



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术

■ 查丽斌 张凤霞 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
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术

查丽斌 张凤霞 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍模拟电子技术课程的内容。全书共8章,主要内容包括:运算放大器及其线性应用、半导体二极管及直流稳压电源、晶体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路与集成运算放大器单元电路、滤波电路及放大电路的频率响应、负反馈放大电路和波形产生电路。本书包含大量例题和习题,配套《模拟电子技术习题及实验指导》,并提供配套多媒体电子课件和习题参考答案。

本书可作为高等学校电子、通信、自动化、电子电气、计算机等专业相关课程的本科生教材,也可作为自学考试和成人教育的自学教材,还可供电子工程技术人员学习参考。

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

模拟电子技术 / 查丽斌, 张凤霞编著. — 北京: 电子工业出版社, 2013.1

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-17609-8

I. ①模… II. ①查… ②张… III. 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(2012)第158662号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 曹剑锋

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: 16.5 字数: 477千字

印 次: 2013年1月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 36.00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 zltz@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

为适应电子信息科学技术的迅猛发展,配合高等学校新的课程体系和教学内容改革,以及教学学时压缩的实际需要,我们在总结多年从事模拟电子技术教学工作经验的基础上,针对模拟电子技术课程教学的基本要求和学习特点,编写了本教材。

鉴于近年来就业的严峻形势,高校普遍对专业基础课时进行压缩,并且把教学时间安排提前到第二、三学期,使得学生在学习高等数学等基础课的同时,就已经开始了专业基础课的学习,内容衔接上的不连贯使得学生对本门课程的掌握普遍感觉困难,所以本书的编写思路是保证基础、注重应用、讲清概念、力求精练;以基础知识为重点,用心安排,使得知识易懂、易学,做到语言精炼,便于自学。

在内容的安排上,本书首先将集成运放作为基本电子器件引入,介绍其外特性及其基本应用,让读者先了解“放大”、“器件”等概念,然后再介绍其他的电子器件——二极管、三极管、场效应管及它们的应用。介绍时,将难点分散,循序渐进。第2~4章以一类半导体器件及其基本应用电路划分,便于读者学习和掌握。在这些内容的介绍中,强调对基本概念、基本原理、基本分析方法的理解和应用,减少复杂的数学推导。在学习完这些器件后,读者已经具备了足够的基础知识来理解后面章节的内容:第5章多级放大电路与集成运算放大器单元电路、第6章滤波电路及放大电路的频率响应、第7章负反馈放大电路和第8章波形产生电路。第7、8章尽量简化定量分析,突出定性分析,力求简明扼要、系统性强。由于微电子学与制造工艺的进步,与双极性器件的性能相比,MOS器件具有明显的优势,所以本书强调了MOS管的内容。

本书包含大量例题,每章后附有习题,这些例题和习题与教材内容紧密配合,深度适当。书末给出部分习题的参考答案,以供读者参考。

《模拟电子技术习题及实验指导》是本书的配套教材,该指导书既可以作为学生的实验指导书,也可以作为学生的作业本和习题指导手册来使用。指导书共9章,1~8章与本书对应,每章给出该章内容的知识要点总结、重点与难点、重点分析方法和步骤、填空题和选择题、习题等5部分。习题部分供学生做作业时使用,可以省去抄题目和画图的时间,提高课后学习的效率,也可以减轻教师的负担。第9章提供了7个典型的模电实验,每个实验均给出实验内容和实验电路的设计方法,不针对具体的实验板设计,通用性较强。

本书向使用本书作为教材的教师提供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。

本书由查丽斌策划、组织和统稿,第1~6章、第8章由查丽斌编写,第7章由张凤霞编写,李自勤参与了第3章、第4章部分内容的编写,刘建岚参与了第1章、第8章部分内容的编写,王宛苹老师参与了本书的校对工作。在本书的编写过程中,许多本校教师和兄弟院校的教师提出了诸多中肯的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢!

本书在编写过程中，参考了一些已经出版的教材和文献，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限且编写时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，诚恳地希望读者提出宝贵意见和建议，以便今后不断改进。

作 者

2013 年 1 月

目 录

第 1 章 运算放大器及其线性应用····· 1	2.3 晶体二极管电路的分析方法····· 34
1.1 放大电路概述及其主要性能指标 1	2.3.1 晶体二极管的模型····· 34
1.1.1 放大电路概述····· 1	2.3.2 晶体二极管电路的分析方法·· 36
1.1.2 放大电路的方框图及其主要性能指标····· 2	2.4 晶体二极管的应用及直流稳压电源····· 39
1.2 集成电路运算放大器····· 4	2.4.1 直流稳压电源的组成····· 39
1.2.1 集成电路运算放大器的内部组成单元····· 4	2.4.2 小功率整流滤波电路····· 39
1.2.2 集成运放的符号、模型及其电压传输特性····· 5	2.4.3 稳压管稳压电路····· 43
1.3 理想集成运算放大器····· 6	2.4.4 三端集成稳压器····· 46
1.3.1 理想集成运算放大器的主要参数····· 6	2.5 特殊二极管····· 50
1.3.2 理想运算放大器工作在线性区的特点····· 6	2.6 半导体器件型号命名及方法(根据国家标准 GB249—74)····· 52
1.3.3 理想运算放大器工作在线性区的特点····· 7	习题 2····· 52
1.4 基本运算电路····· 8	第 3 章 晶体三极管及其基本放大电路·· 58
1.4.1 比例运算电路····· 8	3.1 晶体三极管····· 58
1.4.2 加减运算电路····· 11	3.1.1 晶体管的结构及其类型····· 58
1.4.3 积分和微分运算电路····· 15	3.1.2 晶体管的电流分配与放大作用····· 59
1.5 集成运放的单电源供电····· 17	3.1.3 晶体管的共射特性曲线····· 62
1.5.1 反相放大器的单电源供电····· 17	3.1.4 晶体管的主要参数····· 65
1.5.2 同相放大器的单电源供电····· 17	3.2 放大电路的组成和工作原理····· 66
习题 1····· 18	3.2.1 基本共射极放大电路的组成·· 66
第 2 章 半导体二极管及直流稳压电源·· 23	3.2.2 基本共射极放大电路的工作原理····· 68
2.1 半导体的基础知识····· 23	3.3 放大电路的分析····· 69
2.1.1 本征半导体····· 23	3.3.1 直流通路与交流通路····· 69
2.1.2 杂质半导体····· 24	3.3.2 静态分析····· 71
2.1.3 PN 结的形成及特性····· 25	3.3.3 动态分析····· 73
2.2 半导体二极管····· 30	3.3.4 图解法分析放大电路的非线性失真和动态范围····· 79
2.2.1 二极管的基本结构····· 30	3.4 晶体管放大电路的 3 种接法····· 83
2.2.2 二极管的伏安特性····· 31	3.4.1 静态工作点稳定的共射极放大电路····· 83
2.2.3 二极管的主要参数····· 33	3.4.2 共集电极放大电路····· 87

3.4.3 共基极放大电路·····	90	5.3.5 电流源作有源负载·····	136
3.4.4 3种基本放大电路的性能 比较·····	91	5.4 差分式放大电路·····	136
习题3·····	93	5.4.1 直接耦合放大电路的零点漂移 现象·····	136
第4章 场效应管及其基本放大电路 ·····	100	5.4.2 射极耦合差分式放大电路的 结构·····	137
4.1 金属-氧化物-半导体(MOS) 场效应管·····	100	5.4.3 射极耦合差分式放大电路的 动态性能分析·····	138
4.1.1 增强型MOS管·····	100	5.5 功率放大电路·····	146
4.1.2 耗尽型MOS管·····	104	5.5.1 功率放大电路概述·····	146
4.2 场效应管放大电路·····	106	5.5.2 互补对称功率放大电路·····	148
4.2.1 场效应管放大电路的直流 偏置及静态分析·····	106	5.5.3 采用复合管的互补对称功率 放大电路·····	151
4.2.2 场效应管的微变等效电路·····	110	5.5.4 集成功率放大电路·····	153
4.2.3 共源极放大电路的动态分析·····	112	5.6 通用集成运算放大器·····	155
4.2.4 共漏极放大电路的动态分析·····	115	5.6.1 通用型集成运算放大器·····	155
4.3 结型场效应管(JFET)·····	117	5.6.2 集成运放的主要参数·····	157
4.3.1 JFET的结构和工作原理·····	117	5.6.3 集成运算放大器使用注意 事项·····	158
4.3.2 JFET的特性曲线·····	119	5.7 模拟乘法器及其应用·····	160
4.4 各种场效应管特性的比较以及 与双极型管的比较·····	120	5.7.1 变跨导模拟乘法器·····	160
4.4.1 各种场效应管的特性比较·····	120	5.7.2 模拟乘法器的应用·····	161
4.4.2 MOSFET与双极型晶体管的 比较·····	121	习题5·····	162
习题4·····	122	第6章 滤波电路及放大电路的 频率响应 ·····	168
第5章 多级放大电路与集成运算放大器 单元电路 ·····	127	6.1 有源滤波电路·····	168
5.1 多级放大电路·····	127	6.1.1 滤波电路的基本概念与分类·····	168
5.1.1 阻容耦合放大电路·····	127	6.1.2 低通滤波器·····	172
5.1.2 直接耦合放大电路·····	129	6.1.3 高通滤波器·····	174
5.1.3 变压器耦合放大电路与光电 耦合放大电路·····	130	6.1.4 带通滤波器·····	175
5.2 集成运算放大电路简介·····	131	6.1.5 带阻滤波器·····	175
5.3 集成电流源电路·····	132	6.2 放大电路的频率响应·····	176
5.3.1 镜像电流源电路·····	132	6.2.1 晶体三极管的高频等效模型·····	176
5.3.2 比例式电流源电路·····	134	6.2.2 单管共射极放大电路的频率 特性分析·····	180
5.3.3 微电流源电路·····	134	6.2.3 场效应管的频率响应·····	186
5.3.4 MOSFET镜像电流源·····	135	6.2.4 多级放大电路的频率特性·····	188
		习题6·····	189

第 7 章 负反馈放大电路	193	7.5.1 产生自激振荡的原因及条件	212
7.1 反馈的基本概念与分类	193	7.5.2 负反馈放大电路稳定性的 分析	213
7.1.1 反馈的基本概念	193	7.5.3 消除自激振荡的方法	214
7.1.2 反馈的类型	194	习题 7	215
7.1.3 交流负反馈的 4 种基本组态	198	第 8 章 波形产生电路	219
7.2 负反馈放大电路的方框图及 一般表达式	202	8.1 正弦波振荡电路	219
7.2.1 负反馈放大电路的一般 表达式	202	8.1.1 正弦波振荡电路的振荡 条件	219
7.2.2 4 种组态负反馈放大电路的 增益和反馈系数的表达式	203	8.1.2 RC 文氏桥正弦波振荡电路	220
7.3 负反馈对放大电路性能的 影响	205	8.1.3 LC 正弦波振荡电路	223
7.3.1 提高放大倍数的稳定性	205	8.1.4 石英晶体振荡电路	228
7.3.2 减小非线性失真	205	8.2 非正弦波产生电路	231
7.3.3 展宽通频带	206	8.2.1 电压比较器	231
7.3.4 负反馈对输入、输出电阻的 影响	207	8.2.2 方波发生器	237
7.4 深度负反馈放大电路的分析 计算	208	8.2.3 三角波发生器	238
7.4.1 深度负反馈条件	208	8.2.4 锯齿波发生器	240
7.4.2 虚短和虚断概念的运用	208	习题 8	241
7.5 负反馈放大电路的稳定性	211	附录 A 本书常用文字符号说明	245
		附录 B 部分习题答案	249
		参考文献	256

第 1 章 运算放大器及其线性应用

本章首先介绍放大电路的基本概念和性能指标，然后介绍集成运算放大电路的基本组成部分、电路符号、外特性及理想运算放大器的工作特性，在此基础上详细地分析由理想运放组成的基本运算电路：反相、同相比比例运算电路，反相、同相加法电路，加、减运算电路，积分运算电路，微分运算电路。最后介绍运算放大器的单电源供电电路。

1.1 放大电路概述及其主要性能指标

1.1.1 放大电路概述

放大电路的功能是将微弱的电信号不失真地放大到所需要的数值，从而使电子设备的终端执行器件（如继电器、仪表、扬声器）工作。

图 1.1.1 所示为放大电路的结构示意图。放大器是由集成电路组件或晶体管、场效应管等组成的双口网络——一个信号输入口、一个信号输出口。放大器应能够提供足够大的放大能力，而且应尽可能地减小信号失真。

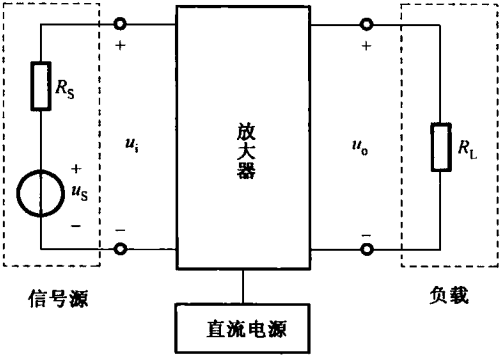


图 1.1.1 放大电路的结构示意图

信号源是待放大的输入信号，这些电信号通常是由传感器将非电量（如温度、声音、压力等）转换成的电量，其一般很弱，不足以驱动负载，因而需要放大器将其放大。

经过放大后的较强信号输出到终端执行器件，通常被称为负载。

放大器不可能产生能量，输出信号的能量增加实际上是由直流电源提供的。放大器只是在输入信号的控制下，由有源元件（如晶体管、场效应管）起能量转化作用，将直流电源的能量转化为负载所需要的信号能量。因此，放大作用实质上是一种能量的控制和转换。

1.1.2 放大电路的方框图及其主要性能指标

针对于不同的应用, 放大电路种类繁多, 但任何一个放大电路都可以用双口网络来表示, 如图 1.1.2 所示。图中, u_s 为信号源电压, R_s 为信号源内阻, u_i 和 i_i 分别为放大电路的输入电压和输入电流, R_L 为负载电阻, u_o 和 i_o 分别为输出电压和输出电流。

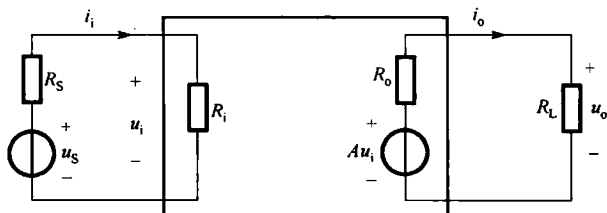


图 1.1.2 放大电路方框图

放大电路放大信号性能的优劣是用它的性能指标来衡量的。性能指标是在规定条件下, 按照规定程序和测试方法所获得的。放大电路性能指标很多, 这里主要讨论放大电路的放大倍数、输入电阻、输出电阻、通频带等几项主要性能指标。

由于任何稳态信号都可以分解为正弦信号的叠加, 所以放大电路常用正弦信号作为测试信号。

1. 放大倍数 $\dot{A}$

放大倍数又称为增益, 是衡量放大电路放大能力的重要指标, 根据输入、输出量的不同, 可以分为电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 、互阻放大倍数 $\dot{A}_r$ 、互导放大倍数 $\dot{A}_g$ 和电流放大倍数 $\dot{A}_i$, 定义为输出量 $\dot{X}_o$ ($\dot{U}_o$ 或 $\dot{I}_o$) 与输入量 $\dot{X}_i$ ($\dot{U}_i$ 或 $\dot{I}_i$) 之比。

(1) 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

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (1.1.1)$$

(2) 电流放大倍数 $\dot{A}_i$, 定义为输出电流 $\dot{I}_o$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 之比, 即

$$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.1.2)$$

(3) 互阻放大倍数 $\dot{A}_r$, 定义为输出电压 $\dot{U}_o$ 与输入电流 $\dot{I}_i$ 之比, 即

$$\dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.1.3)$$

(4) 互导放大倍数 $\dot{A}_g$, 定义为输出电流 $\dot{I}_o$ 与输入电压 $\dot{U}_i$ 之比, 即

$$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} \quad (1.1.4)$$

式中, $\dot{A}_r$ 的量纲为电阻, $\dot{A}_g$ 的量纲为电导。 $\dot{A}_u$ 和 $\dot{A}_i$ 两种无量纲的增益在工程上常用以

10 为底的对数增益来表达, 其基本单位为贝尔 (B), 平时用它的十分之一单位分贝 (dB), 这样用分贝表示的电压增益和电流增益可分别表示如下

$$A_u(\text{dB}) = 20\lg|A_u|(\text{dB}) \quad (1.1.5a)$$

$$A_i(\text{dB}) = 20\lg|A_i|(\text{dB}) \quad (1.1.5b)$$

2. 输入电阻 R_i

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

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} \quad (1.1.6)$$

输入电阻的大小决定了放大电路从信号源获取信号的能力——对电压放大和互导放大电路, 希望 R_i 越大越好; 对电流放大和互阻放大电路, 希望 R_i 越小越好。

通常, 测定输入电阻的办法是在输入端加正弦波信号 u_s 和电阻 R_s , 测出输入端的电压的有效值 U_i , 如图 1.1.3 所示。则

$$R_i = \left(\frac{U_i}{U_s - U_i} \right) R_s \quad (1.1.7)$$

3. 输出电阻 R_o

任何放大电路的输出都可以等效为一个带内阻的电压源或一个带内阻的电流源, 从放大电路输出端看进去的等效电阻称为输出电阻 R_o 。放大电路输出电阻的大小决定了它带负载的能力。带负载能力是指当负载变化时, 放大电路的输出量随负载变化的程度。对电压放大和互阻放大电路, 希望 R_o 越小越好; 对电流放大和互导放大电路, 希望 R_o 越大越好。

通常, 测定输出电阻的办法是在输入端加正弦波信号, 测出负载开路时的输出电压有效值 U'_o , 再测出接入负载 R_L 时的输出电压 U_o , 如图 1.1.4 所示。则

$$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_o} - 1 \right) R_L \quad (1.1.8)$$

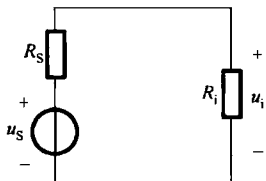


图 1.1.3 输入电阻 R_i 测量电路

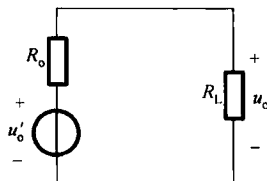


图 1.1.4 输出电阻 R_o 测量电路

4. 通频带 f_{BW}

当改变输入信号的频率时, 放大电路的放大倍数是随之变化的, 输出波形的相位也发生

变化。通常,用通频带来反映放大电路对于不同频率的信号放大能力。一般情况下,放大电路只适用于放大一个特定频率范围的信号,当信号频率太高或太低时,放大倍数都有大幅度的下降,如图 1.1.5 所示。

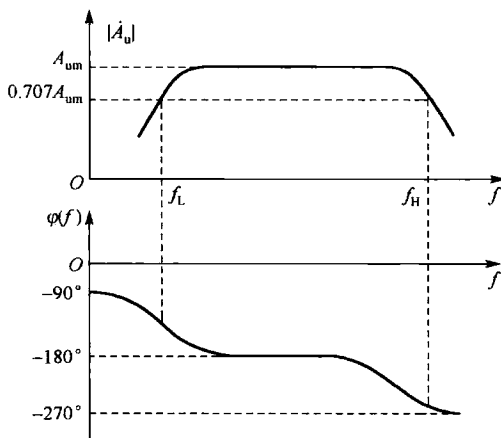


图 1.1.5 放大电路的频率响应

当信号频率升高而使放大倍数下降为中频时放大倍数 A_{um} 的 0.707 倍时,这个频率称为上限截止频率,记做 f_H 。同样,使放大倍数下降为 A_{um} 的 0.707 倍时的低频信号频率称为下限截止频率,记做 f_L 。 f_H 和 f_L 之间形成的频带差称为通频带,记做 f_{BW} ,即

$$f_{BW} = f_H - f_L \quad (1.1.9)$$

通频带 f_{BW} 越宽,表明放大电路对信号频率的适应能力越强。

如果因为受放大电路通频带的限制,而使输出信号产生的失真称为频率失真,也称为线性失真,它包括幅度失真和相位失真。显然,当放大某一频率的正弦波时,不会出现频率失真。

5. 最大不失真输出电压 U_{omax}

最大不失真输出电压是在不失真的前提下能够输出的最大电压,即当输入电压再增大就会使输出波形产生非线性失真时的输出电压。一般以最大值 U_{omax} 表示,也可以用峰-峰值 U_{op-p} 表示, $U_{op-p} = 2U_{omax}$ 。

1.2 集成电路运算放大器

1.2.1 集成电路运算放大器的内部组成单元

集成电路运算放大器是一种高增益的多级直接耦合的电压放大器,是发展最早、应用最广泛的一种模拟集成电路。它是采用集成工艺,将大量半导体三极管、电阻、电容等元器件及其连线制作在一块单晶硅的芯片上,并具有一定功能的电路。由于它最初用于信号的运

算, 所以称为集成运算放大器, 简称集成运放。集成运算放大器的种类很多, 电路也不一样, 其基本结构通常由 4 部分组成, 即输入级、中间级、输出级和偏置电路, 如图 1.2.1 所示。

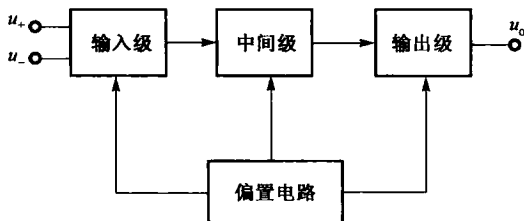


图 1.2.1 集成运算放大器的内部结构框图

1.2.2 集成运放的符号、模型及其电压传输特性

1. 集成运算放大器的符号

集成运算放大器的符号如图 1.2.2 所示, 它有两个输入端、一个输出端。反相输入端标以符号 “-”, 当信号从反相端输入时, 输出信号与输入信号相位相反; 同相输入端标以符号 “+”, 当信号从同相端输入时, 输出信号与输入信号同相。

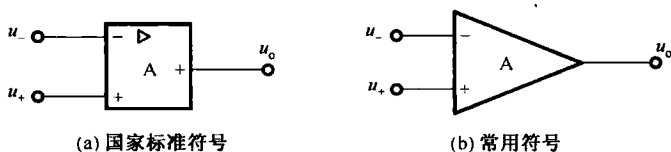


图 1.2.2 集成运算放大器的符号

2. 集成运算放大器的电路模型

集成运算放大器是电压放大器, 根据 1.1 节的有关知识, 运放可用一个包含输入端口、输出端口和供电电源的双口网络来表示。如图 1.2.3 所示, 图中采用双电源 $\pm V_{CC}$ 供电。

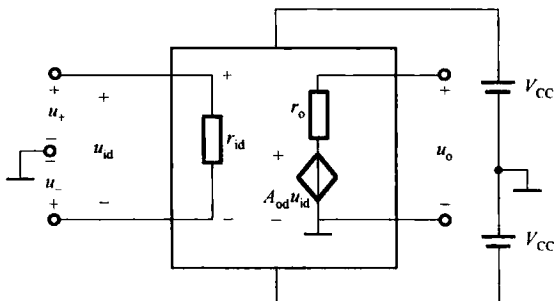


图 1.2.3 集成运算放大器的电路模型

输入端用输入电阻 r_{id} 来模拟, 输出端用输出电阻 r_o 和受控电压源 $A_{od}u_{id}$ 来模拟, $u_{id} = u_+ - u_-$, A_{od} 为开环电压放大倍数。

3. 集成运算放大器的电压传输特性

集成运算放大器的输出电压 u_o 与输入电压 $u_{id} = u_+ - u_-$ (即同相输入端与反相输入端之间的电压差) 之间的关系曲线称为电压传输特性。即

$$u_o = f(u_+ - u_-) \quad (1.2.1)$$

电压传输特性如图 1.2.4 所示。

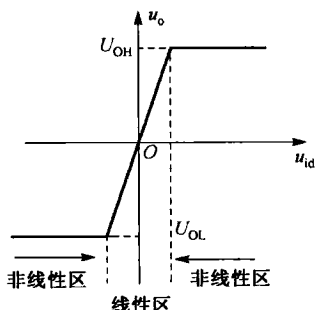


图 1.2.4 集成运算放大器的电压传输特性

从图 1.2.4 可知，集成运放的电压传输特性可分为线性区和非线性区两部分。在线性区，曲线的斜率为电压放大倍数 A_{od} ；在非线性区，输出电压只有两种电压值，即 U_{OH} 和 U_{OL} 。电路模型中的输出电压不可能超过正、负电源电压值，当电源电压为 $\pm V_{CC}$ ，运算放大器为理想时， $U_{OH} \approx +V_{CC}$ ， $U_{OL} \approx -V_{CC}$ 。

由于集成运放的开环电压放大倍数 A_{od} 很大，线性区非常窄。例如， $u_o = \pm 14V$ ， $A_{od} = 10^5$ ，那么 $u_{id} = u_+ - u_- \approx 28\mu V$ ，即 u_{id} 小于 $28\mu V$ 时，电路才能工作在线性区，否则进入非线性区，输出电压为 $\pm 14V$ 。

1.3 理想集成运算放大器

1.3.1 理想集成运算放大器的主要参数

利用集成运放可以构成各种不同功能的实际电路，在分析电路时，通常将集成运放视为理想运放。所谓理想运放，就是将集成运放的性能指标理想化，即

- ① 开环电压增益 $A_{od} = \infty$ ；
- ② 输入电阻 $r_{id} = \infty$ ；
- ③ 输出电阻 $r_o = 0$ ；
- ④ 转换速率 $S_R = \infty$ 。

实际上，集成运放的技术指标均为有限值，理想化后分析电路必定带来一定的误差，但现在运放的性能指标越来越接近理想，这些误差在工程计算中都是允许的，因此，后面的运放电路分析都将运放看做是理想的。只有在误差分析时，才考虑实际运放的有限增益、带宽、输入电阻、输出电阻等所带来的影响。理想运放的符号如图 1.3.1 所示。

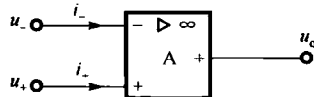


图 1.3.1 理想运放的符号图

1.3.2 理想运算放大器工作在线性区的特点

根据图 1.2.4 所示特性，可以将集成运放的工作区域分为线性区和非线性区。若直接将输入信号作用于理想运放的两个输入端，则由于 A_{od} 为无穷大，必然使之工作在非线性区。因此，为使理想运放工作在线性区，则必须加外部电路，引入负反馈，使两个输入端的电压趋

于零。如图 1.3.2 所示电路就引入了负反馈。输入信号 u_i 加在运放的同相输入端“+”和地之间，电阻 R_f 跨接在输出端和反相输入端“-”之间，输出电压 u_o 通过 R_f 与 R_1 的分压被加到反相输入端从而使两个输入端的电压趋于零。将放大电路的输出量通过一定的方式引回到输入端来影响输入量，称为反馈。若反馈的结果使得输出量的变化减小，则称为负反馈，否则称为正反馈。

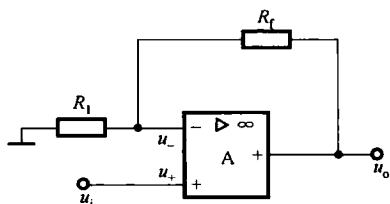


图 1.3.2 集成运放引入负反馈

当运放工作在线性区，即输出电压与输入电压呈线性关系时，具有两个主要特点。

1. 输入电压 u_{id} 等于零

图 1.3.1 所示的理想集成运放，当工作于线性区时，输出电压与输入电压成线性关系，即

$$u_o = A_{od}u_{id} = A_{od}(u_+ - u_-) \quad (1.3.1)$$

由于 u_o 为有限值，对于理想运放 $A_{od} = \infty$ ，因而输入电压 $u_{id} = u_+ - u_- = 0$ ，即

$$u_+ = u_- \quad (1.3.2)$$

式（1.3.2）说明，运放的两个输入端没有短路，却具有与短路相同的特征，这种情况称为两个输入端“虚短路”，简称“虚短”。

2. 输入电流等于零

由于理想运放的输入电阻为无穷大，因此流入理想运放两个输入端的电流为

$$i_- = i_+ = \frac{u_{id}}{r_{id}} \approx 0 \quad (1.3.3)$$

式（1.3.3）说明集成运放的两个输入端没有断路，却具有断路的特征，这种情况称为两个输入端“虚断路”，简称“虚断”。

“虚短”和“虚断”是两个非常重要的概念，是分析工作在线性区的理想运放应用电路中输入与输出函数关系的基本关系式。

集成运放必须引入深度负反馈，才能保证其工作在线性区，工作在线性区的应用电路主要包括运算电路、有源滤波电路等。

1.3.3 理想运算放大器工作在线性区的特点

如前所述，若理想运放工作在开环状态，则运放一定会工作在线性区，若引入正反馈，则势必也工作在线性区。当运放工作在线性区时，同样具有如下两个主要特点。

1. 输出电压只有高、低两种电平

若理想运放工作在开环状态或包含正反馈，由于 $u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$ ，因为运放的 A_{od} 为无穷大，所以当同相输入端和反相输入端之间加的电压 $(u_+ - u_-)$ 为无穷小量时，就能够使输出电压达到正向饱和压降 $+U_{OH}$ 或负向饱和压降 $-U_{OL}$ 。因此，电压传输特性如图 1.3.3 所示，输出电压和净输入电压之间不成线性关系。由图 1.3.3 可见，理想运放工作在线性区时

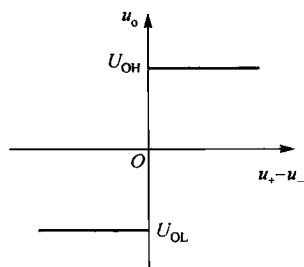


图 1.3.3 理想运放在非线性区时的电压传输特性

输出电压只有高、低两种电平，即

$$u_o = \begin{cases} U_{OH}, & u_+ > u_- \\ U_{OL}, & u_+ < u_- \end{cases} \quad (1.3.4)$$

2. 输入电流等于零

由于理想运放的输入电阻为无穷大，故净输入电流为零，即

$$i_- = i_+ = 0$$

即工作在非线性区的理想运放仍具有“虚断”的特点，但一般不具有“虚短”的特点。

当理想运放处于开环或正反馈时，工作在非线性区，它的应用电路主要包括比较器、信号发生器等。对于工作在非线性区的运放应用电路，上述两个特点是分析其输入信号和输出信号关系的基本出发点。

1.4 基本运算电路

集成运算放大器的应用非常广泛，本节主要介绍它的基本运算电路，包括比例电路、加减运算电路、积分电路和微分电路，其他应用电路将在后面章节进行讨论。

运算放大器有反相和同相两个输入端，因此运算放大器的输入方式有 3 种，即反相输入（同相端直接或间接接地）、同相输入（反相端直接或间接接地）和双端输入。

1.4.1 比例运算电路

将信号按比例放大的电路称为比例运算电路。

1. 反比例电路

图 1.4.1 所示为反比例电路。输入信号 u_i 经电阻 R_1 加到运放的反相输入端，输出信号 u_o 经 R_f 加到反相输入端，同相输入端经平衡电阻 R_p 接地， R_p 的作用是为了使得电路具有对称性以提高运算精度，其阻值等于反相输入端所接的等效电阻，故 $R_p = R_1 // R_f$ 。

利用“虚短”和“虚断”的概念，由图 1.4.1 可知

$$\begin{aligned} i_i &= i_f \\ u_- &= u_+ = 0 \end{aligned}$$

可见，反相输入端与地等电位，称为“虚地”。

“虚地”是反相输入运算放大器的一个重要特点。而

$$i_i = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

所以

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

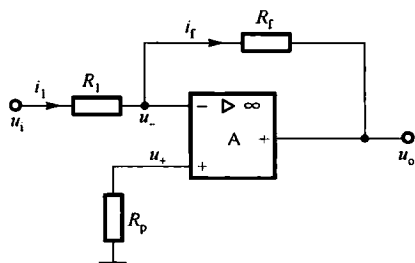


图 1.4.1 反比例电路

即

$$u_o = -\frac{R_f}{R_i} u_i$$

接入负反馈后的电压放大倍数称为闭环电压放大倍数 A_{uf}

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (1.4.1)$$

式(1.4.1)表明,输出电压与输入电压的相位相反,大小成一定的比例关系,电路实现反比例运算,只要 R_i 、 R_f 的阻值精确而稳定,就可得到准确的比例运算关系,与运放本身的 A_{od} 、 r_{id} 和 r_o 无关。 $|A_{uf}|$ 可以大于1,也可以小于1。

由式(1.4.1)可知,当 $R_i = R_f$ 时, $A_{uf} = -1$, 称为反相器。

根据输入电阻的定义,由于 $u_- = u_+ = 0$, 所以

$$R_i = R_i$$

由于理想运放的输出电阻 $r_o = 0$, 所以该电路的输出电阻 $R_o = 0$, 因此带负载能力很强。

2. 同相比例电路

图 1.4.2 所示为同相比例电路,输入信号 u_i 经电阻 R_p 加到运放的同相输入端,输出信号 u_o 经 R_f 加到反相输入端,平衡电阻为 $R_p = R_i // R_f$ 。

利用“虚短”和“虚断”的概念,由图 1.4.2 可知

$$u_- = u_+ = u_i \quad (1.4.2)$$

由于 $i_- = i_+ = 0$, 所以有

$$u_- = \frac{R_i}{R_i + R_f} u_o = u_+ = u_i$$

则

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) u_i$$

闭环电压放大倍数 A_{uf} 为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (1.4.3)$$

式(1.4.3)表明,输出电压与输入电压的相位相同,大小成一定的比例关系,电路实现了同相比例运算,只要 R_i 、 R_f 的阻值精确而稳定,就可以得到准确的比例运算关系, A_{uf} 大于或等于1。

由于同相比例运算电路的输入电流为零,故输入电阻 R_i 为无穷大;输出电阻 R_o 很小,可视为零,带负载能力很强。

由式(1.4.3)可知,当 $R_i = \infty$, $R_f = 0$ 时, $A_{uf} = 1$, 即输出电压与输入电压大小相等,相位相同,这种电路称为电压跟随器,电路如图 1.4.3 所示。

电压跟随器的特点是输入电阻很高、输出电阻趋于零,主要用来实现阻抗变化,常用于连接在具有高阻抗的信号源与低阻抗的负载之间作为缓冲放大器,因此也称为缓冲器。