

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

韩学军 主 编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

主 编 韩学军
编 写 王 冰 张光烈
邢晓敏 解东光
主 审 刘连光 陆 达 谢志远



中国电力出版社

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



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分为10章,主要包括绪论、半导体基础及其半导体二极管、双极结型三极管及放大电路基础、典型BJT放大电路、BJT模拟集成放大电路及功率放大电路、场效应三极管及其放大电路、负反馈放大电路、信号运算电路、正弦波信号产生电路和直流稳压电源。本教材强调加强基础知识的学习,内容涵盖了模拟电子技术的主要知识范围。

本书主要作为普通高等院校电气信息类相关专业的教学用书,也可作为高职、高专教材,同时可供从事电气、电子技术及自动化专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/韩学军主编. —北京:中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6517-6

I. 模… II. 韩… 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(2007)第201112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)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年1月第一版 2008年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16印张 394千字

定价 23.80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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

模拟电子技术基础是高等院校电气信息类专业的重要专业基础课程。为了适应现代电子技术的发展,满足教学、科研和工程设计等方面的需求,编者在多年本科模拟电子技术教学基础上编写了本书。

本书立足于加强基础,结合实际、突出重点、培养能力,并以此为基础,做一些探索和改革。全书共分为10章,涵盖了模拟电子技术的全部主要的基础知识内容。在内容编排上,力求做到入门容易、思路连贯、由浅入深、难点分散。

本书由半导体基础知识讲起,逐渐过渡到电子元器件的构成,再从信号放大的基础知识,逐渐过渡到放大电路的组成原理;由分立元件基本放大电路逐渐过渡到集成放大电路;最后讲述了模拟电子电路所用的正弦波信号源和直流稳压电源。通过对本书的学习,将掌握电子技术的完整、系统的基础知识,为进一步学习现代电子专业技术打下坚实的基础。为便于课堂教学和学生课后复习,本书各章均由概述开始,到主要内容,再到小节、习题,并在本书最后附有部分习题解答。

全书由东北电力大学韩学军教授主编,第2、3、4、9章由韩学军教授编写,第1、8章由王冰副教授编写,第7、10章由张光烈副教授编写,第5章及前5章习题解答由邢晓敏老师编写,第6章及后5章习题解答由解东光老师编写。

全书由华北电力大学刘连光教授和厦门大学陆达教授主审,大纲由华北电力大学谢志远教授审阅。在本书的编写过程中得到了东北电力大学周军教授、王义军副教授、石磊老师、李辉老师、李晓丽老师、张丽老师及赵欣、王鸿昌同志的友情帮助。本书在编写过程中参考了一些文献。在此一并感谢。

编者

2007年10月

符号说明

一、电压、电流符号表示采用的基本原则（以BJT基极电流为例）

I_B : 大写字母、大写下标, 表示直流量

i_B : 小写字母、大写下标, 表示包含直流量的瞬时值

i_b : 小写字母、小写下标, 表示交流量或变化量的瞬时值

I_b : 大写字母、小写下标, 表示交流有效值

$\dot{I}_b$: 大写字母带上标点、小写下标, 表示交流复数值

二、下标符号

i: 输入量

o: 输出量

s: 信号源量

u: 与电压有关的量

i: 与电流有关的量

m: 最大值

L: 负载

th: 开启

on: 导通

三、半导体器件及参数

VD: 二极管

VT: 三极管

VDZ: 稳压二极管

β : BJT 电流放大系数

四、频率、功率和增益

f_L : 放大电路下限截止频率

f_H : 放大电路上限截止频率

f_0 : 振荡电路振荡频率

BW: 通频带

P_{om} : 最大输出功率

P_V : 直流电源供给功率

P_{Vm} : 直流电源供给最大功率

P_T : BJT 管耗功率

P_{Tm} : BJT 最大管耗功率

A: 增益通用符号

REF: 参考量

BR: 反向击穿

P: 夹断

D: 二极管有关量

Z: 稳压管有关量

id: 差模输入量

ic: 共模输入量

f: 反馈量

g_m : FET 跨导

f_T : BJT 特征频率

Q: 静态工作点

$\dot{A}_u$: 放大电路电压增益

$\dot{A}_{us}$: 对信号源的电压增益

$\dot{A}_i$: 电流增益

$\dot{A}_r$: 互阻增益

$\dot{A}_g$: 互导增益

$\dot{A}_f$: 有反馈时的增益

$\dot{A}_{uf}$: 电压串联负反馈电压增益

$\dot{A}_{if}$: 电流并联负反馈电流增益

$\dot{A}_{rf}$: 电压并联负反馈互阻增益

$\dot{A}_{gf}$: 电流串联负反馈互导增益

A_{ud} : 差模电压增益

A_{uc} : 共模电压增益

A_{od} : 运放开环差模电压增益

$\dot{F}$: 反馈系数通用符号

五、直流电源

V_{CC} : BJT 电路集电极回路电源

V_{EE} : BJT 电路发射极回路电源

V_{BB} : BJT 电路基极回路电源

V_{DD} : FET 电路漏极回路电源

V_{SS} : FET 电路源极回路电源

V_{GG} : FET 电路栅极回路电源

$\dot{F}_u$: 电压串联负反馈反馈系数

$\dot{F}_i$: 电流并联负反馈反馈系数

$\dot{F}_r$: 电流串联负反馈反馈系数

$\dot{F}_g$: 电压并联负反馈反馈系数

目 录

前言

符号说明

第1章 绪论	1
1.1 电子系统	1
1.2 模拟电子电路和模拟信号	2
1.3 数字信号和数字电子电路	2
1.4 放大电路的基本概念	3
1.5 放大电路的性能指标	4
本章小结	9
习题	9
第2章 半导体基础及其半导体二极管	11
2.1 半导体基础	11
2.2 PN结及其特性	14
2.3 半导体二极管	18
本章小结	21
习题	22
第3章 双极结型三极管及放大电路基础	25
3.1 双极结型三极管	25
3.2 BJT 共发射极基本放大电路	32
3.3 共发射极放大电路的频率特性	45
本章小结	55
习题	56
第4章 典型 BJT 放大电路	61
4.1 射极偏置共发射极基本放大电路	61
4.2 共基极基本放大电路	67
4.3 共集电极基本放大电路	72
4.4 三种组态放大电路的性能比较	76
4.5 组合放大电路	77
本章小结	84
习题	84
第5章 BJT 模拟集成放大电路及功率放大电路	88
5.1 半导体集成电路简介	88
5.2 集成运算放大器的基本构成	88

5.3	集成运放的直流偏置电路	91
5.4	集成运放的输入级	93
5.5	集成运放的中间级及复合三极管	101
5.6	集成运放的输出级	103
5.7	理想集成运算放大器	106
5.8	功率放大电路	106
	本章小结	113
	习题	114
第 6 章	场效应三极管及其放大电路	118
6.1	结型场效应三极管	118
6.2	金属—氧化物—半导体场效应管	122
6.3	FET 小信号线性等效模型	125
6.4	各种 FET 的性能简介及其与 BJT 的比较	127
6.5	FET 基本放大电路分析	128
6.6	FET 集成运算放大器	136
	本章小结	138
	习题	139
第 7 章	负反馈放大电路	142
7.1	反馈的基本概念与分类	142
7.2	负反馈放大电路的方框图及增益的一般表达式	145
7.3	深度负反馈放大电路增益的估算	149
7.4	负反馈对放大电路性能的改善	155
7.5	负反馈放大电路的稳定性	159
7.6	集成负反馈放大器	162
	本章小结	164
	习题	165
第 8 章	信号运算电路	170
8.1	运算放大器在线性运用时的基本特征	170
8.2	比例运算电路	171
8.3	加法电路	174
8.4	减法电路	176
8.5	积分和微分电路	178
8.6	指数和对数运算电路	182
8.7	乘法和除法运算电路	183
8.8	模拟乘法器及其应用	185
	本章小结	187
	习题	188
第 9 章	正弦波信号产生电路	192
9.1	正弦波振荡电路的构成和振荡条件	192

9.2 RC 正弦波振荡电路	194
9.3 LC 正弦波振荡电路	198
本章小结	204
习题	204
第 10 章 直流稳压电源	208
10.1 直流稳压电源的构成	208
10.2 单相整流电路	208
10.3 滤波电路	215
10.4 稳压电路	217
10.5 集成电路三端稳压器及应用	223
本章小结	225
习题	225
习题解答	229
参考文献	246

第1章 绪 论

电子技术的发展,大大地促进了科学技术的进步。特别是近几十年,现代微电子技术和应用电子技术带动了电子计算机及电子信息技术的深入发展和广泛应用,实现了工业化的又一次大的变革。

本书作为电子技术基础课程教材,从电子学的基础知识、半导体原理入手,由浅入深,从简到繁,较全面地介绍了模拟电子技术所涉及的知识内容。在学习本门课程之前,读者应具备半导体物理、电路等课程的基本知识。

本章作为绪论,主要介绍电子电路的一些基本概念、放大电路的基本知识和模拟电子技术所涉及的应用领域,为后续各章节内容的学习建立概念并提供指导。

1.1 电子系统

1.1.1 电子系统的概念

电子系统通常由电子电路构成。电子电路除了包含电路中所用到的电阻元件、电容元件、电感元件等器件外,还包括所谓的电子器件。随着微电子技术的发展,电子器件的定义已几经变化。在早期,电子器件是指二极管、三极管等简单半导体制成的元件,二极管、三极管与电阻元件、电容元件和电感元件等一起焊接在电路板上,并用导线连接组成电子电路,通常将此类电子电路称为分立元件电子电路。具有不同功能的电子电路组成实用的电子系统。

随着集成电子技术的出现,在现代电子电路中,已将二极管、三极管等有源器件和电阻元件、电容元件、电感元件等无源器件按照特定的电路集成在一块半导体基片上,以代替原来的电路。这类电子电路,称为集成电子电路。集成电子电路既是电子电路,使用时又可视作集成电路元件。因此,现代电子系统,通常应由具有不同功能的集成电路元件构成。

1.1.2 应用电子系统举例

下面以火力发电厂锅炉火焰检测系统为例,介绍一下电子系统的构成。高温、高压燃煤锅炉是火力发电厂的重要设备。燃料煤通过在锅炉炉膛内的燃烧,加热锅炉汽包中的水,使其转变成高温高压蒸汽,高温高压蒸汽推动汽轮机,汽轮机带动发电机旋转,从而发出电力。煤在锅炉炉膛内的燃烧状况,直接决定发电的能力和质量,并涉及锅炉等设备的安全运行。因此,在发电厂生产中,必须对锅炉炉膛内的燃烧火焰状况进行有效监控。

通常监测锅炉炉膛内燃烧情况的方法是检测锅炉炉膛内燃烧火焰的光强。由于煤在燃烧过程中,要散发可见光,燃烧越好,可见光越强。因此,要利用一套电子系统将可见光的光强检测出来,以判别炉膛内燃烧工况,并根据燃烧工况实现适当的调节和控制。

检测锅炉炉膛内检测可见光的电子系统框图如图1-1所示。

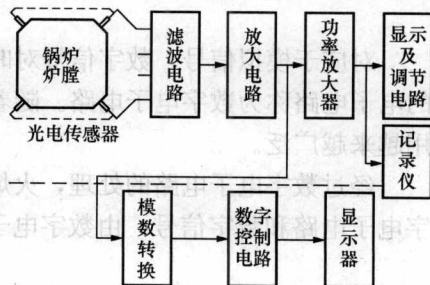


图1-1 检测可见光的电子系统框图

1.2 模拟电子电路和模拟信号

在图 1-1 中, 火焰检测探头是一个光电转换设备, 通过聚光镜片接收炉膛内火焰燃烧

产生的可见光, 再通过光导纤维传导, 光束照射到一个电子器件——硅光电池上。硅光电池的功能是把光信号转换为电信号。电信号的强弱变化规律与入射光强的变化规律一致, 即光越强, 电信号越大; 光越弱, 电信号越小。其变化过程如图 1-2 所示, 其中 u_1 为传感器输出信号, 其幅值较小且存在干扰。经过滤波电路和放大电路后得到的信号电压为 u_2 , 其幅值有了很大的增加, 且去掉了干扰信号。

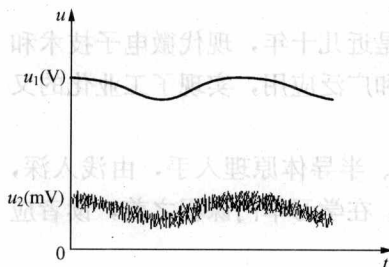


图 1-2 信号及放大后的信号

这种随时间连续变化的信号称为模拟信号, 其在时间上和幅值上均是连续的。自然界中的大多数物理量都是时间上和幅值连续的变量, 如声音、光强、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, 根据需要输入到电子系统中去处理。处理模拟信号的电子电路称为模拟电路。本书模拟部分主要讨论各种模拟电子电路的基本概念、原理、分析方法及应用。所谓对信号的处理, 主要是指对微弱信号的放大。通过各种传感器得到的电信号通常都很微弱, 如硅光电池产生的电信号, 为毫伏数量级, 虽然反映了炉膛内火焰的变化, 但是, 由于信号幅值太小, 且存在一些干扰信号, 不能直接应用到电子系统中。因此, 需要模拟电子电路对电信号进行处理。在系统框图 1-1 中, 由光电传感器所获得的电信号, 首先通过滤波电路去除电路中并非反应光强的干扰信号, 然后通过放大电路将微弱的反应光强的电信号的幅值进行放大, 一般把信号由毫伏级放大成为伏级。

反应光强变化且被放大的电信号, 要驱动显示仪表的表头, 如一些指针式的仪表和走纸式的记录仪。

仪表的指针和记录仪中记录笔的位置都由电信号驱动, 直观反映了炉膛火焰的燃烧状况。但是, 驱动指针和记录笔的电信号需要一定的电功率, 即不仅有电压, 还要有一定的电流, 因此在系统图 1-1 中设计有功率放大的电路。

由图 1-1 可知, 在模拟电子电路中, 信号放大电路是主要电路。

1.3 数字信号和数字电子电路

对应于模拟信号, 数字信号对时间的变化是不连续的, 如方波脉冲信号。处理数字信号的电子电路称为数字电子电路。随着电子信息技术、计算机技术的发展, 数字电子电路的应用越来越广泛。

经过数字电子电路的处理, 火焰燃烧的状况可以通过计算机的显示器显示出来。关于数字电子电路和数字信号, 由数字电子电路方面的教材专门介绍, 本书不再讲授。

1.4 放大电路的基本概念

1.4.1 信号放大的基本概念

根据 1.2 节的介绍,在模拟电子系统中,实现对模拟信号的处理主要是通过放大电路实现的。根据不同的用途,在电子系统中采用不同类型的放大电路。放大电路的作用是把相对微弱的电信号进行放大,使其输出幅值增大,达到所要求的数值。如图 1-3 所示,常见的扩音器就是一个音频信号放大电路。

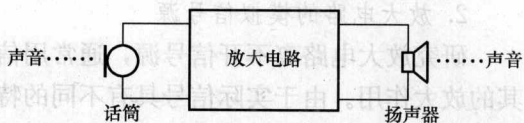


图 1-3 扩音器示意图

声音首先经过话筒转变成成为微弱的电信号,然后这个微弱的电信号加到放大电路的输入端,作为放大电路的输入信号。在放大电路的输出端,得到了比输入信号大得多的电信号,称为放大电路的输出信号。输出信号去推动扬声器,使其发出大于原声的音量,实现了扩音的目的。同时,放大电路也是组成其他模拟电子电路,如滤波电路、振荡电路、稳压电路等电子电路的基本单元电路。

1.4.2 放大电路的研究方法

研究放大电路包括两个方面:一是对现有的放大电路的性能进行分析,掌握其工作原理、各种性能指标以及应用的范围;二是根据要求设计不同的放大电路,使其性能指标满足不同的需求。

1. 放大电路

放大电路的主要作用是将微弱的模拟信号进行放大处理,因此,它必须有信号的输入端口和输出端口。根据电路的定义,放大电路应该是一个双端口电路,如图 1-4 所示。

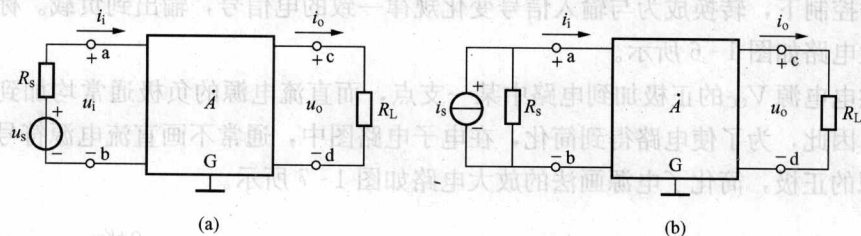


图 1-4 放大电路

(a) 信号源为电压源; (b) 信号源为电流源

由图 1-4 看到,放大电路包括信号输入端 a、b,信号输出端 c、d。通常将输入端的 b,输出端的 d 和端子 G 连在一起,作为输入信号和输出信号的公共端,也叫地端。字符 $\dot{A}$ 代表放大电路的增益。在放大电路的输入端,接入一个内阻 R_s 的电压源 u_s ,这个电压源称为模拟信号源,用这个信号源去代表需被放大的各类模拟输入信号。信号源通常用正弦交流信号表示,信号源可以是电压源 u_s ,如图 1-4 (a) 所示,也可以是电流源 i_s ,如图 1-4 (b) 所示。电压信号源 u_s 去掉在信号源内阻 R_s 上产生的电压降,在放大电路的输入端形成的电压用 u_i 表示,称为放大电路的输入电压 u_i 。电流信号源 i_s 去掉在信号源内阻 R_s 产生的分

流，送入放大电路输入端的电流用 i_i 表示，称为放大电路的输入电流 i_i 。

通常在放大电路输出端要接负载，负载有各种各样的类型。在研究放大电路时一般接电阻 R_L ，用 R_L 去模拟放大电路所连接的各类负载， R_L 被称为放大电路的负载电阻。输出端电压用 u_o 表示，输出回路电流用 i_o 表示。

当放大电路输出端不接 R_L 时，称放大电路处于空载状态。

2. 放大电路的模拟信号源

研究放大电路离不开信号源，通常用信号源去代表各种模拟信号，从而确定放大电路对其的放大作用。由于实际信号具有不同的特征，不可能做到逐一进行讨论，所以在研究放大电路时，一般采用正弦交流信号作为标准信号源，对模拟电子电路进行测试。这是因为正弦交流信号包含有各种信号的特征参数，可以代表放大电路对各种信号源的响应。正弦交流信号可以用它的振幅、角频率和初始相角来表示，其数学表达式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \theta) \tag{1-1}$$

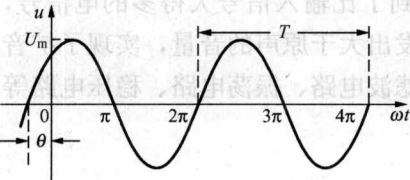


图 1-5 正弦波电压信号波形

式中： u 为正弦波电压的瞬时值； U_m 为振幅值； ω 为角频率； θ 为初始相角； T 为信号周期。

这些参数能代表信号中的所有特征信息。如图 1-5 所示，正弦波电压信号还可以用相量形式表示为 $\dot{U}$ ，用有效值表示为 U ，有效值和振幅值之间有固定的 $\sqrt{2}$ 倍关系，即 $U_m = \sqrt{2}U$ 。

1.4.3 放大电路的直流电源

放大电路输出信号的幅度通常要大于输入信号的幅度，这意味着经过放大电路，输出的能量增加了。根据能量守恒的原理，输出能量的增加，必须有能量的补充，而补充的能量来自于电子电路的供电电源。通常电子电路的供电电源是直流电源，直流电源提供的能量，在输入信号的控制下，转换成为与输入信号变化规律一致的电信号，输出到负载。标注了直流电源的放大电路如图 1-6 所示。

直流供电电源 V_{CC} 的正极加到电路中某一支点，而直流电源的负极通常均加到电子电路的公共端。因此，为了使电路得到简化，在电子电路图中，通常不画直流电源符号，而只标注直流电源的正极，简化了电源画法的放大电路如图 1-7 所示。

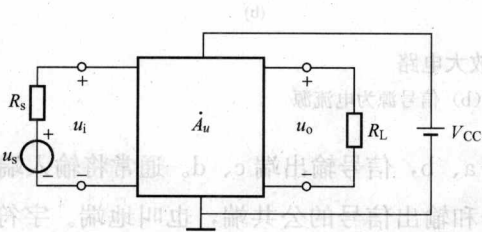


图 1-6 有直流电源的放大电路

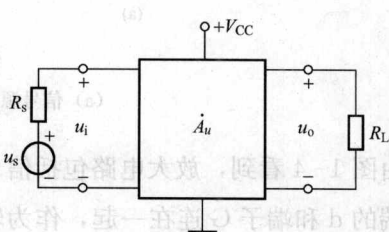


图 1-7 简化电源画法放大电路

1.5 放大电路的性能指标

衡量一个放大电路的工作特性，通常通过以下参数作为放大电路的性能指标。

1. 增益 $\dot{A}$

电路增益是直接衡量放大电路对输入信号放大能力的重要指标, 定义为电路输出量与电路输入量之比。其比值越大, 说明电路的放大能力越强, 或电路输入信号对输出信号的控制能力越强。通常增益 $\dot{A}$ 应为相量, 既有大小, 也有相位。但是, 在不考虑信号频率对增益的影响时, 增益是一个常数 A 。

用 $\dot{X}_i$ 代表输入信号 $\dot{U}_i$ 和 $\dot{I}_i$, 用 $\dot{X}_o$ 代表输出信号 $\dot{U}_o$ 、 $\dot{I}_o$ 。在一般情况下, 经过放大电路, 到达负载电阻的输出信号 $\dot{X}_o$ 要大于输入信号电压 $\dot{X}_i$, 因此用 $\dot{A}$ 来代表此放大电路的放大能力, 称为电路的放大倍数, 也叫放大电路的增益, 可表达为

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

在实际应用中, 根据放大电路输入信号的条件和对输出信号的要求, 可采用四种电路增益来描述放大电路输出与输入信号间的关系。

(1) 电压增益 $\dot{A}_u$ 。如果输入信号用 u_i 表示, 而应用中只需考虑输出电压 u_o 与 u_i 的关系, 则增益可以表示为

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

A_u 表示此电路的电压放大能力, 常称为电压放大倍数, 电压增益为无量纲数值。

(2) 电流增益 $\dot{A}_i$ 。如果输入信号用电流 i_i 表示, 是一个电流源, 而应用中只需考虑输出电流 i_o 与输入电流 i_i 信号之间的关系, 则有

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

A_i 表示此电路的电流放大能力, 称为放大电路的电流增益, 也常称为电流放大倍数。电流增益为无量纲数值。

(3) 互阻增益 $\dot{A}_r$ 。如果输入信号用电流 i_i 表示, 是一个电流源, 而应用中只需考虑输出电压 u_o 与输入电流信号 i_i 之间的关系, 则有

$$\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \quad (1-5)$$

A_r 表示此电路的输入电流对输出电压的控制能力, 称为此放大电路的互阻增益。互阻增益具有电阻的量纲。

(4) 互导增益 A_g 。如果放大电路的输入信号用电压 u_i 表示, 是一个电压源, 而应用中只需考虑输出电流 i_o 与输入电压 u_i 信号之间的关系, 则有

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

A_g 表示此电路的输入电压对输出电流的控制能力, 称为此放大电路的互导增益。互导增益具有导纳的量纲。

在工程上, 常用以 10 为底的对数表达电压增益 $\dot{A}_u$ 和电流增益 $\dot{A}_i$, 其单位为 dB (分

贝), 用分贝表达的电压增益和电流增益公式为

$$\text{电压增益} = 20\lg |\dot{A}_u| \quad (\text{dB}) \quad (1-7)$$

$$\text{电流增益} = 20\lg |\dot{A}_i| \quad (\text{dB}) \quad (1-8)$$

用对数方式表达放大电路的增益的优点是当用对数坐标表达增益随某一参数的变化曲线时, 可以扩大增益可观察的范围; 而且在计算多级放大电路的增益时, 可将乘积转为加法进行运算, 因而, 可以简化对放大电路的分析和计算过程。

2. 输入电阻和输出电阻

由于放大电路是一个具有输入端口和输出端口的双端口电路, 根据电路理论, 从任一端口的电路看进去, 都有等效电阻存在, 因此把从输入端口向电路内看的等效电阻称为放大电路的输入电阻, 用 R_i 表示, 从输出端口向电路内看的等效电阻称为放大电路的输出电阻, 用 R_o 表示。输入、输出电阻的定义如图 1-8 所示。

(1) 输入电阻 R_i 。在图 1-8 中, 输入电阻等于输入电压 u_i 与输入电流 i_i 有效值之比, 即

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (1-9)$$

输入电阻的大小, 代表了放大电路对信号源的影响, 输入电阻越大, 放大电路对信号源的影响越小。在理想条件下, 设输入电阻 $R_i = \infty$, 则有 $i_i = 0$, 此时 $u_i = u_s$, 即信号源电压全部加到了电路的输入端, 被电路放大。在实际应用中, 当 R_i 为一确定值, 则 $i_i \neq 0$, 此时, $u_i = u_s - i_i R_s$ 。这说明, 一部分输入信号被信号源内阻 R_s 消耗, 真正加到放大电路输入端的信号 u_i 要小于信号源电压 u_s 。

当确定放大电路的输入电阻时, 在工程上可采用实际测量法, 其测量电路如图 1-9 所示。

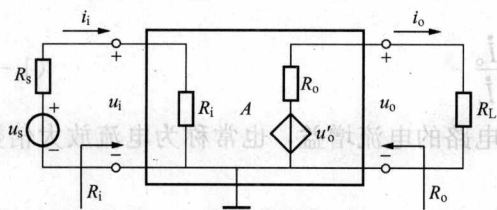


图 1-8 放大电路输入、输出电阻的定义

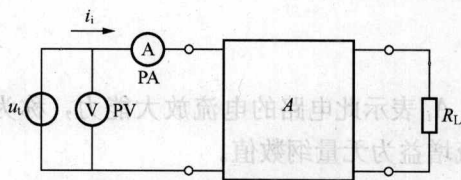


图 1-9 输入电阻测量电路

u_i 是外加到放大电路的一个正弦信号电压源, PV 是交流电压表, PA 是交流电流表, 表的读数是交流电压和电流有效值 U_i 和 I_i 。测量时, 将电压源调到某一合适数值, 则电压表 PV 和电流表 PA 的读数之比, 即为该被测放大电路的输入电阻 R_i , 即

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

(2) 输出电阻 R_o 。由图 1-8 看到, 按双端口网络参数的定义, 放大电路的输出端可以等效成为一个具有内阻 R 的电压源, 电压源的内阻 R 即为放大电路的输出电阻 R_o 。 u'_o 是电路空载 ($R_L = \infty$) 时的输出电压值, 它的大小等于 $A_{uo} u_i$, A_{uo} 是放大电路空载时的电压增益。 u_o 为放大电路接负载 R_L 后输出端电压值。由于输出电阻的存在, u_o 一定小于 u'_o , 它们之间的关系可表达为

$$u_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} u'_o$$

因此, 输出电阻 R_o 可表达为

$$R_o = \left(\frac{U_o'}{U_o} - 1 \right) R_L \quad (1-10)$$

放大电路的输出电阻 R_o 的大小决定了放大电路的带负载能力。所谓带负载能力是指放大电路输出量随负载变化的程度。若放大电路的输出电阻小, 当负载变化时, 输出电压变化很小或基本不变, 表示放大电路带负载能力强; 反之, 若放大电路的输出电阻大, 当负载变化时, 输出电压随之产生很大变化, 则表示放大电路的带负载能力弱。

当定量分析输出电阻 R_o 时, 工程上可参照求输入电阻的测量方法。首先将输入信号源 u_s 短路 (保留信号源内阻 R_s), 然后负载 R_L 开路, 在输出端加入一个正弦信号测试电压 u_t , 并接入电压表 PV 和电流表 PA, 如图 1-10 所示。

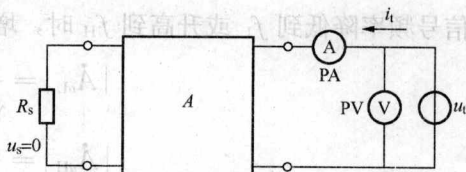


图 1-10 输出电阻测量电路

电压表 PV 和电流表 PA 的读数值之比, 即为电路的输出电阻 R_o , 即

$$R_o = \frac{U_t}{I_t} \Big|_{u_s=0}$$

在上式中, 将输入信号源 u_s 短路, 是为使输出回路的 $u_o' = A_{uo} u_s = 0$, 从而使输出回路中只保留电阻的影响。

输入电阻与输出电阻是分析电子电路在相互连接时, 所产生的影响而引入的参数。通常放大电路输入、输出电阻是指放大电路在线性运用情况下的交流电阻, 而不是直流电阻。

3. 通频带 BW

在放大电路中, 要包含一些电抗元件, 如电感元件、电容元件。同时在电子器件中, 也存在着电容效应。电抗元件的特性随信号频率的变化而变化, 因此, 放大电路对不同频率的信号的增益也有所不同。在通常情况下, 放大电路的增益会在某一信号频率范围内保持稳定, 这个频率范围称作放大电路的中频区。当信号频率低于中频区或高于中频区时, 放大电路的增益都会随频率的下降或升高而下降。信号低于中频区称为放大电路的低频区, 信号高于中频区称为放大电路的高频区, 放大电路的增益随信号频率变化的曲线如图 1-11 所示, 被称为放大电路的频率特性, 频率特性的纵坐标是将放大电路的电压增益的绝对值取对数再乘以 20, 这样表示后, 增益的单位是 dB (分贝), 横坐标为采用对数刻度的信号频率。采用这样的坐标系可以拓展增益和频率的变化范围, 使放大电路的频率特性表达更全面, 也更简便。综上所述, 放大电路的频率特性是在输入正弦信号时, 增益 (输出信号) 随输入信号频率连续变化的稳态响应。

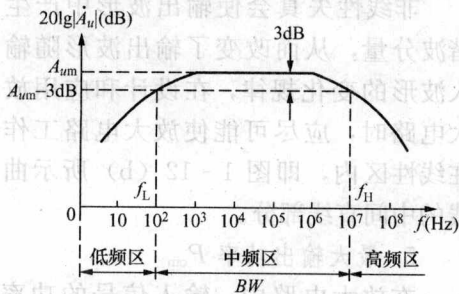


图 1-11 某放大电路的频率特性

在频率特性中, 有两个重要的参数, 分别记为 f_L 和 f_H 。 f_L 定义为放大电路的下限截止频率, f_H 定义为放大电路的上限截止频率。 f_L 、 f_H 定义了放大电路的信号频率区。当信号频率 $f < f_L$ 时, 为低频区; 当信号频率 $f_L < f < f_H$ 时, 为中频区; 当信号频率 $f > f_H$ 时, 为高频区。在中频区, 特性曲线是平坦的, 表示放大电路的增益 $|\dot{A}_u|$ 基本是一个常

数值 A_{um} , A_{um} 称为放大电路的中频电压增益。放大电路的中频区就定义为放大电路的通频带, 即

$$BW = f_H - f_L \quad (1-11)$$

在图 1-11 所示某放大电路的频率特性, 其下限截止频率 $f_L = 100\text{Hz}$, 上限截止频率 $f_H = 10^7\text{Hz} = 10\text{MHz}$, 因此放大电路的通频带为

$$BW = f_H - f_L \approx f_H = 10\text{MHz}$$

由图 1-11 放大电路频率特性可以看出, 当信号频率脱离中频区, 电路增益会衰减。当信号频率降低到 f_L 或升高到 f_H 时, 增益会下降到中频时的 $1/\sqrt{2}$, 即

$$|\dot{A}_{uL}| = \frac{1}{\sqrt{2}} |\dot{A}_{um}| = 0.707 |\dot{A}_{um}|$$

$$|\dot{A}_{uH}| = \frac{1}{\sqrt{2}} |\dot{A}_{um}| = 0.707 |\dot{A}_{um}|$$

将其用分贝 (dB) 表示, 有

$$20\lg |\dot{A}_{uL}| = 20\lg |\dot{A}_{uH}| = 20\lg |\dot{A}_{um}| - 20\lg \sqrt{2} = 20\lg |\dot{A}_{um}| - 3 \quad (\text{dB})$$

即当频率等于 f_L 或 f_H 时, 放大电路的增益相对于通频带内的中频增益, 下降了 3dB。

通频带越宽, 表明放大电路对不同频率的信号适应能力越强, 对不同频率的信号保持相同的放大和处理能力, 从而避免由于信号频率超越了通频带, 而产生信号的失真, 这种失真通常称为放大电路的线性失真。

为避免线性失真, 所设计的放大电路的通频带要大于所要放大的信号频率变化范围, 如医用心电图放大电路, 其通频带要满足 $0.05 \sim 200\text{Hz}$, 而对音频放大电路, 其通频带要满足 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。

4. 非线性失真

放大电路对信号的放大和处理应该是线性的。如果用电压传输特性来描述电压放大电路输出电压和输入电压的关系, 应该为如图 1-12 (a) 所示的线性变化关系。

图 1-12 (a) 中, 电压传输特性是一条直线, 表明放大电路输出电压 u_o 与输入信号电压 u_i 是线性关系, 直线的斜率就是放大电路的电压增益。此为理想放大电路的电压传输特性。但是, 由于组成放大电路的电子器件具有非线性特征, 它们的线性放大范围有一定的限度, 当输入信号幅值超过一定值后, 电压传输特性发生弯曲, 如图 1-12 (b) 所示。此时, 特性曲线上各点切成斜率并不完全相同, 这表明放大电路的增益, 不能保证在输入信号的变化范围内保持恒定。

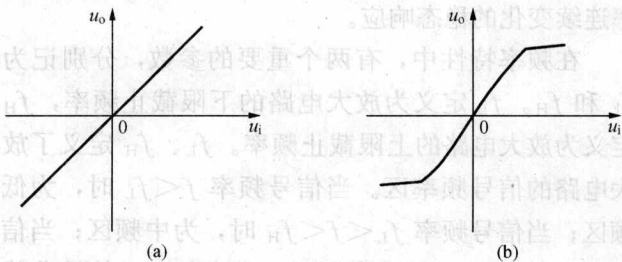


图 1-12 放大电路的电压传输特性

(a) 线性关系; (b) 非线性关系

非线性失真会使输出波形中产生谐波分量, 从而改变了输出波形随输入波形的变化规律, 在设计和应用放大电路时, 应尽可能使放大电路工作在线性区内, 即图 1-12 (b) 所示曲线的中间直线部分。

5. 最大输出功率 P_{om}

在放大电路中, 输入信号的功率通常很小, 但经过放大电路的放大