

21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 电路与磁路

林春英 主 编  
刘源祺 邱云兰 张广华 副主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



中国矿业大学北京教材

# 电路与磁路

主编 王 强  
副主编 王 强 王 强 王 强

中国矿业大学出版社



21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 电路与磁路

主 编 林春英  
副主编 刘源祺 邱云兰 张广华  
编 写 高安芹  
主 审 谭震宇



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。本书的主要内容包括电路的基本概念和基本定律；电阻电路的基本分析方法；正弦稳态电路；三相电路；非正弦周期电流电路；双口网络；线性电路过渡过程的时域分析；线性电路过渡过程的复频域分析；磁路和铁心线圈。

本书的特点是概念清晰，重点突出，循序渐进，易学易用，理论与实践相结合。为了便于读者自学，书中各节都有启发性的思考与练习题，各章末均有主要内容小结，全书有丰富的例题与习题，书末附有习题参考答案。

本书可作为高等院校电类及相关专业教材，也可作为报考电工类各工种职业资格证书考生的培训教材，还可供相关专业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电路与磁路/林春英主编；高安芹编写. —北京：中国电力出版社，2007. 2

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5070 - 7

I. 电... II. ①林... ②高... III. ①电路理论—高等学校—教材②磁路—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 165214 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 503 千字  
印数 0001—3000 册 定价 29.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)



# 前言

本书是根据教育部提出的《面向 21 世纪高等工程教育内容与课程体系改革计划》及对本课程制定的教学基本要求而编写的。本教材力求贯彻高职高专的教学基本要求,突出实用性,加强实践性,强调针对性,注意灵活性。对基础理论的教学以必需、够用为度,突出理论知识的应用和实践动手能力的培养。

面对学时越来越少,内容越来越多的矛盾,为适应高职高专电类不同专业的教学要求,结合多年的教学改革和教学实践编写了本教材,在编写时力求突出以下特点。

(1) 在内容安排上采用分层次模块式。可根据不同专业的教学要求、教学时数适当取舍。采用先稳态后暂态的叙述体系,由浅入深地介绍电路分析的基本知识。本书第一、二章介绍电路的基本概念、基本原理和基本分析方法;第三至七章介绍正弦、非正弦交流稳态电路的分析计算方法;第八、九章介绍暂态电路的分析计算;第十章是磁路与铁心线圈电路,介绍了磁路的基本概念、基本定律及铁心线圈电路的分析计算。在目录上标以“\*”号的内容可供选学及读者自学。

(2) 在内容叙述上尽量用通俗、启发式的教学语言。根据高职高专学生的实际情况和培养目标,注重问题的提出与引申,用精练、有效的方式把问题由浅入深地交代清楚,体现高职高专学生的认知特点,逐步引导读者自主学习。

(3) 在内容选择上注意理论联系实际,培养读者的应用能力和工程意识。精选有助于建立概念,掌握方法,与生产、生活密切结合的例题习题。为了便于读者自学,书中各节都附有启发性的思考与练习题,各章末均有主要内容小结。

本书第一、二、十章由林春英老师编写,第三、四章由张广华老师编写,第五、六、七章由刘源祺老师编写,第八、九章由邱云兰老师编写,高安芹老师对部分习题给出了参考答案。全书由林春英老师主编,并对全书进行了统稿工作。本教材承山东大学谭震宇教授认真审阅并提出了许多宝贵的建设性的意见。在本书的编写过程中,田志斌老师对本书的框架结构安排提出了建设性的意见,本书的出版得到了山东电力高等专科学校领导和老师的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,加之时间仓促,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2006 年 8 月

## 目 录

## 前言

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第一章 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 电路中的主要物理量                     | 3   |
| § 1-3 电路中的无源元件                      | 8   |
| § 1-4 电路中的有源元件                      | 17  |
| § 1-5 基尔霍夫定律                        | 20  |
| 本章主要内容小结                            | 25  |
| 习题                                  | 26  |
| 第二章 电阻电路分析                          | 29  |
| § 2-1 电阻的串联和并联                      | 29  |
| § 2-2 电阻的 Y 形连接与 $\Delta$ 形连接及其等效变换 | 36  |
| § 2-3 电源的等效变换                       | 39  |
| § 2-4 KCL 与 KVL 方程的独立性              | 44  |
| § 2-5 支路电流法                         | 50  |
| § 2-6 回路电流法                         | 53  |
| § 2-7 结点电压法                         | 59  |
| § 2-8 叠加定理与替代定理                     | 63  |
| § 2-9 戴维宁定理与诺顿定理                    | 70  |
| * § 2-10 非线性电阻电路的图解法                | 77  |
| 本章主要内容小结                            | 80  |
| 习题                                  | 83  |
| 第三章 正弦交流电路                          | 88  |
| § 3-1 正弦量                           | 88  |
| § 3-2 正弦量的相量及基尔霍夫定律的相量形式            | 94  |
| § 3-3 单一参数的正弦交流电路                   | 100 |
| § 3-4 阻抗与导纳                         | 109 |
| § 3-5 阻抗(导纳)的串联与并联                  | 118 |
| § 3-6 正弦交流电路的功率                     | 121 |
| § 3-7 正弦稳态交流电路的相量分析法                | 125 |
| § 3-8 串联电路的谐振                       | 130 |
| § 3-9 并联电路的谐振                       | 134 |
| 本章主要内容小结                            | 137 |
| 习题                                  | 138 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第四章 互感电路分析</b>             | 142 |
| § 4-1 互感                      | 142 |
| § 4-2 含互感电路的分析计算              | 146 |
| § 4-3 变压器电路分析                 | 151 |
| 本章主要内容小结                      | 158 |
| 习题                            | 159 |
| <b>第五章 三相电路</b>               | 162 |
| § 5-1 对称三相正弦量                 | 162 |
| § 5-2 三相电源和三相负载的连接            | 166 |
| § 5-3 三相电路中的电压和电流             | 167 |
| § 5-4 对称三相电路的特点和计算            | 171 |
| § 5-5 不对称三相电路的计算              | 174 |
| § 5-6 三相电路的功率                 | 177 |
| * § 5-7 对称分量法                 | 181 |
| * § 5-8 安全用电常识                | 183 |
| 本章主要内容小结                      | 186 |
| 习题                            | 188 |
| <b>第六章 非正弦周期电流电路</b>          | 191 |
| § 6-1 非正弦周期量                  | 191 |
| § 6-2 周期函数的傅立叶级数              | 192 |
| § 6-3 非正弦周期电流电路的计算            | 198 |
| § 6-4 非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和平均功率 | 201 |
| * § 6-5 对称三相电路中的谐波分析          | 206 |
| * § 6-6 电力系统谐波的危害与治理          | 210 |
| 本章主要内容小结                      | 211 |
| 习题                            | 213 |
| <b>第七章 二端口网络</b>              | 215 |
| § 7-1 概述                      | 215 |
| § 7-2 二端口网络的阻抗参数和导纳参数         | 216 |
| § 7-3 二端口网络的传输参数和混合参数         | 222 |
| § 7-4 互易二端口网络的等效电路            | 228 |
| § 7-5 二端口网络的连接                | 231 |
| 本章主要内容小结                      | 233 |
| 习题                            | 234 |
| <b>第八章 线性电路过渡过程的时域分析</b>      | 237 |
| § 8-1 换路定律与初始条件               | 237 |
| § 8-2 一阶 RC 电路的响应             | 241 |
| § 8-3 一阶 RL 电路的响应             | 246 |
| § 8-4 一阶电路的三要素法               | 251 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| § 8-5 一阶电路的阶跃响应 .....           | 255 |
| § 8-6 一阶电路的冲激响应 .....           | 258 |
| § 8-7 二阶 $RLC$ 串联电路的零输入响应 ..... | 263 |
| 本章主要内容小结 .....                  | 269 |
| 习题 .....                        | 270 |
| <b>第九章 线性电路过渡过程的复频域分析</b> ..... | 273 |
| § 9-1 拉普拉斯变换及其基本性质 .....        | 273 |
| § 9-2 拉普拉斯反变换——部分分式展开法 .....    | 276 |
| § 9-3 运算电路 .....                | 279 |
| § 9-4 线性动态电路的复频域分析法 .....       | 281 |
| 本章主要内容小结 .....                  | 284 |
| 习题 .....                        | 285 |
| <b>第十章 磁路和铁心线圈</b> .....        | 286 |
| § 10-1 磁场的基本物理量和基本性质 .....      | 286 |
| § 10-2 铁磁性物质的磁化 .....           | 288 |
| § 10-3 磁路及磁路定律 .....            | 291 |
| § 10-4 恒定磁通磁路的计算 .....          | 294 |
| § 10-5 交流铁心线圈中的波形畸变与能量损耗 .....  | 298 |
| § 10-6 交流铁心线圈的电路模型 .....        | 302 |
| * § 10-7 电磁铁 .....              | 305 |
| 本章主要内容小结 .....                  | 309 |
| 习题 .....                        | 310 |
| <b>部分习题参考答案</b> .....           | 313 |
| <b>参考文献</b> .....               | 322 |



## 第一章 电路的基本概念和基本定律

电路理论是当代工程科学重要的理论基础之一，它目前已经发展成为一门体系完整、逻辑严密、内容丰富，对国民经济和众多学科有着重大影响的学科。

电路理论主要有两个分支：其一是电路分析，它的核心内容是在已知电路结构和元件参数的条件下，研究电路中发生的电磁现象，用电压、电流等物理量来描述输入（或激励）与输出（或响应）之间的关系，而一般不涉及器件内部发生的物理过程；其二是电路综合，是在已知输入和输出的条件下，设计电路的结构并计算电路元件的参数。电路分析的一个重要目的是为了进行电路的设计，并力图使得设计的电路性能良好，同时又要设法降低其成本，提高可靠性等。作为一门理论基础课，在本书中只涉及电路分析中比较基本的内容。

本章主要介绍电路模型、理想电路元件（电阻、电感、电容、独立电源和受控源等）及基尔霍夫定律，并引入了电流、电压参考方向的概念。其中有些内容在《物理学》中可能已经涉及，但在电路理论中将有自己的处理方法和表达形式。对于初学者来说必须明确：本章将为整个课程提供理论基础。

### § 1-1 电路和电路模型

#### 一、电路

人们在生产和生活中会遇到各种各样的实际电路，如输电线路、照明电路、集成电路等。实际电路是为实现某种预期的目的将一些电路器件（如电阻器、电容器等）和电工设备（如电源、变压器、电动机等）按一定的方式连接起来构成的电流的通路，具有传输或转换能量、传递或处理信号、测量、控制等功能。在电路中提供电能或电信号的设备称为电源；转换电能或电信号的设备称为负载；除电源和负载以外的部分称为中间环节，起连接、传输、控制等作用。

#### 二、电路模型

任何一门自然科学都是以自然界客观事物的某种运动形式作为其研究内容的，而客观事物之间存在着各种各样的联系，但各种物理性质并非孤立存在，只是在一定条件下，某种性质占主导地位。为了表示事物在一定条件下的主要物理性能，自然科学的各个分支都建立了自己的模型理论，在模型的基础上，运用数学工具进行研究。例如力学中的质点和刚体的概念，就是为了描述物体机械运动而建立的模型。

在实际电路系统中，各种电气器件或电工设备的工作过程都与电路中的电磁现象有关，例如电阻元件的电阻是由于电场和磁场的能量与其他形式（如热能、光能等）能量的相互转换而形成的；电感线圈中的磁场能量的储存与变化，决定于电路中磁场分布状态；电容元件吞吐电场能量的情况，与电路中的电场分布密切相关；导线中电流变化时，周围就伴随有磁场的变化。以上这些情况说明，任意一个实际电路元件及整个电气装置总是与周围的电磁场相联系，若将所有元件的电磁性能交织在一起，必然使问题复杂化，甚至无法研究。为了研

究复杂电路系统的特性,就必须进行科学抽象与概括,用数学定义一些模型元件(称为理想电路元件)来表征实际电路元件的外部功能,并用这些模型元件按一定规则进行组合,使之具有实际元件或装置的主要电磁性能。例如:电感线圈中集中着磁场能量,我们用电感元件来代表电路中磁场的外部功能;电容元件则是电荷与电场能量的储存者,用电容元件来代表电场的外部功能;将电路中电磁场能量与其他形式能量相互转换的功能用电阻元件代表;把导线只看作各种电路元件的连通器,它能够允许电荷自由通过而不聚集电荷和能量,且其电阻值为零,周围产生的电磁场可忽略不计。实践证明,在一定条件下,建立这样的元件模型,是同实际情况相符的,是可行的。用理想电路元件按一定规则进行组合,使之具有实际电路的主要电磁性能,这就是电路理论研究的对象——电路模型。

在建立电路元件模型时,我们假定元件中的电磁过程都是集中在元件内部进行的,所以,理想电路元件通过每个端钮的电流和任意两个端钮之间的电压在任何时刻都有确定的值。对于二端元件而言,若流入一个端子的瞬时电流等于从另一个端子流出的瞬时电流,该二端电路元件即称为集中参数元件,简称集中元件。由集中元件构成的电路模型称为集中参数电路。当然,用集中参数电路来代替实际电路是有条件的。这个条件是实际电路的外部尺寸要远小于电路工作时电磁波的波长(电磁波在一个周期内的传播距离叫做波长,用 $\lambda$ 表示, $\lambda = c_0 T = \frac{c_0}{f}$ ,其中 $c_0 = 3 \times 10^5 \text{ km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为电磁波的传播速度)。不满足这个条件的电路称为分布参数电路。应该指出,分布参数电路理论是建立在集中参数电路理论的基础之上,一个分布参数电路可以看成是一连串集中参数电路的序列的极限。本书只讨论集中参数电路。

在电路模型中,元件都用规定的图形符号表示(见表1-1),再用连线表示元件之间的连接,这样画出的图形叫电路图。电路图是用图形表达的实际电路的模型。图1-1(b)即为图1-1(a)的电路图。

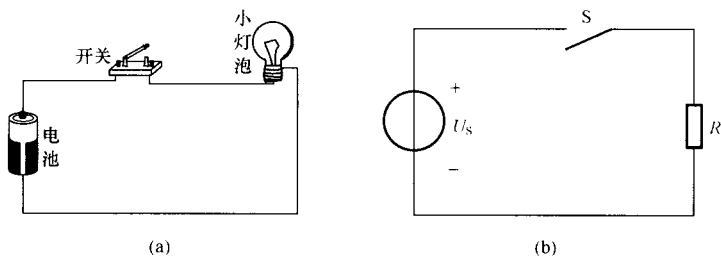


图 1-1 电路及电路图

(a) 电路; (b) 电路图

表 1-1

常用电路元件和常用的其他符号

| 名称 |       | 符号 | 名称       | 符号 |
|----|-------|----|----------|----|
| 电阻 | 一般    |    | 导线       |    |
|    | 可调    |    | 连接的交叉导线  |    |
|    | 滑线变阻器 |    | 导线的不连接跨越 |    |
| 电感 | 空心    |    | 开关       |    |
|    | 铁心    |    | 熔丝       |    |

续表

| 名称  |    | 符号 | 名称     | 符号 |
|-----|----|----|--------|----|
| 电容  | 一般 |    | 接地一般符号 |    |
|     | 可调 |    | 故障     |    |
| 电流源 |    |    | 电流表    |    |
| 电压源 |    |    | 电压表    |    |
| 受控源 |    |    | 照明灯    |    |
| 蓄电池 |    |    | 检流计    |    |

## 思考与练习

- 1.1.1 电路理论研究的对象是什么？  
 1.1.2 实际电路与电路模型有何区别？

## § 1-2 电路中的主要物理量

## 一、电流和电压及其参考方向

在电路理论中为了定量地描述电路的状态或元件特性，一般选用电压和电流（或者电荷和磁链）作为基本变量。所谓基本变量，是指能用它们方便地表示出电路中其他各种物理量。

## 1. 电流及电流的参考方向

电流，是指电荷在电场作用下的定向移动，用  $i(t)$  表示。电流的实际方向习惯上规定为正电荷移动的方向。电流的大小定义为单位时间内通过导体横截面的电量。若电量用  $q(t)$  表示，则

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

如果电流的大小和方向均不随时间改变叫做恒定电流，简称直流，记作 dc 或 DC，用符号  $I$  表示。如果电流的大小和方向随时间改变，则称为变动电流。其中大小和方向随时间周期性变动且平均值为零的电流称为交变电流，简称交流，记作 ac 或 AC，用符号  $i$  或  $i(t)$  表示。

本书中的物理量均采用国际单位制 (SI)。电量的 SI 单位是 C (库仑，简称库)。电流的 SI 单位为 A (安培，简称安)。若每秒通过电路中某处的电量为 1C，则该处的电流大小为 1A。

电流是个代数量。代数量的特点是在指定参考方向下，可以用其数值的正、负反映该物

理量的实际方向。图 1-2 是一个电路中的一条支路，其中长方形块表示一个二端元件。指定该支路电流的参考方向如图 1-2 中实线箭头所示，若电流的实际方向是由 a 端流向 b 端 [如图 1-2 (a) 中虚线箭头所示]，它与参考方向一致，则电流的数值为正，即  $i > 0$ ；若电流的实际方向是由 b 端流向 a 端 [如图 1-2 (b) 中虚线箭头所示]，两者方向不一致，则电流的数值为负，即  $i < 0$ 。在电路分析中往往事先很难确知电流的真实方向，所以参考方向的标定带有任意性。参考方向

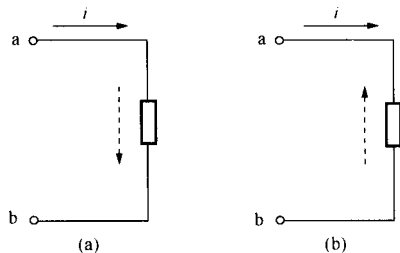


图 1-2 电流的参考方向与实际方向  
(a)  $i > 0$ ; (b)  $i < 0$

向本身并不能断定电路中的真实物理过程，但参考方向的标定便于电路的分析与计算，因此，电路分析中均用参考方向，不用实际方向。在标定的参考方向下，电流的实际方向则可以根据计算结果的正负判断。可见，有了电流的参考方向，电流数值的正负才具有明确的物理意义，若不标定参考方向，谈论电流的正负是没有意义的。

电流的参考方向一般用实线箭头所示，也可以用双下标表示，例如  $i_{ab}$  表示参考方向是由 a 到 b。

## 2. 电压及电压的参考方向

电压是电路理论中另一个基本变量。电路中任意两点间电压  $u(t)$  的大小是指单位正电荷由一点移动到另一点的过程中，电场力对电荷所做的功。可见，电压是从能量方面表示了电场对电荷的做功能力。若将电量为  $dq$  的电荷在电场中从一点移动到另一点时，电场力所做的功为  $dW$ ，则此两点间的电压为

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

在 SI 中功的单位为 J (焦耳，简称焦)，电压的单位为 V (伏特，简称伏)。在电场中若将 1C 的正电荷由 A 点移动到 B 点，如果电场力所做的功为 1J，则 A、B 两点间的电压为 1V。

在电路中任选一点为参考点，则电路中某点到参考点之间的电压就叫做这一点（相对于参考点）的电位。电位用符号  $\varphi$  表示，如 A、B 两点的电位分别记为  $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 。若选取 O 点为参考点，则  $\varphi_A = u_{AO}$ 、 $\varphi_B = u_{BO}$ ，那么  $\varphi_O = 0$ 。这样根据电压的定义知，电路中 A、B 两点间的电压也就是 A、B 两点的电位之差，即

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-3)$$

因此，电压又叫电位差。若  $\varphi_A > \varphi_B$ ，我们称 A 点电位高，B 点电位低。

电压也是一个代数量。习惯上把电压的真实方向规定为由高电位端指向低电位端。在电路图中，将高电位端标以“+”号，低电位端标以“-”号，称为电压的正负极性。与电流选用参考方向的作用类似，电路图中标定的电压的正、负极性均指参考极性，电压的参考方向是由参考“+”极到参考“-”极的方向，即由参考高电位端指向参考低电位端，如图 1-3 所示。和电流一样，电压的真实方向事先也是不确定的，它的参考方向的标定也具有任意性。

然而，在标定各电压的参考极性之后，即可根据计算结果确定电压的真实极性。若计算结果电压的数值为正，即  $u > 0$ ，则表示电路中电压的真实极性与标定的极性相同，如图

1-3 (a) 所示 (图中虚线箭头表示电压的真实方向, 箭头的首端为高电位, 箭头的末端为低电位); 若计算结果电压的数值为负, 即  $u < 0$ , 即表明电压的真实极性与标定的极性相反, 如图 1-3 (b) 所示。这就是说电压数值的正负只有对应于电路图中标定的电压参考极性才有确切的物理意义。若不在电路图中标定电压的参考极性, 谈论电压的数值为正负是没有意义的。

电压的参考方向也可以用实线箭头表示, 箭头的首端为电压的参考“+”极性, 箭头的末端为电压的参考“-”极性。电压的参考方向还可以用双下标表示, 例如  $u_{ab}$  表示其参考方向是从 a 到 b, 即 a 端为参考高电位, b 端为参考低电位。

### 3. 电压与电流的关联参考方向

关于参考方向, 这里有一个问题: 既然在电路中电流的参考方向和电压的参考方向在标定时都具有任意性, 那么二者之间有什么关系呢? 就参考方向本来意义讲, 二者是彼此独立, 没有任何限制。然而对某一个二端元件, 有时需要同时标定电压和电流的参考方向, 其结果有两种情况。一种是电流与电压的参考方向一致, 即电流的参考方向是从标以电压“+”极性的一端流入元件, 而从标以“-”极性的一端流出。为分析问题方便, 把电压与电流的这种参考方向关系称为关联参考方向, 简称关联方向, 如图 1-4 (a) 所示。另一种是电流与电压的参考方向不一致, 即电流的参考方向是从标以电压“-”极性的一端流入元件, 而从标以“+”极性的一端流出, 这种参考方向关系称为非关联参考方向, 简称非关联方向, 如图 1-4 (b) 所示。

参考方向的概念在电路分析中非常重要, 初学者对此要给以足够重视, 在具体应用中还要注意以下几点:

(1) 电流、电压的实际方向是客观存在的, 而参考方向则是根据计算需要任意选择的。参考方向一旦标定, 在整个分析和计算过程中就必须以此为根据, 不能随意变动。

(2) 同一电流 (或电压), 若参考方向选择不同, 其结果是瞬时值大小相等而异号, 即  $i_{ab} = -i_{ba}$ ; 它的解析式也是异号, 即  $i_{ab}(t) = -i_{ba}(t)$ , 其波形则是关于  $t$  轴对称的。由此可见, 电流、电压值的正、负, 只有结合其参考方向才有意义, 所以在分析计算时, 要养成先标定参考方向的习惯。

(3) 所有电路元件上电流与电压的关系以及由此而得出的基本公式和结论, 都是在一定参考方向的前提下得出来的。因此, 在应用这些公式和结论时, 必须注意参考方向的选择。

SI (国际单位制) 中的一些单位, 如 A、V、s 等, 在实用中有时太大或太小, 使用不便。为此, 在 SI 单位制中规定了十六个词头 (简称 SI 词头) 加在原单位前面, 以构成十进制倍数单位和分数单位。常用的 SI 词头有八个, 如表 1-2 所示。SI 词头符号在书写时应注意, 凡兆以下的均为小写字母, 兆和兆以上均为大写字母, 切不可混淆。例如  $1\text{M}\Omega = 1000\text{k}\Omega$ ,  $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ,  $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

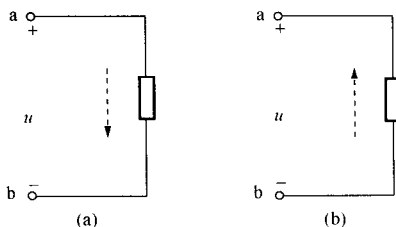


图 1-3 电压的参考方向与真实方向  
(a)  $u > 0$ ; (b)  $u < 0$

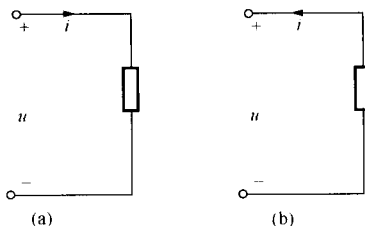


图 1-4 关联参考方向  
(a) 关联方向; (b) 非关联方向

表 1-2 用于构成十进倍数和分数的部分 SI 词头

| 词头名称   | 原文（法） | Téra             | giga            | méga            | kilo            | mili             | micro            | nano             | pico              |
|--------|-------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|        | 中文    | 太〔拉〕             | 吉〔咖〕            | 兆               | 千               | 毫                | 微                | 纳〔诺〕             | 皮〔可〕              |
| 词头符号   |       | T                | G               | M               | k               | m                | μ                | n                | p                 |
| 所表示的因数 |       | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>6</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-9</sup> | 10 <sup>-12</sup> |

注   〔〕 内的字，是在不致混淆的情况下可省略的字。

二、功率和能量

在电路分析与计算中，功率和能量是很重要的两个概念，因为从某种意义上说，电路的基本作用就是实现能量的传递。

1. 功率及功率的性质

图 1-5 中 N 为线性电路的一部分，这部分电路向外引出两个端子（如图 1-5 中 a、b），且无论何时从一个端子流入的电流总等于从另一个端子流出的电流，则这样一对端子称为端口。具有一个端口的电路称为一端口电路（简称一端口）或二端网络。习惯上将端口处的电压  $u(t)$ 、电流  $i(t)$  称为端口电压和端口电流。在电路理论中，电路（circuit）和网络（network）这两种名称并无根本区别，都是指按一定方式连接起来的电路元件的集合。一般说来，网络是指较复杂的电路，但是，基本分析方法对两者都适用。在本书中，根据习惯和需要将采用不同的称呼，但两种叫法从概念上说，认为其含义相同。

对任意一端口电路 N，能量的传递方向，不是由外电路传入一端口 N，就是从一端口 N 输出给外电路，如图 1-6 所示。若正电荷从电压“+”极经电路移动到电压“-”极，即电流从电压高电位流向低电位，电场力对电荷做功，这时该一端口吸收电能；相反，若正电荷从电压“-”极经电路移动到电压“+”极，即电流从电压低电位流向高电位，是外力克服电场力对电荷做功，这时该一端口向外电路释放能量，即发出电能。

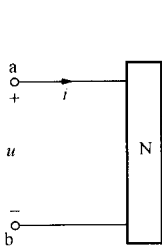


图 1-5 一端口电路

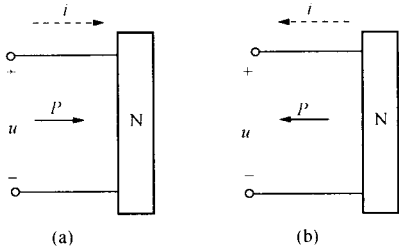


图 1-6 能量的传输方向及功率的性质

(a) 一端口 N 吸收功率（电能）；(b) 一端口 N 发出功率（电能）

功率是能量对时间的变化率。用符号  $p(t)$  表示。设一端口 N 的端口电压为  $u(t)$ ，且在  $dt$  时间内，有  $dq(t)$  的正电荷从电压“+”极经一端口 N 移动到电压“-”极，根据电压定义，该一端口吸收的能量为  $dW(t) = u(t)dq(t)$ ，因为  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ ，所以，该一端口吸收的功率为

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

即

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

由此可知,一端口电路的功率等于其端口电压与端口电流的乘积。当电流的单位为 A,电压的单位为 V 时,功率的单位为 W (瓦特,简称瓦)。

功率也是一个代数量,功率的真实方向就是能量的传输方向。对任意线性一端口电路,若能量的传输方向是由外电路送入一端口电路,则称该电路吸收功率 (或消耗功率);若一端口电路将能量送出至外电路,则称该电路发出功率 (或产生功率)。由式 (1-4) 知,功率是一个复合量,即它由电压和电流确定。而电压、电流的参考方向事先已标定,所以功率的参考方向间接地由电压和电流的参考方向决定。

根据元件的物理性质可知,对某一个一端口电路 (或二端元件): ① 当电压、电流取关联方向时,假设该电路 (或元件) 吸收功率,其量值为  $p = ui$ 。若计算结果  $p > 0$ , 表示该电路确实吸收功率;若计算结果  $p < 0$ , 则表示该电路实际上是发出功率 (与假设的情况相反); ② 当电压、电流取非关联方向时,假设该电路 (或元件) 发出功率,其量值为  $p = ui$ 。若计算结果  $p > 0$ , 表示该元件确实发出功率;若计算结果  $p < 0$  则表示该元件实际上是吸收功率。我们说一个元件吸收功率 100W,也可以说它发出功率 -100W;同理,一个元件若发出功率 100W,也可以说它吸收功率 -100W。这两种说法实际上是相同的。

【例 1-1】 求图 1-7 所示各一端口电路的功率。

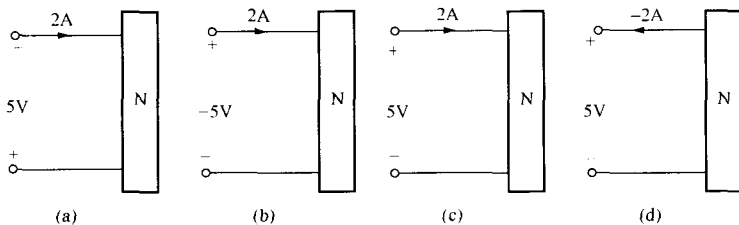


图 1-7 例 1-1 图

解: (1) 图 (a) 中电压、电流为非关联方向,所以,一端口发出的功率为

$$p_1 = 5 \times 2 = 10\text{W}$$

(2) 图 (b) 中电压、电流为关联方向,所以,一端口吸收的功率为

$$p_2 = (-5) \times 2 = -10\text{W} \text{ (实为发出功率 } 10\text{W)}$$

(3) 图 (c) 中电压、电流为关联方向,所以,一端口吸收的功率为

$$p_3 = 5 \times 2 = 10\text{W}$$

(4) 图 (d) 中电压、电流为非关联方向,所以,一端口发出的功率为

$$p_4 = 5 \times (-2) = -10\text{W} \text{ (实为吸收功率 } 10\text{W)}$$

## 2. 能量

由功率的定义知,在  $t_1$  到  $t_2$  一段时间内,元件吸收或发出的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1-5)$$

在国际单位制 (SI) 中,电能的单位为 J。在实用中,电能的单位用 kW · h (千瓦小时,俗称度)。1kW · h = 1000W × 3600s = 3.6 × 10<sup>6</sup>J。

能量转换与守恒定律是自然界的基本规律之一,电路当然遵守这一规律。一个电路中,

每一瞬间接受电能的各元件功率的总和等于发出电能的各元件功率的总和，这个结论称为电路的功率平衡。

### 思考与练习

1.2.1 10A 电流从一个二端元件的 a 端流入、b 端流出，当 a 端电位比 b 端电位低 20V 时，试分别写出  $I_{ab}$ 、 $U_{ab}$  和  $I_{ba}$ 、 $U_{ba}$  的值，并求此元件发出（或吸收）的功率。

1.2.2 已知  $i_{ab}(t) = 10\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi}{3}\right)$  A。试求：(1)  $t = 0, \frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{3T}{2}$  瞬间的电流值；(2) 画出  $i_{ab}$  和  $i_{ba}$  的波形图。

1.2.3 有两个电源，一个发出的电能为  $1000\text{kW} \cdot \text{h}$ ，另一个发出的电能为  $500\text{kW} \cdot \text{h}$ 。是否前一个电源的功率大，后一个电源的功率小？

1.2.4 一个 220V, 100W 的白炽灯，每天接至 220V 的电压源上使用 3h，一个月（按 30 天计）消耗多少电能？

## § 1-3 电路中的无源元件

第一节曾经指出，本书中所研究的电路都是由模型化的理想元件构成的，每个电路元件都具有确定的物理性质和集中的参数，它们的适当组合能近似地描述实际电路元件或电路装置的外部特性。电路元件的参数表征着不同电路变量之间的相互关系，而且只决定于元件的性质。反映电路元件上电压与电流之间关系的数学表达式，称为元件的 VCR (Voltage Current Relation) 或元件的约束方程。

按照不同的分类方法，电路元件可分为不同的类型。例如，从元件的能量特性看，分无源和有源两类，其中无源元件包括双向和单向两种。所谓双向元件，是指其同外电路相连接的端钮互换时，不改变整个电路的工作状态，如电阻元件 R、电容元件 C 和电感元件 L 等即属此种元件；不具有上述性质的元件称为单向元件，如 PN 结二极管等。有源元件包括独立电源和受控电源等。另外，若按外部端钮的数目分类，有二端元件和多端元件两类。本节只讨论二端电阻元件、电容元件、电感元件的定义及它们的约束方程。

### 一、电阻元件

导体或半导体对电流的阻碍作用叫做电阻作用。电阻作用使得导体或半导体通过电流时进行着把电能转换成热能或其他形式能量的不可逆过程。白炽灯、电炉、电烙铁等电阻器就是利用电阻作用而发光、发热的。有些电器，例如发电机、电动机、变压器等通过电流时也要发热而损耗电能。为了模拟电阻器及其他实际器件消耗电能的基本特性引入了电阻元件。

#### 1. 电阻元件

如果一个二端元件，在任意时刻，它的端电压与电流的关系能够由  $u-i$  平面上通过坐标原点的一条曲线（称为伏安特性曲线）决定，这个元件就称为电阻元件。

当电压、电流取关联方向时，若电阻元件的伏安特性在  $u-i$  平面上为过坐标原点的一条直线，如图 1-8 (b) 所示，就称为线性电阻元件；如果线性电阻元件的伏安特性的斜率不随时间变化，又称为线性定常电阻，否则，就称为线性时变电阻。线性定常电阻元件简称



电阻元件，其图形符号如图 1-8 (a) 所示。图中  $R$  是表征电阻元件特性的参数，其大小等于电阻元件伏安特性的斜率。电阻的倒数又称为电导， $G = \frac{1}{R}$ 。在 SI 中，电阻的单位为  $\Omega$  (欧姆，简称欧)；电导的单位为 S (西门子，简称西)。

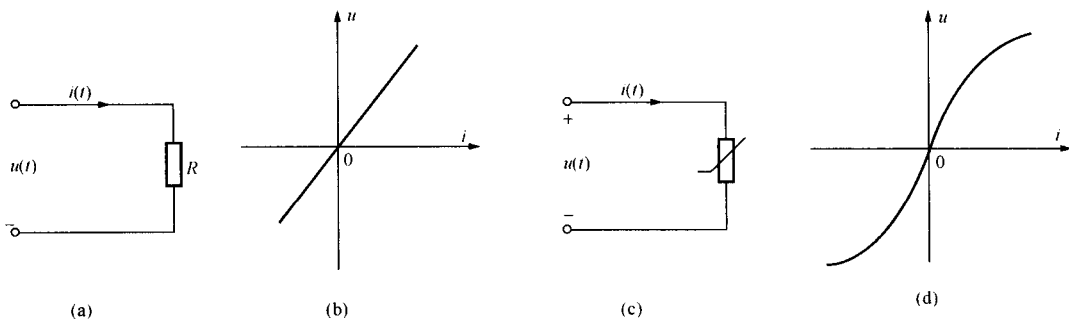


图 1-8 电阻元件的符号及其伏安特性

如果电阻元件的伏安特性不是直线，如图 1-8 (d)，就称为非线性电阻元件，其图形符号如图 1-8 (c) 所示。非线性电阻元件在电子线路中大量存在，作为例子，我们给出二极管的伏安特性曲线，如图 1-9 (b) 所示。如果一个二端非线性电阻元件的伏安特性曲线在  $u-i$  平面上由负电压轴与正电流轴组成，则该元件称为理想二极管。图 1-9 (a)、(c) 分别表示出理想二极管的电路符号与伏安特性曲线。由理想二极管伏安特性曲线可以看出，当它正向连接时，电路处于导通状态，二极管电阻为零；当它反向连接时，电路处于断开状态，二极管电阻为无穷大。在数字电路或自动控制电路中，二极管的这种性质得到了广泛应用。

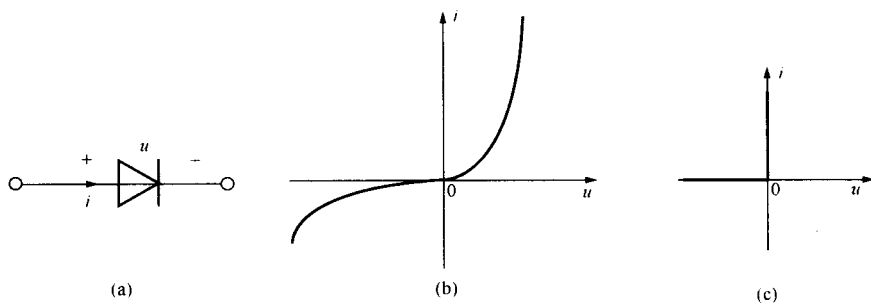


图 1-9 PN 结二极管及其伏安特性

本书主要讨论线性定常元件及含线性定常元件的电路（称为线性电路）。今后，如不加说明，电阻元件均指线性定常电阻元件。

## 2. 电阻元件的电压、电流关系

在线性电阻元件中，电流和电压的关系符合欧姆定律，即电流和电压的大小成正比，真实方向总是一致的。若电阻元件的电压、电流选择关联参考方向，如图 1-10 (a) 所示，则电阻元件上的伏安关系式为

$$u(t) = Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = \frac{1}{R}u(t) = Gu(t) \quad (1-6)$$

若电阻元件的电压、电流选择非关联参考方向，如图 1-10 (b) 所示，则电阻元件上的伏