

高等学校教材

电 路

(修 订 本)

上 册

邱关源 主编

人民教育出版社

本书系《电路(电工原理 I)》的修订本。本书的内容基本上符合教育部电工教材编审委员会于1980年6月审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)各专业试用的《电路教学大纲(草案)》,并经工科电工教材编审委员会电路理论及信号分析编审小组审查通过。

全书共十四章和一个附录,分上、下两册出版。上册共包括八章,即:电路模型和电路定律,电阻电路,一阶电路和二阶电路,正弦电流电路和相量法,具有互感的电路,电路中的谐振,三相电路,非正弦周期电流电路和信号的频谱。下册共包括六章及附录,即拉普拉斯变换,网络图论和网络方程,二端口网络,多端元件,非线性电路,网络的计算机辅助分析简介,均匀传输线(附录)。每章及附录均附有习题,书末有习题答案。

责任编辑 陶思雨

高等学校教材

电 路

(修订本)

上 册

邱关源 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.375 字数 280,000

1978年5月第1版 1982年6月第2版 1983年2月第1次印刷

印数 404,001—446,000

书号 15012·054 定价 1.35 元

修订版序言

本书系《电路(电工原理I)》的修订本。修订本的内容及其次序的安排,基本上符合电工教材编审委员会于1980年6月审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)各专业试用的《电路教学大纲(草案)》。全书共有十四章和一个附录,分上、下两册出版。

与原版本对比,修订本加强和充实了基本的和传统的内容,并调整了原版本后半部分的一些内容。变动较大的地方有:(1)电路元件的介绍集中在第一章。(2)受控源的概念提到前面,因此各种分析和计算方法中均包括具有受控源的电路。(3)过渡过程(时域分析)放在第三章,在正弦电流电路稳态分析的前面。但是,只要稍作一些补充,把第三章移到后面(即仍按原版本的次序)讲授也是可行的。有关部分的写法考虑了这种可能性。(4)原版本的第三章(正弦电流电路的基本概念)不再单独作为一章,其中部分内容删去,部分内容放在本书的第一章,而其主要内容则结合在本书的第四章中。(5)原版本的第十五章(状态方程)删去,部分内容分别放在本书的第十章和第十三章。(6)原版本的第十三章(矩阵),十六章(计算方法),十八章(磁路和铁心线圈)均删去;计算方法的某些内容则移在本书的第十四章。(7)非线性电路的大部分内容经过重写。(8)增加了有关均匀传输线的内容,放在附录中。实质上这部分是本书的一章,主要供不设《电磁场》课程的专业选用,也供愿意在《电路》课程中讲授具有分布参数的电路的教师选用。(9)增加了有关计算机辅助分析内容的一章,但全章作为参考内容处理。

本书保留了原版本的部分内容和例题。习题则全部重选,数量上略有减少,但类型则稍有增加。使用本书的教师可以适当地自选一些习题作为补充。

书中排成小字的内容,包括标有星号(*)的整节,以及排成大字的第十四章都属加深加宽的内容,供参考用。在使用本书教学时,这些内容均可根据实际需要和可能而有所取舍。

参加本书修订工作的有:邱关源、范丽娟、刘国柱、江慰德和刘正兴。本书初稿承哈尔滨工业大学周长源、高象贤和刘润同志仔细审阅,并提出宝贵的修改意见,谨致以衷心的感谢。书稿并经高等学校电工教材编审委员会电路理论及信号分析编审小组审查通过。

本书虽然在原版本的基础上,根据各方面的读者提出的建设性意见作了一些改进,但缺点和错误之处在所难免,希望读者予以批评指出。意见请寄西安交通大学电工原理教研室。

编 者

1982 年

目 录

第一章 电路模型和电路定律	1
§ 1-1 电路和电路模型.....	1
§ 1-2 电流和电压的参考方向.....	4
§ 1-3 功率.....	6
§ 1-4 电阻元件.....	8
§ 1-5 电容元件.....	11
§ 1-6 电感元件.....	16
§ 1-7 几种典型的波形.....	21
§ 1-8 电压源和电流源.....	26
§ 1-9 受控源.....	30
§ 1-10 基尔霍夫定律.....	31
习题.....	38
第二章 电阻电路	43
§ 2-1 电阻的串联、并联和串并联.....	43
§ 2-2 电阻的Y形联接与 Δ 形联接的等效互换.....	49
§ 2-3 电压源、电流源的串联和并联.....	54
§ 2-4 电源的等效变换.....	56
§ 2-5 支路(电流)法.....	58
§ 2-6 回路法.....	64
§ 2-7 节点法.....	72
§ 2-8 叠加定理.....	80
§ 2-9 替代定理.....	89
§ 2-10 戴维南定理和诺顿定理.....	90
*§ 2-11 对偶原理.....	102
习题.....	104
第三章 一阶电路和二阶电路	113
§ 3-1 动态电路及其方程.....	113

§ 3-2	阶跃函数和冲激函数	115
§ 3-3	电路的初始条件	119
§ 3-4	一阶电路的零输入响应	124
§ 3-5	R 、 C 电路的零状态响应·阶跃响应	132
§ 3-6	R 、 L 电路的零状态响应	138
§ 3-7	一阶电路的冲激响应	144
§ 3-8	一阶电路的全响应	148
§ 3-9	二阶电路的零输入响应	153
*§ 3-10	二阶电路的冲激响应和阶跃响应	172
*§ 3-11	电容电压和电感电流的跃变	174
§ 3-12	结束语	180
	习题	182
第四章	正弦电流电路和相量法	189
§ 4-1	正弦量	189
§ 4-2	相量法的基本概念	196
§ 4-3	电阻、电感和电容中的正弦电流	206
§ 4-4	复阻抗	211
§ 4-5	复导纳	218
§ 4-6	复阻抗和复导纳的等效互换	222
§ 4-7	复阻抗(复导纳)的串联和并联	224
§ 4-8	正弦电流电路的功率	227
§ 4-9	复功率	236
§ 4-10	正弦电流电路的稳态计算	240
*§ 4-11	最大功率传输	247
	习题	249
第五章	具有互感的电路	257
§ 5-1	互感	257
§ 5-2	具有互感电路的计算	264
§ 5-3	空心变压器	273
§ 5-4	理想变压器	276
§ 5-5	变压器的电路模型	279
	习题	283

第六章 电路中的谐振	287
§ 6-1 串联电路的谐振.....	287
§ 6-2 串联谐振电路的谐振曲线和选择性.....	293
§ 6-3 并联电路的谐振.....	301
*§ 6-4 串并联电路的谐振.....	305
*§ 6-5 耦合回路的谐振.....	308
习题.....	310
第七章 三相电路	313
§ 7-1 三相电路.....	313
§ 7-2 对称三相电路的计算.....	319
§ 7-3 不对称三相电路的概念.....	325
§ 7-4 三相电路的功率.....	328
习题.....	332
第八章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	336
§ 8-1 非正弦周期电流.....	336
§ 8-2 周期函数分解为傅里叶级数.....	338
§ 8-3 傅里叶级数的指数形式.....	348
§ 8-4 傅里叶积分.....	355
§ 8-5 有效值、平均值和平均功率.....	359
§ 8-6 非正弦周期电流电路的计算.....	364
*§ 8-7 对称三相电路中的高次谐波.....	369
习题.....	373
习题答案	379

第一章 电路模型和电路定律

内 容 提 要

本章介绍电路模型和各种电路理想元件，其中包括电阻、电感、电容、独立电源和受控电源等基本概念，并介绍基尔霍夫两定律。

另外引进了电流、电压的参考方向的概念和几种典型的波形的定义与表示方法。

§ 1-1 电路和电路模型

实际电路是由电工设备和器件等组成的。在电路中，随着电流的通过，进行着从其他形式的能量转换成电能、电能的传输和分配、以及把电能转换成所需要的其他形式能量的过程。典型的例子是电力系统，发电厂的发电机把热能或原子能或水能等转换成电能，通过变压器、输电线等输送给各用电单位；那里又把电能转换成机械能、光能、热能等。这样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，而把用电设备称为负载。

电路的另一重要作用是信号的处理，通过电路把施加的信号（称为激励）变换或“加工”成为其他所需要的输出（称为响应）。举例来说，微弱的信号需要经过放大后才能满足工作的要求，象收音机或电视接收机在接收无线电信号时就是如此。因而有专为放大信号用的电路，称为放大器。在收音机或电视接收机中还有所谓调谐电路，其功能是从接收到的各个发射台发出的许多不同信号中专门选择出所需要的信号而排除其他信号。象放大器和调谐电

路的作用就是处理激励信号使之成为所要求的响应。

在其他许多场合,如自动控制设备、计算机、通讯设备等方面,有种类繁多、形形色色的各种电路。

在电路问题中是用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程的,例如各种信号就是用随时间变化的电压或电流来表示的。同时,把实际电路用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,它们以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,有的元件主要是消耗电能的,如各种电阻器、电灯、电炉等;有的元件主要是供给电能的,如电池和发电机;有的元件主要是储存磁场能量的,如各式各样的电感线圈;有的元件则主要是储存电场能量的,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。例如,我们用“电阻元件”这样一个具有两个端钮的理想电路元件来反映消耗电能的特征,当电流通过它时,在它内部进行着把电能转换成热能等不可逆过程。这样一来,所有的电阻器、电灯、电炉等实际电路元件,都可以用“电阻元件”来近似地代替。象干电池、蓄电池等直流电源则可以近似地用一个“电压源元件”来表征。

每一种理想电路元件都是一种数学模型,它们都有各自的精确定义。用抽象的理想元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一般均指这种抽象电路。

图 1-1 所示的一个简单的实际电路,其中有一个电源(干电池),一个负载(小灯泡)和两根联接导线;其电路模型将如图 1-2 所示,电阻元件 R 表示小灯泡,干电池则用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 来表示,而联接导线消耗电能很少,一般可以忽略不计,即认为

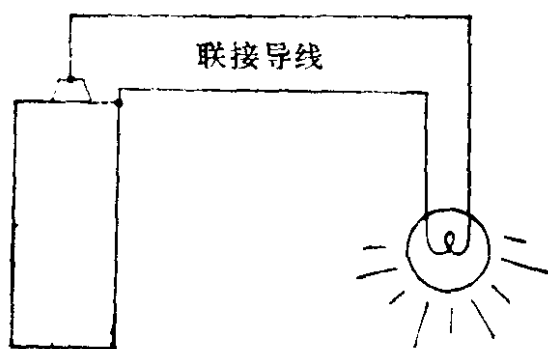


图 1-1 一个简单的实际电路

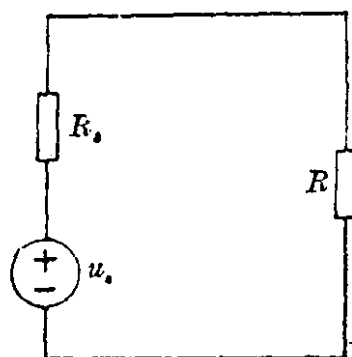


图 1-2 图 1-1 的电路模型

它们的电阻为零。

我们认为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,从具有两个端钮的理想元件的某一个端钮流入的电流将恒等于从另一端钮流出的电流,并且元件两个端钮间的电压值也是完全确定的。

凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件,简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总电路,或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。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。本书正文只考虑集总电路,分布电路(或叫具有分布参数的电路)将在电磁场课程中讨论^①。

本书的主要内容是电路分析。它探讨电路的基本定律和定理,并讨论电路的各种计算方法。前已指出,电路中的物理量主要有电流、电荷、电压和磁通。此外,能量和功率也很重要。无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过几种理想电路元件所构成的

^① 考虑到不设《电磁场》课程的各专业的需要,本书的附录中包括了分布电路的内容。

抽象电路充分地描述，分析和计算这种抽象电路的基本定律也只有几个。

§ 1-2 电流和电压的参考方向

电流在导线中或一个电路元件中流动的实际方向只有两种可能，见图 1-3。当有正电荷的净流量从 A 端流入并从 B 端流出时，

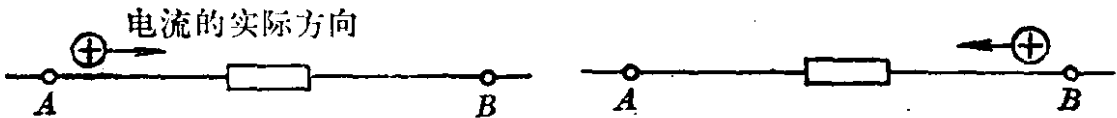


图 1-3 电流方向

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。电路分析中，有时对某一段电路中电流实际流动方向很难立即判断出来，有时电流的实际方向还在不断地改变，因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因，引入了电流“参考方向”的概念。

在图 1-4 中先选定其中某一个方向作为电流的方向，这个方向叫做电流的参考方向。当然所选的电流方向并不一定就是电流实际的方向。把电流看成代数量。若电流的参考方向与它的实际方向一致，则电流为正值($i > 0$)；反之，若电流的参考方向与它的实际方向相反，则电流为负值($i < 0$)，如图 1-4 所示。于是，在指定的电流参考方向下，电流值的正和负，就可以反映出电流的实际

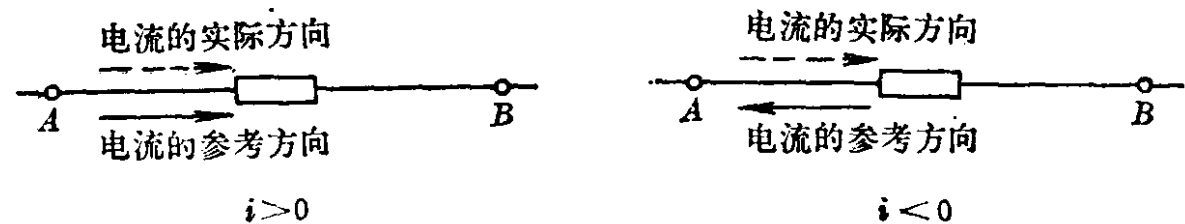


图 1-4 电流参考方向与它的实际方向间的关系

方向。

电流的参考方向是任意指定的, 在电路中一般用箭头表示。也有用双下标表示的, 如 i_{AB} , 其参考方向是由 A 指向 B 。

同理, 两点之间的电压的实际方向(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。同时, 把电压看成代数量。当电压的参考方向与它的实际方向一致时, 电压为正值($u > 0$); 反之, 当电压的参考方向与它的实际方向相反时, 电压为负值($u < 0$), 见图 1-5。

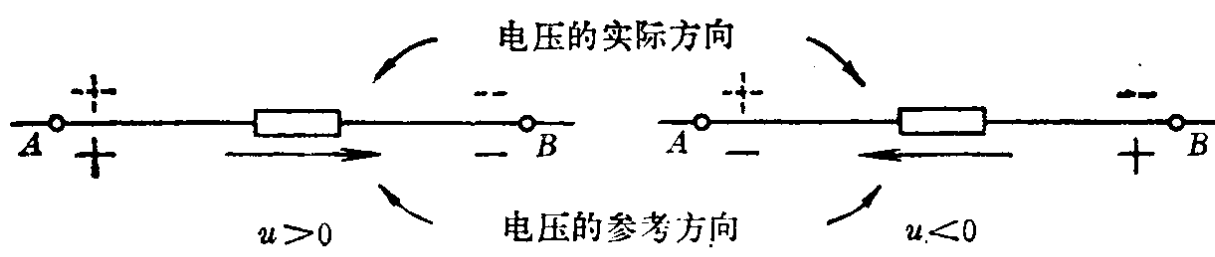


图 1-5 电压的参考方向与它的实际方向之间的关系

电压的参考方向也是任意指定的。在电路中, 电压的参考方向可以用一个箭头来表示, 也可以用正(+)、负(-)极性来表示, 正极指向负极的方向就是电压的参考方向(见图 1-5); 还可以用双下标表示, 如 u_{AB} 表示 A 和 B 之间的电压的参考方向由 A 指向 B 。

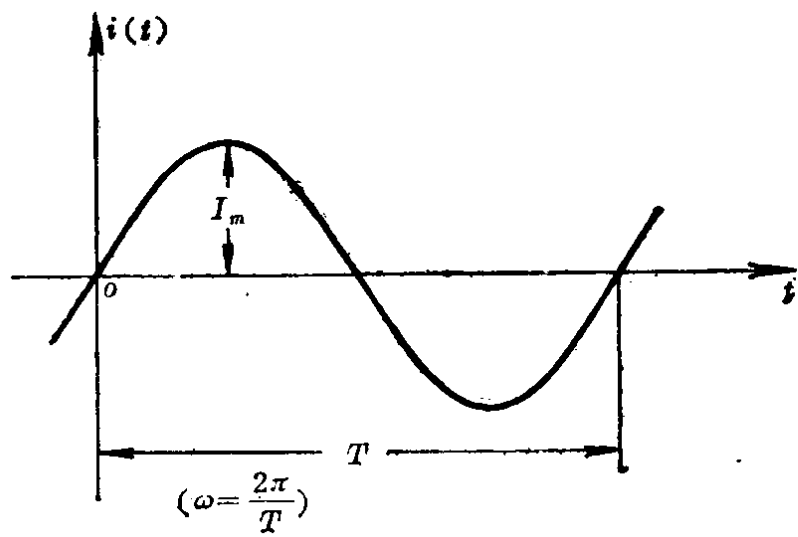


图 1-6 某正弦电流

引入了电流和电压的参考方向后, 电流和电压便可用函数来表示, 如图 1-6 中, 电流按正弦规律随时间变化, 则可表示成 $i(t) = I_m \sin \omega t$ 。对任何电路进行分析时都应先指定各处的电压和电流的参考方向。

“参考方向”在电路分析中起着十分重要的作用。

对一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地加以任意指定。如果指定电流从标以电压“+”极性的一端流入, 并从标以“-”极性的另一端流出, 即电流的参考方向与电压的参考方向一致, 则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向(图 1-7)。

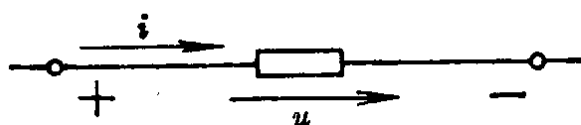


图 1-7 电压和电流的关联参考方向

今后, 在任何瞬间 t 的电流和电压将以 $i(t)$ 和 $u(t)$ 来表示, 且往往简写为 i 和 u 。

§ 1-3 功 率

正电荷从电路元件的电压“+”极, 经元件移到电压的“-”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。

从 t_0 到 t 的时间内, 元件吸收的电功 W 不难根据电压的定义(在量值上, A 、 B 两点间的电压等于电场力将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时所作的功)求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

在电压和电流的关联参考方向下, 由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

式中, u 和 i 都是时间的函数, 并且是代数量, 因此, 电能 W 也是时间的函数, 也是代数量。

电能量对时间的变化率就是电功率。在电工中, 电功率常常简称为功率。

在国际单位制(SI)中, 电流的单位是安培(A), 简称安; 电荷的单位是库仑(C), 简称库; 电压的单位是伏特(V), 简称伏; 能量的单位是焦耳(J), 简称焦; 而功率的单位是瓦特(W), 简称瓦。

在电压和电流的关联参考方向下, 电功率(用 p 表示)可写成

$$p(t) = u(t) i(t)$$

式中, p 是元件吸收的功率。当 $p > 0$ 时, 元件的确吸取电能; $p < 0$ 时, 元件实际上是释放电能, 图 1-8a 中 p 的箭头表示 p 是元件吸收的功率。

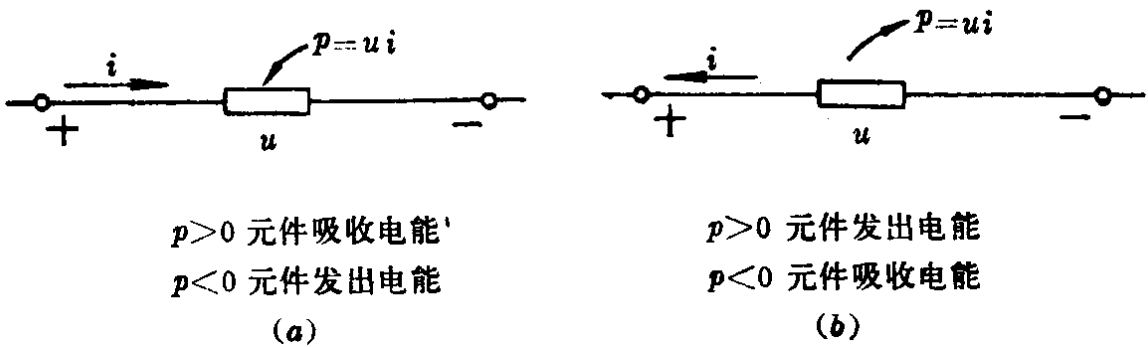


图 1-8 功率

如果电压的参考方向与电流的参考方向相反, 则 $p = ui$ 中的 p 代表元件发出的功率。这种情况下, $p > 0$, 元件发出电能; $p < 0$, 元件实际上是吸收电能。图 1-8b 中 p 的箭头表示 p 是元件发出的功率。

以上有关功率的讨论同样适用于任何一段电路, 而不局限于

一个元件。

这里，顺便说明一下有关辅助单位的问题。国际单位制中的一些单位，如安、伏、瓦等，在实际应用中，有时嫌小，如计量大容量发电机的电流和电力系统中高压设备的电压；有时又嫌太大，如计量电子线路中电流和线路中元件消耗的功率。所以，常在这些单位前加上词头，形成辅助单位，如

$$1 \text{ 微安} (\mu\text{A}) = 1 \times 10^{-6} \text{ 安} (\text{A})$$

$$2 \text{ 千伏} (\text{kV}) = 2 \times 10^3 \text{ 伏} (\text{V})$$

$$5 \text{ 吉瓦} (\text{GW}) = 5 \times 10^9 \text{ 瓦} (\text{W})$$

等等。

§ 1-4 电 阻 元 件

前已述及，在电路理论中，经过科学的抽象后，把实际元件用足以反映其主要电磁性质的一些理想元件替代。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。理想元件是通过端钮与外部相联接的，而根据理想元件端钮的个数是二个、三个、四个，可以分为二端、三端和四端元件等等。下面，我们讨论的无源二端理想元件有：线性电阻元件、线性电容元件和线性电感元件；有源的二端理想元件有：电压源和电流源。

线性电阻元件是这样的二端理想元件，在任何时刻，它两端的电压与其电流的关系服从欧姆定律。线性电阻元件在电路中的图形符号见图 1-9。

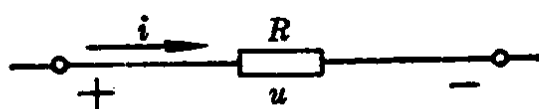


图 1-9 线性电阻

如果把电阻元件的电压取为纵坐标(或横坐标), 电流取为横坐标(或纵坐标), 画出电压和电流的关系曲线, 这条曲线称为该电阻元件的伏安特性。线性电阻元件的伏安特性是通过坐标原点的直线, 元件上电压与元件中电流成正比, 见图 1-10。

在电压和电流的关联方向下, 欧姆定律可表示成

$$u = Ri \tag{1-1}$$

式中 R 称为元件的电阻, 它是联系电阻上电压和电阻中电流的一个电气参数。电阻值由

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

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

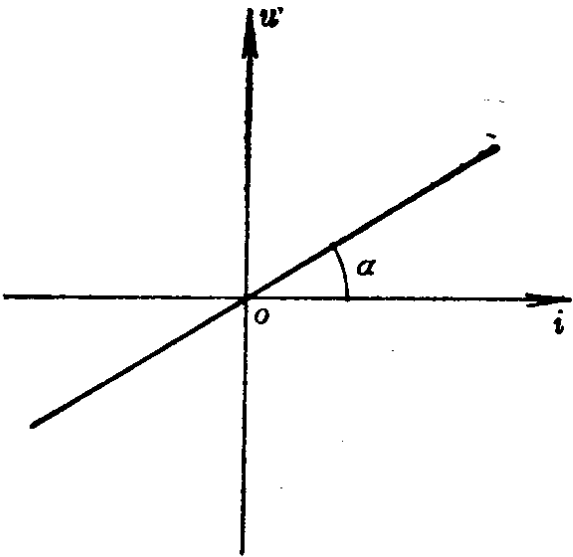


图 1-10 线性电阻元件的伏安特性

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。

令 $G = \frac{1}{R}$, 则式(1-1)变成

$$i = Gu$$

式中 G 称为电阻元件的电导。

电阻的单位为欧姆(Ω), 简称欧; 电导的单位为西门子(S)。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反 (见图 1-11), 则欧姆定律应写为

$$u = -Ri$$

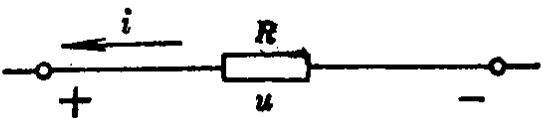


图 1-11 线性电阻元件

或

$$i = -Gu$$

所以,公式必须与参考方向配套使用。

由式(1-1)可知,任何时刻线性电阻元件的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定,而与该时刻以前的电流(或电压)的各种值无关。

在电压和电流的关联方向下,任何时刻线性电阻元件吸取的电功率。

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

电阻 R 、电导 G 是正实常数,故功率 p 恒为非负值。功率 p 既然不可能为负值,这说明,任何时刻电阻元件绝不可能发出电能,也就是,它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,并且还是耗能元件。

如电阻元件把吸取的电能转换成热能,应用焦耳与卡之间的换算关系,从 t_0 到 t 时间内,电阻元件的热量为

$$Q = 0.239W = 0.239 \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi$$

此即焦耳-楞次定律的表达式。当热能的单位用焦耳时,则 $Q = W$ 。

实际上,所有电阻器、电灯、电炉等元件,它们的伏安特性曲线或多或少都是非线性的。但是,这些元件,特别象金属膜电阻器、线绕电阻器等,在一定工作电流范围内,它们的伏安特性近似为一直线,所以可以作为线性电阻元件来处理而得出令人满意的结果。

与线性电阻元件不同,非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线,所以元件上电压和元件电流之间不服从欧姆定律,且元件的电阻将随电压或电流改变而改变。图 1-12 给出某二