常用外围接口电路及扩展	150
6.1.1 8位数据/地址锁存器 74LS 273/373	150
6.1.2 8位并行数据输入/输出锁存器 8212/8282	151
6.1.3 8位并行数据输入/输出接口 8255A	154
6.1.4 带有 RAM 和定时器/计数器的 8位并行输入/输出接口 8155A	159
6.2 存储器扩展	163
6.2.1 外部程序存储器扩展	163
6.2.2 外部数据存储器扩展	165
6.2.3 外部程序/数据共用存储器	166

6.3 数据输入/输出	167
6.3.1 数据类型	167
6.3.2 输入/输出寻址方式	167
6.3.3 输入/输出控制方式	168
6.4 键盘输入接口电路	171
6.4.1 键盘的工作原理	171
6.4.2 键盘接口电路	173
6.4.3 键盘输入程序设计	175
6.5 显示器接口电路	176
6.5.1 LED 显示器及接口电路	176
6.5.2 LCD 显示器及接口电路	181
6.5.3 可编程键盘/显示器接口 8279 及其使用 *	184
6.6 硬件日历钟接口电路 *	194
6.6.1 硬件日历钟 MSM5832 的基本组成与特点	194
6.6.2 MSM5832 的连接使用	196
6.7 串行多机通信	199
6.7.1 串行多机通信	199
6.7.2 与 IBM PC 机串行通信	204
习题	204
第 7 章 模拟通道技术	206
7.1 概述	206
7.2 传感器 *	207
7.2.1 拉力传感器	207
7.2.2 热电偶	207
7.2.3 光敏(红外)传感器	208
7.3 模拟信号输入通道	210
7.3.1 模拟信号的放大与整形	210
7.3.2 采样保持器	213
7.3.3 多路转换开关	214
7.3.4 A/D 转换器的工作原理与使用	215
7.4 模拟信号输出通道	220
7.4.1 D/A 转换器的工作原理与使用	220
7.4.2 开关信号输出电路	224
7.4.3 模拟信号输出电路	226
7.5 光电隔离技术	227
7.5.1 晶体管输出型光电耦合器	227
7.5.2 晶闸管输出型光电耦合器 *	227
7.6 V/F 与 F/V 转换电路 *	228
7.6.1 V/F 转换电路	228
7.6.2 F/V 转换电路	230
习题	231

第8章 单片机应用系统的设计	233
8.1 多路巡回检测系统设计	233
8.1.1 多路巡回检测系统	233
8.1.2 集成化多路模拟输入数据采集系统 MN7150*	234
8.1.3 多路巡回检测系统设计	238
8.2 单片机控制系统执行机构接口技术	240
8.2.1 继电器接口电路	240
8.2.2 步进电机驱动控制电路	240
8.2.3 直流电机驱动控制电路	244
8.3 RS-232C 总线标准与接口电路	245
8.3.1 RS-232C 总线标准	246
8.3.2 接口电路	246
8.4 单片机控制系统设计*	248
8.4.1 计算机控制系统概述	248
8.4.2 单片机控制系统设计规程	250
8.4.3 温度控制	251
8.4.4 速度控制	252
8.4.5 定时控制	254
8.4.6 定位控制	255
习题	256
第9章 8098 单片机的组成与指令系统特点*	258
9.1 概述	258
9.2 8098 CPU 内部结构与特点	259
9.2.1 寄存器算术/逻辑运算单元 RALU	259
9.2.2 CPU 总线结构	260
9.2.3 寄存器文件与专用寄存器组 SFR	260
9.2.4 存储控制器	261
9.2.5 程序状态标志寄存器 PSW	262
9.2.6 时钟与定时	262
9.3 存储器	263
9.3.1 内部存储器	263
9.3.2 系统总线与外部存储器访问	265
9.4 并行 I/O 接口	267
9.5 中断控制	268
9.5.1 中断源	268
9.5.2 中断控制与处理	270
9.6 定时器	272
9.6.1 定时器的组成与功能	272
9.6.2 监视跟踪定时器 WDT	273
9.7 高速输入 HSI 与高速输出 HSO	274
9.7.1 高速输入 HSI	274

9.7.2 高速输出 HSO	276
9.7.3 高速输入/输出控制与状态寄存器	279
9.8 模拟输入	281
9.8.1 模拟输入	281
9.8.2 A/D 转换器控制	281
9.9 脉冲宽度调制 PWM 输出	283
9.9.1 PWM 的结构与工作原理	283
9.9.2 模拟输出与滤波	284
9.10 串行 I/O 接口	285
9.10.1 串行口工作方式	285
9.10.2 串行口发送/接收控制	286
9.10.3 多微处理机通信	288
9.11 复位与电源电压下降使用方式	288
9.11.1 复位信号与复位电路	288
9.11.2 电源与电源电压下降使用方式	289
9.12 引脚功能	290
9.13 指令系统的特点	292
习题	293
第 10 章 16 位 DSP 单片机的组成与特点 *	294
10.1 概述	294
10.2 DSP 56800 单片机内部组成与特点	295
10.2.1 DSP 56800 单片机内部组成与特点	295
10.2.2 定时器与中断控制	298
10.2.3 串行通信接口	299
10.2.4 模数转换器 ADC	300
10.2.5 相位检测器与脉冲调宽输出 PWM	301
10.3 指令系统概述与开发应用	302
10.3.1 指令系统概述	302
10.3.2 开发工具	302
习题	303
参考文献	304

第 1 章 计算机基础*

1.1 概 述

自 1971 年 11 月, 美国 Intel 公司推出 4 位微处理器 Intel 4004 以后, 微处理器迅速发展, 按其集成度、体系结构、字长及综合性能, 大致经历了四个发展时期, 也称为四代。现在的 Pentium 微处理器堪称 Intel 公司的第五代微处理器。

在微处理器的发展过程中, 人们试图在其芯片中增加存储器、I/O 接口电路、定时器/计数器、UART, 甚至 A/D、D/A 转换器等, 以提高其功能, 并赋予专门的用途, 比如数据采集、通信、信号传送与控制等。因此也就产生了各种具有不同功能的微处理器, 称之为微控制器 (Microcontroller), 亦称为单片机 (Single Chip Computer)。自 1976 年 Intel 公司推出 MCS-48 系列单片机以后, 相继涌现出不少生产厂家、公司及系列产品。例如 Intel 公司的 MCS-51 系列, Motorola 公司的 MC68/01、6805, Zilog 公司的 Z8 系列, Rockwell 公司的 6500/1 系列等。

后来, 各生产厂家又在内部结构和制造工艺上进行改进, 从而出现了众多高性能的单片机。例如 Intel 公司的 8051、8096, Motorola 公司的 MC68HC05, MOSTEK 公司的 68200 以及 NS 公司的 HPC16040 等。由于单片机结构紧凑, 体积小, 功能强, 大量用于智能仪器仪表、前端控制设备、家用电器之中, 因此也称为“嵌入式”芯片。

自 20 世纪 90 年代以后, 随着自动控制、网络通信、家用电器以及多媒体技术的发展, 尤其是手机的大量使用, 猛烈地冲击着单片机市场, 使“嵌入式”芯片作为一种新的技术迅速发展。其发展可归结为以下几个方面。

1) 增加字长, 提高数据精度和处理的速率。早期单片机的字长是 8 位, 以后产生了 16 位、24 位和 32 位的单片机。但是在多数应用场合, 8 位数据可以满足需要。因此, 8 位单片机与 16/24/32 位单片机一样, 仍在体系结构、多功能部件集成、流水线与并行处理技术、制造工艺、时钟频率等方面竞相发展。

2) 改进制作工艺, 提高单片机的整体性能。随着集成电路工艺的发展, 单片机的制作由 MOS 型发展成 CMOS、HCMOS 型, 提高了芯片的集成度和器件的速度, 降低了电压和功耗; 内部采用大容量 Flash 快闪存储器, 实现在系统中烧录程序 (ISP) 和在应用中烧录程序 (IAP) 等技术。比如, Philips 的 P89C51RC2/RD2 具有 32/64KB 的 Flash 快闪存储器, 且集成有引导和擦除/烧录程序, 支持 ISP 和 IAP 技术; 外部时钟频率提高到 33~40MHz, 运算速度达到 50~100MIPS。

3) 由复杂指令集 CISC (Complex Instruction Set Computer) 技术转向简单指令集 RISC (Reduced Instruction Set Computer) 技术。早期的 MCS-51 单片机采用的是 CISC 技术, 随着 RISC 技术的发展, 单片机也采用了这一技术, 简化了体系结构, 并提高了 CPU 的速度, 比如 Microchip 的 PIC12/16/17/18Fxxx 微控制器等。

4) 采用多功能模块集成技术, 使一块“嵌入式”芯片具有多种功能。在新型单片机中, 除了 RAM/ROM、寄存器文件、定时器/计数器、并/串行接口电路、V/F 变换器、A/D 与 D/A 电路之外, 已有许多单片机采用双 CPU 或者多 CPU 结构, 增加锁相环路、USB、CAN、ISSC、I²C 等总线接口, 提供支持 TCP/IP 协议的通信接口。一则提高单片机数值计算、数据采集与处理的能力, 二则提供外部数据传送和与通信网络连接的能力。比如美国 Echelon 公司的 Neuron 3150, 内置 3 个 CPU。其中一个用于介质访问, 一个用于数据处理器, 另一个作为网络处理器。又如 Philips 的 P89C66x, 提供 I²C 总线传送方式。

5) 将微处理器与 DSP (Digital Signal Processor) 技术结合, 适时解决网络与多媒体技术所需的高速实时处理能力。比如我国台湾凌阳科技公司推出的 $\mu'nsp$ 系列单片机, 其 16 位机中增添了 DSP 功能, 具有语音编码与解码器, 内置在线仿真电路 ICE (In Circuit Emulator)。又如 Motorola 公司推出了 Motorola DSP 型单片机, 其中在 DSP56800 系列数字信号处理器中集成了通用 I/O 模块 GPIO、异步串行通信模块 SCI、同步串行外设模块 SPI、同步串行通信模块 SSI、控制器局域网模块 CAN 2.0 A/B、多路 A/D 模块、支持各类电机控制的多路脉冲宽度调制 PWM 模块以及定时器 (Timer) 等, 设置 JTAG 和在线仿真 OnEC 调试接口; 关键部件采用双哈佛结构, 支持并行处理; 其中 DSP56800E 的时钟频率达到 120MHz, 运算速度达到 120MIPS。

6) 在内部融入高级语言的编译程序, 支持应用程序接口 API 的使用, 支持 C 及硬件描述语言 VHDL 等高级语言的使用; 内置在线仿真电路 ICE, 支持在线编程写入, 即 ISP 和 IAP 技术等。

7) 追求低电压、宽电压、低功耗和少引脚。改进制作工艺, 降低内部电压和功耗, 提供宽电压使用方式, 以支持不同场合的需要。比如瑞典 Xemic 公司的 XE8301, 使用电压为 1.2~5.5V, 当运算速度为 1MIPS 时电流为 200 μ A, 在待机状态下仅为 1 μ A; DSP56852 外部仅有 81 个引脚。

如今, “嵌入式”单片机已广泛用于数值计算与处理、自动化控制、智能仪器仪表、空间探测、导弹制导、机器人、网络通信、视频电话、家用电器以及各种多媒体技术领域。以 DSP 单片机为内核的产品已经难以尽数, 比如 Web 可视电话、Web 电视游戏机、数字摄像机、数码相机、移动电话、手持挂网影碟机、DVD 以及电视会议设备等。

1.2 计算机中的数制、码制及运算

1.2.1 进位计数制

早在远古时期, 人们就已经有了数的概念, 并且随着生产的发展创造出许多计数的方法。其中应用最广泛、最科学的方法就是“进位计数制”。

所谓进位计数制, 就是按进位的原则计数。它是取有序数符中的任意个, 按位置排列, 其相邻两位之比是一个固定的常数, 这个常数称为基数。取不同的基数, 则可得到不同的进位计数制。若以 R 表示基数, 则为 R 进制的数, 在进位时, 逢 R 进一。

在进位计数制中, 一个数符所表示数的大小不仅与基数有关, 而且与它所在位置有关。数符相同, 若所处的位置不同, 则表示数的大小也就不同。例如人们所熟悉的十进

制数 2002, 就是取有序数符 0, 1, 2, ..., 9 中的 2, 0, 0, 2, 按位置排列。其中两位是 2, 但由于所处的位置不同, 所表示数值的大小也不同。一个表示 2, 另一个表示 2000。这就是人们常说的“个, 十, 百, 千”, 在数学上称为“权”。当数符所处的位置不同时, 其权不同, 因此所表示的数的大小也不同。这样的数通常称为“加权数”或“权码”。显然, 基数不同, 各位的权也不同。对于 R 进制的数, 各位的权分别为

$$\cdots R^3, R^2, R^1, R^0, R^{-1}, R^{-2} \cdots$$

在计算机中, 常用的进位计数制有二进制、八进制、十进制和十六进制。也就是说, R 分别为 2, 8, 10 和 16。

其中十进制是人们最习惯、最熟悉的一种计数方法。它使用 0, 1, 2, ..., 9 十个有序数符和小数点“.”表示一个数。将若干个数字排列起来, 即可得到完整的十进制数, 这种表示方法称为位置表示法或并列表示法, 其基数为十, 逢十进一, 各位的权分别为

$$\cdots 10^3, 10^2, 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2} \cdots$$

例如: 256.7, 各位的权分别为 10^2 , 10^1 , 10^0 和 10^{-1} 。按权展开, 形式如下

$$256.7 = 2 \times (10)^2 + 5 \times (10)^1 + 6 \times (10)^0 + 7 \times (10)^{-1}$$

一般来说, 一个任意的十进制数可以表示为

$$\begin{aligned} (N)_{10} &= (D_{n-1}D_{n-2}\cdots D_1D_0D_{-1}\cdots D_{-m})_{10} \\ &= D_{n-1}(10)^{n-1} + D_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + D_1(10)^1 + D_0(10)^0 + D_{-1}(10)^{-1} \\ &\quad + D_{-2}(10)^{-2} + \cdots + D_{-m}(10)^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} D_i(10)^i \end{aligned}$$

即多项式表示。其中 n 是整数位数, m 是小数位数, D_i 表示十个数字中的任意一个, $0 \leq D_i \leq 9$ 。在书写时, 其后用字母 D 说明, 亦称为后缀, 比如 23.52D。由于十进制数是人们最常用的计数方式, 因此后缀 D 可以默认。

1.2.2 二进制数的表示与基本运算

1. 二进制数的表示

二进制是基数为 2 的进位计数制, 它所使用的数符为 0, 1 和小数点“.”, 各位的权如表 1.1 所示。

表 1.1 二进制 (R=2) 各位的权 (R^i)

i	R^i	i	R^i	i	R^i
-1	0.5	0	1	6	64
-2	0.25	1	2	7	128
-3	0.125	2	4	8	256
-4	0.0625	3	8	9	512
-5	0.03125	4	16	10	1024
-6	0.015625	5	32	11	2048

例如二进制数 1111.11 各位的权分别为 $2^3, 2^2, 2^1, 2^0, 2^{-1}, 2^{-2}$ 和十进制数一样, 它也可表示为

$$\begin{aligned}(N)_2 &= (B_{n-1}B_{n-2}\cdots B_1B_0B_{-1}B_{-2}\cdots B_{-m})_2 \\ &= B_{n-1}(10)^{n-1} + B_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + B_1(10)^1 \\ &\quad + B_0(10)^0 + B_{-1}(10)^{-1} + B_{-2}(10)^{-2} + \cdots + B_{-m}(10)^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} B_i(10)^i\end{aligned}$$

这里 10 对于任何 R 进制数来说, 形式上是一样的, 但表示数值的大小随着 R 的不同而不同。对于二进制数, 10 表示 2, 读作“么零”。在书写时, 其后用字母 B 说明, 比如 101.011B。

2. 算术运算

在计算机中, 基本的算术运算有四种, 即加、减、乘、除。对于二进制数来说, 运算规则非常简单, 下面举例说明。

(1) 加法运算

$$\begin{aligned}0+0 &= 0 \\ 0+1 &= 1 \\ 1+0 &= 1 \\ 1+1 &= 10\end{aligned}$$

例如 $1101 + 1011 = 11000$

$$\begin{array}{r}1101 \\ 1011 \\ \hline 11000\end{array}$$

(2) 减法运算

$$\begin{aligned}0-0 &= 0 \\ 1-0 &= 1 \\ 1-1 &= 0 \\ 10-1 &= 1\end{aligned}$$

例如 $1101 - 0110 = 0111$

$$\begin{array}{r}1101 \\ 0110 \\ \hline 0111\end{array}$$

(3) 乘法运算

$$\begin{aligned}0 \times 0 &= 0 \\ 0 \times 1 &= 0 \\ 1 \times 0 &= 0 \\ 1 \times 1 &= 1\end{aligned}$$

例如 $1101 \times 110 = 1001110$

$$\begin{array}{r}1101 \\ \times 0110 \\ \hline 0000 \\ 1101 \\ + 1101 \\ \hline 1001110\end{array}$$

(4) 除法运算

$$\begin{aligned}0 \div 0 &= 0 \\ 0 \div 1 &= 0 \\ 1 \div 1 &= 1\end{aligned}$$

例如 $11011 \div 101 = 101$ 余 10

$$\begin{array}{r}101 \\ 101 \overline{)11011} \\ \underline{101} \\ 111 \\ \underline{101} \\ 10\end{array}$$

1.2.3 八进制与十六进制数的表示

一般来说, 对于任意进制的数都可以写成多项式的形式:

$$\begin{aligned}(N)_R &= (N_{n-1}N_{n-2}\cdots N_1N_0N_{-1}\cdots N_{-m})_R \\ &= N_{n-1}(10)^{n-1} + N_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + N_1(10)^1 + N_0(10)^0 \\ &\quad + N_{-1}(10)^{-1} + N_{-2}(10)^{-2} + \cdots + N_{-m}(10)^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} N_i(10)^i\end{aligned}$$

其中 n 是整数位数, m 是小数位数, N_i 表示其中的一个数符。括号中的 10, 对于任何 R 进制数来说, 只是形式上一样, 所表示数值的大小随着 R 的不同而不同。

1. 八进制数的表示

在进位计数制中, 若令基数 $R=8$, 即得八进制数。使用的数符有 0, 1, ..., 7, 可以 O (Octal) 作为后缀进行说明。但是由于 O 与数字 0 在书写时难以区分, 因此常以字母 Q 作为后缀, 比如 247.52Q。

2. 十六进制数的表示

在进位计数制中, 若令基数 $R=16$, 即得十六进制数, 使用的数符有 0, 1, 2, ..., 9, A(10), B(11), C(12), D(13), E(14), F(15), 常用字母 H (Hexadecimal) 作为后缀进行说明, 比如 1E.5BH。

1.2.4 不同进位计数制之间的转换

同一个数在不同的进位制中, 其形式不同, 但数值却是一样的。常用的转换方法有多项式替代法和基数乘法。

1. 多项式替代法

将欲转换的进制数展开为多项式, 再将多项式中的数符和基数换成要转换的进位计数制的相应数符, 然后按所要转换的进位计数制计算此多项式, 其值即为对应的十进制结果。

【例 1.1】 二—十转换, $(1001.11)_2 = (?)_{10}$

$$\begin{aligned}\text{解: } (1001.11)_2 &= (1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2})_{10} \\ &= (8 + 1 + 0.5 + 0.25)_{10} \\ &= (9.75)_{10}\end{aligned}$$

【例 1.2】 八—十转换, $(372.01)_8 = (?)_{10}$

$$\begin{aligned}\text{解: } (372.01)_8 &= (3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 2 \times 8^0 + 0 \times 8^{-1} + 1 \times 8^{-2})_{10} \\ &= (250.015625)_{10}\end{aligned}$$