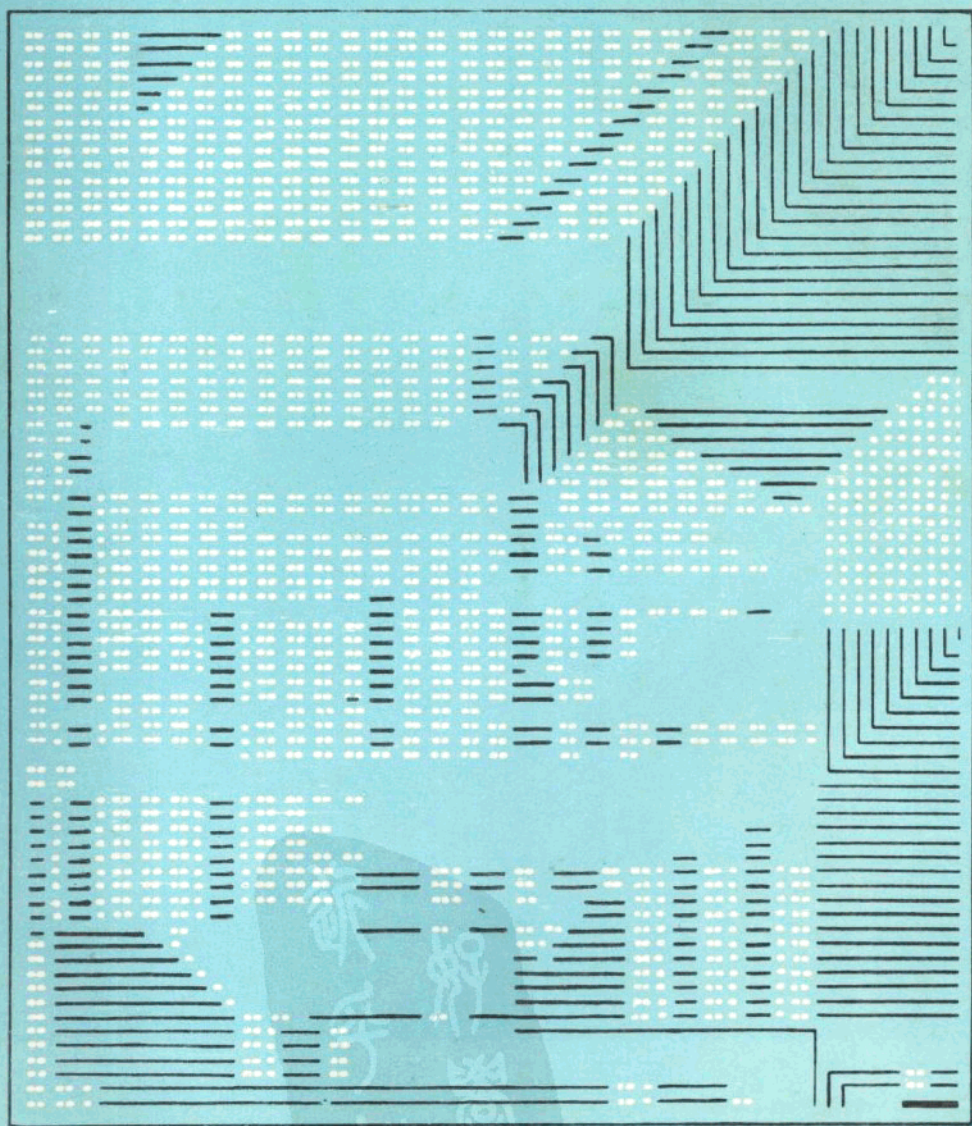


模拟集成电路基础

陈天授 李桂安 李士雄 编著



南京大学出版社

模拟集成电路基础

李士群 陈天授 李桂安 编著

南京大学出版社

1990·南京

内 容 提 要

本书在实践教学的基础上参照电子技术课程指导小组 1986 年 5 月厦门会议制订的《电子技术基础教学基本要求》编成。全书在对分立元件电路作了简要分析后,着重讨论了集成运算放大器基础,集成运算放大器的负反馈、开环和正反馈应用,选频网络和正弦振荡器,有源滤波器,模拟乘法器,集成功率放大器,集成稳压电源,生化电信号放大器,交流电桥检零放大器,7650 动态自稳零高级放大器等。此外,还引入了 VMOS 器件,通用阻抗变换器及频敏负阻等新内容。本书不仅可以作为工科大学本科,大专,电视大学的电力类、自动化类及仪表、检测类专业模拟电子技术基础课程的教材或教学参考书,而且对工程技术人员及自学者也都有参考价值。

模 拟 集 成 电 路 基 础

陈天授 李桂安 李士雄 编著

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 江苏省丹阳练湖印刷厂印刷

1990 年 6 月第 1 版 1990 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 23.5 字数: 596 千

印数: 1—2000

ISBN 7-305-00744-7

TP·25

定价: 7.20 元

前 言

随着模拟集成电路应用的日益广泛,有关院校模拟电子技术课程面临着压缩学时和更新内容的繁重任务。从1982年开始我们就努力根据“少而精”的原则,着手进行教学体系、教学方法及教学内容的改革尝试。在对1980年—1983年四届学生进行教学的过程中,我们不断进行“以方法为主线,加强能力培养”的教改试验,并从基本原理和分析方法的角度去分析分立电路和集成电路之间的区别和联系。为了突出内容主题,我们把章分得较细,以利于教学内容的组织和取舍。书中对留作自学或加深拓宽的内容加上*号以示区别。

本书是在一、二两次初稿的基础上,结合最近的教改实践,参照电子技术课程指导小组于1986年5月厦门会议制订的基本要求进行了大量修改补充而成的。全书在突出基本概念、基本原理、基本方法的同时,注重实用,力求反映国内外电子技术的最新发展。

本书的编写是在南京工学院自动控制系电路与电子技术教研组有关同志集体讨论的基础上进行的。参加一稿讨论的有李士雄、衣承斌、陈天授、陈黎明、李桂安、刘京南、陆履豪,由陈天授执笔完成,李桂安校阅了全部原稿,并选编了思考题和习题;参加二稿整理改编工作的有李士雄、衣承斌、陈天授,陈黎明、李桂安。出版前,由李士雄、陈天授、李桂安整理、修改、增补,并最后定稿。

清华大学童诗白教授对本书的编写给予了热情支持,南京工学院无线电系谢嘉奎教授担任本书主审,给予了具体指导和帮助,编者对此谨致衷心的感谢!

此外,严振祥老师提出了不少有益的意见;王启揆、黄春生、周万珍同志给予了大力支持,在此也一并致谢。

编者1988年7月

目 录

第一章 放大器概论	1
一、放大器的基本概念.....	1
二、放大器的基本框图.....	2
三、放大器抽象为有源四端网络.....	3
四、放大器的主要参数和指标.....	4
复习题.....	6
第二章 半导体物理概论	7
一、半导体的基本概念.....	7
二、半导体中的载流子——自由电子和空穴.....	8
三、本征载流子浓度.....	9
四、杂质半导体.....	10
五、杂质补偿原理.....	11
六、半导体中载流子的运动方式.....	11
复习题、习题.....	12
第三章 PN结及半导体二极管	13
一、半导体器件的核心——PN结.....	13
二、PN结的单向导电性.....	15
三、PN结性能的进一步讨论.....	15
四、PN结的反向击穿.....	17
五、半导体二极管.....	18
六、二极管电路.....	19
附录.....	22
复习题、习题.....	24
第四章 双极型晶体管和简单放大器	26
一、双极型晶体管的构成.....	26
二、双极型晶体管的工作原理.....	27
三、共基极放大器.....	29
四、共射极放大器.....	30
五、共射接法的晶体管特性曲线.....	31
*六、晶体管的极限参数.....	32
七、共射放大器的实际电路.....	33
附录.....	34
复习题、习题.....	35

第五章 图解分析法	39
一、图解分析法的基本原理.....	39
二、应用图解法分析简单放大器.....	40
*三、具有最大不失真输出的放大器工作点图解求法.....	45
*四、图解分析法举例.....	45
附录.....	47
复习题、习题.....	48
第六章 等效电路法	51
一、晶体管的 h 参数及其等效电路.....	51
*二、由晶体管特性曲线求 h 参数.....	53
三、 r_{be} 的计算.....	54
四、简化的 h 参数等效电路.....	55
五、利用等效电路法对放大器作动态分析.....	55
*六、信号流程框图简介.....	57
复习题、习题.....	59
第七章 单极放大器和恒流源电路	61
一、工作点稳定的共射放大器.....	61
二、晶体管恒流源电路.....	64
三、共集电极放大器.....	66
*四、共基极放大器.....	72
复习题、习题.....	74
第八章 级间耦合和多级放大器	78
一、多级放大器的组成规律和结构特点.....	78
二、级间耦合的任务和方式.....	79
三、多级放大器的分析.....	83
*四、分析举例.....	84
复习题、习题.....	88
第九章 高频微变等效电路	90
一、PN 结电容和二极管的高频等效电路.....	90
二、晶体管的混合 π 型等效电路.....	92
三、晶体管的频率特性参数.....	94
复习题、习题.....	96
第十章 放大器的频率特性	97
一、放大器频率特性的概念.....	97
*二、一阶 RC 有源网络频率特性的一般表达式.....	99
三、放大器频率特性的分析方法——分频段法.....	106
四、共射-共基放大器高频特性的分析.....	110
五、多级放大器频率特性的讨论.....	114
六、放大器频率特性的观察和测量.....	114

附录	116
复习题、习题	117
第十一章 场效应晶体管及其应用	120
一、结型场效应管 <i>JFET</i>	120
二、MOS 场效应晶体管	124
*三、场效应管放大器	129
四、场效应管的特点及其应用	134
附录	135
复习题、习题	136
第十二章 反馈放大器基础	139
一、反馈的基本概念	139
二、反馈的基本类型	141
三、负反馈的主要特性——稳定传输增益	145
复习题、习题	147
* 第十三章 反馈放大器的分析计算	150
一、反馈放大器中的基本放大器	150
二、负反馈放大器输入电阻的计算	154
三、负反馈放大器输出电阻的计算	155
四、反馈放大器分析计算举例	158
五、深负反馈放大器的分析估算	166
复习题、习题	170
第十四章 反馈对放大器性能的影响	171
一、负反馈对放大器性能的影响	171
二、反馈放大器的自激振荡	177
复习题、习题	180
第十五章 集成运算放大器基础	183
一、集成运算放大器的结构特点	183
二、差动放大器	185
三、运算放大器内部电路梗概	195
*四、集成运算放大器的主要技术指标	200
五、实际运算放大器的低频等效电路和理想运算放大器	203
附录	204
复习题、习题	205
第十六章 集成运算放大器的负反馈应用	208
一、由集成运算放大器组成的负反馈放大器的特点	208
二、反相输入运算放大器	209
三、同相输入运算放大器	215
四、差动输入运算放大器	220
五、三种输入电路型式的比较	224

*六、折线传输特性的实现	224
*七、误差分析	233
复习题、习题	235
第十七章 集成运算放大器的开环和正反馈应用	239
一、开环和正反馈情况下电路的特征和分析要领	239
二、比较器	239
三、波形发生器	245
四、运算放大器应用电路分析方法小结	249
复习题、习题	250
第十八章 选频网络和正弦振荡器	254
一、正弦振荡的形成条件	254
二、常用的选频网络	255
三、正弦振荡器	259
复习题、习题	265
第十九章 有源滤波器	268
一、滤波器概述	268
二、单放大器有源滤波器	272
*三、多放大器有源滤波器	276
*四、普遍化的阻抗转换器	279
*五、全通滤波器	280
复习题、习题	282
第二十章 模拟乘法器及其应用	284
一、模拟乘法器的基本概念	284
二、模拟相乘的基本原理	285
*三、集成模拟乘法器BG314	288
*四、集成乘法器的主要技术参数	292
五、集成乘法器的应用	293
复习题、习题	295
第二十一章 功率放大器	299
一、功率放大的概念	299
二、乙类推挽功率放大电路的分析与计算	302
三、集成功率放大器	304
*四、功率管的安全使用和极限运行	310
*五、变压器耦合的乙类推挽功率放大器	311
*六、VMOS器件及其在功率放大器中的应用	312
复习题、习题	314
第二十二章 小功率整流及稳压电路	319
一、小功率直流电源的组成	319
二、整流电路	319

三、滤波电路	322
*四、倍压整流电路	323
五、稳压管稳压电路	324
*六、稳压电源的主要技术指标	325
七、提高稳压性能的措施	326
复习题、习题	327
第二十三章 串联式稳压电源	330
一、从反馈的角度认识串联式稳压电源	330
二、串联式稳压电源的工作原理及性能分析	331
*三、改善稳压电源性能的措施	334
*四、集成稳压电源	335
*五、三端集成稳压电源	340
复习题、习题	343
第二十四章 实用电路分析举例	347
一、生化电信号测量放大器	347
二、交流电桥零值检测放大器	351
*三、动态自校零集成运算放大器	354
四、读图要领	359
本书常用符号表	360
部分习题答案	362
主要参考文献	366

第一章 放大器概论

本章介绍放大器的轮廓及指标，以期读者能对模拟电子学中这一核心部件的概貌有所认识。

电子技术广泛地应用在通讯、控制、计算机以及人们的文化生活等方面。随着科学技术的发展，新型的电子器件和电路层出不穷。电子线路可以分为模拟电路和脉冲数字电路两大类。脉冲数字电路所处理的信号是脉冲的、不连续的数字量或是由高、低电平表示的开关动作；而模拟电路所处理的信号则是连续变化的信号，也就是模拟量。本课程所要研究的是工业控制设备中常用的模拟电路及其分析方法。

模拟电路种类繁多，而其最基本、最核心的是放大器。其它电路的工作大都和放大器紧密相关。

一、放大器的基本概念

放大器是将微弱的电信号(电压或电流)不失真地放大到所需要的数值，并对负载提供一定量的信号功率的电子装置。我们常见的扩音机就是一个典型的放大器系统，如图1-1所示。从传声器输送到扩音机输入端的是代表声响的电信号，其数值很小(一般是毫伏数量级)，经过扩音机中的放大器把这个信号放大至伏的数量级，然后由输出端向负载——扬声器提供一定的信号功率。

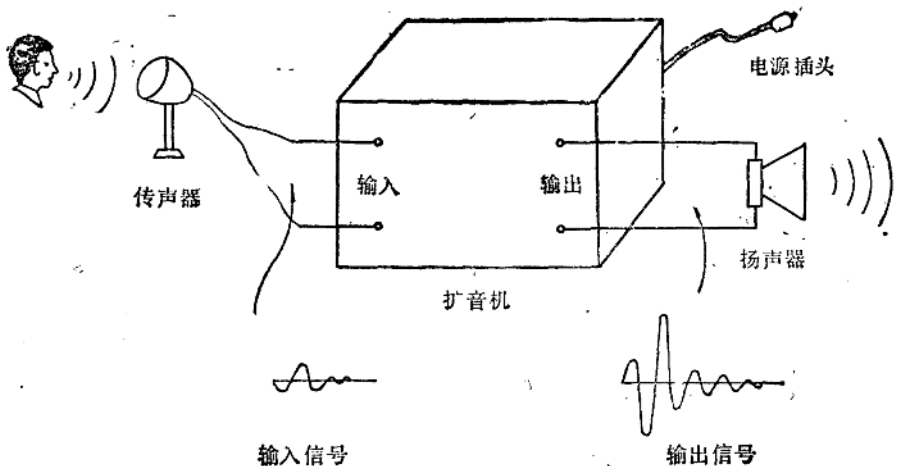


图 1-1 扩音机示意图

二、放大器的基本框图

放大器的基本组成如图 1-2 所示,它是由放大器(主体)、信号源、负载和直流电源四部分组成的。

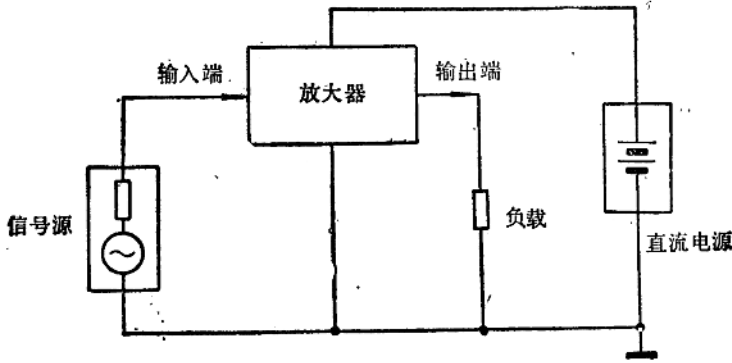


图 1-2 放大器框图

下面对各个部分分别加以介绍。

1. 信号源

信号源提供放大器输入端所需要的电信号。所谓电信号是一种变化的电压或电流,通常是我们所研究的物理量的电气模拟。这个物理量的信息就通过信号电压或电流的某些参数(如幅值、极性、频率和相位等)的变化表现出来。例如传声器(扩音机中放大器的信号源)的输出电压便是声波振动这个物理量的电气模拟,这个电压的幅值代表声波振动的大小,电压的频率代表声波振动的频率。这样,信号电压的幅值和频率就携带了声波振动的信息。因此只有变化的电压和电流才能携带信息,放大器放大的正是这些变化的电压或电流。

在以后各章分析放大器工作时,我们将会遇到这样的情况:为了使放大器的放大器件能正常工作,在放大器的输入端常人为地加上一个恒定的电压和电流分量,使其和输入信号一起作用到放大器的输入端。但这些恒定的分量不是信号,不是放大器放大的对象,要把它和信号严格地区别开来,以免造成混淆。

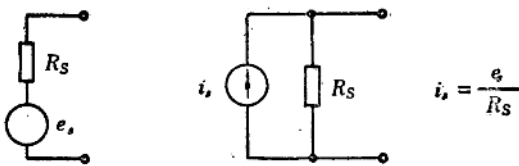


图 1-3 信号源的两表示形式

信号随时间的变化规律,即信号电压或电流的波形,一般是非正弦的。但在分析和计算时,都假定放大器的输入信号是正弦的,这主要是为了方便。因为任何周期性信号都可以根据富氏级数分解为各种频率的正弦分量。如图 1-3 所示,信号源可以用一电压源和一电阻 R_s 相串联的形式,

亦可以用一电流源和一电阻 R_s 相并联的形式来表示。电阻 R_s 是信号源的等效内阻。

2. 放大器

放大器之所以具有放大信号的功能,是由于放大器中包含了放大元件。本书所讨论的放

大器，其基本的放大元件是晶体管。在放大器中先由一个或数个晶体管组成一个能独立完成对信号进行放大作用的最小单元——放大级(简称级)，然后由一个至数个放大级级联组成一个放大器的总体。在多数情况下，一个放大级由一个晶体管及一些电阻、电容、电感等无源元件组成，也有一些特殊的放大级是由数个晶体管组成的。

由于信号源所提供的信号电平*通常是很微弱的，而放大器负载上要求得到的信号电平又常常很大，这就要求放大器具有相当大的放大能力，这是单个放大级所无法达到的。这样就必须把信号经第一放大级放大后再送到第二放大级进一步放大，如此一级一级地把信号放大到足够的大小。这样的级间连接可用图 1-4 来表示。这样的放大器称为多级放大器。例如一个扩音机中的放大器通常是由 4~7 个放大级联成的。

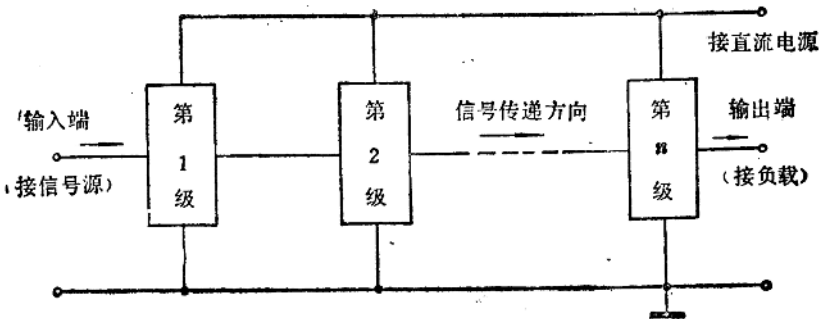


图 1-4 放大器的级联

3. 负载

负载是接收信号功率的元件。在扩音机中，扬声器就是负载。负载可以是电阻、电容、电感及反电势，或它们的不同组合。

负载不是放大器的本体，它是我们要讨论的放大器的外接元件，一般情况下，它不一定是个定值。

4. 直流电源

一般放大器都需要直流电源提供所需要的能量。负载上得到的信号功率也是通过放大器中晶体管的控制作用把直流电能转换成信号电能的。从这个观点上讲，放大器又是一个能量变换器。一般市电是由交流电网供电的。故电子设备中的放大器所需要的直流电源就必须由设备内部的电源变换装置提供。

5. 地

在多数放大器中，信号源、放大器、负载和直流电源这些部分有一个公共点，这个点称为“地”，用“⊥”符号表示。在装配放大器时，通常把“地”点和金属底板相连接；某些情况下，“地”也可和大地相连接。

三、放大器抽象为有源四端网络

在分析放大器的工作时，如果只着眼于放大器输入端和输出端的信号量值，并假定信号

* 信号电平通常指功率，有时也指电压或电流。

为正弦波,用正弦相量表示,就可以把放大器抽象为图 1-5 所示的有源四端网络。图中的 r_i 是放大器的输入阻抗, r_o 是其输出阻抗, $\dot{A}_{uo} \cdot \dot{U}_i$ 代表输出端的开路电势,它是受放大器输入信号控制的受控源。图 1-5(a)输出端的电路部分,也可以用图 1-5(b)电流源的形式来表示。

上述的方法不仅可用来描述一个多级放大器的整体,还可以用来描述多级放大器的某一个放大级,这时信号源就是上一级放大器的输出信号,而负载则是下一级放大器的输入阻抗。

我们指出放大器可抽象为有源四端网络这一点的意义在于:可以用在电工基础中所学的有关有源四端网络的理论来分析放大器的工作。

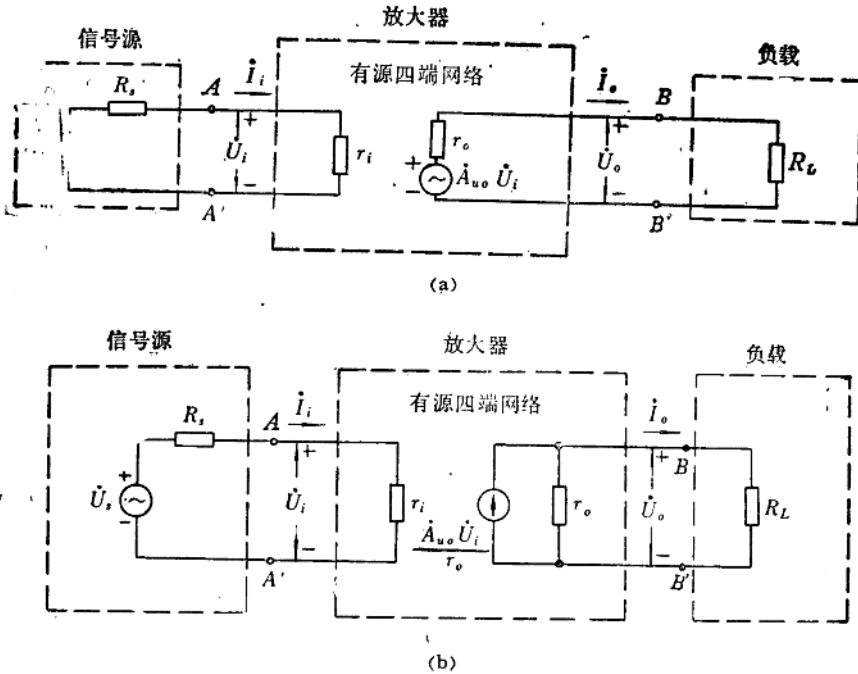


图 1-5 放大器抽象为有源四端网络的两种形式

四、放大器的主要参数和指标

衡量放大器性能的主要参数和指标是:

1. 放大倍数

放大倍数,或称增益,是描述放大器放大能力的一项主要技术指标。它是放大器在波形不失真的情况下,输出端的信号电量与输入端信号电量的比值。一般情况下信号源提供给放大器输入端的电压为 \dot{U}_i , 电流为 \dot{I}_i , 而输出端(即负载两端)得到的信号电压为 \dot{U}_o , 信号电流为 \dot{I}_o 。这样就可用四种增益的形式来描述放大器的放大能力:

$$\text{电压放大倍数} \quad \dot{A}_v = \dot{U}_o / \dot{U}_i \quad (1-1)$$

$$\text{电流放大倍数} \quad \dot{A}_i = \dot{I}_o / \dot{I}_i \quad (1-2)$$

$$\text{跨阻增益} \quad \dot{A}_R = \dot{U}_o / \dot{I}_i \quad (1-3)$$

$$\text{跨导增益} \quad \dot{A}_G = \dot{I}_o / \dot{U}_i \quad (1-4)$$

在这四种增益形式中，以电压放大倍数用得最多。

对于多级放大器中的任一级放大器，也都有它的四种增益形式。多级放大器中的第 k 级放大器，其信号源就是第 $k-1$ 级放大器的输出，而它的负载就是第 $k+1$ 级的输入阻抗，整个多级放大器总的电压增益等于各级放大器电压增益的乘积，可表示为：

$$\dot{A}_U = \dot{A}_{U_1} \cdot \dot{A}_{U_2} \cdot \dots \cdot \dot{A}_{U_n} \quad (1-5)$$

2. 输入阻抗和输出阻抗

1) 输入阻抗

在工业控制设备中的放大器，其输入端通常可看作是无源的，在工作的频率范围内一般可以忽略其电抗分量，而用一个等效内阻 r_i 来代替，这就是放大器的输入阻抗。放大器的输入阻抗代表放大器对信号源所造成的负荷效应的大小。输入阻抗大，则放大器对信号源所取的电流就小，即负荷小。反之，则放大器对信号源所取的电流就大，即负荷大。

输入阻抗可用下式来表示：

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (1-6)$$

2) 输出阻抗

对负载而言，放大器的输出端相当于一个等效信号源，其等效内阻就是放大器的输出电阻 r_o 。 r_o 越小，带负载前后输出电压相差越小，亦即放大器受负载影响的程度越小，所以，一般用输出电阻 r_o 来衡量放大器带负载的能力， r_o 越小，则放大器带负载的能力越强。

3. 放大器的工作频带

信号随时间的变化规律，也就是信号电压或电流的波形，是由信号源的性质决定的。一般情况下，可利用谐波分析原理，将各种不同信号的波形分解成一系列不同频率的正弦波分量，这些正弦波具有一定的频率范围，称为信号的频谱范围。

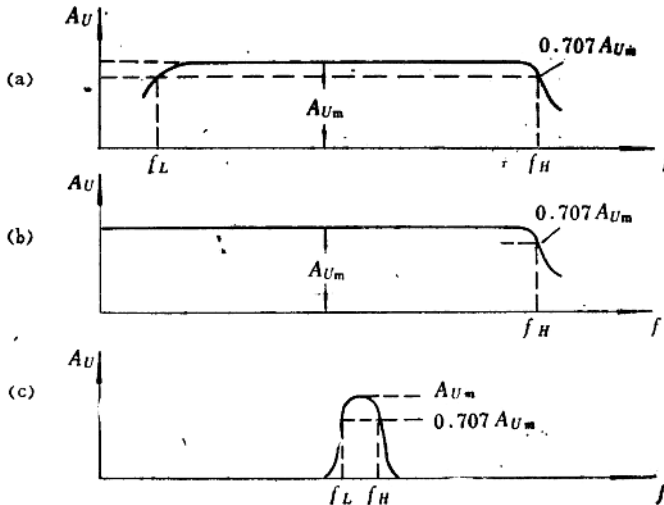


图 1-6 几种典型的放大器幅频特性

(a) 交流宽带放大器；(b) 直流放大器；(c) 选频(带通)放大器

放大器对于不同频率的信号放大能力是不同的，放大倍数与频率的关系曲线，称为幅频特性。图 1-6 画出了几种典型的放大器幅频特性， $A_v = F(f)$ 。

在图 1-6 的幅频特性中，我们设 A_{vm} 是放大倍数的最大值，并规定 $A_v = 0.707 A_{vm}$ 的频率为上限频率 f_H 和下限频率 f_L ， f_L 到 f_H 之间的频率范围称为放大器的工作频率范围，简称通频带，如果 $f_H \gg f_L$ (如图 1-6(a)、(b))，称为宽带放大器；如果 f_H 和 f_L 的数值比较接近(如图 1-6(c))，则称为选频放大器。在图 1-6(a)和(b)两种幅频特性中，图 1-6(a)不能放大频率接近于零的信号，称为交流放大器，而图 1-6(b)则能放大频率低到零的信号，称为直流放大器。本书主要讨论直流放大器和交流宽带放大器。

复 习 题

- 1-1 放大器的作用是什么？它能实现能量放大吗？
- 1-2 衡量放大器的性能有哪些主要指标？它们是如何定义的？

第二章 半导体物理概论

在本书讨论的模拟电子电路中所用的电子器件都是由半导体材料制成的，其工作原理是建立在半导体电特性的理论基础之上的。本章对半导体物理学中的一些基本知识作一简要的讨论。并着重于基本概念的论述，力图避免繁琐的数学推导。

一、半导体的基本概念

1. 半导体晶体的结构

半导体是常温下其电导率介于导体和绝缘体之间的一类物质。最重要的半导体是硅和锗两种元素，其原子量分别为14和32。

尽管硅和锗的原子量不同，但它们都是四价元素，其原子结构示意图均可用图 2-1 来表示。

当将硅、锗等半导体材料制成单晶体时，它们的原子在空间的排列形成很有规律的空间点阵，这种空间点阵称为晶格。在硅和锗的晶格中，任何一个原子 A (见图 2-2) 与相邻最近的四个原子距离相等，这四个与 A 相邻的原子可以设想处在一个正立方体的四个对角顶点上，而原子 A 则处于正立方体的中心上。

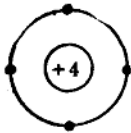


图 2-1 四价元素原子结构示意图

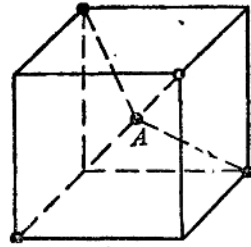


图 2-2 硅和锗晶格内的原子空间排列

2. 晶体的电子公有化现象

晶体内相邻原子间的距离为 $2.5 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，这个距离与原子直径同数量级。原子间的距离在这样近的情况下，各原子的外层电子(即价电子)不仅受到所属原子核的作用，而且还要受到与它相邻的四个原子的强烈作用，这就使得价电子的运动规律发生了质的变化：原子内的每个价电子不再只出现在本身原子的电子层中(围绕本身原子核旋转)，而且由于相邻原子的强烈作用，还会出现在相邻原子的电子层中(即围绕相邻原子核旋转)。对于每个原子来说，与它相邻最近的四个原子也各有一个价电子出现在它的电子层中，这就相当于这个原子与每个相邻的原子各有一对公有电子，这种现象称为电子公有化。在这种情况下，晶格中每个原

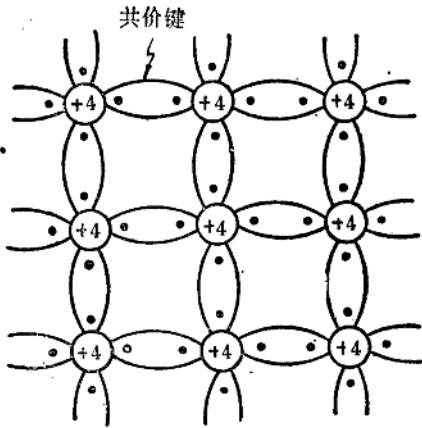


图 2-3 硅和锗原子结构的共价键

子的最外壳层中的电子数量 8 个，构成化学物理性能极为稳定的原子结构。

3. 半导体中的共价键

半导体晶体的这种原子结构，可以用图 2-3 的平面图形象地表示出来。这种通过电子公有化使晶体中每个原子外层都有八个电子的稳定的原子结构，可描述成每两个相邻原子的一对公有电子被牢牢地束缚在一种假想的共价键上，如图 2-3 所示。

共价键对公有电子有着一定的束缚作用，电子必须获得足够的能量才能挣脱共价键的束缚，成为自由电子。要使一个价电子从共价键里挣脱出来，所需要的电能称为游离电能 E_G 。

在常温下，硅的 E_G 约为 1.1eV (电子伏特)，锗的 E_G 约为 0.72eV 。在温度为 0K 时，所有公有电子都被束缚在共价键里，整个晶体内没有任何可以导电的载流子，所以在这种情况下，半导体不导电。

二、半导体中的载流子——自由电子和空穴

当半导体的温度 T 升高或受到光的照射时，公有电子将获得能量，其中能量较大的电子就会挣脱共价键的束缚成为自由电子 (简称电子)，如果此时在半导体上加上电压，在电场的作用下，自由电子就能作定向运动而形成电流。

在半导体受到热和光的激发下产生自由电子的同时，我们还必须注意失去电子的共价键，在图 2-4 中用一个小圆圈来表示，称它为空穴。空穴概念的重要性在于它可以被作为一个带电载流子来对待，效果上可同自由电子相比拟。

现将空穴具有导电性的机理定性地说明如下：当共价键失去电子而出现空穴时，邻近原子的价电子只需要获得很小的能量就能离开共价键填补到这个空穴上去。离开共价键去填补空穴的电子又在其原来的位置上留下一个空穴。新位置上的空穴又可被来自其它共价键的电子所填补。因此，共价键中价电子的这种依次填补空穴的运动，可以视为是空穴在向相反方向运动。这时我们就得到一个不涉及自由电子的导电机理。在图 2-5 中，带点的圆圈表示完整的共价键，空白圆圈表示空穴。图 2-5(a) 示出一个具有十个原子的横列，原子 6 处有一失去电子的键 (即空穴)。假设来自原子 7 的价电子向左移进原子 6 处的空穴，从而形成图 2-5(b) 的结果。与 2-5(a) 比较，则图中的空穴向右移动了 (从原子 6 到原子 7)。以上讨论说明，空穴向某个方向的运动实际上意味着价电子

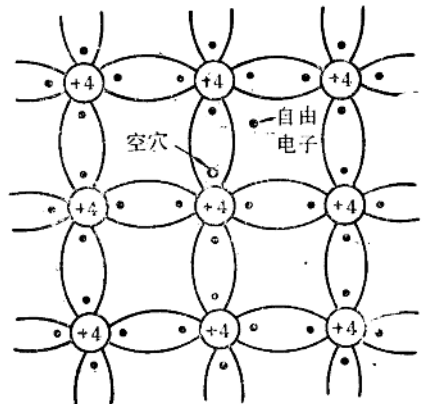


图 2-4 共价键失去电子产生自由电子和空穴