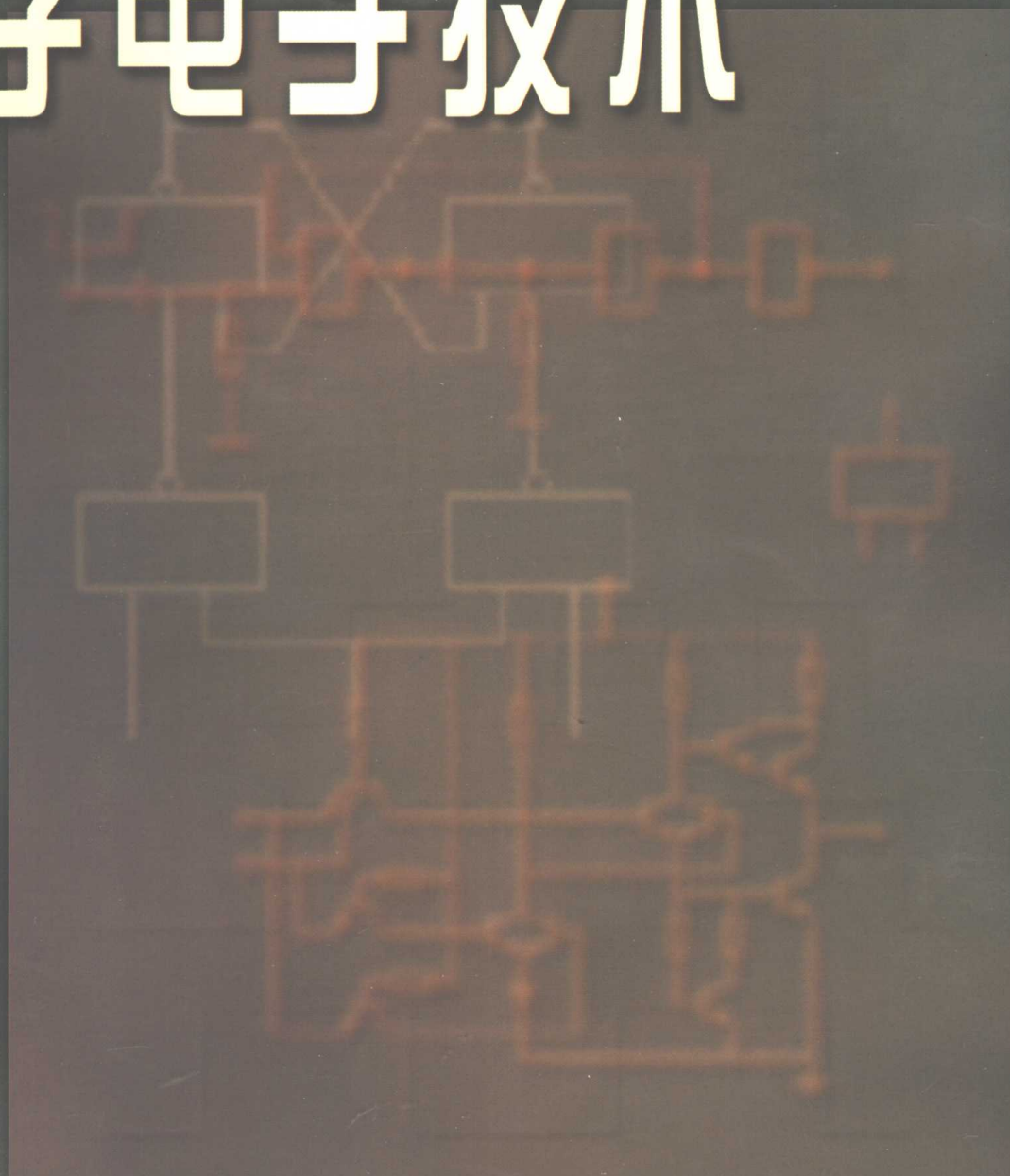


数字电子技术



张英全 侯方勇 编著



机械工业出版社
China Machine Press

重点大学计算机教材

数字电子技术

张英全 侯方勇 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书与前期出版的《模拟电子技术》均是计算机专业本科生电子技术系列课程的教材。本书主要内容有：门电路、触发器、脉冲的产生与整形、光电器件及其应用、模拟开关、数模转换器（DAC）与模数转换器（ADC）、I/O基本电路和信号传输等。在叙述了常用数字电路的基础上，着重讲述了DAC和ADC的基本概念与基本原理。书中附有适量习题。

本书还可以作为控制、测量等专业的教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

数字电子技术 / 张英全，侯方勇编著. —北京：机械工业出版社，2001.1

（重点大学计算机教材）

ISBN 7-111-08630-9

I. 数… II. ①张… ②侯… III. 数字电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字（2001）第00682号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037）

责任编辑：程代伟 李云静

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年1月第1版第1次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 13.5 印张

印数：0 001-5 000册

定价：19.00 元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换

前 言

电子技术和计算机技术的迅速发展,促使计算机专业的电子技术课程内容需不断充实提高。为此,我们参考过去的教材,并总结多年来的教学实践经验,编写了计算机专业本科生电子技术系列课程中的《模拟电子技术》和《数字电子技术》教材,力求内容新颖,篇幅适当,文字流畅,图表清晰,便于自学。

《模拟电子技术》的主要内容有:半导体二极管和晶体管,放大电路基础,场效应晶体管及放大电路,放大电路中的反馈,功率放大器,差分放大器和运算放大器,正弦波发生器和直流稳压电源等。书中通过对半导体器件及电路的分析,叙述了模拟电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。

《数字电子技术》的主要内容有:门电路,触发器,脉冲的产生与整形,光电器件及其应用,模拟开关,数模转换器(DAC)与模数转换器(ADC),I/O常用电路和信号传输等。在叙述了常用数字电路的基础上,着重讲述了DAC和ADC的基本概念和基本原理,以便为计算机应用打下重要的基础。书中附有适量习题,供学生练习。

《模拟电子技术》的第1章至第4章由樊爱华同志编写,第5章至第8章由刘芸同志编写;《数字电子技术》由张英全、侯方勇同志编写,全书由张英全同志统稿,张俊科教授审阅。

《数字电子技术》一书在编写过程中得到国防科技大学计算机学院的多方面支持,教研室其他同志给予了热情的指导和帮助,孙彩霞、张知皎、张爱勇、刘勇鹏和焦照云等同志为绘制本书电路图做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,经验不足,书中错误之处难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2000年8月

目 录

前言

第1章 门电路	1
1.1 数字电路概述	1
1.1.1 数字电路与模拟电路	1
1.1.2 基本逻辑关系	1
1.2 分立元件门电路	3
1.2.1 二极管与门电路	3
1.2.2 二极管或门电路	3
1.2.3 晶体管的开关特性	4
1.2.4 实用非门电路	6
1.3 TTL门电路	9
1.3.1 TTL与非门	9
1.3.2 其他逻辑功能的TTL门电路	17
1.4 ECL门电路	22
1.4.1 基本结构及原理	22
1.4.2 特性	26
1.4.3 逻辑扩展	29
1.5 MOS门电路	31
1.5.1 NMOS反相器	32
1.5.2 NMOS门电路	36
1.5.3 CMOS反相器及门电路	38
习题	40
第2章 触发器	45
2.1 基本RS触发器	45
2.2 同步RS触发器	47
2.3 主从RS触发器	49
2.4 主从JK触发器	50
2.5 边沿JK触发器	54
2.6 维持阻塞D触发器	57
2.7 触发器的脉冲工作特性	59
2.8 触发器的逻辑功能分类	61
2.9 MOS触发器	64

习题66

第3章 脉冲的产生与整形	70
3.1 脉冲发生器	70
3.1.1 集成运算放大器方波发生器	70
3.1.2 TTL与非门方波发生器	71
3.2 单稳电路	78
3.2.1 微分型单稳电路	79
3.2.2 积分型单稳电路	80
3.2.3 集成单稳电路	81
3.2.4 单稳电路的应用	83
3.3 施密特电路	85
3.3.1 运算放大器构成的施密特电路	85
3.3.2 集成TTL施密特电路	85
3.3.3 与非门构成的施密特电路	88
3.3.4 施密特电路的应用	89
3.4 定时器	90
3.4.1 555定时器电路	90
3.4.2 定时器的应用	91
习题	94
第4章 光电器件及其应用	97
4.1 光电器件	97
4.1.1 光敏电阻	97
4.1.2 光敏二极管	98
4.1.3 光敏晶体管	99
4.1.4 发光二极管	100
4.1.5 光耦合器	100
4.2 数据显示	102
4.2.1 七段显示	102
4.2.2 点阵显示	103
4.2.3 多位数据显示	105
第5章 模拟开关	107
5.1 概述	107

5.2 晶体管模拟开关	108	7.2.1 电压-时间间隔-数字转换器	151
5.2.1 基本原理	108	7.2.2 电压-频率-数字转换器	154
5.2.2 正接与反接	108	7.3 比较式ADC	155
5.2.3 正向运用与反向运用	109	7.3.1 工作原理	155
5.2.4 晶体管并联互补模拟开关	109	7.3.2 逐位逼近式ADC的工作过程	156
5.2.5 电路实例	110	7.3.3 比较器	158
5.3 结型场效应晶体管模拟开关	111	7.3.4 双极性转换	159
5.4 绝缘栅场效应晶体管模拟开关	112	7.4 高速ADC	160
习题	115	7.5 ADC的转移特性	163
第6章 数字模拟转换器	116	7.6 ADC的主要参数	164
6.1 DAC的基本原理	116	7.6.1 转换时间	164
6.2 DAC的典型电路	118	7.6.2 分辨率	164
6.2.1 权电阻型DAC	118	7.6.3 精度与误差	164
6.2.2 R-2R型DAC	121	7.7 器件实例	166
6.2.3 倒置R-2R型DAC	123	7.7.1 AD572	166
6.2.4 双极型开关DAC	124	7.7.2 ADC0809	172
6.2.5 CMOS开关DAC	126	7.8 ADC的校准与测试	174
6.3 双极性DAC	128	7.8.1 用数字电压表进行校准与测试	174
6.3.1 双极性代码	129	7.8.2 用基准DAC测试ADC	174
6.3.2 偏流补偿双极性转换	129	习题	175
6.3.3 MDAC双极性转换	131	第8章 I/O常用电路	177
6.4 DAC转移特性	134	8.1 电压测量电路	177
6.5 DAC的主要参数	134	8.1.1 电位差测量	177
6.5.1 分辨率	134	8.1.2 阻抗变换器	179
6.5.2 精度与误差	135	8.1.3 隔离放大器	179
6.5.3 建立时间	137	8.2 电流测量电路	180
6.6 器件实例	138	8.2.1 浮置零阻电流测量电路	180
6.6.1 DAC1132	138	8.2.2 高电位电流测量电路	181
6.6.2 AD7520	141	8.3 采样保持电路	182
6.6.3 DAC0832	142	8.3.1 基本电路及功能	182
6.7 DAC的校准与测试	144	8.3.2 主要参数	183
6.7.1 用数字电压表进行校准与测试	144	8.3.3 常用采样保持电路	184
6.7.2 位扫描DAC校准与测试	145	8.4 参考电压电路	186
习题	147	8.4.1 稳压二极管参考电压电路	186
第7章 模拟数字转换器	149	8.4.2 低参考电压电路	186
7.1 概述	149	第9章 信号传输	190
7.2 计数式ADC	150	9.1 概述	190

9.2 传输线	190	9.3.1 终端匹配	198
9.2.1 信号传输的基本原理	190	9.3.2 始端匹配	199
9.2.2 传输线的基本特性	191	9.4 信号传输方法	200
9.2.3 传输线的终端反射	193	附录一 习题参考答案	201
9.2.4 多次反射	196	附录二 二进制逻辑单元符号对照表	207
9.2.5 脉冲信号在传输线上的传输	198	参考文献	208
9.3 传输线匹配方法	198		

第1章 门 电 路

1.1 数字电路概述

1.1.1 数字电路与模拟电路

电子电路分成两大类：一类叫模拟电路；另一类叫数字电路。这两种类型的电子电路是以它们所处理的电信号的不同来区分的。

在《模拟电子技术》一书中所述的各种电路均属于模拟电路，这些电路的共同特点是它们所处理的电信号都是模拟信号。所谓模拟信号就是信号数值在时间上连续变化的电信号。例如我们所熟悉的正弦波信号就是一种典型的模拟信号，如图1-1a所示。

数字电路是处理数字信号电子电路。数字信号是一种信号数值在时间上不连续变化的电信号，例如幅度相等的矩形脉冲信号就是一种典型的数字信号，如图1-1b所示。

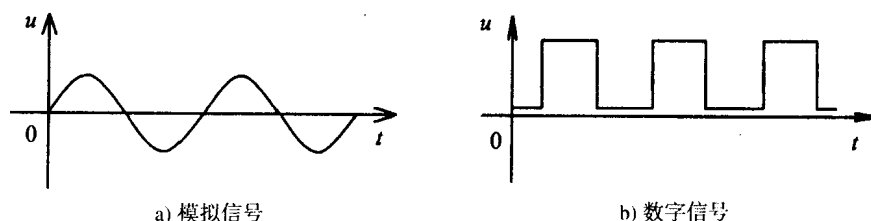


图1-1 模拟信号与数字信号

数字信号的特点是不随时间连续变化，即信号的变化只发生在一系列离散的瞬间，信号的数值是阶跃变化的。

数字信号只有两种状态：高电平、低电平，或者有信号、无信号。在数字电路中，通常把这两种状态用两个符号来表示，即“1”和“0”，也即逻辑1和逻辑0。高电平或有信号用“1”表示，低电平或无信号用“0”表示，这称为正逻辑；相反，低电平或无信号用“1”表示，高电平或有信号用“0”表示，这称为负逻辑。在数字电路的逻辑设计中，有时用正逻辑，有时用负逻辑，本书无特殊声明时，一律采用正逻辑。

1.1.2 基本逻辑关系

数字电路的输出状态与各输入状态之间的关系称为逻辑关系，因此数字电路又称为逻辑电路。数字电路实现的逻辑关系可以很简单，也可以很复杂，但基本的逻辑关系仅有三种，即与、或、非。

1. 与逻辑关系

当决定一件事情的各个条件全部具备时，这件事情才会发生，这样的因果关系称为与逻辑

关系。图1-2a所示电路可以作为与逻辑的实例。电池电压 E 通过开关 S_A 和 S_B 向灯泡供电，只有 S_A 与 S_B 同时接通时，灯泡才亮。 S_A 和 S_B 中只要有一个不接通或两者均不接通时，灯泡HL不亮。因此，该电路中灯泡亮与开关 S_A 和 S_B 的接通构成了与逻辑关系。

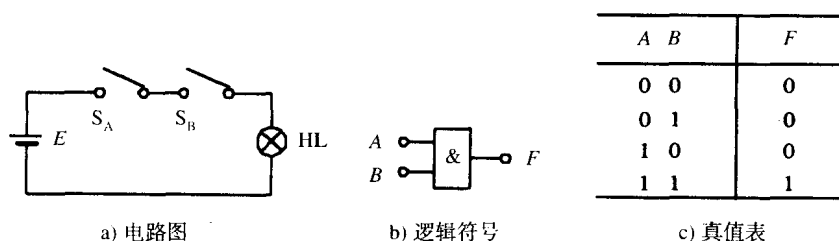


图1-2 与逻辑关系

逻辑关系可以用逻辑表达式或逻辑关系表（或称真值表）表示。例中开关不接通和灯不亮均用逻辑0表示，而开关接通和灯亮均用逻辑1表示，用二元常量 F 、 A 、 B 分别表示灯泡HL和开关 S_A 、 S_B 的状态，则表示上述与逻辑关系的逻辑表达式为

$$F = A \cdot B \text{ 或 } F = AB \quad (1-1)$$

式中，小圆点“ $\cdot$ ”表示与运算，小圆点常常可以省略。与运算逻辑符号如图1-2b所示。图1-2c为上述与逻辑关系的真值表。

2. 或逻辑关系

当决定一件事情的各个条件中，只要具备一个或一个以上的条件时，这件事情就会发生，这样的因果关系称为或逻辑关系。图1-3a可作为或逻辑的实例。电池电压 E 通过开关 S_A 或 S_B 向灯泡供电，只要开关 S_A 或 S_B 接通，或两者均接通，则灯泡亮，而当 S_A 和 S_B 均不通时，则灯泡不亮。因此，该电路中灯泡亮与开关 S_A 和 S_B 的接通构成了或逻辑关系。

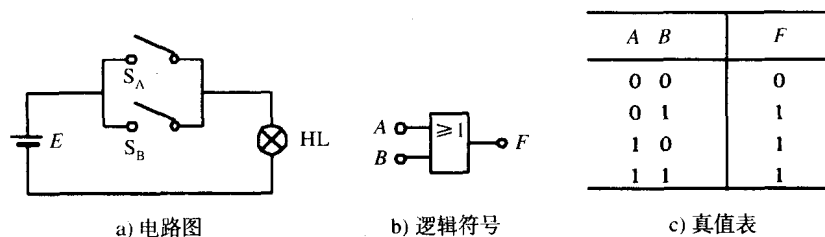


图1-3 或逻辑关系

用二元常量 F 、 A 、 B 分别表示灯泡HL和开关 S_A 、 S_B 的状态，则表示或逻辑关系的逻辑表达式为

$$F = A + B \quad (1-2)$$

式中，符号“ $+$ ”表示或运算。或逻辑的逻辑符号如图1-3b所示。图1-3c为或逻辑的真值表。

3. 非逻辑关系

当一件事情的发生是以相反的条件为前提时，称这种因果关系为非逻辑关系。图1-4a可作为非逻辑关系的实例。电池电压 E 通过电阻 R 向灯泡供电，开关 S_A 并联于灯泡两端，当开关 S_A 接通时，灯泡不亮，当开关 S_A 不接通时，灯泡亮。因此，该电路中灯泡亮与开关 S_A 的接通构成了非逻辑关系。

辑关系。

用二元常量 F 、 A 分别表示灯泡HL和开关 S_A 的状态，则表示非逻辑关系的逻辑表达式为

$F = \bar{A}$ (1-3)

式中，字母 A 上方的短划线“-”表示非运算。非逻辑的逻辑符号如图1-4b所示。图1-4c为非逻辑关系的真值表。

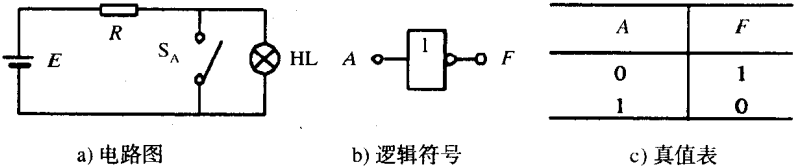


图1-4 非逻辑关系

与、或、非是三种基本逻辑关系，这三种基本逻辑关系经各种组合可构成多种新的逻辑关系，如与非、或非、与或非等。实现这些逻辑关系的电路称为门电路。如实现与逻辑关系的门电路叫与门，实现与非逻辑关系的门电路叫与非门。本章将重点叙述几种门电路的结构、工作原理和外部使用特性。这些门电路包含分立元件门电路、TTL门电路、ECL门电路和MOS门电路。

1.2 分立元件门电路

1.2.1 二极管与门电路

图1-5a为二极管与门电路。

设 A 、 B 输入的高电平为3V，低电平为0V，则图1-5a所示的电路中，对应于 A 、 B 两个输入端的四种组合，输出端 F 的电平如图1-5b所示。若把输出电平0.7V视为低电平，把3.7V视为高电平，则只有当 A 、 B 均输入高电平时，输出 F 才为高电平，否则输出为低电平。可见，该电路实现的逻辑关系符合图1-2c所示真值表，所以它是一种与门电路。

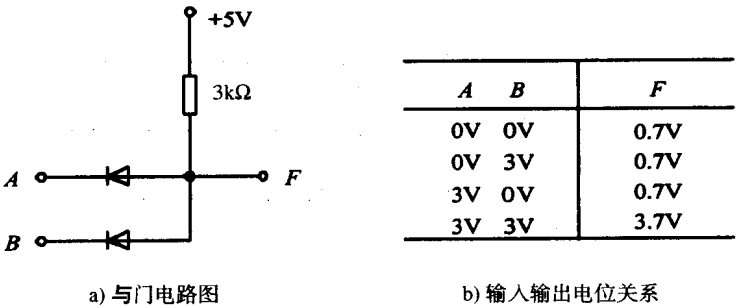


图1-5 二极管与门电路

1.2.2 二极管或门电路

图1-6a为二极管或门电路。如前所述，对应于 A 、 B 两个输入端的四种组合，输出端 F 的电平如图1-6b所示。若把输出电平-0.7V视为低电平，把2.3V视为高电平，则当 A 或 B 有一个输入端为

高电平时, 输出 F 就为高电平。可见该电路实现的逻辑关系符合图1-3c所示真值表, 所以它是一种或门电路。

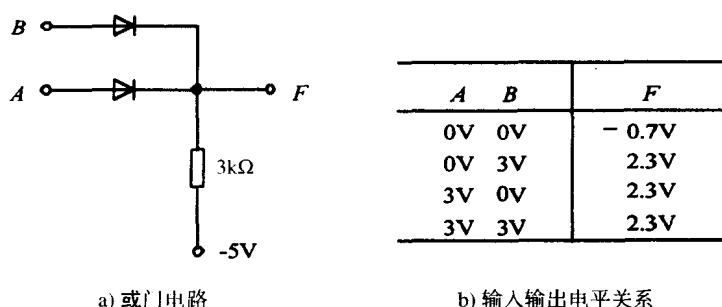


图1-6 二极管或门电路

注意, 在数字电路中, 高电平、低电平是两种不同的状态, 都有一个允许的电压范围, 而不是一个固定不变的数值。

二极管门电路的优点是简单经济, 缺点是负载能力差, 且存在电平偏移。产生电平偏移的原因是二极管有正向压降(硅二极管为0.7V)。当输入信号经二极管与门之后, 输出电平升高了0.7V, 经二极管或门之后, 输出电平下降了0.7V。如果信号经过几个串接起来的与门(或者或门)输出, 电平偏移会很大, 并将造成逻辑上的错误。

1.2.3 晶体管的开关特性

晶体管是电子电路中的重要元件。在模拟电路中, 晶体管主要作为放大元件, 用来放大电信号; 而在数字电路中, 晶体管主要是用作开关元件, 起开关作用。

图1-7a所示电路用来说明晶体管的开关工作状态, 图1-7b为其输出特性曲线, 电路的直流负载线也画在特性曲线中。

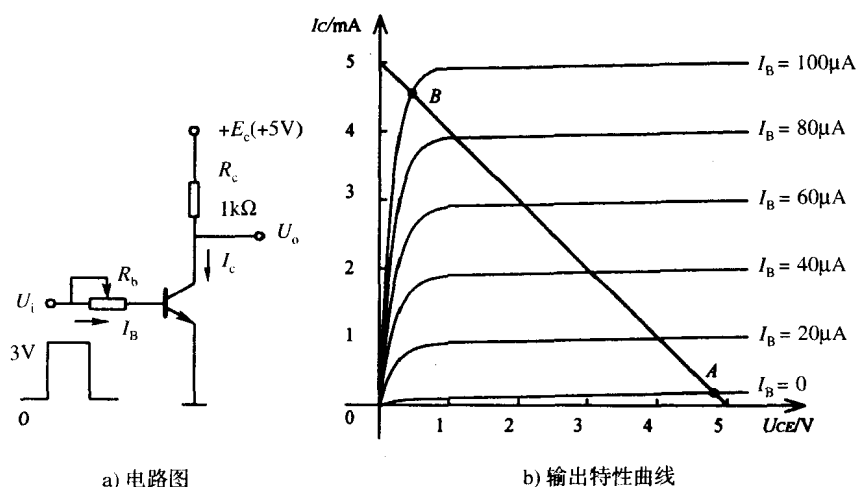


图1-7 三极管的开关工作状态

图1-7a电路中，晶体管为NPN型硅管，输入电压 U_i 为矩形脉冲电压信号，其低电平为0V，高电平为3V。当 U_i 为低电平0V时，晶体管发射结电压为0V，基极电流 $I_B=0$ ，集电极电流 $I_C=0$ 。从输出特性曲线上看，对应于工作点A，晶体管工作在截止区。此时，晶体管的三个电极之间呈现高阻状态，近似于开路，相当于开关断开一样。晶体管的这种工作状态称为**截止**。

当 U_i 为高电平3V时，晶体管的发射结处于正向偏置。调节 R_b ，使 I_B 增加，工作点沿负载线上升，进入输出特性曲线的放大区。当 I_B 增加到 $100\mu\text{A}$ 时，工作点上升到特性曲线的B点。此时，集电极电流 I_C 已接近等于其可能的最大值5mA。如果继续减小 R_b ， I_B 仍可继续增加，但由于 I_C 受 R_c 限制，不可能像放大区那样随着 I_B 的增加而成比例地增加， I_C 仍接近等于5mA，变化很小。这表明集电极电流已基本不受基极电流控制，达到了饱和值。此时的集电极电流称为**集电极饱和电流**，用 I_{CS} 表示，即

$$I_{CS} \approx \frac{E_C}{R_c} \quad (1-4)$$

晶体管的这种工作状态称为**饱和**。刚刚使晶体管达到饱和状态的基极电流称为**临界饱和基极电流**，用 I_{BS} 表示。 I_{BS} 是晶体管从放大状态过渡到饱和状态的临界点，故 I_{BS} 与 I_{CS} 之间仍应满足电流放大规律，如果近似认为这时的电流放大系数仍然是 β （实际上因为特性曲线的非线性，临界饱和时的电流放大系数较处于放大区时下降了），那么

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{E_C}{\beta R_c} \quad (1-5)$$

当晶体管的实际基极电流 $I_B > I_{BS}$ 时，晶体管就进入饱和状态，且 I_B 越大，饱和程度越深。通常以过驱动系数（ I_B 与 I_{BS} 的比值）表示饱和深度。从输出特性曲线上可以看出，晶体管工作在饱和状态时，集电极与发射极之间的压降只有零点几伏，此时c、e间的压降称为晶体管的饱和压降，用 U_{CES} 表示。硅管的饱和压降约为0.3V，锗管约为0.1V，而且晶体管的饱和程度越深，饱和压降 U_{CES} 越小。

由于晶体管饱和后，c、e间的压降很小，近似于短路，相当于开关闭合。习惯上，将晶体管的截止状态称为“关”，将晶体管的饱和状态称为“开”。控制晶体管的饱和与截止，可实现对电路的开、关控制。

NPN型硅晶体管截止、放大、饱和三种工作状态的特点列于表1-1中。此表是判断晶体管工作状态的重要依据。

表1-1 NPN型硅晶体管三种工作状态的特点

状 态	截 止	放 大	饱 和
特 点	$I_B \approx 0$	$0 < I_B < I_{BS}$	$I_B > I_{BS}$
	$I_C \approx 0$	$I_C = \beta I_B$	$I_C = I_{CS} = E_C / R_c$
	be结反偏（或 $U_{BE} < 0.5\text{V}$ ） bc结反偏	be结正偏 bc结反偏	be结正偏 bc结正偏
	$U_{CE} = E_C$	$U_{CE} = E_C - I_C R_c$	$U_{CE} = U_{CES}$

从表中可以看出，截止工作状态的条件是发射结与集电结均为反向偏置，即 $U_B < U_E$ 、 $U_B < U_C$ 。对于发射结来说， $U_{BE} < 0.5\text{V}$ （死区电压）就可以认为 $I_B \approx 0$ ， $I_C \approx 0$ ，晶体管处于截止工作状态。放大工作状态的条件是发射结正偏，且 $U_{BE} > 0.5\text{V}$ ，集电结反偏。其特点是 $I_C = \beta I_B$ ，满足电流放大规律。

饱和工作状态的条件是发射结与集电结均为正偏，其特点是，基极电流 I_B 大于临界饱和基极电流 I_{BS} 。 I_C 达到了集电极饱和电流，饱和压降 U_{CES} 很小。利用上述特点，计算基极电流是判断晶体管工作状态的常用方法。若 $I_B=0$ ，则晶体管截止；若 $I_B>I_{BS}$ ，则晶体管饱和；否则晶体管处于放大状态。在实际电路中，经常用测量晶体管两个结偏置电压的方法快速判断晶体管的工作状态。

1.2.4 实用非门电路

图1-8为实用非门电路。图中晶体管为NPN型硅管， $\beta=30$ ，A为输入端，F为输出端。电路输入的数字信号约定低电平为0.3V，高电平为3.2V。下面分析该电路的工作原理、负载能力和抗干扰能力。

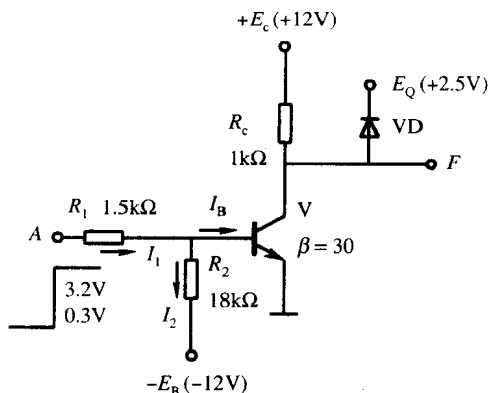


图1-8 实用非门电路

1. 电路工作原理

(1) 当输入端A为低电平0.3V时

由图1-8容易看出，因 E_B 为负电源，故晶体管基极电位 $U_B<0.3V$ ，V截止，集电极电流 $I_C=0$ ，二极管VD两端加正向电压而导通，输出电压

$$U_F = E_Q + U_{VD} = 2.5V + 0.7V = 3.2V$$

(2) 当输入端A为高电平3.2V时

由图1-8中基极所接电阻 R_1 、 R_2 可计算出基极电位 U_B 大于0.7V，故晶体管be结正偏，基极电位钳位在0.7V。根据图1-8所给参数可计算出基极电流 I_B 、集电极饱和电流 I_{CS} 和临界饱和基极电流 I_{BS} 。

$$\begin{aligned} I_B &= I_1 - I_2 = \frac{U_A - U_B}{R_1} - \frac{U_B - (-E_B)}{R_2} \\ &= \frac{3.2V - 0.7V}{1.5k\Omega} - \frac{0.7V + 12V}{18k\Omega} = 0.96mA \\ I_{CS} &= \frac{E_C - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{E_C}{R_C} = \frac{12V}{1k\Omega} = 12mA \\ I_{BS} &= \frac{I_{CE}}{\beta} = \frac{12mA}{30} = 0.4mA \end{aligned}$$

因 $I_B > I_{BS}$, 故晶体管饱和, 输出端电位 $U_F = 0.3V$, 此时二极管VD截止。晶体管的饱和深度为

$$\frac{I_B}{I_{BS}} = \frac{0.96mA}{0.4mA} = 2.4$$

在图1-8所示电路中, 输入低电平时, 输出高电平; 输入高电平时, 输出低电平, 实现了非门的逻辑关系。

2. 输出负载能力

非门输出端所接的其他门电路就是非门的负载。流进非门电路的负载电流叫灌电流, 流出非门电路的负载电流叫拉电流。非门在确保输出高低电平的条件下所能承受的最大灌电流和拉电流, 反映了非门输出的负载能力。灌电流、拉电流越大, 非门输出端可接其他门电路的个数就越多, 其负载能力就越强。

图1-9为灌电流负载情况。当V饱和时, 电流 I_L 流入晶体管的集电极, 此时

$$I_C = I_{RC} + I_L \quad (1-6)$$

当 I_L 增加时, I_C 增加, 也即 I_{CS} 增加, 对应的 I_{BS} 变大, 使晶体管的饱和深度变小, 甚至退出饱和进入放大状态, 从而使输出低电平升高, 因此, 灌电流 I_L 要有一定的限制。

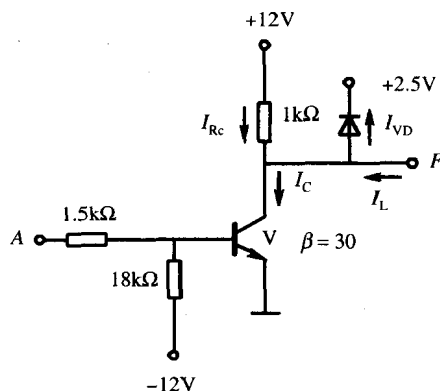


图1-9 灌电流负载

I_L 允许的最大值, 决定于晶体管的原饱和深度以及允许的最大集电极电流 I_{CM} 。(I_{CM} 为晶体管的极限应用参数, 设 $I_{CM} = 30mA$), 即

$$I_{RC} + I_L < \beta I_B \quad (1-7)$$

$$I_{RC} + I_L < I_{CM} \quad (1-8)$$

有

$$I_L < \beta I_B - I_{RC} = 30 \times 0.96mA - 12mA = 16.8mA$$

$$I_L < I_{CM} - I_{RC} = 30mA - 12mA = 18mA$$

故

$$I_{Lmax} = 16.8mA$$

由计算可知, 晶体管基极电流越大, 饱和深度越深, 灌电流负载能力也就越强。

当晶体管截止时, $I_C=0$, 由图1-9可知:

$$I_{VD}=I_{Rc}+I_L \quad (1-9)$$

只要 I_{VD} 不超过二极管的允许电流, 就不会影响工作。

图1-10为拉电流负载情况。当V截止时, $I_C=0$, 有

$$I_{VD}=I_{Rc}-I_L \quad (1-10)$$

为了使二极管导通起钳位作用, 确保输出高电平3.2V, 必须使 $I_{VD}>0$, 即 $I_{Rc}-I_L>0$, 也即

$$I_{Lmax}=I_{Rc}=(E_C-U_{OH})/R_c=(12V-3.2V)/1k\Omega=8.8mA \quad (1-11)$$

若 $I_L>I_{Lmax}=8.8mA$, 则二极管截止, 失去钳位作用, 使输出高电平降低。

当晶体管饱和时, U_F 输出低电平, 二极管截止, 有

$$I_C=I_{Rc}-I_L \quad (1-12)$$

当 I_L 增加时, I_C 下降 (也即 I_{CS} 变小), 不影响晶体管工作, 只会使饱和深度增加。但 I_L 不能超过 I_{Rc} (12mA), 否则输出低电平会偏离规定的电平值。

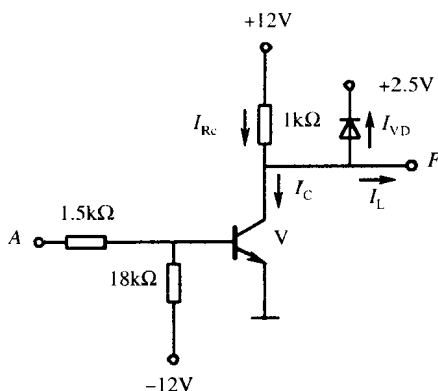


图1-10 拉电流负载

3. 抗干扰能力

外界干扰、电源波动等都可能使门输入端的信号偏离额定的高低电平值。为了提高电路工作的可靠性, 当门输入端的高低电平在一定范围内变化时, 输出电平仍能保持额定值不变。在确保输出高低电平额定值不变的条件下, 允许输入信号电平偏离额定值的电压称为抗干扰能力。

图1-8所示非门电路, 当输入为低电平0.3V时, 晶体管截止, 输出为额定高电平3.2V。如果输入低电平向上波动, 使 $U_{BE}>0.5V$ 时, 晶体管就要导通进入放大状态, I_C 随之增加。但由于非门输出端采用了二极管钳位电路, 只要 $I_C<I_{Rc}$, 二极管会继续导通, 起钳位作用, 使输出保持3.2V。因此, 钳位电路提高了非门输入低电平时的正向抗干扰能力。另外, 由于基极接有负电源 E_B , 降低了输入为低电平时的基极电位, 不但在输入低电平时确保V可靠的截止, 而且使低电平正向电压波动的允许范围加大, 从而提高了正向抗干扰能力。

当输入为高电平3.2V时, 晶体管饱和, 输出为额定低电平0.3V。如果输入高电平向下波动, 基极电流将随之减小, 晶体管的饱和深度减小。当输入高电平下降到使 $I_B<I_{BS}$, 则晶体管进入放大区, 输出低电平将升高。因此, 管子的饱和程度越深, 非门的负向抗干扰能力越强。但也必

须看到，晶体管饱和越深，将会降低开关速度，同时还会增加电路功耗。

1.3 TTL门电路

分立元件门电路目前已很少使用，现在广泛使用的是集成门电路。集成门电路是一种将所有元件与连线都制作在同一块半导体基片上的电路。集成门电路与分立元件门电路相比具有体积小、可靠性高等优点。由于TTL集成门电路的输入端输出端均采用晶体管，所以称为晶体管-晶体管逻辑电路，简称TTL (Transistor-Transistor Logic)。

1.3.1 TTL与非门

1. 电路工作原理

图1-11为典型的TTL与非门电路及其逻辑符号。该电路由五只晶体管和五只电阻构成，采用+5V电源电压。

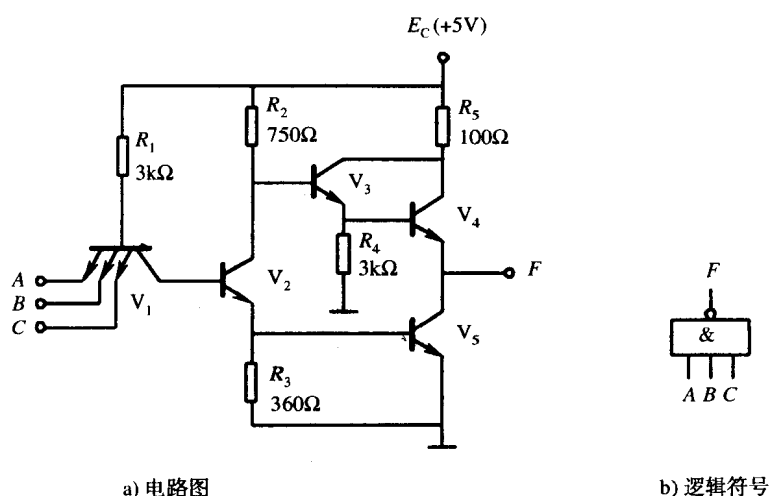


图1-11 TTL与非门

电路可分为三部分：

第一部分是门输入级，由电阻 R_1 和多发射极晶体管 V_1 构成。 V_1 为多发射极晶体管，其结构如图1-12所示，多个发射极共用一个基极和一个集电极，其工作原理与普通晶体管相同。这里利用多个发射极实现输入端之间的与功能。

第二部分是中间放大级，由电阻 R_2 、 R_3 和晶体管 V_2 构成。它实现电流放大，分别由集电极、发射极输出，驱动输出级。

第三部分是输出级，由 V_3 、 V_4 、 V_5 及 R_4 、 R_5 构成。低电平输出时，由 V_5 驱动负载，高电平输出时，由 V_3 、 V_4 驱动负载。

下面分两种情况讨论TTL与非门电路的工作情况。分析计算时，设晶体管的 $\beta=20$ ，饱和压降 $U_{CES}=0.3V$ ，发射结正向压降 $U_{BE}=0.7V$ ，设电路的输入高电平为 $3.6V$ ，输入低电平为 $0.3V$ 。

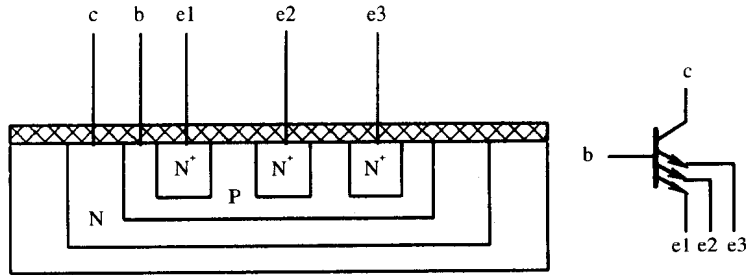


图1-12 多发射极晶体管结构

(1) 全部输入端接高电平

参考图1-13, 当全部输入端接高电平3.6V时, V_1 的基极电位升高, 但其电位被 V_1 的bc结, V_2 、 V_5 的be结钳位在2.1V。此时晶体管 V_1 的be结反偏, bc结正偏, 该管工作于反向放大状态(发射极作为集电极, 集电极作为发射极)。

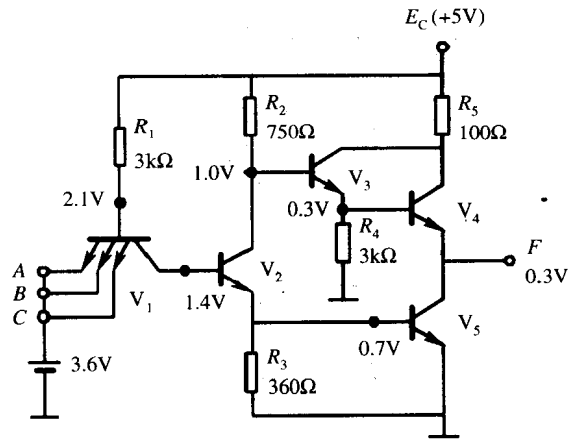


图1-13 TTL与非门电路开门状态

晶体管正向放大时的电流放大倍数用 β_n 表示, 反向放大时的电流放大倍数用 β_i 表示, 由于晶体管的结构原因(集电极和发射极的几何尺寸、形状及掺杂浓度不同)造成 $\beta_n \gg \beta_i$ 。通常 β_i 很小, 设 $\beta_i = 0.01$, 则

$$I_{B1} = \frac{E_C - U_{B1}}{R_1} = \frac{5V - 2.1V}{3k\Omega} \approx 1mA$$

$$I_{B2} = I_{C1} = I_{B1} + 3I_{E1} = I_{B1} + 3\beta_i I_{B1} \approx I_{B1} = 1mA$$

$$I_{CS2} = \frac{E_C - U_{E2} - U_{CES2}}{R_2} = \frac{5V - 0.7V - 0.3V}{0.75k\Omega} \approx 5.3mA$$

$$I_{BS2} = \frac{I_{CS2}}{\beta} = \frac{5.3mA}{20} \approx 0.27mA$$