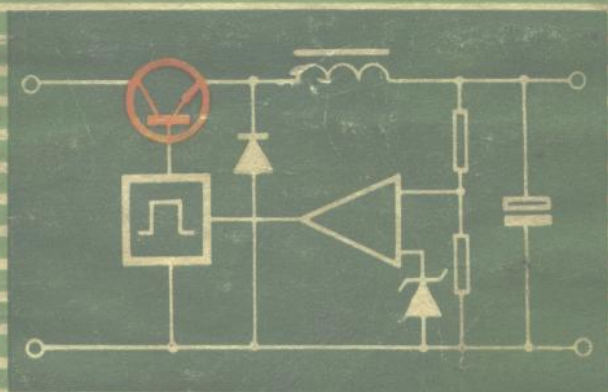


晶体管稳压电源

崔英汉 编著



国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍串联型晶体管稳压电源、晶体管直流开关稳压电源和脉冲宽度调制变流器型直流稳压电源的基本工作原理、设计计算、电路分析、调试和维修。此外，还介绍了稳压电源的各种型式的工程实用电路、保护电路以及主要参数测试等。

本书可供从事电子技术工作的工人和工程技术人员在工作和学习中参考。

晶体管稳压电源

崔英汉 编著

责任编辑 王细李

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北涿中校办印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张57/8 152千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷 印数：00,001—22,550册

统一书号：15034·2653 定价：0.76元

前 言

本书共分六章。第一章为整流及滤波。它给稳压器提供不稳定的直流输入电压，是稳压电源的一个组成部分。这一章主要介绍几种基本形式的整流及滤波电路。第二章为硅稳压管稳压器。这是一种并联型参数稳压器。它作为稳压电源，虽然在应用范围方面有一定的局限性，但在直流稳压电源中，是用作基准电压和辅助电源的，因而是稳压电源中的一个重要部分。第三章为串联型晶体管稳压电源。在六十年代，这类电源就广泛地应用于电子计算机、实验室以及其他电子设备中。它具有精度高、电路结构简单、设计容易、噪音小等优点，目前仍在普遍应用。但这类电源的内部损耗较大，效率低，因此使设备小型化受到限制。第四章为晶体管直流开关稳压电源。这类电源具有效率高、体积小、重量轻等优点。由于宇航技术的发展，对电子设备的体积和重量提出了较高的要求，而电源的体积往往要在整个设备中占相当大的比重，为了解决这一问题，晶体管直流开关稳压电源首先被应用，随着功率开关元件的成批生产，这类电源又有了较大的发展并得到广泛的应用。第五章为脉冲宽度调制变流器型直流稳压电源。这是一种稳压输出的直流变流器。它作为稳压电源有很大的灵活性，可以将较低的直流电压转换成较高的稳定直流电压输出，而不需用高反压晶体三极管。它也可以将较高的直流电压转换成稳定的低电压大电流输出，而不需用大电流的晶体三极管。同时，它也具有体积小、重量轻等优点。除此之外，它还可以使输出电路与输入电路在电气上绝缘，当功率管损坏时，输出端也不会出现高电压，随着高反压晶体管的出现，将可以去掉笨重的输入电源变压器，从而使电源设备的体积和重量大大减小。因此，这种变流器型稳压电源近几年来受到普遍重视。

各章的内容是按照基本工作原理、性能分析、设计计算、实用电路、调整维修的顺序编排的。在实用电路的介绍中，不同类型的电路，都给出了各种量值的电路参数，读者可以在一个很大的范围内直接选用所需要的电路，而不必再进行计算。

第六章介绍稳压电源的过流、过压保护电路以及主要参数的测试方法、测试电路等。

电源变压器部分没有编入本书，仅在附录中列出了“C型铁心电源变压器典型计算参数表”，必要时，可以直接查表计算出所设计变压器的诸参数。

本书在编写过程中，曾得到厂领导、程道志、新疆电视广播厅葛光华、中国计算机技术服务公司董俊清等同志的热情支持和帮助，在此表示衷心感谢。

编 者

目 录

第一章	整流及滤波	1
第一节	整流	1
第二节	滤波器	9
第二章	硅稳压管稳压器	15
第一节	硅稳压管	16
第二节	硅稳压管稳压器	20
第三章	串联型晶体管稳压电源	27
第一节	最简单的串联型稳压电源	27
第二节	具有直流放大器的串联型晶体管稳压电源	29
第三节	串联型晶体管稳压电源的主要单元电路分析	33
第四节	稳压电源的主要参数	47
第五节	串联型稳压电源的性能分析及参数计算	50
第六节	提高串联型晶体管稳压电源性能的措施	56
第七节	如何扩大输出电压调节范围	62
第八节	串联型晶体管稳压电源的设计	68
第九节	实用的串联型晶体管稳压电源	72
第十节	串联型晶体管稳压电源的调试	82
第四章	晶体管直流开关稳压电源	85
第一节	直流开关稳压电源及其工作原理	85
第二节	直流开关稳压电源的单元电路及开关元件	87
第三节	直流开关稳压电源的平滑滤波器	99
第四节	直流开关稳压电源的功率损耗	109
第五节	直流开关稳压电源的实用电路	112
第五章	脉冲宽度调制变流器型直流稳压电源	129
第一节	晶体管脉冲宽度调制变流器型直流稳压电源	129
第二节	磁放大器脉冲宽度调制变流器型直流稳压电源	146

100.33

VI

第六章 稳压电源的保护电路及电参数测试	157
第一节 稳压电源的过流 (或输出短路)、过压保护电路	157
第二节 稳压电源的参数测试	168
附录 C型铁心 50Hz、400Hz 电源变压器的计算	171

8800108

第一章 整流及滤波

一般晶体管电路，需要比较稳定的低压直流电源供电，而电网供给的是电压比较高的交流电，因此，需要把电压较高的交流电转变成电压较低的直流电。要完成这个任务，一般需要用变压器将较高的交流市电变成较低的交流电压，然后利用二极管将交流电压整流成直流电压，再经过电容或电感滤波后，得到比较平滑的直流电压。但是这种直流电压是不稳定的，它随市电波动而波动，因此往往不能满足晶体管电路正常工作的要求。将这种不稳定的直流电压变成具有一定稳定度、波纹电压较小的直流电压是由晶体管直流稳压器完成的。所以，一般晶体管直流稳压电源是由整流器、滤波器、直流稳压器三部分组成的。

第一节 整 流

整流就是利用二极管单向导电的特性，将交流电变为直流电。

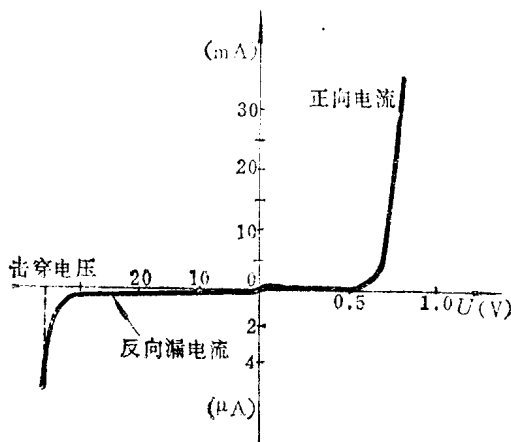


图1-1 二极管的伏安特性

8510033

大家知道, 二极管具有单向导电的特性, 即二极管两端加正向电压时导电, 加反向电压时不导电, 它的伏安特性如图 1-1 所示。

从图 1-1 可以看出, 当二极管两端加有较小的正向电压时, 就有较大电流流过二极管, 而且随正向电压的升高电流急剧上升; 反之, 当二极管两端加反向电压时, 反向电流则很小, 只有当反向电压达到反向击穿电压时, 反向电流才急剧增加。因此, 只要把二极管接入交流回路中, 并保证二极管在反向电压作用下不被击穿, 就可以得到脉动的直流电压。

常用的单相整流电路有: 单相半波整流、单相全波整流、单相桥式整流和倍压整流四种类型。

一、单相半波整流

图 1-2(a) 所示为单相半波整流电路。接通电源后, 变压器次级线圈感应产生交流电压 $\tilde{e}_2$, 假设正半周时, 1 端为正, 2 端为负, 二极管 D 上加的是正向电压, 二极管导通, 电流流过负载 R_L ; 负半周时, 2 端为正, 1 端为负, 二极管加的是反向电压, 二极管 D 截止, 负载 R_L 上就没有电流通过。图 1-2(b) 为其各点电压、电流波形。从图中可以看出, 由于二极管的单向导电作用, 在所供交流电变化一周时, 负载 R_L 上只有半个周期有电流流过, 所以称做半波整流。此时负载上的电压 u_d 是单向脉动电压, 脉动电压的平均值, 就是整流后的输出电压 U_d , 其值为:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \tilde{E}_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \tilde{E}_2 \approx 0.45 \tilde{E}_2 \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $\tilde{E}_2$ ——变压器次级交流电压有效值。

这里我们忽略了整流电路的等效内阻 R_n , 因此, 实际输出电压比计算值略低。

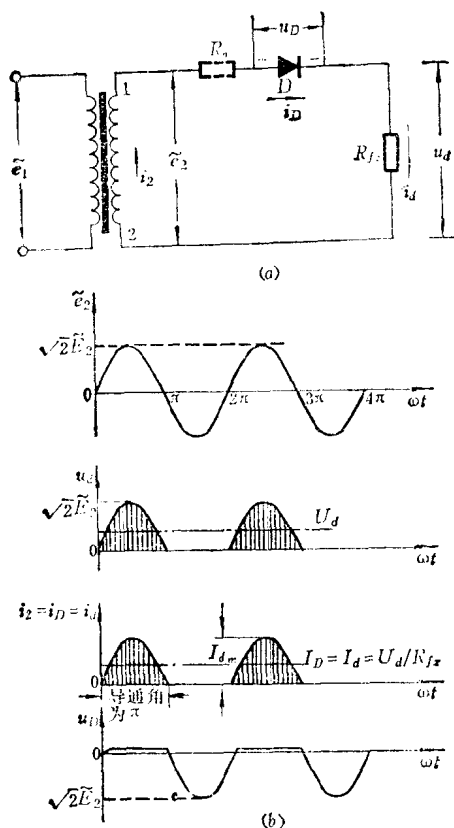


图1-2 单相半波整流电路及波形

(a) 电路图; (b) 波形图。

二、单相全波整流

单相半波整流电路虽然简单,但它没有把交流电压全部利用起来,只利用了半个周期的交流电压,因此,它的效率低、波纹大。为了提高效率、减小波纹电压,在实际应用中广泛采用单相全波整流或单相桥式整流电路。

单相全波整流电路,实际上是由两个半波整流电路合成的。如图 1-3(a) 所示。接通电源后,从次级线圈可得到两个振幅相

等、相位相差 180° 的交流电压 $\tilde{e}_{21}$ 和 $\tilde{e}_{22}$ ，这两个电压轮流被二极管 D_1 和 D_2 整流，在负载 R_{Lz} 上便获得单相全波整流电压。工作过程是：正半周时，二极管 D_1 导通，电流流过 D_1 和 R_{Lz} 回到变压器中心抽头；负半周时，二极管 D_2 导通，电流流过 D_2 和 R_{Lz} 同样回到中心抽头。由此可知，流过负载电阻 R_{Lz} 的两个电流 i_{D1} 和 i_{D2} 的方向是相同的，即在负载电阻 R_{Lz} 上将流过单方向的脉动电流 i_d ，如图 1-3(b) 所示。和半波整流相比，负载电阻 R_{Lz} 上得到的直流电压提高了一倍，即 $U_d = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \tilde{E}_2 \approx 0.9 \tilde{E}_2$ ，故单相全波整流效率比单相半波整流效率高，而且波纹电压也减小了。图 1-3(c) 所示为 R_{Lz} 上的电压波形。

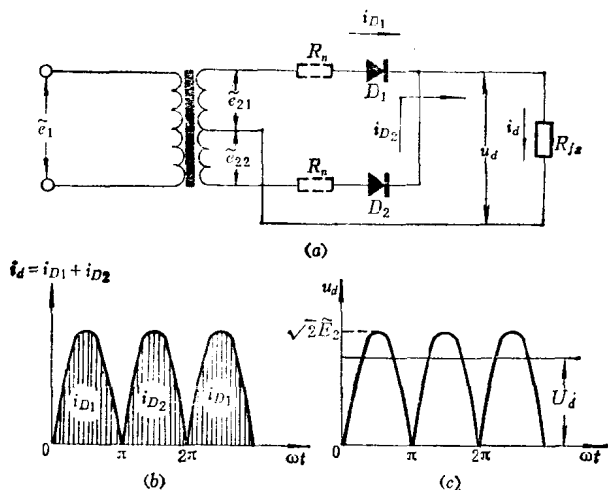


图1-3 全波整流电路及波形

(a) 单相全波整流电路；(b) 负载上的电流波形；(c) 负载上的电压波形。

三、单相桥式整流

图 1-4 所示为单相桥式整流电路，它由四个二极管组成。按其整流原理来说，是属于单相全波整流电路，但其整流元件接成电桥电路，故称单相桥式整流电路。交流电压 $\tilde{e}_2$ 加到电桥的一

个对角线上，而电桥的另一对角线输出直流电压 u_d 。当变压器初级接入电源后，设正半周时，变压器次级线圈 1 端为正，2 端为负，从图 1-4(a) 可以看出，整流二极管 D_1 、 D_3 导通，电流由变压器 1 端通过 D_1 、 R_{fz} ，再经过 D_3 回到变压器的 2 端；在负半周时，变压器 1 端为负，2 端为正，整流二极管 D_2 、 D_4 导通，电流由 2 端经过 D_2 、 R_{fz} ，再通过 D_4 回到 1 端，如图 1-4(b) 所示。负载电阻 R_{fz} 在整个周期内均有一个方向的电流流过。 R_{fz} 上的电压波形和单相全波整流是一样的，不同点是每个二极管所承

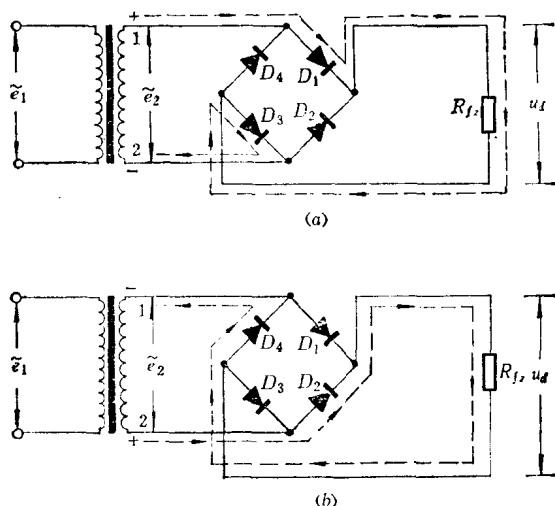


图1-4 桥式整流电路
(a) 正半周；(b) 负半周。

受的反相电压为 $\sqrt{2} \tilde{E}_2$ ，比全波整流时减小一半，但使用的二极管数增加一倍。变压器次级线圈在正半周和负半周都有电流流过，因此，提高了变压器的利用系数，使变压器次级线圈也减少了一半，绕制也简单了。

四、倍压整流

如果只有低电压的交流电源和耐压低的整流元件，而需要高

于整流输入电压若干倍的直流电压时，可以采用倍压整流电路。这种电路适用于输出直流高电压、小电流的小功率整流，如供给显示电路中的显像管的高压等。

倍压整流有半波倍压整流和全波倍压整流，下面以常用的半波双倍压整流为例，来说明其工作原理。

图 1-5 是双倍压整流电路之一，它实现双倍压的方法是用一个周期内的正负半周分别对电容器 C_1 和 C_2 充电，使两个电容器都充电到接近整流输入电压的峰值，然后将 C_1 和 C_2 串联输出，从而在负载上得到两倍的整流输入电压峰值的直流电压。

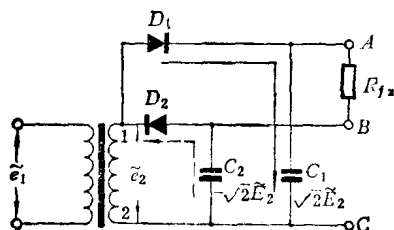


图1-5 双倍压整流电路

此电路的工作原理是：当 $\tilde{e}_2$ 为正半周时，变压器的 1 端为正，2 端为负，二极管 D_1 导通，于是对 C_1 充电， C_1 被充电到接近于 $\tilde{e}_2$ 的峰值 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，并基本保持不变，充电方向如图 1-5 实线所示。在此期间，二极管 D_2 处于截止状态，因此， C_2 不被充电，其两端无电压。在 $\tilde{e}_2$ 负半周时，变压器 2 端为正，1 端为负，二极管 D_2 导通， C_2 也被充电到接近于 $\tilde{e}_2$ 的峰值 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，充电电流的方向如图 1-5 虚线所示。至此，电路产生了三个不同的输出电压，即 AC 间电压为正的 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，BC 间电压为负的 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，而 AB 间电压应为两电容器 C_1 和 C_2 上的电压之和，即变压器次级电压峰值的两倍，所以叫双倍压整流。

在这种电路中，每个二极管承受的最大反向电压是 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，而电容上的电压为 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。

图 1-6 是常用的双倍压整流电路，其工作原理是：当正半周

时, 变压器 1 端为正, 2 端为负, D_1 导通, 电容器 C_1 被充电到接近 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$, 并基本保持不变。在负半周时, 变压器 2 端为正, 1 端为负, 变压器次级电压 $\tilde{e}_2$ 与 C_1 上的电压 U_{C_1} 相加, 通过 D_2 对电容器 C_2 充电, 使 C_2 充到接近于交流电压峰值的两倍, 从而在 C_2 上可获得双倍电压输出。

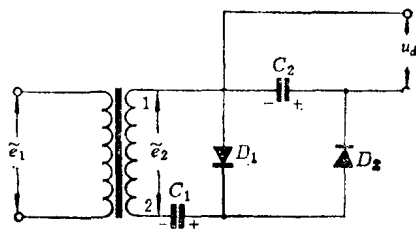


图1-6 常用的双倍压整流电路

在这种电路中, 二极管 D_1 和 D_2 承受的反向电压为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$, C_1 承受的电压为 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$, C_2 承受的电压为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。

同样, 用三个二极管和三个电容器可以做成三倍压整流电路, 如图 1-7 所示, 工作原理与双倍压整流电路类似。在第一个周期内, 二极管 D_1 、 D_2 及电容器 C_1 、 C_2 的工作原理与双倍压整流相同, 二极管 D_3 和电容器 C_3 在此期间不起作用。

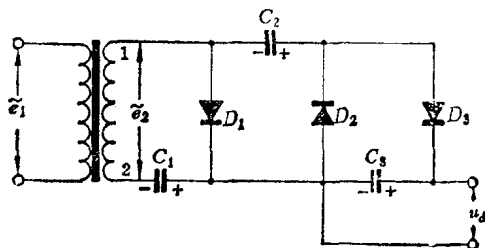


图1-7 三倍压整流电路

在第二个周期的正半周到来时, 变压器次级又是 1 端正, 2 端负, 这时 D_1 又重复上述过程, 同时由于 C_2 已充有 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 的电压, 此电压与变压器次级电压 $\tilde{e}_2$ 相加, 使 D_3 导通, 使 C_3

充电到接近 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，于是在负载上得到的电压为 C_1 和 C_3 上的电压之和，即接近于 $3\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。

需要指出的是， C_1 、 C_2 和 C_3 的充电电压并不是在第二周期的正半周分别充到 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 、 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 和 $3\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 的，而是经过几个周期后， C_3 上的电压才逐渐稳定在 $3\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 左右。

电路中每个整流二极管承受的最大反向电压均为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ， C_1 上承受的电压为 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ， C_2 和 C_3 上承受的电压为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。

依此类推，用 m 个整流二极管和 m 个电容器就可以组成 m 倍压整流电路，如图 1-8 所示，图中除电容器 C_1 外，其它电容器上的电压均为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。因而，每个整流元件的反向电压都是 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。这种电路不仅适用于正弦波，亦适用于对称的矩形波。

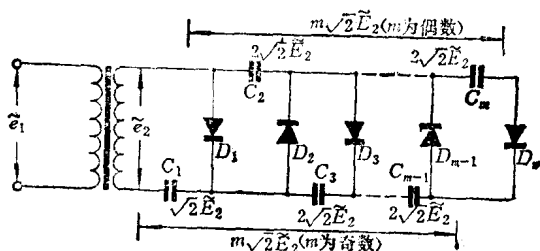


图1-8 m 倍压整流电路

表1-1 几种常用的小功率整流滤波电路特性比较

电路形式	输入交流电压 (有效值)	负载开路时 输出电压 U_d	带负载时的 输出电压 U_d (估计值)	每管的反向 峰值电压	每管通 过的电 流 I_D	使用二 极管的 数目
半波整流电容滤波	$\tilde{E}_2$	$\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	I_d	1
全波整流电容滤波	$\tilde{E}_2 + \tilde{E}_2$	$\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$1.2\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$0.5I_d$	2
桥式整流电容滤波	$\tilde{E}_2$	$\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$1.2\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$0.5I_d$	4
桥式整流电感滤波	$\tilde{E}_2$	$0.9\tilde{E}_2$	$0.9\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$0.5I_d$	4
双倍压整流	$\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	$2\tilde{E}_2$	$2\sqrt{2}\tilde{E}_2$	I_d	2

整流电路选定之后, 流过二极管的平均电流 I_D 和负载电流 I_L 的关系、二极管承受的反向峰值电压和变压器次级电压 $\tilde{E}_2$ 的关系以及输出电压 U_d 和变压器次级电压 $\tilde{E}_2$ 的近似关系就可以知道了 (见表 1-1)。

第二节 滤 波 器

整流后的直流电压, 是脉动的直流电压, 而各种负载对供电电压中所容许含有的交流分量 (波纹电压) 是有一定要求的, 因此, 需要在整流器与负载之间加滤波器进行滤波。滤波器是一种能使直流分量顺利通过, 而阻止交流分量通过的电路, 所以, 整流后的脉动直流电压通过它后, 交流分量就被滤掉了, 从而获得较平滑的直流电压。

滤波器滤掉波纹电压的能力叫做“滤波系数”或“平滑系数”, 以字母 K_{PP} 表示, 其定义是

$$K_{PP} = \frac{\text{平滑滤波器输入端波纹电压基波峰值}}{\text{平滑滤波器输出端波纹电压基波峰值}}$$

一般滤波器是由电阻、电容器、阻流圈等基本元件组成。最常用的滤波器有电容滤波器、 RC 滤波器、 LC 滤波器。一般输出电流在 10 A 以下的稳压电源多采用电容滤波器, 输出电流在 10 A 以上的稳压电源多采用 LC 滤波器, 而 RC 滤波器适合于负载电流较小的整流电路, 因而常用于稳压电源中的辅助电源滤波。

一、电容滤波器

所谓电容滤波器, 就是在整流电路的输出端并联上电容器, 这是一种最简单的滤波器, 如图 1-9 (a) 所示, 它是借助于电容器在电路中的充、放电作用, 使脉动直流电压变得较为平滑。下面以图 1-9 (a) 为例说明其工作原理。

这是一个半波整流的滤波电路, 在正半周, 二极管导电期间, 电源在向负载提供电流的同时, 还向电容器充电。由于二极管导电时电阻很小, 故充电很快, 充电时间常数 $\tau \approx R_d C$, 其中 R_d

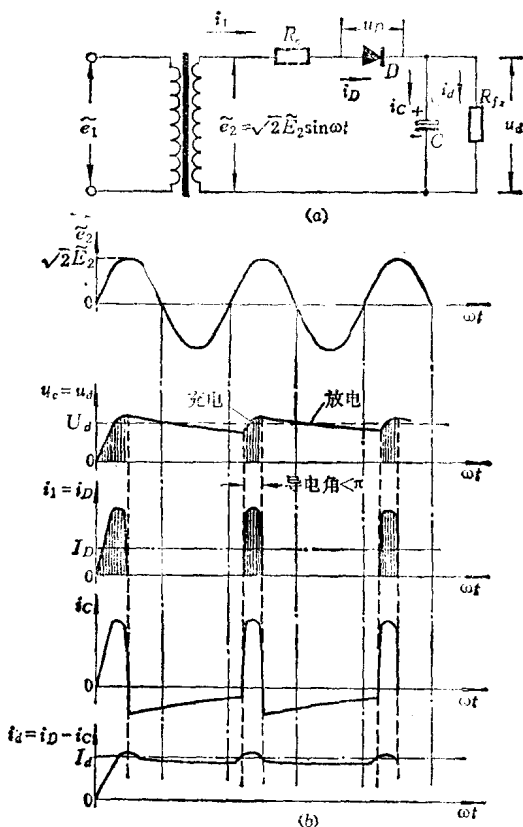


图1-9 半波整流电容滤波电路

(a) 电路图; (b) 波形图。

为整流电路的等效内阻; 电容 C 两端的电压 u_c ($u_c = u_d$) 可一直充到接近交流电压的峰值 $\sqrt{2} \tilde{E}_2$, 当 $\tilde{e}_2$ 达到最大值后开始下降, 这时 $u_c > \tilde{e}_2$, 加在二极管两端的电压反向, 则二极管截止。在此期间, 电容器两端的电压 u_c 将向负载电阻 R_{Lz} 缓慢放电, 所以 R_{Lz} 上仍有电流, 放电时间常数 $\tau = R_{Lz}C$ 。应该指出, τ 必须大于 $T/2$ (T 为交流电源的周期), 否则, R_{Lz} 上的电流将不连续。当正半周再到来并 $\tilde{e}_2 \geq u_c$ 时, $\tilde{e}_2$ 又重新给电容器 C 充电, u_c

又重新升高到接近 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，二极管再次截止，电容再次放电。上述过程作周期性的重复，便得到图 1-9(b) 的波形。从图中可以看出，在接通电源的一个周期后，二极管的总导通角总要小于 π 。当负载开路时，输出电压 $u_d = \sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，因此， $R_{Lz}C$ 值越大，放电速度越慢，输出电压就越接近峰值电压 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，波纹电压也就越小。

从图 1-9(b) 可知，当负载开路时，正半周二极管 D 导通，电源对电容器 C 充电，一直充到电源电压的峰值 $\sqrt{2}\tilde{E}_2$ 。当负半周时，二极管 D 不通，电源电压和电容上的电压全部加在二极管 D 的两端，这时它所承受的电压是最大反向电压，其值为 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，因此，在选择单相半波整流电路中的二极管时，其反向击穿电压应大于 $2\sqrt{2}\tilde{E}_2$ ，否则，二极管就有被击穿的危险。

由图 1-9(b) 还可以看出，加滤波电容后，二极管的导通时间就缩短，因此，通过二极管的电流 i_D ，是周期性的脉冲电流。在数量上，通过负载电阻 R_{Lz} 的直流电流等于流过二极管的平均电流，因此，选择单相半波整流电路中的二极管时，其最大正向工作电流应大于负载上的直流电流 $I_{fz} = U_d/R_{Lz}$ ，这样才能保证整流二极管在大电流的长期冲击下可靠地工作。

这种滤波器的优点是：电路简单、输出电压较高、滤波效能也较高。缺点是：负载能力差、电源启动时的充电电流很大，整流二极管要承受很大的正向浪涌电流。

二、RC 滤波器

RC 滤波器是由电阻和电容组成。图 1-10(a) 就是一个具有 π 型 RC 滤波器的整流电路，电容 C_1 的作用与前面讨论的最简单的电容滤波电路一样，使 C_1 两端得到较平滑的输出电压。这个电压可以看成是直流电压 U_{d1} 和波纹电压 $\tilde{u}_{d1}$ 的叠加，如图 1-10(b) 所示。这两个电压加到 R 和 C_2 的输入端， R 对直流分量和交流分量都有降压作用；但是，电容 C_2 对于交流分量阻抗很小，因此，可以认为 $\tilde{u}_{d1}$ 几乎被 C_2 短路，即交流分量几乎都降在