

21 世纪高等学校电子信息类教材

集成电路原理及应用

● 谭博学 苗汇静 主编
● 唐 诗 刘连鑫 王富奎 副主编
● 杨世成 主审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

21 世纪高等学校电子信息类教材

集成电路原理及应用

谭博学 苗汇静 主 编
唐 诗 刘连鑫 王富奎 副主编
杨世成 主 审

电子工业出版社

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基本特点、基本原理和基本分析方法,结合每部分内容,理论联系实际。全书共分9章,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及可编程逻辑器件。另外,还特别介绍了许多实际应用电路。每章后附有思考题与习题。

本书内容丰富,实用性强,可作为高等院校电子电气类专业的教材,也可作为广大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,苗汇静主编. —北京:电子工业出版社,2003.9

21世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-8988-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 076562 号

责任编辑:王 颖

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:551 千字

版 次:2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:26.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。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。

本书常用符号说明

一、基本符号

A_{CM}	共模电压增益
A_d	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_{os}	输入失调电流
$\Delta I_{os}/\Delta T$	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_{CM}	共模输入电阻
R_d	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	负载电阻
R_o	输出电阻
R_{oe}	等效输出电阻
S_R	电压转换速率
T	周期
T	绝对温度
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
U_o	输出电压
U_{OCM}	共模输出电压
U_{os}	输入失调电压
$\Delta U_{os}/\Delta T$	输入失调电压温度系数
U_{ref}	基准电压,参考电压

U_z	稳压管稳定电压
$U_+(u_+)$	集成运放同相端输入电压
$U_-(u_-)$	集成运放反相端输入电压
u	电压通用符号,电压的瞬时值
u_{BE}	基极-发射极瞬时总电压
u_{be}	基极-发射极瞬时电压交流分量
u_{CE}	集电极-发射极瞬时总电压
u_{ce}	集电极-发射极瞬时电压交流分量
u_f	反馈电压
u_i	输入电压瞬时值
u_o	输出电压瞬时值
u_s	交流电压源电压瞬时值
V_{CC}	集电极回路电源电位
V_{EE}	发射极回路电源电位
V_{DD}	漏极回路电源电位
Z_{CM}	共模输入阻抗
Z_{id}	差模输入阻抗
Z_o	输出阻抗
β	共射电流放大系数
γ	误差
δ	占空比
ω	角频率
ω_c	截止角频率
ω_H	上限角频率
ω_L	下限角频率
$\varphi(\omega)$	相频特性

二、器件符号

A	集成运放
C	电容
IC	集成块
L	电感
R	电阻
RP	电位器
VD	二极管
VD _w	稳压二极管
VT	三极管
VT	场效应管

前 言

自 20 世纪 60 年代集成电路诞生以来,其集成度始终以 2 年左右翻一番的速度发展。集成电路的发展经历了小规模、中规模、大规模和超大规模集成电路时代。现在的超大规模集成电路,已达到了在数平方厘米的半导体芯片上,能够集成 100 万个乃至 1 亿个以上的晶体管元件,而且集成电路产品的种类也日益增多,性能不断提高,价格不断降低,应用领域不断扩大,以至已经广泛地应用到生产和生活的各个方面。与此同时,还出现了新的电路与系统的设计方法。以上巨大变化,不仅改变着电子电气工程领域传统的教学、科研、设计、生产方式与方法,而且也必然引起电子电气专业有关课程的教学内容与教学方法发生相应的变革。就现在的电子产品而言,已很难找到以分立元件或小规模集成电路为主的电子产品了。为此,高等院校电子电气类学生必须熟悉集成电路及其应用设计知识,学会用集成电路来设计电子系统。针对以上情况,我们在课程改革方面做了一些尝试,在总结了多年教学经验的基础上编写了此书。

本书较系统地介绍了各类集成电路的原理及其应用,包括 9 章内容(详细内容请见目录),涉及面广,并涵盖了集成电路的应用。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做了简明扼要的论述,结合每部分内容,理论联系实际,特别介绍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。

本书可作为高等院校电子电气类专业的教材,全书内容以电路、模拟电子技术、数字电子技术为基础,另外,第 8 章和第 3 章的部分章节以高频电子线路为基础。给本科生讲授约需 56 学时,再配合约 8 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。

本书是电子工业出版社约稿,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,编写了第 1 章、第 2 章和电路图的编辑工作;苗汇静编写了第 3 章、第 5 章、第 6 章、第 8 章;唐诗编写了第 4 章;王富奎编写了第 7 章;刘连鑫编写了第 9 章。在编写过程中,山东理工大学电子信息工程专业 99 级的雷学初、张利、闫培渊和张宇为本书的图形编辑做了许多工作,在此向这四位学生表示感谢。

在本书的编写过程中,得到了山东理工大学刘洪年教授、董传岱教授的指导和支持,并由北京科技大学的杨世成教授对本书做了认真审阅,在此向他们表示衷心的感谢。

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,在此向这些作者表示衷心的感谢。

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
2003 年 5 月

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	8
1.1.3 有源负载电路	9
1.1.4 双端变单端电路	9
1.1.5 直流电平位移电路	10
1.1.6 互补推挽输出电路	11
1.2 集成运放的基本构成和表示符号	12
1.2.1 集成运放的基本构成	12
1.2.2 通用型集成运放内部电路简介	13
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	16
1.3.1 集成运放的主要直流参数	16
1.3.2 集成运放的主要交流参数	18
1.3.3 集成运放的分类	20
1.4 集成运放的等效模型	23
1.4.1 集成运放的实际等效模型	23
1.4.2 理想集成运放的等效模型	24
1.5 实际运放与理想运放的误差	24
1.5.1 A_d 为有限值时实际运放和理想运放的误差	25
1.5.2 A_c 为有限值时实际运放和理想运放的误差	25
1.5.3 U_{os} 不为零时实际运放和理想运放的误差	26
1.6 运放电路的稳定性及其判断	27
1.6.1 闭环自激振荡产生的条件	27
1.6.2 集成运放闭环稳定性判据	28
1.7 集成运放的相位补偿技术	30
1.7.1 滞后相位补偿	30
1.7.2 超前相位补偿	33
1.7.3 引起集成运放闭环工作不稳定的其他因素	34
思考题与习题	35
第 2 章 模拟集成电路的线性应用	37
2.1 模拟集成电路的基本放大电路	37
2.1.1 反相放大器	37
2.1.2 同相放大器	40
2.1.3 差动放大器	43
2.2 积分电路	45

2.2.1	基本型积分电路及其理想特性	45
2.2.2	U_{os} 、 I_{IB} 及其漂移对积分电路的影响	47
2.2.3	集成运放的增益和带宽对积分电路的影响	47
2.2.4	积分电路的保持误差	48
2.2.5	几种典型的积分电路	49
2.3	微分电路	51
2.3.1	基本微分器及其理想微分特性	51
2.3.2	微分器的实际微分特性	52
2.3.3	几种典型的微分电路	54
2.4	集成仪器放大器	56
2.4.1	集成仪器放大器的工作原理	56
2.4.2	集成仪器放大器的特性及其应用	58
2.5	动态校零型斩波放大器	61
2.5.1	动态校零型斩波放大器的一般技术	61
2.5.2	动态校零型斩波放大器的工作原理	62
2.5.3	HA2900 型动态校零型斩波集成运放介绍	63
2.5.4	OPA2111 自动校零斩波放大器	66
思考题与习题		67
第3章	模拟集成电路的非线性应用	70
3.1	对数器和指数器	70
3.1.1	对数器	70
3.1.2	指数器	72
3.1.3	集成化的对数器和指数器	74
3.2	乘法器及其应用	75
3.2.1	乘法器的基础知识	75
3.2.2	乘法器的工作原理	77
3.2.3	模拟乘法器的应用电路	79
3.3	二极管检波器和绝对值变换器	87
3.3.1	二极管检波器	87
3.3.2	绝对值检波电路	89
3.4	限幅器	91
3.4.1	二极管并联式限幅器	92
3.4.2	二极管串联式限幅器	93
3.5	二极管函数变换器	94
3.5.1	串联限幅型二极管函数变换器	95
3.5.2	并联限幅型二极管函数变换器	96
3.5.3	线性检波型二极管函数变换器	97
3.6	电压比较器及其应用	99
3.6.1	电压比较器的性能	99
3.6.2	单限电压比较器	100
3.6.3	迟滞电压比较器	102
3.6.4	窗口电压比较器	105
3.6.5	电压比较器的应用举例	108

思考题与习题	111
第4章 集成变换器及其应用	114
4.1 阻抗变换器	114
4.1.1 负阻抗变换器	114
4.1.2 阻抗模拟变换器	115
4.1.3 模拟电感器	116
4.1.4 电容倍增器	117
4.2 U/I 变换器和 I/U 变换器	119
4.2.1 接地负载的 U/I 变换器	119
4.2.2 精密 U/I 变换器	121
4.2.3 精密 I/U 变换器	123
4.3 U/F 变换器和 F/U 变换器	125
4.3.1 VFC100 同步型 U/F, F/U 变换器	126
4.3.2 LMx31 系列 U/F, F/U 变换器	129
4.4 精密 T/I 和 T/U 变换器	133
4.4.1 AD590 T/I 变换器	133
4.4.2 LM135/235/335 T/U 变换器	136
4.5 D/A 转换器	138
4.5.1 D/A 转换器的基础知识	138
4.5.2 8 位 D/A 转换器	141
4.5.3 16 位 D/A 转换器	143
4.6 A/D 转换器	144
4.6.1 A/D 转换器的基础知识	144
4.6.2 8 位 A/D 转换器	146
4.6.3 与 16/8 位连接的 12 位 A/D 转换器	148
4.6.4 串行输出的 A/D 转换器	150
思考题与习题	153
第5章 集成信号发生器	155
5.1 集成正弦波、方波、三角波发生器	155
5.1.1 由集成运放构成的方波和三角波发生器	155
5.1.2 由 ICL8038 构成的正弦波、方波、三角波发生器	156
5.1.3 正弦波、方波和三角波函数发生器的应用电路	161
5.2 集成锯齿波和脉冲波发生器	162
5.2.1 由集成运放构成的脉冲波和锯齿波发生器	162
5.2.2 由 XR-2206 构成的锯齿波和脉冲波发生器	163
5.2.3 由 NE566V 构成的锯齿波发生器	166
5.3 集成高频函数发生器	167
5.3.1 由 MAX038 构成的集成高频函数发生器	167
5.3.2 由 MAX038 和 MC145151 构成的集成高频函数发生器	169
思考题与习题	170
第6章 集成有源滤波器	172
6.1 概述	172

6.1.1 滤波器的分类	172
6.1.2 集成有源滤波器的特点	172
6.1.3 典型滤波器的传递函数	173
6.1.4 传递函数的幅度近似	174
6.1.5 有源滤波器的设计步骤	176
6.2 低通滤波器	177
6.2.1 一阶低通滤波器	177
6.2.2 二阶低通滤波器	177
6.2.3 高阶低通滤波器	180
6.2.4 低通滤波器的应用电路	181
6.3 高通滤波器	184
6.3.1 一阶高通滤波器	184
6.3.2 二阶高通滤波器	184
6.3.3 无限增益多反馈环型高通滤波器	186
6.3.4 高通滤波器的应用电路	187
6.4 带通滤波器	189
6.4.1 无限增益多反馈环型带通滤波器	189
6.4.2 宽带滤波器	190
6.4.3 带通滤波器的应用电路	191
6.5 带阻滤波器	194
6.5.1 窄带阻滤波器(或陷波器)	194
6.5.2 宽带阻滤波器	196
6.5.3 带阻滤波器的应用电路	196
6.6 开关电容滤波器和状态变量滤波器	197
6.6.1 SCN 的基本工作原理	198
6.6.2 开关电容滤波器	200
6.6.3 开关电容滤波器的应用及限制	201
6.6.4 状态变量滤波器	202
思考题与习题	204
第7章 集成稳压电源	206
7.1 线性集成稳压器的基本结构与参数	206
7.1.1 线性集成稳压器的基本结构	206
7.1.2 集成稳压器的参数	207
7.1.3 集成稳压器的分类及使用注意事项	208
7.2 三端集成稳压器	209
7.2.1 三端固定输出集成稳压器的特点	209
7.2.2 三端可调输出稳压器	212
7.3 多端集成稳压器	216
7.3.1 $\mu A723$ 的基本应用	216
7.3.2 $\mu A723$ 构成的实用稳压电源	217
7.4 新型低压差集成稳压器	218
7.4.1 新型低压差 78 系列/MIC5156 的应用	219
7.4.2 超微功耗线性稳压器 BAF033 及 BAL029/030	220

7.4.3 单片机用低压差稳压器·····	222
7.5 开关稳压电源基础知识·····	225
7.5.1 开关电源的发展历史和趋势·····	225
7.5.2 开关电源的基本原理和类型·····	226
7.5.3 脉宽调制式开关电源原理·····	231
7.6 新型单片开关电源·····	231
7.6.1 单片开关电源的基本原理·····	232
7.6.2 三端单片开关电源的原理与应用·····	234
7.6.3 四端单片开关电源的原理与应用·····	238
7.6.4 五端单片开关电源·····	241
7.7 微机和笔记本电脑中的开关电源·····	246
7.7.1 TL494 开关电源集成控制器·····	246
7.7.2 TL494 在微机开关电源中的典型应用·····	248
7.7.3 笔记本电脑中的开关稳压电源·····	252
7.8 大屏幕彩色电视开关电源新技术·····	256
7.8.1 开关电源中的厚膜电路·····	256
7.8.2 自激式开关电源新技术·····	258
7.8.3 他激式开关电源新型厚膜电路·····	259
思考题与习题·····	262
第8章 语音和图像集成电路·····	263
8.1 收音机集成电路·····	263
8.1.1 收音机的基础知识·····	263
8.1.2 AM收音机集成电路·····	265
8.1.3 FM收音机集成电路·····	266
8.1.4 FM/AM收音机集成电路·····	267
8.2 语音集成电路·····	267
8.2.1 语音录放集成电路·····	268
8.2.2 语音识别集成电路·····	273
8.3 功放集成电路·····	276
8.3.1 小功率音频功放集成电路·····	276
8.3.2 双声道功放集成电路·····	277
8.3.3 新型“傻瓜”功放模块·····	280
8.4 电视机及图像处理集成电路·····	281
8.4.1 电视机及图像处理的基础知识·····	281
8.4.2 单片彩电集成电路·····	284
8.5 家庭影院集成电路·····	288
8.5.1 家庭影院的基础知识·····	288
8.5.2 高品质音调均衡集成电路·····	289
8.5.3 虚拟杜比环绕声解码集成电路·····	290
8.5.4 高保真BBE音质增强集成电路·····	291
思考题与习题·····	293
第9章 可编程逻辑器件·····	294
9.1 可编程逻辑器件基础·····	294

9.1.1	可编程逻辑器件的基本结构	294
9.1.2	可编程逻辑器件的分类及特点	294
9.1.3	PLD 的电路结构及其表示方法	295
9.2	可编程只读存储器 PROM	302
9.2.1	一次性可编程只读存储器	302
9.2.2	可重复编程只读存储器	303
9.2.3	用 ROM 实现组合逻辑电路	304
9.3	可编程阵列逻辑 PAL 的原理与应用	306
9.3.1	PAL 器件的基本结构	307
9.3.2	PAL 的输出和反馈结构	307
9.3.3	PAL 器件实例介绍	309
9.4	可编程通用阵列逻辑 GAL	311
9.4.1	GAL 器件的基本结构	312
9.4.2	GAL 器件的控制字	314
9.4.3	GAL 器件行地址分配	316
9.4.4	GAL 器件命名及性能特点	316
9.5	GAL 器件的编程与开发过程	317
9.5.1	ABEL 软件简介	318
9.5.2	ABEL 源文件的基本结构	318
9.5.3	ABEL 软件的基本语法规则	319
9.5.4	常用 ABEL 语句说明	321
9.5.5	GAL 的应用举例	323
	思考题与习题	325
	参考文献	327

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。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应用,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者来说,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,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($u_{i1} = -u_{i2}$)

① 电压增益和输入电阻

这种输入方式的 u_{i1} 与 u_{i2} 极性相反,所以流经 VT_1 、 VT_2 的电流变化极性也相反。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。由此,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 均相当于普通的单管共射放大器。显然,当电路两边完全对称时,两管输出电压的极性相反,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。

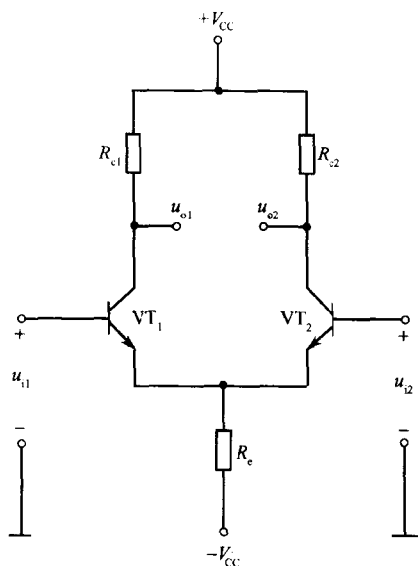


图 1-1-1 差动放大电路的基本形式

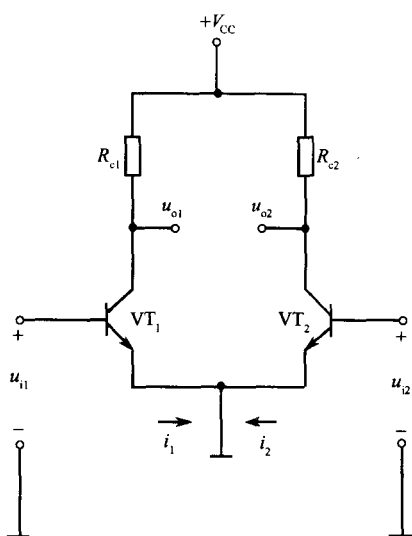


图 1-1-2 差模信号输入时,差动放大器的交流等效电路

若是单端输出时,该电路的电压增益将减半。

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

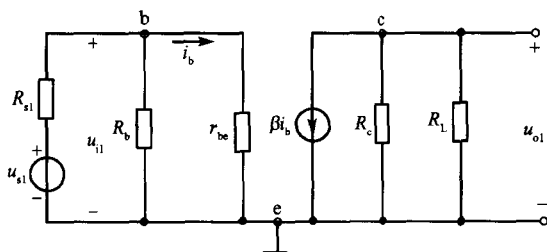


图 1-1-3 单管共射放大器的低频小信号等效电路

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

式中, R_L 是放大器的负载电阻。

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(1-1-3)及式(1-1-4)中, r_i 是单管共射放大器的输入电阻; R_{s1} 是 u_{s1} 信号源的内阻; 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。但是可以证明,只要 R_e 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 是单管放大器的两倍,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,例如在十几微安以下时,上式可改写为

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

由式(1-1-6)和式(1-1-7)可知,根据晶体管的基极电流值就可以估算放大器的输入电阻。

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电压变化量之比。

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时):

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

式中, I_s 是晶体管的反向饱和电流。

式(1-1-8)忽略了反偏的 b-c 结对 I_E 的影响。在 b-e 结正偏条件下,通常, $\frac{qU_{BE}}{kT} \gg 1$,故式(1-1-8)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,其表示式为

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

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

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

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,放大器的电压增益是与工作电流成正比的。若要提高电压增益,就应适当加大三极管的工作电流。

尚需指出的是,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 (单管时为 $U_T \approx 26\text{mV}$)。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($u_{i1} = u_{i2}$)

此时 VT_1, VT_2 的信号电流沿同一方向变化,故流经 R_e 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极性完全相同(设为 i),则流经 R_e 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。

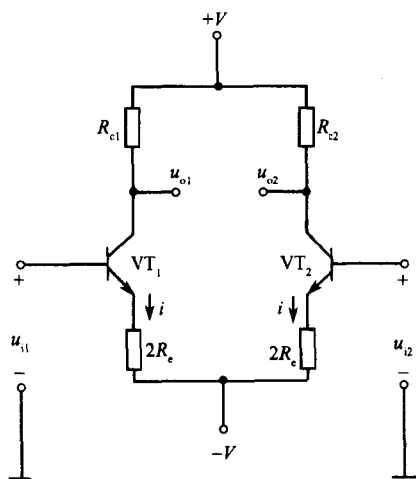


图 1-1-4 共模输入的差动放大器电路

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。加之, 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以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

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

式中, g_m ——三极管标称跨导值;

Δg_m —— VT_1, VT_2 跨导值之差;

R_c ——两边集电极负载电阻的标称值;

ΔR_c ——两边集电极负载电阻的差值;

r_o ——晶体管标称的输出电阻;

Δr_o —— VT_1, VT_2 输出电阻的差值;

R_e ——差动放大器射极的外接电阻值。

在计算式(1-1-16)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