

学习资源  
见书中  
学习说明

电子系统EDA新技术丛书

# 模拟电子系统设计指南 (基础篇)

从半导体、分立元件到TI集成电路  
的分析与实现

◎ 何 宾 编著



- ★ SPICE仿真工具与模拟电子系统理论知识深度融合
- ★ 深度揭示半导体、分立元件与TI集成电路之间的内在联系



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

电子系统 EDA 新技术丛书

# 模拟电子系统设计指南 (基础篇)

从半导体、分立元件到 TI 集成电路  
的分析与实现

何 宾 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从最基本的半导体 PN 结开始,以二极管、双极结型晶体管、金属氧化物半导体场效应管,以及美国 TI 公司的集成运算放大器、集成功率放大器、集成线性低压降电源芯片、集成开关电源芯片为主线,系统介绍了半导体和 PN 结特性、半导体二极管的特性和分析、二极管电路的设计和分析、双极结型晶体管的特性和分析、双极结型晶体管放大电路应用、双极结型晶体管电路反馈原理及稳定分析、金属氧化物半导体场效应管特性和电路分析、金属氧化物半导体场效应管放大电路应用、运算放大器电路的设计和分析、集成差动放大器的原理和分析、运算放大器的性能指标、运算放大器电路稳定性分析、高速放大器的原理和分析、有源滤波器的原理和设计、功率放大器的分析和设计、振荡器的特性和分析、电源管理器的原理和应用、模拟-数字转换器的原理及应用、数字-模拟转换器的原理及应用等内容。

本书的一大特色是将模拟电子系统理论知识和 SPICE 电路仿真进行系统化融合,通过理论计算及 SPICE 仿真结果,诠释了模拟电子系统的本质;本书的另一大特色是通过与美国 TI 公司和美国 NI 公司的产、学、研深度合作,将最新的模拟电子设计理论和设计方法引入书中,使得本书内容能与时俱进,将更精彩的内容呈现给广大读者。

本书适用于从事模拟系统设计的工程师,尤其适用于从事 TI 集成电路设计的工程师。同时,本书也可以作为高等学校模拟电子技术基础课程的教学参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子系统设计指南.基础篇.从半导体、分立元件到 TI 集成电路的分析与实现/何宾编著. —北京:电子工业出版社,2017.10

(电子系统 EDA 新技术丛书)

ISBN 978-7-121-32684-4

I. ①模… II. ①何… III. ①电子系统-系统设计-指南 IV. ①TN02-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 221862 号

策划编辑:王敬栋

责任编辑:底波

印刷:三河市君旺印务有限公司

装订:三河市君旺印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开本:787×1092 1/16 印张:42.75 字数:1149.8 千字

版次:2017 年 10 月第 1 版

印次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定价:138.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:88254113。

# 前 言

在即将完成本书编写之际，感慨颇多。我记得在读大学本科期间，于1996年第一次系统学习了模拟电子技术课程，讲这门课的张诚庆老师在不看讲稿的情况下，只用粉笔板书就可以一气呵成地完成整堂课的教学，并且当我问他问题时也可以把每个细节解释得非常清楚，他是一位令我尊敬的老师。同样，需要提起的是现任南京工业大学副校长的张进明教授，他不但给我上过本科的电路原理课程，而且给我上过硕士研究生的课程，是一位学术思想很活跃的老师，也正是他在1998年给我上硕士研究生课程时，我才第一次接触了Multisim Workbench工具，这也是我接触的第一个电子设计自动化工具。他们两位，算是我从事电子教学和科研工作的启蒙者。我的硕士导师刘凤新教授堪称模电领域的大师，他是一位学术思想活跃同时也是一位对学术要求很严的人，在读硕士期间他教会了我许多分析电路的方法，在他的指导下，我系统学习了模拟集成电路的测试方法，这些方法至今仍然使我受益匪浅。最后一位需要提及的，也是我最尊敬的一位老师，已经过世10年，是曾经指导过我的韩月秋教授，在我读博士期间，在他的悉心指导下，我从事电子信息相关领域研究的能力得到进一步提升。他是一位和蔼可亲同时也是一位学术造诣很深的大师，在电子界尤其是在雷达领域有着崇高的威望，为我们国家电子信息事业的发展贡献了毕生精力。正是在求学期间得到这几位老师的悉心指导，使得我具备了对电子信息领域很多问题进行深入理解和分析的能力。

从1996年第一次接触电子技术到现在，21年过去了。在这21年间，全球半导体技术取得了突飞猛进的发展，一直有条不紊地沿着摩尔定律指明的方向前进。同时，电子设计自动化工具被广泛地用于半导体和电子系统设计中。

但是，国内在模拟电子技术课程的教学内容和教学方法上，表现仍然乏力。主要体现在，教学手段方法落后，讲授内容不能反映最新的半导体技术发展。而模拟电子技术课程的教学质量直接影响电子信息类相关专业许多专业课程的教学效果，如控制原理、检测仪表、信号与系统、通信电子电路、电力电子等。这些课程连接在一起，将直接关系到国家所培养的电子类专业学生的质量。

在当前具有丰富教学资源和教育手段的条件下，模拟电子技术课程仍然成为国内所有本科、高职和中专电子信息类相关专业最难学习的课程之一，也是学生反映最为强烈的一门课程。在我从教12年来，我的学生不断向我抱怨，课程抽象难学，且难以理解，然后他们就发现后面的很多专业课程无法学懂。当我们培养的这些学生毕业后，在不同的公司和科研机构从事相关工作时，他们面对的是力不从心，甚至无从下手的设计和技术支持工作。这也引起我深刻的思考，我在反复不断地思索这个问题，是不是我们在模拟电子技术课程方面的教学真的出问题了？是不是到了我们应该好好更新一下这门课程的教学手段和教学方法的时候了？在很多年前，我一直计划重新编写能反映最新模拟电子系统设计理论和设计方法的相关书籍。

在2016年，我相继得到美国德州仪器（Texas Instruments）公司大学计划、美国国家仪器（National Instruments）公司大学计划和北京普源精电科技有限公司（RIGOL）大学计划的鼎力支持，它们分别给予经费、芯片、SPICE仿真工具以及测试仪器方面的支持和帮助。此外，*Microelectronic circuits analysis and design*一书的作者Muhammad H. Rashid教授提供了教学资源

和仿真测试源文件，他们的支持和帮助是我可以高质量完成本书编写的重要保证。

在编写本书的过程中，我的本科大四学生唐思怡、王中正全程参与，并构建硬件电路对本书所有章节的关键设计实例进行验证。在本书编写中，他们的作用之所以非常重要，就是因为通过与他们的沟通和交流，真正将教育心理学准确地应用到本书的编写中。此外，我的本科学生汤宗美为本书制作了教学课件和相关的资料。

在本书编写过程中，我有一些体会想在此和广大读者分享。

(1) 模拟电子技术是所有电子信息类相关专业最核心的课程，是这些专业的学生可以高质量学习后续课程内容的重要保证，所以必须有充足的课时来保证教师有足够时间高质量地完成课程的教学任务，任何单纯缩减模拟电子技术课程课时的做法都是不明智的。教师的授课任务是讲授关键知识点和电路设计的思路，因此需要正确把握课程的主线。

(2) 由于模拟电子技术涉及的理论知识点有很多，教师在讲授该课程时，要突破传统的理论教学模式，即通过 Multisim 提供的 SPICE 仿真工具，将这些抽象的理论知识点通过图表和数据直观地显示出来，做到理论和实际融会贯通，引导学生思考问题，这样将有利于学生对这些理论知识的理解。

(3) 任何理论的讲解和仿真工具都不能代替硬件实验，在讲授课程时需要在关键知识点设计相关的实验，让学生通过实验真正建立电子元件和电子系统的“物理概念”。通过实验，培养学生独立思考问题和解决问题的能力，这将有助于他们学习后续课程的内容。

(4) 随着半导体技术的不断发展，要求教师能从“系统级角度”讲授模拟电子电路课程，虽然在国内高校一直沿用模拟电子技术基础这一名称，但更重要的是正确认识模拟电子技术课程所讲授的各个模块在整个模拟电子系统中的作用。

为了方便读者学习，本书配有相关的硬件设计案例、SPICE 仿真设计案例，以及公开教学视频等学习资源。

可以这样说，本书的顺利完稿是产、学、研合作的典范，编写本书的目的在于解决教育界和工业界供需侧矛盾，使得教育界培养出来的模拟电子设计人才可以真正满足工业界的需求，真正地“接地气”。

最后，感谢电子工业出版社各位编辑对本书出版给予的帮助和支持，由于我的水平有限，书中难免出现不足之处，请读者不吝指出，帮助我进一步完善本书的内容。

编著者

2017年4月于北京

# 学习说明

## Study Shows

### 1. 本书配套教学资源，为读者提供学习服务

书中所提供的配套设计案例、教学课件和公开教学视频，可以通过作者的维基网站获取。

<http://www.edawiki.com>

### 2. 本书作者联络方式，为读者解答学习过程中遇到的问题

何宾的电子邮箱：[hb@gpnewtech.com](mailto:hb@gpnewtech.com)

### 3. 本书配套硬件及仪器设备购买事宜由北京汇众新特科技有限公司负责，为企业和教师提供配套的硬件设备

北京汇众新特科技有限公司网站：<http://www.gpnewtech.com>

市场及服务支持热线：010 - 83139076 010 - 83139176

### 4. 课程的培训事宜由北京汇众新特科技有限公司负责，为企业和教师提供相关的培训课程服务

北京汇众新特科技有限公司网站：<http://www.gpnewtech.com>

市场及服务支持热线：010 - 83139076 010 - 83139176

电子邮箱：[hb@gpnewtech.com](mailto:hb@gpnewtech.com)

### 5. 作者的微信公众号



### 6. 为方便读者学习交流，作者建立了微信交流群，扫描二维码邀请加入



# 目 录

第1章 模拟电子技术绪论 .....	(1)	2.7.4 反偏模型 .....	(27)
1.1 电子技术的发展历史 .....	(1)	第3章 半导体二极管的特性和	
1.2 模拟电子技术的目标 .....	(2)	分析 .....	(28)
1.2.1 模拟电子技术的基础地位 .....	(3)	3.1 二极管的符号和分类 .....	(28)
1.2.2 模拟电子技术的知识点结构 .....	(4)	3.1.1 二极管的符号 .....	(28)
1.2.3 模拟电子技术的研究角度 .....	(5)	3.1.2 二极管的分类 .....	(28)
1.3 模拟电子系统的评价和分析		3.2 二极管电压和电流特性 .....	(29)
方法 .....	(8)	3.2.1 测试电路构建和分析 .....	(29)
1.3.1 理论分析方法类型 .....	(8)	3.2.2 查看和分析 SPICE 网表 .....	(30)
1.3.2 理论分析方法的实质 .....	(11)	3.2.3 二极管 SPICE 模型描述 .....	(32)
1.3.3 实际测试 .....	(12)	3.2.4 二极管正偏电压-电流	
第2章 半导体和 PN 结特性 .....	(13)	特性分析 .....	(33)
2.1 半导体材料 .....	(13)	3.2.5 二极管反偏电压-电流	
2.1.1 N 型杂质 .....	(13)	特性分析 .....	(36)
2.1.2 P 型杂质 .....	(15)	3.2.6 二极管电压-电流线性	
2.1.3 多子和少子 .....	(15)	化模型 .....	(38)
2.1.4 费米函数 .....	(16)	3.3 二极管温度特性 .....	(39)
2.1.5 载流子浓度 .....	(17)	3.3.1 执行二极管温度扫描分析 .....	(39)
2.2 零偏置 PN 结 .....	(18)	3.3.2 绘制和分析二极管温度	
2.2.1 内建结电势 .....	(19)	特性图 .....	(40)
2.2.2 电场分布 .....	(19)	3.4 二极管频率特性 .....	(41)
2.2.3 结电势分布 .....	(20)	3.4.1 波特图工具的原理 .....	(41)
2.2.4 空间耗尽区宽度 .....	(20)	3.4.2 波特图使用说明 .....	(43)
2.3 正偏 PN 结 .....	(20)	3.4.3 二极管频率特性分析 .....	(46)
2.3.1 耗尽区宽度 .....	(22)	3.5 二极管额定功率特性 .....	(48)
2.3.2 少子电荷分布 .....	(22)	3.6 发光二极管及其特性 .....	(49)
2.4 反偏 PN 结 .....	(22)	3.7 齐纳二极管及其特性 .....	(50)
2.4.1 耗尽区宽度 .....	(23)	3.7.1 电压电流特性 .....	(50)
2.4.2 结电容 .....	(24)	3.7.2 电源管理器的设计 .....	(52)
2.5 结电流密度 .....	(24)	第4章 二极管电路的设计和分析 .....	(58)
2.6 温度依赖性 .....	(25)	4.1 二极管整流器 .....	(58)
2.7 高频交流模型 .....	(25)	4.1.1 半波整流 .....	(58)
2.7.1 耗尽电容 .....	(26)	4.1.2 全波整流 .....	(59)
2.7.2 扩散电容 .....	(26)	4.1.3 平滑整流器输出 .....	(63)
2.7.3 正偏模型 .....	(27)	4.2 二极管峰值检测器 .....	(66)

4.2.1	二极管峰值检测器原理	(66)	5.9	共发射极放大器	(106)
4.2.2	包络检波器实现	(67)	5.9.1	有源偏置共射极放大器	(107)
4.3	二极管钳位电路	(69)	5.9.2	电阻偏置共射极放大器	(110)
4.4	二极管斩波器	(70)	5.10	共集电极放大器	(115)
4.4.1	二极管斩波器原理	(70)	5.10.1	有源偏置射极跟随器	(115)
4.4.2	二极管斩波器应用	(71)	5.10.2	电阻偏置射极跟随器	(117)
4.5	二极管倍压整流器	(72)	5.11	共基极放大器	(120)
4.6	压控衰减器	(73)	5.11.1	输入电阻 $R_i$	(120)
<b>第5章 双极结型晶体管的特性和分析</b>			5.11.2	无负载电压增益 $A_{vo}$	(121)
5.1	晶体管基本概念	(75)	5.11.3	输出电阻 $R_o$	(122)
5.2	双极结型晶体管符号	(77)	5.12	达林顿对晶体管	(123)
5.3	双极结型晶体管 SPICE 模型参数	(78)	5.13	直流电平移位和放大器	(126)
5.4	双极结型晶体管工作原理	(80)	5.13.1	电平移动方法	(127)
5.4.1	双极结型晶体管结构	(80)	5.13.2	电平移位的直流放大器	(128)
5.4.2	电压、电流和电荷控制	(81)	5.14	双极结型晶体管电路的频率响应	(130)
5.4.3	晶体管的 $\alpha$ 和 $\beta$	(81)	5.14.1	高频模型	(131)
5.4.4	BJT 工作区域	(83)	5.14.2	BJT 频率响应	(132)
5.5	双极结型晶体管输入和输出特性	(83)	5.15	BJT 放大器的频率响应	(135)
5.5.1	输入特性	(84)	5.15.1	共发射极 BJT 放大器	(135)
5.5.2	输出特性	(86)	5.15.2	共集电极 BJT 放大器	(139)
5.6	双极结型晶体管电路模型及分析方法	(89)	5.15.3	共基极 BJT 放大器	(142)
5.6.1	直流模型	(90)	<b>第6章 双极结型晶体管放大电路应用</b>		
5.6.2	大信号模型	(91)	6.1	BJT 多级放大器及频率响应	(146)
5.6.3	厄尔利效应	(92)	6.1.1	电容耦合	(146)
5.6.4	小信号模型	(92)	6.1.2	直接耦合	(147)
5.7	密勒定理及其分析方法	(96)	6.1.3	级联晶体管	(147)
5.7.1	密勒定理及其推导	(96)	6.1.4	频率响应	(149)
5.7.2	密勒定理的应用	(97)	6.2	BJT 电流源原理	(152)
5.7.3	密勒效应	(98)	6.2.1	基本电流源	(153)
5.8	双极结型晶体管的直流偏置	(99)	6.2.2	改进型基本电流源	(155)
5.8.1	有源电流源偏置	(99)	6.2.3	Widlar 电流源	(156)
5.8.2	单基极电阻偏置	(101)	6.2.4	共射-共基电流源	(159)
5.8.3	发射极电阻反馈偏置	(101)	6.2.5	威尔逊电流源	(159)
5.8.4	射极跟随器偏置	(102)	6.2.6	多重电流源	(163)
5.8.5	双基极电阻偏置	(102)	6.2.7	零增益放大器	(163)
5.8.6	偏置电路设计	(103)	6.2.8	稳定电流源	(164)
			6.3	BJT 差分放大器原理	(165)



6.3.1 采用阻性负载的 BJT 差分对 .....	(165)	8.1.2 金属氧化物场效应晶体管 符号 .....	(212)
6.3.2 采用基本电流镜有源负载 的 BJT 差分放大器 .....	(174)	8.1.3 金属氧化物场效应管的基本 概念 .....	(213)
6.3.3 采用改进电流镜的差分 放大器 .....	(176)	8.1.4 MOSFET 的 SPICE 模型 参数 .....	(214)
6.3.4 共射极-共基极差分放 大器 .....	(177)	8.2 增强型 MOSFET .....	(215)
6.3.5 差分放大器频率响应 .....	(181)	8.2.1 内部结构 .....	(215)
<b>第 7 章 双极结型晶体管电路反馈 原理及稳定分析 .....</b>	<b>(183)</b>	8.2.2 工作模式 .....	(216)
7.1 放大器反馈机制类型 .....	(183)	8.2.3 工作特性 .....	(218)
7.2 放大器反馈特性 .....	(183)	8.3 耗尽型 MOSFET .....	(222)
7.2.1 闭环增益系数 .....	(183)	8.3.1 内部结构 .....	(223)
7.2.2 频率响应 .....	(184)	8.3.2 工作模式 .....	(223)
7.2.3 失真 .....	(185)	8.3.3 工作特性 .....	(224)
7.3 放大器反馈结构 .....	(186)	8.4 MOSFET 低频模型 .....	(228)
7.3.1 串联-并联反馈结构 .....	(186)	8.4.1 直流模型 .....	(229)
7.3.2 串联-串联反馈结构 .....	(187)	8.4.2 小信号模型 .....	(229)
7.3.3 并联-并联反馈结构 .....	(187)	8.4.3 小信号分析 .....	(230)
7.3.4 并联-串联反馈结构 .....	(188)	8.5 MOSFET 直流偏置 .....	(232)
7.4 放大器反馈分析 .....	(188)	8.5.1 MOSFET 偏置电路原理 .....	(232)
7.4.1 串联-并联反馈结构 .....	(189)	8.5.2 MOSFET 偏置电路设计 .....	(233)
7.4.2 串联-串联反馈结构 .....	(192)	8.6 共源极放大器 .....	(236)
7.4.3 并联-并联反馈结构 .....	(196)	8.6.1 采用电流源负载的共源极 放大器 .....	(236)
7.4.4 并联-串联反馈结构 .....	(199)	8.6.2 采用增强型 MOSFET 负载的 共源极放大器 .....	(239)
7.5 放大器稳定性分析 .....	(203)	8.6.3 采用耗尽型 MOSFET 负载的 共源极放大器 .....	(240)
7.5.1 闭环频率和稳定性 .....	(203)	8.6.4 采用电阻负载的共源极 放大器 .....	(241)
7.5.2 瞬态响应和稳定性 .....	(204)	8.7 共漏极放大器 .....	(244)
7.5.3 闭环极点和稳定性 .....	(205)	8.7.1 有源偏置的源极跟随器 .....	(245)
7.5.4 奈奎斯特稳定准则 .....	(206)	8.7.2 电阻偏置的源极跟随器 .....	(246)
7.5.5 相对稳定性判定 .....	(207)	8.8 共栅极放大器 .....	(249)
7.5.6 相位裕度的影响 .....	(208)	8.9 直流电平移位和放大器 .....	(251)
7.5.7 波特图分析稳定性方法 .....	(209)	8.9.1 电平移动方法 .....	(251)
<b>第 8 章 金属氧化物半导体场效应 管特性和电路分析 .....</b>	<b>(211)</b>	8.9.2 电平移位的 MOSFET 放大器 .....	(252)
8.1 金属氧化物半导体场效应 管基础 .....	(211)	8.10 MOSFET 放大器频率响应 .....	(256)
8.1.1 金属氧化物半导体场效应 管概述 .....	(211)	8.10.1 MOSFET 高频模型 .....	(256)
		8.10.2 共源极放大器频率响应 .....	(258)
		8.10.3 共漏极放大器频率响应 .....	(262)

8.10.4 共栅极放大器频率响应	(264)	10.4 运算放大器的应用	(304)
<b>第9章 金属氧化物半导体场效应管放大电路应用</b>	(268)	10.4.1 电压跟随器	(304)
9.1 MOSFET 多级放大器及频率响应	(268)	10.4.2 加法器	(305)
9.1.1 电容耦合级联放大器	(268)	10.4.3 积分器	(306)
9.1.2 直接耦合放大器	(269)	10.4.4 微分器	(309)
9.1.3 共源-共栅放大器	(269)	10.4.5 半波整流器	(313)
9.2 MOSFET 电流源原理	(271)	10.4.6 全波整流器	(315)
9.2.1 基本电流源	(271)	10.5 单电源供电运放电路	(318)
9.2.2 改进型基本电流源	(273)	10.5.1 单电源运放	(318)
9.2.3 多重电流源	(274)	10.5.2 运算放大电路的基本偏置方法	(318)
9.2.4 共源-共栅电流源	(274)	10.5.3 其他一些基本的单电源供电电路	(325)
9.2.5 威尔逊电流源	(275)	<b>第11章 集成差动放大器的原理和分析</b>	(332)
9.2.6 零增益放大器	(276)	11.1 差分放大器的基本概念	(332)
9.2.7 稳定电流源	(277)	11.2 差分放大器	(333)
9.3 MOSFET 差分放大器原理	(279)	11.3 仪表放大器	(335)
9.3.1 NMOSFET 差分对	(279)	11.4 电流检测放大器	(341)
9.3.2 采用有源负载的 MOSFET 差分对	(286)	11.4.1 低侧电流测量方法	(342)
9.3.3 共源-共栅 MOSFET 差分放大器	(287)	11.4.2 高测电流检测方法	(343)
9.4 耗尽型 MOSFET 差分放大器原理	(290)	11.5 全差分放大器	(346)
9.4.1 采用阻性负载的耗尽型 MOSFET 差分对	(290)	11.5.1 全差分放大器原理	(346)
9.4.2 采用有源负载的耗尽型 MOSFET 差分对	(292)	11.5.2 差分信号源匹配	(349)
<b>第10章 运算放大器电路的设计和分析</b>	(294)	11.5.3 单端信号源匹配	(350)
10.1 集成运算放大器的原理	(294)	11.5.4 输入共模电压	(354)
10.1.1 集成运放的内部结构	(295)	<b>第12章 运算放大器的性能指标</b>	(359)
10.1.2 集成运放的通用符号	(298)	12.1 开环增益、闭环增益和环路增益	(359)
10.1.3 集成运放的简化原理	(298)	12.2 放大器直流精度	(362)
10.2 理想运算放大器模型	(299)	12.2.1 放大器输入端直流参数指标	(362)
10.2.1 理想运算放大器的特点	(299)	12.2.2 放大器输出端直流参数指标	(369)
10.2.2 放大器“虚短”和“虚断”	(300)	12.3 放大器交流精度	(370)
10.2.3 叠加定理	(301)	12.3.1 增益带宽积	(370)
10.3 理想运算放大器的分析	(301)	12.3.2 压摆率	(371)
10.3.1 同相放大器	(301)	12.3.3 建立时间	(373)
10.3.2 反相放大器	(303)	12.3.4 总谐波失真加噪声	(375)
		12.4 其他指标	(376)
		12.4.1 共模抑制比	(376)
		12.4.2 电源噪声抑制比	(379)

12.4.3	电源电流	(380)	14.3.5	电压反馈放大器和电流反馈放大器的选择	(427)
12.4.4	运放噪声	(381)	14.3.6	去补偿电压反馈放大器	(427)
12.5	精密放大器指标	(386)	14.4	压控增益放大器应用	(430)
12.5.1	TI 精密运算放大器	(387)	<b>第 15 章 有源滤波器的原理和设计</b>		
12.5.2	精密放大器选型步骤	(389)			(435)
<b>第 13 章 运算放大器电路稳定性分析</b>					
		(396)	15.1	有源和无源滤波器	(435)
13.1	运放电路稳定性分析方法	(396)	15.2	有源滤波器分类	(436)
13.2	$A_{oi}$ 和 $1/\beta$ 的计算方法	(399)	15.3	有源滤波器模型研究方法	(438)
13.3	外部寄生电容对稳定性的影响	(403)	15.4	一阶滤波器及其特性	(441)
13.3.1	负载电阻影响的瞬态分析	(404)	15.4.1	低通滤波器	(441)
13.3.2	负载电阻影响的交流小信号分析	(405)	15.4.2	高通滤波器	(444)
13.4	修改 $A_{oi}$ 的补偿方法	(409)	15.4.3	带通滤波器	(446)
13.4.1	电路的瞬态分析	(409)	15.4.4	带阻滤波器	(448)
13.4.2	电路的交流小信号分析	(410)	15.5	双二次函数	(450)
13.5	修改 $1/\beta$ 的补偿方法	(412)	15.5.1	贝塞尔响应	(452)
13.5.1	电路的瞬态分析	(412)	15.5.2	巴特沃斯响应	(454)
13.5.2	电路的交流小信号分析	(413)	15.5.3	契比雪夫响应	(457)
<b>第 14 章 高速放大器的原理和分析</b>					
		(416)	15.6	Sallen - Key 滤波器	(460)
14.1	高速放大器的关键指标	(416)	15.6.1	通用形式	(460)
14.1.1	带宽	(416)	15.6.2	低通滤波器	(461)
14.1.2	压摆率	(416)	15.6.3	高通滤波器	(463)
14.1.3	建立时间	(416)	15.6.4	带通滤波器	(465)
14.1.4	THD + N 和运放的位数	(417)	15.7	多重反馈滤波器	(467)
14.2	Bipolar 和 FET 型高速放大器	(418)	15.7.1	低通滤波器	(467)
14.3	电压反馈、电流反馈和去补偿型高速放大器	(418)	15.7.2	高通滤波器	(469)
14.3.1	电压反馈和电流反馈放大器的原理	(418)	15.7.3	带通滤波器	(470)
14.3.2	电压反馈放大器和电流反馈放大器的区别: 带宽和增益	(420)	15.8	Bainter 陷波滤波器	(472)
14.3.3	电压反馈放大器和电流反馈放大器的区别: 反馈电阻的取值	(423)	15.9	全通滤波器	(474)
14.3.4	电压反馈放大器和电流反馈放大器的区别: 压摆率	(426)	15.9.1	一阶全通滤波器	(474)
			15.9.2	二阶全通滤波器	(476)
			15.10	开关电容滤波器	(477)
			15.10.1	开关电容电阻	(478)
			15.10.2	开关电容积分器	(479)
			15.10.3	通用开关电容滤波器	(479)
			15.11	单电源供电滤波器设计	(479)
			15.12	滤波器辅助设计工具	(480)
<b>第 16 章 功率放大器的分析和设计</b>					
		(483)	16.1	功率放大器的类型	(483)
			16.2	功率晶体管	(485)

16.3	A类功率放大器的原理及分析	(485)	17.2	音频振荡器	(531)
16.3.1	射极跟随器	(486)	17.2.1	移相振荡器	(532)
16.3.2	基本的共射极放大器	(490)	17.2.2	正交振荡器	(535)
16.3.3	采用有源负载的共射极放大器	(491)	17.2.3	三相振荡器	(536)
16.3.4	变压器耦合负载共射极放大器	(492)	17.2.4	文氏桥振荡器	(537)
16.3.5	环形振荡器	(540)	17.2.5	环形振荡器	(540)
16.4	B类功率放大器的原理及分析	(494)	17.3	射频振荡器	(542)
16.4.1	互补推挽放大器	(494)	17.3.1	科尔皮兹振荡器	(542)
16.4.2	变压器耦合负载推挽放大器	(498)	17.3.2	哈特莱振荡器	(547)
16.4.3	两级MOS振荡器	(550)	17.3.3	两级MOS振荡器	(550)
16.5	AB类功率放大器的原理及分析	(502)	17.4	晶体振荡器	(553)
16.5.1	转移特性	(502)	17.5	硅振荡器	(556)
16.5.2	输出功率和效率	(503)	17.6	有源滤波器调谐振荡器	(557)
16.5.3	采用二极管的偏置	(504)	第18章	电源管理器的原理和应用	(559)
16.5.4	采用二极管和有源电流源的偏置	(505)	18.1	线性电源管理器	(559)
16.5.5	采用 $V_{BE}$ 乘法器的偏置	(507)	18.1.1	线性电源管理器的内部结构	(559)
16.5.6	准互补AB类放大器	(510)	18.1.2	负载电流对输入和输出压差的影响	(561)
16.5.7	变压器耦合AB类放大器	(511)	18.1.3	输出电压与输入电压和负载电流变化关系	(562)
16.6	C类功率放大器的原理及分析	(512)	18.1.4	LDO电源管理器的效率	(564)
16.7	D类功率放大器的原理及分析	(516)	18.1.5	LDO电源管理器反馈补偿	(566)
16.8	E类功率放大器的原理及分析	(519)	18.1.6	LDO电源抑制比	(570)
16.9	功率运算放大器的类型和应用	(522)	18.2	开关电源管理器	(572)
16.9.1	功率运算放大器的类型	(522)	18.2.1	电感和电容的基本概念	(573)
16.9.2	功率运算放大器的应用	(525)	18.2.2	理想降压转换器的原理和结构	(574)
16.9.3	功率运放功耗	(526)	18.2.3	理想升压转换器的原理和结构	(581)
16.9.4	功率运放热考虑	(527)	18.2.4	理想降压-升压转换器的原理和结构	(585)
16.9.5	功率运放散热设计	(527)	第19章	模拟-数字转换器的原理及应用	(587)
第17章	振荡器的特性和分析	(529)	19.1	数模混合系统结构	(587)
17.1	振荡器原理	(529)	19.2	ADC的原理	(588)
17.1.1	振荡条件分析	(529)	19.2.1	ADC的基本原理	(588)
17.1.2	频率稳定性分析	(531)	19.2.2	量化误差与分辨率	(592)
17.1.3	幅度稳定性分析	(531)	19.2.3	采样率	(595)

19.3	ADC 的性能指标	(604)	20.1	DAC 的原理及信号重构	(642)
19.3.1	静态特性	(605)	20.1.1	DAC 的原理	(642)
19.3.2	动态特性	(608)	20.1.2	模拟信号的重建	(645)
19.4	ADC 的类型和原理	(611)	20.2	DAC 的性能指标	(647)
19.4.1	逐次逼近寄存器型 ADC 的原理 及应用	(611)	20.2.1	分辨率	(648)
19.4.2	$\Delta - \Sigma$ 型 ADC 的原理及 应用	(615)	20.2.2	满量程范围	(648)
19.4.3	流水线型 ADC 的原理及 应用	(620)	20.2.3	静态参数	(648)
19.5	ADC 数字接口类型	(623)	20.2.4	动态参数	(650)
19.5.1	I <sup>2</sup> C 接口	(623)	20.3	DAC 器件类型和原理	(652)
19.5.2	SPI 接口	(628)	20.3.1	电阻串型	(652)
19.5.3	LVDS 接口	(633)	20.3.2	R-2R 型	(653)
19.6	ADC 参考输入源	(636)	20.3.3	乘法型	(654)
19.6.1	串联型电压基准	(636)	20.3.4	电流引导型	(655)
19.6.2	并联型电压基准	(637)	20.3.5	数字电位器	(657)
19.7	全差分放大器和 ADC 接口 设计	(638)	20.3.6	$\Delta - \Sigma$ 型 DAC	(658)
19.8	小结	(640)	20.4	脉冲宽度调制	(660)
第 20 章	数字 - 模拟转换器的原理及 应用	(642)	20.4.1	占空比分辨率	(662)
			20.4.2	谐波失真	(662)
			20.4.3	模拟滤波器的设计	(665)
			20.5	选型原则	(666)
			参考文献	(667)	

# 第 1 章 模拟电子技术绪论

作为本书的开篇部分，本章重点介绍电子技术的发展历史、模拟电子技术的目标、模拟电子系统的评价和分析方法。

通过本章内容的学习，读者可以从整体上把握电子技术发展的方向，以及认知电子技术的方法。

## 1.1 电子技术的发展历史

在电子技术漫长的发展道路上，科学家首先发现了自然界“电”和“磁”内在的规律，然后不断地寻找、验证和实现这些规律的物质和方法，从而推动电子信息技术的不断发展。表 1.1 给出了电子技术发展历史的一些关键事件，从而帮助读者认知电子技术发展的规律。

表 1.1 电子技术发展历史（时间截止到 1979 年）

时 间	事 件
1785 年	C. A. de Coulomb (C. A. de 库伦) 确定了电荷间的相互作用力，对电荷进行了定量的定义
1820 年	H. C. Oersted (H. C. 奥斯特) 发现了电流对磁针力的作用。André - Marie Ampère (安德烈·玛丽·安培) 确定了通电线圈的作用有类似磁铁的作用
1826 年	Georg Simon Ohm (乔治·西蒙·欧姆) 通过实验得出了欧姆定律
1831 年	Michael Faraday (迈克尔·法拉第) 发现了电磁感应的现象
1833 年	Heinrich Friedrich Emil Lenz (海因里希·楞次) 确定了感应电流方向的定则，也称为楞次定则
1864—1873 年	James Clerk Maxwell (詹姆斯·克拉克·麦克斯韦) 提出了电磁波的理论
1883 年	Thomas Alva Edison (托马斯·阿尔瓦·爱迪生) 发现了电子的热效应
1888 年	Heinrich Rudolf Hertz (海因里希·鲁道夫·赫兹) 通过实验获得电磁波，证实了麦克斯韦的理论
1904 年	J. A. Fleming (J. A. 弗莱明) 利用电子热效应制造出电子二极管
1906 年	Leede Forest (李·德弗雷斯特) 发明了电子三极管
1947 年	美国贝尔实验室的 William Shockley (威廉·肖克利)、John Bardeen (约翰·巴丁) 和 Walter Bratain (沃特·布拉顿) 组成的研究小组，研制出一种点接触型的锗晶体管。晶体管的问世，是 20 世纪的一项重大发明，从而掀起了微电子技术的革命
1950 年	William Shockley (威廉·肖克利) 研制出双极型晶体管
1952 年	William Shockley (威廉·肖克利) 研制出单极性场效应晶体管
1956 年	贝尔实验室研制出晶闸管，也称为可控硅整流器
1958 年	美国通用电气公司生产出商用的晶闸管。此时，开始出现不同类型的功率半导体器件
1958 年	仙童 (Fairchild) 公司的 Robert Noyce (罗伯特·诺伊斯) 和 Gordon Moore (戈登·摩尔) 与德州仪器 (Texas Instrument) 公司的 Jack Kilby (杰克·基尔比) 间隔数月分别发明了集成电路。集成电路的发明，使得电子信息技术进入崭新的阶段
1965 年	摩尔定理确定了未来半导体技术的发展规律
1968 年	仙童公司制造出一个商用的集成电路运算放大器 $\mu A709$
1971 年	英特尔 (Intel) 公司研制出第一个微处理器 4004
1972 年	英特尔 (Intel) 公司研制出第一个 8 位微处理器 8008
1976 年	16KB DRAM 和 4KB SRAM 问世
1979 年	Intel 推出主频为 5MHz 的 8088 微处理器，之后，IBM 基于 8088 推出全球第一台 PC

从表 1.1 中, 提炼出电子学发展的几个关键阶段。

(1) 1906 年电子三极管的发明奠定了现代电子学的基础。从此, 人类开始真正地进入到电子时代。以后出现了最早的收音机电路, 包括 1920 年出现的超外差接收机, 1925 年出现的电视机, 1925 年发明了场效应器件, 1933 年发明了调频技术, 1940 年出现了雷达。

(2) 1947 年硅晶体管的发明标志着第一次电子革命, 至此开启了现在电子技术的新篇章。1950 年出现了彩色电视机。

(3) 1956 年晶闸管的发明, 开启了电力半导体器件和转换技术的新篇章。

(4) 1958 年第一片集成电路的发明, 开启了微电子技术的革命。随着这项发明的诞生, 在 1968 年出现了第一个商用运算放大器 IC。

电子管、晶体管和集成电路外观, 如图 1.1 所示。从电子管进化到晶体管, 再到集成电路, 使得模拟电子电路的成本和功耗不断降低、面积不断减少、性能不断提高。因此, 可以说, 半导体技术是整个电子信息技术发展的原动力, 也是信息技术得以不断发展的重要基础。

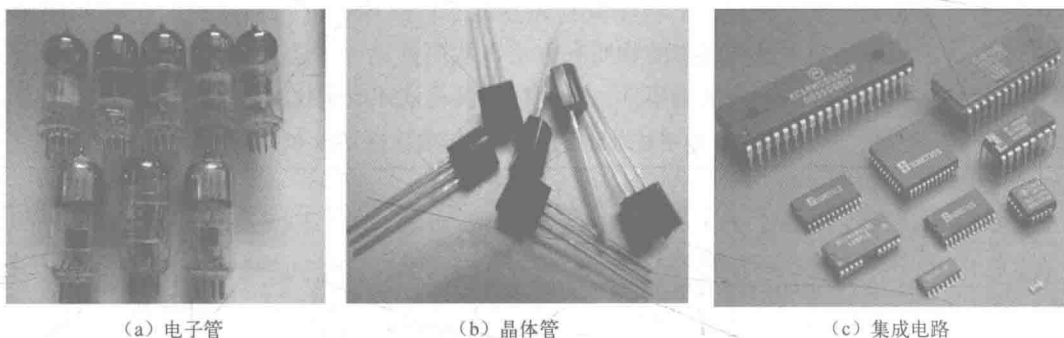


图 1.1 电子管、晶体管和集成电路外观

前面提到摩尔定理全面、系统地阐述了半导体的发展规律, 自从半导体发明以来, 到目前为止, 半导体技术的发展一直服从于这个规律。自从 1979 年后, 半导体技术飞速发展, 使得集成电路成为电子系统的基本组成部分。集成电路的发展主要体现在集成电路的密度不断增加, 功耗不断降低, 成本不断降低, 时钟频率不断提高。根据器件集成度的规模, 将其发展过程划分为几个阶段, 如表 1.2 所示。

表 1.2 集成电路的发展阶段

阶段	集成度	一个芯片上的元件个数 (个)
20 世纪 50 年代	分立元件	1~2
20 世纪 60 年代	小规模集成 (Small - Scale Integration, SSI) 电路	$<10^2$
1966 年	中规模集成 (Medium - Scale Integration, MSI) 电路	$10^2\sim 10^3$
1969 年	大规模集成 (Large - Scale Integration, LSI) 电路	$10^3\sim 10^4$
1975 年	超大规模集成 (Very - Large - Scale Integration, VLSI) 电路	$10^4\sim 10^9$
20 世纪 90 年代	特大规模集成 (Ultra - Large - Scale Integration, ULSI) 电路	$>10^9$

## 1.2 模拟电子技术的目标

在电子信息类相关专业都开设有电路原理、模拟电子技术和数字电子技术公共专业基础课程。在此基础上, 电子信息工程和通信工程专业会开设信号与系统、通信电子电路、通信原理

课程；自动化专业会开设控制原理和电力电子课程，如图 1.2 所示，图中箭头方向表示知识的依赖程度关系。

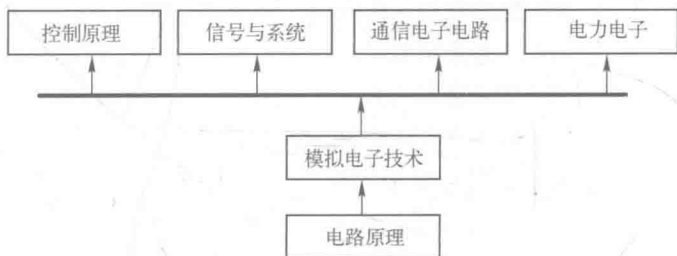


图 1.2 模拟电子技术课程对其他课程的影响和依赖关系

### 1.2.1 模拟电子技术的基础地位

从图 1.2 中可以看出，这些课程都有包含一个共同的字——电。但是，这些课程要解决的问题和目标又截然不同。

(1) 电路原理解决的问题是阐明电路运行的基本规律，这些规律常以定理的形式出现，比如读者熟悉的欧姆定律、基尔霍夫电压定律（Kirchhoff Voltage Law, KVL）和基尔霍夫电流定律（Kirchhoff Current Law, KCL）、戴维南定理和诺顿定理等。在电路原理中，构建了很多电路来讲解这些知识。

很明显，在这些电路中使用的是无源器件，也称为被动器件（Passive Device），包括：电阻、电容、电感、变压器，以及后面所介绍的二极管。这些元器件的共性是不能通过其他电信号来控制流过它的电流。对于被动元件来说，存在线性的电压和电流关系，如电阻；此外，也存在非线性的电压和电流关系，如二极管。

(2) 模拟电子技术解决的问题是阐明晶体管放大器的工作原理和应用。模拟电子电路是阐明模拟电子技术的基础。对于模拟电子电路来说，其输入和输出信号在一段时间内具有连续范围赋值特性。模拟电子电路的功能是以尽可能小的失真处理和传输包含在模拟输入信号中的信息。

与电路原理使用无源器件不同的是，在模拟电子电路中一定包含着有源器件，也称为主动器件（Active Device）。对于有源器件来说，可以通过其他电信号改变流经有源器件的电流。典型的有电子管、晶体管、可控硅/晶闸管（Silicon Controlled Rectifier, SCR）等。对于所有的有源器件来说，都可以通过某种方法来控制流经它的电流。一些有源器件使用电压来控制电流，而其他有源器件可以使用其他电流作为控制信号。使用电压作为控制信号的器件称为电压控制元件；而使用电流作为控制信号控制其他电流的器件称为电流控制元件。

从模拟输入信号中提取所需要的信息是模拟电子电路的任务和目标，这是模拟电子电路设计和分析的根本点和出发点。

(3) 数字电子技术解决的问题是阐明当晶体管工作在“导通”和“截止”状态下的原理和应用。数字电子电路是阐明数字电子技术的基础，对于数字电路来说，输入和输出信号都是在时间上均匀分布的不连续脉冲信号。数字电路的功能是以最少的错误和最快的速度传输和处理包含在数字输入信号中的信息。

进一步讲，基于基本的数字逻辑理论和数字逻辑电路基础，使用硬件描述语言（Hardware Description Language, HDL）描述复杂数字系统。

当学习完模拟电子技术和数字电子技术的课程后，就具备了设计模拟和数字混合系统的能



力。这个能力是学习后续课程的基础。

(4) 通信电子电路是以模拟电子电路为基础的，与模拟电子不同的是，通信电子电路的负载是谐振回路，其工作在较窄的工作频率范围内，并且工作频率比模拟电子电路要高。通信电子电路的功能是将模拟电子电路的低频信号进行调制后发送，以及将接收到的高频调制信号进行解调，解调完的低频信号就可以使用模拟电子技术的方法进行了。此外，与模拟电子技术的分析方法也有所不同，这点也要特别注意。

(5) 电力电子解决的问题是阐明功率半导体器件的工作原理和应用，包括作为电力控制和转换的“导通”和“关断”开关的功率晶体管。模拟和/或数字电子技术（复杂数字系统）用于产生开关功率器件的控制信号，以便完成所期望的转换策略（AC/DC、AC/AC、DC/AC 或 DC/DC），并具有最大效率和最小波形失真。电力系统的输入是直流或交流电源电压（或电流）。电力电子主要关注功率和质量，而不是信号中所包含的信息。例如，电力电子电路可以提供稳定的直流电源，如从 120V@60Hz 的交流电源上提供模拟系统的 12V 和数字系统的 5V 直流电源。

另一个事实就是以微电子技术为基础的半导体构成对模拟电子技术和数字电子技术的强有力支持，半导体制造和设计技术的不断发展成为现在电子信息技术不断发展的原动力。

同时，以模拟电子技术和数字电子技术为基础的数字和模拟混合设计方法是构成复杂电子系统的基础。

### 1.2.2 模拟电子技术的知识点结构

模拟电子技术的基础是模拟电子电路，对于一个完整的模拟电子电路来说，应该包含电源、小信号放大器、滤波器、功率放大器和振荡器等基本的模拟处理单元，如图 1.3 所示。

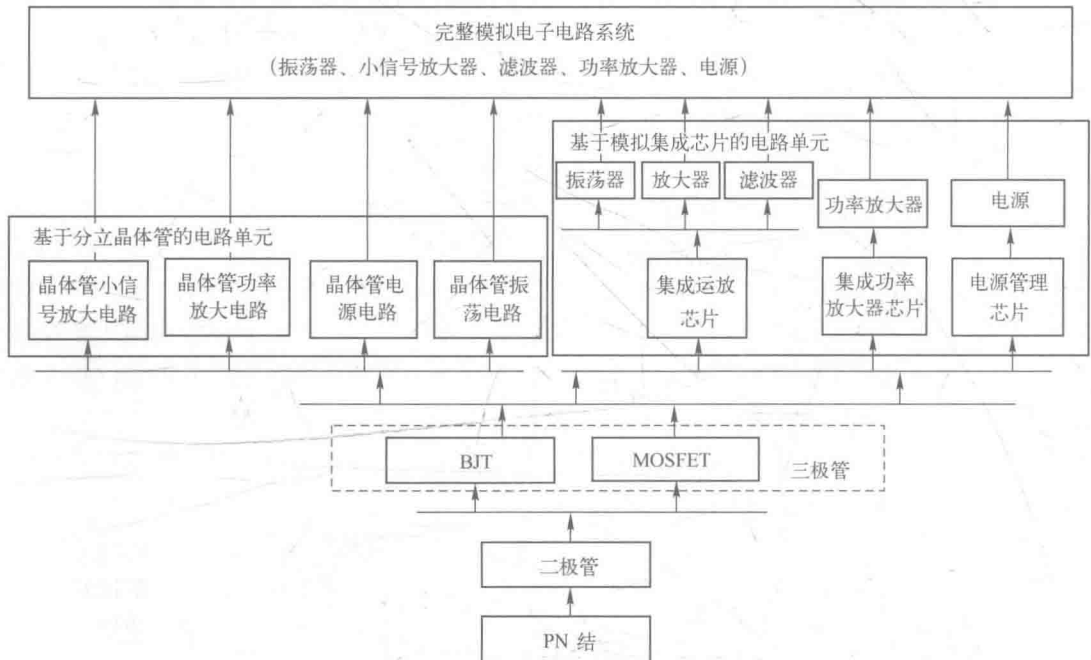


图 1.3 模拟电子技术的知识点结构

从图 1.3 中可以看出，构成模拟电子技术最基本的是半导体材料 PN 节，由 PN 节可以构成二极管。在此基础上，构成以双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）和金属氧