分析数字电子技术基础

福建科学技术出版社

责任编辑：王水俤

分析数字电子技术基础
孙寿波　编著
*
福建科学技术出版社出版
（福州得贵巷27号）
福建省新华书店发行
福建新华印刷厂印刷
开本787×1092毫米 1/32 8.75印张 192千字
1986年10月第1版
1986年10月第1次印刷
印数：1—2,400
书号：7211·49　　定价：1.65元

前　　言

本书是参照1980年6月在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议审订的教学大纲编写的。它吸收了全国重点院校选编的教材的精华，参考了国内外较新的文献。编写时，根据数字信号的离散性和不连续性的特点，以逻辑代数为基础，运用逻辑分析的方法来阐明其内容。

全书分为六章：第一章是“逻辑设计基础”。第二章介绍组合逻辑网络的设计方法。第三章为时序逻辑网络，着重介绍集成触发器和同步时序逻辑网络及其设计方法。第四章介绍静态MOS门电路及其触发器；对动态的MOS存贮器也作了简要论述。第五章介绍脉冲的产生与整形。第六章是数字电子设备的读图。附录中附有每章的习题和思考题答案。

本书可作为高等院校自动化、电力类专业试用教材；适合于工程技术人员、高等院校、中等专科学校师生以及广大自学者阅读。

本书承蒙南京工学院李士雄教授审阅，并提出许多宝贵意见和建议，在此敬致谢意。

由于编者水平有限，在内容取舍上难免有挂一漏万等不当之处，甚至错误，欢迎同志们提出批评指正。

编　　者

一九八五年七月

目　　录

第一章　逻辑设计基础……………………………………（ 1 ）
§1—1　二进制与十进制…………………………………（ 1 ）
§1—2　二—十进制（BCD）码……………………………（ 6 ）
§1—3　逻辑代数及其应用………………………………（ 7 ）
§1—4　二极管开关特性…………………………………（ 37 ）
§1—5　三极管开关特性…………………………………（ 40 ）
§1—6　基本逻辑门电路…………………………………（ 46 ）
§1—7　“与非门”的组成及逻辑关系……………………（ 53 ）
§1—8　三极管—三极管集成逻辑门(TTL)……（ 63 ）
§1—9　高阈值逻辑门电路(HTL)…………………（ 81 ）
第二章　组合逻辑电路……………………………………（ 85 ）
§2—1　组合电路的分析方法和设计方法………（ 85 ）
§2—2　编码器……………………………………………（ 87 ）
§2—3　译码器……………………………………………（ 95 ）
§2—4　半加器和全加器…………………………………（102）
§2—5　组合电路在动态过程中的“竞争冒险”…（109）
第三章　时序逻辑电路……………………………………（116）
§3—1　触发器的基本电路………………………………（118）
§3—2　主—从触发器……………………………………（128）
§3—3　维持阻塞触发器…………………………………（135）
§3—4　T触发器及三种类型触发器的相互转换…………………………………………………（142）

§3—5　寄存器……………………………………(154)
§3—6　计数器……………………………………(163)
第四章　MOS数字集成电路……………………………(192)
§4—1　静态MOS反相器和传输门………………(194)
§4—2　静态MOS门电路……………………………(210)
§4—3　静态MOS触发器……………………………(218)
§4—4　动态MOS逻辑电路…………………………(221)
§4—5　存贮器……………………………………(228)
第五章　脉冲波形的产生与整形…………………………(242)
§5—1　脉冲发生器………………………………(242)
§5—2　整形器……………………………………(249)
§5—3　施密特触发器……………………………(256)
第六章　数字电子设备的读图……………………………(263)
参考文献……………………………………………(267)
附录　思考题和习题答案……………………………(269)

第一章　逻辑设计基础

§1—1　二进制与十进制[3]*

数字设计者的主要任务是进行逻辑设计，作为逻辑设计的主要数学工具是逻辑代数。逻辑代数是研究二进制数字运算的一门学科。本节主要讨论什么是二进制，它和十进制之间的转换，及其数字电路中经常采用的几种所谓二——十（BCD）进制表示法。

一、十进制

所谓十进制——有序符号为0，1，2，……9，逢十进一。

例　$3846=3\times10^3+8\times10^2+4\times10^1+6\times10^0$　其中，

10^0，10^1……我们称之为“权”。

如果我们在数字之后加下标，以表示它是什么进制的数，则有：一个n位的十进制数字表示为N_{10}。

$$N_{10}=a_{n-1}\times10^{n-1}+a_{n-2}\times10^{n-2}+\cdots\cdots+a_1\times10^1+a_0\times10^0$$

简写　$a_{n-1}\ a_{n-2}\ \cdots\cdots\ a_1a_0$

二、二进制

人们采用十进制是很自然的，因为人们的手指就是十个。但是数字电路中采用的是二进制。因为数字电路的基本

注〔3〕* 为本书末所附参考文献的编号，下同。

器件——“开关”，只有两个状态：“开”或“关”，“导通”或“截止”。

所谓二进制——有序符号为“0”和“1”，逢二进一。一个n位二进制数字代表：

$$N_2 = b_{n-1}\times 2^{n-1} + b_{n-2}\times 2^{n-2} + \cdots\cdots + b_1\times 2^1 + b_0\times 2^0$$

例 一个二进制数字1101代表十进制的13，这是因为：

$$N_2 = 1\times 2^3 + 1\times 2^2 + 0\times 2^1 + 1\times 2^0 = 8+4+0+1 = (13)_{10}$$

即写作 $(1101)_2 = (13)_{10}$

三、任何数字0，1，2，……（r—1）为有序符号的r进制

二进制不但可以表示整数，也可以表示分数。如一个有n位整数（小数点以前的位数）和m位分数（小数点以后）的十进制数字代表：

$$N_{10} = a_{n-1}\times 10^{n-1} + a_{n-2}\times 10^{n-2} + \cdots\cdots + a_1\times 10^1 + a_0\times 10^0 + a_{-1}\times 10^{-1} + \cdots\cdots + a_{-m}\times 10^{-m}$$

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

同理，一个有n位整数及m位分数的二进制数字代表：

$$N_2 = b_{n-1}\times 2^{n-1} + b_{n-2}\times 2^{n-2} + \cdots\cdots + b_1\times 2^1 + b_0\times 2^0 + b_{-1}\times 2^{-1} + \cdots\cdots + b_{-m}\times 2^{-m}$$

$$= \sum_{i=-m}^{n-1} b_i\times 2^i$$

例 $(1101.101)_2 = 1\times 2^3 + 1\times 2^2 + 0\times 2^1 + 1\times 2^0$

$$+1\times 2^{-1}+0\times 2^{-2}+1\times 2^{-3}$$

$$=8+4+1+\frac{1}{2}+\frac{1}{8}$$

$$=(13.625)_{10}$$

总之，上述表示方法可以推广到任何数字 0，1，2……（r—1）为有序符号的 r 进制。

即

$$N_r=a_{n-1}r^{n-1}+a_{n-2}r^{n-2}+\cdots\cdots+a_1r^1+a_0r^0$$
$$+a_{-1}r^{-1}+\cdots\cdots+a_{-m}r^{-m}$$
$$=\sum_{i=-m}^{n-1}a_ir^i$$

下面我们对其他进制不再作进一步的讨论，读者有兴趣可自阅一些资料。

四、二进制与十进制数字的互相换算

因为数字电路工作在二进制，人们习惯的计数是十进制，所以需要互相转换。

1. 将二进制换算为十进制。由二进制换算为十进制可以采用下式：

$$N_2=\sum_{i=-m}^{n-1}b_i\times 2^i$$

例 将 $(101101.01)_2$ 换算为十进制数。

解

$$(101101.01)_2=1\times 2^5+0\times 2^4+1\times 2^3+1\times 2^2$$
$$+0\times 2^1+1\times 2^0+0\times 2^{-1}+1\times 2^{-2}$$
$$=32+8+4+1+0.25$$
$$=(45.25)_{10}$$

实践中为了方便计算可通过查“二进制的权2^n”表，见表1—1。

表 1—1　二进制的权2^n表

2^n	n	2^{-n}
1	0	1.0
2	1	0.5
4	2	0.25
8	3	0.125
16	4	0.0625
32	5	0.03125
64	6	0.015625
128	7	0.0078125
256	8	0.00390625
512	9	0.001953125
1024	10	0.0009765625
2048	11	0.00048828125
4096	12	0.000244140625
8192	13	0.0001220703125
16384	14	0.00006103515625
32768	15	0.000030517578125
65536	16	0.0000152587890625
131072	17	0.00000762939453125
262144	18	0.000003814697265625
524288	19	0.0000019073486328125
1048576	20	0.00000095367431640625

2. 十进制换算为二进制。十进制换算为二进制仍可用式：

$$N_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i$$

为此需要从表"二进制的权2^n"中找出小于N_{10}中2^n的最大值,从N_{10}中减去,一步步地进行,下例说明了这一演算方法。

例

47			
−32	2^5	1 最高位	
15			
− 0	2^4	0	
15			
− 8	2^3	1	101111
7			
− 4	2^2	1	
3			
− 2	2^1	1	
1			
− 1	2^0	1 最低位	
0			

$\therefore \quad (47)_{10}=(101111)_2$

另外,如果根据 $N_{10}=\sum_{i=-m}^{n-1} b_i\times 2^i$,对于十进制的整数换算为二进制,可以用另一种方法进行——连续除以2,一直进行到商为0,其余数即 b_{n-1}(二进制数)。

例

2 | 53	余	
2 | 26	1 最低位	
2 | 13	0	
2 | 6	1	110101
2 | 3	0	
2 | 1	1	
0 (商)	1 最高位	

所以 $(53)_{10}=(110101)_2$

§1—2 二——十进制(BCD)码[3]

"BCD"码是(Binary —— Coded Decimal)的缩写。

大部分的电子计算机，是用上面所讲的二进码运算的。但还有一些特别是商业用的机器，也有采用十进制的。由于开关元件只具有两个稳定状态，需要有一种利用二进制码来表示十进制数字的编码方法，这就是所谓二——十进制(BCD)码。

我们知道四位二进码可以有十六种组合($2^4=16$)状态：0000，0001，……1111，可以选取其中任意十个状态代表0～9十个数字。自然的办法就是给二进码以8—4—2—1的"权"。如表1—2所示，这就是所谓自然加权二——十进码或8—4—2—1 BCD码。

表 1—2

十进制数	8421BCD码
0	0 0 0 0
1	0 0 0 1
2	0 0 1 0
3	0 0 1 1
4	0 1 0 0
5	0 1 0 1
6	0 1 1 0
7	0 1 1 1
8	1 0 0 0
9	1 0 0 1

一个 n 位的十进码，需要用 n 个四位的二进码来表示。

例　试以 BCD 码来表示$(37.86)_{10}$

解

因为	3	7	8	6
	0011	0111	1000	0110

所以　$(37.86)_{10}=00110111.10000110$

思考题和习题（Ⅰ）

1. 将下列各数按权展开：

① $(11010)_2$；　② $(1011.011)_2$

③ $(7642)_{10}$；　④ $(4211.375)_{10}$

⑤ $(56.743)_8$；

2. 把下列二进制数换算成十进制数：

① 11000101；　② 1010010；

③ 010001；　④ 0.01001；

⑤ 0.011010；　⑥ 1010101.001

3. 二进制数 0000000000～1111111111 可以代表若干个数？而二进制数 000000000000～111111111111 呢？

4. 把下列十进制整数换算成二进制数：

① 51；　② 67；　③ 102；　④ 193

5. 用自然加权 BCD 码表示$(42.73)_{10}$

6. 用自然加权 BCD 码表示$(103.65)_{10}$

7. 用自然加权 BCD 码表示$(9.04)_{10}$

§1—3　逻辑代数及其应用[3] [1]

一、逻辑代数的基本运算规则

1. 三种最基本的逻辑运算“与”、“或”、“非”。

它可用“逻辑函数”和“真值表”来表达（它们是表示逻辑运算的两种有效方法）。

所谓“逻辑函数”——表示开关网络的逻辑运算式。因为数字电路是一种开关电路（开关网络），如图1—1～1—7所示。其中每个开关元件通常只能取两种状态之一，用0或1表示它，信号也只有两个状态，也用0或1表示它。数字电路从它的工作过程来看，总是在一定条件下体现一种因果判断关系（是或非、真或假），这种因果关系反映到数学上通常是以输出变量与输入变量之间的逻辑函数来描述。

所谓“真值表”——以表格的形式来表达逻辑函数的一种方法。真值表内容包括两部分：一是所有的输入量各种可能的组合，另一是表示其相应输出“0”或“1”。

（1）“与”——逻辑乘法“·”。“与”代表意义——由两个或更多个开关相互串联而完成的一种逻辑运算。如图1—1所示。

图1—1 与门

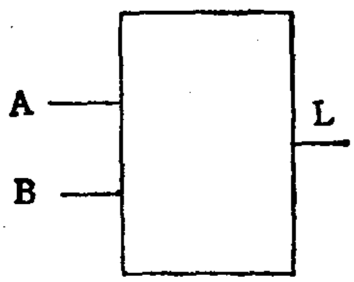
如果用L来描述电路的接通与否（即当L=1代表接通；当L=0代表断开），A=1，B=1分别表示开关闭合；A=0，B=0分别表示开关打开时，则其逻辑运算规律被图1—2所示的“真值表”或“逻辑函数”所描述。

A	B	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

真值表

$L = AB$

逻辑函数



逻辑符号

图1—2 “与”逻辑运算

显然其逻辑规律是：只有当开关 A和B 都闭合时电路才通。

(2) “或”——逻辑加法“+”（念或）。“或”的意义是由两个或更多个开关相并联而完成的逻辑运算，如图 1—3 所示。

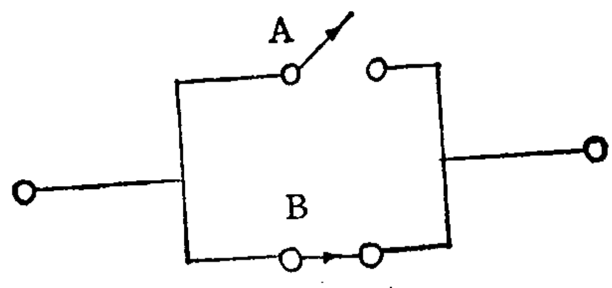


图1—3　或门

显然，在几个并联开关中，只要有一个或一个以上闭合，整个电路就通。“或”的逻辑运算，如图1—4所示。

A B	L
0 0	0
0 1	1
1 0	1
1 1	1

真值表

$$L = A + B$$

逻辑函数

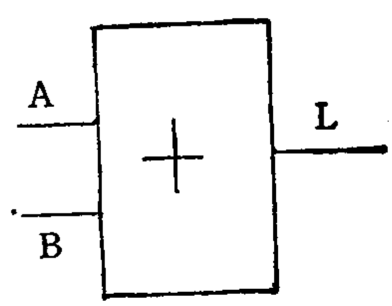


图1—4　或逻辑运算

(3) “非”——用文字上面的横杠“—”表示。非的意义是表示一个开关从一个状态向另一个状态转换，如图1—5所示。关于非门的逻辑运算，

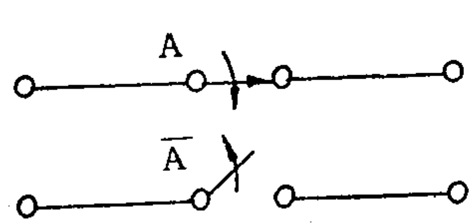


图1—5　非门

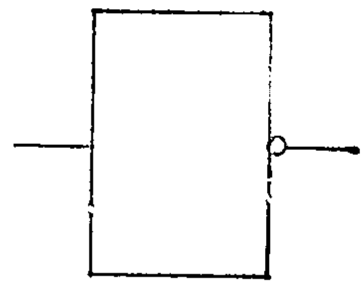
如图 1—6 所示。

A	L
0	1
1	0

真值表

$L=\overline{A}$

逻辑函数



逻辑符号

图1—6　非门逻辑运算

（4）开关网络“逻辑函数”。

例　求图 1—7 开关网络的逻辑函数

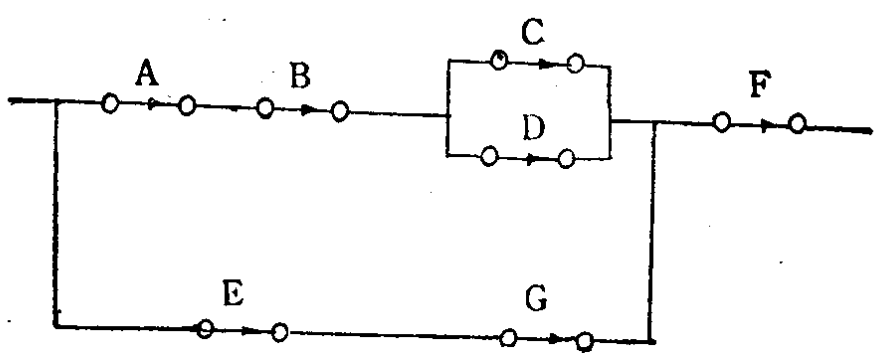


图1—7　开关网络

逻辑函数（L）：

$$L=[A\cdot B\cdot(C+D)+E\cdot G]\cdot F$$

2. 逻辑代数：

逻辑代数——是一门对逻辑函数进行运算和简化的学科。

逻辑变量——逻辑函数中的变量（如 A、B、……）。

逻辑变量特点：首先它不代表大小，其次是只有“0”、“1”两种对立的状况（取值）。

下面将介绍逻辑代数的一些基本运算规则；研究写出并简化逻辑函数的方法；讨论如何根据逻辑函数作出开关网络。

二、基本定律

1．公理。以下五组公理是逻辑代数的基础，其中公理1～3组可以由开关连接证明其正确性，公理4～5则是由于二进制只具有两个状态所导致的必然结果。该五组公理及其证明见图1—8。

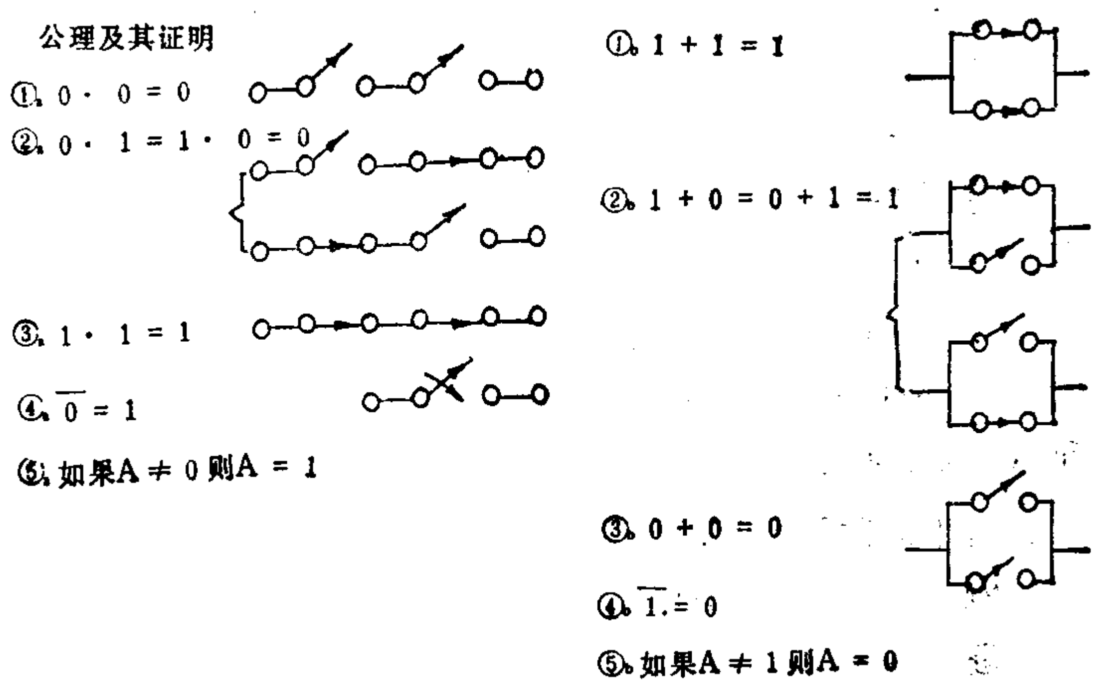


图1—8　公理

2．定理：以下十条定理可以通过上述公理来证明，也可以用开关连接图来证明其正确性。

定理（1）：交换律。

①a $A \cdot B = B \cdot A$ | ①b $A + B = B + A$

定理（2）：结合律。

②a $A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ | ②b $A + (B + C) = (A + B) + C$

定理（3）：分配律。

③$_a$ $A\cdot(B+C)=A\cdot B+A\cdot C$

③$_b$ $A+B\cdot C=(A+B)\cdot(A+C)$

定理（4）：自等律。

④$_a$ $A\cdot 1=A$

④$_b$ $A+0=A$

定理（5）：0—1律。

⑤$_a$ $A\cdot 0=0$

⑤$_b$ $A+1=1$

定理（6）：互补律。

⑥$_a$ $A\cdot\overline{A}=0$

⑥$_b$ $A+\overline{A}=1$

定理（7）：重叠律。

⑦$_a$ $A\cdot A=A$

⑦$_b$ $A+A=A$

定理（8）：吸收律。

⑧$_a$ $A+A\cdot B=A$

⑧$_b$ $A\cdot(A+B)=A$

定理（9）：非非律。

⑨$_a$ $\overline{\overline{A}}=A$

定理(10)：摩根定律。

⑩$_a$ $\overline{(A\cdot B\cdot C\cdots\cdots)}=\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+\cdots\cdots$

⑩$_b$ $\overline{(A+B+C+\cdots\cdots)}=\overline{A}\cdot\overline{B}\cdot\overline{C}\cdot\cdots\cdots$

这十条定理将有助于我们简化一些逻辑表达式。

例 求证 $(A+B)(A+C)=A+BC$

证
$$\begin{aligned}(A+B)(A+C)&=AA+AB+AC+BC\\&=A+AB+AC+BC\\&=A+BC\end{aligned}$$

这里应用了定理：③$_a$；⑦$_a$；⑧$_a$证明了定理③$_b$。

例 求证：$A+\overline{A}B=A+B$

证
$$\begin{aligned}A+\overline{A}B&=(A+\overline{A})(A+B)\\&=A+B\end{aligned}$$

3. 基本定律扩展运用的几点规则。利用下面这几个规