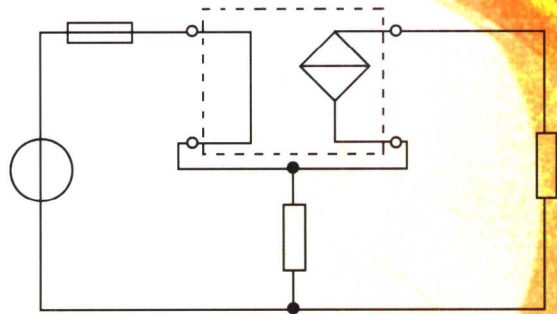


图解电子电路基础系列

电路基础

刘南平 艾艳锦 孟庆杰 编



图解电子电路基础系列

电路基础

刘南平 艾艳锦 孟庆杰 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“图解电子电路基础系列”之一。本书以图解的形式讲解了电路的基础知识,其中包括电路的基本概念和基本定律、线性电阻电路的分析计算、正弦电流电路、耦合电感和变压器、三相交流电路、非正弦周期电流电路、二端口网络、动态电路的过渡过程时域分析等。本书没有繁杂的数学公式的推导,紧随理论基础给出相应的例题及解答,使读者及时学习消化所学到的知识。

本书可作为职业学校相关专业学生的参考用书,也可供从事与电相关工作的广大在职工人阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/刘南平等编. —北京:科学出版社,2006
(图解电子电路基础系列)

ISBN 7-03-017403-8

I. 电… II. 刘… III. 电路-理论-图解 IV. TM13-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060711 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:郭 艳

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 8 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—4 000 字数: 235 000

定 价: 23.90 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

本系列书面向正准备学习电路基础的读者,或是曾经学过但想从头系统地温习这方面知识的读者。也可用作大专院校相关专业学生的教材、教学参考书及公司员工的教育培训教材。

电路是电子通信领域中的一门基础课程,只有学好电路基础,才能进一步向应用发展。但是由于电路抽象、不易接受而往往使很多读者头疼。为了改变这种状态,本书图文并茂,采用大量照片和图片,充分调动读者的视觉效果以帮助理解。

本书内容共9章,包含了电路的基本理论以及电路的计算方法、分析等内容。具体涉及直流电路、正弦电路、非正弦周期电流电路、线性电路的过渡过程、二端口网络等。为使读者加深对基础理论知识的理解,逐步养成严谨求实的工作作风,培养独立分析问题、解决问题和设计创新的能力,本书配有详细的例题解答,以及练习题和答案。

本书在编写过程中,力求做到以培养能力为主线,并在编写中特别注意以下几点:

(1) 在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的基础上,力求避免繁琐的数学推导。

(2) 在讲解的同时,注意加大图解的力度,将抽象的理论概念,用图示来辅助分析。

(3) 在内容编排方面,力求做到由浅入深、由易到难,循序渐进。

(4) 在内容阐述方面,贯彻理论与实践相结合,以应用为目的,以必需够用为度的原则,力求简明扼要,通俗易懂。

希望读者将此书作为电路的入门书加以应用,在培养实际能力方面对读者能有所帮助。

本书由刘南平、艾艳锦、孟庆杰编写。

由于作者水平有限,本书定会有许多不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路的主要物理量	2
1.2.1 电流及其参考方向	2
1.2.2 电压及其参考方向	3
1.2.3 关联参考方向	5
1.2.4 吸收、产生功率	5
1.3 欧姆定律	7
1.4 电阻元件	8
1.5 理想电压源、理想电流源及典型的信号	10
1.5.1 理想电压源	10
1.5.2 理想电流源	10
1.5.3 几种典型的信号	11
1.6 受控源	14
1.7 基尔霍夫定律	16
1.7.1 基尔霍夫电流定律	17
1.7.2 基尔霍夫电压定律	18
习 题	24
第 2 章 线性电阻电路的分析计算	28
2.1 电阻的连接	28
2.1.1 电阻的串联	28
2.1.2 电阻的并联	30
2.1.3 电阻的混联	32
2.2 电压源、电流源模型及其等效变换	34
2.2.1 电压源	34
2.2.2 电流源	35
2.2.3 电源模型的等效变换	35
2.3 支路电流法	36
2.3.1 支路电流方程的建立	37

2.3.2 支路电流法的解题步骤	38
2.4 节点电压法	41
2.4.1 节点方程的建立	41
2.4.2 节点分析法的解题步骤	42
2.5 含有受控源的简单电路的分析计算	47
习 题	49
第3章 电路定律	52
3.1 叠加定理	52
3.2 齐次定理	56
3.3 替代定理	57
3.4 戴维南定理	59
3.4.1 戴维南定理的内容	60
3.4.2 定理证明	60
3.4.3 定理应用	61
3.5 诺顿定理	65
习 题	70
第4章 正弦电流电路	74
4.1 正弦量	74
4.1.1 正弦量的概念	74
4.1.2 正弦量的三要素	75
4.1.3 相位差	77
4.2 正弦量的相量表示法	78
4.3 正弦电流电路中的电阻、电感和电容	80
4.3.1 电阻元件的正弦交流电路	80
4.3.2 电感元件	82
4.3.3 纯电容电路	86
4.4 RLC串联的正弦电路	89
4.4.1 RLC串联电路的电压、电流关系	89
4.4.2 RLC串联正弦交流电路中的功率	91
4.5 RLC并联的电路	93
4.6 RL串联与RC串联电路	96
4.6.1 RL串联电路	96
4.6.2 RC串联电路	96

4.7 电感线圈和电容的并联电路	97
4.8 功率因数的提高	97
习 题	100
第 5 章 耦合电感和变压器	102
5.1 耦合电感元件	102
5.2 耦合电感线圈的串联和并联	105
5.2.1 耦合电感线圈的串联电路	105
5.2.2 耦合电感线圈的并联电路	106
5.3 空芯变压器电路	108
5.4 铁芯变压器电路	111
5.4.1 铁芯变压器的工作原理	111
5.4.2 变压器的负载运行	113
5.4.3 变压器的损耗和效率	114
5.5 附 录	115
5.5.1 磁路及磁路中的几个物理量	115
5.5.2 铁磁物质的磁化曲线	116
5.5.3 磁 阻	118
5.5.4 铁芯损失	119
习 题	121
第 6 章 三相交流电路	123
6.1 三相对称电动势的产生	123
6.2 三相交流电源的连接方法	125
6.2.1 星形接法	125
6.2.2 三角形接法	126
6.3 三相负载及三相电路的计算	127
6.3.1 三相负载的接法	127
6.3.2 负载星形连接的三相电路	127
6.3.3 负载三角形连接的三相电路	133
6.4 三相电路的功率	136
习 题	138
第 7 章 非正弦周期电流电路	140
7.1 非正弦周期量	140

7.2	非正弦周期量分解为傅里叶级数	141
7.3	非正弦周期量的有效值、平均值、平均功率	144
7.3.1	有效值	144
7.3.2	平均值	145
7.3.3	平均功率	146
7.4	非正弦周期电流电路的分析计算	147
习 题		151
第 8 章	二端口网络	153
8.1	二端口网络的阻抗参数和导纳参数	153
8.1.1	二端口网络	153
8.1.2	二端口网络的阻抗参数	154
8.1.3	二端口网络的导纳参数	155
8.2	二端口网络的传输参数和混合参数	157
8.2.1	二端口网络的传输参数	157
8.2.2	二端口网络的混合参数	159
8.3	二端口网络的等效电路	159
8.3.1	T 形等效电路	160
8.3.2	π 形等效电路	160
8.4	二端口网络的级联	161
习 题		163
第 9 章	动态电路的过渡过程时域分析	164
9.1	换路定律和初始条件的计算	164
9.1.1	过渡过程的概念	164
9.1.2	换路定律及初始值的确定	165
9.1.3	初始值的确定	166
9.2	一阶电路的零输入响应	167
9.3	一阶电路的零状态响应	169
9.4	一阶电路的全响应	171
9.5	二阶电路分析	174
习 题		180
习题答案		183

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

本章主要介绍电路元件:电阻、独立电源和受控电源的伏安关系(VAR);电路定律:基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。前者为元件约束;后者为结构约束。这两个基本约束贯穿全书。同时,还介绍电路变量:电流、电压及其参考方向,吸收和产生功率以及对简单电路的分析和计算等。

1.1 电路和电路模型

电路是由各种电器设备按一定方式连接起来的整体,它提供了电流流通的路径。如图 1.1(a)所示的手电筒电路就是一个最简单的例子,它由干电池、小灯泡、金属壳体(连接导体)和开关组成。

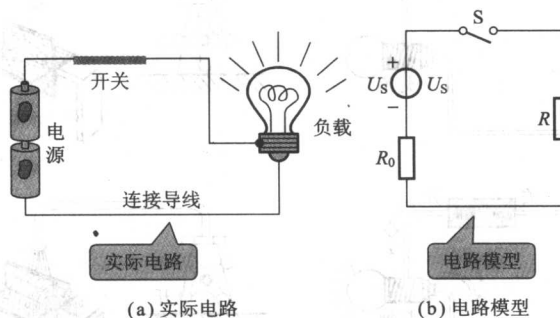


图 1.1 手电筒实际电路和电路模型

干电池是一种电源,给电路提供电能;小灯泡把电能转化为其他形式的能量,是用电的器件,称为负载;金属壳体起导线的作用,它连接电源、负载和开关。

由于实际电路元件和器件的电磁性质比较复杂,如一个实际的电阻器有电流流过时,会产生磁场,因而还兼有电感的性质;一个实际电源总是有内阻的,因而在

使用时不可能总保持一定的端电压;连接导体总会有一点电阻,甚至还会有电感。如果考虑影响因素太多时,就会给分析电路带来很大困难。因此,有必要在一定条件下将实际电路元件和器件理想化,即忽略次要性质,用反映其主要性质的模型来表示。例如,用理想电阻元件表示小灯泡的模型;用理想电压源表示干电池的模型;用理想导体表示连接导体的模型。这些理想化的模型叫做理想电路元件,简称为元件。实际电路元件和器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模型,例如,图 1.1(a) 实际电路可由图 1.1(b) 电路模型来表示。今后,我们研究和分析的对象是电路模型,而不是实际电路,电路模型可简称为电路。

1.2 电路的主要物理量

电路分析中常用到的物理量有:电流、电压、功率等。本节将对这些物理量及其相关概念进行简要说明。

1.2.1 电流及其参考方向

我们用手电筒发光的原理来说明一下电流。一合上手电筒开关就会发光,一关断开关就会熄灭是靠什么发生的呢?现在把手电筒里与发光有关的部件取出来看一下,如图 1.2 所示。

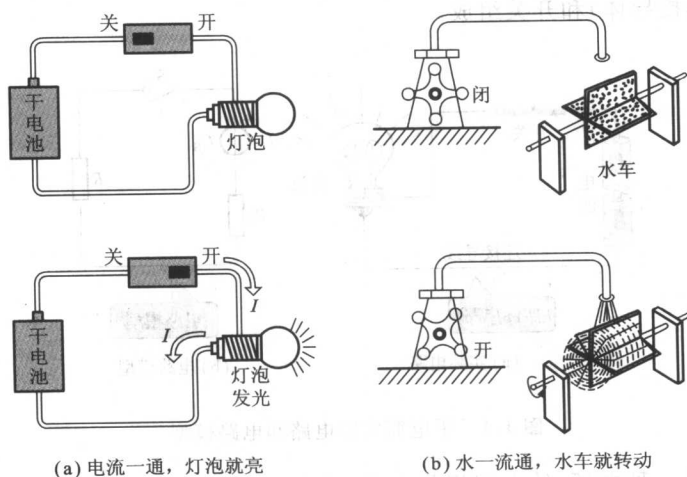


图 1.2 电流使电珠发光

干电池和小灯泡用电线连接,连线中间接入开关。为了弄清手电筒的工作原理,这里用图 1.2(b)中所示的置于水龙头下的水车来进行说明。水龙头的阀门关

上时水不流,水车不转;阀门打开时水流下来,使水车转动,水车转动是靠水流的作用。把开关断开状态看作是水龙头阀门关闭的状态,而开关合上相当于阀门打开的状态。和水车靠水流转动相同,灯泡点亮也是靠某种“流”的作用,这种流就叫做电流。灯泡之所以发光是由于电流流过的缘故。

我们把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电流的大小。电流强度简称为电流,用 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

习惯上,把正电荷运动的方向规定为电流的方向。如果电流的大小和方向不随时间变化,则称为恒定电流,简称为直流,用 I 表示;如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称为交流,用 i 表示。在国际单位制(SI)中,电流的单位是安[培],简称安(A)。

在简单电路中,电流的实际方向可由电源的极性确定;在复杂电路中,电流的方向有时事先难以确定。为了分析电路的需要,我们引入了电流的参考方向的概念。

参考方向是人们任意选定的一个方向,在电路图中用箭头表示。当然,所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当电流的参考方向与实际方向一致时,电流为正值($i > 0$);当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值($i < 0$)。这样,在选定的电流参考方向下,根据电流的正、负,就可以确定电流的实际方向,如图 1.3 所示。

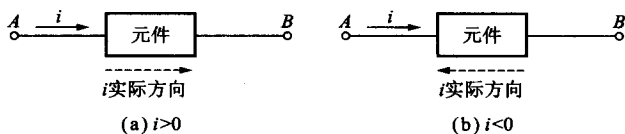


图 1.3 电流参考方向与实际方向的关系

在分析电路时,首先要假定电流的参考方向,并以此为标准去分析计算,最后从答案的正、负值来确定电流的实际方向。本书电路图上所标出的电流方向都是参考方向。

电压及其参考方向

这里仍然以手电筒电路为例来介绍,如图 1.4 所示。把灯泡接到干电池上就会产生电流,为什么会产生电流?现在把这个问题和水流进行对比,水从高处流向低处,即两点间有水压时水就会流动,按同样的思路来考虑电流,可以认为电流是在电气压力作用下产生的,这一压力就称为电压。电流从电压高的点流向电压低的点。

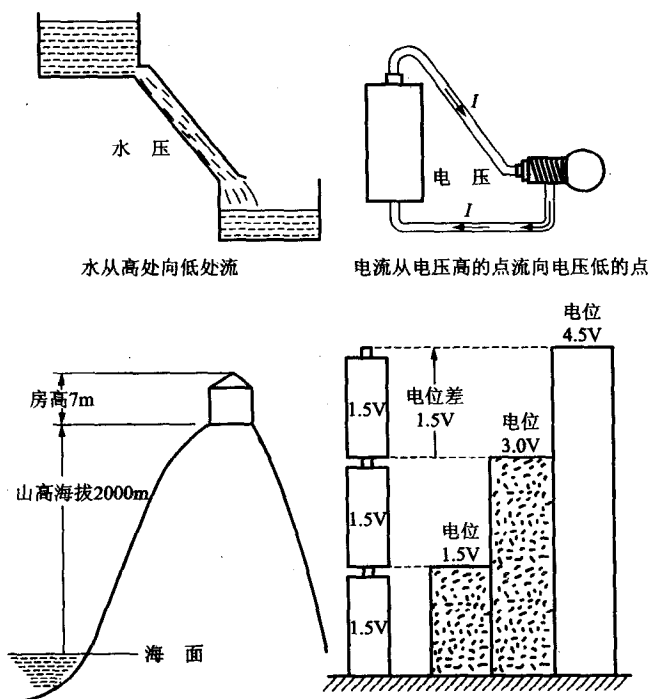


图 1.4 电压的产生

我们把单位正电荷从电路中的 a 点移动到 b 点时所获得或失去的能量定义为 a、b 两点间的电压,用 u 表示,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2)$$

电压又称为电位差,它总是和电路中的两个点电位有关。如果某段电路得到能量, a 点为低电位, b 点为高电位, 则称为电压升; 如果失去能量, a 点为高电位, b 点为低电位, 则称为电压降。电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 是电压降的方向。如果电压的大小和方向不随时间变化, 这样的电压叫做恒定电压或直流电压, 用 U 表示。如果电压的大小和方向都随时间变化, 则称为交变电压或交流电压, 用 u 表示。在国际单位制中, 电压的单位是伏[特], 简称伏(V)。

在分析和计算电路时, 如同需要为电流设定参考方向一样, 我们也需要为电压设定参考极性或参考方向, 并由参考方向和电压的正、负值来反映该电压的实际方向。当电压的参考方向与实际方向一致时, 电压为正 ($U > 0$); 相反时, 电压为负 ($U < 0$)。电压的参考方向可用箭头表示, 也可用正 (+)、负 (-) 极性表示, 如图 1.5 所示。

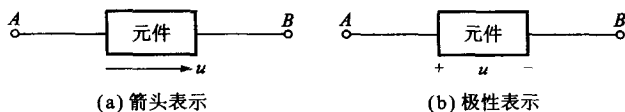


图 1.5 电压参考方向

关联参考方向

如前所述,在分析电路时,既要为流过元件的电流设定参考方向,又要为元件两端的电压设定参考极性。两者是可以独立无关地任意设定的。但为了方便起见,常常采用关联参考方向,即电流的参考方向是从电压的参考“+”极流入“-”极,如图 1.6(a)所示;否则为非关联参考方向,如图 1.6(b)所示。



图 1.6 关联和非关联参考方向

在图 1.6(a)关联参考方向的前提下,可以简化电路的标注。电路图上只需标出电压或电流中任意一个参考方向即可,另一个参考方向可以省略不标,如图 1.7 所示。



图 1.7 关联参考方向的简化表示方法

吸收、产生功率

我们把单位时间内某段电路失去或得到的能量定义为功率,用 P 表示,即

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

在电路中,功率还可以用电压、电流来表示,即

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.4)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏(V),电流的单位为安(A),功率的单位为瓦[特],简称瓦(W)。

前面已经谈到,当正电荷由元件的 a 点移到 b 点失去能量时,该元件是吸收能

量的元件；当正电荷由 a 点到 b 点得到能量，该元件是产生能量的元件。单位时间内吸收或产生的能量就是该元件吸收或产生的功率。在关联参考方向下，由式(1.4)算得的功率为正时，则元件为吸收功率；如果算得的功率为负时，则元件为产生功率。

在非关联参考方向下，则计算功率的公式改为

$$P = -ui \quad (1.5)$$

按照式(1.5)算得的功率，仍然为正，表示吸收功率；功率为负，表示产生功率。如果一个元件吸收功率为 10W，则可以认为它产生功率为 -10W；同理，如果一个元件产生功率为 10W，则可以认为它吸收功率为 -10W。这两种说法是一致的。

【例题 1.1】 如图 1.8 所示，试求元件 A、B 吸收的功率和元件 C、D 产生的功率。

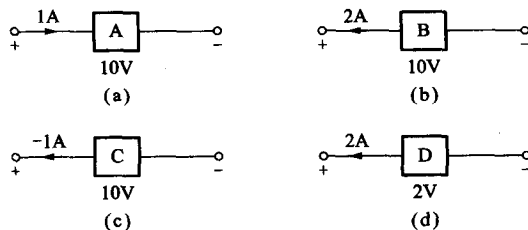


图 1.8 例 1.1 图

解答 (1) 对图 1.8(a) 所示元件 A，电压、电流为关联参考方向，故 $P = 10 \times 1 = 10(\text{W})$ ，因为 $P_A > 0$ ，所以元件 A 吸收功率为 10W。

(2) 对图 1.8(b) 所示元件 B，电压、电流为非关联参考方向，故 $P_B = -10 \times 2 = -20(\text{W})$ ，因为 $P_B < 0$ ，所以元件 B 产生功率为 20W，即吸收功率为 -20W。

(3) 对图 1.8(c) 所示元件 C，电压、电流为非关联参考方向，故

$$P_C = -10 \times (-1) = 10(\text{W})$$

因为 $P_C > 0$ ，所以元件 C 吸收功率为 10W，即产生功率为 -10W。

(4) 对图 1.8(d) 所示元件 D，电压、电流为非关联参考方向，故

$$P_D = -2 \times 2 = -4(\text{W})$$

因为 $P_D < 0$ ，所以元件 D 产生功率为 4W。

1.3 欧姆定律

在图 1.9 所示的电压、电流的测量电路中,当将开关 S 按 0,1,⋯,5 的次序依次切换时,加在电阻 R 上的电压按 0V,10V,⋯,50V 递增。同时,随着电压 V 的变化,流过电阻 R 的电流也发生变化。

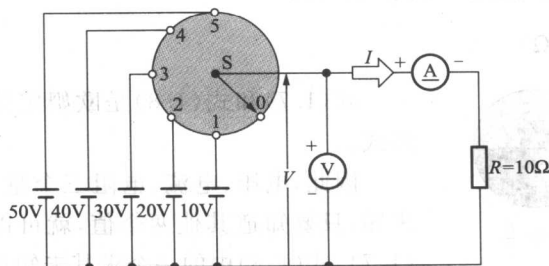


图 1.9 电阻固定电压和电流的测量电路

图 1.10 和图 1.11 是用图表示上述结果的曲线图。

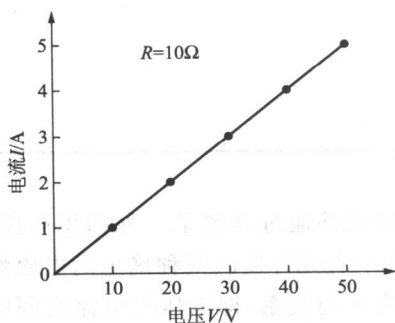


图 1.10 电压和电流的关系

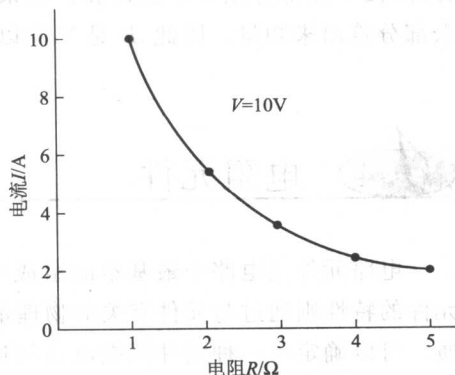


图 1.11 电阻和电流的关系

由图 1.10 可知,如果将电压增大到 2 倍、3 倍,电流也增大到 2 倍、3 倍,电压与电流成正比。因此,若电阻固定,电流 I 与电压 V 成正比。

由图 1.11 可知,将电阻增大到 2 倍、3 倍时,电流却反而减小到原来的 $1/2$ 、 $1/3$,电流与电阻成反比。因此,如果电压固定,电流与电阻成反比。

我们知道,如果电阻固定,电流的大小与电压成正比;如果电压固定,电流的大小与电阻的大小成反比。这里,假定电流用 $I(A)$ 表示,电压用 $V(V)$ 表示,电阻用 $R(\Omega)$ 表示,则由以上的关系可得

$$I = \frac{V}{R} \text{ (A)} \quad (1.6)$$

上述关系是由德国物理学家欧姆(Georg Simon Ohm)于1826年用实验得到证明的,取其名字而称为欧姆定律。

将式(1.6)的两边乘以 R ,就得到

$$V = RI \text{ (V)} \quad (1.7)$$

将式(1.7)的两边用 I 相除,就得到

$$R = \frac{V}{I} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (1.8)$$

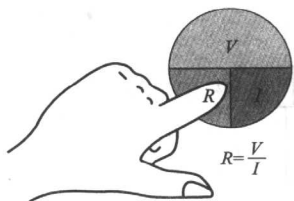


图 1.12 欧姆定律的记忆方法

式(1.7)和式(1.8)是欧姆定律的其他两种表现形式。

因此,电压、电流、电阻三个量中,若一个量的值未知,只要知道其他两个值,就可以利用式(1.6)、式(1.7)、式(1.8)中的一个求其未知量。

欧姆定律的记忆方法:像图1.12那样画一个圆,将其划分为三个部分,在上面部分写上电压 V ,在下面部分写上电阻 R 和电流 I 。在图1.12中,上下是除法运算,上面是分子,下面是分母,而下面部分则是乘法运算。求未知量时,像图那样用手指遮盖该部分,由剩余部分算出未知量。因此, R 是 V 除以 I 。同样, I 是 V 除以 R , V 是 R 和 I 的积。

1.4 电阻元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。电路元件通过其端子与外部相连接,元件的特性则通过与元件有关的物理量描述。每一种元件反映某种确定的电磁性质。可以确定每一种元件两端电压与通过电流之间的关系,即电压与电流之间的关系,或伏安关系,简称为VAR(Volt Ampere Relation)。它约束着每种电路元件的电压和电流两个物理量。这种约束称为元件约束。它是电路的两个基本约束之一。

电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等。电路元件还可分为无源元件和有源元件,线性元件和非线性元件,时不变元件和时变元件等。

电阻元件是电路基本元件之一。它是从实际电阻器抽象出来的模型。线性电阻元件是这样的理想元件:在电压和电流取关联参考方向下,在任何时刻它两端的电压和电流关系服从欧姆定律,即有

$$u = Ri \quad (1.9)$$

式中: u 为电阻元件两端的电压; i 为通过电阻元件的电流; R 为电阻。在非关联参考方向下, 欧姆定律为

$$u = -Ri \quad (1.10)$$

在直角坐标系中, 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), 可绘出 $i-u$ (或 $u-i$) 平面上的曲线, 称为电阻元件的伏安特性曲线。如果一个电阻的伏安特性曲线是通过坐标原点的一条直线, 它就称为线性电阻, 符号如图 1.13(a) 所示; 否则称为非线性电阻, 其符号如图 1.13(b) 所示。

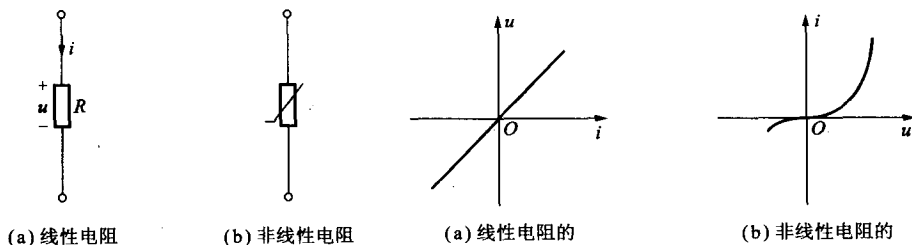


图 1.13 电阻元件符号

图 1.14 电阻的伏安特性曲线

图 1.14 (a) 为线性电阻的伏安特性曲线; 图 1.14 (b) 为非线性电阻的伏安特性曲线。如果电阻伏安特性曲线的斜率不随时间变化, 则称为非时变电阻; 否则称为时变电阻。本书只讨论线性非时变电阻。

电阻元件的导电性能可以用电导 G 来表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.11)$$

式中: R 为电阻; G 为电导。当用电导表示电阻元件时, 欧姆定律可表示为

$$u = \frac{i}{G} \quad (1.12)$$

或

$$i = Gu \quad (1.13)$$

将式(1.6)、式(1.8)代入式(1.4), 得到电阻功率的计算公式, 即

$$P = i^2 R = \frac{i^2}{G} \quad (1.14)$$

或

$$p = \frac{u^2}{R} = u^2 G \quad (1.15)$$

因为电阻 R 和电导 G 都是正实常数, 故根据式(1.14)和式(1.15)算出的功率 P 总是正值, 这说明电阻元件是吸收功率的。