

高等职业技术电子信息类专业教材

实用模拟 电子技术

主编 郭维芹 主审 康华光



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

高等职业技术电子信息类专业教材

实用模拟电子技术

主编 郭维芹

主审 康华光

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书反映了近年来电子技术应用的新发展,同时对模拟电子技术基础性内容也给予足够的重视。内容包括:半导体二极管及整流电路、半导体三极管及其基本电路、运算放大器的线性应用及负反馈电路、放大器频率特性及信号滤波电路、信号处理及信号产生电路、功率放大器及线性稳压电源、功率半导体器件及电力电子器件、光电子器件及应用等。本书内容丰富,重点突出,叙述简明扼要,侧重物理概念表述及器件与电路的紧密结合。书中举例具有工程背景,突出应用性、技术性和实用性。正文和例题、习题紧密配合,为便于读者自我检验,在每章末附有“自我测验题”。

本书可作为高等职业技术教育的“电子技术”课程的教材及“实验与制作”,也可供从事电子系统工艺设计和维修的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

实用模拟电子技术/郭维芹主编. —北京:电子工业出版社,1999.7

高等职业技术教育电子信息类专业教材

ISBN 7-5053-5156-7

I. 实... II. 郭... III. 模拟电路—电子技术—高等教育—教材 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第14529号

丛 书 名:高等职业技术教育电子信息类专业教材

书 名:实用模拟电子技术

主 编:郭维芹

主 审:康华光

责任编辑:连潮东

排版制作:海天计算机公司照排部

印 刷 者:北京东光印刷厂

出版发行:电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:403.2千字

版 次:1999年7月第1版 1999年8月第2次印刷

书 号:ISBN 7-5053-5156-7

G·394

印 数:5000册 定价:20.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换,若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

出版说明

高等职业技术教育是现代教育的重要组成部分。近几年随着社会经济和科学技术的发展,已从客观上提出了发展高等职业技术教育的要求。高等职业技术教育在经历了认识定位和模式创新的阶段之后,开始进入课程建构和教材编写的新阶段。

在教育部职教司教材处的直接领导和电子工业出版社的积极组织下,三所积极发展高等职业技术教育的学校——北京联合大学、上海第二工业大学和深圳职业技术学院组建了教材编写领导小组。

三校教材编写领导小组经过多次研讨,认为目前没有能满足高等职业技术教育需要的现行教材,编写符合高等职业技术教育特点的教材已迫在眉睫。三校对电子信息类专业人才培养目标、职业定位以及电子信息类的内涵等问题达成共识,并将电子信息类教材作为首批开发的选题。

我们组织编写这套教材的原则是:充分探索高等职业教学特点,力图构筑以掌握基本概念、强化实际应用为重点,以获得职业技术所需的最基本、最适用的理论知识,以利于培养学生专业实践的适应能力和应变能力的新课程体系。

编写高等职业技术教育的教材是一个新课题,经验尚不足,希望全国电子信息类高职院校的师生积极提出批评建议,共同探索我国高等职业技术教育的特点和路子,不断提高教材的质量,最终形成电子信息类专业配套的高质量教材。

三校教材编写领导小组

1998年4月

出版说明

高等职业技术教育是现代教育的重要组成部分。近几年随着社会经济和科学技术的发展,已从客观上提出了发展高等职业技术教育的要求。高等职业技术教育在经历了认识定位和模式创新的阶段之后,开始进入课程建构和教材编写的新阶段。

在教育部职教司教材处的直接领导和电子工业出版社的积极组织下,三所积极发展高等职业技术教育的学校——北京联合大学、上海第二工业大学和深圳职业技术学院组建了教材编写领导小组。

三校教材编写领导小组经过多次研讨,认为目前没有能满足高等职业技术教育需要的现行教材,编写符合高等职业技术教育特点的教材已迫在眉睫。三校对电子信息类专业人才培养目标、职业定位以及电子信息类的内涵等问题达成共识,并将电子信息类教材作为首批开发的选题。

我们组织编写这套教材的原则是:充分探索高等职业教学特点,力图构筑以掌握基本概念、强化实际应用为重点,以获得职业技术所需的最基本、最适用的理论知识,以利于培养学生专业实践的适应能力和应变能力的新课程体系。

编写高等职业技术教育的教材是一个新课题,经验尚不足,希望全国电子信息类高职院校的师生积极提出批评建议,共同探索我国高等职业技术教育的特点和路子,不断提高教材的质量,最终形成电子信息类专业配套的高质量教材。

三校教材编写领导小组

1998年4月

序

在二十一世纪即将到来之际,回顾本世纪的工业发展,当以电子工业的速度为最快。如果将本世纪初发明的电子管比作萌芽,则到今天它已成长为根深叶茂、支干纵横的大树,而且正在蔓延成为大片丛林。我们可以看到,从国民经济到日常生活中的各个领域,电子产品几乎无所不在,具体事例无庸在此枚举,其发展前途实未可限量。

电子工业的发展,离不开在生产第一线上的技术人才。世界上一些电子工业强国,就是凭借一批从高等职业技术学校毕业出来的技术人才,使产品质量得到保证,生产率得到提高,从而能占领一部分国际市场。有鉴于此,我国也在积极开展高等职业教育和与之相配合的教材建设。依个人管见,这类教材,在电子技术方面,应着眼于为培养以下几方面的能力打好基础,即有看懂电子设备电路原理图的能力,有正确选择合适的电路和元器件,以实现某种功能的能力,有安装、调试电子产品使其达到额定指标的能力和有检修、维护设备并排除故障的能力。前一阶段,市面上苦于找不到符合上述要求的教材。令人欣慰的是,由上海第二工业大学郭维萍教授主编的《实用模拟电子技术》,不仅有这方面的内容,还有其它特色,现扼要列举如下:

一、突出实用

教材编者首先抓住高等职业技术教育的培养目标,突出教材的实用性。体现在讲清工作原理之后,即接以实例;引入“电路辨识”、“调试维修”、“故障诊断”等内容,并附有实验与制作的多种课题,这些都为培养现场应用型人才和制造型工程师起到为其它教材所不能及的良好作用。

二、体系新颖

目前有关电子技术方面的教材,大都是在介绍半导体各种器件之后再介绍各种电路及其应用。这样做常使读者在学习器件时有空虚之感。本教材则将器件与组成的应用电路紧密结合,例如二极管后紧接整流电路,稳压管后紧接稳压电路,集成运放之后紧接负反馈放大电路,体现了“管路结合,管为路用”的精神。此外,通用教材一般只介绍信号的放大、处理、变换和产生,而本教材除此之外还介绍信号的驱动和显示,即功率半导体器件及电力电子电路,光电子技术及其应用电路以供读者选学,使对电子系统有一个更全面的了解。

三、处理得当

教材编者在处理比较复杂的分析过程时,不是依靠数学公式的推导,而是突出物理概念,以定性分析为主,并辅以合适的图表。其实在电子技术方面所遇到的实际问题,很少是因为分析方法不精确而得不到解决。例如具有电容滤波的整流电路输出电压表达式是一个超越方程,书中则用图表来表示。又如在设计高阶有源滤波电路元件参数时,是用简易公式和查表相结合的办法来解决。

在处理器件模型时,通常是把双极型晶体管和场效应管分别处理,本书则用跨导模型统一起来,使分析和设计工作更为简便,也符合当前国际上用电流模方法设计电路的潮流。

在处理传统器件和先进器件的关系时,编者不是将前者一概删除,而是考虑维修设备时的需要而适当地给以介绍,如 PNP 锗管,通用晶闸管等。

四、 利于教学

在编写本书过程中,编者特别注意使教师好教,学生好学而采取一系列措施,例如多举实例,多加插图,在每章后面附有练习题和自我测验题以巩固学习效果和促进思考,通过实验与制作,可以锻炼分析问题,解决问题,动手操作等能力。此外,书中还介绍了计算机辅助教学软件,该软件能帮助进行电路的分析、设计和开发,仿真实验结果,是一个非常有效的教学辅助工具,对在校学生和社会读者也都是大有裨益的。

编写一本教材,并不像有些人所谓是“剪刀加浆糊”的产品,尤其是编写高等职业技术教育方面的教材,不仅需要丰富的教学经验,还要有丰富的生产实践经验以及卓越的归纳、探索、创新能力。本人有幸结识郭维芹教授三十余年,深知他对此当之无愧,由他主编的《实用模拟电子技术》一定会受到广大学生和读者的欢迎。

童诗白

19.5.20

前 言

本教材是为适应高等职业技术教育的迅猛发展而编写出版的。本书力求“新颖”(体系新、取材新、思路新)和“实用”(实例、实验、实训),旨在使读者把握模拟电子技术的发展脉络和应用的指导思想,故名《实用模拟电子技术》。

教材以当前广泛应用的电子设备和代表发展趋势的电子新技术为背景,在介绍传统电子技术基本原理的基础上,刻意于取材的新颖和实用,力求反映近年来电子技术的发展和符合高等职业技术教育的教学特点。作者在书中通过一定数量的工程应用实例和例题,阐明模拟电子技术基本原理和分析问题的方法,以便为读者深入理解和具体应用电子技术创造有利条件。本书联系实际的范围比较广,因而适用面比较宽。

在编写体系上,传统的电子技术教材较多是先讲器件的作用原理及其特性,而后再分析各种电路及系统。本教材在这个体系上作了较大的改革。它将器件和电路紧密结合起来讲述,在讲某一类器件作用原理及其特性和模型后,紧接着介绍该类器件在模拟电路中的应用和工程分析方法。作者这样做,不是内容上简单的重新组合,而是加强模拟电子技术应用性的体现。无疑,电子技术的核心是器件,电子技术是随着器件的发展而发展的。利用半导体器件的非线性和受控性实现各种电子电路的功能,将器件和电路相结合讲,强调“管为路用”,不仅可以从本质上了解电子电路的工作原理,同时也可克服枯燥无味的问题。

在编写的思路,考虑到模拟电子技术的基本内容是指各种基本单元电路的组成原理和工程分析方法,这些基本内容是从事电子技术人才所必须具备的知识结构。集成器件及其应用也是必须的,是教材中的重要内容。本教材紧扣基本内容的同时突出了应用,尤其加强了集成器件应用的介绍,对电路的分析则大为简化。例如,双极型晶体管采用简化的转移电导(g_m)模型,作者认为以转移电导模型进行工程估算,更具有一般性,在作电路分析和估算时有很高的实用价值,还可以与场效应管的低频模型一致,在讨论器件的电容效应时更易于考虑。采用统一的简化模型进行工程估算,也是针对计算机电子线路分析的仿真软件应用的日益普遍和高等职业技术教育学生的特点出发的。

本教材在对传统内容的取舍上,注意到取材新颖。譬如:近几年,功率半导体器件、电力电子技术和光电子技术发展十分迅速,这部分内容在教材中占有四分之一的篇幅。对发展快、最热门的复合功率器件、第四代的功率集成器件和用于功率开关的控制及驱动集成电路,在教材中都有所反映;同时对虽已进入衰退期但使用仍较普遍的普通晶闸管的内容,以一定篇幅予以讲述。对于目前已很少使用的PNP 锗双极型晶体管,也以极少量篇幅给予介绍,因为,对从事电子设备维护的工程技术人员,在近一段时间内,这些知识应当是必备的。

从内容安排上,本书做到了由浅入深,层次分明,物理概念阐述得比较清楚。在前两章中介绍必要的数学解释和电路模型的变换,估计这些分析读者在数学上并不困难。对于信号滤波电路中需用雄厚的电路分析的基础知识的高阶有源滤波电路,为了使读者易于理解,仅以简明的设计公式来描述,结合查表,使学生可以自行设计高阶滤波电路。

突出应用性、技术性和实用性是编写本教材的指导思想,也是读者对象所确定的一项原则。按高等职业技术教育培养第一线的应用型技术人才的要求,教材不能不从此一点出发。本

书一方面注意把实例和工程应用举例与基础原理紧密结合,此外,在教材中安排了“电路辨识”、“调试方法”和“故障诊断”等技能训练方面的内容,并在某些章节叙述查找故障的通用方法,总结出一些行之有效的技巧和经验,以使读者掌握查找故障根源的要领,以增强其实用性。使今后侧重于工艺设计和电子设备维护的人才,在实践训练方面有所帮助。

在某种意义上讲,有关电子技术的工艺设计、设备调试和维修技术,单靠书本是学不会的,唯有通过实践和借助实验室的工作经验才能真正学到手。电子学的实践经验必须由学生从实践中获得。教科书只能用指南的形式提供电路调试和维修的一般方法以及教会学生辨识电子系统组成的基本电路,本书的意图是避免对原理讲解过于详细,而以学生自己的练习来取代。

全书共8章,前6章为基本的部分,后2章为知识扩展的部分。基本部分内容的教学可以用68至72学时完成,扩展部分需24学时左右。根据专业不同,可以选学和删除某些章和节,譬如,学通信的可以不选第7章(功率半导体器件及电力电子电路),而第4章则是必读的材料;另外,对于工业自动化专业,第7章则是可以作为扩选的内容,而第4章中的第4.3节(信号滤波电路)根据情况可以删节。

本书每章末备有一定数量的练习题供读者练习,附有自我测验题供读者自检,还配有“实验与制作”也是本书的一个特点。

参加本书编写工作的有郭维芹(前言、第1章、第2章、第6章、第7章和第4章的第4.3节)、孙秋冬(第3章、第5章、第8章和第4章的前二节)、周政新(参与全书题纲的讨论和第4章初稿和附录B的编写)和山东工业大学刘志军、上海冶金高等专科学校杨慧敏(参加全书题纲的讨论和参与第6章的编写)。郭维芹任主编,负责全书的组织与定稿。孙秋冬协助主编做了不少工作。

华中理工大学康华光教授任本书主审,他在百忙中为书稿提出许多宝贵意见。清华大学童诗白教授对本书的编写给予鼓励、支持和指导。在此谨致衷心感谢。

在编写过程中,常大俊高级工程师和郑耀宗工程师、上海冶金高等专科学校汤常副教授也提出了一些有益的建议;高虹女士等人承担了本书初稿的录入工作。对所有为本书的出版作过贡献的人们,在此表示诚挚的谢意!另外,还要感谢上海第二工业大学王式正校长和朱懿心副校长,正是在他们的鼓励下,作者才得以投身于本书的编写工作。

由于编者学术水平和教学经验有限,本书的错误和缺点在所难免,敬请有关专家和读者指正。

编者

写于上海第二工业大学

1999年2月

第1章 半导体二极管及整流电路

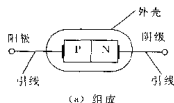
二极管的历史悠久,一百多年前(1898年),马可尼应用晶体检波器使无线电通信获得成功。晶体检波器就是点接触半导体二极管的前身,这意味着在真空管发明之前,二极管已经被使用。半导体二极管的问世是在1948年。在实际中应用的二极管的种类有很多,用途也十分广泛。半导体PN结的单向导电性是二极管的核心,或者说二极管具有整流特性。在功率变换中,用二极管构成整流器把交流变换成直流,是二极管的主要用途。本章叙述二极管的特性和整流电路以及稳压二极管电路。

1.1 半导体二极管

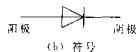
半导体二极管都是由单一PN结为基础制成的器件。半导体二极管按所用材料不同分为锗管和硅管,按制造工艺不同可分为点接触型和面接触型二类。

1.1.1 二极管的结构和类型

二极管用一个PN结做管芯,在P区和N区两侧各接上电极引线,并以外壳封装而成。接在P区的引出线称二极管的阳极,接在N区的引出线为二极管的阴极,如图1-1(a)所示。二极管的符号如图1-1(b)所示,其中三角箭头表示正向电流的方向,正向电流从二极管阳极流入,阴极流出。



(a) 组成



(b) 符号

图 1-1 二极管的组成和符号

1. 点接触型二极管

点接触型二极管是最早的半导体器件。图1-2(a)表示点接触型二极管的结构。它是由一根很细的金属丝热压在N型锗晶片上,并经工艺处理而制成的。与金属丝接在一起的引出线是二极管的阳极,从晶体支架引出的线为二极管的阴极。

锗点接触型二极管,由于金属丝和半导体的接触面很小,所以不能通过较大的电流,但等效的PN结电容小,适宜在高频下工作。常用的点接触型二极管型号有2AP1~2AP7,适用于高频检波、变频,有时也用

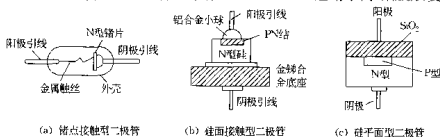


图 1-2 二极管的结构示意图

作小电流整流。

2. 面接触型半导体二极管

图 1-2(b)表示用合金法制成的面接触型二极管的结构。由于面接触型二极管的 PN 结接触面积较大,PN 结电容较大,一般适用于较低的频率下工作,由于接触面积大,允许通过较大的电流和具有较大的功率容量,适用于作整流器件。常用的面接触型二极管有 2CP33 等。

图 1-2(c)是采用光刻、杂质原子扩散等生产工艺制成的硅平面型二极管结构,由于电极面积小,通过的工作电流也小。这类二极管适用于作脉冲电路中的开关元件。常用的管型有 2CK9 等。

1.1.2 半导体二极管

一个理想的开关具有这样的特性,电流从一个方向流时,电阻为零,电流流向另一个方向时,电阻为无穷大。伏安特性可用图 1-3 表示。然而,这种理想开关,在实际中并不存在。

半导体二极管虽然不是一个理想的开关,然而它是一个十分良好的开关。二极管的特性在于它的 PN 结的单向导电性,即阳极电位(P 端)高于阴极(N 端)电位时,管子导通,称为正向,反之,电流极微,可认为基本不导通,称为反向。

图 1-3 理想开关特性

二极管的伏安特性可用 PN 结电流方程来表示:

$$i_D = I_S(e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1.1)$$

式中 I_S 为反向漏电流, U_T 为二极管温度的电压当量。

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (1.2)$$

式中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电荷。在室温 25℃ 的条件下, U_T 约为 26mV, 这个数值通常用作近似计算。

当 $u_D \gg 4U_T$ 时, $i_D \approx I_S e^{u_D/U_T}$, 即管子正向电流与端电压呈指数关系, 当 $u_D \leq 4U_T$ 时, 则 $i_D = -I_S$, I_S 数值, 锗管约为 μA 量级, 而硅管为 nA 量级, 甚至更小。二极管的伏安特性曲线如图 1-4 所示。 $u_D > 0$ 的区域为正向工作区, i_D 随 u_D 增大呈指数增长, 当正向电压较低时, 电流很小且增长慢, 当 u_D 超过某阈值电压后, 电流才显著地增加, 此阈值, 锗管约 0.1V, 硅管约 0.5V。 $u_D < 0$ 的区域是反向工作区。当反向电压值达到某一极限值 U_{BR} 以后, 二极管击穿, 反向电流急剧增长。在击穿区不再符合式(1.1)中的规律, 通常二极管应避免工作在反向击穿区。

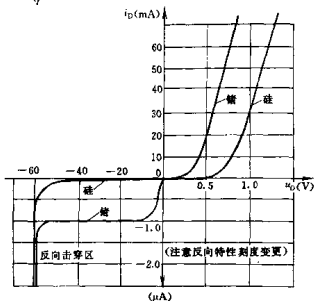


图 1-4 二极管的伏安特性

U_{BR} 称为二极管的反向击穿电压。造成二极管反向击穿的原因有两个,一个是齐纳击穿,另一个是雪崩击穿。齐纳击穿多发生在反向击穿电压 $|U_{\text{BR}}|$ 低于6V的二极管中,雪崩击穿多发生在反向击穿电压 $|U_{\text{BR}}|$ 高于6V的二极管中。然而,当二极管工作在反向击穿区中时,齐纳击穿和雪崩击穿几乎都是同时存在的,不过,对于 $|U_{\text{BR}}| < 6\text{V}$ 的二极管,以齐纳击穿为主,而对于 $|U_{\text{BR}}| > 6\text{V}$ 的二极管,则以雪崩击穿为主。

1.1.3 二极管的直流电阻和交流电阻

1. 直流电阻 R_D

由欧姆定律定义可知,二极管两端所加的直流电压 U_D 与流过管子的直流电流 I_D 之比为二极管的直流电阻,用 R_D 表示,即

$$R_D \triangleq \frac{U_D}{I_D} \quad (1.5)$$

例如,某二极管伏安特性曲线如图1-5所示,若它两端电压 $U_D = 0.7\text{V}$,流过电流 $I_D = 24\text{mA}$,相当于Q点的坐标,则对应于该点的直流电阻

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0.7}{24 \times 10^{-3}} \approx 29\Omega$$

由于已知二极管两端所加的直流电压和流过的直流电流,都能在该管的伏安特性曲线找到相应的一点Q,这时电路中没有变化的电压和电流,所以这一Q点称为二极管的静态工作点。

由图1-5不难看出, R_D 实际上为由原点O到Q点的割线OQ斜率的倒数,即

$$R_D = \text{ctg} \varphi_1 \quad (1.4)$$

由该图可知,Q点位置越高,割线的斜率越大,直流电阻越小。因此,二极管的正向直流电阻随着电流 I_D 的增大而减小。由于反偏时反向电流很小,所以反向直流电阻很大。一般二极管的正向直流电阻约几十欧到几千欧之间,反向直流电阻大于几千欧至几百千欧。

因此,二极管的直流电阻与线性电阻器的电阻不同。线性电阻器的电阻是一个与所加电压的大小、极性无关的常量,其伏安特性是一条过原点的直线;而二极管的直流电阻则与所加电压的大小、极性有关,即与工作点位置有关,其伏安特性是非线性的。由于二极管是非线性器件,它的直流电阻是非线性电阻。

根据二极管的正向与反向直流电阻相差悬殊的特点,可用万用表粗略测试二极管的性能。

2. 交流电阻 r_d

二极管在工作点Q附近的电压微小变化量 $\Delta u_D(u_c)$ 与相应的电流微小变化量 $\Delta i_D(i_s)$ 之比,称为二极管的交流电阻,用 r_d 表示,即

$$r_d \triangleq \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} = \frac{u_d}{i_c} \quad (1.5)$$

① 符号“ $\triangleq$ ”表示“定义为”。

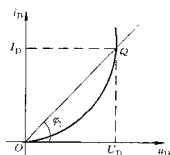


图 1-5 二极管直流电阻的几何意义

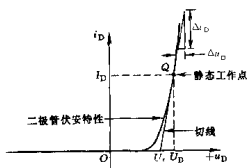


图 1-6 交流电阻的几何意义

求 Q 点的交流电阻时,先在图 1-6 中通过 Q 点对特性曲线作切线。切线与电压轴相交的角度用 φ 表示,则 Q 点的交流电阻可写成

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} = \operatorname{ctg} \varphi \quad (1.6)$$

二极管的交流电阻,除了用上述作图法确定外,还可以由二极管伏安特性表达式推导出来。由二极管方程(1.1),二极管的交流电阻为

$$r_d = \frac{du_D}{di_D} = \frac{U_T}{I_S e^{u_D/U_T}} \approx \frac{U_T}{I_D} \approx \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})} \quad (1.7)$$

根据上式可以很容易地由二极管的静态电流计算出二极管的正向交流电阻,式中 I_D 为流过二极管的静态电流。例如,当静态电流 $I_D = 1.3\text{mA}$ 时, $r_d = 26(\text{mV})/1.3(\text{mA}) = 20\Omega$ 。

1.1.4 二极管的温度特性

图 1-7 示出了温度对二极管伏安特性的影响,由图可看出,反向饱和电流随温度上升而剧增,而正向段表现为特性曲线的左移。

PN 结的反向饱和电流与温度密切相关,由式(1.1)中 U_T 为二极管的温度电压当量,由式(1.2)知,它是温度的函数,由于 PN 结的反向饱和电流 I_S 对温度极其敏感,它亦随温度的上升按指数规律剧增。通常可粗略估计为温度每升高 10°C 左右, I_S 增加一倍。 I_S 对温度的敏感,是造成以 PN 结为基础的半导体器件温度不稳定的主要原因。另一方面,在二极管伏安特性曲线的正向段,当温度升高时,电流 i_D 增大,相当于仅需较小的正偏置电压即能维持相等的正向电流。上述温度对正向段的影响,也是造成以 PN 结为基础的半导体三极管温度不稳定的重要原因。

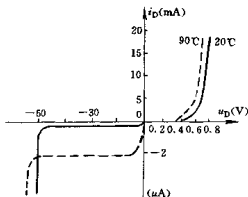


图 1-7 温度对二极管伏安特性的影响

1.1.5 二极管电路的图解法及大信号模型

由 PN 结的伏安特性曲线得知,二极管是一非线性器件。在大信号工作时一般应用图解法,或采用折线近似模型。

1. 二极管电路的图解法

考虑图 1-8(a)的二极管电路, V_{DD} 为偏置电压, R_L 为负载电阻,现需决定负载上的电流及管子上的压降。

根据克希霍夫电压定律,可列出

$$u_D = V_{DD} - i_D R_L \quad (1.8)$$

式中含有 u_D 及 i_D 两个未知数,尚不能求其解,还需寻找第二个包含 u_D 及 i_D 的方程。考虑到电路中的 u_D 和 i_D 除需满足式(1.8)外,还需满足二极管的伏安特性曲线,即二极管方程。求解该电路应为上述两方程的联解。图解法实质上就是求取上述两方程所决定的曲线的交点。式(1.8)所决定的直线在 u_D-i_D 平面上与两坐标轴的两截距分别为 V_{DD}/R_L 及 V_{DD} ,则交点 Q

的坐标 I_D 及 U_D 即为本电路的解, 见图 1-8 (b)。

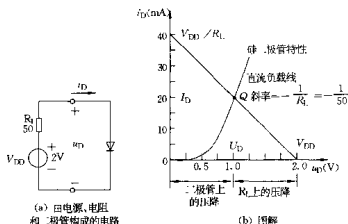


图 1-8 二极管电路的图解法

由于 Q 点的坐标代表管子的直流工作状态, 故 Q 点称为电路的直流工作点或静态工作点, 而由方程 (1.8) 决定的直线, 其斜率为 $-1/R_L$, 即仅与直流负载电阻 R_L 有关, 故该直线称为直流负载线, 式 (1.8) 称为直流负载线方程。

上面所介绍的图解方法并不局限于二极管电路, 它具有普遍的意义。它是分析电子线路的一种重要手段和基本分析方法, 譬如后面要讨论的三极管电路的图解法。

下面对含有交流信号的电路作图解分析, 在图 1-9 (a) 所示电路中, 二极管电路用直流电压 V_{DD} 偏置于直流工作点 Q 上, 一个幅度为 U_m 的正弦波的电压叠加在 V_{DD} 上, 由此, 加于此电路中的电压相当于变化着的 V_{DD} , 电源电压变化范围限于 $V_{DD} \pm U_m$ (设 $U_m \ll V_{DD}$), 相应的工作点 I_D 和 U_D 变化范围为 $I_D \pm \Delta I_D$ 及 $U_D \pm \Delta U_D$ 。如图 1-9 (b) 所示。

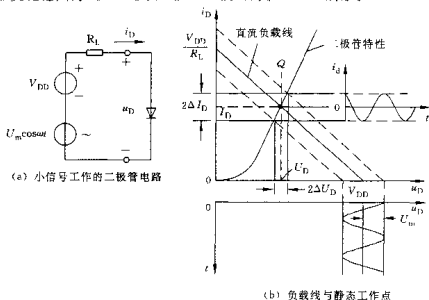


图 1-9 二极管电路交流信号的图解

2. 二极管的折线近似模型

由于二极管的导电特性在偏置电压低于阈值电压时,电流很小,而在偏置电压高于阈值电压后,电流随电压的增加而激增。因此,在工程计算中,在精度允许范围内,常以折线代替二极管的实际伏安特性,以简化计算。图 1-10 为二极管工作在大信号时不同精度的折线模型及其相应的等效电路。其中图 1-10(a)为理想二极管模型,即管子的反向电流为零,正向管压降为零。图 1-10(b)模型是考虑了二极管的正向管压降 U_T (硅管约为 0.6~0.7V,锗管为 0.2V 左右),至于图 1-10(c)乃考虑了二极管正向导通微变电阻 r_d 在内的折线模型。

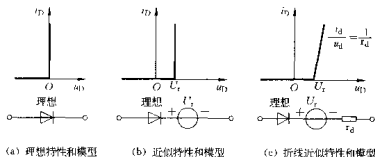


图 1-10 二极管大信号的近似模型和特性

例 1.1 一硅整流二极管提供 1.5A 直流电流,该电流下二极管电压降为 $U_D=0.75\text{V}$ 。确定二极管的折线模型的参数 U_T 和 r_d 。

解 1. 由式(1.7) $r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{0.026}{1.5} = 0.0173\Omega$

2. 由图 1-10(c) $U_T = U_D - (I_D r_d) = 0.75 - (1.5 \times 0.0173) = 0.724\text{V}$

人们可根据精度要求选择相应的二极管的简化模型。通常采用图 1-10(b)所示的二极管折线模型,则电路的计算就简便得多。

3. 二极管的微变模型

工作在小信号情况下的二极管,可以用线性模型代替非线性特性,从而可按线性电路理论对有源电路进行简化分析。

假如我们仅对交流信号感兴趣,则二极管可以模拟成一个电导 g_d

$$g_d \triangleq \frac{\Delta i_D}{\Delta u_D} = \frac{1}{r_d} \quad (1.9)$$

正向偏置二极管的低频微变模型是一个电阻 r_d ,如图 1-11 所示。

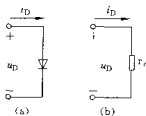


图 1-11 二极管的微变模型

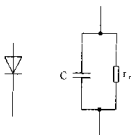


图 1-12 二极管的高频模型

工作在高频情况下的二极管 PN 结呈现电容效应,可得到图 1-12 所示的二极管的高频微变等效电路。其中 C 应为 PN 结电容与扩散电容之和。因为 r_a 及 C 都为线性元件,至此,完成了二极管的线性化工作,剩下的仅是线性电路的计算而已。

1.1.6 二极管的主要参数

半导体二极管都是由单 - PN 结为基础制成的器件。因而不同类型的二极管的特性都大体上相似,但是为了满足不同实际应用的需要,往往采用一些特殊工艺以突出二极管的某些性能。例如,要对高频信号检波时,就要求结电容小的点接触二极管,结电容就成为用于超高频电路二极管的主要参数;又如需要将 50Hz 的交流电源整流成直流电源,就要求额定整流电流大的平面型二极管,因而额定整流电流、最高反向工作电压、反向电流就成为这种类型二极管的主要参数。由此可见,不同用途的二极管,它们的主要参数是不完全相同的。

要确定拟采用二极管的参数,可以从晶体管手册上查到,也可以通过实验方法对它们的特性曲线进行实际测量。下面对几种常用二极管的主要参数指标作简要说明。

表 1-1 列出的是晶体管手册中查到的 2AP1~7 点接触型锗二极管的主要参数;表 1-2 列出的是 2CP33 面接触型二极管的参数。

表 1-1 2AP1~7 点接触型锗二极管的电参数(在电子设备中作检波和小电流整流用)

参 数	单位	测试条件	型 号					
			2AP1	2AP2	2AP3	2AP4	2AP5	2AP6 2AP7
最大整流电流	mA		16	16	25	16	16	12 12
最高反向工作电压(峰值)	V		20	30	50	50	75	100 100
反向击穿电压	V	反向电流为 400 μ A	≥ 40	≥ 45	≥ 45	≥ 75	≥ 100	≥ 150 ≥ 150
正向电流	mA	正向电压为 1V 时测得	≥ 2.5	≥ 2.5	≥ 7.5	≥ 5.0	≥ 2.5	≥ 1.0 ≥ 5.0
反向电流	mA	反向电压分别为 10、25、50、75、100V	≤ 250	≤ 250	≤ 250	≤ 250	≤ 250	≤ 250 ≤ 250
最高工作频率	MHz		150	150	150	150	150	150 150
极间电容	pF		≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1 ≤ 1

表 1-2 2CP33 等面接触型二极管的电参数(在电子设备中主要作整流用)

参 数	单位	型 号				
		2CP33	2CP33A	2CP33B	2CP33C	2CP33D
额定整流电流	mA	500	500	500	500	500
最高反向工作电压(峰值)	V	25	50	100	150	200
最高反向工作电压下的反向电流(测试温度为 125 $^{\circ}$ C)	μ A	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300	≤ 300
额定整流电流下的正向压降	V	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
最高工作频率	kHz	3	3	3	3	3
参 数	单位	型 号				
		2CP33E	2CP33F	2CP33G	2CP33H	2CP33I
额定整流电流	mA	500	500	500	500	500

续表

参 数	单位	型 号				
		2CP33	2CP33A	2CP33B	2CP33C	2CP33D
最高反向工作电压(峰值)	V	250	300	350	400	500
最高反向工作电压下的反向电流(测试温度为125℃)	μA	≤300	≤300	≤300	≤300	≤300
额定整流电流下的正向压降	V	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
最高工作频率	kHz	3	3	3	3	3

两表中参数的意义如下:

• 最大整流电流:二极管用在整流电路中时,通过它的电流是随时在变化着的,这里指的是允许流过二极管电流的平均值。在整流工作条件下,电流通过二极管的每个时刻,在二极管上也必定有一定的压降,因而管子上每个时刻都有瞬时功率。但管子上能散发的功率是有限的,限制最大整流电流,也就等于限制管子上的平均功率。使用时不要超出二极管的这个指标,以免因温度升高损坏管子。

• 反向击穿电压:二极管用在检波或整流电路中时,其反向电压也是变化的。加在二极管上的反向电压超过一定值时,就会出现反向击穿现象。当二极管工作在这个区域时,管子上的电压高而且电流大,消耗的功率很大,如不采取措施限制,管子就要烧坏。然而,一般整流、检波电路中,为了保证整流和检波的效率,是不采取限流措施的,这就要求电路工作时,在任何时刻都不要出现反向电压超过“反向击穿电压”这个指标。

• 最高反向工作电压(峰值):从手册上看,“最高反向工作电压”要比“反向击穿电压”低一些。这是为了在工作过程中确保管子的安全、延长管子寿命而增加的一项指标。另外,有些管子的反向击穿电压的界限并不明显(即反向击穿特性的斜率不大),在反向电压较大时,虽然还未出现完全击穿现象,但反向电流已经比较大,如不注意,也可能烧坏管子。规定“最高反向工作电压”这个指标后,就可提高电路的可靠性。

• 正向电流:这个参数是指在给二极管加上1V的正向电压时的电流。这实际上是给出了二极管正向特性曲线上的一个点。

• 反向电流:这个参数是指在给二极管上加上一定反向电压时的反向电流。这实际上是给出了二极管反向特性曲线上的一个点。

• 最高工作频率:被二极管检波的信号源及被二极管整流的电压源一般都是正弦波形。由于二极管的两电极之间存在电容,在工作时,信号除通过PN结的正常渠道外,还被电容分流一部分。工作频率越高,分流的部分越多。工作频率高到不能忽略极间电容时的频率称为最高工作频率。

• 极间电容:极间电容是指二极管两电极间电容的总称。其中有PN结的结电容、引线电容等。

• 最大整流电流时的正向压降:在整流工作状态下,二极管的正向电流是随时在变化着的。因而,每一瞬间的正向压降也是变化的。这个指标指的是正向压降的平均值。知道了这个参数后,可估算整流时在整流管上的电压损失以及整流管上的功率损耗。

• 最高反向工作电压下的反向电流:二极管工作在最高反向电压下,虽然还没有工作在反向击穿状态,但已有一定数量的反向电流存在。这个参数小,说明该二极管的单向导电性能好,因而整流效率也高。