电工电子技术系列教材

数字电子技术

殷瑞祥　罗昭智　樊利民　编

ShuZi DianZi JiShu

华南理工大学出版社

电工电子技术系列教材

数字电子技术

殷瑞祥　罗昭智　樊利民　编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

电工电子技术是非电子、电气类专业的理论性、实践性都比较强的技术基础课程。本书为“电工电子技术系列教材”之四，主要介绍数字电子技术的基本知识和应用电路。全书共4章，主要内容包括：组合逻辑电路，时序逻辑电路，模拟量和数字量的转换，半导体存储器和可编程逻辑器件等。

书中着重阐述基本概念、基本原理和实际应用方法。例题和习题除围绕上述重点外，还注意思考性、启发性，使读者能增强分析问题和解决问题的能力。

本书兼顾了深度和广度，适合作为非电子、电气类各专业本专科、各种成人教育的教材，对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/殷瑞祥，罗昭智，樊利民编．—广州：华南理工大学出版社，2004.3

(电工电子技术系列教材)

ISBN 7-5623-2064-0

Ⅰ．数…　Ⅱ．①殷…　②罗…　③樊…　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(2003)第 126663 号

总 发 行：华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼，邮编 510640)

发行部电话：020－87113487　87111048(传真)

E-mail：scut202@scut.edu.cn　　http://www.scutpress.com

责任编辑：傅穗文　张　颖

印 刷 者：南海市彩印制本厂

开　　本：787×1092　1/16　**印张**：9.25　**字数**：190 千

版　　次：2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印　　数：1～3 000 册

定　　价：16.00 元

“电工电子技术系列教材”编委会

前　　言

随着科学技术的发展，电工电子技术在各行各业中的应用越来越广泛，电工电子技术基础已经成为大学生不可缺少的基本知识构架之一。在我国高等学校专业培养方案中，非电子、电气类专业传统上以开设电工学课程来实现电工电子技术基础教学。但是，电工电子技术的发展使课程内容越来越庞杂，不利于教和学。

根据电工电子技术基础的学科涵盖范畴，我们在教学改革的基础上，采用模块化教学的思想，将电工学课程从单一课程扩展为电工电子技术系列课程：电路基础、电气控制、模拟电子技术和数字电子技术。本系列教材正是针对非电子、电气类专业电工电子技术基础系列课程而编写的。与传统电工学课程相比，系列课程删减了陈旧繁杂的内容，补充了反映科学技术发展的新内容，《电路基础》把重点放在分析方法的阐述，《电气控制》增加了可编程控制器的应用，《模拟电子技术》和《数字电子技术》突出了集成电路的应用。

电工电子技术系列教材共分 4 册，本书为第 4 册，主要介绍数字电子技术的基本知识和应用电路。全书共 4 章，第 1 章组合逻辑电路，介绍逻辑代数的基本知识，基本门电路，组合逻辑电路的分析综合方法，以及应用电路；第 2 章时序逻辑电路，介绍触发器电路，时序逻辑电路分析与综合方法，典型应用电路；第 3 章模拟量和数字量的转换，介绍常用模拟信号与数字信号的转换电路；第 4 章半导体存储器和可编程逻辑器件，介绍最新数字系统设计中常用的集成电路及其应用。

在编写过程中，我们认真总结了多年的教学经验，学习参考了国内外同类及相关教材和著作，以培养学生分析问题和解决问题的能力、提高学生素质为目标，注重基本概念、基本原理、基本方法的论述，既能使学生掌握好基础，又能启发学生思考、开阔视野。文字叙述力求简明扼要，便于自学。

本系列教材的编写大纲是在华南理工大学电工教研室全体教师集体讨论的基础上制定的，由殷瑞祥教授担任主编。参加本册编写的有罗昭智（第 1、2、3 章）、樊利民（第 4 章），殷瑞祥教授修改统稿。

华南理工大学电工教研室张琳副教授对本书的编写提出了许多建设性意见,并审阅了部分初稿。

由于我们水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编　者

2003年10月于广州

目　录

1 组合逻辑电路

数字电路所处理的信号只有 0 和 1 两个状态，电路的工作是对信号的逻辑运算，因此数字电路也称逻辑电路。根据其逻辑功能的不同特点，数字电路分成两大类：一类为组合逻辑电路（简称组合电路），电路的输出只与当前输入信号状态有关；另一类为时序逻辑电路（简称时序电路），电路的输出不仅与当前输入有关，还与电路过去的工作状态有关。

本章首先介绍数字电路的基础——逻辑代数、基本的门电路，然后介绍组合逻辑电路的分析与设计方法，最后介绍一些常用的组合逻辑电路。

1.1 逻辑代数

逻辑代数也称布尔代数，它是分析数字电路的数学工具。逻辑代数和普通代数不同，普通代数中变量的值是连续变化的，而逻辑代数中变量的取值只有 1 和 0 两个。1 和 0 分别表示两种不同的逻辑状态。例如，可以用 1 和 0 分别表示某事件的是和非、真和假、有和无等，也可以表示电路的导通和断开、电灯的亮和灭等等。因此，在逻辑代数中，1 和 0 的含义完全不同于普通代数中的数值 1 和 0。

逻辑电路中用 1 和 0 表示输入和输出电位的高与低，习惯上把高电位称为高电平，低电位称为低电平。若规定高电平为 1，低电平为 0，这种逻辑关系称为正逻辑，反之则称为负逻辑。本书若无特殊说明，均采用正逻辑。

1.1.1 基本逻辑运算

在逻辑代数中，基本的逻辑运算有 3 种，即"与"运算、"或"运算和"非"运算。所有逻辑运算都可以用这 3 种基本运算构成。

1.1.1.1 与运算

在决定某一事件的各种条件中，只有当全部条件同时具备时，事件才会发生，这种因果关系叫做与运算，也叫做逻辑与（或称逻辑乘）。自变量 A、B 的与运算可写成 $Y = A \times B$ 或 $Y = A \cdot B$ 或 $Y = AB$。

与运算的基本运算规则为：

$$\begin{matrix} 0 \cdot 0 = 0 & \quad 1 \cdot 0 = 0 \\ 0 \cdot 1 = 0 & \quad 1 \cdot 1 = 1 \end{matrix} \tag{1-1}$$

图 1-1 所示是一个与运算的实例，A 和 B 分别表示两个串联的开关，Y 表示灯

泡。假设开关闭合为 1,断开为 0;灯亮为 1,灯灭为 0。由电路原理知,只有两个开关都合上(即 A 和 B 均为 1)时,灯泡 Y 才会通电发光(即 Y 为 1);反之,A、B 中只要有一个断开(为 0),Y 就断电熄灭(即 Y 为 0)。

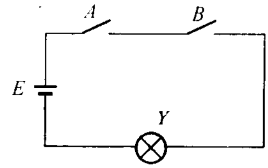
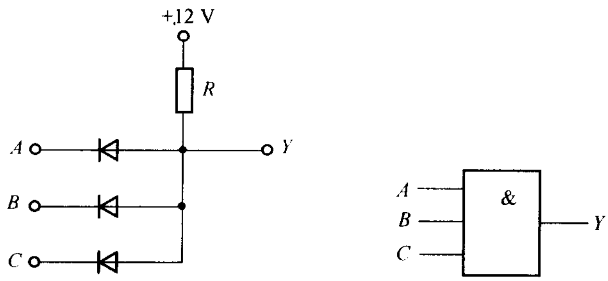


图 1-1　逻辑与

能够实现与运算的单元电路叫做与门。图 1-2a 是一个二极管与门电路,只有当 A、B、C 三端均为高电位(即输入均为 1)时,Y 才具有高电位(即输出为 1);当 A、B、C 中有一个(或一个以上)为低电位(即输入为 0)时,由于对应的二极管导通使 Y 端被钳位于低电位(即输出为 0)。可见,该电路具有与运算的功能。与门的逻辑符号如图 1-2b 所示。



(a) 二极管"与门"　　(b)"与门"的逻辑符号

图 1-2　与门及其逻辑符号

1.1.1.2　或运算

在决定某一事件的各种条件中,只要有一个(或一个以上)条件具备时,事件就会发生,这样一种因果关系叫做或运算,也叫做或逻辑(或逻辑加)。自变量 A、B 的或运算可写成 $Y = A + B$。

或运算的基本运算规则为:

$$\begin{array}{ll} 0+0=0 & 1+0=1 \\ 0+1=1 & 1+1=1 \end{array} \tag{1-2}$$

图 1-3 所示是一个或运算的实例,A 和 B 分别表示两个并联的开关,Y 表示灯泡,由电路原理,我们知道,只要 A、B 中有一个闭合(即为 1)时,灯泡 Y 就会通电发光(即为 1);只有当 A、B 均断开(即为 0)时,Y 才断电熄灭(即为 0)。

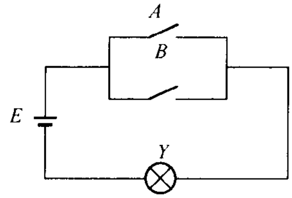
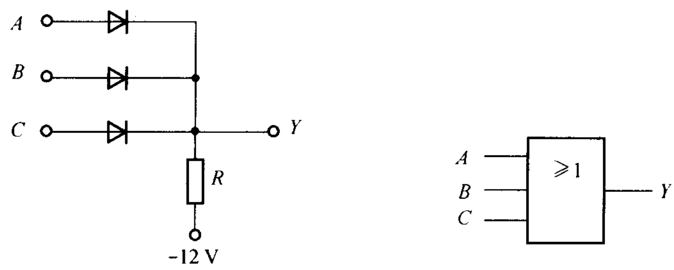


图 1-3　逻辑或

能够实现或运算的单元电路叫做或门。图 1-4a 是一个二极管或门电路,当输入端 A、B、C 有一个(或

一个以上)为高电位(即为 1)时,与该端相连的二极管导通,使输出端 Y 为高电位,即 Y 为 1,其他与加有低电位的输入端相连的二极管因承受反向电压而截止,不影响输出端的电位;只有当 A、B、C 端都加上低电位,即输入全为 0 时,所有二极管导通,使输出 Y 具有低电位,即输出端 Y 为 0。可见,该电路具有或运算的功能。或门的逻辑符号如图 1-4b 所示。



(a) 二极管"或门" (b)"或门"的逻辑符号

图 1-4 或门及其逻辑符号

1.1.1.3 非运算

如果条件具备了,事件便不会发生;而条件不具备时,事件就会发生,这种因果关系叫做非运算,也叫做逻辑非(或反运算)。变量 A 的非运算可写成 $Y=\overline{A}$。非运算的基本运算规则是:

$$\overline{0}=1 \qquad \overline{1}=0 \tag{1-3}$$

图 1-5 所示是一个非运算的实例,当开关 A 闭合(即为 1)时,灯泡 Y 被短路而熄灭(即 Y 为 0);而当开关 A 断开(为 0)时,灯泡 Y 通电发光(即 Y 为 1)。

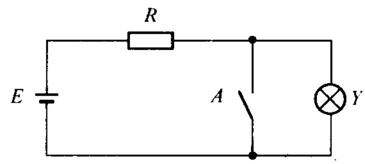
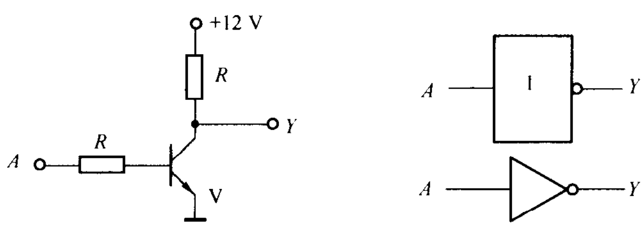


图 1-5 逻辑非

能够实现非运算的单元电路叫做非门。图 1-6a 所示是一个晶体管非门。晶体管 V 工作于开关状态,当输入端 A 接高电位(即输入为



(a) 三极管非门 (b)"非门"的逻辑符号

图 1-6 非门及其逻辑符号

1)时，晶体管饱和导通，输出端 Y 为低电位(即输出为 0)；而当输入端 A 接低电位(即输入为 0)时，晶体管截止，输出端 Y 具有高电位(即输出为 1)。可见，该电路具有非运算的功能。非门的逻辑符号如图 1－6b 所示。

以上介绍的是 3 种基本的逻辑运算及其门电路。实际逻辑问题虽然复杂，但都可以用与、或、非的组合来表示。最常用的复合逻辑运算有与非、或非、与或非、异或、同或等。图 1－7 给出了常用复合逻辑门的图形符号和逻辑表达式。

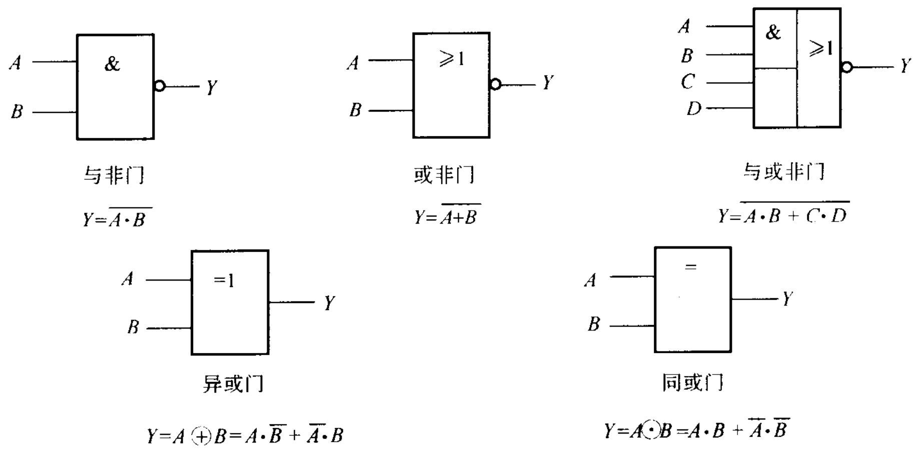


图 1－7　复合逻辑门

异或运算和同或运算互为反运算，即

$$A\oplus B=\overline{A\odot B}\qquad A\odot B=\overline{A\oplus B}$$

为了书写方便，一般省略“与”运算中的“·”。

1.1.2　逻辑代数的运算规则

设 A、B、C 为任意逻辑变量，将逻辑代数的基本运算规则归纳如下：

0－1 律

$$0\cdot A=0\qquad 1+A=1 \tag{1-4}$$

自等律

$$1\cdot A=A\qquad 0+A=A \tag{1-5}$$

重叠律

$$A+A=A\qquad A\cdot A=A \tag{1-6}$$

互补律

$$A+\overline{A}=1\qquad A\cdot\overline{A}=0 \tag{1-7}$$

还原律

$$\overline{\overline{A}}=A \tag{1-8}$$

交换律

$$A+B=B+A \qquad A\cdot B=B\cdot A \tag{1-9}$$

结合律

$$A+(B+C)=(A+B)+C \qquad A\cdot(B\cdot C)=(A\cdot B)\cdot C \tag{1-10}$$

分配律

$$A\cdot(B+C)=A\cdot B+A\cdot C \qquad A+B\cdot C=(A+B)\cdot(A+C) \tag{1-11}$$

吸收律

$$A+A\cdot B=A \qquad A\cdot(A+B)=A \tag{1-12}$$

反演律(摩根定律)

$$\overline{A+B}=\overline{A}\cdot\overline{B} \qquad \overline{A\cdot B}=\overline{A}+\overline{B} \tag{1-13}$$

要证明以上公式是很容易的,最简单的方法就是将变量的各种可能取值组合代入等式两边进行运算,如果等号两边的值相等,则等式成立,否则等式不成立。另外,也可以用已知的公式来证明其余公式。以下举例证明几个公式,其余公式读者可以自己证明。

例 1-1 证明 $A+B\cdot C=(A+B)\cdot(A+C)$。

证明

$$\begin{aligned}(A+B)\cdot(A+C)&=A(A+C)+B(A+C)\\&=A\cdot A+A\cdot C+A\cdot B+B\cdot C\\&=A+AC+AB+BC\\&=A(1+C+B)+BC\\&=A+BC\end{aligned}$$

所以 $A+BC=(A+B)\cdot(A+C)$成立。

例 1-2 证明 $A+A\cdot B=A$。

证明

$$A+A\cdot B=A\cdot(1+B)=A\cdot 1=A$$

上式说明在两个乘积项相加时,若其中一项是另一项的因子,则后者是多余的,可以略去。

例 1-3 证明 $A\cdot(A+B)=A$。

证明

$$A\cdot(A+B)=A\cdot A+A\cdot B=A+A\cdot B=A$$

上式说明,某一变量与包含该变量的和相乘时,其结果等于原变量,即可以将和项略去。

例 1-4 证明$\overline{A\cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$。

证明 将变量的各种取值组合代入等式两边,进行计算,其结果如下表所示。

A	B	$A\cdot B$	$\overline{A\cdot B}$	$\overline{A}$	$\overline{B}$	$\overline{A}+\overline{B}$
0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0

由表中可以看到，在变量 A、B 的各种取值组合下，等式两边的值相等，所以公式成立。

由以上基本公式还可以推导出以下一些常用公式。直接使用这些推导公式可以给化简逻辑函数的工作带来很大方便。

$$A+\overline{A}\cdot B=A+B \tag{1-14}$$

证明

$$A+\overline{A}\cdot B=(A+\overline{A})\cdot(A+B)=1\cdot(A+B)=A+B$$

上式表明，两个乘积项相加时，如果其中一项的反是另一项的因子，则该因子是多余的，可以消去。

$$A\cdot B+\overline{A}\cdot C+BC=A\cdot B+\overline{A}\cdot C \tag{1-15}$$

证明

$$\begin{aligned}A\cdot B+\overline{A}\cdot C+B\cdot C&=A\cdot B+\overline{A}\cdot C+B\cdot C(A+\overline{A})\\&=A\cdot B+\overline{A}\cdot C+A\cdot B\cdot C+\overline{A}\cdot B\cdot C\\&=A\cdot B\cdot(1+C)+\overline{A}\cdot C\cdot(1+B)\\&=A\cdot B+\overline{A}\cdot C\end{aligned}$$

上式说明，若两乘积项中分别包含某变量和该变量的非，则由这两个乘积项的其余因子组成的第三个乘积项是多余的，可以消去。还可以推得

$$A\cdot B+\overline{A}\cdot C+B\cdot C\cdot D=A\cdot B+\overline{A}\cdot C \tag{1-16}$$

1.1.3 逻辑代数的基本定理

1.1.3.1 代入定理

在任何一个逻辑等式中，将某一变量全部代之以一个函数，则等式仍然成立。

利用代入定理，将已知等式中某一变量用任意一个函数代替后，就得到一个新的等式，从而扩大了等式的应用范围。

例 1-5 用代入定理证明摩根定理也适用于多个变量的情况。

解 两变量摩根定理为

$$\overline{A+B}=\overline{A}\cdot\overline{B}\qquad\overline{A\cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$$

现用 $(B+C)$ 代替等式 $\overline{A+B}=\overline{A}\cdot\overline{B}$ 中的 B，则可以得到

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

同理用$(B\cdot C)$代替等式$\overline{A\cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$中的$B$，则可以得到

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

对复杂的逻辑式进行运算时，需遵守逻辑代数的运算顺序，即括号＞非＞与＞或。

1.1.3.2　反演定理

任意一个逻辑函数 Y 的表达式，若将其中所有的“与”替换成“或”，“或”替换成“与”，0 替换成 1，1 替换成 0，原变量替换成反变量（非），反变量替换成原变量，则得到的结果为原函数的非 $\overline{Y}$。

摩根定理实际上是反演定理的一个特例。

例 1－6　已知 $Y=A+\overline{B+\overline{C}+\overline{D+\overline{E}}}$，求 $\overline{Y}$。

解　根据反演定理可得

$$\overline{Y}=\overline{A}\cdot\overline{\overline{B}\cdot C\cdot\overline{\overline{D}\cdot E}}$$

1.1.3.3　对偶定理

任意一个逻辑函数 Y 的表达式中，将其中所有的“与”替换成“或”，“或”替换成“与”，0 替换成 1，1 替换成 0，得到一个新逻辑函数 Y' 的表达式，称其为原函数的对偶式，或者说 Y 与 Y' 互为对偶式。若两个逻辑式相等，则它们的对偶式也相等。

为了证明两个逻辑表达式相等，也可以通过证明它们的对偶式相等来实现，在某些情况下，证明对偶式相等可能更加容易。

例 1－7　证明 $A+B\cdot C=(A+B)\cdot(A+C)$。

解　分别写出等式两边的对偶式，得

$$A(B+C)\text{ 和 }AB+AC$$

由分配律可知，上面两个对偶式是相等的，即 $A(B+C)=AB+AC$。由对偶定理可得原来的两式也必定相等，即 $A+B\cdot C=(A+B)\cdot(A+C)$ 成立。

1.1.4　逻辑函数的化简

1.1.4.1　逻辑函数的表示方法

1. 真值表

将输入变量所有取值组合及其函数值列成的表格称为真值表，也称逻辑状态表。

例 1－8　列出逻辑函数 $Y=AB+BC+AC$ 的真值表。

解　由于每个输入变量有 0 和 1 两种取值，所以 n 个输入变量就有 2^n 个不同的取值组合。

本题中有 3 个输入变量，则共有 $2^3=8$ 种取值组合，将它们分别代入表达式中计算，得到相应的函数值，即可得到真值表，如表 1－1 所示。

表 1-1 $Y=AB+BC+AC$ 真值表

A	B	C	Y	A	B	C	Y	A	B	C	Y
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	0	1	0	1	1				

从表中可以清楚地看到，当输入 A、B、C 中有两个或两个以上为 1 时，输出 Y 为 1。

一般来说，输入变量的取值组合按照二进制数递增的顺序排列较好，这样既不会遗漏，也不会重复。

2. 逻辑函数式

将输出与输入之间的逻辑关系写成与、或、非等运算的组合式，就是逻辑函数式。例如，$Y = A(B+C)$。

真值表和逻辑函数式虽然形式不同，但都表示逻辑函数取值与输入状态的关系，因此，两者之间必定能相互转换。

由逻辑函数式列出真值表，只需将输入变量的所有取值组合代入式中，求出其函数值，列表即可。因此，下面主要讨论由已知真值表如何写出逻辑函数式。

真值表中的每一行表示了输入的一种取值状态。如果以输入变量本身代表 1，而输入变量的非代表 0，则可以用输入变量（或其非）的乘积表示这一输入状态。例如，上述真值表中第 2 行为 $\overline{A}\,\overline{B}C$，第 4 行为 $\overline{A}BC$，将这些乘积项称为最小项（因为它们代表的是所有可能的输入状态中的一种），n 个输入变量共有 2^n 个最小项。有时，为了方便书写，将最小项用 m_k 表示，其中，k 为该最小项输入二进制所对应的十进制数值，如 $\overline{A}\,\overline{B}C$ 简记为 m_1，而 $\overline{A}BC$ 简记为 m_3。

如果有若干个最小项可使逻辑函数取 1，那么，只要其中一个这样的最小项出现，就能够保证逻辑函数取值为 1，这是一种逻辑或的关系。由此可以归纳出从真值表获得逻辑函数表达式的方法如下：

找出真值表中所有使逻辑函数为 1 的最小项，逻辑函数即是这些最小项的逻辑和。

例如，将例 1-8 所示的真值表用逻辑函数表示，可以得到

$$Y = \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$$

任何一个逻辑函数，都可以用最小项之和来表示。但是，用最小项之和表示的逻辑函数表达式并不简便，需要对其进行化简才能得到我们所熟悉的表达式。上式可化简如下：

$$\begin{aligned} Y &= \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC \\ &= \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB \\ &= \overline{A}BC + A(\overline{B}C + B) \\ &= \overline{A}BC + A(C + B) \end{aligned}$$

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

得到与给出表达式一样简便的结果。

例 1-9　将函数 $Y = ABC + \overline{B}C$ 表示成最小项的形式。

解

$$
\begin{aligned}
Y &= ABC + \overline{B}C \\
&= ABC + \overline{B}C(A + \overline{A}) \\
&= ABC + A\,\overline{B}C + \overline{A}\,\overline{B}C
\end{aligned}
$$

3. 逻辑图

将逻辑函数中各个变量之间的与、或、非等逻辑关系分别用与、或、非等逻辑门及其组合来表示，称为逻辑图，也称逻辑电路图。

例 1-10　将 $Y = A + BC$ 用逻辑图表示。

解　用相应的门电路来表示，如图 1-8 所示。

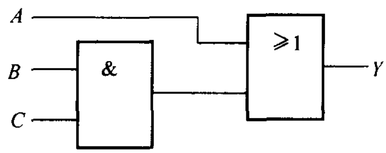


图 1-8　例 1-10 的逻辑图

1.1.4.2　用逻辑公式化简逻辑函数

一个逻辑函数可以写成不同的逻辑表达式，它们的繁简程度相差甚远。逻辑表达式越简单，所表示的逻辑关系越清楚，同时也利于用最少的门电路实现。所以常常需要将逻辑函数化简成最简形式。

逻辑函数式常可分成 5 种：与或表达式，或与表达式，与非与非表达式，或非或非表达式，与或非表达式。例如：

$$
\begin{aligned}
Y &= AB + \overline{A}C && \text{与或表达式} \\
&= (A + C)(\overline{A} + B) && \text{或与表达式} \\
&= \overline{\overline{AB}\;\overline{\overline{A}C}} && \text{与非与非表达式} \\
&= \overline{\overline{A + C} + \overline{\overline{A} + B}} && \text{或非或非表达式} \\
&= \overline{A\overline{B} + \overline{A}\,\overline{C}} && \text{与或非表达式}
\end{aligned}
\tag{1-17}
$$

由于逻辑代数的基本公式和常用公式多为与或表达式，用于化简与或式的逻辑函数较为方便，而其他形式的表达式又可以方便地转化成与或表达式，所以下面主要讨论与或逻辑式的化简。

在与或表达式中，若其中包含的乘积项最少，而且每个乘积项里面的因子也最少，则称它为逻辑函数的最简形式。

用公式化简逻辑函数有以下几种基本方法。

1. 并项法

应用公式 $A + \overline{A} = 1$，将两项合并为一项，消去多余因子。例如：

$$
Y = AB\overline{C} + A\overline{B\overline{C}} = A \tag{1-18}
$$