

全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材

高等职业教育教学改革精品教材

# 电路与 电路仿真分析

DIANLU YU  
DIANLU FANGZHEN FENXI

李西平 等编著

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材  
高等职业教育教学改革精品教材

# 电路与电路仿真分析

李西平 谷良宁 晨田 琥 编著  
张凤言 主审



机械工业出版社

本书从高等职业教育的实际需求出发,内容编排力求突出工程应用,首次引入具有中文界面的电路仿真软件(Tina Pro)辅助教学,将理论教学、技能训练与虚拟仿真分析融为一体,体现“学以致用”的教学宗旨。本书主要内容包括:电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、电路的一般分析方法和基本定理、正弦稳态电路分析、正弦稳态电路的频率响应及谐振、非正弦交流电路、动态电路的过渡过程分析,以及11个虚拟仿真实验等。相关理论知识的内容,大部分章节都配有例题、电路仿真范例和“思考与练习”;每章末都配有对应的练习题和模拟自测题及其答案。

本书具有较强的可读性和趣味性。可作为高职院校电子类、机电类、计算机类、自动化类专业的教材,可用于社会上相关领域的培训教材,同时亦可供工程技术人员以及业余爱好者自学参考。

本教材配有电子教案,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载。咨询邮箱: [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)。咨询电话:010-88379375。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与电路仿真分析/李西平等编著. —北京:机械工业出版社, 2011.8

全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材

高等职业教育教学改革精品教材

ISBN 978-7-111-34845-0

I. ①电… II. ①李… III. ①电路分析—高等职业教育—教材②电子电路—计算机仿真—高等职业教育—教材 IV. ①TM133②TM710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第157726号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:崔占军 边萌 责任编辑:崔占军 边萌

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·354千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34845-0

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

进入 21 世纪以来，高等职业教育呈现出迅猛发展的态势。为了进一步促进教学改革高效、有序地发展，突出高素质技能型人才培养的特色，教育部 2006 年下发了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》。其中提出：在深化教学改革的进程中，要重视内涵建设，促进“工学结合”。基于此，本教材的编写以“调整教学重心，注重实际应用，突出技能培养”为原则，旨在培养学生具有一定的“工程技能”，进而能够适应职业岗位实际工作的需要。

近年来，随着电路仿真软件应用的快速推广，本课程的教学改革引发了一场“革命”。以往成熟、经典而又难以理解的基本理论内容借助仿真软件的直观演示，得到了“事半功倍”的教学效果。毋庸置疑，电路仿真软件的引入不仅可以减少不必要的手工计算，更重要的是，能够高效率地帮助学生理解和巩固所学的理论知识，同时相对降低了课程的学习难度。此外还应看到，随着电子应用技术的不断发展，电路仿真软件的应用作为一种独特的“技能”，必将在工程实践领域中“大放异彩”。因此，电路仿真软件结合工程实际的教学开发将是业内同仁今后共同关注的课题。

基于教学改革的需要，编写本书注意到以下特点：

1. 本书是国内首次运用 TinaPro 电路仿真软件开展电路理论教学的正式教材。TinaPro 电路仿真软件与国内引进的同类软件相比，除性价比高、功能强大外，是目前唯一具有中文版的电路仿真软件。不言而喻，TinaPro 电路仿真软件的中文界面将给学习者的学习带来极大的便利。

2. 本书摒弃以往教科书中仿真软件应用大多局限于例题的验证性测试的作法，而是遵循由浅入深、由简及繁的教学规律，力求将理论教学与工程实际应用结合起来。

3. 本书仿真分析范例在循序教学进程的基础上，将软件的工程应用适时地进行了拓展与延伸，如“最优化目标设计”、“最佳匹配设置”等，如此安排将有利于激发学习者的学习兴趣，从而提高学习效率。

4. 本书中的虚拟仿真实验为学习者构建了一个强调亲自动手的技能训练“平台”，将验证性实验与设计性实验结合起来，以培养创新思维为宗旨，为今后职业岗位上工程应用的展开奠定了基础。

## IV

5. 本书助学内容丰富，每章前有“导言”、“学习目标”；章节间有“要点”“提示”“讨论”“重点内容小结”“思考与练习”；每章后有“练习题”“模拟自测题（并附答案）”等，这对于学习者开展自主化学习以及检验学习成效是非常有利的。

应当提及，Tina pro 电路仿真软件中采用的电参数符号和电子元器件符号与我们国家颁布的国标不尽相同。为了尊重软件的真实内容，书中出现的仿真软件自动生成的图及其符号，没有按我国国标的统一要求修改。

学习者尽快熟悉应用软件中国际通用的“标示符”（图形符号）是符合工程实际需要的。为此，本书中凡涉及 Tina pro 电路仿真软件的应用均以“标示符”标注。相信通过不长时间的接触，学习者不仅能够熟悉“标示符”，而且将体会到它在工程实际应用中的便利性。

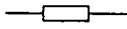
本书由北京航空航天大学张凤言教授任主审，承蒙张老师悉心点拨，方使本书顺利付梓，在此致诚挚的谢意。

撰写本书的作者为：李西平（前言、第1、2、3章及第4章7、8节）；谷良（第5、6、7章）；宁晨（第4章第1-6节）；田虢（第8章）。李西平主持全书的撰写并负责统稿。

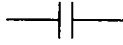
由于时间仓促，兼之作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者和同仁不吝批评指正。

编著者  
2011年06月

## 电路仿真软件 Tina Pro 中的标示符号<sup>⊖</sup>



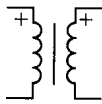
电阻元件



电容元件



电感元件



变压器



电压信号发生器



电流信号发生器



电压表



电流表



欧姆表



阻抗表



功率表



电压测量指针



节点电压测量指针



电流测量指针

<sup>⊖</sup>软件中的符号与我们现行国家标准有所不同，本书讲软件的应用，以软件为准。

# 目 录

## 前言

## 电路仿真软件 Tina Pro 中的标示符号

### 第 1 章 电路的基本概念和基本定律..... 1

- 1.1 电路和电路模型 ..... 1
- 1.2 电流、电压及其参考方向 ..... 3
- 1.3 电功率 ..... 7
- 1.4 电阻元件与欧姆定律 ..... 9
- 1.5 独立电源 ..... 11
- 1.6 受控源 ..... 16
- 1.7 基尔霍夫定律 ..... 17

练习题 1 ..... 24

模拟自测题 1 ..... 26

模拟自测题 1 答案 ..... 28

### 第 2 章 电路的等效变换 ..... 29

- 2.1 单口网络等效变换的概念 ..... 29
- 2.2 电阻串、并联电路的等效电路 ..... 30
- 2.3 电压源串联和电流源并联的等效变换 ..... 37
- 2.4 实际电源的两种模型之间的等效变换 ..... 40

练习题 2 ..... 45

模拟自测题 2 ..... 47

模拟自测题 2 (部分) 答案 ..... 48

### 第 3 章 电路的一般分析方法和基本定理 ..... 49

- 3.1 节点分析法 ..... 50
- 3.2 网孔分析法 ..... 55
- 3.3 叠加定理 ..... 61
- 3.4 戴维南定理 ..... 65
- 3.5 最大功率传输定理 ..... 71

练习题 3 ..... 73

模拟自测题 3 ..... 76

模拟自测题 3 (部分) 答案 ..... 78

### 第 4 章 正弦稳态电路分析 ..... 79

- 4.1 正弦电压和电流 ..... 79
- 4.2 正弦量的相量表示法 ..... 83
- 4.3 基尔霍夫定律的相量形式 ..... 87

4.4 正弦稳态电路的相量模型 ..... 88

4.5 电路的一般分析方法在正弦电路中的应用 ..... 98

4.6 正弦稳态电路的功率和能量 ..... 99

4.7 磁场与变压器 ..... 108

4.8 三相交流电路 ..... 116

练习题 4 ..... 121

模拟自测题 4 ..... 125

模拟自测题 4 答案 ..... 126

### 第 5 章 正弦稳态电路的频率响应及谐振 ..... 128

5.1 网络函数及频率响应 ..... 129

5.2 RC 电路的频率响应、高通及低通电路 ..... 133

5.3 RLC 串联电路的频率响应及谐振 ..... 136

练习题 5 ..... 141

模拟自测题 5 ..... 143

模拟自测题 5 答案 ..... 144

### 第 6 章 非正弦交流电路 ..... 146

6.1 周期函数的傅里叶级数 ..... 146

6.2 非正弦交流电路的计算 ..... 149

6.3 谐波电压及电流条件下有功功率的计算 ..... 152

6.4 指数形式的傅里叶级数 ..... 153

6.5 傅里叶变换 ..... 155

练习题 6 ..... 158

模拟自测题 6 ..... 159

模拟自测题 6 答案 ..... 161

### 第 7 章 动态电路的过渡过程分析 ..... 162

7.1 RC 电路过渡过程产生的原因 ..... 162

7.2 一阶电路过渡过程分析的三要素法 ..... 164

7.3 电路的稳态、暂态响应及零输入、零状态响应 ..... 170

7.4 RLC 串联电路的过渡过程 ..... 171

7.5 RLC 串联电路的零输入响应 ..... 171

练习题 7 ..... 176

模拟自测题 7 ..... 178

模拟自测题 7 答案 ..... 179

<b>第8章 虚拟仿真实验</b> .....	181	<b>测量</b> .....	197
实验1 电路元器件的伏安特性 .....	181	实验7 三相正弦交流电路 .....	200
实验2 电路定理仿真实验 .....	183	实验8 负阻抗变换器的设计 .....	204
实验3 电压源与电流源的等效变换 .....	187	实验9 谐振电路的仿真 .....	206
实验4 电阻式温度计的设计与实现 .....	189	实验10 一阶电路动态响应分析 .....	214
实验5 正弦交流电路 .....	191	实验11 二阶电路动态响应分析 .....	218
实验6 正弦交流电路功率及功率因数的		<b>参考文献</b> .....	222



# 第1章 电路的基本概念和基本定律

## 【导言】

电路理论主要是研究电路中发生的电磁现象，用电流  $i$ 、电压  $u$ 、功率  $p$  等物理量来描述其中的过程。鉴于电路是由电路元件构成的，因而整个电路所呈现的状况既要看元件的连接方式，又要看每个元件的特性，这就决定了电路中各支路电流、电压要受到两种基本规律的约束，即电路元件性质的约束和电路连接方式的约束。基尔霍夫定律是概括这两种约束关系的基本定律。

本章从建立电路模型，认识电路物理量等最基本问题出发，重点讨论电压、电流的参考方向，电路吸收功率和释放功率的概念，理想电源的概念，基尔霍夫定律等。这些概念和定律是电路理论的核心内容，在电路分析中起到至关重要的作用。

本章关于电路仿真应用的引入，一方面与本课程最基本知识的传授同步，即遵循由浅入深、由简到繁的教学规律；另一方面，为使读者深刻体会电路仿真软件的应用，把一些例题结合工程实际，融入了拓展内容。总之，结合例题采用仿真分析与测试的方法，目的在于使学生加强对电路基本原理理解的同时，逐步掌握电路仿真软件的工程应用。

## 【学习目标】

1. 了解建立电路模型的意义。
2. 理解电路基本物理量的概念。
3. 掌握电压、电流的参考方向、关联参考方向以及电路吸收功率和释放功率的概念。
4. 掌握电路基本元件（电阻、电压源、电流源）的特性。
5. 掌握基尔霍夫电流定律和电压定律及其在电路中的应用。

## 1.1 电路和电路模型

电路是由实际元器件按一定要求相连接，为电流的流通提供路径的集合体。电路的基本功能是实现电能的传输、分配和转换，或完成电信号的产生、传输、变换、处理及利用。

实际电路通常是由电阻器、电容器、电感线圈、电源、晶体管、集成电路等元器件组成。不同的元器件性能不同，它们在电路中体现一种主要的物理性质的同时，也要体现一些次要的性质。如电感线圈，主要是储存磁场能量的，但因其是用金属导线绕制而成的，总要呈现一定的电阻，因而兼有电阻的性质。分析电路时，若考虑电路元器件的所有物理性质，是极其麻烦的，而且在工程实践中也无此必要。因此，在分析实际电路时，人们往往将实际元器件理想化，抓住其主要特性，忽略其他次要因素，用一些表征实际电路元器件主要物理性质的模型来代替实际电路元器件。实际元器件的理想化模型，称为元件模型<sup>⊙</sup>，由此而构成的电路称为电路模型，亦称电路原理图（简称电路图）。表 1-1 中列出了几种常见的元件模型及其图形符号。

<sup>⊙</sup>理想化的元件模型，在电路模型中可称为电路元件。

表 1-1 常见元件模型及其图形符号

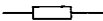
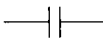


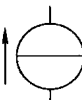
元件模型	主要物理特性	图形符号
电阻元件	消耗电能	
电容元件	储存电场能	
电感元件	储存磁场能	
电压源	提供电能	
电流源		

图 1-1a 所示为电热水器电路的电气图，图中标出电热水器电路由电源、转换开关、电热丝以及连接线等组成。图 1-1b 所示为电热水器的电路模型图，图中 S 为转换开关模型， $u_s$  为电源模型（220V 交流电压）， $R_1$ 、 $R_2$  为电热丝模型，连接线用理想导线（电阻为零）表示。

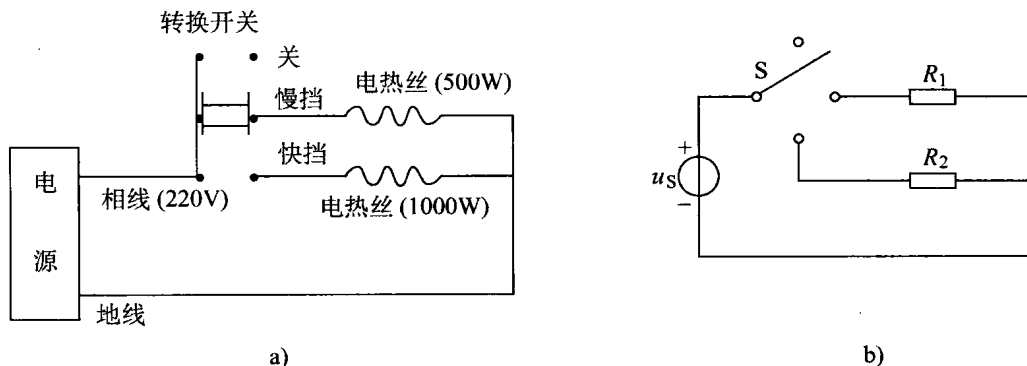


图 1-1 电热水器电路  
a) 电气图 b) 电路模型

应当说明，电路模型的建立取决于元器件在电路中产生的电磁效应。在不同的条件下，同一元器件可能采用不同的模型。例如，在直流条件下，一个电感线圈的模型是一个电阻元件；在较低频率下，其模型是电阻元件和电感元件的串联组合；而在较高频率下，则要考虑导线表面的电荷作用（电容效应），所以其模型还要包含电容元件。总之，建立的电路模型应能够真实地反映实际器件的物理性质。否则，电路的分析和计算是无意义的。

本书今后所述及的电路一般是指由理想元器件构成的电路模型，而理想元器件的模型是在一定的条件下已经被确定了。至于在不同条件下电路模型的建立将在后续课程再行介绍。

## 思考与练习

1-1-1 什么是电路模型？为什么要用电路模型的方法来表示实际电路？

## 1.2 电流、电压及其参考方向

在电路分析中，主要关注的物理量是电流、电压和功率。因此，建立并深刻理解与这些物理量相关的基本概念是极其重要的。

### 1.2.1 电流及其参考方向

通常，金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子，在外界未施加任何影响的情况下，这些自由电子在其内部作无规律的热运动。如果在金属导体的两端接上电源，那么在电场力的作用下，带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动，形成传导电流。习惯上规定以正电荷移动的方向，即负电荷（电子）移动的相反方向为电流运动的实际方向。电流的大小可用单位时间内通过导体横截面的电荷量来计算，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中， $dq$  为通过导体横截面的电荷量。 $i$  随时间按一定规律变化，因此它是时间的函数。若  $i$  的大小和方向均不随时间变化，则电流为恒定值，用大写字母  $I$  表示。式 (1-1) 可写成

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

国际单位制 (SI) 中，电荷的单位是库仑 (C)，时间的单位是秒 (s)，电流的单位是安培 (A)，简称“安”。实用中还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 ( $\mu\text{A}$ ) 等，它们的换算关系为

$$\begin{aligned} 1\text{kA} &= 10^3\text{A} \\ 1\text{mA} &= 10^{-3}\text{A} \\ 1\mu\text{A} &= 10^{-6}\text{A} \end{aligned}$$

电流是经常使用的物理量。电流一词不仅表示一种物理现象，而且也是一个物理量。在一些简单的电路中 (如图 1-1b)，电流的方向可直接看出是从电源  $U_S$  的正极经  $R_1$  或  $R_2$  流向负极的。但对于较复杂的电路，电流的实际方向往往难以确定。为此引入参考方向这一概念。参考方向是人为任意规定的假定方向，有可能与电流的实际方向相同，也可能与电流的实际方向相反，相同和相反可用数学中的正、负概念来表示，这样就可把电流看成是代数量。当电流的实际方向与参考方向一致时，电流为正值；反之，电流为负值，如图 1-2 所示。

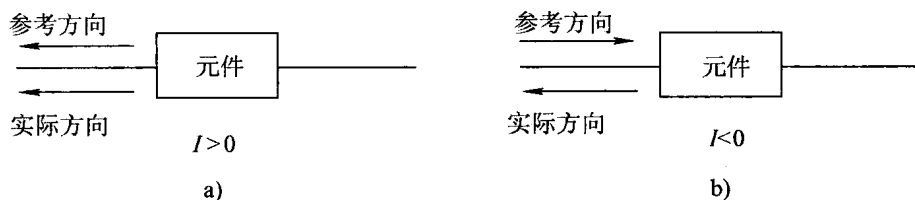


图 1-2 电流的参考方向

**【提示】** 在分析和计算电路时，参考方向一旦设定，就不能再更改，否则会造成混乱。

**【例 1-1】** 图 1-3 所示电路中，各电流的参考方向已标出，已知  $I_1 = -2\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_3 = -1\text{A}$ ，试确定  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的实际方向。

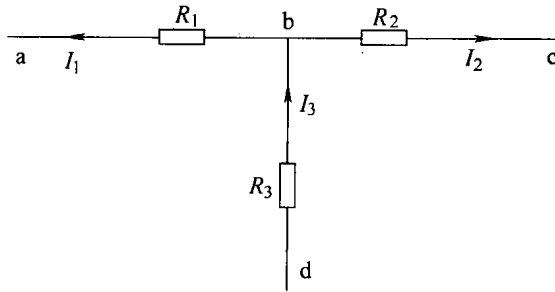


图 1-3 例 1-1 题图

**解：**由于  $I_1 < 0$ ，故  $I_1$  的实际方向与参考方向相反， $I_1$  由 a 点流向 b 点。

同理， $I_2 > 0$ ，则  $I_2$  的实际方向与参考方向相同， $I_2$  由 b 点流向 c 点。

$I_3 < 0$ ，则  $I_3$  的实际方向与参考方向相反， $I_3$  由 b 点流向 d 点。

**【要点】** 规定电流的实际方向与参考方向相同时，电流为正值。若电流为负，则显然两者方向相反。不设定参考方向而讨论电流的正负是无意义的。

### 1.2.2 电压及其参考方向

为了衡量电场力做功的大小，引入电压这个物理量。

图 1-4 所示电路中 a、b 两点间的电压是指电场力把单位正电荷从电路的 a 点移到 b 点所做的功，即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中， $dq$  是被移动的正电荷的电荷量； $dw$  是电场力将正电荷  $dq$  从 a 点移到 b 点所做的功； $u$  是随时间变化的量，故用小写字母表示。

电路中 a、b 两点间的电压大小不随时间变化，它表示在电场力作用下，在同样时间间隔内有相同的电荷量流过导体，这样的电压称为直流电压，用  $U$  表示，式 (1-3) 可写成

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

国际单位制 (SI) 中，电荷的单位是库仑 (C)，功的单位是焦耳 (J)，电压的单位为伏特，简称伏 (V)。使用中还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 ( $\mu\text{V}$ ) 等，它们的换算关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}$$

$$1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

$$1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

电路中，电位 (用字母  $V$  表示) 是指电场力把单位正电荷从电路的一点移到参考点 (习惯选电路中的某点) 所做的功。电位的单位也是伏特 (V)。有了电位的概念，电压可用电位差来表示，即电路中任意两点的电压可用两点间的电位之差来表示。

规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。但在复杂的电路里，元件两端电压的实际方向是不易判别的。尤其在交流电路里，元件两端电压的实际方向是不断变化的。因此，与电流一样，必须要对电路中两点间的电压设定参考方向。在图 1-4 中，规定 a 点为高电位点，标以 “+”，b 点相对于 a 点是低电位点，标以 “-”，

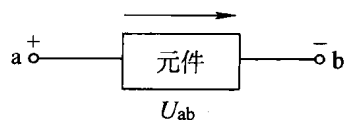


图 1-4 电压的参考方向

因此设定的电压参考方向为 a 点指向 b 点。当电路两点间电压的实际方向与参考方向相同时，电压为正；反之，电压为负。有时为了图示方便，亦可用一个箭头表示电压的参考方向。还可用双下标  $U_{ab}$  表示（见图 1-4）。

设定了参考方向，电压则可看成是一个代数量。但必须明确：电压的正与负，在设定参考方向的条件下才是有意义的。电压的参考方向亦可称为电压的参考极性或正方向。

虽然电位和电压都是从电场力做功方面来阐述的物理量，但也有不同之处。电位是相对参考点而言的，讲到某点电位时，一定要标明参考点的位置，参考点不同，该点电位的数值亦不同。脱离了参考点孤立地讲某一点电位是无意义的。电压是电路中两点电位之差，电位差是不会随参考点的不同而改变，是固定的。

由于参考点的电位常设为零，故参考点又称为“零电位点”。在工程上常选大地作为参考点，即认为大地电位为零。在电路中一般是选一条特定的公共线作为参考点（用符号“ $\perp$ ”表示），这条公共线是众多元件的汇集处并和机壳相连，虽然并非与大地相连，但习惯上亦称为“地线”。下面举例讨论电位的计算。

**【例 1-2】** 电路如图 1-5 所示，分别设定 a、b、c 为参考点，求各点电位。当设 a 点为参考点时，用 b、c 两点的电位差来计算电阻  $R_2$  上的电压  $U_{bc}$ 。

解：当选 a 点为参考点时

$$V_a = 0$$

由于电阻  $R_1$  端电压的实际方向是 a 点指向 b 点（电位降低的方向），所以 b 点电位低于 a 点电位，则

$$V_b = -6V$$

同理

$$V_c = U_{cb} + U_{ba} = -4V + (-6V) = -10V$$

当选 b 点为参考点时，

$$V_b = 0$$

$$V_a = U_{ab} = 6V, V_c = -4V$$

当选 c 点为参考点时，

$$V_c = 0$$

$$V_a = U_{ab} + U_{bc} = 6V + 4V = 10V, V_b = 4V$$

前已述及，电路中两点之间的电压可用这两点的电位之差来表示。因此，当以 a 为参考点时，b、c 两点间的电压可表示为

$$U_{bc} = V_b - V_c = -6V - (-10)V = 4V$$

计算结果表明，不论如何选择参考点，b、c 两点间电压不会改变。

**【要点】** 电路中各点电位数值随所选参考点的不同而改变。若参考点一经选定，那么各点的电位数值就是唯一的，这就是电位的相对性与单值存在性。电路中任意两点之间的电压数值与参考点选在何处无关。

### 【电路仿真分析范例】

**【例 1-3】** 电路如图 1-6 所示，求 a、b 两点电位以及电压  $U_{ab}$ 。

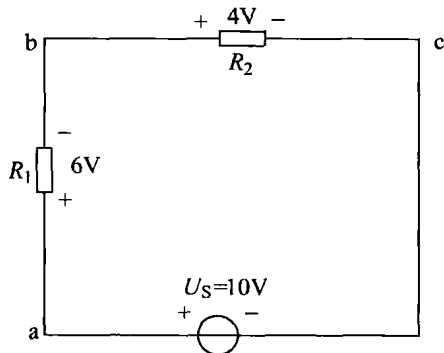


图 1-5 例 1-2 题图

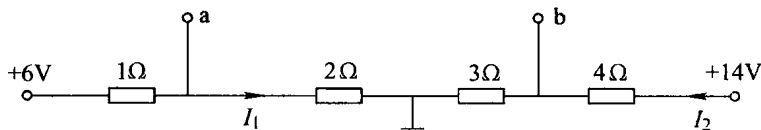


图 1-6 例 1-3 题图

解：仿真电路如图 1-7 所示，可直接测出 a、b 两点电位分别为 3V 和 6V， $U_{ab}$  为 -3V。

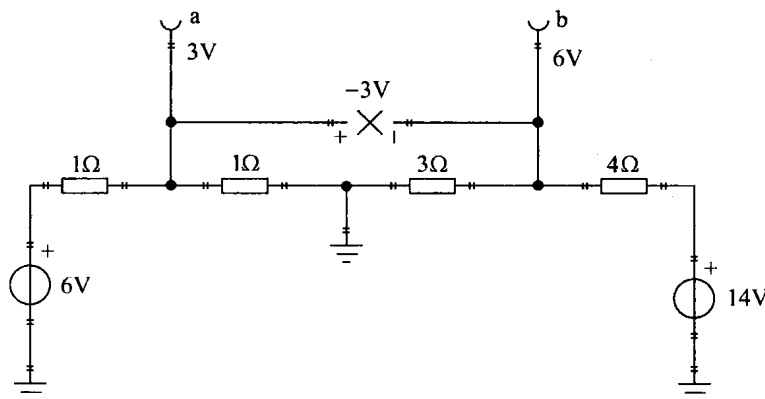
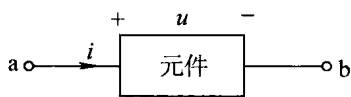


图 1-7 图 1-6 电路仿真图

【讨论】应当提及，电路分析中引入电位的概念，可以简化分析。如电路中两个等电位点可以短接，若用电阻连接或开路处理也不会对电路产生影响。电路分析引入电位的概念对于电路仿真软件的工程应用亦带来了极大的便利。

【注意】电路仿真软件 Tina Pro 使用电流箭头“ $\overrightarrow{\text{AMI}}$ ”、电压指针“ $\text{VM1}$ ”和开路电压“ $\text{VM1}$ ”来完成计算功能，其作用如同安装了电流表和电压表进行测量，本例使用了电压指针和开路电压。

电流、电压的参考方向均可任意设定，两者不相关。但为了分析电路方便起见，常常把元件或一段电路上电流与电压的参考方向取为一致，称为关联参考方向，简称关联方向，如图 1-8 所示。这样，在电路中只需标出电压的参考方向，电流的参考方向就自然确定了，反之亦然。一般情况下，电路图上标出两者中任意一个参考方向，另一个可省略不标。

图 1-8  $u$ 、 $i$  的关联方向

## 思考与练习

1-2-1 为什么在电路分析中要设定参考方向？

1-2-2 电路（方框代表一段电路或一个元件）如图 1-9 所示，已知  $V_a = 5V$ ， $V_b = 0$ ， $V_c = 4V$ ， $V_d = -3V$ ，求  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ac}$ 、 $U_{cd}$ 。

1-2-3 图 1-10 所示电路中，电压和电流的参考方向均已标出，问电路 A 的电压、电流的参考方向是否关联？电路 B 呢？

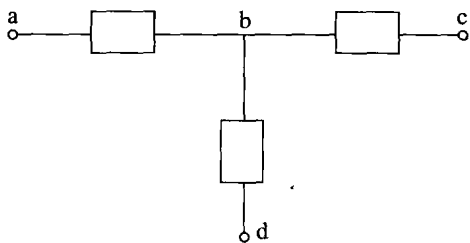


图 1-9 思考与练习 1-2-2 题图

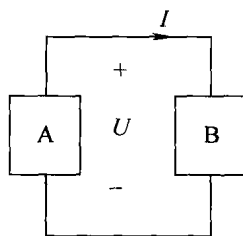


图 1-10 思考与练习 1-2-3 题图

### 1.3 电功率

电路的主要作用之一是完成电能的传输、分配与转换，因此，研究电路元件在单位时间内吸收或释放的电能（电功率）是十分必要的。

讨论电压时已经知道，在电场力作用下，电路中由  $a$  点移动到  $b$  点的正电荷量是  $dq$ ， $a$  点至  $b$  点的电压  $U$  意味着单位正电荷从  $a$  点移至  $b$  点电场力所做的功。因此移动  $dq$  正电荷电场力做的功则为  $dw = Udq$ 。定义单位时间内电场力所做的功为电功率（简称功率），用  $p$  表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

式中，功的单位是焦耳（J）；时间的单位是秒（s）；功率的单位是瓦特（W）。

功率也可以用电压（式（1-3）），电流（式（1-1））的乘积来表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

式中电压单位为伏特（V），电流单位为安培（A），功率单位为瓦特（W），即

$$1\text{W} = 1\text{VA}$$

在直流情况下

$$P = UI \quad (1-7)$$

电路中研究的是功率与电压、电流之间的关系。如果用式（1-6）或式（1-7）来计算电路中某一段电路的功率，则在电压、电流取关联方向时，计算出的功率可能是正值，也可能是负值。

图 1-11 所示电路中的矩形方框表示一段电路。从图 1-11a 可见，当电压、电流取关联方向时，如果计算出的功率为正值（ $U$ 、 $I$  同为正，或同为负），则表明这段电路是吸收（消耗）电功率的。其物理意义是：当正电荷由电路的高电位端向低电位端移动时，电场力做了功，说明这段电路是负载性元件。所谓吸收能量，是指该元件把电能转换成其他形式的能量（如热能、光能等）。

反之，在电压、电流取关联方向时，如果计算出的功率为负值（图 1-11b 中， $U$ 、 $I$  符号相异），表明这段电路是释放（产生）电功率的。其物理意义是：当正电荷由电路低电位端向高电位端移动时，需要有非电场力来克服电场力做功，说明这段电路是释放（产生）能量的，意味着这段电路包含有电源，电源是一种能够产生电能的元件。

当电压、电流取非关联方向时，计算功率的公式应为

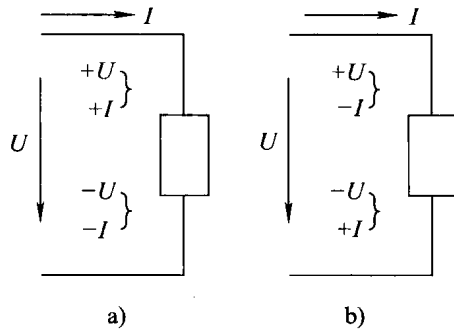


图 1-11 功率的正负

$$p = -ui \quad (1-8)$$

或

$$P = -UI \quad (1-9)$$

按式 (1-8) 或式 (1-9) 算得的功率自然是

 $p$  (或  $P$ )  $> 0$  为吸收 (消耗) 功率

 $p$  (或  $P$ )  $< 0$  为释放 (产生) 功率

【例 1-4】 图 1-12 所示电路中, 已知  $I = 1\text{A}$ ,  $U_{ab} = 4\text{V}$ ,  $U_{bc} = 6\text{V}$ ,  $U_{ac} = 10\text{V}$ , 求 ab, bc, ac 三部分电路上各吸收 (或释放) 的功率  $P_{ab}$ ,  $P_{bc}$ ,  $P_{ac}$ 。

解: 对 ab、bc 两段电路, 由于电压、电流的参考方向关联, 则

$$P_{ab} = U_{ab}I = 4\text{V} \times 1\text{A} = 4\text{W} \quad \text{吸收功率}$$

$$P_{bc} = U_{bc}I = 6\text{V} \times 1\text{A} = 6\text{W} \quad \text{吸收功率}$$

对 ac 段电路, 由于电压、电流参考方向为非关联, 则

$$P_{ac} = -U_{ac}I = -10\text{V} \times 1\text{A} = -10\text{W} \quad \text{释放功率}$$

【要点】 计算一段电路 (或某个元件) 的功率时, 记住以下规律: 当电压、电流设定的参考方向相关联时, 功率式中取正号; 非关联时, 取负号。这样, 如果得出的功率为正, 则是吸收功率; 为负, 则是释放功率。

此例中  $P_{ab} + P_{bc} + P_{ac} = 0$ , 说明任何完整的电路, 吸收的功率与释放的功率是相等的, 称为功率平衡。它是能量守恒定理在电路中的体现。

【例 1-5】 图 1-13 所示为某电路的一部分, 已知  $I = 2\text{A}$ ,  $U_1 = -3\text{V}$ 。

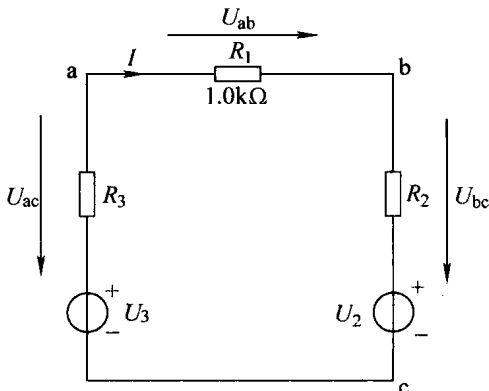


图 1-12 例 1-4 题图

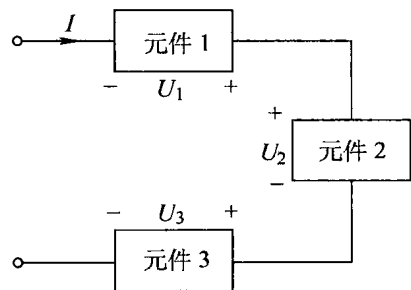


图 1-13 例 1-5 题图



(1) 求元件 1 释放的功率  $P_1$ 。

(2) 若  $P_2 = 8\text{W}$  为元件 2 释放的功率,  $P_3 = 12\text{W}$  为元件 3 吸收的功率, 求  $U_2$ 、 $U_3$ 。

解: (1) 元件 1 上电压、电流参考方向非关联, 所以

$$P_1 = -U_1 I = -(-3) \times 2\text{W} = 6\text{W}$$

$P_1 > 0$ , 说明元件 1 是吸收功率的, 也可以说元件 1 释放的功率是  $-6\text{W}$ 。

(2) 由于  $P_2 = 8\text{W}$  为元件 2 释放的功率, 故功率数应为负值, 即  $P_2 = U_2 I = -8\text{W}$ , 则

$$U_2 = -\frac{8}{2}\text{V} = -4\text{V}$$

同理, 由于  $P_3 = 12\text{W}$  为元件 3 吸收的功率, 故功率数应为正值, 即  $P_3 = U_3 I = 12\text{W}$ , 则

$$U_3 = \frac{12}{2}\text{V} = 6\text{V}$$

**【要点】** 释放的功率也可说成是吸收的负功率, 反之亦然。

判别一个元件是吸收功率还是释放功率, 取决于该元件上电压和电流实际方向是否一致, 一致时是吸收功率, 相反时是释放功率。

### 思考与练习

1-3-1 在电流、电压取关联方向的条件下, 计算出的功率为正值或负值, 它们的意义是什么?

1-3-2 在电路中怎样判别一个元件是负载还是电源?

1-3-3 电路如图 1-14 所示。当  $I = 2\text{A}$ , 电路吸收的功率为  $6\text{W}$ , 求电压  $U$ ; 当  $U = 5\text{V}$ , 电路释放的功率为  $-10\text{W}$ , 求电流  $I$ ; 当  $I = 1\text{A}$ , 电路吸收的功率为  $-2\text{W}$ , 求电压  $U$ 。

1-3-4 图 1-15 所示电路, 已知元件 A 吸收功率  $P_A = 20\text{W}$ , 求元件 B、C、D 吸收的功率。

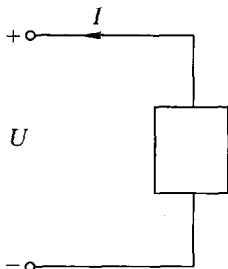


图 1-14 思考与练习 1-3-3 题图

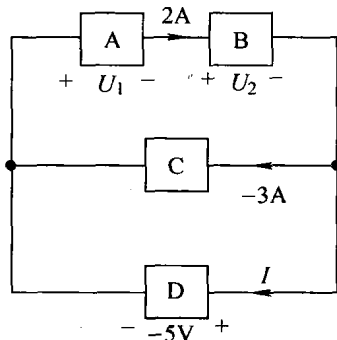


图 1-15 思考与练习 1-3-4 题图

## 1.4 电阻元件与欧姆定律

电阻元件是电路中最常见的一种理想元件, 其特性是对电荷运动呈现阻力, 消耗电能, 并将电能转换成为热能、光能等非电能量, 因此电阻元件是一种耗能元件。

若把电阻两端的电压取为纵坐标, 电流取为横坐标, 对于一系列的电压和电流值就能得到一系列表示二者函数关系的曲线, 这条曲线称为电压电流特性曲线。由于电压的单位是伏特, 电流的单位是安培, 故又称其为伏安特性曲线, 简称伏安特性。

根据电阻元件性质的不同, 电阻分为线性电阻和非线性电阻。线性电阻元件的伏安特性是一条通过坐标原点的直线, 如图 1-16a 所示, 其符号示于图 1-16b。