

高等学校简明通用系列规划教材

模拟电子技术 简明教程

孙肖子 主 编 ◀
赵建勋 副主编 ◀
朱天桥 顾伟舟 王新怀 参 编 ◀



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校简明通用系列规划教材

模拟电子技术简明教程

主 编 孙肖子

副主编 赵建勋

参 编 朱天桥 顾伟舟 王新怀

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共分为 11 章, 内容包括: 绪论、集成运算放大器的基本应用电路、半导体物理基础及晶体二极管、双极型晶体三极管和基本放大器、场效应管原理及场效应管放大器、集成运算放大器内部电路简介、放大器的频率响应、反馈、波形的变换和产生电路、低频功率放大电路、电源及电源管理等。

本书将反馈的概念贯穿全书, 更注重系统和应用, 有些章节加入了工程应用实例, 在加强基本概念及分析方法的基础上, 更贴近工程实际, 内容更丰富、更新颖且更广泛。

本书将纸质教材与在线开放课程相结合, 尝试向新形态数字化课程的目标努力。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、电气与自动化工程、测控技术与仪器、生物医学工程、微电子、电子科学与技术等有关专业的本科生或专科生“电子线路基础”、“电子技术基础”等课程的教材或教学参考书, 也可作为广大工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术简明教程/孙肖子主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-5606-5244-3

I. ①模… II. ①孙… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 023900 号

策划编辑 刘玉芳 云立实

责任编辑 张 玮

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 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5

字 数 362 千字

印 数 1~3000 册

定 价 38.00 元

ISBN 978-7-5606-5244-3 / TN

XDUP 5546001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

“模拟电子技术简明教程”是电子、电气、信息工程类专业的主干课程，是最重要的学科技术基础课之一。该课程的教学宗旨是“打好基础，学以致用，突出实践，突出应用”。一方面该课程要为后续课程的学习打好基础；另一方面该课程的概念性、实践性、工程性强，很多内容与工程实际密切相关，“直面应用”是本课程的特点之一。本书以模拟电子技术的重要知识点和知识链为载体，注重加强学科理论基础，旨在培养创新意识、科学思维方法，提高分析问题和解决问题的能力。

结合多年的教学与科研实践，本书力图做到“基础更扎实，内容更实用，视野更开阔，编排更合理”，在叙述风格上尽量体现简洁明了、通俗易懂、深入浅出。

为便于掌握应用，本书将重点前移，将集成运算放大器与有源 RC 滤波器安排在第 2 章；为了降低教与学的难度，将电压比较器和弛张振荡器后移，归入第 9 章；在有些章节中还加入了工程应用实例。

为了使读者更容易学习，本书分散难点，将半导体原理及晶体二极管作为一章，将双极型晶体三极管与放大器基础合为一章，将场效应管与场效应管放大器合为一章；加强小信号模型及解析法，淡化图解法。

本书将反馈及其应用贯穿全书，在绪论中就提出反馈的概念，在放大器基础、电流源和差分放大器等章节中，均不回避“负反馈”在稳定工作点、提高输入电阻、提高放大倍数稳定度、提高共模抑制比等方面所发挥的作用。其中，第 2 章归纳电路结构的实质是“运放加反馈”；第 8 章全面回顾和总结负反馈的特性、分类及深反馈条件下增益的估算方法，并讨论反馈稳定性及相位补偿的基本概念与原理；第 10、11 章中也大量应用“负反馈”来改善电路性能。可见，“反馈”的概念和应用在模拟电子技术中是何等重要。

本书由西安电子科技大学“丝绸之路云课堂”教学团队编写，其中，孙肖子教授编写了第 1、2、5、6 章及第 8 章的 8.5 节；赵建勋教授编写了第 3、4、9 章和部分习题参考解答；朱天桥老师编了第 7 章和第 8 章的 8.1~8.4 节；顾伟舟副教授编写了第 10 章；王新怀副教授编写了第 11 章。孙肖子教授和赵建勋教授负责修改定稿；江晓安教授审阅了本书的全部内容，并提出了许多宝贵意

见。本书在编写中，得到了西安电子科技大学出版社的大力支持。在此，一并致以最衷心的感谢！

由于时间和水平所限，书中难免存在不足之处，望尊敬的老师、同学和广大读者批评指正。

编 者

2018年10月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 “模拟电子技术简明教程”课程简介	1
1.2 电子器件与电子电路的发展概况	2
1.3 模拟电路的基本命题及主要内容	2
1.4 放大器模型及主要性能指标	3
1.4.1 放大器模型	4
1.4.2 放大器的主要指标	4
1.5 模拟电路的难点及主要解决方案	6
1.5.1 负反馈的基本概念及基本框图	6
1.5.2 负反馈的意义	7
1.6 模拟电路学习方法的建议	8
第 2 章 集成运算放大器的基本应用电路	9
2.1 集成运算放大器特性简介	9
2.1.1 集成运算放大器的符号与模型	9
2.1.2 理想运算放大器的条件	10
2.1.3 集成运算放大器的电压传输特性	10
2.2 比例运算电路	12
2.2.1 同相比例放大器	12
2.2.2 反相比例放大器	13
2.2.3 同相比例放大器与反相比例放大器的比较	15
2.3 求和电路——相加器	16
2.3.1 同相相加器	16
2.3.2 反相相加器	17
2.4 求差电路——相减器	19
2.4.1 基本相减器电路	19
2.4.2 精密相减器电路——仪用放大器	20
2.5 积分器和微分器	21
2.5.1 积分器	21
2.5.2 微分器	23
2.6 电压-电流($U-I$)变换器和电流-电压($I-U$)变换器	24

2.6.1	$U-I$ 变换器	24
2.6.2	$I-U$ 变换器	24
2.7	有源 RC 滤波器	25
2.7.1	滤波器的概念	25
2.7.2	一阶有源 RC 滤波器的电路实现	27
2.7.3	二阶有源 RC 滤波器的电路实现	29
2.7.4	一阶全通滤波器的电路实现	34
2.8	工程应用实例	35
2.8.1	低频增益为 1 的五阶低通滤波器	35
2.8.2	高共模输入范围的电流监测仪及电流-电压转换器	37
2.8.3	单电源 PID 温度控制环	37
	思考题与习题	39
第 3 章	半导体物理基础及晶体二极管	44
3.1	半导体物理基础	44
3.1.1	本征半导体	44
3.1.2	杂质半导体——N 型半导体与 P 型半导体	46
3.1.3	半导体中的电流——漂移电流与扩散电流	47
3.2	PN 结	47
3.2.1	PN 结的形成	47
3.2.2	PN 结的单向导电特性及电流方程	48
3.2.3	PN 结的其他重要特性	50
3.3	晶体二极管	52
3.3.1	晶体二极管的结构和伏安特性	52
3.3.2	晶体二极管的主要参数	53
3.4	晶体二极管的应用	54
3.4.1	整流电路	54
3.4.2	限幅电路	55
3.4.3	电平选择电路	56
3.5	稳压二极管	57
3.6	其他晶体二极管	58
	思考题与习题	60
第 4 章	双极型晶体三极管和基本放大器	62
4.1	双极型晶体三极管	62
4.1.1	双极型晶体三极管的工作原理	62
4.1.2	双极型晶体三极管的伏安特性及参数	64

4.1.3	温度对双极型晶体三极管参数的影响	66
4.1.4	双极型晶体三极管的极限参数	67
4.2	基本放大器的组成原理、直流偏置和组态	67
4.2.1	基本放大器的组成原理	67
4.2.2	基本放大器的直流偏置	68
4.2.3	基本放大器的组态	69
4.3	基本放大器的交流解析分析法	70
4.3.1	双极型晶体三极管的低频小信号模型	70
4.3.2	共发射极放大器	72
4.3.3	共集电极放大器	73
4.3.4	共基极放大器	75
4.3.5	三种组态晶体管放大器的比较	77
4.4	基本放大器的图解分析法	77
4.5	多级放大器	79
4.5.1	多级放大器的结构及级间耦合方式	79
4.5.2	多级放大器的指标计算	82
4.6	工程应用实例	84
	思考题与习题	86
第5章	场效应管原理及场效应管放大器	90
5.1	场效应管的原理及特性	90
5.1.1	结型场效应管的原理及特性	90
5.1.2	绝缘栅场效应管的原理及特性	93
5.1.3	场效应管的主要参数	97
5.1.4	CMOS 场效应管	99
5.1.5	晶体管与场效应管的区别	99
5.1.6	场效应管的低频小信号简化模型——受控源模型	100
5.2	场效应管放大器	100
5.2.1	偏置电路	100
5.2.2	共源放大器	102
5.2.3	共漏放大器和共栅放大器	104
5.3	场效应管的开关特性及其应用	105
	思考题与习题	106
第6章	集成运算放大器内部电路简介	108
6.1	集成运算放大器电路概述	108
6.2	集成运算放大器的电流源电路	109

6.2.1	双极型晶体管组成的电流源	109
6.2.2	场效应管组成的电流源	112
6.3	差分放大器	113
6.3.1	差分放大器简介	113
6.3.2	长尾式差分放大器	114
6.3.3	带恒流源的差分放大器	118
6.3.4	差分放大器的传输特性	120
6.3.5	场效应管差分放大器	122
6.4	有源负载放大器	123
6.4.1	有源负载共射放大器	124
6.4.2	有源负载差分放大器	125
6.4.3	有源负载 CMOS 差分放大器	126
6.5	集成运算放大器的输出级电路	126
6.6	集成运算放大器内部电路举例	128
6.6.1	BJT 通用运算放大器 F007(LM741)	128
6.6.2	C14573 集成运算放大器	129
6.7	集成运算放大器的主要技术参数	130
	思考题与习题	132
第 7 章	放大器的频率响应	135
7.1	频率特性与频率失真的基本概念	135
7.1.1	频率特性及参数	135
7.1.2	频率失真	136
7.1.3	线性失真和非线性失真的区别	136
7.2	晶体管的高频小信号模型和频率参数	137
7.2.1	晶体管的高频小信号混合 π 型等效电路	137
7.2.2	晶体管的高频参数	137
7.3	共射放大器的高频响应	138
7.3.1	共射放大器的高频小信号等效电路	138
7.3.2	密勒定理以及高频等效电路的单向化模型	139
7.3.3	管子内部电容引入的频率响应和上限频率 f_{H1}	140
7.3.4	负载电容 C_L 引入的上限频率 f_{H2}	141
7.4	共集放大器的高频响应	142
7.5	共基放大器的高频响应	143
7.6	放大器的低频响应	144
7.7	多级放大器的频率响应	147

思考题与习题	148
第 8 章 反馈	151
8.1 反馈的基本概念及基本方程	151
8.2 反馈放大器的判断与分类	152
8.2.1 有、无反馈的判断	152
8.2.2 正反馈与负反馈的判断	153
8.2.3 电压反馈与电流反馈	154
8.2.4 串联反馈与并联反馈	154
8.2.5 直流反馈与交流反馈	156
8.3 负反馈对放大器性能的影响	156
8.3.1 对放大倍数及稳定度的影响	157
8.3.2 对放大器通频带及线性失真的影响	157
8.3.3 对非线性失真及输入动态范围的影响	159
8.3.4 对放大器内部产生的噪声与干扰的影响	160
8.3.5 电压负反馈和电流负反馈对输出电阻的影响	160
8.3.6 串联负反馈和并联负反馈对放大器输入电阻的影响	161
8.4 负反馈放大器的分析和近似计算	162
8.4.1 并联电压负反馈放大器	162
8.4.2 串联电压负反馈放大器	163
8.4.3 串联电流负反馈放大器	165
8.4.4 并联电流负反馈放大器	166
8.5 负反馈放大器的自激振荡	167
8.5.1 产生自激振荡现象的原因和条件	167
8.5.2 放大器的稳定性判别	168
8.5.3 常用的消振方法	170
思考题与习题	171
第 9 章 波形的变换和产生电路	175
9.1 精密二极管电路	175
9.1.1 精密二极管整流电路	175
9.1.2 峰值检波电路	176
9.2 电压比较器	177
9.2.1 简单电压比较器	177
9.2.2 引入正反馈的迟滞比较器	178
9.3 方波、三角波产生器——弛张振荡器	181
9.3.1 单运放弛张振荡器	181

9.3.2 双运放弛张振荡器	182
9.4 正弦波振荡器	184
9.4.1 文氏桥振荡器	184
9.4.2 LC 正弦波振荡器	186
9.5 工程应用实例	192
思考题与习题	193
第 10 章 低频功率放大电路	196
10.1 功率放大电路概述	196
10.1.1 功率放大电路的特点和要求	196
10.1.2 功率放大电路的工作状态	197
10.2 互补对称功率放大电路	198
10.2.1 B 类互补对称功率放大电路	198
10.2.2 AB 类互补对称功率放大电路	202
10.2.3 复合管及准互补 B 类功率放大电路(OCL 电路)	206
10.3 集成功率放大电路及工程应用实例	208
10.3.1 TDA2030 的特点和主要参数	208
10.3.2 单电源供电音频功率放大器(OTL)	209
10.3.3 双电源供电音频功率放大器(OCL)	209
10.3.4 双电源供电 BTL 音频功率放大器	210
10.4 D 类功率放大电路	211
思考题与习题	213
第 11 章 电源及电源管理	216
11.1 整流电路和滤波电路	216
11.1.1 整流电路	216
11.1.2 滤波电路	217
11.2 线性稳压电源	218
11.2.1 稳压电源的主要指标	218
11.2.2 串联型线性稳压电源	219
11.3 三端集成线性稳压器	222
11.4 开关型稳压电源	224
11.4.1 开关型稳压电源的原理和基本组成	225
11.5.2 开关变换器的基本拓扑结构	227
思考题与习题	231
部分习题答案	234
参考文献	238

第1章 绪论

1.1 “模拟电子技术简明教程”课程简介

“模拟电子技术简明教程”是电气类、电子信息类、计算机类、自动化类、仪器仪表类、生物医学工程类、机械制造类专业的主干专业基础课之一，同时又是一门直面实际工程的重要课程，与工业界有着密切的联系。

“信号”是“信息”的载体。“信号”有非电物理量信号与电信号之分，光、温度、压力、流量、位移、速度、加速度等属非电物理量信号，而电信号一般指的是随时间变化的电流或电压，也包括电容器的电荷、线圈的磁通以及空间的电磁波等。非电物理量信号可借助“传感器”转换为电信号，以便于信号的加工、处理或传输。

电信号可分为“模拟信号”和“数字信号”。所谓“模拟信号”，就是在时间和数值(幅度)上都连续变化的信号，如图 1.1.1 所示。自然界绝大部分信号都属于“模拟信号”。

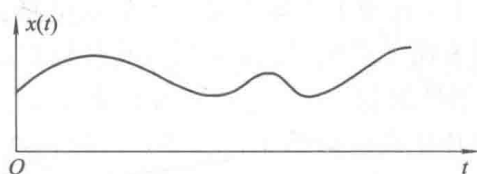


图 1.1.1 模拟信号

如图 1.1.2 所示，一般电子系统的信号处理都是从物理世界获取信息进行处理，再将

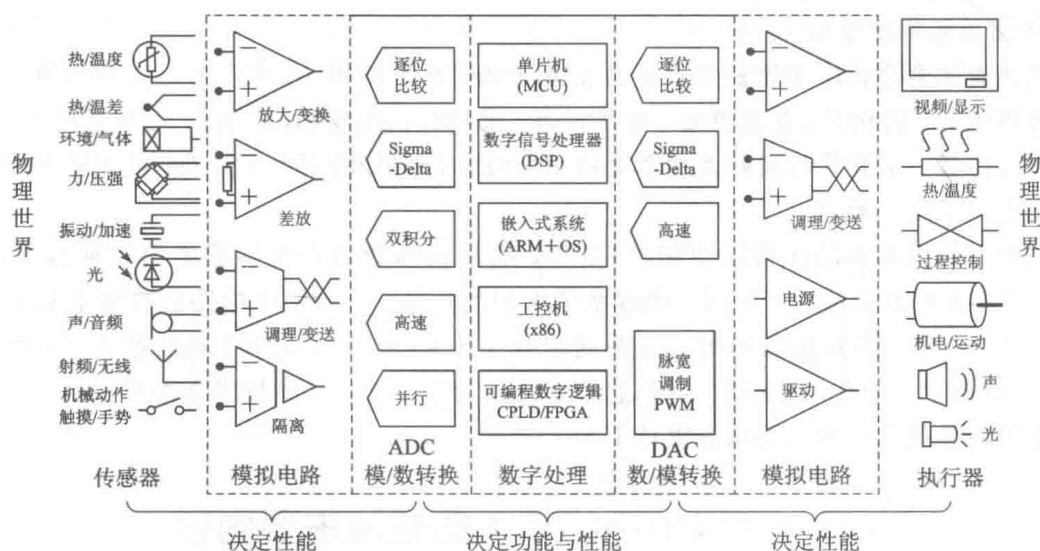


图 1.1.2 一般电子系统信号处理的组成框图

信息返回物理世界的过程。真实的物理世界的本质是模拟的，模拟电路是电子设备与真实物理世界交互的重要桥梁。

“模拟电子技术简明教程”就是一门研究电子器件原理及由电子器件组成的电子电路性能及其应用的课程。

1.2 电子器件与电子电路的发展概况

在“电路分析基础”课程中，曾经介绍过耗能元件电阻(R)和储能元件电容(C)、电感(L)以及受控源模型等，人们一直在寻找具有能量转换和功率放大能力的新器件、新元件，即真实的、可用于工程实际的受控源。

1904年英国物理学家和电气工程师弗莱明发明了电子管(真空管)，并获得了发明专利权。电子管的应用大大推动了科学技术的发展。然而，电子管存在许多难以克服的缺点：体积大、功耗大、发热严重、寿命短、电源利用率低、结构脆弱、可靠性差、需要高电压电源，等等。

20世纪中期，人们对电子器件研究的兴趣由真空环境转向物体内部，特别是半导体内部。1947年，贝尔实验室的威廉·肖克利、约翰·巴丁和沃尔特·布拉顿发明了世界上第一个点接触型晶体管，将其应用于助听器中，标志着人类从此进入电子时代。1958年，德州仪器公司的工程师杰克·基尔比在计算机微型组件的设计中，把三个电阻、一个电容和一个晶体管制作在一块硅片上，发明了世界上第一个集成电路。1959年，飞兆(Fairchild)半导体公司的吉恩·霍尔尼发明了平面工艺，通过氧化层保护硅面不受污染，解决了硅面上电阻、电容和晶体管的可靠性问题。同一年，飞兆半导体公司和英特尔公司的创始人之一罗伯特·诺伊斯设计了单片集成电路的生产技术，通过在氧化层上蒸镀铝线连接元器件，在硅片上制作出了完整电路。吉恩·霍尔尼和罗伯特·诺伊斯的工作使得集成电路的量产成为可能，标志着半导体产业从“发明时代”进入了“产品时代”。肖克利、巴丁、布拉顿三人因发明晶体管而获得了1956年诺贝尔物理学奖。基尔比因发明集成电路而获得了2000年诺贝尔物理学奖。

晶体管的寿命比电子管长几百倍甚至几千倍，并且体积小、耗能小、工作电压低、可用电池供电、不需预热、抗震性好、可靠性高。晶体的出现和广泛应用改变了世界，此后除某些显像管、示波管和高频大功率无线发射设备仍部分沿用电子管外，电子管基本上被淘汰而退出了历史舞台。

从电子管发明到晶体管发明相距43年，而从晶体管发明到集成电路发明仅相隔11年。这些伟大的发明改变了世界，也改变了人们的生活。如今集成电路正在朝着超微精细加工、超高速、超高集成度的片上系统(SoC, System on Chip)方向迅速发展，MEMS(硅片上的机电一体化)技术和生物信息技术将成为下一代半导体技术新的增长点，而人类探求新的科学技术的脚步将永远继续下去。

1.3 模拟电路的基本命题及主要内容

凡是能够处理、加工模拟信号的电路统称为模拟电路，模拟电路的基本命题及主要内

容如图 1.3.1 所示。由于放大器是所有模拟电子电路的基础，因此本书将重点介绍放大器的工作原理、分析方法和设计要点。另外，“电源”是所有电子设备不可或缺的组成部分，本书也将针对此内容有所加强。



图 1.3.1 模拟电路的基本命题及主要内容

1.4 放大器模型及主要性能指标

放大器是本书的重点。为什么需要放大器呢？通常模拟信号都十分微弱，如生物电信号(心电、脑电、肌电等)仅为微伏~毫伏量级，许多传感器(压力传感器、温度传感器等)转换得到的电信号也为毫伏量级，天线接收到的无线电信号一般为 -90 dBm 左右，这样小的信号在 $50\ \Omega$ 电阻上产生的电压约为几微伏，而数字化或进一步加工处理的信号强度为几百毫伏乃至“伏”量级，所以要将信号放大几十、几百、几千甚至几万倍。放大器的作用就是将信号按比例不失真地进行放大。

放大器可以等效为一个有源二端口网络，如图 1.4.1 所示，放大器的输入端口连接待放大的“信号源”。其中， \dot{U}_s 为信号源电压(复相量)， R_s 为信号源内阻， \dot{U}_i 和 \dot{I}_i 分别为放大器的输入电压和输入电流。放大器的输出端口接相应的负载电阻 R_L (Z_L)， \dot{U}_o 和 \dot{I}_o 分别为放大器的输出电压和输出电流。通常输入端口和输出端口有一个公共的电位参考点，称之为“地”。输入端口的 \dot{U}_i 或 \dot{I}_i 作为网络的“激励”信号，那么输出端口的 \dot{U}_o 或 \dot{I}_o 则为“响应”信号，信号传输方向通常是从输入到输出。

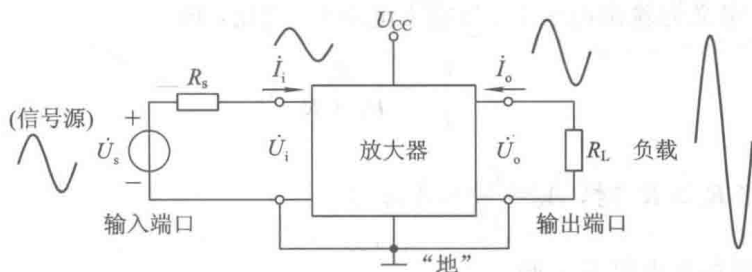


图 1.4.1 放大器等效为有源二端口网络

放大器的基本任务是不失真地放大信号，其基本特征是具有功率放大功能，也就是功率放大倍数大于 1，即

$$\frac{U_o \times I_o}{U_i \times I_i} = \frac{U_o}{U_i} \times \frac{I_o}{I_i} = A_u \times A_i > 1 \quad (1.4.1)$$

式中, A_u 为电压放大倍数, A_i 为电流放大倍数(都是无量纲的比例系数)。注意: 变压器不是放大器, 因为变压器无功功率放大能力, 若次级电压增大 n 倍, 则电流必减小为原来的 $1/n$, 加之变压器本身的损耗, 所以次级功率总是小于初级功率。

1.4.1 放大器模型

由于电压放大器的应用最为普遍, 因此, 本节以电压放大器为例来讨论这个问题。图 1.4.2 所示为电压放大器模型。对信号源而言, 放大器是信号源的负载, 一般用输入阻抗 R_i (Z_i) 来等效; 而对负载 R_L (Z_L) 而言, 放大器又相当于负载的信号源, 也可以用一个电压源来等效。不过该电压源不是独立的电压源, 而是一个受输入电压 \dot{U}_i 控制的“受控源”, 为负载提供放大的信号。受控电压与输入电压成正比, 其比例系数称为开路电压放大倍数 \dot{A}_{uo} , 受控源的内阻称为放大器的输出电阻 R_o , 电压放大器的受控源相当于电压控制电压源 (VCVS)。

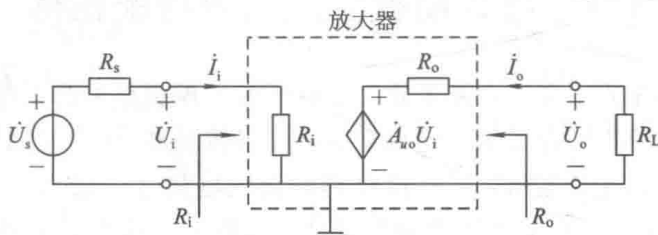


图 1.4.2 电压放大器模型 (VCVS)

1.4.2 放大器的主要指标

1. 电压放大倍数 \dot{A}_u

由图 1.4.2 可见, 由于放大器输出端存在输出电阻 R_o , 因此输出电压 \dot{U}_o 是 $\dot{A}_{uo}\dot{U}_i$ 在输出电阻和负载上的分压值, 即

$$\dot{U}_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} \dot{A}_{uo} \dot{U}_i \quad (1.4.2)$$

电压放大倍数 \dot{A}_u 定义为输出电压 \dot{U}_o 与输入电压 \dot{U}_i 之比, 即

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_L}{R_L + R_o} \dot{A}_{uo} \quad (1.4.3)$$

可见, 只有当 $R_L \gg R_o$ 时, $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \dot{A}_{uo}$ 。

又由于信号源存在内阻 R_s , 则

$$\dot{U}_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{U}_s \quad (1.4.4)$$

因此真正加到放大器输入端的信号 \dot{U}_i 比信号源电压 \dot{U}_s 小。

如果同时计入 R_o 与 R_s 的影响, 则可以得到源增益 \dot{A}_{us} :

$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \times \frac{R_L}{R_L + R_o} \dot{A}_{uo} \quad (1.4.5)$$

可见, 只有当 $R_i \gg R_s$, $R_L \gg R_o$ 时, 有

$$\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{uo} \quad (1.4.6a)$$

因此, 对电压放大器而言, 放大器的输入阻抗越大, 输出阻抗越小, 则增益损失越小。

放大倍数有时用对数表示。例如 $|\dot{A}_u| = 1000$, 用对数表示为

$$|\dot{A}_u| \text{ (dB)} = 20 \lg |\dot{A}_u| = 60 \text{ dB} \quad (1.4.6b)$$

2. 输入电阻 R_i

如图 1.4.2 所示, 放大器的输入电阻是从放大器输入端看进去的等效电阻, 其定义和计算方法为

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (1.4.7)$$

为了减小信号源内阻 R_s 对输入信号的衰减作用, 希望 $R_i \gg R_s$ 。

3. 输出电阻 R_o

如图 1.4.3 所示, 输出电阻 R_o 是从放大器输出端看进去的等效电阻, 其定义和计算方法是

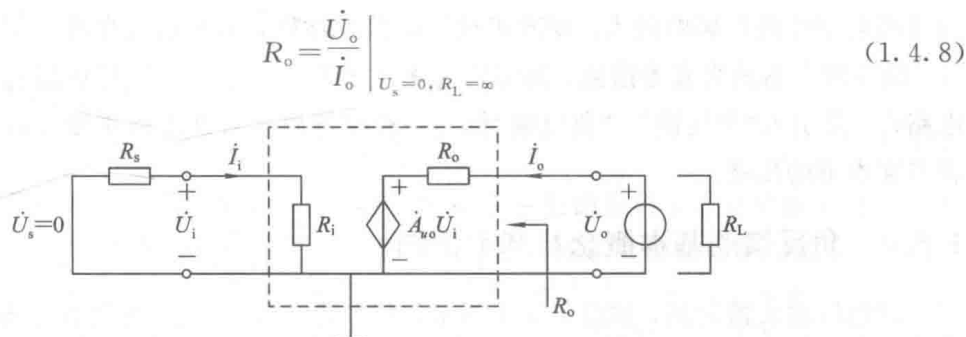
$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} \right|_{\dot{U}_s=0, R_L=\infty} \quad (1.4.8)$$


图 1.4.3 输出电阻 R_o 的定义

输出电阻 R_o 的大小决定了放大器带负载的能力, 只有当 $R_o \ll R_L$ 时, $\dot{U}_o \approx \dot{A}_{uo} \dot{U}_i$, $\dot{A}_u \approx \dot{A}_{uo}$, 负载电阻 R_L 的变化对输出电压及电压放大倍数的影响越小, 输出电压及电压放大倍数才越稳定。

4. 频率响应

理想放大器的放大倍数应该是一个与频率无关的常数, 但由于器件和电路中存在电抗元件(主要是电容), 导致放大器的放大倍数是频率的函数。频率响应用来描述放大倍数与频率之间的关系, 即

$$A_u(j\omega) = |A_u(j\omega)| \angle \varphi(j\omega) \quad (1.4.9)$$

放大倍数的模值 $|A_u(j\omega)|$ 与频率之间的关系称为幅频特性, 放大倍数的相位 $\varphi(j\omega)$ 与频率之间的关系称为相频特性。

通常待放大的信号不是单频信号，而是占有一定频谱的多频复合信号，如果各频率的信号分量的放大倍数和相位是不同的，就会导致放大后的信号产生“失真(畸变)”。由于电抗元件存在导致频率响应不理想，由此而引起的失真称为线性失真。关于频率响应的问题这里暂不展开讨论，将在第7章详细介绍。

5. 总谐波失真系数(非线性失真系数)THD

由晶体管、场效应管的非线性特性引起的失真称为非线性失真。这种失真的特征是输出信号中出现了许多输入信号中所没有的、新的谐波分量。通常用总谐波失真系数(即非线性失真系数)THD来衡量由器件的非线性特性所引起的非线性失真的严重程度。

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \cdots + U_{nm}^2}}{U_{1m}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{nm}^2}}{U_{1m}} \quad (1.4.10)$$

式中，分母 U_{1m} 为放大器输出信号的基波分量振幅，分子为各次谐波功率总和的开方(因为功率与电压平方成正比)。可见，谐波分量越大，THD 就越大，说明非线性失真越严重。

1.5 模拟电路的难点及主要解决方案

模拟电路设计要在速度、功耗、增益、精度、电源等多种因素间进行折中，模拟电路对串扰、噪声等远比数字电路敏感，特别是器件的非线性特性、温度不稳定特性、频率特性对模拟电路性能的影响极大。要改善模拟电路的性能，可采取提高放大器放大倍数的稳定性、减少放大器的失真等措施，其解决方案主要有：一是设计性能更加优越的新器件、新电路；二是引入“负反馈”。“负反馈”作为一种改善放大器性能的重要手段，其概念及方法将贯穿本书的始终。

1.5.1 负反馈的基本概念及基本框图

以电压放大器为例，如图 1.5.1 所示，基本放大器 A_u 是一个性能有待改进的放大器，在 A_u 的基础上加入反馈网络 F ，构成“闭环”。反馈网络 F 将输出信号 U_o 的部分或全部返回到放大器的输入端，形成反馈信号 U_f ，并与输入信号 U_i 相减，使真正加到基本放大器输入端的净输入电压 U'_i 减小，即“净差”为

$$U'_i = U_i - U_f < U_i \quad (1.5.1)$$

此种反馈称为负反馈。

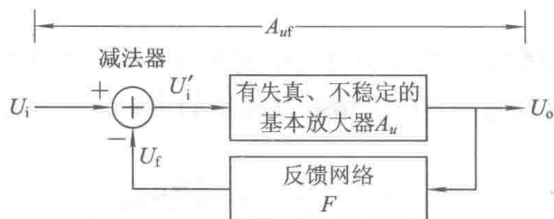


图 1.5.1 负反馈放大器框图