

高等学校试用教材

电子线路

第五册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编

人民教育出版社

内 容 简 介

本书是按照 1977 年高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议“电子线路”小组讨论修订的“电子线路”教材编写大纲编写的。

全书分五册，本册讨论了整流电路、电源变换电路和直流稳压电路的工作原理、性能指标和电路形式及设计方法；介绍了电子管的工作原理及电子管电路的基本特点。本册对容性负载整流电路和线性串联稳压器的设计方法都有较详尽的讨论。

本书可作为高等院校无线电技术类试用教材，也可供从事电子技术工作的工人和技术人员阅读。

本书责任编辑 李永和

高等学校试用教材 电 子 线 路

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编

*

人民邮电出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京市房山县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.5 插页 1 字数 177,000

1979 年 7 月第 1 版 1982 年 3 月第 5 次印刷

印数 63,501—81,000

书号 15012·0188 定价 0.65 元

第五册 目 录

第六篇 电源设备电路

第二十章 整流和电源变换电路

内容提要.....	1
§ 20-1 整流元件	3
20-1-1 硅整流元件.....	3
20-1-2 锗整流元件.....	4
20-1-3 硒整流元件.....	5
§ 20-2 纯电阻负载单相整流电路	6
20-2-1 半波整流电路.....	7
20-2-2 全波整流电路.....	9
20-2-3 桥式整流电路.....	10
*§ 20-3 纯电阻负载三相整流电路	12
20-3-1 三相半波整流电路.....	13
20-3-2 三相桥式整流电路.....	14
§ 20-4 容性负载整流电路	16
20-4-1 半波整流电路.....	16
20-4-2 全波整流电路.....	23
20-4-3 桥式整流电路.....	25
20-4-4 二倍压整流电路.....	27
*20-4-5 多倍压整流电路.....	29
20-4-6 容性负载整流电路的设计.....	30
*20-4-7 设计举例.....	31
20-4-8 电源滤波器.....	33
§ 20-5 感性负载整流电路.....	35
20-5-1 电感输入整流电路.....	35

20-5-2 复式滤波电感输入整流电路	38
*20-5-3 设计实例	40
*§ 20-6 电源变换器电路	41
20-6-1 单管变换器电路	42
20-6-2 推挽式换流器电路	46
20-6-3 双变压器换流器电路	49
20-6-4 变换器中整流管的选用	51
附录一 纹波因数 γ 和脉动系数 s	53
附录二 小功率电源变压器的设计	55
复习思考题	64
参考文献	65

第二十一章 直流稳压电路

内容提要	67
§ 21-1 硅稳压管及其稳压电路	68
21-1-1 硅稳压管	68
21-1-2 稳压管稳压电路	71
*21-1-3 设计实例	73
§ 21-2 线性稳压电路	74
21-2-1 稳压电路的工作原理	74
21-2-2 串联式稳压器的稳压系数 s 和输出电阻 R_o	77
21-2-3 稳压器稳压性能的改进	80
21-2-4 稳压器的温度补偿	83
21-2-5 高压和低压稳压电路	85
21-2-6 使用运算放大器的稳压电路	87
21-2-7 集成化稳压电路	90
21-2-8 串联式线性稳压器的设计	92
*21-2-9 设计实例	99
§ 21-3 开关稳压电路	103
21-3-1 开关稳压器的基本原理	104
21-3-2 对开关元件的要求	106
21-3-3 滤波器参数的选择	108
*21-3-4 开关稳压器实例	111

§ 21-4 稳压器的保护电路·····	118
21-4-1 限流型保护电路·····	118
21-4-2 减流型保护电路·····	120
21-4-3 截止型保护电路·····	122
*§ 21-5 恒流源电路·····	124
21-5-1 场效应管恒流源·····	125
21-5-2 半导体三极管恒流源·····	127
21-5-3 反馈型恒流源·····	128
复习思考题·····	130
参考文献·····	132

第七篇 电子管及其电路

第二十二章 电子管及其电路

内容提要·····	133
§ 22-1 电子管的工作原理·····	134
22-1-1 电子管的种类和基本结构·····	134
22-1-2 电子管的阴极·····	136
22-1-3 二极管·····	139
22-1-4 三极管·····	146
22-1-5 多极管·····	157
22-1-6 三极管和多极管的极限参数·····	164
22-1-7 复合管·····	165
22-1-8 真空三极管、多极管与半导体三极管的比较·····	166
§ 22-2 电子管低频放大器·····	166
22-2-1 电子管低频放大器的工作原理·····	167
22-2-2 放大器的各部分电路·····	169
22-2-3 放大器的分析方法·····	171
22-2-4 放大器的输入阻抗与输出阻抗·····	178
22-2-5 放大器的频率特性·····	180
§ 22-3 电子管高频小信号谐振放大器·····	181

22-3-1 高频小信号谐振放大器电路·····	183
22-3-2 收音机其它电路的工作原理·····	187
§ 22-4 电子管高频谐振功率放大器·····	190
22-4-1 发射电子管的特点·····	192
22-4-2 恒电流曲线图解法·····	195
22-4-3 谐振功率放大器实例·····	204
§ 22-5 示波管及示波器的方框图·····	211
22-5-1 示波管的结构及各部件的作用·····	211
22-5-2 电子束的聚焦·····	213
22-5-3 电子束的偏转·····	216
22-5-4 电子束的显示·····	221
22-5-5 示波器的方框图·····	222
附录一 电真空管型号命名方法(摘录)·····	226
附录二 常用电子管的参数·····	228
复习思考题·····	230
参考文献·····	231
名词索引·····	232

第六篇 电源设备电路

第二十章 整流和电源变换电路

内 容 提 要

交流电源和直流电源是可以相互变换的。交流变为直流称为“整流”；而把直流变为交流称为“换流”。

整流的关键是使用单向导电元件——整流管。最理想的整流元件是硅整流二极管。整流电路是一种非线性电路，它的整流特性受整流器负载的影响很大。虽然实际中很少使用纯电阻负载的单相或多相整流电路，但学习这些内容对于掌握和理解电抗性负载整流电路是有帮助的。例如，感性负载整流电路可以看成是由一个纯电阻负载整流电路和一个电感性滤波器组成的。电容性负

性负载整流电路通常采用图解分析方法。如要进一步减小整流器输出的纹波成分，可在整流器后面再加接滤波器。

换流可由半导体三极管和变压器组成的电源变换电路来实现。本章讨论了几种典型换流器电路。

在本章附录中还给出了电源变压器设计等内容。

对于一个比较复杂的电子设备，往往需要多种不同电压的直流电源，其范围为几伏至几十伏。而某些设备却要求有较高的电

源电压, 高达数千伏甚至数万伏 (如示波管、显像管的加速阳极电压)。

供电电网一般是 50 赫的单相 220 伏或三相 380 伏电源, 也可以是 400 赫的中频电源。为了取得不同的直流电压, 应当用电源变压器先将电网电压变为所要求的交流电压值, 然后经过“整流”将其变为单向电流。为了滤除单向电流中的脉动成分, 还必须对它进行“滤波”。这样一来, 整流器就可以输出平滑的直流电压(或电流)。

小的影响, 这对于大多数电子设备来说是不允许的。因此, 还应对整流电压进一步给以“稳压”。

对于没有电网供电的野外设备、便携或空间设备等, 供电电源采用直流发电机组或电池等直流电, 而这些电源由于电压大小不符合要求等原因而不能直接使用。因此, 首先要将直流电“变换”为交流电(也称“换流”或“逆变”), 然后再经整流滤波以取得所需的直流输出。

电源设备的可能方框图如图 20-0-1 所示

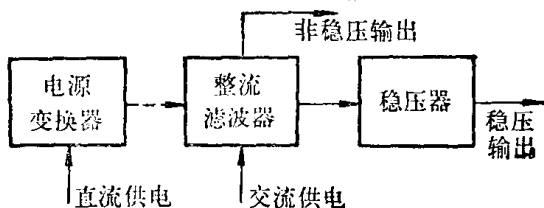


图 20-0-1 电源方框图

整流电路的任务是利用单向导电元件将输入交流电变换为单向电流, 再利用滤波器滤除整流电压中的交流成分。可见整流电路是非线性器件频率变换作用的又一种应用。当整流器和具有电抗性元件的滤波器联接时, 对整流电路进行严格的分析, 和其他非

线性电路一样,也是很困难的。本章将从工程设计的观点,介绍实验曲线的设计方法和近似计算方法。

§ 20-1 整 流 元 件

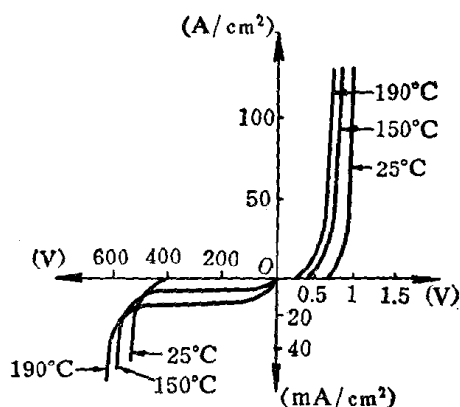
实现整流必须有单向导电元件——整流管。早期整流元件多半用电子管(整流二极管)、离子管(如汞弧整流管)。由于它们存在维护困难、可靠性差、效率低等缺点,已逐渐为半导体整流二极管所代替。

我们知道,半导体 PN 结具有单向导电的整流特性。作为整流元件必须具备下列条件:正向压降小;最大反向电压大;反向电流小;使用寿命长;能充分适应外界工作环境的变化。可见,比较有实用价值的半导体整流元件有硅、锗、硒整流元件。而可控硅整流元件可用在可控电压整流电路中,因篇幅所限不予介绍。

20-1-1 硅整流元件

由图 20-1-1 可见,正向特性曲线的纵坐标是安/平方厘米)。由正向特性可见,在正向电压 U_F 很小时,正向电流 I_F 极小。当电压增大至 0.6~0.8 伏后,电流便开始急剧增大。而且,温度越高,正向压降越小。由反向特性可见,在常温时反向漏电流 I_R 很小,当温度升高时,反向电流增大,而且,当反向电压超过某一允许值时,二极管发生击穿,这时反向电流急剧增大,如果外电路没有电阻,则管子就会因过热而烧毁。不过,参数表中所规定的最高反向峰值工作电压 V_{RM} 是小于反向击穿电压的。

如将许多硅整流二极管串接起来,并给以一定的安全系数,封装在一个管壳内,便成了高压整流元件,称为硅柱或硅堆。



20-1-2 镉整流元件

镉整流元件的特性与硅整流元件的特性存在一定的差别。由图 20-1-2 所示的镉整流管特性可见，其正向电压降比硅二极管小，通常约为 0.2~0.3 伏，也就是说，它的正向损耗较小，并适合作低压整流。正向温度特性与硅管相似，但其最高结温低于 90°C 。镉整流元件的反向工作电压比较低。而且，反向电流也比较大，因

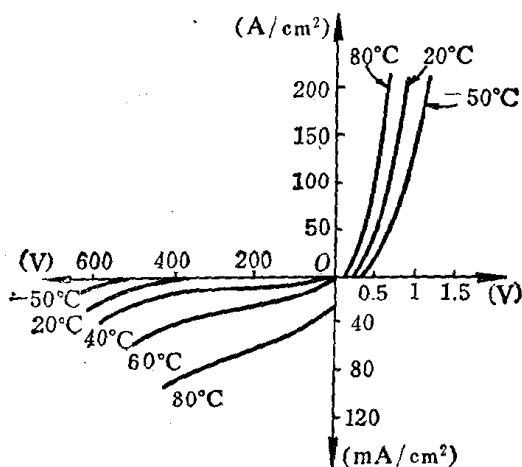


图 20-1-2 镉整流二极管特性

而,反向损耗较大。

一般地讲, 锗整流二极管所允许的最大整流电流比较小。例如, 国产点接触锗二极管 2AP1~2AP28 的整流电流小于 50 毫安, 适合作检波和小电流整流用。而 2AP71~2AP77 虽为面结型二极管, 最高工作频率为 50 千赫, 其整流电流也不超过 300 毫安。

20-1-3 硒整流元件

硒整流元件是一种利用金属和半导体硒之间整流作用的元件, 其构造如图 20-1-3 所示。制备硒整流元件的工艺过程是: 在镀镍的铝基板上蒸发一层薄薄的无定形硒, 经过“晶化”处理后, 无定型硒变成了半导体多晶硒, 再经电形成处理后, 即可获得所需的整流特性。为了防潮, 在硒片上涂有防潮漆。把许多硒片装配在一起就成为柱形整流体, 称为“硒柱”或“硒堆”。

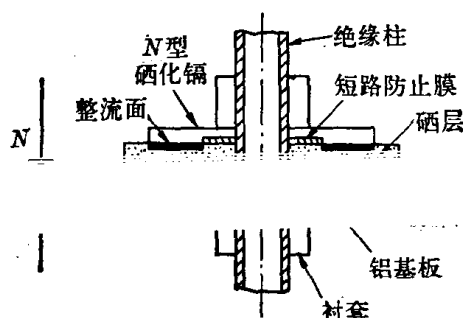


图 20-1-3 硒整流器结构

由图 20-1-4 所示的整流特性可以看出, 其正向压降约为 0.5 伏, 反向电压比较低, 一般每片最大反峰电压约为 26 伏。由于硒整流器散热面积较大, 可允许较大的短时正向过载电流通过。而且, 硒整流元件允许瞬时的反向过电压(浪涌电压)。当硒片上的反向电压超过额定值时, 可使硒片产生局部击穿。但是, 即使发生击穿, 也只有一个小小的熔化点, 这个熔化点变成绝缘物后, 硒片

便恢复了整流特性。因此，有时为了保护硅整流管免受浪涌电压的破坏，常将硒片和硅整流管并接在一起。而硒片瞬时击穿后能很快地恢复性能。

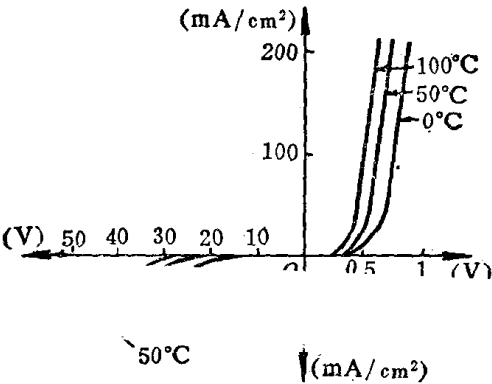


图 20-1-4 硒整流元件特性

硒整流器的缺点是容易老化，即随着使用时间的增加，硒整流元件的正向电阻逐渐增大，而反向电阻却反而减小。因而，其正向和反向的损耗均增大。

§ 20-2 纯电阻负载单相整流电路

整流电路按供电情况有单相和多相之分。对于小功率（1千瓦以下）的整流器通常采用单相整流电路，而中等以上功率整流器大多采用三相供电的多相整流电路；如果按负载性质来分，整流电路可分为纯电阻负载、电容性负载及电感性负载电路；如果按整流元件的接法不同来分，整流电路可分为半波整流、全波整流、桥式整流等。

虽然纯电阻负载整流器在电子设备中很少应用，但本节所导出的电路模式及基本关系对于电抗性负载整流，特别对感性负载整流是极为有用的。

20-2-1 半波整流电路

图 20-2-1 是纯电阻负载单相半波整流电路。整流器包括电源变压器 T_r 、整流二极管 D 及负载电阻 R_L 三部分。对于理想整流电路, 不考虑变压器内阻和整流二极管内阻, 同时认为整流管反向电阻极大。当变压器初级绕组接到电网上后, 变压器次级绕组的感应电势 $\tilde{e}_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ 。式中 E_2 是次级电势的有效值 (或称次级有效值电压), 其峰值为 $E_m = \sqrt{2} E_2$ 。 $\omega = 2\pi f$ 是电网角频率, 通常电网频率 f 为 50 赫。

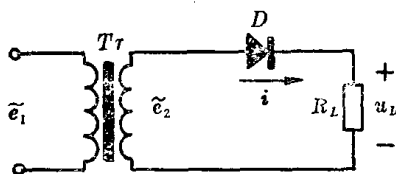


图 20-2-1 单相半波整流电路

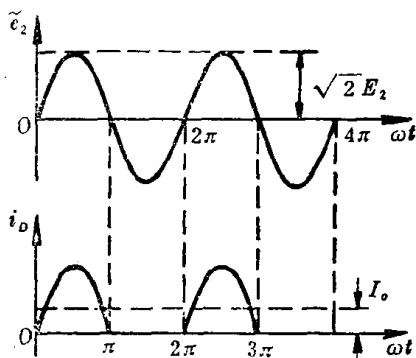


图 20-2-2 半波整流波形

由图 20-2-2 所示整流波形可见, 在电源电压正半周 ($0 < \omega t <$

π) 时, 整流管因反偏而截止, 负载上输出为零, 即 $u_L = 0$ 。

为了分析各参数间的关系, 将负载上电压 u_L 的波形用富氏级数分解可得

$$u_L = \sqrt{2} E_2 \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t \dots \right) \quad (20-2-1)$$

由上式可见, 输出电压包含下列分量:

- (1) 直流成分 $U_o = \sqrt{2} / \pi \cdot E_2 = 0.45 E_2$;
- (2) 基波分量 (频率为 ω) 的振幅 $U_{1m} = 0.7 E_2$;

(3) 高次谐波中只有偶次分量,但其幅度比较小。

整流管中流过的电流和反向电压均不应超过极限值。而计算整流管的允许电流值,实际上是根据其有效值电流通过管子发热的情况而定。对于半波整流电路,通过整流管的有效值(均方根值)电流 I_D 为

$$I_D = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2} E_2 / R_L)^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = 1.57 I_o \quad (20-2-2)$$

式中, $I_o = U_o / R_L$ 是通过负载的输出电流平均值。在半导体手册中

变压器次级绕组中不仅有直流电流,而且还有交流成分。这两部分电流都会使变压器发热,发热情况决定了变压器次级功率(容量)。因此,变压器次级功率(容量)是变压器次级绕组流过的有效值电流和有效值电压之积,可以证明其值为

$$P_2 = E_2 I_2 = 3.49 P_o \quad (20-2-3)$$

式中, $P_o = I_o U_o$ 是直流输出功率。实际上, P_2 并不代表变压器所传递的功率,而是代表变压器次级伏安容量,它由视在功率决定。

为了衡量不同整流方式所用变压器的经济性,可用变压器利用系数来描述。变压器次级利用系数 F_2 为

$$F_2 = P_o / P_2 = 0.287 \quad (20-2-4)$$

可见,为了获得一定的直流输出功率 P_o , 变压器次级功率(容量) P_2 越小,则变压器次级利用系数 F_2 越大,就意味着变压器越经济。

通常,变压器初级功率(容量) P_1 比其次级功率(容量) P_2 来得小,这是因为次级绕组中的交流分量可以感应到初级,而其直流成分是无法感应至初级绕组的。如果变压器初、次级匝数之比 $n = w_1 / w_2 = 1$, 则初级绕组的有效值电流应为

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 - I_o^2}$$

由于初级有效值电流 I_1 小于次级 I_2 ，因而变压器初级功率容量 P_1 小于 P_2 。结果变压器初级利用系数 F_1 通常就高于次级利用系数 F_2 。

为了计量输出电压或电流中的交流成分，可用纹波因数 γ 。定义为

$$\gamma = \frac{\text{负载上交流分量的有效值}}{\text{直流分量}} = \frac{U_{Lac}}{U_o} = \frac{I_{Lac}}{I_o}$$

如已知负载上电流有效值为 $I_L = \sqrt{I_o^2 + I_{Lac}^2}$ ，则交流分量有效值 $I_{Lac} = \sqrt{I_L^2 - I_o^2}$ 。由此可得

$$\gamma = \frac{I_{Lac}}{I_o} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{I_o}\right)^2 - 1} \quad (20-2-5)$$

对于半波整流电路，负载上的电流有效值 I_L 等于通过整流管的有效值 I_D ，将式(20-2-2)代入上式可求得

$$\gamma = \sqrt{1.57^2 - 1} = 1.21.$$

为了便于查阅和比较，将各种电路的整流参数列于表20-1中。

20-2-2 全波整流电路

有一个中心抽头，次级每半个绕组电压均为 $\bar{e}_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ 。在

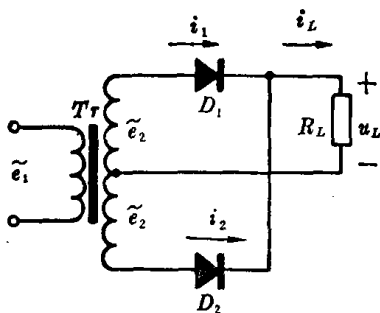


图 20-2-3 单相全波整流电路

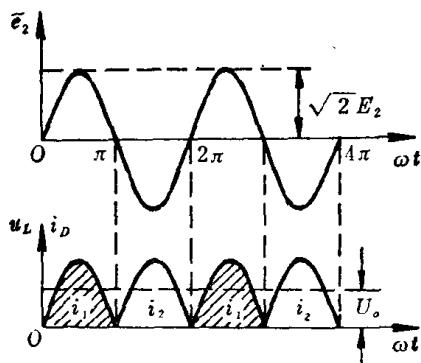


图 20-2-4 单相全波整流波形

$\bar{e}_2$ 为正半周时, 上半绕组电压使整流管 D_1 正偏而导通, 下半绕组电压使 D_2 反偏而截止; 在 $\bar{e}_2$ 为负半周时, D_2 导通而 D_1 截止。在负载上得到如图 20-2-4 所示的波形。由图可见, 负载上的波形是由于 D_1 与 D_2 轮流导电所形成的。因此, 输出的直流分量和偶次谐波均为半波电路的两倍, 而基波分量却抵消了, 使得全波电路的纹波因数 γ 大大减小(即 0.48)。

变压器次级功率(容量)等于两半绕组功率(容量)之和。可以证明

$$P_2 = 2P_1 = 1.75P_0$$

所要求次级视在功率 P_2 下降, 故变压器利用系数反而提高了 ($F_2 = 0.574$)。而且由于变压器次级两半绕组中通过的直流分量方向相反, 使变压器铁心磁路中直流磁化抵消, 变压器不易饱和。

20-2-3 桥式整流电路

图 20-2-5 所示电路是纯电阻负载桥式整流电路。电源变压器次级绕组没有中心抽头, 四个整流管 $D_1 \sim D_4$ 接成电桥形式。在 e_2 正半周时, D_1 与 D_3 导通, D_2 与 D_4 截止; 负半周时, D_2 与 D_4 导通, D_1 与 D_3 截止。负载上得到合成波形与图 20-2-4 所示全波电路波形相同。

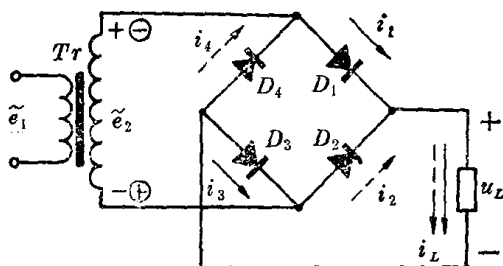


图 20-2-5 单相桥式整流电路

桥式整流的最大特点是变压器次级绕组在整个周期中均有电流通过, 且其电流波形接近正弦波。变压器次级绕组的有效值电流应为

$$I_2 = \sqrt{2} I_D = 1.11 I_o \quad (20-2-7)$$

式中, I_D 是通过每臂整流管的有效值电流。因此, 变压器次级视在功率也比较小, 使桥式电路的变压器利用系数最高 ($F_2 = 0.813$)。而且, 由于变压器次级绕组本来就没有直流分量, 因此, 其初、次级有效值电流相等 (设变压比 $n = 1$), 初级与次级的视在功率 P_1 与 P_2 相同, 变压器利用系数 F_1 与 F_2 相同。

为了比较整流电路的性能, 列表 20-1。表中不仅列出纯电阻单相电路的性能, 还列出了电感负载电路的性能。为了便于比较, 把两种三相电路性能也列入此表。

表 20-1 各种理想整流器的比较 (摘自文献[6], P. 88)

电 路 形 式	单相半波	单相全波	单相桥式	三相半波	三相桥式
电路图	图 20-2-1	图 20-2-3	图 20-2-5	图 20-3-1	图 20-3-3
整流波形	图 20-2-2	图 20-2-4	图 20-2-6	图 20-3-2	图 20-3-4
每相有效值电压 E_2	$2.22U_o$	$1.11U_o$	$1.11U_o$	$0.855U_o$	$0.428U_o$
整流管反峰电压 U_{Rmax}	$3.14U_o$	$3.14U_o$	$1.57U_o$	$2.09U_o$	$1.05U_o$
整流管平均电流 I_{D0}	I_o	$0.5I_o$	$0.5I_o$	$0.33I_o$	$0.33I_o$
通过每个整流管的 峰值电流 I_m	R	$3.14I_o$	$1.57I_o$	$1.57I_o$	$1.21I_o$
	L	/	I_o	I_o	I_o
通过每个整流管的 有效值电流 I_D	R	$1.57I_o$	$0.785I_o$	$0.785I_o$	$0.577I_o$
	L	/	$0.707I_o$	$0.707I_o$	$0.577I_o$
变压器次级每臂 有效值电流 I_2	R	$1.57I_o$	$0.785I_o$	$1.11I_o$	$0.588I_o$
	L	/	$0.707I_o$	I_o	$0.577I_o$