

Learning Guide and Exercises for Principles of Electric Circuits

# 电路原理学习指导与习题集

徐福媛 刘秀成 朱桂萍 编著

Xu Fuyuan Liu Xiucheng Zhu Guiping



清华大学出版社

 Springer

Learning Guide and Exercises for Principles of Electric Circuits

# 电路原理学习指导与习题集

徐福媛 刘秀成 朱桂萍 编著

Xu Fuyuan Liu Xiucheng Zhu Guiping



清华大学出版社  
北京

 Springer

## 内 容 简 介

本书是电路原理课程的教学参考书。其内容涵盖了电路原理课程的主要内容,全书共分17章,包括电路元件与电路定律、电路的等效变换、线性电阻电路的一般分析方法、电路定理及应用、正弦稳态电路分析、有互感的电路、电路中的谐振、三相电路、周期性激励下电路的稳态响应、一阶电路、二阶电路、拉普拉斯变换、二端口网络、网络图论基础、状态变量法、非线性电路和均匀传输线。附录为OrCAD/PSpice电路仿真分析简介。每章均结合重点作了内容小结,给出了相应的例题及详细的解答,并指出了应注意的问题。章后配有大量习题,并于书末附参考答案。

本书可供电类专业教师在电路原理课程教学中使用,对学习电路原理课程的学生会有很大帮助,也可作为电类专业研究生考试复习用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路原理学习指导与习题集 / 徐福媛, 刘秀成, 朱桂萍编著. —北京: 清华大学出版社, 2005.8

ISBN 7-302-10903-6

I. 电… II. ①徐… ②刘… ③朱… III. 电路理论-高等学校-教学参考资料 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 039744 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦  
http://www.tup.com.cn 邮 编: 100084  
社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 王一玲

特邀编辑: 陈 力

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市新茂装订有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 25 字数: 539 千字

版 次: 2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-10903-6/TM·61

印 数: 1~3000

定 价: 33.00 元

# 前 言

本书是电路原理课程的教学参考书，可供电类专业师生选用，也可作为电类专业研究生考试复习用书。其内容包括了电路原理课程的主要内容，读者可根据不同的教学计划和要求选择所需的内容。

本书的基本内容分为 17 章，包括电路元件与电路定律、电路的等效变换、线性电阻电路的一般分析方法、电路定理及应用、正弦稳态电路分析、有互感的电路、电路中的谐振、三相电路、周期性激励下电路的稳态响应、一阶电路、二阶电路、拉普拉斯变换、二端口网络、网络图论基础、状态变量法、非线性电路和均匀传输线。附录为 OrCAD/PSpice 电路仿真分析简介。各章及附录中均配有习题，书末附有习题的参考答案。

各章均按照教学的先后顺序，结合教学内容给出内容要点，配合例题分析，便于学生自学和复习。各章最后均给出了大量习题。题目类型既有基本习题，也有难度较大的综合性练习。读者可根据需要选用。附录中结合仿真例题简单介绍了用 OrCAD/PSpice 进行电路仿真分析的方法。目的是使学生通过仿真练习加深对电路问题的理解，拓宽分析的手段，初步掌握 OrCAD/PSpice 的使用，并为以后解决实际问题打下一定的基础。

本书第 1, 2, 3, 4, 5 章及附录由刘秀成编写；第 6, 7, 8, 9 章及附录中的习题由朱桂萍编写；第 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 章由徐福媛编写。由徐福媛和刘秀成对全书进行了统编。王树民教授审阅了全部书稿。

本书各章后面所附习题大部分取自原清华大学校内讲义《电路原理习题集》，包含了作者的同事们长期从事教学工作所积累的内容。在本书编写过程中作者得到了陆文娟教授的悉心指导与帮助。在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者不吝指正。

编著者

2005 年 6 月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 电路元件与电路定律 .....      | 1   |
| 一、电路的基本概念和基本电路元件 .....     | 1   |
| 二、基尔霍夫定律 .....             | 7   |
| 习题 .....                   | 12  |
| 第 2 章 简单电阻电路的分析方法 .....    | 20  |
| 一、二端网络的等效电阻 .....          | 20  |
| 二、电源的等效变换 .....            | 25  |
| 三、电阻的 Y- $\Delta$ 变换 ..... | 30  |
| 习题 .....                   | 33  |
| 第 3 章 线性电阻电路的一般分析方法 .....  | 41  |
| 一、支路电流法 .....              | 41  |
| 二、回路电流法 .....              | 42  |
| 三、节点电压法 .....              | 46  |
| 四、支路法、回路法与节点法的比较 .....     | 54  |
| 五、含运算放大器的电阻电路分析 .....      | 55  |
| 习题 .....                   | 58  |
| 第 4 章 电路的若干定理 .....        | 71  |
| 一、叠加定理 .....               | 71  |
| 二、替代定理 .....               | 75  |
| 三、戴维南定理和诺顿定理 .....         | 76  |
| 四、特勒根定理 .....              | 81  |
| 五、互易定理 .....               | 83  |
| 六、电路定理的综合应用 .....          | 85  |
| 习题 .....                   | 89  |
| 第 5 章 正弦电流电路稳态分析 .....     | 102 |
| 一、正弦量的相量表示 .....           | 102 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 二、正弦稳态电路的相量模型 .....              | 103        |
| 三、正弦稳态电路的相量分析 .....              | 107        |
| 四、功率分析 .....                     | 111        |
| 五、负载功率因数的提高 .....                | 117        |
| 习题 .....                         | 119        |
| <b>第 6 章 有互感的电路</b> .....        | <b>130</b> |
| 一、同名端 .....                      | 130        |
| 二、互感电压的确定 .....                  | 131        |
| 三、互感电路的分析 .....                  | 133        |
| 四、理想变压器 .....                    | 139        |
| 习题 .....                         | 142        |
| <b>第 7 章 电路中的谐振</b> .....        | <b>148</b> |
| 一、谐振频率的确定 .....                  | 148        |
| 二、处于谐振状态下的电路的分析 .....            | 150        |
| 习题 .....                         | 155        |
| <b>第 8 章 三相电路</b> .....          | <b>159</b> |
| 一、对称三相电路中各相量之间的关系 .....          | 159        |
| 二、对称三相电路的分析 .....                | 161        |
| 三、三相电路功率的计算与有功功率的测量方法 .....      | 163        |
| 四、不对称三相电路的分析 .....               | 167        |
| 习题 .....                         | 168        |
| <b>第 9 章 周期性激励下电路的稳态响应</b> ..... | <b>174</b> |
| 一、周期性信号的谐波分析 .....               | 174        |
| 二、周期性时间函数的有效值和平均功率 .....         | 176        |
| 三、周期性激励下电路的稳态响应 .....            | 177        |
| 习题 .....                         | 182        |
| <b>第 10 章 一阶电路</b> .....         | <b>188</b> |
| 一、电路初始值的确定 .....                 | 188        |
| 二、一阶电路的零输入响应、零状态响应和全响应 .....     | 190        |
| 三、三要素法 .....                     | 197        |

---

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 四、一阶电路的冲激响应 .....          | 202        |
| 五、卷积积分 .....               | 207        |
| 习题 .....                   | 210        |
| <b>第 11 章 二阶电路</b> .....   | <b>222</b> |
| 一、二阶电路的零输入响应 .....         | 222        |
| 二、二阶电路的零状态响应和全响应 .....     | 225        |
| 三、二阶电路的冲激响应 .....          | 229        |
| 习题 .....                   | 230        |
| <b>第 12 章 拉普拉斯变换</b> ..... | <b>235</b> |
| 一、拉普拉斯变换的定义与性质 .....       | 235        |
| 二、拉普拉斯反变换 .....            | 237        |
| 三、复频域电路定律和复频域模型 .....      | 240        |
| 四、拉普拉斯变换法分析电路 .....        | 241        |
| 五、网络函数 .....               | 247        |
| 习题 .....                   | 251        |
| <b>第 13 章 二端口网络</b> .....  | <b>258</b> |
| 一、二端口网络参数和方程 .....         | 258        |
| 二、二端口网络的等效电路 .....         | 260        |
| 三、二端口网络的联接 .....           | 261        |
| 四、二端口网络的转移函数（传递函数） .....   | 264        |
| 五、二端口网络的分析 .....           | 265        |
| 习题 .....                   | 270        |
| <b>第 14 章 网络图论基础</b> ..... | <b>277</b> |
| 一、图的一些基本概念 .....           | 277        |
| 二、图的矩阵表示 .....             | 278        |
| 三、基尔霍夫定律的矩阵形式 .....        | 280        |
| 四、节点方程的矩阵形式 .....          | 281        |
| 习题 .....                   | 284        |
| <b>第 15 章 状态变量法</b> .....  | <b>290</b> |
| 一、状态方程的建立 .....            | 290        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 二、状态方程的求解 .....                      | 296        |
| 习题 .....                             | 299        |
| <b>第 16 章 均匀传输线</b> .....            | <b>304</b> |
| 一、均匀传输线的正弦稳态解 .....                  | 304        |
| 二、均匀传输线正弦稳态解的双曲函数表达式 .....           | 307        |
| 三、不同工作状态下的无损传输线 .....                | 308        |
| 四、无损传输线在激励为恒定电压时的波过程 .....           | 312        |
| 习题 .....                             | 319        |
| <b>第 17 章 非线性电路简介</b> .....          | <b>322</b> |
| 一、非线性元件 .....                        | 322        |
| 二、非线性电阻电路分析 .....                    | 324        |
| 三、非线性动态电路状态方程的列写 .....               | 330        |
| 习题 .....                             | 331        |
| <b>附录 OrCAD/PSpice 电路仿真简介</b> .....  | <b>336</b> |
| A.1 OrCAD/PSpice 9.0 电路仿真的一般步骤 ..... | 336        |
| A.2 图形显示和分析模块 Probe 简介 .....         | 344        |
| A.3 电路仿真实例 .....                     | 349        |
| 仿真习题 .....                           | 359        |
| 习题参考答案 .....                         | 363        |



# 第1章 电路元件与电路定律

## 本章重点

1. 电压、电流和功率等物理量的意义；电压和电流的参考方向。
2. 基本电路元件。
3. 基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）。

## 学习指导

电路原理所讨论的电路是将实际电路元件进行模型化处理后的电路模型。电路模型由为数不多的理想电路元件构成，通常用电压、电流关系描述电路元件，称为元件特性。描述元件之间连接关系的是基尔霍夫电压定律和电流定律。元件特性和基尔霍夫两个定律构成了电路分析的基础。电路分析就是在电路结构、元件特性已知的条件下，分析电路中的物理现象、电路的状态和性能，定量计算电路中响应与激励之间的关系等。

## 一、电路的基本概念和基本电路元件

### 1. 实际电路

实际电路是电流可在其中流通的由导体连接的电器件的组合。组成实际电路的器件种类繁多。

### 2. 电路模型

电路模型与实际电路有区别，它由为数不多的理想电路元件组成，可以反映实际电路的电磁性质。理想电路元件包括电阻、电感、电容、电压源、电流源、受控源、耦合电感和理想变压器等。

电路理论中的电路一般是指电路模型。

### 3. 基本物理量

电压、电流是电路分析的基本物理量。对于储能元件电感和电容，有时也用磁链和电荷来描述。功率和能量也是电路中的重要物理量。

为了用数学表达式来描述电路元件特性、电路方程，首先要指定电压、电流的参考方向。对一个二端元件或支路，电压、电流的参考方向有两种选择，即关联参考方向和非关

联参考方向,如图 1-1 所示。

#### 4. 基本的无源元件

最基本的理想电路元件是线性时不变二端电阻、电感和电容,这些电路元件符号及电压、电流参考方向如图 1-2 所示。



图 1-1

(a)  $u, i$  为关联参考方向; (b)  $u, i$  为非关联参考方向

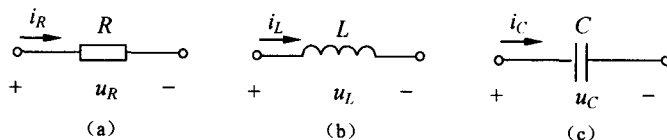


图 1-2

(a) 电阻元件; (b) 电感元件; (c) 电容元件

图 1-2 中,各元件的电压、电流为关联参考方向。在此参考方向下,电压与电流关系(时域)、功率和能量表示如下。

##### (1) 电阻元件

电压、电流特性为

$$u_R = Ri_R \quad \text{或} \quad i_R = Gu_R$$

吸收的功率为

$$p_R = u_R i_R = Ri_R^2 = Gu_R^2$$

从 $-\infty$ 到 $t$ 时刻消耗的能量为

$$W_R = \int_{-\infty}^t u_R i_R dt$$

##### (2) 电感元件

电压、电流特性为

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{或} \quad i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt$$

吸收的功率为

$$p_L = u_L i_L$$

储存的磁场能量为

$$W_L = \int_{-\infty}^t u_L i_L dt = \frac{1}{2} Li_L^2$$

### (3) 电容元件

电压、电流特性为

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad \text{或} \quad u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt$$

吸收的功率为

$$p_C = u_C i_C$$

储存的电场能量为

$$W_C = \int_{-\infty}^t u_C i_C dt = \frac{1}{2} C u_C^2$$

## 5. 独立电源元件

独立电源有理想电压源和理想电流源，它们是电路中的激励，其电路符号如图 1-3 所示。

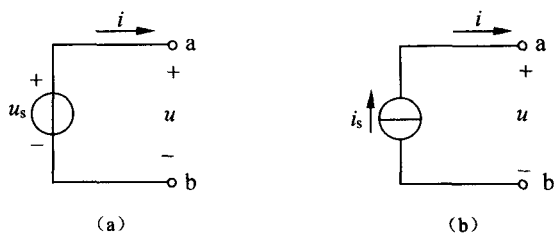


图 1-3

(a) 理想电压源；(b) 理想电流源

理想电压源的电压、电流特性： $u_s$  为给定函数， $i$  由外电路决定。对于直流电压源， $u_s$  为恒定值。

理想电流源的电压、电流特性： $i_s$  为给定函数， $u$  由外电路决定。对于直流电流源， $i_s$  为恒定值。

## 6. 基本的受控源元件

基本的受控源元件按控制量和受控制量的不同可分为四种，即电压控制的电压源 (VCVS)、电流控制的电压源 (CCVS)、电压控制的电流源 (VCCS) 和电流控制的电流源 (CCCS)。它们的电路符号分别如图 1-4 (a)、(b)、(c) 和 (d) 所示。

它们的电压、电流关系为

$$\text{VCVS: } \begin{cases} i_1 = 0 \\ u_2 = \mu u_1 \end{cases}, \quad u_1, i_2 \text{ 由外电路决定}$$

$$\text{CCVS: } \begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = r i_1 \end{cases}, \quad i_1, i_2 \text{ 由外电路决定}$$

$$\text{VCCS: } \begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = g u_1 \end{cases}, u_1, u_2 \text{ 由外电路决定}$$

$$\text{CCCS: } \begin{cases} u_1 = 0 \\ i_2 = \beta i_1 \end{cases}, i_1, u_2 \text{ 由外电路决定}$$

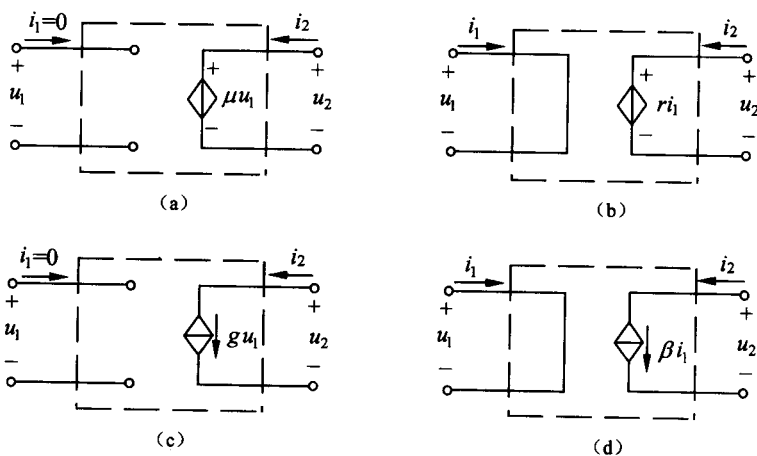


图 1-4

后续章节还会引入其他理想电路元件。

**例 1-1** 电路如图 1-5 (a) 所示。其中电压源  $u_s(t)$  如图 1-5 (b) 所示。已知电感  $L=20\text{mH}$ ，且  $i_L(0)=0$ 。试求：(1) 电感中的电流  $i_L(t)$ ，并画出其波形；(2)  $t=1\text{s}$  时电感中的储能。

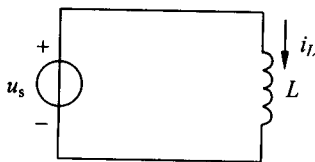


图 1-5 (a)

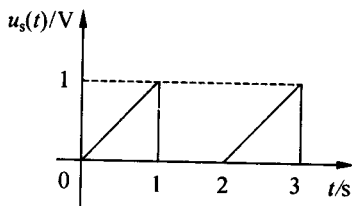


图 1-5 (b)

**解** (1) 电压源  $u_s(t)$  的表达式为

$$u_s(t) = \begin{cases} 0\text{V}, & t < 0 \\ t\text{V}, & 0 < t < 1\text{s} \\ 0\text{V}, & 1\text{s} < t < 2\text{s} \\ t-2\text{V}, & 2\text{s} < t < 3\text{s} \\ 0\text{V}, & t > 3\text{s} \end{cases}$$

根据图 1-5 (a) 及元件特性，有

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_s dt = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_s dt = 50 \int_0^t u_s dt$$

计算得

$$i_L(t) = \begin{cases} 0\text{A}, & t \leq 0 \\ 25t^2\text{A}, & 0 < t \leq 1\text{s} \\ 25\text{A}, & 1\text{s} < t \leq 2\text{s} \\ 25 + 25(t-2)^2\text{A}, & 2\text{s} < t \leq 3\text{s} \\ 50\text{A}, & t > 3\text{s} \end{cases}$$

电感电流的波形如图 1-5 (c) 所示。

(2)  $t=1\text{s}$  时电感中的储能为

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2(t) = \frac{1}{2} \times 0.02 \times 25^2 = 6.25(\text{J})$$

**思考：**若电感串联一电阻  $R$ ，其他条件不变，电感电流的变化会有何不同？

**例 1-2** 图 1-6(a) 所示电路中，已知电阻  $R=2\Omega$ ，电容  $C=0.5\text{F}$ ，电压源电压的波形如题图 1-6 (b) 所示。试分别画出电流  $i$ ， $i_C$  和  $i_R$  的波形。

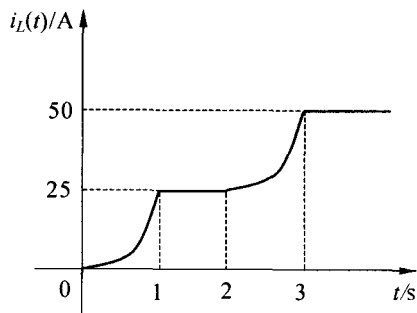


图 1-5 (c)

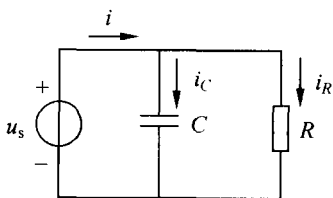


图 1-6 (a)

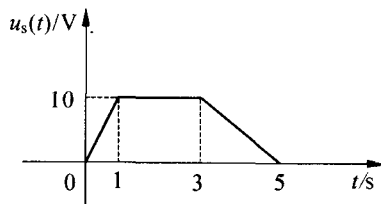


图 1-6 (b)

**解** 电压源  $u_s(t)$  表达式为

$$u_s(t) = \begin{cases} 0\text{V}, & t \leq 0 \\ 10t\text{V}, & 0 < t \leq 1\text{s} \\ 10\text{V}, & 1\text{s} < t \leq 3\text{s} \\ -5(t-5)\text{V}, & 3\text{s} < t \leq 5\text{s} \\ 0\text{V}, & t > 5\text{s} \end{cases}$$

根据电阻的元件特性有

$$i_R = \frac{u_s}{R} = \frac{u_s}{2} = \begin{cases} 0A, & t \leq 0 \\ 5tA, & 0 < t \leq 1s \\ 5A, & 1s < t \leq 3s \\ -2.5(t-5)A, & 3s < t \leq 5s \\ 0A, & t > 5s \end{cases}$$

根据电容的元件特性有

$$i_C = C \frac{du_s}{dt} = 0.5 \frac{du_s}{dt} = \begin{cases} 0A, & t < 0 \\ 5A, & 0 < t < 1s \\ 0A, & 1s < t < 3s \\ -2.5A, & 3s < t < 5s \\ 0A, & t > 5s \end{cases}$$

总电流为

$$i = i_R + i_C = \begin{cases} 0A, & t \leq 0 \\ 5t + 5A, & 0 < t < 1s \\ 5A, & 1s < t < 3s \\ -2.5t + 10A, & 3s < t < 5s \\ 0A, & t > 5s \end{cases}$$

$i$ ,  $i_C$  和  $i_R$  的波形如图 1-6 (c) 所示。

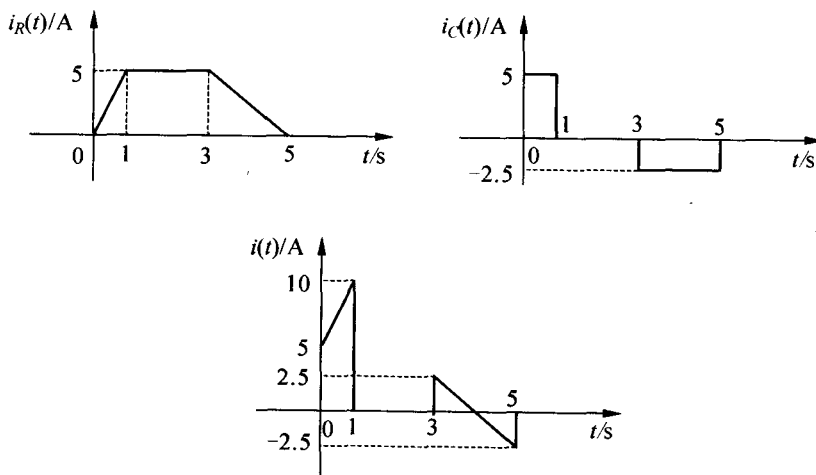


图 1-6 (c)

## 二、基尔霍夫定律

基尔霍夫两个定律是描述集总参数电路拓扑关系的基本定律。

基尔霍夫电流定律 (KCL): 在任何集总参数电路中, 在任一时刻, 流出(或流入)任一节点(或闭合面)的各支路电流的代数和为零, 即

$$\sum i = 0$$

可取流出节点的电流为正, 流入节点的电流为负; 或反之。

基尔霍夫电压定律 (KVL): 在任何集总参数电路中, 在任一时刻, 沿任一闭合路径, 各支路电压的代数和为零, 即

$$\sum u = 0$$

可取与闭合路径绕行方向一致的电压为正, 与闭合路径绕行方向相反的电压为负; 或反之。

**例 1-3** 试写出图 1-7 所示复合支路电压  $u$  与电流  $i$  之间的关系。

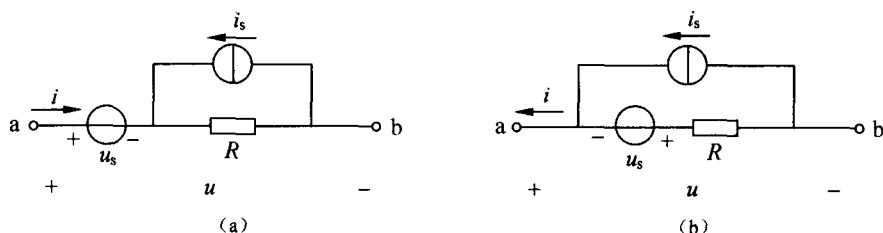


图 1-7

**解** 复合支路的电压、电流关系可根据元件特性及 KCL、KVL 写出。

对图 1-7 (a) 有

$$u = u_s + R(i + i_s)$$

对图 1-7 (b) 有

$$u = -u_s + R(-i + i_s)$$

**例 1-4** 电路如图 1-8 (a) 所示。求电流  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  和电压  $U_1$ ,  $U_2$ 。

**解** 选择三个回路的参考方向如图 1-8 (b) 所示。

电流  $I_1$  可由理想电流源特性得到, 即

$$I_1 = 5(\text{A})$$

电流  $I_2$  可对回路 3 列写 KVL 方程得

$$(2+3)I_2 + 10 = 0$$

解得

$$I_2 = -2(\text{A})$$

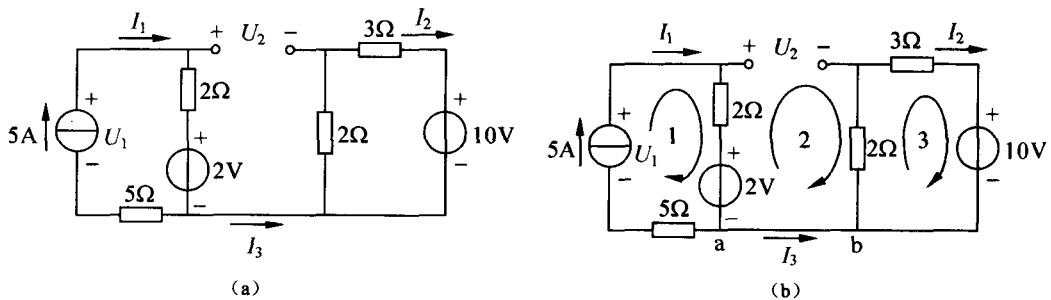


图 1-8

电流  $I_3$  可通过作一穿过  $I_3$  所在支路的闭合面得到。因该闭合面只有这一个支路穿过，根据 KCL 有

$$I_3 = 0$$

电压  $U_1$  可对回路 1 应用 KVL 得

$$U_1 = 2I_1 + 2 + 5I_1 = 7I_1 + 2 = 7 \times 5 + 2 = 37(\text{V})$$

电压  $U_2$  可对回路 2 应用 KVL 得

$$U_2 = 2I_1 + 2 - 2I_2 = 2 \times 5 + 2 - 2 \times (-2) = 16(\text{V})$$

讨论：电流  $I_3$  也可对节点 a 或 b 应用 KCL 得到。电压  $U_2$  也可通过其他的回路得到。但一般不选含电流源支路的回路，除非电流源两端的电压已经求出。

例 1-5 电路如图 1-9 (a) 所示。求：(1) 电流  $I_1$ ,  $I_2$  和电压  $U$ ；(2) 求各支路吸收或发出的功率；(3) 验证电路的功率平衡关系。

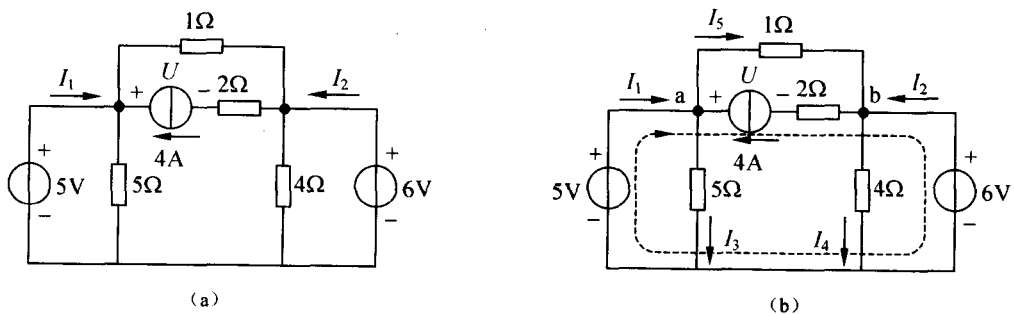


图 1-9

解 此题可根据 KCL、KVL 及元件特性，用简单的递推方法而得到所求结果。各电阻支路的电流参考方向标于图 1-9 (b) 中。

(1) 因为电压源中的电流由外电路决定，所以为求  $I_1$  和  $I_2$ ，可先求  $I_3$ ,  $I_4$  和  $I_5$ 。 $5\Omega$  电阻支路电压为电压源电压  $5\text{V}$ ，由欧姆定律有



$$I_3 = \frac{5}{5} = 1(\text{A})$$

同理有

$$I_4 = \frac{6}{4} = 1.5(\text{A}), \quad I_5 = \frac{5-6}{1} = -1(\text{A})$$

对节点 a 应用 KCL, 得

$$-I_1 + I_3 + I_5 - 4 = 0$$

所以

$$I_1 = -4 + I_3 + I_5 = -4 + 1 + (-1) = -4(\text{A})$$

对节点 b 应用 KCL, 得

$$-I_2 + I_4 - I_5 + 4 = 0$$

所以

$$I_2 = 4 + I_4 - I_5 = 4 + 1.5 - (-1) = 6.5(\text{A})$$

电流源两端的电压同样由外电路决定。可选图 1-9 (b) 中虚线所示回路, 得

$$U = 5 - 6 + 2 \times 4 = 7(\text{V})$$

当然, 求电压  $U$  可有多条路径可供选择。

(2) 各元件吸收或发出的功率如下:

5V 电压源发出的功率

$$P_{U1} = 5 \times (-4) = -20(\text{W})$$

6V 电压源发出的功率

$$P_{U2} = 6 \times 6.5 = 39(\text{W})$$

4A 电流源发出的功率

$$P_I = 7 \times 4 = 28(\text{W})$$

5Ω电阻消耗的功率

$$P_{R1} = 5I_3^2 = 5 \times 1^2 = 5(\text{W})$$

4Ω电阻消耗的功率

$$P_{R2} = 4I_4^2 = 4 \times 1.5^2 = 9(\text{W})$$

1Ω电阻消耗的功率

$$P_{R3} = 1 \times I_5^2 = 1 \times (-1)^2 = 1(\text{W})$$

2Ω电阻消耗的功率

$$P_{R4} = 2 \times 4^2 = 32(\text{W})$$

(3) 电压源、电流源发出的功率为

$$P_{U1} + P_{U2} + P_I = -20 + 39 + 28 = 47(\text{W})$$

电阻消耗的功率为

$$P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} + P_{R4} = 5 + 9 + 1 + 32 = 47(\text{W})$$