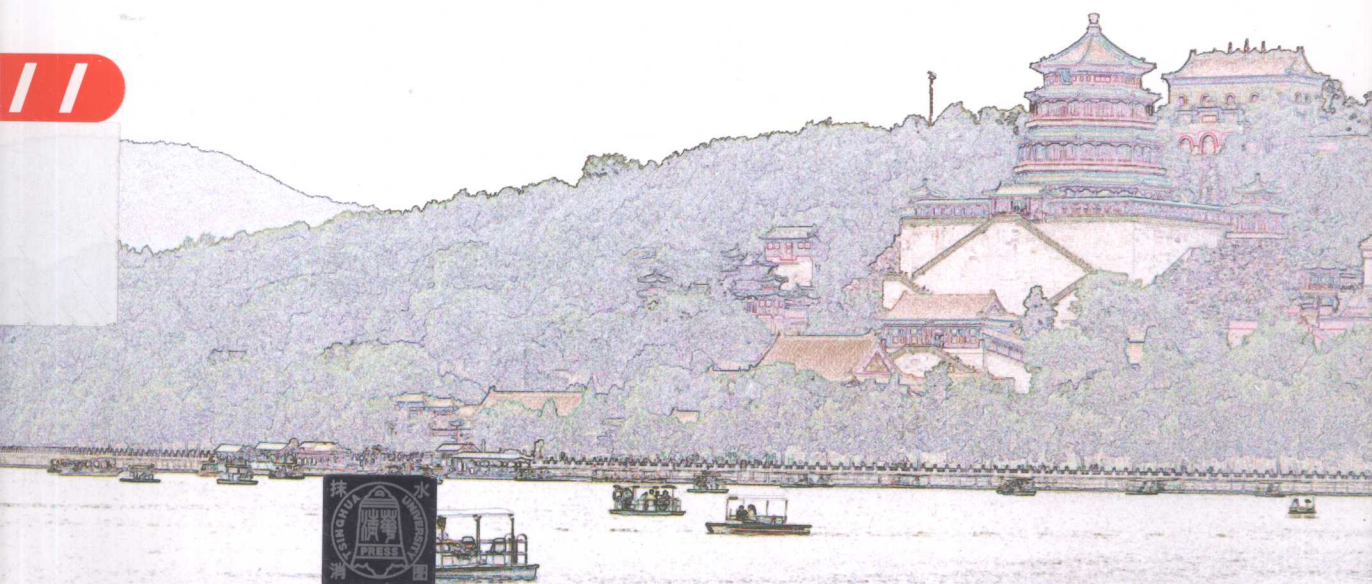


全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

模拟电子技术

(修订版)

元增民 编著



清华大学出版社

014006811

TN710-43
95-2

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

模拟电子技术

(修订版)

元增民 编著



TN710-43
95-2



北航

C1690135

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍 BJT 和 FET 两种半导体器件,包括放大、反馈、滤波、振荡四大模块。本书特点是层次清晰重点突出,如工作点分为内涵与外延;有来有去逻辑性强,如根据输出电压摆幅最大要求寻求临界工作点;分析计算力求定量,如对工作点稳定性的分析一改历来的定性分析,实现定量设计;电路分析透彻周到,如对放大器的一参数九指标分析计算齐全;详略得当深浅有序,如介绍三极管时,以讲透三极管三特性为宜,如介绍集成放大器工作原理时,以讲清三项关键技术——差分放大、电流镜和有源负载技术为宜;连接孤岛融会贯通,如根据方波的梯形畸变来计算运放芯片的压摆率;抓住要害有的放矢,如针对削平失真、上半部分矮胖下半部分瘦长非线性失真及交越失真三大几何失真进行放大器、振荡器的设计。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/元增民编著.一修订版.一北京:清华大学出版社,2013

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-33938-0

I. ①模… II. ①元… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 220361 号

责任编辑:文 怡 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:27

字 数:667 千字

版 次:2013 年 10 月第 1 版

印 次:2013 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:44.50 元

产品编号:054145-01

第一版前言

模拟电子技术进入大学课堂已近 50 年。模拟电子学理论虽然已经初具整体框架,但细节上还不够完善。工业上很多问题是由商业机密解决的。专业教育很难回避理论欠缺的问题。模拟电子技术,教师感到难教,学生感到难学。模电被戏称为魔电,模电课程被戏称为名补。

现在的模拟电子学理论缺陷包括理论空白、方法无效、计算错误,导致了一些问题甚至有电路结构错误这样的问题。理论空白莫过于,晶体管放大器基(栅)极偏置电阻都是凭经验给定,没有任何分析计算方法可言,致使所获得的最大输出摆幅参差不齐,最低只达到应有最大值的 60%。方法无效莫过于,基于晶体管输出特性曲线的放大器图解分析法,洋洋洒洒几十页,剑指最佳工作点和输出范围,但是最后一无所获,因而已经开始被抛弃。分析错误莫过于,权威著作双 T 振荡器振荡频率计算误差竟然高达 30%。电路结构错误莫过于,权威著作把 78XX 扩流电路所用大功率三极管位置及极性双双颠倒。

研究模拟电子学理论,改进模拟电子技术教科书,利于当代,功在千秋。工程师写书往往受到理论不全的束缚,教师写书往往受到实践经验少的影响。作者作为高级工程师在工厂一线工作多年,作为教授在学校一直站在讲台。双师型作者写书,具有得天独厚的优势。

作者的理论研究和教科书改革主要表现在以下几方面。

- (1) 一方面强调特性曲线是追踪器件工作的金钥匙,另一方面又注意不滥用;
- (2) 理顺逻辑关系,明确来龙去脉,典型如 $I_b \rightarrow I_c \rightarrow U_{rc} \rightarrow U_{cc}$, U_{cc} 又制约 I_b 的增长;
- (3) 根据输出范围最大要求,科学确定临界工作点及基(栅)极偏置电阻;
- (4) 建立工作点内涵外延概念,有的放矢,使工作点稳定性实现定量分析计算;
- (5) 客观抽象出相减反馈、相加反馈、单通道反馈与双通道反馈等概念;
- (6) 着眼发展,依照共源、共漏、共栅三种组态,系统地介绍 FET 放大器;
- (7) 系统地计算 BJT 及 FET 三种组态放大器及差分放大器的十项技术指标;
- (8) 用多种方法解决同一问题,如用两种方法同时解决双 T 振荡器频率的计算。

本书理论部分大约需要 72 学时,前 10 章为理论部分,穿插介绍了很多实验,第 11 章为实验指导书,收录了 16 项模拟电子技术实验,每项实验按照 2 学时编排。

国防科技大学刘文彦、清华大学王宏宝、王敏稚,以及陈有卿等同志,长沙大学教务处、科研处等都对作者给予了支持,国家级教学名师、西安电子科技大学孙肖子教授审阅了书稿并提出了宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

本书备有电子课件,登录中国电力出版社 jc.cepp.sgcc.com.cn 即可免费下载。

作者的工作颇具挑战性和开创性,但因条件及水平局限,不足之处还望大家不吝指正。意见请发到 yzm@ccsu.cn。

作 者

2009 年仲夏于长沙浏阳河畔

第二版前言

本书第一版原本由作者与清华大学出版社签订出版合同,于2008年开始筹备。书稿在责编王敏稚老师的悉心指导下完成后,因故于2009年改由中国电力出版社出版。第二版改由清华大学出版社出版。

本书的使用反馈表明,第一版的编写思想是积极的,采取措施是得力的,选用方法是有效的,使用效果是明显的。本书应用于教学,为改善教学效果做出了明显贡献。作者使用新体系模拟电子技术教科书,再加上采取自制自备实验器材在课堂上随讲随练等积极措施,实验课不再拖堂,所任教的模拟电子技术及相关课程考试及格率已连续五年保持在95%以上。作者由此获得所在学校、相关系部及连续多届学生的高度好评。在网上评教中,学生赞誉本书作者为“人民的好老师”。

第二版继承了第一版的指导思想和整体构架,章节布局风貌依然。本次修订的主要目的是融进作者四年来的研究进展,并认真采纳读者的建议和意见,进行如下改进。

- (1) 将长篇公式的推证作为附录列在书后,以更好地满足各层次教学和读者的需要。
- (2) 讲解越加形象,如用水在不同高度上的分布形容电子在不同能级上的分布。
- (3) 传统BJT输入特性及输出特性曲线的纵轴为电流、横轴为电压,伏安特性曲线成了安伏特性曲线,用其判断动态电阻,思维曲折,令人郁闷。根据学生建议,改为电压纵轴、电流横轴,伏安特性曲线名正言顺,用以判断动态电阻直观明了。
- (4) 强调在器件数理模型中注意电压电流方向的关系,夯实建立等效电路的基础。
- (5) 注意抓主要矛盾,理清纷乱的头绪。如在三极管三特性——输入特性、传输特性、输出特性中,强调传输特性是BJT的第一特性,电流放大倍数 β 值是第一参数。
- (6) 增加介绍了FET高频数理模型,为讨论FET放大器高频特性打下基础。
- (7) 将作者的电容耦合功放专利成果编入书中,充实功率放大器内容。
- (8) 明确差分放大器有双输出和单输出两种模式,并就两种模式展开分析计算。
- (9) 进一步强化分析计算,如精密电流接力棒的像电流与基准电流的接力计算。
- (10) 增加用双通道复合反馈理论分析计算4~20mA电流源电路的实用内容。
- (11) 追踪新动态增加新内容,如增加电容降压整流、低压差稳压器LDO。
- (12) 连接孤岛,融会贯通。如将方波发生器实验所观测的梯形畸变用于分析 $\mu\text{A}741$ 芯片的压摆率,计算结果与datasheet所公布的原始数据几乎一致。

本书备有电子课件,登录清华大学出版社 www.tup.tsinghua.edu.cn 可免费下载。

以尽致的文字、严密的逻辑、合时的题材、丰富的内涵服务社会,是作者编写本书的宗旨。但因认识局限,不足之处还望大家多多指正。意见请发到 yzm@ccsu.cn。

作 者

2013年春于长沙浏阳河畔

主要符号表

1. 专用下标

s: 信号或 FET 源极;
g: FET 栅极;
d: FET 漏极;
b: BJT 基极;
c: BJT 集电极;
e: BJT 发射极;
r: 电阻;
i: 输入;
o: 输出, 负载;
m: 电流或电压幅度。

2. 专用符号

β : BJT 电流放大倍数;
 g_m : FET 跨导;
 θ : BJT 电流放大倍数 β 值的温度系数;
 λ : 集电极偏置电流的温度系数;
 ξ : 集-射极偏置电压的温度系数;
 σ : 输出范围的温度系数。

3. 带下标的参量

R_b : BJT 基极外接偏置电阻;
 R_c : BJT 集电极外接安伏变换器;
 R_e : BJT 发射极外接反馈电阻;
 R_g : FET 栅极外接偏置电阻;
 R_d : FET 漏极外接安伏变换器;
 R_s : FET 源极外接反馈电阻;
 R_L : 放大电路负载电阻;
 r_{be} : BJT 发射结电阻(b、e 动态电阻);
 r_{ce} : BJT 输出电阻(c、e 动态电阻);
 r_{ds} : FET 输出电阻(d、s 动态电阻);

r_i : 放大电路的输入电阻;
 r_o : 放大电路的输出电阻;
 r_s : 信号源内阻;
 $\dot{E}_s$: 信号源电动势相量, E_s 为其有效值;
 $\dot{I}_s$: 信号源瞬时总电流, I_s 为其有效值;
 i_b : BJT 基极瞬时总电流;
 i_c : BJT 集电极瞬时总电流;
 i_e : BJT 发射极瞬时总电流;
 i_d : FET 漏极瞬时总电流;
 i_r : 某电阻瞬时总电流;
 I_b, I_c, I_e, I_d : 直流偏置电流;
 $I_{c(cr)}, I_{e(cr)}, I_{d(cr)}$: 直流偏置电流临界值;
 I_{dss0} : 零电阻零栅压漏极电流;
 I_{dss} : 零栅压漏极电流;
 u_{ce} : BJT 集-射极电压瞬时值;
 U_{ce} : BJT 集-射极偏置电压;
 $U_{ce(cr)}$: BJT 集-射极偏置电压临界值;
 u_{ds} : FET 漏-源极电压(降)瞬时值;
 U_{ds} : FET 漏-源极偏置电压;
 $U_{ds(cr)}$: FET 漏-源极偏置电压临界值;
 $\dot{U}_o$: 负载电压(相量);
 U_o : 负载电压有效值;
 U_{om} : 负载电压幅度;
 $U_{om(max)}$: 负载电压的最大幅度(动态范围);
 $\dot{I}_o$: 负载电流(相量);
 A_u : 源电压放大倍数;
 A_{uz} : 放大电路自身电压放大倍数;
 A_i : 电流放大倍数;
 A_p : 功率放大倍数。

目 录

第一版前言	i
第二版前言	iii
主要符号表	v
绪论	1
第 1 章 晶体管	6
1.1 半导体 PN 结与晶体二极管数理模型	6
1.1.1 半导体	6
1.1.2 PN 结的扩散势及其内电场	10
1.1.3 PN 结(二极管)数理模型	13
1.2 晶体二极管种类、参数及应用	16
1.3 晶体三极管原理及数理模型	23
1.3.1 背靠背的 PN 结——三极管工作原理	23
1.3.2 三极管三特性	25
1.3.3 三极管数理模型	31
1.4 三极管的技术参数及测试应用	35
1.4.1 三极管的技术参数	35
1.4.2 三极管的测试鉴别	38
1.4.3 三极管的产品形态	40
1.4.4 三极管的封装应用	43
本章小结	45
习题 1	46
第 2 章 场效管	49
2.1 结型场效管(JFET)	49
2.1.1 JFET 的工作原理	49
2.1.2 JFET 的传输特性	51
2.1.3 JFET 的输出特性	55
2.1.4 JFET 的数理模型及技术参数	56
2.2 金属氧化物半导体场效管(MOSFET)	62
2.2.1 金属氧化物半导体场效管	62
2.2.2 各种 FET 及其与 BJT 的综合对比	66

本章小结	69
习题 2	70
第 3 章 晶体管基本放大电路	72
3.1 基本共射放大器的工作原理	72
3.1.1 用直流器件放大交流信号的原理	72
3.1.2 基极偏置电阻与削波失真	75
3.1.3 临界工作点与输出范围	78
*3.2 基本共射放大器元器件的功耗与电路效率	82
3.3 基本共射放大器的频率特性函数与交流参数	86
3.4 基本共射放大器的频率特性	91
3.4.1 单位频率特性函数	92
3.4.2 频带参数与耦合电容	94
3.4.3 对数频率特性——波德图	97
3.5 分压偏置共射放大电路的工作原理	99
3.5.1 临界工作点及极限参数分析计算与实验	99
3.5.2 频率特性函数与交流参数	102
3.6 分压偏置放大器工作点的稳定性分析与设计	104
3.6.1 工作点影响因子与温度系数	104
3.6.2 基极偏置电阻的设计计算与实验	108
3.7 共集放大器(射极输出器,电压跟随器)	113
3.7.1 工作点及其稳定效果	114
3.7.2 频率特性及交流参数	115
3.8 共基放大电路(电流跟随器)	120
3.8.1 直流通路及交流通路	120
3.8.2 技术参数分析计算与实验	121
3.8.3 输出幅度定理及其应用	127
3.9 放大器工作点及输出范围的图解分析	127
3.9.1 基本共射放大器与射随器的图解分析	128
3.9.2 分压偏置放大器的图解分析	131
3.9.3 共基放大电路的图解分析	132
本章小结	134
习题 3	136
第 4 章 场效应管基本放大电路	140
4.1 栅极无偏置共源放大器	140
4.1.1 漏极偏置电阻与输出范围	140
4.1.2 交流参数	143

4.2	分压偏置共源放大器	144
4.2.1	工作点与输出范围	144
4.2.2	工作点稳定系数与栅极偏置电阻	145
4.2.3	中低频率特性函数与交流参数	146
4.3	共漏放大器(源极输出器)	150
4.3.1	工作点与输出范围	150
4.3.2	交流参数与中低频率特性函数	152
4.4	栅极无偏置共栅放大器(电流缓冲器)	154
4.5	分压偏置共栅放大器(电流缓冲器)	156
	本章小结	158
	习题 4	159
第 5 章	多级放大器及功率放大器	162
5.1	放大器级间耦合方式及磁耦合放大器	162
5.1.1	放大器级间耦合方式	162
5.1.2	磁耦合放大器	163
5.2	多级放大器的技术参数与频率特性	169
5.2.1	电压放大倍数与频率特性	169
5.2.2	输入输出电阻及工作点	173
5.3	乙类及甲乙类互补功率放大器	178
5.3.1	种类及工作原理	179
5.3.2	乙类功率放大器的技术参数指标	181
5.4	电容耦合互补功率放大器	184
	本章小结	187
	习题 5	188
第 6 章	差分放大与集成放大电路	191
6.1	基本差分放大电路	191
6.1.1	差分放大电路的基本概念与工作点	191
6.1.2	电压放大倍数及共模抑制比	193
6.2	长尾差分放大电路	194
6.2.1	BJT 长尾差分放大电路偏置设计	194
6.2.2	电压放大倍数及共模抑制比	198
6.2.3	输出模式对共模抑制比的影响	201
6.2.4	FET 长尾差分放大电路	205
6.3	电流源偏置差分放大电路	206
6.3.1	电流源偏置差分放大电路的工作原理与工作点设计	206
6.3.2	电压放大倍数及共模抑制比	208

6.4	电流镜及电流镜偏置差分放大器	208
6.4.1	BJT 镜像电流源及电流镜偏置差分放大器	208
6.4.2	FET 镜像电流源(电流接力棒)	213
6.5	有源负载差分放大电路	214
6.5.1	BJT 有源负载差分放大电路	214
6.5.2	FET 有源负载差分放大电路	219
6.6	从分立放大电路到集成放大电路的发展	220
6.7	集成运算放大器	222
6.7.1	集成运算放大器典型产品	222
6.7.2	集成运算放大器的技术参数及其分类	227
6.8	集成功率放大器	231
	本章小结	232
	习题 6	234
第 7 章	反馈原理	237
7.1	反馈的概念及分类	237
7.1.1	反馈的概念	237
7.1.2	反馈的分类及组态	239
7.2	反馈的极性及反馈的作用	243
7.2.1	反馈的极性	243
7.2.2	反馈的作用	244
7.3	分立放大器反馈分析	246
7.3.1	分压偏置放大器反馈分析	246
7.3.2	自偏置(相加反馈)放大器分析	249
7.3.3	双级负反馈放大器反馈分析	251
7.4	集成运算放大器反馈分析计算	253
7.4.1	集成运算放大器闭环应用的误差分析	253
7.4.2	集成运算放大器工程应用的分析计算方法	255
	本章小结	259
	习题 7	261
第 8 章	集成运算放大器的应用	263
8.1	集成运算放大器的线性应用(1)	263
8.1.1	比例及加减法运算	263
8.1.2	微分及积分运算	266
8.2	集成运算放大器的线性应用(2)	268
8.2.1	对数运算与反对数运算	268
8.2.2	模拟乘法器、除法器及开方器	269

8.2.3 有源滤波	270
8.3 集成运算放大器的线性应用(3)	273
8.3.1 4~20mA 电流发生器	273
8.3.2 测量放大器	275
8.3.3 数模转换器	279
8.4 集成运算放大器的非线性应用	281
8.4.1 单限比较器	281
8.4.2 滞后比较器	283
8.5 集成运算放大器的使用技巧	284
8.5.1 锁零电路	284
8.5.2 保护电路、调零电路及防振电路	287
本章小结	288
习题 8	289
第 9 章 振荡电路	293
9.1 自激振荡原理及振荡电路	293
9.1.1 自激振荡原理	293
9.1.2 振荡电路基本类型	295
9.2 振荡电路中常用的谐振滤波器	297
9.2.1 振荡电路中常用的带通滤波器	298
9.2.2 振荡电路中常用的带阻滤波器	301
9.3 分立元件振荡电路	304
9.3.1 电容三点式振荡电路(科比兹振荡器)	304
9.3.2 电感三点式振荡电路(哈特莱振荡器)	306
9.3.3 其他分立元件振荡电路	307
9.4 石英晶体振荡电路	308
9.5 文氏电桥集成振荡电路	311
9.6 双 T 网络集成振荡电路	315
9.7 非正弦波振荡电路	318
9.7.1 矩形波振荡器	318
9.7.2 三角波振荡电路与锯齿波振荡电路	321
本章小结	324
习题 9	326
第 10 章 直流稳压电源	329
10.1 整流电路	329
10.1.1 单相半波整流电路	329
10.1.2 单相全波整流电路	330

10.1.3	单相桥式整流电路	331
10.1.4	电容降压整流电路	332
10.1.5	倍压整流电路	333
10.2	滤波电路	334
10.3	串联稳压电源	337
10.3.1	串联稳压电路的工作原理	337
10.3.2	集成稳压器产品及应用电路	338
10.4	开关稳压电源	342
	本章小结	344
	习题 10	345
第 11 章	模拟电子技术实验	347
11.1	基本共射放大器实验	347
11.2	分压偏置共射放大器实验	349
11.3	基本共集放大器(射极输出器)实验	351
11.4	基本共基放大器实验	353
11.5	栅极无偏置 JFET 及 DMOSFET 共源放大器实验	354
11.6	分压偏置 EMOSFET 共源放大器实验	355
11.7	基本共漏放大器(源极输出器)实验	356
* 11.8	分压偏置 EMOSFET 共栅放大器实验	358
11.9	双级负反馈放大器实验	359
11.10	电容耦合 BJT 互补功率放大器实验	360
11.11	差分放大器实验	363
11.12	有源负载差分放大器实验	365
11.13	集成运算放大器线性运算系列实验	366
11.14	文氏电桥振荡电路系列实验	369
* 11.15	双 T 电桥振荡电路系列实验	372
11.16	矩形波振荡电路实验	374
11.17	三角波与锯齿波振荡电路实验	375
11.18	直流稳压电源设计与制作	376
附录 A	常用元器件识别及仪器仪表操作要领	378
附录 B	公式推导及微分方程列解过程	386
附录 B.1	基本共射放大器有关公式的推导过程	386
附录 B.2	分压偏置共射放大器偏置及摆幅公式的推导过程	388
附录 B.3	共基放大器源电压放大倍数的推证过程	389
附录 B.4	无偏置共源放大器临界偏置条件的推证过程	391

附录 B.5 共栅放大器有关公式的推证过程	392
附录 B.6 基本差分放大器有关公式的推证过程	394
附录 B.7 文氏电桥集成振荡电路微分方程的列解过程	395
附录 B.8 双 T 电桥集成振荡电路微分方程的列解过程	399
 附录 C 多功能电子电路仿真平台 Multisim 应用入门	 402
 部分习题参考答案	 408
 参考文献	 413

绪 论

1. 一个世纪以来电子技术的发展

1897年,英国的J.J.汤姆逊发现了电子,使人类对物质的认识发展到更深的层次。

1900年,意大利的马可尼和俄罗斯的波波夫首次实现了无线电通信。

1904年,英国的弗莱明(John A. Fleming)发明了真空电子二极管。

1907年,美国的德弗雷斯特发明了真空电子三极管(电子管)。

1936年,英国的Esiler提出印制电路的概念,但被冷落。后来由美国抢先制造出印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)用于军事领域。Esiler被称为“印制电路之父”。

1947年,美国贝尔实验室(Bell Lab.)的肖克莱、巴丁、布拉顿发明了晶体管(BJT)。

1960年,美国贝尔实验室(Bell Lab.)的D. Kahng和Martin Atalla发明了场效应管(FET)。

1960年,美国德州仪器公司的基尔比发明了集成电路,微电子信息时代开始来临。

1965年,美国仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor)的鲍波·维德拉(Bob Widlar)设计制造出第一块运算放大器 $\mu A709$,后改进为 $\mu A741$,得到广泛应用,几乎成为行业标准。

2. 模拟电子技术课程的性质与任务

模拟电子技术课程是物理、电子、通信、电气、自动化、机电、雷达等很多专业都需要的技术课程。模拟电子技术课程也叫做半导体电子电路、模拟电子线路等。模拟电子技术研究方法以线性化方法为主,故有些地区(如中国台湾)也称之为线性电子技术。

模拟电子技术课程以电路(电工技术)为先修课。电路课以 R 、 L 、 C 三大元件为研究对象。模拟电子技术研究的第一对象是BJT、FET等半导体器件,第二对象才是 R 、 L 、 C 三大元件, R 、 L 、 C 变成了BJT、FET等器件的陪衬。本课程的任务是以BJT、FET及IC为核心,以 R 、 L 、 C 为陪衬,研究放大、反馈、滤波和振荡技术的基本规律与设计方法。

3. 模拟电子技术课程的学习方法

以电路理论为基础学习模拟电子技术,首先要注意两门课程的共性与个性。电路理论中的电压源与电流源的概念、VCR、KCL及KVL定理等,在模拟电子技术中也适用。把信号源看作电源,并对半导体器件进行线性化处理后,迭加法也适用于模拟电子电路。

元器件是电子技术的“细胞”。就像生物技术离不开细胞一样,电子技术也离不开元器件技术。学习模拟电子技术首先要按二极管、BJT到FET的顺序学好半导体器件。

电路理论中的 R 、 L 、 C 通常是有形的,而模拟电子技术中的 R 、 L 、 C 不再局限于有形的。例如,BJT的输入电阻 r_{be} 、输出电阻 r_{ce} 、 r_{ds} 及极间分布电容等都是无形的等效元件。

唯物辩证法是学好模拟电子技术的哲学基础。要善于区别主要矛盾和次要矛盾,要注意具体问题具体分析,要注意避免形而上学,防止先入为主,要以实践作为检验真理的唯一标准。

近似与线性化处理是模拟电子技术的两大法宝。本课程几乎通篇都在进行近似处理。一方面大量近似,另一方面又保证计算精度。通常 r_{ce} 被忽略,但有时又要利用 r_{ce} 。一般来

讲,器件的非线性特性有害,很多场合忽略非线性,进行线性化处理,但某些工作却需要依赖非线性。

模拟电子技术有四道坎:

- ① 从直流半导体器件到交流放大电路的台阶;
- ② 从开环到闭环的台阶;
- ③ 从分立元件到集成电路的台阶;
- ④ 从放大到振荡的台阶。

注意,BJT基极电流和集电极电流必须是不间断的正弦脉动电流即BJT不能截止,BJT的集-射电压必须是不间断的正弦脉动电压,即BJT不能饱和,就能攀上从直流半导体器件到交流放大电路的台阶;把握好反馈概念并灵活运用,就能登上从开环到闭环的台阶;吃透差分放大、电流镜技术和有源负载技术,就能跃上从分立元件到集成电路的台阶;认识到放大、带控滤波和正反馈的综合作用,就能跨上从放大到振荡的台阶。

学习模拟电子技术,还要注意到电子技术发展史很短暂,相关理论还有很多需要完善。传统的模电理论既不讲透工作点究竟应当如何确定,又不细讲工作点温度系数。单靠目前的并联反馈和串联反馈概念也是不足的。如果你对同一个问题冥思苦想,甚至夜不能寐,但就是不得要领,那就不要总怀疑自己,而要大胆地怀疑目前一些理论是否不足、思路是否正确。

本书是作者多年来进行模拟电子学理论探讨和实验分析后写就的新体系模拟电子技术教科书。特色主要是缝补空隙纠正错误,如提出晶体管的两种饱和方式,证明JFET传输特性曲线分布在双象限,提出工作点的内涵外延,讨论临界工作点及稳定性的定量计算,用等效电路进行多级放大电路电压增益的分析,全面计算磁耦合放大电路的十项技术参数,提出相减反馈和相加反馈等简明扼要的概念,明确LC带通滤波器的谐振分压系数为负,用微分方程方法分析振荡电路的工作原理,准确计算双T网络振荡电路的工作频率并证明频率可调等。

模拟电子技术课程由BJT、FET两大器件及放大、反馈、滤波、振荡和电源五大模块组成。五大模块密切联系。探测微弱的传感信号离不开放大器,振荡器也以放大技术为基础,其他如混频、滤波、调制与解调等也离不开放大。放大技术是电子学的精髓。整个模拟电子技术以放大电路为引子来展开。下面讨论本书很多章节都涉及的放大电路的一些共性问题。

半导体器件的非线性使放大及振荡过程中产生各种失真。模拟电子技术的学习,应当围绕如何避免或抑制削平失真、一胖一瘦的非线性失真和交越失真三大几何失真来进行。

4. 放大电路的技术指标与技术参数及设计要求

- (1) 电压、电流、功率三大放大倍数,代表放大能力、频率特性和频响能力;
- (2) 输入电阻应尽可能大,一般来说越大越好,但不能一概而论;
- (3) 输出电阻代表放大器负载驱动能力,越小越好,理想放大器的输出电阻应为0;
- (4) 工作点(偏置量),工作点合适或偏置量大小适中,输出电压摆幅才能达到最大;
- (5) 工作点温度系数,工作点温度系数越小越好;
- (6) 非线性失真度(THD)代表抑制非线性失真的能力,起码要求 $\text{THD} < 5\%$;
- (7) 最大不失真输出电压幅度(摆幅),也叫做输出范围,输出范围越大越好;

(8) 最大不失真输入电压幅度(摆幅),也叫做输入范围;

(9) 元器件消耗功率及负载最大功率;

(10) 放大电路效率,越高越好。

其中,除了工作点属于技术参数外,其余 9 项都属于技术指标,简称一参数九指标。

5. 放大电路的共性问题

1) 信号

要放大的信号有两种:一是正弦交流信号;二是直流信号。直流放大器既能放大直流信号,也能放大交流信号。由于交流信号易于与直流偏置量区别开来,所以即便在分析直流放大器时也假设要放大的是交流信号,这是一个明智的选择。

本书第 3~第 5 章专门讨论交流信号的放大,从第 6 章开始涉及直流信号的放大。

2) 放大器等效电路

若不考虑功率大小,信号源也是一种电源,图 0.1.1 中的 $\dot{E}_s$ 就是信号源电动势(即开路输出电压)。放大器可以等效为一个新的电源或新的信号源。放大器、变压器等很多电路都可以等效为如图 0.1.1 所示的电源电路。

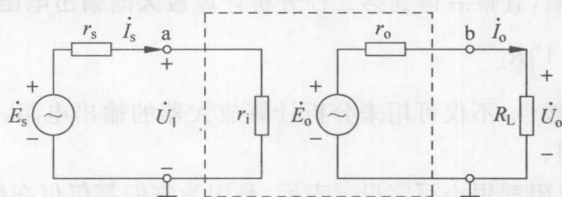


图 0.1.1 放大器等效电路

从等效电源电路输入端 a 看进去,放大器等效为一个负载。这个等效负载电阻叫做放大器的输入电阻,用 r_i 表示。放大器的一个基本设计要求就是将输入电阻做得尽可能大一些。

从等效电源电路输出端 b 看进去,放大器相当于一个新的信号源或新的等效电源。放大器输出电阻是反映放大器带负载能力的技术指标。放大器输出电阻越小越好。

放大器输入电阻和输出电阻的分析计算是一项基础工作。首先结合图 0.1.1 所示的通用等效电路来介绍放大器输入电阻和输出电阻的通用分析计算方法,以供各章节参考使用。

3) 输入电阻与输出电阻的通用计算方法

(1) 输入电阻的通用计算方法。

设 $\dot{E}_s$ 为信号源电动势, r_s 为信号源内阻, r_i 为放大器输入电阻,与信号源内阻相串联的从输入点 a 到公共地之间的等效电阻就是放大器的输入电阻,如图 0.1.1 所示,可以在放大器等效输入回路列出方程 $(r_s + r_i)\dot{I}_s = \dot{E}_s$,从中可得放大器输入电阻的通用分析公式。

$$r_i = \frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_s} - r_s \quad (0.1.1)$$

如果从电路图中能看出从输入点 a 到公共地之间的电阻网络由哪些电阻串并联组成,就能根据电阻串、并联原理直接计算输入电阻,而不必用式(0.1.1)。就是说,放大电路结构

已知、清晰且较简单时,可以直接根据电路结构写出输入电阻的计算公式。

当电路图中从输入点 a 到公共地之间的电阻网络结构已知但比较复杂时,一眼难以看出所有电阻究竟如何连接,则可以假设加上一个信号源电动势 $\dot{E}_s$, 然后用某种方法分析在 $\dot{E}_s$ 作用下产生的信号源电流 $\dot{I}_s$ 与 $\dot{E}_s$ 的关系,再用式(0.1.1)计算放大器的输入电阻。

即使放大电路结构未知,也可以实际加上一定数值的信号源电动势,同时测量产生的信号源电流,然后用式(0.1.1)具体计算放大电路的输入电阻。

(2) 输出电阻的通用计算方法——空载负载对比法。

r_o 是放大器输出电阻, $\dot{E}_o$ 是开路输出电压, $\dot{U}_o$ 是负载电阻 R_L 上的输出电压,如图 0.1.1 所示,可在等效输出回路列出方程 $\frac{\dot{E}_o}{r_o + R_L} = \frac{\dot{U}_o}{R_L}$, 从中可得到放大器输出电阻的通用分析公式。

$$r_o = \left(\frac{\dot{E}_o}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L \quad (0.1.2)$$

式(0.1.2)中的分子分母同时除以 $\dot{E}_s$, 注意 $\dot{U}_o/\dot{E}_s = A_u$ 为负载电压放大倍数, $\dot{E}_o/\dot{E}_s = A_{uo}$ 为开路电压放大倍数,置换后得到第二种分析计算放大器输出电阻的通用分析公式。

$$r_o = \left(\frac{A_{uo}}{A_u} - 1 \right) R_L \quad (0.1.3)$$

式(0.1.3)具有一般性,不仅可用来分析计算放大器的输出电阻,而且还可用来分析变压器等电路的输出电阻。

输入电阻和输出电阻都用小写字母 r 表示,是因为它们都仅仅在概念上存在,而不一定真正是一个电阻实体。

(3) 输入电阻与输出电阻的通用计算方法——加压测流法或加压求流法。

给放大器施加电压 $\dot{U}$, 产生电流 $\dot{I}$, 则电压电流比 $\dot{U}/\dot{I}$ 就是其输入电阻 r_i 。

如图 0.1.2 所示,从零电源输出端与地之间看到的就是电源内阻。放大器等效为一个新的信号源。信号源为零,放大器输出也为零。放大器输出为零时,输出端与地之间就是内阻。

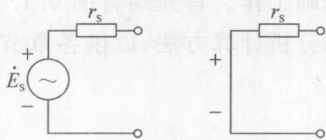


图 0.1.2 零信号源电路输出端与地之间是内阻

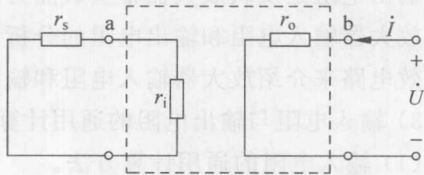


图 0.1.3 零信号源放大器等效电路

若放大电路结构已知、清晰且较简单,从电路图中能看出从输出点 b 到地之间的电阻网络由哪些电阻串并联组成,就能根据电路结构即电阻串并联关系直接计算输出电阻。

信号为 0 的放大器可以等效为一个电阻网络,如图 0.1.3 所示。断开负载电阻,假想在输出端子上加上一个电压 $\dot{U}$, 产生一个电流 $\dot{I}$, 此电压电流比值即是输出电阻。

$$r_o = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad (0.1.4)$$