



学习目标

- (1) 了解集成电路的分类、特点,了解集成运算放大电路的组成。
- (2) 掌握差动放大电路抑制零点漂移的原理。理解共模信号、差模信号和共模抑制比的概念。
- (3) 掌握差动放大电路的输入、输出方式,能进行差模放大倍数、输入和输出电阻的计算。
- (4) 了解集成运放的主要参数。
- (5) 理想集成运放的特点及工作在线性区的“虚断”“虚短”概念。
- (6) 掌握集成运放组成的基本运算电路的输入、输出关系。
- (7) 了解集成运放的线性及非线性应用。
- (8) 了解集成运放使用时应注意的问题,会应用集成运放。

4.1 集成运算放大电路概述

1. 集成电路的概念及其分类、特点

将整个电路中的晶体管、电阻、电容和导线等集中制作在一小块硅片上,封装成一个整体,这类电路称为集成电路(IC)。

集成电路按其功能的不同,可分为模拟集成电路和数字集成电路两大类。模拟集成电路的种类很多,如集成运放,集成功放,集成高、中频放大电路,集成稳压源等。

集成电路具有体积小、重量轻、价格低、可靠性高、通用性好等优点,在自动检测、自动控制、信号产生与处理等方面获得了广泛的应用。

2. 集成运算放大电路的组成

集成运算放大电路是一种高放大倍数的多级直接耦合放大电路,它通常由差动输入级、中间级(电压放大级)、输出级和偏置电路四部分组成,如图 4-1 所示。

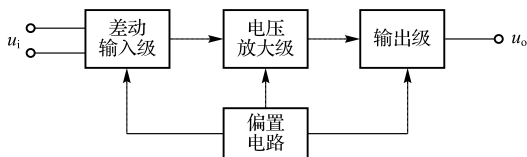


图 4-1 集成运算放大电路的组成

差动输入级是集成运算放大电路的关键部分,由差动放大电路组成。其特点是电路对称,输入电阻很高,能有效地放大有用信号,抑制干扰信号。中间级为运放提供足够的电压放大倍数,一般由共射放大电路组成。输出级为了能输出较大功率推动负载,一般由互补对称式电路构成,其输出阻抗很低。偏置电路的作用是给各级放大电路提供合理的静态工作点电流,使各级电路具有合理的静态工作点。

【练习题】

4.1.1 集成电路有哪些优点?

4.1.2 填空题。

(1)集成运算放大电路通常由_____、_____、_____和_____四部分组成。

(2)集成电路按其功能的不同,可分为_____和_____两大类。

(3)差动输入级是集成运算放大电路的关键部分,由_____电路组成。

4.2 差动放大电路

交流放大电路放大的是随时间变化较快的周期性信号,为使电路简单、设计方便,常采用阻容耦合。但在实际应用中,常常要放大一些变化极为缓慢的非周期信号或某一直流量,通常把这些信号统称为直流信号。对于直流信号,不能采用阻容耦合或变压器耦合,必须采用直接耦合方式。这种直接耦合、能放大直流信号的放大电路称为直流放大电路。

4.2.1 直接耦合电路的主要问题

直流放大电路的基本分析方法与交流放大电路相似,但在分析、设计直流放大电路时应注意以下两个主要问题:

1. 级间影响

由于交流放大电路的级间耦合电容能隔断直流量,使各级放大电路的静态工作点相互独立,而直接耦合放大电路级间无耦合电容,各级工作点不再独立,相互有影响。

在图 4-2 所示电路中, VT_1 的集电极电位恒等于 VT_2 的基极电位,即 $U_{CE1} = U_{BE2}$ 。因此,无论 VT_2 采用硅材料或锗材料,都将使 VT_1 的动态范围太小(0.7 V 或 0.3 V),容易产生饱和失真。

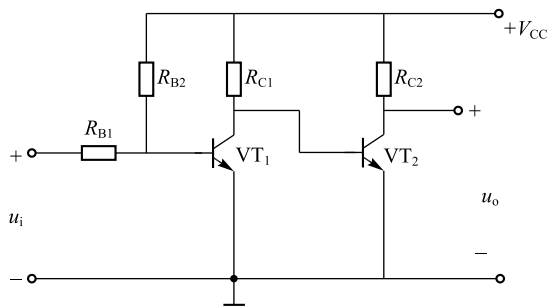


图 4-2 直接耦合放大电路

为了保证各级放大电路都有合适的动态范围,必须采取有效措施,既保证各级工作点合理,又保证直流信号能有效地传递。通常采用的措施是利用稳压管或发射极电阻提高后级的发射极电位,如图 4-3 所示。因为稳压管的动态电阻很小,因此利用稳压管提高后级发射极电位的方法对放大电路的放大倍数影响小,效果较好。

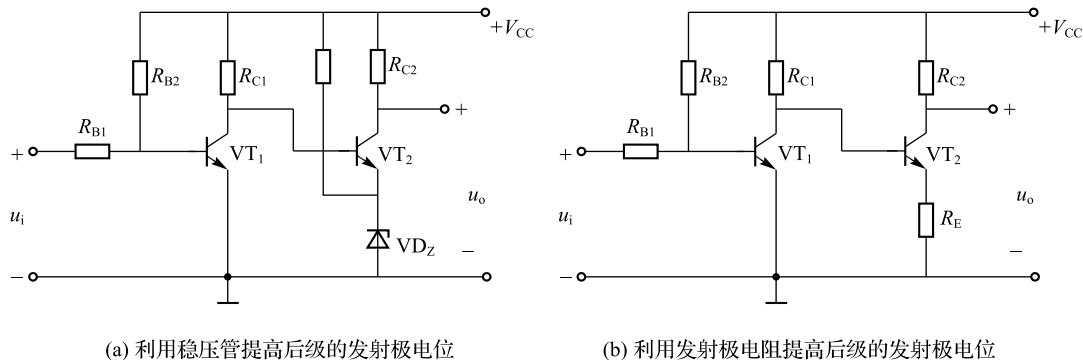


图 4-3 提高后级发射极电位的常用方法

2. 零点漂移

直接耦合放大电路在实际应用时,即使将输入端短路,输出电压也并不为零,而且这个不为零的电压会随时间做缓慢的、无规则的、持续的变动,这种现象称为零点漂移,简称零漂。产生零漂的原因在于直接耦合。当外界因素(如温度、电源电压、晶体管内部的杂散参数等)变化时,输出电压也随之变化,其中温度的影响最大,所以有时也把零漂称为温漂。第一级的零漂经第二级放大,再传给第三级,依次传递的结果是使输出端产生了较大的零漂电压,这个变化的电压与有用的输出信号混在一起,严重时甚至会淹没有用信号,使放大电路无法工作。

目前,抑制零漂主要采用差动放大电路。

4.2.2 差动放大电路分析

差动放大电路也称为差分放大电路,简称为差放。它可以将零漂减小到可以忽略的数量级,因而应用广泛。

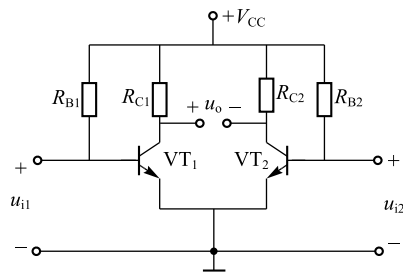


图 4-4 基本差动放大电路

1. 基本差动放大电路的工作原理

图 4-4 所示为基本差动放大电路,它由两个完全相同的单管共射极放大电路组成。差动放大电路要求电路对称,即 VT_1 、 VT_2 的特性相同,外接电阻对称, $R_{B1} = R_{B2} = R_B$, $R_{C1} = R_{C2} = R_C$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$,差动放大电路有两个输入端。

(1) 静态分析。静态时, $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 。由于电路左右对称, $I_{C1} = I_{C2}$, $U_{C1} = U_{C2}$, 则输出电压 $U_o = U_{C1} - U_{C2} = 0$ 。

当电源电压波动或温度变化时,两个三极管的集电极电流和集电极电位同时发生变化,

输出电压仍然为零。可见,尽管各三极管的零漂存在,但总输出电压为零,从而使零漂得到抑制。

(2) 动态分析。

① 差模输入。放大电路的两个输入端分别输入大小相等、极性相反的信号($u_{i1} = -u_{i2}$),这种输入方式称为差模输入。

差模输入电压为

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 2u_{i1} = -2u_{i2} \quad (4-1)$$

则

$$u_{i1} = \frac{1}{2}u_{id} \quad u_{i2} = -\frac{1}{2}u_{id} \quad (4-2)$$

差模输出电压为

$$u_{od} = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1} = -2u_{o2} \quad (4-3)$$

差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = A_{u1} = A_{u2} \quad (4-4)$$

即差动放大电路的差模电压放大倍数等于单管共射极放大电路的电压放大倍数。

$$A_{ud} = A_{u1} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} \quad (4-5)$$

若接上 R_L , 则

$$A_{ud} = A_{u1} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (4-6)$$

式中, $R'_L = R_C // \left(\frac{1}{2}R_L\right)$ 。

由于两管对称, R_L 的中点电位不变, 相当于交流的零电位。因此, 一个放大电路的负载是 R_L 的一半, 即 $\frac{1}{2}R_L$ 。

输入电阻是从放大电路的两个输入端向电路里看进去的等效动态电阻, 由图 4-4 可知输入电阻为

$$R_i = 2r_{be} \quad (4-7)$$

因为输出端经过两个 R_C , 故输出电阻为

$$R_o = 2R_C \quad (4-8)$$

② 共模输入。在差动放大电路的两个输入端分别加入大小相等、极性相同的信号, 即 $u_{i1} = u_{i2}$, 这种输入方式称为共模输入。共模输入信号用 u_{ic} 表示。共模输入时, $u_{ic} = u_{i1} = u_{i2}$, 此时输出电压与输入电压的比称为共模电压放大倍数, 用 A_{uc} 表示。在电路完全对称的情况下, 输出端电压 $u_{oc} = u_{o1} - u_{o2} = 0$, 即输出电压为零, 故 $A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} = 0$, 共模电压放大倍数为零。

抑制零点漂移的原理为: 在差动放大电路中, 无论是电源电压波动还是温度变化, 都会使两三极管的集电极电流和集电极电位发生相同的变化, 相当于在两输入端加入共模信号。由于电路完全对称, 使得共模输出为零, 共模电压放大倍数 $A_{uc} = 0$, 从而抑制了零点漂移。

差动放大电路放大的只是差模信号。

③任意信号分解。 u_{i1} 和 u_{i2} 是两个任意信号,可写成

$$u_{i1} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} + \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2}$$

$$u_{i2} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} - \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2}$$

那么就有

$$u_{i1} = u_{ic} + u_{id}, u_{i2} = u_{ic} - u_{id}$$

其中

$$u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2}$$

$$u_{id} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{2}$$

任意信号输入时,先分解为差模输入信号和共模输入信号,再分别放大、叠加。

(3)共模抑制比。在理想状态下,即电路完全对称时,差动放大电路对共模信号有完全的抑制作用。在实际电路中,差动放大电路不可能绝对对称,这时 $U_{oc} \neq 0, A_{uc} \neq 0$,为了衡量差动放大电路对共模信号的抑制能力,引入共模抑制比,用 K_{CMRR} 表示,即

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (4-9)$$

共模抑制比的大小反映了差动放大电路对共模信号的抑制能力。其对数表示式为

$$K_{CMRR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ (dB)}$$

由上式可以看出, K_{CMRR} 越大,差动放大电路放大差模信号(有用信号)的能力越强,抑制共模信号(无用信号)的能力越强,即 K_{CMRR} 越大越好。理想的差动放大电路,其共模抑制比 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$ 。

2. 带 R_E 的差动放大电路

基本差动放大电路对共模信号的抑制是靠电路两侧的对称性来实现的,但对于各管自身的工作点漂移没有抑制作用。若采用单端输出,则差模与共模放大倍数相等,这时 $K_{CMRR} = 1$,失去了差动放大电路的优势,即使是双端输出,由于实际电路的不完全对称性,仍然有共模电压输出。

为了不降低 A_{ud} ,只降低 A_{uc} ,提高共模抑制比,可采用带公共 R_E 的差动放大电路,如图 4-5 所示,这种电路也称为长尾式差动放大电路。 K_{CMRR} 是由差模电压放大倍数和共模电压放大倍数共同决定的,下面分析 R_E 对差模电压放大倍数和共模电压放大倍数的影响。

(1)静态分析。图 4-5 所示电路的直流通路如图 4-6 所示, I_E 电流为 I_{E1} 和 I_{E2} 之和,由于电路对称, $I_{E1} = I_{E2}$,因此流过 R_E 的电流为 $2I_{E1}$ ($2I_{E2}$)。

由于

$$U_{BE} + 2I_E R_E - V_{EE} = 0$$

则

$$I_C \approx I_E = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{2R_E} \quad (4-10)$$

$$U_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C R_C - 2I_E R_E \quad (4-11)$$

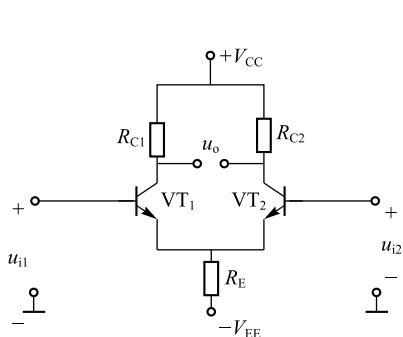
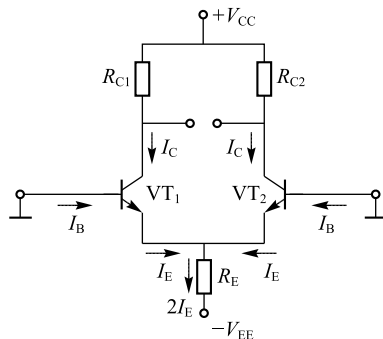
图 4-5 带 R_E 的差动放大电路

图 4-6 图 4-5 所示电路的直流通路

(2) 稳定静态工作点的过程。加 R_E 后, 当温度上升时, 由于 I_{C1} 和 I_{C2} 同时增大, 稳定过程实质上是一个负反馈过程。 R_E 越大, 工作点越稳定, 但 R_E 过大会导致 V_E 过高, 从而使静态工作点电流太小, 加入负电源 $-V_{EE}$ 可补偿 R_E 上的压降。

(3) 动态分析。

① R_E 对差模信号的影响。如图 4-5 所示, 加入差模信号, 由于 $u_{i1} = -u_{i2}$, 则 $i_{E1} = -i_{E2}$, 流过 R_E 的电流 $i_E = i_{E1} + i_{E2} = 0$ 。对差模信号来讲, R_E 上没有信号压降, 即 R_E 对差模电压放大倍数没有影响。差模电压放大倍数、输入电阻、输出电阻与基本差动放大电路相同。

② R_E 对共模信号的影响。图 4-6 所示电路加入共模信号, 由于 $u_{i1} = u_{i2}$, 则 $i_{E1} = i_{E2}$, 流过 R_E 的电流 $i_E = i_{E1} + i_{E2} = 2i_{E1}$ 。可见, 对于共模信号, 可以等效成每管发射极接入 $2R_E$ 的电阻。

共模电压放大倍数为

$$A_{uc} = -\beta \frac{R_C}{r_{be} + 2(1+\beta)R_E} \quad (4-12)$$

与不加 R_E 时的放大倍数相比, 加上 R_E 使共模电压放大倍数减小; 而且 R_E 越大, A_{uc} 越小, K_{CMRR} 越大。

3. 具有恒流源的差动放大电路

通过对带 R_E 的差动放大电路的分析可知, R_E 越大, K_{CMRR} 越大, 但增大 R_E , 相应的 V_{EE} 也要增大, 显然过高的 V_{EE} 是不合适的。在不增大 V_{EE} 的情况下, 若 $R_E \rightarrow \infty$, $A_{uc} \rightarrow 0$, 则 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$, 这是最理想的。为达到这个目的, 用恒流源电路来代替 R_E , 电路如图 4-7(a) 所示。 VT_3 采用分压式偏置电路, 无论 VT_1 、 VT_2 有无信号输入, I_{B3} 恒定, I_{C3} 恒定, 所以 VT_3 称为恒流管。其一般表示电路如图 4-7(b) 所示。

恒流源具有很大的动态电阻, 所以在集成电路中得到了广泛的应用。

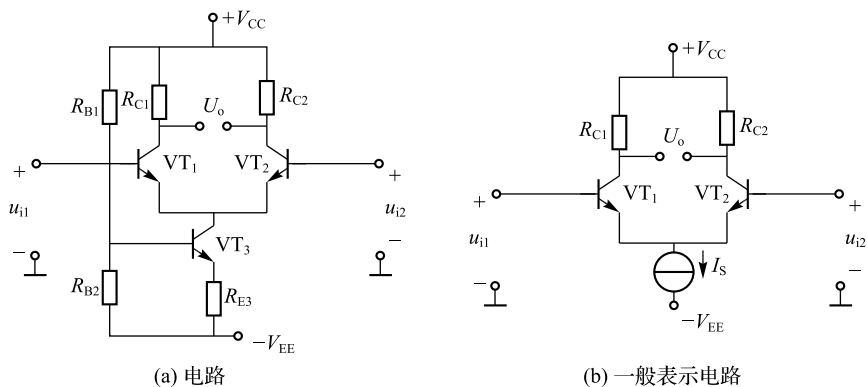


图 4-7 具有恒流源的差动放大电路

4.2.3 差动放大电路的输入/输出方式

由于差动放大电路有两个输入端和两个输出端,所以信号的输入和输出有四种方式,分别是双端输入双端输出、单端输入双端输出、单端输入单端输出、双端输入单端输出。实际应用中根据不同需要可选择不同的输入/输出方式。

1. 双端输入双端输出

电路如图 4-8 所示,其中,差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (4-13)$$

式中, $R'_L = R_C // \left(\frac{1}{2}R_L\right)$ 。

输入电阻为

$$R_i = 2r_{be} \quad (4-14)$$

输出电阻为

$$R_o = 2R_C \quad (4-15)$$

此电路适用于输入、输出不需要接地,对称输入、对称输出的场合。

2. 单端输入双端输出

如图 4-9 所示,信号从一只管子的基极与地之间输入,另一只管子的基极接地,表面上似乎两管不是工作在差动状态,但实际输入信号 $u_{i1} = u_i, u_{i2} = 0$,两个输入端之间的差模输入信号就等于 u_i ,因此,单端输入的实质还是双端输入,其 A_d, R_i, R_o 的计算与双端输入双端输出的情况相同。

此电路适用于将单端输入转换成双端输出的场合。

3. 单端输入单端输出

图 4-10 所示为单端输入单端输出差动放大电路。信号只从一只管子的基极与地之间接入,输出信号从一只管子的集电极与地之间输出,输出电压只有双端输出的一半,电压放大倍数 A_{ud} 也只有双端输出的一半。

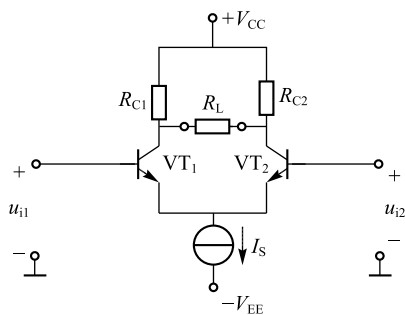


图 4-8 双端输入双端输出差动放大电路

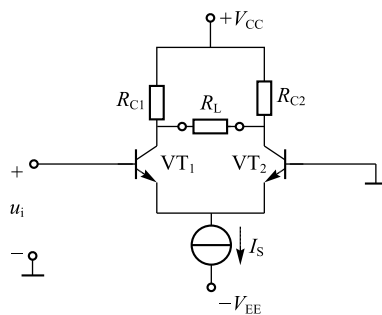


图 4-9 单端输入双端输出差动放大电路

$$A_{ud} = -\beta \frac{R'_L}{2r_{be}} \quad (4-16)$$

式中, $R'_L = R_C // R_L$ 。

输入电阻为

$$R_i = 2r_{be} \quad (4-17)$$

输出电阻为

$$R_o = R_C \quad (4-18)$$

此电路适用于输入、输出均有一端接地的场合。

4. 双端输入单端输出

图 4-11 所示电路的输入方式和双端输入相同,输出方式和单端输出相同,它的 A_{ud} 、 R_i 、 R_o 的计算和单端输入单端输出相同,此电路适用于双端输入转换成单端输出的场合。

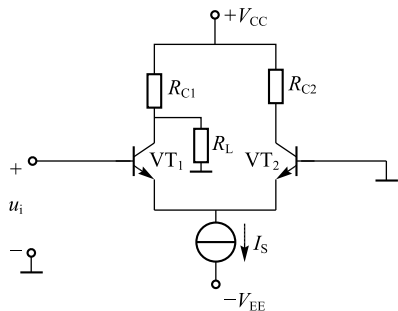


图 4-10 单端输入单端输出差动放大电路

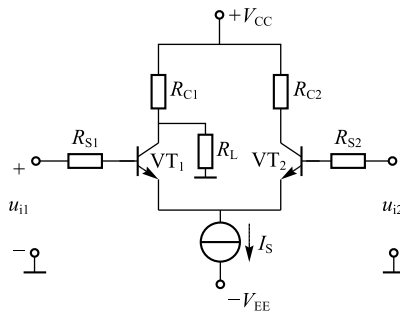


图 4-11 双端输入单端输出差动放大电路

【练习题】

- 4.2.1 什么是零点漂移? 差动放大电路为什么能抑制零漂?
- 4.2.2 什么是共模信号? 什么是差模信号?
- 4.2.3 已知差动放大电路 $u_{i1} = 10.06 \text{ mV}$, $u_{i2} = 9.94 \text{ mV}$, 求输入共模和差模电压。
- 4.2.4 如图 4-8 所示电路, 已知 $r_{be} = 1.2 \text{ k}\Omega$, $R_C = 5.1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5.1 \text{ k}\Omega$, $\beta = 60$ 。试计算电压放大倍数、输入及输出电阻。

4.2.5 填空题。

(1)差动放大电路放大的是_____信号。

(2)共模抑制比的大小反映了差动放大电路对_____的抑制能力。理想的差动放大电路的共模抑制比 K_{CMRR} _____。

4.3 集成运放的主要参数、分类及符号

4.3.1 集成运放的主要参数

集成运放的参数是评价其性能优劣的主要标志,也是正确选择和使用集成运放的依据。

1. 电源电压

施加于运放电源端子的最大直流电压值称为电源电压。一般有用正、负两种电压 V_{CC} 、 V_{EE} 表示或用它们的差值表示两种表示方法。

2. 最大差模输入电压 U_{idmax}

U_{idmax} 是运放同相端和反相端之间所能承受的最大电压值。输入差模电压超过 U_{idmax} 时,可能会使输入级的管子反相击穿而损坏。

3. 最大共模输入电压 U_{icmax}

U_{icmax} 是指运放所能承受的最大共模输入电压。若超过此值,集成运放的共模抑制比、差模放大倍数等会显著下降。

4. 开环差模电压放大倍数 A_{ud}

集成运放开环时输出电压与输入差模信号电压之比称为开环差模电压放大倍数,用 A_{ud} 表示。 A_{ud} 越高,运放组成电路的精度越高,性能越稳定。

5. 输入失调电压 U_{os}

实际上,集成运放难以做到差动输入级完全对称。当输入电压为零时,为了使输出电压也为零,需在集成运放两端额外附加补偿电压,该补偿电压称为输入失调电压,用 U_{os} 表示。 U_{os} 越小越好,一般为 $0.4\sim 5\text{ mV}$ 。

6. 输入失调电流 I_{os}

I_{os} 是当运放输出电压为零时,两个输入端的偏置电流,即 $I_{os} = |I_{B1} - I_{B2}|$,它是由内部元件参数不一致等原因造成的。 I_{os} 越小越好,一般为 $1\sim 10\ \mu\text{A}$ 。

7. 输入偏置电流 I_B

I_B 是输出电压为零时,流入运放两输入端静态基极电流的平均值,即 $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$ 。 I_B 越小越好,一般为 $1\sim 100\ \mu\text{A}$ 。

8. 共模抑制比 K_{CMRR}

K_{CMRR} 是差模电压放大倍数和共模电压放大倍数之比,即 $\left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$,也可表示为 $K_{CMRR} = 20\lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$ 。 K_{CMRR} 越大越好,一般运放在 80 dB 以上。

9. 差模输入电阻 r_{id}

r_{id} 是开环时输入电压变化量与它引起的输入电流的变化量之比,即从输入端看进去的

动态电阻。 r_{id} 一般为兆欧级。

10. 输出电阻 R_o

R_o 是开环时输出电压变化量与它引起的输出电流的变化量之比,即从输入端看进去的电阻。 R_o 越小,运放的带负载能力越强。

除了以上指标外,集成运放还有其他一些参数,如最大输出电压、最大输出电流、带宽等。

4.3.2 集成运放的分类

集成运放有以下几种分类方法:

(1)按用途分为通用型和专用型两大类。通用型集成运放的参数和指标比较均衡、全面,适用于一般工程设计。通用型是一般设计时应首先考虑选择的。专用型集成运放是为了满足某些特殊要求而设计的,其中有一项或几项指标非常突出,可以分为低功耗型或微功耗型、高速型、宽带型、高精度型、高电压型、功率型、高输入阻抗型、电流型、跨导型和低噪声型等。

(2)按供电电源分为单电源和双电源两类。

(3)按制作工艺分为双极型、单极型和双极-单极兼容型。

(4)按每个芯片中含运放的数目分为单运放、双运放、三运放和四运放等。

(5)按封装形式分为塑料双列直插式、陶瓷扁平封装、金属圆壳封装等多种。

4.3.3 集成运放的外形和符号

常见集成运放的外形及引脚如图 4-12 所示。

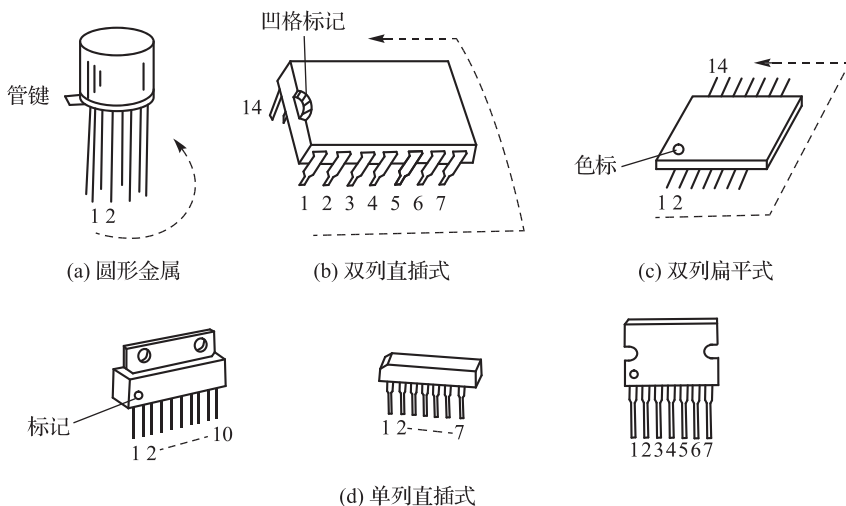


图 4-12 常见集成运放的外形及引脚

集成运放的图形符号如图 4-13 所示,图 4-13(a)所示为集成运放的习惯画法,图 4-13(b)所示为目前世界上通用的标准符号,本书采用标准符号。

图中“ $-$ ”为反相输入端,输入信号由此端输入时,输出信号与输入信号反相;“ $+$ ”为同相输入端,输入信号由此端输入时,输出信号与输入信号同相。“ \triangleright ”表示传输方向,“ ∞ ”表示理想条件。

图 4-14 所示为 LM741 集成运算放大器的电路引脚图。LM741 共有 8 个引脚,各引脚的功能如下:

引脚 2 和引脚 3 为差动输入级的两个输入端,引脚 2 为反相输入端,引脚 3 为同相输入端,引脚 6 为输出端;输入信号由引脚 2 输入时,引脚 6 输出端信号与引脚 2 输入信号反相,输入信号由引脚 3 输入时,引脚 6 输出端信号与引脚 2 输入信号同相。

引脚 4 和引脚 7 为外接电源端,给集成运算放大器提供直流电源。运算放大器通常采用双电源供电,引脚 4 接负电源的负极,引脚 7 接正电源的正极,使用时不能接错。

引脚 1 和引脚 5 为外接调零补偿电位器端。集成运算放大器的输入虽然为差动电路,但电路参数和三极管的参数不能完全对称,因此当输入信号为零时,输出并不为零,调节电位器,可使输入信号为零时输出为零。

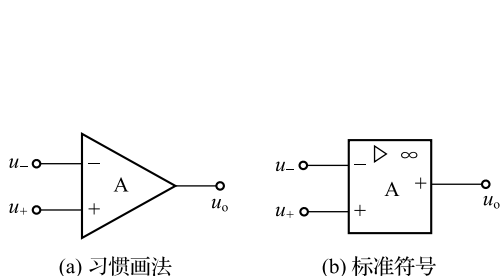


图 4-13 集成运放的图形符号

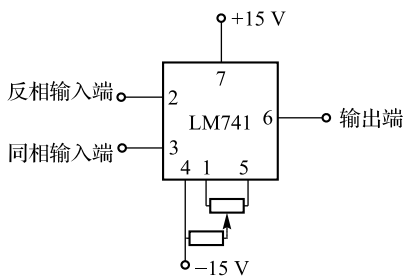


图 4-14 LM741 集成运算放大器的电路引脚图

测试:集成运放简易测试

集成运放使用前,必须熟悉各引脚功能和接线方法。利用万用表可以对集成运放进行简易测试。

用万用表 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡测量集成运放同相输入端、反相输入端间的正反向电阻,各引脚对输出端的正反向电阻,各引脚对正电源端、负电源端的正反向电阻。将测得阻值与同型号集成运放的正常值相比,应比较接近,如果相差很大,甚至出现短路和断路现象,一般是集成运放已损坏。

也可将集成运放接成图 4-15 所示电路,接通电源,用万用表直流电压挡测量输出电压,调节可调电阻,输出电压应能在 $0 \sim V_{CC}$ 变化。如果调节可调电阻,输出电压不变或变化很小,说明集成运放已损坏。

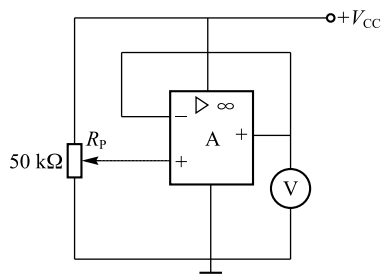


图 4-15 集成运放简易测试电路

【练习题】

4.3.1 什么是最大差模输入电压? 什么是最大共模输入电压?

4.3.2 什么是输入失调电压?

4.3.3 填空题。

(1)集成运放按制作工艺分为_____、_____和_____。

(2)共模抑制比是_____和_____之比,共模抑制比数值越_____越好。

4.4 理想集成运放的模型

4.4.1 集成运放的电压传输特性

集成运放输出电压与其输入电压之间的关系曲线称为电压传输特性,集成运放的电压传输特性如图 4-16 所示。

从图中可以看到,当 u_i 为小信号,在 $-u_{im}$ 和 $+u_{im}$ 之间时,输出与输入为线性关系。此时运放工作在线性区。当 u_i 超过上述区域时,运放输出信号不再跟随输入信号线性变化,进入饱和区(非线性区),输出电压分别为正向和负向的最大值,即 $+u_{om}$ 和 $-u_{om}$ 。

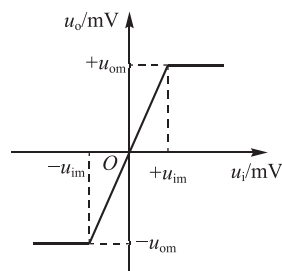


图 4-16 集成运放的电压传输特性

4.4.2 理想集成运放的特点

理想集成运放的特点如下：

- (1) 开环差模电压放大倍数 $A_{ud} \rightarrow \infty$ 。
- (2) 差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$ 。
- (3) 输出电阻 $R_o \rightarrow 0$ 。
- (4) 共模抑制比 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$ 。
- (4) 输入偏置电流 $I_{B1} = I_{B2} = 0$ 。
- (6) 失调电压、失调电流及温漂为零。

分析集成运放应用电路时,常把集成运放看成理想运算放大电路,这样可以使分析简化,但会造成一定的误差。

4.4.3 理想集成运放工作在线性区的特点

由于集成运放的开环差模电压放大倍数很大($A_{ud} \rightarrow \infty$),而开环电压放大倍数受温度影响很不稳定,采用深度负反馈可以提高其稳定性。此外,运放的开环带宽很窄,如 F007 只有 7 Hz,无法适应交流信号的放大要求,加负反馈后可将带宽扩展 $(1+AF)$ 倍。负反馈还可以改变输入、输出电阻,减小失真,提高稳定性等。所以集成运放工作在线性区时,采用负反馈是必要条件。

集成运放工作在线性区时,输出电压与差模输入电压之间满足

$$u_o = A_{ud}(u_+ - u_-)$$

由于理想集成运放 A_{ud} 为无穷大,输出 $u_o = A_{ud}(u_+ - u_-)$ 为有限值,所以两输入端电位近似相同,即 $u_+ \approx u_-$,这一特征称为“虚短”。

又由于集成运放的差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$,因此两输入端电流近似为零,即 $i_+ \approx i_- \approx 0$,这一特征称为“虚断”。

4.4.4 理想集成运放工作在非线性区的特点

集成运放工作在非线性区时,一般为开环或引入正反馈。其特点如下：

当 $u_- > u_+$ 时, $u_o = +u_{om}$; 当 $u_- < u_+$ 时, $u_o = -u_{om}$ 。理想集成运放工作在非线性区时,

不再具有“虚短”特性。

由于集成运放的差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$, 因此两输入端电流近似为零, 即 $i_+ \approx i_- \approx 0$ 。理想集成运放工作在线性区时, 仍具有“虚断”特性。

【练习题】

4.4.1 理想集成运放有哪些特点?

4.4.2 如何理解“虚短”和“虚断”?

4.4.3 填空题。

(1) 集成运放工作在线性区, 当 $u_- > u_+$ 时, $u_o =$ _____; 当 $u_- < u_+$ 时, $u_o =$ _____。

(2) 理想集成运放工作在线性区时, 仍具有 _____ 特性, 不再具有 _____ 特性。

4.5 基本运算电路

4.5.1 比例运算电路

比例运算电路有反相比例运算电路和同相比例运算电路两种, 它们是最基本的运算电路。

1. 反相比例运算电路

反相比例运算电路是指信号由运放的反相端输入。图 4-17 所示为反相比例运算电路, 输入信号经 R_1 加到反相输入端, R_f 为反馈电阻, 经 R_f 把输出信号电压 u_o 反馈到反相输入端, 构成深度电压并联负反馈。

(1) “虚地”的概念。由于集成运放工作在线性区, $u_+ \approx u_-$, $i_+ \approx i_- \approx 0$, 即流过 R_2 的电流为零, 则 $u_+ = 0$, $u_- \approx u_+ = 0$, 说明反相输入端虽然没有直接接地, 但其电位为地电位, 相当于接地, 是“虚假接地”, 简称为“虚地”。“虚地”是反相比例运算电路的重要特点。

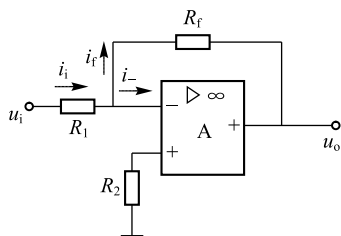


图 4-17 反相比例运算电路

(2) 电压放大倍数。

如图 4-17 所示, 可得

$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

$$i_i = \frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$$

由于 $i_+ \approx i_- \approx 0$, 则 $i_f = i_i$, 即

$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f}$$

则

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i \quad (4-19)$$

或

$$A_{uf} = -\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (4-20)$$

式中, A_{uf} 是反比例运算电路的电压放大倍数。

上式表明, 反比例运算电路中, 输出信号电压 u_o 和输入信号电压 u_i 相位相反, 大小成比例关系, 比例系数为 $-\frac{R_f}{R_1}$ 。当 $R_f=R_1$ 时, $A_{uf}=-1$, 即输出电压和输入电压的大小相等, 相位相反, 此电路称为反相器。同相输入端电阻 R_2 用于保持运放的静态平衡, 要求 $R_2=R_1//R_f$, R_2 称为平衡电阻。

(3) 输入电阻、输出电阻。由于 $u_- = 0$, 所以反比例运算电路的输入电阻为

$$R_{if} = \frac{u_i}{i_i} = R_1$$

由于反比例运算电路采用并联负反馈, 所以从输入端看进去的电阻很小, 近似等于 R_1 。放大电路采用电压负反馈, 其输出电阻很小, $R_o \approx 0$ 。

【例 4-1】 在图 4-17 中, 设 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, 求电压放大倍数 A_{uf} ; 若 $u_i = 0.3 \text{ V}$, 则输出电压 u_o 为多少?

解 电压放大倍数为

$$A_{uf} = -\frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} = -10$$

输出电压为

$$u_o = A_{uf} u_i = -10 \times 0.3 = -3 \text{ V}$$

2. 同相比例运算电路

同相比例运算电路是指信号由运放的同相端输入。图 4-18 所示电路为同相比例运算电路, 输入信号 u_i 经 R_2 加到集成运放的同相输入端, R_f 为反馈电阻, R_1 为平衡电阻 ($R_2 = R_1 // R_f$)。

(1) 电压放大倍数。图中有 $u_- \approx u_+$, 称为“虚短”。由于 $u_+ = u_i$, $u_- = u_f$, 则 $u_+ \approx u_- = u_i = u_f$ 。图中有 $i_- \approx i_+ \approx 0$, 称为“虚断”。则

$$i_f = -i_{R1}$$

根据

$$i_{R1} = \frac{u_f}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f}$$

有

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i \quad (4-21)$$

由式(4-21)可得电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

上式表明, 同相比例运算电路中输出电压与输入电压的相位相同, 大小成比例关系, 比例系数为 $\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$ 。

在图 4-18 中, 如果把 R_f 短路 ($R_f = 0$), 把 R_1 断开 ($R_1 \rightarrow \infty$), 则 $A_{uf} = 1$, 即输出信号 u_o 和输入信号 u_i 大小相等, 相位相同。

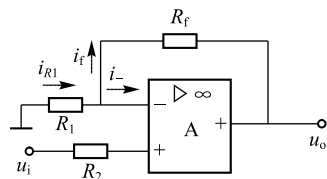


图 4-18 同相比例运算电路

(2)输入电阻、输出电阻。由于采用了深度电压串联负反馈,该电路具有很高的输入电阻和很低的输出电阻,即 $R_{if} \rightarrow \infty, R_o \rightarrow 0$ 。这是同相比例运算电路的重要特点。

【例 4-2】 分析图 4-19 所示电路的输出电压与输入电压的关系。

解 图中反相输入端未接电阻 R_1 , 即 $R_1 = \infty$, 稳压管电压为输入信号加到同相输入端, 则有

$$u_o = u_i$$

此电路可作为基准电压源, 且可提供较大的输出电流。

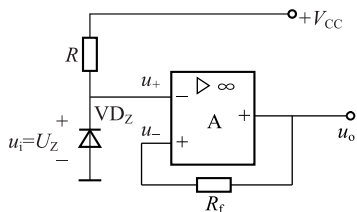


图 4-19 例 4-2 图

4.5.2 加法运算电路

利用集成运放工作在线性区的特点, 根据输入电压和输出电压的关系, 外加不同的反馈网络可以实现多种数学运算。

1. 反相加法运算电路

如图 4-20 所示, 图中有三个输入信号加在反相输入端, 同相输入端的平衡电阻 $R_4 = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$ 。

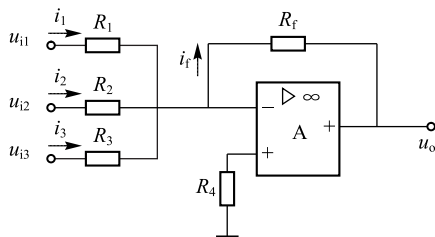


图 4-20 反相加法运算电路

因 $u_- \approx u_+ = 0$, 则各支路电流分别为

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1}, i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}, i_3 = \frac{u_{i3}}{R_3}, i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

又由于“虚断”, $i_- = 0$, 则

$$i_f = i_1 + i_2 + i_3$$

即

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

整理得到

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3}\right) \quad (4-22)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 时, 式(4-22)变为

$$u_o = -\frac{R_f}{R}(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$

若 $R_f = R$, 有 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$, 实现了加法运算。

【例 4-3】 一个测量系统的输出电压与待测量之间的关系为 $u_o = 2u_{i1} + u_{i2} + 4u_{i3}$, 试用集成运放构成电路, 并求各电阻值。

解 此题是三个输入信号的加法运算。仿照加法运算的表达式,可知各个系数由反馈电阻 R_f 与各输入信号的输入电阻的比例关系所决定,由于式中各系数都是正值,而反相加法电路的系数都是负值,因此需加一级变号运算电路。实现这一运算的电路如图 4-21 所示。

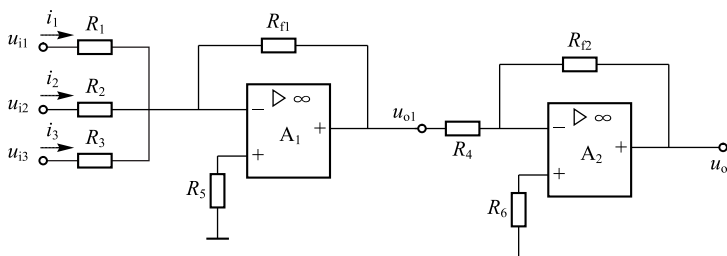


图 4-21 例 4-3 图

输出电压和输入电压的关系为

$$u_{o1} = -\frac{R_{f1}}{R_1}u_{i1} - \frac{R_{f1}}{R_2}u_{i2} - \frac{R_{f1}}{R_3}u_{i3}$$

$$u_o = -\frac{R_{f2}}{R_4}u_{o1} = \left(\frac{R_{f1}}{R_1}u_{i1} + \frac{R_{f1}}{R_2}u_{i2} + \frac{R_{f1}}{R_3}u_{i3}\right)\frac{R_{f2}}{R_4}$$

其中, $\frac{R_{f1}}{R_1} = 2, \frac{R_{f1}}{R_2} = 1, \frac{R_{f1}}{R_3} = 4, \frac{R_{f2}}{R_4} = 1$ 。

取 $R_{f1} = R_{f2} = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, 则 $R_1 = 5 \text{ k}\Omega, R_2 = 10 \text{ k}\Omega, R_3 = 2.5 \text{ k}\Omega$ 。

而 $R_5 = R_1 // R_2 // R_3 // R_{f1} = 1.25 \text{ k}\Omega, R_6 = R_4 // R_{f2} = R_{f2} / 2 = 5 \text{ k}\Omega$ 。

2. 同相加法运算电路

如图 4-22 所示电路,输入信号 u_{i1} 经 R_2 加到集成运放的同相输入端, u_{i2} 经 R_3 加到集成运放的同相输入端, R_f 为反馈电阻,满足 $R_1 // R_f = R_2 // R_3$ 。

u_{i1}, u_{i2} 作用应用叠加定理,可得

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i1} + \frac{R_2}{R_2 + R_3}u_{i2}$$

根据 $u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)u_+$, 可得

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

$$= \frac{R_3 // R_2}{R_1 // R_f} \cdot R_f \cdot \left(\frac{u_{i1}}{R_2} + \frac{u_{i2}}{R_3}\right)$$

因 $R_1 // R_f = R_2 // R_3$, 有

$$u_o = R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_2} + \frac{u_{i2}}{R_3}\right) \quad (4-23)$$

电路实现了同相加法运算。

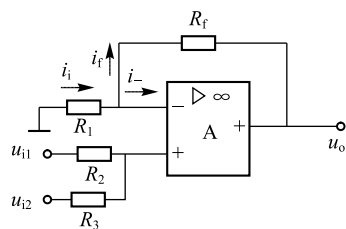


图 4-22 同相加法运算电路

4.5.3 减法运算电路

减法运算电路如图 4-23 所示。

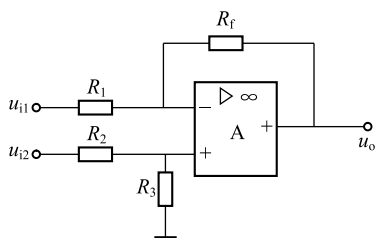


图 4-23 减法运算电路

由于“虚断”， $i_- = 0$ ，有

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

由于“虚短”，有 $u_+ = u_-$ ，则

$$\frac{u_{i1} - u_+}{R_1} = \frac{u_+ - u_o}{R_f}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_+ - \frac{R_f}{R_1} u_{i1} \quad (4-24)$$

即

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

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时，上式变为 $u_o = u_{i1} - u_{i2}$ ，实现了减法运算。

减法运算电路也可应用叠加定理进行分析。

【例 4-4】 如图 4-24 所示电路，分析输出电压与输入电压的关系。

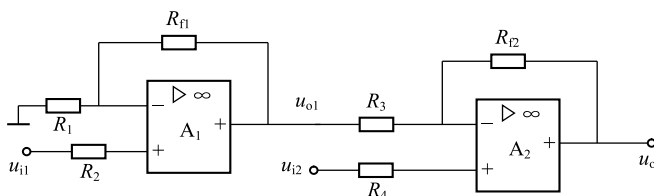


图 4-24 例 4-4 图

解 第一级运放构成同相比例运算电路，第二级运放构成减法运算电路。

根据前面的分析，有

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) u_{i1}$$

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) u_{i2} - \frac{R_{f2}}{R_3} u_{o1} = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) u_{i2} - \frac{R_{f2}}{R_3} \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) u_{i1}$$

若 $\frac{R_{f2}}{R_3} = \frac{R_1}{R_{f1}}$ ，取 $R_1 = R_{f2}$ ， $R_3 = R_{f1}$ ，则有

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_3}\right) (u_{i2} - u_{i1})$$

【例 4-5】 如图 4-25 所示电路， $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ， $R_3 = 12.5 \text{ k}\Omega$ ， $R_4 = 50 \text{ k}\Omega$ ， $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ ， $u_{i1} = 0.2 \text{ V}$ ， $u_{i2} = 0.4 \text{ V}$ ， $u_{i3} = 0.5 \text{ V}$ ，求输出电压 u_o 。

解 此电路是加减运算电路。

应用叠加定理，可得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2}\right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2}\right) \frac{R_4}{R_4 + R_3} u_{i3}$$

将已知条件代入，有

$$\begin{aligned}
 u_o &= -\left(\frac{100}{25} \times 0.2 + \frac{100}{20} \times 0.4\right) + \left(1 + \frac{100}{25 // 20}\right) \times \frac{50}{12.5 + 50} \times 0.5 \\
 &= -2.8 + 10 \times \frac{50}{12.5 + 50} \times 0.5 = 1.2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

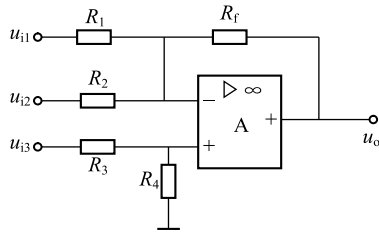


图 4-25 例 4-5 图

4.5.4 积分和微分运算电路

1. 积分运算电路

积分运算电路是模拟计算机中的基本单元电路,该电路如图 4-26 所示。

在反相比例运算电路中,将反馈电阻 R_f 换成电容器 C ,就构成了积分运算电路。

电路中 $u_o = -u_c, i_i = i_c = \frac{u}{R_{i1}}$ 。

而 $i_c = C \frac{du_c}{dt}$, 则

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

因此有

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt \quad (4-25)$$

由式(4-25)可以看出,此电路可以实现积分运算。

若 $u_i = U$, 由式(4-25)可得

$$u_o = \frac{U}{R_1 C} t + u_c(0_+)$$

$u_c(0_+)$ 为电容 C 两端电压初始值。若 $u_c(0_+) = 0$, 则 u_o 与 t 成正比。 u_o 与 u_i 波形如图 4-26(b) 所示。

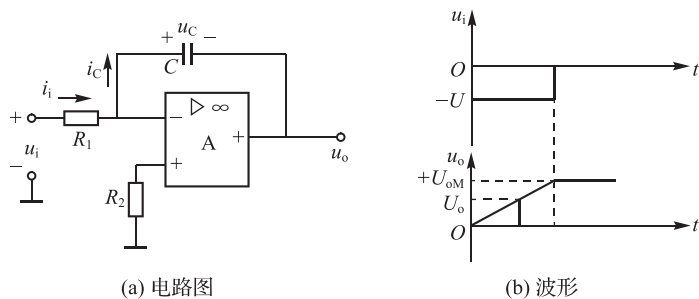


图 4-26 积分运算电路及其波形

2. 微分运算电路

微分运算是积分运算的逆运算。将积分运算电路中的电阻、电容互换位置就可以实现微分运算,如图 4-27(a)所示。

根据虚断、虚短,有

$$i_c = i_f = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$$

则

$$u_o = -i_f R_f = -i_c R_f = -R_f C \frac{du_i}{dt} \quad (4-26)$$

由式(4-26)可以看出,输出信号 u_o 与输入信号 u_i 有微分关系,即实现了微分运算。负号表示输出信号与输入信号反相。 $R_f C$ 为微分时间常数,其值越大,微分输出电压越大。

当输入信号 u_i 为矩形脉冲时,输出 u_o 为尖脉冲,如图 4-27(b)所示。

积分、微分运算电路应用很广,如用于延时、波形变换等。当图 4-26(a)输入 u_i 为方波时,输出 u_o 为三角波。

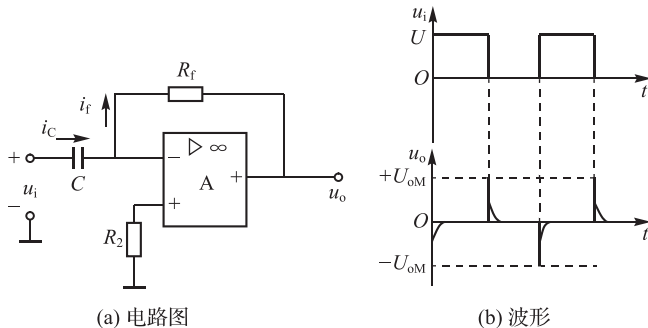


图 4-27 微分运算电路及其波形

测试:比例、加法、减法运算电路测试

1. 反相比例运算电路

(1)如图 4-28 所示,根据电路选择元件(集成运放为 $\mu A741$),按照反相比例运算电路连接电路,检查电路无误后接通电源($\pm 12\text{ V}$),输入端对地短路,进行调零和消振。

(2)调信号源,使输入电压 $u_i = 0.3\text{ V}$,测量相应的 u_o ,并注意观察 u_o 和 u_i 的相位关系,记入表 4-1 中。

表 4-1 反相比例运算电路测试结果

u_i/V	u_o/V	A_u	
		实测值	计算值

2. 同相比例运算电路

(1)如图 4-29 所示,根据电路选择元件(集成运放为 $\mu A741$),按照同相比例运算电路连接电路,检查电路无误后接通电源($\pm 12\text{ V}$),输入端对地短路,进行调零和消振。

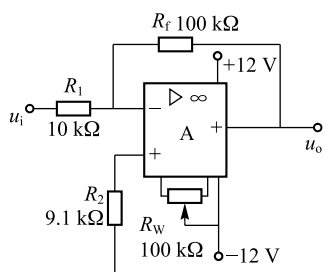


图 4-28 反相比例运算测试电路

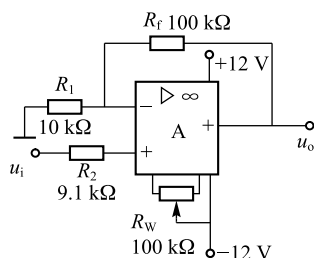


图 4-29 同相比例运算测试电路

(2)调信号源,使输入电压 $u_i=0.2\text{ V}$,测量相应的 u_o ,并注意观察 u_o 和 u_i 的相位关系,记入表 4-2 中。

表 4-2 同相比例运算电路测试结果

u_i/V	u_o/V	A_u	
		实测值	计算值

3. 反相加法运算电路

(1)如图 4-30 所示,根据电路选择元件(集成运放为 $\mu\text{A}741$),按反相加法运算电路连接电路,检查电路无误后接通电源($\pm 12\text{ V}$),输入端对地短路,进行调零和消振。

(2)按表 4-3 调信号源,使输入电压 u_{i1} 、 u_{i2} 为表中数值,测量相应的 u_o ,并注意观察 u_o 和 u_i 的相位关系,记入表 4-3 中。

表 4-3 反相加法运算电路测试结果

u_{i1}/V	0.1	0.2	0.3
u_{i2}/V	0.2	0.3	0.4
u_o/V			

4. 减法运算电路

(1)如图 4-31 所示,根据电路选择元件(集成运放为 $\mu\text{A}741$),按减法运算电路连接电路,检查电路无误后接通电源($\pm 12\text{ V}$),输入端对地短路,进行调零和消振。

(2)按表 4-4 调信号源,使输入电压 u_{i1} 、 u_{i2} 为表中数值,测量相应的 u_o ,并注意观察 u_o 和 u_i 的相位关系,记入表 4-4 中。

表 4-4 减法运算电路测试结果

u_{i1}/V	0.1	0.2	0.3
u_{i2}/V	0.2	0.3	0.4
u_o/V			

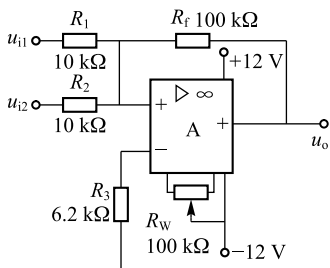


图 4-30 反相加法运算测试电路

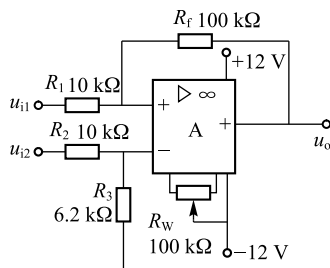


图 4-31 减法运算测试电路

【练习题】

4.5.1 理想集成运放的特点有哪些？

4.5.2 比较同相比例运算电路和反相比例运算电路的结构与特点。

4.5.3 填空题。

(1)反相比例运算电路的输出、输入电压关系式为_____；同相比例运算电路的输入、输出电压的关系式为_____。

(2)由于集成运放的差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$ ，因此两输入端电流_____，即_____，这称为“虚断”。由于理想集成运放开环电压放大倍数为无穷大，最大输出电压 $u_o = A_{ud}(u_+ - u_-)$ 为有限值，所以两输入端_____，即_____，称为“虚短”。

(3)在积分运算电路中，电容接在_____与_____之间。

4.6 集成运放的应用

4.6.1 集成运放的线性应用

1. 测量放大器

测量放大器常用于热电偶、应变电桥、流量计、生物电测量及其他具有较大共模干扰的直流缓变微弱信号的检测。常用的测量放大器电路如图 4-32 所示。该电路由三个集成运放组成，每个集成运放都接成比例运算电路， A_1 、 A_2 接成同相输入方式， A_1 、 A_2 组成第一级，输入电阻很高。由于电路对称，它们的漂移和失调互相抵消。 A_3 组成减法运算电路。

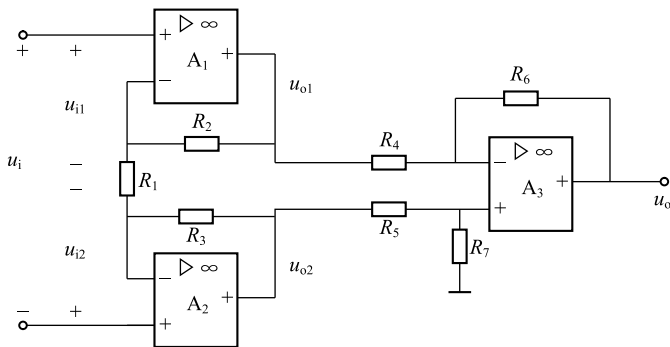


图 4-32 常用的测量放大器电路

在图 4-32 中,当加上差模信号 u_i 时,若运放 A_1 、 A_2 参数对称,且 $R_2=R_3$,则 R_1 的中点将为地电位,此时

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{\frac{1}{2}R_1}\right) u_{i1}$$

即

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) u_{i1}$$

同理有

$$u_{o2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) u_{i2}$$

则

$$u_{o1} - u_{o2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (u_{i1} - u_{i2}) = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) u_i$$

第一级电压放大倍数为

$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_i} = 1 + \frac{2R_2}{R_1}$$

第二级为减法运算电路,若 $R_4=R_5$, $R_6=R_7$,可得

$$\frac{u_o}{u_{o1} - u_{o2}} = -\frac{R_6}{R_4}$$

该测量放大器的电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{u_{o1} - u_{o2}} \cdot \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_i} = -\frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

放大器的差模输入电阻等于两个同相比例运算电路的输入电阻之和。

R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 四个电阻必须采用高精度电阻,并要精确匹配,否则不仅给放大倍数带来误差,而且将降低电路的共模抑制比。

2. 滤波器

滤波器的作用是允许信号中的某一部分频率的信号通过,而将其他频率的信号衰减。

滤波器按工作频率的不同分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。

(1) 低通滤波器。允许低频率信号通过,将高频信号衰减。

(2) 高通滤波器。允许高频率信号通过,将低频信号衰减。

(3) 带通滤波器。允许某一频率范围内的信号通过,将此频率范围以外的信号衰减。

(4) 带阻滤波器。阻止某一频率范围内的信号通过,允许此频率范围以外的信号通过。

按滤波器元件性质不同,滤波器分为无源滤波器和有源滤波器。

(1) 无源滤波器。利用电阻、电容等无源器件构成的简单滤波电路称为无源滤波器。

图 4-33 所示电路分别为低通滤波器和高通滤波器。其幅频特性如图 4-34 所示。

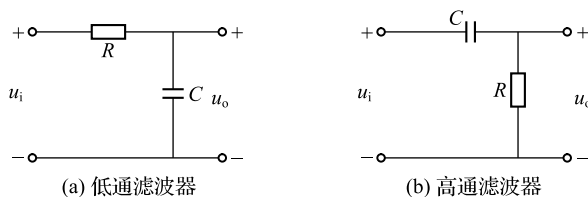


图 4-33 无源滤波器

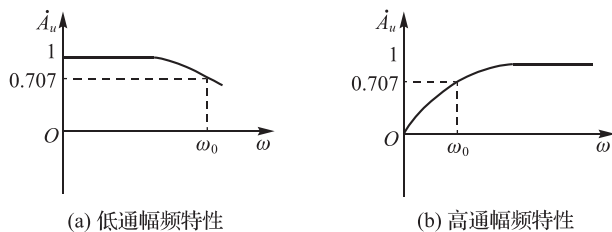


图 4-34 无源滤波器的幅频特性

无源滤波器结构简单,价格低廉,但对有用信号成分也会有较大的衰减作用,本身不具备放大能力,带负载能力差,性能不理想。

(2)有源低通滤波器。图 4-35(a)将无源滤波网络接到集成运放的同相输入端,图 4-35(b)将无源滤波网络接到集成运放的反相输入端。有源低通滤波器的幅频特性如图 4-36 所示。调整 R 、 C 参数即可改变截止频率。

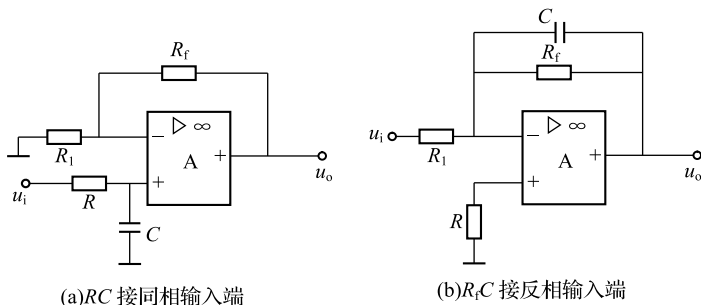


图 4-35 有源低通滤波器

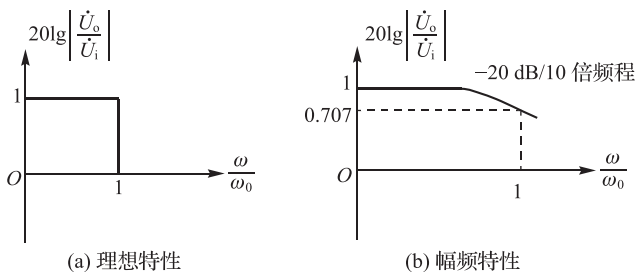


图 4-36 有源低通滤波器的幅频特性

(3)有源高通滤波器。有源高通滤波器如图 4-37 所示。图 4-37(a)所示为同相输入接法,图 4-37(b)所示为反相输入接法。其理想特性如图 4-38 所示。改变 R_f 、 R_1 可调整电压放大倍数,调整 RC 、 R_1C 参数可改变截止频率。

(4)有源带通滤波电路和有源带阻滤波电路。将低通滤波器、高通滤波器进行不同的组合,可以构成带通滤波器和带阻滤波器。

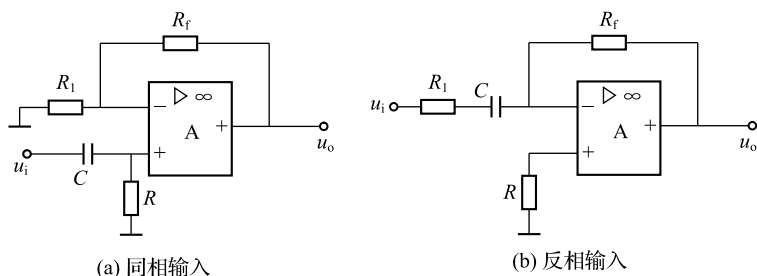


图 4-37 有源高通滤波器

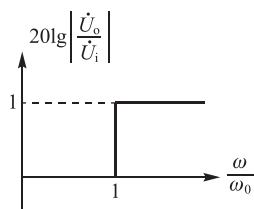


图 4-38 有源高通滤波器的理想特性

如图 4-39 所示,将一个低通滤波电路与一个高通滤波电路串联可组成带通滤波电路,将一个低通滤波电路与一个高通滤波电路并联可组成带阻滤波电路。

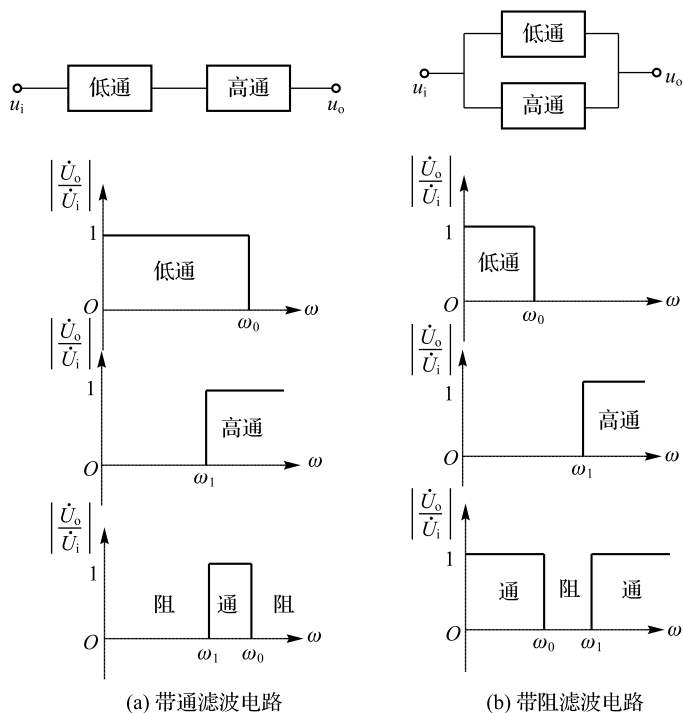


图 4-39 带通滤波电路和带阻滤波电路组成原理图

带通滤波电路与带阻滤波电路的典型电路如图 4-40 所示。

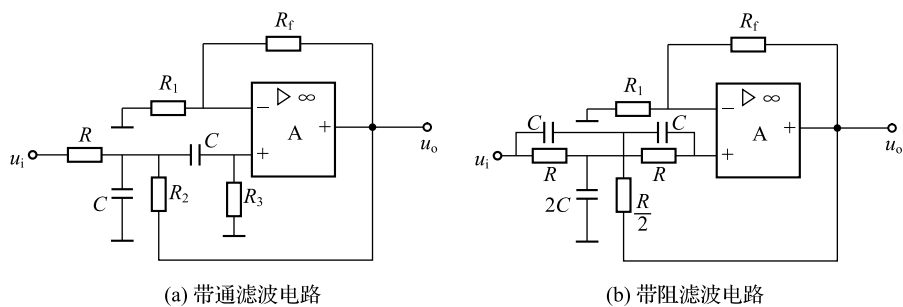


图 4-40 带通滤波电路与带阻滤波电路的典型电路

4.6.2 集成运放的非线性应用

1. 单限电压比较器

电压比较器的基本功能是比较两个或多个模拟输入量的大小,并将比较结果由输出状态反映出来。电压比较器工作在开环状态,即工作在非线性区。

图 4-41(a)所示电路为简单的单限电压比较器。图中,反相输入端接输入信号 u_i ,同相输入端接基准电压 u_R 。集成运放处于开环工作状态,当 $u_i < u_R$ 时,输出为高电平 $+u_{om}$;当 $u_i > u_R$ 时,输出为低电平 $-u_{om}$,其传输特性如图 4-41(b)所示。

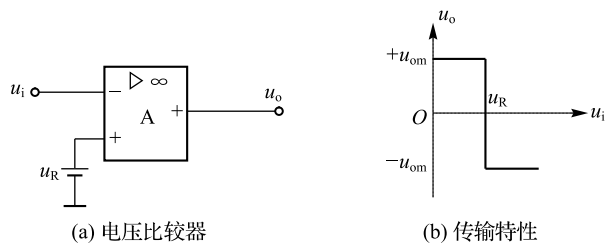


图 4-41 单限电压比较器

由图可知,只要输入电压相对于基准电压发生微小的正负变化,输出电压就在负的最大值到正的最大值之间做相应变化。

比较器也可以用于波形变换。例如,比较器的输入电压 u_i 是正弦波信号,若 $u_R = 0$,则 u_i 每过零一次,输出状态就要翻转一次,如图 4-42(a)所示;若 $u_R \neq 0$,则 u_i 每经过 u_R 一次,输出状态就要翻转一次,如图 4-42(b)所示。

比较器可以由通用运放组成,也可以由专用运放组成,它们的主要区别是输出电平有差异。通用运放比较器输出的高、低电平值与电源电压有关,专用运放比较器在其电源电压范围内输出的高、低电平值是恒定的。

2. 迟滞电压比较器

单限电压比较器存在的问题是,当输入信号在 u_R 处附近波动时,输出电压会出现多次翻转。采用迟滞电压比较器可以消除这种现象。迟滞电压比较器如图 4-43 所示,该电路的同相输入端电压 u_+ 由 u_o 和 u_R 共同决定,根据叠加原理有

$$u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o + \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_R$$

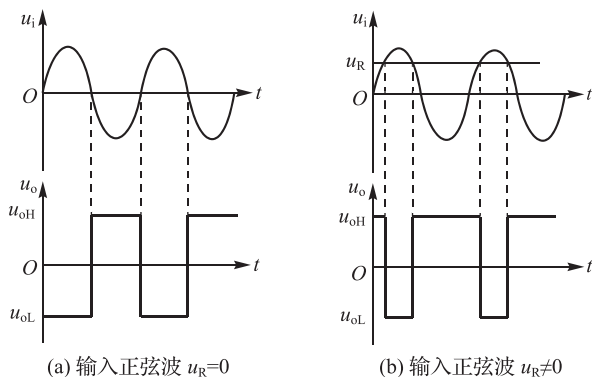


图 4-42 过零比较器

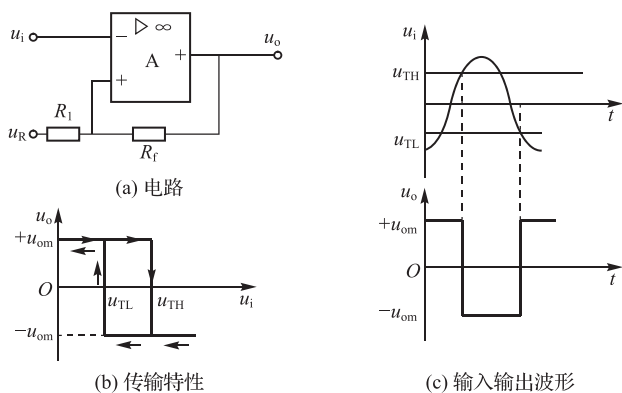


图 4-43 迟滞电压比较器

由于运放工作在非线性区,输出只有高、低电平两个电压($+u_{om}$ 和 $-u_{om}$),因此当输出电压为 $u_{oH} = +u_{om}$ 时, u_+ 的上门限值为

$$u_{TH} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_{om} + \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_R$$

输出电压为 $u_{oL} = -u_{om}$ 时, u_+ 的下门限值为

$$u_{TL} = \frac{-R_1}{R_1 + R_f} u_{om} + \frac{R_f}{R_1 + R_f} u_R$$

这种比较器在两种状态下,有各自的门限电压。对应于 u_{om} 有高门限电平 u_{TH} ,对应于 $-u_{om}$ 有低门限电平 u_{TL} 。

迟滞电压比较器的特点是:当输入信号发生变化且通过门限电平时,输出电压会发生翻转,门限电平也随之变换到另一值。当输入电压反相变化,通过导致刚才翻转那一瞬间的门限电平值时,输出不会发生翻转,直到 u_i 继续变化到另一个门限电平,电路才能翻转,出现转换迟滞。常用回差电压 Δu 表示迟滞电压的大小, $\Delta u = |u_{TH} - u_{TL}|$ 。迟滞电压比较器又称为施密特触发器。回差电压是迟滞电压比较器的重要参数,回差电压越大,比较器的抗干扰能力越强。

【练习题】

4.6.1 有源滤波电路与无源滤波电路相比有何特点?

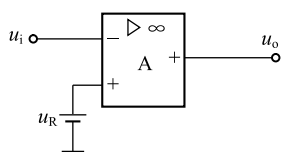


图 4-44 练习题 4.6.3(2)图

4.6.2 迟滞电压比较器有什么特点?

4.6.3 填空题。

(1)集成运放构成的电压比较器工作在_____状态,即工作在_____。

(2)如图 4-44 所示的单限电压比较器,当 $u_i < u_R$ 时,输出为_____,当 $u_i > u_R$ 时,输出为_____。

4.7 应用集成运放的注意事项

集成运放的应用广泛,在使用前必须进行测试。使用中应特别注意其主要参数和极限参数不要超过允许值。在实际应用中,除了要根据用途和要求正确选择运放的型号外,还必须注意以下几个方面的问题:

1. 调零

实际运放的失调电压、失调电流都不为零,因此,当输入信号为零时,输出信号不为零。使用时需接上调零电位器进行调零,如图 4-45 所示。

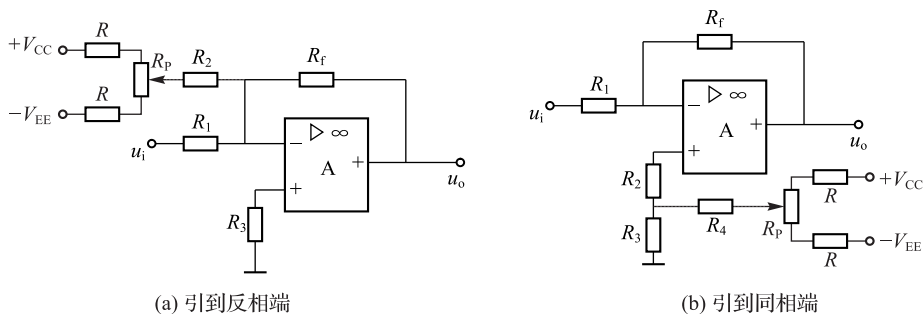


图 4-45 运放的调零电路

2. 消除自激振荡

运放内部是一个多级高增益放大电路,而运算放大电路又引入了深度负反馈,在工作时容易产生自激振荡。大多数集成运放在内部都设置了消除自激振荡的补偿网络,有些运放引出了消振端子,用外接 RC 消除自激现象。实际使用时可按图 4-46,在电源端、反馈支路及输入端连接电容或阻容支路来消除自激。

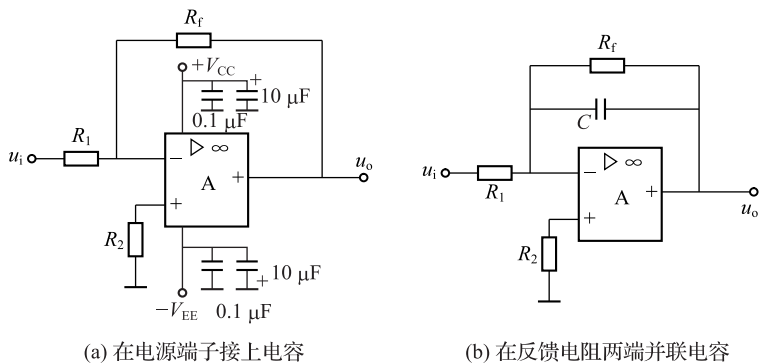


图 4-46 运放的消振电路

3. 保护措施

集成运放在使用时由于输入、输出电压过大,输出短路及电源极性接反等原因会损坏,因此需要采取保护措施。为防止输入差模或共模电压过高而损坏集成运放的输入级,可在集成运放的输入端并接极性相反的二极管,从而使输入电压的幅度限制在二极管的正向导通电压之内,如图 4-47(a)所示。

为了防止输出级被击穿,可采用图 4-47(b)所示的保护电路。输出正常时双向稳压管未被击穿,相当于开路,对电路没有影响。当输出电压大于双向稳压管的稳压值时,稳压管被击穿,减小了反馈电阻,负反馈加深,将输出电压限制在双向稳压管的稳压范围内。

为了防止电源极性接反,在正、负电源回路串接二极管。若电源极性接反,则二极管截止,相当于电源断开,起到保护作用,如图 4-47(c)所示。

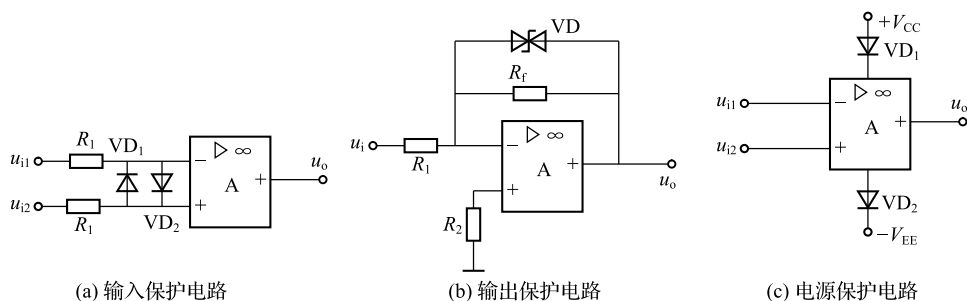


图 4-47 运放的保护电路

【练习题】

4.7.1 集成运放在实际应用中应注意哪些问题?

4.7.2 填空题。

(1)为防止输入差模或共模电压过高而损坏集成运放的输入级,可在集成运放的输入端并接极性相反的_____,从而使输入电压的幅度限制在_____之内。

(2)使用集成运放时,为了防止电源极性接反,在_____。

(3)大多数集成运放在内部都设置了消除自激的补偿网络,有些运放引出了消振端子,用外接_____消除自激现象。

本章小结

(1)集成运放是高增益的直接耦合放大电路,为了有效抑制零点漂移和提高共模抑制比,采用差动放大电路作为输入级;差动电路利用其电路的对称性使零输入时达到零输出,对差模信号具有很强的放大能力,而对共模信号具有很强的抑制作用。

(2)由于差动放大电路有两个输入端、两个输出端,所以信号的输入和输出有四种方式,分别是双端输入双端输出、双端输入单端输出、单端输入双端输出、单端输入单端输出。实际应用中根据不同需要可选择不同的输入、输出方式。

(3)集成运放的参数是评价其性能优劣的主要标志,也是正确选择和使用的依据。

模拟电子技术基础

(4)理想集成运放工作在线性区,具有“虚短”“虚断”特点。

理想集成运放工作在线性区时,当 $u_- > u_+$ 时, $u_o = +u_{om}$; 当 $u_- < u_+$ 时, $u_o = -u_{om}$ 。理想集成运放工作在线性区时,不再具有“虚短”特性,但仍具有“虚断”特性。

(5)集成运放构成的基本运算电路有反比例运算电路和同比例运算电路。

反比例运算电路是指信号由运放的反相端输入, $u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$ 。

同比例运算电路是指信号由运放的同相端输入, $u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_i$ 。

根据输入电压和输出电压的关系,外加不同的反馈网络可以实现加法、减法、积分、微分等电路。

(6)集成运放线性应用可以构成测量放大器、滤波器,非线性应用可以构成电压比较器、波形发生器等。

(7)集成运放在应用时应注意调零、自激、保护等问题。

习 题

4-1 在差动放大电路中,单端输出与双端输出在性能上有何区别?

4-2 如图 4-5 所示基本差动放大电路,已知 $V_{CC} = V_{EE} = 12\text{ V}$, $R_{C1} = R_{C2} = 10\text{ k}\Omega$, $R_E = 20\text{ k}\Omega$, $\beta = 60$,两输出端之间所接负载 $R_L = 20\text{ k}\Omega$,试计算静态工作点,差模电压放大倍数、差模输入及输出电阻。

4-3 已知差动放大电路输入信号, $u_{i1} = 10.02\text{ mV}$, $u_{i2} = 9.98\text{ mV}$,求共模和差模输入电压。若 $A_{ud} = -50$, $A_{uc} = -50$,试求放大电路的输出电压及共模抑制比。

4-4 如图 4-48 所示差动放大电路,已知 $\beta_1 = \beta_2 = 80$,试计算静态工作点,差模电压放大倍数、差模输入及输出电阻。

4-5 如图 4-49 所示差动放大电路,已知 $V_{CC} = V_{EE} = 12\text{ V}$, $R_{C1} = R_{C2} = 20\text{ k}\Omega$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $\beta_1 = \beta_2 = 100$,试计算差模电压放大倍数、差模输入及输出电阻。

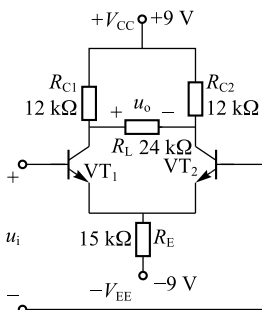


图 4-48 习题 4-4 图

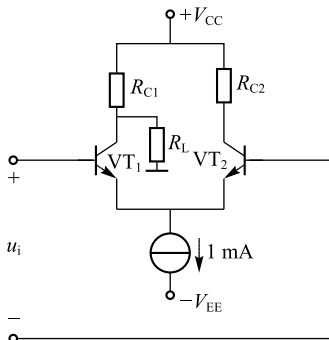


图 4-49 习题 4-5 图

4-6 如图 4-50 所示电路, $u_{i1} = 20\text{ mV}$, $u_{i2} = 10\text{ mV}$, $\beta_1 = \beta_2 = 100$, R_P 的滑动触头位于中点,试计算双端和单端输出时的电压放大倍数。

4-7 如图 4-51 所示电路。

- (1) 当 $R_1=10\text{ k}\Omega$, $R_f=100\text{ k}\Omega$ 时, 分析 u_o 与 u_i 的运算关系。
 (2) 当 $R_f=100\text{ k}\Omega$ 时, 欲使 $u_o=26u_i$, R_1 应为何值?

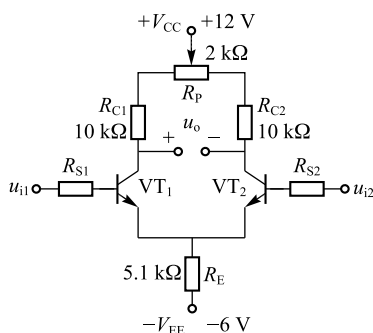


图 4-50 习题 4-6 图

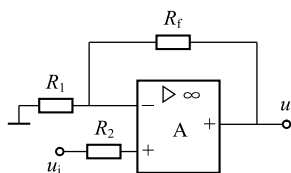


图 4-51 习题 4-7 图

4-8 如图 4-52 所示电路, 计算电路输出电压。

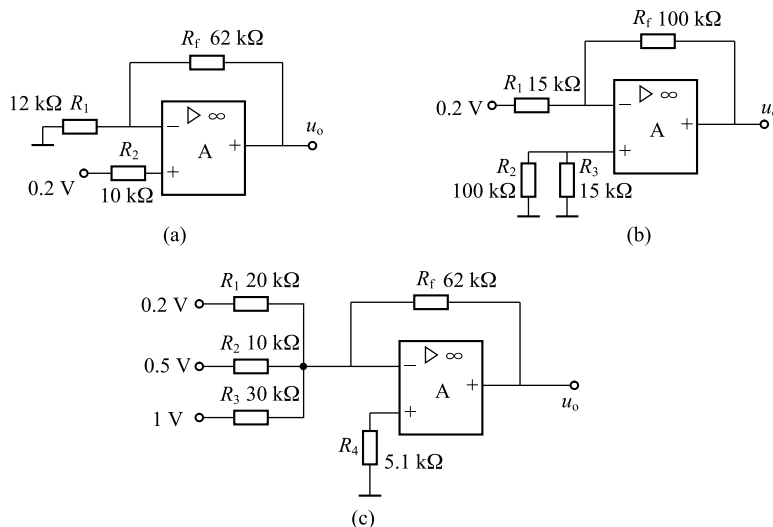


图 4-52 习题 4-8 图

4-9 在图 4-53 中, 已知 $R_1=2\text{ k}\Omega$, $R_f=5\text{ k}\Omega$, $R_2=2\text{ k}\Omega$, $R_3=18\text{ k}\Omega$, $u_i=0.5\text{ V}$, 求 u_o 的值。

4-10 求图 4-54 所示运放电路的输出电压 u_{o1} 。

4-11 证明图 4-55 所示运放的电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{1}{R_1} (R_{f1} + R_{f2} + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f3}})$$

4-12 如图 4-56 所示, 已知 $R_f=5R_1$, $u_i=5\text{ mV}$, 求 u_o 。

4-13 如图 4-57 所示, 分析 u_o 与 u_i 的关系。

4-14 如图 4-58 所示, 分析 u_o 与 u_{i1} 和 u_{i2} 之间的关系。

4-15 如图 4-59 所示电路, 已知 $R_f \parallel R = R_1 \parallel R_2$, 证明 $u_o = \frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2}$ 。

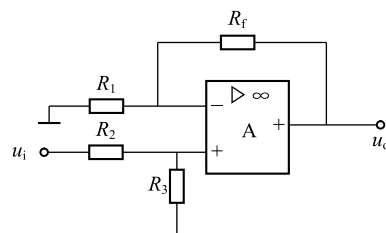


图 4-53 习题 4-9 图

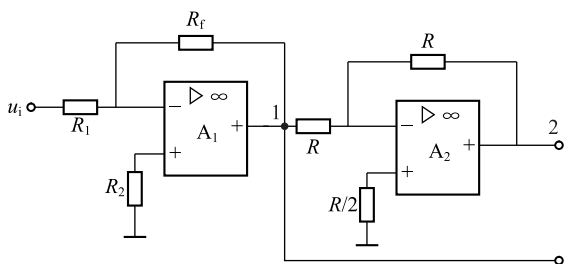


图 4-54 习题 4-10 图

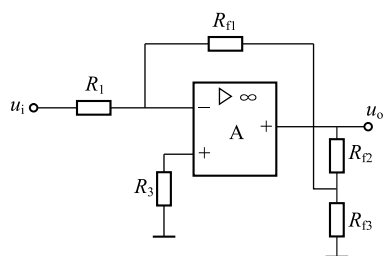


图 4-55 习题 4-11 图

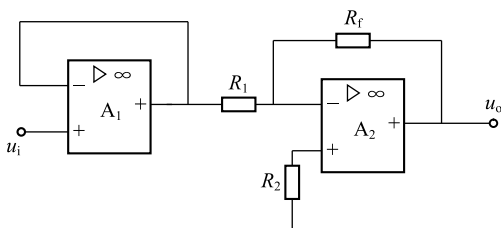


图 4-56 习题 4-12 图

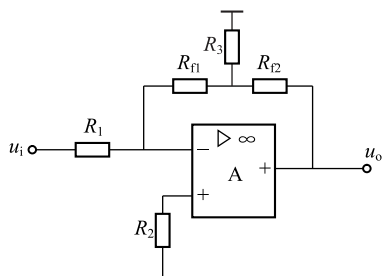


图 4-57 习题 4-13 图

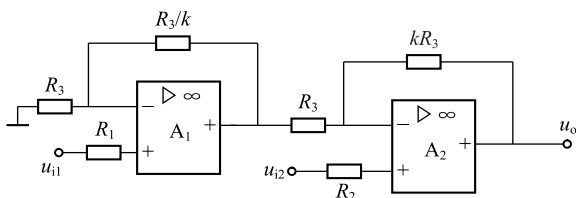


图 4-58 习题 4-14 图

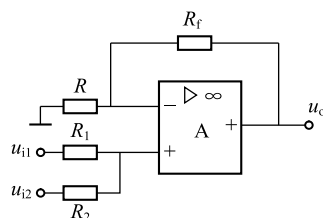


图 4-59 习题 4-15 图

4-16 电路如图 4-60 所示, 写出 u_o 与 u_{i1} 和 u_{i2} 的函数关系。

4-17 如图 4-61 所示电路, 已知 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_f = 4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $u_{i1} = 0.5 \text{ V}$, $u_{i2} = 0.2 \text{ V}$, $u_{i3} = 0.1 \text{ V}$, 计算输出电压 u_o 。

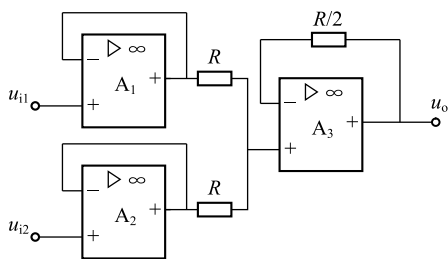


图 4-60 习题 4-16 图

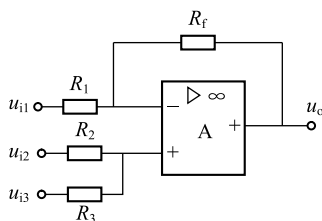


图 4-61 习题 4-17 图

4-18 分析设计实现下列运算的电路。

- (1) $u_o = -5u_i (R_f = 100 \text{ k}\Omega)$ 。
- (2) $u_o = -(2u_{i1} + 0.5u_{i2}) (R_f = 100 \text{ k}\Omega)$ 。
- (3) $u_o = 3u_i (R_f = 20 \text{ k}\Omega)$ 。
- (4) $u_o = -u_{i1} + 4u_{i2} (R_f = 15 \text{ k}\Omega)$ 。

- 4-19 试设计一个运放电路,满足 $u = 5u_{i1} - 2u_{i2} - u_{i3} - 3u_{i4}$,要求采用反相输入方式。
 4-20 如图 4-62 所示电路,分析输出电压与输入电压的关系。
 4-21 两个集成运放组成的抗共模噪声电路如图 4-63 所示,已知 $R_1 = 9 \text{ k}\Omega, R_2 = 1 \text{ k}\Omega, R_3 = 1 \text{ k}\Omega, R_4 = 9 \text{ k}\Omega$,求电压放大倍数。
 4-22 分析图 4-64 的示电路的电压传输关系。

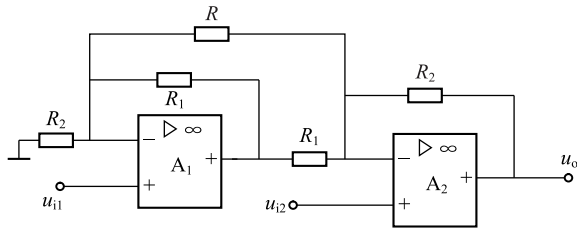


图 4-62 习题 4-20 图

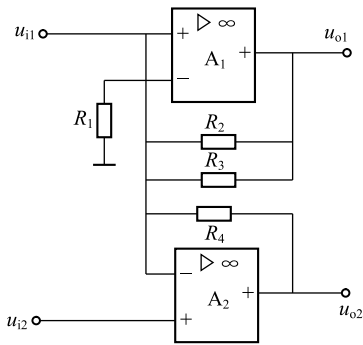


图 4-63 习题 4-21 图

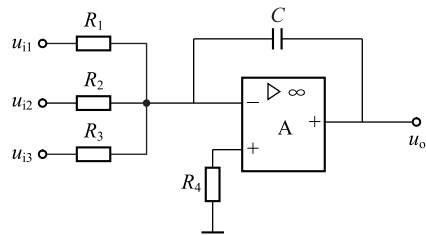


图 4-64 习题 4-22 图

- 4-23 绘出图 4-65(a)所示电路的输出电压波形,已知输入电压波形如图 4-65(b)所示,运放的 $u_{oH} = 6 \text{ V}, u_{oL} = -3 \text{ V}$ 。
 4-24 已知图 4-66(a)所示比较器的两输入端波形如图 4-66(b)所示,运放的 $u_{om} = \pm 10 \text{ V}$,试画出输出波形。

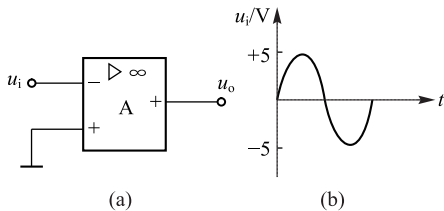


图 4-65 习题 4-23 图

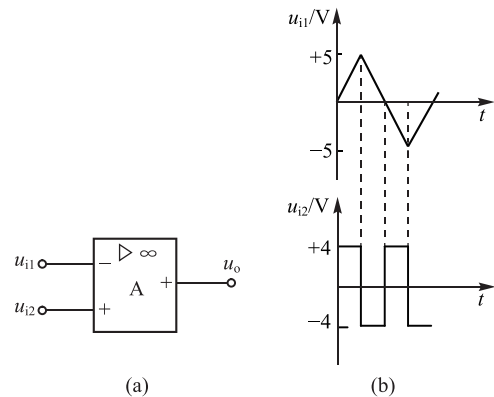


图 4-66 习题 4-24 图