

21 SHIJI DIANGONGXUE XILIE JIAOCAI

21世纪电工学系列教材

DIANLU

电路基础

Dianlu Jichu

主编 张晓冬 王英

21 世纪电工学系列教材

电 路 基 础

主 编 张 晓 冬 王 英

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 提 要

本书共 8 章, 内容包括: 电路元件和电路定律、线性电路的分析和定理、正弦交流稳态电路分析、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的暂态分析、电路仿真、电工测量基础。本教材可供 24~48 学时使用。

本书可作为任何普通高等学校非电类本科专业的教材, 也适合包括电类在内的各专业高职高专以及成人教育、网络教育, 还可供各类工程技术人员和自学者参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

电路基础 / 张晓冬, 王英主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2008.12

(21 世纪电工学系列教材)

ISBN 978-7-5643-0165-1

I. 电… II. ①张…②王… III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 211774 号

21 世纪电工学系列教材

电路基础

主编 张晓冬 王 英

*

责任编辑 黄淑文

封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 14.375

字数: 361 千字 印数: 1—5 000 册

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0165-1

定价: 25.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

以电工电子技术为教学内容的“电工学”是我国高等教育体系中非电类专业的一门传统的技术基础课程。电工电子技术的发展日新月异，且应用十分广泛，已经渗透到很多学科领域。“电工学”分为电路基础、电机与控制、模拟电子技术和数字电子技术等几部分。随着我国高等教育改革的展开，作为一门课程名称的“电工学”已很少出现，取而代之的是电工电子技术、电工技术、电子技术、电路等具体名称，由这些课程组成课程群；各院校安排的学时数也不尽相同。

2005 年，教育部电子信息科学与电气信息类专业教学指导委员会制定了“电子信息科学与电气信息类基础课程教学基本要求”，包括“电工学”在内共 12 门课程。

本书是“电工学”中的理论基础部分“电路基础”，是根据“电工学课程教学基本要求”中的理论教学的电路理论部分编写的，包含了全部基本内容和可选内容，使教学具有更大的灵活性。在编写过程中，编者充分考虑到多数普通高等学校的教学改革情况，吸收了包括自身在内的各级精品课程多年的建设成果。在内容上，力求在保持经典理论足够篇幅的基础上增加新知识、新技术、新手段，使读者在学习过程中提高能力。在讲解上，尽量引用结合实际例子，以增强趣味性和时代感。

本书共分 8 章：电路元件和电路定律、线性电路的分析和定理、正弦交流电路稳态分析、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的暂态分析、PSpice 电路仿真、电工测量基础。附录 A 列出了部分术语的中英文对照，附录 B 为本书所涉及的电路符号对照。依据内容的取舍，本书的适用学时为 24~48。

本书可作为任何普通高等学校非电类本科专业的教材，也适合包括电类在内的各专业高职高专以及成人教育、网络教育，还可供各类工程技术人员和自学者参考。

本书由北京交通大学张晓冬和西南交通大学王英主编，王英主编第 1、2、3 章，张晓冬主编其余各章及附录，何圣仲参编第 1、2 章，李冀昆参编第 3 章，马晓春参编第 4、5、8 章，卢艳霞参编第 7 章及附录，全书由张晓冬统编。成书过程中参考了大连交通大学张继和教授等专家的意见和建议，责任编辑黄淑文老师为本书的出版付出了大量心血，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促，书中不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 电路元件和电路定律	1
1.1 电路模型和变量	1
1.2 电路元件	7
1.3 基尔霍夫定律	16
1.4 电阻电路	20
1.5 理想电源电路	28
本章小结	32
习 题	33
第 2 章 线性电路的分析和定理	39
2.1 电源模型的等效变换法	39
2.2 支路电流法	42
2.3 结点电压法	43
2.4 叠加定理	49
2.5 戴维南定理与诺顿定理	53
2.6 最大功率传输定理	62
本章小结	66
习 题	67
第 3 章 正弦交流电路稳态分析	74
3.1 正弦函数与相量	74
3.2 基尔霍夫定律的相量形式和元件伏安特性	84
3.3 RLC 电路的阻抗	91
3.4 正弦电路的稳态分析	100
3.5 RLC 电路的功率	103
3.6 谐 振	116
本章小结	123
习 题	125
第 4 章 三相电路	133
4.1 对称三相正弦交流电源	133
4.2 三相负载的连接	136
4.3 对称三相电路电压、电流的计算	136
4.4 对称三相电路的功率	139
4.5 无中线的不对称三相电路	143

4.6 安全用电	144
本章小结	155
习 题	157
第 5 章 非正弦周期电流电路	158
5.1 非正弦周期量的分解	158
5.2 非正弦周期电流电路的计算	162
5.3 非正弦周期电流电路的有效值和平均功率	163
本章小结	166
习 题	166
第 6 章 电路的暂态分析	169
6.1 换路定则和暂态过程初始值	169
6.2 RC 电路的零输入响应和零状态响应	172
6.3 一阶线性电路的全响应和三要素法	177
本章小结	180
习 题	180
第 7 章 PSpice 电路仿真	183
7.1 PSpice 概述	183
7.2 OrCAD /PSpice10.5 初步了解	185
7.3 直流分析	192
7.4 交流频率扫描分析	197
7.5 瞬态分析	199
7.6 参数扫描分析	201
本章小结	203
习 题	203
第 8 章 电工测量基础	206
8.1 测量的基本概念	206
8.2 电量测量	208
8.3 电流表、电压表和功率表的构成	210
8.4 非电量测量	212
8.5 现代测量技术	213
本章小结	216
习 题	216
附录 A 部分术语中英文对照	218
附录 B 本书所涉及电路符号对照	222
参考文献	223

第 1 章

电路元件和电路定律

本章主要讨论电路的基本概念、基本元件、基本定律、基本电路结构和规律。论述电路中电压、电流受到的两种约束，即元件特性的约束和基尔霍夫定律的约束。阐述电路元件串联、并联、星三角连接的等效分析方法和等效概念，为后续各章节的知识点讨论和学习奠定基础。

1.1 电路模型和变量

1.1.1 电路基本概念

1. 电 路

电路是由电子电气设备和电路元件通过各种方式相互连接形成电流通路的系统。电路的结构和功能种类繁多，常用的如手机、计算机、测量仪器仪表，复杂的如电力电子系统、电气控制系统等。

电路可分为线性电路和非线性电路，由线性元件组成的电路称为线性电路，至少含有一个非线性元件的电路称为非线性电路。线性电路最基本的特性有叠加性和齐次性。

叠加性：线性电路中含有若干个输入信号同时作用时，其输出等于各个输入信号单独作用时产生的输出叠加，此即为线性电路的叠加性。如图 1.1.1 (b) 所示，当信号 x_2 为零时，输入信号 x_1 产生的输出为 y_1 ；当信号 x_1 为零时，输入信号 x_2 产生的输出为 y_2 ；当信号 x_1 和 x_2 共同作用时，其输出为 y_1+y_2 。

齐次性：若输入信号 x 产生输出为 y ，则当输入信号为 kx 时，其产生的输出为 ky ，此即线性电路的齐次性。如图 1.1.1 (c) 所示。

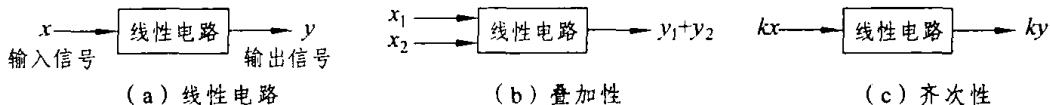


图 1.1.1 线性电路的叠加性和齐次性

严格地讲，线性电路在实际中是不存在的。但是在一定条件下，实际电路可以近似视为线性电路，即实际电路在一定条件下理想化为线性电路。本篇作为电路理论的基本教材，重点研究线性电路。

2. 电路的作用

- ① 实现电能的传输、转换及分配。

例如，电力系统（见图 1.1.2），电路的主要作用是将发电机提供的电能传输和分配到各用电设备。其中：发电机又称为电源，是提供电能的设备，其功能是把热能、水能或核能等其他形式的能量转换成电能；变压器和输电线的作用是实现电能的分配和传输；电动机、电炉、电灯等用电设备统称为负载，其功能是把电能转换成机械能、热能和光能等。

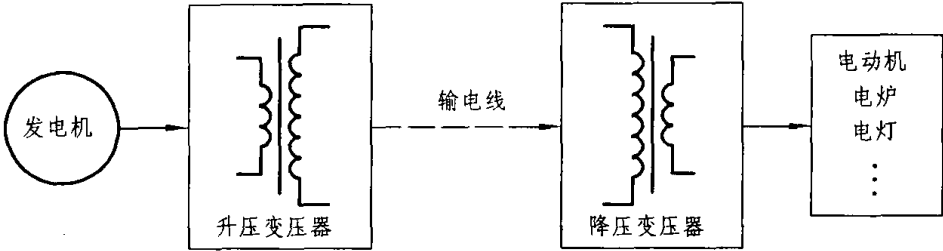


图 1.1.2 电力系统示意图

② 实现信号的传递和处理。

信号传递和处理的实例很多，如手机、计算机、电视机等，它们把载有语言、文字、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，通过电子电路对信号进行传递和处理，还原为原始信息（如声音、图像等）输出到扬声器、显示器等。

1.1.2 电路模型

实际电路是由电子元件、电气器件及设备与导线等构成。这些实际部件在工作过程中往往同时产生几种物理效应，常常要进行理想化处理。例如，一个白炽灯[见图 1.1.3 (a)]通电后除了发光发热（电阻性）外，在灯丝两头有电压，故两极之间有电场效应（即电容性），在灯丝中通过的电流会产生磁场，因而灯丝又有电感性。电阻性、电容性和电感性这三种物理效应同时存在于白炽灯工作中，但其电阻性是主要的，而电容性和电感性较小可忽略不计。因此，可把白炽灯理想化为集总参数的电阻值 R 元件，并在电路图中抽象化为一个电路图形符号，如图 1.1.3 (b) 所示。



图 1.1.3 白炽灯与其电路模型

电路理论往往不是直接研究实际的电路，而是研究实际电路的数学模型，又称电路模型或电路图。电路模型是由抽象的理想化电路元件（简称电路元件）相互连接构成的。每一种电路元件只表征一种物理特性，可以用精确的数学关系来定义。实际的器件可以根据其表现出的物理效应用一种或几种电路元件来描述。例如，一个实际的电感线圈，在一般频率下可用电路元件电阻和电感的串联组合来描述，如图 1.1.4 所示；但如果在频率较高时电场效应不可忽略，这时电感线圈有三种物理效应：发热效应、磁场效应和电场效应，其电路模型可用电路元件电阻和电感串联、再并联一个电容来描述，如图 1.1.5 所示。

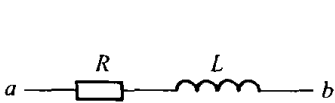


图 1.1.4 一般频率下线圈的电路模型

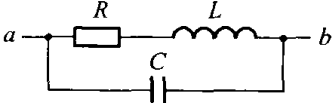


图 1.1.5 高频下线圈的电路模型

由上述可见，同一实际器件在不同的条件下，所得的电路模型有所不同。电路模型主要是由实际器件在一定条件下所表现出的物理效应来决定，即电路模型的建立是有条件的，并且通过电路模型分析出的结果在一定的精度范围内与实际电路的特性相符。本章主要讨论电路模型的分析计算，不涉及实际器件如何建立电路模型的问题。

由于构成电路模型的电路元件都满足集总参数条件，因此，电路模型的大小和几何形状不影响电路的特性。

1.1.3 电压、电流和功率

电路变量是用来对电路模型进行描述的，电路分析的任务则是计算出特定的电路变量，进而了解电路的特性和技术指标。在电路分析中主要分析可实际测量的变量——电压和电流，通过电压和电流变量可计算出电路模型中的其他物理量，如功率、电路元件参数等，因此，电压和电流又称为电路的基本变量。

1. 电 压

为了克服正电荷和负电荷之间存在引力，以功的形式施加一定的能量，将异性电荷拉开一定的距离，从而使异性电荷间存在一定的势能，这种电荷的势能差称为电势差，又称为电压。电压是电路中的驱动力，是产生电流的原因。

设一个定量的正电荷 dq 从电路中 a 点移动到 b 点时，能够放出的能量为 dW ，则电路中 a 、 b 两点间的电压 u [单位为伏特 (V)] 定义为

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1.1.1)$$

式中， u 的单位为伏特 (V)， W 的单位为焦耳 (J)， q 的单位为库仑 (C)。

在电路分析中常用电位来表示电压，即任意两点间的电位之差称为电压。电路中的电位是相对参考点而定义的电压。如图 1.1.6 所示，设 O 点为电路的参考点， a 点的电位为 v_a ， b 点的电位为 v_b ，则 a 、 b 两点间的电压为 u_{ab} ，即

$$u_{ab} = v_a - v_b$$

在实际电路中，参考点通常选为大地、设备机壳或某一个公共连接点。在电路分析中，可以任意选择电路中的某一点为参考点，即设参考点的电位为零。因此，电路中各点的电位值与所选定的参考点有关，但任意两点间的电压则与参考点的选择无关。例如，图 1.1.6 中的参考点改选为 b 点，如图 1.1.7 所示，这时 b 点的电位为零， O 点的电位为 v_o ， a 点的电位等于 a 、 b 两点间的电压，即

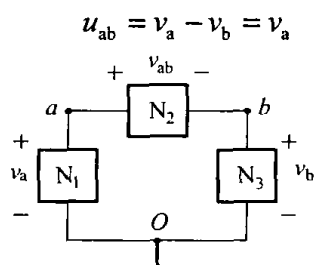


图 1.1.6 电压与电位

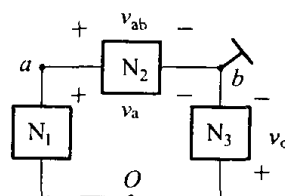


图 1.1.7 参考点、电位与电压

由于图 1.1.6 与图 1.1.7 所选择的参考点不同, 所以同一点的电位不同, 但任意两点间的电压是固定不变的, 即电压不会因参考点的不同而发生变化。

在电路分析中定义的电压相当于物理学中的电势降落。因此, 实际电压的方向定义为由高电位端指向低电位端, 高电位端用 “+” 符号表示, 低电位端用 “-” 符号表示。也可用双下标或箭头表示电压的方向。如图 1.1.8 所示是负载上相同电压极性的三种表示方式。

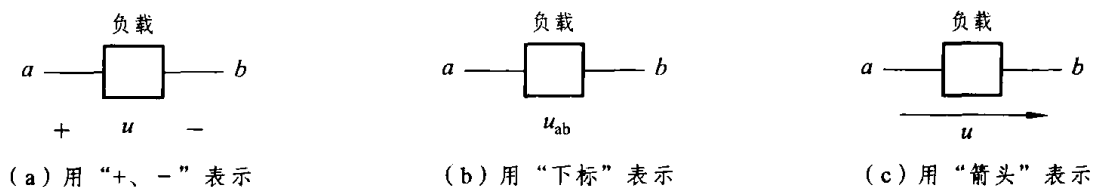


图 1.1.8 电压方向的表示方式

在复杂电路分析计算前, 电压的实际方向很难判断, 这时必须假定电压的方向, 即电压的参考方向 (参考极性)。具有参考方向电压的数学表示才有物理意义。

根据参考方向计算出电压数值, 如果是正值, 说明该电压的参考方向与实际方向相同; 如果是负值, 则表明该电压的参考方向与实际方向相反。电路中电压的参考方向是任意假设的 (见章节: 1.1.4 参考方向)。

注意: 电动势 E 的参考方向是在电源内部由低电位端指向高电位端, 即为电位升高的方向。当电压源电动势和电压的参考方向用箭头表示时, 两者相反; 但是, 当用 “±” 表示时, 两者相同。

2. 电 流

电流的物理意义是电荷质点的定向运动。单位时间内通过导体横截面积的电量定义为电流强度 i (简称电流), 即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.2)$$

式中, i 的单位为安培 (A), q 的单位为库仑 (C), t 的单位为秒 (s)。

在工程上规定正电荷移动的方向为电流方向。在电路模型中, 电流方向有两种表示方法: 箭头和双下标, 如图 1.1.9 所示, 两种表示方法均表示电流方向为从 a 到 b 。在复杂电路分析中, 由于电流的实际方向很难确定, 常用参考方向来表示电流的方向。即在分析计算复杂电路之前, 先假定电流的方向 (称为参考方向), 再根据电流参考方向计算出电流的数值。如果结果为正值, 说明电流的参考方向与实际方向相同; 如果为负值, 则说明电流的参考方向与实际方向相反。



图 1.1.9 电流方向的表示方式

电流按其大小和方向可分为三种：

① 直流电流。电流的大小、方向都不随时间发生变化。用大写的英文字母 I 表示，如图 1.1.10 (a) 所示。测量直流电流的仪表标志为 DC（直流电流表）。

② 脉动电流。电流的大小随时间发生变化，但方向不变。用小写的英文字母 i 表示，如图 1.1.10 (b) 所示。脉动电流电路的分析在模拟电子技术中讨论。

③ 交流电流。电流的大小、方向都随时间发生变化。用小写的英文字母 i 或 $i(t)$ 表示，本教材主要讨论正弦交流电流，如图 1.1.10 (c) 所示。测量正弦交流电流的仪表标志为 AC（交流电流表）。

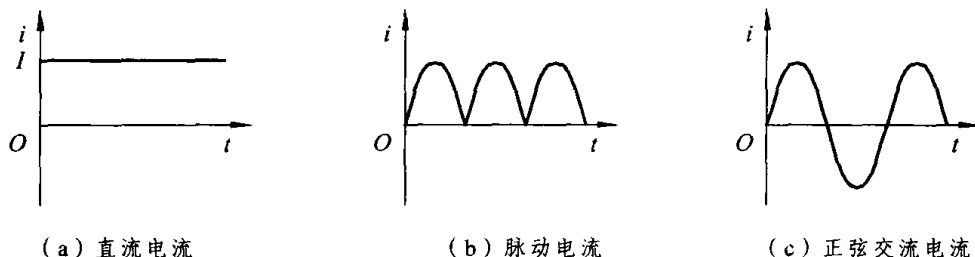


图 1.1.10 电流的分类

3. 功率和能量

在电路分析时，经常分析电路中的能量和功率的分布和转移。因此，功率和能量是电路中两个重要的物理量。功率定义为单位时间内所转换的电能，用 p 表示。功率 p 与能量 W 的关系如下所示

$$\left. \begin{aligned} p(t) &= \frac{dW}{dt} \\ W(t) &= \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (1.1.3)$$

式中，功率的单位为瓦特（W），能量的单位为焦耳（J）。

在元件功率分析中，设元件上电压与电流的参考方向如图 1.1.11 所示，即电流从电压的正极流到负极。则元件吸收的能量为

$$dW = u(t) dq$$

元件吸收的功率为

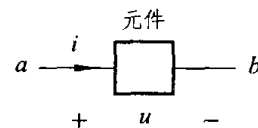


图 1.1.11 电压和电流表示功率

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (1.1.4)$$

式 (1.1.4) 是通过元件的端电压和流过电流的乘积来定义功率。对于计算出的值是吸收（输入）功率还是提供（输出）功率，可直接根据电压和电流的实际方向来确定。当电流从电压的正极流到负极时（注意是实际方向），元件吸收功率，或者说元件是负载；当电流从电压的负极流到正极时，元件提供功率，或者说元件是电源。根据功率计算表达式直接判断功率的方向（吸收、提供），将在参考方向一节中讨论。

1.1.4 参考方向

在复杂的电路分析中,电压和电流都是根据设定的参考方向进行讨论,即任意假设电压、电流的正方向称为参考方向。参考方向概念的引入,解决了复杂电路中实际电压、电流方向难以确定的问题,同时又不影响电路分析的结果。

在参考方向条件下,电路分析计算的结果存在两种情况:计算结果为“+”,说明参考方向与实际方向相同;计算结果为“-”,说明参考方向与实际方向相反。

由于电压、电流的参考方向都是任意假设的,因此,参考电流从参考电压的正极(高电位)流到负极(低电位)时,这种电压与电流的参考方向称为关联参考方向,如图 1.1.12 (a) 所示。



图 1.1.12 电压、电流的参考方向

在关联参考方向条件下,如果计算的功率 $p=ui>0$,则说明元件吸收功率(可称为负载);如果功率 $p<0$,则说明元件提供功率(可称为电源)。

参考电流从参考电压的负极流到正极,称电压、电流的参考方向为非关联参考方向,如图 1.1.12 (b) 所示。在非关联参考方向条件下,如果用 $p=-ui$ 计算功率,计算出的功率性质的判断与关联参考方向的相同,即 $p>0$ 的元件吸收功率; $p<0$ 的元件提供功率。

注意:① 元件上的电压、电流参考方向是否关联,与元件的属性(电源或负载)无关。

② 非关联参考方向条件下,也可以用 $p=ui$ 计算功率,只是此时功率 $p>0$ 的元件为提供功率; $p<0$ 的元件为吸收功率。

③ 电源在电路中既可能为电源,也可能为负载,这由电源外接电路的结构、元件性质与参数决定。因此,必须通过电路分析、计算来判断电源是否提供功率。例如手机电池,在充电时吸收功率为负载,在向手机供电时为电源。

例 1.1.1 已知图 1.1.13 所示电路中 $U_1=5\text{ V}$, $U_2=-5\text{ V}$, $U_3=U_4=10\text{ V}$, $I_1=1\text{ A}$, $I_2=-1\text{ A}$, $I_3=-2\text{ A}$, $I_4=-1\text{ A}$ 。

① 电路中各元件上的电压、电流参考方向是否关联? ② 计算各元件吸收的功率,并判断元件的性质(电源或负载),验证功率是否平衡。

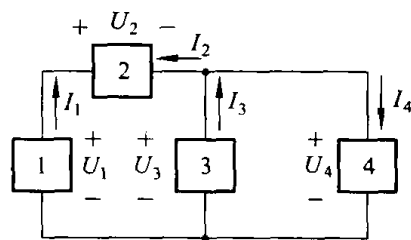


图 1.1.13 例 1.1.1 图

解 ① 元件 1、2、3 的电流参考方向是从参考电压的负极流向正极,故其电压、电流参考方向为非关联参考方向;元件 4 的电流参考方向是从参考电压的正极流向负极,故其电压、电流参考方向为关联参考方向。

② 根据电路中电压、电流的参考方向,各元件的功率如下:

元件 1 $P_1 = -U_1 I_1 = -(5 \times 1) = -5\text{ (W)}$

元件 2 $P_2 = -U_2 I_2 = -(-5) \times (-1) = -5\text{ (W)}$

元件 3 $P_3 = -U_3 I_3 = -10 \times (-2) = 20\text{ (W)}$

元件 4 $P_4 = -U_4 I_4 = 10 \times (-1) = -10\text{ (W)}$

由于各元件功率的分析计算是设定在关联参考方向条件下，因此，元件 3 功率大于零为吸收功率，即元件 3 是负载；元件 1、2、4 的功率小于零，说明在电路中提供功率，即元件 1、2、4 是电源。

$$\sum P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = (-5) + (-5) + 20 + (-10) = 0$$

可见，电源提供的功率等于电路消耗的功率，这就是电能的守恒，常称为功率平衡。在电路分析计算中，可利用功率平衡的概念，检验计算结果的正误。

1.2 电路元件

电路元件是电路分析中最基本的组成单元。电路元件按其特性可分为有源元件和无源元件两种。对于只是用来表征电能消耗，以及电场、磁场能量的储存和转换的元件称为无源元件，这类元件的特点是本身并不能产生电能。无源元件主要有耗能元件电阻 R 、储能元件电感 L 和电容 C ；有源元件主要有独立电源和受控电源元件。

每一种元件都有唯一对应的物理特性和电路符号，在分析电路元件时，重点关注理想化的线性元件外部特性，即 $u-i$ 关系、 $q-u$ 关系、 $\Psi-i$ 关系，并用数学公式和特性曲线两种方式描述其特性。下面讨论各电路元件上电压和电流的约束关系。

1.2.1 电阻 R

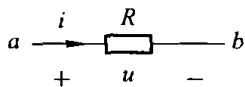
在电路理论中，电阻元件是一种反映消耗电能转换成其他形式能量物理特征的电路模型。

线性电阻元件电路符号、电压和电流参考方向如图 1.2.1 (a) 所示，特性曲线如图 1.2.1 (b) 所示，从图中可以看出线性电阻特性曲线在 $u-i$ 平面上是过原点的直线。

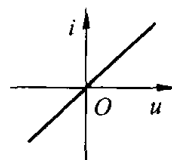
在电阻元件两端电压与电流为关联参考方向时，电阻元件的欧姆定律为

$$u = Ri, \quad i = Gu \quad (1.2.1)$$

式中， R 为线性电阻，是一个正实常数，单位为欧姆 (Ω)； G 为电阻元件的电导，单位为西门子 (S)。 R 和 G 都是电阻元件的参数，且 $G = 1/R$ 。下面线性电阻元件简称电阻。



(a) 线性电阻元件及关联参考方向



(b) 线性电阻的伏安特性

图 1.2.1 线性电阻元件

欧姆定律表明，电阻元件上某时刻的端电压 u 由该时刻的电流 i 确定，而与过去的电流值大小无关，故称电阻 R 为“无记忆”的元件。

如果一个电阻元件的端电压不为零值，而流过它的电流恒为零值，则这时电阻值为无穷大，即 $R = \infty$ ，称电阻 R 为开路。

如果流过一个电阻元件的电流不为零值,而元件的端电压恒为零值,则 $R=0$,称电阻 R 为短路。

在电压和电流的关联参考方向下,电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

因为电阻 R 是正值,所以电阻 R 吸收的功率总大于零,这说明电阻元件始终是耗能元件。

注意:当电阻 R 端电压和电流为非关联参考方向时,如图 12.2 所示,电阻 R 元件上的电压与电流的数学表达式为

$$u = -Ri$$

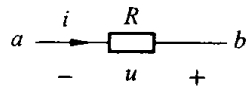


图 1.2.2 电阻元件及非关联参考方向

注意:

① 非关联参考方向条件下,欧姆定律式应加一个负号;负电流(或负电压)说明实际电流(或电压)方向与参考方向相反,即参考方向与数学分析结果结合起来才有物理意义。

② 功率的物理性质与参考方向的设置无关。

③ 电路理论中的“电阻元件 R ”是一个抽象理想化的物理元件模型,具有更深层次的内涵。当然它也具有实际意义,例如,实际电阻器的理想化模型为电阻 R ;白炽灯在一定条件下理想化为 R 等。

在直流电路的稳态分析中,其电压、电流和功率的变量用大写字母 (U 、 I) 表示。在关联参考方向条件下有

$$P = UI \quad (1.2.2)$$

不具有线性电阻特性的二端元件称为非线性电阻。例如半导体二极管 VD 元件,在一定条件下是一个非线性电阻元件,其特性曲线在 $u-i$ 平面上不是过原点的直线,如图 1.2.3 (b) 所示。



(a) 半导体二极管元件

(b) 伏安特性

图 1.2.3 非线性电阻元件

例 1.2.1 电路如图 1.2.4 所示,已知 $R=5\ \Omega$, $I=-1\ \text{A}$,求电阻上的电压 U 和功率。

解

$$U = -IR = -(-1) \times 5 = 5\ (\text{V})$$

$$P = -UI = -5 \times (-1) = 5\ (\text{W})$$

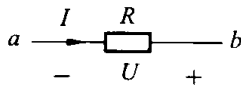


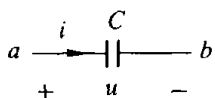
图 1.2.4 例 1.2.1 图

1.2.2 电容 C

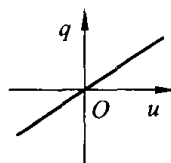
实际电容器是由绝缘介质隔开的两个导电极板构成,在外电路的作用下,两个极板上分别聚集起等量的正、负电荷,从而在介质中建立电场而具有电场能量。将外电路移去后,电荷依靠电场吸力可继续聚集在极板上,电场继续存在。因此,电容器是一种储存电荷或

者说储存电场能量的元件。电路分析中的电容元件是表征储存电场能这一物理特征的电路模型。

线性电容元件（简称电容元件）的电路符号、电压和电流参考方向如图 1.2.5 (a) 所示，特性曲线如图 1.2.5 (b) 所示，特性曲线在 $q-u$ 平面上是过原点的直线。



(a) 线性电容元件及关联参考方向



(b) 线性电容的库伏特性

图 1.2.5 线性电容 C 元件

电容元件由电容电荷 q 与电容端电压 u 的正比关系来定义，即

$$q = Cu$$

式中，比例系数 C 称为电容值，是一个正实常数，单位为法拉 (F)。实际电容值的大小常常为微法 ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{F}$) 或皮法 ($1 \text{pF} = 10^{-12} \text{F}$) 数量级。

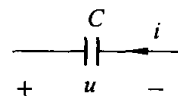
在电路分析中，主要研究电容元件的伏安关系。如果电容元件的电压 u 和电流 i 取关联参考方向，如图 1.2.5 (a) 所示，则伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.2.3)$$

式 (1.2.3) 表明：电容 C 中某时刻的电流 i 与该时刻其端电压 u 的大小无关，而与端电压 u 的变化率成正比。当电容 C 端电压 u 不随时间变化时，电流 i 为零。即端电压 u 为常数（直流）时，电容 C 相当于开路。电容 C 元件具有隔断直流（简称隔直）的作用。

当采用非关联参考方向时，如图 1.2.6 所示，电容元件的伏安关系为

$$i = -C \frac{du}{dt}$$



由式 (1.2.3) 可得电容 C 两端的电压 u 的表达式为 图 1.2.6 电容元件及非关联参考方向

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi$$

或

$$u = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i d\xi \quad (1.2.4)$$

式 (1.2.4) 表明：电容 C 两端的电压 u 除与 $0 \sim t$ 时间内的电流 i 值有关外，还与 $t=0$ 时电容元件上初始电压值 $u(0)$ 有关，因此，电容元件是一种有“记忆”的元件。

在电压 u 和电流 i 关联参考方向下，如图 1.2.5 (a) 所示，电容元件的瞬时吸收功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

当电容元件的瞬时吸收功率为正值时，说明电容储存的电场能量增加，称为“电容充电”；

当瞬时吸收功率为负值时, 元件释放充电时储存的能量, 称为“电容放电”。由于电容只储存电场能量而不消耗能量, 因此称电容元件为储能元件。

电容元件从 0 到 t 时间内吸收的电能为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^t p d\xi = \int_0^t Cu \frac{du}{d\xi} d\xi = C \int_{u(0)}^{u(t)} u du \\ &= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(0) \end{aligned} \quad (1.2.5)$$

式 (1.2.5) 表明, 任意时刻电容元件的储能总是大于或等于零, 因此, 电容元件属于无源元件。

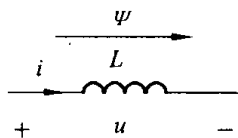
一个实际电容器除有储能作用外, 还会消耗一定的电能, 这时, 电容器的电路模型是电容元件和电阻元件的并联组合。

如果某电容元件的特性曲线在 $q-u$ 平面上不是过原点的直线, 则此元件为非线性电容元件。本教材只讨论线性电容电路。

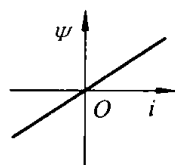
1.2.3 电感 L

实际电感器通常是由导线绕制在磁性材料上的线圈构成。当线圈中流过电流时, 其周围便产生磁场, 电能便转化为磁场能, 并以磁场的形式存在。电路分析中的电感元件是表征电流产生磁通和储存磁场能这一物理特征的电路模型。

线性电感元件 (简称电感元件) 的电路符号、电压和电流参考方向如图 1.2.7 (a) 所示, 特性曲线如图 1.2.7 (b) 所示, 特性曲线在 $\Psi-i$ 平面上是过原点的直线。



(a) 线性电感元件及关联参考方向



(b) 线性电感的韦安特性

图 1.2.7 线性电感元件

电感元件由磁链 Ψ 与电流 i 的正比关系来定义, 即

$$\Psi = Li$$

式中, 比例系数 L 称为线性电感值, 是一个正实常数, 单位为亨利 (H)。当电感值较小时, 常用毫亨 ($1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$) 或微亨 ($1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$) 表示。

在电压 u 和电流 i 关联参考方向条件下, 当电感元件中的电流 i 变化时, 根据电磁感应定律, 可得到电感元件的伏安关系为

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.2.6)$$

式 (1.2.6) 表明: 电感 L 中某时刻的电压 u 与该时刻电流 i 的大小无关, 而与流过的电流 i 变化率成正比。当电感 L 中的电流为直流时, 其端电压为零, 电感 L 相当于短路。

通过式 (1.2.6) 可计算出电感 L 中流过的电流 i , 即

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi$$

或

$$i = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u d\xi \quad (1.2.7)$$

式 (1.2.7) 表明: 电感 L 中的电流 i 除与 $0 \sim t$ 时间内的端电压 u 值有关外, 还与 $t=0$ 时电感元件上初始电流值 $i(0)$ 有关, 因此电感元件也是“记忆”元件。

在电压和电流关联参考方向下, 如图 1.2.7 (a) 所示, 电感元件的瞬时吸收功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

电感元件的瞬时吸收功率不会转变成其他形式的能量而消耗掉, 而是以磁场能的形式储存在电感线圈形成的磁场中, 因此, 电感元件属于储能元件。

电感元件从 0 到 t 时间内吸收的电能为

$$\begin{aligned} W &= \int_0^t p d\xi = \int_0^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = L \int_{i(0)}^{i(t)} i di \\ &= \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(0) \end{aligned} \quad (1.2.8)$$

式 (1.2.8) 说明, 任意时刻电感元件的储能 W 总是大于或等于零, 因此, 电感元件属于无源元件。

如果某电感元件的特性曲线在 $\Psi-i$ 平面上不是过原点的直线, 则此元件为非线性电感元件。例如, 空心电感的电感值近似为常数, 则其为线性电感; 而有铁芯的电感, 其电感值与电感线圈中的导磁材料的磁导率有关, 所以它是非线性电感。本教材只讨论线性电感电路。

1.2.4 独立电源

独立电源是指在电路中能独立提供能量的元件 (电压源或电流源)。实际的独立电源有电池、发电机、信号源等。在电路分析中, 独立电源常作为电路的输入或激励。当独立电源抽象理想化为只表征一种物理特征的独立电源元件时称为理想电源, 包括理想电压源和理想电流源。

1. 理想电压源

理想电压源 (简称电压源) 表征了一个二端有源元件所提供的电压与流过的电流无关的物理特征。