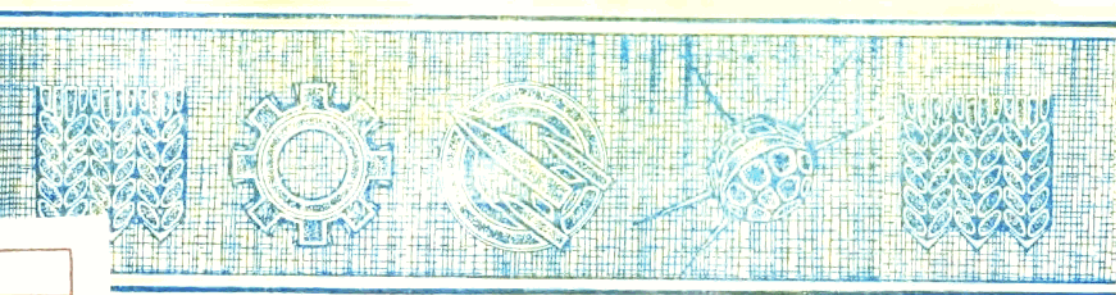


中等专业学校试用教材

机械制造类专业适用

工业电子学

南京机器制造学校沈裕锺主编



人民教育出版社

目 录

序 言	4
第一章 晶体管整流与滤波电路	1
1-1 概述	1
1-2 半导体的基本知识	1
1-3 晶体二极管	5
1-4 单相整流电路	7
1-5 三相整流电路	13
1-6 滤波电路	17
1-7 硅稳压管和简单的直流稳压电路	21
思考题	23
第二章 晶体管放大电路	26
2-1 概述	26
2-2 晶体三极管	26
2-3 单管交流电压放大器	35
2-4 偏置电路及静态工作点的稳定	44
2-5 阻容耦合两级电压放大器	47
2-6 负反馈放大器	50
2-7 功率放大器	54
2-8 晶体管放大器的应用举例	62
2-9 直流放大器	65
2-10 场效应晶体管及其放大电路	68
思考题	72
第三章 晶体管振荡电路	75
3-1 概述	75
3-2 LC 回路的选频特性	75
3-3 LC 振荡器	77
3-4 LC 振荡器的应用举例	80
思考题	84
第四章 可控硅整流电路	86
4-1 概述	86
4-2 可控硅整流元件	86

4-3 具有电阻性负载的可控整流电路.....	89
4-4 具有电感性负载的可控整流电路.....	93
4-5 可控硅元件的保护.....	94
4-6 可控硅的触发电路.....	97
4-7 可控硅的应用举例	100
思考题.....	102
第五章 晶体管脉冲电路	104
5-1 概述.....	104
5-2 晶体管的开关特性.....	105
5-3 RC 电路	108
5-4 晶体管反相器.....	110
5-5 双稳态触发器.....	115
5-6 单稳态触发器.....	123
5-7 多谐振荡器.....	127
5-8 门电路.....	129
5-9 集成“与非”门电路.....	135
5-10 集成“与非”门组成的触发器.....	141
思考题	147
第六章 晶体管数字电路的基本环节	150
6-1 概述.....	150
6-2 数的表示法.....	150
6-3 计数器.....	154
6-4 寄存器.....	161
6-5 译码器.....	164
6-6 数字显示电路.....	168
思考题	171
第七章 电子管	172
7-1 二极管及其整流电路.....	172
7-2 三极管及其放大电路.....	175
7-3 五极管及束射四极管.....	182
7-4 电子管振荡器.....	183
思考题	186
附录一 国产半导体器件型号命名法	187
附录二 几种常用半导体器件的主要参数	188
附录三 电阻标称阻值系列表	191
附录四 本书采用的文字符号说明	192

第一章 晶体管整流与滤波电路

1-1 概 述

发电厂所提供的电能都是交流。在生产上虽然广泛采用交流电,但是许多电子仪器、电气设备、工艺过程和自动控制系统中往往需要直流电。把交流电转变为直流电,就称为整流。用作整流的装置称为整流器。

由于半导体技术的迅速发展,晶体管整流器的应用日益广泛。这是因为晶体管整流器具有结构简单、体积小、重量轻、不需要加热灯丝等优点。晶体管整流器的整流元件是一种半导体器件——晶体二极管。而许多半导体器件都是由 $p-n$ 结构成的。因此,本章首先介绍半导体的特性和 $p-n$ 结的形成、晶体二极管的特性和参数,然后分析几种常用的晶体管整流与滤波电路,最后介绍硅稳压管和简单的直流稳压电路。

1-2 半导体的基本知识

自然界里的所有物质,按其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。导体的导电性能很好,绝缘体的导电性能极差。而半导体的导电性能则介于导体和绝缘体之间。

金属导体中由于原子外层的电子受原子核的束缚力很小,因此有大量的电子能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子,它们能在外电场的作用下作定向运动而形成电流。这些大量的自由电子就是金属导体中运载电荷的载流子。

绝缘材料中,原子外层的电子受原子核的束缚力很大,能形成自由电子的机会非常小。因此,绝缘材料的导电性能极差。

半导体的原子结构比较特殊。它既不象导体的外层电子,容易挣脱原子核的束缚;也不象绝缘体的外层电子,受原子核的束缚很紧。因此,半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间。

(一) 半导体的导电特征

半导体材料很多,我们以常用的硅和锗为例,说明半导体的导电特征。

硅和锗都是四价元素,亦即它们的原子结构的共同特点是外层电子都是四个。

当硅和锗等半导体材料制成单晶体时,其原子排列就由杂乱无章变为非常整齐的状态。每个原子外层的四个电子,不仅受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的四个原子发生联系。这时,每两个相邻的原子之间都共有一对电子,使相邻两原子间产生一种束缚力,形成共价键结构,如图 1-1(a)所示。这样,每个原子的外层就有了八个电子,这八个电子分为四对,是该原子与周围相邻的四个原子所共有的电子。

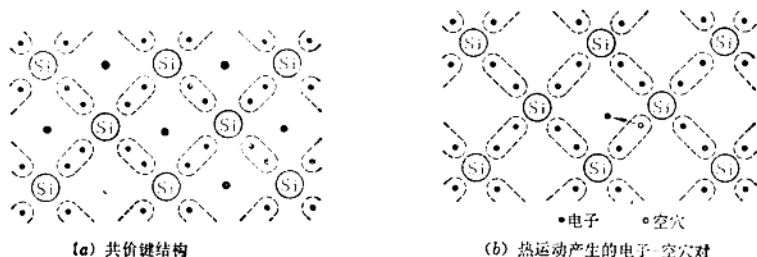


图 1-1 硅单晶体的结构

根据原子理论,每个原子的外层有八个电子,就属于比较稳定的状态。但是,在硅或锗的单晶体中,位于原子外层的八个电子虽是共有电子,但并不象绝缘体中外层电子那样被原子核紧紧地束缚着。当它受到热或光的激励时,其中少数电子就可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子。值得注意的是,共有电子在挣脱束缚成为自由电子后,在它的原来位置上,由于缺少一个应有的电子而留下一个空位,如图 1-1(b)所示。因此,自由电子和空位总是成对产生、数量相等的。自由电子和空位不断地产生,也不断地复合。

当有外界电场作用时,自由电子将沿着和外电场相反的方向作定向运动,形成一部分电流——电子电流。同时,在外电场作用下,外层缺少一个电子的原子,很容易把邻近原子的外层电子吸引过来,填补自己的空位,而被拉走了一个外层电子的原子又留下了一个新的空位,邻近的电子又递补过来……。这样,可以看成空位也在运动,空位的运动方向与电子的运动方向相反。我们把这一空位运动想象成为一个正电荷粒子的运动,这个粒子所带电量与电子相等而符号相反。这种想象的带正电粒子称为空穴,它形成另一部分电流——空穴电流。

综上所述,在半导体中不仅有自由电子形成的电子电流,还有由于共有电子的递补运动形成的空穴电流。所以,在半导体中不仅有自由电子这一种载流子,还有另一种载流子——空穴。这是半导体导电的一个重要特征。

在硅和锗的纯单晶体里,由于自由电子和空穴的数量很少,因而它们的导电能力仍远远不如导体。

(二) n 型半导体和 p 型半导体

在硅单晶体中,若掺入少量的五价元素磷,由于每个磷原子的外层有五个电子,其中四个分别与邻近的四个硅原子相结合,组成四对共有电子,形成共价键以外,还多出一个受原子核束缚很弱的电子。它很容易受激励而成为自由电子,如图 1-2(a)所示。因为掺入硅中的每一个磷原子都可能供给一个自由电子,所以在这种半导体中,自由电子的数量大大多于空穴,因而导电也主要依靠自由电子。由此可见,电子是这种半导体的多数载流子,而数量很少的空穴,则是这种半导体的少数载流子。这种类型的半导体称为电子型半导体,或 n 型半导体。由于磷原子提供了自由电子,所以 n 型半导体中的磷原子又称施主原子,失去了一个电子的施主原子本身成为带正电的粒子, n 型半导体结构的简化示意图如图 1-2(b)所示。

如果在硅单晶体中掺入少量的三价元素硼,由于每个硼原子外层只有三个电子,当它与邻

近四个硅原子相结合而形成共价键时，就自然提供了一个空穴，如图 1-2(c) 所示。所以在这种半导体中，空穴的数量大大多于自由电子，因而主要依靠空穴导电，空穴就成为这种半导体的多数载流子，而电子则是这种半导体的少数载流子。这种类型的半导体称为空穴型半导体，或p 型半导体。由于硼原子提供了空穴，它的作用是接受电子，所以 p 型半导体中的硼原子又称受主原子，接受了一个电子的受主原子本身成为带负电的粒子，p 型半导体结构的简化示意图如图 1-2(d) 所示。

(三) pn 结的形成和特性

单纯的 p 型或 n 型半导体，仅仅是导电能力增加了，并没有多大的实用价值。如果在一块 n 型半导体上再制成一层 p 型

半导体，于是在 p 型半导体和 n 型半导体的交界处，就会形成一个 pn 结。pn 结是构成半导体器件的基本结构，二极管就是只由一个 pn 结构成的半导体器件。

当 p 型半导体和 n 型半导体结合在一起时，由于 p 型半导体中的空穴多，n 型半导体中的自由电子多，在它们的交界处就会产生多数载流子的扩散运动。p 区的多数载流子(空穴)向 n 区扩散，同时 n 区的多数载流子(电子)向 p 区扩散，如图 1-3(b) 所示。随着扩散运动的进行，在 p 区和 n 区的交界面 p 区一侧出现一层带负电的粒子区(这是不能移动的受主原子)；而在交界面 n 区一侧出现一层带正电的粒子区(这是不能移动的施主原子)。这样，在交界面的

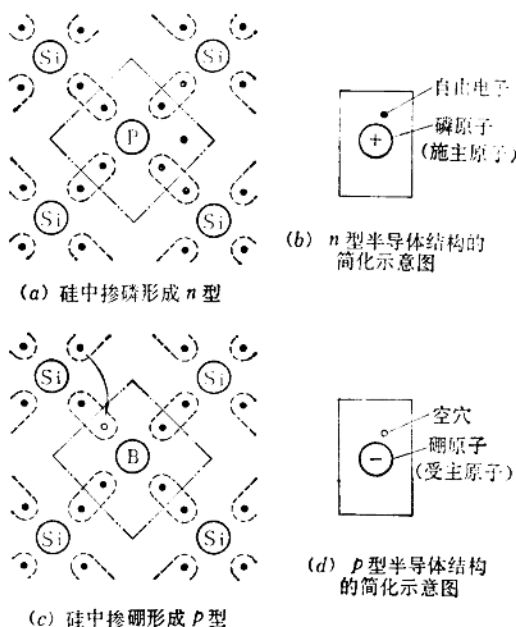


图 1-2 硅单晶体中掺杂后的示意图

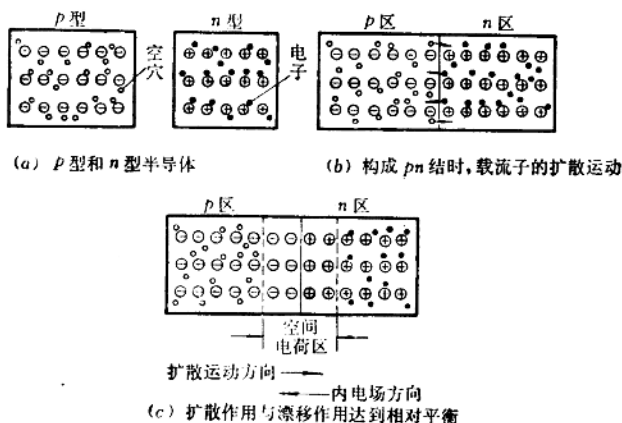


图 1-3 pn 结的形成

两侧就形成了一个空间电荷区,如图 1-3(c)所示,这个空间电荷区就是 pn 结。

空间电荷区的右侧为正、左侧为负,产生一个内电场。显然,这个内电场的方向对多数载流子的扩散运动起着阻碍作用,内电场所产生的阻力(电场力)实际上是要使多数载流子向相反的方向运动,通常把载流子在电场作用下的这种运动称为漂移运动。可见,扩散运动和漂移运动是互相对立的。扩散要使电子由 n 区向 p 区移动,空穴由 p 区向 n 区移动,而漂移则使电子回到 n 区,空穴回到 p 区。

随着多数载流子扩散运动的进行,空间电荷区越来越厚,阻碍扩散运动的电场力也越来越大,漂移运动也越来越强。所以,当扩散运动进行到一定程度时,在同一时间内,扩散到空间电荷区的载流子数量和漂移回去的载流子数量相等,这时,扩散运动和漂移运动达到了暂时的、相对的动态平衡,空间电荷区就不再加厚了。

如果在 pn 结两端外加一个直流电压,其方向是 p 区接正, n 区接负,如图 1-4(a)所示,这个外加电压称为正向电压。外加电压所产生的电场(外电场)与空间电荷区的内电场方向相反,因而削弱了内电场,这一过程也就是空间电荷区变薄的过程。因为在外加电压的作用下, p 区的空穴向右推移,抵消了空间电荷区中一部分负电荷;而 n 区的电子向左推移,抵消了空间电荷区中一部分正电荷。因此,空间电荷区变薄,内电场削弱,漂移运动也随之削弱,便有利于扩散运动连续不断地进行。这样,多数载流子就能畅通地流过 pn 结而形成较大的电流,其方向是从 p 到 n ,称为正向电流。这时 pn 结所表现的电阻(正向电阻)是很小的, pn 结处于导通状态。

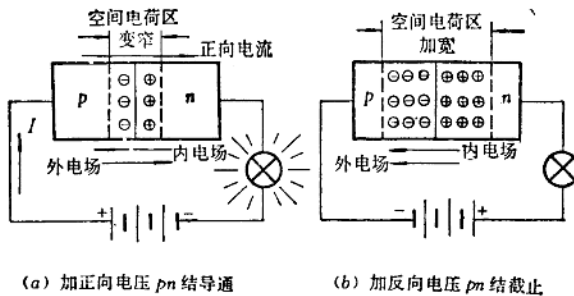


图 1-4 pn 结的单向导电性

如果给 pn 结外加一个反向电压,即 n 区接正, p 区接负,如图 1-4(b)所示。这时外加电场和内电场的方向一致,使总的电场大大增强,这一过程也就是空间电荷区加厚的过程。因为在外加电场的作用下, p 区的空穴向左移动, n 区的电子向右移动。在空间电荷区的左边由于空穴移走,使负电荷量增加;而在空间电荷区的右边,由于电子移走,使正电荷量增加。这样,空间电荷区加厚,因而内电场的电场力加强,漂移运动加强,致使多数载流子的扩散运动无法进行。但是,在 p 型半导体中还存在有少数载流子(电子), n 型半导体中也还存在有少数载流子(空穴)。这些极少量的少数载流子,在反向电压的作用下,通过 pn 结移到对方去而形成极微小的反向电流(又称反向漏电流),其方向是从 n 到 p 。这时 pn 结所表现出的电阻(反向电阻)很大,可以认为基本上是不导电的, pn 结处于截止状态。

由此可见, pn 结在电路中具有单向导电作用。在正向电压作用下, pn 结导通, 电流可以顺利通过; 在反向电压作用下, pn 结截止, 阻止电流通过。 pn 结的单向导电性是晶体二极管、三极管及其它许多半导体器件作用原理的基础。

必须指出的是: 反向电流是由少数载流子所形成的。而 p 区中极少量的自由电子和 n 区中极少量的空穴都是由热运动产生的, 所以 pn 结的反向电流随温度的变化很大, 在使用半导体器件时, 必须考虑到环境温度对它的影响这一重要因素。

1-3 晶体二极管

(一) 晶体二极管的结构

晶体二极管(又称半导体二极管, 简称二极管), 实际上就是在一个 pn 结的两端接上电极引线做成管心, 并以管壳封装加固而成。 p 型半导体的引出线称为阳极或正极, n 型半导体的引出线称为阴极或负极。

根据内部结构的不同, 晶体二极管有点接触型和面结合型两种, 如图 1-5 所示。图 1-5(a) 为点接触型晶体二极管, 它多用于高频信号的检波, 脉冲电路以及小电流的整流器中。图 1-5(b) 为面结合型晶体二极管, 它多用于低频大电流的整流器中。

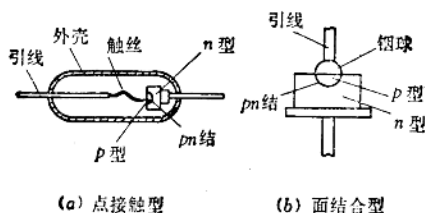


图 1-5 二极管的结构型式示意图

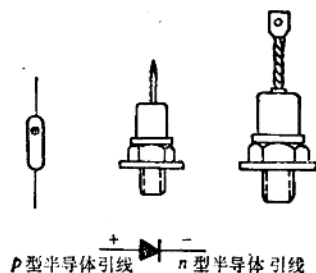


图 1-6 晶体二极管的外形和符号

根据所用半导体材料的不同, 又分为锗二极管和硅二极管两种。目前大容量的整流元件一般都采用硅材料。

晶体二极管的型号很多, 例如 2AP1, 其中 2 表示二极管; A 表示 n 型锗材料; P 表示普通管; 1 表示序号。又如 2CZ11, C 表示 n 型硅材料; Z 表示整流管。我国半导体器件命名方法见本书附录一。

常见的几种晶体二极管的外形及符号如图 1-6 所示。

(二) 晶体二极管的伏安特性

为了正确地使用晶体二极管, 需要了解它的电压-电流关系曲线, 由于电压、电流的单位分别为伏、安(或毫安、微安), 所以二极管的电压-电流关系曲线, 又称伏安特性曲线。图 1-7 为

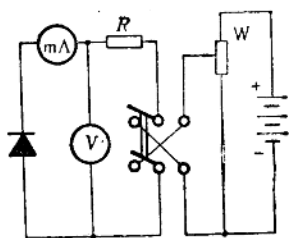


图 1-7 晶体二极管特性的测量电路

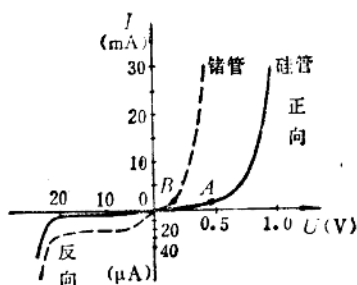


图 1-8 二极管的伏安特性曲线

测量晶体二极管伏安特性的电路。图 1-8 为晶体二极管的伏安特性曲线。

从伏安特性曲线上可以清楚地看到:

(1) 当二极管为正向接法时,在正向电压由 0 开始增加的一段,由于外加电压很低,这时 pn 结的内电场对载流子的扩散运动仍起阻挡作用,电路中基本上没有电流通过。这一段电压称为“死区电压”。硅管的死区电压约为 0~0.5 伏(图中 0~A)之间,锗管约为 0~0.2 伏(图中 0~B)之间。当外加电压超过死区电压后,电流随电压的增加才有明显的上升。二极管一经导通,电流便迅速增加,正向电阻已变得很小。

(2) 当二极管在反向电压作用下,反向电流极小,可以认为二极管基本上是不导通的。反向电流越小,说明二极管的反向电阻越大,反向截止性能越好。一般硅管的反向电流要比锗管小得多(通常硅管为几微安到几十微安,而锗管可达几百微安)。当反向电压增加到一定数值时,反向电流就会突然剧增,二极管失去了单向导电性而被“反向击穿”。这时所加的反向电压数值称为“反向击穿电压”。二极管正常工作时,是不允许出现这种情况的。

晶体二极管的特性受温度影响很大。当温度升高时,正、反向电流都随着增大,而反向击穿电压则要下降。一般硅二极管 pn 结允许的工作温度比锗二极管高,因此,在同样的 pn 结的面积条件下,硅管允许通过的电流比锗管大,这也是硅管的优点之一。所以大功率的晶体二极管几乎都是硅管。

(三) 晶体二极管的主要参数

晶体二极管的参数规定了二极管的适用范围,它是合理选用二极管的依据。晶体二极管的主要参数有下列两个:

(1) 最大整流电流

这是指长期工作时,二极管能允许通过的最大正向平均电流值。如果电流太大,发热过甚,就会把 pn 结烧坏。在选用二极管时,工作电流不能超过它的最大整流电流。

(2) 最高反向工作电压

这是指二极管工作时,所能承受的反向电压峰值。为了防止二极管因反向击穿而损坏,通常标定的最高反向工作电压要比反向击穿电压低一些。在选用二极管时,加在二极管上的反向电压峰值不允许超过这一数值,以保证二极管能正常工作,不致反向击穿而损坏。

除了这两个主要参数外,还有其它一些参数,如最高工作频率,最大反向电流,最高使用温度,极间电容等。这些参数在半导体器件手册中均可查得。本书附录二中列举了一些常用的晶体二极管的主要参数。

(四) 晶体二极管的简易测试

在使用二极管时,常需辨别二极管的正负极性和粗略判断二极管的质量。最简易的方法是用一只普通的万用表来测量它的正反向电阻。

测量时应将万用表欧姆档的量程拨到 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 位置,用接在万用表上的红、黑两根表棒,分别正接和反接测量二极管的两端,即可测出大、小两个阻值,如图 1-9 所示。大的是反向电阻,小的是正向电阻。如果测出的正向电阻是几百欧,反向电阻是几百千欧,那就说明被测的二极管是好的。如果反向电阻太小,二极管就失去了单向导电作用;如果正、反向电阻均为无穷大,表示二极管已经断路。

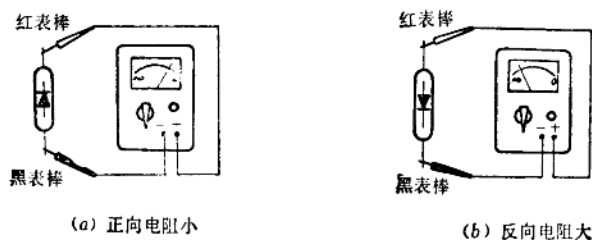


图 1-9 用万用表测试二极管

二极管正、负极性的判别,可用万用表对它进行正接和反接测量一次。因为万用表的红表棒(或表上的符号“+”)与表内电池的负极相连;黑表棒(或表上的符号“-”)与表内电池的正极相连。所以,当测得正向电阻时,黑表棒所接的一端即为二极管的正极,红表棒所接的一端则为二极管的负极。

1-4 单相整流电路

利用二极管的单向导电性,实现以整流为目的的电路称为整流电路。整流电路按其用交流电源的相数不同,可分为单相整流电路和多相整流电路。本节先讲述几种常用的单相整流电路。

(一) 单相半波整流电路

单相半波整流电路如图 1-10 所示。图中 B 为电源变压器,它把交流电源的电压 u_1 变为适当数值的电压 u_2 ; D 为整流元件(晶体二极管); R_{Lz} 为需要取用直流的负载。

设变压器副方电压 u_2 为一正弦电压,即

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

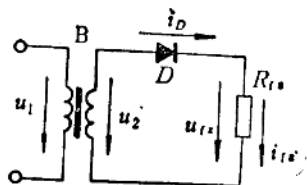


图 1-10 单相半波整流电路

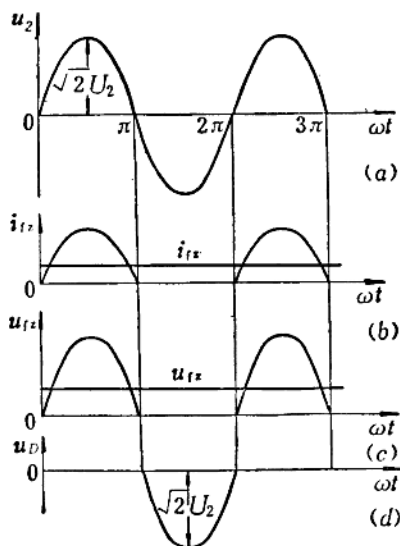


图 1-11 单相半波整流的波形图

式中 U_2 为变压器副方电压的有效值。 u_2 的波形图如图 1-11(a)所示。

在 u_2 交变的正半周 ($0 \leq \omega t \leq \pi$) 期间, 变压器副绕组上端为正, 下端为负, 使二极管 D 受正向电压作用而导通。电流从变压器副绕组的上端流出, 经二极管 D 流过负载 R_L 回到变压器副绕组的下端。如略去二极管的正向电压降不计, 加在负载上的电压 u_L 就等于变压器副电压 u_2 。

在 u_2 的负半周 ($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$) 期间, 变压器副绕组上端为负, 下端为正, 使二极管 D 承受反向电压作用而截止, 负载上可以认为没有电流流过, 负载上的电压 u_L 也就为零。

因此, 尽管变压器的副方电压 u_2 是交变的, 由于二极管的单向导电作用, 流过负载的电流 i_L 和负载上的电压 u_L 都是单一方向, 如图 1-11(b) 和 (c) 所示。这种电路只在电源电压 u_2 的半个周期中才有电流通过, 故称半波整流电路。

由于负载电压 u_L 是一个半波脉动电压, 在整个周期内, 负载电压的平均值

$$\begin{aligned} U_L &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2 \end{aligned} \quad (1-1)$$

上式表明, 在单相半波整流电路中, 负载电压 (即直流输出电压) 的平均值是变压器副方电压有效值的 0.45 倍。

流经负载的电流平均值

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (1-2)$$

由于二极管 D 与负载 R_L 是串联的, 流经二极管 D 的电流 i_D 和负载电流 i_L 是同一电流,

其平均值为

$$I_D = I_{Lz} \quad (1-3)$$

二极管 D 在反向截止时, 所承受的反向电压为变压器副绕组输出的全部电压 u_2 。因此, u_2 的最大值就是二极管 D 截止时所承受的最大反向电压。

$$U_{Dm} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-4)$$

为了保证二极管能安全可靠地工作, 应选用最大整流电流和最高反向工作电压分别大于计算出的 I_D 和 U_{Dm} 的二极管。

单相半波整流电路虽很简单, 但明显的缺点是直流输出电压低, 脉动程度大, 整流效率低。这种电路仅适用于对直流输出电压平滑程度要求不高的小功率整流场合。

(二) 单相全波整流电路

单相全波整流电路如图 1-12 所示, 实际上是由两个半波整流电路组合而成。电源变压器 B 的副绕组具有中心抽头 0 , 副绕组 $a0$ 和 $b0$ 两部分是完全对称的。因此, $a-0$ 和 $b-0$ 这两部分电压 u_{2a} 和 u_{2b} 大小相等而相位差为 180° , 即

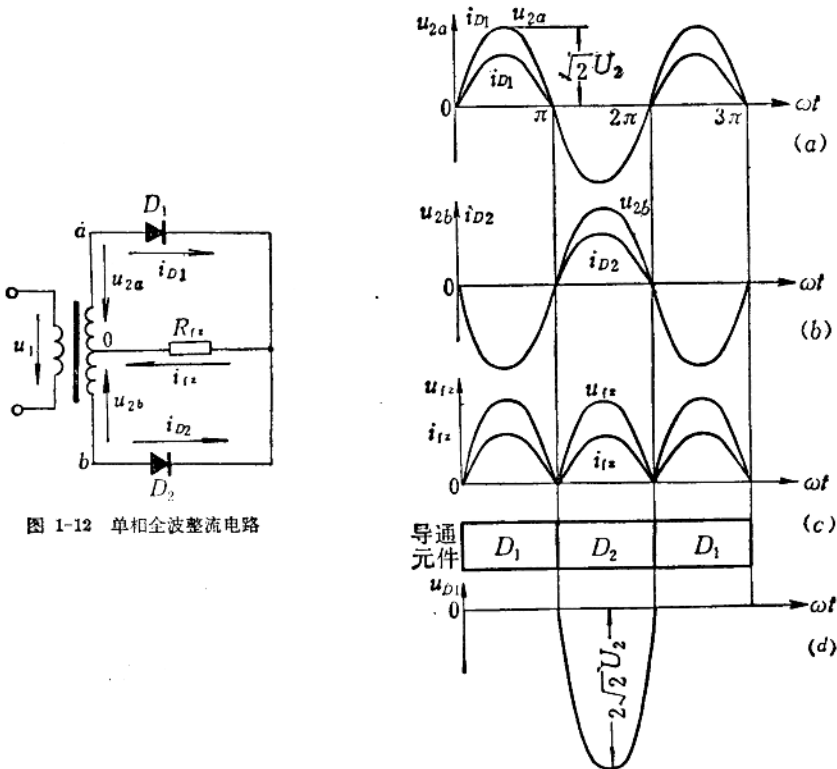


图 1-13 单相全波整流的波形图

$$u_{2a} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

$$u_{2b} = \sqrt{2} U_2 \sin (\omega t - 180^\circ)$$

式中 U_2 为变压器半个副绕组的电压有效值。 u_{2a} 和 u_{2b} 的波形如图 1-13(a)、(b)所示。

在 ωt 为 $0 \sim \pi$ 期间, u_{2a} 为正值, u_{2b} 为负值(即变压器副绕组 a 端为正, b 端为负)。二极管 D_1 因受正向电压作用而导通, 电流自 a 端流出, 经 D_1 流过负载 R_{Lz} 至变压器副绕组中心抽头 0 , 此时二极管 D_2 因承受反向电压作用而截止, 因此下一支路中没有电流流过。

在 ωt 为 $\pi \sim 2\pi$ 期间, u_{2a} 为负值, u_{2b} 为正值(即 a 端为负, b 端为正)。二极管 D_1 因承受反向电压作用而截止, 上一支路中没有电流流过。此时二极管 D_2 因受正向电压作用而导通, 电流自 b 端流出, 经 D_2 流过负载 R_{Lz} 至副绕组中心抽头 0 。

由此可见, 在交变电压的整个周期内, 两个二极管 D_1 、 D_2 轮流导通, 使负载上均有电流流过。流过负载的电流 i_{Lz} 是单一方向的全波脉动电流, 因而负载电压 u_{Lz} 也是单一方向的全波脉动电压, 如图 1-13(c)所示。所以这种整流电路称为全波整流电路。

全波整流电路的负载电压和负载电流的平均值显然为半波整流时的两倍, 即

$$U_{Lz} = 0.9 U_2 \quad (1-5)$$

$$I_{Lz} = \frac{0.9 U_2}{R_{Lz}} \quad (1-6)$$

但是, 流过每只二极管的电流(平均值)却是负载电流的一半, 即

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{1}{2} I_{Lz} \quad (1-7)$$

值得注意的是: 单相全波整流电路中每个二极管所承受的最大反向电压是半波整流时的两倍, 即

$$U_{Dm} = 2\sqrt{2} U_2 \quad (1-8)$$

这是因为当二极管 D_1 导通时, 在略去 D_1 的正向电压降的情况下, 此时反向截止的二极管 D_2 , 其负极电位与变压器副绕组 a 端电位相等, D_2 的正极是接在副绕组 b 端的。所以作用在 D_2 上的反向电压等于变压器整个副绕组的全部电压, 其最大值为 $2\sqrt{2} U_2$ 。同理, 当 D_2 导通时, 作用在 D_1 上的反向电压也是这样。

单相全波整流电路与前述的半波整流电路相比, 虽然输出直流电压高, 电流大, 脉动程度减小了, 但是全波整流电路还存在一些缺点: 电源变压器的副绕组必须具有中心抽头, 而且每个半个副绕组只在半个周期内有电流通过, 变压器的利用率仍不高; 每个二极管承受的反向电压大。为了克服这些缺点, 往往采用桥式整流电路。

(三) 单相桥式整流电路

单相桥式整流电路由四个二极管组成桥形连接, 图 1-14 为单相桥式整流电路的几种画法。

设电源变压器副绕组的电压

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

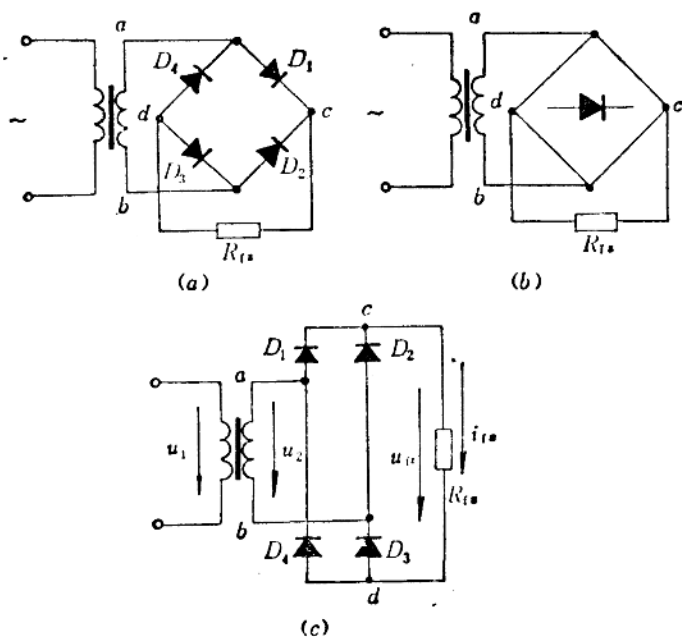


图 1-14 单相桥式整流电路

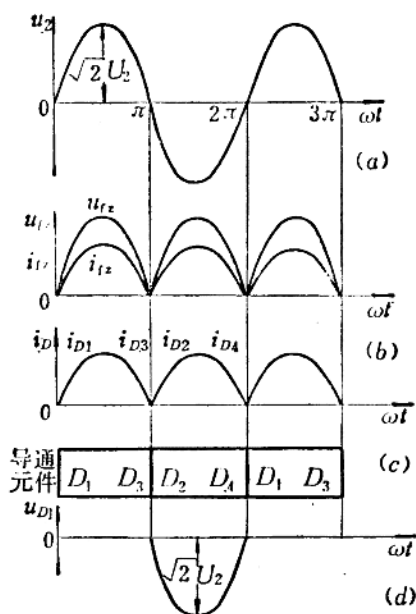


图 1-15 单相桥式整流的波形图

其波形如图 1-15(a) 所示。

在 u_2 的正半周 ($0 \leq \omega t \leq \pi$) 期间, 由于副绕组 a 端为正, b 端为负, 二极管 D_1 、 D_3 受正向电压作用而导通。电流自 a 端流出, 经 D_1 、 R_{Lz} 、 D_3 而至副绕组 b 端。此时二极管 D_2 、 D_4 因承受反向电压作用而截止。

在 u_2 的负半周 ($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$) 期间, a 端为负, b 端为正, 二极管 D_1 、 D_3 承受反向电压作用而截止, D_2 和 D_4 受到正向电压作用而导通。电流自 b 端流出, 经 D_2 、 R_{Lz} 、 D_4 而至 a 端。

因此, 在整个周期内, 四个二极管分为两组, 轮流导通, 轮流截止, 这样不断重复, 负载上就能得到单一方向的全波脉动电压和电流, 其波形与全波整流时完全相同, 如图 1-15(b) 所示。故负载电压、负载电流、二极管电流的平均值也是和单相全波整流的计算方法相同, 即

$$U_{Lz} = 0.9 U_2 \quad (1-9)$$

$$I_{Lz} = \frac{0.9 U_2}{R_{Lz}} \quad (1-10)$$

$$I_D = \frac{1}{2} I_{Lz} \quad (1-11)$$

但是每个二极管所承受的最大反向电压却与全波整流不同, 它等于

$$U_{Dm} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-12)$$

因为每个整流二极管, 在截止时承受的反向电压等于变压器副绕组输出的全部电压, 其最大值为 $\sqrt{2} U_2$ 。而在全波整流时, 半个副绕组的电压即为 $\sqrt{2} U_2$, 所以在相同直流输出电压的情况下, 桥式整流电路中整流元件所承受的反向电压仅为全波整流电路中的一半。

单相桥式整流电路具有全波整流电路的各种优点, 并且还克服了全波整流的缺点。如电源变压器的副绕组无需中心抽头, 在整个周期内均有电流通过, 提高了变压器的利用率, 加在每个二极管上最大反向电压降低了一半等。因此, 桥式整流电路得到广泛的应用。它的缺点是需用四个二极管, 电路结构比较复杂。

例 1-1 有一电阻性负载, 需要电压 110 伏、电流 3 安的直流电源供电, 现采用单相桥式整流电路, 试求电源变压器副绕组的电压有效值, 并选择整流二极管的型号。

解: 根据公式(1-9)确定电源变压器副方电压

$$U_2 = \frac{U_{Lz}}{0.9} = \frac{110}{0.9} = 122 \text{ 伏}$$

根据公式(1-11)和(1-12)求出每个二极管的平均电流和承受的最大反向电压

$$I_D = \frac{1}{2} I_{Lz} = \frac{1}{2} \times 3 = 1.5 \text{ 安}$$

$$U_{Dm} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 122 = 172 \text{ 伏}$$

根据计算所得, 查本书附录二, 选择整流二极管。若选用 2CZ12C, 它的最大整流电流是 3 安, 最大反向电压是 200 伏, 已可满足计算要求。但考虑到在实际使用时, 交流电源电压波动较大, 为了保证整流二极管能安全可靠的工作, 选管时要留有余量。为此可选用 2CZ12D, 它的最大整流电流也是 3 安, 但最大反向电压是 300 伏, 这样则较为安全可靠。

1-5 三相整流电路

单相整流电路只适用于小功率整流,即负载功率约为几瓦到几千瓦的范围内。当负载需要更大功率时,若仍采用单相整流电路,则会造成三相电网负荷不平衡,对电力网的供电产生不良影响。因此在需要大功率整流时,常采用三相整流电路。这样既可保持三相负荷平衡,又能获得脉动程度较小的直流输出。常用的三相整流电路有以下两种:

(一) 三相半波整流电路

三相半波整流电路如图 1-16 所示。图中三相电源变压器 B 的原绕组接成三角形,副绕组接成星形。设副绕组输出的三个相电压为

$$u_a = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

$$u_b = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_c = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

其波形如图 1-17(a) 所示。

在 $t_1 \sim t_2$ ($\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6}$) 三分之一周期内,相电压 u_a 为正值且最高,即 a 点电位最高,(参阅图 1-16),所以二极管 D_1 处于正向电压作用下而导通。如果忽略 D_1 的正向电压降,则 n 点的电位等于 a 点,使另两个二极管 D_2 和 D_3 承受反向电压(u_{ab} 和 u_{ac})作用而截止。电流由 a 点流出,经 D_1 到 n 点,再经负载 R_{Lz} 回到 0 点。作用在负载上的电压 u_{Lz} 就是在此期间的电源相电压 u_a ,如图 1-17(b) 所示。

同理,在 $t_2 \sim t_3$ 三分之一周期内, u_b 为正值且最高。二极管 D_2 导通,而 D_1 和 D_3 截止,电流由 b 点流出,经 D_2 到 n 点,再经 R_{Lz} 回到 0 点。 u_{Lz} 即为此期间的 u_b 。

在 $t_3 \sim t_4$ 三分之一周期内, u_c 为正值且最高,即 c 点电位最高。二极管 D_3 导通,而 D_1 和 D_2 截止,电流由 c 点流出,经 D_3 到 n 点,再经 R_{Lz} 回到 0 点。 u_{Lz} 即为此期间的 u_c 。

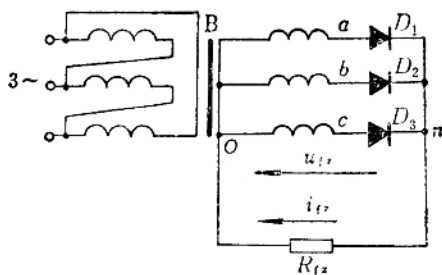


图 1-16 三相半波整流电路

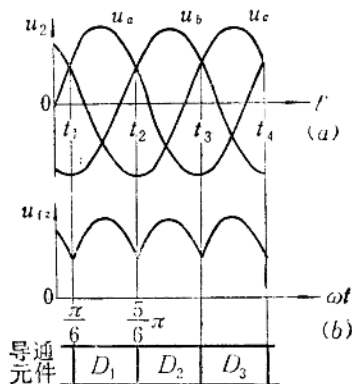


图 1-17 三相半波整流的波形图

综上所述可知,在电源电压的一个周期内,三个二极管 D_1 、 D_2 和 D_3 轮流导通,每个二极管的导通时间是三分之一周期。在任一瞬时,相电压最高的一相中所接的二极管是导通的,负载电压 u_{iz} 按三个相电压 u_a 、 u_b 和 u_c 的波顶连线而变化,是单一方向的脉动电压,如图 1-17 (b) 所示。其脉动程度显然比任一种单相整流电路为小。

由于负载电压 u_{iz} 的波形每三分之一周期内都是相同的,所以只要取出三分之一周期内的波形,便可求得负载电压的平均值,即

$$U_{iz} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1.17 U_2 \quad (1-13)$$

负载电流的平均值

$$I_{iz} = \frac{1.17 U_2}{R_{iz}} \quad (1-14)$$

由于三个二极管在一个周期的时间内轮流导电,所以通过每个二极管电流的平均值为负载电流平均值的三分之一,即

$$I_D = \frac{1}{3} I_{iz} \quad (1-15)$$

每个二极管所承受的反向电压,如分析该电路的工作原理时所述,应为变压器副方的线电压。所以加在每个二极管上的最大反向电压也就是线电压的最大值,即

$$U_{Dm} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_2 = 2.45 U_2 = 2.09 U_{iz} \quad (1-16)$$

三相半波整流电路的缺点是:变压器的利用率不高(每相绕组只在三分之一周期内工作);输出电压的脉动程度仍较大;且二极管承受的反向电压较高。为了克服这些缺点,实际上往往采用三相桥式整流电路。

(二) 三相桥式整流电路

三相桥式整流电路是三相整流中常用的一种电路,如图 1-18 所示。该电路共有六个二极管,分成两组。其中 D_1 、 D_3 、 D_5 三个二极管的阴极联接在一起,称为共阴极组; D_2 、 D_4 、 D_6 三个

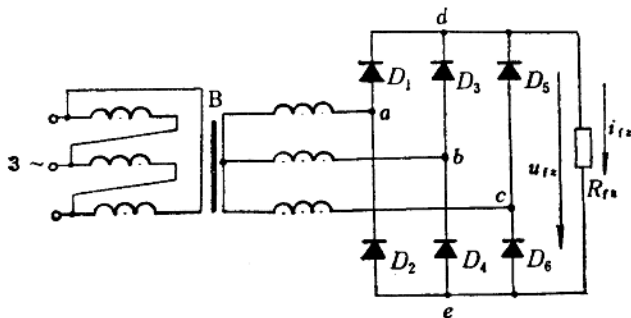


图 1-18 三相桥式整流电路