

电路原理课程作业

**Homework of Principles of Electric Circuits**

丁毅

中国科学院大学，北京 100049

**Yi Ding**

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2024.8 – 2025.1

## 序言

本文为笔者本科时的“电路原理”课程作业（Homework of Principles of Electric Circuits, 2024.9-2025.1）。由于个人学识浅陋，认识有限，文中难免有不妥甚至错误之处，望读者不吝指正，在此感谢。

我的邮箱是 [dingyi233@mails.ucas.ac.cn](mailto:dingyi233@mails.ucas.ac.cn)。

---

## 目录

序言	I
目录	I
1 2024.8.27 - 2024.9.2	1
2 2024.9.3 - 2024.9.9	5
3 2024.9.10 - 2024.9.18	8
4 2024.9.19 - 2024.9.24	16
5 2024.9.25 - 2024.10.8	18
附录 A Matlab 代码	24

## Homework 1: 2024.8.27 - 2024.9.2

### 1.1 习题集 1-2: 求题图各电路中的电压 $U$ 和电流 $I$

- (a) 短路, 因此  $U = 0$ ,  $I = \frac{U_s}{R_i}$   
 (b) 开路, 因此  $U = U_s$ ,  $I = 0$   
 (c) 构成回路, 因此  $U = \frac{U_s R}{R + R_i}$ ,  $I = \frac{U_s}{R + R_i}$

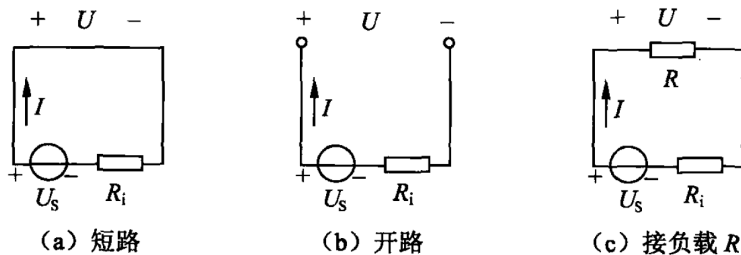


图 1.1: 1.1 习题集 1-2

### 1.2 习题集 1-9: 求题图 (a) 中的电压 $U_{ab}$ , 图 (b) 中的电阻 $R$ , 图 (c) 中的电压 $U_s$ 和图 (d) 中的电流 $I$

- (a)  $\varphi_a - 3\text{ V} + 2\text{ V} = \varphi_b \Rightarrow U_{ab} = 1\text{ V}$   
 (b)  $I = 1\text{ A}$ ,  $3 - IR = -4 \Rightarrow R = 7\ \Omega$   
 (c)  $-3 + U_s = 1 \Rightarrow U_s = 4\text{ V}$   
 (d)  $R = 2\ \Omega$ ,  $-IR + 2 = 3 \Rightarrow I = -0.5\text{ A}$

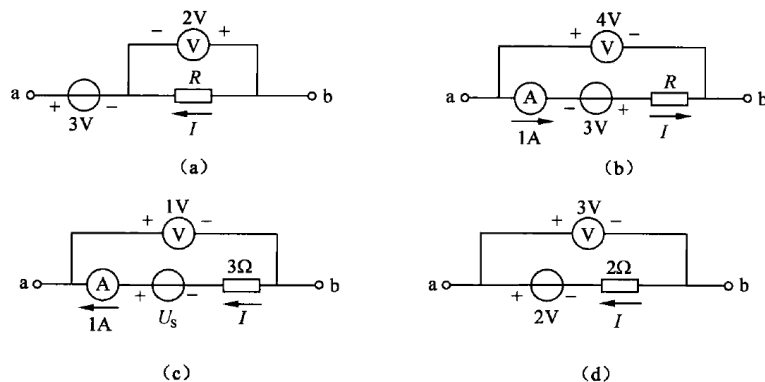


图 1.2: 1.2 习题集 1-9

### 1.3 习题集 1-10: 求题图电路中的电压 $U_{ab}$

- (a) 记参考点 a 的电势  $\varphi_a = 0$ , 则  $\varphi_c = 2\text{ V}$ ,  $\varphi_b = -2\text{ V}$ , 因此  $U_{ab} = 2\text{ V}$   
 (b) 记参考点 d 的电势  $\varphi_d = \varphi_b = 0$ , 则  $\varphi_c = 6\text{ V}$ ,  $\varphi_a = -2\text{ V}$ , 因此  $U_{ab} = -2\text{ V}$

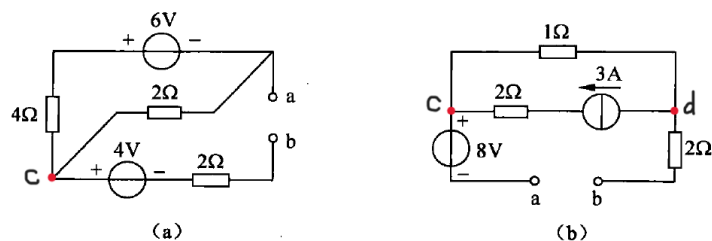


图 1.3: 1.3 习题集 1-10

后补: (b) 中电流源两端仍有电势差,  $\varphi_c \neq 6\text{ V}$  而是  $\varphi_c = -3\text{ V}$ , 最终得  $U_{ab} = -5\text{ V}$ 。

#### 1.4 习题集 1-15: 求题图各电路汇总所标出的电压和电流

- (a)  $I = -\frac{U}{R} + 4\text{ A} = -2\text{ A}$   
 (b)  $U = 12\text{ V} + 3\Omega \times 4\text{ A} = 0$   
 (c)  $I = 8\text{ A} - 6\text{ A} = 2\text{ A}$ ,  $U = 12\text{ V} + 3 \times 8\text{ V} = 36\text{ V}$   
 (d) 取点  $d$  为参考点, 则  $\varphi_d = \varphi_c = 0$ ,  $\varphi_b = \varphi_a = 9\text{ V}$ , 于是  $U_1 = 9 + 2 \times 3 = 15\text{ V}$ ,  $U_2 = 9 + 2 \times 2 = 13\text{ V}$ ,  $I = 2 - (9 - 3) = -4\text{ A}$

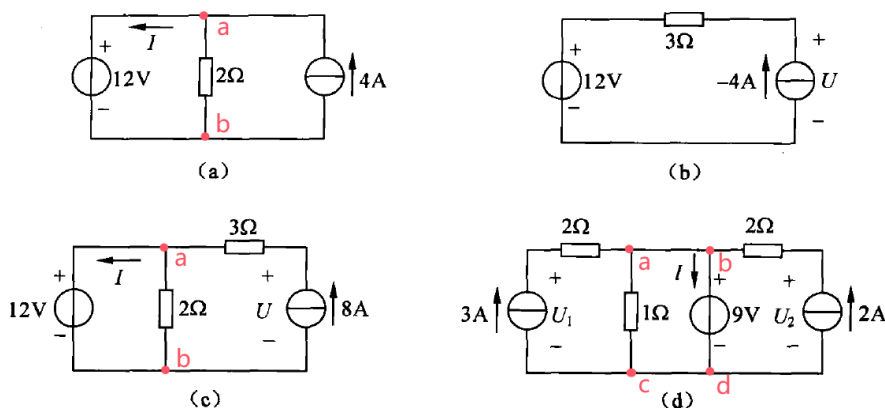


图 1.4: 1.4 习题集 1-15

#### 1.5 习题集 1-29: 题图电路中流过 $40\Omega$ 电阻的电流为 $2\text{ A}$ , 求电流源的电流值 $I_S$

取点  $a$  为参考点  $\varphi_a = 0$ , 可得  $\varphi_b = 100U_1 - 80$ , 于是在结点  $a$  有电流:

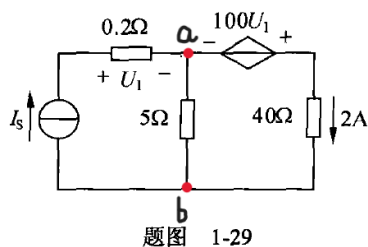
$$I_S + \frac{100U_1 - 80}{5} = 2$$

$0.2\Omega$  电阻处又有  $U_1 = 0.2I_S$ , 联立解得  $I_S = 3.6\text{ A}$ ,  $U_1 = 7.2\text{ V}$ 。

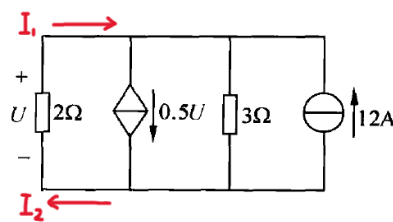
#### 1.6 习题集 1-30: 求题图电路中独立电源的功率

这里要注意左二元器件是受控电流源, 因此  $0.5U$  是指电流大小而非电压。  $I_1$  处可列出方程:

$$\frac{U}{2} + 12 - \frac{U}{3} = 0.5U \Rightarrow U = 36\text{ V} \Rightarrow P = UI = 432\text{ W}$$



题图 1-29



题图 1-30

图 1.5: 1.4 习题集 1-29 和 1.5 习题集 1-30

后补：上面的方程列错了，错将  $I_1$  的方向标为由左向右，应该是由右向左。最后得到  $P = 108\text{ W}$ 。另外，也可以直接将受控电流源看作是  $2\Omega$  的电阻，这样左侧三个电阻并联，也可求出正确答案  $108\text{ W}$ 。

### 1.7 讲义题 1-6: 关联参考方向下，电阻的 $\alpha > 90^\circ$ 代表什么物理意义

$\alpha > 90^\circ$  时，电阻为“负电阻”。

### 1.8 讲义题 1-7: 充电电池的 1 C 是什么意思，涓流充电是多少 C，快速充电是多少 C

充放电倍率 C 的含义：

C（充放电倍率）表示电池充放电时电流相对电池容量的大小数值， $C = \frac{\text{电池容量}}{\text{充放电所需时间}}$ 。例如，1 C 电流充电表示电池需要 1 小时充满，5 C 充电表示电池需要 0.2 小时充满。放电也是类似的，一个 10 Ah 的电池以 2 C 放电，表示以 20 A 的电流放电 0.5 h。

若倍率上升，总时间就会下降，若倍率下降，总时间就会上升。通俗来讲，C 代表了电池的爆发力大小，高倍率的动力电池瞬间放电电流大，特别适合大电流放电产品使用，如航模。

涓流充电：

涓流充电是指在电池接近完全充满电后，采用非常小的电流进行充电，以弥补电池自放电造成的容量损失。理论倍率 C 约为最大倍率  $C_{\max}$  的  $\frac{1}{100}$  至  $\frac{1}{1000}$ ，但由于倍率太小，常常根本无法充电，一个比较好的方法是脉冲式充电，例如以  $\frac{C_{\max}}{10}$  充电 6 s，然后停止充电 54 s。

快速充电：

快速充电至少要求 1 C，现阶段的快速充电多在 1.5 C 至 2 C 之间。

### 1.9 讲义题 1-8 (Multisim 仿真)：用 Multisim 实现课堂仿真中的 MOSFET。画出 $U_{GS}$ 固定为 5 V， $U_{DS}$ （横轴）从 0 V 到 12 V 变化时 $I_{DS}$ （纵轴）的曲线；以及 $U_{DS}$ 固定为 10 V， $U_{GS}$ （横轴）从 0 至 10 V 变化时 $I_{DS}$ （纵轴）的曲线

仿真电路如图 1.6 所示，

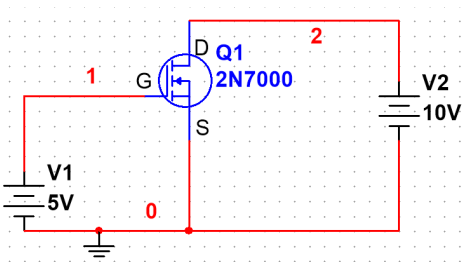


图 1.6: 仿真电路图

先固定  $U_{GS} = 5\text{ V}$  不变 (即  $V_1 = 5\text{ V}$ ), 横坐标  $U_{DS} \in [0\text{ V}, 12\text{ V}]$ , 画出  $I_{DS}$  (即  $I_2$ ) 的变化曲线, 如图 1.7 所示。再固定  $U_{DS} = 10\text{ V}$  不变 (即  $V_2 = 10\text{ V}$ ), 横坐标  $U_{GS} \in [0\text{ V}, 10\text{ V}]$ , 画出  $I_{DS}$  (即  $I_2$ ) 的变化曲线, 如图 1.8 所示。

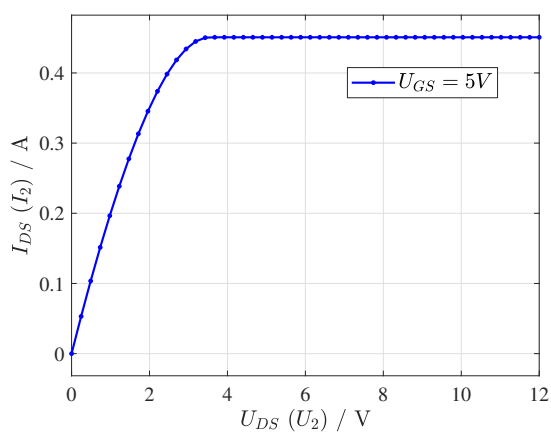


图 1.7: 仿真结果 1

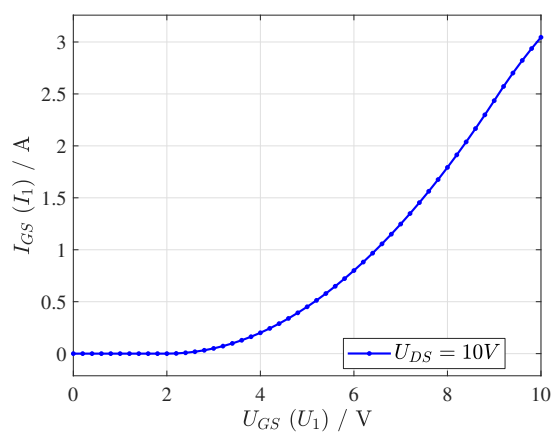


图 1.8: 仿真结果 2

## Homework 2: 2024.9.3 - 2024.9.9

2.1 习题集 1-33: 题图电路中  $R_1 = 40$ ,  $R_e = 27$ ,  $R_b = 150$ ,  $R_L = 1500$ , 单位都为  $\Omega$ ,  $\alpha = 0.98$ , 求电压增益  $\frac{u_2}{u_1}$  和功率增益  $\frac{p_2}{p_1}$ , 其中  $p_1$  是  $u_1$  输出的功率,  $p_2$  是  $R_L$  吸收的功率

左半边回路有:

$$u_1 - 67i_e - (1 - \alpha)i_e \cdot 150 = 0 \Rightarrow \frac{u_2}{u_1} = \frac{\alpha i_e R_L}{70i_e} = \frac{0.98 \times 1500}{70} = 21$$

$$p_2 = (\alpha i_e)^2 R_L, \quad p_1 = u_1 i_e \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{(\alpha i_e)^2 R_L}{70i_e^2} = 20.58$$

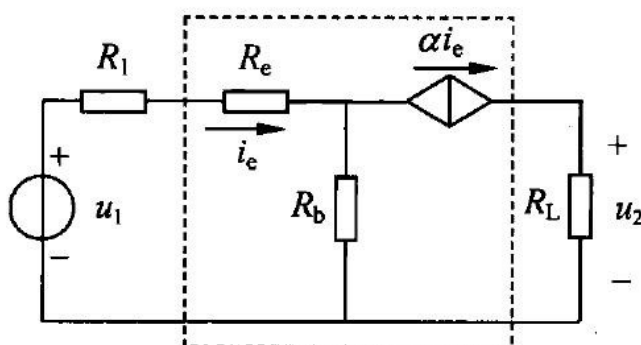


图 2.1: 习题集 1-33

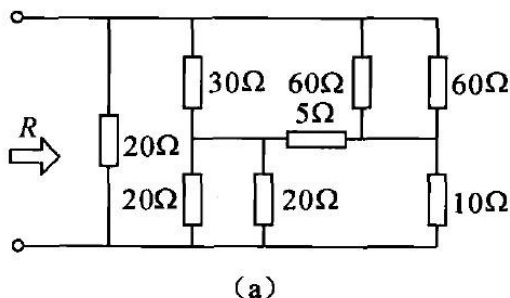
2.2 习题集 2-2: 求题图各电路的入端电阻  $R$

对图 (a), 化简并联后电桥平衡, 可以得到

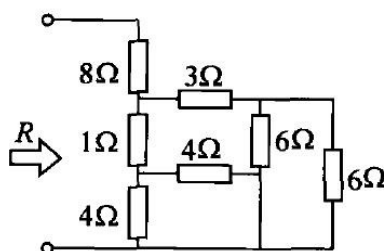
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{20} + \frac{1}{40} + \frac{1}{40} \Rightarrow R = 10 \Omega$$

对图 (b), 经过多次并联化简, 可以得到:

$$R = 8 + \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 10 \Omega \quad (2.1)$$



(a)



(b)

图 2.2: 习题集 2-2

2.3 习题集 2-6: 将题图中各电路化为最简电路

各电路的最简电路图如图 2.4 所示:

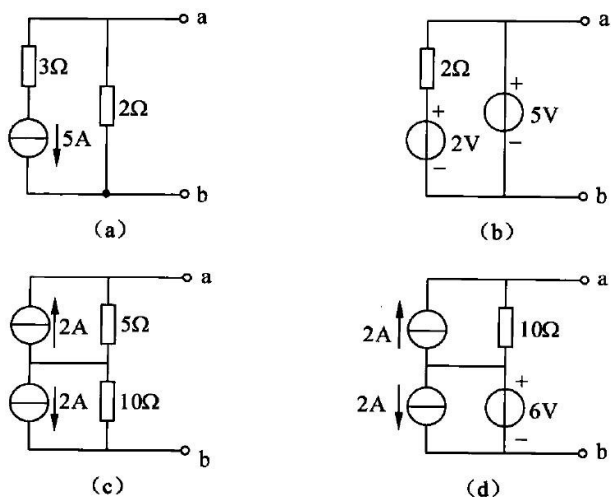


图 2.3: 习题集 2-6

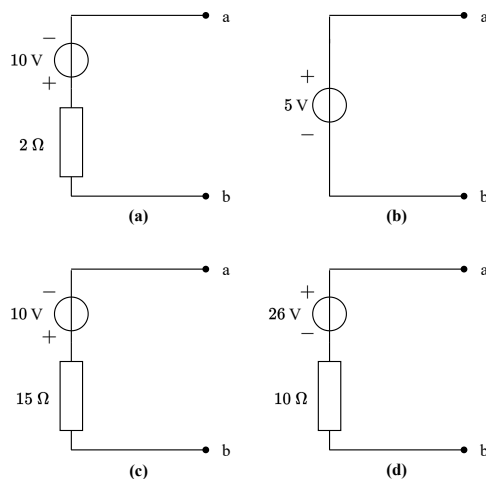


图 2.4: 习题集 2-6 解答

## 2.4 习题集 2-8: 用电源等效方法求题图中的电流 $i$

对原电路进行多次等效转换, 得到最简电路如图所示, 进而有:

$$I = \frac{3}{2 + 3 + 5} = 0.3 \text{ A}$$

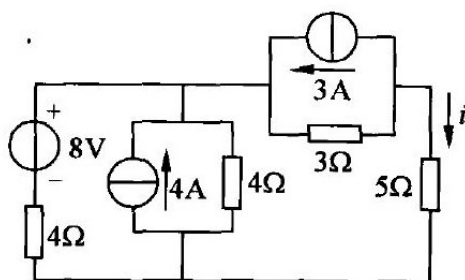


图 2.5: 习题集 2-8

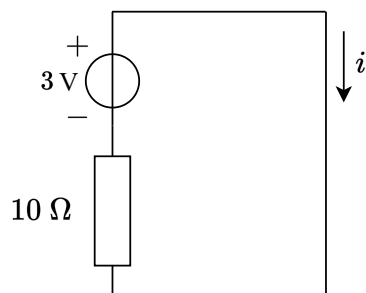


图 2.6: 习题集 2-8 等效电路

## 2.5 习题集 2-11: 求题图中的电流 $I$

等效电路图如图 2.8 所示, 由 KVL 得:

$$28 = 4I' + 4(I' - I), \quad 25 = -8I + 4(I' - I) \Rightarrow I' = 2.95 \text{ A}, \quad I = -1.1 \text{ A}$$

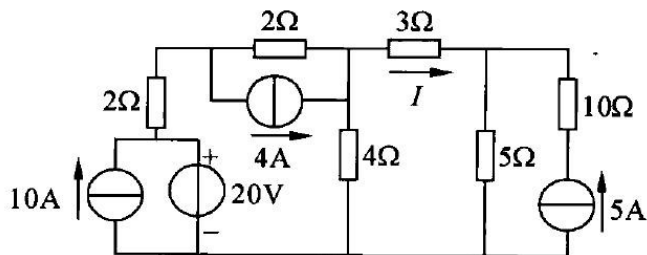


图 2.7: 习题集 2-11

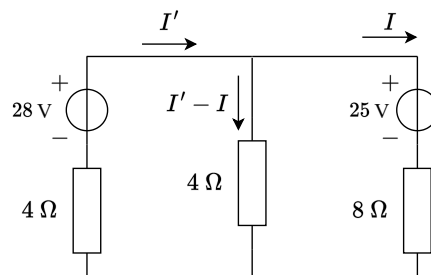


图 2.8: 习题集 2-11 等效电路



## 2.6 习题集 2-17: 求题图中的电压 $U_{ab}$

等效电路图如图 2.10 所示, 可以求得:

$$4I - 8 = 12(I - 1) \Rightarrow I = 0.5 \text{ A} \Rightarrow U_{ab} = 8 - 8I = 4 \text{ V}$$

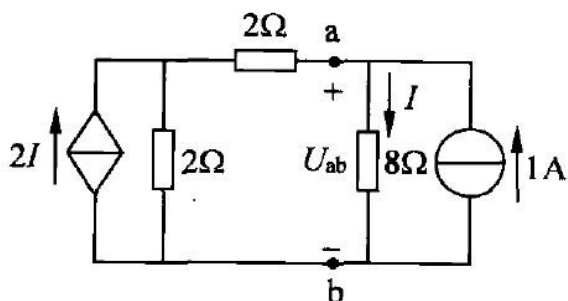


图 2.9: 习题集 2-17

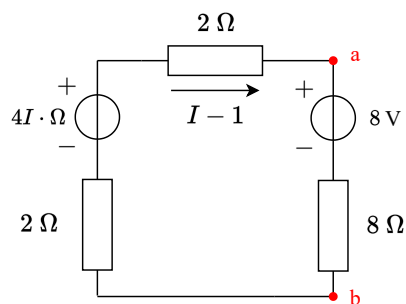


图 2.10: 习题集 2-17 等效电路

## 2.7 习题集 2-22: 求题图中的电压 $U_1$ , $U_2$ 和电流源发出的功率

经过电源等效和  $\Delta$ -Y 变换, 等效电路图如图 2.12 所示, 回路总电阻  $R = 3 + \frac{4}{9} + \frac{14}{9} = 5 \Omega$ ,  $I_1 = \frac{U}{R} = 1.2 \text{ A}$ , 则有:

$$U_1 = 6 - 3 \times 1.2 = 2.4 \text{ V}, \quad U_2 = 2 \times \frac{I}{2} = 1.2 \text{ V}, \quad P = 2U_1 = 4.8 \text{ W}$$

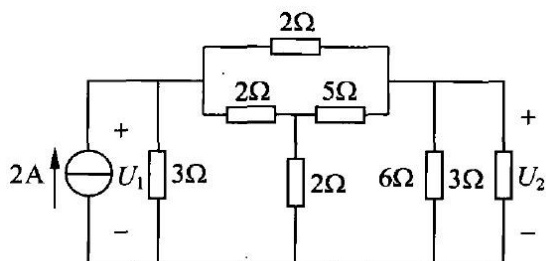


图 2.11: 习题集 2-22

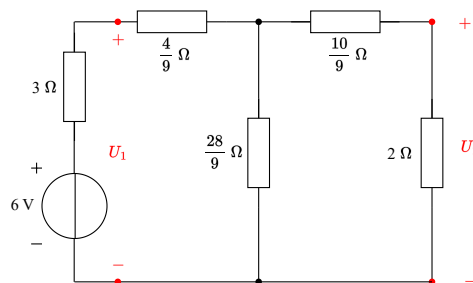


图 2.12: 习题集 2-22

## Homework 3: 2024.9.10 - 2024.9.18

**3.1 习题集 3-40 (书上答案不正确):** 题图电路中,  $u_s(t) = \sin 4t$  V, 电阻  $R_2 = 2R_1 = 1$  k $\Omega$ , 求电流  $i(t)$

由虚短和虚断, 可以得到  $R_1$  处电流为  $i_1 = \frac{u_s}{R_1}$  (从上至下), 于是输出电压  $u_o = 3u_s$ , 右侧负载由三个电阻构成, 并联电阻分压  $2u_s$ , 最后得电流  $i(t)$ :

$$i(t) = \frac{2u_s}{6 \text{ k}\Omega} = \frac{u_s}{3} \text{ mA} \quad (3.1)$$

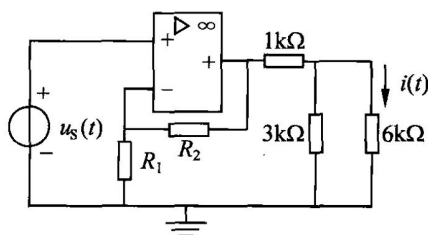


图 3.1: 习题集 3-40

**3.2 习题集 3-45 (注意题目单位是 S):** 对题图电路, 求电压增益  $\frac{U_o}{U_i}$  和入端电阻  $R_i$

如图所示, 将电导全部转换为电阻。由虚断、虚短, 流经  $\frac{1}{10} \Omega$  电阻的电流为  $i_1 = \frac{u_s}{0.1 \Omega} = 10u_s$ 。右下角两电阻分压, 再由虚短可得  $i_2 = 2U_o$ , 于是  $i_3 = i_1 + i_2 = 10U_s + 2U_o$ , 由 KVL:

$$0 - \frac{1}{3}(10U_s + 2U_o) = U_o \Rightarrow \frac{U_o}{U_s} = -2 \quad (3.2)$$

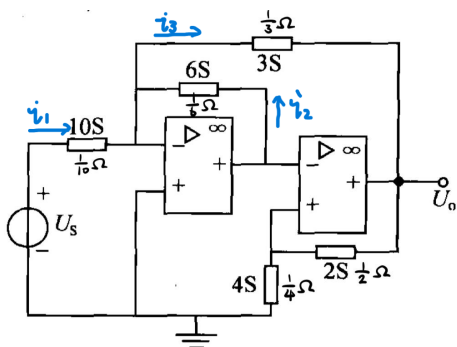
入端电阻  $R_i$ :

$$i_1 = 10U_s \Rightarrow R_i = \frac{1}{10} \Omega \quad (3.3)$$

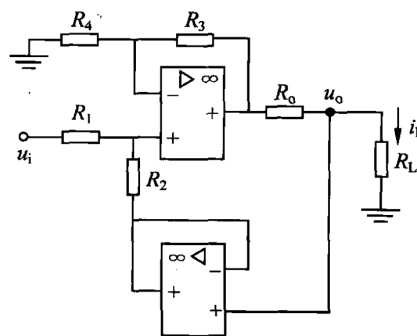
**3.3 习题集 3-46:** 题图电路中,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_o = R_L$ , 求在输入电压  $u_i$  作用下的负载电流  $i_L$

依据 KVL、KCL、虚短、虚断, 标出各节点电势, 如图所示。则有:

$$(u_i + u_o) - u_o = i_L R, i_L = \frac{u_o}{R_L} \Rightarrow u_o = u_i, i_L = \frac{u_o}{R_L} = \frac{u_i}{R_L} \quad (3.4)$$



(a) 习题集 3-45



(b) 习题集 3-46

图 3.2: 习题集 3-45 和习题集 3-46

### 3.4 讲义题 2-19: 求同相比例放大器和反向比例放大器的输入电阻和输出电阻, 放大器均理想, 根据求解结果讨论两种放大器的优劣

#### (1) 反相比例放大器

对输入电阻,  $i_1 = \frac{u_i}{R_1} \Rightarrow R_i = R_1$ 。对输出电阻, 将输入电压源短路, 采用加流求压法, 在输出端接入电流源, 由  $u = iR$  且  $u = 0$ , 得  $R_o = 0$ 。也即:

$$R_i = R_1, R_o = 0 \quad (3.5)$$

#### (2) 同相比例放大器

对输入电阻,  $R_1$  右端断路, 因此  $R_i = \infty$ 。对输出电阻, 将输入电压源短路, 采用加流求压法, 在输出端接入电流源, 由  $u = iR$  且  $u = 0$ , 得  $R_o = 0$ 。也即:

$$R_i = \infty, R_o = 0 \quad (3.6)$$

从输入输出电阻特性来看, 同相比例放大器电气特性更优秀。

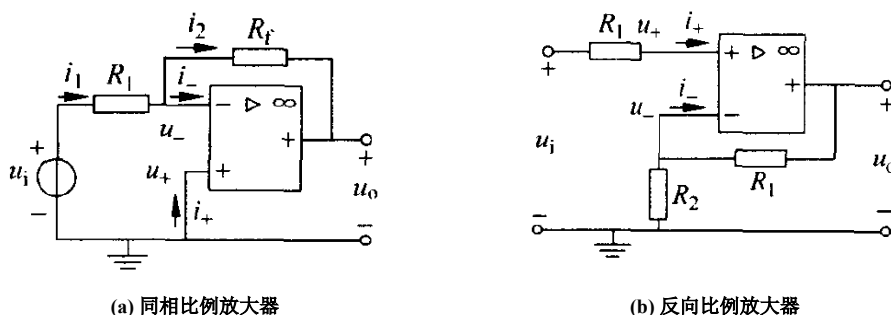


图 3.3: 讲义题 2-19

### 3.5 讲义题 2-20: 求题图各网络的 $G$ 参数

(a) 由 KVL 有:

$$\begin{cases} u_1 = R_2(i_1 - i_2) \\ u_2 = R_1 i_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_2} u_1 + \frac{1}{R_1} u_2 \\ i_2 = \frac{1}{R_1} u_2 \end{cases}, G = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_1} \\ \frac{1}{R_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

(b) 由 KVL, KCL 有:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \left( i_1 - \frac{u_1 - u_2}{R_2} \right) \\ u_2 = R_1 \left( i_2 + \frac{u_1 - u_2}{R_2} \right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) u_1 - \frac{1}{R_2} u_2 \\ i_2 = -\frac{1}{R_2} u_1 + \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) u_2 \end{cases}, G = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

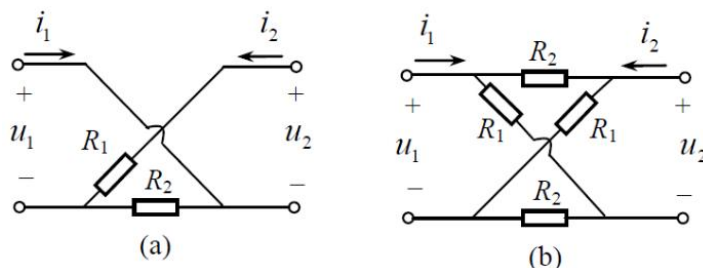


图 3.4: 讲义题 2-20

### 3.6 仿真 2-1: 题目详见图 3.8 (b)

#### (1) 单 OPA 实现电压运算

电路如图 3.5 (a) 所示, 接线端示意图见图 3.5 (b)。

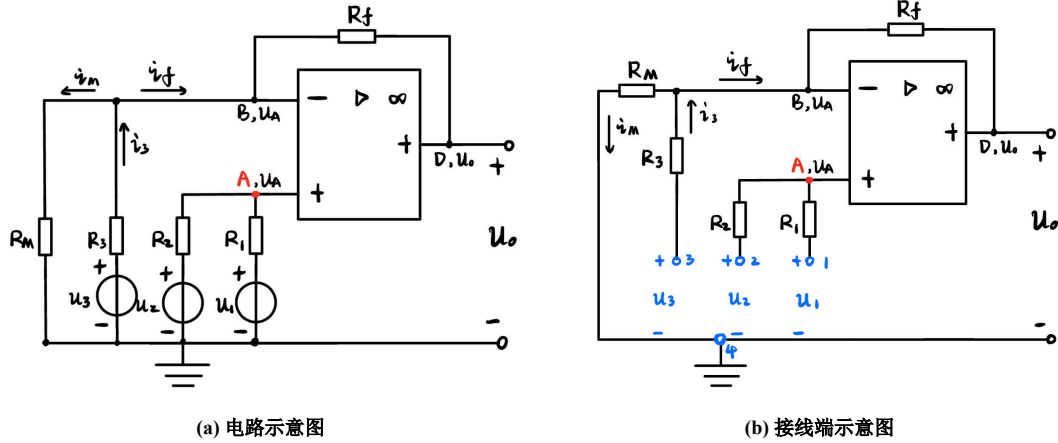


图 3.5: 单 OPA 实现电压运算

下面分析其输出特性。由虚断, 在  $u_1$  和  $u_2$  构成的回路中, 设正向流经  $u_2$  的电流为  $i_2$ , 则有:

$$i_2 = \frac{u_2 - u_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow u_A = u_2 - i_2 R_2 = \frac{R_2 u_1 + R_1 u_2}{R_1 + R_2} \quad (3.9)$$

由虚短, B 点的电势也为  $u_A$ , 于是:

$$i_3 = \frac{u_3 - u_A}{R_3}, i_M = \frac{u_A}{R_M} \Rightarrow i_f = i_3 - i_M = \frac{u_3 - u_A}{R_3} - \frac{u_A}{R_M} = \frac{u_3}{R_3} - \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_M}\right)u_A \quad (3.10)$$

由虚断和 KVL:

$$u_o = u_A - i_f R_f = u_A - \frac{R_f}{R_3} u_3 + \left(\frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right)u_A = \left(1 + \frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right)u_A - \frac{R_f}{R_3} u_3 \quad (3.11)$$

将  $u_A$  的表达式代入, 最终得到:

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right) \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1} u_1 + \left(1 + \frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right) \frac{\frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2} + 1} u_2 - \frac{R_f}{R_3} u_3 \quad (3.12)$$

我们需要  $u_1, u_2, u_3$  前的系数分别为 3, 2, -0.5, 于是有:

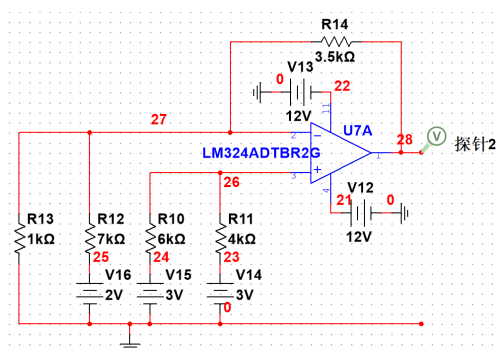
$$\begin{cases} \left(1 + \frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right) \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1} = 3 \\ \left(1 + \frac{R_f}{R_3} + \frac{R_f}{R_M}\right) \frac{\frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2} + 1} = 2 \\ -\frac{R_f}{R_3} = -0.5 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_1 = \frac{2}{3} R_2, & R_2 > 0 \\ R_3 = 2 R_f, R_M = \frac{2}{7} R_f, & R_f > 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

为了保持 OPA 的理想性, 我们应选择  $K\Omega$  量级的电阻, 同时, 为了降低电路的整体功率, 减少消耗, 电阻阻值应该尽量大。综合下来, 不妨选取  $R_2 = 6 K\Omega$ ,  $R_f = 3.5 K\Omega$ , 此时所有电阻阻值为:

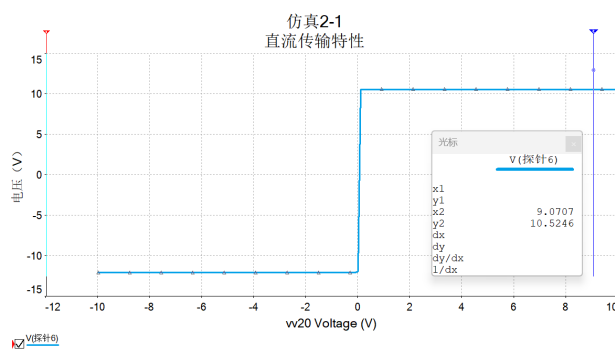
$$R_1 = 4 K\Omega, R_2 = 6 K\Omega, R_3 = 7 K\Omega, R_M = 1 K\Omega, R_f = 3.5 K\Omega \quad (3.14)$$

如图 3.6 (a), 在 Multisim 中进行仿真, 得到的结果如下表所示:

项目	1			2			3			4		
	$x, u_1$	$y, u_2$	$z, u_3$	$x, u_1$	$y, u_2$	$z, u_3$	$x, u_1$	$y, u_2$	$z, u_3$	$x, u_1$	$y, u_2$	$z, u_3$
	1	1	1	1	3	2	-2	2	0	3	3	2
理论输出 (V)	$3 + 2 - 0.5 = 4.5$			$3 + 6 - 1 = 8$			$-6 + 4 - 0 = -2$			$9 + 6 - 1 = 14$		
仿真输出 (V)	4.50			8.00			-2.00			10.494		



(a) 单 OPA 实现电压运算



(b) OPA 饱和电压

图 3.6: 仿真电路图与 OPA 饱和电压

由表可见, 除了最后一组数据, 仿真结果与理论结果完全一致。最后一组之所以不同, 是因为输出电压  $u_o$  超出了此 OPA 的饱和电压  $U_{sat}$ , 导致输出电压  $u_o = U_{sat} = 10.494V$ 。如图 3.6 (b) 所示, 此 OPA (LM324ADTBR2G) 的饱和电压为 10.525V, 与解释相符。具体仿真时的结果见图 3.7。

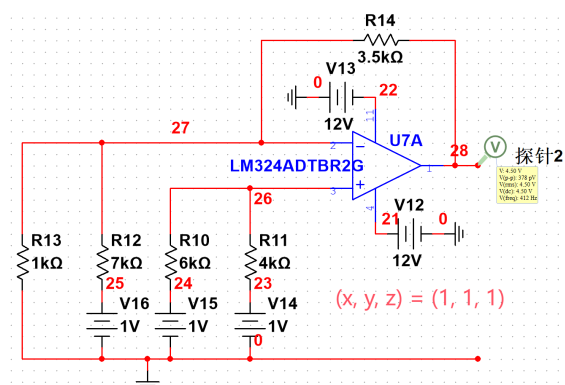
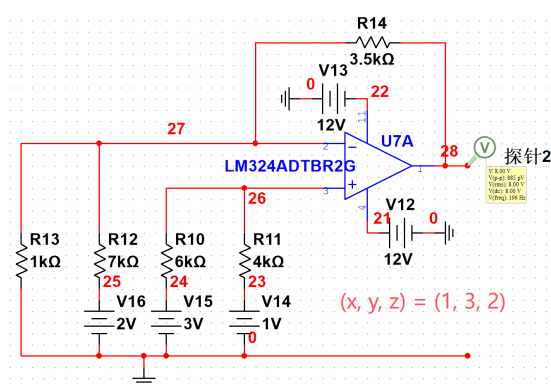
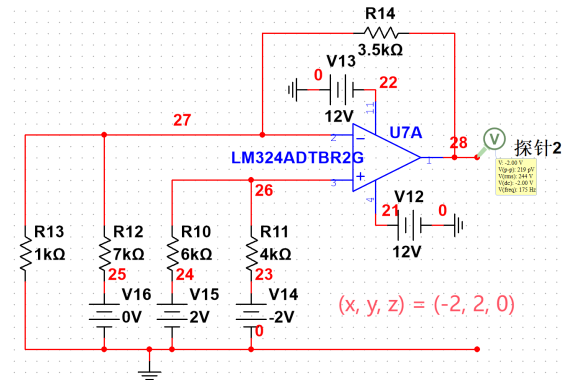
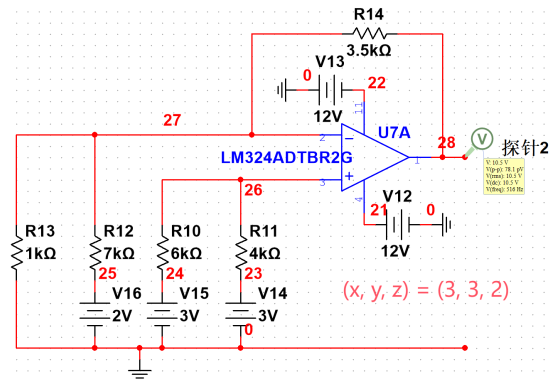
(a)  $(x, y, z) = (1, 1, 1)$ (b)  $(x, y, z) = (1, 3, 2)$ (c)  $(x, y, z) = (-2, 2, 0)$ (d)  $(x, y, z) = (3, 3, 2)$ 

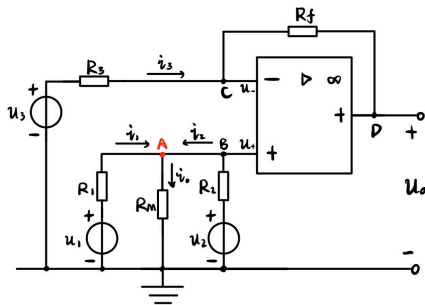
图 3.7: 仿真具体结果图

## (2) 一些失败的例子

注意到, 减法器是在反相加法器的基础上, 串联入电压源 (和电阻) 改变了  $u_+$  端的电压。这样, 在最终的输出电压  $u_o$  中,  $u_-$  端的电源电压会带负号,  $u_+$  端的电源电压带正号。用类似的思想, 我们可以对减法器进行改造, 最终仅用一个 OPA 便实现  $3x + 2y - 0.5z$  的电压运算。

一种方法是向  $u_+$  端再串联一个电压源, 使得输出  $u_o$  中两正一负, 然后通过电阻值来调整系数, 但是, 这样不满足接线端的要求 (三正一共地)。另一种方法是向  $u_-$  端再并联一个电压源, 使得输出  $u_o$  中两负一正 ( $-u_1, -u_2, +u_3$ ), 最后通过电阻值来调整系数, 但是, 这样得到的是两负一正而不是两正一负, 虽满足了接线端要求, 却不是我们需要的结果。

其实, 我们只需要向  $u_+$  端的电压源再并联一个电压源即可, 如图所示。下面分析其输出特性。



(a) 失败的例子

### 第一次仿真作业

注意: 一定要独立完成!

1. 用运算放大器实现  $3x+2y-0.5z$  的信号运算功能, 你的输入只有4个接线端, 分别对应  $x, y, z$  信号的正端和整个电路公共的地 ( $x, y, z$  信号的公共负端)。由于信号有公共的地, 你只能得到  $x, y, z$  信号,  $-x, -y$  和  $-z$  信号需要自己实现。运算放大器在 Multisim 中选择某5端或更多端运放 (具有  $\pm$  电源输入的运放, 比如 Analog - OPAMP - LM324AD 等等)。运放供电电压需固定为主 15V, 不得改变运放内部的缺省参数, 不得选择 5 端 virtual 运放来仿真。 (这个条件的目的是确保你的运放是饱和的)

(1) 使用的运算放大器的数量不能超过3个, 电阻数量不限;

(2) 画出电路原理图, 分析输出与输入信号  $x, y, z$  的关系;

(3) 根据仿真结果完成下表, 要求打印仿真电路图并在图中适当位置注明相应的信号表达式, 如果输出结果与计算不同, 请分析结果并分析一下可能的解决方案。

	1			2			3			4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
理论	1	1	1	1	3	2	-2	2	0	3	3	2
输出												
仿真												

(b) 仿真作业 2-1

图 3.8: 示意图

在  $u_1, R_1, u_2, R_2$  和  $R_M$  构成的局部电路中, 由 KVC:

$$\begin{cases} u_1 - R_1 i_1 - R_M(i_1 + i_2) = 0 \\ u_2 - R_2 i_2 - R_M(i_1 + i_2) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{(R_2 + R_M)u_1 - R_M u_2}{R_1 R_2 + R_1 R_M + R_2 R_M} \\ i_2 = \frac{(R_1 + R_M)u_2 - R_M u_1}{R_1 R_2 + R_1 R_M + R_2 R_M} \end{cases} \quad (3.15)$$

由此得点 A 处的电势  $u_A$ :

$$u_A = \frac{R_2 R_M u_1 + R_1 R_M u_2}{R_1 R_2 + R_1 R_M + R_2 R_M} \quad (3.16)$$

也即点 B 和非反相输入端的电势  $u_+ = u_B = u_A$ 。由虚短,  $u_- = u_+$ , 可得电流  $i_3$ :

$$i_3 = \frac{u_3 - u_-}{R_3} = \frac{1}{R_3} \left( u_3 - \frac{R_2 R_M u_1 + R_1 R_M u_2}{R_1 R_2 + R_1 R_M + R_2 R_M} \right) \quad (3.17)$$

由虚断, 经过电阻  $R_f$  求得 D 点电势, 也即输出电压  $u_o$ :

$$u_o = u_A - i_3 R_f = \left( 1 + \frac{R_f}{R_3} \right) u_A - \frac{R_f}{R_3} u_3 \quad (3.18)$$

$$= \left( 1 + \frac{R_f}{R_3} \right) \cdot \frac{\frac{R_M}{R_1} u_1 + \frac{R_M}{R_2} u_2}{1 + \frac{R_M}{R_1} + \frac{R_M}{R_2}} - \frac{R_f}{R_3} u_3 \quad (3.19)$$

$$= \frac{1 + \frac{R_f}{R_3}}{1 + \frac{R_M}{R_1} + \frac{R_M}{R_2}} \left( \frac{R_M}{R_1} u_1 + \frac{R_M}{R_2} u_2 \right) - \frac{R_f}{R_3} u_3 \quad (3.20)$$

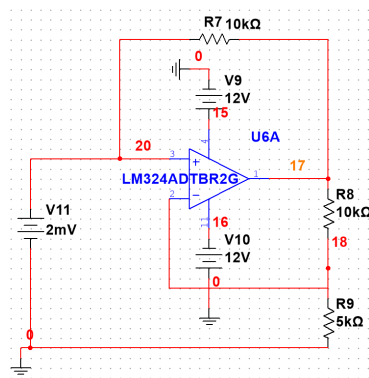
最后调整电阻阻值。为了保持 OPA 的理想性, 电阻需要在  $K\Omega$  量级, 令电阻比例如下:

$$\begin{cases} \frac{R_f}{R_3} = 0.5 \\ \frac{1 + \frac{R_f}{R_3}}{1 + \frac{R_M}{R_1} + \frac{R_M}{R_2}} \cdot \frac{R_M}{R_1} = 3 \\ \frac{1 + \frac{R_f}{R_3}}{1 + \frac{R_M}{R_1} + \frac{R_M}{R_2}} \cdot \frac{R_M}{R_2} = 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_f = \frac{1}{2} R_3 \\ R_1 = -2 R_M \\ R_2 = -\frac{4}{3} R_M \end{cases} \quad (3.21)$$

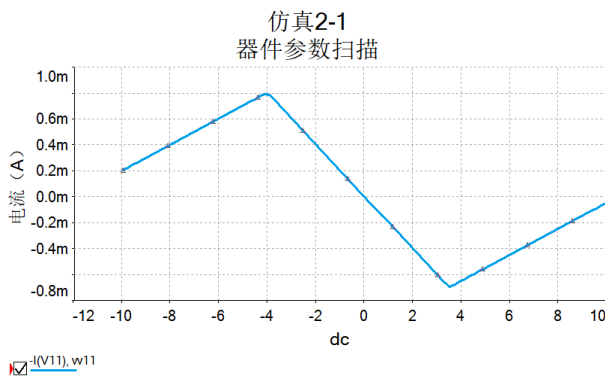
显然, 这不可能实现, 舍弃。

### 3.7 仿真 2-2

仿真电路如图 3.9 (a) 所示, 对输入电压进行参数扫描, 输出通过电压源的电流, 得到图 3.9 (b)。这里需要注意, 在 Multisim 中, 电流的参考方向始终是高电势指向低电势 (包括电压源), 因此, 仿真输出中的  $I(V11)$  是从上往下通过 V11 的电流 (而不是从下至上), 电压源 V11 的实际电流为  $i = -I(V11)$ 。



(a) 负电阻仿真电路



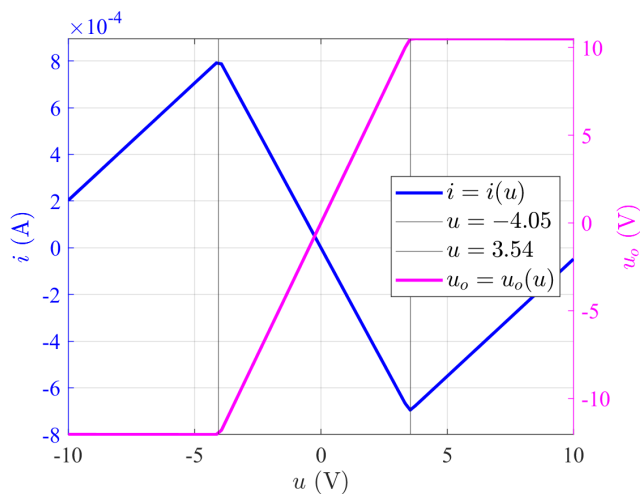
(b)  $I$  (纵轴)  $U$  (横轴) 关系

图 3.9: 负电阻仿真

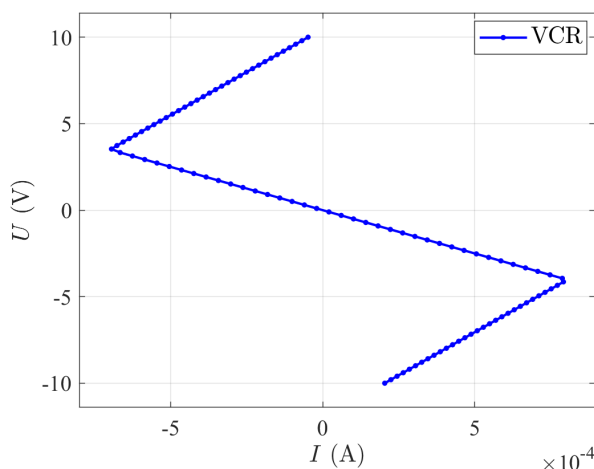
简记电压源 V11 的电压为  $u$ , 继续仿真输出电压  $u_o$  关于输入电压  $u$  的变化, 将数据导出后在 Matlab 中绘制曲线, 如图 3.10 (a)。再将  $I - U$  关系转化为  $U - I$  关系, 如图 3.10 (b)。可以发现, 在线性工作区内, 电路表现为负阻。而线性区外的两段折线位于 OPA 的饱和区, 此时  $u_o$  始终为饱和电压, 电路呈现正电阻, 且阻值为:

$$\begin{cases} i = \frac{u - U_{\text{sat}}}{R_1} & , u > 3.54 \text{ V} \\ i = \frac{u + U_{\text{sat}}}{R_1} & , u < -4.05 \text{ V} \end{cases} \Rightarrow R_{\text{sat}} = R_1 = 10 \text{ K}\Omega \quad (3.22)$$

这与图 3.10 (b) 中曲线的斜率是相符的。而在线性区, 负电阻  $R = -\frac{10 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega} \cdot 5 \text{ K}\Omega = -5 \text{ K}\Omega$ , 这也是符合的。



(a)  $u_o$  与  $i$  关于  $u$  的变化

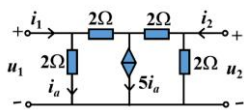


(b)  $U-I$  关系 (VCR)

图 3.10: 仿真结果分析

## 第二次习题课课前练习

### 一、求图示二端口的G参数

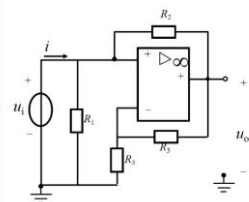


### 二、设计一个用于直流信号下最简单的二端口。

要求当负载  $R = 600\Omega$  时,

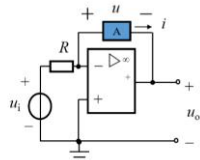
- (1) 从电源端看出的电阻  $R_{sr} = 600\Omega$ ;
- (2)  $u_{sc} = 0.1u_{sr}$  ( $sr$  和  $sc$  分别表示电源端和负载端);
- (3) 对调电源和负载, 网络的性质依然满足。

### 三、求图示电路的电压增益以及从电源看过去的入端等效电阻。



### 四、某元件A端口u-i关系如图所示(其中 $U_{TH}$ 、 $I_S$ 均为元件参数)。(1)求含运放电路的功能。(2)如何实现指数运算功能? (3)如何实现乘法运算功能?

$$i = I_S e^{u/U_{TH}}$$



### 五、分析下图所示电路的功能, 其中 $d_i$ 与 $\bar{d}_i$ 互为反(均为数字信号0或1)。提示: 看 $d_0, d_1, d_2$ 取不同值时 $u_o$ 的输出。

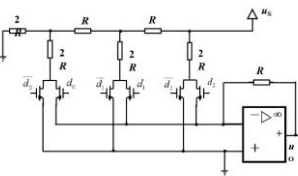


图 3.11: 第二次习题课课前练习

## 3.8 求图示二端口的 G 参数

由 KVL 和广义 KCL, 得到:

$$\begin{cases} (i_1 - 0.5u_1) + (i_2 - 0.5u_2) = 5(0.5u_1) \\ 3u_1 + 0.5u_2 = 2i_1 + 2i_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{9}{8}u_1 + \frac{5}{8}u_2 \\ i_2 = \frac{15}{8}u_1 - \frac{1}{8}u_2 \end{cases}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{8}{9} & \frac{8}{5} \\ \frac{8}{15} & -8 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (3.23)$$

## 3.9 设计一个用于直流信号下的最简二端口 (略)

## 3.10 求图示电路的电压增益与入端电阻

容易得到:

$$u_o = 2u_i, \quad i = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)u_i \Rightarrow A = 2, \quad R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (3.24)$$

## 3.11 根据图示电路回答问题

- (1) 这是一个 (反相) 对数运算电路,  $u_o = -U_{TH} \ln\left(\frac{u_i}{I_S R}\right)$
- (2) 将二极管与电阻  $R$  的位置互换
- (3) 依次复合对数运算、线性运算和指数运算, 或者依次复合指数运算、线性运算和对数运算

## 3.12 分析下图所示电路的功能

图示电路是一个简易的 DAC (Digital-Analog Converter), 将数字信号转为模拟信号。考虑到无论输入的数字信号是多少, 中间三条支路中的电阻都是接地的, 因此各三条支路的电流值是不变的, MOS 管的作用仅是调节电流是否输入到运放, 也即是否通过运放上侧的电阻  $R_f = R$ , 依次调节输出电压  $u_o = -i_f R_f$ 。



列出方程如下：

$$\begin{cases} 2i_2R = u_s \\ 2i_2R - (i + i_0 + i_1)R = 2i_1R \\ 2i_1R - (i + i_0)R = 2i_0R \\ 2i_0R - i(2R) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_2 = \frac{1}{8R}4u_s \\ i_1 = \frac{1}{8R}2u_s \\ i_0 = i = \frac{1}{8R}u_s \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\Rightarrow u_o = -(d_0i_0 + d_1i_1 + d_2i_2)R = -\frac{u_s}{8} (d_2 \cdot 2^2 + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) \quad (3.26)$$

## Homework 4: 2024.9.19 - 2024.9.24

### 4.1 讲义题 2-20: 求图示各网络的和 $R$ 参数

如图 4.1 (a), 对 (a) 电路有:

$$\begin{cases} u_1 + u_2 = i_2 R_1 \\ u_1 = (i_1 - i_2) R_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_1 = R_2 i_1 + (-R_2) i_2 \\ u_2 = (-R_1) i_1 + (R_1 + R_2) i_2 \end{cases}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_2 & -R_2 \\ -R_1 & R_1 + R_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

对 (b) 电路, 设 2 号端口的低电位为  $u$ , 也即  $u_{2,-} = u$ , 由 KCL:

$$\begin{cases} i_1 + \frac{u+u_2-u_1}{R_2} = \frac{u_1-u}{R_1} \\ \frac{u_1-u}{R_1} = i_2 + \frac{u}{R_2} \\ \frac{u+u_2}{R_1} + \frac{u}{R_2} = i_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_1 + u_2 = R_1 i_1 + R_1 i_2 \\ u_1 - u_2 = R_2 i_1 - R_2 i_2 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u_1 = \frac{R_1+R_2}{2} i_1 + \frac{R_1-R_2}{2} i_2 \\ u_2 = \frac{R_1-R_2}{2} i_1 + \frac{R_1+R_2}{2} i_2 \end{cases}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{R_1+R_2}{2} & \frac{R_1-R_2}{2} \\ \frac{R_1-R_2}{2} & \frac{R_1+R_2}{2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

### 4.2 讲义题 2-21: 图示电路中 $R_1 = 10 \Omega$ , $R_2 = 40 \Omega$ , 求

(1) 此二端口网络的  $T$  参数:

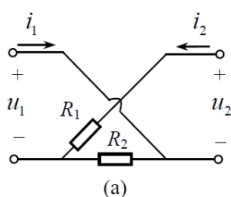
$i_1 = \frac{u_2}{R_2} + (-i_2)$ ,  $u_1 = u_2 - R_1(i_2 - \frac{u_2}{R_2})$ , 得到此二端口的  $T$  参数:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_1}{R_2} & R_1 \\ \frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{4} & 10 \Omega \\ \frac{1}{40} \text{ S} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

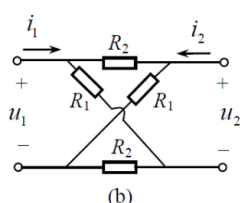
(1) 求  $U_{S1}$  和  $I_1$

$(-i_2) = I_2 = 2 \text{ A}$ ,  $u_2 = I_2 R_3 = 40 \text{ V}$ , 代入即得:

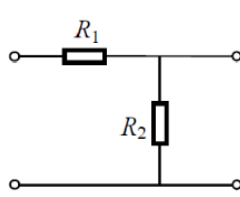
$$\begin{bmatrix} U_{S1} \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} 40 \text{ V} \\ 2 \text{ A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70 \text{ V} \\ 3 \text{ A} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$



(a) 讲义题 2-20 图



(b)



(b) 讲义题 2-21 图

图 4.1: 讲义题 2-20、讲义题 2-21

### 4.3 讲义题 2-22: 图示电路中二端口网络的 $T$ 参数为 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 2 & 8 \Omega \\ 0.5 \text{ S} & 2.5 \end{bmatrix}$

(1) 求此二端口的等效电路

$T$  参数满足  $\det T = 5 - 4 = 1$ , 也即满足互易条件, 因此可以等效为 T 型三电阻电路, 如图 ?? 所示。此时的电阻阻值为:

$$R_T = \frac{1}{T_{21}} = 2 \Omega, \quad R_a = R_T(T_{11} - 1) = 2 \Omega, \quad R_b = R_T(T_{22} - 1) = 3 \Omega \quad (4.6)$$

(1)  $R_2$  为何值时其获得最大功率

$R_2$  吸收的功率为  $p = \frac{u_2^2}{R_2}$ , 回路总电阻为  $2 + 2 + 2 \parallel (3 + R_2) = 4 + \frac{2(3+R_2)}{5+R_2}$ , 由分压原理得到  $u_2$ :

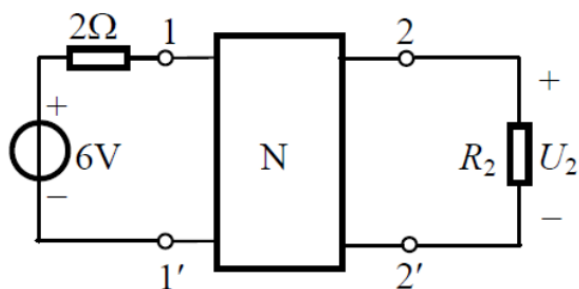
$$u_2 = 6 \cdot \frac{\frac{2(3+R_2)}{5+R_2}}{4 + \frac{2(3+R_2)}{5+R_2}} \cdot \frac{R_2}{3 + R_2} = \frac{6}{3 + \frac{13}{R_2}} \quad (4.7)$$

于是  $R_2$  上的功率  $p$  为:

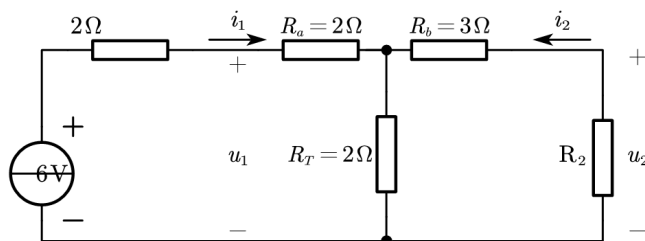
$$p = \frac{u_2^2}{R_2} = \frac{36}{\frac{13^2}{R_2} + 78 + 9R_2} \leq \frac{36}{2 \cdot 13 \cdot 3 + 78} \text{ W} = \frac{9}{39} \text{ W} = 0.2308 \text{ W} \quad (4.8)$$

当且仅当  $\frac{13^2}{R_2} = 9R_2$  取等, 此时  $R_2 = \frac{13}{3} \Omega$ 。

事实上, 视  $R_2$  为负载, 视电路的剩余部分为电源, 可求得电源的内阻 (也即输出电阻) 为  $R_s = \frac{13}{3} \Omega$ , 因此当  $R_2 = R_s = \frac{13}{3} \Omega$  时, 外部电路 (也即负载  $R_2$ ) 有最大功率。



(a) 讲义题 2-22 图



(b) 讲义题 2-20 等效电路

图 4.2: 讲义题 2-22

## Homework 5: 2024.9.25 - 2024.10.8

### 5.1 教材 2-41: 求由 N-E MOS 构成的两输入 NAND 和两输入 NOR 的最大功率, 并指出何时最大功率

对于 NAND, 仅当两输入都为 1 时有静态功率, 也即最大功率, 设 N-E MOS 的导通电阻为  $R_{ON}$ , 外接电阻  $R_L$ , 电源电压  $U_S$ , 则功率为:

$$P_{NAND, \max} = \frac{U_S^2}{R_L + 2R_{ON}} \quad (5.1)$$

对于 NOR, 任一输入为 1 时都具有静态功率, 两输入都为 1 时有最大功率:

$$P_{NOR, \max} = \frac{U_S^2}{R_L + \frac{R_{ON}}{2}} \quad (5.2)$$

### 5.2 用两个 N-E MOS、两个 P-E MOS 和电源构成静态功率为零的 NAND

题意也即 C-MOS NAND, 我们不妨直接用 C-MOS 构成三种基本逻辑门 (反相器 NOT、或非门 NOR、与非门 NAND), 如图 5.1 所示, 其中红色表示 P-MOS, 蓝色表 N-MOS。

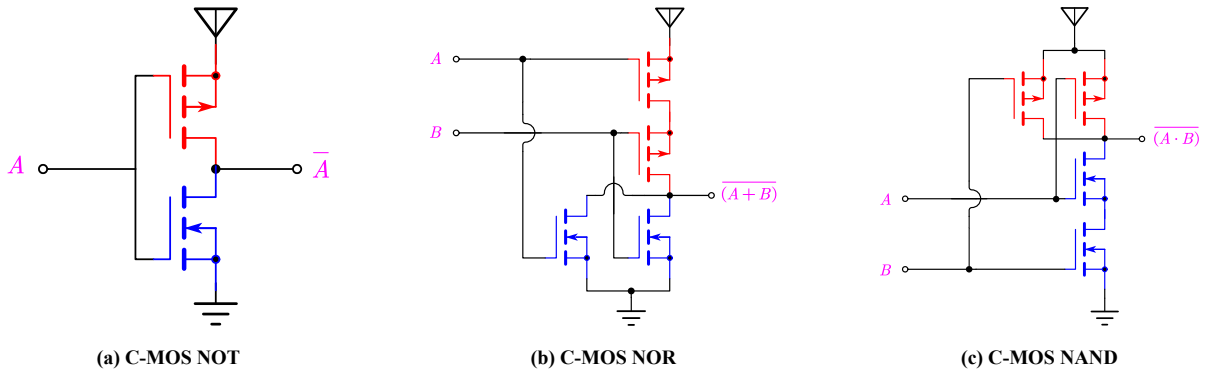


图 5.1: 由 C-MOS 构成三种基本逻辑门

### 5.3 半加器、全加器、四位加法器

#### (1) 教材 2-40: 用电源、N-E MOS (最多九个) 和电阻器构成一个半加器 HA

半加器是一种基本的逻辑电路, 用于将两个二进制数相加, 输出一个两位的二进制数, 表示相加的结果。输出的高位和低位分别称为“进位  $C$ ”、“和位  $S$ ”。也就是说, 半加器实际上是“一位加法器”, 能够处理两个一位二进制数的相加, 并输出一个两位二进制结果。设输入为  $A$  和  $B$ , 则有:

$$Y = (CS)_{(2)} = A_{(2)} + B_{(2)} \quad (5.3)$$

$$C = A \cdot B, \quad S = A \oplus B \quad (5.4)$$

由于要求使用的 MOS 尽量少 (仅使用 N-MOS), 对半加器的逻辑表达式作处理, 利用下面式子可得最简半加器 (7 个 N-MOS), 其数字电路见图 5.2 (a), 实际电路见图 5.3 (a)。

$$C = \overline{(A \cdot B)}, \quad S = \overline{[(A \cdot B) + (A + B)]} \quad (5.5)$$

当然, 考虑到半加器的逻辑表达式, 也可以用异或门 XOR 和与门 AND 直接构成半加器, 我们采用经过优化的 6 MOS 异或门 XOR (三个 N-MOS 和三个 P-MOS), 它的静态功率为 0。由此构成的半加器数字电路见图 5.2 (b), 实际电路见图 5.3 (b)。

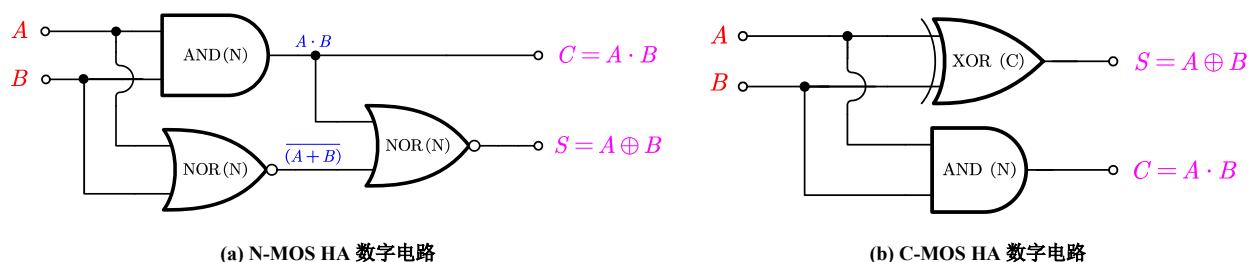


图 5.2: 半加器 HA 数字电路

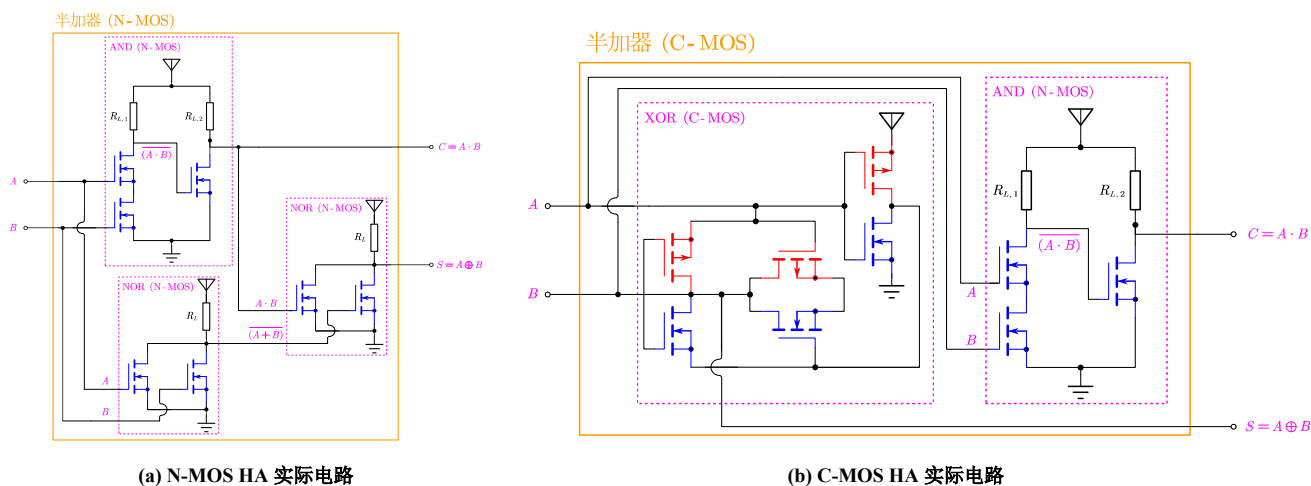


图 5.3: 半加器 HA 实际电路

## (2) 用两个半加器 HA 和一个逻辑门构成一个全加器 FA

由半加器可以进一步构造全加器，全加器是一种能够处理三个一位二进制数相加的逻辑电路，输出一个两位的二进制数  $Y = (C_o S)_{(2)}$ ，表示相加的结果。输出的高位称为进位  $C_o$ ，低位称为和位  $S$ 。也就是说，全加器可以理解“三输入一位加法器”。记全加器的三个输入为  $A, B, C$ ，它们都是一位的二进制数，则全加器可写为：

$$Y = (C_o S)_{(2)} = A_{(2)} + B_{(2)} + C_{(2)} \quad (5.6)$$

$$C = A \cdot B + A \cdot C + B \cdot C, \quad S = A \oplus B \oplus C \quad (5.7)$$

角标 (2) 表示上式为二进制运算。由两个 HA 和一个 OR 即可构成全加器，数字电路如图 5.4。

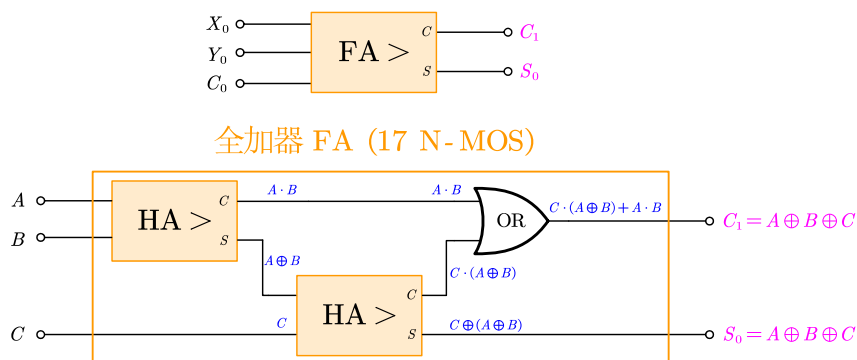


图 5.4: 全加器 FA

### (3) 用四个全加器 FA 构成一个四位加法器

四位加法器，输入两个四位二进制数  $X$  和  $Y$ ，分别记作  $X = (X_3X_2X_1X_0)_{(2)}$ ， $Y = (Y_3Y_2Y_1Y_0)_{(2)}$ ，输出一个五位二进制数  $Z = (CS_3S_2S_1S_0)_{(2)}$ ，代表两数相加的结果。原理及数字电路如图 5.5 所示。

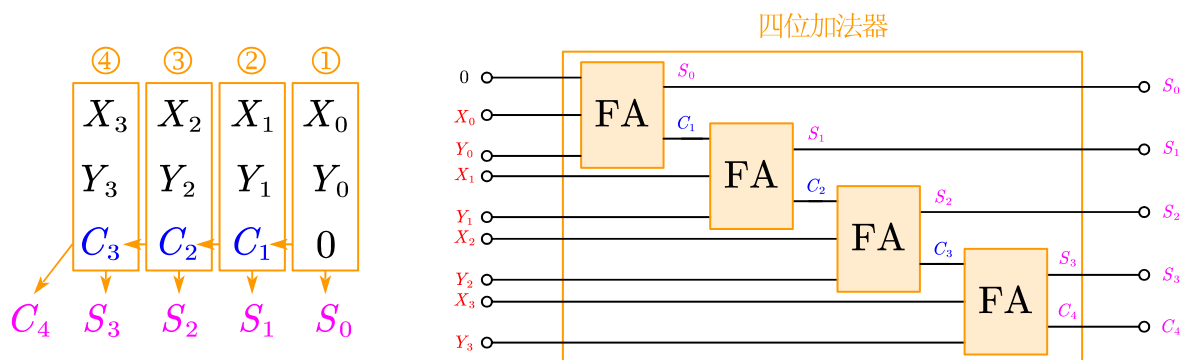


图 5.5: 四位加法器

### 5.4 习题集 3-20: 用节点法求图中电路的电流 $I$ 和电流源两端电压 $U$

对电路作等效处理，得到等效电路如图 5.6 (b) 所示，则有节点电压方程组如下式左半边。再任意选取一个节点作为参考节点，这里选择节点 3，即  $U_3 = 0$ ，可以解得：

$$\begin{cases} \text{节点 1:} & (\frac{5}{8} + 1)U_1 - \frac{5}{8}U_2 - U_3 = -10.75 \\ \text{节点 2:} & -\frac{5}{8}U_1 + (\frac{5}{8} + \frac{3}{5})U_2 - \frac{3}{5}U_3 = +10.75 \\ \text{节点 3:} & -U_1 - \frac{3}{5}U_2 + (1 + \frac{3}{5})U_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{129}{32} \text{ V} \\ \frac{215}{32} \text{ V} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

返回到原电路，可得电流  $I$  和电流源两端电压  $U$ ：

$$I = \frac{U_2 - 8 - U_3}{2} = -\frac{41}{64} \text{ A} = -0.640625 \text{ A}, \quad U = U_2 - U_1 + 6 = \frac{67}{4} \text{ V} = 16.75 \text{ V} \quad (5.9)$$

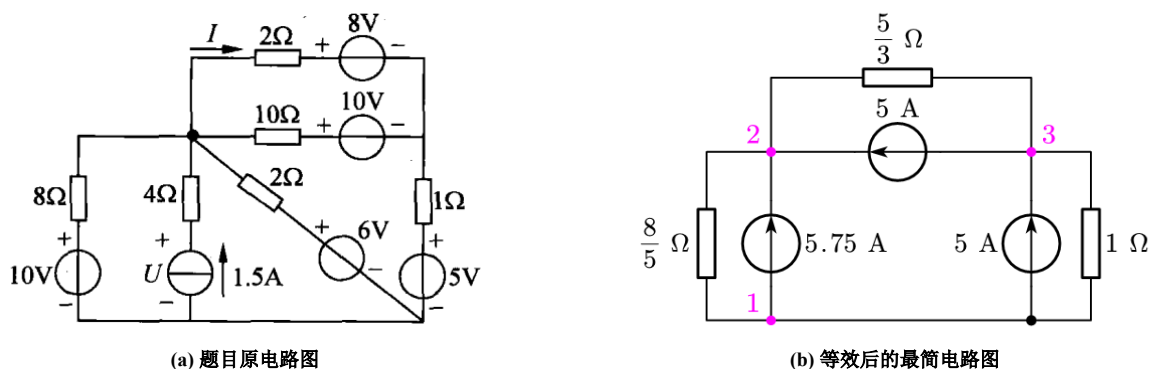


图 5.6: 5.4 习题集 3-20

### 5.5 习题集 3-21: 用节点法求电流源两端电压 $U$ 和各支路电流

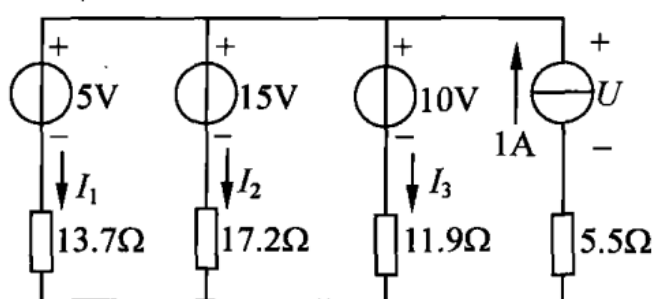
还是对电路作等效处理，得到等效电路如图 5.7 (b) 所示。这次先选取参考节点再列方程，以节点 0 为参考点，得到：

$$\left( \frac{1}{13.7} + \frac{1}{17.2} + \frac{1}{11.9} \right) U_1 = \frac{5}{13.7} + \frac{15}{17.2} + \frac{10}{11.9} + 1 \Rightarrow U_1 = 14.3024 \text{ V} \quad (5.10)$$

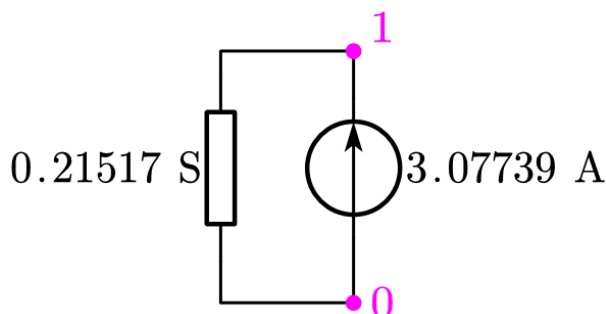
于是得到电压  $U$  和各支路电流:

$$U = U_1 + 5.5 = 19.8024 \text{ V}, \quad I_1 = \frac{U_1 - 5}{13.7} = 0.6790 \text{ A} \quad (5.11)$$

$$I_2 = \frac{U_1 - 15}{17.2} = -0.0406 \text{ A}, \quad I_3 = \frac{U_1 - 10}{11.9} = 0.3615 \text{ A} \quad (5.12)$$



(a) 题目原电路图



(b) 等效后的最简电路图

图 5.7: 5.5 习题集 3-21

## 5.6 (选做) 讲义题 3-4: 按指定的参考节点, 列出电路的节点电压方程

原题图和等效电路如图 5.8 所示, 电路中有 4 个节点 (不含无伴电压源) 和 2 个受控源控制变量, 需要列出 3 个节点方程和 2 个控制方程, 如下:

$$\begin{aligned} \text{节点 1:} \quad & (1+1)U_1 - U_2 - 0 = 2u - 1 \\ \text{节点 2:} \quad & -U_1 + (1 + \frac{1}{4})U_2 - \frac{1}{4}U_3 = 3i \\ \text{节点 3:} \quad & 0 - \frac{1}{4}U_2 + (1 + \frac{1}{4})U_3 = 1 \\ \text{控制方程:} \quad & i = U_1 - U_2, \quad u = U_3 \end{aligned} \quad (5.13)$$

代入化简并求解:

$$\begin{cases} 2U_1 - U_2 - 2U_3 = -1 \\ -16U_1 + 17U_2 - U_3 = 0 \\ 0 - U_2 + 5U_3 = 1 \end{cases} \Rightarrow U_1 = U_2 = U_3 = 1 \text{ V}, \quad i = 0, \quad u = 1 \text{ V} \quad (5.14)$$

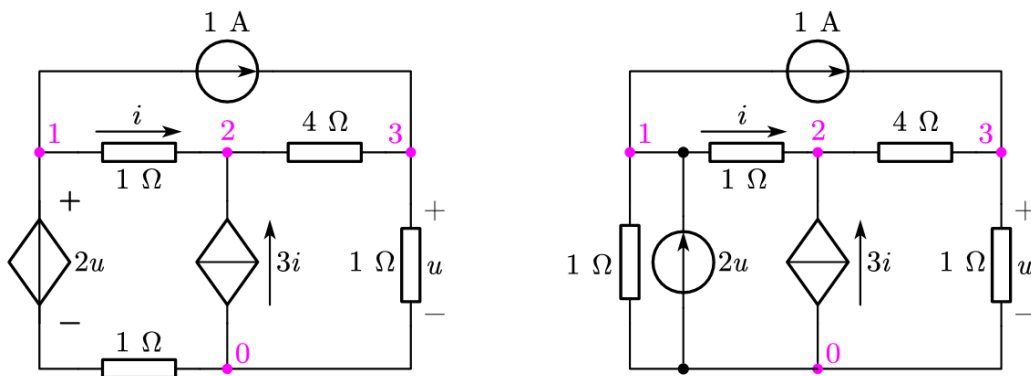


图 5.8: 5.6 讲义题 3-4

### 5.7 习题集 3-15: 用回路电流法求图中电路的独立电流源功率

原电路已无法继续化简, 电路中有 3 个网格 (含 2 个无伴电流源), 1 个受控源变量, 共需列出  $3 + 1 = 2$  个方程。如图 5.9 (a), 先列出三个网格电流方程, 如下:

$$\text{网格 1: } 100i_1 - 20i_2 - 30i_3 = 0 \quad (5.15)$$

$$\text{网格 2: } i_2 = 1 \quad (5.16)$$

$$\text{网格 3: } i_3 = -0.02U \quad (5.17)$$

又有控制变量  $U$ :

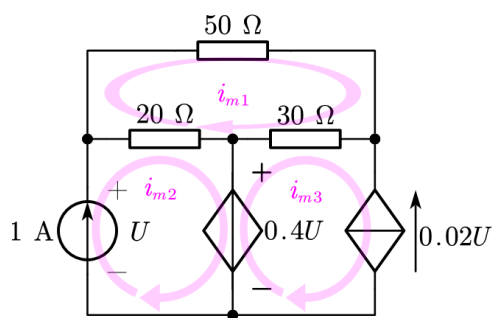
$$0 + U - 20(i_2 - i_1) - 0.4U = 0 \Rightarrow U = \frac{100}{3}(i_2 - i_1) \quad (5.18)$$

联立上面四个方程, 可以得到:

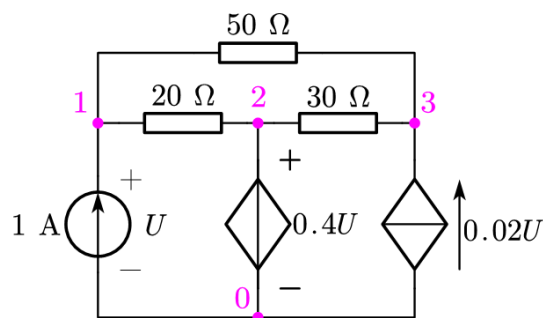
$$\begin{cases} \text{网格 1: } 100i_1 - 20i_2 - 30i_3 = 0 \\ \text{网格 2: } i_2 = 1 \\ \text{网格 3: } -2i_1 + 2i_2 + 3i_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 0 \text{ A} \\ i_2 = 1 \text{ A} \\ i_3 = -\frac{2}{3} \text{ A} \end{cases} \quad (5.19)$$

得到功率  $P$ :

$$P = 1 \text{ A} \cdot U = \frac{100}{3}(i_2 - i_1) = \frac{100}{3} \text{ W} = 33.3333 \text{ W} \quad (5.20)$$



(a) 回路电流法



(b) 节点电压法

图 5.9: 5.7 习题集 3-15

不妨也用节点电压法求解一下此题。如图 5.9 (b), 电路中有 4 个节点 (含 1 个无伴电压源) 和 1 个 (受控源) 控制变量, 取节点 0 为参考节点, 共需列出  $(4 - 1 - 1) + 0 + 2 = 4$  个方程, 如下:

$$\text{节点 1: } \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{20}\right)U_1 - \frac{1}{20}U_2 - \frac{1}{50}U_3 = 1 \quad (5.21)$$

$$\text{节点 2: } U_2 = 0.4U \quad (5.22)$$

$$\text{节点 3: } -\frac{1}{50}U_1 - \frac{1}{30}U_2 + \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{30}\right)U_3 = 0.02U \quad (5.23)$$

$$\text{控制方程: } U = U_1 \quad (5.24)$$

联立上述四个方程, 可以得到:

$$\begin{cases} \text{节点 1: } \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{20}\right)U_1 - \frac{1}{20}U_2 - \frac{1}{50}U_3 = 1 \\ \text{节点 2: } -0.4U_1 + U_2 = 0 \\ \text{节点 3: } -\frac{2}{50}U_1 - \frac{1}{30}U_2 + \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{30}\right)U_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_1 = \frac{100}{3} \text{ V} \\ U_2 = \frac{40}{3} \text{ V} \\ U_3 = \frac{100}{3} \text{ V} \end{cases} \Rightarrow P = 1 \text{ A} \cdot U = \frac{100}{3} \text{ W} \quad (5.25)$$



### 5.8 （选做）讲义题 3-8: 列出图中电路的网孔电流方程，并计算受控源的吸收功率

如图，电路共有 3 个网孔（内含 2 个无伴电流源）和 1 个控制变量，将  $i_2$  和  $i_3$  合并为超网路后，共需要列出 2 个网路方程、1 个超网路内部方程和 1 个控制方程，如下：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{网路 1:} & i_1 = 2 \\ \text{网路 2,3:} & -3i_1 + (2i_2 + 4i_3) = 4 \\ \text{网路 2,3 内部:} & 2i = i_2 - i_3 \\ \text{控制方程:} & i = i_3 - i_1 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_1 = 2 \\ -3i_1 + 2i_2 + 4i_3 = 4 \\ 2i_1 + i_2 - 3i_3 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_1 = 2 \text{ A} \\ i_2 = 1.4 \text{ A} \\ i_3 = 1.8 \text{ A} \\ i = -0.2 \text{ A} \end{array} \right. \quad (5.26)$$

于是得到吸收功率：

$$P = 2i \cdot [0 - (4 - 2(i_2 - i_1))] = 2.8 \text{ W} \quad (5.27)$$

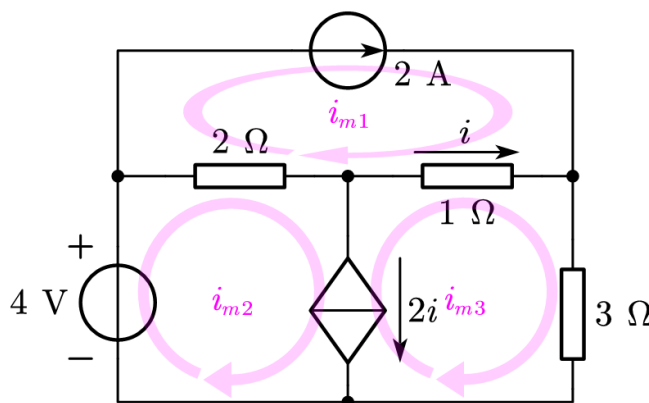


图 5.10: 5.8 讲义题 3-8

# 附录 A Matlab 代码

## A.1 图 ?? 源码