

高等学校教材

电 工 学

下 册

裘益钟主编

高 等 教 育 出 版 社

本书是在上海交通大学电工学教研组所编《电工学》(上、中册于1960年8月出版,1961年7月再版,下册仅在校内印成讲义,未曾公开出版)的基础上,参照1962年5月高等工业学校教学工作会议审订的高等工业学校本科五年制机械制造类专业适用的《电工学教学大纲(试行草案)》修订而成的,由南京工学院李士雄同志审阅,并经高等工业学校电工课程教材编审委员会电工学及电工基础课程教材编审小组复审通过。

本书共分三册。下册包括整流器、放大器、振荡器、电子继电器与电子仪器、非电量的电测法。书末有附录,各章有小结、问题及习题。

本书可作为高等工业学校本科五年制机械制造类专业电工学课程的试用教科书,也可供有关工程技术人员参考。

电 工 学

下 册

袁 益 钟 主 编

北京市书刊出版业营业许可证出字第119号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K15010·1196 开本 850×1168 $1/32$ 印张 5 $1/16$
字数 136,000 印数 0,001—5,000 定价(7) ¥0.65
1965年12月第1版 1965年12月北京第1次印刷

下册目录

第三部分 工业电子技术与非电量的电测法

第十三章 整流器(史淦森编)	2
13-1. 概述	2
13-2. 真空二极管	2
13-3. 半导体整流元件	6
13-4. 单相整流电路	9
13-5. 滤波器	13
13-6. 热阴极充气二极管	17
13-7. 三相整流电路	18
13-8. 闸流管及可控整流电路	20
*13-9. 汞弧整流器	23
*13-10. 引燃管	25
*13-11. 相敏整流电路	26
小结	26
问题	27
习题	28
第十四章 放大器(薛瑞福编)	30
14-1. 概述	30
14-2. 真空三极管及其特性	30
14-3. 真空三极管的单管放大电路(图解法)	33
14-4. 真空三极管的参数和微变等效电路	39
14-5. 真空四极管、真空五极管和束射四极管	44
14-6. 放大器的分类和放大倍数	49
14-7. 阻容耦合放大器	50
*14-8. 变压器耦合放大器	56
14-9. 音频单管功率放大器	57
14-10. 推挽式功率放大器	62
14-11. 倒相电路	64
14-12. 负反馈放大器·阴极输出器	65
14-13. 直流放大器	71
*14-14. 相敏放大器	73
*14-15. 半导体三极管放大器的概念	74
小结	78
问题	80
习题	80

第十五章 振荡器(薛瑞福编)	83
15-1. 概述	83
15-2. 自激振荡器的基本原理	83
15-3. LC 正弦波振荡器的工作原理	85
15-4. LC 正弦波振荡器的典型电路	88
*15-5. RC 正弦波振荡器	90
小结	92
问题	92
第十六章 电子继电器与电子仪器(方志成编)	94
16-1. 概述	94
16-2. 电子定时继电器	94
16-3. 光电继电器	95
16-4. 直流电子稳压器	97
16-5. 真空管电压表	99
16-6. 电子射线示波器	103
小结	111
问题	111
第十七章 非电量的电测法(孙文卿编)	112
17-1. 概述	112
17-2. 变换器的分类	113
17-3. 电容变换器	114
17-4. 电感变换器	115
17-5. 电阻丝变换器	118
17-6. 热电阻变换器	120
17-7. 热电变换器(热电偶)	122
17-8. 光电变换器	123
17-9. 测量电路	124
*17-10. 自动电子电位计	128
17-11. 电阻应变仪	133
小结	135
附录 1	137
附录 2 常用真空管特性	140
附录 3 充气管和光电管	144
附录 4 电阻、电容规格	145
附录 5 电子管特性曲线	147
附录 6 几种国产电子设备的电路图	158

第三部分 工业电子技术与 非电量的电测法

工业电子技术是把电子器件应用到工业生产中的科学技术。在近代各工业部门中,为了提高劳动生产率、降低劳动强度和改进产品质量,都广泛地应用了电子技术,尤其在工业生产自动化方面,更少不了电子技术装置。

电子技术在工业生产自动化技术中,具有各种特点:

1. 电子或离子在真空和气体中的运动速度极高,惯性极小,所以工作迅速。
2. 某些电子器件可以将微弱信号放大,即能利用很小的能量来控制很大的能量,所以灵敏度很高。
3. 电子仪器极为灵敏,能反映微小误差,所以准确度很高。
4. 应用电子技术,不仅对于各种电量可以很方便的进行测量和控制,对于各种非电量,也可用适当的方法变为电量,再进行测量和控制。

电子技术既然具有种种特点,因此在近代各工业部门、医学、物理、测量技术、计算技术以及国防等方面都得到广泛的应用。

本书第三部分内容,主要是讨论整流器、放大器、振荡器和几种常用电子仪器的基本电路,以及学习非电量电测法中的常用变换器和测量电路等,其目的是为非电专业学生将来从事工程技术工作或科学研究工作创造条件。

第十三章 整流器

13-1. 概述

在电子设备、电机励磁系统、自动控制系统以及在许多现代工业生产、科学部门中都需要直流电源。但是一般电网供给的是交流电能，所以需要一种把交流电能转换成直流电能的设备以获得直流电源。能把交流电能转换成直流电能的设备除了电动机-发电机组和单枢换流机外，还有一种就是整流器。整流器按其工作原理可分为电子的、离子的、半导体的及机械的等种，本章只讲电子的、离子的及半导体的整流器(以下简称整流器)。

整流器中一定有整流元件，如真空二极管、充气二极管或半导体整流元件等。

13-2. 真空二极管

1. 构造

真空二极管的基本构造是，在玻璃泡或金属管中，装着一个阴极和围在阴极外面的一个圆筒形的阳极。

阴极是利用电流通过灯丝来加热，当它达到相当温度时，一部分自由电子可能获得充分的能量而飞离阴极，结果在阴极附近的空问积聚了许多电子。这种现象称为热电子发射。

阴极通常由涂氧化物的金属丝制成。这就不需要象钨丝或钽钨丝那样必须具有很高的温度，便能够发射大量的电子。由于加热方式的不同，阴极又分为直热式与旁热式两种。直热式阴极就是灯丝，加热后直接发射电子。旁热式阴极是外面涂有氧化物层的镍制圆筒，套在钨丝外面，钨丝通电后，就使阴极间接加热，发射

电子。由于旁热式阴极的热惯量较大,因而在采用交流加热时,电子发射的脉动现象减少很多,交流声干扰较小。

真空二极管的外形与符号如图 13-1 所示。

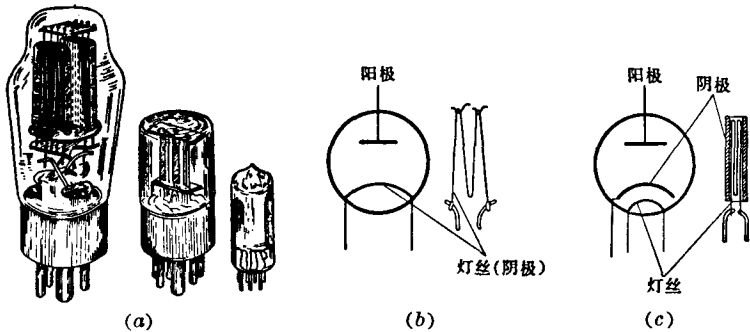


图 13-1 真空二极管:

(a)外形图; (b)直热式阴极与符号; (c)旁热式阴极与符号。

2. 单向导电性

当电流通过灯丝时,使阴极的温度升高,于是阴极产生热电子发射。若阳极电位高于阴极电位(图 13-2),则阴极所发射的电子受阳极电场的作用,将继续不断地飞向阳极,形成电子流,所以真空管中有电流从阳极流向阴极,这个电流称为**阳极电流**。若阳极电位低于阴极电位,则阳极的负电场将阻止阴极所发射的电子飞向阳极,而使之返回阴极,这样阳极回路中就没有电流。所以,

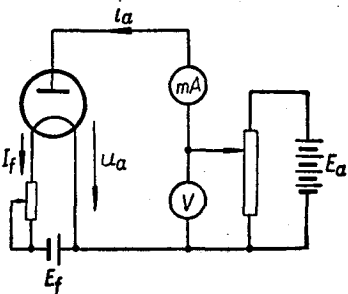


图 13-2. 真空二极管电路。

当外加电压的极性反复改变时,只有当真空二极管的阳极电位高于阴极电位时,它才能导电,这一特点就表明它具有单向导电的性质,所以可用作整流元件。

真空二极管是最简单的一种电子管。

3. 伏安特性曲线与空间电荷作用

真空二极管中电流的大小，取决于阴极被加热的温度及阳极

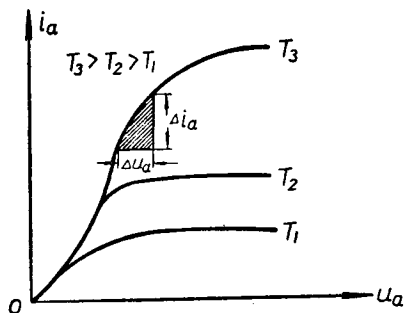


图 13-3. 在不同阴极加热温度下真空二极管的伏安特性曲线。

与阴极之间的电压。如果阴极温度维持不变，那末真空二极管的阳极电流 i_a 仅与阳极电压 u_a 有关，这个关系 $i_a = f(u_a)$ ，称为真空二极管的伏安特性曲线（图 13-3）。

当阳极电压对阴极而言为零时，电子不受阳极吸引，

阳极电流为零。如果阳极电压增高，阳极电流也随之增大，但是由于阳极与阴极之间聚集着许多电子，形成空间电荷，它对于继续从阴极发射出来的电子有排斥作用，所以在这种情况下，真空二极管的阳极电流既受阳极电压的作用，也受极间空间电荷的影响，于是曲线便从原点开始弯曲上升。当阳极电压到达某一定值以后，阴极所发射的电子，几乎全部被阳极所吸收。此后阳极电压再增加，阳极电流便不怎么增大，这时的电流称为饱和电流。饱和电流将随着灯丝温度的增高而增大。

4. 参数与额定值

(1) 内电阻 真空二极管的内电阻有直流内电阻 \bar{R}_i 与交流内电阻 R_i 。前者是在额定灯丝电压下，直流阳极电压 U_a 与直流阳极电流 I_a 的比值，即

$$\bar{R}_i = \frac{U_a}{I_a} \quad (13-1)$$

后者是在额定灯丝电压下，阳极电压增量 Δu_a 与相应的阳极电流

增量 Δi_a 的比值的极限值, 即

$$R_i = \frac{du_a}{di_a} \quad (13-2)$$

由于 $i_a = f(u_a)$ 并非直线, 所以真空二极管的内电阻不是常数, 通常在电子管手册中所列的内电阻是直流内电阻。真空二极管的内电阻愈小愈好。

(2) 阳极损耗功率 P_a 从阴极发射的电子到达阳极时, 将它的动能传给阳极, 使阳极发热, 同时使其温度升高。这种能量损耗称为阳极损耗。阳极损耗功率为

$$P_a = U_a I_a [\text{瓦}] \quad (13-3)$$

式中 U_a 为直流阳极电压, I_a 为直流阳极电流。

二极管在使用时, 阳极温度上升是有限制的, 它的阳极损耗功率不能超过最大的允许数值, 否则就可能使阳极烧红损坏。

(3) 阳极平均电流 I_a 真空二极管的阳极平均电流就是它的直流输出电流。整流二极管所容许的最大 I_a 值是受阳极损耗功率所限制。 I_a 值可从手册中查得, 例如 6Z4(6U4II)^① 型双阳极整流二极管的 $I_a = 75$ 毫安。

(4) 最大容许阳极峰值电流 I_{atmax} 真空二极管所容许瞬时通过的最大脉冲电流值是受阴极发射电子的能力所限制, 如果超过的话, 也会导致电子管的损坏。例如 6Z4(6U4II) 型双阳极整流二极管的 I_{atmax} 为 300 毫安。

(5) 最大阳极反向峰值电压 U_{atfmax} 当二极管的阳极与阴极之间接上交流电压时, 由于真空二极管具有单向导电性能, 在电压的负半周内, 电子管不导电, 它的阳极与阴极之间将承受全部的阳极反向电压, 这个反向电压的峰值不能超过电子管所能承受而不被击穿的最大容许电压, 否则将使真空二极管失去单向导电性能

① 括弧中所标的是过去的型号。

而损坏。实际上,电子管的阳极反向峰值电压 U_{aff} 的大小,在电路接法一定的情况下,由外加交流电压的大小决定,所以,电子管对于阳极反向峰值电压的限制就是对于外加交流电压的限制。

我们在选用电子管时,应考虑到它的阳极平均电流 I_a 、最大阳极峰值电流 I_{afmax} 与最大阳极反向峰值电压 U_{affmax} 等三个额定值,这三个数值都可以从电子管手册中查得。

13-3. 半导体整流元件

从物理学中知道,P型半导体与N型半导体相接触时,在接触处N型中的电子将向P型中扩散,P型中的空穴将向N型中扩散,结果在交界处就有正负电荷的积累,形成一称为PN结的电偶层,产生一个电位差(N型的电位高于P型的电位),这个电位差将阻碍以后的电子与空穴跨过交界处继续扩散,终于达到动平衡状态,所以PN结又称为“阻挡层”。

当P端接于外加电压的正极,N端接于负极,那末PN结中的电位差将要降低,因而使N型中的电子与P型中的空穴易于通过

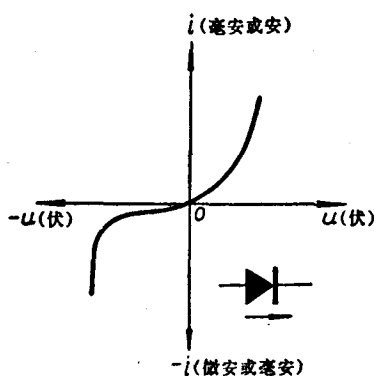


图 13-4. 半导体PN结的伏安特性曲线与半导体整流元件的符号。

阻挡层,就是正向电流容易通过,而且正向电流随着外加电压的增高而增大。反之,当P端接于外加电压的负极,N端接于正极,那末PN结中的电位差将升高,因而N型中的电子与P型中的空穴难于通过阻挡层,就是反向电流不易通过,而且很快达到饱和。PN结的伏安特性曲线略如图13-4所示。由此可见,半导体PN结虽有反向电流存在,但是由于

它具有强烈的不对称导电特性，所以它与真空二极管的整流作用相当，可以用作整流元件。

半导体整流元件比真空二极管具有下列许多优点：结构简单，体积小，重量轻，无需灯丝加热，且维护方便，机械强度较高，寿命长，可靠性高。它的缺点是，反向电阻比真空二极管的低得多，它的伏安特性受温度影响很大，参数随时间而变化。不过这些缺点会随着半导体技术的发展而逐步改进。

工业上用于工频整流方面的半导体整流元件有以下几种：

硒整流元件 在镀镍铁片上涂一薄层硒，然后再在硒上喷涂一层锡镉合金。掺杂质的硒是P型半导体，而锡镉合金在热处理时与硒起化学反应，成为硒化镉，它是N型半导体，所以在硒与硒化镉之间形成PN结而成为整流元件。图13-5为硒整流元件的示意图与结构图。

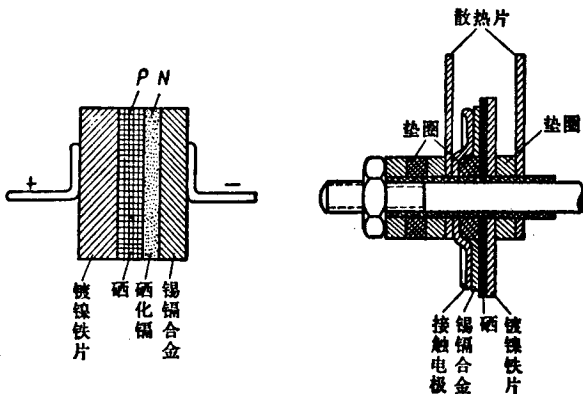


图13-5. 硒整流元件的示意图与结构图。

锗整流元件 采用特殊方法将镉溶于直径为几个厘米的锗结晶薄片上，锗晶体是N型半导体，在锗晶体中掺入镉后便成为P型半导体，二者之间形成PN结而成为整流元件。图13-6为锗整

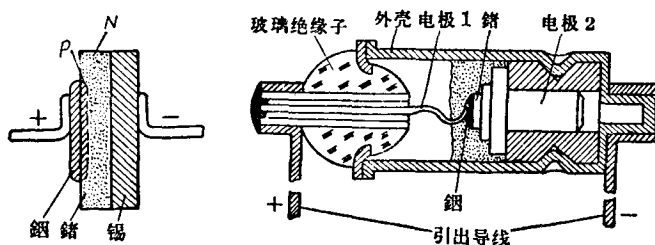


图 13-6. 锗整流元件的示意图与结构图。

流元件的示意图与结构图。

硅整流元件 应用适当的方法在直径为几个厘米的硅单晶薄片上，一面覆盖薄铝层扩散而成为P型半导体，另一面覆盖金或铋的合金层成为N型半导体，于是二者之间形成PN结而成为整流元件。图 13-7 为硅整流元件的示意图与结构图。

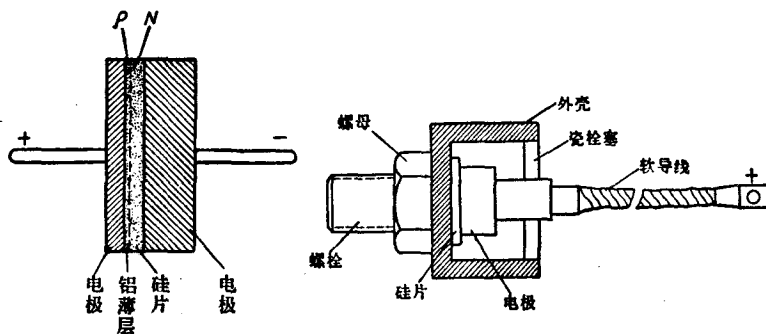


图 13-7. 硅整流元件的示意图与结构图。

上述三种半导体整流元件的主要特性如表 13-1 所示。

由于每个整流元件的工作电压与电流具有一定限度，所以在使用时，需要将适当数目的整流元件加以串联和并联，以获得所需要的整流电压与整流电流。硒整流元件在工艺要求上比较简单，而且短时过载后可以自行复原，所以在几毫安到几安的整流范围

表 13-1. 半导体整流元件的主要特性

整流元件类别	电流密度 (安/厘米 ²)		最大反向峰值电压 (伏)	容许温度 (°C)		电压降 (伏)	最大时的效率 (%)	同规格的体积比
	自然冷却时	强迫冷却时		连续工作	瞬时工作			
硒整流元件	0.07	0.2	35	-10~+80	-20~+150	1.2	92	15
锗整流元件	40	100	80~400	-55~+65	-55~+80	0.6~0.7	98.5	3
硅整流元件	80	200	50~1500	-55~+175	-55~+200	1~1.3	99.6	1

内，一般都采用硒整流元件。氧化铜整流元件虽然问世已有三十余年，但是它的整流性能一般说来比硒整流元件差，所以目前在大功率整流方面几乎趋于淘汰之列，唯其在小电流情况下，正向电阻较小，反向电阻较大，且在长期搁置后也不致失去整流作用，因此在整流式的交流电压表中和一些测量计算装置中还常采用。锗和硅整流元件的体积小，效率高，整流功率大，都是大功率整流方面的新生力量，所以它们已很广泛地用于电解、冶金与电力机车等的大型整流装置中。尤其是硅的蕴藏量极大，而且目前对于提炼超纯单晶硅的技术问题已经解决，我国自大跃进以来，各类型的硅整流元件已先后制成，今后大有发展前途。

13-4. 单相整流电路

真空二极管和半导体均具有单向导电的性能，都可以用作整流元件。整流电路按其特点，可以分为以下几种基本形式：

1. 单相半波整流电路

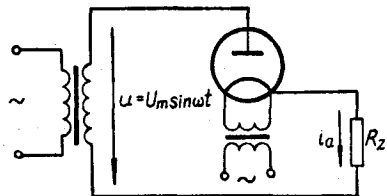


图 13-8. 单相半波整流电路。

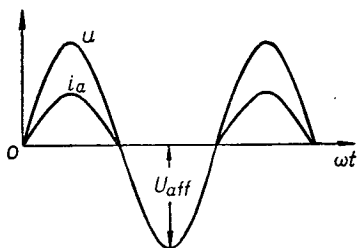


图 13-9. 单相半波整流电路的电压与电流波形。

在图 13-8 中, 当 u 在正半周时, 阳极电位对阴极而言为正, 管子导电, 电路中有电流 i_a 通过。当 u 在负半周时, 管子不导电, 电路中电流为零, 所以整流电流的脉动很大(图 13-9)。

从上册 2-15 节中知道, 在一周中电流的平均值或直流分量

I_0 为

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi} = \frac{1}{\pi} \frac{U_m}{R_z} \quad (13-4)$$

在负载电阻 R_z 两端的平均电压或直流电压 U_0 为

$$U_0 = I_0 R_z = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U}{\pi} \approx 0.45 U, \quad (13-5)$$

式中 U 为加于二极管的交流电压的有效值。

由图 13-8 中可以看出, 在不导电的半周期中, 二极管的阳极反向峰值电压就是电源负半周时的电压的幅值, 即 $U_{aff} = U_m$ 。

整流电流的有效值为

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_a^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{U_m}{R_z}\right)^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{1}{2} \frac{U_m}{R_z} = \frac{1}{2} I_m. \end{aligned} \quad (13-6)$$

在单相半波整流电路中, 电源变压器的原副绕组, 仅在一半时间内有电流通过, 所以利用率不高, 如采用全波整流电路就能弥补这个缺点。

① 由于整流元件导电时的内电阻一般比负载电阻小得多, 所以可以忽略或与负载电阻 R_z 合并。

2. 单相全波整流电路

将两只相同的二极管的阳极和电源变压器 YB 副绕组的两端 A, B 相接, 它们的阴极都经过负载电阻 R_z 和变压器副绕组的中心抽头 O 点连接(图 13-10)①。副绕组的两部分电压 u_1 与 u_2 对 O 点而言, 是幅值相等而相位相反, 即 $u_1 = U_m \sin \omega t$, $u_2 = -u_1 =$

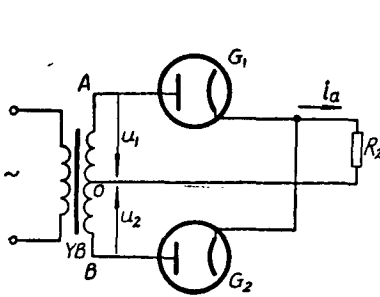


图 13-10. 全波整流电路。

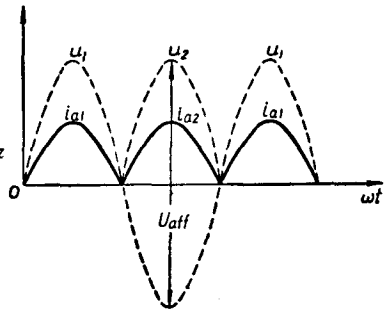


图 13-11. 全波整流电的电压与电流波形。

$= U_m \sin(\omega t + \pi)$ 。所以当二极管 G_1 导电时, G_2 不导电, 但在电压的另半周期内, 二极管 G_2 导电, G_1 不导电。因此在电源电压的整个周期内, 均有电流流过负载电阻, 并且电流的方向相同, 它的波形如图 13-11 所示。

全波整流电流在一周期中的平均值是半波整流电流的两倍, 即

$$I_0 = \frac{2}{\pi} \frac{U_m}{R_z} \quad (13-7)$$

在负载电阻 R_z 两端的平均电压 U_0 为

$$U_0 = I_0 R_z = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \approx 0.90U \quad (13-8)$$

整流电流的有效值为

① 为了简化, 二极管的灯丝与加热电源均未画出。

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_m}{R_z} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (13-9)$$

由图 13-11 中知道, 全波整流电流比半波整流电流的脉动减小了很多。再从图 13-10 中看到, 不导电的二极管所承受的阳极反向峰值电压是变压器副绕组的全部电压的幅值, 即 $U_{att} = 2U_m$ 。还可以看到, 在一个周期中, 变压器副绕组的 AO 部分与 BO 部分轮流工作。换句话说, 在任何时刻, 变压器总有一半副绕组被利用, 它的原绕组在整个周期都有电流, 因此变压器的利用率较半波整流电路为高。一般小功率的全波整流电路多用双阳极整流二极管, 如图 13-14, a 所示。

3. 单相桥式整流电路

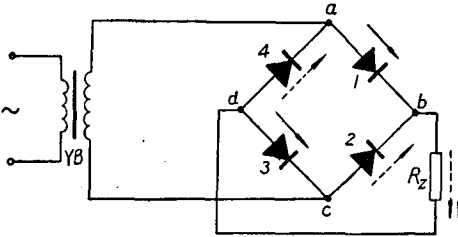


图 13-12. 桥式整流电路。

桥式整流电路 (图 13-12) 是利用四个整流元件 (通常采用半导体整流元件) 组成, 在电压的正半周期内 (a 端为正, c 端为负), 元件 1、3 导电, 电流沿着实线箭头方向流过负载电阻。在电压的负半周期内 (c 端为正, a 端为负), 元件 2、4 导电, 电流沿着虚线箭头方向流过负载电阻。由此可见, 电源电压的极性虽然改变, 而负载电阻上的电流方向始终不变, 它的波形与单相全波整流的一样。

桥式整流电路具有下列优点: (1) 可以不需要变压器也能获得全波整流; (2) 如果为了获得所需的电压而用变压器, 那末变压器原副绕组在正负两个半周期内均有电流流过, 所以变压器的利用率比单相全波整流电路中的利用率为高; (3) 在同样的直流输出电压的条件下, 桥式整流电路与全波整流电路相比较, 不导电的整流

元件所承受的反向电压，前者的只是后者的一半。但是这种电路也有一定的缺点：(1)需要四个整流元件；(2)导电时，电流流经两个整流元件，使整流器内电阻电压降加倍，从而降低了整流器的输出电压。

例 13-1. 两只真空二极管，忽略它们的内电阻，用于全波整流，负载电阻 R_z 为 5000 欧，输入电压的有效值为 400 伏。试求：(1)负载电流的最大值；(2)负载电流的直流分量；(3)负载电流的交流分量有效值；(4)负载直流电压；(5)通过二极管的平均电流值。

解：(1)负载电流的最大值

$$I_m = \frac{U_m}{R_z} = \frac{\sqrt{2}U}{R_z} = \frac{\sqrt{2} \times 400}{5000} = 0.113 \text{ 安。}$$

(2)负载电流的直流分量

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_m = \frac{2}{\pi} \times 0.113 = 0.072 \text{ 安。}$$

(3)为了求出负载电流的交流分量有效值 \bar{I} ，应先求整流电流的有效值 I ，即

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 0.113 = 0.08 \text{ 安。}$$

$$\therefore \bar{I} = \sqrt{I^2 - I_0^2} = \sqrt{0.08^2 - 0.072^2} = 0.035 \text{ 安。}$$

(4)负载直流电压

$$U_0 = I_0 R_z = 0.072 \times 5000 = 360 \text{ 伏。}$$

(5)通过二极管的阳极平均电流 I_a 应是负载电流直流分量的一半，即

$$I_a = \frac{1}{2} I_0 = \frac{1}{2} \times 0.072 = 0.036 \text{ 安。}$$

13-5. 滤波器

整流电路整流后的电流是脉动的，因此在负载电阻 R_z 上的输出电压中包含着交流分量，它往往不能满足实际需要。为了消除或减小这些交流分量，就必需在整流电路与负载之间接入滤波器。滤波器是含有电抗元件的组合物，它使某些频率的电压(或电流)