唐竞新　编著

数字电子电路

清华大学出版社

唐竞新 编著

数字电子电路

清华大学出版社
北 京

内容简介

本书全面介绍了数字电子电路的基本理论、基本分析方法和设计方法。全书共分8章，包括逻辑代数和逻辑函数、门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲和定时电路，A/D和D/A转换电路、存储器和可编程逻辑器件等。

本书概念清楚，内容先进实用，章节编排合理；每章均有计算实例和大量习题，易于学习。

本书可作为高等学校理工科各专业学生的教材，也可作为教师的教学参考书，还可供有关工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子电路 / 唐竞新编著. —北京：清华大学出版社，2003.9

ISBN 7-302-06836-4

Ⅰ. 数… Ⅱ. 唐… Ⅲ. 数字电路－高等学校－教材 Ⅳ. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 082877 号

出版者：清华大学出版社　　**地　址**：北京清华大学学研大厦

http://www.tup.com.cn　　**邮　编**：100084

社总机：010-62770175　　**客户服务**：010-62776969

组稿编辑：王仁康

文稿编辑：邹开颜

版式设计：肖　米

印刷者：清华大学印刷厂

发行者：新华书店总店北京发行所

开　本：185×260　**印张**：25　**字数**：571千字

版　次：2003年9月第1版　2003年9月第1次印刷

书　号：ISBN 7-302-06836-4/TN・142

印　数：1～5000

定　价：30.00元

前言

本书是作者根据国家教委制订的电子技术基础课程教学基本要求，并在多年教学实践的基础上编写而成。本书可作为高等院校的教材，亦可作为有关专业工程技术人员的参考书。

数字电子电路是理工科专业一门重要的专业基础课。本书着重介绍数字电子电路的基本理论以及电路的分析与设计方法。在内容的节选上注重先进性和实用性，在章节的编排上力求兼顾国内一些通用教材的体系。为便于读者对所讲述内容的理解和消化，在每章开始前有“内容提要”，在每章之后有“本章小结”。每章中均有大量计算实例，各章之后均有习题。

全书共分 8 章。第 1 章介绍分析和设计数字电路的工具——逻辑代数和逻辑函数。第 2 章介绍数字电路最基本的单元——门电路，对集成门电路的原理和电气特性作了较为详细的介绍。第 3 章介绍组合逻辑电路，重点介绍了几种常见的、典型的组合电路。第 4 章和第 5 章是本书重点，分别介绍了触发器和时序逻辑电路。触发器是时序逻辑电路的基本单元，所以书中单独设一章，从触发器的结构、动作特性、不同逻辑功能触发器及其转换等角度对它作了较为详细的介绍。时序逻辑电路是数字电路中最重要的内容，书中对寄存器、计数器、顺序脉冲发生器等典型电路作了详尽的描述，并介绍了时序逻辑电路的多种设计方法。第 7 章介绍 A/D，D/A 转换电路，对 D/A 和 A/D 转换的多种方法以及相关的集成电路作了介绍。第 8 章介绍存储器和可编程逻辑器件，重点介绍了只读存储器 ROM 和随机存取存储器 RAM 的结构、原理和应用。可编程逻辑器件 PLD 是一种新型器件，本书简要地介绍了它的发展概况，并对 PLA，PAL 和 GAL 等典型 PLD 器件的原理和应用作了较详细的介绍。

本书除第 8 章采用国际通用符号外，其余章节基本采用国家标准 GB/T 4728《电气简图用图形符号》所规定的逻辑符号。

限于作者的水平，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作　者

2003 年 5 月于清华园

目录

数字电子电路

第1章 逻辑代数和逻辑函数

内容提要：逻辑代数是分析和设计数字电路的数学工具。本章先扼要地介绍逻辑代数中常用的公式和定理，然后再介绍逻辑函数及其描述方法，最后着重介绍逻辑函数的化简法。

1.1 基本和复合逻辑关系及其描述

逻辑代数是数字电路分析和设计时所用的一种主要数学工具，是对逻辑函数进行运算和化简的代数。

逻辑代数是由英国数学家乔治·布尔(George Boole)在1849年首先提出的，因而也称布尔代数。

1.1.1 与、或、非逻辑

在逻辑代数中，常用英文字母$A, B, C, \cdots$表示变量。在二值逻辑中，变量的取值仅有0和1两种，因而运算的规则简单。这里所述的0和1的含义不是具体数值的大小，而是代表两种不同的逻辑状态。

人们常用因果关系来描述客观事物条件和结果之间的关系。

若决定事物结果的全部条件都满足时，结果才能发生，则称这种因果关系为逻辑与。

若决定事物结果的各种条件中只要有一个满足，结果就会发生，则称这种因果关系为逻辑或。

若决定事物结果的条件成立，则结果不会发生，反之条件不成立，结果反而发生，称此因果关系为逻辑非。

图1.1.1所示开关和灯的3种示意电路可以分别用来说明上述3种基本的逻辑关系。

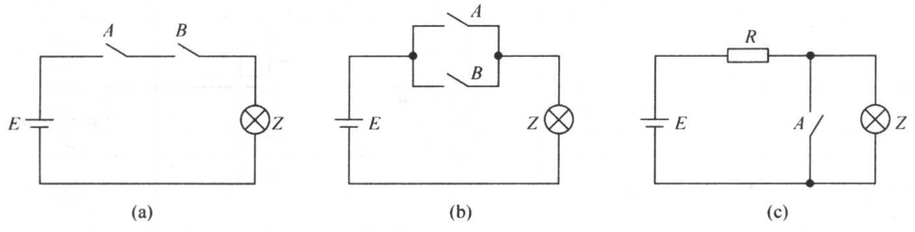


图1.1.1 开关和灯的示意电路

图 1.1.1(a)电路表明，只有当电路中两个开关 A,B 同时闭合时，灯泡 Z 才亮。条件全部满足，事件才发生，为逻辑与。

图 1.1.1(b)电路表明，电路中两个开关 A,B 只要有一个闭合，灯泡 Z 就亮。任一条件满足，事件就发生，为逻辑或。

图 1.1.1(c)电路表明，开关 A 闭合，灯泡 Z 不亮；开关 A 打开，灯泡 Z 才亮。条件满足，事件不成立，反之条件不满足，事件成立，为逻辑非。

和这 3 种基本的逻辑关系相对应，逻辑代数中有与、或、非 3 种基本运算，也常称为逻辑乘、逻辑加、逻辑求反。这 3 种运算常用算符"·"、"＋"和"－"表示，"·"经常省略。

这样图 1.1.1 所示的 3 种电路描述的逻辑关系就可以写成如下数学形式：

图 1.1.1(a)电路　$Z=A\cdot B=AB$

图 1.1.1(b)电路　$Z=A+B$

图 1.1.1(c)电路　$Z=\overline{A}$

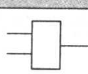
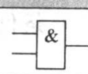
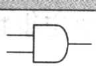
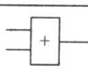
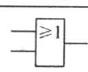
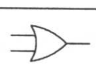
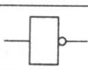
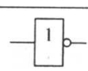
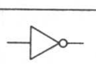
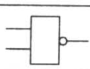
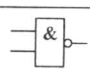
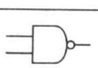
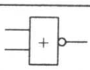
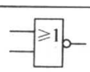
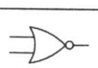
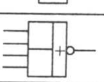
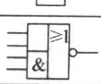
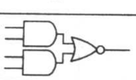
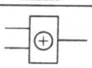
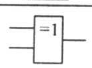
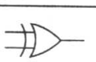
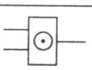
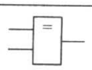
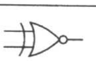
上述形式常称为逻辑表达式。

1.1.2 复合逻辑关系

实际数字系统中的逻辑问题远比简单的与、或、非运算复杂。为便于描述，引出了各种复合逻辑运算，常见的有与非、或非、与或非、异或和同或等。

现将 3 种基本逻辑和各种复合逻辑关系的逻辑表达式和逻辑符号整理在表 1.1.1 中。表中各种复合逻辑关系是用 3 种基本的与、或、非的逻辑组合而成，其中：与非是与和非的直接组合；或非是或和非的直接组合；与或非是先与、后或、再求反的组合。

表 1.1.1　各种逻辑关系的表达式和逻辑符号

逻辑关系	逻辑表达式	逻辑符号		
		常用	国标	国际
与	$Z=AB$			
或	$Z=A+B$			
非	$Z=\overline{A}$			
与非	$Z=\overline{AB}$			
或非	$Z=\overline{A+B}$			
与或非	$Z=\overline{AB+CD}$			
异或	$Z=A\oplus B$			
同或	$Z=A\odot B$			

异或的含义是当输入 A 和 B 不相同时，输出 Z 为高电平；反之 A,B 输入相同，输出 Z 为低电平。异或的表达式可写成与或的形式，即有

$$A \oplus B = A\overline{B} + \overline{A}B$$

同或的含义是当输入 A 和 B 相同时，输出 Z 为高电平；反之当 A,B 输入不相同，输出 Z 为低电平。同或逻辑也可认为是异或非逻辑。同或的表达式写成与或的形式为

$$A \odot B = AB + \overline{A}\,\overline{B}$$

各种逻辑关系除用逻辑表达式表示外，还常用相应的逻辑符号来描述。表 1.1.1 中的 3 套符号从左向右分别为常用符号、国家标准符号和国际通用符号。

1.2　逻辑代数中的公式和定理

1.2.1　基本公式

逻辑代数中的基本公式，也称为布尔恒等式，列写如下：

(1) $A+0=A$　　(1′) $A \cdot 1=A$

(2) $A+1=1$　　(2′) $A \cdot 0=0$

(3) $A+\overline{A}=1$　　(3′) $A\overline{A}=0$

(4) $A+B=B+A$　　(4′) $AB=BA$

(5) $A+(B+C)=(A+B)+C$　　(5′) $A(BC)=(AB)C$

(6) $A(B+C)=AB+AC$　　(6′) $A+BC=(A+B)(A+C)$

(7) $A+A=A$　　(7′) $AA=A$

(8) $\overline{\overline{A}}=A$

(9) $\overline{A+B}=\overline{A}\,\overline{B}$

(10) $\overline{AB}=\overline{A}+\overline{B}$

基本公式共有 17 个，其中(9)和(10)也称为摩根定理(De Morgan's theorem)，在逻辑函数的运算和化简时经常用到。

上述公式中，除公式(6′)外，其余的都容易证明。对公式(6′)的证明如下。公式右边

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

因为右边等于左边，所以公式(6′)成立。

另外公式(1′)～(7′)和公式(1)～(7)互为对偶式，用对偶定理(在 1.2.3 节中将介绍)可直接求得。

1.2.2　常用公式

这里介绍 5 个逻辑代数中的常用公式：

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

(2) $A+AB=A$

(3) $A+\overline{A}B=A+B$

(4) $AB+\overline{A}C+BC=AB+\overline{A}C$

(5) $\overline{A\overline{B}+\overline{A}B}=AB+\overline{A}\overline{B}$

公式(4)的证明如下。公式左边

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

因为左边等于右边，所以公式(4)成立。

公式(5)的证明如下。公式左边

$$\begin{aligned} \overline{A\overline{B}+\overline{A}B} &= \overline{A\overline{B}}\;\overline{\overline{A}B} \\ &= (\overline{A}+B)(A+\overline{B}) \\ &= AB+\overline{A}\,\overline{B} \end{aligned}$$

因为左边等于右边，所以公式(5)成立。

1.2.3 基本定理

介绍 3 个基本定理，反演定理、对偶定理和代入定理。

1. 反演定理

反演定理也称为反演规则或香农定理(Shannon's theorem)，用于求一个函数的反函数，描述如下。

若对一逻辑函数 F 同时进行下述 6 种替换：

$$+ \rightleftarrows \cdot$$

$$0 \rightleftarrows 1$$

$$x \rightleftarrows \overline{x}$$

且保持原函数先后运算顺序不变，则所得函数即为原函数 F 的反函数，记为 $\overline{F}$。

现结合一实例介绍反演定理的具体应用。

例 1.1 已知一个 4 变量函数 F，且

$$F(ABCD)=\overline{A\overline{B}C+AC\overline{D}}(\overline{A}\overline{B}D+\overline{B}CD)$$

用反演定理求其反函数，写出 $\overline{F}$ 的逻辑表达式。

解 按反演定理所求的反函数 $\overline{F}$ 的表达式为

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

从本例所得的反函数 $\overline{F}$ 的表达式可看出，在反演过程中要进行规定的原变量和反变量、加号和乘号的互换，且需保持原有函数的运算顺序不变，但原函数中多个变量上共用的反号应保持不变。

2. 对偶定理

若对一逻辑函数 F 同时进行下述 4 种替换：

$$+ \rightleftarrows \cdot$$
$$0 \rightleftarrows 1$$

且保持原函数先后运算顺序不变，则所得函数即为原函数 F 的对偶函数，记为 F'。

现仍以上述 4 变量函数 F 为例，介绍对偶定理的具体应用。

例 1.2　试用对偶定理写出上述 4 变量函数 F 的对偶函数。

解　按对偶定理所求的对偶函数 F'的表达式为

$$F' = \overline{(A+\overline{B}+C)(A+C+\overline{D})} + (\overline{A}+\overline{B}+D)(\overline{B}+C+D)$$

由 F'表达式知，对偶过程中，原函数中多个变量上共同的反号也应保持不变。这点和反演过程相同。

反演需进行 6 种变换，而对偶只进行其中的 4 种变换，不需对原、反变量进行变换。它常用于对逻辑函数与或式和或与式的变换中。

需注意的是，对一个逻辑函数的对偶式 F'再进行一次对偶运算，所得函数即为原函数 F，即

$$(F')' = F$$

3. 代入定理

若将函数 H 代替一个等式中的某一变量，则等式仍然成立。

下面试举一例，说明此定理。设

$$f(x_1, x_2, \cdots, x_n) = g(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

已知 $H=h(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，若用 H 代替上述等式中的任一变量，如 x_1，则有

$$f(H, x_2, \cdots, x_n) = g(H, x_2, \cdots, x_n)$$

将代入定理应用于基本公式和常用公式中，可以在较大程度上拓宽这些公式的使用范围。

1.3　逻辑函数及其表示方法

逻辑代数中的变量称为逻辑变量，对逻辑变量进行与、或、非等各种逻辑运算而得到的一些表达式，常称为逻辑函数。

1.3.1　逻辑函数的引出

下面结合一个 3 位多数表决电路来引出逻辑函数。

例 1.3　设有 A，B，C 共 3 人对某议案进行表决，两人以上赞成，议案通过，议案用 Z 表示。写出多数表决电路的逻辑表达式。

解　先设定 0 和 1 的含义：表决人赞成用 1 表示，反对用 0 表示；议案通过用 1 表示，否决用 0 表示。

可以将各种表决的结果列成表格的形式，如表 1.3.1 所示。此表也称为真值表。

表 1.3.1 多数表决真值表

A	B	C	Z
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

真值表中内容表明，在下述 4 种情况下，议案能通过：

B，C 赞成，A 反对；

A，C 赞成，B 反对；

A，B 赞成，C 反对；

A，B，C 都赞成。

若分别用 $\overline{A}BC$，$A\overline{B}C$，$AB\overline{C}$ 和 ABC 表示上述 4 种情况，则议案 Z 和 A，B，C 的关系可用下面的表达式来描述：

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

上式即为逻辑函数 Z 的逻辑表达式。

1.3.2 逻辑函数的表示方法

逻辑函数的表示方法通常有真值表（表格形式）、逻辑表达式（数学公式形式）、逻辑电路（逻辑符号形式）、卡诺图（几何图形）等 4 种方法。这里先介绍前面 3 种，卡诺图形式将在后面图形法化简函数中再作详细介绍。

1. 函数的真值表

将输入变量和输出函数列成表格的形式，如表 1.3.1 所示的即为函数真值表。函数的真值表能直观明了地反映函数的功能，但通常只适用于变量数较少的情况。若变量数多时，则真值表形式反显繁琐。

2. 逻辑表达式

逻辑表达式是一种数学公式形式，用输入变量与、或、非等逻辑运算的组合来描述输出函数，便于运算、变换和化简。如上述 3 位多数表决电路函数 Z 的表达式为

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

函数 Z 若经化简，可写成

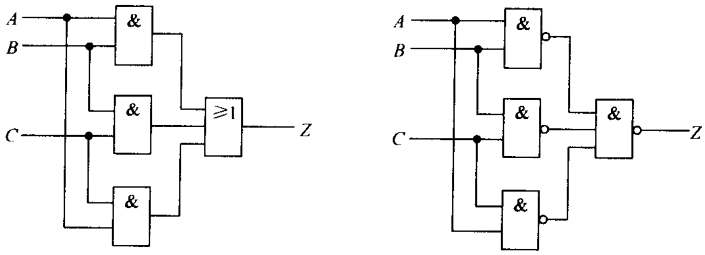
$$Z = AB + BC + AC$$

两式实际为同一函数，但后者比前者简单。后者为 3 项和，每项两个变量，而前者是 4 项和，每项 3 个变量。

3. 逻辑电路图

通常将逻辑符号组成的图形称为逻辑电路图。

图 1.3.1(a)，(b)所示即为上述 3 位多数表决函数 Z 的逻辑电路图，其中图 1.3.1(a)采用与门和或门实现，图 1.3.1(b)采用与非门实现。



(a)　　(b)

图 1.3.1　3 位多数表决逻辑电路图

1.3.3　逻辑表达式的种类

在 1.3.2 节介绍逻辑函数的表示方法时，曾提到逻辑表达式的形式，实际上逻辑表达式的种类有 8 种之多。现仍以 3 位多数表决函数 Z 为例，其 8 种表达式如下：

$$Z=AB+BC+AC \qquad \text{与或式}$$

$$Z=\overline{\overline{AB}\ \overline{BC}\ \overline{AC}} \qquad \text{与非-与非式}$$

$$Z=\overline{(\overline{A}+\overline{B})(\overline{B}+\overline{C})(\overline{A}+\overline{C})} \qquad \text{或与非式}$$

$$Z=\overline{\overline{A}+\overline{B}}+\overline{\overline{B}+\overline{C}}+\overline{\overline{A}+\overline{C}} \qquad \text{或非-或式}$$

$$Z=\overline{\overline{A}\,\overline{B}+\overline{B}\,\overline{C}+\overline{A}\,\overline{C}} \qquad \text{与或非式}$$

$$Z=\overline{\overline{A}\,\overline{B}}\ \overline{\overline{B}\,\overline{C}}\ \overline{\overline{A}\,\overline{C}} \qquad \text{与非-与式}$$

$$Z=(A+B)(B+C)(A+C) \qquad \text{或与式}$$

$$Z=\overline{\overline{A+B}+\overline{B+C}+\overline{A+C}} \qquad \text{或非-或非式}$$

上述 8 种逻辑表达式中基本的两种是与或式、或与式，其中与或式为最基本。其他如与非-与非式、与或非式以及或非-或非式在数字电路的设计中常用到，因为这 3 种表达式和数字电路中 3 种最常见的门电路与非门、与或非门以及或非门相对应。而剩下的 3 种表达式只是在个别情况下才使用，如 ECL IC 中用或非-或式，使用 TTL OC 门时用与非-与式较为方便。

1.3.4　函数的 $\sum m_i$ 和 $\prod M_j$ 的形式

逻辑函数也常用最小项之和 $\sum m_i$ 和最大项之积 $\prod M_j$ 来表示，常将这两种形式称为逻辑函数的两种标准形式。下面分别介绍最小项和最大项的有关内容。

1. 最小项和最大项

最小项为包含所有变量的乘积项，且每个变量只能以原变量或反变量的形式出现一次。

如前面介绍的 3 位多数表决电路输出函数 Z 中的 $\bar{A}BC$，$A\bar{B}C$，$AB\bar{C}$ 和 ABC 等项均为最小项。而经化简后表达式中的 AB，BC 和 AC 等都不能称为最小项，原因是未包含所有变量。

最大项为包含所有变量的和项，且每个变量只能以原变量或反变量的形式出现一次。对变量为 A，B，C 的 3 变量函数而言，如$(A+B+C)$，$(A+B+\bar{C})$，…，$(\bar{A}+\bar{B}+\bar{C})$等均为最大项。

(1) 最小项和最大项的编码表

现以 3 变量 A，B，C 为例，其最小项和最大项的编码表如表 1.3.2 所示。

表 1.3.2 最小项、最大项编码表

变量			最小项	编号	最大项	编号
A	B	C				
0	0	0	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$	m_0	$(A+B+C)$	M_0
0	0	1	$\bar{A}\bar{B}C$	m_1	$(A+B+\bar{C})$	M_1
0	1	0	$\bar{A}B\bar{C}$	m_2	$(A+\bar{B}+C)$	M_2
0	1	1	$\bar{A}BC$	m_3	$(A+\bar{B}+\bar{C})$	M_3
1	0	0	$A\bar{B}\bar{C}$	m_4	$(\bar{A}+B+C)$	M_4
1	0	1	$A\bar{B}C$	m_5	$(\bar{A}+B+\bar{C})$	M_5
1	1	0	$AB\bar{C}$	m_6	$(\bar{A}+\bar{B}+C)$	M_6
1	1	1	ABC	m_7	$(\bar{A}+\bar{B}+\bar{C})$	M_7

(2) 最小项和最大项主要性质

最小项和最大项的主要性质各列举了 4 点，如表 1.3.3 所示。

表 1.3.3 最小项和最大项性质

性质	最小项	最大项
1	在输入变量的任何取值下，必有一个最小项，而且仅有一个最小项的值为 1	在输入变量的任何取值下，必有一个最大项，而且仅有一个最大项的值为 0
2	全部最小项之和为 1，记为 $\sum_{i=0}^{2^n-1} m_i = 1$	全部最大项之积为 0，记为 $\prod_{i=0}^{2^n-1} M_i = 0$
3	任意两个不同的最小项之积为 0，即 $m_i m_j = 0,\quad i \neq j$	任意两个不同的最大项之和为 1，即 $M_i + M_j = 1,\quad i \neq j$
4	n 变量的最小项有 n 个相邻项	n 变量的最大项有 n 个相邻项