

►► 高等学校应用型本科“十三五”规划教材



低频电子电路



主 编 张 媛
副主编 唐林建
主 审 李卫东



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校应用型本科“一二三”规划教材

低频电子电路

主 编 张 媛
副主编 唐林建
主 审 李卫东



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以电子信息系统中的放大电路为主线,介绍了放大、信号运算、功率放大、直流电源等单元功能电路,主要包括半导体二极管及其基本电路、双极型三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大器、负反馈放大电路、功率放大电路和直流电源。全书内容系统性较强,结构完整,重点突出,每章均附有小结和思考与练习题。

本书在编写上保持简明易学的风格,力图摆脱理论推导繁琐的方式,着重介绍放大电路分析的基本思想和方法,尽可能地使知识易于为读者所接受,同时,补充了一些实践应用的内容。

本书可作为高等院校电气信息类各专业学生的教材,也可作为自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子电路/张媛主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.8

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4613-8

I. ① 低… II. ① 张… III. ① 电子电路—低频 IV. ① TN710.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 177771 号

策 划 戚文艳

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 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 虎彩印艺股份有限公司

版 次 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16

字 数 376千字

印 数 1000册

定 价 32.00元

ISBN 978-7-5606-4613-8/TN

XDUP 4905001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

为了适应电子科学技术的发展和高等教育培养高素质人才的需要,我们根据近年电子技术的新发展,总结多年来课程改革的经验,并考虑素质教育的特点,编写了本书。本书在保留基本理论体系的基础上,精炼基础部分,适当拓宽知识面,以培养学生创新意识为目标,并以“保证基础,联系实际,体现先进,引导创新”为编写原则,力求体现“精炼”和“实用”。本书在编写时考虑到要使学生获得必要的电子技术基础理论、基本知识和基本技能,因此舍去了繁复的、不必要的理论叙述与推导,以加强应用,提高学生分析和解决实际问题的能力。

全书共9章,编写特色如下:

1. 在内容安排上,先介绍半导体器件,再介绍放大电路;先介绍分立元件构成的放大电路,再介绍集成运放电路;围绕信号的放大、运算、处理、转换和产生这一主线展开介绍。

2. 以集成电路为主,分立元件为辅。引入常用的模拟集成电路和新的常用电子器件的介绍,重在对电路的认知和对应用能力的培养。

3. 各章力图按“提出问题、突出主干、启发引导、举一反三”的原则编排内容,沿主干方向由浅入深、由简到繁、承前启后,激发读者学习兴趣。

4. 由于电子电路分析和设计方法的现代化和自动化,使定量计算更准确和精确,因而设计者将更侧重电路结构的设计。因此,本书注重电路结构的构思,突出定性分析,使学生从中获得启迪,并进一步提高创新意识。

5. 各章节在讲清基本内容的基础上,增加了“提高”的内容,以扩展知识面,开阔视野。这部分内容教师可以按学时多少和专业需要取舍。

6. 内容与习题融为一体。每章的思考与练习中都设置填空、选择、判断与计算题,以帮助学生总结内容,拓宽思路,提高分析问题和解决问题的能力。

本书由重庆邮电大学移通学院通信与信息工程系组织编写,张媛任主编,唐林建任副主编,李卫东任主审,唐燕、蔡凯、高飞、何春燕、张雪莲、胡蓉、

郑秋菊、郭彦芳等参与了编写。本书编写过程中，参阅了大量的相关教材和资料，并借鉴了部分内容，同时本书的出版得到西安电子科技大学出版社的大力支持，在此对相关作者及编辑一并表示感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏、欠妥之处，恳请各位读者批评指正。

编者

2017年4月

目 录

第1章 绪论	1	3.1.3 三极管的特性曲线	43
1.1 信号与电子系统	1	3.1.4 三极管的主要参数	46
1.1.1 信号及其分类	1	3.1.5 温度对三极管特性及其参数 的影响	48
1.1.2 典型电子系统举例	3	3.2 共发射极放大电路	49
1.2 放大电路的基本概念	3	3.2.1 共发射放大电路的组成	49
1.2.1 放大电路的符号	4	3.2.2 放大电路的两种工作状态	50
1.2.2 放大电路的主要性能指标	5	3.3 放大电路的分析方法	51
1.2.3 放大电路模型	9	3.3.1 图解法	51
本章小结	12	3.3.2 小信号模型分析法	56
思考与练习	12	3.4 放大电路静态工作点的稳定问题	62
第2章 半导体二极管及其基本电路	15	3.4.1 温度对静态工作点的影响	62
2.1 半导体的基础知识	15	3.4.2 射极偏置电路	63
2.1.1 半导体材料	15	3.4.3 稳定静态工作点的措施	67
2.1.2 本征半导体	16	3.5 共集电极和共基极放大电路	68
2.1.3 杂质半导体	17	3.5.1 共集电极放大器的结构与特性	68
2.1.4 PN结的形成及特点	18	3.5.2 共基极放大器的结构与特性	71
2.2 半导体二极管	22	3.5.3 三种基本放大电路性能的比较	72
2.2.1 二极管的结构	23	3.6 多级放大电路	73
2.2.2 二极管的基本特性	23	3.6.1 多级放大电路的耦合方式	73
2.2.3 二极管的主要参数	25	3.6.2 多级放大电路的动态分析	77
2.2.4 二极管的等效电路	26	本章小结	79
2.2.5 二极管基本电路	27	思考与练习	79
2.2.6 特殊二极管	31	第4章 场效应管及其放大电路	89
本章小结	35	4.1 场效应管	89
思考与练习	36	4.1.1 结型场效应管	89
第3章 双极型三极管及其放大电路	40	4.1.2 绝缘栅型场效应管	93
3.1 双极型三极管	40	4.2 场效应管的主要参数	95
3.1.1 三极管的结构及其类型	40	4.3 场效应管放大电路的静态分析	97
3.1.2 三极管的工作原理	41		

4.3.1 场效应管放大电路的三种接法	97	6.3.3 集成运算放大电路的主要性能指标	146
4.3.2 场效应管放大电路的静态工作点设置及估算	97	6.3.4 集成运算放大电路的低频等效电路	147
4.3.3 场效应管放大电路的动态分析	99	6.3.5 集成运算放大电路中的电源电路	148
4.4 场效应管放大电路的特点	103	6.4 集成运算放大电路的线性应用——基本运算电路	151
本章小结	103	6.4.1 理想运算放大器的两个工作区	152
思考与练习	103	6.4.2 比例运算电路	153
第5章 放大电路的频率响应	109	6.4.3 加法和减法运算电路	155
5.1 频率响应及其表示方法	109	6.4.4 积分和微分运算电路	159
5.2 三极管的高频等效模型	113	6.4.5 对数和指数运算电路	161
5.3 场效应管的高频等效模型	115	6.5 集成运算放大电路的非线性应用——电压比较器	162
5.4 单极放大电路的频率响应	116	6.5.1 单限比较器	162
5.4.1 共射极放大电路的频率响应	116	6.5.2 滞回比较器	165
5.4.2 共源极放大电路的频率响应	122	6.5.3 窗口比较器	166
5.4.3 放大电路频率响应的改善和增益带宽积	123	6.5.4 集成电压比较器	167
5.5 多级放大电路的频率响应	124	6.6 集成运算放大电路的使用	167
5.5.1 多级放大电路频率特性的定性分析	124	6.6.1 集成运算放大电路的选用原则	167
5.5.2 截止频率的估算	125	6.6.2 集成运算放大电路的使用注意事项	168
本章小结	128	本章小结	168
思考与练习	128	思考与练习	169
第6章 集成运算放大电路	134	第7章 负反馈放大电路	174
6.1 概述	134	7.1 反馈的基本概念和类型	174
6.1.1 集成电路制造工艺简介	134	7.1.1 反馈的基本概念	174
6.1.2 集成电路中的元件	135	7.1.2 负反馈放大器框图	175
6.2 差分放大电路	135	7.1.3 反馈深度 $ 1+AF $	176
6.2.1 差分放大电路的组成	135	7.2 反馈的类型及判别	177
6.2.2 长尾式差分放大电路	136	7.2.1 直流反馈与交流反馈	177
6.2.3 差分放大电路的四种接法	140	7.2.2 正反馈和负反馈	177
6.3 集成运算放大电路	144	7.2.3 负反馈的组态及其判别方法	178
6.3.1 集成运算放大电路的结构特点与组成	145		
6.3.2 集成运算放大电路的电压传输特性	146		

7.3 深度负反馈条件下闭环增益的估算.....	180	8.2.2 OCL 电路的输出功率及效率 ...	208
7.3.1 “虚短”和“虚断”概念.....	180	8.3 集成功率放大电路.....	209
7.3.2 深度负反馈条件下闭环增益的估算.....	180	8.3.1 集成功率放大电路分析.....	209
7.4 负反馈对放大电路性能的影响.....	185	8.3.2 集成功率放大电路的主要性能指标.....	211
7.4.1 提高闭环增益 A_f 的稳定性	185	8.3.3 集成功率放大电路的应用.....	212
7.4.2 展宽通频带, 减小频率失真	186	本章小结	213
7.4.3 减小非线性失真, 抑制干扰及噪声.....	187	思考与练习	214
7.4.4 负反馈对放大电路输入电阻和输出电阻的影响.....	188	第 9 章 直流电源	219
7.5 放大电路引入负反馈的一般原则.....	190	9.1 整流电路.....	219
7.6 自激振荡及其消除.....	191	9.1.1 单相半波整流电路.....	219
7.6.1 产生自激振荡的原因.....	191	9.1.2 单相全波整流电路.....	221
7.6.2 产生自激振荡的条件.....	192	9.1.3 单相桥式整流电路.....	222
7.6.3 负反馈放大电路的稳定性分析和判断.....	192	9.2 滤波电路.....	223
7.6.4 负反馈放大电路自激振荡的消除.....	194	9.2.1 电容滤波电路.....	224
本章小结	195	9.2.2 电感滤波电路.....	225
思考与练习	196	9.2.3 复合滤波电路.....	226
第 8 章 功率放大电路	200	9.3 倍压整流电路.....	227
8.1 概述.....	200	9.3.1 二倍压整流电路.....	227
8.1.1 功率放大电路的特点.....	200	9.3.2 多倍压整流电路.....	228
8.1.2 功率放大电路工作状态分类.....	201	9.4 稳压电路.....	229
8.1.3 功率放大电路的组成.....	202	9.4.1 稳压电路的性能指标.....	229
8.2 互补功率放大电路.....	206	9.4.2 稳压管稳压电路.....	229
8.2.1 OCL 电路的组成及工作原理 ...	206	9.4.3 串联型稳压电路.....	232
		9.4.4 开关型稳压电路.....	235
		9.4.5 集成稳压电路及其应用.....	237
		本章小结	240
		思考与练习	241
		参考文献	247

第1章 绪论

以微电子技术为标志的现代电子技术的飞速发展,推动了计算机、自动控制、通信和互联网等技术的发展。目前,人类已进入信息时代,而信息时代最重要的基础就是电子技术。

电子技术的基本任务是完成信号的产生、传输和处理。对电子器件、电子电路、电子系统性能的研究决定着电子技术基本任务的完成与否。

按照功能和构成原理的不同,电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类,本书将对模拟电子电路进行详细的阐述。

本章在简要介绍信号与电子系统基本概念的基础上,介绍模拟电子电路中应用最普遍的基本电路(即放大电路),并介绍放大电路的主要性能指标,为后续各章的学习提供必要的基础知识。

1.1 信号与电子系统

1.1.1 信号及其分类

信号是信息的载体,信息通过信号进行传输。信息既可以用语言、文字、图像等来表达,也可以用人们事先规定好的编码来表达。多数情况下,表达信息的语言、文字、图像、编码等不便于直接传输。因此,在近代科学技术中,通常利用一种变换设备把各种信息转换为随时间而相应变化的电压或电流进行传输,这种随信息相应变化的电压或电流称为电信号。所以,信息的传输是采用电信号来实现的。当电信号传递到目的地后,再利用一种与上述相反的变换设备,把电信号还原成原来的信息。最早的无线电系统就是利用电磁波传输信息的无线电通信系统。

例如,在电视广播系统中,传输配有声音的景物时,先利用电视摄像机把景物的光线、色彩转变成图像信号(电压或电流),并利用传声器把声音转变成伴音信号(电压或电流),图像信号和伴音信号就是电视要传输的带有信息的电信号。然后,把这些信号送入电视发射机进行处理,产生一种反映信息变化的便于传输的高频电信号,再由天线将高频电信号转换为电磁波发射出去,在空间传播。电视观众用接收天线截获了电磁波的很小一部分能量并将其送入电视接收机,接收机的作用与发射机相反,它对接收的由电磁波转换得到的高频电信号进行处理,从而恢复出原来的图像和伴音信号,并分别送入显像管与扬声器,供观众欣赏。这个过程可用一个简明的方框图表示,如图 1.1-1 所示。其中,变换器指的是把表达信息的景物和声音转换为电信号的装置(如摄像机和传声器)或把电信号转换为景物和声音的装置(如显像管和扬声器等)。

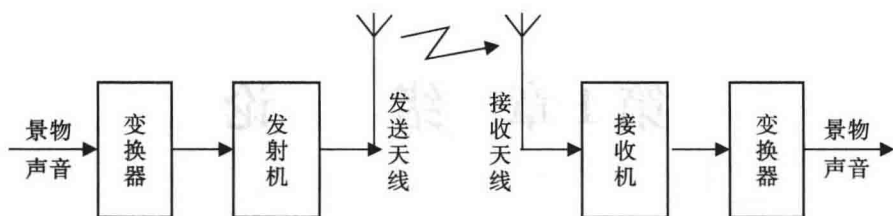


图 1.1-1 电视系统方框图

综上所述，电子技术中的信号指的是电信号，即变化的电压或电流。根据电信号随时间的变化规律，可将电信号分为两大类：模拟信号和数字信号。

图 1.1-2 所示的电压波形有正弦波、三角波、调幅波和阻尼振荡波等，均可用复杂的数学函数表示。虽然它们随时间的变化规律不同，但都是模拟信号。模拟信号的幅值随时间呈连续变化，波形上任意一点的数值均有其物理意义。在前面介绍的电视系统中，模拟语音的音频信号、模拟图像的视频信号都是模拟信号。自然界中大部分物理参数都属于模拟量，如温度、压力、位置、速度和重量等。在电子技术中，为了测量和分析的需要，常常将这些物理量转换为模拟信号。产生和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路，如交流放大器、直流放大器和音频信号发生器等。

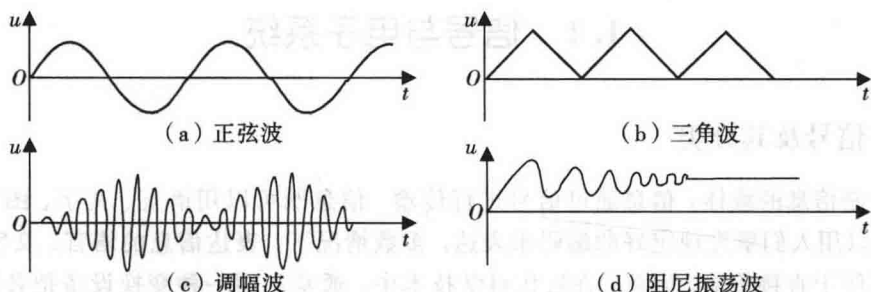


图 1.1-2 几种模拟信号波形

与模拟信号相对应的是数字信号，它只在某些不连续的瞬时给出函数值，其函数值通常是某个最小单位的整数倍，小于这个最小单位的数值是没有意义的。如电灯的“亮”和“灭”，工厂产品数量的统计等都是数字信号。图 1.1-3 所示的方波信号就是典型的数字信号。产生和处理数字信号的电路称为数字电子电路，如各种门电路、触发器、计数器等。

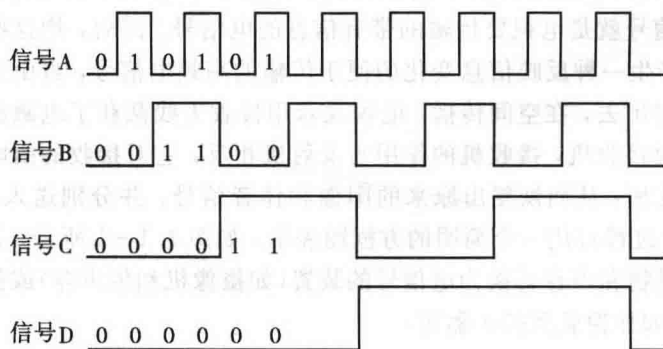


图 1.1-3 数字信号波形举例

1.1.2 典型电子系统举例

电子系统由若干相互关联的单元电子电路组成,用来实现信号的传输或信号的处理。电子系统的种类很多,下面通过两个典型的例子来说明。

1. 热电偶温度计

热电偶温度计是电子测量系统的一个例子,如图 1.1-4 所示。热电偶有两个结,一个与待测温度的物体接触,另一个浸于冰槽的冰水中,以产生稳定的参考温度。当热电偶的两个结点间存在温差时,两端就会产生相应的模拟电压信号 u_T ,将此电压送往放大器进行放大。因为热电偶的电压不可能很准确地正比于温度,所以放大器输出的电压通过线性补偿器加一个小的校正电压进行补偿,以使获得的测量电压正比于温差。最后,把信号送往显示器(指针式仪表或数字式仪表)显示出来。

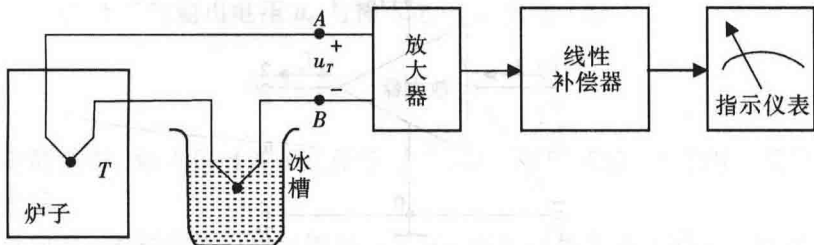


图 1.1-4 热电偶温度计的方框图

2. 炉温自动控制系统

炉温自动控制系统如图 1.1-5 所示。炉温的希望值存储在单片机内存中。热电偶两端的电压 u_T 可近似认为与炉温成正比。该电压信号经放大、滤波、模/数转换、单片机自动控制,经数/模转换器转换为相应的模拟电压信号,以驱动功率调节器,适当改变电阻丝的加热电流,使炉温调整到希望值。

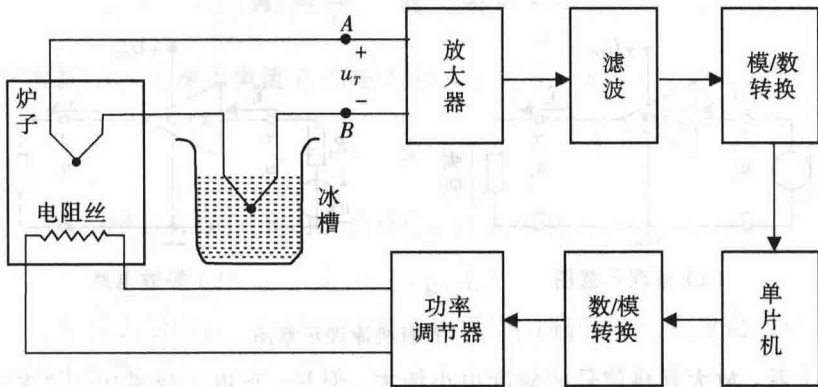


图 1.1-5 炉温自动控制系统

1.2 放大电路的基本概念

放大是模拟信号处理电路的最基本功能。大多数电子系统通常包含各种各样的放大电

路,以便将微弱信号增强(放大)到所需的数值。放大电路是构成其他模拟电路的基本单元和基础,是模拟电子技术课程研究的主要内容。本节将介绍放大电路的基本概念及主要性能指标。

1.2.1 放大电路的符号

放大电路是由晶体三极管(或场效应管、集成运算放大器)、电阻和电容等元器件构成的二端口网络,可用图1.2-1所示的电路符号表示。其中,输入端口(1-1')接信号源,端口输入电压用 u_i 表示、输入电流用 i_i 表示;输出端口(2-2')接负载,输出电压用 u_o 、输出电流用 i_o 表示。图1.2-1中,各电压、电流的正方向按照二端口网络的习惯规定标注。在放大器输入端口和输出端口之间有一个公共端“0”,用来作为零电位参考点,称作放大器的“地”。

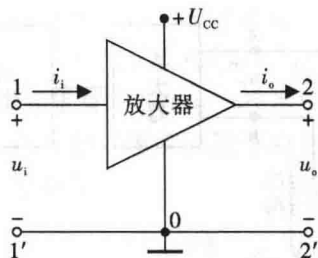


图 1.2-1 放大电路的符号

作为放大电路的一个应用例子,扩音机的工作原理如图1.2-2(a)所示。当人们对着传声器(话筒)讲话时,传声器把声音转变成频率和振幅随之变化的毫伏数量级电压信号,由放大器把微弱的电压信号增强为足够大的电压信号,才能驱动扬声器播放放大的声音。因此,传声器的作用可与一个内阻为 R_s 的信号源 u_s 的作用等效,它为放大器提供输入信号电压 u_i ;扬声器可等效为放大器的负载电阻 R_L 。扩音机的等效电路如图1.2-2(b)所示。

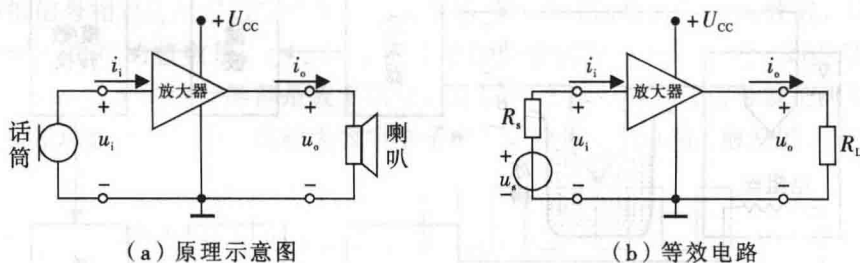


图 1.2-2 扩音机原理示意图

从表面上看,放大是将信号的幅度由小增大。但是,在电子技术中,放大的本质则是实现能量的控制和转换。通常,输入信号的能量较微弱,不足以推动负载。因此,需要在放大电路中另外提供一个直流能源,通过输入信号的控制,使放大电路将直流能量转换为较大的交流输出能量,去推动负载。这种小能量对大能量的控制作用就是放大作用。因此,放大电路又称为有源电路,放大电路中的放大元件也称为有源器件。

另外,放大的前提是不失真,放大后的信号波形与放大前的波形形状必须相同或基本相同,否则就会丢失要传送的信息,失去放大的意义。

1.2.2 放大电路的主要性能指标

放大电路的质量好坏必须用一些性能指标来衡量,这些指标主要是围绕放大能力和不失真等方面的要求提出的。但是,所制定的指标除了能衡量放大器的优劣之外,还应该便于测量,因此,常用正弦电压信号作为实验的测试信号。

1. 增益

增益又称为放大倍数,定义为输出变化量的幅值与输入变化量的幅值之比,是直接衡量放大能力的重要指标。对于图 1.2-1 所示放大器,由于输入和输出信号都有电压和电流,因此,根据研究对象的不同,可用 4 种增益来表示。

(1) 电压增益(A_u)为输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比,即

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (1.2-1)$$

在分析和测试中,输入信号常用正弦信号。因此,在正弦稳态分析中,信号电压、电流均可用复数表示。

需要注意的是,若输出波形出现明显的失真,则增益就失去了意义。放大器的其他指标也是如此。

(2) 电流增益(A_i)是输出电流 i_o 与输入电流 i_i 之比,即

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.2-2)$$

(3) 互阻增益(A_r)是输出电压 u_o 与输入电流 i_i 之比,即

$$A_r = \frac{u_o}{i_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.2-3)$$

(4) 互导增益(A_g)是输出电流 i_o 与输入电压 u_i 之比,即

$$A_g = \frac{i_o}{u_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} \quad (1.2-4)$$

在工程上,电压增益常以分贝(dB)为单位,其定义为

$$\dot{A}_u = 20 \lg |\dot{A}_u| \quad (1.2-5)$$

采用分贝为单位表示增益,可以十分方便地将增益数值的相乘转化为增益数值的相加,从而大大简化运算。

2. 输入电阻

放大电路与信号源相连接就成为信号负载,必然从信号源汲取电流。汲取电流的大小表明了放大器对信号源的影响程度。输入电阻 R_i 是从放大电路输入端看进去的等效电阻,定义为输入电压 $\dot{U}_i$ 和输入电流 $\dot{I}_i$ 之比,即

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (1.2-6)$$

由图 1.2-3 可见, R_i 越大, 则放大电路从信号源汲取的电流越小, 信号源内阻 R_s 上的电压越小, 输入端所得到的电压 $\dot{U}_i$ 越接近信号源电压 $\dot{U}_s$ 。理想电压放大器的 $R_i = \infty$ 。

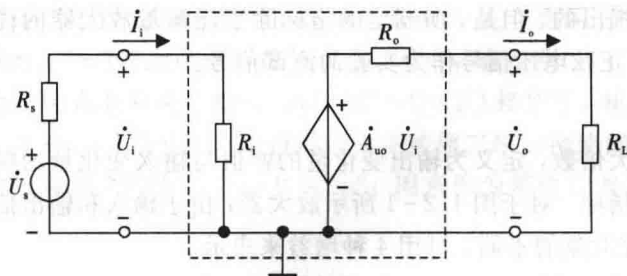


图 1.2-3 放大器的输入电阻和输出电阻

3. 输出电阻

任何放大电路的输出端都可等效为一个有内阻的电压源, 从放大电路输出端看进去的等效电阻称为输出电阻 R_o , 如图 1.2-3 所示。图 1.2-3 中, $\dot{A}_{uo}\dot{U}_i$ 为负载 R_L 开路(空载)时的输出电压, $\dot{A}_{uo}$ 称为放大电路的开路电压增益。由图可得, 放大电路带负载时的输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} \times \dot{A}_{uo} \times \dot{U}_i \quad (1.2-7)$$

由式(1.2-7)可见, R_o 越小, 放大器带负载前后的输出电压相差越小, 即放大器受负载影响的程度越小。因此, 输出电阻是衡量放大器带负载能力的参数。理想电压放大器的输出电阻 $R_o = 0$ 。输出电阻可由实验测得: 在放大器的输入端加一正弦信号, 测出负载 R_L 开路时的输出电压 $\dot{A}_{uo}\dot{U}_i$, 再测出接入负载 R_L 时的输出电压 $\dot{U}_o$, 由式(1.2-7)可求得

$$R_o = \left(\frac{\dot{A}_{uo}\dot{U}_i}{\dot{U}_o} - 1 \right) \times R_L \quad (1.2-8)$$

4. 非线性失真

理想放大器具有线性传输特性, 如图 1.2-4 所示, 传输特性的斜率(即增益)为常数。

输入单一频率的正弦波时, 输出是同频率的正弦波, 且 u_o 应正比于 u_i 。然而, 实际放大器的传输特性是非线性的, 如图 1.2-5 所示。这是因为放大器是由三极管等具有非线性特性的器件组成的。当输入信号过大, 超出三极管线性工作区进入非线性区时, 放大器的输出信号不再是与输入信号成正比的正弦波, 而是非正弦波, 它除了基波外, 还含有许多谐波分量, 即在输出信号中产生了输入信号中没有的新的频率分量, 这是非线性失真的基本特征。

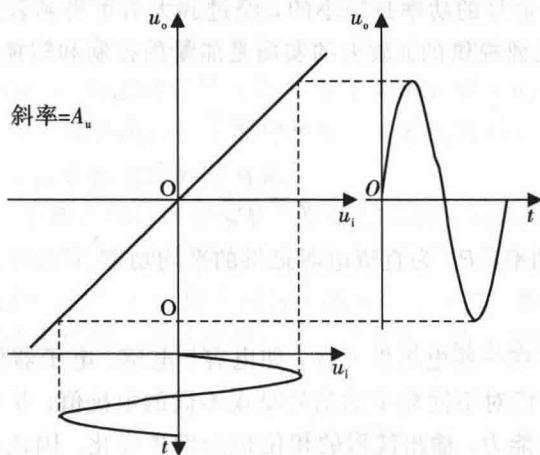


图 1.2-4 线性传输特性与线性放大

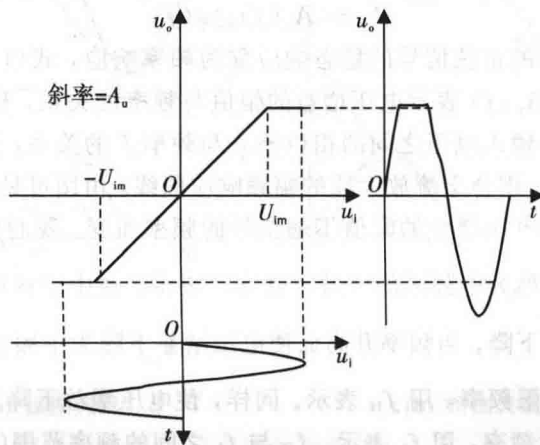


图 1.2-5 非线性传输特性与非线性失真

放大器的非线性失真的程度可用非线性失真系数 D 来表示, 定义为

$$D = \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \cdots} \quad (1.2-9)$$

式中, U_1 、 U_2 、 U_3 、 $\cdots$ 分别为基波和各次谐波的幅值。

5. 最大输出幅值

在图 1.2-5 中传输特性出现了弯曲, 说明实际放大器只在允许的范围 $(-U_{im} \sim +U_{im})$ 内与理想放大器相同, 输出电压与输入电压成线性关系; 超出这个范围, 输出波形将出现失真。也就是说, 实际放大器的输入信号、输出信号最大值是受限制的。

通常把非线性失真系数达到某一规定值(例如 5%)时的输出幅值称为最大输出幅值, 用 $(U_{om})_{\max}$ 或 $(I_{om})_{\max}$ 来表示。

6. 最大输出功率与效率

最大输出幅值是输出不失真时的单项指标。此外还应该有一个综合性的指标, 即最大不失真功率。它是在输出信号基本不失真的情况下能输出的最大功率, 记作 P_{om} 。

在放大器中,输入信号的功率是很小的,经过放大后可得到较大的输出功率,这些多出来的能量是由直流电源提供的。放大的实质是能量的控制和转换,因此就存在转换效率的问题。

效率定义为

$$\eta = \frac{P_o}{P_U} \quad (1.2-10)$$

式中, P_o 是输出信号功率, P_U 为直流电源提供的平均功率。

7. 频率响应

放大电路中总是存在一些电抗性元件,如电容、电感、电子器件的极间电容以及接线电容和接线电感等,它们对不同频率的信号呈现不同的电抗值,从而使放大器对不同频率的信号具有不同的放大能力,输出波形的相位也会发生变化。因此,放大器的电压增益应该用复数表示,即

$$\dot{A}_u = A_u(f) \angle \varphi(f) \quad (1.2-11)$$

放大器对不同频率的正弦信号的稳态响应称为频率响应,式(1.2-11)是放大器的频率响应表达式。其中: $A_u(f)$ 表示电压增益的幅值与频率的关系,称为幅频响应;而 $\varphi(f)$ 表示放大器输出电压与输入电压之间的相位差 φ 与频率 f 的关系,称为相频响应。

图 1.2-6(a) 为 RC 耦合交流放大器的幅频响应曲线。由图可见,在一个较宽的频率范围内曲线是平坦的,即电压增益的幅值不随信号的频率而变。我们把这个频率范围称为中频区,对应的电压增益称为中频区的增益,用 $\dot{A}_{um}$ 表示。在中频区以外信号的频率升高或降低时,电压增益都将下降。当频率升高而使电压增益下降为中频区增益 $\dot{A}_{um}$ 的 0.707 倍时,对应的频率称为上限频率,用 f_H 表示。同样,使电压增益下降为 $\dot{A}_{um}$ 的 0.707 倍时的低频信号频率称为下限频率,用 f_L 表示。 f_H 与 f_L 之间的频率范围(中频区)通常又称为放大器的通频带,用 B_w 表示,即

$$B_w = f_H - f_L \quad (1.2-12)$$

有些放大器的电压增益只在高频范围内下跌,如图 1.2-6(b) 所示,其通频带 $B_w = f_H$ 。这种放大器被称为直流(直接耦合)放大器。模拟集成电路大多采用直接耦合进行放大。

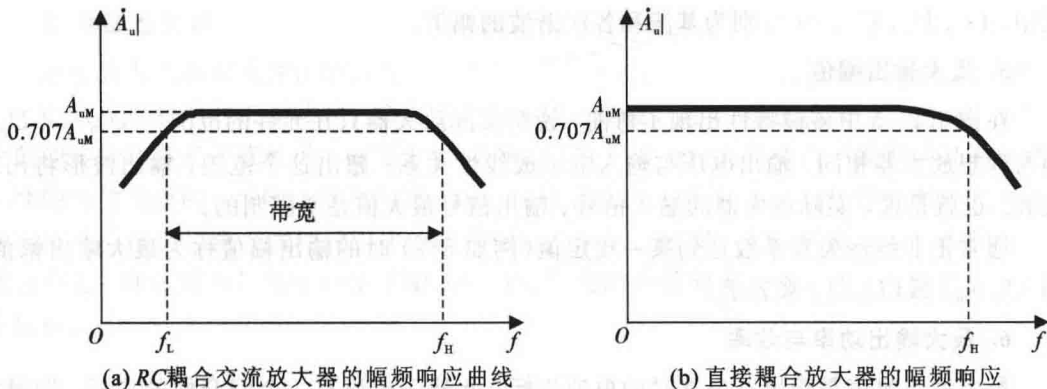


图 1.2-6 放大器的幅频响应

通频带越宽,表明放大器对信号频率的适应能力越强。那么,通频带的宽窄对信号的放大究竟会产生什么影响呢?我们知道,实际放大器的输入信号一般不会是单一频率的正弦信号,而是比较复杂的。一个复杂信号可分解为许多不同频率的正弦谐波分量,而放大器的带宽却是有限的,并且相频响应也不能保持常数。若放大器对复杂信号的各个频率成分放大程度不一样,就会造成输出波形的失真。

例如,图 1.2-7(a) 中输入信号由基波和二次谐波组成,如果受放大器带宽限制,基波增益较小,而二次谐波增益较大,于是输出电压波形产生了失真,这叫做幅度失真。同样,当放大器对不同频率的信号产生的相移不同时,也要产生失真,称为相位失真。例如,在图 1.2-7(b) 中,如果放大后的二次谐波滞后了一个相角,输出波形也会变形。

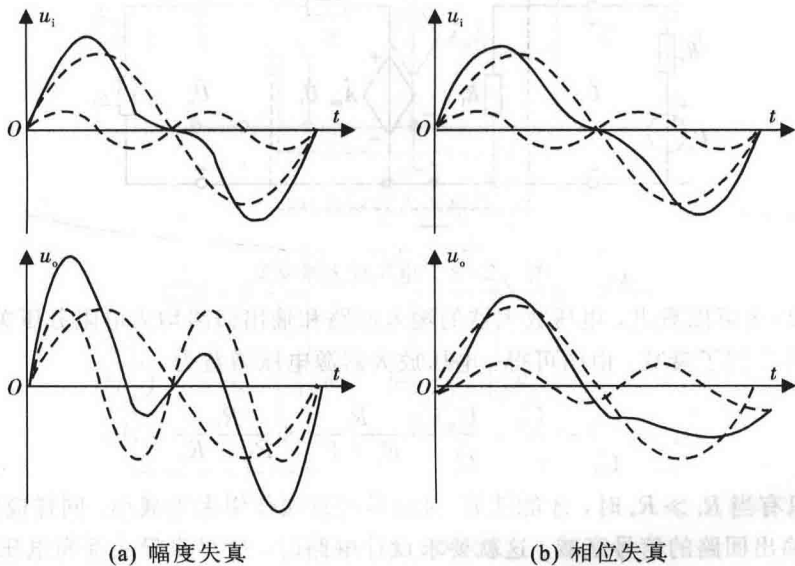


图 1.2-7 频率失真

需要指出的是,产生幅度失真的同时,往往会产生相位失真。幅度失真和相位失真总称为频率失真,它们都是由线性电抗元件所引起的,所以又称为线性失真,以区别于因元器件的非线性造成的非线性失真。

对放大器通频带的要求,要根据放大器的用途、信号的特点及允许的失真度来确定。为使信号的频率失真限制在容许的范围之内,要求设计放大器时正确估计信号的有效带宽,以使电路带宽与信号带宽相匹配。例如,对于收录机、扩音机来说,通频带宽意味着可以将原乐曲中丰富的高、低音都能表现出来,但放大器带宽过宽,往往造成噪声电平升高或产生成本增加。音响系统放大器的带宽在 20 Hz ~ 20 kHz,这与人类听觉的生理功能相匹配。在有些情况下,则希望通频带较窄,以减小干扰和噪声。

1.2.3 放大电路模型

为了能够在电子系统中像积木块一样地使用放大器,必须用适当方式来表征放大器两个端口的特性。

由上所述,根据实际的输入信号和所需的输出信号是电压或电流,放大器可分为 4 种