

電 工 基 礎

吳鐵才 楊林根 編 著



復旦大學出版社

TM1
TM1
90

高等工程专科学校试用教材

电工基础

吴铁才 杨林根 编著



华工 B0005606

141998

复旦大学出版社

内 容 简 介

本书是根据国家教委关于高等工程专科学校基础理论教学“以必需、够用为度”，“以掌握概念、强化应用为教学重点”的原则编写的专科教材，内容符合“高等工程专科学校电路及磁路课程教学基本要求”，教学时数(理论教学部分)为100学时。

本书共十一章，内容有：电路的基本概念与基本定律；电路的等效变换；线性网络的一般分析方法；正弦交流电路；互感电路；三相电路；周期非正弦电流电路；二端口网络；电路的暂态分析；非线性电阻电路；磁路和铁心线圈电路。本书重点突出，难点分散，联系实际，强调应用，循序渐进，易教易学。书中有较丰富的例题、思考练习题和习题，每章有小结，书末附有习题参考答案。

本书可作高等工程专科学校、职工大学、业余大学电类专业教材，也可作中专、高级技工培训班教学用书和工业企业技术人员参考用书。

责任编辑 董锡江

电 工 基 础

吴铁才 杨林根 编著

复旦大学出版社出版发行

(上海国权路579号)

常熟市第四印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张22.625 字数520千字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数1—4000

ISBN7-309-00710-7/T·29

定价：8.90元

前 言

《电工基础》是电气类专业的主干基础课程,编写具有专科特点的《电工基础》教材是提高专科电气专业教学质量的一项重要工作。基于这种认识,我们从一九八六年开始,就着手编写《电工基础》教材。一九八七年在太原召开高等专科学校电气专业协会成立大会期间,兄弟学校肯定了该教材的编写提纲。嗣后,在五年的教学实践中,我们先后编写了两轮讲义,在四届十个班级中使用,得到了好评。现经再次修改后正式付印出版。

本书内容符合“高等工程专科学校电路及磁路课程教学基本要求”。在编写中,我们根据国家教委关于高等工程专科学校的基础理论教学“以必需、够用为度”,“以掌握概念、强化应用为教学重点”的原则,结合专科特点,将内容按“先直流后交流”、“先稳态后动态”的体系组织;在内容选择上,在确保电路部分基本内容和保证必需的传统内容的前提下,适当增加了非线性电阻电路的分析和具有运算放大器电路的分析,充实加强了磁路分析,以适应后续课程的教学和科技发展的需要。在编写中,我们在突出重点、分散难点,联系实际、强调应用,循序前进、方便自学诸方面作了一些努力和尝试。本书有较多的例题、习题、思考与练习题,全书采用最新国家统一标准的图形符号和文字符号。

本书适用于高等工程专科学校、职工大学、业余大学电类专业作教材,也可作中专、高级技工培训班教学用书和工业企业技术人员参考用书。

本书由上海机械专科学校吴铁才、杨林根共同编写,其中第一、二、三、八、九、十章由杨林根编写,第四、五、六、七、十一章由吴铁才编写,全书由杨林根统稿。本教材理论教学时数为100学时。

本书在编写过程中,始终得到上海机械专科学校孔凡才副教授、董锡江副教授和南京化工动力专科学校王永止副教授的关心、支持,并提出了很多很好的意见,编者谨向他们表示衷心的感谢。

本书由王永止副教授主审,并主持召开了审稿会。参加审稿会的有江苏水利工程专科学校华增吉、上海轻工业专科学校宗祥娟、上海化工专科学校王振义、上海纺织专科学校马绍中及上海机械专科学校孔凡才、席时达、董锡江等老师。与会同志根据多年来从事专科教学的丰富经验,提供了许多宝贵的意见和建议,编者谨表由衷的感谢。

书中错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

1990年11月

目 录

第一章 电路的基本概念与基本定律	1
§ 1—1 电路和电路模型.....	1
§ 1—2 电路的基本物理量及其参考方向.....	2
§ 1—3 电阻元件 欧姆定律.....	8
§ 1—4 电源.....	11
§ 1—5 基尔霍夫定律.....	15
§ 1—6 电路中各点电位的计算.....	21
本章小结.....	26
习题.....	27
第二章 电路的等效变换	33
§ 2—1 无源电阻网络.....	34
§ 2—2 电源模型的等效变换.....	45
§ 2—3 戴维南定理与诺顿定理.....	55
§ 2—4 叠加定理.....	61
§ 2—5 含受控源网络的等效变换.....	65
本章小结.....	72
习题.....	73
第三章 线性网络的一般分析方法	81
§ 3—1 支路电流法.....	81
§ 3—2 网孔电流法.....	85
§ 3—3 节点电压法 弥尔曼定理.....	91
§ 3—4 含受控源网络分析法 运算放大电路.....	96
本章小结.....	103
习题.....	104
第四章 正弦交流电路	108
§ 4—1 正弦量.....	108
§ 4—2 正弦量的相量表示.....	113
§ 4—3 电容元件和电感元件.....	117
§ 4—4 电路元件伏安关系的相量形式.....	122
§ 4—5 阻抗和导纳.....	126

§ 4—6 阻抗的串联和并联	134
§ 4—7 应用相量法分析正弦电路	139
§ 4—8 正弦电路的功率	144
§ 4—9 正弦电流电路中的谐振	151
本章小结	157
习题	159
第五章 互感电路	165
§ 5—1 互感、互感电压和同名端	165
§ 5—2 互感电路分析	168
§ 5—3 理想变压器	175
本章小结	181
习题	181
第六章 三相电路	183
§ 6—1 三相电路的联接方式	183
§ 6—2 对称三相电路的计算	188
§ 6—3 不对称三相电路的分析	192
§ 6—4 三相电路的功率及其测量	196
本章小结	199
习题	200
第七章 周期非正弦电流电路	204
§ 7—1 周期函数分解为傅里叶级数	204
§ 7—2 周期非正弦量的有效值、平均值及平均功率	209
§ 7—3 周期非正弦电路的计算	212
§ 7—4 对称三相电路中的高次谐波	216
本章小结	219
习题	219
第八章 二端口网络	222
§ 8—1 二端口网络的方程及其参数矩阵	222
§ 8—2 线性无源二端口网络的等效电路	234
§ 8—3 二端口网络的联接	237
本章小结	241
习题	241
第九章 电路的暂态分析	244
§ 9—1 动态电路的初始条件	245

§ 9—2 一阶电路的零输入响应·····	250
§ 9—3 一阶电路的零状态响应·····	258
§ 9—4 一阶电路的全响应和三要素法·····	263
§ 9—5 阶跃响应与冲激响应·····	268
§ 9—6 二阶电路的零输入响应·····	277
§ 9—7 拉普拉斯变换·····	285
§ 9—8 电路定律的运算形式 运算法·····	293
本章小结·····	299
习题·····	300
第十章 非线性电阻电路 ·····	304
§ 10—1 非线性电阻电路 ·····	304
§ 10—2 图解法·····	307
§ 10—3 小信号分析法 ·····	313
§ 10—4 试探法 ·····	316
本章小结·····	317
习题·····	317
第十一章 磁路和铁心线圈电路 ·····	320
§ 11—1 磁场的基本概念 ·····	320
§ 11—2 铁磁材料的磁化 ·····	321
§ 11—3 磁路和磁路定律 ·····	325
§ 11—4 恒定磁通磁路的计算 ·····	327
§ 11—5 永久磁铁 ·····	332
§ 11—6 交流铁心线圈 ·····	333
§ 11—7 电磁铁及其它铁磁器件 ·····	338
本章小结·····	343
习题·····	344
习题参考答案 ·····	347

第一章 电路的基本概念与基本定律

内 容 提 要

本章介绍电路模型、理想电路元件(其中的电容元件和电感元件将在第四章中介绍)和电路的基本物理量。

电路分析的主要任务在于分析电路中的电流、电压以及它们之间的关系,为了便于进行分析,引进了电流、电压的参考方向的概念。分析电路要运用电路的基本定律,本章介绍的欧姆定律和基尔霍夫定律,是集总电路的基本定律,与构成电路的元件性质无关。

§ 1—1 电路和电路模型

电路(circuit)是电流的通路。实际电路是由电工设备、器件和连接导线组成的。

电路的作用是:

1. 实现能量的传输与转换。例如电力系统,它是由电源、负载和中间环节三部分组成的。发电机(或电池)是电源,是供应电能的设备;电灯、电动机、电炉等是负载,是取用电能的设备;变压器和输电线是中间环节,是联接电源和负载的部分,起传输和分配电能的作用。

2. 传递和处理信号。例如扩音机。先由话筒把信号或音乐转换成相应的电压或电流(电信号),通过电路传递到扬声器,再把电信号还原为语言或音乐。由于话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,因此中间还要用放大器放大。信号的这种转换和放大,称为信号的处理,是由电路实现的。

由于在各种场合,如自动控制设备、计算机、通讯设备等场合中,实际电路的用途各异,因而电路也必然种类繁多。我们不能对形形色色的实际电路一一列举分析,只能借助抽象的、理想化的模型来进行分析。

建立理想化电路模型的依据是电路器件中发生的物理现象,如发光、发热、作功及电磁场能量的储存或释放等。电路器件的理想化模型称为电路元件。每一种电路元件都可表示电路中的一种物理现象或性质,如

1. 电阻元件(resistance element) 表示电路中消耗电能,具有将电能转换为其它形式能量的不可逆过程的物理现象,如电阻器、电灯、电炉等;

2. 电容元件(capacitance element) 具有储存或释放电场能量的性质,表示电场效应这种物理现象,如各种电容器;

3. 电感元件(inductance element) 具有储存或释放磁场能量的性质,表示磁场效应这种物理现象,如各种电感线圈;

4. 电源元件(source element) 表示将其他形式的能量(如化学能、机械能或太阳能

等)转换为电能的物理现象,如干电池、蓄电池、发电机、光电池等。

上述元件都具有两个端钮,称为二端元件。具有两个以上端钮者,称为多端元件。

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路,使得模型中出现的电磁现象与实际电路中反映出来的现象十分近似,这个由理想电路元件组成的电路称为电路模型。今后我们分析的电路都是电路模型,模型中的元件都是理想电路元件。

图1—1(a)为一简单的实际电路。干电池组可用电源元件表示,若考虑到电池内部消耗电能的现象,就要用电源和电阻两个元件来表示(E, r_i),灯泡用电阻元件 R 表示,实际导线也具有电阻,故用电阻元件 r_1, r_2 表示。这样,图1—1(a)就可画成图1—1(b)的电路模型。若忽略导线的电阻(r_1, r_2),则可画成图1—1(c)的电路模型。

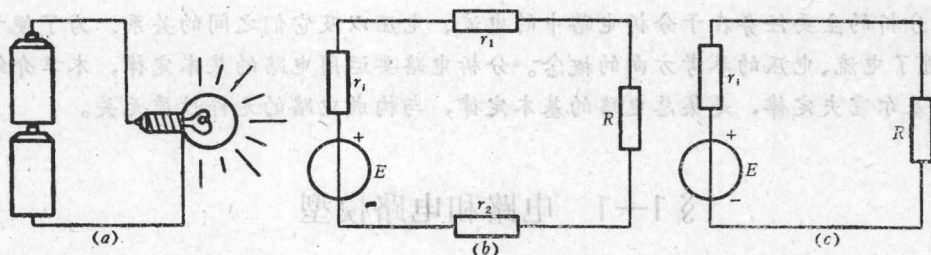


图1—1 实际电路与电路模型

我们认为理想电路元件的电磁过程都集中在元件内部进行,因而在任何时刻,从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流将恒等于从另一端钮流出的电流,并且元件两端钮间的电压值也是完全确定的。这样的电路元件称为集总(中)参数元件,简称为集总元件(lumped element)。由集总元件构成的电路称为集总电路(lumped circuit),或具有集总参数的电路。

用集总电路来近似替代实际电路是有条件的。这个条件就是实际电路的尺寸要远小于电路工作时电磁波的波长。如果不满足这个条件,实际电路便不能按集总电路来处理。本书只考虑集总电路。有关分布电路(或叫具有分布参数的电路)的内容,读者可参阅有关电磁场理论的教材。

§ 1—2 电路的基本物理量及其参考方向

一、电流及其参考方向

电流(current),是带电质点在电场作用下的定向运动。我们用电流强度(current intensity)这个物理量表示电流的强弱。电流强度在数值上等于单位时间内通过某一导体截面的电量。或者说,电流强度是电量对时间的变化率。设 Δt 时间内流过电路横截面的电量是 Δq ,则有

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \text{或} \quad i = \frac{dq}{dt}$$

i 称为电流强度,简称电流。本书规定用小写英文字母 $i(t)$ 或 i 表示随时间变化的电流;用斜体字母 I 表示不随时间变化的电流。不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流(direct

current, 简写为dc, 或DC)。直流电流与电量的关系是:

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

当 t 的单位为秒(second, 简写为s)、 q 的单位为库仑(Coulomb, 简写为C)时, i 的单位为安培(Ampere), 简写为安(A), 且 $1\text{安} = \frac{1\text{库仑}}{1\text{秒}}$ 。电流的单位还可用于千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等表示。

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}; \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}; \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

电流的大小和方向对电路的工作状态都有影响, 所以在测量或计算电路的电流时, 应同时给出电流的大小和方向, 仅有电流数值而没有指明电流流向的答案是不完整的。

如图1—2为某电路中的一段电路。设其中的电流为2A, 从A点流向B点, 则 $i = 2\text{A}$, 方向为实线箭头指向; 若电流仍由A流向B, 则图中虚线 $i' = -2\text{A}$ 。

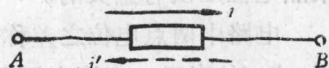


图1—2 电流表示法

电流的大小与方向还可用双下标表示, 如图1—2中, $i_{AB} = 2\text{A}$ 或 $i_{BA} = -2\text{A}$ 。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流方向, 也称真实方向。在简单电路情况下, 人们很容易判断出电流的真实方向。如图1—3(a)中所示, 倘若在图中 a 、 b 点间再接入一个电阻如图1—3(b), 那末该电阻中电流如何流动呢?

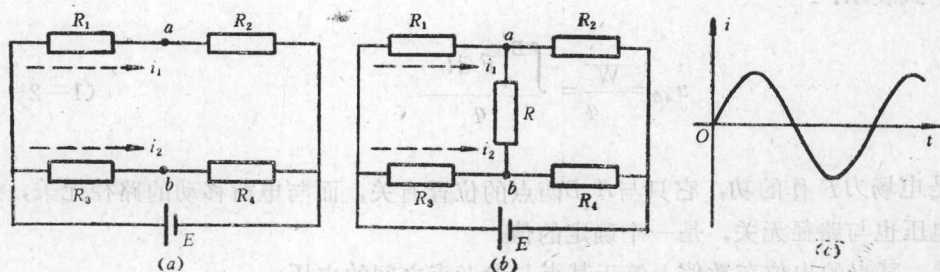


图1—3 电流方向的判断

显然无法直观判定。另外, 当电流如图1—3(c)中所示是交变的, 即流向随时间变化, 则在图上也无法表示其流向。于是, 我们引入一个十分重要的概念——参考方向(reference direction)。

参考方向, 也叫正方向, 是假定的电流方向。在电路中一般用箭头表示; 也可用双下标

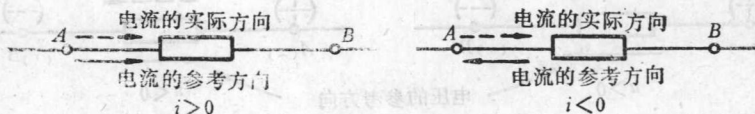


图1—4 电流的参考方向与实际方向

表示, 如 i_{AB} 表示电流由 A 流向 B 。参考方向选定后, 电流是一代数量。若按选定参考方向后计算电路得出的电流为正值, 说明实际电流方向与参考方向相同; 若为负值, 说明实际电流方向与参考方向相反。如图1—4所示。

二、电位、电压及其参考方向

正电荷在电路某点上所具有的能量, 称为正电荷在该点的电位能。电位能与电荷量的比值称为电位(electric potential)。通常把电路作为一个完整的体系, 可以指定电路中任一点(只能指定一点)的电位为零, 称这点为电位参考点。实际电路中, 一般指定电路中接地或接机壳的点为参考点。指定参考点后, 电路中其余各点对参考点来讲都有电位。若某点的电位高于参考点的电位, 则电位为正, 反之为负。某点, 如 A 点、 B 点, 对参考点的电位用 u_A 、 u_B 表示。显然, 电位是个相对参考点的量, 参考点选择不同, 则某点的电位也不同, 离开参考点说某点电位是没有意义的。

电路中两点电位之差称为电位差(electric potential difference)或电压(voltage), 用 u 或 $u(t)$ 表示, 直流电压用 U 表示。若 A 、 B 两点的电位分别为 u_A 、 u_B , 且 $u_A > u_B$, 则 A 、 B 两点间的电压 u_{AB} (双下标表示电压指向顺序, 此处为 A 指向 B)为

$$u_{AB} = u_A - u_B > 0$$

电压的实际方向由高电位点指向低电位点, 即电位降落的方向, 故有时称电压为电位降(potential drop)。

A 、 B 两点间的电压, 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所作的功, 因而也可用下式表示:

$$u_{AB} = \frac{W}{q} = \frac{\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}}{q} \quad (1-2-1)$$

式中 W 是电场力 $\vec{F}$ 作的功, 它只与 A 、 B 两点的位置有关, 而与电荷移动的路径无关, 所以两点间的电压也与路径无关, 是一个确定的值。

显然, 某点的电位在数值上等于某点与参考点之间的电压。

电位和电压具有相同的量纲, 其单位是伏特(Volt, 简写V)。还可用于千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)表示, 它们之间的关系是:

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; \quad 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}; \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

如同电流一样, 在计算电路时, 也要首先选定电压的参考方向。参考方向可用箭头表示,

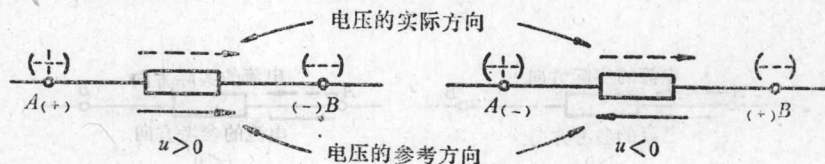


图1—5 电压的参考方向与实际方向

也可用双下标表示,也可用极性“+”、“-”表示,“+”表示高电位,“-”表示低电位。三种方法通常不同时使用,本书一般情况下采用极性表示法。参考方向(极性)选定后,电压也是一代数量。若计算电路求得 $u > 0$,表示实际极性与参考极性一致, $u < 0$ 则表示相反,如图1—5所示。

三、 电动势及其参考方向

电源两端具有电位差(电压)。电源的电位差是由外力(如化学力、电磁力等)引起的,使得电源具有把正电荷从低电位端(负端)推向高电位端(正端)的能力。外力在这过程中所做的功与正电荷的比值,定义为电源的电动势(electromotive force简称为emf),用 e 或 $e(t)$ 表示,直流电源的电动势则用 E 表示。电源电动势的实际方向从负端指向正端,故有时称其为电位升(potential rise)。图1—6中标注有电源电动势及其端电压的方向和极性。图中 e 与 u 的箭头方向相反,但由于这两个物理量的含义不同(电位升与电位降),所以实际上都说明同一客观事实,即: A点的电位比B点高,从而有

$$e = u$$

若指定 u' 及虚线箭头(与 e 同向,如图所示)为端电压参考方向,则有

$$e = -u'$$

当讨论电感元件中感应电动势与端电压关系时,就要注意上述问题。

电动势具有与电压相同的量纲。

对于电流和电压的参考方向,还有以下几点需加以说明:

(1) 电流和电压的参考方向可任意指定。但一经指定,在电路的分析和计算过程中,则不应改变。如可能判别实际方向,则尽量选择参考方向与实际方向一致。

(2) 引入了电流和电压的参考方向后,电流和电压便可函数来表示。如图1—7中,电流按正弦规律随时间变化,则可表示成 $i(t) = I_m \sin \omega t$,这样,函数的值就确定地描述了参考方向下的电流的大小和方向。

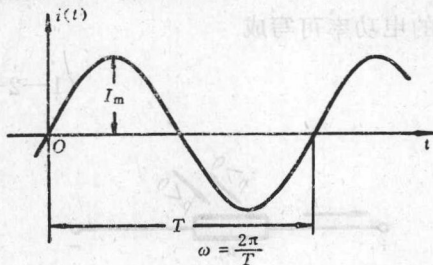


图1—7 正弦电流

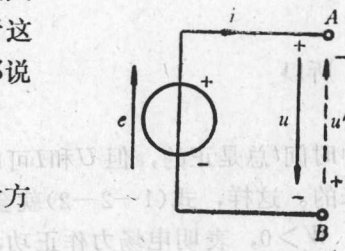


图1—6 电源电动势极性与端电压极性的关系

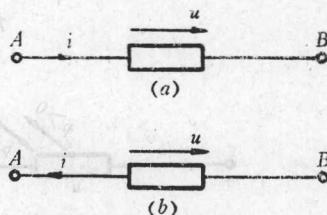


图1—8 关联方向与非关联方向

(3) 一般地讲,同一段电路的电流和电压的参考方向可以各自任意假定。这样,二者的参考方向可能有两种情形:一种如图1—8(a)所示,为一致的参考方向,即电流从“+”极流向“-”极,称为关联参考方向;另一种如图1—8(b)所示,为不一致的参考方向,电流从“-”极流向“+”极,称为非关联参考方向。研究电路时,为方便起见,我们往往取关联参考方向,且

约定：电路图上可只标出两者中的任一个参考方向，另一个参考方向省略；同样，如果电路图的某一段电路上只标出电流(或电压)参考方向时，我们将理解为是选定了关联参考方向。

四、电功率

正电荷从电路元件的电压“+”极，经过元件移到电压的“-”极，是电场力对电荷做功的结果，这时元件吸取能量。相反地，正电荷从电路元件的电压“-”极经元件移到电压“+”极，元件向外释放能量。

由式(1—2—1)可得电场力作的功为

$$W = qU$$

而

$$q = It$$

所以

$$W = UIt \quad (1-2-2)$$

式中时间 t 总是正的，但 U 和 I 可以是正值，也可以是负值，因为它们都是根据参考方向计算出来的。这样，式(1—2—2)就会出现两种情况，即 $W > 0$ 及 $W < 0$ 。当 U 和 I 取关联参考方向时， $W > 0$ ，表明电场力作正功，使电场能量减少，这减少的能量被正电荷移动的这段电路(或元件)所吸收；反之，当 U 、 I 为非关联方向时， $W < 0$ 表明电场力作负功，实际是非电场力作正功，使电场能量增加，亦即该电路(或元件)产生电能。

单位时间内吸收(或产生)的电能量，称为电功率(power)，简称功率。若是直流电路，则由(1—2—2)式可得功率

$$P = \frac{W}{t} = UI$$

当电压单位为伏特(V)、电流单位为安培(A)时，功率单位为瓦特(Watt，简写W)，简称瓦。其辅助单位有千瓦(kW)、毫瓦(mW)，

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

与电场能量计算中出现正负值相仿，电功率在计算中也有正或负。若一段电路的电压、电流取关联参考方向，如图1—9(a)，元件吸收的电功率可写成

$$p = ui$$

$$(1-2-3)$$

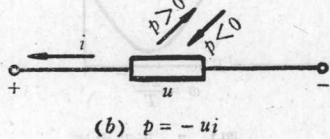
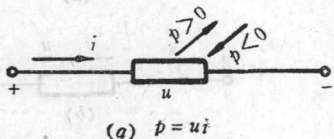


图1—9 功率表示

当计算得 $p > 0$ 时，说明该段电路(或元件)确实吸收能量(或说消耗能量)；当计算得 $p < 0$ 时，说明这段电路(或元件)实际上是释放能量(或说提供能量)。

若一段电路的电压、电流取非关联参考方向，如图1—9(b)，此时元件吸收的电功率应

写成

$$p = -ui$$

这样计算得 $p > 0$ 时,也恰好是正电荷从电路元件的电压“+”极到电压“-”极,电路元件吸收能量; $p < 0$ 时,电路元件释放能量。

由此可见,对于电路中的某元件或某条支路,我们都可用公式(1—2—3)或(1—2—4)求出功率,然后以功率的正负来判断元件或支路在电路中的作用($p > 0$,吸收能量,起负载作用; $p < 0$,释放能量,起电源作用)。

例1—2—1 在图1—10所示的元件1和元件2中, $I_1 = I_2 = 2\text{mA}$,电压的大小及参考极性如图中所标,试求元件产生的功率或吸收的功率。

解: (1) 图(a)中,电流、电压为关联参考方向,由式(1—2—3)得

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 2 \times 10^{-3} = 2(\text{mW}) > 0$$

元件1吸收功率2mW

(2) 图(b)中,电流、电压为非关联参考方向,由式(1—2—4)得

$$P_2 = -U_2 I_2 = -(-1) \times 2 \times 10^{-3} = 2(\text{mW}) > 0$$

元件吸收功率2mW。

例1—2—2 如图1—11电路段,已知 $u = e^{-10t}\text{V}$, $i = \sin 500t\text{A}$,求功率 p 。

解: 因 u 、 i 参考方向一致,故有

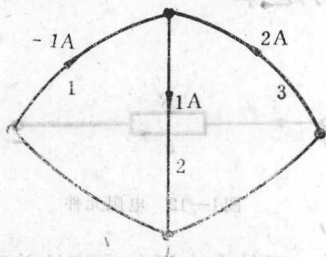
$$p = ui = e^{-10t} \sin 500t (\text{W})$$

可以看出, p 值有时为正,有时为负,故该段电路有时吸收功率,有时提供功率。

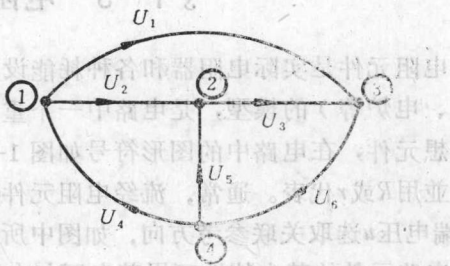
思考与练习

1—2—1 在一段电路中,标定电流的参考方向又标定电流的正负值,说明什么?

1—2—2 图中所示为某电路的线图(即联接方式与原电路模型一样,但抽去其元件的具体内容),试在已标出电流参考方向的线段上指明电流实际方向。



题1—2—2图

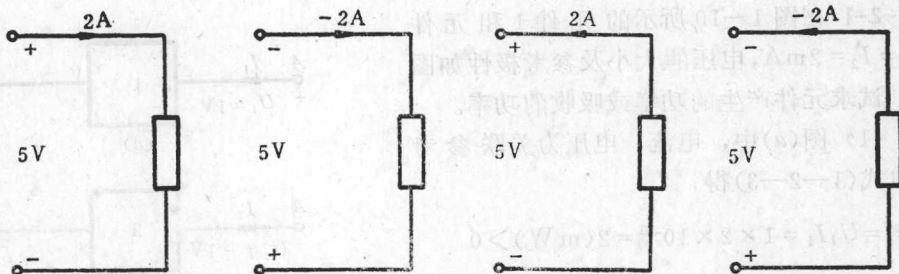


题1—2—3图

1—2—3 题图为某电网的线图，箭头所指为各段的电压参考方向，当 $U_1 = -10\text{V}$ ， $U_2 = 2\text{V}$ ， $U_3 = -3\text{V}$ ， $U_4 = -1\text{V}$ ， $U_5 = -8\text{V}$ ， $U_6 = 11\text{V}$ 时，试标明各段电压实际方向。若各支路电流、电压为非关联参考方向，当 $I_1 = 1\text{A}$ ， $I_2 = 5\text{A}$ ， $I_3 = -2\text{A}$ ， $I_4 = -4\text{A}$ ， $I_5 = -7\text{A}$ ， $I_6 = -6\text{A}$ 时，试指出各支路电流实际方向。

1—2—4 电压和电位在概念上有哪些区别和联系？

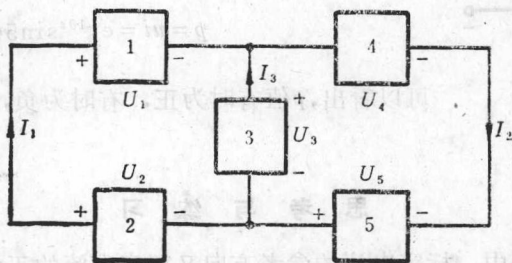
1—2—5 计算电路图中各元件的功率，并指出是吸收还是提供功率。



题1—2—5图

1—2—6 电路图中，方框代表电路元件。各电压、电流参考方向如图所示，且已知 $I_1 = 3\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_3 = -2\text{A}$ ， $U_1 = 5\text{V}$ ， $U_2 = 11\text{V}$ ， $U_3 = 6\text{V}$ ， $U_4 = -2\text{V}$ ， $U_5 = -8\text{V}$ 。

- (1) 若测量 I_1 、 I_2 和 U_3 、 U_4 值，电流表和电压表如何联接：（直流电表有“+”、“-”端）
- (2) 求各元件的功率，并说明是吸收还是提供功率？
- (3) 验证整个电路中吸收和提供的功率是否平衡？



题1—2—6图

§ 1—3 电阻元件 欧姆定律

电阻元件是实际电阻器和各种耗能设备（如电灯、电炉等）的模型，是电路中一个重要的二端理想元件，在电路中的图形符号如图 1—12 所示，并用 R 或 r 代表。通常，流经电阻元件的电流 i 和端电压 u 选取关联参考方向，如图中所标。

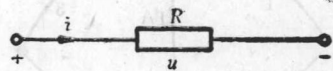


图1—12 电阻元件

电路元件的基本特性可用其电压与电流的关系来表示。元件上电压与电流的关系常简称为伏安关系，记作VCR(voltage current relation的缩写)。电阻元件的伏安关系可用 $u \sim i$

平面上的图形来表示,称为元件的伏安特性曲线,简称伏安特性(volt-ampere characteristic)。图1—13就是电阻元件的伏安特性。其中图(a)的伏安特性曲线是通过坐标原点的

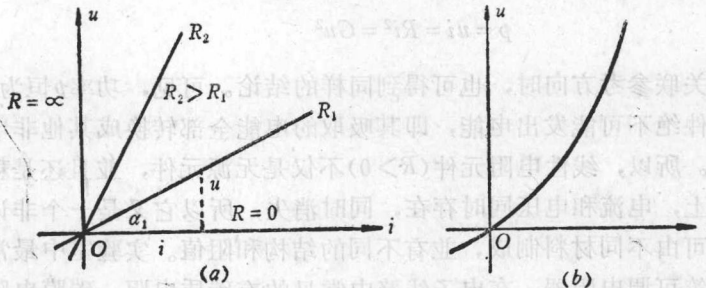


图1-13 电阻元件的伏安特性

直线,我们称此元件为线性电阻元件(linear resistance);图(b)的伏安特性曲线是一条曲线,我们称此元件为非线性电阻元件(nonlinear resistance)。有关非线性电阻元件,我们将在第十章中介绍。

线性电阻元件的伏安关系,在图1—12的关联参考方向时,可写成

$$u = Ri \quad (1-3-1)$$

式(1—3—1)即为我们熟知的欧姆定律(Ohm's law)。也可写成

$$R = \frac{u}{i}$$

R 为元件的电阻值,当 u 的单位为伏特、 i 的单位为安培时, R 的单位为欧姆(Ohm, Ω), $1 \Omega = \frac{1V}{1A}$ 。电阻还可用于千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$)表示,

$$1k\Omega = 10^3\Omega, \quad 1M\Omega = 10^6\Omega$$

在图1—13(a)中,电阻值由

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha$$

来确定,其中 m_u 、 m_i 分别为电压和电流在 $u \sim i$ 平面坐标上的比例尺, α 乃伏安特性直线与电流轴之间的夹角。可见,线性电阻元件的电阻 R 是一个与电压 u 、电流 i 无关的常数。电阻值越大,直线的斜率也越大。

电阻元件也可用电导(conductance)来表示它的参数。电导用 G 表示,等于电阻的倒数:

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

电导的单位为西门子(S)。这样,电阻元件的伏安关系也可写成

$$i = Gu \quad (1-3-2)$$

当电阻元件上电压和电流的参考方向相反时,其伏安关系应为

$$u = -Ri$$

$$i = -Gu$$

在电压与电流关联参考方向下,电阻元件吸取的功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

在电压、电流非关联参考方向时,也可得到同样的结论。可见,功率 p 恒为正值。这说明,任何时刻电阻元件绝不可能发出电能,即其吸取的电能全部转换成其他非电能量而被消耗掉或作为其他用途。所以,线性电阻元件($R > 0$)不仅是无源元件,而且还是耗能元件。

在电阻元件上,电流和电压同时存在,同时消失,所以它又是一个非记忆元件。

实际电阻器可由不同材料制成,並有不同的结构和阻值。实验室中最常见的有滑线电阻器、圆盘电阻器等可调电阻器。在电子线路中常见的有碳质电阻、碳膜电阻、金属膜电阻、金属氧化物电阻以及集成电路电阻等。这些元件的伏安特性曲线或多或少都是非线性的。但在一定的工作电流范围内,它们的伏安特性近似为一条直线,所以可以作为线性电阻元件来处理而得到令人满意的结果。

对任何一个实际电阻器或电气设备,使用时不得超过标明的额定功率(rated power)或额定电压或额定电流,否则会由于发热而烧坏。由于功率和电压、电流有一定关系,一般不给出功率、电压、电流等全部额定值。例如灯泡只标明额定电压和额定功率(如220V、40W),电阻器除标出电阻值外,另标明功率值(如1k Ω 、1W)等。

金属导线虽不是元件或电气设备,但本身也有电阻,通过电流时也要发热。电流超过允许值会因过热而损坏导线的绝缘保护层,甚至烧坏导线。选用导线应根据通过的电流(也称载流量),查阅《电工手册》中的有关导线使用规范,选取相应的导线型号和截面。

例1—3—1 30 Ω 的电阻,通过的电流为0.8A,求电阻两端电压,並计算其吸收的功率。

解: 电压

$$U = RI = 30 \times 0.8 = 24(\text{V})$$

功率

$$P = RI^2 = 30 \times 0.8^2 = 19.2(\text{W})$$

例1—3—2 一家用电器上标明的电功率为2500W,电流为5A,求该家用电器在额定工作状态下的电阻值。

解: 电阻

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{2500}{5^2} = 100(\Omega)$$

思考与练习

1—3—1 1W、200 Ω 的电阻器是否可以直接接在220V的电压上?

1—3—2 40W、220V和100W、220V的两个白炽灯泡,哪个电阻大?为什么?

1—3—3 一个51 Ω 、 $\frac{1}{4}$ W的电阻器,使用时允许加在两端的最大电压是多少?允许通过的最大电流又是多少?

1—3—4 有一个电阻为20 Ω 的电炉,接在220V的电源上,连续使用8小时,问它一共消耗了多少度电?(1千瓦小时为1度电)