

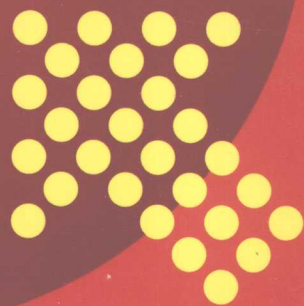
21世纪高等学校规划教材



MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术

元增民 编著



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材

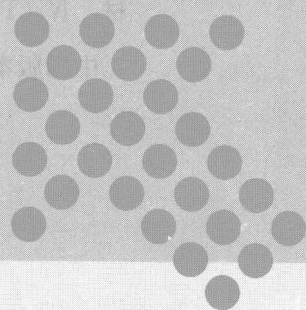


MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术

编 著 元增民

主 审 孙肖子



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 11 章, 主要内容包括 BJT 原理、FET 原理、BJT 放大电路、FET 放大电路、多级放大电路、差分放大与集成放大电路、反馈原理、集成运算放大器应用、振荡电路、直流稳压电源和模拟电子技术实验。书后附录 Multisim 应用简介。本书具有逻辑性强、实事求是、循序渐近等特色。

本书可作为普通高等院校电气信息类专业教材, 也可作为电子技术爱好者以及有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/元增民编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9276-9

I. 模… II. 元… 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 138379 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 581 千字

定价 38.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着 1947 年晶体管的发明及 1960 年场效应管的发明和集成电路的发明, 20 世纪 60 年代半导体电子技术开始进入大学课堂。没有一门技术像半导体电子技术对人类社会的影响如此巨大, 也没有一门技术像半导体电子技术这样年轻。年轻的理论往往存在这样那样的问题。半导体模拟电子技术的很多领域, 理论通, 但实践不通; 实践通的, 理论上又难以解析。

在很多学校里, 模拟电子技术教科书被戏称为“天书”, 模电课程被戏称为“名补”, “模电”被戏称为“魔电”。很多教师感到模拟电子技术难教, 很多学生感到模拟电子技术难学。模拟电子技术虽然很重要, 但实际往往变成制约人们发展的瓶颈、影响教学质量的拦路虎。

左右教学质量的有学校、教师和教科书等因素。“知识不是教出来的, 而是学生学出来的”的观点彰显教科书的重要性。学校虽然名贯中外, 教师虽然学富五车, 课件虽然五彩缤纷, 课堂虽然庄重典雅, 但所起到的多是过场作用。一本好书能使一个名师分身为无数个名师。能忠诚伴随并使读者潜移默化的首当教科书。模拟电子技术教科书被戏称为“天书”的历史应当结束。许多人都在为此而探索。

作者在模拟电子技术理论和实践方面发掘已有二十年, 积累文字材料已有数百万字, 进行 BJT、FET 等器件特性及放大、振荡等电路实验达数百次、提出新概念、新方法等二十余项, 并在这方面发表了不少研究论文。现在, 将作者的科研成果转化为教学成果并与现有知识的合理成分相融合, 编写新体系模拟电子技术教科书的时机已经成熟。

本书撰写时注意采取循序渐进的篇章结构、有来有去的逻辑关系、深入浅出的说理方式以及简洁明了的演绎风格。本书组织题材时充分注意以下方面:

(1) 根据教育部模拟电子技术课程教学基本要求和目前电子技术发展状况, 立足分立元件, 着眼集成电路, 充分考虑专业教学需要编排内容。新体系主要表现在研究思路和分析计算方法上, 至于具体研究内容还是与目前接轨。

(2) 妥善处理创新与继承的关系, 既积极采纳创新成果, 又充分尊重已有知识。

(3) 实践与理论相辅相成。本书列有实验指导书, 包含 16 项实验。

本书按照 110 学时编写, 其中理论 78 学时、实验 32 学时。建议根据专业特色选讲 60 学时左右, 实验 20 学时左右, 留下 30 学时左右供学员自学。各章建议学时如下:

章次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
学时	6	4	14	8	6	10	6	10	10	4	32

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、电信系、计算机系对作者开展电子技术基础研究项目和新体系模拟电子技术教科书建设提供了宝贵支持, 国家电工电子教学基地原主任、第二届国家级教学名师、西安电子科技大学孙肖子教授审阅书稿并提出宝贵意见, 在此一并表示衷心感谢。

模拟电子技术基础理论研究以及新体系教科书编撰是一项浩大的系统工程。不足之处还希望大家多多指正。建议和意见请发到作者电子邮箱 yzm@ccsu.cn 或 yzmhb@126.com。

本书备有配套 PPT 电子课件，需要者请向作者索取或向中国电力出版社索取。

元增民

2009 年仲夏于长沙

主要符号表

1. 字母使用说明

1.1 电压与电流的表达

i 、 u 瞬时电流和电压
 I 、 U 偏置量或有效值
大写字母上加点 相量

1.2 电阻的表达

R 有形电阻
 r 输入电阻、输出电阻

2. 下标

s ① 信号；② 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
 cr 临界
 i 输入
 o 输出，负载
 m 电流或电压幅度
 max 最大的
 min 最小的

3. 常用符号

β BJT 电流放大倍数
 g_m FET 跨导
 R 电阻
 L 电感
 C 电容

4. 带下标的参量

r_{be} BJT 发射结交流电阻
 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 放大电路输入电阻
 r_o 放大电路输出电阻
 r_s 信号源内阻

R_b BJT 基极外接偏置电阻
 R_e BJT 发射极偏置 (反馈) 电阻
 R_L 放大电路负载电阻
 R_s FET 源极外接偏置 (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
 $\dot{E}_s$ 信号源电动势相量
 E_s 信号源电动势有效值
 $\dot{I}_s$ 信号源瞬时总电流
 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_{ccr} 、 I_{ecr} 、 I_{dcr} 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_{cecr} 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_{ommax} 负载电压最大幅度 (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

前言	
主要符号表	
绪论	1
第 1 章 晶体管	7
1.1 半导体 PN 结与晶体二极管	7
1.2 晶体三极管传输特性及其数学模型	20
1.3 三极管技术参数及测试应用	31
小结	41
习题一	42
第 2 章 场效应管	45
2.1 结型场效应管	45
2.2 金属氧化物半导体场效应管	57
小结	63
习题二	65
第 3 章 晶体管放大电路	66
3.1 基本共射放大电路工作原理	66
3.2 基本共射放大电路元器件功耗与电路效率*	75
3.3 基本共射放大电路频率特性函数与交流参数	79
3.4 基本共射放大电路频率特性	82
3.5 分压偏置共射放大电路工作原理	89
3.6 分压偏置放大电路工作点稳定性分析与设计*	95
3.7 共集放大电路(射极输出器)	104
3.8 共基放大电路	112
3.9 放大电路工作点及动态范围的图解分析	120
3.10 动态范围定理*	126
小结	127
习题三	130
第 4 章 场效应管基本放大电路	133
4.1 栅极无偏置共源放大电路	133
4.2 分压偏置共源放大电路	138
4.3 共漏放大电路(源极输出器)	145
4.4 栅极无偏置共栅放大电路*	149
4.5 分压偏置共栅放大电路*	153
小结	154

习题四	156
第 5 章 多级放大电路	158
5.1 放大电路级间耦合方式	158
5.2 多级放大电路技术参数与频率特性	164
5.3 功率放大电路	173
小结	177
习题五	178
第 6 章 差分放大与集成放大电路	180
6.1 基本差分放大电路	180
6.2 长尾差分放大电路	185
6.3 电流源偏置差分放大电路	196
6.4 镜像电流源与电流接力棒	199
6.5 有源负载差分放大电路	205
6.6 从分立放大电路到集成放大电路的发展	211
6.7 集成运算放大器	213
小结	219
习题六	220
第 7 章 反馈原理	223
7.1 反馈概念及反馈分类	223
7.2 反馈极性及反馈作用	228
7.3 分立元件放大电路反馈分析计算	232
7.4 集成运算放大器反馈分析计算	236
小结	243
习题七	245
第 8 章 集成运算放大器应用	247
8.1 集成运算放大器的线性应用 (1)	247
8.2 集成运算放大器的线性应用 (2)	253
8.3 集成运算放大器的线性应用 (3)	258
8.4 集成运算放大器的线性应用 (4)——集成功率放大器	264
8.5 集成运算放大器的非线性应用	265
8.6 集成运算放大器使用技巧	268
小结	272
习题八	273
第 9 章 振荡电路	277
9.1 自激振荡原理及振荡电路	277
9.2 振荡电路常用谐振滤波器	282
9.3 分立元件振荡电路	288
9.4 石英晶体振荡电路	292
9.5 文氏电桥集成振荡电路	295

9.6 双 T 网络集成振荡电路*	301
9.7 非正弦波振荡电路	306
小结	311
习题九	313
第 10 章 直流稳压电源	316
10.1 整流电路	316
10.2 滤波电路	319
10.3 串联稳压电源	321
10.4 开关稳压电源	326
小结	328
习题十	328
第 11 章 模拟电子技术实验	330
11.0 实验操作要领	330
11.1 基本共射放大电路实验	335
11.2 分压偏置共射放大电路实验	337
11.3 基本共集放大电路(射极输出器)实验	339
11.4 基本共基放大电路实验*	341
11.5 栅极无偏置 JFET 及 DMOSFET 共源放大电路实验*	342
11.6 分压偏置 EMOSFET 共源放大电路实验	343
11.7 基本共漏放大电路(源极输出器)实验	344
11.8 分压偏置 EMOSFET 共栅放大电路实验*	346
11.9 双级负反馈放大电路实验	347
11.10 差分放大电路实验	348
11.11 有源负载差分放大电路实验*	350
11.12 集成运算放大器线性运算系列实验	351
11.13 文氏电桥振荡电路系列实验	354
11.14 双 T 电桥振荡电路系列实验*	356
11.15 矩形波振荡电路实验	358
11.16 三角波与锯齿波振荡电路实验	359
附录 多功能电子电路仿真平台 Multisim 应用入门	360
部分习题参考答案	365
参考文献	370

(标识 * 的内容目前介绍较少,读者可根据需要灵活掌握。)

绪 论

1. 一个世纪以来电子技术的发展

1897 年, 法国 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, 意大利马可尼和俄罗斯波波夫在世界上首次实现了无线电通信。

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

1907 年, 美国德弗雷斯特 (Lee de Forest) 发明了真空电子三极管 (电子管)。

真空电子二极管和三极管的问世, 促进了自动控制技术的发展, 并为无线电音频和视频技术进入家庭奠定了基础。

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), 电子技术从此进入了半导体时代。

同年, 印制电路板 (Printed Circuit) 问世。

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

同年, 美国得州仪器公司的基尔比发明集成电路, 微电子信息技术时代开始来临。

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 $\mu A741$, 得到广泛应用并成为行业标准。

1971 年, 一部分人离开仙童公司成立英特尔公司, 并推出 4004 微处理器。

1980 年, 有线电视替代无线电视在美国流行。

电视信号传播从无线方式到有线方式, 不是简单的回归, 而是伴随着多频道、高清晰、可控制的发展。

目前, 不仅工业、农业及国防科技等很多部门都离不开微电子技术, 就连人们的日常生活都与微电子信息技术息息相关。

2. 模拟电子技术课程的性质与任务

模拟电子技术课程是一门与电子技术发展密切相关的技术课程。自 20 世纪 70 年代以来, 模拟电子技术课程已经从主要围绕电子管展开变为围绕晶体管等半导体器件和集成电路展开。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。模拟电子技术的研究方法以线性化方法为主, 因此有些地区 (如中国台湾) 也称之为线性电子技术。

模拟电子技术课程是物理、电子、通信、电气、自动化、机电、雷达等很多理工科专业的专业基础课, 它以电路课为先修课。

电路理论以电阻 R 、电感 L 、电容 C 三大元件为研究对象, 研究 R 、 L 、 C 三大元件组成的电路在电源激励下的工作状况, 包括暂态和稳态。

模拟电子技术研究的第一对象是 BJT、FET 等半导体器件, 第二对象是 R 、 L 、 C 三大元件。在模拟电子技术中, R 、 L 、 C 三大元件变成了 BJT、FET 等半导体器件的陪衬。模拟电子技术主要研究以 BJT、FET 等半导体器件 (Semiconductor Device) 和 R 、 L 、 C 三大

元件 (Element) 共同组成的电子电路在电源激励下的工作情况, 通常主要考虑稳态。

模拟电子技术课程的基本任务是: 以晶体管 (BJT)、场效管 (FET)、二极管等半导体器件为核心, 以电阻 R 、电感 L 、电容 C 三大电子元件为陪衬, 研究放大、反馈、滤波和振荡技术的基本规律, 探讨放大、反馈、滤波和振荡电路的分析与设计方法。

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。两门课程的共性很多, 如电路理论中的电压源与电流源概念、基尔霍夫电压定律和电流定律等, 在模拟电子技术中也适用。根据物理概念把信号源作为电源看待, 并对电子电路线性化处理后, 叠加法多数情况下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从二极管、BJT 到 FET 的顺序学好半导体器件。

电路理论中的电阻 R 、电感 L 、电容 C 三大元件通常是有形的, 而模拟电子技术中的电阻 R 、电感 L 、电容 C 三大元件不再局限于有形, 也可能是无形的。例如, 晶振中的等效电阻、等效电感、等效电容都是无形的, 晶体管输出电阻 r_{ce} 、 r_{ds} 也是无形的等效电阻, r_{ce} 、 r_{ds} 作为有源负载具有很多优点。学习模拟电子技术, 不仅要学会使用有形的元件, 而且要善于使用无形的元件来分析和解决问题。

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。

在很多场合晶体管输出电阻 r_{ce} 被认为是无穷大而被忽略, 但有些场合 (如分析有源负载放大电路) 又要利用 r_{ce} 而需估计 r_{ce} 大体有多大。二极管、BJT、FET 等半导体器件在某些方面表现出非线性, 在某些方面又表现出线性。一般来讲非线性有害, 很多场合忽略器件非线性, 进行线性化处理, 充分利用器件和电路的线性, 但某些工作 (如混频和模拟乘法等) 却需要非线性。

学习模拟电子技术要过四道坎。第一道坎是从直流半导体器件到交流放大电路的台阶, 第二道坎是从开环到闭环的台阶, 第三道坎是从分立元件到集成电路的台阶, 第四道坎是从放大到振荡的台阶。例如, 分立元件放大电路中电阻电容数量多于晶体管, 集成放大电路晶体管数量多于电阻电容。若迈不上从分立元件到集成电路的台阶, 就将在密密麻麻的晶体管面前眼花缭乱而对集成放大电路感到一筹莫展, 以后应用集成运算放大器时将永远被牵着鼻子走而始终感到被动。

注意 BJT 基极电流和集电极电流至少是不间断的脉动电流即 BJT 不能截止, BJT 集电极电压至少是不间断的脉动电压, 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; 了解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, 还要注意电子技术的发展史相对很短暂, 因此电子技术理论还有很多方面需要完善: 传统理论既不讲工作点究竟应当多大, 又不讲工作点温度系数; 反馈理论的很多问题, 单靠目前的并联反馈和串联反馈概念是不能解决的。很多人对同一个问题冥思苦想, 甚至夜不能寐, 但就是不得要领, 这时不要总怀疑自己, 而要大胆地怀疑目前的一些理论是否不足、路子是否不对头。

本书是编者多年来进行电子技术理论探讨和实验研究后撰写的新体系模拟电子技术教材。新体系主要表现在：证明 JFET 传输特性曲线分布在两个象限，提出晶体管的两种饱和方式，提出工作点的内涵外延，讨论工作点究竟应当多大，提出工作点影响因子及温度系数，用等效电路进行多级放大电路电压放大倍数的分析计算并进行严格的理论证明，进行磁耦合放大电路 10 项技术参数的分析计算，用相减反馈和相加反馈等简明扼要的概念分析反馈极性，明确 LC 带通滤波器的谐振分压系数为负并使用负分压系数分析起振条件，用微分方程方法分析振荡电路工作原理，证明双 T 网络振荡电路工作频率可调，用相减反馈概念证明伯德判据与自激振荡条件一致等。

模拟电子技术课程由放大、反馈、滤波和振荡等主要部分组成，这四大部分密切联系。探测微弱的传感信号离不开放大器，振荡器也以放大为基础，其他像混频、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。

4. 放大电路的技术指标与技术参数

放大电路有以下 10 项常见的技术指标和技术参数：

- (1) 电压放大倍数，代表放大器的主要功能；
- (2) 输入阻抗及输入电阻，代表信号源对放大器工作的影响；
- (3) 输出阻抗及输出电阻，代表放大器驱动负载的能力；
- (4) 频率特性，代表放大器对信号频率的适应性；
- (5) 临界工作点，决定放大电路输出电压幅度能达到最大；
- (6) 工作点温度系数；
- (7) 最大不失真输出电压幅度，也叫做动态范围；
- (8) 最大不失真输入电压幅度；
- (9) 负载最大功率；
- (10) 效率。

其中，除了临界工作点属于技术参数外，其余 9 项都属于技术指标。

在放大器的 9 项技术指标中，电压增益（电压放大倍数）、输入阻抗及输入电阻、输出阻抗及输出电阻、频率特性属于纯交流参数，临界工作点及工作点温度系数属于直流参数，而最大输入电压、动态范围、负载最大功率和效率属于极限参数。

通常要求放大器电压增益高、输入电阻大、输出电阻小、频率特性平坦且宽广、输出信号相移小、动态范围大、效率高。

(1) 放大倍数

它包括电压放大倍数、电流放大倍数和功率放大倍数。

(2) 输入电阻

从输入端看进去，放大电路等效于一个负载，这个等效负载（阻抗）电阻叫做放大电路的输入（阻抗）电阻。输入电阻越大，放大电路从信号源索取的电流就越小。因此，一般来讲放大电路的输入电阻越大越好。

(3) 输出电阻

从输出端看进去，放大电路等效于一个信号源或电源。这个等效信号源的内阻（抗）叫做放大电路的输出电阻（阻抗）。输出电阻越大，放大器驱动负载的能力就越强。因此，放

大电路的输出电阻越小越好。

(4) 频率特性

放大电路所能放大的交流信号的频率范围应尽可能宽, 频率响应曲线应满足要求。一般来讲, 幅频响应曲线应当既宽阔又平坦。

(5) 工作点

为使放大器能放大交流信号, 事先应使 BJT 具备直流电流和电压即偏置量。若仅仅考虑放大电流, 偏置电流自然越大越好。但是 BJT 集—射极压降等于电源电压 U_{cc} 减去安伏变换器 R_c 电压降, 即 $U_{ce} = U_{cc} - R_c I_c$, 参见图 3.1.5。电源电压 U_{cc} 有限, I_c 过大, 必将使 U_{ce} 过小甚至达到 0, 将使 BJT 在无信号时就饱和。若无信号时 BJT 已饱和, 则在信号正半周时会更加饱和, 对信号电压变化无任何反应。

就是说, 集电极偏置电流、集—射偏置压降大小合适时, 集电极瞬时电流、集—射瞬时压降才能在信号作用下可大可小。BJT 直流偏置参数统称为工作点。如何确定集—射偏置压降临界值, 是一项主要设计任务。

(6) 动态范围

用直流电路来放大交流信号, 在信号幅度足够大时正弦电压波形肯定会失真。通常把正弦电压波形刚好不失真时放大器所能输出的正弦电压的最大幅度称为放大器动态范围。放大器的动态范围自然是越大越好。动态范围是由工作点保证的, 把使动态范围最大的工作点称为临界工作点。

(7) 负载最大功率与放大器效率

负载所能获得的极限功率应尽可能大, 直流能量向交流能量的转换效率 (即放大器效率) 应尽可能高。

本书主要讨论以上常见的技术参数和指标。除此之外, 放大电路还有失真度和噪声等指标。

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 3~5 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

不谈功率大小, 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。

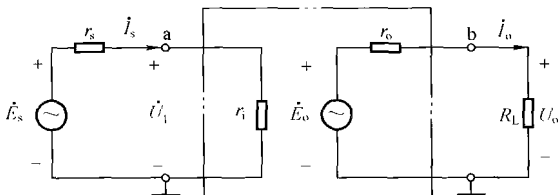


图 0.1.1 放大器等效电路

从等效电源电路输入端 a 看进去, 放大器等效于一个负载。这个等效负载电阻叫做放大器的输入电阻, 用 r_i 表示。输入电阻不仅要消耗信号源功率, 而且要降低放大倍数即影响放大效果, 因此输入电阻越大越好。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些。

从等效电源电路输出端看进去,放大器又相当于一个新的信号源或新的等效电源。这个新等效电源的电动势等于放大器开路输出电压,内阻等于放大器的输出电阻,用 r_o 表示。放大器的输出电阻是反映放大器带负载能力的技术指标。像所有电源的输出电阻一样,放大器的输出电阻也是越小越好。放大器的另一个基本设计要求是将输出电阻做得尽可能小些。

这里介绍了单级放大器等效电路,第 5 章将介绍多级放大器等效电路。

放大器输入电阻和输出电阻的分析计算是一项基础工作。客观地分析计算放大器输入电阻和输出电阻,对于观察放大器结构及各种因素对输入电阻和输出电阻的影响,设计结构和参数搭配都合理的放大电路,有着重要的指导意义。为了分析计算给定放大器输入电阻和输出电阻,首先就图 0.1.1 所示等效电路来介绍放大器输入电阻和输出电阻分析计算的通用方法。

(3) 输入电阻与输出电阻通用计算方法

1) 输入电阻通用计算方法。设放大器输入电阻为 r_i , 参见图 0.1.1, 可以在放大器等效输入回路列出方程

$$(r_s + r_i) \dot{I}_s = \dot{E}_s$$

式中, $\dot{E}_s$ 为信号源电动势相量; r_s 为信号源内阻。

从中可以得到放大器输入电阻通用分析公式

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

从图 0.1.1 所示放大器等效电路可以看出,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计算公式。

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。

放大电路结构未知时,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。

式 (0.1.1) 具有一般性,不仅可用来分析计算放大器的输入电阻,而且还可用来分析变压器等电路的输入电阻。

2) 输出电阻通用计算方法。

① 输出电阻通用计算方法之一。设放大器输出电阻为 r_o , $\dot{E}_o$ 是放大器开路输出电压即电动势, $\dot{U}_o$ 是驱动负载电阻 R_L 时的输出电压,参见图 0.1.1, 可以在放大器等效输出回路列出方程

$$\frac{\dot{E}_o}{r_o + R_L} = \frac{\dot{U}_o}{R_L}$$

从中可得放大器输出电阻通用分析公式

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

式 (0.1.2) 中的分子分母同时除以 $\dot{E}_s$ 有

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

$\dot{U}_o/\dot{E}_s = A$ 为放大器负载电压放大倍数, $\dot{E}_o/\dot{E}_s = A_o$ 为放大器开路电压放大倍数, 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

$$r_o = \left(\frac{A_o}{A} - 1 \right) R_L \quad (0.1.3)$$

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。

式 (0.1.3) 虽然可以解决任意结构的放大电路的输出电阻分析计算问题, 但有时分析计算过程比较冗长。下面来看第二种输出电阻通用计算方法。

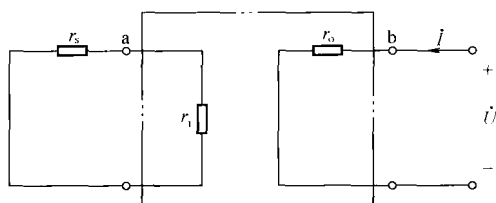


图 0.1.2 零信号源放大器等效电路

② 输出电阻通用计算方法之二。设放大器的输入信号为 0, 则输出信号亦为 0, 见图 0.1.2。输入信号为 0 的放大器可以等效为一个 RC 网络, 在频带内可以等效为一个电阻网络。

理论上设想给放大器输出端加上电源电压 $\dot{U}$, 设在放大器输出端产生的电流为 $\dot{i}$, 则放大电路输出电阻的计算式为

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

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 到公共地之间的电阻网络由哪些电阻串并联组成, 也能根据电路结构即电阻串并联关系直接计算输出电阻。

(4) 频带宽度 Δf 与上限频率 f_h 和下限频率 f_l 的关系

$$\Delta f = f_h - f_l$$

通常 $f_l \ll f_h$, 故一般有

$$\Delta f \approx f_h$$

第 1 章 晶 体 管

1.1 半导体 PN 结与晶体二极管

1.1.1 半导体

电导率介于导体与绝缘体之间的材料称为半导体。常见的半导体材料有硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 等。半导体材料有以下四个基本特点:

- (1) 电导率介于导体与绝缘体之间。
- (2) 物质结构为单晶体。
- (3) 微量掺杂后晶体结构不变。
- (4) 光照或受热后电导率增大。

硅的电导率约为 $5 \times 10^{-14} \text{ S/m}$, 是陶瓷的 1.5×10^9 倍, 是铜的 10^{11} 分之一。

1. 本征半导体

成分完全纯净、结构为完整单晶的理想半导体材料称为本征半导体。

制造半导体器件要用纯度 99.999 999 9% (俗称九个 9) 以上的半导体单晶材料。

硅是四价元素。硅原子外层电子个数为 4。每立方厘米硅晶体约有 5×10^{22} 个原子, 两原子间最近距离为 0.235nm, 次近距离为 0.384nm。图 1.1.1 中的硅原子 E 与最近的 4 个原子 A、B、C、D 间距离均为 0.235nm, 而原子 A、B、C、D 之间的距离均为 0.384nm。相距最近为 0.235nm 的两硅原子的外层电子组成共价键结构, 见图 1.1.1, 相距不小于 0.384nm 的硅原子的外层电子没有直接关系。共价键中的电子相互约束, 很难成为自由电子, 是本征半导体材料及高纯半导体材料电导率很低的主要原因。

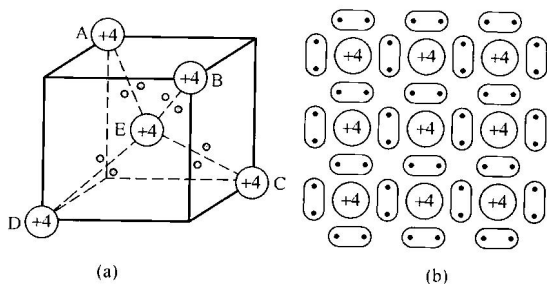


图 1.1.1 本征半导体硅、锗晶体结构

(a) 硅、锗晶体实际的立体结构图;

(b) 硅、锗晶体简化的平面表达

2. 杂质半导体—N 型半导体与 P 型半导体

在 850°C 高温条件下按照以下两条要求有意识地往纯净半导体材料中掺入杂质。

- 1) 掺杂量适当, 通常为微量掺杂, 实际掺杂率约为百万分之一数量级。
- 2) 掺入杂质为三价元素或五价元素。

首先, 因为掺杂率非常低, 不至于影响原来的晶体结构, 所以掺杂后形成的杂质半导体仍旧为共价键单晶体结构, 每立方厘米硅晶体中的原子数目仍约为 5×10^{22} 个。

其次, 掺入三价元素或五价元素将形成特性不同的杂质半导体。

在杂质半导体中, 把占主导地位的四价元素原子称为主原子, 把掺入的少量三价元素或五价元素原子称为杂质原子。

(1) N 型半导体

五价元素磷、砷和锑的外层电子个数为 5。在纯净的半导体材料硅中加入微量五价元素

磷、砷或锑，虽然这些五价元素的原子量等参数与主体材料硅不同，但因为掺入的五价元素数量很少，因此不足以影响主体材料硅的晶体结构。从晶体结构上看，可以说数量极少的五价杂质元素被四价主体元素硅“同化”。

掺入微量磷时，作为杂质的磷原子外层 5 个电子中有 4 个电子与相邻硅原子的 4 个电子形成共价键，多余的第 5 个电子被排斥在共价键之外。被排斥在共价键之外的电子极易成为自由电子，使半导体的电导率明显变大。

往四价硅中掺入微量五价磷后电导率增大，原因是产生了带负电荷的自由电子。人们把这种掺入五价元素后依靠自由电子导电的杂质半导体称为 N 型半导体 (Negative-type Semiconductor)。N 型半导体晶体的平面展开结构见图 1.1.2。

图 1.1.2 (a) 中的“+4”代表 4 个单位正电荷，标有“+4”的圆圈代表硅原子实，“+5”代表 5 个单位正电荷，标有“+5”的圆圈代表杂质磷原子实。

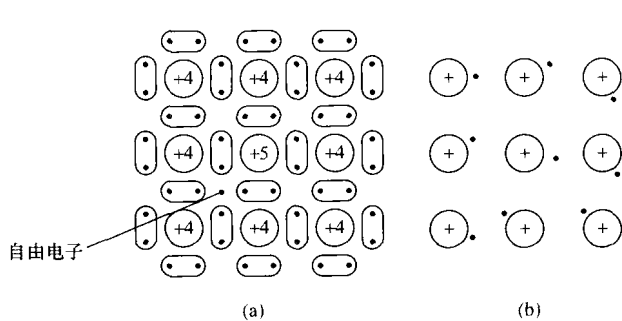


图 1.1.2 (b) 简化画法省略了所有主体原子，只画出杂质原子。此处标有“+”号的圆圈代表失去一个电子 (带 1 单位正电荷即 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$) 的杂质离子——磷离子，而黑点代表带 1 单位负电荷的自由电子。

(2) P 型半导体

三价元素原子最外层电子轨道有 3 个电子。

在纯净的半导体材料硅中加入微量三价元素硼、铝或镓，也不影响硅晶体结构。以掺入微量硼为例，硼原子外层 3 个电子与相邻 4 个硅原子的外层价电子形成 3 个共价键和 1 个空穴。自由态下空穴的位置虽然飘忽不定，但在外加电压作用下，空穴也会定向运动。空穴的定向运动像自由电子的定向运动一样，都能导电。

往四价硅中掺入微量三价硼后电导率增大的原因是产生了带正电荷的空穴。人们把这种掺入三价元素后依靠空穴导电的杂质半导体称为 P 型半导体 (Positive-type Semiconductor)。P 型半导体晶体的平面展开结构见图 1.1.3。

图 1.1.3 (a) 中的“+4”代表 4 个单位正电荷，标有“+4”的圆圈代表硅原子实，“+3”代表 3 个单位正电荷，标有“+3”的圆圈代表杂质硼原子实。

图 1.1.3 (b) 简化画法省略了所有的主体原子，只画出杂质原子。此处标有“-”号的圆圈代表得到 1 个电子 (即带 1 单位负电荷) 的杂质离子——硼离子，而小圆圈代表带 1 单位正电荷的空穴。

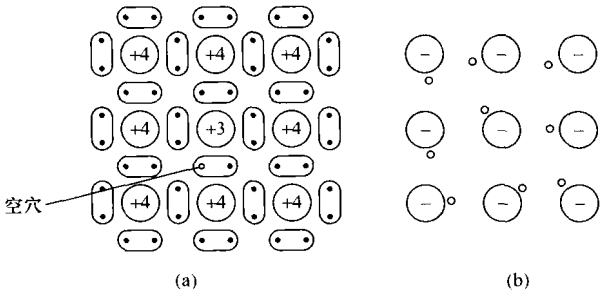


图 1.1.3 P 型半导体晶体结构及其简化画法

(a) P 型半导体结构的平面表示；(b) P 型半导体结构的简化画法

图 1.1.2 和图 1.1.3 表明：半导体晶体结构中既有大量主体原子，又有微量杂质原子。