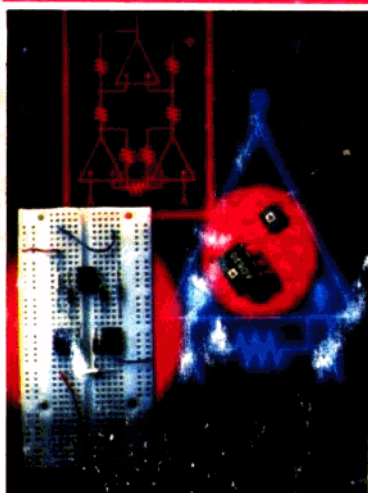
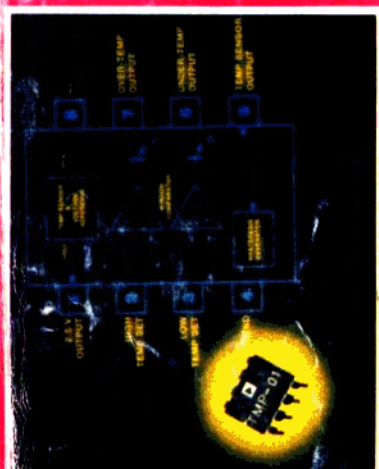


模拟集成电路

——原理及应用

谈文心 钱聪 宋云娴



西安交通大学出版社

前 言

模拟集成电路是 60 年代中期发展起来的一类新型电路,随着集成工艺水平和电路设计技术的不断提高,模拟集成电路的新品种,新产品日益增多,能实现的功能范围迅速扩大,目前已广泛用于通信、广播、测量、计算机和自动控制等电子技术领域。本书系统地介绍模拟集成电路几个重要分支的基本电路原理,国内外常用芯片及其典型应用。可作为电类本科或专科学生的选修课教材,在学习“电子技术”课程的基础上进一步拓宽知识面,深入掌握模拟集成电路中常用芯片的主要特性及其应用时外围电路的正确设计,也可供有关科研与工程技术人员参考。期望本书能在电子技术领域中推广集成电路应用、进行技术革新方面起到一点作用。

本书共分 8 章。第 1 章介绍了几种新型集成运放、集成宽放、集成功放的电路结构及其典型应用;第 2 章全面阐述由集成运放实现的各种信号处理电路,尤其对高阶有源滤波器的设计有详细的分析和设计举例;第 3、4、5 章分别介绍了单片集成四象限模拟乘法器、集成定时电路和集成锁相环路的工作原理及各种应用电路;第 6 章介绍在微型计算机应用中模拟通道的主要部件 A/D 和 D/A 芯片,采样保持电路和多路模拟开关,列举了较多转换芯片与计算机接口的实例;第 7 章重点介绍开关型集成稳压器的基本原理及其应用;第 8 章介绍几种通信专用集成电路,有编译码器、调制解调器、音频压缩扩展器等。编写时注意精选内容和理论联系实际,列举了大量国内外集成片应用实例,尽可能做到深入浅出,反映当前新器件、新技术的现状,每章后附有思考题和习题,以帮助读者加深理解。

本教材由西安交通大学、西安通信学院、西安空军工程学院的有关教师联合编写。西安交通大学谈文心编写第 3、4、5 章和附录,并和西安空军工程学院宋云娴共同编写第 1、2 章;西安通信学院钱聪编写第 6、7、8 章,谈文心负责全书的统稿工作。

本教材承西安电子科技大学孙肖子教授审阅,并提出许多宝贵意见,在此致以衷心的感谢。

由于我们的水平和学识有限,书中难免有错误或不妥之处,恳请读者提出批评和指正。

编 者

1994 年 3 月

目 录

第1章 线性集成放大电路

1.1 集成运算放大器	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 理想运算放大器及其基本放大电路	(4)
1.1.3 集成运放的信号运算电路	(6)
1.1.4 $V-I$ 和 $I-V$ 变换器	(13)
1.2 集成运算放大器产品介绍	(14)
1.2.1 CMOS 集成四运放 5G14573	(15)
1.2.2 高精度集成运放 5G0P07D	(16)
1.2.3 隔离运算放大器 (ISO AMP) 289	(19)
1.2.4 集成数据放大器 AD624	(20)
1.3 集成宽带放大器	(23)
1.3.1 集成宽带放大器 F733	(23)
1.3.2 集成宽带高增益放大器 F1590	(24)
1.3.3 集成宽带放大器 CX35	(25)
1.3.4 超高频集成宽带放大器 μ PC1651	(26)
1.4 集成功率放大器	(28)
1.4.1 单片集成功率放大器 LM386	(29)
1.4.2 集成低频功率放大器 TDA2040	(30)
1.4.3 大功率集成功率放大器 LM12	(31)
1.4.4 双声道音频集成功率放大器 TA7232P	(33)
思考题与习题	(34)

第2章 集成运放实现的信号处理电路

2.1 电压比较器	(36)
2.1.1 简单电压比较器	(36)
2.1.2 具有迟滞特性的电压比较器	(39)
2.1.3 单片集成电压比较器	(41)
2.2 波形发生器	(44)
2.2.1 方波发生器	(44)
2.2.2 三角波发生器	(45)
2.2.3 脉冲和锯齿波发生器	(46)
2.2.4 正弦波振荡器	(47)
2.3 波形变换电路	(49)

2.3.1 绝对值电路和峰值检波电路	(50)
2.3.2 限幅电路和箝位电路	(51)
2.4 有源滤波器	(52)
2.4.1 有源低通滤波器	(53)
2.4.2 有源高通滤波器	(58)
2.4.3 有源带通滤波器	(59)
2.4.4 有源带阻滤波器	(62)
2.4.5 状态变量滤波器及其应用	(64)
2.4.6 开关电容滤波器	(67)
思考题与习题	(71)

第3章 模拟乘法器及其应用

3.1 模拟相乘的基本概念	(73)
3.1.1 乘法器的工作象限	(73)
3.1.2 理想乘法器的基本性质	(73)
3.2 变跨导模拟乘法器的工作原理	(75)
3.2.1 跨导型运算放大器	(75)
3.2.2 双平衡模拟乘法器	(78)
3.3 模拟乘法器的应用	(81)
3.3.1 模拟运算电路	(81)
3.3.2 函数发生器和波形变换电路	(84)
3.3.3 模拟乘法器在通信电路中的应用	(85)
3.4 单片集成模拟乘法器及其典型应用	(91)
3.4.1 MC1496/MC1596 及其应用	(92)
3.4.2 MC1495/MC1595 及其应用	(96)
3.4.3 MC1494/MC1594 及其应用	(100)
3.4.4 单片集成模拟乘法器 XR2208/XR2208M 及其应用	(103)
3.4.5 线性化乘除器 AD532 及其应用	(105)
3.4.6 高性能乘除器 AD534 及其应用	(107)
思考题与习题	(109)

第4章 集成定时电路

4.1 单片定时电路的工作原理	(112)
4.1.1 555 电路的组成部分	(112)
4.1.2 555 电路的型号、封装和主要参数	(114)
4.2 555 电路的基本模式及其应用电路	(116)
4.2.1 单稳态模式及其应用	(116)
4.2.2 双稳态模式及其应用	(121)
4.2.3 无稳态多谐振荡模式及其应用	(124)

思考题与习题	(131)
--------	-------

第5章 锁相环原理及应用

5.1 锁相环的基本原理	(132)
5.1.1 锁相环的组成部件	(132)
5.1.2 锁相环工作过程	(135)
5.1.3 锁相环的典型应用	(137)
5.2 单片集成锁相环及其应用	(141)
5.2.1 集成锁相环组成部件电路分析	(142)
5.2.2 通用型低频集成锁相环 NE565	(147)
5.2.3 通用单片集成锁相环 NE562	(150)
5.2.4 超高频通用单片集成锁相环 NE564	(153)
5.2.5 单片集成锁相环 NE567	(154)
5.2.6 CMOS 单片集成锁相环 CD4046	(157)
思考题与习题	(161)

第6章 变换与接口电路

6.1 采样保持电路	(163)
6.1.1 采样与保持的基本原理	(163)
6.1.2 采样保持集成电路及其应用	(164)
6.2 D/A 和 A/D 转换的基本原理	(166)
6.2.1 D/A 转换的基本原理	(166)
6.2.2 A/D 转换的基本原理	(168)
6.3 常用 A/D、D/A 转换集成电路及其应用	(170)
6.3.1 D/A 转换集成电路及其应用	(170)
6.3.2 A/D 转换集成电路及其应用	(178)
6.4 V/F 和 F/V 变换集成电路及其应用	(186)
6.4.1 AD650 V/F(F/V)变换器	(186)
6.4.2 VFC32	(189)
6.4.3 V/F 变换器应用举例	(191)
6.5 变换电路与计算机的接口	(192)
6.5.1 多路模拟开关	(192)
6.5.2 D/A 转换芯片与计算机的接口	(193)
6.5.3 A/D 转换芯片与计算机的接口	(195)
6.5.4 V/F 变换器与计算机的接口	(196)
思考题与习题	(197)

第7章 集成稳压器

7.1 线性集成稳压器及其应用	(199)
-----------------	-------

7.1.1	线性集成稳压器的基本原理	(199)
7.1.2	线性集成稳压器的主要技术指标	(201)
7.1.3	线性集成稳压器及其应用	(202)
7.1.4	线性稳压电源的设计举例	(211)
7.2	开关型集成稳压器及其应用	(213)
7.2.1	开关稳压的基本原理	(213)
7.2.2	集成开关稳压器及其应用	(216)
7.3	DC-DC 变换器	(228)
7.3.1	ICL7660	(228)
7.3.2	DC91-1/91-2 直流变换器	(230)
	思考题与习题	(231)

第 8 章 通信专用集成电路

8.1	编译码器	(235)
8.1.1	PCM 的基本原理	(235)
8.1.2	CSC2914/29C14 PCM 编译码和滤波器	(237)
8.1.3	YYH26/27/28 编译码器	(241)
8.1.4	SC22103 AMI/HDB3 编译码器	(243)
8.2	调制解调器	(247)
8.2.1	SC3417/3418 增量调制解调器	(247)
8.2.2	SC8880 双音多频调制解调器	(249)
8.3	其它通信专用集成电路	(252)
8.3.1	CSC22100 4×4 模拟开关阵列电路	(252)
8.3.2	NE570/571 音频压缩扩展器	(254)
8.3.3	UM91210 C/D 脉冲/双音频兼容发号电路	(257)
	思考题与习题	(259)
附录一 我国集成电路的型号命名		(260)
附录二 国内集成电路主要生产厂家的产品标识词头		(261)
附录三 国外集成电路主要生产厂家的产品标识词头		(262)
参考资料		(263)

随着集成电路技术的发展,线性集成放大电路的应用日益广泛。本章主要介绍集成运算放大器的电路结构、技术指标及对其构成的基本放大、运算电路的分析。并介绍几种典型的单片集成运算放大器及其实际应用电路,同时介绍几种常用的单片集成宽带放大器和单片集成功率放大器及其应用实例。

1.1 集成运算放大器

1.1.1 概述

模拟集成电路分为线性集成电路和非线性集成电路。通常将输出信号和输入信号的变化成线性关系的集成电路称为线性集成电路;将输出信号和输入信号的变化不成线性关系的集成电路称为非线性集成电路。

在模拟集成电路发展初期,主要是研制线性集成电路即集成运算放大器,简称集成运放,它因用于模拟量的数学运算(如加、减、微分、积分等)而得名。目前,它已成为一种通用性很强的功能部件,在信息处理、自动控制、测量仪表及其它电子设备中得到越来越广泛的应用。

集成运放的发展可分为以下几个阶段。1964年问世的 $\mu A702$ (我国的F001)是小规模集成电路,属于第一代;1966年问世的第二代运放如 $\mu A741$ (我国的F007)属于中规模集成电路,其特点是内部电路采用恒流源负载;1972年问世的第三代运放如MC1556(我国的4E325),内部电路中差动输入级采用超 β 晶体管($\beta = 1\,000 \sim 5\,000$);1973年问世的第四代运放如HA2900,ICL7650(我国的5G7650)集成度高,已达大规模水平,内部电路采用调制,解调技术,且能自动稳零。电路中既有场效应管,又有双极型三极管。

由于MOS管具有制造工艺简单、集成度高、功耗低等优点,70年代中期应用大规模,超大规模技术制成全MOS运放。

以上介绍的属于通用型集成运放。还有为满足某些特定要求而设计的各种专用型集成运放,如高速型、高压型、低温漂移型、低功耗型等等。还有在一个芯片上同时集成二个、三个、四个甚至六个相同运放的器件,有助于简化电路,缩小体积,特别是要求几路对称时,选用多运放更具有优越性。

1. 集成运算放大器的组成

集成运放的符号如图1-1(a)所示,它有两个输入端:“+”号表示同相输入端,“-”号表示反相输入端。另外,它还有一个输出端。电源电压端及其它可省略不画。

集成运算放大器的内部电路大多为直接耦合多级放大器,一般由四部分电路组成,见图

1-1 (b) 所示。图(c) 为单片中增益集成运放 MC1530 的内部电路图。

(1) 输入级。运放通常是具有恒流源的差动放大电路,以获得尽可能低的零点漂移,尽可能高的共模抑制比以及良好的输入特性。图(c)中,由 T_2, T_3 构成差动输入级, R_2, R_3 为集电极负载, $T_1, R_1, R_4, D_1, D_2, R_5$ 构成恒流源电路。

(2) 中间放大级。它提供尽可能高的电压增益,另外还具有将双端输入转换为单端输出及直流电平移动的作用,使运放实现零输入时零输出。图(c)中,由 T_4, T_5, R_7 构成双端输入、单端输出的差动放大器, T_6 构成射极跟随器, T_7, D_3, R_8 构成有源负载, R_9 起直流电平移位作用。

(3) 输出级。它直接与负载相连,要求它具有足够大的输出电压和输出电流,即有足够的输出功率。输出级一般由射极输出器或互补推挽电路组成,有时为避免过负荷损坏器件,设有过流保护电路。图(c)中由 T_8 构成功放前置放大, R_{11} 为负载电阻, T_9 构成射极输出器, T_{10}, D_4 为其有源负载。

(4) 偏置电路。它向各级放大器提供偏置电流,以设置稳定合适的静态工作点,并提供

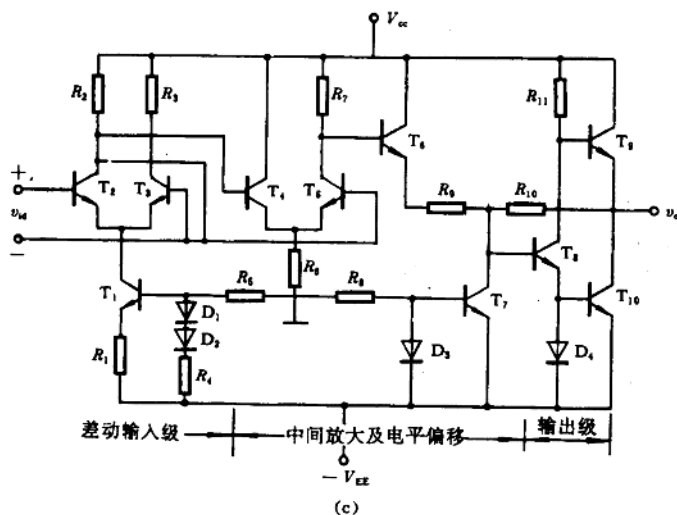
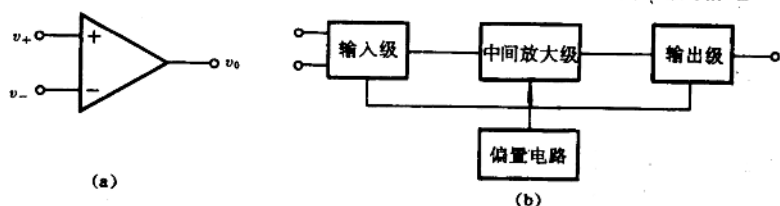


图 1-1 (a) 集成运放符号; (b) 组成框图; (c) MC1530 内部电路图

恒流源。图(c)中 $D_1 \sim D_4, R_4, R_5, R_6, R_8$ 及 T_1, T_7, T_{10} 共同构成偏置电路。

集成运放除了上述四个主要部分外,还可外接调零电路和 RC 相位补偿电路。

2. 集成运算放大器的主要电参数

(1) 输入失调电压 V_{io} 和输入失调电流 I_{io} 。

输入失调主要反映运放输入级差动电路的不对称性。要使零输入时输出端为零电位,运放

两输入端之间必须外加的直流补偿电压,称为输入失调电压,用 V_{I0} 表示;必须外加的直流补偿电流,称为输入失调电流,用 I_{I0} 表示。

(2) 失调温漂

在规定的工作温度范围内, V_{I0} 随温度的平均变化率,称为输入失调电压温漂,以 $\frac{dV_{I0}}{dT}$ 表示。

在规定的工作温度范围内, I_{I0} 随温度的平均变化率,称为输入失调电流温漂,以 $\frac{dI_{I0}}{dT}$ 表示。

(3) 输入偏置电流 I_{IB}

当运放输入电压为零时,两输入端偏置电流的平均值,称为输入偏置电流,用 I_{IB} 表示。

(4) 开环差模电压增益 A_{vd} 。

运放在开环状态,工作于线性区时,其输出电压变化与差模输入电压变化的比值称为开环差模电压增益,用 A_{vd} 表示,常用分贝 (dB) 为单位。

(5) 共模抑制比 K_{CMR}

运放工作在线性区时,其差模电压增益 A_{vd} 与共模电压增益之比称为共模抑制比。常以分贝为单位。

(6) 差模输入电阻 R_d

运放的两个差动输入端之间的等效动态电阻,称为差模输入电阻。

(7) 输出电阻 R_o 。

在运放输出端加信号电压后,此电压变化量与对应的电流变化量之比值称为输出电阻。

(8) 最大差模输入电压 V_{dm}

运放两输入端所允许加的最大电压差,称为最大差模输入电压。

(9) 最大共模输入电压 V_{cm}

当运放的共模抑制特性显著变坏时的共模输入电压即为最大共模输入电压。

(10) 输出峰-峰电压 V_{opp}

是指在特定的负载 ($7k\Omega$ 或 $10k\Omega$) 条件下,运放能输出最大电压幅值,正、负向的输出电压摆幅可能不同。

(11) 带宽

运放的开环电压增益从直流增益下降 3dB (或直流增益的 0.707 倍) 时所对应的频带宽度称为开环带宽,也称 -3dB 带宽,用 BW 表示。

运放开环电压增益下降到 1 时的频带宽度,称为单位增益带宽,用 f_c 表示。

(12) 转换速率 (压摆率) S_R

在额定的负载条件下,当输入阶跃大信号时,运放输出电压的最大变化率称为转换速率。该指标反映运放对高速变化的输入信号的响应情况。

(13) 全功率带宽 BW_P

在额定负载条件下,运放接成单位增益组态,当输入正弦大信号时,使输出电压幅度达到最大 (在规定的失真条件下,通常失真为 1%) 的信号频率,称为全功率带宽。

一般情况, S_R 与 BW_P 之间近似关系为

$$BW_P = \frac{S_R}{2\pi V_{om}}$$

式中 V_m 为运放输出的峰值电压。

1.1.2 理想运算放大器及其基本放大电路

1. 理想运算放大器及其特性

在大多数情况下,将运放视为理想运放,就是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 $A_{vd} = \infty$

输入阻抗 $R_{id} = \infty$

输出阻抗 $R_o = 0$

带宽 $BW = \infty$

失调与漂移均为零

理想运放在线性应用时的两个重要特性:

(1) 输出电压 v_o 与输入电压之间满足关系式

$$v_o = A_{vd}(v_+ - v_-) \quad (1-1)$$

由于 $A_{vd} = \infty$, 而 v_o 为有限值, 因此, $v_+ - v_- \approx 0$, 即 $v_+ \approx v_-$, 称为“虚短”。

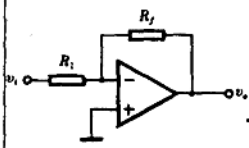
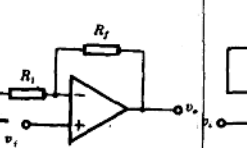
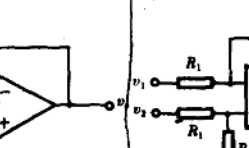
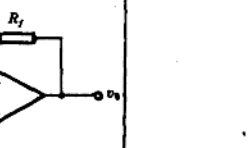
(2) 由于 $R_{id} = \infty$, 故流进两个输入端的电流可视为零, 即 $I_m \approx 0$, 称为“虚断”。这说明运放对其前级吸取电流极小。

上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本规则, 可简化运放电路的计算。

2. 基本放大电路

由理想运放组成的基本放大电路有反相放大器、同相放大器、同相跟随器和差动放大器, 其原理电路和输入、输出电压之间的关系如表 1-1 所列。

表 1-1 集成运算放大器的基本放大电路

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	$v_o = -\frac{R_f}{R_i} v_i$	$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_i}) v_i$	$v_o = v_i$	$v_o = \frac{R_f}{R_i} (v_{i1} - v_{i2})$
输入阻抗	R_i (低)	∞	∞	∞
输出阻抗	0	0	0	0

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。下面以反相放大器为例,讨论当 $A_{vd} \neq \infty$ 和 $R_{id} \neq \infty$ 时所产生的误差。

图 1-2 为反相放大器的等效电路。由图可得

$$I_1 = I_f + I_B \quad \text{即} \quad \frac{v_i - v_-}{R_1} = \frac{v_- - v_o}{R_f} + \frac{v_-}{R_{id}}$$

将 $v_- = -\frac{v_o}{A_{vd}}$ 代入上式,可解得

$$\begin{aligned} \frac{v_o}{v_i} &= -\frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}}} \\ &= -\frac{R_f}{R_1} \left[1 - \frac{\frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}}}{1 + \frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}}} \right] \end{aligned}$$

上式与理想运放的计算结果相比较,相对误差 δ_A 为

$$\begin{aligned} \delta_A &= \frac{\frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}}}{1 + \frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}}} \\ &\approx \frac{1}{A_{vd}}(1 + \frac{R_f}{R_1}) + \frac{R_f}{A_{vd}R_{id}} \end{aligned} \quad (1-2)$$

上式中,第一项代表 $A_{vd} \neq \infty$ 时产生的误差;第二项代表 $R_{id} \neq \infty$ 时产生的误差。因此 A_{vd} 愈大, R_f/R_{id} 和 R_f/R_1 愈小,则 δ_A 愈小,计算精度愈高。

【例】在反相放大器中,已知 $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $R_f = 1\text{M}\Omega$,采用集成运放 F007 时 $A_{vd} = 10^5$, $R_{id} = 2\text{M}\Omega$,求相对误差 δ_A 。

解:
$$\delta_A = \frac{1}{10^5} \left(1 + \frac{1000}{100} \right) + \frac{1}{10^5 \times 2} = 1.15 \times 10^{-4}$$

可见,产生的误差较小(一般 δ_A 在千分之几以下),因此为分析方便,常将集成运放当作理想运放处理。

3. 交流放大电路

采用电容耦合的交流放大器可不考虑运放输入失调的影响。

(1) 反相交流放大器

在放大交流信号时可采用交流放大器。图 1-3 是运放构成的反相交流放大器, C 为耦合电容,输出电压 V_o 为

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1 + \frac{1}{sC}} V_i$$

因此,闭环电压增益 A_{vf}

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1 + \frac{1}{sC}} \quad (1-3)$$

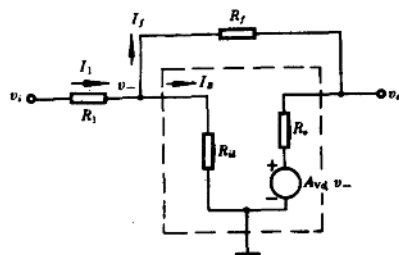


图 1-2 反相放大器等效电路

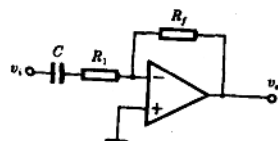


图 1-3 反相交流放大器

由式 (1-3) 可求得放大器的下限频率 (-3dB 频率) 是

$$f_L = \frac{1}{2\pi C R_i} \quad (1-4)$$

在中频区通带内, 电容 C 视为近似短路, 故电压增益为

$$A_{vI} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (1-5)$$

(2) 同相交流放大器

电路如图 1-4 (a) 所示, 电阻 R_2 提供直流通路, 这样使电路的输入电阻降低, 输入电阻近似等于 R_i 。为了提高电路的输入电阻可采用图 (b) 电路, 电容 C_2 取值足够大对交流短路, 使运放同相端和 A 点几乎等电位, 因此 R_2 中几乎没有电流流过, 这样电路可获得极高的输入电阻。

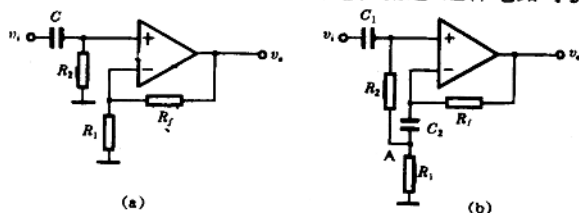


图 1-4 同相交流放大器

(3) 交流电压跟随器

实用的交流电压跟随器如图 1-5 所示, 该电路适宜与高阻抗信号源及低阻抗负载相连接。电容 C_1, C_2 对工作频率呈交流短路, 电阻 R_1, R_2 为运放同相端提供直流通路, 电容 C_2 为自举电容, 将 R_1 连接到输出端, 由于 $v_o \approx v_i$, R_1 两端电压降几乎为零, 流过 R_1 的电流近似为零, 使输入电阻大大提高。

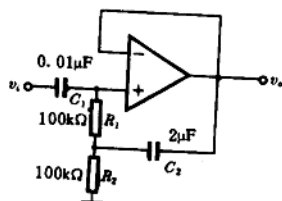


图 1-5 交流电压跟随器

1.1.3 集成运放的信号运算电路

1. 基本运算电路

由理想运放构成的基本运算电路如表 1-2 所列。

表 1-2 基本运算电路

电路名称	原理电路图	运算关系
反相加法电路		$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2 + \frac{R_f}{R_3}v_3\right)$ 若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 则 $v_o = -(v_1 + v_2 + v_3)$

电路名称	原理电路图	运算关系
减法电路		$v_o = \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) v_2 - \frac{R_f}{R_1} v_1$ 若 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$ 则 $v_o = \frac{R_f}{R_1} (v_1 - v_2)$
反相积分电路		$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$
反相微分电路		$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$
对数电路		$v_o = -v_T \ln \frac{v_i}{R I_s}$ $v_T = \frac{RT}{q}, \text{ 室温时等于 } 26\text{mV}$
反对数电路		$v_o = -I_s R e^{v_i/v_T}$ $I_s \text{ 为 PN 结反向饱和电流}$

2. 实用运算电路分析

(1) 实用的积分电路

图 1-6 积分电路能防止工作在较低频率(直流)时,因增益过高出现阻塞现象,电阻 R_f 限制直流增益为 R_f/R_1 (通常取 $R_f = 10R_1$),使电路在直流输入时能稳定正常工作。

在运放反相端可得到

$$\frac{V_i(s)}{R_1} + sC_f V_o(s) + \frac{V_o(s)}{R_f} = 0$$

$$V_o(s) = -\frac{1}{sR_1C_f + R_1/R_f} V_i(s)$$

令 $s = j\omega$,

$$|A_v| = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 R_1^2 C_f^2 + \left(\frac{R_1}{R_f} \right)^2}} = \frac{R_f/R_1}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}}$$

(1-6)

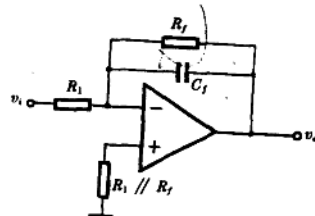


图 1-6 实用积分电路

当 $\omega = 0$ 时 $|A_V| = \frac{R_f}{R_1}$ (1-7)

[例] 图 1-7 电路, 设输入电压 v_i 为常数, 写出 $v_o(t)$ 的微分方程表达式

解: 由图可写出传递函数表达式为

$$\begin{aligned}\frac{V_o(s)}{V_i(s)} &= -\frac{Z_f}{R_1} = -\frac{R_2 + \frac{R_3/sC}{R_3 + 1/sC}}{R_1} \\ &= -\frac{(R_2 + R_3) + sCR_2R_3}{R_1(1 + sCR_3)}\end{aligned}$$

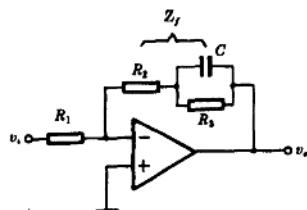


图 1-7 模拟微分方程的电路

即 $R_1(1 + sCR_3)V_o(s) + [(R_2 + R_3) + sCR_2R_3]V_i(s) = 0$

在时域中, s 即为微分算子 $\frac{d}{dt}$, 上式可写成

$$R_1(1 + CR_3 \frac{d}{dt})v_o(t) + [(R_2 + R_3) + CR_2R_3 \frac{d}{dt}]v_i(t) = 0$$

因 v_i 为常数, $\frac{d}{dt}v_i(t) = 0$

得到

$$C \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R_3} + \frac{v_i}{R_1} + \frac{R_2}{R_1R_3}v_i = 0$$

(2) 实用微分电路

实际使用的微分电路如图 1-8 (a) 所示, 电阻 R_1 可降低高频噪声, 电容 C_f 用于抑制自激

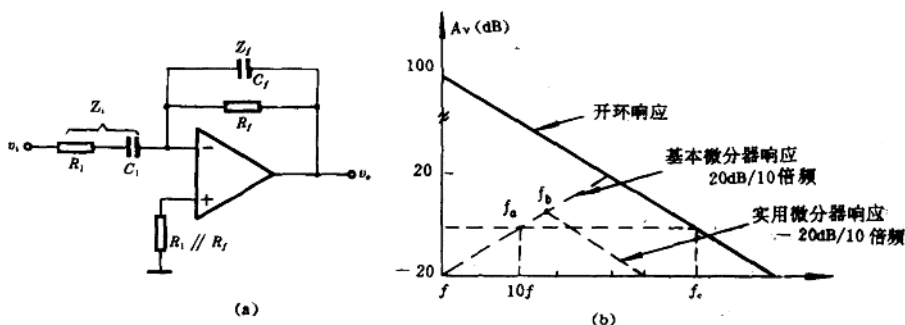


图 1-8 (a) 实用微分电路; (b) 图(a) 电路幅频特性

振荡。电路的传递函数为

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_f}{Z_1} = -\frac{sR_fC_1}{(1 + sR_fC_f)(1 + sC_1R_1)}$$

若 $R_fC_f = R_1C_1$, 得到 $\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{sR_fC_1}{(1 + sR_1C_1)^2}$

令 $s = j\omega$,

$$A_V = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = -\frac{j2\pi f/f_a}{(1 + jf/f_b)^2} \quad (1-8)$$

式中

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1C_1}; \quad f_a = \frac{1}{2\pi R_fC_1}$$

令 $f_a < f_b < f_c$, f_c 为运放开环时的单位增益带宽。

由式 (1-8) 可画得幅频特性如图 (b) 所示。

当 $f = f_a$ 时, $|A_V| = 0\text{dB}$;

$f < f_s$ 时, $|A_v|$ 以 20dB/10 倍频增大。

$f > f_s$ 后, 一方面 $|A_v|$ 以 20dB/10 倍频增大, 另一方面以 -40dB/10 倍频下降, 结果以 -20dB/10 倍频下降。这样有利于抑制高频噪声。要求信号周期 $T \geq R_f C_1$ 。

当 $R_f C_1 > R_1 C_1$ 或 $R_f C_1 > R_f C_f$ 时, 则

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -sR_f C_1$$

在时域中得到

$$v_o = -R_f C_1 \frac{dv_i}{dt} \quad (1-9)$$

通常, 微分电路的设计步骤如下:

- (1) 设定 f_s 等于输入信号的最高频率, 选择电容 $C_1 < 1\mu\text{F}$, 然后计算 R_f 。
- (2) 选 $f_s = 10f_s$, 计算 R_1 。
- (3) 由 $R_1 C_1 = R_f C_f$, 计算 C_f 。

[例] 设计由运放构成的微分器电路。当输入信号最高频率为 100Hz, 振幅为 1V 的正弦波时, 画出输出波形图; 如果输入方波信号(频率、振幅不变), 画出输出波形图。

解: 1) 设 $f_s = f_{\max} = 100\text{Hz}$, 选 $C_1 = 0.1\mu\text{F}$

$$\text{则 } R_f = \frac{1}{2\pi f_s C_1} = \frac{1}{2\pi \times 10^2 \times 10^{-7}} = 15.9\text{k}\Omega \quad \text{取标称值 } R_f = 1.5\text{k}\Omega$$

$$\text{选 } f_s = 10f_s = 1\text{kHz}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_s C_1} = \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times 10^{-7}} = 1.59\text{k}\Omega \quad \text{取标称值 } R_f = 1.5\text{k}\Omega$$

$$C_f = \frac{R_1 C_1}{R_f} = \frac{1.59 \times 10^3 \times 10^{-7}}{1.59 \times 10^3} = 0.01\mu\text{F}$$

$$\begin{aligned} 2) \quad v_o &= -R_f C_1 \frac{dv_i}{dt} = -15 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} \frac{d}{dt} (1 \sin 2\pi \cdot 10^2 t) \\ &= -15 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} (2\pi \cdot 10^2) \cos 2\pi \cdot 10^2 t = -0.94 \cos 2\pi \cdot 10^2 t \end{aligned}$$

v_o 波形如图 1-9(a) 所示。

3) 当方波输入时, 输出波形如图(b) 所示, 为正、负尖脉冲, 幅度为 2V。

(3) 具有温度补偿的对数放大电路

如图 1-10(a) 所示, 运放 A_1, A_2 构成对数运算电路, A_3 构成减法电路, A_4 构成同相放大器, V_{ref} 为外接基准电压。假设晶体管 T_1, T_2 特性相同, 两管的反向饱和电流亦相等, 即 $I_{s1} = I_{s2} = I_s$ 。图中

$$v_1 = -V_T \ln\left(\frac{v_i}{R_1 I_s}\right); \quad v_2 = -V_T \ln\left(\frac{V_{ref}}{R_1 I_s}\right)$$

$$v_o = v_2 - v_1 = V_T \left[\ln\left(\frac{v_i}{R_1 I_s}\right) - \ln\left(\frac{V_{ref}}{R_1 I_s}\right) \right] = V_T \ln \frac{v_i}{V_{ref}}$$

由于 $V_T = kT/q$, 因此 v_o 将随温度 T 的变化而改变。采用正温度系数热敏电阻 R_t 可达到温度补偿的作用, v_o' 经同相放大后, 输出电压 v_o 为

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_t}\right) \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{v_i}{V_{ref}}\right) \quad (1-10)$$

图 1-10(b) 仅用二个运算放大器, 就能得到与图(a) 相同的输出电压。

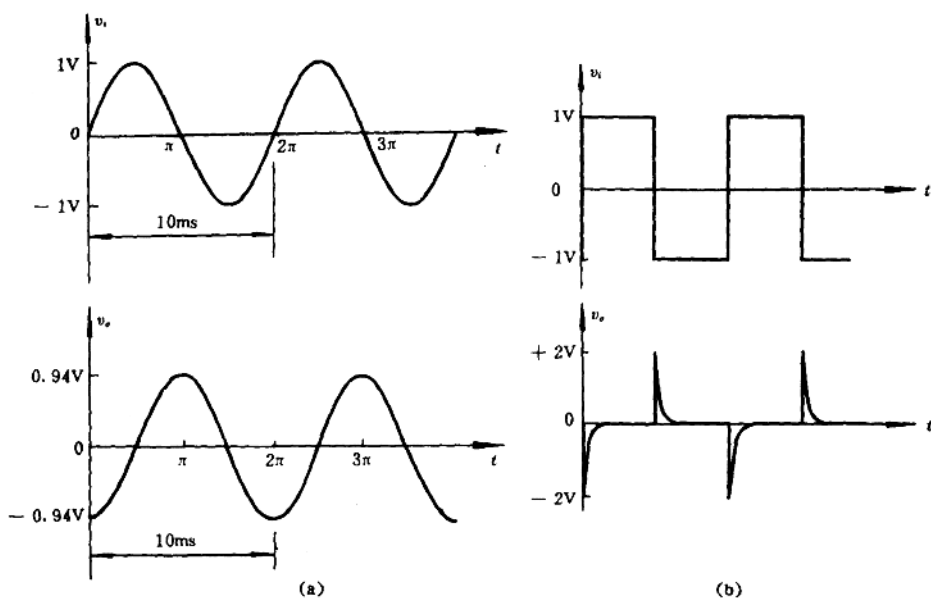


图 1-9 微分电路输入、输出波形图

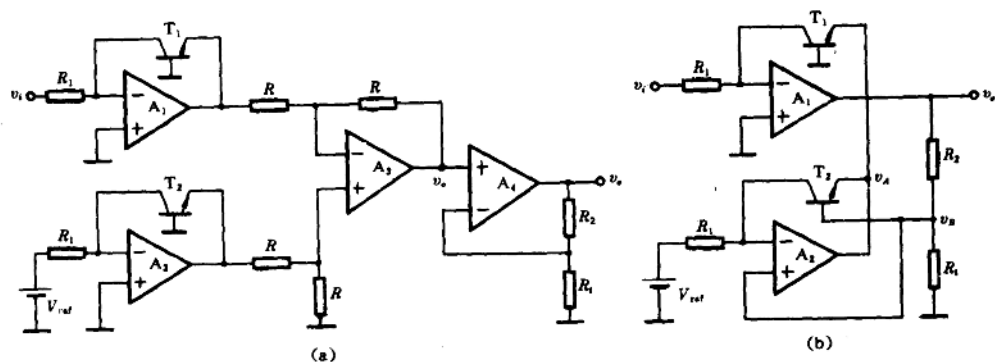


图 1-10 具有温度补偿的对数放大电路

(4) 具有温度补偿的反对数放大电路

如图 1-11 所示。由图可知

$$\frac{v_o}{R_1} = I_s \exp \frac{v_{BE1}}{V_T} \quad \text{即} \quad v_{BE1} = V_T \ln \left(\frac{v_o}{R_1 I_s} \right)$$

同理

$$v_{BE2} = V_T \ln \left(\frac{v_{ref}}{R_1 I_s} \right)$$

由于晶体管 T_1 的基极接地, 故

$$v_A = -v_{BE1} = -V_T \ln \left(\frac{v_o}{R_1 I_s} \right)$$

$$v_B = v_i \frac{R_i}{R_i + R_2}$$

$$\begin{aligned} \text{又 } v_A &= v_B - v_{BE2} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_i - V_T \ln \left(\frac{V_{ref}}{R_1 I_1} \right) \\ \text{因此 } \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_i &= -V_T \left(\ln \frac{v_o}{R_1 I_1} - \ln \frac{V_{ref}}{R_1 I_1} \right) = -V_T \ln \frac{v_o}{V_{ref}} \\ \text{即 } -\frac{0.434}{V_T} \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_i &= 0.434 \ln \frac{v_o}{V_{ref}} = \lg \frac{v_o}{V_{ref}} \\ \text{得到 } v_o &= V_{ref} \lg^{-1}(-K' v_i) \quad \text{或} \quad v_o = V_{ref} (10^{-K' v_i}) \end{aligned} \quad (1-11)$$

$$\text{式中 } K' = \frac{0.434}{V_T} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.434 \frac{q}{kT} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

(5) 模拟计算机

一个模拟计算机可执行加、减、与常数相乘、积分等线性运算,因此可以解决线性微分方程的运算问题。模拟计算机的组成部分有反相求和运算放大器、分压器、反相求和积分器等,它们的符号分别如图 1-12 所示。

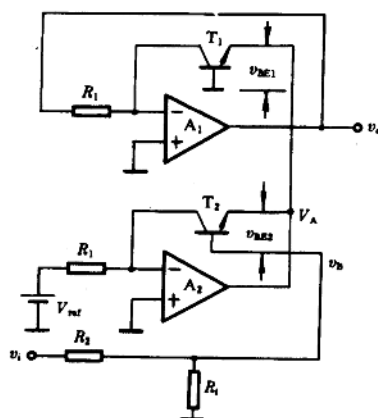


图 1-11 具有温度补偿的反对数放大电路

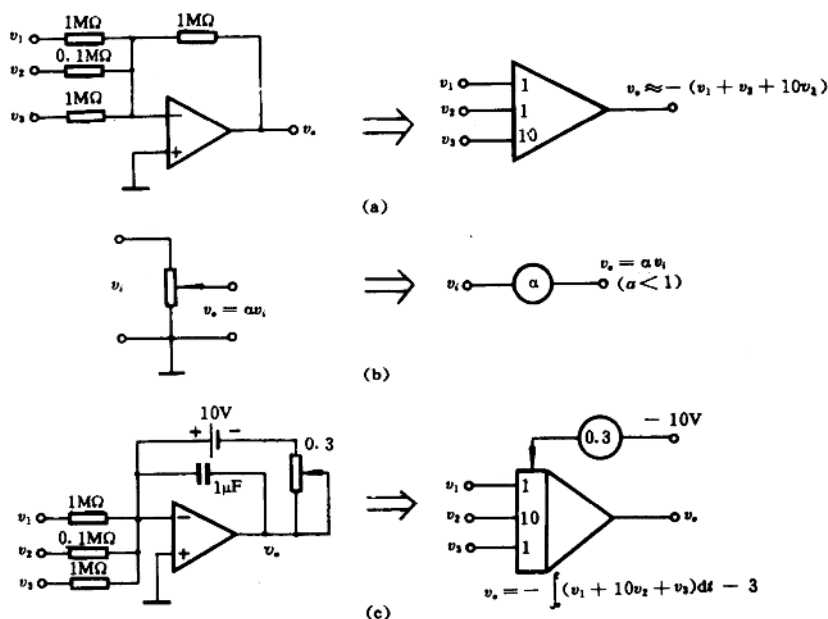


图 1-12 (a) 求和及其符号表示; (b) 分压器及其符号表示; (c) 求和积分及其符号表示

[例] 用模拟计算机模拟二阶微分方程

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 5.4 \frac{dy}{dt} + 0.58y = v(t)$$

$$\text{初始条件 } y(0) = -4.8 \quad \frac{dy}{dt} = \dot{y}(0) = 2.3$$

解: 二阶微分方程可写为 $\ddot{y} = -5.4\dot{y} - 0.58y + v(t)$

用图 1-13(a) 电路,在运放输出端 B 可实现 $\dot{y}$ 。图(b) 为符号表示。