
可编程逻辑设计

许芳

2021-2022-2

课程大纲

专业教育选修课 32学时（16学时理论，16学时实验）

- **第一章 数字逻辑基础**
- **第二章 Verilog HDL入门**
- **第三章 Verilog HDL基础与组合电路建模**
- **第四章 时序逻辑建模**
- **第五章 有限状态机设计**
- **第六章 可编程逻辑器件**

课程考核：出勤、作业(10%) + 课程设计(20%) + 考试(70%)

参考教材

- 罗杰 主编，Verilog HDL与FPGA数字系统设计，机械工业出版社



- 李辉 邓超 主编，FPGA原理与应用，机械工业出版社



1 数字逻辑基础

1.1 数字电路的发展历史及分类

1.2 逻辑运算及逻辑门

1.3 逻辑函数的代数化简法

1.1 数字电路与数字信号

1.1.1 数字电路的历史与分类

1.1.2 模拟信号与数字信号

1.1.3 数字信号的描述方法

1.1 数字电路的历史与分类

数字电路是数字计算机和自动控制系统的基础，它的发展是以电子器件的发展为基础的，器件的发展可以大致上分为3个阶段：

- 电子管 (1906年)
- 晶体管 (1947年)
- 集成电路 (Integrated Circuit, 简称IC, 1958年)

□ 器件发展的几个阶段：

数字电路发展特点：以电子器件的发展为基础

电子管时代

电压控制器件： 电真空技术



1906年，福雷斯特等发明了电子管；电子管体积大、重量重、耗电大、寿命短。目前在一些大功率发射装置中使用。



□电子管时代



1946年2月由宾州大学研制成功ENIAC



重达30 t



占地250m²



启动功耗

150000 W



1.8万个电子管



保存80个字节

晶体管时代

电流控制器件 半导体技术

1947年12月，Bell实验室的John Bardeen(巴丁)、Walter H. Brattain (布拉顿) 及William Shockley(肖克利) 共同发明了晶体管，1956年获诺贝尔物理学奖。

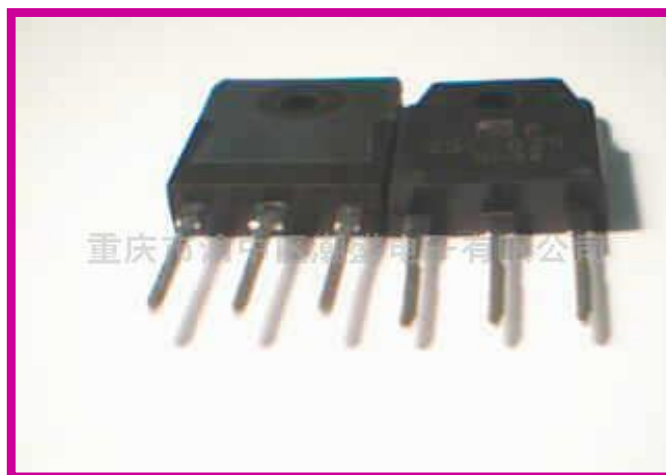


世界上第1只晶体管

晶体管时代

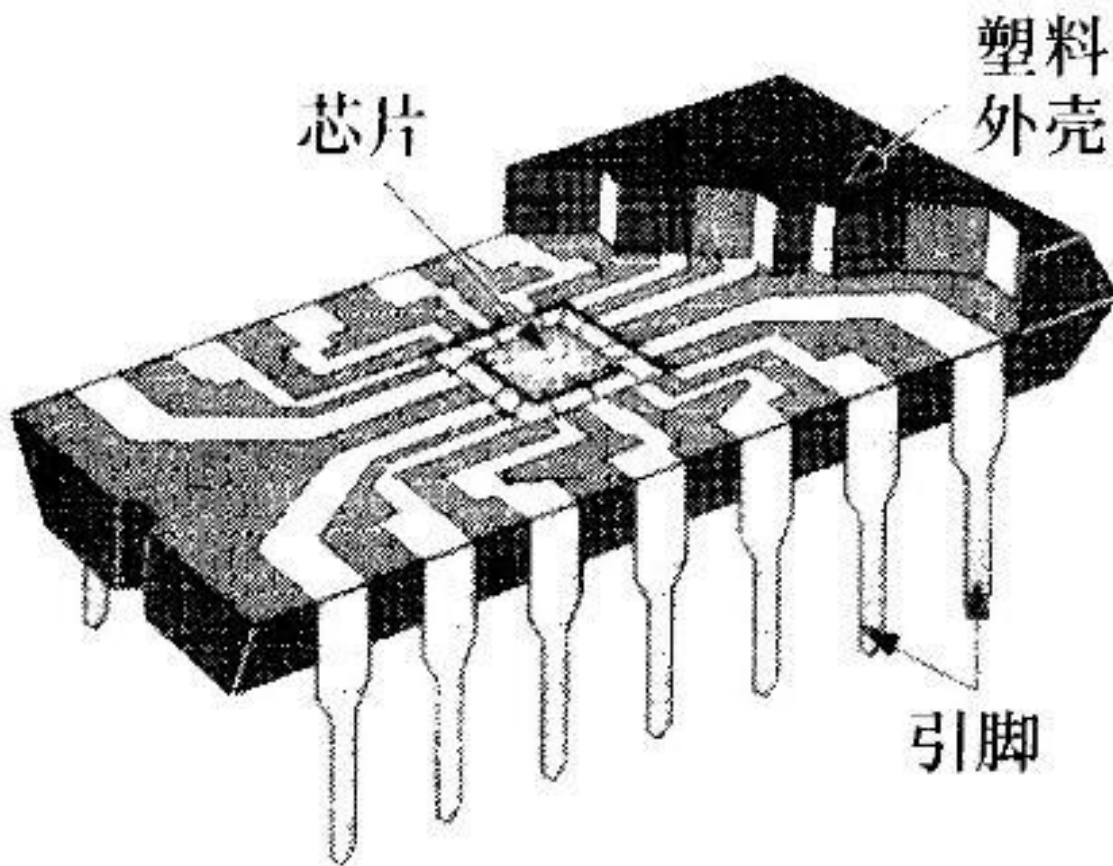
器件

半导体二极管、三极管



半导体集成电路IC 时代

集成电路 (Integrated Circuit, IC) 把构成具有一定功能电路所需的晶体管、电阻、电容等元件及它们之间的连接导线全部集成在一小块硅片上，然后焊接封装在一个管壳内，其封装外壳有圆壳式、双列直插式、扁平式或球形栅格阵列式等多种形式。



半导体集成电路IC 时代

1958年美国 TI (Texas Instruments) 公司的Jack Kilby (杰克·基尔比) 研制出世界上第一个集成电路 (相移振荡和触发器：由12个器件构成)。



基尔比, J.



1958

Jack Kilby invents integrated circuit.

IC的发展阶段

20世纪60~70代: IC技术迅速发展: SSI、MSI、LSI、VLSI。10万个晶体管/片。

20世纪80年代后: ULSI, 10亿个晶体管/片、ASIC 制作技术成熟

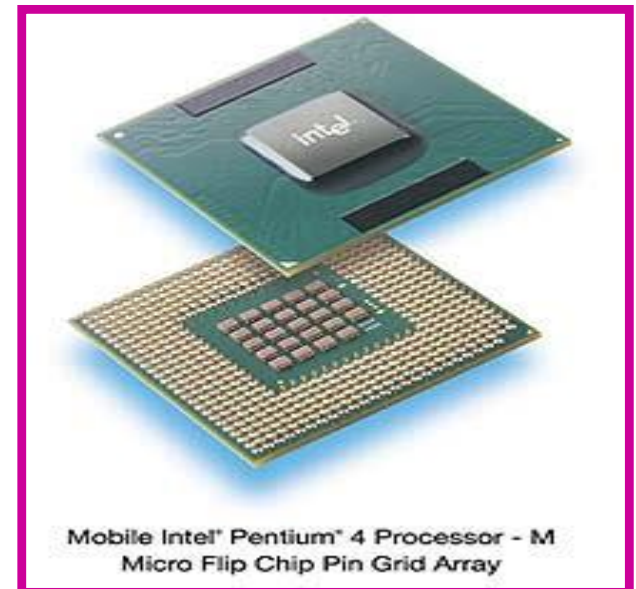
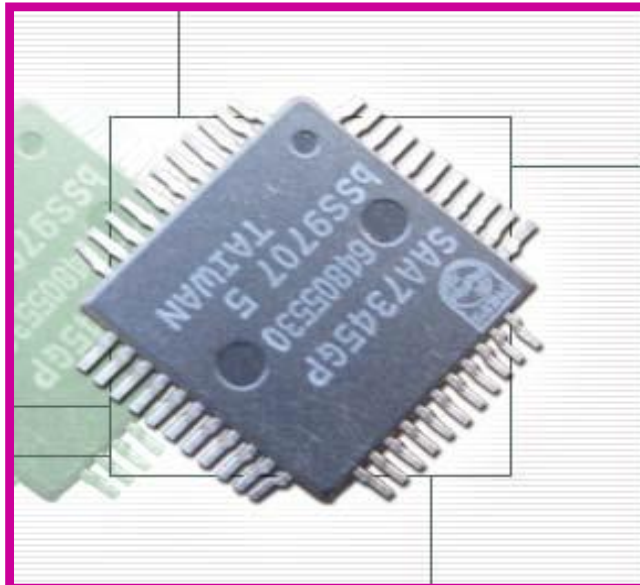
20世纪90年代后: 97年一片集成电路上有40亿个晶体管。

目前: 芯片内部的布线细微到纳米(90~28 nm)量级

微处理器的时钟频率高达3GHz (10^9 Hz)

将来: 高分子材料或生物材料制成密度更高、三维结构的电路

半导体集成电路IC 时代



□ 电路设计方法伴随器件变化 从传统走向现代

(a)传统的设计方法:

采用自下而上的设计方法；由人工组装,经反复调试、验证、修改完成。所用的元器件较多，电路可靠性差,设计周期长。

(b)现代的设计方法:

现代EDA技术实现硬件设计软件化。采用从上到下设计方法，电路设计、分析、仿真、修订等全部通过计算机完成。

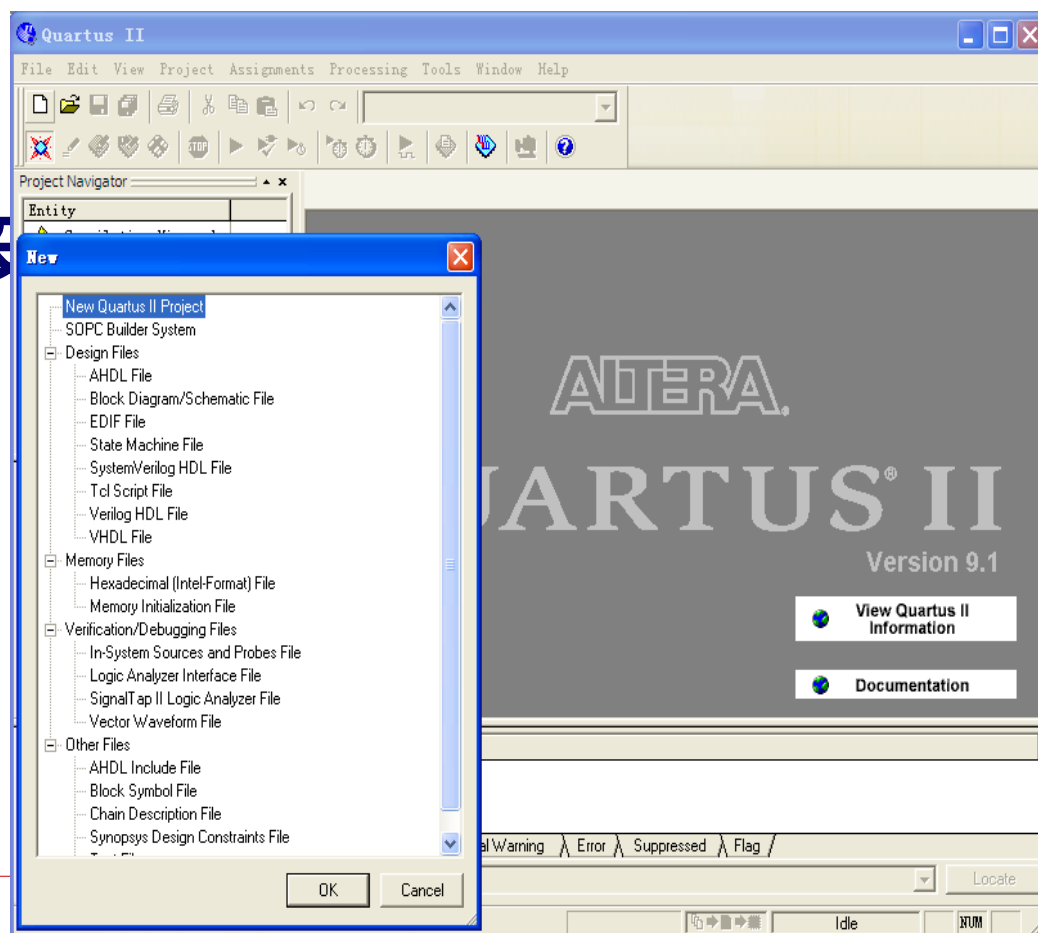
EDA (Electronics Design Automation)技术

EDA技术以计算机为基本工具、借助于软件设计平台，自动完成数字系统的仿真、逻辑综合、布局布线等工作。最后下载到芯片，实现系统功能。使硬件设计软件化。

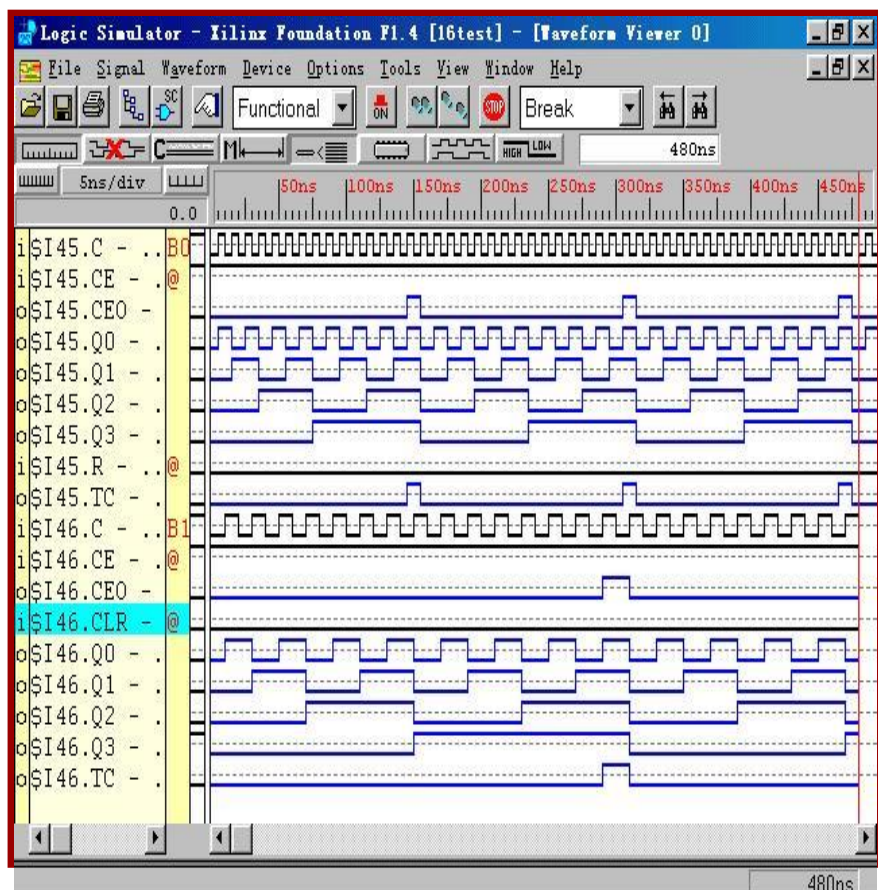
1. 设计

在计算机上利用软件平台进行设计

设计方法 { 原理图设计
Verilog HDL设计
状态机设计



2.仿真



3.下载



4.验证结果

□ 数字集成电路的分类

根据芯片内部集成的**逻辑门数目（集成度）**

- 早期把数字集成电路分为大、中、小三类。随着技术的进步，后来出现的规模更大的集成电路称为超大规模集成、甚大规模五类。
- 实际上，LSI与VLSI之间的界限有些模糊不清，并且后来趋向于以晶体管的个数而不是以逻辑门的个数来界定IC，凡是超过100万个晶体管的IC就是VLSI。

从器件类型不同

- 将使用BJT的芯片称为双极型集成电路。
- 将使用MOSFET的芯片称为单极型集成电路。

□ 数字集成电路的分类

表1.1.1 数字集成电路的集成度分类

分类	门的个数	典型集成电路
小规模	最多 12 个	逻辑门、触发器
中规模	12~99	计数器、加法器
大规模	100~9 999	小型存储器、门阵列
超大规模	10 000 以上	大型存储器、微处理器、可编程逻辑器件等

□ 数字集成电路的分类

从器件类型不同

- 将使用BJT的芯片称为双极型集成电路，典型代表是基于TTL（Transistor-Transistor Logic）技术的**7400系列**。
 - 将使用MOSFET的芯片称为单极型集成电路，典型代表是基于CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor）技术的**4000系列**。
- TTL是1964年由TI 公司作为标准产品推出的，TI 公司称之为54/74逻辑系列。
 - 54系列为军用型产品，而74系列为商用型产品。两个系列相应型号的功能一样，但性能不同。

□ 数字集成电路的分类

从器件类型不同

- 将使用BJT的芯片称为双极型集成电路，典型代表是基于TTL（Transistor-Transistor Logic）技术的**7400系列**。
 - 将使用MOSFET的芯片称为单极型集成电路，典型代表是基于CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor）技术的**4000系列**。
- 第一个CMOS集成电路在1968年就被研发出来，功耗低，但速度较慢，其应用范围受到一定的限制。
 - 经过长期研究与改良，CMOS IC 性能大大提高。
 - 到20世纪90年代后期，CMOS电路便逐渐取代TTL电路而成为当前数字集成电路的主流产品。

□ 数字集成电路的分类

TTL系列	说 明	缩写字母注释
74 74L 74S 74LS 74AS 74ALS 74F 74H 74LV	标准 TTL （出现得最早） 低功耗型 肖特基型 低功耗肖特基型（应用广泛） 增强型肖特基型 增强型低功耗肖特基型 快速型 高速型 低电源电压型	Low-power Schottky Low-power Schottky Advanced Schottky Advanced low-power Schottky Fast High-speed Low-voltage

□ 数字集成电路的分类

CMOS系列	说 明
4000	最早出现的 CMOS ，供电电源为 3~18V
74HC	与TTL芯片的引脚兼容、编号相同的高速 CMOS ，供电电源为 2-6V
74HCT	类似于 74HC ，并能与TTL直接相连，供电电源为 4.5~5.5V
74AC	增强型 CMOS ，供电电源为 3.0~5.5V
74ACT	类似于 74AC ，并能与TTL直接相连，供电电源为 4.5~5.5V
74AHC	增强型高速 CMOS ，供电电源为 2.0~5.5V
74AHCT	类似于 74AHC ，并能与TTL直接相连，供电电源为 4.5~5.5V
74FCT	具有TTL输入电平的快速 CMOS ，供电电源为 4.75~5.25V
74LVC	低电源电压型，供电电源为 2.0~3.6V

早期**CMOS IC**典型代表是**4000**系列，其供电电源在**3~18 V**之间，后来为了能与TTL芯片兼容，多数**CMOS**芯片使用**5V**或者更低的电源。现在，**CMOS**有**4000**、**74HC**、**74AC**、**74HCT**等系列。

1.2 逻辑运算及逻辑门

逻辑变量与逻辑函数

- **逻辑**是指事物因果之间所遵循的规律。为了避免用冗繁的文字来描述逻辑问题，逻辑代数采用逻辑变量和一套运算符组成逻辑函数表达式来描述事物的**因果关系**。
- 逻辑代数中的变量称为**逻辑变量**，一般用大写字母 A 、 B 、 C ...表示。逻辑变量的取值只有两种，即逻辑0和逻辑1。**0和1称为逻辑常量**。这里0和1本身并没有数值意义，它仅仅是一种**符号**，代表事物矛盾双方的**两种状态**。

1.2 逻辑运算及逻辑门

逻辑变量与逻辑函数

- 数字电路的输出与输入之间的关系是一种因果关系，因此它可以用**逻辑函数**来描述，并称为**逻辑电路**。
- 对于任何一个电路，若输入逻辑变量 A 、 B 、 $C \dots$ 的取值确定后，其输出逻辑变量 L 的值也被唯一地确定了，则可以称 L 是 A 、 B 、 $C \dots$ 的逻辑函数，并记为

$$L = f(A, B, C, \dots)$$

□**逻辑运算**:当0和1表示逻辑状态时，两个二进制数码按照某种特定的**因果**关系进行的运算。

1.2 .1 基本逻辑运算及对应的逻辑门

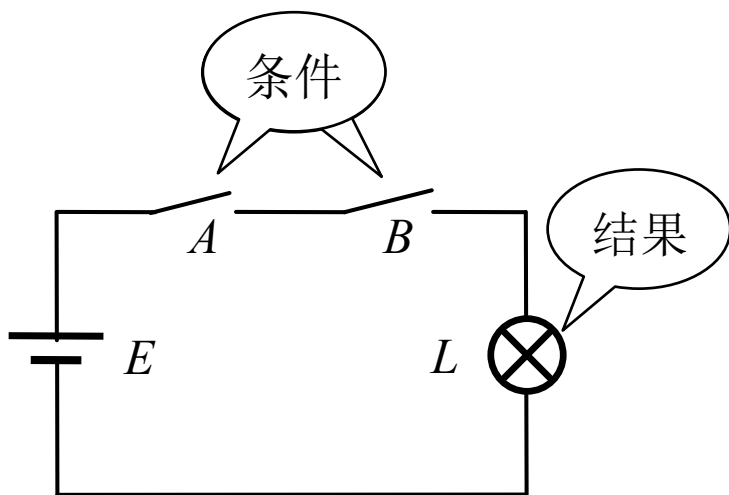
□ 在逻辑代数中，有**与、或、非**三种基本的逻辑运算。还有**与非、或非、同或、异或**等常用的复合逻辑运算。

□ 逻辑运算的描述方式:逻辑代数表达式、真值表、逻辑图、卡诺图、波形图和硬件描述语言（HDL）等。

1. 与运算

(1) 与逻辑:只有当决定某一事件的条件全部具备时,这一事件才会发生。这种因果关系称为与逻辑关系。

与逻辑举例



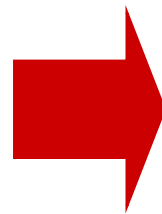
电路状态表

开关 S_1	开关 S_2	灯
断	断	灭
断	合	灭
合	断	灭
合	合	亮

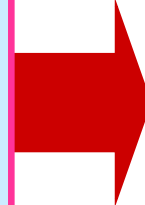
1. 与运算

与逻辑举例状态表

开关 S_1	开关 S_2	灯
断	断	灭
断	合	灭
合	断	灭
合	合	亮



$S_1 - A$
 $S_2 - B$
 断-0
 合-1
 灯- L
 火-0
 亮-1



逻辑真值表

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

与逻辑符号



逻辑表达式

与逻辑: $L = A \cdot B = AB$

与门电路

实现与逻辑运算
(即满足与逻辑真值表)
的电子电路称为与门电
路 (简称与门)

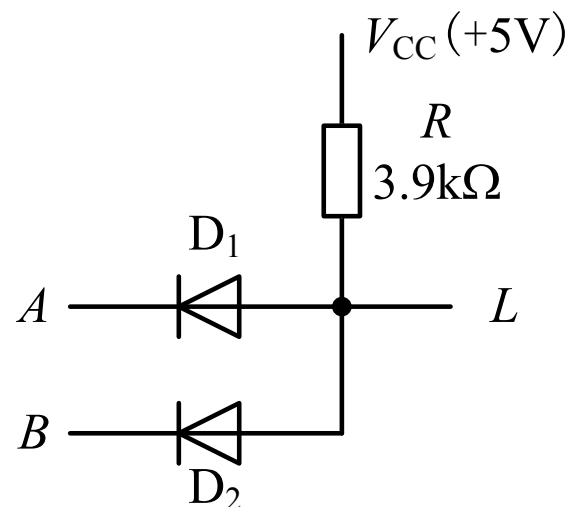
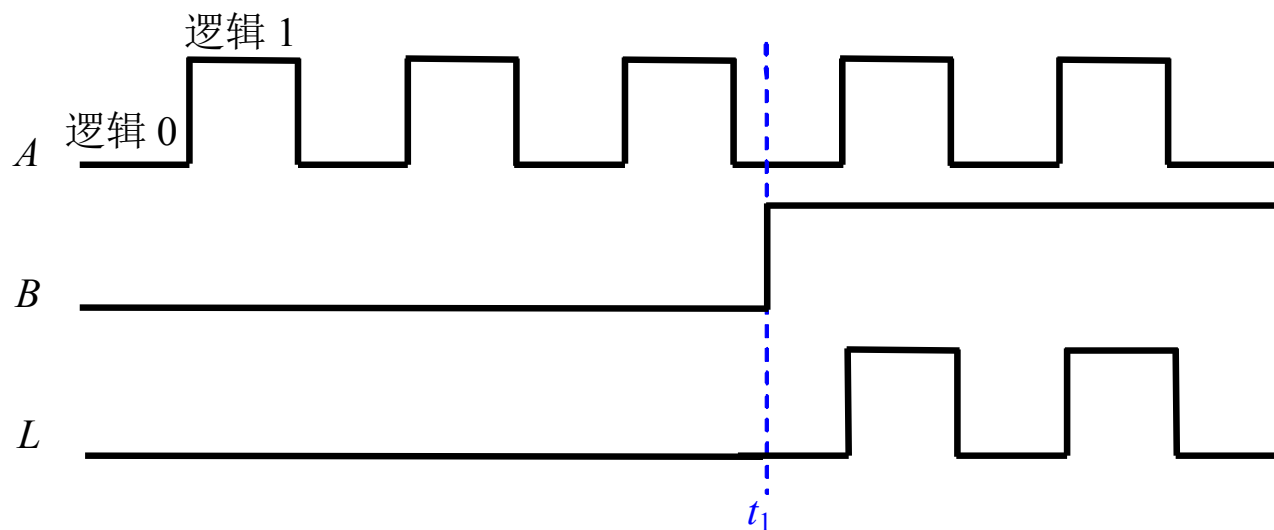


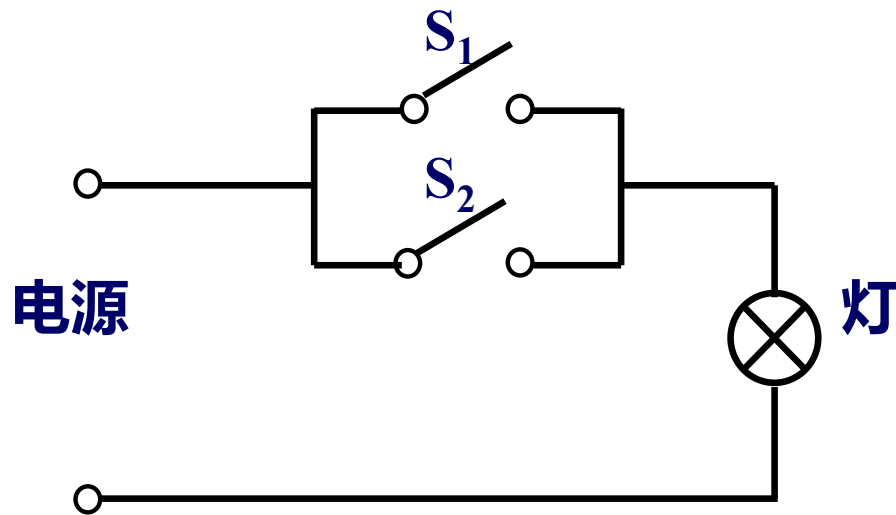
图1.4.3 二极管实现的与门电路



2. 或运算

只要在决定某一事件的各种条件中，有一个或几个条件具备时，这一事件就会发生。这种因果关系称为或逻辑关系。

或逻辑举例



电路状态表

开关 S_1	开关 S_2	灯
断	断	灭
断	合	亮
合	断	亮
合	合	亮

2. 或运算

或逻辑举例状态表

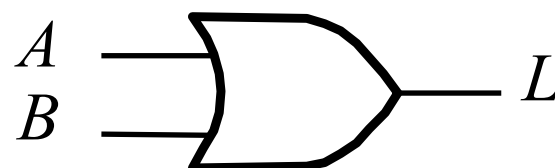
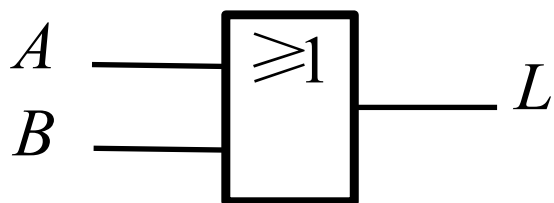
开关 S_1	开关 S_2	灯
断	断	灭
断	合	灭
合	断	灭
合	合	亮

$S_1 - A$
$S_2 - B$
断-0
合-1
灯- L
灭-0
亮-1

逻辑真值表

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

或逻辑符号



逻辑表达式

或逻辑: $L = A + B$

或门电路

实现或逻辑运算
(即满足或逻辑真值表)
的电子电路称为或门电
路 (简称或门)。

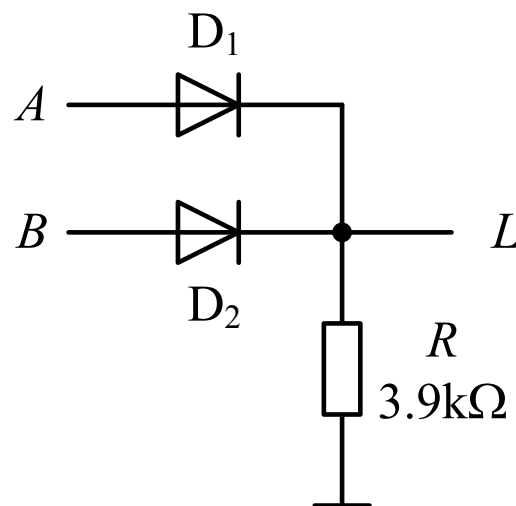
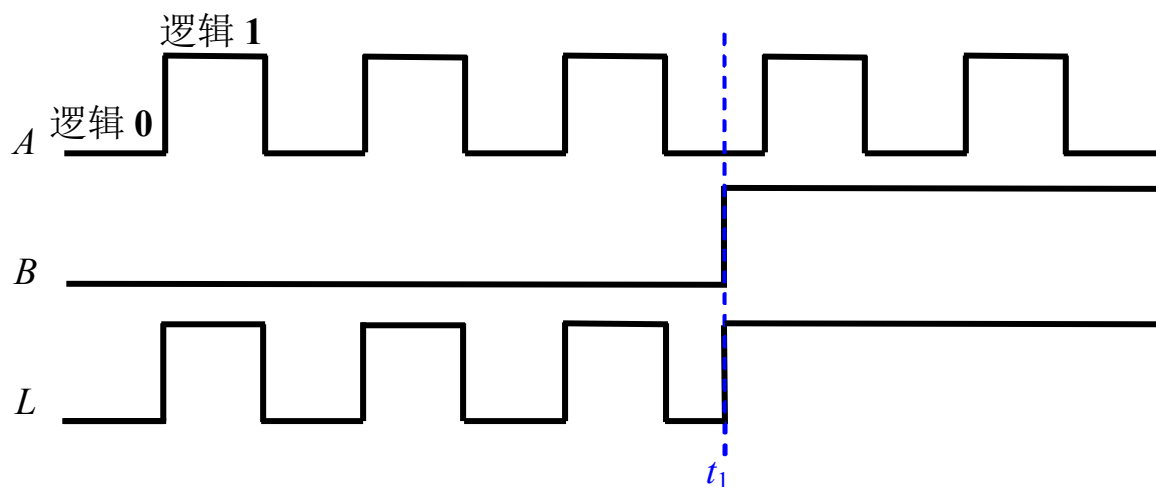


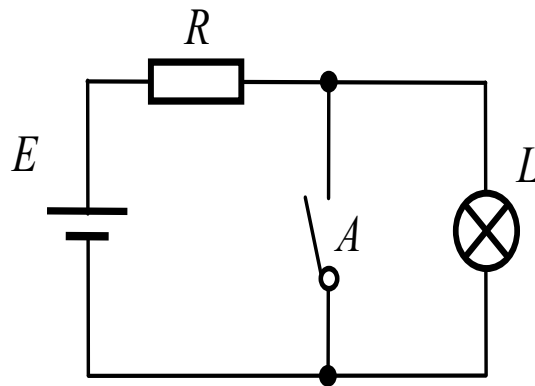
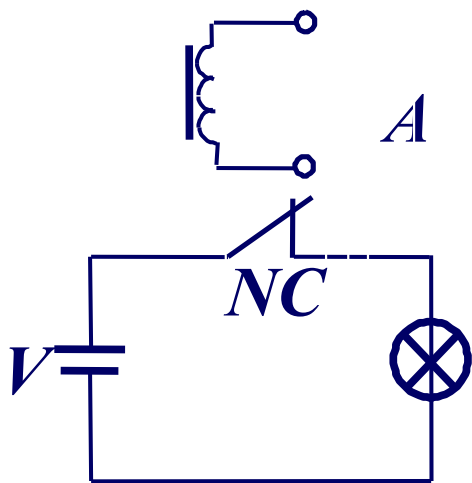
图1.4.7 二极管实现的或门电路



3. 非运算

事件发生的条件具备时，事件不会发生；事件发生的条件不具备时，事件发生。这种因果关系称为非逻辑关系。

非逻辑举例



非逻辑举例状态表

A	灯
不通电	亮
通电	灭

3. 非运算

非逻辑举例状态表

A	灯
不通电	亮
通电	灭

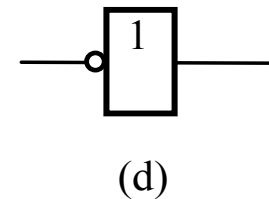
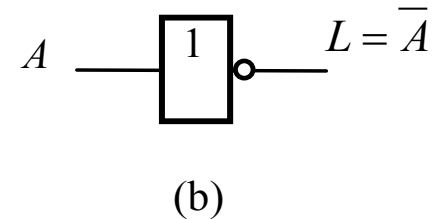
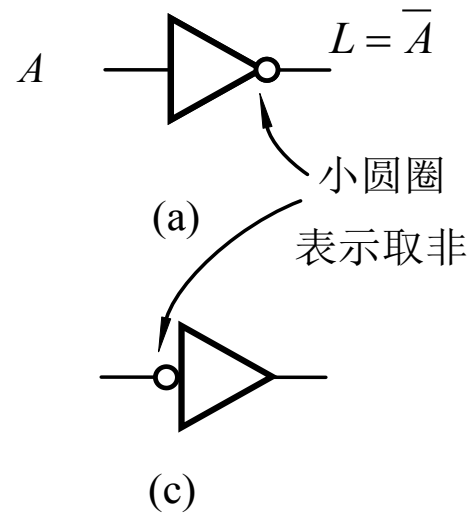
线圈(A) 通电- 1
不通电- 0

灯(L) 灭-0
亮 -1

非逻辑真值表

A	L
0	1
1	0

非逻辑符号



逻辑表达式

$$L = \bar{A}$$

3. 非运算

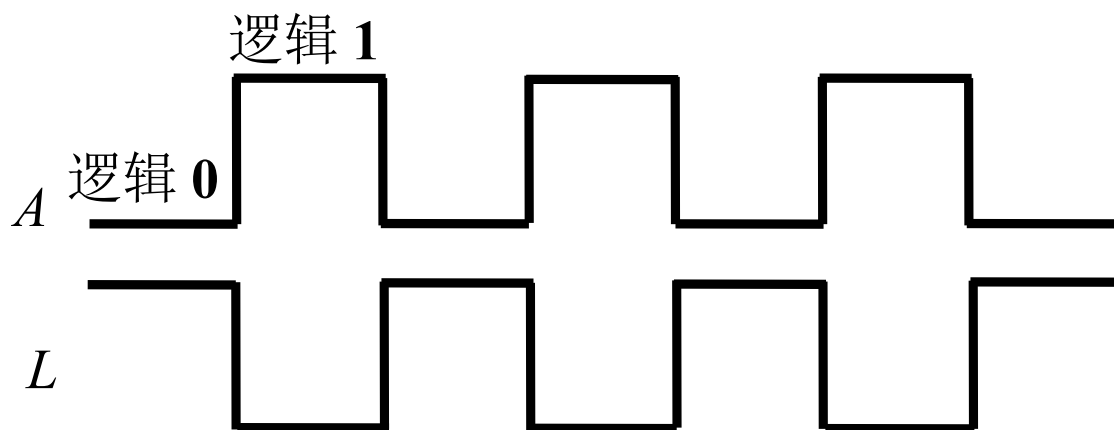
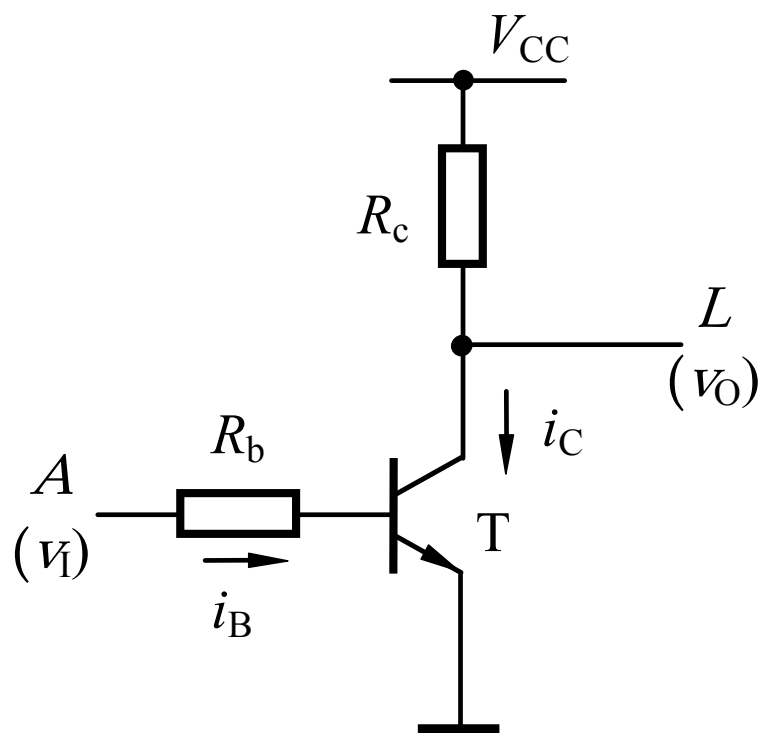


图1.4.11 三极管实现的非门电路图

1.4.12 非门的输入、输出波形图

1.2.2 常用复合逻辑运算及对应的逻辑门

□ 在逻辑代数中，有与、或、非三种基本的逻辑运算。还有与**非**、**或非**、**同或**、**异或**等常用的复合逻辑运算。

□ 逻辑运算的描述方式:逻辑代数表达式、真值表、逻辑图、卡诺图、波形图和硬件描述语言（HDL）等。

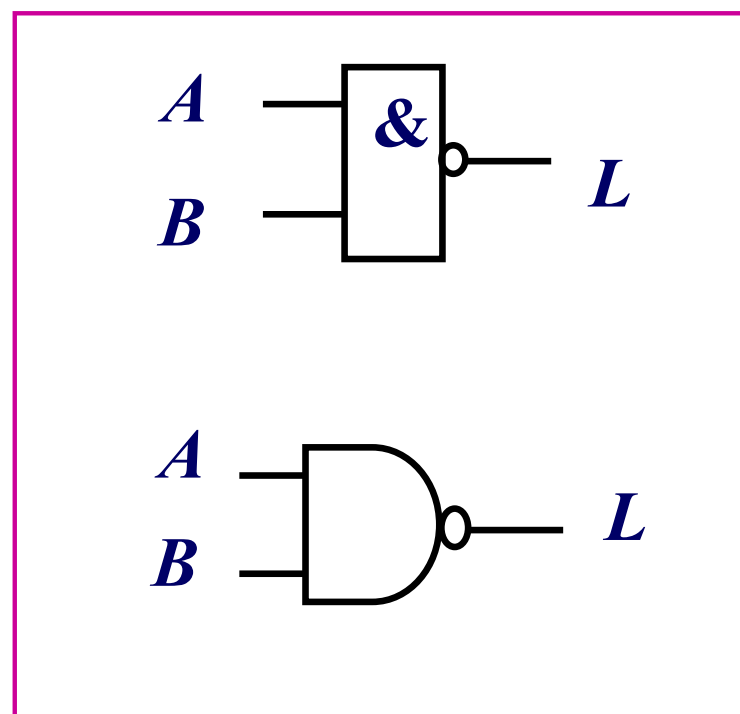
1. 与非运算



两输入变量与非
逻辑真值表

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

与非逻辑符号



与非逻辑表达式

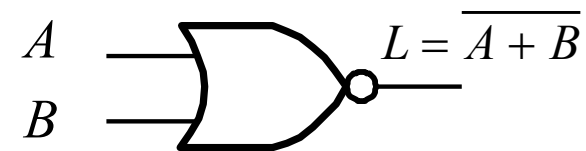
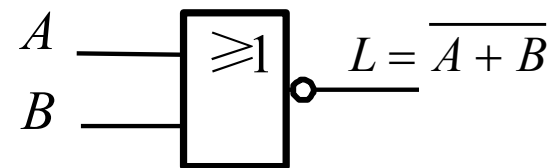
$$L = \overline{A \cdot B}$$

2. 或非运算

两输入变量或非
逻辑真值表

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

或非逻辑符号



或非逻辑表达式

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

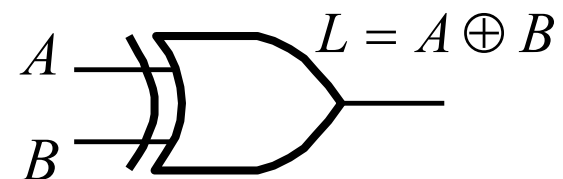
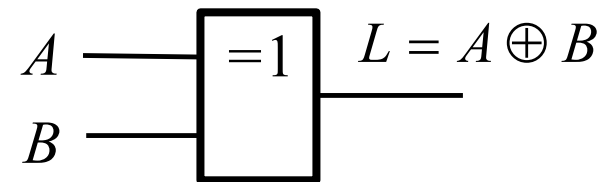
3. 异或逻辑

若两个输入变量的值相异，输出为1，否则为0。

异或逻辑真值表

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

异或逻辑符号



异或逻辑表达式 $L = \bar{A}B + A\bar{B} = A \oplus B$

4. 同或运算

若两个输入变量的值相同，输出为1，否则为0。

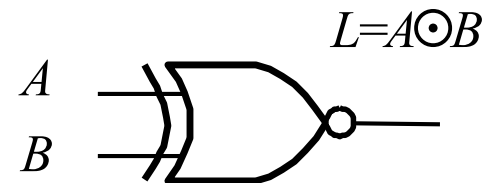
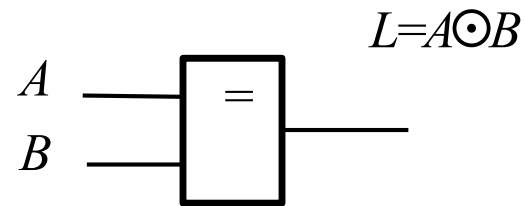
同或逻辑真值表

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

同或逻辑表达式

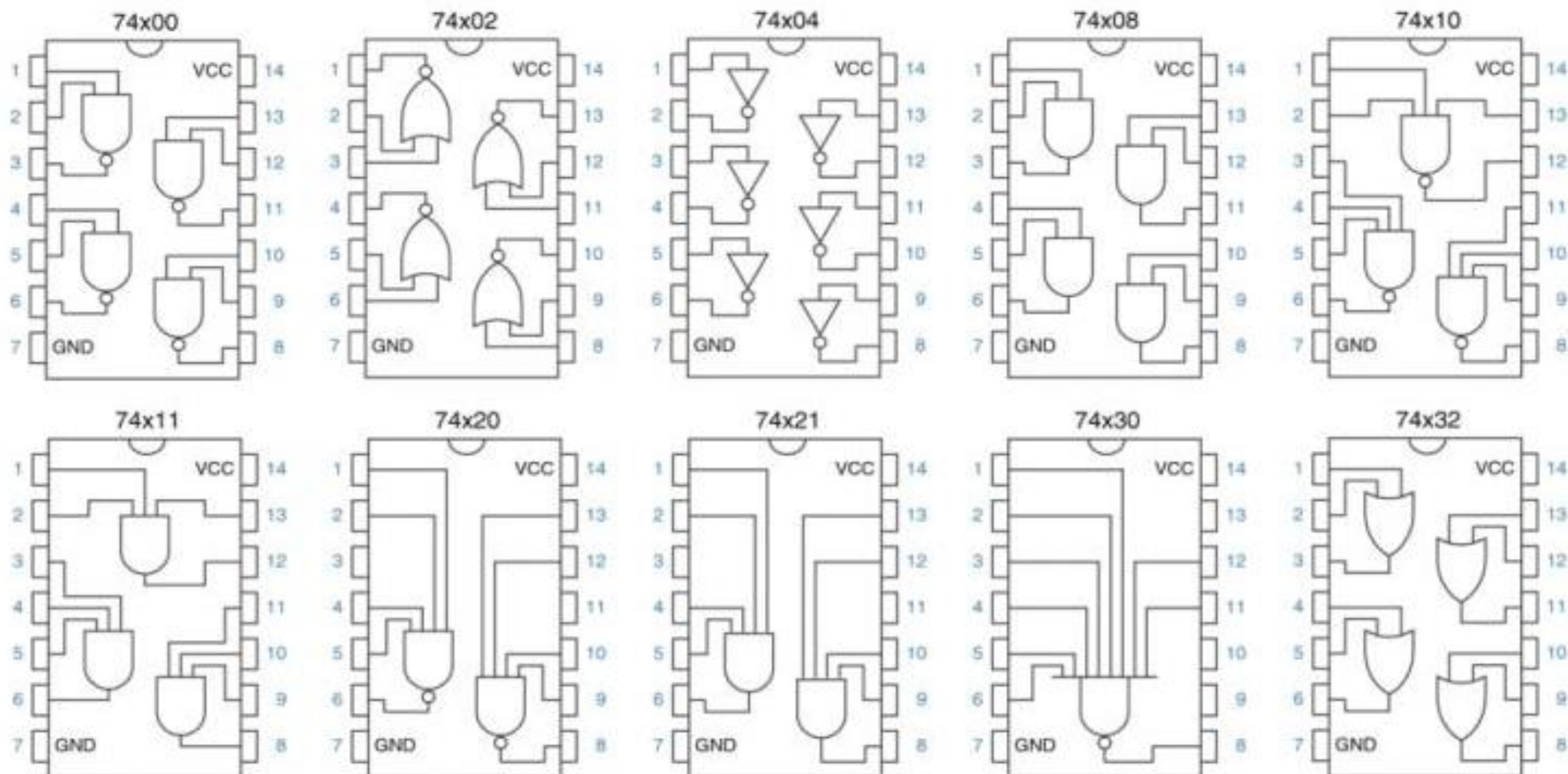
$$L = AB + \overline{A}\overline{B} = A \odot B$$

同或逻辑逻辑符号



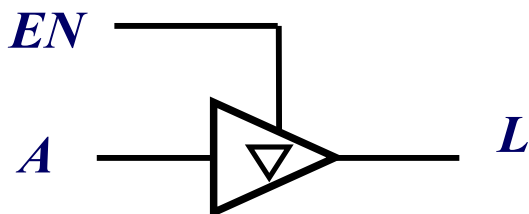
1.2.3 集成逻辑门电路简介

逻辑运算都可以用集成电路实现。



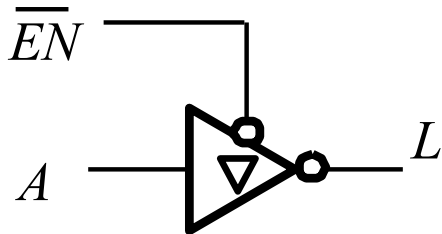
1.2.4 三态门

三态输出门电路逻辑符号



高电平有效的同相三态门

使能 EN	输入 A	输出 L
1	0	0
1	1	1
0	×	高阻



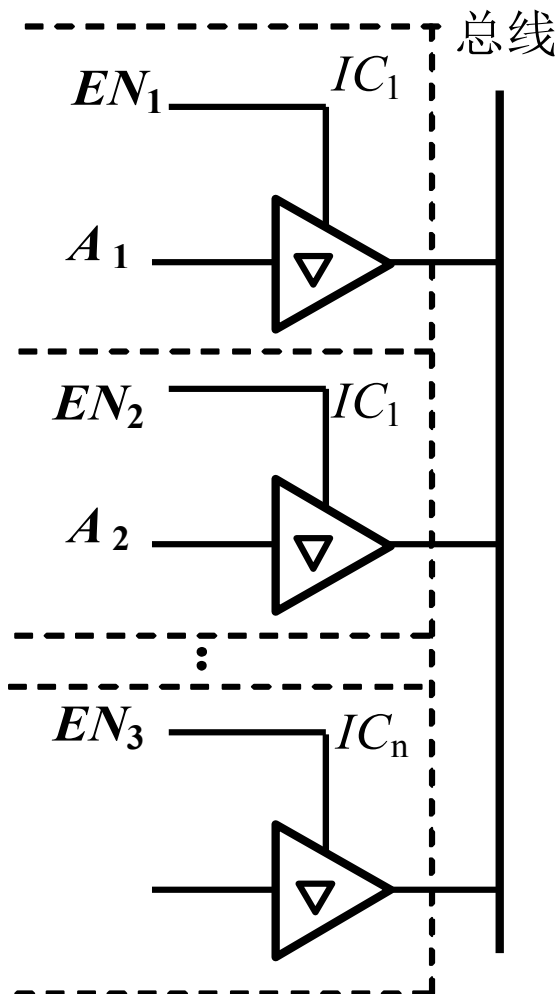
低电平使能的三态输出非门电路

三态输出门的真值表

EN	A	L
0	0	1
0	1	0
1	×	高阻

1.2.4 三态门——应用举例

(1) 构成总线传输结构

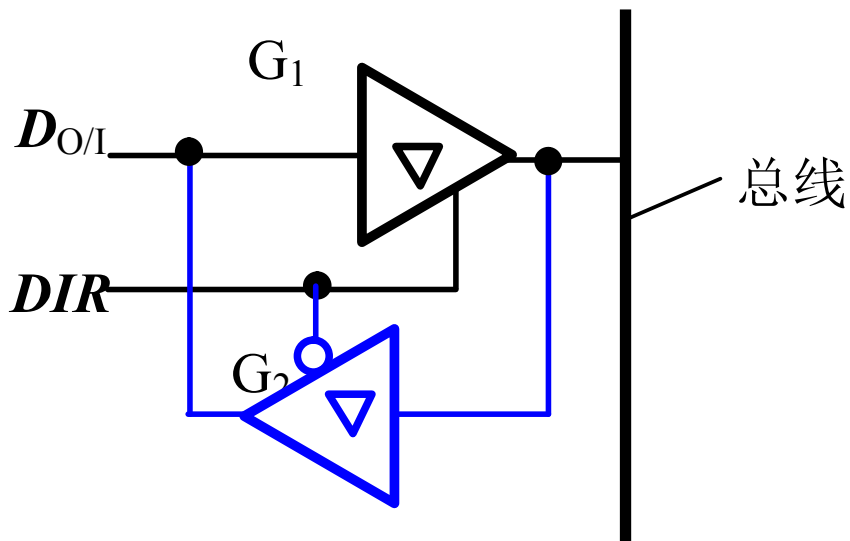


为了减少复杂的系统中各个单元电路之间的连线，数字系统中信号的传输常常采取一种称为“总线”（Bus）的结构形式，以达到在同一导线上分时传递若干路信号的目的。

工作时只要控制各个 EN 端的逻辑电平，保证在任何时刻仅有一个三态输出电路被使能，就可以把各个输出信号按要求顺序送到总线上，而互不干扰。

1.2.4 三态门——应用举例

(2) 实现信号的双向传输



DIR 为传送控制信号。

➤ 当 $DIR=1$ 时 G_1 工作， G_2 为高阻态，数据线 $D_{O/I}$ 上的数据经 G_1 送到总线上

➤ 当 $DIR=0$ 时， G_2 工作而 G_1 为高阻态，来自总线的数据经 G_2 送到的 $D_{O/I}$ 线上。

1.3 逻辑函数的代数法化简

1.3.1 逻辑函数的最简形式

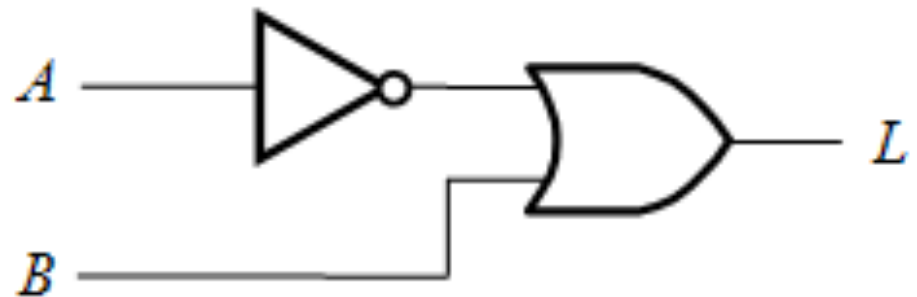
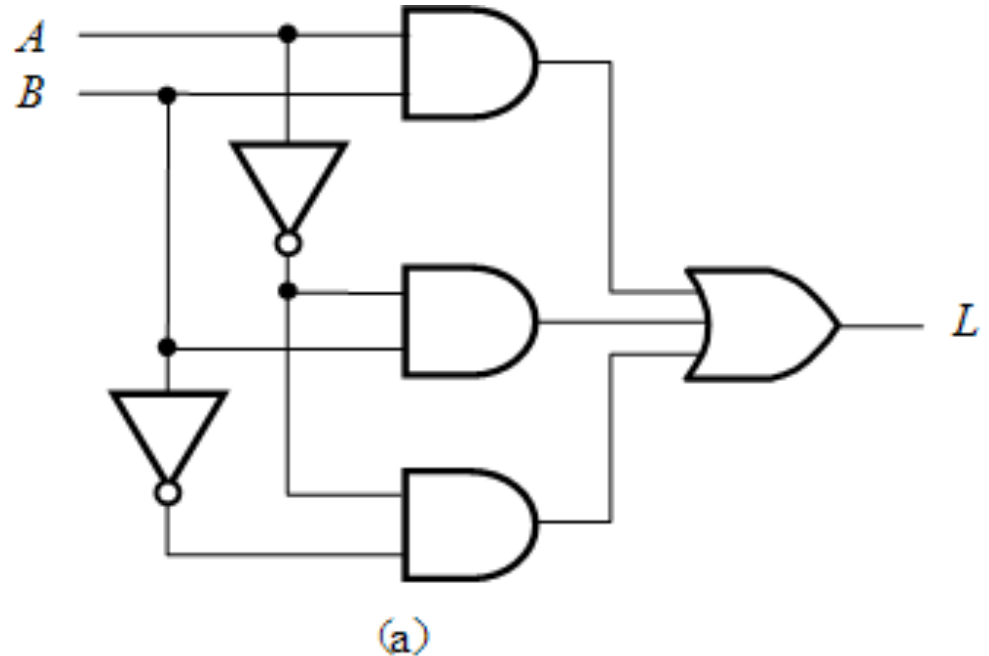
1.3.1 逻辑函数的最简形式

1. 化简逻辑函数的意义

$$\begin{aligned} L &= AB + \bar{A}B + \bar{A}\bar{B} \\ &= (A + \bar{A})B + \bar{A}\bar{B} \\ &= 1 \cdot B + \bar{A}\bar{B} \\ &= B + \bar{A} \end{aligned}$$

□两个电路的逻辑功能完全相同。但简化电路使用的逻辑门较少，体积小且成本低。

□化简的意义：根据化简后的表达式构成的逻辑电路简单，可节省器件，降低成本，提高工作的可靠性。



1.3.1 逻辑函数的最简形式

简化标准(最简的与-或表达式)

- 乘积项的个数最少(与门的个数少) ;
- 每个乘积项中包含的变量数最少 (与门的输入端个数少) 。

化简的主要方法:

1. 公式法 (代数法)

运用逻辑代数的基本定律和恒等式进行化简的方法。

2. 图解法 (卡诺图法)

□ 在逻辑代数中，有与、或、非三种基本的逻辑运算。还有与非、或非、同或、异或等常用的复合逻辑运算。

□ 逻辑运算的描述方式:逻辑代数表达式、真值表、逻辑图、卡诺图、波形图和**硬件描述语言 (HDL)**等。