

● 教学内容改革成果教材

电子技术应用

梁伟洋
冯祥
郑仲明
等编著

国防科技大学出版社

教学内容改革成果教材

电子技术应用

梁伟洋 冯 祥 郑仲明 编著
张先永 尼 喜 贾承军

国防科技大学出版社

· 长沙 ·

内 容 简 介

为了适应培养面向 21 世纪电子技术人才的需要,本书在《电子技术基础》常规内容的理论基础之上讲述了大量常用集成电路和有关新器件、新技术的应用知识,以贯彻“分立元件起步,集成电路落脚”的改革思想,并为学生铺垫起从理论基础到实际应用的过渡性桥梁。

本书的主要内容包括:集成运算放大器的应用、集成功率电路、D/A 与 A/D 转换器、可编程逻辑器件、通用电路仿真软件 PSpice、硬件描述语言和电子电路的设计。

本书可作为高等院校电子类、电气类、自动化类及其它相近专业本、专科生的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术应用/梁伟洋等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2002.6

ISBN 7-81024-883-9

I. 电… II. 梁… III. 电子技术 IV. TN 70

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@pubic.cs.hn.cn

责任编辑:石少平 责任校对:黄 煌

新华书店总店北京发行所经销

空军第一航空学院印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张:22.25 字数:514 千

2002 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—4000 册

*

定价:29.00 元

前 言

电子技术课程是电类各专业的一门技术基础课,它着重研究各种半导体器件及其各种基本电路的原理及分析方法,具有很强的工程应用特性。随着微电子技术、信息技术、计算机技术的迅猛发展及相互融合,新的器件和电路层出不穷,电子电路的分析和设计方法正在发生着革命性的变化,原来的模拟电子技术基础和数字电子技术基础的内容已不能满足电子信息时代的要求。经过近年来电子技术课程的教学改革与实践,本书在传统的《模拟电子技术》和《数字电子技术》的内容基础上,删旧增新,加大了新技术知识含量,突出了应用技术特色,重新规划出《电子技术基础》和《电子技术应用》这一新体系。本书的编写过程中注意了以下几个方面。

(1)力图体现“分立元件起步、集成电路落脚”的原则。《电子技术基础》主要以分立元件为主讲解模拟电路与数字电路的基本概念、基本电路原理和基本分析方法,构建电子技术的理论基础;而《电子技术应用》则主要以目前广泛使用的和一些较新的集成电路为主,着重讲解现代电子电路的设计、组成方法及应用集成电路过程中的一些实际问题。试图构建起从理论基础到应用技能的完整知识体系。两本书既互相联系,又独立成书,可考虑作为上下册使用,也可根据需要选用。

(2)力图体现电子技术领域的新发展。在电子技术应用篇中大篇幅介绍了可编程逻辑器件<如 CPLD、FPGA 等>、硬件描述语言和现代电子电路 CAD 方法<如 Pspice 软件应用>等,以期使学生跟踪现代电子技术的新发展。

(3)力图体现电子技术课程的工程应用特性。本书在介绍各种电路的结构原理的基础上都给出一定量的实际应用举例,并专门设置了一章《电子系统的设计》,介绍了电路设计中的实际问题。另外,在课程设置上还有一个 40~60 学时的《电子电路实验》课与电子技术应用课程相配套,以加速学生学以致用进程。

(4)力图缓解有限的教学时数与教学内容膨胀的矛盾。本教材按本科生总时数 80 学时(包含习题课、实验课等环节)来编写的。教学时数与内容的矛盾十分突出,为了压缩篇幅,部分内容作为思考题与习题的形式给出,以扩充学生的自学空间。全书本着本、专科适宜,宽编窄用的原则精选内容,对超出专科教学要求或一些较深入的内容以“*”给出标注。

本书由张先永(第 1 章),郑仲明(第 2、3 章),冯祥(第 4 章),贾承军(第 5 章),梁伟洋(第 6 章),尼喜(第 7 章)等同志参与编写。梁伟洋同志担任主编,冯祥和郑仲明为副主编,协助主编工作。此外,马宁负责校对了全书的原稿,贾承军负责绘制了全书的插图,吴家科完成了书中 CAD 例题的解答工作。

在本书编写的过程中,空军第一航空学院的领导和机关给予了大力支持,周德泉教授担任全书的主审工作。华中科技大学教授曹汉房、解放军信息工程大学王志刚教授和天津大学滕建业教授等同志给予了热情的指导并提出了宝贵的建议,上海 Lattice 公司陈恒教授提供了详实的资料和热情的帮助,编者在此表示衷心的感谢。

编 者

2002 年 5 月

目 录

第一章 集成运算放大器的应用

1.1 概述	(1)
1.2 集成运放的应用基础	(2)
1.2.1 集成运放的类型	(2)
1.2.2 集成运放的工作特点	(4)
1.2.3 理想集成运放的重要结论	(5)
1.3 集成运放的基本应用	(6)
1.3.1 基本放大电路	(6)
1.3.2 电压比较器	(12)
1.3.3 有源滤波器	(17)
1.3.4 非正弦波产生电路	(30)
1.4 集成运放的特殊应用	(35)
1.4.1 $U-I$ 和 $I-U$ 变换器	(35)
1.4.2 测量放大电路	(37)
1.4.3 程控增益放大电路	(40)
1.4.4 隔离放大电路	(45)
1.4.5 宽带放大电路	(47)
1.5 使用集成运放应注意的几个问题	(48)
1.5.1 运放参数的测试	(48)
1.5.2 运放的调零、性能扩展及安全保护	(54)
1.5.3 运放在使用中可能出现的异常现象	(59)
思考与练习题	(61)

第二章 集成功率电路

2.1 集成功率放大器	(70)
2.1.1 通用型集成功放 LM386	(71)
2.1.2 专用型集成功放 5G31	(73)
2.1.3 双声道音频集成功放 TA7232P	(74)
2.2 集成稳压器	(77)
2.2.1 线性集成稳压器	(77)
2.2.2 开关型集成稳压器	(91)

思考与练习题	(110)
--------	-------

第三章 D/A 与 A/D 转换器

3.1 D/A 转换器	(115)
3.1.1 D/A 转换器的基本原理	(115)
3.1.2 D/A 转换的输出方式	(119)
3.1.3 D/A 转换器的主要技术指标	(121)
3.1.4 集成 D/A 转换器及其应用	(123)
3.2 A/D 转换器	(128)
3.2.1 A/D 转换的一般工作过程	(128)
3.2.2 A/D 转换器及其工作原理	(130)
3.2.3 A/D 转换器的主要技术指标	(138)
3.2.4 采样保持集成电路、集成 A/D 转换器及其应用	(139)
3.2.5 A/D 转换系统设计举例	(147)
思考与练习题	(149)

第四章 可编程逻辑器件

4.1 概 述	(154)
4.2 PLD(Programmable Logic Devices)的结构和分类	(154)
4.3 可编程通用阵列逻辑(GAL)	(155)
4.3.1 GAL 器件的基本结构	(156)
4.3.2 输出逻辑宏单元(OLMC)的组态结构	(160)
4.4 在系统可编程逻辑器件	(161)
4.4.1 高密度在系统可编程逻辑器件的结构	(161)
4.4.2 ISPGDS 介绍	(165)
4.4.3 在系统可编程逻辑器件的设计过程	(166)
4.4.4 ispEXPERT 简介	(169)
* 4.5 在系统可编程模拟器件	(181)
4.5.1 ispPAC10 的结构	(182)
4.5.2 ispPAC10 的开发	(183)
* 4.6 FPGA 现场可编程逻辑器件	(187)
4.6.1 FPGA 的结构	(187)
4.6.2 FPGA 的连接方法	(192)
4.6.3 FPGA 的开发	(193)
思考与练习题	(195)

第五章 通用电路仿真软件 Pspice

5.1 绪 论	(196)
---------	-------

5.1.1	电路 CAD 工具介绍	(196)
5.1.2	Pspice 的基本结构	(196)
5.1.3	Pspice 电路文件的组成	(199)
5.2	Pspice 的元器件和模型	(202)
5.2.1	模型描述语句	(202)
5.2.2	无源元器件描述语句	(203)
5.2.3	电源描述语句	(207)
5.2.4	半导体器件描述语句	(209)
5.2.5	电路宏模型	(215)
5.3	Pspice 电路分析功能	(222)
5.3.1	直流分析	(222)
5.3.2	小信号分析	(224)
5.3.3	瞬态分析	(226)
5.3.4	其它分析语句	(227)
5.4	输出语句与输出变量	(228)
5.4.1	文本打印语句.PRINT	(228)
5.4.2	文本绘图语句.PLOT	(228)
5.4.3	绘图软件包调用语句.PROBE	(229)
5.4.4	输出变量	(230)
5.5	应用举例	(231)
5.5.1	单管共射放大电路的工作原理分析	(231)
5.5.2	共射放大电路的频率响应特性分析	(234)
5.5.3	NMOS 反相器电路	(236)
5.5.4	积分电路	(238)
5.5.5	RC 振荡器	(239)
	思考与练习题	(242)

第六章 硬件描述语言

6.1	ABEL—HDL 语言	(250)
6.1.1	ABEL—HDL 语言元素	(250)
6.1.2	ABEL 语言源文件的编写	(257)
* 6.2	VHDL 语言	(276)
6.2.1	概述	(276)
6.2.2	VHDL 入门	(280)
6.2.3	VHDL 语言的基本结构和语法	(287)

第七章 电子电路的设计

7.1	模拟电子电路的设计	(306)
-----	-----------------	-------

7.1.1 模拟电子电路的功能设计	(306)
7.1.2 模拟电子电路设计举例	(312)
7.2 数字系统的设计	(321)
7.2.1 数字系统设计步骤	(321)
7.2.2 数字系统设计方法	(325)
* 7.3 电子系统的可靠性设计	(328)
7.3.1 可靠性的基本概念	(328)
7.3.2 电子系统的可靠性保障技术	(330)
思考与练习题	(335)
附录1 常用FPGA/GPLD芯片基本特征和引脚图	(336)
附录2 我国集成电路的型号命名	(345)
附录3 国外集成电路主要生产厂家的其产品标识词头	(346)
参考文献	(347)

第一章 集成运算放大器的应用

内容提要

集成运放是一种通用性很强的功能部件,广泛应用于信息处理、自动控制、测量仪器及其它电子设备等领域。本章首先介绍了集成运放的应用基础,简述了集成运放的分类及其工作特点,重点讨论了集成运放组成的各种基本应用电路的工作原理和设计方法,其中包括直接耦合放大电路、单双电源供电的电容耦合交流放大电路、电压比较电路、有源滤波电路及波形产生电路等。为扩展读者的知识面,架起从基本应用电路到工程实用电路的桥梁,本章还讨论了集成运放的几种特殊应用电路,介绍其工作原理和设计方法,并列举了实用电路。最后介绍了使用集成运放中应注意的几个问题,如运放的参数测试、性能扩展等。

1.1 概 述

集成运算放大器简称为集成运放,最初应用于模拟计算机对模拟信号进行诸如加法、减法、微分、积分等数学运算而得名。随着工艺水平和设计能力的提高,集成运放在性能和品种方面都得到了迅猛发展。目前,它已成为一种通用性很强的功能部件,广泛应用于信息处理、自动控制、测量仪器及其它电子设备等领域。

集成运放出现于20世纪60年代中期。当时,美国仙童公司生产了第一个小规模集成运放 $\mu A702$,由于该产品存在增益低、输入阻抗低、负载能力弱等许多缺点,很快被 $\mu A709$ 所代替,成为真正得到流行的第一代集成运放。其他公司都以 $\mu A709$ 为参考进行生产,且保留709的型号、指标和管脚排列方式,仅在709数字的前面冠以本公司代号,在709数字的后面加上表示温度范围和外壳封装形式的后缀,因此出现了诸如RC709T、LM709AH等产品。709在内部电路上的特点是以电阻作为放大级的负载,因此其增益还是不够高。为了进一步提高增益,仙童公司又推出了中规模集成运放 $\mu A741$,它的特点是内部电路采用了恒流源作为放大级的负载,使增益得以大大提高。 $\mu A741$ 的输入级虽然采用了两级差分电路串接的形式,其输入阻抗比采用普通差分电路作为输入级的 $\mu A709$ 有所提高,但离理想输入阻抗值仍相差甚远。为了进一步提高输入阻抗,人们在传统工艺流程的基础上又增加了一些工序,制造出超 β 晶体管($\beta=1000\sim 5000$)作为集成运放中差分输入级的放大管,如美国摩托罗拉公司的MC1556和我国的4E325等产品。为了多方面提高集成运放的性能,于20世纪70年代又出现了大规模集成运放,如日本日立公司的HA2900和我国的5G7650等产品,这类产品的内部电路采用了调制解调和自动稳零技术,且既有场效应管,又有双极型三极管,其性能特点是超低漂移、低失调、高增

益、高输入阻抗。此外,由于 MOS 管具有制造工艺简单、集成度高、功耗低等优点,超大规模全 MOS 集成运放也由此而诞生。

以上介绍的是在一个芯片中只集成一个运放的器件,还有在一个芯片中同时集成二个、甚至四个相同运放的器件,这样有助于简化电路、缩小体积,特别是要求多个电路性能参数对称时,选用多运放器件更具有优越性。

1.2 集成运放的应用基础

自从集成运放问世以来,它使工程技术人员从繁琐的分立元件电路的设计中解脱出来,集成运放性能优良、可靠,而且使用方便,因此它已成为电子电路设计者的首选器件。为了学习集成运放应用电路的工作原理,掌握集成运放的应用方法,在已学过了《电子技术基础》的前提下,首先明确下列基础知识是十分必要的。

1.2.1 集成运放的类型

集成运放品种繁多,其原因是由于它们的工作信号是模拟量,不易像数字集成电路那样系列化和标准化。但是,根据主要参数的某些特点,人们将它们分为通用型和专用型两大类。

通用型集成运放的特点是主要参数指标为一般。但是与分立元件组成的高增益直接耦合放大器相比较,各项指标都有很大提高。这种类型的集成运放价格低廉、品种多、应用面广,在无特殊要求的条件下,是优先选用的器件。

专用型集成运放是针对某一项或几项指标的特殊要求而设计的器件,如高速型、高压型、高精度型、宽带型、低功耗型等,主要应用于具有相应特殊要求的场合。

表 1.2.1 列出了不同类型集成运放的特点及应用范围。表 1.2.2 列出了部分集成运放的主要参数。

表 1.2.1 不同类型集成运放的主要特点及应用范围

类 型	主 要 特 点	应 用 范 围
通用型	各项指标一般	一般场合
高速型	转换速度高($S_R > 30V/\mu s$) 单位增益带宽大(大于 100MHz)	D/A、A/D、S/H、比较器、有源滤波、视频放大
高阻型	差模输入电阻大(大于 $10^9\Omega$) 输入偏置电流小(小于几十 pA)	D/A、A/D、S/H、有源滤波、测量放大
高压型	工作电压高(大于 40V)	伺服放大、功率放大、电源
高精度型	开环差模增益高($A_{od} \geq 120dB$) 共模抑制比高($K_{CMR} \geq 110dB$) 低漂移($\Delta U_D/\Delta T < 2mV/^\circ C$, $\Delta I_{IO}/\Delta T < 200pA/^\circ C$)	微弱信号检测或放大
低耗型	电源电压为 $\pm 15V$ 时,最大功耗小于 6mW	空中、野外电池供电场合
宽带型	工作频带宽	高频电路、脉冲电路

集成运放的主要参数是制造厂用来衡量产品性能指标的方式,同时也是电路设计者根据电路的具体设计要求正确选用器件的参考依据。表 1.2.2 中所列参数的含义在《电子技术基础》中已经介绍,在此不再重复。

由于集成运放的品种繁多,这对初学初用者来说会觉得眼花缭乱,因此,在选用器件时必须全面考虑。总的来说应注意两点:一是尽可能选用流行较广的器件,少用或不用“冷门货”,这样可减少以后维护、更新的麻烦;二是根据整机设备产品数量来选用,对于大批量生产的产品,在保证其性能指标的前提下,应尽可能降低成本,提高性价比,而对于小批量或急需产品,就不必苛求成本,应以保证性能为主。

表 1.2.2 集成运放典型产品的主要参数

主要参数名称	国内外同类产品符号单位	类型	通用型			专 用 型					
			I 型	II 型	III 型	高精度	低功能	高 阻	高 速	高 压	宽带
			F702	F709	F741	OP07	F253A	F3130	F715	F143	F507K
			F002	F005	F007						
			μ A702	μ A709	μ A741		μ PC253	μ A715	LM143	AD507	
输入失调电压	U_{IO} mV		0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	2	2.0	2.0	1.5
输入失调电流	I_{IO} nA		180	50	20	2.0	4	5×10^{-3}	70	1.0	15
输入偏置电流	I_{IB} nA		2000	200	80	42	20	5×10^{-3}	400	8.0	15
U_{IO} 的温漂	a_{UIO} μ V/ $^{\circ}$ C		2.5	6.0		2.0	3	10			8
I_{IO} 的温漂	a_{IIO} nA/ $^{\circ}$ C		3.0	35×10^{-3}							0.2
开环差模增益	A_{ol} dB		71	93	106	130	110	110	90	105	104
共模抑制比	K_{CMR} dB		100	90	90	120	100	90	92	80	100
输出电阻	r_o Ω		200	150	75	150		75	75		
最大共模输入电压	U_{km} V		+0.5, -4.0	±10	±13		±15	-0.5~+12	±12	±40	±11
最大差模输入电压	U_{ldm} V		±5	±5.0	±30	±14	±30	±8		80	±12
差模输入电阻	r_{id} M Ω		0.04	0.4	2.0	1.5	6		1.0	1.5×10^6	300
最大输出电压	U_{OPP} V		±4.0	±14	±14	±13.5	±13.5	13.3	±13	±37	±12
-3dB 带宽	f_H Hz				7						

续表 1.2.2

主要参数名称	单位	通用型			专用型					
		I型	II型	III型	高精度	低功能	高阻	高速	高压	宽带
		F702	F709	F741	OP07	F253A	F3130	F715	F143	F507K
		F002	F005	F007						
单位增益带宽	BW_G MHz	$\mu A702$	$\mu A709$	$\mu A741$		$\mu PC253$	$\mu A715$	LM143	AD507	
静态功耗	P_D mW	30		1		1	15	65	1.0	35
静态电流	I_D mA	90	80	50	80	0.6		165	680	
转换速率	S_R V/ μs	5.0		1.7		0.04		5.5	2.0	3.0
电源电压	V	+12, -6	± 15	± 15	± 15	± 15	+15, 0V	± 15	± 28	± 15
工作电压范围	V		$\pm 9 \sim \pm 18$			$\pm 3 \sim \pm 18$	5~16 或 $\pm 2.5 \sim \pm 18$		$\pm 4.0 \sim \pm 40$	$\pm 5 \sim \pm 20$

1.2.2 集成运放的工作特点

1. 集成运放是一个有源器件

大家知道,集成运放的内部电路是一个高增益的直接耦合放大器。在电子电路中,集成运放是作为一个有源器件使用的。除了这个有源器件外,它的外围电路通常还使用如电阻、电容、二极管等无源器件。根据所使用无源器件的方式不同,可以构成各种不同功能的模拟电路。只要使用得当,在保证集成运放正常工作的前提下,电路中输出信号与输入信号之间的关系就可由稳定的无源器件的参数值确定。

2. 集成运放具有两种工作状态

在电路中,运放的工作状态只有两种,即线性工作状态和非线性工作状态。线性工作状态指的是运放电路的输出信号与输入信号成线性关系,而非线性工作状态指的是运放电路的输出信号与输入信号不成线性关系。运放究竟工作在那种状态,则取决于外围电路的设计。

一个实际集成运放在开环条件下的传输特性如图 1.2.1(a)所示。其中 U_{o+} 和 U_{o-} 分别表示集成运放输出的正向饱和电压及负向饱和电压,在数值上近似等于运放的正负电源电压。由图可见,集成运放在开环条件下传输特性的线性范围内所对应净输入电压 ($U_+ - U_-$) 的允许变化量是极小的,这是因为运放的开环电压增益通常都很大所造成的必然结果。例如,设运放的开环电压增益 $A_{ol} = 10^6$, 输出电压饱和值 $U_o = \pm 10V$, 则运放的净输入电压 $U_+ - U_- = \pm 10V / 10^6 = \pm 10\mu V$ 。若净输入电压超过该值,运放将进入非线性工作状态。

为保证运放可靠工作于线性状态,通常利用外围电路引入深度负反馈,使闭环增益远

小于开环增益。即大大减小传输特性线性段的斜率,从而可使线性范围内所对应净输入电压的允许变化量增加,此时线性段的传输特性如图 1.2.1(b)所示。

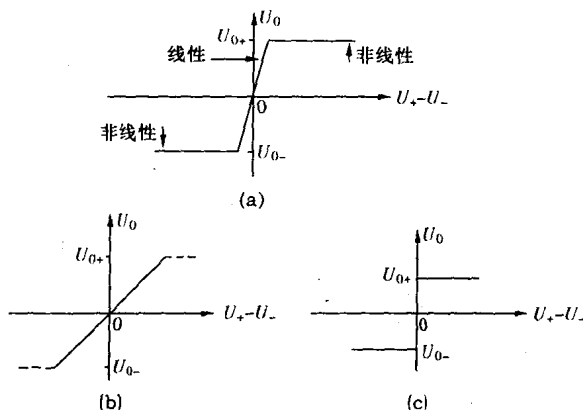


图 1.2.1 集成运放的传输特性

欲使运放工作于非线性状态,通常利用外围电路引入正反馈,或直接采用开环形式工作,此时的理想传输特性如图 1.2.1(c)所示。可见该传输特性没有线性段,而只有非线性段,而且输出电压 U_o 只有 U_{o+} 和 U_{o-} 两个饱和值,与净输入电压无线性关系。

1.2.3 理想集成运放的重要结论

在大多数情况下,可以将实际运放看成是理想运放,即将运放的各项技术指标理想化。满足下列条件的称为理想运放:

- 开环电压增益 $A_{ol} = \infty$
- 共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$
- 带宽 $BW = \infty$
- 输入电阻 $r_{id} = \infty$
- 输出电阻 $r_o = 0$

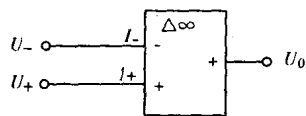


图 1.2.2 理想集成运放

理想运放如图 1.2.2 所示

1. 理想运放工作于线性状态的重要结论

由于输出电压与输入电压之间满足关系式:

$$U_o = A_{ol}(U_+ - U_-)$$

根据理想化条件 $A_{ol} = \infty$, 而 U_o 为有限值, 因此 $U_+ = U_-$, 即理想运放的两个输入端电位相等, 称为“虚短路”。

根据理想化条件 $r_{id} = \infty$, 因此 $I_+ = I_- = 0$, 即流进理想运放两个输入端的电流等于零, 称为“虚断路”。

2. 理想运放工作于非线性状态的重要结论

由于输出电压与输入电压之间的关系是:

$$U_o \neq A_{ol}(U_+ - U_-)$$

而 U_o 只等于 U_{o+} 或 U_{o-} 两种可能值。因此理想运放的两个输入端电位不一定相等, 有如

下三种情况。

$$\begin{cases} \text{当 } U_+ > U_- \text{ 时, } U_o = U_{o+} \\ \text{当 } U_+ < U_- \text{ 时, } U_o = U_{o-} \\ \text{当 } U_+ = U_- \text{ 时, } U_o \text{ 值跳变, 称为临界转换点} \end{cases}$$

而 $r_{id} = \infty$, 因此 $I_+ = I_- = 0$, 即流进理想运放两个输入端的电流仍等于零。

1.3 集成运放的基本应用

集成运放作为一种高增益的有源器件,被广泛应用于电子技术领域的各个方面。它不仅可以构成信号放大和运算电路,而且在信号的产生和处理等电路中也可以充分发挥其特有的长处。本节将讨论由集成运放构成的基本应用(即典型单元)电路,包括信号的放大、运算、产生和处理等类型的电路。要求在理解工作原理的基础上,重点掌握电路的分析及设计方法。

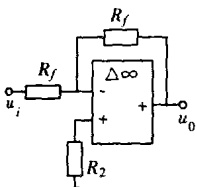
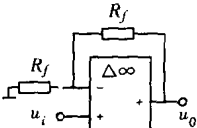
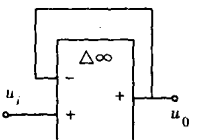
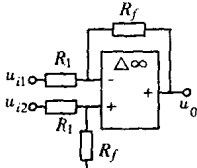
1.3.1 基本放大电路

1. 直接耦合基本放大电路及误差分析

1) 直接耦合基本放大电路

由理想集成运放组成的直接耦合基本放大电路包括反相放大、同相放大、电压跟随和差动放大等形式,其原理电路和输入、输出电压之间的关系如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 直接耦合基本放大电路

名称	反相放大器	同相放大器	电压跟随器	差动放大器
原理电路				
关系式	$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$	$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$	$u_o = u_i$	$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$
输入阻抗	R_1 (低)	∞	∞	∞
输出阻抗	0	0	0	0

2) 误差分析

实际的集成运放并非完全理想,因此由理想运放得出的计算公式将会带来一定的误差。下面以直接耦合反相放大电路为例,讨论非理想情况下所产生的误差以及为减小误差应采取的措施。对于直接耦合同相放大电路,其分析方法是类似的。

图 1.3.1 为直接耦合反相放大等效电路。为分析简便,假设运放的输出电阻 $r_o = 0$, 共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$ 。由图可以列出下列方程组:

$$I_i = \frac{U_i - U_-}{R_1} = I_f + \frac{U_-}{r_{id}} + I_{B1} \quad (1.3.1)$$

$$I_f = \frac{U_- - U_o}{R_f} \quad (1.3.2)$$

$$U_o = -A_{od}U_- \quad (1.3.3)$$

$$U_- = U_{I0} + U_{id} + \left(\frac{U_{id}}{r_{id}} - I_{B2} \right) R_2 \quad (1.3.4)$$

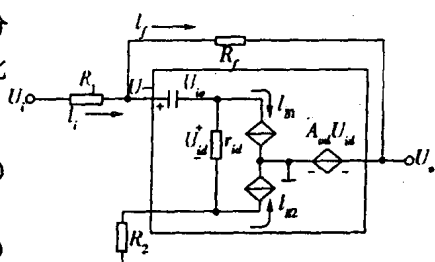


图 1.3.1 直接耦合反相放大等效电路

下面解方程组:将(1.3.2)代入式(1.3.1)得

$$\frac{U_i - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_o}{R_f} + \frac{U_-}{r_{id}} + I_{B1} \quad (1.3.5)$$

式(1.3.4)代入式(1.3.5)中,得

$$\frac{U_i - U_{I0} - U_{id} - \frac{U_{id}R_2}{r_{id}} + I_{B2}R_2}{R_1} = \frac{U_{I0} + U_{id} + \frac{U_{id}R_2}{r_{id}} - I_{B2}R_2 - U_o}{R_f} + \frac{U_{id}}{r_{id}} + I_{B1} \quad (1.3.6)$$

将式(1.3.6)两边乘以 R_f 并整理得

$$\begin{aligned} U_o = & -\frac{R_f}{R_1}U_i + I_{B1}R_f - I_{B2}R_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) + \\ & U_{I0} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) + U_{id} \left[\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right] \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

将式(1.3.3)代入式(1.3.7)中并整理得

$$U_o = \frac{-\frac{R_f}{R_1}U_i + I_{B1}R_f - I_{B2}R_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) + U_{I0} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)}{1 + \frac{1}{A_{od}} \left[1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right]} \quad (1.3.8)$$

可见,输出电压 U_o 不完全取决于 $-\frac{R_f}{R_1}U_i$, 还与运放的参数 A_{od} 、 r_{id} 、 I_B 、 U_{I0} 等有关。

(1) $A_{od} \neq \infty$ 和 $r_{id} \neq \infty$ 所引起的误差

在式(1.3.8)中,令 $I_{B1} = 0$, $I_{B2} = 0$, $U_{I0} = 0$, 则

$$U_o = \frac{-\frac{R_f}{R_1}U_i}{1 + \frac{1}{A_{od}} \left[1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right]}$$

因此,实际闭环电压放大倍数为

$$A'_{uf} = \frac{-\frac{R_f}{R_1}}{1 + \frac{1}{A_{od}} \left[1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right]}$$

与理想闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1}$$

相比可知,不完全由外围电阻 R_f 和 R_1 决定,还与 A_{ud} 和 r_{id} 有关。为减小误差,应尽可能选用 A_{ud} 和 r_{id} 大的运放。此外,采用较小的比值 R_f/R_1 ,也有利于减小误差,但闭环电压放大倍数也随之减小,所以在 A_{ud} 和 r_{id} 一定的条件下,减小误差是要以减小闭环电压放大倍数为代价的。

[例 1.3.1] 在直接耦合反相放大电路中,已知 $R_1=1\text{k}\Omega$, $R_f=50\text{k}\Omega$, $R_2=R_1//R_f=0.98\text{k}\Omega$ 。①计算理想闭环电压放大倍数 A_{uf} ; ②若 $r_{id}=50\text{k}\Omega$, $A_{ud}=10^4$, 计算实际闭环电压放大倍数 A'_{uf} ; ③计算相对误差 $\frac{A_{uf}-A'_{uf}}{A_{uf}}$ 。

解:①理想闭环电压放大倍数

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1} = -50$$

② $r_{id}=50\text{k}\Omega$, $A_{ud}=10^4$ 时,实际闭环电压放大倍数

$$A'_{uf} = \frac{-\frac{R_f}{R_1}}{1 + \frac{1}{A_{ud}} \left[1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \right]} = -49.692$$

③相对误差

$$\frac{A_{uf}-A'_{uf}}{A_{uf}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{ud}} \left[1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{r_{id}} + \frac{R_2}{r_{id}} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \right]} = 0.616\%$$

此例说明, A'_{uf} 与 A_{uf} 是很接近的,其相对误差通常在千分之几以下,因此为了分析方便,常将实际运放的 A_{ud} 和 r_{id} 按满足理想运放的条件来处理。

(2) 输入偏置电流 I_B 所引起的误差

在式(1.3.8)中,令 $A_{ud}=\infty$, $U_{i0}=0$, $I_{B1}=I_{B2}=I_B$, 则

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i + I_B \left(R_f - R_2 \frac{R_1 + R_f}{R_1} \right)$$

上式中,第二项为误差项,若选择

$$R_2 = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$$

则误差项

$$I_B \left(R_f - R_2 \frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) = 0$$

(3) $U_{i0} \neq 0$ 和 $I_{i0} \neq 0$ 所引起的误差

在式(1.3.8)中,令 $A_{ud}=\infty$, 则

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i + I_{B1} R_f - I_{B2} R_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) + U_{i0} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

又由于输入失调电流的定义为 $I_{i0}=I_{B1}-I_{B2}$, 即 $I_{B1}=I_{i0}+I_{B2}$, 代入上式并整理得

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i + I_{i0} R_f + I_{B2} \left(R_f - R_2 \frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) + U_{i0} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

若选择 $R_2 = R_1 // R_f$ 时, 上式可改写为

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1}U_i + I_{IO}R_f + U_{IO}\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) = -\frac{R_f}{R_1}U_i + U'_o$$

其中, $U'_o = I_{IO}R_f + U_{IO}\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$, 为 U_{IO} 和 I_{IO} 在输出端所引起的误差电压。若将 U'_o 折算到输入端, 则得到 U_{IO} 和 I_{IO} 在输入端所引起的误差电压为

$$U'_i = \left| \frac{U'_o}{A_{uf}} \right| = \frac{1}{|A_{uf}|} \left[I_{IO}R_f + U_{IO}\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right]$$

在实际应用中, 通常可采用调零电路来消除 U_{IO} 和 I_{IO} 所引起的误差, 但这不能消除它们的温漂所引起的误差。由上式不难写出 U_{IO} 和 I_{IO} 在输入端所引起误差电压的温漂为:

$$\frac{dU'_i}{dT} = \frac{1}{|A_{uf}|} \left[R_f \frac{dI_{IO}}{dT} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{dU_{IO}}{dT} \right]$$

可见为了减小失调误差, 一方面要选用 U_{IO} 和 I_{IO} 及其温漂小的运放, 同时应采用较大的 A_{uf} 值, 而 R_f 的值则应当较小为好。

【例 1.3.2】在直接耦合反相放大电路中, 已知集成运放是 5G23, 它的 $I_B = 2\mu A$, $I_{IO} = 0.2\mu V$, $dI_{IO}/dT = 10nA/^{\circ}C$, $U_{IO} = 5mA$, $dU_{IO}/dT = 5\mu V/^{\circ}C$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_f = 1M\Omega$, $R_2 = R_1 // R_f$ 。①计算 U_{IO} 和 I_{IO} 在输入端引起的误差电压 U'_i ; ②温度变化 $20^{\circ}C$ 时, 计算 $\Delta U'_i$ 。

解: ①由于

$$A_{uf} = -\frac{R_f}{R_1} = -100$$

所以输入端误差电压为

$$U'_i = \frac{1}{|A_{uf}|} \left[I_{IO}R_f + U_{IO}\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \right] = 7.05mV$$

②输入端误差电压的温漂为

$$\frac{dU'_i}{dT} = \frac{1}{|A_{uf}|} \left[R_f \frac{dI_{IO}}{dT} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{dU_{IO}}{dT} \right] = 0.06mV/^{\circ}C$$

则温度变化 $20^{\circ}C$ 时, 温漂所引起的误差电压为:

$$\Delta U'_i = \frac{dU'_i}{dT} \Delta T = 0.06 \times 20 = 1.2mV$$

计算表明, U_{IO} 和 I_{IO} 所引起的误差电压是相当可观的, 它限制了电路能够放大的最小信号(即分辨率)。在本例中, 若要求达到 1% 的运算精度, 则输入信号至少要大于 $U'_i / 0.01 = 705mV$ 。所以为了放大小信号, 必须采用调零电路并精心调零来消除它的影响。假设只考虑温漂所引起的误差, 则输入电压至少要大于 $\Delta U'_i / 0.01 = 120mV$ 。可见本例电路所选用的运放 5G23 不能满足放大微小信号的要求。若要放大微小信号, 必须选用 U_{IO} 和 I_{IO} 及其温漂更小的集成运放。

以上分析了集成运放的 A_{uf} 、 r_{id} 、 I_{IO} 、 U_{IO} 在不理想情况下所引起的误差, 并提出了减小误差的方法。当然其它参数在不理想情况下也会产生误差, 在此不一一讨论。

2. 电容耦合基本放大电路

直接耦合放大电路可以放大直流和交流信号, 但容易受 I_B 、 I_{IO} 、 U_{IO} 等直流参数的影