

中国计算机函授学院教材
中央电视台电视教学用书

数字逻辑电路

皇甫正贤 编著



中国科学技术大学出版社

数字逻辑电路

皇甫正贤 编著

中国科学技术大学出版社
1993. 合肥

(皖)新登字 08 号

数字逻辑电路

皇甫正贵 编著

责任编辑:于文良 陈 浩

*

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号 邮政编码:230026)

中国计算机函授学院激光照排

安徽医科大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

开本:787×1092/16 印张:13 字数:308 千
1993 年 4 月第 1 版 1993 年 4 月第 1 次印刷

印数:1-33,000 册

ISBN7-312-00457-1/TN·19 定价:9.00 元

前 言

本书是根据全日制大专层次的“计算机及应用专业”对“数字逻辑电路”课程的基本要求编写的。

“数字逻辑电路”是本专业一门重要的硬件基础课。通过它的学习,为计算机应用专业的后续课程打下扎实的硬件基础,它是一门理论性和实践性较强的专业基础课程。

目前数字集成电路的制造技术迅速发展,中大规模集成电路已在我国各个技术领域内被广泛应用。因此,在本书编写过程中,按照“教学基本要求”和电子技术发展趋势,必须从实际出发,不能贪多求全,通过精选内容,适当更新来满足专业对本课程的要求。在编写中力求简明实用,通俗易懂、便于自学。

本书将小规模集成逻辑门和触发器作为数字电路中的基础器件,并在此基础上着重介绍中规模数字电路的各种逻辑功能部件。在讨论这些集成电路的形式和工作原理过程中,均注意以应用为目的。强调读者主要掌握它们的功能、外部特性、主要参数及典型应用,不要求详细探讨它们的制造工艺及内部结构。

考虑到目前 MOS 数字集成电路的迅速发展,且应用已趋普及的现状,本书在编写时采用渗入对比的办法。将各种功能的双极型电路和 MOS 电路同时介绍给读者,通过对比归纳,全面介绍它们的特点,以便学习和利用。

在本书学习中必须注意运用组合逻辑电路的分析设计方法、时序逻辑电路的分析方法及同步时序电路的设计方法。因为它们贯穿于各种数字部件介绍的始终。而在这些方法中,逻辑代数、真值表、卡诺图、特性方程、状态转换表、状态转换图、次态方程、驱动方程、输出方程及波形图是主要的分析设计工具,应很好掌握并灵活应用。

“数字逻辑电路”是实践性很强的技术基础课,要求通过实验的手段将课程内容很好吸收、理解和巩固。并且通过典型数字部件的介绍,学会通过查手册,根据电路引脚图及功能真值表能找到和使用符合功能要求的集成芯片。

本书各章后附了不少习题,希望读者在自学后,进行必要的练习,以检查和巩固所学的知识。

本书中使用的符号和半导体集成电路型号命名方法为目前国内教材和技术资料中常用的四机部部颁标准[部标(SJ611—77)],为方便地阅读和查找国外器件和技术资料,本书中介绍了国外技术资料中常用符号和相应的一些器件型号。国家标准 GB4728·12—85 规定的定性符号在一些器件中也作了对照介绍(书中称为新符号)。

本书主要是依据李士雄、皇甫正贤、郑虎申编的《数字集成电路基础》教材编写的,并参考了华中理工大学康华光教授、清华大学阎石教授、东南大学丁康源教授等编写的教材及江苏省自学考试指导委员会出版的教材。全书由东南大学屠念祖教授主审,屠老师对全书初稿提出了许多宝贵意见,编者作了必要的修改。在此向各位参考教材的编者及审阅老师表示最诚挚的谢意。

由于编者水平有限,加之时间比较仓促,书中错误之处,在所难免,殷切希望使用本书的读者给予批评指正。

编 者

1993 年 4 月

内 容 简 介

本书是根据全日制专科学校水平的计算机专业“数字逻辑电路”教学大纲编写的。

全书包括:数字电路概述、逻辑电路的分析基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、脉冲的产生及整形、数模和模数转换器等八章数字电路最基本的教学内容。

“数字逻辑电路”是计算机应用专业的一门重要的硬件基础课程,其理论性和实践性很强。本书全面地阐述了数字逻辑电路的基本理论、基本概念和基本方法。为了便于读者自学,编写上力求通俗易懂、文字简洁、观点明确、逻辑清晰。由于目前微电子技术发展迅速,中大规模器件大量生产和应用。因此教材内容处理中重视方法、加强应用,注重实践,以工程观点适当更新,以集成电路为起点,介绍基础知识,从实际应用的角度去分析各种典型电路。

本书主要是为计算机应用专业的自学读者编写的,也可作大专院校计算机应用、电子电气、自控专业和工程技术人员教学和学习的参考用书。

目 次

第一章 数字电路概述	(1)
1.1 数字信号和数字电路	(1)
1.1.1 数字信号	(1)
1.1.2 数字电路	(2)
1.2 半导体器件开关运用特性	(3)
1.2.1 二极管的开关运用特性	(3)
1.2.2 三极管的开关运用特性	(5)
1.2.3 MOS 管的开关运用特性.....	(8)
1.3 数制和码制.....	(12)
1.3.1 数制.....	(12)
1.3.2 码制.....	(17)
习题	(20)
第二章 逻辑电路的分析基础	(23)
2.1 三种基本逻辑关系及基本逻辑门.....	(23)
2.1.1 “与”逻辑及“与”门.....	(23)
2.1.2 “或”逻辑及“或”门.....	(25)
2.1.3 “非”逻辑及“非”门.....	(26)
2.1.4 正逻辑和负逻辑.....	(27)
2.2 逻辑代数的基本定律和公式.....	(28)
2.2.1 逻辑代数的基本定律.....	(28)
2.2.2 逻辑代数的常用公式.....	(29)
2.3 逻辑函数的建立及表示方法.....	(30)
2.4 逻辑函数的化简.....	(31)
2.4.1 逻辑函数化简的含义.....	(31)
2.4.2 逻辑函数的代数化简法.....	(32)
2.4.3 逻辑函数的卡诺图化简法.....	(33)
习题	(42)
第三章 集成逻辑门电路	(44)
3.1 集成逻辑门的分类.....	(44)

3.2 TTL 逻辑门电路	(45)
3.2.1 TTL 与非门	(45)
3.2.2 其它功能的 TTL	(50)
3.2.3 TTL 门电路的改进	(55)
* 3.3 其它双极型逻辑门电路	(57)
3.3.1 ECL 逻辑门电路	(57)
3.3.2 I ² L 逻辑门电路	(59)
3.4 单极型——MOS 逻辑门	(60)
3.4.1 NMOS 反向器及逻辑门	(60)
3.4.2 PMOS 反向器及逻辑门	(64)
3.4.3 CMOS 反向器及逻辑门	(67)
习题	(73)
第四章 组合逻辑电路	(76)
4.1 组合逻辑电路的分析	(76)
4.1.1 组合电路分析的含义及步骤	(76)
4.1.2 组合电路分析举例	(76)
4.2 组合逻辑电路设计	(78)
4.2.1 组合逻辑电路设计	(78)
4.2.2 组合电路设计举例	(78)
4.2.3 组合逻辑电路中的竞争冒险	(81)
4.3 译码器和编码器	(83)
4.3.1 中规模数字集成电路的特点	(83)
4.3.2 译码器的概念	(83)
4.3.3 变量译码器举例	(84)
4.3.4 码制变换译码器举例	(87)
4.3.5 显示译码器	(88)
4.3.6 编码器	(91)
4.3.7 优先译码器	(93)
4.4 数据选择器	(94)
4.4.1 数据选择器的功能及电路分析	(94)
4.4.2 典型应用	(96)
4.5 数据比较器	(100)
习题	(103)
第五章 触发器	(106)
5.1 触发器的性质	(106)
5.1.1 触发器的基本性质	(106)
5.1.2 基本触发器	(106)

5.1.3 时钟触发器的分类	(107)
5.2 时钟触发器的逻辑功能	(108)
5.2.1 SR 触发器	(108)
5.2.2 D 触发器	(110)
5.2.3 JK 触发器	(111)
5.2.4 T 触发器	(112)
5.3 时钟触发器的结构形式和触发方式	(112)
5.3.1 同步式触发器	(112)
5.3.2 维持阻塞触发器	(114)
5.3.3 边沿触发器	(114)
5.3.4 主从触发器	(115)
5.3.5 时钟触发器的直接置位和直接复位	(116)
5.3.6 触发器的逻辑符号	(116)
5.4 触发器的时间参数	(117)
5.4.1 对时钟脉冲的要求	(117)
5.4.2 传输延迟时间	(117)
5.4.3 建立时间和保持时间	(117)
习题	(119)
第六章 时序逻辑电路	(122)
6.1 时序逻辑电路概述	(122)
6.1.1 时序逻辑电路的定义和一般结构	(122)
6.1.2 同步时序和异步时序电路	(123)
6.2 时序逻辑电路的分析	(123)
6.2.1 时序电路分析步骤	(123)
6.2.2 同步时序电路分析举例	(124)
6.2.3 异步时序电路的分析举例	(126)
6.3 时序逻辑电路的设计	(129)
6.3.1 Mealy 型同步时序电路设计举例	(129)
6.3.2 Moore 型同步时序电路设计举例	(131)
6.4 计数器	(133)
6.4.1 计数器的功能和分类	(133)
6.4.2 二进制计数器	(135)
6.4.3 中规模集成计数器	(139)
6.5 移位寄存器	(145)
6.5.1 移位寄存器的工作原理	(145)
6.5.2 集成双向移位寄存器	(147)
6.5.3 移位寄存器的应用	(148)
6.6 存储器	(150)

6.6.1 只读存储器(ROM)	(150)
6.6.2 随机存取存储器(RAM)	(157)
习题	(159)
第七章 脉冲的产生与变换	(162)
7.1 555 定时器	(162)
7.1.1 电路的组成	(162)
7.1.2 功能	(162)
7.2 施密特触发器	(163)
7.2.1 由 555 定时器构成的施密特触发器	(163)
7.2.2 由 CMOS 门构成的施密特触发器	(164)
7.2.3 施密特触发器的应用	(166)
7.3 单稳态触发器	(167)
7.3.1 由 555 定时器构成的单稳态触发器	(167)
7.3.2 微分型单稳态触发器	(169)
7.3.3 集成单稳触发器	(171)
7.3.4 单稳态触发器的应用	(173)
7.4 多谐振荡器	(173)
7.4.1 由 555 定时器构成的多谐振荡器	(174)
7.4.2 由两个集成单稳构成的多谐振荡器	(176)
7.4.3 石英晶体振荡器	(177)
习题	(179)
第八章 数模和模数转换器	(183)
8.1 数模转换器(DAC)	(184)
8.1.1 数模转换器的基本概念	(184)
8.1.2 权电阻求和网络 DAC	(185)
8.1.3 $R-2R$ 梯形电阻网络 DAC	(187)
8.1.4 $R-2R$ 倒梯形网络 DAC	(189)
* 8.1.5 DAC 中的模拟开关	(190)
8.2 模数转换器 ADC	(191)
8.2.1 ADC 的组成及一些基本概念	(191)
8.2.2 逐次比较型 ADC	(194)
8.2.3 双积分型 ADC	(195)
习题	(198)

第一章 数字电路概述

学习要点:1. 数字信号和数字电路的基本概念

2. 半导体器件开关运用及分析要点

3. 二进制、十进制、十六进制数的表示和转换以及各种代码

1.1 数字信号和数字电路

1.1.1 数字信号

一、模拟信号和数字信号的区别

电子线路中的电信号可分为模拟信号和数字信号两大类。模拟信号是随时间连续变化的物理量,如我们用热电偶检测一台锅炉中蒸气的温度,所得的电压是随时间作连续变化的,它不会产生突然的变化。而数字信号是随时间断续变化的信号,一般来说数字信号是在两个稳定状态之间阶跃式变化的信号,它有电位型和脉冲型两种表示形式。用高低不同的电位信号表示数字“1”和“0”是电位型表示法;用有无脉冲表示数字“1”和“0”是脉冲型表示法。

二、脉冲及其参数

脉冲是一个突然变化的过程,是一个不连续的现象。如电压、电流突然发生变化就是一个电脉冲。如图 1.1.1 所示为几种常用的电脉冲波形,显然它们与典型的模拟信号——正弦交流电压波形有很大区别。

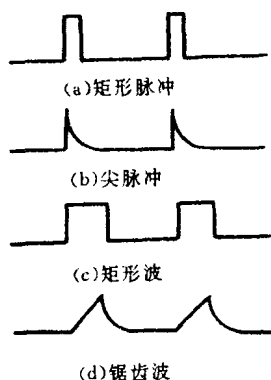


图 1.1.1 几种常用的电脉冲

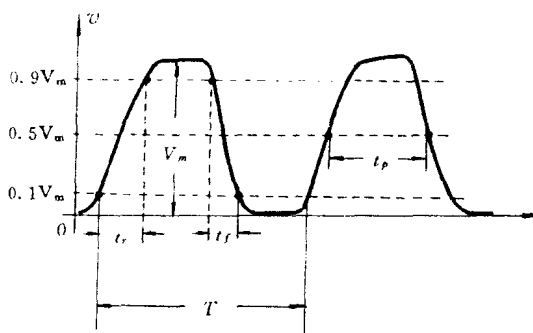


图 1.1.2 实际矩形脉冲波及其参数

正弦交流电压(或电流)可用幅值、初相位和频率三个参数表示它的量值,脉冲电压(或电流)的量值用什么来表示呢?我们在图 1.1.2 中以实际的矩形波为例来说明。

一个脉冲的参数主要有以下几个:

1. V_m ——脉冲最大幅度

它是电压从起始稳态值到峰值之间的变化幅度。单位:V(伏)

2. t_r —— 脉冲上升时间

是从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所需时间。它反映电压上升时,过渡过程的快慢。单位:秒;毫秒($ms=10^{-3}$ 秒);微秒($\mu s=10^{-6}$ 秒);毫微秒(纳秒 $ns=10^{-9}$ 秒)。

3. t_f —— 脉冲下降时间

是从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需时间。它反映电压下降时,过渡过程的快慢。单位同 t_r 。

4. t_p —— 脉冲宽度

是同一脉冲内两次到达 $0.5V_m$ 的时间间隔。单位同 t_r 。

5. T —— 周期

在周期性连续脉冲中,相邻两个脉冲波形相位相同点之间的时间间隔。单位同 t_r 。

6. f —— 频率

在周期性连续脉冲中,每秒出现脉冲波形的次数。单位:赫兹(Hz);千赫(kHz);兆赫(MHz)。

显然频率为周期的倒数,即 $f = \frac{1}{T}$ 。

7. D —— 占空比

它是脉冲宽度与脉冲重复周期的比值, $D = \frac{t_p}{T}$,它是描绘脉冲疏、密的物理量。

1.1.2 数字电路

一、什么是数字电路

严格来说,数字电路包括了脉冲电路和数字逻辑电路两部分。脉冲电路主要研究脉冲的产生、变换和测量。尽管脉冲波形形状多样,但它们都有共同点,就是整个波形都由若干个暂态和稳态过程组成。为了获得暂态过程,脉冲电路必须包括两个组成部分:一个是开关电路,用来接通和断开电路,以破坏电路稳态建立暂态;一个是惰性电路,用以控制暂态过程时间。我们使用的开关是晶体三极管、二极管、MOS管及由它们构成的集成电路。常用的惰性电路有 RC 、 RL 、 RLC 和延迟线,其中以 RC 电路为主,这部分内容在第七章中详细介绍。

数字逻辑电路是一门研究数字信号的编码、运算、记忆、计数、存储、分配、测量和传输的科学技术。简单地说是用数字信号去实现运算、控制和测量的科学。

数字电路与模拟电路相比有如下优点:

1. 电路结构简单,容易制造,便于集成和系列化生产,成本低廉,使用方便;
2. 由数字电路组成的数字系统,工作准确可靠,精度高。
3. 不仅能完成数值运算,还可以进行逻辑运算和判断,在控制系统中这是不可缺少的,因此数字电路又可称作数字逻辑电路。

数字电路相对于模拟电路的这一系列优点,使它在通信、自动控制、测量仪器及计算机等各个科学领域中得到广泛的应用。

二、数字电路的分类

1. 按电路组成的结构来分,可分为分立元件电路和集成电路两类。分立元件电路,是将元件和器件用导线连接起来的电路;而集成电路是将元件、器件和导线均用半导体工艺

集成制作在同一块硅片上。按集成度的大小(在一块硅片上包含逻辑门电路或元件的数量多少)集成电路可分为小规模(SSI)、中规模(MSI)、大规模(LSI)和超大规模(VLSI)这几类。小规模电路(Small-Scale Integrated Circuits)通常是逻辑单元电路,如逻辑门电路、触发器;中规模电路(Medium-Scale Integrated Circuits)通常是逻辑功能部件,如译码器、编码器、选择器、计数器、比较器等;大规模集成电路(Large-Scale Integrated Circuits)通常可构成一个小的数字逻辑系统,如微处理器、中央控制器、存储器、串并行接口电路等;超大规模集成电路(Very Large-Scale Integrated Circuits)可构成一个数字逻辑系统,如在一片硅片上集成一个完整的微处理机。本书主要讨论中、小规模集成电路。

2. 按电路所用的器件来分,可分为双极型(如 DTL、TTL 等)和单极型(如 NMOS、PMOS、CMOS 等)电路。

3. 按数字电路逻辑功能又可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。

数字电路的工作信号是不连续变化的数字信号,所以在数字电路中工作的半导体器件多数工作在开关状态,因此在 1.2 节重点介绍半导体器件的开关运用。

1.2 半导体器件开关运用特性

1.2.1 二极管的开关运用特性

一、二极管的静态特性和等效电路

1. 二极管的静态特性

在半导体物理中,曾建立了二极管特性的数学模型(即二极管的电压电流关系式):

$$i = I_s (e^{qV/kT} - 1)$$

式中: I_s ——反向饱和电流,其大小决定于半导体材料特性、几何尺寸和温度。

q ——电子的电荷量,等于 1.602×10^{-19} 库仑

T ——绝对温度,单位是 $^{\circ}\text{K}$

k ——波尔兹曼常数,等于 1.38×10^{-23} 焦耳/ $^{\circ}\text{K}$

由此数学模型可画出如图 1.2.1 所示的理论化的二极管特性曲线。

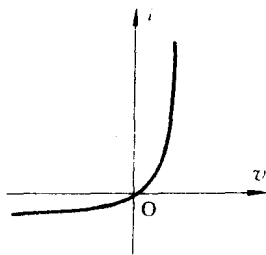


图 1.2.1 理论化的二极管特性

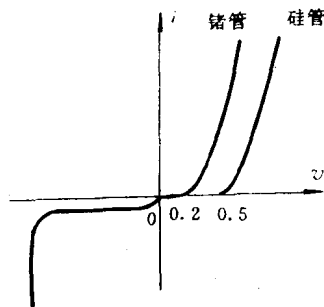


图 1.2.2 实际二极管特性曲线

如图 1.2.2 所示为实际的硅二极管和锗二极管的特性曲线,它们也就是二极管的实际静态特性,显然与理论化的二极管特性曲线相比是有差异的,其主要区别在:

(1) 实际二极管的正向特性存在一个 V_D 的死区电压,当二极管上加正向电压,但此电

压小于死区电压 V_r 时,几乎无电流通过 PN 结,因此 i 基本为零;当二极管加上的正向电压大于死区电压 V_r 时,二极管上才流过较大的正向电流。硅二极管的死区电压 V_r 约为 $0.5V$,锗二极管的 V_r 约为 $0.2V$ 。

(2)由于实际二极管 P 区和 N 区存在体电阻,在电流较大的区域,它的影响变得十分显著,此时体电阻 $R_r = \frac{\Delta V}{\Delta I}$,近似于一个常数。

(3)实际硅二极管和锗二极管反向电流很小,为微安数量级,在温度不高时,可忽略不计。实际的二极管有一个反向击穿电压,当反向电压绝对值大于此值时,反向电流会急剧增长。

2. 二极管的等效电路

(1)在正向电压较大的工作状况下,图 1.2.2 所示二极管的实际曲线可简化成图 1.2.3(a)所示折线,简化后的二极管特性曲线可用图 1.2.3(b)所示等效电路来代替,非线性二极管静态特性,经替代后,就可以线性化,二极管电路就能用计算的方法求取电路中的电流和电压。

等效电路中的二极管是理想二极管,即加上正向电压时, PN 结相当于短路;加上反向电压时,相当于断路。

等效电路中的 R_r 为二极管正向体电阻, V_r' 为折线化后的死区电压,又称为箝位电压,硅管相当于 $0.7V$;锗管相当于 $0.3V$ 。

(2)在数字电路中,更多情况下,具备负载电阻 $R_L \gg R_r$ 的条件,因此为了分析方便,常可将 R_r 忽略不计,其进一步简化的特性及等效电路分别如图 1.2.4(a)和(b)所示。

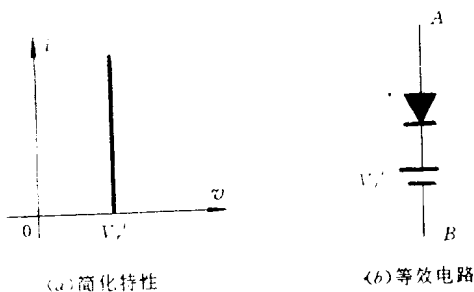


图 1.2.4 二极管进一步简化的特性及等效电路

或加上反向电压,二极管截止,这称为二极管的“关”态,可用图 1.2.5(b)来表示。

在脉冲信号的作用下,二极管在“开”态和“关”态之间转换,当脉冲频率高时,其变化速率会很快,可达每秒 100 万次以上。在高速开关状态下,就必须考虑二极管状态转化的过渡过程时间。

实验可证,二极管由正向导通转为反向截止所需的过渡过程时间较大,这过程称为反向恢复过程,存在反向恢复过程的实质是电荷的存储效应。

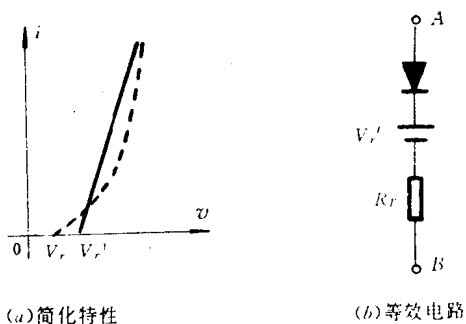


图 1.2.3 二极管简化特性及等效电路

2. 二极管的动态特性

由二极管静态特性的分析可知,二极管具有单向导电性。

在数字电路中,二极管一般按图 1.2.4 特性曲线和等效电路分析,即二极管加上正向且超过箝位电压 V_r' 的电压,二极管导通且箝位(即二极管的 PN 结有固定的正向压降 V_r'),这称为二极管的“开”态,可用图

1.2.5(a)来表示;加上正向电压但小于 V_r'

由电工电子学可知,二极管在正向导通时,外电场削弱了内电场,载流子运动以漂移运动为主, P 区和 N 区的多数载流子,不断向对方区注入,形成正向电流,在 PN 结边界附

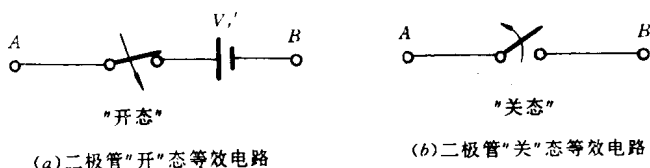


图 1.2.5 二极管开关等效电路

近存储着一定数量的少数载流子(多数载流子注入对方区域就成了对方区域的少数载流子),它们称为存储电荷。当外加电压由正向转为反向时,外电场加强了内电场,在反向电场作用下,这些存储电荷会从本区域流出,形成漂移电流 $i_{\text{反}}$,这些存储电荷是不会立即消失的,刚开始时 $i_{\text{反}}$ 很大,随着存储电荷的减少,反向电流也逐渐减小到正常反向饱和电流值,二极管就转变为截止状态。

通常我们用 t_r 表示反向恢复时间,它一般为毫微秒数量级。正向导通时电流越大,存储电荷越多,反向恢复时间就越大。

二极管从反向截止转为正向导通所需时间,称为开通时间,与反向恢复时间相比,它很小,它只是在正向偏压下,使空间势垒区变窄所需的时间。因此影响二极管动态特性的主要参数是 t_r ,开通时间常可忽略不计。

1.2.2 三极管开关运用特性

一、三极管的三状态与“开”、“关”等效电路

三极管是一种三极(发射极 E 、基极 B 、集电极 C)二结(发射结、集电结)半导体器件,它有 NPN 型和 PNP 型两种,可工作在截止、放大、饱和三种工作状态。

通常在数字电路中,三极管作为开关元件主要工作在饱和状态(“开”态)和截止状态(“关”态),并经常在饱和区和截止区之间,经过放大区快速转换,这就是“三极管的开关运用”。因此,在电工电子学的基础上有必要对三极管三状态的条件和特点作进一步的归纳和分析。

现以图 1.2.6(a)所示的 NPN 硅三极管共发射极电路为例,来分析其静态特性。

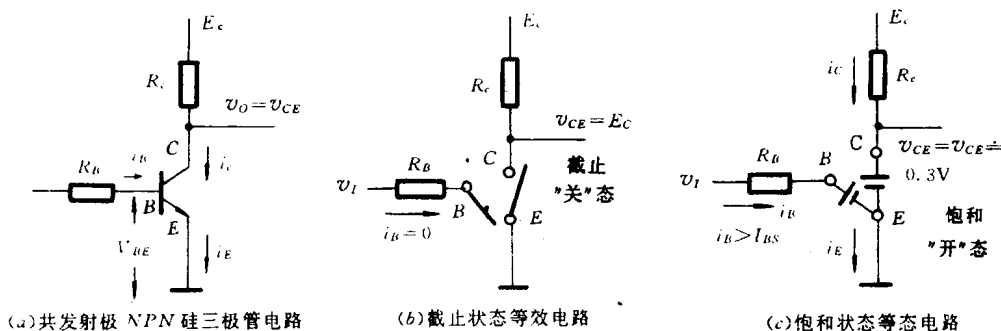


图 1.2.6 三极管开关等效电路

1. 截止状态

由于发射极接地,因此 $v_E = 0$,当输入电压 $v_I < 0$ 时,发射结电压 $v_{BE} < 0$,因此发射结处于反偏状态,发射极电流 i_E 、基极电流 i_B 、集电极电流 i_C 基本上为零,最多只有很小的

反向漏电流。

此时集电极电阻 R_C 上无压降,集电极电位 $v_C = E_C$,集电结电压 $v_{BC} < 0$,自然处于反偏状态。 B 、 E 、 C 三极如同断开一样,这个状态称为三极管的截止状态,也就是三极管的“关”态。

若 $v_I > 0$,但小于死区电压 $0.5V$,发射结虽正偏,但由于未超过死区电压 v_r 而无发射极电流 i_E ,因此三极管仍处于截止状态,基极电流 i_B 及集电极电流 i_C 也均为零,输出电压 $v_{CE} \doteq E_C$ 。

在截止状态下,硅三极管的等效电路如图 1.2.6(b)所示。

2. 放大状态

若 v_I 上升,且超过 $+0.5V$,则发射结正偏且超出死区电压,发射区发射出电子,注入基区,形成发射极电流 i_E 。三极管中发射极多子浓度远远大于基极、集电极多子浓度,而且基区很薄,因此注入基区的电子只有一小部分在基极与空穴复合,形成基极电流 i_B ,大部分通过扩散,到达集电极边界,由于集电结处于反偏,因此可将基区到达集电结边界的电子充分加以收集形成集电极电流 i_C , i_C 的大小决定于发射区发射电子的数量。

在放大状态下,集电极电流 i_C 与基极电流 i_B 的关系为: $i_C = \beta i_B$ 这是电流的放大作用,式中系数 β 为电流放大系数。

由于根据克希荷夫第一定律, i_C 、 i_B 、 i_E 具有下式关系:

$$i_E = i_C + i_B$$

因此 $i_E = \beta i_B + i_B = (1 + \beta) i_B$ 。

在放大状态下,输出电压 $v_{CE} = E_C - i_C R_C$,它在数值上大于 v_{BE} ,因此放大状态下的集电结始终处于反偏状态。

若 $v_{BE} = 0.5V$,三极管处于截止和放大状态的边缘,称为临界导通点。

经验证明:硅三极管导通后,即使基极电流 i_B 在一个相当宽广的范围内变化,发射结正向压降 v_{BE} 也只能在 $0.7V$ 左右作微小变化,因此可认为硅三极管导通时发射结正向压降为 $0.7V$,若发射极接地,基极电位 v_B 必箝位在 $0.7V$ 左右。

导通的锗三极管发射结的正向压降一般取 $0.3V$ 。

3. 饱和状态

三极管导通后,随着输入电压 v_I 增大, i_B 、 i_C 、 i_E 均增大, $v_{CE} = E_C - i_C R_C$ 不断下降,当 v_{CE} 降到 $0.7V$ 以下时,三极管集电结由反偏转向正偏,外电场削弱了内电场,使集电结对基区边界的电子收集作用减弱,发射极发射到基区的多余电子在基区和集电区边界堆积,使基极复合电流 i_B 增加,而 i_C 不再增大。此时,发射有余而收集不足。

在饱和状态下,发射结和集电结都正偏,集电极电流不再服从放大状态下 $i_C = \beta i_B$ 这一规律, $i_C \doteq E_C / R_C$ 。

在饱和状态下集电极和发射极之间成低阻抗,集电极与发射极之间的压降很小,硅管为 $0.3V$ (锗管为 $0.1V$),称为三极管的饱和压降,用 V_{CES} 表示。此时,集电极与发射极之间如同短路接通一样,这称为三极管的“开”态,其等效电路如图 1.2.6(c)所示。

饱和也是一种导通状态。它与放大状态有如下共性:放大与饱和状态下, i_E 、 i_B 、 i_C 都不为零,都服从 $i_E = i_C + i_B$ 这一规律;发射结正偏,且超出死区电压,硅管发射结压降 v_{BE} 为 $0.7V$ (锗管为 $0.3V$)。

B1

饱和与放大状态不同处为：放大时集电结反偏，饱和时集电结正偏；放大时电流 $i_C = \beta i_B$ 、 $i_E = (1 + \beta) i_B$ ，它们之间具有线性关系。饱和时， $i_C < \beta i_B$ 、 $i_E < (1 + \beta) i_B$ ， i_C 不会随 i_B 的增加而增加， $i_C \doteq \frac{E_C}{R_C}$ 。

集电结零偏，即 $v_C = v_B$ 时，称为临界饱和点，此时的基极电流 $i_B = i_{BS} = \frac{i_{CS}}{\beta} \doteq \frac{E_C}{R_C \beta}$ ， i_{BS} 为临界饱和基极电流， i_{CS} 是临界饱和集电极电流。严格说来，硅管的 i_{CS} 应为 $\frac{E_C - 0.7V}{R_C}$ （锗管则为 $\frac{E_C - 0.3V}{R_C}$ ），但 0.7V（或 0.3V）与 E_C 相比较小，有时为分析方便，可忽略不计。

三极管三状态的条件和特点可由表 1.2.1 表示。

表 1.2.1 NPN 硅三极管共射极电路三状态条件和特点

状 态	条 件		特 点					
	$v_{BE}(V)$	i_B	i_B	i_C	i_E	$v_{CE}(V)$	发射结偏置	集电结偏置
截 止	< 0.5	0	0	0	0	E_C	反偏或正偏小于 V_r	反 偏
放 大	≈ 0.7	$< i_{BS}$	$i_B, i_C, i_E = 1: \beta: (1 + \beta)$			$E_C \sim 0.7$	正 偏	反 偏
饱 和	≈ 0.7	$> i_{BS}$	$> i_{BS} < \beta i_B < (1 + \beta) i_B$			≈ 0.3	正 偏	正 偏

二、三极管的动态特性

同二极管一样，在脉冲输入信号的作用下，NPN 硅三极管共射极电路中的三极管时而饱和和导通，时而截止。当脉冲频率高时，三极管开关速度很快，要求器件在微秒或纳秒（毫微秒）数量级内完成开关状态的转换，其过渡过程时间就必须考虑，这就是我们所需研究的动态特性。

在图 1.2.6(a) 电路中若加入如图 1.2.7 所示输入电压 v_I ，可得到相应的集电极电流 i_C 和集电极电压 v_C ($v_C = E_C - i_C R_C$) 波形如图所示。

v_I 输入的是理想矩形波，但 i_C 和 v_C 却不是理想波，对应于输入脉冲的上跳沿和下跳沿，它们均有延迟，且波形的上下跳沿变差。

为描述其动态过程，引入如下参数：

1. 延迟时间 t_d —— 从输入 v_I 上跳到集电极电流 i_C 上升到 $0.1 i_{CS}$ 所需时间。

2. 上升时间 t_r —— i_C 由 $0.1 i_{CS}$ 上升到 $0.9 i_{CS}$ 所需时间。

3. 存储时间 t_s —— 从输入 v_I 下跳到 i_C 由 i_{CS} 下降到 $0.9 i_{CS}$ 所需时间。

4. 下降时间 t_f —— i_C 从 $0.9 i_{CS}$ 下降到 $0.1 i_{CS}$ 所需时间。

$t_d + t_r = t_{ON}$ ，称为开通时间，即三极管由截止转换为饱和导通所需过渡过程时间。

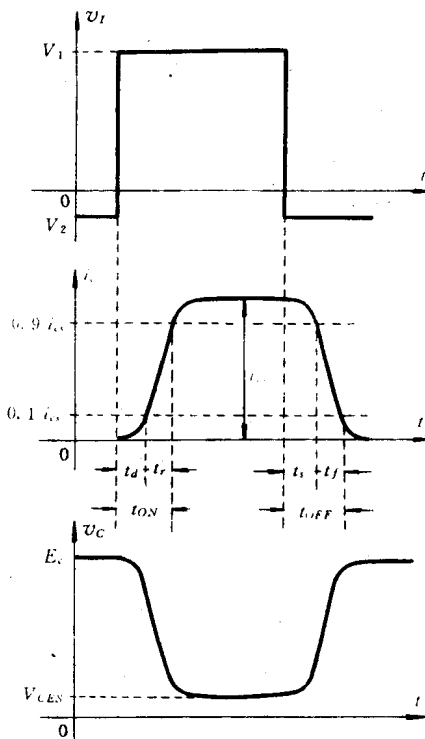


图 1.2.7 波形图

$t_i + t_f = t_{OFF}$, 称为关断时间, 即三极管由导通饱和转向截止所需过渡过程时间。

与二极管相似, 存在这些过渡过程时间的原因是基区存储电荷效应。开通时间是建立基区存储电荷所需时间, 关断时间是基区存储电荷消散所需的时间, 它们一般都在纳秒数量级。

要提高三极管的开关速度, 通常有改进管子内部结构及外部电路两种措施, 减小基极厚度和发射结、集电结面积; 用掺金工艺增加基区复合中心, 可从管子内部提高其开关性能。在外部电路, 适当选择基极正反向电流及集电极最大电流, 也可改善其动态特性。

1.2.3 MOS 管的开关运用特性

半导体器件中, 除二极管、三极管能作开关运用外, 还有一类集成度高、功耗低、工艺简单的器件——MOS 场效应管。

MOS 管是由金属 (Metal)、氧化物 (Oxide)、半导体 (Semiconductor) 三种材料构成的三层器件, 它依靠半导体表面外加电场的变化来控制器件的导电能力。由于这种晶体管只有一种极性的载流子 (多数载流子) 参与导电, 并且只渡越一种导电类型 (P 型或 N 型) 的半导体, 因此, 有时也称之为单极型晶体管。

一、MOS 管的结构、分类和主要参数

1. MOS 管的结构

图 1.2.8(a) 是 MOS 场效应管的结构图, 在 P 型硅衬底上扩散两个高浓度的 N 区, 两个 N 区之间的半导体表面上覆盖一层二氧化硅 (SiO_2) 绝缘层, 再在其上面沉积一层金属铝作为栅极 G。两个高浓度 N 区中, 一个称为源区, 其引出线称为源极 S; 另一个称为漏区, 其引出线称为漏极 D。源极和漏极具有对称性, 可以调换使用。衬底又称基片, 引出线称为基极 B。

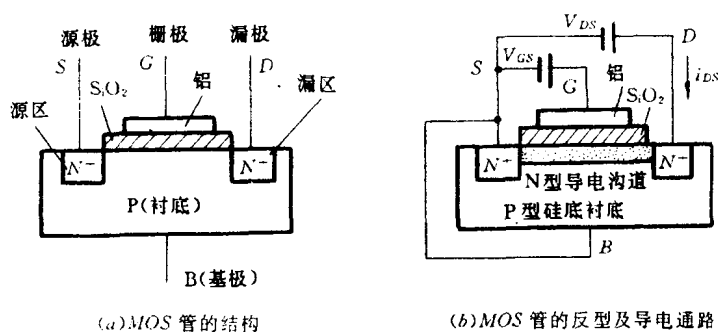


图 1.2.8 MOS 场效应管

在栅极不加电压的情况下, 源极和漏极之间不存在导电沟道, 这时在源极和漏极之间相当于有两个串联的背靠背 PN 结, 无论源漏两极间加什么极性的电压, 总有一个 PN 结处于反向偏置, 器件处于高阻的截止状态。

若如图 1.2.8(b) 所示, 将源极 S 和基极 B 连接在一起, 在栅极 G 和源极 S 之间加上正电压 V_{GS} , 则在 SiO_2 绝缘层中产生一个指向半导体表面的电场, 由于绝缘层很薄 (0.1 微米左右), 因此数伏电压就能产生很强的电场 (约 $10^5 \sim 10^6$ 伏/厘米)。这个强电场会将电子拉到 P 型半导体表面, 形成一条 N 型导电沟道, 这叫做表面场效应。表面场效应引起