

目录

前 言	2
第 1 讲 电路模型及电路定律	3
第 2 讲 电阻电路的等效变换	27
第 3 讲 电路方程	60
第 4 讲 电路定理	81
第 5 讲 理想运放	122
第 6 讲 动态电路之基本元件	138
第 7 讲 动态电路之时域分析	147
第 8 讲 正弦稳态电路	208
第 9 讲 耦合电路	248
第 10 讲 谐振电路	274
第 11 讲 三相电路	291
第 12 讲 非正弦周期电路	320
第 13 讲 动态电路的复频域分析	336
第 14 讲 二端口参数电路	364
第 15 讲 非线性电路	392
第 16 讲 状态方程	409

前言

各位同学，首先感谢大家对水木珞研团队的信任。宝典S可以说是水木珞研团队的呕心沥血之作，这里有几点需要说明一下（请大家耐心读完）：

1、考研毕竟不是期末考试，重点只是相对的，希望大家学习的时候还是尽量学多点和学深点，谁也不敢保证命题老师不会突然考的冷门和偏难。其实每个院校的电路难度就是看难题的比例，因此宝典S中除了简单题、常规题之外也会设置一点点的冷门题和提高题来锻炼大家的解题能力，所以希望同学们好好完成宝典S。

2、由于各个学校的考纲和考试难度不一样，每个学校的知识点部分要求也不同。但是这里为了知识体系的完备性，也为了防止大家后期换学校，每一章的知识点部分都是全面覆盖的。比如：有些学校不考回转器等，但知识点部分这部分内容可能也会给出，如果自己学校不考这个可以自动跳过这部分。但是后面的习题部分不会出现这部分内容。因此，希望同学了解一下。

3、宝典S很多人之前发了一份24年的，对于新旧宝典的更新使用，建议是这样的：从当前学的下一个章节开始，比如，25的讲义用到了第3章，那么从第4章开始就用新的25年讲义了，24的讲义上的笔记也不用重新挪到新讲义上。因为，首先讲义修改的幅度大概就10%-20%，大家不用浪费大量时间去挪动笔记。其次，24年的资料体系是很完整的，上万学长学姐同学都使用过去参加考试了，所以完全可以应付知识点学习和考试的。建议大家二轮复习的时候，之前的章节用新的25讲义再做一遍。

4、绝大部分学校的资料除了宝典S外还会有ABC，其中宝典B（24年全国电气高校考研真题精选大串讲）的题目也很多，第一轮复习的时候不太建议做，除非这个章节学完后，课后题和S做完了，但是感觉知识点掌握还是有点迷迷糊糊的，这时可以做一下宝典B这章的习题来强化一下。强化冲刺阶段大建议是先回顾一章宝典S的知识点和好题，然后有时间的话再做一章宝典B。当然，如果此时宝典S都没做完，那可以不做宝典B。或者宝典B只做自己不会或者比较薄弱的章节，一句话就是优先级：宝典S>>宝典B，宝典B用来查缺补漏或者强化。

5、宝典S中的【综合提高】题属于难度较大题，如果基础不是很好的同学，可以第一轮跳过去，等学完强化课再做。基础还不错、感觉知识点掌握较好的同学也可以选择直接做

6、最后，人无完人，由于水平有限，宝典S资料中，难免有一点疏漏之处，会有一点点的编辑错误，但是所有题目的思路 and 结果应该都没问题的。希望各位同学体谅一下同时也欢迎各位同学的批评与指正。在这里说明一下，大家如果在做宝典S后面习题的过程中，发现哪个地方有错误（计算错误、思路错误或编辑错误等），如果这个错误是我们没有发现的，可以加微信号：scut-kaoyan，我们会给你一个红包奖励。（注：一定要确定是之前没有发现的且是真正的错误，如果觉得有问题，可以先去答疑群问一下答疑学长。如果认定了是错误的，来加微信：scut-kaoyan——水木珞研学长）



这里祝各位同学一战成硕！

电路哥、菩提哥、水木珞研电路教务组

第一讲 电路模型及电路定律

一、【命题基本点重点】

- 1、电阻电路常见基本概念
- 2、电路中的常见基本元件
- 3、KCL 与 KVL 方程及其应用。

二、【基本考点总结】

1、知识点 A：集总参数元件与集总参数电路

集总参数元件：每一个具有两个端钮的元件中有确定的应流，端钮间有确定的电压。

集总参数电路：由集总参数元件构成的电路。

一个实际电路要能用集总参数电路近似，要满足如下条件：即实际电路的尺寸必须远小于电路工作频率下的电磁波的波长。

2、知识点 B：电路中的基本变量及原件

(1) 电流(current)

①电流：带电质点的定向运动形成电流。

电流的大小用电流强度表示。

$$i(t) \stackrel{def}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

单位名称：安(培)

符号：A (Ampere) mA μ A

②电流的参考方向

参考方向：任意选定的一个方向作为电流的参考方向。

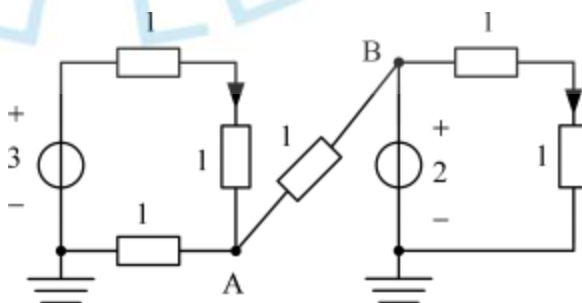
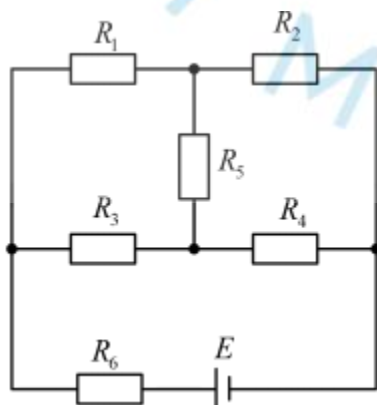


$i > 0$ 表示电流的参考方向与实际方向相同

$i < 0$ 表示电流的参考方向与实际方向相反

③为什么要引入参考方向？

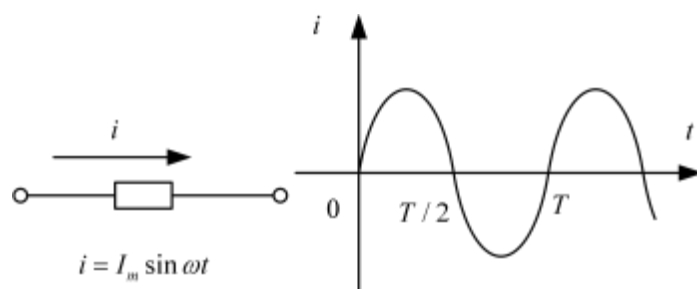
(a)复杂电路的某些支路事先无法确定实际方向。



(b)电流是交变的

当 $0 < t < \frac{T}{2}$, $i > 0$ 电流实际方向与参考方向相同

当 $\frac{T}{2} < t < T, i < 0$ 电流实际方向与参考方向相反



(2) 电压 (voltage)

①电压 (voltage): 电场中某两点 A, B 间的电压 (降) U_{AB} 等于将单位正电荷 q 从 A 点移至 B 点电场力所做的功 W_{AB} , 即

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_{AB}}{dq}$$

单位名称: 伏 (特)

符号: V (Volt) mV μV

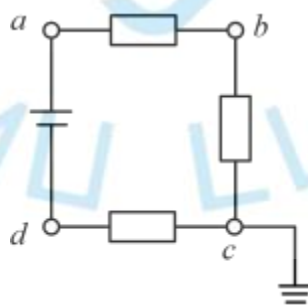
②电压 (降) 的参考方向



③电位

取恒定电场中的任意一点 (O 点), 设该点的电位为零, 称 O 点为参考点。则电场中一点 A 到 O 点的电压 U_{AO} 称为 A 点的电位, 记为 Q_A 。单位 V (伏)。

(3) 电位



设 C 点为电位参考点, 则 $Q_c = 0, Q_a = U_{ac}, Q_b = U_{bc}, Q_d = U_{dc}, U_{ab} = Q_a - Q_b$

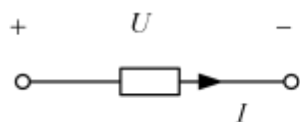
例 1: 见例题部分

(4) 小结

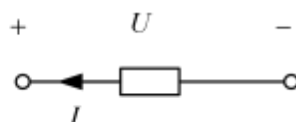
①分析电路前必须选定电压和电流的参考方向, 并据此列写电路方程, 此时电压电流以代数量的形式约束在方程中。

②参考方向一经选定, 必须在图中相应位置标注(包括方向 和符号), 在计算过程中不得任意改变。

③关联参考方向和非关联参考方向。



关联参考方向



非关联参考方向

④电路计算完毕，结合参考方向和电压电流值的正负才能判定电压电流的实际方向，因此在电路计算中始终是依据参考方向进行。

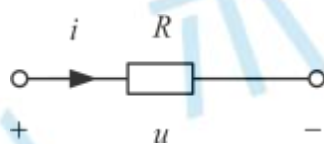
(4) 功率 (power)

①电功率：单位时间内电场力所做的功

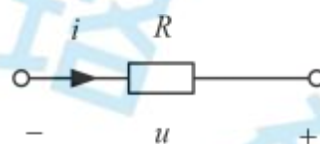
$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui$$

功率的单位名称：瓦（特） 符号（W）

能量的单位名称：焦（耳）符号（J）



$$p = ui = i^2 R = u^2 / R$$

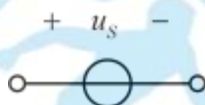


$$p = ui = (-Ri)i = -i^2 R = -u^2 / R$$

表明电阻元件在任何时刻总是消耗功率的。

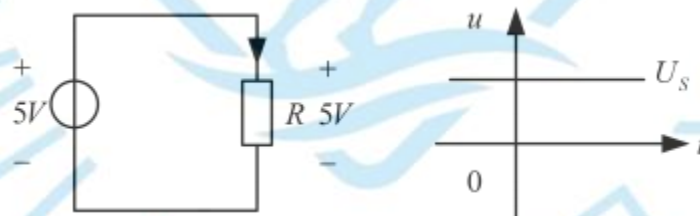
(5) 电源

①电压源

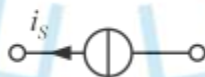


(a)端电压确定不变。由电源本身决定，与外电路无关；

(b)通过它的电流是任意的，由外电路决定。



②电流源 电路符号

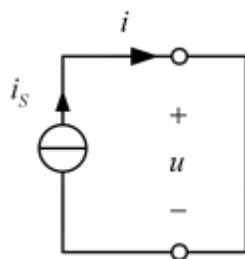


特点：

(a)电源电流确定不变由电源本身决定的，与外电路无关；

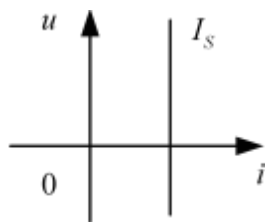
(b)电流源两端电压是由外电路决定。

理想电流源的短路与开路



短路: $i = i_s, u = 0$

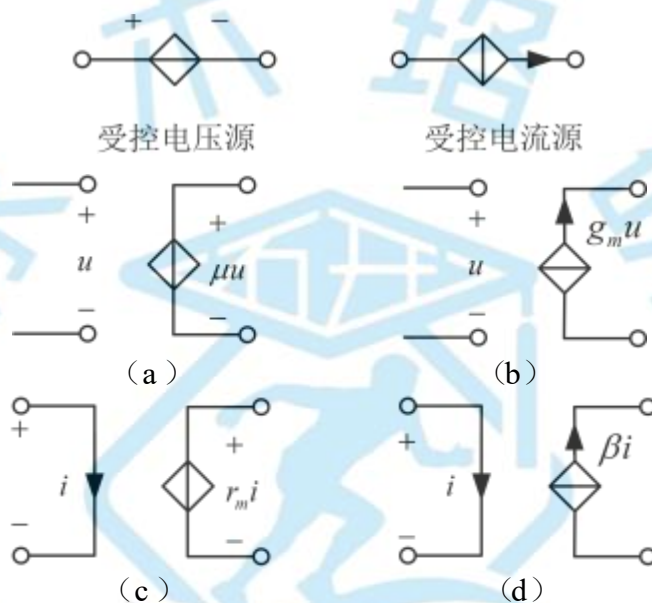
开路: 理想电流源不允许开路。



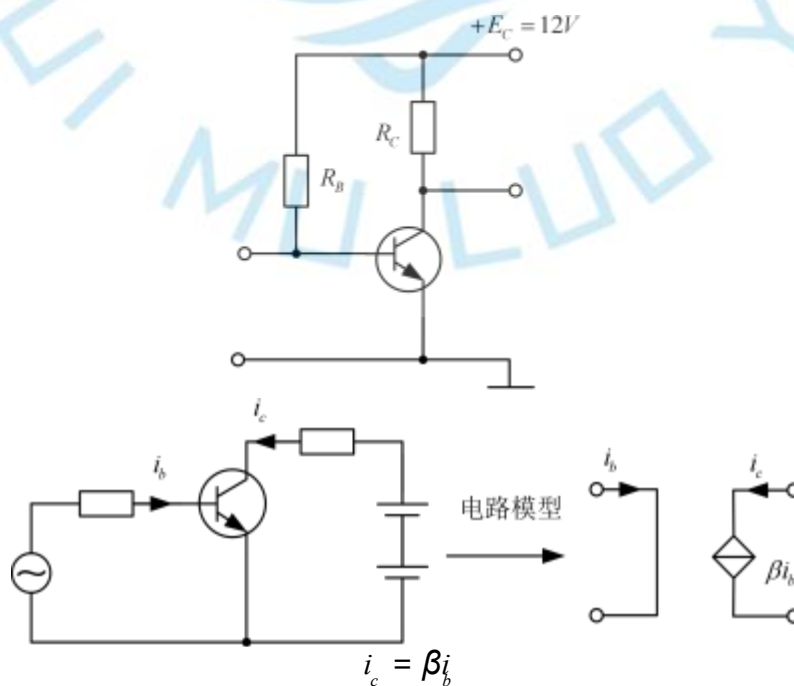
(6) 受控电源(非独立源)

①定义: 电压或电流的大小和方向不是给定的时间函数, 而是受电路中某个地方的电压(或电流)控制的电源, 称受控源。

电路符号



实际中的受控源

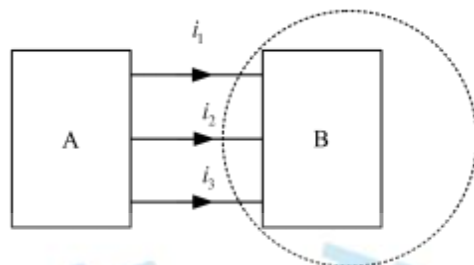


3、知识点 C:基尔霍夫定律

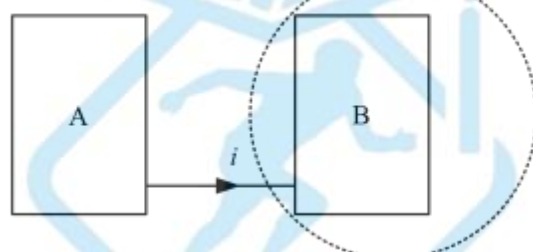
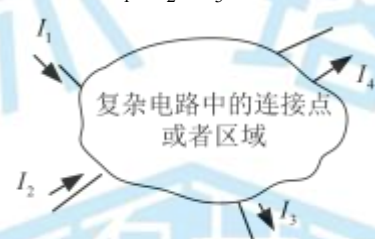
在集总参数电路中，任一时刻流出(流入)任一节点的各支路电流的代数和为零。
即

$$\sum i(t) = 0$$

KCL 的推广：

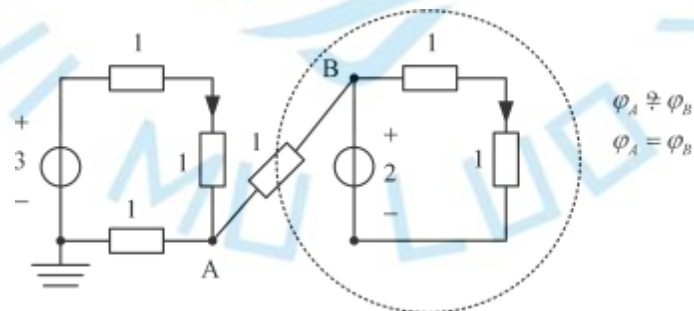


$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

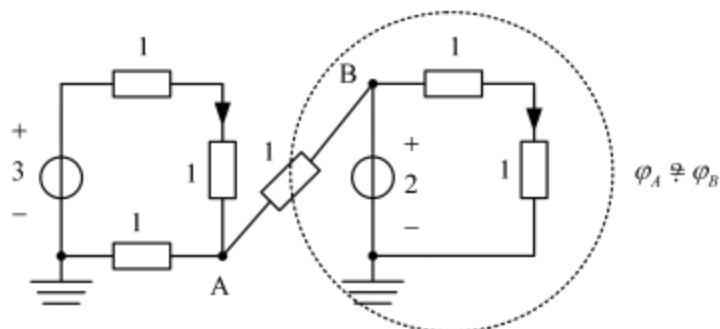


只有一条支路相连，则 $i = 0$

(1)



(2)



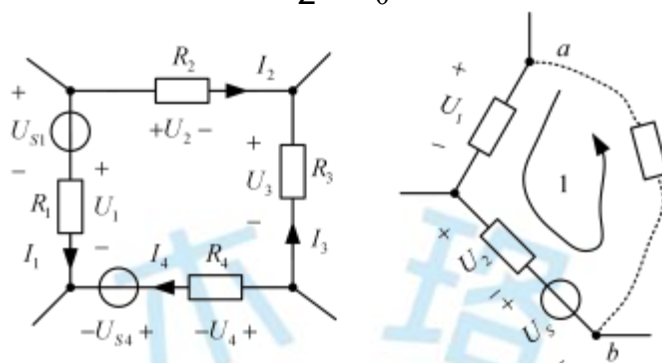
① KCL 是电荷守恒和电流连续性原理在电路中任意结点处的反映;

②KCL 是对支路电流加的约束，与支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关；

③KCL 方程是按电流参考方向列写，与电流实际方向无关。

集总参数电路中，任一时刻沿任一闭合路径(按固定绕向),各支路电压代数和为零。
即

$$\sum u = 0$$



①KVL 的实质反映了电路遵从能量守恒定律；

②KVL 是对回路电压加的约束，与回路各支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关；

③KVL 方程是按电压参考方向列写，与电压实际方向无关。

④KVL 中的回路可以是假想的回路。

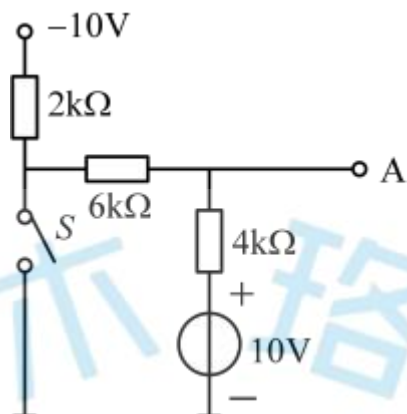
例 2—例 10:详见例题部分

第一讲 练习

一、例题部分

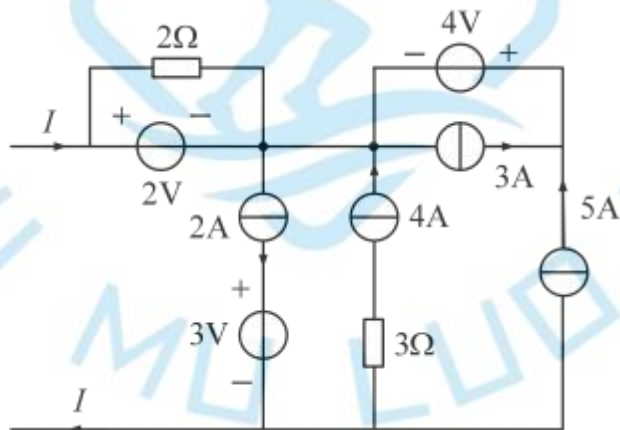
例 1

求图中开关闭合前后 A 点的电位。



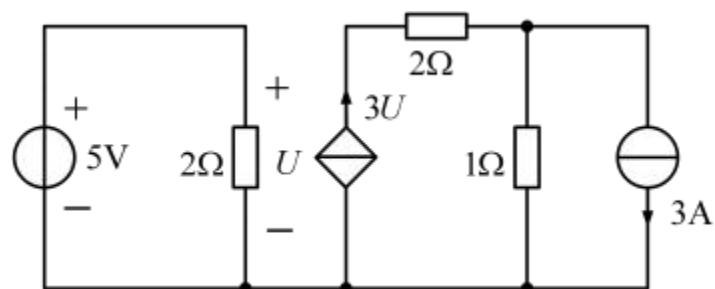
例 2

下图所示电路，求电流 I 。



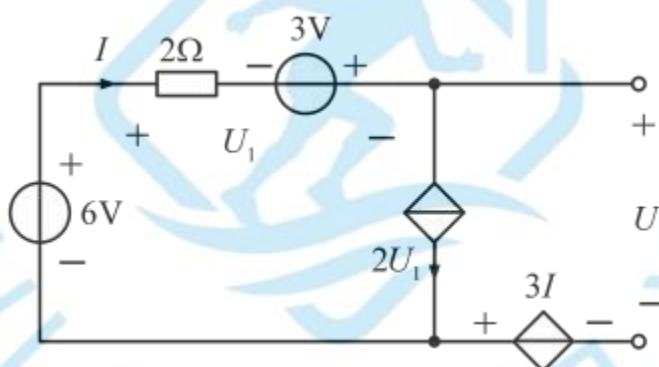
例 3

在下图所示的电路中，3A 电流源发出的功率为多少？【华南理工大学考研真题】



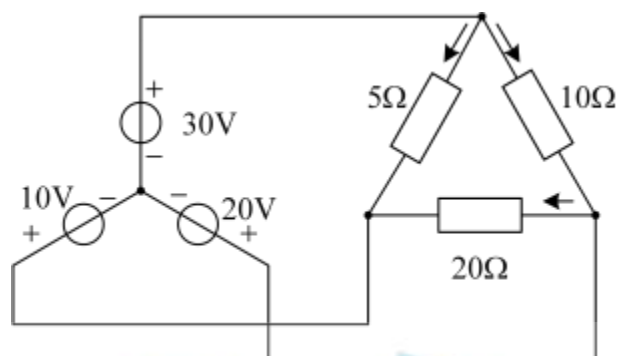
例 4

如图所示电路端口，求电流 I 和开路电压 U 。【沈阳工业大学考研真题】

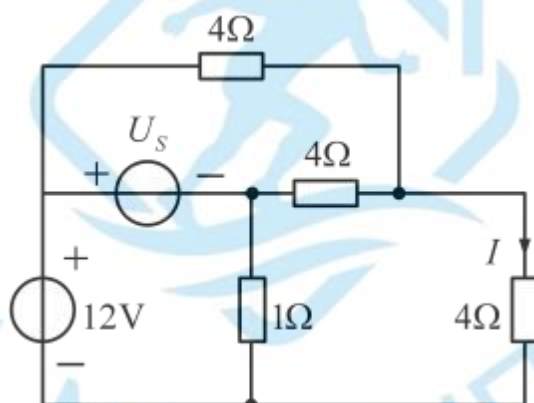


例 5

已知电路参数如下图所示，试求各电阻支路的电流。

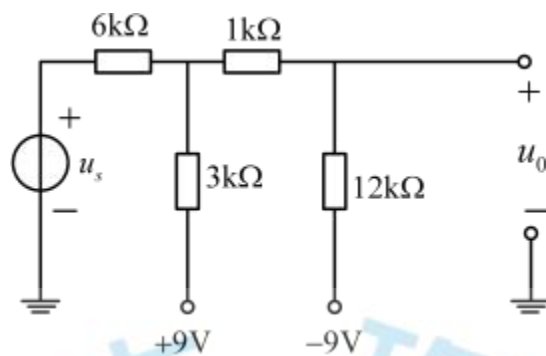
**例 6**

下图所示电路，求电压源值 U_s 的值。【沈阳工业大学考研真题】



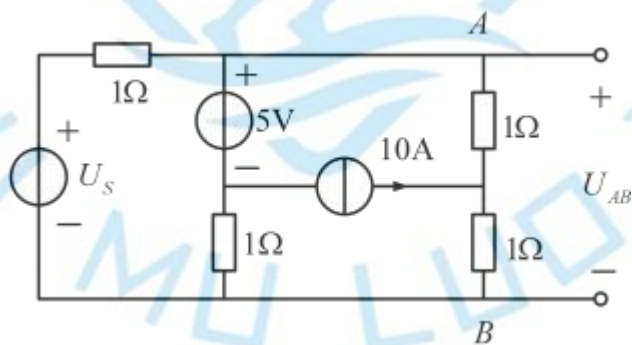
例 7

下图所示电路中 $u_s = 3\sin\omega t V$ 。试求电压 u_0 。【清华大学作业题】



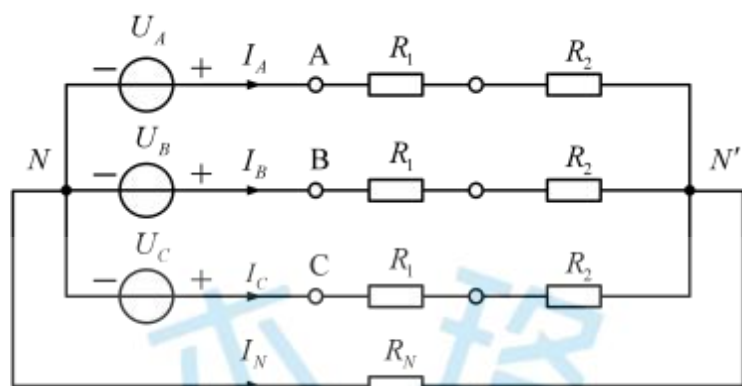
例 8

下图所示电路中，已知 $U_{AB} = 5V$ ，则电压源 $U_s =$ _____。【华南理工大学】



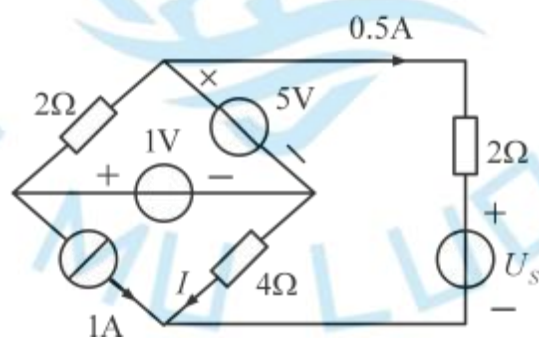
例 9

电路如下图所示，其中 $U_A = U_B = U_C$ ， R_1 ， R_2 和 R_N 均已知。求电流 I_A ， I_B ， I_C ， I_N 。[电路哥改编原创题目]



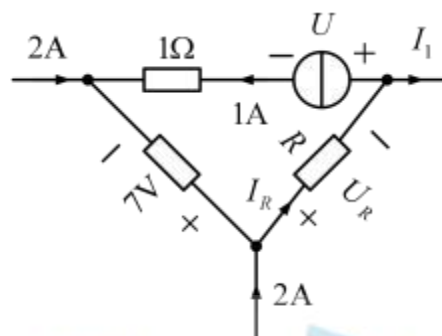
例 10

电路如下图所示，求 U_s 的值。【中国电科院考研真题】



例 11

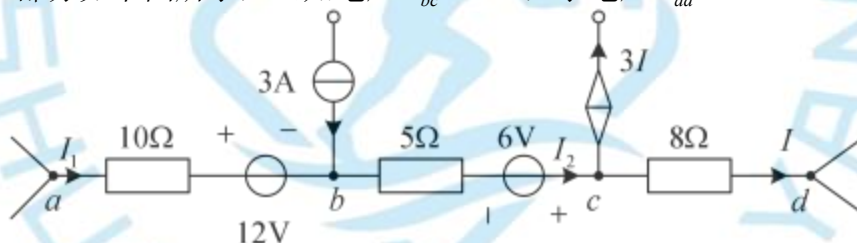
下图所示电路中，已知 1A 电流源吸收的功率为 1W ，求电阻 R 。



二、习题部分

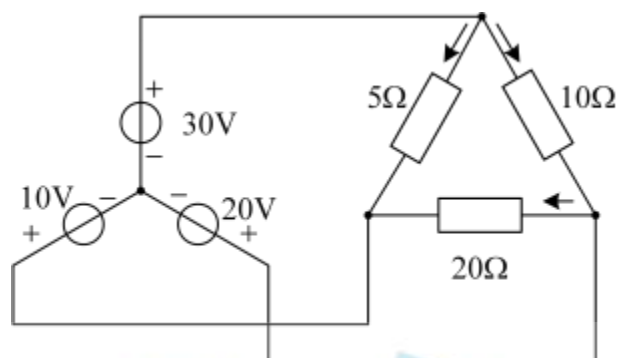
题 1

电路的一部分如下图所示，已知电压 $U_{bc} = 4\text{V}$ ，求电压 U_{ad} 。



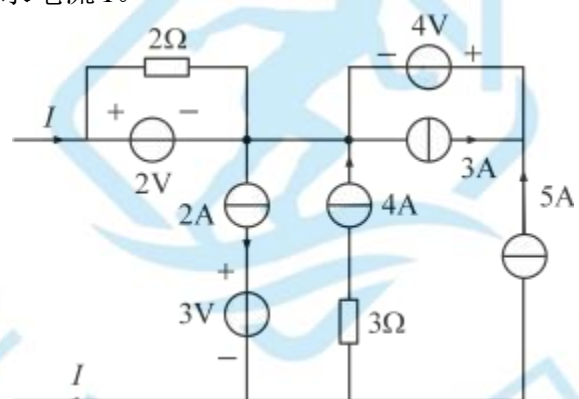
题 2

已知电路参数如下图所示，试求各电阻支路的电流。



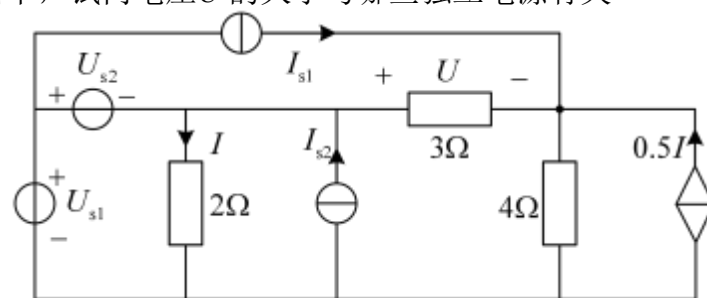
题 3

如下图所示电路，求电流 I 。



题 4

下图所示电路中，试问电压 U 的大小与哪些独立电源有关？



A. I_{s1}

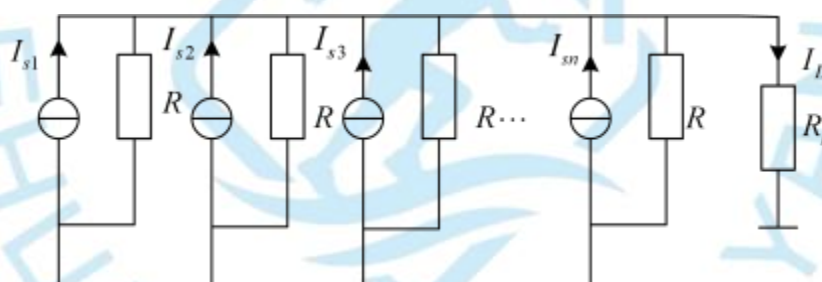
B. I_{s2}

C. U_{s1}

D. U_{s2}

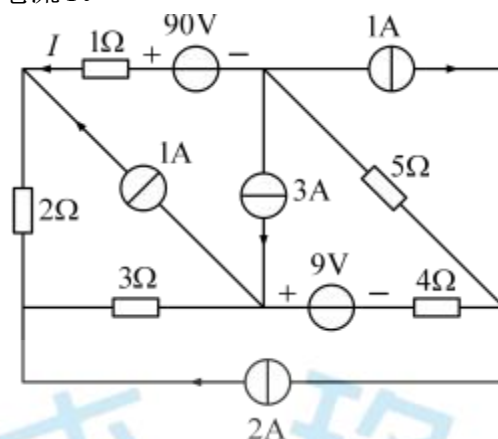
题 5

下图所示电路中，已知 $I_{s1} = I_{s2} = \cdots = I_{sn} = I_s$ ，负载中的电流 $I_L =$ _____。



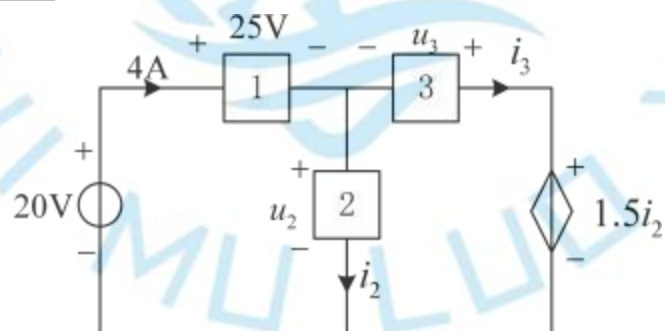
题 6

试求下图所示电路中的电流 I 。



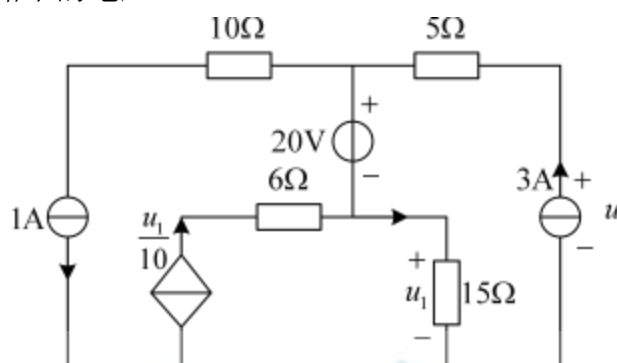
题 7

电路如下图所示，电路中电压电流的方向标记如下。元件 1、2、3 吸收的总功率的最小值为_____。



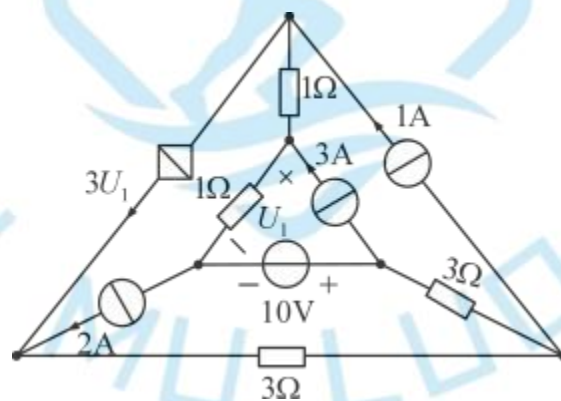
题 8

试求下图所示电路中的电压 u 。



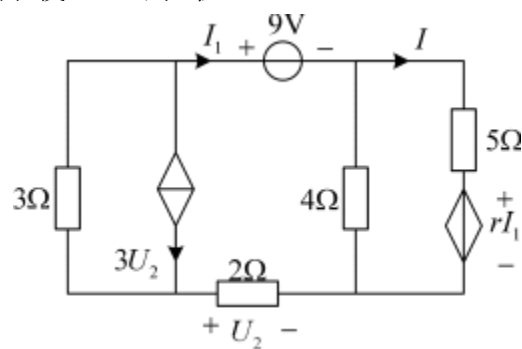
题 9

计算下图所示电路中各支路电流及所有电源的功率。



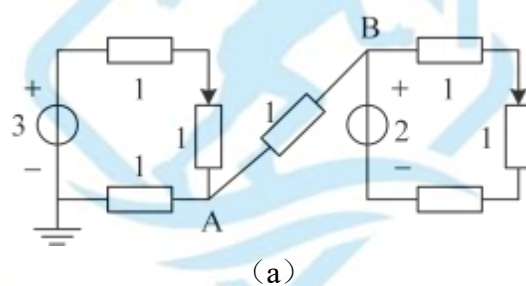
题 10

如题图所示电路，试求使 $I = 0$ 的 r 值。

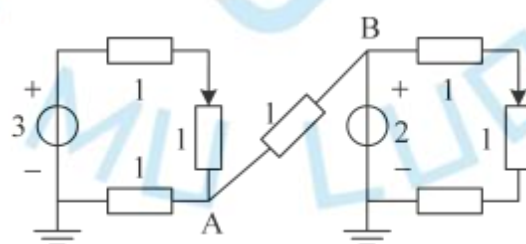


题 11

求如下两个电路图 (a) (b) 中 AB 支路电流，图中电阻单位都是 Ω 。



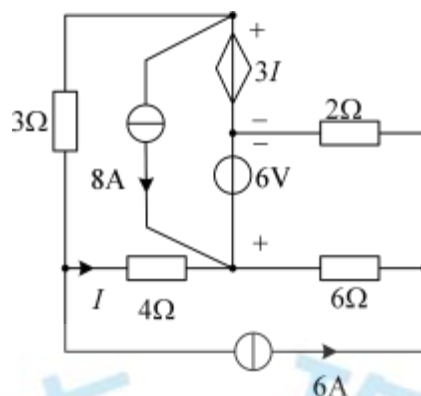
(a)



(b)

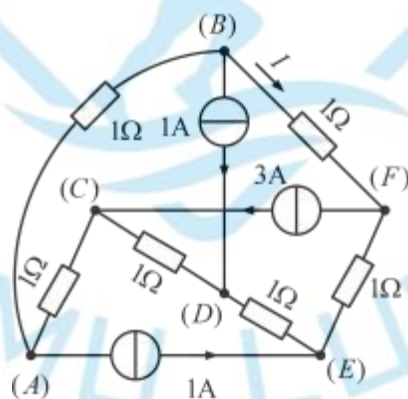
题 12

求下图所示电路中的电流，。



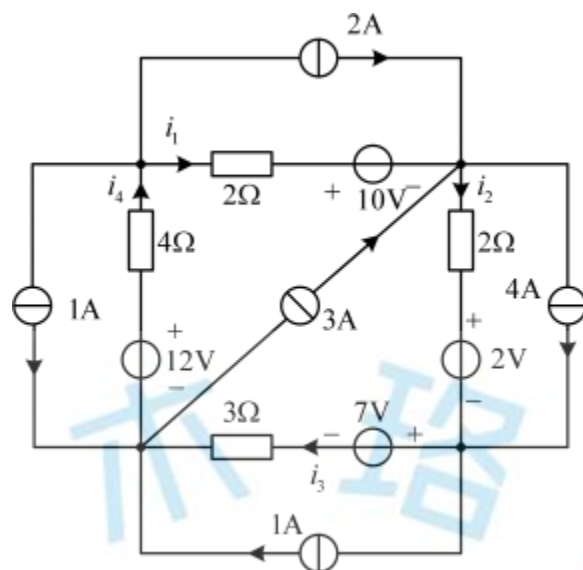
题 13

下图所示电路为一非平面网络，电路参数如下图所示。试求电流的 I 大小。



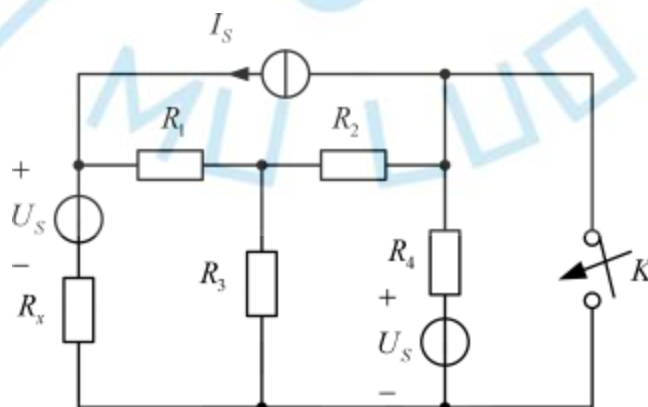
题 14

求下图所示电路中电流 i_1 和 i_4 。



题 15 【二轮提高专用】

电路如下图所示， $U_s = 4V$, $I_s = 2A$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 6\Omega$, $R_4 = 4\Omega$, 欲使开关 K 打开或闭合时电路状态保持不变，电阻 R_x 应选何值？

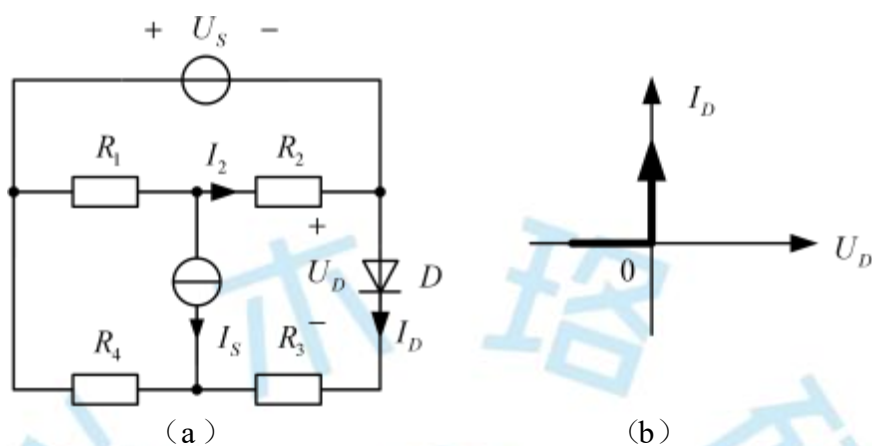


题 16 【二轮提高专用】

电路如图(a)所示, 已知 $U_S = 8\text{V}$, $I_S = 4\text{A}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4\Omega$, 理想二极管伏安特性如图(b)所示;

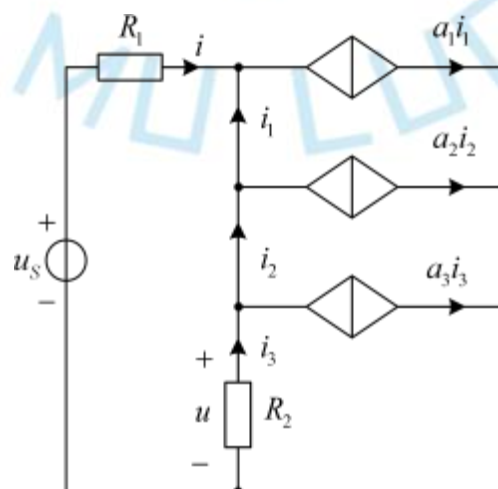
(1) 求电流 $I_2 = ?$

(2) 若电流源变为 $I_S = -4\text{A}$, 电路其余参数不变, 求电流 $I_2 = ?$



题 17 【补充习题】

在下图所示电路中各元件参数已知, 其中 $\alpha_i \neq 1$, 试求 u/u_S 。



第二讲 电路的 PS 技术--等效变换

一、【命题基本点重点】

- 1、等效变换的概念
- 2、电阻的串、并联
- 3、Y-Δ变换
- 4、电压源和电流源的串并联及其等效变换
- 5、输入电阻的求解方法

简单电路的含义 (电路结构——串联、并联及星形、三角形联接)
包含的元件——同一类元件

电路分析的基本依据: KCL、KVL; 元件特性

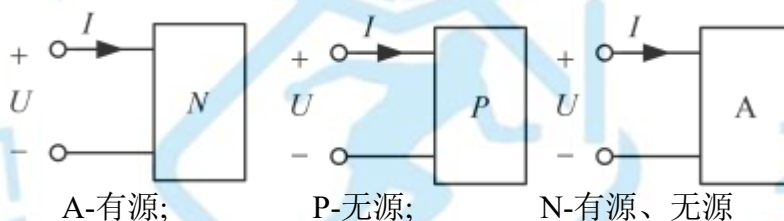
二、【基本考点总结】

变换: 对不关心的部分电路而言, 力图用较简单的结构代替原来比较复杂的结构 (复杂问题简单化)

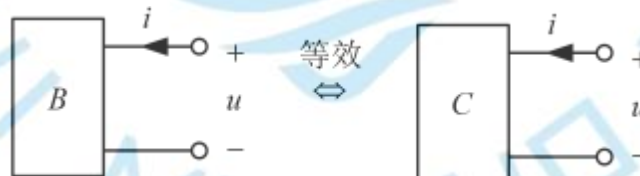
等效: 对所关心的部分电路 (未变换部分) 而言, 作用效果相同

1、知识点 A: 无源网络的等效变换

(1) 一端口网络: 任一复杂电路通过两个连接端钮与外电路相连, 这样具有两个端钮的网络即称为一端口网络或二端钮网络。



等效变换的条件: 两个内部结构完全不同的一端口网络 P_1 、 P_2 , 如果他们端口上的电压—电流之间的伏安特性完全相同, 则称为两者等效。



对 A 电路中的电流、电压和功率而言, 满足

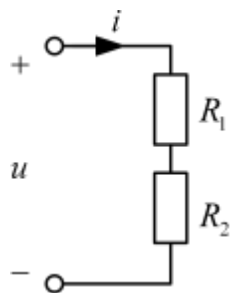


明确:

- ① 电路等效变换的条件 牵 两电路具有相同的 VCR
- ② 电路等效变换的对象 牵 未变化的外电路 A 中的电压、电流和功率
- ③ 电路等效变换的目的 牵 简化电路, 方便计算

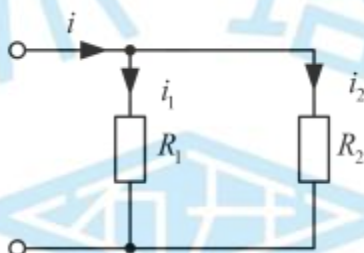
(2) 串并联等效变换

- ① 两电阻串联 $R_{eq} = R_1 + R_2, u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u, u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u$

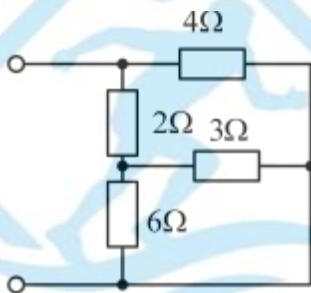


②两电阻并联

$$\begin{cases} G_{eq} = G_1 + G_2 & \text{常} R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ i = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i, i_2 = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} u \end{cases}$$



③电阻的混联



$$R = 4 // (2 + 3 // 6) \text{ 牵 } R = 2\Omega$$

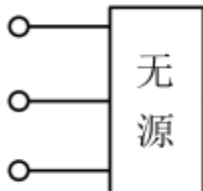
参考方向尽量按照真实方向选取!

例 1—例 3: 详见例题部分

2、知识点 B: 星三角等效变换

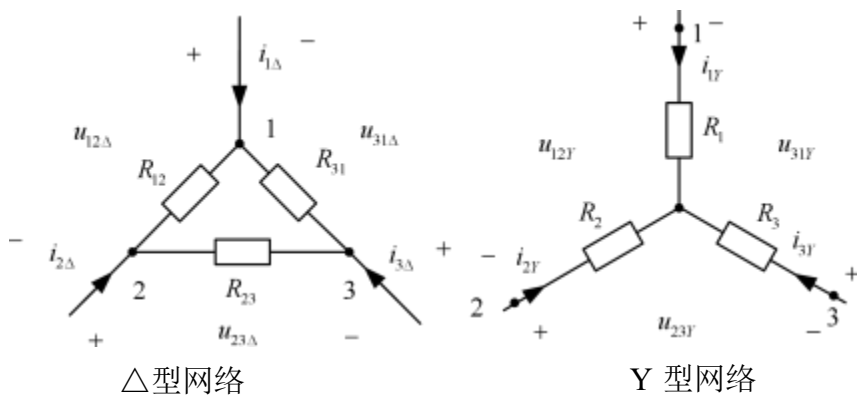
(1) 几个概念

①三端无源网络: 引出三个端钮的网络, 并且内部没有独立源。

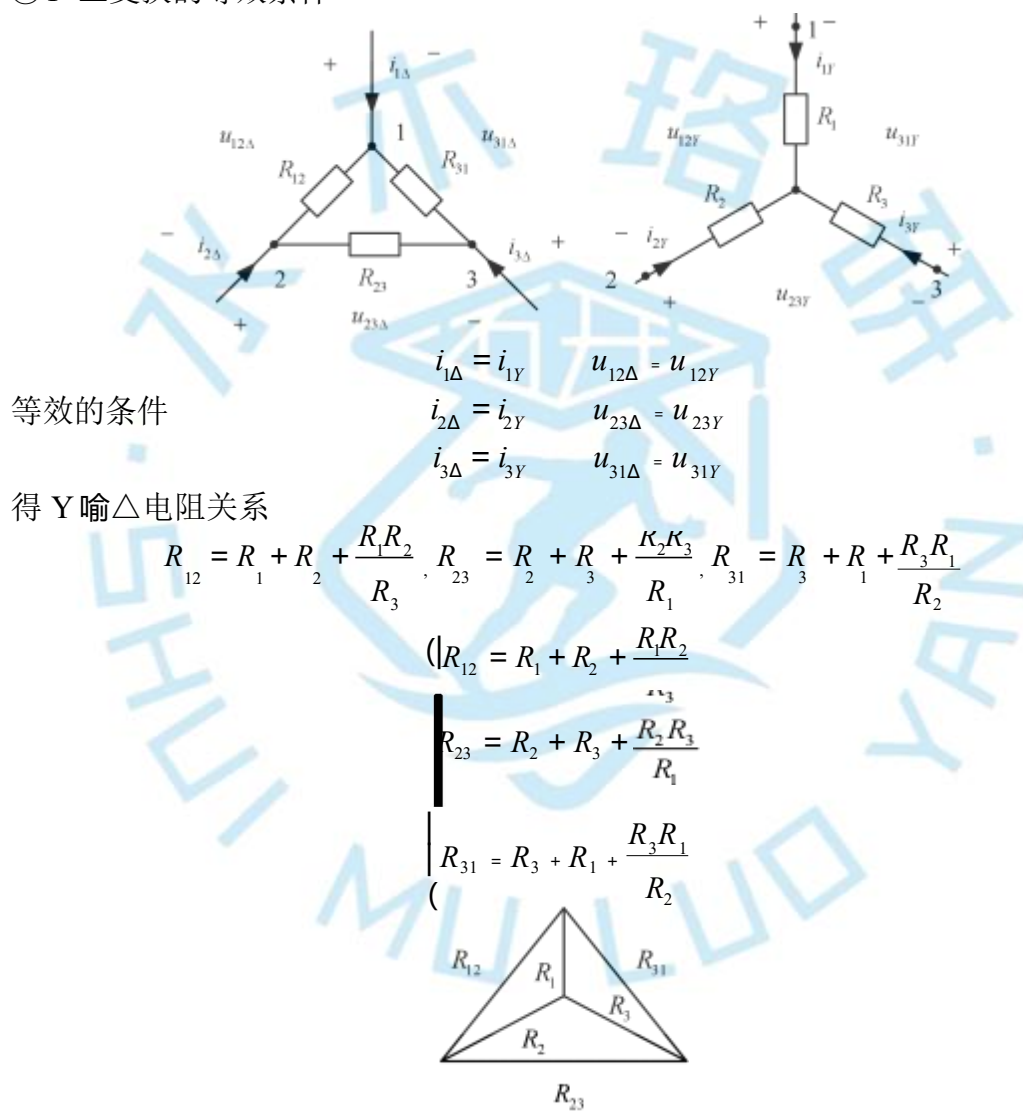


②△, Y 形联接:

三端电阻无源网络的两个例子: △, Y 网络:

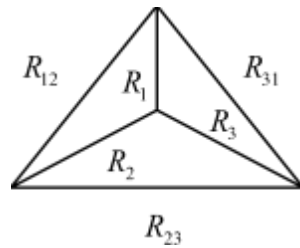


③Y-△变换的等效条件



同理可得由△喻Y 电阻关系

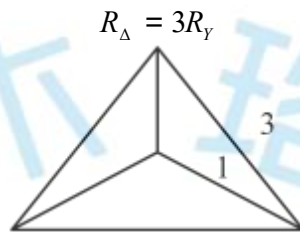
$$\left\{ \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \right.$$



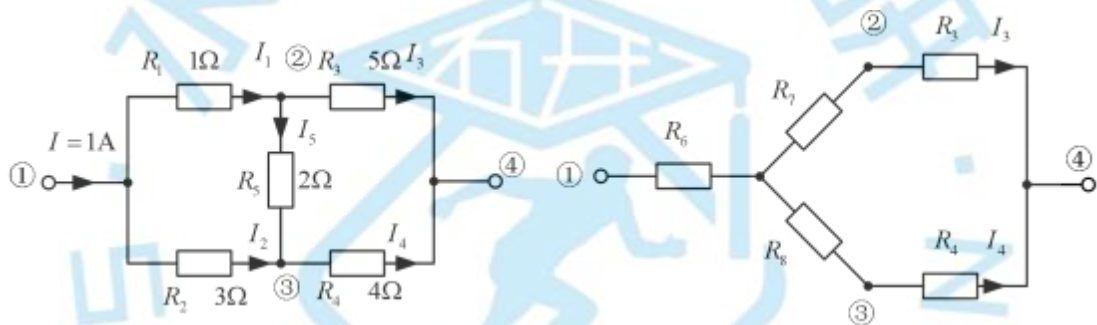
即

$$R_Y = \frac{\Delta\text{-相邻电阻乘积}}{\Sigma R_{\Delta}}$$

特例，若三个电阻相等(对称)，则有



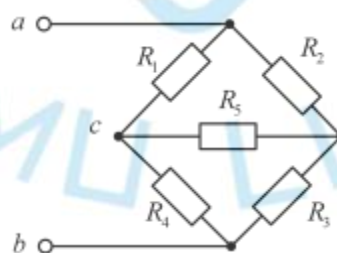
应用：



例 4—例 6: 详见例题部分

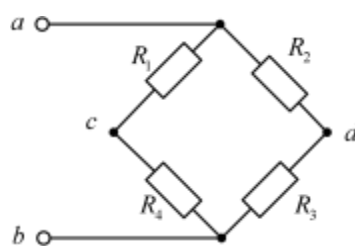
3、知识点 C：电桥专题【推荐电路哥专题: 电桥平衡, B 站可以试看】

(1) 电桥电路(桥式电路)

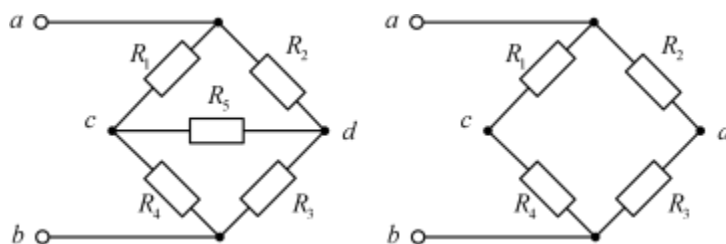


1 结构特点:

各电阻为非串并联, R_5 为桥支路, 其余 4 条为桥臂

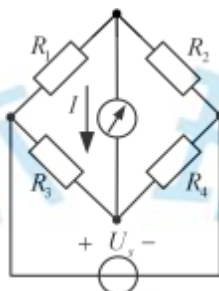


2 电桥平衡



从一个端子到达另外一个端子时，最短的路径依次经过的电阻的比值相等，则电桥平衡

③电桥电路



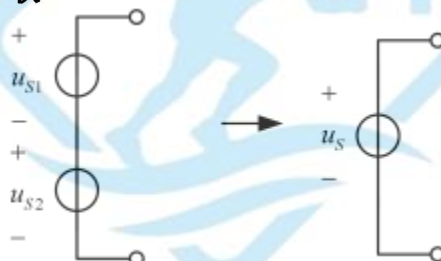
当 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ，即 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时， $I = 0$ ，称 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 为电桥平衡条件。

利用上述关系式，可测量电阻。

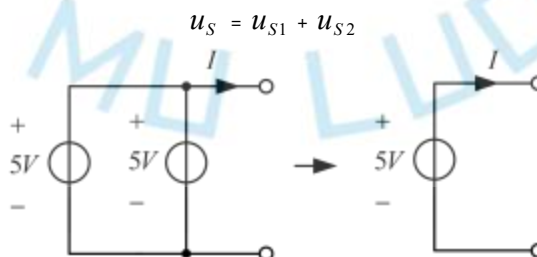
例 7—例 13: 详见例题部分

4、知识点 D：理想电源的等效变换

(1) 理想电压源的串并联



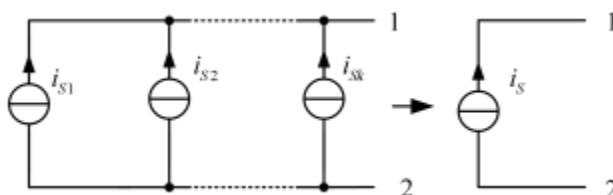
①串联: $u_S = \sum u_{S_k}$ (注意参考方向)



②并联: 电压相同的电压源才能并联，且每个电源的电流不确定。

(2) 电流源的串并联

①并联: 可等效成一个理想电流源 i_S (注意参考方向)。

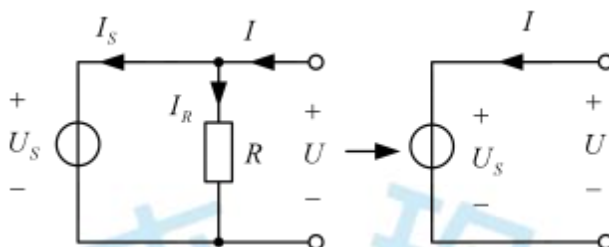


$$i_s = \sum i_{sk}, i_s = i_{s1} + i_{s2} + \dots + i_{sk} \quad \text{代数和}$$

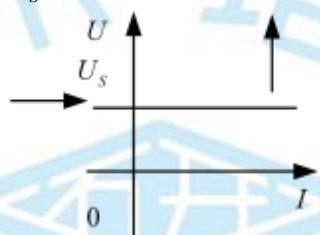
如果 i_{sk} 的参考方向与 i_s 的参考方向一致时, 式中 i_{sk} 的前面取“+”号, 不一致时取“-”号。

②串联: 电流相等且方向一致的电流源才能串联, 否则违背 KCL, 每个电流源两端的电压不能确定。

(a)电压源与支路并联的等效电路

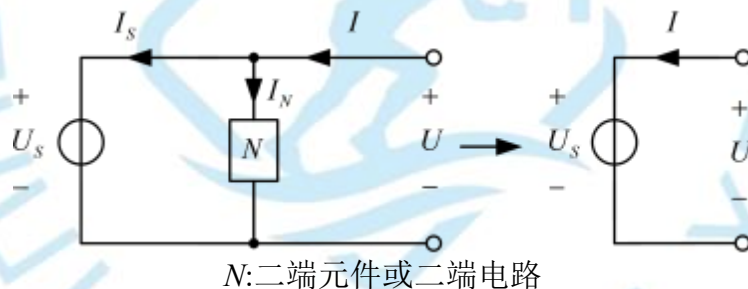


(b)电压源非电压控制型! $U = U_s$



等效电压源的电压等于原来电压源的电压 U_s , 但等效电压源中的电流不等于替代前的电压源的电流。

(c)电压源与支路并联的等效电路



N :二端元件或二端电路

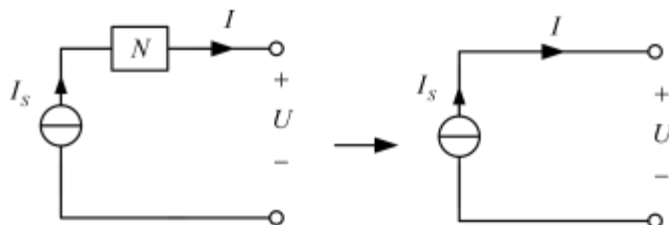
问题:

(a)如果 N 也是一电压源, 那么对它有何限制?

(b)这样的变换对电压源 U_s 等效吗?

备注:类似的变换对受控电源也适用, 不过要注意受控电源的控制量。

(c)电流源与支路串联的等效电路



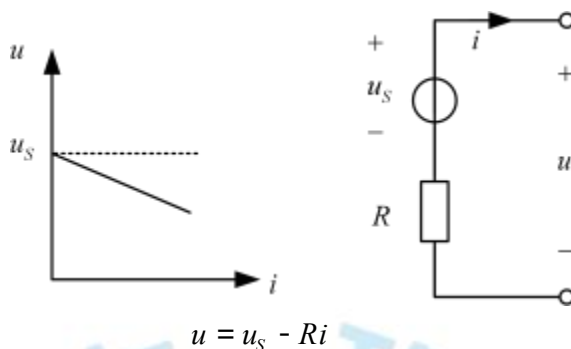
N :二端元件或二端电路

等效电流源的电流等于原来电流源的电流 i_s , 但等效电流源两端的电压不等于替代前的电流源的电压。

(2) 实际电源的两种模型及其等效变换

①实际电压源的电路模型

实际电压源实测的端电压安关系并不是一条与*I*轴平行的直线，而是一条稍微向下倾斜的直线。如图所示：

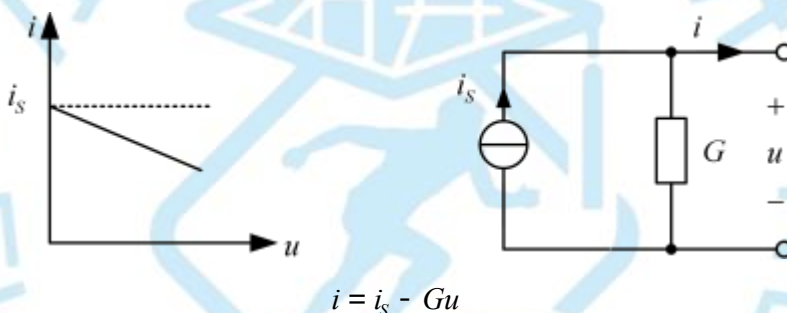


R:电源内阻，一般很小

一个实际电压源，可用一个理想电压源 u_s 与一个电阻 R 串联的支路模型来表征其特性， u_s 表示实际电压源空载或开路时的端电压， R 是电源内阻。当它向外电路提供电流时，它的端电压 u 总是小于 u_s ，电流越大端电压 u 越小。

②实际电流源的电路模型

实际电流源是一条稍微向下倾斜的直线，如下图所示：

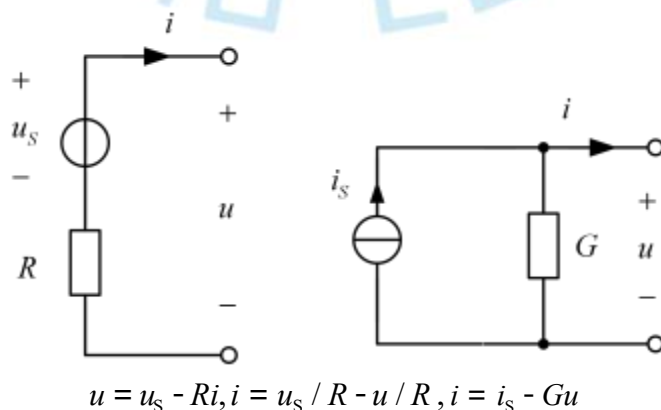


G:电源内电导，一般很小。

一个实际电流源，可用一个电流为 i_s 的理想电流源和一个内电导 G 并联的模型来表征其特性， i_s 表示实际电流源短路时输出电流。当它向外电路供给电流时，并不是全部流出，其中一部分将在内部流动，随着端电压的增加，输出电流减小。

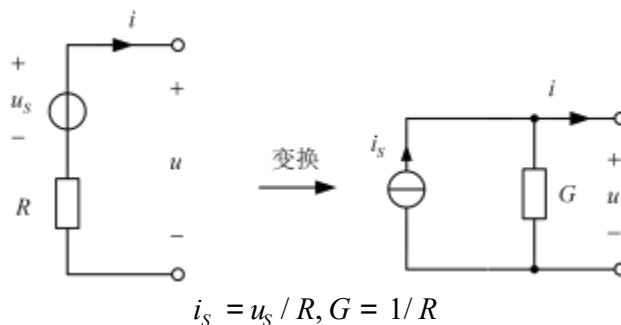
③实际电压源和实际电流源模型的等效变换

本小节将说明实际电压源、实际电流源两种模型可以进行等效变换，所谓的等效是指端口的电压、电流在变换过程中保持不变。

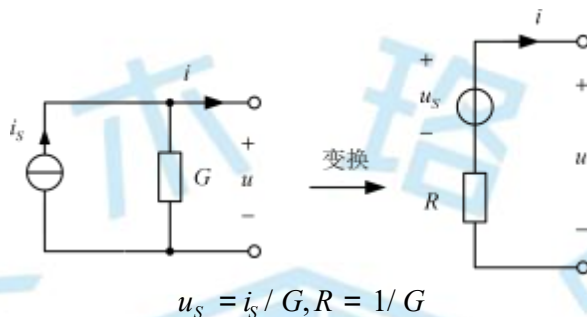


通过比较，得等效的条件： $i_s = u_s / R, G = 1 / R$

由电压源变换为电流源:



由电流源变换为电压源:



注意:

①一般情况下,这两种等效变换前后的内部功率不相同,但对外部来说,他们吸收或放出的功率相同。

例:开路状态下,电压源与电阻的串联没有功率的消耗,而将其变换成电流源与电阻的并联后,功率全部消耗在内阻上。

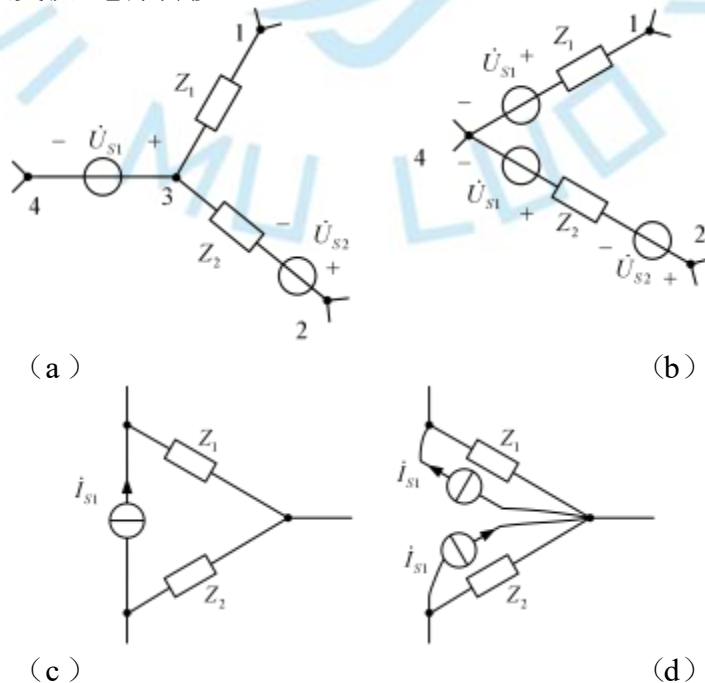
②电压源的极性与电流源的方向必须一致。

③受控源一般也可用此法来做,但受控源不能与独立源合并,控制量一定不要动。

电路哥 A, 同学 B

例 14—例 16: 详见例题部分

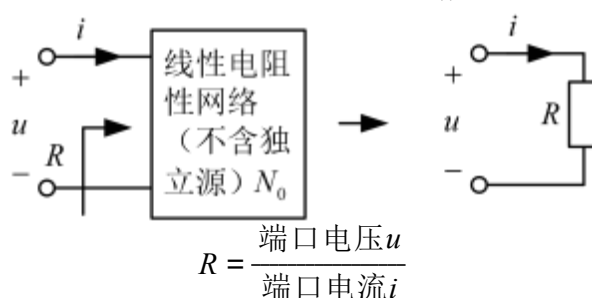
(3) 电源等效变换: 电源转移



例 17—例 18: 详见例题部分

5、知识点 E: 输入电阻

(1) 无源(独立源)一端口网络的输入(入端)电阻 R_{in}



- ① 当电路已知时, 求 R_{in} 。关键是寻求 $u \sim i$ 的关系式, 例如 $u = Ri, R_{in} = u / i = k$
- ② 纯电阻电路可用串并联和 Y- Δ 变换求等效电阻 R_{eq} 而 $R_{in} = R_{eq}$
- ③ 含受控源电阻电路只能用上述定义求 R_{in} , 且 $R_{eq} = R_{in}$
- ④ R_{in} 是端口 u, i 的比值, R_{eq} 是等效替代一端口的电阻, 它们在数值上是相等的
- ⑤ 输入电阻的思想也是一种实验方法, 尤其是处理“黑箱”电路时必须如此。

(2) 输入电阻的求法

- ① 无受控源电路: 电阻变换, 星三角形变换, 电桥平衡, 等势点法, 特殊电路方法(梯形电路、对称电路)
- ② 有受控源电路:
 - (a) 加压求流法及加流求压法
 - (b) 开路电压/短路电流
 - (c) 控制变量法则(电路哥自创)

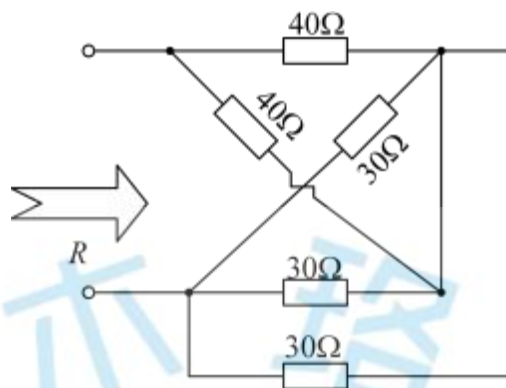
例 19: 详见例题部分

第二讲 练习

一、例题部分

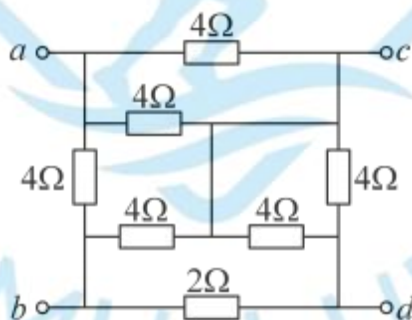
例 1

求下图所示电路的等效电阻



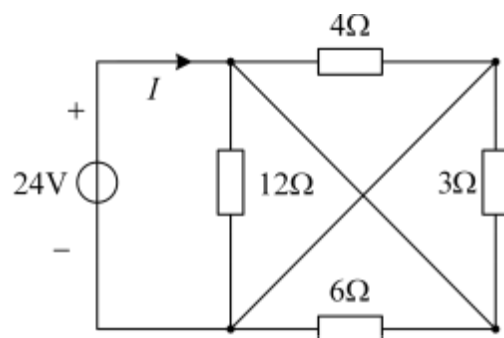
例 2

求下图所示电路中 ab 端和 cd 端的等效电阻 R_{ab} 、 R_{cd} 。

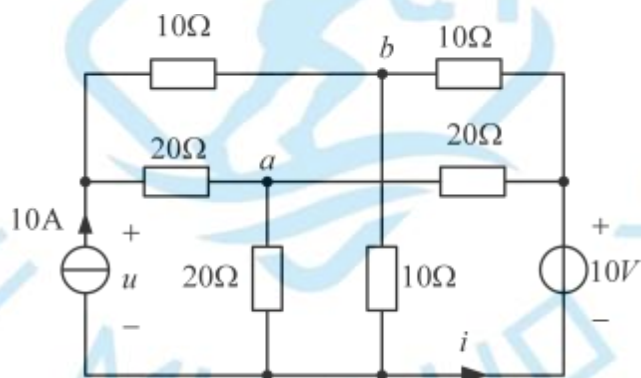


例 3

试求下图所示电路中电压源的电流，的值，图中导线中间没有物理连接

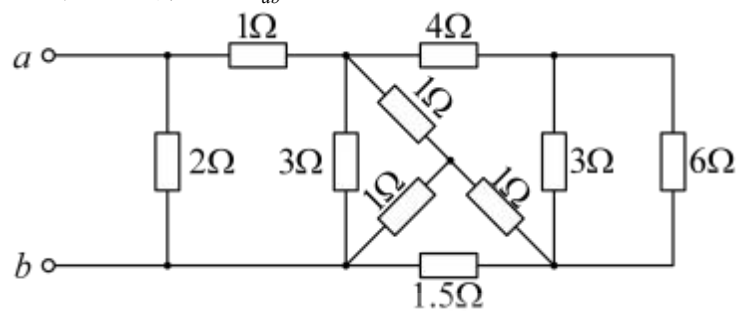
**例 4**

求下图所示电路中各电源提供的功率。



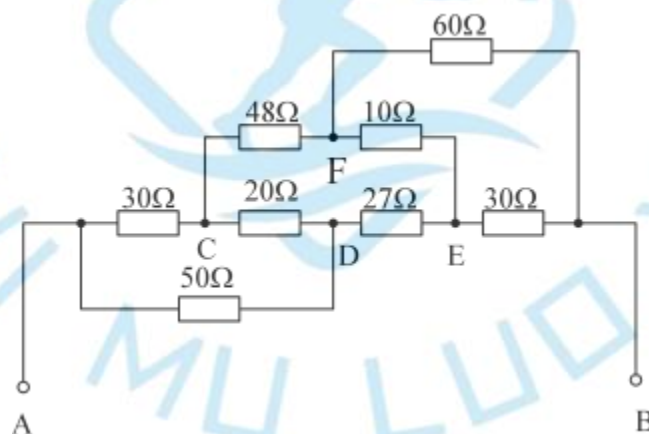
例 5

试求下图所示电路的入端电阻 R_{ab} 。



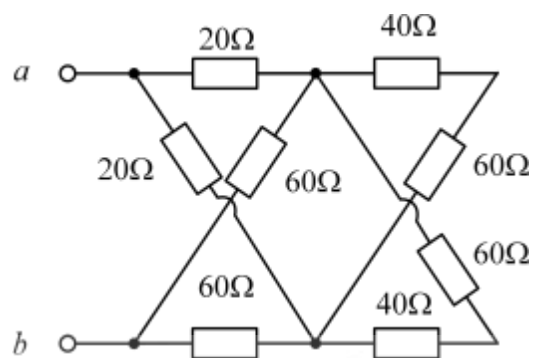
例 6

求下图所示电路中 AB 间的等效电阻。

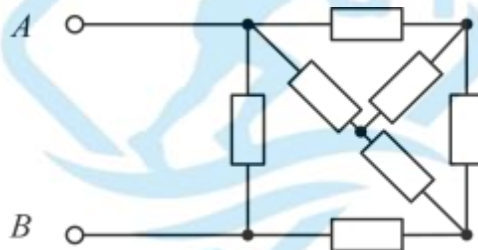


例 7

求下图所示电路的 a 、 b 端口的等效电阻。

**例 8**

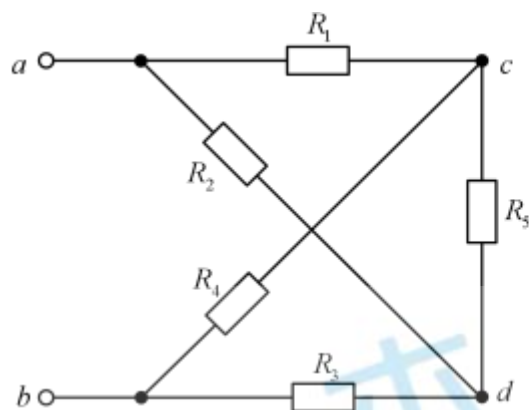
求下图所示电路的等效电阻，图中各电阻均为 6Ω 。



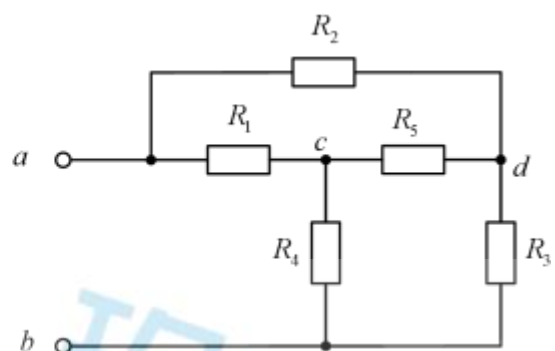
例 9

电桥变形及识别

画出下图所示(a)(b)电路的等效电路



(a)

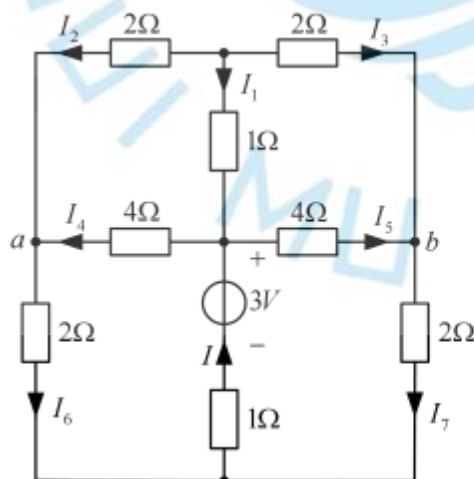


(b)

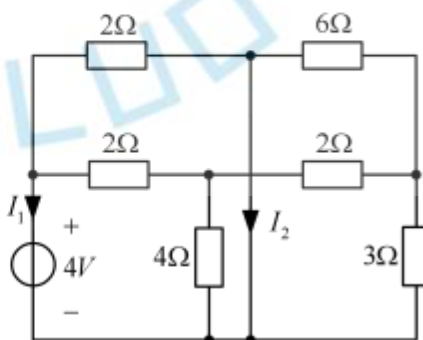
例 10

电桥变形及识别

求下图(a)(b)所示电路中的电流。



(a)

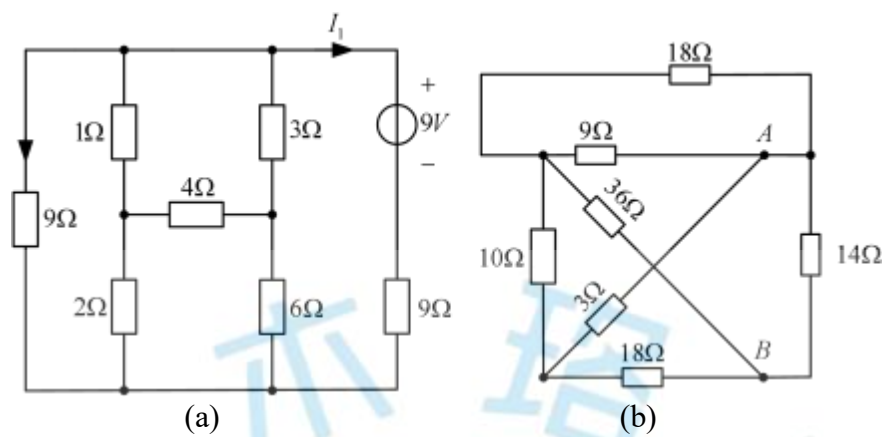


(b)

例 11

电桥变形及识别

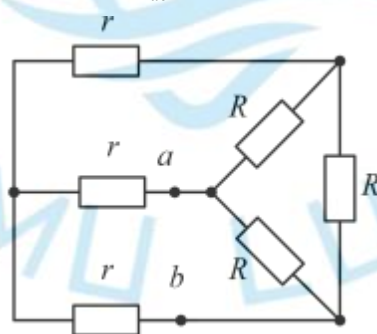
求图(a)所示电路的电流 I_1 ，求图(b)所示电路中端口的等效电阻 R_{AB} ，图(b)中导线没有交点。



例 12

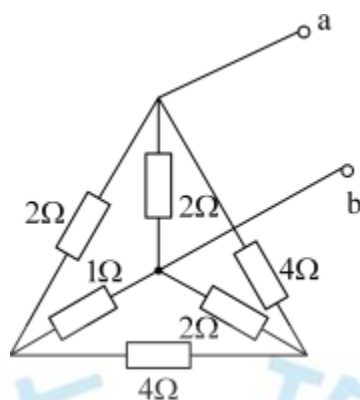
电桥变形及识别

求下图所示电路中端口的等效电阻 R_{ab} 。



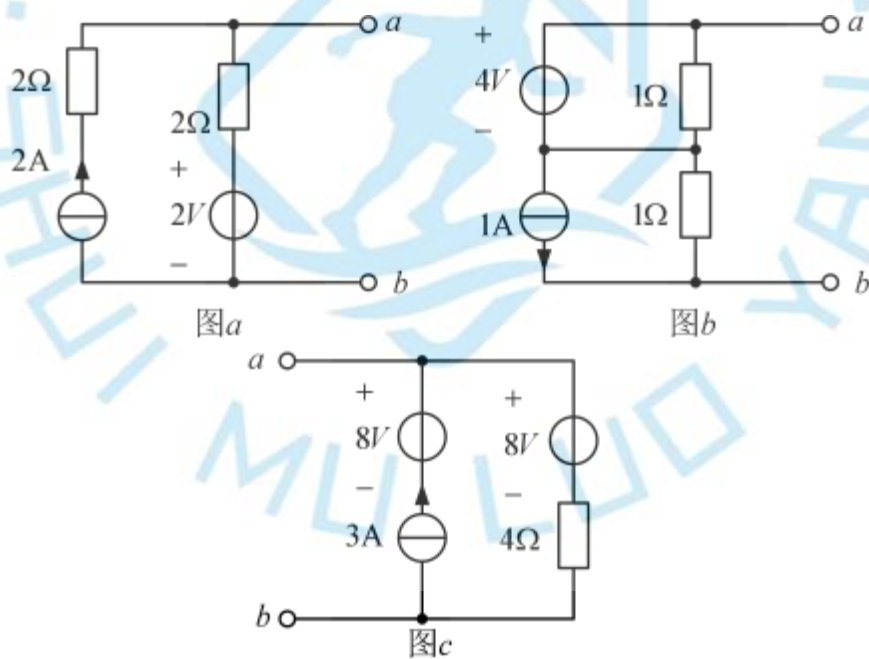
例 13

下图所示电路中，求端口等效电阻 R_{ab} 。



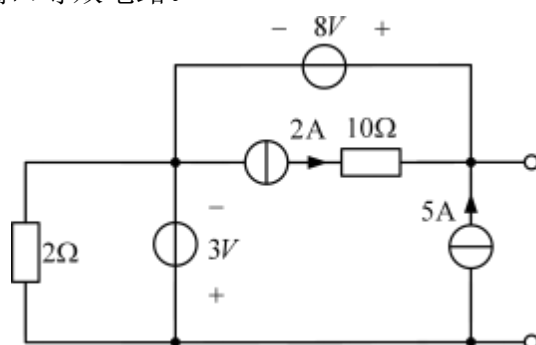
例 14

将 a 、 b 间电路简化为等效电压源

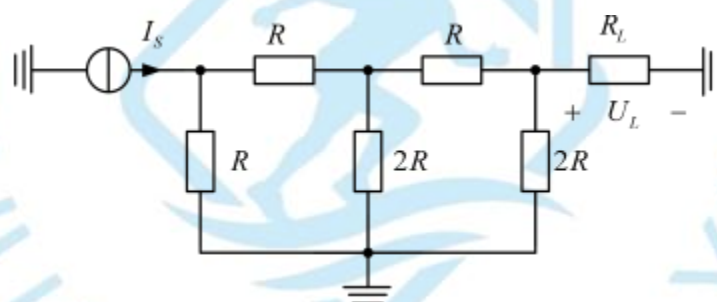


例 15

求下图所示电路的端口等效电路。

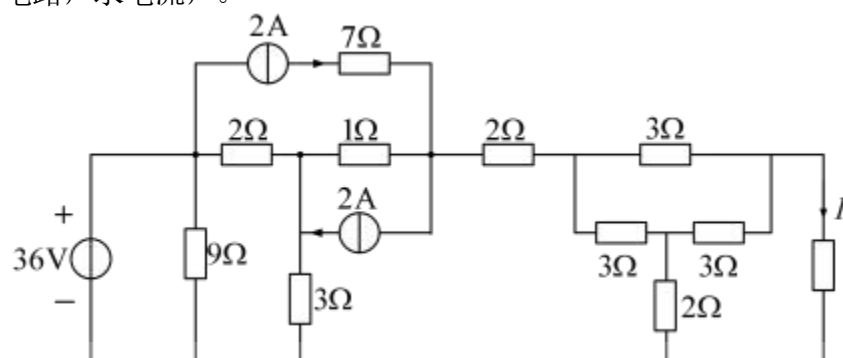
**例 16**

电路如下图所示，求电压 U_L



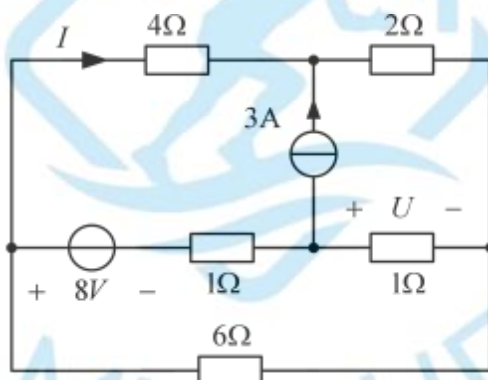
例 17

下图所示电路，求电流，。



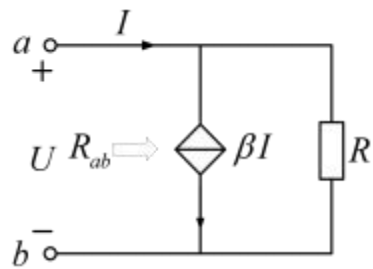
例 18

电路如下图所示，求电压 U 。



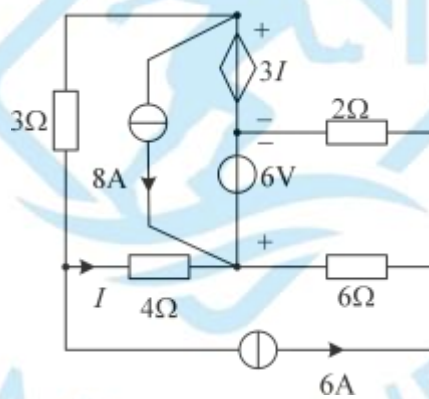
例 19

求 a, b 两端的入端电阻 R_{ab} 。



例 20

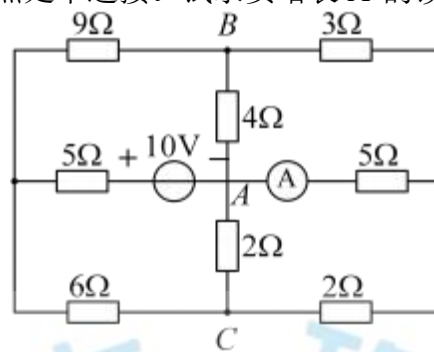
求下图所示电路中的电流，以及 4Ω 两端的等效电阻。



二、习题部分

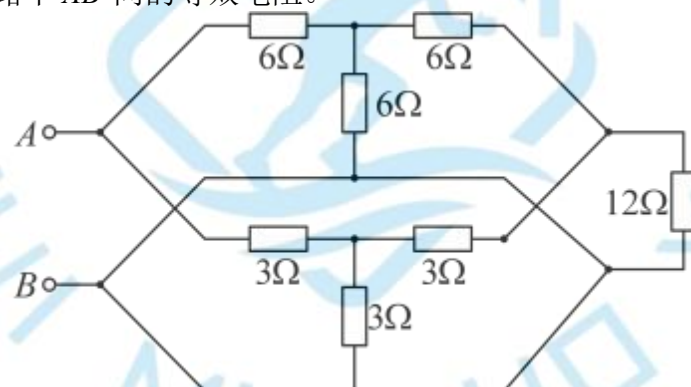
题 1

在下图所示电路中， A 点处不连接。试求安培表 A 的读数。



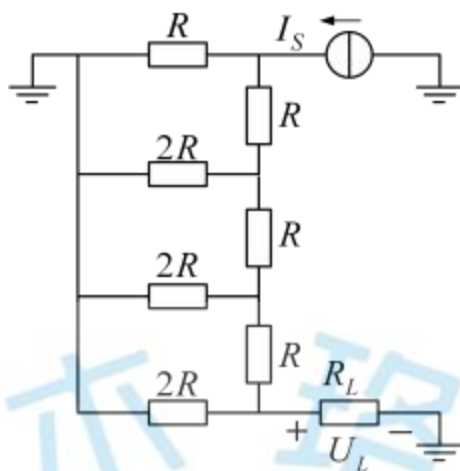
题 2

求下图所示电路中 AB 间的等效电阻。



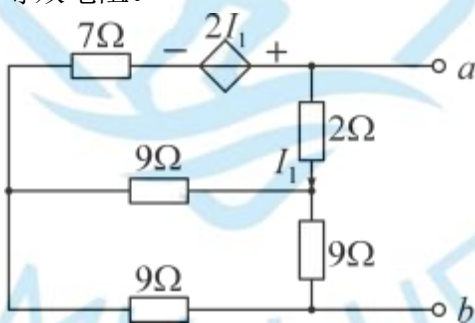
题 3

求下图所示电路中的电压 U_L 。设 I_S ， R ， R_L 为已知。



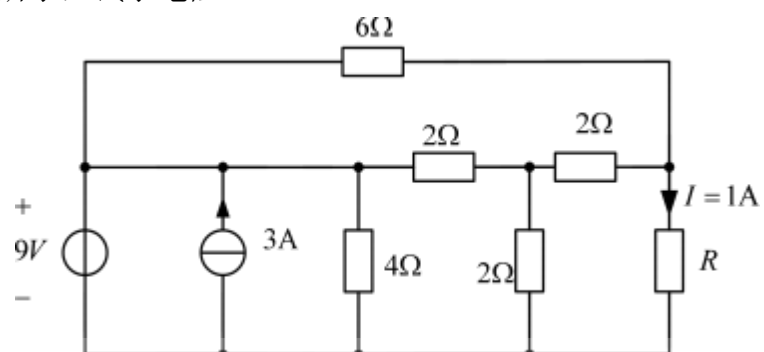
题 4

求下图所示电路的端口等效电阻。



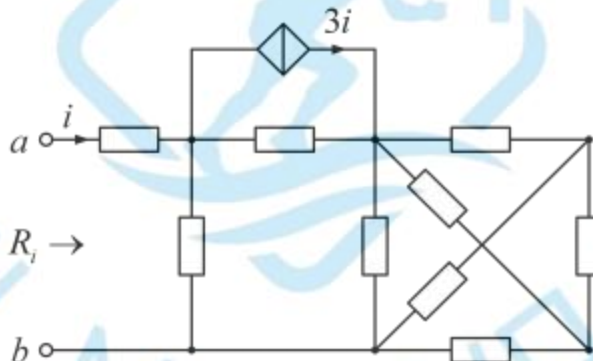
题 5

电路图如下所示，试求电阻 R 。



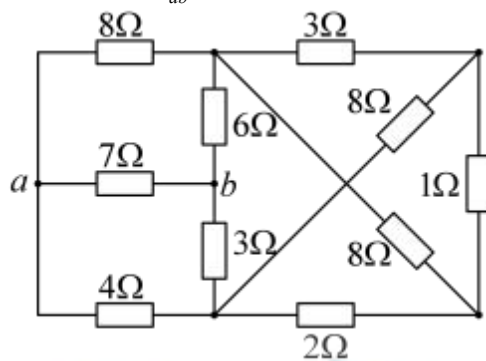
题 6

下图所示电路中电阻均为 1Ω ，求输入电阻 R_i 。



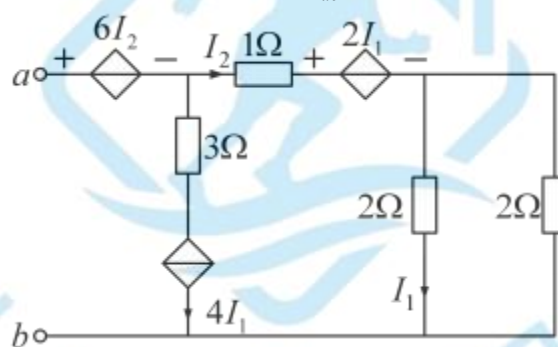
题 7

试求下图所示两电路的入端电阻 R_{ab} 。



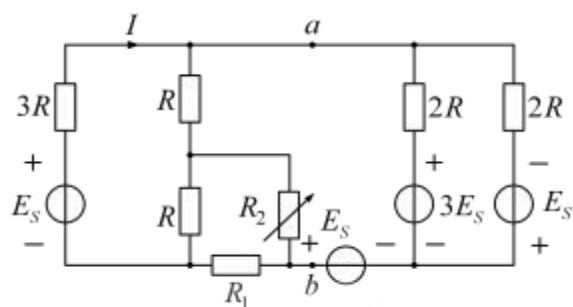
题 8

电路如下图所示，试求 ab 端口等效电阻 R_{ab} 。



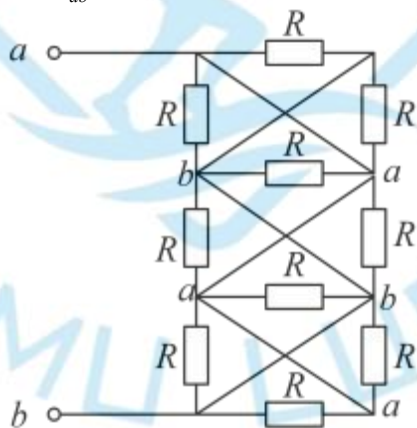
题 9

下图所示电路中， E_s 与均为已知，当 R_2 由 $0 \sim m$ 变化时各支路电流不变，试确定电阻 R_1 并求电流 I 。



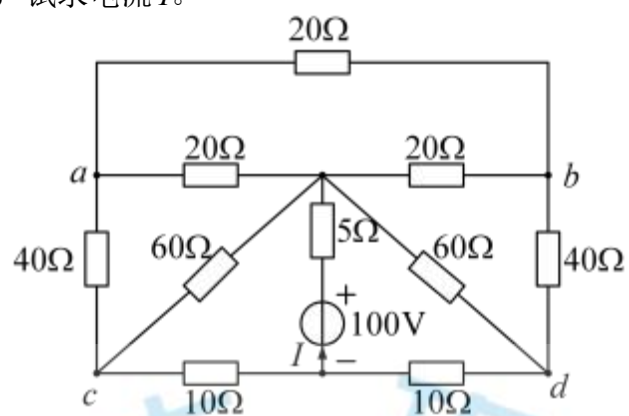
题 10

求下图所示电路的输入电阻 R_{ab} 。



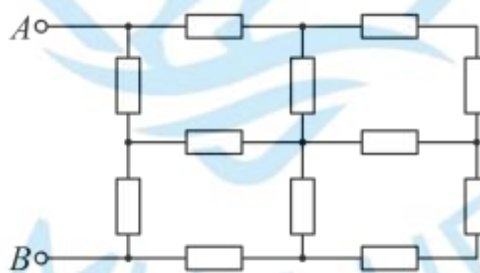
题 11

电路如下图所示，试求电流 I 。



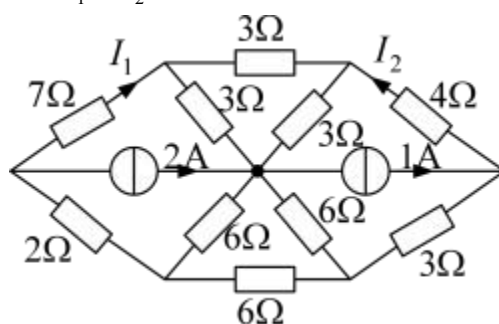
题 12

电路如下图所示，各个电阻阻值都是 R 。求端口等效电阻。



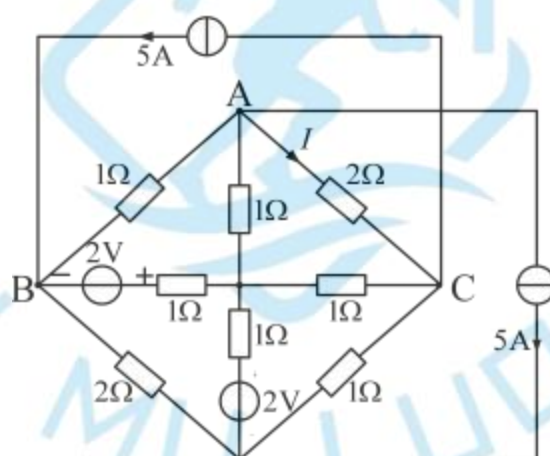
题 13【强化提高题目】

求下图所示电路中的电流 I_1 和 I_2 。



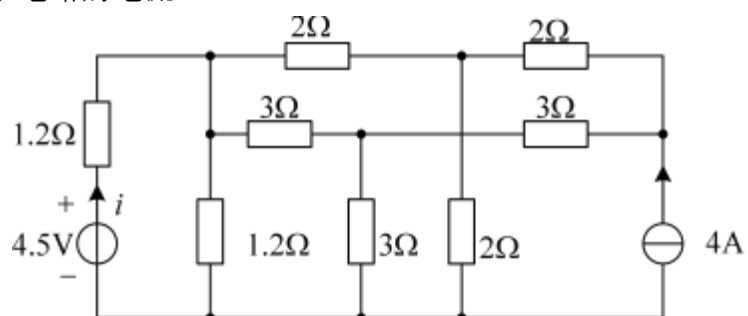
题 14【强化提高题目】

试求下图所示电路中的电流 I 。



题 15

计算下图所示电路的电流 i 。



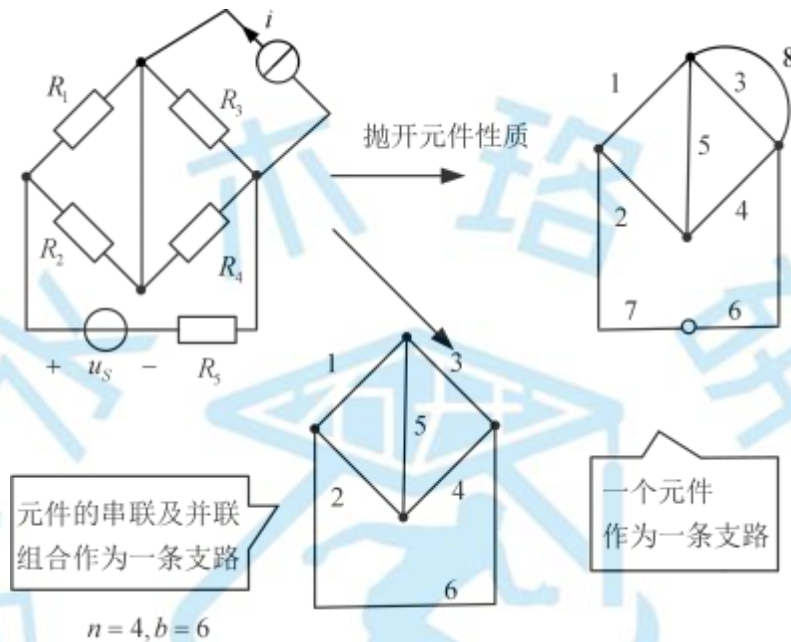
第三讲 电路的方程

一、【命题基本点重点】

- 1、电路方程及独立方程个数
- 2、回路电流方程及其注意事项
- 3、结点电压方程及其注意事项

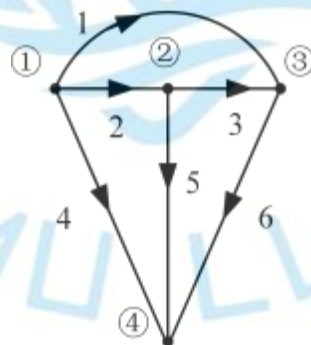
二、【基本考点总结】

1、知识点 A：电路的拓扑图



2、知识点 B：KCL 和 KVL 的独立方程数

(1) KCL 方程独立数



$$i_1 + i_2 + i_4 = 0$$

$$i_2 + i_3 + i_5 = 0$$

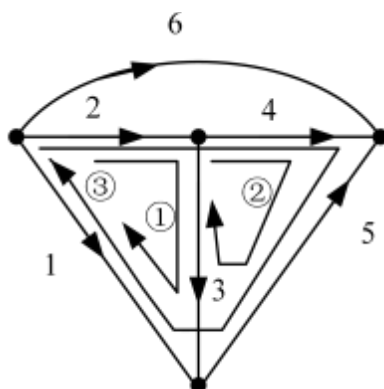
$$i_1 - i_3 + i_6 = 0$$

$$i_4 - i_5 - i_6 = 0$$

结论: n 个结点的电路只能有 $n-1$ 个独立的 KCL 方程。

(2) KVL 方程的独立数

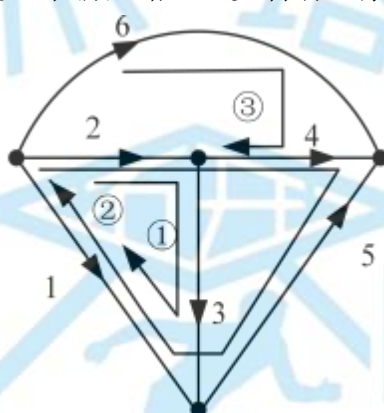
①问题 1: 一个图 $G(n,b)$ 可以有很多回路, 因此可以写出很多 KVL 方程。独立的方程数是多少? \Rightarrow 独立的回路数是多少?



回路 1 (1,2,3) 回路 2 (3,4,5) 回路 3 (1,2,4,5) 回路 1+回路 2=回路 3

②问题 2: 如何选取一组独立回路?

独立回路的充分条件: 每选一个新回路, 至少含有一条其它回路没有的新支路。



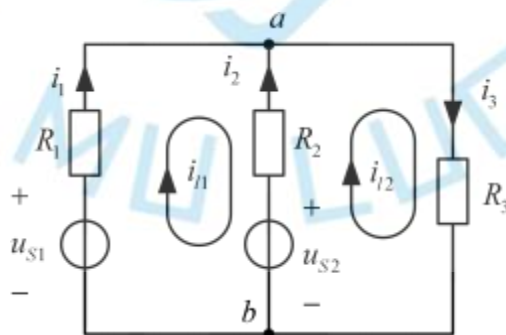
回路 1 (1,2,3) 回路 2 (1,2,4, 5) 回路 3 (2,4,6)

所以, 选取的 3 个回路相互独立, 经验方法

2、知识点 B: 回路(网孔)电流法

(1) 基本思想:

假想每个回路中有一个回路电流。则各支路电流可用回路电流线性组合表示。



怎样确定独立回路?

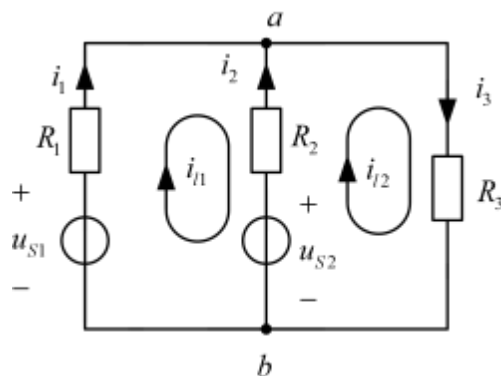
什么情况下选择网孔法?

什么情况下选择回路电流法?

平面电路中的网孔是独立的回路

(2) 回路电流法:

以回路电流为未知量列写电路方程分析电路的方法。独立方程数为 $b-(n-1)$



$$\text{回路1: } R_1 i_{l1} + R_2 (i_{l1} - i_{l2}) - u_{S1} + u_{S2} = 0 \quad \text{即 } (R_1 + R_2) i_{l1} - R_2 i_{l2} = u_{S1} - u_{S2}$$

$$\text{回路2: } R_2 (i_{l2} - i_{l1}) + R_3 i_{l2} - u_{S2} = 0 \quad \text{牵 } \begin{cases} R_1 i_{l1} + R_2 i_{l2} = u_{S1} \\ -R_2 i_{l1} + (R_2 + R_3) i_{l2} = u_{S2} \end{cases}$$

①准形式回路方程:

$$\begin{cases} R_{11} i_{l1} + R_{12} i_{l2} = u_{S11} \\ R_{12} i_{l1} + R_{22} i_{l2} = u_{S12} \end{cases}$$

R_{ii} 自电阻:该回路中的总电阻。始终为正。

R_{ij} 互电阻:两个回路公共的电阻。当两个回路电流流过此电阻的方向相同时,互电阻取正号;否则为负号。

② U_{sli} 回路中的等效电压源:回路 i 中所有电压源电压的代数和。当电压源电压升方向与该回路方向一致时,取正号;反之取负号。

③回路法的一般步骤:

(a)选定 $l = b - (n - 1)$ 个独立回路,并确定其绕行方向;

(b)对 l 个独立回路,以回路电流为未知量,列写 KVL 方程;

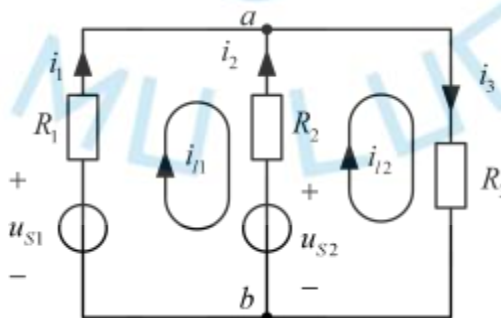
(c)求解上述方程,得到 l 个回路电流;

(d)求各支路电流(用回路电流表示);

④其它分析

网孔电流法:对平面电路,若以网孔为独立回路,此时回路电流也称为网孔电流,对应的分析方法称为网孔电流法。

一般情况,对于具有 $l = b - (n - 1)$ 个回路的电路,有



$$\begin{cases} R_{11} i_{l1} + R_{12} i_{l2} + \dots + R_{1l} i_{ll} = u_{S11} \\ R_{21} i_{l1} + R_{22} i_{l2} + \dots + R_{2l} i_{ll} = u_{S22} \\ \vdots \\ R_{l1} i_{l1} + R_{l2} i_{l2} + \dots + R_{ll} i_{ll} = u_{Sll} \end{cases}$$

其中:

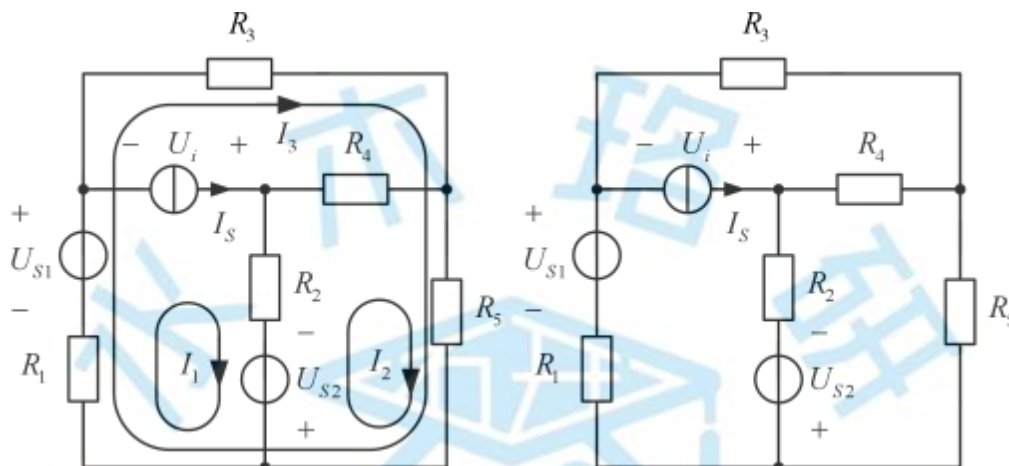
(a): R_{kk} - 回路 k 的自电阻(为正), $k = 1, 2, \dots, l$

- (b): R_{ik} - 回路 j 与回路 k 互电阻;
 (c): “+”流过互阻时两个回路电流方向相同;
 (d): “-”流过互阻时两个回路电流方向相反;
 (e) 二回路无公共支路时, 互阻为 0。
 (f) 不含受控源的线性网络 $R_{jk} = R_{kj}$, 系数矩阵为对称阵。

例 0: 详见例题部分

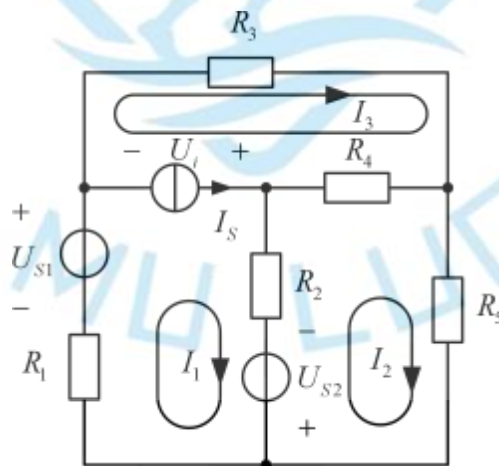
⑤ 含有电流源时候, 如何列写回路电流方程?

选取独立回路时, 使理想电流源支路仅仅属于一个回路, 该回路电流即 I_s 。



$$\begin{cases} I_1 = I_s \\ -R_2 I_1 + (R_2 + R_4 + R_5) I_2 + R_5 I_3 = -U_{S2} \\ R_1 I_1 + R_5 I_2 + (R_1 + R_3 + R_5) I_3 = U_{S1} \end{cases}$$

列写含有理想电流源支路的回路电流方程。



引入电流源电压为变量, 增加回路电流和电流源电流的关系方程。

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) I_1 - R_2 I_2 = U_{S1} + U_{S2} + U_i \\ -R_2 I_1 + (R_2 + R_4 + R_5) I_2 - R_4 I_3 = -U_{S2} \\ -R_4 I_2 + (R_3 + R_4) I_3 = -U_i \\ U_s = I_1 - I_3 \end{cases}$$

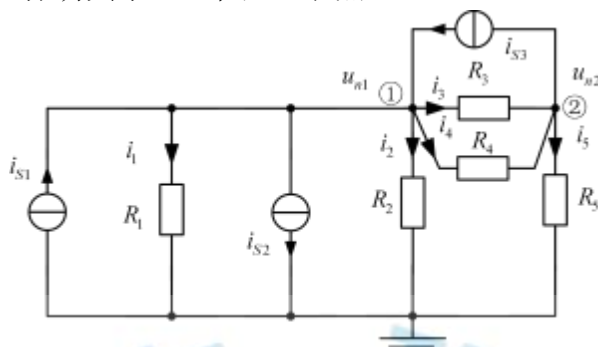
⑥ 含有受控电流源时候, 如何列写回路电流方程?

例 1-2: 详见例题部分

(3) 结点电压方程

①举例说明:

(a)选定参考节点, 标明其余 $n-1$ 个独立节点



(b)对 $n-1$ 个独立结点列写 KCL 方程:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = i_{s1} - i_{s2} + i_{s3} \\ -i_3 - i_4 + i_5 = -i_{s3} \end{cases} \quad (1)$$

(c)写出支路方程:

$$\begin{cases} i_1 = u_1 / R_1 = u_{n1} / R_1 \\ i_2 = u_2 / R_2 = u_{n1} / R_2 \\ i_3 = u_3 / R_3 = (u_{n1} - u_{n2}) / R_3 \\ i_4 = u_4 / R_4 = (u_{n1} - u_{n2}) / R_4 \\ i_5 = u_5 / R_5 = u_{n2} / R_5 \end{cases} \quad (2)$$

(d)将方程(2)代入方程(1):

$$\begin{cases} \frac{u_{n1}}{R_1} + \frac{u_{n1}}{R_2} + \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_3} + \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_4} = i_{s1} - i_{s2} + i_{s3} \\ -\frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_3} - \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_4} + \frac{u_{n2}}{R_5} = -i_{s3} \end{cases} \quad (3)$$

整理方程(3)得:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n1} - \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n2} = i_{s1} - i_{s2} + i_{s3} \\ -\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n1} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) u_{n2} = -i_{s3} \end{cases} \quad (4)$$

②直接列写结点电压方程

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n1} - \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n2} = i_{s1} - i_{s2} + i_{s3} \\ -\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) u_{n1} + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) u_{n2} = -i_{s3} \end{cases} \quad (5)$$

令 $G_k = 1/R_k, k = 1 \sim 5$, 并将方程(4) 写为线性方程的一般形式:

$$\begin{cases} G_{11}u_{n1} + G_{12}u_{n2} = i_{s11} \\ G_{21}u_{n1} + G_{22}u_{n2} = i_{s22} \end{cases} \quad (6)$$

I. 结点 1、2 的自电导: $\begin{cases} G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \\ G_{22} = G_3 + G_4 + G_5 \end{cases}$

II. 结点 1 与结点 2 之间的互电导, 为联接在节点 1 与节点 2 之间所有支路的电导之和, 并冠以负号。 $G_{12} = G_{21} = -(G_3 + G_4)$

III. $i_{S11} = i_{S1} - i_{S2} + i_{S3}$: 流入节点 1 的电流源电流的代数和。

IV. $i_{S22} = -i_{S3}$: 流入节点 2 的电流源电流的代数和。

V. 流入节点取正号, 流出取负号。

$$G_{11}u_{n1} + G_{12}u_{n2} + \dots + G_{1,n-1}u_{n,n-1} = i_{S11}$$

③一般情况:

$$\begin{cases} G_{11}u_{n1} + G_{12}u_{n2} + \dots + G_{1,n-1}u_{n,n-1} = i_{S11} \\ \vdots \\ G_{n-1,1}u_{n1} + G_{n-1,2}u_{n2} + \dots + G_{n-1,n-1}u_{n,n-1} = i_{S_{n-1,n-1}} \end{cases}$$

I. G_{ii} —结点*i* 自电导, 等于接在节点*i* 上所有支路的电导之和(包括电压源与电阻串联支路)。总为正。

II. $G_{ij} = G_{ji}$ —结点*i* 与结点*j* 之间互电导, 等于接在节点*i* 与节点*j* 之间的所支路的电导之和, 并冠以负号。

III. i_{Sij} —流入节点*i* 的所有电流源电流的代数和(包括由电压源与电阻串联支路等效的电流源)。

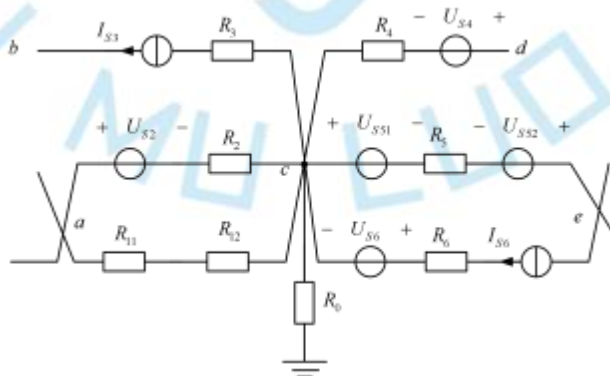
注意: 当电路含受控源时, 系数矩阵一般不再为对称阵。

④节点法的一般步骤:

- 选定参考节点, 标定*n*-1个独立节点;
- 对*n*-1个独立节点, 以节点电压为未知量, 列写其 KCL 方程;
- 求解上述方程, 得到*n*-1个节点电压;
- 求各支路电流(用节点电压表示);
- 其它分析。

思考题:①回路电流法与节点电压法的本质?特殊情况

②节点电压法中电流源(独立、受控)串联电阻如何处理?为什么?



$$U_c \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_0} \right) - U_a \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_2} \right) - U_b \frac{1}{R_3} - U_d \frac{1}{R_4} - U_e \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) = -\frac{U_{s2}}{R_2} - I_{S3} - \frac{U_{s4}}{R_4} + \frac{-U_{s51} + U_{s52}}{R_5} + I_{S6} - \frac{U_{s6}}{R_6}$$

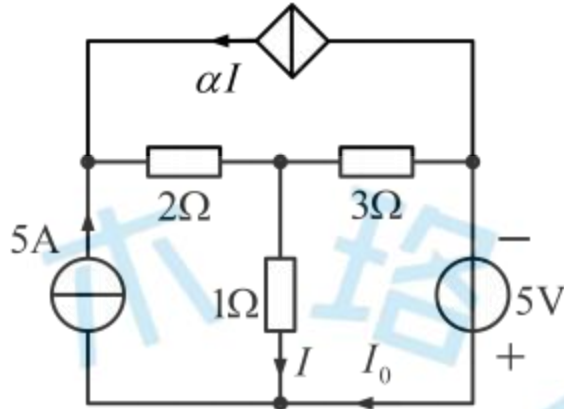
例 3-例 7: 详见例题部分

第三讲 练习

一、例题部分

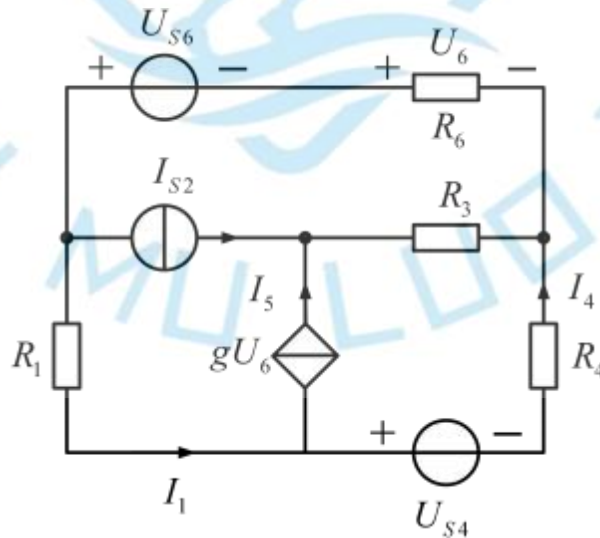
例 1

下图所示电路中，已知 $5V$ 电压源支路的支路电流 I_0 为 $10A$ ，试确定受控电流源的控制系数 α 。



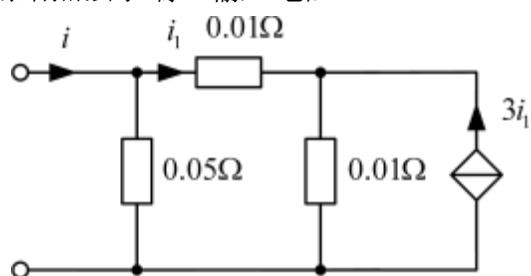
例 2

已知 $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 2\Omega$ ， $U_{S4} = U_{S6} = 2V$ ， $I_{S2} = 1A$ ， $g = 0.5$ ，用回路电流法求电流 I_1 。



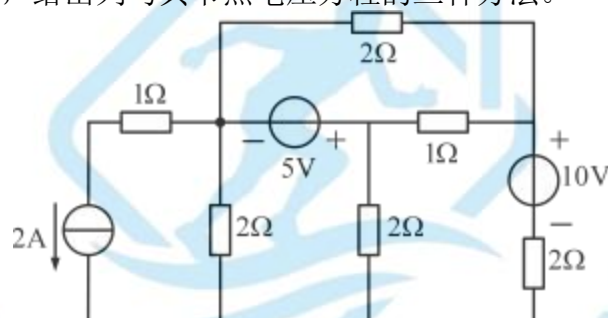
例 3

电路如下图所示，用结点法求端口输入电阻。



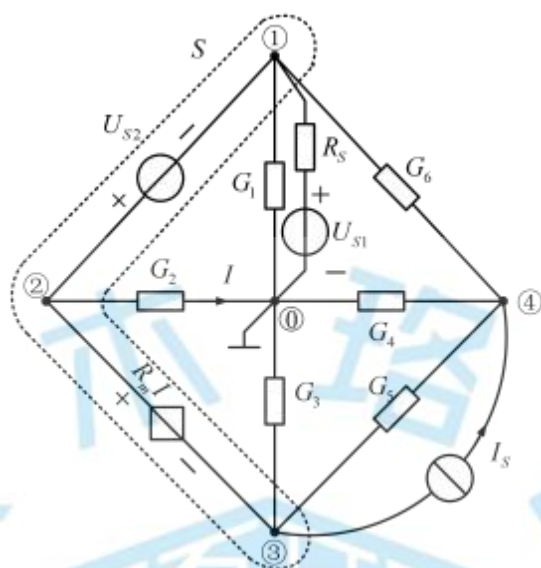
例 4

电路如下图所示，给出列写其节点电压方程的三种方法。



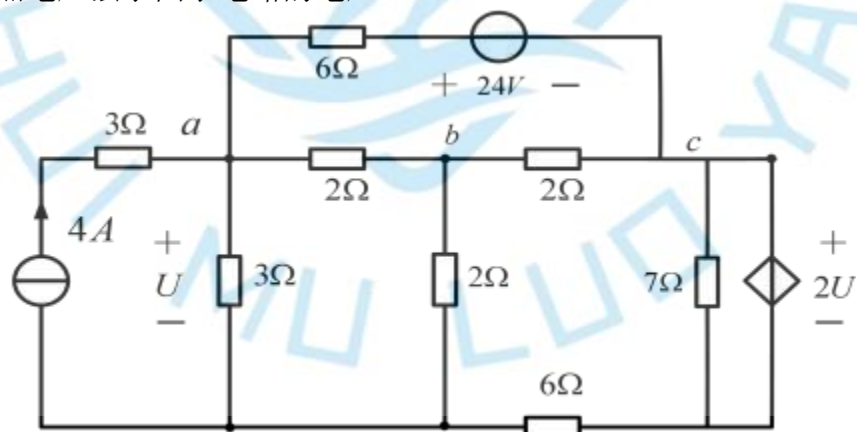
例 4A

列出下图所示电路的结点电压方程。如果 $R_s = 0$ ，则方程又如何？（提示：为避免引入过多附加电流变量，对连有无伴电压源的结点部分，可在包含无伴电压源的封闭面 S 上写出 KCL 方程。）



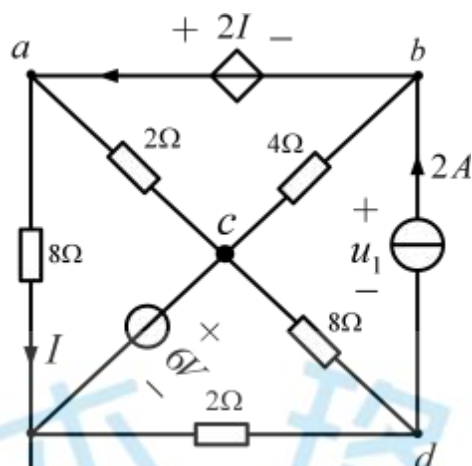
例 5

使用结点电压法求图示电路的电压 U 。



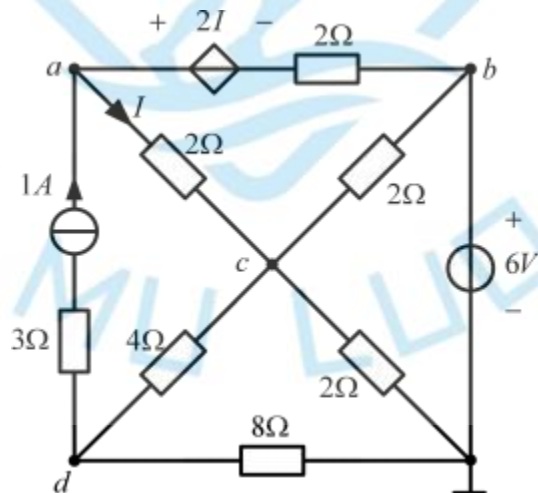
例 6

用结点电压法求下图所示电路的各节点电压和 $2A$ 电流源发出的功率。



例 7

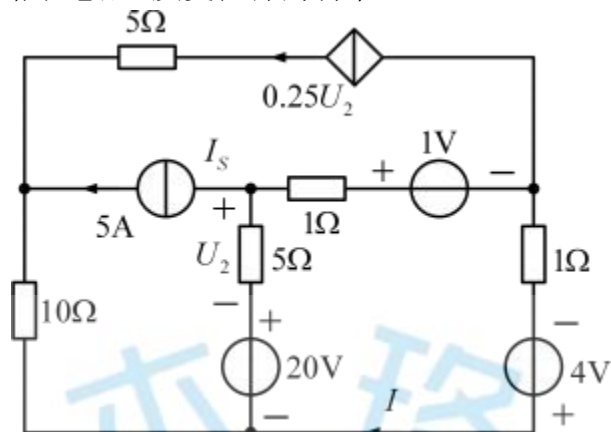
用结点电压法求下图所示电路的各节点电压以及 $6V$ 电压源发出的功率



二、习题部分

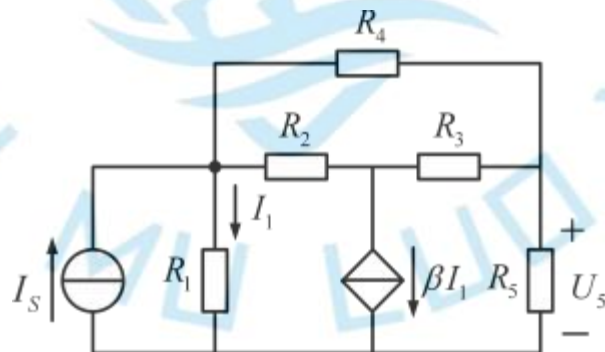
题 1

试求下图所示电路中电流 I 及受控源的功率。



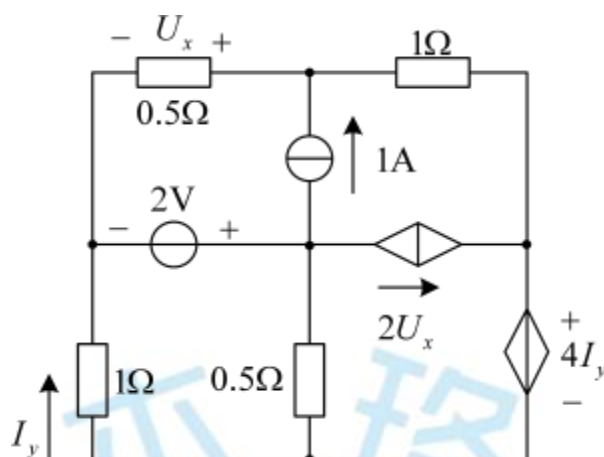
题 2

已知 $I_s = 1A$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = 30\Omega$, $R_5 = 8\Omega$, $\beta = 9$ 。求电压 U_5 。



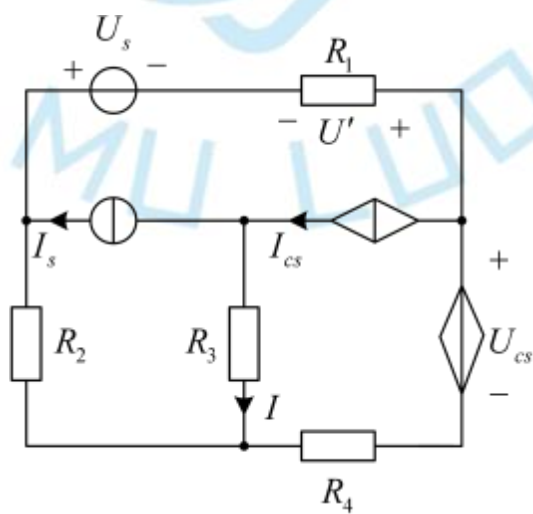
题 3

电路如下图所示，试分别用节点电压法、回路电流法求解 I_y ， U_x 。



题 4

下图所示直流电路，已知 $R_1 = 2\Omega$ ， $R_2 = 4\Omega$ ， $R_3 = 16\Omega$ ， $R_4 = 10\Omega$ ，电压源 $U_s = 2V$ ，电流源 $I_s = 1A$ ，电流控制电压源 $U_{cs} = 50I$ ，电压控制电流源 $I_{cs} = 1.5U'$ 。求各电源（包括受控源）输出的功率。



题 5

某线性电阻电路的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} 1.6 & -0.5 & -1 \\ -0.5 & 1.6 & -0.1 \\ -1 & -0.1 & 3.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{n1} \\ u_{n2} \\ u_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

试画出其最简单的电路。

题 6

某线性电阻电路的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} 1.6 & 1 & -1 \\ -0.5 & 1.6 & -0.1 \\ -1 & -0.1 & 3.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{n1} \\ u_{n2} \\ u_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

试画出其最简单的电路。

题7【二轮提高专用】

已知某电路的节点电压方程为

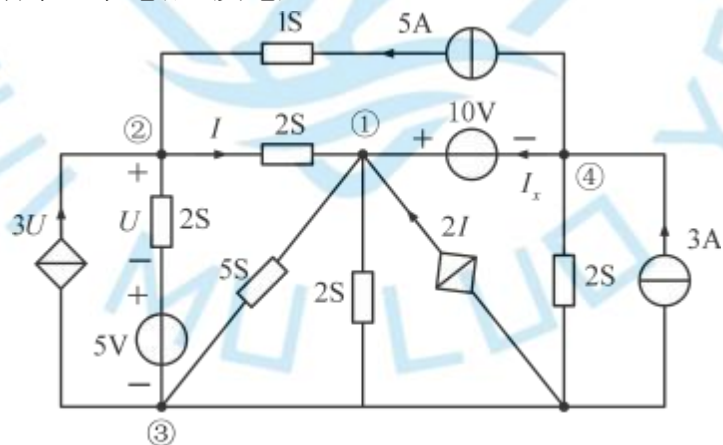
$$\begin{bmatrix} 8 & -3 & -2 & -4 \\ -3 & 6 & -1 & 0 \\ -2 & -1 & 7 & -1 \\ -4 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

试写出同时再接入下述三种元件后所得电路的节点电压方程：

- (1) 节点①和参考节点跨接一个 VCCS，受控源方程 $i_d = 2(U_{n1} - U_{n2})$ ，方向由参考节点指向①。
- (2) 在节点②和节点③之间跨接一个 2A 的独立电流源，方向由节点③指节点②。
- (3) 在节点③和节点④之间跨接一个 1Ω 的电阻。

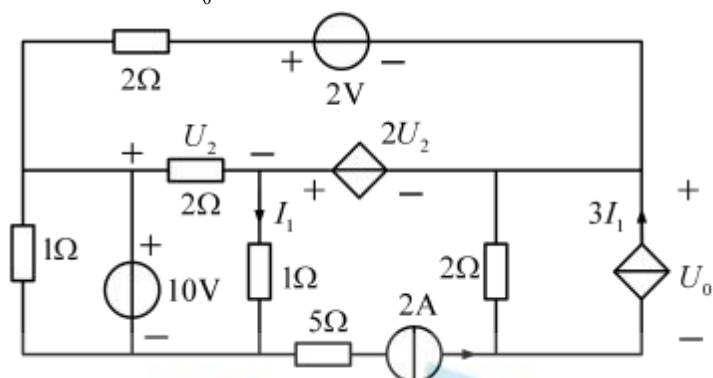
题8

电路如下图所示，求电流 I 及电压 U 。



题 9

求下图所示电路中的电压 U_0 。

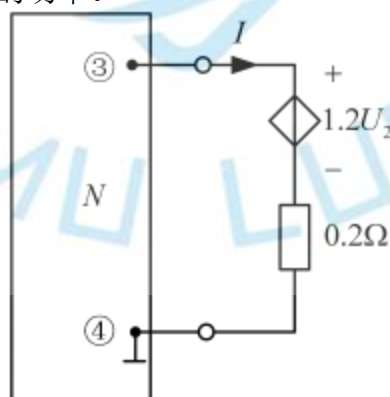


题 10 【二轮提高专用】

下图所示电路中, N 是具有 4 个节点的线性网络,其节点电压方程为

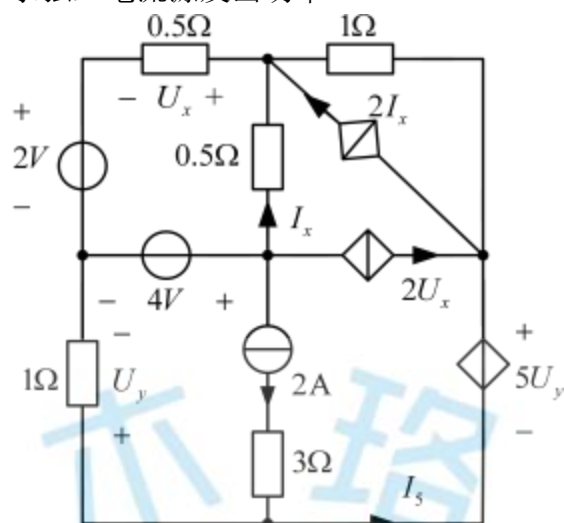
$$\begin{cases} 4U_1 - 2U_2 - U_3 = 3 \\ -2U_1 + 6U_2 - 4U_3 = 0 \\ U_1 - 2U_2 + 3U_3 = 1 \end{cases}$$

式中电导单位为西门子(S), 电流单位为安培(A)。现在节点③,④之间另接入一负载支路,求负载支路获得的功率。



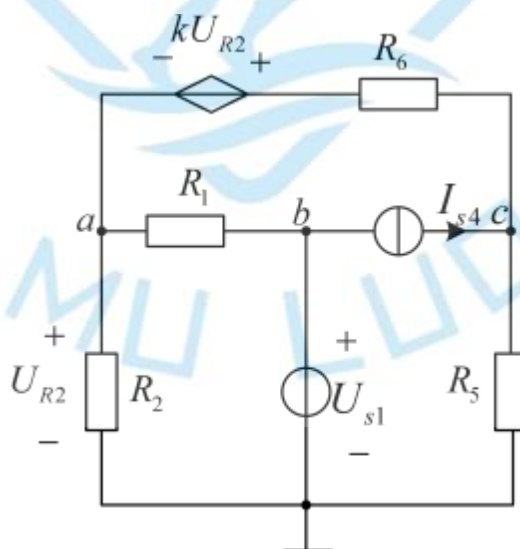
题 11【二轮提高专用】

电路如下图所示，求独立电流源发出功率。



题 12

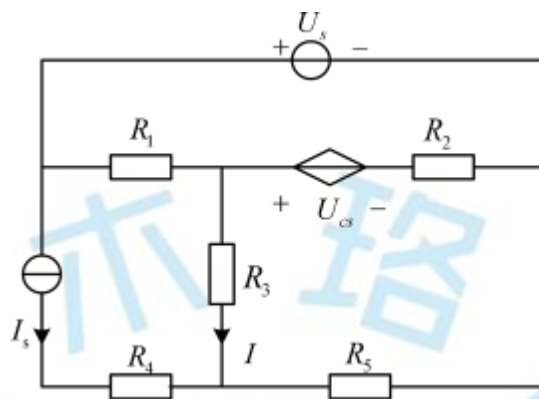
已知 $R_1 = 1\Omega$ ， $R_2 = 2\Omega$ ， $R_5 = 4\Omega$ ， $R_6 = 2\Omega$ ，控制系数 $k = 2$ ， $U_{s1} = 10V$ ，欲使 $U_c/U_a = 3$ ，试确定 I_{s4} 的大小。



题 13

直流电路如下图所示，已知 $R_1 = 3\Omega$ ， $R_2 = 2\Omega$ ， $R_3 = 6\Omega$ ， $R_4 = 2\Omega$ ， $R_5 = 3\Omega$ ， $I_s = 1A$ ， $U_s = 30V$ ，电路控制电压源 $U_{cs} = 8I$ 。求：

- (1) 求各独立源供出的功率；
- (2) 若使电流源 I_s 供出的功率为零，电阻 R_4 应为何值？



第四讲 电路定理

一、【命题基本点重点】

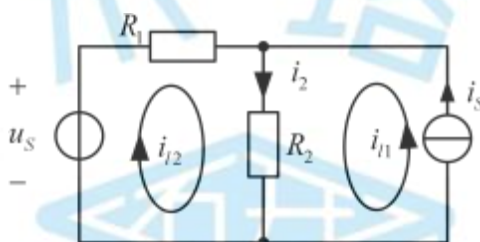
[本章属于难点，推荐看看基础视频及强化冲刺视频]

- 1、叠加定理及其运用
- 2、替代定理及其运用
- 3、戴维南定理与诺顿定理
- 4、特勒根定理与互易定理
- 5、几个电路定理的综合应用
- 6、出题形式:几个定理直接联合出题;与稳态电路、双口网络、时域分析综合出题。

二、【基本考点总结】

1、知识点 A: 叠加定理

(1) 定义



响应是激励的线性函数，应用回路法，得电路的回路电流方程为：

$$\begin{cases} i_{11} = i_s \\ R_2 i_{11} + (R_1 + R_2) i_{12} = u_s \end{cases}$$
$$i_{12} = \frac{u_s - R_2 i_s}{R_1 + R_2}$$

解得：

则

$$i_2 = i_{11} + i_{12} = \frac{1}{R_1 + R_2} u_s + \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_s$$

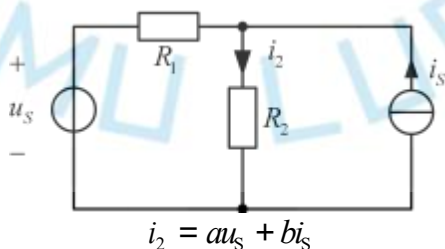
令

$$a = 1/(R_1 + R_2), b = R_1/(R_1 + R_2)$$

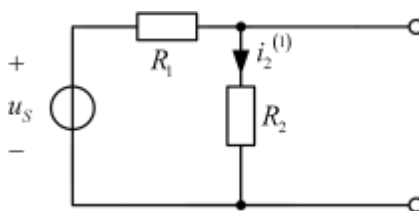
得到

$$i_2 = a u_s + b i_s \quad (*\text{响应是激励的线性函数})$$

(2) 说明

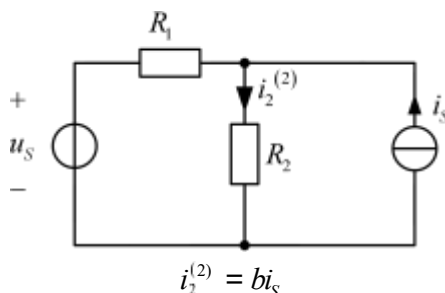


当 $i_s = 0, u_s \neq 0$ ，即电压源单独作用



$$i_2^{(1)} = au_s$$

当 $u_s = 0, i_s \neq 0$ ，即电流源单独作用



因此 $i_2 = i_2^{(1)} + i_2^{(2)}$ ， i_2 为二电源共同作用， $i_2^{(1)} + i_2^{(2)}$ 各电源单独作用在支路 2 上产生的电流叠加

2、知识点 B: 叠加定理与齐性定理

叠加定理: 在线性电路中，任一支路电流（或电压）都是电路中各个独立电源单独作用时，在该支路产生的电流（或电压）的代数和。

单独作用: 一个独立电源作用，其余独立电源不作用

$$\text{不作用的} \begin{cases} \text{电压源}(u_s = 0) & \text{短路} \\ \text{电流源}(i_s = 0) & \text{开路} \end{cases}$$

(1) 关于叠加定理的几点说明

① 叠加定理只适用于线性电路求电压和电流；不适用于非线性电路。

② 独立源单独作用有两种方式: 一次作用或分组作用。

受控源不能单独作用，而应保留在电路中。

③ 不作用电源置零:

电压源 → 短路代替，电流源 → 开路代替

④ 叠加时要注意 u, i 的参考方向，总量是各分量的代数和。

⑤ 功率是 u 或 i 的二次函数，不能使用叠加定理。

例: $P = Gu^2 = Ri^2$ ，以电流为例 $i = i_r + i_n$

$$P = R(i_r + i_n)^2 = Ri_r^2 + Ri_n^2 + 2Ri_r i_n \neq p_r + p_n$$

例 1-例 2A: 详见例题部分

⑥ 叠加定理的重要性表现在线性电路的理论分析中。如戴维宁定理的推导、非正弦周期电流电路的分析等。

(2) 叠加定理考研重点难点热点

① 线性网络中某一支路响应（电压或电流） Y 都是激励源 X_1, X_2, \dots, X_m 的线性组合，即 $Y = K_1 X_1 + K_2 X_2 + \dots + K_m X_m$ ，式中 $K_i (i = 1, \dots, m)$ 为常量，由电路结构和参数决定。

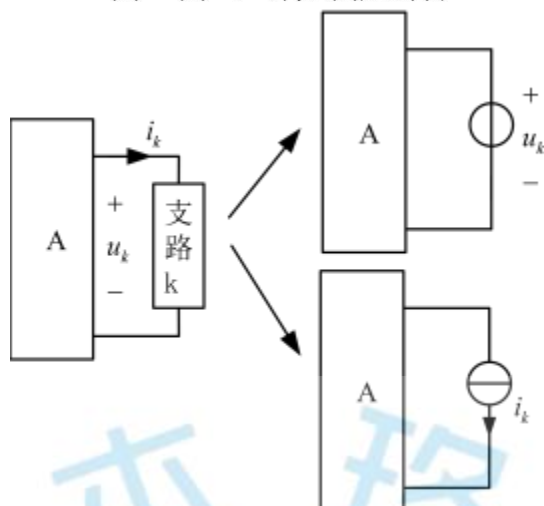
② 当激励源变化，而电路结构和参数不变时，可以应用叠加定理来求响应。

③ 当没有给定电路结构或参数时，可以用叠加定理或叠加定理与其他定理（替代、戴维南定理）结合来求响应。

3、知识点 C: 替代定理

(1) 定义: 给定任意一个线性电阻电路，其中第 k 条支路的电压 U_k 和电流 i_k 已知，那么这条支路就可以用一个电压等于 U_k 的独立电压源，或是用一个电流等于 i_k 的独立电流源来替代，替代后电路中全部电压和电流均将保持原值。

例 3-例 5: 详见例题部分

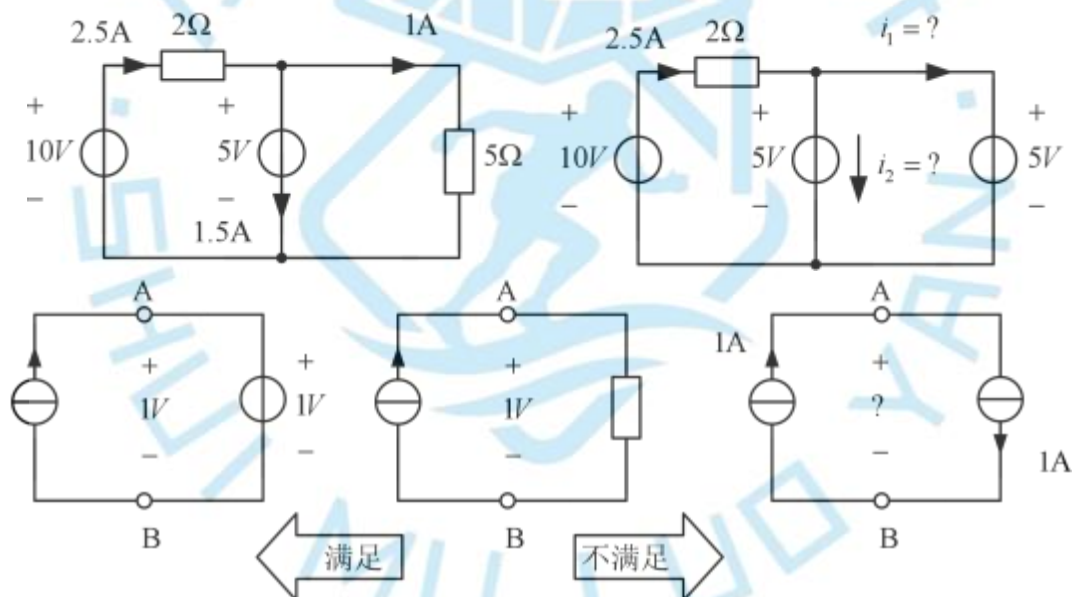


(2) **注意:**第 k 条支路可以是有源的,也可以是无源的,但一般不应含受控源或受控源的控制量。说明

①替代定理适用于线性、非线性电路、定常和时变电路。

②替代定理的应用必须满足的条件:

I.原电路和替代后的电路必须有唯一解



II.被替代的支路和电路其它部分应无耦合关系

例 6: 详见例题部分

4、知识点 D:戴维南定理

(1) 定义

一般的一个含有独立电源、线性电阻和线性受控源的一端口,对外电路来说,可以用一个电压源 U_d 和电阻 R_d 的串联组合来等效替代;

①电压源 U_d : 外电路断开时端口处的开路电压;

②电阻 R_d : 一端口中全部独立电源置零后的端口等效电阻。

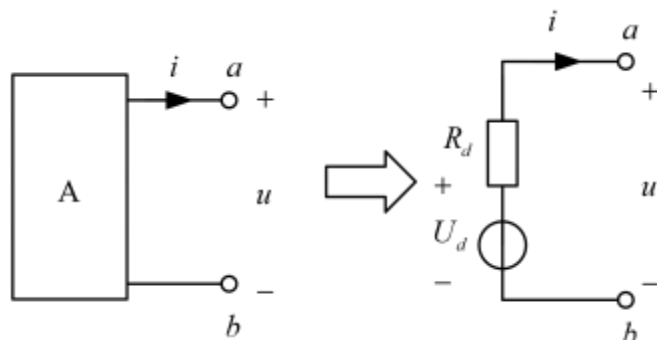
戴维南定理如何证明呢?

③使用注意:

I.只适用于线性一端口网络

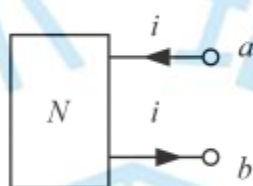
II. 外电路可以是非线性

III. 被等效的一端口网络与外电路支路间不具有耦合关系



(2) 注意基本概念:

① 端口

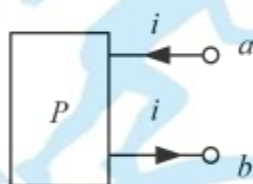


端口指电路引出的一对端钮，其中，从一个端钮（如 a）流入的电流一定等于从另一端钮（如 b）流出的电流。

② 一端口网络

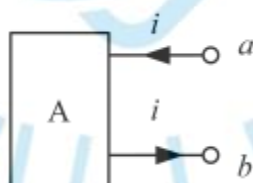
网络与外部电路只有一对端钮（或一个端口）联接。

③ 无源一端口（passive port）



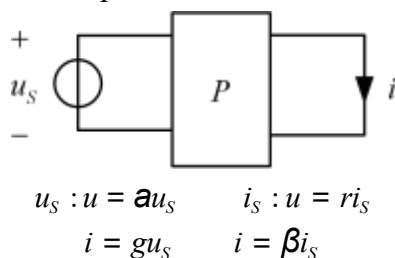
端口内部电路不含独立电源。

④ 含源一端口网络（active port）



端口内部电路包含独立源。

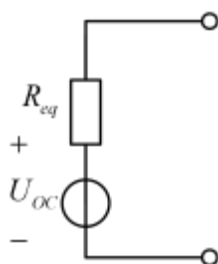
⑤ 激励与响应（excitation and response）



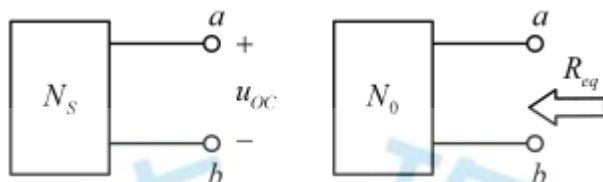
(3) 求解戴维宁等效电路

① 两步法

第一步: 求开路电压 u_{OC}



第二步:求等效电阻 R_{eq}



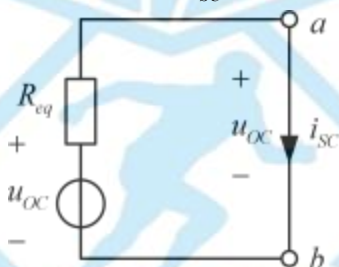
②在 N_0 网络中

a) N_0 中不含受控源时,可用电阻的串并联, $\Delta - Y$ 变换求 R_{eq}

b) 外加电源法:求 N_0 的输入电阻 R_{in} , $R_{eq} = R_{in}$

③开路电压、短路电流法:在 N_S 中求 u_{OC} 和 i_{SC} , 利用公式

$$R_{eq} = \frac{u_{OC}}{i_{SC}}$$



注:使用开路电压、短路电流法求戴维宁等效电阻时应注意参考方向的选取,公式与参考方向配套使用。

(4) 小结

①戴维南等效电路中电压源电压等于将外电路断开时的开路电压 U_d , 电压源方向与所求开路电压方向相同。

②串联电阻为将一端口内部独立电源全部置零(电压源短路, 电流源开路)后, 所得一端口网络的等效电阻。

等效电阻的计算方法:

I. 电阻串并联公式:网络内部不含有受控源;

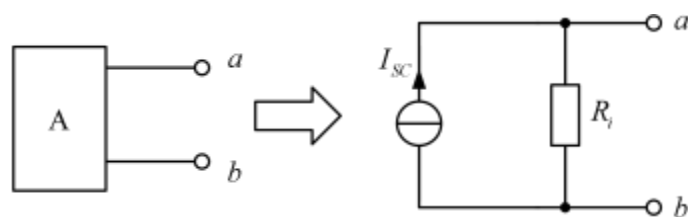
II. 加源法:端口(内部独立电源置零)加电压求电流法或加电流求电压法。

III. 开路短路法:等效电阻 $R_d = \text{端口的开路电压 } U_d / \text{短路电流 } I_d$ 。

③当一端口内部含有受控源时, 控制支路与受控源支路必须包含在被等效变换的同一部分电路中。

5、知识点 E:诺顿定理

任何一个含独立电源, 线性电阻和线性受控源的一端口, 对外电路来说, 可以用一个电流源和电阻(电导)的并联组合来等效置换;电流源的电流等于该端口的短路电流, 而电阻(电导)等于把该一端口的全部独立电源置零后的输入电阻(电导)。



诺顿定理的证明与戴维南定理类似。

诺顿等效电路可由戴维南等效电路经电源等效变换得到。

思考题:

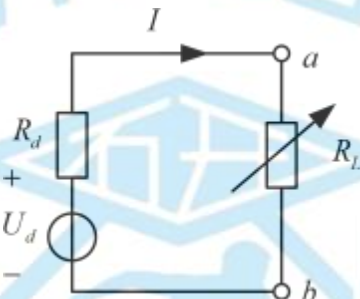
(1) 若一个线性含源一端口网络内部结构未知,用一块电压表和一个可调电阻进行测量,是否能得到此一端口的戴维宁等效电路?

(2) 是否任意线性含源一端口网络都存在戴维宁或者诺顿等效电路?

(3) 戴维宁或者诺顿等效电路的参数值是否唯一?

例 7-例 9: 详见例题部分

6、知识点 F:最大功率传输定理



线性有源一端口网络向可变电阻

负载 R_L 传输最大功率的条件是: $R_L = R_d$ 。

$$P_{R_L} = \left(\frac{U_d}{R_d + R_L} \right)^2 R_L$$

$$\frac{dP_{R_L}}{dR_L} = U_d^2 \left\{ -2 \left(\frac{1}{(R_d + R_L)^3} \right) R_L + \left(\frac{1}{(R_d + R_L)^2} \right) \right\} = U_d^2 \frac{R_d - R_L}{(R_d + R_L)^3} = 0$$

$$P_{\max} = \frac{U_d^2}{4R_L}$$

当 $R_L = R_d$ 时, 负载获得最大功率。也称为功率匹配。

匹配状态下, 功率的传输效率只有 50%。经常出现在电子线路中。对于电力系统的输、配电线路, 传输功率大, 要求传输效率高, 以减少传输过程中的能量损耗, 因此都不在匹配状态下工作。

例 10: 详见例题部分

7、知识点 G:特勒根定理定理

(1) 定义:

特勒根定理是电路理论中对集总电路普遍适用的基本理论, 就这个意义上, 它与基尔霍夫定律等价。特勒根定理有两种形式。

①特勒根定理 I: 对于一个具有 n 个结点和 b 条支路的电路, 设各支路电流和支路电压取关联参考方向, 并令 $(i_1, i_2, \dots, i_b), (u_1, u_2, \dots, u_b)$ 分别为 b 条支路的电流和电

压, 则任何时间 t , 有 $\sum_{k=1}^b u_k i_k = 0$ 。

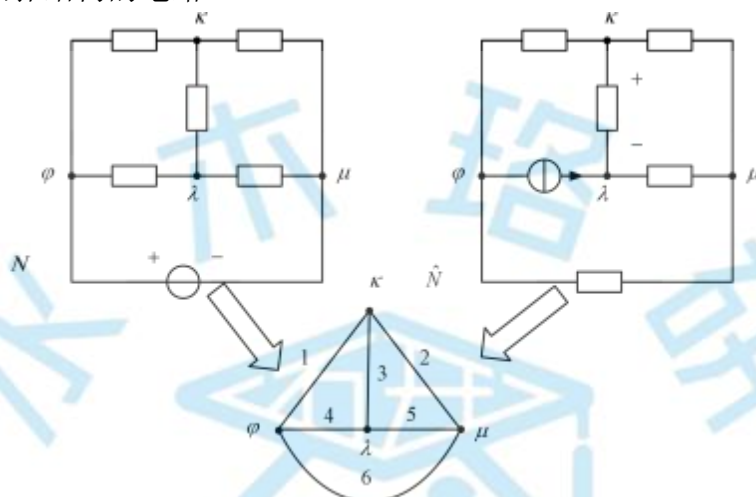
特勒根定理对任何具有线性、非线性、时不变、时变元件的集总电路都适用。

特勒根定理 1 是功率守恒的数学表达, 它表明任何一个电路的全部支路吸收的功率之和恒等于零。

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = \sum_{k=1}^b p_k = 0$$

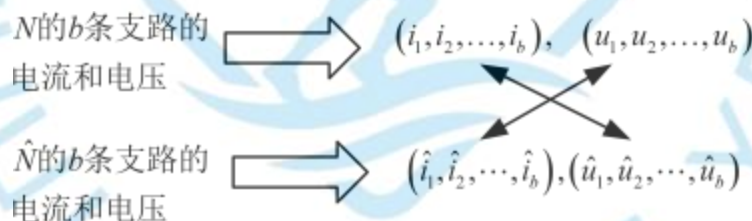
②特勒根定理 II

I. 具有相同拓扑结构的电路



II. 特勒根定理 II

如果有两个具有 n 个结点和 b 条支路的电路, 并分别记为 N, \hat{N} , 它们具有相同的图, 但由内容不同的支路构成。设各支路电流和电压都取关联参考方向



则

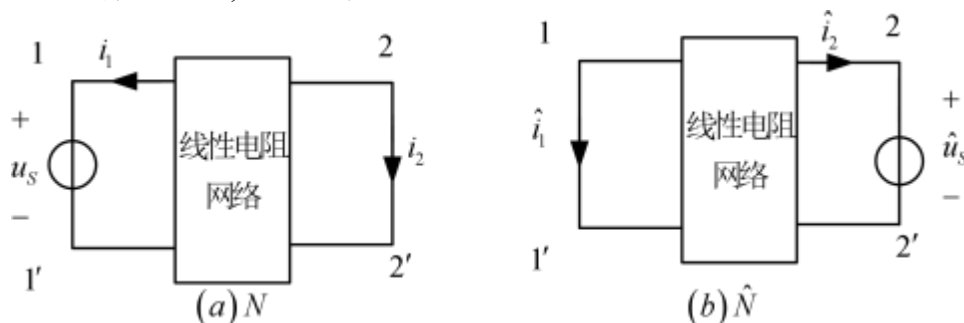
$$\sum_{k=1}^b \hat{u}_k i_k = 0 \quad \sum_{k=1}^b u_k \hat{i}_k = 0$$

例 11: 详见例题部分

8、知识点 H: 互易定理

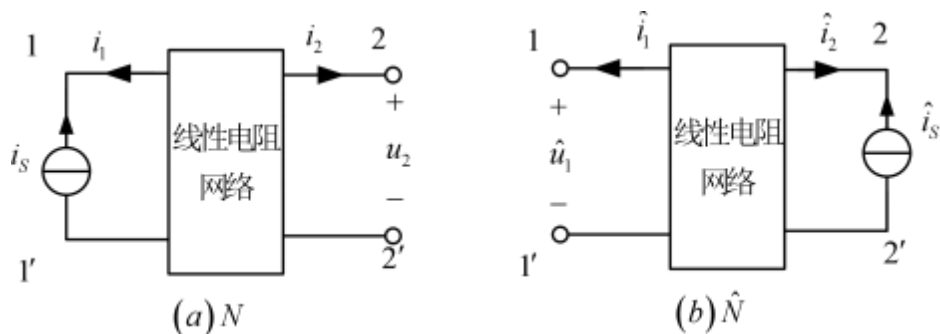
(1) 定义: 对一个仅含线性电阻的电路, 在单一激励的情况下, 当激励和响应互换位置时, 将不改变同一激励所产生的响应。

①形式 1: 激励电压源; 响应短路电流



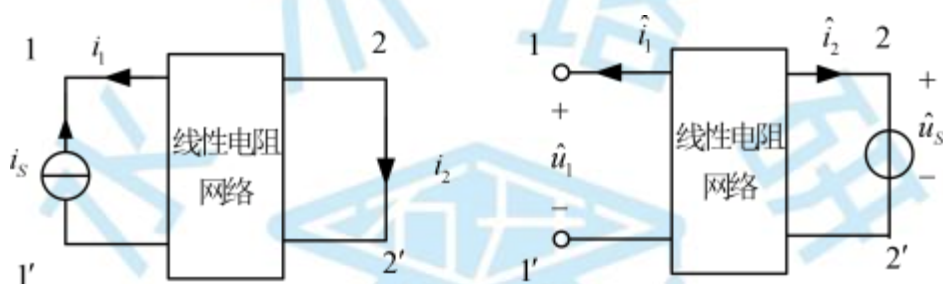
如果 $u_s = \hat{u}_s$, 则 $i_2 = \hat{i}_1$

②形式 2:激励电流源, 响应开路电压



如果 $i_s = \hat{i}_s$, 则 $u_2 = \hat{u}_1$

③形式 3:



如果在数值上 $i_s = \hat{i}_s$, 则 $i_2 = \hat{i}_1$

(2) 说明:

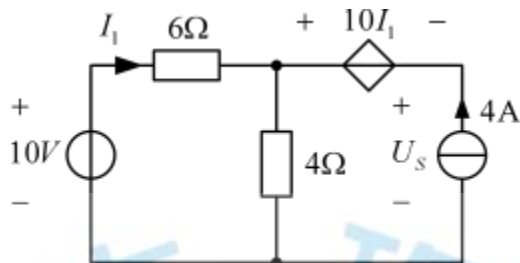
- ①适用于线性网络只有一个电源时, 电源支路和另一支路间电压、电流的关系。
- ②互易时要注意电压、电流的方向。
- 3 含有受控源的网络, 互易定理一般不成立。

第四讲 练习

一、例题部分

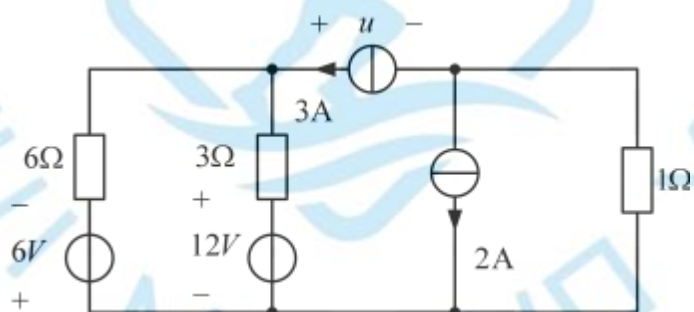
例 1

电路如下图所示，求电压 U_s 。



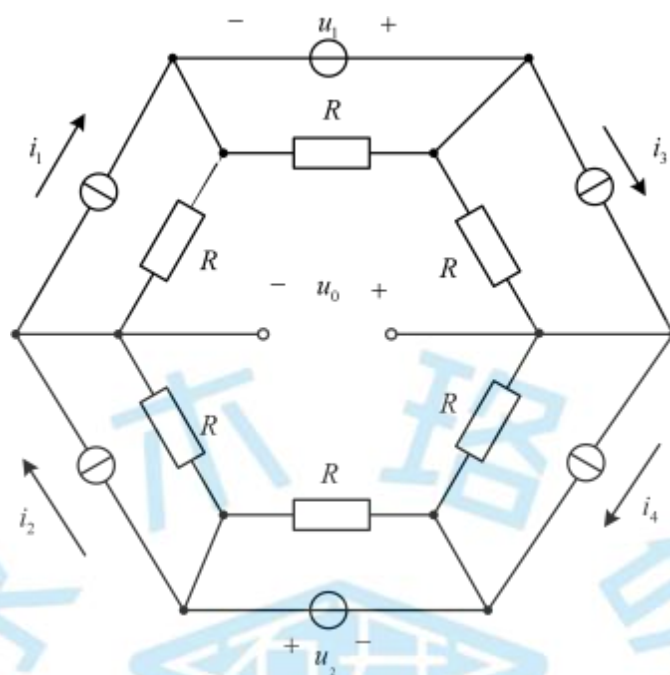
例 2

电路如下图所示，计算电压 u 。



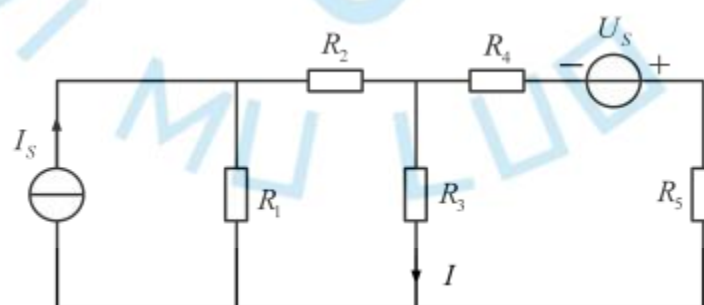
例 2A

求下图所示电路的电压 u_0 。



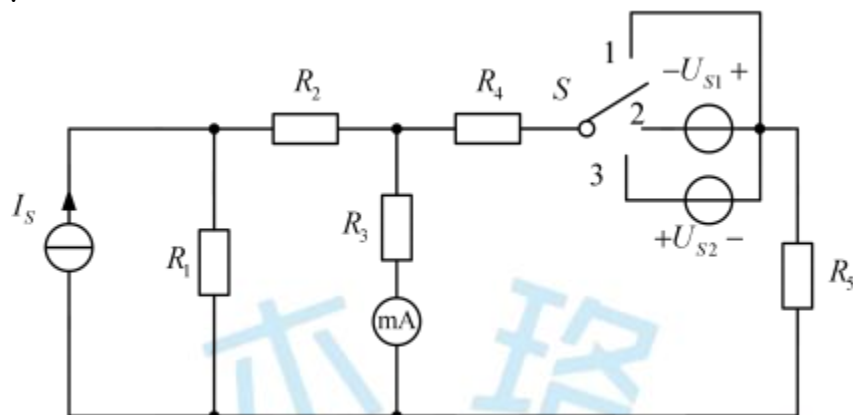
例 3

下图所示电路，当 $U_s = 0$ 时， $I = 40\text{mA}$ ；而当 $U_s = 4\text{V}$ 时， $I = -60\text{mA}$ 。求 $U_s = 6\text{V}$ 时的电流 I 。



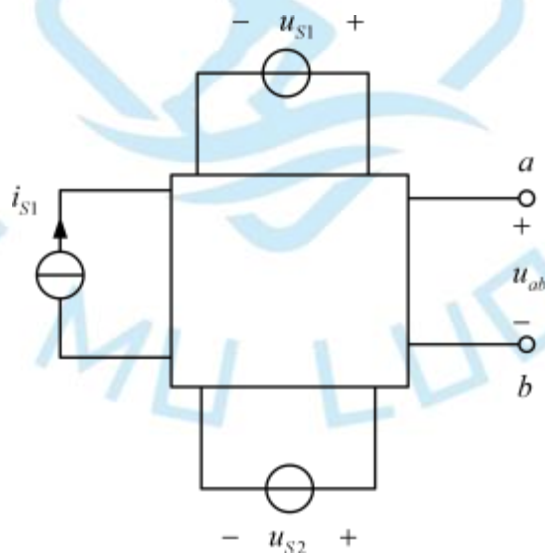
例 4

已知 $U_{S1} = 10V$, $U_{S2} = 15V$ ，当开关 S 在位置 1 时,毫安表读数为 $I' = 40mA$,当开关 S 倒向位置 2 时,毫安表读数为 $I'' = -60mA$ 。如果把开关 S 倒向位置 3,毫安表读数为多少?



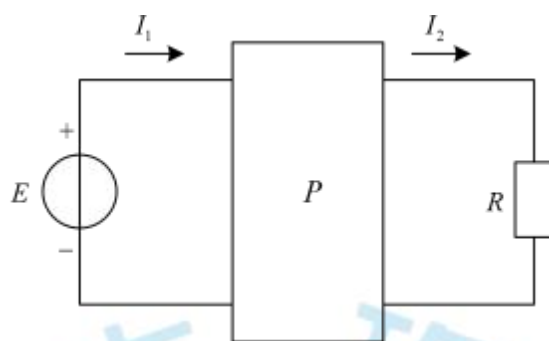
例 5

在下图所示电路中,当电流源 i_{S1} 和电压源 u_{S1} 反向时(u_{S2} 不变),电压 u_{ab} 是原来 0.5 倍;当 i_{S1} 和 u_{S2} 反向时(u_{S1} 不变),电压 u_{ab} 为原来的 0.3 倍。问:仅 i_{S1} 反向时(u_{S1}, u_{S2} 均不变),电压 u_{ab} 应为原来的多少倍?



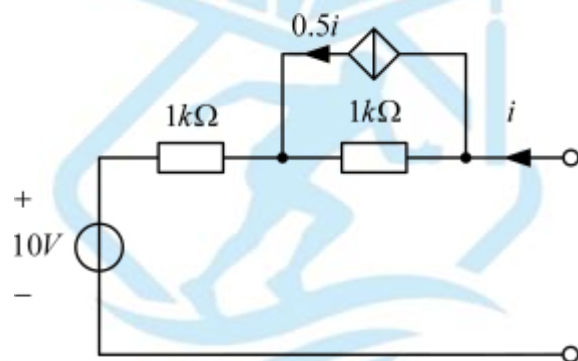
例 6

下图所示电路中, P 为一线性不含独立源的电阻网络, 已知: $R = R_1$ 时, $I_1 = 5A$, $I_2 = 2A$; $R = R_2$ 时, $I_1 = 4A$, $I_2 = 1A$ 。求 $R = \infty$ 时 I_1 的值。



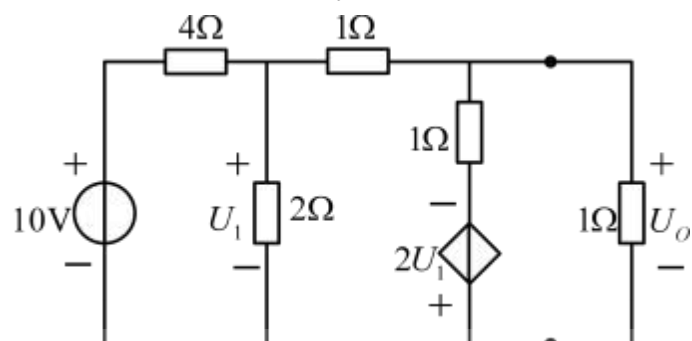
例 7

求下图所示一端口的戴维宁等效电路。



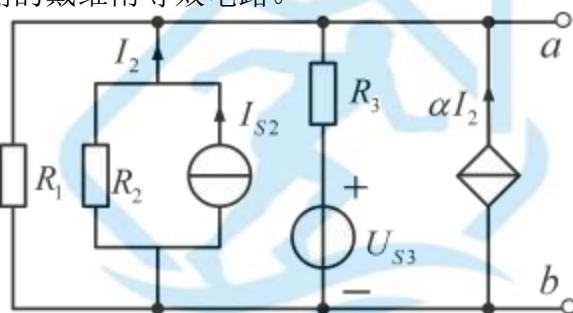
例 8

用戴维南定理求下图所示电路中电压 U_o 。



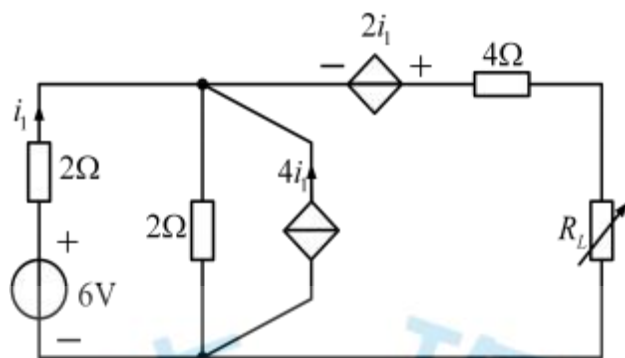
例 9

下图所示电路中， $R_1 = 4\Omega$ ， $R_2 = 6\Omega$ ， $R_3 = 12\Omega$ ， $a = 3$ ， $I_{S2} = 2A$ ， $U_{S3} = 12V$ ，试求端钮 $a - b$ 左侧的戴维南等效电路。



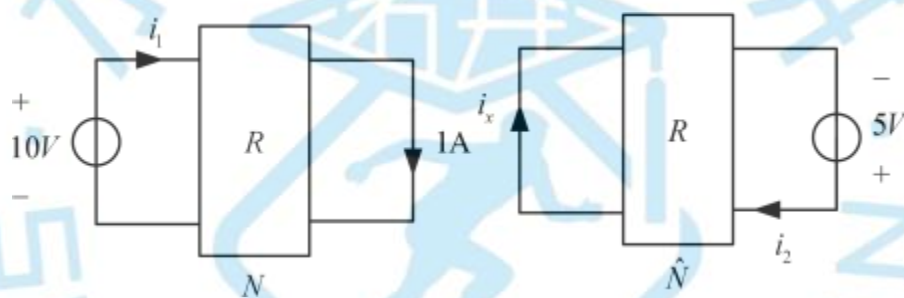
例 10

下图所示电路的负载电阻 r_L 可变，试问 r_L 等于何值时可吸收最大功率？求此功率。



例 11

已知电路如下图所示，求电流 i_x 。

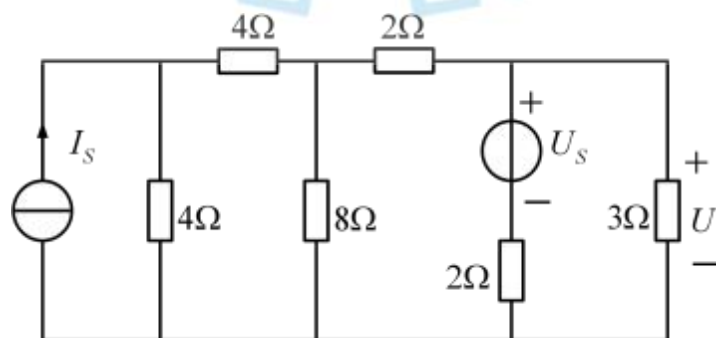


二、习题部分

题 1

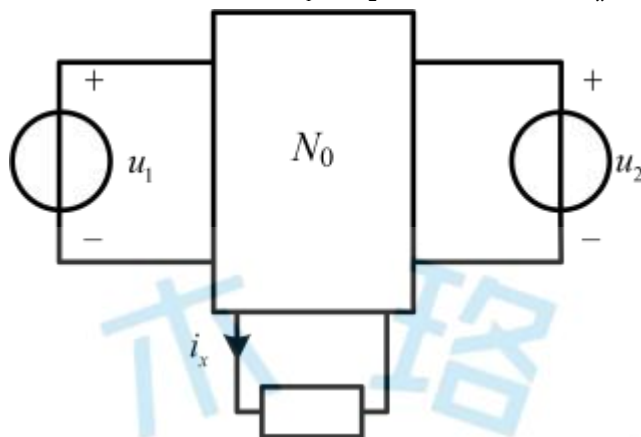
电路如下图所示，电流源 I_s 数值不变，当 $U_s = 4V$ 时， $U = 5V$ ；求：

- (1) 当 $U_s = 0$ ， $U = ?$
- (2) $I_s = ?$ 【2014 年西南交大真题】



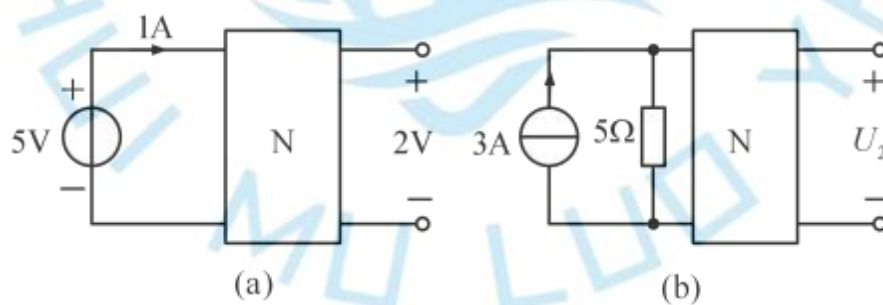
题 2

下图所示电路中 N_0 为无源电阻性网络，当 $u_1 = 2V$ ， $u_2 = 3V$ 时， $i_x = 20A$ ；又当 $u_1 = -2V$ ， $u_2 = 1V$ 时， $i_x = 0$ 。若将 N_0 变换为含有独立源的网络后，在 $u_1 = u_2 = 0$ 时， $i_x = -10A$ ，试求网络变换后，当 $u_1 = u_2 = 5V$ 时的电流 i_x 。



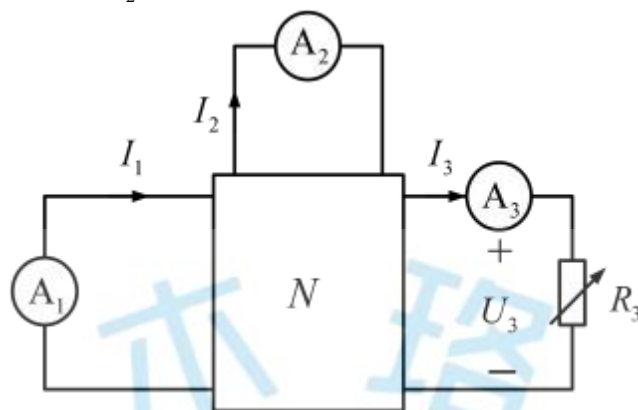
题 3

下图所示电路中 N 为无独立源线性电阻网络，已知条件如图(a)所示。求图(b)中的电压 U_2 。



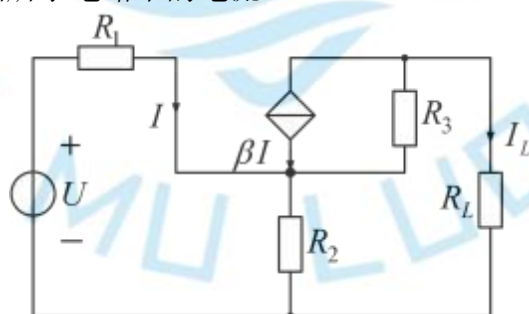
题 4

下图所示电路， N 为有源线性电路。当调节 $R_3 = 8\Omega$ ，电流表读数 $A_1 = 11A$ ， $A_2 = 4A$ ， $A_3 = 20A$ ；当 $R_3 = 2\Omega$ 时，电流表读数 $A_1 = 5A$ ， $A_2 = 10A$ ， $A_3 = 50A$ 。今欲使 $A_1 = 0$ ，问 R_3 应调为何值？此时 A_2 的读数是多少？



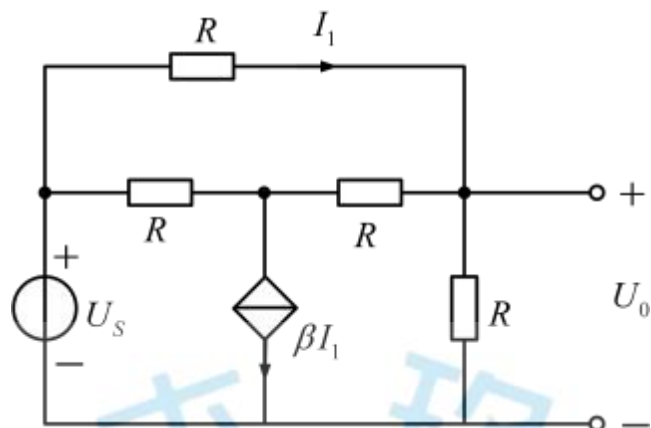
题 5

用戴维南定理求下图所示电路中的电流 I_L 。



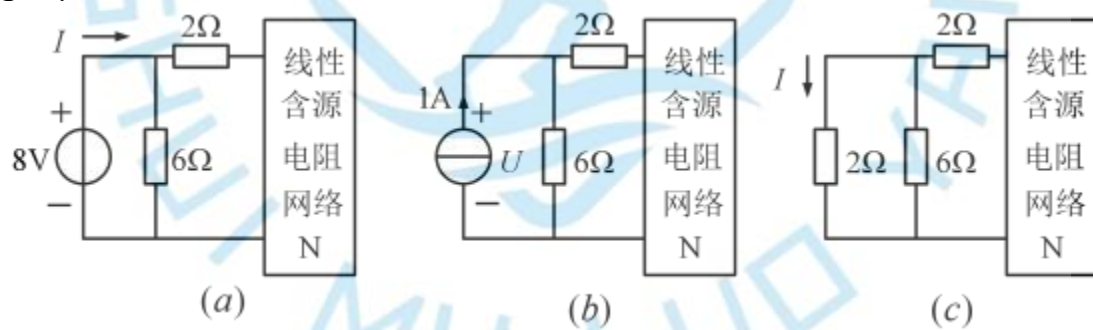
题 6

下图所示电路，已知 $U_s = 8V$ ， $R = 10\Omega$ ， $\beta = 5$ ，试求戴维南（诺顿）等效电路。



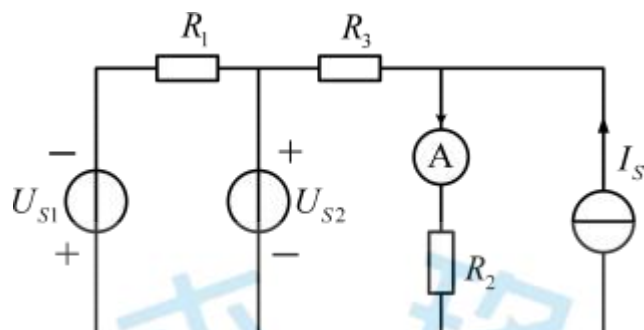
题 7

图(a)电路中电流 $I = 2A$ ，题一图(b)电路中电压 $U = 6V$ ，求题一图(c)电路中电流 $I = ?$



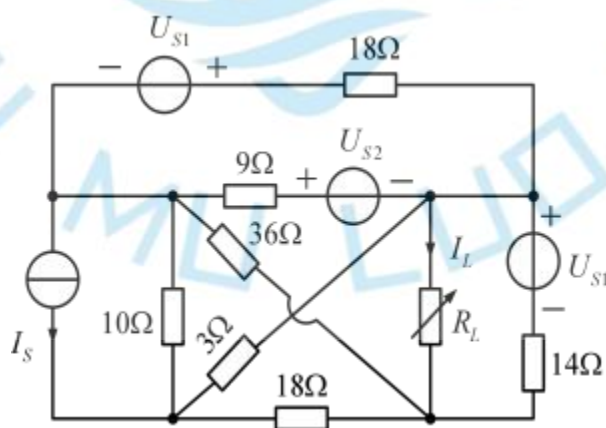
题 8

电路如下图所示。当 $U_{S1} = 8V$, $U_{S2} = 12V$, $I_S = 0$ 时, 电流表的读数为 $1.2A$; 当 $U_{S1} = 10V$, $U_{S2} = 6V$, $I_S = 1.2A$ 时, 电流表的读数为 $1.2A$; 求当 $U_{S1} = 12V$, $U_{S2} = 3V$, $I_S = 1.8A$ 时电流表的读数。



题 9

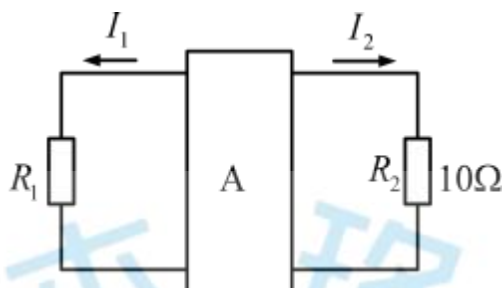
电路如下图所示, 其中 R_L 任意可调, 已知当 $R_L = 3\Omega$ 时, $I_L = 3A$ 。求当 $R_L = 13\Omega$ 时 I_L 的值。



题 10

方框A为含独立电源的电阻网络。当 $R_1 = 7\Omega$ 时 $I_1 = 20A$ ， $I_2 = 10A$ ；当 $R_1 = 2.5\Omega$ 时 $I_1 = 40A$ ， $I_2 = 6A$ 。求：

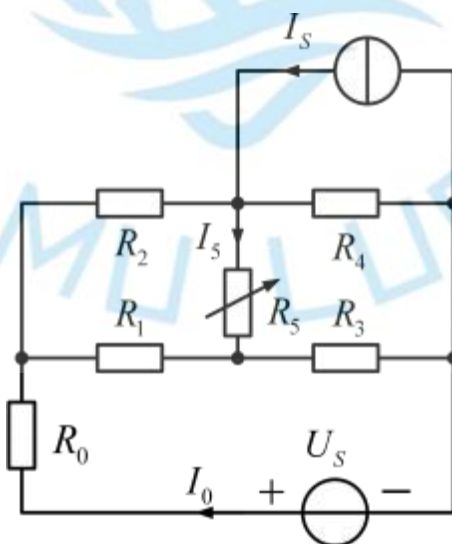
- (1) 电阻 R_1 为何值时它获得功率为最大，并求此最大功率；
- (2) R_1 为何值时 R_2 消耗功率最小。



题 11

下图所示电路，当 $R_5 = 8\Omega$ 时， $I_5 = 20A$ ， $I_0 = -11A$ ； $R_5 = 2\Omega$ 时， $I_5 = 50A$ ， $I_0 = -5A$ 。求：

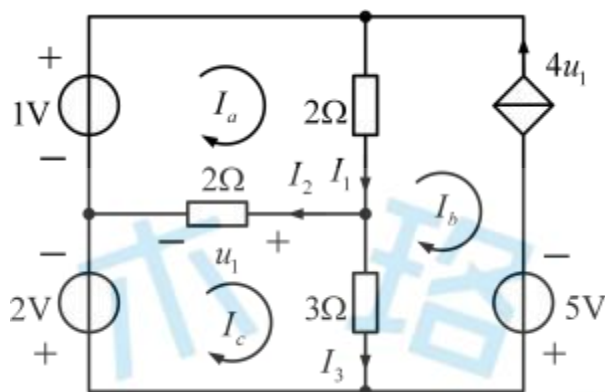
- (1) R_5 为何值时，它消耗功率最大，并求出最大功率。
- (2) R_5 为何值时， R_0 消耗的功率为最小？并求出此最小功率。



题 12

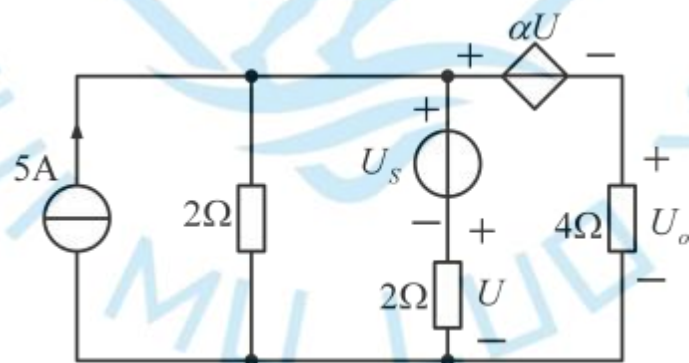
电路如下图所示：

- (1) 写出电路的回路电流方程；
- (2) 求电路中的各电阻流过的电流；
- (3) 若图中 $2V$ 恒压源的电压增加为 $10V$ ，电路其它条件不变，利用(2)中结果及叠加原理计算上述电流。



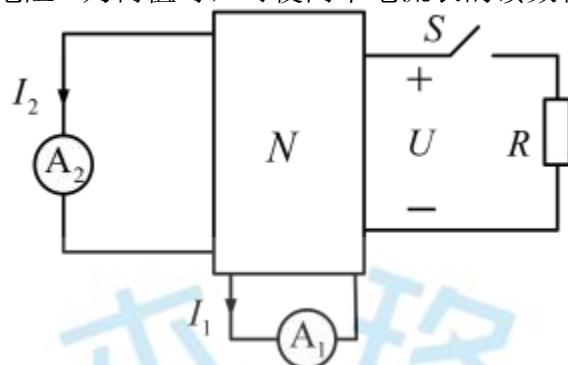
题 13

下图所示直流电路，若使电压 u_o 不受电压源 u_s 的影响，试确定受控源控制系数 a 的值。



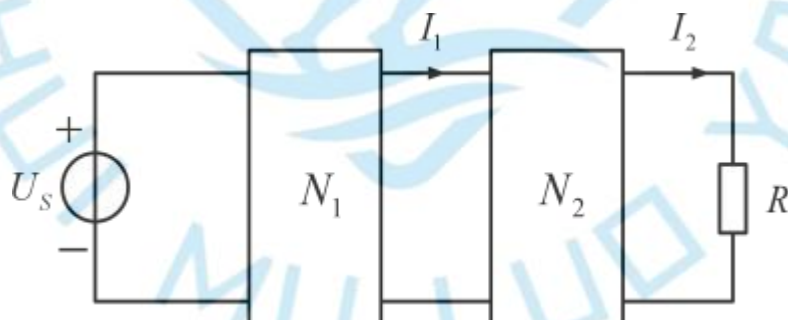
题 14

下图所示电路中， N 为线性含源电阻网络。当开关 S 断开时， $I_1 = 1A$ ， $I_2 = 5A$ ， $U = 10V$ ；当 $R = 6\Omega$ 且 S 合上， $I_1 = 2A$ ， $I_2 = 4A$ ；当调节 $R = 4\Omega$ 时其获得最大功率。试求当调节电阻 R 为何值时，可使两个电流表的读数相等，读数为多少？



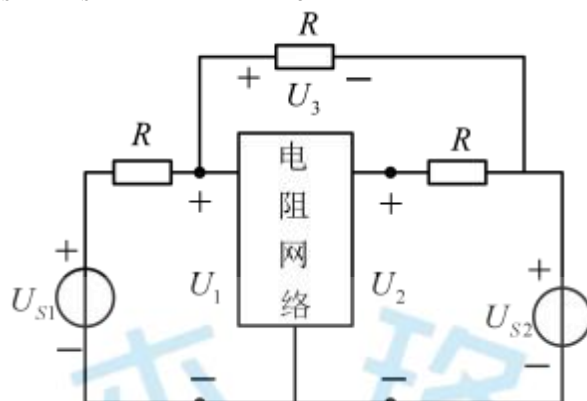
题 15

下图所示电路中， N_1 和 N_2 是两个不同的线性无源网络。当 $U_s = 9V$ ， $R = 3\Omega$ 时， $I_1 = 3A$ ， $I_2 = 1A$ ；当 $U_s = 10V$ ， $R = 0$ 时， $I_1 = 4A$ ， $I_2 = 2A$ 。求当 $U_s = 13V$ ， $R = 6\Omega$ 时， I_1 和 I_2 等于多少？



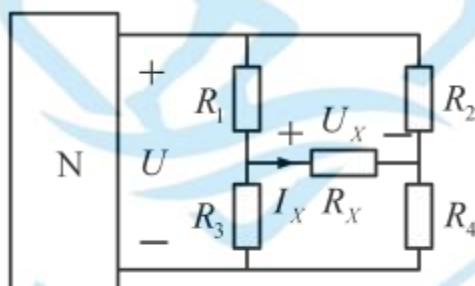
题 16

方框网络是由线性电阻组成。电阻 $R = 3\Omega$ ， $U_{s1} = 9V$ 。当 U_{s1} 单独作用时， $U_1 = 3V$ ， $U_2 = 1.5V$ 。又当 U_{s1} 和 U_{s2} 共同作用， $U_3 = 1V$ 。求电压源电压 U_{s2} 。



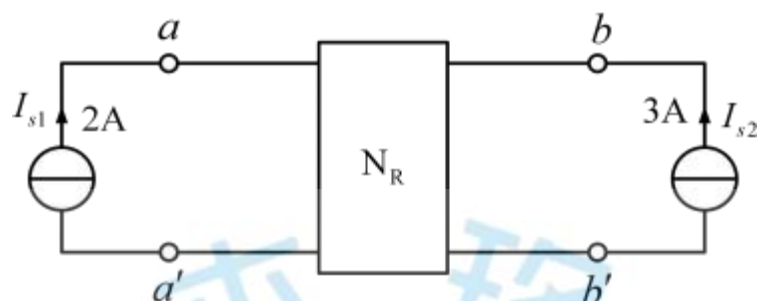
题 17

下图所示电路中，N为含源二端口电路，已知 $R_1 = R_2 = 10\Omega$ ， $R_3 = 6\Omega$ ， $R_4 = 3\Omega$ ， $U_x = U/24$ ，试求 R_x 。



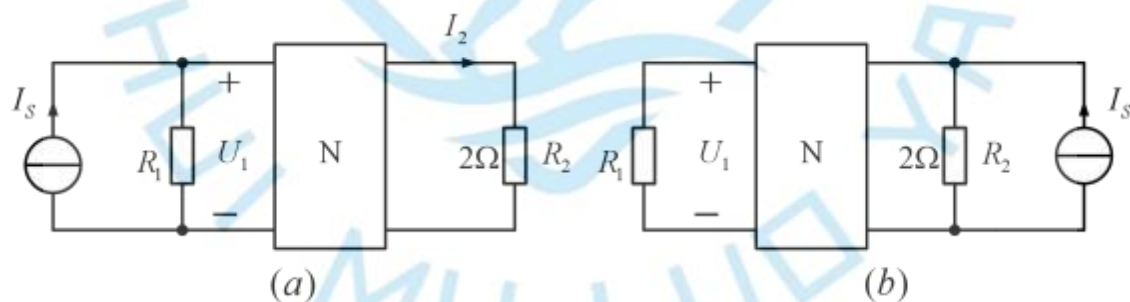
题 18

下图所示的电路中 N_R 为线性电阻电路，当 $a-a'$ 端口的电流源 I_{s1} 单独作用时，电路消耗的功率为 $28W$ ，此时 $b-b'$ 端口的开路电压为 $8V$ 。又当 $b-b'$ 端口的电流源 I_{s2} 单独作用时，电路消耗的功率为 $54W$ 。试计算 I_{s1} 和 I_{s2} 同时作用时，两电流源各自产生的功率是多少？



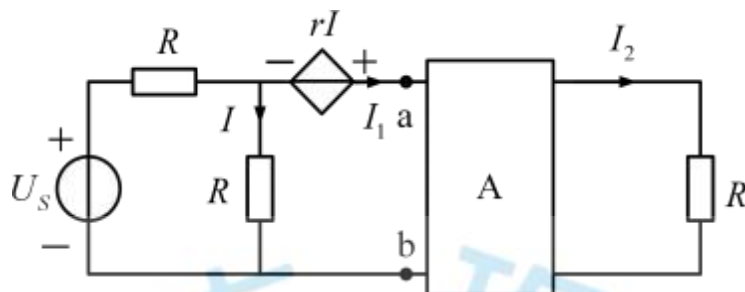
题 19

(a) 图所示电路， N 为有源线性电阻电路。已知 $I_s = 0$ 时， $U_1 = 2V$ ， $I_2 = 1A$ ； $I_s = 4A$ 时， $I_2 = 3A$ 。现将电流源 I_s 与 R_2 并联，如题(b)图所示，且 $I_s = 2A$ ，求此时 U_1 为多少？



题 20

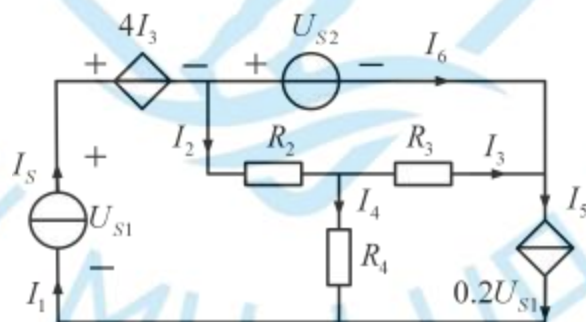
已知A 为线性有源网络， $U_s = 2V$ ， $R = 1\Omega$ ，当 $r = 1\Omega$ 时， $I_1 = 0$ ， $I_2 = \frac{1}{2}A$ ；当 $r = 3\Omega$ 时， $I_1 = \frac{2}{3}A$ ， $I_2 = \frac{3}{2}A$ 。试求：当 $r = 5\Omega$ 时，电流 $I_2 = ?$



题 21

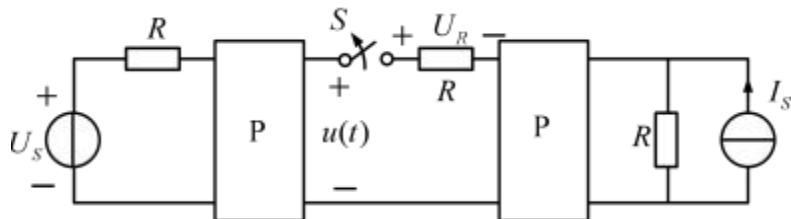
已知 $R_2 = R_3 = 2\Omega$ ， $R_4 = 5\Omega$ ， $I_s = 6A$ ， $U_{s2} = 8V$ ，试求：

- (1) 各支路电流、各电源及受控电源发出的功率。
- (2) 若电流源电流增加了 $0.9A$ （即 $\Delta I_s = 0.9A$ ），则电流源供出的功率增加多少？



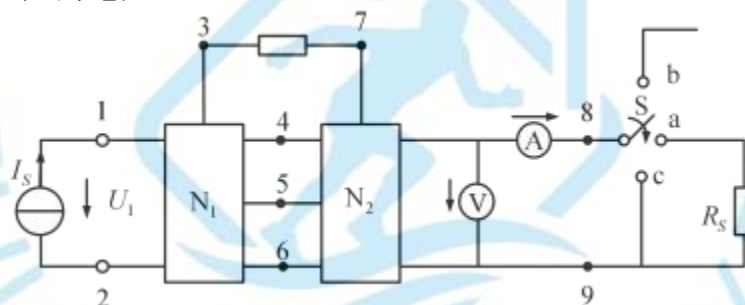
题 22

电路如图所示，已知 $U_s = 20V$ ， $I_s = 2A$ ， $R = 5\Omega$ ， P 为线性电阻组成的对称双口网络。开关 S 闭合时， $U_R = 1V$ ， $U = 8V$ ，求开关 S 打开后的电压 $u(t)$ 。



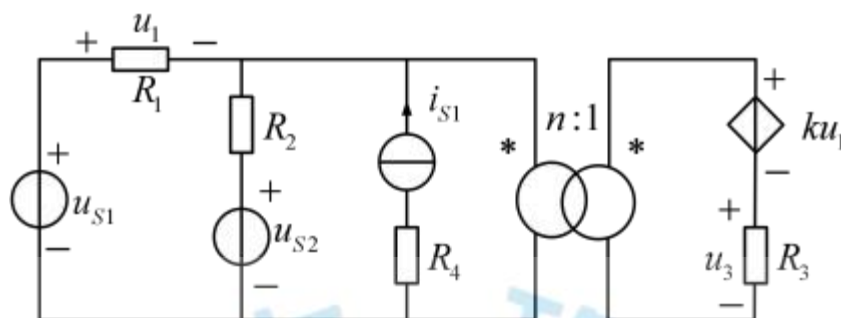
题 23

$I_s = 4A$ ， $R_s = 3\Omega$ 。当开关 S 闭合在 a 点时，1 与 2 之间电压为 U_1 ；当开关 S 接至 b 点时，电压表读数为 $12V$ ；当开关 S 接至 c 点时，电流表读数 $2A$ 。问，开关 S 接至 c 点时，欲使得电流源 I_s 的端电压仍等于 S 接在 a 点时的数值 U_1 ，需在电流源支路中串联多大的电阻 R 。



题 24

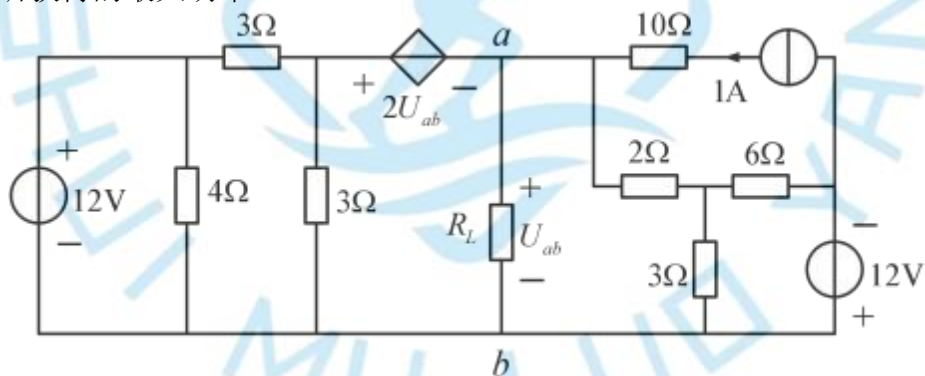
已知电路参数 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，理想变压器的变比为 $n:1$ ，若要使交流电压源 u_{S1} 变化时电压 u_3 保持不变，试确定受控源的控制系数 k 。



题 25

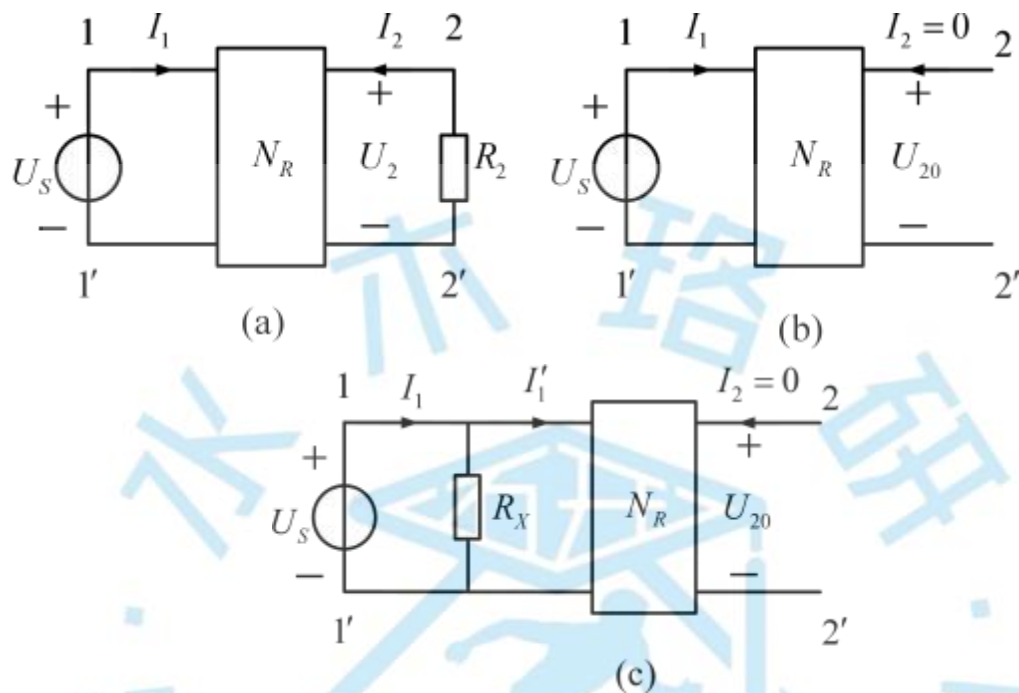
下图所示电路中， a 、 b 端接有负载电阻 R_L 。试求：

- (1) R_L 为何值时可获得最大功率；
- (2) 所获得的最大功率。



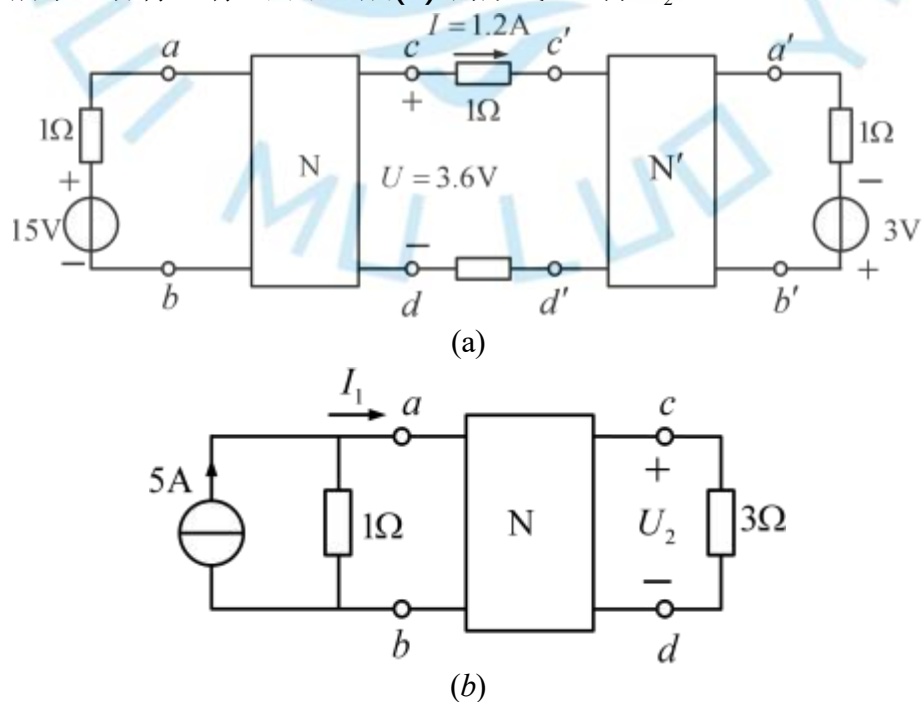
题 26

电路如下图所示, N_R 为无源线性电阻网络, 端口1-1', 加电压源 U_s 。当端口2-2', 接电阻 R_2 时, 1-1' 的电流为 I_1 , 如图(a)。2-2' 开路时, 开路电压为 U_{20} , 如图(b), 2-2' 的输入电阻为 R_0 。如果在2-2' 开路时要保持电压源 U_s 的电流仍为 I_1 , 可在端口1-1' 并联一电阻 R_x , 如图(c) 所示, 求 R_x 的值。



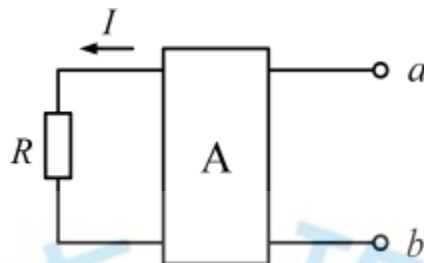
题 27

下图所示电路中 N 、 N' 是两个相同的仅含线性电阻的对称双口网络, 已知条件如图中所示。若将二端口网络连成(b) 的形式, 试求 U_2 。



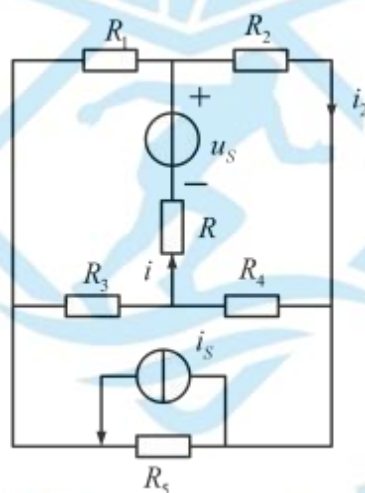
题 28

下图所示电路中，方框部分为含独立源的网络。当端口 a 、 b 短接时，电阻 R 支路中电流 $I = I_{S1}$ 。当端口 a 、 b 开路时，电阻 R 支路中电流 $I = I_{S2}$ 。当端口 a 、 b 间接电阻 R_f 时， R_f 获得最大功率。求端口 a 、 b 间接电阻 R_f 时，流过 R 支路的电流 I 。



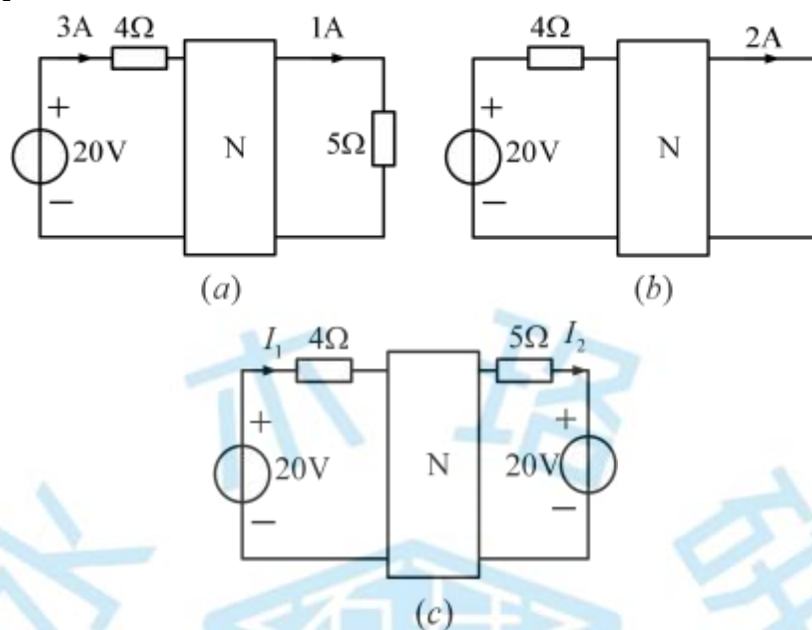
题 29

下图所示线性电阻电路，各电阻元件参数单位均为 Ω 。已知：当 $u_s = 0$ 时， $i = 0$ ， $i_2 = 1A$ ；当 $u_s = 5V$ 时， $i = 0.2A$ ， $i_2 = 1.4A$ 。求当 $u_s = 10V$ ， R 减少 5Ω 时的电流 i_2 。



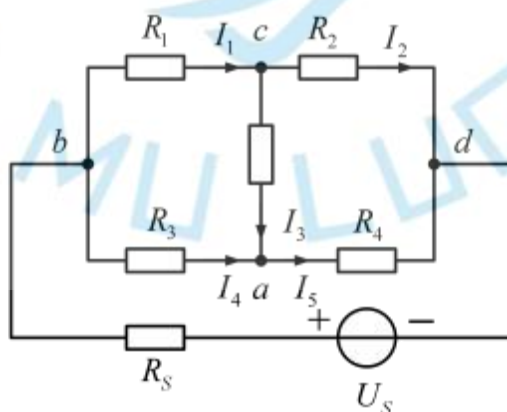
题 30

下图所示电路中， N 仅由电阻组成。根据图(a)和图(b) 的已知情况，求图(c)中电流 I_1 和 I_2 。



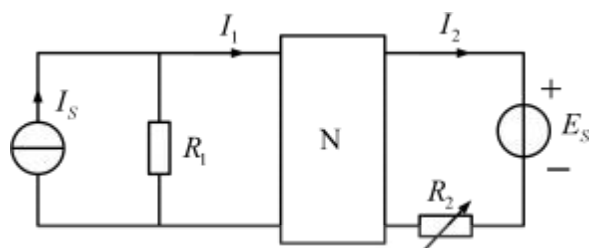
题 31

下图所示电桥电路，桥臂 1（即具有电阻 R_1 的支路）接入前， bc 两端间电压 $U_{bc} = 2V$ ；桥臂 1 接入后，电桥恰好平衡，且流经桥臂的电流 $I_1 = 2mA$ ，当桥臂 1 电阻 R_1 减小 200Ω 后，电桥失去平衡，桥臂 2 中的电流 $I_2 = 1.997mA$ 。试求： R_1 变化多少时可使 $I_2 = 2.006mA$



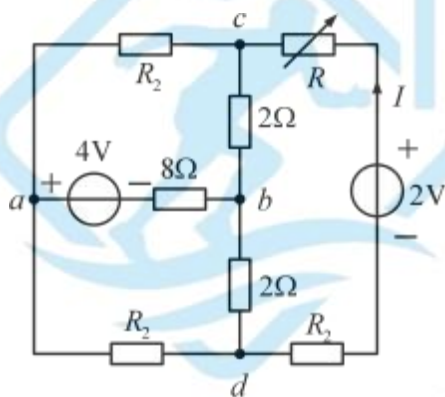
题 32

下图所示线性电路中，N为无源对称双口网络， R_2 为可调电阻， $R_1 = 2\Omega$ ， $I_s = 5A$ ， $E_s = 5V$ 。当 $R_2 = R_1$ 时， $I_1 = 2A$ ；当 $R_2 = 2R_1$ 时， $I_2 = 1A$ 。求： R_2 可能获得的最大功率及此时 R_2 的值。



题 33

电路中 R 为可变电阻， R_2 未知，当 $R = 2\Omega$ 时， $I = \frac{1}{4}A$ 。求当 $R = 10\Omega$ 时 I 的值。

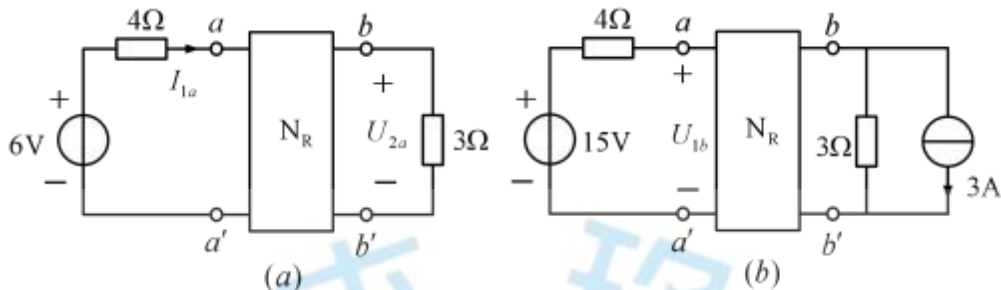


题 34

N_R 是同一个线性非时变电阻电路，其中不包含独立源和受控电源。已知图

(a) 中 $I_{1a} = 1A$ ， $U_{2a} = 1.5V$ ，试求图(b) 中的 U_{1b} 的值。

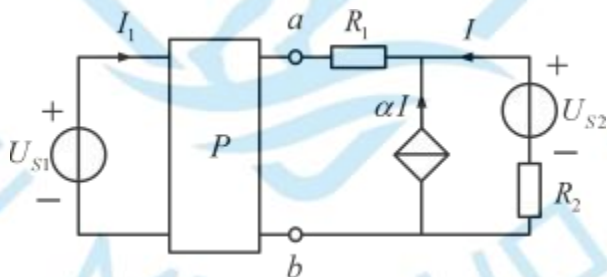
- (1) 用互易定理和叠加定理求解；
- (2) 用特勒根定理求解。



题 35

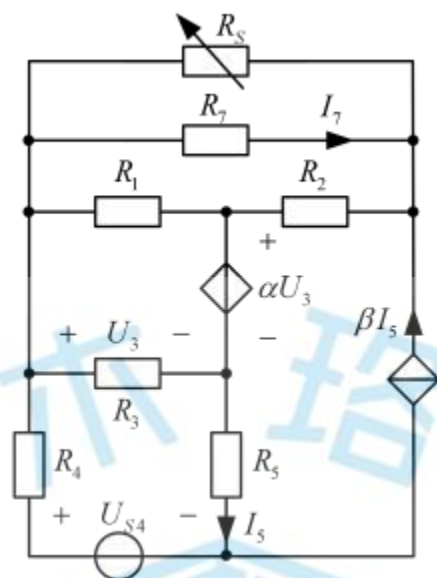
P 为纯电阻无源网络，已知 $U_{S1} = 30V$ ， $U_{S2} = 10V$ ， $R_1 = 1\Omega$ ， $R_2 = 10\Omega$ ， $\alpha = 4$ ，此时 $I_1 = 8A$ ， $I = -0.2A$ ；当 $R_1 = 4\Omega$ ， R_1 上可获得最大功率。

- (1) 求当 R_1 上获得最大功率时， $a-b$ 端左侧的戴维南等效电路，此时 I_1 为何值？
- (2) 当 U_{S1} 为何值时，电流 I 的值不受 R_1 变化的影响。



题 36 【二轮提高专用】

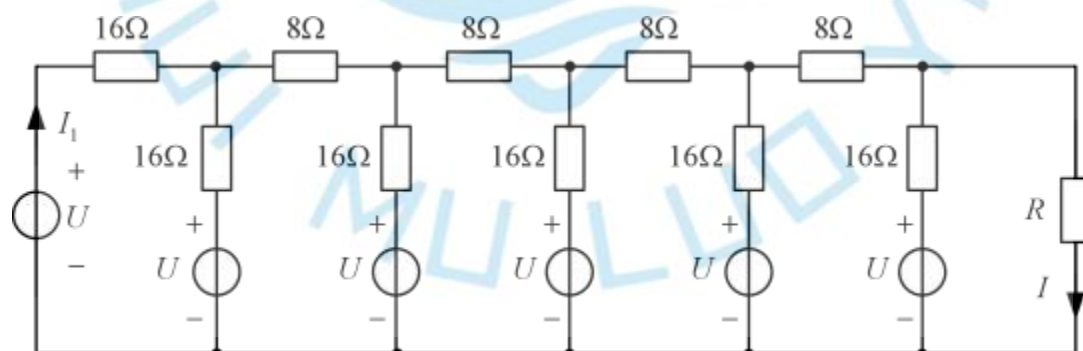
电路如图所示，已知 $U_{S4} = 20V$ ， $R_1 = R_3 = R_5 = R_7 = 20\Omega$ ， $R_2 = R_4 = 10\Omega$ ， $\beta = 2$ ，当 R_S 变化时，电流 I_7 不变，求控制系数 α 的值。



题 37 【二轮提高专用】

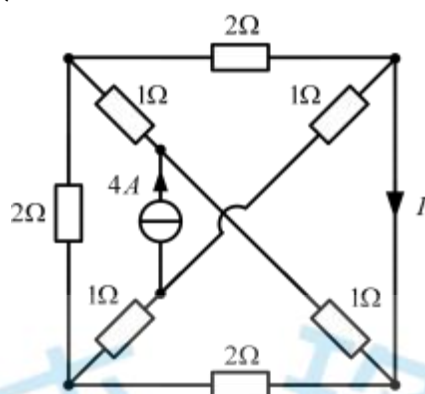
下图所示电路中，已知 $U = 8V$ 。

- (1) R 为何值时它消耗的功率最大，并求此最大功率。
- (2) $R = 12\Omega$ 。求电流 I 和 I_1 的值。



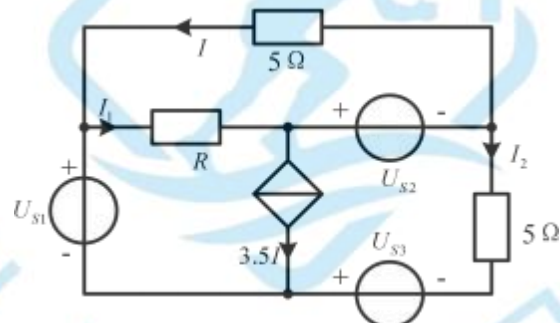
题 38 【二轮提高专用】

电路如下图所示，试求短路线中电流 I ；如果去掉该短路线，试问代之什么元件可使流过此支路的电流为零。



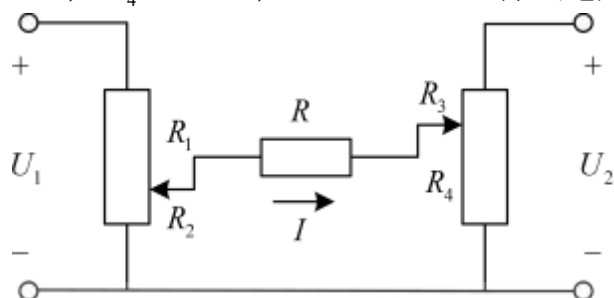
题 39

下图所示电路中，当 $R = 2\Omega$ 时， $I_1 = 5A$ ， $I_2 = 4A$ 。求当 $R = 4\Omega$ 时， I_1 和 I_2 为多少？



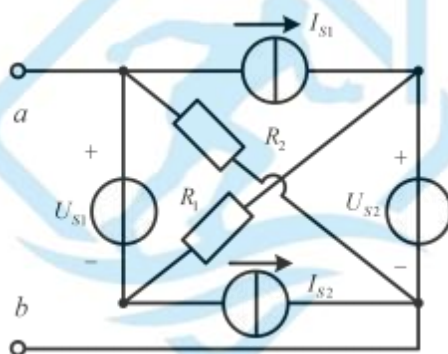
题 40

下图所示电路常用于控制电路中。已知 $U_1 = 72V$ ， $U_2 = 80V$ ， $R_1 = 1.5k\Omega$ ， $R_2 = 3k\Omega$ ， $R_3 = 1.4k\Omega$ ， $R_4 = 2.6k\Omega$ ， $R = 1.5k\Omega$ 。试求出电阻 R 中的电流 I 。



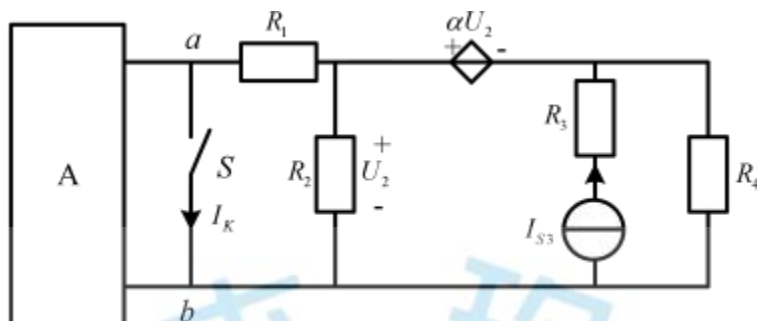
题 41

求下图所示电路的戴维南等效电路。



题 42

下图所示电路，已知 A 是有源二端网络， $R_1 = R_2 = R_3 = 20\Omega$ ， $R_4 = 10\Omega$ ， $a = \frac{1}{2}$ ， $I_{s3} = 1A$ ，当开关 S 打开时，开关两端的电压 $u_{ab} = 25V$ ，当开关 S 闭合时，流过开关的电流为 $I_k = \frac{10}{3}A$ ，试求有源网络 A 的戴维南等效电路。



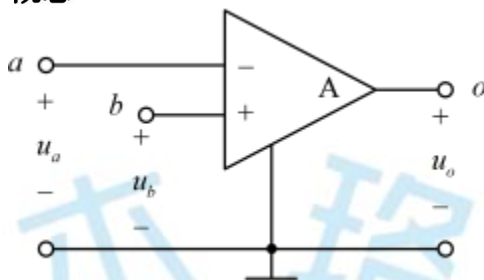
第五讲 理想运放

一、【命题基本点重点】

- 1、理想运放的基本概念
- 2、理想运放的分析方法

二、【基本考点总结】

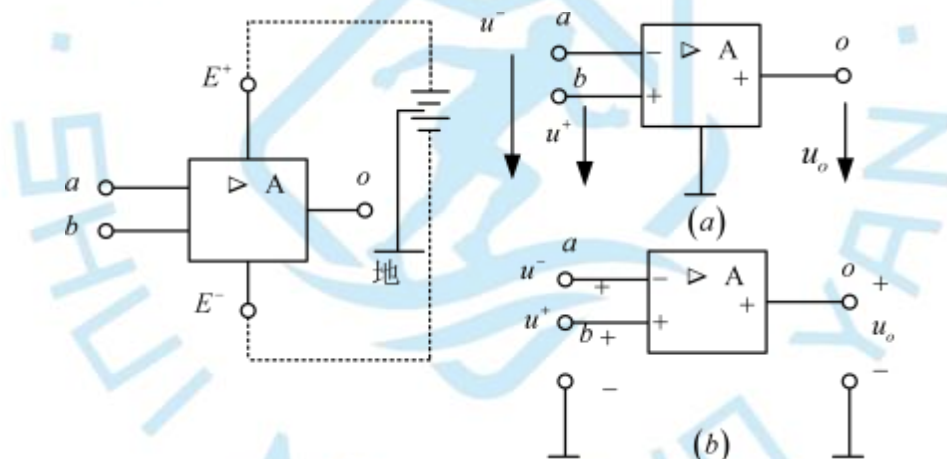
1、知识点 A:运放基本概念



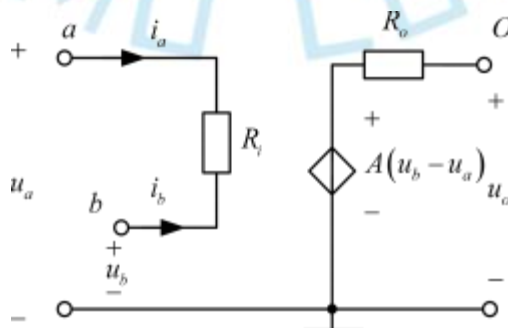
(1) 定义:

运算放大器是一种放大倍数很高(通常放大倍数 $A > 10^5$), 并且可同时放大直流和交流信号的放大器。它是一种多端元件, 即通过多个端点与外部电路相联的电路器件。它与其它元件组合起来, 可以加、减、乘、除、微分、积分等数学运算, 所以可以形象地称其为运算放大器

电路符号



(2) 电路模型

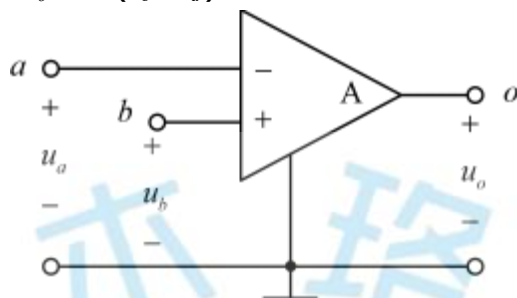


①它就代表一个运算放大器, u_a, u_b 为输入电压, u_o 为输出电压

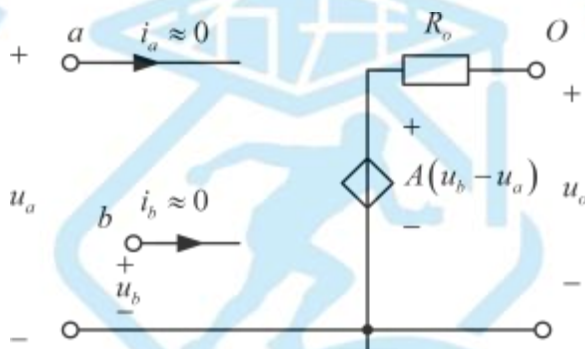
②图中的 a 点为反相输入端(即输出与输入反相), b 点为同相输入端(即输出与

输入同相), A 为放大倍数

③对于运算放大器, 在进行网络分析时, 我们常用 VCVS 的受控源模型来替换。由于运算放大器的输入电阻 R_i 一般都很大, 即 $R_i > 10^6 \Omega$; 输出电阻 R_o 一般都很小, 即 $10 \Omega < R_o < 100 \Omega$ 。所以将运算放大器作理想化处理, 即 $R_i \rightarrow \infty$, 则 $i_a \sim 0, i_b \sim 0$, 此即“虚断”的概念, 即在电路方程中可以将 $i_a = 0, i_b = 0$ 代入, 在电路图中不能将 a 、 b 点断开。 $R_o = 0$, 则 $u_o = A(u_b - u_a)$

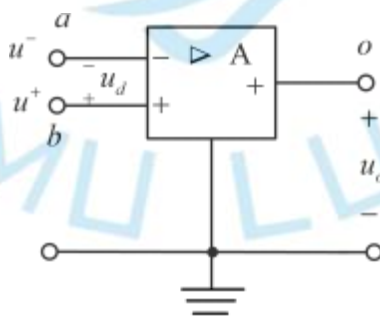


若放大倍数 $A \rightarrow \infty$, 且输出电压 u_o 为有限值时, 则有 $u_b - u_a \sim 0$, 此即“虚短”的概念, 即在电路方程中可以用 $u_a = u_b$ 代入, 在电路图中不能将 a 、 b 两点短接。于是理想化下, 运算放大器的电路模型即为:



(3) 运算放大器的外特性

①运放的输入方式



设在 a, b 端分别加上电压 u^-, u^+ , 则输出 u_o 为:

$$u_o = A(u^+ - u^-) = Au_d$$

称为差动输入, $u_d = u^+ - u^-$: 差动输入电压;

I. 开环电压放大倍数, 可达十几万倍。

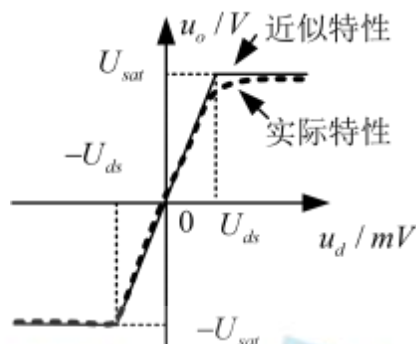
将同向输入端与公共端联接, 在反向输入端加输入电压 u^- , 则

$$u_o = -Au^-$$

将反向输入端与公共端联接, 在同向输入端加输入电压 u^+ , 则

$$u_o = Au^+$$

II.运放的外特性



(a)线性工作区:

$$|u_d| < U_{ds}, \text{ 则 } u_o = A(u^+ - u^-) = Au_d$$

(b)正向饱和区:

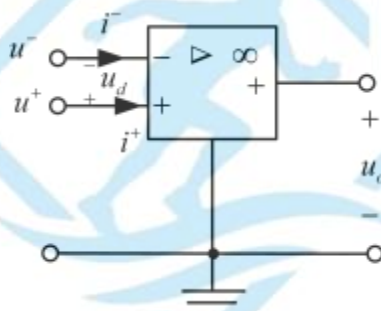
$$u_d > U_{ds}, \text{ 则 } u_o = U_{sat} \text{ (正向饱和电压)}$$

(c)反向饱和区:

$$u_d < -U_{ds}, \text{ 则 } u_o = -U_{sat} \text{ (反向饱和电压)}$$

这里 U_{ds} 是一个数值很小的电压,例如 $U_{sat} = 13V, A = 10^5$ 。则 $U_{ds} = 0.13mV$

(4) 理想运算放大器—前面的性质可以简单看一下, 考试一般考这里的



理想运放的电路符号

在线性放大区, 将运放电路作如下的理想化处理:

R_{in} 喻伪, R_o 喻 0, A 喻伪

①由 $u_o = Au_d$

u_o 为有限值, 则 u_d 喻 0, 即 $u^+ = u^-$, 两个输入端之间相当于短路(虚短路); 当一个端子接地时, $u^+ = u^- = 0$, 称为"虚地"。

② R_{in} 喻伪, $i^+ = 0, i^- = 0$ 。即从输入端看进去, 元件相当于开路(虚断路)。

2、知识点 B:理想运放的分析方法

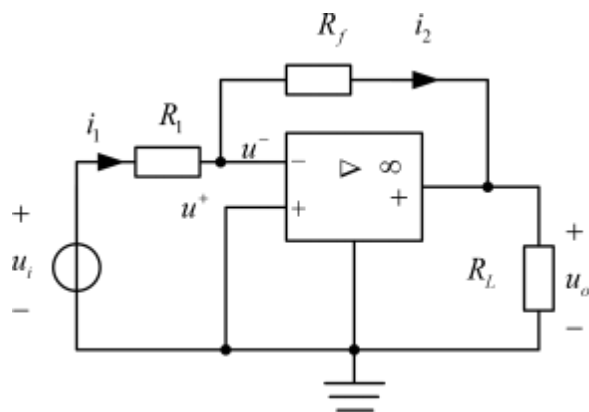
(1) 分析方法:节点电压法

①采用概念:"虚短", 虚断", 虚地"

②避免问题:对含有运放输出端的节点不予列方程

③求解次序:由最末一级的运放输入端开始, 逐渐前移

(2) 根据理想运放的特性分析



①根据“虚短”:

$$u^+ = u^- = 0, i_1 = u_i / R_1$$

$$i_2 = u_o / R_f$$

②根据“虚断”

$$i_1 = 0, i_2 = i_1 \Rightarrow u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

(3) 注意

①当 R_1 和 R_f 确定后,为使 u_o 不超过饱和电压(即保证工作在线性区),对 u_i 有一定限制。

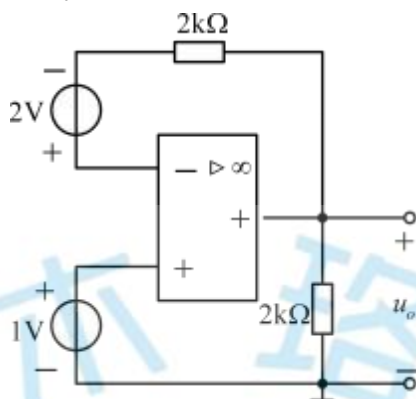
②运放工作在开环状态极不稳定,振荡在饱和区;工作在闭环状态,输出电压由外电路决定。(R_f 接在输出端和反相输入端,称为负反馈)。

第五讲 练习

二、习题部分

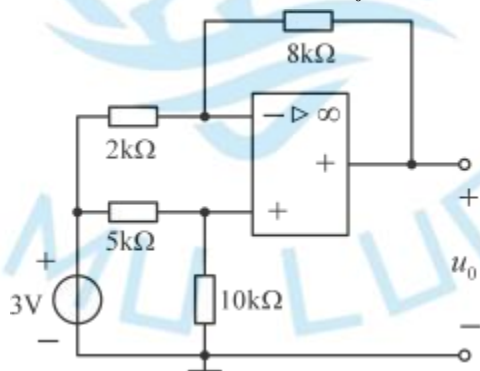
题 1

试求题图电路中的输出电压 u_o 。



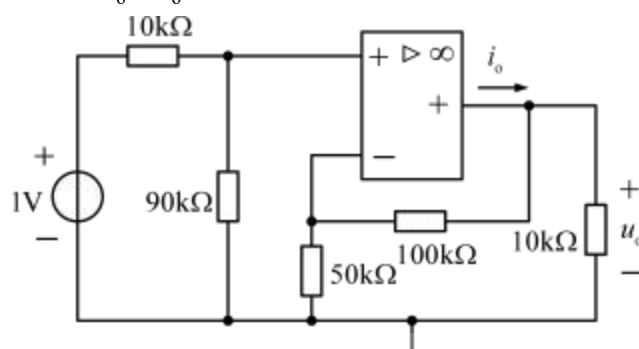
题 2

试求下图所示理想集成运放电路中的输出电压 u_o 。



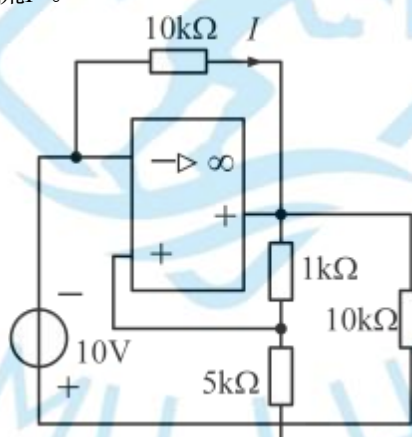
题 3

试求下图所示电路中的 u_o 和 i_o 。



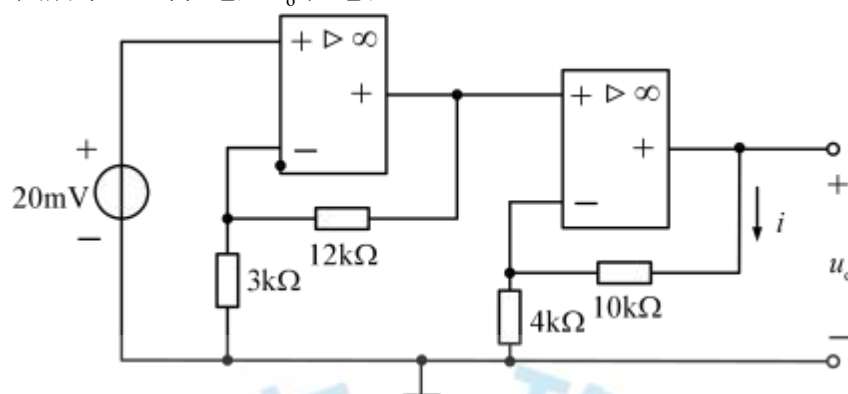
题 4

求下图所示电路中的电流 I 。



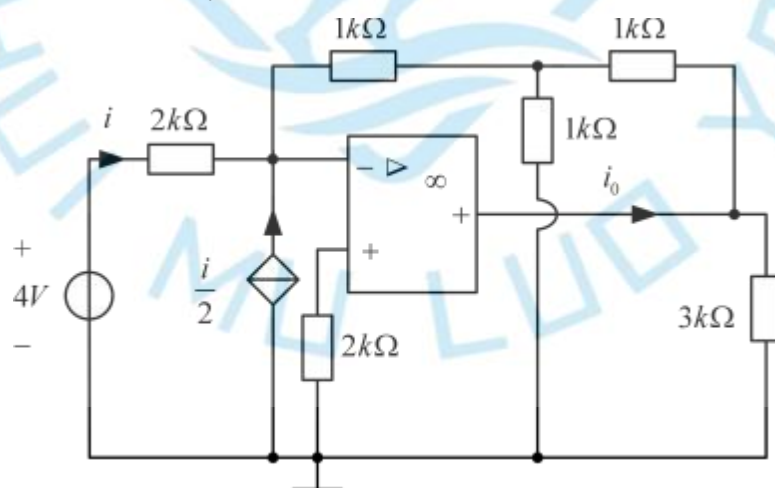
题 5

电路如下图所示。试求电压 u_o 和电流 i 。



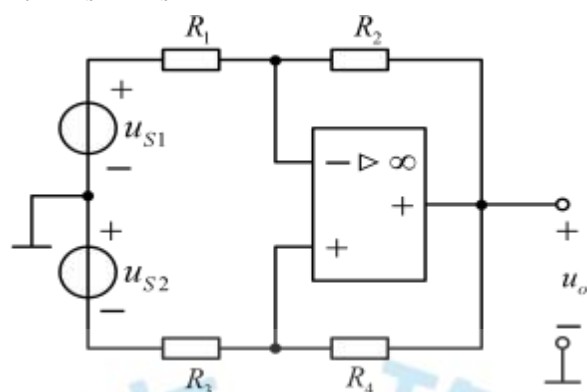
题 6

电路如下图所示，求电流 i_0 （西南交通大学 2015）



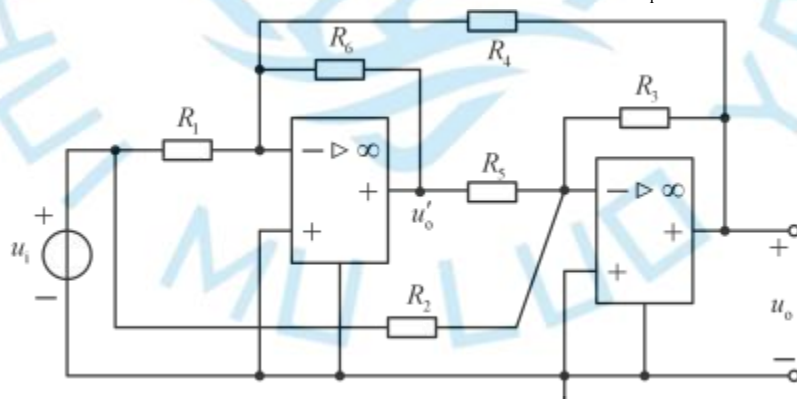
题 7

求下图所示电路的 u_o 与 u_{S1} 、 u_{S2} 之间的关系。



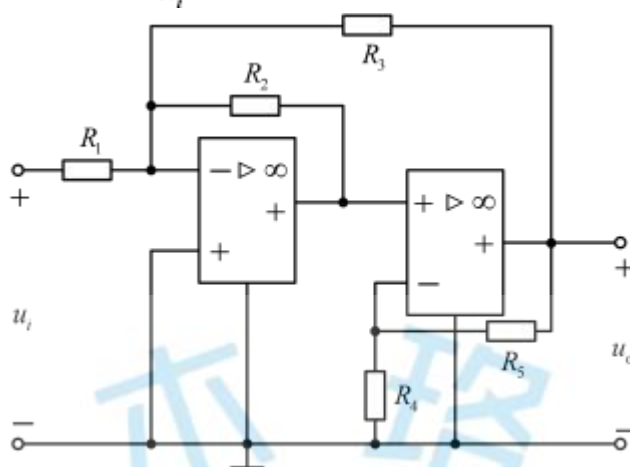
题 8

下图所示电路含有 2 个理想集成运放，设 $R_5 = R_6$ 。试求 $\frac{u_o}{u_i}$ 。



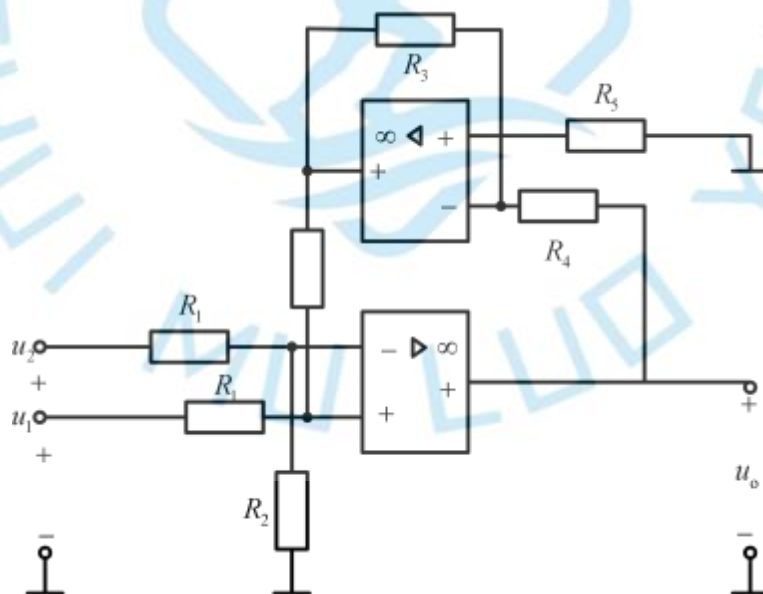
题 9

求下图所示电路的电压比值 $\frac{u_o}{u_i}$ 。



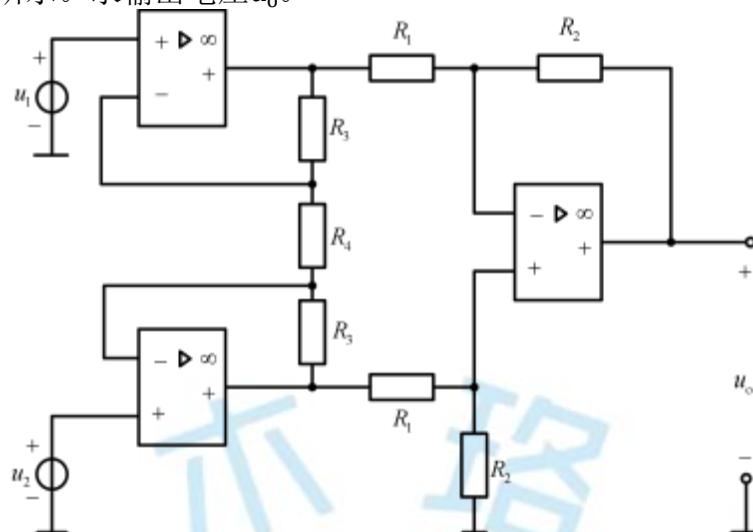
题 10

试求下图所示电路图中输出电压 u_o 与输入电压 u_1 和 u_2 的函数关系。



题 11

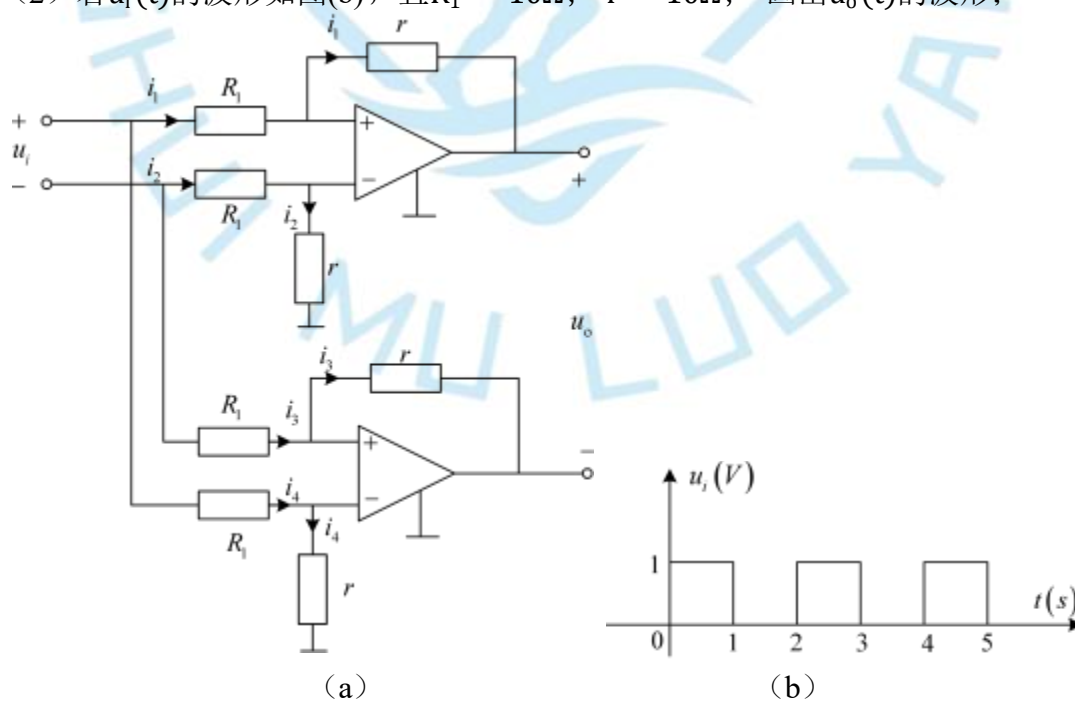
电路如下图所示。求输出电压 u_o 。



题 12

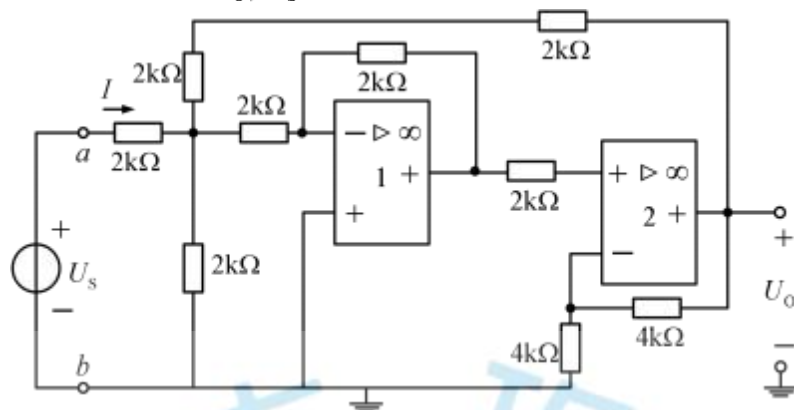
电路如图所示，图(a)中运算放大器为理想运算放大器，求：

- (1) 输出电压与输入电压的关系： u_o/u_i ；
- (2) 若 $u_i(t)$ 的波形如图(b)，且 $R_1 = 10\Omega$ ， $r = 10\Omega$ ，画出 $u_o(t)$ 的波形；



题 13

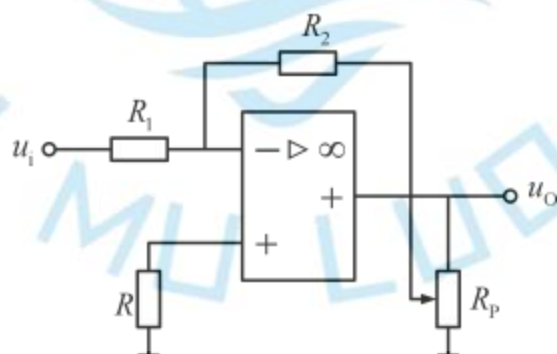
求下图所示电路的电压比 U_o/U_s ，以及 ab 端的等效输入电阻。



题 14

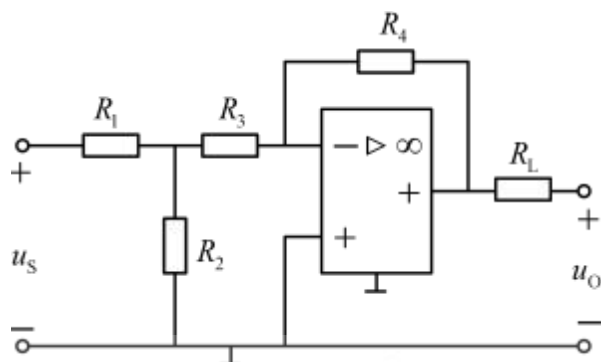
下图所示含理想运算放大器电路，其最大输出电压为 $\pm 15V$ ， $R_1 = 100k\Omega$ ， $R_2 = 200k\Omega$ ， $R_p = 5k\Omega$ ， $u_i = 2V$ 。试求在下述三种情况下的 u_o 。求：

- (1) R_p 滑动头在顶部位置；
- (2) R_p 滑动头在正中位置；
- (3) R_p 滑动头在底部位置。
- (4) 其他条件不变，输入电压 $u_i = 20V$ ，再求 (1) 问。



题 15

电路如下图所示，试求其输入端和输出端的等效电阻。



题 16

下图所示电路中，运放都工作在线性区。

- (1) 求 $\frac{U_o}{U_i}$ ；
- (2) 分别求输入端口和输出端口看入的等效电阻。

