

实验四报告： 运算放大器与受控电源

学号：2113662 姓名：张丛 选课号：0982

一、实验目的

1. 熟悉和加深对受控电源的理解。
2. 学习运算放大器的使用方法和含有运算放大器线性电路的分析方法，形成有源器件的概念。
3. 测量电压控制型电流源和电压源，电流控制型电流源和电压源的特性。

二、实验原理

1. 运算放大器

运算放大器（简称“运放”）是具有很高放大倍数的电路单元。在实际电路中，通常结合反馈网络共同组成某种功能模块。其输出信号可以是输入信号加、减或微分、积分等数学运算的结果。由于早期应用于模拟计算机中，用以实现数学运算，故得名“运算放大器”。

运算放大器是一个有源三端器件，它有两个输入端和一个输出端。其中，“+”端称为同相输入端，“-”端称为反相输入端。若信号从“+”端输入，而将“-”端接参考地时，则输出信号与输入信号相位相同；若信号从“-”端输入，而将“+”端接参考地时，输出信号与输入信号相位相反。

运算放大器的电路符号及其等效电路如图 1 所示：

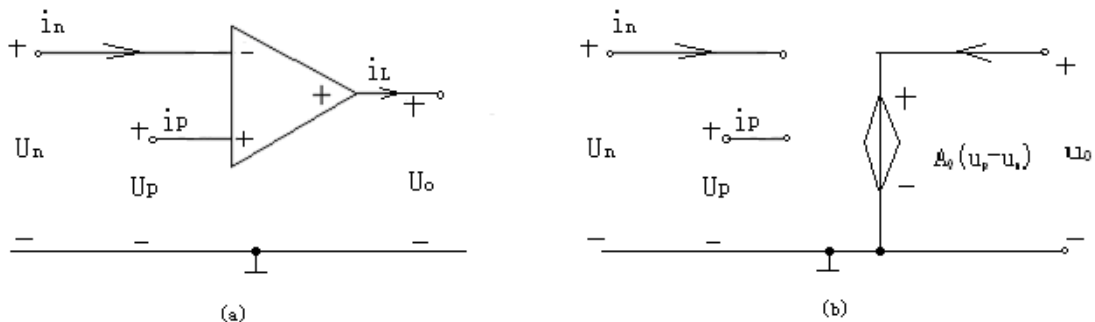


图 1 运算放大器的电路符号及等效电路

如果运算放大器工作在线性区，“+”端和“-”端分别接输入电压 U_p 和 U_n 则运算放大器的输出电压 $U_o = A_0(U_p - U_n)$ ，其中 A_0 是运放的开环电压放大倍数，在理想情况下， A_0 与运放的输入电阻 R_i （“+”端的输入电阻记为 R_{ip} 、“-”端的输入电阻记为 R_{in} ）均为无穷大，输出电压 U_o 是一个有限的数值，因此有：

$$\begin{aligned} U_p &= U_n \\ i_p &= \frac{U_p}{R_{ip}} = 0 \\ i_n &= \frac{U_n}{R_{in}} = 0 \end{aligned}$$

这说明理想运放具有下列三大特征：

- ①运放的“+”端与“-”端电位相等，通常称为“虚短路”。
- ②运放输入端电流为零，通常称为“虚断路”。

③运放的输出电阻为零。

以上三个重要的性质是分析所有运放网络的重要依据。

运放除了两个输入端、一个输出端和一个参考地接线端以外，要使运放工作，还须接有正、负直流工作电源（称双电源），有的运放可用单电源工作。运放的工作特性是在接有电源的工作状态下才具有的。

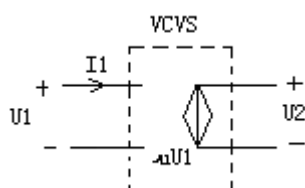
理想运放的电路模型是一个受控源——电压控制电压源（即 VCVS），如图 1(b)所示，在它的外部接入不同的电路元件，可构成四种基本受控源电路，以实现输入信号的各种模拟运算或模拟变换。

2.受控源

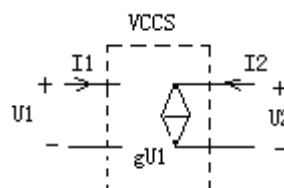
与受控源相对的是独立源。独立源的电压和电流是固定的数值或某一时间函数，不随电路其余部分的状态改变而改变。受控电源又与无源元件不同，无源元件的电压和它自身的电流有一定的函数关系，而受控电源的电压和电流与另一支路的电流或电压有某种函数关系。

受控源是由电子器件抽象而来的一种模型。如，晶体管、真空管等。受控源是一种双口元件，它含有两条支路，其一为控制支路，这条支路或为开路或为短路，另一为受控制支路，这条支路或用一个受控“电压源”表明该支路的电压受控制的性质，或用一个受控“电流源”表明该支路的电流受控制的性质。这两种“电源”本非严格意义上的电源。受控源只是表明电路内部电子器件中所发生物理现象的一种模型，用以表明电子器件的“互参数”或电压、电流“转移”关系得一种方式而已。

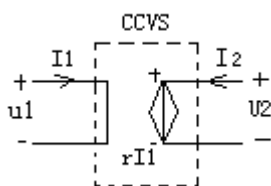
受控源分为受控电压源和受控电流源两类，而每一类按控制量的不同又分为电压控制与电流控制两种。因此，受控电源一共有四种，即电压控制电压源、电流控制电压源、电压控制电流源和电流控制电流源，如图 2 所示。



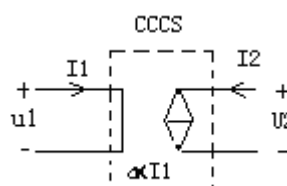
(a) 电压控制电压源 (VCVS)



(b) 电压控制电流源 (VCCS)



(c) 电流控制电压源(CCVS)



(d) 电流控制电流源(CCCS)

图 2 受控源的四种类型

受控源的控制端与受控端的关系称为转移函数。

四种受控源转移函数参量的定义如下：

①电压控制电压源（VCVS）

如图 2(a)所示，其转移特性为： $U_2=f(U_1)$

其中， $\mu=U_2/U_1$ ，称为转移电压比，或电压增益、电压放大倍数。

②电压控制电流源（VCCS）

如图 2(b)所示，其转移特性为： $I_2=f(U_1)$

其中, $g_m = I_2/U_1$ 称为转移电导。

③ 电流控制电压源 (CCVS)

如图 2(c)所示, 其转移特性为: $U_2 = f(I_1)$

其中, $r_m = U_2/I_1$ 称为转移电阻。

④ 电流控制电流源 (CCCS)

如图 2(d)所示, 其转移特性为: $I_2 = f(I_1)$

其中, $\alpha = I_2/I_1$ 称为转移电流比, 或电流增益、电流放大倍数。

3. 受控源的线路原理分析

① 电压控制电压源 (VCCS)

典型的由运放构成的电压控制电压源的电路如下图 3 所示。

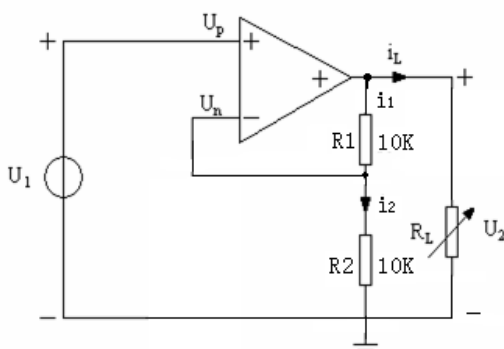


图 3 用运放构成的电压控制电压源实验电路

由于运放的虚短路特性, 有:

$$U_p = U_n = U_1$$

$$i_2 = \frac{U_n}{R_2} = \frac{U_1}{R_2}$$

又因运放内阻视为无穷大, 则有 $i_1 = i_2$ 。

因此, 可以推导出:

$$U_2 = i_1 R_1 + i_2 R_2 = i_2 (R_1 + R_2) = \frac{U_1}{R_2} (R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_1$$

即运放的输出电压 U_2 只受输入电压 U_1 的控制, 与负载 R_L 大小无关。

转移电压比为:

$$\mu = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

上式中, μ 无量纲。

这里的输入、输出有公共接地点, 这种联接方式称为共地联接。

② 电压控制电流源 (VCCS)

将图 3 的 R_L 看成一个负载电阻 R_L , 如图 4 所示, 即成为电压控制电流源 VCCS。

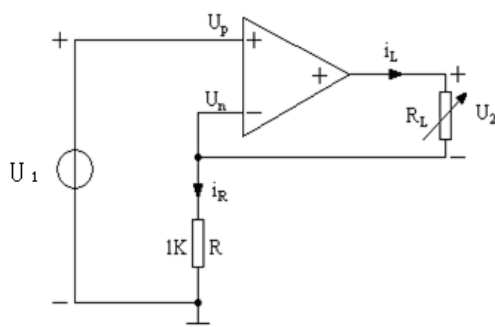


图 4 用运放构成的电压控制电流源实验电路

此时，运放的输出电流为：

$$i_L = i_R = \frac{U_n}{R} = \frac{U_1}{R}$$

即运放的输出电流 i_L 只受输入电压 U_1 的控制，与负载 R_L 大小无关。

转移电导为：

$$g_m = \frac{i_L}{U_1} = \frac{1}{R}$$

上式中， g_m 的单位为 S。

这里的输入、输出无公共接地点，这种连接方式称为浮地连接。

③ 电流控制电压源（CCVS）

典型的由运放构成的电流控制电压源的电路如下图 5 所示。

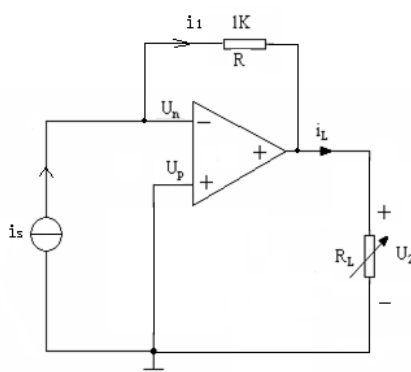


图 5 用运放构成的电流控制电压源实验电路

由于运放的“+”端接地，所以 $U_p=0$ ，“-”端电压 U_n 也为零，此时运放的“-”端称为虚地点。显然，流过电阻 R 的电流 i_i 就等于网络的输入电流 i_s 。

此时，运放的输出电压 $U_2 = -i_L R = -i_s R$ ，即输出电压 U_2 只受输入电流 i_s 的控制，与负载 i_L 大小无关。

转移电阻为

$$r_m = \frac{U_2}{i_s} = -R$$

上式中， r_m 的单位为 Ω 。此电路为共地连接。

④电流控制电流源（CCCS）

典型的由运放构成的电流控制电压源的电路如下图6所示。

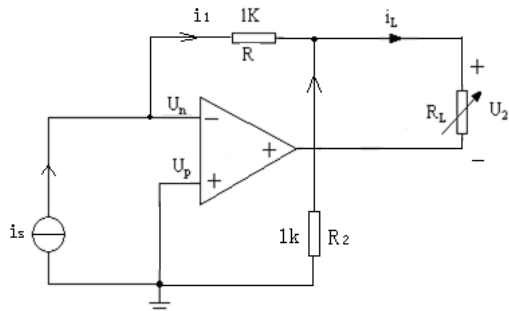


图 6 用运放构成的电流控制电流源实验电路

可以推导：

$$i_1 R_1 = i_2 R_2$$

$$i_L = i_1 + i_2 = i_1 + \frac{R_1}{R_2} i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) i_s$$

即输出电流 i_L 只受输入电流 i_s 的控制，与负载 R_L 大小无关。

转移电流比：

$$\alpha = \frac{i_L}{i_s} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

上式中， α 无量纲。此电路为浮地连接。

三、实验设备

名称	规格	数量
直流可调稳压电源	0~30V	1
直流稳压电源	$\pm 12V$	1
直流电压表		1
直流电流表		1
元件箱		2
连接线		若干

注：线上运用仿真软件操作，所得数据均附截图

四、实验内容及数据

1. 测定电压控制电压源 VCVS 的特性

①按下图 7 连接电路。

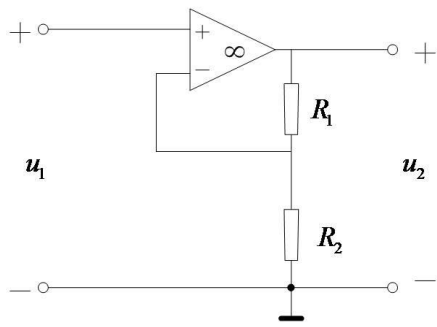


图 7 VCVS 实验电路

②给定 $R_1=R_2=2\text{K}\Omega$ ，对应表 1 测量 VCVS 实验电路的性能。

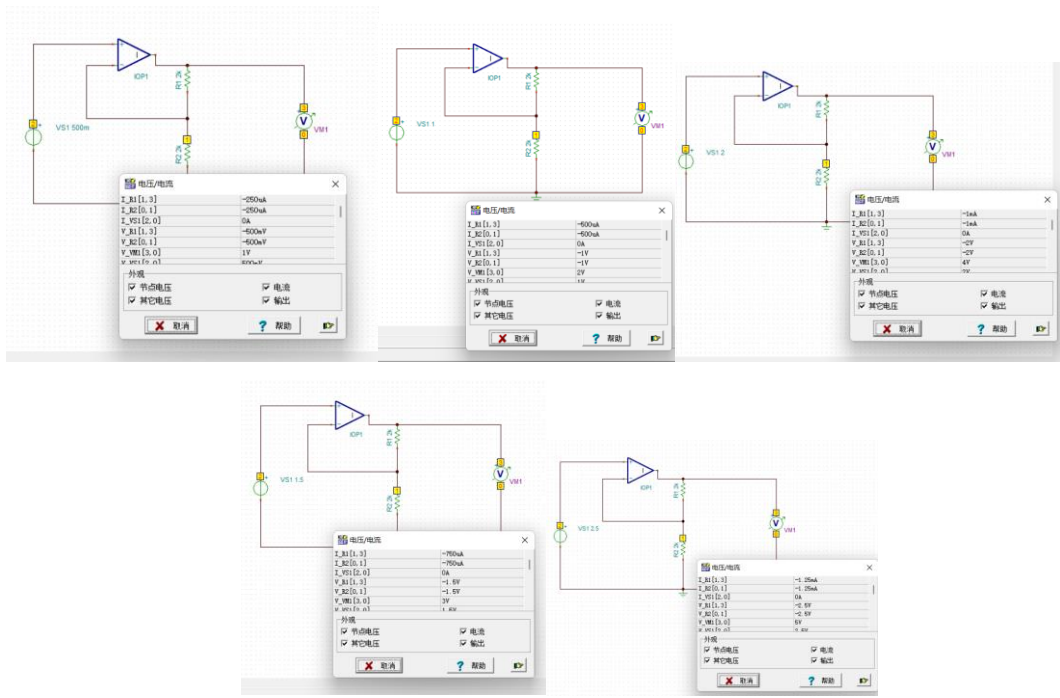


表 1 VCVS 特性测量

给定值		U1(V)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
VCVS	测试值	U1(V)	0.5	1	1.5	2.0	2.5
	测试值	U2(V)	1	2	3	4	5
	计算值	μ	2	2	2	2	2

③在输出端接入可调 R_L 电阻箱，改变阻值， $U_1=1.0\text{V}$ ，测量 VCVS 的输出电压，并填入下表 2 中。

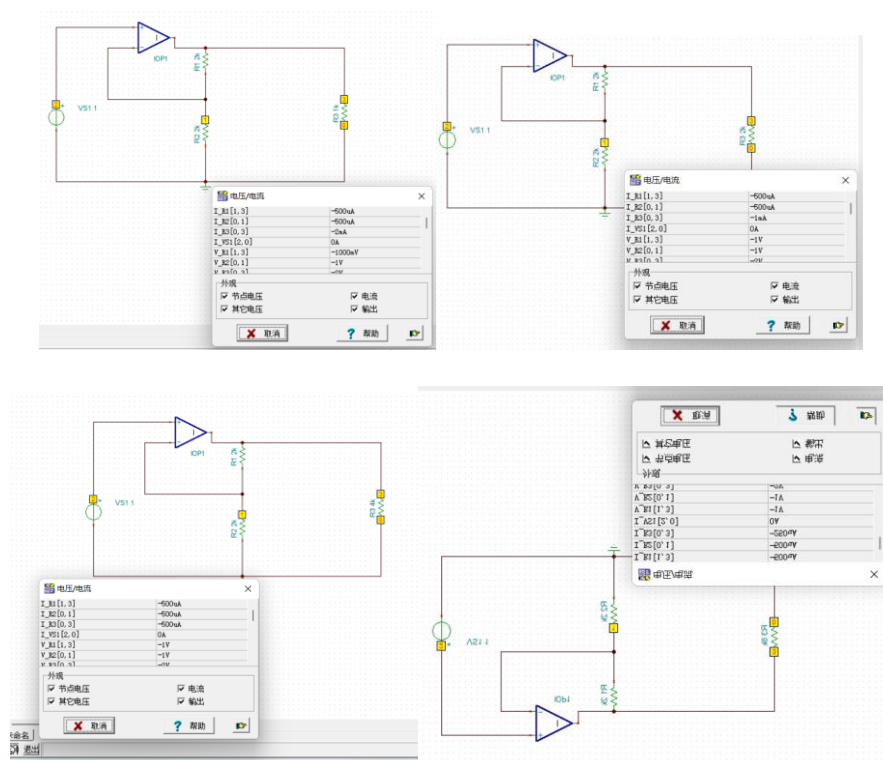


表 2 VCVS 外部特性测量

给定值		$R_L (\Omega)$	1K	2K	4K	8K
VCVS	测试值	$U_2 (V)$	2	2	2	2

2. 测定电压控制电流源 VCCS 的特性

①按下图 8 连接电路。

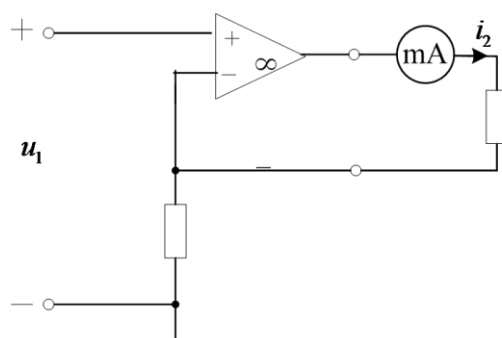


图 8 VCCS 实验电路

②给定 $U_1=2V$ ， $R=2k\Omega$ ， R_L 接可调电阻箱，按照表 3 测定 VCCS 性能，并计算 g_m 。

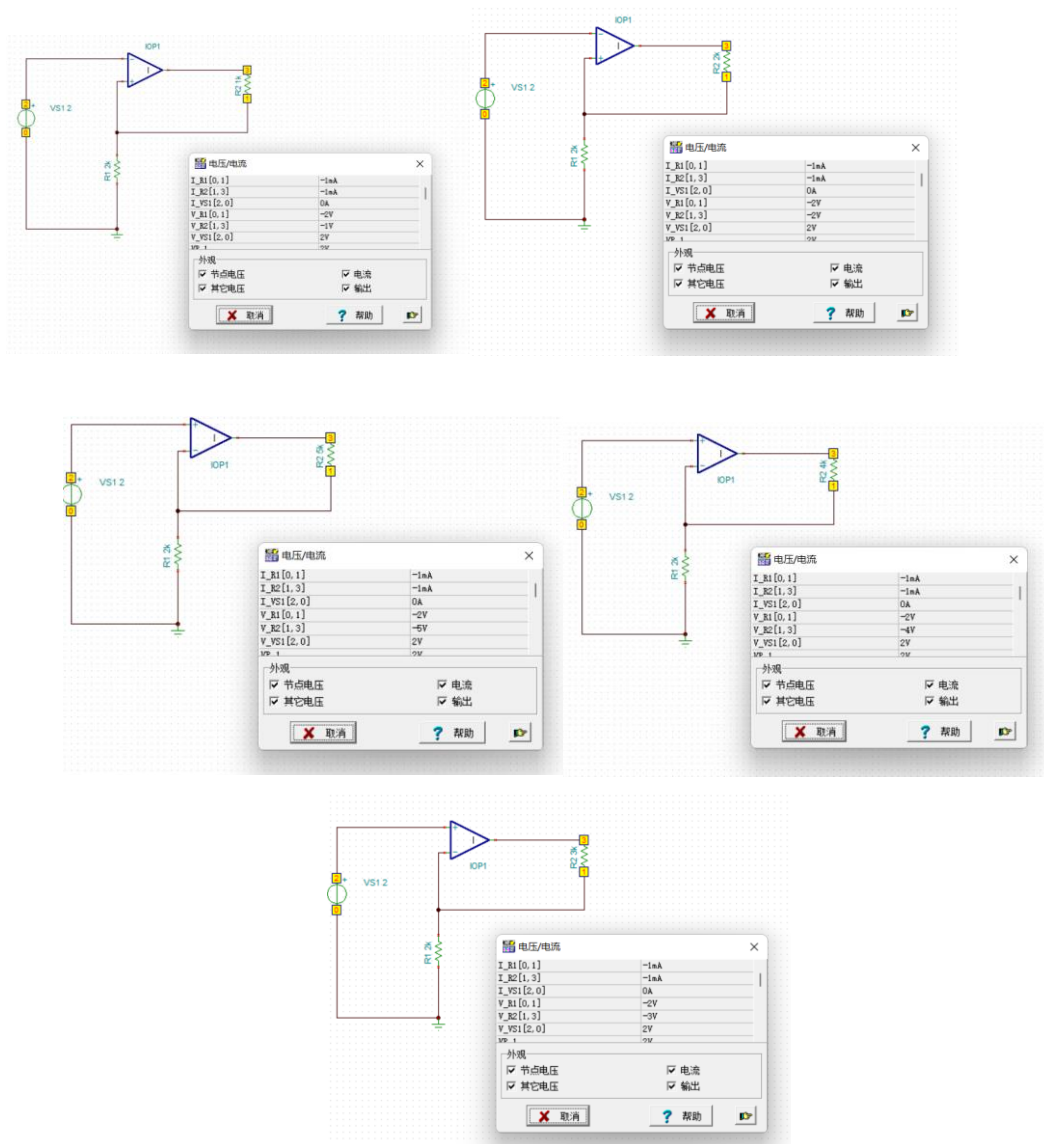


表 3 VCCS 外部特性测量

给定值		$R_L (\Omega)$	1K	2K	3K	4K	5K
VCCS	测试值	$i_2 \text{ (mA)}$	1	1	1	1	1
	计算值	$g_m \text{ (S)}$	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

③给定 $R_L=5K\Omega$, $R=2K\Omega$, 改变 U_1 的电压值, 按照表 4 测量并记录。

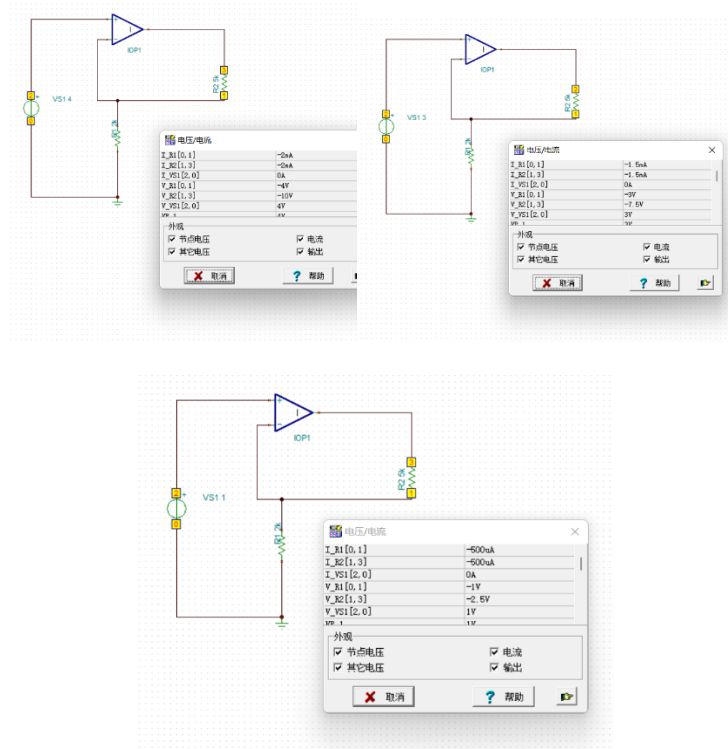


表 4 VCCS 特性测量

给定值		U_1 (V)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
VCCS	测试值	U_1 (V)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	测试值	i_2 (mA)	0.5	1	1.5	2.0	2.5
	计算值	g_m (S)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

3. 测定电流控制电压源 CCVS 的特性

①按下图 9 连接电路。

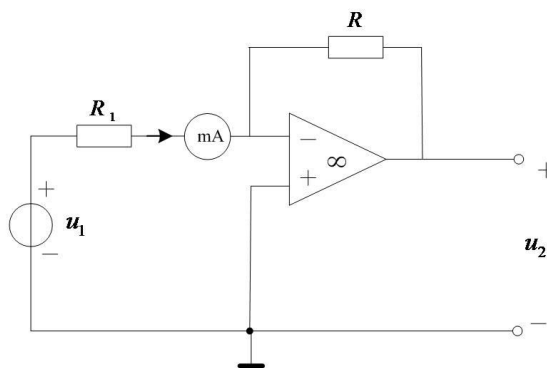


图 9 CCVS 实验电路

②给定 $U_1=3.0\text{V}$ 、 $R=3\text{K}\Omega$ ，按照表 5 测定 CCVS 性能，并计算 r_m 。

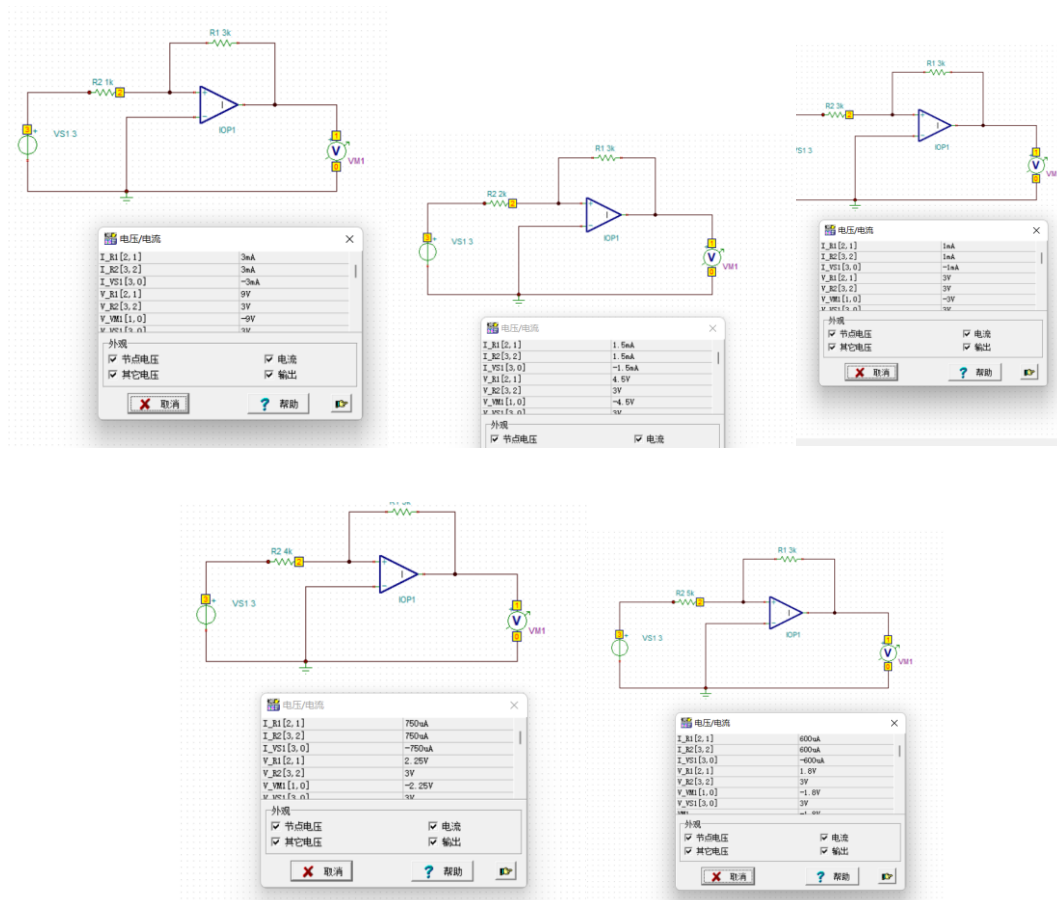


表 5 CCVS 特性测量

给定值	R_1 (Ω)	1K	2K	3K	4K	5K
测试值	i_1 (mA)	3	1.5	1	0.75	0.6
	U_2 (V)	-9	-4.5	-3	-2.25	-1.8
计算值	$r_m(R)$	-3000	-3000	-3000	-3000	-3000

③将 R_1 改为固定电阻 $2\text{k}\Omega$ ， $U_1=3.0\text{V}$ 、 $R=3\text{K}\Omega$ ，在输出端接入可调变阻箱 R_L ，按照表 6 测量并记录。

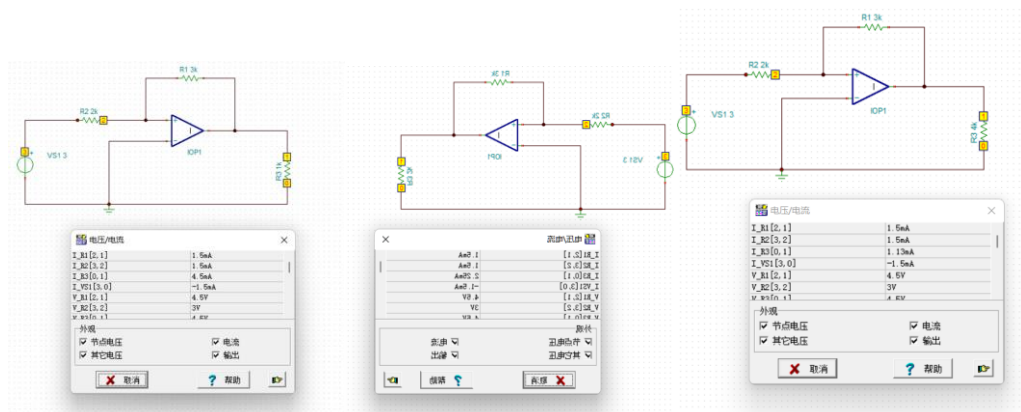


表 6 CCVS 外部特性测量

给定值		R_L (Ω)	1K	2K	4K	8K
CCVS	测试值	i_1 (mA)	1.5	1.5	1.5	1.5
		U_2 (V)	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5

4. 测定电流控制电流源 CCCS 的特性

①按下图 10 连接电路。

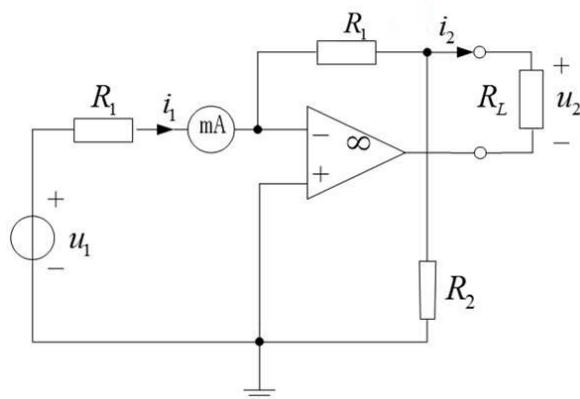


图 10 CCCS 实验电路

②给定 $U_1=2.0V$ ， $R_1=R_2=2k\Omega$ ，按照表 7 测定 R_L 由 $0\sim 3k\Omega$ 变化时， i_1 、 U_2 的值，并由此计算得到 i_2 值，并计算 α 。

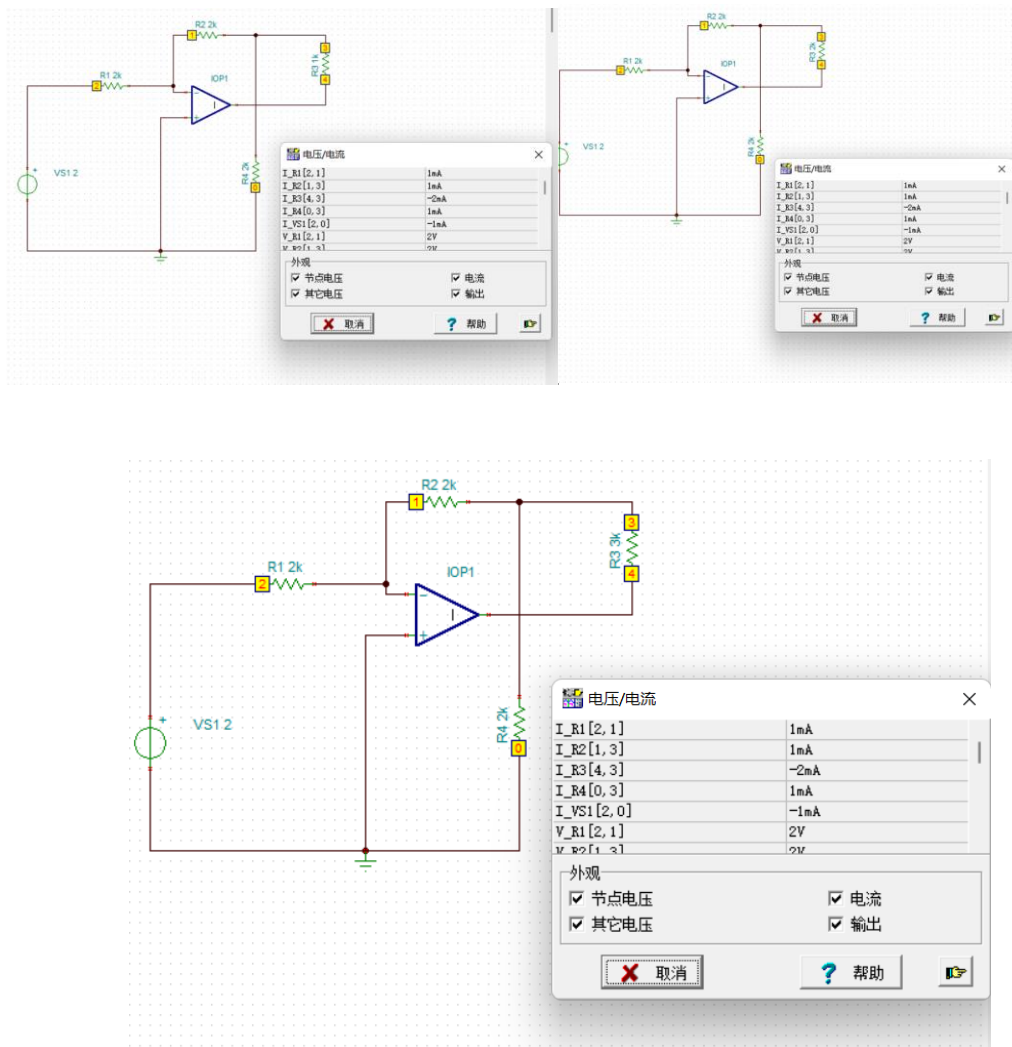


表 7 CCVS 特性测量

给定值	$R_L (\Omega)$	1K	2K	3K
测试值	$i_1 (\text{mA})$	1	1	1
	$U_2 (\text{V})$	2	4	6
计算值	$i_2 (\text{mA})$	2	2	2
	α	2	2	2

五、数据分析

实验数据满足其对应的特性。

六、思考题

1.掌握四种受控源的符号、电路模型、控制量与被控制量之间的关系，以及四种受控源中的 μ 、 g_m 、 r_m 和 α 的意义。

答：

μ ，转移电压比

g_m , 转移电导
 r_m , 转移电阻
 α , 转移电流比

4.将测量结果与理论值进行比较，分析误差产生的原因。

答：实验为仿真软件，故数据几乎无误差。

若在实际中，误差可能来自导线的电阻带来误差。

5.试分析受控源的输出特性是否适用于交流信号。

答：适用于交流信号。比如加大输入信号后，输出电压波形先按比例被放大，但随着输入信号的不断加大输出电压会产生失真，波形的上限和下限被限伏。