

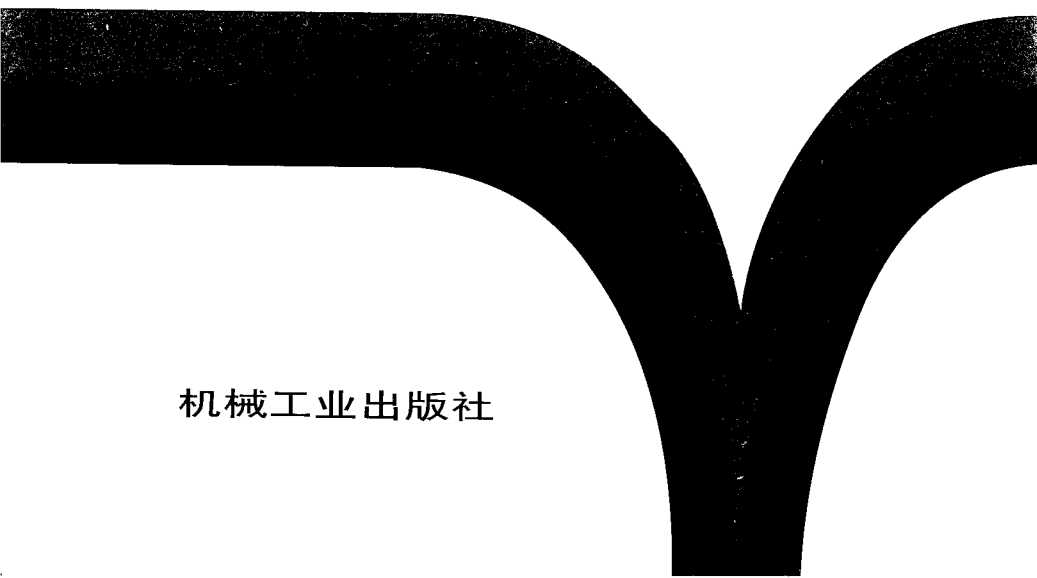
高等学校教材

模拟 电子技术

获机械部第三届优秀教材二等奖

王远 主编

机械工业出版社



本书是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),根据多年教学实践经验,本着教学改革的精神编写的。本书的内容是以集成电路为主,但又保留了一定篇幅的、作为分立和集成电路共同基础的重要内容。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、集成电路运算放大器及其应用电路等几个方面。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,多级放大电路和集成电路运算放大器,放大电路的频率响应,反馈,集成电路运算放大器的线性应用,信号发生电路,功率电路。在章节的划分上,考虑了分散难点和理论联系实际。各章最后都有数量适当的、按章节编排的习题。讲授本书约需 65~75 学时。

本书可与本系列教材中的《数字电子技术》配套使用,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 远 主编

*

责任编辑:卢若薇 贡克勤 版式设计:冉晓华

封面设计:方 芬 责任校对:孙志筠

责任印制:路 琳

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街 22 号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850mm×1168mm¹/₃₂·印张 15.25·字数 397 千字

1999 年 10 月第 1 版第 5 次印刷

印数 30 001—35 000·定价:20.00 元

*

ISBN 7-111-04210-7/TN·86 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

一、编写目的和要求

本书是机械电子工业部高等学校电子技术基础课程协作组组织编写的电子技术基础系列教材之一。

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。这些教材的使用范围广,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,又有主观上的学术水平和教学经验的不足。

根据协作组的研究决定,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,同时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。本书是以介绍集成电路为主,同时又保留了一定篇幅的、作为分立和集成电路共同基础的重要内容。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,在教学法上下功夫,把书写成“教材”,写出特色,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,而不单纯追求所讲线路之多少,这样才有可能使学生达到“举一反三”的境界。

二、主要内容和讲授时数

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的技术科学。

就电子器件和电子电路所处理的信号来说,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8章,可以划分为几个部分:

从第1章到第4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，我们把半导体二极管和三极管分章介绍，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1章就介绍二极管电路的应用。

从第5章到第7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8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。掌握了这些内容，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筑各种具体的电子设备。这也是“重在基础”精神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。

讲授本书所需的总学时约为65，其中各章的学时数建议分配如下：

章号	1	2	3	4	5	6	7	8
学时	8	16	8	4	8	8	7	6

三、本书的出版情况

本书先以胶印本（送审稿）的形式，于1990年提交给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，并于1991年11月首次正式出版。

首次出版两年多以来,经三十多所高等学校使用,普遍反映较好。在协作组的组织下,采用多种形式认真而广泛地收集了教师 and 学生的意见,有的学校还为此印出了材料。这次我们根据本课程指导小组1993年6月新修订的教学基本要求、关于文字图形符号的新国家标准以及广大使用者的意见和建议,对教材进行了修订,并在1993年10月协作组领导小组会议上决定由机械工业出版社出版。

本书的修订工作包括:

1.根据新修订的教学基本要求,增写了一些内容,更加注意突出以集成电路为主的要求。

2.本着尽可能精练的原则,大力删除了各章中以及章与章之间不必要的重复,文字叙述上不必要的繁琐,和一些可有可无的内容。

3.根据使用者的意见,在可能的条件下,增加了一些联系实际应用的内容(例如,集成运放应用电路实例)。

4.改正了一些明显的错误和叙述上不妥之处,舍弃了不易为读者接受的讲法。

5.根据新的国家标准,对教材中使用的文字符号和图形符号进行了认真的检查修改,并注意全书的统一。在名词术语上也尽量做到明确、精练、规范化,减少不必要的混淆。

本书的修订工作是由北京理工大学王远(第5~8章)和赵金声(第1~4章)负责完成的。我们希望本书重新出版后能保持原有优点,改正已发现的错误和缺点,更加有利于教学,为本课程的教材建设进一步作出贡献。由于编者水平的限制,加之本教材使用时间还不长,以及修订时间的仓促,书中肯定还有不少缺点和错误,欢迎使用本书的广大教师和学生不断向我们坦率提出。

参加本书首版编写的有:北京理工大学赵金声(第1章和第2章的2.4~2.6),华东工学院周连贵(第3、4章),北京理工大学王远(前言,第2章的2.1~2.3,第5、6章),陕西机械学院朱万群(第7、8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教授担任本书首版的主审，他对书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。

编 者

1993年12月于北京

目 录

前 言

关于本书所用部分文字、图形符号的说明1

第1章 半导体二极管和电路分析5

1.1 半导体器件基础5

1.1.1 本征半导体5

1.1.2 杂质半导体9

1.1.3 PN结12

1.1.4 PN结的伏安特性15

1.2 半导体二极管20

1.2.1 半导体二极管的结构和类型20

1.2.2 半导体二极管的伏安特性21

1.2.3 半导体二极管中的电容效应24

1.2.4 半导体二极管的参数26

1.2.5 半导体二极管的型号及选择27

1.2.6 稳压管的特性和参数29

1.3 半导体二极管电路的分析方法31

1.3.1 模型（或等效电路）分析法32

1.3.2 模型分析法的应用34

1.4 半导体二极管的应用36

1.4.1 半导体二极管整流电路36

1.4.2 硅稳压管稳压电路45

1.4.3 二极管限幅电路48

习 题50

第2章 半导体三极管和基本放大电路54

2.1 双极型晶体三极管54

2.1.1 晶体管的结构54

2.1.2 晶体管中的电流控制作用55

2.1.3	共射接法晶体管的特性曲线	62
2.1.4	晶体管的主要参数及安全工作区	68
2.1.5	晶体管的类型、型号及选用原则	72
2.2	晶体管基本放大电路的组成和工作原理	73
2.2.1	放大的概念和实质	73
2.2.2	基本放大电路的组成和工作原理	74
2.2.3	放大电路的性能指标	77
2.3	晶体管放大电路的图解分析法	82
2.3.1	晶体管放大电路的特点和分析方法	82
2.3.2	晶体管放大电路的静态分析	83
2.3.3	晶体管放大电路的动态分析	86
2.3.4	图解分析法的应用范围	94
2.4	晶体管放大电路的等效电路分析法	94
2.4.1	晶体管的直流模型及静态工作点的计算	94
2.4.2	晶体管的交流低频小信号模型及其参数	96
2.4.3	用交流低频小信号模型分析动态性能指标	103
2.5	其他基本放大电路的分析	106
2.5.1	射极偏置放大电路(分压式工作点稳定电路)	106
2.5.2	晶体管共集放大电路(射极输出器)	109
2.5.3	晶体管共基放大电路	114
2.5.4	三种晶体管基本放大电路的比较	116
2.6	场效应晶体三极管(场效应管)及其放大电路	116
2.6.1	结型场效应管的结构、电压控制作用、特性和主要参数	117
2.6.2	绝缘栅场效应管	126
2.6.3	场效应管与双极型晶体管的比较	131
2.6.4	场效应管共源基本放大电路的分析	132
2.6.5	场效应管共漏基本放大电路	138
	习 题	139
第3章	多级放大电路和集成电路运算放大器	148
3.1	多级放大电路的一般问题	148
3.1.1	级间耦合问题	148
3.1.2	多级放大电路的分析方法	155
3.2	差动放大电路	160

3.2.1 电路的组成及抑制零点漂移的原理	160
3.2.2 射极耦合差动放大电路的静态分析	167
3.2.3 射极耦合差动放大电路的动态分析	169
3.2.4 输入和输出的四种接法及其性能比较	172
3.2.5 带射极恒流源的差动放大电路	180
3.3 集成电路运算放大器	183
3.3.1 集成电路的制造工艺和特点	183
3.3.2 集成运放的组成和电流源电路	188
3.3.3 典型集成运放电路	194
3.3.4 集成运放的主要技术指标	198
3.3.5 集成运放的发展概况	202
习 题	204
第4章 放大电路的频率响应	211
4.1 频率响应的基本概念	211
4.1.1 RC 低通电路的频率响应	211
4.1.2 RC 高通电路的频率响应	214
4.2 晶体管的高频小信号模型	216
4.2.1 晶体管的物理模型——混合参数 π 型等效电路	216
4.2.2 晶体管共射电流放大系数 β 的频率响应	221
4.2.3 共基接法晶体管和场效应管的高频小信号模型	224
4.3 基本放大电路的频率响应	225
4.3.1 单管共射放大电路频率响应的定性分析	225
4.3.2 单管共射放大电路频率响应的定量分析	228
4.3.3 放大电路频率响应的改善和增益带宽积	237
4.4 多级放大电路的频率响应	239
4.4.1 多级放大电路的频率响应表达式和波特图	239
4.4.2 多级放大电路下限截止频率 f_L 的估算	241
4.4.3 多级放大电路上限截止频率 f_H 的估算	242
习 题	242
第5章 反馈	244
5.1 基本概念和反馈类型	244
5.1.1 基本概念	244
5.1.2 反馈的具体形成	253

5.1.3 负反馈的类型 (组态)	256
5.2 方框图表示法	257
5.2.1 目的和根据	257
5.2.2 方框图中各个量的含义及量纲	259
5.2.3 闭环增益 A_f 及其一般表达式	260
5.2.4 反馈深度 $ 1 + A F $	262
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	263
5.3.1 提高闭环增益 A_f 的稳定性	264
5.3.2 扩大通频带, 减小频率失真	265
5.3.3 减小非线性失真和抑制干扰及噪声	267
5.3.4 负反馈对放大电路输入电阻和输出电阻的影响	269
5.4 负反馈放大器的分析计算	273
5.4.1 深度负反馈放大器的本质特点	273
5.4.2 深度负反馈放大器闭环增益 A_f 的计算举例	274
5.4.3 带深度负反馈的集成运放电路的特点及其分析	276
5.5 负反馈的正确引入	282
5.6 自激振荡及其消除	286
5.6.1 实验中观察到的现象	286
5.6.2 产生自激振荡的物理原因	287
5.6.3 产生自激振荡的条件	288
5.6.4 反馈放大器的稳定性和自激振荡的消除	289
习 题	295
第6章 集成电路运算放大器的线性应用	304
6.1 应用的分类和应用电路的分析方法	304
6.1.1 线性应用和非线性应用	304
6.1.2 集成运放线性应用电路的分析方法	304
6.2 运算电路	305
6.2.1 运算电路中集成运放的输入情况	305
6.2.2 比例运算电路	307
6.2.3 加法和减法运算电路	318
6.2.4 积分和微分运算电路	327
6.2.5 对数和指数运算电路	333
6.2.6 乘法和除法运算电路	338

6.3 有源滤波器	346
6.3.1 滤波器的功能	346
6.3.2 滤波器的频率特性及分类	346
6.3.3 有源滤波电路及其分析方法	348
6.3.4 有源滤波器举例	350
习 题	362
第7章 信号发生电路(振荡器)	367
7.1 概述	367
7.2 正弦波振荡器	368
7.2.1 产生自激振荡的条件	368
7.2.2 正弦波振荡器的组成和分类	370
7.2.3 RC 正弦波振荡器	370
7.2.4 LC 正弦波振荡器	378
7.2.5 石英晶体振荡器	386
7.3 非正弦波振荡器	389
7.3.1 电压比较器——集成运放的非线性应用	389
7.3.2 用电压比较器组成的非正弦波振荡器	400
7.4 压控振荡器	410
习 题	412
第8章 功率电路	421
8.1 低频功率放大电路的特殊问题	421
8.2 互补功率放大电路	425
8.2.1 电路的组成	425
8.2.2 晶体管工作状态的分类	430
8.2.3 互补功率放大电路的输出功率和效率	430
8.2.4 晶体管的功率损耗	435
8.2.5 功率放大电路中晶体管的选择	437
8.3 实际的功率放大电路	438
8.3.1 OCL 准互补功率放大电路	438
8.3.2 采用集成运放的 OCL 准互补功率放大电路	444
8.3.3 单电源供电的 OTL 功率放大电路	445
8.3.4 通用型和专用型集成功率放大电路	446
8.4 直流稳压电源	449

8.4.1 稳压电路的工作原理	451
8.4.2 稳压电路的性能指标	457
8.4.3 稳压电路中的保护措施	458
8.4.4 集成稳压电路及其应用	461
习 题	464
主要参考文献	473

关于本书所用部分文字、

图形符号的说明

1. 电压、电流中直流分量、交流分量、总量的表示（以三极管基极电流为例）

直流量： I_B ，文字符号和下标均用大写英文字母。

交流量：瞬时值 i_b ，文字符号和下标均用小写英文字母；有效值 I_b ，最大值 I_{bm} ，文字符号用大写，下标用小写。

交直流总量： i_B ，文字符号用小写，下标用大写。

2. 电位和电位差（电压）以及电动势的表示

（1）放大电路中直流电源电压用文字符号 V ，下标用双重大写英文字母，如集电极直流电源电压 V_{CC} ，射极直流电源电压 V_{EE} 。

（2）端点对地电压用文字符号 U 或 u ，下标用单个文字，如 U_B ；两端点之间电位之差（电位差或电压）用文字符号 U 或 u ，下标用双重字母，如 U_{CB} 表示 C 端与 B 端之间的电位差或电压。

（3）电动势用文字符号 E 。

3. 放大电路输入量和输出量的表示

放大电路输入量和输出量的情况比较复杂。如为直流量（或缓变量），文字符号及下标用大写的英文字母表示，如 U_i 、 U_o ；如为交流量，文字符号及下标用小写的英文字母表示，如 u_i 、 u_o ；在一般情况下，既可能有直流分量，又可能有交流分量，则文字符号用小写英文字母，下标用大写英文字母，如 u_i 、 u_o 。

4. 器件和放大电路的输入电阻和输出电阻

器件本身的输入和输出电阻的文字符号及下标用小写英文字母

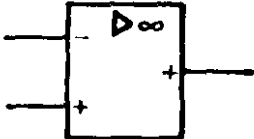
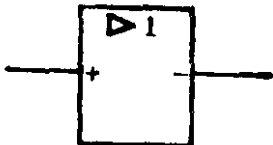
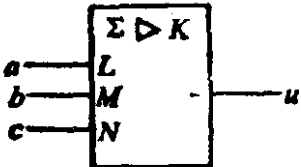
母，如 r_i 、 r_o ；包含很多器件的放大电路的输入和输出电阻，则文字符号用大写英文字母表示，如 R_i 、 R_o 。（注：下标的大小写根据是直流量或交流量而定）。集成运放虽是复杂的放大电路，但往往看作是单一的器件。

5.最大的最大值

一般交流量只有固定的最大值，但在放大电路中，其电压、电流和功率受输入信号大小的控制，其最大值和有效值又随控制信号的大小而变。为了保证各量不失真，输入信号大小有限制，交流电压、电流和功率的最大值也有一个最大值，用双重下标表示，如 $(U_m)_m$ ， $(I_m)_m$ ， $(P_o)_m$ 。

6.矢量用黑斜体文字，如 $\boldsymbol{A}$ ；标量用明体文字，如 A 。

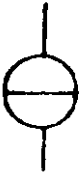
7.部分器件的图形符号

序号	元 器 件 名 称	图 形 符 号
1	放 大 器	
2	运算放大器	
3	放大系数为 1 的反相器	
4	求和放大器	

(续)

序号	元 器 件 名 称	图 形 符 号
5	积 分 器	
6	微 分 器	
7	对数放大器	
8	乘 法 器	
9	除 法 器	
10	指数运算器	
11	模拟比较器	

(续)

序号	元 器 件 名 称	图 形 符 号
12	电压源和电流源 (1)独立电压源 (2)独立电流源	 (1)  (2)
	(3)受控电压源 (4)受控电流源	 (3)  (4)