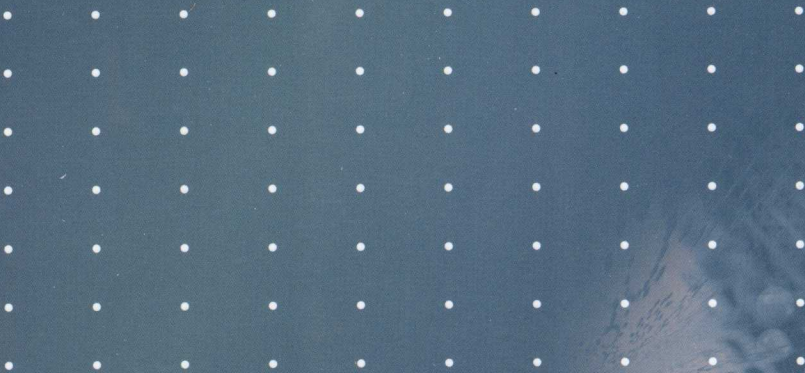


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

模拟电子技术基础

■ 孙肖子 主编
■ 孙肖子 谢松云 李会方 张进成 谢 楷 编著



013030797

TN710-43

144

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分

模拟电子技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

■ 孙肖子 主编

■ 孙肖子 谢松云 李会方 张进成 谢 楷 编著



TN710-43
144



北航

C1636317



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

707081810

内容简介

本书共分八章：绪论、常用半导体器件原理、双极型晶体管和场效应管放大器基础、集成运算放大器内部电路设计、集成运算放大器的基本应用电路、基于集成运算放大器的有源 RC 滤波器的分析与设计、反馈与振荡（弛张振荡器与正弦振荡器）、功率电路及电源管理。本书将反馈的概念贯穿到全书，更注重系统和应用，加强了有源 RC 滤波器、功率开关、功率电路以及电源管理等实际应用内容。在加强基本概念及分析方法的基础上，更贴近工程实际。书中增加了许多实际应用和设计案例，内容更丰富、更新颖。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、电气工程及其自动化、医学信息工程、微电子科学与工程、电子科学与技术等有关专业的本科生或专科生“电子线路基础”、“电子技术基础”等课程的教材或教学参考书，也可作为广大工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/孙肖子主编；孙肖子等编著. —北京：高等教育出版社，2012.12

ISBN 978-7-04-036841-3

I. ①模… II. ①孙… ②孙… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 009018 号

策划编辑 吴陈滨
插图绘制 尹 莉

责任编辑 王勇莉
责任校对 王 雨

封面设计 赵 阳
责任印制 朱学忠

版式设计 范晓红

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 涿州市京南印刷厂
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 22.5
字 数 550 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.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2012 年 12 月第 1 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价 32.80 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 36841-00

序 一

由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,西安电子科技大学与高等教育出版社联合策划的这套电子信息类专业基础课程系列教材即将陆续出版发行,我很高兴,这是我国高校电子信息类教材建设工作的一个新举措!

本系列教材的编写基于西安电子科技大学的电子信总办学特色和长期的教学经验积累。学校从1931年诞生于江西瑞金的中央军委无线电学校,到1949年张家口的军委工校和20世纪60年代的“西军电”,80年代的西北电讯工程学院,到现在的西安电子科技大学,一直致力于为国家军队培养电子信息方面的高级专业人才,是国内最早建立信息论、信息系统工程、雷达、微波天线、电子机械、电子对抗等专业的髙校之一,形成了鲜明的电子与信息学科特色与优势。本系列教材由学校众多知名教授担任主编,他们长期从事电子信息专业基础课教学和研究,努力继承和发扬学校在电子信息类专业基础课教学方面的经验和特色,并结合最新的科技进展组织和编写了系列教材。

大家知道,培养高素质的电子信息专门人才的前提,是要加强基础课程建设,尤其是数理基础和专业技术基础,要打造一个高水平的专业基础课程平台;本系列教材正是瞄准这一目标,从电路分析、信号与系统、模电(低频,高频)、数电、电磁场等专业基础课,到通信原理、雷达原理、软件技术基础、微波技术与天线等技术基础课,构成了一个知识面宽阔的电子信息类专业基础课教材体系。

本系列教材在编写时强调了如下几点,也可看做是本系列教材的特色:

1. 本系列教材自成体系,以西安电子科技大学的优势学科和特色专业为依托,覆盖了学校电子信息类专业的主干专业基础课程,知识结构系统完整,内容精练,具有先进性、系统性、完整性等特点;

2. 本系列教材由学校知名教授、专家(包括国家级教学名师、教育部相关教指委委员、学科带头人等)担任主编,他们具有较丰富的教学和科研经验,保证了该系列教材的编写质量;

3. 本系列教材具有很好的基础,大部分教材都是在原有教材的基础上进行修订,在此基础上增加先进的内容和新的方法,而部分原有教材是国家“九五”、“十五”、“十一五”国家级规划教材和普通高等教育精品教材,获得过省部级优秀教材奖。

4. 本系列教材对应的本科生课程大部分是国家级精品课程或省级精品课程,课程建设和教材建设十分注重基础理论知识与实际工程应用之间的紧密结合,注重对学生的分析问题和解决问题能力的培养。

电子信息领域是一个发展异常迅速的领域,新的需求不断产生,新技术不断涌现,电子信息产品迅速更新并广泛应用于社会的各个方面,从而对IT人才培养提出了更高的要求,反映在课程建设和教材建设上,就是要有前瞻性,并不断强化基础、不断适应新技术和新要求,就是要通过

教学改革与创新,不断提高教学质量,进而促进人才培养质量的全面提升。

希望本系列教材能在这方面产生一些积极的促进作用,并在实践中不断改进和提高,为国家培养出更多优秀的电子信息高级专业人才做出贡献!

保 铮

2012 年 5 月于西安

序 二

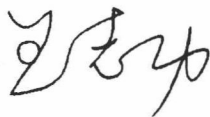
自 1999 年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类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

前言

“模拟电子技术基础”课程是电类专业的主干课程,是最重要的学科技术基础课之一。该课程的教学宗旨是“打好基础,学以致用”。一方面该课程要为后续课程的学习打好基础,另一方面该课程的实践性、工程性特别强,很多内容与工程实际密切相关,“直面应用”是本课程的特点之一。本教材以模拟电子技术的重要知识点和知识链为载体,注重加强学科理论基础,培养创新意识、科学思维方法,提高分析问题和解决问题的能力。

“兴趣是最好的老师”,“想象力比知识更重要”,本教材在绪论中,简单介绍“电子管的发明”、“晶体管的发明”以及“集成电路的发明”等电子技术发展的里程碑,显示人类智慧是无限的,科学技术发展、发现、创新是永无止境的。

结合多年的教学与科研实践,本教材力图做到“基础更扎实,内容更实用,视野更开阔,编排更合理”。本教材有以下特点:

1. 在第一章,给出本书的教学路线图(MAP),使教与学都有较清晰的思路。提前介绍“反馈”的概念与框图,并将“反馈”的概念贯穿全书。在第三章双极型晶体管和场效应管放大器基础、第四章电流源和差分放大器中,均不回避“负反馈”在稳定工作点、提高输入电阻、减小放大倍数、提高共模抑制比等方面所发挥的作用。在第五、第六章集成运算放大器基本应用和滤波器中,归纳电路结构可以发现其实质是“运放加反馈”。第七章全面回顾和总结负反馈的特性、分类及深反馈条件下增益的估算方法,讨论反馈稳定性及相位补偿的基本概念与原理,简要介绍正反馈在振荡器中的应用等。第八章功率电路及电源管理中,仍然大量应用“负反馈”来改善电路性能。可见,“反馈”的概念和应用在模拟电子技术中是何等重要。

2. 第二章“常用半导体器件原理”中从能带角度说明半导体与绝缘体、导体的区别,概念更为清晰。教材扩展了晶体二极管类型的介绍。在讨论器件特性曲线与参数的基础上,紧跟着提出晶体管的简化交流小信号模型,为下章放大器的分析与计算准备了条件。

3. 第三章“双极型晶体管和场效应管放大器基础”,借助“电路分析基础”的二端口网络模型来介绍放大器模型及放大器主要指标,一开始就提出三种基本组态电路,并用简化交流小信号模型来计算放大器的主要指标。对直流工作点的分析也以解析法估算为主,适当淡化了图解分析法,只将其作为讨论非线性失真和动态范围较为形象的方法来处理。本章还提出一种“快速估算法”,看到电路图,就能写出各项指标的结果,而无需画出等效电路。本章最后讨论放大器的频率响应,由浅入深,由易到难,思路清晰。教材在重要分析后都进行讨论、归纳,提高规律性的结论,对实际应用具有较好的指导意义。

4. 第四章针对集成运算放大器的结构和工艺特点,以及直接耦合放大电路的特殊问题,采用提出问题、找出原因、探索解决方法的思路,讨论了基于BJT和MOS器件的各种电流源的原理和应用、差分放大器电路和互补输出电路的工作原理与分析方法并举例分析了两种集成运算放

大器的内部电路。介绍了实际运算放大器的参数含义,为正确选择运放提供依据。

5. 第五章“集成运算放大器的基本应用电路”强调“运放加反馈”是构成各种功能电路的基本形式,在讨论基本应用电路的基础上,适当扩展知识面,简单介绍一些特殊运算放大器(高速电流反馈型运放、单片集成仪表放大器、单片集成增益可控运放等)。并指导实际应用中如何选择运放型号,如何正确使用单电源运放、注意电源去耦、电路消振、保护、调零以及负载驱动能力等问题。

6. 第六章中讲到的滤波器是最重要的一类模拟电路之一,本教材将有源 RC 滤波器从运放基本应用中独立出来,单独成章,旨在加强这方面的内容。书中对滤波器概念、形式、分类及其特点介绍更为清晰,对滤波器的工程设计方法阐述更加明确,对实际应用更具指导意义。

7. 第七章“反馈与振荡”全面总结负反馈在放大器中的应用规律。讨论负反馈放大器产生“自激振荡”的现象与原因,介绍消除自激的方法,具有一定的实际指导意义。最后简要介绍正反馈在迟滞比较器、弛张振荡器和正弦振荡器中的应用。

8. 第八章中提到的电源是所有电子设备中必备的部件,本教材给予足够的重视。晶体管和场效应管等分立元件在小信号放大器中虽然已很少应用,但作为大功率开关则有广泛而重要的应用领域。为适应实际工程需要,本教材在功率电路和电源管理方面有了很大的加强。

书中打“*”的内容可以不讲,供进一步扩展知识面及工程设计时参考。

本教材是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,是西安电子科技大学组织编写的16本电子信息类系列教材中的一本。本教材由西安电子科技大学与西北工业大学联合编写。西安电子科技大学工程学院孙肖子教授提出本教材的整体构架和内容安排,并编写了第一、第三和第七章;西北工业大学电子信息学院谢松云教授编写了第五章;西北工业大学电子信息学院李会方教授编写了第四、第六章;西安电子科技大学微电子学院张进成教授编写了第二章;西安电子科技大学机电工程学院谢楷副教授编写了第八章;孙肖子负责全书的修改、补充和统稿。

西安交通大学邓建国教授审阅了全部书稿,提出许多宝贵的改进意见和建议。高等教育出版社的编辑老师们为本书的出版付出了许多智慧和辛苦。对于所有帮助我们的同志表示深深的感谢。

由于时间和水平所限,书中必然存在许多不足之处,望尊敬的老师、同学和广大读者批评指正,并请与编者联系:xzsun@xidian.edu.cn。

编者

2012年8月于西安

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120



北航

C1636317

目 录

第一章 绪论	1	2.4.2 晶体管的伏安特性	35
1.1 电子器件与电子电路发展史概要	1	2.4.3 直流偏置下晶体管的工作状态 分析	37
1.1.1 电子管的发明	1	2.5 场效应管	38
1.1.2 晶体管的发明	2	2.5.1 结型场效应管	38
1.1.3 集成电路的发明	2	2.5.2 绝缘栅场效应管	41
1.2 模拟电路的特点及主要应用领域	3	2.5.3 各种场效应管的比较以及场效应 管与晶体管的对比	46
1.2.1 模拟信号与模拟电路的特点	3	2.5.4 直流偏置下场效应管的工作状态 分析	47
1.2.2 模拟电路的主要内容及应用领域	4	2.6 晶体管和场效应管的低频交流 小信号简化模型	47
1.3 本书的教学路线图(MAP—— 地图)	5	2.6.1 晶体管的低频交流小信号模型	48
1.4 有关模拟电路学习方法的建议	8	2.6.2 场效应管的低频交流小信号模型	50
第二章 常用半导体器件原理	9	本章小结	51
2.1 半导体物理基础	9	习题	51
2.1.1 半导体与绝缘体、导体的区别	9	第三章 双极型晶体管和场效应管放 大器基础	56
2.1.2 半导体材料的种类	11	3.1 放大器的基本概念	56
2.1.3 本征半导体	11	3.1.1 4种放大器及4种放大倍数定义	56
2.1.4 N型半导体和P型半导体	13	3.1.2 放大器模型及放大器主要指标	57
2.1.5 漂移电流和扩散电流	15	3.2 三种组态的放大电路	61
2.2 PN结	15	3.3 共发射极放大器分析	63
2.2.1 PN结的形成	15	3.3.1 阻容耦合共发射极放大器电路 结构	63
2.2.2 PN结的单向导电性	16	3.3.2 直流工作状态分析与计算	63
2.2.3 PN结的击穿特性	18	3.3.3 共射放大器的交流分析及主要 指标估算	66
2.2.4 PN结的电容特性	18	3.4 共集电极放大器	72
2.3 晶体二极管	20	3.4.1 直流工作状态分析	72
2.3.1 二极管的伏安特性	20	3.4.2 交流指标计算	73
2.3.2 温度对二极管伏安特性的影响	22	3.5 共基极放大器	74
2.3.3 二极管的近似伏安特性和简化 电路模型	23	3.5.1 直流工作状态分析	74
2.3.4 稳压二极管	24		
2.3.5 其他二极管	26		
2.3.6 二极管应用电路举例	28		
2.4 双极型晶体管	31		
2.4.1 晶体管的工作原理	32		

3.5.2 交流指标计算	75	4.3.5 MOS 差分放大器	139
3.6 三种组态放大器比较	75	4.3.6 差分放大电路的传输特性及 应用	140
3.7 关于非线性失真与输出动态范 围的讨论	77	4.4 集成运算放大器的输出电路	144
3.7.1 直流负载线与交流负载线	77	4.5 集成运算放大器内部电路举例	145
3.7.2 非线性失真与动态范围	78	4.5.1 BJT 通用运算放大器 F007	145
3.8 场效应管放大器	80	4.5.2 C14573 集成运算放大电路	147
3.8.1 偏置电路	80	4.6 集成运算放大器的主要技术 参数	148
3.8.2 共源放大器	81	本章小结	151
3.8.3 共漏放大器和共栅放大器	83	习题	151
3.9 放大器的级联	85	第五章 集成运算放大器的基本应用 电路	157
3.9.1 级间耦合方式及组合原则	85	5.1 集成运算放大器的符号、模型、 电压传输特性	157
3.9.2 多级放大器的性能指标计算	86	5.1.1 集成运算放大器的符号、模型 及理想运算放大器条件	157
3.10 放大器的频率响应	90	5.1.2 集成运算放大器的电压传输 特性	158
3.10.1 频率特性与频率失真概念	90	5.2 反相比例放大器与同相比例 放大器	159
3.10.2 低频区频率响应	92	5.2.1 反相比例放大器	159
3.10.3 负载电容 C_L 对高频区频率响 应的影响	94	5.2.2 同相比例放大器	162
3.10.4 晶体管的高频小信号模型及高 频参数	96	5.2.3 两种放大器比较	164
3.10.5 共射放大器的高频响应	97	5.3 加法器	166
3.10.6 共集放大器及共基放大器的高 频响应	100	5.3.1 反相加法器	166
3.10.7 场效应管放大器的高频响应	102	5.3.2 同相加法器	167
3.10.8 多级放大器的频率响应	104	5.4 基本减法器及仪用放大器	168
本章小结	105	5.4.1 基本减法器电路	168
习题	106	5.4.2 精密相减器电路——仪用放 大器	169
第四章 集成运算放大器内部电路 设计	117	5.5 积分器和微分器	170
4.1 集成运算放大器电路概述	117	5.5.1 积分器	170
4.2 集成运放电路中的电流源电路	119	5.5.2 微分器	172
4.2.1 双极型晶体管组成的电流源	119	5.6 电压-电流($U-I$)变换器和电 流-电压($I-U$)变换器	173
4.2.2 场效应管组成的电流源	124	5.6.1 $U-I$ 变换器	173
4.2.3 电流源的主要应用——有源 负载	125	5.6.2 $I-U$ 变换器	174
4.3 差分放大电路	127	5.7 对数、反对数放大器及乘除器	178
4.3.1 零点漂移现象	127	5.7.1 对数运算器	178
4.3.2 一般差分放大电路的特性分析	127		
4.3.3 带恒流源的差分放大电路	135		
4.3.4 有源负载的差分放大电路	136		

5.7.2 反对数(指数)运算器	179	6.4 多功能有源 RC 滤波器(状态 变量滤波器)的工作原理与工 程设计	230
5.7.3 乘法器和除法器	179	6.4.1 多功能有源 RC 滤波器(状态 变量滤波器)的工作原理	230
5.8 精密整流、检波(峰值检波、 相敏检波)及取样保持电路	180	6.4.2 集成多功能有源 RC 滤波器 UFA42	232
5.8.1 精密整流(限幅)电路	180	6.5 一阶全通滤波器(移相器)的 原理与工程设计方法	236
5.8.2 峰值检波电路	182	6.6 开关电容滤波器基本原理	237
5.8.3 相敏检波电路	182	6.6.1 基本开关电容单元及等效电路	238
5.8.4 取样保持电路	183	6.6.2 开关电容积分器	239
5.9 特殊用途的集成运算放大器	184	本章小结	240
5.9.1 高速电流反馈型集成运算放 大器	184	习题	241
5.9.2 集成仪表放大器	189	第七章 反馈与振荡	247
5.9.3 增益可控集成运算放大器	190	7.1 反馈基本方程及其含义	247
5.10 运放开环应用及电压比较器	193	7.1.1 反馈基本方程	247
5.10.1 运放开环应用——电压比较器	193	7.1.2 深度负反馈的启示	249
5.10.2 单片集成专用电压比较器	194	7.2 正确判断放大器的反馈类型	249
5.11 实际集成运算放大器选型 指南及应用注意事项	196	7.2.1 有、无反馈的判断	249
5.11.1 正确选用集成运算放大器	196	7.2.2 直流反馈与交流反馈的判断	250
5.11.2 集成运放应用中的注意事项	197	7.2.3 正反馈与负反馈的判断	250
本章小结	201	7.2.4 电压反馈与电流反馈的判断	251
习题	202	7.2.5 串联反馈与并联反馈的判断	251
第六章 基于集成运算放大器的有源 RC 滤波器分析与设计	209	7.3 负反馈对放大器性能的影响	253
6.1 滤波器的概念	209	7.3.1 负反馈使放大倍数稳定度提高	253
6.1.1 滤波器的特性	209	7.3.2 负反馈使放大器通频带展宽、 线性失真减小	254
6.1.2 理想滤波器的逼近方法	211	7.3.3 负反馈使非线性失真减小、线 性动态范围展宽	255
6.1.3 二阶滤波器的传递函数	213	7.3.4 负反馈可以减小放大器内部产 生的噪声与干扰的影响	256
6.2 一阶有源 RC 滤波器的电路 实现	215	7.3.5 负反馈对放大器输出电阻的 影响	256
6.2.1 无源滤波电路	215	7.3.6 负反馈对放大器输入电阻的 影响	257
6.2.2 一阶有源低通滤波器	216	7.4 负反馈放大电路分析及闭环 电压增益估算	258
6.3 二阶有源 RC 滤波器的电路实现 及工程设计	218	7.5 正确应用与引入反馈	261
6.3.1 二阶压控电压源型(Shallen-key) 滤波器的电路实现及工程设计	218	7.5.1 应用和引入反馈的一般原则	261
6.3.2 二阶无限增益多路反馈(MFB)滤 波器的电路实现及工程设计	224		
6.3.3 二阶带阻滤波器的电路实现及 工程设计	227		

7.5.2 应用和引入反馈的举例	262	8.2.5 集成线性稳压器	304
7.6 负反馈放大器的稳定性讨论	264	8.3 开关稳压电源电路	306
7.6.1 负反馈放大器稳定工作的条件	264	8.3.1 功率开关电路	306
7.6.2 利用开环增益的波特图来判别 放大器的稳定性	265	8.3.2 脉宽调制	308
7.6.3 常用的消振方法——相位补 偿法	266	8.3.3 开关电源的原理和基本组成	308
7.7 正反馈应用之一——迟滞 比较器与弛张振荡器	271	*8.3.4 开关变换器的基本拓扑结构	309
7.7.1 迟滞比较器	271	*8.3.5 PWM 发生器与反馈控制模式	310
7.7.2 弛张振荡器	276	*8.3.6 集成开关稳压器及开关电源 电路分析	312
7.8 正反馈应用之二——正弦振 荡器	279	8.3.7 各类稳压电路的性能对比	315
7.8.1 RC 文氏桥正弦振荡器	279	8.4 低频功率放大电路	316
7.8.2 LC 正弦振荡器	281	8.4.1 低频功率放大电路的组成与 原理	316
7.8.3 晶体振荡器	283	8.4.2 功率级电路及其工作状态分类	316
本章小结	285	8.4.3 功率放大器的评价指标	323
习题	286	*8.4.4 功率放大电路的扩展	324
第八章 功率电路及电源管理	296	*8.4.5 集成音频功率放大器	325
8.1 常用功率电子器件及特性	296	8.5 D 类(开关)功率放大电路	327
8.2 整流及线性稳压电源	298	8.5.1 D 类功率放大器的基本原理	327
8.2.1 整流及滤波电路	298	*8.5.2 集成 D 类功率放大器及应用 举例	328
8.2.2 线性稳压电源的基本结构和 指标	300	本章小结	329
8.2.3 线性稳压电源原理与分析	301	习题	330
8.2.4 低压差稳压电路(LDO)	303	参考文献	335
		附录 专用名词汉英对照	337
		部分习题答案	342

第一章 绪 论

本章主要介绍电子器件与电子电路的发展简史、模拟电子电路特点及其主要应用领域,了解本书内容的基本脉络,介绍一个贯穿全书的重要概念——“反馈”,以及关于模拟电子电路学习方法的若干建议。

1.1 电子器件与电子电路发展史概要

了解电子技术领域的发展概况,追寻科技发明的足迹,可以激发我们的想象力、创造性和好奇心。这里仅介绍与本课程紧密相关的三个事件,即电子管、晶体管和集成电路的发明。

1.1.1 电子管的发明

很长时间,科学家与工程师们一直在寻找能实现电信号放大、产生、变换、控制与处理的新理论、新材料和新器件。

受“爱迪生效应”启发,1904年英国物理学家和电气工程师弗莱明发明了电子管,并获得了发明专利权。人类第一只电子管的诞生,使人类找到了一种实现电信号放大、产生、变换、控制与处理的核心器件,开辟了通信、雷达、仪器仪表等电子技术飞速发展的道路,标志着世界迈进了“电子时代”。

电子管又名真空管,其工作原理是在抽成真空的玻璃管内放置一个灯丝和若干个金属电极(如图1.1.1所示),当灯丝通电加热后,使金属内电子获得足够能量而发射出来,并在金属电极电压的作用下形成可控制的电子电流,从而达到信号的放大、产生、控制、处理和加工之目的。在一定的历史阶段,电子管的应用大大推动了人类科学技术的发展。然而,电子管存在许多难以克

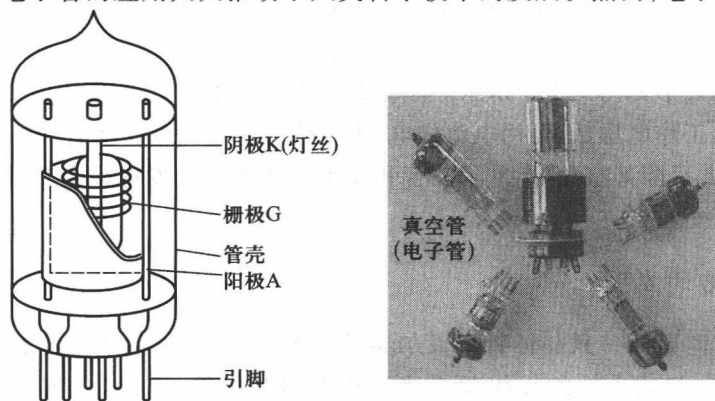


图 1.1.1 电子管结构示意图和实物照片

服的缺点:体积大、功耗大、发热严重、寿命短、电源利用率低、结构脆弱、可靠性差、需要高电压电源等。世界上第一台计算机用了1.8万只电子管,占地 170 m^2 ,重 $30\,000\text{ kg}$,耗电 150 kW 。电子管的这些问题,促使人们继续探索和寻找新理论、新材料和新器件。

1.1.2 晶体管的发明

20世纪中期,人们对电子器件研究的兴趣由真空环境转向物体内部。当时的美国贝尔实验室总裁默文凯利从20世纪30年代起就致力于寻找采用新材料、新原理工作的电子放大器件,第二次世界大战后他果断地决定加强半导体的基础研究,以开拓电子技术的新领域。由贝尔实验室理论物理学家威廉·肖克利(1910—1989年)、理论物理学家约翰·巴丁(1908—1991年)和实验物理学家沃尔特·布拉顿(1902—1987年)三人组成的研究小组于1947年12月发明了具有放大作用的点触式晶体管,1950年又宣布成功研制了基于PN结的结型晶体管,这是20世纪中期最伟大的发明,它标志着“固体电子技术时代”的到来。基于此项发明,肖克利、巴丁、布拉顿三人获得了1956年诺贝尔物理学奖。图1.1.2给出晶体管的发明者与点触式晶体管实验装置照片。

1947
Transistor



图 1.1.2 晶体管的发明者与点触式晶体管实验装置

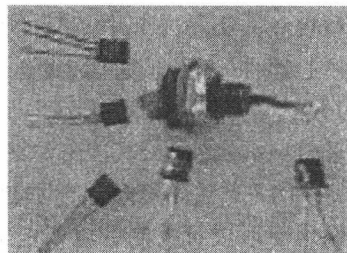


图 1.1.3 部分晶体管外形

一些晶体管的外形如图1.1.3所示。晶体管的寿命比电子管长几百倍乃至几千倍,并且它的体积小、耗能小、工作电压低、可用电池供电、不需预热、抗震、可靠性高。晶体管的出现和广泛应用改变了世界,此后除某些显像管、示波管和高频大功率无线发射设备仍部分延用电子管外,电子管已退出了历史舞台。

1.1.3 集成电路的发明

1947年12月世界第一只晶体管在贝尔实验室诞生,大大推动了电子技术的发展,但是对于复杂的电子设备,仍需大量的导线和焊接点将众多晶体管、电阻、电容连接起来,导致设备还是过于庞大和沉重,人们继续探索电子设备微型化之路。1952年英国皇家雷达研究所提出“集成电路”的概念,1958年9月12日美国德州仪器公司年轻工程师杰克·基尔比(Jack

S. Kilby, 34 岁) 发明了世界第一片集成电路——相移振荡器, 成功地实现了把电子器件(电阻、电容、晶体管)集成在一块半导体材料上的构想, 而获得了集成电路发明专利。集成电路的发明, 不仅推动了现代科学技术和工业实现里程碑式的发展, 而且改变了人们生活的世界, 从此人类迈进了“现代微电子时代”。基尔比因发明集成电路而获得 2000 年的诺贝尔物理学奖。

关于集成电路的发展和应用, 我们还需记得另一个名字——罗伯特·诺伊斯 (Robert Noyce)。1959 年 7 月, 仙童 (Fairchild) 公司的诺伊斯研究出一种二氧化硅的扩散技术和 PN 结的隔离技术, 创造性地在氧化膜上制作出铝条连线, 使元件和导线合成一体, 并获得了集成电路内部连接技术专利权。从而为半导体集成电路的平面制作工艺和集成电路的工业大批量生产奠定了坚实的基础。1968 年诺伊斯离开了仙童 (Fairchild) 公司, 与戈登·摩尔、安迪·格罗夫共同创建了英特尔 (Intel) 公司。

部分集成电路外形如图 1.1.4 所示。电子管发明到晶体管发明相距 43 年, 而晶体管发明到集成电路发明仅相隔 10 年。这些伟大的发明改变了世界, 也改变了人们的生活。如今集成电路正在朝着超微精细加工、超高速、超高集成度、片上系统 SoC (System on Chip) 方向迅速发展, MEMS 技术(硅片上的机电一体化)和生物信息技术将成为下一代半导体主流技术新的增长点, 而人类探求新的科学技术的脚步将永远继续下去。

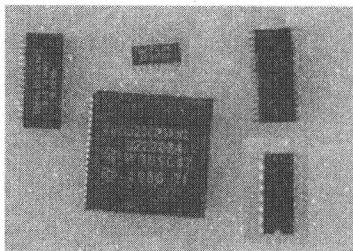


图 1.1.4 部分集成电路外形

1.2 模拟电路的特点及主要应用领域

1.2.1 模拟信号与模拟电路的特点

所谓模拟信号, 是指在时间和数值(幅度)上都是连续变化的信号, 如图 1.2.1 所示。另一种被称为“采样数据信号”, 在时间上是离散的, 而幅度却仍为连续变化(不量化)的, 如图 1.2.2 (a)、(b) 所示, 图中 T_s 为采样周期, $x(nT_s)$ 为对应时间 $t = nT_s$ 时的函数 $x(t)$ 的样品值。采样数据信号由于幅度连续变化(不量化), 因此通常也将其归于模拟信号一类中。

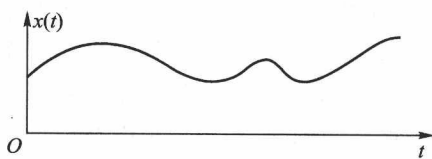


图 1.2.1 模拟信号——时间、幅度均为连续变化的信号

数字信号则不仅时间离散而且幅度也为离散量, 即幅度“量化”的信号, 通常将某一时刻的信号 $x(nT_s)$ 量化为用 0、1 (二进制) 表示的序列码信号, 如图 1.2.3 所示。

当今数字信号处理和数字集成电路发展迅速, 但不可能取代模拟电路技术。因为自然界存在的信号大多是模拟信号, 如麦克风接收到的语音信号、地震仪接收到的地震波信号、传感器转换的许多非电物理量(温度、压力、位移……)信号、生物电信号等。这些信号往往比较微弱, 而且受干扰和噪声污染, 需经放大、滤波等信号预处理后, 方可进入数字化阶段。即使在数字通信、

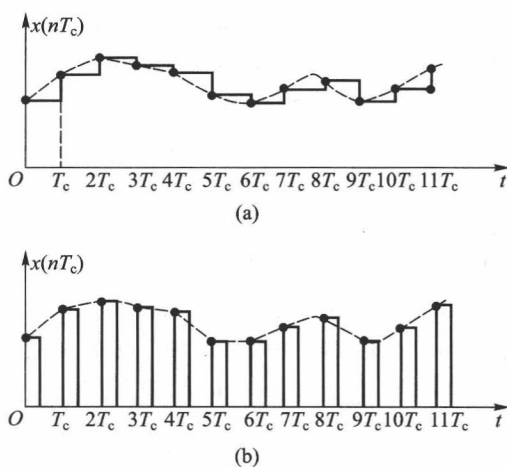


图 1.2.2 采样数据信号(时间离散、幅度连续变化的信号)

(a) 采样保持数据信号 (b) 样本数据信号(非保持)

$x(0)$	01101100	<u>0</u> <u>11</u> <u>0</u> <u>11</u> <u>00</u>
$x(T_c)$	10110011	<u>1</u> <u>0</u> <u>11</u> <u>00</u> <u>11</u>
$x(2T_c)$	11011001	<u>11</u> <u>0</u> <u>11</u> <u>00</u> <u>1</u>
$x(3T_c)$	10101011	<u>1</u> <u>0</u> <u>1</u> <u>0</u> <u>1</u> <u>0</u> <u>11</u>

图 1.2.3 数字信号——时间离散、幅度也离散(量化)的信号

光通信、无线收发器甚至是微处理器和存储器等设备中都不可避免地涉及模拟电路技术,特别是高速数字电路设计实质上就是模拟电路设计。

模拟电路设计要在速度、功耗、增益、精度、电源等多种因素间进行折中,模拟电路对串扰、噪声等远比数字电路敏感,电阻、电容数值和器件的二级效应对模拟电路的影响远比数字电路严重。高性能的模拟电路设计很少能依靠计算机自动完成,在一定程度上仍依赖于设计者的经验和直觉。正如毕查德·拉扎维(Behzad Razavi)教授(美)所说的那样:“好的模拟电路设计需要直觉、严密与创新,作为模拟电路设计者,必须以工程师的眼光快速而直觉地理解一个大的电路,以数学家的智慧量化那些在电路中难以捉摸而又重要的效应,以艺术家的灵感发明新的电路结构。”

1.2.2 模拟电路的主要内容及应用领域

凡是能够处理、加工模拟信号的电路统称为模拟电路,模拟电路内容十分丰富,主要包括元器件(双极型晶体管、场效应管、运算放大器、乘法器……);放大器(小信号放大器、选频放大器、功率放大器……);滤波器(RC 有源滤波器:低通、高通、带通、带阻、全通,开关电容滤波器……);振荡器(弛张振荡器、正弦振荡器……);电源及电源管理(线性稳压电源、开关稳压电源、DC-DC\低功耗技术……);调制与解调等,如图1.2.4所示。在本课程中,将介绍调制解调