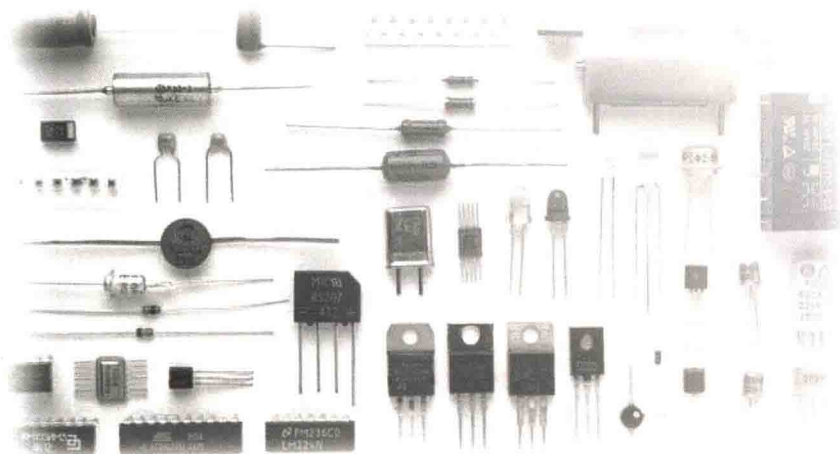




普通高等教育创新型人才培养规划教材



电子系统设计与实践

——模拟部分

张芝贤 孙克梅 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育

教材

电子系统设计与实践

——模拟部分

张芝贤 孙克梅 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书采用先全局后具体的层次结构,注重理论知识与实际应用的结合,在保证基本理论知识的前提下,强调设计思想和实际应用。全书以电子系统设计实践中必需的知识 and 技能为出发点,全面介绍了电子系统中模拟电子技术的相关理论知识。全书共分7章,内容包括:基本放大电路、功率放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大器、反馈、集成运算放大器的应用、直流电源。与以往的电子技术基础书籍相比,本书在各章节的编排上也做了调整,首先介绍基本电压放大电路,接着介绍功率放大电路,然后介绍放大电路的频率响应等基础知识。同时,为了突出与实际应用的结合,除了7章的基本内容外,本书还增加了附录I和附录II,分别介绍了半导体分立元件的测试和常用电子元器件的识别。

本书可以作为高等院校电子、通信、计算机、自动化等专业模拟电子技术基础课程的教材或参考书,也可以作为工程技术人员的参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计与实践. 模拟部分 / 张芝贤, 孙克梅
编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5124-2335-0

I. ①电… II. ①张… ②孙… III. ①电子系统—系
统设计 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 021702 号

版权所有,侵权必究。

电子系统设计与实践——模拟部分

张芝贤 孙克梅 编著

责任编辑 杨 昕

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:14.25 字数:365 千字

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-2335-0 定价:34.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

随着电子信息技术的迅速发展和高校教学改革的不断深入,特别是为配合“卓越工程师计划”的实施,在以“保证基础理论”、“强化工程实践”为指导思想的前提下,我们编写了《电子系统设计与实践》这本教材。教材主要采用先全局后具体的“自顶向下”的编写思路与方法,先总体给出电子系统的功能及框架;然后介绍为实现具体系统设计所需的基本理论知识及基本分析方法;最后再通过具体的电子线路设计实例和实用电路的仿真设计,有针对性地进行设计方法的论述与基础理论的强化。这样使读者在开始阶段不会先被大量的器件内部结构和原理等所困扰,而是形成一种从系统整体到系统具体实现的认识过程,有利于培养读者电子系统总体设计的意识,形成先系统功能和系统构建,然后再具体理论和具体器件的实际工程设计理念。教材的这种“自顶向下”的层次结构,弥补了以往教材只注重基础理论论述,忽视实际工程设计能力培养的不足。本书既可以作为普通高等学校模拟电子线路课程的教材,也可以供电子工程技术人员参考。

实际的电子系统设计一般包括模拟电路部分和数字电路与系统部分,本书为《电子系统设计与实践——模拟部分》,即电子系统设计的模拟电子线路部分。教材以基本理论为主线,以项目或系统总体为切入点引入相关课程内容。例如,在第1章基本放大电路部分,首先给出实际扩音系统的总体框图,然后说明系统组成及放大电路在系统中的地位和作用,进而引出放大的基本概念;接着进行整体指标的论述,再介绍设计放大电路所需的基本理论知识;最后给出放大电路的设计实例与分析,从开始实际系统的引入到最后的总结实例,充分体现了课程的工程性。教材的编写思路可以总结为实际问题的提出→问题分析的切入点→所需要的基本理论→具体的分析及设计方法→分析、设计结果的评估等。读者在学习的过程中不再重复以往“只见树木而不见森林的”认知过程,而是在整体理解课程理论知识的实际应用的基础上,先看到了“整片森林”,更有利于读者理解基本理论知识及其实际应用,强化读者的实际工程意识,适合当今素质教育的理念。

全书由正文和附录两部分组成。正文共分7章:第1章基本放大电路,第2章功率放大电路,第3章放大电路的频率响应,第4章集成运算放大器,第5章反馈,第6章集成运算放大器的应用,第7章直流电源。附录分为两部分:附录Ⅰ半导体分立元件的测试,附录Ⅱ常用电子元器件的识别。第1、3、4、5章介绍了模拟电子线路的基础知识和分析方法,包含基本放大电路中所需元、器件和基本原理、概念的介绍,基本放大电路的组成及工作原理,基本放大电路的实际应用和工程设计方法,放大电路频率响应的基本概念及应用,反馈的概念及应用,负反馈放大电路的分析与设计方法等,在各部分内容的引入过程中都注重了以实际工程应用为



切入点;第2、6、7章为基本应用电路,包括功率放大电路及集成功率放大电路,集成运算放大器构成的信号产生电路及电压比较器、有源滤波电路和直流电源电路,每部分均以实际工程整体需求为出发点,引入各部分基本概念、基本理论及分析设计方法。另外,每章的最后均以实际工程电路设计实例或 Multisim 应用电路仿真实例的形式体现本书注重实际工程应用能力培养的主旨。最后,为了更好地配合实际工程应用需求,书中给出了附录Ⅰ和附录Ⅱ,主要介绍半导体分立元件测试及常用元器件的识别方法。

本书由张芝贤担任主编,负责全书内容的编排、整合、统稿和审查。孙克梅担任副主编,编写了第1、2、5、6、7章,部分习题及索引内容。关宗安编写了第3章和附录。赵雪莹编写了第4章及部分习题。

作 者

2017年1月

目 录

第 1 章 基本放大电路	1
1.1 放大电路的基础知识	2
1.1.1 放大电路的性能指标	2
1.1.2 放大电路中的半导体器件	4
1.1.3 基本共射放大电路的组成及工作原理	29
1.2 放大电路的分析方法	30
1.2.1 图解法	32
1.2.2 微变等效电路法	34
1.3 放大电路静态工作点的稳定	37
1.3.1 静态工作点稳定的必要性	37
1.3.2 静态工作点稳定的放大电路	38
1.4 基本共集电极放大电路和共基极放大电路	41
1.4.1 共集电极放大电路	41
1.4.2 共基极放大电路	42
1.4.3 三种组态的比较	43
1.5 场效应管放大电路	44
1.5.1 场效应管偏置电路	44
1.5.2 场效应管放大电路的动态分析	45
1.6 多级放大电路	47
1.6.1 级间耦合方式	47
1.6.2 多级放大电路的分析	50
1.7 分立元件放大电路设计实例	51
1.7.1 设计任务与要求	51
1.7.2 设计方法	52
习 题	53
第 2 章 功率放大电路	60
2.1 功率放大电路概述	60
2.1.1 功率放大电路的特点	60
2.1.2 提高功率放大电路效率的主要途径	61
2.2 互补功率放大电路	62
2.2.1 OCL 电路	63
2.2.2 OTL 功率放大电路	67



2.2.3	BTL 功率放大电路	69
2.2.4	双通道功率放大电路	69
2.3	集成功率放大电路	70
2.3.1	LM386 集成功率放大电路及其应用	70
2.3.2	LM1875 集成功率放大电路及其应用	72
2.3.3	TDA2030 集成功率放大电路及其应用	73
2.4	功率电路的安全运行	74
2.5	功率放大电路设计实例	74
2.5.1	设计要求	74
2.5.2	设计方法及电路	74
习 题		75
第 3 章	放大电路的频率响应	79
3.1	频率响应概述	79
3.1.1	频率响应的基本概念	79
3.1.2	无源 RC 电路的频率响应分析	80
3.2	单管共射放大电路的频率响应	83
3.2.1	三极管的混合 π 模型	83
3.2.2	阻容耦合共射放大电路的频率响应	84
3.3	多级放大电路的频率响应	89
3.4	实际电子系统频率响应分析与设计举例	91
习 题		92
第 4 章	集成运算放大器	95
4.1	集成运算放大器概述	95
4.2	集成运算放大器的电流源电路	96
4.2.1	基本电流源电路	96
4.2.2	有源负载放大电路	98
4.3	差动放大电路	99
4.3.1	差动放大电路的组成	99
4.3.2	差动放大电路抑制零点漂移的原理	100
4.3.3	差动放大电路对共模信号的抑制作用	101
4.3.4	差动放大电路对差模信号的放大作用	102
4.3.5	具有恒流源的差动放大电路	103
4.3.6	差动放大电路对任意输入信号的放大特性	104
4.4	集成运算放大器的输出级电路	105
4.5	集成运算放大器电路举例	105
4.6	集成运算放大器的使用	107
4.6.1	集成运算放大器的主要参数	107



4.6.2	集成运算放大器的使用及保护措施	109
4.7	集成运算放大器的电压传输特性及理想运算放大器	110
4.7.1	集成运算放大器的电压传输特性	110
4.7.2	理想运算放大器	111
习 题		111
第5章	反 馈	116
5.1	反馈的基本概念和一般表达式	116
5.2	反馈的判断及负反馈组态	118
5.2.1	反馈的判断	118
5.2.2	四种负反馈组态	120
5.3	深度负反馈放大电路的分析	122
5.3.1	深度负反馈的实质	122
5.3.2	深度负反馈放大电路电压放大倍数的计算	123
5.4	负反馈对放大电路性能的影响	125
5.4.1	提高放大倍数的稳定性	126
5.4.2	减小非线性失真和抑制干扰	126
5.4.3	改变输入电阻和输出电阻	127
5.4.4	展宽频带	128
5.4.5	放大电路中引入负反馈的一般原则	128
5.5	负反馈放大电路的自激振荡	129
5.5.1	自激振荡产生的原因和条件	129
5.5.2	负反馈放大电路的稳定性判断	129
5.5.3	自激振荡的消除	130
5.6	负反馈放大电路的设计实例	131
5.6.1	设计要求	131
5.6.2	设计方法	131
习 题		132
第6章	集成运算放大器的应用	136
6.1	数学运算电路	136
6.1.1	比例运算电路	136
6.1.2	加减运算电路	138
6.1.3	积分运算和微分运算电路	140
6.1.4	对数和指数运算电路	141
6.1.5	乘法运算电路	142
6.2	有源滤波电路	143
6.2.1	滤波电路的基础知识	143
6.2.2	低通滤波电路	143



6.2.3	其他滤波电路	145
6.2.4	有源滤波电路 Multisim 仿真举例	146
6.3	电压比较器	151
6.3.1	单限比较器	152
6.3.2	滞回比较器	153
6.3.3	窗口比较器	153
6.4	集成运算放大器在波形产生方面的应用	154
6.4.1	正弦波产生电路	154
6.4.2	矩形波产生电路	156
6.4.3	三角波产生电路	157
6.4.4	波形产生电路 Multisim 仿真举例	159
6.5	集成运算放大器综合应用电路设计实例	163
6.5.1	设计要求	163
6.5.2	设计方法	164
6.6	集成运算放大器实际应用电路举例	165
习 题		168
第 7 章	直流电源	173
7.1	直流电源的组成	173
7.2	单相桥式整流电路	174
7.2.1	工作原理	174
7.2.2	参数计算	174
7.3	滤波电路	175
7.3.1	电容滤波电路	175
7.3.2	其他滤波电路	176
7.4	稳压电路	177
7.4.1	稳压管稳压电路	178
7.4.2	串联型稳压电路	180
7.4.3	集成稳压电路	181
7.5	直流稳压电源电路设计实例	182
7.5.1	设计要求	182
7.5.2	设计思路	182
7.5.3	具体设计过程及器件选择	182
习 题		183
附录 I	半导体分立元件的测试	188
一、	二极管	188
二、	三极管	191
三、	场效应管	195



四、 单结管	196
五、 晶闸管	197
附录 II 常用电子元器件的识别	202
一、 电阻器	202
二、 电容器	204
三、 电感器	206
四、 电声器件	207
五、 二极管	208
六、 三极管	210
七、 模拟集成电路	211
八、 三端稳压 IC	212
九、 电 池	213
十、 特殊器件	213
索 引	215
参考文献	217

第 1 章 基本放大电路

本章从扩音系统的应用实例出发,首先介绍放大电路的性能指标、半导体二极管、晶体三极管、场效应管等放大电路中的半导体器件;然后分别介绍三极管放大电路的组成原理、分析方法及基本组态,场效应管放大电路的组成和分析;最后介绍多级放大电路。

本章的难点在于电子系统中放大概念的建立、三极管及场效应管的工作原理、放大电路的组成原理和分析。

本章知识要点:

1. 什么是电子系统的放大?
2. 放大电路有哪些性能指标?
3. 为什么采用半导体材料制作二极管、三极管等电子元器件?
4. 三极管是通过什么方式来控制集电极电流的? 场效应管是通过什么方式来控制漏极电流的? 为什么它们均可以用于实现放大?
5. 怎样将三极管或场效应管接入电路才能使其实现放大作用?
6. 放大电路的组成原则是什么?
7. 三极管放大电路与场效应管放大电路有什么区别? 如何选用不同的放大电路?

在实践中,放大电路的应用十分广泛,无论是日常使用的收音机、电视机,还是各类测量仪器和复杂的自动控制系统,都可以找到各种各样的放大电路。比如一个歌手在一个能容纳上万人的体育场举办演唱会,无论他怎样拼尽全力歌唱,也不能让所有观众都能清楚地听到他的歌声,这是因为人发出的声音强度有限,且在空气中传播时还要衰减。但是,如果经过扩音系统的处理和放大,即先用话筒采集声音,经过放大之后再由扬声器播放出来,就可以解决这个问题。扩音系统框图如图 1-1 所示。

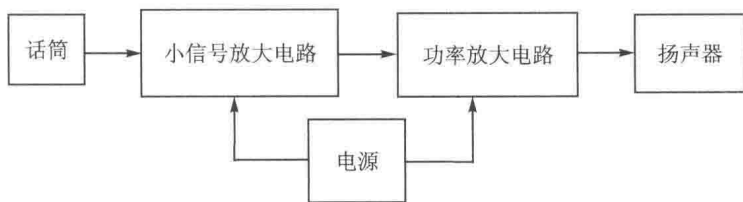


图 1-1 扩音系统框图

由图 1-1 可见,电子学中的放大分为小信号放大和功率放大两种。话筒将声音信号转变为微小的电信号,首先经过小信号放大电路(或前置放大电路)进行幅度放大,然后再送入功率放大电路(或主放大电路)进行功率放大后方能推动扬声器发声。

扩音系统中有小信号放大电路和功率放大电路两级放大电路,为什么不能只用小信号放大电路或功率放大电路之一来实现扩音呢? 首先,因为小信号放大电路虽然把电信号的幅度放大了,但是对于扬声器这种消耗功率较大的负载而言,单一放大了幅度的信号还是无法直接驱动的。再者,若直接将话筒输出的电信号送到功率放大电路中,则由于功率放大电路的输入



阻抗与话筒的阻抗不匹配,会使话筒的输入信号还没被放大就被消耗了,功率放大电路势必无法获得足够的输入信号,也就更无法输出足够大的信号驱动扬声器了。所以,在扩音系统中,要通过小信号放大电路与功率放大电路的组合,才能有效地实现信号的传递和放大。

通常,小信号放大电路都是电压放大电路,本章主要研究的就是小信号放大电路。

三极管的一个典型应用就是构成放大电路。放大是对模拟信号最基本的处理,它是利用三极管的电流控制作用,把微弱的电信号不失真地放大到所需要的数值,实现将直流电源的能量转换为较大能量的输出信号。

1.1 放大电路的基础知识

1.1.1 放大电路的性能指标

为了衡量放大电路的性能,必须引入若干指标。对于信号而言,任何一个放大电路均可看成一个两端口网络,放大电路的示意图如图 1-2 所示。由于任何稳态信号都可以分解为若干频率的正弦信号之和,所以放大电路常以正弦波作为测试信号。当内阻为 R_s 的正弦波信号源 $\dot{U}_s$ 作用在放大电路输入端口时,放大电路得到输入电压 $\dot{U}_i$,同时产生输入电流 $\dot{I}_i$,在输出端口的输出电压为 $\dot{U}_o$,输出电流为 $\dot{I}_o$, R_L 为负载电阻。

1. 放大倍数

放大倍数是衡量放大电路放大能力的重要指标,其定义为放大电路输出量与输入量之比。按照输出量与输入量的类型,放大倍数可以分为电压放大倍数、电流放大倍数、互阻放大倍数和互导放大倍数几类。

(1) 电压放大倍数

电压放大倍数定义为输出电压与输入电压之比,即

$$\dot{A}_{uu} = \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (1-1)$$

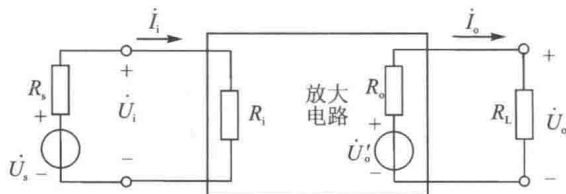


图 1-2 放大电路示意图

(2) 电流放大倍数

电流放大倍数是输出电流与输入电流之比,即

$$\dot{A}_{ii} = \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (1-2)$$

(3) 互阻放大倍数

互阻放大倍数是输出电压与输入电流之比,即



$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \quad (1-3)$$

(4) 互导放大倍数

互导放大倍数是输出电流与输入电压之比,即

$$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} \quad (1-4)$$

对于一般放大电路而言,电压放大倍数是最重要的指标。应当指出,在实际测量时,必须用示波器观察输出波形,只有在输出不失真的情况下,测试数据才有意义。

2. 输入电阻

实际应用中,放大电路与信号源或前一级放大电路相连接,相当于信号源或前级放大电路的一个负载电阻,这个电阻就是放大电路的输入电阻 R_i 。输入电阻是从放大电路输入端看进去的等效电阻,如图 1-2 所示,定义为输入电压有效值与输入电流有效值之比,即

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (1-5)$$

R_i 越大,表明放大电路从信号源或前级索取的电流越小,换言之,信号电压的损失越小。

3. 输出电阻

对于负载或后一级放大电路而言,任何放大电路都相当于一个有内阻的电压源,这个电压源的内阻称为放大电路的输出电阻 R_o ,如图 1-2 所示。输出电阻定义为当输入信号短路、输出端负载开路时,在输出端外加一个正弦电压 U_o ,得到相应的输出电流 I_o ,二者之比即为输出电阻,即

$$R_o = \left. \frac{U_o}{I_o} \right|_{\substack{\dot{U}_s=0 \\ R_L=\infty}} \quad (1-6)$$

实际测试输出电阻时,通常在输入端加上一个固定的正弦交流电压 $\dot{U}_i$,首先使负载开路,测得输出电压为 $\dot{U}'_o$,然后接上负载电阻 R_L ,测得此时的输出电压为 U_o ,根据图 1-2 中的输出回路可得

$$R_o = \left(\frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_o} - 1 \right) R_L \quad (1-7)$$

输出电阻用来描述放大电路的带负载能力,输出电阻越小,负载电阻变化时放大电路输出电压的变化越小,放大电路的带负载能力越强。

4. 通频带

由于放大电路中电容、电感及半导体器件的结电容等电抗元件的存在,因此,放大电路的放大倍数将随着信号频率的变化而变化。一般情况下,当频率升高或降低时,放大倍数的数值都将减小并产生相移,而只在中间一段频率范围内,因各电抗元件的作用可以忽略,故放大倍数基本不变,如图 1-3 所示。当信号频率下降使放大倍数的数值下降到中频时的 0.707 倍时,其所对应的频率称为下限截止频率 f_L ;同理,当信号频率上升使放大倍数的数值下降到中频时的 0.707 倍时,其所对应的频率称为上限截止频率 f_H 。 f_L 与 f_H 之间的频率范围称为通频带,记为 f_{bw} 。

$$f_{bw} = f_H - f_L \quad (1-8)$$

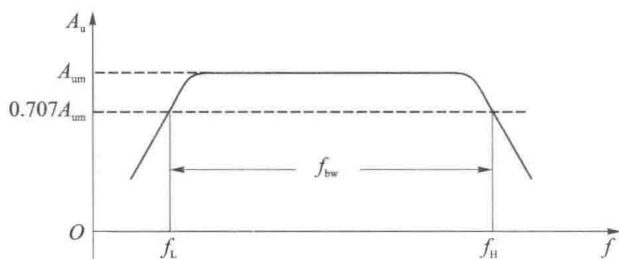


图 1-3 放大电路的通频带

通频带越宽,表明放大电路对不同频率信号的适应能力越强。但应当指出,实际中应根据具体需求为放大电路设计相应的通频带,而不是单一追求宽频带。

5. 最大不失真输出电压

最大不失真输出电压是在输出波形没有明显失真的情况下,放大电路能够提供给负载的输出电压最大值,一般用有效值 U_{om} 表示,也可以用峰-峰值 U_{opp} 表示。对于正弦信号而言,有

$$U_{opp} = 2\sqrt{2}U_{om} \quad (1-9)$$

6. 最大输出功率和效率

放大电路的最大输出功率,表示在输出波形基本不失真的情况下能够向负载提供的最大输出功率,记为 P_{om} 。当电路达到最大输出功率时,输出电压也达到最大不失真输出电压。

放大的本质是能量的控制和转换,负载上得到的输出功率,实际上是利用放大器件的控制作用将直流电源的功率转换成交流信号功率而得到的,因此就存在一个能量转换效率问题。放大电路的效率 η 定义为最大输出功率 P_{om} 与直流电源消耗的功率 P_V 之比,即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_V} \quad (1-10)$$

7. 非线性失真系数

由于放大器件的非线性特性,放大电路的输出波形不可避免地会产生或大或小的非线性失真。其具体表现为,当输入为某一频率的正弦信号时,输出波形中除基波成分之外,还包含一定数量的谐波。输出波形中谐波成分总量与基波成分之比称为非线性失真系数,记为 D ,有

$$D = \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{A_3}{A_1}\right)^2 + \dots} \quad (1-11)$$

式中: A_1 为基波幅值, A_2 、 A_3 ... 为各次谐波分量的幅值。

以上介绍的是放大电路的几个主要技术指标。此外,针对不同的应用场合,还可提出其他指标,如抗干扰能力、信号噪声比、工作温度等。需要说明的是,在实际测试各指标参数时,对于 $\dot{A}$ 、 R_i 、 R_o ,应给放大电路输入中频段小幅值信号;对于 f_L 、 f_H 、 f_{bw} ,应给放大电路输入宽频率范围且小幅值的信号;对于 U_{om} 、 P_{om} 、 η ,应给放大电路输入中频段大幅值信号。

1.1.2 放大电路中的半导体器件

电子学中放大的本质是能量的控制和转换,即在半导体器件的控制下,将直流电源供给的能量转换为交流信号能量输出。半导体器件是放大电路的核心,常用的构造放大电路的半导体器件是晶体三极管和场效应管。由半导体材料制成的 PN 结是半导体器件的基本组成单元,利用 PN 结的特性及多个 PN 结之间的相互作用,可以使三极管和场效应管具有电流控制



作用,从而实现放大。

1. 半导体基础知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质为半导体。自然界中属于半导体的物质很多,用来制作半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge),它们都是四价元素,其中硅的应用最广泛。

(1) 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。硅(或锗)原子的最外层轨道上有4个价电子,为便于讨论,常采用如图1-4(a)所示的简化原子结构模型。在硅(或锗)的晶体中,原子在空间形成排列整齐的点阵,称为晶格。其中,每个原子最外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚,还受到相邻原子核的吸引。因此,价电子不仅围绕自身的原子核运动,同时也出现在相邻原子核的轨道上,即两个相邻原子共有一对价电子,组成共价键结构,如图1-4(b)所示。由于本征半导体中共价键的结合力很强,在绝对零度(即热力学温度 $T=0\text{ K}$, 相当于 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,因此,晶体中没有自由电子,半导体不导电,相当于绝缘体。

当温度逐渐升高时,例如在室温条件下,少数价电子获得足够能量足以挣脱共价键的束缚而成为自由电子。与此同时,在共价键中留下一个空位,称为空穴。在本征半导体中,自由电子和空穴是成对出现的,即自由电子与空穴数目相等,如图1-5所示。原子因失掉一个价电子而带正电,或者说空穴带正电。由于空穴的存在,邻近共价键中的电子就比较容易进来填补,而在附近的共价键中留下一个新的空位,其他价电子又有可能来填补后一个空位,相当于带正电的空穴在运动。在外加电场的作用下,一方面自由电子将产生定向运动,形成电子电流;另一方面,由于空穴的存在,价电子将按一定方向依次填补空穴,也就是说空穴产生定向运动,形成空穴电流。本征半导体中的电流是自由电子与空穴两种载流子的电流之和。

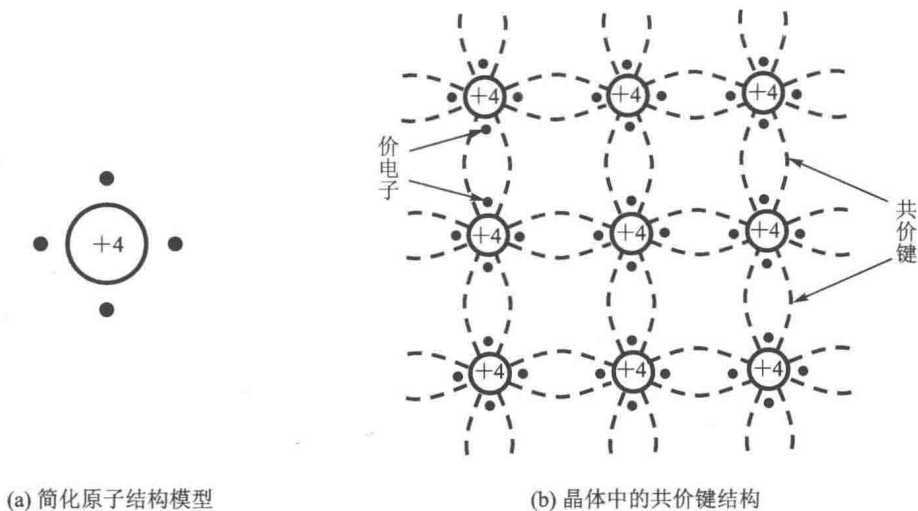


图1-4 本征半导体结构示意图

能运载电荷的粒子称为载流子,半导体中有两种载流子,即自由电子和空穴。空穴的产生也是半导体区别于导体的本质特征。

本征半导体在受热时,产生激发,从而产生自由电子-空穴对的现象,称为本征激发或热激发。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,这种现象称为

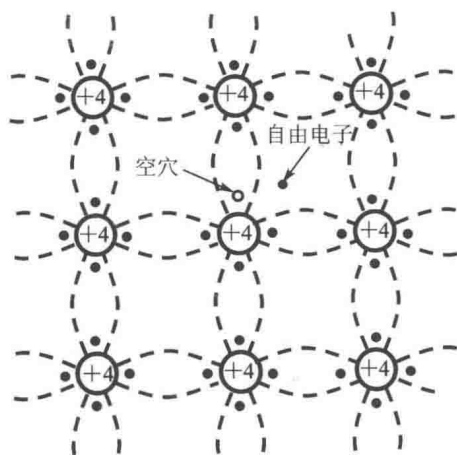


图 1-5 本征半导体中的自由电子和空穴

复合。本征半导体中同时存在激发和复合两种矛盾的运动。在一定温度下,激发与复合两种运动达到了动态平衡,使自由电子-空穴对浓度一定。本征半导体中载流子的浓度除与半导体材料本身的性质有关外,还与温度密切相关,随着温度升高,浓度基本按指数规律增加。半导体材料性能对温度的这种敏感性,一方面可以用来制作光敏和热敏器件,另一方面是造成半导体器件温度稳定性差的原因。

自由电子-空穴对的产生使本征半导体具有一定的导电能力,但因载流子的数量很少,所以本征半导体的导电能力很弱。

(2) 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力,可以在本征半导体中掺入某种特定的杂质元素,掺杂后的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质元素的不同,杂质半导体可分成 N 型半导体和 P 型半导体。控制掺入杂质元素的浓度,就可以控制杂质半导体的导电性能。

在纯净的硅(或锗)晶体中掺入五价元素,如磷、砷等,则原来晶格中某些硅原子将被杂质原子取代。因为杂质原子的最外层有 5 个价电子,所以它与周围 4 个硅原子组成共价键时多出一个价电子。这个多余的价电子不受共价键的束缚,在室温下即可成为自由电子,如图 1-6(a)所示。在 N 型半导体中,自由电子的浓度将大大高于空穴浓度,自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。N 型半导体主要依靠自由电子导电,其中的 5 价杂质原子可以提供电子,所以称为施主原子。

在纯净的硅(或锗)晶体中掺入三价元素,如硼、铝等,就构成了 P 型半导体。由于杂质原子的最外层只有 3 个价电子,当杂质原子与周围的硅原子组成共价键时,因缺少一个价电子而产生一个空位,这个空位易被相邻共价键中的价电子填补,而在其相应共价键中产生一个空穴,如图 1-6(b)所示。在 P 型半导体中,空穴的浓度将大大高于自由电子浓度,因而主要依靠空穴导电。P 型半导体中的空穴为多子,自由电子为少子。因 3 价杂质原子的空位可以吸收电子,故称为受主原子。

2. 半导体二极管

半导体二极管,以下简称二极管(Diode),由杂质半导体制成,广泛应用于各种电子设备中。二极管种类很多,按制造材料可分为硅(Si)二极管和锗(Ge)二极管;按用途可分为普通二

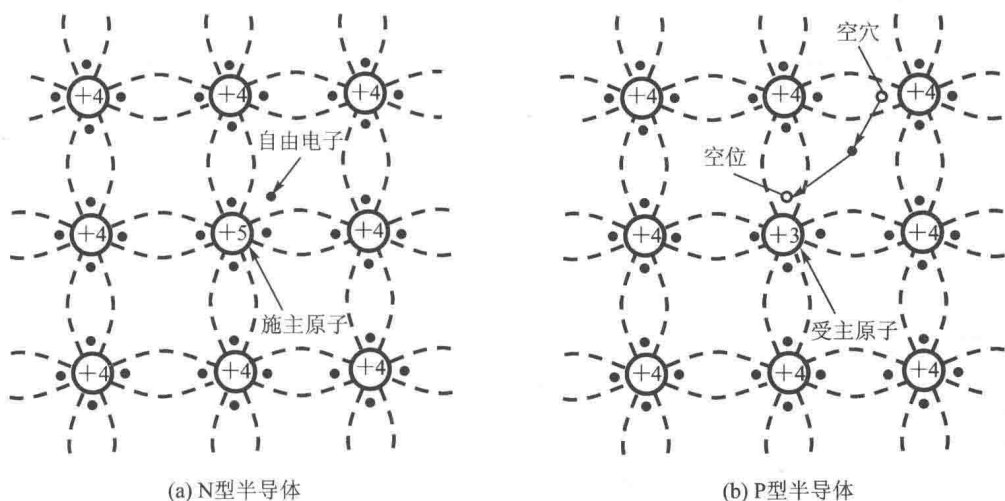


图 1-6 杂质半导体

极管、整流二极管、检波二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管、开关二极管等；按电流容量可分为大功率二极管、中功率二极管和小功率二极管。二极管的常见外形如图 1-7 所示。

二极管的应用实例如图 1-8 所示，图(a)为电视机中使用的高频调谐器，俗称高频头，它利用变容二极管的电容随外加电压变化的特性，通过调节外加电压实现对变容二极管电容的调节，从而实现对不同频道电视节目的调谐，最终选出所需的电视节目；图(b)为新型 LED 节能灯，它利用整流二极管把交流电转变为直流电后，点亮高亮度发光二极管，用来照明；图(c)为电视机的遥控器，它利用红外发光二极管将操作电视机的控制信号发射出去，与配套的遥控接收器配合，实现电视节目调节、音量调节等遥控操作；图(d)为由发光二极管组成的交通信号灯，它将多个发光二极管拼排成所需的交通标志或字符，在控制信号控制下，实现交通指挥。

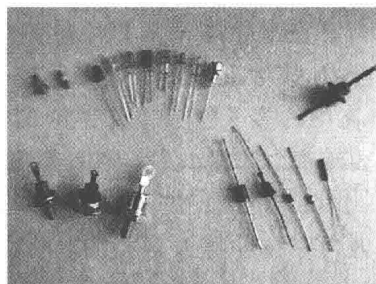


图 1-7 二极管外形图

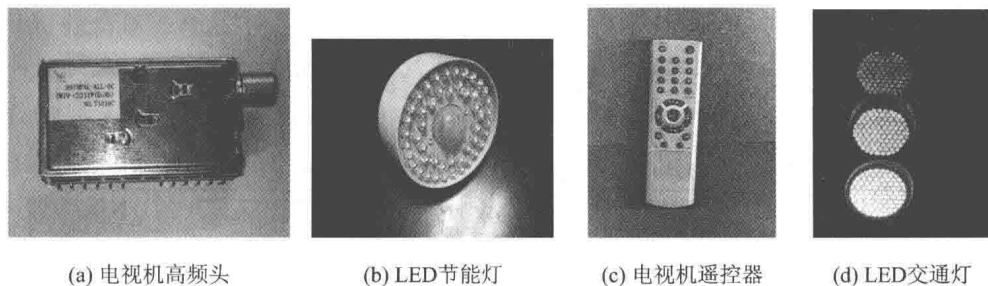


图 1-8 二极管应用实例

二极管是一种由 PN 结构成的基本电子器件。PN 结是由 P 型半导体和 N 型半导体有机结合而形成的。二极管结构及电路符号如图 1-9 所示。它有 2 个电极，由 P 型半导体区引出