

现代数字逻辑 电路

前 言

在 20 世纪 90 年代，国际上电子和计算机技术先进的国家，一直在积极探索新的电子电路设计方法，在设计方法、工具等方面进行了彻底的变革，并取得巨大成功。在电子设计技术领域，可编程逻辑器件（如 CPLD、FPGA）的应用，已得到很好的普及，这些器件为数字系统的设计带来极大的灵活性。由于该器件可以通过软件编程而对其硬件结构和工作方式进行重构，使得硬件的设计可以如同软件设计那样方便快捷。这一切极大地改变了传统的数字系统设计方法、设计过程和设计观念。随着可编程逻辑器件集成规模不断扩大，自身功能不断完善和计算机辅助设计技术的提高，使现代电子系统设计领域的 EDA 应运而生。传统的数字电路设计模式，如利用卡诺图的逻辑化简手段、布尔方程表达式设计方法和相应的中小规模集成电路的堆砌技术正在迅速地退出历史舞台。

《现代数字逻辑电路》是基于超高速集成电路硬件描述语言 VHDL（Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Language）编写的。VHDL 作为 IEEE 标准的硬件描述语言和 EDA 的重要组成部分，经过十几年的发展、应用和完善，以其强大的系统描述能力、规范的程序设计结构、灵活的语言表达风格和多层次的仿真测试手段，在电子设计领域受到了普遍的认同和广泛的接受，成为现代 EDA 领域的首选硬件设计语言。专家认为，在新世纪中，VHDL 与 Verilog 语言将承担起几乎全部的数字系统设计任务。

为了保持数字电路内容的完整性和理论的系统性，《现代数字逻辑电路》包括了数制与编码、逻辑代数、门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲单元电路、数模和模数转换等基本内容，但对利用卡诺图的逻辑化简手段、布尔方程表达式设计方法和相应的中小规模集成电路的堆砌技术部分内容进行了适当的删除或节选。考虑到 VHDL 是现代电子设计师必须掌握的硬件设计计算机语言，在数字系统设计中扮演着极其重要的角色，书中新增加了程序逻辑电路、可编程逻辑器件及 VHDL 等内容。

全书逻辑电路图尽可能地采用国标 GB4728.12—85，为了读者习惯，保留了国际和国内的惯用符号。

本书由江国强主编，陆绮荣同志参加了第 3 章、第 4 章和第 8 章部分内容的编写，陈以同志参加了第 10 章的编写。

对于书中的错误和不足之处，恳请读者指正。

编 者

2002 年 7 月

目 录

第1章 数制与编码.....	(1)
1.1 概述.....	(1)
1.1.1 模拟电子技术和数字电子技术.....	(1)
1.1.2 脉冲信号和数字信号.....	(1)
1.1.3 数字电路的特点.....	(2)
1.2 数制及其转换.....	(2)
1.2.1 数制.....	(2)
1.2.2 数制之间的转换.....	(4)
1.3 编码.....	(6)
1.3.1 二-十进制编码.....	(6)
1.3.2 字符编码.....	(6)
本章小结.....	(7)
思考题和习题.....	(8)
第2章 逻辑代数基础.....	(9)
2.1 逻辑代数基本概念.....	(9)
2.1.1 逻辑常量和逻辑变量.....	(9)
2.1.2 基本逻辑和复合逻辑.....	(9)
2.1.3 逻辑函数的表示方法.....	(13)
2.1.4 逻辑函数的相等.....	(15)
2.2 逻辑代数的运算法则.....	(16)
2.2.1 逻辑代数的基本公式.....	(16)
2.2.2 逻辑代数的基本定理.....	(17)
2.2.3 逻辑代数的常用公式.....	(18)
2.2.4 异或运算公式.....	(19)
2.3 逻辑函数的表达式.....	(19)
2.3.1 逻辑函数常用表达式.....	(19)
2.3.2 逻辑函数的标准表达式.....	(21)
2.4 逻辑函数的公式简化法.....	(23)
2.4.1 逻辑函数简化的意义.....	(23)
2.4.2 逻辑函数的公式简化法.....	(24)
2.5 逻辑函数的卡诺图简化法.....	(25)
2.5.1 卡诺图的概念.....	(25)

2.5.2 卡诺图简化法.....	(26)
2.5.3 具有约束的卡诺图的化简.....	(28)
2.5.4 多变量卡诺图的化简.....	(30)
本章小结.....	(31)
思考题和习题.....	(31)
第3章 门电路.....	(33)
3.1 概述.....	(33)
3.2 晶体二极管和三极管的开关特性.....	(34)
3.2.1 晶体二极管的开关特性.....	(34)
3.2.2 晶体三极管的开关特性.....	(38)
3.3 分立元件门.....	(42)
3.3.1 二极管与门.....	(42)
3.3.2 二极管或门.....	(44)
3.3.3 三极管非门.....	(44)
3.3.4 复合逻辑门.....	(45)
3.3.5 正逻辑和负逻辑.....	(47)
3.4 TTL 集成门.....	(48)
3.4.1 TTL 集成与非门.....	(48)
3.4.2 TTL 与非门的外部特性.....	(49)
3.4.3 TTL 与非门的主要参数.....	(54)
3.4.4 TTL 与非门的改进电路.....	(55)
3.4.5 TTL 其他类型的集成电路.....	(56)
3.4.6 TTL 集成电路多余输入端的处理.....	(58)
3.5 其他类型的双极型集成电路.....	(59)
3.5.1 ECL 电路.....	(59)
3.5.2 I^2L 电路.....	(59)
3.6 MOS 集成门.....	(59)
3.6.1 MOS 管.....	(60)
3.6.2 MOS 反相器.....	(62)
3.6.3 MOS 门.....	(64)
3.6.4 CMOS 门的外部特性.....	(67)
本章小结.....	(69)
思考题和习题.....	(69)
第4章 组合逻辑电路.....	(74)
4.1 概述.....	(74)
4.1.1 组合逻辑电路的结构和特点.....	(74)
4.1.2 组合逻辑电路的分析方法.....	(74)
4.1.3 组合逻辑电路的设计方法.....	(75)
4.2 若干常用的组合逻辑电路.....	(77)

4.2.1	算术运算电路.....	(78)
4.2.2	编码器.....	(81)
4.2.3	译码器.....	(84)
4.2.4	数据选择器.....	(88)
4.2.5	数值比较器.....	(91)
4.2.6	奇偶校验器.....	(93)
4.3	采用中规模集成部件实现组合逻辑电路.....	(95)
4.3.1	用译码器实现组合逻辑电路.....	(96)
4.3.2	用数据选择器实现组合逻辑电路.....	(97)
4.4	组合逻辑电路的竞争-冒险现象.....	(100)
4.4.1	竞争-冒险现象及其成因.....	(100)
4.4.2	竞争-冒险的判断方法.....	(101)
4.4.3	消除竞争-冒险现象的方法.....	(101)
	本章小结.....	(102)
	思考题和习题.....	(103)
第5章	触发器.....	(106)
5.1	概述.....	(106)
5.2	基本 RS 触发器.....	(107)
5.2.1	由与非门构成的基本 RS 触发器.....	(107)
5.2.2	由或非门构成的基本 RS 触发器.....	(109)
5.3	钟控触发器.....	(110)
5.3.1	钟控 RS 触发器.....	(110)
5.3.2	钟控 D 型触发器.....	(112)
5.3.3	钟控 JK 触发器.....	(113)
5.3.4	钟控 T 型触发器.....	(115)
5.3.5	钟控 T' 触发器.....	(115)
5.4	集成触发器.....	(116)
5.4.1	主从结构 JK 触发器.....	(116)
5.4.2	边沿 JK 触发器.....	(118)
5.4.3	维持-阻塞结构集成触发器.....	(119)
5.5	触发器之间的转换.....	(120)
5.5.1	用 JK 触发器实现其他类型触发器.....	(121)
5.5.2	用 D 触发器实现其他类型触发器.....	(122)
	本章小结.....	(123)
	思考题和习题.....	(123)
第6章	时序逻辑电路.....	(126)
6.1	概述.....	(126)
6.1.1	时序逻辑电路的结构和特点.....	(126)
6.1.2	时序逻辑电路功能的描述方法.....	(126)

6.1.3	时序逻辑电路的分析方法.....	(127)
6.1.4	同步时序逻辑电路和异步时序逻辑电路.....	(129)
6.2	寄存器和移位寄存器.....	(129)
6.2.1	寄存器.....	(129)
6.2.2	移位寄存器.....	(130)
6.2.3	集成移位寄存器.....	(131)
6.3	计数器.....	(133)
6.3.1	同步计数器的分析.....	(133)
6.3.2	异步计数器的分析.....	(137)
6.3.3	集成计数器.....	(142)
6.4	时序逻辑电路的设计.....	(145)
6.4.1	同步计数器的设计.....	(145)
6.4.2	异步计数器的设计.....	(149)
6.4.3	移存型计数器的设计.....	(152)
6.4.4	一般同步时序逻辑电路的设计.....	(156)
	本章小结.....	(158)
	思考题和习题.....	(159)
第7章	脉冲单元电路.....	(162)
7.1	概述.....	(162)
7.1.1	脉冲电路的分类、结构和波形参数.....	(162)
7.1.2	脉冲波形参数的分析方法.....	(163)
7.1.3	555 定时器.....	(163)
7.2	施密特触发器.....	(165)
7.2.1	用 555 定时器构成施密特触发器.....	(165)
7.2.2	集成施密特触发器.....	(168)
7.3	单稳态触发器.....	(169)
7.3.1	用 555 定时器构成单稳态触发器.....	(169)
7.3.2	集成单稳态触发器.....	(171)
7.4	多谐振荡器.....	(174)
7.4.1	用 555 定时器构成多谐振荡器.....	(174)
7.4.2	用门电路构成多谐振荡器.....	(176)
7.4.3	石英晶体振荡器.....	(177)
7.4.4	用施密特电路构成多谐振荡器.....	(178)
	本章小结.....	(179)
	思考题和习题.....	(179)
第8章	数模和模数转换.....	(181)
8.1	概述.....	(181)
8.2	数模(D/A)转换.....	(182)
8.2.1	D/A 转换器的结构.....	(182)

8.2.2 D/A 转换器的主要技术指标.....	(186)
8.3 模数 (A/D) 转换.....	(187)
8.3.1 A/D 转换器的基本原理.....	(187)
8.3.2 A/D 转换器的类型.....	(189)
8.3.3 A/D 转换器的主要技术指标.....	(194)
本章小结.....	(195)
思考题和习题.....	(195)
第 9 章 程序逻辑电路.....	(197)
9.1 概述.....	(197)
9.1.1 程序逻辑电路的结构及特点.....	(197)
9.1.2 半导体存储器的结构.....	(197)
9.1.3 半导体存储器的分类.....	(199)
9.2 随机存储器.....	(199)
9.2.1 静态随机存储器 (SRAM).....	(199)
9.2.2 动态随机存储器 (DRAM).....	(200)
9.2.3 随机存储器的典型芯片.....	(201)
9.2.4 随机存储器的扩展.....	(203)
9.3 只读存储器.....	(204)
9.3.1 固定 ROM.....	(204)
9.3.2 可编程只读存储器.....	(205)
9.3.3 可擦除可编程只读存储器.....	(205)
9.3.4 ROM 的应用.....	(206)
9.4 可编程逻辑阵列 PLA.....	(209)
9.5 程序逻辑电路的应用.....	(210)
本章小结.....	(210)
思考题和习题.....	(211)
第 10 章 可编程逻辑器件.....	(213)
10.1 可编程逻辑器件的基本原理.....	(213)
10.1.1 可编程逻辑器件的分类.....	(213)
10.1.2 阵列型可编程逻辑器件.....	(215)
10.1.3 现场可编程门阵列 FPGA.....	(220)
10.2 可编程逻辑器件的设计.....	(226)
10.2.1 概述.....	(226)
10.2.2 可编程逻辑器件的设计流程.....	(228)
10.2.3 在系统可编程技术.....	(231)
10.2.4 边界扫描技术.....	(234)
本章小结.....	(235)
思考题和习题.....	(235)
第 11 章 VHDL.....	(236)

11.1 概述.....	(236)
11.2 VHDL入门.....	(237)
11.2.1 VHDL 设计实体基本结构.....	(237)
11.2.2 基本逻辑器件的VHDL描述.....	(240)
11.3 VHDL语言要素.....	(242)
11.3.1 VHDL文字规则.....	(243)
11.3.2 VHDL数据对象.....	(244)
11.3.3 VHDL数据类型.....	(246)
11.3.4 VHDL的预定义数据类型.....	(246)
11.3.5 IEEE预定义的标准逻辑位和矢量.....	(248)
11.3.6 用户自定义数据类型方式.....	(248)
11.3.7 VHDL操作符.....	(249)
11.3.8 VHDL的属性.....	(250)
11.4 VHDL的基本描述语句.....	(251)
11.4.1 顺序语句.....	(252)
11.4.2 并行语句.....	(260)
11.5 VHDL设计平台.....	(269)
11.5.1 编辑VHDL源程序.....	(270)
11.5.2 生成设计元件符号.....	(272)
11.5.3 产生顶层设计文件.....	(272)
11.5.4 编译顶层设计文件.....	(272)
11.5.5 仿真顶层设计文件.....	(273)
11.5.6 下载顶层设计文件.....	(274)
本章小结.....	(274)
思考题和习题.....	(275)
附录 国产半导体集成电路型号命名法.....	(277)

第 1 章 数制与编码

本章介绍脉冲信号和数字信号的特点、数制及其转换、二-十进制编码和字符编码。

1.1 概 述

1.1.1 模拟电子技术和数字电子技术

电子技术可以分为模拟电子技术和数字电子技术。模拟电子技术是分析和处理模拟信号的技术，模拟信号具有在数值上和时间上都是连续的特点，正弦波是模拟信号的典型代表。在模拟电路中，使用的主要器件是晶体管，而且控制晶体管工作在线性区（即放大区），构成信号的放大和正弦振荡电路。

数字电子技术是分析和处理数字信号的技术。数字信号具有在数值上和时间上都是不连续的特点，矩形波是数字信号的典型代表。在数字电路中，使用的主要器件也是晶体管，但控制晶体管工作在非线性区（即截止区和饱和区），构成信号的开关电路。

1.1.2 脉冲信号和数字信号

从狭义上讲，脉冲信号是指在短时间内突然作用的信号，如图 1.1 所示。从广义上讲，除了正弦波或若干个正弦波合成的信号以外的信号都可以称为脉冲信号。由图可见，脉冲波形是不连续的，但一般都有周期性。

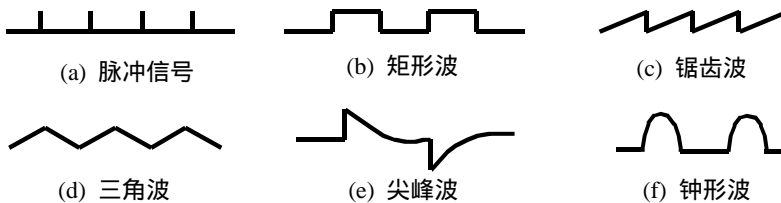


图 1.1 各种脉冲信号波形

数字信号是指由高低两种电平构成的矩形波，通常用“1”表示高电平，用“0”表示低电平。把矩形波按周期划分，就可以得到由 0 和 1 构成的符号组合，如图 1.2 所示。图中的符号组合是“110100011”，它可以代表二进制数字，所以把矩形波称为数字信号。数字信号也是一种脉冲信号，因此一些教材取名为“脉冲与数字电路”。



图 1.2 数字信号波形

1.1.3 数字电路的特点

数字电路只有“与”、“或”、“非”3种基本电路，这些电路对元件的精度要求不高，允许有较大的误差，只要在工作时能可靠地区分高、低两种电平状态就可以了，因此电路简单，而且容易实现。

数字电路容易实现集成化，数字集成电路具有体积小、功耗低、可靠性高等特点。

数字电路用0和1两种状态来表示信息，便于信息的存储、传输和处理。因此，许多现代技术都向着数字技术发展，如数字电话、数字电视等。

数字电路能够对输入的数字信号进行各种算术运算和逻辑运算。所谓逻辑运算，就是按照人们设计好的规则，进行逻辑推理和逻辑判断，得出相应的输出结果。因此，数字电路具有逻辑思维能力，它是计算机以及智能控制电路的基本电路。

由于具有这些显著的特点，数字电路已广泛地应用在计算机、数字通信、智能仪器仪表、自动控制及航天航空等领域中。

1.2 数制及其转换

在数字电路和计算机中，只用0和1两种符号来表示信息，参与运算的数也是由0和1构成的，称为二进制数。考虑到人类计数习惯，在计算机操作时，一般都要把输入的十进制数转换为二进制数后再让计算机处理；而计算机处理的二进制结果也需要转换为便于人类识别的十进制数后显示出来。因此，我们需要学习不同的数制及其转换方法。

1.2.1 数制

用数字量表示物理量的大小时，仅用一位数码往往不够用，因此经常需要用进位计数的方法组成多位数码使用。把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制。常用的数制有十进制、二进制、八进制和十六进制。

1. 十进制

十进制用0~9这10个符号来表示数，计数的基数是10（即使用的符号个数）。超过9的数必须用多位数表示，其中低位和相邻高位之间的关系是“逢十进一”或“借一当十”，故称为十进制。任意一个十进制数 D 均可展开为

$$(D)_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 10^i \quad (1.1)$$

其中 k_i 是第 i 位的系数，它可以是0~9这10个数码中的任何一个。若整数部分的位数是 n ，小数部分的位数是 m ，则 i 包含从 $n-1$ 到0的所有正整数和从-1到 $-m$ 的所有负整数。 10^i 称为第 i 位的权值（即基数的幂次）。例如，按权展开十进制数

$$(125.625)_{10}=1 \times 10^2+2 \times 10^1+5 \times 10^0+6 \times 10^{-1}+2 \times 10^{-2}+5 \times 10^{-3}$$

若以 N 取代式 (1.1) 中的 10, 即可得到任意进制 (N 进制) 数展开式的普遍形式

$$(D)_N = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times N^i \quad (1.2)$$

2. 二进制

二进制用 0 和 1 两个符号来表示数, 计数的基数是 2, 权值为 2^i 。低位和相邻高位之间的关系是“逢二进一”或“借一当二”, 故称为二进制。

根据式 (1.2) 的规则, 任意一个二进制数 D 均可展开为

$$(D)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 2^i \quad (1.3)$$

并可计算出它所表示的十进制数的大小。例如

$$(1101.101)_2=1 \times 2^3+1 \times 2^2+0 \times 2^1+1 \times 2^0+1 \times 2^{-1}+0 \times 2^{-2}+1 \times 2^{-3}=(13.625)_{10}$$

3. 八进制

八进制是用 0~7 这 8 个符号来表示数, 计数的基数是 8, 权值为 8^i 。低位和相邻高位之间的关系是“逢八进一”或“借一当八”, 故称为八进制。

任意一个八进制数 D 均可展开为

$$(D)_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 8^i \quad (1.4)$$

并可计算出它所表示的十进制数的大小。例如

$$(376.65)_8=3 \times 8^2+7 \times 8^1+6 \times 8^0+6 \times 8^{-1}+5 \times 8^{-2}=(254.828125)_{10}$$

4. 十六进制数

十六进制是用 0~9 和 A~F 这 16 个符号来表示数, 计数的基数是 16, 权值为 16^i 。低位和相邻高位之间的关系是“逢十六进一”或“借一当十六”, 故称为十六进制。

任意一个十六进制数 D 均可展开为

$$(D)_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 16^i \quad (1.5)$$

并可计算出它所表示的十进制数的大小。例如

$$(1FD.6C)_{16}=1 \times 16^2+15 \times 16^1+13 \times 16^0+6 \times 16^{-1}+12 \times 16^{-2}=(509.421875)_{10}$$

在数字电路中, 为了区别不同数制表示的数, 可以用括弧加下注脚的方式, 或者用在数字后面加数制后缀的方式。其中, 十进制数的后缀为“D” (Decimal), 二进制数的后缀为“B” (Binary), 八进制数的后缀为“O” (Octonary) 或“Q”, 十六进制数的后缀为“H” (Hexadecimal)。例如

$$(25)_{10}=25D=25 \quad (\text{十进制数的后缀可略})$$

$$(1101.101)_2=1101.101B$$

$$(76.56)_8=76.56Q$$

$$(1FD.6C)_{16}=1FD.6CH$$

都是不同数制的表示形式。

1.2.2 数制之间的转换

把一种数制数转换为另一种数制数称为数制之间的转换。十进制与二进制数之间的转换是最常用的转换。为了方便表示二进制数，有时也需要在二进制数与八进制或二进制数与十六进制数之间转换。

1. 十进制数到 N 进制数的转换

十进制数的整数和小数部分到 N 进制数的转换方法是不同的，整数部分按除以 N 看余数的方法进行，小数部分按乘以 N 看向整数的进位进行。下面以十进制数转换为二进制数为例来讨论这个问题。

假定十进制整数为 $(S)_{10}$ ，等值的二进制数为 $(k_{n-1}k_{n-2}\cdots k_0)_2$ ，依式 (1.3) 可知

$$\begin{aligned}(S)_{10} &= k_{n-1}2^{n-1} + k_{n-2}2^{n-2} + \cdots + k_12^1 + k_02^0 \\ &= 2(k_{n-1}2^{n-2} + k_{n-2}2^{n-3} + \cdots + k_1) + k_0\end{aligned}\quad (1.6)$$

上式表明，若将 $(S)_{10}$ 除以 2，则得到的商为 $k_{n-1}2^{n-2} + k_{n-2}2^{n-3} + \cdots + k_1$ ，而余数即 k_0 ，得到转换后的二进制数的最低位 (LSB)。

同理，将式 (1.6) 中的商除以 2 得到新的商，可写成

$$k_{n-1}2^{n-2} + k_{n-2}2^{n-3} + \cdots + k_1 = 2(k_{n-1}2^{n-3} + k_{n-2}2^{n-4} + \cdots + k_2) + k_1\quad (1.7)$$

由式 (1.7) 看出，若将 $(S)_{10}$ 除以 2 的商再次除以 2，则所得的余数即 k_1 。

依次类推，反复将每次得到的商再除以 2，就可以得到二进制数的每一位了。当 $(S)_{10}$ 被除到 0 时，得到的最后一个余数是 k_{n-1} ，即为转换后的二进制数的最高位 (MSB)。

例如，将 $(62)_{10}$ 转换为二进制数可按照如下方法进行

2	62	...	余数 = 0 = k_0 (LSB)
2	31	...	余数 = 1 = k_1
2	15	...	余数 = 1 = k_2
2	7	...	余数 = 1 = k_3
2	3	...	余数 = 1 = k_4
2	1	...	余数 = 1 = k_5 (MSB)
	0		

故 $(62)_{10} = (111110)_2$ 。

其次讨论小数的转换。若 $(S)_{10}$ 是一个十进制数的小数，对应的二进制数为 $(0.k_1k_2\cdots k_m)_2$ ，依式 (1.3) 可知

$$(S)_{10} = k_{-1}2^{-1} + k_{-2}2^{-2} + \cdots + k_{-m}2^{-m}$$

将上式两边同乘以 2 得到

$$2(S)_{10} = k_{-1} + (k_{-2}2^{-1} + k_{-3}2^{-2} + \cdots + k_{-m}2^{-m+1})\quad (1.8)$$

上式说明，将小数 $(S)_{10}$ 乘以 2 所得乘积的整数部分即 k_{-1} ，这是转换后的二进制小数的最高位 (MSB)。

同理，将乘积的小数部分再乘以 2 又可得到

$$2(k_{-2}2^{-1} + k_{-3}2^{-2} + \cdots + k_{-m}2^{-m+1}) = k_{-2} + (k_{-3}2^{-1} + k_{-4}2^{-2} + \cdots + k_{-m}2^{-m+2})\quad (1.9)$$

亦即乘积的整数部分就是 k_{-2} 。

依次类推，将每次乘 2 后所得乘积的小数部分再乘以 2，便可求出二进制小数的每一位。例如，将 $(0.625)_{10}$ 转换为二进制数时可按照如下方法进行

$$\begin{array}{r}
 0.625 \\
 \times 2 \\
 \hline
 1.250 \quad \dots\dots\dots \text{整数部分} = 1 = k_{.1} \quad (\text{MSB}) \\
 \times 2 \\
 \hline
 0.500 \quad \dots\dots\dots \text{整数部分} = 0 = k_{.2} \\
 \times 2 \\
 \hline
 1.000 \quad \dots\dots\dots \text{整数部分} = 1 = k_{.3}
 \end{array}$$

故 $(0.625)_{10} = (0.101)_2$

请读者注意，按除以 2 看余数的方法，将十进制数的整数部分转换为二进制数时，任何十进制整数经过若干次除以 2 的运算后，最终结果都可以达到 0。因此，十进制整数转换成二进制整数的结果是精确的。而十进制小数部分按乘以 2 看向整数的进位方法转换为二进制小数时，若经过若干次乘以 2 的运算后，其小数部分变为 0 时结束转换，则这些十进制小数转换成二进制小数的结果也是精确的。但是，大部分十进制小数（例如 0.66）不断乘以 2 后，其小数部分结果将永远不会为 0。因此，这部分十进制小数转换为二进制小数的结果是不精确的。在这种情况下，可以按照转换精度的要求，进行若干次乘以 2 的运算后结束转换。

2. N 进制数转换为十进制数

将 N 进制数按权展开后即可转换为十进制数。例如

$$\begin{aligned}
 (1101.011)_2 &= 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} = \\
 &8 + 4 + 0 + 1 + 0.0 + 0.25 + 0.125 = (13.375)_{10} \\
 (376.65)_8 &= 3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 6 \times 8^0 + 6 \times 8^{-1} + 5 \times 8^{-2} = (254.828125)_{10} \\
 (1FD.6C)_{16} &= 1 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 13 \times 16^0 + 6 \times 16^{-1} + 12 \times 16^{-2} = (509.421875)_{10}
 \end{aligned}$$

3. 二进制数与八进制数之间的转换

因为 $2^3=8$ ，所以 3 位二进制数与 1 位八进制数有直接对应关系，即 3 位二进制数直接可写为 1 位八进制数，而 1 位八进制数也可直接写为 3 位二进制数。例如

$$\begin{aligned}
 (11010011.1101101)_2 &= (323.664)_8 \\
 (174.536)_8 &= (1111100.10101111)_2
 \end{aligned}$$

4. 二进制数与十六进制数的转换

因为 $2^4=16$ ，所以 4 位二进制数与 1 位十六进制数有直接对应关系，即 4 位二进制数直接可写为 1 位十六进制数，而 1 位十六进制数也可直接写为 4 位二进制数。例如

$$\begin{aligned}
 (11010011.1101101)_2 &= (D3.DA)_{16} \\
 (17C.5F)_{16} &= (10111100.01011111)_2
 \end{aligned}$$

十进制数到八进制数（或十六进制数）的转换，可以用整数部分按除 8（或除 16）看余数，小数部分按乘 8（或乘 16）看向整数进位的方法进行，但采用这种转换方法时运算比较繁琐。一般采用把十进制数首先转换为二进制数后，再将二进制数写为八进制数或十六进制数方法比较简单。例如

$$(62.625)_{10} = (111110.101)_2 = (76.5)_8 = (3E.A)_{16}$$

1.3 编 码

在数字电路和计算机中，也可以用 0、1 二进制符号表示十进制数、英文字母和一些特殊符号。用二进制符号表示特定信息的过程叫做二进制编码。

1.3.1 二-十进制编码

用 4 位二进制符号表示 1 位十进制数的方法叫做二-十进制编码，也称为 BCD (Binary Coded Decimal) 代码。表 1.1 中列出了几种常见的 BCD 代码，根据编码规则的不同，分为有权码和无权码两类。

表 1.1 几种常用的 BCD 代码

编码种类 十进制数	8421 码	2421 码	4221 码	5421 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	1000	0100	0111
5	0101	0101	1001	1000	1000
6	0110	0110	1010	1001	1001
7	0111	0111	1011	1010	1010
8	1000	1110	1110	1011	1011
9	1001	1111	1111	1100	1100
权值	8421	2421	4221	5421	无

1. 有权码

在有权码的编码方式中，每个代码中的“1”都代表一个固定的十进制数值，称为这一位的权值。把每一位的“1”代表的十进制数值加起来，得到的结果就是它所代表的十进制数值。例如 8421 代码中从左到右每一位“1”的权值分别为 8，4，2，1，所以把这种代码叫做 8421 码。此外，还有 2421 码、4221 码和 5421 码等都是有权码。

2. 无权码

在无权码的编码方式中，每个代码中的“1”都不代表固定数值，因此不能按照有权码的方法找到每个代码代表的十进制数值。一般无权码都有一定的编码规则，例如，余 3 码是由每个 8421 码加上 3 后得到的。

1.3.2 字符编码

用若干位二进制符号表示数字、英文字母、命令以及特殊符号叫做字符编码，常用的字符编码是美国国家信息交换标准码，简称 ASCII (American Standard Code for Information Interchange) 码。ASCII 用 7 位二进制符号 $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1$ 来表示字符和命令。

ASCII 编码表如表 1.2 所示，表中列出了各种命令、数字、字母（含大小写）和一些特殊符号的 ASCII 编码。例如，数字“0”的 ASCII 码是 0110000B 或 30H；“9”是 0111001B 或 39H；“A”是 1000001B 或 41H；“a”是 1100001B 或 61H。

表 1.2 ASCII 编码表

$a_7a_6a_5 \rightarrow$ $\downarrow a_4 a_3 a_2 a_1$	000	001	010	011	100	101	110	111
0000	NUL	DLE	SP	0	@	P	`	p
0001	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010	STX	DC2	”	2	B	R	b	r
0011	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0100	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0101	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0110	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0111	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1000	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1010	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1011	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1100	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1101	CR	GS	-	=	M	]	m	}
1110	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1111	SI	US	/	?	O	-	o	DEL

ASCII 码是目前大部分计算机与外部设备交换信息的字符编码。例如，键盘将按键的字符用 ASCII 码表示送入计算机，而计算机将处理好的数据也是用 ASCII 码传送到显示器或打印机，因此称为信息交换标准码。

本章小结

数字信号是指由高低两种电平构成的矩形波，通常用 1 符号代表高电平，用 0 符号代表低电平。数字电路可以对数字信号进行存储、传输和处理，因此数字电路是计算机的基本电路。用 0 和 1 符号代表的数称为二进制数，它是计算机惟一能识别和处理的数字。为了方便人与计算机的交流，在操作计算机时需要把十进制数转换为二进制数，或者把二进制数转换为十进制数。

0 和 1 两个符号不仅可以直接代表二进制数，也可以代表各种不同的信息。用二进制符号表示信息的方法称为二进制编码，常用的二进制编码有 BCD 码和 ASCII 码。此外，二进制符号还可以对声音和图像进行编码。

数字电路具有许多显著的特点，随着数字技术的发展，数字电路已涉足很多科技领域，例如，自动控制、航空、航天、仪器仪表、智能设备、数字通信及数字电视等。

思考题和习题

1.1 常用的二-十进制编码有哪些？为什么说用 4 位二进制代码对十进制数 10 个数字进行编码的方案有很多？

1.2 将下列十进制数转换成等值的二进制数和十六进制数。要求二进制数保留小数点以后 4 位有效位。

(1) 18D; (2) 225D; (3) 0.565D; (4) 33.625D。

1.3 将下列二进制数转换成等值的十进制数和十六进制数。

(1) 11010001B; (2) 1011000B; (3) 0.101101B; (4) 11.01101B。

1.4 将下列八进制数和十六进制数转换成等值的二进制数。

(1) 56Q; (2) 73.54Q; (3) 3DH; (4) 0F6.2CH。

1.5 通过查表 1.2，得出下列字符 ASCII 码（用十六进制数写出）。

字符	ASCII 码	字符	ASCII 码	字符	ASCII 码	字符	ASCII 码
D		f		#		?	

第2章 逻辑代数基础

本章介绍分析和设计数字逻辑电路功能的数学方法。首先介绍逻辑代数的基本概念、逻辑函数及其表示方法、基本公式、常用公式和重要定理，然后介绍如何应用这些公式和定理简化逻辑函数。

2.1 逻辑代数基本概念

1849年，英国数学家乔治·布尔（George Boole）首先提出了描述客观事物逻辑关系的数学方法——布尔代数。后来，由于布尔代数被广泛地应用于解决开关电路和数字逻辑电路的分析和设计上，所以也把布尔代数叫做开关代数或逻辑代数。逻辑代数是分析和设计数字逻辑电路的数学工具。

2.1.1 逻辑常量和逻辑变量

逻辑代数最基本的逻辑常量是0和1，一般用来代表两种逻辑状态，如电平的高和低、电流的有和无、灯的亮和灭、开关的闭合和断开等。在后续的章节中，还会见到其他逻辑常量，如高阻“Z”、未知“X”等。

逻辑代数中的逻辑变量是由字母或字母加数字组成的，分为原变量和反变量两种。原变量的变量名上没有加“ $\bar{\quad}$ ”号（非号），例如A、B、C、A1是原变量；反变量的变量名上加有“ $\bar{\quad}$ ”号，例如 \bar{A} 、 \bar{B} 、 \bar{C} 、 $\bar{A1}$ 是反变量。原变量和反变量都是用来表示逻辑常量的，但原变量中的值与反变量中的值总是相反的，若A中的值是1，则 \bar{A} 中的值为0，反之亦然。一般把A和 \bar{A} 称为互非，或称为互补。

2.1.2 基本逻辑和复合逻辑

1. 基本逻辑

逻辑代数中的基本逻辑有与、或、非3种。

(1) 与逻辑

与逻辑概念可以从图2.1(a)所示的指示灯控制电路来说明。在此电路中，只有当两个开关A、B同时闭合时，指示灯P才会亮。此例表明，只有决定事物结果的全部条件同时具备时，结果才发生。这种因果关系叫做逻辑与。

在逻辑代数中，可以用真值表、逻辑函数表达式和逻辑符号来表示各种逻辑关系。若用A、B作为输入变量表示开关，“1”表示开关闭合，“0”表示开关断开；用P作为输出变量