

基于Proteus仿真的 51单片机应用

主编 周爱军



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

基于 Proteus 仿真的 51 单片机应用

主 编 周爱军

副主编 陆 霞 李海燕



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书介绍了单片机的基本结构与原理,单片机的指令系统,单片机的基本输入/输出、中断系统、定时/计数器、串口通信、A/D 与 D/A 转换以及典型的应用系统设计。

本书通过大量实例讲解各知识点,易于初学者学习,书中实例基于 Proteus 仿真平台、利用 keil C 编程实现。

本书可作为应用型本科学校单片机课程的教材,也可以作为单片机应用人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

基于 Proteus 仿真的 51 单片机应用/周爱军主编. —北京:北京理工大学出版社, 2018.2
ISBN 978-7-5682-2834-3

I. ①基… II. ①周… III. ①单片微型计算机 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字-(2016)第 195930 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13.25

字 数 / 312 千字

版 次 / 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 54.00 元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

“单片机原理及应用”课程是工科院校各类专业普遍开设的一门公共基础课，它以 MCS-51 系列单片机为例介绍其硬件系统原理、软件编程方法、系统接口原理及应用三大板块内容。长期以来，该课程存在原理概念不易理解、软件编程不易掌握、开发技能不易提高的问题，使不少学习者颇感困惑。

近年来，单片机仿真软件的普及促进了国内单片机课程教学水平的提升，单片机教材内容有待进一步跟进。著名仿真软件 Proteus 有句响亮的商业口号“从概念到产品”，宣称其功能的多样性。我们认为，改进单片机教材也需要有“从概念到产品”的思想，即在重视原理教学的同时，强化动手能力的培养，掌握研发单片机应用产品全过程的各项技能。为此，我们运用新思路、新方法编写了这教材。

1. 引入仿真工具内容，拓宽课程知识体系

将当前国际上两个最先进的单片机仿真工具软件 Proteus 和 Keil C 内容引入单片机教材，形成硬件、软件、接口、工具四大板块有机结合的新体系。仿真工具的引入对理解单片机系统原理和软件系统编程都有较大的促进作用。新技术与传统知识的结合不仅拓宽了读者的视野，也使学习方法发生了深刻变化，可收到事半功倍的学习效果。

2. 编程语言重新定位，C51 语言与汇编语言角色互换

重新定位了汇编语言与 C51 语言的教学目标：C51 语言作为主干编程语言，要求熟练掌握，灵活应用；汇编语言作为辅助编程语言，只要求一般了解，能读懂源程序即可。如此可使读者在仿真工具软件的辅助下，一步到位地掌握实用性强的 C51 语言和适量的汇编语言，为日后解决复杂应用问题打下基础。

3. 设计全新的仿真实验，注重实践能力的培养

针对单片机实物实验难以提供充足的动手实践机会的问题，本教材特别设计与重要知识点衔接、具有设计性与综合性特点、基于仿真软件的一套全新教学实验。为了配合课前预习，实验指导中附有内容丰富的阅读材料。利用 Proteus 和 Keil C 近似真实的单片机软、硬件运行环境，为读者打造一个可自由发挥潜力、循序渐进提高应用技能的实践平台。

编 者

目 录

第 1 章 单片机基础知识概述	1
1.1 单片机概述	1
1.1.1 单片机及其发展概况	1
1.1.2 单片机的特点和应用	2
1.1.3 单片机的发展趋势	3
1.1.4 MCS-51 单片机	4
1.2 单片机学习的预备知识	6
1.2.1 数制及其转换	6
1.2.2 有符号数的表示方法	8
1.2.3 二-十进制代码 (BCD 码)	9
1.3 Proteus 应用简介	10
本章小结	13
习题	13
第 2 章 MCS-51 单片机的结构及原理	14
2.1 MCS-51 单片机的内部结构	14
2.1.1 MCS-51 单片机的组成	14
2.1.2 MCS-51 单片机的外部引脚及其功能	17
2.2 MCS-51 单片机的存储器结构	18
2.2.1 存储器的划分方法	18
2.2.2 程序存储器	19
2.2.3 数据存储器	20
2.2.4 特殊功能寄存器	22
2.3 I/O 端口	25
2.3.1 并行 I/O 端口	25
2.3.2 串行 I/O 端口	29
2.4 单片机的复位、时钟与时序	29
2.4.1 复位与复位电路	29
2.4.2 时钟电路	30

2.4.3 单片机时序	31
本章小结	32
习题	32
第3章 MCS-51 单片机汇编语言程序设计	33
3.1 汇编语言程序设计概述	33
3.1.1 汇编语言的特点	33
3.1.2 汇编语言的语句格式	34
3.1.3 描述操作数的简记符号	34
3.1.4 汇编语言程序设计的步骤	34
3.2 MCS-51 单片机指令系统简介	35
3.2.1 MCS-51 单片机指令系统	35
3.2.2 伪指令	35
3.3 单片机汇编语言程序的基本结构形式	36
3.3.1 顺序程序	36
3.3.2 分支程序	36
3.3.3 循环程序	38
3.4 MCS-51 单片机汇编语言程序设计举例	39
3.4.1 算术运算程序	39
3.4.2 数制转换程序	40
3.4.3 定时程序	41
3.4.4 查表程序	41
3.4.5 数据极值查找程序	42
3.4.6 数据排序程序	43
本章小结	44
习题	44
第4章 C 语言程序设计	46
4.1 数据类型	46
4.1.1 变量与常量	48
4.1.2 整型数据	49
4.1.3 浮点型数据	50
4.1.4 字符型数据	50
4.1.5 位类型	51
4.2 运算符及表达式	51

4.2.1	算术运算符及表达式	51
4.2.2	关系运算符及表达式	52
4.2.3	逻辑运算符及表达式	53
4.2.4	赋值运算符及表达式	54
4.2.5	移位运算符及表达式	54
4.2.6	位运算符及表达式	55
4.2.7	运算符的优先级和关联性	55
4.3	程序控制结构	56
4.3.1	条件结构	56
4.3.2	开关结构	60
4.3.3	循环结构	61
4.4	函数	64
4.4.1	常用标准库函数	65
4.4.2	函数定义	68
4.4.3	函数的调用	69
4.5	指针与数组	70
4.5.1	指针	70
4.5.2	数组	71
	本章小结	74
	习题	74
第 5 章	开发工具——Proteus 和 Keil C	75
5.1	Proteus 环境	75
5.1.1	ISIS 的界面简介	75
5.1.2	ISIS 工具栏	78
5.1.3	仿真控制按钮	79
5.1.4	原理图设计	79
5.2	Keil C 环境	84
5.2.1	Keil 的配置	85
5.2.2	Keil 的调试	86
5.3	Keil 和 Proteus 联合编程	87
	本章小结	91
	习题	92

第6章 开发工具——单片机 I/O 端口应用	93
6.1 LED 及数码管	93
6.2 按键及键盘	97
6.3 蜂鸣器和扬声器	102
6.4 I/O 应用举例	103
本章小结	112
习题	112
第7章 单片机的中断系统	113
7.1 中断的基本概念	113
7.2 中断处理过程	114
7.3 单片机中断控制	116
7.3.1 5 级中断源	116
7.3.2 中断寄存器	117
7.3.3 中断响应及中断服务控制	119
7.4 中断应用举例	120
本章小结	128
习题	129
第8章 单片机的定时/计数器	130
8.1 定时/计数器的结构	130
8.1.1 定时/计数器的工作原理	130
8.1.2 定时/计数器的结构	131
8.2 定时/计数器的控制	131
8.2.1 TMOD	131
8.2.2 TCON	132
8.3 定时/计数器的工作方式	133
8.4 定时/计数器应用举例	134
8.4.1 初值计算	134
8.4.2 编程举例	135
本章小结	145
习题	145
第9章 单片机的串行口应用	146
9.1 通信的基本概念	146
9.1.1 并行通信与串行通信	146

9.1.2	同步通信与异步通信	147
9.1.3	波特率	148
9.1.4	单工制式、半双工制式、双工制式	149
9.2	串行口内部结构	149
9.3	串行口的控制	150
9.3.1	串行口控制寄存器 SCON (98H)	150
9.3.2	电源控制寄存器 PCON (87H)	150
9.4	工作方式	151
9.4.1	工作方式 0	151
9.4.2	工作方式 1	151
9.4.3	工作方式 2、方式 3	151
9.4.4	MCS-51 单片机串行口的波特率	152
9.5	应用举例	153
	本章小结	156
	习题	156
第 10 章	单片机的 A/D 和 D/A 应用	157
10.1	ADC0809	157
10.1.1	ADC0809 的内部逻辑结构	157
10.1.2	引脚结构	158
10.1.3	ADC0809 应用说明	159
10.2	DAC0832	161
10.2.1	D/A 转换概念	161
10.2.2	分辨率概念	161
10.2.3	DAC0832 引脚功能	162
10.2.4	DAC0832 的结构与工作方式	162
10.2.5	DAC0832 的外部连接	163
10.2.6	DAC0832 应用举例	163
	本章小结	167
	习题	167
附录一	实验指导	168
实验一	数据传送	168
实验二	闪烁灯	170
实验三	跑马灯	172

实验四 串联/并联转换.....	174
实验五 数码管显示.....	176
实验六 I ² C 总线实验	179
实验七 定时器实验.....	183
实验八 串口通信.....	185
实验九 称重实验.....	187
实验十 电子时钟实验.....	190
附录二 MCS-51 单片机指令系统及指令解释.....	195
参考文献.....	200

第 1 章

单片机基础知识概述



内容概述

本章主要介绍单片机的定义、发展历史，单片机分类方法、应用领域及发展趋势，单片机中数的表示和运算方法、基本逻辑电路，以及与单片机系统仿真工具 Proteus 相关的内容。



教学目标

1. 了解单片机的概念及特点
2. 了解单片机中数的表示和运算方法，以及基本逻辑门电路
3. 初步了解 Proteus 软件的功能

1.1 单片机概述

单片机是一个单芯片形态、面向控制对象的嵌入式应用计算机系统，它的出现及发展使计算机技术从通用型数值计算领域进入智能化的控制领域。从此，计算机技术在两个重要领域——通用计算机领域和嵌入式计算机领域都得到了极其重要的发展，并正在深刻地改变着我们的社会。

1.1.1 单片机及其发展概况

1. 单片机的概念

所谓单片机，即把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、输入/输出接口电路、定时/计数器，以及串行通信接口等集成在一块芯片中，构成一个完整的微型计算机。单片机早期的含义为单片微型计算机（Single Chip Microcomputer），直接译为单片机。

由于单片机面向的是测控对象，突出的是控制功能，所以它从功能和形态上来说都是应控制领域应用的要求而诞生的。随着技术的发展，单片机在芯片内集成了许多面向测控对象的接口电路，如 ADC、DAC、高速 I/O 口、PWM、WDT 等，这些对外电路及外设接口已经突破了微型计算机（Microcomputer）传统的体系结构，所以反映单片机本质更为确切的名称应是微控

制器。

单片机是单芯片形态作为嵌入式应用的计算机,它有惟一的、专门为嵌入式应用而设计的体系结构和指令系统,加上它的芯片级体积的优点和在现场环境下可高速可靠地运行的特点,又被称为嵌入式微控制器(Embedded Micro Controller)。但是,在国内单片机的叫法仍然有着普遍的意义。

目前按内部数据通道的宽度,单片机分为4位、8位、16位及32位单片机。

2. 单片机的发展

单片机出现的历史并不长,它的产生与发展和微处理器的产生与发展大体上同步。

1970年,微型计算机研制成功后,美国Intel公司随即在1971年生产出了4位单片机4004,它的特点是结构简单、功能单一、控制能力较弱,但价格低廉。1976年,Intel公司推出了MCS-48系列单片机,它以体积小、功能全、价格低等特点获得了广泛的应用,成为单片机发展进程中的一个重要阶段,此可算是第一代单片机。

20世纪80年代初,Intel公司在MCS-48系列单片机的基础上,推出了第二代单片机的代表MCS-51系列单片机。这一代单片机的主要技术特征是为单片机配置了完美的外部并行总线和串行通信接口,规范了特殊功能寄存器的控制模式,并为增强控制功能而强化布尔处理系统和相关的指令系统,为发展具有良好兼容性的新一代单片机奠定了良好的基础。

近几年出现了具有许多新特点的单片机,可称之为第三代单片机。它以新一代的80C51系列单片机为代表,同时16位单片机也有很大发展。

尽管目前单片机品种繁多,但其中最为典型的仍属Intel公司的MCS-51系列单片机,它的功能强大,兼容性强,软硬件资料丰富,国内也以此系列的单片机应用最为广泛。直到现在,MCS-51单片机仍为单片机中的主流机型,在今后相当长的时间内,单片机应用领域中的8位机主流地位不会改变。

1.1.2 单片机的特点和应用

一块单片机芯片就是一台具有一定规模的微型计算机,加上必要的外围器件就可以构成一个完整的计算机硬件系统。单片机的应用正在使系统的控制技术发生巨大的变化,它是对传统控制技术的一场革命。

1. 单片机的特点

单片机独特的结构决定了它具有如下特点。

1) 高集成度、高可靠性

单片机将各功能部件集成在一块晶体芯片上,集成度高,体积小。芯片本身按工业测控环境要求设计,内部布线很短,其抗工业噪音性优于通用的CPU。单片机程序指令、常数及表格等固化在ROM中,不易破坏,许多信号通道均在一个芯片内,可靠性高。

2) 控制功能强

为了满足对对象的控制要求,单片机的指令系统具有极丰富的条件,如分支转移能力、I/O口的逻辑操作及位处理能力,非常适用于专门的控制功能。

3) 低电压、低功耗

为了满足便携式系统应用的需求,许多单片机内的工作电压仅为1.8V~3.6V,而工作电流

仅为数百微安。

4) 优异的性能价格比

单片机的性能极高。为了提高速度和运行效率,单片机使用 RISC 流水线和 DSP 等技术,其寻址能力突破了 64kB 的限制,有的可达 1MB 和 16MB,片内的 ROM 容量可达 62MB, RAM 容量则可达 2MB。

由于单片机的广泛使用,因而销量极大,各大公司的商业竞争更使其价格十分低廉,其性能价格比极高。

2. 单片机的应用领域

随着单片机功能的飞速发展,其应用范围,已远远超出了计算机科学的领域,小到玩具、信用卡,大到航天器、机器人,从数据采集、过程控制、模糊控制等智能系统到人类的日常生活,到处都有单片机的身影。

单片机主要的应用领域如下。

1) 在测控系统中的应用

单片机可以用来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,工业上的锅炉控制、电机控制、车辆检测系统、水闸自动控制、数控机床及军事上的雷达、导弹系统等。

2) 在智能化仪器仪表中的应用

单片机应用于仪器仪表设备中,促使仪器仪表向数字化、智能化、多功能化和综合化等方向发展。单片机的软件编程技术解决了测量仪表误差修正、线性化处理等难题。

3) 在机电一体化中的应用

单片机与传统的机械产品结合使传统的机械产品结构简化,控制走向智能化,构成新一代的机电一体化产品。这是机械工业发展的方向。

4) 在智能接口中的应用

计算机系统,特别是较大型的工业测控系统中采用单片机进行接口的控制管理,单片机与主机并行工作,可以大大提高系统的运行速度。例如,在大型数据采集系统中,利用单片机对模/数转换接口进行控制,不仅可以提高采集速度,还可以对数据进行预处理,如数字滤波、误差修正、线性化处理等。

5) 在人类生活中的应用

单片机由于其价格低廉、体积小,被广泛应用在人类生活的诸多场合,如洗衣机、电冰箱、空调、电饭煲、视听音响设备、大屏幕显示系统、电子玩具、信用卡、楼宇防盗系统等。

单片机将使人类的生活更加方便舒适,丰富多彩。

1.1.3 单片机的发展趋势

单片机问世以来,经过 30 多年的发展,已从最初的 4 位机发展到 32 位机,同时体积更小,集成度更高,功能更强大。如今,单片机正朝多功能、多选择、高速度、低功耗、低价格以及大存储容量、强 I/O 功能及结构兼容方向发展。

综观单片机 30 多年的发展历程,结合半导体集成电路技术和微电子设计技术的发展,我们可以预见未来单片机技术发展的趋势。单片机将朝着大容量高性能化、小容量低价格化、外

围电路的内装化, 以及 I/O 接口功能的增强、功耗降低等方向发展。

1. 单片机的大容量化

单片机内存储器容量进一步扩大。以往片内 ROM 为 1kB 到 8kB, RAM 为 64 字节到 256 字节, 现在片内 ROM 可达 40kB, 片内 RAM 可达 4kB, I/O 也不需要外加扩展芯片, OTPROM、FlashROM 成为主流供应状态。

随着单片机程序空间的扩大, 在空余空间可嵌入实时操作系统 RTOS 等软件, 将大大提高产品的开发效率和单片机的性能。

2. 单片机的高性能化

今后, 技术的发展将不断改善单片机内 CPU 的性能, 加快指令运算速度, 提高系统控制的可靠性, 加强位处理、中断与定时控制功能, 并采用流水线结构, 指令以队列形式出现在 CPU 中, 使其具有更高的运算速度。采用多流水线结构的单片机, 其运算速度比标准的单片机高出 10 倍以上。

单片机的扩展方式从并行总线发展出各种串行总线, 并被工业界接受, 形成一些工业标准, 如 I²C 总线、DDB 总线、USB 接口等。它们采用 3 条数据总线代替现行的 8 位数据总线, 减少了单片机引线, 降低了成本。

3. 单片机的小容量低廉化

小容量低廉的 4 位、8 位是单片机发展方向之一, 其用途是把以往用数字逻辑电路组成的控制电路单片化。专用型的单片机将得到大力发展, 使用专用单片机可最大限度地简化系统结构, 提高可靠性, 使资源利用率最高, 在大批量使用时有可观的经济效益。

4. 单片机的外围电路内装化

随着单片机集成度的提高, 众多的外围功能器件可以集成到单片机内。除了 CPU、ROM、RAM 外, 还可以把 A/D、D/A 转换器, DMA 控制器, 声音发生器, 监视定时器, 液晶驱动电路, 锁相电路等集成在芯片内。为了减少外部的驱动芯片, 进一步增强单片机的并行驱动能力, 有的单片机可以直接输出大电流和高电压, 以便直接驱动显示器。为了进一步加快 I/O 口的传输速度, 有的单片机设置了高速 I/O 口, 可以用最快的速度驱动外部设备或响应外部事件。

5. 单片机将实现全面的低功耗管理

单片机的全盘 CMOS 化和非 CMOS 工艺单片机的淘汰, 将给单片机技术发展带来广阔的天地, 最显著的变革是本身低功耗和低功耗管理技术的飞速发展。低功耗的技术措施可以提高可靠性, 降低工作电压, 使抗噪声和抗干扰等各方面性能得到全面提高, 这是一切电子系统所追求的目标。

1.1.4 MCS-51 单片机

MCS-51 系列单片机是 Intel 公司在总结 MCS-48 系列单片机的基础上于 20 世纪 80 年代初推出的高档 8 位单片机, 其制成及发展与 HMOS 工艺的发展密切相关。HMOS 是高性能的 NMOS 工艺, 而 CMOS 与 HMOS 工艺的结合则产生了 C-HMOS 工艺的产品, 如 80C51、

80C31 等，既保持了 HMOS 高速和高封装密度的特点，又具有 CMOS 低功耗的优点。C-HMOS 工艺的单片机具有掉电保护和冻结运行两种独特的处理方式。MCS-51 系列的基本产品见表 1-1。

表 1-1 MCS-51 系列的基本产品

特征 \ 类型	8051	8051 AH	8052 AH	80C51 BH	83C51 FA	83C51 FB	83C51 GA	83C512 JA	83C512 JC	83C451	83C452
无 ROM 型	8031	8031 AH	8032 AH	8031 BH	80C51 FA	80C51 FB	80C51 GA	80C51 JA	80C152 JC	80C451	80C452
EPROM 型		8751 8751BH	8752 BH	87C51	87C51 FA	87C51 FB	87C51 GA				87C452P
ROM/kB	4	4	8	4	8	16	4	8	8	4	8
RAM/kB	128	128	256	128	256	256	256	128	256	128	256
8 位 I/O 口	4	4	4	4	4	4	4	5	5	7	5
16 位 定时/计数器	2	2	3	2	3	3	2	2	2	2	2
可编程计数器 (PAC)					√	√					
异步串行口 (UART)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
串行扩展口 (SEP)							√				
多功能串行口 (GSC)								√	√		
DMA 通道								2	2		2
A/D 转换器							8				
中断源/中断 向量	6/5	6/5	8/6	6/5	14/7	14/7	8/7	19/11	19/11	6/5	9/8
掉电和空闲 方式				√	√	√	√	√	√	√	√

1. 8051 单片机

这是 MCS-51 系列最基本的产品，其特点如下：

- (1) 一个 8 位的 CPU 中央处理器；
- (2) 一个片内的振荡器及时钟电路；
- (3) 4kB 的应用程序存储器，8051 为掩膜型 (Mask) ROM；
- (4) 128kB 的片内数据存储器；
- (5) 64kB 程序存储器可寻址的地址空间；
- (6) 64kB 数据存储器可寻址的地址空间；
- (7) 两个 16 位可编程的定时/计数器；
- (8) 一个可编程的全双工通用异步接收/发送器 UART；
- (9) 32 条可按位寻址的双向 I/O 线；
- (10) 两个优先级嵌套，5 个中断源的中断结构；

(11) 有很强的布尔处理能力, 即按位处理能力。

8051 尚有两个变体, 即无片内程序存储器 (ROMLESS) 的 8031 和有片内可编程、可改写的 EPROM 8751。现 8751 已完全被 8751H 所取代。

2. 8051AH 单片机

8051AH 单片机以当时较新的 HMOSII 工艺技术制造而成, 其他方面与 8051 完全相同。8031AH 为无片内 ROM 的 8051AH, 8751H 是以 EPROM 取代了 Mask ROM 的 8051AH。

3. 8052AH 单片机

8052AH 单片机也以 HMOSII 技术制成, 与 8051 向上兼容, 其特点如下:

- (1) 有 256 个字节的片内数据存储器;
- (2) 有 8KB 的片内程序存储器;
- (3) 有 3 个 16 位可编程定时器/计数器;
- (4) 中断源增加到 6 个中断结构。

8032AH 为无片内 ROM 的 8052AH, 8752AH 为带片内 EPROM 的 8052AH。

4. 80C51BH 单片机

80C51BH 单片机是采用 C-HMOS 工艺制造生产的 8051, 两者功能完全兼容, 但 80C51BH 的功耗明显低于 8051。80C31 为无片内 ROM 的 80C51BH, 87C51 为带片内 EPROM 的 80C51BH。

对于以上芯片, 若不特指某一具体型号可泛称为 8051 和 8052, 即 8051 除了包括 8051 外, 还包含 8051AH、80C51BH 以及相对应的 8031、8031AH、80C31AH、8751、8751H 及 87C51, 而 8052 还泛指 8052AH、8032AH 和 8052BH。

1.2 单片机学习的预备知识

单片机采用二进制, 学习者需具备必要的数制转换和逻辑门关系等基础知识。为此, 本节仅从单片机学习需要的角度出发, 对二进制和逻辑门关系进行简单介绍, 为未具备相关知识的读者补充知识。如果读者已经掌握了这方面的知识, 可跳过本节直接进行下节的学习。

1.2.1 数制及其转换

1. 数制概述

计算机中常用的表达整数的数制有以下几种。

1) 十进制数

十进制数有 0, 1, 2, …, 9 等 10 个数码元素, 任何一个大小的数字都由这 10 个元素组成。例如, $(475.8)_{10}$ 或 $(475.8)_D$ 可以写成

$$(475.8)_{10} = 4 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 8 \times 10^{-1},$$

它表明: 进制数为 10 (即 $r=10$) 高低位之间关系为逢 10 进 1, 高位至低位的权值为 $10^{n-1}, 10^{n-2}, \dots, 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-m}$, 因此有通式

$$(N)_r = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i \cdot (r)^i,$$

式中 n 是整数部分的位数, m 是小数部分的位数, K_i 是第 i 位的数码, r 表示任意进制的基数, 如二进制数、八进制数和十六进制数等。

2) 二进制数

二进制数有 0, 1 两个数码元素, 基数 $r = 2$, 逢 2 进 1。例如, $(110101.101)_2$ 或 $(110101.101)_B$, 写成通式展开后为

$$(110101.101)_B = 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3},$$

高位至低位的权值为 $2^{n-1}, 2^{n-2}, \dots, 2^2, 2^1, 2^0, 2^{-1}, 2^{-2}, \dots, 2^{-m}$ 。

3) 八进制数

八进制数有 0, 1, ..., 6, 7 等 8 个数码元素, 基数 $r = 8$, 逢 8 进 1。例如, $(356.71)_8$ 或 $(356.71)_O$, 写成通式展开后为

$$(356.71)_O = 3 \times 8^2 + 5 \times 8^1 + 6 \times 8^0 + 7 \times 8^{-1} + 1 \times 8^{-2}$$

高位至低位的权值为 $8^{n-1}, 8^{n-2}, \dots, 8^2, 8^1, 8^0, 8^{-1}, 8^{-2}, \dots, 8^{-m}$ 。

4) 十六进制数

十六进制数有 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F 等 16 个数码元素, 基数 $r = 16$, 逢 16 进 1。例如, $(5A8D.C6)_{16}$ 或 $(5A8D.C6)_H$, 写成通式展开后为

$$(5A8D.C6)_H = 5 \times 16^3 + A \times 16^2 + 8 \times 16^1 + D \times 16^0 + C \times 16^{-1} + 6 \times 16^{-2},$$

高位至低位的权值为 $16^{n-1}, 16^{n-2}, \dots, 16^2, 16^1, 16^0, 16^{-1}, 16^{-2}, \dots, 16^{-m}$ 。

十进制、二进制、八进制和十六进制数之间的关系见表 1-2。

表 1-2 十进制、二进制、八进制和十六进制数的转换关系

十进制	二进制	八进制	十六进制
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F

2. 各种进制数之间的相互转换

数字电路运行在二值的二进制数字信号下, 为了书写方便, 常用八进制和十六进制数表示,