



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

电工电子基础

Analog Circuit Analysis and Design

模拟电路分析与设计

第2版

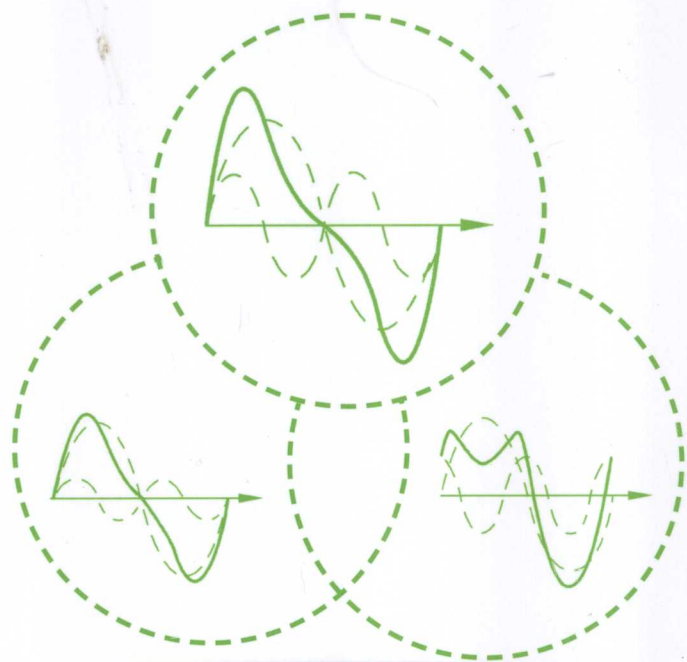
王骥 肖明明 杜爽 王立臣 编著

Wang Ji

Xiao Mingming

Du Shuang

Wang Lichen



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Analog Circuit Analysis and Design

模拟电路分析与设计

第2版

王骥 肖明明 杜爽 王立臣 编著

Wang Ji

Xiao Mingming

Du Shuang

Wang Lichen

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统论述了模拟电路的基本原理和设计方法。全书包括 12 章: 半导体基础知识、半导体晶体管及其基本电路、场效应管与特殊三极管基本应用电路、集成运算放大器、放大电路的频率响应、负反馈放大器、集成运算放大器组成的运算电路、低频功率放大器、信号检测与处理电路、波形发生电路、直流电源、模拟电子线路读图与设计方法。

全书各章均提供了丰富的习题, 这些习题多改编自高校研究生入学考试题, 针对性极强; 全书配有精心制作的教学课件, 便于教师参考使用。本书适合作为普通高等院校电子信息类与电气信息类的本科生教学用书, 也可作为相关工程技术人员的参考图书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路分析与设计/王骥等编著. --2 版.--北京: 清华大学出版社, 2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-44671-2

I. ①模… II. ①王… III. ①模拟电路—电路分析—高等学校—教材 ②模拟电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 179949 号

责任编辑: 盛东亮

封面设计: 李召霞

责任校对: 李建庄

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者: 北京嘉实印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 32.5

字 数: 810 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版

2016 年 9 月第 2 版

印 次: 2016 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~2500

定 价: 59.80 元

产品编号: 062775-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

关于模拟电路学习的一点思考及对本书的一点说明

“智能硬件”技术发展如日中天,给电子工程领域带来了全新的内容与挑战。典型例子莫过于2015年Apple Watch正式诞生给电子线路设计领域带来的新思维;而Google计划的“CTARA”模块化手机更是颠覆了硬件设计的传统理念。其思路是给定一个固定的基础设计框架,并为用户提供了正面2个背部8个支持用户随意更换的组装模块,其兼容多达20~30个不同模块更是让人叹为观止。当代科技需要更新设计理念,适应时代科技需求,我们修著了《模拟电路分析与设计》(第2版)。编者给予读者的劝勉是学好模拟电路要带着问题学,活学活用,学用结合,急用先学,要在“用”字上做足文章。本书第2版正是本着这样的思想,从基础理论、关键技术、工程实用角度系统重新阐述了模拟电子技术的基本原理和设计方法。重点修正的内容是各章增加了一些典型习题,并精修了重点应该掌握的内容。模拟电路学习重在电路分析与工程设计,本着习题适量原则。全书包括12章,我们将各章用于基础教育所应选取的内容列出来供使用者参考。其他内容可以根据专业需要自行取舍。本课程默认14周,每周4学时,且面向学生对象具有电路频域分析与拉普拉斯变换方面的基础知识能力,具有电子学的电路入门分析能力。

第1章 半导体基础知识。主要掌握PN结外部特性——伏安特性,2学时。

第2章 半导体晶体管及其基本电路。掌握晶体二、三极管特性(重点是伏安特性)及其在应用电路中的使用方法,8学时。

第3章 场效应管与特殊三极管基本应用电路。掌握MOS管原理与使用方法,4学时。

第4章 集成运算放大器。围绕集成运放的单元电路,重点讲授差动放大、电流源电路、多级放大电路,6学时。

第5章 放大电路的频率响应。介绍晶体管、场效应管、集成运放的频率响应及其上下限频率计算方法,4学时。

第6章 负反馈放大器。详细介绍几种反馈放大器经典分析方法,重点掌握深度负反馈的“虚短”“虚断”分析方法,并掌握在具体工程中正确引入反馈的方法,8学时。

第7章 集成运算放大器组成的运算电路。重点掌握比例、加减、微积分运算电路的分析与设计方法;理解乘、除、对指数运算电路原理。掌握几种运算电路组合应用的电路计算方法,8学时。

第8章 低频功率放大器。重点掌握乙类、甲乙类功率放大器分析计算方法,4学时。

第9章 信号检测与处理电路。重点掌握仪用放大器、电压比较器计算分析方法,4

学时。

第10章 波形发生电路。重点掌握文氏桥电路原理与设计方法,4学时。

第11章 直流电源。重点掌握串、并联型稳压电源原理,4学时。

其他章节自学,不安排学时。

学习模拟电子技术,关键掌握两大部分——晶体管和运放的线性与非线性部分;两个方法——小信号微变等效分析法与深度负反馈“虚断虚短”分析法;两个观点——直交流分开分析观点与工程近似观点。

工程实践是本学科的“王道”。

“智者乐水,仁者乐山。”从数学模型转化为工程近似的方法实现是本课程从数学、物理的方法中独立出来的工程标志,工程理念要贯彻于教学过程始终。最后强调的是要学好模拟电路,行之有效的方法还是读书,要详读、细读、精读。阅读对一个人的影响到底有多大?最经典的诠释是这样一句经典的话:“我读过很多书,但后来大部分都被我忘记了,那阅读的意义是什么?当我还是个孩子的时候,我吃过很多食物,现在已经记不起来吃过什么了,但可以肯定的是,它们中的一部分已经长成我的骨骼、血肉,甚至灵魂”。

科技给了我们无限的遐想空间。当智能硬件设备逐渐渗透到人们生活的各个领域时,电子技术行业已经致力于各类智能硬件的定制化开发设计,提供给“互联网+”研究领域系统级智能硬件解决方案。智能硬件代表电子科技的未来。所以,本书的创新方向是启迪学生的硬件设计理念向模块化、智能化方向发展。

编者

编者寄语

AUTHOR'S WORDS

本书是为高等院校电类及其相近专业所开设的“模拟电子技术”课程而编著的教材,编写过程严格按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委会出版的《电子电气基础课程教学基本要求》,在内容选材方面考虑了高等院校信息类学科的教育改革要求。

模拟电子技术在学科领域的地位

电子信息工程是一门应用现代化电子科技与网络技术进行电子信息控制和处理的学科,主要研究信息的获取与处理方法以及电子系统与设备的设计、开发、应用和集成的通用技术。现在,电子信息工程已经涵盖了社会的诸多方面,像电视机怎么处理各种电视音视频信号,手机是怎样传递我们的声音甚至图像的,互联网怎样传递数据,甚至信息化时代军队信息传递中如何保密等都要涉及电子信息工程的应用技术。可以说,电子信息工程专业是集现代电子技术、信息技术、通信技术于一体的专业。本书主要通过一些电子技术知识的学习引导读者分析电子信息系统,使读者能够应用先进的电子系统设计技术进行新产品研究和开发。

本书主要讲述模拟电子系统处理信息的方法与知识。因此,课程的学习首先要有扎实的数学基础;对物理学的要求也很高,并且主要是电学理论方面;同时,更主要的是要学习许多电路、信号与系统的基本知识。学习过程学生自己还要动手设计、连接一些电路并结合计算机进行实验。同时,对动手操作和使用工具也有非常高的要求。例如自己设计传感器信息处理与获取的电路;用计算机软件仿真分析语音通信系统线路;参观一些大公司的电子和信息处理设备,理解手机信号、网络信号是如何传输的等,并能有机会在老师指导下参与接近工程实际的课程设计等。学习模拟电子线路理论,要喜欢钻研思考,并善于开动脑筋发现新问题。

随着社会信息化的深入,各行业大都需要电子信息工程专业人才,而且薪金很高。学生毕业后可以从事电子设备和信息系统的设计、应用开发以及技术管理等相关工作。例如,做电子工程师,设计开发一些电子、通信设备;做软件工程师,设计开发与硬件相关的各种软件;做项目主管,策划一些大的系统,这些对经验、知识要求很高;还可以继续进修成为教师,从事科研工作……这一切,都要从本课程开始。

本书主要研究现代模拟电子技术理论、探讨电子系统设计原理与方法,为培养面向电子技术、自动控制 and 智能控制、计算机与网络技术 etc 电子、信息、通信领域的宽口径、高素质、德智体全面发展的具有创新能力的工程技术人才打下扎实的专业知识基础。

本书内容简介

模拟电子线路包括“线性”和“非线性”(“低频”和“高频”)两部分内容,一般分为两门课程讲授。本书研究低频电路的分析与设计方法。

本书在阐述模拟电子线路基本理论和技术的基础上,融入了大量当代模拟集成电子学的研究新成果。全书分为12章,内容包括:半导体基础知识,半导体晶体管及其基本电路,场效应管与特殊三极管基本应用电路,集成运算放大器,放大电路的频率响应,负反馈放大器,集成运算放大器组成的运算电路,低频功率放大器,信号检测与处理电路,波形发生电路,直流电源,模拟电子线路读图与设计方法。

本书中通过对各种半导体分立器件、集成组件特性及其电路的分析,阐述了模拟电子技术的基本概念与基本原理;研究了模拟电子线路基本形式、分析与应用方法;同时介绍了VMOSFET、IGBT等新功率器件及其应用电路;探讨了集成开关电容电路、集成开关稳压电路等新理论、新技术、新集成组件及其应用新方法。

本书理论教学建议安排60学时,实验教学建议安排10学时。各专业可以参照这个建议根据教学要求微调。

本书习题许多改编自部分高校研究生试题,数量少而有代表性,建议读者全部完成。

教材编写特点

本课程是电类专业学生接触实际电路工程的第一门专业基础课程,内容抽象,教学任务重,而且又有其本身不同于先修课程的特点和规律。因此,在教学实践中反映出的问题是教师“难教”,学生“难学”。问题的关键还是对这门课“教学内容”和“教学方法”认识不足。对于一门课程的教学内容应满足两方面:一要反映科学的基本事实与规律,体现本学科最新成就并密切联系实际;二要符合培养目标和符合教学计划对本课程的基本要求,能体现本课程在教学体系中地位和作用。为配合教与学的关系,本书编写过程注意加强了以下方面的分析。

分立元器件与集成的关系

一般来说,作为专业基础课,本课程教学内容应相对稳定,但这门课的特点注定它要加快新陈代谢。因为器件是电子线路的基石,从电子管到晶体管,再到集成电路的电子器件发展过程代表了电子技术的发展和几次大的变革,同时也说明了半导体器件制造核心技术发展日新月异。由于IC产业特别是EDA技术的长足进展,现在已经彻底打破了器件、电路和系统的界限,从根本上改变了电子技术和信息科学的领域传统思维。同时也对电子线路的教学提出更新更高的要求。为了避免与工程实践脱节,本教材教学内容选材以当代电子技术发展水平为背景,以器件为主线加速由“分立”向“集成”的转化的原则。

在教学实践中,虽然“重在集成”的观点已经被大家所接受,但集成电路的内部单元实际上是由分立元件构成的。如果忽视内部单元电路的原理,只掌握外特性和工作参数,但是这种教法的结果势必造成学生只知IC的管脚排列与外围连接,而对集成电路的内部结构以及工作原理完全不理解。从而导致课程知识结构的“分立”,使学生“知其然而不知其所以然”,难以使学生达到知识结构的“集成”。为了解决这个矛盾,在教学中要坚持“强调集成电路外特性和应用,兼顾内部单元电路原理分析”的内外兼修原则。终极目标是使传教者感到“言之有物”,受教者也感到“学有所获”。

本教材教学上明确要求学生过好“器件关”,对典型电子器件(有源器件)掌握要求做到“分析、选择、应用”一体化,关键是要掌握这些器件的外部特性,时刻注意“器件为路用”的教学原则。特别是通过分析元器件及其系统特性曲线往往有利于掌握器件与系统的模型、参数和工作原理。要懂得学习器件目的“重在应用”。要熟悉和掌握各种模拟集成电路的应

用,诸如集成运放、集成功放、集成稳压器以及锁相环、乘法器等,才不至于与当代科技脱轨。实际集成电路可以宏观上把握“掌握两种集成电路”的教学理念,即线性电路——重点掌握运算放大器;非线性电路——重点掌握模拟乘法器与集成比较器。这两类芯片都属于通用型 IC,几乎可以实现线性和非线性领域的绝大部分应用电路的设计。在教学实践中对于这两种芯片要讲深讲透,要详细分析其电路结构、工作原理、参数特征以及典型应用。教师如果把握了教材处理方法和教材内容“粗讲、细讲”的分寸,可大大便于学生对于这门课程的学习。

“工程”思维与“理论”思维的关系

就分析方法而言,从过去的理想数学模型精密计算转换到本课程采用电子线路近似工程分析是本课程的核心思路与课程思维。本课程教与学中遇到的困难,究其原因往往是没有正确把握这门课的性质和分析方法。

本教材强调模拟电子技术是一门“工程应用性”课程。因此,其教学重点是掌握电子线路工程分析的方法,即“近似估算法”。实践证明,学生对于从基础课到专业基础课的过渡往往不适应。合理估算与恰当近似是要重点解决的问题。过去其他课程计算时可能得到唯一的答案,而在本课程只能计算某个值,其理论计算结果以及该结果相近的值都算正确。也就是近似结果的标准是“一个数量级”而不是“一个值”。

先修课“电路分析”与本课程虽然同为专业基础课,但在采用的数学模型和分析方法上都有所不同。“电路分析”采用理想模型和严格计算的方法,而本课程采用近似模型和工程估算的方法。在“电路分析”教材中,可以出现像“法拉级”量纲的脱离现实的电容元件数值,而模拟电子技术课程中电路元件要采用与实际标称值相符的结果。在“电路分析”课上学生用计算器得出一个值可以有任意多位小数,而本课程的计算结果却要结合实际仪表量程与误差要求对结果进行取舍。从实际电子测量和误差分析的角度看,电子元件和测量仪器都是有误差的,保留如此多的有效数字仅仅说明是“算”出来的数,完全脱离实际。通过以上分析可以看出,“电路分析”偏重理论,而“模拟电路”更偏重实际应用,所以只有正确把握“模拟电路”的课程性质才能掌握正确的分析方法。基于此,本教材从数学模型建立到分析计算充满了“近似和估算”;从分立放大器晶体管 h 参数模型建立与简化过程到运放放大器两条基本运算法则“虚短、虚断”的应用等都反映了这一思维。可以说“近似估算法是本书的灵魂”。

实践与理论关系的合理化思维方法

本教材的鲜明特点是强调实践性教学,注重工程素质培养和专业基本训练。因此加强实践环节改革,是课程建设的重要任务之一。实践环节就本课程而言包括课程设计与实验课环节。实验课程应该贯穿与配合理论教学全过程。实验是对理论学习的强化和补充。国外许多学校电子线路的教学重点在实验室而不在教室,国内许多学校加强实验而采取实验单独开课,如果合理设计,这些做法都是有益的。

检验学校培养学生质量的唯一标准是社会实践。电子线路课程的基本要求是培养“硬件能力”。硬件是电子线路的基础,硬件能力是电子工程师的基本能力。从产业界反馈的需求信息来看,硬件工程师严重缺乏;当前学校对学生硬件能力的培养普遍不足,所谓“硬件不硬”,这个问题已经引起了学校和产业界的普遍重视。课程实践教学加强对硬件能力的培养可以分为“基本能力”和“工程能力”两个阶段和要求。“基本能力”是对基本电路的分析和应用能力,归结为“懂、算、选、用”。“懂”指能读懂电路图,能够看懂电路图是工程技术

人员的一项基本功。“算”指能够计算电路设计时所需的元件参数。“选”指在实际应用中能够根据设计需要正确选用元器件(首先是有源器件)和相关的电路形式,要会查阅和借助技术手册和工具书进行工作。“用”可以泛指会“应用”,包括使用各种电子设备和仪器,具备安装、焊接、调整、测试、修理这些基本实验技能。

电子设计的工程能力是电子工程师的高级能力。具有电子设计和产品开发能力的工程师受到社会的欢迎和产业界的青睐。因此加强电子设计工程级能力的培养也成为本课程教学的高级要求。完成这个教学环节往往需要循序渐进,从“模拟电路”起打好基础,通过“实验课—课程设计—毕业设计”顺延配合实现。

本书注重电子线路设计分析的数学过程,提出了与传统教材互补的新的分析方法,如负反馈、集成运放分析方法等,可以说本书是一本具有专著特色的教材。

综上所述,当前深化教学改革和课程建设必须做到联系实际和注重实效。教材改革也要紧跟这个方向。学生毕业后面对社会现实,起码要具备“专业素质”和“综合素质”两个方面。综合素质是多方面的,而一个人的“核心竞争力”往往是其“专业素质”,用人单位首先考虑的也是学生的专业素质。本书核心思想是提高学生的“专业素质”,它也是我们教学改革和课程建设的指导思想。这个问题实际上就是“学以致用”。希望本书能够在培养学生专业素质方面起到启蒙的作用。

由于模拟电路知识面广,新器件、新技术不断涌现,加上作者水平、时间所限,书中定有疏漏,望广大读者不吝赐教(编者邮箱 zjouwangji@163.com)。

编者

常用符号说明

SYMBOLS CONVENTION

使用原则：小写字母(u, i, r)带小写下标表示交流动态量；大写字母带大(小)写角标表示直流量或有效值(平均值)；小写字母带大写下标表示含有直流、交流成分的全量；两个下标一般第一个为输出量(反馈量)，第二个为输入量。

1. 电流

I, i ——直、交流电流通用符号
 i_D ——PN结或二极管电流，交、直流混合量
 I_S ——PN结或二极管反向饱和电流
 I_{DM} ——最大整流电流
 I_{DQ}, I_D ——二极管静态电流或电流有效值
 I_z ——稳压管稳定电流
 I_{EN} ——三极管发射极电子电流
 I_{EN} ——晶体三极管发射极空穴电流
 I_B, i_b ——晶体三极管基极静态、动态电流
 i_B ——晶体三极管基极静态、动态混合电流
 I_{BN} ——基极电子电流
 I_{CN} ——集电极电子电流
 I_{CBO} ——集电区与基区反向饱和电流
 I_C, i_c ——集电极静态、动态电流
 i_C ——集电极静态、动态混合电流
 $\Delta i_i, \Delta i_o$ ——动态输入、输出电流变化量
 I_{CEO} ——晶体三极管C-E极间反向饱和电流
 I_{CM} ——晶体三极管最大集电极电流
 I_R ——PN结或二极管反向电流
 i_i, \dot{I}_i ——输入电流及其对应相量
 i_o, \dot{I}_o ——输出电流及其对应相量
 I_D ——场效应管沟道电流
 i_D ——场效应管漏极全电流
 I_{DQ} —— $U_{GS} = 2U_T$ 时的 I_D
 I_{DSS} ——饱和漏极电流
 I_{REF} ——基准电流
 i_C, i_L, i_R ——电容、电感、电阻电流
 i_+, i_- ——运放同相端与反相端电流
 $I_{D(AV)}$ ——整流二极管平均整流电流

I_{AV} ——平均电流

I_H ——维持电流

2. 电压

U, u ——直、交流电压通用符号
 u_D ——二极管端电压，交直流混合量
 U_T ——温度电压当量
 U_{BR} ——反向击穿电压
 U_{RM} ——二极管最大反向电压
 U_D ——二极管正向压降
 U_{DD} ——场效应管漏极或二极管电源
 U_z ——稳压管击穿电压或稳定电压
 U_{CM} ——晶体三极管最大集电极电压
 U_{BE}, u_{be}, u_{BE} ——晶体三极管发射结静态、动态、混合电压
 U_{CE}, u_{ce}, u_{CE} ——晶体三极管集电结-发射结静态、动态、混合电压
 $U_{(BR)CBO}$ ——e开路时，c-b之间的反向击穿电压
 $U_{(BR)CEO}$ ——b开路时，c-e间的反向击穿电压
 $U_{(BR)EBO}$ ——c极开路时，e-b极间的反向击穿电压
 u_s, \dot{U}_s ——信号源电压及其对应相量
 u_i, \dot{U}_i ——输入电压及其对应相量
 $u_{b'e}, \dot{U}_{b'e}$ ——晶体三极管发射极动态电压及其对应相量
 u_o, \dot{U}_o ——输出电压及其对应相量
 u'_o, \dot{U}'_o ——负载开路输出电压及其对应相量
 U_{omax}, I_{omax} ——放大电路的最大输出电压或电流
 $\Delta u_i, \Delta u_o$ ——动态输入电压、输出电压变化量
 U_{CC}, U_{BB} ——集电极电源、基极电源
 $U_{(BR)DS}$ ——场效应管漏源间击穿电压

$U_{(BR)GS}$ ——场效应管栅源间击穿电压
 U_G, I_G ——晶闸管触发电压和触发电流
 U_{BO} ——晶闸管阳极-阴极电压
 U_{DRM} ——晶闸管正向重复峰值电压
 U_{RRM} ——晶闸管反向重复峰值电压
 U_{GS} ——场效应管栅极和源极的外加电压
 U_{DS} ——场效应管 D、S 间电压
 u_{GS}, u_{gs} ——场效应管栅源全量电压、动态电压
 u_{DS}, u_{ds} ——场效应管漏极全量电压与动态电压
 $U_P, U_{GS(off)}$ ——场效应管夹断电压
 $U_{GS(th)}, U_T$ ——场效应管开启电压
 $u_p(u+), u_n(u-)$ ——运放同相端与反相端电位
 U_{om} ——电压信号幅值
 U_{OM} ——运放饱和输出电压
 U_{REF} ——参考电压
 U_{TH} ——比较器阈值电压
 u_{OS} ——比较器输入失调电压
 ΔU_{TH} ——门限宽度
 $U_{o(av)}$ ——整流输出电压平均值
 ΔU_{BE} ——三极管基-射电压差
 u_{id}, u_{ic} ——差模电压信号、共模电压信号
 U_N ——等效输入噪声电压

3. 功率

P ——功率通用符号
 P_{zm} ——稳压管最大额定功耗
 P_{CM} ——最大集电极耗散功率
 P_{om} ——放大器最大输出功率
 P_T, P_D ——晶体管与场效应管上的功耗
 P_S ——直流电源提供的功率
 P_{DM} ——漏极最大允许耗散功率

4. 电阻、电导、阻抗

r, R ——动态、静态电阻通用符号
 r_d ——PN 结或二极管动态电阻
 r_z ——稳压管动态电阻
 R_D ——PN 结或二极管静态电阻
 R_S ——放大器信号源内阻
 R_L ——放大器负载电阻
 R_o ——放大器输出电阻
 R_i ——放大器输入电阻
 $r_{bb'}$ ——晶体三极管基区电阻
 $r_{b'e}$ ——晶体三极管发射区电阻
 $r_{b'e'}$ ——晶体三极管发射结电阻
 $r_{b'c}$ ——晶体三极管集电结电阻

r_{if}, r_{of} ——反馈时的输入输出电阻
 r_o ——输出电阻
 r_{ec} ——晶体三极管集电极-发射极动态电阻
 r_e ——晶体三极管发射结引线与封装电阻
 R'_E ——晶体三极管发射结外接负载电阻
 R'_L ——晶体三极管集电极外接负载电阻
 R_{GS} ——场效应管外接输入电阻
 r_d ——场效应管动态输出电阻
 R_{G1}, R_{G2}, R_{G3} ——场效应管栅极外接电阻
 r_{gs} ——场效应管动态输入结电阻
 r_i, r_o ——放大器动态输入、输出电阻
 R_{CE}, r_{ce} ——晶体三极管 C-E 极间静态、动态等效电阻
 r_{id}, r_{ic}, r_{od} ——差模输入电阻、共模输入电阻、差模输出电阻
 g_m ——场效应管低频跨导
 R_+, R_- ——运放同相端与反相端等效电阻
 R_P ——平衡电阻
 R_G ——增益控制电阻
 r ——线圈电阻
 r_q ——石英晶体动态电阻
 R_t ——温度系数热敏电阻
 G_{ie} ——晶体三极管输入电导
 G_{oc} ——晶体三极管输出电导
 Z ——动态元件阻抗通用符号
 X ——动态元件电抗通用符号
 ρ ——石英晶体特性阻抗

5. 电容、电感

C ——通用电容
 C_B ——PN 结势垒电容
 C_D ——PN 结扩扩散电容
 C_j ——PN 结耗尽层电容或变容二极管电容
 C_E ——旁路电容
 $C_{b'e}$ ——晶体三极管发射结电容
 $C_{b'c}$ ——晶体三极管集电结电容
 $C'_{b'e}, C''_{b'e}$ —— $C_{b'e}$ 在晶体三极管微变等效模型中输入、输出侧等效电容
 C_{GS}, C_{GD}, C_{DS} ——场效应管栅-源极间、栅-漏极间、漏-源极间结电容
 C_{GS}, C_{GD}, C_{DS} ——场效应管极间电容
 C_A ——传感器压电元件的电容
 C_C ——电缆电容
 C_i ——放大器输入电容

- C_f ——放大器反馈电容
 C_o ——石英晶体安装电容
 C_q ——石英晶体动态电容
 L ——电感通用符号
 M ——互感系数
 L_q ——石英晶体动态电感
 6. 频率(角频率)、周期(时间)
 f, ω ——信号频率、角频率
 f_H ——上限频率
 f_L ——下限频率
 BW ——放大器通频带、开环带宽
 BWG ——放大器单位增益带宽
 f_β ——共发射极截止频率
 f_q ——石英晶体串联谐振频率
 f_p ——石英晶体并联谐振频率
 f_N ——石英晶体标称频率
 ω_0 ——中心角频率
 τ_L, τ_H ——低频、高频段时间常数
 t_R ——比较器响应时间
 t_{Sr} ——比较器选通脉冲释放时间
 T ——信号周期
 7. 放大倍数(增益)、反馈系数、传输函数
 $\bar{\beta}$ ——晶体三极管共射直流电流放大系数
 β ——晶体三极管共射交流电流放大系数
 $\bar{\alpha}, \alpha$ ——晶体三极管共基直流电流放大系数和交流电流放大系数
 A_{um} ——放大器中频增益
 $A_{ii}, A_{uu}, A_{iu}, A_{ui}$ ——放大器开环电流、电压、互导、互阻增益
 $\dot{A}_{ii}, \dot{A}_{uu}, \dot{A}_{iu}, \dot{A}_{ui}$ ——放大器开环电流、电压、互导、互阻增益相量
 A_u, A_{us} ——放大器电压增益、源电压增益
 A_i ——放大器电流增益
 CTR ——光电耦合电流传输比
 A_{ud}, A_{uc} ——放大器差模电压放大倍数、共模电压放大倍数
 $A(j\omega), A(s)$ ——传输频率、复频域增益函数
 A_{uH} ——放大器高频区电压增益的幅值
 A_{uL} ——放大器低频区电压增益的幅值
 A_f ——放大电路的闭环放大倍数
 $A_{uif}, A_{uif}, A_{iuf}, A_{iif}$ ——放大器闭环电压增益、互阻增益、互导增益、电流增益
 A_{uo} ——放大器去掉负载的电压增益
 A_{od} ——放大器差模开环放大倍数
 A_{up} ——滤波器的中频传输增益
 $| \dot{K} |$ ——晶体管 c-e 与 b-e 极间电压放大倍数
 T, \dot{T} ——环路增益及其相量
 $H(z)$ ——系统函数
 $H(e^{j\omega})$ ——频率响应
 $H_d(e^{j\omega}), H_d(n)$ ——理想频率响应、单位脉冲响应
 8. 器件相关名称符号
 D ——二极管
 D_Z ——稳压二极管
 T ——晶体三极管
 $b(B), c(C), e(E)$ ——晶体管基极、集电极、发射极
 Tr ——耦合变压器
 $G(g), S(s), D(d)$ ——场效应管栅极、源极、漏极
 FET ——场效应管
 $MOSFET$ ——金属-氧化物-半导体场效应管
 $JFET$ ——结型场效应管
 $IGBT$ ——绝缘栅双极型晶体管
 IOA ——集成运放
 PC ——光电耦合
 PGA ——可编程增益放大器
 LPF ——低通滤波电路
 HPF ——高通滤波电路
 BPF ——带通滤波电路
 BEF ——带阻滤波电路
 APF ——全通滤波电路
 K ——开关
 9. 其他物理量符号、名称
 K ——波尔兹曼常数
 T ——热力学温度
 W ——耗尽层厚度、禁带宽度
 n ——杂质浓度
 n ——变压器的匝数比
 x_i, \dot{X}_i ——输入量及其对应相量
 x_o, \dot{X}_o ——输出量及其对应相量
 x_i, x_f, x_{id} ——输入信号、反馈信号、净输入信号
 D ——失真系数
 η ——电路能量转换效率
 $h_{11e}, h_{12e}, h_{21e}, h_{22e}$ ——晶体管 h 参数
 S_E ——晶体三极管发射区面积

K_{CMRR} ——差放共模抑制比

F ——反馈系数通用符号

SR ——电压转换率

φ_{H} ——高频区相角

φ_{L} ——低频区相角

q ——压电传感器产生的电荷

Q ——品质因数

p ——折合接入系数

S ——整流输出电压的脉动系数

S_{γ} ——稳压系数

S_U ——电压调整率

S_I ——电流调整率

S_{rip} ——纹波抑制比

S_T ——输出电压的温度系数

目录

CONTENTS

序	3
前言	5
编辑寄语	7
常用符号说明	11
第 1 章 半导体基础知识	1
科技前沿——PN 结在太阳能电池技术领域的应用	1
1.1 电子信息系统	2
1.1.1 电信号	2
1.1.2 模拟信号的概念	3
1.1.3 电子信息系统组成	5
1.2 半导体的基础知识	7
1.2.1 半导体材料分类	8
1.2.2 本征半导体	8
1.2.3 杂质半导体	10
1.3 PN 结	12
1.3.1 PN 结形成过程	12
1.3.2 PN 结及其特性	13
1.3.3 PN 结的电容效应	15
1.3.4 PN 结的击穿特性	17
1.3.5 PN 结的应用	18
1.4 太阳能发电系统简介	18
本章小结	19
习题	20
第 2 章 半导体晶体管及其基本电路	22
科技前沿——3D 晶体三极管制造技术延伸摩尔定律	22
2.1 半导体二极管	23
2.1.1 半导体二极管的结构和类型	23
2.1.2 半导体二极管的伏安特性	24
2.1.3 温度对二极管伏安特性的影响	24
2.1.4 半导体二极管的主要参数与型号	25
2.1.5 二极管电路的分析方法	28
2.1.6 半导体二极管的应用	31