

## 实验一 模拟运算电路（仿真）

独立完成，如发现雷同则重做或无成绩！图纸要求见实验内容，可将多张图片和波形拼接在一页 A4 纸打印，黑白打印，打印的图片或波形，细节必须能看清楚。下文中的图片或波形仅供参考，非标准答案！请自行绘制原理图和波形图，并在图中显示本人班级\_姓名（如“信 123\_张三”，短横可省去）！实验报告中图和表的标号顺序根据实际情况按序规范标记。

### 一、实验目的

1. 理解运算放大器的“虚短”、“虚断”的概念。熟悉运算放大器在模拟运算方面的应用。
2. 掌握反相比例运算电路、反相加法电路和减法电路的设计方法。
3. 学会利用 OrCAD 软件测量上述各运算电路的输出电压的数值与波形。

### 二、实验原理

#### 1. 集成运算放大器

集成运算放大器（简称集成运放或运放），是一种直流耦合、差模输入、通常为单端输出的高增益电压放大器，具有电压增益高、输入电阻大、输出电阻小、功耗低、工作可靠、使用方便等显著特点。在集成运放的输出端与输入端之间接入不同的反馈网络，便可以实现各种不同的电路功能。

#### 2. “虚短”和“虚断”

很多工程实际中，将集成运放看做理想器件，即认为运放的输入电阻、增益均为无穷大，输出电阻近似为零。

由于理想运放的输入电阻为无穷大，故其工作时两个输入端的电流都近似为零，即有  $i_p \approx 0$  和  $i_n \approx 0$ ，因此，运放同相输入端和反相输入端均可看成虚假的断路，简称“虚断”。

当理想运放工作在线性区时，由于电压增益为无穷大，要保证其输出电压为有限值，则  $v_p - v_n \approx 0$ ，即  $v_p \approx v_n$ ，说明此时两个输入端的电位近似相等，看做虚假的短路，简称“虚短”。

分析理想化集成运放时，注意抓住两虚的概念，可以使得分析问题的过程变得十分简便。

#### 3. 反相比例运算电路

反相比例运算电路如图1.1所示，信号  $v_i$  由反相端输入，输出电压  $v_o$  与  $v_i$  相位相反。输出电压经  $R_f$  反馈到反相端，构成负反馈电路。 $R_1$  为闭环输入电阻，应选择  $R_1 = -\frac{R_f}{A_{vf}}$ ， $R_2$  为输入平衡电阻，选

择参数时应使  $R_2 = R_1 // R_f$ 。

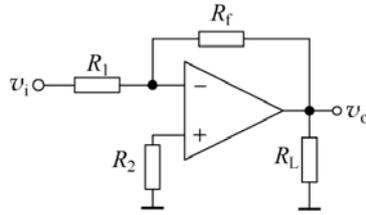


图1.1 反比例运算电路

由两虚的概念可知，该电路的闭环电压增益为：

$$\dot{A}_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

当  $R_f = R_1$  时，该电路的输出电压等于输入电压的负值，称为反相器。

由集成运放的电压传输特性可知，运放的输出电压值不会超过正负电源电压，即  $-V_{om} \leq v_o \leq +V_{om}$ 。为了确保该运算电路的结果正确有效，其输出电压值不能进入饱和区，所以输入电压的取值范围是：

$$\frac{-V_{om}}{|A_{vf}|} \leq v_i \leq \frac{+V_{om}}{|A_{vf}|}$$

#### 4. 同相比例运算电路

同相比例运算电路如图1.2所示，输入电压  $v_i$  通过平衡电阻  $R_p$  加在运放的同相输入端。运放的反向输入端通过电阻  $R_1$  接地，反馈电阻  $R_f$  跨接在反相输入端与输出端之间。

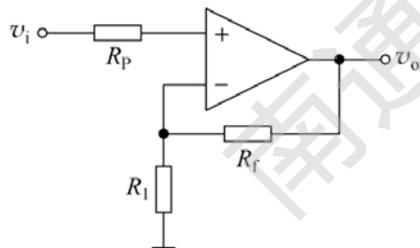


图 1.2 同相比例运算电路

在理想条件下，该电路的闭环电压增益为：

$$\dot{A}_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

电路中的平衡电阻  $R_p$  的选取与之前的反比例运算电路类似，应选为  $R_p = R_1 // R_f$ 。

#### 5. 反相加法电路

反相加法电路如图1.3所示，它是在反比例运算电路的基础上增加了一个输入支路构成的

反相加法运算电路。理想条件下，由于运放的反相端“虚地”，两路输入电压彼此隔离，各自独立地经过输入电阻转换为电流，进行代数和运算。其总输出电压为：

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_{i1} + \frac{R_f}{R_2}v_{i2}\right)$$

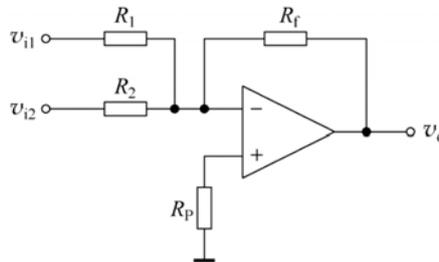


图 1.3 反相加法电路

图中的 $R_p$ 为平衡电阻，取值为 $R_p = R_1 // R_2 // R_f$ 。

当 $R_1 = R_2 = R_f$ 时， $v_o = -(v_{i1} + v_{i2})$ 。

### 6. 减法电路

减法电路如图1.4所示，从电路结构上看，它是反相输入和同相输入相结合的放大电路。利用两虚的概念分析可得，该电路的输出电压为：

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

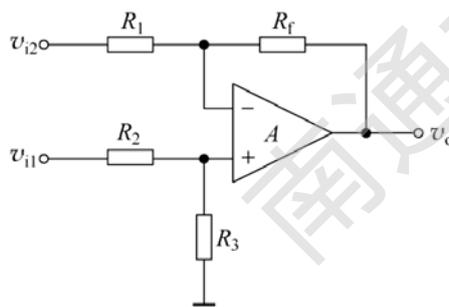


图 1.4 减法电路

当 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ 时，则输出电压为：

$$v_o = \frac{R_f}{R_1}(v_{i1} - v_{i2})$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时， $v_o = v_{i1} - v_{i2}$ ，实现了减法运算。

### 三、实验内容

## 1. 设计反相比例运算电路

设计一个反相比例运算电路，使其满足  $\dot{A}_{vf} = -10$ 。要求至少验证三组输入情况下的输出电压。

实验操作如下：

(1) 启动 Orcad 软件，建立新的工程文件

电脑的开始菜单→程序菜单→Cadence→Orcad Capture CIS Lite，即可进入 Orcad Capture 应用程序界面。

在开始界面点选“New Project”，或者在菜单栏点选“File→New→Project”新建一个工程文件，会出现对话框如图 1.5：



图 1.5 New Project 会话框

其中name和Location必须是全英文或数字，不能出现汉字！新建工程类型必须选第一个“Analog or Mixed A/D”！之后点OK，会出现如图1.6的会话窗口：

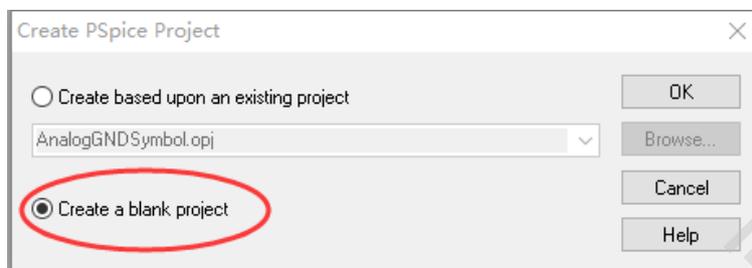


图 1.6 新建 Pspice 工程窗口

点选“Create a blank project”，再点OK，出现Orcad Capture项目工作空间，如图1.7：

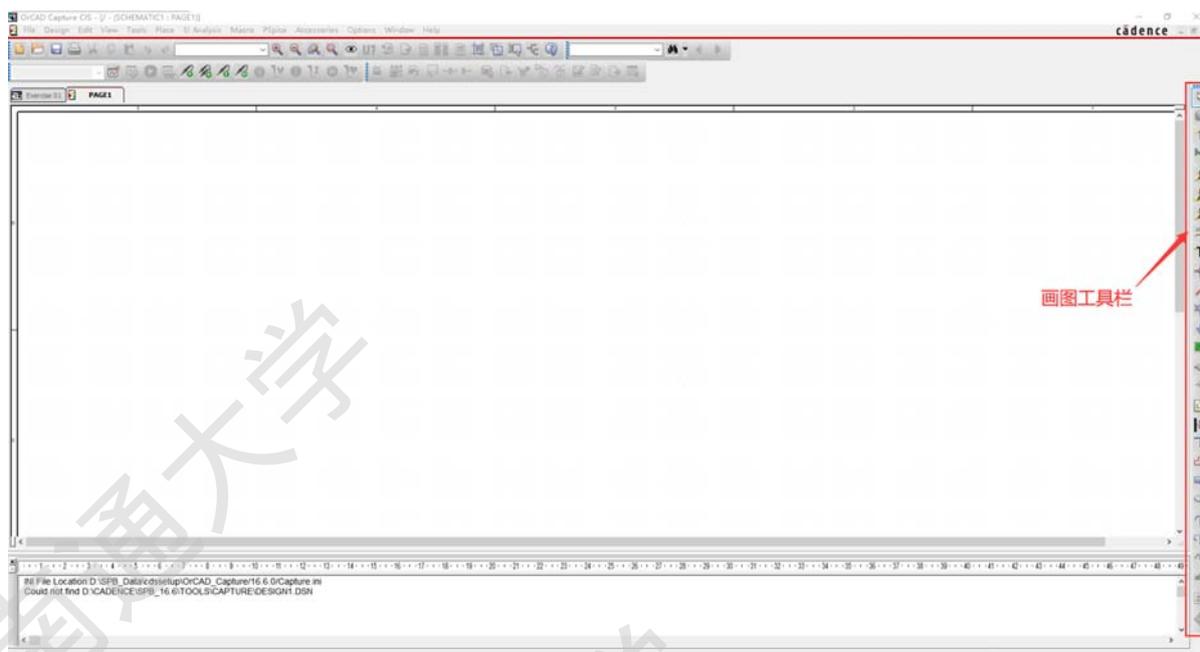


图 1.7 OrCAD Capture 项目界面

## (2) 绘制电路原理图

点选项目界面最右边的画图工具栏中的“Place Part”快捷按钮 ，如图 1.8。画图工具栏的左侧会弹出 Place Part 窗口。



图 1.8 Place Part 按钮所在位置

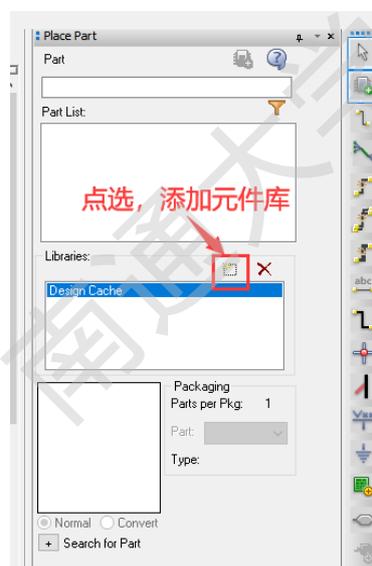


图 1.9 添加元件库按钮所在位置

首次绘图需要手动添加元件库，点击“Add Library”按钮 ，如图 1.9。选择 Pspice 文件夹中的所有.olb 文件，如图 1.10，再点“打开”，导入库文件。

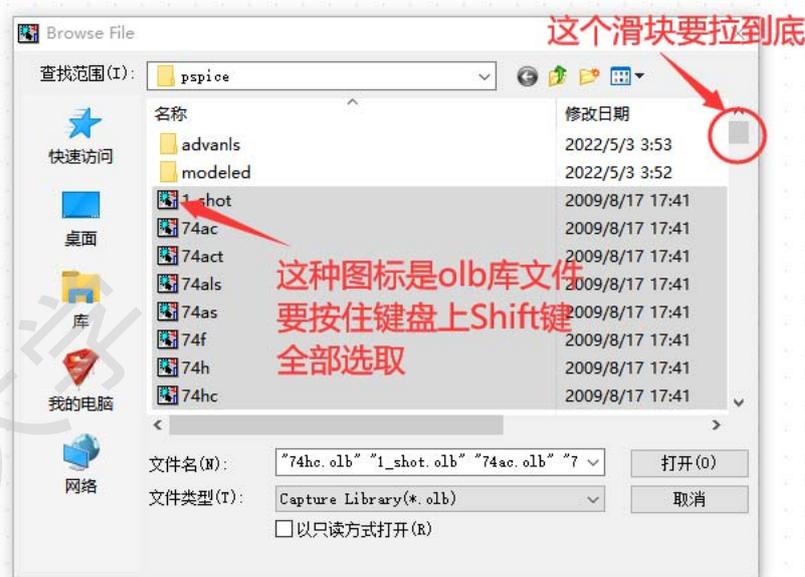


图 1.10 pspice 文件夹中的库文件

库文件导入后，Libraries窗口中会出现被导入的元件库名，默认是蓝色，表示这些元件库全部被选中。一般情况下不要手动修改被选元件库的范围，让它们被默认全选。

接下来在Part窗口中键入所需要的元件名，例如本实验所要使用的uA741运放，如图1.11。

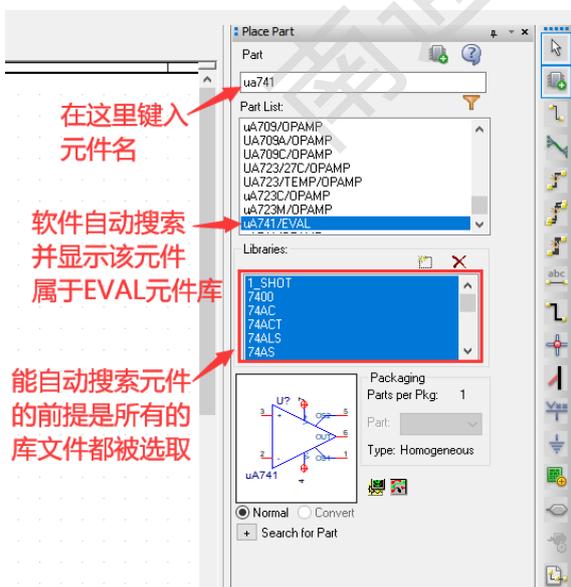


图 1.11 搜索需要的元件

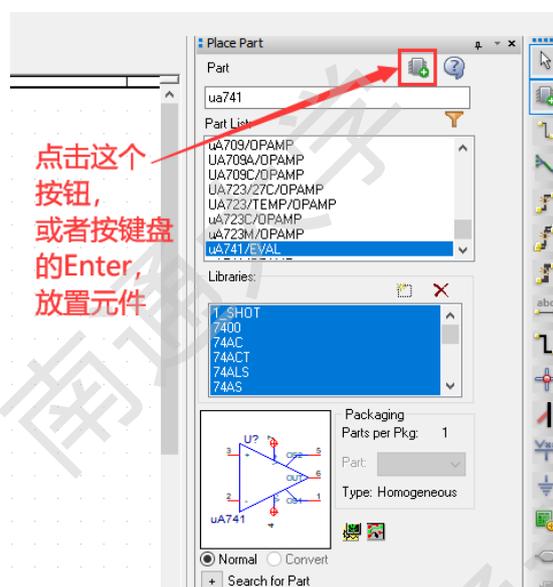


图 1.12 放置所需的元件

找到所需元件后，点击搜索框上方的“Place Part”按钮或者直接单击键盘的“Enter”键，如图1.12。鼠标光标即刻黏连一个该元件，点一次左键放置一个；按键盘的ESC键退出放置。

本实验除了 uA741 以外，还需要使用电阻 R、直流电源 VDC（注意是 VDC，不是 VCD!）、正弦信号源 VSIN 和参考点。其中 R、VDC 和 VSIN 的搜索与放置方法均跟 uA741 相同，参考点的放

置则使用画图工具栏中的“Place ground”按钮，之后在对话框中选“0/CAPSYM”，再点OK。

接下来对照图1.1绘制反相比例运算电路的仿真原理图，需要注意的是，默认放置的uA741是同相端在上，反相端在下，如图1.13。而图1.1给出的电路中是运放的反相端在上，同相端在下。所以，需要使用将元件作一下垂直翻转。鼠标左键选中该元件，再单击鼠标右键，在右键菜单中点选“Mirror Vertically”做一次垂直翻转，如图1.14。

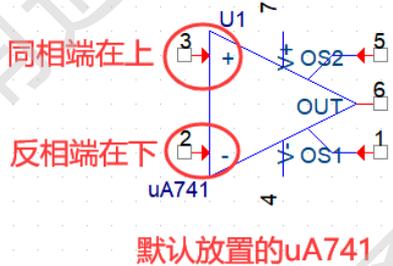


图 1.13 默认放置的 uA741

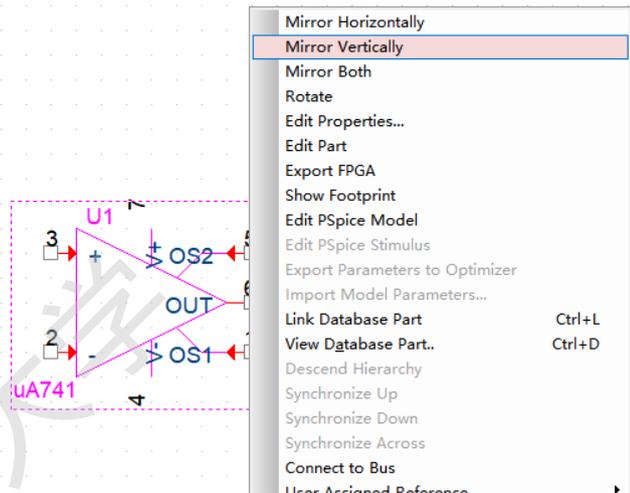


图 1.14 元件的右键菜单

绘制原理图时，有些元件需要做水平翻转或者单纯的旋转90度，同样可以使用右键菜单中的命令：Mirror Horizontally水平翻转，Mirror Both同时做垂直和水平翻转，Rotate逆时针旋转90度。元件放置好后，可以按照教材原理图或者各人习惯修改元件名，如图1.15。

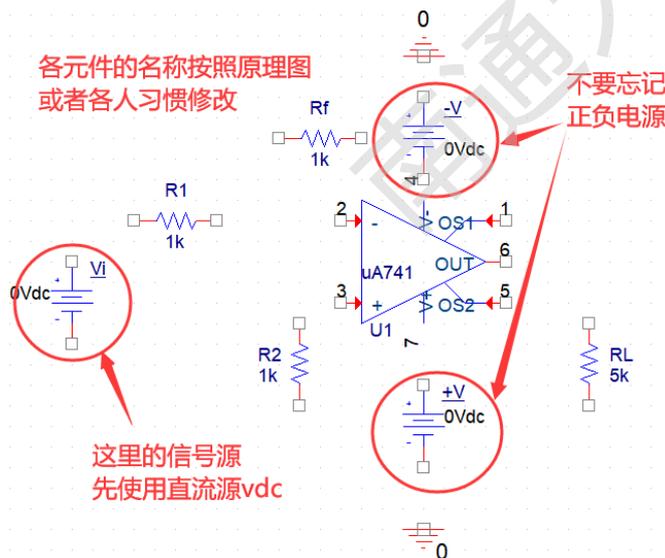


图 1.15 初步放置所需元件

点选画图工具栏中的按钮进入连线模式，绘制连接线。如图 1.16。

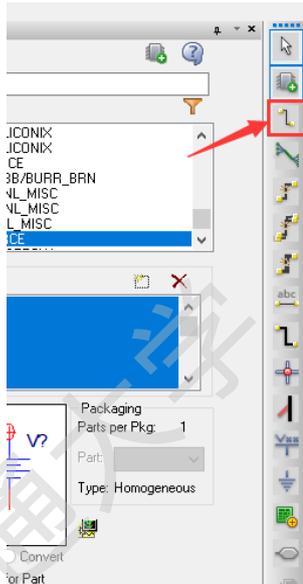


图 1.16 连线符号所在位置

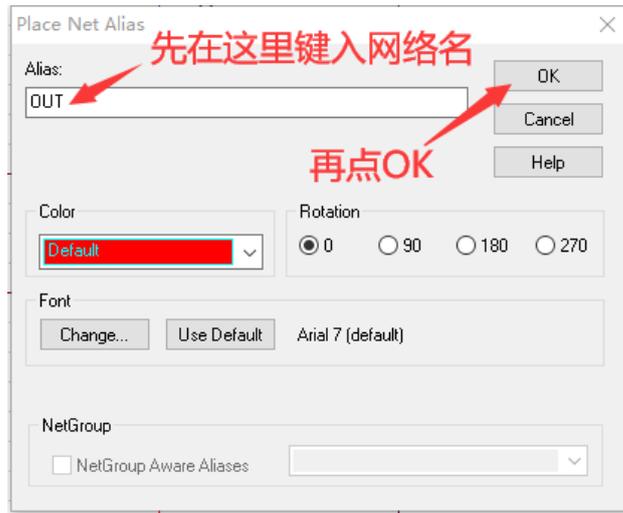


图 1.17 网络名称编辑窗口

将各元件按照反相比例运算电路的结构连好，并修改参数。

本实验要求设计一个  $\dot{A}_{vf} = -10$  的反相比例运算电路。故可以选取  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_f = 100\text{k}\Omega$ ，平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_f \approx 9.1\text{k}\Omega$ 。负载  $R_L = 5\text{k}\Omega$ ，正负电源选用典型值为  $\pm 15\text{V}$ 。信号源  $v_i$  的数值先设为  $0.5\text{V}$ 。完成连线和元件参数设置后，可以按需要在电路适当的位置添加网络名称，点选画图工具栏的  按钮，会弹出对话框，如图 1.17。之后网络名会黏连在鼠标箭头上，把它移动到合适的位置再点左键放置。（网络名称只能放置在连接线上，不能放置在元件上或者图纸空白处。）

最终的仿真电路图如图 1.18。

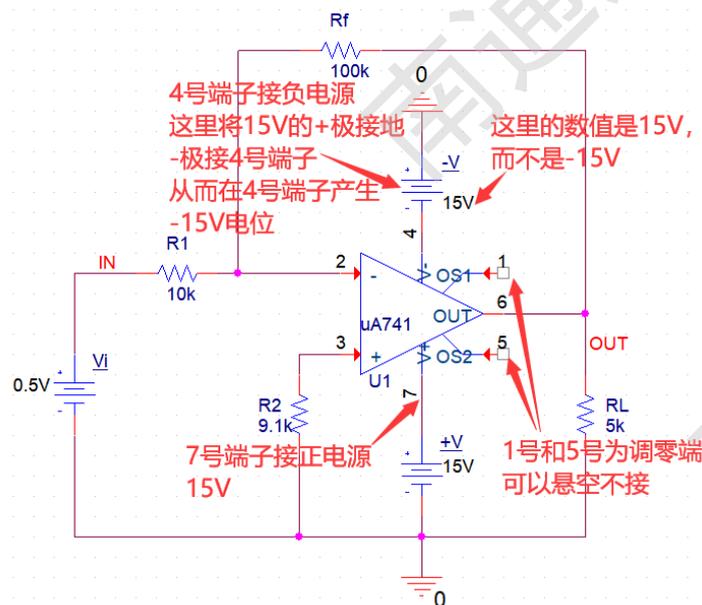


图 1.18 反相比例电路仿真原理图

### (3) 设置仿真参数

点击 Pspice 工具栏中的 ，如图 1.19，建立一个新的仿真配置文件，如图 1.20。之后会自动弹出新的配置文件设置窗口，如图 1.21，本实验先使用默认设置，直接点“确定”。

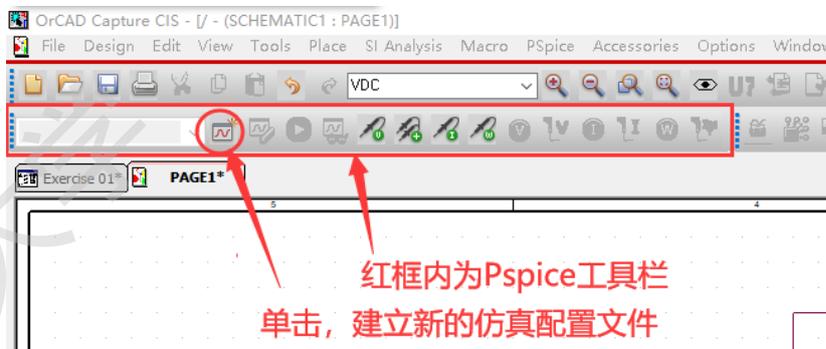


图 1.19 Pspice 工具栏

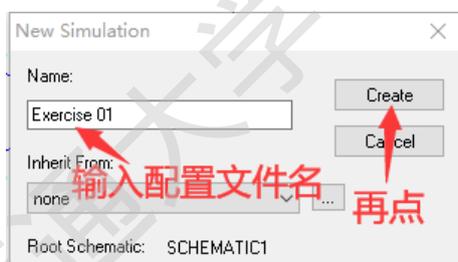


图 1.20 新建仿真配置文件窗口

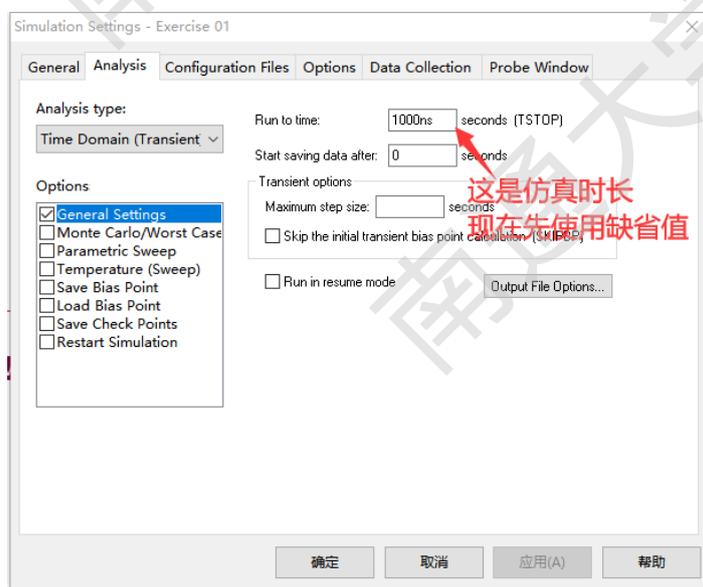


图 1.21 仿真配置文件设置窗口

设置完配置文件后，Pspice 工具栏中的按钮会由之前的灰色变为绿色，表示可以仿真了。

### (4) 运行仿真

点 ，运行仿真。仿真结束后，会自动弹出一个新的窗口，如图 1.22。

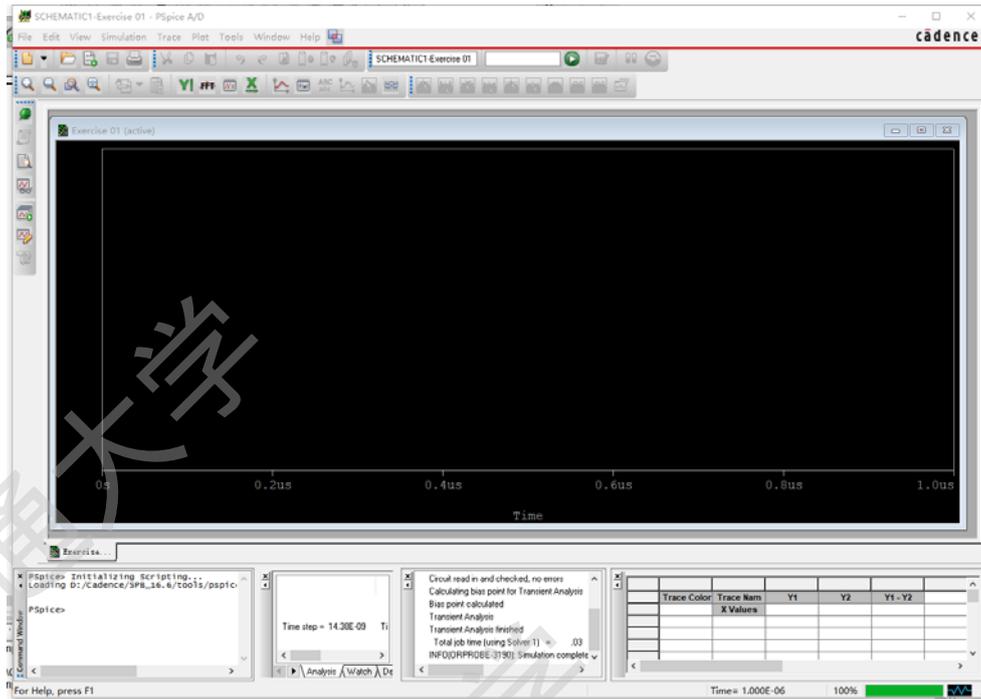


图 1.22 Pspice A/D 窗口界面

如果需要观察波形，则需要在此窗口操作，现在的信号源是 0.5V 直流源，无需观察波形，故直接将该窗口关闭，回到原理图界面。

点击 Pspice 工具栏中的  按钮，即可显示直流的电压数值。如图 1.23，输入电压为 500mV，输出电压为 -5V， $-5V \div 500mV = -10$ ，满足设计要求。

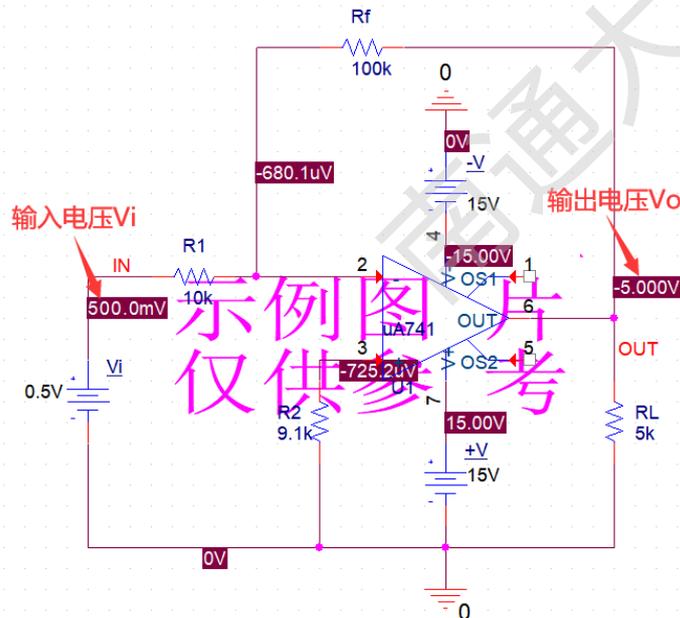


图 1.23 显示了直流电压值的反相比例原理图

根据表 1.1 修改信号源  $V_i$  的数值，重复运行仿真，观察输出电压的数值，记录并填入表 1.1。同

时需要填入表 1.1 的还有电压增益的计算值和理论值。

表 1.1 反比例运算电路的直流信号验证

$V_i$ (V)	0.5V	0.2V	-0.2V	-0.5V
$V_o$ (V)				
$A_{vf}$ (计算值)				
$A_{vf}$ (理论值)				

直流信号验证结束后，还要对本电路进行交流验证。需要将直流信号源改为交流信号源VSIN，其中参数VOFF为直流分量，设为0；VAMPL为正弦信号的幅值（最大值），先设为0.5V；FREQ为正弦信号的频率，设为1kHz；AC可以不设置。修改完的电路如图1.24。

要观察正弦信号的波形，就要进行时域分析（瞬态分析）。点击 Pspice 工具栏中的  按钮，编辑已有的仿真配置文件，将仿真时长改为电路中正弦信号源周期的 3~5 倍，如图 1.25。其中 Maximum step size 可以限定最大仿真的步长，也就是每间隔多长时间绘制一个点，最终的曲线是由若干个点连接而成，所以步长越大，点数越少，曲线越接近折线，步长越小，点数越多，曲线就越精确，但仿真的耗时会更长，也更占用电脑资源。这里选取正弦信号周期的 1/100 作为最大步长。

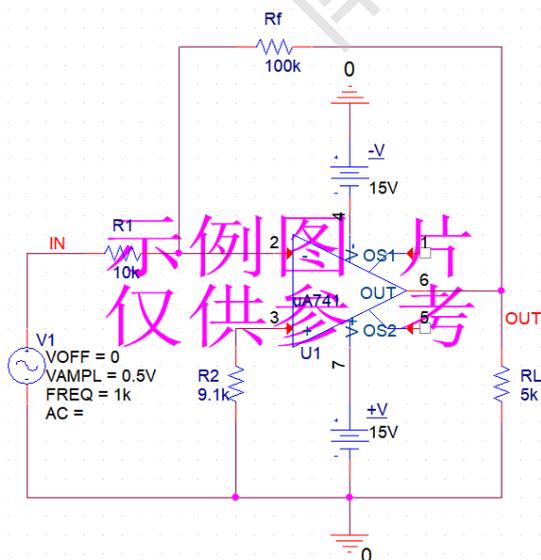


图 1.24 反比例电路交流验证原理图

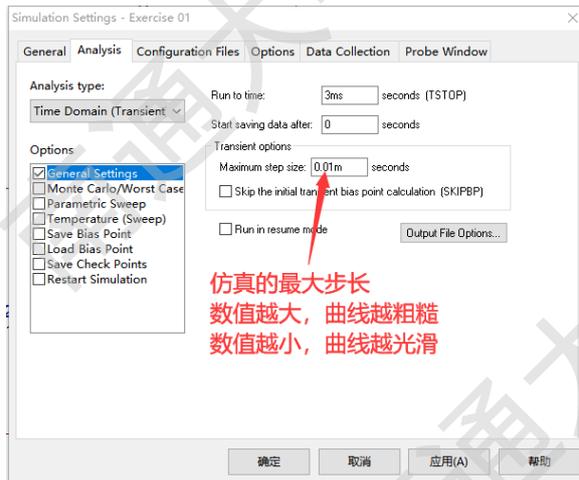


图 1.25 时域分析参数设置

再次点击  按钮，运行仿真，如图 1.22 的 Pspice A/D 窗口会再次打开。现在，需要在这里观察输入、输出波形。点击 probe 工具栏（如图 1.26）中的 Add Trace  添加需要观察的波形曲线。

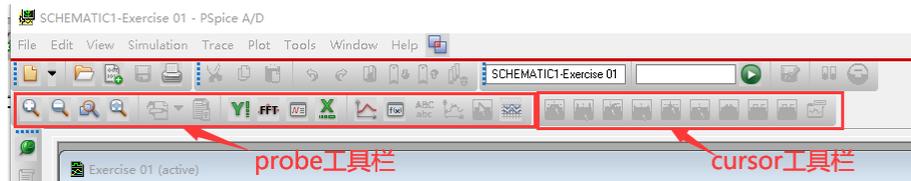


图 1.26 Pspice A/D 界面中的工具栏

对于本实验，我们需要观察图1.24中网络名为“IN”和“OUT”的两处电压，所以在Add Traces对话框中点选V(IN)和V(OUT)，如图1.27，然后点OK，便可在同一个坐标系中观察IN和OUT两处的电压波形，如图1.28。（图1.28的窗口背景色已由默认的黑色改为白色，修改方式：菜单栏Tools→Options→Color Settings标签中Background下拉菜单选取所需的背景色）

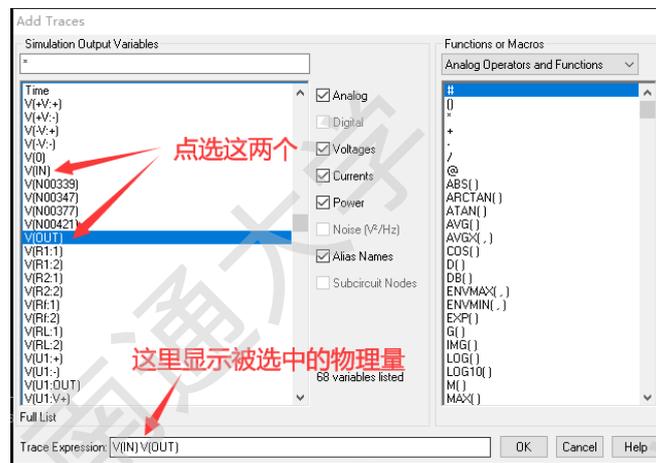


图 1.27 添加曲线的界面

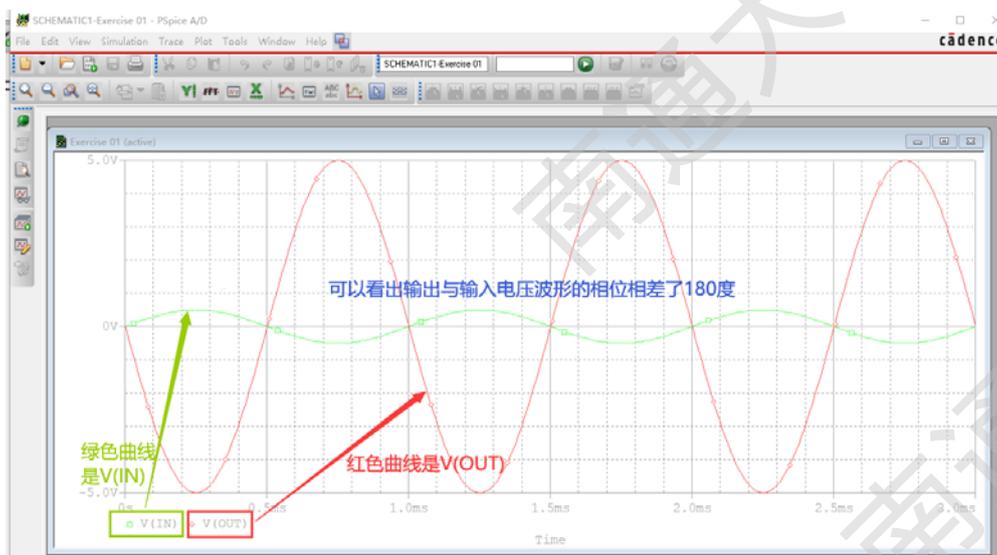


图 1.28 反比例电路的交流波形图参考图

最后，还要标出两个曲线各自的最大值。

方法：点击 probe 工具栏中的 ，激活 cursor，此时 cursor 工具栏会从灰色变成蓝色，表示已

被激活。同时 V(IN)前面的图样会被一个虚线框框住，表示该颜色的曲线已被激活 cursor 光标，此时按住鼠标左键在坐标系中拖动，便会看见一个十字形瞄准器沿着绿色的 V(IN)曲线滑动，如图 1.29。

激活 V(IN)的 cursor 后，点击 cursor 工具栏的 ，瞄准器自动锁定最大值，再点击 ，自动标出该点的横、纵坐标。类似的，用鼠标左键点击 V(OUT)前面的图样，则红色的 V(OUT)曲线被激活左键 cursor，重复上面的操作，标出其最大值，如图 1.30。

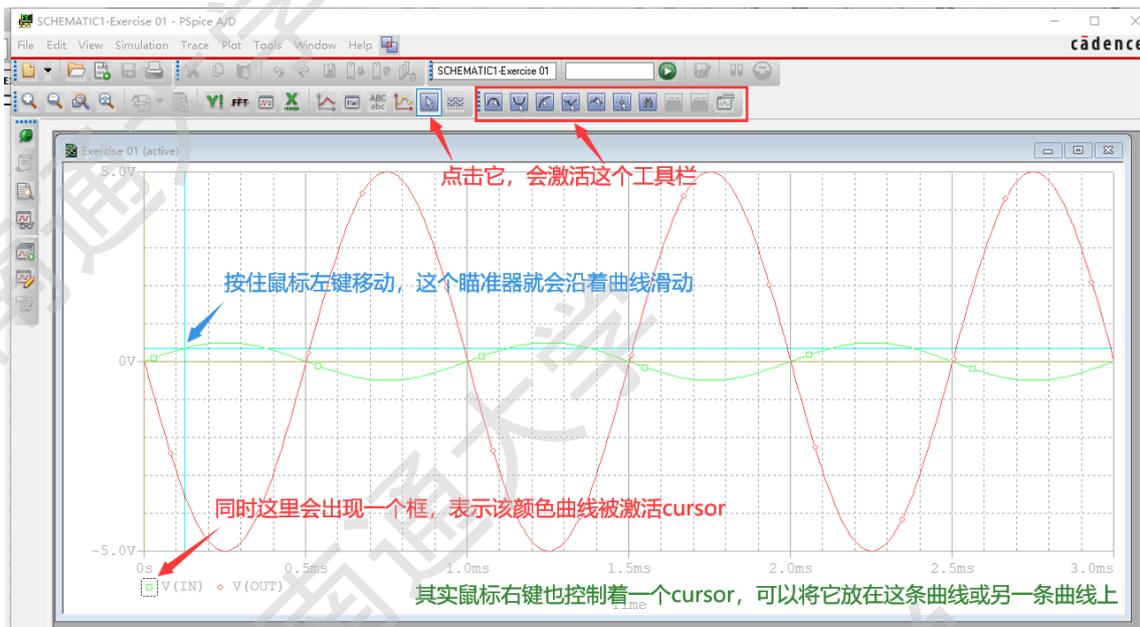


图 1.29 光标 cursor 工具栏及使用

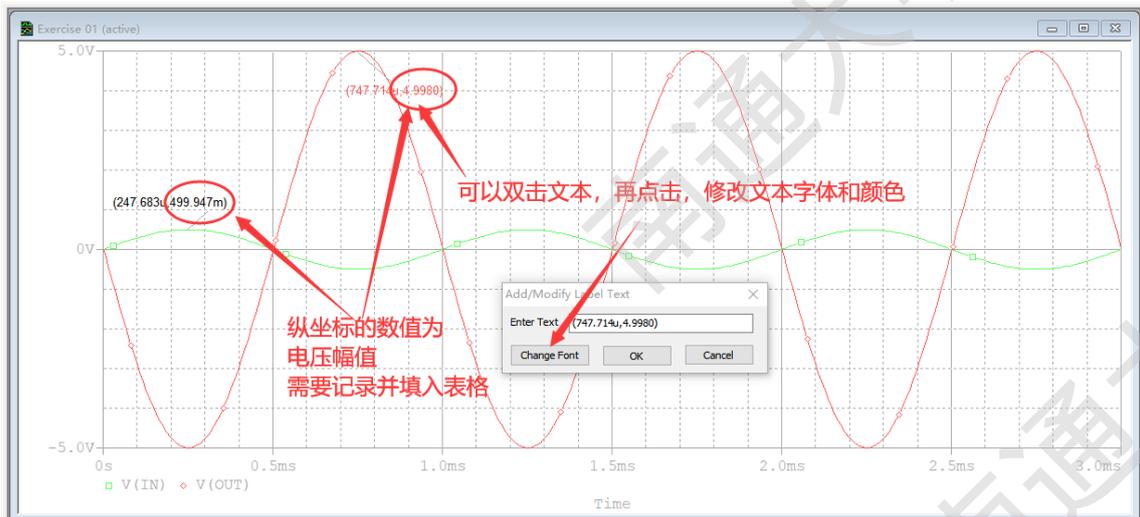


图 1.30 在曲线图中添加文本

图 1.30 中标出的输入、输出曲线的最大值，需要记录并填入表 1.2。

实验时，VSIN 的 VAMPL 参数分别选取 0.5V、0.7V 和 0.9V，表 1.2 中的 Vim 填实际读到的数值，例如图 1.30 中的 499.947mV。

表 1.2 反相比例运算电路的交流信号验证

$V_{im}$ (mV)	$V_{om}$ (V)	$ A_{vf} $ (计算值)

注意：“设计反相比例运算电路”需要

(a) 图 1.23、图 1.24 的原理图在撰写报告时要求打印，在画图工具栏中点击  添加图注文本，标明班级\_姓名文本框，例如“信 123 张三”。另外，直流验证时使用了 4 组不同数据，故图 1.23 需要打印 4 次，对应 4 种不同情况。

(b) 图 1.23、图 1.24 所示原理图在保存时不要直接在编辑界面截图，使用 Orcad 菜单栏 File→Print Area→Set，选择打印区域，再选择 File→Print Setup，在弹出的“打印机设置”对话框中将“名称”选为“Microsoft Print to PDF”或者“Microsoft XPS Document Writer”，如图 1.31，最后选择 File→Print...→OK，打印为 PDF 或 XPS 格式后再截图。

(c) 图 1.30 的波形图在撰写报告时也要求打印，在 Pspice 工具栏中点击  添加图注文本，标明班级\_姓名文本框，例如“信 123 张三”。不要在软件仿真界面直接截图，在 Pspice A/D 界面选择 File→Printer Setup...，会弹出类似图 1.31 的窗口，同样将打印机选为“Microsoft Print to PDF”或者“Microsoft XPS Document Writer”，最后选择 File→Print...→OK，输出为 PDF 或 XPS 格式，保留图片上方和下方的文档路径和打印日期，如图 1.32。由于交流验证使用了 3 组不同数据，故图 1.30 要打印 3 次，对应 3 种不同情况。

(d) 部分波形坐标轴标尺字号偏小，波形交细，需要加大字号，加粗波形，再截图打印。

(e) 波形打印，需要白色背景，黑色前景，软件默认的前景色为灰色，打印后会不太清晰，请根据模电理论课教材《模拟电子技术基础》P286 中 (5) ① 里的方法修改。

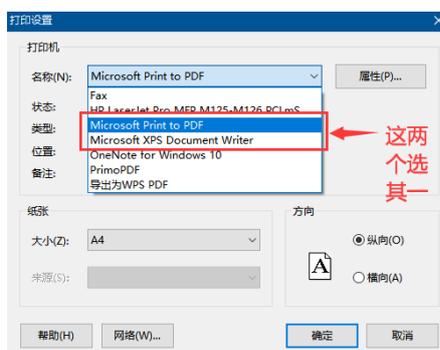


图 1.31 打印机设置界面

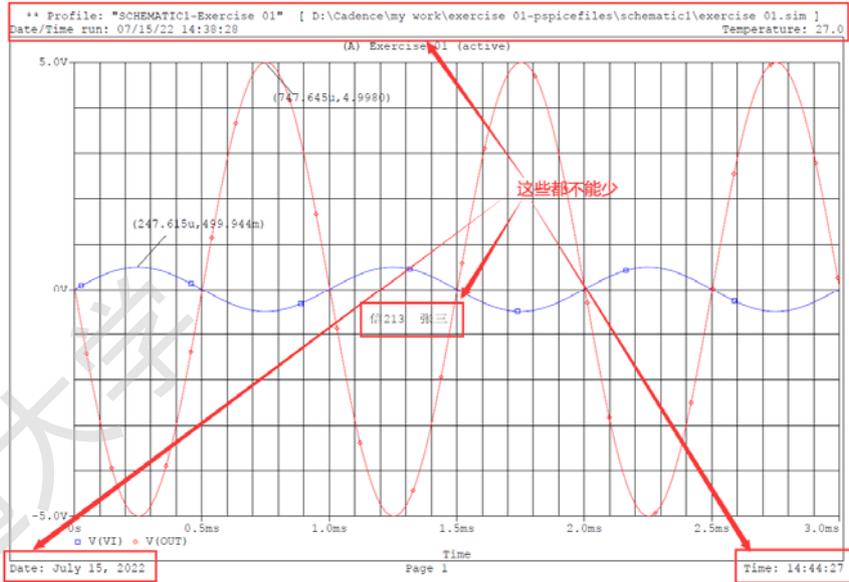


图 1.32 波形打印示例

## 2. 设计反相加法器

设计一个反相加法电路，使其满足  $v_o = -(v_{i1} + v_{i2})$ 。  $v_{i1}$  和  $v_{i2}$  分别选用两个不同的直流电压信号源，测量相应的输出电压  $v_o$  的值。要求验证至少三组不同输入情况下的输出电压。

实验操作如下：

(1) 根据图 1.3 绘制电路仿真原理图

由反相加法电路的输出电压  $v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_{i1} + \frac{R_f}{R_2} v_{i2}\right)$  可知，要满足  $v_o = -(v_{i1} + v_{i2})$ ，必须

$R_1 = R_2 = R_f$ ，  $R_p = R_1 // R_2 // R_f = \frac{R_1}{3}$ 。示例中选取了  $R_1 = 300\text{k}\Omega$ ，  $R_p = 100\text{k}\Omega$ ，如图 1.33。

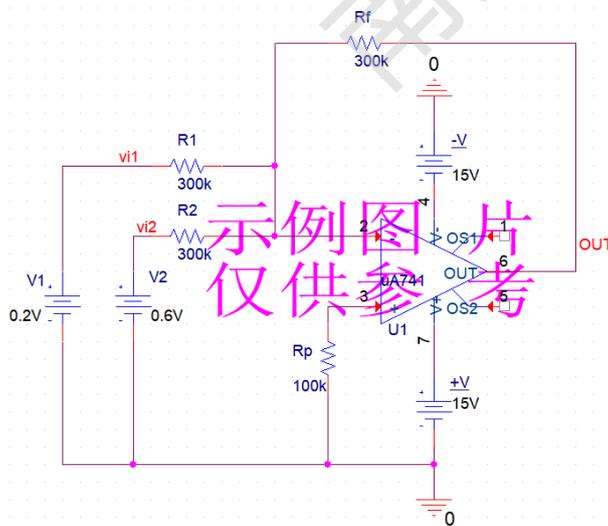


图 1.33 反相加法电路仿真原理图

(2) 运行仿真，记录结果

因为是观察直流信号，故无需专门设置仿真配置文件，直接点击  运行仿真，并关闭自动打开的 Pspice A/D 界面窗口。点击 Pspice 工具栏中的 ，显示各结点的直流电压值，如图 1.34。

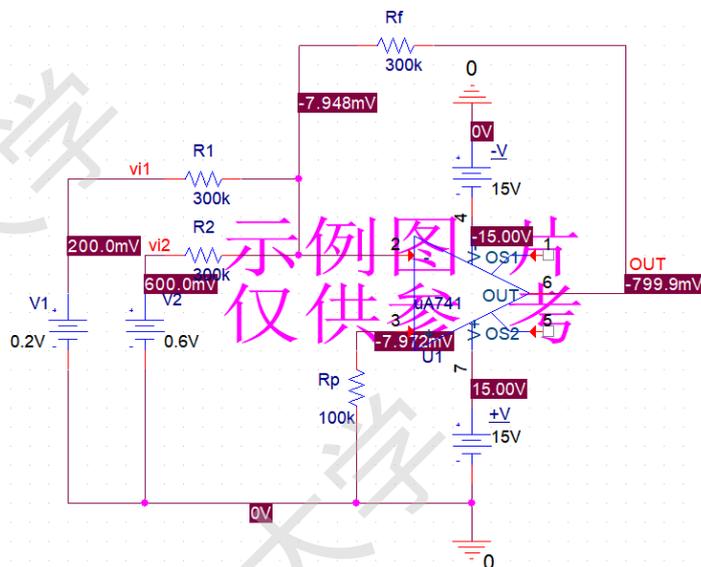


图 1.34 显示了直流电压值的反相加法原理图

根据表 1.3 改变  $V_{i1}$  和  $V_{i2}$  的取值，重复运行仿真，将输出电压  $V_o$  记录在表 1.3 中。

表 1.3 反相加法电路的直流验证

$V_{i1}$ (V)	$V_{i2}$ (V)	$V_o$ (V) (测量值)	$V_o$ (V) (理论值)
0.2	0.6		
0.4	1.2		
-0.5	-1.5		

注意：“设计反相加法器”需要打印类似图 1.34 这样含有仿真结果的原理图 3 次，对应 3 组不同情况。

打印要求与“设计反相比例运算电路”的要求相同。

### 3. 设计减法器

设计一个减法电路，使其满足  $v_o = -10(v_{i1} - v_{i2})$ 。  $v_{i1}$  和  $v_{i2}$  分别选用两个不同的直流电压信号源，测量相应的输出电压  $v_o$  的值。要求验证至少三组不同输入情况下的输出电压。

实验操作如下：

(1) 根据图 1.4 绘制电路仿真原理图

由减法电路的输出电压  $v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) v_{i1} - \frac{R_f}{R_1} v_{i2}$  可知，当  $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$  时， $v_o = \frac{R_f}{R_1} (v_{i1} - v_{i2})$ ，

要满足  $v_o = -10(v_{i1} - v_{i2})$ ，实际是满足  $v_o = 10(v_{i2} - v_{i1})$ ，所以必须另  $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = 10$ ，并将  $v_{i2}$  接在运放的

同相输入端，将  $v_{i1}$  接在反相输入端。示例中选取了  $R_f = R_3 = 100\text{k}\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ ，如图1.35。

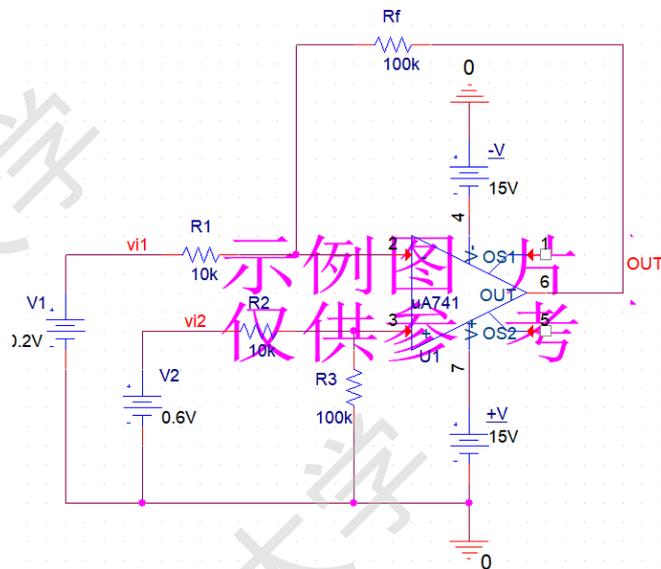


图 1.35 减法电路仿真原理图

(2) 运行仿真，记录结果

因为是观察直流信号，故无需专门设置仿真配置文件，直接点击  运行仿真，并关闭自动打开的Pspice A/D界面窗口。点击Pspice工具栏中的 ，显示各结点的直流电压值，如图1.36。

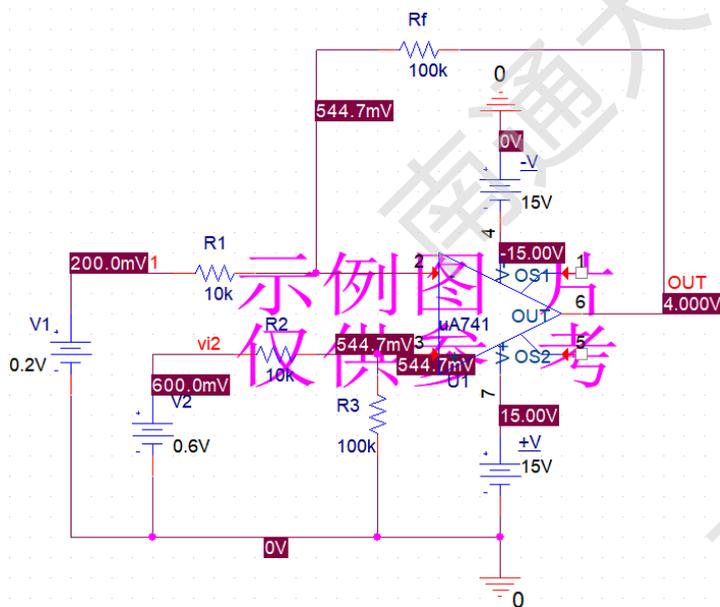


图 1.36 显示了直流电压值的减法原理图

根据表 1.4 改变  $V_{i1}$  和  $V_{i2}$  的取值，重复运行仿真，将输出电压  $V_o$  记录在表 1.4 中。

表 1.4 减法电路的直流验证

$V_{i1}$ (V)	$V_{i2}$ (V)	$V_o$ (V) (测量值)	$V_o$ (V) (理论值)
0.2	0.6		
0.4	1.2		
-5	-15		

提醒：第三组数据的测量值和理论值会出现不相符的情况，结合思考题 2 想一想是什么原因？

**注意：“设计减法器”需要打印类似图 1.36 这样含有仿真结果的原理图 3 次，对应 3 组不同情况。打印要求与“设计反相比例运算电路”的要求相同。**

#### 四、报告要求

1. 通过 Cadence OrCAD 软件，根据实验内容中的要求绘制并打印电路原理图和仿真波形图。
2. 完成表 1.1~表 1.4，整理实测数据和理论值，并比较、讨论三种运算电路是否满足设计要求。
3. 对打印的仿真波形图进行观察、分析、讨论。

#### 五、思考题

1. 理想运算放大器具有哪些特点？
2. 运放构成的运算电路的输入信号是否可以取任意值？为什么？