



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校电工电子课程改革系列教材

电工电子技术教程

(下册：集成模拟电子技术基础)

■ 邹逢兴 主编
■ 刘安芝 陆 珉 李云钢 刘少克 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

Electrical Technology
&
Electrical

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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校电工电子课程改革系列教材

电工电子技术教程

(下册:集成模拟电子技术基础)

邹逢兴 主编

刘安芝 陆珉 李云钢 刘少克 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是作者所在单位长期以来进行电工电子系列课程统筹改革成果的结晶。全书分三册,上册:电工与电路基础,中册:集成数字电子技术基础,下册:集成模拟电子技术基础。经过精心设计,各册既有相对独立性、完整性,又是一个内容既不脱节又不重叠、相互协调呼应、有机联系的统一体。

本册以上册“电工与电路基础”为基础,以模拟电子技术和模拟电路设计技术的最新发展成果为起点,从培养学生分析、设计实用模拟电路的能力出发,主要介绍模拟集成电路基础、基于集成运算放大器的信号运算电路、基于集成运算放大器的信号处理电路、基于集成运算放大器的信号产生电路、基于集成运算放大器的信号变换电路、基于集成运算放大器的功率放大电路、集成直流稳压电源和在系统可编程模拟器件与模拟EDA等内容。

本书从体系到内容都有很大创新,重点放在基于集成电路的分析设计上,突出实用性和论例结合,非常适合于作为各级各类高等学校理工科专业的本、专科生新一代教材。对于电子信息领域的科学研究和工程技术人员,本书也是一本很好的实用参考书。

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

电工电子技术教程. 下册:集成模拟电子技术基础/邹逢兴主编. —北京:电子工业出版社, 2011.6

普通高等教育“十一五”国家级教材规划

ISBN 978-7-121-13640-5

I. ①电… II. ①邹… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材③集成电路—高等学校—教材④模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 098809 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂
装 订:

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:13.75 字数:358 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:32.00 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

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是作者所在单位长期以来进行电工电子系列课程统筹改革成果的结晶。

随着电子技术和电子设计技术的发展,目前的电子工程师或工科各专业从事硬件电路开发的人员,已很少用分立元件去搭建各类电子系统了,一般都是基于不同规模的 IC 芯片去设计和构造实际系统。因此,作为学校教育,应该顺应技术发展潮流,适应行业工作现状,把电子技术课程教学的起点提高到集成电路芯片上,重点转移到基于集成芯片的分析与设计能力的培养上,没必要再从分立元件和基于分立元件的最基础电路讲起了。这是一个方面。另一方面,即使基于集成电路的数字、模拟电子系统分析与设计,还是需要有基本电路分析理论作支撑,所以以电路分析基础类课程作为电子技术课程的前修课仍是必要的。但是,传统的电路分析基础类课程,往往是仅基于集总 R、C、L 元件论原理的居多,与“模电”、“数电”实际电路特别是集成电子电路的结合很少,其结果使理论与实际脱节,几门课的整体效率不高,综合效果不好,教学效时比偏低。

正是基于上述两方面考虑,我们从 20 世纪 90 年代开始,就将这几门课作为一个系列课程,从理论与实践的结合上,统筹考虑其内容和体系结构的改革,取得了较好的教学成效。在此基础上,进入 21 世纪后,我们将电工电子技术基础的内涵整合成“电工电子技术导论”、“集成数字电子技术”、“集成模拟电子技术”和“EDA 技术与设计实践”4 门课,并策划设计了一套由与之同名的四本书构成的电工电子类课程改革系列教材。前三本书于 2005 年在电子工业出版社正式出版。从几年的自用和他用反馈的意见看,该系列教材的特色优势得到了本单位和诸多用书院校教师的高度认同,本人还因此而多次应邀在国内相关教学学术研讨会和经验交流会上作专题报告,有关课程改革及教材编写思想引起了同行专家的广泛共鸣。但同时也暴露出三本书在具体内容的有机融合、统筹兼顾、前后呼应方面还存在不足。

本书在很大程度上可以说是对上述系列教材的改进和修订。修订后,融入了作者所在学校近年来相关课程教学研究、教学改革的新思维、新理念、新成果,也吸收了用户对原书反馈的一些建设性意见,还吸取了近年来出版的一些同类教材的精华,尤其针对原来的不足做了较多改进。为体现原三本书是一个统一整体,这次将它们统一在《电工电子技术教程》一个书名下各成一册,并按学科发展内涵和教育、教学规律,从内容上到体系上对它们作出优化整合、处理:一方面,将“模电”、“数电”的必要基础知识与基本电路理论、基本电工原理有机融为一体,构成“上册:电工与电路基础”,其中各章均以电路分析理论应用举例等形式,融入了较多实用电路和典型电子电路,为后面的“数电”、“模电”奠定了基础和埋下了伏笔;另一方面,将原来的“数电”和“模电”改为以上册为基础,直接从 IC(集成电路)切入,直奔基于集成电路的数字/模拟电路分析与设计,而且从 SSIC 到 MSIC 再到 LSIC/VLSIC,集成规模越大,越把它作为介绍的重点,最后都归结到基于 LSIC/VLSIC 的数字/模拟 EDA,从而形成“中册:集成数字电子技术基础”和“下册:集成模拟电子技术基础”。与此同时,特别注意三册的有机融合和承前启后、

协调呼应。这样,既可保持学科内容上的科学性、基础性、完整性,又可体现电子技术的先进性、实用性,较好地反映和适应电子设计技术发展的现状和趋势,还可以用较少的学时数实现上述“五性”的统一,提高教学效时比。

本书将“集成数字电子技术”作为中册,而将“集成模拟电子技术”作为下册,是基于这样一种考虑:学完“电工与电路基础”后,最好把“集成数字电子技术”课安排在“集成模拟电子技术”课前面,这样有利于将必须以“数电”为先修课的“计算机硬件技术基础”(或“微机原理与接口技术”)类课程尽早开,从而有利于实现本科四年“计算机应用不断线”的改革理念,也使学生有条件、有能力尽早参加电子设计、计算机应用方面的创新实践活动和学科竞赛,更好地培养工程实践能力和科技创新能力。

本册作为全书下册,以上册“电工与电路基础”为基础,以模拟电子技术和模拟电路设计技术的最新发展成果为起点,从培养学生分析、设计实用模拟电路的能力出发,主要介绍模拟集成电路基础、基于集成运算放大器的信号运算电路、基于集成运算放大器的信号处理电路、基于集成运算放大器的信号产生电路、基于集成运算放大器的信号变换电路、基于集成运算放大器的功率放大电路、集成直流稳压电源和在系统可编程模拟器件与模拟 EDA 等内容。

全书由邹逢兴主编,策划、提出了全书内容及组织结构,确定了编写思想,撰写了三级目录,审读修改、协调统一了全部书稿。刘安芝、陆珉、李云钢、刘少克 4 人参加了本册编写/修订工作。国防科技大学先后从事本系列课程教学的许多教师,如丁文霞副教授、史美萍副教授、关永峰副教授、刁节涛副教授、刘国福副教授、潘孟春教授、胡助理副教授、唐莺副教授、李季副教授、陈隶湘副教授、张玘教授、翁飞兵副教授、高广珠副教授、黄春琳副教授、计科峰副教授、刘希顺副教授、陈绍荣讲师等,参加了对本册内容和结构的讨论,提出过许多很好的建议。尤其是我国著名电子学专家、原国家教委电子技术课程教学指导小组组长、华中科技大学教授康华光老先生,在对原系列教材给予较高评价并为出版作序的同时,也对其后的修订改进提出了中肯的指导性意见。在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于本书从体系到内容都有较大创新,把重点放在基于集成电路的分析设计上,突出了实用性和论例结合,非常适合作为各级各类高等学校理工科专业的大学生新一代教材。对电子信息领域的科学研究和工程技术人员,本书也是一本很好的实用参考书。又由于本书在确保贯彻改革创新思维的前提下,从体系到内容还做了一些其他方面的精心设计,使上、中、下三册的内容既相互协调呼应、有机联系,又有各自相对的独立性、完整性。因此,配套选用三册作为三门课教材自然最好,但单独选用某一册也未尝不可。

尽管本书力求改得更好,但毕竟内容取舍和结构模式都具有探索性,加之作者水平、经验有限,一定还存在不少缺陷,敬请读者不吝赐教。

邹逢兴
2011 年 4 月于长沙

目 录

第 1 章 模拟集成电路基础	1
1.1 模拟集成电路概述	1
1.2 模拟集成电路的基本组件——集成运算放大器	2
1.2.1 集成运算放大器的基本结构	3
1.2.2 集成运算放大器的电压传输特性	3
1.3 集成运算放大器的单元电路	4
1.3.1 直接耦合多级放大电路	4
1.3.2 差分放大输入电路	7
1.3.3 恒流源电路	12
1.3.4 互补功放输出电路	16
1.4 集成运算放大器的主要技术指标	17
1.4.1 静态指标	17
1.4.2 动态指标	18
1.4.3 集成运算放大器的电路模型	19
1.5 集成运算放大器的分类与选用	21
1.5.1 分类与选用原则	21
1.5.2 几种典型集成运算放大器芯片	22
1.5.3 集成运算放大器使用须知	23
1.6 模拟电路中的反馈	24
1.6.1 反馈的基本概念与负反馈组态	24
1.6.2 负反馈对放大电路性能的影响	29
1.6.3 放大器中引入负反馈的原则	31
1.6.4 深度负反馈放大电路的计算	31
1.6.5 深度负反馈放大器自激振荡的消除	35
思考题与习题 1	36
第 2 章 基于集成运算放大器的信号运算电路	41
2.1 集成运算放大器线性应用的电路	41
2.2 比例运算电路	41
2.2.1 反比例运算电路	42
2.2.2 同比例运算电路	43
2.2.3 差分比例运算电路	43
2.3 加减法运算电路	44
2.3.1 比例求和电路	44
2.3.2 减法运算电路	45
2.4 积分微分运算电路	46
2.4.1 积分运算电路	46
2.4.2 微分运算电路	47

2.5 对数、指数运算电路	48
2.5.1 对数运算电路	48
2.5.2 指数运算电路	49
2.6 乘除法运算电路	49
2.6.1 基于对数、指数运算的乘除法运算电路	49
2.6.2 基于恒流源差放的变跨导式乘法器电路	50
2.7 其他运算电路	52
2.7.1 开方、均方根运算电路	52
2.7.2 绝对值运算电路	52
2.8 集成运算放大器性能对运算精度的影响	53
2.8.1 有限共模抑制比的影响	53
2.8.2 非零输入失调电压电流的影响	54
思考题与习题 2	55
第 3 章 基于集成运算放大器的信号处理电路	59
3.1 混频、倍频电路	59
3.2 限幅电路	60
3.2.1 二极管并联限幅电路	60
3.2.2 二极管串联限幅电路	60
3.3 有源滤波电路	61
3.3.1 滤波电路概述	61
3.3.2 有源低通滤波器(LPF)	62
3.3.3 有源高通滤波器(HPF)	64
3.3.4 带通滤波器(BPF)	65
3.3.5 双 T 带阻滤波器(BEF)	66
3.3.6 开关电容滤波器(SCF)	67
3.4 调制解调电路	68
3.4.1 调制解调概述	68
3.4.2 幅度调制与解调电路	68
3.4.3 角度调制与解调电路	77
3.5 锁相环(PLL)电路	91
3.5.1 锁相环概述	91
3.5.2 锁相环的基本组成原理	91
3.5.3 锁相环主要组成部件特性分析	92
3.5.4 锁相环的相位模型和跟踪特性	94
3.5.5 锁相环(PLL)的基本特性及应用	95
3.5.6 集成锁相环及其典型应用	96
思考题与习题 3	100
第 4 章 基于集成运算放大器的信号产生电路	103
4.1 正弦波产生电路	103
4.1.1 通过振荡产生正弦波的条件	103
4.1.2 正弦波振荡电路的基本组成	104
4.1.3 RC 正弦波振荡电路	104

4.1.4 LC 正弦波振荡电路	106
4.1.5 石英晶体正弦波振荡器	110
4.2 非正弦波产生电路	112
4.2.1 非正弦波产生电路的基本单元——比较器	112
4.2.2 矩形波产生电路	113
4.2.3 三角波、锯齿波产生电路	115
4.3 集成函数发生器	117
思考题与习题 4	118
第 5 章 基于集成运算放大器的信号变换电路	121
5.1 波形变换电路	121
5.1.1 矩形波变换为三角波	122
5.1.2 正弦波变换为矩形波	123
5.1.3 三角波变换为锯齿波	123
5.1.4 三角波变换为正弦波	124
5.2 电压—电流变换电路	125
5.2.1 电压变换为电流	126
5.2.2 电流变换为电压	127
5.3 电压—频率变换电路	127
5.3.1 电压变换为频率	127
5.3.2 频率变换为电压	129
5.4 交流—直流变换电路	131
5.4.1 交流变换为直流(精密整流电路)	131
5.4.2 直流变换为交流(逆变器)	132
思考题与习题 5	133
第 6 章 基于集成运算放大器的功率放大电路	135
6.1 功率放大器概述	135
6.1.1 功率放大器与一般放大器的区别	135
6.1.2 变压器耦合功率放大器	136
6.1.3 无输出变压器(OTL)功率放大器	137
6.1.4 无输出电容(OCL)功率放大器	138
6.1.5 平衡式无输出变压器(BTL)功率放大器	138
6.1.6 功率放大器的效率分析	139
6.2 甲乙类互补对称功率放大电路	141
6.2.1 甲乙类双电源互补对称电路	142
6.2.2 甲乙类单电源互补对称电路	142
6.3 典型集成功率放大器电路	143
6.3.1 集成 OTL 功放电路及分析	144
6.3.2 集成 OCL 功放电路及分析	145
6.3.3 集成 BTL 功放电路及分析	146
6.3.4 集成功率放大器主要性能指标	149
6.4 集成功率放大器的应用	151
6.4.1 集成 OTL 功放电路应用	151

6.4.2 集成 OCL 功放电路应用	152
6.4.3 集成 BTL 功放电路应用	153
思考题与习题 6	153
第 7 章 集成直流稳压电源	156
7.1 直流稳压电源概述	156
7.1.1 直流稳压电源组成原理	156
7.1.2 整流电路	157
7.1.3 滤波电路	161
7.1.4 稳压电路	164
7.1.5 集成直流稳压电源及分类	166
7.2 三端集成稳压器产品简介	167
7.2.1 输出固定式三端集成稳压器	167
7.2.2 输出可调式三端集成稳压器	168
7.2.3 典型三端集成稳压器及其主要参数	169
7.3 三端集成稳压器的应用	170
7.3.1 固定式三端稳压器的应用	170
7.3.2 可调式三端集成稳压器的应用	172
7.4 开关式稳压电路	173
7.4.1 开关式稳压电路概述	173
7.4.2 串联开关式稳压电路	174
7.4.3 并联开关式稳压电路	175
7.4.4 典型集成开关式稳压器及其主要参数	176
7.5 集成直流稳压电源模块	176
7.5.1 集成直流稳压电源模块概述	176
7.5.2 DC/DC 功率变换模块	176
7.5.3 AC/DC 功率变换模块	177
7.5.4 典型集成直流稳压电源模块及其主要参数	177
思考题与习题 7	178
第 8 章 在系统可编程模拟器件与模拟 EDA	181
8.1 在系统可编程模拟器件概述	181
8.2 ispPAC 系列在系统可编程模拟器件	182
8.2.1 ispPAC10 结构及特点	182
8.2.2 ispPAC20 结构及特点	184
8.2.3 ispPAC30 结构及特点	185
8.2.4 ispPAC80 结构及特点	187
8.3 模拟 EDA 入门	189
8.3.1 关于模拟 EDA 技术	189
8.3.2 模拟 EDA 开发软件	189
8.3.3 基于 PAC-Designer 的 EDA 设计	194
8.3.4 基于 Multisim 10 的 EDA 设计	200
思考题与习题 8	210
参考文献	212

第1章 模拟集成电路基础

本章导读信息

集成电路通常分为模拟集成电路和数字集成电路。集成运算放大器是模拟集成电路中的基本组件,以它为基础,再辅之以若干其他元器件构成的电路,将能实现放大、比较、变换、加减乘除和微分积分等各种处理、转换和运算。集成运算放大器如同双极型晶体管、场效应管等分立器件一样,被认为是另一种独立的电路器件,在电子系统中非常流行。

1. 内容提要

本章从组成运算放大器的内部单元电路出发,介绍了放大器的耦合方式、差分放大电路、恒流源电路、互补功率放大电路以及电子技术中的负反馈技术;讨论了运算放大器的指标参数及运算放大器的理想电路模型和实际电路模型,为后续的运算放大器应用电路的分析、设计提供了基本技术支持。

2. 重点难点

【本章重点】

- (1) 集成运算放大器中的单元电路:差分放大电路、恒流源电路、互补功率放大电路;
- (2) 集成运算放大器的理想化模型;
- (3) 理想运算放大器的虚短、虚断法则;
- (4) 4种基本负反馈组态与反馈判断;
- (5) 负反馈放大电路的分析。

【本章难点】

- (1) 各种恒流源的特点;
- (2) 差分放大电路的静态、动态分析方法;
- (3) 互补功率放大电路中的图解分析方法、影响功放效率的因素及效率与非线性失真的矛盾;
- (4) 电路中反馈的判断、反馈对电路的影响;
- (5) 反馈的引入和深度负反馈条件下反馈放大器动态参数的分析计算。

1.1 模拟集成电路概述

集成电路(integrated circuit)是一种微型电子器件或部件。它采用一定的工艺,将整个电路中的元器件及布线互连在一起,制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上,然后封装所构成的具有特定功能的电子电路。它具有体积小,引出线和焊接点数目少,功耗低和可靠性高等特点。

集成电路按其功能、结构的不同,可以分为模拟集成电路、数字集成电路和数模混合集成电路三大类。

数字集成电路用来产生和处理各种数字信号(指在时间上和幅度上离散取值的信号),而模拟集成电路又称线性电路,用来产生、放大和处理各种模拟信号(指幅度随时间连续变化的信号)。模拟集成电路种类繁多,有运算放大器、宽频带放大器、功率放大器、模拟乘法器、模拟锁相环、模数和数模转换器、稳压电源和音像设备中常用的其他模拟集成电路等。

1.2 模拟集成电路的基本组件——集成运算放大器

集成运算放大器(integrated operational amplifier),简称集成运算放大器,因最初被设计出来的目的是将电压类比成数字,用来进行加、减、乘、除的运算而得名。自1963年问世以来,它已走过了近50年的发展历程,并已成为所有线性系统中事实上的标准部件和基本组件。现今的运算放大器可以起到放大器、缓冲器、比较器、差分放大器、线路驱动器、积分器、电平转换器、峰值检波器、滤波器、光电二极管放大器等很多功能。其应用已经延伸到汽车电子、通信、消费等各个领域,是应用最为广泛的模拟集成电路器件。

按集成运算放大器的参数来分,它可分为以下几类。

(1) 通用型运算放大器

通用型运算放大器是以通用目的而设计的运算放大器。这类器件的主要特点是价格低廉、产品量大面广,其性能指标能适合于一般性使用。例如 μ A741(单运算放大器)、LM358(双运算放大器)、LM324(四运算放大器)及以场效应管为输入级的LF356都属于此类。它们是目前应用最为广泛的集成运算放大器。

(2) 高阻型运算放大器

这类集成运算放大器的特点是利用场效应管高输入阻抗的特点,以场效应管组成运算放大器的差分输入级,使差模输入阻抗非常高,一般为 $1\text{G}\Omega\sim 1\text{T}\Omega$,输入偏置电流非常小,一般为几到几十皮安。用场效应管做输入级还使运算放大器具有高速、宽带和低噪声等优点,但输入失调电压较大。常见的集成器件有LF355、LF347(四运算放大器)及更高输入阻抗的CA3130、CA3140等。

(3) 低温漂型运算放大器

在精密仪器、弱信号检测等自动控制仪表中,总是希望运算放大器的失调电压要小且不随温度的变化而变化。低温漂型运算放大器就是为此而设计的。目前常用的高精度、低温漂运算放大器有OP07、OP27、AD508及由MOSFET组成的斩波稳零型低漂移器件ICL7650等。

(4) 高速型运算放大器

在快速A/D和D/A转换器、视频放大器中,要求集成运算放大器的转换速率很高,单位增益带宽足够大。高速型运算放大器主要特点是具有高的转换速率和宽的频率响应。常见的运算放大器有LM318、 μ A715等。

(5) 低功耗型运算放大器

随着便携式仪器应用范围的扩大,要求器件必须满足低电源电压供电、低功耗的要求。常用低功耗运算放大器有TL-022C、TL-060C等,其工作电压为 $\pm 2\sim \pm 18\text{V}$,消耗电流为 $50\sim 250\mu\text{A}$ 。目前有的产品可采用单节电池供电,功耗达 μW 级。

(6) 高压大功率型运算放大器

运算放大器的输出电压主要受供电电源的限制。在普通的运算放大器中,输出电压的最大值一般仅几十伏,输出电流仅几十毫安。若要提高输出电压或增大输出电流,集成运算放大器外部必须要加辅助电路。高压大电流集成运算放大器外部不需附加任何电路,即可输出高电压和大电流。

(7) 可编程控制运算放大器

可编程模拟集成电路的发展远不及可编程数字集成电路的发展。目前,可编程模拟集成电路主要有可编程增益放大电路和可编程滤波电路两种。

1.2.1 集成运算放大器的基本结构

在集成运算放大器内部,由于晶体管容易制造,且占用面积小,因此大量采用晶体管来代替其他元器件,如采用三极管构成二极管、用有源负载代替电阻负载等。电路中各元件是在同一硅片上,又是通过相同的工艺过程同时制造的,较易获得良好的对称特性,比如制造两个特性相同的管子或阻值相等的电阻等。电路中的部分电阻和小电容采用半导体工艺制造,而大电阻、大电容由于在硅片上占用面积大,所以集成电路内部很少采用,需要时采用外接方法。

集成运算放大器内部包括 4 个基本环节:输入级、中间放大级、输出级和偏置电路,如图 1.1 所示。

输入级是提高运算放大器质量的关键部分,一般采用差分放大电路,以提高输入电阻,减小零点漂移和抑制干扰信号,提高差模和共模输入电压范围。

中间级主要进行电压放大,均采用直接耦合多级放大电路,以提供大的增益。一般由共发射极放大电路构成。

输出级与负载相接,要求其输出电阻低,带负载能力强,能输出足够大的电压和电流。输出级多采用互补推挽、跟随器推挽、多级互补推挽等电路构成。

偏置电路的作用是为上述各级电路提供稳定和合适的偏置电流,决定各级的静态工作点,一般由各种恒流源电路构成。

某些运算放大器中还集成了一些辅助电路,如内电源稳压电路、控温电路、温度补偿电路、输入过压保护电路、输出过流过热保护电路等,目的是提高运算放大器的稳定性和耐受过载的能力。

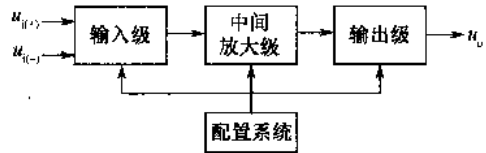


图 1.1 集成运算放大器的组成框图

1.2.2 集成运算放大器的电压传输特性

运算放大器的电器符号如图 1.2 所示,它有两个输入端和一个输出端。反相输入端标上“-”号,表示输出端信号相位与该端输入信号相位相反;同相输入端标上“+”号,表示输出端信号相位与该端输入信号相位相同。

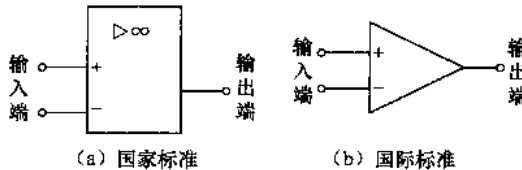


图 1.2 集成运算放大器的电器符号

表示输出电压与输入电压之间关系的特性曲线称为电压传输特性。设运算放大器“+”、“-”两输入端输入信号分别为 u_+ 和 u_- , 它们之差 $u_{id} = u_+ - u_-$; 输出信号为 u_o , 运算放大器电压传输特性可由式(1.1)表示。

$$u_o = f(u_{id}) \quad (1.1)$$

运算放大器的电压传输特性如图 1.3 所示。从运算放大器的实际传输特性图 1.3(a) 可以看出,集成运算放大器有线性放大区 ($|u_{id}| < U_{m}$ 时) 和非线性区或称饱和区 ($|u_{id}| \geq U_{m}$ 时)。在线性区,曲线的斜率为电压放大倍数;在非线性区只有两种电压输出。通常集成运

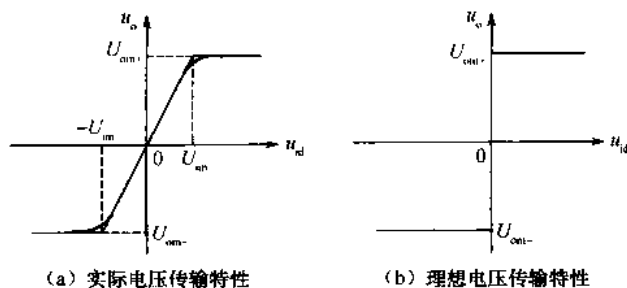


图 1.3 运算放大器的电压传输特性

算放大器电压增益极高,所以线性区曲线的斜率极为陡峭,即使输入毫伏级以下的信号,也足以使输出电压饱和,其值 U_{om+} 达到运算放大器能输出的正向最大值,通常该值接近正电源电压; U_{om-} 达到运算放大器能输出的负向最大值,通常该值接近负电源电压。实际电压传输曲线可近似成图 1.3(b)所示的理想电压传输特性,该理想电压传输特性显示了运算放大器作为电压比较器的工作方式,可判别 u_+ 与 u_- 电位的大小。

由此可得:运算放大器工作有两种方式,其一为线性放大方式,在此方式下,为保证输入一定范围电压差信号的线性放大,必须减小运算放大器的电压增益,因此运算放大器必须工作在负反馈状态下;其二为电压比较器方式,运算放大器必须工作在开环或正反馈状态。有关反馈的内容将在本章 1.6 节介绍。

1.3 集成运算放大器的单元电路

集成运算放大器内部电路主要包含差分放大器、恒流源、推挽功放等单元电路,是多级放大器直接耦合所形成的级联放大电路。

1.3.1 直接耦合多级放大电路

在电子技术应用中,往往需要放大非常微弱的信号,为了获得很高的电压放大倍数,可以把多个基本放大电路连接起来,组成多级放大电路。组成多级放大电路的每一个基本放大电路称为一级,级与级之间的连接方式叫耦合方式。放大电路的级间耦合必须要保证信号的无失真传输,且保证各级的静态工作点稳定。放大器级间耦合一般有 4 种方式,分为直接耦合、阻容耦合、变压器耦合和光电耦合。阻容耦合、变压器耦合方式具有各级的静态工作点相互独立的优点,但它们对低频信号衰减较大,不能放大直流信号,尤其是变压器耦合由于其体积、功耗和费用较大,现已较少采用。光电耦合是用发光器件将电信号转变光信号,再通过光敏器件把光信号变为电信号来实现级间耦合,它具有抗干扰能力强、级间电气隔离的优点,但其电路复杂,非线性失真较大。如果把前一级的输出直接接到后一级的输入端,就称为直接耦合方式。由于集成运算放大器内部无法集成大电容、电感器件,因而集成运算放大器内部多级放大器的连接均采用直接耦合的方式。

1. 直接耦合方式的基本结构

图 1.4 给出的是两级直接耦合放大电路。它虽然有传输通路,但输入信号并不能很好地被放大,这是因为直接耦合的结果使 VT_2 的工作点已接近饱和区。为此,常以图 1.5 所示的几种方式对图 1.4 直耦电路进行改进,使之能正常地、不失真地放大。

① 第二级接射极电阻 R_{e2} ,如图 1.5(a)所示。适当选择该电阻,可以使 VT_1 和 VT_2 工作

在放大区。该电路的缺点是, R_{c2} 的接入会使第二级的电压放大倍数下降。

② 用稳压管 VD_z 代替 R_{c2} , 如图 1.5(b) 所示。稳压管有这样的特性: 流过管子的电流在一定范围内变化时, 稳压管两端的电压基本不变。因此, 在静态时它可以有效地提高 VT_1 管的静态工作点, 而在动态时它的动态电阻 r_D 又很小, 不会太多地降低第二级的电压放大倍数。

③ NPN 型和 PNP 型管配合使用, 如图 1.5(c) 所示。在直接耦合放大电路中, 如果采用同类型(例如 NPN 型)晶体管, 则各级管子的集电极电位是逐级升高的, 因而限制了可能的级数。为了解决这一问题, 可以在前后级中配合使用 NPN 型和 PNP 型晶体管。图中 VT_2 的 U_{c2} 小于 VT_1 的 U_{c1} , 因而可以把后级的集电极电位降下来。

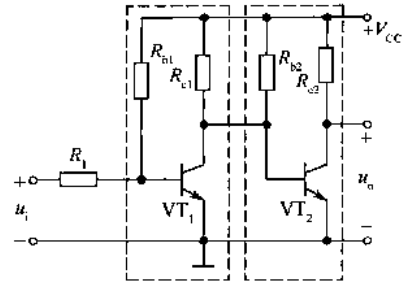


图 1.4 直接耦合放大电路，其中 VT_2 将工作在饱和区

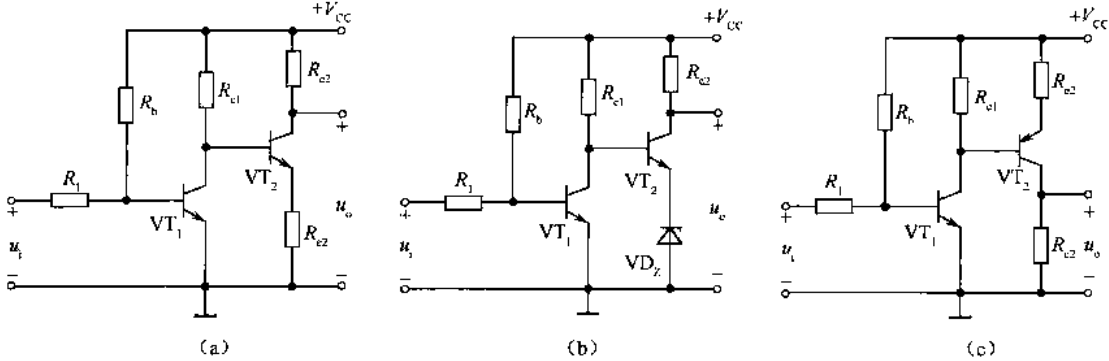


图 1.5 常用的直接耦合放大电路

2. 直接耦合方式的优缺点

直接耦合方式下, 由于前后级放大电路直接相连, 因此既可以放大交流信号, 也可以放大变化缓慢的信号, 还可以反映信号直流电平的变化, 所以它的低频特性比较好。这是它的一个优点。第二个优点是, 因为电路中没有电容和电感, 只有管子和电阻, 所以便于集成。

但是, 正因为直接耦合方式是前后级直接相连的, 使各级的静态工作点不是独立的, 会相互影响, 这也给设计、计算和调试带来了诸多不便。

3. 零点漂移问题

(1) 什么叫零点漂移

如果把图 1.5 中的各电路的输入端短路, 则输出电压 u_o 应为某一初始值, 而且应该不变。但是, 如果在输出端接上电压表或记录仪, 就会发现随着时间的迁移, u_o 会偏离初始值而做缓慢的随机的变动。这种现象就称为零点漂移, 简称零漂。

(2) 产生零点漂移的原因

严格说来, 电路中每个电阻或管子参数的变化、电源电压的波动, 都会使 u_o 发生变化, 即产生零点漂移。如果采用高精度的电阻并经过老化, 且采用高稳定度的电源, 则晶体管参数随温度的变化将成为产生零点漂移的主要原因。

对晶体管工作影响最大的 U_{BE} 、 β 、 I_{CBO} 三个参数都与温度有关。当温度升高时, 这三个参

数的变化将使管子的 I_{BQ} (下标 Q 表示静态工作点) 略微增大, I_{CQ} 增大, 而输出特性曲线族则上移, 且曲线的间距增大。晶体管参数的变化将导致零点漂移。例如, 在图 1.5(b) 中, 温度升高使 I_{C1Q} 增大后, 会引起下面的过程:

$$U_{CE1Q} \downarrow \rightarrow U_{BE2Q} \downarrow \rightarrow I_{B2Q} \downarrow \rightarrow I_{C2Q} \downarrow \rightarrow U_{OQ} \uparrow$$

而且这些变化都带有随机性, 这样就产生了零点漂移。

(3) 零点漂移问题的严重性及其抑制方法

温度变化和零点漂移都是随时间缓慢进行的, 如果多级放大电路各级之间采用电容耦合或变压器耦合, 则这种缓慢变化的信号不会逐级传递和放大, 问题不会很严重。但是, 对直接耦合多级放大电路来说, 输入级的零点漂移会逐级放大。如果零点漂移的大小足以和输出的有用信号相比拟, 就无法正确地将两者加以区分。因此, 为了使放大电路能正常工作, 必须有效地抑制零点漂移。

抑制零点漂移的主要方法有:

- ① 采用恒温措施, 使晶体管工作温度恒定。
- ② 采用补偿法。在电路中用热敏元件或二极管 (或晶体管的发射结), 来与工作管的温度特性互相补偿。但是, 在大范围内进行温度补偿不易实现。
- ③ 设计特殊形式的放大电路, 用特性相同的两个管子来提供输出, 使它们的零点漂移互相抵消。在运算放大器中, 广泛采用差动放大电路来抑制零漂, 就是基于这种思想。

4. 多级放大电路的分析

(1) 静态工作点的分析

在直接耦合多级放大电路中, 由于各级的直流通路是相互联系的, 因此各级的静态工作点无法单独计算, 需要统一考虑。一般根据电路的约束条件和管子 I_B 、 I_C 和 I_E 的相互关系, 列出方程组求解。如果电路中有特殊电位点, 则应以此为突破口, 简化列写方程的过程。

【例 1.1】 图 1.6 是一个输入短路的直接耦合两级放大电路, 计算对应于静态工作点的 I_{B1Q} 、 I_{C1Q} 、 U_{CE1Q} 和 I_{B2Q} 、 I_{C2Q} 、 U_{OQ} 的值。设 VT_1 、 VT_2 的 β 值分别是 $\beta_1 = 50$ 、 $\beta_2 = 35$, 稳压管 VD_Z 的稳电压值 $U_Z = 4V$, $U_{BE1Q} = U_{BE2Q} = 0.7V$ 。

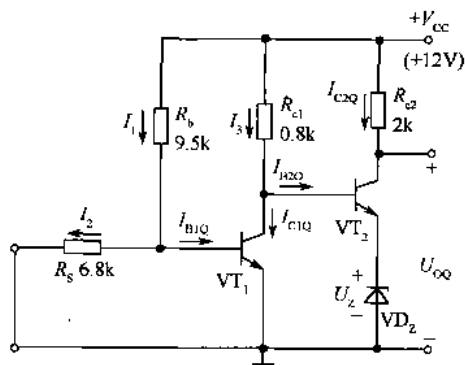


图 1.6 静态工作点计算

解 由图 1.6 可知

$$I_1 = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_b} = \frac{12 - 0.7}{95 \times 10^3} \approx 0.12 \text{mA}$$

$$I_2 = \frac{0.7}{R_s} = \frac{0.7}{6.8 \times 10^3} \approx 0.1 \text{mA}$$

$$I_{B1Q} = I_1 - I_2 = 0.02 \text{mA}$$

$$I_{C1Q} = \beta_1 I_{B1Q} = 50 \times 0.02 = 1 \text{mA}$$

$$U_{CE1Q} = U_{BE2Q} = 0.7 + U_Z = 4.7 \text{V}$$

$$I_3 = \frac{V_{CC} - U_{CE1Q}}{R_{b1}} = \frac{12 - 4.7}{6.8 \times 10^3} = 1.07 \text{mA}$$

$$I_{B2Q} = I_3 - I_{C1Q} = 1.07 - 1 = 0.07 \text{mA}$$

$$I_{C2Q} = \beta_2 I_{B2Q} = 35 \times 0.07 = 2.45 \text{mA}$$

$$U_{OQ} = V_{CC} - I_{C2Q} R_{c2} = 12 - 2.45 \times 2 = 7.1 \text{V}$$

(2) 电压放大倍数的计算

由图 1.7 可知, 放大电路多级连接以后, 其总的电压放大倍数 A_u 为

$$A_u = A_{u1} A_{u2} \cdots A_{uk} = \prod_{i=1}^k A_{ui} \quad (1.2)$$

即总的放大倍数为每一级放大倍数之积。但应注意,在计算各级放大电路的电压放大倍数时,应考虑前后级之间的相互影响。具体说来,应把下一级的输入电阻作为上一级的负载,而上一级的输出电阻就是下一级的信号源电阻。

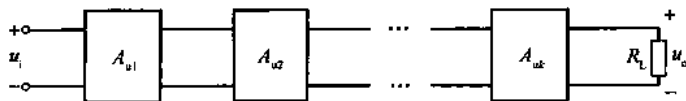


图 1.7 多级放大电路的电压放大倍数

1.3.2 差分放大输入电路

毫无例外,集成运算放大器的输入级电路都是采用差分放大电路结构。差分放大电路(简称差放)就其功能来说,是放大两个输入信号之差。由于它在电路性能方面有许多优点,因而成为集成运算放大器的主要组成单元。

1. 差分放大电路的基本结构

图 1.8 是差放的两种典型电路。从电路结构上看,差放具有两个明显的特征:对称性(从上部看)和长尾(从下部看)。图 1.8(a)的长尾是电阻 R_e ,称为电阻长尾式差放;图 1.8(b)的长尾是恒流源 I_o ,称为恒流源式差放。两者没有本质区别,假如把图 1.8(a)中的长尾电阻 R_e 看成是负电源 $-V_{EE}$ 的内阻,而且 R_e 很大,那么电阻式长尾就成了恒流源式长尾。

差放有两个输入端和两个输出端。当两个输入端都有信号输入时,称为双端输入;当一个输入端接地,另一个输入端有信号输入时,称为单端输入。类似地,当输出取之于两个输出端之间时,称为双端输出;当输出只取之于一个输出端与地之间时,称为单端输出。

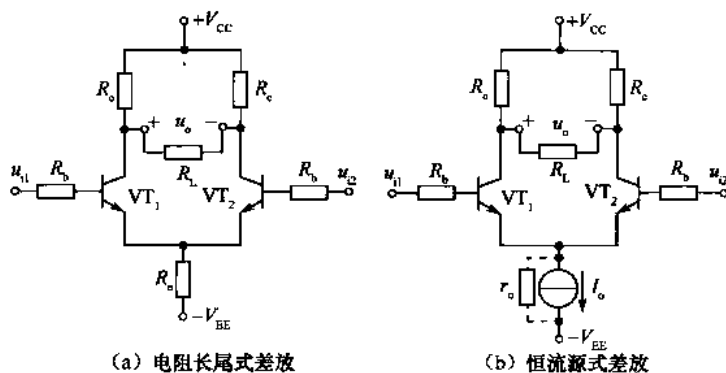


图 1.8 差分放大电路

2. 差模信号与共模信号

定义差放的两个输入信号之差为差模输入信号,简称差模信号,用 u_{id} 表示;定义差放的两个输入信号的算数平均值为共模输入信号,简称共模信号,用 u_{ic} 表示。这样,就有

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \quad (1.3)$$

$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (1.4)$$

如果用 u_{id} 和 u_{ic} 来表示 u_{i1} 和 u_{i2} , 则有

$$u_{i1} = \frac{1}{2}u_{id} + u_{ic} \quad (1.5)$$

$$u_{i2} = -\frac{1}{2}u_{id} + u_{ic} \quad (1.6)$$

可见, 两输入端对地分别输入的信号 u_{i2} 和 u_{i2} 等效于两输入端同时分别输入了一个大小、极性相同的共模信号 u_{ic} 和一个大小相同、极性相反的差模信号 $\pm u_{id}/2$ 。在一般情况下, 输入信号可看成是一对差模信号和一个共模信号的叠加。分别求得差放对差模和共模信号的响应特性之后, 应用叠加定理即可求得总的响应特性。

单端输入是双端输入的一个特例。设 $u_{i1} = u_i, u_{i2} = 0$ 则 $u_{id} = u_i, u_{ic} = u_i/2, u_{i1} = u_i/2, u_{i2} = -u_i/2$, 这样单端输入就等效成了双端输入。

3. 差模放大与共模抑制

由于电路对称, 差模放大器静态(即 $u_{i1} = u_{i2} = 0$)时, 两管的静态工作点相同, 其单端输出电压 $u_{o1} = u_{o2} = U_{C1Q} = U_{C2Q}$, 而双端输出电压 $U_{OQ} = 0$ 。

差模信号($u_{i1} = -u_{i2}$)输入时, 电路对称点的电位和对称支路上的电流大小相同、极性相反。因此, 两个输出端上的电压增量将大小相等、方向相反, 双端间输出的电压增量将是单端输出电压增量的两倍。在此情况下, 长尾的电流增量和电压增量皆为零, 这意味着长尾对差模信号而言电阻值为零。这样, 两管的发射极均为地电位, 从而构成了标准的共发射极放大电路, 所以, 差放对差模信号具有放大作用。

共模信号($u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$)输入时, 电路对称点的电位和对称支路上的电流大小、极性相同。因此, 两个输出端上的电压增量将大小相等、方向相同, 双端间输出的电压增量将为零。可见, 如果电路绝对对称, 双端输出时, 共模信号可以被完全抑制。在共模输入下, 长尾的电流增量是单管的两倍, 在长尾电阻 R_c (或恒流源动态内阻 r_o) 上产生的电压增量也是单管情况下的两倍, 它将削弱对输入共模信号的放大作用。例如, 设共模电压为正, 长尾上的压降方向将提高发射极电位, 从而使 u_{BE} 减小, 最终使两管的电流增量减小, 单端有共模信号的输出, 但输出受到抑制。长尾的上述作用称为共模负反馈。可见, 双端输出时, 对共模输入信号的抑制作用取决于电路的对称性; 单端输出时, 对共模输入信号的抑制作用取决于长尾电阻的大小, 长尾电阻越大, 差放的共模抑制能力就越强。由于恒流源的动态内阻很大, 所以恒流源式差放具有很强的共模抑制能力。

在我们周围, 存在着种种干扰(如各种电器设备产生的干扰), 常常会影响放大器的正常工作。特别是在放大微弱信号时, 这种干扰的危害就更大。对于差放而言, 外界干扰将同时作用于它的两个输入端, 相当于输入了共模信号, 如果将有用信号以差模形式输入, 那么上述的干扰就将被抑制, 而有用信号得到放大。此外, 在电路对称条件下, 两管的零点漂移折算到输入端的漂移电压相同, 相当于输入了共模信号, 因此差放也能充分地抑制零点漂移。

4. 差分放大电路的分析

(1) 静态分析

电路的静态分析是分析在无信号输入时, 电路在供电电源的作用下所处的工作状态, 也称为静态工作点分析, 分析所对应的电路称为静态电路(或直流电路), 下面举例说明。

【例 1.2】如图 1.9 所示, 设电阻长尾式差放的参数为: $R_c = 3k\Omega, R_b = 1k\Omega, R_e = 6.2k\Omega, V_{CC} = -V_{EE} = 6V$, 管子参数 $\beta = 50, U_{BE} = 0.7V$ 。试估算其静态工作点 $I_{C1Q}, I_{C2Q}, U_{CE1Q}, I_{CE2Q}$ 和