

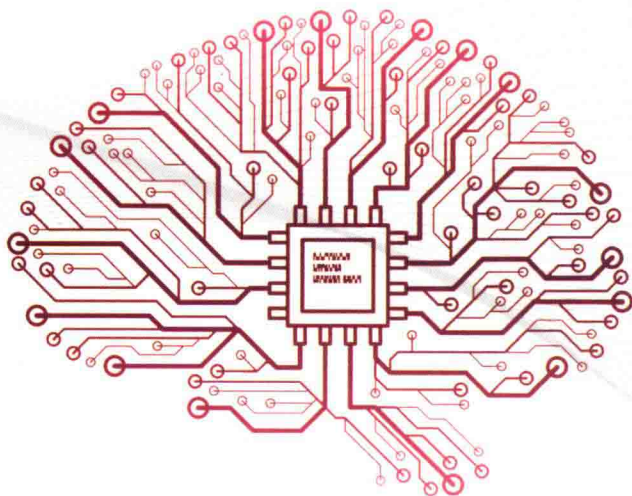


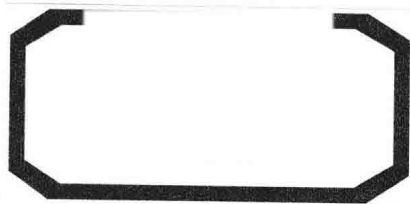
普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电路分析基础

Basis of Circuit Analysis

◎ 董翠莲 主编





普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电路分析基础

主 编 董翠莲
副主编 宋婀娜 穆秀春
参 编 赵承滨 郭静华 李 娜
主 审 郭明良

机械工业出版社

本书由多年从事电路分析基础教学和研究工作的教师团队共同编写完成。书中内容经过精心组织,注重电路分析的基础性、结构的系统性,强调知识的逻辑性与连贯性。

全书共 14 章,包括电路元件和基尔霍夫定律、线性电阻电路、电路定理、电容元件和电感元件、正弦稳态电路、含有耦合电感的电路、三相电路、频率特性和谐振电路、线性动态电路暂态过程的时域分析、线性动态电路暂态过程的复频域分析、非正弦周期电流电路、非线性电路、电路方程的矩阵形式、二端口网络。每章附有小结和习题。附录包括 Multisim 概要和研究生入学试题选及部分试题答案,可帮助学习者更好地掌握电路分析基础。

本书可作为高等学校自动化、电气工程、电子信息工程、测控技术与仪器、通信工程等专业的理论教材,也可供其他从事电气与电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/董翠莲主编. —北京:机械工业出版社, 2019.6
普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-62761-6

I. ①电… II. ①董… III. ①电路分析—高等学校—教材
IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 102625 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: 王玉鑫 责任编辑: 王玉鑫 张珂玲 刘丽敏
责任校对: 杜雨霏 封面设计: 张 静
责任印制: 李 昂
河北鹏盛贤印刷有限公司印刷
2019 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·14.75 印张·384 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-62761-6
定价: 37.00 元

电话服务

客服电话: 010-88361066
010-88379833
010-68326294

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com
机工官博: weibo.com/cmp1952
金书网: www.golden-book.com
机工教育服务网: www.cmpedu.com

封底无防伪标均为盗版

前 言

“电路分析基础”课程是高等学校电子与电气信息类专业的重要基础课，是所有强电专业和弱电专业的必修课。通过本课程的学习，读者可以掌握电路的基本理论、基本分析方法及电路实验、仿真的初步技能，并为后续课程的学习提供必要的电路理论知识和分析方法。

随着电气、电子信息技术的迅猛发展，对电气信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新都提出了更高的要求。在高等院校加强通识教育、素质教育的大背景下，我们在构建电气信息类专业基础课程体系的过程中，结合电路分析课程的改革实践编写了本书。

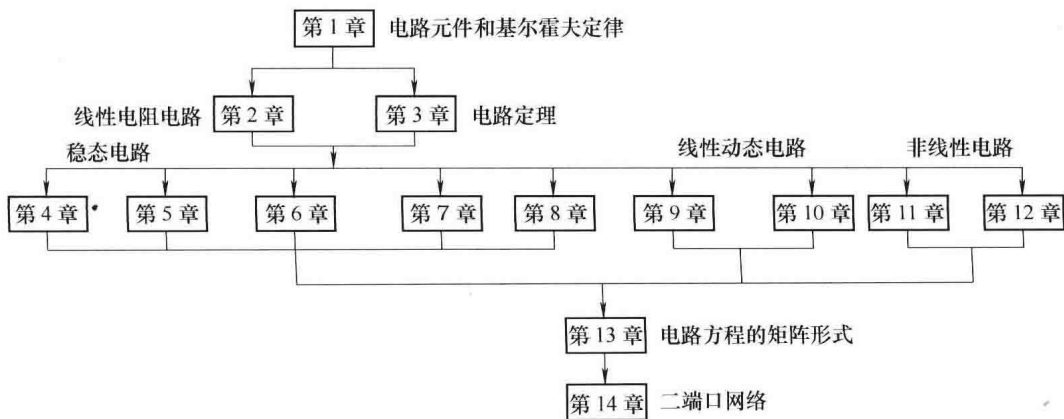
在编写过程中，特别考虑了以下问题：

(1) 强调理论和应用相结合。电路是一门理论性和工程性都非常强的学科，而电路分析课程又是电气信息类专业必修的一门专业基础课程。我们在内容上力求讲清楚电路分析的方法，以及理论基础。对一些较难、不宜在课堂上讲授，但对读者深入理解和掌握电路分析方法有帮助的内容，我们将借助计算机辅助分析的方法，力求使内容做到图文并茂，使读者更轻松地理解和掌握。

同时，在本书中有针对性地编入一些电路理论应用的内容，如谐振电路、功率因数的提高、最大功率传输等，以培养读者的工程应用意识。

(2) 难度适中，既注重基本概念、基本理论的阐述，又强调解题的技巧和灵活性。在编写过程中，详细阐述了电路分析的基本概念、基本理论和基本方法，同时根据电路分析题型多变、灵活的特点，适当强调解题的技巧性和灵活性。

(3) 以电路分析方法为主线，便于读者掌握电路分析的方法。全书编写结构如下图所示。



本书第1章主要介绍电路基本元件、基本定律。第2、3章开始介绍电路基本的分析方法和电路定理，并将这些分析方法和定理应用到正弦稳态电路（第5章）、含有耦合电感的电路（第6章）、三相电路（第7章）、谐振电路（第8章）。将电容元件和电感元件单独在第4章中阐述，是为了在讲授这些元件之后即可得到应用，增强了内容的连贯性。对动态电路的分析，将其基本概念和基本方法分在第9章和第10章中阐述，引导读者尽快理解和掌握动态电

路分析中所面对的问题及相应的分析方法,在这两章中,以动态电路的时域分析、复频域分析、状态变量分析进行分节编排,让读者理解和掌握动态电路分析方法的概貌。在第11章中对非正弦周期电流电路的概念和分析方法进行阐述,使读者对非正弦电流电路分析有一定的了解。在第12章中对非线性电路进行阐述,使读者掌握非线性动态电路暂态分析的方法。电路网络图论、网络矩阵内容放在本书的第13章,降低了起点难度,便于读者在知识的掌握上进行取舍。第14章对二端口网络的参数、特性、等效和连接进行了阐述,为将来读者从事滤波器的分析和设计做好知识准备。

(4) 强调可读性,精选例题和习题。通过例题读者可以更好地掌握电路分析方法,本书特别注重例题的选取。每章都配置了丰富的习题,通过这些习题,读者可以进一步巩固和掌握电路的基本知识和基本分析方法。

(5) 适当加入计算机辅助分析的内容。电路的计算机辅助分析是电路分析重要而实用的方法,读者应该掌握。为了让读者了解和掌握电路的计算机辅助分析方法,而又不降低对电路分析的基本概念、基本原理和基本方法的掌握效果,我们选用 Multisim 作为电路分析的辅助工具,在书中插入各种电路分析程序,供读者学习和揣摩。

本书由多位编者分工撰写,董翠莲任本书的主编,负责全书的整体规划与统稿工作,宋婀娜、穆秀春任副主编,参与编写工作的还有赵承滨、郭静华、李娜。其中电路元件和基尔霍夫定律及线性电阻电路由赵承滨编写,电路定理、电容元件和电感元件由宋婀娜编写,正弦稳态电路和含有耦合电感的电路由郭静华编写,三相电路、频率特性和谐振电路由李娜编写,线性动态电路暂态过程的时域分析、线性动态电路暂态过程的复频域分析和非正弦周期电流电路及附录由董翠莲编写,非线性电路、电路方程的矩阵形式和二端口网络由穆秀春编写。全书由郭明良主审。在本书编写过程中,郭明良提出了许多宝贵意见,在此向他表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中难免会有疏漏和不足之处,希望广大读者予以批评指正。

编者

目 录

前 言

第 1 章 电路元件和基尔霍夫定律 1

1.1 电路和电路模型 1

1.2 电流、电压及其参考方向 2

1.3 电功率与能量 4

1.4 基尔霍夫定律 5

1.5 电阻元件 8

1.6 独立电源 9

1.7 受控电源 11

本章小结 12

习题 12

第 2 章 线性电阻电路 14

2.1 电路的等效变换 14

2.2 电阻的串联、并联及等效 14

2.3 电阻的星形与三角形联结 17

2.4 电源和电阻的串联与并联 19

2.5 支路电流法 20

2.6 网孔电流法 23

2.7 回路电流法 25

2.8 结点电压法 27

2.9 含运算放大器的电路分析 29

本章小结 30

习题 30

第 3 章 电路定理 33

3.1 替代定理 33

3.2 叠加定理与齐性定理 35

3.3 戴维南定理和诺顿定理 39

3.4 特勒根定理 43

3.5 互易定理 45

3.6 对偶定理 46

本章小结 47

习题 48

第 4 章 电容元件和电感元件 51

4.1 电容元件 51

4.2 电感元件 54

4.3 电容、电感元件的串联和并联 56

本章小结 57

习题 58

第 5 章 正弦稳态电路 60

5.1 正弦量 60

5.2 正弦量的相量表示法 62

5.3 电路定律的相量形式 64

5.4 阻抗、导纳的串联和并联 69

5.5 正弦稳态电路的相量分析法 71

5.6 正弦稳态电路的功率 75

5.7 复功率 81

5.8 最大功率传输定理 82

本章小结 82

习题 84

第 6 章 含有耦合电感的电路 86

6.1 耦合电感 86

6.2 含有耦合电感电路的计算 89

6.3 理想变压器和空心变压器 93

本章小结 97

习题 98

第 7 章 三相电路 100

7.1 三相电路概述 100

7.2 对称三相电路的分析和计算 105

7.3 不对称三相电路的分析和计算 106

7.4 三相电路的功率 108

本章小结 110

习题 111

第 8 章 频率特性和谐振电路 112

8.1 网络函数和频率特性 112

8.2 RLC 串联电路的频率特性 114

8.3 RLC 串联谐振电路 117

8.4 GCL 并联谐振电路 119

本章小结 121

习题	122	本章小结	161
第 9 章 线性动态电路暂态过程的时域分析	123	习题	161
9.1 动态电路的暂态过程及其初始条件	123	第 12 章 非线性电路	162
9.2 一阶电路的零输入响应	126	12.1 非线性电阻	162
9.3 一阶电路的零状态响应	129	12.2 非线性电容和非线性电感	164
9.4 一阶电路的全响应	130	12.3 非线性电阻电路的串联和并联	166
9.5 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	132	12.4 非线性电阻电路的分析	167
9.6 二阶电路的暂态过程	137	12.5 非线性动态电路的状态方程	171
9.7 状态方程	139	本章小结	171
本章小结	141	习题	172
习题	141	第 13 章 电路方程的矩阵形式	173
第 10 章 线性动态电路暂态过程的复频域分析	143	13.1 割集	173
10.1 拉普拉斯变换的基本性质	143	13.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	174
10.2 拉普拉斯反变换	145	13.3 基尔霍夫定律方程的矩阵形式	176
10.3 电路定律与电路模型的复频域形式	148	本章小结	180
10.4 应用拉普拉斯变换分析线性动态电路的暂态过程	151	习题	180
10.5 复频域中的网络函数	152	第 14 章 二端口网络	182
本章小结	153	14.1 二端口网络概述	182
习题	153	14.2 二端口网络的方程和参数	183
第 11 章 非正弦周期电流电路	155	14.3 二端口网络等效电路	192
11.1 非正弦周期电流和电压	155	14.4 二端口网络的连接	194
11.2 非正弦周期信号的傅里叶展开	156	14.5 回转器和负阻抗变换器	197
11.3 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	157	本章小结	200
11.4 非正弦周期电流电路的计算	160	习题	200
		附录	203
		附录 A Multisim 概要	203
		附录 B 研究生入学试题选	217
		附录 C 部分试题答案	221
		参考文献	230

第 1 章 电路元件和基尔霍夫定律

内容提要

随着现代科技的飞速发展，越来越多的电子设备使我们的生活丰富多彩，许多电子设备伴随着我们的学习生活，这些电子设备遍布工农业、国防以及生产生活的各个领域，而所有的电子设备都是由各种基本电路组成的，因此，电路的基础知识、分析方法是工科院校学生应首先学习的内容，下面首先从电路和电路模型讲起。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的概念

1. 电路及其组成

通俗地讲，电路是电流通过的路径。实际电路通常是由各种电气元件（如电源、电阻、电容、电感、二极管、晶体管等）组成。每一种元件都具有各自不同的电磁特性和功能，按照人们的需要，把相关电路元件按一定方式进行组合，就构成了一个个电路。如果某个电路元器件数量很多且电路结构又较为复杂时，通常又把这些电路称为网络。

在现实生活中有许多电路，如图 1-1 所示。最简单的电路可能就是带有电池、开关和一个小灯泡的手电筒电路了。较复杂的电路是日光灯电路、扬声器电路等，更复杂的比如电动机电路、雷达导航设备电路、计算机电路等。不管简单还是复杂，电路的基本组成部分都是三个基本环节：电源、负载和中间环节。

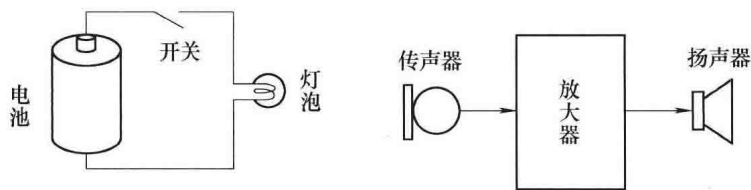


图 1-1 手电筒和扬声器电路

- 1) 电源：提供电能的装置，其作用是将其其他形式的能量转换成电能。
- 2) 负载：接收电能的装置，其作用是将电能转换成其他形式的能量。
- 3) 中间环节：电源和负载之间不可缺少的连接和控制部件，起着传输和分配能量、控制和保护电气设备的作用。

2. 电路的功能及种类

工程应用中的实际电路，按照功能的不同可概括为两大类：一是完成电能的传输、分配与转换。如照明电路中电池通过导线将电能传递给灯泡，灯泡将电能转化为光量和热能。这类电路的特点是大功率、大电流；二是实现信号的传递、变换、储存和处理的电路，比如教室用的扬声器电路。传声器将声音的振动信号转换为电信号即相应的电压和电流，经过放大处理后，

通过电路传递给扬声器，再由扬声器还原为声音。这类电路的特点是小功率、小电流。

1.1.2 理想元件与电路模型

我们将实际电路器件理想化（即只考虑元件的主要电磁特性，忽略次要因素）而得到只具有某种单一电磁性质的元件，称为理想电路元件，简称为电路元件，常见的电路元件有电阻元件、电容元件、电感元件、电压源与电流源等，其表示符号如图 1-2 所示。

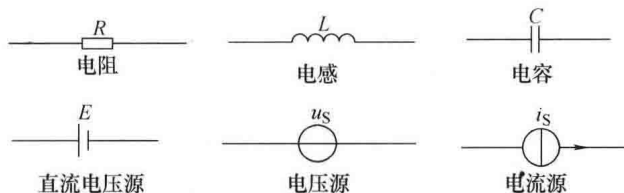


图 1-2 理想电路元件的符号

由于实际电路的电磁过程是相当复杂的，难以进行有效的理论分析和计算。

在电路理论中，为了方便于实际电路的分析和计算，我们通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理，这样抽象出实际电路元件的“电路模型”，即由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。手电筒的实际电路、原理图和电路模型如图 1-3 所示。

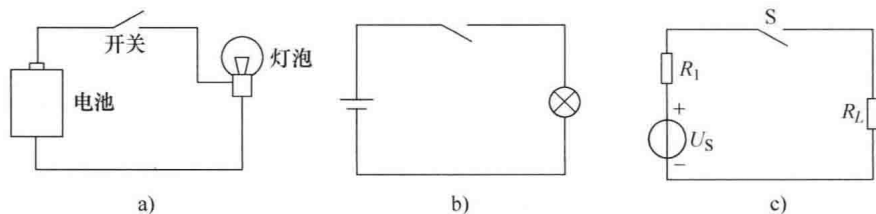


图 1-3 手电筒实际电路、原理图和电路模型

a) 实际电路 b) 原理图 c) 电路模型

1.2 电流、电压及其参考方向

电路中的变量是电流和电压。研究电路时应该首先弄清电流与电压的概念及其参考方向，对进一步掌握电路的分析与计算是十分重要的。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流

电荷的定向移动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，其定义为：单位时间内通过导体横截面的电荷量，用公式表示为

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

式中， i 是随时间变化的电流； dq 是在 dt 时间内通过导体横截面的电量。

在国际单位制中，电流的单位为安培，简称安（A）。实际应用中，大电流用千安（kA）表示，小电流用毫安（mA）表示或者用微安（ μA ）表示。它们的换算关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

在外电场的作用下，正电荷将沿着电场方向运动，而负电荷将逆着电场方向运动（金属导体内是自由电子在电场力的作用下定向移动形成电流），习惯上规定电流的实际方向为：正电

荷运动的方向或者自由电子运动的反方向。

电流有交流和直流之分，大小和方向都随时间变化的电流称为交流电流。方向不随时间变化的电流称为直流电流；大小和方向都不随时间变化的电流称为稳恒直流。

2. 电流的参考方向

由于自由电子很抽象不可见，一般很难判断出电流的实际方向，而列方程、进行定量计算时需要电流有一个约定的方向；对于交流电流，电流的方向随时间改变，无法用一个固定的方向表示，因此引入电流的“参考方向”。

电流的参考方向是可以任意设定的电流的假定正方向，电流参考方向的表示方法有两种，如图 1-4 所示。用箭头表示（图 1-4a）和用带双下标的字母表示（图 1-4b），其中 i_{ab} 表示电流 i 的参考方向由 a 指向 b 。

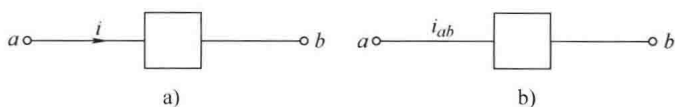


图 1-4 电流的参考方向

当电流的实际方向与参考方向一致时，电流的数值就为正值（即 $i > 0$ ）；当电流的实际方向与参考方向相反时，电流的数值就为负值（即 $i < 0$ ），如图 1-5 所示。需要注意的是，未规定电流的参考方向时，电流的正负没有任何意义。

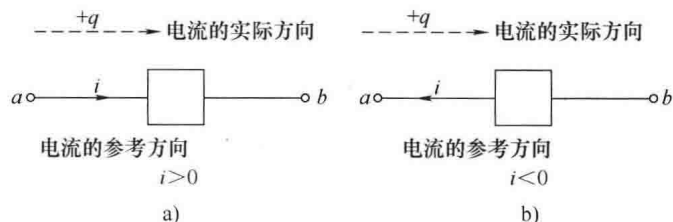


图 1-5 电流及其参考方向

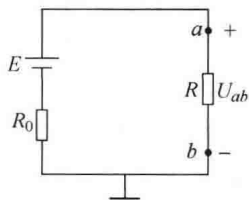
1.2.2 电压及其参考方向

1. 电压

在电场力的作用下，正电荷要从电源正极 a 经过导线和负载流向负极 b （实际上是带负电的电子由负极 b 经负载流向正极 a ），形成电流，而电场力就对电荷做了功。电场力把单位正电荷从 a 点经外电路（电源以外的电路）移到 b 点所做的功，叫作 a 、 b 两点之间的电压，记作 U_{ab} 。如图 1-6 所示。因此，电压是衡量电场力做功本领大小的物理量。

若电场力将正电荷 dq 从 a 点经外电路移到 b 点所做的功是 dw ，则 a 、 b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2) \quad \text{图 1-6 电压的定义}$$



在国际单位制中，电压的单位为伏特，简称伏（V）。实际应用中，大电压用千伏（kV）表示，小电压用毫伏（mV）表示或者用微伏（ μV ）表示。它们的换算关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

电压的实际方向规定为从高电位指向低电位，在电路图中可用“+”“-”表示，也可用箭头来表示。

2. 电压的参考方向

复杂电路通常不容易确定电路中任意两点间的电压，为了分析和计算方便，与电流的方向规定类似，在分析计算电路之前必须对电压标以极性标注（正、负号），或标以方向（箭头），

这种标法就是参考方向，如图 1-7 所示。如果采用双下标 u_{ab} 标记时，意味着电压的参考方向从 a 指向 b ，若电压参考方向选 b 点指向 a 点，则应写成 u_{ba} ，两者仅差一个负号，即 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

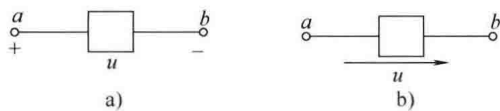


图 1-7 电压的参考方向

分析求解电路时，先按选定的电压参考方向进行分析、计算，再由计算结果中电压值的正负来判断电压的实际方向与任意选定的电压参考方向是否一致；即电压值为正，则实际方向与参考方向相同，电压值为负，则实际方向与参考方向相反。

显然，假设了参考方向之后，电流和电压都变成了代数量。由于电压和电流的参考方向都是任意指定的，对于同一元件，电压与电流参考方向的关系有两种可能性——两者一致或相反，当电流参考方向与电压的参考方向一致或相反，前者称电流与电压为关联参考方向，后者称电流与电压为非关联参考方向，如图 1-8 所示。

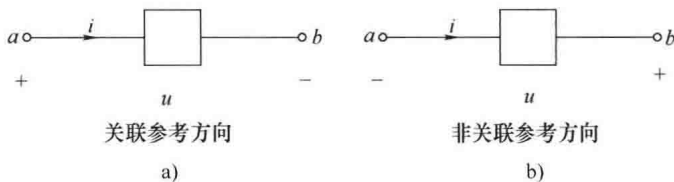


图 1-8 关联参考方向与非关联参考方向

1.3 电功率与能量

1.3.1 电功率

电流通过电路时传输或转换电能的速率，即单位时间内电场力所做的功，称为电功率，简称功率。数学描述为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

式中， p 表示功率。国际单位制中，功率的单位是瓦特（W），规定元件 1s 内提供或消耗 1J 能量时的功率为 1W。常用的功率单位还有毫瓦（mW）和千瓦（kW）。换算关系为

$$1\text{kW} = 1000\text{W} = 10^6\text{mW}$$

将式（1-3）等号右边分子、分母同乘以 dq 后，变为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

可见，元件吸收或发出的功率等于元件上的电压乘以元件上的电流。

当 u 、 i 为关联参考方向时

$$p = ui \text{ (直流功率 } P = UI) \quad (1-5a)$$

当 u 、 i 为非关联参考方向时

$$p = -ui \text{ (直流功率 } P = -UI) \quad (1-5b)$$

无论关联与否，只要计算结果 $p > 0$ ，则该元件就是在吸收功率，即消耗功率，该元件是负载；若 $p < 0$ ，则该元件是在发出功率，即产生功率，该元件是电源。

根据能量守恒定律，对一个完整的电路，发出功率的总和应正好等于吸收功率的总和。

例 1-1 计算图 1-9 中各元件的功率，指出是吸收还是发出功率，并求整个电路的功率。

已知电路为直流电路, $U_1=1\text{V}$, $U_2=-2\text{V}$, $U_3=3\text{V}$, $I=2\text{A}$ 。

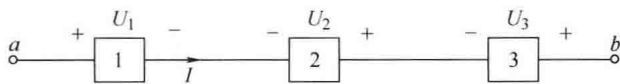


图 1-9 例 1-1 电路图

解 在图中, 元件 1 电压与电流为关联参考方向, 由式 (1-5a) 得

$$P_1 = U_1 I = 1 \times 2\text{W} = 2\text{W}$$

故元件 1 吸收功率。

元件 2 和元件 3 电压与电流为非关联参考方向, 由式 (1-5b) 得

$$P_2 = -U_2 I = -(-2) \times 2\text{W} = 4\text{W}$$

$$P_3 = -U_3 I = -3 \times 2\text{W} = -6\text{W}$$

故元件 2 吸收功率, 元件 3 发出功率。

整个电路功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (2 + 4 - 6)\text{W} = 0$$

本例中, 元件 1 和元件 2 的电压与电流实际方向相同, 两者吸收功率; 元件 3 的电压与电流实际方向相反, 发出功率。由此可见, 当电压与电流实际方向一致时, 电路一定是吸收功率, 是负载; 反之 (当电压与电流实际方向相反时) 则发出功率, 是电源。

1.3.2 电能

电路在一段时间内消耗或提供的能量称为电能。电路元件在 t_0 到 t 时间内消耗或提供的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 电能的单位是焦耳 (J)。1J 等于 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。通常电业部门用“度”作为单位测量用户消耗的电能, “度”是千瓦·时 (kW·h) 的简称。1度 (或 1kW·h) 电等于功率为 1kW 的元件在 1h 内消耗的电能。即

$$1 \text{ 度} = 1\text{kW} \cdot \text{h} = 10^3 \times 3600\text{J} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

如果通过实际元件的电流过大, 会由于温度升高使元件的绝缘材料损坏, 甚至使导体熔化; 如果电压过大, 会使绝缘击穿, 所以必须加以限制。

电气设备或元件长期正常运行的电流允许值称为额定电流, 其长期正常运行的电压允许值称为额定电压; 额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。如一白炽灯标有“220V、40W”, 表示它的额定电压为 220V, 额定功率为 40W。

1.4 基尔霍夫定律

电路中各元件的电压与电流除受自身的伏安关系约束外, 还受元件之间连接方式的制约。这种由电路结构所形成的约束关系, 可用基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 来描述, 它是分析电路的基本定律, 包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律两条。

基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 是描述电路中电压、电流遵循的最基本规律。在介绍基尔霍夫定律之前, 首先结合图 1-10 介绍若干表述电路结构的名词。

支路: 由单个或若干个元件串联组成的分支称为电路的一个支路。含有电源元件的支路称为有源支路, 不含电源元件的支路称为无源支路。一条支路流过同一个电流, 称为支路电流。

图 1-10 中共有三条支路, 其中 acb 和 adb 为有源支路, 支路电流分别为 I_1 和 I_2 , ab 为无源支路, 支路电流为 I_3 。

结点: 电路中由三条或三条以上支路交汇的点称为结点 (也可称为节点)。图 1-10 中共有两个结点, 分别为 a 结点和 b 结点, 而 c 点和 d 点都不是结点。由图 1-10 还可以看出, 每一条支路都是连接在两个结点之间的。两个结点之间的电压, 称为结点电压。任一个结点可列出一个电流方程, 但并非所有结点列出的电流方程都是独立的电流方程。

回路: 电路中由一条或多条支路所组成的任一闭合路径, 称为回路。在图 1-10 中共有 3 条回路, 分别为 $acba$ 、 $adba$ 和 $acbda$ 。任一回路可列出一个电压方程, 但并非所有回路列出的方程都是独立的电压方程。

网孔: 在平面电路中, 不包围任何支路的单孔回路称网孔。网孔一定是回路, 而回路不一定是网孔, 图 1-10 中共有 2 个网孔, 分别为网孔 I 和网孔 II。每个网孔所列出的电压方程均为独立方程, 故网孔也称为独立回路。

基尔霍夫定律是分析电路的基本定律, 包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律两条, 先讨论电流定律。

1.4.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 又称第一定律。它是基于电荷守恒定律和电流连续性, 描述连接于电路同一结点的各支路电流之间关系的定律。KCL 指出, 在任一时刻, 流入电路中任一结点的电流总和等于由该结点流出的电流总和。即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-7)$$

在图 1-10 所示电路中对结点 a 可以写出 $I_1 = I_2 + I_3$, 整理后, 还可以写成 $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ 。基尔霍夫电流定律也可以这样描述: 在任一时刻, 流入 (或流出) 结点电流的代数和恒等于零。即

$$\sum I_{\text{入}} = 0 \quad (1-8)$$

在这里, 对电流的“代数和”做出这样的规定: 如果以流入结点的电流为“+”, 则流出结点的电流为“-” (反之亦然)。

KCL 不仅适用于电路中的任一结点, 也可推广应用于广义结点, 即包围部分电路的任一闭合面。可以证明流入或流出任一闭合面电流的代数和为 0。如图 1-11 所示电路中, 虚线闭合面围成的电路, 有 3 条支路穿过该闭合面, 支路电流分别为 I_1 、 I_2 和 I_3 。根据基尔霍夫电流定律可以得出闭合面电流方程式为

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1-9)$$

例 1-2 如图 1-12 所示电桥电路, 已知 $I_1 = 25\text{mA}$, $I_3 = 16\text{mA}$, $I_4 = 12\text{mA}$, 试求其余电阻中的电流 I_2 、 I_5 、 I_6 。

解 在结点 a 上: $I_1 = I_2 + I_3$, 则 $I_2 = I_1 - I_3 = 9\text{mA}$

在结点 d 上: $I_1 = I_4 + I_5$, 则 $I_5 = I_1 - I_4 = 13\text{mA}$

在结点 b 上: $I_2 = I_6 + I_5$, 则 $I_6 = I_2 - I_5 = -4\text{mA}$

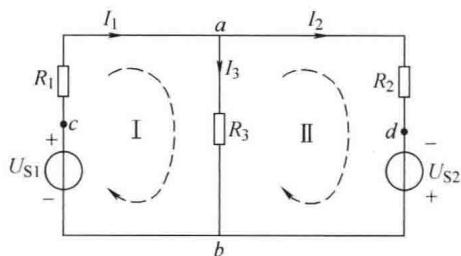


图 1-10 支路、回路与结点

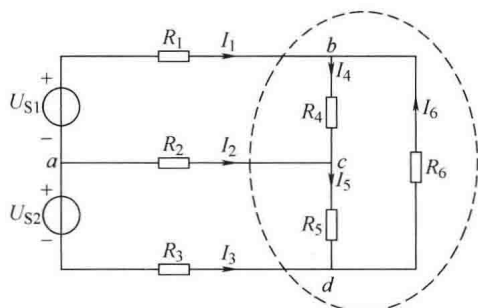


图 1-11 广义 KCL

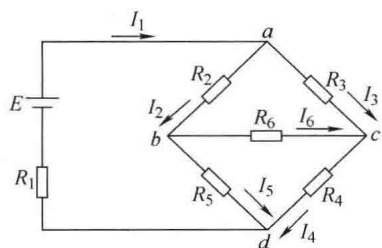


图 1-12 例 1-2 图

例 1-3 求图 1-13 所示电路中的电流 I_2 。

解 本题主要练习 KCL 的应用。在列写方程时应注意，KCL 即适用于结点，也适用于广义结点（闭合面）。

方法 1：根据 KCL 先对结点 a 列写方程

$$4 - 6 - I_1 = 0 \Rightarrow I_1 = -2\text{A}$$

再对结点 b 列写方程

$$5 + 3 + I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = 6\text{A}$$

方法 2：将图 1-13 中的虚线闭合面看成一个广义结点，对该闭合面列写 KCL 方程为

$$4 + 5 - 6 + 3 - I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = 6\text{A}$$

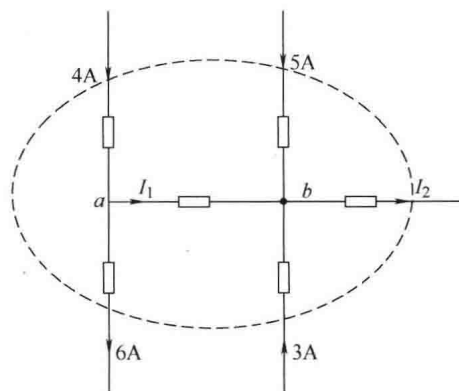


图 1-13 例 1-3 图

1.4.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) 又称第二定律。它是能量守恒定理在电路中的体现，反映了电路中电位的单值性，它给出了电路中组成回路的各部分电压之间的约束关系。KVL 指出，在任一时刻，沿任一闭合回路循行一周，回路中各部分电压降的总和恒等于各部分电压升的总和。即

$$\sum U_{\text{降}} = \sum U_{\text{升}} \quad (1-10)$$

基尔霍夫电压定律也可以这样描述：在任一时刻，沿着一定的循行方向绕行一周，各段电压的代数和恒为零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-11)$$

应用式 (1-10) 列 KVL 的电压方程时，首先应假设出回路中各元件电压的参考方向，并且选定一个绕行方向。回路的绕行方向可以选择顺时针方向，也可以选择逆时针方向，如图 1-10 中网孔 I 和网孔 II 虚线所示。当电压的参考方向与回路的绕行方向一致时，该元件上的电压称为电压降；反之，电压的参考方向与回路的绕行方向相反时的电压称为电压升。根据这一规定，在图 1-10 中网孔 I 和网孔 II 分别沿着顺时针方向绕行，网孔 I 和网孔 II 的 KVL 电压方程分别为

$$\text{网孔 I: } I_1 R_1 + I_3 R_3 = U_{S1} \quad (1-12)$$

$$\text{网孔 II: } I_2 R_2 = U_{S2} + I_3 R_3 \quad (1-13)$$

同理，应用 KVL 定律，也可以列出 $adbca$ 回路的电压方程为

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = U_{S1} + U_{S2} \quad (1-14)$$

应用式 (1-11) 时, 当参考方向与回路的绕行方向一致时取 “+”, 当参考方向与回路的绕行方向相反时取 “-”, 此时网孔 I 和网孔 II 的 KVL 电压方程分别为

$$\text{网孔 I: } I_1 R_1 + I_3 R_3 - U_{S1} = 0 \quad (1-15)$$

$$\text{网孔 II: } I_2 R_2 - U_{S2} - I_3 R_3 = 0 \quad (1-16)$$

KVL 不仅适用于闭合回路, 也可以推广应用到非闭合电路 (开口电路)。如图 1-14 所示电路是一个开口电路, 若在 ab 开口两端假想存在一个电压 U_{ab} , 并将它设想为一个闭合回路。若按图中虚线所示的绕行方向循行一周, 根据 KVL 可列出开口电路的电压方程为

$$U_S = U_{ab} + IR \quad (1-17)$$

例 1-4 有一闭合回路如图 1-15 所示, 各支路的元件是任意的, 但已知: $U_{ab} = 5\text{V}$, $U_{bc} = -4\text{V}$, $U_{da} = -3\text{V}$ 。试求: (1) U_{cd} ; (2) U_{ca} 。

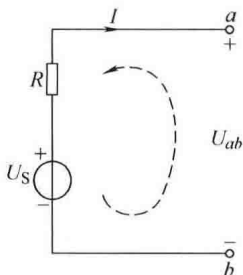


图 1-14 非闭合电路的 KVL

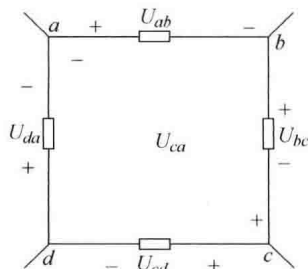


图 1-15 例 1-4 图

解 (1) 由基尔霍夫电压定律可列出

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$$

即

$$5 + (-4) + U_{cd} + (-3) = 0 \Rightarrow U_{cd} = 2\text{V}$$

(2) $abca$ 不是闭合回路, 可以应用基尔霍夫电压定律列出

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0$$

即

$$5 + (-4) + U_{ca} = 0 \Rightarrow U_{ca} = -1\text{V}$$

综上所述, KCL 反映了电路的结构对结点上各支路电流的约束关系; 而 KVL 反映了对回路中各部分电压的约束关系。必须指出的是, 以上在对基尔霍夫定律的讨论中, 对各支路元件并无要求, 也就是说基尔霍夫定律只与电路的结构有关, 而与元件的性质无关, 故适合于任何线性或非线性电路。

1.5 电阻元件

电阻是一种最简单、最常见, 用于反映电流热效应的二端电路元件。电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类, 如无特殊说明, 本书所称电阻元件均指线性电阻元件。在实际交流电路中, 像白炽灯、电阻炉、电烙铁等, 均可看成是线性电阻元件。图 1-16a 是线性电阻的符号, 在电压、电流关联参考方向下, 其端钮伏安关系为

$$u = Ri \quad (1-18a)$$

式中, R 为常数, 用来表示电阻及其数值。

式 (1-18a) 表明, 凡是服从欧姆定律的元件即是线性电阻元件。图 1-16b 为它的伏安特性曲线。若电压、电流在非关联参考方向下, 伏安关系应写成

$$u = - Ri \quad (1-18b)$$

在国际单位制中,电阻的单位是欧姆(Ω),规定当电阻电压为1V、电流为1A时的电阻值为 1Ω 。此外,电阻的单位还有千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$)。电阻的倒数称为电导,用符号 G 来表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-19)$$

电导的单位是西门子(S)或1/欧姆($1/\Omega$)。

同一个电阻元件,既可以用电阻 R 表示,也可以用电导 G 表示。引用电导后,欧姆定律可表达为

$$i = uG \quad (1-20)$$

电阻是一种耗能元件。当电阻通过电流时会发生电能转换为热能的过程。电阻所吸收并消耗的电功率可由下式计算得到:

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-21)$$

一般地,电路消耗或发出的电能可由以下公式计算:

$$W = \int_{t_0}^t uiddt \quad (1-22)$$

在直流电路中:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-23)$$

$$W = UI(t - t_0) \quad (1-24)$$

如果电阻元件的电阻值不是一个常数,也就是说,它的数值会随着其工作电压或电流的变化而变化,那么这样的电阻元件称为非线性电阻元件,它的伏安特性就不再是一条通过原点的直线。如图1-17所示是二极管的伏安特性曲线,它是非线性的。

1.6 独立电源

在组成电路的各种元件中,电源是提供电能或电信号的元件,常称为有源元件,如发电机、电池和信号源等。电源中,能够独立地向外电路提供电能的电源,称为独立电源;不能独立向外电路提供电能的电源称为非独立电源,又称为受控源。本节先介绍独立电源,独立电源可用两种不同的电路模型表示——用电压形式表示的称为电压源;用电流形式表示的,称为电流源。

1.6.1 电压源

理想电压源是实际电源的一种抽象。它的端电压总能保持某一恒定值或时间函数值,而与

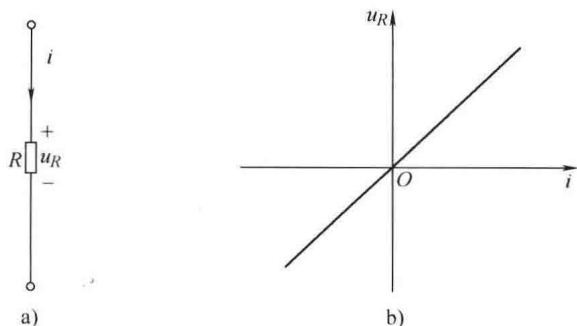


图 1-16 电阻元件及其伏安特性曲线

a) 电阻元件 b) 伏安特性曲线

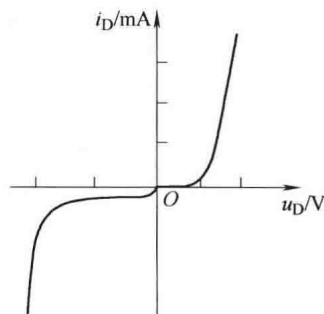


图 1-17 二极管伏安特性曲线

通过它的电流无关,也称为恒压源。图 1-18a 为理想电压源的表示符号,图 1-18b 是理想电池表示符号,专指理想直流电压源。理想电压源的伏安特性可写为

$$u = u_s(t) \quad (1-25)$$

理想电压源的电流是任意的,与电压源的负载(外电路)状态有关。图 1-18c 为理想电压源的伏安特性曲线。

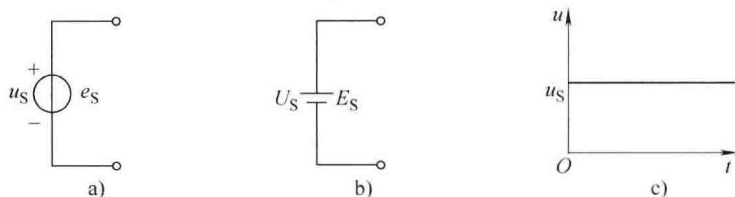


图 1-18 理想电压源

a) 理想电压源的表示符号 b) 理想电池的表示符号 c) 理想电压源的伏安特性

实际的电源总是有内部消耗的,只是内部消耗通常都很小,因此可以用一个理想的电压源元件与一个阻值较小的电阻 R_0 (称内阻) 串联组合来等效,如图 1-19a 点画线部分所示。

当电压源两端接上负载 R_L 后,负载上就有电流 i 和电压 u ,分别称为输出电流和输出电压。在图 1-19a 中,电压源的外特性方程为

$$u = u_s - iR_0 \quad (1-26)$$

由此可画出电压源的外部特性曲线,如图 1-19b 的实线部分所示,它是具有一定斜率的直线段,因内阻很小,所以外特性曲线较平坦。

根据式 (1-26),该电路的功率平衡关系式为

$$ui = u_s i - i^2 R_0 \quad (1-27)$$

其中,负载 R_L 上消耗的功率为 $P_0 = ui$,电压源发出功率为 $P_E = u_s i$,电压源内阻消耗的功率为 $\Delta P_0 = i^2 R_0$ 。通常情况下,实际电压源内阻 R_0 是比较小的,因为 R_0 越小,输出电压越大,当 $R_0 = 0$ 时,输出电压 $u = u_s$,称理想电压源。

电压源不接外电路时,电流总等于零值,这种情况称为“电压源处于开路”。当 $u_s(t) = 0$ 时,电压源的伏安特性曲线为 $u-i$ 平面上的电流轴,输出电压等于零,这种情况称为“电压源处于短路”,实际中是不允许发生的。

1.6.2 电流源

刚才讨论的电压源是电压恒定,电流随外接负载变化,反之电流恒定,电压随外接负载变化的元件称电流源。理想电流源也是实际电源的一种抽象。它提供的电流总能保持恒定值或时间函数值,而与它两端所加的电压无关,也称为恒流源。理想电流源两端所加电压是任意的,与电流源的负载(外电路)状态有关。图 1-20 为理想电流源的表示符号和伏安特性。

实际的电源总是有内部消耗的,只是内部消耗通常都很小,因此实际电流源可以用一个理