

电子信息工程系列教材



数字电路

主编 熊年禄



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

电子 信息 工程 系列 教材

数 字 电 路

主 编 熊 年 禄

副 主 编 孙 利 华 黄 翠 翠 陈 荣

蔡 红 娟 郭 映 柳 华 梅

编 支: 甘 友 斌

编 改: 杨 益 升

编 校: 文 金 黄 薛 琳 丑 贵



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字电路/熊年禄主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2008. 8

电子信息工程系列教材

ISBN 978-7-307-06465-2

I. 数… II. 熊… III. 数字电路—高等学校—教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 121329 号

责任编辑: 黄金文 刘鹏阶

责任校对: 刘 欣

版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北省通山县九宫印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 12.875 字数: 320 千字

版次: 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-06465-2/TN · 30 定价: 22.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

电子信息工程系列教材

编 委 会

主 任: 王化文

编 委: (以姓氏笔画为序)

王代萍 王加强 李守明 余盛武 殷小贡 唐存琛

章启俊 焦淑卿 熊年禄

执行编委: 黄金文, 武汉大学出版社计算机图书事业部主任, 副编审



内 容 简 介

本书内容遵循“以实用为主，理论够用为度”的原则，注重突出实用性。为适应当前电子技术人才培养的迫切需求，教材介绍了数字电路的基础知识和常规内容，同时还介绍了数字电子技术的新器件、新技术等方面内容，其中包括常用中、大规模数字集成电路的分析与应用，各类常用器件的测试技能等。

全书共分 8 章，包括数字电路基础、基本逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、模拟量和数字量的转换，以及半导体存储器等。

本书深入浅出，重点明确，实例丰富。可以作为高校电子、通信、光电、计算机、电气及自动化等专业的专业基础课教材，尤其适合独立院校电气信息类专业，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。相关专业的《数字逻辑》课程也可使用本教材。

前言

“数字电子技术”是电子、通信、光电、计算机、电气及自动化等电类专业的一门重要的专业基础课。随着电子技术和信息处理技术的迅猛发展,数字电子技术已成为当今电子领域不可或缺的一门学科。为了适应对 21 世纪电子技术人才的培养需要,编者在中国地质大学江城学院等二级学院和高职高专等多所学校的相关专业从教多年,根据多年教学经验和体会,遵循“以实用为主,理论够用为度”的原则,编写了本教材。教材系统地介绍了数字电子技术的基本理论和分析、设计方法,以及常用数字电路电子器件的应用。希望学生在学习完本教材后,能熟悉掌握常用数字电路的基本结构和初步分析方法,为后继课程和将来从事电子技术及相关方面的工作打下良好的基础。

全书共分 8 章。第 1 章介绍了数字电路的基础知识和数字电路的测试方法;第 2 章介绍了基本逻辑门电路及其基本应用;第 3 章介绍了组合逻辑电路,包括逻辑代数、逻辑函数的各种表示方法和化简方法,组合逻辑电路的分析、设计方法,以及常用组合逻辑器件的应用;第 4 章讲述了各类触发器,包括触发器的组成与测试;第 5 章介绍了时序逻辑电路及时序逻辑电路的分析设计和应用;第 6 章介绍了脉冲波形的产生和整形电路;第 7 章介绍了模拟量和数字量的转换接口(A/D 与 D/A)电路及其常用器件;第 8 章简单介绍了半导体存储器的结构和组成。

根据二级学院和高职高专学校教学实际情况而编制的本教材具有不同于其他一些教材的鲜明特色:

1. 针对二级学院和高职高专教学特点,精选教材内容。根据“以实用为主,理论够用为度”的原则,选择学生能在后继课程和今后工作中常用的知识点为基础进行理论讨论和分析计算。因此,本书缩简篇幅,简化了教材的内容。概念描述清晰简练,学习目的明确,内容鲜明实用。

2. 编者注重理论的严谨性,在保持内容的先进性、完整性的同时,叙述力求深入浅出,且注重实用性;本书对每个问题的理论和概念的叙述力求由简到繁,深入浅出。去除了传统教材中的一些复杂的理论推导与计算,着重于结果的应用和物理意义的表述。特别是注重图解法与形象化的描述。

3. 习题的选择“少而精”。根据每章要求学生必须掌握的知识点,精选了相应的习题。这样不仅让学生在练习中加深了知识点的印象,掌握了所要求的知识点,而且也避免了学生学习负担过重而缺乏学习的自信心。可以有更多的精力从事该课程的教学实践和课程设计。

4. 全书结构合理,内容精辟,图文并茂。既方便教师课堂讲授,也有利于学生自学。

通过本课程的教学,学生应具备以下能力:(1)能正确分析常见数字电路;(2)能准确设计简单数字电路;(3)能利用所学知识进行与数字电路相关的电子综合设计。

本书前言、附录由蔡红娟执笔;第 1、7 章由郭映执笔;第 2、4 章由黄翠翠执笔;第 3 章由孙利华执笔;第 5 章由陈荣执笔;第 6 章由熊年禄执笔;第 8 章由柳华梅执笔。全书由

熊年禄统筹、修订定稿。

本书的编写工作离不开中国地质大学江城学院电信学院领导的支持,编写中得到了李守明教授和王化文教授的热情关心和帮助。在本书出版过程中,武汉大学的黄金文副编审和支笛等编辑给予了大力支持和帮助,作者在此一并表示衷心的感谢。在编写过程中,编者借鉴了有关参考资料,在此对参考文献的作者也一并表示深深的谢意。

本教材的先修课程为:《电路分析基础》、《低频模拟电路》。

本课程参考学时为 64 学时,学时分配建议见下表。

序号	内容	理论	实践	合计
1	数字电路基础	6		6
2	基本逻辑门电路	10	4	14
3	组合逻辑电路	12	4	16
4	触发器	8	4	12
5	时序逻辑电路	10	4	14
6	脉冲波形的产生和整形	6	4	10
7	※ 模拟量和数字量的转换	6		6
8	※ 半导体存储器	6		6
合计		64	20	84

※ 为选学部分,根据教学情况可归入到《微机原理与接口技术》等相关课程学习。

作者

2008 年 5 月

电子信息工程系列教材书目

电信技术专业英语

江华圣

光纤通信技术

王加强

低频模拟电路

熊年禄等

现代交换技术

叶 磊等

现代通信技术与系统

陆 韬

数字电路

熊年禄等

目 录

第 1 章 数字电路基础	1
1.1 模拟与数字信号	1
1.1.1 模拟信号	1
1.1.2 数字信号	1
1.2 数制与码制	3
1.2.1 十进制	3
1.2.2 二进制	4
1.2.3 进制转换	5
1.2.4 二进制编码	6
习 题 1	11
第 2 章 基本逻辑门电路	12
2.1 基本逻辑运算	12
2.1.1 与、或、非逻辑运算	13
2.1.2 其他逻辑运算	14
2.1.3 逻辑函数	16
2.1.4 正负逻辑	17
2.2 分立元件门电路	18
2.2.1 二极管与门电路	18
2.2.2 二极管或门电路	19
2.2.3 三极管非门电路	19
2.3 集成 TTL 门电路	20
2.3.1 TTL 与非门电路	20
2.3.2 TTL 与非门的主要技术参数	22
2.3.3 集电极开路与非门和三态输出与非门	24
2.3.4 其他类型的 TTL 门电路	29
2.3.5 TTL 集成逻辑门电路系列简介	30
2.4 集成 CMOS 电路	31
2.4.1 CMOS 反相器	32
2.4.2 CMOS 与非门	33
2.4.3 CMOS 漏极开路门 (OD 门)	34
2.4.4 CMOS 传输门	35
2.4.5 CMOS 逻辑门电路的系列及主要参数	36

2.5 门电路的接口	37
2.5.1 TTL 门驱动 CMOS 门	37
2.5.2 CMOS 驱动 TTL 门	38
2.5.3 TTL 和 CMOS 电路带负载时的接口问题	39
2.5.4 多余输入端的处理	40
习 题 2	40
第 3 章 组合逻辑电路	43
3.1 逻辑函数的代数化简	43
3.1.1 布尔代数（逻辑代数）	43
3.1.2 逻辑函数的布尔代数化简	46
3.2 逻辑函数的卡诺图化简	47
3.2.1 逻辑函数的最小项表达式	47
3.2.2 逻辑函数的卡诺图表示	48
3.2.3 逻辑函数的卡诺图化简	49
3.3 组合逻辑函数的分析和设计	53
3.3.1 组合电路特点和数字描述	53
3.3.2 组合逻辑电路的分析	53
3.3.3 组合逻辑电路的设计	56
3.4 常用组合逻辑器件	59
3.4.1 编码器	59
3.4.2 译码器	65
3.4.3 数据选择器	69
3.4.4 数据分配器	72
3.4.5 数据比较器	73
3.4.6 半加器与全加器	76
3.5 组合逻辑电路中的竞争与冒险	78
习 题 3	79
第 4 章 触发器	82
4.1 基本 RS 触发器	82
4.1.1 基本 RS 触发器的工作原理	82
4.1.2 基本 RS 触发器的功能	83
4.2 同步触发器	84
4.2.1 同步 RS 触发器	84
4.2.2 同步 D 触发器	85
4.2.3 同步 JK 触发器	86
4.2.4 同步 T 触发器	88
4.2.5 同步触发器存在的问题——空翻	88
4.3 主从触发器	88

4.3.1 主从 RS 触发器	88
4.3.2 主从 JK 触发器	90
4.3.3 T 触发器和 T' 触发器	92
4.4 边沿触发器	94
4.4.1 维持—阻塞边沿 D 触发器	94
4.4.2 下降沿触发的 JK 触发器	96
4.4.3 CMOS 主从结构的边沿触发器	97
4.5 集成触发器	99
4.5.1 集成触发器举例	99
4.5.2 触发器功能的转换	101
4.5.3 集成触发器的脉冲工作特性和主要指标	102
习 题 4	105
第 5 章 时序逻辑电路	109
5.1 时序逻辑电路概述	109
5.1.1 时序逻辑电路的结构特点	109
5.1.2 时序逻辑电路的分类	110
5.1.3 时序逻辑电路的表示方法	110
5.1.4 时序逻辑电路的分析方法	111
5.2 计数器	114
5.2.1 二进制计数器	114
5.2.2 非二进制计数器	118
5.2.3 集成计数器 74LS90, 74LS160, 74LS161, 74LS162, 74LS163	120
5.3 寄存器	126
5.3.1 数码寄存器	126
5.3.2 移位寄存器	127
5.3.3 集成寄存器 74LS175、74LS194	128
习 题 5	131
第 6 章 脉冲波形的产生和整形	134
6.1 多谐振荡器	134
6.1.1 多谐振荡器电路原理	134
6.1.2 石英晶体振荡器	135
6.2 单稳态触发器	136
6.2.1 微分型单稳态触发器	137
6.2.2 集成单稳态触发器	139
6.2.3 单稳态触发器的应用	142
6.3 施密特触发器	144
6.3.1 施密特触发器的电路组成和工作原理	144
6.3.2 集成施密特触发器及其应用	146

6.4	555 定时器及其应用	149
6.4.1	555 定时器的内部结构	149
6.4.2	555 定时器的应用	151
习 题 6		154
第 7 章	模拟量和数字量的转换*	157
7.1	D/A 转换器	157
7.1.1	倒 T 型电阻网络 D/A 转换器	157
7.1.2	转换器的主要技术指标	159
7.1.3	集成 D/A 转换器 AD7520、ADC0832 及其应用	159
7.2	ADC 转换器	162
7.2.1	逐次逼近型 A/D 转换器的工作原理	162
7.2.2	A/D 转换器的主要技术指标	163
7.2.3	集成 ADC 转换器 ADC0809 及其应用	164
习 题 7		165
第 8 章	半导体存储器	166
8.1	随机存储器 (RAM)	166
8.1.1	RAM 结构和工作原理	166
8.1.2	RAM 的工作时序图	171
8.1.3	RAM 的存储容量扩展	172
8.1.4	常用集成 RAM	173
8.2	只读存储器 (ROM)	176
8.2.1	MROM 电路结构原理	176
8.2.2	PROM 电路结构原理	177
8.2.3	EPROM 电路结构原理	177
8.2.4	E ² PROM 电路结构原理	178
习 题 8		179
附录 A	美国标准信息交换码 (ASCII)	181
附录 B	二进制数算术运算	182
附录 C	TTL 和 CMOS 逻辑门电路的技术参数	184
附录 D	常用逻辑符号对照表	185
附录 E	习题参考答案	187
参考文献		192

第1章 数字电路基础

随着信息时代的到来,“数字”二字正以越来越高的频率出现在各个领域,如数字手表、数字电视、数字通信、数字控制……数字化已成为当今电子技术的发展潮流。数字电路是数字电子技术的核心,是计算机和数字通信的硬件基础。本章首先介绍数字电路的一些基本概念及数字电路中常用的数制与码;然后讨论数字电路中二极管、三极管的工作方式;最后介绍数字逻辑中的基本逻辑运算、逻辑函数及其表示方法。从现在开始,你将跨入数字电子技术这一神奇的世界,去探索它的奥秘,认识它的精彩。

1.1 模拟与数字信号

1.1.1 模拟信号

电子技术中,被传送、加工和处理的信号有两类:一类是模拟信号,另一类是数字信号。所谓模拟信号是指时间上连续、数值也连续的信号。模拟电路中的电压或电流信号就属于模拟信号,已知这些物理量在时间和数值上均是连续变化的。典型的模拟信号波形如图 1-1 所示。

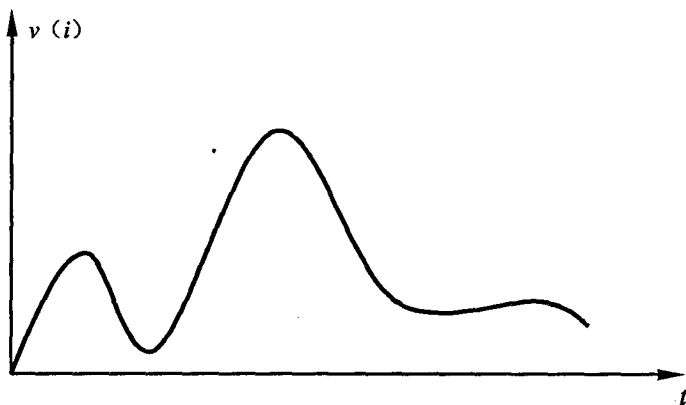


图 1-1 模拟信号

1.1.2 数字信号

数字信号是指在数值和时间上都是离散的、突变的信号,常常被称做“离散”信号,如

图 1-2 所示。数字信号是表示数字量的信号，一般说来数字信号是在两个稳定状态之间作跳跃式变化，它有电位型和脉冲型两种表示形式：①用高低不同电位信号表示数字 1 和 0 的是电位型表示法；②用有无脉冲表示数字 1 和 0 的是脉冲型表示法。

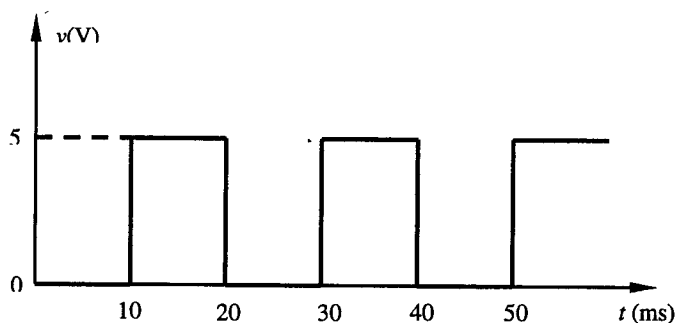


图 1-2 典型的数字信号图

1. 二值数字逻辑、逻辑电平

客观世界中存在相互对立的两种状态，如真和假、是与非、开和关、高电平与低电平等，经常用逻辑“1”和逻辑“0”两个数字来描述。这里的 0 和 1 不是十进制数中的数字，而是逻辑 0 和逻辑 1，被称为二值数字逻辑或数字逻辑。而逻辑电平的高低是物理量的相对表示而非物理量本身。

数字信号是一种二值信号，用两个电平（高电平和低电平）来分别表示两个逻辑值（逻辑 1 和逻辑 0）。实用中有两种逻辑体制：正逻辑与负逻辑。正逻辑体制规定：高电平为逻辑 1，低电平为逻辑 0。负逻辑体制规定：低电平为逻辑 1，高电平为逻辑 0。

2. 数字波形

所谓数字波形就是逻辑电平对时间变化的图形表示。当波形只有两个离散值时，常称之为脉冲波形。常见的脉冲种类包括矩形脉冲、锯齿脉冲、尖脉冲、阶梯波、梯形波、方波、断续正弦波和钟形脉冲等。从其波形就可以看出它们与典型的模拟信号如正弦交流电压、电流波形相比有很大的区别，它们的波形是不连续的、离散的并伴有突然变化。与模拟波形定义相同，数字波形也有周期性和非周期性之分。周期性数字波形也用周期 T 或频率 f 来描述。脉冲波形的频率也常称为脉冲重复频率 PRR。

3. 数字电路

1) 数字电路的分类

数字电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。利用组合逻辑电路和时序逻辑电路可以控制、操作和运算数字系统中的信息。

常将数字集成电路按集成度分为：小规模、中规模、大规模、超大规模、甚大规模等，数字集成电路分类情况见表 1-1。

表 1-1 数字电路分类表

分类	三极管个数	典型集成电路
小规模	最多 10 个	逻辑门电路
中规模	10~100	计算器、加法器
大规模	100~1000	小型存储器、门阵列
超大规模	1000~10 ⁶	大型存储器、微处理器
甚大规模	10 ⁶ 以上	可编程逻辑器件、多功能集成电路

2) 数字电路的分析与测试方法

数字电路中输入信号是“条件”，输出信号是“结果”，因此输入、输出之间存在一定的因果关系，称为逻辑关系。数字电路的主要研究对象就是电路的输出与输入之间的逻辑关系。可以用逻辑表达式、图形和真值表来描述逻辑关系。也可以用硬件描述语言（如 VHDL 语言）分析、仿真与设计数字电路或数字系统。测试仪器主要有数字电压表和电子示波器。

4. 模拟信号与数字信号转换（A/D、D/A 变换）

人类可以感觉接收到的信号（读、听、看、说）都是模拟信号，模拟信号在处理传送过程中易受干扰，保密性差，处理计算方法复杂，而数字信号处理简单，保密性和抗干扰能力强。现代电子信息处理与传送基本上都是将模拟信号转换成数字信号（A/D 变换），经数字系统处理后再转换成模拟信号并为人类或执行机构所接受（D/A 变换）。模拟信号和数字信号之间是可以互相转换的。

信号的数字化（A/D 变换）过程需要三个步骤：抽样、量化和编码。抽样是指用每隔一定时间的信号样值序列来代替原来在时间上连续的信号，也就是在时间上将模拟信号离散化。量化是用有限个幅度值近似原来连续变化的幅度值，把模拟信号的连续幅度变为有限数量的有一定间隔的离散值。编码则是按照一定的规律，把量化后的值用二进制数字表示，然后转换成二值或多值的数字信号流。这样得到的数字信号可以通过电缆、微波干线、卫星通道等数字线路传输。在接收端则与上述模拟信号数字化过程相反，经过后置滤波又恢复成原来的模拟信号以驱动执行机构。

数字电路中经常遇到计数及编码的问题，这就涉及数制与码制。

1.2 数制与码制

1.2.1 十进制

数制也称进位计数制，是人类按照进位的方法对数量进行计数的一种统计规律。在日常生活中，常常用到的是十进制，也就是逢十进一的进位计数制。在数字系统中，常常用到的数制是二进制、八进制和十六进制。

1. 基数、权

基数是指一种数制中所用到的数码个数。一般称基数为 R 的数制为 R 进制，即逢 R 进

一, 它包括 0、1……、 R 等 R 个数码。

位权是指在 R 进位制所表示的数中, 处于某个固定数位上的计数单位。某一个数位上的数值是由这一位上的数字乘以这个数位的位权值得到的。不同的数位上有不同的位权值。例如, 十进制百位的位权值是 10^2 , 千位的位权值是 10^3 , 百分位的位权值是 10^{-2} 等。位权值简称为权。以十进制数 987.65 为例, 有:

$$(987.65)_{10} = 9 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

上式中括号下方数字 R ($=10$) 代表 R ($=10$) 进制, 以下相同。通常在数字后面紧跟一英文字母表示该数为几进制, 例如 D 代表十进制, B 代表二进制, H 代表十六进制, O 代表八进制, 等等。在约定的情况下, 后缀可以省去。

2. 十进制的表达

基数为 10 的数制为十进制, 因此, 在十进制数中, 每位有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个不同的数码, 其进位规律是“逢十进一”。数码所处的位置不同时, 其代表的数值也不同。上例中 987.65 的表达式为典型的十进制的表达。

1.2.2 二进制

基数为 2 的数制为二进制, 因此, 在二进制中, 进位规律是“逢二进一”, 表示数值的数字只有 0 和 1。在数字系统中之所以经常采用二进制, 是因为它的运算很简单。下面给出它的运算规律。

1. 二进制的表达

在数字电路中, 数以电路的状态来表示。找一个具有 10 种状态的电子器件比较困难, 而找一个具有两种状态的器件很容易, 所以数字电路中广泛使用二进制。二进制的数码只有两个, 即 0 和 1。进位规律是“逢二进一”。

二进制数 1101.11 可以用一个多项式形式表示成:

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

对任意一个二进制数可表示为:

$$(N)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 2^i$$

(1) 二进制的加法规律

$$0+0=0; \quad 1+1=1; \quad 0+1=1+0=1;$$

(2) 二进制的乘法规律

$$0 \times 0 = 0; \quad 1 \times 1 = 1; \quad 0 \times 1 = 1 \times 0 = 0;$$

可见, 二进制的运算规律非常简单, 而且因为它每位只有 0 和 1 两种表示, 所以在数字系统中实现起来很方便。人们经常用 0 来表示低电位或晶体管的导通, 用 1 来表示高电位或晶体管的截止等。

2. 二进制的波形

在数字电子技术和计算机应用中, 二值数据常用数字波形来表示。使用数字波形可以使数据比较直观, 也便于使用电子示波器进行监视。图 1-3 表示某计数器的波形。

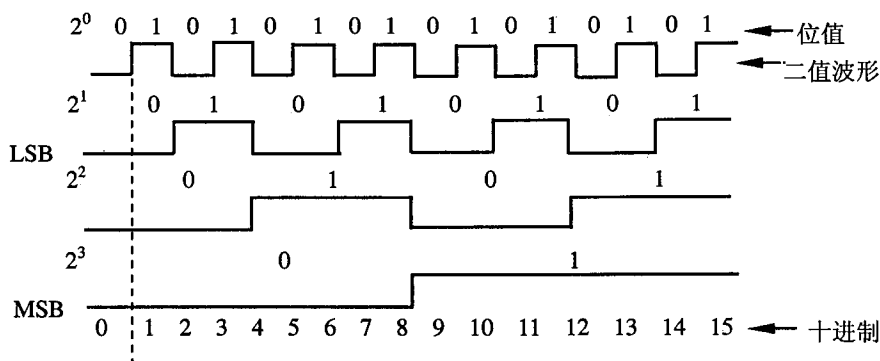


图1-3 用二进制数表示0~15波形图

3. 八进制、十六进制

基数为8的数制为八进制，因此，在八进制中，进位规律是逢八进一，表示数值的数字有8个即0~7。

基数为16的数制为十六进制，因此，在十六进制中，进位规律是“逢十六进一”，十六进制表示数值的数字比较特殊，共有16个，包括0~9十个数字和六个符号A、B、C、D、E、F分别表示十进制的10~15。

1.2.3 进制转换

计算机中存储数据和对数据进行运算采用的是二进制数，当把数据输入计算机中，或者从计算机中输出数据时，要进行不同计数制之间的转换。

1. 二进制转换成十进制

例 1-1 将二进制数 10011.101 转换成十进制数。

解：将每一位二进制数乘以位权，然后相加，可得

$$\begin{aligned}(10011.101)_2 &= 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (19.625)_{10}\end{aligned}$$

2. 十进制转换成二进制

可用“除2取余”法将十进制的整数部分转换成二进制。

例 1-2 将十进制数 23 转换成二进制数。

解：根据“除2取余”法的原理，按如下步骤转换：

$$\begin{array}{rcll} 2 \overline{) 23} & \cdots \cdots \cdots & \text{余 } 1 & b_0 \\ 2 \overline{) 11} & \cdots \cdots \cdots & \text{余 } 1 & b_1 \\ 2 \overline{) 5} & \cdots \cdots \cdots & \text{余 } 1 & b_2 \\ 2 \overline{) 2} & \cdots \cdots \cdots & \text{余 } 0 & b_3 \\ 2 \overline{) 1} & \cdots \cdots \cdots & \text{余 } 1 & b_4 \\ & & 0 & \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{读} \\ \text{取} \\ \text{次} \\ \text{序} \end{array}$$

则

$$(23)_{10} = (10111)_2$$