



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工学

(上册)

电工技术

王 浩 主编

姚 伟 刘跃群 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工学

(上册)

电工技术

主 编 王 浩
副主编 姚 伟 刘跃群
编 写 朱继明 朱 琼
主 审 程隆贵 丁巧林



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

全书分上、下两册。

《电工学》(上册)(电工技术)共七章,内容包括电工基础、变压器、感应电动机、直流电动机、同步发电机、微控制电机、发电厂厂用电、低压电动机的控制、安全用电、常用电工仪表等。

《电工学》(下册)(电子技术)共五章,内容包括常用的半导体器件、三极管交流放大电路、集成运算放大器、整流电路、数字电路等。

本书可作为高职、高专非电类专业教材,亦可作为成人高等教育教材和相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工学/王浩主编. —北京:中国电力出版社, 2006

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3768-9

I. 电... II. 王... III. 电工学—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 153854 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>)

三河德利印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 上、下册 20.75 印张 上、下册: 430 千字

印数 0001—3000 册 上、下册定价 27.00 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

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

为了适应非电类不同专业的灵活选用，本书分装成上、下两册。上册定名为《电工学》（上册）（电工技术），内容包括电工基础和电工技术应用；下册定名为《电工学》（下册）（电子技术），内容包括模拟电路和数字电路。

本书的主要特点：

（1）注意与原有知识的妥善衔接。本书是在高中、初中起点的五年制大专《物理》基础上编写的，注意与原有的电磁基本知识的妥善衔接，但不重复；

（2）精选基础部分的教学内容。对于基础部分（电工基础）的选材紧扣专业需要，以够用为度；

（3）拓宽电工技术应用的内容。加强数字电路部分，目的是为不同专业提供较大的选材空间，适应电子技术新的发展方向；

（4）章、节内容安排层次分明，条理清楚，概念阐述力求简明、准确，理论分析力求透彻，文字力求通俗易懂；

（5）突出实践性。从选材、内容的讲述，到例题、习题的配置，都力求理论联系实际。

完成本教材全部教学内容的学时，上册约需65~70节课时，下册约需45~50节课时。不同专业应根据所给学时及需要，确定选学内容。在教学过程中，应尽可能安排一定的实验、实训环节，以加强学生的实际技能。

本书由保定电力职业技术学院王浩老师主编，山西电力职业技术学院姚伟老师、长沙电力职业技术学院刘跃群老师担任副主编，保定电力职业技术学院朱继明老师、朱琼老师参编。姚伟编写上册第一、七章，刘跃群编写下册第一、二章，朱继明编写上册第三章，朱琼编写下册第五章，其余各章及附录由王浩编写。全书由武汉电力职业技术学院程隆贵老师、华北电力大学丁巧林老师主审。

由于编者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的老师和读者予以指正。

编者

2005年10月

目 录

(上 册)

电 工 技 术

前言

第一章 直流电路	1
第一节 电路及电路模型	1
第二节 电流、电压及电动势	1
第三节 功率与电能	5
第四节 电阻元件及欧姆定律	7
第五节 基尔霍夫定律	8
第六节 电路的工作状态	11
第七节 电阻的串联与并联	13
第八节 两种电源模型及其等效互换	15
第九节 叠加定理	17
第十节 戴维南定理	18
本章小结	21
习题一	23
第二章 电容元件与电感元件	27
第一节 电容元件	27
第二节 电容的串联与并联	28
第三节 RC 电路的过渡过程	30
第四节 电感元件	34
本章小结	36
习题二	36
第三章 正弦交流电路	38
第一节 正弦量的基本概念	38
第二节 正弦量的相量表示法及其加减运算	41
第三节 正弦交流电路中的电阻元件	44
第四节 正弦交流电路中的电感元件	46
第五节 正弦交流电路中的电容元件	49
第六节 电阻、电感、电容串联的正弦交流电路	51
第七节 电路的谐振	55
第八节 三相交流电源	58
第九节 三相负载的联结	61
本章小结	66

习题三	68
第四章 磁路与变压器	71
第一节 铁磁物质及磁路	71
第二节 交流铁芯线圈	73
第三节 变压器的基本结构及工作原理	75
第四节 变压器的效率与外特性	78
第五节 变压器的同名端	79
第六节 三相电力变压器	80
第七节 特殊变压器	82
本章小结	85
习题四	85
第五章 电机	87
第一节 三相感应电动机的结构及铭牌	87
第二节 三相感应电动机的工作原理	89
第三节 三相感应电动机的电磁转矩与机械特性	92
第四节 三相感应电动机的启动与调速	95
第五节 三相感应电动机的反转与制动	98
第六节 单相感应电动机	99
第七节 直流电动机的结构及工作原理	101
第八节 直流电动机的使用	103
第九节 同步发电机的结构	104
第十节 同步发电机的工作原理	107
第十一节 控制微电机简介	111
本章小结	113
习题五	114
第六章 发电厂厂用电及低压电动机的控制	117
第一节 发电厂厂用电的基本知识	117
第二节 常用的低压电器	119
第三节 低压三相感应电动机的常用控制电路	124
第四节 安全用电常识	127
第五节 触电急救	130
本章小结	130
习题六	131
第七章 常用电工仪表及使用	134
第一节 电工仪表的基本知识	134
第二节 直流电流表、电压表及使用	137
第三节 交流电流表和电压表及使用	139
第四节 万用表的使用	141
第五节 单臂电桥及其使用	142

第六节 兆欧表及其使用	143
本章小结	145
习题七	145
(上册) 附录	147
(上册) 部分习题参考答案	152

直流电路

第一节 电路及电路模型

一、电路

电流流经的路径称为电路。

电路的形式很多。按传输电压、电流的频率不同，可分为直流电路和交流电路；按作用来分，可分为实现电能转换及传输的电力电路和实现信号传递及处理的电子电路。

电路的形式虽然很多，就其组成而言，电力电路可分成三大部分，即电源、负载、中间环节。电源是供给电能的设备，其主要作用是向电路提供电能，如发电机、蓄电池、干电池等。负载是各种用电设备的总称，其主要作用是将电能转变成其他形式的能量，如电动机将电能转换为机械能、日光灯将电能转换为光能。中间环节是电路中除电源和负载之外其他部分的统称，其主要作用是在电路中传输、分配、控制电能，如连接导线、开关、控制电器等。

二、电路模型

为了对电路进行分析和计算，通常把实际电路器件加以近似化和理想化处理，在一定条件下，忽略其次要因素，考虑其主要特性的电路元件称为理想元件。如一个最简单的线绕式电阻器，从能量转换的角度看，其主要作用是将电能转换成热能，因此，电阻器是一个耗能元件。如果从电磁感应的角度看，当电流流过电阻器时，有一部分电能必然转化成磁场能。但是二者比较，电能转变成热能是主要的，因此电阻器主要是消耗电能，故可以用一个理想电阻元件来代替电阻器。

理想电路元件的图形符号是国家标准统一规定的。用电路元件图形符号代替实际电路器件所绘制的电路称电路模型，简称电路图。图 1-1 (a) 所示为手电筒的实物电路图，图 1-1 (b) 所示为手电筒原理电路图。

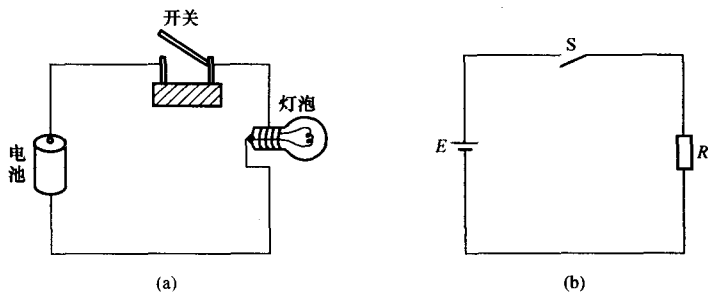


图 1-1 手电筒电路图

(a) 实物电路；(b) 原理电路图

图 1-1 中， E 表示电源、 S 表示开关、 R 是电阻元件。各个理想元件之间用导线连接。

由于电路图便于研究和分析电路，便于反映电路的实际情况，因此得到了广泛的应用。今后凡无特殊说明，电路均指电路模型，电路元件均指理想电路元件。

第二节 电流、电压及电动势

一、电流

电荷的定向运动称为电流。导体中的自由电子、半导体中的电子和空穴，均是能自由运

动的带电粒子,称为载流子。当载流子定向运动时便形成电流。

电流的大小用电流强度来衡量。单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流强度,简称电流,用 i 表示为

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

式中: dq 为 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

在直流电路中,单位时间内通过导体横截面的电荷量是恒定的,直流电流用 I 表示

$$I = \frac{Q}{t}$$

在国际单位制(简称 SI 制):电荷的单位为 C(库仑);时间的单位为 s(秒);电流的单位为 A(安培),简称安,有时也用 kA(千安)、mA(毫安)、 μ A(微安)等单位。其单位换算关系为

$$\begin{aligned} 1\text{kA} &= 10^3\text{A} \\ 1\text{mA} &= 10^{-3}\text{A} \\ 1\mu\text{A} &= 10^{-3}\text{mA} \end{aligned}$$

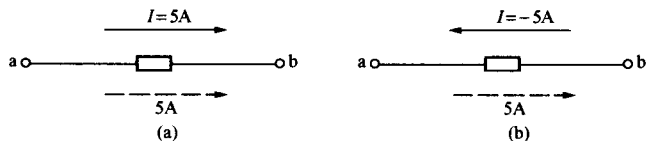


图 1-2 电流参考方向图示及应用

(a) 电流参考方向与实际方向一致; (b) 电流参考方向与实际方向相反

规定正电荷运动的方向为电流的方向,习惯上称为实际方向,在电路中用虚线箭头表示。对于几个电源共同作用的电路中,有时很难直接判断出某段电路或某个元件上的电流实际方向。为了解决这个问题,通常引进电流的参考方向。所谓电流参考方向就是人为假定的电流方向。在图 1-2 所示的一段电路中,电流参考方向用实线箭头表示。当选定的电流参考方向与电流的实际方向一致时,电流为正值 ($I > 0$),见图 (a);当选定的参考方向与电流的实际方向相反时,电流为负值 ($I < 0$),见图 (b)。参考方向选定之后,电流的数值便有了正、负值之分,电流变成了一个代数量。

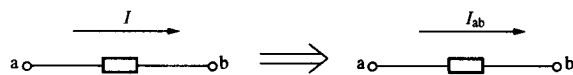


图 1-3 电流参考方向用电流符号右下角加双字母角标表示的图示

在文字叙述中,还常用在电流符号的右下角加双字母角标表示电流参考方向的做法,例如,在图 1-3 中, I_{ab} 表示电流参考方向为由 a 流向 b,显然 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

二、电压

带电体的周围存在着电场,电场对处在电场中的电荷有力的作用,此力称为电场力。若在电场力的作用下,正电荷 dq 从 a 点移动到 b 点,电场力做功为 dW ,则 a 点到 b 点的电压为

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

在 SI 制中:当功的单位为 J(焦耳),电荷的单位为 C(库仑)时,电压的单位为 V(伏特),也常用 kV(千伏)、mV(毫伏)、 μ V(微伏)等单位。其单位换算关系为

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 10^3\text{V} \\ 1\text{mV} &= 10^{-3}\text{V} \end{aligned}$$

$$1\mu\text{V} = 10^{-3}\text{mV}$$

若正电荷从 a 点移动到 b 点, 电场力做功, 被移动的正电荷的电势能减少, 则电压的方向为由 a 点指向 b 点, 即规定电压的方向为正电荷电势能减少的方向。习惯上把电压的方向也称为电压的实际方向, 在电路图中用虚线箭头表示。在电路的分析中, 同样引进电压的参考方向。电压的参考方向和电流的参考方向一样, 也是任意选定的。若电压的实际方向与参考方向一致, 则电压为正值

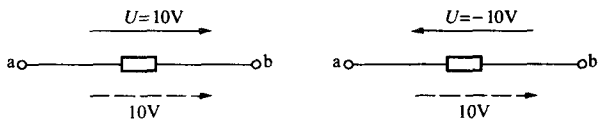


图 1-4 电压参考方向的图示及应用

($U>0$); 若电压的实际方向与参考方向相反, 则电压为负值 ($U<0$)。如图 1-4 所示。

在图示中, 电压的参考方向还可以用“+”、“-”极性表示, 规定电压参考方向为由“+”极性端指向“-”极性端, 如图 1-5 所示。

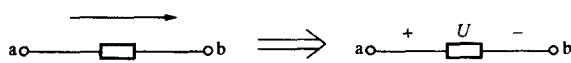


图 1-5 电压参考方向用+、-极性符号表示

在文字叙述中, 也常用在电压符号右下角加双字母角标表示电压参考方向的做法, 例如, U_{ab} 表示电压参考方向为由 a 指向 b, U_{ba} 表示电压参考方向为由 b 指向 a。

对于电路中 a、b 两个确定点, 显然 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

在某一段电路或某一元件上, 若所选电压与电流的参考方向一致, 则称电压、电流为关联参考方向; 若电压与电流的参考方向相反, 则称电压、电流为非关联参考方向。以后如不加说明, 一般均指关联参考方向。

【例 1-1】 电压与电流的参考方向如图 1-6 所示, 已知: $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = -1\text{A}$, $U_1 = 1\text{V}$, $U_2 = -1\text{V}$, 指出各电流、电压的实际方向。

解: 按照参考方向与实际方向的关系: 当实际方向与参考方向一致时取正值, 相反时取负值的规定, 图中

$I_1 > 0$, I_1 的实际方向与参考方向相同, 电流 I_1 从 a 流向 b, 大小为 1A。

$I_2 < 0$, I_2 的实际方向与参考方向相反, 电流 I_2 从 b 流向 a, 大小为 1A。

$U_1 > 0$, U_1 的实际方向与参考方向相同, 电压 U_1 从 a 指向 b, 大小为 1V。

$U_2 < 0$, U_2 的实际方向与参考方向相反, 电压 U_2 从 b 指向 a, 大小为 1V。

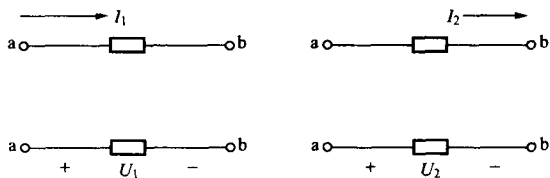


图 1-6 例 1-1 电路图

参考方向是为了分析计算电路而引入的数学工具, 参考方向的引入, 并不会改变电路中电压或电流的实际方向。为此, 着重指出以下几点:

(1) 电路中电流或电压的实际方向是客观存在的真实方向, 而参考方向是为了分析电路人为假设的。

(2) 引进参考方向后, 电压、电流变成具有正、负值的代数量, 离开参考方向谈电压或电流的正负是无意义的。

(3) 在求解电流、电压的电路分析计算中, 首先应选定参考方向, 然后进行计算, 当计算结果为正值, 则表明该电压或电流的实际方向与参考方向相同, 反之则相反。

三、电位

在电路中任选一点为参考点,则某一点对参考点的电压就叫该点的电位。这里的电位即是物理学中的电动势。工程中,习惯把物理学中的电动势称为电位。

电位常用字母 V 表示,如 a 点的电位表示为 V_a 。若指定 0 点为参考点,根据其定义,可用公式表示为

$$V_a = U_{a0} \quad (1-3)$$

其单位同电压单位。

在图 1-7 中,若以 0 点为参考点,则有 $V_a = U_{a0}$, $V_b = U_{b0}$ 。根据电场力移动电荷做功与路径无关的性质,有

$$U_{ab} = U_{a0} + U_{0b} = U_{a0} - U_{b0} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

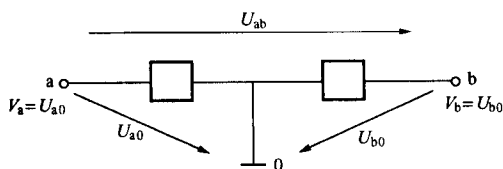


图 1-7 电位表示图

式 (1-4) 说明,电路中 a 点到 b 点的电压等于 a 点电位与 b 点电位之差。即电路两点间的电压等于两点之间的电位差。显然电压的方向是从高电位指向低电位的方向。

需要指出的是,电路中参考点的选定是任意的,但一经选定,各点电位随之确定。若参考点变化,各点电位随之变化,但任意两点之间的电压不会发生变化。

【例 1-2】 在图 1-8 中,已知 $U_{CO}=3V$, $U_{CD}=2V$ 。试分别以 D 点和 O 点为参考点,求各点的电位及 D 、 O 两点间的电压 U_{DO} 。

解: (1) 以 D 为参考点,即 $V_D=0V$ 。由电位定义可知, $V_C = U_{CD}=2V$, 因为 $U_{CO}=V_C - V_O$, 所以 $V_O = V_C - U_{CO} = 2 - 3 = -1V$

$$U_{DO} = V_D - V_O = 0 - (-1) = 1V$$

(2) 以 O 点为参考点,即 $V_O=0V$ 。所以, $V_C = U_{CO}=3V$, 因为 $U_{CD}=V_C - V_D$, 所以 $V_D = V_C - U_{CD} = 3 - 2 = 1V$

$$U_{DO} = V_D - V_O = 1 - 0 = 1V$$

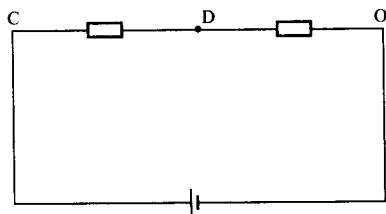


图 1-8 例 1-2 电路图

由例 1-1 可知,各点的电位与参考点的选择有关,而两点之间的电压与参考点的选择无关。

在电路中,参考点可以任意选定。在电力工系统中,常选大地作为参考点,符号为“ $\perp$ ”。在电子设备中,常选公共点作为参考点,符号为“ $\perp$ ”。

四、电动势

在物理学中我们知道,在电源的外部正电荷在电场力的作用下,从电源的正极流向电源的负极,而要保持电路中的电流持续不断,必须在电源内部有一种非电场力,将正电荷从电源的负极移动到电源的正极,这种力叫做电源力。

电源力在移动正电荷的过程中要做功。为了衡量电源力做功的能力,引入电动势这个物理量。在电源内部,电源力将单位正电荷从电源负极移动到电源正极所做的功叫做电源的电动势,直流电源电动势的文字符号为 E ,即

$$E = \frac{W_{ba}}{Q} \quad (1-5)$$

其中, Q 、 W_{ba} 分别是电源力把正电荷由电源负极移动到电源正极的电荷量和所做的功。电

电动势的单位同于电压。其实际方向是由电源的负极指向正极。

在电路分析中,常用电源的端电压来表示电源的电动势。其区别在于,电动势的实际方向是由电源的负极指向正极,而端电压的实际方向是由电源的正极指向负极(即从高电位到低电位)。显然,电动势的方向与电压的方向是相反的。在电源不接负载情况下,电源电动势和电源的端电压在数值上是相等的。

在电路分析中,同样引进电动势的参考方向,可用实线箭头或“+”、“-”参考极性表示。当用参考极性表示电动势参考方向时,规定由“-”极(短线)端指向“+”极(长线)端。

对于直流电源,如果按图 1-9(a)所示,选取电动势的参考方向与电压参考方向相反,则有

$$E = U \quad (1-6)$$

如果按图 1-9(b)所示,选取电动势的参考方向与电压参考方向相同,则有

$$E = -U \quad (1-7)$$

应当指出,尽管电源的开路电压和电动势在数值上相同,并且具有相同的单位,但是,电源的电动势和电压其物理意义是不同的。电动势是描述电源力(非电场力)做功能力的物理量,而电压则是描述电场力做功能力的物理量。电动势仅存在于电源内部,而电压则不仅存在于电源内部,而且还存在于电源外部。

第三节 功率与电能

一、功率

在电路中,通常将单位时间内一段电路(或一个元件)吸收或发出的电能定义为功率,即电能对时间的变化率叫功率,用 p 表示,即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-8)$$

在 SI 制中, W 、 t 分别为 J、s 时,功率的单位为 W(瓦特,简称瓦)。常用的单位还有 kW(千瓦), mW(毫瓦)等。其单位换算关系为

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}$$

$$1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$$

按照电流和电压的定义,式(1-8)可写成

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-9)$$

在直流电路中,功率用大写 P 表示

$$P = UI$$

在电路中,对外只有两个端钮的部分电路称为二端网络。二端网络内可以是一个元件,也可以是几个元件;可以是含源的,也可以是无源的。二端网络图形符号如图 1-10 所示。

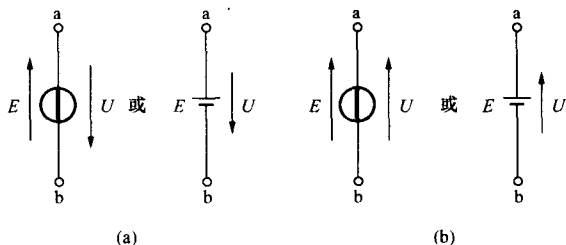


图 1-9 电动势与电压的参考方向

(a) 相反; (b) 相同

一个二端网络,有的吸收功率,有的发出功率,当二端网络吸收功率时为负载,发出功率时为电源。

对于一个二端网络,当端口电压和电流取关联参考方向时,如图 1-11 (a) 所示,若按 $P=UI$ 计算出的功率 $P>0$,表示网络实际吸收电功率;若计算出的功率 $P<0$,表示网络实际发出电功率。

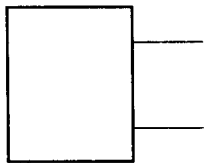


图 1-10 二端网络图形符号

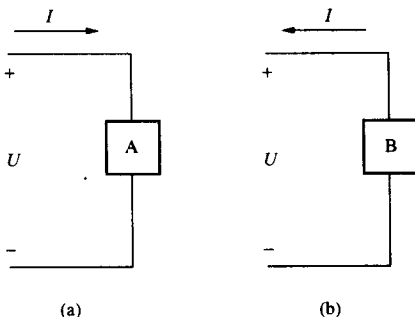


图 1-11 讨论二端网络功率计算用图

(a) U 、 I 参考方向关联; (b) U 、 I 参考方向非关联

当二端网络端口电压和电流取非关联方向时,如图 1-11 (b) 所示,如果功率按下式计算

$$P = -UI \quad (1-10)$$

若 $P>0$,则仍表示元件吸收电功率; $P<0$,则表示元件发出电功率。

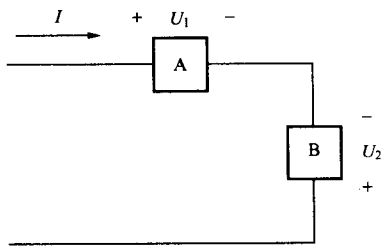


图 1-12 例 1-3 电路图

【例 1-3】 图 1-12 中,两个元件流过相同的电流 $I=1\text{A}$, $U_1=1\text{V}$, $U_2=2\text{V}$,求各元件功率,并说明是发出还是吸收功率。

解: 元件 A 中,端口电压 U_1 与 I 为关联参考方向,则

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

$P_1>0$,说明元件 A 吸收功率 1W。

元件 B 中, U_2 与 I 为非关联方向,则

$$P_2 = -U_2 I = -2 \times 1 = -2 \text{ (W)}$$

$P_2<0$,说明元件 B 发出功率 2W。

二、电能

电功率是单位时间内电场力所做的功。在一段时间内电场力做功的总和称为电能,用 W 表示。在直流电路中,一个二端网络所吸收或发出的电功率为 P ,则在 t 时间内该二端网络所吸收或发出的电能为

$$W = Pt \quad (1-11)$$

在交流电路中,一个二端网络所吸收或发出的功率 p 是随时间变化的,则在 dt 时间内网络吸收或发出的电能 dW 为

$$dW = p dt = u \cdot i dt$$

那么从 t_1 到 t_2 的一段时间内,网络吸收或发出的电能则为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} u i dt \quad (1-12)$$

在 SI 制中,当 u 、 i 、 t 的单位分别为 V、A、s 时,则 W 的单位为 J (焦)。实际中还常

用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·时) 作为电能的单位, $1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$ 。习惯上 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 称为 1 度电。

由能量守恒原理可知, 一个电路中, 所有电源发出的功率必然等于所有负载吸收的功率, 或者说, 整个电路功率的代数和为零, 即

$$\sum P = 0$$

这一结论称为电路的功率平衡。

【例 1-4】 某礼堂有 100W 的灯泡 20 盏, 使用 5h , 共消耗多少电能? 若每千瓦·时电费为 0.5 元, 应付多少电费?

解: 全部电灯的总功率为

$$P = 100 \times 20 = 2000(\text{W}) = 2\text{kW}$$

使用 5h 的电能为

$$W = Pt = 2 \times 5 = 10(\text{kW} \cdot \text{h})$$

则

$$10 \times 0.5 = 5(\text{元})$$

即应付电费 5 元。

第四节 电阻元件及欧姆定律

一、电阻元件

当电流流过金属导体时, 做定向移动的电子会与金属中的原子发生碰撞。可见, 导体对电荷的定向运动有阻碍作用。电阻就是反映导体对电流阻碍作用的一个物理量。

电阻用字母 R 表示, 单位是 Ω (欧姆)。工程上还常用 $\text{k}\Omega$ (千欧)、 $\text{M}\Omega$ (兆欧) 做单位。其单位换算关系为

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega$$

在电气工程中, 根据不同的用途, 用不同的材料, 制成各种形式的电阻器。当电流流过电阻器时, 电阻器会发热, 消耗电能。这是所有电阻器的共同特征。

如果一个二端元件通过电流时总是消耗电能, 那么, 它的电压和电流的方向总是一致的。为了模拟电阻器及其它实际器件消耗电能的基本特性, 引入电阻元件的概念。电阻元件是一个理想的二端元件, 在任意时刻, 它的电压和电流的方向都一致, 总是在不断地消耗电能。在关联参考方向下, 它的电压和电流的关系曲线为如图 1-13 所示。该曲线称为电阻元件的伏安特性, 简记为 $u-i$ 曲线。

实际电阻器一般都可以近似地看成电阻元件, 即可用电阻元件作为其电路模型。

电压与电流大小成正比关系的电阻元件, 它的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线, 如图 1-13 (a) 所示, 称为线性电阻元件。否则, 称为非线性电阻元件, 如图 1-13 (b) 所示。由线性元件组

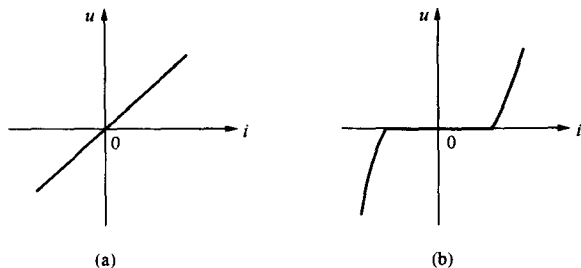


图 1-13 电阻元件的伏安特性

(a) 线性的; (b) 非线性的

成的电路称为线性电路。本书只讨论线性电阻元件及其组成的线性电路。今后,如无特殊说明,均指线性电阻元件,并简称为电阻元件。

线性电阻元件电压大小与电流大小的比值

$$\frac{u}{i} = R \quad (1-13)$$

比值 R 是一个与电压、电流无关的常数,称为电阻。电阻的倒数

$$G = \frac{1}{R}$$

称为电导。在 SI 中,电导的单位是 S(西门子)。

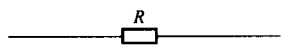


图 1-14 电阻元件的图形符号

电阻元件的特性由其电阻值 R 表征, R 是反映能量损耗的电路参数。电阻元件又简称电阻,其图形符号如图 1-14 所示。

二、欧姆定律

在任何情况下,电阻元件上电压和电流的方向总是一致的。

对线性电阻元件,若选择电压、电流为关联参考方向,如图 1-15(a)所示,则

$$U = RI \quad (1-14)$$

若选择电压、电流为非关联参考方向,如图 1-15(b)所示,则

$$U = -RI \quad (1-15)$$

式(1-14)和式(1-15)均称为欧姆定律式。

可见,应用欧姆定律式时,若选择电压电流为非关联参考方向时,则公式前须加“-”号,这一点应引起重视。

欧姆定律式还可以写成

$$I = GU$$

三、电阻元件的功率

电阻元件上电压、电流的方向总是一致,且总是吸收电能,所以,电阻元件是耗能元件。

电阻元件吸收功率的计算式为

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} = GU^2 \quad (1-16)$$

由于电阻元件总是把消耗的电能转变成热能,利用这一特性可以制成各种电热设备,如电热水器,电烤箱等。对电机、变压器等电气设备,由于其导电部分具有电阻,因而当通过电流时要发热,发热的程度与其通过的电流大小和时间长短有关。若长时间通过大电流,会引起设备过热,影响其使用寿命。

第五节 基尔霍夫定律

电路是由元件相互连接而成的。基尔霍夫定律从电路连接方面阐明了电路的电流、电压所遵循的约束关系,是分析和计算电路的基本依据之一。基尔霍夫定律与元件的性质无关,适用于电路的任一瞬间。它包括基尔霍夫电流定律(即基尔霍夫第一定律)和基尔霍夫电压

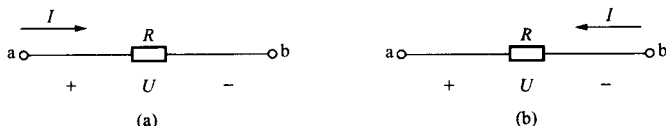


图 1-15 选择电阻元件电压、电流不同的参考方向
(a) 参考方向关联; (b) 参考方向非关联

定律（即基尔霍夫第二定律）两个内容。

下面首先介绍有关电路结构的几个名词。

(1) 支路——电路中具有两个端钮且通过同一电流的、一个或几个元件串联而成的分支称为支路。含有电源的支路叫有源支路，不含电源的支路叫无源支路。图 1-16 中 aec、ac、bd、bfd、ab 均为支路。cd 不是支路，因其间没有元件。

(2) 节点——三条及三条以上支路的连接点称为节点。图 1-16 中，a 点和 b 点是节点，c 点和 d 点是等电位点可以看做一个节点，e 和 f 点不是节点。

(3) 回路——电路中任意闭合的路径称为回路。图 1-16 中，aeca、acdba、bfdb、eabdc 等均是回路。

(4) 网孔——内部不含支路的回路叫网孔。如图 1-16 中的 aeca、abdca、bfdb 是网孔，而 eabdc 不是网孔。显然，网孔一定是回路，而回路不一定是网孔，网孔是一种特殊的回路。

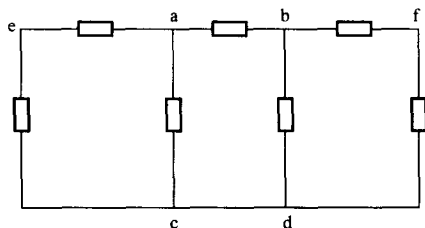


图 1-16 讨论电路结构的有关名词用图

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (kirchhoff's Current Law)，简称 KCL，它研究的是电路中各节点上支路电流间的约束关系。其表述为，对电路中的任意一个节点，任一瞬时，流进的总电流等于流出的总电流。可以由实例证明，当各支路电流均采用参考方向时，上述结论仍然成立，即对于任意一个节点有

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}}$$

或

$$\sum I = 0 \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可知，基尔霍夫电流定律又可表述为，汇集于电路中任一节点的各支路电流的代数和恒等于零。

应用式 (1-17) 列写 KCL 方程的方法是：若对流进电流取“+”（或“-”）号，则流出电流取“-”（或“+”）号，例如，对图 1-17 中的节点 a，有

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

或

$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

KCL 是电荷守恒定律及电流连续原理在电路中的体现。

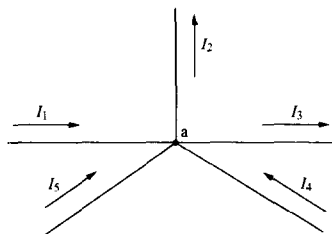


图 1-17 讨论 KCL 图例

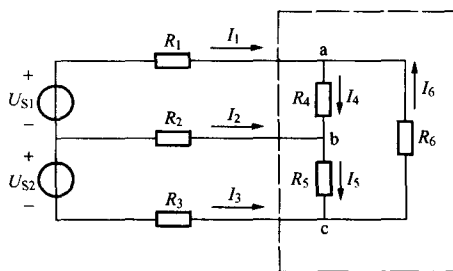


图 1-18 KCL 应用于假想的封闭面

KCL 不仅适用于电路的节点，还适用于电路中假想的封闭面。如图 1-18 所示电路中，

封闭面包围了 a、b、c 三个节点, 对这三个节点应用 KCL 有

$$-I_1 + I_4 - I_6 = 0$$

$$-I_2 - I_4 + I_5 = 0$$

$$-I_3 - I_5 + I_6 = 0$$

以上三式相加, 得到

$$-I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

可见, 汇集于任一封闭面的电流代数和恒等于零, 即 KCL 对于封闭面也是适用的。应用式 (1-17) 对一个封闭面列写 KCL 方程的方法与节点相同, 只需把封闭面看成一个扩大的节点即可。

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law) 简称 KVL, 它所研究的是电路回路中各电压间的约束关系。其表述为, 在任一瞬间, 电路中任一回路内各元件电压的代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-18)$$

应用式 (1-18) 时, 应首先选定回路的绕行方向, 凡回路内各元件或支路电压的参考方向与绕行方向一致的, 该电压取 “+” 号, 反之取 “-” 号。例如, 对图 1-19 所示的回路, 首先选择顺时针绕行方向, 按各元件所标电压的参考方向, 可得各电压的关系式为

$$-U_1 + U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

由 KVL 可知, 各并联元件两端的电压相同。

KVL 不仅适用于闭合回路, 还适用于假想的闭合回路。如图 1-20 所示电路中, ab 之间并未直接闭合但存在电压 U_{ab} , 可假想为 ab 之间有一元件, 该元件电压为 U_{ab} , 即可用与回路相同的办法列出 KVL 方程, 则可求出 U_{ab} , 即

$$U_1 + U_2 - U_{ab} = 0$$

$$U_{ab} = U_1 + U_2$$

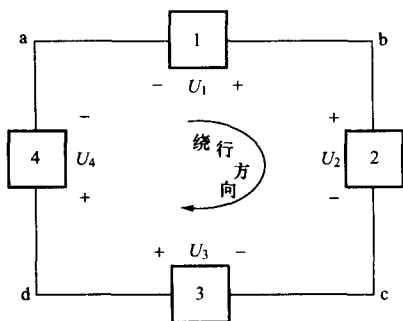


图 1-19 KVL 说明示意图

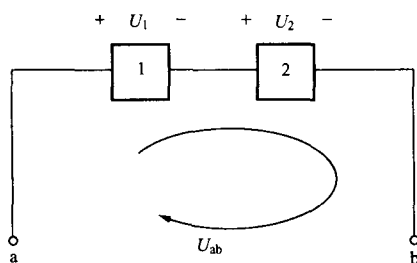


图 1-20 KVL 应用于假想的闭合回路

可见, 应用 KVL 可以方便地求出电路两点之间的电压。

【例 1-5】 试计算图 1-21 所示电路中各元件的功率。

解: (1) 元件 1 电流为 10A, 电压为 10V, 由于电压与电流为非关联参考方向, 故

$$P_1 = -U_1 I_1 = -10 \times 10 = -100(\text{W})$$

元件 1 发出功率 100W。

(2) 元件 2 电流为 10A, 电压为 2V, 电压与电流为关联参考方向, 则