

直流稳压电源的制作与调试



教学目标

知识目标	技能目标
<ul style="list-style-type: none"> ● 掌握二极管的结构、符号、特性及主要参数。 ● 了解直流稳压电源的基本组成及其主要性能指标。 ● 理解整流电路、滤波电路的组成及工作原理，并能估算输出电压平均值。 ● 了解集成三端稳压器的分类及应用。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 能用万用表对二极管、电容等元件进行检测。 ● 能查阅集成稳压电路的相关资料，并能正确选用。 ● 能对直流稳压电源进行安装与测试。



项目引入

电路工作时需要电源提供能量，电源是电路工作的动力。电源的种类很多，如干电池、蓄电池和太阳电池等。但在日常生活中，大多数电子设备的供电都来自电网提供的交流市电，但这些电子设备的内部电路往往需要几伏至几十伏的稳压直流电，为解决这个问题，需设置专门的电子装置把交流电压转换为稳定的直流电压，这种电子装置称为直流稳压电源。

直流稳压电源主要分为线性稳压电源和开关稳压电源两大类。本项目只涉及小功率线性稳压电源，它的任务是将 200V/50Hz 交流市电转换为幅值稳定的直流电压，这种电源主要由变压、整流、滤波和稳压四个模块组成，如图 1-1 所示，框图的每部分下方都画出了信号经过各模块处理后的波形，这些波形只是为了便于说明各部分的功能，在实际电路中有的波形可能与图中不同。

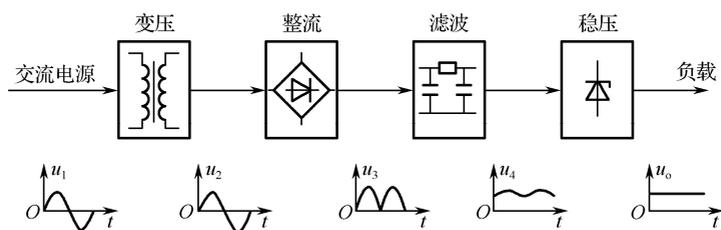


图 1-1 小功率线性稳压电源的框图



直流稳压电源各模块作用如下。

(1) 变压模块。利用工频变压器将电网电压变换为所需的交流电压，一般采用降压变压器来实现。

(2) 整流模块。利用二极管的单向导电性，将交流电变换为单一方向的脉动直流电，常采用二极管直流电路来实现。

(3) 滤波模块。将脉动直流电压中的脉动成分滤除，得到比较平滑的直流电压，常采用电容、电感或其组合电路来实现。

(4) 稳压模块。在电网电压波动和负载变化时，保持直流输出电压的稳定，小功率稳压电源常采用集成三端稳压器来实现。

本项目的主要任务就是按照小功率线性稳压电源的基本组成，采用集成稳压方式制作一个可调直流稳压电源，并进行调试。



相关知识

1.1 半导体基础知识

自然界的物质按导电性能来分，可分为导体、绝缘体和半导体。自然界中常见的铜、铁、铝等金属材料都是良好的导体，而陶瓷、水泥、橡胶等都是良好的绝缘体。半导体是导电能力介于导体与绝缘体之间的一类物质，常用的半导体材料有硅（Si）和锗（Ge）等。

半导体被用来制造电子元器件，是因为它的导电能力在外界某些因素作用下会发生显著的变化。主要体现在以下 3 个方面。

(1) 杂敏特性。半导体的电导率会因加入杂质而发生显著的变化。例如，在室温下，纯硅中加入杂质，其电导率会增加几百倍。各种不同元器件的制作，正是利用掺杂杂质来改变和控制半导体的电导率。

(2) 热敏特性。温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化，人们利用这种热敏效应制作出了热敏元件。但是，热敏效应会使半导体元器件的热稳定性下降，所以应采取有效措施抑制因半导体元器件热敏特性造成的电路不稳定性。

(3) 光敏特性。光照不仅可以改变半导体的电导率，还可以产生电动势，这种现象统称为半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏晶体管、光耦合器和光电池等。

1.1.1 本征半导体和杂质半导体

1. 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。半导体元器件的制造首先要有本征半导体。

(1) 本征半导体的晶体结构。本征半导体是通过复杂的工艺和技术将纯净的半导体制成单晶体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵，称为晶格。由于相邻原子间的距离很小，因此，相邻两个原子的一对最外层电子（即价电子）不但各自围绕自身所属的原子核运动，



而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为共用电子，这样的组合称为共价键结构，如图 1-2 所示。图中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

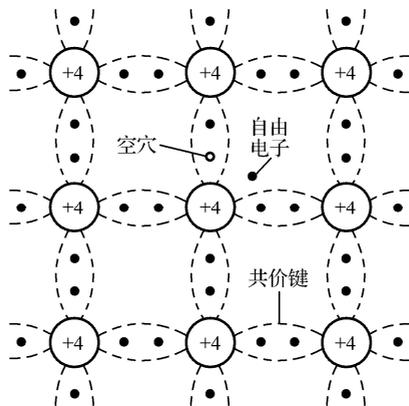


图 1-2 本征半导体共价键结构

(2) 本征半导体中的两种载流子。晶体中的共价键具有很强的结合力，在常温下，本征半导体中有极少数的价电子由于热运动（热激发）获得足够的能量，从而挣脱共价键的束缚变成自由电子。与此同时，失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下一个空位，这个空位称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电（或者说空穴带正电）。由于本征硅（或锗）每产生一个自由电子必然会有一个空穴出现，即电子与空穴成对出现，所以称为电子空穴对，如图 1-2 所示。

当本征半导体处于外界电场作用下时，一方面其内部自由电子逆外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移电子电流；另一方面由于空穴的存在，价电子将按一定的方向依次填补空穴，相当于空穴顺外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移空穴电流。自由电子带负电荷，空穴带正电荷，它们都对形成电流做出贡献，因此本征半导体中有两种载流子，即自由电子和空穴。本征半导体在外电场作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

在常温下，本征半导体内产生的电子空穴对数目是很少的，因此本征半导体的导电能力比较弱。

2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素，便可得到杂质半导体。掺入的杂质元素不同，可分别形成 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) P 型半导体。如果在本征半导体中掺入微量三价元素，如硼（B）、镧（In）等，就形成了 P 型半导体。例如，在硅本征半导体中掺入三价元素硼（B），由于最外层有三个价电子，所以当它们与周围四个硅原子形成共价键时，就产生一个空位，在室温或其他能量激发下，与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位，从而在电子原来的位置上形成带正电的空穴，硼原子本身则因获得电子而被称为受主原子，如图 1-3（a）所示。

在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”。



P 型半导体在外界电场作用下，空穴电流远大于电子电流。P 型半导体是以空穴导电为主的半导体，所以它又被称为空穴型半导体。

(2) N 型半导体。如果在本征半导体中掺入微量五价元素，如磷 (P)、砷 (As) 等，其中杂质元素的四个价电子与周围的四个半导体原子形成共价键，第五个价电子很容易脱离原子核的束缚成为自由电子，杂质元素因提供一个电子而被称之为施主原子，这种半导体叫作 N 型半导体，如图 1-3 (b) 所示。

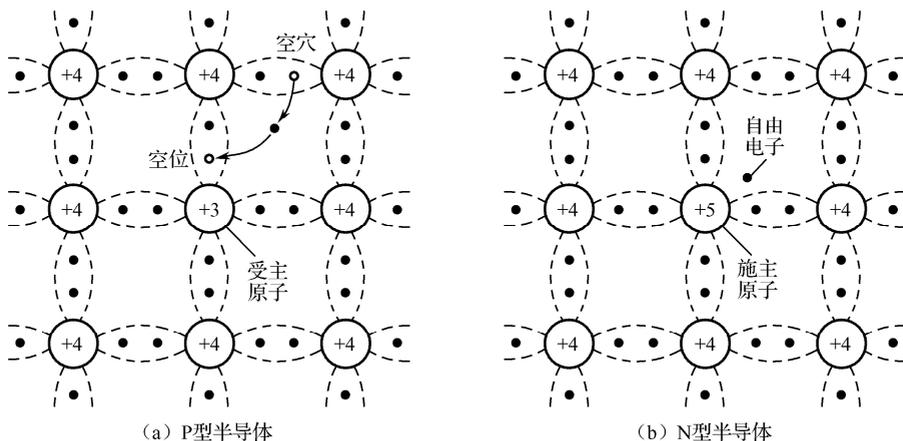


图 1-3 P 型半导体和 N 型半导体示意图

在 N 型半导体中，自由电子数远大于空穴数，所以 N 型半导体的多子是自由电子，少子是空穴。N 型半导体在外界电场作用下，电子电流远大于空穴电流。N 型半导体是以电子导电为主的半导体，所以它又被称为电子型半导体。

半导体中多子的浓度取决于掺入杂质的多少，少子的浓度与温度有密切的关系。

1.1.2 PN 结

单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体，只能作为一个电阻元件。但如果把 P 型半导体和 N 型半导体通过一定方法结合起来就形成了 PN 结。PN 结是构成二极管、三极管、晶闸管及集成运算放大器等众多半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结合后，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差。由于电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散，所以有一些电子要从 N 区向 P 区扩散，同时也有一些空穴从 P 区向 N 区扩散，如图 1-4 所示。

扩散到 P 区的电子与空穴复合，扩散到 N 区的空穴与电子复合，随着扩散的进行，在交界面附近的 P 区中空穴数大量减少，出现了带负电的离子区；而在 N 区一侧因缺少电子，显露出带正电的离子区。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，所以并不参与导电。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷，它们在交界面上形成一个很薄的空间电荷区。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了（或者说耗



(微课视频：PN 结的形成)



尽了), 因此该电荷区又叫耗尽层, 如图 1-5 所示。

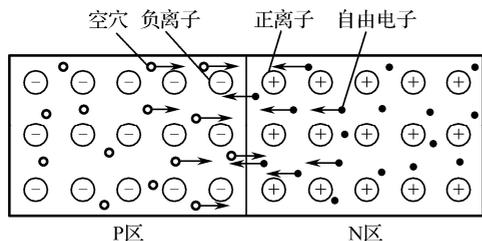


图 1-4 载流子的扩散

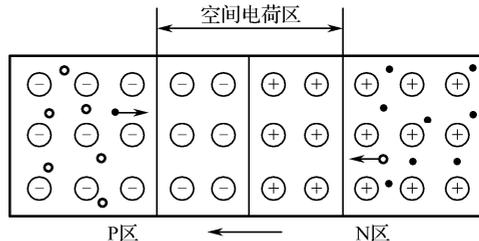


图 1-5 PN 结的形成

在出现了空间电荷区后, 由于正负电荷之间的相互作用, 在空间电荷区中形成了一个电场, 其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。由于这个电场是由载流子扩散运动 (即由内部) 形成的, 故称为内电场。

PN 结的内电场是阻止扩散的, 因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反, 所以空间电荷区又可看作一个阻挡层, 它对多数载流子的扩散有阻挡作用。另外, 根据电场的方向和电子、空穴的带电极性还可以看出, 这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移, 使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移, 漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。当多数载流子扩散和少数载流子漂移达到动态平衡时, 它们的作用大小相等、方向相反、相互抵消, 外部 (宏观) 不显现电流现象。

2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压。如图 1-6 所示, 在 PN 结上外加正向电压 V , 即 V 的正端接 P 区, 负端接 N 区, 这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压, 简称正偏。外加电场与 PN 结的内电场方向相反, 外电场会削弱内电场的作用, 所以 PN 结变窄, 即阻挡层的厚度变薄。这时多子的扩散运动将大于漂移运动, 这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压, 简称正偏。结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定, 在外电路上形成一个流入 P 区的电流, 称为正向电流 I_F 。当外加电压 V 升高, PN 结内电场便进一步减弱, 扩散电流随之增加。在正常工作范围内, PN 结上外加电压只要稍有变化, 便能引起电流的显著变化。这样, 正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

(2) 外加反向电压。如图 1-7 所示, 在 PN 结上外加反向电压 V , 即 V 的正端接 N 型区, 负端接 P 型区, 这个方向的外加电压称为反向电压或反向偏置电压, 简称反偏。外加电场与 PN 结的内电场方向相同, 促进了内电场的作用, 使阻挡层厚度加宽。这样, P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过阻挡层, 因此扩散电流趋近于零。但由于内电场的增加, 使 N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动。PN 结的电流就由起支配地位的漂移电流所决定, 在外电路上就形成了一个流入 N 区的反向电流 I_S 。但由于少数载流子的浓度很低, 所以反向漂移电流很小, 而且少数载流子是由本征激发产生的, 当材料制成后, 其数值取决于温度。在一定温度下, 电压再高, 其值也几乎不变, 所以 PN 结在反向偏置时, 可认为基本上是不导电的, 表现为一个很大的电阻。



(微课视频: 为什么 PN 结具有单向导电性)

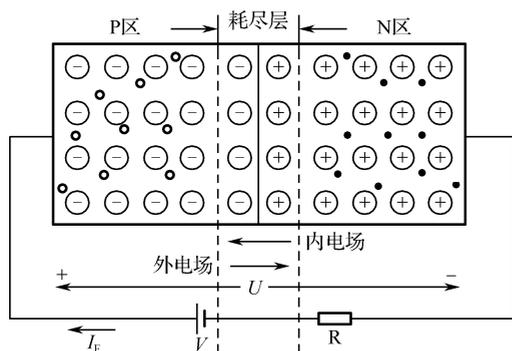


图 1-6 外加正向电压的 PN 结

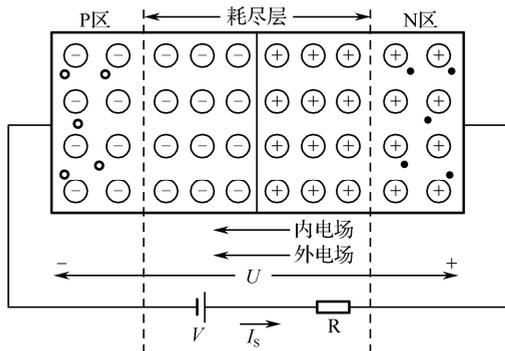


图 1-7 外加反向电压的 PN 结

由此可见，PN 结正向偏置时，正向电阻很小，形成较大的正向电流；PN 结反向偏置时，呈现较大的反向电阻，反向电流很小，这就是 PN 结的单向导电性。PN 结具有单向导电性的关键是其阻挡层可随外加电压而变化。

3. PN 结的反向击穿

当加于 PN 结的反向电压增大到一定数值时，反向电流会突然急剧增大，这种现象称为 PN 结的反向击穿。电流开始剧增时对应的电压称为反向击穿电压。PN 结击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿是由于 PN 结内的少数载流子受强电场的加速作用而获得很大的能量，当它与结内原子碰撞时，把其中的价电子碰撞出来，产生新的电子-空穴对。新的电子-空穴对在强电场的作用下，再去碰撞其他的原子，产生更多的电子-空穴对，如同雪崩一样。雪崩击穿的本质是碰撞电离，易发生在掺杂浓度较低、外加电压较大的情况下。

齐纳击穿易发生在高浓度掺杂的 PN 结内。由于杂质浓度高，故形成的 PN 结很窄，即使外加反向电压不高（5V 以下），结内电场也非常强，它可以把结内的束缚电子从共价键中拉出来引起反向电流的剧增。

在发生以上两种反向击穿时，如果反向电压下降到击穿电压以下，则 PN 结的性能仍能恢复到原来的状态，称之为电击穿。但前提条件是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的散耗功率，超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升，直到过热而烧毁，这种现象就是热击穿。热击穿是不可恢复的，在应用中应尽量避免。但在有些情况下，电击穿则往往被人们所利用（如用于制作稳压管等）。

4. PN 结的电容效应

(1) 势垒电容。PN 结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容称为势垒电容 C_b 。

(2) 扩散电容。PN 结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，其等效电容称为扩散电容 C_d 。



（微课视频：什么是雪崩击穿和齐纳击穿）



（微课视频：什么是 PN 结的电容效应）



PN 结的结电容 C_j 为势垒电容和扩散电容的和, 即

$$C_j = C_b + C_d \quad (1-1)$$

若 PN 结外加电压频率高到一定程度, 则失去单向导电性。

1.2 二极管

1.2.1 二极管的结构和特性

1. 二极管的结构及分类

把一个 PN 结的两端接上电极引线, 外面用金属 (或玻璃、塑料) 管壳封闭起来, 便构成了二极管。P 端引出的电极为阳极 (正极), N 端引出的电极为阴极 (负极)。

二极管按照制造材料可分为硅二极管、锗二极管; 按用途可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管和检波二极管等。

根据构造上的特点和加工工艺的不同, 二极管又可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管 PN 结的接触面积小, 不能通过很大的正向电流和承受较高的反向电压, 但它的高频性能好, 工作频率可达 100MHz 以上, 适于在高频检波电路和小功率电路中使用。面接触型二极管 PN 结的接触面积大, 可以通过较大电流, 能承受较高的反向电压, 适于在整流电路中使用。平面型二极管是采用扩散法制成的, 适用于大功率开关管, 广泛应用于数字电路中。图 1-8 (a)、1-8 (b)、1-8 (c) 所示是二极管的结构示意图, 二极管的电路符号如图 1-8 (d) 所示。

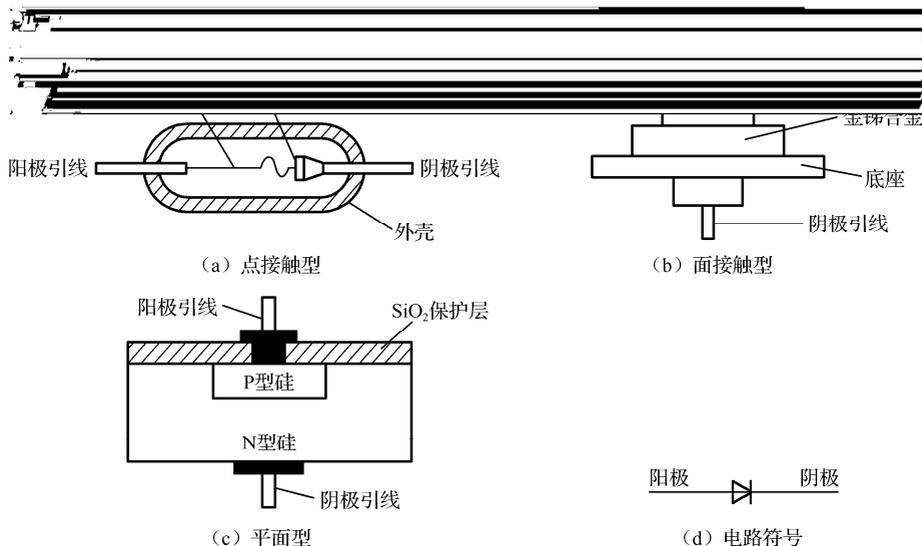


图 1-8 二极管的结构示意图及符号



2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性就是流过二极管的电流 I_D 与加在二极管两端的电压 U_D 之间的关系曲线。它可通过测试电路（见图 1-9）测试出来，即分别在二极管两端加上正向电压和反向电压，改变电压数值的大小，同时再分别测量流过二极管的电流值，就可得到二极管的伏安特性曲线。图 1-10 所示为硅和锗二极管的伏安特性曲线。

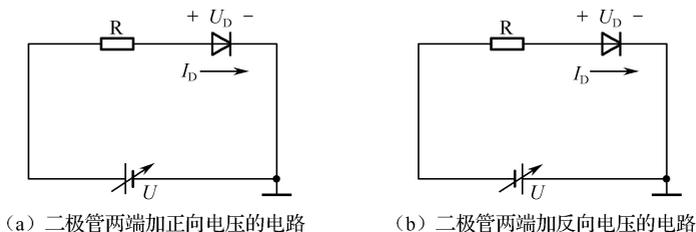


图 1-9 二极管的伏安特性测试电路

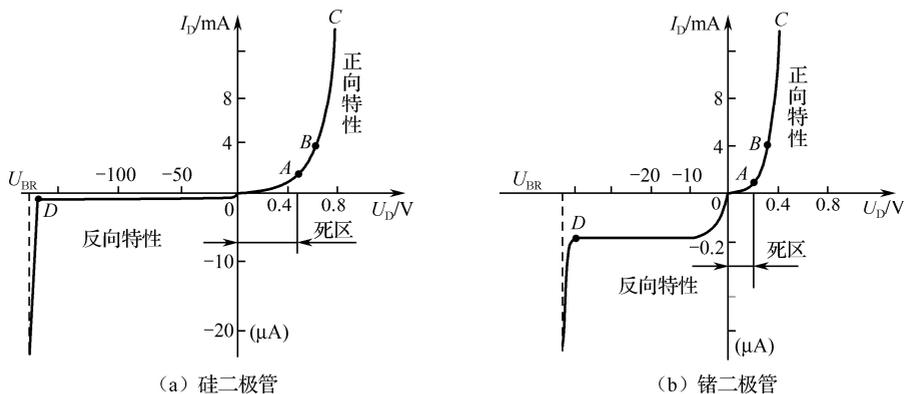


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

(1) 正向特性。正向特性是指二极管加正向电压时的电流-电压关系。

死区：图 1-10 中的 0~A 段，当外加正向电压较小时，正向电流非常小，近似为零。在这个区域内二极管实际上还没有导通，二极管呈现的电阻很大，故该区域常称为“死区”。硅二极管的死区开启电压约为 0.5V，锗二极管的死区开启电压约为 0.1V。

正向导通区：过 A 点后，当外加正向电压超过死区电压后，正向电流开始增加，但电流与电压不成比例。当正向电压超过 B 点，即大于 0.6V 以后（对于锗二极管，此值约为 0.2V），正向电流随正向电压增加而急速增大，基本上是直线关系。这时二极管呈现的电阻很小，可以认为二极管处于充分导通状态。在该区域内，硅二极管的导通电压降约为 0.7V，锗二极管的导通电压降约为 0.3V。但是流过二极管的正向电流需要加以限制，不能超过规定值，否则会使 PN 结过热而烧坏二极管。

(2) 反向特性。反向特性是指二极管加反向电压时的电流-电压关系。

反向截止区：图 1-10 中 0~D 段，在所加反向电压下，反向电流的值很小，且几乎不随电压的增加而增大，此电流被叫作反向饱和电流。此时二极管呈现很高的电阻，近似处于截



止状态。硅二极管的反向电流比锗二极管的反向电流小，约在 $1\mu\text{A}$ 以下，锗二极管的反向电流达几十微安甚至几毫安以上。这也是现在硅二极管应用比较多的原因之一。

反向击穿区：过 D 点以后，反向电压稍有增大，反向电流就急剧增大，这种现象称为反向击穿。二极管发生反向击穿时所加的电压叫作反向击穿电压。

综上所述，二极管的伏安特性是非线性的，因此二极管是一种非线性器件。在外加电压取不同值时，就可以使二极管工作在不同的区域，从而充分发挥二极管的作用。

3. 二极管的温度特性

物质热运动的强度随温度的升高而增大，因而温度升高对二极管特性的影响是不容忽视的。图 1-11 所示为温度对二极管伏安特性的影响。



(微课视频：二极管的温度特性)

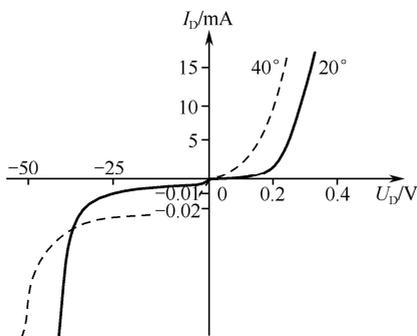


图 1-11 温度对二极管伏安特性的影响

实验发现，随着温度升高，二极管的正向压降将减小，即二极管正向压降有负的温度系数，约为 $-2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ；二极管的反向饱和电流随温度的升高而增加，温度每升高 10°C ，反向电流约增加一倍，二极管的反向击穿电压随着温度升高而降低。

二极管的温度特性对电路的稳定是不利的，在实际应用中要加以抑制。但人们可以利用二极管的温度特性对温度的变化进行检测，从而实现自动对温度的自动控制。

4. 二极管的伏安特性表达式

理论和实验均可证明，二极管的伏安特性可近似表示为

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-2)$$

式中， i_D 为流过二极管的电流； I_S 为反向饱和电流； u_D 为外加电压； U_T 为温度的电压当量，当 $T = 330\text{K}$ 时， $U_T = 26\text{mV}$ ； e 为自然对数的底， $e \approx 2.71828$ 。

1.2.2 二极管的主要参数

器件参数是对器件性能的定量描述，是选择器件的依据。二极管的主要参数如下。

(1) 最大整流电流 I_{FM} 。它是二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流。其大小取决于 PN 结的面积、材料和散热条件。一般二极管的 I_{FM} 值可达几毫安，大功率二极管的 I_{FM}



可达几安培。工作电流不要超过 I_{FM} 值，否则在长时间工作情况下，二极管将因热击穿而烧毁。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是保证二极管不被反向击穿而规定的最大反向电压。一般手册中给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半，以确保二极管安全运行。例如，2AP1 最高反向工作电压规定为 20V，而反向击穿电压实际上大于 40V。

(3) 反向饱和电流 I_S 。它是二极管未击穿时的反向电流值。 I_S 越小，二极管的单向导电性越好。实际应用时应注意温度对 I_S 的影响。

(4) 最大功耗 P_M 。它是保证二极管安全工作所允许的最大功率损耗。通常大功率二极管要加散热片。

(5) 直流电阻 R_D 。它是二极管伏安特性曲线上工作点所对应的直流电压与直流电流之比，即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-3)$$

显然，工作点不同，其直流电阻值就不同。器件的参数随工作电压和电流的变化而变化，这种现象是非线性器件特有的性质。 R_D 在工程计算中用处不大，但可用来说明二极管单向导电性的好坏。平时用万用表欧姆挡测量出的二极管电阻就是直流电阻 R_D 。一般二极管的正向直流电阻为几十至几百欧姆，反向直流电阻为几千至几百千欧姆。



(微课视频：什么是二极管的交流电阻)

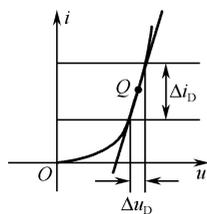


图 1-12 交流电阻 r_d 的几何意义

(6) 交流电阻 r_d 。二极管在小信号工作情况下，需要用到交流电阻这一参数。如图 1-12 所示，交流电阻 r_d 的定义是：二极管伏安特性曲线工作点 Q 附近电压的变化量与相应的电流变化量之比，即

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{i_D=I_Q}$$

r_d 的数值是随工作点电流的增大而减小的，通常正向交流电阻 r_d 为几欧姆到几十欧姆。

r_d 的数值还可以从二极管的伏安特性表达式导出，即

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \left. \frac{du_D}{di_D} \right|_{i_D=I_Q} = \left. \frac{du_D}{d[I_S(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)]} \right|_{i_D=I_Q} \approx \left. \frac{U_T}{I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}} \right|_{i_D=I_Q} \approx \frac{U_T}{I_Q} \quad (1-4)$$

(当 $T = 300K$ 时, $U_T = 26mV$)

例如，当 Q 点 $I_Q = 2mA$ 时， $r_d = 13\Omega$ 。

(7) 最高工作频率 f_M 。PN 结具有电容效应，它的存在限制了二极管的工作频率。如果通过二极管的信号频率超过管子的最高工作频率，则结电容的容抗变小，高频电流将直接从结电容通过，二极管的单向导电性变差。



1.2.3 二极管电路分析方法

由二极管组成的电路是非线性电路，它的分析方法有图解分析法和模型分析法。在工程中，通常采用模型分析法。它是在特定的条件下，将非线性的二极管伏安特性分段线性化处理，从而可以用由某些线性元器件组成的电路（模型）来近似替代二极管，把非线性的二极管电路转化为线性电路来求解。常用的二极管等效电路有以下两种模型。

1. 理想模型

理想模型将二极管看作一个开关。加正向电压时导通，即开关闭合，二极管两端的电压 $u_D = 0$ ；加反向电压时截止，即开关断开，流过二极管的电流 $i_D = 0$ 。二极管的理想模型如图 1-13 所示。当二极管正向电压和正向电阻与外接电路的电压和电阻相比均可忽略时，可采用该模型。

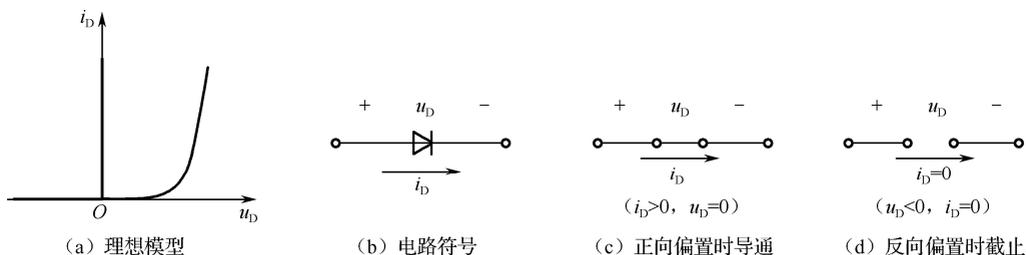


图 1-13 二极管的理想模型

2. 恒压降模型

恒压降模型将二极管看作理想二极管和一个恒压源的串联组合，恒压源的电压 U_D 为二极管的导通电压（该值与二极管的材料有关，若是硅二极管则 $U_D = 0.7$ ，若是锗二极管则 $U_D = 0.2$ ）。二极管的恒压降模型如图 1-14 所示。通常在二极管的正向压降与外加电压相比不能忽略时使用这种模型。

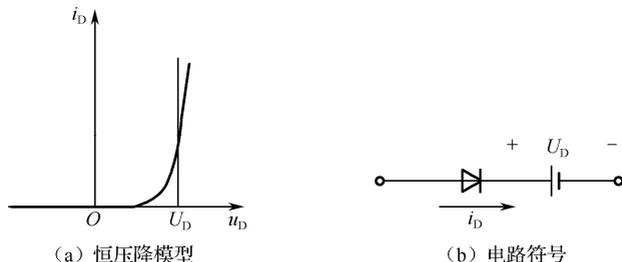


图 1-14 二极管的恒压降模型

【例 1-1】 二极管电路如图 1-15 所示，二极管为硅管，试分别用二极管的理想模型、恒压降模型计算回路中的电流 I_D 和输出电压 U_O 。

解： 首先要判断二极管 VD 是导通还是截止。为此，可假定移去二极管 VD，计算连接二极管两端处的电位 U_a 和 U_b 。由图 1-15 可知



$$U_a = -12\text{V}, U_b = -16\text{V}$$

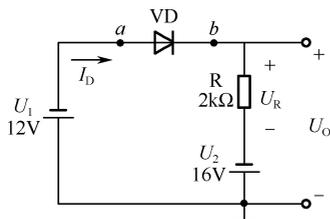


图 1-15 例 1-1 的电路图

(微课视频: 二极管电路分析方法(例 1-1))

因为 $U_a > U_b$, 且 $U_a - U_b > 0.5\text{V}$, 故在理想模型和恒压降模型中, 二极管 VD 均导通。

(1) 用理想模型计算。由于二极管 VD 导通, 故其管压降 $u_D = 0$, 其等效电路如图 1-16

(a) 所示。所以

$$I_D = \frac{U_R}{R} = \frac{-U_1 + U_2}{R} = \frac{-12 + 16}{2} = 2 \text{ (mA)}$$

$$U_O = -U_1 = -12\text{V}$$

(2) 用恒压降模型计算。由于二极管 VD 导通, 故将其等效为电压值为 0.7V 的恒压源, 等效电路如图 1-16 (b) 所示。所以

$$I_D = \frac{U_R}{R} = \frac{-U_1 + U_2 - U_D}{R} = \frac{-12 + 16 - 0.7}{2} = 1.65 \text{ (mA)}$$

$$U_O = I_D R - U_2 = 1.65 \times 2 - 16 = -12.7 \text{ (V)}$$

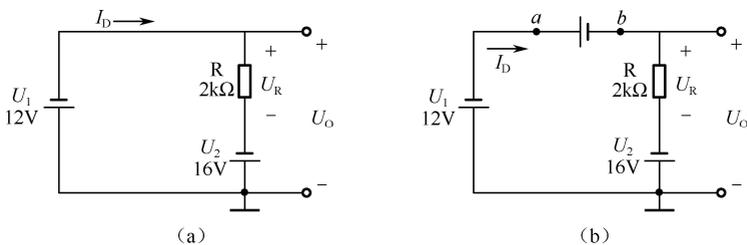


图 1-16 例 1-1 的等效电路图

【例 1-2】 电路如图 1-17 所示, 试分别计算如下两种情况下输出端 O 的电位。

(1) 输入端 A 的电位为 $U_A = 3.6\text{V}$, B 的电位为 $U_B = 3.6\text{V}$;

(2) 输入端 A 的电位为 $U_A = 0\text{V}$, B 的电位为 $U_B = 3.6\text{V}$ 。

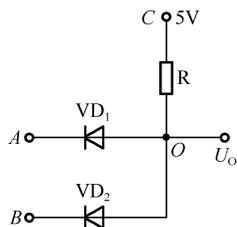


图 1-17 例 1-2 的电路图

解: (1) 当 $U_A = 3.6\text{V}$ 、 $U_B = 3.6\text{V}$ 时, VD_1 、 VD_2 均导通, 则

$$U_O \approx 3.6\text{V}$$

(2) 当 $U_A = 0\text{V}$ 、 $U_B = 3.6\text{V}$ 时, 因为 A 端的电位比 B 端电位低, 所以 VD_1 优先导通, 则

$$U_O \approx 0\text{V}$$

当 VD_1 导通后, VD_2 上承受反向电压而截止。

当二极管正向导通时, 正向压降很小, 可以忽略不计, 所以可以强制使其阳极电位与阴极电位基本相等, 这种作用称为二极管的



钳位作用。当二极管加反向电压时，二极管截止，相当于断路，阳极和阴极被隔离，称为二极管的隔离作用。在例 1-2(1) 中， VD_1 、 VD_2 均起钳位作用，把输出端 O 的电位钳制在 $3.6V$ ；在例 1-2(2) 中， VD_1 起钳位作用，把输出端 O 的电位钳制在 $0V$ ， VD_2 起隔离作用，把输入端 B 和输出端 O 隔离开。

【例 1-3】 在图 1-18 所示的电路中， $U = 5V$ ， $u_i = 10\sin\omega tV$ （见图 1-19 (a)）， VD 为理想二极管，试画出输出电压 u_o 的波形。

解：分析 u_i 和 $5V$ 电源共同作用下，在哪个时间区段上 VD 正向导通，在哪个时间区段上 VD 反向截止，并在等效电路中求出 u_o 的波形。

(1) 在 u_i 正半周，且 $u_i < 5V$ 时， VD 的正极经 R 接 u_i ，其负极电源为 U 。由于 $u_i < 5V$ ，故 VD 反向偏置，理想二极管 VD 可视为开路。

此时， $u_o = u_i$ ，输出电压波形为图 1-19 (b) 中的 $0a$ 段和 bc 段，波形与输入电压 u_i 波形是一致的。

(2) 在 u_i 正半周，当 $u_i > 5V$ 时。此时 VD 正向偏置，理想二极管 VD 可视为短路。

此时， $u_o = 5V$ ，输出电压波形位于图 1-19 (b) 的 ab 段，平行于横轴。

(3) 在 u_i 负半周，此时 VD 反向偏置，理想二极管 VD 可视为开路。此时， $u_o = u_i$ ，即 u_o 的波形与 u_i 的波形是一致的。

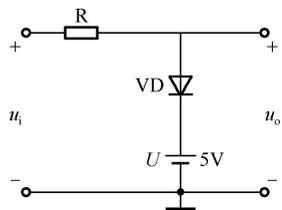


图 1-18 例 1-3 的电路图

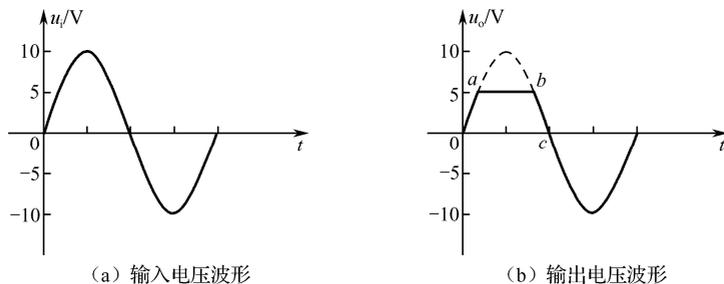


图 1-19 输入电压与输出电压波形

1.2.4 特殊的二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管。在反向击穿区，稳压二极管电流变化很大而电压基本不变，利用这一特性可实现电压的稳定。由于它工作在反向击穿区的电击穿区，所以在规定的电流范围内使用时，不会形成破坏性的击穿。稳压二极管的伏安特性及符号如图 1-20 所示。

2. 发光二极管

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是一种光发射器件，能把电能直接转化成光能，



它是由镓 (Ga)、砷 (As)、磷 (P) 等元素的化合物制成的。由这些材料构成的 PN 结加上正向电压时, 就会发出光来, 光的颜色主要取决于制造所用的材料, 如砷化镓发出红色光、磷化镓发出绿色光等。目前市场上发光二极管的颜色有红、橙、黄、绿、蓝五种, 其外形有圆形、长方形等。如图 1-21 (a) 所示是发光二极管的电路符号。

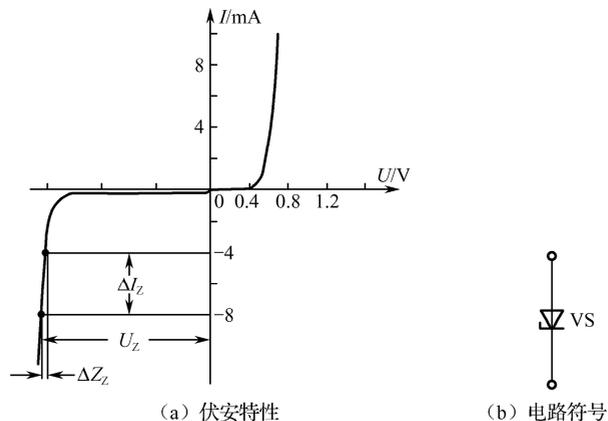


图 1-20 稳压二极管的伏安特性及电路符号

发光二极管工作在正偏状态, 也具有单向导电性。它的导通电压比普通二极管大, 一般为 $1.7 \sim 2.4V$, 工作电流一般为 $5 \sim 20mA$ 。应用时, 加上正向电压, 并接入相应的限流电阻即可。发光强度基本上与电流大小呈线性关系。

发光二极管用途广泛, 常用作微型计算机、电视机、音响设备、仪器仪表中的电源和信号的指示器, 也可做成数字形状, 用于显示数字。七段 LED 数码管就是用七个发光二极管组成一个发光显示单元, 可以显示数字 (0~9)。将七个发光二极管的负极接在一起, 就是共阴极数码管; 将七个发光二极管的正极接在一起, 就是共阳极数码管。市场上有各种型号的发光二极管产品出售。发光二极管也可以组成字母、汉字和其他符号, 用于广告显示。它具有体积小、省电、工作电压低、抗冲击振动、寿命长、单色性好及相应速度快等优点。

3. 光敏二极管

光敏二极管是一种光接收器件, 其 PN 结工作在反偏状态。如图 1-21 (b) 所示为光敏二极管的电路符号。

光敏二极管在管壳上有一个玻璃窗口以便于接受光照, 它的反向电流随着光照强度的增加而上升。

光敏二极管作为光电器件, 广泛应用于光的测量和光电自动控制系统。如光纤通信中的光接收机、电视机和家庭音响的遥控接收。另外, 大面积的光敏二极管可用作能源, 即光电池, 光能源是很有发展前途的绿色能源。

4. 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结的电容效应工作的, 它工作于反向偏置状态, 它的电容量与反偏电压大小有关。改变变容二极管的直流反偏电压, 就可以改变其电容量。如图 1-21 (c) 所示



为变容二极管的电路符号。



图 1-21 发光二极管、光敏二极管和变容二极管的电路符号

变容二极管被广泛应用于谐振回路中。例如，在电视机中就使用它作为调谐回路的可变电容器来实现电视频道的选择。在高频电路中，变容二极管作为变频器的核心器件，是信号发射机中不可缺少的器件。

1.3 单相整流电路

整流电路是构成线性稳压电源最重要的环节，它利用二极管的单向导电性，将正负交替的正弦交流电压变成单方向的脉动电压。单相整流电路有半波整流、全波整流和桥式整流电路等。

1.3.1 单相半波整流电路

1. 电路的组成和工作原理

如图 1-22 (a) 所示是单相半波整流电路，变压器 T 将电网的正弦交流电 u_1 变成 u_2 ，设

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (1-5)$$

在变压器二次电压 u_2 的正半周期，二极管 VD 正偏导通，电流经过二极管流向负载，在负载电阻 R_L 上得到一个极性为上正、下负的电压，即 $u_o = u_2$ （忽略管压降）；在 u_2 的负半周期内，二极管反偏截止，负载上几乎没有电流流过，即 $u_o = 0$ 。所以负载上得到了单方向的直流脉动电压，负载中的电流也是直流脉动电流。半波整流的波形如图 1-22 (b) 所示。

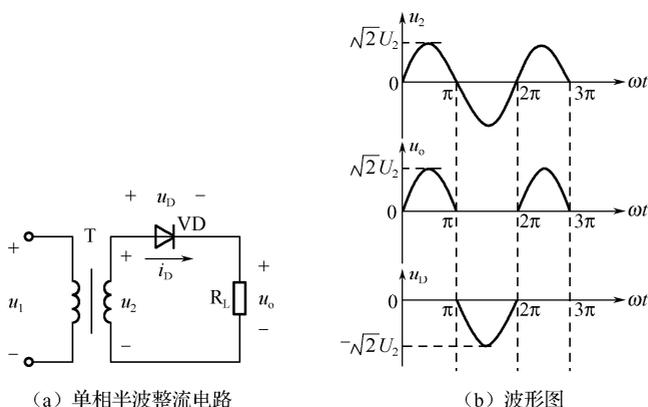


图 1-22 单相半波整流电路及其波形图



2. 负载上平均电压和电流的估算

在半波整流情况下，负载两端的平均电压为输出电压的瞬时值在一个周期内的平均值，即

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.45U_2 \quad (1-6)$$

负载电流的平均值为

$$I_o = \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (1-7)$$

整流输出电压的脉动因数定义为输出电压的基波最大值 U_{om} 与输出电压平均值 U_o 之比，用字母 S 表示。半波整流电路的脉动因数 S 为

$$S = \frac{U_{om}}{U_o} = \frac{\sqrt{2}U_2}{0.45U_2} = \frac{\sqrt{2}}{0.45} \approx 3.14 \quad (1-8)$$

3. 二极管的选择

理想情况下，二极管的参数选择主要由流过二极管的电流平均值 I_F 和它在电路中所承受的最高反向电压 U_{RM} 来确定。而实际情况下，电网电压有 20% 的正负波动，即电源变压器一次电压值为 198~242V，因此，二极管的参数 I_F 和 U_{RM} 应留有 20% 的余地。

(1) 最大正向平均电流 I_F 的参数选择。在半波整流电路中，二极管的电流任何时候都等于输出电流，故二极管的最大正向平均电流 I_F 取值范围为

$$I_F \geq 1.2I_o = 1.2 \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (1-9)$$

(2) 高反向电压 U_{RM} 的参数选择。如图 1-22 (b) 所示，在半波整流电路中，二极管的最大反向电压就是变压器二次电压的最大值 $\sqrt{2}U_2$ ，故二极管的最高反向电压 U_{RM} 取值范围为

$$U_{RM} \geq 1.2\sqrt{2}U_2 \quad (1-10)$$

4. 半波整流电路的特点

半波整流电路的特点是电路简单、使用元器件少、整流效率低、输出脉动大。由于上述原因，半波整流电路只用在一些对输出电压要求不高，输出电流较小且对电压平滑程度要求不高的场合。

1.3.2 桥式整流电路



1. 电路的组成和工作原理

(微课视频：桥式整流)

为了克服半波整流电路的缺点，常采用桥式整流电路，如图 1-23 电路的组成和工作原理所示。桥式整流电路中的四只二极管可以是四只分立的二极管，也可以是一个内部装有四只二极管的桥式整流器（桥堆）。

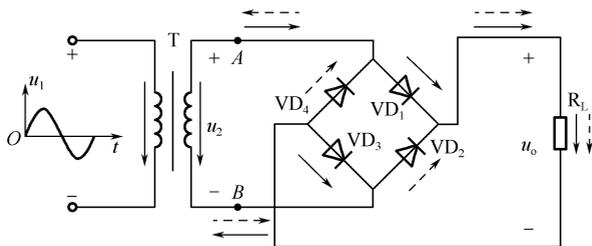


图 1-23 桥式整流电路

在 u_2 的正半周内 (A 端为正、 B 端为负), 二极管 VD_1 、 VD_3 因正偏而导通, VD_2 、 VD_4 因反偏而截止, 且 $u_o = u_2$ (忽略管压降); 在 u_2 的负半周内 (B 端为正、 A 端为负), 二极管 VD_2 、 VD_4 导通, VD_1 、 VD_3 截止, 且 $u_o = -u_2$ (忽略管压降)。但无论在 u_2 的正半周还是负半周, 流过负载 R_L 中的电流方向是一致的。在整个周期内, 四只二极管分两组轮流导通或截止, 负载上得到了单方向的脉动直流电压和电流。桥式整流电路中各处的波形如图 1-24 所示。

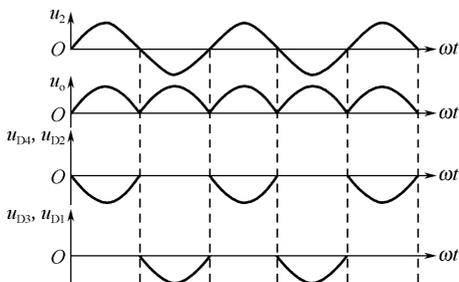


图 1-24 桥式整流电路的相关波形

2. 负载上平均电压和电流的估算

在桥式整流情况下, 负载两端的平均电压为

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_o d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_2 d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9 U_2 \quad (1-11)$$

负载电流的平均值为

$$I_o = 0.9 U_2 / R_L \quad (1-12)$$

脉动因数 S 为

$$S = \frac{U_{om}}{U_o} = \frac{\sqrt{2} U_2}{0.9 U_2} = \frac{\sqrt{2}}{0.9} \approx 1.57 \quad (1-13)$$

3. 二极管的选择

考虑电网电压 20% 波动情况下, 二极管的参数 I_F 和 U_{RM} 应留有 20% 的余地。

(1) 最大正向平均电流 I_F 的参数选择。在桥式整流电路中, 由于四只二极管两两轮流导电, 即二极管都只在半个周期内导通,



(微课视频: 如何选择桥式整流电路的元件参数)



二极管平均电流是输出电流平均值的一半，故二极管的最大正向平均电流 I_F 取值范围为

$$I_F \geq 1.2 \frac{I_o}{2} = 1.2 \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (1-14)$$

(2) 高反向电压 U_{RM} 的参数选择。在桥式整流电路中，二极管的最大反向电压就是变压器二次电压的最大值 $\sqrt{2}U_2$ ，故二极管的最高反向电压 U_{RM} 取值范围为

$$U_{RM} \geq 1.2\sqrt{2}U_2 \quad (1-15)$$

4. 桥式整流电路的特点

桥式整流电路输出电压的直流分量、纹波小，且每只二极管流过的平均电流也都小，因此桥式整流电路应用最为广泛。

【例 1-4】 设计一个输出电压为 24V，输出电流为 1A 的桥式整流电路，试确定变压器二次绕组的电压有效值 U_2 ，并选定相应的整流二极管。

解：变压器二次绕组电压有效值为

$$U_2 = \frac{U_o}{0.9} = \frac{24}{0.9} = 26.7 \text{ (V)}$$

考虑电网 20% 波动情况下，整流二极管承受的最高反向电压 U_{RM} 取值范围为

$$U_{RM} \geq 1.2\sqrt{2}U_2 \approx 1.2 \times 1.414 \times 26.7 = 45.3 \text{ (V)}$$

流过整流二极管的平均电流 I_F 取值范围为

$$I_F \geq 1.2 \frac{I_o}{2} = 1.2 \times \frac{1}{2} = 0.6 \text{ (A)}$$

因此，可选用四只型号为 2CZ11A 的整流二极管，其最大整流电流为 1A，最高反向电压为 100V。

1.4 滤波电路

经过整流电路后的输出电压是直流电压，但直流成分里含有较大的脉动成分，这样的直流电压不能保证仪器仪表正常工作，因此需要抑制输出电压中的脉动成分，同时还要尽量保留其中的直流成分，从而使得输出电压更加平滑，滤波电路可以实现这种功能。

滤波电路一般由电容、电感、电阻等元器件组成。常用的滤波电路有电容滤波电路、电感滤波电路、 Π 形滤波电路等。

1.4.1 电容滤波电路

图 1-25 所示为桥式整流电容滤波电路原理图，电容器 C 与整流电路的负载并联。

1. 工作原理分析

电容滤波电路是根据电容器的端电压在电路状态改变时不能发生突变的原理工作的，下面分析其滤波原理。

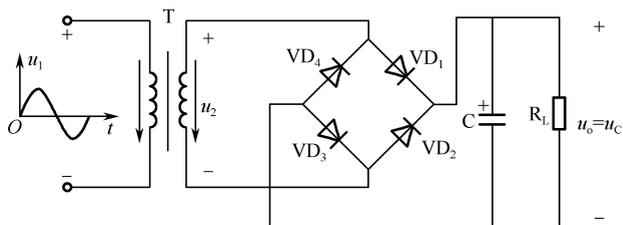
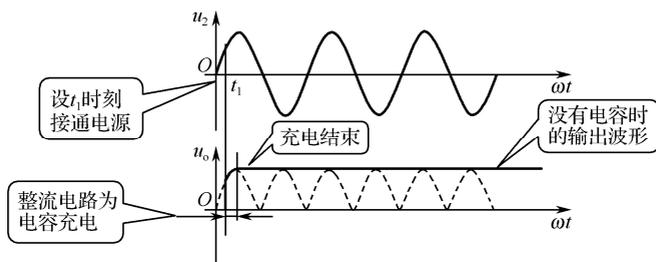


图 1-25 电容滤波电路原理图

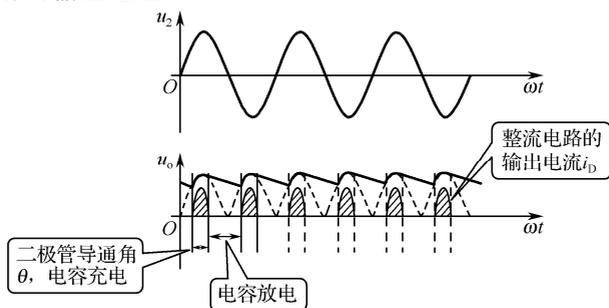


(微课视频: 电容滤波电路
工作原理)

(1) 未接入负载 R_L 时的情况如图 1-26 所示。设电容器两端初始电压为零, 若在 u_2 的正半周接通交流电源, u_2 通过 VD_1 、 VD_3 向电容器 C 充电; 若在 u_2 的负半周接通交流电源, u_2 通过 VD_2 、 VD_4 向电容器 C 充电, 充电时间常数为 τ , $\tau = R_n C$, 其中, R_n 包括变压器二次绕组的电阻和二极管的正向电阻。由于一般 R_n 很小, 因此电容器很快就充电达到交流电压 u_2 的最大值 $\sqrt{2}U_2$ 。由于未接入负载 R_L , 电容器无放电回路, 故输出电压 u_o (即电容器 C 两端的电压 u_c) 保持为 $\sqrt{2}U_2$, 输出为一个恒定的直流电压。

图 1-26 未接入负载 R_L 时的电容滤波电路工作波形

(2) 接入负载 R_L 时的情况如图 1-27 所示。设变压器次级电压 u_2 在 $t=0$ 时刻从 0 值开始上升 (即正半周开始), 这时接入负载 R_L , 且电容器在负载接入前已充电至 $\sqrt{2}U_2$, 故刚接入负载时 $u_2 < u_c$, 二极管 VD_1 、 VD_3 承受反向电压而截止, 电容器 C 经 R_L 放电。随着放电时间的推移, 电容电压两端电压下降, u_2 值在增加。当 $u_2 > u_c$ 时, 二极管导通, u_2 一方面经过整流电路给负载供电, 另一方面对电容 C 充电, 充电电流为 i_D , 充电电压 u_c 随着正弦电压 u_2 增大而增大, 而后 u_2 增大至最大值再下降, 当 u_2 再次小于 u_c 时, 重复上述过程, 这样周而复始, 在输出端得到较为平滑的输出电压。

图 1-27 接入负载 R_L 时的电容滤波电路工作波形



电容器放电过程的快慢程度取决于 R_L 与 C 的乘积, 即放电时间常数 $\tau = R_L C$ 。

τ 越大, 放电过程越慢, 输出电压越平稳。

2. 输出电压的估算

经电容滤波后, 负载 R_L 上电压平均值的大小与负载 R_L 的阻值有关。当 R_L 为无穷大时 (不接负载), 电容充电到最大值 $\sqrt{2}U_2$ 后, 无放电回路, 故 u_o 的平均值为 $\sqrt{2}U_2$, 而无滤波电容时, 桥式整流电容滤波的输出电压 u_o 的平均值为 $0.9U_2$, 由此可得工程实际中, 一般估算输出电压为

$$U_o \approx 1.2U_2 \quad (1-16)$$

需要注意的是, 在上述输出电压的估算中, 都没有考虑二极管的导通压降和变压器二次绕组的直流电阻。在设计直流电源时, 当输出电压较低时 (10V 以下), 应该把上述因素考虑进去, 否则实际测量结果与理论设计差别较大。实践经验表明, 在输出电压较低时, 按照上述公式的计算结果再减去 2V (二极管的压降和变压器二次绕组的直流压降之和), 可以得到与实际测量相符的结果。

3. 滤波电容和整流二极管参数的选择

(1) 滤波电容的选择。在负载 R_L 一定的条件下, 电容 C 越大, 放电常数越 τ 大, 滤波效果越好, 根据工程经验, 电容器 C 的容量选择应该满足

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (1-17)$$

式中, T 为交流电的周期, $T = 0.02s$ 。

电容的耐压值为 $U_C > \sqrt{2}U_2$

(2) 整流二极管的选择。如图 1-27 所示, 只有整流电路输出电压大于 u_o 时, 才有充电电流 i_D , 因此整流电路的输出电流是脉冲波。整流二极管导通角 θ 小, 冲击电流较大, 故一般选管时, 取

$$I_F = (5 \sim 7) \frac{I_L}{2} = (5 \sim 7) \frac{U_o}{2R_L} \quad (1-18)$$

【例 1-5】 单相桥式整流电容滤波电路的输出电压 $U_o = 30V$, 负载电流为 250mA, 试选择整流二极管的型号和滤波电容 C 。

解: (1) 考虑电网 20% 波动情况下, 选择整流二极管。

$$I_F \geq 1.2 \frac{I_o}{2} = 1.2 \times \frac{250}{2} = 150 \text{ (mA)}$$

整流二极管承受的最高反向电压 U_{RM} 。

$$U_2 = U_o / 1.2 = 25V, \quad U_{RM} \geq 1.2\sqrt{2}U_2 \approx 1.2 \times 1.414 \times 25V = 42.4V$$

查手册选用 2CP21A, 参数 $I_{FM} = 3000mA$, $U_{RM} = 50V$ 。

(2) 确定滤波电容大小。

$$R_L = U_o / I_o = 30 / 250 = 120 \text{ (}\Omega\text{)}$$

根据 $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$, 取 $C = 2T / R_L$, 故 $C = 2T / R_L = 2 \times 0.02 / 120 = 333.3\mu F$