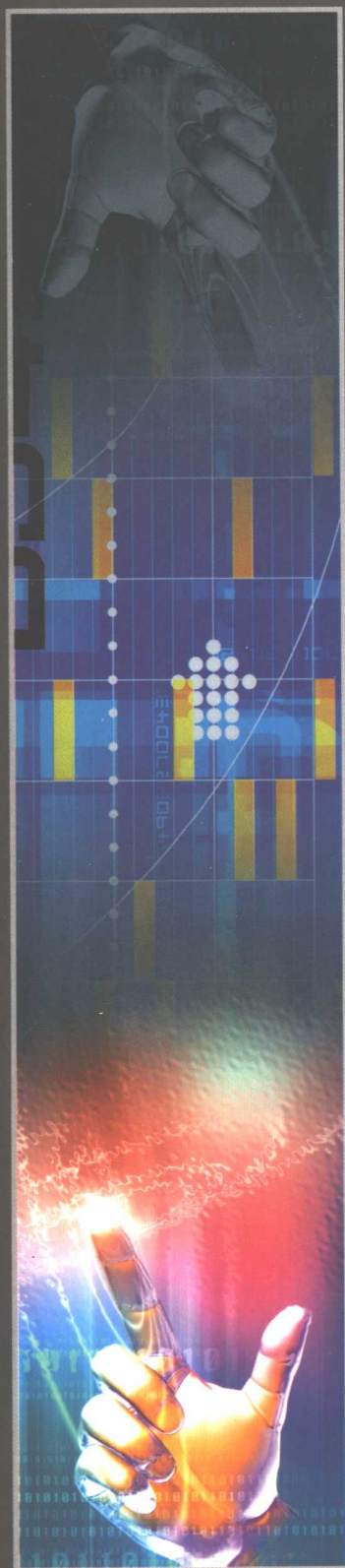


丛书主编 王凤兰

考研新干线

电路原理常见题型解析及模拟题

刘长林 刘静 高美静 陈卫东 张燕君 编著 毕卫红 主审



國防工業出版社

http://www.wndip.com

电 路 原 理

常见题型解析及模拟题

刘长林 刘静 高美静 陈卫东 张燕君 编著
毕卫红 主审

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电路原理常见题型解析及模拟题 / 刘长林等编著.
北京:国防工业出版社,2005.1
(考研新干线)
ISBN 7-118-03533-5

I. 电... II. 刘... III. 电路理论-研究生-入学考试-自学参考资料 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 073957 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 534 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—5000 册 定价:30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:68428422

发行邮购:68414474

发行传真:68411535

发行业务:68472764

前 言

《电路理论》是电类专业第 1 门技术基础课,它既为后续技术基础课和专业课打下必要的基础,也为将来从事科研、教学和其他技术工作奠定理论基础。为了帮助学习者和考研者全面准确地掌握课程的重点及难点,拓宽解题思路,掌握解题技巧,提高解题能力和效率,受国防工业出版社的委托,我们编写了《电路原理常见题型解析及模拟题》一书,希望能帮助学习者和考研者提高电路理论的学习质量,适应各类考试,特别是硕士研究生的入学考试。

本书是根据教育部制定的“高等工科院校电路分析课程基本要求”,参考国内一些重点教材和辅导教材,收集了近几年一些高校研究生入学电路试题,并结合作者多年的教学和研究成果而精心编写的。全书共分 14 章,每章包含重点及难点、典型题解析和习题 3 部分。

重点及难点。精炼课程内容,强调基本概念的理解,注重解题方法的指导,明确提出基本要求,使读者用较少的时间掌握电路理论的内容体系。

典型题解析。它是本书的核心。作者精心选择和编拟的 263 个例题,类型齐全,有足够的深度和广度,符合硕士研究生入学电路试题的命题规律和潮流。在解题过程中,力求概念清晰,步骤完整,计算准确。通过这些例题使读者启迪思路、开阔视野,学会分析问题和解决问题的方法,提高解题能力。

习题部分。编者为读者提供 179 道与例题难度相当的习题,用于检查读者的学习效果,进一步提高解题能力,书后附有习题参考答案。

附录部分包括 4 所高校硕士研究生入学电路试题和答案,供读者掌握复习应该达到的深度和广度。

本书由刘长林主编、毕卫红主审,参加本书编著者有刘静、高美静、陈卫东、张燕君、夏可宇和刘学军。全书计算机打字和绘图由高美静完成,王魁荣参加了书稿的校对工作。

由于编者水平有限,加之时间仓促,错误和疏漏在所难免,望同行专家和读者批评指正,作者万分感激!

编 者

2004 年 7 月

内 容 简 介

本书是依据教育部制定的“高等工科院校电路分析课程基本要求”,参考国内一些重点教材和辅导教材,收集了近几年一些高校研究生入学电路试题,并结合作者多年的教学和研究成果而精心编写的。内容有:电路模型和电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路定理、含运算放大器的电阻电路、正弦稳态电路的分析、含有耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电流一阶和二阶电路、拉普拉斯变换和网络函数、电路方程的矩阵形式、二端口网络、非线性电路和一个附录(硕士研究生入学电路试题选)。书末附有各章习题参考答案。

本书是“电路理论”学习者和考研者的参考资料,也可供教师 and 科技人员参考。

目 录

第 1 章 电路模型和电路定律	1
1.1 重点及难点	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 基本要求	4
1.2 典型题解析	4
1.3 习题	13
第 2 章 电阻电路的等效变换	16
2.1 重点及难点	16
2.1.1 基本概念	16
2.1.2 基本要求	18
2.2 典型题解析	18
2.3 习题	29
第 3 章 电阻电路的一般分析方法	32
3.1 重点及难点	32
3.1.1 基本概念	32
3.1.2 基本要求	33
3.2 典型题解析	33
3.3 习题	46
第 4 章 电路定理	49
4.1 重点及难点	49
4.1.1 基本概念	49
4.1.2 基本要求	52
4.2 典型题解析	52
4.3 习题	78
第 5 章 含运算放大器的电阻电路	82
5.1 重点及难点	82
5.1.1 基本概念	82
5.1.2 基本要求	82
5.2 典型题解析	83
5.3 习题	90
第 6 章 正弦稳态电路分析	92
6.1 重点及难点	92

6.1.1 基本概念	92
6.1.2 基本要求	100
6.2 典型题解析	101
6.3 习题	134
第 7 章 含耦合电感的电路	139
7.1 重点及难点	139
7.1.1 基本概念	139
7.1.2 基本要求	145
7.2 典型题解析	145
7.3 习题	160
第 8 章 三相电路	164
8.1 重点及难点	164
8.1.1 基本概念	164
8.1.2 基本要求	168
8.2 典型题解析	168
8.3 习题	182
第 9 章 非正弦周期电流电路	184
9.1 重点及难点	184
9.1.1 基本概念	184
9.1.2 基本要求	187
9.2 典型题解析	187
9.3 习题	199
第 10 章 一阶电路和二阶电路	202
10.1 重点及难点	202
10.1.1 基本概念	202
10.1.2 基本要求	206
10.2 典型题解析	206
10.3 习题	241
第 11 章 拉普拉斯变换和网络函数	246
11.1 重点及难点	246
11.1.1 基本概念	246
11.1.2 基本要求	249
11.2 典型题解析	250
11.3 习题	270
第 12 章 电路方程的矩阵形式	273
12.1 重点及难点	273
12.1.1 基本概念	273
12.1.2 基本要求	278
12.2 典型题解析	278

12.3 习题	295
第 13 章 二端口网络	298
13.1 重点及难点	298
13.1.1 基本概念	298
13.1.2 基本要求	302
13.2 典型题解析	302
13.3 习题	317
第 14 章 非线性电路	319
14.1 重点及难点	319
14.1.1 基本概念	319
14.1.2 基本要求	324
14.2 典型题解析	324
14.3 习题	337
习题参考答案	339
附录 研究生入学电路试题选	349
1. 2000 年西北工业大学研究生入学考试电路基础试题	349
2. 2001 年华中理工大学(武汉)研究生入学考试电路基础试题	353
3. 2002 年西安交通大学研究生入学考试电路试题	354
4. 燕山大学 2003 年硕士研究生入学考试电路试题	356
参考文献	359

第 1 章 电路模型和电路定律

1.1 重点及难点

1.1.1 基本概念

1. 电路与电路模型

能完成某种功能的若干电工设备和器件连接成的集合体,称作电路,电路也称作电网络。

电路理论的研究对象不是实际电路,而是由一些理想化的电路元件组成的电路模型。理想化的电路元件是由实际电路元件中抽象出来的一些具有单一电磁性质的元件。只消耗电能的元件,称作电阻元件;只有磁效应并储存磁场能量的元件,称作电感元件;只有电场效应并储存电场能量的元件,称作电容元件;能把非电能转化为电能的元件,称作电源元件。将这些元件按一定方式连接起来,逼近实际电路的特性,便构成了实际电路的模型。电路模型简称作电路。

电阻元件、电感元件和电容元件都是二端元件,它们分别集总地代表实际电路中耗能作用、磁场作用和电场作用,每个元件中都有确定的电流,端子间都有确定的电压,这些元件称作集总参数元件。由集总参数元件构成的电路,称作集总参数电路。实际电路用集总参数电路来近似是有条件的,即实际电路的长度须远小于电路工作频率下电磁波的波长。

2. 电路的基本变量

电流 i 和电压 u 是分析电路的基本变量。在直流电路中,分别用大写字母 I 、 U 表示。

在一个复杂电路中,每个元件中的电流和电压的实际方向很难确定,有时电流和电压的实际方向是随时间不断变化的。因此,在电路分析中引入了电流和电压的参考方向(正方向)。电流和电压的参考方向是一个人为规定的计算方向,并约定电流和电压的实际方向与参考方向一致时为正值,相反则为负值。因此,在一定的参考方向下,电流和电压为代数量。根据电流和电压的参考方向和计算结果的正或负,便可确定电流和电压的实际方向。在一个元件上,若其电流与电压的参考方向是一致的,称作关联参考方向,如图 1.1(a)所示;若电流和电压的参考方向相反,则称作非关联参考方向,如图 1.1(b)所示。



图 1.1 关联和非关联参考方向

3. 功率和能量

根据电流和电压的定义,元件的电压和电流参考方向一致时,此元件吸收功率的表达式为

$$p = ui$$

这里, p 为代数量, $p > 0$, 表示该元件吸收功率; $p < 0$, 表示该元件发出功率。元件的电压和电流参考方向相反时, 此元件发出功率的表达式为

$$p = ui$$

$p > 0$, 表示该元件发出功率; $p < 0$ 表示该元件是吸收功率。

在 t_0 到 t 的时间段内, 图 1.1(a) 所示元件吸收的电能为

$$W = \int_0^t u(t)i(t)dt$$

4. 电路元件上的电流、电压关系

(1) 电阻元件。当电压和电流参考方向一致时, 线性电阻元件(图 1.2)的电压和电流符合欧姆定律, 即

$$u_R = Ri_R$$

或

$$i_R = Gu_R$$

电阻元件吸收的功率为

$$p_R = u_R i_R = Ri_R^2 = \frac{u_R^2}{R} \geq 0$$

故电阻元件是耗能元件、即时元件和无源元件。

(2) 电感元件。当电压与电流参考方向一致时, 线性电感元件(图 1.3)的电流、电压关系为

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

或

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t)dt$$

电感元件吸收功率为

$$p_L = u_L i_L$$

电感元件储存的磁场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li_L^2 \geq 0$$

故电感元件是动态元件、记忆元件、储能元件和无源元件。

(3) 电容元件。当电压与电流参考方向一致时, 线性电容元件(图 1.4)的电流、电压关系为

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

或

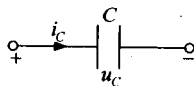


图 1.4 电容元件

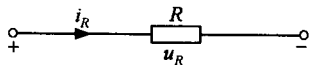


图 1.2 电阻元件

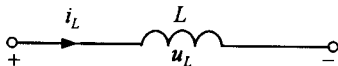


图 1.3 电感元件

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt$$

电容元件吸收功率为

$$P_C = u_C i_C$$

电容元件储存的电场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} C u_C^2 \geq 0$$

故电容元件是动态元件、记忆元件、储能元件和无源元件。

(4) 独立电源元件。独立电源元件包含电压源和电流源,是有源二端元件(图 1.5)。

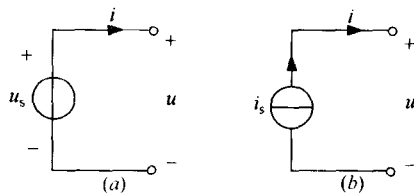


图 1.5 独立电源元件

电压源如图 1.5(a)所示,电压源的电压 u_s 是给定的时间函数,与通过电压源的电流 i 无关。因此,电压源的端电压 u 为

$$u = u_s$$

即电压源的端电压 u 是已知的;而电流 i 是未知的,它由外电路决定。

电压源发出的功率为

$$P = u_s i$$

电流源如图 1.5(b)所示,电流源的电流 i_s 是给定的时间函数,与其端电压 u 无关。因此,电流源的输出电流 i 为

$$i = i_s$$

即电流源的输出电流 i 是已知的;而其端电压 u 是未知的,它由外电路决定。

电流源发出的功率为

$$P = u i_s$$

独立电源元件是有源元件,对电路起激励作用,是电路中产生电压和电流的源泉。

(5) 受控电源元件。在电子电路中有这样一类元件,它们有有源元件的一些特性,但其电压或电流不是给定时间的函数,而是受电路中某个电压或电流的控制,称作受控源或非独立源。受控源分 4 种类型,它们分别为:电压控制电压源 (VCVS), $u_2 = \mu u_1$; 电压控制电流源 (VCCS), $i_2 = g_m u_1$; 电流控制电压源 (CCVS), $u_2 = r_m i_1$; 电流控制电流源 (CCCS), $i_2 = \beta i_1$ 。其中 u_1 、 i_1 为控制量, u_2 、 i_2 为被控量, μ 、 g_m 、 r_m 、 β 为控制系数,分别称作转移电压比、转移电导、转移电阻、转移电流比。当 μ 、 g_m 、 r_m 、 β 均为常数时,称作线性受控源。

受控源与独立源不同,受控源对电路不起激励作用,只是反映电路中一处电压或电流对另一处电压或电流的控制作用。

5. 基尔霍夫定律

在分析集总参数电路时,除了元件本身特性(元件约束)之外。还应掌握它们之间的

互连接给元件电压和电流带来的约束——电路的拓扑约束。基尔霍夫定律表达了这类约束关系。

(1) 基尔霍夫电流定律(KCL)。表述如下:在集总参数电路中,任一瞬间流出一个节点的支路电流的代数和恒等于零。即

$$\sum i = 0$$

方程 $\sum i = 0$ 是按电流参考方向列写的,电流参考方向离开节点,前面取“+”号;电流的参考方向指向节点,前面取“-”号。

基尔霍夫电流定律不仅适用一个节点,也适用于一个闭合曲面。

(2) 基尔霍夫电压定律(KVL)。表述如下:在集总参数电路中,任一瞬间沿着一个回路所有支路电压的代数和恒等于零。即

$$\sum u = 0$$

列写 $\sum u = 0$ 方程式时,要规定回路的绕行方向,支路电压的参考方向与回路绕行方向一致时,前面取“+”号;相反前面取“-”号。

1.1.2 基本要求

- (1) 深刻理解和掌握规定电流和电压参考方向的必要性。
- (2) 熟练掌握一个元件上的电压和电流的参考方向与计算该元件吸收或发出功率表达式的——对应关系。
- (3) 熟练掌握电阻元件、电感元件和电容元件的特性方程(VCR)与元件上电压和电流参考方向的——对应关系。
- (4) 深刻理解独立电源的概念,掌握其特性,理解受控源的概念,掌握受控源的特性。
- (5) 熟练掌握基尔霍夫电流定律和电压定律。

1.2 典型题解析

【例 1.1】 电路如图 1.6 所示,求电路中各元件的电流和功率。

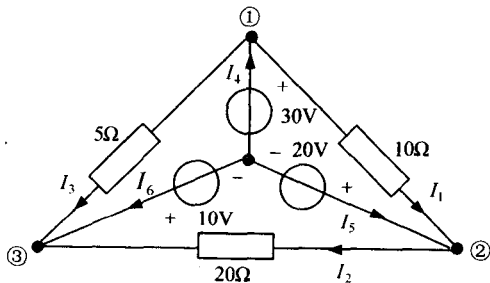


图 1.6 例 1.1 图

【解】 在电路中标出各支路电流的参考方向。根据 KVL,有

$$U_{12} = U_{14} - U_{24} = 30 - 20 = 10V$$

$$U_{23} = U_{24} - U_{34} = 20 - 10 = 10V$$

$$U_{13} = U_{14} - U_{34} = 30 - 10 = 20\text{V}$$

根据欧姆定律,三个电阻元件中的电流分别为

$$I_1 = \frac{U_{12}}{10} = \frac{10}{10} = 1\text{A}$$

$$I_2 = \frac{U_{23}}{20} = \frac{10}{20} = 0.5\text{A}$$

$$I_3 = \frac{U_{13}}{5} = \frac{20}{5} = 4\text{A}$$

对节点①、②、③列 KCL 方程,可得三个电压源中的电流为

$$I_4 = I_1 + I_3 = 1 + 4 = 5\text{A}, I_5 = I_2 - I_1 = 0.5 - 1 = -0.5\text{A}$$

$$I_6 = -I_2 - I_3 = -0.5 - 4 = -4.5\text{A}$$

各电阻元件吸收的功率为

$$P_1 = 10I_1^2 = 10 \times 1^2 = 10\text{W}, P_2 = 20I_2^2 = 20 \times (0.5)^2 = 5\text{W}$$

$$P_3 = 5I_3^2 = 5 \times 4^2 = 80\text{W}$$

各电压源发出的功率为

$$P_4 = 30I_4 = 30 \times 5 = 150\text{W}, P_5 = 20I_5 = 20 \times (-0.5) = -10\text{W}$$

$$P_6 = 10I_6 = 10 \times (-4.5) = -45\text{W}$$

【例 1.2】 电路如图 1.7 所示,求各元件的功率。

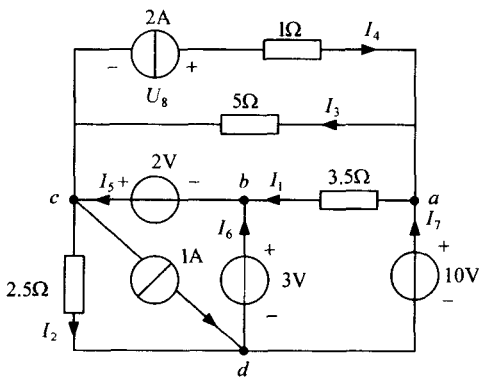


图 1.7 例 1.2 图

【解】 在电路图中标出电阻元件和电压源中电流的参考方向,标出电流源端电压的参考方向,如图所示。根据 KVL,有

$$U_{ab} = U_{ad} - U_{bd} = 10 - 3 = 7\text{V}, U_{cd} = U_{cb} + U_{bd} = 2 + 3 = 5\text{V} = U_9$$

$$U_{ac} = U_{ad} - U_{bd} - U_{cb} = 10 - 3 - 2 = 5\text{V}, U_8 = 1 \times I_4 + U_{ac} = 2 + 5 = 7\text{V}$$

由欧姆定律,得

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{3.5} = \frac{7}{3.5} = 2\text{A}, I_2 = \frac{U_{cd}}{2.5} = \frac{5}{2.5} = 2\text{A}, I_3 = \frac{U_{ac}}{5} = \frac{5}{5} = 1\text{A}$$

根据 KCL,对节点 c 有

$$I_5 = 1 + 2 + I_2 - I_3 = 1 + 2 + 2 - 1 = 4\text{A}$$

对节点 b 有

$$I_6 = I_5 - I_1 = 4 - 2 = 2\text{A}$$

对节点 a 有

$$I_7 = I_1 + I_3 - 2 = 2 + 1 - 2 = 1\text{A}$$

各电阻元件吸收的功率为

$$P_1 = 3.5I_1^2 = 3.5 \times 2^2 = 14\text{W}, P_2 = 2.5I_2^2 = 2.5 \times 2^2 = 10\text{W}$$

$$P_3 = 5I_3^2 = 5 \times 1^2 = 5\text{W}, P_4 = 1 \times I_4^2 = 1 \times 2^2 = 4\text{W}$$

各电压源吸收的功率为

$$P_5 = -2I_5 = -2 \times 4 = -8\text{W}, P_6 = 3I_6 = -3 \times 2 = -6\text{W}$$

$$P_7 = -10I_7 = -10 \times 1 = -10\text{W}$$

各电流源吸收的功率为

$$P_8 = -2U_8 = -2 \times 7 = -14\text{W}, P_9 = 1 \times U_9 = 1 \times 5 = 5\text{W}$$

【例 1.3】 图 1.8 所示电路由一个电阻 R 、一个电感 L 和一个电容 C 组成。电流 $i(t) = 10e^{-t} - 20e^{-2t}\text{A}$, $t \geq 0$; 电压 $u(t) = -5e^{-t} + 20e^{-2t}\text{V}$, $t \geq 0$ 。若在 $t = 0$ 时, 电路中的总储能为 25J , 求 R 、 L 、 C 的值。

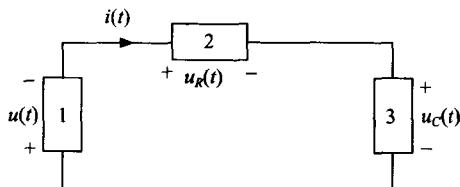


图 1.8 例 1.3 图

【解】 图中元件 1 的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 的参考方向是关联的, 并且电压 $u(t)$ 与电流的变化率 $di(t)/dt$ 成正比, 因此元件 1 是电感元件, 则元件 1 的电感 L 为

$$L = \frac{u(t)}{\frac{di(t)}{dt}} = \frac{-5e^{-t} + 20e^{-2t}}{-10e^{-t} + 40e^{-2t}} = 0.5\text{H}$$

设元件 2 和 3 分别为电阻元件和电容元件, 并规定两元件的电压参考方向与电流 $i(t)$ 的参考方向一致, 如图示。则根据 KVL, 有

$$-u(t) = u_R(t) + u_C(t) = Ri(t) + u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

即

$$5e^{-t} - 20e^{-2t} = R(10e^{-t} - 20e^{-2t}) + u_C(0) + \frac{1}{C}(-10e^{-t} + 10e^{-2t})$$

由于在 $t = 0$ 时, 电感和电容中的总的能量储能为 25J , 即

$$W_L(0) + W_C(0) = 25\text{J}$$

而

$$W_L(0) = \frac{1}{2} Li^2(0) = \frac{1}{2} \times 0.5 \times (-10)^2 = 25\text{J}$$

则

$$W_C(0) = \frac{1}{2} C u_C^2(0) = 0, u_C(0) = 0$$

所以有

$$5e^{-t} - 20e^{-2t} = 10Re^{-t} - 20Re^{-2t} - \frac{10}{C}e^{-t} + \frac{10}{C}e^{-2t}$$

比较上式两边同类项系数,得

$$\begin{cases} 5 = 10R - \frac{10}{C} \\ -20 = -20R + \frac{10}{C} \end{cases}$$

解得

$$R = 1.5\Omega, C = 1F$$

【例 1.4】 在图 1.9 所示的电路中, $I_5 = 1A$, $I_6 = 2A$, 求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 。

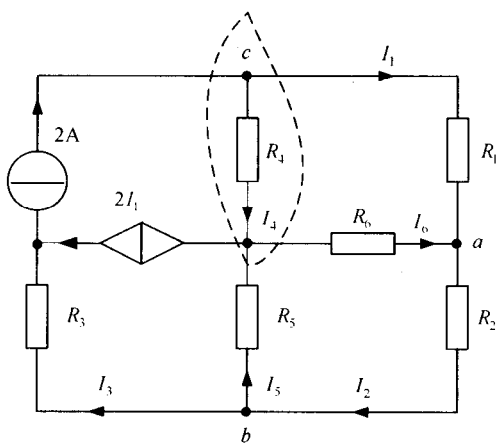


图 1.9 例 1.4 图

【解】 规定出各电阻元件中的电流参考方向,对图中虚线围成的封闭面列 KCL 方程,有

$$I_1 + 2I_1 - I_5 + I_6 - 2 = 0$$

$$I_1 = \frac{2 + I_5 - I_6}{3} = \frac{1}{3}A$$

根据 KCL,对节点 a 有

$$I_2 = I_1 + I_6 = \frac{1}{3} + 2 = \frac{7}{3}A$$

对节点 b 有

$$I_3 = I_2 - I_5 = \frac{7}{3} - 1 = \frac{4}{3}A$$

对节点 c 有

$$I_4 = 2 - I_1 = 2 - \frac{1}{3} = \frac{5}{3}A$$

【例 1.5】 求图 1.10 所示电路中的 I_X 和 U_X 。

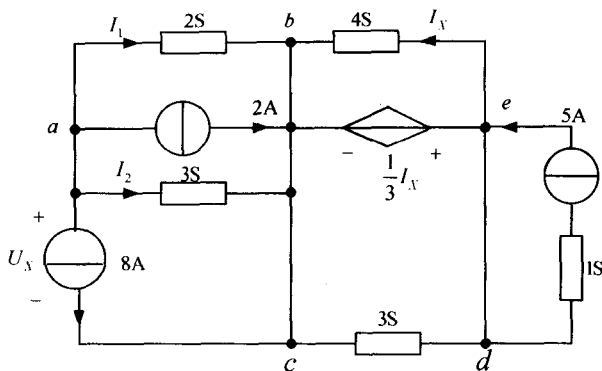


图 1.10 例 1.5 图

【解】 在图 1.10 中流过电流 I_X 的支路端电压为 $\frac{1}{3}I_X$, 则有

$$I_X = 4 \times \frac{1}{3}I_X, (1 - \frac{4}{3})I_X = 0$$

$$I_X = 0$$

对节点 a 列 KCL 方程, 有

$$I_1 + I_2 + 2 + 8 = 0, I_1 = 2U_X \quad I_2 = 3U_X$$

则

$$5U_X = -10, U_X = -2V$$

【例 1.6】 在图 1.11 所示电路中, $I_1 = 1A$, 求电压源的电压 U_s 。

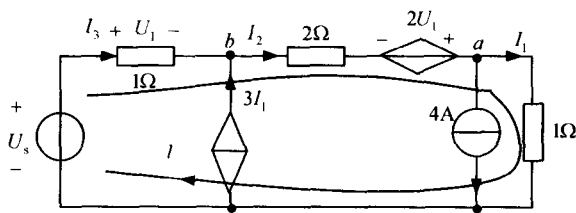


图 1.11 例 1.6 图

【解】 电流 I_2, I_3 的参考方向如图中所示。对节点 a 列 KCL 方程, 有

$$I_2 = I_1 + 4 = 1 + 4 = 5A$$

对节点 b 列 KCL 方程, 有

$$I_3 = I_2 - 3I_1 = 5 - 3 \times 1 = 2A$$

电压 U_1 为

$$U_1 = 1 \times I_3 = 1 \times 2 = 2V$$

对图中回路 l 列 KVL 方程, 有

$$U_s = U_1 + 2I_2 - 2U_1 + 1I_1 = 2 + 2 \times 5 - 2 \times 2 + 1 \times 1 = 9V$$

【例 1.7】 在图 1.12 所示电路中, $R_2 = \frac{2}{7}\Omega$, 其端电压为 $U_2 = 1V$, 求电阻 R_1 的值。

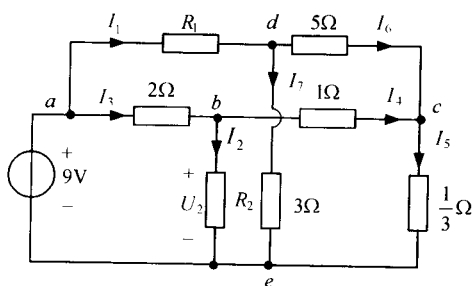


图 1.12 例 1.7 图

〔解〕 由欧姆定律,有

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{1}{\frac{2}{7}} = 3.5\text{A}$$

由 KVL,有

$$U_{ab} = U_{ae} - U_{be} = 9 - 1 = 8\text{V}$$

则

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{2} = \frac{8}{2} = 4\text{A}$$

由 KCL,对节点 b 有

$$I_4 = I_3 - I_2 = 4 - 3.5 = 0.5\text{A}$$

由 KVL,有

$$U_{ce} = U_2 - U_{bc} = 1 - 1 \times 0.5 = 0.5\text{V}$$

则

$$I_5 = \frac{U_{ce}}{\frac{1}{3}} = \frac{0.5}{\frac{1}{3}} = 1.5\text{A}$$

由 KCL,对节点 c 有

$$I_6 = I_5 - I_4 = 1.5 - 0.5 = 1\text{A}$$

由 KVL,有

$$U_{de} = U_{dc} + U_{ce} = 5I_6 + U_{ce} = 5 + 0.5 = 5.5\text{V}$$

则

$$I_7 = \frac{U_{de}}{3} = \frac{5.5}{3} = \frac{11}{6}\text{A}$$

由 KCL,对节点 d 有

$$I_1 = I_6 + I_7 = 1 + \frac{11}{6} = \frac{17}{6}\text{A}$$

由 KVL,有

$$U_{ad} = U_{ae} - U_{de} = 9 - 5.5 = 3.5\text{V}$$

则根据欧姆定律,有