

● 模拟集成 电路的应用

● 陈秀中 主编

模拟集成电路的应用

陈秀中 主编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书着重讲述各种通用型模拟集成电路的应用。其中包括：由运算放大器组成的基本运算电路； RC 有源滤波器的设计；运算放大器的宏模型和含有运算放大器的网络的机辅分析；模拟乘法器及其组成的基本运算电路；检波器；限幅器与比较器；正弦波发生器与波形发生器； D/A 与 A/D 转换器；集成锁相环路与应用；开关电容电路等。并附有必要的程序和习题。

本书可作为工科高等院校电子与自控类专业的模拟集成电路应用课程的教材，也可作为工程技术人员学习模拟集成电路应用方法的参考书。

模拟集成电路的应用

陈秀中 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 17.625 插页 1 字数 140 000

1988年9月第1版 1983年9月第1次印刷

印数 0001—3,850

ISBN 7-04-000290-6/TN·45

定价 6.35 元

前 言

当前电子技术发展最突出的特点之一就是**高速度**。这集中体现在微电子技术的发展、集成电路集成度的增长,以及集成电路应用的普及。在这种形势下,为了使教学水平和科学技术的发展相适应,在本书中尽量考虑了教学内容的更新,学科的长远发展和目前教学现状的可行性等问题。

本书在内容编选上,除主要讲述运算放大器的应用外,还以较多的篇幅介绍了模拟乘法器、集成定时器、**D/A**与**A/D**转换器、集成锁相环和开关电容电路等一些通用型集成电路的基本原理及应用。

另外,当前是计算机进入社会各个领域的时代,它对教育的改革和发展也起了很大的推动作用。目前各学科、专业的课程都在积极引入这一新技术。对于“模拟集成电路应用”课中的机辅分析与设计,本书主要做了如下考虑。

在计算机辅助分析方面主要解决两个问题:一是介绍了集成运算放大器宏模型的建立方法,以作为对集成电路建模的基础;二是提供了与模型相适应的分析程序,以使机辅分析切实可行。

众所周知,对于分立元件电路或集成电路的内部电路的机辅分析,不少书中已有介绍。在分析中所用的器件级模型也已比较成熟。但是,对于集成电路的应用电路的机辅分析是否仍可用器件级模型呢?事实说明是困难的。这是因为应用电路一般都要含有几个集成电路片子,而每一只集成电路片子就至少含有几十只管子。所以,尽管一个晶体管的模型并不显得十分复杂,但对应用电路若仍用器件级模型来模拟,则必然是电路的支路数、节点数很多,整体电路十分复杂,使分析和设计所占的内存和机时都很大,

不仅不能使用微型机,甚至使一般中、小型机都难以胜任。所以集成电路应用系统的机辅分析所面临的首要问题,就是如何建立起一种电路简单,支路数与节点数都比原电路大大减少,但又能模拟出原集成电路主要特性的模型(又称集成电路宏模型)。为此,在本书的第三章和第五章中,介绍了理想运算放大器的宏模型与其机辅分析方法;非理想运算放大器的交流小信号激励下的宏模型的建立方法和在大信号激励下的运算放大器的非线性宏模型的建立方法。介绍这些内容的目的,一方面由于运算放大器的这几种宏模型具有一定的实用价值,但更多的是考虑到通过这两章的学习,能够了解与掌握集成电路建模的基本方法,为以后的自学与研究打下基础。

电路的分析程序一般是通用性强且程序规模比较大,编写起来比较麻烦。如果让读者学习该内容时自己去编写分析程序是不切实际的。所以在第三章中附有益于分析含有理想运算放大器网络的通用分析程序(IOAN 程序),该程序采用 BASIC 语言,比较简短,可用于微型机。关于交流小信号激励下的运算放大器宏模型电路的分析,本书也提供了一个采用 FORTRAN 语言的通用分析程序(ROAN 程序)。该程序可用来分析含有非理想运算放大器和受控源的线性电路,也可以处理含有理想运算放大器的电路,它可以代替 IOAN 程序。但考虑到 IOAN 程序简短、适用于各种微机、便于教学使用并能解决一定实际问题,故本书中仍然保留。关于在大信号激励下的运算放大器的非线性宏模型电路的分析程序,直接借用了当前国内在电路分析方面使用最普及的 SPICE 程序。为此,书中所介绍的运算放大器的非线性宏模型是以适用于 SPICE 程序为前提建立的。

这样,虽然本书只在第三章和第五章中直接讲述了集成电路宏模型与机辅分析的问题。实际上作为一种方法,它具有很广泛的应用面。所介绍的模型与分析程序均有较强的通用性,适用于

运算放大器的各种应用电路的线性与非线性工作状态的分析。

关于机辅设计,与分析不同,突出的是专用性,不同的电路要有不同的设计方法和专用设计程序。而应用电路种类很多,所以机辅设计应着重用来解决那些电路比较复杂,设计比较麻烦,甚至用手工难以做定量计算的电路,本书在第二章 RC 有源滤波器的设计中和第八章的函数电路的设计中引入了机辅设计的方法。

本书可作为高等学校电子与自控等专业的学生学习模拟集成电路的教材或参考书。作为讲义曾在天津大学电子工程系 84 级无线电技术与仪器专业使用过。

本书的第十章由孙庆萱同志编写,第十二章由武瑞恒同志编写,其它各章均由陈秀中同志编写。

本书由清华大学王筱颖副教授主审,对书的结构、内容、文字均提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。另外,在编写过程中,还得到李兰友同志的帮助。何璠、苏文钧、陈莹、党劲松等同志在调试程序与实验中做了一定的工作。在此一并表示谢意。

由于电子技术的发展日新月异,加之作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,请读者多加指正。

作者

1987 年 3 月

目 录

第一章 理想运算放大器的特性与基本运算电路	I
§ 1-1 理想运算放大器的特性	1
§ 1-2 反相运算放大器	2
1-2-1 反相比例器	3
1-2-2 反相加法器	4
1-2-3 高输入电阻的反相比例器	6
§ 1-3 同相运算放大器	12
1-3-1 同相比例器	12
1-3-2 电压跟随器	16
1-3-3 同相加法器	17
§ 1-4 差动放大器	18
1-4-1 基本差动放大器	18
1-4-2 高输入阻抗的差动放大器	23
§ 1-5 积分器	30
1-5-1 基本积分器	30
1-5-2 求和积分器	31
1-5-3 同相积分器	32
1-5-4 差动积分器	33
§ 1-6 微分器	35
1-6-1 基本微分器	35
1-6-2 差动微分器	36
§ 1-7 对数与反对数运算电路	37
1-7-1 对数运算电路	37
1-7-2 反对数运算电路	41
习题	43

第二章 RC 有源滤波器	55
§ 2-1 概述	55
§ 2-2 有源滤波器的种类与基本性能	56
2-2-1 低通滤波器	56
2-2-2 高通滤波器	57
2-2-3 带通滤波器	57
2-2-4 带阻滤波器	59
§ 2-3 二阶有源滤波器的传递函数	59
2-3-1 二阶有源滤波器传递函数的普遍形式	59
2-3-2 各种类型滤波器二阶节的传递函数与频响特性	60
2-3-3 阻尼系数 α (或品质因数 Q) 对滤波器性能的影响	66
§ 2-4 二阶有源滤波器电路的设计	70
2-4-1 MFB 型滤波器	70
2-4-2 VCVS 型滤波器	83
§ 2-5 二阶有源滤波器的设计框图、程序与设 计实例	92
2-5-1 低通滤波器	92
2-5-2 高通滤波器	97
2-5-3 带通滤波器	100
2-5-4 带阻滤波器	102
习题	105
第三章 含有理想运算放大器的网络的计算机辅助 分析	106
§ 3-1 含有理想运算放大器的网络约束方程的 建立	106
§ 3-1-1 理想运算放大器的零子-任意子模型	106
§ 3-1-2 约束方程的建立	108
§ 3-2 含有理想运算放大器的网络的分析程序与 应用实例	112

3-2-1 含有理想运算放大器的网络的分析程序	112
3-2-2 应用实例	123
习题	127
第四章 运算放大器的特性参数及其对电路性能的影响	130
§ 4-1 集成运算放大器的主要性能参数	130
§ 4-2 $A_{vd}(s)$ 、 $Z_{id}(s)$ 、和 $Z_o(s)$ 对电路性能的影响	135
4-2-1 反相放大器	135
4-2-2 同相放大器	142
4-2-3 跟随器	146
§ 4-3 共模抑制比 $K_{CMR}(s)$ 对电路性能的影响	148
4-3-1 考虑运算放大器共模效应时的电路模型	148
4-3-2 $K_{CMR}(s)$ 对差动放大器输出电压的影响	149
§ 4-4 直流失调与温度漂移	152
4-4-1 直流失调对电路的影响	152
4-4-2 失调的温度漂移	156
附录 常用的几种运算放大器的性能参数表	157
习题	161
第五章 运算放大器的宏模型	163
§ 5-1 简介	163
§ 5-2 运算放大器的线性宏模型	165
5-2-1 运算放大器的交流小信号宏模型的建立方法	165
5-2-2 模拟方法的几点讨论	171
5-2-3 线性宏模型的应用实例	177
§ 5-3 运算放大器的非线性宏模型	185
5-3-1 运算放大器的转换速率	185
5-3-2 运算放大器的大信号非线性宏模型的建立	194
5-3-3 宏模型的应用实例	206

附录 可用来分析含有理想或非理想运算放大器的线性网络的通用分析程序——ROAN 程序	210
习题	231
第六章 模拟乘法器与其基本应用电路	233
§ 6-1 可变互导集成模拟乘法器	234
6-1-1 基本工作原理	234
6-1-2 双平衡模拟乘法器	237
6-1-3 线性化可变互导型模拟乘法器	240
§ 6-2 乘法器的基本运算电路	254
6-2-1 乘法与乘方运算	254
6-2-2 除法与开方运算	254
习题	260
第七章 检波器、限幅器与比较器	263
§ 7-1 线性检波与绝对值电路	263
7-1-1 线性检波(半波整流)电路	263
7-1-2 绝对值(全波整流)电路	265
§ 7-2 限幅电路	274
7-2-1 二极管单向限幅器	276
7-2-2 二极管双向限幅器	278
7-2-3 稳压管双向限幅器	282
7-2-4 稳压管桥式双向限幅器	284
7-2-5 区间限幅器	286
§ 7-3 电压比较器	290
7-3-1 零电平比较器	290
7-3-2 任意电平比较器	291
7-3-3 迟滞比较器	293
7-3-4 双限比较器	301
习题	306
第八章 函数发生器	311

§ 8-1 二极管函数电路	311
8-1-1 用折线逼近正弦曲线的方法	311
8-1-2 二极管函数电路	313
§ 8-2 幂级数和函数的近似	317
8-2-1 正弦函数发生器	317
8-2-2 任意函数发生器	338
习题	353
第九章 信号发生电路	355
§ 9-1 正弦波发生器	355
9-1-1 正弦波发生器的振荡条件	355
9-1-2 文氏电桥正弦波发生器	356
9-1-3 移相式正弦波发生器	369
9-1-4 积分式正弦波发生器	371
9-1-5 双T选频网络正弦波发生器	374
§ 9-2 方波与三角波发生器	380
9-2-1 方波发生器	380
9-2-2 方波和三角波发生器	383
§ 9-3 脉冲和锯齿波发生器	387
9-3-1 门限电位不对称的脉冲发生器	387
9-3-2 积分时间常数不等的脉冲波和锯齿波发生器	389
§ 9-4 阶梯波发生器	392
§ 9-5 集成定时器——5G555 的应用	396
9-5-1 5G555 的工作原理	396
9-5-2 单稳态触发器	398
9-5-3 多谐振荡器	402
9-5-4 施密特触发器	402
习题	404
第十章 数模(D/A)与模数(A/D)转换器	409
§ 10-1 D/A 转换器	410

10-1-1	D/A 转换器的基本原理与电路	410
10-1-2	单片集成 D/A 转换器	413
§ 10-2	A/D 转换器	427
10-2-1	双积分 A/D 转换器	427
10-2-2	并联型 A/D 转换器	433
10-2-3	逐次逼近型 A/D 转换器	434
10-2-4	256 R 全 MOS 模-数转换器	436
§ 10-3	D/A 与 A/D 转换器的基本参数	438
§ 10-4	应用实例	444
10-4-1	A/D 转换器在数字式直流电压表中的应用	444
10-4-2	数据采集系统	447
习题		450
第十一章	集成锁相环路与应用	452
§ 11-1	锁相环路的基本工作原理	452
11-1-1	锁相环(PLL)的组成	452
11-1-2	锁相环的基本方程和相位模型	456
11-1-3	环路传递函数	459
§ 11-2	环路的主要部件与集成化	461
11-2-1	压控振荡器	461
11-2-2	鉴相器	469
11-2-3	单片集成锁相环实例	478
§ 11-3	锁相环路的应用	483
11-3-1	锁相环鉴频器	483
11-3-2	锁相环在频率合成技术中的应用	485
11-3-3	倍频、分频和移频电路	487
习题		438
第十二章	开关电容电路	492
§ 12-1	开关电容电路的基本概念及特点	492
§ 12-2	基本开关电容电路	498

12-2-1 其它形式的开关电容等效电阻电路	496
12-2-2 简单开关电容电路	501
§ 12-3 开关电容电路的解析分析方法	504
12-3-1 开关电容网络中的信号	504
12-3-2 开关电容网络的时域分析	505
12-3-3 开关电容网络的频域分析	508
§ 12-4 开关电容滤波器	516
12-4-1 双线性映射和 LDI 映射	519
12-4-2 由双线性映射构成 SC 滤波器	522
12-4-3 跳耦型 SC 滤波器的构成	526
12-4-4 典型开关电容滤波器件及其应用实例	533
§ 12-5 开关电容网络的计算机辅助分析	535
12-5-1 改进节点法	535
12-5-2 等效电路法	538
习题	548
参考文献	549

第一章 理想运算放大器的特性 与基本运算电路

§ 1-1 理想运算放大器的特性

为了分析问题简便起见，在应用电路中常将运算放大器视为理想器件，并用图 1-1 所示的符号表示。图中符号“-”代表运算放大器的反相输入端， V_- 是这个端子对地的电压。符号“+”代表同相输入端， V_+ 是同相输入端子对地的电压。 V_o 是输出端子对地的电压。

理想运算放大器是指放大器的各项性能参数为理想值。主要是：

- i) 开环增益无限大；
- ii) 输入阻抗无限大；
- iii) 输出阻抗为零；
- iv) 输入失调电压和失调电流为零；

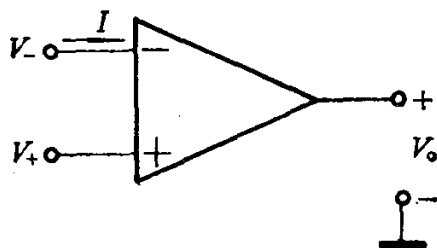


图 1-1 理想运算放大器符号

- v) 共模抑制比无限大；

- vi) 带宽无限大。

由上述条件可以导出理想运算放大器的两个重要特性。

特性 I 由于理想运算放大器的开环增益趋近于无限大，即

$$\frac{V_o}{V_+ - V_-} \rightarrow \infty$$

$$V_+ - V_- \rightarrow 0$$

所以可以认为理想运算放大器的两个输入端之间的电压差为零，即

$$V_+ = V_-$$

特性 II 由于理想运算放大器的输入阻抗趋近于无限大，所以流经放大器两输入端的电流也趋近于零。即

$$I \rightarrow 0$$

尽管真正理想的运算放大器是不能获得的，但是理想运算放大器的概念和由它而导出的两个特性很重要。这是因为用理想运算放大器的特性来分析电路，可使问题大大简化，而所得到的结果又与实际情况十分接近。

§ 1-2 反相运算放大器

在由运算放大器组成的各种运算电路中，如果输入信号从反相输入端引入，则属于反相运算电路。它的基本电路形式如图 1-2 所示。图中 Z_1 和 Z_f 为反馈电路元件， Z_p 为温度补偿元件。为了确保运算放大器处于对称平衡状态，应使从反相输入端和从同相输入端向外部看去的等效直流电阻相等，即元件选择时应使 $Z_p = Z_f \parallel Z_1$ 。

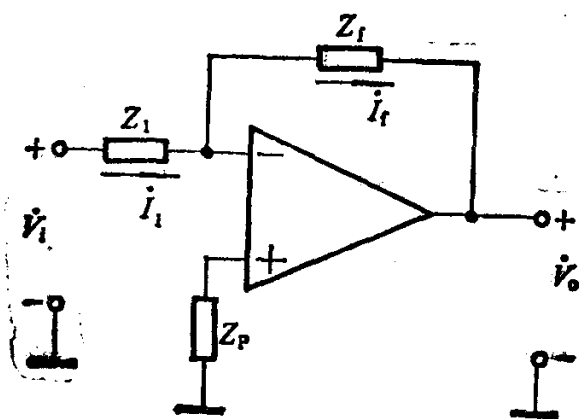


图 1-2 反相运算电路

如果将运算放大器视为理想器件, 根据理想运算放大器的特性 II 可知, 流经运算放大器两输入端的电流为零, 则有

$$V_+ = 0$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_f$$

再由理想运算放大器特性 I, 运算放大器两输入端之间的电压差应为零, 可得

$$V_- = V_+ = 0$$

这种反相端电位为零的现象是反相运算放大器的共同特点, 叫做虚地。由此得出

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_1}$$

$$\dot{I}_f = -\frac{\dot{V}_o}{Z_f}$$

由上述关系式可得出图 1-2 所示的反相运算电路输出-输入电压的关系式为

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_1} = -\frac{Z_f}{Z_1} \quad (1-1)$$

如果用不同的电阻、电容网络来组成 Z_f 和 Z_1 , 就能得到功能不同的各种反相运算电路。例如反相比例器、积分器、微分器、有源滤波器和有源校正电路等。

1-2-1 反相比例器

用电阻 R_f 、 R_1 和 R_p 分别代替图 1-2 电路中的 Z_f 、 Z_1 和 Z_p , 则构成反相比例器。电路如图 1-3 所示。

反相比例器的闭环电压增益 A_{vf} 可根据式(1-1)求得

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1-2)$$

式(1-2)表明, 在运算放大器具有理想特性时, 反相比例器的电压增益 A_{vf} 仅与外电路的电阻有关, 而与运算放大器本身的参数无关。选用相应的电阻比值 R_f/R_1 , 就可得到所需要的电压增益

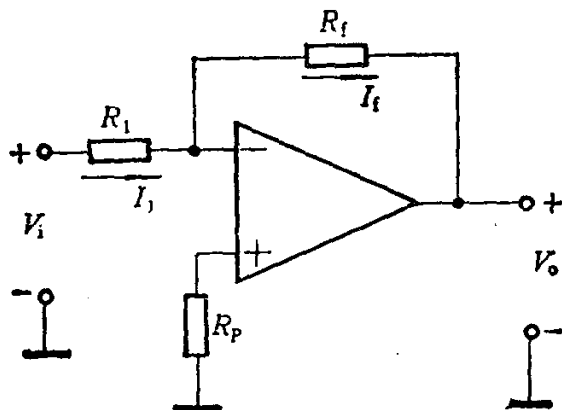


图 1-3 反相比例器

A_{vf} 。由于电阻的精度和稳定性很高,所以闭环电压增益的精度和稳定性也是很高的,这是运算放大器在深度负反馈条件下工作的一个重要优点。式(1-2)中的负号表明输出电压 V_o 和输入电压 V_i 之间的相位相反。

当 $R_1 = R_f = R$ 时,由式(1-2)可得

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = -1$$

这时图 1-3 所示电路就是最简单的单位增益反相器,简称反相器。

考虑到反相端是“虚地”,电位为零,所以反相比例器的输入电阻 R_{if} 就等于电阻 R_1 。即

$$R_{if} = \frac{V_i}{I_1} = R_1 \quad (1-3)$$

应当指出的是,上述运算结果是在运算放大器的参数为理想的条件下引入深度负反馈而得出的。实际上,运算精度既与外电路元件的参数有关,也与集成运算放大器本身的特性参数有关。

1-2-2 反相加法器

反相加法器的电路如图 1-4 所示。由于反相端为“虚地”,故三个输入电压彼此独立地通过自身的输入回路电阻,并转换成下