

实验三 含有非独立源的电路的研究

实验报告

姓名：彭程

学号：2020011075

班级：自 02

日期：2021 年 3 月 12 日

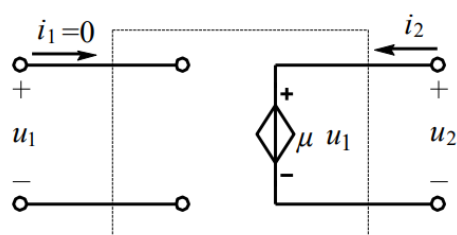
1. 实验目的

- (1) 加深对非独立电源的特性的理解；
- (2) 通过理论分析和实验验证掌握含有非独立电源的线性电路的分析方法。

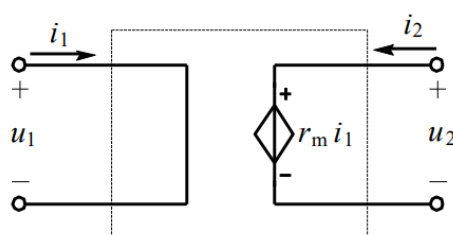
2. 实验说明

- (1) 四种受控源及其电路符号：

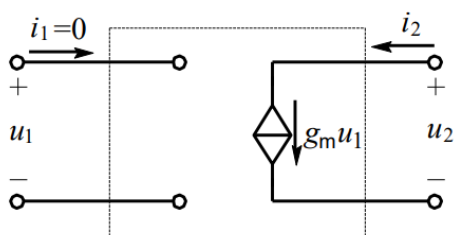
非独立电源也称为受控源，该电压源的电压(或电流源的电流)不是独立的，而是受电路中其他支路的电压(或电流)的控制。当控制量为电压(或电流)时，按控制量和受控源的不同，非独立电源可分为四种即：电压控制的电压源(VCVS)、电流控制的电压源(CCVS)、电压控制的电流源(VCCS)和电流控制的电流源(CCCS)。它们的电路符号分别示于图 (a)、(b)、(c)、(d) 中。



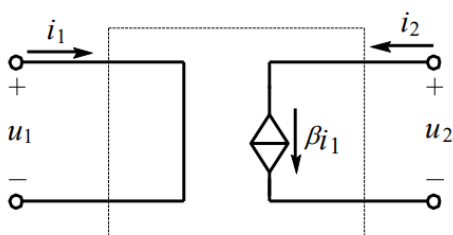
(a) $u_2 = \mu u_1$



(b) $u_2 = r_m i_1$



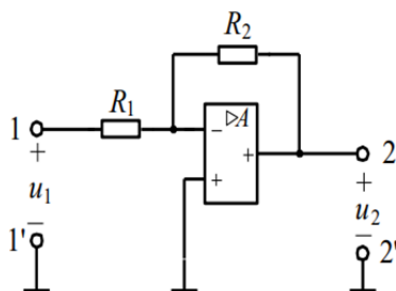
(c) $i_2 = g_m u_1$



(d) $i_2 = \beta i_1$

由上图可知，一个非独立源可用一个含有两个支路的二端口来表示。当比例系数 μ 、 r_m 、 g_m 和 β 是常数，这样的非独立源便是线性元件。含有线性非独立电源及其他线性元件的电路仍是线性电路。对含有非独立电源的线性电路，叠加定理、戴维南定理等也都是适用的。

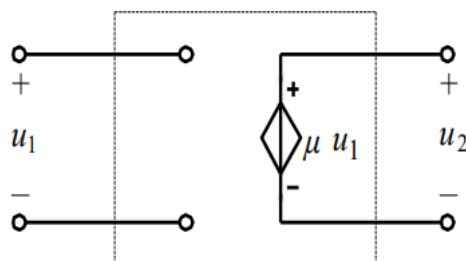
本实验所用的电压控制的电压源是一个由运算放大器构成的比例器，如图所示：



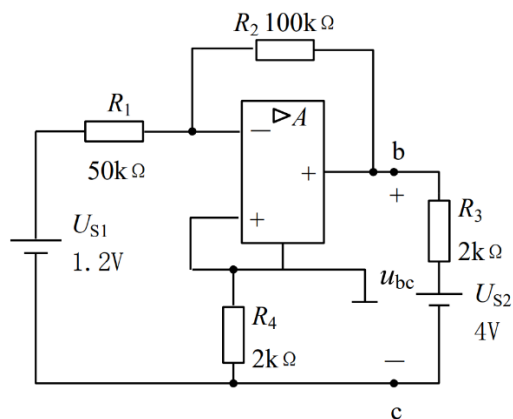
在理想情况下($A \rightarrow \infty$), 它的输入电压 u_1 与输出电压 u_2 有以下关系:

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1}u_1$$

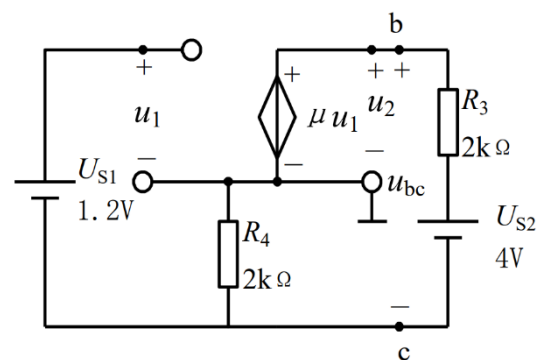
如果 R_1 足够大, 就可以将它看作下图的电压控制的电压源, 其中 $\mu = -R_2/R_1$ 。
(注意, 对于实际的运算放大器, 仅当 u_2 不超过规定的范围才满足上述关系)。



3. 实验电路



(a) 实际电路



(b) 等效电路

4. 实验任务

4.1 预习计算

(1) 列写电路方程求解

设通过电阻 R_4 的电流为 I

对左右两侧回路列写 KVL 方程:

$$\mu u_1 + 2000I - 4 + 2000I = 0$$

$$u_1 + 2000I - U_{s1} = 0$$

解得:

$$u_1 = -0.4V$$

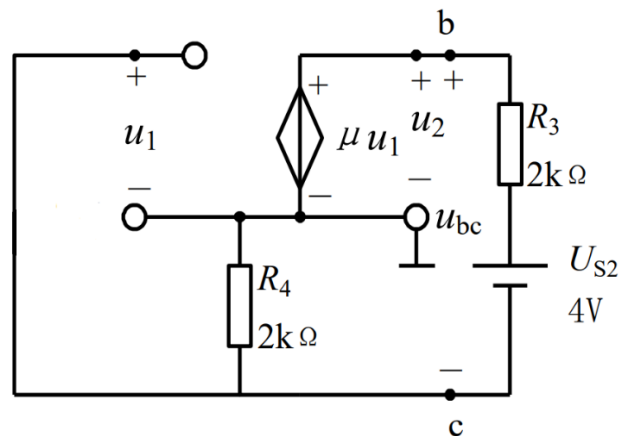
$$I = 0.8mA$$

故：

$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I = 2.4V$$

(2) 叠加定理求解

先将电源 U_{s1} 置 0，得到如下电路：



同样，设通过电阻 R_4 的电流为 I

对左右两侧回路列写 KVL 方程：

$$u_1 + 2000I = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I + 2000I - U_{s2} = 0$$

解得：

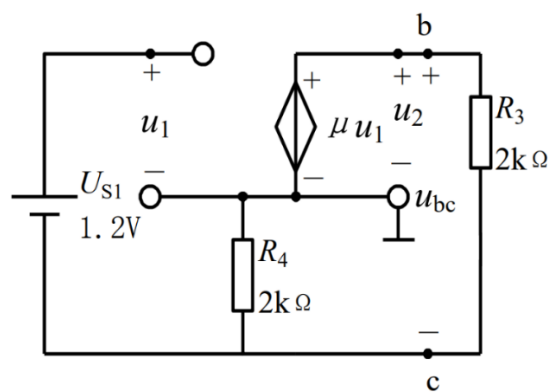
$$u_1 = -1V$$

$$I = 0.05mA$$

故：

$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I = 3V$$

再将电源 U_{s2} 置 0，得到如下电路：



对左右两侧回路列写 KVL 方程：

$$u_1 + 2000I - U_{s1} = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I + 2000I = 0$$

解得：

$$u_1 = 0.6V$$

$$I = 0.3mA$$

故：

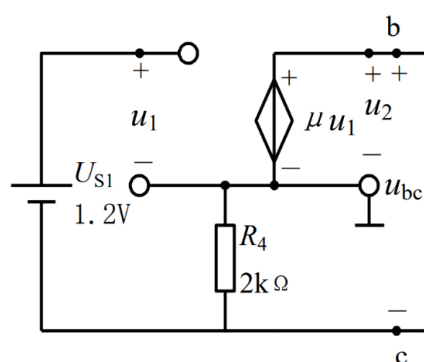
$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I = -0.6V$$

综合两种情况，得到：

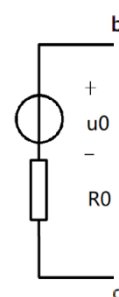
$$u_{bc} = 3 - 0.6 = 2.4V$$

(3) 戴维南定理求解

由戴维南定理，将下(a)图等效为(b)图：



(a)

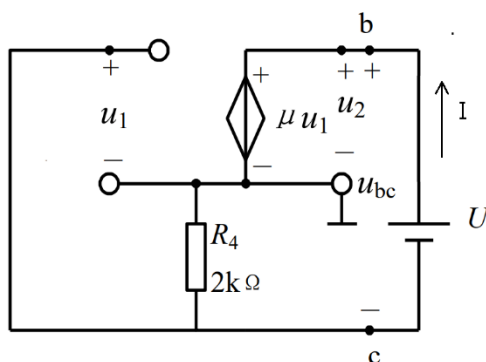


(b)

u_0 为 bc 开路端电压， R_0 为独立源不作用时 bc 端输入电阻。

$$u_0 = \mu u_1 = -2.4V$$

通过加压求流法计算 bc 端输入电阻：



对左右两网孔列写 KVL 方程得：

$$u_1 + 2000I = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I - U = 0$$

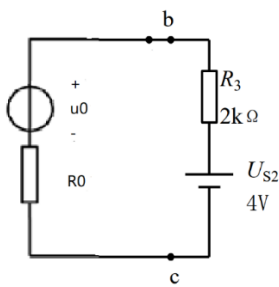
联立两式可以得到：

$$\frac{U}{I} = 6000\Omega$$

即：

$$R_0 = 6000\Omega$$

故最终电路可等效为：



其中：

$$u_0 = -2.4V$$

$$R_0 = 6000\Omega$$

设电阻 R_3 两端电压为 u ，

列写回路的 KVL 方程：

$$u_0 + 3u + u - 4 = 0$$

解得：

$$u = 1.6V$$

$$u_{bc} = u_0 + 3u = 2.4V$$

(4) 求解结果列表

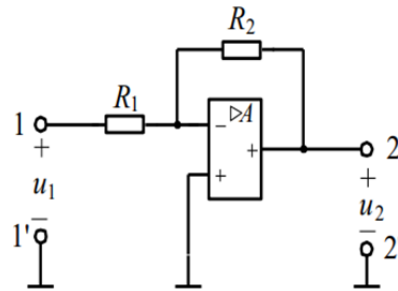
求解方法	求解结果
列写电路方程	$u_{bc} = 2.4V$
叠加定理	U_{S1} 作用, $U_{S2}=0$ 时 $u'_{bc} = -0.6V$ $U_{S1}=0$, U_{S2} 作用时 $u''_{bc} = 3V$ U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用时 $u_{bc} = u'_{bc} + u''_{bc} = 2.4V$
戴维南定理	等效电势 $U_0 = -2.4V$ 等效内阻 $R_0 = 6000\Omega$ $u_{bc} = 2.4V$

4.2 实验课任务

4.2.1 测定所使用的非独立源的比例系数及适用的电压范围：

实验思路：

测量电路图如下：



其中： $R_1 = 50k\Omega$ ， $R_2 = 100k\Omega$

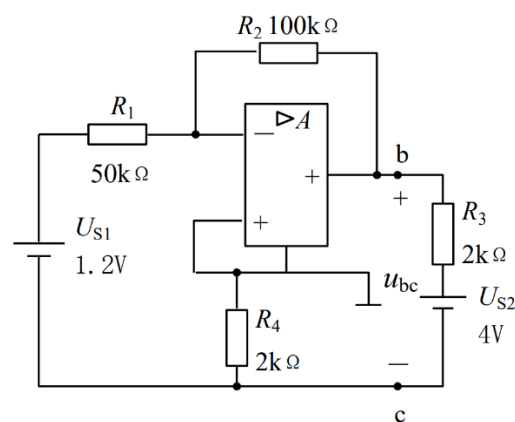
根据运算放大器的输入输出特性，本实验在不同 u_1 的情况下测量 u_2 ，则当 u_1 在一定范围内变化时， u_2 与 u_1 成线性且比例系数为常数 μ 。

由于测量电表有一定误差，所以实验得到的比例系数 μ 有一定差异。在本实验条件下，若差异超过2%就认为此非独立源已经超出了线性范围。比例系数取线性范围内的平均值。

4.2.2 运用三种方法测定电压 u_{bc}

实验思路：

测量电路图如下：



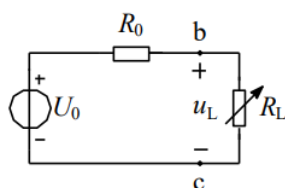
(1)直接法：直接使用电压表测量 bc 两端电压；

(2) 叠加法: 即分别测量 U_{S1} 、 U_{S2} 单独作用时 bc 端的电压 u_{bc}' 、 u_{bc}'' , 则 $u_{bc} = u_{bc}' + u_{bc}''$ 。

(3) 戴维南等效电路法, 即分别测出图中端口 bc 左端电路的戴维南等效电路中的开路电压 U_0 和等效电阻 R_0 , 再由等效电路算出 u_{bc} 。

其中, 在利用戴维南等效电路法时, 测量 R_0 的过程中为了避免造成非独立源过载超出线性变化范围, 我们不采用加压求流或通过测量开路电压和短路电流得到 R_0 的方式, 而是采用半偏法。

从戴维南等效来看, 在 bc 端串联一变阻器后的等效电路如下:



当 bc 端电压达到 $U_0/2$ 时, 即半偏时, $R_0 = R_L$ 。

实验原始数据表格如下:

原始记录:

$U_1(V)$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4.0	4.5
$U_2(V)$	-1.017	-2.017	-3.018	-4.020	-5.022	-6.022	-6.813	-6.895	-6.925
U	-2.034	-2.017	-2.012	-2.010	-2.009	-2.007	-1.947	-1.723	-1.534

测量结果	
直接法	$U_{bc} = 2.371V$
叠加定理	U_{S1} 作用, $U_{S2} = 0$, $U'_{bc} = -0.587V$ $U_{S1} = 0$, U_{S2} 作用, $U''_{bc} = 2.956V$ U_{S1} , U_{S2} 同时作用, $U_{bc} = U'_{bc} + U''_{bc} = 2.369V$
戴维南定理	等效电势 $U_0 = -2.276V$ 等效电阻 $R_0 = 5750\Omega$ $U_{bc} = 2.380V$

电源: 15028576 、 15028529

台式万用表 11029579

电阻箱 DZ-1525

实验人: 彭程 2020011075

日期: 2021.3.26.

7 倍 3.76

5. 思考题

如果仔细观察，实测的 bc 端开路电压的绝对值(戴维南定理中的 U_0)总比预习计算的结果小，为什么？

实际运算放大器的输入电阻 R_i 并不是正无穷。由于 R_i 和 R_4 的分压作用，实测时有电流 I 流过 R_4 ，所以开路电压 $U_0 = \mu u_1 + u_4$ ， $u_1 = U_{s1} - u_4$ ，故 $U_0 = \mu U_{s1} + (1 - \mu)u_4$ ，取实际测量值 $\mu = -2.01$ ，得 $U_0 = -2.01 \times 1.20 + 3.01u_4$ ，故 $|U_0| < 2.40V$ 。

6. 终结报告要求

1. 用实测的 μ 值用三种方法计算 u_{bc}

$U_1(V)$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4.0	4.5
$U_2(V)$	-1.017	-2.017	-3.018	-4.020	-5.022	-6.022	-6.813	-6.895	-6.925
μ	-2.034	-2.017	-2.012	-2.010	-2.009	-2.007	-1.947	-1.723	-1.534

根据表格和不超过 2% 差异的原则，计算得出 $\mu = -2.01$

三种方法计算 u_{bc} 如下：

列写电路方程法：

$$\mu u_1 + 2000I - 4 + 2000I = 0$$

$$u_1 + 2000I - U_{s1} = 0$$

解得：

$$u_1 = -0.399V$$

$$I = 0.799mA$$

故：

$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I \approx 2.40V$$

叠加定理：

先将电源 U_{s1} 置 0，同样，设通过电阻 R_4 的电流为 I ，对左右两侧回路列写 KVL 方程：

$$u_1 + 2000I = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I + 2000I - U_{s2} = 0$$

解得：

$$u_1 = -0.998V$$

$$I = 0.050mA$$

故：

$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I \approx 3.00V$$

再将电源 U_{s2} 置 0，对左右两侧回路列写 KVL 方程：

$$u_1 + 2000I - U_{s1} = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I + 2000I = 0$$

解得：

$$u_1 = 0.599V$$

$$I = 0.301mA$$

故：

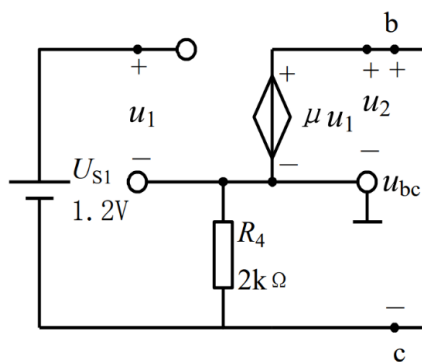
$$u_{bc} = \mu u_1 + 2000I = -0.60V$$

综合两种情况，得到：

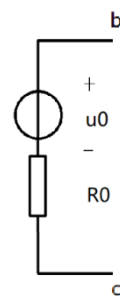
$$u_{bc} = 3.00 - 0.60 = 2.40V$$

戴维南定理求解：

由戴维南定理，将下(a)图等效为(b)图：



(a)

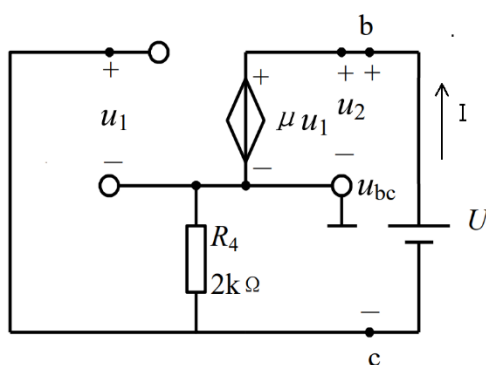


(b)

u_0 为 bc 开路端电压， R_0 为独立源不作用时 bc 端输入电阻。

$$u_0 = \mu u_1 = -2.41V$$

通过加压求流法计算 bc 端输入电阻：



对左右两网孔列写 KVL 方程得：

$$u_1 + 2000I = 0$$

$$\mu u_1 + 2000I - U = 0$$

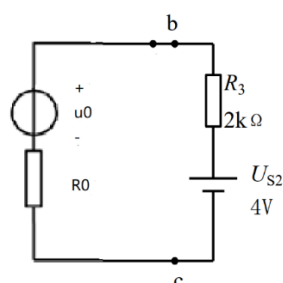
联立两式可以得到：

$$\frac{U}{I} = 6020\Omega$$

即：

$$R_0 = 6020\Omega$$

故最终电路可等效为：



其中：

$$u_0 = -2.414V$$

$$R_0 = 6020\Omega$$

设电阻 R_3 两端电压为 u ，

列写回路的 KVL 方程：

$$u_0 + 3u + u - 4 = 0$$

解得：

$$u = 1.603V$$

$$u_{bc} = u_0 + 3u \approx 2.40V$$

故最终的计算结果如下：

求 解 方 法	求 解 结 果
列写电路方程	$u_{bc} = 2.40V$
叠加定理	U_{S1} 作用, $U_{S2}=0$ 时 $u'_{bc} = -0.60V$ $U_{S1}=0$, U_{S2} 作用时 $u''_{bc} = 3.00V$ U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用时 $u_{bc} = u'_{bc} + u''_{bc} = 2.40V$
戴维南定理	等效电势 $U_0 = -2.41V$ 等效内阻 $R_0 = 6020\Omega$ $u_{bc} = 2.40V$

2. 将上述计算结果与实验测量值进行比较，分析产生误差的原因。

- (1) 运算放大器的入端阻抗不够大，即输入电阻不是无穷大；
- (2) 实验用电阻箱阻值不够准确；
- (3) 各个接线端的接触电阻产生的接触误差；
- (4) 读表时存在的随机误差。

3. 实验结论

- (1) 对含有非独立电源的线性电路，叠加定理、戴维南定理等都适用；
- (2) 仅当 u_2 处于一定范围内时，运算放大器处于线性工作区；
- (3) 当由运算放大器构成的比例器中电阻 R_1 足够大，且电压处于线性工作区时，可以将其看作是压控电压源。

- (4) 非独立电源的特性为：

电流控制的电流源： $i_2 = \beta i_1$

电流控制的电流源： $i_2 = g_m u_1$

电流控制的电压源： $u_2 = r_m i_1$

电压控制的电压源： $u_2 = \mu u_1$

4. 收获

- (1) 当运算放大器处于线性工作区时，运用运算放大器的特性可以构成实际的压控电压源。
- (2) 用叠加法测量时，切不可将不作用的输出端直接短路，否则会烧毁电源。
- (3) 为避免超出非独立源线性范围，同时消除电压表带来的误差，在测量戴维南等效电阻时可以采用半偏法测量电阻。
- (4) 实验时，为了使测得的电压比较准确，要求输入端和输出端的电压都经过电压表而不是简单的调节电源电压。