

模拟电子技术

王 远 主编 ● 北京理工大学出版社



模拟电子技术

王 远 主编

北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 简 介

本书按照国家教委颁发的《电子技术基础课程教学基本要求》(第一部分),根据多年来的教学实践经验,本着教学改革的精神编写而成。全书在精选内容、优选讲法方面作了比较认真的考虑,压缩了篇幅,力求做到少而精。本书以集成电路为主,但又保留了一定篇幅的、作为重要基础的分立电路部分。本书的重点放在讲述各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、集成运算放大器及其应用电路等几个方面,并如意引导学生掌握构成各种电子电路的规律性,以便在教学上收“举一反三”之效。

全书共八章,分别为:半导体二极管和电路分析,半导体三极管和基本放大电路多级放大电路,放大电路的频率响应,反馈,集成运算放大器的线性应用,波形发生电路,功率电路。在章节的划分上,考虑到了分散难点和理论联系实际。各章最后都有数量适宜的、按章节编排的习题。讲授本书约需60~70学时。

本书可与《数字电子技术》~~教材~~作为高等学校电气类、电子类、自动控制类和其他相近专业的本科生教材,也可供有关的工程技术人员自学和参考。

模拟电子技术
王 延 主编

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 15.625印张 403千字

1991年11月第一版 1991年11月第一次印刷

ISBN 7-81013-426-4/TN·25

印数: 1—9000 册 定价: 6.95元

前 言

一. 编写目的和要求

自本世纪70年代末至今,在国内高等学校电类和自动化类专业电子技术基础课程方面已经出版了几套教材。这些教材使用范围广,一般已经过多次修订,深受广大教师和学生的欢迎,有的已荣获国家级奖励。在这种情况下,还有必要在同一门课程上再来编写新的教材吗?如果要编写,其特色又应该是什么?这是首先要回答的问题。

在同一门课程上,应该允许和鼓励教师编写不同风格的教材,有的内容详尽而完备,有的剪裁得宜而精练。这样才能做到百花齐放,相得益彰。多年来,国家教委工科电子技术课程教学指导小组正是这样做的。此其一。再者,在多年的教学实践中,不少教师的共同感受是:在电子技术基础这门课程上,内容与学时的矛盾一直很尖锐。现有的某些教材编写水平很高,但篇幅失之过大,使教与学都感到不便。因此,编写一本内容精练,篇幅不大,而又能较好满足教学基本要求的教材,就是大家共同的心愿。但是,要实现这一愿望又谈何容易。这里既有客观上的实际困难,又有主观上学术水平和教学经验的不足。

根据机械电子工业部高等学校电子技术基础课程协作组的研究和决定,要求参加协作组的各院校通力合作,编写一套符合上述要求的教材,并委托我们几所院校合作编写其中的《模拟电子技术》。我们勉为其难,试挑重担,中心惴惴,无时或已。

在1989年11月协作组召开的教材编写大纲讨论会上,由我们提出并经与会同志修改补充,形成了如下的编写指导思想:

1. 力求少而精,在“精练”上取胜。要精选内容,优选讲法,

以符合教学基本要求为准。

2. 本课程是电子技术方面入门性的技术基础课,要确保基础,决不贪多,坚持“伤其十指,不如断其一指”的原则。根据教学实践的经验,模拟电子技术有一个“入门难”的问题。为此要分散难点,并建议在教学方法上调动一切手段来解决这个问题。

3. 因为是“技术”基础课,就要理论联系实际,学以致用,使学生建立工程观点、实际观点。在教材中要有意识地逐步培养学生的读图能力和分析问题、解决问题的能力,把完成习题看成是一种重要的实践环节。

4. 正确处理传统和先进内容之间的关系。以介绍集成电路为主,又保留适当的分立电路部分。可以说,不掌握一定的分立电路基础,也无法学好集成电路。

5. 既要博采众长,善于学习,又要认真总结自己的教学经验,在教学法上见功夫,把书写成“教材”,而不是材料的堆砌。

6. 本课程的特点是内容广泛,线路众多。就事论事,就线路讲线路,是编写这类教材之大忌。要重在突出事物的规律,而不争所讲线路之多少,这样才有可能使学生达到“举一隅以三隅反”的境界。

二、电子技术发展简史

电子技术和电子学 (electronics), 是与电子 (electron) 有关的理论和技术。1895年, H.A. Lorentz 假定电子存在。1897年, J.J. Thompson 用实验找出了电子。1904年, J.A. Fleming 发明了最简单的二极管 (diode 或 valve), 用于检测微弱的无线电信号。1906年, L. De Forest 在二极管中安上第三个电极 (栅极, grid), 发明了具有放大作用的三极管, 这是电子学早期历史中最重要的里程碑。又经过五年研究改进, 从1911年开始了实用电子技术的时代。所以, 电子技术作为一门新兴学科, 其发展至今不过七八十年。

1948年用半导体材料做成了第一只晶体管, 叫“半导体器件”

或“固体器件”(solid-state device)。1951年有了商品,这是出现分立元件的又一个里程碑。本世纪50年代末提出“集成”的观点。1959年Kilby在IRE(美国无线电工程师学会)的一次会议上宣布“固体电路”(solid circuit)的出现,以后叫“集成电路”(integrated circuit)。1960年集成电路处于“小规模集成”(small-scale integration)阶段,每个半导体“芯片(chip)”上有不到100个元器件。1966年进入“中规模集成”(medium-scale integration)阶段,每个芯片上有100~1000个元器件。1969年进入“大规模集成”(large-scale integration)阶段,每个芯片上的元器件达到10000个以下。1975年更进一步跨入“超大规模集成”(very-large scale integration)阶段,每个芯片上的元器件多达10000个以上。从1960至1980年的二十年间,芯片上元器件的“集成度”(密度)增加了 10^6 倍,每年递增率为 $\sqrt[20]{10^6} \approx 2$ 。目前的超大规模集成,在几十 mm^2 的芯片上有上百万个元器件,已进入“微电子”(microelectronics)时代,大大促进了先进科学技术的发展。

现在电子技术的应用已经渗透到人类生活和生产的各个方面。西方学者把电子技术的应用归纳为四个方面,或者叫四个“C”。有两种说法:一种是元器件(Components)制造工业,通讯(Communication),控制(Control)和计算机(Computer);另一种说法是通讯,控制,计算机和文化生活(Cultural life,如广播、电视、录音、录像、电化教学、电子文体用具、电子表、家务电子化等)。

总起来讲,电子技术就是研究电子器件、电子电路及其应用的技术科学。

三、本书的主要内容和讲授时数的建议

就电子器件和电子电路所处理、放大和变换的信号来说,电子技术可分为“模拟”和“数字”两大类。在模拟电子技术的范围内,电子器件和电子电路所处理、放大和变换的信号(电压或电流)

都是时间的连续函数，即所谓模拟信号 (analog signal)。“模拟”指的是主要以电压或电流的大小来表示 (或模拟) 信号的实际变化。

本书共八章，可以划分为几个部分：

从第一章到第四章是学习电子技术的重要基础，必须教好学好。为此，要在教学进度上、在各种教学环节的配合上想办法。鉴于这是入门性的课程，又有难点集中在前造成“入门难”的特点，我们建议这门课的教学进度应该从前往后逐渐加快。为了分散难点，我们把二极管和晶体管分章介绍，并把多级放大电路和频率响应独立成章。为了做到理论联系实际，学以致用，也为了给后面的内容作准备，我们在第一章就介绍二极管电路的分析方法和应用。

从第五章到第七章集中介绍了模拟电子技术的重点和难点——反馈，以及集成电路运算放大器的线性和非线性应用。集成电路运算放大器是模拟集成电路的主要类型，而它的各种应用电路就是由它加上不同类型的反馈而组成的。

由于功率放大电路有其重要性和特殊性，而且也是放大电路的基本形式之一，我们还是用一章的篇幅 (第八章) 来介绍它。

本书以讲授各种形式的基本电子电路及其分析方法为主。掌握了这些基本电路，再通过其他实践性教学环节的配合，学生应该有能力去分析和构成各种具体的电子设备。这也是“重在基础”这一点在本书编写中的体现。小功率直流稳压电源是由各种基本电子电路组合而成的。因此，在本书中并不为此单独设章，而是把它的各个组成部分分散到有关的章节中去。

根据编写指导思想，也为了减少篇幅，在本书中精简了一些不必要的内容和附录，在每一章的前后也不写提要和小结。我们认为，在具体学习之前，每章前面的提要作用不大，而章后的小结理应也是有可能由大学本科生们自己来做的。

讲授本书所需的总学时约为60，其中各章的学时数建议分配

如下:

章号	一	二	三	四	五	六	七	八
学时	7	14	8	4	8	7	6	6

本书先以胶印本(《送审稿》)的形式,于1990年提交由协作组召开的审稿会。会上对书稿进行了认真细致的集体审查,在充分肯定其成绩和特色的基础上,提出了不少建设性的和中肯的意见。在随后的半年中,本书的送审稿在华东工学院和北京理工大学两校的班级中试用。同时,本书主编又根据编写指导原则、审稿会和试用的意见,进行了全面的修改和定稿工作。定稿后,本书总字数基本达到了预期的目标。但是,本书的编写工作肯定还有很多不妥当,甚至是错误的地方,有待于教学实践的考验以及前辈同仁们的指正。

参加本书编写的有:北京理工大学赵金声(第一章和第二章的2.4~2.6节),华东工学院周连贵(第三、四章),北京理工大学王远(前言,第二章的2.1~2.3节,第五、六章),陕西机械学院朱万群(第七、八章)。本书由王远任主编,负责全书的组织、修改和定稿。吉林工业大学王万树副教授担任本书主审,他对送审稿进行逐字逐句非常认真负责的审查,写出了详尽的审稿意见,给了编写者以很大的启迪和帮助。在成书过程中,北京理工大学出版社、教材科和印刷厂给了我们热情的支持,在此谨向他们致以衷心的感谢。

编者

1990年12月于北京

目 录

第一章 半导体二极管和电路分析

1.1 半导体器件基础	(1)
1.1.1 本征半导体	(1)
1.1.2 杂质半导体	(6)
1.1.3 PN结	(9)
1.1.4 PN结的伏安特性	(12)
1.2 半导体二极管	(17)
1.2.1 半导体二极管的结构和类型	(17)
1.2.2 半导体二极管的伏安特性和参数	(18)
1.2.3 半导体二极管的型号及选择	(21)
1.2.4 稳压管的特性和参数	(23)
1.2.5 半导体二极管中的电容效应	(25)
1.3 半导体二极管电路的分析方法	(28)
1.3.1 图解分析法	(29)
1.3.2 模型(或等效电路)分析法	(31)
1.4 半导体二极管的应用	(35)
1.4.1 半导体二极管整流电路	(35)
1.4.2 硅稳压管稳压电路	(44)
1.4.3 二极管限幅电路	(47)
习题	(49)

第二章 半导体三极管和基本放大电路

2.1 双极型晶体三极管	(53)
2.1.1 晶体管的结构	(53)
2.1.2 晶体管中的电流控制作用	(54)
2.1.3 共射接法晶体管的特性曲线	(63)

2.1.4	晶体管的主要参数及安全工作区	(69)
2.1.5	晶体管的类型、型号及选用原则	(73)
2.2	晶体管基本放大电路的组成和工作原理	(75)
2.2.1	放大的概念和实质	(75)
2.2.2	放大电路的性能指标	(78)
2.2.3	单管共射放大电路的组成和工作原理	(83)
2.3	晶体管放大电路的图解分析法	(86)
2.3.1	晶体管放大电路的特点和分析方法	(86)
2.3.2	晶体管放大电路的静态分析	(88)
2.3.3	晶体管放大电路的动态分析	(92)
2.3.4	图解分析法的应用范围	(100)
2.4	晶体管放大电路的等效电路分析法	(100)
2.4.1	晶体管的直流模型及静态工作点的计算	(101)
2.4.2	晶体管的交流低频小信号模型及其参数	(102)
2.4.3	用交流低频小信号模型分析动态性能指标	(109)
2.5	场效应晶体三极管(场效应管)及其放大电路	(111)
2.5.1	结型场效应管的结构、电压控制作用、特性和主要参数	(112)
2.5.2	绝缘栅场效应管	(121)
2.5.3	场效应管与双极型晶体管的比较	(127)
2.5.4	场效应管共源基本放大电路的分析	(128)
2.6	其他基本放大电路的分析	(133)
2.6.1	射极偏置放大电路(分压式工作点稳定电路)	(133)
2.6.2	晶体管共集放大电路(射极输出器)	(138)
2.6.3	晶体管共基放大电路	(143)
2.6.4	三种晶体管基本放大电路的比较	(144)
2.6.5	场效应管共漏基本放大电路	(145)
习题		(146)

第三章 多级放大电路和集成电路运算放大器

3.1	多级放大电路的一般问题	(156)
3.1.1	级间耦合问题	(156)

3.1.2 多级放大电路的分析方法	(163)
3.2 差动放大电路	(169)
3.2.1 电路的组成及抑制零点漂移的原理	(169)
3.2.2 射极耦合差动放大电路的静态分析	(177)
3.2.3 射极耦合差动放大电路的动态分析	(178)
3.2.4 输入和输出的四种接法及其性能比较	(182)
3.2.5 带射极恒流源的差动放大电路	(189)
3.3 集成运算放大器	(192)
3.3.1 集成电路的制造工艺和特点	(193)
3.3.2 集成运算放大器的组成和电流源电路	(198)
3.3.3 F001型集成运算放大器的电路分析	(205)
3.3.4 集成运算放大器的主要技术指标	(208)
3.3.5 集成运算放大器的发展概况	(211)
习题	(213)

第四章 放大电路的频率响应

4.1 频率响应的基本概念	(220)
4.1.1 RC低通电路的频率响应	(220)
4.1.2 RC高通电路的频率响应	(224)
4.2 晶体管的高频小信号模型	(225)
4.2.1 晶体管的物理模型——混合参数 π 型等效电路	(225)
4.2.2 晶体管共射电流放大系数 β 的频率响应	(230)
4.2.3 共基接法晶体管和场效应管的高频小信号模型	(233)
4.3 基本放大电路的频率响应	(235)
4.3.1 单管共射放大电路频率响应的定性分析	(235)
4.3.2 单管共射放大电路频率响应的定量分析	(238)
4.3.3 放大电路频率响应的改善和增益带宽积	(246)
4.4 多级放大电路的频率响应	(249)
4.4.1 多级放大电路的频率响应表达式和波特图	(249)
4.4.2 多级放大电路下限截止频率 f_L 的估算	(250)
4.4.3 多级放大电路上限截止频率 f_H 的估算	(251)
习题	(252)

第五章 反馈

5.1 基本概念和反馈类型	(254)
5.1.1 基本概念	(254)
5.1.2 反馈的具体形成	(266)
5.1.3 负反馈的类型	(270)
5.2 方框图表示法	(271)
5.2.1 目的和根据	(271)
5.2.2 方框图中各个量的涵义及量纲	(273)
5.2.3 闭环增益 A_f 及其一般表达式	(274)
5.2.4 反馈深度 $ 1 + \dot{A}\dot{F} $	(275)
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	(276)
5.3.1 提高闭环增益 A_f 的稳定性	(277)
5.3.2 扩大通频带, 减小频率失真	(278)
5.3.3 减小非线性失真和抑制干扰及噪声	(279)
5.3.4 对放大电路输入电阻和输出电阻的影响	(281)
5.4 负反馈放大器的分析计算	(285)
5.4.1 深度负反馈放大器的本质特点	(286)
5.4.2 深度负反馈放大器闭环增益 A_f 的计算举例	(287)
5.4.3 带深度负反馈的集成运放电路的特点及其分析	(289)
5.5 负反馈的正确引入	(295)
5.6 自激振荡及其消除	(300)
5.6.1 实验中观察到的现象	(300)
5.6.2 产生自激振荡的物理原因	(301)
5.6.3 产生自激振荡的条件	(303)
5.6.4 反馈放大器的稳定性和自激振荡的消除	(303)
习题	(307)

第六章 集成运算放大器的线性应用

6.1 应用分类和分析方法	(316)
6.1.1 线性应用和非线性应用	(316)
6.1.2 集成运算放大器线性应用电路的分析方法	(316)

6.2 运算电路	(317)
6.2.1 运算电路中集成运算放大器的输入情况.....	(317)
6.2.2 比例运算电路.....	(321)
6.2.3 加法和减法运算电路.....	(325)
6.2.4 积分和微分运算电路.....	(333)
6.2.5 对数和指数运算电路.....	(340)
6.2.6 乘法和除法运算电路.....	(346)
6.3 有源滤波器	(355)
6.3.1 滤波器的功能.....	(355)
6.3.2 滤波器的频率特性及分类.....	(355)
6.3.3 有源滤波电路及其分析方法.....	(357)
6.3.4 有源滤波器举例.....	(359)
习题	(372)

第七章 波形发生电路

7.1 产生自激振荡的条件	(377)
7.2 RC 正弦波振荡器	(380)
7.2.1 RC串并联电路的选频特性	(380)
7.2.2 RC 桥式振荡器	(381)
7.2.3 振荡的稳幅和稳频.....	(384)
7.3 LC 正弦波振荡器	(386)
7.3.1 LC 并联回路的选频特性	(386)
7.3.2 构成LC正弦波振荡器的一般规律.....	(388)
7.4 石英晶体振荡器	(396)
7.4.1 石英谐振器的电特性.....	(396)
7.4.2 晶体振荡电路.....	(398)
7.5 电压比较器——集成运放的非线性应用	(399)
7.5.1 简单的电压比较器.....	(399)
7.5.2 带正反馈的迟滞型电压比较器.....	(404)
7.5.3 集成电压比较器.....	(407)
7.6 用电压比较器组成的非正弦波发生电路	(410)
7.6.1 非正弦波发生电路的基础知识.....	(410)

7.6.2 矩形波发生电路	(411)
7.6.3 三角波发生电路	(415)
7.6.4 锯齿波发生电路	(419)
习题	(421)

第八章 功率电路

8.1 低频功率放大电路的特殊问题	(430)
8.2 互补功率放大电路	(434)
8.2.1 电路的组成	(434)
8.2.2 晶体管工作状态的分类	(441)
8.2.3 互补功率放大电路的输出功率和效率	(441)
8.2.4 晶体管的功率损耗	(446)
8.2.5 功率放大电路中晶体管的选择	(448)
8.3 实际的功率放大电路	(448)
8.3.1 OCL准互补功率放大电路	(448)
8.3.2 采用集成运放的OCL准互补功率放大电路	(456)
8.3.3 OTL功率放大电路	(456)
8.3.4 通用型和专用型集成功率放大电路	(458)
8.4 直流稳压电源	(462)
8.4.1 稳压电路概述	(463)
8.4.2 稳压电路的性能指标	(465)
8.4.3 线性串联型稳压电路	(466)
8.4.4 稳压电路中的保护措施	(468)
8.4.5 集成稳压电路及其应用	(471)
习题	(474)
主要参考文献	(482)

第一章 半导体二极管和电路分析

1.1 半导体器件基础

1.1.1 本征半导体

一、什么是半导体？

自然界存在各种不同性质的物质，按导电能力强弱可分为导体、绝缘体和半导体，导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫半导体。

半导体还具有一些特殊的性质，如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等。即半导体受到光照和热的辐射，或在纯净的半导体中掺入微量的其它特定元素（也叫“杂质”）后，它的导电能力将有明显的改善。利用半导体的这些特性可制造出具有不同性能的半导体器件。

物质的原子结构及其导电机理，决定了物质的性质。为揭示半导体的物理特性，就必须研究半导体的原子结构。

二、本征半导体的原子结构

半导体是晶体。高度提纯、晶体结构完整的单晶体叫做“本征半导体”。半导体硅和锗是近代电子技术中常用的半导体材料，使用时都要经过工艺处理做成本征半导体，叫本征硅或锗。

硅和锗的原子序分别为14和32，即它们各有14和32个电子分层绕原子核旋转，其原子结构由图1.1-1 (a) 表示。各层轨道上的电子都受原子核的束缚。最外层轨道上的电子叫做价电子，它受原子核的束缚力最小。价电子数决定物质的化学性质。为突出价电子的作用，原子结构可用简化模型表示，如图1.1-1 (b) 所

示。外层表示价电子数， $(+4)$ 叫惯性核，其电荷量 $(+4)$ 是原子核和除价电子以外的内层电子电荷量的总和。

在本征硅（锗）的晶体结构中，硅（锗）原子按一定规律整齐排列，组成一定形式的空间点阵。由于原子间距离很近，各原子间的相互影响大，使原来属于某一原子的一个价电子为相邻两

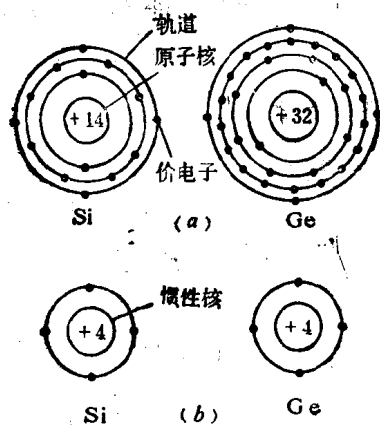


图1.1-1

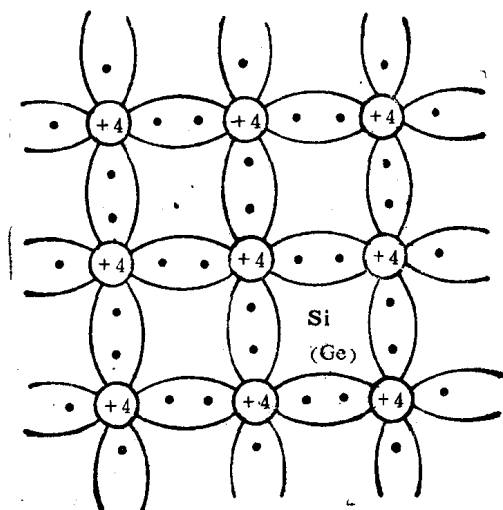


图1.1-2

个原子所共有，从而形成了晶体中的“共价键”结构。每个硅原子的四个价电子与相邻的四个原子的各一个价电子分别组成四对共价键，结果使每个硅原子最外层形成拥有八个共有电子的稳定结构，如图 1.1-2 所示。

三、本征半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

我们知道，金属导体的导电机理是靠导体中大量带负电荷的“自由电子”在电场作用下的定向移动形成电流。因此，自由电子是金属导体中的载流子，而且是唯一的一种载流子。

1. 绝对零度 (0K) 时，本征半导体中无载流子。

本征硅（锗）原子共价键上的两个电子受两个相邻原子核的共同束缚，叫“束缚电子”。束缚电子与原子核间有较强的结合力。在绝对零度且无外部激发能量时，硅（锗）的价电子不能挣脱原子核的束缚成为自由电子，此时在本征半导体中无运载电荷的载流子，在外电场作用时也不会产生电流。在这种条件下，本征硅（锗）是良好的绝缘体。

2. 本征半导体受激发产生自由电子和空穴

价电子在外部能量作用下，脱离共价键成为自由电子的过程叫做“激发”，电子脱离共价键束缚所需要的最小能量叫“激活能” E_g 。硅的激活能 $E_g=1.1\text{eV}$ （电子伏），锗的激活能 $E_g=0.68\text{eV}$ 。光照和热辐射都是激活能的来源。

(1) 本征半导体中的自由电子载流子 当共价键上的电子获得激活能后，即可脱离共价键成为自由电子，它是带负电荷量的粒子，叫“载流子”，如图 1.1-3 所示。因此，自由电子是本征半导体中的一种载流子。在外电场作用下，自由电子将逆着电场方向运动形成电流（按规定，该电流方向与电场方向相同）。载流子的这种运动叫“漂移”，所形成的电流叫“漂移电流”。

(2) 本征半导体中的空穴载流子 价电子脱离原子核的束缚成为自由电子后，在原来的共价键中便留下一个空位（如图 1.1-3 中①），叫“空穴”。在外界能量激发下，该空穴会被相邻原子