

南开大学电子信息与光学工程学院

电路基础实验 四

实验名称 运算放大器与受控源

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。

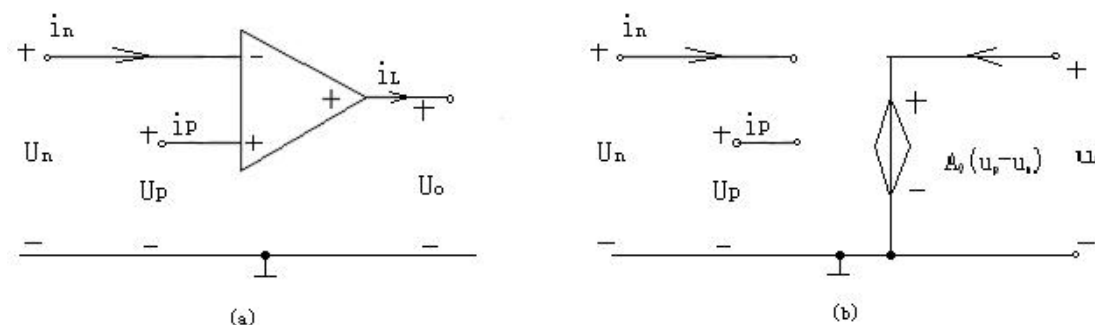
二. 实验原理

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：



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：

$$U_p = U_n \qquad i_p = \frac{U_p}{R_{ip}} = 0 \qquad i_n = \frac{U_n}{R_{in}} = 0$$

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。

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。

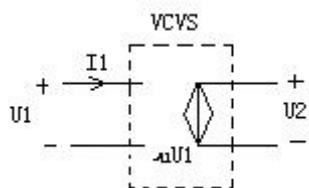
理想运放的电路模型是一个受控源——电压控制电压源（即 VCVS），如图 1(b) 所示，在它的外部接入不同的电路元件，可构成四种基本受控源电路，以实现输入信号的各种模拟运算或模拟变换。

2. 受控源

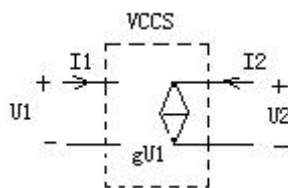
与受控源相对的是独立源。独立源的电压和电流是固定的数值或某一时间函数，不随电路其余部分的状态改变而改变。受控电源又与无源元件不同，无源元件的电压和它自身的电流有一定的函数关系，而受控电源的电压和电流与另一支路的电流或电压有某种函数关系。

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。

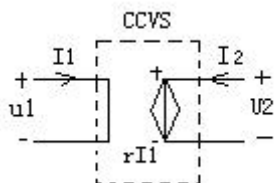
受控源分为受控电压源和受控电流源两类，而每一类按控制量的不同又分为电压控制与电流控制两种。因此，受控电源一共有四种，即电压控制电压源、电流控制电压源、电压控制电流源和电流控制电流源，如图 2 所示。



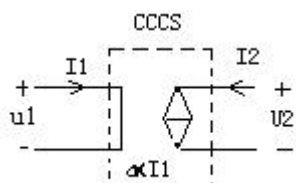
(a) 电压控制电压源 (VCVS)



(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（VCVS）

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。

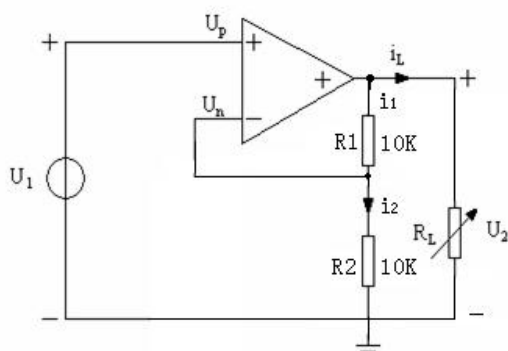


图 3 用运放构成的电压控制电压源实验电路

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 R1 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。

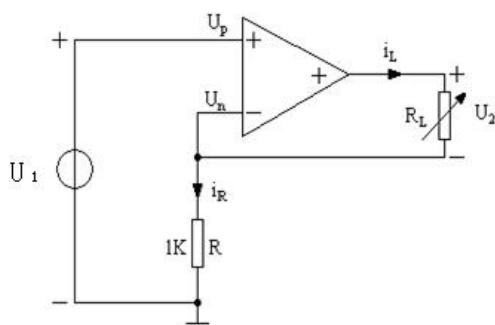


图 4 用运放构成的电压控制电流源实验电路

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。

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_1 就等于网络的输入电流 i_s 。

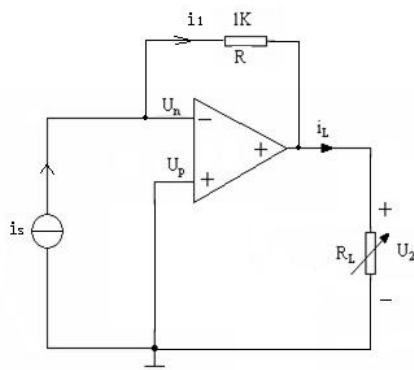


图 5 用运放构成的电流控制电压源实验电路

此时，运放的输出电压 $U_2 = -i_1 R = -i_s R$ ，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。

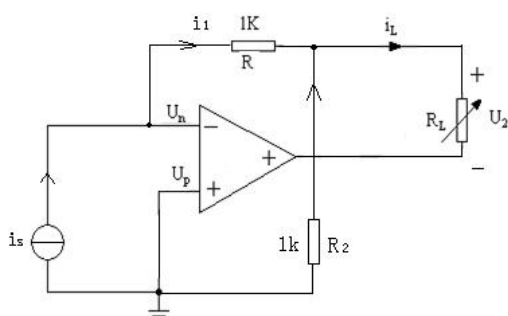


图 6 用运放构成的电流控制电流源实验电路

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

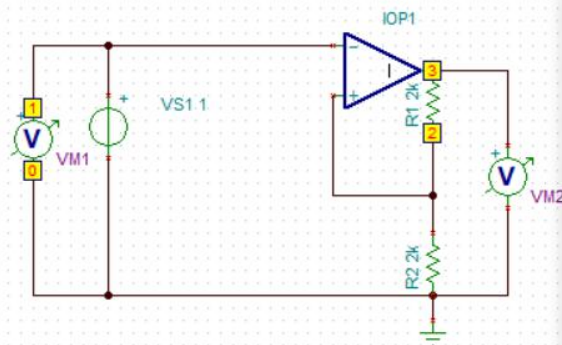
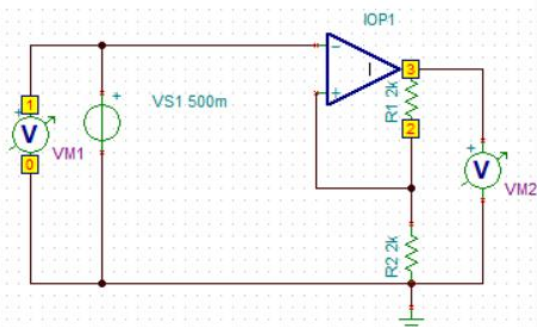
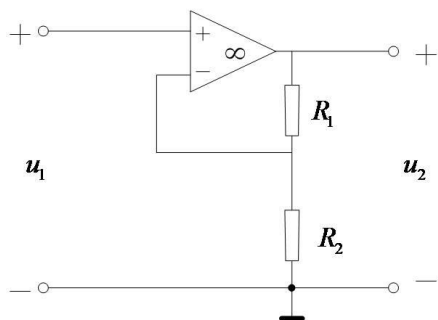
名称	规格	数量
直流可调稳压电源	0~30V	1
直流稳压电源	±12V	1
直流电压表		1
直流电流表		1
元件箱		2
连接线		若干

四、实验内容及步骤

1. 测定电压控制电压源 VCVS 的特性

①按下图 7 连接电路。

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



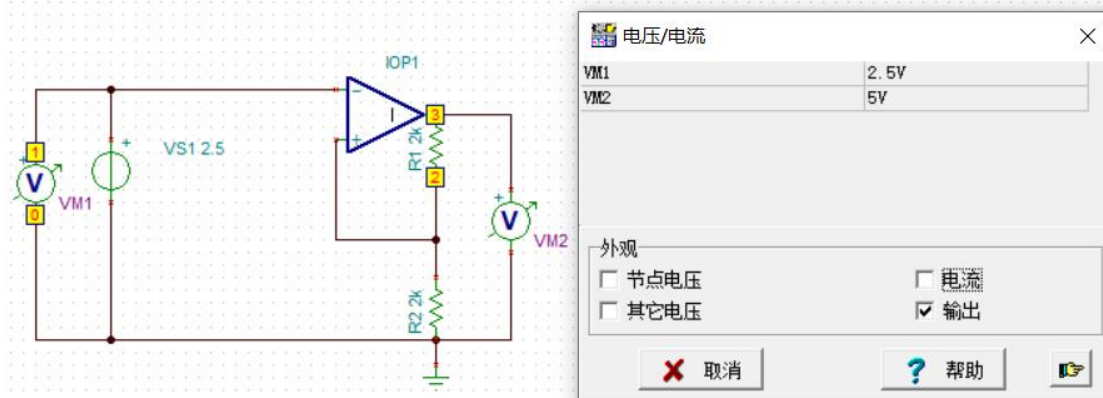
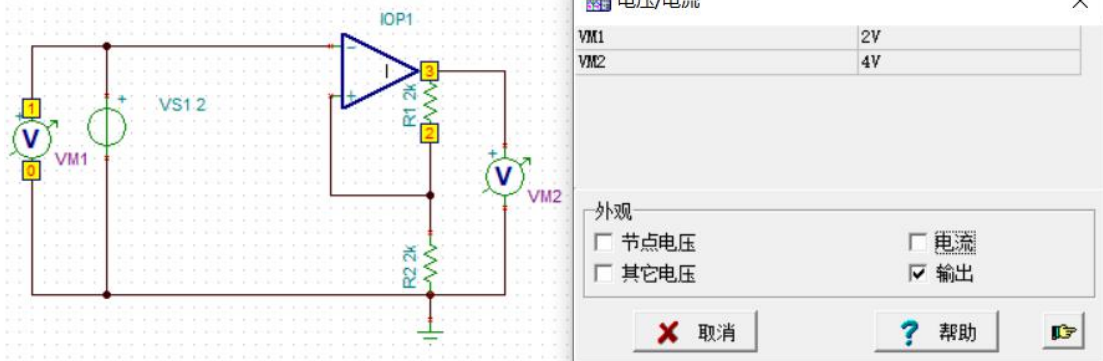
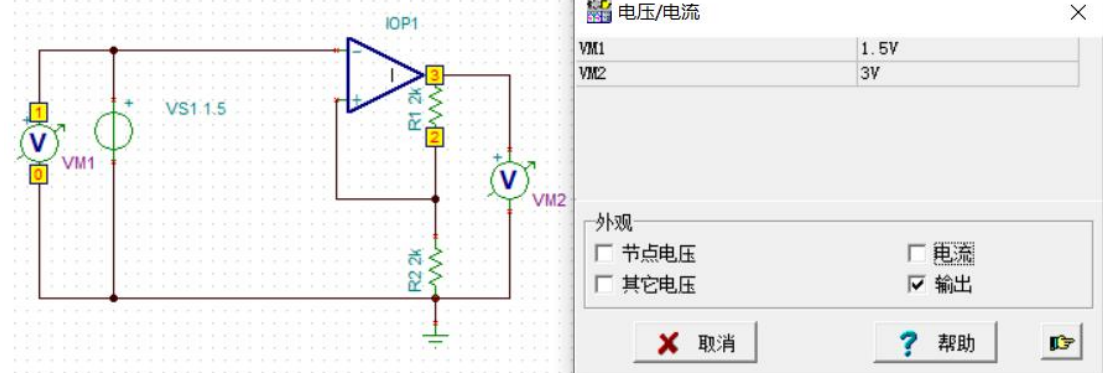
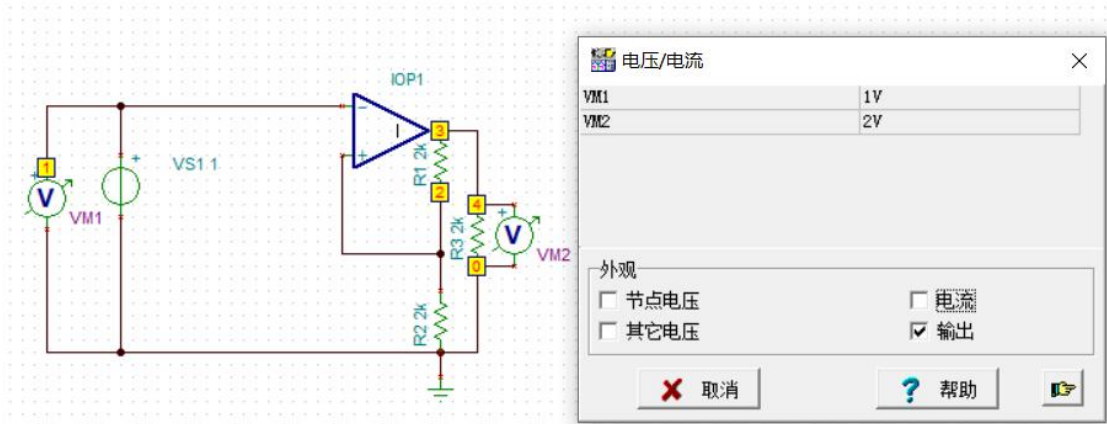
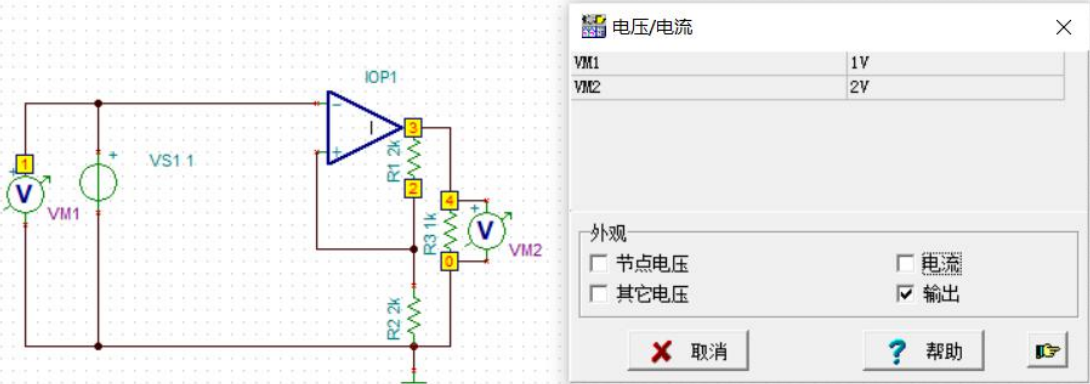


图 7 VCVS 实验电路

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	1.0	1.5	2.0	2.5
	测试值	U2(V)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	计算值	μ	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

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



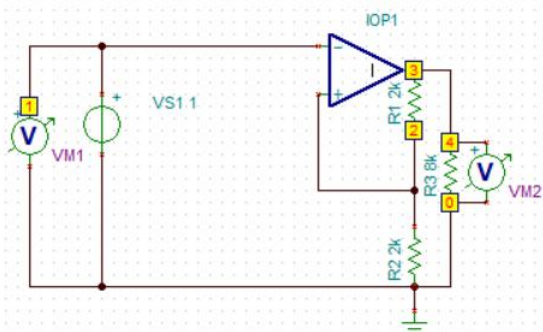
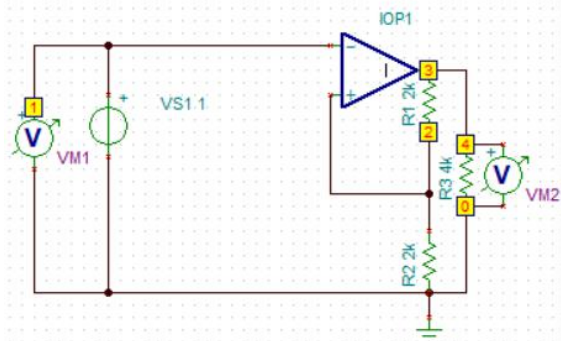


表 2 VCVS 外部特性测量

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。

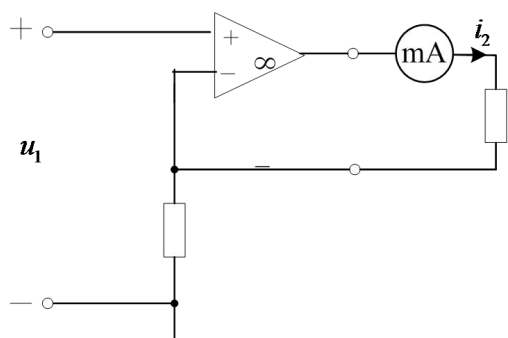
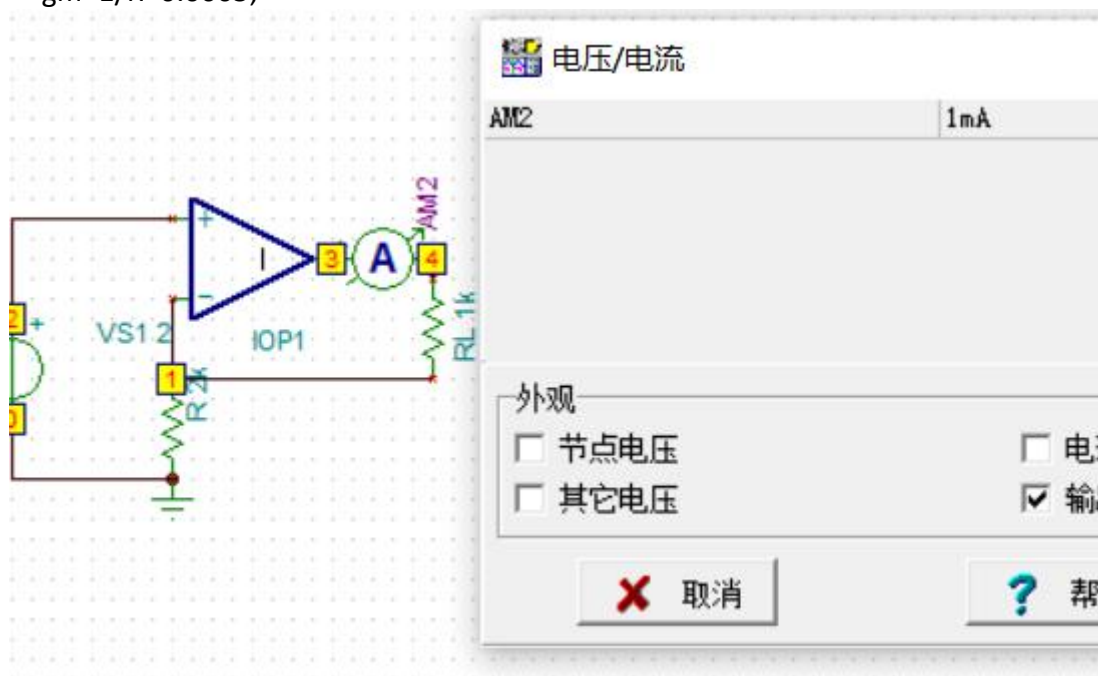
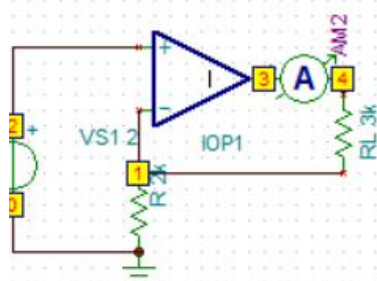
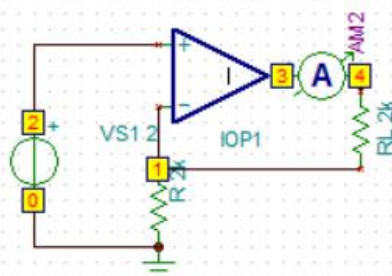


图 8 VCCS 实验电路

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 。

$$g_m=1/R=0.0005;$$





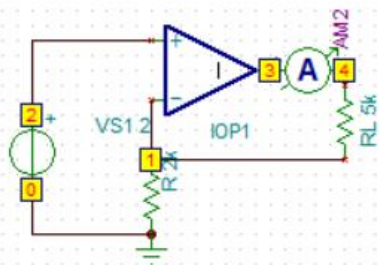
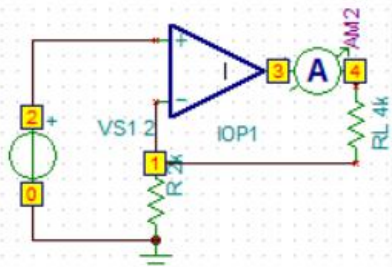
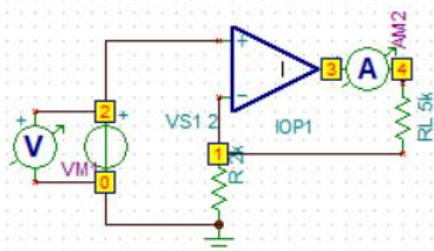
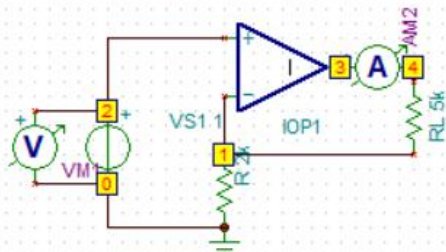
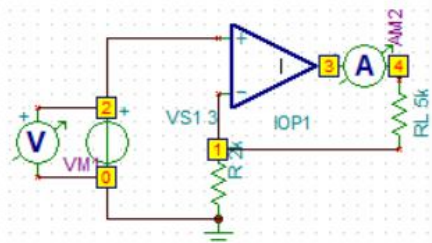


表 3 VCCS 外部特性测量

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	$I_2(\text{mA})$	1	1	1	1	1

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





电压/电流

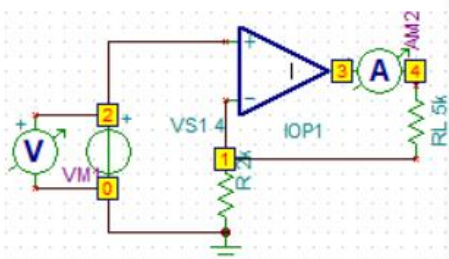
AM2	1.5mA
VM1	3V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助



电压/电流

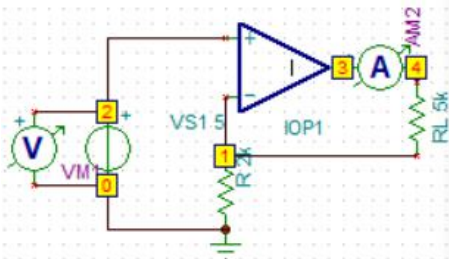
AM2	2mA
VM1	4V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助



电压/电流

AM2	2.5mA
VM1	5V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助

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	2	3	4	5
	测试值	i_2 (mA)	0.5	1	1.5	2	2.5
	计算值	I_2 (mA)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

3. 测定电流控制电压源 CCVS 的特性

①按下图 9 连接电路。

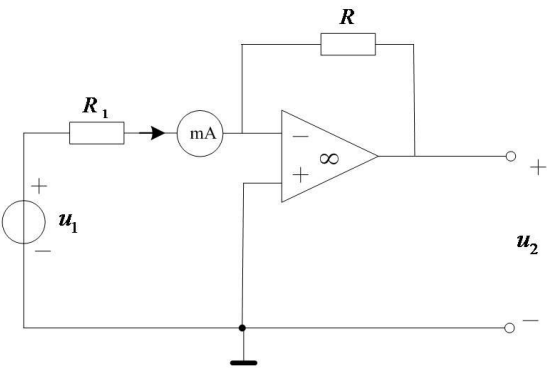
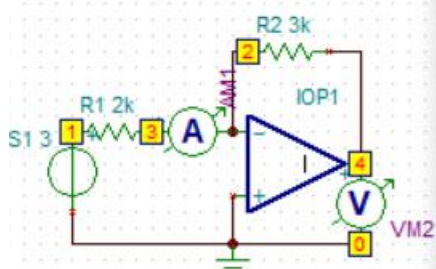
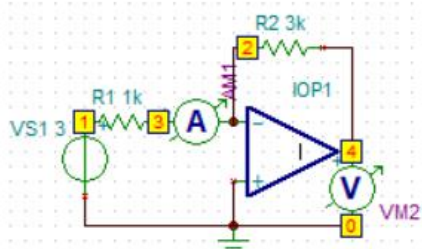
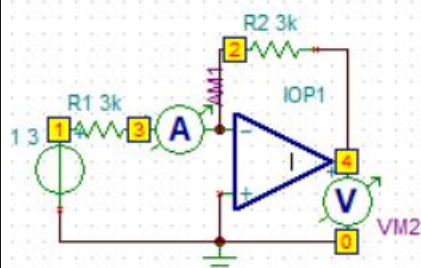


图 9 CCVS 实验电路

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

$$r_m=-R=-3000;$$





电压/电流

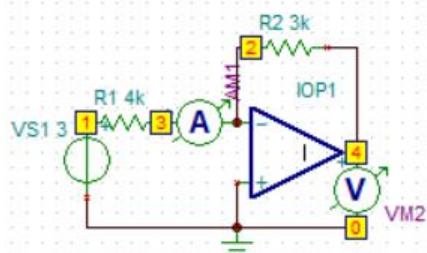
AM1	1mA
VM2	-3V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助



电压/电流

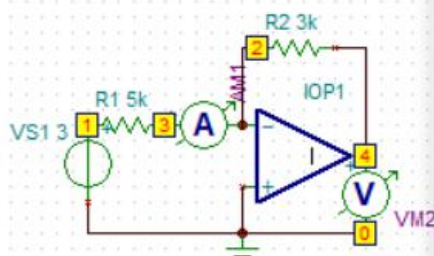
AM1	750uA
VM2	-2.25V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助



电压/电流

AM1	600uA
VM2	-1.8V

外观

☐ 节点电压 ☐ 电流

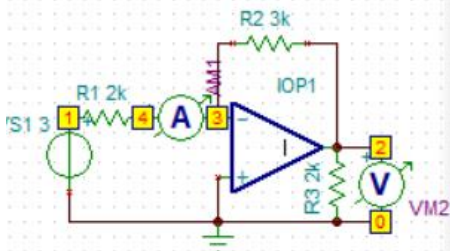
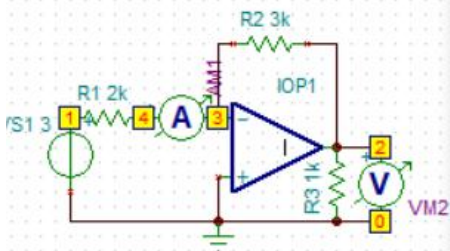
☐ 其它电压 ☒ 输出

取消 帮助

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	$-3000 * i_1(A)$	-9	-4.5	-3	-2.25	-1.8

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



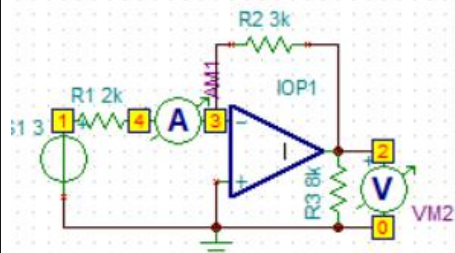
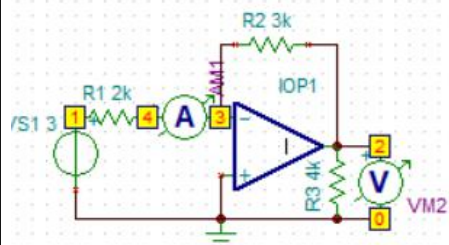


表 6 CCVS 外部特性测量

给定值		$R_L (\Omega)$	1K	2K	4K	8K
CCVS	测试值	$i_1 (\text{mA})$	1.5	1.5	1.5	1.5
		$U_2 (\text{V})$	-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。

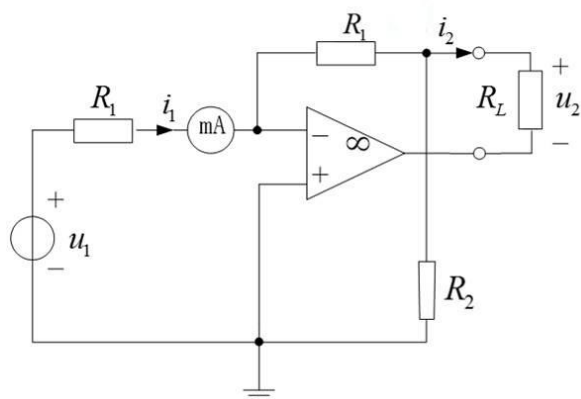
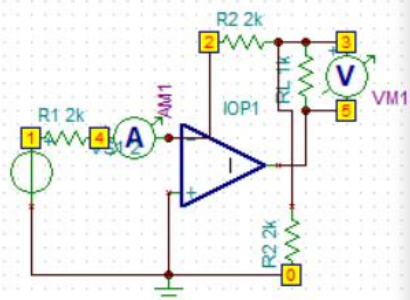
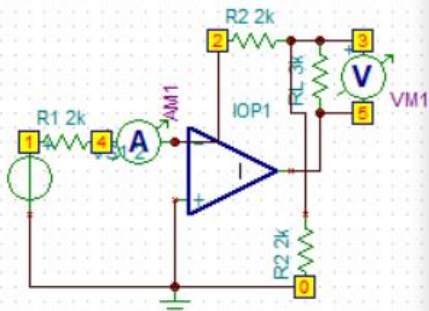
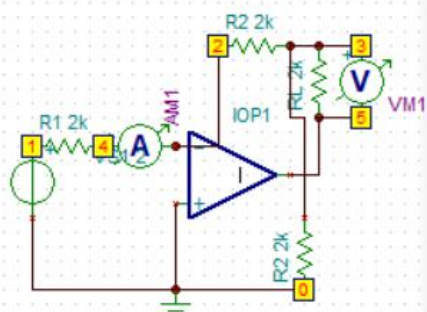


图 10 CCCS 实验电路

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 。

$$\alpha = 1 + R1 / R2 = 2;$$

表 7 CCCS 特性测量

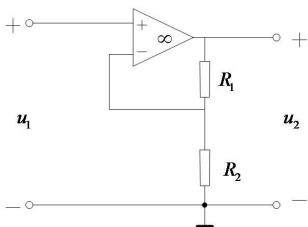
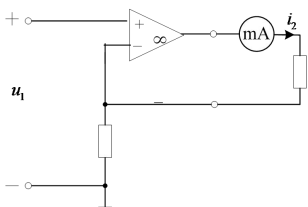
给定值	$R_L (\Omega)$	1K	2K	3K
测试值	$i_1 (\text{mA})$	1	1	1

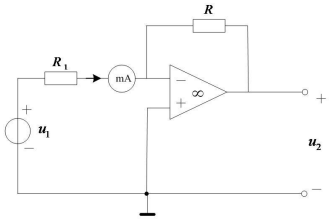
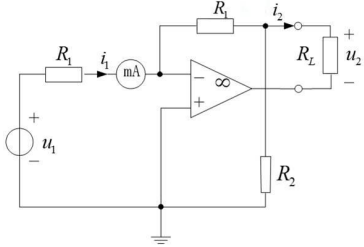
	U_2 (V)	2	4	6
计算值	i_2 (mA)	2	2	2
	α	2	2	2

五、实验分析和数据

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。

受控源符号	电路模型	控制量与被控制之间的关系
VCVS		$\mu = U_2/ U_1$ 称为转移电压比，或电压增益、电压放大倍数； $U_2 = i_1R_1 + i_2R_2 = i_2(R_1 + R_2) = \frac{U_1}{R_2}(R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)U_1$
VCCS		$G_m = I / U = 1 / R$ 称为转移电导

CCVS		转移电阻 $r_m = \frac{U_2}{i_s} = -R$
CCCS		<p>α 称为转移电流比，或电流增益、电流放大倍数</p> $i_L = i_1 + i_2 = i_1 + \frac{R_1}{R_2} i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) i_s$

2.对于初学电路基础的同学们来说，运放的概念可能有些抽象，理解上可能会遇到困难。同学们应详细阅读有关运放和受控源的章节，结合实验内容，争取尽早消化理解。在完成本节的实验内容之后，需要同学们结合测量数据，总结出四类受控源的特性和带负载时的特性，加深对于受控源的认识。

受控源类型	受控源特性	带负载时特性
VCVS	转移特性为： $U_2 = f(U_1)$	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
VCCS	转移特性为： $I_2 = f(U_1)$	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
CVVS	转移特性为： $U_2 = f(I_1)$	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

CVCS	转移特性为: $i_2 = f(i_1)$	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
------	-----------------------	---

3: 四类受控源由运放和相关电路组成, 每一类的受控源的电路都不是唯一的, 本节实验列举的只是其中的一个典型电路。同学们可以根据实验原理中的电路自行推导, 求出每一类受控源电路的转移函数, 加深对于运放和受控源的理解。

①电压控制电压源 (VCVS)

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)

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)

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)

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。

4. 将测量结果与理论值进行比较, 分析误差产生的原因。

1: VCVS, 由仿真与理论, $U_2 = \mu U_1$ 恒成立,

2: VCCS, 由仿真与理论, $i_2 = g_m U_1$ 恒成立,

3: CCVS, 由仿真与理论, $U_2 = r_m i_1$ 恒成立,

4: CCCS, 由仿真与理论, $i_2 = \alpha i_1$ 恒成立,

在实际操作中，读取电流表、电压表读数时系统或偶然误差等使得实验与理论值有出入。

5.试分析受控源的输出特性是否适用于交流信号。

受控源的输出特性适用于交流信号。受控源与信号种类无关。受控源对外提供的能量,既非取自控制量又非受控源内部产生的,而是由电子器件所需的电源供给。所以受控源实际上是一种能量转换装置。受控源的电流或电压由控制支路的电流或电压控制,当对受控源输入交流信号时,则受控源的电压、电流受交流信号控制,此时受控源的输出特性同样适用于交流信号。