

中山大学

电路基础实验报告

完成人： 雷俊峰、李冬

学号： 19308069、19308072

一、实验目的

通过本次实验，达到以下目的：

1. 基尔霍夫定律证明实验：
 - 验证基尔霍夫电流、电压定律，加深对基尔霍夫定律的理解；
 - 加深对电流、电压参考方向的理解。
2. 叠加定理证明实验：
 - 验证叠加定理；
 - 正确使用直流稳压电源和万用电表。

二、仪器设备

1. TPE-DG2L 电路分析实验箱，主要使用：
 - 不同阻值电阻（ $1k\Omega$ 、 $510k\Omega$ 、滑动变阻器）、电线等
2. SIGLENT SDM3065X 数字万用表
3. SIGLENT SPD3303X 可编程线性直流电源

三、实验原理与内容

1. 戴维南定理

（1）实验目的

1. 验证戴维南定理
2. 测定线性有源一端口网络的外特性和戴维南等效电路的外特性。

（2）实验原理

戴维南定理指出：任何一个线性有源一端口网络，对于外电路而言，总可以用一个理想电压源和电阻的串联形式来代替，理想电压源的电压等于原一端口的开路电压 U_{oc} ，其电阻（又称等效内阻）等于网络中所有独立源置零时的入端等效电阻 R_{eq} ，如图 1-1。

（3）电路图

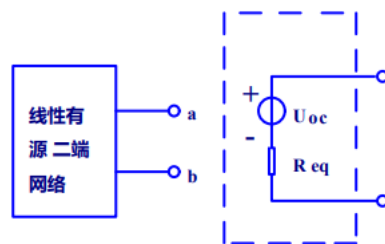


图. 1-1

(4) 预习内容

在图 1-2 中设 $E_1=10V$, $E_2=6V$, $R_1=R_2=1k\Omega$, 根据戴维南定理将 AB 以左的电路化简为戴维南等效电路。即计算图示虚线部分的开路电压 U_{oc} , 等效内阻 R_{eq} 及 A、B 直接短路时的短路电流 I_{sc} 之值, 填入自拟的表格中。

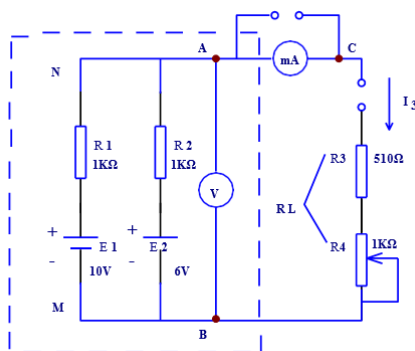


图. 1-2

$U_{oc}(V)$	$R_{eq}(k\Omega)$	$I_{sc}(mA)$
8	0.5	16

(5) 实验内容与步骤

1. 用戴维南定理求支路电流 I_3

测定有源二端网络的开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_{eq} 。

- 按图 1-2接线, 经检查无误后, 采用直接测量法测定有源二端网络的开路电压 U_{OC} , 数据填入表1-1。电压表内阻应远大于二端网络的等效电阻 R_{eq} 。

- 用两种方法测定有源二端网络的等效电阻 R_{eq} :

A. 采用原理中介绍的方法二测量：

首先利用上面测得的开路电压 U_{oc} 和预习中计算出的 R_{eq} 估算网络的短路电流 I_{sc} 大小，在 I_{sc} 之值不超过直流稳压电源电流的额定值和毫安表的最大量限的条件下，可直接测出短路电流，并将此短路电流 I_{sc} 数据记入表1-1中。

B. 采用原理中介绍的方法三测量：

接通负载电阻 R_L ，调节电位器 R_4 ，使 $R_L = 1K$ ，使毫安表短接，测出此时的负载端电压 U ，并记入表格 1-1 中。

取 A、B 两次测量的平均值作为 R_{eq} ，并记入表格 1-1 中。（ I_3 的计算见数据分析与比较）

表1-1

项目	$U_{oc} (V)$	$U(V)$	$I_{sc}(mA)$	$Req1 (\Omega)$	$Req2 (\Omega)$	$R_{eq} (\Omega)$ -均值
数值	7.99918	5.31223	16.01682	499.423731	498.5796	499.0016746

2. 测定有源二端网络的外特性

调节电位器 R_4 即改变负载电阻 R_L 之值，在不同负载的情况下，测量相应的负载端电压和流过负载的电流，共取五个点将数据记入表 1-2 中。测量时注意，为了避免电表内阻的影响，测量电压 U 时，应将接在 AC 间的毫安表短路，测量电流 I 时，将电压表从 A、B 端拆除。若采用万用表进行测量，要特别注意换档。

表1-2

次数	1	2	3	4	5
U (V)	4.4039	4.93466	5.14657	5.38807	6.03466
I (mA)	7.20551	6.14235	5.71891	5.23456	3.93307

3. 测定戴维南等效电路的外特性

将另一路直流稳压电源的输出电压调节到等于实测的开路电压 U_{oc} 值，以此作为理想电压源，调节电位器 R_6 ，使 $R_5 + R_6 = R_{eq}$ ，并保持不变，以此作为

等效内阻，将两者串联起来组成戴维南等效电路。按图 1-3接线，经检查无误后，重复上述步骤测出负载电压和负载电流，并将数据记入表1-3中。

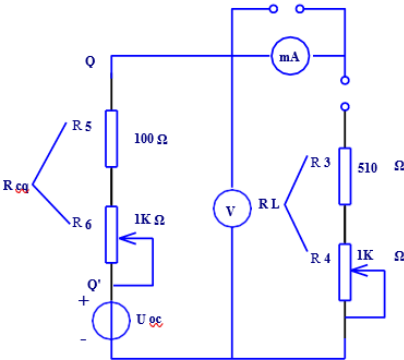


图. 1-3

次数	3	4	1	2	5
U (V)	4.40189	4.93309	5.14809	5.38971	6.03783
I (mA)	7.20363	6.1408	5.71775	5.23414	3.9325

表 1-3

(6) 数据分析与比较

1. 应用戴维南定理，根据实验数据计算 R_3 支路的电流 I_3 ，并与计算进行比较。

根据电路图1-2计算 I_3 :

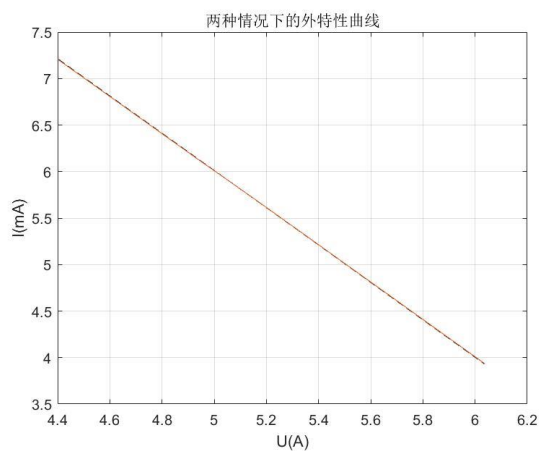
$$I_3 = \frac{U_{oc}}{R_{eq} + R_L} = \frac{8V}{0.5k\Omega + 1k\Omega} = 5.333mA$$

根据实验数据计算 I_3 :

$$I_3 = \frac{U_{oc}}{R_{eq} + R_L} = \frac{7.99918V}{499.0016746\Omega + 1000\Omega} = 5.336mA$$

可见，实验计算数据得到的 I_3 与根据电路图计算得到的 I_3 数值相差很小。实验戴维南等效成功。

2. 在同一坐标纸上作出两种情况下的外特性曲线,并作适当分析。
判断戴维南定理的正确性。



如图所示:

黑色虚线为有源二端网络的外特性;

橙色实线为戴维南等效电路的外特性。

实验结果显示当元器件均正常工作时戴维南等效电路得到的外特性和戴维南等效电路外特性曲线近乎重合。也即是对于该有源一端口网络,其相对于外电路的作用可用一个理想电压源和电阻的串联形式来代替,理想电压源的电压等于 U_{oc} , 等效内阻等于 R_{eq} 。实验结果验证了戴维南定理的正确性。

2. 运算放大器和受控源

(1) 实验目的

1. 获得运算放大器有源器件的感性认识。
2. 测试受控源特性，加深对它的理解，

(2) 实验原理及电路图

1. 运算放大器的“+”端与“-”端之间等电位，通常称为“虚短路”。
2. 运算放大器的输入端电流等于零。称为“虚断路”。
3. 理想运算放大器的输出电阻为零。
4. 图2-1所示的电路是一个电压控制型电压源（vcvs）

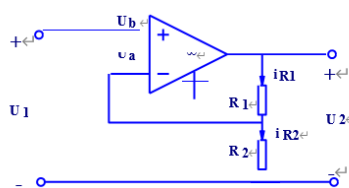


图 2-1

它的理想电路模型如图2-2所示

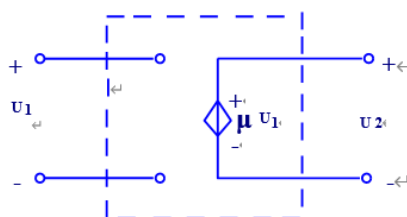


图. 2-2

其电压比为： $\mu = u_2/u_1 = 1 + R_1/R_2$

5. 图2-1电路中的 R_1 看作一个负载电阻，这个电路就成为一个电压控制型电流源(vccs)如图2-3所示。

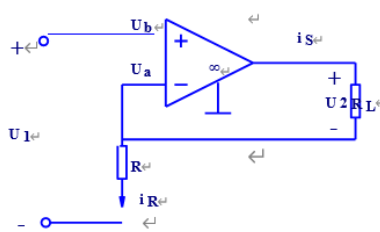


图. 2-3

运算放大器的输出电流： $i_s = i_R = u_a/R = u_1/R$ 。即 i_s 只受运算放大器输入电压 u_1 的控制，与负载电阻 R_L 无关。图2-4是它

的理想电路模型。

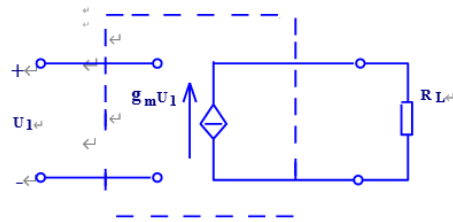


图. 2-4

比例系数： $g_m = i_s / u_1 = 1/R$ ， g_m 具有电导的量纲称为转移电导。图2-3所示电路中，输入、输出无公共接地点，这种联接方式称为浮地联接。

6. 一个简单的电流控制型电压源(ccvs)电路如图2-5所示。

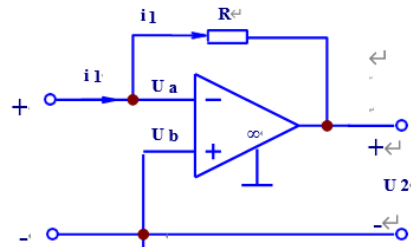


图. 2-5

流过电阻 R 的电流即为网络输入端口电流 i_1 ，运算放大器的输出电压 $u_2 = -i_1 R$ ，它受电流 i_1 所控制。图2-6是它的理想电路模型。

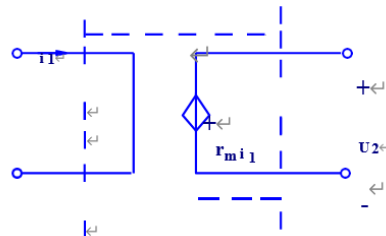


图. 2-6

其比例系数： $r_m = u_2 / i_1 = -R$ ， r_m 具有电阻的量纲、称为转移电阻，联接方式为共地联接。

7. 一个简单的电流控制型电压源(ccvs)电路如图2-7所示。

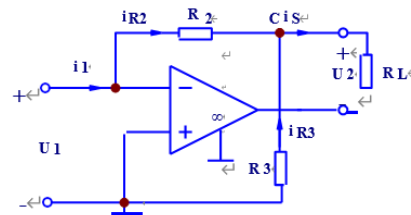


图. 2-7

输出电流 i_s 受输入端口电流 i_1 的控制，与负载电阻 R_L 无关。它的理想电路模型如图5-9所示。其电流比： $\alpha = i_s/i_1 = 1 + R_2/R_3$ ， α 无量纲称为电流放大系数。这个电路实际上起着电流放大的作用，联接方式为浮地联接。

(3) 实验内容与步骤

1. 测试电压控制电压源和电压控制电流源特性
实验线路及参数如图 2-8 所示。

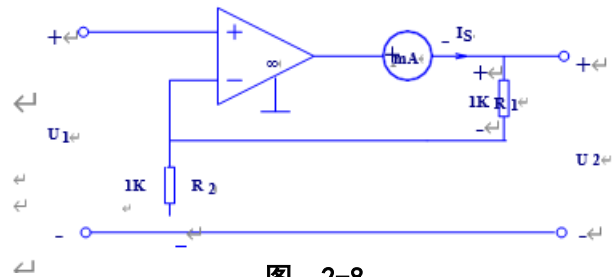


图. 2-8

- ①电路接好后，先不给激励电源 U_1 ，将运算放大器“+”端对地短路，接通实验箱电源工作正常时，应有 $U_2=0$ 和 $I_s=0$ 。
- ②接入激励电源 U_1 ，取 U_1 分别为 0.5V、1V、1.5V、2V、2.5V（操作时每次都要注意测定一下）测量 U_2 及 I_s 值并逐一记入表 2-1 中。测量 U_2 如图 2-11，测量 I_s 如图 2-12
- ③保持 U_1 为 1.5 伏，改变 R_1 （即 R_L ）的阻值，分别测量 U_2 及 I_s 的值并逐一记入表 2-2 中。测量 U_2 电路图如图 2-13，测量 I_s 的电路图如图 2-14。
- ④核算表 2-1 和表 2-2 中的各 μ 和 g_m 值，分析受控源特性。

表 2-1

给定值		U_1 (V)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
VCVS	测量值	U_2 (V)	0	1.000459	2.000489	3.00117	4.00064	5.00036
	计算值	μ	/	2.000918	2.000489	2.00078	2.00032	2.000144
VCCS	测量值	I_s (mA)	0	0.502153	1.00428	1.50667	2.008423	2.51089
	计算值	g_m (s)	/	0.001004	0.001004	0.001	0.001004	0.001004

表 2-2

给定值		R_1 (K Ω)	1	2	3	4	5
vcvs	测量值	U_2 (V)	3.00093	4.49972	6.00334	7.50072	9.002
	计算值	μ	2.00062	2.9998133	4.0022267	5.00048	6.00133333
vccs	测量值	I_s (mA)	1.50656	1.506601	1.50654	1.50652	1.50637
	计算值	g_m (s)	0.001	0.0010044	0.0010044	0.001	0.00100424

2. 测试电流控制电压源特性

实验电路如图 2-9 所示，输入电流由电压源 U_s 与串联电阻 R_i 所提供。

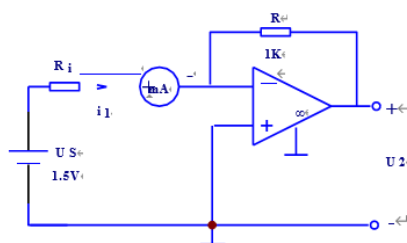


图. 2-9

①给定 R 为 $1K\Omega$ ， U_s 为 $1.5V$ ，改变 R_i 的阻值，分别测量 I_1 和

U_2 的值，并逐一记录于表 2-3 中，注意 U_2 的实际方向。 I_1 ， U_2 测量

图分别为图 2-15，图 2-16。

表 2-3

给定值	R_i (K Ω)	1	2	3	4	5
测量值	I_1 (mA)	1.36791	0.71741	0.485676	0.367468	0.29537
	U_2 (V)	-1.50088	-0.75094	-0.500203	-0.375379	-0.30024
计算值	r_m (Ω)	-1097.21362	-1046.75	-1029.911	-1021.528	-1016.48

②保持 U_s 为 $1.5V$ ，改变 R_i 为 $1K\Omega$ 的阻值，分别测量 I_1 和 U_2 的值，并逐一记录于表 2-4 中。 I_1 和 U_2 的测量图分别为图 2-17，图 2-18。

表 2-4

给定值	R ($K\Omega$)	1	2	3	4	5
测量值	I_1 (mA)	1.367905	1.36786	1.367729	1.367704	1.36769
	U_2 (V)	-1.500884	-3.00036	-4.50052	-6.00642	7.50064
计算值	r_m (Ω)	-1097.21362	-2193.48	-3290.506	-4391.608	5484.16

③核算表 5-3 和表 5-4 中的各 r_m 值，分析受控源特性。

3. 测试电流控制电流源特性，实验电路及参数如图 2-10 所示

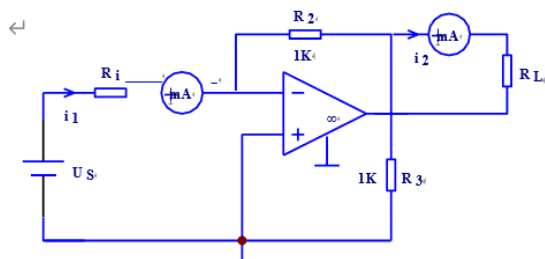


图. 2-10

①给定 U_s 为1.5 伏 R_i 为 3 千欧, R_2 和 R_3 为1 千欧, 负载分别取0.5 千欧、2 千欧、3 千欧逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。填入表格2-5

表 2-5

给定值	RL ($K\Omega$)	0.5	2	3
测量值	I_1 (mA)	0.485633	0.4856	0.485585
	I_2 (mA)	1.004189	1.00417	1.004138
计算值	α	2.067793993	2.0679	2.067893

②保持 U_s 为 1.5 伏, R_L 为 1 千欧, R_2 和 R_3 为 1 千欧, 分别取 R_i 为 3 千欧、2.5 千欧、2 千欧、1.5 千欧、1 千欧, 逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。填入表格 2-6。

表 2-6

给定值	$R_i(\text{K}\Omega)$	1	1.5	2	2.5	3
测量值	$I_1(\text{mA})$	1.368364	0.94055	0.717239	0.57869	0.48538
	$I_2(\text{mA})$	3.01533	2.0087	1.507398	1.204337	1.00357
计算值	α	2.203602258	2.1357	2.10167	2.081144	2.0676

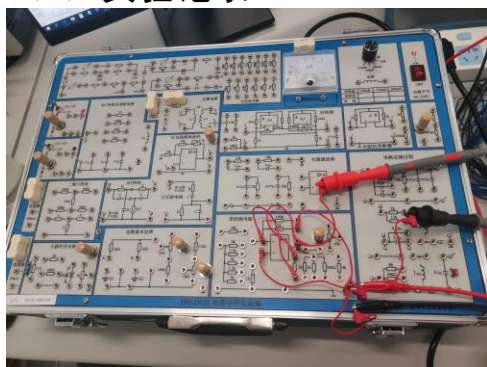
③保持 U_s 为 1.5 伏， R_L 为 1 千欧、 R_i 为 3 千欧，分别取 R_2 （或 R_3 ）为 1 千欧、2 千欧、3 千欧、4 千欧、5 千欧，逐一测量并记录 I_1 及 I_2 的数值。填入表格2-7。 I_1 和 I_2 的测量图如图2-19和图2-20

表 2-7

给定值	$R_3(\text{K}\Omega)$	1	2	3	4	5
测量值	$I_1(\text{mA})$	0.485371	0.48535	0.485323	0.485298	0.48529
	$I_2(\text{mA})$	1.003652	0.75278	0.668941	0.627235	0.60209
计算值	α	2.067803804	1.551	1.37834	1.292474	1.2407

④核算各种电路参数下的 α 值，分析受控源特性。

(4) 实验记录

图 2-11 vcvs 测量 U_2 图 2-12 vccs 测量 I_1 。在 $U_1=0.5\text{V}$ 时

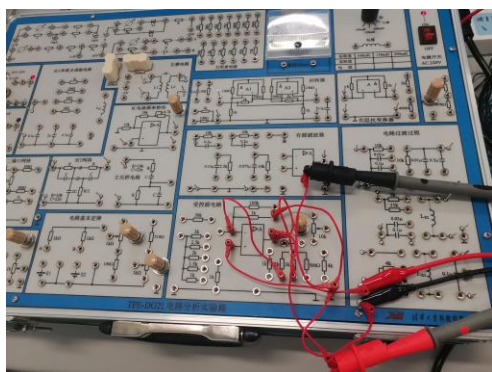


图 2-13 vcvS 测量 U_2

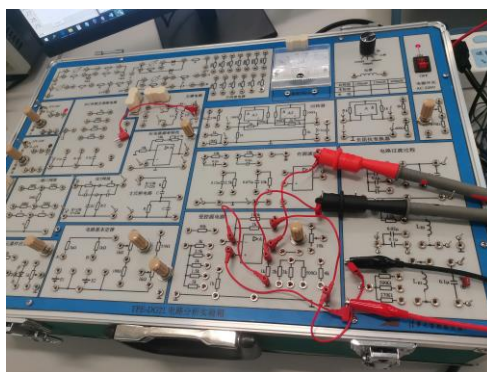


图 2-14 vccs 测量 I_1

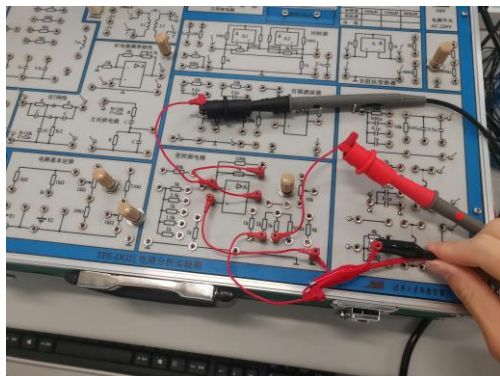


图 2-15 ccvs 测量 I_1

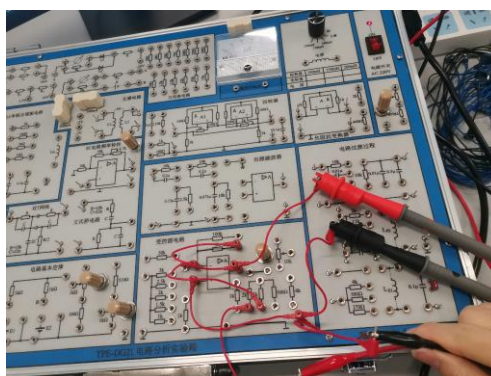


图 2-16 ccvs 测量 U_2

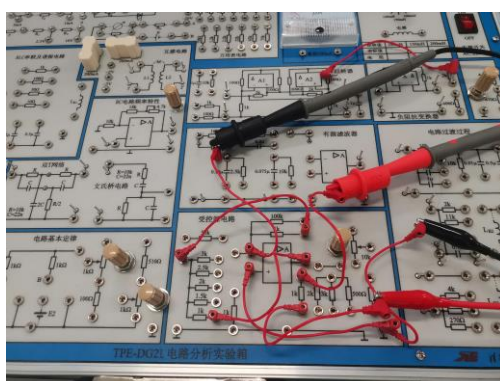


图 2-17 cccs 测量 I_1

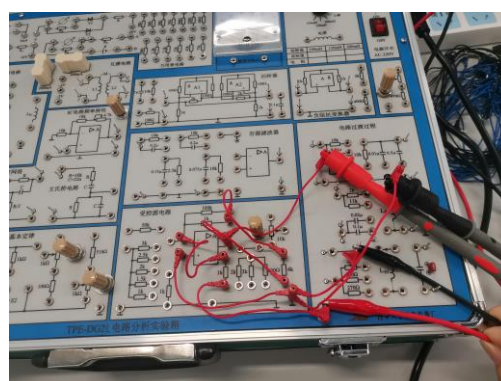


图 2-18 cccs 测量 U_2

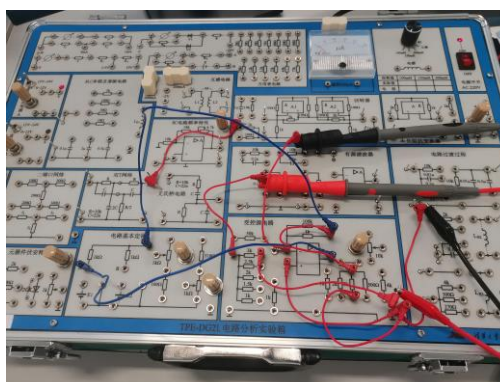


图 2-19 cccs 测量 I_1

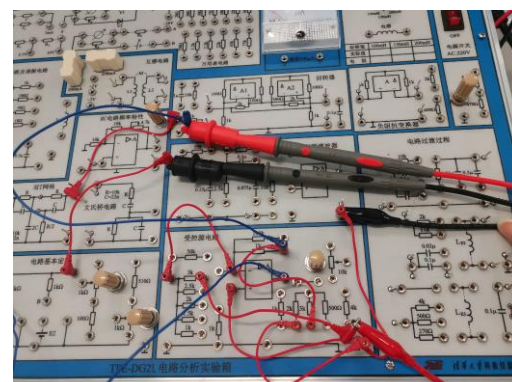


图 2-20 cccs 测量 I_2

(5) 数据分析

1. 测试电压控制电压源和电压控制电流源特性:

在 U_1 取变化值的实验中, 理论计算所得的 μ 值应为 2, 通过测量所得的 μ 值亦约为 2, 与理论相符。说明 U_2 电压受 U_1 控制, 受控源表现为电压控制型电压源。

将 R_1 看作负载之后 g_m 的理论值应为 $1/1K$, 即 $0.001s$, 实验中通过测量后计算所得的 g_m 同样约为 0.001, 与理论值相符。说明输出端的电流受电压 U_1 控制, 受控源表现为电压控制型电流源。

在 U_1 不变, 改变 R_1 的值的实验中, 通过实验计算所得的 μ 值和 g_m 都与 R_1 在不同阻值下的理论 μ 值和 g_m 值十分接近。说明改变 R_1 也即改变了电路结构, 受控源的参数改变, 但是受控源特性不改变。在 $vcvs$ 下, U_2 仍然受 U_1 控制, 在 $vccs$ 下, 输出端电流 I_s 仍然受 U_1 控制。

说明受控源系数 μ 可以由 $1+R_1/R_2$ 得出, 受控源系数 g_m 可以由 $1/R$ 得出。

2. 测试电流控制电压源特性:

在改变 R_i 组织的实验中, 通过实验测量计算所得的 r_m 与理论值十分接近, 除了在 R_i 等于 $1k\Omega$ 时误差接近 10%, 其余组的数据误差都保持在 5% 以内。由此可以分析出, 电路中的 R 决定了受控源系数, 与 R_i 无关。

在改变 R 阻值的实验中, 每组计算所得的 r_m 与理论值的误差都接近但小于 10%, 由此可以再次佐证受控源电路中的 R 决定了受控源系数, r_m 的值可以由 $-R$ 计算所得。且 U_2 受 I_1 控制, 该受控源为 $ccvs$ 。

对于当 R_i 为 $1k\Omega$ 时误差接近 10% 的原因我们分析后认为, 应该是实验中所用的运算放大器不是理想运算放大器, 所以计算式中所用的 i_1 与实际偏小 (即不能把运算放大器的输入端完全看作断路), 导致 $|r_m|$ 偏大。而当 R_i 逐渐增大时运算放大器输入端的分流电流逐渐变小, 使得误差变小。

这样便可以解释在改变 R_i 阻值的实验时, 随着 R_i 的增大, 为何实验测量计算所得误差逐渐变小。

3. 测试电流控制电流源特性:

在改变 R_L 和改变 R_i 的实验中, 通过测量计算所得的受控源系数 α 都与理论

值十分接近，且不随 R_L 和 R_i 的改变而改变。但是在 R_i 较小时误差较大，原因与上面 2. 中的结论相同，即此时运算放大器不能完全看作理想放大器，即运算放大器的输入端不能完全看作断路。

当改变 R_3 的阻值时， α 随着 R_3 的值的而变化而变化，且与理论值的误差保持在 5% 以内，由此可以说明 R_3 决定了受控源系数， α 的值可以由 $1+R_2/R_3$ 得出，电路中的 I_s 受 I_1 控制，该受控源为 cccs。

四、实验中的问题和体会

实验总结：

本次的实验内容为验证戴维南定理和测定线性有源一端口网络的外特性和戴维南等效电路的外特性。

戴维南定理是一端口电路对外界伏安特性的等效，所以预习部分首先根据电路图进行理论计算，然后实接电路测量等效部分的伏安特性，验证其是否和原电路相同。验证的标准为测量得到的 I_3 值。本实验最终得到的测量值基本符合理论计算。

遇到的问题：进行第二个实验测量运算放大器和受控源的外特性时接通电源后出现测量值和理论估计值符号相反的情况。

解决方法：经过排查线路后发现是由于线路过于复杂，接线口混乱导致测量万用表正负极接反，调整电路后示数恢复正常。