

SHUZI LUOJI FENXI YUSHEJI

数字逻辑 分析与设计

童永承 主编

科学出版社

数字逻辑分析与设计

童永承 主编

汪白云 顾家林 董武世 叶远谋
郭峰林 宋锦河 金其洲 副主编

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书重点介绍数字逻辑电路,全书共八章,内容包括逻辑门电路,数字系统逻辑分析基础及逻辑函数化简;组合逻辑电路;时序逻辑电路;组合逻辑电路特殊设计法;时序逻辑电路设计;脉冲发生与整形;数字险象引论等。

书中介绍了大量的由数字集成芯片构成的组合逻辑电路与时序逻辑电路,给出了许多对学习极有帮助的例题,每一章后都附有大量习题。本书第八章的数字险象引论详细讨论了组合险象中的逻辑冒险及功能冒险,判定规律及精确定位理论,目的在于引发、培养学生的创新思维、创新能力。

本书可作为大学计算机技术、电子工程、自动化、信息工程等专业的教学用书,对硕士研究生、博士研究生也有重要参考价值,还可作为相应领域工程技术人员及研究人员的参考用书。

数字逻辑分析与设计

童永承 主编

汪自云 顾家林 董武世 叶远谋 副主编

郭峰林 宋锦河 金其洲

责任编辑 李承辉

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉大学出版社印刷总厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2002年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年8月第一次印刷 印张:25

印数:1~5 000 字数:620 000

ISBN 7-03-010546-X/TN·408

定价:32.50元

前 言

电路、模拟电路、数字电路、数字逻辑、计算机组成与结构、微机接口技术、计算机控制系统等课程,在大学电子工程专业、自动化专业、计算机专业、电子信息工程专业,特别是计算机应用专业以及与此联系极其密切的一些其他专业中,是必修的理论基础课、专业技术基础课、专业课。每一门课程的讲授及学习时间一般都应在 60 学时以上,但由于课程改革,学科建设,以及其他种种原因,各门课程的讲授及学习时间很难以得到保证,导致了一些必修的理论基础课不能正常开出,致使后续课程不能深入。要在 21 世纪培养大批基础扎实,有创新思维,创新能力的优秀人才,必须有好的教材及其配套体系。事实告诉我们,深厚的理论基础,扎实的技术基础,对创新思维、创新能力的培养极为重要。为了在课程改革、学科建设方面进行一些有益的探讨,我们在总结 20 多年教学、科研经验的基础上编著了本书。

本书共八章,内容分别为:第一章,逻辑门电路;第二章,数字系统分析基础及逻辑函数化简;第三章,组合逻辑电路;第四章,时序逻辑电路;第五章,脉冲的发生与整形;第六章,组合逻辑电路的特殊设计法;第七章,时序逻辑电路设计;第八章,数字险象引论。书中带有大量的例题及习题。

本书内容注意循序渐进,引入当前本学科最新内容及处理方法,全书增加了许多关于集成电路的素材,并给出了作者近几年在数字电路险象方面的研究成果。附*的章节可不进行讲授,但可供读者深入学习研究。

我们引进数字险象引论的目的是:第一、为计算机应用专业及相应专业的本科学生的创新思维、创新能力的激发和培养,提供思维方式及思维方法;第二,为计算机应用专业及相应专业的硕士研究生与博士研究生提供重要的参考资料及科学研究手段;第三、数字险象是故障诊断中极为关键的研究方向,希望这一章能对信息安全、网络安全的故障诊断研究起到推动作用。

本书内容面向计算机应用专业、自动化专业及相近专业的学生,希望有助于学生科研能力的培养及思路的拓展。限于能力及水平,加之时间仓促,书中欠妥、疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2002 年 8 月

目 录

第一章 逻辑门电路	(1)
§ 1.1 开关元件及其时间特性	(1)
§ 1.2 基本逻辑门电路	(5)
1.2.1 逻辑状态及正负逻辑系统.....	(5)
1.2.2 基本逻辑门电路.....	(6)
§ 1.3 复合逻辑门电路	(11)
1.3.1 简单复合逻辑门电路	(11)
1.3.2 复杂复合逻辑门电路	(15)
§ 1.4 集成逻辑门电路	(17)
1.4.1 TTL 逻辑门电路	(17)
1.4.2 TTL 与非门电压传输特性及其主要参数	(22)
1.4.3 其他 TTL 逻辑门电路	(25)
§ 1.5 集成 MOS 逻辑门电路	(31)
1.5.1 NMOS 反相器	(31)
1.5.2 NMOS 逻辑门电路	(33)
1.5.3 CMOS 反相器	(35)
1.5.4 CMOS 逻辑门电路	(38)
习题	(40)
第二章 数字系统分析基础及逻辑函数化简	(54)
§ 2.1 基本逻辑运算及逻辑函数	(54)
§ 2.2 逻辑代数基本规律及常用公式	(56)
2.2.1 基本定律	(56)
2.2.2 常用扩展规律及常用公式	(58)
§ 2.3 逻辑函数与逻辑电路关系	(61)
§ 2.4 逻辑函数的代数化简法	(63)
§ 2.5 逻辑函数的几何化简法	(68)
2.5.1 逻辑函数的最小项逻辑表达式	(68)
2.5.2 逻辑函数的卡诺图	(70)
2.5.3 逻辑函数的几何化简法	(72)
§ 2.6 利用约束条件化简逻辑函数	(76)
习题	(80)
第三章 组合逻辑电路	(89)
§ 3.1 一般分析方法及一般设计方法	(89)
3.1.1 一般分析方法	(89)
3.1.2 一般设计方法	(90)
§ 3.2 编码器与译码器	(93)
3.2.1 编码器	(93)
3.2.2 译码器	(99)

§ 3.3 数码比较器	(104)
3.3.1 同比较器	(104)
3.3.2 大小比较器	(105)
* 3.3.3 比较器地址译码电路	(108)
§ 3.4 多路选择器	(110)
3.4.1 多路选择器	(110)
3.4.2 多路选择器作函数发生器用	(111)
§ 3.5 全加器	(112)
3.5.1 半加器	(112)
3.5.2 全加器	(113)
* 3.5.3 多位加法器	(114)
§ 3.6 奇偶校验电路	(116)
3.6.1 奇偶校验电路	(116)
3.6.2 奇偶校验位及集成奇偶校验器	(117)
* § 3.7 只读存贮器	(119)
3.7.1 固定只读存贮器 ROM	(119)
3.7.2 可编程序只读存贮器 PROM	(120)
3.7.3 可改写只读存贮器 EPROM	(121)
* § 3.8 可编程逻辑阵列 PLA	(123)
习题	(126)
第四章 时序逻辑电路	(135)
§ 4.1 组合逻辑电路与时序逻辑电路描述方法及比较	(135)
§ 4.2 触发器	(136)
4.2.1 逻辑功能描述	(136)
4.2.2 常用电路结构	(140)
4.2.3 逻辑功能互换	(147)
§ 4.3 寄存器	(151)
4.3.1 数码寄存器	(151)
4.3.2 移位寄存器	(153)
* § 4.4 随机存取存贮器 RAM	(156)
4.4.1 一般结构	(156)
4.4.2 应用实例	(163)
* § 4.5 有序存取存贮器 SAM	(163)
§ 4.6 计数器	(172)
4.6.1 二进制计数器	(172)
4.6.2 非二进制计数器	(182)
* 4.6.3 环形计数器	(191)
§ 4.7 顺序脉冲发生器	(199)
习题	(202)
第五章 脉冲的发生与整形	(222)
§ 5.1 方波发生器	(222)
§ 5.2 单稳态触发器	(230)
5.2.1 逻辑门单稳态触发器	(230)
5.2.2 集成单稳态触发器	(238)

5.2.3 集成单稳态触发器的应用	(242)
§ 5.3 施密特触发器	(243)
5.3.1 集成施密特触发器	(243)
5.3.2 逻辑门电路施密特触发器	(246)
5.3.3 集成施密特触发器应用	(247)
* § 5.4 集成定时器	(250)
5.4.1 集成 555 定时器	(250)
5.4.2 集成定时器应用实例	(252)
习题	(255)
第六章 组合逻辑电路的特殊设计方法	(265)
§ 6.1 组合逻辑电路设计概述	(265)
§ 6.2 公用技术组合逻辑电路设计法	(273)
§ 6.3 不同要求的组合逻辑电路设计	(278)
§ 6.4 集成电路组合逻辑电路设计法	(281)
习题	(287)
第七章 时序逻辑电路设计	(292)
§ 7.1 同步时序逻辑电路设计	(292)
7.1.1 原始状态图、原始状态表的建立	(293)
7.1.2 原始状态表化简	(295)
7.1.3 状态编码	(305)
7.1.4 驱动函数集及输出函数集	(306)
7.1.5 同步时序逻辑电路设计实例	(307)
§ 7.2 脉冲异步时序逻辑电路设计	(311)
§ 7.3 电位异步时序逻辑电路设计	(317)
§ 7.4 集成时序逻辑电路设计	(323)
7.4.1 集成寄存器应用设计	(323)
7.4.2 集成计数器应用设计	(325)
习题	(329)
* 第八章 组合险象引论	(337)
§ 8.1 组合险象的基本概念及定义	(337)
§ 8.2 组合险象逻辑余式判据及二变量输入组合险象精确定位	(339)
§ 8.3 多输入变量逻辑函数组合险象精确定位	(349)
§ 8.4 功能冒险简化快速算法	(365)
§ 8.5 无险象组合逻辑电路设计	(373)
习题	(379)
附录 A 混和逻辑系统中的逻辑符号等效代换	(384)
附录 B 常用逻辑符号对照表	(387)
主要参考文献	(389)

第一章 逻辑门电路

数字电路是电子计算机及智能化系统的最重要、最根本的硬件基础。本章将讨论开关器件及其时间特性;定义逻辑状态及正负逻辑系统;分析基本逻辑门电路及其描述方法;详细地分析最常用简单复合逻辑门电路——TTL 与非门的工作原理,给出了 TTL 与非门的电压传输特性及主要参数;简单介绍三态门及集电极开路逻辑门电路及 MOS 逻辑门电路。

§ 1.1 开关元件及其时间特性

数字电路又称为逻辑电路,也称为开关电路,它是利用基本开关元件作为电路的组成部分而进行工作的。

开关有两种工作状态:一种工作状态是开关的闭合,对于理想开关元件来说,开关两端的电压降为零,开关元件中的电流可以是任意值,即开关元件中的电流由开关元件所处的电路决定,数字电路中常将开关元件的闭合与逻辑 1 相对应(当然也可以与逻辑 0 对应);另一种工作状态是开关的断开,对于理想开关元件来说,开关两端的电压降为任意值,电压降的具体数值由开关元件所处的电路决定,开关元件中的电流为 0,数字电路中常将开关元件的断开与逻辑 0 相对应(当然也可以与逻辑 1 对应)。数字电路只有逻辑 1、逻辑 0 两种工作状态,那么用开关元件作为基本电路元件构成数字电路势必是非常自然的事情。

理想开关元件很难制备。数字电路中的开关元件是实际开关器件,即电子开关器件,常用的电子开关器件有二极管、三极管、场效应管。

一、二极管

1. 电特性

二极管电特性是指二极管作为开关使用时,导通或截止状态所对应的电气性能。

二极管正向偏置时, $V_D > 0$, 对于硅二极管, V_D 约为 $0.65 \sim 0.75\text{V}$, 一般取 $V_D = 0.7\text{V}$; 对于锗二极管, V_D 约为 $0.15 \sim 0.25\text{V}$, 一般取 $V_D = 0.2\text{V}$ 。二极管 D 正向导通时的等效电阻 r_D 很小, 一般情况下, 小于几十 Ω , 正向导通电流 I_D 相当大。若二极管是作开关使用, 此时开关是处于闭合状态。

二极管反向偏置时, $V_D < 0$, 二极管截止, 二极管内通过的电流极其微小, 对于硅二极管, 反向截止的电流小于 $0.1\mu\text{A}$; 对于锗二极管, 反向截止的电流小于 0.1mA 。这个微小的反向电流实际上是 PN 结反向饱和电流 I_s , 一般情况下, 都将这个反向截止电流作为 0, 反向截止时, 二极管的等效电阻 r_D 相当大, 通常都大于几百 $\text{k}\Omega$ 。若二极管作开关使用, 此时开关是处在断开状态。

2. 时间特性

二极管时间特性指的是二极管作开关使用时, 由正向偏置状态转换为反向偏置状态, 即由开关闭合转向开关断开所需的时间, 或者由开关断开转向开关闭合所需的时间。二极管开关时间可由图 1.1 所示电路及其工作波形来描述。

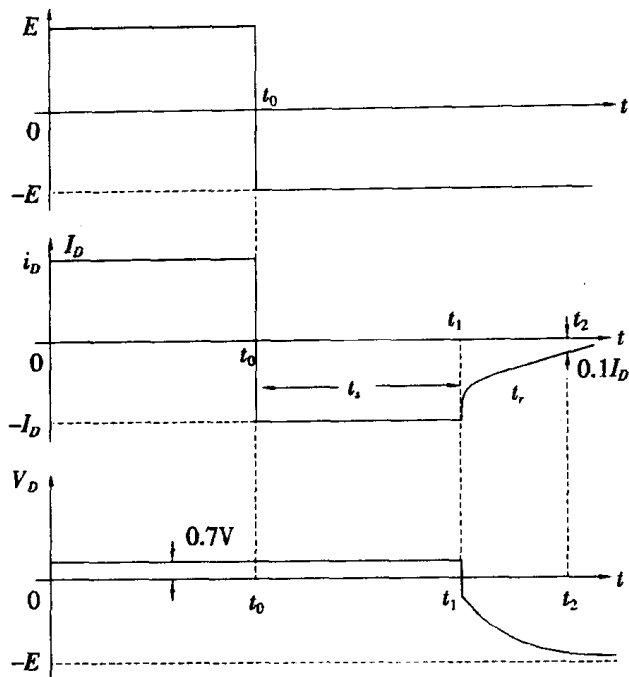
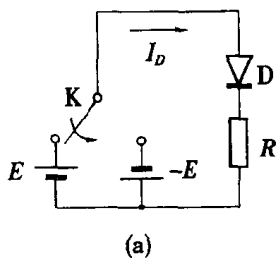


图 1.1 (b)

在图 1.1(a)中,开关 K 在时间 t_0 由电源 E 掷向电源 $-E$,那么图中所示电路的二极管 D 则由正向偏置状态转换为反向偏置状态。所测得的对应二极管内电流 i_D 及二极管两端电压降 v_D 的波形如图 1.1(b)所示。

图 1.1(b)表明,在 t_0 时刻,二极管 D 并不立即处于反向偏置状态,或者说二极管 D 作开关使用时,并未断开,二极管 D 两端的电压降 V_D 仍为 $0.7V$,管内电流很大,只是方向相反,即二极管 D 还是处于开关闭合状态,这个状态须持续一段时间。此后,二极管内电流开始减小,二极管两端压降反向增大,当二极管电流 i_D 减小到 $0.1 I_D$ 时($0.1 I_D$ 可与 PN 结反向饱和电流 I_s 比较),二极管电压降为 $-E$,此时刻为 t_2 。 t_2 时,二极管真正反偏,开关断开。

上述工作过程及电路工作波形可由二极管本身结构来加以解释。

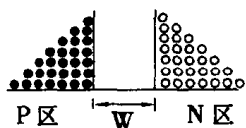


图 1.2

图 1.2 示出了二极管正向偏置时,PN 结两侧由于电源提供大电流,造成非平衡载流子堆积的情况。此时 PN 结宽度 W 小,PN 结等效电阻 r_D 小,如果忽略 PN 结正向导通压降 $V_D (=0.7V)$ 及等效电阻 r_D ,则此时的二极管电流为

$$I_D = \frac{V_i}{R} = \frac{E}{R}$$

电流 I_D 如图 1.1(b)中电流波形所示。在 $t = t_0$ 时刻,由图 1.2 可看出,此时虽然在二极管 D 两端外加大小一样、方向相反的电源 $-E$,但二极管并不能立即反偏,PN 结宽度仍为 W ,亦即 PN 结还处在正向偏置状态下,二极管电流为

$$I'_D = \frac{V'_i}{R} = \frac{-E}{R} = -I_D$$

上式表明:二极管内电流大小没有改变,仅只方向相反而已,大的反向电流也如图 1.1(b)电流波形所示。大反向电流将 PN 结两侧的非平衡载流子输运走。到 $t = t_1$ 时刻,堆积的非平衡载流子消失,所需时间为 $t_s = t_1 - t_0$,称为非平衡载流子存贮时间。当时间 $t > t_1$ 时,二极管外加

反向电源才使PN结宽度 W 增大,二极管等效电阻 r_D 随之增大,那么二极管内电流必然减小,到达 $t = t_2$ 时刻,二极管电流减小到

$$i_D = 0.1I_D \doteq I,$$

时,二极管才真正处于反向偏置状态。这段时间内的二极管电流 i_D 的变化情况也在图1.1(b)的电流波形中表明。上述的这段时间为 $t_r = t_2 - t_1$,称为二极管延迟时间。

由此可知,二极管作为开关使用时的开关断开时间由下式表示:

$$t_{\text{off}} = t_s + t_r \quad (1-1)$$

二极管由反向偏置状态转换为正向偏置状态所需时间称开关闭合时间 t_{on} 。一般情况下,闭合时间 t_{on} 可以看做为零,那么二极管的时间特性就由断开时间 t_{off} 表征。

二、三极管

1. 电特性

三极管的电气性能可由三极管输出特性曲线来描述,在输出特性曲线中,可分三个区域:饱和区、放大区及截止区(参见图1.3),这些区域与三极管的三个工作状态:饱和状态、放大状态及截止状态一一对应。

在数字电路中,三极管是作为开关器件使用的,所以它的工作区间在饱和区和截止区;在模拟电路中,三极管是作为放大器件使用的,它的工作区间在放大区。

所谓三极管的电特性指的是:三极管处于不同的工作状态时所需要的偏置条件,以及各电极电流、各电极间压降的关系。

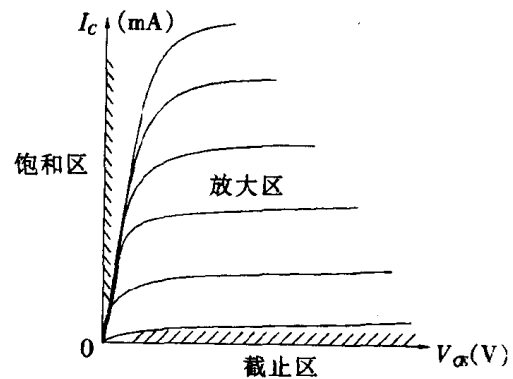


图 1.3

2. 饱和状态

三极管的饱和状态可由下式描述:

$$\begin{cases} V_{BE} > 0 & I_{CS} \doteq \frac{E_C}{R_C} \\ V_{BC} > 0 & I_C \neq \beta I_B \quad r_{ce} \text{ 很小} \end{cases} \quad (1-2)$$

上式表示:发射结正偏, $V_{BE} > 0$,集电结正偏, $V_{BC} > 0$,三极管集电极接有电阻 R_C ,发射极未接电阻,在饱和工作状态下, $I_C = \beta I_B$ 不成立,且集电极电流 I_C 相当大,集电极-发射极间等效电阻 r_{ce} 相当小,集电极-发射极饱和压降 V_{CES} ,对于硅三极管, $V_{CES} = 0.3V$,对于锗三极管, $V_{CES} = -0.1V$ 。若三极管作为开关元件使用,则开关元件处在开关闭合状态。

3. 放大状态

三极管的放大状态可由下式描述:

$$\begin{cases} V_{BE} > 0 & V_{CE} = E_C - I_C R_C \\ V_{BC} < 0 & I_C = \beta I_B \quad r_{ce} \text{ 可变} \end{cases} \quad (1-3)$$

上式表明:发射结正偏, $V_{BE} > 0$,集电结反偏, $V_{BC} < 0$,集电极电流与基极电流的关系可由 $I_C = \beta I_B$ 表示,集电极-发射极压降为 $V_{CE} = E_C - I_C R_C$,且集电极-发射极间等效电阻 r_{ce} 可变。

4. 截止状态

三极管的截止状态可由下式描述:

$$\begin{cases} V_{BE} < 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} I_B = 0 \\ I_C \doteq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} V_{CE} \doteq E_C \\ r_{ce} \text{ 很大} \end{cases} \quad (1-4)$$

上式表明:发射结反偏, $V_{BE} < 0$, 集电结反偏, $V_{BC} < 0$, 基极电流 $I_B = 0$ 是三极管处于截止状态的标志, 此时, 集电极电流 $I_C = 0$, 集电极-发射极压降为 $V_{CE} \doteq E_C$, 即集电极为高电位, 集电极-发射极间等效电阻 r_{ce} 特别大。若三极管当作开关器件使用, 则开关器件处在开关断开状态。

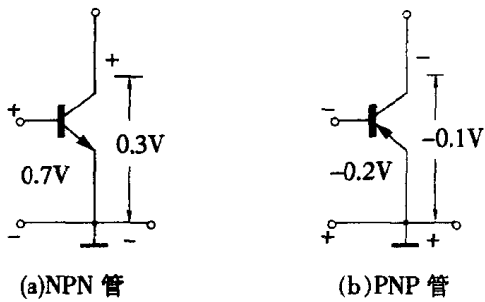


图 1.4

图 1.4 给出了很有实用价值的三极管饱和状态的典型数据。

5. 时间特性

三极管时间特性指的是, 三极管在外加偏置条件下, 由截止状态转换为饱和状态时所需要的开关转换时间, 及由饱和状态转换为截止状态时所需要的开关转换时间。这两个时间可由图 1.5 所示电路及电路工作波形来描述。

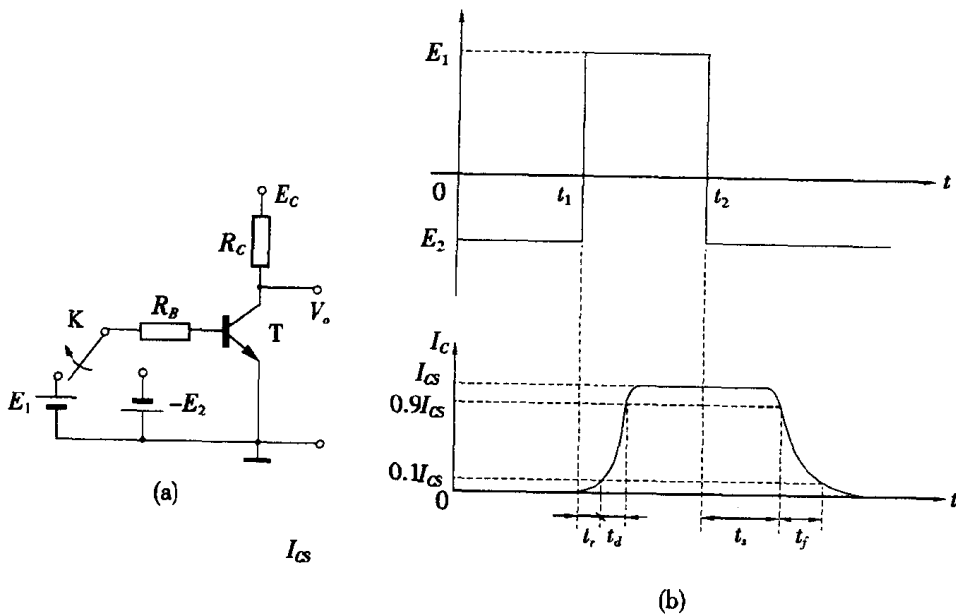


图 1.5

在图 1.5(a) 电路中, 开关 K 于时刻 t_1 由电源 $-E_2$ 掷向电源 E_1 , 三极管由截止状态转换为饱和状态, 在时刻 t_2 , 开关 K 掷回电源 $-E_2$, 三极管由饱和状态转换为截止状态, 其对应的输入电压波形及集电极电流 I_C 波形示于图 1.5(b), 图(b)中的临界饱和集电极电流 I_{CS} 为

$$I_{CS} = \frac{E_1 - V_{CES}}{R_C} \doteq \frac{E_1}{R_C}$$

图 1.5(b) 中的集电极电流波形可由三极管自身结构加以解释。可用图 1.6 说明。在时间 $t < t_1$ 内, 负电源 $-E_2$ 加在三极管 B 极, 三极管处在截止状态, 基极电流 $I_B = 0$, 集电极电流 $I_C = 0$ 。在 $t = t_1$ 时刻, 正电源 E_1 作用在基极 B 上, 并不立即建立较大的集电极电流 I_C , 而由电源

E_1 提供注入的非平衡载流子建立基区中的电荷分布 Q_1 后,才产生明显的集电极电流。如图 1.6 所示,电荷分布 Q_1 对应于集电极电流 $0.1I_{CS}$,所需时间 t_r 称为延迟时间。随着时间的增大,正电源提供的非平衡载流子增多,出现了电荷分布 Q_2 ,此时,基区中由发射区扩散而来的载流子基本上都由集电极收集,形成 $0.9I_{CS}$ 这样大的集电极电流,这段过程所需时间称为上升时间 t_d 。此后,虽有正电源 E_1 作用,集电极电流也基本不变,为临界饱和电流 I_{CS} ,电源注入的载流子以存贮电荷的形式构成电荷分布 Q_3 存放在基区两侧。

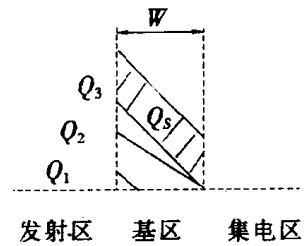


图 1.6

若在时刻 $t = t_2$ 时,开关 K 由电源 E_1 掷向电源 $-E_2$,三极管由饱和状态开始转向截止状态,转换过程并不能立即实现,与二极管转换过程类似,只有使存贮电荷,亦即电荷分布 Q_3 消散后才有可能。存贮电荷 Q_3 消失,亦即集电极电流从 I_{CS} 下降到 $0.9I_{CS}$,所需时间称为存贮时间 t_s 。存贮电荷 Q_3 消散后,PN 结宽度增大,集电极电流变小,集电极电流减小到 $0.1I_{CS}$ 所需时间称为下降时间 t_f 。

由图 1.5(b)所示的集电极电流波形图可知:由三极管的时间特性表明的开关时间(闭合时间 t_{on} 和断开时间 t_{off})可由下式表征:

$$t_{on} = t_r + t_d \quad (1-5)$$

$$t_{off} = t_s + t_f \quad (1-6)$$

数字电路是由逻辑门电路构成的。无论是基本逻辑门电路,还是简单复合逻辑门电路,或者是复杂复合逻辑门电路,都是以二极管或三极管作为基本器件组成的,因此实际逻辑门电路的开关时间(常称为延迟时间)与二极管、三极管的开关时间密切相关。

若要了解或严格推导延迟时间 t_r 、上升时间 t_d 、存贮时间 t_s 及下降时间 t_f ,请参阅半导体器件物理等的有关文献。

§ 1.2 基本逻辑门电路

1.2.1 逻辑状态及正负逻辑系统

数字电路除了开关电路的别称外,还有一个经常使用的称呼:逻辑电路。数字电路既然又叫逻辑电路,那么电路的工作状态必然与逻辑状态息息相关,或者简单地说,电路的工作状态就是逻辑状态。数字电路的工作状态只有两个:开关器件的闭合状态和断开状态。开关器件的这两种工作状态可用两个逻辑状态来表示。

一、逻辑状态

逻辑状态为一定因果关系的状态。实际生活中,这种因果状态关系普遍存在,而且两种状态关系相互对立。除了上述数字电路中的开关闭合与断开之外,一个人身材的高矮,物体体积的大小,温度的高低,电路中信号的有无等等,比比皆是。这些状态关系都可以用逻辑状态表示。

逻辑状态 1:逻辑状态 1 简称逻辑 1。逻辑 1 可表示开关闭合、电位高、物体体积大、有信号等。

逻辑状态 0:逻辑状态 0 简称逻辑 0。逻辑 0 可表示开关断开、电位低、物体体积小、无信号

等。

二、正负逻辑系统

在数字电路中,由于所使用的开关器件的不同,表示电路工作状态的电位、电流也随之不同。为了方便分析电路工作过程,形象地描述电路特性,便采用不同的逻辑状态表示方法来表征电路的因果状态关系。也就是用正负逻辑系统分别刻划由不同特征的开关器件构成的逻辑电路的逻辑状态性能。

正逻辑系统:

逻辑 1:开关闭合,电位高,有信号,……;逻辑 0:开关断开,电位低,无信号,……。

负逻辑系统:

逻辑 1:开关断开,电位低,无信号,……;逻辑 0:开关闭合,电位高,有信号,……。

从上述正、负逻辑系统之逻辑 1、逻辑 0 的规定可以清楚看出:若将正逻辑系统中的逻辑 1 全都换成逻辑 0,逻辑 0 全都换成逻辑 1,那么正好是负逻辑系统;反之亦然。

1.2.2 基本逻辑门电路

一、正与门

可用真实开关构成图 1.7 所示电路。其中,令开关闭合为逻辑 1,开关断开为逻辑 0,电灯 L 亮为逻辑 1,电灯 L 不亮为逻辑 0。很显然,从上述电路可清楚看出:只有在开关 A、开关 B 与开关 C 均闭合时,电灯 L 才亮。若用逻辑形式描述,则为:仅当 A 为逻辑 1、B 为逻辑 1、C 也为逻辑 1 时,L 才为逻辑 1,否则 L 为逻辑 0。上述电路表明的就是逻辑“与”关系,这种“与”关系也可描述为:A、B、C 中至少有一个为逻辑 0 时,L 才为逻辑 0。

能够实现逻辑“与”关系的电路称为“与门”,图 1.7 中所示电路是与门的一种表示形式。

数字电路中的与门是由实际开关器件即二极管组成,三个二极管组成的正与门电路如图 1.8 所示,二极管的 N 端为输入端,输入电压为 0~6V,二极管 P 端经由电阻接电源+12V。规定逻辑 0 为低电平,逻辑 1 为高电平。

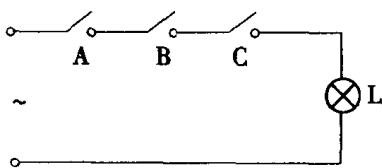


图 1.7

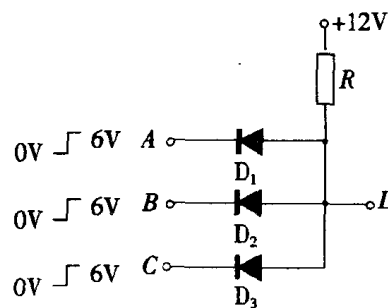


图 1.8

在图 1.8 所示电路中,若三个输入电压都为 0V,即: $V_A = V_B = V_C = 0V$,对应的逻辑状态为: $A = B = C = 0$ 时,二极管 D_1, D_2, D_3 都正偏导通,输出电压为

$$V_L = V_D + V_A = V_D + 0 = V_D = 0.7(V)$$

0.7V 与 0V 相差不大,可认为就是 0V,其对应的逻辑状态为: $L = 0$ 。

在图 1.8 所示电路中,若有两个输入电压为 0V,一个输入电压为 6V,比如: $V_A = V_B =$

0V, $V_C = 6V$, 则相应的逻辑状态为: $A = B = 0, C = 1$ 。此时二极管 D_1, D_2 两端正外加电压值为: $12 - 0 = 12V$, 二极管 D_3 两端正外加电压值为: $12 - 6 = 6V$, 二极管 D_1, D_2 优先导通, 输出电压为: $V_L = V_D + V_A = V_D = 0.7V$, 那么二极管 D_3 反偏截止, 对应的输出逻辑状态为: $L = 0$ 。若输入电压为: $V_A = V_C = 0V, V_B = 6V$; 或者, $V_B = V_C = 0V, V_A = 6V$ 。这两种输入情况下的输出结果同上述一样, 输出电压仍为低电平, 输出仍为逻辑 0。

在图 1.8 所示电路中, 若只有一个输入电压为 0V, 其他两个输入电压均为 6V, 比如: $V_A = 0V, V_B = V_C = 6V$, 相应的逻辑状态为: $A = 0, B = C = 1$ 。此时, 二极管 D_1 两端电压值为 12V, 二极管 D_2, D_3 两端电压值为 6V, 二极管 D_1 优先导通, 输出电压为: $V_L = V_D + V_A = V_D = 0.7V$, 二极管 D_2, D_3 反偏截止, 对应的输出逻辑状态为: $L = 0$ 。若输入电压为: $V_B = 0V, V_A = V_C = 6V$, 或者, $V_C = 0V, V_A = V_B = 6V$ 。这两种情况下的输出结果与上述输入情况一样, 输出电压仍为低电平, L 仍为逻辑 0。

在图 1.8 所示电路中, 三个输入电压都为 6V, 即 $V_A = V_B = V_C = 6V$, 相应的输入逻辑状态为: $A = B = C = 1$ 。此时三个二极管 D_1, D_2, D_3 都正偏导通, 输出电压为

$$V_L = V_A + V_D = 6 + 0.7 = 6.7(V)$$

6.7V 与 6V 相差不多, 可认为就是 6V, 对应的输出逻辑状态为: $L = 1$ 。

上述情况就是三输入正与门的全部工作过程。

用这种分析来表示正与门的输入-输出逻辑关系, 亦即正与门的逻辑功能很有不便之处, 因此常用下面描述的方法来表示正与门。

逻辑图法: 图 1.8 中的二极管正与门电路可用图 1.9 所示逻辑图, 或者逻辑电路表示。图 1.9 表明正与门有三个输入端: A, B, C , 一个输出端 L 。

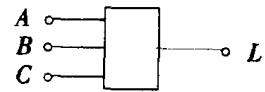


图 1.9

逻辑表达式法: 图 1.8 中的二极管正与门之输入-输出逻辑关系可用如下逻辑表达式描述:

$$L = ABC \quad (1-7)$$

上式称为逻辑与, 又称为逻辑乘或者与操作。式(1-7)清楚表明: 仅在输入 A, B, C 全为逻辑 1 时, 输出 L 才为逻辑 1, 否则, 输出 L 为逻辑 0, 这与图 1.8 所示的电路工作情况完全一致。

逻辑真值表法: 若将图 1.8 中的二极管正与门电路的工作状态一一罗列, 并以表格形式描述, 这种表格就称为逻辑真值表, 三输入正与门逻辑真值表示于表 1.1。

表 1.1 逻辑真值表

输入			输出
A	B	C	L
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

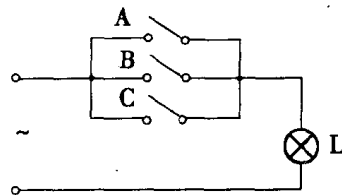


图 1.10

这个逻辑真值表完全表示了三个输入正与门的全部工作状态, 三输入端一共有 $2^3 = 8$ 个不同的输入组合, 若上述逻辑真值表中缺少一栏, 或者多一栏, 都不是三输入正与门。

上述逻辑图、逻辑表达式、逻辑真值表三种描述方法,都表示的是同一个逻辑门电路,仅使用的目的及使用的地方不同。

二、正或门

可用真实开关构成图 1.10 所示电路。图示电路中的输入、输出逻辑状态的规定同图 1.7 中的电路一样。很显然,图 1.10 电路表明:开关 A 或开关 B 或开关 C 闭合,即输入逻辑为 1 时,电灯 L 亮,输出逻辑为 1,否则输出逻辑为 0。也可以这样说:只要开关 A、B、C 中至少有一个闭合,亦即输入逻辑中至少有一个为 1,输出逻辑即为 1,否则输出逻辑为 0。这就是正或逻辑门,简称正或门。

数字电路中的正或门用实际开关器件组成,由二极管构成的正或逻辑门如图 1.11 所示。图中电路的输入、输出逻辑状态也与图 1.8 中电路的规定相同。

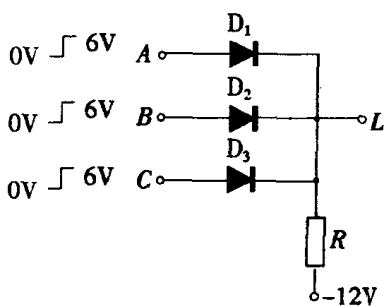


图 1.11

在图 1.11 所示电路中,若输入逻辑全为 0,即 $A = B = C = 0$,二极管 D_1, D_2, D_3 均正偏导通,输出电压为: $V_L = V_A - V_D = -V_D = -0.7V$,即输出逻辑为: $L = 0$ 。

在图 1.11 的电路中,若输入逻辑中,有两个为 0,一个为 1,比如: $A = B = 0, C = 1$ 。此时,二极管 D_1, D_2 两端电压值为: $0 - (-12) = 12V$,二极管 D_3 两端电压值为: $6 - (-12) = 18V$,二极管 D_3 优先导通,输出电压为: $V_L = V_C - V_D = 6 - 0.7 = 5.3V$,二极管 D_1, D_2 反偏截止,输出逻辑为 1。与此相类似的,还有输入情况: $A = C = 0, B = 1$; $B = C = 0, A = 1$ 。这两种情况下,输出逻辑亦有: $L = 1$ 。

在图 1.11 所示电路中,若输入逻辑中有一个为 0,两个为 1,比如: $A = 0, B = C = 1$ 。此时,二极管 D_1 两端电压值为 $0 - (-12) = 12V$,二极管 D_2, D_3 优先导通,输出电压为: $V_L = V_A - V_D = 6 - 0.7 = 5.3V$,输出逻辑为: $L = 1$ 。与此相类似的,还有输入情况: $A = C = 0, B = 1$; $B = C = 0, A = 1$,这两种情况下,输出逻辑亦有: $L = 1$ 。

在图 1.11 的电路中,若输入逻辑全为 1,即 $A = B = C = 1$,二极管 D_1, D_2, D_3 均正偏导通,输出电压为: $V_L = 5.3V$,输出逻辑为: $L = 1$ 。

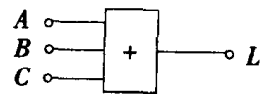


图 1.12

图 1.11 所示的正或门逻辑电路只有上述 8 种不同的输入情况。

正或门逻辑功能也可用下述方法描述。

逻辑图法:图 1.11 中正或门逻辑电路可用图 1.12 所示逻辑图表示。

逻辑表达式法:图 1.11 中正或门逻辑电路的输入-输出逻辑关系可用下式表示

$$L = A + B + C \quad (1-8)$$

式(1-8)表明:输入逻辑中,至少有一个为逻辑 1 时输出逻辑为: $L = 1$,否则,输出逻辑为: $L = 0$ 。换句话说:仅在三个输入逻辑都是 0 时,输出逻辑才是 0。式(1-8)称为逻辑或,也称逻辑加、或操作。

逻辑真值表法:图 1.11 中的正或门逻辑电路可用逻辑真值表全面表示其输入-输出逻辑关系。正或门逻辑真值表如表 1.2 所示。

同样,表 1.2 也应是 8 种不同的输入情况,否则此表就不能表示正或门。

可从表 1.1, 1.2 看出一些有趣的规律: 表中的输入部分是有规则的排列, 这种形式不会导致出错或遗漏; 若将表 1.1 中的 0 全都换为 1, 1 全都换为 0, 表 1.1 正好是表 1.2, 0 换为 1, 1 换为 0 是负逻辑, 这说明: 正或门是负与门; 若将表 1.2 中的 0 全都换为 1, 1 全都换为 0, 正好是表 1.1, 这说明正与门是负或门。

表 1.2 逻辑真值表

输入			输出
A	B	C	L
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

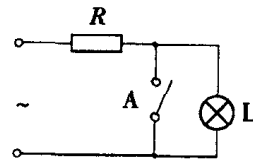


图 1.13

三、非门

用真实开关构成的非门如图 1.13 所示。图中 R 为限流电阻, 开关 A , 电灯 L 的逻辑规定如前所述。开关 A 闭合时的等效电阻 r_A 极其微小, 可忽略。此时电灯 L 中无电流通过, L 不亮, 即输入 A 为逻辑 1, 输出 L 为逻辑 0。

数字电路中的非门是用实际开关三极管组成的, 非门逻辑电路如图 1.14 所示。

图 1.14 中负电源 $-6V$ 是为提高电路抗干扰能力而引入的, 电容 C_S 是小电容, 可改善三极管 T 之时间特性, 即为减小开关时间而引入, 故有时称 C_S 为加速电容。当 A 端为低电平 $0V$ 时, 在负电源作用下, 三极管基极对地电位 V_B 为负值, 三极管 T 截止, 基极 $I_B = 0$, 集电极电流 $I_C = 0$, 集电极-发射极压降 $V_{CE} = E_C - I_C R_C = 6V$, 即输出电压为: $V_L = V_{CE} = 6V$, 高电平。当 A 端为高电平 $6V$ 时, 若电阻

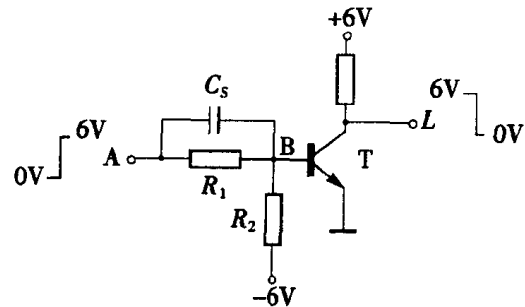


图 1.14

R_1, R_2 选择得当, 三极管 T 之基极电位 $V_B = V_{BE} \geq 0.7V$, 且加速电容 C_S 两端电压 V_{CS} 不能突变, V_A 高电平, 此时加在三极管 T 之基极使三极管迅速饱和和导通, 进入稳态后, C_S 不作用, 工作情况则由 R_1, R_2 , 负电源决定。此时三极管 T 之集电极-发射极压降必为饱和导通压降: $V_{CES} = 0.3V$, 输出电压为: $V_L = V_{CES} = 0.3V \approx 0V$, 低电平。也就是, 图 1.14 所示电路的输出是输入的“非”逻辑关系, 即, 当 $A = 1$ 时, $L = 0$, 当 $A = 0$ 时, $L = 1$ 。

非门逻辑功能也可用下述方法描述。

逻辑图法: 数字电路中的非门逻辑电路可用图 1.15 表示。

逻辑表达式法: 非逻辑电路的输入-输出逻辑关系可用下式表征:

$$L = \bar{A} \quad (1-9)$$

上式称为逻辑非, 又叫求反运算。

逻辑真值表法:非门的输入-输出逻辑状态对应关系也可用如表 1.3 所示的逻辑真值表描述。

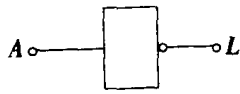


图 1.15

输 入	输 出
A	L
0	1
1	0

数字电路仅有两个逻辑状态:0,1,不是0必然是1,不是1必然是0,所以非门的逻辑真值表特别简单。

数字电路只有三个基本逻辑门电路,有时为了方便,常将门电路名称前的正字去掉,此时指的仍是在正逻辑系统下运用,三个基本逻辑门为:与门、或门、非门。通常用逻辑图、逻辑表达式及逻辑真值表来描述逻辑电路的输入-输出逻辑关系。

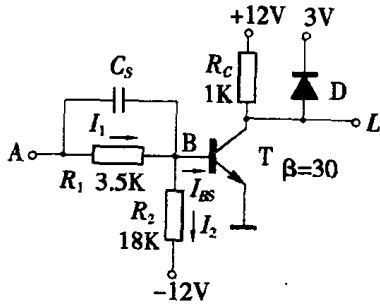


图 1.16

例 1 对于图 1.16 所示非门电路,试计算:

- (1) 电路可靠工作的高电平最小输入值;
- (2) 临界饱和集电极电流 I_{CS} 、基极电流 I_{BS} ;
- (3) 输出高电平值。

解:(1) 电路在高电平输入下可靠地工作,指的是三极管 T 处在饱和状态,即基极-发射极压降 $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。此时对输入电路来说,处于稳定状态,电容 C_S 不予考虑,电阻 R_1 中流有两个电流:基极临界饱和电流 I_{BS} 及 I_2 。三极管 T 饱和时,临界饱和集电极电流为

$$I_{CS} = \frac{E_C - V_{CES}}{R_C} = \frac{12 - 0.3}{1 \times 10^3} \doteq 12(\text{mA})$$

基极临界饱和电流为

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{12}{30} = 0.4(\text{mA})$$

电阻 R_2 中流过的电流为

$$I_{R_2} = \frac{V_{BE} - E_B}{R_2} = \frac{0.7 - (-12)}{18 \times 10^3} \doteq 0.616(\text{mA})$$

电阻 R_1 中流过的电流为

$$I_1 = I_2 + I_{BS} = 0.616 + 0.4 = 1.016(\text{mA})$$

那么,输入电压为

$$\begin{aligned} V_{Amin} &= V_{R_1} + V_{BE} = I_1 R_1 + V_{BE} \\ &= 1.016 \times 10^{-3} \times 3.5 \times 10^3 + 0.7 \doteq 4.26(\text{V}) \end{aligned}$$

即,为使在高电平输入下电路能可靠工作,输入电压最小值为 4.26V。

(2) 三极管临界饱和时,饱和临界集电极电流及临界饱和基极电流均已求出:

$$I_{CS} = 12\text{mA} \quad I_{BS} = 0.4\text{mA}$$

(3) 电路输出为高电平,此时输入必然为低电平,三极管 T 截止,集电极电流 $I_C = 0$,集电极对地电位 V_C 为高电平,二极管 D 为箝位二极管,D 正偏导通,输出电压为

$$V_L = V_D + E_D = 0.7 + 3 = 3.7\text{V}$$