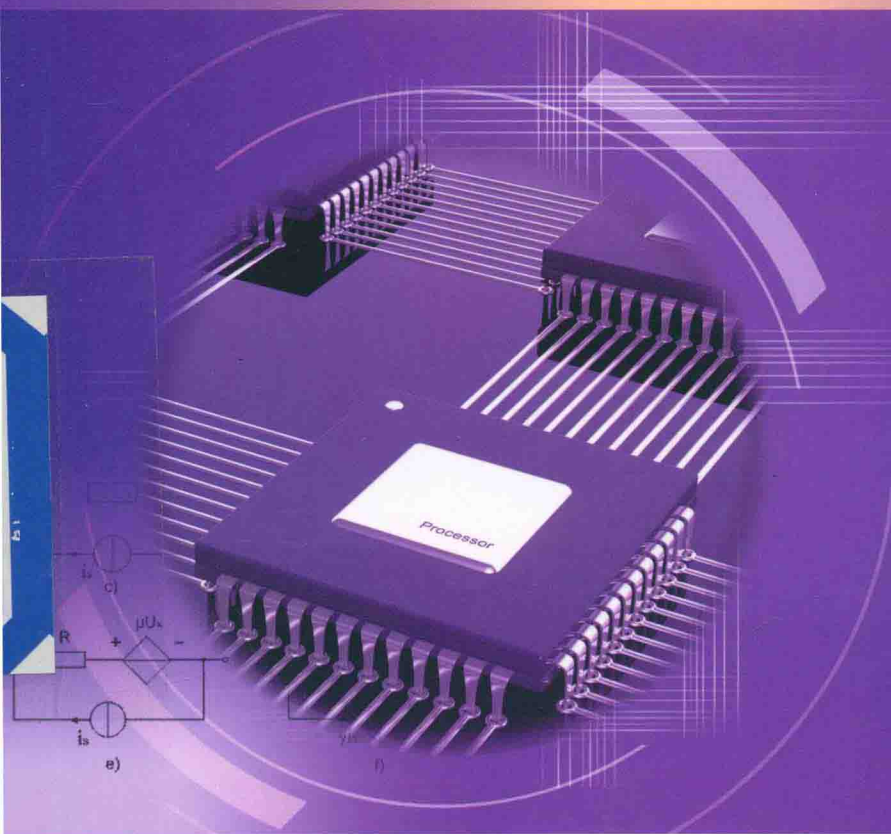




普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电工电子技术 基础与实践

贾贵玺 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM-43
156

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

电工电子技术基础与实践

贾贵玺 主编



机械工业出版社

本书是依据必需、够用和少而精的原则编写的一本电工电子技术少学时教材。教材的上篇（第1~6章）是电工技术部分，下篇（第7~12章）是电子技术部分，主要包括电路基础、磁路与变压器、电机与控制、半导体器件、直流稳压电源、模拟电子技术、数字电子技术等内容，每章均配有思考题、本章小结和一定数量的习题，书后附有实验指导和部分习题参考答案。本书内容简明、重点突出、深入浅出、便于自学，可作为高等院校工科非电类专业本科、高职高专学生的教材或参考书，也可供有关工程技术人员培训和自学使用。

图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术基础与实践/贾贵玺主编. —北京：机械工业出版社，2016.3

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-111-53022-0

I. ①电… II. ①贾… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第035274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：路乙达 责任编辑：徐 凡

责任校对：刘怡丹 封面设计：张 静

责任印制：乔 宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·406千字

标准书号：ISBN 978-7-111-53022-0

定价：35.00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

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

前 言

电工与电子技术是高等工科院校非电类专业的一门技术基础课，教学内容涵盖面广、信息量大，主要内容包括电路基础、磁路与变压器、电机与控制、半导体器件、直流稳压电源、模拟电子技术、数字电子技术等。

本书作者多年从事电工技术、电子技术的教学，积累了丰富的教学与实验经验，本书所有内容都经过作者精心选编，具有很强的实用性和指导性。本书力求做到讲述清楚、语言流畅、图文并茂、便于自学，并力求做到理论性和实践性并重。

为了适应教学和自学的要求，本书在编写过程中遵循少而精的原则，具有以下特色：

1) 精选内容，突出基本要求。对基本概念、基本原理和基本方法的阐述简明，使读者对电工与电子技术中的基本理论、基本知识和基本技能有明确、系统的认识。

2) 在概念阐述上避免过深的论述，通过例题讲解使读者加深对定理、定律、原理的理解和应用。

3) 配有一定数量的思考题，每章都有小结，便于读者复习和总结；每章都配有足够数量的习题供读者练习，书后备有习题答案，便于自学检查。

4) 附有实验指导，学生通过这些实验，不仅可以提高动手能力，而且可以加深对电工电子基本理论的理解。

本书由贾贵玺任主编，其中上篇电工技术（第1~6章）和实验指导由贾贵玺编写，下篇电子技术（第7~12章）由田梦君编写。

由于编者水平有限，书中难免出现一些不足之处，恳请读者批评指正，以便进一步修改和完善。

编者

目 录

前言

上篇 电工技术

第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路的组成及其作用	1
1.2 电路中的基本物理量	2
1.3 欧姆定律	8
1.4 电压源和电流源	9
1.5 电路的工作状态	15
1.6 基尔霍夫定律	17
本章小结	19
习题	19
第2章 电路的分析方法	23
2.1 电阻的串联与并联	23
2.2 支路电流法	25
2.3 叠加原理	27
2.4 戴维南定理	30
2.5 电位的计算	32
本章小结	33
习题	34
第3章 单相正弦交流电路	37
3.1 正弦交流电的基本概念	37
3.2 正弦量的相量表示法	41
3.3 单一参数元件 (R 、 L 、 C) 的正弦交流电路	45
3.4 RLC 串联的正弦交流电路	50
3.5 阻抗的串联与并联	57
3.6 正弦交流电路的功率与功率因数的提高	59
本章小结	64
习题	65
第4章 三相电路及安全用电	68
4.1 三相正弦交流电路	68
4.2 安全用电	75
本章小结	80
习题	80
第5章 磁路和变压器	82

5.1 磁路的概念和基本定律	82
5.2 直流和交流磁路	86
5.3 变压器	88
本章小结	91
习题	92
第6章 三相异步电动机及其控制	93
6.1 三相异步电动机	93
6.2 继电器-接触器控制系统	103
本章小结	112
习题	112

下篇 电子技术

第7章 半导体器件	115
7.1 半导体基础知识	115
7.2 二极管	117
7.3 稳压管	120
7.4 晶体管	121
本章小结	129
习题	129
第8章 直流稳压电源	133
8.1 单相整流电路	133
8.2 电容滤波电路	137
8.3 稳压管稳压电路	139
8.4 集成稳压电路	140
本章小结	142
习题	143
第9章 晶体管放大电路	146
9.1 放大电路概述	146
9.2 共发射极放大电路的组成	147
9.3 电压放大原理	148
9.4 静态工作点稳定的放大电路	151
9.5 放大电路的图解分析法	153
9.6 放大电路的微变等效电路分析法	158
9.7 射极跟随器	163
9.8 差动放大电路	165
本章小结	168
习题	169

第 10 章 集成运算放大器及其应用	171	12.2 触发器的应用	215
10.1 集成运算放大器简介	171	12.3 集成时序逻辑电路及其应用	221
10.2 模拟运算电路	181	本章小结	224
本章小结	186	习题	225
习题	186	附录 实验指导	228
第 11 章 数字逻辑基础与逻辑门		实验一 叠加原理	228
电路	189	实验二 单相交流电路参数的测量	229
11.1 脉冲与数字的概念	189	实验三 三相交流电路	232
11.2 分立元器件门电路	191	实验四 三相异步电动机的基本控制	234
11.3 TTL 集成门电路	195	实验五 单管放大器	237
11.4 逻辑代数基础	199	实验六 集成运算放大器的基本应用	239
本章小结	204	实验七 TTL 集成门电路	242
习题	204	实验八 集成计数器的应用	245
第 12 章 触发器与时序逻辑电路	209	部分习题参考答案	249
12.1 触发器	209	参考文献	257

上篇 电工技术

第1章 电路的基本概念与基本定律

电路是电工和电子技术的基础。在本章,通过对直流电路的学习,可掌握和熟悉电路的基本概念、基本定律及分析方法,内容包括电路及模型、电压和电流的方向、电路的基本定律——欧姆定律和基尔霍夫定律、电路的工作状态、电位的计算、电源及其等效变换等。这些基本定律经过适当的扩展,也可以用于交流电路的分析和计算。

1.1 电路的组成及其作用

电路是电流或信号的通路,具有传输电能、处理信号、测量、控制、运算等功能。

1.1.1 电路的组成

在电路中,产生电能或电信号的元器件称为电源或信号源。用电设备称为负载。电压和电流都是在电源的作用下产生的,因此,电源又称为激励,由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。根据激励和响应的因果关系,也可以将激励称为输入,响应称为输出。连接电源与负载的导线和开关等设备称为中间环节。

1.1.2 电路的作用与分类

1. 强电电路

电路的一个重要作用是实现能量的传输和转换,电力系统是典型的例子:发电厂的发电机将各种形式的非电能(如燃料的化学能、流水的动能和势能、原子的核能等)转换为电能,通过输配电系统,将电能输送和分配到各个用电部门,通过各种各样的用电设备,再将电能转换成声、光、热、机械等各种形式的非电能。在电力系统中,发电机是电源,用电设备是负载,而其余部分可以统称为中间环节,如图1-1所示。由于这类电路的电压高、电流大、传输和转换的功率较大,所以一般将这类电路称为强电电路。

2. 弱电电路

电路的另一种作用是信号处理。在某些电路(如各种电子电路)中,电压、电流都携带着一定的信息,如电视信号就携带着图像和伴音信息。一般将这种携带一定信息的电压、电流叫做信号。电路的作用是将这些信号进行处理,以满足某种特定的需要。例如,电视机电路的作用就是将电视信号接收下来,并将其进行适当的处理,以适应显示器显示图像和扬声器放声的要求;在计算机控制系统中,是将采集到的反映现场情况的信号进行处理、运

算,产生新的输出信号以进行实时控制等。图 1-2 所示为有线广播系统示意。由于这类电路传送和变换的电信号和功率相对较小,因此称为弱电电路。

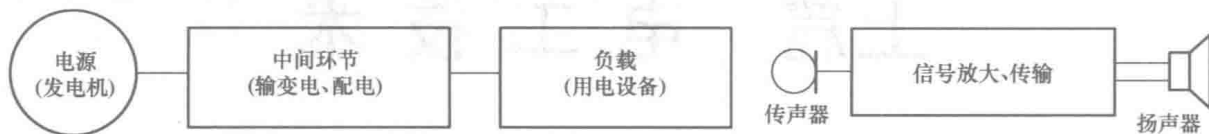


图 1-1 电力系统示意

图 1-2 有线广播系统示意

1.1.3 电路模型

构成实际电路的电气设备和元器件,都是一个个的物理实体,如电源、开关、电阻、晶体管等,称之为实际元件或器件。电路理论的研究一般不涉及元器件内部发生的物理过程,主要进行计算各种元器件的输入、输出电流和电压。实际的电路可能很大、很复杂,如一个电力系统或一片超大规模的集成电路。为了便于电路分析,需要将实际电路理想化(模型化),即由理想元件构成的电路,称为电路模型。图 1-3a 所示为手电筒电路示意,图 1-3b 所示为其电路模型,其中 E 和 R_0 为电源(电池)的电动势及内阻、 S 为开关、 R 为灯泡(负载、等效为电阻)。当开关闭合后,在电源(激励)作用下,产生电流 I 并在负载上产生电压 U (响应),通过灯泡将电能转换为光能。

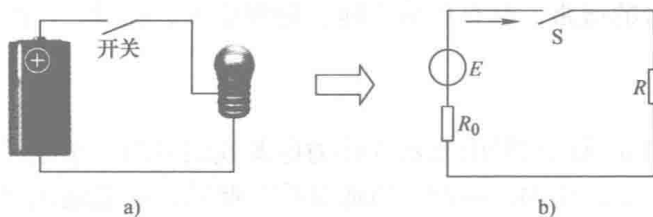


图 1-3 手电筒电路示意及电路模型

a) 电路示意 b) 电路模型

【思考题】

1. 什么是电路?
2. 电路通常由哪几个主要部分组成?
3. 电路的主要作用有哪两类?

1.2 电路中的基本物理量

电流、电压等是描述电路中能量转换关系或信号传递和处理的基本物理量。在学习电路分析方法前,首先要弄清它们的相关概念及其参考方向等问题。

1.2.1 电流

电流是电荷(带电粒子)的有规则的定向运动,在电场力的作用下,导体中的自由电荷作定向移动,在导体中即产生了电流。电荷量对时间的变化率定义为电流,以 $i(t)$ 表示,电流 $i(t)$ 和电荷量 q 的关系为

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

“电流”一词具有双重含意，既指电荷的定向移动这种物理现象，又指量度这种物理现象的物理量。

在国际单位制 (SI) 中， q 的单位为库仑 (C)， t 的单位为秒 (s)，则电流 i 的单位为安培 (A)。计算微小电流时，以毫安 (mA) 或微安 (μA) 为单位。 $1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

习惯上将正电荷移动的方向或负电荷移动的相反方向作为电流的实际方向，但电流参数的计算时，电流通常是时间的函数，方向并不固定。即使在直流电路中，在对电路求解之前，电流的实际方向也难以确定。为便于电路分析，需预先设定电流的参考方向，根据参考方向计算，然后根据计算结果判断实际方向。

图 1-4 表示电路中电流通过一个元件，如果电流的实际方向（用虚线表示）和参考方向（用实线表示）一致，则电流为正值 ($i > 0$)；如果不一致，则电流为负值 ($i < 0$)。或者说，根据参考方向，计算结果电流为正值时，实际方向与参考方向一致；计算结果电流为负值时，实际方向与参考方向相反。

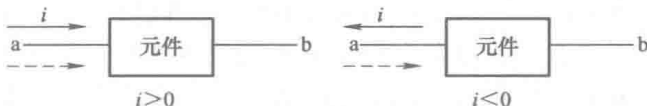


图 1-4 电流的参考方向

电流的参考方向可以用箭头表示，也可以用双下标表示。如 i_{ab} 表示电流的参考方向是从 a 点流向 b 点；反之， i_{ba} 表示电流的参考方向是从 b 点流向 a 点。

$$i_{ab} = -i_{ba}$$

参考方向确定后，才能运用各种定律、定理计算电流，而电流才有正、负之分。

1.2.2 电压

电压是衡量电场力做功的物理量。电荷在电路中定向移动时，必然伴随着电位能的变化，将正电荷 q 由电路中的某点 a 移到另一点 b 时的电位能的降低，即正电荷从 b 点到 a 点所做的功，定义为 a 、 b 两点间的电位差或电压，以 $u(t)$ 表示，即

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

在国际单位制 (SI) 中，能量 w 的单位为焦耳 (J)，电荷量 q 的单位为库仑 (C)，则电压 u 的单位为伏特 (V)。

计算微小电压时，以毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 为单位，计算高电压时，可以用千伏 (kV) 为单位。 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ， $1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$ 。

将电位能降低的方向规定为电压的实际方向。如果正电荷由 a 点移到 b 点，电位能降低，则 a 点电位高于 b 点，电压 u_{ab} 为正值，而 u_{ba} 为负值，即

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

电压也需要设定参考方向或参考极性，可以用正 (+) 负 (-) 号表示，正极指向负极的方向就是电压的参考方向。如图 1-5 所示，电压的实际方向从 a 到 b ，与参考方向一致，所以 $u > 0$ ；如果实际方向与参考方向相反，则 $u < 0$ 。

电压也可以用双下标表示。如 a、b 两端的电压 u_{ab} ，其参考方向是由 a 到 b，即 a 的参考极性为“+”、b 的参考极性为“-”，两端电压可表示为 u_{ab} 。如果参考方向是从 b 到 a，则 b、a 两端电压为 u_{ba} ，很明显， $u_{ab} = -u_{ba}$ 。

为简化书写，常将时间函数表达式中的 (t) 略去，即 $i(t)$ 、 $u(t)$ 可简写为 i 、 u ，但必须牢记，诸如 i 、 u 一类的小写字母，通常代表时变量。

一个元件上电流和电压的参考方向可以独立地任意设定，如果电流的参考方向是从电压的正极流向负极，则电压 u 和电流 i 的参考方向相同，称为关联参考方向，如图 1-6 所示。否则，即为非关联参考方向。

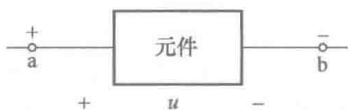


图 1-5 电压的参考方向

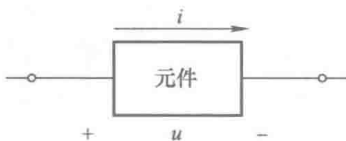


图 1-6 关联参考方向

在电路的分析和计算中，电压和电流的参考方向一旦设定即不再改变，参考方向并不表示其实际方向。根据电压和电流的参考方向和分析结果的正负，即可确定它们的实际方向。可见，只有引入了参考方向的概念后，电压和电流的正负才有意义，它们和时间的关系，才可表示为某种确定的函数关系，或用函数图像（波形）表示。

若电流和电压的大小和方向都不随时间而改变，则称为直流，式 (1-1) 和式 (1-2) 可改写为

$$I = \frac{Q}{T} \quad U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-3)$$

电路中直流量和恒定量用大写字母表示，如直流电流 I 、直流电压 U 、直流电动势 E 等。

【例 1-1】 电路及电压、电流的参考方向如图 1-7 所示，计算回路电流 I 和电阻上电压 U_R 。

解：根据参考方向，列出表达式

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R}$$

$$U_R = RI = \frac{E_1 - E_2}{R} R = E_1 - E_2$$

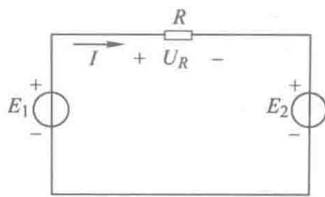


图 1-7 例 1-1 图

如果 $E_1 > E_2$ ， I 和 U_R 为正值，实际方向与参考方向一致；
如果 $E_1 < E_2$ ， I 和 U_R 为负值，实际方向与参考方向相反。

1.2.3 电阻

电阻是一种二端元件。电阻既是电阻元件（电阻器）的简称，同时也表示为这个元件的参数。作为限流元件，将电阻接在电路中后，可限制通过它所连支路的电流大小。灯泡、电炉等用电设备在一定条件下可以用线性电阻等效，而作为电子器件的半导体二极管则可等效为非线性电阻。

阻值不能改变的称为固定电阻器，阻值可变的称为可变电阻器或电位器。理想的电阻器是线性的，即任何时刻，通过电阻器的电流与外加电压成正比。在裸露的电阻体上，紧压着可移

金属触点。触点位置确定电阻体任一端与触点间的阻值，可以在一定范围内改变电阻的阻值。

电阻元件（电阻器）的图形符号如图 1-8 所示，包括固定电阻（见图 1-8a）和可变电阻（见图 1-8b）。电阻的文字符号为 R ，单位是欧姆（ Ω ），简称欧。电阻的倒数称为电导，文字符号是 G ，单位为西门子（S），简称西。两者的关系为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-4)$$

图 1-8 电阻元件的图形符号

a) 固定电阻 b) 可变电阻

电阻的阻值与其材料的电阻率和外形的长度成正比、与其截面积成反比，可以表示为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-5)$$

式中， ρ 为电阻率，单位是欧姆米（ $\Omega \cdot \text{m}$ ），各种材料的电阻率是不同的，同时也与温度有关。在常温（ 20°C ）下，纯金属中的铜和铝分别为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 和 $2.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，作为合金的锰铜和康铜分别为 $4.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 和 $4.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ ，而绝缘体（胶木、塑料、橡胶等）一般在 $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 以上； L 为长度，单位是米（m）； S 为截面积，单位是平方米（ m^2 ）。

【例 1-2】用直径 $d = 1\text{mm}$ 的锰铜线绕制阻值为 10Ω 的绕线电阻，需多少米？

解：根据有关公式

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$$S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

$$L = \frac{RS}{\rho} = \frac{R\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\rho} = \frac{10 \times 3.14}{4.2 \times 10^{-7}} \times \left(\frac{10^{-3}}{2} \right)^2 \text{m} = 18.7\text{m}$$

可知，用直径 1mm 、电阻率为 $4.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 的锰铜线绕制 10Ω 绕线电阻，需 18.7m 。

电阻两端电压和所通过电流的关系称为伏安特性。当电阻为常数时，电阻的阻值与电压、电流无关，称为线性电阻，其伏安特性为一条过原点的直线，如图 1-9a 所示。

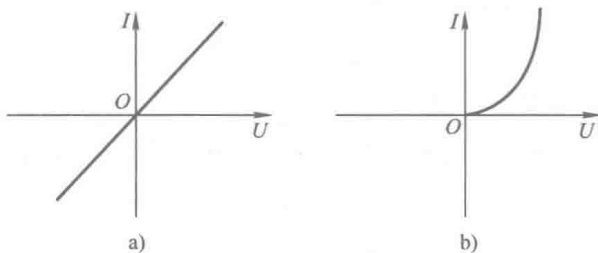


图 1-9 电阻的伏安特性

a) 线性电阻 b) 非线性电阻（半导体二极管）

如果电阻不是常数，而是随外加电压或所通过的电流变换而改变，则称为非线性电阻，如半导体二极管的伏安特性就是一条曲线，如图 1-9b 所示。

1.2.4 电动势

电动势是表示电源特征的物理量，电源的电动势是指电源将其他形式的能量转换为电能

的能力。电动势在数值上等于将单位正电荷从电源的负极通过电源内部移到正极所做的功。在图 1-10a 中, 为了维持回路中电流 I , 需要电源的端电压 U_{ab} 保持恒定, 就需要在电源内部的另外一种力, 它能够克服正负之间的电场力, 将正电荷从负极移动到正极, 这种力可称为电源力, 所以, 电动势也是衡量电源力的物理量。图 1-10b 所示为电压源的电路图形符号, 其中 E 为电动势, 箭头表示其方向; U 为电动势的端电压。

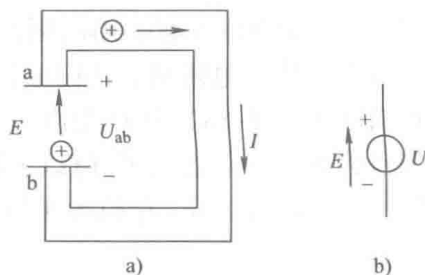


图 1-10 电动势

a) 电动势示意 b) 电源电动势的方向

电源电动势的实际方向是从电源的负极到正极, 即电位升高的方向。而电源电压的实际方向是从高电位到低电位的方向, 即电位降低的方向。所以, 电源的电动势与电压方向相反。电动势的方向可用箭头表示。

电动势用 E 表示, 其单位与电压相同, 即伏特 (V)。

1.2.5 电功率

电流在单位时间内做的功叫做电功率。电功率是用来表示消耗电能、电流做功快慢的物理量, 用 p 表示。在国际单位制 (SI) 中, 电压、电流的单位分别为伏特 (V)、安培 (A), 则功率的单位为瓦特 (W)。

在图 1-6 中的电路元件上, u 、 i 采用关联参考方向, 即认为正电荷沿电位降低的方向 (即 u 的方向) 通过元件, 在此过程中, 单位正电荷失去的能量可由下式求得:

$$dw = u dq \quad (1-6)$$

这些能量全部为电路元件吸收 (或消耗), 在单位时间内吸收的能量即为元件吸收的功率

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-7)$$

以式 (1-6) 和式 (1-7) 得

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

若 u 、 i 的参考方向相反, 即非关联参考方向, 则

$$p = -ui$$

说明该电路元件发出 (供出) 功率。

按式 (1-8) 计算元件吸收的功率, 计算结果可正可负。正的结果表明 u 、 i 的实际方向相同, 电路元件确实是吸收功率的; 负的计算结果表明, u 、 i 实际方向不同, 元件实际上不是吸收功率, 而是发出功率。

电阻是耗能元件, 只能吸收功率, 其功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-9)$$

上述计算功率的方法同样适用于部分电路, 图 1-11 所示的左右两部分电路, 左半部分 u 、 i 参考方向相反, 释放功率

$$p_1 = -ui$$

右半部分 u 、 i 参考方向相同, 吸收功率

$$p_2 = ui$$

全电路吸收的总功率

$$p = p_1 + p_2 = -ui + ui = 0$$

上述结果表明, 一个完整电路在任一瞬间, 功率的代数和为零, 即一部分电路若吸收一定量的功率, 则另一部分电路必然发出相同数量的功率。此结论符合能量守恒原理, 另外, 此结论可以用于验证功率计算结果是否正确。

在电路中, 电阻一定是吸收功率的, 而电源可能是发出功率、也可能是吸收功率的, 当电源吸收功率时, 其作用实际相当于负载。

【例 1-3】 图 1-12 所示电路, 已知 $E_1 = 9\text{V}$ 、 $E_2 = 3\text{V}$ 、 $R_1 = 4\Omega$ 、 $R_2 = 2\Omega$, 求各元件的功率并验证功率是否平衡。

解: 电路中电流

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{9 - 3}{4 + 2} \text{A} = 1\text{A}$$

E_1 为非关联方向, 所以发出功率

$$P_{E1} = -1 \times 9\text{W} = -9\text{W}$$

E_2 为关联方向, 所以吸收功率

$$P_{E2} = 1 \times 3\text{W} = 3\text{W}$$

电阻 R_1 和 R_2 上吸收功率

$$P_R = I^2 R = 1^2 \times (2 + 4) \text{W} = 6\text{W}$$

满足功率平衡条件, 即

$$P_{E1} = P_{E2} + P_R$$

E_1 发出 (供出) 功率、 E_2 和电阻吸收 (消耗) 功率, 两者平衡。

【例 1-4】 图 1-13 所示电路, 电源及电流参数、方向如图, 说明三个电阻共吸收 (消耗) 多少功率?

解: 根据电流的方向, 6V 和 3V 电源上的功率 P_1 和 P_2 分别为

$$P_1 = -IU = -2 \times 6\text{W} = -12\text{W}$$

$$P_2 = IU = 1 \times 3\text{W} = 3\text{W}$$

因为 6V 电源发出 12W 功率、3V 电源吸收 3W 功率, 根据功率平衡条件, 所以三个电阻共吸收其余 9W 的功率。

【思考题】

1. 电压和电流的参考方向和实际方向有何不同? 为什么要设定参考方向?
2. 什么是关联参考方向?
3. 如何根据参考方向的计算结果判断实际方向?
4. 什么是线性电阻? 线性电阻的特性有什么特点?
5. 电阻的阻值与哪些因素有关?
6. 如何判断一个元件是发出功率还是吸收功率? 是电源还是负载?
7. 什么是功率平衡? 如何判断功率是否平衡?

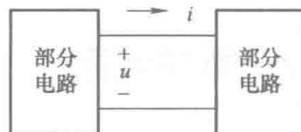


图 1-11 部分电路

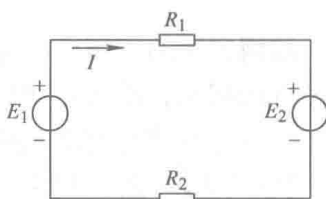


图 1-12 例 1-3 图

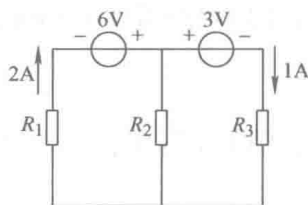


图 1-13 例 1-4 图

1.3 欧姆定律

欧姆定律是把电学中三个重要的物理量电流、电压、电阻联系起来的一个重要定律，是电学中最基本的定律，也是学习电学知识和分析电路的基础，其描述是：在同一电路中，导体中的电流与导体两端的电压成正比，与导体的电阻成反比。

在图 1-14 所示电路中， U 和 I 的参考方向相同，用欧姆定律描述为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-10)$$

其中，电阻 R 和电压 U 分别为

$$R = \frac{U}{I}, \quad U = IR$$

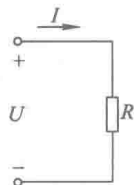


图 1-14 欧姆定律的电路

欧姆定律的应用要根据电压和电流的参考方向，如果电压、电流的参考方向相反，欧姆定律的表达式中将出现负号，但不要将电压和电流的正、负号与欧姆定律表达式中的正、负号混淆。

【例 1-5】 图 1-15 所示电路中，根据电压和电流的参考方向，应用欧姆定律列出表达式并求电阻。

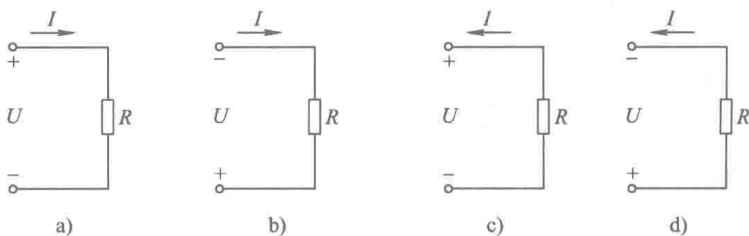


图 1-15 例 1-5 图

解：根据电压和电流的参考方向，应用欧姆定律列出表达式。如果是关联参考方向，表达式前为正号，反之为负号。

在图 1-15a 中， $U = 6\text{V}$ ， $I = 2\text{A}$ ， U 与 I 为关联参考方向，所以

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{2}\Omega = 3\Omega$$

在图 1-15b 中， $U = -6\text{V}$ ， $I = 2\text{A}$ ， U 与 I 为非关联参考方向，所以

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{-6}{2}\Omega = 3\Omega$$

在图 1-15c 中， $U = 6\text{V}$ ， $I = -2\text{A}$ ， U 与 I 为非关联参考方向，所以

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-2}\Omega = 3\Omega$$

在图 1-15d 中， $U = -6\text{V}$ ， $I = -2\text{A}$ ， U 与 I 为关联参考方向，所以

$$R = \frac{U}{I} = \frac{-6}{-2}\Omega = 3\Omega$$

在图 1-16 所示的电路中， E 为电源的电动势， R_0 为电源内阻，共同构成实际电源（点画线框部分），所产生的电流 I 在负载 R 上得到电压 U ，同时也是电源的端电压。

各参数之间的关系为

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-11)$$

由于考虑到电源的内阻, 所以式(1-11)称为全电路欧姆定律, 说明电路中电流与电源电动势成正比, 与电源内阻和负载成反比。

【例1-6】图1-16中, 电源电动势 $E = 3\text{V}$, 内阻 $R_0 = 1\Omega$, 负载电阻 $R = 100\Omega$, 求电流 I 及电压 U 。

解: 根据全电路欧姆定律, 回路中电流为

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{3}{100 + 1} \text{A} = 0.0297 \text{A} = 29.7 \text{mA}$$

电源端电压 (负载电压) 为

$$U = IR = 0.0297 \times 100 \text{V} = 2.97 \text{V}$$

由于电源内阻的存在, 电源的端电压小于其电动势, 如果 $R \gg R_0$, 则 $U \approx E$ 。

【思考题】

1. 欧姆定律是如何叙述电压、电流、电阻三者关系的?
2. 什么情况下欧姆定律会出现负号?
3. 什么情况下需要引入全电路欧姆定律? 电源内阻的大小对电源端电压有什么影响?

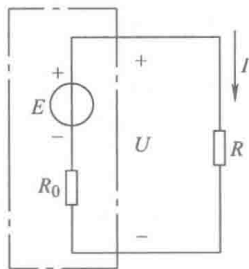


图 1-16 例 1-6 图

1.4 电压源和电流源

电源包括电池、发电机、信号源等, 可以由两种不同的电路模型表示: 一种以电压的形式表示, 称为电压源; 另一种以电流的形式表示, 称为电流源。

1.4.1 理想电压源

理想电压源是一种理想电源模型。理想电压源的端电压与电流无关, 通常为时间 t 的函数, 即为时变量。电路图形符号如图 1-17a 所示。其中, u_S 为理想电压源的电压, 正、负号表示其参考极性, 在图中所示的参考方向下, 其端电压 $u = u_S$, 若 u 的参考方向设定相反, 则 $u = -u_S$ 。

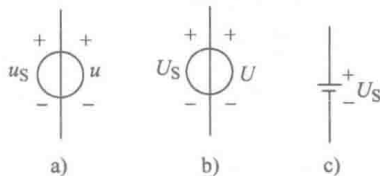


图 1-17 理想电压源图形符号

如果理想电压源的电压为一定值, 称为恒压源或直流电压源, 以 U_S 表示, 电路图形符号如图 1-17b 所示, 也可以用图 1-17c 所示的图形符号表示。在图所设参考方向下, 其端电压

$$U = U_S \quad (1-12)$$

理想电压源的电流由外电路决定, 可为任意值, 方向也可以改变, 但其端电压不随外电路的改变而改变。

1.4.2 理想电流源

理想电流源是另一种理想电源模型。理想电流源的电流与端电压无关, 通常为时间 t 的函数, 即也是时变量, 其电路图形符号如图 1-18a 所示, 其中, i_S 为理想电流源的电流。在

图所设的参考方向下, 其输出电流 $i = i_S$ 。

如果理想电流源的电流为恒定值, 则称为恒流源或直流电流源, 以 I_S 表示, 如图 1-18b 所示, 其输出电流

$$I = I_S \quad (1-13)$$

随着外电路的变化, 理想电流源的端电压可为任意值, 方向也可改变, 但其电流不随外电路的改变而改变。

【例 1-7】图 1-19 所示电路, 要求:

- 1) 分析电流源两端电压 u 的极性与电流大小的关系;
- 2) $U_S = 10\text{V}$, $I = 1\text{A}$, 求电压源发出的功率。

解:

- 1) 根据电路列出表达式

$$u = i_S R - u_S$$

回路中电流是由电流源产生的恒流, 调节可变电阻, 可以改变该电阻上的电压。

当 $i_S R > u_S$ 时, $u > 0$; 当 $i_S R < u_S$ 时, $u < 0$ 。

- 2) 因 U_S 和 I 为非关联方向, 故

$$P = -IU_S = -1 \times 10\text{W} = -10\text{W}$$

电压源发出功率为 10W , 或吸收功率为 -10W 。

【例 1-8】图 1-20 所示电流源, 其中 $U = -10\text{V}$, $I_S = 1\text{A}$, 求电流源供出的功率。

解: 因 U_S 、 I_S 参考方向相反 (非关联方向), 故

$$P = -UI_S = -(-10 \times 1)\text{W} = 10\text{W}$$

电流源吸收功率 10W , 或供出功率 -10W 。

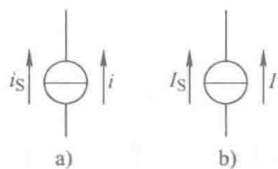


图 1-18 理想电流源图形符号

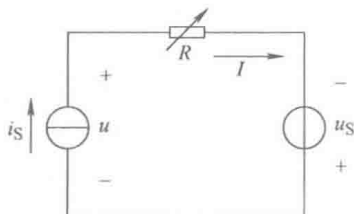


图 1-19 例 1-7 图

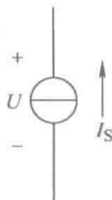


图 1-20 例 1-8 图

1.4.3 实际电源的模型与电源等效变换

1. 实际电源的模型

某些实际电源, 在一定条件下, 特性非常接近于理想电压源, 如一节新的干电池, 在小电流下端电压几乎恒定; 一台发电机, 在输出电流远小于额定电流的情况下, 端电压几乎与输出电流无关, 所以, 可以直接用理想电压源作为它们的模型。而另有一些实际电源, 在特定条件下, 特性非常接近于理想电流源, 如光电池, 在照度适中的情况下, 输出电流几乎与外部负载无关, 即与端电压无关, 仅仅取决于照度, 所以, 可用理想电流源直接作为它们的模型。但是, 大量实际电源的特性与两种理想电源都有较大差异, 不能以理想电源直接作为它们的模型。下面以实际直流电源为例, 讨论实际电源的模型。

图 1-21 所示为由直流电源和可变电阻负载 R 构成的电路, 用实验方法改变负载 R 的数值, 可以测出该电源的 $U-I$ 特性, 如图 1-22 所示, 为一直线。该直线在 U 坐标轴上的截距 U_S 即电源开路 ($I=0$) 时的开路电压 U_0 , 而斜率可由两个测试点 M 、 N 求出

$$K = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} = -R_S \quad (1-14)$$

其中

$$R_S = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} \quad (1-15)$$

为正值, 故直线方程为

$$U = U_S - R_S I \quad (1-16)$$

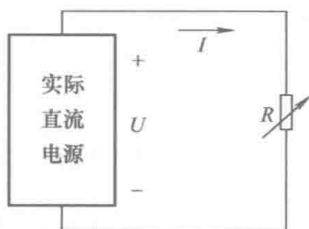


图 1-21 直流电源与可变负载构成的电路

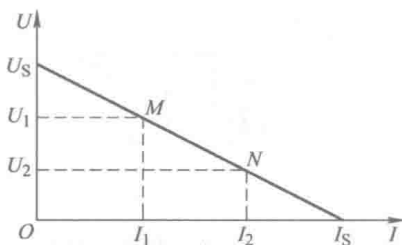


图 1-22 电源的 $U-I$ 特性

令负载 $R=0$, 即 $U=0$, 可得到电源的短路电流

$$I_S = \frac{U_S}{R_S} \quad (1-17)$$

故直线方程可改写为另一种形式

$$I = \frac{U_S}{R_S} - \frac{U}{R_S}$$

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1-18)$$

由式 (1-16) 可建立实际电源的一种模型, 如图 1-23 所示, 为理想电压源 U_S 和内阻 R_S 的串联组合, 称为电压源模型, 简称电压源。 U_S 等于电源的开路电压, 而 R_S (即电源的等效内电阻) 反映了电源内部的能量损耗。

实际电压源 (含内阻) 的外特性曲线如图 1-24 中虚线所示, 其中 U_0 为开路电压、 I_S 为短路电流。

当内阻 $R_S=0$ 时, $U=U_S$, 即电路的端电压 U 是一个定值, 而电流 I 则是任意的, 由负载电阻和端电压确定, 这样的电压源即为理想电压源或恒压源, 其外特性如图 1-24 中实线所示。

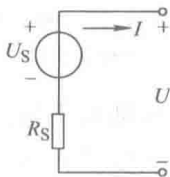


图 1-23 电压源模型

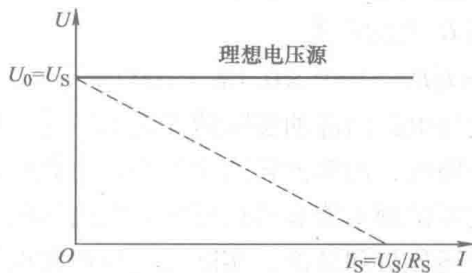


图 1-24 电压源外特性

由式 (1-18) 可建立实际电源的另一种模型, 如图 1-25 所示, 为理想电流源 I_S 和内阻 R_S 的并联组合, 称为电流源模型, 简称电流源。

根据式 (1-18) 作出电流源的外特性曲线, 如图 1-26 中虚线所示。 I_S 等于电源的短路电流, 而 R_S 也为电源的等效内阻。