

浙江大学实验报告

专业：信息工程
姓名：胡东东
学号：3240102873
日期：2025 年 12 月 15 日
地点：东 4-216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军/叶险峰/邓靖靖 成绩：

实验名称：集成运算放大器应用电路研究 实验类型：设计性实验 同组学生姓名：赵皓翌

集成运算放大器基本运算电路研究

一、实验目的

研究由集成运放构成的比例、加法、减法、积分等基本运算电路的组成与功能，加深对集成运放线性应用电路结构和性能特点的理解，掌握其设计方法。了解集成运放在实际应用时应考虑的一些问题，掌握其正确使用方法。

二、实验方案设计

图 1 所示为反相放大器，反相放大器是最常用的信号放大电路之一，这是一个电压并联负反馈电路，其主要技术指标为：闭环电压增益、输入电阻和输出电阻；图 2 所示为反相权重加法器，其输出电压克表示为： $u_o = -(\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + \frac{R_F}{R_2} u_{i2})$ ，这实际上是反相放大器的扩展应用，对多输入信号情况可以以此类推。

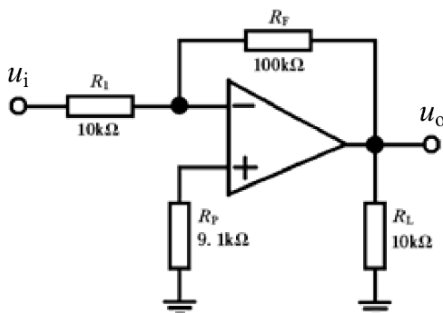


图 1 反相放大器电路

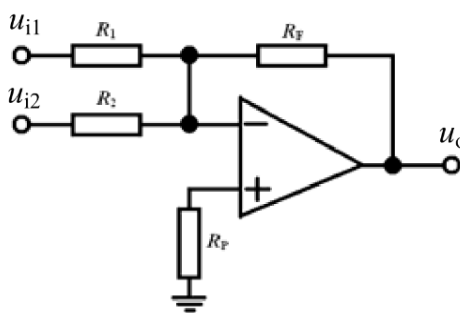


图 2 反向权重加法器电路

三、实验原理

(1) 理想运算放大器：

工程设计与分析时，往往把运算放大器视为理想运放，就是将运放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。

开环差模电压增益 $A_{ud} = \infty$	共模抑制比 $CMRR = \infty$
输入电阻 $R_i = \infty$	带宽 $BW = \infty$
输出电阻 $R_o = 0$	失调、温漂、内部噪声均为零等。

(2) 理想运放在线性应用时的两个重要特性

由上述理想技术指标容易导出运放工作在线性区时的两个重要特性。

- (1) 虚短：即运放的同相输入端和反相输入端的电位“无限”接近，就象短路一样，但不是真正的短路。
- (2) 虚断：即同相输入端和反相输入端的偏置电流趋于零，就像断路一样，但不是真正的断路。这两个特性使得集成运放构成的深度负反馈电路的分析和设计大大简化，而且与实测结果的误差很小。

四、实验任务要求

(1) 反相放大器设计研究

- ①设计反相放大电路，要求 $R_i \geq 15K\Omega$ ， $|A_v| = 15V/V$ 。
- ②安装该电路，研究输入、输出信号的幅度、相位关系。输入信号幅度合理自定。

(2) 设计并安装一个算术运算电路

要求实现： $V_o = -(V_{i1} + 0.5V_{i2})$ ，

其中 V_{i1} 用直流、 V_{i2} 用正弦信号在合适的幅度和频率范围内，进行验证并记录波形及参数。

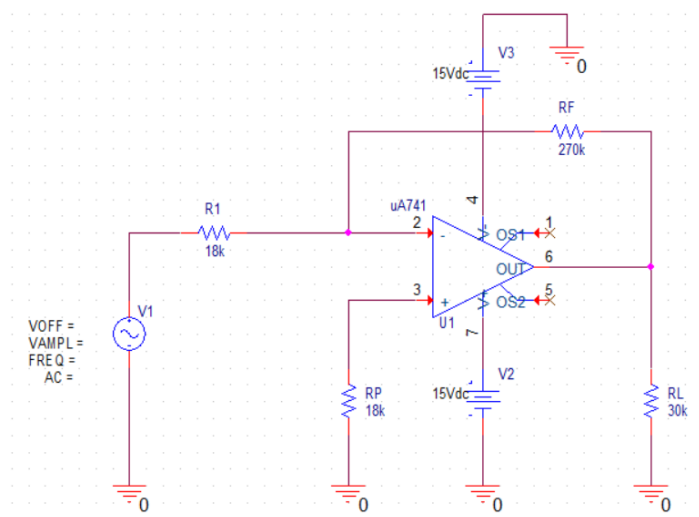
(3) 增益带宽积研究

运放可工作在零赫兹（即直流），因此其带宽 BW 就等于其截止频率 f_H 。增益越高，带宽越窄，增益带宽积 $A_v \cdot BW = \text{常数}$ 。当电压增益等于 1 时，对应的带宽称为单位增益带宽。利用这一点改变电压增益测定其带宽，研究增益带宽积。

五、实验步骤与实验数据记录

(1) 反相放大器设计研究

- ①设计反相放大电路，要求 $R_i \geq 15K\Omega$ ， $|A_v| = 15V/V$ 。



电路外围元件参数设计计算过程：

$$R_{in} = R_1 = 18k\Omega > 15k\Omega$$

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_F}{R_1} = -15V/V$$

$$\text{所以 } R_F = |A_{uf}| \cdot R_1 = 270k\Omega$$

$$R_P = R_1 || R_F = 16.875k\Omega, \text{ 取标称值 } 18k\Omega$$

图 3 反相放大器电路设计

元件值： $R_1=18k\Omega$ ， $R_P=18k\Omega$ ， $R_F=270k\Omega$ ，则理论增益为 $|A_v|=15V/V$ 。

②安装该电路，研究输入、输出信号的幅度、相位关系，测量并验证增益。

输入直流信号（DC 耦合，输出不饱和）：



图 4 输入输出波形图（直流）

输出交流信号：



图 5 输入输出波形图（交流）

（2）设计并安装一个算术运算电路

③设计一个反向权重加法器电路，要求实现 $V_o = -(V_{i1} + 0.5V_{i2})$ ；

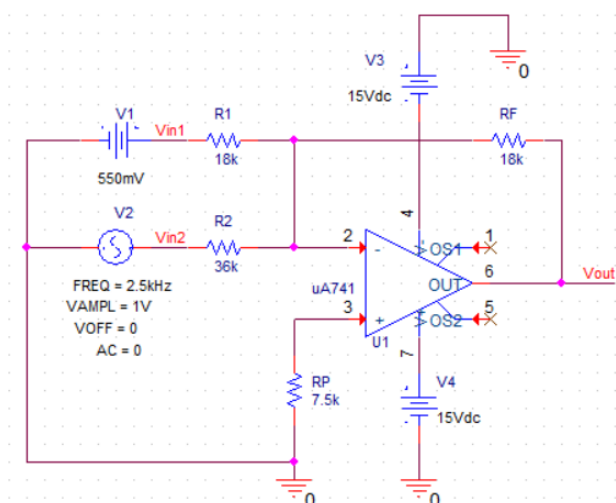


图 6 反向权重加法器电路设计

元件值： $R_1=18k\Omega$ ， $R_2=36k\Omega$ ， $R_P=7.5k\Omega$ ， $R_F=18k\Omega$ $R_P = R_1 || R_F = 9k\Omega$ ，取标称值 $7.5k\Omega$ 。

输入直流信号，并确保输出不饱和，利用示波器双踪显示输入输出波形图如图 4 所示，输入输出电压反相，测量得到 $V_{in}=560mV$ ， $V_{out}=8.5V$ ，则反相放大器增益 $|A_v|=V_{out}/V_{in}=15.18V/V$ ，满足设计要求。

输入交流信号（2.5kHz 正弦），并确保输出不失真，利用示波器双踪显示输入输出波形图如图 4 所示，可见输入输出电压反相，测量得到 $V_{ip-p}=512mV$ ， $V_{op-p}=8.1V$ ，则反相放大器增益 $|A_v|=V_{op-p}/V_{ip-p}=15.82V/V$ ，满足设计要求。

电路外围元件参数设计计算过程：

要实现 $V_o = -(V_{i1} + 0.5V_{i2})$ ，

对于所使用的反向权重加法器有：

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_{i1} + \frac{R_F}{R_2}u_{i2}\right),$$

$$\text{故有 } \frac{R_F}{R_1} = 1, \quad \frac{R_F}{R_2} = 0.5,$$

取 $R_F = 18k\Omega$ ，则有 $R_1 = 18k\Omega$ ， $R_2 = 36k\Omega$ ，

④安装该电路，设置 V1 为 550mV 直流信号，V2 为幅值 1V 的 2.5kHz 正弦交流信号，利用示波器双踪显示输入端正弦信号与输出端信号如图 7 所示，由波形图可见输入输出波形反相，利用示波器的光标测量得到 $V_{outp-p}=1.01V$ ， $V_{in2p-p}=2.02V$ ， $V_{in1}=554.6mV$ ，成功实现 $V_o=-(V_{i1}+0.5V_{i2})$ ，测量过程如图 8 所示；



图 7 反向权重加法器输入输出波形图

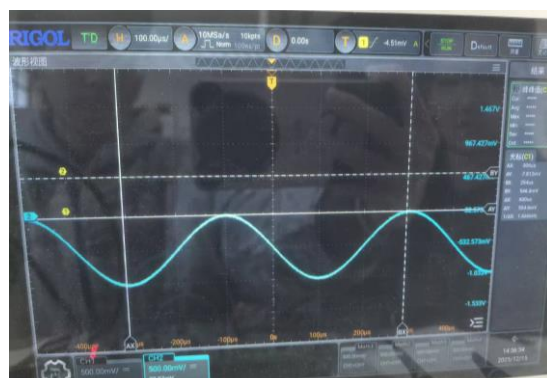


图 8 光标法测量输入输出信号过程

⑤利用 OrCAD 对该反向权重加法器电路进行仿真，仿真得到的 V_{in1} ， V_{in2} 和 V_{out} 结果如图 9 所示，利用光标测量得到 $V_{outp-p}=0.999V$ ， $V_{in2p-p}=1.998V$ ， $V_{in1}=550mV$ ，满足输出信号峰峰值为输入信号峰峰值的 0.5 倍关系，输入输出信号反相，仿真结果与测量结果吻合，设计满足实现 $V_o=-(V_{i1}+0.5V_{i2})$ 的要求；

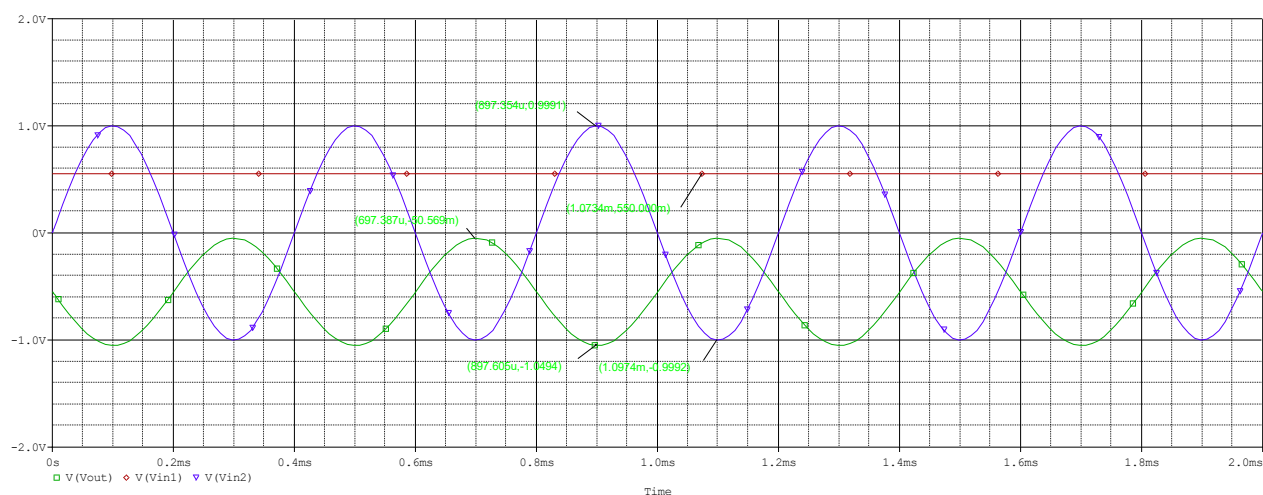


图 9 OrCAD 仿真得到的输入输出波形图

(3) 增益带宽积研究

⑥使用如图 3 所示的反相放大器电路，接入 $R_1=10k\Omega$ ， $R_f=10k\Omega$ ，输入幅度 50mV 的 1kHz 正弦信号，保持输入信号幅值不变，计算此时的电压增益 A_v 。逐渐提高频率，增益逐渐下降，增益下降到 0.707 A_v 时所对应的频率即为增益带宽。改变 R_f 阻值测量多组数据，研究增益带宽积的变化，实验数据记录在表 1；

表 1 测量增益带宽积实验数据

R1		Rf	Av	fH	Av · BW
1	10k Ω	10k Ω	1V/V	506kHz	506kHz
2	10k Ω	100k Ω	10V/V	66kHz	660kHz
3	10k Ω	1M Ω	100V/V	7.2kHz	720kHz

由实验数据可知，在保持其他条件不变的情况下，随着 RF 增大，反向放大器电路的电压增益变高，带宽变窄，增益带宽积 $A_v \cdot BW$ 处在同一个数量级，在一定的误差范围内可视作基本不变。

⑦利用 OrCAD 对反相放大器进行模拟仿真，通过改变 RF 阻值，在不同开环增益 A_v 下测定其带宽 BW，并对增益带宽积 $A_v \cdot BW$ 进行研究，不同增益下的仿真输出如图 10、11、12 所示，仿真数据记录在表 2；

图 10 开环增益为 1V/V 时带宽的测定

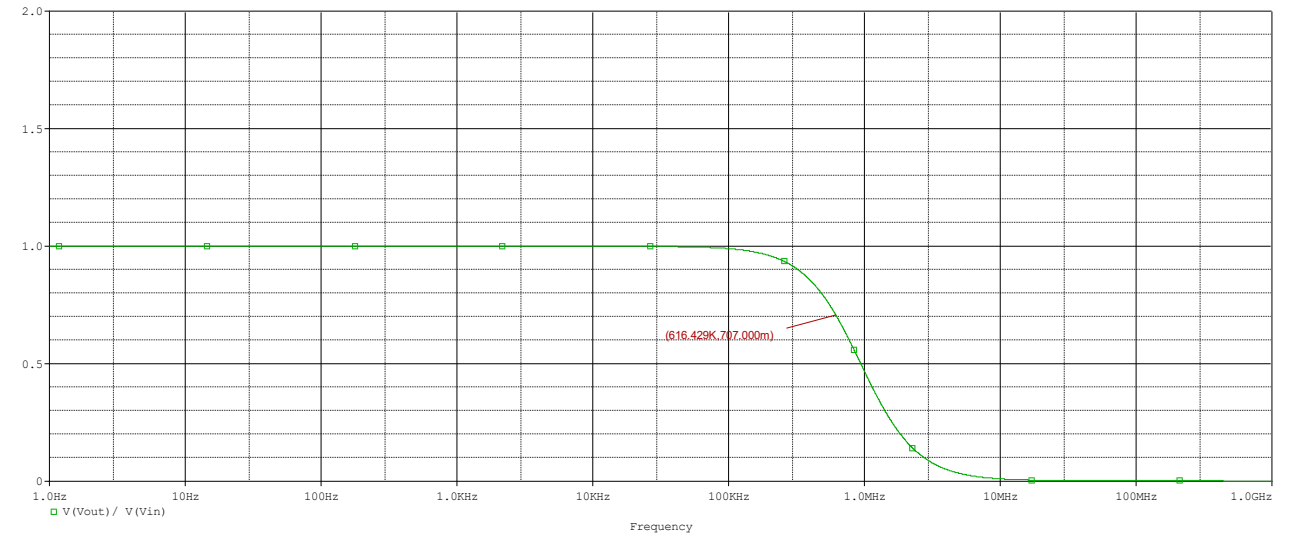


图 11 开环增益为 10V/V 时带宽的测定

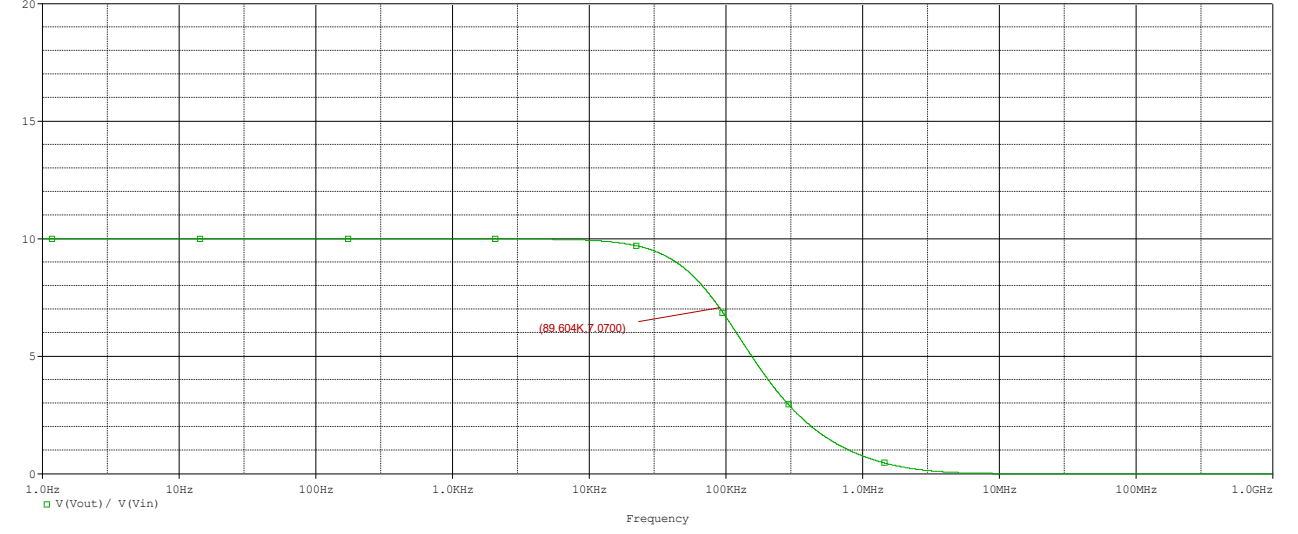


图 12 开环增益为 100V/V 时带宽的测定

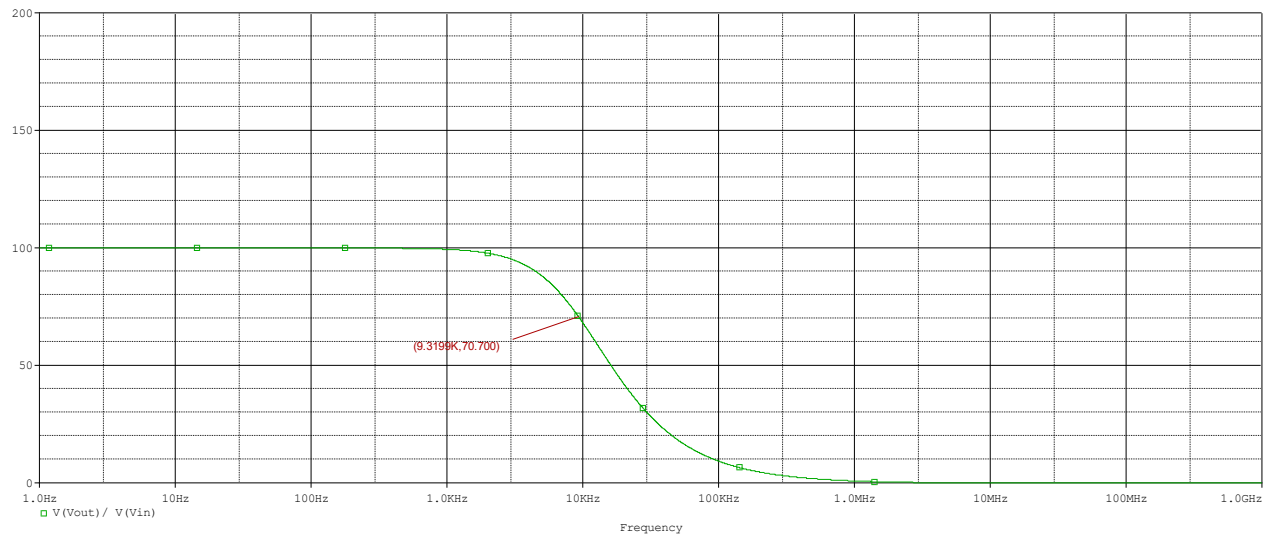


表 2 测量增益带宽积仿真数据

R1		Rf	Av	fH	Av · BW
1	10k Ω	10k Ω	1V/V	616kHz	616kHz
2	10k Ω	100k Ω	10V/V	90kHz	900kHz
3	10k Ω	1M Ω	100V/V	9.3kHz	930kHz

由仿真数据可知，在保持其他条件不变的情况下，随着 R_F 增大，反向放大器电路的电压增益变高，带宽变窄，增益带宽积 $A_v \cdot BW$ 处在同一个数量级，在一定的误差范围内可视作基本不变。

六、结论

本次实验围绕集成运算放大器的基本运算电路展开，重点研究了反相放大器、反向权重加法器的设计与功能验证，并对运算放大器的增益带宽积特性进行了实验与仿真分析。通过理论设计、实际搭建电路测试以及仿真验证，得出以下结论：

- ①成功设计并搭建了闭环电压增益 $|A_v|=15V/V$ 的反相放大器，输入电阻满足 $R_i \geq 15k\Omega$ 。实测结果表明，在直流与交流信号输入下，输出电压与输入电压均呈现反相关系，实测增益分别为 $15.18V/V$ 和 $15.82V/V$ ，与理论值基本一致，验证了反相放大器的基本功能与设计方法的正确性。
- ②利用反向权重加法器实现运算 $V_o=-(V_{i1}+0.5V_{i2})$ 。在 V_{i1} 为直流信号、 V_{i2} 为正弦信号的条件下，实测输出波形与输入信号反相，幅值关系符合设计要求。OrCAD 仿真结果与实测数据吻合良好，进一步验证了电路设计的准确性。
- ③通过改变反馈电阻 R_F 以调节闭环增益，实测与仿真均表明：随着增益提高，电路带宽下降，增益带宽积 $A_v \cdot BW$ 在误差范围内基本保持不变。这一结果符合运算放大器增益带宽积为常数的理论特性。