

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材



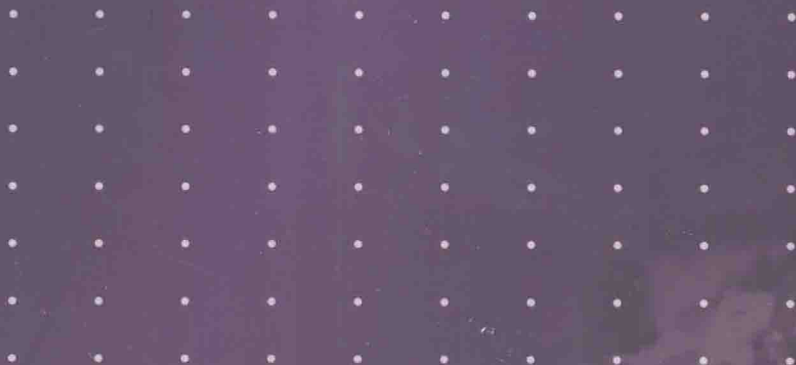
“十二五”江苏省高等学校重点教材

电路与电子线路基础

电子线路部分 (第二版)

■ 王志功 沈永朝 等 编著

Fundamentals of Electric and Electronic Circuits
Part II: Electronic Circuits (Second Edition)



高等教育出版社

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材
(编号: 2015-1-029)

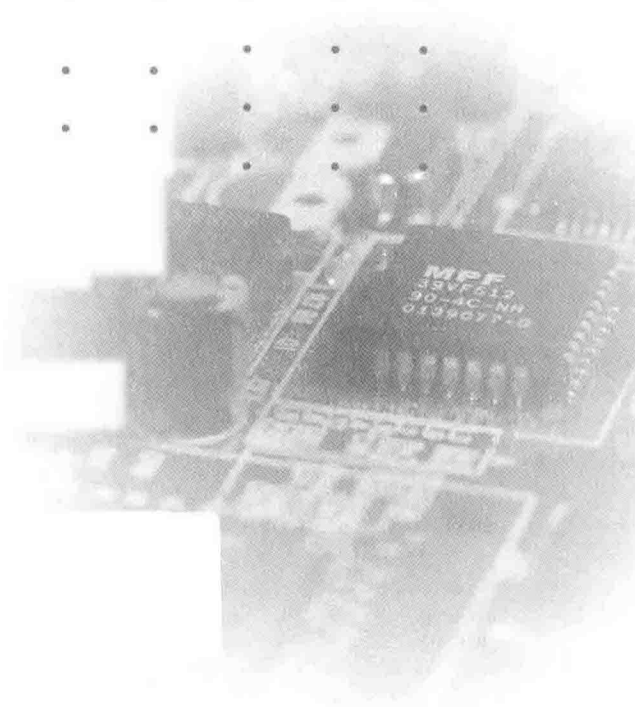
电路与电子线路基础

电子线路部分 (第二版)

DIANZI XIANLU BUFEN

■ 王志功 沈永朝 徐建 赵鑫泰 编著

Fundamentals of Electric and Electronic Circuits
Part II: Electronic Circuits (Second Edition)



高等教育出版社·北京

内容提要

本书首先引出非线性器件与电路的概念, 接下去依次讲述半导体 PN 结及其代表性器件二极管、双极型晶体管和场效应晶体管的器件原理、制造工艺、电路模型和基本电路, 进一步讲述多级放大器、反馈放大器、运算放大器和由运算放大器构造的各种电路, 晶体管功率放大与处理电路, 振荡和频率变换电路, 逻辑门电路和模拟数字互相转换电路, 最后介绍电子线路的分析、设计与测试。

作为教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐的一套两册教程, 本书适合于高等学校电子电气信息类专业本科生电子线路课程的教学, 并强烈建议与《电路与电子线路基础 电路部分(第二版)》联合使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子线路基础. 电子线路部分 / 王志功等编著. --2 版. --北京: 高等教育出版社, 2016.9

ISBN 978-7-04-045936-4

I. ①电… II. ①王… III. ①电路理论-高等学校-教材②电子线路-高等学校-教材 IV. ①TM13②TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 170824 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 韩颖 封面设计 赵阳 版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹 责任校对 陈杨 责任印制 耿轩

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市大天乐投资管理有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 29
字 数 710 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2013 年 4 月第 1 版
2016 年 9 月第 2 版
印 次 2016 年 9 月第 1 次印刷
定 价 41.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 45936-00

序

自 1999 年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

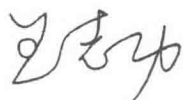
2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过 2~3 年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010 年 12 月

第二版前言

自 2012 年第一版出版以来,经过本校三轮教学实践和多所兄弟院校的选用,本教材的整体适用性虽已得到认可,但部分章节的修改亦显得必要。为此,我们着手了第二版的编写工作。

第二版整体上继承了第一版的框架,保留了原有的章节。改动主要针对编者和选用本教材的兄弟院校老师的反馈建议,对教材进行了精简和少量补充。

首先,本版第 1 章删除了 1.5 节中张弛振荡器部分。第 3 章删除了原 3.4.1 节“受控源端口电压关系和端口电流关系”,删除了原 3.5.2 节中受控源“链接次序改变的影响”,同时对 3.6.1 节“反馈概念的产生”做了精简。第 5 章删除了 5.3.1 节中关于专用集成电路中带隙电流源部分的介绍,删除了 5.3.2 节中低失真差分放大器部分,删除了 5.4.1 节中采用负反馈来降低输出阻抗的内容,删除了 5.4.2 节中关于电压源的部分内容。第 6 章删除了原 6.3.1 节和 6.3.2 节关于 PMOS 和 NMOS 工艺的介绍,删除了原 6.4.2 节“迁移率的退化”部分。第 7 章删除了 7.4.1 节中电流源和电流漏的部分内容。第 8 章对 8.2.4 节“负反馈放大器的稳定性”内容做了重新整理,删除了原 8.3.4 节“LM308A、 μ A745 和 OP07”,删除了原 8.3.5 节“LM318”,删除了原 8.3.6 节“LF356、RC4558、TL07X/TL08X 和 LF411”。第 9 章删除了 9.1.5 节和 9.1.6 节的部分内容,删除了 9.3.3 节中二阶有源滤波电路的部分内容,删除了 9.4.4 节中对数变换的部分。第 12 章删除了原 12.2.5 节“单端 BJT 混频器设计实例”。

在对原教材做减法的同时,也适当做了一些加法。第 1 章增加了 1.2.4 节“非线性器件建模”,第 2 章增加了新 2.2.4 节“二极管的小信号模型”和新 2.4.4 节“二极管的主要参数”,增加了 2.5.1 节中齐纳二极管的主要参数说明。第 4 章增加了 4.4.2 节中共基极的小信号模型推导,增加了 4.4.6 节“BJT 的极限参数”。第 5 章增加了 5.1.2 节“共发组态放大电路”中共放大器工作区域及其应用的介绍。第 9 章 9.4.6 节中增加了迟滞比较器的介绍。

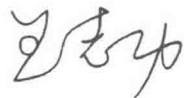
针对教材内容,补充了部分习题。同时对原版中发现的一些插图和文字上的失误做了勘正。此外,增加了附录三“电子线路教学博物板”的照片。该配套教学博物板将理论传授和动手实践相结合,在课堂上及课后采用虚拟信号源和示波器,可随时进行电路的创新和验证,改变了传统教学中只能在实验室里才能进行实践的传统教学方式。该教学博物板可配套本书教学使用。

希望修订后的本书为选用的师生提供更完整的理论知识和更全面的工程能力培养素材。同时仍然希望读者能够进一步提出修改意见。作者邮箱为 zgwang@seu.edu.cn。

本版修改内容的大部分工作是由本人的教学与科研助手徐建副教授和赵鑫泰副教授完成的,因此,将他们两位增加为共同作者。

II 第二版前言

前来做高级访问学者的南京理工大学硕力更副教授对第二版文稿进行了校对,并补充了部分习题,在此对她的贡献表示感谢。



2016年3月于南京

第一版前言

2007 年秋,东南大学实施了一项教育创新计划,每学年选拔 15 名左右优秀高中毕业生组建“高等理工实验班”,尝试以全新模式培养创新性人才。此举对学制、课程设计和教材等诸多教学环节都提出了非常高的要求。

虽然称为“高等理工实验班”,但由于东南大学的理工教育以电子信息学科最具优势,故对这批学生在电子信息基础课程方面的特色教学成为亟待解决的问题。这时,主管教学的副校长郑家茂教授、吴健雄学院院长李久贤教授等邀请我承担“高等理工实验班”电子信息基础课程的改革工作,并担任“电路”与“电子线路”两门课程的主讲,借此实现两门课程的贯通。由此,我被推上了新课程建设的前台。

在我大学毕业后的 30 多年的教学科研生涯中,早期曾担任过数年本科生“电子线路”的教学工作,后赴德国深造并从事高速集成电路的科学研究,回国后的前 10 年中,则主要承担集成电路设计方面的教学和科研任务。如何使传统课程的教学适应当代电子工业的实际需要,实现“电路”与“电子线路”的贯通教学,成为我长时间反复思考的问题。下列 5 个方面为我开展新课程的建设提供了前提和基础:

(1) 我的硕士生导师沈永朝教授在 20 世纪 90 年代初期进行过“电路”与“电子线路”贯通教学的大胆尝试,曾编写过一套讲义。我在这套讲义基础上开始工作,以传承导师的事业。

(2) 自 2003 年始,我作为教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员,组织了电子电气基础课程 5 个方向 12 门课程“教学基本要求”的制订工作。其间,同国内数十名“电路”与“电子线路”教学名师在一起,向他们学习了很多宝贵的知识和经验。两门课程已制订的“教学基本要求”成为我组织新课程和编写新讲义的指南。

(3) 从 2004 年开始,我参加了一年一度的“国家精品课程”的评选工作。在此过程中,我从参评“国家精品课程”的相关材料中也学到不少知识。数门“电路”与“电子线路”方面的“国家精品课程”为准备这本《电路与电子线路基础》提供了很好的借鉴。

(4) 10 年以来,我主编了 6 本、翻译了 5 本集成电路设计方面的教科书,积累了不少资料 and 知识。我们知道,集成电路技术涵盖半导体理论、材料和工艺、电路特别是电子线路理论和技术。相关的知识为这套《电路与电子线路基础》的编写奠定了基础。

(5) Internet 上有一些文献、资料和图片可供参考和选用。

本书的编写应该说是众多传统知识与新技术的一种再结晶的过程。希望这种结晶能够像硅半导体那样,最终产生出千变万化的、集成创新的电子线路。

本套教材本着基础理论与工程技术相结合、电路与电子线路贯通、循序渐进和删繁就简的原则来组织教学内容。全书总的路线是:从简单元件到实际器件,从简单电路到复杂电路,从直流到时变,从线性到非线性,从模拟到数字逻辑和从分析到设计。

具体到本册内容,第 1 章首先引出非线性器件与电路的概念,为讲述各类二极管和晶体三极管的特性与应用奠定理论基础。第 2 章讲述作为半导体基本结构的 PN 结及其代表性器件二极

管的特性、模型和基本应用。第3章引入双端口非线性网络、有源网络和反馈的概念,以电子三极管小信号等效电路为引子,给出了模拟有源双端口器件的4种受控源的定义。第4章至第7章依次讲述双极型晶体管和多种场效应晶体管的器件原理、工艺、模型和基本电路。第8章讲述由两大类晶体管构成的多级放大、反馈放大与集成运算放大电路。第9章介绍由运算放大器构造的线性和非线性运算电路。第10章介绍模拟大信号相关的功率放大与处理电路。第11和12章介绍振荡和频率变换等非线性动态信号生成和频率生成电路。第13和14章介绍更高程度的非线性逻辑门电路和模拟数字互相转换的电路,从而到达纯数字逻辑电路的交界面,使得有关数字电路的课程可以从不依赖晶体管级物理层的逻辑层开始。第15章讲述电子线路的分析、设计与测试,从而指明学习和运用电子线路的目标。

为了实现汉英双语专业词汇对照教学,以便使读者能够阅读英文专业书籍和期刊,基本中文专业术语在本教材第一次出现时都给出了其对应的英文术语,且在书后按汉语拼音顺序给出了汇总,以便学生日后写英文论文时查阅。

通过“电路与电子线路”课程两个学期约128学时的学习,希望学生能够掌握目前开设的“电路”和“电子线路”的基本知识,为学习诸如“数字电路与系统”、“通信电路与系统”、“控制系统”等奠定基础。

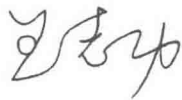
赵鑫泰博士参与了第8、11、12和14章的编写,对全书文稿进行了校对和格式整理,编写了部分习题,并参与了部分章节的讲授实践。徐建博士参与了部分书稿的校对和部分章节的讲授实践。在此一并表示感谢。

清华大学电子工程系董在望教授仔细审阅了本书全部手稿,提出了一系列指导性的修改建议,在此表示衷心感谢。

感谢教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会委员对本教材编写的关心、支持和作为十二五教改教材的大力推荐。感谢高等教育出版社为本书出版所做的大量工作。

虽然本书的形成从2009年起经历了4轮教学实践,对内容和文字做过多修改,但由于这是我们把电路和电子线路打通教学后的第一版教材,无论是课程设计、教材内容还是文字修辞都有待进一步完善。希望读者多提宝贵意见。

意见和建议请发至作者邮箱:zgwang@seu.edu.cn。



2012年10月于南京

目 录

第 1 章 非线性电路概述	(1)	2.4.2 检波电路	(33)
1.1 引言	(1)	2.4.3 限幅电路	(34)
1.2 非线性元件	(1)	2.4.4 二极管的主要参数	(35)
1.2.1 非线性电阻	(1)	2.5 特殊二极管	(35)
1.2.2 非线性电容	(6)	2.5.1 齐纳二极管	(35)
1.2.3 非线性电感	(7)	2.5.2 肖特基二极管	(36)
1.2.4 非线性器件建模	(8)	2.5.3 发光二极管	(37)
1.3 非线性电路方程	(9)	2.5.4 激光二极管	(38)
1.4 小信号分析法	(10)	2.5.5 光电二极管	(40)
1.5 分段线性优化方法	(13)	思考题与习题	(42)
思考题与习题	(15)	第 3 章 双端口非线性器件与受控源	(44)
第 2 章 半导体 PN 结与二极管	(18)	3.1 双端口非线性电子器件	(44)
2.1 半导体与 PN 结	(18)	3.2 单元电路的隔离	(44)
2.1.1 半导体与掺杂	(18)	3.2.1 隔离的必要性	(44)
2.1.2 N 型与 P 型半导体	(18)	3.2.2 隔离器基本结构	(49)
2.1.3 PN 结的动态平衡	(21)	3.3 受控电源	(51)
2.1.4 PN 结的正向偏置	(21)	3.3.1 受控源电路图	(52)
2.1.5 PN 结的反向偏置	(22)	3.3.2 电压控制电压源	(53)
2.2 二极管模型	(23)	3.3.3 电压控制电流源	(53)
2.2.1 二极管的伏安特性	(23)	3.3.4 电流控制电压源	(54)
2.2.2 PN 结电容效应	(24)	3.3.5 电流控制电流源	(54)
2.2.3 二极管大信号模型	(25)	3.4 受控源在电路中的基本行为	(55)
2.2.4 二极管的小信号模型	(26)	3.4.1 受控源的放大功能	(55)
2.2.5 简单二极管电路的计算方法	(27)	3.4.2 放大的基本概念	(58)
2.3 二极管器件的 SPICE 语句输入格式	(29)	3.5 有源电路的计算	(58)
2.3.1 半导体器件的 SPICE 语句描述方式	(29)	3.5.1 有源电路计算举例	(58)
2.3.2 二极管 D 的 SPICE 语句输入格式	(30)	3.5.2 受控源的层次链接	(62)
2.4 二极管的应用	(31)	3.6 反馈的基本概念	(64)
2.4.1 整流电路	(31)	3.6.1 反馈概念的产生	(64)
		3.6.2 反馈基本方程式	(65)
		3.6.3 反馈的组态及判断	

方法	(67)	5.3 电流源及其应用	(122)
思考题与习题	(68)	5.3.1 电流源	(122)
第 4 章 双极型晶体管	(71)	5.3.2 电流源的应用	(133)
4.1 晶体管的发明	(71)	5.4 BJT 电压源	(137)
4.2 BJT 的基本工作原理	(72)	5.4.1 产生电压源的基本	
4.2.1 PNP 型晶体管的基本		方法	(137)
工作原理	(72)	5.4.2 电压源实用电路	(138)
4.2.2 NPN 型晶体管的基本		思考题与习题	(142)
工作原理	(75)	第 6 章 场效应晶体管原理、特性	
4.3 BJT 的制造工艺	(76)	与工艺	(147)
4.4 BJT 的电路模型	(79)	6.1 结型场效应晶体管	(147)
4.4.1 BJT 的 Ebers-Moll		6.1.1 PN 结场效应晶体管	(147)
模型	(79)	6.1.2 金属-半导体结场效应	
4.4.2 BJT 的小信号等效		晶体管	(149)
电路	(81)	6.1.3 高电子迁移率晶体管 ...	(149)
4.4.3 BJT 的 Gummel-Poon		6.1.4 JFET 的大信号模型	(151)
电路模型	(82)	6.1.5 JFET 的 SPICE 语句	
4.4.4 BJT 的 SPICE 输入		格式	(151)
语句格式	(82)	6.1.6 JFET 的仿真模型	(151)
4.4.5 BJT 的 SPICE 模型语句		6.1.7 JFET 与 BJT 的对比	(153)
与参数	(83)	6.2 MOSFET 的基本结构	
4.4.6 BJT 的极限参数	(85)	与原理	(153)
思考题与习题	(85)	6.2.1 MOS 的基本结构	(154)
第 5 章 BJT 基本电路	(86)	6.2.2 MOS 伏安特性	(156)
5.1 共基极、共发射极和共集电极		6.2.3 NMOS 电容的组成	(159)
3 种基本组态电路	(86)	6.2.4 MOS 管的阈值电压 V_T ...	(160)
5.1.1 共基极组态放大电路 ...	(86)	6.2.5 MOSFET 的体效应	(160)
5.1.2 共发射极组态放大		6.2.6 MOSFET 尺寸按比例	
电路	(93)	缩小	(161)
5.1.3 共集电极组态放大		6.2.7 MOSFET 的跨导 g_m	(162)
电路	(108)	6.2.8 MOSFET 的动态特性受	
5.1.4 共基极、共发射极和共集电极		尺寸缩小的影响	(163)
放大器主要特征比较 ...	(109)	6.2.9 MOSFET 的温度特性	(163)
5.2 BJT 直接耦合基本电路	(110)	6.2.10 MOSFET 的噪声	(163)
5.2.1 达林顿连接	(112)	6.3 与 MOSFET 相关的 VLSI	
5.2.2 NPN 型晶体管与 PNP 型		工艺	(164)
晶体管组合放大器	(114)	6.4 MOS 器件的二阶效应	(167)
5.2.3 差分放大器	(115)	6.4.1 L 和 W 的变化	(167)
5.2.4 管联放大器	(121)		

6.4.2	沟道长度调制	(169)	8.1.1	单级与多级放大器	(210)
6.4.3	短沟道效应引起门限 电压变化	(170)	8.1.2	多级放大器基本构造与 设计要点	(211)
6.4.4	狭沟道效应引起门限 电压变化	(170)	8.1.3	多级放大器的增益	(215)
6.5	MOSFET 的等效电路 模型	(171)	8.1.4	多级放大器的频率 特性	(215)
6.5.1	MOSFET 的 SPICE 输入 语句	(171)	8.2	反馈放大器	(216)
6.5.2	MOSFET 的等效电路 模型参数	(172)	8.2.1	反馈放大器基本类型 和判断	(216)
6.5.3	FET 小信号等效电路	(175)	8.2.2	负反馈对放大器性能的 影响	(218)
	思考题与习题	(176)	8.2.3	反馈放大器的分析	(221)
第 7 章	基本 FET 模拟电路	(177)	8.2.4	负反馈放大器的 稳定性	(225)
7.1	FET 基本组态	(177)	8.3	集成运算放大器	(231)
7.1.1	共栅组态	(178)	8.3.1	通用集成放大器	(231)
7.1.2	共源组态	(179)	8.3.2	原始的集成运算 放大器	(233)
7.1.3	共漏组态	(180)	8.3.3	μ A709、 μ A741 和 LM301	(233)
7.1.4	共源-共栅管联组态	(181)	8.3.4	CMOS 运算放大器	(236)
7.1.5	源极耦合 FET 对管	(182)	8.4	由运算放大器构造的放大器 基本原理	(237)
7.2	FET 可变电阻与开关	(186)	8.4.1	运算放大器模型 与符号	(237)
7.2.1	FET 可变电阻	(186)	8.4.2	由运算放大器构成的两种 放大器电路	(238)
7.2.2	FET 开关	(187)	8.4.3	运算放大器工作时的直流 偏置	(240)
7.3	MOS 二极管与有源电阻	(188)	8.5	运算放大器的大信号工作和 转换速率	(248)
7.4	电流漏、电流源和电流镜	(189)		思考题与习题	(252)
7.4.1	电流漏和电流源	(189)	第 9 章	由运算放大器构成的 电路	(255)
7.4.2	电流镜	(191)	9.1	利用运算放大器构造放大 电路	(255)
7.5	MOS 基准电压	(192)	9.1.1	电压跟随器	(256)
7.6	MOS 放大器	(194)	9.1.2	同相放大器构成的加法	
7.6.1	有源负载反相放大器	(194)			
7.6.2	CMOS 差分放大器	(201)			
7.6.3	电流镜负载的 CMOS 差分 放大器设计	(205)			
7.7	总结	(206)			
	思考题与习题	(207)			
第 8 章	多级放大器和集成运算 放大器	(210)			
8.1	多级放大器	(210)			

电路	(257)	电路与电压电流波形 ...	(313)
9.1.3 反相放大器构成的加法		10.2.2 甲类功率放大器	(314)
电路	(259)	10.2.3 乙类功率放大器	(316)
9.1.4 减法电路	(260)	10.2.4 甲乙类互补推挽电路 ...	(320)
9.1.5 可变增益放大器	(261)	10.2.5 丙类功率放大电路	(321)
9.1.6 弱信号放大与高精度运算		10.3 开关功率放大器	(321)
放大器	(262)	10.3.1 丁类功率放大器	(322)
9.2 由运算放大器构成的信号		10.3.2 戊类功率放大器	(322)
变换电路	(267)	10.3.3 己类功率放大器	(323)
9.2.1 基准电压源	(267)	10.4 电源变换电路	(323)
9.2.2 基准电流源	(268)	10.4.1 电源变换电路的分类 ...	(323)
9.2.3 电压-电流变换电路	(269)	10.4.2 线性直流稳压电源	(324)
9.2.4 电流-电压变换电路	(273)	10.4.3 串联型线性直流稳压	
9.2.5 电阻-电压变换电路	(275)	电路	(325)
9.3 利用运算放大器构成的线性		思考题与习题	(328)
运算电路	(278)	第 11 章 振荡器	(332)
9.3.1 微分运算电路	(278)	11.1 引言	(332)
9.3.2 积分运算电路	(280)	11.2 正反馈回路型振荡器	
9.3.3 有源滤波电路	(281)	原理	(332)
9.4 由运算放大器构成的		11.3 非谐振回路型振荡器	(333)
非线性电路	(290)	11.3.1 环形振荡器	(333)
9.4.1 整流电路	(290)	11.3.2 <i>RC</i> 桥式振荡器	(336)
9.4.2 绝对值电路	(294)	11.3.3 多谐振荡器	(338)
9.4.3 限幅电路	(297)	11.4 <i>LC</i> 调谐型振荡器	(341)
9.4.4 对数变换电路	(299)	11.4.1 电感三端式振荡器	(341)
9.4.5 乘法运算电路	(301)	11.4.2 电容三端式振荡器	(343)
9.4.6 比较电路	(303)	11.4.3 <i>LC</i> 振荡器的频率	
思考题与习题	(306)	稳定性	(345)
第 10 章 功率放大与电源变换		11.5 石英晶体振荡器	(348)
电路	(309)	11.5.1 石英晶体的物理特性和	
10.1 功率放大电路基础	(309)	等效电路	(348)
10.1.1 功率放大电路的作用 ...	(309)	11.5.2 晶体振荡电路	(351)
10.1.2 功率放大电路的特点 ...	(309)	11.6 负阻振荡器	(352)
10.1.3 功率放大电路的主要技术		11.6.1 负阻振荡原理	(353)
参数	(311)	11.6.2 负阻器件和电路	(353)
10.1.4 功率放大器的分类	(313)	11.6.3 负阻振荡器电路	(355)
10.2 线性功率放大器	(313)	思考题与习题	(357)
10.2.1 单管线性功率放大器基本			

第 12 章 频率变换电路	(358)	13.7 源极耦合 FET 逻辑—— SCFL	(406)
12.1 引言	(358)	思考题与习题	(407)
12.2 混频器	(358)	第 14 章 模数与数模转换电路	(410)
12.2.1 混频器的基本特性	(358)	14.1 引言	(410)
12.2.2 混频器的基本原理	(359)	14.2 模数转换器	(410)
12.2.3 混频器的作用	(360)	14.2.1 原理	(410)
12.2.4 单端混频器	(361)	14.2.2 并联式 ADC	(411)
12.3 倍频器	(364)	14.2.3 流水线 ADC	(412)
12.4 分频器	(364)	14.2.4 逐次逼近式 ADC	(413)
12.4.1 再生式分频器	(364)	14.3 数模转换器	(414)
12.4.2 振荡锁定分频器	(365)	14.3.1 原理	(414)
12.4.3 数字分频器	(366)	14.3.2 参考电压法 DAC	(414)
12.5 幅度调制与解调电路	(367)	14.3.3 参考电流法 DAC	(416)
12.5.1 幅度调制	(368)	14.3.4 $R-2R$ 梯形 DAC	(417)
12.5.2 幅度解调	(373)	思考题与习题	(419)
12.6 角度调制与解调电路	(375)	第 15 章 电子线路分析、设计 与测试	(420)
12.6.1 角度调制原理	(375)	15.1 引言	(420)
12.6.2 频率调制电路	(377)	15.2 电子线路分析	(420)
12.6.3 鉴频器	(378)	15.2.1 电子线路分析与模拟的 流程	(420)
思考题与习题	(380)	15.2.2 电路特性分析和控制 语句	(421)
第 13 章 逻辑门电路	(381)	15.3 电子线路设计	(424)
13.1 引言	(381)	15.3.1 电子线路设计步骤	(424)
13.2 模拟电路与数字电路	(381)	15.3.2 版图设计	(425)
13.3 二极管逻辑门电路	(383)	15.3.3 版图检查	(426)
13.4 BJT 逻辑门电路	(384)	15.3.4 版图数据提交与流片	(428)
13.4.1 TTL 门电路	(384)	15.4 电子线路测试	(428)
13.4.2 ECL 门电路	(386)	思考题与习题	(429)
13.5 FET 基本逻辑电路	(388)	附录一 共发电路的 Ebers-Moll 模型及 输入输出特性	(430)
13.5.1 FET 传输门	(388)	附录二 专业术语中英文对照	(436)
13.5.2 NMOS 非门电路	(396)	附录三 电子线路教学博物板	(443)
13.5.3 CMOS 非门	(398)	参考文献	(449)
13.5.4 CMOS 非门的瞬态 特性	(402)		
13.6 CMOS 基本逻辑门电路	(405)		
13.6.1 与非门电路	(405)		
13.6.2 或非门电路	(406)		

第 1 章 非线性电路概述

Chapter 1 Overview of Nonlinear Circuits

1.1 引 言

本教材电路部分主要给出了线性元件和线性电路的分析方法,所建立的诸如戴维宁定理和叠加定理等一系列定理和双端口网络参数等一系列计算方法都是建立在线性电路的基础之上的。因此,它们不适用于本册讨论的非线性电路。

本册教材将引入非线性器件和非线性电路的分析与设计方法。本章简要地介绍非线性元件,并举例说明非线性电路方程的建立方法;同时,介绍图解法、小信号法和分段线性化等分析非线性电路的常用方法。

1.2 非线性元件

线性元件的特点是其参数不随所施加的电压或电流变化。如果元件参数随电压或电流变化,则称为非线性元件(nonlinear element)。含有非线性元件的电路称为非线性电路。

实际电路元件的参数总是或多或少地随着电压或电流而变化的。所以,严格说来,一切实际电路都是非线性电路。但在工程计算中,将那些非线性程度比较微弱的元件作为线性元件来处理,不会出现本质上的问题,从而简化了电路分析。但是,许多元件的非线性特征是不能忽略的,否则就将无法解释电路中发生的物理现象。如果将这些非线性元件作为线性元件处理,势必使计算结果与实际情况相差过大,甚至会产生错误。另外,诸如整流器和混频器等许多功能电路就是利用元件的非线性来实现的,此时,电路元件的非线性正是所需要的特性。因此,研究非线性元件和电路具有重要的意义。下面首先对非线性电阻加以讨论。

1.2.1 非线性电阻

线性电阻的伏安特性可用欧姆定律来表示,即 $v = Ri$,在 $v-i$ 平面上它是通过坐标原点的一条直线。非线性电阻(nonlinear resistor)的电压电流不再满足欧姆定律,而是遵循某种特定的非线性函数关系。非线性电阻在电路中的符号如图 1.1(a)所示(为了使问题简化,这里仅考虑 $v > 0$ 和 $i > 0$ 的情况)。

若非线性电阻两端的电压是其电流的单值函数,则称这种电阻为电流控制型电阻,它的伏安

特性可用

$$v = f(i) \quad (1.1)$$

表示,其典型的伏安特性如图 1.1(b)所示。从特性曲线上可以看到:对于每一个电流值 i ,有且只有一个电压值 v 与之相对应;而对于某一电压值,与之对应的电流值可能有多个,如 $v = V_a$ 时,就有 I_1 、 I_2 和 I_3 三个不同的电流值。某些二极管就具有这种伏安特性。

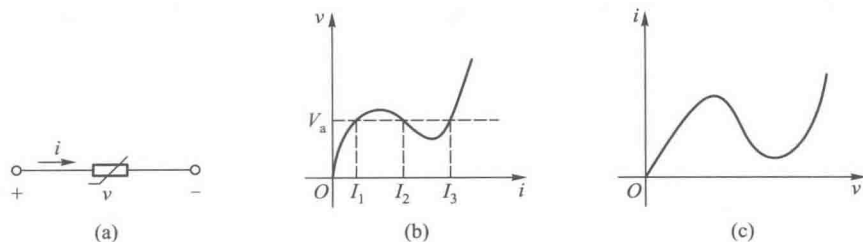


图 1.1 非线性电阻:(a) 电路符号,(b) 电流控制型电阻,(c) 电压控制型电阻

若通过非线性电阻的电流是其两端电压的单值函数,则称这种电阻为电压控制型电阻,其伏安特性可用

$$i = g(v) \quad (1.2)$$

表示,其典型伏安特性如图 1.1(c)所示,从曲线上可以看到:对于某一电流值,与之对应的电压值有多个。但是对于每一个电压值 v ,有且只有一个电流值 i 与之对应。隧道二极管(tunnel diode)就具有这样的伏安特性。

从图 1.1(b)、(c)中还可以看出,上述两种伏安特性曲线都具有负斜率的线段,即在此范围内,电流随电压增加而减小。

然而,最常用的非线性电阻具有“单调型”伏安特性,即是单调增长或是单调下降。最早发明的真空二极管(vacuum diode tube)或称电子二极管就具有这样的特性。图 1.2 给出一种电子二极管的实物图和工作原理图。

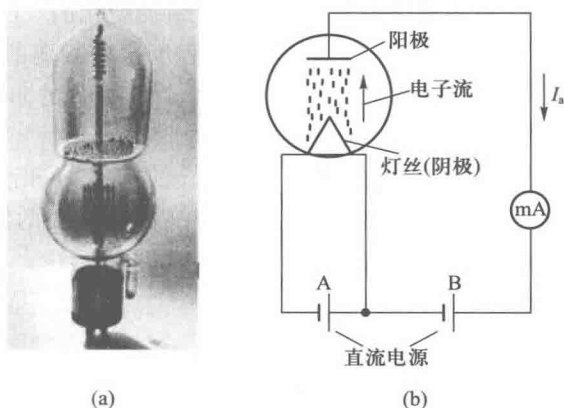


图 1.2 一种电子二极管的实物图(a)和电工作原理图(b)

由原理图中的器件构造示意图可知,二极管的基本结构是位于真空玻璃管下部、用作阴极(cathode)的灯丝和位于真空玻璃管上部的阳极(anode)。相对于下一章介绍的半导体二极管,

电子二极管的结构和工作原理都是容易理解的。加在灯丝两端的直流电源 A 加热灯丝,使灯丝金属材料中的电子受热得到动能,逸出金属形成电子气 (electron gas); 加在由板状金属构成的阳极和由灯丝金属形成的阴极上的直流电源 B 在管内两极间的真空中形成上正下负的电场; 阴极金属周围逸出的电子在电场作用下产生高速运动飞向阳极,被阳极收集后流向外电路,形成阳极电流 I_a 。

由于其非对称结构、外加电压方向性和电子运动的力学特性的影响,电子二极管的伏安特性为

$$\begin{aligned} I_a &= CV_a^{3/2}, & V_a &\geq 0 \\ I_a &= 0, & V_a &< 0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 C 为与管子几何参数有关的一个常数。这就是著名的 Child-Langmuir 定律。

图 1.3 给出某种型号电子二极管根据式 (1.3) 计算得到的大信号伏安特性曲线和测试得到的数据值。可以看出,二者符合得很好。

式 (1.3) 和图 1.3 表明:① 电流是电压的非线性函数;② 电流是电压的单值函数。

与电子二极管 I - V 特性的 $3/2$ 方率不同,下一章将要讨论的 PN 结二极管则具有如下的指数率特性

$$i = I_s (e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (1.4)$$

式中 I_s 为一常数,称为反向饱和电流 (reverse saturation current), q 是电子的电荷量,其值为 1.6×10^{-19} C, k 是玻耳兹曼常数,其值为 1.38×10^{-23} J/K, T 为热力学温度。

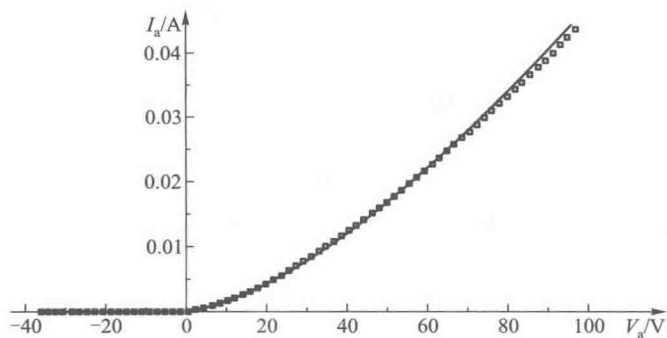


图 1.3 电子二极管的大信号伏安特性曲线和系列测试数据点

该式也表明,电流是电压的非线性单值函数。从式 (1.4) 可求得

$$v = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{i}{I_s} + 1 \right)$$

上式表明,电压也是电流的单值函数。图 1.4 为 PN 结二极管的伏安特性曲线。

特别要指出,线性电阻是双向性的,而许多非线性电阻 (例如二极管) 具有单向性。当加在非线性电阻两端的电压大小相等而方向不同时,流过它的电流会完全不同,故其特性曲线不对称于原点。在工程中,非线性电阻的单向导电性可以用来实现整流功能。

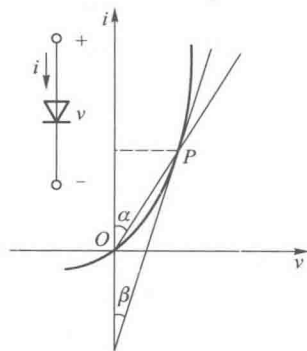


图 1.4 PN 结二极管的伏安特性

为满足计算的需要,以下给出非线性电阻的静态(static)电阻和动态(dynamic)电阻的概念。

非线性电阻元件在某一工作状态(如图1.4中 P 点)下的静态电阻 R 等于该点的电压值 v 与电流值 i 之比,即

$$R = \frac{v}{i}$$

显然 P 点的静态电阻正比于 $\tan \alpha$ 。动态电阻 R_d 定义为该点电压 v 对电流 i 的导数值,即

$$R_d = \frac{dv}{di}$$

显然 P 点的动态电阻正比于 $\tan \beta$ 。

特别要说明的是,图1.1(b)、(c)中所示伏安特性曲线的负斜率段,其动态电阻为负值,因此具有“负电阻”(negative resistance)的性质。

例 1.1 设有一个非线性电阻元件,其伏安特性为 $v=f(i)=100i+i^3$ 。

- (1) 试分别求出 $i_1=5\text{ A}$, $i_2=10\text{ A}$, $i_3=0.01\text{ A}$, $i_4=0.001\text{ A}$ 时对应的电压 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 的值;
- (2) 试求 $i=2\cos(314t)\text{ A}$ 时对应的电压 v 的值;
- (3) 设 $v_{12}=f(i_1+i_2)$,试问 v_{12} 是否等于 $(v_1+v_2)^3$?

解 (1) $i_1=5\text{ A}$ 时

$$v_1 = (100 \times 5 + 5^3) \text{ V} = 625 \text{ V}$$

$i_2=10\text{ A}$ 时

$$v_2 = (100 \times 10 + 10^3) \text{ V} = 2\,000 \text{ V}$$

$i_3=0.01\text{ A}$ 时

$$v_3 = [100 \times 0.01 + (0.01)^3] \text{ V} = (1 + 10^{-6}) \text{ V}$$

$i_4=0.001\text{ A}$ 时

$$v_4 = [100 \times 0.001 + (0.001)^3] \text{ V} = (0.1 + 10^{-9}) \text{ V}$$

从上述计算可以看出,如果把电阻作为 $100\ \Omega$ 的线性电阻,当电流 i 不同时,引起的误差不同,当电流值较小时,引起的误差不大。

(2) 当 $i=2\cos(314t)\text{ A}$ 时

$$v = [100 \times 2\cos(314t) + 8 \cos^3(314t)] \text{ V} = [206\cos(314t) + 2\cos(942t)] \text{ V}$$

电压 v 中含有3倍于电流频率的分量,所以利用非线性电阻可以产生频率不同于输入信号频率的输出(这种作用称为“倍频”)。

(3) 现假设 $v_{12}=f(i_1+i_2)$,则

$$\begin{aligned} v_{12} &= 100(i_1+i_2) + (i_1+i_2)^3 = 100(i_1+i_2) + (i_1^3+i_2^3) + (i_1+i_2) \times 3i_1i_2 \\ &= v_1+v_2+3i_1i_2(i_1+i_2) \end{aligned}$$

可见,一般情况下, $i_1+i_2 \neq 0$,因此有

$$v_{12} \neq v_1+v_2$$

所以叠加定理不适用于非线性电路。

当非线性电阻串联或并联时,只有所有非线性电阻的控制类型相同,才有可能得出其等效电阻(equivalent resistance)伏安特性的解析表达式。如果把非线性电阻串联或并联为一个单端口网络,则网络端口的电压电流关系称为此单端口的驱动点特性。例如,将两个非线性电阻串联,