

# 浙江大学实验报告

专业：微电子科学与工程  
姓名：wcHikaru  
学号：/  
日期：2025 年 12 月 9 日  
地点：东四 216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军、叶险峰、邓婧婧 成绩：  
实验名称：集成运算放大器应用电路研究 I 实验类型：设计型实验 同组学生姓名：/

## 一、实验目的

- 研究由集成运放构成的比例、加法、减法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。
- 研究放大电路增益带宽积与单位增益带宽的关系。
- 了解运算放大器构成的基本运算电路在实际应用时的局限性和应考虑的问题。

## 二、实验任务与要求

### (1) 反相放大器设计研究

设计一反相放大电路，要求：输入阻抗： $R_i \geq 15 \text{ K}\Omega$ ，电压增益： $|A_v| = 15 \text{ V/V}$ 。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) 算术运算电路设计安装

设计并安装一个算术运算电路，要求实现：

$$\text{A、} V_o = -(V_{i1} + 0.5V_{i2})$$

$$\text{B、} V_o = 1.8(V_{i1} - V_{i2}) \quad (\text{选做其中一个})$$

$V_{i1}$ 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

利用给定电路：验证增益越高，带宽越窄，增益带宽积  $A_v \cdot \text{BW} = \text{常数}$ 。

## 三、实验原理

### 1. 理想运算放大器

理想运算放大器有以下主要特点：

- 开环差模电压增益： $A_{vd} = \infty$
- 输入阻抗： $R_i = \infty$
- 输出阻抗： $R_o = 0$
- 共模抑制比： $\text{CMRR} = \infty$
- 频带宽度： $\text{BW} = \infty$

在分析或设计集成运算放大器构成的电路时，通常可以认为运放是“理想的”：

| 参数                  | 理想值      |
|---------------------|----------|
| 输入阻抗 $R_i$          | $\infty$ |
| 输出阻抗 $R_o$          | 0        |
| 开环增益 $A_{v0}$       | $\infty$ |
| 共模抑制比 $\text{CMRR}$ | $\infty$ |
| 带宽 $\text{BW}$      | $\infty$ |

## 2. 理想运放线性应用时的特性：

- 虚短：  $V_+ = V_-$ （两个输入端的电位“无限”接近，像短路一样，但不是真正的短路）
- 虚断：  $I_+ = 0, I_- = 0$ （两个输入端的偏置电流趋于 0，像断路一样，但不是真正的断路）

## 3. 基本运算电路

### 3.1) 反比例放大器

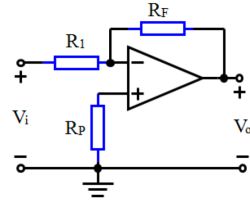


Figure 1: 反比例放大电路

反比例放大器的主要参数：

- 放大倍数：  $A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_F}{R_1}$
- 输入电阻：  $R_i = R_1$
- 输出电阻：  $R_o = 0$
- 平衡电阻：  $R_P = R_1 \parallel R_F$

### 3.2) 反相加法器（反相权重加法器）

反相加法器是反相放大器的扩展应用，可以此类推到多个输入信号。

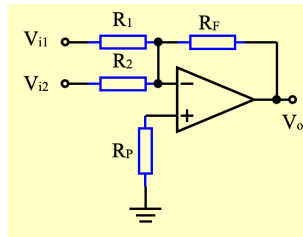


Figure 2: 反相加法器电路

反相加法器的主要参数：

- 输出电压：  $V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}V_{i1} + \frac{R_F}{R_2}V_{i2}\right)$
- 平衡电阻：  $R_P = R_1 \parallel R_2 \parallel R_F$

特殊情况：

若  $R_1 = R_2$ ，则：

$$V_o = -\frac{R_F}{R_1}(V_{i1} + V_{i2})$$

若  $R_1 = R_2 = R_F$ ，则：

$$V_o = -(V_{i1} + V_{i2})$$

### 3.3) 同比例放大器

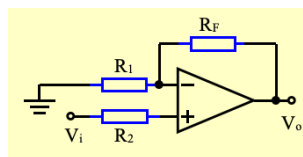


Figure 3: 同比例放大电路

同比例放大器的主要参数：

- 放大倍数：  $A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$
- 输入电阻：  $R_i = \infty$
- 输出电阻：  $R_o = 0$
- 平衡电阻：  $R_2 = R_1 \parallel R_F$

特殊情况：电压跟随器

若  $R_1 = \infty$ ，则：

$$V_o = V_i$$

### 3.4) 减法器（差分放大器）

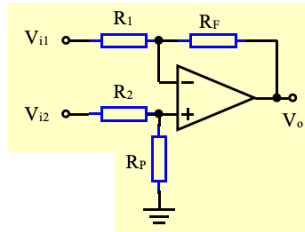


Figure 4: 减法器电路

减法器的主要参数：

- 输出电压：  $V_o = \frac{R_3 + R_1}{R_1} \cdot \frac{R_F}{R_3 + R_F} V_{i2} - \frac{R_F}{R_1} V_{i1}$

特殊情况：

若  $R_1 = R_3$ ， $R_F = R_2$ ，则：

$$V_o = \frac{R_F}{R_1} (V_{i2} - V_{i1})$$

若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$ ，则：

$$V_o = V_{i2} - V_{i1}$$

### 4. 增益带宽积

运算放大器的增益带宽积（GBW）是一个重要的性能参数，定义为：

$$GBW = A_v \times BW = \text{常数}$$

其中：

- $A_v$  为电压增益
- BW 为带宽（通常指 -3dB 带宽）

这意味着：增益越高，带宽越窄；增益越低，带宽越宽。

单位增益带宽  $f_T$  是指增益为 1 (0dB) 时的频率，对于大多数运放来说：

$$f_T \approx GBW$$

## 四、实验仪器与设备

- 万用表、示波器、信号发生器、直流电源、杜邦线
- 实验电路平台

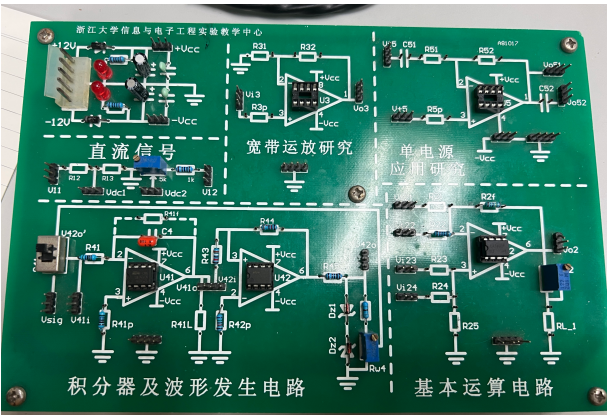


Figure 5: 实验电路平台

五、实验步骤与记录

1. 反相放大器设计研究

设计一反相放大电路，要求：输入阻抗： $R_i \geq 15\text{ K}\Omega$ ，电压增益： $|A_v| = 15\text{ V/V}$ 。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。

1.1) 设计计算

由反向放大， $A_v = -\frac{R_f}{R_1}$ ，要使  $|A_v| = 15\text{ V/V}$ ，取  $R_1 = 18\text{ k}\Omega \Rightarrow R_f = 270\text{ k}\Omega$

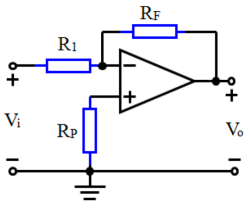


Figure 6: 反相比例放大电路

1.2) 电路测试

根据理论计算结果，搭建反相电路。在  $u_i$  处连接分别接入直流输入电压、交流输入电压，测得的输入输出波形如图 7、图 8 所示：

1.2.1) 直流耦合测试

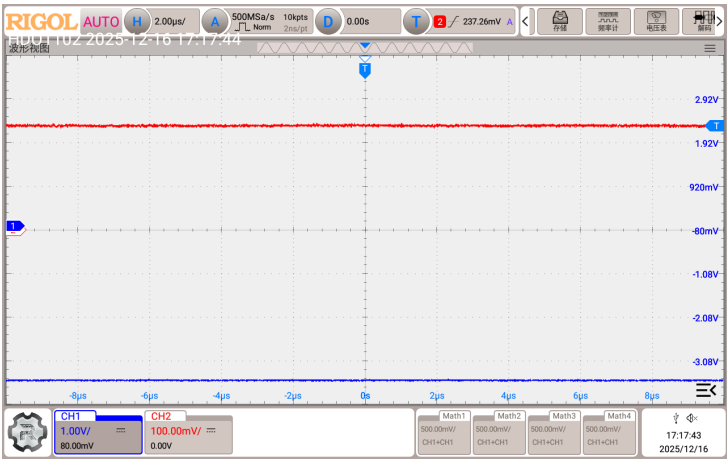


Figure 7: 反相比例放大电路

记录的结果如下：

| $u_i$ | $u_o$  | $A_v(\text{理论})$ | $A_v(\text{实际})$ |
|-------|--------|------------------|------------------|
| 235mV | -3.48V | -15              | -14.81           |

Table 1: 直流增益测量

1.2.2) 交流耦合测试

接入交流信号，频率设为 2.5kHz，幅度设为 400mVpp，测得的输入输出波形如图 8 所示：

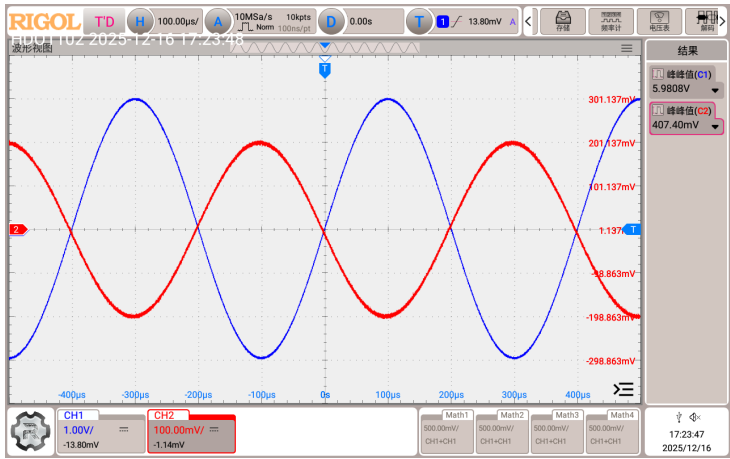


Figure 8: 反相比例放大电路交流耦合测试

记录的结果如下：

| $u_{ipp}$ | $u_{opp}$ | $A_v(\text{理论})$ | $A_v(\text{实际})$ |
|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 408mV     | 5.99V     | -15              | -14.68           |

Table 2: 交流增益测量

2. 设计算术运算电路

设计并安装一个算术运算电路，实现：

$$V_o = 1.8(V_{i1} - V_{i2})$$

$V_{i1}$ 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。

2.1) 设计计算

由  $V_o = 1.8(V_{i1} - V_{i2})$  选取  $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ， $R_F = 18\text{ k}\Omega$

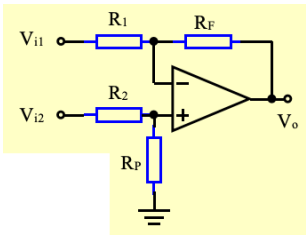


Figure 9: 算术运算电路

2.2) Orcad 仿真

绘制电路图如下

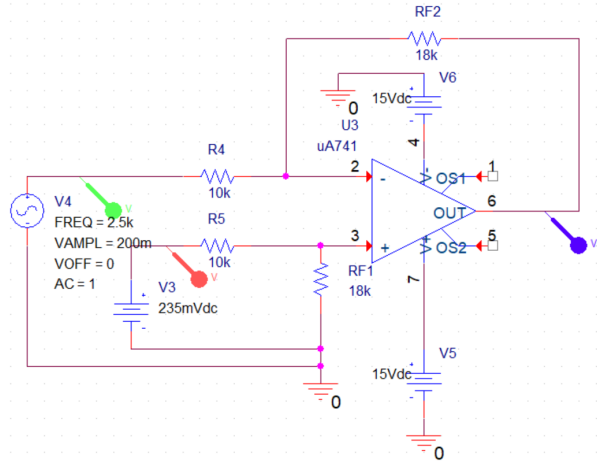


Figure 10: Orcad 仿真电路图

瞬态分析参数设置如下，时长为两个周期

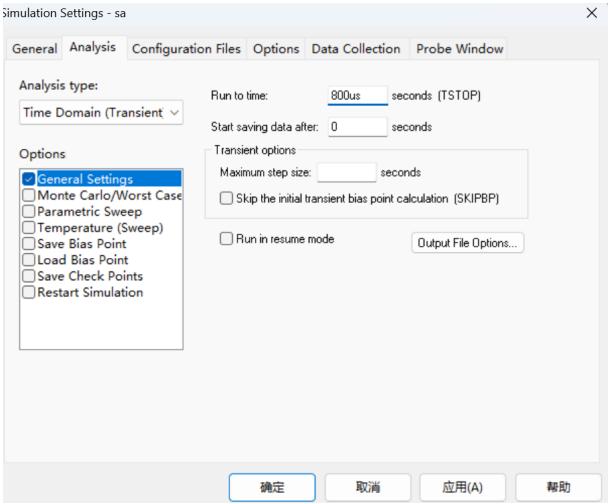


Figure 11: Orcad 瞬态分析参数设置

仿真结果如下

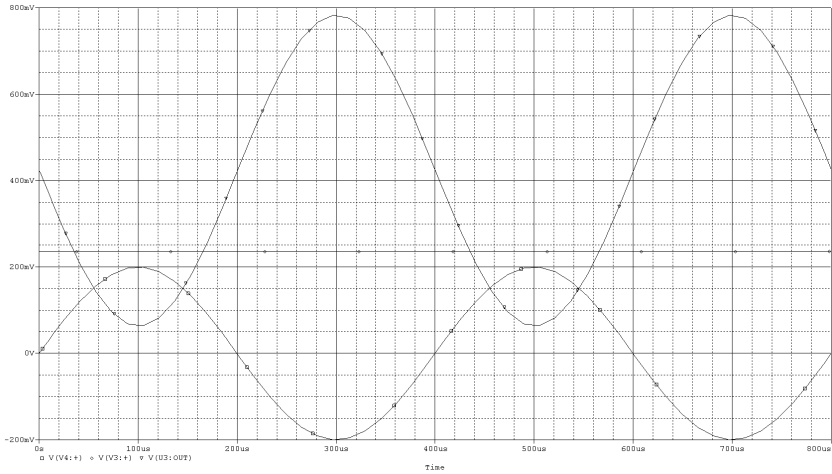


Figure 12: Orcad 仿真结果

观察仿真波形，可知近似有 $V_o = 1.8(V_{i1} - V_{i2})$  成立。

2.3) 电路测试

根据理论计算结果，搭建算术运算电路。在  $V_{i1}$  处连接直流输入信号， $V_{i2}$  处连接交流输入信号，测得的输入输出波形如下图所示：

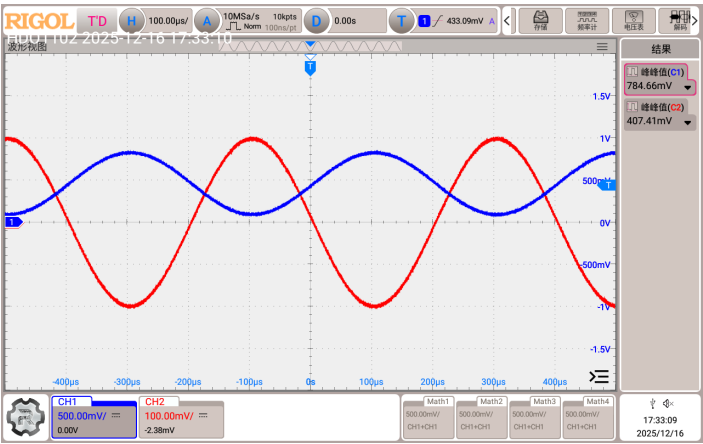


Figure 13: 算术运算电路测试波形（直流耦合）

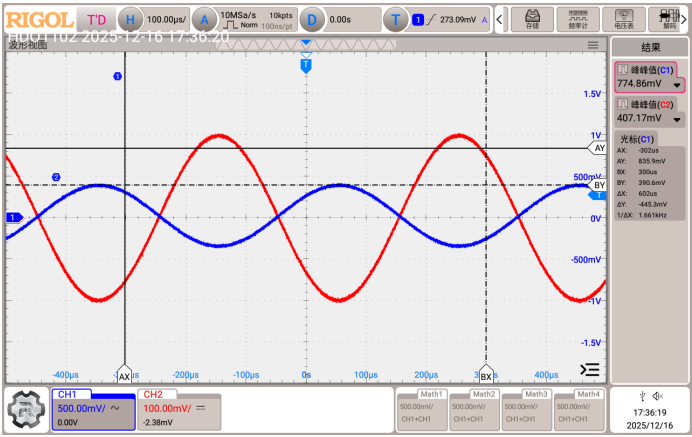


Figure 14: 算术运算电路测试波形（交流耦合）

观察到输出波形的交流分量与输入交流信号呈反相及放大关系，符合预期。将输出波形分别调整为直流耦合与交流耦合，其差值作为直流分量。记录的结果如下：

| $V_{i1}$ | $V_{O1}$ (直流分量) | $V_{i2pp}$ | $V_{O2pp}$ (交流分量) | $V_O$ (理论最大值) | $V_O$ (实际测量最大值) |
|----------|-----------------|------------|-------------------|---------------|-----------------|
| 235mV    | 445.3mV         | 409mV      | 770mV             | 791.1mV       | 837.63mV        |

Table 3: 算术运算电路测量结果

3. 增益带宽积研究

3.1) 实验电路

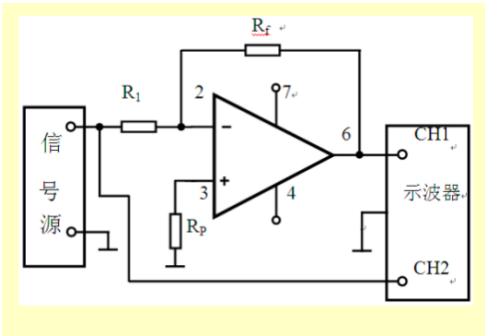


Figure 15: 增益带宽积研究电路

### 3.2) Orcad 仿真

绘制电路图如下

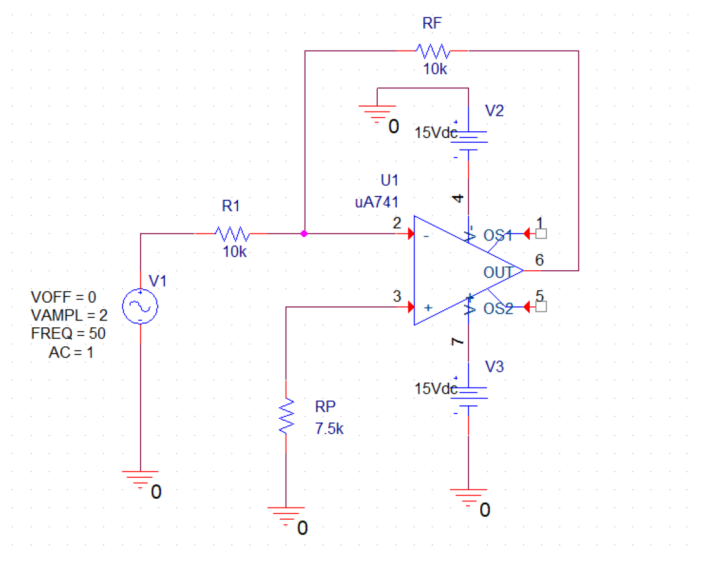


Figure 16: Orcad 仿真电路图

设置交流分析参数如下

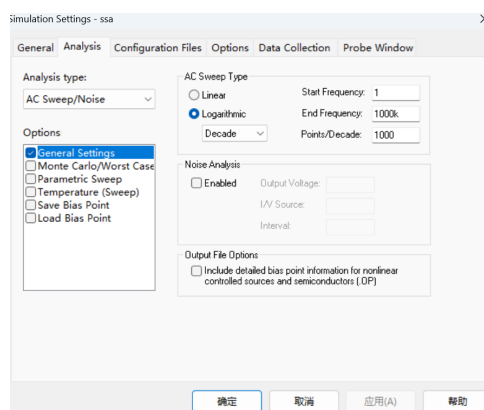


Figure 17: Orcad 瞬态分析参数设置

- 设置  $R = 10k$  ,仿真结果如下

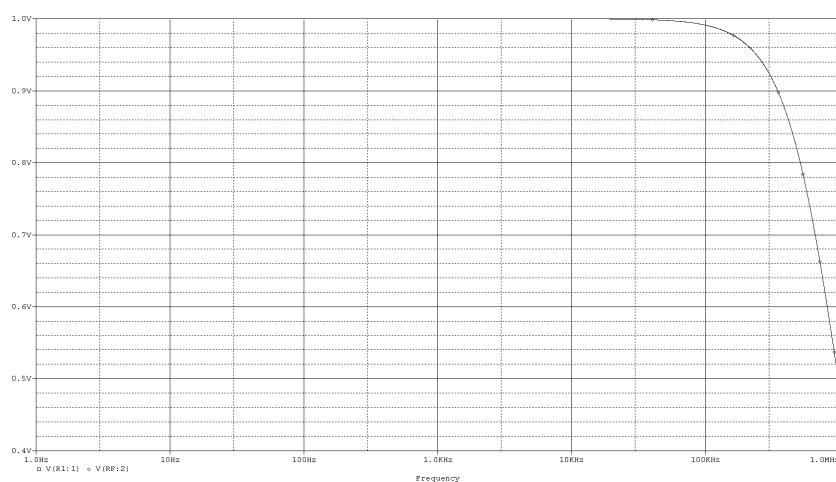


Figure 18: Orcad 仿真结果

测得的理想放大倍数  $A_v = 1$  , 用光标测得  $f_H = 754.603 \text{ kHz}$

- 设置  $R = 100k$  ,仿真结果如下

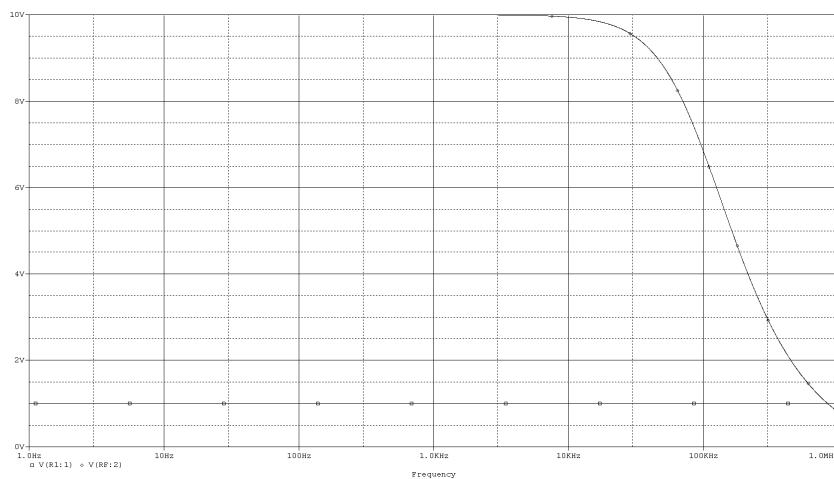


Figure 19: Orcad 仿真结果

测得的理想放大倍数  $A_v = 10$  ,用光标测得  $f_H = 72.32$  kHz

- 设置  $R = 1M$  ,仿真结果如下

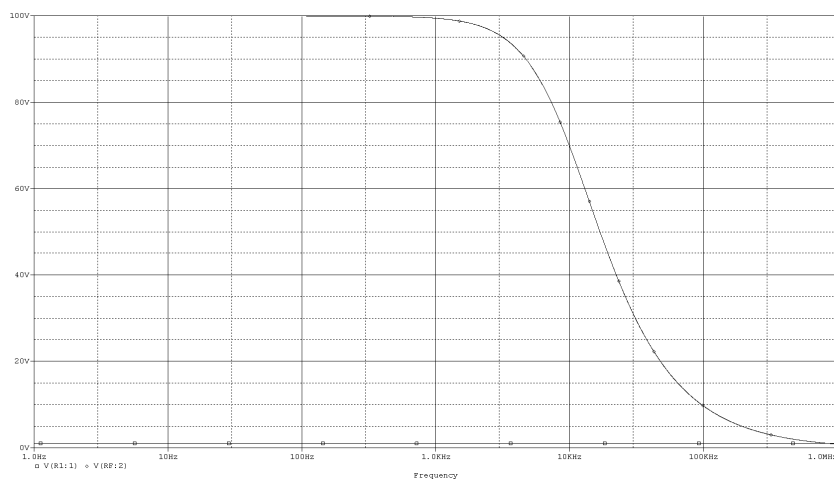


Figure 20: Orcad 仿真结果

测得的理想放大倍数  $A_v = 100$  ,用光标测得  $f_H = 7.14$  kHz

### 3.3) 电路测试

根据给定电路，分别测量不同增益下的带宽，验证增益带宽积为常数。

| $R_1$        | $R_f$         | $A_v$ | $f_H$   | $A_v \cdot BW$ ( kHz ) |
|--------------|---------------|-------|---------|------------------------|
| 10k $\Omega$ | 10k $\Omega$  | 1     | 468kHz  | 468                    |
| 10k $\Omega$ | 100k $\Omega$ | 10    | 72kHz   | 720                    |
| 10k $\Omega$ | 1M $\Omega$   | 100   | 7.11kHz | 711                    |

Table 4: 增益带宽积测量结果

观察表 4 数据发现，当设定增益  $|A_v| = 10$  和  $|A_v| = 100$  时，计算所得的增益带宽积 ( $A_v \times BW$ ) 分别为 720kHz 和 711kHz，两者非常接近且较为恒定。然而，当  $|A_v| = 1$  时，计算值为 468kHz，显著低于后两组。造成这一现象的主要原因如下：

#### 1. 噪声增益与信号增益的区别

理论上，运放的增益带宽积常数关系是基于 噪声增益 成立的，即  $GBW = A_{\text{noise}} \times BW$ 。

- 对于反比例放大器，噪声增益  $A_{\text{noise}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ，而信号增益模值  $|A_v| = \frac{R_f}{R_1}$ 。
- 当  $|A_v| = 100$  时：  $A_{\text{noise}} = 101$ ，与信号增益 100 仅相差约 1%，因此  $A_v \times BW \approx GBW$  成立。

- 当  $|A_v| = 1$  时：  $A_{\text{noise}} = 1 + 1 = 2$ ，而信号增益为 1。此时噪声增益是信号增益的 2 倍。如果我们直接用信号增益乘以带宽，得到的结果仅为理论常数的一半左右。这解释了为何第一组数据的计算值 (468kHz) 远小于后两组。

## 2. 大信号压摆率限制

在单位增益 ( $A_v = 1$ ) 测试中，带宽较宽 (达到 468kHz)。如果在高频下输入信号幅度较大，运放可能会受到压摆率 (SR) 的限制，导致输出波形失真，使得测得的 -3dB 截止频率低于理想的小信号带宽，从而进一步引入误差。

## 3. 示波器读数误差

在宽频带测试中，幅频特性曲线下降较为平缓，精确定位 -3dB 点 (幅度下降至 0.707 倍) 存在视觉读数误差。

# 六、 心得体会

本次实验主要围绕集成运算放大器的线性应用展开，通过设计、安装与调试反相比例放大器、算术运算电路以及研究增益带宽积，我对模拟电路的理论知识有了更深刻的实际感悟。

首先，在反相放大器与算术运算电路的设计中，我深刻体会到了“虚短”与“虚断”是分析运放电路的核心工具。通过 Orcad 仿真与实际电路测试的对比，我验证了在负反馈深度足够的情况下，实际电路的增益与由电阻比值决定的理论增益高度吻合。特别是在算术运算电路的设计中，我学会了如何利用叠加定理将复杂的数学运算转化为电路拓扑，并意识到平衡电阻  $R_p$  对消除偏置电流引起的误差至关重要。

其次，实验过程中遇到的增益带宽积 (GBW) 研究让我印象最深。在验证  $GBW = A_v \times BW$  为常数的过程中，我发现低增益下的实验数据与理论预期存在偏差。通过查阅资料和分析，我理解了这并非理论失效，而是我们在简化计算时混淆了“信号增益”与“噪声增益”的概念。这一发现让我明白，工程实践往往需要比课本理论考虑更多的非理想因素，如压摆率限制和开环增益的有限性。

此外，在调试过程中我也积累了宝贵的经验。例如在处理交流小信号时，示波器的耦合方式选择 (AC/DC) 以及触发电平的调节对波形观测至关重要。我也意识到了电路布局和接地处理对减少噪声干扰的重要性。

总的来说，这次实验不仅锻炼了我的电路设计与调试能力，更培养了我严谨的数据分析习惯。从仿真到实测，再到误差分析，这一完整的闭环过程让我对集成运放的性能边界有了更直观的认识，为后续更复杂的模电设计打下了坚实基础。