

高等学校教材

模拟电子技术基础 简明教程

(第三版)

- 清华大学电子学教研组 编
- 杨素行 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

高等学校教材

模拟电子技术基础简明教程

(第三版)

清华大学电子学教研组 编
杨素行 主 编

高等教育出版社

内容简介

本书依据“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”制订的“电子技术基础(A)课程教学基本要求”修订。本书上一版以通俗易懂、便于自学的特点广受全国高校师生欢迎,是电子技术基础课程比较有影响的教材之一。本次修订主要有以下变化:1. 删减比较陈旧的内容,加强对新技术的介绍,如集成运算放大器和其他模拟集成电路的应用。2. 引入EDA内容,每章增加Multisim仿真实例,仿真围绕教学的基本要求和重点内容进行。3. 将功率放大器的内容提前安排在第4章。

全书内容共10章,分别是半导体器件、放大电路的基本原理和分析方法、放大电路的频率响应、功率放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的反馈、模拟信号运算电路、信号处理电路、波形发生电路、直流电源。

本书简明扼要,深入浅出,便于自学,可作为高校电气信息类及相关专业“模拟电子技术”课程教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础简明教程/杨素行主编;清华大学电子学教研组编. —三版. —北京:高等教育出版社, 2006.5

ISBN 7-04-019285-3

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第021898号

策划编辑 韩颖 责任编辑 欧阳舟 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 王超 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landraco.com
印 刷	北京鑫海金澳胶印有限公司		http://www.landraco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	1985年10月第1版
印 张	31.25		2006年5月第3版
字 数	580 000	印 次	2006年5月第1次印刷
		定 价	35.50元(含光盘)

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 19285-00

授权同意书

北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司为加拿大 IIT (Interactive Image Technologies Ltd.) 与中国大陆市场总代理,并接受该公司之书面委托负责中国大陆地区有关产品之中文书籍编著授权作业。

兹同意清华大学自动化系教授杨素行老师所编写中文书名《模拟电子技术简明教程》(第三版)的引用 multisim、ultiboard 中的荧幕画面、专有名词、指令命令、使用方法及程序描述,并同意将原厂之演示盘 (DEMO DISK) 授权由高等教育出版社印制随书出版发行。

北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司

二零零六年三月十日

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》，其行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给予严厉打击。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) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

第三版前言

自从本书第二版出版以来,短短几年间,世界已经进入了 21 世纪,而电子技术本身以及高等学校的电子技术课程教学都发生了巨大的变化和迅速的发展。在这样的形势下,本书第三版的修订提上了日程。

修订第三版时,在继续遵循原来的编写原则:“保证基础,精选内容,加强概念,面向更新,联系实际,利于自学”的同时,主要考虑以下几个问题。首先,为了适应电子技术迅猛发展的现实情况,在内容方面,进一步加强集成放大器和其他模拟集成电路的应用。在介绍集成运算放大器、集成功率放大器、集成仪器放大器、集成比较器以及集成稳压器等电路时,尽量结合国内外通用的主流产品,而且从应用的要求出发,除了扼要介绍它们的电路原理外,着重介绍器件的主要技术性能、典型应用或连接方法。同时,进一步删减比较陈旧的内容,适当简化分立元件放大电路和器件内部原理的介绍。

考虑到电子电路设计自动化也是目前电子技术发展的一个重要趋势,因此,在第三版引入了 EDA(Electronics Design Automation)的内容。每章均有 Multisim 仿真实例,并给出仿真练习题。仿真实例围绕教学的基本要求和重点内容展开。所有仿真实例都经作者上机仿真通过,可以实现。第三版中所有仿真实例的电路均在本书所附的光盘中给出,读者可以利用正版的 Multisim 7 教育版,调用这些电路自己进行仿真实验。

在第三版的结构上,将功率放大器的内容提前安排在第 4 章,避免了在介绍集成运算放大器的输出级时,与功率放大器一章的部分内容重复。

修订第三版时,尽量注意保持原书的风格,力求简明扼要,深入浅出,在各章增加 Multisim 仿真实例和仿真练习题的情况下,避免全书篇幅过大。

第三版的修订由杨素行担任主编。修订过程中得到清华大学自动化系电子学教研组以及清华大学电工电子学教学实验中心许多老师的关心。华成英教授对本书的修订大纲提出了很多意见和建议。陈莉平和秦俭对仿真实验提供了许多帮助和支持。

本书修订过程中,在高等教育出版社的帮助下,广泛听取了采用本书作为教材的许多高等学校教学第一线教师的意见。许多老师根据自己多年的教学实

践,对本书的修订工作提出了具体中肯的意见。

主审单位北京工业大学自动化系的陆培新教授认真审阅了第三版的全部书稿,提出了详细的修改意见和许多很好的建议。谨对以上所有同志的指导、帮助和支持致以衷心的感谢。

承蒙加拿大 IIT 公司(Interactive Image Technologies Ltd.)授权作者编著本书时引用该公司产品 Multisim 的有关内容,并授权高等教育出版社将原厂之 Multisim 7 演示盘随本书出版,在此表示深深的感谢。还要感谢 IIT 公司的中国大陆市场总代理北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司,在软件、资料和技术方面的大力支持和帮助。

本书属于高等教育出版社出版的一套立体化教材中的主教材,与本书配套的其他教材有《Multisim 7 Product Demo》光盘(随本书出版),《模拟电子技术基础简明教程(第三版)教学指导书》等。

书中注有“*”号处,是选讲内容,可根据学时多少,决定取舍。在各章“习题与思考题”中,凡题号前标有符号“△”者,均选自中央广播电视大学历届试题。

由于作者水平的限制,书中一定存在许多错误或不妥之处,敬请广大读者批评指正,以便帮助我们改进工作。

作 者

2005 年 10 月 于清华大学

第二版前言

《模拟电子技术基础简明教程》一书自 1985 年出版以来,被许多院校选为教材,得到了广大读者的关心。但是,由于电子技术的迅猛发展,原教材中的有些内容显得比较陈旧,因此,在初版基础上,进行了修订,使本书更加符合当前电子技术课程教学的需要。

本书第二版修订工作的指导思想是,主要依据国家教育委员会高等学校工科电工课程教学指导委员会电子技术课程教学领导小组制定的“电子技术基础课程教学基本要求(1995 年修订版)”,同时,继续遵循本书第一版的编写原则:“保证基础,精选内容,加强概念,面向更新,联系实际,利于自学”。在具体内容上,修订的重点主要有以下几方面:

首先,为适应当前电子技术发展的形势,在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,进一步压缩分立元件放大电路以及其他比较陈旧或次要的内容,加强以集成运算放大器为主的各种模拟集成电路的分析和应用。在教材内容的安排上,将集成运算放大电路的介绍提前到半导体器件和放大电路的基本原理等最基本的内容之后进行,以便于随后的反馈放大电路、运算电路、信号处理电路以及正弦波和非正弦波发生电路等,均以集成电路为主进行分析。在第二版中,还介绍了集成模拟乘法器、集成电压比较器、集成功率放大器、集成稳压器以及开关型稳压电源等电路的原理和应用。

其次,在本书的第二版中,新增加了半导体器件一章。在第一版中,半导体器件的内容放在《数字电子技术基础简明教程》一书中。总结两本教材多年的使用实践,可以看到,虽然数字电子电路与模拟电子电路一样,也要使用半导体二极管、双极型三极管和场效应三极管等半导体器件,但是,在数字电路中比较注重器件的开关特性,因而在数字电子技术教材中不便于对半导体器件的放大特性进行更加深入、详尽的介绍,所以,此次修订将半导体器件的内容移至《模拟电子技术基础简明教程》中。但是,这一变动并不影响电子技术课程教学过程中,模拟电路和数字电路两部分的先后顺序安排。采用本书作为教材时,既可以先讲模拟电子电路,也可以先讲数字电子电路。

最后,在修订第二版时,注意保持和发扬原书的风格和特点,力求简明扼要,

深入浅出,便于自学。在加强模拟集成电路和增加半导体器件一章的情况下,尽量避免全书的篇幅过于膨胀。

书中注有“*”号处,是选讲内容,可根据学时多少,决定取舍。在各章“习题与思考题”中,凡题号前标有符号“△”者,均选自中央广播电视大学历届试题。

本书可与《数字电子技术基础简明教程》一书配套使用,同时又有相对的独立性,可以作为高等院校工科有关专业讲授模拟电子技术课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

本书第二版的修订由杨素行完成,并担任主编。修订工作自始至终在童诗白教授的悉心指导下进行。胡东成教授多次参加了修订大纲的讨论,提出了许多宝贵意见。修订工作得到了清华大学电子学教研组华成英主任和教研组其他许多老师的关心和支持。

北京工业大学自动化系陆培新教授担任本书第二版的主审工作,他在百忙中认真审阅了全部修订稿,提出了中肯、详细的修改意见。虞光楣教授也十分关心本书的修订工作,提出了许多有益的意见。谨对以上同志的指导和帮助表示由衷的感谢。

由于编者的水平所限,本书第二版中一定仍有不少错误和缺点,敬请广大读者给予批评指正,帮助我们不断加以改进。

编 者

1997年5月

初版前言

我们编写的《模拟电子技术基础》(童诗白主编)和《数字电子技术基础》(阎石主编)试用教材,自从1980年和1981年分别出版以来,经过我校本科有关专业和中央广播电视大学讲授“电子技术基础”课程的试用,并得到了其他高等院校、企业部门的关心。在为84届中央广播电视大学准备教材时,由于讲课学时大幅度削减,原来的教材显得篇幅过于庞大,容易造成学生负担过重。同时为了适应我校本科各有关专业的需要,我们在上述两套教材的基础上,按照总授课时间为120学时(不包括实验)的教学大纲,改编了目前这套《数字电子技术基础简明教程》和《模拟电子技术基础简明教程》。

我们的编写原则是:“保证基础,精选内容,加强概念,面向更新,联系实际,利于自学”。目的是为了在保证基本内容学到手的前提下,努力培养学生处理实际问题和自学的能力,同时避免学习负担过重。考虑到目前电子技术的飞速发展,适当地加强了新技术的内容。例如在模拟电子技术部分,在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,大幅度地压缩各种分立元件电路的设计和其他次要内容,加强以集成运放为主的模拟集成电路的功能和应用。在数字电子技术部分,以中、小规模集成电路为主,适当介绍大规模集成电路,分立元件部分基本删去。在教学方法上,我们力图多用物理概念来阐明问题的本质,避免大量地推导公式。

关于电子技术课程中模拟电路和数字电路的先后顺序问题,国内外各种教材中两种安排都有。在编写本教程时,主要为了处理好电路原理、电子技术基础和计算机原理几门课程之间的衔接关系,便于安排教学计划,因此把数字电路安排在模拟电路之前,半导体器件的基本知识放在《数字电子技术基础简明教程》一书中。但是,采用本教程时也可以先讲授模拟电路,只要在开始讲模拟电路之前,先介绍半导体器件的基本知识一章即可。

这套教材的《模拟电子技术基础简明教程》部分由杨素行执笔,《数字电子技术基础简明教程》部分由余孟尝执笔。全部编写工作是在童诗白教授和阎石副教授的具体组织下进行的。童诗白教授不仅为改编工作提出了如上所述的基本原则,指导制订了编写大纲,而且与执笔的同志多次进行讨论,提出了许多指

导意见,并且还详细地审阅和修改了模拟部分的全部初稿。

参加本教程大纲讨论的还有孙家炘、孙梅生、高扬、华成英、唐竞新、徐振英和胡尔珊等同志。其中孙家炘和孙梅生同志为本教程模拟电路部分提供了一些补充习题。

在本教程编写过程中,主审单位北京工业大学自动化系陆培新副教授和虞光楣副教授认真审阅了全部初稿,指出了初稿中的错误和不妥之处,并提出了详细的修改意见。中央广播电视大学电子组的全体同志参加了教材大纲的讨论,提出了许多宝贵意见。谨对以上同志们的指导和帮助,表示诚挚的谢意。

由于我们水平有限,加之时间过于仓促,书中一定存在不少错误和不妥之处,敬请各方面的读者给予批评指正,以便今后不断改进。

清华大学自动化系电子学教研组

1985年春

本书常用文字符号说明

通常一个文字符号包括两部分:基本符号和下标。基本符号大都为一个字母,少数情况有多个字母。下标可由一个或多个字母组成。当基本符号或下标分别采用大写或小写时,各自表示不同的含义,一般规定如下:

① 电流和电压

- I_B 、 U_{BE} 大写字母、大写下标表示直流量
 I_b 、 U_{be} 大写字母、小写下标表示交流有效值
 \dot{I}_b 、 \dot{U}_{be} 大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量
 i_B 、 u_B 小写字母、大写下标表示总瞬时值
 i_{be} 、 u_{be} 小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

② 直流电源电压

- V_{CC} 双极型三极管集电极直流电源电压
 V_{BB} 双极型三极管基极直流电源电压
 V_{EE} 双极型三极管发射极直流电源电压
 V_{DD} 场效应管漏极直流电源电压
 V_{GG} 场效应管栅极直流电源电压
 V_{SS} 场效应管源极直流电源电压

③ 电阻

- R 大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
 r 小写字母表示器件的等效电阻

1. 基本符号

(1) 电流和电压

- I_i 、 U_i 输入电流、输入电压
 I'_i 、 U'_i 净输入电流、净输入电压
 I_o 、 U_o 输出电流、输出电压
 $U_{o(AV)}$ 输出电压平均值
 U_{om} 最大输出电压
 I_f 、 U_f 反馈电流、反馈电压
 I_Q 、 U_Q 静态电流、静态电压
 U_{REF} 参考电压
 U_S 信号源电压

U_T	电压比较器的门限电平或阈值电压
U_T	温度的电压当量
$I_+、U_+$	集成运放同相输入端的电流、电压
$I_-、U_-$	集成运放反相输入端的电流、电压

(2) 功率

P	功率的通用符号
P_o	输出交变功率
P_{om}	输出交变功率最大值
P_V	电源提供的直流功率

(3) 频率

BW	通频带
f_H	放大电路的上限(-3 dB)频率
f_L	放大电路的下限(-3 dB)频率
f_0	振荡频率、谐振频率
ω	角频率的通用符号

(4) 电阻、电容、电感、阻抗

$R_i、R_o$	电路的输入电阻、输出电阻
$R_{if}、R_{of}$	有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_s	信号源内阻
G	电导的通用符号
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
X	电抗的通用符号
Z	阻抗的通用符号

(5) 增益或放大倍数、反馈系数

A	增益或放大倍数的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
F	反馈系数的通用符号

2. 器件符号

(1) 器件及引脚名称

VD	二极管
VD _Z	稳压管
VT	双极型三极管,场效应管

b	双极型三极管的基极
c	双极型三极管的集电极
e	双极型三极管的发射极
d	场效应管的漏极
g	场效应管的栅极
s	场效应管的源极

(2) 器件参数

A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'c}$	集电结等效电容
$C_{b'e}$	发射结等效电容
I_{CBO}	集电极 - 基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极 - 发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
$I_{D(AV)}$	整流二极管平均电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S_R	集成运放转换速率
U_Z	稳压管稳定电压
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极 - 基极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极 - 发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极 - 基极之间的反向击穿电压
U_{CES}	集电极 - 发射极之间的饱和管压降
U_{lcm}	集成运放最大共模输入电压
U_{ldm}	集成运放最大差模输入电压
U_{IO}	集成运放输入失调电压
$U_{GS(off)}$	场效应管的夹断电压
$U_{GS(th)}$	场效应管的开启电压
BW_G	集成运放的单位增益带宽
f_T	双极型三极管的特征频率
f_α	共基截止频率
f_β	共射截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻

r_{be}	共射接法下基极 - 发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极 - 发射极之间的微变等效电阻
r_{ds}	场效应管漏极 - 源极之间的微变等效电阻
r_{gs}	场效应管栅极 - 源极之间的微变等效电阻
r_{id}	集成运放差模输入电阻
α	共基电流放大系数
$\bar{\alpha}$	共基直流电流放大系数
α_{IIO}	集成运放输入失调电流温漂
α_{UIO}	集成运放输入失调电压温漂
β	共射电流放大系数
$\bar{\beta}$	共射直流电流放大系数

3. 其他符号

D	非线性失真系数
K	热力学温度
K_{CMR}	共模抑制比
M	互感系数
Q	品质因数
S	整流电路的脉动系数
S_r	稳压系数
T	周期, 温度
η	效率
τ	时间常数
φ	相位角

目 录

第 1 章 半导体器件	1
内容提要	1
1.1 半导体的特性	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 杂质半导体	2
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 PN 结及其单向导电性	4
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	7
1.2.4 稳压管	8
1.3 双极结型三极管	9
1.3.1 三极管的结构	10
1.3.2 三极管中载流子的运动和电流分配关系	11
1.3.3 三极管的特性曲线	13
1.3.4 三极管的主要参数	16
1.4 场效应三极管	18
1.4.1 结型场效应管	18
1.4.2 绝缘栅型场效应管	23
1.4.3 场效应管的主要参数	29
1.5 半导体器件 Multisim 仿真实例	30
本章小结	33
习题与思考题	34
Multisim 仿真练习题	38
第 2 章 放大电路的基本原理和分析方法	40
内容提要	40
2.1 放大的概念	40
2.2 放大电路的主要技术指标	41
2.3 单管共发射极放大电路	44

2.3.1	单管共发射极放大电路的组成	44
2.3.2	单管共发射极放大电路的工作原理	44
2.4	放大电路的基本分析方法	46
2.4.1	直流通路与交流通路	47
2.4.2	静态工作点的近似估算	47
2.4.3	图解法	48
2.4.4	微变等效电路法	56
2.5	静态工作点的稳定问题	63
2.5.1	温度对静态工作点的影响	63
2.5.2	分压式静态工作点稳定电路	64
2.6	双极型三极管放大电路的三种基本组态	67
2.6.1	共集电极放大电路	67
2.6.2	共基极放大电路	70
2.6.3	三种基本组态的比较	73
2.7	场效应管放大电路	75
2.7.1	共源极放大电路	76
2.7.2	分压-自偏压式共源极放大电路	79
2.7.3	共漏极放大电路	82
2.8	多级放大电路	84
2.8.1	多级放大电路的耦合方式	84
2.8.2	多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	91
2.9	基本放大电路 Multisim 仿真实例	92
	本章小结	100
	习题与思考题	101
	Multisim 仿真练习题	111
第3章	放大电路的频率响应	113
	内容提要	113
3.1	频率响应的一般概念	113
3.1.1	幅频特性和相频特性	113
3.1.2	下限频率、上限频率和通频带	113
3.1.3	频率失真	114
3.1.4	波特图	114
3.1.5	高通电路和低通电路	116
3.2	三极管的频率参数	120
3.2.1	共射截止频率	121
3.2.2	特征频率	122
3.2.3	共基截止频率	122