



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



模拟电子技术基础

哈尔滨工业大学电子学教研室 编

主 编 王淑娟 蔡惟铮 齐 明

副主编 于 泳 刘贵栋



高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



模拟电子技术基础

哈尔滨工业大学电子学教研室 编

主 编 王淑娟 蔡惟铮 齐 明

副主编 于 泳 刘贵栋



高等教育出版社

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。根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“模拟电子技术基础”课程教学基本要求编写。在保证基础的前提下,更新课程内容,介绍当代先进的电子技术知识;淡化内部电路的分析和计算,重点介绍典型电路的外特性和使用方法;采用戴维宁定理进行基本放大电路的静态分析;提出了三点式 LC 正弦波振荡电路相位平衡条件的判断规则;将科研实践中一些实用电路引入了教材,例如新增集成有源滤波器 MAX275、集成开关电容滤波器 MAX260 等应用电路;增加了电子电路计算机仿真软件(Multisim10.1)的介绍和仿真实例,提高学生分析问题和解决问题的能力。

教材的编写紧紧围绕信号的放大、运算、产生、处理与变换等内容进行。全书共 10 章,分别是绪论、半导体二极管及其基本应用电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、集成运算放大器的单元电路、集成运算放大器基本应用电路、放大电路中的反馈、信号发生电路、信号的处理与变换和直流电源。

本书可与哈尔滨工业大学杨春玲教授主编的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《数字电子技术基础》配套使用,作为高等院校电气信息、电子信息类专业模拟电子技术基础课程的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/王淑娟,蔡惟铮,齐明主编;哈尔滨工业大学电子学教研室编. —北京:高等教育出版社,2009.5

ISBN 978 - 7 - 04 - 026447 - 0

I. 模… II. ①王…②蔡…③齐…④哈… 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(2009)第 050702 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787 × 960 1/16
印 张 30.75
字 数 580 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 5 月第 1 版
印 次 2009 年 5 月第 1 次印刷
定 价 35.90 元

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 26447 - 00

前言

本书是根据教育部《电子技术基础课程教学基本要求》编写而成的普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是哈尔滨工业大学电子技术基础国家级精品课程教学研究和教学改革成果的凝练。

哈尔滨工业大学电子学教研室根据电子技术发展趋势,在总结电子技术基础精品课程后续建设经验的基础上,对以往教材内容做了修改和更新。将启发式教学、研究性教学和优秀生培养思路及成果融入新教材编写之中。本教材的编写紧紧围绕信号的放大、运算、产生、处理与变换等内容进行,其内容包括:绪论、半导体二极管及其基本应用电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、集成运算放大器的单元电路、集成运算放大器基本应用电路、放大电路中的反馈、信号发生电路、信号的处理与变换和直流电源。本教材具体特点如下:

1. 在每章引言中将本章内容以问题的形式提出,引导学生进行探究式学习,培养学生自主学习的能力,培养学生创新思维能力。在每章的小结中对引言中的问题给予了较精炼的解答,提炼了模拟电子技术基础中的基本概念、基本原理和基本方法。

2. 本教材在借鉴国内模拟电子技术基础教材优点的基础上,对传统教学内容进行了精选与整合,精简和优化经典的模拟电子技术基础知识,增加现代模拟电子技术知识的比重。在保证基础的前提下,更新课程内容,介绍当代先进的电子技术知识;进一步淡化内部电路的分析和计算,重点介绍典型电路的外特性和使用方法;采用戴维宁定理进行基本放大电路的静态分析;提出了三点式 LC 正弦波振荡电路相位平衡条件的判断规则。

3. 为了将教学与科研有机结合,充分发挥科研优势对本科教学的促进作用,将科研实践中一些实用电路引入本教材。例如,新增集成有源滤波器 MAX275、集成开关电容滤波器 MAX260、可控增益放大器 PGA204、功率放大器 LM3886 等应用电路。

4. 教材安排了适量的思考题、例题、自我检测和习题,以便帮助学生更好地理解模拟电子技术基础的基本概念、基本电路和基本方法。

5. 教材每章章末安排 2~3 个 Multisim 仿真实例,利于教师授课和学生学习。这些实例均为章内重点、难点内容。通过理论课、仿真实验和动手实验的有

机结合,能够帮助学生更好地理解教材内容,提高学生的学习兴趣,提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书由北京航空航天大学胡晓光教授审阅。她仔细阅读了书稿,指出了错误和不妥之处,并提出了详细的修改意见。在此对胡晓光教授的帮助和支持致以衷心的感谢!参加本教材编写工作的有王淑娟、蔡惟铮、齐明、于泳、刘贵栋、徐乐、陶隽源、吕超、王立欣、杨春玲、刘英、杨荣峰和朱敏等同志。由王淑娟、蔡惟铮、齐明任主编,于泳、刘贵栋任副主编。

由于我们的能力和水平有限,书中定有错误和不妥之处,恳请读者给予批评指正!

编者

于哈尔滨工业大学

2009年2月

符号说明

一、基本规定

1. 物理量的符号用英文或希腊文斜体,如 U 、 u 、 I 、 i 、 β 等。
2. 变化量用小写斜体,如 u 、 i 等;直流量、平均值、有效值用大写斜体。
3. 下标一般用正体,如 U_{CE} 、 U_O 、 I_L 、 R_e 等。
4. 用科学家名字命名的单位用大写正体,如 V、A、F、H、W、 Ω 、S、K 等;其他非科学家名字命名的单位用小写正体,如 s、m、g 等。
5. 单位前表示数量级的符号用正体,如 p(10^{-12})、n(10^{-9})、 μ (10^{-6})、m(10^{-3})、k(10^3)、M(10^6)、G(10^9) 等。
6. 专用名词、器件型号用大写正体,如 VT、VD、TTL、MOS、BJT、3DG100 等。
7. 三角函数如 $\sin$ 、 $\tan$,对数 $\log$ 、 $\ln$ 等用正体;常量,如 π 、 e 等用正体。
8. 双极型晶体管的管脚用 e、b、c;场效应管用 s、g、d。
9. 集成电路的引脚名称,一般为正体。

二、直流、交流、交直流量的含义

1. U_{CE} 、 U_{BE} 、 U_{DS} 、 U_{GS} 表示器件相应电极之间的直流电压。
2. u_{ce} 、 u_{be} 、 u_{ds} 、 u_{gs} 表示器件相应电极之间的交流电压。
3. u_{CE} 、 u_{BE} 、 u_{DS} 、 u_{GS} 表示器件相应电极之间的交、直流总电压。
4. ΔU 、 ΔI 表示直流变化量; Δu 、 Δi 表示交流变化量。
5. U_C 、 U_B 、 U_E 、 U_D 、 U_G 、 U_S 表示器件相应电极对地的直流电位。
6. U_{CEQ} 、 U_{BEQ} 、 U_{DSQ} 、 U_{GSQ} 表示器件相应电极之间的静态工作点电压。
7. I_{CQ} 、 I_{BQ} 、 I_{DQ} 表示器件相应电极中的静态工作点电流。

三、基本符号

1. 电压和电流

U 、 u

电压通用符号

I 、 i

电流通用符号

$\dot{U}_i$ 、 u_i

输入电压复数量、交流输入电压

$\dot{U}_s$ 、 u_s

信号源电压复数量、信号源交流电压

$\dot{U}_o$ 、 u_o

输出电压复数量、交流输出电压

u_i 、 u_o

输入电压、输出电压(含交流和直流)

$\dot{U}_f, u_f$	反馈电压复数量、交流反馈电压
$\dot{X}_i, \dot{X}_f, \dot{X}'_i$	反馈电路中的输入信号、反馈信号和净输入信号
$\dot{U}'_i$	反馈放大电路中的净输入电压
$U_1, \dot{U}_1$	变压器一次侧交流电压有效值、一次侧交流电压复数量
$U_2, \dot{U}_2$	变压器二次侧交流电压有效值、二次侧交流电压复数量
U_{TH}	电压比较器的阈值电压
U_{OH}	电压比较器的输出高电平
U_{OL}	电压比较器的输出低电平
U_Z	稳压二极管的稳定电压
u_{id}	差模输入电压
u_{ic}	共模输入电压
U_{I0}, I_{I0}	输入失调电压、输入失调电流
I_{IB}	输入偏置电流
$\Delta U_{I0}/\Delta T, \Delta I_{I0}/\Delta T$	输入失调电压温漂、输入失调电流温漂
U_{Idmax}, U_{Icmax}	最大差模输入电压、最大共模输入电压
U_{REF}	参考电压
2. 电源	
V_{CC}	双极型晶体管电路的集电极直流电源
V_{EE}	双极型晶体管电路的发射极直流电源
V_{BB}	双极型晶体管电路的基极直流电源
V_{DD}	场效应管电路的漏极直流电源
V_{SS}	场效应管电路的源极直流电源
V_{REF}	参考电压源
3. 功率	
P	功率通用符号
p	瞬时功率
P_o	交流输出功率
P_0	静态功耗
P_C	集电极功耗
P_D	漏极功耗

P_T	晶体管功耗
P_V	直流电源功耗
4. 频率	
f, F	频率通用符号
ω	角频率
f_L	下限截止频率
f_H	上限截止频率
BW	通频带
f_0	谐振频率、切割频率、中心频率
f_c	临界频率
f_p	极点频率
5. 电阻、电导、电容、电感	
R	电阻
C	电容
G	电导
L	电感
R_i	输入电阻
R_L	负载电阻
R_o	输出电阻
R_s	信号源内阻
6. 放大倍数、增益	
$\dot{A}$	放大倍数通用符号
$\dot{A}_u$	电压放大倍数、电压增益
$\dot{A}_i$	电流放大倍数、电流增益
A_p	功率放大倍数、功率增益
$\dot{A}_f$	反馈放大倍数、反馈增益
$\dot{A}_{ui}$	互阻放大倍数、互阻增益
$\dot{A}_{iu}$	互导放大倍数、互导增益
$\dot{F}_u, \dot{F}_{uu}$	电压反馈系数
$\dot{F}_i, \dot{F}_{ii}$	电流反馈系数
$\dot{F}_{ui}$	互阻反馈系数

$\dot{F}_{iu}$

互导反馈系数

四、器件参数符号

1. 二极管

 C_b

PN 结的势垒电容

 C_d

PN 结的扩散电容

 C_j

PN 结的结电容

 D 、 VD

二极管

 D_Z 、 VD_Z

稳压二极管

 n_i

电子浓度

 p_i

空穴浓度

 I_F

二极管最大整流电流

 I_R

二极管的反向电流

 I_S

二极管的反向饱和电流

 $I_{D(AV)}$

二极管的整流平均电流

 I_D

二极管正向电流

 U_T

温度的电压当量

 $U_{O(AV)}$

输出电压平均值

 U_D

二极管正向电压

 U_{BR}

二极管反向击穿电压

 U_{RM}

二极管最大反向工作电压

 U_F

二极管在额定正向电流条件下的正向电压降

 r_d

二极管动态电阻

 α_{U_D}

二极管正向电压温度系数

2. 双极型晶体管

 T 、 VT

晶体管、三极管

 α 、 $\bar{\alpha}$

共基极交流电流放大系数、直流电流放大系数

 β 、 $\bar{\beta}$

共射极交流电流放大系数、直流电流放大系数

 β_s

饱和区电流放大系数

 I_{CBO}

发射极开路时 b-c 间的反向电流

 I_{CEO}

基极开路时 c-e 间的穿透电流

 I_{CM}

集电极最大电流

 P_{CM}

集电极最大功耗

$r_{bb'}$	基区体电阻
U_{CES}	晶体管饱和压降
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时的 C、B 间的击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时的 C、E 间的击穿电压
$U_{(BR)CER}$	基极与发射极间接电阻时的 C、E 间的击穿电压
$U_{(BR)CES}$	基极与发射极间短路时的 C、E 间的击穿电压
$U_{(BR)BEO}$	集电极开路时的 B、E 间的击穿电压
f_T	特征频率
f_β	共射截止频率
f_α	共基截止频率
C_π	晶体管发射结电容
C_μ	晶体管集电结电容
3. 场效应晶体管	
T、VT	场效应晶体管
g_m	低频跨导
I_{DO}	增强型 MOS 管 $U_{GS} = 2U_{GS(off)}$ 时的漏极电流
I_{DSS}	结型场效应管 $U_{GS} = 0V$ 时的漏极电流
$U_P/U_{GS(off)}$	夹断电压
$U_T/U_{GS(th)}$	开启电压
4. 运算放大器、模拟乘法器	
$U_+、U_P、u_+、u_P$	运算放大器同相输入端电压
$U_-、U_N、u_-、u_N$	运算放大器反相输入端电压
A_{ud}	开环差模电压放大倍数
r_{id}	差模输入电阻
K_{CMR}	共模抑制比
$BW_G(f_T)$	单位增益带宽
S_R	转换速率(压摆率)
K	模拟乘法器的比例系数
五、其他	
$^{\circ}C$	摄氏度
K	热力学温度单位, 开氏度
D	非线性失真系数, 占空比
Q	静态工作点、品质因数
S	脉动系数

T	周期、温度
η	效率
φ	相位角
τ	时间常数
θ	导通角

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电信号	2
1.3 模拟电路和数字电路	2
1.4 模拟电子技术基础课程	3
1.4.1 模拟电子技术基础课程的特点	3
1.4.2 如何学习模拟电子技术基础课程	3
1.5 电子电路仿真分析与设计软件 Multisim 简介	4
第 2 章 半导体二极管及其基本应用电路	6
2.1 引言	6
2.2 半导体基础知识	6
2.2.1 本征半导体	7
2.2.2 杂质半导体	8
思考题	9
2.3 PN 结	10
2.3.1 PN 结的形成	10
2.3.2 PN 结的单向导电性	11
2.3.3 PN 结的伏安特性	12
2.3.4 PN 结的电容效应	13
思考题	14
2.4 半导体二极管	14
2.4.1 二极管的结构类型	15
2.4.2 二极管的伏安特性	15
2.4.3 二极管的主要参数	17
2.4.4 二极管的等效模型	18
2.4.5 二极管基本应用电路	21
思考题	23
2.5 稳压二极管	23
2.5.1 稳压二极管的伏安特性	23
2.5.2 稳压二极管的主要参数	24
2.5.3 稳压二极管稳压电路	25

思考题	27
2.6 其他类型二极管	28
思考题	30
2.7 二极管特性的仿真研究	30
2.7.1 二极管的单向导电性仿真研究	30
2.7.2 稳压二极管稳压电路限流电阻的确定	31
本章小结	32
自我检测	33
习题	35
第3章 双极型晶体管及其基本放大电路	38
3.1 引言	38
3.2 双极型晶体管	38
3.2.1 晶体管的结构及类型	38
3.2.2 晶体管的三种组态	39
3.2.3 晶体管的电流放大作用	40
3.2.4 晶体管的共射特性曲线	41
3.2.5 晶体管的主要参数	43
3.2.6 晶体管的温度特性	46
3.2.7 晶体管的型号及封装	46
思考题	48
3.3 放大的概念和放大电路的性能指标	48
3.3.1 放大的概念	48
3.3.2 放大电路的性能指标	49
思考题	51
3.4 共射基本放大电路的组成及工作原理	52
3.4.1 共射基本放大电路的组成	52
3.4.2 共射基本放大电路的工作原理	53
思考题	55
3.5 基本放大电路的分析方法	55
3.5.1 图解法	55
3.5.2 微变等效电路法	61
思考题	69
3.6 晶体管三种组态基本放大电路	69
3.6.1 共射基本放大电路	70
3.6.2 共集基本放大电路	74
3.6.3 共基基本放大电路	77
3.6.4 三种组态晶体管基本放大电路的性能比较	79

思考题	80
3.7 放大电路的频率响应	81
3.7.1 频率响应的基本概念	81
3.7.2 一阶 RC 电路的频率响应	82
3.7.3 双极型晶体管的高频小信号模型	84
3.7.4 共射基本放大电路的频率响应	88
思考题	91
3.8 晶体管基本放大电路的仿真研究	91
3.8.1 共射基本放大电路的仿真研究	91
3.8.2 共集基本放大电路的仿真研究	95
本章小结	99
自我检测	100
习题	106
第4章 场效应管及其基本放大电路	111
4.1 引言	111
4.2 场效应管	111
4.2.1 绝缘栅场效应管	112
4.2.2 结型场效应管	116
4.2.3 场效应管的主要参数和型号	120
4.2.4 双极型晶体管和场效应管的比较	122
思考题	123
4.3 场效应管基本放大电路	123
4.3.1 场效应管共源基本放大电路	123
4.3.2 场效应管共漏基本放大电路	128
4.3.3 场效应管共栅基本放大电路	131
4.3.4 双极型晶体管和场效应管基本放大电路的比较	132
4.3.5 场效应管基本放大电路的频率响应	132
思考题	134
4.4 场效应管基本放大电路的仿真研究	135
本章小结	138
自我检测	139
习题	140
第5章 集成运算放大器的单元电路	143
5.1 引言	143
5.2 集成运算放大器概述	144
5.2.1 集成运放的组成	144
5.2.2 集成运放的符号和电压传输特性	144

思考题	145
5.3 多级放大电路	146
5.3.1 多级放大电路的耦合方式	146
5.3.2 零点漂移	149
5.3.3 直接耦合放大电路的电位移动	150
5.3.4 多级放大电路电压放大倍数的计算	151
思考题	154
5.4 集成运算放大器中的电流源	154
5.4.1 电流源	154
5.4.2 恒流源作为有源负载的放大电路	158
思考题	159
5.5 差分放大电路	159
5.5.1 差分放大电路的组成	159
5.5.2 差分放大电路的输入和输出方式	159
5.5.3 差模信号和共模信号	160
5.5.4 差分放大电路的静态分析	162
5.5.5 差分放大电路的差模动态分析	163
5.5.6 差分放大电路的共模动态分析	167
5.5.7 恒流源差分放大电路	170
思考题	171
5.6 互补功率放大电路	172
5.6.1 概述	172
5.6.2 乙类互补功率放大电路	174
5.6.3 单电源互补功率放大电路	179
5.6.4 复合管	179
思考题	181
5.7 集成运算放大器的参数和种类	181
5.7.1 集成运算放大器的参数	181
5.7.2 集成运算放大器的种类及选择	183
思考题	187
5.8 集成运算放大器的使用注意事项	187
思考题	188
5.9 差分放大电路和功率放大电路的仿真研究	189
5.9.1 差分放大电路的仿真研究	189
5.9.2 功率放大电路的仿真研究	192
本章小结	195
自我检测	196
习题	200

第 6 章 集成运算放大器基本应用电路	205
6.1 引言	205
6.2 理想运算放大器	205
6.2.1 理想运放的技术指标	205
6.2.2 理想运放工作在线性区和非线性区的特点	206
思考题	207
6.3 比例运算电路	207
6.3.1 反相比例运算电路	208
6.3.2 同相比例运算电路	209
6.3.3 差分比例运算电路	210
思考题	211
6.4 加减运算电路	212
6.4.1 反相输入求和电路	212
6.4.2 同相输入求和电路	212
6.4.3 减法运算电路	213
思考题	214
6.5 积分和微分运算电路	214
6.5.1 积分运算电路	214
6.5.2 微分运算电路	217
思考题	218
6.6 对数和指数运算电路	218
6.6.1 对数运算电路	218
6.6.2 指数运算电路	219
思考题	219
6.7 电压比较器	220
6.7.1 单限比较器	220
6.7.2 滞回比较器	222
6.7.3 窗口比较器	226
6.7.4 集成电压比较器	227
思考题	231
6.8 运算放大器基本应用电路的仿真研究	231
6.8.1 积分运算电路的仿真研究	231
6.8.2 三种电压比较器的仿真研究	233
本章小结	235
自我检测	236
习题	240
第 7 章 放大电路中的反馈	246

7.1 引言	246
7.2 反馈的基本概念	246
思考题	247
7.3 反馈的判断方法	247
思考题	250
7.4 反馈的基本方程式	250
思考题	252
7.5 四种负反馈放大电路的分析	252
7.5.1 电压串联负反馈放大电路	252
7.5.2 电压并联负反馈放大电路	254
7.5.3 电流串联负反馈放大电路	256
7.5.4 电流并联负反馈放大电路	258
思考题	262
7.6 负反馈对放大电路性能的影响	262
7.6.1 提高增益的稳定性	262
7.6.2 改变输入电阻	263
7.6.3 改变输出电阻	264
7.6.4 展宽频带	266
7.6.5 抑制非线性失真和环内噪声	267
7.6.6 引入负反馈的原则	267
思考题	268
7.7 负反馈放大电路的自激振荡及消除	268
7.7.1 负反馈放大电路产生自激振荡的原因及条件	268
7.7.2 判断负反馈放大电路产生自激振荡的方法	269
7.7.3 自激振荡的消除	271
思考题	272
7.8 放大电路中其他形式的反馈	273
7.8.1 自举电路	273
7.8.2 电流反馈运算放大电路	274
思考题	277
7.9 负反馈放大电路的仿真研究	277
本章小结	281
自我检测	282
习题	286
第8章 信号发生电路	291
8.1 引言	291
8.2 正弦波振荡电路组成及振荡条件	291