

Learning Guide and Exercises for
Principles of Electric Circuits

电路原理学习指导与习题集

朱桂萍 刘秀成 徐福媛 编著 (第2版)

Zhu Guiping Liu Xiucheng Xu Fuyuan



清华大学出版社

Learning Guide and Exercises for
Principles of Electric Circuits

电路原理

学习指导与习题集

(第2版)

朱桂萍 刘秀成 徐福媛 编著

Zhu Guiping Liu Xiucheng Xu Fuyuan

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是电路原理课程的教学参考书,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、非线性电路、二端口网络、一阶电路、二阶电路、状态变量法、拉普拉斯变换、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、网络图论基础和均匀传输线。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。章后附有大量习题,内容丰富。书末附有参考答案。

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。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理学习指导与习题集 / 朱桂萍, 刘秀成, 徐福媛编著. —2 版. —北京: 清华大学出版社, 2012. 5
ISBN 978-7-302-27998-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 019515 号

责任编辑: 王一玲 王丽娜

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 何 芊

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京富博印刷有限公司

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×230mm 印 张: 25.25 字 数: 616 千字

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2012 年 5 月第 2 版 印 次: 2012 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 39.00 元

产品编号: 040654-01

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及有关技术人员参考，也可作为电类专业研究生考试复习用书。本书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进行选择。

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、非线性电路、二端口网络、一阶电路、二阶电路、状态变量法、拉普拉斯变换、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、网络图论基础和均匀传输线。附录为 OrCAD/PSpice 电路仿真分析简介。各章及附录中均附有习题，书末附有习题的参考答案。

本书章节基本按照清华大学信息学院电路原理课程（64 学时）的教学顺序安排，内容兼顾清华大学电机工程与应用电子技术系的教学大纲要求（96 学时）。每章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。章节标题或习题上加“*”标记表示是 64 学时课程不要求的内容。习题类型既有基本概念练习，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 9.2 进行电路仿真分析的方法。目的是通过仿真练习加深学生对电路问题的理解，拓宽分析手段，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、11 章及附录由刘秀成编写；第 12、13、14、15 章及附录中的习题由朱桂萍编写；第 5、6、7、8、9、10 章由朱桂萍在徐福媛编写的第 1 版基础上加以修订，第 16、17 章由刘秀成在徐福媛编写的第 1 版基础上加以修订。由朱桂萍和刘秀成对全书进行了统编，徐福媛教授审阅了全部书稿。

本书各章后面所附习题大部分取自清华大学校内讲义《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

2011 年 7 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	8
习题	13
第 2 章 简单电阻电路的分析方法	21
一、二端网络的等效电阻	21
二、电源的等效变换	26
三、电阻的 Y- Δ 变换	32
习题	34
第 3 章 线性电阻电路的一般分析方法	42
一、支路电流法	42
二、回路电流法	43
三、节点电压法	47
四、支路法、回路法与节点法的比较	55
五、含运算放大器的电阻电路分析	56
习题	59
第 4 章 电路的若干定理	68
一、叠加定理	68
二、替代定理	72
三、戴维南定理和诺顿定理	73
四、特勒根定理	79
五、互易定理	80
六、电路定理的综合应用	82
习题	86
第 5 章 非线性电路简介	99
一、非线性元件	99

二、非线性电阻电路分析	102
习题	110
第6章 二端口网络	114
一、二端口网络参数和方程	114
二、二端口网络的等效电路	116
三、二端口网络的联接	117
四、含二端口网络的电路分析	118
习题	120
第7章 一阶电路	124
一、电路初始值的确定	124
二、一阶电路的零输入响应、零状态响应和全响应	126
三、三要素法	133
四、一阶电路的冲激响应	140
五、卷积积分	145
习题	148
第8章 二阶电路	160
一、二阶电路的零输入响应	160
二、二阶电路的零状态响应和全响应	163
三、二阶电路的冲激响应	167
习题	169
第9章 状态变量法	173
一、状态方程的建立	173
二、状态方程的求解*	180
习题	182
第10章* 拉普拉斯变换	188
一、拉普拉斯变换的定义与性质	188
二、拉普拉斯反变换	190
三、复频域电路定律和复频域模型	193
四、拉普拉斯变换法分析电路	194
五、网络函数	201

习题	206
第 11 章 正弦电流电路的稳态分析	216
一、正弦量的相量表示	216
二、正弦稳态电路的相量模型	217
三、正弦稳态电路的相量分析	223
四、功率分析	228
五、负载功率因数的提高	235
习题	238
第 12 章 有互感的电路	253
一、同名端	253
二、互感电压的确定	254
三、互感电路的分析	256
四、理想变压器	262
习题	265
第 13 章 电路中的谐振	271
一、谐振频率的确定	271
二、处于谐振状态下的电路的分析	273
习题	278
第 14 章 三相电路	282
一、对称三相电路中各相量之间的关系	282
二、对称三相电路的分析	284
三、三相电路功率的计算与有功功率的测量方法	286
四、不对称三相电路的分析	290
习题	291
第 15 章 周期性激励下电路的稳态响应	297
一、周期性信号的谐波分析	297
二、周期性时间函数的有效值和平均功率	299
三、周期性激励下电路的稳态响应	300
习题	306

第 16 章* 网络图论基础	313
一、图的一些基本概念	313
二、图的矩阵表示	314
三、基尔霍夫定律的矩阵形式	315
四、节点方程的矩阵形式	317
习题	320
第 17 章* 分布参数电路	325
一、均匀传输线的正弦稳态解	325
二、均匀传输线正弦稳态解的双曲函数表达式	328
三、不同工作状态下的无损传输线	329
四、无损传输线在激励为恒定电压时的波过程	333
习题	340
附录 OrCAD/PSpice 电路仿真简介	343
A.1 OrCAD/PSpice 9.0 电路仿真的一般步骤	343
A.2 图形显示和分析模块 Probe 简介	351
A.3 其他电路仿真实例	356
仿真习题	367
习题参考答案	371

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，首先要先指定电压、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。



图 1-1 二端元件及其参考方向

4. 基本的无源元件

最基本的理想电路元件是线性非时变二端电阻、电感和电容。其电路元件符号及电压、电流参考方向如图 1-2 所示。

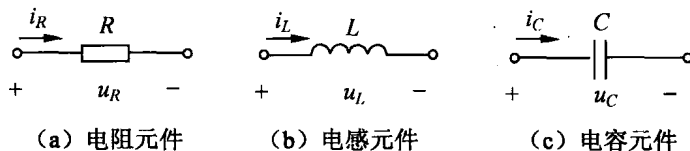


图 1-2 三种基本元件的电路符号

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。

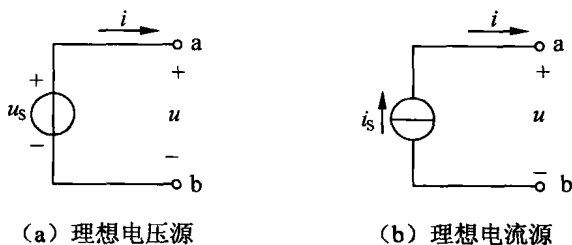


图 1-3 两种独立源的电路符号

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

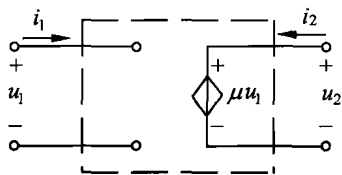
基本的受控源元件按控制量和受控制量的不同，可分为四种，即电压控制的电压源 (VCVS)、电流控制的电压源 (CCVS)、电压控制的电流源 (VCCS) 和电流控制的电流源 (CCCS)。它们的电路符号分别如图 1-4 (a)、(b)、(c) 和 (d) 所示。

它们的电压、电流关系为

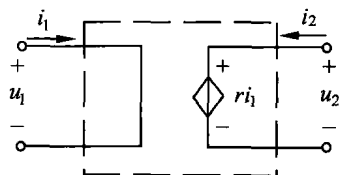
$$\begin{aligned} \text{VCVS: } & \begin{cases} i_1 = 0 \\ u_2 = \mu u_1 \end{cases}, \quad u_1, i_2 \text{ 由外电路决定。} \\ \text{CCVS: } & \begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = r i_1 \end{cases}, \quad i_1, i_2 \text{ 由外电路决定。} \end{aligned}$$

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

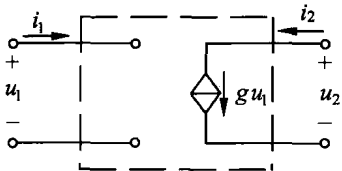
$$\text{CCCS: } \begin{cases} u_1 = 0 \\ i_2 = \beta i_1 \end{cases}, \quad i_1, u_2 \text{ 由外电路决定。}$$



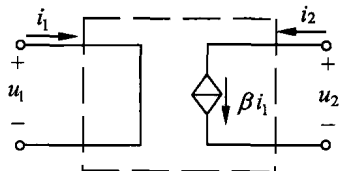
(a) 压控电压源



(b) 流控电压源



(c) 压控电流源



(d) 流控电流源

图 1-4 四种受控源的电路符号

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。

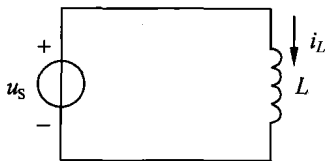


图 1-5 (a)

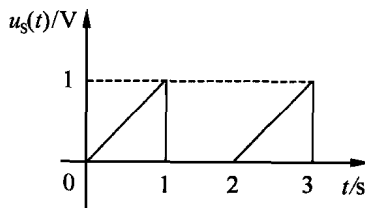


图 1-5 (b)

解 (1) 电压源 $u_s(t)$ 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。

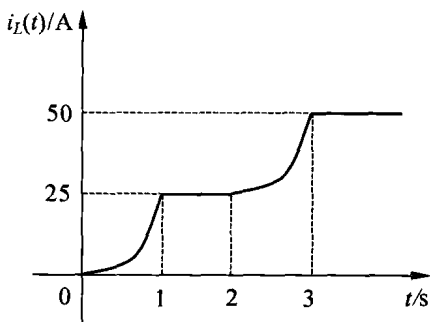


图 1-5 (c)

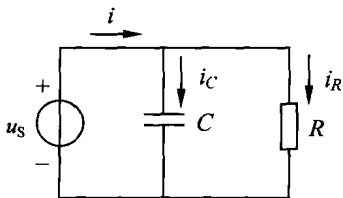


图 1-6 (a)

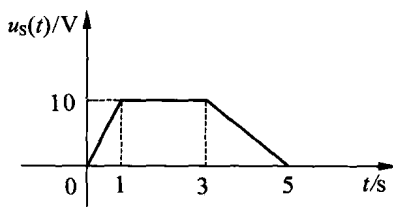


图 1-6 (b)

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

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

根据电容的元件特性有

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

总电流为

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

i , i_C 和 i_R 的波形如图 1-6 (c) 所示。

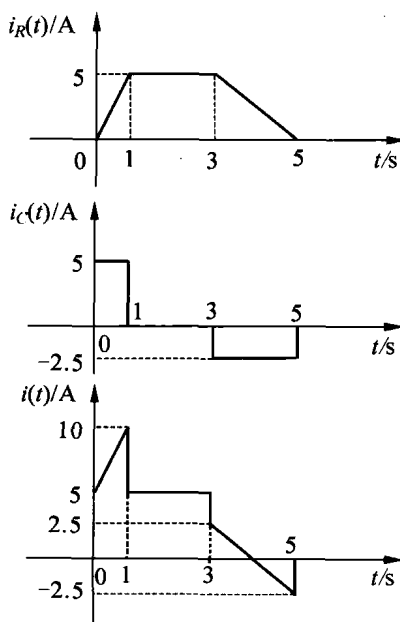


图 1-6 (c)

7. 金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的电路模型

图 1-7 (a) 为 N 沟道增强型 MOSFET 的电路符号；图 1-7 (b) 是 MOSFET 静态特性测试电路；图 1-7 (c) 是某一 MOSFET 的电气特性。

由于 MOSFET 结构上的特点，没有流经栅极的电流，即栅极始终开路。

(1) 当 u_{GS} 小于某一阈值 U_T (其典型值为 1V 左右) 即 $u_{GS} < U_T$ 时，D-S 之间开路，MOSFET 工作在截止区；

(2) $u_{GS} > U_T$ 时，D-S 之间导通， i_{DS} 与 u_{DS} 的关系曲线如图 1-7 (c) 所示。由于栅极电流始终为零，因此 D-S 可以看成是一个端口，此时 D-S 之间的特性可以粗略地分为两个区域，即图 1-7 (c) 中的斜线区域和水平线区域。由图 1-7 (c) 可以看出，在某个 u_{GS} 下，斜线部分可以近似看成是过原点的一条线段，因此 D-S 之间可等效为一个电阻，故称其为电阻区；而水平线部分可看成是一条平行于电压轴的线段，因此 D-S 之间相当于一个电流源，故称其为恒流区。工作在电阻区的 MOSFET 可等效为图 1-8 (a) 所示的 SR 电路模型，图中电阻就是 D-S 间的导通电阻；工作在恒流区的 MOSFET 可等效为图 1-8 (b) 所示的 SCS 电路模型，图中

$$i_{DS} = \frac{K(u_{GS} - U_T)^2}{2}$$

显然是一个非线性受控源。

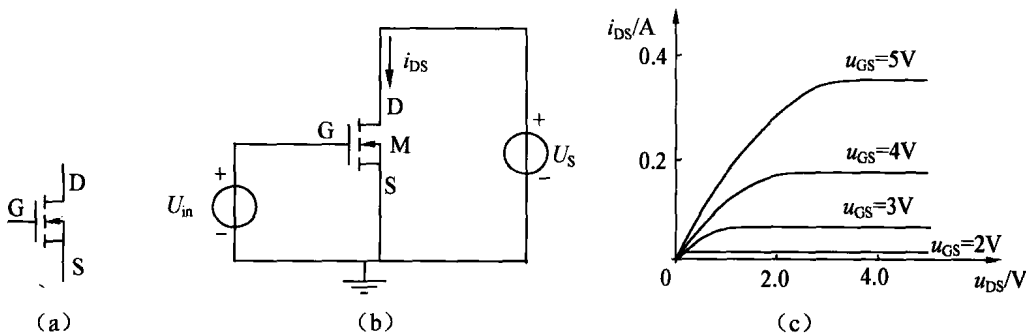


图 1-7

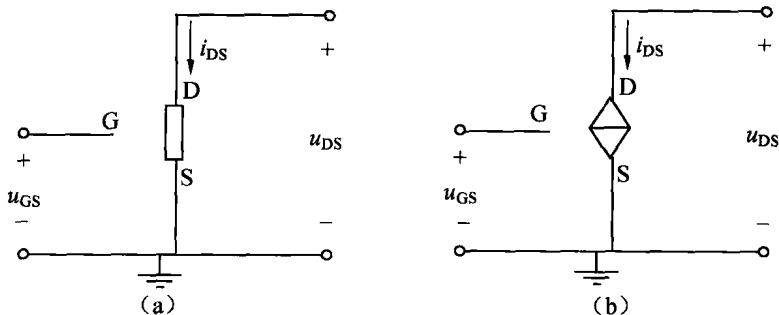


图 1-8

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 1-9 所示复合支路电压 u 与电流 i 之间的关系。

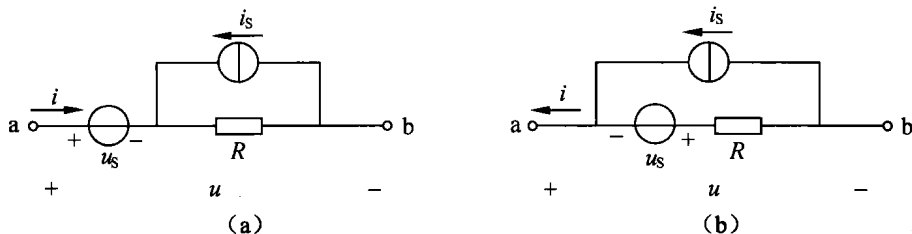


图 1-9

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 1-9 (a) 有

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

对图 1-9 (b) 有

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

例 1-4 电路如图 1-10 (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 1-10 (b) 所示。

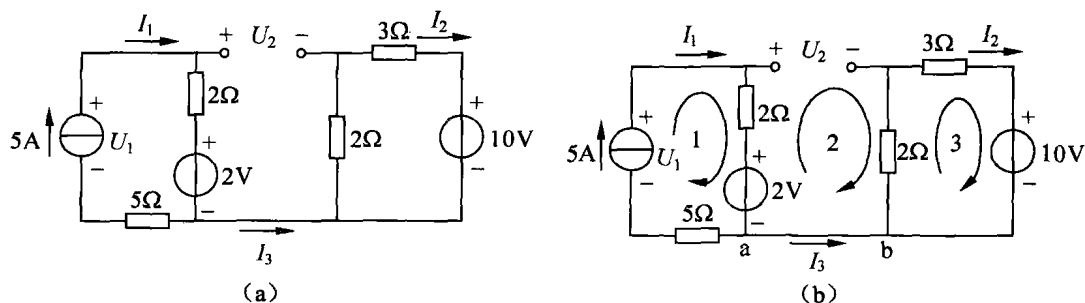


图 1-10

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 可由列写回路 3 的 KVL 方程得

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

解得

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

电流 I_3 可作一穿过 I_3 所在支路的闭合面。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

$$U_2 = 2I_1 + 2 + 2I_2 = 2 \times 5 + 2 + 2 \times (-2) = 8 \text{ (V)}$$

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 1-11 (a) 所示。求: (1) 电流 I_1 , I_2 和电压 U ; (2) 各支路吸收或发出的功率; (3) 验证电路的功率平衡关系。

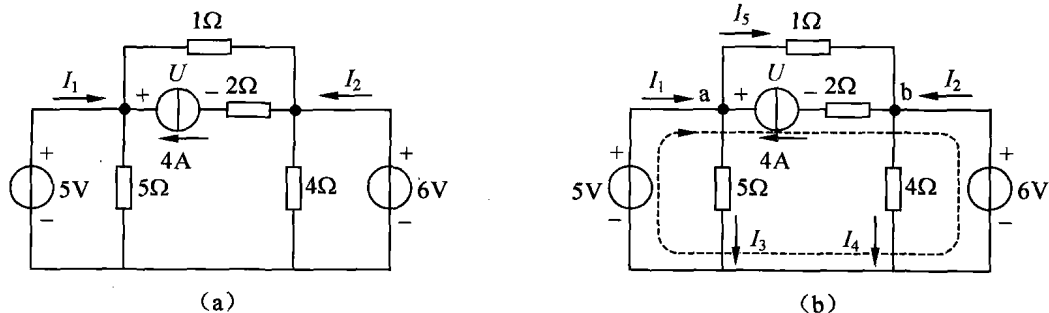


图 1-11