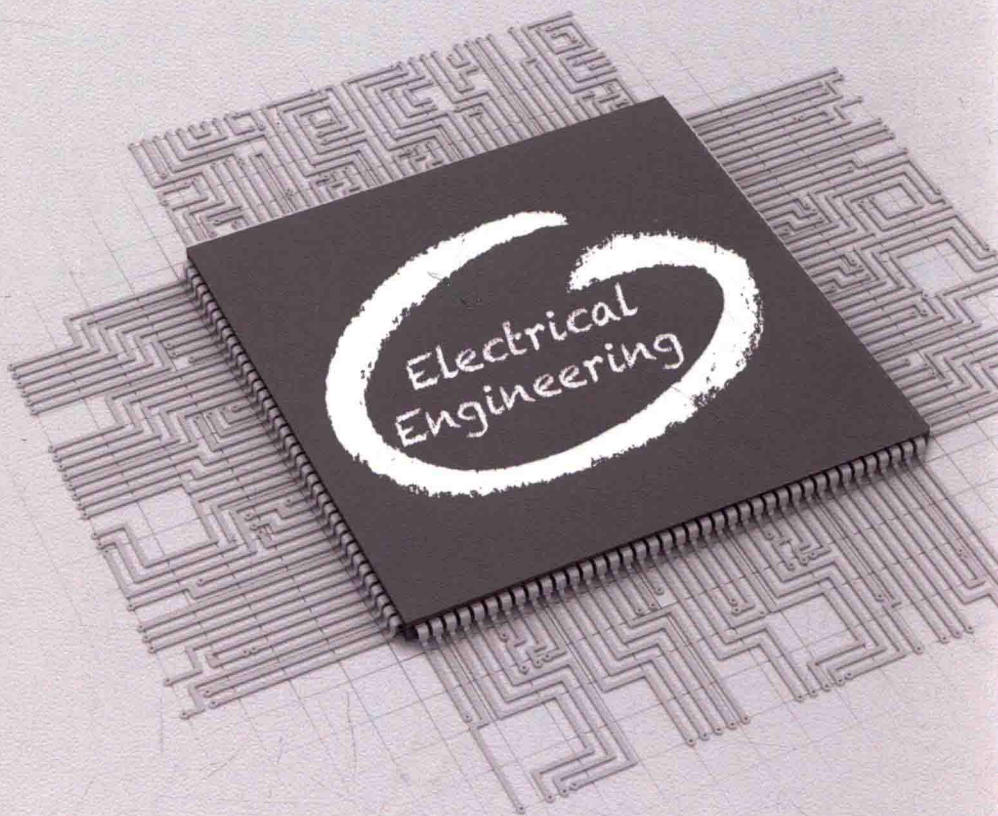




普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材



电工学(下册)

电子技术基础

■ 李自勤 主编 ■ 查丽斌 辛 青 孔庆鹏 编著

 中国工信出版集团



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
电工电子基础课程规划教材

电工学（下册） ——电子技术基础

李自勤 主编

查丽斌 辛 青 孔庆鹏 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路与数字电路的基础知识。全书共 8 章, 主要内容包括: 模拟集成运算放大器及其应用、半导体二极管及直流稳压电源、晶体三极管及其放大电路、场效应管放大电路与功率放大电路、电子电路中的反馈、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、模拟量与数字量的转换等。本书配备大量例题和习题, 并提供配套多媒体电子课件、习题详解和 MOOC 网络课程。

本书可与《电工学(下册)习题及实验指导——电子技术基础》、《电工学(上册)——电工技术基础》和《电工学(上册)习题及实验指导——电工技术基础》等书配套使用。

本书可作为高等学校非电类专业的本科生教材, 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

电工学. 下册, 电子技术基础/李自勤主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.1

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-25045-3

I. ①电… II. ①李… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 283932 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 文字编辑: 王晓庆

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 13.25 字数: 339 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 29.90 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

“电工学”(电工技术基础与电子技术基础)课程是高等学校非电类专业一门重要的专业基础课,通过本门课程的学习,学生可以获得电路、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能。该课程内容涉及电工电子学科各个领域,并有很强的实践性。为适应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,作者在总结多年从事电工学教学工作经验的基础上,针对电工和电子技术课程教学的基本要求和学习特点,编写了本套教材。全套教材包括《电工学(上册)——电工技术基础》、《电工学(上册)习题及实验指导——电工技术基础》、《电工学(下册)——电子技术基础》和《电工学(下册)习题及实验指导——电子技术基础》共4本书,本套书的编写思路是: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,本书具有以下特点。

- 强调“集成”、淡化“分立元件”

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、场效应管及其应用。

- 强调“外部应用”,淡化“内部结构”

模拟电路部分的集成运放、二极管、三极管、场效应管,数字电路部分的JK触发器、D触发器等,都只介绍器件的外部特性,不介绍内部结构,强调非电类专业学生掌握器件应用技能的学习。

- 将难点分散,循序渐进

第1~4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。由于微电子学与制造工艺的进步,与双极型器件的性能相比,MOS器件具有明显的优势,所以本书强调了MOS管的内容。第5章介绍了电子电路中的反馈与正弦波振荡电路。第6~8章介绍了数字电路中的基础内容:门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路,以及模拟量与数字量的转换。

- 强调“设计仿真”,鼓励自主探索学习

每章都有设计仿真的题目,要求完成设计,采用Multisim仿真软件进行仿真,在不增加总学时的情况下,建议在教学中利用2~4学时进行软件的介绍,主要让学生自学,完成设计题目的设计和仿真,将结果以邮件的形式发送给老师。在计算机和网络技术如此普及的今天,这一点应该是完全可以做到的。设计题目的内容要求不拘泥于课本的内容,鼓励学生查找资料,自主探索学习,解决设计问题。

《电工学(下册)习题及实验指导——电子技术基础》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,

第1~8章与本书对应,每章包括本章内容的知识要点总结、本章重点与难点、重点分析方法与步骤、填空题和选择题、习题等5部分内容。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11个典型的模电和数电实验,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。

该套教材适应总学时在60~110学时、实验学时在20~50学时的教学要求,适宜分两学期开课的情况,由于涉及内容较多,有些内容可以在教师指点下让学生通过自学掌握,不必全在课堂上讲授,并建议使用现代教学手段,以提高教学质量和效率。

本套教材包含大量例题,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。书末给出部分习题参考答案,以供读者参考。本书向使用本套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。

本书由杭州电子科技大学信息工程学院李自勤策划、组织和统稿,第1、2章由李自勤编写,第3、4章由查丽斌编写,第6、7章由辛青编写,第5、8章由孔庆鹏编写。刘建岚参与了第1章部分内容的编写,王宛苹、王勇佳、吕幼华、汪洁、胡体玲和李付鹏等老师参与了本教材的编写、本书习题的解答及设计题目的模拟仿真工作,在结构和内容方面提出了很多重要的意见,张凤霞和钱文阳参与了本书的部分校对工作,钱梦楠与钱梦菲参与了本书部分书稿和图的录入工作。在本书编写的过程中,我们得到了杭州电子科技大学信息工程学院的大力支持,许多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图书和文献,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

2015年1月

目 录

第 1 章 模拟集成运算放大器及其应用	1
1.1 放大电路概述及其主要性能指标	1
1.1.1 放大电路概述	1
1.1.2 放大电路的方框图及其主要性能指标	1
1.2 模拟集成运算放大器	4
1.2.1 集成运算放大器的符号	4
1.2.2 集成运算放大器的电路模型	5
1.2.3 集成运算放大器的电压传输特性	5
1.3 理想集成运算放大器	6
1.3.1 理想集成运算放大器的主要参数	6
1.3.2 理想运算放大器工作在线性区的特点	6
1.3.3 理想运算放大器工作在非线性区的特点	7
1.4 基本运算电路	7
1.4.1 比例运算电路	8
1.4.2 加减运算电路	10
1.4.3 积分和微分运算电路	14
1.5 电压比较器	16
1.5.1 简单电压比较器	16
1.5.2 迟滞电压比较器	19
习题 1	21
第 2 章 半导体二极管及直流稳压电源	26
2.1 半导体二极管的外部特性	26
2.1.1 二极管的基本结构	26
2.1.2 二极管的伏安特性	27
2.1.3 二极管的主要参数	28
2.2 晶体二极管电路的分析方法	29
2.2.1 晶体二极管的模型	29
2.2.2 晶体二极管电路的分析	30
2.3 晶体二极管的应用及直流稳压电源	31
2.3.1 直流稳压电源的组成	32
2.3.2 小功率整流滤波电路	32
2.3.3 稳压管稳压电路	35
2.3.4 三端集成稳压器	37
2.4 半导体器件型号命名及方法 (根据国家标准 GB249—74)	41
习题 2	42
第 3 章 晶体三极管及其放大电路	47
3.1 晶体三极管的外部特性	47
3.1.1 晶体管的类型及符号	47
3.1.2 晶体管的电流分配与放大作用	48
3.1.3 晶体管的共射特性曲线	49
3.1.4 晶体管的主要参数	52
3.2 放大电路的组成和工作原理	53
3.2.1 基本共射极放大电路的组成	53
3.2.2 基本共射极放大电路的工作原理	54
3.3 放大电路的分析	55
3.3.1 静态分析	55
3.3.2 动态分析	57
3.3.3 图解法分析放大电路的非线性失真和动态范围	62
3.4 晶体管放大电路的 3 种接法	66
3.4.1 静态工作点稳定的共射极放大电路	66
3.4.2 共集电极放大电路	69
3.4.3 共基极放大电路	72
3.4.4 3 种基本放大电路的性能比较	73
习题 3	75
第 4 章 场效应管放大电路与功率放大电路	81
4.1 场效应管的外部特性	81
4.1.1 增强型 MOS 管的外部特性	81
4.1.2 耗尽型 MOS 管的外部特性	84
4.1.3 4 种场效应管的特性比较	85
4.2 场效应管放大电路	86
4.2.1 场效应管放大电路的直流偏置及静态分析	86
4.2.2 共源极放大电路的动态分析	88
4.2.3 共漏极放大电路的动态分析	90

4.3 功率放大电路	92	6.4.3 加法器	145
4.3.1 功率放大电路概述	93	6.4.4 编码器	146
4.3.2 互补对称功率放大电路	94	6.4.5 译码器	149
4.3.3 采用复合管的互补对称功率 放大电路	98	习题 6	151
4.3.4 集成功率放大电路	99	第 7 章 触发器与时序逻辑电路	155
习题 4	100	7.1 双稳态触发器	155
第 5 章 电子电路中的反馈	106	7.1.1 RS 触发器	155
5.1 反馈的基本概念与分类	106	7.1.2 JK 触发器	159
5.1.1 反馈的基本概念	106	7.1.3 D 触发器	160
5.1.2 反馈的类型	107	7.1.4 T 触发器	161
5.1.3 交流负反馈的 4 种基本组态	110	7.1.5 触发器逻辑功能的转换	162
5.2 负反馈对放大电路性能的影响	113	7.2 寄存器	163
5.2.1 降低放大倍数	113	7.2.1 数码寄存器	163
5.2.2 提高放大倍数的稳定性	114	7.2.2 移位寄存器	164
5.2.3 减小非线性失真	115	7.3 计数器	166
5.2.4 展宽通频带	115	7.3.1 二进制计数器	166
5.2.5 负反馈对输入、输出电阻 的影响	116	7.3.2 十进制计数器	169
5.3 振荡电路中的反馈	117	7.3.3 常用中规模集成计数器	170
5.3.1 正弦波振荡电路的振荡条件	117	7.3.4 用集成计数器实现任意进制 计数器	172
5.3.2 RC 文氏桥正弦波振荡电路	118	7.4 时序逻辑电路分析	174
习题 5	120	7.5 555 定时器及其应用	177
第 6 章 门电路与组合逻辑电路	124	7.5.1 555 定时器及其应用	177
6.1 数字信号、数制与码制	124	7.5.2 555 定时器组成的单稳态 触发器	179
6.1.1 数字信号	124	7.5.3 555 定时器组成的多谐振荡器	180
6.1.2 数制及其转换	125	习题 7	182
6.1.3 码制	127	第 8 章 模拟量与数字量的转换	188
6.2 逻辑函数及其化简	128	8.1 D/A 转换器	188
6.2.1 逻辑代数的运算	128	8.1.1 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	188
6.2.2 逻辑代数的基本定律	129	8.1.2 D/A 转换器的主要技术指标	190
6.2.3 逻辑函数的表达方式	130	8.1.3 集成 D/A 转换器	191
6.2.4 逻辑函数的化简	131	8.2 A/D 转换器	191
6.3 逻辑门电路	134	8.2.1 逐次逼近型 A/D 转换器	193
6.3.1 分立元件基本逻辑门电路	134	8.2.2 A/D 转换器的主要技术指标	194
6.3.2 基本逻辑门电路的组合	135	8.2.3 集成 A/D 转换器	194
6.3.3 TTL 门电路	137	习题 8	196
6.3.4 CMOS 门电路	140	附录 A 本书常用文字符号说明	197
6.4 组合逻辑电路	142	附录 B 部分习题参考答案	201
6.4.1 组合逻辑电路的分析	142	参考文献	206
6.4.2 组合逻辑电路的设计	143		

第 1 章 模拟集成运算放大器及其应用

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、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集成运算放大器组成的基本运算电路和电压比较电路。

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、扬声器等）工作。

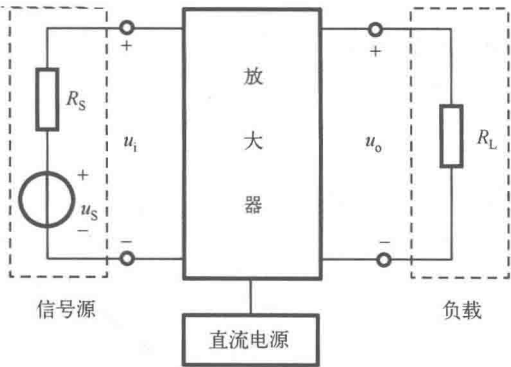


图 1.1.1 放大电路的结构示意图

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，即一个信号输入口，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。

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，它们一般很弱，不足以驱动负载，因而需要通过放大器将其放大。

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，由晶体管起能量转化作用，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作用。

1.1.2 放大电路的方框图及其主要性能指标

由于有不同的应用，因此放大电路种类繁多，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。

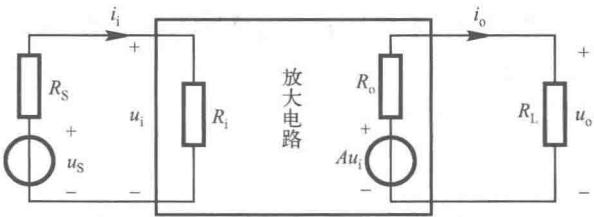


图 1.1.2 放大电路双口网络

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。放大电路的性能指标有很多,这里主要讨论放大电路的放大倍数、输入电阻、输出电阻、通频带和最大不失真输出电压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 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,根据输入量、输出量的不同,可以分为电压放大倍数 A_u 、互阻放大倍数 A_r 、互导放大倍数 A_g 和电流放大倍数 A_i , 定义为输出量 $\dot{X}_o$ 与输入量 $\dot{X}_i$ 之比。

(1) 电压放大倍数 A_u , 定义为输出电压 $\dot{U}_o$ 与输入电压 $\dot{U}_i$ 之比, 即

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

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

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

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

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

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

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

式中, A_u 和 A_i 两种无量纲的增益在工程上常用以 10 为底的对数增益表达, 其基本单位为贝尔 (B), 平时常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分别如下

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

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

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方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的带负载能力。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方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 时的输出电压有效值 U_o ，如图 1.1.4 所示，则

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

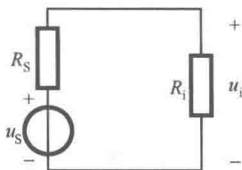


图 1.1.3 输入电阻 R_i 测量电路

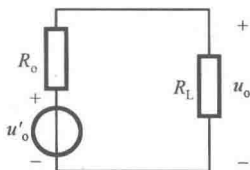


图 1.1.4 输出电阻 R_o 测量电路

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，用通频带来反映放大电路对于不同频率信号的适应能力。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。

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。

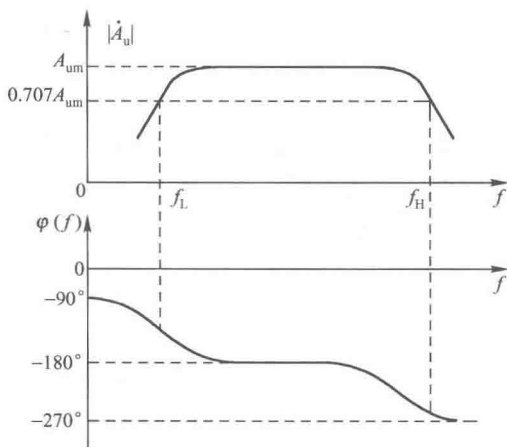


图 1.1.5 放大电路的频率响应

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,包括幅度失真和相位失真。显然,当放大单一频率的正弦波时,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时,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 模拟集成运算放大器

1.2.1 集成运算放大器的符号

集成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。

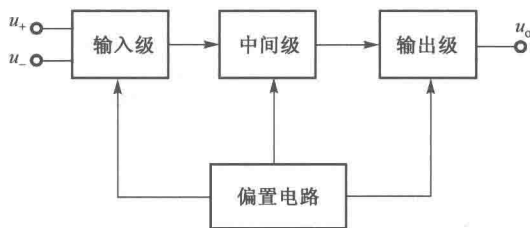


图 1.2.1 集成运算放大器的基本结构

集成运算放大器的符号如图1.2.2所示。它有两个输入端 u_+ 和 u_- , 一个输出端 u_o 。 u_+ 端称为同相输入端,表示输出电压 u_o 与输入电压 u_+ 的相位相同; u_- 端称为反相输入端,表示输出电压 u_o 与输入电压 u_- 的相位相反。

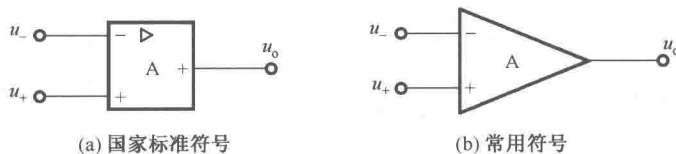


图 1.2.2 集成运算放大器的符号

对于使用者来说需要知道运放的各个引脚的功能和运放的主要参数,这些可以通过查数据手册得到。通用型集成运放 F007 被认为是早期发展阶段集成运放电路的一个范例, F007 是国内型号,对应国外同类产品的型号为 $\mu A741$, 它的外形结构和引脚排列如图1.2.3所示,有金属圆外壳和陶瓷双列直插式封装两种类型。辨认圆外壳封装元件的引脚时,应将引脚朝上,圆外壳突出处的引脚为第8脚,其他引脚则沿顺时针方向按1~7的顺序排列。辨认双

列直插式封装元件的引脚时, 应将元件正面放置, 即引脚朝下, 将正面的半圆标记置于左边, 从左下角开始逆时针方向按 1~8 的顺序排列。

对照图 1.2.3, F007 的 7 个引出脚分别为: 7 脚接正电源 $+V_{CC}$, 4 脚接负电源 $-V_{EE}$, 1 脚和 5 脚之间接调零电位器, 6 脚为输出脚, 2 脚为反相输入端, 3 脚为同相输入端。F007 运放的外部接线图如图 1.2.4 所示。

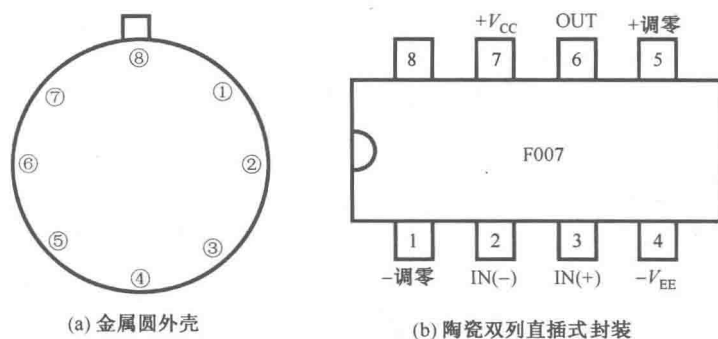


图 1.2.3 F007 的外形结构和引脚排列

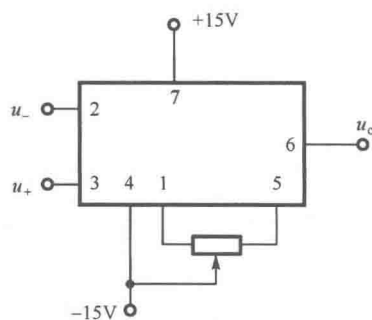


图 1.2.4 F007 运放的外部接线图

1.2.2 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 1.2.5 所示, 图中采用双电源 $\pm V_{CC}$ 供电。

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。定义为

$$A_{od} = \frac{u_o}{u_{id}} = \frac{u_o}{u_+ - u_-} \quad (1.2.1)$$

开环电压增益通常用 $20\lg|A_{od}|$ 表示, 其单位为分贝 (dB), 目前有些通用型运放的 A_{od} 可以达到 140dB 以上。

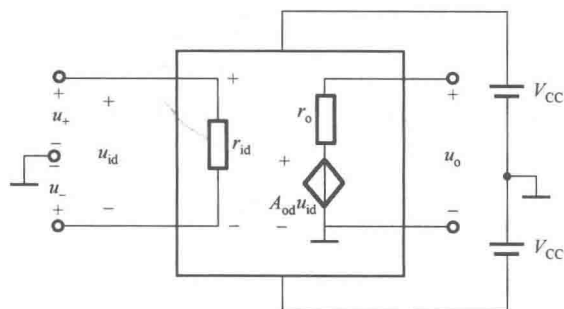


图 1.2.5 集成运算放大器的电路模型

1.2.3 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

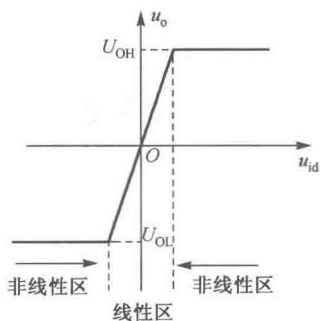


图 1.2.6 集成运算放大器的电压传输特性

$$u_o = f(u_+ - u_-) \quad (1.2.2)$$

电压传输特性如图 1.2.6 所示。

从图 1.2.6 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, $U_{OH} \approx +V_{CC}$, $U_{OL} \approx -V_{CC}$ 。

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, $u_o = \pm 14V$, $A_{od} = 10^6$, 那么 $u_{id} = u_+ - u_- \approx 28\mu V$, 即当 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。

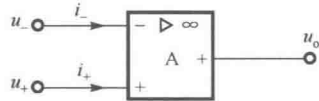


图 1.3.1 理想运放的符号

1.3.2 理想运算放大器工作在线性区的特点

根据图 1.2.6 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。当运放存在深度负反馈时, 其工作在线性区, 输出电压与输入电压呈线性关系 (关于反馈的概念将在后面章节详细介绍), 此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, 当工作在线性区时, 输出电压与输入电压呈线性关系, 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。

1.3.3 理想运算放大器工作在非线性区的特点

如前所述, 若理想运放工作在无反馈 (开环) 或正反馈状态下, 则运放一定会工作在非线性区, 当运放工作在非线性区时, 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, $u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$, 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 1.3.2 所示, 理想运放工作在非线性区时输出电压只有高、低两种电平, 即

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

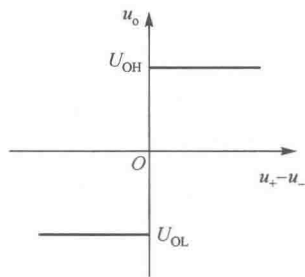


图 1.3.2 理想运放工作在非线性区

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。

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 $R_p = R_1 // R_f$ 。

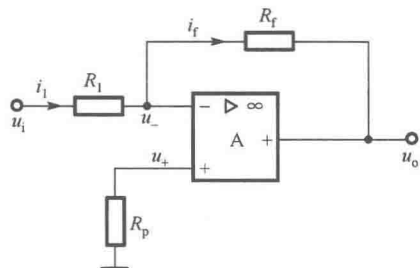


图 1.4.1 反比例电路

利用“虚短”和“虚断”的概念, 由图 1.4.1 可知

$$i_i = i_f$$

$$u_- = u_+ = 0$$

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

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

即

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

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}

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1.4.1)$$

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_1 、 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 $R_1 = R_f$ 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

$$R_i = R_1$$

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. 同比例电路

图 1.4.2 所示为同比例电路, 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 $R_p = R_1 // R_f$ 。

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

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

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_+ = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

则

闭环电压放大倍数 A_{uf} 为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (1.4.3)$$

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_1 、 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 $R_1 = \infty$ ， $R_f = 0$ 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。

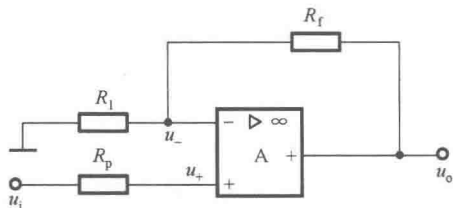


图 1.4.2 同相比例电路

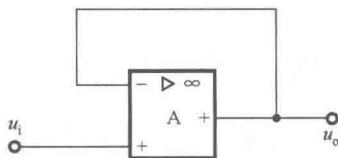


图 1.4.3 电压跟随器

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换，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。

【例 1.4.1】 将一个开路电压为 1V、内阻为 $100\text{k}\Omega$ 的信号源与阻值为 $1\text{k}\Omega$ 的负载电阻相连接。求：（1）直接连接时负载上的电压；（2）通过电压跟随器连接时负载上的电压。

解：（1）直接连接时如图 1.4.4(a) 所示，此时负载上的电压为

$$u_o = \frac{R_L}{R_S + R_L} u_S = \frac{1}{1 + 100} u_S \approx 0.01 u_S = 10\text{mV}$$

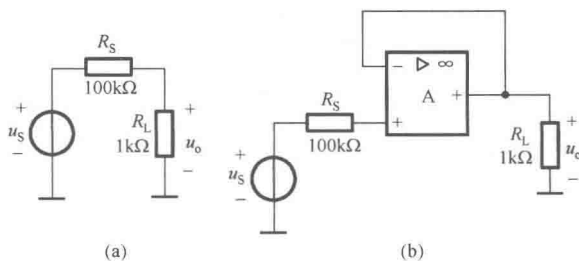


图 1.4.4 例 1.4.1 电路图

(2) 通过电压跟随器连接的电路如图 1.4.4(b) 所示。因电压跟随器的输入电阻 $R_i \rightarrow \infty$ ，该电路几乎不从信号源吸取电流， $u_+ = u_s$ ，而 $R_o \rightarrow 0$ ，所以负载电压 $u_o = u_+ = u_- = u_s = 1\text{V}$ 。当负载变化时，输出电压几乎不变，从而消除了负载变化对输出电压的影响。

【例 1.4.2】电路如图 1.4.5 所示，已知 $u_o = -33u_i$ ，其余参数如图所示， R_3 和 R_6 为平衡电阻，试求 R_5 的阻值。

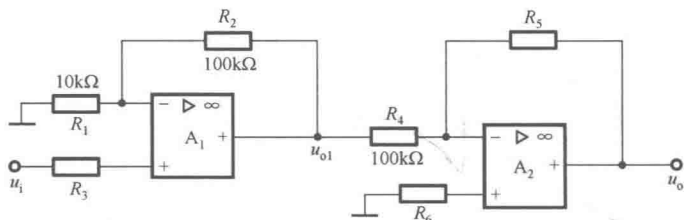


图 1.4.5 例 1.4.2 电路图

解：由图 1.4.5 可知， A_1 构成同相比例电路， A_2 构成反相比例电路，所以

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_i = 11u_i$$

$$u_o = -\frac{R_5}{R_4} u_{o1} = -\frac{R_5}{100} \times 11u_i = -33u_i$$

可得 $R_5 = 300\text{k}\Omega$ 。

1.4.2 加减运算电路

实现多个输入信号按各自不同的比例求和或求差的电路，统称为加减运算电路。

1. 加法电路

根据输入信号的输入端不同，加法电路有反相加法电路和同相加法电路。

如果多个输入信号同时作用于集成运放的反相输入端，就构成了反相加法电路，如图 1.4.6 所示，平衡电阻 $R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$ 。

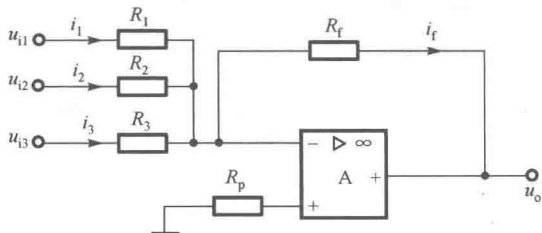


图 1.4.6 反相加法电路

根据“虚断”和“虚地”的概念，有

$$i_f = i_1 + i_2 + i_3$$

即

$$-\frac{u_o}{R_f} = \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}$$