



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

◎ 电子信息科学与工程类专业 规划教材

集成电路 原理及应用

(第3版)

◎ 谭博学 苗汇静 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息科学与工程类专业规划教材

集成电路原理及应用

(第3版)

谭博学 苗汇静 编著
刘 伟 王富奎 唐 诗 李震梅 刘连鑫 参编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书较系统地介绍了各类集成电路的原理及其应用,内容包括:集成运放的基础知识、模拟集成电路的线性应用、模拟集成电路的非线性应用、集成变换器及其应用、集成信号发生器、集成有源滤波器、集成稳压电源、语音和图像集成电路、数字集成电路及应用、可编程逻辑器件和实验部分。

本书对各类集成电路的基本特点、基本原理和基本分析方法作了简明扼要的论述,结合每部分内容,理论联系实际,从国内外著作和期刊杂志中精选了许多实际应用电路。每章后附有思考题与习题。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《集成电路原理及应用(第2版)》的再版。本书内容丰富,实用性强,可作为高等院校电气与电子信息类专业的教材,也可作为电子与电气类科研人员和工程技术人员的参考书。

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

集成电路原理及应用 / 谭博学, 苗汇静编著. —3版. —北京: 电子工业出版社, 2011.6

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-13812-6

I. ①集… II. ①谭… ②苗… III. ①集成电路—高等学校—教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 110092 号

责任编辑: 凌 毅

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 20 字数: 512 千字

印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 35.00 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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

第3版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《集成电路原理及应用(第2版)》的再版。

本书是在第2版的基础上,根据近几年集成电路技术的发展情况和高等教育教学改革的需要修订而成的。

本书在以下几方面做了改动:

- (1)增加了第11章 实验,编写了实验指导书,开发研制了实验箱。
- (2)将原8.4节删去,改写为8.4节 数字电视图像处理集成电路。
- (3)对7.2节进行了修改。
- (4)对第3章、第4章、第6章、第8章、第9章的部分内容做了适当修改和删减。
- (5)对本书其余部分做了适当修改。

本书较系统地介绍了各类集成电路的原理及其应用,包括11章内容,涉及面广,涵盖了集成电路的大部分应用方面。该书对各类集成电路的基本特点、基本原理和基本分析方法作了简明扼要的论述,结合每部分内容,理论联系实际,从国内外著作和期刊杂志中精选了许多实际应用电路。每章后都附有思考题与习题。本书具有以下特点:① 根据各类集成电路的特点,在编写方法上采用了多种模式,理论与实际相结合;② 电路原理与器件特性紧密结合,使器件与电路融为一体,以便于读者学习和查阅;③ 既有对常用集成电路工作原理和分析方法的论述,又有最新集成电路芯片介绍和实际应用电路;④ 内容丰富,涉及面广,实用性强;⑤ 配有实验指导书。

本书可作为高等院校电气与电子信息类专业的教材,全书内容以电路、模拟电子技术、数字电子技术和高频电子线路为基础。给本科生讲授约需54学时,再配合约10学时的实验,以提高学生的动手能力。各院校可根据不同专业方向的需要,适当增减讲授内容。本书也可作为电子与电气类科研人员和工程技术人员的参考书。

本书由谭博学、苗汇静拟订编写大纲和编写目录。谭博学负责总体安排和电路图的编辑工作,编写第1章、第2章;苗汇静编写第3章、第6章、第11章和8.1节、8.2节、8.3节、8.5节;刘伟编写第5章、10.3节、10.4节、10.5节;王富奎编写第7章和8.4节;唐诗编写第4章;李震梅编写第9章;刘连鑫编写10.1节、10.2节。

在本书的编写过程中,参考了大量的国内外著作和期刊杂志,参考了书后所列参考文献的一些编写思想和习题,在此向这些作者致以衷心的感谢。

本书的出版得到了电子工业出版社凌毅编辑的支持,在此深表感谢。

由于编者水平有限,错误和不足之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 著 者
2011年4月
于山东理工大学

第2版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,《集成电路原理及应用》(电子工业出版社,2003年)的第2版。

本书是在第1版的基础上,根据近几年集成电路技术的发展情况和高等教育教学改革的需要修订而成。

本书在以下几方面做了改动:

(1) 增加第9章 数字集成电路及应用部分。

(2) 重新编写第10章 可编程逻辑器件部分,增加10.3节,复杂可编程逻辑器件(CPLD);增加10.4节,现场可编程逻辑器件(FPGA);增加10.5节,CPLD/FPGA器件的编程与开发。

(3) 重新编写第5章 集成信号发生器部分,增加5.2节,直接数字频率合成技术;增加5.3节,基于FPGA的DDS任意波形发生器。

(4) 增加6.7节,可编程滤波器部分。

(5) 重新编写第7章和4.5节、4.6节。

(6) 对本书其余部分做了适当修改和删减。

本书较系统地介绍各类集成电路的原理及其应用,包括10章内容,涉及面广,涵盖了集成电路的大部分应用方面。该书对各类集成电路的基本特点、基本原理和基本分析方法做了简明扼要的论述,结合每部分内容,理论联系实际,从国内外著作和期刊杂志中精选了许多实际应用电路。每章后都附有思考题与习题。本书具有以下特点:①根据各类集成电路的特点,在编写方法上采用多种模式,理论与实际相结合;②电路原理与器件特性紧密结合,使器件与电路融为一体,以便于读者学习和查阅;③既有对常用集成电路工作原理和分析方法的论述,又有最新集成电路芯片的介绍和实际应用电路;④内容丰富,涉及面广,实用性强。

本书可作为高等院校电子与电气类专业的教材,全书内容以电路、模拟电子技术、数字电子技术和高频电子线路为基础。给本科生讲授可安排64学时,其中讲课54学时,实验10学时。各院校可根据不同专业方向的需要,适当增减讲授内容。本书也可作为电子与电气类科研人员和工程技术人员的参考书。

本书由谭博学、苗汇静拟订编写大纲和编写目录。谭博学负责总体安排和电路图的编辑工作,编写第1~2章;苗汇静编写第3,6,8章;唐诗编写第4章;刘伟编写第5章、第10.3~10.5节;王富奎编写第7章;李震梅编写第9章;刘连鑫编写第10.1~10.2节。在本书编辑过程中,山东理工大学电气与电子工程学院2005级的李顺和刘清风为本书的图形编辑做了许多工作,在此向两位学生表示感谢。

在本书的编写过程中,参考了大量的国内外著作和期刊杂志,参考了书后所列参考文献的一些编写思想和习题,在此向这些作者致以衷心的感谢。

本书的出版得到了电子工业出版社凌毅编辑的支持,在此深表感谢。

由于编者水平有限,错误和不足在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 者
2008年1月
于山东理工大学

本书常用符号说明

一、基本符号

A_{uc}	共模电压增益
A_{ud}	开环差模电压增益
A_F	闭环增益
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压增益
CMRR	共模抑制比
E_m	电压比较器的门限电位
E_{mH}	电压比较器的上门限电位
E_{mL}	电压比较器的下门限电位
ΔE_m	电压比较器的门限宽度
F	反馈系数
f_c	截止频率
GBW	增益带宽积
$G(s)$	传输函数
$G(\omega)$	幅频特性
g_m	跨导
I	电流的通用符号,交流电流有效值
$\dot{I}$	正弦交流电流的相量符号
I_B	基极直流电流
I_{IB}	输入偏置电流
$I_{IB+}、I_{IB-}$	集成运放输入端的两个偏置电流
I_b	基极电流有效值
I_C	集电极直流电流
I_c	集电极电流有效值
I_{CM}	集电极最大允许电流
I_D	二极管直流电流
I_E	发射极直流电流
I_e	发射极电流的有效值
I_f	反馈电流
I_o	输出电流
I_{∞}	输入失调电流
$I_{\infty}/\Delta T$	输入失调电流温度系数

i	电流通用符号,电流的瞬时值
i_B	基极瞬时电流总值
i_b	基极交流电流值
i_C	集电极瞬时电流总值
i_c	集电极交流电流值
i_o	输出电流瞬时值
P	功率,平均功率
PSRR	电源电压抑制比
Q	品质因数
R_b	基极电阻
R_c	集电极电阻
R_{ic}	共模输入电阻
R_{id}	差模输入电阻
R_e	发射极电阻
R_f	反馈电阻
R_i	输入电阻
R_{ie}	等效输入电阻
R_{L_i}	负载电阻
R_o	输出电阻
R_{∞}	等效输出电阻
S_R	电压转换速率
T	周期
T	热力学温度
t	时间
t	温度
t_w	脉冲宽度
U	电压通用符号,交流电压有效值
$\dot{U}$	正弦交流电压的相量符号
U_{BE}	基极-发射极直流电压
U_{CE}	集电极-发射极直流电压
U_T	温度电压当量
U_D	二极管的正向导通电压
U_i	输入电压
U_{ic}	共模输入电压

U_{id}	差模输入电压	Z_{ic}	共模输入阻抗
U_o	输出电压	Z_{id}	差模输入阻抗
U_{oCM}	共模输出电压	Z_o	输出阻抗
U_{on}	输入失调电压	β	共射电流放大系数
$\Delta U_{os}/\Delta T$	输入失调电压温度系数	γ	误差
U_{ref}	基准电压,参考电压	δ	占空比
U_Z	稳压管稳定电压	ω	角频率
$U_+(u_+)$	集成运放同相端输入电压	ω_c	截止角频率
$U_-(u_-)$	集成运放反相端输入电压	ω_H	上限角频率
u	电压通用符号,电压的瞬时值	ω_L	下限角频率
u_{BE}	基极-发射极瞬时总电压	$\varphi(\omega)$	相频特性
u_{be}	基极-发射极瞬时电压交流分量	二、器件符号	
u_{CE}	集电极-发射极瞬时总电压	A	集成运放
u_{ce}	集电极-发射极瞬时电压交流分量	C	电容器
u_f	反馈电压	IC	集成块
u_i	输入电压瞬时值	L	电感器
u_o	输出电压瞬时值	R	电阻器
u_s	交流电压源电压瞬时值	R_p	电位器
V_{CC}	集电极回路电源电位	VD	二极管
V_{EE}	发射极回路电源电位	VD_Z	稳压二极管
V_{DD}	漏极回路电源电位	VT	三极管
		VT	场效应管

目 录

第1章 集成运放的基础知识	1
1.1 集成运放的基本组成电路	1
1.1.1 差动输入电路	1
1.1.2 恒流源电路	6
1.1.3 有源负载电路	8
1.1.4 双端变单端电路	9
1.1.5 直流电平位移电路	9
1.1.6 互补推挽输出电路	9
1.2 集成运放的基本构成和表示符号	11
1.2.1 集成运放的基本构成	11
1.2.2 通用型集成运放内部电路简介	12
1.2.3 集成运放的表示符号及其引出端	14
1.3 集成运放的主要参数和分类	15
1.3.1 集成运放的主要直流参数	15
1.3.2 集成运放的主要交流参数	17
1.3.3 集成运放的分类	19
1.4 集成运放的等效模型	21
1.4.1 集成运放的实际等效模型	21
1.4.2 理想集成运放的等效模型	22
1.5 实际运放与理想运放的误差	22
1.5.1 A_d 为有限值时实际运放和理想运放的误差	23
1.5.2 A_c 为有限值时实际运放和理想运放的误差	23
1.5.3 U_{os} 不为零时实际运放和理想运放的误差	24
1.6 运放电路的稳定性及其判断	25
1.6.1 闭环自激振荡产生的条件	25
1.6.2 集成运放闭环稳定性判据	25
1.7 集成运放的相位补偿技术	27
1.7.1 滞后相位补偿	28
1.7.2 超前相位补偿	30
1.7.3 引起集成运放闭环工作不稳定的其他因素	31
思考题与习题	32
第2章 模拟集成电路的线性应用	33
2.1 模拟集成电路的基本放大电路	33
2.1.1 反相放大器	33
2.1.2 同相放大器	36
2.1.3 差动放大器	38
2.2 积分电路	40
2.2.1 基本积分电路及其理想特性	40
2.2.2 U_{os} , I_{in} 及其漂移对积分电路的影响	42
2.2.3 集成运放的增益和带宽对积分电路的影响	43
2.2.4 积分电路的保持误差	43
2.2.5 几种典型的积分电路	44
2.3 微分电路	45
2.3.1 基本微分器及其理想微分特性	45
2.3.2 微分器的实际微分特性	46
2.3.3 几种典型的微分电路	47
2.4 集成仪器放大器	48
2.4.1 集成仪器放大器的工作原理	49
2.4.2 集成仪器放大器的特性及其应用	50
2.5 动态校零型斩波放大器	53
2.5.1 动态校零型斩波放大器的一般技术	53
2.5.2 动态校零型斩波放大器的工作原理	54
2.5.3 HA2900型动态校零型斩波集成运放介绍	55
思考题与习题	58
第3章 模拟集成电路的非线性应用	60
3.1 对数器和指数器	60
3.1.1 对数器	60

3.1.2 指数器	62	4.4 精密 T/I 和 T/U 变换器	111
3.1.3 集成化的对数器和指数器	63	4.4.1 AD590T/I 变换器	111
3.2 乘法器及其应用	64	4.4.2 LM135/235/335T/U 变换器	114
3.2.1 乘法器的基础知识	65	4.5 D/A 转换器	116
3.2.2 乘法器的工作原理	66	4.5.1 D/A 转换器的特性与技术 指标	116
3.2.3 模拟乘法器的应用电路	68	4.5.2 12 位串行 D/A 转换器 DAC7512	117
3.3 二极管检波器和绝对值变换器	72	4.5.3 16 位 D/A 转换器 PCM54	119
3.3.1 二极管检波器	73	4.6 A/D 转换器	120
3.3.2 绝对值检波电路	74	4.6.1 A/D 转换器的主要技术 指标	120
3.4 限幅器	77	4.6.2 并行 A/D 转换器 AD574	121
3.4.1 二极管并联式限幅器	77	4.6.3 16 位串行 A/D 转换器 MAX195	123
3.4.2 二极管串联式限幅器	78	思考题与习题	125
3.5 二极管函数变换器	80	第 5 章 集成信号发生器	127
3.5.1 串联限幅型二极管函数 变换器	80	5.1 模拟集成函数发生器	127
3.5.2 并联限幅型二极管函数 变换器	81	5.1.1 由集成运放构成的方波和 三角波发生器	127
3.5.3 线性检波型二极管函数 变换器	82	5.1.2 由 ICL8038 构成的集成函数 发生器	128
3.6 电压比较器及其应用	84	5.1.3 由 MAX038 构成的集成函数 发生器	132
3.6.1 电压比较器的性能	84	5.2 直接数字频率合成技术	134
3.6.2 单限电压比较器	85	5.2.1 DDS 的基本原理	135
3.6.3 迟滞电压比较器	87	5.2.2 DDS 的基本参数计算公式	135
3.6.4 窗口电压比较器	89	5.2.3 DDS 各部分的具体参数	135
3.6.5 电压比较器的应用举例	90	5.2.4 DDS 芯片 AD9852	136
思考题与习题	92	5.2.5 由 AD9852 构成的信号 发生器	138
第 4 章 集成变换器及其应用	94	5.3 基于 FPGA 的 DDS 任意波形 发生器	140
4.1 阻抗变换器	94	思考题与习题	141
4.1.1 负阻抗变换器	94	第 6 章 集成有源滤波器	142
4.1.2 阻抗模拟变换器	95	6.1 概述	142
4.1.3 模拟电感器	96	6.1.1 滤波器的分类	142
4.1.4 电容倍增器	97	6.1.2 集成有源滤波器的特点	142
4.2 U/I 变换器和 I/U 变换器	98	6.1.3 典型滤波器的传递函数	143
4.2.1 接地负载的 U/I 变换器	98	6.1.4 传递函数的幅度近似	144
4.2.2 精密 U/I 变换器	100	6.1.5 有源滤波器的设计步骤	146
4.2.3 精密 I/U 变换器	103		
4.3 U/F 变换器和 F/U 变换器	104		
4.3.1 VFC100 同步型 U/F, F/U 变换器	105		
4.3.2 LMx31 系列 U/F, F/U 变换器	107		

6.2 低通滤波器	146	7.2 新型低压差集成稳压器	181
6.2.1 一阶低通滤波器	146	7.2.1 新型低压差 78 系列/MIC5156 的应用	181
6.2.2 二阶低通滤波器	147	7.2.2 单片机用低压差稳压器	182
6.2.3 高阶低通滤波器	148	7.3 开关型稳压电源	184
6.2.4 低通滤波器的应用电路	150	7.3.1 开关电源的基本原理和 类型	184
6.3 高通滤波器	150	7.3.2 脉宽调制式开关电源原理	189
6.3.1 一阶高通滤波器	150	7.3.3 笔记本电脑中的开关稳压 电源	189
6.3.2 二阶高通滤波器	151	7.3.4 大屏幕彩色电视机开关 电源	193
6.3.3 高通滤波器的应用电路	152	7.4 新型单片开关电源	195
6.4 带通滤波器	153	7.4.1 单片开关电源的基本原理	195
6.4.1 无限增益多反馈环型带通 滤波器	153	7.4.2 单片开关电源的典型应用	198
6.4.2 宽带滤波器	154	思考题与习题	202
6.4.3 带通滤波器的应用电路	155	第 8 章 语音和图像集成电路	203
6.5 带阻滤波器	156	8.1 收音机集成电路	203
6.5.1 窄带阻滤波器(或陷波器)	157	8.1.1 收音机的基础知识	203
6.5.2 宽带阻滤波器	158	8.1.2 AM 收音机集成电路	204
6.5.3 带阻滤波器的应用电路	158	8.1.3 FM 收音机集成电路	206
6.6 开关电容滤波器和状态变量 滤波器	159	8.1.4 FM/AM 收音机集成电路	206
6.6.1 SCN 的基本工作原理	160	8.2 语音集成电路	207
6.6.2 开关电容滤波器	161	8.2.1 语音录放集成电路	207
6.6.3 开关电容滤波器的应用及 限制	163	8.2.2 语音识别集成电路	213
6.6.4 状态变量滤波器	163	8.3 功放集成电路	215
6.7 可编程滤波器	165	8.3.1 小功率音频功放集成电路	215
6.7.1 可编程滤波器 MAX260 系列 芯片简介	165	8.3.2 双声道功放集成电路	216
6.7.2 采用 MAX260 系列芯片设计 滤波器的流程	167	8.3.3 新型“傻瓜”功放模块	218
6.7.3 基于 MAX262 的程控滤波器 设计实例	167	8.4 数字电视图像处理集成 电路	219
思考题与习题	171	8.4.1 平板电视(FPD)接收机的 组成	219
第 7 章 集成稳压电源	173	8.4.2 数字信号接收处理集成电路 Sil9021-HDMI	222
7.1 线性集成稳压器	173	8.5 家庭影院集成电路	226
7.1.1 线性集成稳压器的基本 结构	173	8.5.1 家庭影院的基础知识	226
7.1.2 集成稳压器的参数	174	8.5.2 高品质音调均衡集成电路	227
7.1.3 集成稳压器的分类及使用 注意事项	175	8.5.3 虚拟杜比环绕声解码集成 电路	228
7.1.4 三端集成稳压器	175	8.5.4 高保真 BBE 音质增强集成 电路	228
7.1.5 三端可调输出稳压器	179		

思考题与习题	230	10.2.2 PAL 的输出和反馈结构	270
第 9 章 数字集成电路及应用	231	10.2.3 GAL 器件的基本结构	273
9.1 数字集成电路的分类与特性	231	10.3 复杂可编程逻辑器件 (CPLD)	276
9.1.1 数字集成电路的分类	231	10.3.1 CPLD 的基本结构	276
9.1.2 数字集成电路的一般特性	232	10.3.2 CPLD 常用器件型号	278
9.1.3 使用数字集成电路的注意事项	233	10.4 现场可编程逻辑器件 (FPGA)	279
9.2 集成逻辑门电路和中规模组合逻辑电路	234	10.4.1 FPGA 的基本结构	279
9.2.1 集成逻辑门电路及应用	234	10.4.2 FPGA 常用器件型号	282
9.2.2 中规模组合逻辑电路	238	10.5 CPLD/FPGA 器件的编程与开发	282
9.3 中规模时序逻辑集成电路	245	10.5.1 CPLD/FPGA 器件的开发过程	282
9.3.1 集成触发器和锁存器	245	10.5.2 CPLD/FPGA 器件的配置方法	282
9.3.2 集成移位寄存器	249	10.5.3 CPLD/FPGA 应用举例	285
9.3.3 集成计数器	250	思考题与习题	286
9.3.4 十进制加/减/译码/锁存驱动电路 CD40110 及其应用	253	第 11 章 实验	287
9.3.5 4 位十进制定时/减法计数集成电路 TEC9410 及应用	256	11.1 “集成电路原理及应用”实验箱使用说明	287
9.3.6 多功能程控彩灯 CD71061P 及其应用	257	11.2 实验指导	288
9.4 集成定时器及其应用	259	实验 1——积分器和微分器 ($\mu A741$)	288
9.4.1 集成定时器	259	实验 2——仪器放大器和差动放大器 (OPA2111、INA106)	290
9.4.2 多谐振荡器	261	实验 3——电压比较器 (LM311)	293
9.4.3 单稳态触发器	262	实验 4——U/F 变换器和 F/U 变换器 (LM331)	295
思考题与习题	263	实验 5——函数信号发生器 (ICL8038)	299
第 10 章 可编程逻辑器件	265	实验 6——集成有源滤波器 (MAX275)	301
10.1 可编程逻辑器件基础	265	实验 7——集成稳压电源 (LM78XX、LM79XX、LM317)	305
10.1.1 可编程逻辑器件的基本结构	265	实验 8——集成音频功率放大器 (TDA2822)	307
10.1.2 可编程逻辑器件的分类及特点	265	参考文献	309
10.1.3 PLD 的电路结构及其表示方法	266		
10.2 可编程阵列逻辑 PAL 和 GAL 的原理与应用	270		
10.2.1 PAL 器件的基本结构	270		

第1章 集成运放的基础知识

集成运算放大器 IC Operational Amplifier(缩写为 OP-Amp) 简称为集成运放,它是 20 世纪 60 年代发展起来的一种高增益直接耦合放大器。随着集成电路的发展,集成运放与其他集成电路一样,经历了小规模、中规模、大规模和超大规模集成电路的发展阶段。集成运放是目前模拟集成电路中发展最快、品种最多、应用最广泛的一种模拟集成电子器件。集成运放配上不同的外围器件,可以构成功能和特性完全不同的各种集成运放电路,简称为运放电路,运放电路是各种电子电路中最基本的组成部分。集成运放及运放电路在电子技术、计算机技术、测量技术、自动控制、广播通信、仪器仪表、雷达电视、航空航天等各个领域中有极其广泛的用途,而且随着集成运放性能的不断提 高,品种的不断 增加,将会使某些领域的面貌焕然一新。

全面了解集成运放需要涉及半导体材料、微电子技术和集成电路制造工艺等许多方面的知识。集成运放电路的设计和制造是一个专业性很强的技术领域,对于大部分从事集成运放应用的工作人员来说,主要是将集成运放作为电路的一个基本器件,从它的外部特性去了解、掌握和应用它。本章主要介绍有关集成运放的基础知识和基本理论。

1.1 集成运放的基本组成电路

集成运放是由各个单元电路组成的,品种繁多的集成运放内部电路,不仅结构有很多相似之处,而且许多集成运放所用的单元电路的性能也很接近。

本节简要介绍差动输入电路、恒流源电路、有源负载电路、双端变单端电路、直流电平位移电路、互补推挽输出电路等单元电路,它们是集成运放的基本组成电路。

1.1.1 差动输入电路

1. 差动放大电路的基本特性

图 1-1-1 所示为差动放大电路的基本形式。它是由两个完全对称的共射电路组成的,晶体管 VT_1 和 VT_2 完全匹配,集电极电阻 $R_{c1} = R_{c2} = R_c$ 。

当输入状态不同时,差动放大器的工作情况也有所不同。下面分别予以说明。

(1) 输入差模信号时(即 $u_{i1} = -u_{i2}$)

① 电压增益和输入电阻

这种输入方式的 u_{i1} 与 u_{i2} 相位相反,所以流经 VT_1 , VT_2 的电流变化相位也相反。由于 u_{i1} 与 u_{i2} 幅度相同,则 VT_1 , VT_2 两管电流将有相同的变化幅度。因此,射极电阻 R_e 中的电流变化为零。所以当差模信号输入时,差动放大器的交流等效电路如图 1-1-2 所示。

此时 VT_1 , VT_2 均相当于普通的共射单管放大器。显然,当电路两边完全对称时,两管输出电压的相位相反,幅度相等。因此上述电路对称输出(也称差分输出)时的电压增益为

$$A_{ud} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = A_u \quad (1-1-1)$$

式中, A_u 是单管共射放大器的电压增益。

若是单端输出,该电路的电压增益将减半。

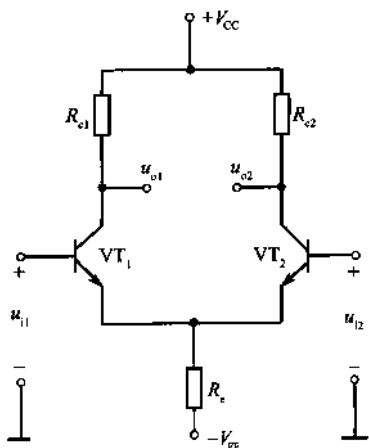


图 1-1-1 差动放大电路的基本形式

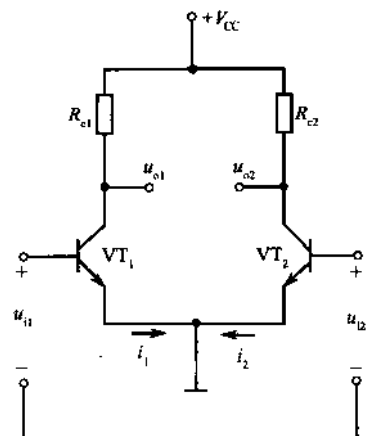


图 1-1-2 差模信号输入时，差动放大器的交流等效电路

图 1-1-3 所示为单管共射放大器的低频小信号等效电路，可求得单管共射放大器的电压增益为

$$A_u = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \quad (1-1-2)$$

式中， R_L 是放大器的负载电阻。

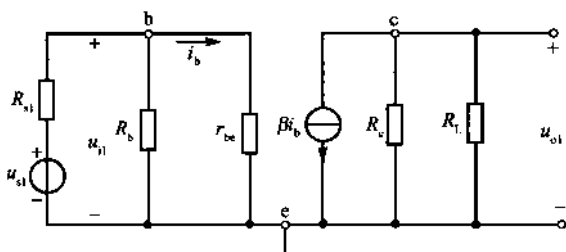


图 1-1-3 单管共射放大器的低频小信号等效电路

单管共射放大器的源电压增益为

$$A_{us1} = \frac{r_i}{R_{s1} + r_i} A_u \quad (1-1-3)$$

$$r_i = R_b // r_{be} = \frac{R_b r_{be}}{R_b + r_{be}} \quad (1-1-4)$$

式中， r_i 是单管共射放大器的输入电阻， R_{s1} 是信号源 u_{s1} 的内阻， R_b 是放大器的基极偏置电阻。

当电路两边不对称时，两边输出信号将不平衡。但可以证明，只要 R_c 取得足够大，就能有效地克服这种不平衡性。

差模输入时，放大器两输入端之间的差模输入电阻 R_d 是单管放大器的 2 倍，即 R_d 为

$$R_d = 2(R_b // r_{be}) \quad (1-1-5)$$

在室温条件下，当 β 很大，信号源内阻很小时， R_d 可近似表示为

$$R_d \approx \frac{52(\text{mV})}{I_B} \quad (1-1-6)$$

式中， I_B 是三极管基极电流。

当三极管工作电流很小时，如在十几微安以下时，上式可改写为

$$R_d \approx \frac{80(\text{mV})}{I_B} \quad (1-1-7)$$

由上述两式,根据晶体管的基极电流值就可以估计放大器的输入电阻。

② 跨导

为了便于估算差动放大器的增益,常引入差动放大器跨导的概念。双极型三极管的跨导定义为三极管输出电流变化量与对应的 e-b 结电压之比。差动放大器的跨导定义为其输出差分电流变化量与对应的差模输入变化量之比。

为了计算跨导,可以利用三极管射极电流与 e-b 结电压的关系式(忽略三极管的基区宽度调制效应)

$$I_E = I_S(e^{\frac{qU_{BE}}{kT}} - 1) \quad (1-1-8)$$

式中, I_S 是晶体管的反向饱和电流。上式忽略了反偏的 b-c 结对 I_E 的影响。在通常情况下, $e^{\frac{qU_{BE}}{kT}} \gg 1$, 故上式可简化为

$$I_E \approx I_S e^{\frac{qU_{BE}}{kT}} \quad (1-1-9)$$

由此算得晶体管的跨导为

$$g_m = \frac{dI_c}{dU_{BE}} = \frac{qI_S}{kT} e^{\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)} = \frac{I_c}{U_T} \quad (1-1-10)$$

式中, U_T 为温度的电压当量,其表示式是

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (1-1-11)$$

式(1-1-10)表明三极管的跨导正比于集电极电流。

利用同样的方法,可推导出双极型差动放大器的等效跨导表示式为

$$g_m = \frac{d(I_{c1} - I_{c2})}{d(U_{BE1} - U_{BE2})} \Big|_{(U_{BE1} - U_{BE2})=0} = \frac{I_c}{U_T} \quad (1-1-12)$$

式中, I_c 为每单边三极管的集电极电流($I_c \approx \frac{1}{2}I_o$)。

式(1-1-12)表明,差动放大器在差动输入时,其跨导与单管时相同。由式(1-1-12)还可得

$$g_m = \frac{qI_c}{kT} \quad (1-1-13)$$

由此可得到差动放大器电压增益的近似式为

$$A_{ud} \approx -g_m(r_{oe} // R_c) \quad (1-1-14)$$

式中, r_{oe} 为三极管输入端交流开路时的输出电导的倒数。在室温情况下,可进一步近似为

$$A_{ud} \approx -20I_{o1}(r_{oe} // R_c) \approx -40I_c(r_{oe} // R_c) \quad (1-1-15)$$

式中, I_{o1} 为差动放大器的恒流源电流。

显然,放大器的电压增益与其工作电流成正比。若要提高电压增益,就应适当加大三极管的工作电流。

需要指出的是,差模输入的差动放大器的动态输入范围为 $2U_T$, 室温时其近似为 52mV (单管时 $U_T \approx 26\text{mV}$)。当输入信号大于此范围时,输出信号将出现非线性。

(2) 输入共模信号时(即 $u_{i1} = u_{i2}$)

此时 VT_1, VT_2 的信号电流沿同一方向变化,故流经 R_c 的电流将不为零。当电路完全对称时, VT_1, VT_2 中信号电流的幅值与相位完全相同(设为 i),则流经 R_c 的电流为 $2i$ 。由此,该电路可用图 1-1-4 进行等效,图 1-1-4 所示为共模输入的差动放大器电路。

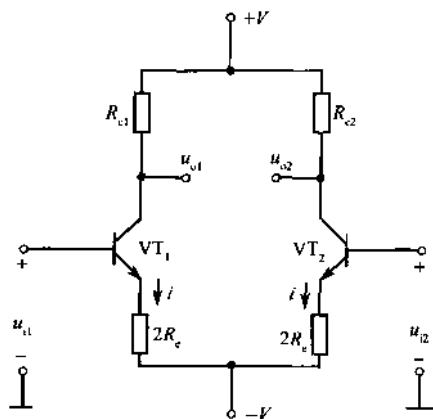


图 1-1-4 共模输入的差动放大器电路

此时,由于 $2R_e$ 的负反馈作用, VT_1, VT_2 的电压增益值将很小。另外, VT_1, VT_2 集电极输出电压的幅值与相位均相同,故该电路差动输出的电压 $u_{o1} - u_{o2} = 0$ 。这表明完全对称的差动放大器,其共模增益为零,因此对各种共模信号具有良好的共模抑制作用(这里的共模信号包括外加的共模输入信号及放大器本身的共模输入等效信号,如温度等原因引起的等效信号等)。

当电路两边不匹配时,差动放大器的共模抑制特性将变差。根据电路的小信号等效电路计算结果,当差动输出时,电路的共模抑制比(即差动放大器差模增益与共模增益之比)表示式为

$$\frac{1}{CMRR} = \frac{\Delta g_m}{2g_m^2} \cdot \frac{R_c + r_o + 2R_e}{r_o R_e} + \frac{\Delta r_o}{2r_o} \cdot \frac{R_c + 2R_e}{g_m R_e} + \frac{\Delta R_c}{R_c} \cdot \frac{1}{2R_e g_m} \quad (1-1-16)$$

式中, g_m 为三极管标称跨导值; Δg_m 为 VT_1, VT_2 跨导值之差; R_c 为两边集电极负载电阻的标称值; ΔR_c 为两边集电极负载电阻的差值; r_o 为晶体管标称的输出电阻; Δr_o 为 VT_1, VT_2 输出电阻的差值; R_e 为差动放大器射极的外接电阻值。在上式计算时,忽略了晶体管 β 不对称性的影响。实际情况下,这种忽略是允许的。

分析式(1-1-16)可以得到:

① 当差动放大器两边电路的 g_m, R_c 与 r_o 不对称时,它的 CMRR 从无穷大值降为有限值。 $\Delta g_m/g_m, \Delta R_c/R_c$ 与 $\Delta r_o/r_o$ 越大,则 CMRR 的值也越低。

② R_e 越大,两边电路的不对称性对 CMRR 的影响就越小。这是由于 R_e 越大,每边电路的共模增益越小,则差动输出时的差值就更小。因此在集成运放中,差动放大器中的 R_e 均以恒流源代替。

③ 提高三极管的输出电阻 r_o 及跨导 g_m ,都将提高差动放大器的 CMRR。

2. 差动放大器的输入失调及其漂移

绝大多数集成运放的输入级都采用差动放大器的形式。输入级的失调是整个运放输入失调的主要来源,因此,减小差动放大器的输入失调是很重要的。

(1) 差动放大器的输入失调电压及其漂移

在实际的差动放大器中,当差动输出电压为零时,输入端所加的直流补偿电压的大小称为差动放大器的输入失调电压。

图 1-1-5 所示为分析差动放大器失调电压的示意图。对于差动放大器,当差动输出电压为零时,应有

$$U_o = U_{o1} - U_{o2} = I_{c1} R_{c1} - I_{c2} R_{c2} = 0 \quad (1-1-17)$$

分析上式可以看到,引起差动放大器输出电压不平衡的因素有 3 个。

① VT_1, VT_2 的 U_{BE} 相同时,它们的射极电流不相等。根据式(1-1-9),这是由于 VT_1, VT_2 的反向饱和电流 I_{s1}, I_{s2} 不匹配的结果。

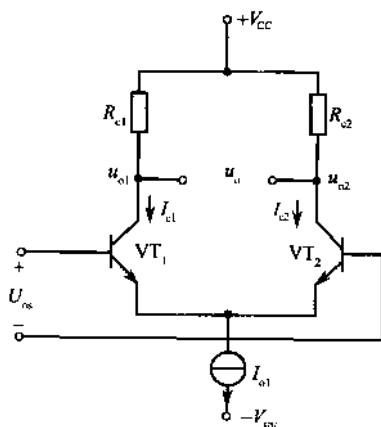


图 1-1-5 分析差动放大器失调电压的示意图

② VT_1, VT_2 的集电极电阻 R_{c1}, R_{c2} 不匹配。

③ VT_1, VT_2 的电流增益 β_1, β_2 不匹配。

计算结果表明,差动放大器的输入失调电压 U_{os} 可表示为

$$U_{os} = U_{BE1} - U_{BE2} = U_T \left(\frac{\Delta I_s}{I_s} + \frac{\Delta R_c}{R_c} + \frac{\Delta \beta}{\beta^2} \right) \quad (1-1-18)$$

式中, I_s 为晶体管反向饱和电流的标称值; ΔI_s 为 VT_1, VT_2 反向饱和电流的差值; R_c 为集电极电阻 R_{c1}, R_{c2} 的标称值; ΔR_c 为 R_{c1}, R_{c2} 的差值; β 为三极管共射电流增益; $\Delta \beta$ 为 VT_1, VT_2 共射电流增益的差值。

式(1-1-18)的三项分别对应于上述3个因素,一般情况下(除去低漂移型运放外), $\frac{\Delta \beta}{\beta^2}$ 很小,其影响可忽略。式(1-1-18)中的第一项可以用相等射极电流时 VT_1, VT_2 的 U_{BE} 之差 ΔU_{BE}^0 (称为差分对管本身的输入失调电压)表示

$$U_{os} \approx \Delta U_{BE}^0 + U_T \frac{\Delta R_c}{R_c} \approx \Delta U_{BE}^0 + \frac{I_{ol}}{2g_m} \cdot \frac{\Delta R_c}{R_c} \quad (1-1-19)$$

当忽略电阻温度系数的差值时, U_{os} 的温漂主要决定于 ΔU_{BE}^0 的温漂。根据三极管原理分析,三极管 U_{BE} 的温度系数为

$$\frac{dU_{BE}}{dT} = \frac{U_{BE} - E_g/q}{T} - \frac{3K}{q} \quad (1-1-20)$$

式中, E_g 是硅的禁带宽度。室温时 $\frac{dU_{BE}}{dT}$ 约为 $-2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。由此,差动放大器的输入失调电压的温度系数为

$$\frac{\Delta U_{os}}{\Delta T} \approx \frac{d\Delta U_{BE}^0}{dT} = \frac{d(U_{BE1} - U_{BE2})}{dT} = \frac{U_{os}}{T} \quad (1-1-21)$$

对应于 1mV 的输入失调电压,在室温时它的温度系数约为 $3.3\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。

(2) 差动放大器的输入失调电流及其漂移

差动放大器的输出直流电压等于零时,两输入端所加偏置电流的差值即为其输入失调电流 I_{os} 。引起 I_{os} 的原因是:晶体管的 β 不对称,使基极注入电流产生偏差;由于集电极负载电阻不对称,引起输出电压偏差。为使这些偏差等于零,差分对管的基极注入电流将发生偏差。可以证明 I_{os} 的表示式为

$$I_{os} = I_B \left(\frac{\Delta \beta}{\beta} + \frac{\Delta R_c}{R_c} \right) \quad (1-1-22)$$

式中, I_B 是三极管 VT_1, VT_2 基极电流的标称值。上式表明, I_{os} 与晶体管的偏置电流 I_B 成正比。

当不考虑电阻温度的偏差时, I_{os} 的温度系数可近似用下式表示

$$\frac{\Delta I_{os}}{\Delta T} = \frac{dI_{os}}{dT} \approx \left(\frac{1}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dT} \right) \cdot I_B \quad (1-1-23)$$

当工作温度大于 25°C 时, $\frac{1}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dT}$ 约为 $-0.005/^\circ\text{C}$; 当工作温度小于 25°C 时,其值约为 $-0.015/^\circ\text{C}$ 。

注意,上述讨论中均假设差分对管处于同样的温度环境中。在实际的集成运放中,由于电路中有些元件的功耗较大,芯片存在温度梯度,故输入差分对管的温度环境可能有差别,它将使差动放大级的输入失调增加。

3. 集成运放的输入级

集成运放的许多性能指标主要取决于差动输入级。如输入失调及其漂移、输入阻抗、共模抑

