**中央民族大学信息工程学院**

**实验报告**

姓名：叶璟霖 学号：22012663 专业：计算机科学与技术

课程：模拟电子技术基础实验 实验名称：基本运算放大电路

1. 实验目的

1. 研究由集成运算放大器组成比例、加法、减法、积分和微分等基本运算电路的功能。

2. 掌握基本运算电路的设计方法。

3. 了解运算放大器在实际应用时应考虑的一些问题。

1. 实验原理

集成运算放大器是具有高放大倍数的直接耦合放大电路,其内部电路由差分输入级、电压放大级、功率输出级和偏置电路四部分组成。由于内部各级采用直接耦合方式,因此可以放大低频甚至直流信号,但同时存在零点漂移问题。

1. 集成运算放大器的分类

集成运算放大器可以分为如下几类:

1. 通用型运算放大器

通用型运算放大器是以通用为目的而设计,其特点是价格低廉、产品量大,性能指标适合于一般性使用,是最为广泛的集成电路,如实验中用到的μA741(单运放)、LM324(四运放)LM358(双运放)等。

1. 高阻型运算放大器

高阻型运算放大器具有如下特点:差模输入阻抗高、输入偏置电流小,一般R>()Ω,为几皮安到几十皮安,这些指标的实现是利场效应管的高输入阻抗,用场效应管组成运放的差分输入级,不仅输入阻抗高,输入偏置电流低,而且具有高带宽、低噪声和高速的特点,但输入失调电压较大也是其缺点。该类运算放大器常用的有LF347(四运放)、LF351、LF353、CA3140(输入阻抗更高)等。

1. 高速型运算放大器

高速型运算放大器的主要特点是具有高的转换速率和宽的频率响应,常用在视频放大器、快速A/D和D/A转换器中,集成运算放大器的转换速率SR要求很高,单位增益带宽 BWG要足够大,而通用型集成运算放大器不适合应用于高速场合。常见的运算放大器有μA715、LM2505等,其SR=50~70 V/μs,BWG>20 MHz。

1. 低温漂型运算放大器

低温漂型运算放大器旨在解决运算放大器的失调电压要小且不随温度的变化而变化,常用在精密仪器,弱信号检测等自动控制仪表中,OP\_27、AD508及由 MOSFET组成的斩波稳零型低漂移器件iCL7650等军事当前常用的高精度、低温漂型运算放大器。

1. 低功耗型运算放大器

电子电路集成化使得复杂电路小型轻便化,因此便携式仪器需要使用如下特性的运算放大器:即低电源电压供电、低功率消耗。这类运算放大器常见的有TL-022C、TL-060C等,其工作电压为±2V~±18V,消耗电流为50~250 μA。*i*CL7600的供电电源为1.5V,功率已达微瓦级;为10mW,可采用单节电池供电。

1. 高压大功率型运算放大器

运算放大器的供电电源限制其输出电压的大小。普通运算放大器的输出电压的最大值一般仅几十伏,输出电流仅几十毫安。为了提高输出电压或输出电流,集成运算放大器外需外加辅助电路。而高压大电流集成运算放大器不需外加电路,即可输出高电压和大电流。例如,D41集成运算放大器的电源电压可达±150 V,μA791集成运算放大器的输出电流可达1A。

1. 可编程控制型

量程是仪器仪表使用时需要注意的地方,固定电压的输出需要改变运算放大器的放大倍数。例如,有一运算放大器的放大倍数为10倍,输人信号为1mV时,输出电压为10mV,当输入电压为0.1mV时,输出就只有1mV,为了得到10mV就必须改变放大倍数为100。可编程控制型就可以有效解决这一问题。例如,PGA103A,通过控制1、2脚的电平来改变放大的倍数。

1. 集成运算放大器的选择

集成运算放大器使用较广,具体使用时根据应用不同,所选的性能要求也不同。

一般情况下,没有特殊要求时,使用通用型集成运算放大器,可降低成本,保证充足的货源。当需要使用多个运算放大器时,可选用多运放集成电路,比如 LF347、LM324等四运放集成电路。

集成运算放大器通过综合性能评估衡量其性能优劣。常用系数K来衡量,其定义为

*K*=*S*R/*ii*b*U*OS

式中,*S*R为摆率,其值越大,表明运放的交流特性越好;*U*OS为输入失调电压,*ii*b为输入偏置电流,这两个参数值越小,则运放的直流特性越好。在音频放大电路、视频放大电路等交流信号的电路中,应选择摆率较大的运算放大器。对于处理微弱直流信号的电路,集成运算放大器应满足如下特性:即精度高,失调电压、失调电流、温漂等较小。

在实际选择过程中,除了以上参数需要考虑,还考虑其他因素。例如,信号源、电压源或者电流源。负载性质,集成运算放大器输出电流电压是否满足。环境条件:允许工作范围、工作电压范围、功耗、体积等。

1. 理想运算放大器特性

在大多数情况下，将运算放大器视为理想运算放大器，即把运算放大器的各项技术指标理想化。满足下列条件的运算放大器称为理想运放:

* 开环电压增益:A*U*d =∞。
* 输入阻抗:*Ri*=0。
* 输出阻抗:*R*o=0。
* 带宽:fBW =0。

理想运算放大器在线性应用时的两个重要特性:

1. 输出电压*U*与输入电压之间满足关系式：

*u*o=Aud(*u*+-*u*-)

由于Aud=∞，而*u*o为有限值，因此*u*+-*u*-≈0。即*u*+≈*u*-，称为“虚短”。

1. 由于*Ri*=∞，故流进运算放大器两个输入端的电流可视为零，即*i*+=*i*-=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算放大器应用电路的基本原则，可简化运算放大器电路的计算。

1. 集成运算放大器的应用

集成运算放大器是具有两个输入端、一个输岀端增高增益、高输入阻抗的直接耦合多级放大电路。在它的输出端和输入端之同加上反馈网络,则可实现各种不同的电功能。当反馈网络为线性电路时,运算放大器的功能有:放大、加、减、微分和积分等;当反馈网络为非线性电路时,可实现对数、乘法和除法等功能:还可组成各种波形形成电路,如正弦波、三角波脉行波等波形发生器。

1. 反相比例放大电路

反相比例放大电路如图5-19所示。输入信号*ui*通过电阻*R*1作用于集成运放的反相输入端。以输出电压和输入电阻反向。*R*1应远大于信号源的内阻。电阻*R*f作为负反馈电阻,构成电压并联负反镀,使得电阻的输入、输出电阻都较小。*R*f不能取得太大.以免产生较大的噪声和漂移、一般取十至几百千欧。同相输入端通过平衡电阻接地,确保集成运放输入级差分放大电路的对称性,为了减小输入级偏置电流引起的运算误差,*R*P=*R*f//*R*1。当运算放大器开环增益足够大时(大于104以上),反相比例放大器输出电压与输入电压之间的关系为：



由上式可知，选用不同的电阻比值*R*f/*R*1，电路的闭环电压增益A*U*d可以大于1，也可以小于1。若取*R*f=*R*1，则放大器的输出电压等于输入电压的负值，即*U*o=-*Ui*，这时电路称为反相跟随器或反相器。

1. 同相比例放大电路

同相比例放大电路即将图5-19所示的输入、输出端互换，如图5-20所示，电阻作为负反馈电阻，构成电压串联负反馈，使得电阻的输入阻抗高、输出电阻小。当运算放大器开环增益足够大时（大于以上），同相比例放大器输出电压与输入电压之间的关系为：



由上式可知，电路的闭环电压增益恒大于1，其中*R*P=*R*f//*R*1。

若*R*f=0或*R*1=∞,A*U*d为1，于是同相比例放大器转变为跟随器（见图5-21）。跟随器具有输入阻抗高、输出阻抗低的特点，且有阻抗变换的作用，常用来做缓冲或隔离级。此时,*R*P=*R*f，用以减小漂移和起保护作用。一般取10kΩ，*R*f太小起不到保护作用，太大则影响跟随性。





图5-21 电压跟随器

1. 加法器

加法器根据信号输入端不同，可分为反相加法器和同相加法器两种。反相加法器的多个输入端信号均作用于集成运放的反相输入端，如图5-22所示，同相加法器的多个输入信号均作用于集成运放的同相输入端，电路如图5-23所示。当运算放大器开环增益足够大时，运算放大器的输入端为虚地，3个输入电压可以独立地通过自身的输入回路电阻转换为电流，能精确地实现代数相加运算。



输入电压与输出电压之间的关系为：



当*R*1=*R*2=*R*3=*R*f时，*u*o=-(*ui*1+*ui*2+*ui*3)。图5-22中*R*P=*R*1//*R2*//*R*3//*R*f。

对于同相加法器，其输出电压为：



式中，*R*P=*R2*//*R*3。

将同相加法器后面再加一级反相跟随器,即能实现输出等于输入的同相相加。

1. 减法器

将同相放大器和反相放大器进行组合,即当多个信号同时作用于两个输入端时,就构成了减法器电路,如图5-24 所示。

则输入、输出之间的关系为:



当运算放大器开环增益足够大时，若取*R*1=*R2*，*R*3=*R*f，则输出电压*U*o与各输入电压之间的关系为:



1. 积分器

积分器是指输出信号与输入信号对时间成积分关系,反相输人和同向输入均可构成积分运算电路,将反向输入比例电路中的反馈电阻换成电容,就可构成一个反相积分器,电路如图5-25所示。



当运算放大器开环增益足够大时，流入运放的电流为零，可认为:

*i*R=*i*C

由于*u*+=*u*-=0，故有



将其代人上式，整理得到输出电压与输人电压之间为积分关系:



即输出电压的大小与输人电压对时间的积分值成正比关系，比值由电阻和电容决定，RC 确定了积分时间，数值越大，达到给定的输出值所需的时间就越长。前面的符号表明输入、输出电压反相。

如果电容器两端的初始电压为零，则

当输入信号*u*i(*t*)是幅度为*U*的阶跃电压时，



此时输出电压*u*o(*t*)的形随时间线性下降，如图5-26所。但输入电值不会无限制地增加。时间常数数值越大，达到饱和所需的时间

越长。因此，RC 的值要满足:



式中，*u*omax为运算放大器的最大输出电压。

如果输入电压*u*i(*t*)是幅度为 的形波，则输出电压的波形为三波，如图5-27 所示。



三角波的幅值要满足一定要求，需要通过常数RC进行调整，RC过小，积分器的输出会在未达到积分时间要求时进入饱和，RC值过大，则在一定的积分时间内，输出电压会过低，无法满足输出幅值的要求。

当时间常数RC确定之后，就需要对R、C的值进行确定。在反相积分电路中，输入电阻等于R，因此R的值越大越好，但在RC一定的情况下，要求C的值就要小一些，积分漂移就越严重。因此，一般满足输入电阻要求之后，尽量加大C的取值。但一般不超过1μF。

实际积分电路中，由于失调电压的影响，会在输出中出现直流漂移，通常在积分电容C两端并联反馈电阻，用作直流负反馈，目的是减小放大器输出端的直流漂移。但是，反馈电阻的存在将影响积分器的线性关系，为了改善线性特性，反馈电阻一般不宜太小，但太大又对抑制直流漂移不利，因而反馈电阻应取适中值，常取1MΩ。积分电容应选漏电小的电容。

实际积分器中，输入失调电压、输入偏置电流和失调电流的影响，使得积分出现误差，另外，积分电容的漏电流也是产生积分误差的原因。所以，积分器需要采用失调电压较小，输入偏置电流和失调电流都较小的运算放大器，同时在同相输入端接入严格对称的平衡电阻；另外，应该选择泄漏电流小的电容，从而减小积分电容的漏电带来的积分误差。

1. 微分电路

微分电路的输出信号是输入信号对时间的微分关系，电路如图5-28所示。当运算放大器开环增益足够大时，流入运放的电流为零，可认为：

由于*u*+=*u*-=0，故有



将其代入上式，整理得到输出电压与输人电压之间为微分关系:



当输入电压*u*i(*t*)=*U*msinω*t*时，输出电压*u*o(*t*)=-*U*mω*R*f*C*cosω*t。*

基本微分电路很少直接应用，因为当输人信号频率高时，电容容抗变小，放大倍数升高，使得高频噪声和干扰比较严重。另外，反馈网络为滞后网络，与集成运放内部的滞后环节相叠加，容易满足自激振荡的条件，导致电路不稳定。为了克服这些问题，在实际微分电路中，应在电容*C*两端串入电阻，在反馈电阻*R*f两端并联电容，以解决直流漂移、高频噪声等问题。同时，并联上稳压二极管，以限制输出幅度，从而保证集成运放中的放大管始终工作在放大区，不至于出现阻塞现象，并在电阻R 上并人一个很小的电容*C*2，起到相位补偿作用，提高电路的稳定性。具体电路如图 5-29 所示。



1. 预习内容

1.查阅集成运算放大器谑疤棒膀挨袄爱安蔼奥榜料，熟悉运放各参数的意义。

2.熟悉电路的工作原理和分析方法，计算出设计电路的理论值

1. 实验内容

1.实验电路图

2.实验步骤及数据（数据表格形式）

1. 调零

为了提高集成运算放大器的运算精度，消除因失调电压和失调电流引起的误差，必须采取调零技术，保证运算放大器输入为零时，输出也为零。无调零端的运放需外加一个补偿电压，以抵消运放本身的失调电压，达到调零的目的。具有外部调零端的运放，如μA741，其调零电路如图5-30所示。将输入端接地，用万用表直流电压挡测量输出电压，调节调零电位器，使输出电压为零。



图5-30 调零电路

1. 比例放大电路

设计一反相比例放大电路，使输出与输入之间满足关系式*u*o=-20*u*i。

在该比例放大电路的输入端加入下列直流电压值：-700mV、-500mV、-300mV、-100mV、0、100mV、300mV、500mV、700mV，用万用表直流电压挡测出运算放大器的输出电压值，观察其线性。

在输入端加入正弦电压*u*i=0.5V,f=1kHz，用示波器测量输出电压的幅度。

1. 加法器

设计一加法器，使输出、输入之间满足关系式：*u*o=-2(5*u*i1+*u*i2)。

1. 两个输入信号都是频率为1kHz的正弦信号，峰-峰值分别为300m和500mV，观察输出是否满足要求。
2. 一个输入信号是峰-峰值200mV，频率是1kHz的交流正弦信号，一个是直流信号，电压幅值是5V，观测输出是否满足要求，观察输出信号中是纯交流信号与含有直流信号时的区别。
3. 减法器

设计一减法器，使输出、输入之间满足关系式：*u*o=3(*u*i1-*u*i2)。

选择合适的幅值，使得输出波形无失真，观察输出是否满足要求。

1. 反向积分器

积分时间常数是0.5ms，输入信号为频率1kHz、占空比50％的方波，峰-峰值为5V,观察信号的输入幅值，并和理论值进行比较。

改变积分时间常数RC的值，让其变大或者变小，观察输出信号幅度的变化及失真情况，掌握RC对输出的影响，

1. 微分器

时间常数是2ms。

1. 在输入端加三角波，频率为1kHz，其峰-峰值为5V，观测输出信号的幅度，并与理论值进行比较，如果输出有振荡，调整输入电阻的阻值，直到消除振荡。
2. 改变输入信号的频率，让其变大或者变小，观察输出信号幅度的变化及失真情况，掌握在输入频率变化时，输出是如何被RC影响的。

五：实验数据

1. 反向比例放大电路

如图所示：R1=10k，Rp=10k，Rf=200k

图示, 示意图

描述已自动生成

2、反相求和放大电路

白板上的字

描述已自动生成

f=1KHz，Ui1=300mV，Ui2=500mV 输出U0=4.08V

Ui1为1KHz，峰峰值200mV正弦信号，Uiz为5V直流信号

接入直流信号Ui2时，正弦波信号下移9.28V，且U0=1.98V

失真图形：

形状

描述已自动生成

3、减法器

图示, 示意图

描述已自动生成

Ui1:1000Hz,0.5V Ui2:1000Hz,0.5V

R1=10kΩ，R2=10kΩ Rp=30kΩ Rf=32kΩ

U0=Rf/R1(Ui2-Ui1) 所以输出信号为正弦波，U0=Vpp=0.66V

4、积分器

图示, 示意图

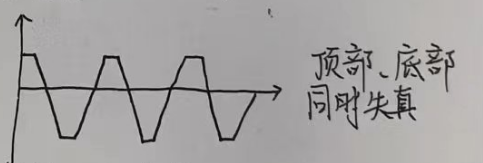
描述已自动生成

输入Ui波形，在0.1ms时刻

图表, 折线图

描述已自动生成

在0.05ms时刻出现失真



结论：时间常数τ=RC越小，越容易出现失真。

4、微分器

图片包含 游戏机, 物体, 钟表

描述已自动生成  
Rf下降，U0下降，出现失真

Rf上升，U0上升，不失真

f上升，U0上升，不失真

f下降，U0下降，顶部出现失真

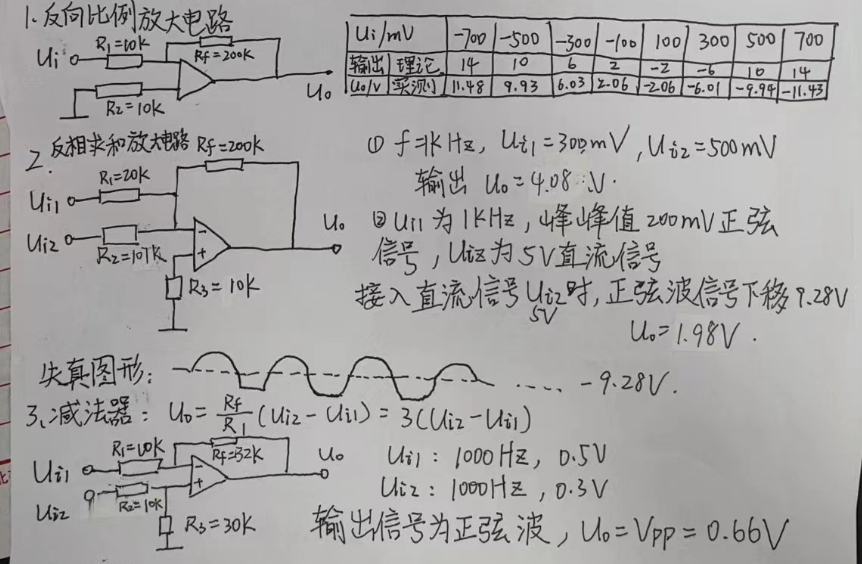
Ui Uo

形状, 折线图, 多边形

描述已自动生成 形状

低可信度描述已自动生成

原始数据图片



图示, 示意图

描述已自动生成

六、误差分析及思考题：

1、误差分析：

（1）反相比例放大电路

电阻精度：电阻器的公差可能导致实际电阻值与标称值不符，影响放大倍数的准确性。

失调电压和电流：运算放大器的输入失调电压和电流可能导致输出偏移。

温度波动：温度变化可能影响元件的特性，尤其是半导体元件。

测量仪器精度：使用的万用表或示波器精度限制也可能导致读数误差。

（2）加法器

阻抗匹配：输入信号源的阻抗可能与电路不匹配，导致信号失真。

电源干扰：电源噪声或干扰可能影响电路性能。

电路布线：不恰当的布线（如过长的导线）可能导致信号传输过程中的损耗或干扰。

（3）减法器

电阻匹配：减法器的性能高度依赖于电阻的精确匹配，任何微小的不匹配都会导致输出误差。

共模干扰：共模信号（两输入端同时出现的相同信号）可能未被完全抵消。

信号源差异：如果两个输入信号源的特性有所不同，比如内阻不同，也会影响准确性。  
（4）反向积分器

电容器漏电：电容器的漏电流可能导致积分器的性能偏离理论值。

初始条件：电容器的初始电荷可能对实验结果产生影响。

频率响应：输入信号的频率如果超出了运算放大器的有效响应范围，将导致输出信号失真。

（5）微分器

高频噪声：微分器对高频噪声敏感，可能导致输出信号中出现不希望的高频成分。

电容和电阻的精度与稳定性：电容和电阻的值若不精确或受温度等因素影响，将直接影响微分效果。

稳定性问题：微分电路可能因相位延迟而变得不稳定，特别是当输入信号频率较高时。

1. 思考题：

（1）运算放大器作精密放大时，同相输入端对地的直流电阻要与反相输入端对地的直流电阻相等，如果不相等，会引起什么现象，请详细分析。

答：输入偏置电流产生的误差：运算放大器的两个输入端都有微小的输入偏置电流。这些电流通过输入端电阻流向地线，从而在电阻上产生微小的电压降。如果两个输入端的电阻值不同，这将导致两个输入端产生不同的电压降，从而产生差模误差。这个误差将被放大器的增益放大，从而导致输出误差。

共模抑制比（CMRR）降低：共模抑制比是衡量运算放大器抑制共模信号（即两个输入端同时出现的信号）能力的一个参数。当两个输入端对地电阻不平衡时，共模信号会被不均匀地转换为差模信号，从而降低放大器的CMRR。这意味着放大器将无法有效地抑制外部干扰和噪声，特别是当处理微弱信号时。

输入阻抗不对称：输入阻抗的不对称可能导致信号源与放大器之间的匹配问题，特别是在信号源阻抗高或与放大器输入阻抗相近时。这可能会影响信号的传输和放大器的频率响应。

温度漂移的影响：电阻的温度系数可能导致随温度变化的电阻值变化。如果两个输入端的电阻在温度变化下的响应不同，这将导致额外的温度依赖误差。

（2）运算放大器接成积分器时，在积分电容两端跨接电阻R，试分析为什么这样能减少输出端的直流漂移?R太大或太小对电路有何影响?

答：减少直流漂移：

电容的漏电：任何实际的电容都会有一定程度的漏电流，这会导致电容上积累的电荷随时间发生变化，从而产生直流漂移。

输入偏置电流：运算放大器的输入端会有一个微小的偏置电流，这个电流在积分电容上积累电荷，也会引起直流漂移。

跨接电阻R提供了一个放电路径，帮助消除由于电容漏电和输入偏置电流在电容上积累的电荷，减少直流漂移。这个放电路径确保电容两端的电压不会无限增长，从而维持电路的稳定运作。

电阻R的大小对电路的影响：

R太大：如果电阻R过大，其放电路径的作用将会减弱，这会导致电容上积累的电荷更多，从而可能增加直流漂移。同时，如果R过大，它可能不足以有效抵消输入偏置电流造成的影响，从而影响积分器的性能。

R太小：另一方面，如果R太小，它将提供一个较强的放电路径，这可能导致电容两端的电压过快放电，影响积分器的积分效果。实际上，过小的R会减少电路的积分时间常数（τ=RC），从而影响其积分性能。

模电实验心得

同组人：王嘉毅，叶璟霖

通过本学期的模拟电子技术基础实验，我对电子电路的设计、分析和实际应用有了更深入的理解。这些实验不仅加深了我对课堂理论的认识，而且提升了我的实践操作能力，让我对电子工程的实际应用有了更加直观的感受。

在实验过程中，我首先学习了如何使用和读取电子测试仪器，例如示波器和万用表。这些基础技能对于进行精确测量和故障诊断至关重要。随后，通过构建和测试不同类型的电路，如运算放大器的基本应用（包括放大器、加法器、减法器、积分器和微分器），我逐步掌握了电路设计的核心原理。

特别让我印象深刻的是运算放大器的实验部分。在设计和搭建这些电路时，我不仅应用了电路理论知识，还必须考虑实际元件的非理想特性，如电阻的公差和电容的漏电。这些实验帮助我理解了理论与实际应用之间的差异，并教会了我如何调整和优化电路以获得更好的性能。

此外，这些实验还培养了我的问题解决技能。在面对电路设计的挑战时，我学会了如何系统地分析问题、识别故障点，并采取相应的调整措施。例如，在积分器实验中，我发现输出信号有意料之外的偏移，通过调整跨接电阻的大小，成功减少了这种直流漂移。

我也认识到了团队合作的重要性。在实验过程中，我与同伴共同讨论问题、分享观察结果，并相互协助进行复杂的实验步骤。这种协作不仅提高了实验效率，还增强了我的沟通和协调能力。

总的来说，这些模拟电子技术基础实验不仅增强了我对电子电路的理解，还提高了我的实践技能，为我未来的学习和职业生涯奠定了坚实的基础。