

国外电子与通信教材系列

# 电子学原理

Electronics Concepts: An Introduction

[美] Jerrold H. Krenz 著

马爱文 赵霞 彭力 等译

何福友 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
www.phei.com.cn

国外电子与通信教材系列

# 电子学原理

Electronics Concepts: An Introduction

[美] Jerrold H. Krenz 著

马爱文 赵霞 彭力 等译

何福友 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

当今,电子学与微电子学领域的相互渗透,使电子技术所涵盖的内容更加广泛。本书正是通过讲述电子学概念及其适当的应用,使读者加深对电子学的理解和基本原理的掌握。

本书内容包括:电子技术在各个领域的应用、半导体二极管及其电路、晶体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路及直流电源等6部分。书中通过对各种半导体器件及其电路的分析,系统地阐述了电子学中的基本概念、基本原理和基本分析方法,介绍了电路实例,并附有一定数量的例题和习题,非常利于学习和实践运用。

本书可作为高等工科院校通信类、电子类专业的基础课程教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition published by The Syndicate of the Press of the University of Cambridge, England. Copyright © Cambridge University Press 2000.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2002.

本书中文简体专有翻译出版版权由Cambridge University Press 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号:图字:01-2001-2157

### 图书在版编目(CIP)数据

电子学原理 / (美)克伦茨(Krenz, J. H.)著;马爱文等译. -北京:电子工业出版社, 2002.5  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Electronics Concepts: An Introduction  
ISBN 7-5053-7588-1

I. 电... II. ①克... ②马... III. 电子学 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第029118号

责任编辑:王春宁

印刷者:中国科学院印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <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:24.25 字数:621千字

版 次:2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

定 价:36.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长、中国电子学会会上、副理事长 中国通信学会常务理事
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师 移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	阮秋琦	北方交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	徐重阳	华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、教材建设委员会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社副社长

## 译 者 序

电子学原理是通信和电子工程类各专业的一门专业基础课,它是研究各种半导体器件的物理特性、电路及其应用的学科。本书内容精练,重点突出,反映了作者具有丰富的教学实践经验和较宽的专业知识面。在内容安排上,作者注意贯彻从实际出发、由浅入深、由特殊到一般、从感性上升到理性等原则,通过对各种半导体器件及其电路的分析来阐述电子学中的基本概念、基本原理和基本分析方法。对于基本的和常用的半导体电路,除了进行定性的分析外,还介绍了工程计算和设计方法。对于更全面的分析和设计,则可借助 SPICE 软件来实现,这将有利于读者开拓思路,增强学习的主动性。为了加深对课堂知识的理解,书中列举了若干电路实例,并配有一定数量的例题、思考题和习题。本书从不同侧面介绍了电子学的基本概念及其应用,能满足大多数读者的需求,指导他们在电子学课程的学习中获得最大的收益。

本书由马爱文、彭力、赵霞和李德良等翻译,全书由何福友审校,其他参译人员还有张政保、杨文飞、何英、谢颖、王子章和王瑾。由于译者水平有限,书中一定存在不少错误和不妥之处,敬请各方面的读者批评指正。

# 前 言

今天的电子学和微电子学领域包含了大量的知识和实践,因此在教学过程中必须限定基本课程中涉及的主题,以避免仅仅成为大量电子电路和系统的百科全书式的目录。为了理解电子学,需要掌握一些着重强调的概念。作者的目的是用学生和教师都易于接受的方法来讲述电子学概念及其适当的应用,这是掌握一般概念及理解其限制条件的根本。本书的做法是讲好一定数量的主题,而不是包括粗略的大范围的主题,因为后者留给人们的只是一个数量巨大的词汇表。

本书内容非常充实,远远超出了电子学课程一学期的授课量。另外,本书需要读者有很好的线性电路的应用知识和对微积分学与物理学的正确理解。虽然有关材料的复杂性有所增加,但本书在选材方面很灵活。作者试图给出足够的说明材料,不仅说明做什么,而且说明特定电路是如何应用的。大部分章节都有详细解答的例题,这些解答使用了分析和计算机仿真两种方法。另外,本书还引用了大量的参考文献,使有兴趣的学生能在一个特定主题中学到更多的知识。

本书开篇第1章很有特色,这一章对许多电子系统进行了概述。它使学生的学习任务更加有趣,并引入了有关信号的概念。信号是用电子电路来处理的,电子电路的发展是为了满足特定的需要。同时,电子系统的进步依赖于当时可用电子器件的性能。本书是自上而下和自下而上方法的结合,考虑到了系统以及理解器件所需的基本物理概念。

本书是从电路理论课程中只讨论简单电路模型( $v=iR$ 等)适用的双端线性器件的一个过渡。尽管对于电路理论很少需要对模型及模型所代表的器件加以区分,但对于电子器件却不能这样。在电子学原理中,学生逐渐学习到每个器件所使用的模型的作用。特定模型的使用与器件所在电路的特性以及所加信号有关。对学生来说,带有非线性器件和三端(有时四端)器件电路的处理是概念上的显著飞跃。

第2章讨论了半导体结型二极管,包括对半导体物理特性的简单定性讨论。虽然人们认为深入学习半导体物理特性的知识非常重要,但作者认为这最好在同期和后续的理论课程学习中完成。电子学原理讨论的是由于电位的差异引起的电子和空穴的运动,从而为直观地理解半导体器件提供了一个基础。本章介绍了负载线、二极管特性方程及用于对二极管特性进行近似的各种二极管模型,讨论了光电电池和发光二极管的基本原理以及重要的应用。

第3章介绍了双极结型晶体管。首先讨论场效应器件的确有一定的吸引力,因为场效应器件的模型比双极结型晶体管简单。然而,双极结型晶体管是结型二极管的直接扩展,并且这种晶体管在做演示实验时更加方便。从宏观上强调了对分立半导体器件的理解,以及对与在放大和开关电路中使用器件有关的概念的理解。

第4章简单地讨论了MOSFET器件的物理特性,并介绍了其宏观表现的分析表达式。虽然包括了以小信号工作情况为基础的模拟电路的工作情况,但本章的主线是数字电路。对于采用适合于集成电路的器件结构的逻辑门,确定了其静态和动态工作情况。在双稳态电路之后,讨论了半导体存储器。

第5章的主题是运算放大器及负反馈。这里强调了运算放大器电路的负反馈性质,因为基本电路中经常使用的“理想运放”通常掩盖了运放电路的负反馈性质。负反馈虽然增加了复杂性,但可看出对没有反馈的电路有许多改进。同时也应强调,如果负反馈使用不当将会发生不合需要的结

果。本章突出了使用运放的模拟设计技术。

第6章的主题是关于电子电路的电源,讨论了整流器、滤波器、电子调整器和电池。关于这些器件的知识对于几乎所有的电子系统设计都是必要的,这些内容经常在基本电子学课程中被忽略。如果省略电子调整器一节,本章可以紧跟在第2章之后。

附录A中关于集成电路的制造把我们带到了本书所强调的电子电路之外。它使我们看到了制造过程中用到的物理和化学技术以及器件的实际物理结构和尺寸。附录B为设计过程,进行了几个简单电子电路的设计。每一步都有说明,这样学生就能理解设计的基本原理。

本书自始至终都使用了计算机仿真。我们假定每个学生都熟悉SPICE,即在线性电路课程中用到过它(如果没有,有大量的参考书可用)。所有版本的SPICE都一样,在所有仿真例题中都包括电路文件。虽然本书使用的是Probe(MicroSim)图形,但使用其他程序可以得到类似的解答。

本书包括了要求用分析方法求解的问题和要求用计算机仿真方法求解的问题。书中的问题和仿真比一学期课程所用的要多很多,这样,教师可以根据不同的学期进行不同的安排,并减少前几课的解答。计算机仿真只限于那些可在个人计算机上用学生版PSPICE程序运行的电路。书中还包括了自由发挥的设计练习。

每章中与理论直接相关的实验可以在World Wide Web上查找:

<http://www.cup.org/titles/66/0521662826.html>

实验使用的是便携式文件格式(扩展名为.pdf),以便于下载和打印。有详细的实验步骤来指导学生进行测量和观察,要求教师做的工作已降到最少量,当然也可以把实验部分作为课堂演示。

# 目 录

<b>第 1 章 电子系统：一个世纪的发展历程</b> .....	1
1.1 电子器件：概述 .....	2
1.1.1 二极管 .....	2
1.1.2 真空三极管 .....	3
1.1.3 晶体管和集成电路 .....	5
1.2 无线通信：新的时代 .....	6
1.2.1 电子调谐 .....	7
1.2.2 真空管电路 .....	8
1.2.3 超外差式接收机 .....	9
1.3 电报和电话：广域连接 .....	10
1.3.1 电报 .....	10
1.3.2 基本电话系统 .....	11
1.3.3 模拟电话信号 .....	12
1.3.4 数字电话系统 .....	13
1.4 电视：时间相关的可视图像 .....	14
1.4.1 模拟电视 .....	15
1.4.2 阴极射线管显像器 .....	16
1.4.3 摄像机设备 .....	17
1.4.4 数字电视 .....	19
1.5 电磁频谱：多种用途 .....	21
1.5.1 频谱 .....	21
1.5.2 雷达 .....	22
1.5.3 通信卫星 .....	24
1.6 计算机：数百万晶体管的组合 .....	25
1.6.1 逻辑电路 .....	26
1.6.2 计算机的基本框架 .....	28
1.6.3 存储器 .....	30
1.7 集成电路：器件尺寸缩小，复杂性提高 .....	33
1.8 参考文献 .....	35
1.9 习题 .....	37
1.10 计算机仿真 .....	42
<b>第 2 章 半导体结型二极管：现代电子技术的基础</b> .....	44
2.1 电子和电导：基础知识回顾 .....	44
2.2 半导体：电子和空穴的作用 .....	48

2.2.1	本征半导体 .....	50
2.2.2	n 型半导体 .....	51
2.2.3	p 型半导体 .....	52
2.3	结型二极管：典型的半导体器件 .....	55
2.3.1	内部电位分布 .....	57
2.3.2	外部电压的作用 .....	58
2.4	结型二极管：端特性 .....	59
2.4.1	二极管电流 .....	59
2.4.2	SPICE 模型 .....	62
2.5	二极管电路：如何处理非线性元件 .....	64
2.5.1	负载线 .....	65
2.5.2	迭代法 .....	66
2.5.3	SPICE 求解 .....	67
2.6	结型二极管建模：近似模型 .....	72
2.6.1	理想二极管开关模型 .....	72
2.6.2	二极管恒压降模型 .....	74
2.6.3	折线模型 .....	74
2.7	光电池：光 - 半导体的相互作用 .....	79
2.7.1	光子 .....	79
2.8	发光二极管和激光二极管：光通信 .....	85
2.8.1	发光二极管 .....	85
2.8.2	发光二极管的应用 .....	85
2.9	参考文献 .....	92
2.10	习题 .....	94
2.11	计算机仿真 .....	103
<b>第 3 章</b>	<b>双极结型晶体管：有源电子器件 .....</b>	<b>106</b>
3.1	共基极组态：物理描述 .....	109
3.2	共射极组态：同样器件的不同用法 .....	114
3.2.1	等效电路 .....	114
3.2.2	传输特性 .....	115
3.2.3	SPICE 仿真模型 .....	117
3.3	共射极等效电路：求解晶体管电路 .....	123
3.3.1	基极偏置电路 .....	123
3.3.2	发射极电阻 .....	125
3.3.3	射极输出电压 .....	127
3.4	数字逻辑电路：静态和动态特性 .....	133
3.4.1	晶体管的工作区 .....	133
3.4.2	电容负载 .....	134
3.4.3	逻辑系列 .....	137
3.4.4	晶体管 - 晶体管逻辑 .....	140

3.5	放大电路：小信号特性 .....	144
3.5.1	模拟信号 .....	144
3.5.2	电容耦合 .....	145
3.5.3	小信号等效电路 .....	147
3.5.4	混合 p 型晶体管模型 .....	148
3.6	PNP 晶体管：补偿器件 .....	154
3.6.1	对称补偿 .....	157
3.7	参考文献 .....	162
3.8	习题 .....	162
3.9	计算机仿真 .....	173
3.10	设计练习 .....	175
<b>第 4 章</b>	<b>金属氧化物场效应晶体管：另一种有源器件 .....</b>	<b>178</b>
4.1	电场感应载流子：MOSFET 器件的物理特性 .....	181
4.1.1	SPICE 模型 .....	185
4.2	共源等效电路：应用 .....	189
4.2.1	共源放大器 .....	190
4.2.2	源极跟随放大器 .....	192
4.3	MOSFET 逻辑门：基本考虑 .....	200
4.3.1	基本的逻辑反相器 .....	202
4.3.2	MOS 管反相门 .....	203
4.4	集成逻辑门电路：不需要电阻 .....	207
4.4.1	增强型负载 .....	208
4.4.2	衬底偏置 .....	209
4.4.3	耗尽型负载 .....	211
4.5	互补的金属氧化半导体逻辑门：能量效率逻辑系列 .....	215
4.5.1	P 沟道 MOSFET 器件 .....	216
4.5.2	CMOS 的反相门 .....	218
4.5.3	CMOS 逻辑门 .....	221
4.6	逻辑存储器：存储兆字节的基础 .....	224
4.6.1	MOSFET 双稳态电路 .....	225
4.6.2	触发存储元件 .....	226
4.6.3	存储阵列 .....	227
4.6.4	动态存储阵列 .....	229
4.7	参考文献 .....	234
4.8	习题 .....	235
4.9	计算机仿真 .....	244
4.10	设计练习 .....	246

<b>第 5 章 负反馈及运算放大器</b> .....	248
5.1 负反馈：关键概念 .....	250
5.1.1 分贝表示法 .....	252
5.1.2 减小失真 .....	253
5.1.3 负反馈对放大电路其他性能的改善 .....	256
5.2 稳定性：不是所有放大器都具有 .....	261
5.2.1 放大器的相移 .....	262
5.2.2 稳定性 .....	265
5.3 运算放大电路分析：基本思路 .....	271
5.3.1 理想运算放大器 - 输入端虚短 .....	272
5.3.2 运算放大器的局限性 .....	275
5.4 预加重和去加重电路：设计举例 .....	283
5.4.1 预加重电路 .....	283
5.4.2 去加重电路 .....	284
5.4.3 设计 .....	285
5.4.4 SPICE 证明 .....	287
5.5 宽带放大器：设计举例 .....	288
5.5.1 单级放大器 .....	289
5.5.2 两级放大器 .....	290
5.5.3 三级放大器 .....	290
5.5.4 最终设计 .....	291
5.5.5 SPICE 验证 .....	293
5.6 参考文献 .....	296
5.7 习题 .....	296
5.8 计算机仿真 .....	302
5.9 设计练习 .....	305
<b>第 6 章 电源</b> .....	307
6.1 整流器 .....	308
6.1.1 半波整流器 .....	308
6.1.2 全波整流器 - 带中间抽头的变压器 .....	310
6.1.3 全波整流 - 桥式整流器 .....	311
6.2 滤波器：减小负载电压的波动 .....	316
6.2.1 电容滤波器 - 半波整流器 .....	316
6.2.2 电容滤波器 - 全波整流器 .....	318
6.2.3 非理想变压器 .....	320
6.3 齐纳二极管稳压器：改善输出电压 .....	325
6.4 稳压器：近乎理想的电源 .....	330
6.4.1 基本的运算放大器稳压器 .....	330
6.4.2 带齐纳二极管基准电压的稳压器 .....	332
6.4.3 使用带隙基准电压的稳压器 .....	333

6.4.4	开关式稳压器 .....	337
6.5	电池：一种越来越重要的电子能源 .....	338
6.6	参考文献 .....	342
6.7	习题 .....	342
6.8	计算机仿真 .....	349
6.9	设计练习 .....	351
<b>附录 A</b>	<b>集成电路的制造 .....</b>	<b>352</b>
A.1	集成电路晶体管 .....	352
A.2	制造过程 .....	355
A.3	小结 .....	358
A.4	参考文献 .....	358
<b>附录 B</b>	<b>设计过程 .....</b>	<b>359</b>
B.1	双极结型晶体管电路（第3章）.....	359
B.2	金属氧化物场效应晶体管（第4章）.....	363
B.3	负反馈和运算放大器（第5章）.....	366
B.4	电源（第6章）.....	368
B.5	参考文献 .....	371

# 第1章 电子系统：一个世纪的发展历程

电子系统塑造了我们的日常生活。家庭中有大量的电子产品：收音机、电视机、录像机、高保真音响、便携式摄像机、盒式录音机及CD唱机、电话应答机、微波炉及个人计算机。虽然不是很明显，但复杂的电子产品控制了我们大部分的生活，例如，微处理器控制着我们的汽车。我们使用的电话系统，其功能是用电子设备放大和传输话音信号。利用微波或光纤与卫星的结合，我们的交谈可以传遍整个世界。从一个机场到另一个机场的安全飞行依赖于电子雷达系统，电子传感器和计算机可以使现代喷气式飞机“飞”起来。现代医疗工作依靠非常复杂的电子诊断和监控系统。此外，如果没有电子通信及信息处理系统，商业和工业部门将无法工作。无处不在的显示器昭示着我们正处于一个新的电子世界。

电子学改善了我们的生活，但有时也使生活变得更糟糕。虽然我们一直与世界上发生的事情保持着不变的联系，但也处于难以想像的武器破坏力的危害之中，而武器的破坏力依赖于电子学的进步。不管是为了设计和使用电子系统，还是为了指引电子系统的发展方向，对电子学的理解都是必不可少的，这样它们才能服务于人类生活条件的改善。

有人说，要想前进，必须知道自己的位置。20世纪是电子时代——直到1900年才出现现在称之为电子的器件。现代意义的术语“电子学”，直到1930年才开始使用（Süsskind 1966）。本章作为介绍性章节，从对电子器件的简要概括开始，接着讨论了无线系统：无线电。电子器件首先在收音机中得到应用，1904年发明了真空二极管，1906年发明了三极管。不仅无线电通信比真空管的发明早将近10年，而且，20世纪的前10年大部分系统都没有使用真空管。毫不夸张地说，真空管可以称为无线电通信的一场革命，它导致了连续发射信号和高灵敏度与选择性接收机的产生。随着真空管1913年在电话中的第一次应用，它就成了电话系统中的一个重要器件。真空管放大器和多路传输电路的使用，使长途电话业务得到了极大的扩展。20世纪后半期出现的晶体管和集成电路使得发展数字系统成为可能。随着这种发展，电话交换和传输系统又一次得到显著的提高。

一方面，电子设备的发展依赖于基础物理学原理的知识：真空中电子的行为及其与其他物质间的相互作用。另一方面，需要不断地开发电子器件以满足认知的需求。电子器件的特征决定了哪些应用能够实现。1.4节讨论的电视机，说明了电子设备的发展和专用集成电路之间的相互联系。模拟电视系统在20世纪30年代发展起来，在40年代后期进入商用。在20世纪剩余的时间里，电视都是基于这种模拟系统，惟一的进步是引入了彩色信息分载体。20世纪末数字系统发展了起来，它与模拟系统完全不同，并与其不兼容。虽然从传输方面看数字系统效率更高，但是所需的信号处理非常复杂。如果没有20世纪80年代发展起来的、用于编码和解码的超大规模集成电路（VLSI），就不可能有数字电视。

电磁频谱（1.5节）用于各种收音机、电视机及其他通信设备。虽然早期的雷达系统可以追溯到20世纪30年代，但是第二次世界大战促进了这项技术的快速发展。人们发明了能够传输和检测超高频信号（ $f > 1000 \text{ MHz}$ ）的新电子器件。20世纪60年代第一次发射的通信卫星也依赖于这种超高频（微波）器件。

数字电路导致了计算的革命。早期的计算机，直到20世纪60年代中期左右还依赖于真空管电

路。在今天看来,这些计算机不仅处理能力小,而且由于真空管可靠性的限制,频繁发生死机。固态器件不仅导致了可靠性的大幅度提高,而且使得拥有更高计算能力的机器成为可能。借助于超大规模集成电路,桌面计算机具有了10年前只有大型主机才能达到的计算能力。

不用说,除了这些讨论之外,电子器件和电路在许多其他应用中也已经很常见。功率电子学依赖于电子开关器件和电路。应用电子系统可以有效地完成频率电压转换以及交流变直流和直流变交流的转换。在医用电子学中,各种电子传感器电路与计算机系统一起发展起来,用来处理和显示数据。更进一步,电子系统,如心脏起搏器,已经很好地增进了机体的功能。依靠简单微处理器的电子传感和控制系统,其应用范围从可编程恒温器到汽车点火和燃料系统。涉及大规模计算能力的、更复杂的传感和控制系统已经应用于自动制造系统。虽然对这些的讨论及其应用已经超出了本章的范围,但应该认识到,不同的系统经常采用类似的电子器件和电路。为了理解最简单和最复杂的电子系统,有必要知道基本概念和本文主题。

## 1.1 电子器件: 概述

约翰·安布罗斯·弗莱明爵士(Pierce 1950; Shiers 1969)在英国制造出热离子阀,又称真空管。该管依据所谓的爱迪生效应,电流由灯泡中的热灯丝产生。通过用热灯丝附近装有电极的灯泡进行的一系列试验,弗莱明推断出电流为阴极电荷所致。我们现在知道,电流是由于热灯丝发射的电子被电极收集形成的。在某种程度上,该电流只由电子产生,到电极的电流是单方向的;在高真空度的管子中,不会形成相应于正电荷运动的电流。

### 1.1.1 二极管

弗莱明阀包括一个热灯丝(相当于灯泡中炽热的灯丝),该灯丝由外加电池所产生的电流加热。发射的电子由灯丝周围的屏极收集(图1.1)。尽管实际电流是由于电子从电极向屏极的移动产生的,但是屏极电流 $i_p$ 习惯上为正值,因为电流定义为正电荷的假定移动方向。正的屏极电压吸引电子,所以电流增加,反之负的屏极电压排斥电子,产生极小的电流或零电流。这种非线性作用导致了电流只有一个方向( $i_p \geq 0$ )。对于有效正电压,排空良好的管电流基本为零。

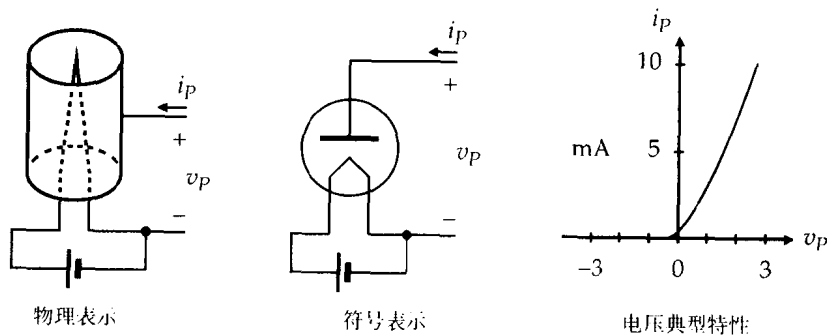


图1.1 真空二极管及典型特性曲线

大约与弗莱明发明真空管的同时,Greenleaf W.Pickard正在试验一种点接触型的半导体检波器(Douglas 1981)。该器件可被看做现代固态器件的前身。除了Pickard制造的使用硅的检波器之外,

Henry H.C. Dunwoody 在 1906 年开发出了使用碳化硅的类似检波器。直到 20 世纪 50 年代引入面接触型结型半导体二极管以前，点接触型二极管得到了极大的应用。

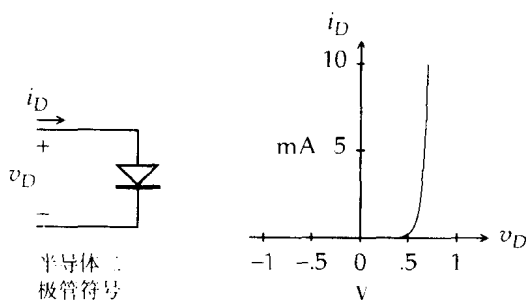


图 1.2 半导体二极管及典型特性曲线

与真空管一样，半导体二极管具有非线性特性（图 1.2）。二极管电流  $i_D$  随二极管电压  $v_D$  的增加而迅速增加（对于理想二极管，可以看出电流与电压成指数关系）。二极管的整流特性，即单向导电性，首先应用于无线信号的检波。检波问题推动了真空管和半导体二极管的发展。图 1.3 所示为使用典型调幅载波信号的基本无线电接收机。虽然早期通信系统的载波频率通常为 50 kHz 到 100 kHz，但是现在的无线广播波段包含了载波频率为 540 kHz 到 1600 kHz 的信号。对于开-关系统（连续波或称 CW），载波信号被简单地固定为开和关以形成点和划线。而对于调幅（AM），载波信号的幅度随被调制信号的变化而变化。例如由话筒产生的声音信号。

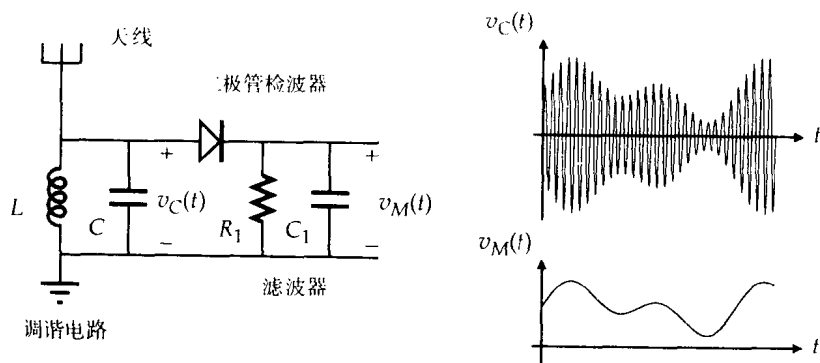


图 1.3 基本二极管无线电检波器

应该注意的是，载波频率的周期通常远小于被调制信号能感觉到的变化时间。在无线电接收机中，天线接收到的能量耦合到调谐电路，理想情况下，调谐电路去掉其他所有与载波频率不同的信号。接着用检波二极管把载波信号  $v_C(t)$  转换为单极信号。如电路所示，电容  $C_1$  可以平滑检出信号。如果没有这个电容，信号将类似于  $v_C(t)$  的上半部。

### 1.1.2 真空三极管

从影响来说，进入电子时代的第二个显著进步是，Lee De Forest 在弗莱明的真空二极管中加入了控制电极，或称栅极。这导致了真空三极管的产生。图 1.4 所示是它的实际器件示意图，因为有三个电极，所以被称为三极管。第三个电极，即栅极，是一个环绕在管中灯丝周围的笼子状金属丝结构。外加的栅极电位控制着管中的屏极电流。