

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

Fundamental Electric and Electronic Circuits
Part II : Electronic Circuits

电路与电子线路基础

电子线路部分

■ 王志功 沈永朝 编著



 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导

电路与电子线路基础

DIANLU YU DIANZI XIANLU JICHU

电子线路部分

DIANZI XIANLU BUFEN

■ 王志功 沈永朝 编著



Fundamental Electric and Electronic Circuits
Part II : Electronic Circuits

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、课程设置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 and 图片可供参考 and 选用。

本书的编写应该说是众多传统知识 with 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 and 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 and 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 with 电路的概念,为讲述各类二极管 and 晶体三极管的特性 with 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 and 基本应用。第 3 章引入双端口非线性网络、有源网络 and 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 and 多种场效应晶体管的器件原理、工艺、模型 and 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 with 集成运算放大电路。第 9 章介绍由运算放大器构造的线性 and 非线性运算电路。第 10 章介绍模拟大信号相关的功率放大 with 处理电路。第 11 和 12 章介绍振荡 and 频率变换等非线性动态信号生成 and 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 and 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 with 测试,从而指明学习 and 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 and 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” and “电子线路”的基本知识,为学习诸如“数字电路 with 系统”、“通信电路 with 系统”、“控制系统”等奠定基础。

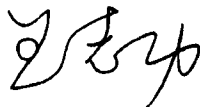
赵鑫泰博士参与了第 8、11、12 和 14 章的编写,对全书文稿进行了校对 and 格式整理,编写了部分习题,并参与了部分章节的讲授实践。徐建博士参与了部分书稿的校对 and 部分章节的讲授实践。在此一并表示感谢。

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次修改,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

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。

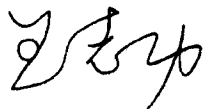
3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

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

目 录

第 1 章 非线性电路概述	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 非线性元件	(1)
1.2.1 非线性电阻	(2)
1.2.2 非线性电容	(8)
1.2.3 非线性电感	(9)
1.3 非线性电路方程	(10)
1.4 小信号分析法	(12)
1.5 分段线性优化方法	(15)
第 2 章 半导体 PN 结与二极管	(24)
2.1 半导体与 PN 结	(24)
2.1.1 半导体与掺杂	(24)
2.1.2 N 型与 P 型半导体	(25)
2.1.3 PN 结的动态平衡	(27)
2.1.4 PN 结的正向偏置	(29)
2.1.5 PN 结的反向偏置	(29)
2.2 二极管模型	(31)
2.2.1 二极管的伏安特性	(31)
2.2.2 PN 结电容效应	(32)
2.2.3 二极管大信号模型	(33)
2.2.4 简单二极管电路的计算方法	(34)
2.3 二极管器件的 SPICE 语句输入格式	(36)
2.3.1 半导体器件的 SPICE 语句描述方式	(36)
2.3.2 二极管 D 的 SPICE 语句输入格式	(38)
2.4 二极管的应用	(39)
2.4.1 整流电路	(39)
2.4.2 检波电路	(42)
2.4.3 限幅电路	(42)

2.5	特殊二极管	(43)
2.5.1	齐纳二极管	(44)
2.5.2	肖特基二极管	(45)
2.5.3	发光二极管	(45)
2.5.4	激光二极管	(47)
2.5.5	光电二极管	(50)
第 3 章	双端口非线性器件与受控源	(54)
3.1	双端口非线性电子器件	(54)
3.2	单元电路的隔离	(54)
3.2.1	隔离的必要性	(54)
3.2.2	隔离器基本结构	(61)
3.3	受控电源	(62)
3.3.1	受控源电路图	(64)
3.3.2	电压控制电压源	(64)
3.3.3	电压控制电流源	(65)
3.3.4	电流控制电压源	(66)
3.3.5	电流控制电流源	(66)
3.4	受控源在电路中的基本行为	(67)
3.4.1	受控源端口电压关系和端口电流关系	(67)
3.4.2	受控源的放大功能	(69)
3.4.3	放大的基本概念	(73)
3.5	有源电路的计算	(73)
3.5.1	有源电路计算举例	(74)
3.5.2	受控源的层次链接	(78)
3.6	反馈的基本概念	(82)
3.6.1	反馈概念的产生	(82)
3.6.2	反馈基本方程式	(84)
3.6.3	反馈的组态及判断方法	(85)
第 4 章	双极型晶体管	(92)
4.1	晶体管的发明	(92)
4.2	BJT 的基本工作原理	(93)
4.2.1	PNP 型晶体管的基本工作原理	(93)
4.2.2	NPN 型晶体管的基本工作原理	(97)
4.3	BJT 的制造工艺	(98)

4.4	BJT 的电路模型	(102)
4.4.1	BJT 的 Ebers - Moll 模型	(102)
4.4.2	BJT 的小信号等效电路	(104)
4.4.3	BJT 的 Gummel - Poon 电路模型	(106)
4.4.4	BJT 的 SPICE 输入语句格式	(107)
4.4.5	BJT 的 SPICE 模型语句与参数	(107)
第 5 章	BJT 基本电路	(111)
5.1	共基、共发和共集 3 种基本组态电路	(111)
5.1.1	共基组态放大电路	(111)
5.1.2	共发组态放大电路	(120)
5.1.3	共集组态放大电路	(137)
5.1.4	共基、共发和共集放大器主要特征比较	(139)
5.2	BJT 直接耦合基本电路	(140)
5.2.1	达林顿连接	(143)
5.2.2	NPN 型晶体管与 PNP 型晶体管组合放大器	(145)
5.2.3	差分放大器	(146)
5.2.4	管联放大器	(154)
5.3	电流源及其应用	(155)
5.3.1	电流源	(155)
5.3.2	电流源的应用	(170)
5.4	BJT 电压源	(177)
5.4.1	产生电压源的基本方法	(177)
5.4.2	电压源实用电路	(180)
第 6 章	场效应晶体管原理、特性与工艺	(194)
6.1	结型场效应晶体管	(194)
6.1.1	PN 结场效应晶体管	(194)
6.1.2	金属 - 半导体结场效应晶体管	(196)
6.1.3	高电子迁移率晶体管	(197)
6.1.4	JFET 的大信号模型	(199)
6.1.5	JFET 的 SPICE 语句格式	(200)
6.1.6	JFET 的仿真模型	(200)
6.1.7	JFET 与 BJT 的对比	(201)
6.2	MOSFET 的基本结构与原理	(202)
6.2.1	MOS 的基本结构	(203)

6.2.2	MOS 伏安特性	(205)
6.2.3	NMOS 电容的组成	(209)
6.2.4	MOS 管的阈值电压 V_T	(210)
6.2.5	MOSFET 的体效应	(211)
6.2.6	MOSFET 尺寸按比例缩小	(213)
6.2.7	MOSFET 的跨导 g_m	(214)
6.2.8	MOSFET 的动态特性受尺寸缩小的影响	(214)
6.2.9	MOSFET 的温度特性	(215)
6.2.10	MOSFET 的噪声	(215)
6.3	与 MOSFET 相关的 VLSI 工艺	(216)
6.3.1	PMOS 工艺	(217)
6.3.2	NMOS 工艺	(219)
6.3.3	CMOS 工艺	(223)
6.4	MOS 器件的二阶效应	(226)
6.4.1	L 和 W 的变化	(226)
6.4.2	迁移率的退化	(228)
6.4.3	沟道长度调制	(229)
6.4.4	短沟道效应引起门限电压变化	(230)
6.4.5	狭沟道效应引起门限电压变化	(231)
6.5	MOSFET 的等效电路模型	(232)
6.5.1	MOSFET 的 SPICE 输入语句	(232)
6.5.2	MOSFET 的等效电路模型参数	(233)
6.5.3	FET 小信号等效电路	(237)
第 7 章	基本 FET 模拟电路	(239)
7.1	FET 基本组态	(240)
7.1.1	共栅组态	(240)
7.1.2	共源组态	(241)
7.1.3	共漏组态	(243)
7.1.4	共源 - 共栅管联组态	(244)
7.1.5	源极耦合 FET 对管	(245)
7.2	FET 可变电阻与开关	(250)
7.2.1	FET 可变电阻	(250)
7.2.2	FET 开关	(251)
7.3	MOS 二极管与有源电阻	(252)

7.4	电流漏、电流源和电流镜	(253)
7.4.1	电流漏和电流源	(253)
7.4.2	电流镜	(259)
7.5	MOS 基准电压	(260)
7.6	MOS 放大器	(262)
7.6.1	有源负载反相放大器	(262)
7.6.2	CMOS 差分放大器	(270)
7.6.3	电流镜负载的 CMOS 差分放大器设计	(275)
7.7	总结	(277)
第 8 章	多级放大器和集成运算放大器	(282)
8.1	多级放大器	(282)
8.1.1	单级与多级放大器	(282)
8.1.2	多级放大器基本构造与设计要点	(283)
8.1.3	多级放大器的增益	(290)
8.1.4	多级放大器的频率特性	(290)
8.2	反馈放大器	(291)
8.2.1	反馈放大器基本类型和判断	(291)
8.2.2	负反馈对放大器性能的影响	(294)
8.2.3	反馈放大器的分析	(297)
8.2.4	负反馈放大器的稳定性	(301)
8.3	集成运算放大器	(311)
8.3.1	通用集成放大器	(311)
8.3.2	原始的集成运算放大器	(312)
8.3.3	μ A709、 μ A741 和 LM301	(313)
8.3.4	LM308A、 μ A725 和 OP07	(316)
8.3.5	LM318	(317)
8.3.6	LF356、RC4558、TL07X/TL08X 和 LF411	(318)
8.3.7	CMOS 运算放大器	(324)
8.4	运算放大器基本原理	(325)
8.4.1	运算放大器定义	(325)
8.4.2	两种运算放大器电路	(326)
8.4.3	运放工作时的直流偏置	(330)
8.5	运放的大信号工作和转换速率	(341)

第 9 章 由运算放大器构成的电路	(347)
9.1 利用运放构造放大电路	(347)
9.1.1 电压跟随器	(348)
9.1.2 同相放大器构成的加法电路	(349)
9.1.3 反相放大器构成的加法电路	(352)
9.1.4 减法电路	(353)
9.1.5 可变增益放大器	(354)
9.1.6 弱信号放大与高精度运放	(358)
9.2 由运放构成的信号变换电路	(365)
9.2.1 基准电压源	(365)
9.2.2 基准电流源	(367)
9.2.3 电压 - 电流变换电路	(368)
9.2.4 电流 - 电压变换电路	(373)
9.2.5 电阻 - 电压变换电路	(377)
9.3 利用运放构成的线性运算电路	(380)
9.3.1 微分运算电路	(380)
9.3.2 积分运算电路	(383)
9.3.3 有源滤波电路	(385)
9.4 由运放构成的非线性电路	(406)
9.4.1 整流电路	(406)
9.4.2 绝对值电路	(411)
9.4.3 限幅电路	(414)
9.4.4 对数变换电路	(417)
9.4.5 乘法运算电路	(424)
9.4.6 比较电路	(429)
第 10 章 功率放大与电源变换电路	(434)
10.1 功率放大电路基础	(434)
10.1.1 功率放大电路的作用	(434)
10.1.2 功率放大电路的特点	(435)
10.1.3 功率放大电路的主要技术参数	(436)
10.1.4 功率放大器的分类	(439)
10.2 线性功率放大器	(439)
10.2.1 单管线性功率放大器基本电路与电压电流波形	(439)
10.2.2 甲类功率放大器	(441)

10.2.3	乙类功率放大器	(442)
10.2.4	甲乙类互补推挽电路	(447)
10.2.5	丙类功率放大电路	(448)
10.3	开关功率放大器	(449)
10.3.1	丁类功率放大器	(450)
10.3.2	戊类功率放大器	(450)
10.3.3	己类功率放大器	(451)
10.4	电源变换电路	(452)
10.4.1	电源变换电路的分类	(452)
10.4.2	线性直流稳压电源	(452)
10.4.3	串联型线性直流稳压电路	(453)
第 11 章	振荡器	(462)
11.1	引言	(462)
11.2	正反馈回路型振荡器原理	(462)
11.3	非谐振回路型振荡器	(463)
11.3.1	环形振荡器	(463)
11.3.2	RC 桥式振荡器	(466)
11.3.3	多谐振荡器	(469)
11.4	LC 调谐型振荡器	(472)
11.4.1	电感三端式振荡器	(473)
11.4.2	电容三端式振荡器	(475)
11.4.3	LC 振荡器的频率稳定性	(477)
11.5	石英晶体振荡器	(481)
11.5.1	石英晶体的物理特性和等效电路	(481)
11.5.2	晶体振荡电路	(485)
11.6	负阻振荡器	(487)
11.6.1	负阻振荡原理	(487)
11.6.2	负阻器件和电路	(488)
11.6.3	负阻振荡器电路	(490)
第 12 章	频率变换电路	(493)
12.1	引言	(493)
12.2	混频器	(493)
12.2.1	混频器的基本特性	(493)
12.2.2	混频器的基本原理	(494)

12.2.3	混频器的作用	(495)
12.2.4	单端混频器	(497)
12.2.5	单端 BJT 混频器设计实例	(500)
12.3	倍频器	(504)
12.4	分频器	(504)
12.4.1	再生式分频器	(504)
12.4.2	振荡锁定分频器	(505)
12.4.3	数字分频器	(507)
12.5	幅度调制与解调电路	(508)
12.5.1	幅度调制	(508)
12.5.2	幅度解调	(514)
12.6	角度调制与解调电路	(517)
12.6.1	角度调制原理	(517)
12.6.2	频率调制电路	(520)
12.6.3	鉴频器	(521)
第 13 章	逻辑门电路	(524)
13.1	引言	(524)
13.2	模拟电路与数字电路	(524)
13.3	二极管逻辑门电路	(527)
13.4	BJT 逻辑门电路	(528)
13.4.1	TTL 门电路	(528)
13.4.2	ECL 门电路	(531)
13.5	FET 基本逻辑电路	(533)
13.5.1	FET 传输门	(534)
13.5.2	NMOS 非门电路	(542)
13.5.3	CMOS 非门	(546)
13.5.4	CMOS 非门的瞬态特性	(550)
13.6	CMOS 基本逻辑门电路	(553)
13.6.1	与非门电路	(553)
13.6.2	或非门电路	(554)
13.7	源极耦合 FET 逻辑——SCFL	(555)
第 14 章	模数与数模转换电路	(559)
14.1	引言	(559)
14.2	模数转换器	(559)

14.2.1	原理	(559)
14.2.2	并联式 ADC	(560)
14.2.3	流水线 ADC	(561)
14.2.4	逐次逼近式 ADC	(562)
14.3	数模转换器	(564)
14.3.1	原理	(564)
14.3.2	参考电压法 DAC	(564)
14.3.3	参考电流法 DAC	(566)
14.3.4	$R-2R$ 梯形 DAC	(568)
第 15 章	电子线路分析、设计与测试	(571)
15.1	引言	(571)
15.2	电子线路分析	(571)
15.2.1	电子线路分析与模拟的流程	(571)
15.2.2	电路特性分析和控制语句	(574)
15.3	电子线路设计	(577)
15.3.1	电子线路设计步骤	(577)
15.3.2	版图设计	(578)
15.3.3	版图检查	(580)
15.3.4	版图数据提交与流片	(581)
15.4	电子线路测试	(582)
附录一	共发电路的 Ebers - Moll 模型及输入输出特性	(585)
附录二	专业术语中英文对照	(592)
参考文献		(599)

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,它们很可能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。