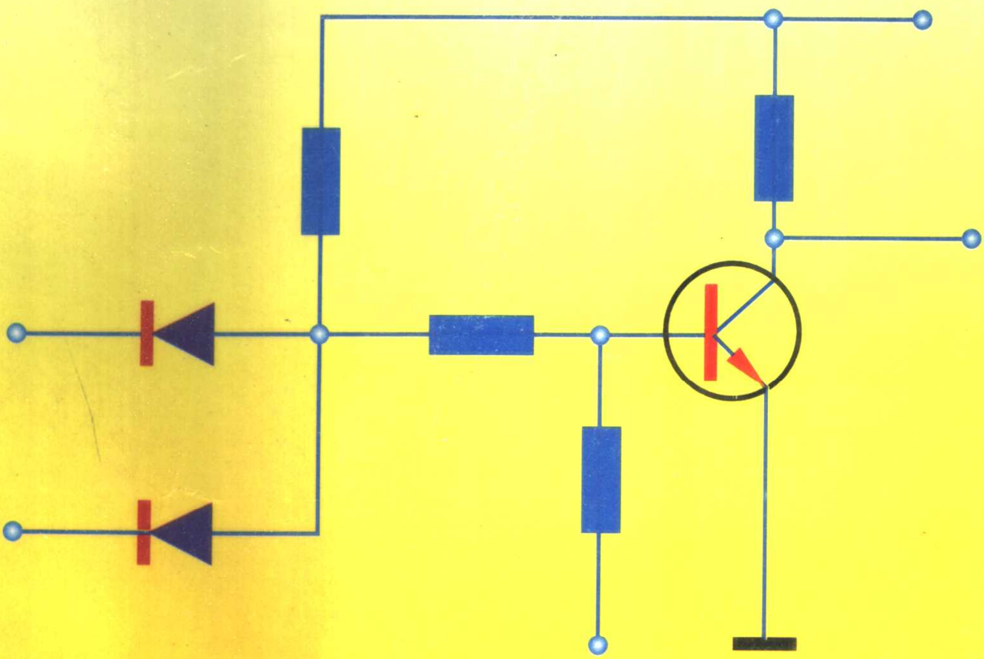
高等师范电子系列教材

数字电子技术基础

禹淑芳　主编
黄庆元　主审



陕西师范大学出版社

图书代号：JC038900

高等师范电子系列教材
数字电子技术基础
鬲淑芳 编 黄庆元 审

陕西师范大学出版社出版发行
（西安市陕西师大 120 信箱 邮政编码 710062）
新华书店经销 西安电子科技大学印刷厂印刷
开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 399 千
1995 年 2 月第 1 版 1998 年 1 月第 2 次印刷
印数：5001—15000
ISBN7－5613－1165－6/O・50
定 价：15.00 元

开户行：西安工行小寨分理处 帐号：216－144610－44－815
读者购书、书店添货或发现印刷装订问题，请与发行科联系、调换。
电话：（029）5251046

前　言

高等师范电子系列教材是由中国电子学会高等师范教学研究会，中国物理学会教育学院分会等组织广大高等师范院校富有教学经验和教材编写经验的教师，根据现代高等师范人才培养特点、电子科学技术的飞速发展和高等师范电子类教材的现状协同编写的。该系列教材包括《模拟电子技术基础》、《数字电子技术基础》、《黑白电视接收机原理与维修》、《彩色电视接收机原理与维修》、《微机原理及应用》、《收录机与立体声系统》、《共用天线系统与卫星接收》、《录像机原理与维修》、《家用电器原理及维修》、《电工学及其应用》等10种。与此同时，还筹划编写一套与系列教材配套的实验指导书和学习指导书。为保证系列教材的质量，成立了由中国电子学会高等师范教学研究会，中国物理学会教育学院分会和高等教育出版社组成的“高师电子系列教材编审委员会”，负责系列教材从编写大纲到内容的全部审订工作。该系列教材的全部编写大纲已分别于1991年4月在陕西咸阳和1993年6月在四川成都召开的有40余所高师院校参加的审订会上审订，各种教材将陆续由高等教育出版社、陕西师范大学出版社出版发行。

本书是在1985～1991年已出版发行的两版电子技术基础教材的基础上，根据全国百余所高师院校多年使用后的意见和建议，并考虑到近年来电子技术、电子工艺、电子产品、电子器件的更新换代，经过大幅度地修改后编成的。全书共8章，包括：数字电路基础；逻辑门电路；组合逻辑电路；触发器；时序逻辑电路；半导体存储器；D／A和A／D转换；脉冲波形的产生与整形电路。

本书的编写原则是：保证基础、推陈出新、强化集成、开阔眼界、着手实际、放眼未来、突出“师范”、简洁明快。

本书在选材和编排方面的最大特点是，第一，以集成为中心。例如在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下，删除了大量分立元件的内容，除第一章外，各章均以中小规模集成电路为中心组织教材，并逐步向大规模集成电路过渡，以尽快地适应电子技术的新发展。第二、以实用为目的。例如，在典型器件、典型电路、典型产品的介绍方面，均以其外部功能和电特性为主，注重其在实际中的应用，各章例题的选用也均侧重于此。借此以培养和提高学生的实际技能。第三、为后续课程铺路。例如，为了便于计算机课程的学习，增设了半导体存储器一章，在其它章节的介绍中也照顾到后续课程的要

求。

本书可作为高等师范院校（含教育学院及有关院校）理科学生数字电子技术基础课程的教材。使用学时为60～70学时，讲授顺序为先模拟后数字。对于理工科非电子类专业的学生，也可作为电子技术基础课的学习参考书；对于电大、函大、夜大、职大等成人教育的同类课程，也可作为教材或教学参考书。

本书的教学大纲在1993年6月成都教材编审会上审订后，由鬲淑芳同志主笔编写了主要章节，李宗领、王时建等同志也参加了部分章节内容的编写和修改，黄庆元教授审订了全部书稿。在此表示深深的谢意。

电子技术日新月异，教育改革不断深化，我们的水平和能力很难跟上科学技术的发展和教育改革的要求，本书稿虽几经修改，但错漏之处亦在所难免，再次恳请广大师生、同行、读者一如既往，不吝赐教，以及时修正错误，将这套系列教材搞得更好。顺表最诚挚的谢意。

编　者

1994年6月于西安

目　　录

第一章　数字电路基础

本章主要介绍数字电路的特点、基本概念和分析数字电路的数学工具及基本方法。本章是学习数字电路的基础。

§1.1　数字电路概述

1.1.1　数字电路的主要特点

处理数字信号的电路叫数字电路。数字信号是用来表示数字量的信号，而数字量则是指在时间上和数量上离散变化的物理量。数字电路的主要特点来源于它所处理的信号是离散信号。

1. 由于数字电路处理的是离散的数字信号，因此，电路中的核心器件如晶体管是工作在饱和区或截止区，即工作在开关状态，而线性放大状态仅是其过渡状态。所以数字电路常被称为开关电路。

2. 数字电路是利用电路状态来反映数字信号状态的，电路中易于得到而又可以严格区分的是两种状态，如晶体管的饱和与截止，开关的通与断，脉冲的有与无等，因此，通常总是用二进制的数码 1 和 0 来表示信号的两种状态，反映在电路上则是高电平和低电平两种状态；

3. 数字电路研究的主要问题是输入信号的状态（1 或 0）与输出信号的状态（1 或 0）之间的逻辑关系，即电路的逻辑功能，因此，数字电路也称为逻辑电路。对于数字信号，只研究它的有无或出现的次数，对其大小并无严格要求。

4. 数字电路都是由几种基本的单元电路组成的，最基本的单元电路是逻辑门和触发器。对于单元电路中的元器件精度要求不高，允许有一定的误差，只要电路工作时能可靠地区分两种状态（1 或 0）就行了；

5. 分析数字电路的主要工具是逻辑代数；研究方法主要是逻辑分析和逻辑设计；描述电路逻辑功能的主要方法是逻辑真值表、逻辑表述式、逻辑图及卡诺图；

6. 数字电路不仅具有普通的算术运算功能，更重要的是具有逻辑运算功能，即具有"逻辑思维"和"记忆"能力。

7. 数字电路主要用来对数字信号进行传输、控制、运算、计数、寄存、显示及数字信号本身的产生、整形和变换等。数字电路已广泛应用于数控装置、数字测量、数字通讯及数字计算机等领域。

8. 数字电路具有速度快、精度高、抗干扰能力强、易于集成等优点。目前，数字电路已全部实现集成化，数字集成电路的种类很多，通常按集成度的大小可分为：

小规模集成电路（Small Scale Integration，简写 SSI），其集成度为 1～10 门／片或 10—100 元件／片，主要是逻辑单元电路，如各种逻辑门、触发器等；

中规模集成电路(Medium Scale Integration，简写 MSI)，其集成度为 10～100 门／片或 100～1000 元件／片，主要是逻辑功能部件，如编码器、译码器、选择器、比较器、寄存器、计数器、算术逻辑运算部件、模／数、数／模转换器等；

大规模集成电路(Large Scale Integration，简写 LSI)，其集成度为 100～1000 门／片或 1000～10000 元件／片，主要是数字逻辑系统，如微型计算机中的中央处理器(CPU)、存储器(ROM、RAM)及各种接口电路(PIO、CTC)等；

超大规模集成电路(Very Large Scale Integration，简写 VLSI)，其集成度在 1000 门／片以上或 10000 元件／片以上，主要是高集成度的数字逻辑系统，如各种单片机等。

1.1.2 数字电路中"数"的表示方法

数字电路中的"数"是用电路状态来表示的，不仅使用了数制，更重要地是使用了码制。

一、数制

计数方法称之为数制。日常生活中人们习惯采用十进制计数，在数字电路中通常采用二进制计数，有时也采用八进制和十六进制计数。

1. 十进制

十进制是以 10 为基数的计数体制,它使用 0～9 十个数码。任何一位十进制的数都可以而且只可以用 0～9 这十个数码中的一个来表示。十进制的进位规则是"逢十进一"，借位规则是"借一当十"。十进制数中，不同数码在不同的位置所代表的数值不同，如 521 中，5 处于百位，代表 500，即 5×10^2；2 处于十位，代表 20，即 2×10^1；1 处于个位，代表 1，即 1×10^0。这样，$521=5\times10^2+2\times10^1+1\times10^0$，显然，式中 10^2、10^1、10^0 是由各数码所处的位置决定的，称之为位权，简称为权。可见，十进制数中各位的权都是 10 的幂，而每个权的系数只能是 0～9 十个数码之一。

一个包含有 n 位整数、m 位小数的十进制数，可以用一般表达式表示为：

$$N_D{}^{①}= a_{n-1}\times10^{n-1}+a_{n-2}\times10^{n-2}+\cdots+a_1\times10^1+a_0\times10^0+a_{-1}\times10^{-1}+\cdots$$
$$+a_{-m}\times10^{-m}=\sum_{i=n-1}^{-m}k_i\times10^i \tag{1.1.1}$$

式中 K_i 是基数 10 的第 i 次幂的系数，只能取 0～9 十个数码中的一个；10^i 是第 i 位的权；m、n 均为正整数；整数部分的权为正次数幂，小数部分的权为负次数幂。由上式亦可明显看出，任意一个十进制数的数值等于各加权系数(乘上权的系数称加权系数)之和。

从数字电路的角度看，采用十进制是很不方便的，因为十进制的 0～9 十个数码需要电路产生十种能严格区分的状态来表示，这显然是难于实现的，所以数字电路不能直接采用十进制计数。

2. 二进制

二进制是以 2 为基数的计数体制，它只有 0 和 1 两个数码。任何一位二进制的数都可以而且只可以用 0 或 1 两个数码来表示。二进制的进位规则是"逢二进一"，借位规则是"借一当二"。同理任何一个二进制的数(包含 n 位整数，m 位小数)都可以用一般表达式表示为：

---

①N_D 中下标D(Decimal)表示十进制。

$$N_B①= b_{n-1}\times 2^{n-1}+ b_{n-2}\times 2^{n-2}+ \cdots + b_1\times 2^1+ b_0\times 2^0+ b_{-1}\times 2^{-1}+ \cdots + b_{-m}\times 2^{-m}= \sum_{i=n-1}^{-m} k_i\times 2^i \tag{1.1.2}$$

式中，K_i是基数 2 的第 i 次幂的系数，只能取 0 或 1 两个数码，各位的权都是 2 的幂，整数部分的权为正次数幂，小数部分的权为负次数幂。同样，二进制数的数值也等于各加权系数之和，

例 1.1.1

$$1011.101_B = 1\times 2^3+0\times 2^2+1\times 2^1+1\times 2^0+1\times 2^{-1}+0\times 2^{-2}+1\times 2^{-3} = 11.625_D$$

可以看出，二进制的数值最终是用十进制的等值数来表示的，这是人们习惯于十进制的缘故。

从数字电路的角度看，采用二进制计数十分方便，因电路易于产生和能严格区分的两种状态正好可用来表示二进制的 0 和 1，所以数字电路广泛采用二进制计数。

3. 八进制和十六进制

八进制和十六进制实际上是二进制的变换形式，为了书写和读数方便，在有些数字系统中（如数字计算机）采用了八进制、十六进制。

(1) 八进制　八进制是以 8 为基数的计数体制,它使用 0～7 八个数码，进位规则是"逢八进一"，借位规则是"借一当八"。同样，任意一个八进制的数，可以用一般表达式表示为

$$N_O②= \sum_{i=n-1}^{-m} K_i\times 8^i \tag{1.1.3}$$

整数部分以 8 的正次数幂为权，小数部分以 8 的负次数幂为权，八进制数的数值亦等于加权系数之和（十进制的等值数)。

例 1.1.2　$751_O=7\times 8^2+5\times 8^1+1\times 8^0=489_D$

从数字电路的角度来看，八进制的基数 $8=2^3$，即用三位二进制的数就可表示一位八进制的数，因此八进制数用于电路时，并不需要 0 和 1 以外的状态。

(2) 十六进制　十六进制是以 $16=2^4$ 为基数的计数体制,它除了使用 0～9 十个数码外，还使用了 A、B、C、D、E、F 这六个特殊数码,其进位规则是"逢十六进一"。整数以 16 的正次数幂为权，小数以 16 的负次数幂为权，其加权系数和的表达式为

$$N_H③= \sum_{i=n-1}^{-m} K_i\times 16^i \tag{1.1.4}$$

一位十六进制的数可以用四位二进制的数来表示，用于数字电路时，也像二进制一样方便。

八进制和十六进制由于极易转换为二进制，不仅电路易于实现，而且同一个数远比二进制的位数少，便于书写和读数，同时使电路的计数容量大为扩大，所以在计算机中获得了广

①N_B 中下标B(Binary)表示二进制。

②N_O 中下标O(Octal)表示八进制。

③N_H 中下标H(Hexadecimal)表示十六进制。

泛应用。

4. 数制之间的转换

由前可知，数字电路采用的主要是二进制、八进制和十六进制计数，而人们习惯于十进制计数，因此，在人与机器进行信息交流的时候，便需要进行数制之间的转换。

(1) 二、八、十六进制数转换成十进制数

二、八、十六进制数转换成十进制的数，其转换方法相同，即只要将相应进制的数按式(1.1.2)、式(1.1.3)和式(1.1.4)求加权系数之和，即得相应的十进制的等值数，举例如前，这里省略。

(2) 十进制数转换成二进制数

十进制数转换成二进制数时，其整数部分和小数部分的转换方法不同，故需分开进行转换。

例 1.1.3 将 157.34_D 转换成二进制的数

先进行整数部分的转换，其转换方法是辗转相除，取余数，逆序排列法。即对整数部分连续用 2 去除，直至商等于零为止，再把余数由低位到高位依次排列，即得等值二进制的数。

辗转相除 ↓

		取余数
2	157	
2	78	…… 1
2	39	…… 0
2	19	…… 1
2	9	…… 1
2	4	…… 1
2	2	…… 0
2	1	…… 0
	0	…… 1

逆序排列 ↑

$$157_D = 10011101_B$$

对于小数部分转换的方法是辗转相乘，取整数，顺序排列法，即将小数部分连续用 2 去乘，取每次乘积的整数部分，然后将这些整数部分按由高到低的顺序依次排列，即得等值二进制的数。

辗转相乘 ↓

	取整数
0.34	
× 2	
0.68	…… 0
× 2	
1.36	…… 1
× 2	
0.72	…… 0
× 2	
1.44	…… 1
× 2	
0.88	…… 0
× 2	
1.76	…… 1
⋮	

顺序排列 ↓

$$0.34_D = 0.010101_B$$

应当指出，在本例中我们人为地结束了运算过程，这必然引入了一定的舍入误差，除非某一次乘 2 运算结果使小数部分等于 0，否则十进制小数不能用有限位二进制小数来表示，因此，舍入是不可避免的。究竟舍入误差取多大，要视具体情况中精度的要求而定。

综合整数和小数部分的转换，即可得到总的转换为：

$$157.34_D = 10011101.010101_B$$

(3) 二进制数与八、十六进制数之间的转换

二进制数转换成八、十六进制数比较容易，因八、十六进制的基数分别为 2^3 和 2^4，故三位二进制的数对应一位八进制的数，即 000～111 对应 0～7；四位二进制的数对应一位十六进制的数，即 0000～1111 对应 0～F，所以二进制数转换成八进制或十六进制数时，将二进制从小数点开始，整数部分自右至左，小数部分自左至右，分别分成三位一组（八进制）或四位一组（十六进制），不够三位或四位的添零补齐，则每组二进制数即对应一位八进制或十六进制的等值数。

例 1.1.4 将 1110100110.1011011_B 分别转换成八进制和十六进制的数。

$$\begin{array}{ccccccccc} & 001, & 110, & 100, & 110. & 101, & 101, & 100_B \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ = & 1 & 6 & 4 & 6. & 5 & 5 & 4_O \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccc} & 0011 & 1010, & 0110. & 1011, & 0110 \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ = & 3 & A & 6. & B & 6_H \end{array}$$

八、十六进制数转换成二进制数则方法与上相反，即将每一位八进制或十六进制的数展开成三位或四位二进制的数，排列顺序不变，则得等值二进制的数。

例 1.1.5 将 753.24_O 和 $4F9E.8C_H$ 分别转换成二进制的数。

$$\begin{array}{cccccc} & 7 & 5 & 3. & 2 & 4_O \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ = & 111, & 101, & 011. & 010, & 100_B \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccccc} & 4 & F & 9 & E. & 8 & C_H \\ & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ = & 0100, & 1111, & 1001, & 1110. & 1000, & 1100_B \end{array}$$

二、码制

1. 代码

由前已知，表示数的符号叫数的代码，简称数码。数码是人们按照特定规则组成的，除了表示数的大小外，还可以用来作为表示特定事物的代号，如"113"中学，"41"次列车，"204"研究所等。这种用来表示特定事物的代号，称为代码。

2. 编码与码制

用代码表示特定事物时，其代码含义是通过人们事先的约定而赋予的。同一代码，约定的方式不同，便可在同一场合表示不同的事物，如 505 号运动员，505 号房间，505 神功元气袋等。这种按约定赋予代码特定含义的过程称为编码。在编码时，可以建立代码与事物之

间任意的对应关系，但是，为了便于记忆和识别代码，人们在编码时，总是遵从一定的规则进行，这些规则称之为码制。

3. 二进制码

在数字电路中常用的码制是二进制。二进制码的基本符号与二进制数的数码相一致,即为 0 和 1，不过，这里的 0 和 1 已无数的含义。用这种符号组成的代码就叫二进制代码。二进制代码不仅可以用来表示二进制的数，还可以用来表示特定事物，如数字电路中的信息等。二进制代码是由若干个 0 和 1 排列而成的，排列占用的位数叫代码的位数或码长。n 位二进制代码有 2^n 种不同的组合，只能代表2^n 个不同的数或事物。如果对 N 项信息或事物进行编码，则需用二进制代码的位数 n 为$N \leqslant 2^n$。

采用不同的编码方法，形成的码各有其规律和特点。常用的二进制码有自然二进码和 BCD 码①。

(1) 自然二进制码

这是一种完全按照二—十进制数之间的转换规律所编排的二进制代码。如若用四位二进制代码编码时，有 $2^4=16$ 种组合，即 0000～1111，可用来代表 0～15 这 16 个十进制的数，其编码表如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1　自然二进制码编码表

十进制数	四位自然二进制码	十进制数	四位自然二进制码
0	0 0 0 0	8	1 0 0 0
1	0 0 0 1	9	1 0 0 1
2	0 0 1 0	10	1 0 1 0
3	0 0 1 1	11	1 0 1 1
4	0 1 0 0	12	1 1 0 0
5	0 1 0 1	13	1 1 0 1
6	0 1 1 0	14	1 1 1 0
7	0 1 1 1	15	1 1 1 1

当然，代码的位数取的越多，产生的代码个数就越多。如取五位自然二进制代码，则可产生 $2^5=32$ 种组合，即 00000～11111，可用来代表 0～31 十进制数或 32 种事物。这种代码的优点是简单易记。

(2) BCD 码

BCD 码也叫二—十进制码，通常是采用四位二进制代码来表示一位十进制的数。由于用四位二进制代码编码时，可以产生 16 种代码，即 0000～1111，而表示 0～9 十个十进制数只需要其中的十种代码就够了。这就需要选择，根据选择形式的不同，便产生了多种 BCD 码，且有有权码和无权码两大类。有权码如 8421 码、2421 码、4221 码、5421 码等，

①BCD码是Binary-Coded-Decimal的缩写。

无权码如余 3 码，循环码等。数字系统中最常用的是 8421 恒权码。表 1.1.2 列出了几种 BCD 码的编码表。

表 1.1.2 几种 BCD 码编码表

编码 / 十进制数	8421 码	5421 码	2421 码	4221 码	余 3 码
0	0000	0000	0000	0000	0011
1	0001	0001	0001	0001	0100
2	0010	0010	0010	0010	0101
3	0011	0011	0011	0011	0110
4	0100	0100	0100	0110	0111
5	0101	1000	1011	0111	1000
6	0110	1001	1100	1100	1001
7	0111	1010	1101	1101	1010
8	1000	1011	1110	1110	1011
9	1001	1100	1111	1111	1100
权	8421	5421	2421	4221	

由表中可以看出，8421 码是采用了四位自然二进制码的前十种代码 0000～1001 来表示 0～9 十个十进制数的，而另外的 1010～1111 六种代码则弃置不用，称为禁止码。8421 码从高位到低位的权依次是 8、4、2、1，码名即由此而来。每一组代码加权系数之和即为之所代表的十进制的等值数，如 $1001=1\times 2^3+1\times 2^0=9$。

其它几种有权码所取四位自然二进码的十种代码情况各有差别，如表中所列，各码从高位到低位的权如各自码名所示。

余 3 码是一种无权码，如果把每一个余 3 码看作四位二进制的数，则它的数值要比它所表示的十进制的等值数多 3，故称之为余 3 码。从表中亦可看出，每一个余 3 码减去相应的 8421 码，结果都等于 3。如十进制数 7 对应的余 3 码为 1010，而对应的 8421 码则是 0111，二者之差为 0011。另外，余 3 码具有互补性，按中轴线对称的码互为反码，如 0011 和 1100，0100 和 1011 等互为反码。

除了数字码之外，还有人们进行信息交换（人机对话等）用的各种字符码，如电传码、键位码等。这些字符码既有国际标准码（如 ASCII 码），又有各国的国家标准码（如我国的国家标准码 SJ939−75）等。目前我国还广泛地发展和使用了汉字编码，如王幼铭的五笔字型（简称王码）等。

1.1.3 数字电路中的"运算"

数字电路不仅具有算术运算功能，更重要的是具有逻辑运算功能。

一、算术运算

1. 无符号数的算术运算

在数字电路中，当两个二进制的数仅表示数量的大小而不考虑其正负时，称它们为无符号数，它们之间可以进行数值运算，这种运算也和十进制数之间的运算一样，称之为无符号数的算术运算。

无符号的二进制数和十进制数使用数码的值和位，其概念是相同的，二者的四则运算法则也是相同的。无符号二进制数的算术运算规则可规结为：

乘法：$0\times 0=0$　　$0\times 1=1\times 0=0$　　$1\times 1=1$

加法：$0+0=0$　　$0+1=1+0=1$　　$1+1=0$(向高位进 1)

减法：$0-0=0$　　$0-1=1$(向高位借 1)　　$1-0=1$　　$1-1=0$

例 1.1.6　无符号二进制数的四则运算

加法运算：

$$\begin{array}{r} 1011011 \\ +\ 1001101 \\ \hline 10101000 \end{array}$$

即 $1011011+1001101=10101000$

减法运算：

$$\begin{array}{r} 1101101 \\ -\ 1001011 \\ \hline 0100010 \end{array}$$

即 $1101101-1001011=100010$

乘法运算：

$$\begin{array}{r} 1011.01 \\ \times\ \ 10.1 \\ \hline 101101 \\ +\ 101101 \\ \hline 11100.001 \end{array}$$

即 $1011.01\times 10.1=11100.001$

除法运算：

$$\begin{array}{r} 1010.111 \\ 10.1\,)\overline{11011.01} \\ \underline{101} \\ 111 \\ \underline{-\ 101} \\ 1001 \\ \underline{-\ 101} \\ 1001 \\ \underline{-\ 101} \\ 1000 \\ \underline{-\ 101} \\ 110 \\ \underline{-\ 101} \\ 1 \end{array}$$

即 $11011.01\div 10.1=1010.111$

(舍入误差以精度要求而定)

四则混和运算顺序与十进制运算完全相同。

2. 有符号数的算述运算

实际中无论是二进制数，还是十进制数，不仅有大小，而且有正负，这种带有正负号