



普通高等教育“十二五”规划教材

普通高等教育电路设计系列规划教材

模拟电子电路基础

◎ 胡飞跃 主编

◎ 刘圆圆 游彬 顾梅园 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育电路设计系列规划教材

模拟电子电路基础

胡飞跃 主编
刘圆圆 游 彬 顾梅园 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据教育部对电子信息类专业模拟电子电路的基本要求编写而成。全书共 13 章，主要内容包括：模拟电子电路导论，理想运算放大器及其线性应用，晶体二极管及其基本应用，场效应管，双极型晶体管，通用型集成运放结构及其单元电路，功率放大器，放大器的频率响应，负反馈放大器及其稳定性分析，特殊运放的应用，有源滤波器及基本电流模电路，波形产生电路及其应用，直流稳压电路和集成稳压器。本书配套多媒体电子课件和习题答案。

本书可作为高等学校电子信息类专业相关课程的教材，也可供相关行业领域工程技术人员和科技工作者参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子电路基础 / 胡飞跃主编；刘圆圆，游彬，顾梅园编著. —北京：电子工业出版社，2013.9
普通高等教育电路设计系列规划教材
ISBN 978-7-121-20321-3

I. ①模… II. ①胡… ②刘… ③游… ④顾… III. ①模拟电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 094937 号

策划编辑：王羽佳

责任编辑：王羽佳 文字编辑：王晓庆

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：15.75 字数：455 千字

印 次：2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlbs@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

电子技术是 20 世纪发展最为迅速的领域之一，和现代信息社会密切相关。模拟电子技术是其中一个重要的分支。

根据教育部对电子信息类专业模拟电子电路的基本要求，结合自身的教学经验，在本书的编写过程中，选材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，内容由浅入深，简明扼要。对于工程性应用章节删除了一些烦琐的理论推导，比较适合 48~64 学时课程教学，全书力求概念清楚、论述严密、易学易懂。

本书系统介绍了模拟电子电路的基本知识、基本理论、常用集成器件及应用，内容包括：模拟电子电路导论，理想运算放大器及其线性应用，晶体二极管及其基本应用，场效应管，双极型晶体管，通用型集成运放结构及其单元电路，功率放大器，放大器的频率响应，负反馈放大器及其稳定性分析，特殊运放的应用，有源滤波器及基本电流模电路，波形产生电路及其应用，直流稳压电路和集成稳压器等，根据教学学时安排可以自由选择。限于篇幅的原因，关于电子技术仿真软件的相关知识不在此介绍。

教学中，可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合，也可以进行适当扩展。为适应教学模式、教学方法和教学手段的改革，本书配套多媒体电子课件和习题答案，请登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）注册下载。

本书是杭州电子科技大学电子信息工程国家特色专业建设的成果之一，也是浙江省重点教材资助项目，汇集了杭州电子科技大学模拟电子电路课程组全体教师的智慧。胡飞跃编写了第 8、10、11 和 13 章，并负责全书的统编工作，刘圆圆编写了第 1、2、3 和 6 章，游彬编写了第 4、5 章，顾梅园编写了第 7、9、12 章及附录。

虽已在教学工作中辛勤耕耘了数十年，但由于编者水平有限，书中仍可能存在许多不足之处，恳请同行专家和读者批评指正。

最后，衷心感谢为本书付出辛勤劳动的同行和支持本书出版的编辑。

作 者
于杭州电子科技大学

符号说明

本书采用目前国际上流行的与集成电路设计相衔接的电路符号，与目前国内流行的电路符号有所区别，特说明如下。

1. 电流与电压表示方法（以漏极电流和栅源电压为例）：

大写字母、大写下标表示直流量，如 I_D 、 V_{GS} ；







小写字母、小写下标表示交流量，如 i_d 、 v_{gs} ；

小写字母、大写下标表示总的瞬时量，如 i_D 、 v_{GS} ；

在时域分析中，大写字母、小写下标表示交流有效值，如 I_d 、 V_{gs} ；

在频域分析中，大写字母、小写下标表示相量，如 I_d 、 V_{gs} 。

2. 本书采用国际通用的标准电路符号：

	直流偏置电压
	电池、直流电压源
	电压源
	电流源
	受控电压源
	受控电流源

目 录

第 1 章 模拟电子电路导论	1	3.2.4 PN 结的电容特性	25
1.1 信号与电子系统	1	3.3 晶体二极管	26
1.1.1 信号	1	3.3.1 PN 结的伏安特性	26
1.1.2 信号频谱	1	3.3.2 二极管的主要参数	27
1.1.3 模拟信号和数字信号	1	3.4 晶体二极管应用电路及其	
1.1.4 电子系统	2	分析方法	27
1.2 放大器基本概念及模型	2	3.4.1 常规二极管的建模	27
1.2.1 放大器的符号	3	3.4.2 图解分析法	30
1.2.2 放大器的主要参数	3	3.4.3 齐纳二极管的建模	31
1.3 放大器的频率响应	5	3.4.4 二极管应用电路分析	32
第 1 章习题	7	3.5 特殊晶体二极管	35
第 2 章 理想运算放大器及其线性应用 ..	8	第 3 章习题	36
2.1 集成运放理想模型与分析方法	9	第 4 章 场效应管	39
2.2 集成运放线性基本运算电路	9	4.1 MOSFET 结构及工作原理	39
2.2.1 反相组态	9	4.1.1 N 沟道 EMOSFET 器件结构	39
2.2.2 同相组态	10	4.1.2 N 沟道 EMOS 场效应管的	
2.3 运放的其他应用电路	11	工作原理	40
2.3.1 求和电路	11	4.1.3 N 沟道 EMOS 场效应管特性	44
2.3.2 求差电路	12	4.1.4 P 沟道增强型 MOSFET 特性	47
2.3.3 仪用运算放大器	13	4.1.5 耗尽型 MOSFET	48
2.3.4 积分电路和微分电路	14	4.1.6 互补 MOS 或 CMOS	50
2.4 非理想运放的工作性能	15	4.1.7 衬底效应	50
2.4.1 增益与带宽	15	4.2 结型场效应管	50
2.4.2 运放的大信号参数	16	4.2.1 结型场效应管的结构	50
2.4.3 运放的直流参数	16	4.2.2 工作原理	51
第 2 章习题	17	4.2.3 特性曲线与特征方程	52
第 3 章 晶体二极管及其基本应用	20	4.3 场效应管电路直流偏置	54
3.1 半导体基础知识	20	4.3.1 工作点	54
3.1.1 本征半导体	20	4.3.2 各种常用偏置电路	55
3.1.2 载流子的运动方式及形成的		4.3.3 直流分析与信号分析分离	56
电流	21	4.3.4 场效应管直流电路分析	57
3.1.3 杂质半导体	21	4.4 场效应管放大电路分析	57
3.2 PN 结及其特性	23	4.4.1 场效应管小信号模型	58
3.2.1 PN 结的形成	23	4.4.2 放大电路的性能指标	60
3.2.2 PN 结的基本特性	24	4.4.3 放大器的 3 种组态	60
3.2.3 PN 结的反向击穿现象	25	4.4.4 共源放大器	60

4.4.5 接源极电阻的共源放大器·····	62	6.4 组合放大单元电路·····	105
4.4.6 共栅放大器·····	63	6.4.1 多级放大器的耦合方式及对信号 传输的影响·····	105
4.4.7 共漏放大器或源极跟随器·····	64	6.4.2 Cascode 放大器·····	106
4.4.8 3种组态放大器的比较·····	65	6.4.3 常用的组合单元电路·····	106
第4章习题·····	65	6.5 有源负载放大电路·····	107
第5章 双极型晶体管 ·····	70	6.5.1 有源负载 CS 和 CE 放大器·····	107
5.1 晶体三极管的器件结构及 工作原理·····	70	6.5.2 有源负载 MOS 差分放大器·····	108
5.1.1 器件结构·····	70	6.5.3 有源负载 BJT 差分放大器·····	110
5.1.2 放大模式下 NPN 晶体三极管的 工作原理·····	71	6.6 经典通用型运放 μ A741 内部 电路分析·····	112
5.1.3 晶体三极管的电路符号及 特性曲线·····	73	6.7 集成运放的技术参数和性能特点及 集成运放的使用·····	113
5.2 晶体三极管的直流偏置·····	76	第6章习题·····	114
5.2.1 晶体三极管常用偏置电路·····	76	第7章 功率放大器 ·····	119
5.2.2 直流分析与交流分析分离·····	77	7.1 功率放大器的特点及类型·····	119
5.2.3 晶体三极管直流电路分析·····	78	7.1.1 功率放大器的特点·····	119
5.3 晶体三极管放大电路分析·····	79	7.1.2 功放输出级的分类·····	120
5.3.1 晶体三极管小信号模型·····	79	7.2 A 类输出级·····	120
5.3.2 共射放大器·····	81	7.2.1 电路结构和传输特性·····	120
5.3.3 接发射极电阻的共发射极放大器·····	82	7.2.2 输出功率及转换效率·····	121
5.3.4 共基放大器·····	84	7.2.3 其他组态的功率放大器·····	122
5.3.5 共集电极放大器或射极跟随器·····	85	7.3 B 类输出级·····	123
5.3.6 3种组态放大器的比较·····	86	7.3.1 电路结构和工作原理·····	123
第5章习题·····	86	7.3.2 传输特性·····	124
第6章 通用型集成运放结构及其 单元电路 ·····	91	7.3.3 输出功率及转换效率·····	124
6.1 集成运算放大电路简介·····	91	7.3.4 采用复合管的 B 类输出级·····	126
6.2 电流源电路及其应用·····	91	7.4 AB 类输出级·····	127
6.2.1 MOS 镜像电流源电路及比例 电流源电路·····	92	7.4.1 电路结构和工作原理·····	127
6.2.2 BJT 镜像电流源电路及比例 电流源电路·····	92	7.4.2 常见的几种 AB 类输出级 偏置方式·····	127
6.2.3 电流导向电路·····	93	7.5 功率放大器输出级的设计·····	128
6.3 差分放大单元电路·····	94	7.5.1 输出级工作方式的选择·····	128
6.3.1 MOS 差分放大器的典型电路及其 性能分析·····	95	7.5.2 BJT 功率管和 MOS 功率管的 比较·····	129
6.3.2 BJT 差分放大器的典型电路及其 性能分析·····	99	7.5.3 功率管的选择·····	131
6.3.3 差分放大器的差模传输特性·····	102	7.5.4 功率管的散热和二次击穿问题·····	132
6.3.4 差分放大器的非理想参数·····	104	7.6 集成功率放大器·····	133
		7.6.1 集成功率放大器内部的电路 结构·····	133
		7.6.2 具有固定增益的集成功率	

放大器 LM380	134	9.4.2 反馈对放大器极点的影响	170
7.6.3 大功率集成功率		9.4.3 负反馈放大电路的稳定性分析	170
放大器 TDA2040	135	9.4.4 频率补偿	172
第 7 章习题	136	9.4.5 其他形式的反馈在放大器中的	
第 8 章 放大器的频率响应	138	应用	175
8.1 晶体管高频参数和等效		第 9 章习题	177
电路	138	第 10 章 特殊运放的应用	181
8.1.1 BJT 内部电容与高频模型	138	10.1 特殊运放芯片简介	181
8.1.2 MOSFET 内部电容与高频模型	140	10.1.1 高精度运放 OP177	181
8.2 单级放大器的频率响应	140	10.1.2 高速宽带集成运放 LT1226	182
8.2.1 频率响应概论	140	10.1.3 CMOS 集成运放 CF7613	183
8.2.2 MOSFET 放大电路频率响应	144	10.2 集成运放性能参数对运算	
8.2.3 BJT 共射放大电路的频率		误差的影响	185
响应分析	147	10.2.1 A_{vd} 、 R_{id} 为有限值引起闭环	
8.3 多级放大器和宽带放大器的		增益的误差	185
频率响应	150	10.2.2 共模抑制比 CMRR 为有限值	
8.3.1 多级放大电路的高频响应	150	引起的闭环增益的误差	186
8.3.2 多级放大电路的低频响应	151	10.2.3 输入失调参数 I_{IB} 、 V_{IO} 及 I_{IO}	
第 8 章习题	151	引起输出电压的误差	187
第 9 章 负反馈放大器及其稳定性		10.2.4 运放的开环带宽对闭环	
分析	154	增益的影响	188
9.1 反馈的基本概念和判断方法	154	第 10 章习题	188
9.1.1 反馈的基本概念	154	第 11 章 有源滤波器及基本	
9.1.2 负反馈放大器的 4 种基本组态	156	电流模电路	192
9.1.3 反馈的判断	157	11.1 有源滤波器	192
9.2 负反馈对放大电路性能的影响	159	11.1.1 一阶滤波器	192
9.2.1 稳定静态工作点	159	11.1.2 二阶滤波器	192
9.2.2 降低增益灵敏度	160	11.2 电流模电路基础	194
9.2.3 减小非线性失真	160	11.2.1 电流模电路的基本概念	194
9.2.4 扩展放大器的带宽	161	11.2.2 跨导线性回路原理	194
9.2.5 降低噪声	162	11.2.3 TL 回路构成的电流放大电路	195
9.2.6 对放大器的输入输出电阻的		第 11 章习题	197
影响	162	第 12 章 波形产生电路及其应用	200
9.3 深度负反馈放大器的分析与		12.1 正弦波振荡器	200
近似计算	163	12.1.1 电路组成	200
9.3.1 深度负反馈的实质	163	12.1.2 正弦波振荡器的振荡条件	200
9.3.2 深度负反馈条件下的近似计算	164	12.1.3 文氏电桥振荡器	201
9.3.3 负反馈放大器的设计	169	12.1.4 带稳幅环节的文氏电桥振荡器	202
9.4 负反馈放大器的稳定性分析	169	12.1.5 RC 移相式振荡器	203
9.4.1 负反馈放大电路产生自激		12.1.6 LC 振荡器	203
振荡的条件	169	12.1.7 石英晶体振荡器	206

12.2 非正弦波振荡器	207	13.2.1 电源滤波电路	228
12.2.1 集成电压比较器	208	13.2.2 串联型线性稳压电源及应用	229
12.2.2 矩形波振荡器	214	13.3 开关型稳压器	230
12.2.3 锯齿波振荡器	216	13.3.1 开关串联稳压电路	230
12.2.4 由 555 定时器构成的多谐 振荡器	217	13.3.2 开关集成稳压器及应用	231
12.3 集成函数信号发生器	219	第 13 章习题	232
12.3.1 工作原理	219	附录 A 本书常用的符号表	236
12.3.2 典型应用	220	附录 B 半导体集成工艺简介	237
第 12 章习题	223	附录 C 电路网络定理	239
第 13 章 直流稳压电路和集成 稳压器	226	C.1 基尔霍夫定律	239
13.1 直流稳压电源概述	226	C.2 戴维南定理和诺顿定理	239
13.1.1 直流稳压电源主要指标	226	C.3 单时间常数网络	240
13.1.2 单相整流电路	227	C.3.1 STC 网络的分类	240
13.2 电源滤波电路和串联型线性稳压 电源	228	C.3.2 STC 网络中时间常数的求解	241
		C.3.3 STC 网络的频率响应	242
		参考文献	244

第1章 模拟电子电路导论

1.1 信号与电子系统

1.1.1 信号

信号包含很多关于物理世界的事情和行为的信息，是信息传输的载体。人类的自然环境中存在着各种各样的信息。例如，气候变化时包含的温度、气压、风速等信息；播音员播音时话筒将声信号转换为电信号，就会产生描述播音员声音特征的信息，如频率、频带宽度等。任意一种自然现象都包含大量的能够描述该现象的信息参数，这些信息通过一定的传感器可以转换为电信号，电信号的处理由电子系统来完成。

为了从一系列的信号中抽取所需要的信息，观测后要预先确定一些处理信号的方法，来分析该信号的特征。信号可以用两种不同的形式出现——时域信号和频域信号。针对这两种信号，目前都有专门的理论和实验手段进行分析和处理。

1.1.2 信号频谱

对时域信号最有用的一种描述方式是它的频谱，可以通过傅里叶变换来完成。如图 1.1 所示的一个任意电信号，它相对的频谱如图 1.2 所示。

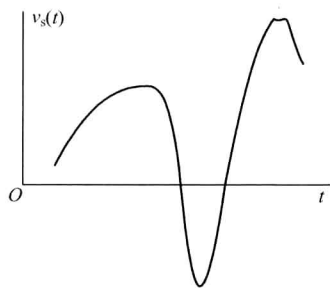


图 1.1 时域信号

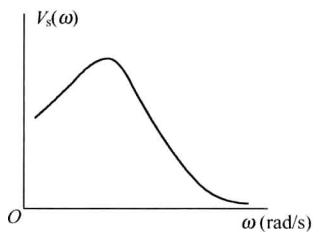


图 1.2 频域信号

也就是说，一个信号既可以用随时间变化的波形来描述，也可以用它的频谱来表示。

1.1.3 模拟信号和数字信号

和自然界中广泛存在的实际信号类似，图 1.1 所示的信号为模拟信号，它在幅度和时间上都是连续的函数。

现代电子系统处理信号时，在很多场合都采用数字的处理方法。这样就需要一种处理方式，将模拟信号变换为数字信号，然后再进行处理。

所谓数字信号，是在时间上和幅度上都是离散的一种信号，便于用数字来描述。将模拟信号转换为数字信号，需要经过采样和量化编码两个环节。图 1.3 所示为采样后时间离散的信号，该信号再

经过量化编码得到如图 1.4 所示的数字信号（用 8 位二进制数表示）。

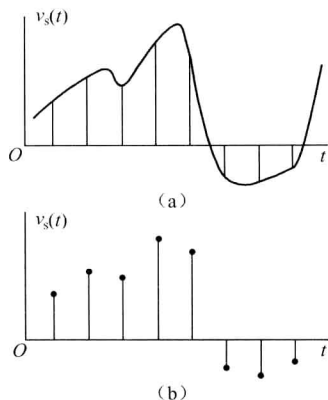


图 1.3 时间离散的信号

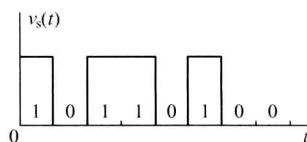


图 1.4 数字信号

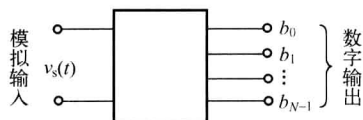


图 1.5 A/D 转换器

目前有专用的电子电路来完成上述任务，称为 A/D 转换器，如图 1.5 所示。对数字信号的处理可以借助计算机软件辅助完成。

总之，尽管目前信号的数字处理技术非常普遍，但还是存在只能用模拟电路才能实现的信号处理方式。因此，许多电子系统既包括模拟部分，也包括数字部分，且学科前沿部分多处在两种

信号混合的电路设计上。作为一个优秀的电子工程师，必须对模拟电路和数字电路的设计都要擅长。

1.1.4 电子系统

“电子系统”有很多种描述定义，一般来说，将多个具有一定功能的单元模块电路相互连接，组成规模较大、能够完成特定功能的电路整体，可以称为“电子系统”。图 1.6 所示为电子系统的一般结构框图，主要包括“信号输入”、“预处理”、“模数转换”、“信号处理”、“信号输出”等基本部分。

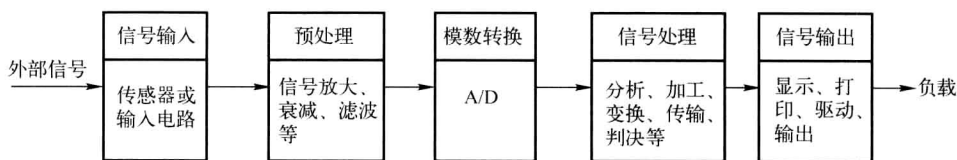


图 1.6 电子系统的一般结构框图

由于从外界采集的信号往往非常微弱，而且伴随着噪声及其他干扰，因此预处理是电子系统中的重要环节。预处理主要是解决信号的放大、衰减、滤波等，即通常所说的“信号调理器”，经预处理后的信号，在幅度和其他方面都比较适合做进一步的分析或数字化处理。这一部分的信号仍多为模拟信号。在这个环节中，放大器是重要的组成部分。

放大器是模拟信号处理中最重要、最基本的单元。放大电路不仅具有独立实现信号不失真放大的功能，而且也是其他模拟电路，如振荡器、滤波器、稳压器、调制解调器的基础和基本组成部分。

1.2 放大器基本概念及模型

在电子系统中，由于采集信号的换能器（或传感器）输出的信号往往比较微弱，范围基本在毫伏或微伏级，不利于进行可靠的后续处理，因而需要将这样的信号进行幅度放大，但不改变信号的其

他特性，即输出波形和输入波形除了幅度外都是一模一样的，任何波形上的变化都认为是失真。能够实现这样功能的电路称为放大器。一个处理电压信号的放大器可以用式 (1.1) 来描述：

$$v_o = Av_i \quad (1.1)$$

式中， A 表示放大器的放大能力，称为放大器的增益； v_i 和 v_o 分别是输入信号和输出信号。

1.2.1 放大器的符号

放大器是一个双口网络，一端是信号输入口，另一端是信号输出口，常用符号如图 1.7 (a) 所示，一个电压输入、电压输出的放大器的实际连接电路如图 1.7 (b) 所示。

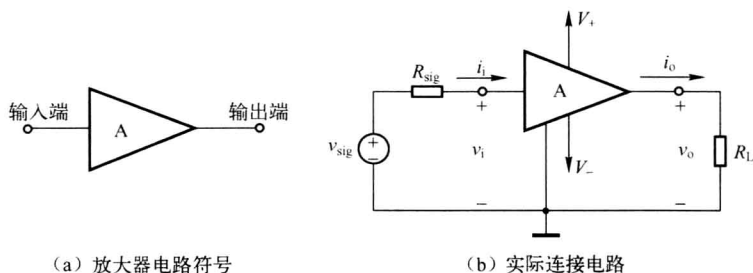


图 1.7 放大器电路符号及实际连接电路

放大器本质上是一种换能器，因此工作时需要有电源提供能量，图 1.7 (b) 中的 V_+ 和 V_- 代表了供电的直流电源，供电方式有双电源供电和单电源供电两种形式。放大器的输入端和输出端之间存在一个公用端子，这个公用端子作为一个参考点，称为地或者零电位。图中 v_{sig} 为信号源， R_{sig} 为信号源内阻， R_L 为电路的负载， v_i 为电路的输入电压， i_i 为电路的输入电流， v_o 为负载上的输出电压， i_o 为电路的输出电流。

放大器最重要的参数就是增益，增益的定义式为

$$\text{增益} = \frac{\text{输出量}}{\text{输入量}}$$

$$\text{则电压增益为} \quad A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{V/V} \quad (1.2)$$

$$\text{电流增益为} \quad A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{A/A} \quad (1.3)$$

$$\text{功率增益为} \quad A_p = \frac{P_L}{P_1} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i \quad \text{W/W} \quad (1.4)$$

为了拓宽坐标轴的显示范围，电子工程师经常使用对数来表示放大器的增益，即

$$\text{电压增益的分贝表示} = 20 \lg |A_v| \text{ dB}$$

$$\text{电流增益的分贝表示} = 20 \lg |A_i| \text{ dB}$$

$$\text{功率增益的分贝表示} = 10 \lg |A_p| \text{ dB}$$

因此在增益计算分析时，要注意两种表示方法的换算。

1.2.2 放大器的主要参数

放大器的主要参数是衡量放大器性能优劣的标准，并决定了放大器的使用范围。

1. 增益

增益是描述放大器放大能力的重要参数。实际上根据放大器端口的输入量与输出量的不同，增益有 4 种定义：

电压增益 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ ，相应的放大器称为电压放大器；

电流增益 $A_i = \frac{i_o}{i_i}$ ，相应的放大器称为电流放大器；

互阻增益 $A_r = \frac{v_o}{i_i}$ ，相应的放大器称为互阻放大器；

互导增益 $A_g = \frac{i_o}{v_i}$ ，相应的放大器称为互导放大器。

也就是说，放大器根据输入、输出量的不同，可以分为 4 类基本放大器。每一类对信号源要求不同，对负载输出的信号要求也不同，实际应用中可以根据需要进行选取。

2. 输入电阻 R_i

输入电阻是放大器在输入端的等效电阻，同时作为信号源的负载，它表明了放大器从信号源有效吸取信号大小的能力。其定义为

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (1.5)$$

如图 1.8 (a) 所示，计算出 v_i 与由 v_i 引起的输入电流 i_i 的比值，即可得到 R_i 。

引入源电压增益的定义，即

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} \quad (1.6)$$

又因为

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} v_{sig} \quad (1.7)$$

故

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_{sig}} \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v \quad (1.8)$$

式中， R_{sig} 为信号源内阻， v_{sig} 为信号源电压。

可见只有当 $R_i \gg R_{sig}$ 时， $v_i \approx v_{sig}$ ， $A_v \approx A_{vs}$ ，此时，信号源内阻几乎不损失信号，信号源信号几乎全被放大器吸取。

3. 输出电阻 R_o

输出电阻是放大器在输出端的等效电阻，同时作为放大器的内阻，它的大小决定了放大器带负载的能力。其定义为

$$R_o = \left. \frac{v_t}{i_t} \right|_{\substack{v_{sig}=0 \\ R_L \rightarrow \infty}} \quad (1.9)$$

图 1.8 (b) 所示为输出电阻的测试方法，在输出端加一测试电压 v_t ，由其引起的电流为 i_t ，通过计算两者的比值即可得到输出电阻。

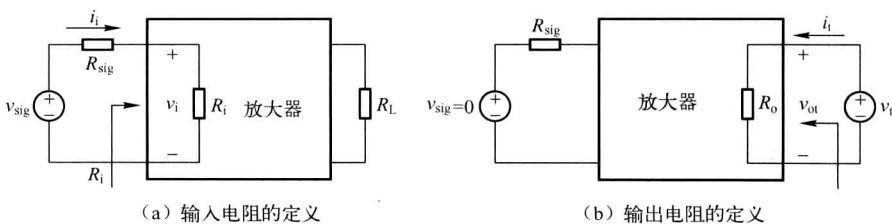


图 1.8 输入、输出电阻测试方法

引入开路电压增益, 即

$$A_{vo} = \left. \frac{v_{ot}}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} \quad (1.10)$$

式中, v_{ot} 为负载开路时的输出电压。

又因为

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} v_{ot} \quad (1.1)$$

故

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{ot}} \cdot \frac{v_{ot}}{v_i} = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{vo} \quad (1.12)$$

可见只有当 $R_o \ll R_L$ 时, $v_o \approx v_{ot}$, $A_v \approx A_{vo}$, 此时放大器几乎将处理后的信号无损地送到负载上输出。

表 1.1 所示为 4 类基本放大器及其模型。

表 1.1 4 类基本放大器及其模型

类型	电路模型	增益参数	理想特性
电压放大器		开路电压增益 $A_{vo} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right _{i_o=0}$ (V/V)	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow 0$
电流放大器		短路电流增益 $A_{is} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right _{v_o=0}$ (A/A)	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow \infty$
互导放大器		短路互导增益 $G_m = \left. \frac{i_o}{v_i} \right _{v_o=0}$ (A/V)	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow \infty$
互阻放大器		开路互阻增益 $R_m = \left. \frac{v_o}{i_i} \right _{i_o=0}$ (V/A)	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow 0$

1.3 放大器的频率响应

在实际电路中, 除电阻外, 还存在许多电抗元件, 如电路的分布电容、杂散电容、器件的极间

电容和分布电感等。不同电抗元件对频率呈现不同的阻抗特性，这必然会导致放大器的增益也是频率的函数，即增益为一个“复数”：

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = |A(\omega)| e^{j\varphi_A(\omega)} \quad (1.13)$$

其中， $|A(\omega)|$ 和角频率 ω 的关系曲线称为“幅频特性”，相移 $\varphi_A(\omega)$ 和角频率 ω 的关系曲线称为“相频特性”。一般工程上习惯用分贝（dB）来表示增益函数的幅度，因此得到 $20\lg|A(\omega)|$ 与频率的关系曲线。

图 1.9 所示为某放大器的幅频特性示意图，图中， $f = \omega/2\pi$ ，单位为 Hz。可以看到放大器的幅频特性在一定宽度的频率范围之内，增益几乎是固定不变的，这个频率范围称为“中频区”，而当频率很高或很低时，增益会逐渐减小，分别称为“高频区”和“低频区”。若中频增益为 A_0 ，则随着频率的升高或降低，增益会下降，当增益下降到 $A_0/\sqrt{2}$ 时，对应的频率分别为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 。

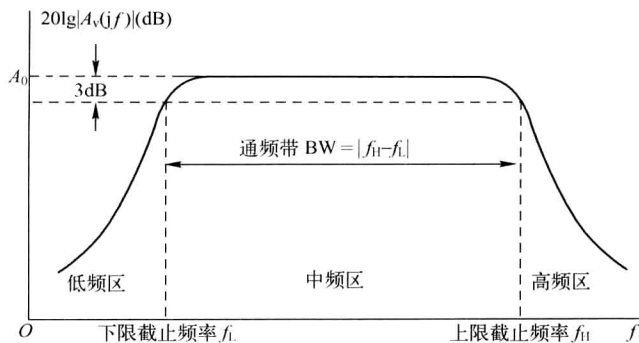


图 1.9 放大器的幅频特性

工程上更习惯采用另外一种定义方式。若增益采用分贝（dB）来表示，则

$$20\lg\left|\frac{A_0}{\sqrt{2}}\right| = 20\lg|A_0| - 20\lg\sqrt{2} = 20\lg|A_0|(\text{dB}) - 3\text{dB} \quad (1.14)$$

即由中频增益下降 3dB 对应的频率分别为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 。

定义放大器的通频带（也称为带宽 BW（BandWidth））为

$$\text{BW} = |f_H - f_L| \quad (1.15)$$

要计算放大器的频率响应，必须分析所有电抗元件的等效电路模型。一个电感 L 的电抗或阻抗是 $j\omega L$ ，而一个电容 C 的电抗或阻抗是 $1/j\omega C$ ，等效的电纳或导纳是 $j\omega C$ 。因此在频域分析中我们处理的是阻抗或导纳，分析的结果是放大器的增益函数 $A(j\omega)$

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \quad (1.16)$$

在对一个电路进行分析以确定它的频率响应时，可以通过使用复数频率变量 s 来简化运算，即一个电感 L 的阻抗是 sL ，电容 C 的阻抗是 $1/sC$ 。用阻抗代替相应的电抗元件并进行标准的电路分析，就可以得到如下的传输函数 $A(s)$ ：

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (1.17)$$

然后, 用 $j\omega$ 代替 s 就可以得到用物理频率表示的传输函数 $A(j\omega)$ 。

第1章习题

1.1 某放大器用 $\pm 3\text{V}$ 的电源供电。当输入为峰值为 0.2V 的正弦波时, 可获得峰值为 1.0mA 的电流, 并在 100Ω 负载上产生峰值为 2.2V 的正弦波。每个电源的平均电流为 20mA 。求用分贝表示的电压增益、电流增益和功率增益。

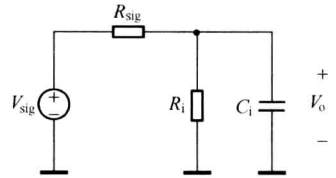
1.2 某电压放大器的输入电阻为 $10\text{k}\Omega$, 输出电阻为 200Ω , 增益为 1000V/V 。它被连接在电阻为 $100\text{k}\Omega$ 、开路电压为 10mV 的信号源和 100Ω 之间, 则:

- (1) 输出电压为多少?
- (2) 从源到负载的电压增益为多少?
- (3) 从放大器输入端到负载的电压增益为多少?

1.3 某电流放大器有 $R_i = 1\text{k}\Omega$, $R_o = 10\text{k}\Omega$, $A_{is} = 100\text{A/A}$, 它被连接在电阻为 $100\text{k}\Omega$ 的 100mV 信号源和 $1\text{k}\Omega$ 负载之间。整个放大电路的电流增益、电压增益和功率增益分别为多少?

1.4 某互导放大器的 $R_i = 2\text{k}\Omega$, $G_m = 40\text{mA/V}$, $R_o = 20\text{k}\Omega$, 它由电阻为 $2\text{k}\Omega$ 的电压源激励, 并接有 $1\text{k}\Omega$ 的电阻负载, 求实际得到的电压增益。

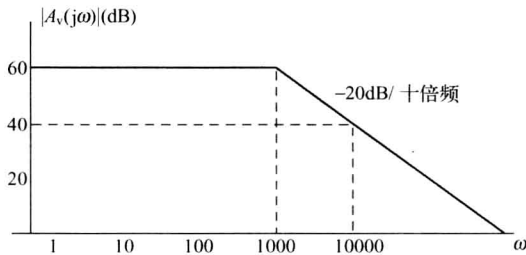
1.5 某互阻放大器由内阻为 R_{sig} 的电流信号源 i_{sig} 激励, 输出端接 R_L 的负载电阻。证明下式给出的总增益: $\frac{v_o}{i_{\text{sig}}} = R_m \frac{R_{\text{sig}}}{R_{\text{sig}} + R_i} \frac{R_L}{R_L + R_o}$ 。



图题 1.1

1.6 如图题 1.1 所示, 推导 $V_o(s)/V_i(s)$ 的表达式, 说明类型 (高通还是低通)。当 $R_{\text{sig}} = 20\text{k}\Omega$, $R_i = 80\text{k}\Omega$, $C_i = 5\text{pF}$ 时, 求 3dB 频率。

1.7 某一电压放大器的幅频特性如图题 1.2 所示, 求: (1) 中频增益; (2) 上限截止频率; (3) 下限截止频率。



图题 1.2

第 2 章 理想运算放大器及其线性应用

在放大器中有一类非常重要的单元电路——运算放大器（简称运放），它是模拟集成电路中应用极为广泛的一种器件。这类器件可以对电信号进行线性运算，一般具有高增益、高输入阻抗和低输出阻抗等特性，同时还能实现信号产生、滤波等多项处理功能。由于它具有多功能性，我们几乎可以用运算放大器做任何事情。本章暂不讨论运算放大器内部电路结构，而是将其视为一个模块化的单元电路来进行介绍，首先讨论理想运放模型以及它的端口特性，然后介绍其典型应用，并给出相应的电路分析方法。这些应用和方法可以直接用于实际的电路设计与分析中。

运算放大器的电路符号如图 2.1 所示。图 2.2 所示为运算放大器的一般等效电路模型，在后面的电路分析中会多次应用该模型。

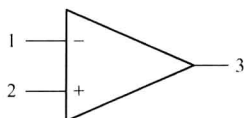


图 2.1 运算放大器的电路符号

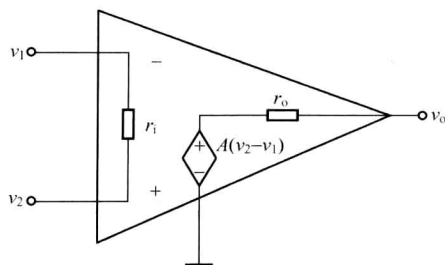


图 2.2 电压型运算放大器的一般等效电路模型

从信号输入、输出的角度看，运算放大器最基本的端口有 3 个：两个输入端口和一个输出端口，其中，端口 1 称为反相输入端，用“-”号标注；端口 2 称为同相输入端，用“+”号标注；端口 3 为输出端。理想运放的输入信号与输出信号之间满足关系式 (2.1)，其中 A 为放大器开环增益。

$$v_o = A(v_+ - v_-) \quad (2.1)$$

待处理信号如果是从端口 1 送入的，则在端口 3 得到的输出信号应该会与输入信号反相；待处理信号如果是从端口 2 送入的，则在端口 3 得到的输出信号应该会与输入信号保持同相。

首先介绍两个新的概念：差模信号和共模信号。对于任意一对待处理信号 v_1 和 v_2 ，其差模信号的定义为

$$v_{id} = v_2 - v_1 \quad (2.2)$$

其共模信号的定义为

$$v_{icm} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.3)$$

在此定义的基础上，任意一对待处理信号都可以表示成其差模信号与共模信号的代数和形式

$$v_1 = v_{icm} - \frac{v_{id}}{2} \quad (2.4)$$

$$v_2 = v_{icm} + \frac{v_{id}}{2} \quad (2.5)$$

也就是说，对于一个理想运算放大器，其基本功能是放大两个输入端口上输入信号的差值（即差模部分），而完全抑制输入信号的共模分量。因此，理想运算放大器本质上是差分放大器。