

# 应用数字集成电路

(一)

北京市技术交流站

1978·9

## 目 录

绪 论	- - - - -	3
第一章 逻辑运算和逻辑电路	- - - - -	13
1-1 基本逻辑运算	- - - - -	13
1-1-1 二进制	- - - - -	13
1-1-2 逻辑表达式及其表示	- - - - -	15
1-1-3 真值表	- - - - -	16
1-1-4 基本逻辑运算公式	- - - - -	17
1-2 逻辑电路	- - - - -	21
1-2-1 基本逻辑门	- - - - -	21
1-2-2 逻辑门组成逻辑系统的方式 (组合逻辑与时序逻辑)	- - - - -	26
1-3 逻辑式与逻辑电路的互化	- - - - -	28
1-3-1 将逻辑电路化为逻辑式	- - - - -	29
1-3-2 将逻辑式化为逻辑电路	- - - - -	30
1-4 实际电信号的逻辑含义	- - - - -	33
第二章 集成电路逻辑门的基本原理	- - - - -	35
2-1 理想开关	- - - - -	36
2-2 二极管和三极管开关	- - - - -	36
2-3 晶体管——晶体管逻辑(TTL)	- - - - -	38
与非门	- - - - -	38
2-4 MOS 晶体管开关	- - - - -	48
2-5 P-MOS 反相器	- - - - -	52
2-6 互补 MOS (CMOS) 反相器 和传输门	- - - - -	55

第三章	集成电路逻辑门的技术指标和测试	- - -	59
3-1	集成电路逻辑门的性能指标	- - -	59
3-1-1	噪声容限与逻辑振荡	- - -	60
3-1-2	扇入和扇出	- - -	65
3-1-3	平均传输延迟时间	- - -	68
3-1-4	功耗	- - -	71
3-2	各种类型集成电路逻辑门性能的比较	-	74
3-3	集成电路逻辑门的测试	- - -	76
3-4	集成电路逻辑门使用中的几个问题	- -	80
3-4-1	线与逻辑上拉电阻 $R_p$ 的计算	-	80
3-4-2	多余输入端的处置	- - -	82
3-4-3	MOS 集成电路的保护及使用 注意事项	- - -	83
3-5	不同类型集成电路的衔接和接口电路	-	87
3-5-1	电路衔接条件	- - -	87
3-5-2	接口电路	- - -	89
第四章	集成电路触发器和自激多谐振荡器	- - -	96
4-1	基本 RS 触发器	- - -	96
4-2	RS 复位置位触发器	- - -	99
4-3	优先置位 (S) 和优先复位 (R) 触发器	105	
4-4	数据 (D 和 DV) 触发器	- - -	107
4-5	双输入端 JK 和 E 触发器	- - -	111
4-6	计数 (T) 触发器和具有直接置位端的 计数 (RST)	- - -	113

## 绪 论

数字集成电路是在晶体管数字电路的基础上发展起来的一种新型电路。在计算机技术、工业自动化、通讯观测等方面都得到了广泛的应用。

晶体管、电阻、电容等元件所组成的电路，一般称为分立元件电路。这种电路有不少缺点：体积大、耗电多、费材料、费工。但最严重的问题是故障。一个用于进行计算或控制的数字化机械线路所包含的分立元件数量很大。而这些电路又往往由大量元件、用几千根导线、成千个焊点组装起来的。因此发生故障的机会很多，而且由于故障也难于寻找和排除。生产实践告诉人们必须解决这个问题。

1960年前后作为取代电子管的第二代电子元件晶体管在各个领域中已得到了相当广泛的应用，特别是硅材料晶体管和溅射技术、外延生长技术、光刻技术、氧化的绝缘扩散技术等工艺技术的迅速发展，使得平均晶体管的产量大为提高，在许多方面取代了原来统治地位的真空管并显示了很大的优越性。这样就为硅元件工艺的基础上展开了集成电路的研制工作。

通过实践，找到了一个好办法。把很多电路元件都制作在一个很小的硅片上，封在一个管壳里，外形像只晶体管，管壳里却是一个完整的电路。这样就使焊点和引线自然大为减少，使用起来出毛病的机会也就少多了。这种封装在一个管壳里能进行逻辑运算的开关电路可能是一个或几个逻辑门电路，也可能是由成千个元件或元件组成的逻辑元件，统称为数字集成电路。

实际上应用的数字集成电路的品种很多，一般都以某些元件的名称或其所组成逻辑电路的方式来命名和分类，称之为累

种逻辑的数字集成电路。如TTL就是指晶体管 晶体管  
逻辑数字集成电路，MOS逻辑就是指金属 氧化物  
半导体逻辑数字集成电路等。图1列出了常用数字集成电路  
的分类。另外，集成电路也可以按集成度来分类。一个集成度

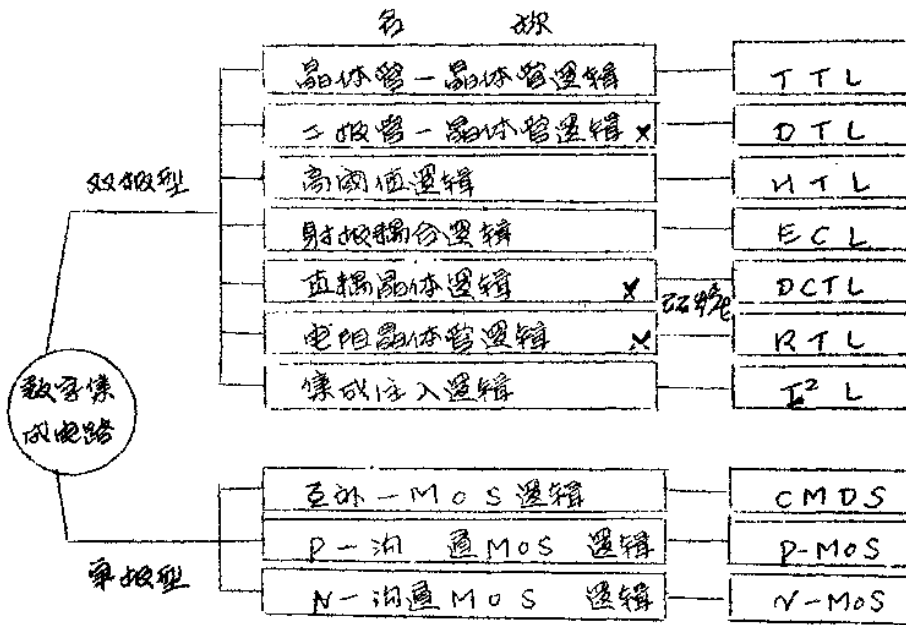


图 1

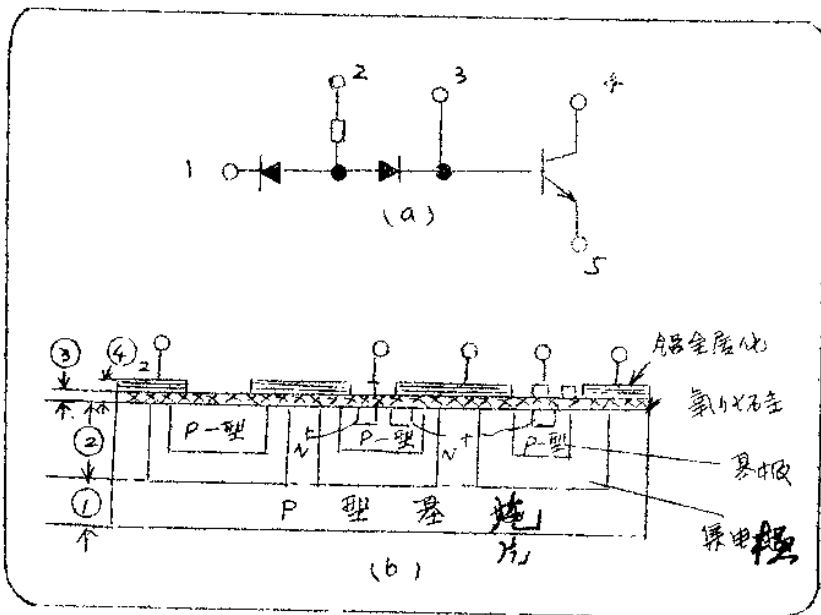
所包含的门的个数 $n$ 称为集成度。一般称 $n < 13$ 的电路为  
小规模集成电路 (SSI)，称 $13 < n < 100$  的电路为  
中规模集成电路 (MSI)，而 $n > 100$  的电路则称为大规  
模集成电路 (LSI)

任何电子数字计算机或其他数字系统都是由10~20种  
基本逻辑电路及逻辑组合起来的。因此采用数字集成电路之后，

不仅降低材料和电力消耗大大降低，也可以简化设计。若着数  
能二时，便于实现小型化，增加可靠性，与分立元件电路相比  
还发生成本大的下降 20%。

集成电路里的结构怎样：究竟如何制作出来的呢？下面  
我们通过一个简单的集成电路的内层结构来加以说明，图 2-  
a 示示了包括一个晶体管，两个二极管和一个电阻的高集成度逻辑  
电路。把它作成集成电路的内层结构原理示于图 2-b。总的  
看来，它是由四层材料组成的（参见图 2-b）：

①. 底层：这是一个厚度的为  $150 \mu m$  的 p-型硅片，  
称为基底，也叫做衬底。任何集成电路都是以基底为依此形成  
起来的。



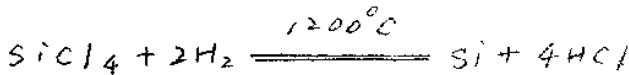
②. N-型层：这一层是在 p-型基底上生长出来的。

~ 6 ~

与 p-型的晶体结构相同的 n-型单晶层，一般称为外延层。在集成电路中所有的晶体管、二极管、电阻和电容等元件都是在这一层材料中制作的。它的厚度很小，大约只有  $2.5 \mu m$ 。

③. 二氧化硅 ( $SiO_2$ ) 保护层：在实际制作中，我们常需要把一个硅片的某些部分表面掩蔽起来，并对其余部分进行杂质扩散。  $SiO_2$  层正好可以起到这种掩蔽杂质扩散的作用。此外，  $SiO_2$  膜还可以保护已经做好的电路 p-n 结不受外界腐蚀剂污染。

④. 金属化层：一般用金属铝作成。它用来实现晶体管各元件之间的内部联接。  
制备集成电路的主要工序如图3所示，它们是在  $1200^\circ C$  的炉中左右高温下通入适当的气体，使硅片上生长各种单晶层。其基本化学反应为

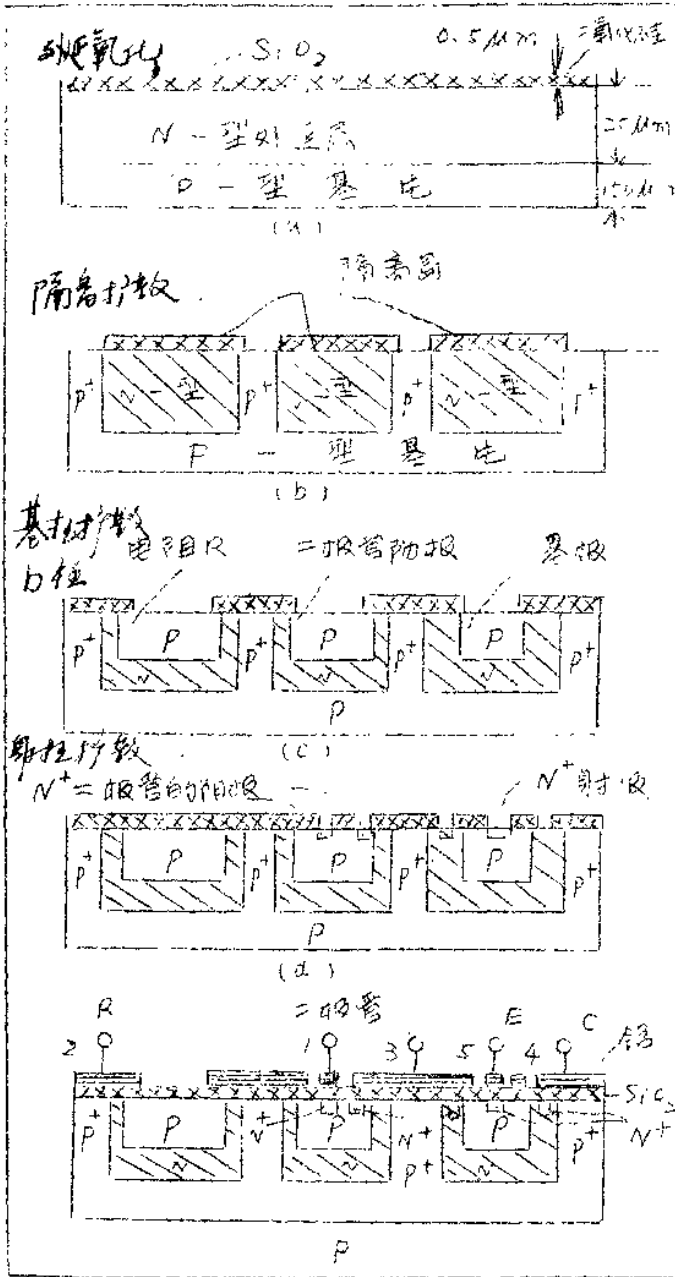


根据需要，通入 p-型杂质硼或 n-型杂质磷便可分别得到 p-或 n-型外延层。

外延层长好之后需要进行氧化。这道工序是把硅外延片放在高温下与氧气或水汽反应，在其表面生成一层的  $0.5 \mu m$  的  $SiO_2$  保护膜

第二步、隔离扩散 (图3-b)：这 p 工序主要是通过光刻的方法按照一定图形除去一部分  $SiO_2$  膜，使被这层除去的部分表面暴露出来，称为开窗口，窗口开好后，再进行杂质扩散，形成一个 n-型隔离层。

光刻工艺如图5所示。先在硅片的表面上均匀覆盖上一层光刻胶。这种胶一经光照射后就不溶于显影液。然后将胶



(e) 图 3



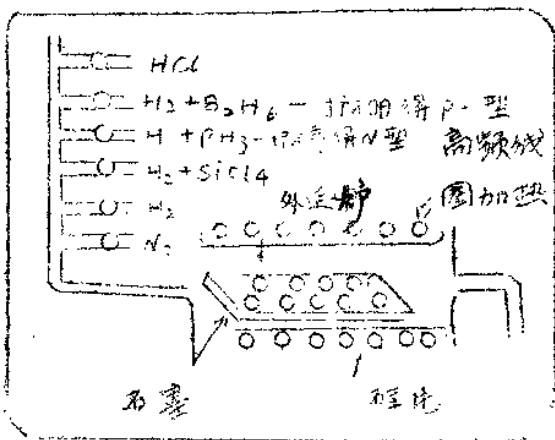


图 4

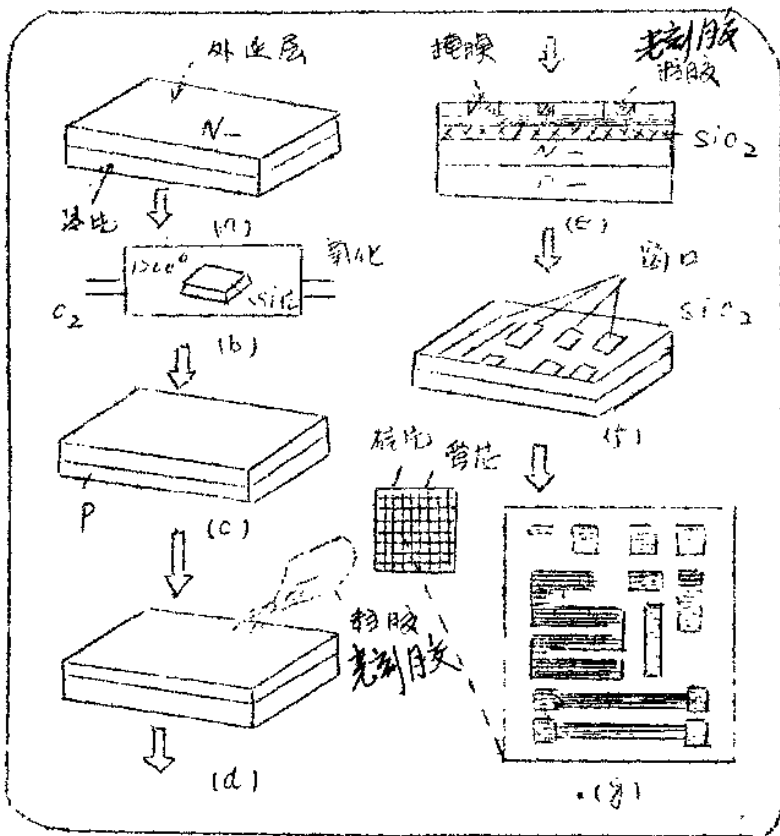


图 5

将集成电路所要求的图形事先做好的掩膜（它相当于照相底片）放在硅片上进行曝光。然后用溶剂将未经曝光的刻蚀膜溶解掉，并将相应的  $SiO_2$  膜层溶解，形成一个窗口；而由下部的曝光的刻蚀膜图形则构成一层保护膜，使下面的  $SiO_2$  膜不受腐蚀。这层  $SiO_2$  膜又好比一个新掩膜。

光刻之后，把硅片置于高温、有杂质的气氛中，杂质就可以顺着硅片的窗口扩散进来，在原来的  $V$ -型外延层中形成一个杂质浓度还要高的  $p$ -型区，用  $p^+$  表示（图 3-b）。因为此时  $SiO_2$  膜下部的各  $N$ -型区被一对互相掺杂的  $p$ - $N$ 、结二极管所隔离，因此这些  $N$ -型区就被称为隔离岛，通过这种隔离方式可以使电路中的各个元件实现相互间的电气绝缘。

第三步、基极扩散（图 3-c）：在这道工序中，首先进行氧化，形成一层新的  $SiO_2$  膜。然后进行涂胶、掩膜、曝光、腐蚀。随后对窗口进行杂质扩散（扩散）形成晶体管的基极。电路的电阻和二极管的阳极是  $p$ -型区。

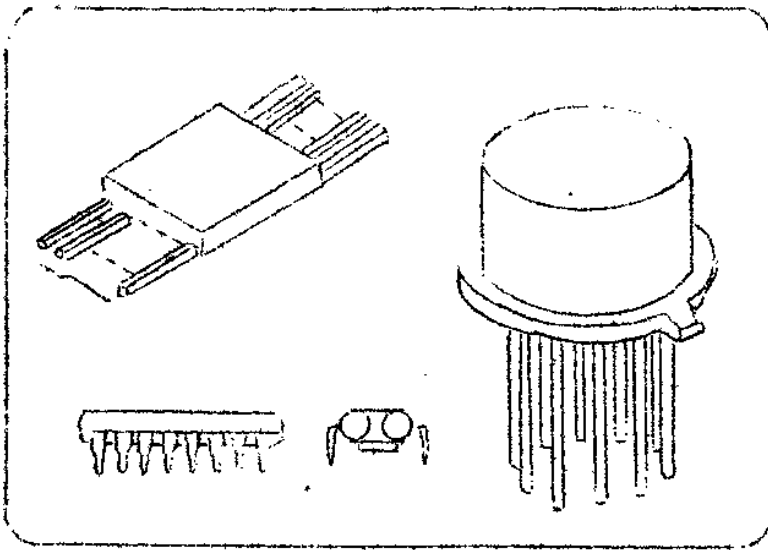
第四步、发射极扩散（图 3-d）：这一步工序又重复氧化、涂胶、掩膜、曝光、腐蚀等步骤。然后对新开的窗口进行扩散，便可得到一些  $N^+$  型区，分别作为晶体管的发射极、二极管的阳极等。

还应当指出，对于硅材料，铝是一种  $p$ -型杂质。所以在本工序中大象杆磷可以防止下步高温工序时铝错渗进而形成寄生  $p$ - $N$  结的现象发生。

第五步、铝金属化（图 3-e）：在以上各步工序中，已经制成了电路中所有的  $p$ - $N$  结和电阻，下道工序是把它们按所要求的逻辑关系连成电路。为此，在一个  $SiO_2$  膜上再开新窗口，然后在真空中加热金属液完成蒸发，从而在一个硅片

的表面上涂敷一层很薄的导电金属膜。再用光刻的方法去掉无用的部分，使导电部分在硅片上的一个集成电路管芯。每个管芯的面积大约只有  $125 \times 150 \mu\text{m}^2$ 。经过划片工序后，将一块大硅片上的一个管芯（图c-9）切开。再从管芯的余度化部分（通过焊接）接出外引线，封装起来，便成了一个产品集成电路。

目前生产的集成电路封装方式主要有圆形管壳式（图b-a）、扁平式（图b-b）和双列直插式（图b-c）三种。圆形管壳的优点是散热性能好，易于组装，但体积容量大，影响装配密度的提高，一般数字集成电路不大采用。扁平封装是目前国内生产采用较多的一种方式，它的最大优点是可以提高装配密度，但散热性能不及圆形管壳的好。双列直插式是比较兼有以上两种封装方式优点的一个品种，尤其在拆卸时不会损坏



电路管腿或弄巧印制板等电参量是其显著的优点。但目前国内这种封装的生产仍还不及扁平封装普遍。

以上简要介绍了数字集成电路的分类，内中结构、制造工艺和封装方式。我们的学重点是介绍集成电路的应用。这里分五章。图7表示了这五章的内容及其内在联系。其中第一章《逻辑元件和逻辑电路》主要讨论数字集成电路应用中涉及到的基本数字二值的逻辑概念。第二章《集成电路逻辑门》和第三章实际集成电路中产生的大问及理性问题的归纳成为种平富体下受初基本集成电路逻辑门，并通过对这些基本元件和基本电路工作原理的分析为后面的分析各种实际电路打下基础。

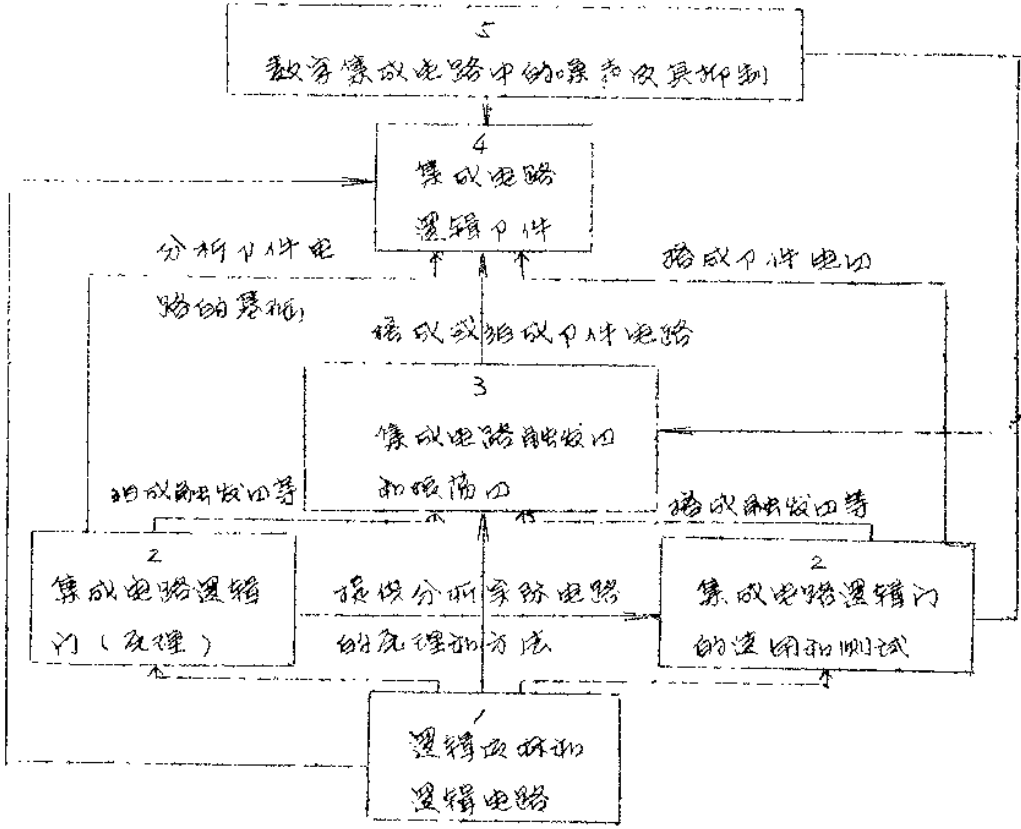


图 7

~ 12 ~

第3、4两章讨论由集成电路逻辑门搭成的各种触发器和逻辑元件，也讨论了由这些门组成的集成电路触发器和中规模集成电路。最后介绍实际应用中经常遇到的一些问题：噪声的产生及其抑制方法。

总之，要能灵活运用各种数字集成电路，需要学会分析这些电路的基本方法，了解这些电路的基本逻辑功能和性能指标的含义。掌握了这些要点，实际问题就不难迎刃而解。

## 第一章 逻辑运算和逻辑电路

即使像电子计算机、模拟计算装置或数字通信装置那样比较复杂的数字系统，也只不过是几种最基本的逻辑运算。这些逻辑运算要重复许多次。与门、或门、非门和触发器是这些数字系统中最常用的电路。因为它们是用来实现逻辑运算的，所以称为逻辑电路。数字集成电路就是一种逻辑电路。

在本章，我们讨论与数字集成电路应用有关的某些逻辑运算和逻辑电路。

先介绍研究逻辑电路的数学工具逻辑运算。

然后介绍最基本的逻辑电路、门电路。

对门电路组成逻辑系统方式（组合逻辑与时序逻辑）的讨论使我们能站在系统的高度认识各种门在整体电路中的作用。

逻辑式与逻辑电路的互相转化是设计和分析电路中时常会遇到的问题。我们以组合逻辑为例说明转化的方法，并特别着重讨论怎样将一个逻辑表达式化为由数字集成电路中最常用的与非门及或非门搭成的逻辑电路。

最后讨论逻辑电路中电信号的含义，正逻辑与负逻辑的概念，使我们了解实际电路中的物理量与逻辑式中的运算量之间的关系。

总之，通过以上讨论着重解决逻辑运算和逻辑电路的有关基本概念及二者之间的关系，为应用数字集成电路作为数字系统提供一个分析和设计工具。

### 1-1 基本逻辑运算

#### 1-1-1 二进制

我们在日常工作和生活中一般都用0、1、2、3、4、5、6、7、8、9

~ 14 ~

这十个数码符号进行运算。这就是十进制计数制运算。这些数码符号称为数码。例如883.56就表示 $8 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$ 这个数。由此可见,这些数码一经组成数字之后,即便是相同的数码,意义也变了。如“883.56”这个数中,第一个数码8表示 $8 \times 10^2 = 800$ ,第二个也是8,但它表示的却是 $8 \times 10^1 = 80$ ,在一个数字中,数码所占的位置叫做数位,所以上面的意思也可以说成是:处于不同数位的数码代表的数值不同。所以在十进制中十个数码按不同的方式组合起来能表示无数个不同的数字。

这里说明的是,十进制指的是进位计数的方式。我们常称数码的个数称为基数。十进制的基数是10。一个十进制数,每位计满10个数码后就向高位进1。这也就是平常所说的“逢十进一”。

于是又提出了问题。用数字电路实现十进制运算方便吗?在数字电路的应用中有没有更合适的进位制来代表常用的十进制呢?人们从生产实践中发现,二进制扮演这个角色相当合适。

在二进制里只有两个数码0和1。所以说它的基数是2。它是“逢二进一”的。例如二进制 $1101.01 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$ 。在二进制数和十进制数中一样,每个数码也占据一定的位置,称为二进制数位。每个数码占了一定的数码后,就具有了特定的意义。如上例数字中最高位的1表示 $1 \times 2^3 = 8$ ,最低位的1则表示 $1 \times 2^{-2} = \frac{1}{4}$ 。

二进制的一大特点是运算简单,节省电路元件。我们知如无论用哪种进制,要作简单的算术运算都必须记住对两个整数作加法和乘法的结果。例如在十进制中就要记住 $\frac{10(10+1)}{2} = 55$ 个和积。因此相应的运算和控制线路就比较庞杂。而在二进制中作同样的运算只需要 $\frac{2(2+1)}{2} = 3$ 个和积。加法是:

$$0 + 0 = 0$$

$$1 + 0 = 0 + 1 = 1$$

$$1 + 1 = 10$$

(注：10不是“+”，在二进制中读做“-0”。)

乘法的：

$$0 \times 0 = 0$$

$$1 \times 0 = 0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

可见，实现同样的运算，采用二进制比十进制在线路上要简单得多。

采用二进制还有一个重要原因，就是二进制中只包含两个数码，1和0。所以用电路中具有两种不同稳定状态的任何简单的开关元件都能表示任一个二进制单位。

但是，数学电路或计算机本身不“理解”什么叫二进制。必须令它们通过一定的数学方法和一定的运算规律才能实现二进制运算。这和数学称为逻辑学，这种运算规律称为逻辑运算。

### 1 - 1 - 2 逻辑学及其表示：什么是逻辑学？为什么要用

逻辑学：它和普通的代数有什么不同？这是我们接触这个问题后会很自然联想起来的问题。回答是：因为有开关和开关电路，需要给它们一个数学的描述，好让它们实现二进制运算。一个开关只有“合”与“断”两个状态。用普通的十进制数制不好描述它。于是人们就想到用二进制的逻辑学来描述开关的两个状态。它不像代数那样表示实际的数值而只是表示两种对立状态中的一种，分别命名为0(伪)和1(真)。可以说，普通代数是数学变量间关系的符号表示法，而逻辑代数则用符号表示逻辑学之间的关系。



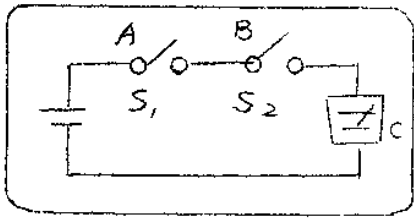
一个逻辑变既可以逻辑变也可以逻辑常变。如果它是逻辑变的话，那么随着时间的迁移，它总是，而且只能是在“1”，“0”两个状态之间变化；如果是逻辑常变，那么它就永远保持“1”或“0”两种状态中的一个。

在逻辑代数中，用字母表示逻辑变变的取值(状态)。例如，字母A可以表示一个逻辑变变的取值。这时，因为一个逻辑变变只可能取两种逻辑值(状态)，因此A的取值只能是1，或者是0。

1 - 1 - 3 真值表

一个逻辑电路总有一个或几个输入和输出变。输入或输出变之间的关系称为逻辑关系或逻辑功能。一般用逻辑运标式来表示这种关系(功能)。还有一种最常用的直观方法描述逻辑关系，叫做真值表。我们通过图1-1a的电路来说明它。图中，用A表示开关S<sub>1</sub>的状态，B表示开关S<sub>2</sub>的状态，电路的输出为电流表的指示值C。可以用一个简单的逻辑运标式来描述这个电路输出和输入变之间的逻辑关系：

$$A \cdot B = C$$



逻辑变变 输入

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

(a) 图 1 - 1 (b)

图1-1-b用真值表来描述同一逻辑关系。方法是：沿水平方向列出一个逻辑式中所有的变变(电路的输入变)和由这些变变所确定的输出变。在本例中就是A、B和C，沿垂直方向