

第5单元 集成运算放大器及其应用电路

实验 5-1 运算放大器主要参数的估测

1. 实验项目

- (1) 测试运算放大器的输入阻抗 R_i 。
- (2) 估测运算放大器的失调电压 U_{IO} 。
- (3) 估测运算放大器的开环电压放大倍数 A_{uo} 。

2. 实验目的

- (1) 了解运算放大器失调电压的概念。
- (2) 了解运算放大器具有极高的开环电压增益的特点。
- (3) 了解运算放大器具有极高的输入阻抗的特点。
- (4) 学会集成电路器件测试方法。

3. 实验原理

3.1 通用型集成运算放大器及引脚功能

前几单元涉及的三极管放大电路、功率放大电路均为分立元件连接组成的电子电路。集成电路是相对于分立元件而言的,把整个电路的各个元件以及相互之间的连接制造在一块半导体芯片上,组成一个不可分的整体,是当前器件的主流。集成运算放大器是集成电路,简称集成运放,是一种包含许多晶体管的多端器件。集成运算放大器是一种集成化的、高增益的(可达几万倍甚至更高)、高输入电阻、低输出电阻的直接耦合放大器。

从本质上来说,集成运算放大器与使用三极管及一些外围元件构成的放大器功能并没有任何区别,都是把输入电压按所需倍数实现放大再输送出去,其输出电压与输入电压的比值称为电压放大倍数或称为电压增益。

按照集成运算放大器的参数来分,可以分成通用型、高阻型、低温漂型、高速型和低功耗型运算放大器。其中通用型运算放大器是以通用为目的设计的,价格低廉,适于一般性使用,如实验室中所用的 LM324(四运放)、LM386(双运放)、 μ A741(单运放)等。还有在一些精密仪器、弱信号检测等自动控制仪表中,须用低温漂型运算放大器(其失调电压小且不随温度变化),如 ICL7650。在快速 A/D 和 D/A 转换器、视频放大器中需使用高速型运算放大器(其转换速率高、单位增益带宽足够大),如 μ A751。

集成运算放大器通常采用双列直插式塑料封装,是一个不可拆分的整体,因此应用集成

运算放大器设计搭建电路时,需要重点了解运放的外部特性、电路模型、各引脚功能、连接方式及放大器的主要参数,至于其内部电路结构一般是无关紧要的。

实验前,要正确识别器件的引脚,以免出错造成人为故障,甚至损坏器件。实验中常用运放模块为 LM324,其集成运放的引脚排列图和电路图符号如图 5-1-1 所示。在 LM324 内部集成了 4 个独立的运放单元,这 4 个运放各自独立工作,互不影响。由于每一个运放单元都集成了若干个型号和参数确定的晶体管、电容和电阻等器件实现放大功能,因此在使用运放时不需要考虑放大器的静态工作点等问题,从而简化了电路结构。

从图 5-1-1(a)中可知,三角形和 A 符号代表“放大器”,运放有两个输入端 u_P 、 u_N 和输出端 u_O 。其中通常将输入端 u_P 命名为同相输入端,在这个输入端接入一个正极性信号时,输出端将测得与其极性相同的信号(即输出也为正极性信号);将输入端 u_N 命名为反相输入端,如果在这个输入端接入一个正极性信号时,输出端将测得与其极性相反的信号(即输出为负极性信号)。电源端 V_+ 和 V_- 连接直流偏置电压,以维持集成运算放大器内部晶体管正常工作, V_+ 接正电压, V_- 接负电压,这里电压的正负是对“地”或公共端而言的。

从图 5-1-1(b)中可知,LM324 为双列直插式封装,有 14 个引脚。集成电路上“D”型凹槽、缺口或圆形小坑是 IC 引脚判别的依据。一般来说,圆形小坑对应着的是 1 号引脚的位置,然后以逆时针顺序确定其他引脚。3 脚为同相输入端,2 脚为反相输入端,这引脚输入端对运放的应用极为重要,绝对不能接错。1 脚为输出端,与外接负载相连。4 脚接正极性电压(+12V 稳压电源),11 脚接负极性电压(-12V 稳压电源)。

切记:在实验中,集成电路烧毁通常是由于过电压、过电流或正负极接反引起的。当集成电路烧毁时有时会发热,严重时会烧出小洞或有残纹之类痕迹,甚至爆炸。通常利用直流稳压电源形成大小相等极性相反的电压,绝对不能接错,否则会烧毁芯片。

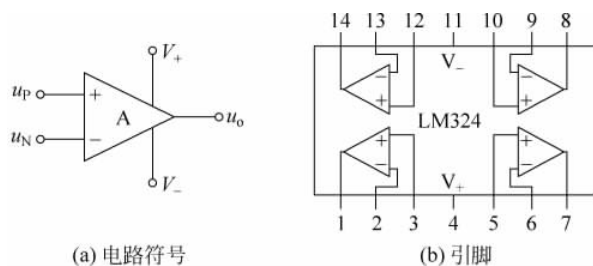


图 5-1-1 LM324 电路符号及引脚图

3.2 测量运算放大器的输入阻抗 R_i

输入阻抗的概念与求解方法在电路理论课中学习过。输入阻抗 R_i 定义为,一个二端网络或单端口电路,如果其内部仅由电阻构成,或如果二端网络由受控源和电阻构成不含任何独立源,则不管其结构如何复杂,最后总可以等效成一个电阻,其大小为端口输入电压有效值 U 与端口输入电流有效值之比。通常在线性电路中可直接用公式法求解输入阻抗,如含受控源电路则需用外加电压源方法,再用公式法求解。

$$R_i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{U_1}{I_1} \quad (5-1-1)$$

集成运放的输入阻抗是指运放工作在线性放大区时,输入电压变化量与输入电流变化量之比,是衡量一个运放质量高低的尺度之一。为了能让运算放大器的使用者在各种场合下方便地使用运算放大器,运算放大器的输入阻抗 R_i 通常都做得非常高。可以利用前面学

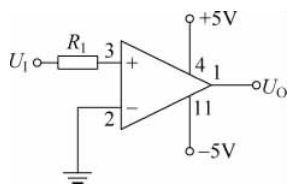


图 5-1-2 集成运算放大器符号

过的测试放大器输入阻抗的方法,来测试运算放大器的输入阻抗 R_i ,其电路原理图如图 5-1-2 所示。

在运算放大器通电的情况下,只要测出 U_1 和 U'_1 的值,便可计算出运算放大器对直流信号的输入阻抗。同样,只要将输入信号改成交流信号,便可测出运算放大器对交流信号的输入阻抗(应该注意的是,输入信号的幅度应小于电源电压的绝对值)。输入阻抗 R_i 的计算公式为

$$R_i = \frac{U'_1}{U_1 - U'_1} R_1 \quad \text{或} \quad r_i = \frac{u'_1}{u_1 - u'_1} R_1 \quad (5-1-2)$$

在选取电阻 R_1 时应注意,原则上讲 R_1 的大小应尽可能与输入阻抗 R_i 在数值上相似相等,以减小测量误差。但由于运放的输入阻抗非常高,若 R_1 的阻值也非常高,无法满足数字表的阻值应远远大于信号源内阻的条件,也会带来较大的测量误差。

3.3 测量失调电压 U_{io}

测量失调电压是衡量集成运算放大器的质量的关键指标。

失调电压定义:在常温(25℃)、标准电压下,如将理想集成运算放大器的两个输入端之间短路(即输入电压为 0V, $U_{id}=0V$)时,其输出应为 0V。但实际集成运算放大器由于集成运算放大器内部差分放大器不完全对称,即由晶体管构成的差分电路 U_{BE} 不同会产生微弱的假信号,经过运算放大器内部高倍数电压放大后,造成当输入电压为零($U_{id}=0V$)时输出电压 $U_o \neq 0V$ 。这种输入为零输出不为零的现象称为集成运放的失调,此时输出电压 U_o 为输出失调电压。

消除失调电压的方法:如果为了使输出电压为零($U_o=0V$),通常需要在输入端加上反相补偿电压(即施加一个 mV 级的小信号),让这个小信号抵消掉差分放大器内部的假信号,使运放输出端的电压等于 0V,该补偿电压称为运算放大器的输入失调电压 U_{io} 。

失调电压 U_{io} 是运算放大器的一个重要性能指标,其值有正有负,其大小反映了运算放大器内部差分输入级中两个三极管 U_{BE} 的失配程度, U_{io} 越小说明运算放大器内部的差分放大器做得越精确。高质量的运放 U_{io} 通常在 1mV 以下。

测试失调电压 U_{io} 的电路如图 5-1-3 所示。

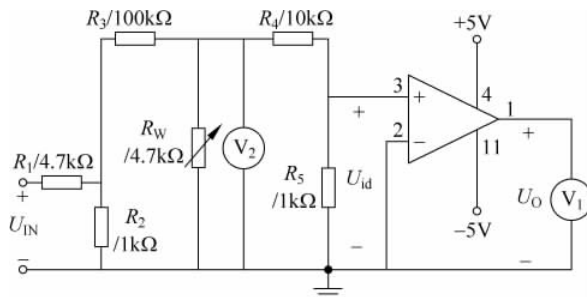


图 5-1-3 测量失调电压电路图

当电路中的实际集成运放 4 脚和 11 脚加上电源后,就已经工作在失调状态。此时如果将运算放大器的同相输入端和反相输入端短接,用万用表测量集成运放输出电压 U_O 的极性,就可以确定输入端所需添加消除失调电压的极性。即如果测量 U_O 电压值为负,则 U_{IN} 应接 +5V 电源,以抵消失调信号;如果 U_O 是正的电压值,则 U_{IN} 应接 -5V 电源,来抵消失调信号。通过调节 R_w 阻值的大小,产生恰当的 U_{id} ,使输出电压为 0V。

数字万用表测量直流电压时的分辨率为毫伏级,为提高其测量的分辨率,能更加精确测量运放输入端的电压值,通常增加电阻 R_4 和 R_5 实现分压,若分压比是 1:9,同时如果数字万用表上测得的电压是 1mV,则说明此时运放输入端的实际电压为 0.1mV(运放的输入阻抗非常大,其 3 脚几乎不取任何电流,因此完全可以把它看成开路状态)。

3.4 测量运算放大器的开环差模电压放大倍数 A_{od}

运算放大器的开环差模电压放大倍数 A_{od} ,是指在没有外部反馈回路将输出信号送回输入端的情况下,运放输出电压 U_O 和两个差分输入端所加信号电压 U_{id} 之比。简单地说,在运算放大器的输出端与输入端之间没有外接电路时,所测的输出电压与差模输入电压之比。开环电压放大倍数越高,所构成的运算电路越稳定,运算精度也越高。

A_{od} 应是信号频率为零时直流放大倍数,但为了测试方便,通常采用低频几十赫兹以下的正弦交流信号进行测量。测量运算放大器的开环差模电压放大倍数 A_{od} ,仍然可以利用图 5-1-3 的电路。调节 R_w 找到 U_O 从正或负的最大值(记为 U'_{Om})刚刚开始变小时,数字电压表 V_2 的测量值(记为 U'_2),继续调节 R_w 找到刚好使 U_O 到达负或正的最大值(记为 U''_{Om})时,数字电压表 V_2 的测量值,(记为 U''_2),则由定义知

$$A_{od} = \left| \frac{U''_{Om} - U'_{Om}}{U''_2 - U'_2} \right| \times 11 \quad (5-1-3)$$

式中的系数 11,是图 5-1-3 电路中 R_4 和 R_5 形成分压后的折算值。通常运算放大器的开环差模电压放大倍数 A_{od} 都在 10^4 以上。需要指出的是,以上的测试都是一种近似的估测方法,目的是帮助我们认识运算放大器的特性。

4. 实验设备与器件

- (1) LM324 运算放大器一只。
- (2) 双路稳压电源一台。
- (3) 数字式万用表、指针式万用表各一块。
- (4) 电阻若干。

5. 实验内容与步骤

5.1 测试运算放大器的输入阻抗 R_i

5.1.1 要点概述

请参见本实验原理 3.2 部分。其核心是采用输入换算法来测量输入电阻大小,在信号源与被测放大电路之间串联一个电阻,分别测出电阻两端对地电压,就可求出输入电阻大小。

注意：集成电路烧毁通常是由于过电压、过电流或正负极性接反引起的。如果供电极性接反，集成器件一瞬间将被这个反向电压击毁，所以在接通集成器件电源前要慎重检查供电极性。LM324 切记 4 号接电源正极，11 脚接电源负极。

5.1.2 实验步骤

(1) 按图 5-1-2 连接实验线路。

(2) 接通运算放大器正负 5V 电源，令 $U_1=2.5\text{V}$ ，测量 U'_1 的值，记录于表 5-1-1 中相应处，计算同相输入端的输入阻抗。

(3) 将同相端和反相端的接线方法对调，即将同相输入端接地，反相输入端接于 R_1 ， R_1 的另一端连接输入信号 U_1 ，令 $U_1=2.5\text{V}$ ，测量 U'_1 的值，记录于表 5-1-1 中相应处，计算反相输入端的输入阻抗。

(4) 将输入信号 U_1 换成频率为 1kHz，有效值为 1V 的正弦信号 u_i ，仍然采用上述方法，用晶体管毫伏表测量运算放大器反相端的交流输入阻抗，记录于表 5-1-1 中相应处。

表 5-1-1 数据记录及分析表

项 目	直流输入阻抗参数			交流输入阻抗参数		
	U_1	U'_1	R_i	u_i	u'_i	r_i
反相输入端	2.5V					
同相输入端	2.5V					
测试数据分析	观察表 5-1-1 第一行数据，从数据上看出测量的输入阻抗在直流信号与交流信号分别加在反相端时有何不同					
	观察表 5-1-1 中 R_i 列数据，直流信号加在同相端与反相端时输入阻抗相同吗					

5.2 测量运算放大器的失调电压 U_{10}

5.2.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.3 部分。其核心是利用同相输入端和反相输入端短接时，用数字式万用表测量运算放大器的失调电压 U_{10} ，并将所测得的输出端电压反馈到同相输入端从而使输出端电压为 0V。

5.2.2 实验步骤

(1) 按图 5-1-3 连接线路(V_2 为数字电压表， V_1 为置于直流模式的示波器)。

(2) 将运放的同相输入端和反相输入端短接，检测运放的输出电压 U_{Om} ，记录于表 5-1-2 中。

表 5-1-2 数据记录及分析表

U_{Om}	V_2	U_{Io}
测试数据分析	从表 5-1-2 中所测输入电压 U_{Om} 数据,判定其极性,并总结用万用表判定极性的方法	
	从表中所测 U_{Om} 和 V_2 数据大小,分析两值之间的关系	
	根据所测得的失调电压 U_{Io} ,判断其是否合理,并分析其在什么范围内取值能确定该集成运算放大器性能好	

(3) 根据输出电压 U_{Om} 的极性,确定 U_{IN} 是连接 +5V 电源还是一 5V 电源。

(4) 断开运放输入端的短路线,调节 R_W 并通过示波器的直流模式观察运放输出 U_O 变化情况,当 $U_O=0V$ 时,在表 5-1-2 中记录数字万用表显示的 V_2 的值。

(5) 若不能稳定地观察到 $U_O=0V$ 的情况,可适当调整 R_5 的阻值,改变分压比,直至观测到比较稳定的输出电压 $U_O=0V$ 的情况。

(6) 根据 R_4 和 R_5 的分压比,计算失调电压 U_{Io} :

$$U_{Io} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} V_2 \quad (5-1-4)$$

5.3 测试运算放大器的开环电压放大倍数 A_{uo}

5.3.1 要点概述

请参见本实验原理 3.4 部分。其核心是利用数字万用表测量出输出电压与输入电压,按定义式简单计算可求出电路的放大倍数。

注意: 集成运放工作在线性区,输出信号幅度应较小,且无明显失真。在描述放大倍数时应说明是什么频率点的放大倍数,属于无负反馈的开环放大倍数、有负反馈的闭环放大倍数、不带负载开环放大倍数和带负载放大倍数哪一种。

5.3.2 实验步骤

(1) 继续使用图 5-1-3 的电路。

(2) 调节 R_W 和 U_{IN} (如果需要,可调换输入电压 U_{IN} 的极性),使运放输出端的电压值刚刚偏离正或负的最大值 ($+U_{Om}$ 或 $-U_{Om}$),定义此时运放的输出电压值和数字表上的电压分别为 U_{Om1} 和 U_{21} ,将其记录于表 5-1-3 中。

表 5-1-3 数据记录及分析表

测量数据					计算数据
U_{Om1}	U_{21}	U_{Om2}	U_{22}	U_o	A_{od}
测试数据分析	根据表 5-1-3 中各数据计算的运算放大器开环电压放大倍数,并判断其值是否合理				
	在测试图 5-1-3 所示运算放大器电路的开环电压放大倍数 A_{od} 的过程中,若调节 R_w 时,观察 V_2 值,看其是否在可读出的最小测量单位仅变化 1 个单位,记录输出电压变化				
	如果在表 5-1-3 中 U_o 由正的输出最大值跳变到负的输出电压最大值。请问在这种情况下能测出开环电压放大倍数吗? 能估算出开环电压放大倍数的最小值吗? 若想得到运算放大器的开环电压放大倍数 A_{od} 的值,应改变电路的什么参数				

(3) 继续调节 R_w 和 U_{IN} ,使运放输出电压刚好达到与 U_{Om1} 极性相反的最大值($-U_{Om}$ 或 $+U_{Om}$),定义此时运放的输出电压值和数字表上的电压分别为 U_{Om2} 和 U_{22} ,将其记录于表 5-1-3 中。

(4) 按下式计算运放的开环电压差模增益(即开环放大倍数) A_{od} 。

$$A_{od} = \left| \frac{U_{Om1} - U_{Om2}}{U_{21} - U_{22}} \right| \times \frac{R_4 + R_5}{R_5} \tag{5-1-5}$$

6. 预习思考题

- (1) 在如图 5-1-3 所示测试运算放大器失调电压 U_{IO} 的电路中,若运算放大器的输入端短路后,输出电压 $U_o \approx +5V$,请问 V_{IN} 应连接 $+5V$ 电源,还是 $-5V$ 电源?
- (2) 若电压表 V_2 的最小分辨率是 $0.1mV$,根据图 5-1-3 中 R_4 和 R_5 的阻值,请分析测量运算放大器输入端的电压分辨率能达到多少?

实验 5-2 反相运算电路

1. 实验项目

- (1) 组装反相比值运算电路和反相加法运算电路。
- (2) 测试这两种电路的参数。

2. 实验目的

- (1) 掌握反相比值运算、反相加法运算电路的原理。
- (2) 能正确分析运算精度与运算电路中各元件参数之间的关系。

3. 实验原理

3.1 集成运算放大器电压传输特性

电压传输特性曲线是用来表示集成运算放大器输入电压与输出电压之间关系的曲线,从图 5-2-1 中可看出,运算放大器的特性曲线可分为线性区和饱和区两部分。

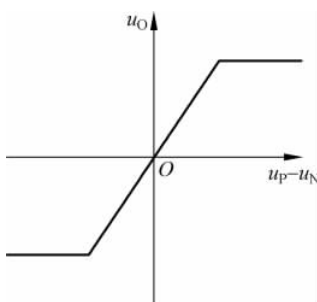


图 5-2-1 电压传输特性

(1) 当集成运放工作在线性区时,输出电压与输入差值电压($u_P - u_N$)呈线性关系,是一段通过原点的直线,其斜率等于开环放大倍数 A_{od} ,即 $u_o = A_{od}(u_P - u_N)$ 。

集成运算放大器是一个线性放大元件,由于 A_{od} 值很大,即使在输入端加一个很小的信号也会使输出电压饱和(即达到正负电源电压值),因此为了电路稳定运行和实现线性放大,通常运算放大器工作在线性区时需外接反馈电路构成闭环运行,如同相比值、反相比值放大电路等。

在工程应用运算放大器时,如输入电压频率较低且在误差允许的范围内,通常将实际运算放大器看成是一个理想集成运算放大器,即实际集成运算放大器理想化条件:

开环电压放大倍数无穷大 $A_{od} \rightarrow \infty$;

差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$;

开环输出电阻 $R_o \rightarrow 0$;

共模抑制比 $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。

在理想化条件下, $A_{od} \rightarrow \infty$,集成运放工作在线性区时与纵轴重合,输出电压 $u_O =$

$A_{od}(u_P - u_N)$ 是一个有限值, 则差分输入电压被强制为零, $(u_P - u_N) = \frac{u_o}{A_{od}} \approx 0$, 即同相端电压与反相端电压相等 $u_P = u_N$, 称为“虚短”。如同相端接地, 即输入为 0 时, 则有同相端电压与反相端电压相等且等于 0, 即 $u_P = u_N = 0$, 称为“虚地”。

在理想化条件下, 差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$, 则可认为运放两个输入端的电流均为零, 相当于断路, 即 $i_P = i_N = 0$, 称为“虚断”。说明运放对前一级吸取电流极小。

(2) 当集成运放工作在饱和区时, 从图 5-2-1 中可看出, $u_o = A_{od}(u_P - u_N)$ 不再适用。当 $u_P > u_N$ 时, 输出电压不再变化呈一条平行于横轴的一条直线, 达到正的饱和值(正电源电压) $u_o = +U_{Om}$, 而当 $u_P < u_N$ 时, 输出电压不再变化呈一条平行于横轴的一条直线, 达到负的饱和值(负电源电压) $u_o = -U_{Om}$ 。说明输入信号达在一定范围内可以放大, 超过一定值会饱和, 正负饱和值不一定相等。

通常集成运算放大器构成比较器时工作在饱和区。如判断集成运算放大器的好坏可利用其工作在饱和区、输出在正负饱和值之间切换的特点, 将反相输入端接地($u_N = 0$), 同相输入端接 +5V, 则出现 $u_P > u_N$ 情况, 此时用万用表测量输出端电压如为正的饱和值, 说明集成运算放大器正常工作。

3.2 运算放大器输出电压最大动态范围 U_{OPP}

运算放大器的输出电压是限制在一个正负电压范围内的, 这个范围是由给运放供电的正负电源电压($\pm V_{CC}$)的大小来确定的, 通常用 $+U_{Om}$ 和 $-U_{Om}$ 来表示运算放大器输出电压正的和负的最大值, $\pm U_{Om}$ 的绝对值通常都要会比给运放供电的 $\pm V_{CC}$ 的绝对值要小一些。在设计使用某个运算放大器时, 必须要搞清楚该运放的实际 $\pm U_{Om}$ 值是多大, 避免因输出信号的幅度不能超过 $\pm U_{Om}$ 而产生严重的误差。

3.3 反相比例运算电路

理想集成运放通常工作在线性区, 具有“虚短”和“虚断”的特性, 当其外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时, 可以灵活地实现各种特定的函数关系, 包括各种比例运算电路, 如反相比例、同相比例、加法、减法、微积分等。在分析含有理想集成运算放大器的电路时, 利用“虚短”和“虚断”特性以及电路中所学的基尔霍夫电流和电压定律、结点电压法、网孔电流法等定理简化分析电路。

反相比例运算电路如图 5-2-2(a) 所示, 对于理想运算放大器, 该电路的输出电压与输入电压之间的关系为

$$u_o = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right)u_i \quad (5-2-1)$$

当理想集成运算放大器开环电压足够大时, 输出电压与输入电压的关系只与常量 R_f 与 R_1 有关, 而与运算放大器本身的参数无关, 保证成比例放大的稳定性和精确度。负号代表输出电压与输入电压反相。当 $R_f = R_1$ 时, 比例系数为 -1, 称为反相器。

$$u_o = -u_i \quad (5-2-2)$$

实际应用理想集成运算放大器构成电路时, 为了减小误差、提高精度, 清除静态基极电流对输出电压的影响, 通常在同相输入端接入电阻 $R_2 = R_1 // R_f$, 以保证实际理想集成运放反相与同相输入端对地的等效电阻相等, 从而使其处于对称与平衡工作状态。

反相放大器的输入阻抗和运算放大器的输入阻抗, 是两个完全不同的概念, 以图 5-2-2(a) 的

电路为例,运算放大器的输入阻抗,是指从运算放大器的2脚向右看进去的电阻;而反相放大器的输入阻抗,如图5-2-2(b)所示是指从反相放大器的输入端A点 u_1 向右看进去的电阻,因此说它们之间是有很大的差别的。

另外还需要注意的是,在测量放大器的各项参数时,必须保证放大器是处于线性工作状态下进行的,否则都将会引起严重的测量误差。

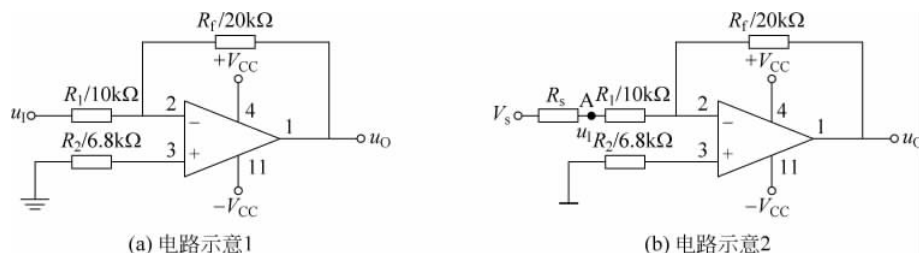


图 5-2-2 反比例运算电路图

3.4 反相加法运算电路

反相加法运算电路如图5-2-3所示。其输出电压与输入电压之间的关系为

$$u_O = - \left(\frac{R_f}{R_1} u_{11} + \frac{R_f}{R_2} u_{12} \right) \quad (5-2-3)$$

当 $R_1 = R_2$ 时有

$$u_O = - \frac{R_f}{R_1} (u_{11} + u_{12}) \quad (5-2-4)$$

当 $R_1 = R_2 = R_f$ 时有

$$u_O = - (u_{11} + u_{12}) \quad (5-2-5)$$

即输出电压是两个输入电压之和的反相值。

3.5 直流信号源

图5-2-4是采用电位器提供直流信号的方式。电位器的内部是一个表面裸露的电阻体,C点是可滑动接触于电阻体的引出线。随着滑动点C接触电阻位置的不同,便可得到不同的电阻 R_{AC} 和 R_{CB} ,从而C点得到不同的分压值,实现了输出信号电压可变的目的。

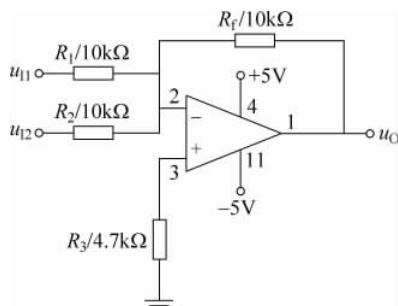


图 5-2-3 反相加法运算电路图

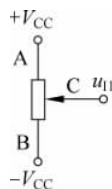


图 5-2-4 可调直流信号源

$\pm V_{CC}$ 是用直流稳压电源产生。直流稳压电源有三组输出,两组可变化的 $0 \sim 30V$,一组固定 $5V$ 。为同时产生正负极性的电源,有两种方法,其中一种是将两组变化的正“+”和

负“-”直接相接,再接到面包板上作为电路的公共地端,剩下的一组负“-”作为电源负极($-V_{CC}$),另一组电源的“+”作为电源的正极($+V_{CC}$)。

3.6 常见故障及解决办法

(1) 故障现象:当运放输入直流电压小于 1V 时,输出电压接近正饱和值或负饱和值,即接近所加直流稳压电源上的电压值。

分析:用万用表检查同相输入端 3 引脚和反相输入端 2 引脚之间的电压,求其差值,如果差值为几毫伏(正常应为“虚短”,差值应差 1mV 左右),说明此时运算放大器没有工作在线性区,没有反馈通路。

解决:检查图 5-2-2 中运算放大器反相端引脚 2 和同相端引脚 3 是否断开或接触不良;用万用表测量引脚 3 对地电位,如接近电源电压,说明运放可能损坏。

(2) 故障现象:在反相比例运算电路中,输入电压增加,输出电压始终为零。

分析:输入电压没有加入到电路中。

解决:检查图 5-2-2 中电阻 R_1 两端连接导线是否断开或接触不良,或电位器连接是否正确。

电位器有三根线,其中有一根线连接在电位器最底部的触点上,那个是电中间触点(即图 5-2-4 中的 C 点)。另两根线可互换使用,万用表打到电阻挡,调旋钮,万用表示数随旋钮变化验证接线正确。

(3) 故障现象:输出不满足所要求。

分析:逐级检查电路,先查芯片是否故障,再查直流电源、输入信号接入是否正确,数值大小是否正确,面包板插线是否正确,示波器使用是否正确以及各引脚连线是否有误。

解决:先查直流稳压电源,可能是直流电源未接上或电源电压数值不对,三组电源两组可调,一组为固定 5V。电源应接正负 5V,有些同学正负电源未实现。如电源连接没有问题,再检查产生直流信号输入的电位器输出是否正确,或交流信号输入时信号发生器的示数与输出设备是否相符。检查示波器使用。检查运放引脚各连线是否正确牢固。

(4) 故障现象:运放冒烟或有烧焦味。

分析:运放正负电源接反,输出端对地短路或与电源短接,直流稳压电源产生直流电压过大。

解决:LM324 中包含 4 个运放,使用其他运放或更换芯片。

4. 实验设备与器件

- (1) LM324 运算放大器一只。
- (2) 稳压电源一台。
- (3) 数字式万用表、指针式万用表各一块。
- (4) 电阻若干。

5. 实验内容与步骤

5.1 运算放大器好坏的初步判定及士 U_{om} 值的测量

5.1.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.1。其核心是利用集成运算放大器电压传输特性中运算放大

器工作在饱和区特性。通过在运放的两个输入端之间施加一个较大的电压差,使运放的输出端有一个明确的可预期的 $+U_{om}$ 或 $-U_{om}$ 的输出电压值,通过观察电压值的方法来达到初步判断运算放大器好坏的目的。

5.1.2 实验步骤

(1) 连接运算放大器的 $\pm V_{cc}$ (取 $\pm 5V$),反相输入端2脚接地,同相输入端3脚接 $+5V$,这时运放输出端的电压应达到正的最大值 $+U_{om}$,用数字万用表测量输出端的电压值,记录于表5-2-1中相应处。

(2) 将同相输入端3脚由接 $+5V$ 改为接 $-5V$,保持电路其他状态不变,这时运放输出端的电压应达到负的最大值 $-U_{om}$,用数字万用表测量输出端的电压值,记录于表5-2-1中相应处。

(3) 将运放的 $\pm V_{cc}$ 调整为 $\pm 10V$,重复(1)、(2)的实验内容,将数据记录于表5-2-1中相应处。

(4) 如果在上述的操作中,运放的输出电压值的确发生了较大的正负之间的跳变,则可以初步判断该运放是好的。

表 5-2-1 数据记录及分析表

V_{cc}	$+U_{om}$	$-U_{om}$
$\pm 5V$		
$\pm 10V$		
测试数据分析	根据表中数据分析,当不同 V_{cc} 值时,所测得的最大正负饱和值的大小一样吗?其大小与直流电源大小有关吗 表中输入正负值时如果在输出端测量出 $\pm U_{om}$ 和 V_{cc} 值相差很大说明什么问题	

5.2 反相运算放大器电压增益的实验

5.2.1 要点概述

实验原理请参见本实验3.3。其核心是通过在运放的反相输入端上施加一个用直流稳压电源产生的电压,测量运放的输出端电压值,来达到计算电压放大倍数的目的,验证理想集成运放其输出电压与输入电压之间关系满足 $u_o = (-R_f/R_1)u_i$ 。其中输出电压正负最大值均为正负电源电压值。

5.2.2 实验步骤

(1) 按图5-2-2(a)连接实验线路。将 V_{cc} 调整到 $\pm 10V$,反相运放输入信号为直流信号,采用原理3.3实现直流信号不同幅度的直流信号输出,按表5-2-2所示输入电压 u_i 值,完成表5-2-2的测试内容。

表 5-2-2 数据记录及分析表

U_i/V	-5.5	-3	-1	-0.2	0.3	2	3.5	6
U_o/V								
测试数据分析	根据表中数据,对比输入、输出电压,请分析输入输出数据的相位特点? 说明原因。							
	从测量的数据可以看出,在什么范围内输出会随输入变化而变化? 为什么?							
	请分析第一列数据是否合理并说明原因?							
	表格最后一列数据产生原因? 说明为什么运算放大器的输入电压不能无条件地按放大倍数被放大?							
	写出该比例运算电路的放大倍数公式							

(2) 在测试表 5-2-2 最后两列数据时,同时测量运放 2 脚的电压 U_2 和 3 脚的电压 U_3 ,记录于表 5-2-3 中。

表 5-2-3 数据记录及分析表

U_i/V	U_2	U_3
3.5		
6		
测试数据分析	测量运放 2 引脚电压与运放输出电压数据是否有矛盾? 为什么?	
	运放 2 引脚和 3 引脚数据说明什么问题?	
	如果要把该电路的比例放大倍数增大到 10 倍,电路应该做如何的调整	

(3) 输入 $f=100\text{Hz}$, $u_i=0.5\text{V}$ 的正弦交流信号,用示波器测量相应的输出电压大小,观察输入、输出电压的相位关系,记入表 5-2-4 中。

注意: 测量交流信号时,注意测量接线需要共地。

表 5-2-4 数据记录及分析表

u_i/V	u_o/V	A_u
测试数据分析	从表中数据可以观察出输入信号与输出信号之间的相位关系如何? 从所画图形可看出,输入信号是否可以无限增加,输出信号仍随一定比例变化	

5.3 反相放大器输入阻抗的实验

5.3.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.3。其核心是利用输入折算法求输入电阻,在整个反相比例运算电路的端口串联一个电阻,分别测量电阻两端电压,再用串联分压公式求解。

5.3.2 实验步骤

在图 5-2-2(a)所示电路的输入端上,串接一个 $2k\Omega$ 的电阻 R_s ,构成图 5-2-2(b)所示电路。保持 $V_{CC}=\pm 10V$ 不变,调整 V_s 使其等于 2V、4V、8V,完成表 5-2-5 中 u_i 项的测试内容。

表 5-2-5 数据记录及分析表

项目	u_i	R_i
$V_s=2V$		
$V_s=4V$		
$V_s=8V$		
测试数据分析	实验 5-1 中测量输入阻抗实验与此实验有何区别 观察不同 V_s 下表中所测得的输入阻抗有何变化? 与 u_i 有何关系 计算当 V_s 等于 8V 时,输入阻抗有何变化? 此时运放还工作在线性区吗	

5.4 测量运算放大器输出电压最大动态范围的设计实验

在实验 5.3 反相放大器图 5-2-2 基础上,自拟实验步骤和方法设计实验。

5.5 反相加法器电路实验

5.5.1 要点概述

请参见本实验原理 3.4 部分。其核心是在集成运放的反相输入端同时接入两个输入信

号时,在理想条件下,其输出电压满足反相相加比例求和的关系。

5.5.2 实验步骤

(1) 连接图 5-2-3 所示电路。

(2) 用图 5-2-4 所示产生可调直流信号的电路作为直流信号源,给反相加法器电路提供 u_{11} 和 u_{12} 信号,观察反相加法器的输入输出信号关系,完成表 5-2-6 的测试内容(表 5-2-6 中第 2 行给出的 u_{12} 数据,为图 5-2-4 电阻分压电路未接负载时的空载电压,当接入反相加法器电路后,实际提供的 u_{12} 数据会发生变化,实验中应以实际测量值为准,并将实测值记录于右侧的括号内)。

表 5-2-6 数据记录及分析表

U_{12}/V	2.0	-0.6	1	0.6	-0.4
U_{12}/V	-1()	-1()	1()	1()	1()
实测 U_o/V					
理论值 U_o/V					
测试数据分析	观察并找出表中不同输入所获得的输出的规律				
	利用表中数据计算出该比例运算电路的放大倍数				
	运算放大器电压为正负 15V 的条件下,反相加法的输入电压是否有限制? 为什么				
	开环再测输出信号大小与原闭环测得的数据比较,分析反相加法器的放大倍数会低于运放的开环放大倍数的原因				
	表中实测数据与理论值之间的关系				

(3) 设计反相加法电路,使其输出满足 $u_o = 12u_{11} + 2u_{12} - 4u_{13}$,分别加入 0.5V、1V 和 1.5V 电压,测出输出电压值。

6. 预习思考题

- (1) 请默画出反相运算放大电路的电路图。
- (2) 如何使用万用表来测出电位器的固定电阻端和滑动端?
- (3) 实验 5.2.2 中为什么需要将电压调至 $\pm 10V$?
- (4) 图 5-2-2 电路中的地线(接地点)和 $\pm 5V$ 电源间是怎样的关系,请画出电路示意图。
- (5) 试分析电路在什么情况会出现当理想运放输入直流电压小于 1V 时,输出电压接近

正的饱和值,即接近所加电源的电压的情况。

(6) 请分析,在图 5-2-2 所示的反相运算电路处于正常工作状态时,运放 2 脚的电压应该是多少伏?(参考运放的开环电压放大倍数 A_{od} 可看成无穷大的特点)

(7) 为什么图 5-2-2 中 $R_1=R_2$ 时电路会保持平衡?

(8) 实验中若将图 5-2-4 中电位器的 C 点误接到 $\pm 5V$ 的某一端,请分析为什么会出现调整电位器时会将其烧毁的恶果?

(9) 在图 5-2-4 的电路中,不改变电阻大小,若要使 $u_{12}=1V$,该如何连接线路?

(10) 运算放大器作精密实验测量时,同相输入端与反相输入端的对地直流电阻如果不相等,可以吗?为什么?

(11) 在分析比例运算电路时,所依据的基本概念是什么?基尔霍夫电流定律是否适用?

(12) 若输入信号与放大器的反相端连接,当信号增大反相电压时,运算放大器的输出是正还是负?

(13) 集成运放用于放大交流信号时,如果采用单电源供电,应如何连接电路?

实验 5-3 同相运算电路

1. 实验项目

- (1) 组装同相比比例运算电路、电压跟随器和减法运算电路。
- (2) 测试这三种电路的参数。

2. 实验目的

- (1) 掌握同相比比例运算、电压跟随器和减法运算电路的原理及搭建方法。
- (2) 学会运算电路中相关参数的测量方法。

3. 实验原理

3.1 同相比比例运算电路

输入信号加在同相端,反馈电阻 R_f 加在反相端和输出端之间。电路如图 5-3-1 所示。该电路的输出电压与输入电压之间的关系为

$$u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_I \quad (5-3-1)$$

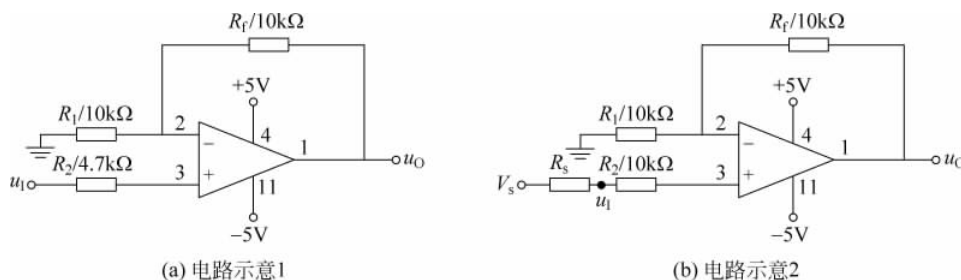


图 5-3-1 同相比比例运算电路

3.2 电压跟随器

当 $R_1 \rightarrow \infty$ 或 $R_f \rightarrow \infty$ 时,得 $u_O = u_I$,即得到如图 5-3-2 所示的电压跟随器。

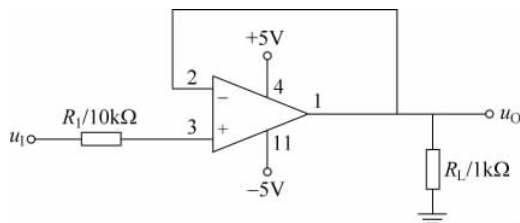


图 5-3-2 电压跟随器

电压跟随器的作用是实现阻抗匹配。对于一个提供电压信号的信号源,人们希望它的输出阻抗越低越好;而对于一个接收电压信号的放大器来说,人们则希望它输入端的输入

阻抗越大越好。在对这种配合关系有较高要求、而信号源的输出阻抗或放大器的输入阻抗又无法满足时,一个很好的解决办法是在信号源的输出端和放大器的输入端之间插入一个电压跟随器,利用电压跟随器输入阻抗极高、输出阻抗极低的特性,起到阻抗变换的作用,在信号源和放大器之间做缓冲级用。多级放大电路分为输入级、中间级和输出级,中间级通常采用放大倍数较高共射极或集成运放实现。电压跟随器可接入放大电路的输入级中,其对于前一级电源而言相当于负载,由于电压跟随器输入电阻高,因此可以从前一级信号源获得较高的电压,较大的能量;电压跟随器也可接入到多级放大电路的输出级,由于其对后一级电路而言相当于电源,其输出电阻低,对负载而言相当于拥有较小的内阻的电源,内阻越小消耗越小,带负载能力越强。电压跟随器这种输入阻抗极高、输出阻抗极低的优越特性,在电子线路中得到了广泛的应用。

3.3 差动放大电路(减法器)

电路如图 5-3-3 所示。当 $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_f$ 时,输出电压与输入电压之间的关系为:

$$u_O = \frac{R_f}{R_1}(u_{I2} - u_{I1}) \quad (5-3-2)$$

可见输出信号的大小,与两个输入信号差值的大小成正比。

3.4 常见故障及解决办法

(1) 故障现象:在同相运算电路中,输入电压与输出电压相等,未实现成比例放大。

分析:电阻 R_1 没有起作用,同相比比例运算电路成为特殊的电压跟随器。

解决:检查图 5-3-1 中电阻 R_1 两端连接导线是否断开或接触不良。

(2) 故障现象:同相运算电路连接正常没有错误,有输出电压,但未达到所要求放大。

分析:电路连接正确,说明同相比比例系数未达要求。

解决:检查图 5-3-1 中电阻 R_1 、 R_f 值与实际搭建电路中电阻阻值是否一致。

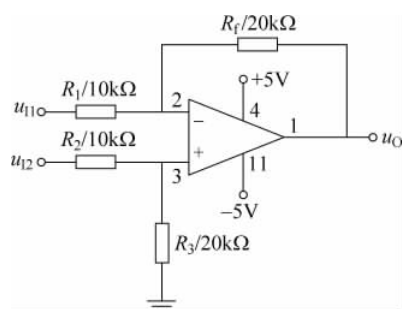


图 5-3-3 减法运算电路

4. 实验设备与器件

- (1) LM324 运算放大器一只。
- (2) 双路稳压电源一台。
- (3) 数字式万用表、指针式万用表各一块。
- (4) 电阻若干。

5. 实验内容与步骤

5.1 同相放大电路电压增益的测量

5.1.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.1。其核心是通过在运放的同相输入端上施加一个用直流稳压电源产生的电压,测量运放的输出端电压值来达到计算电压放大倍数的目的。其中输出

电压正负最大值均为正负电源电压值。

5.1.2 实验步骤

(1) 连接图 5-3-1(a)的实验电路,用 $4.7\text{k}\Omega$ 电位器产生实验中输入端需要的一系列电压信号 U_i 的值。

(2) 完成表 5-3-1 同相运算放大器电压放大倍数的实验数据。

表 5-3-1 数据记录及分析表

U_i/V	-0.6	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.5
实测 U_o/V						
理论计算值 U_o/V						
测试数据分析	用表中数据计算出该比例运算电路的放大倍数					
	根据表中数据实测值与输入值比较,分析输入输出是否为同相位? 说明原因					
	如果输入 3V 电压,那么输出电压会是多少? 说明原因					
	同相运算电路与反相运算电路在电路结构上何区别					
	将表中测得的实测数据和理论计算值相比较,说明什么问题					

(3) 按照表 5-3-2 所示完成测量,验证理想集成运放工作在线性区满足虚短、虚断。

表 5-3-2 数据记录及分析表

项 目	测试条件	理论估算值	实测值
Δu_o	R_L 开路,直流输入信号 U_i 由 0 变成 800mV		
$\Delta u_{2,3}$			
Δu_{R2}			
Δu_{R1}			
Δu_{OL}	$R_L=5\text{k}\Omega$ $U_i=800\text{mV}$		
测试数据分析	用表 5-3-2 中数据证明集成运放工作在线性区		

5.2 关于同相放大器输入阻抗的实验

5.2.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.1 部分。其核心是利用输入折算法求输入电阻,在整个同相比例运算电路的端口串联一个电阻,分别测量电阻两端电压为 V_s 和 U_1 ,再用串联分压公式求解。

5.2.2 实验步骤

在图 5-3-1(a)的输入端,串联一个阻值为 $20\text{k}\Omega$ 的电阻 R_s ,构成图 5-3-1(b)所示的电路。保持 $V_{CC}=\pm 5\text{V}$ 不变,令 V_s 等于 1V ,测量 U_1 电压并记录于表 5-3-3 之中。

表 5-3-3 数据记录及分析表

V_s	U_1	R_i
1V		
测试数据分析	用表中数据计算出输入阻抗	
	计算输入阻抗,并说明与实验 5-2 中的反相放大器的输入阻抗有何区别,说明原因	

5.3 关于电压跟随器的实验

5.3.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.2 部分。其核心是电压跟随器给定输入测输出,得到输入与输出大小极性均相同的特性。

5.3.2 实验步骤

连接如图 5-3-2 所示电路,并在输出端对地之间接一个阻值为 $1\text{k}\Omega$ 的电阻,完成表 5-3-4 的测试内容。

表 5-3-4 数据记录及分析表

U_i/V	-3.0	-1.5	-0.2	0.1	1.5	3.0
U_o/V						
测试数据分析	根据表中数据,分析输入输出数据特点,从而说明电压跟随器的特点					
	利用表中数据计算电压放大倍数					
	为什么输入信号经过了一个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻后,连接在 $1\text{k}\Omega$ 的负载上测量出的信号大小一点也没有被 $10\text{k}\Omega$ 的电阻衰减? 说明原因					

5.4 关于差动放大器的实验

5.4.1 要点概述

差动放大器通过给定输入测输出,计算电压放大倍数,实验原理请参见本实验 3.3 部分。其核心是通过在运放的同相输入端上施加一个用直流稳压电源产生的电压,测量运放的输出端电压值,来达到计算电压放大倍数的目的。其中输出电压正负最大值均为正负电源电压值。

5.4.2 实验步骤

(1) 连接图 5-3-3 所示电路, V_{CC} 取 $\pm 9V$ 。

(2) 完成表 5-3-5 要求的测试内容(表 5-3-5 中第 2 行给出的 U_{I2} 数据为图 5-2-4 电阻分压电路未接负载时的空载电压,当接入差动放大器电路后,实际提供的 U_{I2} 数据会发生变化,实验中应以实际测量值为准,并将实测值记录于下方的括号内)。

表 5-3-5 数据记录及分析表

U_{I1}/V	标称值	2.0	-0.5	1.0	0.5	-1.5
	实测值					
U_{I2}/V	标称值	-1.0	-1.0	1.0	1.0	1.0
	实测值					
实测 u_o/V						
理论值 u_o/V						
测试数据分析		根据实验数据,说明差分放大器输入信号与输出信号的关系				
		利用表中数据,计算电压放大倍数				
		分析表中理论值与实测值之间存在误差吗? 合理吗? 说明原因				
		如何确定差分放大器各输入端信号的加减关系? 说明原因				
		表中数据是否满足叠加定理? 说明原因				

5.5 验证叠加定理在运算放大器线性区运用的正确性

5.5.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.2 部分。其核心是通过在运放的两个输入端上各施加一系列用直流稳压电源产生的电压,测量运放的输出端电压值,来达到计算电压放大倍数的目的。其中输出电压正负最大值均为正负电源电压值。

5.5.2 实验步骤

叠加定理的描述：对于一个同时有几个电源存在的电路，如果该电路是线性的，那么对于该电路上任何一点的电压，均可以把它看成是分别由其中的一个电源作用，其余电源归零后在该点产生的电压的总和。

依照叠加定理的描述，对于图 5-3-3 所示的差动放大器，只要输出电压的最大值没有超出 $\pm U_{om}$ 的范围，输入信号和输出信号就是一个线性关系，满足叠加定理的条件，即完全可以利用该定理分析电路。

依照以上分析，令 V_{CC} 等于 $\pm 5V$ ，用一个 $4.7k\Omega$ 电位器分别在同相输入端和反相输入端产生一系列电压信号 U_{I1} 和 U_{I2} 的值，完成表 5-3-6 叠加定理的实验。

表 5-3-6 数据记录及分析表

U_{I1}/V	2.0	0	-0.5	0	0.5	0
U_{I2}/V	0	-1.0	0	-1.0	0	1.0
U_{O2}/V						
U_{O1}/V						
$U_o = U_{O1} + U_{O2}/V$						
测试数据分析	表中数据是否满足叠加定理？说明原因					

6. 预习思考题

- (1) 不参考其他资料，独立默画出同相运算放大电路的电路图。
- (2) 同相比例电路与反相比例电路输入阻抗有何区别？
- (3) 计算图 5-3-1(a) 同相比例运算电路的电压放大倍数，并预测输入与输出相位关系。
- (4) 图 5-3-1(a) 电路中，电源接 $\pm 5V$ ，为了能按比例正常放大，输入信号的取值范围是多少？
- (5) 在图 5-3-1 电路中，若运放电源改为 $\pm 15V$ ，取 $R_f = 100k\Omega$ ，当输入信号 $u_i = 2V$ 时，输出等于多少？（注意运放的最大输出电压范围）
- (6) 在图 5-3-1(b) 电路中，注意表 5-3-3 中 U_i 应在输入端何处测量？ V_s 如何产生？
- (7) 说明电压跟随器的特点，它适用的应用场合有哪些？
- (8) 说明加法器和减法器电路构成上的重要区别。
- (9) 本实验同相运算电路和实验 5-2 反相运算电路，在电路结构上有什么区别之处？有什么相同之处？在输出结果上有什么区别？
- (10) 若输入信号与放大器的同相端连接，当增加正相信号时，运算放大器的输出是正还是负？

实验 5-4 单电源供电运放电路

1. 实验项目

实现用单电源给双电源运放供电。

2. 实验目的

实现用单电源给双电源运放供电。

3. 实验原理

人们经常看到的很多非常经典的运算放大器应用图集,它们都建立在双电源的基础上,但在很多时候,电路的设计者从实际放大信号的对象和简化电路设计的角度出发,非常希望仅用单个电源完成对运放的供电,因此本实验介绍将双电源的电路转换成单电源电路的方法。

3.1 双电源供电和单电源供电

一般运算放大器都有两个电源引脚,在资料中它们的标识是 $+V_{CC}$ 和 $-V_{CC}$,一个双电源是由一个正电源和一个相等电压的负电源组成。一般是 $\pm 15V$ 、 $\pm 12V$ 以及 $\pm 5V$ 。绝大多数的模拟电路设计者都知道怎么在双电源电压的条件下使用运算放大器,但是还有一些技术资料,它们给出运放电源电压的标识是 $+V_{CC}$ 和GND(地),这是因为这些数据手册的提供者试图将这种标识的差异作为单电源运放和双电源运放的区别。但是,这并不是说这些运放就一定要那样使用,它们完全有可能工作在其他的供电电压形式下。例如,对于同一个型号的运算放大器,如图 5-4-1 所示有两种电源实现方法。图 5-4-1(a)是双电源供电电路,输入电压和输出电压都是对照参考地给出的,其最大输出电压幅度在 $-U_{Om}$ 和 $+U_{Om}$ 之间。

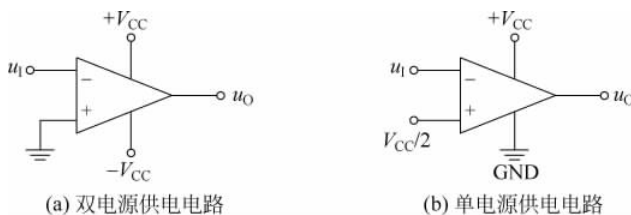


图 5-4-1 单双电源供电图

如图 5-4-1(b)所示是单电源供电电路,运放的 $+V_{CC}$ 电源引脚连接到正电源上, $-V_{CC}$ 电源引脚连接到单电源的地(GND)。将正电压用阻值相等的两个电阻分成一半后的电压作为虚地接到运放的输入引脚上,此时运放的输出电压也等于虚地电压,运放的输出电压以虚地为中心,最大输出电压幅度在 $0V$ (地)和 $+U_{Om}$ 之间。

需要特别注意的是,有不少设计者会很随意地用虚地来参考输入电压和输出电压,但在大部分应用中,输入和输出是参考电源地的,所以设计者必须在输入和输出的地方加入隔直电容,用来隔离虚地和地之间的直流电压。

3.2 虚地

单电源工作的运放需要外部提供一个虚地,通常情况下,这个虚地电压是 $V_{CC}/2$,图 5-4-2 的电路可以用来产生 $V_{CC}/2$ 的电压。

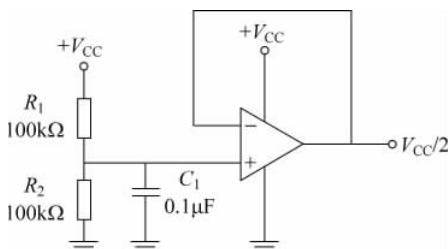


图 5-4-2 虚地电路

R_1 和 R_2 是等值的,其阻值的大小是由允许消耗的电源多少和允许的噪声大小来选择,电容 C_1 是一个低通滤波器,用来减少从电源上传来的噪声。在有些应用中可以省略缓冲运放,直接用 R_1 、 R_2 和 C_1 组成的电路来提供虚地。

3.3 交流耦合

使用单电源供电的运放电路,一般都是用来放大交流信号的。交流信号的零电平,通常都是相对电源地而言的,而单电源供电的运放的输入端是一个虚地点,它的特点是虚地是高于电源地的一个直流电平,这是一个小的、局部的“地”电平。这样就产生了一个电势问题:因输入和输出电压是参考电源地的,如果直接将信号源的输出接到运放的输入端,这将会因两个地之间有一个很大的电压差,使运放的输出信号远远超出运放允许的输出范围,导致运放将不能正确地响应输入电压。

利用放大交流信号时,人们只关心交流信号被放大的幅度,而不关心交流信号的电平值的特点,可以将信号源和运放之间用交流耦合的方法进行信号传递。使用这种方法,输入和输出器件就都可以参考系统地,并且运放电路可以参考虚地。

3.4 放大电路的形式

放大电路两个基本类型(同相放大器和反相放大器)的交流耦合形式如图 5-4-3 所示。

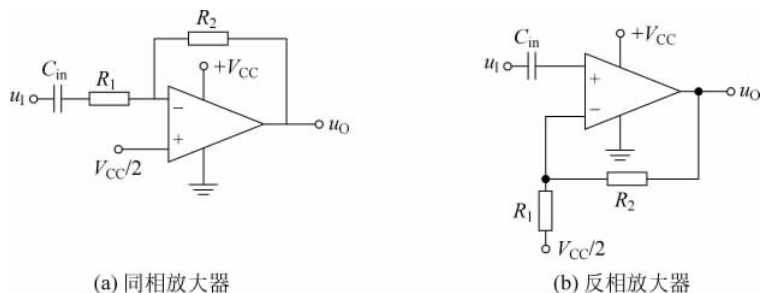


图 5-4-3 同相和反相放大器交流耦合电路

对于交流电路,反相放大的意思就是输出信号相对输入信号相位差为 180° 。这种电路采用了耦合电容 C_{in} 。 C_{in} 被用来阻止电路产生直流放大,这样电路就只会对交流产生放大

作用。如果在直流电路中, C_{in} 被省略, 那么就必须对直流放大进行计算。对于反相放大器, 其电压增益为 $-R_2/R_1$, 对于同相放大器, 其电压增益为 $1+R_2/R_1$ 。

4. 实验设备与器件

- (1) 示波器一台。
- (2) 信号发生器一台。
- (3) 直流双路稳压电源一台。
- (4) LM324 双电源运放一只, 电阻电容若干。

5. 实验内容与步骤

5.1 单电源反相放大器

5.1.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.1 部分。其核心是利用直流稳压电源实现正负电源电压值输出。

5.1.2 实验步骤

- (1) 按图 5-4-3(b) 电路图连接线路, $R_1=10k\Omega, R_2=470k\Omega$;
- (2) 信号源置 1kHz 正弦波, 峰峰值电压取值 20mV, 连接到输入端 u_i ; 示波器置双踪/直流模式, CH1 接输入信号, CH2 接输出端, 完成表 5-4-1 的测试内容。

5.2 单电源同相放大器

5.2.1 要点概述

实验原理请参见本实验 3.1 部分。其核心是利用直流稳压电源实现单电源为同相比比例运算电路供电, 实现输入信号的同相比比例放大。

5.2.2 实验步骤

- (1) 按图 5-4-3(a) 电路图连接线路, $R_1=10k\Omega, R_2=470k\Omega$;
- (2) 图 5-4-3(b) 信号源置 1kHz 正弦波, 峰峰值电压取值 20mV, 连接到输入端 u_i ; 示波器置双踪/直流模式, CH1 接输入信号, CH2 接输出端, 完成表 5-4-1 的测试内容。

表 5-4-1 数据记录及分析表

项 目	u_i	u_o
反相放大器		
同相放大器		
测试数据分析	从表中数据可看出, 反相、同相放大器输入输出是否相同? 说明单电源与双电源是否都可用 从连接电路方面分析单电源与双电源相比有何优势? 说明原因	

6. 预习思考题

- (1) 说明一个双电源运算放大器的电源引脚应如何和单电源的电极连接。
- (2) 图 5-4-3 中所示电容应采用何种型号? 分析其作用。
- (3) 一个双电源运算放大器,若按单电源的电极连接,其输出电压的范围应是多大?
- (4) 若一个双电源运算放大器的电源引脚按单电源的电极连接后,适合放大交流信号还是直流信号?

实验 5-5 有源滤波器

1. 实验项目

二阶 VCVS 有源滤波器的设计。

2. 实验目的

了解 VCVS 滤波器的一般设计方法及性能。

3. 实验原理

由 RC 元件与集成运算放大器构成的滤波器称为 RC 有源滤波器,其电路功能是允许一定频率范围内的信号通过,抑制或急剧衰减此频率范围外的信号,可用在信息处理、数据传输、抑制干扰等方面。因受运算放大器带宽限制,RC 有源滤波器主要用于低频范围。目前有源滤波器的最高工作频率只能达到 1MHz。根据对频率范围选择不同,可分为低通(LPF)、高通(HPF)、带通(BPF)和带阻(BEF)四类滤波器。

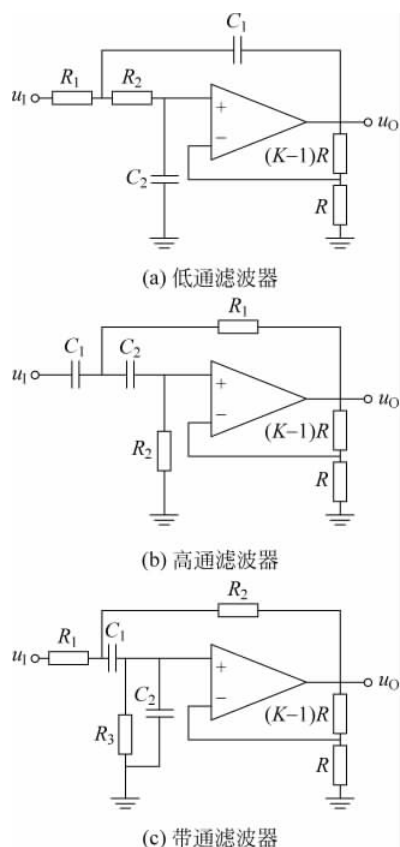


图 5-5-1 有源滤波器

VCVS(压控电压源)滤波器又称为受控源滤波器。图 5-5-1(a)、(b)、(c)分别给出了这种滤波器的低通、高通及带通的二阶电路形式,根据对滤波器截止频率 f_c 的不同要求,可换算出电路中 R 和 C 的不同取值,根据对滤波器性能指标要求高低的不同,可采用 n 个二阶 VCVS 滤波器级联的方式,构成 2、4、6、8 等 $n \times 2$ 阶有源滤波器,滤波器的阶数越高,性能就越优越。

在设计滤波器时,根据设计特点、指标要求和考虑侧重点不同,通常可从 3 种滤波器结构中进行选择: ①巴特沃兹滤波器,它的特点是力求通带内的幅频特性尽可能平坦,但缺点是带外衰减不陡峭(如图 5-5-2(a)所示); ②切比雪夫滤波器,它的特点是带外衰减非常迅速,缺点是这种迅速的带外衰减,来源于牺牲了一定的带内平整度实现的(如图 5-5-2(b)所示); ③贝塞尔滤波器,它虽然没有前两种滤波器的优点,但却有良好的相频特性,即在通带内,滤波器对不同的频率产生的相位移,与频率成正比,这对保证信号波形不失真是十分重要的,它的幅频特性见图 5-5-2(c)所示。

为了便于 VCVS 滤波器的设计,工程技术人员已设计好了一个简化的 VCVS 滤波器参数设计表(见表 5-5-1),只要根据给出问题的要求,查表求出相关参数即可。

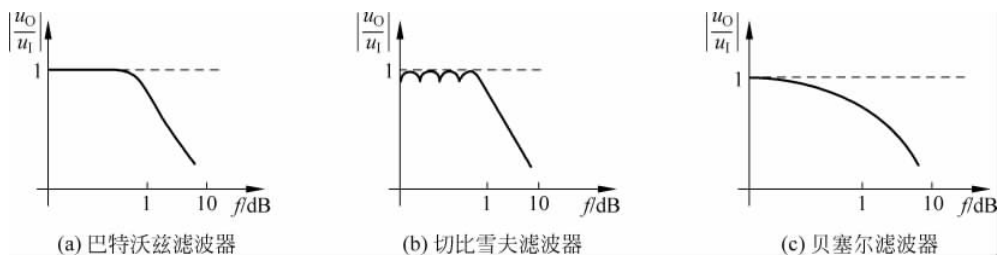


图 5-5-2 滤波器的幅频特性

表 5-5-1 VCVS 有源滤波器设计参数表

阶数	巴特沃兹 K	贝塞尔 $f_n K$		切比雪夫 (0.5dB) $f_n K$		切比雪夫 (2.0dB) $f_n K$	
2	1.586	1.272	1.268	1.231	1.842	0.907	2.114
4	1.152	1.432	1.084	0.597	1.582	0.471	1.924
	2.235	1.606	1.759	1.031	2.660	0.964	2.782
6	1.068	1.607	1.040	0.396	1.537	0.316	1.891
	1.586	1.692	1.364	0.768	2.448	0.730	2.648
	2.483	1.908	2.023	1.011	2.846	0.983	2.904
8	1.038	1.781	1.024	0.297	1.522	0.238	1.879
	1.337	1.835	1.213	0.599	2.379	0.572	2.605
	1.889	1.956	1.593	0.861	2.711	0.842	2.821
	2.610	2.192	2.184	1.006	2.913	0.990	2.946

【设计示例】 请设计一个截止频率 $f_c=500\text{Hz}$ 的巴特沃兹二阶低通滤波器。由

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

得

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c} = \frac{1}{6.28 \times 500} = 3.185 \times 10^{-4}$$

通常电阻 R 的取值范围在 $100\text{k}\Omega$ 左右,选取标准规格电容 $C=4700\text{pF}$,可求出电阻阻值 $R=67.7\text{k}\Omega$,在此选标准电阻 $68\text{k}\Omega$ 。

查表知巴特沃兹二阶 VCVS 低通滤波器的 K 等于 1.586。

对于设计贝塞尔和切比雪夫低通滤波器来说,当要用到多级二阶有源滤波器时,每一级的 RC 应按下边公式计算

$$RC = \frac{1}{2\pi f_n f_c}$$

对于设计贝塞尔和切比雪夫高通滤波器来说,当要用到多级二阶有源滤波器时,每一级的 RC 则应按下边公式计算

$$RC = \frac{f_n}{2\pi f_c}$$

应注意的是,由于运算放大器的高频响应是有限的,所以它主要应用在中低频以下的频段内。

4. 实验设备与器件

- (1) 晶体管毫伏表一台。
- (2) 信号发生器一台。
- (3) 示波器一台。
- (4) LM324 运算放大器、电阻、电容等。

5. 实验内容与步骤

5.1 要点概述

其核心是搭建二阶低通有源滤波器电路,通过改变频率测量输出电压方法来验证其为低通有源滤波器。

5.2 实验步骤

连接图 5-5-1(a)所示 VCVS 二阶低通有源滤波器电路。

- (1) 按 $f_c=300\text{Hz}$ 计算参数 R 、 C 。

(2) 完成表 5-5-2 的测试内容(首先将信号频率由 300Hz 向低端扫一遍,用晶体管毫伏表监测输出端,找到使输出信号幅度最大的那个频点,调节信号发生器的幅度,使在该频点下输出幅度 U_{om} 为一个比较容易观察的值,如取 U_{om} 等于 3V,保持信号发生器的幅度不变,调节频率,完成各项测试内容)。

表 5-5-2

f/Hz	3	5.33	9.48	16.87	30	53.3	94.9	169
u_o/V								
f/Hz	300	533	948	1687	3000	5334	9487	16 870
u_o/V	3							
f/Hz	30 000	53 340	94 870	168 700				
u_o/V								

- (3) 分析 $f=300\text{Hz}$ 频点处信号的幅度,是不是通带内信号幅值的 0.707 倍(-3dB),若不是,请调整有关参数使满足。

6. 预习思考题

- (1) 设计巴特沃兹二阶 VCVS 低通滤波器, $f_c=300\text{Hz}$ 时,计算出 R 、 C 和 K 的数值。
- (2) 巴特沃兹滤波器的优缺点是什么?
- (3) 讨论运算放大器的闭环增益对有源滤波器特性的影响。
- (4) 低通滤波器的下限频率受哪些因素影响? 采用什么措施可以减少这些影响?
- (5) 滤波器在通信和信号处理中的应用有哪些? 滤波器有什么功能?
- (6) 试计算该滤波器在频率为 948Hz 和 3kHz 处信号衰减的分贝数。
- (7) 有源低通滤波器与积分器非常相似,具体使用时有何不同?