

● 新型电子电路应用指南

信号处理电路

● 谢沅清 李宗豪 朱金明 编著

● 电子工业出版社



73.4126
905

新型电子电路应用指南丛书

信号处理电路

谢沅清 李宗豪 朱金明 编著

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书介绍模拟信号的几种常见的信号处理电路的原理、实用电路及其估算方法。

全书共分五章，第一章为模拟运算；第二章为箝位、比较和定时；第三章为振幅调制、检波、变频、脉冲宽度调制与检测；第四章为角度调制与检测；第五章为滤波器设计。

本书可供从事电子技术、自动化、通信等方面的工程技术人员自学和参考，也可作为高等学校电子类学生的参考读物。

2011/26/3

新型电子电路应用指南丛书

信号处理电路

谢沅清 李宗豪 朱金明 编著

责任编辑：魏向东

电子工业出版社出版

北京市 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市顺义县天竺源华印刷厂印刷

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：9.5 字数：225 千字

1994 年 12 月第一版 1994 年 12 月北京第一次印刷

印数：6000 册 定价：11.00 元

ISBN 7-5053-2533-7/TN·742

9210073

编 委 会

主 任 谢沅清

副主任 赵学泉

编 委 (按姓氏笔画排序)

华正权 杨世成 张乃国 张国华

郭 斌 解月珍

序 言

本丛书是为应用电子电路的工程技术人员提供一些必备的基础知识而编写的。

目前公开出版的电子电路书籍有两类，一类是教科书，一类是应用手册。教科书编重于理论，而且由于受到学时和篇幅的限制，只能讲述一些主要的基本电路。众所周知，一个实用的电路，往往比原理性电路要复杂一些。初出校门的读者，阅读实际电路，或是自己设计一个实用电路，仅依靠教科书上介绍的电路知识，有一定的困难。而在许多电子电路手册或是电子电路集锦中，往往只给出电路及其所能实现的功能，原理阐述不够。不利于读者灵活变通应用。本丛书试图弥补上述不足，确定了如下的编写宗旨。

1. 考虑到本书的主要读者对象是中专以上水平的工程技术人员和电子爱好者。他们和教科书的读者——很少接触电子电路实际的青年学生不同。具体地说，这些读者或多或少有一些电子电路方面的基本知识。另一方面，相当多的一部分读者不一定具备高等数学基础。因此，本书讲述基础知识时，并不是所有基本理论都从头讲起，对有些问题的讲述，其起点比一般的教科书略高一些。编写时尽量避免应用较深的数学分析和推导，而是注重定性分析和工程估算。

2. 和教科书稍有不同的是，本丛书着重讲述和实际应用有关的理论，介绍一些经验公式和数据。书中还适当附上部分常用元器件的特性数据及选型原理。讲述设计时，不强调从头到尾的通盘设计和精确计算，偏重于利用参考电路作一些局部修改以适应实际需要的工程计算。还适当介绍某些调测电路的方法。

3. 本丛书的选材着眼于目前国内普遍应用的电路。对于一些已经过时，虽然在部分陈旧设备中还有应用的电路，则不予选用。

本丛书第一批选题内容的安排以信号流程为主线，分为信号产生、信号放大、信号处理、信号变换、测量、电源及数字逻辑电路七个分册。每一分册相对独立，不存在某一分册为其它分册打基础的问题。

本丛书在动笔前，编委会曾多次集会研讨编写宗旨，内容深度、广度，制定出各分册的编写要求和大纲，并对若干分册的样章进行过讨论。各分册初稿完成后，由主编一一过目，各分册均确定了审稿人，提出修改意见，返回作者修改定稿。但由于各分册作者工作较忙，无法集中长时间进行写作，还由于水平有限，书成后未能全部达到预期目的。书中还难免出现这样或那样的缺点甚至错误，敬希广大读者批评指正。

编者

1994年1月

前 言

在电子技术的各个应用领域,需要对电信号进行不同的处理。本书作为《新型电子电路应用指南》的一个分册,介绍模拟信号常见的几种处理方法。

全书分五章。第一章介绍运算电路,包括加、减、微分、积分、对数、指数、相乘、相除、乘方和开方。第二章介绍箝位、比较及定时,箝位分限幅式箝位和非限幅式箝位讲述,比较是汇集成电压比较器作为核心部分,讲述各类比较电路。定时则是介绍以比较器构成单稳态定时电路和 555 型等单片定时电路构成的定时电路。第三章为振幅调制、检波、变频、脉冲宽度调制与检测。第四章为角度调制与解调。第五章是滤波器设计,在简要讲述一下滤波器的基本知识后,具体介绍 LC 无源滤波器和 RC 有源滤波器的设计方法,并附有必要的图表,供读者设计时查阅。

本书和一般的教科书有所不同。作为教材,信号处理电路只是模拟电子技术的一部分,其选材受到讲授学时和教材字数的限制。本书专门介绍模拟信号处理电路,涉及的内容要广一些。本书的书名为应用指南,在讲述理论时,限于最必要的,其起点也以适合具有中等程度的读者为原则。和一般的教科书不同的特点是本书尽可能编入一些实用电路,并对一些实际应用有关的理论问题提出来予以介绍。滤波器设计一章,作者编入了近年来从事这一方面工作的研究成果和经验总结。

本书第一、二章由谢沅清编写,第三、四章由朱金明编写,第五章由李宗豪编写。

限于编者的水平,书中难免存在有不少缺点和错误,敬希读

者提出批评指正意见，不胜感激。

编者

1994 年 1 月

目 录

第一章 模拟运算	(1)
1.1 线性模拟运算	(1)
一、模拟相加	(1)
二、模拟相减	(6)
三、积分运算	(7)
四、微分运算	(14)
1.2 非线性模拟运算	(19)
一、对数运算	(20)
二、指数运算	(27)
三、乘、除、乘方及开方运算	(31)
第二章 箝位、比较、定时	(47)
2.1 箝位	(47)
一、限幅式箝位	(47)
二、非限幅式箝位	(48)
2.2 信号比较	(52)
一、基本电压比较器	(52)
二、运算放大器接成比较器	(55)
三、迟滞比较器	(56)
四、窗口比较器	(58)
五、区域比较器	(60)
六、三态比较器	(60)
2.3 定时	(63)
一、比较器(或运算放大器)构成的单稳态电路	(63)
二、单片定时电路	(66)
三、555 单片定时电路构成的单稳态电路	(68)
四、长延时电路	(71)
五、其他单片定时电路简介	(71)

第三章 振幅调制、检波、变频、脉冲宽度调制与检测	(74)
3.1 调幅信号的分析	(74)
一、普通调幅信号	(74)
二、抑制载波的双边带调幅信号	(76)
三、单边带调幅波	(77)
3.2 调幅与检波的基本原理	(78)
3.3 调幅电路	(78)
一、双边带调幅电路	(79)
二、普通调幅电路	(79)
三、单边带调幅电路	(81)
3.4 检波电路	(82)
一、相乘检波	(83)
二、二极管峰值包迹检波	(85)
三、线性检波	(96)
四、三种检波电路的比较	(98)
3.5 变频	(99)
一、相乘混频器	(99)
二、晶体管混频器	(102)
三、二极管双平衡混频器	(105)
四、混频时产生的干扰和失真	(109)
3.6 脉冲宽度调制与检测	(111)
一、脉冲宽度调制电路	(111)
二、脉冲宽度鉴别	(115)
第四章 角度调制与解调	(121)
4.1 调角信号简介	(121)
4.2 实现调频的基本原理和方法	(123)
4.3 直接调频电路	(124)
一、变容二极管调频器	(124)
二、积分式调频振荡器	(129)
三、集成压控振荡器	(131)
4.4 间接调频电路	(132)
一、可变移相法调相电路	(133)

二、可变时延法调相电路	(135)
4.5 扩展线性频偏的方法	(138)
4.6 频率解调的基本原理和方法	(139)
4.7 鉴频电路	(140)
一、斜率鉴频器	(140)
二、振幅检波型相位鉴频器	(150)
三、比例鉴频器	(153)
四、相位检波型相位鉴频器	(159)
五、脉冲计数式鉴频器	(162)
六、锁相环鉴频器	(166)
第五章 滤波器设计	(171)
5.1 基本知识	(171)
一、滤波器的分类	(171)
二、滤波器的传输函数及衰减特性	(173)
三、网络函数的归一化	(174)
5.2 LC 滤波器设计	(176)
一、几种常用的低通滤波器的特性及设计	(177)
二、频率变换	(233)
三、等电感带通滤波器的设计	(244)
5.3 有源滤波器设计	(264)
一、一阶和二阶传输函数	(265)
二、滤波器传输函数的频率变换	(272)
三、一阶滤波器的实现	(275)
四、二阶节的实现	(276)

第一章 模拟运算

模拟运算的基本原理是根据深负反馈条件下,放大器的输出、输入信号之间的关系,取决于外反馈电路,而与放大器的放大特性无关。人们利用运算放大器具有高增益的特性,容易实现深度负反馈,在运算放大器外部连接不同的负反馈电路,以得到输出、输入信号之间的不同运算关系。

1.1 线性模拟运算

线性模拟运算包括比例、相加、相减、积分和微分运算。比例运算就是加深负反馈情况下的放大。在本丛书放大部分已作过介绍,这里介绍后四种运算。

一、模拟相加

根据输入信号是加到运算放大器的反相输入端还是加到运算放大器的同相输入端,模拟相加器分为反相输入式和同相输入式。

(一) 反相输入式模拟相加器

图 1-1 示出反相输入式相加器的电路。 u_{i1} 、 u_{i2} 、 u_{i3} 为待相加的输入信号。将其和反相输入式放大器相比较,可以看出,反相输入式相加器是一个多输入端的反相输入式放大器。作为模拟相加器,输入端的数目不一定象图 1-1 那样限定为 3 个,根据待相加信号数目的多少不同而可以增减。

在满足深负反馈的条件下,放大器的反相输入端为虚地,可得

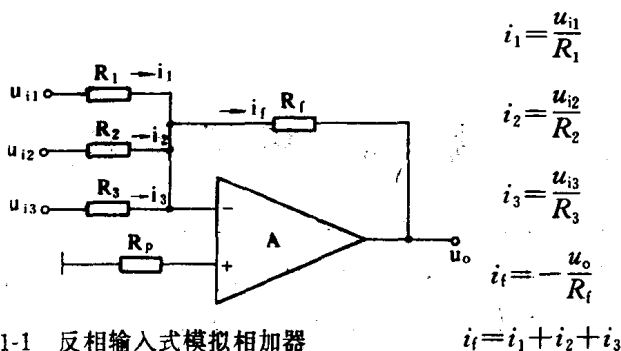


图 1-1 反相输入式模拟相加器

由以上诸式可得

$$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right) \quad (1-1a)$$

或

$$u_o = A_{f1}u_{i1} + A_{f2}u_{i2} + A_{f3}u_{i3} \quad (1-1b)$$

式中 $A_{f1} = -\frac{R_f}{R_1}$, $A_{f2} = -\frac{R_f}{R_2}$, $A_{f3} = -\frac{R_f}{R_3}$ 。

由此可见，各输入电压为各自经放大后求和。当 $A_{f1} \neq A_{f2} \neq A_{f3}$ 时，各输入电压经不同倍数的放大后求和。

由式 (1-1) 可以看出，改变某一路输入信号的信号源与放大器反相输入端的电阻，就可以单独改变该路信号由输入至输出端的传输系数。其物理原因是待相加信号的会聚点——放大器反相输入端的“虚地”特性。同理，任何一路信号源内阻的变化，也不会影响其他路信号由输入至输出端的传输系数。当信号频率升高时，由于放大器的放大倍数下降，反馈深度随之下降，放大器反相输入端的“虚地”特性变坏，上述特性也就渐趋消失。

接于同相输入端的补偿电阻，根据减小温漂（温度漂移）的要求，其值应为

$$R_p = R_1 // R_2 // R_3 // R_f \quad (1-2)$$

在设计模拟相加器时，一个值得注意的问题是：放大器输入偏置电流在输入端所产生的电压应该很小，一般应不大于输入信号电压的十分之一，否则，运算结果会有明显的误差。下面举例说明。

例 1-1: 采用图 1-1 所示电路作为三个输入端模拟相加器, 三个输入端的电压在由 10mV 至 30mV 之内变化时, 放大倍数 $A_{f1}=A_{f2}=A_{f3}=-20$ 。试选定运算放大器并确定电路元件值。

解: 本设计无工作频率的要求, 选定 741 型通用运放 C 档。C 档器件输入偏置电流 $I_{IB} \leq 300\text{nA}$ 。根据题意 $A_{f1}=A_{f2}=A_{f3}$, 故 $R_1=R_2=R_3$ 。因此, 流经每个电阻的偏置电流平均分配, 小于或等于 100nA。最小输入电压为 10mV, 则偏置电流在输入端电阻上产生的电压不应大于 1mV, $R_1=R_2=R_3=R$ 的值不应大于

$$\frac{1\text{mV}}{100\text{nA}} = 10\text{k}\Omega。$$

根据放大倍数 $A_{f1}=A_{f2}=A_{f3}=A_f=-20$ 的要求,

$$R_f = -A_f R = 20 \times 10 = 200\text{k}\Omega$$

温漂补偿电阻

$$\begin{aligned} R_p &= R_1 // R_2 // R_3 // R_f \\ &= \frac{10\text{k}\Omega}{3} // 200\text{k}\Omega = 3278\Omega \end{aligned}$$

取标称值

$$R_p = 3.3\text{k}\Omega$$

例 1-2: 设计一个二输入端模拟相加器, 其中一个输入电压变化范围 $u_{i1} = 2 \sim 50\text{mV}$, 另一个输入电压变化范围 $u_{i2} = 4 \sim 100\text{mV}$ 。希望在最大输入电压时, 二者分别在输出端产生的输出电压相等, 而输出总电压不能超出 2V。

解: 根据题意要求 u_{i1} 和 u_{i2} 在最大输入电压时, 分别在输出端产生的电压相等, 且总和电压不超过 2V, 即各产生 1V 的电压, 于是有

$$A_{f1} = -\frac{1\text{V}}{50\text{mV}} = -20$$

$$A_{f2} = -\frac{1\text{V}}{100\text{mV}} = -10$$

因为 A_{f1} 为 A_{f2} 的两倍, 故 R_2 为 R_1 的两倍, 流过 R_1 的输入偏置电流为流过 R_2 的输入偏置电流的两倍。即 741 型运放 300nA 的输入偏置电流在 R_1 和 R_2 上按 2:1 分配, 流过 R_1 的输入偏置电流

为 200nA ，流过 R_2 的输入偏置电流为 100nA 。因为 u_{i1} 小，而且 R_1 流过的输入偏置电流大，故从确定 R_1 的值入手

$$R_1 \leq \frac{0.1\mu_{i1\min}}{200\text{nA}} = \frac{0.1 \times 2\text{mV}}{200\text{nA}} = 1\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 2R_1 = 2\text{k}\Omega$$

$$R_f = -A_{f1}R_1 = 20\text{k}\Omega$$

温漂补偿电阻

$$R_p = R_1 // R_2 // R_f = 1\text{k}\Omega // 2\text{k}\Omega // 20\text{k}\Omega = 645\Omega$$

取标称值

$$R_p = 620\Omega$$

如同设计放大器一样，模拟相加器中，运算放大器的最大容许输出电流限制外接负载电阻的最小容许值。在最大输出电压时，流经负载电阻的电流最大，本例中，最大输出电压为 2V ，流经 R_L 的电流为

$$I_f = \frac{2\text{V}}{20\text{k}\Omega} = 100\mu\text{A}$$

741 型运放的最大容许输出电流为 $I_{\text{omax}} = 5\text{mA}$ ，流过负载的最大容许电流为

$$I_{L\max} = I_{\text{omax}} - I_f = 4.9\text{mA}$$

负载电阻最小容许值

$$R_{L\min} = \frac{V_{\text{omax}}}{I_{L\max}} = \frac{2\text{V}}{4.9\text{mA}} = 408\Omega$$

(二) 同相输入式模拟相加器

图 1-2 所示为同相输入式模拟相加器的电路。所有待相加的信号均送到放大器的同相输入端。

在深负反馈条件下，运算放大器两个输入端之间具有虚开路和虚短路特性。在同相输入端运用克希荷夫电流定律，就有

$$\frac{u_{i1} - u_+}{R_1} + \frac{u_{i2} - u_+}{R_2} + \frac{u_{i3} - u_+}{R_3} = \frac{u_+}{R_p}$$

在反相输入端运用克希荷夫电流定律，有

$$\frac{u_-}{R_{f1}} = \frac{u_o - u_-}{R_{f2}}$$

除此之外, 还有

$$u_+ = u_-$$

由以上三式可得

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}\right) (R_1 // R_2 // R_3 // R_p) \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3}\right) \quad (1-3a)$$

或

$$u_o = A_{f1}u_{i1} + A_{f2}u_{i2} + A_{f3}u_{i3} \quad (1-3b)$$

式中

$$A_{f1} = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}\right) \frac{R_1 // R_2 // R_3 // R_p}{R_1}$$

$$A_{f2} = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}\right) \frac{R_1 // R_2 // R_3 // R_p}{R_2}$$

$$A_{f3} = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}\right) \frac{R_1 // R_2 // R_3 // R_p}{R_3}$$

由以上诸式可以看出, 它与反相输入式相加器的一个显著不同点是各路输入信号的电压传输系数, 不仅和本路信号源与放大器输入端所接电阻之值有关, 还和其他路信号源与放大器输入端所接电阻之值有关。也就是说电路中各路输入信号之间有相互影响。从这个意义上讲, 它具有和普通的电阻混合网络实现信号相加同样的缺点。

温漂补偿电阻 R_p 之值应满足

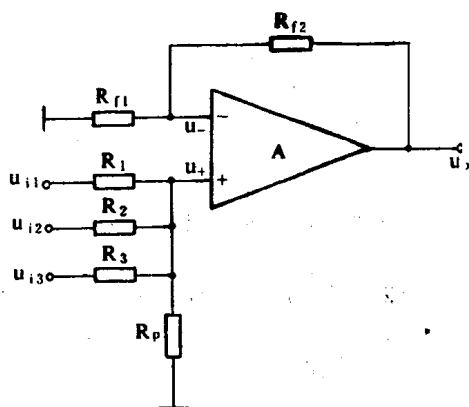


图 1-2 同相输入式相加器

$$R_1 // R_2 // R_3 // R_p = R_{i1} // R_{i2} \quad (1-4)$$

如果按上式算出的 R 为负值, 表示 $R_1 // R_2 // R_3$ 之值小于 $R_{i1} // R_{i2}$ 。而当满足式 (1-4) 时, 则式 (1-3) 可简化为

$$u_o = R_{i2} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right) \quad (1-5)$$

同相输入式相加器具有和同相输入式放大器一样的缺点, 这就是输入端有较大的共模电压。在计算最大共模输入电压时, 应同时考虑所有待相加的各输入电压。当共模电压不超过最大容许值时, 其不良影响仅仅是造成运算误差。

同相输入式放大器有比反相输入式放大器高得多的输入阻抗, 可是同相输入式相加器的输入电阻和反相输入式相加器的输入电阻相比, 在两种

电路中的 R_1 、 R_2 、 R_3 分别相同的条件下, 前者比后者高不了多少。这是因为任一路信号源和放大器同相输入端所接的电阻, 对其它路来说, 等效于接在放大器同相输入端与地之间的电阻

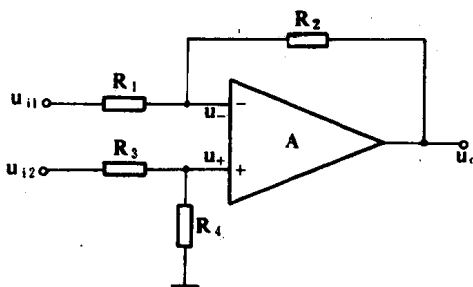


图 1-3 模拟相减器

阻, 使放大器的等效输入电阻为之减小。

二、模拟相减

将运算放大器接成差动放大形式, 如图 1-3, 便是模拟相减器。

在深负反馈条件下

$$u_- = u_+ = u_{i2} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$