

中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

模拟电子技术基础

主编 初永丽 王雪琪 范丽杰



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

模拟电子技术基础

主 编 初永丽 王雪琪 范丽杰

副主编 王永强 张 勇 丁昕苗 张艳丽

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据近年来电子技术的发展变化和编者多年的教学实践经验,针对模拟电子技术课程教学的基本要求和特点编写而成。

本书系统地介绍了模拟电子技术的基本知识、基本理论、常用器件及其应用,共分十章,包括绪论、半导体二极管及其基本电路、晶体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大电路、反馈放大电路、信号的运算与处理、信号发生电路、直流稳压电源等内容。

本书可作为高等学校电子与电气信息类专业模拟电子技术基础课程的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/初永丽,王雪琪,范丽杰主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.7

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4157-7

I. ① 模… II. ① 初… ② 王… ③ 范… III. ① 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ① TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 148178 号

策划编辑 毛红兵

责任编辑 买永莲

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.5

字 数 438千字

印 数 1~3000册

定 价 37.00元

ISBN 978-7-5606-4157-7/TN

XDUP 444900-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

在电子技术日新月异的发展形势下,为了培养电子技术方面的人才,编者依照教育部颁发的《电子技术基础(A)课程基本要求》,结合自身多年的教学和科研工作经验,编写了本书。根据电子技术知识的逻辑关系构建了科学的教材体系,内容由浅入深、循序渐进,符合认知规律。本书在内容方面注重基础性和先进性相结合、理论知识和工程应用相结合,科学地安排了教学内容的深度和广度。书中模拟电子技术的基本概念、基本电路和基本分析方法等占主要篇幅,内容较系统,且叙述细致深入。同时,编者力图在讲清电路工作原理和分析方法的同时,尽量阐明电路结构的构思方法,使读者从中获得启迪,培养创新意识。

本书具有教材体系科学、教学内容合理和教学适应性强等特点。内容编排上遵循先器件后电路、先基础后应用的规律。每章的最后一节安排有 Multisim 例题仿真,对典型电路和难以手工分析计算的电路进行了仿真,通过仿真结果使读者对电路的特点、性能有更深入的理解。课程中各个教学环节的配合十分重要,除了课堂讲授外,还必须设置对应的习题课和实验课等,把知识环节有机地结合起来。通过实验课,不仅可以验证理论,加深对理论知识的理解,更重要的是,可以学会电子电路的测试技术,掌握各种电子仪器的使用方法,使理论紧密结合实践。

参加本书编写工作的有王雪琪(第1章、第8章)、张勇(第2章、第7章)、丁昕苗(第3章、第4章)、张艳丽(第5章、第6章)和初永丽(第9章、第10章)等,范丽杰负责每章的 Multisim 例题仿真分析,王永强负责书稿最终的文字润色和校订工作。

由于编者能力和水平所限,书中难免疏漏和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2016年4月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.3 放大电路的分析方法	41
1.1 电子技术的发展	1	3.3.1 图解分析法	42
1.2 信号	2	3.3.2 等效电路法	46
1.3 模拟电子系统	3	3.4 共集电极和共基极放大电路分析	52
1.4 放大的概念和放大电路的主要性能指标	4	3.4.1 共集电极放大电路	52
第 2 章 半导体二极管及其基本电路	8	3.4.2 共基极放大电路	54
2.1 半导体的基本知识	8	3.4.3 三种基本放大电路的比较	55
2.1.1 半导体材料	8	3.5 放大电路静态工作点的稳定问题	56
2.1.2 本征半导体及其导电作用	9	3.5.1 温度对静态工作点的影响	56
2.1.3 杂质半导体	10	3.5.2 稳定工作点的电路	57
2.1.4 PN 结的形成及特性	12	3.6 多级放大电路	62
2.2 半导体二极管及其基本应用电路	16	3.6.1 放大电路的极间耦合方式	62
2.2.1 二极管的结构	16	3.6.2 多级放大电路的分析计算	64
2.2.2 二极管的 $U-I$ 特性	17	3.7 Multisim 仿真例题	67
2.2.3 二极管的主要参数	18	本章小结	70
2.2.4 二极管的等效电路及其分析方法	19	习题	71
2.3 特殊二极管	23	第 4 章 场效应管及其基本放大电路	78
2.3.1 稳压二极管	23	4.1 场效应管	78
2.3.2 其他类型二极管	24	4.1.1 金属氧化物-半导体(MOS)场效应管	78
2.4 Multisim 仿真例题	26	4.1.2 结型场效应管(JFET)	84
本章小结	27	4.1.3 JFET 的特性曲线	87
习题	28	4.1.4 场效应管的主要参数	88
第 3 章 晶体三极管及其基本放大电路	31	4.2 场效应管单管放大电路	89
3.1 晶体三极管	31	4.2.1 静态工作点的计算	90
3.1.1 BJT 的结构及类型	31	4.2.2 图解分析法	91
3.1.2 放大状态下 BJT 的工作原理	32	4.2.3 小信号模型分析法	91
3.1.3 BJT 的 $U-I$ 特性曲线	34	4.3 Multisim 仿真例题	94
3.1.4 BJT 的主要参数	37	本章小结	96
3.1.5 温度对 BJT 参数及特性的影响	39	习题	96
3.2 共射极放大电路的组成及工作原理	40	第 5 章 放大电路的频率响应	99
3.2.1 共射极放大电路的组成	40	5.1 频率响应概述	99
3.2.2 共射极放大电路的工作原理	40	5.1.1 基本概念	99
		5.1.2 典型 RC 电路的频率响应分析	100
		5.2 单管放大电路的高频特性	103

5.2.1 晶体管的混合 Π 型等效电路	104	7.2.1 电压串联负反馈放大电路	167
5.2.2 单管共射极放大电路的高频特性	108	7.2.2 电压并联负反馈放大电路	168
5.2.3 共基极放大电路的高频特性	111	7.2.3 电流串联负反馈放大电路	168
5.3 单管放大电路的低频特性	112	7.2.4 电流并联负反馈放大电路	169
5.4 多级放大电路的频率特性	115	7.3 负反馈放大电路增益的一般表达	170
5.5 放大电路的瞬态响应	117	7.4 反馈对放大电路性能的影响	172
本章小结	119	7.4.1 提高增益的稳定性	172
习题	120	7.4.2 减小非线性失真	173
第 6 章 集成运算放大电路	122	7.4.3 对输入电阻和输出电阻的影响	174
6.1 集成电路概述	122	7.5 深度负反馈条件下的近似计算	177
6.2 电流源电路	123	7.6 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	180
6.3 差分放大电路	127	7.6.1 产生自激振荡的原因及条件	180
6.3.1 差分放大电路概述	127	7.6.2 负反馈放大电路稳定工作的条件及稳定性分析	181
6.3.2 差分放大电路静态分析	128	7.6.3 消除自激振荡的方法	182
6.3.3 差分放大电路动态技术指标计算	128	7.7 Multisim 仿真例题	185
6.3.4 带有恒流源的差分放大电路	132	本章小结	190
6.3.5 差分放大电路的调零	133	习题	191
6.4 功率放大电路	134	第 8 章 信号的运算与处理	196
6.4.1 功率放大电路的一般问题	134	8.1 集成运算放大器的应用基础	196
6.4.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	136	8.1.1 集成运算放大器的符号	196
6.4.3 甲乙类互补对称功率放大电路	139	8.1.2 理想集成运算放大器	197
6.4.4 实际的功率放大电路	141	8.1.3 集成运算放大器的电压传输特性	197
6.5 集成运算放大器	141	8.2 基本运算电路	198
6.5.1 典型的集成运算放大器电路	141	8.2.1 比例运算电路	199
6.5.2 集成运放的主要参数	144	8.2.2 加法电路	202
6.5.3 CMOS 集成运放	146	8.2.3 减法电路	202
6.5.4 专用型集成运放	147	8.2.4 积分电路	204
6.6 Multisim 仿真例题	148	8.2.5 微分电路	204
6.6.1 仿真例题 1	148	8.2.6 非理想运算放大器运算电路的分析	206
6.6.2 仿真例题 2	152	8.3 对数和指数运算放大电路	208
本章小结	155	8.3.1 对数运算放大电路	209
习题	155	8.3.2 指数运算放大电路	210
第 7 章 反馈放大电路	161	8.4 模拟乘法器	211
7.1 反馈的基本概念与分类	161	8.4.1 用对数函数网络构成的乘法器	211
7.1.1 什么是反馈	161	8.4.2 四象限变跨导模拟乘法器	213
7.1.2 直流反馈与交流反馈	162	8.5 有源滤波电路	217
7.1.3 正反馈与负反馈	164	8.5.1 一阶有源滤波电路	218
7.1.4 串联反馈与并联反馈	165	8.5.2 二阶有源滤波电路	219
7.1.5 电压反馈与电流反馈	166	8.6 Multisim 仿真例题	224
7.2 负反馈放大电路的四种组态	167		

本章小结	227	9.5.4 锯齿波发生电路	254
习题	228	9.6 Multisim 仿真例题	
第 9 章 信号发生电路	235	255 本章小结	257
9.1 正弦波振荡电路	235	习题	258
9.2 RC 正弦波振荡电路	237	第 10 章 直流稳压电源	266
9.2.1 RC 移相选频网络	237	10.1 小功率整流滤波电路	266
9.2.2 RC 串并联网络振荡电路	239	10.1.1 单相桥式整流电路	266
9.3 LC 正弦波振荡电路	240	10.1.2 滤波电路	268
9.3.1 LC 并联电路的频率响应	240	10.2 稳压电路	271
9.3.2 LC 选频放大电路	242	10.2.1 稳压电源的质量指标	271
9.3.3 变压器反馈式 LC 正弦波 振荡电路	242	10.2.2 稳压管稳压电路	272
9.3.4 三点式 LC 振荡电路	243	10.2.3 串联反馈式稳压电路的 工作原理	273
9.4 石英晶体振荡电路	245	10.2.4 三端集成稳压电路	274
9.4.1 石英晶体谐振器的电特性	246	10.3 串联开关式稳压电路	278
9.4.2 石英晶体振荡电路	247	本章小结	280
9.5 非正弦波发生电路	247	习题	280
9.5.1 电压比较器	247	附录 模拟电子技术符号说明	285
9.5.2 方波发生电路	251	参考文献	288
9.5.3 方波-三角波发生电路	253		

第 1 章 绪 论

1.1 电子技术的发展

近 50 年来,由于微电子技术和其他高新技术的发展,工业、农业、科技和国防等领域发生了令人瞩目的变化。与此同时,电子技术也正在改变着人们的日常生活,收音机、电视机、高保真音响、通信设备、个人计算机、手机等各种各样的电子产品,已经成为人们生活中不可缺少的用品。

电子技术日益广泛的应用与电子器件的不断发展紧密相连。20 世纪初首先得到推广应用的电子器件是真空电子管。真空电子管是由在抽成真空的玻璃或金属外壳内安置特制的阳极、阴极、栅极和加热用的灯丝而构成的。电子管的发明引发了通信技术的革命,产生了无线电通信和早期的无线电广播及电视。这一时期称为电子技术的电子管时代。

由于电子管不仅体积大、笨重,而且耗电量大、寿命短、可靠性差,各国科学家开始致力于寻找性能更为优越的电子器件。1947 年,美国贝尔实验室的科学家发明了晶体管,从此揭开了电子技术发展的新篇章。由于晶体管是一种固体器件,不需要用灯丝加热,所以体积小、重量轻、耗电省,而且寿命长,可靠性也大为提高。随后几乎在所有的应用领域中,晶体管逐渐取代了电子管。1960 年又诞生了新型的金属-氧化物-半导体场效应管,为后来大规模集成电路的研制奠定了基础。这一时期称为电子技术的晶体管时代。

1959 年,美国德克萨斯仪器公司的科学家吉尔伯(Kilby)研制成功了半导体集成电路(Integrated Circuit, IC)。由于这种集成电路将为数众多的晶体管、电阻和连线组成的电子电路制作在同一块硅半导体芯片上,因此这项技术的应用减少了电子电路的体积,实现了电子电路的微型化,大大提高了电路的可靠性,从而开创了电子技术的集成电路时代。随着集成电路制造技术的不断进步,集成电路的集成度不断提高。在以后的十几年时间里,集成电路制造技术便完成了从小规模到中规模,再到大规模和超大规模的发展。自 20 世纪 70 年代以来,集成电路基本上遵循着摩尔定律在发展进步,即每一年半左右集成电路的综合性能就提高一倍,而每三年左右集成电路的集成度也提高一倍。

高集成度、高性能、低价格的大规模集成电路批量生产并投放市场,极大地拓展了电子技术的应用空间。它不仅促进了信息产业的迅速发展,而且成了改造所有传统产业的强有力的手段。因此有人把 20 世纪中期以来的这一时期称为硅片时代。

然而,集成度不可能无限制提高,因此许多科学家已经开始潜心研究和寻找比硅片集成度更高、性能更好的新型电子器件了。

1.2 信 号

1. 电信号

在人类的日常生活中,存在着各种各样的信息。例如,气象信息包含温度、气压、风速等信号;播音员播音时,微音器将声音信号转换为电信号,然后经过电子系统中的放大、滤波等电路,驱动扬声器发出播音员的声音。由此可见,自然界的各种物理量必须首先经过传感器(将各种物理量转换为可由电子电路处理的信号的电子设备)将非电量信号转换为电量信号,即电信号。

在处理各种信号时,需要对信号的表达与特性作简要的介绍。传感器的输出信号都是电信号。前述的微音器就是将声音信号转换为电信号的传感器。为一般化起见,常把传感器当作信号源看待。根据电路理论的知识,电路中的信号源都可以等效为如图 1.2.1 所示的两种形式。其中,图(a)是以理想电压源和内电阻 R_s 串联的等效信号源,称为戴维宁等效电路;而图(b)是以理想电流源和内电阻 R_s 并联的等效信号源,称为诺顿等效电路。这两种信号源电路也可以等效转换,应根据不同的场合,使用不同的信号源形式。

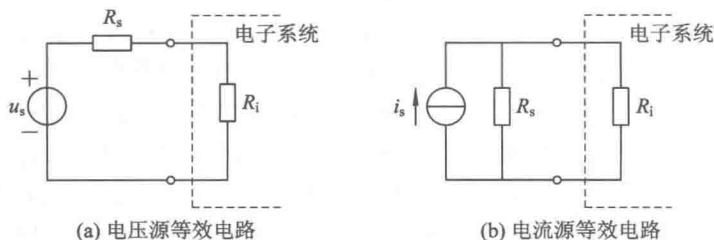


图 1.2.1 信号源的等效电路

2. 模拟信号和数字信号

在电子电路中,信号分为模拟信号和数字信号。

如图 1.2.2(a)所示,信号随时间的变化在数值上是连续的,而且连续变化过程中的每个数值都有具体的物理意义,这样的信号称为模拟信号。微音器输出的电压信号以及经放大器放大后的电压信号都是模拟信号。从宏观上看,我们周围世界中的大多数物理量都是时间连续、数值连续的变量,如气温、气压、风速等,这些变量通过相应的传感器都可转换为模拟电信号输入到电子系统中。处理模拟信号的电子电路称为模拟电路。本书主要讨论各种模拟电子电路基本的概念、原理、分析方法及应用。

数字信号与模拟信号不同,如图 1.2.2(b)所示,数字信号在时间和数值上均具有离散性,电压或电流的变化在时间上不连续,总是发生在离散的瞬间,且它们的数值是一个最小量值的整数倍,并以此倍数作为数字信号的数值。

随着计算机技术的发展和应用的普及,绝大多数电子系统都引入了计算机或微处理器来对信号进行处理。由于它是数字电路系统,只能处理数字信号,所以需要将模拟信号转换为数字信号。

本书所涉及的信号均为模拟信号。

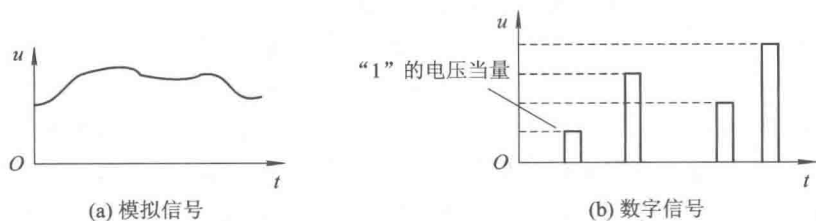


图 1.2.2 模拟信号和数字信号

1.3 模拟电子系统

1. 模拟电子系统的组成

模拟电子系统包括信号的提取、信号的预处理、信号的加工和信号的执行几部分。系统首先采集信号，这些信号通常来源于测试各种物理量的传感器、接收器，或者来源于用于测试的信号发生器。传感器或接收器所提供的信号幅值往往很小，噪声很大，有时候甚至分不清什么是有用信号，什么是干扰或噪声。因此，在加工信号之前需要对信号进行预处理。预处理包括对信号进行隔离、滤波、阻抗变换等环节，将信号分离出来，然后进行放大。当信号足够大时，再对信号进行运算、转换、比较、采样-保持等不同的加工。最后，一般还要经过功率放大来驱动执行机构，或者经过模拟信号到数字信号的转换，变为计算机可以接收的信号。

2. 常用的模拟电路

- (1) 放大电路：用于信号的电压、电流或者功率的放大。
- (2) 滤波电路：用于信号的提取、变换或抗干扰。
- (3) 运算电路：完成一个或者多个信号的加、减、乘、除、积分、微分、对数、指数等运算。
- (4) 信号转换电路：用于将电流信号转换成电压信号或将电压信号转换成电流信号，将直流信号转换成交流信号或将交流信号转换为直流信号，将直流电压信号转换为与之成正比的频率信号，等等。
- (5) 信号发生电路：用于产生正弦波、矩形波、三角波、锯齿波信号等。
- (6) 直流电源：将 220 V、50 Hz 交流电转换成不同输出电压和电流的直流电，作为各种电子电路的供电电源。

上述电路中均含有放大电路，因此放大电路是模拟电子电路的基础。

1.4 放大的概念和放大电路的主要性能指标

模拟信号最基本的处理电路是放大电路，大多数模拟电子系统中都应用了不同类型的放大电路，如滤波、振荡、稳压等电路中的基本单元电路都是放大电路。

1. 放大的概念

检测外部物理信号的传感器所获得的信号通常都是很微弱的，无法直接显示，而且一

般也很难做进一步的分析处理。通常必须对它们进行放大,才能用仪器仪表显示出来。如果对信号进行数字化处理,则必须把信号放大到数伏量级才能送给模/数转换器进行转换。如利用扩音机放大声音,话筒(传感器)将声音信号转换成微弱的电信号,经放大电路放成功率足够大的电信号,驱动扬声器,发出比较强的声音信号。输出大功率信号的能量由直流电源提供,直流电源在输入信号的控制下,通过放大电路将直流能量转换成交流能量输出到扬声器(负载)。由此可见,电子电路中放大的本质是能量的控制和转换,放大的基本特征是信号功率的放大。放大电路必须包含将直流电源功率转换为信号功率的电子元件,即有源元件,如晶体三极管、场效应管,它们是放大电路的核心元件。对放大电路最基本的要求是不失真地放大,只有在不失真的情况下放大才有意义。

由于任何稳态信号都可分解为若干频率正弦波信号的叠加,而且正弦波信号在实验室容易获得,所以放大电路常以正弦波作为测试信号。

2. 放大电路的模型及其主要性能指标

若仅研究信号的作用,可将放大电路看成一个黑匣子,一个信号输入口,一个信号输出口,即放大电路可以看作一个双口网络,如图 1.4.1 所示。 u_i 是信号源加给放大电路的输入电压,产生输入电流 i_i ,输入电压和输入电流的关系可以用一个电阻 R_i 来等效,即从输入口看向放大电路,放大电路等效成一个电阻;从输出口看向放大电路,放大电路是一个有源二端网络,可以用一个电压源和电阻的串联来等效。 R_L 是负载电阻。不同放大电路在信号源和负载相同的情况下,输入电流、输出电流、输出电压将不同,说明不同的放大电路从信号源索取的电流不同,对同样信号的放大能力也不同;同一放大电路在幅值相同、频率不同的信号源作用下,输出电压也会不同,即同一放大电路对不同频率的信号放大能力也存在差异。为了衡量放大电路的性能优劣,这里主要讨论放大电路的几项主要性能指标。

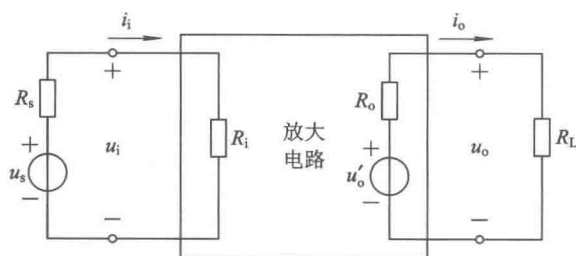


图 1.4.1 放大电路的模型

1) 放大倍数

放大倍数即增益,是直接衡量放大电路放大能力的重要指标,它实际上反映了放大电路在输入信号的控制下,将直流电源的能量转换为信号能量的能力,其值为输出量与输入量之比。

电压放大倍数是输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比,即

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} \quad (1.4.1)$$

电流放大倍数是输出电流 i_o 与输入电流 i_i 之比,即

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad (1.4.2)$$

电压对电流的放大倍数是输出电压 u_o 与输入电流 i_i 之比, 即

$$A_r = \frac{u_o}{i_i} \quad (1.4.3)$$

其量纲为电阻, 因此也称为互阻放大倍数。

电流对电压的放大倍数是输出电流 i_o 与输入电压 u_i 之比, 即

$$A_g = \frac{i_o}{u_i} \quad (1.4.4)$$

其量纲为电导, 因此也称为互导放大倍数。

在四种放大倍数中, 最常用的是电压放大倍数 A_u 。

2) 输入电阻

输入电阻定义为放大电路的输入电压与输入电流之比, 即从输入端向放大电路看进去的等效电阻:

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} \quad (1.4.5)$$

输入电阻的大小决定了放大电路从信号源索取电流的大小。对输入为电压信号的放大电路, 即电压放大和互导放大电路, R_i 愈大, 则放大电路输入端的 u_i 值愈大。反之, 输入为电流信号的放大电路, 即电流放大和互阻放大电路, R_i 愈小, 输入放大电路的输入电流 i_i 愈大。所以放大电路的输入电阻要根据需要而设计。

3) 输出电阻

输出电阻 R_o 定义为从输出端向放大电路看进去的等效电阻, 其大小决定了放大电路带负载能力的大小。所谓带负载能力, 是指放大电路的输出量随负载变化的程度。信号经放大电路放大后, 总要输出给负载, 当放大电路带上负载后, 输出信号必然要比空载时有所下降。当负载变化时, 放大电路的输出量变化很小或基本不变, 即输出量与负载大小的关联程度愈弱, 表示放大电路的带负载能力愈强。

对于不同类型的放大电路, 输出量的表现形式是不一样的。例如, 电压放大和互阻放大电路, 输出量为电压信号。对于这类放大电路, R_o 愈小, 负载电阻 R_L 的变化对输出电压 u_o 的影响愈小, 放大电路的带负载能力愈强。对输出为电流信号的放大电路, 即电流放大和互导放大电路, R_o 愈大, 负载电阻 R_L 的变化对输出电流 i_o 的影响愈小。

当定量分析放大电路的输出电阻 R_o 时, 可采用图 1.4.2 所示的方法。在信号源短路 ($u_s=0$, 但保留 R_s) 和负载开路 ($R_L=\infty$) 的条件下, 在放大电路的输出端加一测试电压 u_i , 相应地产生一测试电流 i_i , 于是可得输出电阻为

$$R_o = \left. \frac{u_i}{i_i} \right|_{u_s=0, R_L=\infty}$$

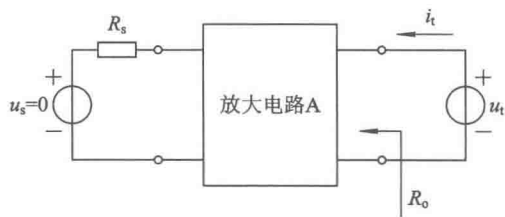


图 1.4.2 求放大电路的输出电阻

另外, 也可以用实验的方法获得 R_o 的值。具体方法是分别测得放大电路开路时的输出

电压 u_o' 和带负载时的输出电压 u_o ，由式 $R_o = \left(\frac{u_o'}{u_o} - 1 \right) R_L$ 计算得到 R_o 的值。

4) 通频带

实际的放大电路中总是存在一些电抗性元件，如电容和电感元件以及电子器件的极间电容、接线电容与接线电感等。因此，放大电路的输出和输入之间的关系必然与信号频率有关。在输入正弦信号情况下，输出随输入信号频率连续变化的稳态响应，称为放大电路的频率响应。只改变输入信号的频率时，发现放大电路的增益是随之变化的，输出波形的相位也发生变化。通频带是用来反映放大电路对于不同频率信号的适应能力的指标。一般情况下，放大电路只适用于放大一个特定频率范围的信号，当信号频率太高或太低时，放大电路的增益都有大幅度的下降。

若考虑电抗性元件的作用和信号角频率变量，则放大电路的电压增益可表示为

$$\dot{A}_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_o(j\omega)}{\dot{U}_i(j\omega)} \quad (1.4.6)$$

或

$$\dot{A}_u = A_u(\omega) \angle \varphi(\omega) \quad (1.4.7)$$

式中， ω 为信号的角频率， $A_u(\omega)$ 表示电压增益的模与角频率之间的关系，称为幅频响应；而 $\varphi(\omega)$ 表示放大电路输出与输入正弦电压信号的相位差与角频率之间的关系，称为相频响应。

将二者综合起来可全面表征放大电路的频率响应。图 1.4.3 是一个放大电路的幅频响应。

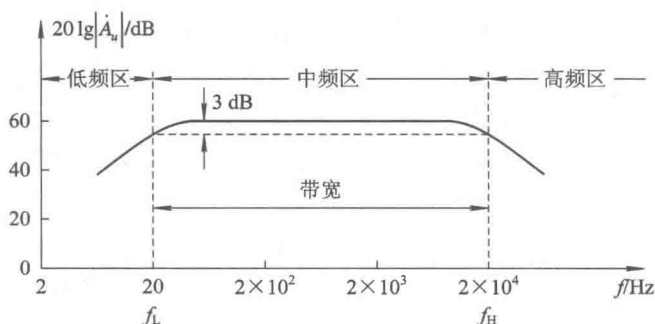


图 1.4.3 放大电路的幅频响应

由图 1.4.3 可见，幅频响应的中间一段是平坦的，即增益保持为常数，称为中频区。在输入信号幅值保持不变的条件下，信号频率降低或升高，增益比中频区下降 3 dB 的频率点，称为截止频率。高频时上限截止频率为 f_H ，低频时下限截止频率为 f_L 。我们认为在 $f_L < f < f_H$ 时，信号得到正常放大。定义放大电路的通频带(或称带宽)为 $f_{BW} = f_H - f_L$ ，也称中频段。放大电路的通频带越宽，则对不同频率信号的适应能力越强，性能越好。

5) 非线性失真系数

由于放大器件均具有非线性特性，它们的线性放大范围有一定限度，当输入信号幅度超过一定值后，输出电压将会产生非线性失真，可用非线性失真系数来衡量，即

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{ok}^2}}{U_{o1}} \times 100\% \quad (1.4.8)$$

式中, U_{o1} 是输出电压信号基波分量的有效值, U_{ok} 是高次谐波分量的有效值, k 为正整数。

6) 最大不失真输出电压

最大不失真输出电压定义为当输入信号再增大就会使输出波形产生非线性失真时的输出电压, 一般用有效值 U_{om} 表示, 也可以用峰峰值 U_{opp} 表示。

7) 最大输出功率与效率

最大输出功率是在输出信号基本不失真时, 输出的最大功率 P_{om} 。最大输出功率 P_{om} 与放大电路中直流电源提供的功率 P_U 的比值, 称为能量转换效率, 即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_U} \quad (1.4.9)$$

在测试上述性能指标时, 对于放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o , 应给放大电路输入中频段小幅值信号; 对于通频带, 应给放大电路输入小幅值、宽频率范围的信号; 对于 U_{om} 、 P_{om} 、 η 和 D , 应给放大电路输入中频段大幅值信号。

第 2 章 半导体二极管及其基本电路

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分，由于它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。

本章首先介绍半导体的基本知识，半导体中载流子的运动；接着介绍 PN 结的基本性质，重点介绍二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数，以及二极管基本电路及其分析方法与应用；在此基础上，对齐纳二极管、变容二极管和光电子器件的特性与应用进行简要介绍。

2.1 半导体的基本知识

2.1.1 半导体材料

多数现代电子器件是由性能介于导体与绝缘体之间的半导体材料制造而成的。为了从电路的观点理解这些器件的性能，首先必须从物理的角度了解它们是如何工作的。这里着重介绍半导体材料的特殊物理性质，以及电子器件的伏安($U-I$)特性。在电子器件中，常用的半导体材料有元素半导体，如硅(Si)、锗(Ge)；化合物半导体，如砷化镓(GaAs)等。其中硅是目前最常用的一种半导体材料。半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外，它还具有不同于其他物质的特点，例如，当半导体受到外界光和热的激励时，其导电能力将发生显著变化。又如在纯净的半导体中加入微量的杂质后，其导电能力将会显著增强。为了理解这些特点，必须了解半导体的结构。

在电子器件中，用得最多的材料是硅和锗，下面重点介绍硅的物理结构和导电机制。硅的简化玻尔原子模型如图 2.1.1 所示。这是因为硅是四价元素，原子的最外层轨道上有 4 个电子，称为价电子。由于原子呈中性，故正离子芯(或正离子)用带圆圈的+4 符号表示。半导体的导电性与价电子数目有关，因此，价电子是我们研究的对象。从定性的角度来考虑，其他半导体的物理性能与硅材料类似。

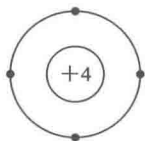


图 2.1.1 硅的原子结构简化模型

半导体与金属和许多绝缘体一样，均具有晶体结构，它们的原子形成有序的排列，邻

近原子之间由共价键连接，如图 2.1.2 所示。图中表示的是二维结构，实际上半导体晶体结构是三维的。

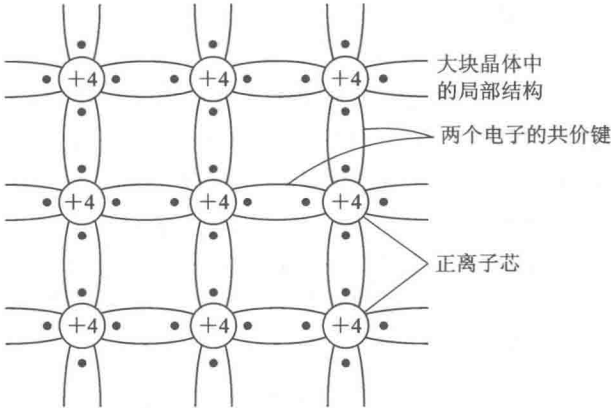


图 2.1.2 硅的二维晶格结构图

2.1.2 本征半导体及其导电作用

1. 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。半导体的重要物理特性是它的电导率，电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子的数量有关。电荷载流子的浓度愈高，其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素，包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。在 $T=0\text{ K}$ 和没有外界激发时，由于每一原子的外围电子被共价键所束缚，这些束缚电子对半导体内的传导电流没有贡献。但是，半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中被束缚得那样紧。例如在室温(300 K)下，被束缚的价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这些自由电子很容易在晶体内运动，如图 2.1.3 所示，这种现象称为本征激发。

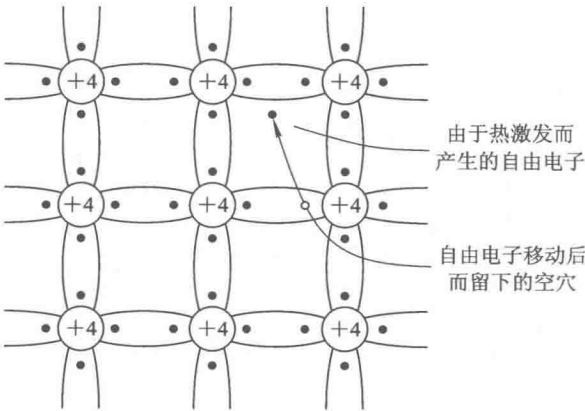


图 2.1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这个空位叫做

空穴。原子因失掉一个价电子而变成带正电的正离子，或者说空穴带正电。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。在本征半导体中，自由电子与空穴是成对出现的，即自由电子与空穴浓度相等，即

$$n_i = p_i \quad (2.1.1)$$

若在本征半导体两端外加一电场，则自由电子将产生定向移动，形成电子电流；另外，由于空穴的存在，价电子将按一定的方向依次填补空穴，也就是说空穴也产生定向移动，形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同，所以它们的运动方向相反，本征半导体中的电流是这两个电流的和。

运载电荷的粒子称为载流子。导体导电只有一种载流子，即自由电子导电；而本征半导体有两种载流子，即自由电子和空穴均参与导电，这是半导体导电的特殊性质。

2. 载流子的产生与复合

如前所述，由于本征激发，半导体产生自由电子-空穴对，温度愈高，其产生率愈高。另一方面，自由电子在运动过程中如果与空穴相遇就会填补空穴，使两者同时消失，这种现象叫做复合。一旦空穴和自由电子浓度建立起来，复合作用就是经常性的。当温度一定时，载流子(电子和空穴)的复合率等于产生率，即达到一种动态平衡。

当载流子的浓度较高时，晶体的导电能力增强。换言之，本征半导体的电导率将随温度的增加而增加。

2.1.3 杂质半导体

1. P 型半导体

在硅的晶体内掺入少量三价元素杂质，如硼等，因硼原子只有 3 个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时就有可能填补这个空位，使硼原子成了不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子，形成了空穴，但整个半导体仍呈中性，如图 2.1.4 所示。

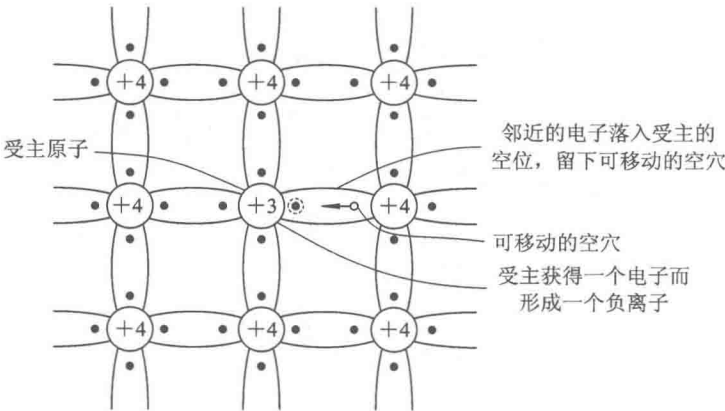


图 2.1.4 P 型半导体的共价键结构

因为硼原子在硅晶体中能接受电子，故称硼为受主杂质或 P 型杂质(P 是 Positive 的