

函授大学教材



电工原理

华北水利水电学院北京研究生部 邱孝宝 合编
华北水利水电学院 武维正



函授大学教材

电 工 原 理

华北水利水电学院北京研究生部 邱孝宝 合编
华北水利水电学院 武维正

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京地质矿产局印刷厂印刷

787 × 1092毫米 16 开本 29.75 印张 674千字

1991年5月第一版 1991年5月北京第一次印刷

印数 0001—3120册

ISBN 7-120-01298-3/TM · 369

定价13.85元

内 容 提 要

本书是供高等院校非电力类专业本科函授生成电专业专科函授生所用的教材,也可作为其它本科工科院校学生用书或参考书。

本书共分十四章,主要内容有:直流电路、直流电路的分析方法、正弦交流电路、互感、谐振、三相交流电路、非正弦周期电流电路、一阶电路、拉普拉斯变换、网络图论、双端口网络、多端元件的网络、非线性电路的分析、磁路。各章附有一定数量的习题与例题,最后还有电路的基本实验,作为理论与实践相结合的一个重要环节。

前 言

电工原理一书由邱孝宝、武维正合编，侯树文、汪英珍、张忠亮参编。本书共分十一章，其中第一、二章由汪英珍编写，第三、四章由武维正编写，第九、十、十一章由侯树文编写，第六、八章由河北煤炭建筑工程学院张忠亮编写，第五、七章由邱孝宝编写，全书由邱孝宝及武维正进行全书统稿。

本书由北京教授讲学团罗景富主审。本书得到华北水电学院函授部领导的大力支持和许多同志的热情帮助，在此一并致谢。

本书作为高等学校的非电专业函授及成人教育的教材，其深度和广度介于电专业和非电专业之间，每章有一定量的例题，习题和阶段测验，有益于读者自学。如果教学学时有限，可有所删减。有不妥之处，请给予指正，并致谢。

编者

1989年8月

目 录

前 言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路图	2
第二节 电流的参考方向和电压的参考极性	3
第三节 电阻元件	7
第四节 电感元件	10
第五节 电容元件	14
第六节 电功率	16
第七节 电压源和电流源	18
第八节 受控源	23
第九节 克希荷夫定律	28
第十节 电路中各点电位的计算	33
本章小结	37
习题	38
第二章 电路的分析方法	46
第一节 电阻的串联、并联和混联	46
第二节 电阻的Y形联接与△形联接的等效变换	53
第三节 电源的串联、并联和混联	58
第四节 支路电流法	63
第五节 回路电流法	65
第六节 节点电位法	68
第七节 叠加定理	74
第八节 等效电源定理——戴维南定理和诺顿定理	78
第九节 替代定理	86
本章小结	88
习题	89
第一次阶段测验题	97
第三章 正弦交流电路和相量法	99
第一节 交流电的基本概念	99
第二节 正弦电压与电流的三要素	101
第三节 正弦交流电路的有效值	106
第四节 相量法的基本概念	108
第五节 正弦交流电的相量表示法	114

第六节 电阻中的正弦电流	121
第七节 电感中的正弦电流	125
第八节 电容中的正弦电流	130
第九节 电阻、电感、电容的串联,复阻抗	134
第十节 电阻、电感、电容的并联,复导纳	141
第十一节 复阻抗和复导纳的等效互换	146
第十二节 复阻抗(复导纳)的串联和并联	149
第十三节 正弦电流电路中的功率	151
第十四节 功率因数的提高	157
第十五节 克希荷夫定律的相量形式	161
第十六节 最大功率传输定理	167
本章小结	169
习题	172
第二次阶段测验题	177
第四章 互感电路	179
第一节 线圈中的互感和互感电压	179
第二节 含有互感的交流电路的计算	186
第三节 空芯变压器电路的分析	193
第四节 理想变压器及其阻抗变换	197
第五节 变压器的模型	202
本章小结	207
习题	209
第五章 谐振电路	214
第一节 串联谐振电路	214
第二节 串联谐振电路的频率特性和选择性	219
第三节 并联谐振电路	225
本章小结	233
习题	234
第六章 三相电路	237
第一节 三相电源	237
第二节 负载星形联接的三相电路	243
第三节 负载三角形联接的三相电路	250
第四节 三相电路的功率及其测量	252
第五节 三相电路的计算	261
本章小结	268
习题	269
第三次阶段测验题	272
第七章 非正弦周期电流电路	274
第一节 非正弦周期电流	274
第二节 非正弦周期函数分解为傅里叶级数	275
第三节 有效值、平均值及平均功率	280

第四节 非正弦周期电流电路的计算	284
第五节 三相制中的高次谐波	289
第六节 傅里叶级数的复数形式	292
习题	298
第八章 线性电路的过渡过程	300
第一节 电路中的过渡过程	300
第二节 换路定律与电压、电流初始值的确定	302
第三节 单位阶跃函数和单位脉冲函数	307
第四节 一阶电路的零输入响应	310
第五节 一阶电路的零状态响应	317
第六节 一阶电路的全响应及三要素法	325
第七节 一阶电路的阶跃响应和冲击响应	332
第八节 一阶电路对正弦激励的响应	340
第九节 RLC 电路的放电过程	345
第十节 RLC 串联电路的充电过程	355
本章小结	358
习题	359
第四次阶段测验题	365
第九章 线性电路的复频域分析	367
第一节 复频域分析的基本概念	367
第二节 拉普拉斯变换及性质	368
第三节 求解拉普拉斯反变换的部分分式展开法	373
第四节 电路及基本定律的复频域表达	377
第五节 线性电路过渡过程分析	379
第六节 网络函数	385
第七节 卷积及卷积定理	388
本章小结	391
习题	391
第十章 网络的图论方法及状态方程	395
第一节 图的基本概念	395
第二节 图的矩阵表示	399
第三节 节点分析法	403
第四节 割集分析法	414
第五节 回路分析法	418
第六节 特勒根定理	421
第七节 网络的拓扑分析	425
第八节 网络的状态方程	431
本章小结	440
习题	441
第十一章 双端口网络	446
第一节 双端口网络的一般概念	446

第二节 双端口网络的参数的描述.....	447
第三节 双端口网络的等效电路.....	453
第四节 双端口网络的联接.....	455
第五节 双端口网络的特性函数.....	458
本章小结.....	460
习题.....	464

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章主要内容有：

- (1) 电路的基本概念。
- (2) 电流的参考方向和电压的参考极性。
- (3) 电阻、电感及电容元件的特点。
- (4) 电压源与电流源。
- (5) 受控电压源与受控电流源。
- (6) 克希荷夫定律——电流定律和电压定律。
- (7) 电位的概念。

通过本章的学习应重点掌握以下内容：

- (1) 应充分理解和牢固掌握电流的参考方向和电压的参考极性的基本概念。
- (2) 掌握作用于电阻、电感、电容等无源元件上的电压和电流之间的关系以及各无源元件自身的特性。
- (3) 熟练掌握电压源和电流源的特性。
- (4) 进一步掌握受控源的含义和特性。
- (5) 充分理解电功率 $P > 0$ 和 $P < 0$ 的物理意义。
- (6) 熟练掌握克希荷夫电压定律和电流定律的概念以及它们的实际应用。

本章所介绍的电流参考方向和电压参考极性是一个新的概念，学习时不要和物理学中所讲的电压电流的实际方向混淆，而应搞清它们之间的相互关系。

另外我们所涉及到的理想电路元件虽然是从实际电路器件中抽象出来的假想元件，但反过来，又能用它们和它们的组合来相当精确地表征出实际电路器件的主要电磁特性。这正是为什么能够用理想元件进行电路分析的关键所在。

本章所介绍的克希荷夫定律——电流定律和电压定律，是电路理论的基础，该定律内容虽然简单，但要熟练准确地应用，还应进一步从物理概念上加深理解。该定律最大的特点在于无论电路是由什么性质的（线性、非线性、时变、非时变等）集总元件所组成，此定律总是成立的。它们是分析和计算电路的主要依据，因此它们具有普遍的实用意义。在学习时要经常有意识地应用克希荷夫定律去分析问题和解决问题，以便达到熟练掌握和运用的目的。

这一章所介绍的内容与全书其它章节的内容有着密切的联系，是各章的理论基础，学习时应给予足够的重视。

第一节 电路和电路图

电路，实际上就是电流通过的路径。不论电路的结构如何复杂，它都是由电工设备和元器件等组成的。在电路中进行着能量的相互转换，即一方面由光能、化学能、原子能等其他形式的能量转换成电能（电源部分），另一方面又由电能转换成所需要的其他能量（负载）。例如：电力系统中发电厂的发电机把热能、原子能或水能等转换成电能，通过变压器、输电线输送给各用电单位，用电单位再根据自己所需，把电能转换成机械能、光能、热能等。这样就构成了一个极为复杂的电路或系统。我们把供给电能的设备称为电源，把用电设备称为负载。

一个实际电路可以用一个足以反映其电磁性质的一些理想电路元件的组合来代替。理想电路元件是具有某种确定的电或磁性质的假想元件，它们及它们的组合可以反映出实际电路元件的电磁性质和电路的电磁现象。实际电路元件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有共同的地方，如：有的元件主要是消耗电能的，例如各种电阻器、电灯、电炉等；有的元件主要是供给电能的，例如电池和发电机；也有的元件主要是储存磁场能量的，例如各式各样的电感线圈；还有的元件则主要是储存电场能量的，例如各种类型的电容器。因而实际元件可以用理想元件或其组合来近似地代替或等效。

一个最简单又最常见的手电筒电路就是：将干电池和小灯泡经过一个开关用导线联接起来，就构成了一个电路。当开关闭合后，在这个闭合通路中，便有电流通过，于是小灯泡发光。对这个电路来说，干电池是电源；电源对电路起提供电能的作用，这种电能是在电源内部由其它形式的能量转化而来的。小灯泡是一种用电设备；用电设备在电路中称为负载，它能把电能转化成其它形式的能量。

在分析和研究电路的工作时，总是把构成电路的实际部件抽象成一些理想化的模型。这些理想化的模型叫做理想电路元件，简称为元件。实际部件用理想化的模型表示后，就可以画出由理想电路元件组成的电路图。例如，图1-1的手电筒电路可以画成如图1-2所示的理想电路图。我们把小灯泡看作一个电阻元件 R ；对新的干电池来说，它的内阻很小可以忽略不计，因此可以用电动势为 E 的直流理想电压源元件来表示；至于联接导体，因为它的长度很短，它的内阻完全可以忽略不计，而被看做是理想导体。用抽象的理想元

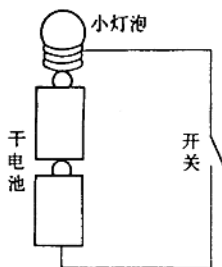


图 1-1 手电筒电路示意图

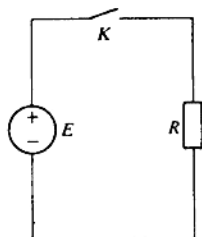


图 1-2 手电筒电路图

件及其组合近似地替代实际元件，从而构成了与实际电路相对应的电路模型。今后我们所说的电路均指这种抽象电路。

实际电路元件的特性都与电路中所发生的电磁现象和过程有关，这种电磁现象及过程按性质来说，可以分为储存电场能量，储存磁场能量，供给电能，消耗电能。因此，电路中的参数就有：反映消耗电能参数的称为电阻，用符号 R 表示；反映储存磁场能量参数的称为电感，用符号 L 表示；反映储存电场能量参数的称为电容，用符号 C 表示。

理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的，所以在任何时刻，在具有两个端钮的理想元件中，从元件某一端钮流入的电流恒等于从另一端钮流出的电流，并且元件两端钮间电压值是完全确定的。凡端钮处电流及端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件，简称集总元件。

由集总元件构成的电路称为集总电路，或称为具有集总参数的电路。用集总电路来近似实际电路是有条件的。也就是说实际的电路尺寸要远小于电路工作时电磁波的波长，整个电路的实际尺寸可以略去不计，因此可以把它集中在一起，用一个或有限个分立的 R 、 L 、 C 来加以描述，这样，这些电路的参数就叫做集中参数。在集中参数元件中，电阻、电感和电容是三种最基本的元件。

电路元件的种类很多，具有两个端钮的叫做二端元件，如电阻等。具有两个以上端钮的叫多端元件，如三极管等。对于一个多端元件，在任何时刻，从任一端钮流入的电流值及任意两个端钮之间的电压值也都是完全确定的。

能正确反映实际电路中各部件联接关系的图叫做电路图，电路图中各元件的位置并不一定与实际电路中各部件的位置完全相同。图1-1完全是按实物模拟画出来的，而图1-2中的开关 K 和电阻 R 的位置则与图1-1有所不同。当然，图1-2中 K 和 R 的位置也可以画成与图1-1完全一致。图1-2无论怎样画，效果都是一样的，即 K 闭合后 R 和 E 构成了电流的通路，当 K 打开时，电路就断开了。

在分析电路时，重要的问题就是决定电路的工作状态，即各元件上的工作电压与电流。电压与电流的大小和方向都不随时间变化的电路，叫做恒定电流电路或叫做直流电路；电压与电流的大小和方向都随时间变化的电路则叫做交变电流电路或称交流电路。

在直流电路中，与电路联系着的磁场、电场都不随时间变化，因此不必考虑电磁感应现象及与变化电场有关的物理现象，这样就比较易于对电路进行分析了，而且能够突出基本原理和分析方法。

第二节 电流的参考方向和电压的参考极性

带电粒子（例如导体中的自由电子）在电场力的作用下有规则地作定向运动，就形成了电流。电流的大小、强弱用电流强度来表示，电流强度可定义为：单位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度通常简称为电流，用公式表示，则为

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

式中 i —— 电流, A (安培);

dq —— dt 时间内通过导体某横截面的电量。

一、电流的参考方向

对于电流的参考方向, 习惯上规定: 正电荷运动的方向作为电流的方向。因此, 在金属导体中, 电流的方向和自由电子运动的方向正好相反。在国际单位制 (SI) 中, 电量的单位是库仑 (C); 时间的单位是秒 (s); 因此电流的单位是库仑/秒 (C/s)。然而人们更习惯用一专用单位安培表示电流, 即

$$1 \text{ 安培} = \frac{1 \text{ 库仑}}{1 \text{ 秒}} \quad \text{即} \quad 1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

安培简称为安 (A)。

实际中, 电流在导线或电路元件中流动的方向只有两种可能, 如图 1-3 所示, 当有正电荷的净流量从 A 端流入并从 B 端流出时, 习惯上就认为电流是从 A 端流向 B 端。反之, 则认为电流是从 B 端流向 A 端。

在电路中, 对于大小和方向都不随时间变化的电流称为直流, 直流电流一般用大写字母 I 表示。小写字母 i 一般表示随时间变化的交变电流。以后规定凡是不随时间变化的量, 一律用大写字母表示, 例如电流 I 、电压 U 、电动势 E ; 随时间变化的量用小写字母表示, 例如电流 i 、电压 u 、电动势 e 。直流电流 I 与电量 q 的关系为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中 I —— 直流电流, A;

q —— 电量, C;

t —— 时间, s。

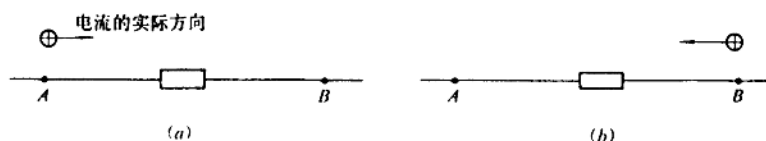


图 1-3 电流方向

在简单的直流电路中, 各元件中电流的实际方向很容易判断。因此在电路图上标明它的实际方向并不困难。但当电路比较复杂时, 某些电流的实际方向往往很难直接看出, 有时电流的实际方向还在不断地变化, 因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因, 我们将引入电流“参考方向”的概念。

在交流电路中, 电流的方向不断地随时间变化, 所以根本无法在电路图上用符号表示它的实际方向。对于电流这种具有两种可能方向的物理量, 可以任意选定其中一个方向作为参考方向, 在电路图中用一个实线箭头表示。而且还规定, 电流的实际方向与参考方向一致时, 电流为正值 ($i > 0$), 如果电流的实际方向与参考方向相反, 则为负值 ($i < 0$)。这样, 就可以将电流看成是一个代数量了, 它既可以是正值, 也可以是负值。

值得注意的是,今后在电路图中所标明的电流方向都是它的参考方向,而且电流的参考方向是任意指定的,并不一定是电流的实际方向(参看图1-4)。电流的参考方向也叫电流的正方向。

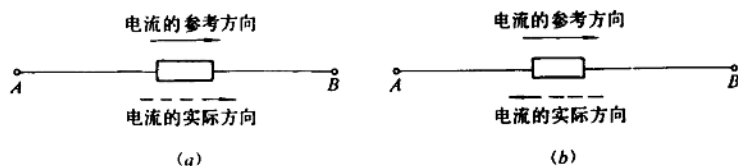


图 1-4 电流的参考方向

二、电压的参考方向

对于电压也有必要指定它的参考极性或参考方向。两点之间电压的实际方向(即高电位点指向低电位点的方向)也只有两种可能,可以选定其中任意一个方向为电压的参考方向。电压可用字母 U 或 u 表示,直流电压一般用字母 U 表示,交流电压用 u 表示。

在电路中,如果设正电荷 dq 由 a 点移到 b 点时电场力所作的功为 dA ,则 a 、 b 两点之间的电压如采用双下标时就有

$$U_{ab} = \frac{dA}{dq} \quad (1-3)$$

或者说,电场力是把单位正电荷由 a 点移到 b 点时所作的功在数值上等于 a 、 b 两点间的电压。如果 $U_{ab} > 0$,则表示正电荷由 a 点移到 b 点通过这段电路时,电场力是作功的,说明这段电路是吸收能量的。或者说,正电荷在 a 点时所具有的能量(电位能) W_a 比它在 b 点时所具有的能量(电位能) W_b 大,其差额等于这段电路吸收的能量。我们把正电荷在电路中某点所具有的电位能与电量的比值,叫做该点的电位,用字母 φ 表示。例如, a 、 b 点的电位分别为

$$\varphi_a = \frac{W_a}{q}$$

$$\varphi_b = \frac{W_b}{q}$$

电压也叫电位差(或叫电位降)。 a 、 b 两点间的电压为

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{W_a - W_b}{q} \quad (1-4)$$

显然,电压的实际方向总是从高电位指向低电位,或者说,电压的实际方向是电位降的方向。如果用“+”号表示高电位,“-”号表示低电位,也可以说,电压的实际极性是 a 点为“+”, b 点为“-”。当两点间电压的实际极性或方向不易判断或随时间改变时,可以任意选定一点的极性为“+”,另一点的极性为“-”。

在电路中,规定任意选定的极性叫做电压的参考极性(用“+”、“-”号表示),从参考“+”极指向参考“-”极的方向叫做电压的参考方向(一般用带箭头的实线表示)。当电压的实际极性和参考极性一致时,电压为正值,反之则为负值。

当我们对电路进行分析和计算时,首先应标出电压的参考极性,如图1-5(a)所示或标出电压的参考方向,如图1-5(b)所示,最后我们再根据计算结果的正负确定出电压的实际极性或实际方向。

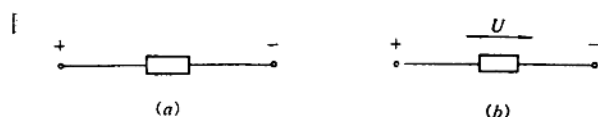


图 1-5 电压的参考极性和参考方向

参考方向在电路分析中起着十分重要的作用,对某段电路或某个元件上电压和电流的参考方向可以独立地加以任意指定。如果指定的电流参考方向是从电压的“+”极性端流入,并从“-”极性端流出,即电流的参考方向与电压的参考方向一致时,我们称电流和电压的这种参考方向为关联参考方向,如图1-6所示。

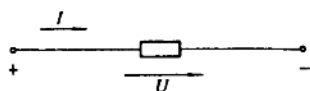


图 1-6 电压和电流的关联参考方向

三、电动势的参考方向

对于电动势,同样也可以任意选定它的参考方向或参考极性。在电源内部,把单位正电荷从低电位“-”极移到高电位“正”极时,外力所作的功在数值上等于电动势。电动势一般用字母 e 或 E 表示。显然,电动势的实际方向是电位升高的方向,即由“-”极指向“正”极的方向。

电路图中,表示电动势的图形符号如图1-7所示。图(a)中表示电动势极性的“+”、“-”号也可以标在圆圈之外,图(b)中,圆圈内的箭头代表电动势的方向,图(c)是电池的实际符号,长划代表“+”极,短划代表“-”极。

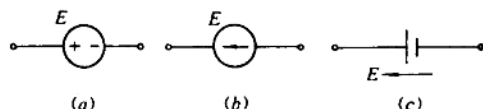


图 1-7 电动势的符号

在国际单位制中,电压、电位与电动势的单位都是伏特,简称伏(V)。

注意:对电源来说,电动势的实际方向正好和它两端电压的实际方向相反,但两者的实际极性却完全相同。本书中一律采用参考极性这一规定。这样规定,将给电路的分析和计算带来很多方便。例如:在一直流电路中,由于电压的方向是电位降的方向,而电动势的方向是电位升的方向,因此,如选取电压 U 的参考方向与电动势 E 的方向相反,如图1-8中的(a)图,则有 $U = E$, 即 $U_{ab} = E_{ba}$; 若两者的方向相同,如图(b),则 $U = -E$, 即

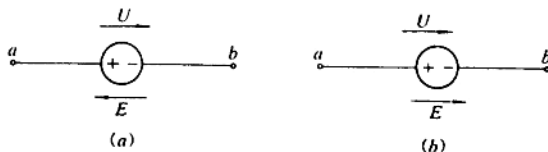


图 1-8 电动势和电压之间的关系

$U_{ab} = -E_{ab}$ 。从图中可以看出，对电动势和电压同时采用参考极性的优越性。

电流的方向和电压的极性也可以直接采用双下标来表示。例如，在上图中，可以直接写出： $U_{ab} = E_{ba}$ 或 $U_{ab} = -E_{ab}$ 。这样就不必在图上标出极性符号或箭头了。而且也必然有下列关系

$$\left. \begin{aligned} I_{ab} &= -I_{ba} \\ U_{ab} &= -U_{ba} \\ E_{ba} &= -E_{ab} \\ U_{ab} &= E_{ba} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

因为电压的参考“+”极指向“-”极的方向就是电压的参考方向，所以许多书中把电压的参考极性与参考方向不加区别，相互通用。而且，当电流的参考方向是从电压的参考“+”极流入，并从“-”极流出，即电流的参考方向与电压的参考方向一致时，就把电流和电压的这种参考方向叫做关联参考方向，如图1-9所示。

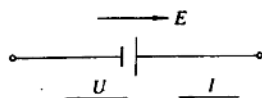


图 1-9 关联正方向示例

第三节 电 阻 元 件

在电路理论中，通常将电路中实际元件的主要电磁性质，经过科学抽象用所谓的理想元件替代。这些理想元件都是数学模型，每一个都有它各自的精确定义。

体现电能转换成热能或其它能量的电路元件，称为电阻元件，简称电阻。电阻的特性通常用电压与电流之间的函数关系来表征，电压与电流之间的函数关系称为伏安特性。按照伏安特性的不同，可将电阻分为线性电阻和非线性电阻。

一、线性电阻

线性电阻元件是二端理想元件，在任何时刻，它两端的电压与电流的关系服从欧姆定律。即通过电阻元件的电流 i 、与元件两端的电压 u 成正比，而与元件本身的阻值 R 成反比，这就是欧姆定律。它可以写成

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-6)$$

或

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

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，简称 (Ω)。

$$1[\text{欧姆}] = \frac{1[\text{伏特}]}{1[\text{安培}]} \quad \text{即} \quad 1\Omega = \frac{1\text{ V}}{1\text{ A}},$$

线性电阻元件在电路中的图形符号如图1-10所示。

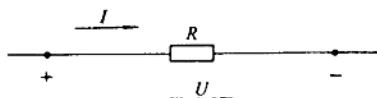


图 1-10 线性电阻

值得注意的是，在电阻元件中，只有在电流与电压参考方向一致的前提下，即电流从电阻的高电位端（参考正极）流向电阻的低电位

端（参考负极）。符合以上条件时，式（1-6）、（1-7）才是正确的。反之，则应相差一个负号。

从式（1-7）可以看出，如果用一个特定符号 G 来表示电阻 R 的倒数，即

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

那么，欧姆定律可改写成

$$I = GU$$

这个特定的符号 G 称为电导，其法定单位是西门子，简称为西（S）。

在直角坐标系中，以外加电压为横坐标（或纵坐标），通过电阻的电流为纵坐标（或横坐标），对一系列的电压值和电流值，就可得到一条代表电流与电压之间函数关系的曲线，这种曲线就叫做电阻的伏安特性。线性电阻的伏安特性见图1-11，电阻阻值由伏安特性的斜率来确定，即为 $R = \text{常数}$ 。

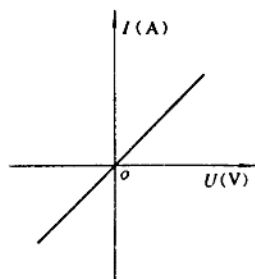


图 1-11 线性电阻的伏安特性

$R = \text{常数}$ 与伏安特性具有线性特点是同一意思，显然， $R = \text{常数}$ 是指电阻元件的阻值是不随电压电流的变化而改变的，或者说，电阻与通过它的电流和加在它两端的电压无关。

$R = \text{常数}$ ，表明欧姆定律是关于电压电流的直线方程。

电阻是纯耗能元件，将电能转变成热能或其它形式的能，因此，在直流电路中，电阻元件所消耗的电功率 P 用

下式表示

$$P = UI \quad (1-8)$$

考虑到式（1-7），计算电阻功率的公式还有

$$P = UI = (RI)I = I^2 R \quad (1-9)$$

和

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} = U^2 G \quad (1-10)$$

二、非线性电阻

如果电阻值与通过它的电流及加在它两端的电压有关，即当电流或电压改变时，电阻的数值也随之而变。这样的电阻就叫做非线性电阻。

非线性电阻的伏安特性不是直线，如图1-12所示是半导体二极管的伏安特性，它与直线相差很大，显然，欧姆定律是不适用于非线性电阻的。

严格讲纯线性电阻是不存在的，其伏安特性或多或少都是非线性的。然而，对于碳膜电阻、绕线电阻等许多电阻元件在一定的电流（或电压）运用范围内，它们的阻值变化极小，因此，可以用线性电阻作为它们的模型。为此，这里重点讨论线性电阻，对于非线性电阻将

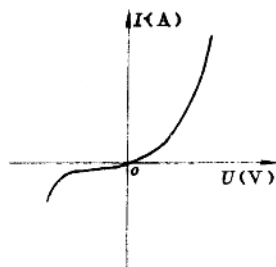


图 1-12 非线性电阻的伏安特性

在后续章节中讨论。

由式 (1-9) 可知, 当电流一定时, 电阻 (线性电阻) 消耗的电功率与电阻成正比, 又由式 (1-10) 可知, 当电压一定时, 电阻消耗的电功率与电阻成反比或与电导成正比。又因为电阻 R 和电导 G 都是正常数, 故根据式 (1-9) 或 (1-10) 算出的电功率总是正值, 不可能为负值。这说明, 线性电阻元件任何时刻都不可能发出能量。显然, 它所吸收的电能, 全部转换成了热能而被消耗掉。因此, 线性电阻是一种耗能元件。

仅限于有源和无源线性元件构成的电路称线性电路。本书主要研究线性电路。无源线性元件除电阻之外, 还有电感和电容等。直流电路中仅讨论线性电阻。

电阻元件在时间 dt 内消耗的电能为

$$dw = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

这些能量如转化为热能, 则以热量的形式出现。如果以卡 (cal) 作为热量的单位, 则在时间 dt 内, 电阻的发热量为

$$dQ = 0.239 I^2 R dt$$

式中, 0.239 是热功当量。而从 0 到 t_1 的时间内, 电阻的发热量为

$$Q = 0.239 \int_0^{t_1} i^2 R dt \quad (1-11)$$

对于直流, 在时间 t 内电阻 R 的发热量为

$$Q = 0.239 I^2 R t \quad (1-12)$$

【例 1-1】 一只 220 V、100 W 的灯泡, 在正常点燃时通过灯丝的电流和灯丝的电阻是多少?

解 由式 (1-10) 可知, 通过灯丝的电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.4545 \text{ (A)}$$

又由式 (1-12) 可知, 灯丝的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 (\Omega)$$

或者根据欧姆定律得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.4545} = 484 (\Omega)$$

【例 1-2】 为了测量某直流电机励磁线圈的电阻 R , 采用了下图所示的伏安法。电压表读数为 220 V, 电流表读数为 0.7 A, 求线圈的电阻。

如果在实验中有人误将电流表当电压表并联在电源上, 其后果如何? (电流表的量程为 1 A, 内阻 R_A 为 0.4Ω)。

解 励磁线圈电阻为

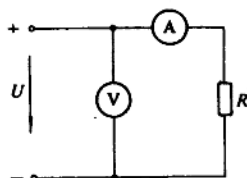


图 1-13 例1-2图