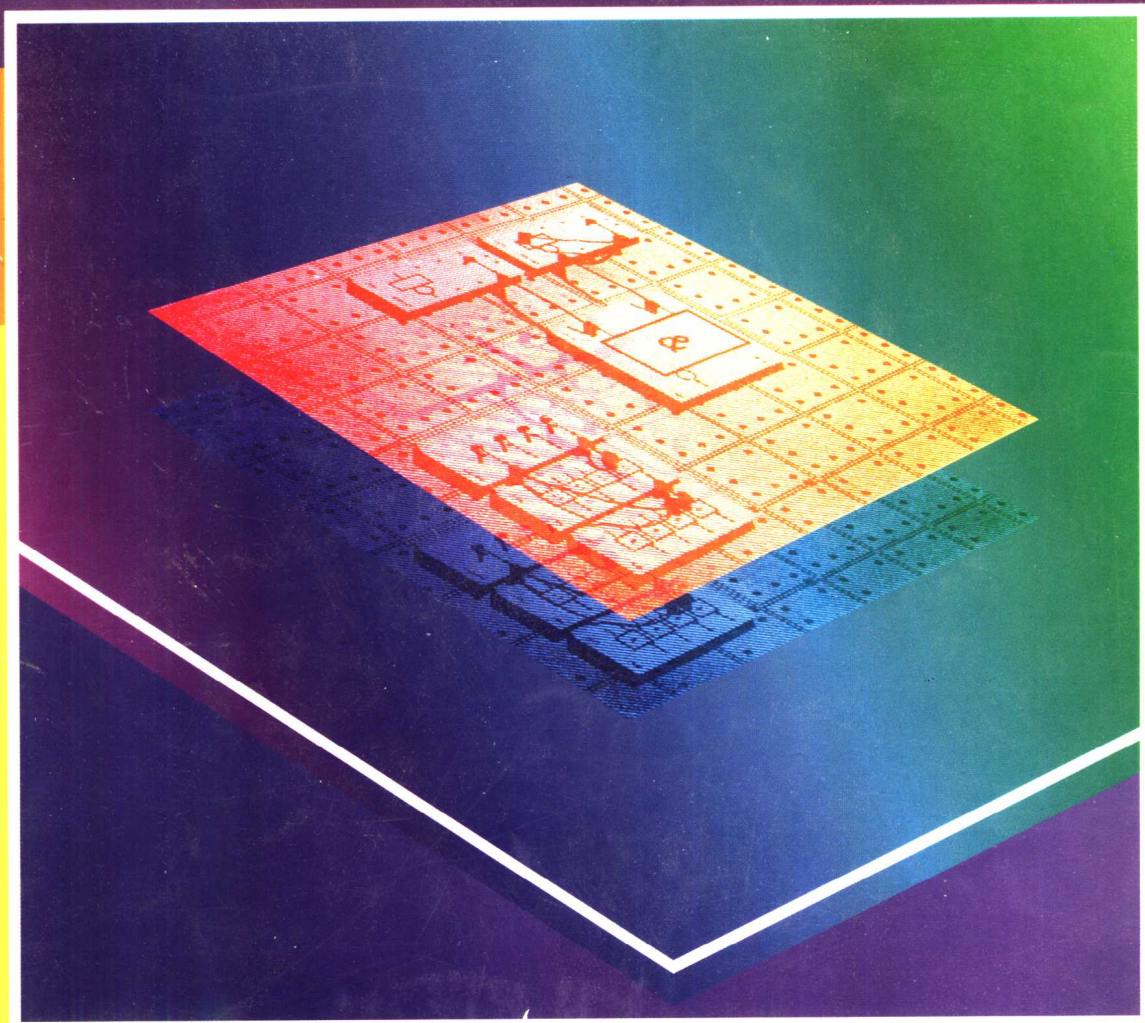


双元制培训电工电子专业理论教材

电子技术

——数字电路分册

双元制培训电工电子专业理论教材编委会 编



机械工业出版社
China Machine Press

双元制培训电工电子专业理论教材

电 子 技 术

——数字电路分册

双元制培训电工电子专业理论教材编委会 编

机 械 工 业 出 版 社

本书是技工学校、职业技术学校推行双元制办学体制的电工电子专业理论教材之一。本书主要内容：第1章与第2章为数字电路基础知识（门电路和逻辑代数）；第3章为组合逻辑电路知识；第4章与第5章为时序逻辑电路知识（触发器和时序逻辑电路）；第6章为数/模、模/数转换电路知识。

本书可作为技工学校、职业技术学校电工电子专业的教材，也可作有关工程技术人员和教师的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电子技术. 数字电路分册/双元制培训电工电子专业理论教材编委会编.
—北京：机械工业出版社，2000.12
双元制培训电工电子专业理论教材
ISBN 7-111-08338-5

I. 电… II. 双… III. 数字电路—专业学校—教材 IV. TN711.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2000）第71757号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

责任编辑：吴天培 版式设计：霍永明 责任校对：韩晶

封面设计：姚毅 责任印制：郭景龙

北京京丰印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2001年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·10印张·245千字

0 001—4 000册

定价：15.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677—2527

双元制培训电工电子专业理论教材编委会

主 任	孙宝源	花 昀	
副 主 任	李超群	李大卫	蒋建华
委 员	(按姓氏笔划排列)		
	吕景泉	李本元	吴天培
	季福全	姚柳雄	贾文鹏
	徐琤颖		

本书主编	李本元
主 审	施剑兰

前 言

“双元制”是德国等发达国家发展职业技术教育的一种先进的办学体制，被誉为二战后德国经济腾飞的“秘密武器”，其特点是企业与职业学校合作共同完成培养人才的任务。培训以企业为主，因此培养出来的人才能满足企业的要求；学习理论与学习技能，以技能为主，既注重基础技能的培养，更注重专业技能的训练，培养出来的是复合型实用人才；同时注重对学生解决问题的能力 and 社交能力的培养，以适应现代化大生产共同合作完成培训任务的要求。

改革开放以来，我国许多省、市和企业先后引进或借鉴“双元制”办学经验，培养出了一大批受企业欢迎、掌握现代科技技能的复合型技工。这株由日尔曼民族培养出的美丽奇葩，一经移栽到华夏大地的沃土之上即开放出鲜艳夺目的花朵。实践证明“双元制”基本适合我国国情，并具有强大的生命力。但是，由于多年来没有完整的、系统的、既能反映“双元制”特点，又适合我国国情的培训教材，已成为阻碍“双元制”在我国推广和发展的原因之一。为此，天津中德培训中心和上海大众汽车有限公司在机械工业出版社的支持下编写了这套双元制电工电子理论课培训教材。它包括《电工技术》、《电子技术——模拟电路分册》、《电子技术——数字电路分册》。在编写中我们特别注重保持“双元制”教材的特点，既保持教材的先进性、适用性、多样性以及形式的直观性，又特别注重结合我国的国情：注重专业理论为专业技能服务的基本原则和注重对学生专业能力、解决问题的能力 and 社交能力的培养。但是，由于我们实践的时间较短，对教材内容的选择、内容的深度和广度的把握缺乏经验，难免会详略不当、深浅不宜，对形式的选用也会有欠妥之处。因此，希望读者能提出宝贵意见，使其日趋正确、不断完善和适合读者的要求，以期为国家培养出更多、更好的复合型实用人才。

双元制培训电工电子专业理论教材编委会

2000年10月

双元制培训电工电子专业理论教材书目

电工技术

电子技术——模拟电路分册

电子技术——数字电路分册

目 录

前言	
绪论	
第 1 章 门电路	3
1.1 三种最基本的逻辑关系	3
1.2 三种基本逻辑关系的组合	5
1.3 开关电路	10
1.4 MOS 电路	28
复习思考题	36
第 2 章 逻辑代数	38
2.1 常量与变量	38
2.2 逻辑代数的基本法则	38
2.3 逻辑代数的运算规则	39
2.4 数制与编码	41
2.5 逻辑函数的表示方法	47
2.6 逻辑函数的化简	52
复习思考题	56
第 3 章 组合逻辑电路	58
3.1 组合逻辑电路的分析方法 和设计方法	58
3.2 常见的组合逻辑电路分析	60
3.3 码型转换电路和电平转换电路	64
3.4 比较器	78
3.5 多路选择器	81
3.6 地址译码器	86
3.7 计算电路	88
3.8 乘法电路	94
3.9 只读存储器	95
复习思考题	99
第 4 章 触发器	100
4.1 几种常见的触发器	100
4.2 触发器的时序图	112
4.3 单稳态触发器	114
4.4 延时触发电路	117
复习思考题	119
第 5 章 时序逻辑电路	120
5.1 计数器的特点与分类	120
5.2 异步计数器	120
5.3 同步计数器	126
5.4 分频器	134
5.5 寄存器与存储器	136
复习思考题	142
第 6 章 数/模、模/数转换器	144
6.1 数/模转换器	144
6.2 模/数转换器	147
复习思考题	153

绪 论

一、模拟量与数字量的描述

模拟与数字的概念源于计算技术，后来被广泛运用在电工电子技术以及测量技术中。

1. 模拟量的描述 模拟量模拟了物理量的实际变化规律，它的变化过程是平滑而连续的，在一定范围内可以任意取值。模拟量的测量精度要根据测量对象而定。例如测量电压时，其精度可以是 $\pm 1\%$ ，也可以是 $\pm 1\text{‰}$ ，还可以定得更高。

在日常的生活与工作中有很多不同的模拟量。例如，指针式测量仪表是一种模拟式测量仪表，用它测量的模拟量的大小是用指针与零分度线之间的夹角或者相应的分度盘弧线长度衡量的，见图0-1。指针可以指示出分度盘上的任何一个值。

图0-2中表示的也是一种模拟量，模拟量的大小是用涂黑的矩形的高度表示的。

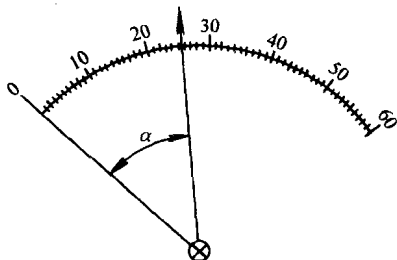


图0-1 指针式测量仪表

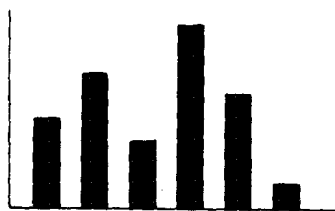


图0-2 用矩形高度表示的模拟量

另外，直角坐标系中的电压波形也是一种模拟量，见图0-3。我们可以在允许的范围取任意的电压值。

2. 数字量的描述 英文中数字这个词 (Digital) 源于拉丁文，意思为手指，人们可以用数手指的方法计数。数字计数方法有其优点已经是公认的了，它的准确性不受物理界限的限制。

现在的电子计算机中用脉冲来计数，每个脉冲代表一位数字，即计录三个脉冲表示数字3，37个脉冲表示数字37。这种方法很不经济也不便于推广，因此出现了编码的方法。图0-4是某种数字信号的波形图。

数字式仪表用数字显示结果，比如，数字式测量仪表，电子表等。数字显示的结果可以一目了然，不用像指针式仪表那样对最后一位进行估算。

二、二进制与逻辑状态

数字量是可数的，因此可以用两种、三种或更多

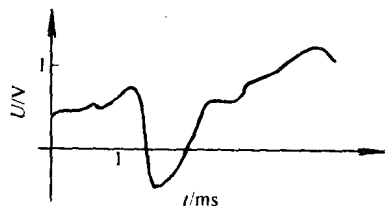


图0-3 任意电压波形

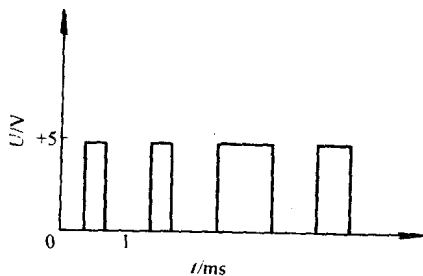


图0-4 数字信号波形图

种状态来描述。图 0-5 所表示的是有三种状态的数字信号，它的三种状态是 10V、5V、和 0V。

数字技术中最常用的计数方法是用 1 和 0 代表两种状态，如对于脉冲，用 1 表示“有”，用 0 表示“无”。对于电压，用 1 表示“高电平”，用 0 表示“低电平”，这种计数方法叫作二进制。与十进制一样，它也是一种数制，但它只包含两个数字“0”与“1”。现在所使用的数字电路以及电路符号都是二进制的。到目前为止，至少在技术领域内还没有其它数字技术可以代替二进制。在数字技术中常用的数字状态就是二进制状态。例如，开关的“开”与“关”，晶体管的“导通”与“截止”，材料的“有磁”与“无磁”等。数字电路中最常用到的是电压的高、低电平，在不同的场合可以选择不同的电压值作为高、低电平。例如，“+2V”与“0V”，“+5V”与“0V”，“+5V”与“-5V”，“+12V”与“0V”，“0V”与“-12V”等等。对于上述的电压状态，允许有一定的误差。例如，一个电压状态可以是 4~5.5V，另一个电压状态可以从 0~+0.8V。通常低电平用 u_L 表示，高电平用 u_H 表示，见图 0-6。

二进制数还必须遵从某种逻辑关系。在算术逻辑中，逻辑状态“1”表示“真”或“有”，逻辑状态“0”表示“假”或“无”。在某些应用中选用的逻辑状态可以与算术逻辑相反，但是逻辑状态一旦选定，就不能任意改变。常用的逻辑状态是：

$$0 = 0V$$

$$1 = 5V$$

需要注意的是二进制的两个状态，如高电平与低电平，与逻辑状态是两个不同的概念，二者不可混淆。

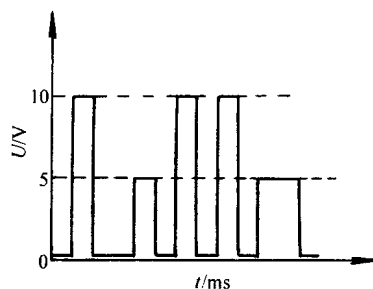


图 0-5 三种状态的数字信号

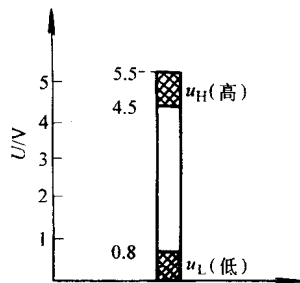


图 0-6 二进制电压状态高电平的低电平取值范围

第1章 门 电 路

1.1 三种最基本的逻辑关系

在数字电路中，“门”是指那些基本逻辑关系的电路。最基本的逻辑关系有“与”、“或”、“非”三种，因此最基本的逻辑门是“与门”、“或门”和“非门”。

1.1.1 “与门”

“与门”是实现“与”逻辑关系的电路。下面这句话中就包含“与”逻辑关系：如果明天天气好，弟弟有时间，我们一起去划船。只有“A：天气好”和“B：弟弟有时间”两个条件都满足，“Z：我们一起去划船”才能实现。这种关系可以用真值表1-1表述，其中“1”表示满足条件，“0”表示不满足条件。表中的排列顺序是最常用的一种。

表 1-1 真值表

	A	B	Z		A	B	Z
1	0	0	0	3	1	0	0
2	0	1	0	4	1	1	1

如果用电路来实现“与”逻辑关系，则只有A和B同时为1时Z才等于1。图1-1就是实现“与”逻辑关系的电路。

“与”逻辑关系也可以用表达式表述，其表达式为

$$Z = A \cdot B$$

图1-2中是“与门”的电路符号，图中所画的是只有两个输入端的“与门”。“与门”输入端的个数可以任意，但是只有所有输入端都为1时，输出端Z才等于1。

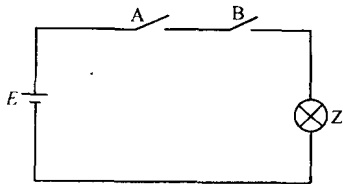


图 1-1 “与”逻辑电路

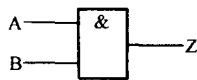


图 1-2 两输入端
“与门”

1.1.2 “或门”

“或门”是实现“或”逻辑关系的电路。下面这句话中就包含有“或”逻辑关系：如果我得到一笔遗产或者中了大奖，我将周游世界。只要“A：得到遗产”或者“B：中大奖”二者之一得到满足，或者两个条件都得到满足，则可以实现“Z：周游世界”。这种关系可以用真值表1-2表述，其中“1”表示满足条件，“0”表示不满足条件。

表 1-2 真值表

	A	B	Z		A	B	Z
1	0	0	0	3	1	0	1
2	0	1	1	4	1	1	1

如果用电路来实现“或”逻辑关系，则当输入端 A 和 B 中有一个为 1 或者两个都为 1 时，输出 Z 就等于 1。图 1-3 就是实现“或”逻辑关系的电路。

“或”逻辑关系也可以用表达式表述，其表达式为

$$Z = A + B$$

图 1-4 是“或门”的电路符号，图中所画“或门”只有两个输入端，实际应用中“或门”可以有多个输入端。电路符号上的“ ≥ 1 ”表示只要众多输入端中等于 1 的输入端个数 ≥ 1 ，则输出 Z 等于 1。

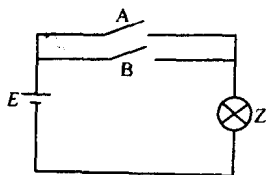
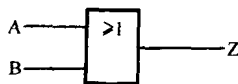


图 1-3 “或”逻辑电路

图 1-4 两输入端
“或门”

1.1.3 “非门”

“非门”是实现“非”逻辑关系的电路，即此种电路的输入与输出状态总是相反的，输入是“真”，输出就是“假”。请看下面这句话：如果有客人来访，晚上我就不能去看电影。如果“A：有客人来访”是真的，那么“Z：去看电影”就不能实现，如果 A 是假的即无客人来访，那么“Z：去看电影”就能实现。真值表表 1-3 表达了这种关系，这个真值表中只有两种可能。

由于“非门”的输入与输出状态总是相反，通常称它为反相器。图 1-5 是“非门”电路。

表 1-3 真值表

	A	Z
1	0	1
2	1	0

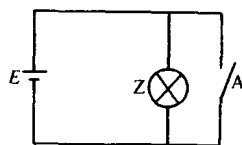


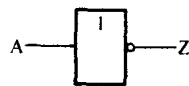
图 1-5 “非门”电路

“非”逻辑关系也可以用表达式表述，其表达式为

$$Z = \bar{A}$$

式中 A 上的短横线表示相反。

图 1-6 是非门的电路符号。

图 1-6 “非门”
电路符号

1.2 三种基本逻辑关系的组合

1.2.1 “与非门”

将“与门”与“非门”按图 1-7 所示联接起来,“与门”输出端 X 的状态将反相,其结果如表 1-4。从表中可以看出输出 Z 的状态由“与门”输出 X 反相得到,因此 A、B 与 Z 之间是“与非”的关系,这种组合电路称为“与非门”。图 1-8 是“与非门”的电路符号,表 1-5 是它的真值表。

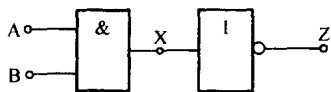


图 1-7 “与门”和“非门”组合而成的“与非门”

表 1-4 图 1-7 电路真值表

	A	B	X	Z
1	0	0	0	1
2	0	1	0	1
3	1	0	0	1
4	1	1	1	0

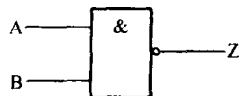


图 1-8 “与非门”
电路符号

表 1-5 “与非门”真值表

	A	B	Z
1	0	0	1
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	0

“与非门”是这样一种电路,当其输入不全是 1 时,其输出为 1,反之为 0。“与非门”的表达式为

$$Z = \overline{A \cdot B}$$

1.2.2 “或非门”

将“或门”与“非门”按图 1-9 联接起来,“或门”的输出信号 X 将被反相,其结果如表 1-6。A、B 与 Z 之间的逻辑关系为“或非”,这种电路组合为“或非门”。图 1-10 是“或非门”的电路符号。

“或非门”是这样一种逻辑电路,只有输入都是 0 时输出 Z 才等于 1。“或非门”表达式如下

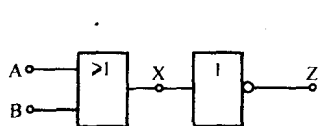


图 1-9 “或门”与“非门”组合的“或非门”

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

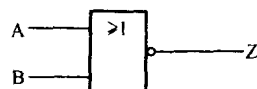


图 1-10 “或非门”
电路符号

1.2.3 “异或门”

实际应用中经常需要这样一种电路，当两个输入状态不同时，输出为 1；而当两个输入状态相同时，输出为 0，这种逻辑关系称为“异或”。图 1-11 是用最基本的逻辑门组成的“异或门”。表 1-7 是“异或门”的真值表，在此表中列出了每个基本逻辑门的输出结果，以便于分析。

表 1-7 中的①、②两列给出了输入端 A、B 的四种组合，信号 A、B 经过“非门”输出为 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ ，其状态写在③、④列中，⑤、⑥两列是两个“与门”的输出状态，分别为 Q 与 S，最后一列⑦中是“或门”的输出状态，也就是“异或门”的输出结果。“与门”输出 Q 和 S 同时作为“或门”的输入，Q 和 S 中只要有一个为 1，Z 就等于 1。图 1-12 是“异或门”的电路符号，表 1-8 是它的真值表。根据“异或门”电路，可以写出它的表达式为

$$Z = \bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B}$$

“异或门”也可以用其它基本门电路组成。

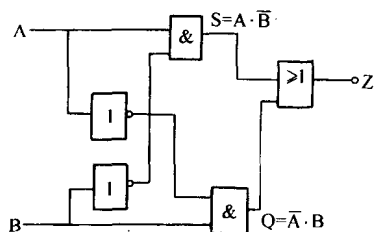


图 1-11 基本逻辑门组成的
“异或门”

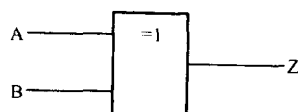


图 1-12 “异或门”电路符号

表 1-7 “异或门”真值表

	① A	② B	③ $\bar{A}$	④ $\bar{B}$	⑤ $Q = \bar{A} \cdot B$	⑥ $S = A \cdot \bar{B}$	⑦ $Z = Q + S$
1	0	0	1	1	0	0	0
2	0	1	1	0	1	0	1
3	1	0	0	1	0	1	1
4	1	1	0	0	0	0	0

表 1-8 真值表

	A	B	Z		A	B	Z
1	0	0	0	3	1	0	1
2	0	1	1	4	1	1	0

1.2.4 “异或非门”

在异或门的输出端联接一个非门，异或门的输出被反相。新组成的逻辑门产生这样一种逻辑关系，两个输入信号 A 与 B 的状态相同时，即同时为 0 或者同时为 1，输出 Z 等于 1，不同时 Z 等于 0。这种电路称作“异或非门”。图 1-13 就是用基本逻辑门组成的异或非门，表 1-9 是列出了各种基本逻辑门输出状态的真值表。

表 1-9 与表 1-8 的排列方法相同，这里不再赘述。根据图 1-13 可以写出“异或非门”的表达式为

$$Z = \bar{A} \cdot \bar{B} + A \cdot B$$

图 1-14 是“异或非门”的电路符号，表 1-10 是它的真值表。

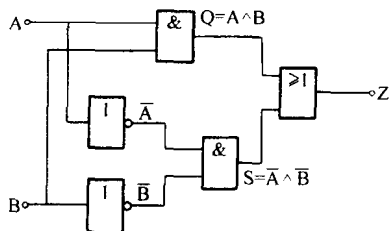


图 1-13 基本逻辑门组成的异或非门

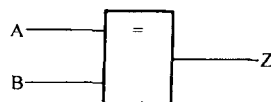


图 1-14 “异或非门”电路符号

表 1-9 “异或非门”的分列真值表

	① A	② B	③ $\bar{A}$	④ $\bar{B}$	⑤ $Q = A \cdot B$	⑥ $S = \bar{A} \cdot \bar{B}$	⑦ $Z = Q + S$
1	0	0	1	1	0	1	1
2	0	1	1	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0
4	1	1	0	0	1	0	1

表 1-10 “异或非门”真值表

	A	B	Z		A	B	Z
1	0	0	1	3	1	0	0
2	0	1	0	4	1	1	1

从以上的分析可以看出“异或门”和“异或非门”相互间有“非”的逻辑关系。根据摩根定理很容易将“异或门”表达式转换为“异或非门”表达式。有关问题将在后续章节继续说明。

1.2.5 两输入端门电路

我们已经分析了基本逻辑门和由基本逻辑门组合而成的逻辑门电路，那么两输入逻辑门在前面已给出的四种输入组合状态下是否可以有其它的输出呢？回答是肯定的，但没有什么用处。

下面将四种输入组合与可能出现的 16 种输出状态列在一个真值表中进行分析比较, 见表 1-11。观察这个真值表可以看出, 16 种输出中有几种没有实际意义。对于“恒为 0”和“恒为 1”没有相应的逻辑门与之对应, 因为不论输入状态如何变化, 输出恒等于 1 或 0, 也就是说实际上输入与输出没有关系。“A 非”与“B 非”两栏可以分别用“非门”实现。“A 同”与“B 同”可以用同相放大器实现。同相放大器的输入为 1 时, 输出总是 1。经此种放大器可以再生微弱信号, 见图 1-15。

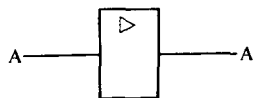


图 1-15 同相放大器
电路符号

表 1-11 两输入逻辑门 16 种输出状态真值表

	A	B	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₁₄	Z ₁₅	Z ₁₆	
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
2	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	
3	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
			恒 为 0	或 非	禁 A 与 门	A 非	禁 B 与 门	B 非	异 或 门	与 非 门	与 门	异 或 非 门	同 B	禁 A 或 门	同 A	禁 B 或 门	或 门	恒 为 1	

“禁 A 与门”和“禁 B 与门”是特殊的与门, 它们都有一个输入端先经非门反相再接入与门, 见图 1-16 与图 1-17。

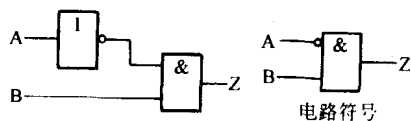


图 1-16 禁 A 与门及其电路符号

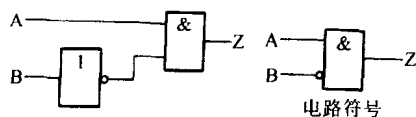


图 1-17 禁 B 与门及其电路符号

“禁 A 或门”和“禁 B 或门”是特殊的或门, 它们都有一个输入端先经非门反相后再接入或门, 见图 1-18 与图 1-19。

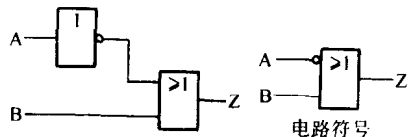


图 1-18 禁 A 或门及其电路符号

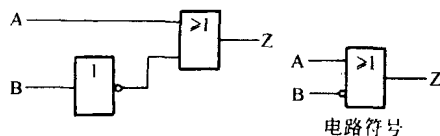


图 1-19 禁 B 或门及其电路符号

上述两种逻辑门电路应用面较窄, 而且市面上买不到, 要用基本逻辑门组合而成。

1.2.6 三输入端及多输入端门电路

逻辑门电路可以有两个输入端, 也可以有三个甚至多个输入端。

两输入端逻辑门有 4 种输入组合，在前面讲述的逻辑门真值表中已经反复出现过。如果再增加一个输入端，它的状态可以是 0 也可以是 1。现在以与门为例加以说明。两输入与门的输入端为 A 和 B，再增加一个输入端 C，A、B 原有的 4 种输入组合要和 C=0 组合一次，还要和 C=1 再组合一次才能完成三个输入端的逻辑组合，因此三个输入端的逻辑组合就变成了 8 种。表 1-12 是三输入与门真值表。图 1-20 是它的电路符号。

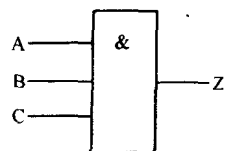


图 1-20 三输入与门电路符号

表 1-12 三输入与门真值表

	A	B	C	Z
1	0	0	0	
2	0	0	1	
3	0	1	0	
4	0	1	1	
5	1	0	0	
6	1	0	1	
7	1	1	0	
8	1	1	1	

再增加一个输入端 D，D 的状态可以是 0 也可以是 1，A、B、C 的 8 种组合要分别同 D=0 和 D=1 各组合一次，也就是说四个输入端的逻辑组合有 16 种。从上面的分析可以看出，每增加一个输入端，输入端逻辑组合的数量就要增加一倍，据此可以推算出，五个输入端逻辑门的输入逻辑组合为 32 个，六个输入端逻辑门的输入逻辑组合为 64 个等等。稍加分析即可以找出其中的规律，输入逻辑组合的数量等于 2 的 n 次方， n 即为输入端的个数。表 1-13 是四输入与门的真值表。

表 1-13 四输入与门真值表

	A	B	C	D	Z
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0

(续)

	A	B	C	D	Z
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	0
6	0	1	0	1	0
7	0	1	1	0	0
8	0	1	1	1	0
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	1	0
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	0
15	1	1	1	0	0
16	1	1	1	1	1

从表 1-12 和表 1-13 两个真值表可以看出各输入端 0、1 状态的转换很有规律。输入端 D 的 0、1 状态交替出现；输入端 C 每隔 2 个 0 或 2 个 1 转换一次；输入端 B 每隔 4 个 0 或 4 个 1 转换一次；输入端 A 则是每隔 8 个 0 或 8 个 1 才转换一次。

与门、或门、与非门和或非门大多都是两输入端或 4 输入端，有时也能见到八输入端。

1.3 开关电路

晶体管、场效应管都可以作为无触点电子开关使用，二极管的单向导电性具有电子开关的功能。这些半导体元件的开状态也就是它们的导通状态，输出呈低电平；关状态就是它们的截止状态，输出呈高电平。这里所说的高、低电平就是前面所说的二进制状态，因此这些半导体元件可以组成各种门电路。

由半导体元件组成的门电路可以分为分立元件门电路和集成门电路。分立元件门电路是将市面上能买到的半导体元件（通常是二极管、三极管）用导线连接成门电路。这种电路体积大而且价格贵，已很少使用。在集成电路中制成晶体管系统或二极管系统并不困难，系统