



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电子技术基础

刘 琨 编

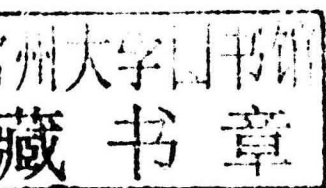
 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电子技术基础

刘 琨 编  
刘庭欣 主审



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书分两部分：第1~4章为模拟电路部分，主要包括二极管、三极管及应用电路，反馈及应用电路及集成运算放大器的应用；第5~7章为数字电路部分，分别是门电路及组合逻辑电路、集成触发器和时序逻辑电路及数字电路中的常用应用电路。本书在编写过程中，根据“淡化理论，加强技能，拓展广度，重在应用”的要求，力求体现职业教育的特点，充分考虑了适用范围、应用性、实践性及有利于对学生能力的培养等方面的问题。

本书主要作为高职高专非电类专业“电子技术基础”课程的教材，同时可供从事电子工程技术的人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础/刘琨编. —北京：中国电力出版社，2012.5  
全国电力职业教育规划教材  
ISBN 978-7-5123-3015-3

I. ①电… II. ①刘… III. ①电子技术—职业教育—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 092592 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 262 千字

定价 20.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

---

“电子技术基础”是一门研究电子器件及其应用的科学技术，它是电气类、机电类、电子类专业的一门必修课，也是基础理论课向专业工程类课程过渡的桥梁。

电子技术发展一日千里，新技术、新器件不断涌现。为了适应电子技术的发展和高职教育改革的需要，本书在编写过程中，根据“淡化理论，加强技能，拓展广度，重在应用”的要求，力求体现职业教育的特点，充分考虑了适用范围、应用性、实践性及有利于对学生能力的培养等方面的问题，即突出电子技术的基础性，又强调电子技术的应用性，并具有以下特点：

(1) 在着重介绍电子技术领域的基础知识、基本理论、基本技能训练的同时，注意吸收新知识、新器件的相关内容。

(2) 基础理论知识讲授以应用为目的，精选内容，以“必需、够用”为度，讲清原理，突出基本概念，理论证明和公式推导从简。

(3) 在教材结构、风格上，力求简明扼要、深入浅出和便于自学；例题和习题尽量结合工程实际，突出应用性，强调启发性。

(4) 教材编写注意将培养学生能力的要求贯穿于整个教学中。本教材通过教学目标、教学要求以及例题、习题等多种途径帮助学生建立学习本课程的正确方法，抓住重点，明确思路，真正从“应用”这个角度加强对知识的掌握。

(5) 教材内容形成模块化形式，便于教师根据需求对教学内容进行调整，为教师进行项目教学提供帮助。

本书由沈阳职业技术学院刘琨编写，由沈阳航空航天大学刘庭欣主审。主审以高度负责的精神，认真仔细地审阅了书稿，并提出许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。但由于编者水平有限，书中仍难免有缺点和疏漏，敬请广大读者批评指正，以便修订时改进。

编 者

2012年5月

# 目 录

---

## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 半导体二极管及应用电路     | 1  |
| 1.1 半导体的特性及类型         | 1  |
| 1.2 半导体二极管            | 2  |
| 1.3 半导体二极管应用电路        | 5  |
| 本章小结                  | 15 |
| 习题                    | 15 |
| 第 2 章 半导体三极管及其放大电路    | 18 |
| 2.1 晶体三极管             | 18 |
| 2.2 基本放大电路的组成及其主要性能指标 | 23 |
| 2.3 共发射极放大电路的分析       | 26 |
| 2.4 静态工作点稳定的放大电路      | 33 |
| 2.5 多级放大电路            | 37 |
| 2.6 功率放大电路            | 41 |
| 本章小结                  | 46 |
| 习题                    | 47 |
| 第 3 章 反馈及其应用          | 53 |
| 3.1 反馈的基本概念           | 53 |
| 3.2 负反馈放大电路           | 54 |
| 3.3 正弦波振荡电路           | 57 |
| 本章小结                  | 66 |
| 习题                    | 67 |
| 第 4 章 集成运算放大电路        | 72 |
| 4.1 集成运算放大器简介         | 72 |
| 4.2 集成运放的线性应用         | 74 |
| 4.3 集成运放的非线性应用        | 77 |
| 4.4 集成运放的使用           | 79 |
| 本章小结                  | 81 |
| 习题                    | 81 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第 5 章 数字逻辑基础 .....  | 84  |
| 5.1 数字电路概述 .....    | 84  |
| 5.2 数制与编码 .....     | 86  |
| 5.3 逻辑代数基础 .....    | 89  |
| 5.4 逻辑函数 .....      | 91  |
| 5.5 集成门电路 .....     | 99  |
| 本章小结 .....          | 105 |
| 习题 .....            | 106 |
| 第 6 章 组合逻辑电路 .....  | 110 |
| 6.1 概述 .....        | 110 |
| 6.2 常用组合逻辑电路 .....  | 113 |
| 本章小结 .....          | 130 |
| 习题 .....            | 130 |
| 第 7 章 时序逻辑电路 .....  | 135 |
| 7.1 双稳态触发器 .....    | 135 |
| 7.2 寄存器 .....       | 141 |
| 7.3 计数器 .....       | 144 |
| 7.4 集成定时器及其应用 ..... | 152 |
| 本章小结 .....          | 157 |
| 习题 .....            | 158 |
| 参考文献 .....          | 167 |

## 半导体二极管及应用电路

电子技术是一门研究电子线路及其应用的科学技术，广泛地应用于通信、控制、计算机等许多领域。电子线路是研究构成电子系统的单元电路如何实现信号的产生、放大和处理的课程。任何一个单元电子线路都是由电子元件和器件组成，电子元件如电阻器、电容器、变压器等。半导体管如二极管、三极管被称做器件。本章简单介绍半导体基本知识，重点介绍半导体二极管的构成、特性及其常用电路。

### 1.1 半导体的特性及类型

#### 1.1.1 半导体的特性

自然界的物质按其导电能力可以分成三类。一类是导电性能良好的物质，它们都是一价至三价元素，例如金、铜、铝等金属，称为导体；另一类是几乎不导电的物质，它们都是五价至八价元素，例如塑料、陶瓷、橡胶等，称为绝缘体；再一类是导电性能介于导体与绝缘体之间的物质，它们都是四价元素，例如硅（Si）、锗（Ge）等，称为半导体。

本征半导体又称做纯净半导体，是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。例如，在常用的半导体材料硅的内部就只有硅原子。

半导体理论证实，在半导体中存在两种导电的带电物体：一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴，它们在外电场的作用下都能运载电荷，形成电流，通常被称为载流子。而在金属导体内的载流子只有自由电子一种，这是半导体区别于导体的一个重要特点。在本征半导体内，自由电子和空穴总是成对出现的。因此在任何时候，本征半导体中的自由电子和空穴数总是相等的。

常温下，本征半导体内的载流子很少，所以其导电能力很弱。当本征半导体所处环境温度升高或有光照射时，其内部载流子数增多，导电能力随之增强。上述特点称为本征半导体的热敏特性和光敏特性，利用这些特性可以制成半导体热敏元件和光敏元件。

#### 1.1.2 N型半导体与P型半导体

在本征半导体中掺入微量的其他元素（杂质）所形成的半导体，称为杂质半导体。因掺入杂质不同，杂质半导体可分为空穴（P）型和电子（N）型半导体两类。

（1）P型半导体。在硅（或锗）的晶体内掺入微量三价元素（如硼元素）所形成的半导体，因其内部空穴数远远大于自由电子数，即空穴是多数载流子，电子是少数载流子。在这种半导体中，以空穴导电为主，所以称做空穴（P）型半导体。

（2）N型半导体。在硅（或锗）的晶体内掺入微量五价元素（如磷元素）所形成的半导体，因其内部自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子，且以电子导电为主，所以称做电子（N）型半导体。

由于杂质的掺入，使得P型和N型半导体内的载流子数目远远大于本征半导体，所以它们的导电能力也有了极大地增强。通过控制杂质掺入量的多少，可以达到控制半导体导电

能力强弱的目的，这是半导体区别于导体的另一个重要特点。

### 1.1.3 PN 结

#### 1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体通过工艺措施结合后，在二者的结合处会形成一个特殊的薄层，称为 PN 结。图 1-1 为 PN 结的结构示意图，中间画有斜线的部分即为 PN 结。

#### 2. PN 结的单向导电性

PN 结是一种特殊的物质，当在其两端外加电压时，其导电情况也呈现特殊性。

(1) 外加正向电压。如图 1-2 (a) 所示，将外加电压  $U$  的正极接 P 区，负极接 N 区，这种接法称为给 PN 结加正向电压，简称正偏。此时 PN 结呈现出的电阻很小，于是，从 P 区到 N 区有较大电流流过，PN 结的这种状态称为正向导通状态。

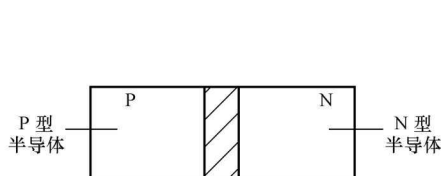


图 1-1 PN 结的结构示意图

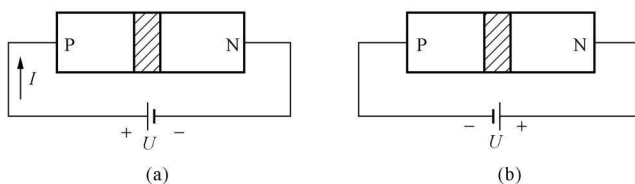


图 1-2 PN 结的单向导电性

(a) PN 结正向导通；(b) PN 结反向截止

(2) 外加反向电压。如图 1-2 (b) 所示，将外加电压  $U$  的负极接 P 区，正极接 N 区，称 PN 结被加上反向电压，简称反偏。此时 PN 结呈现出一个很大的电阻，使 PN 结内几乎无电流流过，PN 结的这种状态称为反向截止状态。

综上所述，PN 结具有正向导通、反向截止的导电特性，称之为单向导电性。

## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 二极管的结构

在硅或锗单晶基片上，加工出 P 区和相邻的 N 区，再加上相应的电极和管壳，就是一个二极管。图 1-3 (a) 为二极管的构成示意图。由图可见它有两个电极，分别引自 P 区和 N 区；从 P 区引出的电极称为二极管的正极，从 N 区引出的电极称为负极。图 1-3 (b) 为二极管在电路中的代表符号，通常用字母 VD 表示二极管。

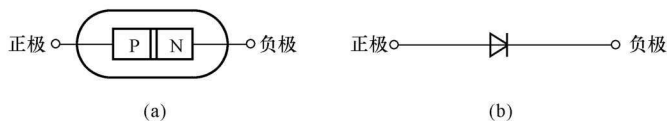


图 1-3 二极管构成及电路符号

(a) 二极管构成示意图；(b) 二极管电路符号

### 1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的核心就是一个 PN 结，所以它具有与 PN 结相同的单向导电特性。为了更准确、更全面地了解二极管的这种导电特性，将二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的

关系用一条曲线描绘出来,并称之为二极管的伏安特性曲线,如图1-4所示(图中实线为硅二极管,虚线为锗二极管)。下面对该特性分正向与反向加以说明。

### 1. 正向特性

正向特性曲线如图1-4中第一象限所示。在起始部分,由于正向电压较小,正向电流几乎为零,二极管呈现电阻很大,处于截止状态,这部分区域称为死区。当正向电压超过一定的数值时,电流才随电压的上升迅速增加,称这个电压值为门槛电压 $U_{th}$ (又称死区电压)。硅管的门槛电压约为0.5V,锗管的约为0.2V。此后二极管呈现电阻很小,进入导通状态。二极管完全导通后,流过二极管的电流很大,而二极管两端的正向压降却近于定值,硅管的正向压降约为0.7V,锗管的约为0.3V。

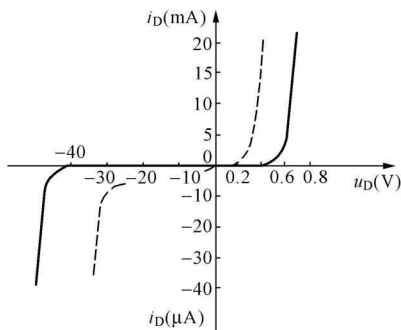


图1-4 二极管伏安特性曲线

### 2. 反向特性

反向特性曲线如图1-4中第三象限所示。在起始的一定范围内,反向电流很小(硅管几乎为零),且不随反向电压而变化。当反向电压增大到某一数值时,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿,对应的电压值称为反向击穿电压 $U_{BR}$ 。

在没有限流措施的情况下,二极管加过大的正向电压或反向电压,都有可能使PN结因流过电流太大而引起热击穿,造成二极管的永久性损坏。

## 1.2.3 二极管的类型和参数

### 1. 二极管的类型

按制作材料分,二极管有硅管(如2CP10)和锗管(如2AP1)两类,硅管的温度稳定性较好。

按PN结的接触方式分,二极管有点接触型和面接触型两类,后者因PN结面积大,允许较大的电流通过。

按用途分,二极管有整流管、稳压管、开关管和发光二极管等多种类型,它们都具有单向导电性,但由于使用目的不同,某些性能指标会有较大差异。

### 2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 $I_F$ :指管子长期运行时,允许通过的最大正向平均电流,若超过此值,二极管内的PN结会过分发热而损坏。

(2) 反向击穿电压 $U_{BR}$ :指管子反向击穿时的电压值。一般手册上给出的最高反向工作电压 $U_{RM}$ 约为反向击穿电压的一半,以确保二极管的安全运行。

(3) 反向电流 $I_R$ :指二极管未击穿时的反向电流。其值越小,二极管的单向导电性越好。但温度的增加,会使反向电流急剧增加。

## 1.2.4 特殊二极管

本小节主要介绍在电子电路中最常用的稳压二极管及几种光电子器件,如发光二极管(LED)、光电二极管(PD)。

### 1. 硅稳压二极管

(1) 特性。硅稳压二极管(简称稳压管)是一种用特殊工艺制造的硅半导体二极管。其

电路符号如图 1-5 (a) 所示, 图 1-5 (b) 是稳压管的伏安特性曲线。其正向特性与普通硅二极管相同, 反向特性在击穿区比普通硅管更陡。

由于工艺上的特殊处理, 只要二极管击穿后的反向电流小于它的最大允许值, 二极管仅发生电击穿不发生热击穿。也就是说, 当外加反向电压减小后, 稳压管可以恢复到击穿前的状态而没有损坏, 所以可以反复使用。在击穿区, 电流增量  $\Delta i_s$  很大, 但只引起二极管两端电压的很小变化  $\Delta u_s$ , 这就是稳压管的稳压特性。

(2) 主要参数。

1) 稳定电压  $U_s$ : 也叫击穿电压, 是稳压管正常工作时两端所呈现出的电压。由于工艺方面的原因, 同一型号的稳压管的稳定电压可允许有一定的范围。

2) 最小稳定电流  $I_{smin}$ : 指稳压管进入正常稳压状态所必需的起始电流, 小于此值, 稳压管无法进入击穿状态, 从而起不到稳压作用。

3) 最大稳定电流  $I_{smax}$ : 指稳压管正常工作时允许通过的最大电流, 超过此值, 稳压管会损坏。

4) 稳定电流  $I_s$ : 指稳压管在稳定电压下的工作电流, 其值应在  $I_{smax}$  与  $I_{smin}$  之间。

5) 动态电阻  $r_s$ : 指稳压管在稳压区内, 其两端电压的变化量与对应的电流的变化量的比值, 即

$$r_s = \frac{\Delta u_s}{\Delta i_s} \quad (1-1)$$

$r_s$  越小, 稳压效果越好。

## 2. 发光二极管 (LED)

发光二极管 (Light Emitting Diode) 是一种能将电能转换成光能的特殊二极管。图 1-6 示出了它的几种常见外形和电路图形符号。

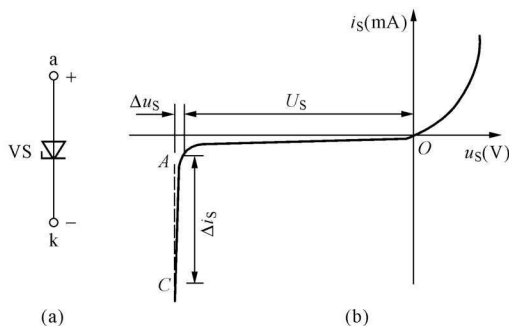


图 1-5 稳压管电路符号及伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 伏安特性曲线

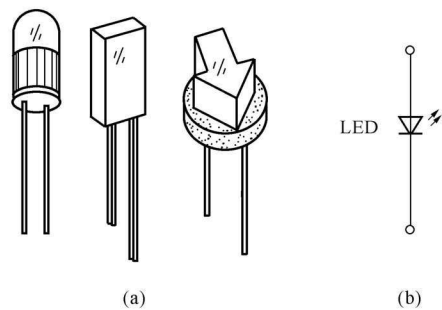


图 1-6 发光二极管的常见外形和符号

(a) 常见外形; (b) 电路图形符号

发光二极管的基本结构是一个 PN 结, 通常用砷化镓、磷化镓等化合物制成。它的特性曲线和普通二极管相似, 但正向导通电压一般为  $1 \sim 2V$ 。制成 LED 的半导体中掺杂浓度很高, 当管子施加正向电压时, 多数载流子的扩散运动加强, 大量的电子和空穴在空间电荷区复合时释放出的能量大部分转换为光能, 从而使 LED 发光。但其光谱范围是比较窄的, 其波长由所使用的基本材料而定。常见的发光颜色有红、黄、绿等, 发光强度随着正向电流的增大而增强。发光二极管常用来作为光源发生器、信号灯、显示器件等, 除单个使用外, 也

用于制成七段数字显示器（见图 1-7），工作电流一般为几毫安至十几毫安之间。

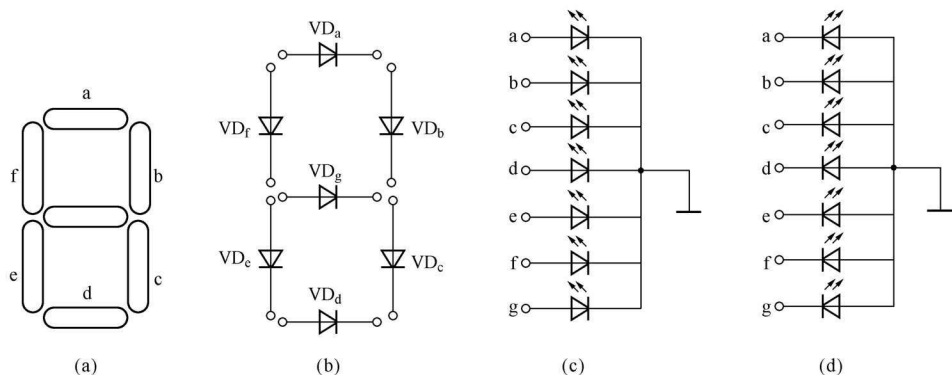


图 1-7 由发光二极管构成七段数字显示器

(a) 七段显示外形；(b) 发光二极管构成 8 字形；(c) 高电平驱动连接方式；(d) 低电平驱动连接方式

发光二极管的正向电阻比普通二极管的正向电阻大得多，一般为几十千欧，反向电阻则大于  $200\text{k}\Omega$ 。在测量正、反向电阻的同时，可判断发光二极管的极性，判别方法与普通二极管一样。

### 3. 光电二极管 (PD)

光电二极管 (Photo Diode) 又叫光敏二极管，是一种光接收器件，它的结构与普通二极管相似，但在管壳上有一个玻璃窗口以便于接受光照。使用时要使光电二极管的 PN 结工作在反向偏置状态，当它接受光照射时，反向电流随着光照强度的增加而上升，这时的反向电流叫做光电流，即光电二极管是一种将光信号转换为电信号的半导体器件。图 1-8 是光电二极管的电路符号及特性曲线。其主要特点是，它的反向电流与照度  $E$  成正比，灵敏度的典型值为  $0.1\mu\text{A}/\text{lx}$  的数量级， $\text{lx}$ （勒 [克斯]）是光照度单位。

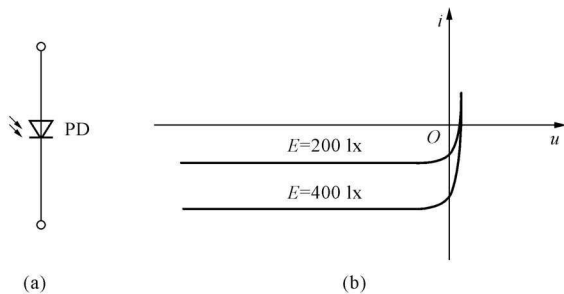


图 1-8 光电二极管的电路符号及特性曲线

(a) 电路符号；(b) 特性曲线

在无光照射时，光电二极管的伏安特性和普通二极管的一样，此时的反向电流叫做暗电流，一般在几微安，甚至更小。

光电二极管可用于光信号的测量和光控电路。若与发光器件组合，可以制成光电耦合器，同时完成电—光和光—电转换。

光电二极管的反向电阻随着从窗口射入光线的强弱而发生显著变化。在没有光照时，光电二极管的正、反向电阻测量以及极性判别与普通二极管一样。

## 1.3 半导体二极管应用电路

利用半导体二极管的单向导电性，可以组成多种应用电路，如整流电路、限幅电路、检波电路、开关电路等。下面介绍几种二极管电路。

### 1.3.1 二极管并联型稳压电源

#### 1. 直流稳压电源的组成框图

通常直流稳压电源的组成如图 1-9 所示，它表示了把交流电变换为直流电的过程。

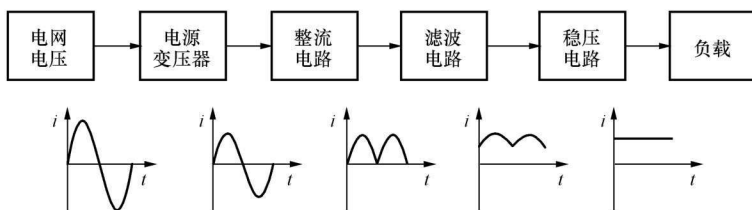


图 1-9 直流稳压电源的组成框图

图中各组成部分的作用如下。

(1) 电源变压器：将电网交流电压（220V 或 380V）变换为符合整流电路所需要的交流电压（通常是低压）。

(2) 整流电路：利用整流元件的单向导电性，将正、负交替的交流电压整流成为单方向的脉动电压。

(3) 滤波电路：它由电容、电感等储能元件组成。其作用是减小整流电压的脉动程度，将其中的交流成分滤掉，使输出电压成为比较平滑的直流电压。

(4) 稳压电路：当交流市电、负载波动和温度变化时，能自动保持负载电压的稳定。

本节将按顺序分述各部分的电路组成及其特点。

#### 2. 单相整流电路

小功率整流电路是利用半导体二极管单向导电特性实现的。它主要是把交流电压变换成单向脉动电压。对于大功率整流，采用三相整流电路。

##### (1) 单相半波整流电路。

1) 电路组成。它是由电源变压器  $T_r$ 、整流二极管和负载  $R_L$  组成，如图 1-10 (a) 所示。

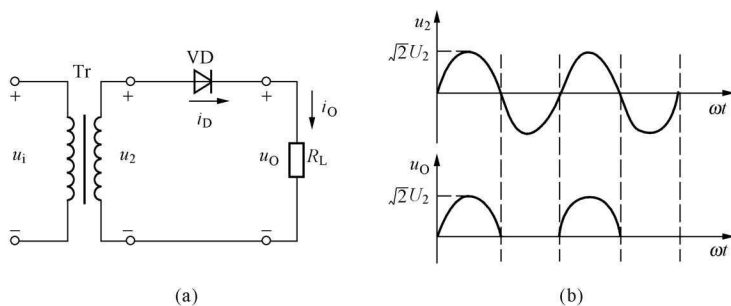


图 1-10 单相半波整流电路

(a) 电路图；(b) 波形图

2) 工作原理。设变压器二次侧电压有效值为  $U_2$ ，其瞬时值  $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ，二极管为理想二极管。

当  $u_2$  为正半周（上正下负）时，VD 正向导通，则  $u_D=0$ ， $u_O=u_2$ ， $i_O=i_D=u_2/R_L$ 。

当  $u_2$  为负半周（下正上负）时，VD 反向截止，则  $u_D=u_2$ ， $u_O=0$ ， $i_O=i_D=0$ 。

这样，在  $u_2$  变化的一个周期内，负载  $R_L$  上得到了一个单方向半波脉动直流电压  $u_O$ ，其波形如图 1-10 (b) 所示。因此这种电路形象地称为“半波整流电路”。

3) 基本参数。

a) 负载上的直流电压  $U_O$ 。从图 1-10 (b) 可见，虽然通过  $R_L$  的电压  $u_O$  有变化，但其半波脉动直流平均值为

$$U_O = 0.45U_2 \quad (1-2)$$

b) 负载上的直流电流  $I_O$ 。根据欧姆定律可知

$$I_O = U_O/R_L = 0.45U_2/R_L \quad (1-3)$$

c) 通过二极管的平均电流  $I_D$ 。由图 1-10 (a) 可看出，通过整流二极管的电流与负载电流相等，则有

$$I_D = I_O = U_O/R_L \approx 0.45U_2/R_L \quad (1-4)$$

d) 二极管承受的最大反向电压  $U_{RM}$ 。由图 1-10 (a) 还可看出，当  $u_2$  为负半周时，二极管承受的最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \quad (1-5)$$

式 (1-4) 和式 (1-5) 是选用整流二极管的依据。

可见，半波整流电路结构简单，只用了一个整流二极管；但输出波形脉动幅度大，直流成分低，变压器半周不导通，利用率低。

(2) 单相桥式整流电路。

1) 电路组成。它由电源变压器 Tr、四只整流二极管（视为理想二极管）和负载  $R_L$  组成，如图 1-11 (a) 所示。由于四只二极管接成电桥形式，故将此电路称为桥式整流电路。

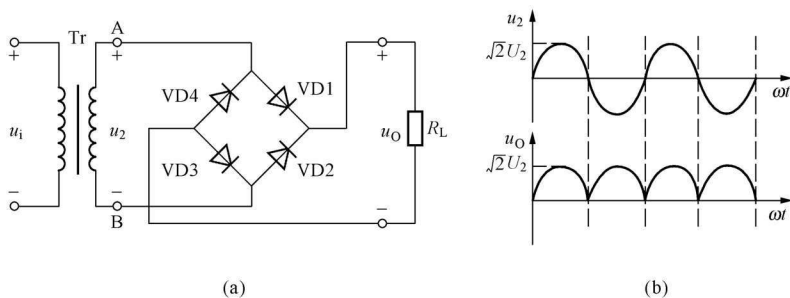


图 1-11 单相桥式整流电路

(a) 原理电路；(b) 波形图

2) 工作原理。当  $u_2$  为正半周时，VD1、VD3 导通，VD2、VD4 截止。电流流通的路径为：A→VD1→ $R_L$ （电流方向由上至下）→VD3→B→A。

当  $u_2$  为负半周时，VD2、VD4 导通，VD1、VD3 截止。电流流通的路径为：B→VD2→ $R_L$ （电流方向由上至下）→VD4→A→B。

这样，在  $u_2$  变化的一个周期内，负载  $R_L$  上得到了一个单方向全波脉动直流电压  $u_O$ ，其波形如图 1-11 (b) 所示。

3) 基本参数。

a) 负载上的直流电压  $U_O$ 。从图 1-11 (b) 可见, 因全波输出波形面积为半波的两倍, 因此

$$U_O = 2 \times 0.45U_2 = 0.9U_2 \quad (1-6)$$

b) 负载上的直流电流  $I_O$ 。

$$I_O = U_O/R_L = 0.9U_2/R_L \quad (1-7)$$

c) 通过二极管的平均电流  $I_D$ 。由图 1-11 (a) 可看出, 每两只整流二极管串联后在  $u_2$  的正、负半周轮流导通, 因此经过每个二极管的平均电流只是负载上平均电流的一半, 则有

$$I_D = I_O/2 = 0.45U_2/R_L \quad (1-8)$$

d) 二极管承受的最大反向电压  $U_{RM}$ 。由图 1-11 (a) 还可看出, 当 VD1、VD3 导通时, 截止管 VD2、VD4 的负极与 A 端相接, 正极与 B 端相连, 截止管两端所承受的最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \quad (1-9)$$

可见, 桥式整流电路虽然比半波整流电路多用了三只整流二极管, 但直流成分却提高了一倍, 变压器利用率也得到充分利用, 因此桥式整流电路得到了广泛的应用。

### 3. 滤波电路

由半波整流电路演变到桥式整流电路, 虽输出波形脉动幅度减小了很多, 但输出仍是直流脉动电压, 这种脉动电压中含有较多的交流成分, 因而不能保证电子设备的正常工作, 哪怕较小的交流成分在音响设备中也会出现严重的交流噪声, 电视机的图像产生扭曲, 等等。因此需要进一步减小输出电压的纹波, 使其更加平滑。于是人们常采用电容、电感等储能元件来完成此功能, 这种电路被称为滤波电路。滤波电路的种类有电容滤波、电感滤波、阻容滤波和感容滤波, 其中后两种属于复式滤波。本部分重点分析电容滤波。

#### (1) 电容滤波电路。

1) 电路组成。如图 1-12 (a) 所示, 由于电容的特点是其两端电压不能突变, 故在滤波电路中电容与负载电阻应采用并联方式。

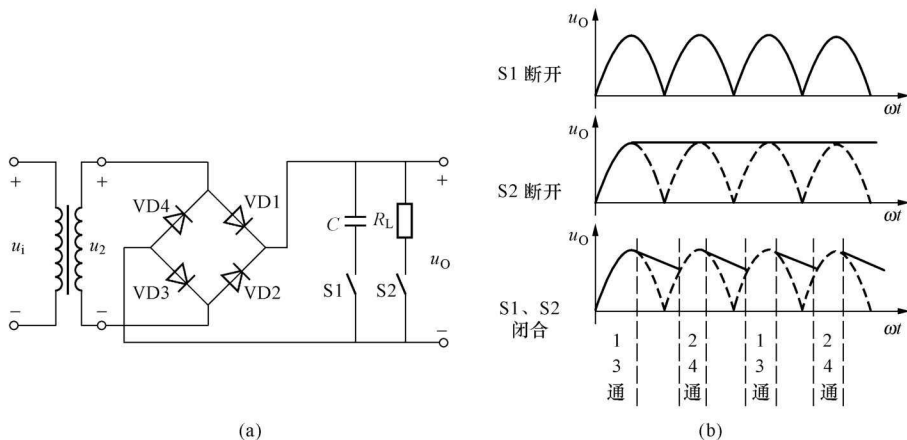


图 1-12 桥式整流电容滤波电路

(a) 电路图; (b) 波形图

2) 滤波原理。

a) S1 断开、S2 闭合的状态。此时，该电路就是前述的桥式整流电路，负载将得到  $0.9U_2$  的脉动电压波形，如图 1-12 (b) 所示。

b) S2 断开、S1 闭合的状态（空载）。设初始  $u_C=0$ ，当接通电源后， $u_C$  被充电到峰值  $\sqrt{2}U_2$ ，此时将使电桥中的二极管截止， $u_C$  无放电通路，只能保持峰值不变， $U_O=\sqrt{2}U_2$ ，如图 1-12 (b) 所示。

c) S1、S2 闭合的状态。为了分析方便，不妨在变压器二次侧无损耗，二极管导通电压为零的理想情况下讨论。

当  $u_2$  为正半周时，VD1、VD3 导通，VD2、VD4 截止。电流一路流经负载电阻  $R_L$ ，另一路对电容  $C$  充电，在理想情况下认为电容两端电压  $u_C$  ( $u_O$ ) 能够跟随  $u_2$  的上升而上升并充电到  $u_2$  的峰值  $\sqrt{2}U_2$ ，如图 1-12 (b) 所示。此后  $u_2$  按正弦规律从峰值开始下降，电容  $C$  通过负载  $R_L$  放电，其电压  $u_C$  也开始下降，趋势与  $u_2$  基本相同。由于电容  $C$  按指数规律放电，所以当  $u_2$  下降到一定数值后， $u_C$  的下降速度小于  $u_2$  的下降速度，使  $u_C$  大于  $u_2$ ，从而导致 VD1、VD3 反偏而变为截止。此后，电容  $C$  继续通过  $R_L$  放电， $u_C$  按指数规律缓慢下降，而不随  $u_2$  的下降而下降。只有待到负半周输入信号  $|u_2|>u_O$  时，VD2、VD4 导通，再次向电容  $C$  充电，当  $u_C$  达到峰值之后，随着  $|u_2|$  的减小电容再次放电，直到  $|u_2|<u_C$  时，整流二极管再次同时截止，电容  $C$  又经  $R_L$  缓慢放电。如此循环，输出电压  $u_O$  变成了比较平滑的直流电压，如图 1-12 (b) 所示。从而达到了滤波的目的。

在实际电路中，为了获得较好的滤波效果，总是希望  $R_L C$  越大越好，一般选择

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (1-10)$$

式中： $T$  为交流输入电压的周期。

此时  $U_O \approx 1.2U_2$ 。

电容滤波电路一般用于要求输出电压较高、负载电流较小且变化也较小的场合。

3) 两种单相整流电容滤波电路的比较。当整流电路加上电容滤波后，将涉及较多的参量计算公式。为了加以区别和比较，不妨给出表 1-1。

表 1-1 两种单相整流电容滤波电路的比较表

| 电路名称 | 负载上的直流电压 $U_O$ |               |          | 每个整流管的最大反向电压 $U_{RM}$ |                | 每个整流管的平均电流 $I_D$ |
|------|----------------|---------------|----------|-----------------------|----------------|------------------|
|      | 纯整流电路          | 带电容滤波         |          |                       |                |                  |
|      |                | $R_L$ 开路      | 带有 $R_L$ | 纯整流电路                 | 带电容滤波          |                  |
| 半波   | $0.45U_2$      | $\sqrt{2}U_2$ | $U_2$    | $\sqrt{2}U_2$         | $2\sqrt{2}U_2$ | $I_O$            |
| 桥式   | $0.9U_2$       | $\sqrt{2}U_2$ | $1.2U_2$ | $\sqrt{2}U_2$         | $\sqrt{2}U_2$  | $I_O/2$          |

**【例 1-1】** 在图 1-12 (a) 电路中， $U_2=20V$ （有效值），若用直流电压表测得输出电压值出现下列五种情况：①28V；②24V；③20V；④18V；⑤9V。讨论哪种是正常工作情况，哪种已发生故障以及何种故障。

**解** 分析如下：对于桥式整流电路只有三种可能，正常时  $U_O=1.2U_2=24V$ ；若  $R_L$  开路时， $U_O=\sqrt{2}U_2=28V$ ；若  $C$  开路时， $U_O=0.9U_2=18V$ 。对于半波整流电路也有三种可

能, 正常时  $U_O = U_2 = 20\text{V}$ ; 若  $R_L$  开路时,  $U_O = \sqrt{2}U_2 = 28\text{V}$ ; 若  $C$  开路时,  $U_O = 0.45U_2 = 9\text{V}$ 。根据上述分析不难区分题中所给的五种现象。

28V 为  $R_L$  开路时的故障情况, 24V 为正常工作情况, 18V 为  $C$  开路时的故障情况, 20V 为桥式整流电路四只整流管中有一个开路时变成半波整流的故障, 9V 为桥式整流电路四只整流管中有一个开路时变成半波整流, 并且  $C$  开路时的故障。

**【例 1-2】** 在桥式整流电容滤波电路中, 已知交流电源频率  $f = 50\text{Hz}$ , 负载电阻为  $120\Omega$ , 要求直流电压  $U_O = 30\text{V}$ 。试选择整流元件及滤波电容。

**解** 1) 选择整流二极管: 流过二极管的平均电流为  $I_D = I_O/2 = U_O/(2R_L) = 30/(2 \times 120) = 125\text{ (mA)}$ ; 由  $U_O \approx 1.2U_2$  得  $U_2 = U_O/1.2 = 30/1.2 = 25\text{ (V)}$ , 故二极管承受的最大反向电压  $U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 35\text{V}$ 。

因此, 可以选用 4 只 2CP21 二极管 ( $I_{DM} = 300\text{mA}$ ,  $U_{RM} = 100\text{V}$ )。

2) 选择滤波电容。因为  $T = 1/f = 0.02\text{s}$ , 再由式 (1-10) 取  $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$ , 得  $C = 417\mu\text{F}$ 。根据电容标称值系列, 可选用  $C = 500\mu\text{F}$ , 耐压值为 50V 的电解电容。

(2) 电感滤波电路。

1) 电路组成。电感滤波主要是利用电感中的电流不能突变的特点, 使输出电流波形比较平滑, 从而使输出电压的波形也比较平滑, 故电感应与负载串联。桥式整流电感滤波电路如图 1-13 所示。

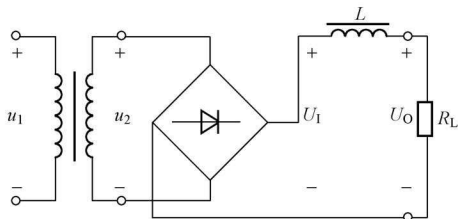


图 1-13 桥式整流电感滤波电路

2) 滤波原理。由图 1-13 可知,  $u_2$  经桥式整流后的脉动直流电压  $U_1 = 0.9U_2$ 。由理论计算可知电感电压的平均值为零, 故该电路输出的直流电压为

$$U_O = U_1 - U_L \approx 0.9U_2 \quad (1-11)$$

可见, 对于桥式整流电感滤波电路来说, 输出电压平均值与电感大小无关, 电感的作用就是抑制纹波。

3) 电路特点。理论表明电感滤波外特性较硬, 带负载能力强。所以, 电感滤波电路适合于负载电流较大、负载变化大的场合。

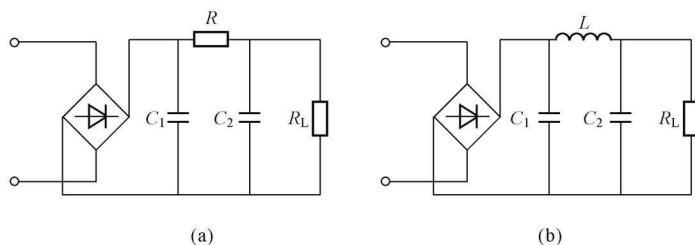
(3)  $\Pi$  形滤波电路。当单独使用电容或电感进行滤波, 效果仍不理想时, 可采用复式滤波电路。图 1-14 所示为两种常见的滤波电路。由于滤波电路像“ $\Pi$ ”字形, 故称为  $\Pi$  形滤波电路。

1)  $RC$   $\Pi$  形滤波电路。如图 1-14 (a) 所示, 对于直流电流, 因为  $R_L \gg R$ , 而使绝大部分电压降至  $R_L$  上, 因  $U_{C1} \approx 1.2U_2$ , 经  $R$  分压得  $U_{RL} = R_L U_{C1} / (R + R_L)$ 。对于交流, 因  $X_{C2} // R_L \ll R$ , 使交流分量电压绝大部分降至  $R$  上。

2)  $LC$   $\Pi$  形滤波电路。如图 1-14 (b) 所示, 对于交流, 因为  $X_L \gg X_{C2} // R_L$ , 使交流分量电压更多地降在  $L$  上; 对于直流,  $L$  的直流电阻很小, 使更多的电压直流分量降在  $R_L$  上,  $U_{RL} \approx U_{C1} = 1.2U_2$ 。

4. 稳压电路

在前面部分, 只讨论了组成直流电源电路的整流、滤波部分。通过本节的讨论, 将对图

图 1-14  $\Pi$  形滤波器(a) RC  $\Pi$  形滤波器; (b) LC  $\Pi$  形滤波器

1-9 所示的直流电源电路有一个完整的认识。

(1) 并联硅稳压管稳压电路。在前面 1.2 节中, 已经介绍过稳压管, 在此给出一个并联硅稳压管形成的完整的稳压电源电路, 如图 1-15 所示。

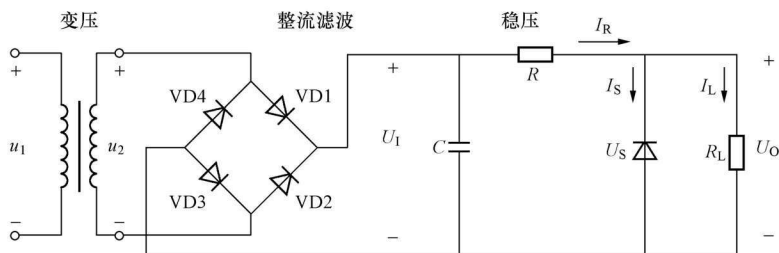


图 1-15 并联型稳压电源

1) 稳压电路及其工作原理。该电路由变压、整流滤波和稳压组成, 反映了直流电源电路的基本组成。在稳压部分,  $R$  起限流作用, 由于负载  $R_L$  与起稳压作用的稳压管相并联, 故称为并联型稳压电路。

电路的稳压原理如下:

a) 当负载不变 (即  $R_L$  不变)、电网电压变化时的稳压过程。假设电网电压升高时, 经整流滤波后的  $U_1$  也随之上升, 马上引起输出电压  $U_O$  升高; 由稳压管的伏安特性可知  $I_S$  将大幅度上升, 随之引起限流电阻  $R$  上的压降  $U_R = (I_S + I_L)R$  也升高, 迫使  $U_O$  下降, 最终使  $U_O$  基本不变。上述稳压过程可表述为

$$U_1 \uparrow \rightarrow U_O (U_S) \uparrow \rightarrow I_S \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow \rightarrow \text{稳压}$$

反之, 当  $U_1$  下降时, 限流电阻上的压降下降, 最终使  $U_O$  也基本不变。

b) 当电网电压不变 (即  $U_1$  不变)、负载变化时的稳压过程。假设负载  $R_L$  减小, 立刻引起  $I_L$  和  $I_R$  的升高, 使  $U_O$  下降; 由于稳压管的端电压略有下降, 则  $I_S$  大大减小, 迫使  $I_R$  下降, 随之引起限流电阻  $R$  上的压降  $U_R = I_R R$  下降,  $U_O$  上升, 最终使  $U_O$  基本不变。上述稳压过程可表述为

$$R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O (U_S) \downarrow \rightarrow I_S \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow \text{稳压}$$

反之, 当负载  $R_L$  增大时, 同理, 最终仍使  $U_O$  基本不变。

可见, 电路的稳压是由  $I_S$  的调节作用和限流电阻压降  $U_R$  的补偿作用来实现的。

2) 电路参数的计算。