



普通高校系列教材·信息技术

数字集成电路基础

普通高校教材（信息技术）编委会主编

作者：皇甫正贤



南京大学出版社

普通高校系列教材·信息技术

数字集成电路基础

皇甫正贤 主 编

王启祥 主 审

南京大学出版社

内
容
简
介

本书内容包括数字电子技术概述、逻辑代数基础及基本逻辑门、集成逻辑门电路、逻辑函数及其化简、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、存储器、脉冲的产生与变换及数/模和模/数转换器等十章最基本的教学内容,全面地阐述了数字电路的基础理论、基本概念和基本方法。在编写上力求通俗易懂、观点明确、突出重点、概念清晰。

本书可作为大专院校计算机应用、电子电气、自控专业及工程技术人员教学 and 学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字集成电路基础/皇甫正贤主编. —南京:南京大学出版社,2001

ISBN 7-305-02675-1

I. 数... II. 皇... III. 数字集成电路—基础理论 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 062266 号

数字集成电路基础

皇甫正贤 主编

王启祥 主审

南京大学出版社出版发行

(南京大学校内 邮政编码:210008)

合肥学苑印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:432 千

2002 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-305-02675-1/TP·115

定价:23.00 元

普通高校教材(信息技术)编委会

主 任:孙钟秀 中国科学院院士

副主任:张福炎 南京大学教授

陈国良 中国科学技术大学教授

钱洲胜 中国计算机函授学院院长

委 员(按姓氏笔划排序):

王佩珠	西安交通大学	王文兰	桂林电子工业学院
王蔚韬	重庆建筑大学	伍良富	成都电子科技大学
成松林	东南大学	刘存书	郑州信息工程大学
朱大奇	安徽工业大学	朱宝长	西安电子科技大学
孙德文	上海交通大学	杜象元	上海交通大学
李茂青	厦门大学	李学干	西安电子科技大学
杨来利	兰州大学	何淑兰	北京科技大学
张凤祥	华中科技大学	张绍林	河北行政学院
张维勇	合肥工业大学	张民坤	云南工业大学
张景书	哈尔滨工程大学	邹华跃	中国计算机函授学院
赵良全	新疆大学	皇甫正贤	东南大学
洪志全	成都理工学院	姚君遗	合肥工业大学
高 平	浙江大学	陶世群	山西大学
曹翊旺	湖南省计算机高等专科学校	梁文康	山东大学
韩国强	华南理工大学	舒 洪	南昌大学
葛 燕	中国科学技术大学	解世耀	辽宁大学
谭耀铭	南京大学	黎庆国	合肥工业大学

出版前言

近些年来我国的高等教育事业有了长足的发展,高校招生人数年年递增,越来越多的年轻人有机会接受正规的高等教育。这一举措无疑对我国的社会进步和经济发展有着重要的意义。但是人们也深刻的认识到,高等教育质量的好坏是一个不容忽视的关键性问题,而保证教育质量的一个重要环节就是抓好教材建设。但是教材内容陈旧,教学手段落后的现象一直存在着。尤其像计算机技术这样的新兴领域发展迅猛,知识更新日新月异,教学内容落后于新技术新知识的矛盾显得尤为突出。基于上述两方面考虑,在南京大学出版社的鼎力相助下,一个以组编高校信息、电子类专业教材为主要任务的教材编委会成立了。

针对我国高等教育的现状和信息、电子技术的发展趋势,编委会组织部分高校的专家教授进行了深入的专题研讨。大家一致认为,在当前情况下组编一套紧跟新技术发展、符合高校教学需要、满足大学生求知欲望的系列教材势在必行,这将有助于规范教学体系、更新教学内容、把握教学质量,培养合格人才。专家们还对教材的结构、内容、体例及配套服务等提出了具体要求。为了能使这套教材逐步完善,并促进全国各地高校教学质量的提高,编委会决定在教材之外认真做好三件事:第一、为每本教材配备一本供学生使用的学习参考书,其主体内容为学习方法指导、习题分析与解答、典型题解或课程设计、模拟测试卷及解答、实验指导书;第二、定期对教材内容进行修订,及时补充新技术新知识,并根据具体情况组编新的教材;第三、有计划地组织各地高校教师进行教学交流与研讨,通过这种途径来提高偏远地区的师资水平。我们相信,通过各方面的大力支持和大家的不懈努力,这套教材会逐步被广大师生所接受,并在使用过程中得到完善、充实。

大家都知道,组编这样一套系列教材是个牵涉面很广的大工程。这个工程不仅在起步阶段需要得到各级教育主管部门、各高等院校、出版社的大力支持和协助,而且在使用过程中也离不开各位专家、教授、学生的热心呵护和指导。因此,殷切期待所有的能人志士关心我们,帮助我们,向我们提出好的建议或意见,为我们指出教材中的不足之处。

最后,感谢所有为本套系列教材出版付出辛勤劳动的同志们。

普通高校教材(信息技术)编委会

2001年8月

编 者 的 话

本书是根据普通高校教材(信息技术)编委会对“数字逻辑电路”教材的要求而编写的。《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,也是一门理论与实践结合密切的专业基础课程。

目前数字集成电路的制造技术发展迅速,中大规模集成电路在我国各个技术领域内被广泛应用,因此在本教材中,突出以数字集成电路为主要内容,从实际出发,不贪多求全,通过精选内容、适当更新、强调应用来满足专业对本课程的要求。在编写中力求通俗易懂,简明实用,便于学习。

本书将小规模集成逻辑门和触发器作为数字电路的基础器件来介绍,并在此基础上着重介绍各种中规模集成的数字逻辑部件。在讨论这些集成电路的电路形式和工作原理的过程中,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内部结构及制造工艺。

在以往出版的教材和技术资料中,数字电路的符号通常用的是四机部部颁标准[部标(SJ611-77)],在本书中称为惯用符号;国家标准局从1990年元月1日起,要求所有电气技术教材和图纸一律采用新的国家标准[GB4728·12-25,二进制逻辑单元图形符号]就是其中之一,本书中称为新标准符号;在国外技术资料及器件手册中则常用另一类符号,我们在书中称为国外符号。

由于新标准符号规定很多,也较复杂,因此在本书后面加一附录,对其主要规定加以说明。门电路及触发器的符号根据国家标准局的要求,在书中均用新标准符号来表示,其他两种符号则作对照说明。对复杂的组合逻辑和时序逻辑电路,一方面列出新标准符号,同时也列出惯用符号,在实际应用举例中常用惯用符号,逻辑图较简单清楚。

本书主要是依据李士雄、丁康源主编,李士雄、丁康源、皇甫正贤编的《数字集成电子技术教程》及皇甫正贤编的《数字逻辑电路》两本教材编写的。在编写过程中,参考了清华大学阎石教授、华中理工大学康华光教授等编写的教材,书后的附录则主要参考了丁康源、巫之鹤在《电工教学》上发表的文章。

全书由南京大学王启祥教授主审,东南大学李士雄教授、南京师范大学陈冠清教授审阅,并开了审稿会。三位教授对全书初稿提出了许多宝贵意见,编者作了必要的修改。在此我向他们表示最诚挚的谢意。

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

2001年8月于南京

目 录

第一章 数字电子技术概述.....	(1)
§ 1.1 数字电子技术和模拟电子技术的区别	(1)
§ 1.2 半导体二极管开关运用特性	(4)
§ 1.3 三极管开关运用特性	(6)
§ 1.4 MOS 管的开关运用特性	(10)
§ 1.5 数制.....	(15)
§ 1.6 码制.....	(20)
小结	(24)
习题	(24)
第二章 逻辑代数基础及基本逻辑门电路	(27)
§ 2.1 几个基本概念.....	(27)
§ 2.2 “与”逻辑及“与”门.....	(28)
§ 2.3 “或”逻辑及“或”门.....	(30)
§ 2.4 “非”逻辑及“非”门.....	(32)
§ 2.5 正逻辑和负逻辑.....	(34)
§ 2.6 逻辑代数的基本定律和公式.....	(35)
小结	(37)
习题	(38)
第三章 集成逻辑门电路	(39)
§ 3.1 集成逻辑门的分类.....	(39)
§ 3.2 TTL 与非门	(42)
§ 3.3 其他功能的 TTL 门电路	(49)
§ 3.4 TTL 门电路的改进	(56)
§ 3.5 其他双极型逻辑门电路.....	(58)
§ 3.6 MOS 逻辑门	(61)
小结	(76)
习题	(76)
第四章 逻辑函数及其化简	(79)
§ 4.1 逻辑函数的建立及表示方法.....	(79)
§ 4.2 逻辑函数化简的含意.....	(80)
§ 4.3 逻辑函数的代数化简法.....	(81)
§ 4.4 逻辑函数的卡诺图化简法.....	(83)
小结	(92)
习题	(92)
第五章 组合逻辑电路	(94)
§ 5.1 组合逻辑电路的分析.....	(95)
§ 5.2 组合逻辑电路设计.....	(97)
§ 5.3 组合逻辑电路中的竞争冒险.....	(99)
§ 5.4 中规模数字集成电路的特点	(101)
§ 5.5 全加器	(102)
§ 5.6 译码器	(104)
§ 5.7 编码器	(114)

§ 5.8 数据选择器	(118)
§ 5.9 数据比较器	(125)
小结	(128)
习题	(129)
第六章 触发器	(132)
§ 6.1 触发器的性质与分类	(132)
§ 6.2 时钟触发器的逻辑功能	(135)
§ 6.3 时钟触发器的结构形式及触发方式	(141)
§ 6.4 触发器的时间参数	(149)
小结	(150)
习题	(151)
第七章 时序逻辑电路	(155)
§ 7.1 时序逻辑电路的概述	(155)
§ 7.2 时序逻辑电路的分析	(157)
§ 7.3 时序逻辑电路的设计	(162)
§ 7.4 计数器	(168)
§ 7.5 寄存器和移位寄存器	(183)
小结	(192)
习题	(193)
第八章 存储器	(196)
§ 8.1 存储器的概念	(196)
§ 8.2 只读存储器(ROM)	(197)
§ 8.3 可编程逻辑阵列 PLA	(204)
§ 8.4 随机存取存储器(RAM)	(209)
小结	(213)
习题	(213)
第九章 脉冲的产生与变换	(215)
§ 9.1 555 定时器电路及其功能	(215)
§ 9.2 施密特触发器	(216)
§ 9.3 单稳态触发器	(222)
§ 9.4 多谐振荡器	(232)
小结	(237)
习题	(238)
第十章 数模和模数转换器	(242)
§ 10.1 数模转换器的基本概念	(243)
§ 10.2 DAC 电路形式和工作原理	(245)
§ 10.3 模拟电子开关	(252)
§ 10.4 模数转换器的基本概念	(254)
§ 10.5 ADC 电路形式和工作原理	(257)
§ 10.6 电压频率变换器(VFC)	(265)
小结	(267)
习题	(268)
附录 二进制逻辑单元图形符号国家标准——GB4728.12—85 简介	(270)
主要参考文献	(277)

第一章

数字电子技术概述

1. 数字电子技术与模拟电子技术的区别,数字信号和数字电路的基本概念。

2. 半导体器件(二极管、三极管、MOS管)在数字电路中主要工作于开关状态,重点介绍它们的开关运用特性。

3. 数字系统中信息可分数值和文字符号两大类。数值的计数体制常用的有二进制、十进制、十六进制,重点介绍它们的表示方法及相互转换;文字符号常采用特定的二进制代码来表示,重点介绍常用的BCD码、格雷码和奇偶校验码。

§ 1.1 数字电子技术和模拟电子技术的区别

一、数字信号

在模拟电子技术中,电子线路主要处理的是模拟信号;而在数字电子技术中,电子线路主要处理的是数字信号。

在模拟电子技术学习中,我们知道模拟信号是在时间上和数值上均作连续变化的电信号,如收音机、电视机通过天线接收到的音频信号、视频信号都是随时间作连续变化的物理量,信号电压在正常情况下是不会突然跳变的。

在数字电子技术中,我们遇到的大量电信号是在数值上和时间上均断续变化的信号,这种信号还常常被称作“离散”信号。

数字信号是表示数字量的信号,一般来说数字信号是在两个稳定状态之间作阶跃式变化的信号,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。下面具体来介绍一下脉冲信号的常见形式及其参数。

脉冲是一个突然的变化过程,在数字信号中,脉冲是突然变化的电压或电流信号。

如图 1.1.1 所示为几种常用的电脉冲波形,它们分别为矩形脉冲、尖脉冲、矩形波、锯齿波。从它们的波形就可看出与典型的模拟信号——正弦交流电压、电流波形有很大区别,它们是不连续的,有突然变化的,也就是离散的。

正弦交流电压、电流可用幅值、初相位和频率表示它的量值,而脉冲信号用什么参数来表示它的量值呢?我们在图 1.1.2 中以一个实际的矩形波为例来加以说明。

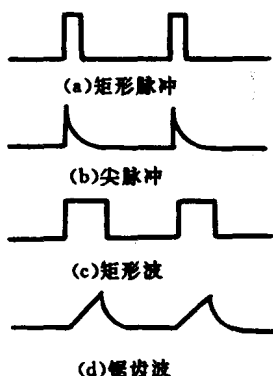


图 1.1.1 几种常用的电脉冲

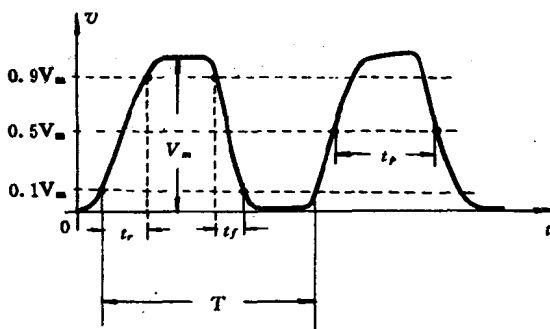


图 1.1.2 实际矩形脉冲波及其参数

一个脉冲的参数主要有下列几个:

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 ($\text{ms} = 10^{-3}$ 秒); 微秒 ($\mu\text{s} = 10^{-6}$ 秒); 毫微秒 (纳秒 $\text{ns} = 10^{-9}$ 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 T 的比值, $D = \frac{t_p}{T}$, 它是描绘脉冲疏密的物理量。

二、数字电路

1. 什么是数字电路

在模拟电子技术中,介绍的基本放大器、多级放大器、放大电路中的反馈、直接耦合放大器、集成运算放大器及正弦波振荡电路等均是模拟信号的产生、放大、处理、运用电路,因此称作“模拟电路”。

数字电子技术则是一门研究数字信号的产生、整形、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、测量的科学。在数字电子技术中,能实现上述功能的电路称为“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大部分。其中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。我们使用的开关电路是半导体晶体二极管、三极管、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,脉冲电路的内容主要在第九章脉冲的产生与变换中介绍,数字电路的其它内容则在其余各章中逐一介绍。

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,使它在计算机、自动控制、数字通信及仪器仪表等各个科学领域中得到广泛的应用。

2. 数字电路的分类

- ①按电路组成的结构来分:可分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构成的电路。

- ②按集成度的大小来分:所谓集成度大小是指在同一块集成芯片上制作的逻辑门电路或元器件数量的多少。

数字电路按集成度分类的情况如表 1.1.1 所示,其中 SSI 、 MSI 、 LSI 、 $VLSI$ 分别是小规模、中规模、大规模和超大规模集成电路英文名称的缩写,它们的英文全称如表下所注。

在本课程中将主要讨论中、小规模集成电路的原理及应用,并适当地介绍一些大规模集成电路的概念。

表 1.1.1 数字电路按集成度分类

类 别	集 成 度	电路规模与范围
小规模集成电路 (SSI)	1~10 门/片 或 10~100 元件/片	通常为逻辑单元电路。 如:各种逻辑门电路、集成触发器等。
中规模集成电路 (MSI)	10~100 门/片 或 100~1000 元件/片	通常为逻辑功能部件。 如:译码器、编码器、数据选择器、计数器、寄存器、移位寄存器等。
大规模集成电路 (LSI)	100~1000 门/片 或 1000~10000 元件/片	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 (VLSI)	1000 门/片 以上 或 1 万元件/片 以上	可构成一个完整的数字系统。 如:在一片硅片上集成一个完整的微处理机

* SSI — Small Scale Integrated Circuits

MSI — Medium Scale Integrated Circuits

LSI — Large Scale Integrated Circuits

VLSI — Very Large Scale Integrated Circuits

③按构成电路的半导体器件来分:可分双极型电路和单极型电路两大类。

以双极型晶体管(二极管、三极管)为基本器件的集成电路称为双极型数字集成电路,属于这一类的有 TTL、ECL、I²L 等。

以 MOS 单极型晶体管为基本器件的集成电路称为单极型数字集成电路,属于这一类的有 NMOS、PMOS、CMOS 等。

这些门电路将在第三章集成逻辑门中详细介绍。

④按电路有无记忆功能来分:可分组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。

组合逻辑电路是一种在任何时刻的输出仅取决于该时刻电路的输入,与电路过去的输入情况无关的逻辑电路。如全加器、译码器、数据选择器等均属于组合逻辑电路,它们不能“记忆”过去的输入情况。

时序逻辑电路是一种在任何时刻的输出不仅取决于该时刻电路的输入,还与过去的输入情况有关的逻辑电路。如计数器、寄存器、移位寄存器等均属于时序逻辑电路,它们能用触发器等存储元件“记忆”过去的输入情况。

数字电路的工作信号是不连续变化的数字信号,因此在数字电路中工作的半导体器件多数工作在开关状态,因此有必要讨论它们在开关应用下的特性。

§ 1.2 半导体二极管开关运用特性

一、二极管的静态特性和等效电路

1. 二极管的静态特性

用实验的方法,在二极管的阳极和阴极两端加上不同极性和不同数值的电压,同时测量流过二极管的电流值,可以绘制出二极管的伏安特性曲线,也就是二极管的静态特性曲

线。

典型的锗二极管和硅二极管的伏安特性曲线如图 1.2.1 所示。

从特性曲线可知,二极管的电压电流关系是非线性的,其正、反向特性具有如下特点:

①实际二极管的正向特性存在一个 V_r 的死区电压,当二极管加上正向电压(即 PN 结二端加上正向电压),但此电压小于死区电压 V_r 时,几乎无电流通过 PN 结,因此正向电流 i 基本上为零;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。但 i 和 v 的关系是非线性的。

硅二极管的死区电压 V_r 约为 $0.5V$,锗二极管的死区电压 V_r 约为 $0.2V$ 。

②实际的二极管加上反向电压,有一个很小的反向电流,为微安数量级,硅管的反向电流一般比锗管小,在温度不高时,一般可以忽略不计。

③实际的二极管有一个反向击穿电压,当在二极管上加的反向电压大于此值时,反向电流会急剧增长,因此一般二极管反向电压不允许超过此值。

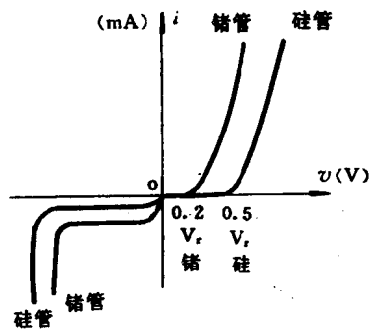
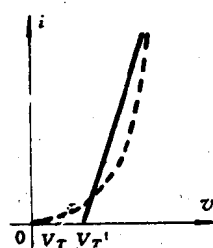


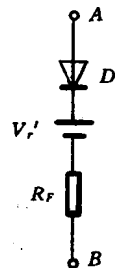
图 1.2.1 二极管的伏安特性曲线

2. 二极管的等效电路

由于实际的二极管 P 区和 N 区存在体电阻,在正向电压较大的情况下,电流 i 也较大,体电阻的影响较显著,此时的体电阻 $R_F = \frac{\Delta v}{\Delta i}$,近似于一个常数,因此,二极管的伏安特性曲线可简化成图 1.2.2(a)所示折线,简化后的二极管特性曲线可用图 1.2.2(b)所示等效电路来代替,也就是将非线性的二极管静态特性线性化,就可以近似地用计算的方法来求取电路中的电流和电压。



(a) 简化特性



(b) 等效电路

图 1.2.2 二极管的简化特性和等效电路

等效电路中的二极管 D 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_F 为二极管正向体电阻, V_r' 为折线化后的死区电压,又称为钳位电压,硅管的钳位电压一般取 $0.7V$;锗管的钳位电压则取 $0.3V$ 。

在数字电路中,更多情况下,具备负载电阻 $R_L \gg R_F$ 的条件,因此为了分析方便,常可将 R_F 忽略不计,二极管的进一步简化的特性和等效电路分别如图 1.2.3(a)和(b)所示。

二、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 1.2.3 特性曲线和等效电路分析,即二极管加上正向

且超过钳位电压 $V_{r'}$ 的电压,二极管导通且钳位(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 1.2.4 (a)来表示;加上正向电压但小于 $V_{r'}$ 或加上反向电压,二极管截止,这称为二极管的“关”态,可用图 1.2.4 (b)来表示。

在脉冲信号的作用下,二极管可在“开”态和“关”态二种工作状态间转换,当脉冲频率高时,其变化速率就很快,可能会达到每秒 100 万次以上。在高速开关状态下,就必须考虑二极管状态转换过渡过程时间。

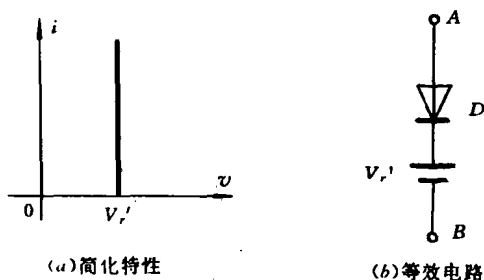


图 1.2.3 二极管进一步简化的特性及等效电路

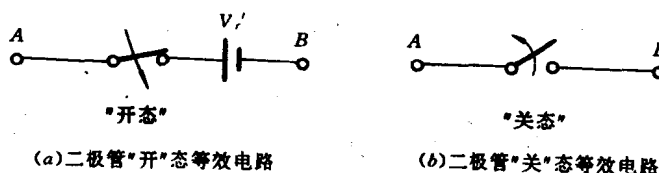


图 1.2.4 二极管开关等效电路

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,这个过程称为反向恢复过程,存在反向恢复过程的实质是二极管存在电荷的存储效应。

由模拟电子技术可知,二极管在正向导通时,外电场方向与内电场方向相反,外电场削弱了内电场,空间电荷区变窄,载流子的运动就以漂移运动为主, P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子电子不断向对方区域注入,形成正向电流,在 PN 结边界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,反向恢复时间就越长。

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,使空间电荷区变窄所需的时间。因此影响二极管动态特性的主要参数是电荷存储效应所形成的反向恢复时间 t_r ,开通时间常通可忽略不计。

§ 1.3 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,通过放大区快速转换,这就是“三极管的开关运用”。

因此,在模拟电子技术基础上,有必要对三极管三状态条件和特点作进一步的归纳与分析。

现以图 1.3.1(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。

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 $v_C = V_{CC}$,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 $v_I > 0$,但小于钳位电压(折线化后的死区电压) $V_{I'} = 0.7V$,发射结虽正偏,但由于未超过钳位电压 $v_{I'}$ 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 $v_{CE} \approx V_{CC}$ 。

在截止状态下,硅三极管的等效电路如图 1.3.1(b)所示。

2. 放大状态

若 v_I 上升,且超过死区电压 $0.7V$,发射结正偏,发射区发射出的电子注入基区,形成发射极电流 i_E 。

三极管中发射极多数载流子浓度远远大于基极、集电极多子浓度,而且基区很薄,注入基区的电子只有一小部分在基区与空穴复合,形成基极电流 i_B ,大部分通过扩散,到达集电结边界,由于集电结处于反偏,因此集电极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,流入节点电流的总和等于流出节点电流的总和,把 NPN 三极管看作为一个大节点,因此流入节点的电流 i_B 和 i_C 之和,等于流出节点的电流 i_E , i_C 、 i_B 、 i_E 具有下式所示关系:

$$i_E = i_C + i_B$$

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

在放大状态下,输出电压 $v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$,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。

若发射结压降 $V_{BE}=0.7V$ 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 就钳位在 $0.7V$ 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， $v_{CE}=V_{CC}-i_C R_C$ 不断地下降，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， $i_C\approx V_{CC}/R_C$ 。

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} 来表示。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 1.3.1(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 $0.3V$ ）。

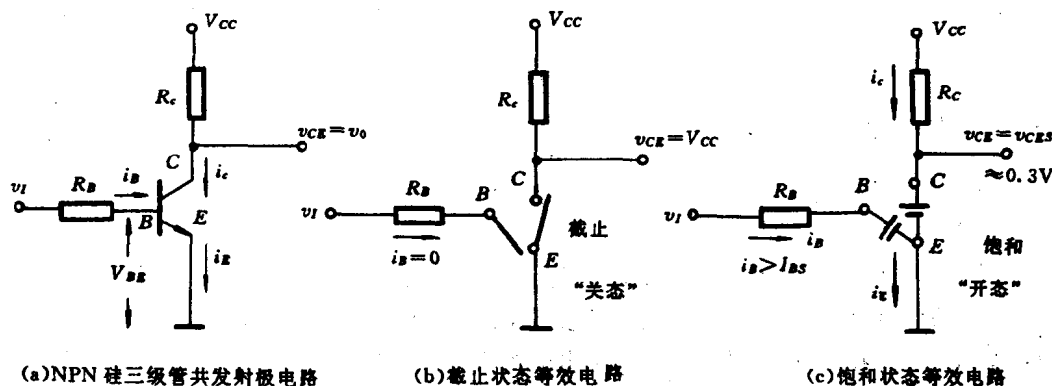


图 1.3.1 三极管开关等效电路

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， $i_C\approx V_{CC}/R_C$ 。

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 $i_B=i_{BS}=\frac{i_{CS}}{\beta}=\frac{V_{CC}}{R_C\beta}$ ， 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 $\frac{V_{CC}-0.7V}{R_C}$ （锗管则为 $\frac{V_{CC}-0.3V}{R_C}$ ），但 $0.7V$ （或 $0.3V$ ）与 V_{CC} 相比较小，有时为了分析方便，可忽略不计。

三极管三状态的条件和特点可由表 1.3.1 表示。

表 1.3.1 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	<0.7	0	0	0	0	V_{CC}	反偏或正偏小于 V_r 反 偏
放 大	≈ 0.7	$<i_{BS}$	$i_B, i_C, i_E = 1, \beta, (1+\beta)$			$V_{CC} \sim 0.7$	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

2. 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 1.3.1(a)电路中若加入如图 1.3.2 所示脉冲输入电压 v_I ,可得到相应的集电极电流 i_C 和集电极电压 $v_C(v_C = V_{CC} - i_C R_C)$ 波形如图所示。

由图 1.3.2 可见, v_I 输入的是理想矩形波,但集电极电流 i_C 和集电极电位 v_C (即电路输出电压 v_O)却不是理想矩形波,对应于输入脉冲的上跳沿和下跳沿它们均有延迟,且使波形的上下跳沿变差。

为描述其动态过程,引入如下参数:

(参阅图 1.3.2)

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

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

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

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

$t_s + t_f = t_{OFF}$, 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 t_{ON} 是建立基区存储电荷所需时间,关断时间 t_{OFF} 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和外部电路两种措施,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,也可改善其动态性能。

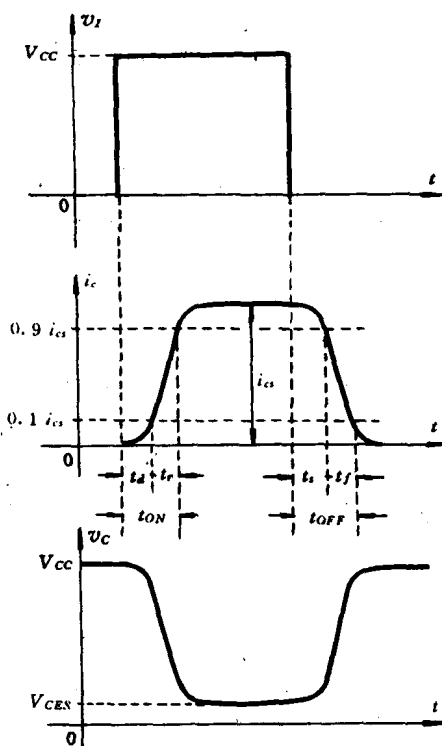


图 1.3.2 波形图