

数字电子技术 实践教程

阎勇 编著



科学出版社

数字电子技术实践教程

阎 勇 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本密切配合数字电子技术基础课程的实验指导书，全书包括十六个实验，每个实验安排六部分内容，均选用较为典型的实验电路，对提高学生理论联系实际，灵活应用理论知识解决实际问题的能力有积极的促进作用。书中实验一到实验七介绍了基本门电路、组合逻辑电路、触发器、小规模和中规模集成组合逻辑电路和时序逻辑电路；实验八到实验十一介绍了计数器、寄存器、脉冲发生器、波形产生电路和小规模及中规模集成时序逻辑电路及器件；实验十二和实验十三介绍了 555 定时器和 D/A、A/D 转换电路；实验十四到实验十六介绍了数字系统的综合设计方法。实验元器件以 TTL 小规模和中规模集成电路为主，兼顾 CMOS 电路。

本书可作为高等院校电子信息工程、电气工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、自动化、机电一体化及其他相关专业的本科生或专科生实验教材，也可作为相关行业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术实践教程 / 阎勇编著. —北京: 科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060766-9

I. ①数… II. ①阎… III. ①数字电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043684 号

责任编辑: 于海云 董素芹 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 4 月第一次印刷 印张: 20 1/2

字数: 525 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

数字电子技术理论和应用的飞速发展，大大推动了社会对电子信息产业人才的需求。无论学习数字电子电路技术课程的学生，还是数字电子技术领域的工程技术人员，都具有这样一个共识：数字电子技术离不开实验。数字电路是一门很注重实践的课程，它的任务是使学生获得数字电子电路技术的基本理论和基本技能，通过实验巩固和加深对基础理论知识的理解，培养学生独立分析问题和解决问题的能力，为适应日后工作打下良好的基础。

目前我国高等教育电气类学科的教学中仍然存在很多问题，例如，在课程设置和教学实践中，局部知识过深、过细、过难，缺乏整体性、前沿性、可发展性；教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧，教学与实践环节脱节，知识型教学多于研究型教学；所培养的电子信息与电气科学人才还不能很好地满足社会需求。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展，培养合格的电子信息与电气学科人才，已成为教育改革中的热点问题之一。

本书每章都列出了实验目的、实验原理、实验内容和步骤等，力求突出重点，书中的实验例题分析有助于读者熟练掌握基本知识点，每章最后都附有一定数量的思考题，帮助学生加深对实验课程内容的理解，其中部分思考题有一定的深度，可使学生在深入掌握课程内容的基础上扩展知识，拓展思维，部分思考题综合了多个章节的内容，以锻炼学生综合运用能力。

为满足不同专业、不同层次的实验教学要求，本书通过总结“数字电子技术”课程组的教师实验教学改革和实践的经验，从人才培养整体体系出发，以能力培养为主线，通过分层次实验，建立了一套系统的实验教学体系。实验体系内容与理论教学有机衔接，互相渗透，相辅相成，力图体现现代数字电子电路技术的基础教学与发展方向。本书重点强调基本技能训练、强调实践能力培养。

编写本书的教师多年从事数字电子电路等相关课程的教学研究，书中汇集了教师多年的教学经验。由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同，所以对教材的理解也不尽相同，我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中及时给我们提出批评与改进意见，以便我们做好教材的修订改版工作，使其日趋完善。

编 者

2019年1月

目 录

实验一 数的进制和半导体的基本知识及常用仪器设备的使用	1	2.4 实验器材	28
1.1 实验目的	1	2.5 复习要求与思考题	28
1.2 实验原理和电路	1	2.5.1 复习要求	28
1.2.1 常用的数制	1	2.5.2 思考题	28
1.2.2 半导体的基本知识	3	2.6 实验报告要求	28
1.2.3 二极管的结构、工作原理及开关特性	4	实验三 组合逻辑电路设计(一)	29
1.2.4 三极管的结构、工作原理及开关特性	5	3.1 实验目的	29
1.2.5 分立元件门电路	8	3.2 实验原理和电路	29
1.3 实验内容和步骤	8	3.2.1 逻辑电路的特点及一般分析方法	29
1.3.1 二进制的认识实验	8	3.2.2 常用组合逻辑电路	34
1.3.2 二极管开关特性测试	8	3.3 实验内容和步骤	52
1.3.3 三极管开关特性测试	9	3.3.1 编码器实验	52
1.3.4 分立元件门电路逻辑功能测试	9	3.3.2 译码器实验	54
1.4 实验器材	10	3.3.3 半加器和全加器实验	56
1.5 复习要求与思考题	10	3.4 实验器材	59
1.5.1 复习要求	10	3.5 复习要求与思考题	59
1.5.2 思考题	10	3.5.1 复习要求	59
1.6 实验报告要求	10	3.5.2 思考题	60
实验二 TTL 门电路及其应用	11	3.6 实验报告要求	60
2.1 实验目的	11	实验四 组合逻辑电路设计(二)	61
2.2 实验原理和电路	11	4.1 实验目的	61
2.2.1 TTL 门电路	11	4.2 实验原理和电路	61
2.2.2 常见 74LS 系列集成电路芯片	14	4.2.1 数据选择器	61
2.2.3 OC 门和三态门	17	4.2.2 数据选择器的应用	65
2.3 实验内容和步骤	19	4.2.3 数据选择器的扩展	71
2.3.1 TTL 门电路逻辑功能验证	19	4.2.4 数据分配器	73
2.3.2 TTL 门电路参数测试	23	4.2.5 数值比较器	74
2.3.3 集电极开路(OC)门实验	25	4.2.6 数值比较器功能的扩展	77
2.3.4 TTL 集成门电路应用实验	27	4.3 实验内容和步骤	80
		4.3.1 数据选择器实验	80
		4.3.2 数据分配器实验	81

4.3.3 数值比较器实验	82	6.2.5 主从触发器	119
4.4 实验器材	83	6.3 实验内容和步骤	125
4.5 复习要求与思考题	83	6.3.1 基本触发器	125
4.5.1 复习要求	83	6.3.2 时钟触发器	126
4.5.2 思考题	83	6.3.3 不同逻辑功能触发器之间的转换	128
4.6 实验报告要求	83	6.4 实验器材	128
实验五 组合逻辑电路综合设计	84	6.5 复习要求与思考题	128
5.1 实验目的	84	6.5.1 复习要求	128
5.2 实验原理和电路	84	6.5.2 思考题	128
5.2.1 三人表决电路	86	6.6 实验报告要求	129
5.2.2 数值比较电路	87	实验七 时序逻辑电路测试及设计	130
5.2.3 病房呼叫电路	89	7.1 实验目的	130
5.2.4 1位二进制全减器电路	90	7.2 实验原理和电路	130
5.2.5 交通信号灯监测电路	91	7.2.1 概述	130
5.2.6 工厂供电控制电路	91	7.2.2 时序逻辑电路的分析	137
5.2.7 码制变换电路	93	7.2.3 同步时序逻辑电路的设计	145
5.3 实验内容和步骤	94	7.3 实验内容和步骤	148
5.3.1 三人表决电路实验	94	7.3.1 同步时序逻辑电路的分析实验	148
5.3.2 数值比较电路实验	95	7.3.2 异步时序逻辑电路的分析实验	149
5.3.3 病房呼叫电路实验	96	7.3.3 同步时序逻辑电路的设计实验	150
5.3.4 1位二进制全减器电路实验	96	7.4 实验器材	150
5.3.5 交通信号灯监测电路实验	97	7.5 复习要求与思考题	151
5.3.6 工厂供电控制电路实验	98	7.5.1 复习要求	151
5.3.7 码制变换电路实验	98	7.5.2 思考题	151
5.4 实验器材	99	7.6 实验报告要求	151
5.5 复习要求与思考题	99	实验八 计数器	152
5.5.1 复习要求	99	8.1 实验目的	152
5.5.2 思考题	100	8.2 实验原理和电路	152
5.6 实验报告要求	100	8.2.1 同步计数器	152
实验六 RS、D、JK 触发器, 三态输出		8.2.2 异步计数器	158
触发器及锁存器	101	8.2.3 集成计数器	162
6.1 实验目的	101	8.2.4 集成计数器的应用	167
6.2 实验原理和电路	101	8.3 实验内容和步骤	172
6.2.1 触发器的特点与分类	101	8.4 实验器材	177
6.2.2 基本 RS 触发器	102	8.5 复习要求与思考题	178
6.2.3 同步触发器	105	8.5.1 复习要求	178
6.2.4 边沿触发器	111	8.5.2 思考题	178

8.6 实验报告要求	178	11.5 复习要求与思考题	249
实验九 寄存器	179	11.5.1 复习要求	249
9.1 实验目的	179	11.5.2 思考题	249
9.2 实验原理和电路	179	11.6 实验报告要求	249
9.2.1 数据寄存器	179	实验十二 555 定时电路及其应用	250
9.2.2 移位寄存器	182	12.1 实验目的	250
9.2.3 集成移位寄存器	185	12.2 实验原理和电路	250
9.2.4 移位寄存器的应用	187	12.2.1 555 定时器的内部电路结构及 工作原理	250
9.3 实验内容和步骤	191	12.2.2 555 定时器的典型应用	252
9.4 实验器材	196	12.3 实验内容和步骤	260
9.5 复习要求与思考题	196	12.4 实验器材	261
9.5.1 复习要求	196	12.5 复习要求与思考题	261
9.5.2 思考题	196	12.5.1 复习要求	261
9.6 实验报告要求	196	12.5.2 思考题	262
实验十 顺序脉冲发生器和序列信号 发生器	197	12.6 实验报告要求	262
10.1 实验目的	197	实验十三 D/A、A/D 转换实验	263
10.2 实验原理和电路	197	13.1 实验目的	263
10.2.1 顺序脉冲发生器	197	13.2 实验原理和电路	263
10.2.2 序列信号发生器	204	13.2.1 概述	263
10.3 实验内容和步骤	212	13.2.2 D/A 转换器	264
10.4 实验器材	213	13.2.3 A/D 转换器	279
10.5 复习要求与思考题	214	13.2.4 集成 D/A、A/D 转换器及其应用	289
10.5.1 复习要求	214	13.3 实验内容和步骤	294
10.5.2 思考题	214	13.3.1 D/A 转换器实验	294
10.6 实验报告要求	214	13.3.2 A/D 转换器实验	295
实验十一 脉冲波形产生及单稳态 触发器	215	13.4 实验器材	296
11.1 实验目的	215	13.5 复习要求与思考题	297
11.2 实验原理和电路	215	13.5.1 复习要求	297
11.2.1 脉冲信号与脉冲电路	215	13.5.2 思考题	297
11.2.2 施密特触发器	217	13.6 实验报告要求	297
11.2.3 单稳态触发器	226	实验十四 简单数字电路设计	298
11.2.4 多谐振荡器	237	14.1 实验目的	298
11.3 实验内容和步骤	244	14.2 实验原理和电路	298
11.4 实验器材	249	14.2.1 数字电路一般设计方法	298
		14.2.2 数字电路的调试	301

14.3 实验内容和步骤	303	15.5.1 复习要求	311
14.3.1 简述	303	15.5.2 思考题	311
14.3.2 设计任务和要求	304	15.6 实验报告要求	311
14.3.3 设计方案提示	304	实验十六 交通信号灯控制电路设计	312
14.3.4 参考电路及简要说明	305	16.1 实验目的	312
14.4 实验器材	307	16.2 实验原理和电路	312
14.5 复习要求与思考题	307	16.2.1 设计背景	312
14.5.1 复习要求	307	16.2.2 设计任务和要求	312
14.5.2 思考题	307	16.3 实验内容和步骤	314
14.6 实验报告要求	307	16.3.1 设计方案	314
实验十五 智力竞赛抢答器的设计	308	16.3.2 参考电路及简要说明	315
15.1 实验目的	308	16.4 实验器材	317
15.2 实验原理和电路	308	16.5 复习要求与思考题	317
15.2.1 设计背景	308	16.5.1 复习要求	317
15.2.2 设计任务和要求	308	16.5.2 思考题	317
15.3 实验内容和步骤	309	16.6 实验报告要求	317
15.3.1 设计方案	309	参考文献	318
15.3.2 参考电路及简要说明	309	附录 THK-880D 型数字电路实验系统	
15.4 实验器材	311	简介	319
15.5 复习要求与思考题	311		

实验一 数的进制和半导体的基本知识及常用仪器设备的使用

1.1 实验目的

- (1) 熟悉 THK-880D 型数字电路实验系统的基本原理, 学会使用方法。
- (2) 熟悉二进制、十进制、十六进制的表述方法。
- (3) 掌握二极管、三极管的工作原理及开关特性。
- (4) 学习分立元件门电路逻辑功能的测试方法。

1.2 实验原理和电路

1.2.1 常用的数制

1. 十进制

十进制是人们在日常生活及生产中最熟悉、应用最广泛的计数方法。在十进制数中, 每一位有 0~9 十个数码, 所以计数的基数是 10。超过 9 的数必须用多位数表示, 其中低位和相邻高位之间的关系是“逢十进一”, 故称为十进制, 常用符号 D(decimal) 表示。例如, 十进制数 1548.3687 可以表示成

$$(1548.3687)_{10} = 1 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 4 \times 10^1 + 8 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2} + 8 \times 10^{-3} + 7 \times 10^{-4}$$

所以任意一个十进制数 D 均可展开为

$$D = \sum k_i \times 10^i \quad (1.1)$$

式中, k_i 是第 i 位的系数, 它可以是 0~9 这十个数码中的任何一个。若整数部分的位数是 n , 小数部分的位数是 m , 则 i 包含 $n-1 \sim 0$ 的所有正整数和 $-1 \sim -m$ 的所有负整数。

2. 二进制

二进制是数字电路和计算机中采用的一种数制, 它由 0、1 两个数码组成, 是以 2 为基数的计数体制, 低位和相邻高位间的进位关系是“逢二进一”, 故称为二进制, 常用符号 B(binary) 表示。例如, 二进制数 1011.101 可表示成

$$(1011.101)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

所以任意一个二进制数均可展开为

$$B = \sum k_i \times 2^i \quad (1.2)$$

二进制由于只有两个数字符号 0 和 1, 因此很容易用电路元件的状态来表示。例如, 三极管的截止和饱和、继电器的接通和断开、灯泡的亮和灭、电平的高和低等, 都可以将其

中一个状态定为 0，另一个状态定为 1。此外，二进制数制运算比较简单，存储和传送也十分可靠。

3. 八进制

八进制数的每一位有 0~7 八个不同的数码，计数的基数为 8。低位和相邻高位间的进位关系是“逢八进一”，故称为八进制，常用符号 O(octal)表示。例如，八进制数 12.64 可表示成

$$(12.64)_8 = 1 \times 8^1 + 2 \times 8^0 + 6 \times 8^{-1} + 4 \times 8^{-2}$$

所以任意一个八进制数均可展开为

$$O = \sum k_i \times 8^i \quad (1.3)$$

4. 十六进制

十六进制是以 16 为基数的计数体制，共有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15) 16 个数码，采用“逢十六进一”计数原则进位计数。因此十六进制数的基数是 16，十六进制数常用符号 H(hexadecimal)表示。例如，十六进制数 2A.7F 可表示成

$$(2A.7F)_{16} = 2 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2}$$

所以任意一个十六进制数均可展开为

$$H = \sum k_i \times 16^i \quad (1.4)$$

十进制、二进制、八进制、十六进制数制对照表如表 1.1 所示。

表 1.1 数制对照表

对照内容	十进制	二进制	八进制	十六进制
数 字 符 号	0	0000	00	0
	1	0001	01	1
	2	0010	02	2
	3	0011	03	3
	4	0100	04	4
	5	0101	05	5
	6	0110	06	6
	7	0111	07	7
	8	1000	10	8
	9	1001	11	9
	10	1010	12	A
	11	1011	13	B
	12	1100	14	C
	13	1101	15	D
	14	1110	16	E
	15	1111	17	F
进位规律	逢十进一	逢二进一	逢八进一	逢十六进一
基数 R	10	2	8	16
任意整数、小数表达式	$D = \sum k_i \times 10^i$	$B = \sum k_i \times 2^i$	$O = \sum k_i \times 8^i$	$H = \sum k_i \times 16^i$

数制之间是可以相互转换的，具体方法参考有关教材，表 1.1 中列出 15 以内应熟记的二进制、八进制、十进制、十六进制数制的表示和对应关系。

1.2.2 半导体的基本知识

1. PN 结的形成

通过一定的工艺，在同一个半导体硅片上形成两个互相接触的 P 型区和 N 型区，它们的交界面处则形成 PN 结。

P 型半导体的多数载流子是空穴，N 型半导体的多数载流子是自由电子，两者的浓度差而引起的载流子定向运动称为扩散。交界面两侧的多子扩散到对方后很快复合而消失，在交界面留下不能移动的离子，即空间电荷，这一区域称为空间电荷区（又称为耗尽层），如图 1.1 所示。

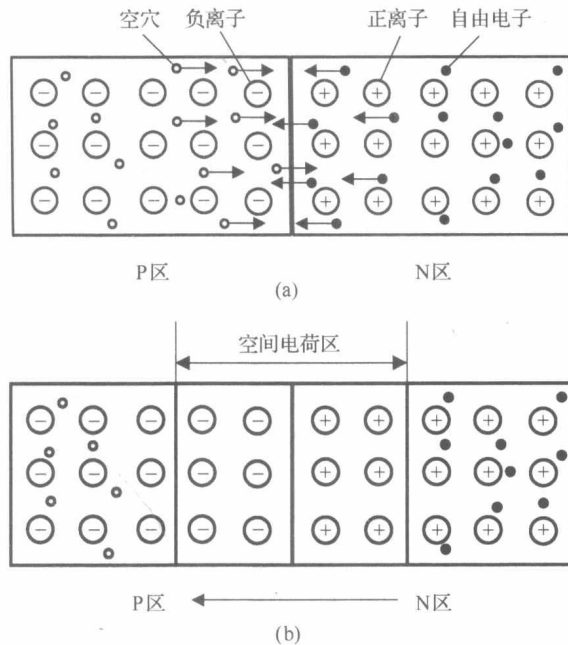


图 1.1 PN 结的形成

在电场力作用下，载流子的运动称为漂移运动。当空间电荷区形成后，在内电场作用下，少数载流子产生漂移运动，空穴从 N 区向 P 区运动，而自由电子从 P 区向 N 区运动。在无外电场和其他激发作用下，参与扩散运动的多子数目等于参与漂移运动的少数载流子数目，从而达到动态平衡，形成 PN 结。如图 1.1 (b) 所示，此时，空间电荷区具有一定的宽度，有一定的电压，电流为零。空间电荷区内，正、负电荷的电量相等，因此，当 P 区与 N 区杂质浓度相等时，负离子区与正离子区的宽度也相等，称为对称结；而当两边杂质浓度不同时，浓度高一侧的离子区宽度低于浓度低的一侧，称为不对称 PN 结；两种结的外部特性是相同的。

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压，就会破坏原来的平衡状态。此时，扩散电流不再等于漂移电流，因而 PN 结将有电流流过。当外加电压极性不同时，PN 结表现出截然不同的导电性能，即呈现出单向导电性。

当 PN 结的 P 区接电源正极，N 区接电源负极，外加正向电压时，也称正向接法或正向偏置，此时外电场将多数载流子推向空间电荷区，使其变窄，削弱了内电场，破坏了原来的平衡，使扩散运动加剧，漂移运动减弱，PN 结内多子扩散电流形成较大的正向电流，PN 结的导通电阻很小，称其处于导通状态，如图 1.2 所示。PN 结导通时的结压降只有零点几伏，因而在它所在的回路中串联一个电阻，以限制回路的电流，防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

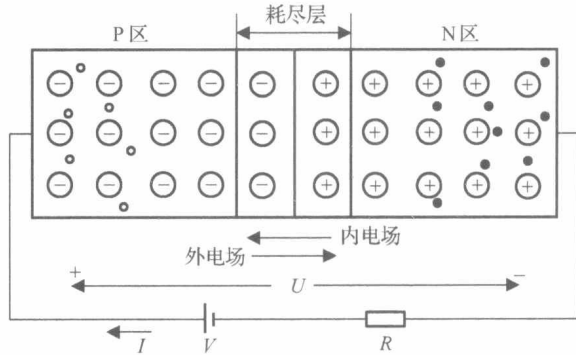


图 1.2 PN 结加正向电压时导通

相反，若电源正极接到 PN 结的 N 端，电源的负极接到 PN 结的 P 端，称为 PN 结外加反向电压，也称反向接法或反向偏置，如图 1.3 所示。此时外电场使空间电荷区变宽，加强了内电场，阻止扩散运动的进行，而加剧漂移运动的进行，形成反向电流，也称漂移电流。因为少子的数目极少，即使所有的少子都参与漂移运动，反向电流也非常小，几乎为零，所以在近似分析中可以忽略不计，认为 PN 结相当于一个非常大的电阻，称其处于截止状态。PN 结这种外加正向电压导通，外加反向电压截止的性能称为单向导电特性。

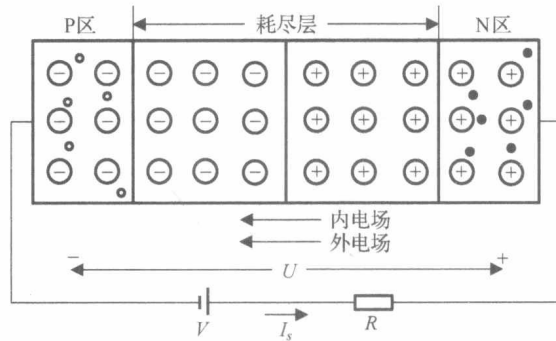


图 1.3 PN 结加反向电压时截止

1.2.3 二极管的结构、工作原理及开关特性

1. 二极管的结构和工作原理

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引脚就构成了半导体二极管，简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极，由 N 区引出的电极为阴极。

与 PN 结一样，二极管具有单向导电性。但是，由于二极管存在半导体电阻和引脚电阻，

所以当外加正向电压时，在电流相同的情况下，二极管的端电压大于 PN 结上的压降，或者说，在外加正向电压相同的情况下，二极管的正向电流要小于 PN 结的电流，在大电流情况下，这种影响更为明显。另外，由于二极管表面漏电流的存在，外加反向电压时，反向电流更大。

2. 二极管的开关特性

二极管的主要特性就是单向导电性。图 1.4 是数字电路中常用的硅二极管伏安特性曲线。由图 1.4 可见，当加在二极管上的正向电压 V_D 大于死区电压 V_0 时，二极管开始导通，此后电流 I_D 随着 V_D 的增加而急剧增加。当 V_D 小于 V_0 时， I_D 已经很小，而且基本不变。因此，我们常在实际应用时，把二极管当作一个理想的开关元件，即 $V_D \geq 0.7V$ 时，二极管导通；当 $V_D < 0.7V$ 时，二极管截止。

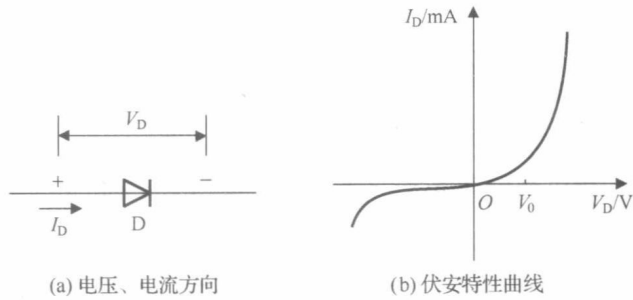


图 1.4 二极管特性

1.2.4 三极管的结构、工作原理及开关特性

1. 三极管的结构和工作原理

晶体三极管中有两种带有不同极性电荷的载流子参与导电，故称为双极型晶体管 (bipolar junction transistor, BJT)，又称为导体三极管，以下简称三极管。

根据不同的掺杂方式在同一个硅片上制造出三个掺杂区域，并形成两个 PN 结，就构成了三极管。采用平面工艺制成的 NPN 型硅材料三极管的结构如图 1.5 (a) 所示。NPN 三极管由三个区 (发射区、基区和集电区)、两个结 (发射结、集电结)、三个引出电极 (发射极、基极和集电极) 组成。它的内部结构有以下特征。

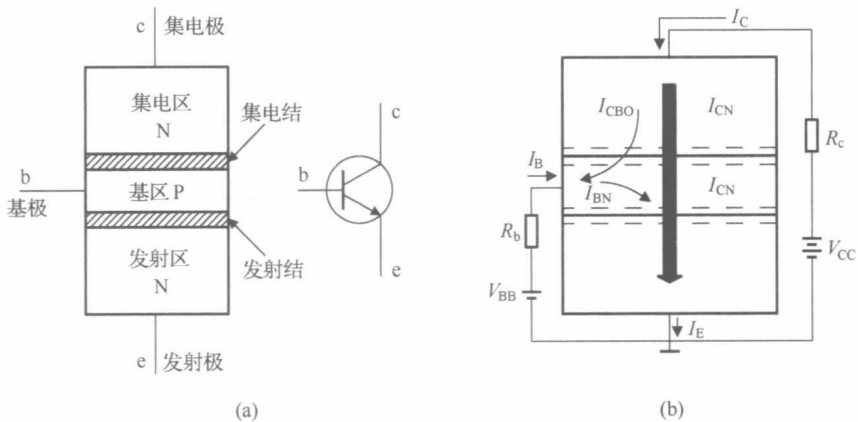


图 1.5 NPN 型三极管结构和电流分配

- (1) 发射区掺杂浓度高，因而多数载流子的浓度很高。
- (2) 基区做得很薄，通常只有几微米到几十微米，而且掺杂浓度很低，因此多子浓度很低。
- (3) 集电区掺杂浓度也较低，它的多子浓度低于发射区，所以集电极和发射极不能互换使用。

要使三极管正常工作在放大状态，三个电极间必须外加合适的电源电压。

(1) 发射结外加正向电压，又称正向偏置，且 $U_{BE} > 0.5V$ 。

(2) 集电结外加反向电压，又称反向偏置，且 $U_{BC} < 0V$ 。

图 1.5(b) 是三极管外加合适的电源电压后，各极电流分配示意图。

(1) 发射极电流 I_E 。发射区向基区发射自由电子，形成发射极电流 I_E ，其中大部分被集电区收集，形成集电极收集电流 I_{CN} ，少部分在基区形成基极复合电流 I_{BN} ，故

$$I_E = I_{CN} + I_{BN} \quad (1.5)$$

(2) 基极电流 I_B 。基极电流 I_B 包含基极复合电流 I_{BN} 和集电区少子漂移到基区形成的基极反向饱和电流 I_{CBO} 。前者由基极流入，后者由基极流出，故

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \quad (1.6)$$

(3) 集电极电流 I_C 。集电极电流 I_C 包含集电极收集电流 I_{CN} 和基极反向饱和电流 I_{CBO} ，两者方向都是由集电极流入，故

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \quad (1.7)$$

(4) 共发射极电流放大系数 β 。三极管制成后，只要工作在放大状态，它的集电极收集电流和基极复合电流的比值是一个常数，即

$$\beta = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} \quad (1.8)$$

而且 β 值为几十至几百。

从上述公式可以得到下面的重要关系式：

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_B + (1 + \beta)I_{CBO} \\ &= \beta I_B + I_{CEO} \\ &\approx \beta I_B \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} I_E &= (1 + \beta)I_B + (1 + \beta)I_{CBO} \\ &= (1 + \beta)I_B + I_{CEO} \\ &\approx (1 + \beta)I_B \end{aligned} \quad (1.11)$$

式中， I_{CEO} 称为穿透电流。它的数值一般很小，通常可以忽略其影响。这时，三极管集电极电流和发射极电流只受基极电流控制。当改变基极电流的大小时，若其变化量为 ΔI_B ，则集电极电流和发射极电流都产生较大的变化，它们分别为

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B \quad (1.12)$$

$$\Delta I_E = (1 + \beta) \Delta I_B \quad (1.13)$$

因为 β 远远大于 1，所以三极管具有电流放大作用。在共发射极电路中，一般它还具有电压放大作用。

图 1.6 是硅三极管共发射极的输出特性曲线。三极管的输出特性曲线描述基极电流 I_B 为一个常量时，集电极总电流 i_C 与管压降 u_{CE} 之间的函数关系，即

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}} \quad (1.14)$$

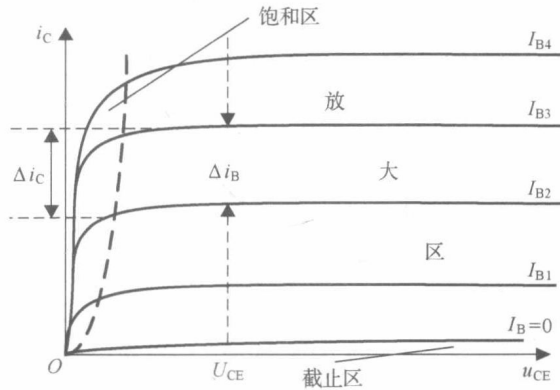


图 1.6 三极管的输出特性曲线

对于每一个确定的 I_B ，都有一条曲线，所以输出特性曲线是一簇曲线。对于某一条曲线，当 u_{CE} 从零逐渐增大时，集电结电场随之增强，收集基区非平衡少子的能力逐渐增强，因而 i_C 也就逐渐增大。而当 u_{CE} 增大到一定数值时，集电结电场足以将基区非平衡少子的绝大部分收集到集电区来， u_{CE} 再增大，收集能力已不能明显提高，表现为曲线几乎平行于横轴，即 i_C 几乎仅仅决定于 i_B 。

从输出特性曲线可以看出，三极管有三个工作区域。

(1) 截止区：其特征是发射结电压小于开启电压且集电结反向偏置。对于共射电路， $u_{BE} \leq U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$ 。此时 $I_B = 0$ ，而 $i_C \leq I_{CEO}$ 。小功率硅管的 I_{CEO} 在 $1\mu A$ 以下，锗管的 I_{CEO} 小于几十微安。因此在近似分析中可以认为三极管截止时的 $i_C \approx 0$ 。

(2) 放大区：其特征是发射结正向偏置 (u_{BE} 大于发射结开启电压 U_{on}) 且集电结反向偏置。对于共射电路， $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} \geq u_{BE}$ 。此时， i_C 几乎仅仅决定于 i_B ，而与 u_{CE} 无关，表现出 i_B 对 i_C 的控制作用， $I_C \approx \beta I_B$ ， $\Delta i_C \approx \beta \Delta i_B$ 。在理想情况下，当 I_B 按等差变化时，输出特性是一簇平行于横轴的等距离线。

(3) 饱和区：其特征是发射结与集电结均处于正向偏置。对于共射电路， $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} < u_{BE}$ 。此时 i_C 不仅与 i_B 有关，而且明显随 u_{CE} 增大而增大。在实际电路中，若三极管的 u_{BE} 增大时， i_B 随之增大，但 i_C 增大不多或基本不变，则说明三极管进入饱和区。对于小功率管，可以认为当 $u_{CE} = u_{BE}$ ，即 $u_{CB} = 0V$ 时，三极管处于临界状态，即临界饱和或临界放大状态。

2. 三极管的开关特性

三极管是数字电路中最基本的开关元件，多数工作在饱和导通或截止这两种工作状态下，并在这两种工作状态之间进行快速转换。在图 1.7 所示的电路中，当输入端加电压 $V_1 = 0V$ 时，三极管截止；当 V_1 变化到 $+3V$ 时，三极管饱和导通。

通常我们把三极管的基极电流 I_B 大于临界饱和值时的数值 I_{BS} 称为饱和导通条件，而把基极电压 V_{BE} 小于 $0.5V$ 作为三极管截止的条件。

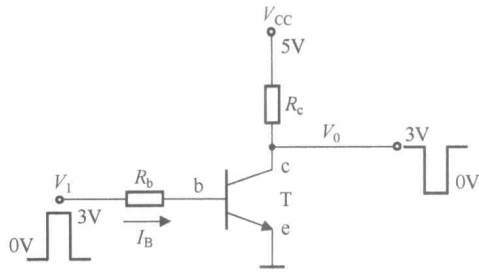


图 1.7 三极管工作状态的转化

1.2.5 分立元件门电路

在数字电路中，门电路大多是集成的，只有少量的(或大功率电路中)用到分立元件门电路。这些分立元件门电路就是由二极管、三极管及电阻等组成的。相关电路见 1.3 节有关实验电路。

1.3 实验内容和步骤

1.3.1 二进制的认识实验

将 THK-880D 实验系统上的四只逻辑开关分别接四只发光二极管(LED)，如图 1.8 所示。

分别拨动逻辑开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为表 1.1 中十六种二进制状态，通过 LED 显示，熟记它们所对应的八进制、十进制、十六进制所表示的数。

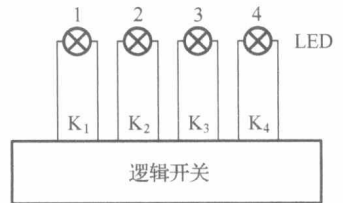


图 1.8 二进制数制实验接线图

1.3.2 二极管开关特性测试

(1) 按图 1.9(a) 接线，输入 V_1 接逻辑开关 K ，输出 V_0 接 LED，电阻一端接二极管 D 的负极，一端接实验系统地。

(2) 接通实验系统电源(5V)，拨动逻辑开关，使之输入逻辑 1 (>3V) 或逻辑 0 (0V) 电平，用万用表测量电压 V_D 和 V_0 ，并分别填入表 1.2 中。

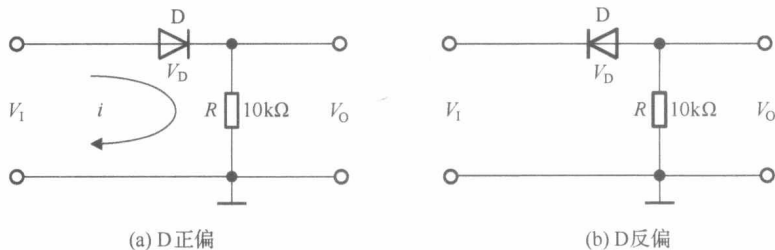


图 1.9 二极管开关特性测试电路

(3) 改变二极管的方向，按图 1.9(b) 接线，重复第(2)步。

表 1.2 二极管开关特性记录表

二极管的状态	V_I/V	V_D/V	V_O/V
正偏	逻辑 1		
	逻辑 0		
反偏	逻辑 1		
	逻辑 0		

1.3.3 三极管开关特性测试

(1) 按图 1.10 所示在实验系统上接好线, 其中 $R_c=3k\Omega$, $R_b=2k\Omega$, $V_{CC}=5V$, 输入端 V_I 接逻辑开关 (若自选参数, 则要求输入分别为高、低电平时, T 分别能可靠地饱和、截止)。

(2) 接通实验系统电源, 拨动逻辑开关, 在输入端分别加高 (逻辑 1) 或低 (逻辑 0) 电平时, 按表 1.3 要求测量和记录有关电压、电流值。测量电流时, 断开电路, 将万用表串入电路中。

(3) 将 V_O 接实验台上的 LED, 拨动逻辑开关, 观察输入与输出的逻辑关系。

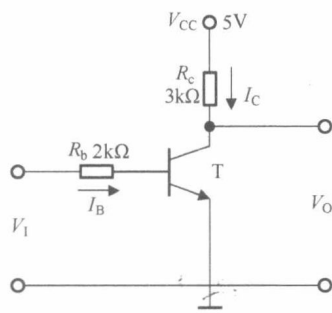


图 1.10 三极管开关特性测试实验电路图

表 1.3 三极管开关特性记录表

V_I/V	I_B/mA	I_C/mA	V_B	V_O	三极管的状态

(4) 用双踪示波器观察输入、输出信号的相位关系。

按图 1.10 把输入端 V_I 改接到实验系统连续脉冲输出端 (频率调制 1kHz 左右), 同时接双踪示波器 Y_A ; 电路输出端 V_O 接示波器 Y_B 输入, 示波器显示方式置为“交替”, 适当调节“电平”和“扫描速度”旋钮, 观察输入、输出信号的相位关系。

1.3.4 分立元件门电路逻辑功能测试

1. 与门逻辑功能测试

(1) 在实验系统上, 按图 1.11 所示的电路连线。

(2) 输入端 A、B 接逻辑开关, 输出端接发光二极管和万用表, 按表 1.4 要求测试并记录输出端逻辑状态, 写出 Y 的逻辑表达式。

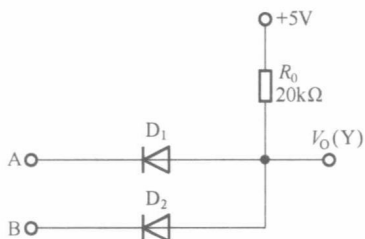


图 1.11 二极管“与”逻辑电路

表 1.4 “与”逻辑功能状态表

A	B	V_O/V	Y 状态
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		