

高等学校试用教材

电路分析原理

上册

吉三成 编

高等教育出版社

本书是为高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)各专业教学使用而编写的基本教材,内容和体系均遵循1980年6月教育部在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议所审订的《电路教学大纲》。

全书共计十章,分上、下两册出版。上册五章,即:电路模型和电路定律、电阻电路的分析、时域分析、正弦稳态分析、非正弦周期电流电路和信号的频谱。下册五章,即:复频域分析、网络定理和网络方程、二端口网络和多端元件、分布参数电路、非线性电路。

本书亦可供有关科技人员参考和校外人员自学。

本书责任编辑 刘秉仁

高等学校试用教材

电路分析原理

上册

吉三成 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京通县瓦子店印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 字数 265,000

1985年5月第1版 1985年5月第1次印刷

印数 00,001—9200

书号 15010·0614 定价 2.25 元

目 录

第一章 电路模型和电路定律	1
§ 1-1 电路、电路模型和电路元件.....	1
§ 1-2 集中参数电路,网络.....	4
§ 1-3 电流和电压及其参考方向.....	5
§ 1-4 电路中的功率和能量.....	10
§ 1-5 电阻元件电压与电流关系,电阻吸收的功率.....	11
§ 1-6 电容元件电荷与电压的关系.....	14
§ 1-7 电容元件电压与电流关系,电容的电场能量.....	15
§ 1-8 电感元件磁链与电流的关系.....	18
§ 1-9 电感元件电压与电流的关系,电感的磁场能量.....	19
§ 1-10 互感,互感磁链与电流的关系.....	22
§ 1-11 互感电压与电流的关系.....	23
§ 1-12 理想独立电压源和电流源及其发出的功率.....	28
§ 1-13 受控电源.....	31
§ 1-14 几种典型的波形.....	31
§ 1-15 基尔霍夫定律.....	39
§ 1-16 一段含源电阻电路的电压电流关系.....	41
习题.....	46
第二章 电阻电路的分析	51
§ 2-1 简单电阻电路的计算.....	51
§ 2-2 等效电阻的概念和计算.....	57
§ 2-3 星形联接电阻与三角形联接电阻的等效变换(Y- Δ 变换).....	63
§ 2-4 实际电源的电压源模型和电流源模型.....	66
§ 2-5 电压源模型与电流源模型的等效变换.....	69
§ 2-6 支路法.....	71
§ 2-7 回路法.....	75
§ 2-8 节点法.....	84

§ 2-9 叠加定理	94
§ 2-10 替代定理	98
§ 2-11 戴维南定理和诺顿定理	103
习题	113
第三章 时域分析	122
§ 3-1 电路的动态过程、初始状态和初始条件	123
§ 3-2 一阶 (RC) 电路的响应	130
一、 RC 电路的零状态响应	130
二、 RC 电路的零输入响应	139
三、 RC 电路的全响应	144
§ 3-3 一阶 (RL) 电路的响应	147
一、 RL 电路的零状态响应	147
二、 RL 电路的零输入响应	155
三、 RL 电路的全响应	158
§ 3-4 RC 电路和 RL 电路的冲激响应	160
§ 3-5 二阶 (RLC) 电路的零输入响应	168
§ 3-6 二阶 (RLC) 电路的冲激响应	176
习题	181
第四章 正弦稳态分析	187
§ 4-1 正弦量的基本概念	187
§ 4-2 正弦量的相量表示, 相量法	195
§ 4-3 电阻、电感、电容元件的电压电流关系的相量形式	203
§ 4-4 基尔霍夫定律的相量形式	211
§ 4-5 RLC 串联电路电压电流关系的相量形式, 复阻抗	214
§ 4-6 RLC 并联电路电压电流关系的相量形式, 复导纳	219
§ 4-7 复阻抗与复导纳的相互换算	224
§ 4-8 正弦电流电路中的功率	228
§ 4-9 正弦电流电路的计算	233
* § 4-10 最大功率传输定理	245
§ 4-11 串联谐振电路及其频率特性	248
§ 4-12 并联谐振电路及其频率特性	256
§ 4-13 具有互感的电路计算	262

§ 4-14 理想变压器	269
§ 4-15 变压器的电路模型	274
§ 4-16 三相电路, 对称三相电压源	280
§ 4-17 对称三相电路的计算	283
§ 4-18 不对称三相电路的概念, 对称三相电压的相序	290
§ 4-19 三相电路中的功率及其测量	294
习题	299
第五章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	306
§ 5-1 非正弦周期波的傅里叶级数, 谐波分析	306
§ 5-2 非正弦周期电流电路的计算	314
§ 5-3 非正弦周期电流的有效值	318
§ 5-4 非正弦周期电流电路的功率	321
§ 5-5 傅里叶级数的指数形式, 周期信号的频谱	324
§ 5-6 傅里叶变换, 非周期性信号的频谱	330
习题	335
习题答案	338

第一章 电路模型和电路定律

电路分析是研究电路的分析方法，探讨电路的基本性质和规律。在作分析时，电路总是由其模型表达。因此，什么是电路模型，就是一个首先需要解决的问题。此外，有各种类型的电路，它们都遵守着某些共同的规律，这就是电路定律。这些定律既是电路分析的重要内容，也是阐述电路分析广泛内容的依据。因此，研究电路，也需要先介绍电路定律。本章讨论电路模型和电路定律。

§ 1-1 电路、电路模型和电路元件

凡属电路都有一个物理实体，称为电路实体。图 1-1 所示是一日光灯的电路实体，其中， L 是镇流器，它是一个铁心线圈； R 是日光灯管，日光灯管实际上相当于一个电阻器； C 是电容器； S 是起辉器； K 是开关；另外，还有 220 伏的交流电源，以及连接导线等等。另外，当我们打开收音机或电视机的机壳，就会看见它们的电

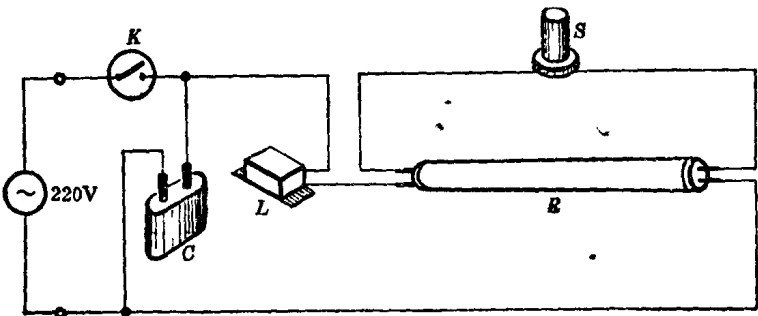


图 1-1

路实体,其中,有半导体二极管、三极管、各种各样的电阻器、干电池、电容器和变压器,可能还有电子管以及其它许许多多的电气器件。诸如这些能够看得见、摸得着的电气器件,都称为实际电路元件。

任何一个电路实体,都是由实际电路元件按照一定方式连接而成。为了便于对电路进行分析和用数学描述,就需要建立实际电路的模型。电路模型是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。电路模型是由一些理想的电路元件所组成。理想电路元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件和独立电源元件等。这些元件分别由其相应的参数来表征。电阻元件的参数是电阻元件所具有的电阻,用 R 表示。电阻元件常用图 1-2(a) 所示符号代表。电感元件的参数是电感元件所具有的电感,用 L 表示。电感元件常用图 1-2(b) 所示符号代表。电容元件的参数是电容元件所具有的电容,用 C 表示。电容元件常用图 1-2(c) 所示符号代表。独立电源元件又分电压源元件和电流源元件。电压源元件的参数是电压源元件所具有的电压,用 u 表示。电流源元件的参数是电流源元件所具有的电流,用 i 表示。图 1-2(d) 和(e) 所示分别为电压源元件和电流源元件的代表符号,由于二者都是电源,所以使用了相同的符号,只是由旁边所标的 u 和 i 加以区别。

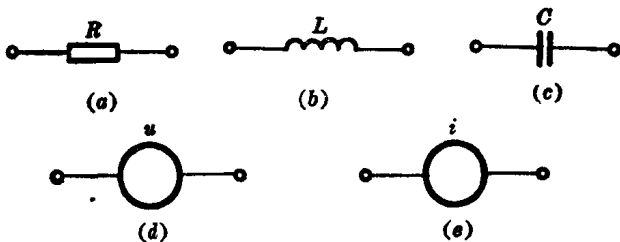


图 1-2

应当指出,同一实际电路,在不同的条件下,有不同的模型。例

如,由一电感线圈构成的电路,在理想的条件下,它的模型是一电感元件;但在频率不甚高的交流条件下,它的模型则是由一电阻元件和一电感元件相串联构成,如图 1-3(a)所示;在频率甚高时,则其模型是由电阻元件与电感元件相串联,再并联一电容元件所构成,如图 1-3(b)所示。

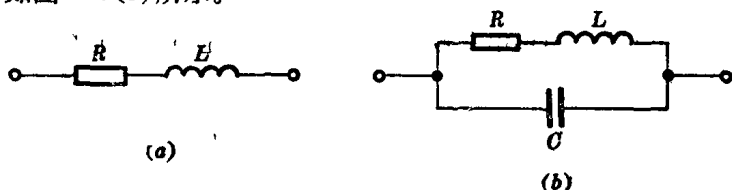


图 1-3

还应当指出,同一实际电路,由于研究时所要求的精度不同,也有不同的模型。例如,由一实际电容器构成的电路,若要求精度不高,可用一电容元件作模型;若要求精度较高,则其模型须由一电容元件和一电阻元件相并联所构成,如图 1-4 所示。

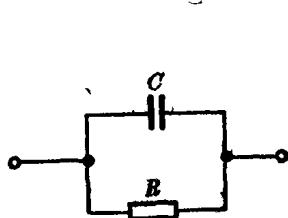


图 1-4

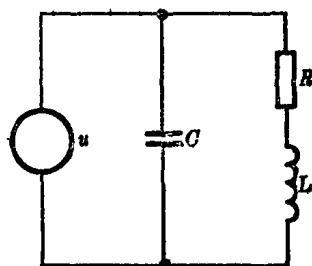


图 1-5

图 1-5 所示是图 1-1 所示日光灯电路实体的电路模型,由一电阻元件、一电感元件、一电容元件和一电压源元件所构成。构成电路模型的元件,除了上述电阻、电感、电容和独立电源等元件之外,还有理想变压器、回转器及受控电源等。这些元件在后边都要讲到。电阻、电感、电容和独立电源等元件,因只具有两个端子,常称为二端元件。而理想变压器、回转器和受控电源等,由于具有四个端子,则称为四端元件。实际的电路,尽管千差万别,类型各

异，但往往都可以用上面提到的元件构成其电路模型。

§ 1-2 集中参数电路，网络

若一电路实际元件，允许用上节所述电阻、电感和电容等参数中的一个或几个来表征时，则称为集中参数元件。由集中参数元件构成的电路，叫集中参数电路；例如，上面提到的日光灯电路便是一集中参数电路。

电路元件又分线性元件与非线性元件。电阻、电感和电容元件的参数 R 、 L 和 C 的值，称为元件的参数值。元件参数值与元件电流和电压无关的元件，称为线性元件。否则，称为非线性元件。如果集中参数电路的各个元件或是线性的，或是独立电源，则此电路叫线性电路。含有一个或多个非独立电源的非线性元件的电路叫非线性电路。线性元件又分线性时不变元件和线性时变元件。前者是指元件的参数值与时间无关；后者是指元件的参数值随时间而改变。如果集中参数的各个元件或是时不变线性的，或是独立电源，则此电路叫集中常参数电路。含有一个或多个非独立电源的时变线性元件的电路，叫集中变参数电路。

本书一至八章研究集中常参数电路。第九章研究分布参数电路。第十章研究非线性电路。

复杂的集中参数电路，习惯上称为网络。换句话说，网络是含有许多元件的电路。网络一词和电路一词并无严格的区别，常常混用。一般地说，网络有复杂之意，电路有普遍之意；因为，不

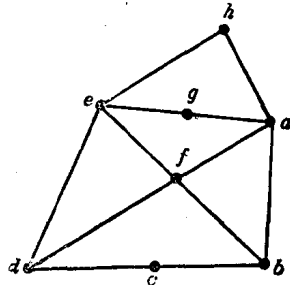


图 1-6

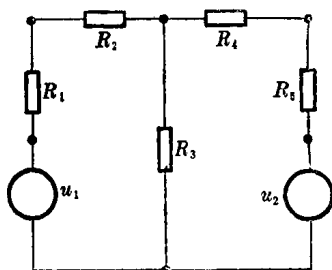
论是简单电路还是复杂电路，统统都是电路。设有一电路是由许多二端元件构成，每一元件不管其性质如何，均用一两头标有圆点的

几何线段表示, 这样, 在我们的想象之中, 便可得到一个如图 1-6 所示的几何图形。该图形类似蛛网或鱼网, 但表示的是一个电路, 所以称为电网络图。

为了便于今后的讨论, 这里介绍几个有关网络的名称。(1) 组成网络的每一二端元件, 叫做支路; 如图 1-6 中的 ab 、 bc 、……; 显然, 该网络共有 12 条支路。(2) 两条或两条以上支路的连接点, 称为节点; 例如, a 、 h 、……; 可以看出, 该网络共有 8 个节点。应当特别指出的是, 常常也把相互串联着的二端元件的组合称为支路; 例如, 元件 bc 和 cd 相串联, 因而 bd 为一条支路; 与此相应, 节点的定义也成为三条或三条以上支路的连接点。如此, 图 1-6 网络的支路数是 9, 而节点数是 5。(3) 从任一节点出发, 沿着某些支路循进, 最后回到原出发点, 且所经过的节点和支路都没有重复, 这样所经历的闭合路径叫回路。例如图中 $abfa$ 和 $abfeha$ 都是回路。对于平面电路^①而言, 若回路内部不能再分出其他回路, 则该回路称为网孔; 例如, 回路 $abfa$ 和 $bcdfb$ 都是网孔。显然, 这里共有 5 个网孔。

练习题

1-1 图示为一由理想电阻元件和理想电压源元件组成的电路, 试按照关于支路的两种不同规定, 确定其支路数、节点数、回路数和网孔数。



练 1-1 图

§ 1-3 电流和电压及其参考方向

一、电流及其参考方向

电路或网络在工作或运行的时候, 基本的物理实际之一是电

^① 平面电路是指可画在一个平面上而不会出现支路与支路相交叠情况的电路。图 1-6 所示的电路, 就是平面电路。

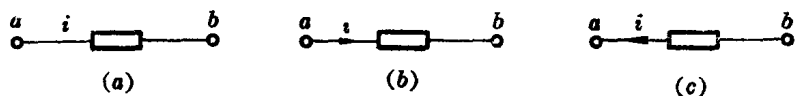


图 1-7

路中存在着电流。电荷的定向运动即形成电流。设图 1-7(a) 所示为某电路的一段电路^①。若电荷从 a 端流向 b 端或由 b 端流向 a 端, 则我们说该段电路中有电流。电流是个概念, 习惯上是指正电荷的流动; 这个正电荷流也包括沿相反方向流动的负电荷流所等效成的正电荷流。例如, 由 b 端流向 a 端的负电荷流可等效为由 a 端流向 b 端的正电荷流。

电流的大小用电流强度表示。电流强度在数值上等于单位时间内穿过电路段任一截面的电荷量。对于图 1-7(a) 所示的电路段, 若在时间 Δt 内, 由 a 端向 b 端流过任一截面的正电荷量为 Δq , 则电流强度为

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \text{或} \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

这里, t 的单位为秒(s), q 的单位是库(C), i 的单位是安培, 简称为安(A), 这是属于国际单位制。电流的辅助单位有毫安(mA), 微安(μA)和纳安(nA)。它们的关系是:

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A} \quad 1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$$

如上所述, 电流强度和电流二者在概念上是有区别的, 但在习惯上, 常常将电流强度亦称做电流。电流的实际方向是这样规定的: 在图 1-7(a) 中, 若正电荷流的方向是由 a 端指向 b 端, 则电流的实际方向是由 a 端指向 b 端。若正电荷不是由 a 端流向 b 端, 而是由 b 端流向 a 端, 则电流的实际方向是由 b 端指向 a 端。

研究电路时, 为了便于描述电路的规律和分析计算, 常常需要

^① 本书规定: 任意一段电路(两个端)的符号图与理想电阻元件的符号图相同, 但旁边不标注 R 。

指定电流的参考方向，用带箭头的短线表示。电流的参考方向可以任意指定，而不必考虑其实际方向。例如，上述图 1-7(a) 电路段，其电流的参考方向可指定为由 a 到 b ，如图 1-7(b) 所示；也可指定为由 b 到 a ，如图 1-7(c) 所示。参考方向指定之后，若实际方向与参考方向相同，则电流值记为正；反之，则记为负。例如设上述电路段实际电流由 a 端流向 b 端，且大小为 3A ，若选用图 1-7(b) 中参考方向，则 $i=3\text{A}$ ；若选用图 1-7(c) 中参考方向，则 $i=-3\text{A}$ 。

二、电压及其参考方向

电流是电荷的定向移动。电荷在移动过程中发生着能量的交换。在一些情况下，电荷会获得能量，在另一些情况下，电荷会失去能量。单位正电荷由电路的一点移动至另一点的过程中能量变化量的绝对值，称为该两点间的电压。在图 1-8(a) 所示电路段中，设电荷 dq 由 a 端移至 b 端，获得(或失去)的能量为 dW ，则两点间的电压为

$$u = \frac{dW}{dq}$$

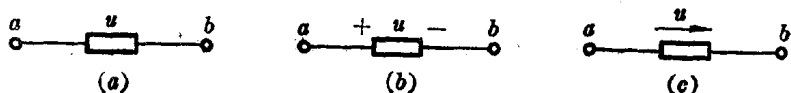


图 1-8 电压的参考方向

电压的常用单位为伏(V)，1伏(V)表示1库(C)的电荷量经过电路段时，获得(或失去)的能量为1焦耳(J)。电压的辅助单位有毫伏(mV)、微伏(μV)和千伏(kV)等。它们的关系是：

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

电压也规定有方向；也有参考方向和实际方向之分。首先说明电压的实际方向，以图 1-8(a) 电路段为例，设正电荷由 a 端移向 b 端，若获得能量，则 b 点电位高于 a 点；若失去能量，则 a 点电

位高于 b 点。电压的实际方向是由高电位点指向低电位点,也可以说成是正电荷流经电路段时失去能量的方向。电压的参考方向可任意指定: 可以由 a 至 b , 也可以是由 b 至 a 。参考方向选定之后, 若已知电压的实际方向与参考方向一致, 则电压值记为正, 否则, 电压值记为负。

在电路的分析和计算中, 为了便于讨论, 常常需要标出电压的参考方向。有两种标法: 一种是由 (+)、(-) 极性表示, 叫参考极性, 如图 1-8(b) 中所示; 一种是用带箭头的短线表示, 如图 1-8(c) 中所示。

关于电流和电压的参考方向, 还有以下几点需要说明:

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。

2. 电流或电压的时间函数与其参考方向之间有着相应的联系。若在某一时刻, 由电流函数或电压函数所确定的值为正, 则表示在该时刻, 电流或电压的实际方向与参考方向一致。反之, 若由函数所确定的值为负, 则表示在该时刻, 实际方向与参考方向相反。

3. 一般地讲, 同一段电路的电流和电压的参考方向可以各指定各的, 不必强求一致。因此, 二者的参考方向可能有四种组合: 其中两种组合如图 1-9(a) 所示, 叫做一致的参考方向; 另两种组

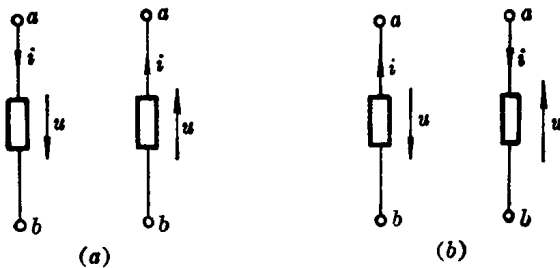


图 1-9

合,如图 1-9(b)所示,叫做不一致的参考方向。研究电路时,为了准确地描述元件或一段电路的特性,电流和电压二者的参考方向往往需要关联地指定,称为关联参考方向。关联参考方向有时采用一致的方向,有时采用不一致的方向,视需要而定。

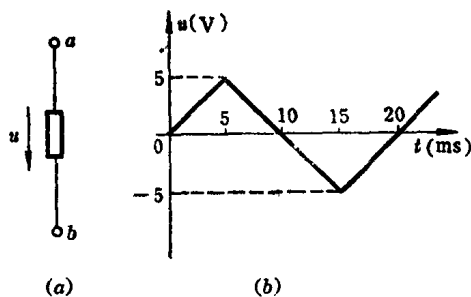
例 1-1 在图 1-7(b)中,已知由 a 至 b 流经电路段任一截面电荷量的时间函数为: (1) $q=8t$ C; (2) $q=10e^{-10t}$ C。求电流 i , 并指出它的实际方向。

解: (1) 由指定参考方向, 可得 $i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(8t) = 8$ A, 电流值为正, 说明实际方向与参考方向一致。

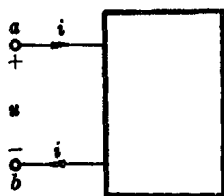
(2) $i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(10e^{-10t}) = -100e^{-10t}$ A。电流值总为负, 说明实际方向与参考方向总相反。

练习题

1-2 在图(a)所示电路段中,电压的参考方向如图所示。已知电压的波形如图(b)所示。试求: t 等于 2、8 和 13 ms 时电压的值, 并指出其实际方向。



练 1-2 图



练 1-3 图

1-3 由 a 端流入或由 b 端流出图示电路段的电荷量为

$$q(t) = 100e^{-t} \sin \frac{\pi}{4} t \text{ C}$$

试分别求 $t=0$ 、2 和 3 s 时电流 i 的值, 并指出其实际方向。

$$[25\pi \text{ A}, -13.5 \text{ A}, -6.3 \text{ A}]$$

§ 1-4 电路中的功率和能量

象电流和电压一样，功率也是电路的基本物理量之一。能量是功率的时间积分。本节一般性地讨论电路的功率和能量，并研究如何进行计算。

图 1-10 所示 ab 电路段，电流和电压的参考方向选取一致，则在 dt 时间内通过电路段的电荷量为

$$dq = i dt \quad (1-2)$$

同时由 u 的定义，可得电荷 dq 由 a 端移到 b 端时失去的能量为

$$dW = u \cdot i \cdot dt \quad (1-3)$$

此能量为电路段所吸收，吸收的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = u \cdot i$$

或
$$p = u i \quad (1-4)$$

这说明，当电流、电压的关联参考方向为一致的方向时，电路段吸收的功率等于 u 与 i 二者的乘积。

计算功率时，若 p 值为正，表明电路段真正得到能量；若 p 值为负，表明电路段实际放出能量。

当 u 和 i 的单位为伏和安时， p 的单位为瓦(W)。功率的辅助单位有毫瓦(mW)和千瓦(kW)等，它们的关系是

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

能量是功率的时间积分，因此，在由 0 至 t 时间内电路段吸收的能量，应由下式计算：

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt$$

当功率 p 的单位为瓦时，能量 W 的单位为焦耳。



图 1-10

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

解: 因 u 和 i 参考方向一致, 于是得

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

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, 有时放出功率。

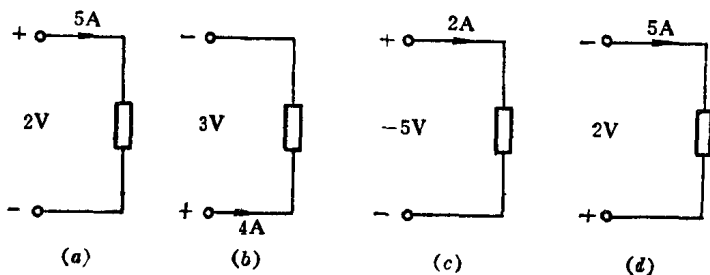
思考题

如果上例电路段的电流、电压的参考方向不一致, (1) 电路段吸收功率的表达式应如何写? (2) 若明确提出要计算电路段的发出功率, 那么功率的表达式应如何写?

练习题

1-4 计算下图各电路段吸收的功率。

[10 W, 12 W, -10 W, -10 W]



练 1-4 图

§ 1-5 电阻元件电压与电流关系, 电阻吸收的功率

电路由元件连接而成。欲研究电路, 了解其规律, 首先得研究元件, 了解其性能。从本节起, 我们将逐个地研究一些基本元件的性能。元件的性能主要表现在其电流与电压的关系上。本节研究电阻元件的电流与电压关系。

以电流 i 为横坐标, 电压 u 为纵坐标, 作一平面, 叫做 $u-i$ 平

面。一般地讲,若元件的电压与电流关系表现为 $u-i$ 平面上的一条曲线,则该元件称为电阻元件,如图 1-11(a)和(b)所示。以图(b)而论,该电阻元件的 u, i 关系为过原点的一直线,称为线性电阻。当 u, i 二者的关联参考方向取为一致,如图 1-12 中所示,则 u, i 之间的关系可由下式表示,即

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} u &= Ri \\ i &= \frac{u}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

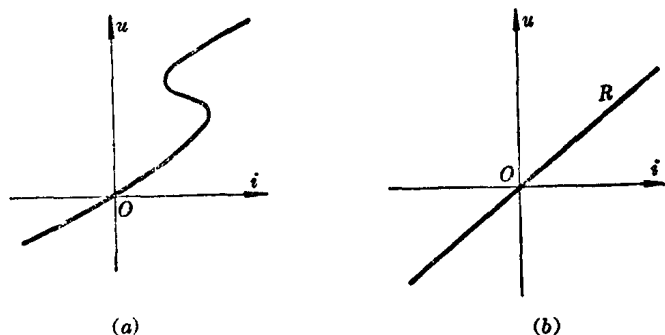


图 1-11

R 为直线的斜率,其值为正,是电阻元件的电阻; u 正时, i 亦正, u 负时, i 亦负。

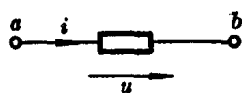


图 1-12

若令 $G = \frac{1}{R}$, G 称为电阻元件的电导,则式(1-5)可写为

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} i &= Gu \\ u &= \frac{i}{G} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

当 u 的单位为伏(V)、 i 的单位为安(A)时, R 的单位为欧(Ω), G 的单位为西(S)。式(1-5)或式(1-6)称为线性电阻元件的性能方程。

若电阻元件的电压、电流关系曲线随时间而改变,则称为时变电阻元件。