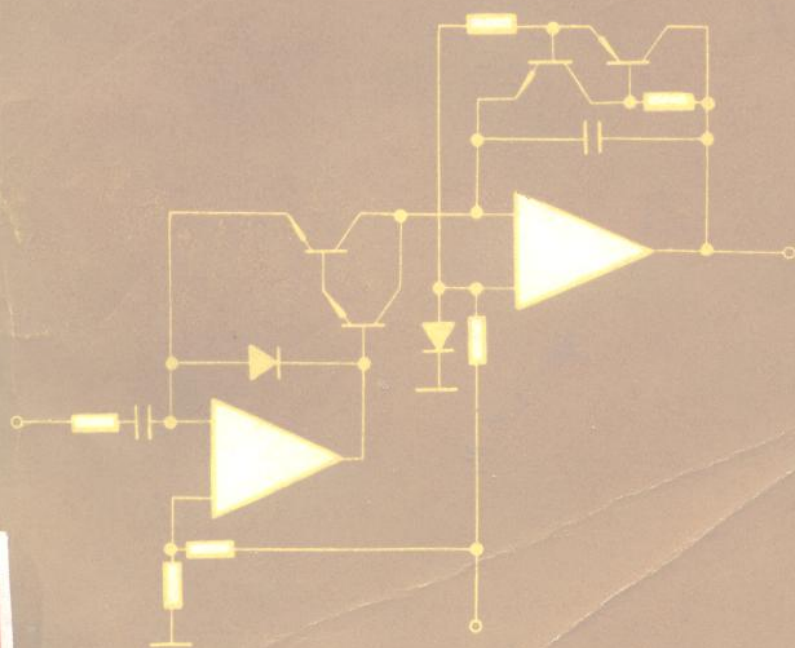


模拟组件及其应用

孙崇德 编著



科学出版社

55.

7-11205
491

模拟组件及其应用

孙崇德 编著



科学出版社

1983

1110574

内 容 简 介

本书主要讨论集成化差分放大器、负反馈放大器、运算放大器、模拟乘法器、集成化稳压电源以及功能化模拟组件(如中频放大器、高频放大器、宽带放大器、变频器、混频器等)的电路原理,详细介绍了电视图象通道和伴音通道中的集成电路,并从各种型号的模拟组件中选出一些典型,介绍它的电路特性和应用实例。

本书以介绍模拟集成电路的原理及应用为主。对于电路,力求将理论与实践、数学分析与物理概念密切结合起来,并注意介绍近年来的新成就和新内容,以适应当前教学、生产及科研的需要。

本书可作为理工科大学的无线电、自动化、电工、电机类专业有关课程的教学参考书,也可供从事模拟集成电路研制及应用的科技人员参考。

212269

模拟组件及其应用

孙崇德 编著

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 1 月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1983 年 1 月第一次印刷	印张: 11 1/4
印数: 0001—7,750	字数: 292,000

统一书号: 15031·455

本社书号: 2894·15—7

定 价: 2.10 元

序 言

模拟集成电路是指能对电压、电流等模拟量进行放大与转换的集成电路。它包括除了数字集成电路以外的所有集成电路。在模拟集成电路中,输出信号可以是输入信号的线性放大,如各种放大器;也可以是随输入信号作相应的非线性变化的信号,如混频器、检波器等。所以模拟集成电路应该包括线性电路和非线性电路两种。但习惯上也常笼统地把模拟集成电路称为线性集成电路。

模拟集成电路主要用于通信设备、雷达、电子计算机、自动控制、测试仪表等方面。由于它品种繁多,要求数量不大,制造难度较高,因而比起数字集成电路来,发展较晚,产量较少。但是近几年来,随着集成电路工艺水平的不断提高,模拟集成电路的品种和数量都有大幅度的增加,电路的性能指标也显著提高,因而它在集成电路中所占的比重愈来愈大,目前生产量已与数字集成电路接近。

模拟集成电路中最主要的是集成运算放大器,它是一种高增益直流放大器,在外接了一些反馈元件后,可进行数学上的加法、比例、积分、微分等运算。由于半导体集成电路中较容易得到配对性能良好的晶体管,因此,集成电路的运算放大器几乎全是差分输入形式的放大器。运算放大器的电路形式也比较充分地发挥了集成电路的特长。

稳压电源也是模拟集成电路中很重要的方面。在早期的集成化稳压电源中,由于大功率的输出管集成在一个单片上比较困难,所以电源的输出电流较小,为了获得大电流输出,可把大功率调整管与电源的其它部分同时封装在一个管壳内,构成双片式电路。随着集成工艺水平的不断提高,较新的集成稳压器中已能将大功率调整管集成在同一硅片上,实现了大电流输出的稳压电源。

通信、雷达等方面应用的集成电路,品种很多,如中频放大器、

高频放大器、宽带放大器、变频器、混频器、检波器等。其中,最基本的电路是在差分对管的集电极上外接 LC 选频回路,实现选频放大特性,采用集成差分对管,可使电路的性能得到改善。宽带放大电路通常是以电阻为负载的放大器,它在一个较宽的频率范围内有均匀一致的增益特性。

电视机、收音机是广播事业的重要设备。数量很大。集成化后,对缩小体积,提高性能指标,增加可靠性,简化调试过程都有利,特别是便于大量生产和维修。这些电路也是模拟集成电路中产品数量最大品种最多的电路。在其它民用集成电路中,医疗设备中的集成电路日益增多,也成为模拟集成电路的一个方面。

目前,模拟集成电路的工作频率已发展到微波频段,由于微波电路的设计和集成工艺都有它的特殊性,所以这类电路专称为微波集成电路。微波集成电路和一般低频集成电路一样,由于制作方法不同,一般可分为单片式和混合式两类,即半导体微波集成电路和混合微波集成电路。前者是在高阻半导体基片上(如高阻硅、砷化镓等)制作有源和无源元件所构成的电路,其体积比混合式的小,但电路的损耗较大,谐振电路的 Q 值低。后者则是在诸如氧化铝陶瓷、蓝宝石或铁氧体等基片上,采用薄膜或厚膜技术制作无源元件和电路,再把有源元件以适当的方法装配到电路中而构成的电路。当前国内外达到实用水平的电路,主要是混合微波集成电路。只是在毫米波段内才有可能采用砷化镓来制作单片微波集成电路。若按电路设计原则,每类又可分成集总参数电路和分布参数电路两种,即微波集成电路共有四种:单片集总参数电路、单片分布参数电路及混合集总参数电路、混合分布参数电路。微波集成电路所运用的频率范围基本上在 300MHz 到 100GHz 。一般在 1GHz 以下,以集总参数设计电路较多;在 1GHz 以上的,主要用分布参数来设计电路。目前,混合微波集成技术已适于制作各种微波集成放大器、混频器、振荡器、倍频器、滤波器、移相器、转换开关等各种电路、并正向集成度更高、更复杂的电路发展。

模拟集成电路的工艺过程和数字集成电路基本相同。只是模

拟电路常常要有较高的输出电压或输出功率，所用电源电压一般比较高。这就要求集成电路的隔离特性要好。PN 结隔离往往不能满足要求，所以模拟集成电路常采用介质隔离方式。

本书主要介绍集成化差分放大器、负反馈放大器、运算放大器以及功能化线性集成电路和集成化稳压电源的工作原理。并从各种型号的模拟集成电路中选取一些典型，介绍它的电路特性和应用实例以及使用时应注意的事项。本书以讨论模拟集成电路的原理和应用为主，集成工艺为副。对于电路，力求将理论与实践，数学分析与物理概念密切结合起来，着重基本原理的分析，对于集成工艺只作了一般介绍。

目 录

第一章 基本放大电路	1
1-1 共基极电路	1
1-2 共发射极电路	9
1-3 共集电极电路	12
1-4 基本放大电路的频率特性	17
一、分布电容对放大电路电压增益的影响	18
二、多极点放大电路的频率特性	23
三、参数 β 的频率特性	25
第二章 恒流源偏置电路	27
2-1 NPN 晶体管组成的恒流源	27
2-2 横向 PNP 晶体管恒流源	33
一、横向 PNP 晶体管	34
二、横向 PNP 晶体管组成的恒流源	37
第三章 差分放大器	41
3-1 差分放大器的电压增益	41
一、差模输入	42
二、共模输入	45
三、单端输入	49
3-2 差分放大器的传输特性	52
一、差模传输特性	52
二、跨导	54
三、共模传输特性	56
3-3 差分放大器的失调和温度漂移	57
一、差分放大器的失调	57
二、失调电压的温度漂移	60
三、失调电流的温度漂移	63
四、差分对管和集成化差分放大器	64

第四章 调制和解调	71
4-1 模拟乘法器	71
一、变跨导式模拟乘法器的工作原理	71
二、单片集成化模拟乘法器	74
三、平衡调制器	77
4-2 电视图象专用集成电路	80
一、符合检波器(乘法检波器)	80
二、5G39 图象检波器	81
三、5G313 图象中频放大和自动增益控制电路	84
4-3 电视伴音专用集成电路	87
一、模拟乘法器的鉴相特性	87
二、CA3013 电视伴音电路	89
三、5G32 限幅中放、鉴频电路	89
四、7CD13 伴音电路	95
第五章 负反馈放大器	100
5-1 负反馈对放大器性能的影响	100
一、负反馈对增益的影响	101
二、负反馈能提高增益的稳定性	103
三、负反馈对输入和输出阻抗的影响	104
四、负反馈对频率特性的改善	105
五、负反馈可以提高放大器的信噪比	106
5-2 采用负反馈放大器的集成电路	106
一、SA-20 宽频带放大器	106
二、8FZ1 宽频带放大器	109
三、BG302 宽频带放大器	113
四、负反馈放大器与差分放大器的比较	115
第六章 集成运算放大器的电路结构	117
6-1 输入级	117
一、复合管差分输入级	118
二、互补差分输入级	120
三、场效应管差分输入级	122
四、超增益晶体管差分输入级	123
6-2 中间级	125

一、有源负载	125
二、直流电平移动	128
三、双端-单端转换	130
6-3 输出级	131
一、单管射极跟随器输出级	132
二、互补射极跟随器输出级	133
三、输出级过流保护	136
第七章 模拟运算电路	138
7-1 反相运算放大器	138
一、反相负反馈放大器	139
二、基本运算电路	144
7-2 同相运算放大器	155
一、同相负反馈放大器	156
二、同相输入基本运算电路	160
三、比例、微分、积分复合运算器	161
7-3 差分输入运算放大器	165
一、基本差分输入运算放大器	165
二、高输入阻抗差分运算放大器	169
第八章 集成运算放大器的典型产品	172
8-1 集成运算放大器的早期产品	172
一、工作原理	173
二、典型应用举例	175
8-2 集成运算放大器的第一代产品	178
一、 $\mu A709$ 运算放大器	178
二、FC3 集成运算放大器	182
三、5G23 集成运算放大器	184
四、典型应用	187
8-3 集成运算放大器的第二代产品	190
一、 $\mu A741$ 集成运算放大器	190
二、BG305 集成运算放大器	195
三、BG308 集成运算放大器	198
四、BG303 集成运算放大器	199
五、5G24 集成运算放大器	199

六、典型应用举例	202
8-4 集成运算放大器的第三代产品	203
一、AD508L 集成运算放大器	203
二、MC1556 集成运算放大器	206
8-5 集成运算放大器的第四代产品	207
一、HA2900 集成运算放大器	207
二、典型应用	210
8-6 专用型集成运算放大器	211
一、低漂移集成运算放大器	212
二、低功耗集成运算放大器	215
三、高速集成运算放大器	216
附表 1 国内外部分通用型低增益集成运算放大器主要性能 参数	220
附表 2 国内外部分通用型中增益集成运算放大器主要性能 参数	222
附表 3 国内外部分通用型高增益集成运算放大器主要性能 参数	224
附表 4 国内外部分低漂移集成运算放大器主要性能参数	226
附表 5 国内外部分低功耗集成运算放大器主要性能参数	228
附表 6 国内外部分高速集成运算放大器主要性能参数	230
附表 7 国内外部分集成运算放大器型号对照	231
第九章 信号发生电路	235
9-1 正弦波发生器	235
一、文氏桥式振荡器	235
二、移相式正弦波发生器	238
三、双 T 网络正弦波发生器	239
9-2 非正弦波发生器	241
一、方波发生器	241
二、三角波发生器	244
三、阶梯波发生器	247
第十章 集成运算放大器应用中的几个问题	251
10-1 调零与消振	251
一、调零	251

二、消振	257
三、防止闩锁	262
10-2 性能扩展	263
一、增大输出电流和输出电压	263
二、提高输入电阻	265
三、驱动 TTL 电路	266
四、保护措施	269
第十一章 功能化集成电路	271
11-1 集成高频放大器	271
一、寄生元件对频率的影响	271
二、集成高频放大器	273
11-2 集成音频放大器	275
一、M5101S 集成音频放大器	275
二、WC334T 集成功率放大器	277
三、5G31 集成功率放大器	278
四、5G37 集成功率放大器	280
五、SL38 集成功率放大器	282
第十二章 集成化稳压电源	285
12-1 串联型稳压电源	285
一、调整管	286
二、基准电压	289
三、比较放大器	296
四、取样电路	298
五、启动电路	299
六、恒流源电路	300
12-2 集成稳压器	302
一、STK501 混合集成稳压器	302
二、W1 系列集成稳压器	303
三、KC582 集成稳压器	304
四、5G11 集成稳压器	306
五、5G14 集成稳压器	311
六、W 集成稳压器	314
七、LM100 集成稳压器	317

八、 $\mu A723$ 集成稳压器	319
九、MC1466 集成稳压器	321
12-3 集成运算放大器组成的稳压电源	325
一、线性整流电路	325
二、基准电压源	328
三、稳压电源	330
12-4 开关式稳压电源	333
一、开关式稳压电源的工作原理	334
二、自激式开关稳压电源	337
三、他激式开关稳压电源	338
四、稳压电源的特性参数	339
12-5 保护电路	340
一、过流保护	340
二、输出短路保护	342
三、过压保护	346
参考文献	348

第一章 基本放大电路

在基本放大电路中,晶体管的接法有共基极、共发射极、共集电极三种,不同接法的输入端和输出端各不相同,但它们的工作原理基本相同。作为晶体管电路的复习,下面对这三种接法进行讨论和比较,以便为学习模拟集成电路打下基础。

1-1 共基极电路

所谓共基极电路,是指基极接地,如图 1-1-1 所示,发射极加正向偏压 U_e , 集电极加反向偏压 U_c 。 I_e 、 I_c 、 I_b 分别代表发射极

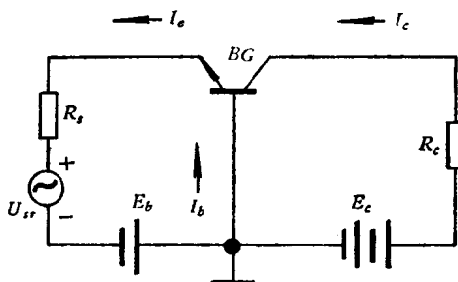


图 1-1-1 共基极电路

电流、集电极电流和基极电流,信号由发射极输入,由集电极输出。作为一个四端网络,它的四个变量为 U_e 、 I_e 、 U_c 和 I_c 。四个变量之间彼此相互关联,任取两个做自变量,则其余两个变量可以用自变量表示,例如选 I_e 和 U_e 为自变量,则有

$$U_c = U(I_e, U_e) \quad (1-1-1)$$

$$I_c = I(I_e, U_e) \quad (1-1-2)$$

如果以 $\dot{U}_e$ 、 $\dot{U}_c$ 代表 U_e 和 U_c 中小信号的交流分量, $\dot{I}_e$ 和 $\dot{I}_c$ 代表

I_e 和 I_c 中小信号的交流分量, 则有

$$\dot{U}_c = \frac{\partial U_c}{\partial I_e} \dot{I}_e + \frac{\partial U_c}{\partial U_c} \dot{U}_c \quad (1-1-3)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\partial I_c}{\partial I_e} \dot{I}_e + \frac{\partial I_c}{\partial U_c} \dot{U}_c \quad (1-1-4)$$

在小信号的条件下, 可以认为这种关系是线性的。用一组参数来描写, 选取不同的自变量, 可以得到不同的参数, 但这些参数的作用是等价的, 而且可以互相推导。如果采取输出电压和输入电流不变的条件, 测出一组参数, 称为 h 参数, 则有

$$\dot{U}_c = h_{ib} \dot{I}_e + h_{rb} \dot{U}_c \quad (1-1-5)$$

$$\dot{I}_c = h_{fb} \dot{I}_e + h_{ob} \dot{U}_c \quad (1-1-6)$$

其中

$$h_{ib} = \left. \frac{\partial U_c}{\partial I_e} \right|_{U_c = \text{常数}} \quad (1-1-7)$$

它代表集电极交流短路时的输入阻抗。发射极电流随发射极电压成指数关系而增长:

$$I_c \approx I_{cs} e^{\frac{qU_c}{kT}} \quad (1-1-8)$$

由此求得输入阻抗为

$$h_{ib} = \frac{\partial U_c}{\partial I_e} = \frac{kT}{qI_c} \quad (1-1-9)$$

因而, 可以通过控制发射极电流 I_e 来改变 h_{ib} 的大小, 在实际使用时, 要求输入阻抗比较小, 以便获得较大的电压增益。一般晶体管的 h_{ib} 为几十欧姆到几百欧姆。

$$h_{rb} = \left. \frac{\partial U_c}{\partial U_c} \right|_{I_e = \text{常数}} \quad (1-1-10)$$

表示当发射极电流不变时, 集电极电压 U_c 的变化引起发射极电压 U_e 的变化, 这标志着反馈作用, 所以称为电压反馈系数。

$$h_{fb} = \left. \frac{\partial I_c}{\partial I_e} \right|_{U_c = \text{常数}} \quad (1-1-11)$$

表示集电极短路时的电流增益, 它就是严格定义下的电流放大系数 α 。

$$h_{ob} = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_c} \right|_{I_e = \text{常数}} \quad (1-1-12)$$

代表发射极电流不变时的输出电导，单位是西门子。图 1-1-2 是相应于 h 参数的等效电路。其中恒流源电流大小为 $h_{ib}I_c$ ，电流方向如图。恒流源内阻趋于无穷。电压源电压为 $h_{rb}U_c$ ，内阻等于零。 h_{ib} 和 $1/h_{ob}$ 分别表示两个电阻的数值。

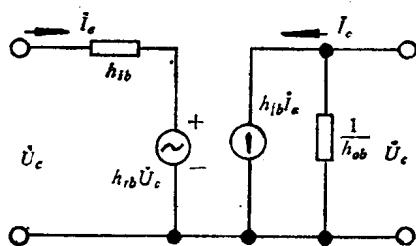


图 1-1-2 共基极 h 参数等效电路

上面讨论了 h 参数，它是把晶体管看成是一个有源的四端网络而推出的，因此称为网络参数。网络参数除了 h 参数外，还有 z 参数和 y 参数。 z 参数主要应用在早期文献资料中，缺点是测量不易准确，因为晶体管输出阻抗高，不易实现输出端开路的条件。 y 参数在高频运算时物理意义比较明显，缺点同样是测量不易准确，因为晶体管输入阻抗低，不易实现输入端短路的条件。 h 参数是不同量纲的参数混合起来的混合参数，测量的条件容易实现，所以在电路分析和设计使用中都方便。 h 参数中的第一下标的意义是： i 表示输入， r 表示反向传输， f 表示正向传输， o 表示输出，第二下标 b 表示共基极。

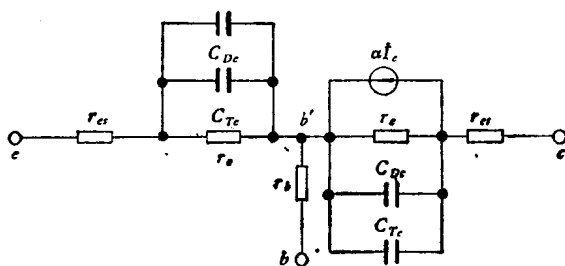


图 1-1-3 共基极 T 型等效电路

在模拟集成电路中, 设计和分析晶体管时也常应用图 1-1-3 所示的 T 型等效电路。T 型等效电路是由晶体管的物理结构直接模拟得到的, 因此也称为物理参数等效电路。

发射区相当于一个欧姆电阻, 用 r_{es} 表示。由于发射区掺杂浓度很高, r_{es} 是很小的。

当发射极电压改变时会引起发射结空间电荷区空间电荷的变化, 这一变化用发射结势垒电容 C_{Te} 来描述; 也会引起发射极电流的变化, 这一变化的大小用发射结动态电阻 r_e 来反映; 还会引起基区、发射区贮存电荷的改变, 这一改变用发射结扩散电容 C_{De} 来描述。发射结可以等效的看成是三者的并联。

集电极电压改变时, 所引起的变化, 用集电结势垒电容 C_{Tc} 、扩散电容 C_{Dc} 和集电结动态电阻 r_c 来描述, 即集电结可以等效的看成是三者的并联。图中的 αI_e 为一电流源, 它代表发射极电流对集电极回路的影响。 r_{cs} 为串联电阻, 它代表由集电区的半导体材料、电极引线的欧姆接触等引起的电阻值。

基极电流在基区产生电压降, 可以等效地看成在基极处有一个电阻 r_b 。

如果 C_{Te} 、 C_{De} 并联后的电容用 $C_{b'e}$ 表示; C_{Tc} 、 C_{Dc} 并联后的电容用 $C_{b'c}$ 表示。因 r_{es} 、 r_{cs} 数值都比较小, 常忽略不计。T 型等效电路就可以改画成图 1-1-4 所示的等效电路。

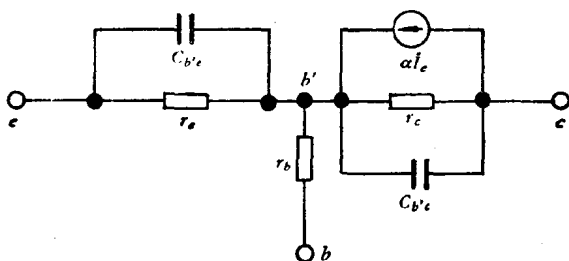


图 1-1-4 忽略 r_{es} 、 r_{cs} 时的 T 型等效电路

T 型等效电路中各参数的大小是可以测量的, 通常

$$r_b \approx \text{十几欧} - \text{一、二百欧}$$

$$r_e \approx \frac{26}{I_c(\text{mA})} \text{ 欧}$$

$$r_c \approx \text{几十千欧—几兆欧}$$

$$C_{sr} \approx \frac{1}{2\pi f_a r_e} \approx \text{几十微微法—几千微微法}$$

$$C_{sc} \approx \text{几微微法—几十微微法}$$

在低频时, 电容 $C_{b'e}$ 和 $C_{b'c}$ 都可以忽略, 图 1-1-4 可以改画成图 1-1-5, 这时把 T 型等效电路与 h 参数等效电路相比较, 就可

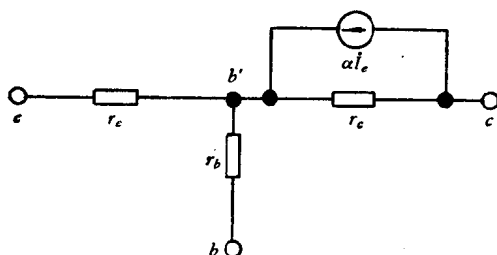


图 1-1-5 低频时的 T 型等效电路

以用 h 参数表示 r_e 、 r_b 、 r_c 、 α 四个量如下:

$$r_b = \frac{h_{rb}}{h_{ob}} \quad (1-1-13)$$

$$r_c = \frac{(1 - h_{rb})}{h_{ob}} \approx \frac{1}{h_{ob}} \quad (1-1-14)$$

$$r_e = h_{ib} - \frac{h_{rb}(1 + h_{fb})}{h_{ob}} \quad (1-1-15)$$

$$\alpha = -\frac{h_{fb} + h_{rb}}{1 - h_{rb}} \quad (1-1-16)$$

同样, 也可以把 h 参数用 r_e 、 r_b 、 r_c 和电流放大系数 α 来表示成以下的关系:

$$h_{ib} = \frac{r_e r_b + r_c [r_e + r_b(1 - \alpha)]}{r_b + r_c} \approx r_e + r_b(1 + \alpha) \quad (1-1-17)$$

$$h_{rb} = \frac{r_b}{r_b + r_c} \approx \frac{r_b}{r_c} \quad (1-1-18)$$