

高职高专公共基础课规划教材

GAOZHIGAOZHUANGONGGONGJICHUKEGUIHUAJIAOCAI



电子技术 基础

付秋华 主编 曾 荣 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专公共基础课规划教材

GAOZHIGAOZHUANGONGGONGJICHUKEGUIHUAJIAOCAI



电子技术基础

主 编 付秋华
副主编 曾 荣
编 写 高明华 万南萍 赵春芳
主 审 朱传琴



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为高职高专公共基础课规划教材。

全书分为十一章，主要内容包括半导体器件及其特性、基本放大电路、放大器中的负反馈、集成运算放大器、数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路分析和设计、常用组合逻辑功能器件、触发器、时序逻辑电路的分析和设计、常用时序逻辑功能器件、半导体存储器、数模和模数转换器。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业、机电类专业、自动化技术类专业及其他相关专业“电子技术基础”课程的教材，亦可供从事电子工程技术工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础/付秋华主编. —北京: 中国电力出版社, 2008
高职高专公共基础课规划教材
ISBN 978-7-5083-7998-2

I. 电… II. 付… III. 电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 195545 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 404 千字

定价 26.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

本书是在电子技术日新月异的形势下，为了加快我国高素质应用型人才培养的步伐，按照高等职业技术教育培养目标的要求而编写。

本书从注重实用性和可操作性，以“管为路用，分立为集成服务”为指导思想，以培养生产一线应用型人才的教育为目标，以培养学生实际动手能力和职业能力为特征而组织的教学内容。书中将模拟电路部分进行优化组合，精选了常规内容，并简化了内部电路结构，突出元器件典型应用电路的分析，具有较强的实用性。每章配有适量的典型例题、习题和思考题，便于教学，便于读者对知识的消化、理解和深入学习。本书还介绍了 EWB 电子电路仿真软件的使用，有条件的学校可进行电路仿真实验。

参加本书编写工作的有江西电力职业技术学院付秋华，武汉电力职业技术学院曾荣，江西电力职业技术学院万南萍，华东交通大学高明华。付秋华同志为主编，曾荣同志为副主编，协助主编工作。

本书由山东电力高等专科学校朱传琴教授主审，在审阅中提出了许多宝贵的意见和建议。武汉电力职业技术学院彭同明教授对本书的编写给予了大力的支持，我们在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间比较仓促，书中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 9 月

目 录

前言

第一章 半导体器件及其特性	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 半导体二极管	4
第三节 半导体三极管	14
第四节 场效应管	20
第五节 晶闸管	26
本章小结	30
习题一	31
第二章 基本放大电路	33
第一节 共射极放大电路	33
第二节 共集电极和共基极放大电路	40
第三节 多级放大器(简介)	44
第四节 放大器中的负反馈	45
本章小结	51
习题二	52
第三章 集成运算放大器	57
第一节 概述	57
第二节 集成运算放大器在信号运算中的应用	65
第三节 集成运算放大器在信号检测与处理方面的应用	72
本章小结	80
习题三	81
第四章 数字逻辑基础	85
第一节 模拟信号与数字信号	85
第二节 数制和码制	86
第三节 基本逻辑关系	90
第四节 逻辑代数	94
第五节 逻辑函数的化简	98
本章小结	103
习题四	104
第五章 逻辑门电路	107
第一节 半导体二极管和三极管的开关特性	107
第二节 基本逻辑门电路	108
第三节 集成 TTL 门电路	110
第四节 CMOS 逻辑门电路	116
本章小结	118
习题五	118

第六章 组合逻辑电路	120
第一节 组合逻辑电路的分析	120
第二节 组合逻辑电路设计	122
第三节 常用中规模集成组合逻辑电路	123
第四节 组合逻辑功能器件综合应用	137
本章小结	139
习题六	139
第七章 触发器	141
第一节 概述	141
第二节 各种逻辑功能的触发器	141
第三节 触发器间的相互转换	151
第四节 触发器的应用——555 定时器	153
本章小结	160
习题七	160
第八章 时序逻辑电路	165
第一节 时序逻辑电路的分析	165
第二节 常用的时序逻辑电路	167
第三节 时序逻辑电路的设计	181
本章小结	185
习题八	185
第九章 数/模转换器和模/数转换器	189
第一节 数/模转换器及应用	189
第二节 模/数转换器及应用	195
本章小结	205
习题九	205
第十章 电子电路仿真软件 Multisim2001 的应用	207
第十一章 基础实验	212
实验一 常用电子仪器的使用	212
实验二 用万用表粗测半导体二极管、三极管	218
实验三 单管放大电路的测试	221
实验四 负反馈放大电路的测试	224
实验五 运放的线性应用——各类运算电路	225
实验六 逻辑门电路的逻辑功能测试	228
实验七 组合逻辑电路的分析与设计	231
实验八 编码器和译码器	232
实验九 触发器逻辑功能的测试	234
实验十 555 定时器的应用	237
实验十一 计数、译码显示电路	240
实验十二 D/A 和 A/D 转换器	244
附录 1 半导体器件型号命名方法	247
附录 2 集成运放命名法及主要参数	248
部分习题参考答案	250
参考文献	258

半导体器件及其特性

半导体元器件是电子线路的核心部件。只有掌握半导体的结构、性能、工作原理和特点,才能正确分析电子线路工作原理,正确选择和合理使用半导体元器件。本章主要介绍常用半导体二极管、三极管、场效应管、晶闸管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数以及应用电路等。

第一节 半导体的基本知识

自然界中的物质按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体。金、银、铜、铁、铝等金属材料是导体,塑料、陶瓷、橡胶等是绝缘体,这些材料已经得到广泛的应用。还有一些物质其导电能力介于导体和绝缘体之间,其导电能力会受外界因素如光、热,杂质等的影响,故被称为半导体。在电子器件中,常见的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)、碳化硅(SiC)等,其中硅和锗是目前最常用的半导体材料,其原因是硅和锗都具有共价键结构且容易获取。

半导体之所以广泛应用于电子器件的生产,是因为其具有以下三个特性:

(1) 掺杂性。在半导体中掺入微量的杂质后,其导电能力会显著提高。利用半导体的掺杂性,可以形成杂质型半导体,进而制成各种半导体器件。

(2) 热敏性。半导体受热升温后,其导电能力会明显提高。利用半导体的热敏性,可以制成热敏电阻、温度补偿二极管等。

(3) 光敏性。半导体受光照射后,其导电能力也会明显提高。利用半导体的光敏性,可以制成光电池、光电二极管、光电三极管、光敏电阻等光电器件。

一、本征半导体

本征半导体是一种结构完整、完全纯净的半导体晶体,它在物理结构上呈单晶体形态。本征半导体中包含自由电子和空穴两种载流子。本征半导体中各原子之间靠得很近,各原子的四个价电子同时受到相邻原子的吸引,分别与周围的四个原子的价电子形成共价键。共价键中的价电子为这些原子所共有,并为原子所束缚,在空间形成排列有序的晶体。共价键上的八个电子是由相邻原子各用一个电子组成的,这些电子被称为束缚电子。被束缚电子不仅受自身原子核的束缚还受共价键的束缚,如果没有足够的能量,不易脱离轨道。因此,在绝对温度 $T=0\text{K}(-273^{\circ}\text{C})$ 时,由于共价键中的电子被束缚着,本征半导体中没有自由电子,不导电。只有受到激发,本征半导体才能导电。

当导体处于热力学温度 0K 时,导体中没有自由电子。当温度升高或受到光的照射时,价电子能量增大,有的价电子可以挣脱原子核的束缚,而参与导电,成为自由电子。自由电子产生的同时,在其原来的共价键中就出现了一个空位,原子的电中性也被破坏,呈现出正电性,其正电量与电子的负电量相等。人们常称呈现正电性的这个空位为空穴。我们把本征

半导体受热产生自由电子和空穴的现象称为热激发，亦称本征激发。可见因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的，称为自由电子—空穴对。游离的部分自由电子也可能回到空穴中去，称为复合。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。

由于共价键中出现了空穴，在外加能源的激发下，邻近的价电子有可能挣脱束缚补充到这个空穴上，而这个电子原来的位置又出现了空穴，其他电子又有可能转移到该位置上。这样一来在共价键中就出现了电荷迁移——电流，因此空穴也是载流子。电流的方向与电子移动的方向相反，与空穴移动的方向相同。本征半导体中，产生电流的根本原因是由于共价键中出现了空穴。由于空穴数量有限，所以其电阻率很大。因此，室温（25℃）时本征半导体的导电能力很弱。

二、杂质半导体

在本征半导体中掺入某些其他微量元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素，掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体，其可分为 P 型半导体和 N 型半导体。

1. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓、铟等可形成 P 型半导体，也称为空穴型半导体。因为三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。每掺入一个杂质原子，就会产生一个空穴，掺入杂质越多，产生空穴越多。当相邻共价键上的电子因受激发获得能量时，就可能填补这个空穴，而产生新的空穴。P 型半导体的特点是：空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子，其导电能力主要依赖于空穴。

2. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素，例如，磷、砷、锑等可形成 N 型半导体，也称电子型半导体。因为五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。掺入杂质越多，产生自由电子数目越多。N 型半导体的特点是：自由电子是多数载流子，它主要由杂质原子提供，而空穴是少数载流子，其导电能力主要依赖于自由电子。

三、PN 结及其特性

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。但是如果把 P 型半导体和 N 型半导体通过一定的工艺结合起来就可以形成 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、晶闸管和集成电路等众多半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

在一块本征半导体的两侧通过扩散不同的杂质，分别形成 N 型半导体和 P 型半导体。在这两种杂质半导体的交界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层，这个特殊性质的薄层就是 PN 结。由于 P 区与 N 区之间存在载流子浓度的显著差异：P 区空穴多、电子少；N 区电子多，空穴少。于是在 P 区和 N 区的交界面处就会发生多数载流子的扩散运动。所谓扩散运动，就是物质要从浓度高的区域向浓度低的区域运动。扩散的结果使交界面附近 P 区因空穴减少而呈现负电性，N 区因电子的减少而呈现正电性，从而形成了内电场。内电场的建立，一方面阻碍了多数载流子的扩散运动；另一方面，对方区域中的少数载流子会被吸引过来，形成漂移运动。当扩散和漂移运动达到平衡后，空间电荷区的宽度和内电场强度就相

对稳定下来，此时，有多少个多子扩散到对方，就有多少个少子从对方飘移过来，这样，在交界面上就出现了由正负离子构成的空间电荷区，这个区域中的正负离子由于结构的原因都不能移动，这就是PN结，PN结的形成过程如图1-1所示。

在空间电荷区，由于缺少载流子，所以也称耗尽层；又由于阻碍了多数载流子的扩散运动，所以也称阻挡层。由于耗尽层的存在，PN结的电阻很大。

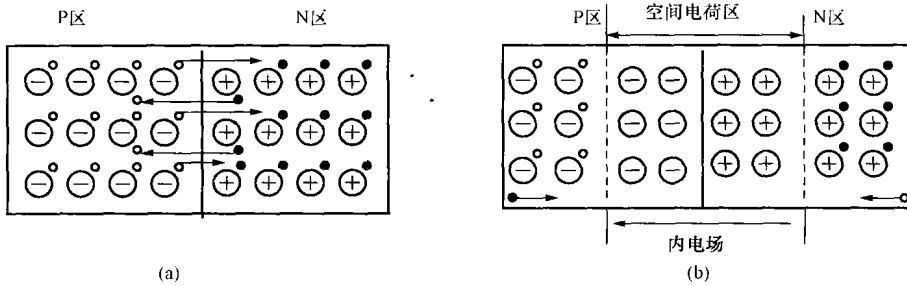


图 1-1 PN 结的形成
(a) 多数载流子的扩散；(b) PN 结的形成

2. PN 结的特性

实验发现，PN 结在外加电压的作用下，可以形成电流。外加电压的极性不同，流过PN 结的电流大小有很大差别。

(1) PN 结的正向导通特性。给 PN 结加正向电压，即电源正极接 P 区，负极接 N 区，称为 PN 结正向偏置，如图 1-2 (a) 所示，这时 PN 结外加电场与内电场方向相反，外电场削弱内电场作用，使空间电荷区变窄，有利于多数载流子运动，形成正向电流。外加电场越强，正向电流越大，这意味着 PN 结的正向电阻变小了。可见，给 PN 结加正向电压时 PN 结处于正向导通状态。

(2) PN 结的反向截止特性。给 PN 结加反向电压，即电源正极接 N 区，负极接 P 区，称为 PN 结反向偏置，如图 1-2 (b) 所示。这时外加电场与内电场方向一致，使内电场的作用增强，PN 结变厚，多数载流子扩散运动难以进行，有助于少数漂移载流子运动，形成反向电流。由于少数载流子很少，所以电流很小，接近于零，即 PN 结反向电阻很大。可

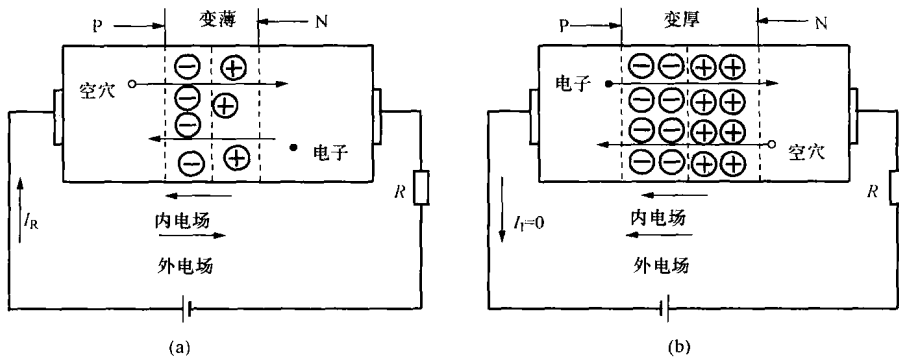


图 1-2 PN 结的导电特性
(a) 正向偏置；(b) 反向偏置

见，给 PN 结加反向电压时 PN 结处于反向截止状态。

PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。因此，PN 结具有单向导电性。

第二节 半导体二极管

一、二极管的结构和类型

半导体二极管按其结构的不同可分为点接触型、面接触型、平面型。

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，但它的结电容小，高频特性好，适用于高频检波电路和小功率电路。面接触型二极管 PN 结的接触面积大，可以通过很大的正向电流，能承受较高的反向电压，适用于整流电路。平面型二极管适用于低频大功率管，在数字电路中也有广泛的应用。图 1-3 所示为是二极管的类型结构示意图。

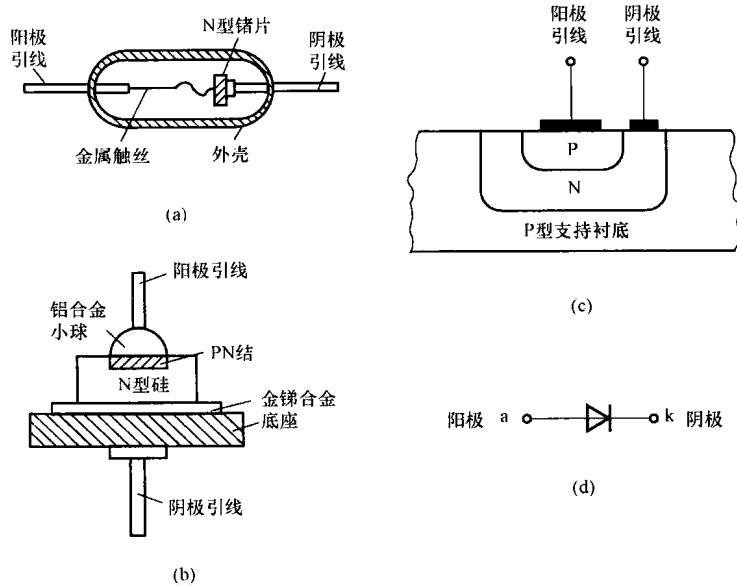


图 1-3 二极管的类型结构示意图
(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 电路符号

二、二极管的特性参数及选用

1. 二极管的伏安特性

理论分析指出，二极管电流 I 和端电压 U 之间的关系为

$$I = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \tag{1-1}$$

式中， I_s 称为反向饱和电流； U_T 称为温度电压当量，常温下 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。式 (1-1) 称为理想二极管电流方程，实际伏安特性分析如图 1-4 所示。

二极管的伏安特性曲线就是流过二极管的电流 I 与加在二极管两端的电压 U 之间的关系曲线。图 1-4 所示为硅和锗二极管的伏安特性曲线。

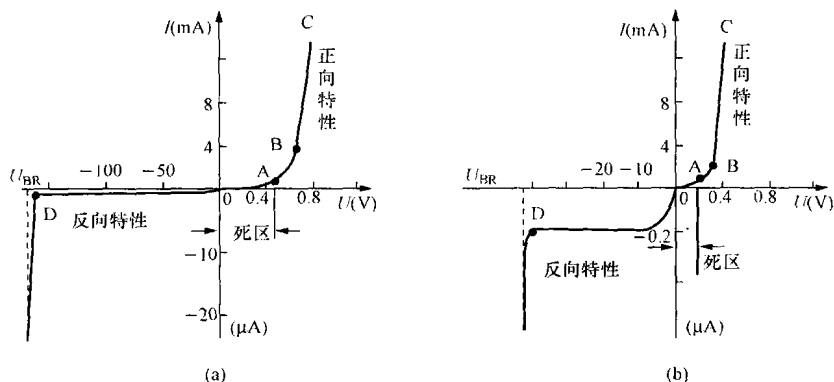


图 1-4 二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管；(b) 锗二极管

(1) 正向特性。在正向特性的起始部分 0A 段，由于正向电压较小，外电场还不足以克服 PN 结的内电场，因而这时的正向电流几乎为零，二极管呈现出一个大电阻，过 A 点后正向电流开始增大，好像一个门槛，A 点电压称为门槛电压，又称死区电压。硅管的门槛电压 U_{th} 约为 0.5V，锗管的 U_{th} 约为 0.1V。过 A 点后，随着外加正向电压的增加，正向电流开始增大，但电流增量和电压增量不成正比。当电压大于 0.6V（锗管为 0.2V），正向电流随正向电压增加而急速增加，基本上是直线关系。这时二极管呈现的电阻很小，可以认为二极管是处于导通状态。此区域内，硅管的导通电压约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

(2) 反向特性。0D 段，在所加反向电压下，反向电流很小，且几乎不随电压的增加而增大，此电流值称为反向饱和电流。此时二极管呈现很高的电阻，处于截止状态。硅管的反向电流比锗管的反向电流小，约在 $1\mu\text{A}$ 以下，锗管的反向电流达几十微安甚至几毫安以上。这也是现在硅管应用比较多的原因之一。过 D 点后，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做反向击穿电压。一般的二极管是不允许工作在反向击穿区的，因为这将导致 PN 结的反向导通而失去单向导电的特性，长时间工作在反向击穿区还会因功率大而烧坏器件。

综上所述可知二极管的伏安特性是非线性的，二极管是一种非线性元件。

在实际工程估算中，若二极管的正向导通电压比外加电压小很多时（一般以 10 倍来衡量），常可忽略不计，并将此时的二极管称为理想二极管。

2. 温度对二极管特性的影响

二极管对温度很敏感。实验发现：随着温度升高，二极管的正向压降减小，即二极管正向电压有负温度系数，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 ，二极管的反向电流约增加一倍。实验还发现：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，但却可以利用二极管的温度特性，对温度的变化进行检测，从而实现了对温度的控制。

3. 二极管的主要参数

在实际应用中，常用二极管的参数来定量描述二极管在某方面的性能。二极管的主要参数有最大整流电流、最高反向工作电压和反向击穿电压等。

(1) 最大整流电流 I_F 。最大整流电流 I_F 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向直

流电流的平均值。 I_F 与二极管的材料、面积和散热条件有关。点接触型二极管的 I_F 较小，而面接触型二极管的 I_F 较大。在实际使用时，流进二极管最大平均电流不能超过 I_F ，否则二极管会因过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。最高反向工作电压 U_{RM} 是指二极管在工作时所能承受的反向电压峰值。通常以二极管的 U_{BR} 一半作为二极管的 U_{RM} ，二极管在实际使用时的电压应不超过此值，否则当温度变化较大时，二极管就有发生反向击穿的可能。

(3) 反向击穿电压 U_{BR} 。反向击穿电压 U_{BR} 是指二极管反向击穿时的电压值。击穿时，反向电流急剧增加，二极管的单向导电性被破坏，甚至会因过热而烧坏。

此外，二极管还有结电容和最高工作频率等许多参数，在此不详述，可参考有关手册。半导体器件型号命名方法见附录1。

三、二极管的应用

二极管是电子电路中最常用的器件。利用其单向导电性及导通时正向电压降很小特点，可以用于整流、检波、钳位、限幅、开关以及元件保护等。

(一) 整流

所谓整流，就是将交流电变为脉动的直流电。利用二极管的单向导电性可组成单相、三相等各种整流电路，然后再经过滤波、稳压，便可以得到平稳的直流电。这些内容将在后面详述。

(二) 钳位

利用二极管导通时正向电压降很小的特点可组成钳位电路，如图1-5所示。图中，若A点电位 U_A 为零，则二极管导通，由于其压降很小，故F点的电位也钳制在A点电位左右，既 $U_F \approx 0$ 。

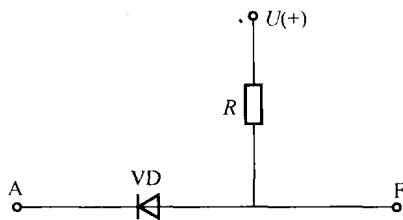


图 1-5 二极管钳位电路

(三) 限幅

利用二极管导通后正向电压降很小且基本不变的特点，可以构成限幅电路，使输出电压的幅度限制在某一电压值内。图1-6(a)为一双向限幅电路。设输入电压 $u_i = 10\sin\omega t$ (V)， $U_{s1} = U_{s2} = 5V$ ，则输出电压 u_o 被限制在 $\pm 5V$ 之间，将输入电压的幅度削掉了一半，其波形如图1-6(b)所示。

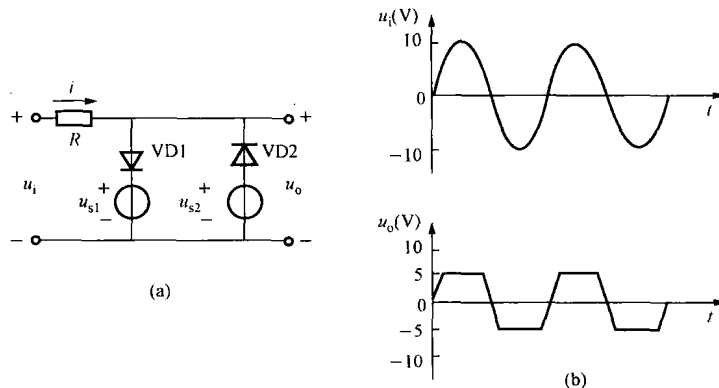


图 1-6 二极管限幅电路及波形图

(a) 限幅电路；(b) 波形

(四) 器件保护

在电子电路中，常用二极管来保护其他器件免受过高电压的损害。

如图 1-7 所示电路， L 和 R 是线圈的电感和电阻。在开关 S 接通时，电源 E 给线圈供电， L 中有电流流过，储存了磁场能。开关 S 突然断开时， L 中将产生感生电动势 e_L ，电动势 e_L 和电源 E 叠加作用在开关端子上，会使端子产生火花放电，影响设备的正常工作。接入二极管后， e_L 通过二极管放电，使端子两端的电压不会很高，从而保护了开关 S ，此时二极管又被称为续流二极管。

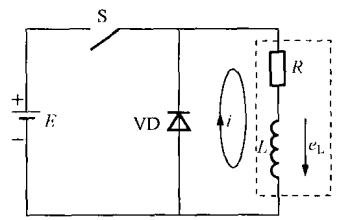


图 1-7 二极管保护电路

(五) 单相整流电路

单相整流电路有半波整流、全波整流、桥式整流和倍压整流电路。本节将对单相半波整流电路和单相桥式整流电路进行分析。以下分析整流电路时，为简单起见，二极管都当成理想情况处理，即正向导通电阻为零，反向截止电阻无穷大。

1. 单相半波整流电路

(1) 电路组成和工作原理。图 1-8 所示为单相半波整流电路，变压器 T 将电网的正弦交流电 u_1 变成 u_2 ，设

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \text{ V} \tag{1-2}$$

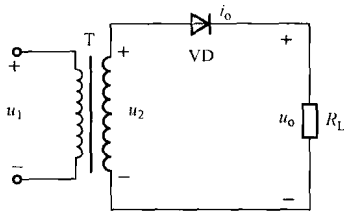


图 1-8 单相半波整流电路

在变压器二次侧电压 u_2 的正半周期内，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 $u_o = u_2$ 。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向的直流脉动电压，负载中的电流也是直流脉动电流。单相半波整流后的输出电压和电流波形如图 1-9 所示。

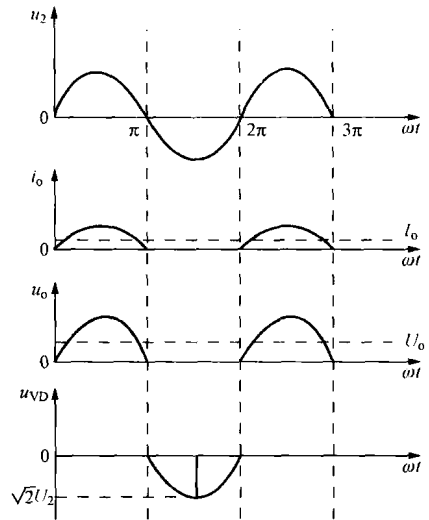


图 1-9 单相半波整流电路的波形图

(2) 负载上直流电压和电流的估算。单相半波整流时，负载两端的直流电压平均值可由下式计算

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$U_o = 0.45U_2 \tag{1-3}$$

负载中的平均电流为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \tag{1-4}$$

(3) 二极管的选择。在单相半波整流电路中，二极管中的电流等于输出电流，所以在选用二极管时，二极管的最大整流电流 I_F 应大于负载电流 I_0 。

二极管的最高反向电压就是变压器二次侧电压的最大值。根据 I_F 和 U_{RM} 的值，查阅半导体手册就可以选择到合适的二极管。

单相半波整流电路的优点是结构简单，使用元件少。但是它也有明显的缺点：只利用了交流电的半个周期，输出的直流分量较低，且输出电压的纹波大，电源变压器的利用率也低，所以单相半波整流电路只能用在输出电压较低且性能要求不高的地方。

2. 单相桥式整流电路

(1) 电路组成和工作原理。电路如图 1-10 (a) 所示。图中 T 为电源变压器，它的作用是将交流电网的 u_1 变成整流电路所要求的 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ， R_L 是负载电阻，四只整流二极管 VD1~VD4 接成电桥的形式，故称为桥式整流电路，图 1-10 (b) 是它的简化画法。

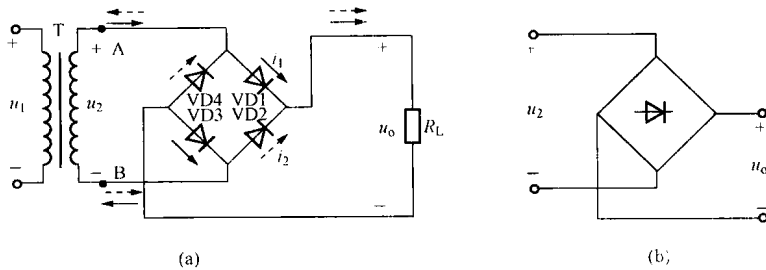


图 1-10 单相桥式整流电路

(a) 单相桥式整流电路；(b) 简化电路

在 u_2 的正半周内 (A 端为正, B 端为负), VD1、VD3 因正偏而导通, VD2、VD4 因反偏而截止; 在 u_2 的负半周内, 二极管 VD2、VD4 导通, VD1、VD3 截止。但是无论在 u_2 的正半周还是负半周, 流过 R_L 中的电流方向都是一致的。在 u_2 的整个周期内, 四只二极管分两组轮流导通或截止, 在负载上得到了单一方向的脉动直流电压和电流。单相桥式整流电路中各处的电压和电流波形如图 1-11 所示。

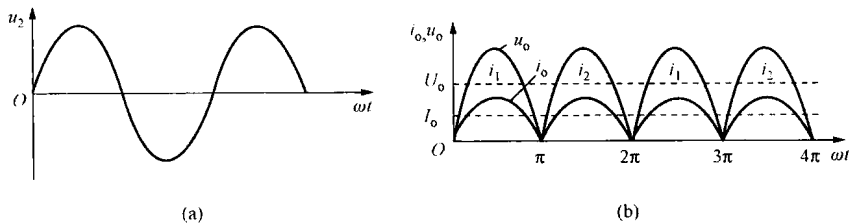


图 1-11 单相桥式整流电路的波形图

(a) 输入信号；(b) 输出电压、电流

(2) 负载上直流电压和电流的估算。由图 1-11 可知，单相桥式整流输出电压波形的面积是单相半波整流时的两倍，所以输出的直流平均电压也是单相半波整流时的两倍，即

$$U_0 = 0.9U_2 \quad (1-5)$$

输出平均电流为

$$I_o = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-6)$$

(3) 二极管的选择。在单相桥式整流电路中，由于四只二极管两两轮流导电，即每只二极管都只是在半个周期内导通，所以流过每个二极管的平均电流是输出电流平均值的一半，即

$$I_F = \frac{I_o}{2} \quad (1-7)$$

二极管的最大反向峰值电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \quad (1-8)$$

由以上分析可知，单相桥式整流输出电压的直流分量大，纹波小，且每个二极管流过的平均电流也小，因此单相桥式整流电路应用最为广泛。

3. 滤波电路

滤波电路用于滤去整流输出电压中的纹波（偶次谐波），一般由电抗元件组成，如在负载两端并联电容器 C ，或与负载串联电感器 L ，以及由电容、电感组合成复式滤波电路。常见的几种滤波电路如图 1-12 所示。

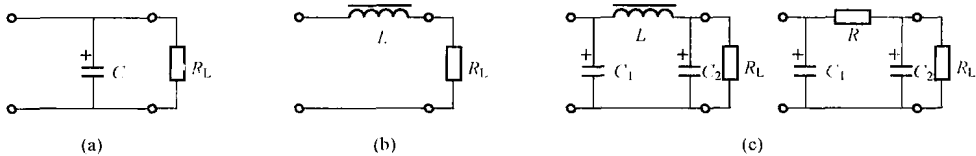


图 1-12 几种常见的滤波电路

(a) 电容滤波；(b) 电感滤波；(c) π 形滤波

(1) 电容滤波电路。图 1-13 所示电路是单相桥式整流电容滤波电路。图 1-14 所示电路滤波中电压和电流的波形图。

1) 工作原理。设电容 C 上初始电压为零。接通电源时 u_2 由零逐渐增大，二极管 VD_1 、 VD_3 正偏导通，此时 u_2 经二极管 VD_1 、 VD_3 向负载 R_L 提供电流，同时向电容器 C 充电，因充电时间常数很小 ($\tau_c = R_{int}C$, R_{int} 是由电源变压器内阻、二极管正向导通电阻构成的总等效直流电阻)，电容 C 两端电压很快达到 u_2 的峰值，即 $u_C = \sqrt{2}U_2$ 。 u_2 达到最大值以后按正弦规律下降，当 $u_2 < u_C$ 时， VD_1 、 VD_3 反向偏置，所以 VD_1 、 VD_3 截止，电容 C 只能通过负载 R_L 放电，放电时间常数 $\tau_d = R_L C$ ，放电时间常数越大，放电就越慢， u_o (u_C) 的波形就越平滑。在 u_2 的负半周，二极管 VD_2 、 VD_4 正偏导通， u_2 通过 VD_2 、 VD_4 向电容 C 充电，使电容 C 上的电压很快达到 u_2 的峰值。过了该时刻以后，在图 1-14 中 e 点后， VD_2 、 VD_4 因反向偏置而截止，电容又通过负载 R_L 放电，如此周而复始。从图可以看出负载上得到的是脉动成分大大减小的直流电压。

2) 输出直流电压 U_o 和负载电流 I_o 的估算。当滤波电容较大时，一般单相桥式整流电容滤波电路的输出直流电压 U_o 为

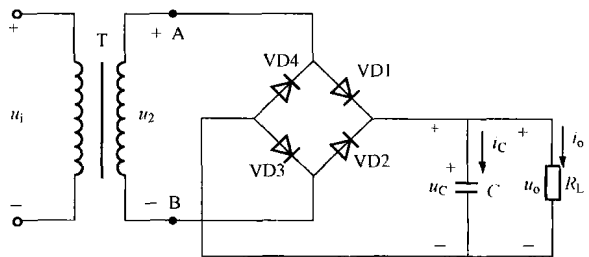


图 1-13 单相桥式整流电容滤波电路

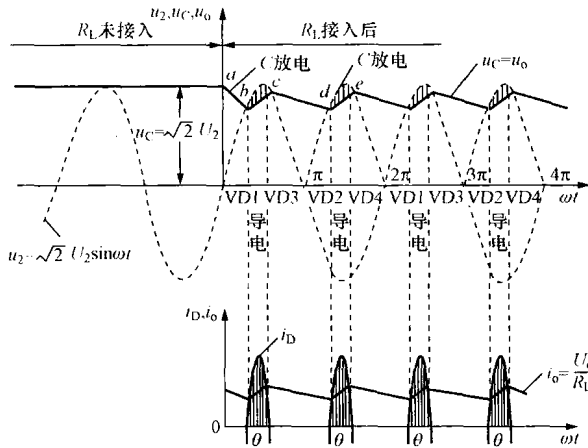


图 1-14 电容滤波电路中电压电流波形

$$U_o = 1.2U_2 \quad (1-9)$$

负载电流 I_o 为

$$I_o = 1.2 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-10)$$

而单相半波整流电容滤波电路输出直流电压 U_o 为

$$U_o = U_2 \quad (1-11)$$

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侧绕组的直流电阻。在设计直流电源时，当输出电压较低（10V 以下）时，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) 滤波电容器的选择。在负载 R_L 一定的条件下，电容 C 越大，滤波效果越好，电容的容量经过实验可按下述公式选取

$$C \geq 2T/R_L \quad (1-12)$$

式中， T 为电源电压的周期。

电容器的额定耐压值为

$$U_C > 2U_2 \quad (1-13)$$

滤波电容器型号的选定应查阅有关器件手册，并取电容器的系列标称值。

电容滤波的优点是结构简单、输出电压提高、脉动成分减小、二极管导通时间大大减少；缺点是负载电流不宜过大，负载电流较大时会造成输出电压下降，纹波增加，影响滤波效果，所以电容滤波适用于负载变动不大，电流较小的场合。

由于输出直流电压较高，整流二极管截止时间长，导通角小，故整流二极管冲击电流较大，所以在选择二极管时，应满足二极管的最大整流电流 I_F 大于二极管的工作电流，同时二极管的最高反向工作电压 U_{RM} 大于二极管实际承受的反向电压 $\sqrt{2}U_2$ ，而不是去限制二极管的实际工作电流与电压，这样才能保证二极管的安全。

(2) 电感滤波电路。图 1-15 所示为单相桥式整流电感滤波电路，电感 L 串联在负载 R_L 回路中。由于电感的直流电阻很小，交流阻抗很大，因此直流分量经过电感后基本上没有损失，而交流分量大部分损失在电感上，所以减小了输出电压中的脉动成分，负载 R_L 上得到了较为平滑的直流电压。电感滤波的波形如图 1-16 所示。

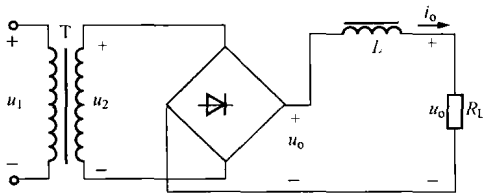


图 1-15 单相桥式整流电感滤波电路

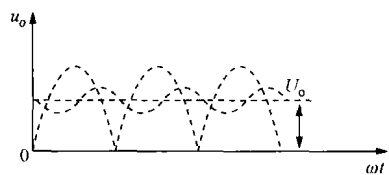


图 1-16 电感滤波的电压波形

在忽略滤波电感 L 上的直流压降时, 一般输出的直流电压为

$$U_o = 0.9U_2 \quad (1-14)$$

二极管承受的反向峰值电压仍为 $\sqrt{2}U_2$ 。

电感滤波的优点是输出特性比较平坦, 而且电感 L 越大, 负载 R_L 越小, 输出电压的脉动就越小, 适用于要求输出电压低、负载电流较大的场合, 如工业电镀等。电感滤波的缺点是体积大、成本高、有电磁干扰。

(3) π 形滤波电路。如图 1-17 所示为桥式整流 π 形 LC 滤波电路, 这种滤波电路是在电容滤波的基础上再加一级 LC 滤波电路构成的。

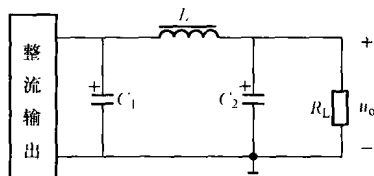


图 1-17 π 形 LC 滤波电路

桥式整流后得到的脉动直流电在经过电容 C_1 滤波以后, 剩余的交流成分在电感 L 中受到感抗的阻碍而衰减, 然后再次被电容 C_2 滤波, 使负载得到的电压更加平滑。当负载电流较小时, 常用小电阻 R 代替电感 L , 以减小电路的体积和重量, 收音机和录音机中的电源滤波电路就采用了 π 形 RC 滤波电路。

【例 1-1】 图 1-18 所示电路中, 已知 $U_2 = 30\text{V}$ (有效值), 设二极管为理想二极管, 操作者用直流电压表测得负载两端电压值 U_o 。出现下列五种情况: ①42V; ②36V; ③30V;

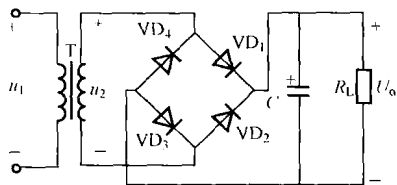


图 1-18 [例 1-1] 图

④27V; ⑤13.5V。试讨论:

(1) 在这五种情况中, 哪些是正常工作时的电压? 哪些是发生了故障时的电压?

(2) 分析故障产生的原因。

解: 单相桥式整流电容电路输出电压的值为 $U_o = 1.2U_2$ 。

在电路正常工作时, 该电路输出的直流电压 U_o 应为 36V。因此, 在这五种情况下, 第②种情况是正常的工作情况, 其他四种情况均为不正常的工作情况。

对于第①种情况: $U_o = 42\text{V}$, $\frac{U_o}{U_2} = \frac{42}{30} = \sqrt{2}$, 即 $U_o = \sqrt{2}U_2$ 。根据单相桥式整流电容滤波电路的特性可知, 当 R_L 开路时, $U_o = \sqrt{2}U_2$, 所以这种情况是负载 R_L 开路所致。

对于第③种情况: $U_o = 30\text{V}$, $U_o = U_2$, 说明电路已经不是单相桥式整流电容滤波电路了。因为单相半波整流电容滤波电路的输出电压估算式为 $U_o \approx U_2$, 所以可知出现这种情况的原因是四只二极管中有一个二极管开路, 变成了单相半波整流电容滤波电路。

对于第④种情况: $U_o = 27\text{V}$, $\frac{U_o}{U_2} = 0.9$, 即 $U_o = 0.9U_2$ 。这个数值满足单相桥式整流电路的输出电压值 $U_o = 0.9U_2$, 说明滤波电容没起作用。所以, 出现这种情况的原因是滤波电容开路。

对于第⑤种情况: $U_o = 13.5\text{V}$, $\frac{U_o}{U_2} = 0.45$, 即 $U_o = 0.45U_2$ 。这个数值正好是单相半波整流电路输出的直流电压。出现这种情况的原因是单相桥式整流电路中有一个二极管开路, 且滤波电容也开路。