

第7章

直流稳压电源

[引言]

电子设备中都需要稳定的直流电源,功率较小的直流电源大多采用220 V、50 Hz单相交流供电,它一般由电源变压器、整流、滤波和稳压四部分组成。

电源变压器用来将单相交流电变换为整流电路所需的交流电,一般情况下都为降压变压器,而在开关稳压电路中也可不用电源变压器。

整流电路是利用二极管的单向导电性,将交流电变成脉动的直流电,常用的有半波整流和桥式整流电路。

滤波电路用来滤除整流后单向脉动电压中的交流成分,使之成为平滑的直流电压,常采用电容、电感等储能元件构成。

稳压电路用来当输入交流电压波动或负载和环境温度变化时,维持输出直流电压的稳定。目前广泛采用集成稳压器,集成稳压器种类很多,主要可以分成线性稳压器和开关稳压器两大类。

本章首先讨论整流滤波电路的工作原理,然后介绍线性和开关稳压器的工作原理及其应用,最后介绍直流稳压电源的使用知识及技能训练项目。重点讨论桥式整流电容滤波电路及三端稳压器的应用。

7.1 单相整流滤波电路

小功率直流电源因功率比较小,通常采用单相交流供电,因此,本节只讨论单相整流电路。常用的二极管整流电路有单相半波整流电路和桥式整流电路等。

7.1.1 单相整流电路

一、半波整流电路

单相半波整流电路如图7.1.1(a)所示,图中Tr为电源变压器,用来将市电220 V交流电压变换为整流电路所要求的交流低电压,同时保证直流电源与市电电源有良好的隔离。设V为整流二极管,令它为理想二极管, R_L 为要求直流供电的负载等效电阻。

设变压器二次电压为 $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$ 。当 u_2 为正半周($0 \leq \omega t \leq \pi$)时,由图7.1.1(a)可见,二极管V因正偏而导通,流过二极管的电流 i_D 同时流过负载电阻 R_L ,即 $i_O = i_D$,负载电阻上的电压 $u_O \approx u_2$ 。当 u_2 为负半周($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$)时,二极管因反偏而截止, $i_O \approx 0$,因此,输出电压 $u_O \approx 0$,此时 u_2 全部加在二极管两端,即二极管承受反向电压 $u_D \approx u_2$ 。

u_2 、 u_O 、 i_O 、 u_D 波形示于图7.1.1(b)中,由图可见,负载上得到单方向的脉动电压。由于该电路只在 u_2 的正半周有输出,所以称为半波整流电路。

半波整流电路输出电压的平均值 $U_{O(AV)}$ 为

$$\begin{aligned} U_{O(AV)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_O d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45 U_2 \end{aligned} \quad (7.1.1)$$

流过二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 为

$$I_{D(AV)} = I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (7.1.2)$$

教学课件:
单相整流滤波电路

笔记

二极管承受的反向峰值电压 U_{RM} 为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (7.1.3)$$

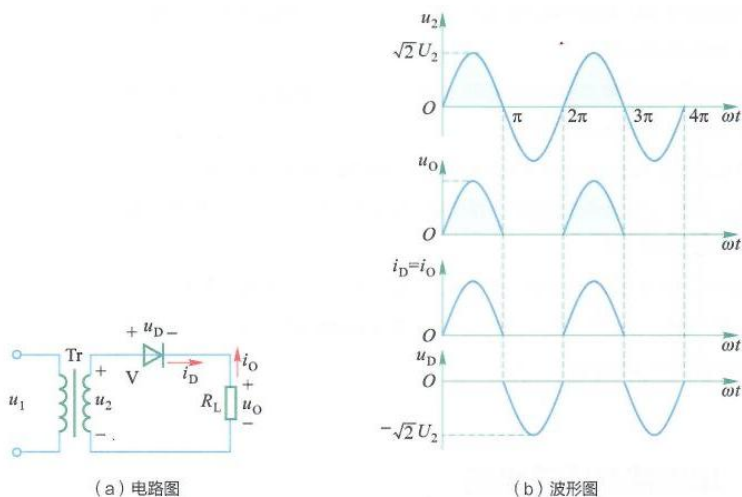


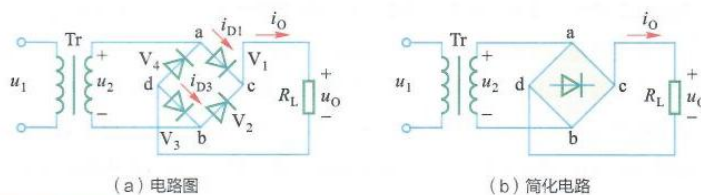
图 7.1.1
半波整流电路及其波形

二、桥式整流电路

1. 工作原理

桥式整流电路如图7.1.2 (a) 所示。图中, $V_1 \sim V_4$ 四只整流二极管接成电桥形式, 故称为桥式整流, 其简化电路如图7.1.2 (b) 所示。

设变压器二次电压 $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$, 波形如图7.1.3 (a) 所示。在 u_2 的正半周, 即 a 点为正, b 点为负时, V_1 、 V_3 承受正向电压而导通, 此时有电流流过 R_L , 电流路径为 $a \rightarrow V_1 \rightarrow R_L \rightarrow V_3 \rightarrow b$, 此时 V_2 、 V_4 因反偏而截止, 负载 R_L 上得到一个半波电压, 如图7.1.3 (b) 中的 $0 \sim \pi$ 段所示。若略去二极管的正向压降, 则 $u_O \approx u_2$ 。



动画: 单相桥式整流电路

图 7.1.2
桥式整流电路

在 u_2 的负半周, 即 a 点为负、b 点为正时, V_1 、 V_3 因反偏而截止, V_2 、 V_4 因正偏而导通, 此时有电流流过 R_L , 电流路径为 $b \rightarrow V_2 \rightarrow R_L \rightarrow V_4 \rightarrow a$ 。这时 R_L 上得到一个与 $0 \sim \pi$ 段相同的半波电压, 如图7.1.3 (b) 中的 $\pi \sim 2\pi$ 段所示, 若略去二极管的正向压降, $u_O \approx -u_2$ 。

由此可见, 在交流电压 u_2 的整个周期始终有同方向的电流流过负载电阻 R_L , 故 R_L 上得到单方向全波脉动的直流电压。可见, 桥式整流电路输出电压为半波整流电路输出电压的两倍, 所以桥式整流电路输出电压平均值为

$$U_{O(AV)} = 2 \times 0.45 U_2 = 0.9 U_2 \quad (7.1.4)$$

桥式整流电路中, 由于每两只二极管只导通半个周期, 故流过每只二极管的平均电流仅

微课: 桥式整流电路

为负载电流的一半, 即

$$I_{D(AV)} = \frac{1}{2} I_{O(AV)} = \frac{1}{2} \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (7.1.5)$$

在 u_2 的正半周, V_1 、 V_3 导通时, 可将它们看成短路, 这样 V_2 、 V_4 就并联在 u_2 上, 其承受的反向峰值电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (7.1.6)$$

同理, V_2 、 V_4 导通时, V_1 、 V_3 截止, 其承受的反向峰值电压也为 $U_{RM} = \sqrt{2} U_2$ 。二极管承受电压的波形如图 7.1.3 (d) 所示。

桥式整流电路与半波整流电路相比, 具有输出电压高、脉动小、电源电压利用率高等优点, 因而广泛用于各种电子设备中。半波整流电路虽结构简单、使用元器件少, 但电源电压利用率低, 输出电压脉动大, 所以只在要求不高的场合使用。

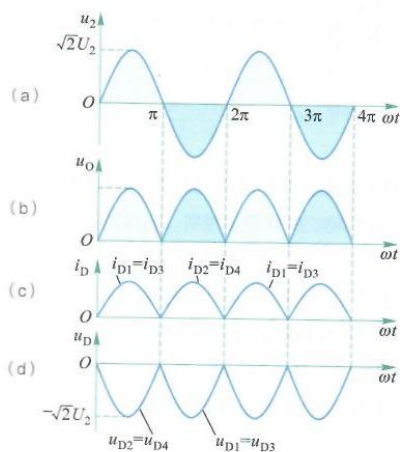


图 7.1.3 桥式整流电路电压、电流波形

2. 整流桥

由于桥式整流电路需采用四只特性相同的二极管连接成电桥, 应用时较为不方便, 而且其中一个二极管的极性接错, 就会导致电路损坏, 为此, 半导体器件制造厂家常将四只二极管接成桥路后, 制作在一起, 封装成一个器件, 称为整流桥, 供选用, 其外形如图 7.1.4 所示。图中, a、b 端接交流输入电压; c、d 为直流输出端, c 为正极性端, d 为负极性端。

选择整流桥时主要考虑其整流电流和工作电压。整流桥最大整流电流有 0.5 A、1 A、1.5 A、2 A、…、20 A 等多种规格; 工作电压 (最大反向电压) 有 25 V、50 V、100 V、200 V、…、1 000 V 等多种规格。

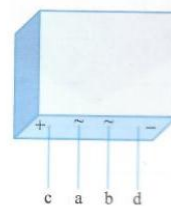


图 7.1.4 整流桥外形图

7.1.2 滤波电路

整流电路将交流电变为脉动直流电, 但其中含有大量的交流成分 (称为纹波电压)。为了获得平滑的直流电压, 应在整流电路的后面加接滤波电路, 以滤去交流成分。



微课：电容滤波电路

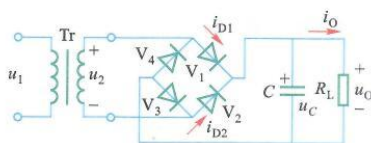


动画：电容滤波电路

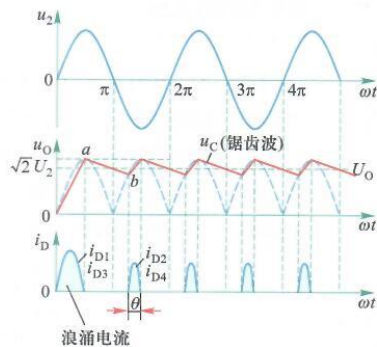
图 7.1.5
桥式整流电容滤波电路及其波形

一、电容滤波电路

图 7.1.5 (a) 所示在桥式整流电路输出端与负载电阻 R_L 并联一个较大电容 C ，构成电容滤波电路。



(a) 电路



(b) 电压、电流波形

设电容两端初始电压为零，并假定在 $t=0$ 时接通电路， u_2 为正半周，当 u_2 由零上升时， V_1 、 V_3 导通， C 被充电，同时电流经 V_1 、 V_3 向负载电阻供电。如果忽略二极管正向电压降和变压器内阻，电容充电时间常数近似为零，因此， $u_O = u_C \approx u_2$ ，在 u_2 达到最大值时， u_C 也达到最大值，见图 7.1.5 (b) 中 a 点，然后 u_2 下降，此时 $u_C > u_2$ ， V_1 、 V_3 截止，电容 C 向负载电阻 R_L 放电，由于放电时间常数 $\tau = R_L C$ ，一般较大，电容电压 u_C 按指数规律缓慢下降。当 u_O (u_C) 下降到图 7.1.5 (b) 中 b 点后， $|u_2| > u_C$ ， V_2 、 V_4 导通，电容 C 再次被充电，输出电压增大，以后重复上述充、放电过程，便可得到图 7.1.5 (b) 所示输出电压波形，它近似为一锯齿波直流电压。

由图 7.1.5 (b) 可见，整流电路接入滤波电容后，不仅使输出电压变得平滑，纹波显著减小，同时输出电压的平均值也增大了。输出电压平均值 $U_{O(AV)}$ 的大小与滤波电容 C 及负载电阻 R_L 的大小有关， C 的容量一定时， R_L 越大， C 的放电时间常数 τ 就越大，其放电速度越慢，输出电压就越平滑， $U_{O(AV)}$ 就越大。当 R_L 开路时， $U_{O(AV)} \approx \sqrt{2} U_2$ 。为了获得良好的滤波效果，一般取

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (7.1.7)$$

式中， T 为输入交流电压的周期。此时输出电压的平均值近似为

$$U_{O(AV)} \approx 1.2 U_2 \quad (7.1.8)$$

在整流电路采用电容滤波后，只有当 $|u_2| > u_C$ 时二极管才导通，故二极管的导通时间缩短，一个周期的导通角 $\theta < \pi$ ，如图 7.1.5 (b) 所示。由于电容 C 充电的瞬时电流很大，形成了浪涌电流，容易损坏二极管，故在选择二极管时，必须留有足够的电流裕量。一般可按 $(2 \sim 3) I_{D(AV)}$ 来选择二极管。

例 7.1.1 单相桥式整流电容滤波电路如图 7.1.5 (a) 所示，交流电源频率 $f=50 \text{ Hz}$ ，负载电阻 $R_L=40 \Omega$ ，要求输出电压 $U_{O(AV)}=20 \text{ V}$ 。试求变压器二次电压有效值 U_2 ，并选择二极管和

笔记

滤波电容。

解：由式(7.1.8)可得

$$U_2 = \frac{U_{O(AV)}}{1.2} = \frac{20 \text{ V}}{1.2} \approx 17 \text{ V}$$

通过二极管的电流平均值为

$$I_{D(AV)} = \frac{1}{2} I_{O(AV)} = \frac{1}{2} \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{20 \text{ V}}{40 \Omega} = 0.25 \text{ A}$$

二极管承受最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 17 \text{ V} \approx 24 \text{ V}$$

因此应选择 $I_F \geq (2 \sim 3) I_{D(AV)} = (0.5 \sim 0.75) \text{ A}$ 、 $U_{RM} > 24 \text{ V}$ 的二极管，查手册可选四只 2CZ55C 二极管（参数： $I_F = 1 \text{ A}$ ， $U_{RM} = 100 \text{ V}$ ）或选用 1 A、100 V 的整流桥。

根据式(7.1.7)，取 $R_L C = 4 \times \frac{T}{2}$ ，因为 $T = \frac{1}{f}$ ，故 $T = \frac{1}{50} \text{ s} = 0.02 \text{ s}$ ，所以

$$C = \frac{4 \times \frac{T}{2}}{R_L} = \frac{4 \times 0.02 \text{ s}}{2 \times 40 \Omega} = 1000 \mu\text{F}$$

可选取 1000 μF 、耐压为 50 V 的电解电容。

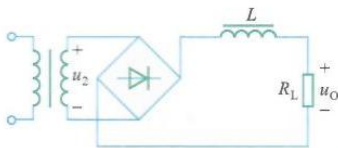
电容滤波电路中，为了平滑输出电压，需要容量很大的电容，但容量过大会影响整流管的寿命。实用中常采用带极性的电解电容作滤波电容，使用中电解电容的正极应接输出电压的正极，负极接输出电压的负极，不能接反，否则电解电容很可能损坏。此外，电容器的耐压应大于整流输出电压的最大值，通常耐压可按实际工作电压的两倍以上来确定。

电容滤波电路输出电压平均值 $U_{O(AV)}$ 会随负载电流的增加（即负载电阻减小）而减小，纹波电压也会随之增大，所以电容滤波适用于负载电流较小或负载电流基本不变的场合。

二、其他形式滤波电路

1. 电感滤波电路

电路如图 7.1.6 所示，电感 L 起着阻止负载电流变化使之趋于平直的作用。从整流电路输出的电压中，其直流量由于电感近似于短路而全部加到负载 R_L 两端，即 $U_{O(AV)} = 0.9 U_2$ 。交流分量由于 L 的感抗远大于负载电阻而大部分降在电感 L 上，负载 R_L 上只有很小的交流电压，达到了滤除交流分量的目的。有时为了进一步减小交流电压，还可以在电感线圈的后面与负载 R_L 并接一个滤波电容。一般电感滤波电路只用于低电压、大电流的场合。



试题库：
单选题、判断题、填空题、计算分析题

图 7.1.6
电感滤波电路

2. π 型 LC 滤波电路

为了进一步减小负载电压中的纹波可采用图 7.1.7 所示 π 型 LC 滤波电路。由于电容 C_1 、 C_2 对交流的容抗很小，而电感 L 对交流阻抗很大，因此，负载 R_L 上的纹波电压很小。若负载

电流较小时,也可用电阻代替电感组成 π 型 RC 滤波电路。由于电阻要消耗功率,所以,此时电源的损耗功率较大,电源效率降低。

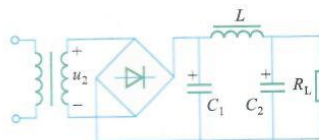


图 7.1.7
 π 型 LC 滤波电路

复习与讨论题

复习与讨论题
分析参阅参考文献
[26]

7.1.1 图7.1.1(a)所示半波整流电路中,已知 $R_L = 100 \Omega$, $u_2 = (10 \sin \omega t) \text{V}$,试求输出电压的平均值 $U_{O(AV)}$ 、流过二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 及二极管承受的反向峰值电压 U_{RM} 的大小。

7.1.2 桥式整流电容滤波电路如图7.1.5(a)所示,已知变压器二次电压有效值 $U_2 = 10 \text{V}$,且 $R_L C \geq (3 \sim 5) T/2$ 。试问:(1)输出电压 $U_{O(AV)}$ 等于多少?(2) R_L 开路时, $U_{O(AV)}$ 等于多少?(3) C 开路时, $U_{O(AV)}$ 等于多少?(4)二极管 V_1 开路时, $U_{O(AV)}$ 将如何变化?

7.1.3 桥式整流电容滤波电路如图7.1.5(a)所示,在电路中出现下列故障,会出现什么现象?(1) R_L 短路;(2) V_1 击穿短路;(3) V_1 极性接反;(4)四只二极管极性都接反。

7.1.4 试说明电容滤波电路的特点。