



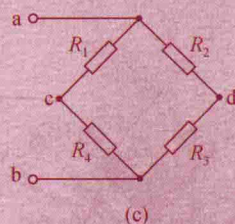
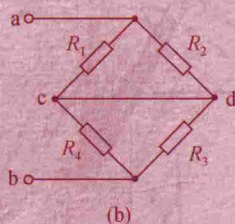
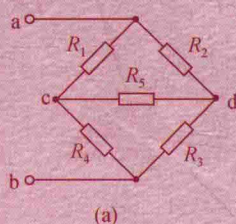
教育电气工程及其自动化类课程规划教材

(第二版)

# 电路

DIANLU

主 编 吴仕宏 高艳萍  
主 审 邵力耕



大连理工大学出版社

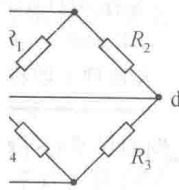
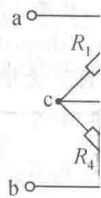
# (第二版) 电 路

DIANLU

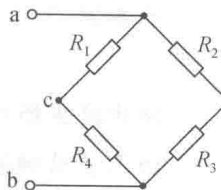
主 编 吴仕宏 高艳萍

副主编 周 巍 黄 蕊 杨冶杰 姜竹楠

主 审 邵力耕



(b)



(c)



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路 / 吴仕宏, 高艳萍主编. — 2 版. — 大连 :  
大连理工大学出版社, 2018. 7

普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材

ISBN 978-7-5685-1641-9

I. ①电… II. ①吴… ②高… III. ①电路—高等学  
校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 165094 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail: dulp@dulp.cn URL: <http://http://dulp.dlut.edu.cn>

大连理工印刷有限公司印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:21.5 字数:523 千字

2012 年 8 月第 1 版

2018 年 7 月第 2 版

2018 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑:王晓历

责任校对:李建博

封面设计:张莹

ISBN 978-7-5685-1641-9

定 价:49.80 元

本书如有印装质量问题,请与我社发行部联系更换。

# 前言

《电路》(第二版)是新世纪普通高等教育教材编审委员会组编的电气工程及其自动化类课程规划教材之一。

本课程是电气工程、电力电子工程、信息工程、控制系统、计算机及微电子系统等领域的一门重要的基础学科,是电气工程及信息类专业本科生必修的专业基础课程。本课程主要分析电路中电磁现象的变化规律、逻辑性、系统性和理论性,培养学生严谨的思维能力、分析问题和解决问题的能力,进而培养学生的创新、创造能力,为后续相关学科的学习打下坚实的基础。本教材还可以作为高等工科院校各类电相关专业电路课程教材,以及电气工程技术人员和电气技术爱好者的参考用书。

本教材综合了编者院校在电路理论课程中进行的双语教学改革的成果,借鉴国内外优秀教材并总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验,注重理论的系统性、实用性和应用性,力求重点突出和具有启发性,注重电路理论的基本概念、基本原理及应用分析,力求做到内容精练、论证严密、重点突出、适用面广,使教材兼顾强电和弱电类专业的共同教学需求。教材内容遵循由简到繁、逐步深入的原则,采用先静态(直流)、后稳态(正弦和非正弦)、再动态(过渡过程)的教学体系,力求难点分散,利于教学,完善和提高教学效果。

全书共分14章,分别是:电路模型和电路定律;线性电阻电路的一般分析方法;电路定理;正弦稳态电路分析;含有耦合电感的电路;三相电路;非正弦周期电流电路和信号的频谱;一阶电路的时域分析;二阶电路的时域分析;拉普拉斯变换和网络函数;电路方程矩阵形式;二端口网络;非线性电路;均匀传输线。

本教材在编写的过程中将每章中的关键术语均给出英文译注,并在个别章或节的开头用英文介绍一些电子工程先驱人物的历史传略,使学生加深理解。本教材的建议学时为90~110学时。

为了帮助学生巩固和加深对课程内容的理解,教材给出了习题的参考答案供学生参考。

本教材由沈阳农业大学吴仕宏、大连海洋大学高艳萍任主编；西北工业大学周巍、沈阳农业大学黄蕊、辽宁石油化工大学杨冶杰、沈阳工程学院姜竹楠任副主编；西安科技大学赵燕云、沈阳农业大学谭东明、大连海洋大学姜凤娇参加了部分章节的编写工作。具体编写分工如下：吴仕宏编写第3、4、8、9章；高艳萍编写第1章；周巍编写第13、14章；黄蕊编写第5章；杨冶杰编写第11、12章；姜竹楠编写第2章；赵燕云编写第10章；姜凤娇编写第6、7章。谭东明参加了部分习题和绘制插图工作。吴仕宏负责全书的统稿和定稿。大连交通大学邵力耕审阅了全书并提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表谢意！

本教材借用二维码等手段将纸质图片与网络素材联动起来，拓展了教材的内容含量，使读者在阅读本教材的过程中通过“扫一扫”查看各章习题答案，以更加有趣的方式深化对教材知识的理解。本教材力求增强学生学习的自主性与自由性，将课堂教学与课下学习紧密结合，力图为广大读者提供更为全面且多样化的教材配套服务。

本教材在编写过程中参阅了其他同类教材和相关文献资料，在此对这些教材和文献的作者深表感谢！

由于编者水平和时间所限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者  
2018年7月

所有意见和建议请发往：[dutpbk@163.com](mailto:dutpbk@163.com)

欢迎访问教材服务网站：<http://www.dutpbook.com>

联系电话：0411-84708462 84708445



|                                      |    |                                         |     |
|--------------------------------------|----|-----------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 电路模型和电路定律</b> .....         | 1  | <b>第 4 章 正弦稳态电路分析</b> .....             | 87  |
| 1.1 电路和电路模型 .....                    | 1  | 4.1 正弦量 .....                           | 87  |
| 1.2 电路的基本物理量 .....                   | 2  | 4.2 正弦量的相量表示法 .....                     | 91  |
| 1.3 电路元件 .....                       | 6  | 4.3 电阻、电感和电容元件的交流<br>电路 .....           | 95  |
| 1.4 基尔霍夫定律 .....                     | 15 | 4.4 复阻抗、复导纳及其等效变换 ..                    | 101 |
| 1.5 电路的等效变换 .....                    | 20 | 4.5 正弦稳态电路的功率 .....                     | 111 |
| 1.6 电阻的串联和并联 .....                   | 20 | 4.6 正弦稳态电路的计算 .....                     | 115 |
| 1.7 电阻星形连接、三角形连接的<br>等效变换及桥形电路 ..... | 23 | 4.7 功率因数的提高 .....                       | 120 |
| 1.8 理想电源的串联和并联 .....                 | 26 | 4.8 串联电路的谐振 .....                       | 123 |
| 1.9 实际电源的两种模型及其等效<br>变换 .....        | 27 | 4.9 并联电路的谐振 .....                       | 130 |
| 1.10 输入电阻 .....                      | 29 | 4.10 实际应用电路 .....                       | 133 |
| 1.11 实际应用电路 .....                    | 30 | 习 题 .....                               | 135 |
| 习 题 .....                            | 32 | <b>第 5 章 含有耦合电感的电路</b> .....            | 140 |
| <b>第 2 章 线性电阻电路的一般分析方法</b> ..        | 39 | 5.1 互 感 .....                           | 140 |
| 2.1 电路图 .....                        | 39 | 5.2 含有耦合电感电路的计算 .....                   | 143 |
| 2.2 KCL 和 KVL 的独立方程数 ..              | 41 | 5.3 空心变压器 .....                         | 148 |
| 2.3 支路电流法 .....                      | 42 | 5.4 理想变压器 .....                         | 151 |
| 2.4 网孔电流法 .....                      | 44 | 5.5 实际应用电路 .....                        | 153 |
| 2.5 回路电流法 .....                      | 47 | 习 题 .....                               | 155 |
| 2.6 节点电压法 .....                      | 48 | <b>第 6 章 三相电路</b> .....                 | 157 |
| 2.7 实际应用电路 .....                     | 53 | 6.1 三相电路的概念 .....                       | 157 |
| 习 题 .....                            | 55 | 6.2 线电压(电流)与相电压(电流)的<br>关系 .....        | 159 |
| <b>第 3 章 电路定理</b> .....              | 59 | 6.3 对称三相电路的计算 .....                     | 161 |
| 3.1 叠加定理 .....                       | 59 | 6.4 不对称三相电路的计算 .....                    | 163 |
| 3.2 替代定理 .....                       | 63 | 6.5 三相电路的功率及其测量方法 ..                    | 165 |
| 3.3 戴维宁定理和诺顿定理 .....                 | 64 | 6.6 实际应用电路 .....                        | 167 |
| 3.4 特勒根定理 .....                      | 75 | 习 题 .....                               | 168 |
| 3.5 互易定理 .....                       | 78 | <b>第 7 章 非正弦周期电流电路和信号的<br/>频谱</b> ..... | 171 |
| 3.6 对偶原理 .....                       | 80 | 7.1 非正弦周期信号 .....                       | 171 |
| 3.7 实际应用电路 .....                     | 81 | 7.2 周期函数分解为傅里叶级数 .....                  | 172 |
| 习 题 .....                            | 82 | 7.3 有效值、平均值和平均功率 ..                     | 175 |

|                                    |     |                               |     |
|------------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 7.4 非正弦周期电流电路的计算 .....             | 177 | 第 11 章 电路方程矩阵形式 .....         | 248 |
| 7.5 实际应用电路 .....                   | 179 | 11.1 割集 .....                 | 248 |
| 习 题 .....                          | 180 | 11.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵 ..        | 250 |
| 第 8 章 一阶电路的时域分析 .....              | 183 | 11.3 回路电流方程的矩阵形式 ..           | 256 |
| 8.1 动态电路的方程及其初始条件 ..               | 183 | 11.4 节点电压方程的矩阵形式 ..           | 260 |
| 8.2 一阶电路的零输入响应 .....               | 187 | 11.5 割集电压方程的矩阵形式 ..           | 264 |
| 8.3 一阶电路的零状态响应 .....               | 192 | 11.6 状态方程 .....               | 266 |
| 8.4 一阶电路的全响应及三要素法 ..               | 195 | 习 题 .....                     | 270 |
| 8.5 一阶电路的阶跃响应和冲激<br>响应 .....       | 199 | 第 12 章 二端口网络 .....            | 273 |
| 8.6 一阶电路对正弦激励的响应 .....             | 206 | 12.1 二端口网络的概念 .....           | 273 |
| 8.7 实际应用电路 .....                   | 207 | 12.2 二端口网络的方程及参数 .....        | 274 |
| 习 题 .....                          | 208 | 12.3 二端口等效电路 .....            | 284 |
| 第 9 章 二阶电路的时域分析 .....              | 211 | 12.4 二端口网络的网络函数 .....         | 289 |
| 9.1 二阶电路的零输入响应 .....               | 211 | 12.5 二端口网络的连接 .....           | 293 |
| 9.2 二阶电路的零状态响应和<br>全响应 .....       | 217 | 12.6 回转器和负阻抗变换器 .....         | 298 |
| 9.3 二阶电路的冲激响应 .....                | 223 | 12.7 实际应用电路 .....             | 302 |
| 9.4 实际应用电路 .....                   | 226 | 习 题 .....                     | 302 |
| 习 题 .....                          | 227 | 第 13 章 非线性电路 .....            | 306 |
| 第 10 章 拉普拉斯变换和网络函数 .....           | 230 | 13.1 非线性电阻 .....              | 306 |
| 10.1 拉普拉斯变换的定义 .....               | 230 | 13.2 非线性电容和非线性电感 ..           | 310 |
| 10.2 拉普拉斯变换的基本性质 ..                | 231 | 13.3 非线性电路方程 .....            | 312 |
| 10.3 拉普拉斯反变换的部分分式<br>展开式 .....     | 234 | 13.4 小信号分析法 .....             | 313 |
| 10.4 运算电路 .....                    | 236 | 13.5 分段线性化法 .....             | 315 |
| 10.5 应用拉普拉斯变换法分析<br>线性电路 .....     | 239 | 13.6 实际应用电路 .....             | 318 |
| 10.6 网络函数 .....                    | 241 | 习 题 .....                     | 319 |
| 10.7 网络函数的极点分布与电路<br>冲激响应的关系 ..... | 243 | 第 14 章 均匀传输线 .....            | 321 |
| 10.8 卷积定理 .....                    | 244 | 14.1 分布参数电路 .....             | 321 |
| 习 题 .....                          | 245 | 14.2 均匀传输线参数及其方程 ..           | 322 |
|                                    |     | 14.3 均匀传输线方程的正弦稳态解 ..         | 323 |
|                                    |     | 14.4 均匀传输线上的行波和传播<br>特性 ..... | 328 |
|                                    |     | 14.5 终端接有负载的传输线 .....         | 332 |
|                                    |     | 14.6 无损耗传输线 .....             | 334 |
|                                    |     | 习 题 .....                     | 337 |
|                                    |     | 参考文献 .....                    | 338 |

# 第 1 章

## 电路模型和电路定律

**【内容提要】** 本章介绍电路模型的变量(电荷、电压和电流)及其传递的功率和能量;电流和电压的参考方向;电阻元件、电容元件、电感元件、独立电源和非独立电源;基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律。等效变换法。运用等效变换法求解电路,是将电路的某一部分依照等效原则用一个简单电路替代,进而对未被替代的部分进行求解。主要内容包括电阻的串联、并联、星形连接、三角形连接和桥形电路,理想电源的串联、并联,实际电源的两种模型及其等效变换以及输入电阻的概念。

### 1.1 电路和电路模型

电路(electric circuit)是由电路部件(例如电源和负载等)和电路器件(例如二极管、晶体管和集成电路等)相互连接而成,为完成某种功能(例如电能或信号的传输、信号测量和处理等)而设计的电系统。电系统与人们的工作和生活是息息相关的,例如通信系统、计算机系统、自动控制系统、电力系统和信号处理系统等,各类电系统都是由电路组成的。电源(electric source)是指能产生电能或电信号的元件(element),由于电路中的电压(voltage)和电流(current)都是由电源产生的,所以也将电源形象地称为激励(excitation);在电路中,由于激励的作用而产生的电压和电流均称为响应(response)。负载(load)是指日光灯和电动机等用电设备,它能将电能转换为热能、光能或机械能等其他形式的能量。如图 1-1 所示电路是一个简单的手电筒电路,生活中常用的手电筒电路由于电池、灯泡、开关和导线组成。如图 1-2 所示电路是相对复杂一点的汽车点火电路,它是由蓄电池、开关、电阻元件、电感元件、电容元件及导线等组成。

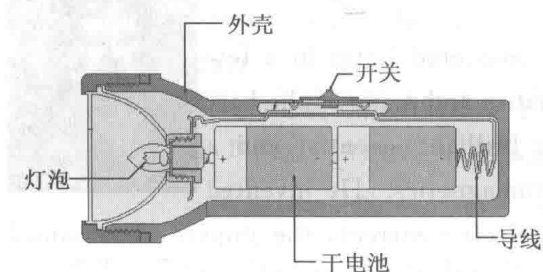


图 1-1 手电筒电路

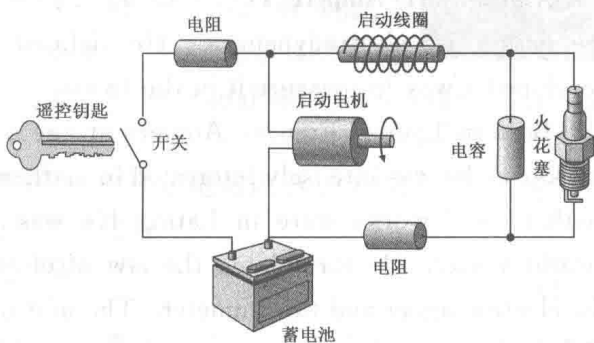


图 1-2 汽车点火电路

在一定的工作条件下,将理想电路元件组合起来足以模拟实际电路部件和器件完成某一物理过程,理想电路元件及其组合称为实际电路模型(model),以上过程称为实际电路建模。实际电路建模是在考虑一定工作条件下,按不同的精度将实际电路主要的电磁性质反映出来的过程。例如,一只白炽灯在通有电流的情况下,可以产生磁场,说明其具有电感性,但是由于它产生的磁场十分微弱,到可以忽略不计,所以通常认为白炽灯是一个电阻元件。一个线圈在直流激励的作用下的反应为线圈导线电流引起能量消耗,此时它的电路模型可以看做是一个电阻元件,在电流变化时(包括交变电流),线圈电流产生的磁场会引起感应电压,此时它的电路模型可以看做是一个电阻元件和一个电感元件的串联组合;当电流变化速度很快时(包括高频交流),考虑到线圈导体表面的电荷作用,线圈将产生电容效应。此时的电路模型中还应包含电容元件。图 1-3(a)所示为手电筒的电路模型。电珠是电阻元件,其参数为电阻  $R$ ;干电池用电压源  $U_S$  和内电阻(简称内阻)  $R_0$ 。连接导线是连接干电池与电珠的中间环节(还包括开关),其电阻忽略不计,可认为是一无电阻的理想导体。图 1-3(b)则是汽车点火系统的电路模型,该电路模型由电源、电感、电容和电阻等元件组成。今后教材中分析的都是电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元器件用规定的图形符号表示。所谓电路分析,就是指在电路的结构和元器件参数已知的条件下,讨论电路的激励与响应之间的关系。

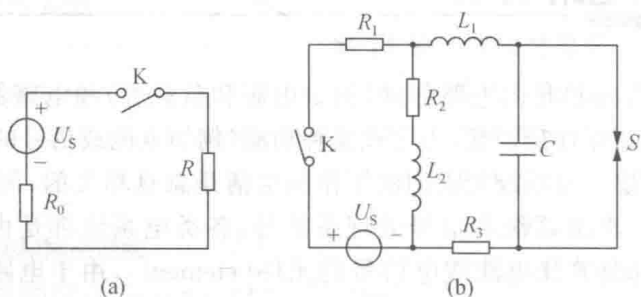


图 1-3 电路模型

## 1.2 电路的基本物理量

**Andre-Marie Ampere** (1775—1836), A French mathematician and physicist, laid the foundation of electrodynamics. He defined the electric current and developed a way to measure it in the 1820s.

Born in Lyons, France, Ampere at age 12 mastered Latin in a few weeks, as he was intensely interested in mathematics and many of the best mathematical works were in Latin. He was a brilliant scientist and a prolific writer. He formulated the law of electromagnetics. He invented the electromagnet and the ammeter. The unit of electric current, the ampere, was named after him.



如图 1-3(a)所示是最简单的直流电阻电路,当开关闭合时电路中有电流。电路原理中涉及的重要物理量主要有电荷  $Q(q)$ (charge)、电流  $I(i)$ (current)、电压  $U(u)$ (voltage)、电功率  $P(p)$ (electric power)和电能  $W$ (electric energy)。

电荷是双极性的(正电荷、负电荷)离散量,电荷的运动引起电的流动即电流,把单位时间内通过导体横截面的电荷量  $q$  定义为电流  $i$ ,即

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

当电流的大小和方向不随时间变化时,称为直流电流,用大写字母  $I$  表示;按国际单位制,电荷的单位为库仑(coulomb,C),时间的单位为秒(second,s),电流的单位为安培(Ampere,A)。

物理学习上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向,但在分析较为复杂的直流电路时,往往难以事先判断某支路中电流的实际方向。当涉及某个元件或部分电路的电流时,有必要指定电流的参考方向,这是因为电流的实际方向可能是未知的,或者电流的方向也可能随时间有规律地变化。对于直流电路,任意电阻元件(以电阻为例)电流的实际方向只有两种可能(除电流为零外),即从 A 端流向 B 端,如图 1-4(a)所示,或者从 B 端流向 A 端,如图 1-4(b)所示。如果假定某一个方向为电流的方向,用箭头标注在电路图中,当分析计算所得的电流大于零(正值)时,电流的实际方向与假定的电流方向相同;当电流小于零(负值)时,实际的电流方向与假定的电流方向相反。在分析计算直流电路时,任意假定的电流方向称为电流的参考方向(reference direction),根据电流的参考方向和计算出的电流值的正与负,就可确定电流的实际方向。



图 1-4 电流的参考方向

对于方向和大小均随时间按正弦变化的交流电流,如果电流的实际方向与参考方向相同,即所谓正弦交流电的正半周;如果电流的实际方向与参考方向相反,即所谓正弦交流电的负半周。引入了电流参考方向的概念,便可方便地表示出不同时刻电流的实际方向。

**Alessandro Antonio Volta** (1745—1827), an Italian physicist, invented the electric battery which provided the first continuous flow of electricity and the capacitor. Born into a noble family in Como, Italy. Volta was performing electrical experiments at age 18. His invention of the battery in 1796 revolutionized the use of electricity. The publication of his work in 1800 marked the beginning of electric circuit theory. Volta received many honors during his lifetime. The unit of voltage or potential difference, the volt, was named in his honor.



电荷的分离引起电场力做功即产生了电压,将单位正电荷由 A 点移至 B 点,电场力所做的功定义为 A、B 两点间的电压  $u$ ,电压的计算公式为

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

将单位正电荷分别由 A 点或 B 点移至某一参考点,电场力所做的功定义为 A 点或 B 点的电位,用  $V_A$  或  $V_B$  表示,A、B 两点间的电压  $u$  等于 A、B 两点间的电位差(potential

difference), 即

$$u = V_A - V_B$$

当电压的大小和方向不随时间变化时,称为直流电压,用大写字母  $U$  表示;按国际单位制,若电荷的单位为库仑(coulomb,C),功的单位为焦耳(joule,J),则电压的单位为伏特(volt,V)。

和电流一样,电路中任意两点之间的电压也可假定参考方向或参考极性。在表达两点之间的电压时,用正极性(+)表示高电位,用负极性(-)表示低电位,而正极指向负极的方向就是电压的参考方向。指定电压的参考方向后,电压就是一个代数量,对直流电压而言,电路中任意元件(以电阻为例)两端的电压极性只有两种可能(零电压除外),如图 1-5 所示。如图 1-5(a)所示的电压参考方向是由 A 指向 B,也就是假定 A 点的电位比 B 点的电位高;如果 A 点的电位确实高于 B 点的电位,则  $u > 0$ ,即电压的实际方向是由 A 到 B,两者的方向一致,若实际电位是 B 点高于 A 点,则  $u < 0$ 。对于方向和大小均随时间按正弦变化的交流电压,引入了电压参考方向的概念,便可方便地表示出不同时刻电压的实际方向,确定电压随时间变化的规律。有时为了图示方便,可用箭头来表示,也可用双下标来表示电压的参考方向(图 1-5)。

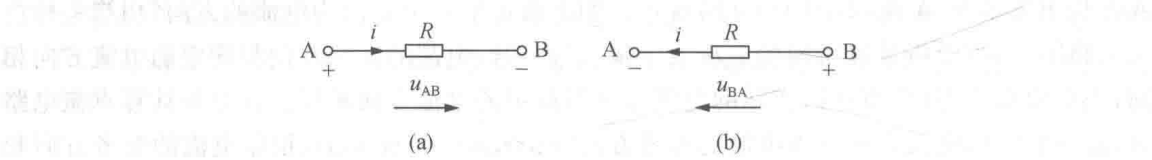


图 1-5 电压的参考方向

一个元件的电流或电压的参考方向是任意假定的。如果流过某一元件电流的参考方向是从电压参考极性的正极性端指向负极性端,那么两者的参考方向是一致的,这种电流和电压参考方向的选择称为关联参考方向。由于电阻元件的电流总是从高电位端流向低电位端,如图 1-6(a)所示,所以电流和电压的参考方向是关联的;当两者不一致时,称为非关联参考方向。由于电源向负载供电时,如图 1-6(b)所示,流过电源的电流总是从低电位端流向高电位端,所以电流和电压参考方向是非关联参考方向。如图 1-6(c)所示,对于有两个端子与外电路连接的网络而言,电流的参考方向自高电位端向低电位端流出,两者的参考方向一致,是关联参考方向。如图 1-6(d)所示,电流和电压的参考方向不一致,是非关联参考方向。在电路分析时电流或电压的参考方向一般根据电路元件的性质科学地选择。

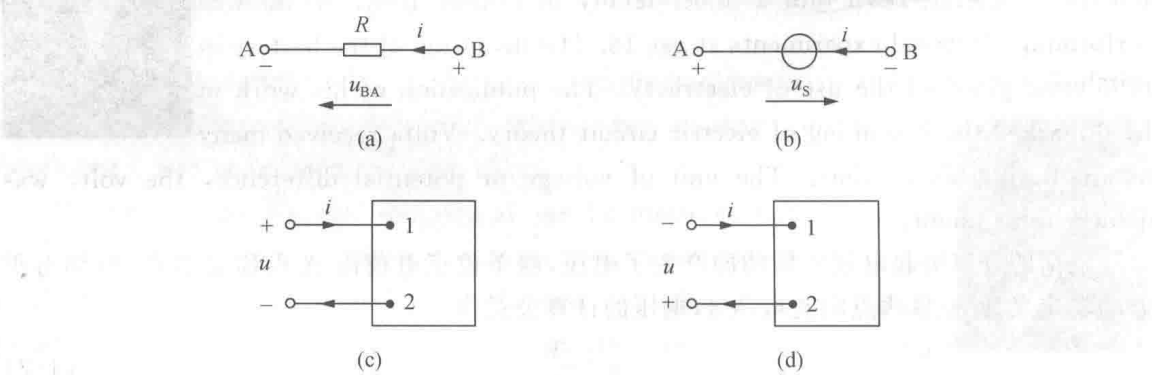
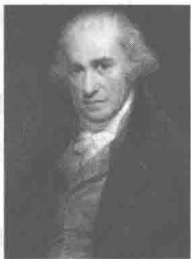


图 1-6 关联参考方向与非关联参考方向

**James Watt** (1736—1819), a Scottish inventor and mechanical engineer, renowned for

his improvements in steam engine technology. Born in Greenock, Watt initially worked as a maker of mathematical instruments, but soon became interested in steam engines. In around 1764, Watt designed a separate condensing chamber for the steam engine that prevented enormous losses of steam. His first patent in 1769 covered this device and other improvements on Newcomen's engine and patented several other important inventions including the rotary engine, the double-action engine and the steam indicator. Watt received many honours during his lifetime. The unit of measurement of electrical and mechanical power-the watt-was named in his honour.



在电路分析中,功率和能量的计算也是非常重要的。因为尽管在基于系统的电量分析和设计中,电压和电流是有用的变量,但是系统有效的输出经常是非电气的,这种输出用功率和能量来表示比较合适。另外,所有实际电气设备或部件对功率的大小都是有限制的。使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏而不能正常工作。因此,在电路设计过程中仅仅计算电压和电流是不够的。

物理学定义单位时间所做的功为功率(power),用  $p$  表示,其表达式为

$$p = \frac{dW}{dt} \tag{1-3}$$

当时间的单位为秒(s),功的单位为焦耳(J)时,功率的单位为瓦特(W)。

电功率与电压和电流有着密切的关系。例如,对于电阻元件,当正电荷从电阻元件上电压的正极性端经元件移动到电压的负极性端时,电场力对电荷做功,此时电阻元件吸收能量;对于电源元件,当正电荷从电压的负极性端经电源元件运动到电压的正极性端时,电场力做负功,电源元件向外释放电能。

电压与电流关联的功率可以直接根据式(1-1)和式(1-2)定义的电压和电流的计算公式推出,即

$$p = \frac{dW}{dt} = \left( \frac{dW}{dq} \right) \left( \frac{dq}{dt} \right) \\ p = ui \tag{1-4}$$

其中,  $p$  是元件功率,单位为 W;  $u$  是电压,单位为 V;  $i$  是电流,单位为 A。

式(1-4)表示任意电路元件的功率等于流过元件的电流和元件上电压的乘积;若电流和电压参考方向非关联,如图 1-7(a)、图 1-7(c)所示,功率的计算式必须加一个负号,即  $p = -ui$ 。当  $p$  大于零时,表明该电路元件吸收或消耗电能;当  $p$  小于零时,表明该电路元件发出功率或释放电能。

按如图 1-7 所示四种情况总结电压和电流参考方向关联或非关联时功率的计算式。

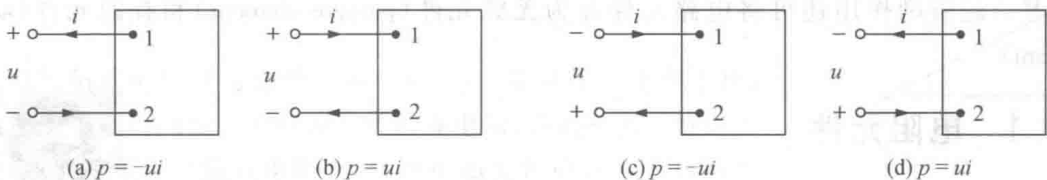


图 1-7 参考方向和功率计算式

如图 1-7(a)所示,电压和电流的参考方向是非关联的,如果  $i=5\text{ A}$ 、 $u=-10\text{ V}$ ,那么

$$p=-ui=-(-10)\times 5=50\text{ W}$$

由于  $p>0$ ,所以框内这部分电路吸收或消耗功率  $50\text{ W}$ 。

如图 1-7(b)所示,电压和电流的参考方向是关联的,如果  $i=-5\text{ A}$ 、 $u=10\text{ V}$ ,那么

$$p=ui=10\times(-5)=-50\text{ W}$$

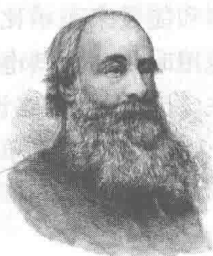
由于  $p<0$ ,所以框内这部分电路发出或释放功率  $50\text{ W}$ 。

在  $t_0$  到  $t$  这段时间内电路元件吸收的电能为

$$W(t)=\int_{t_0}^t p(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_{t_0}^t u(\tau)i(\tau)\mathrm{d}\tau \quad (1-5)$$

由于  $u$ 、 $i$  都是代数量,能量  $W$  和功率  $p$  一样也是代数量。当  $W>0$  时,元件吸收能量;当  $W<0$  时,元件释放电能。

**James Prescott Joule** (1818—1889) was born on Christmas Eve, 1818, into a wealthy Manchester brewing family. He initially was educated at home, before being tutored, at the age of sixteen, by the eminent Manchester scientist John Dalton. Joule soon began to conduct independent research at a laboratory built in the cellar of his father's home. By the 1840's, scientists had realized that heat, electricity, magnetism, chemical change and the energy of motion were all interconvertible. Joule was extremely involved with this work, and between 1837 and 1847, he established the principle of conservation of energy, and the equivalence of heat and other forms of energy.



## 1.3 电路元件

电路元件(element)是电路中最基本的组成单元,是实际器件的理想化物理模型,每一个电路元件通过它的两个端子与外部电路相连接,元件的特性是通过端子的电路物理量之间的函数关系来描述的,电路的基本物理量有电压  $u$ 、电流  $i$ 、电荷  $q$  以及磁通  $\Phi$ (或磁通链  $\Psi$ )等。电阻元件的特性是电压  $u$  与电流  $i$  的函数关系,即  $u=f(i)$ ;电感元件的特性是磁通链  $\Psi$  与电流  $i$  的函数关系,即  $\Psi=f(i)$ ;电容元件的特性则是电荷  $q$  与电压  $u$  的函数关系,即  $q=f(u)$ 。如果描述元件特性的函数是一个线性函数,那么这种元件称为线性元件(linear element)。反之若描述元件特性的函数是一个非线性函数,那么这种元件称为非线性元件(non-linear element)。按照与外部电路连接端子的个数将电路元件分为二端、三端和四端元件;按照在电路中是否起激励作用还可将电路元件分为无源元件(passive element)和有源元件(active element)。

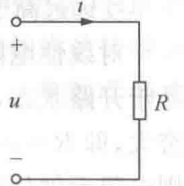
### 1.3.1 电阻元件

**Georg Simon Ohm** (1789—1854) was the German physicist who in 1827 discovered the law that the current flow through a conductor is



proportional to the voltage and inversely proportional to the resistance. Ohm was then a professor of mathematics in Cologne. His work was coldly received. The Prussian minister of education announced that “a professor who preached such heresies was unworthy to teach science.” Ohm resigned his post, went into academic exile for several years, and then left Prussia and became a professor in Bavaria.

电阻元件是用来模拟电能损耗或电能转换为热能等其他形式能量的理想元件,在电路中阻止电流的流动,例如电阻炉、白炽灯和电阻器等。对于线性电阻元件,在任意时刻,元件端电压和端电流的函数关系遵循欧姆定律 (ohm's law),它的图形符号如图 1-8 所示,当电压和电流取关联参考方向时,有



$u=Ri$  (1-6) 图 1-8 电阻元件

式(1-6)中的  $R$  并不是电阻符号,而是电阻元件的参数,称为元件的电阻(resistance),电阻是与电流和电压大小无关且大于零的实常数。当电流单位为安培(A),电压单位为伏特(V)时,电阻的基本单位为欧姆( $\Omega$ )。

令  $G=\frac{1}{R}$ ,则式(1-6)变成

$$i=Gu \tag{1-7}$$

式中, $G$  是电阻的倒数,称为电阻元件的电导(conductance),电导的单位为西门子(siemens, S)。 $G$  和  $R$  一样都是电阻元件的参数。符号  $G$  一方面表示一个电导元件,另一方面还表示电导元件的参数。

**Siemens** (1816—1872) was born in Prussia. While in prison for acting as a second in a duel, he began to experiment with chemistry, which led to his invention of the first electroplating system. In 1837, Siemens began making improvements in the early telegraph and contributed greatly to the development of telegraphic systems. The unit of conductance is named in his honor.



如果电压和电流参考方向取非关联参考方向,则

$$u=-Ri \text{ 或 } i=-Gu$$

任一时刻电阻元件的端电压  $u$  和流经的电流  $i$  之间的关系,可由  $u-i$  平面上的一条曲线来表示,该曲线称为电阻的伏安特性曲线,它反映了电阻的电压与电流的关系 (Voltage Current Relation,简称 VCR)。

线性电阻的伏安特性曲线是  $u-i$  平面上的一条通过原点的直线,如图 1-9 所示,如果伏安特性曲线上任意一点的坐标为  $(u,i)$ ,则

$$G=\frac{i}{u}=\tan\alpha \quad \text{或} \quad R=\frac{u}{i}=\tan\beta$$

电阻值或电导值与直线的斜率(slope)分别成反比和正比。直线的斜率随时间变化时称为线性时变电阻,否则称为线性时不变电阻(简称线性电阻或电阻)。线性电阻元件的伏安特性曲线一般位于第一、三象限如图 1-9 所示。如果伏安特性曲线位于第

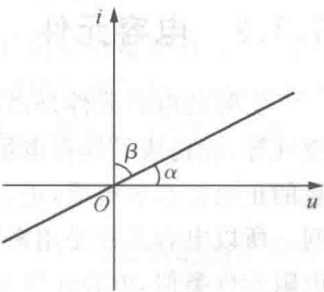


图 1-9 电阻元件的伏安特性曲线

二、四象限,则此元件的电阻为负值,即  $R < 0$ 。这样的电阻元件称为负电阻元件,一般需要专门设计。负电阻元件实际上是一个发出电能的元件。

不满足线性特性的电阻为非线性电阻。非线性电阻元件的伏安特性曲线不是一条通过原点的直线。例如,手电筒中的小电珠是一个典型的非线性热电阻。小电珠在室温时测得电阻小于  $1\ \Omega$ ,而在  $2.5\ \text{V}$ 、 $0.3\ \text{A}$  额定工作情况下,其电阻为  $2.5/0.3=8.3\ \Omega$ 。这是因为小电珠工作温度远远高于室温,致使灯泡电阻增加了近 10 倍。非线性电阻也有时变与时不变之分。

对线性电阻元件而言,无论它的端电压为何值,如果流过它的电流恒为零,则电阻元件处于开路状态,开路状态的伏安特性曲线在  $u-i$  平面上与电压轴重合,此时的电阻相当于无穷大,即  $R=\infty$ (或  $G=0$ )。无论流过线性电阻元件的电流为何值,如果它的端电压恒为零,则电阻元件处于短路状态,短路状态的伏安特性曲线在  $u-i$  平面上与电流轴重合,此时的电阻  $R=0$ (或  $G=\infty$ )。如果电路中的某一条支路呈断开状态,相当于在该支路两端之间连接  $R=\infty$  的电阻元件,此时该支路处于开路状态。如果把电路中的某一条支路两端用电阻为零的理想导线连接起来,此时该支路处于短路状态。

当电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时,由电功率的定义及欧姆定律可知,电阻元件的功率为

$$p=ui=Ri^2=\frac{i^2}{G} \quad (1-8)$$

因为式(1-8)中的  $R$  和  $G$  是正的实常数,所以功率  $p$  恒为正值,这表明线性电阻元件总是吸收(或消耗)电能,线性电阻元件是一种无源元件。所谓有源元件,是指元件可向外部电路提供大于零且无限长时间的平均功率的元件。

由式(1-5)和式(1-7)可推导出,电阻元件在  $t_0$  到  $t$  这段时间内吸收(或消耗)的电能为

$$W(t)=\int_{t_0}^t p(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_{t_0}^t u(\tau)i(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_{t_0}^t Ri^2(\tau)\mathrm{d}\tau \quad (1-9)$$

电阻元件将所吸收的电能转换成热能或其他形式的能量。

严格地讲,线性电阻实际是不存在的,以上讨论的电阻元件是理论上的理想模型。这种理想的电阻元件可以模拟实际的电阻器,以及其他具有电阻特性的物理器件和装置。例如,实际的线绕电阻器是由电阻丝绕制而成的,在直流电路中,电压和电流的关系基本符合欧姆定律时,可用线性电阻元件来近似模拟。在高频电路中,还要考虑到绕线之间的电感和电容效应,这时只用一个线性电阻就不能反映实际器件的物理特性。此外,在电子器件和线路中,有时还要考虑导线或介质的电阻效应,这也可用电阻元件来模拟。

值得注意的是,实际的电阻元件在规定的工作电压、电流和功率范围内才能正常工作。一个实际的电阻元件不仅要注明电阻的标称值,还要注明额定功率。

### 1.3.2 电容元件

实际的电容元件是由两片平行导体极板(金属板),其间填充绝缘介质(如云母、绝缘纸、空气等)而构成的储存电场能量的器件。当在两极板上加上电压后,两极板上将分别聚集等量的正电荷和负电荷,正、负电荷在介质中建立电场并将电场能量存储于两片平行导体极板间。所以电容元件是用来模拟一类能够储存电场(electric field)能量的理想元件模型。与电阻元件类似,电容元件也有线性、非线性、时不变和时变之分。本书仅限于讨论线性时不变电容元件。

线性电容元件的图形符号如图 1-10 所示,当电压参考极性与极板储存电荷的极性一致时,任意时刻线性电容元件极板上的电荷  $q$  与电压  $u$  成正比,线性电容元件的特性为

$$q = Cu \quad (1-10)$$

式中,  $C$  是电容元件的参数,它是一个正实常数,称为电容(capacitance)。在国际单位制中,当电荷和电压的单位分别为 C 和 V 时,电容的单位为 F(法拉,简称法)。法拉的单位太大,实际应用中常采用微法( $\mu\text{F}$ )和皮法(pF),  $1\text{ F} = 1 \times 10^6 \mu\text{F} = 1 \times 10^{12} \text{ pF}$ 。本书中提到的“电容”既是指电容元件也是指电容参数,以  $q$  和  $u$  为坐标轴可以画出电容元件的库伏特性曲线。线性电容元件的库伏特性曲线是一条通过原点的直线,如图 1-11 所示。参数  $C$  与直线的斜率成正比。

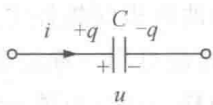


图 1-10 电容元件符号

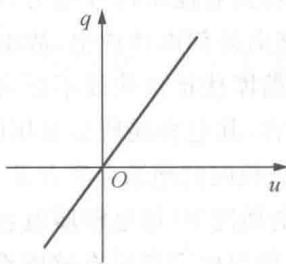


图 1-11 电容元件的库伏特性曲线

在电路分析中经常讨论电容元件的电压与电流的关系。如果电容元件的电流  $i$  和电压  $u$  取关联参考方向(如图 1-10 所示),并考虑到式(1-10),则电容元件的电压与电流的关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,电容的电流与其两端电压的变化率成正比,与其电压的数值大小无关。当电容电压发生剧变时,电压的变化率  $\frac{du}{dt}$  会很大,此时的电流也很大,实际电路中通过电容的电流  $i$  为有限值,则电容电压  $u$  必定是时间的连续函数。当电容电压恒定不变时,电流等于零,相当于开路,故而电容具有隔断直流的作用。由式(1-11)可得

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \\ &= u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-12)$$

式(1-12)中,  $u(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau$  称为电容电压在  $t = 0$  时刻的初始值。电容电压  $u$  与电流  $i$  的关系是动态的,电容元件是动态元件,任一时刻的电容电压不仅与该时刻的电流有关,而且还与此时刻以前的“历史状态”有关(从  $-\infty$  开始),即电容元件有记忆电流的作用,故称电容元件为记忆元件。当电容的  $u$  和  $i$  为非关联方向时,上述微分和积分表达式前要冠以负号,即

$$i = -C \frac{du}{dt}; \quad u = -u(0) - \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$$

假设电容的电压和电流参考方向取关联参考方向,则线性电容元件吸收电能的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-13)$$

则在  $t_0$  到  $t$  时刻, 电容元件吸收的能量为

$$\begin{aligned} W &= \int_{t_0}^t p dt = \int_{u(t_0)}^{u(t)} C u du \\ &= \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(t_0) \\ &= W(t) - W(t_0) \end{aligned} \quad (1-14)$$

当  $|u(t)| > |u(t_0)|$  时,  $W(t) > W(t_0)$ , 表明电容元件从外部电路吸收能量, 并以电场能的形式储存起来, 这段时间内电容元件被充电(charge); 当  $|u(t)| \leq |u(t_0)|$  时,  $W(t) < W(t_0)$ , 表明电容元件将充电时吸收并储存起来的电场能量向外部电路释放。这段时间内电容元件放电(discharge)。电容具有能量储存能力, 通常称为储能元件。需要强调的是: 电容元件只有先被充电, 才有可能向外部电路放电, 故电容元件是无源元件。

非线性电容元件的库伏特性曲线不是通过原点的直线, 例如, 晶体二极管中的变容二极管就是一种非线性电容, 其电容随所加电压的变化而变化。

实际电容元件两极板间的绝缘介质并非是理想的。当两极板间施加电压时, 将有漏电流存在。在考虑漏电流的情况下(如电解质电容器), 实际电容器可用一理想电容元件和理想电阻元件的并联来模拟, 所以电容器除有储能作用外, 还会消耗一部分电能。实际应用中, 为改变电容量的大小, 常将极板的面积制作成可调的, 称为可变电容器, 如收音机中用来选台(调频)的电容器。电容器是为了获得一定大小的电容而特意制成的, 实际电容器制作的材料和结构不尽相同, 通常有云母电容器、陶瓷电容器、钽质电容器、聚碳酸酯电容器等。此外, 电容的效应在许多别的场合也存在, 这就是分布电容和杂散电容。例如, 在两根架空输电线之间, 每一根输电线与地之间都有分布电容。在晶体三极管或二极管的电极之间, 甚至一个线圈的线匝之间也存在着杂散电容。在电路模型中是否计入这些电容, 应视工作条件而定。

**Michael Faraday** (1791—1867) British physicist and chemist, best known for his discoveries of electromagnetic induction and of the laws of electrolysis. His biggest breakthrough in electricity was his invention of the electric motor. Michael Faraday built two devices to produce what he called electromagnetic rotation: that is a continuous circular motion from the circular magnetic force around a wire. Ten years later, in 1831, he began his great series of experiments in which he discovered electromagnetic induction. These experiments form the basis of modern electromagnetic technology.



### 1.3.3 电感元件

当导体中有电流流过时, 在导体周围将产生磁场。变化的磁场可以使置于磁场中的导体产生电压, 这个电压的大小与产生磁场的电流随时间的变化率成正比, 将导线绕制成线圈如图 1-12 所示是上述原理的应用, 其中  $\Phi$  为磁通,  $N$  为线圈的匝数, 磁通链  $\Psi = \Phi N$ , 由于磁通和磁通链是由线圈本身的电流  $i$  产生的, 所以也称为自感磁通和自感磁通链。图 1-12 中  $\Phi$  (或  $\Psi$ ) 的方向与电流  $i$  的参考方向遵循右手螺旋关系, 交变的电流将产生交变的磁场, 当磁通链  $\Psi$  随时间变化时, 在线圈的两端产生感应电压, 假设感应电压的参考方向与电流的参考方向关联(即感应电压的参考方向与磁通链  $\Psi$  成右手螺旋关系), 根据电磁感应定律, 感