

高等学校教材
电工学 II

电子技术

DIANZI
JISHU

第三版

肖广润 周惠领 主编

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子技术(电工学Ⅱ)/肖广润,周惠领 主编. -3版
武汉:华中理工大学出版社, 1996年2月
ISBN 7-5609-1226-5

I. 电…
Ⅰ. ①肖… ②周…
Ⅱ. 电工技术-电工学
N. TM. 21

高等学校教材

电子技术

电工学Ⅱ

(第三版)

肖广润 周惠领 主编

责任编辑:叶翠华

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

核工业中南三〇九印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16 字数:390 000

1996年2月第3版 1999年10月第19次印刷

印数:76 001—79 000

ISBN 7-5609-1226-5/TM·57

定价:18.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

本书是在《电子技术》第二版(1988年修订本)的基础上进行修订的。

本书的内容包括二极管整流电路、晶体三极管放大电路、反馈放大电路与功率放大电路、集成运算放大器的电路基础、集成运算放大器的应用、晶闸管电路、实用电子线路的分析、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路和电子测量等十一章。图形、文字符号采用国家统一的技术标准,每章有小结、例题和习题,教学时数为60~70学时。

本书可作为高等理工科院校相应课程(电工学或电工及电子技术)的教材,也可供工程技术人员参考。

前 言

本书第一版是经过国家教委审定作为高等学校教材而编写的,于1986年2月出版;第二版是按照1987年国家教委颁发的“电工技术(电工学Ⅰ)”与“电子技术(电工学Ⅱ)”的教学基本要求修订的,于1989年出版;这版是第三版,是在多年的教学实践基础上总结提高,再次进行修订的.1995年,《电工技术》、《电子技术》和《微型计算机原理与应用》三本书均进行了修订,可作为高等学校上述三门课程的教材.

经过修订后,该书具有以下几方面的特点:

(1)精选了传统内容,更新了知识结构.如删简了晶体管分立元件电路和触发器的内部结构,加强了集成运算放大器的应用电路,等等.

(2)理论联系实际,工程性较强.如增加了电工、电子测试技术及应用电路的分析;增加了数字逻辑电路的卡诺图化简法和使用中规模集成电路芯片进行逻辑设计,等等.

(3)图形文字符号国标化.根据国家标准局关于在图书刊物、技术文件中采用“国标”的规定,我们对本书所涉及到的电器、电子器件、数字逻辑部件的图形文字符号采用了国家统一的技术标准,适时地为读者提供了范例.

(4)教材内容符合教学基本要求,便于学者学,教者教.加深加宽的内容以星号*标记,便于各类专业选用.图文并茂,每章有小结、例题和习题,便于读者自学.

本书由肖广润(广东工业大学)、周惠领(华中理工大学)担任主编,参加修订工作的还有李锡雄、翁良科、郑玲坚、张鄂亮、徐士毅等同志.本书前两版还得到许多教师和读者的关怀,他们提出了宝贵的修改意见,在此致以衷心的感谢.

该书虽是第二次修订,但限于编者的能力,有些内容还可能不够妥善,甚至可能还会有错误之处,敬请使用本书的教师和广大读者批评指正.

编 者

1995年3月

目 录

第一章 二极管整流电路	(1)
1-1 半导体二极管	(1)
1-1-1 PN 结及其单向导电性	(1)
1-1-2 二极管的结构及型号	(3)
1-1-3 二极管的伏安特性及主要参数	(3)
1-2 整流电路	(4)
1-2-1 单相半波整流电路	(4)
1-2-2 单相桥式整流电路	(5)
1-2-3 单相全波整流电路	(7)
1-2-4 倍压整流电路	(9)
1-3 滤波电路	(10)
1-4 硅稳压管及其稳压电路	(12)
小 结	(16)
习 题	(17)
第二章 晶体三极管放大电路	(19)
2-1 晶体三极管	(19)
2-1-1 三极管的结构及电流放大作用	(19)
2-1-2 三极管的特性曲线与主要参数	(21)
2-2 基本放大电路的静态分析	(24)
2-2-1 基本放大电路的组成	(24)
2-2-2 静态工作点的确定	(25)
2-3 放大电路的图解法	(26)
2-3-1 直流负载线与交流负载线	(26)
2-3-2 放大电路的动态分析	(28)
2-3-3 静态工作点对波形失真的影响	(30)
2-4 放大电路的微变等效电路分析法	(30)
2-4-1 基本放大电路的微变等效电路	(31)
2-4-2 基本放大电路的电压放大倍数	(32)
2-4-3 输入电阻与输出电阻	(34)
2-5 分压式射极偏置放大电路	(35)
2-5-1 静态工作点的稳定问题	(35)
2-5-2 电压放大倍数的计算	(36)
2-6 阻容耦合多级放大电路	(39)
* 2-7 场效应管及其放大电路	(41)
2-7-1 场效应管	(42)
2-7-2 场效应管放大电路	(45)
小 结	(48)

习 题	(50)
第三章 反馈放大电路与功率放大电路	(54)
3-1 放大电路中的负反馈	(54)
3-1-1 反馈方式和类型	(54)
3-1-2 反馈性质及反馈方式的判别	(55)
3-1-3 负反馈对放大器性能的影响	(58)
3-2 射极输出器	(60)
3-3 LC 正弦波振荡电路	(63)
3-4 功率放大电路	(67)
3-4-1 对功率放大电路的基本要求	(67)
3-4-2 互补对称式射极输出电路	(68)
3-4-3 OCL 和 OTL 电路	(70)
小 结	(71)
习 题	(72)
第四章 集成运算放大器的电路基础	(75)
4-1 直流放大器的级间耦合和零点漂移	(75)
4-2 差动放大电路原理	(77)
4-3 典型差动放大器	(79)
4-4 晶体管恒流源差动放大电路	(82)
4-5 集成运算放大器	(84)
4-6 理想集成运算放大器的模型	(86)
小 结	(86)
习 题	(87)
第五章 集成运算放大器的应用	(89)
5-1 集成运放闭环状态的基本电路	(89)
5-2 信号运算的基本电路	(93)
5-3 比例、积分、微分调节器	(96)
5-4 信号处理电路	(99)
5-5 RC 正弦波振荡器	(103)
* 5-6 其它应用电路简介	(104)
小 结	(106)
习 题	(108)
第六章 晶闸管电路	(111)
6-1 晶闸管	(111)
6-1-1 晶闸管的结构及工作原理	(111)
6-1-2 晶闸管的伏安特性及主要参数	(113)
6-2 可控整流电路	(114)
6-2-1 单相半波可控整流电路	(114)
6-2-2 单相桥式半控整流电路	(115)
6-2-3 感性负载与续流二极管	(117)

6-3 晶闸管的触发电路	(118)
6-3-1 双基极二极管的结构和特性	(118)
6-3-2 简单的双基极二极管触发电路	(119)
6-3-3 带有放大器的双基极二极管触发电路	(121)
6-4 晶闸管的保护	(122)
6-5 双向晶闸管及其应用	(123)
小 结	(124)
习 题	(125)
第七章 实用电子线路的分析	(126)
7-1 串联型晶体管稳压电源	(126)
7-2 集成稳压电源	(129)
* 7-3 电子电位差计	(131)
* 7-4 温度控制电路	(135)
小 结	(136)
习 题	(137)
第八章 数字电路基础	(138)
8-1 数字电路概述	(138)
8-1-1 数字信号及数字电路	(138)
8-1-2 数字电路的分类	(138)
8-1-3 半导体器件的开关特性	(139)
8-2 进位计数制	(141)
8-2-1 十进制	(141)
8-2-2 二进制	(141)
8-2-3 十六进制和八进制	(141)
8-2-4 不同计数制之间的转换	(142)
8-2-5 8421BCD 码	(143)
8-3 基本逻辑运算及逻辑门	(144)
8-3-1 逻辑变量、逻辑函数	(144)
8-3-2 与运算及与门电路	(144)
8-3-3 或运算及或门电路	(145)
8-3-4 非运算及非门电路	(146)
8-3-5 复合逻辑运算及复合逻辑门	(148)
8-4 数字电路的逻辑分析	(149)
8-4-1 逻辑代数的基本运算规律	(149)
8-4-2 逻辑函数和逻辑图	(151)
8-4-3 逻辑函数的化简(卡诺图法)	(154)
8-5 集成逻辑门电路	(158)
8-5-1 TTL 与非门电路	(158)
8-5-2 TTL 的其它类型门电路	(161)
8-5-3 CMOS 门电路	(163)
8-5-4 高阈值逻辑门电路(HTL)	(165)
8-5-5 正逻辑和负逻辑	(165)

小 结	(167)
习 题	(168)
第九章 组合逻辑电路	(172)
9-1 组合逻辑电路的分析和设计	(172)
9-2 编码器	(173)
9-2-1 二进制编码器	(173)
9-2-2 二-十进制编码器	(174)
9-2-3 优先权编码器	(175)
9-3 译码器和数字显示电路	(177)
9-3-1 数字显示器件	(177)
9-3-2 二进制译码器	(178)
9-3-3 显示译码器	(179)
9-3-4 数字显示电路	(181)
9-4 数字比较器	(183)
9-4-1 一位二进制数字比较器	(183)
9-4-2 中规模集成四位二进制数字比较器	(184)
9-5 集成多路器	(185)
9-5-1 多路分配器	(185)
9-5-2 多路选择器	(186)
* 9-6 应用中规模集成电路芯片进行组合逻辑设计	(186)
小 结	(191)
习 题	(191)
第十章 时序逻辑电路	(193)
10-1 触发器	(193)
10-1-1 RS 触发器	(193)
10-1-2 D 触发器	(195)
10-1-3 T' 触发器	(195)
10-1-4 JK 触发器	(196)
10-2 寄存器	(197)
10-2-1 数据寄存器	(197)
10-2-2 移位寄存器	(200)
10-3 计数器	(202)
10-3-1 二进制计数器	(203)
10-3-2 二-十进制计数器	(206)
10-3-3 其它进制计数器及计数器的组合	(209)
10-4 脉冲波的产生与整形电路	(212)
10-4-1 单稳态触发器	(212)
10-4-2 无稳态触发器	(213)
10-4-3 施密特触发器	(214)
10-4-4 555 定时电路及其应用	(216)
10-5 数字量与模拟量相互转换	(218)
10-5-1 数-模转换器	(218)

10-5-2 模-数转换器.....	(219)
小 结	(220)
习 题	(221)
第十一章 电子测量	(224)
11-1 电子测量的内容及特点	(224)
11-2 电路参数的测量	(225)
11-3 电压的测量	(228)
11-4 频率和时间的测量	(232)
11-5 电子示波器	(236)
11-6 非电量的测量	(240)
附录一 常用半导体器件	(243)
附录二 集成电路型号命名	(246)

第一章 二极管整流电路

半导体器件自本世纪 50 年代初问世以来,由于其体积小、重量轻、寿命长、工作可靠性高等许多优点;因而逐步取代了电子管器件.随后微型化的大规模集成电路的出现,电子技术进入了飞跃发展的时期.

本章主要介绍半导体二极管(包括硅稳压管)以及它们在整流方面的应用.其它类型的半导体器件及集成电路将在以后的章节中介绍.

1-1 半导体二极管

1-1-1 PN 结及其单向导电性

在现代电子工业中,用得最多的半导体材料是硅和锗,它们都是四价元素.当硅和锗等半导体材料被制成单晶时,其原子的排列就由杂乱无章的状态变成非常整齐的晶体结构.这种纯单晶半导体称为本征半导体.本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很低.如果在本征半导体中掺入微量的杂质,其导电能力将大大地提高.由于掺入的杂质不同,这种杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类.

一类是在硅或锗的晶体中掺入少量五价元素(如磷)的杂质,半导体中自由电子数远大于空穴数,即自由电子成为“多数载流子”.而空穴是“少数载流子”.就是说,这种杂质半导体将以自由电子导电为主,所以称为 N 型(电子型)半导体.

另一类是在硅或锗的晶体中掺入少量的三价元素(如硼)的杂质,半导体中空穴数远大于自由电子数,即空穴成为“多数载流子”,而自由电子是“少数载流子”.就是说,这种杂质半导体将以空穴导电为主,所以称为 P 型(空穴型)半导体.

必须指出,不论是 P 型半导体还是 N 型半导体,就其整体而言,仍是电中性的.

在一块完整的晶片上,用不同的掺杂工艺使晶体的一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,那么在两者的交界处就会形成 PN 结. PN 结是构成二极管、晶体三极管、固体组件等半导体器件的基础.

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,由于 P 型半导体内空穴多而电子少, N 型半导体内电子多而空穴少,在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别,这样空穴和电子都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,因此有一些空穴要从 P 型区向 N 型区扩散,也有一些电子要从 N 型区向 P 型区扩散,如图 1-1-1(b)所示.它们扩散的结果使 P 型区和 N 型区中原来的电中

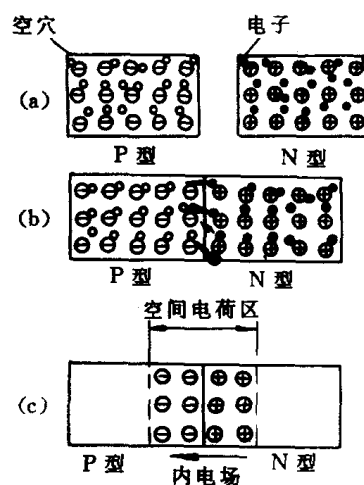


图 1-1-1 载流子的扩散和 PN 结的形成

- (a) P 型和 N 型半导体;
- (b) PN 结载流子的扩散运动;
- (c) 平衡状态的 PN 结

性结构被破坏,在PN交界面附近,P型一边失去带正电的空穴和接受了带负电的电子而带负电(图中用 $-$ 表示);N型一边失去带负电的电子和接受了带正电的空穴而带正电(图中用 $+$ 表示).这些电荷就集中在P型区和N型区的交界面附近形成很薄的空间电荷区,如图1-1-1(c)所示.当扩散越多,空间电荷区越宽,因而在电荷区中形成了一个内电场,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区.显然,这个内电场的建立将成为载流子扩散运动的阻力,它阻止P区的空穴向N区扩散,同样也阻止N区的电子向P区扩散.同时,这个内电场将驱使P区的少数载流子——电子向N区漂移,N区的少数载流子——空穴向P区漂移.我们把载流子在电场力作用下的运动称为漂移运动,以区别于因载流子的浓度差而形成的扩散运动.由于漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反,所以漂移运动的结果是使空间电荷区变窄.

由此可见,P区与N区载流子的相互扩散,使交界面附近的内电场增强,反而增加了扩散的阻力;漂移运动使电荷区变窄,内电场减弱,使扩散容易进行.当扩散运动与漂移运动的作用相等时,就达到了动态平衡,于是在交界面形成了稳定的空间电荷区,这就是PN结.PN结内电场的作用,阻止多数载流子的扩散运动,使结内载流子减少.结内电阻率很高,所以PN结是个高阻区,也称阻挡层或耗尽区(PN结是很薄的,一般约为 $0.5\mu\text{m}$).但是,如果在PN结两端加上不同极性的外电压,就可以打破PN结内部载流子的平衡状态,而呈现单向导电的性能.

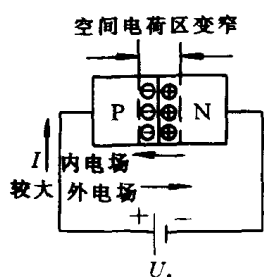


图 1-1-2 PN 结加正向电压

当在PN结两端加正向电压(即外电源的正极接P侧,负极接N侧)时,如图1-1-2所示.由于PN结是一个高阻区,所以电源电压几乎全部降在结上,电源电压在结上造成的外电场刚好与PN结内电场的方向相反.外电场将P区的空穴和N区的电子推向PN结,把空间电荷区两边的正负电荷中和了一部分,使得电荷区变窄,内电场减弱,扩散运动超过了漂移运动,使阻挡层的厚度变薄,PN结的电阻减小,所以这个方向的外加电压称为“正向偏置”.PN结在正向偏置下,多数载流子的扩散运动连续不断地进行下去,越过PN结,形成较大的正向电流(由P区流向N区的电流).外部电源不断地向半导体提供载流子,使电流得以维持.在一定范围内,外电场愈强,正向电流愈大,这时PN结呈现的电阻很低.

当PN结两端加反向电压(即外加电压正极接N侧,负极接P侧)时,如图1-1-3所示.外电压在结上造成的外电场与PN结内电场的方向相同,外电场驱使N区的电子和P区的空穴离开PN结,使阻挡层厚度加宽,PN结的电阻增大.就是说PN结处于反向偏置,由于内电场增强,使多数载流子的扩散运动难于进行.但是,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动,即N区中的空穴越过PN结进入P区,P区中的电子越过PN结进入N区,在电路中形成反向电流.由于少数载流子浓度很小,所以反向电流很弱,一般为微安的数量级.但是,少数载流子是由热运动产生的,少数载流子的浓度是随着温度的升高按指数规律增强,随着温度的变化,反向电流的变化非常快.

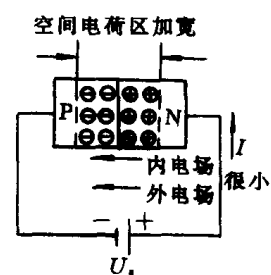


图 1-1-3 PN 结加反向电压

综上所述可见,PN结正向偏置时,结电阻很低,正向电流甚大(PN结处于导通状态);PN结反向偏置时,结电阻很高,反向电流很小(PN结处于截止状态),这就是PN结的单向导电性.

1-1-2 二极管的结构及型号

半导体二极管是由一个 PN 结, 加上接触电极、引线和管壳而构成. 按内部结构的不同, 半导体二极管有点接触型和面接触型两类. 它们的管芯结构和符号如图 1-1-4 所示, 通常由 P 区引出的电极称为阳极, N 区引出的电极称为阴极. 图(c)中三角箭头的方向表示其导电方向.

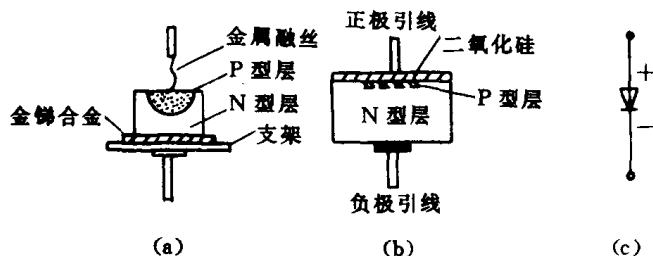


图 1-1-4 二极管的结构和符号

(a)点接触型; (b)面接触型; (c)符号

点接触型二极管, 由于 PN 结的面积很小, 结电容小, 工作频率高, 适用于高频电路和开关电路. 面接触型二极管的 PN 结的面积大, 因而允许通过大的电流, 但由于结电容也大, 故它们只能用于大功率整流等低频电路中.

半导体二极管的种类及型号很多, 往往用一个符号来代表它的名字. 例如 2AP5, 其中 2 表示二极管, A 表示由 N 型锗材料为基础组成, P 表示普通管, 5 则是序号. 又如 2CZ11, 其中 C 表示由 N 型硅材料为基础组成, Z 表示整流管.

1-1-3 二极管的伏安特性及主要参数

二极管具有单向导电性, 可用其伏安特性来描述. 所谓伏安特性, 就是指加到二极管两端的电压与流过二极管的电流的关系曲线, 如图 1-1-5 所示. 这个特性曲线可分为正向特性和反向特性两个部分.

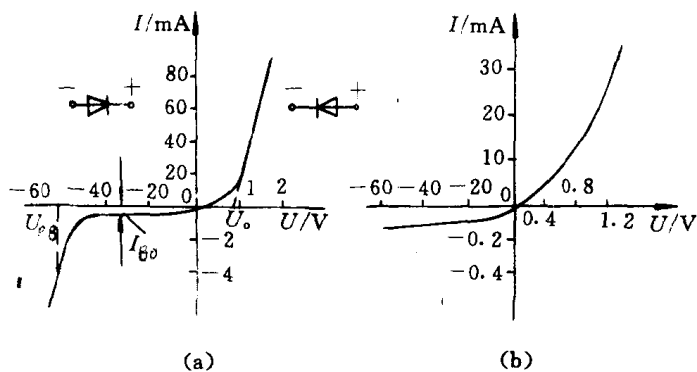


图 1-1-5 二极管的伏安特性曲线

(a)硅二极管; (b)锗二极管

(1) 正向特性

当二极管加上正向电压时, 便有正向电流通过. 但是, 当正向电压很低时, 外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所形成的阻力, 故正向电流很小, 二极管呈现很大的电阻. 当正向电压超过一定数值(硅管约 0.5 V, 锗管约 0.2 V)以后, 内电场被大大削弱, 二极管

电阻变得很小,电流增长很快.这个电压往往称为阈电压 U_{TH} (又称死区电压).二极管正向导通时,硅管的压降一般为 $0.6\sim 0.7\text{ V}$,锗管则为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$.

硅管正向特性曲线的上升部分,比锗管更陡一些.二极管导通以后,PN结的电阻很小,因此管压降也很小,对于大功率二极管,即使工作到最大允许电流,其管压降也不超过 1.5 V .

(2) 反向特性

二极管加上反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流.反向电流有两个特性:一是它随温度的增加而增长得很快,这是由于少数载流子的数量随温度增加而按指数规律迅速增长的缘故;二是在反向电压不超过某一范围时,反向电流不随反向电压改变而达到饱和,故这个电流 I_{BO} 称为反向饱和电流.硅二极管的反向饱和电流 I_{BO} 比锗二极管的小得多.例如 2CK 系列管,在常温下的 $I_{BO} < 1\text{ }\mu\text{A}$,而锗管 2AP 系列的 $I_{BO} > 100\text{ }\mu\text{A}$.

加于二极管的反向电压过高时,反向电流突然急剧增大,二极管失去单向导电性,这种现象称为电击穿,这个电压 U_{RB} 称为反向击穿电压.发生击穿的原因是外加的强电场强制地把原子的外层价电子拉出来,使载流子数目急剧上升.而处于强电场中的载流子又因获得很大能量,而将其它价电子撞击出来,产生更多载流子,如此链锁反应,使反向电流迅速增大,这种现象称为雪崩击穿.因此,当二极管的反向电压接近或超过击穿电压 U_{RB} ,又没有适当的限流措施时,将会因电流大,电压高而使管子造成永久性的损坏.

半导体器件的性能、质量指标,常用它的参数来表示,各种参数可从半导体器件手册中查出.下面只介绍几个常用的主要参数.

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管能够允许通过的最大正向平均电流值.当电流超过这个允许值时,二极管会因过热而烧坏,使用时务必注意.

2. 反向击穿电压 U_{RB} 与最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RB} 是指二极管反向击穿时的电压值.击穿后,其反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏,甚至管子因过热而烧坏.一般手册上给出的最高反向工作电压 U_{RM} 约为反向击穿电压的一半或三分之二,以确保管子安全运行.

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指在二极管上加最高反向工作电压时的反向电流值. I_{RM} 愈小,则管子的单向导电性能愈好.硅管的反向电流较小,常在 $1\text{ }\mu\text{A}$ 以下.锗管的反向电流较大,一般为硅管的几十倍到几百倍.

1-2 整流电路

在电子线路和自动控制装置中,为了得到稳定的直流电压,目前广泛采用各种半导体直流电源,而整流电路则是它们的中心环节.

利用二极管的单向导电性将交流电转换为单向脉动直流电的电路,称为整流电路.整流电路的输入是交流大信号,而二极管导通时的正向压降很小,相对于输入电压而言可看成是合上的开关(即短路),因此整流二极管即可看成开关元件,即所谓理想二极管.

1-2-1 单相半波整流电路

图 1-2-1 是单相半波整流电路.图中 T 是单相电源变压器,它将交流电源电压变为整流电

路所需的交流电压. 二极管 D 与负载电阻 R_L 串联接至变压器副绕组两端.

设变压器副边的交流电压为

$$u(t) = \sqrt{2}U\sin\omega t,$$

其波形如图 1-2-2(a) 所示. 当 $\omega t=0\sim\pi$ 时, $u(t)$ 为正半周, 变压器副边的极性为上正下负 (见图 1-2-1), 即 a 点电位高于 b 点, 二极管受正向电压作用而导通, 电流通过负载电阻. 由于二极管的正向电阻很小, 二极管的正向压降也很小, 可忽略不计. 所以负载电阻 R_L 上的电压 $u_o(t) = u(t)$. 当 $\omega t=\pi\sim2\pi$ 时, $u(t)$ 为负半周, 变压器副边的极性为上负下正, 即 a 点的电位低于 b 点, 二极管受反向电压作用而截止, 没有电流通过负载, 输出电压 $u_o(t)=0$. 因此, 在负载电阻 R_L 上得到的是半波整流电压 $u_o(t)$. 其大小是变化的, 而且极性一定, 即所谓单向脉动电压.

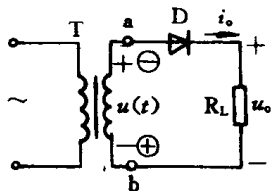


图 1-2-1 单相半波整流电路

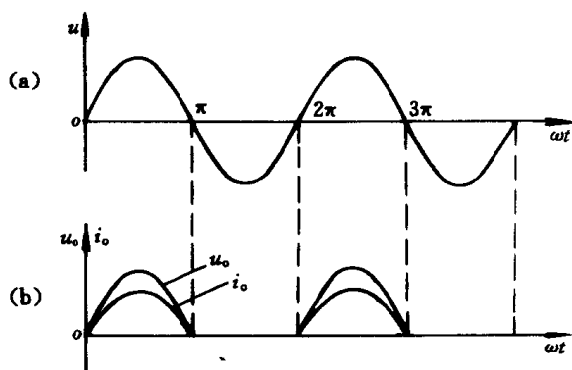


图 1-2-2 单相半波整流电路的电压与电流的波形

这种脉动直流电压的大小用它的平均值表示, 即

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U\sin\omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi}U = 0.45U, \quad (1-2-1)$$

式中 U 为变压器副边电压的有效值.

由此得出整流电流的平均值:

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.45 \frac{U}{R_L}. \quad (1-2-2)$$

当二极管不导通时, 承受的最高反向电压就是变压器副边交流电压 u 的最大值 U_m , 即

$$U_{\text{DRM}} = U_m = \sqrt{2}U. \quad (1-2-3)$$

根据负载的要求可以计算出 U_o 、 I_o 和 U_{DRM} , 并选择合适的整流元件. 考虑到电源电压的波动, 在选二极管时, 对最大整流电流和最大反向电压应留有一定的余量.

[例 1-1] 有一单相半波整流电路, 如图 1-2-1 所示. 已知负载电阻 $R_L=450\ \Omega$, 变压器副边电压 $U=20\text{ V}$, 试求 U_o 、 I_o 及 U_{DRM} .

解:

$$U_o = 0.45U = 0.45 \times 20\text{ V} = 9\text{ V},$$

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{9}{450}\text{ A} = 0.02\text{ A} = 20\text{ mA},$$

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 20\text{ V} \approx 28.3\text{ V}.$$

1-2-2 单相桥式整流电路

图 1-2-3 是单相桥式整流电路, 它由电源变压器 T、整流二极管 D (共四个) 和负载电阻 R_L

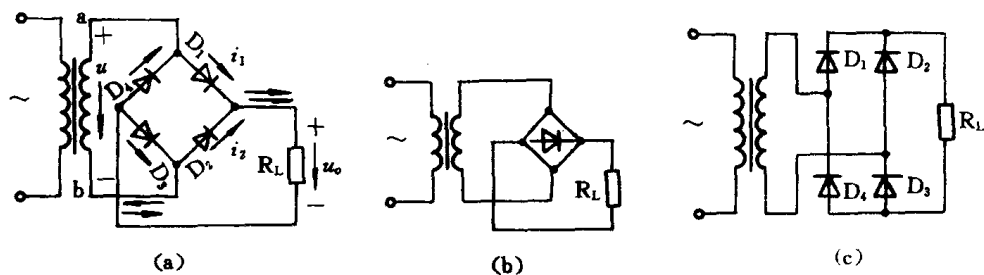


图 1-2-3 单相桥式整流电路

组成. 由于四个整流二极管接成一个电桥, 故称为桥式整流电路, 其中 D_1 阳极与 D_4 阴极相连, D_2 阳极与 D_3 阴极相连, 分别接向变压器副绕组的 a、b 两端; D_1 与 D_2 的阴极相连, D_3 与 D_4 阳极相连, 分别接向负载的两端而输出直流电压. 图(a)、(b)、(c)是桥式整流电路不同的表示形式.

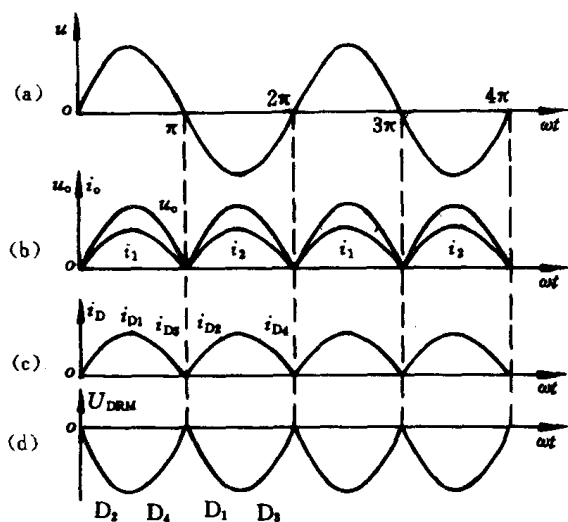


图 1-2-4 单相桥式整流的波形图

设变压器副边电压波形如图 1-2-4(a) 所示, 在 $\omega t = 0 \sim \pi$ 期间, u 处于正半周, 变压器副边的极性为上正下负 [见图 1-2-3(a)], 即 a 点的电位高于 b 点, 因此, 二极管 D_1 和 D_3 受正向电压作用而导通, D_2 和 D_4 受反向电压作用而截止, 电流 i_1 的通路为 $a \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow b$, 这时负载电阻 R_L 上得到一个半波电压.

在 $\pi \sim 2\pi$ 期间, u 处于负半周, 变压器副边的极性为上负下正, 即 b 点电位高于 a 点, 因此, D_1 和 D_3 截止, D_2 和 D_4 导通, 电流 i_2 的通路是 $b \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow a$, 同样, 在 R_L 上得到另一半波电压, 并且在两个半周内流经 R_L 的电流方向一致.

由此可见, 当电源电压交变一周时, 在 R_L 上得到的整流电压 u_o 在两个半周内都有, 而且方向是相同的, 其波形如图 1-2-4(b) 所示.

显然, 由波形图可知, 在电源电压 u 相同的情况下, 桥式整流电路输出的直流电压的平均值 U_o 是半波整流电路的二倍, 即

$$U_o = 2 \times 0.45U = 0.9U. \quad (1-2-4)$$

流经 R_L 的直流电流, 即输出的直流电流

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{0.9U}{R_L}. \quad (1-2-5)$$

在单相桥式整流电路中, 负载电流是由两组整流二极管 (D_1 、 D_3 和 D_2 、 D_4) 轮流供给的, 如图 1-2-4(c) 所示. 因此流过整流元件的平均电流 I_D 等于输出的直流电流 I_o 的一半, 即

$$I_D = \frac{1}{2}I_o = 0.45 \frac{U}{R_L}. \quad (1-2-6)$$

整流二极管承受反向电压, 在 u 的正半周, D_1 、 D_3 导通. 如果忽略它的正向压降, 二极管

D_2 、 D_4 的阴极就等于接在变压器绕组的上端,阳极接在绕组的下端,因此 D_2 、 D_4 承受的最大反向电压等于 u 的峰值. 在 u 的负半周, D_1 、 D_3 承受同样大小的反向峰值电压,如图 1-2-4(d)所示. 可见每个整流元件承受的最大反向电压为

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U. \quad (1-2-7)$$

桥式整流电路输出的直流电压高,脉动小,电源变压器得到充分利用,比较好地完成了整流任务,因此这种电路在生产实践中得到了广泛的应用.

[例 1-2] 设一台直流电源采用单相桥式整流电路,交流电路电压为 380 V,负载要求输出直流电压 $U_o = 110$ V、直流电流 $I_o = 3$ A. (1)求通过二极管的平均电流、二极管承受的最高反向电压;(2)选用合适的二极管;(3)求整流变压器的变比及容量.

解: (1)通过二极管的平均电流

$$I_D = \frac{1}{2}I_o = 0.5 \times 3 \text{ A} = 1.5 \text{ A}.$$

按式(1-2-4)和式(1-2-7)可以确定变压器副边电压有效值 U 和二极管承受的最高反向电压 U_{DRM} :

$$U = \frac{U_o}{0.9} = \frac{110}{0.9} \text{ V} = 122 \text{ V}; \quad U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 122 \text{ V} \approx 173 \text{ V}.$$

(2)根据计算所得 I_D 和 U_{DRM} 的数值,查半导体器件手册,选用合适的二极管. 为了使用安全,二极管的最高反向电压要为 U_{DRM} 的二倍左右. 因此,选用 2CZ12D 二极管,其最大整流电流为 3 A,最高反向电压为 300 V.

(3)考虑到变压器副绕组及管子上的压降,变压器副边电压大约要高出 10%,即 $122 \times 1.1 \text{ V} = 134 \text{ V}$.

变压器的变比

$$K = \frac{380}{134} = 2.8;$$

变压器副边电流的有效值

$$I = \frac{I_o}{0.9} = \frac{3}{0.9} \text{ A} = 3.3 \text{ A};$$

变压器的容量

$$S = UI = 134 \times 3.3 \text{ A} \approx 442 \text{ VA}.$$

1-2-3 单相全波整流电路

单相桥式整流电路的缺点是整流元件较多,因此在生产实践中常采用单相全波整流电路,如图 1-2-5 所示. 它由一副绕组具有中心抽头的变压器和两个整流二极管 D_1 、 D_2 组成,变压器副绕组上下两半边的电压 u_a 和 u_b 大小相等,极性相反(相对于变压器的中心抽头 0 点而言).

全波整流电路实际上等于由两个半波整流电路叠加而组成,因此电路的工作情况与半波整流电路工作情况一样. 当电源电压交变一周时,由于两个二极管轮流导电,而在 R_L 上得到一个与桥式整流电路中相同的电压波形,如图 1-2-6 所示. 所以全波整流电路的整流电压和整流电流的大小与桥式整流电路的是一样的,即

$$U_o = 0.9U,$$

式中 $U = U_a = U_b$, U_a 和 U_b 分别为 u_a 和 u_b 的有效值.

流过整流二极管的直流电流

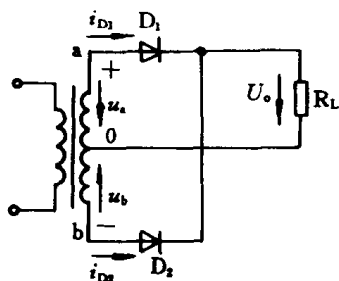


图 1-2-5 单相全波整流电路

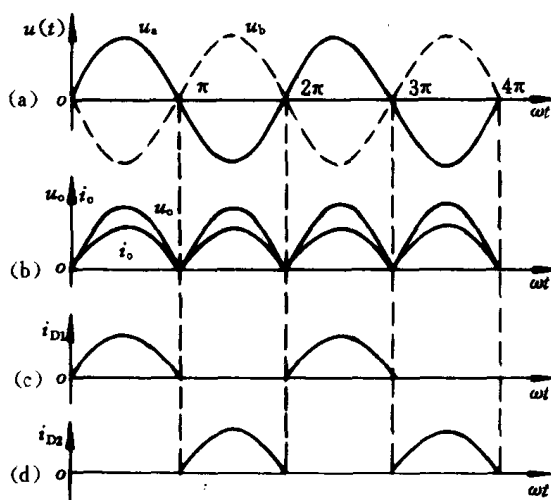


图 1-2-6 单相全波整流电路的电压和电流的波形

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{1}{2} I_o.$$

从电路结构特点可知,在 D_1 导通和 D_2 截止的半周内, D_2 所承受的最高反向电压为变压器副边总电压的峰值,即

$$U_{\text{DRM}} = 2\sqrt{2}U, \quad (1-2-8)$$

即整流元件承受的反向电压为桥式整流电路的两倍.因此这种电路要采用耐压高的整流元件,这是一个很大的缺点.

[例 1-3] 负载要求与例 1-2 相同,即 $U_o = 110 \text{ V}$, $I_o = 3 \text{ A}$.若采用单相全波整流电路,试计算 I_D 和 U_{DRM} 之值.

解:通过二极管的平均电流

$$I_D = \frac{1}{2} I_o = 0.5 \times 3 \text{ A} = 1.5 \text{ A}.$$

二极管承受的最高反向电压

$$U_{\text{DRM}} = 2\sqrt{2}U = 2\sqrt{2} \times 122 \text{ V} = 345 \text{ V}.$$

为了便于比较,将上述三种单相整流电路列成表 1-1.表中,变压器副边电流有效值 I 的计算方法如下:

$$\text{半波整流 } \frac{I}{I_o} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}}{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t)} = 1.57;$$

$$\text{桥式整流 } \frac{I}{I_o} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}}{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t)} = 1.11;$$