



高等学校教材

电子信息系列

模拟集成电路应用

王秀杰 张畴先 主编

*Electronic
Information*



西北工业大学出版社

模拟集成电路应用

王秀杰 张畴先 主编

西北工业大学出版社

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书主要包括集成运算放大器、电压比较器、集成稳压器、压控振荡器与集成波形产生电路、模拟乘法器、集成锁相环,模拟开关与采样/保持电路、开关电容电路、ADC与DAC及专用功能集成电路等。各章均配有适量的习题与思考题。

本书可作为高等工科院校电子、自动控制、计算机等专业的选修课教材,亦可供与电子技术有关的工程技术人员参考。

模拟集成电路应用

王秀杰 张畴先 主编

责任编辑 李珂

责任校对 李 邑

*

©2001 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

空军导弹学院印刷厂印装

ISBN 7-5612-0852-9/TN·19

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:14.5 字数:348千字

1994年5月第1版

2003年2月第4次印刷

印数:9501—12500册 定价:18.00元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

模拟集成电路是电子技术的一个重要组成部分,它在通讯、自动控制、计算机及人们的文化生活中经常遇到的电视、录音、录像等诸方面获得了十分广泛的应用。为了满足大学本科进一步了解模拟集成电路应用的需要,我们组织编写了本教材。

本书是在多年来为本科生开设选修课教学内容的基础上编写的。全书共10章,内容包括集成运算放大器、电压比较器、集成稳压器、压控振荡器与波形产生电路、模拟乘法器、集成锁相环、模拟开关与采样/保持电路、开关电容电路、ADC与DAC及专用功能集成电路等线性与非线性模拟集成电路的应用。各章均配有一定数量的习题与思考题,便于学生复习和巩固有关的教学内容。若有条件,再安排若干实验内容,效果将会更佳。课程讲授的参考学时为64学时。根据实际需要也可选择其中的若干部分进行讲授。

本书编写分工:张畴先编写第一至第四章,王光明编写第五、七章,王秀杰第七、八、十章,曾南编写第九章。由王秀杰、张畴先任主编,负责对全书进行统稿定稿工作。

西安电子科技大学邬国扬教授对书稿进行了仔细审阅,并对书稿的编写思路及文字修饰提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。同时感谢为本书出版做了许多工作的其他同志。

限于水平,书中不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论	1
第一章 集成运算放大器的应用	4
第一节 概述	4
第二节 集成运算放大器的基本特性	4
第三节 集成运算放大器的应用电路	7
第四节 专用功能集成运算放大器	30
习题和思考题	37
附录 I 运算放大器外引线图	40
附录 I 集成运算放大器的主要性能指标	44
第二章 电压比较器及其应用	46
第一节 电压比较器的主要性能	46
第二节 基本的电压比较器电路	49
第三节 电压比较器的典型应用举例	53
习题和思考题	57
第三章 集成稳压器	59
第一节 串联型集成稳压器的工作原理及性能	59
第二节 集成稳压器的保护电路	62
第三节 多端可调整集成正压稳压器举例	66
第四节 三端固定输出集成稳压器	72
第五节 半导体集成基准源	77
第六节 集成开关稳压电源(SMR)	80
习题和思考题	89
第四章 压控振荡器及波形产生电路	90
第一节 压控振荡器	90
第二节 555 集成定时器电路及其应用	95
第三节 函数发生器	102
习题和思考题	106
第五章 模拟乘法器	107
第一节 概述	107

第二节 对数-指数乘法器	109
第三节 多功能转换器	110
第四节 可变跨导模拟乘法器	115
第五节 模拟乘法器的应用	122
习题和思考题	130
第六章 集成锁相环	132
第一节 概述	132
第二节 锁相环的基本工作原理	132
第三节 锁定范围和捕捉范围	133
第四节 集成锁相环的典型产品	135
第五节 集成锁相环的应用	140
习题和思考题	144
第七章 模拟开关与采样/保持电路	146
第一节 模拟开关	146
第二节 采样/保持器	154
习题和思考题	160
第八章 开关电容电路	161
第一节 概述	161
第二节 基本开关电容电路	163
第三节 开关电容电路的分析方法	165
第四节 开关电容滤波器	172
习题和思考题	178
第九章 数字/模拟和模拟/数字转换器	180
第一节 数字/模拟转换器(DAC)	180
第二节 模拟/数字转换器(ADC)	197
习题和思考题	208
第十章 专用功能集成电路	211
第一节 仪表放大器	211
第二节 集成功率晶体管	212
第三节 电子衰减器 MC3340	214
第四节 低噪声前置放大器	215
第五节 双线变送器	216
第六节 调频伴音电路	218
第七节 调频立体声解调器集成电路	219

第八节 AM 收音机系统集成电路	220
习题和思考题	222
主要参考文献	223

绪 论

集成电路的设想是在 1952 年由一位英国的雷达专家 G. W. A. 达默提出的。大约在 1959 年美国德克萨斯仪器公司的基比尔和仙童半导体公司的诺伊斯首先成功地制造了世界上第一块集成电路。30 余年来, 集成电路的制造技术获得了飞速的发展。形成了当代高科技研究的一个重要领域。它的出现和发展极大地推动了计算机科学、控制技术、通讯技术及人们文化生活等各个部门的变革。所以人们把集成电路的发明看作是电子技术发展史上的一个重要里程碑。

一、什么是集成电路

集成电路 (Integrated circuits) 是利用半导体三极管常用的硅平面制造工艺技术, 把组成电路的电阻、电容、二极管、三极管等有源无源器件及其内部连接线同时制造在一块很小的硅半导体芯片上的电子电路, 对外部它能完成某一电路或系统的功能。

集成电路的出现, 以其体积小、重量轻、耗电省、可靠性高等一系列优异性能, 获得了科学技术界各个部门的青睐。我国在 1965 年成功地研制了第一块集成电路。目前, 各种中小规模的集成电路系列产品已推向市场, 大规模和超大规模集成电路在近年来发展也十分迅速。自行设计制造的各类集成电路已推广到计算机、航空、航天、航海等国防科学技术以及仪器仪表、自动化生产、通讯、广播电视等各个领域。随着改革开放的步伐和国民经济发展的需要, 我国的集成电路研制和应用将展示出更加美好的前景。

集成电路的品种是很多的。按其产品情况大致可分为 TTL, HTL, ECL, PMOS, NMOS, CMOS, 集成运算放大器, 集成稳压电源, 时基电路, 功放、宽带放大、射频放大等其它线性电路, 接口电路, 电视机、音响、收录机等专用电路以及敏感型集成电路等 13 种。按处理信号的类别有数字集成电路和模拟集成电路两大类。前者用于产生、变换和处理数字信号, 后者则用于放大、变换与处理模拟信号。按照集成电路中有源器件的导电类型可分为单极型集成电路与双极型集成电路。在单极型集成电路中主要是 MOS 电路。在近年来 MOS 模拟集成电路以集成度高、功耗低等独特优点受到人们普遍重视。此外还可按照单片上能集成的元器件数目进行分类, 这就是所谓小规模 (SSI)、中规模 (MSI)、大规模 (LSI) 和超大规模 (VLSI) 集成电路。这里应当指出: 在模拟集成电路中, 由于内部有源器件工作状态复杂、制造难度大, 所以一般把能在单片上集成 100 个以上的元器件就称为大规模集成电路了。这点是与数字电路的集成度数量有很大差别的。本书主要研究模拟集成电路的应用。

二、模拟集成电路在电子系统中的作用、地位

前已指出, 模拟集成电路是整个集成电路中的一个重要分支, 它的主要任务是用来传输和处理信号幅值随时间连续变化的信号。而模拟信号几乎在所有电子系统中常常是必不可少的, 许多物理量例如温度、压力、光强等均通过传感器变换成电信号, 这种电信号在多数情况下是随时间连续变化的模拟电信号, 而且还是十分微弱的电信号, 对于这类电信号的放大

处理就离不开高性能集成运算放大器这类模拟集成电路。经过放大后的模拟信号若要通过计算机来进行快速实时处理。常常还要通过模拟信号到数字信号的变换电路。即模数转换器(ADC),以便获得既能反映模拟信号特性又能为计算机所辨认的信号。计算机的输出是一种数字信号,有些场合下,计算机输出操作的终端设备要求模拟量来控制。这就要求在计算机输出与终端设备之间加设数模变换器(DAC),完成数字信号到模拟信号的变换。此外,任何电子设备均需要有供电系统,它可由集成稳压器来完成。这些诸如ADC、DAC集成稳压器等均是模拟集成电路。可见,模拟集成电路在整个电子设备和系统中是不可缺少的一个组成部分,那种认为数字集成电路的高速发展可以完全取代模拟集成电路的想法是不符合实际的。无论集成电路如何发展演变,模拟集成电路在现代电子科学技术中将始终享有重要的地位。

在整个电子系统中,模拟信号的处理始终是影响其特性优劣的一个瓶颈。一个控制系统其控制质量的高低很大程度上取决于模拟信号处理质量的好坏。而模拟信号的处理则必须有高质量的模拟集成电路来完成。所以,每一个从事电子科学工作的工程技术人员都必须高度重视模拟集成电路这一个重要分支。

这里也应当指出:随着超大规模集成电路的不断发展,模拟与数字之间的概念也在不断模糊。例如近几年迅速发展起来的集成滤波技术。就是模数结合的集成电路的一个实例:它利用MOS开关、MOS电容和MOS运算放大器同时集成在一个单片上组成的开关电容滤波器(SCF)完成对模拟信号的处理。即使是这样,模拟电路作为大规模集成电路中的一个子系统也还是必不可少的。所以超大规模集成电路的发展、模数概念的模糊,决不意味着电子科学技术工作者可以淡化对模拟集成电路重要性的认识。

基于这些基本认识,为了满足本科生培养目标的要求,在为本科生多次开设选修课的基础上编写了这本教材。

三、本书的基本内容

模拟集成电路应用是一个相当广泛的论题。由于教学时数的限制,本书不可能包罗万象,择其最基本、最主要的内容予以介绍。全书共10章,可供64学时教学使用。

本书的第一章是集成运算放大器的应用。在扼要地复习了集成运算放大器基本特性参数的基础上,列举数十种集成运算放大器的应用例子。同时还简要地介绍了目前正在迅速发展和广泛应用的若干专用型集成运算放大器。

电压比较器作为一种非线性模拟集成电路广泛应用于各种控制和接口电路中。放在第二章讨论。本章讨论电压比较器的主要性能、基本电路结构及在电子系统中的若干应用实例。

第三章是集成稳压器。它是电子设备中必不可少的一类线性模拟集成电路。本书讨论了它的基本组成原理和性能要求;较为详细地介绍了各种保护电路的原理及特性;扼要地列举了几种典型的串联型集成稳压器及应用;同时还向读者介绍了开关型集成稳压电源的原理与应用。

信号的产生是模拟集成电路应用的一个重要方面。第四章讨论了各种压控振荡器和波形产生器电路,其中包括集成压控振荡器电路原理、集成定时器的原理与应用等。

第五章是模拟乘法器及应用。集成化的模拟乘法器的出现,为模拟信号处理提供了一个非常有用的非线性模拟集成器件。教材主要讨论了变跨导和对数-反对数两种集成模拟乘法器的原理、特性及在模拟运算、信号处理和通讯系统中的若干应用实例。

锁相环电路在现代通讯技术中有着十分重要的作用,它也是一种非线性模拟集成电路,只是在集成化之后才获得了广泛的应用。第六章就是在讨论了集成锁相环电路原理及特性的基础上较为详细地讨论了它的主要应用。

第七章介绍的是模拟开关与采样/保持电路。这是为适应微处理技术的飞速发展需要而产生的一种接口电路,是数字与模拟两种性质不同的信号相互连通的接口相容器件,在多路数据采集系统中是必不可少的。本章讨论了常用的开关电路原理、特性、采样和保持电路及应用实例。

开关电容滤波器是近年来 MOS 模拟集成电路中发展最为迅速的一类集成电路,大大提高和改善了其滤波特性,使模拟信号的滤波技术发展到了一个新的阶段。第八章就是在介绍开关电容电路原理的基础上,讨论了开关电容电路的分析方法及开关电容滤波器的设计与应用。

第九章研究了模拟集成电路中的一个重要分支——模数与数模转换器。这类集成电路正在向着高精度、高速度和低成本的方向发展。本章主要讨论其原理、典型产品及应用实例。

最后一章介绍一些专用模拟集成电路:如仪用放大器、电子衰减器、低噪声集成电路等,供读者参考。

为了便于读者复习掌握各部分内容,每章末均附有少量的习题和思考题,供课后练习。

第一章 集成运算放大器的应用

集成运算放大器是模拟集成电路中品种最多、应用最广泛的一类组件，也是构成模拟集成电路系统的一个最基本的组成部件。所以在研究模拟集成电路应用时，首先讨论各种集成运算放大器的应用电路。

本章将在复习集成运算放大器的一些基本概念、主要参数及特性的基础上，着重介绍集成运算放大器在电路和系统中的各种实际应用。

第一节 概 述

集成运算放大器是实现高增益放大功能的一种模拟集成电路，它在发展初期，主要用来实现模拟运算功能。后来，集成运算放大器已成为像晶体管一样的通用器件，以其高增益、高可靠性、低成本和小尺寸等优越的性能被广泛地应用在电路与系统的各个领域。

从电性能看，集成运算放大器是一种十分理想的增益器件，它的增益可达 $10^4 \sim 10^7$ (80~140 dB)，输入电阻从几十 k Ω 到 10^6 M Ω ，而输出电阻很小，仅为几十 Ω 。而且在静态工作时，具有零输入、零输出的特点。因此在集成运放级连使用时，就不要求它们之间的电平配置问题。这些优异的电特性是一般分立式晶体管组成的放大电路所无法比拟的。

从内部电路组成看，集成运放是一个多级串接的直接耦合放大器电路。它的输入级是各种改进型的差分放大器电路结构；中间级一般由一级共发射级放大器（或共源放大器）或组合放大电路组成；输出级大多为互补推挽电路，并附有输出安全保护电路；整个电路的直流偏置均采用恒流源偏置方式。有些集成运放组件还带有自动恒温控制电路，以改善集成运放的温度特性。

集成运放的电路符号如图 1-1 所示，它有两个输入端和一个输出端。两个输入端中，一个是反相输入端，注有“-”号，表示输出端的电压 V_o 与该输入端电压 V_i 相位相反；另一个输入端是同相输入端，注有“+”号，表示输出电压 V_o 与该输入端电压 V_i 相位相同。

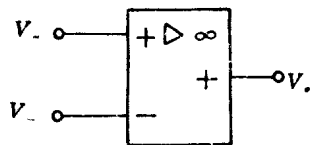


图 1-1 集成运算放大器的电路符号

实际上，集成运放的外部引出端子不止上述三个，通常还有连接正负电源的电源端子；失调调零端子；相位

校正用的相位补偿端子；公共接地端子及其它附加端子。这些端子排列，对不同的产品可从产品说明书上查阅，本书的附录 I，示出了常用的一些国产集成运放的引线排列图，供读者使用时参考。

第二节 集成运算放大器的基本特性

集成运算放大器由于电路结构及制造工艺上的许多重要特点，它的性能非常优异。通常

在电路分析时把它作为一个理想化器件来处理。这时，该器件对信号源而言，则可视为电路中的零子来处理；对负载而言，则可视为电路中的任意子。从而使由集成运算放大器组成的电路分析大为简化。这种假定就是我们通常所说的理想化条件。具体地说，就是指器件的开环增益和输入电阻均为无限大；输出电阻为零；共模抑制比及带宽为无限大；电路的温度漂移和失调视为零等。因此，在上述理想化条件下，集成运算放大器具备两个重要的法则：认为集成运算放大器的两个输入端之间的电位差为零，这就是所谓集成运放的虚短特性；此外还可认为集成运放对信号源不取电流，即集成运放两个输入端的电流为零，这就是集成运放的虚断特性。它们构成了理想化集成运放的两个基本特性。这里必须指出，这两个基本特性只有运放工作在线性放大状态下才成立，一旦集成运放工作到非线性区，则这两个基本特性也随之消失。

实际的集成运放是不可能完全满足理想化条件的。因此为了表征集成运算放大器的实际特性，工程上，提出了如下一些指标来反映集成运放的实际性能，以供使用者合理选择和正确使用时参考。这些主要特性参数是：

一、输入误差特性参数

这项特性包括：输入偏流 I_{IB} ；输入失调电流 I_{IO} ，输入失调电压 V_{IO} ，输入失调电流和电压的温度漂移 $\frac{dI_{IO}}{dT}$ ， $\frac{dV_{IO}}{dT}$ ，它们分别定义为：

1. 输入偏流 I_{IB} 它是指运放的输出电压 $V_o=0$ 时两个输入端流入的偏置电流 I_{B+} ， I_{B-} 的平均值。即 $I_{IB} = \frac{1}{2} (I_{B+} + I_{B-})$ 。一般对 BJT 集成运放 I_{IB} 约为 $10 \sim 100 \text{ nA}$ ，对 FET 集成运放约为 $1 \sim 10 \text{ pA}$ 。

2. 输入失调电压 V_{IO} 它是指运放在 $V_o=0$ 时两个输入端之间的电压值。对 BJT 集成运放， $V_{IO}=1 \sim 5 \text{ mV}$ ，对 EFT 集成运放 $V_{IO}=\pm 20 \text{ mV}$ 左右。

3. 输入失调电流 I_{IO} 它是指集成运放的输出电压 $V_o=0$ 时，两个输入端输入偏流的差值，即 $I_{IO}=|I_{B+}-I_{B-}|$ ，一般为输入偏流 I_{IB} 的 $5 \sim 10\%$ 。

4. 输入失调电压和输入失调电流的温漂 一般用 $\frac{dV_{IO}}{dT}$ 与 $\frac{dI_{IO}}{dT}$ 表示，其中对 BJT 通用集成运放而言 $\frac{dV_{IO}}{dT}=\pm 3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ， $\frac{dI_{IO}}{dT}$ 为 $0.1 \text{ nA}/^\circ\text{C}$ 左右。

二、差模特性参数

它是用来表示集成运算放大器在输入差模信号作用下的传输特性。主要包括有差模电压增益 A_{vd} ，最大的差模输入电压范围 V_{IDM} ，差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_o 等。

1. 差模电压增益 A_{vd} 它是指在标称的电源电压和负载电阻条件下，其输出电压 V_o 与差模输入电压 V_{id} 的比值，一般 A_{vd} 大约在 $80 \sim 140 \text{ dB}$ 之间。

2. 最大差模输入电压 V_{IDM} 它是指集成运放的同相输入端和反相输入端之间允许施加的最大电压。一旦输入差模电压超过这一规定值时，器件特性就将变坏，甚至造成永久性损坏。

3. 差模输入电阻 R_{id} 和输出电阻 R_o R_{id} 是指对差模输入信号的视入等效电阻，一般对

BJT 集成运放 R_{id} 在几十 $k\Omega$ ~几 $M\Omega$ 的范围内, 对 FET 集成运放 R_{id} 可高达 $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ 。输出电阻 R_o 是指输入端短路, 负载开路时从运放输出端视入的等效电阻, 一般为 $20 \sim 200 \Omega$ 左右。

三、共模特性参数

它用来表示集成运放在共模输入信号作用下的传输特性, 主要包括有共模抑制比 K_{CMR} , 最大共模输入电压 V_{ICM} , 以及共模输入电阻 R_{IC} 等。

1. 共模抑制比 K_{CMR} 它是指集成运放的差模增益与共模增益的比值, 一般 $K_{CMR} = 80 \sim 120$ dB。

2. 最大共模输入电压 V_{ICM} 它表示了集成运放允许施加的最大共模输入信号。一旦共模输入电压超过规定的 V_{ICM} 值, 则运放就要丧失对共模信号的抑制能力。

3. 共模输入电阻 R_{IC} 这是指集成运放对共模输入信号的视入等效电阻, 一般 $R_{IC} > 100 M\Omega$ 。

四、大信号动态特性参数

它表征了集成运放在大输入信号作用下的动态特性。这些参数主要包括有转移速率 SR 和满功率带宽 BW_P 等。

1. 转移速率 SR

它是指放大器闭环工作时在大信号状态下输出电压对时间的最大变化率。用 $V/\mu s$ 表示。 SR 越大, 表示闭环大信号工作时输出电压跟随时间变化的速度越快。有些高转移速率的运放, 其 SR 可高达几 $kV/\mu s$ 。例如 BB 公司生产的单位增益缓冲器 3553, 它的 SR 达 $2000 V/\mu s$, LH0063 单位增益缓冲器 SR 高达 $6000 V/\mu s$ 。

2. 满功率带宽 BW_P

这是表征在大幅度稳态正弦信号输入时集成运放动态特性的一个重要参数。随着正弦信号电压频率的增加, 该信号在过零处的变化速度也随之增加。一旦该变化速率超过了集成运放允许的转移速率 SR , 则该正弦波的输出就会产生明显的畸变。为此, 在工程上把大信号工作时集成运放输出不产生明显失真所允许的最高正弦波信号频率定义为满功率带宽 BW_P , 它与转移速率 SR 之间的关系如下:

设输出的电压为 $v_o = V_{or} \sin \omega t$, 则输出电压随时间的变化速率为 $\frac{dv_o}{dt} = \omega V_{or} \cos \omega t$, 在过零处 $\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{t=0}$ 达到最大值, 其大小为 $\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \omega V_{or}$, 显然, 为保证大信号时不产生明显失真, 必须使 $\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} \leq SR$, 即 $\omega V_{or} \leq SR$ 。由此可确定大信号工作时允许的最高正弦波信号频率 (即满功率带宽 BW_P) 为

$$BW_P = \frac{SR}{2\pi V_{or}} \quad (\text{Hz}) \quad (1-1)$$

V_{or} 为集成运放输出的峰值电压。

五、电源特性参数

它表征了集成运放供电电源的基本特性, 主要包括了静态功耗 P_c , 电源电压允许变化范

围及电源电压抑制比 K_{SVR} 等。

静态功耗 P_C 是指输入信号为零、负载开路时电源的功率消耗，例如 F007，在 $\pm 15\text{ V}$ 的电源电压条件下，静态功耗 P_C 的典型值为 50 mW ，一般希望 P_C 尽可能小。

电源电压允许变化范围是指保证集成运放正常工作的最低和最高电源电压之间的范围。

电源电压抑制比 (K_{SVR}) 也称电源电压灵敏度。它是指由电源电压变化所引起的输入失调电压变化量与电源电压变化量之比。典型值为 -96 dB 。

表 1-1 示出了在室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时集成单片运算放大器的典型参数值。

表 1-1

输入失调电压 V_{IO}	5 mV
输入失调电流 I_{IO}	20 nA
输入偏流 I_{IB}	100 nA
共模抑制比 K_{CMR}	100 dB
I_{IO} 的温漂	0.1 nA/ $^\circ\text{C}$
V_{IO} 的温漂	5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
转移速率 SR	1 V/ μs
满功率带宽 BW_P	50 kHz
开环差模增益 A_{Id}	100 dB
开环输出电阻 R_o	100 Ω
开环输入电阻 (BJT) R_{Id}	1 M Ω
(JFET) R_{Id}	10 ¹² Ω
电源电压抑制比 K_{SVR}	20 $\mu\text{V}/\text{V}$

第三节 集成运算放大器的应用电路

集成运放作为一种性能优异的器件已广泛应用于各种电子线路中，本节将通过若干基本电路来定性说明运放在信号运算电路、信号处理电路及信号产生电路等方面的应用，供读者使用时参考。

一、信号运算电路

1. 比例运算

实现模拟信号的比例运算有三种基本的电路结构：反相比例运算电路、同相比例运算电路和差分比例运算电路。

图 1-2 示出了一种基本的反相比例运算电路，输入信号 V_s 通过电阻 R_1 加到运放的反相输入端，电路经由 R_2 又引入了一个电压并联负反馈。同相输入端一般经由一只阻值为 $R_1 \parallel R_2$ 的平衡电阻接地，该电阻的作用是用来消除输入偏流产生的运放输出误差。可以证明，在理想化条件下电路的传输关系为

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_s \quad (1-2)$$

若取 $R_1 = R_2$ ，则 $V_o = -V_s$ ，电路就成为一个符号变换器。

图 1-3 示出了基本的同相比例运算电路，从负反馈的观点看，它本质上是一种电压串联负反馈放大电路，因此具有高输入电阻、低输出电阻和稳定输出电压的特点。它的基本传输关系为

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_s \quad (1-3)$$

若取 $R_2 = R_1$, $R_1 = \infty$, 则 $V_o = V_s$, 可见此时电路具有单位增益的传输特性, 通常称为电压跟随器。它广泛用来作为高阻信号源与低阻负载之间的缓冲级。电路如图 1-4。

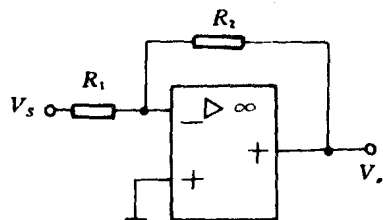


图 1-2 反相放大器

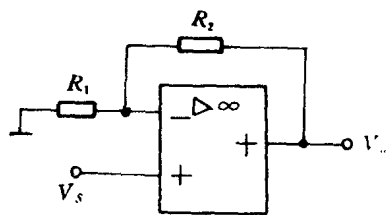


图 1-3 同相放大器

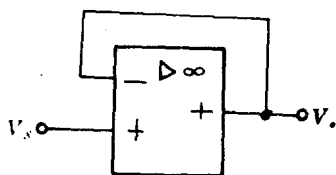


图 1-4 电压跟随器

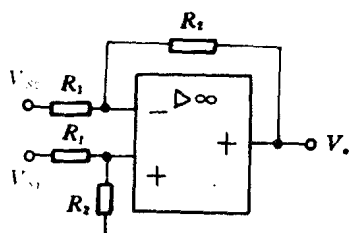


图 1-5 差分放大器

图 1-5 示出了一种基本的差分运算电路。为了实现精确的差分比例运算, 外接电阻元件必须严格匹配, 它的传输关系为

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_{s1} - V_{s2}) \quad (1-4)$$

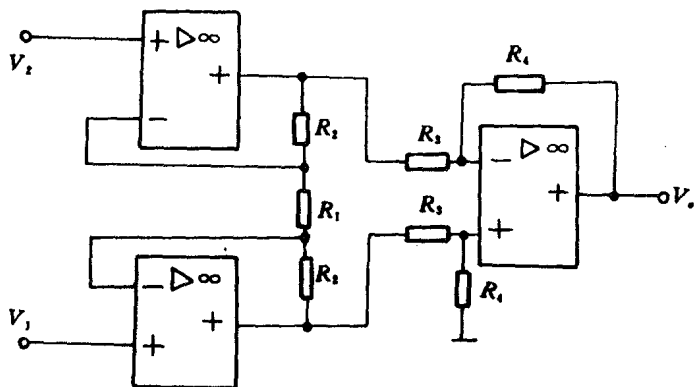


图 1-6 仪用放大器

这种差分放大器的缺点是对差模信号的输入电阻低, 且电路的增益调节困难。为此在许多实际的系统中广泛采用如图 1-6 所示的高输入电阻且增益可以连续调节的仪用放大器。此时, 电路的传输关系为

$$V_o = \frac{R_1}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (V_1 - V_2) \quad (1-5)$$

改变 R_1 的大小可以自由地调节电路的增益。

在有些场合下, 要求实现对比例增益的电压控制, 这时可采用图 1-7 所示的增益可控比例运算电路。它是利用场效应管的压控电阻特性来实现放大器增益可控功能的。当场效应管工作在非饱和工作区时, 其漏极与源极之间的等效电阻为

$$r_{ds} = \frac{r_{ds\ on}}{1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_{GS\ off}}}} \quad (1-6)$$

式中 $r_{ds\ on}$ 为 $V_{GS}=0$ 时漏源之间的等效电阻;

$V_{GS\ off}$ 为场效应管的夹断电压。

图 1-7 (a) 就是用该电阻来取代同相比例运算电路中的电阻 R_1 时组成的一种增益可控放大器, 相应的增益为

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{R_2}{r_{ds}} \quad (1-7)$$

式中 $r_{ds} = \frac{r_{ds\ on}}{1 - \sqrt{\frac{V_c}{V_{GS\ off}}}}$

可见此时 A_v 与控制电压 V_c 之间是非线性关系, 有些系统中要求 A_v 随 V_c 线性变化, 则可用图 1-7 (b) 所示的增益线性可控放大器电路。

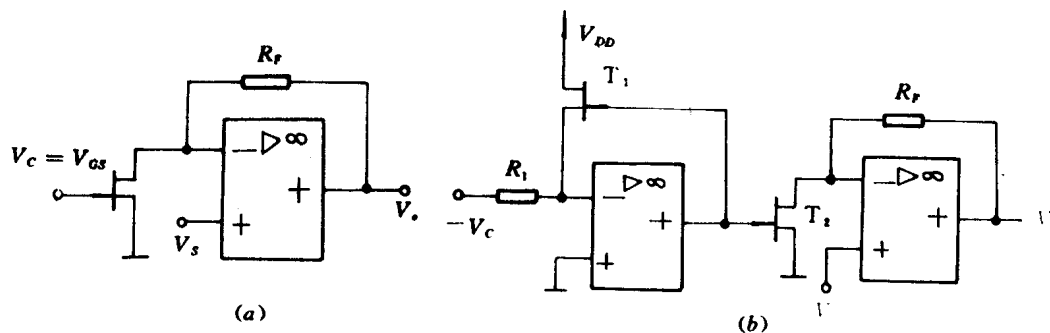


图 1-7 增益可控放大器

(a) 增益可控放大器

(b) 增益线性可控放大器

图 1-7 (b) 采用了场效应管对 T_1, T_2 。对 T_1 管的电阻 $r_{ds1} = \frac{V_{DD}}{I_{D1}} = \frac{V_{DD} R_1}{V_c}$, 由于 $V_{GS1} = V_{GS2}$, 只要 $V_{DD} \leq \frac{1}{5} V_{GS\ off}$, 则 $r_{ds2} = r_{ds1} = \frac{V_{DD} R_1}{V_c}$ 成立, 因此, 相应电路的闭环电压增益为

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} \frac{V_c}{V_{DD}} \quad (1-8)$$

从而实现了控制电压 V_c 对放大器增益的线性控制, 这在自动增益控制电路中是有实际意义的。

2. 加法器

实现模拟信号按给定比例进行代数相加是信号运算中经常遇到的一个问题。在实际电路中通常采用反相加法器电路,如图1-8所示。 n 个不同的模拟信号 $V_{s1}, \dots, V_{sn}$ 分别通过电阻 $R_1, \dots, R_n$ 加到运放的反相输入端,这时其输出电压为

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_{s1}}{R_1} + \frac{V_{s2}}{R_2} + \dots + \frac{V_{sn}}{R_n} \right) \quad (1-9)$$

若要实现同相相加,则可用图1-9所示电路,这时利用叠加原理可先求得输入信号在同相输入端的信号,然后按同相放大器求输出电压,对图示电路,其输出电压为

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + (R_3 \parallel R_4)} V_{s1} + \frac{R_2 \parallel R_4}{(R_4 \parallel R_2) + R_3} V_{s2} \right) \quad (1-10)$$

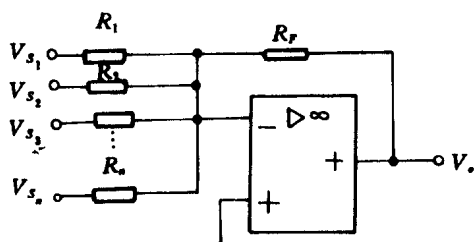


图 1-8 反相加法器

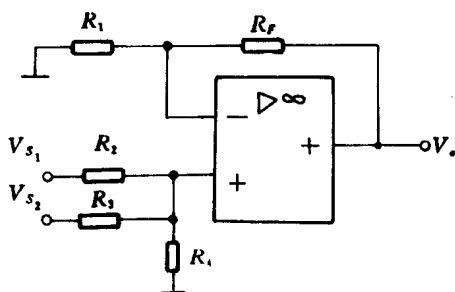


图 1-9 同相加法器

3. 积分与微分运算电路

图1-10是一种基本的反相积分器电路。在积分周期 T 期间,其输出电压为

$$v_o(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^T v_s dt \quad (1-11)$$

图中开关 S 是用于控制积分周期而引入的。在 $t=0$ 的时刻, S 断开,积分过程开始;当 $t=T$ 时, S 闭合,积分电容 C_1 经 S 迅速放电,并准备开始下一个积分周期。

图1-11是一种反比例积分器电路,它的传递函数为

$$A_v(S) = -\frac{R_f}{R_1} \left(\frac{1}{1 + SR_f C_1} \right) \quad (1-12)$$

这种电路,当 $\omega R_f C_1 \ll 1$ 时,电路实现比例放大;而当 $\omega R_f C_1 \gg 1$ 时,电路实现积分运算,其积分时常数为 $R_1 C_1$ 。这在控制系统中也是一种实用电路。

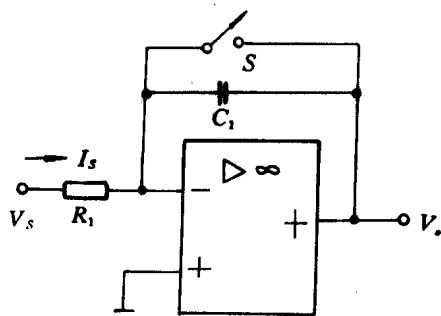


图 1-10 反相积分器

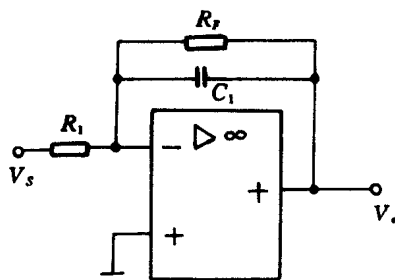


图 1-11 比例积分器