



21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字电子技术

● 主编 余新平



华中科技大学出版社

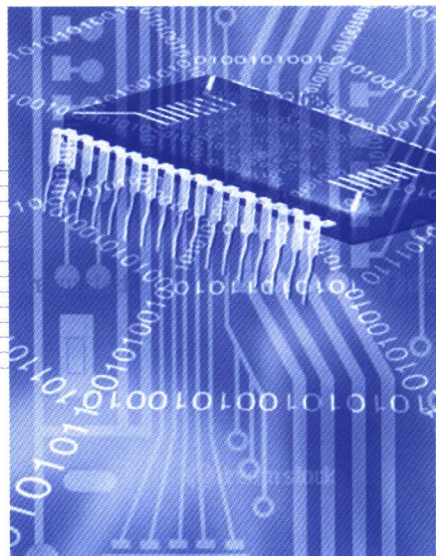
<http://www.hustp.com>



21世纪电气信息学科立体化系列教材

数字电子技术

主 编	佘新平	
副主编	刘 歆	戴丽萍
	张 彦	吴桂华
主 审	张小华	



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/余新平 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年3月
ISBN 978-7-5609-3949-0

I. 数… II. 余… III. 数字电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020505 号

数字电子技术

余新平 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅

责任校对:胡金贤

封面设计:秦茹

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风图文照排中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:19 插页:2

字数:383 000

版次:2007年3月第1版

印次:2007年3月第1次印刷

定价:31.80元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-3949-0/TN·107

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内容简介

本书是根据“教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会制定的“数字电子技术基础”课程教学基本要求编写的。全书共 11 章,主要内容有:数制与编码、逻辑门、逻辑代数基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、存储器与可编程器件、D/A 与 A/D 转换器、脉冲波形的产生与整形电路等。

本书内容丰富,深入浅出,突出工程应用,便于自学。书中提供的 400 多张图、表,700 多道自测练习、例题和习题,能加深学生对所学知识的理解与运用。

本书可作为高等学校电气、电子信息类和部分非电类专业的本科生教材,也可作为高职高专的教材及有关工程技术人员的参考书。

前言

当今正处于一个学习的时代,知识的不断膨胀和更新,给学习者带来了巨大的压力。为学习者提供一本深入浅出、适于自学的教材,是作者多年来一直追求的目标。一本合适的教材,除了在内容方面符合规定的教学要求外,更要立足于读者的基础和需求,按照科学的认知规律,引导读者循序渐进地学习新的知识。

基于上述目的,作者根据多年从事教学工作的经验与体会,参考了大量的国外教材,并吸收了它们的写作风格编写了本书。与目前国内同类教材相比,本书在章节编排顺序及编写内容两个方面做了一些新的尝试,希望能对读者的学习有所帮助。

本书以现代电子技术的发展为背景,全面地介绍了数字电路的基本分析和设计方法。全书共分 11 章,第 1 章介绍各种数制及其相互转换、常用的二进制编码;第 2 章介绍各种集成逻辑门的功能及外部特性,不涉及逻辑门的内部电路分析,便于学生理解;第 3 章介绍逻辑代数的基础知识,以及逻辑函数的化简方法;第 4 章介绍组合逻辑电路的分析和设计方法,并分节讨论各种常用中规模组合逻辑器件及其应用;第 5、6、7 章以触发器、寄存器和计数器为主线介绍时序逻辑电路,并讨论典型时序逻辑电路的分析与设计方法;第 8 章介绍各种存储器,包括目前流行的快闪存储器,以及 PAL、GAL 等可编程器件的应用;第 9、10 章简要介绍 D/A 转换器和 A/D 转换器、多谐振荡器、单稳态触发器和施密特触发器的基础知识及实际应用;第 11 章简单介绍 TTL 和 CMOS 集成电路的内部电路结构和工作原理,该章不影响前面所有内容的学习。限于篇幅,本书没有介绍利用 EDA 工具软件对数字电路进行仿真、分析和设计等内容,这部分内容以及本书的电子教案、自测练习和习题的全部解答均放在与本书配套发行的光盘里,供读者参考。

本书由长江大学余新平任主编,负责制定编写提纲及全书的修改和统稿工作,同时编写第 6、10 章;湖北工业大学刘歆编写第 1、2、11 章;武汉工程大学戴丽萍编写第

4、9 章;武汉科技大学张彦编写第 3、7 章;中南民族大学吴桂华编写第 5、8 章;全书由湖北工业大学张小华担任主审。

在本书的编写过程中,得到了长江大学教务处和电子信息学院的大力支持。长江大学罗炎林、张明波和邹学玉对本书的编写提出过不少建设性建议,华中科技大学出版社王红梅对本书进行了认真修改。在此,向他们表示衷心的感谢!

在本书的编写过程中,作者参考了国内外的大量专著、教材和文献,在此谨向有关著作者致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材编委会

《数字电子技术》编写组

2007 年 1 月

目 录

1 数制与编码	(1)
1.1 数字电路基础知识	(1)
1.2 数制	(4)
1.3 数制转换	(10)
1.4 二进制编码	(16)
本章小结	(23)
习题一	(23)
2 逻辑门	(25)
2.1 基本逻辑门	(25)
2.2 复合逻辑门	(29)
2.3 其他逻辑门	(33)
2.4 集成电路逻辑门	(37)
本章小结	(45)
习题二	(46)
3 逻辑代数基础	(49)
3.1 概述	(49)
3.2 逻辑代数的运算规则	(50)
3.3 逻辑函数的代数化简法	(54)
3.4 逻辑函数的标准形式	(56)
3.5 逻辑函数的卡诺图化简法	(60)
本章小结	(67)
习题三	(68)
4 组合逻辑电路	(71)
4.1 组合逻辑电路的分析	(71)
4.2 组合逻辑电路的设计	(74)
4.3 编码器	(80)
4.4 译码器	(87)
4.5 数据选择器与数据分配器	(95)

4.6	加法器	(102)
4.7	比较器	(106)
4.8	码组转换电路	(108)
4.9	组合逻辑电路的竞争与冒险	(111)
	本章小结	(114)
	习题四	(114)
5	触发器	(119)
5.1	RS 触发器	(119)
5.2	D 触发器	(124)
5.3	JK 触发器	(127)
5.4	不同类型触发器的相互转换	(134)
	本章小结	(136)
	习题五	(136)
6	寄存器与计数器	(139)
6.1	寄存器与移位寄存器	(139)
6.2	异步 N 进制计数器	(146)
6.3	同步 N 进制计数器	(150)
6.4	集成计数器	(154)
	本章小结	(169)
	习题六	(170)
7	时序逻辑电路的分析与设计	(173)
7.1	概述	(173)
7.2	时序逻辑电路的分析	(175)
7.3	同步时序逻辑电路的设计	(181)
	本章小结	(187)
	习题七	(187)
8	存储器与可编程逻辑器件	(191)
8.1	存储器概述	(191)
8.2	RAM	(194)
8.3	ROM	(199)
8.4	快闪存储器	(208)
8.5	存储器的扩展	(211)
8.6	可编程阵列逻辑	(213)
8.7	通用阵列逻辑	(222)
8.8	CPLD、FPGA 和在系统编程技术简介	(229)
	本章小结	(232)

习题八	(233)
9 D/A 转换器和 A/D 转换器	(235)
9.1 概述	(235)
9.2 D/A 转换器	(236)
9.3 A/D 转换器	(243)
本章小结	(248)
习题九	(249)
10 脉冲波形的产生与整形电路	(253)
10.1 概述	(253)
10.2 多谐振荡器	(254)
10.3 单稳态触发器	(258)
10.4 施密特触发器	(262)
10.5 555 定时器及其应用	(265)
本章小结	(270)
习题十	(271)
11 数字集成电路简介	(273)
11.1 TTL 门电路	(273)
11.2 CMOS 门电路	(283)
11.3 数字集成电路的使用	(288)
本章小结	(290)
习题十一	(290)
参考文献	(293)
专业词汇汉英对照	(294)

1

数制与编码

本章首先解释模拟信号、数字信号及其之间的区别,以及数字电路的特点;接着从常用的十进计数制开始,讨论一般的进位计数规则和各种不同数制之间的转换方法,重点讨论二进计数制的基本特点及其在计算机中的表示形式;最后介绍十进制数的二进制编码表示:加权码、非加权码及字符代码。

1.1 数字电路基础知识

本节将学习

- ④ 模拟信号与数字信号的概念及区别
- ④ 数字电路的特点

1.1.1 模拟信号与数字信号

在近代电子工程中,按照所处理的信号形式,通常将电路分成模拟电路和数字电路两大类。模拟电路处理的是模拟信号,数字电路处理的是数字信号。在电子应用中,可测量的信号分为模拟信号和数字信号。

1. 模拟信号

模拟信号是指时间上和幅度上均为连续取值的物理量。在自然环境下,大多数物理信号都是模拟量。温度是一个模拟量,因为它的取值是连续的,在一天的某个时间段内,温度的变化不是从一个值跳变到另一个值,而是在值域范围内连续变化。例如,温度不会在一瞬间从 30°C 跳变到 31°C ,而是经历了 $30\sim 31^{\circ}\text{C}$ 之间的所有值。图 1-1 表示了气象台记录某一天的温度在不同时间的变化情况,这是一条光滑、连续的曲线。其中,纵轴为温度值,横轴为时间。

模拟信号的另一个实例是速度。汽车行驶时,计数器上显示车速,单位是千米每小时(km/h)。如果从 50 km/h 加速到 60 km/h,车速不会从 50 km/h 马上跳变到 60 km/h,而是经历了两者之间所有的速度值,最终到达 60 km/h。加速度越大,车速变化所需的时间就越短,但是仍然不可能瞬间完成加速的全过程。也就是说,速度总是连续变化的,因此也是模拟量。其他模拟量的实例还有声波、压力、距离、时间等,几乎所有的自然现象都是模拟量。

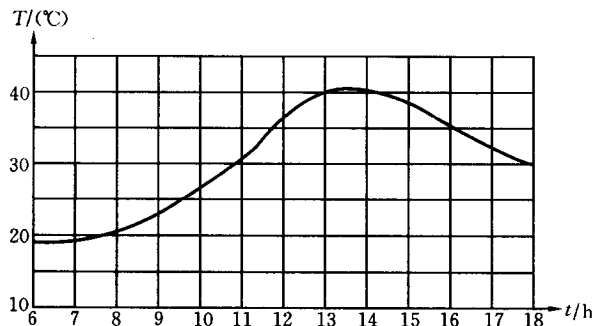


图 1-1 夏季某一天的温度变化曲线

2. 数字信号

数字信号是指时间上和幅度上均为离散取值的物理量。尽管自然界中大多数物理量是模拟的,但仍可以用数字形式来表示。例如图 1-1 所示的温度变化曲线,不考虑温度变化的连续性,只考虑时间轴上整点的温度值,这实际上是对温度曲线的特定点处进行采样,如图 1-2 所示。但应注意的是,它还不是数字信号,只有将各采样值用数字代码表示后才为数字信号。

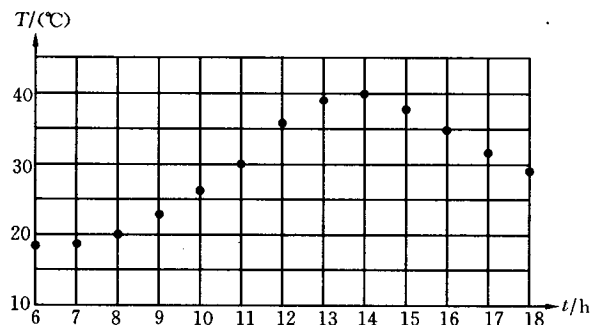


图 1-2 对图 1-1 中模拟量的采样(采样间隔为 1 小时)

数字信号可能是二值、三值或多值信号。但目前数字电路中只涉及二值信号,即用 0、1 表示的数字信号,如图 1-3 所示。这里的 0 和 1 没有大小之分,只表示逻辑关系,即逻辑 0 和逻辑 1,因而称为二值数字逻辑或简称数字逻辑。图 1-3 所示的波形为数字波形是逻辑电平随时间变化的曲线。当电压值在高电平和低电平之间变化时,就产生了数字波

形,数字波形由脉冲序列组成。

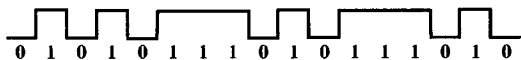


图 1-3 用逻辑 1 和 0 表示的数字信号波形

1.1.2 数字电路的特点

数字电子技术是一门快速发展的技术学科,它的进步产生了计算机技术,计算机已经成为数字系统中最常见、最有代表性的一种设备。大多数民用新产品、工业设备及控制、办公、医疗、军事以及通信设备等都用到了数字电路,其得以广泛应用的主要原因是廉价集成电路的发展,以及显示、存储和计算机技术的应用。

数字电路的结构是以二值数字逻辑为基础的,其中的工作信号是离散的数字信号。电路中的电子器件工作于开关状态。数字电路分析的重点已不是其输入、输出(简称 I/O)间波形的数值关系,而是 I/O 序列间的逻辑关系,所采用的分析工具是逻辑代数,电路功能的表示方法主要是功能表、真值表、逻辑表达式、布尔函数以及波形图。但随着计算机技术的发展,现在则普遍采用硬件描述语言来分析、仿真和设计数字电路或数字系统。

数字电路主要有以下一些特点。

1) 数字系统一般容易设计。这是因为数字系统所使用的电路是开关电路,开关电路中电压或电流值的精确与否并不重要,重要的是其所处的范围(高或低)。

2) 信息的处理、存储和传输能力更强。数字电路在信息的处理、存储和传输方面都比模拟电路更有效、更可靠、数据量更大。

3) 数字系统的精确度及精度容易保持一致。信号一旦数字化,在处理过程中所包含的信息不会降低精度。在模拟系统中,电压和电流信号由于受到信号处理电路中元器件参数的改变及温度、湿度的影响产生失真。

4) 很容易设计一个数字系统,其操作由编程指令控制。模拟系统也可被编程,但其操作实现很复杂。

5) 数字电路抗干扰能力强。在数字系统中,因为电压的准确值并不重要,只要噪声信号不至于影响区别高低电平,则电压寄生波动(噪声)的影响就可忽略不计。

6) 多数数字电路能制造在 IC 芯片上。事实上,模拟电路也受益于快速发展的 IC 工艺,但是模拟电路相对复杂一些,所用器件无法经济地集成在一起(如大容量电容、精密电阻、电感、变压器等),它阻碍了模拟系统达到与数字电路同样的集成度。

当涉及模拟 I/O 时,如果利用数字电路来实现,必须采取下述 3 个步骤。

1) 把实际应用中的模拟输入转换为数字形式;

2) 数字信息处理;

3) 把数字输出变换为模拟输出。

这种变换 I/O 的技术是后面将要学到的 D/A 或 A/D 转换部分的内容。

自测练习

- 1.1.1 表示同一物理量数值的两种基本方法是()和()形式。
- 1.1.2 取值连续的量称为()。
- (a) 数据量 (b) 模拟量 (c) 数字量
- 1.1.3 取值离散的量称为()。
- (a) 模拟量 (b) 二进制量 (c) 数字量
- 1.1.4 指出下列哪些量是模拟量,哪些是数字量()。
- (a) CD 光盘存储的信息 (b) 飞机的飞行高度
- (c) 自行车轮胎的压力 (d) 扬声器中的电流

1.2 数制

本节将学习

- ② 进位计数制、基数与权值的概念
- ② 二进制计数法及构造方式
- ② 最高有效位、最低有效位的概念
- ② 二进制数的加、减、乘、除运算
- ② 八进制和十六进制的计数方法

人们在日常工作和学习中,已经接触过各种各样的数。讨论数的问题,主要是从计算机的角度研究数的表示方法及其特点。

人们在长期的生产实践中,发明了多种不同的计数方法,如现在广泛使用的源于阿拉伯民族文化的十进制数;钟表计时采用的六十进制数;还有 2 只筷子计为 1 双、中国古代的八卦等采用的二进制数表示。在数字系统中常用的进位计数制有十进制、二进制、八进制和十六进制。

说到数制,就有规则性的问题,如十进制采用“逢 10 进 1”的进位规则,六十进制采用“逢 60 进 1”的进位规则。下面给出相关的定义。

表示数码中每一位的构成及进位的规则称为进位计数制,简称数制。

进位计数制也叫位置计数制,其计数方法是把数划分为不同的数位,当某一数位累计到一定数量之后,该位又从零开始,同时向高位进位。在这种计数制中,同一个数码在不同的数位上所表示的数值是不同的。进位计数制可以用少量的数码表示较大的数,因而被广泛采用。

一种数制中允许使用的数码符号的个数称为该数制的基数,记作 R 。而某个数位上数码为 1 时所表征的数值,称为该数位的权值,简称为权。各个数位的权值均可表示成 R^i 的形式,其中 i 是各数位的序号。利用基数和“权”的概念,可以把一个 R 进制数 D 表示为

$$\begin{aligned}
 D_R &= (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_R \\
 &= a_{n-1}\times R^{n-1} + a_{n-2}\times R^{n-2} + \cdots + a_0\times R^0 + a_{-1}\times R^{-1} + \cdots + a_{-m}\times R^{-m} \\
 &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times R^i
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中, n 是整数部分的位数; m 是小数部分的位数; R 是基数, R^i 称为第 i 位的权; a_i 是第 i 位的系数, 是 R 进制中 R 个数字符号中的任何一个, 即 $0 \leq a_i \leq R-1$ 。所以, 某个数位上的数码 a_i 所表示的数值等于数码 a_i 与该位的权值 R^i 的乘积。

式(1-1) 等号左边的形式, 为数制 R 的位置计数法, 也称为并列表示法; 等号右边的形式为 R 进制的多项式表示法, 也称为按权展开式。

注意: 为了避免在用到多种进制时可能出现的混淆, 本书用下标形式来表示特定数的基数, 如用 D_R 表示 R 进制的数 D 。

1.2.1 十进制数

自古以来, 人们在日常生活中习惯使用的是十进计数制, 这可能与人有 10 个手指有关。十进制的基数 R 为 10, 采用 10 个数码符号 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 来表示数的大小(如果是小数, 还需要有一个小数点符号“.”), 这样的若干个数码符号并列在一起即可表示一个十进制数。十进制的表示常用下标 10、D 或缺省标记, 如十进制数 98 可以表示为: 98_{10} , 98_D 或 98。

对照式(1-1), 十进制按权展开式为

$$D_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i \tag{1-2}$$

式中, n 是整数部分的位数; m 是小数部分的位数; a_i 是数码 0 ~ 9 中的一个。

例如, 十进制数 368.25, 小数点左边的第 1 位为个位, 8 代表 8; 左边第 2 位为十位, 6 代表 6×10 ; 左边第 3 位为百位, 3 代表 3×100 ; 小数点右边第 1 位为十分位, 2 代表 2×10^{-1} ; 右边第 2 位为百分位, 5 代表 5×10^{-2} 。由此可以看出, 处于不同位置的数字符号代表着不同的意义, 也就是说有不同的权值。这 5 个数字中 3 的位权最大, 称为最高有效位数字(MSB), 5 的位权最小, 称为最低有效位数字(LSB)。

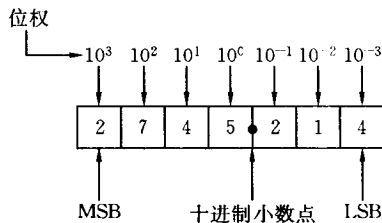


图 1-4 位权用 10 的幂表示

小数点用来区分一个数的整数和小数部分。相对于小数点, 不同位置所含权的大小可用 10 的幂表示, 即十进制数各位的权值为 10^i , i 是各数位的序号。如图 1-4 所示, 以数 2745.214 为例, 以小数点为界, 整数部分为 10 的正次幂, 小数部分为 10 的负次幂, 故其按权展开式为

$$2745.214 = 2 \times 10^3 + 7 \times 10^2 + 4 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 1 \times 10^{-2} + 4 \times 10^{-3}$$

十进制数的计数规律是低位向其相邻高位“逢 10 进 1, 借 1 为 10”。也就是说, 每位数

累计不能超过 10, 计满 10 就应向高位进 1; 而从高位借来的 1, 就相当于低位的数 10。

一般情况, N 位十进制, 可表示 10^N 个不同的数值, 从 0 开始 (包括 0), 其最大数为 $10^N - 1$ 。

1.2.2 二进制数

在数字系统中, 十进制不便于实现。例如, 很难设计一个电子器件, 使其具有 10 个不同的电平 (每一个电压值对应于 0 ~ 9 中的一个数字)。而具有 2 个工作电平的电子电路却很容易设计。因为二进制数只需两个状态即可表示, 与机器的开关状态相对应, 所以容易实现。这就是二进制在数字系统中得到广泛应用的根本原因。此外, 二进制也是数字系统唯一可识别的代码。

所谓二进制, 就是基数 R 为 2 的进位计数制, 它只有 0 和 1 两个数码符号。二进制数一般用下标 2 或 B 表示, 如 101_2 , 1101_B 等。

对照式 (1-1), 二进制按权展开式为

$$D_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 2^i \quad (1-3)$$

式中, n 是整数部分的位数; m 是小数部分的位数; a_i 是数码 0 或 1。

前面有关十进制的论述同样适用于二进制, 二进制也属于位置计数体系。其中每一个二进制数字都具有特定的数值, 它是用 2 的幂所表示的权, 即各位的权值为 2^i , i 是各数位的序号, 如图 1-5 所示。这里, 二进制小数点 (对应于十进制小数点) 左边是 2 的正次幂, 右边是 2 的负次幂。图中所示数值为 1011.101_2 , 为了求得与二进制数对应的十进制数, 可把二进制各位数字 (0 或 1) 乘以位权并相加, 即

$$\begin{aligned} 1011.101_2 &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 8 + 0 + 2 + 1 + 0.5 + 0 + 0.125 \\ &= 11.625_{10} \end{aligned}$$

在二进制中, 二进制数位经常称为“位”。因此, 在图 1-5 所示的数中, 小数点左边有 4 位, 它们是该数的整数部分; 小数点右边有 3 位, 是小数部分。最左边一位是最高有效位 (MSB), 最右边一位是最低有效位 (LSB), MSB 的位权是 2^3 , LSB 的位权是 2^{-3} 。

在二进制中, 仅有“0”和“1”两个符号, 即使如此, 二进制同样可用来表示十进制或其他进制所能表示的任何数, 但用二进制表示一个数所用的位数较多。

用 N 位二进制可实现 2^N 个计数, 可表示的最大数是 $2^N - 1$ 。

例 1-1 用 8 位二进制能表示的最大数是多少?

解 $2^N - 1 = 2^8 - 1 = 255_{10} = 11111111_2$

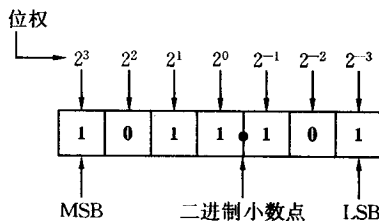


图 1-5 位权用 2 的幂表示

二进制的计数规则是低位向相邻高位“逢 2 进 1, 借 1 为 2”。二进制的四则运算规则很简单, 以下将介绍二进制数的加、减、乘、除四则运算。

1. 二进制加法

二进制的加法运算规则为

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 10 \text{ (“逢 2 进 1”)}$$

上述结果可列加法表, 如表 1-1 所示。

例 1-2 (a) $1010_2 + 111_2 = ?$

(b) $1011.101_2 + 10.01_2 = ?$

解 列出加法算式如下:

$$\begin{array}{r} \text{(a)} \quad 1010 \\ + \quad 111 \\ \hline 10001 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{(b)} \quad 1011.101 \\ + \quad 10.01 \\ \hline 1101.111 \end{array}$$

2. 二进制减法

二进制的减法运算规则为

$$0 - 0 = 0$$

$$1 - 0 = 1$$

$$1 - 1 = 0$$

$$0 - 1 = 1 \text{ (“借 1 当 2”)}$$

上述结果可列减法表, 如表 1-2 所示。

表 1-1 二进制加法

被加数	加数	和	进位
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

表 1-2 二进制减法

被减数	减数	差	借位
0	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
0	1	1	1

例 1-3 (a) $1011_2 - 101_2 = ?$

(b) $1101.111_2 - 10.01_2 = ?$

解 列出减法算式如下:

$$\begin{array}{r} \text{(a)} \quad 1011 \\ - \quad 101 \\ \hline 110 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{(b)} \quad 1101.111 \\ - \quad 10.01 \\ \hline 1011.101 \end{array}$$

3. 二进制乘法

二进制的乘法运算规则为