



新世纪高等学校规划教材·电气工程系列

主 编◎张苑农

电路分析基础



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社



新世纪高等学校规划教材·电气工程系列

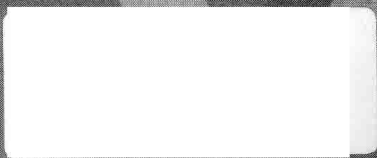


主 编◎张苑农

副主编◎尹雪梅 董 静

参 编◎宫 鑫 江赛标 张 磊

电路分析基础



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/张苑农主编. —北京:北京师范大学出版社,
2017.12

新世纪高等学校规划教材. 电气工程系列
ISBN 978-7-303-22986-4

I. ①电… II. ①张… III. ①电路分析—高等教育—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255667 号

营销中心电话 010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社 www.jswsbook.com
电子信箱 jswsbook@163.com

出版发行:北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码:100875

印刷:三河市东兴印刷有限公司
经销:全国新华书店
开本:787 mm×1092 mm 1/16
印张:17.25
字数:380 千字
版次:2018 年 1 月第 1 版
印次:2018 年 1 月第 1 次印刷
定价:45.00 元

策划编辑:苑文环 责任编辑:苑文环
美术编辑:刘超 装帧设计:刘超
责任校对:赵非非 责任印制:赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、反侵权举报电话:010-62978190

北京读者服务部电话:010-62979006-8021

外埠邮购电话:010-62978190

本书如有印装质量问题,请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话:010-62979006-8006

◆ 前 言 ◆

“电路分析基础”是大学本科、专科、高职等电类各专业重要的技术基础课程，课程理论严密，逻辑性强，有广阔的工程背景，是电类专业学生知识结构的重要组成部分。学习本课程对培养学生的科学思维能力，树立理论联系实际的工程观点，提高学生分析问题、解决问题的能力以及在人才培养中都起着十分重要的作用。

许多重要的电路理论知识都是在“电路分析基础”课程中逐步建立的，课程中的基本定理、定律在应用中的地位十分重要，正确掌握并灵活应用它们，能大大提高我们分析问题和解决问题的能力。“电路分析基础”课程的任务，就是使学生掌握电类技术人员必须具备的电路基础理论、基本分析方法，掌握各种常用电工仪器、仪表的使用以及基础电工测量的方法，为后续专业课的学习和今后踏入社会的工程实际应用打下坚实的基础。

本教材是根据应用型人才培养目标的要求，避开高深的理论推导，注重与实际紧密相关的电路整体特性及元器件外部特性，增加了电路的计算机辅助分析，真正立足于工程实际应用。每章均含有与内容相适应的计算机辅助电路分析的应用举例，为理论和方法的学习运用于实际电路分析打下基础。这不仅有利于提高学生的学习兴趣，扩大学习视野，而且有利于提高学生分析问题和解决问题的能力。

鉴于很多学校应用型人才培养方案中“电路分析基础”教学学时分配的实际情况，本教材建议的教学时数为 80 学时左右。各专业可根据本专业的教学需求，对相关章节内容进行适当取舍。

本教材共分 10 章，由张苑农担任主编，并编写了第 4 章、第 6 章；尹雪梅编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章；宫鑫编写了第 5 章、第 8 章和附录 B；董静编写了第 9 章和附录 A；江赛标编写了第 7 章、第 10 章；董静、张磊负责部分习题的整理工作。张苑农制定了本教材的编写大纲和体例，并负责全书的统稿，负责制作了与教材相配套的教学课件。

本教材在编写过程中得到了北京理工大学珠海学院信息学院和吉林大学珠海学院电子信息系领导和相关教师们的大力支持，北京师范大学出版社也给予了很大帮助，在此一并表示深深的谢意！

由于编者水平有限，教材和课件中难免存在不足之处，敬请广大读者给予批评指正。作者联系方式：zhangyn@zhbit.com。

编 者

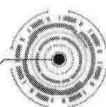
2017 年 6 月

目 录

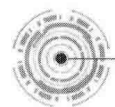
第 1 章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路与电路模型	(1)
1.1.1 实际电路的组成与功能	(1)
1.1.2 电路模型	(1)
1.2 电路的基本物理量	(3)
1.2.1 电流	(3)
1.2.2 电压	(4)
1.2.3 功率和能量	(5)
1.3 电阻元件和欧姆定律	(6)
1.3.1 电阻元件	(6)
1.3.2 欧姆定律	(7)
1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量	(8)
1.4 电压源与电流源	(8)
1.4.1 独立源	(9)
1.4.2 受控源	(10)
1.5 基尔霍夫定律	(11)
1.5.1 一些有关的电路术语	(11)
1.5.2 基尔霍夫电流定律(KCL)	(12)
1.5.3 基尔霍夫电压定律(KVL)	(13)
1.6 电路的等效变换	(15)
1.6.1 电路等效的概念	(15)
1.6.2 电阻的串联和并联	(16)
1.6.3 电阻Y联结和 Δ 联结的等效变换	(19)
1.6.4 电压源、电流源的串联和并联	(21)
1.6.5 实际电源的两种模型及其等效变换	(23)
1.7 计算机辅助电路分析举例	(26)
第 2 章 电阻电路分析	(35)
2.1 支路电流法	(35)
2.2 网孔电流法和回路电流法	(38)
2.2.1 网孔电流法	(38)



2.2.2	回路电流法	(41)
2.3	节点电压法	(41)
2.4	叠加定理和齐性定理	(44)
2.4.1	叠加定理	(44)
2.4.2	齐性定理	(46)
2.5	戴维南定理与诺顿定理	(47)
2.5.1	戴维南定理	(48)
2.5.2	诺顿定理	(49)
2.6	最大功率传输定理	(50)
2.7	计算机辅助电路分析举例	(51)
第3章	动态电路的时域分析	(61)
3.1	动态元件	(61)
3.1.1	电容	(61)
3.1.2	电感	(64)
3.1.3	电容、电感的串联和并联	(66)
3.2	动态电路和换路定律	(68)
3.2.1	动态电路的特点	(68)
3.2.2	换路定律	(69)
3.2.3	初始值的确定	(70)
3.3	动态电路方程及其解	(72)
3.4	一阶电路的响应	(73)
3.4.1	零输入响应	(73)
3.4.2	零状态响应	(78)
3.4.3	全响应	(80)
3.5	一阶电路的三要素公式	(82)
3.6	一阶电路的阶跃响应和冲激响应	(83)
3.6.1	一阶电路的阶跃响应	(83)
3.6.2	一阶电路的冲激响应	(85)
3.7	计算机辅助电路分析举例	(88)
第4章	正弦稳态交流电路分析	(99)
4.1	正弦交流电的基本概念	(99)
4.1.1	正弦量的三要素	(100)
4.1.2	正弦量的相位差	(101)
4.1.3	正弦量的有效值	(102)



4.2	正弦量的相量表示	(103)
4.2.1	复数及其运算	(103)
4.2.2	正弦量的相量表示法	(104)
4.3	基尔霍夫定律和元件特性的相量形式	(106)
4.3.1	基尔霍夫定律的相量形式	(106)
4.3.2	元件特性方程的相量形式	(107)
4.4	阻抗和导纳	(109)
4.4.1	阻抗	(109)
4.4.2	导纳	(111)
4.4.3	阻抗和导纳的关系	(112)
4.5	正弦交流电路的分析	(113)
4.6	正弦交流电路的功率	(119)
4.6.1	正弦交流电路的有功功率、无功功率、视在功率和复功率	(119)
4.6.2	功率因数的提高	(122)
4.6.3	最大功率传输	(124)
4.7	计算机辅助电路分析举例	(124)
第5章	谐振电路	(134)
5.1	串联谐振电路	(134)
5.1.1	串联谐振的条件	(134)
5.1.2	串联谐振电路的基本特性	(135)
5.1.3	串联谐振电路的频率特性	(136)
5.2	并联谐振电路	(140)
5.2.1	并联谐振的条件	(140)
5.2.2	并联谐振电路的基本特性	(140)
5.2.3	并联谐振电路的频率特性	(141)
5.3	谐振电路的应用	(142)
5.4	计算机辅助电路分析举例	(144)
第6章	互感耦合电路	(150)
6.1	互感	(150)
6.1.1	互感现象和互感电压	(150)
6.1.2	耦合系数	(151)
6.1.3	同名端	(152)
6.1.4	耦合电感的伏安特性	(152)
6.2	含耦合电感电路的分析	(154)



6.2.1	耦合电感的串联	(154)
6.2.2	耦合电感的并联	(155)
6.2.3	耦合电感的 T 形等效	(156)
6.3	空心变压器	(158)
6.4	理想变压器	(160)
6.5	计算机辅助电路分析举例	(162)
第 7 章	三相电路	(167)
7.1	三相电源与三相负载	(167)
7.1.1	三相电源	(167)
7.1.2	三相电源的连接方式	(168)
7.1.3	三相负载的连接方式	(170)
7.1.4	三相电路的连接方式	(172)
7.2	对称三相电路的分析计算	(173)
7.2.1	Y-Y 电路的计算	(173)
7.2.2	Δ -Y 电路的计算	(174)
7.2.3	复杂三相电路的计算	(176)
7.3	非对称三相电路的分析	(176)
7.3.1	三相三线制 Y-Y 电路的计算	(176)
7.3.2	三相四线制 Y-Y 电路的计算	(178)
7.4	三相电路功率	(180)
7.4.1	三相电路的有功功率	(180)
7.4.2	三相电路的无功功率	(180)
7.4.3	三相电路的视在功率	(181)
7.4.4	对称三相电路的瞬时功率	(181)
7.4.5	三相功率的测量	(182)
7.5	计算机辅助电路分析举例	(184)
第 8 章	非正弦周期电流电路	(189)
8.1	非正弦周期信号	(189)
8.2	非正弦周期信号的频谱	(190)
8.2.1	傅里叶级数的三角形式	(190)
8.2.2	频谱图	(193)
8.3	非正弦周期信号的有效值、平均值和功率	(194)
8.3.1	有效值	(194)
8.3.2	平均值	(194)



8.3.3 平均功率	(194)
8.4 非正弦周期电流电路的分析	(195)
8.5 计算机辅助电路分析举例	(196)
第 9 章 二端口网络	(201)
9.1 二端口网络的概念	(201)
9.2 二端口网络的方程与参数	(202)
9.2.1 二端口网络的参数	(202)
9.2.2 各组参数间的转换关系	(208)
9.3 二端口网络的等效	(209)
9.4 二端口网络的连接	(210)
9.5 二端口网络的特性阻抗和传输常数	(212)
9.6 计算机辅助电路分析举例	(215)
第 10 章 简单非线性电阻电路	(220)
10.1 非线性电阻电路	(220)
10.1.1 非线性电阻概念	(220)
10.1.2 非线性电阻的串联、并联与混联	(221)
10.2 非线性电阻电路的分析方法	(222)
10.2.1 图解法	(222)
10.2.2 小信号分析法	(224)
10.3 计算机辅助电路分析举例	(226)
附录 A PROTEUS 软件及使用方法	(229)
附录 B MATLAB 软件及其在电路分析中的基本应用	(238)
部分习题参考答案	(247)
参考文献	(263)

❖ 第 1 章 电路的基本概念和基本定律 ❖

学习目标:

通过本章的学习,了解电路模型,掌握基本元件的概念及表示方法;掌握基本变量概念、参考方向及计算方法;掌握 KCL、KVL;掌握等效变换分析方法。

➡ 1.1 电路与电路模型

➤ 1.1.1 实际电路的组成与功能

实际电路是由零部件(如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电池、发电机等)按一定的方式相互连接构成的整体,它为电流的流通提供途径。实际电路常借助于电压、电流而完成传输电能或信号、处理信号、测量、控制、计算等功能。譬如,电力系统的发电机将热能(或水位能、原子能等)转换为电磁能,经输电线传送给各用电设备(如电灯、电动机等),这些设备再将电磁能转换为光、热、机械能等。又如,生产过程中的控制电路用传感器将所观测的物理量(如温度、流量、压力等)变换为电信号(电压或电流),经过适当的“加工”处理得出控制信号,用以控制生产操作(如断开电炉的电源停止加热或接通电源加热等);电视机将接收到的高频电信号经过变换、处理(如选频、放大、解调等),将分离出的图像信号送到显像管,在控制信号的作用下,将信号显示为画面,同时将伴音信号传送到扬声器转换为声音。实际电路种类繁多,但就其功能来说可概括为两个方面:一是进行能量的传输、分配与转换;二是实现信息的传递与处理。

其中,电能或电信号的发生器称为电源,用电设备称为负载。由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的,因此电源又称为激励源或激励;由激励而在电路中产生的电压、电流称为响应。有时,根据激励与响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。

实际电路多种多样,具体的功能也各不相同,但它们有其共性,正是在这种共性的基础上,形成了电路理论这一学科。

➤ 1.1.2 电路模型

1. 实际电路与电路模型

分析任何一个物理系统,都要用理想化的模型描述该系统。经典力学中的质点就是小物体的模型,质点的几何尺寸为零,但却有一定的质量,有确定的位置和速度等。

要分析实际电路的物理过程也需构造出能反映该实际电路物理性质的理想化模型,也就是用一些理想化的元件,相互连接组成理想化电路(电路模型),用以描述该实际电路,

进而对电路模型进行分析，其所得结果就反映了实际电路的物理过程。图 1-1 所示为一个简单的实际照明电路及其对应的电路模型。

电路理论研究的对象不是实际电路，而是理想化的电路模型。今后，本书所涉及电路均指由理想电路元件构成的电路模型。同时，把理想电路元件简称为电路元件。

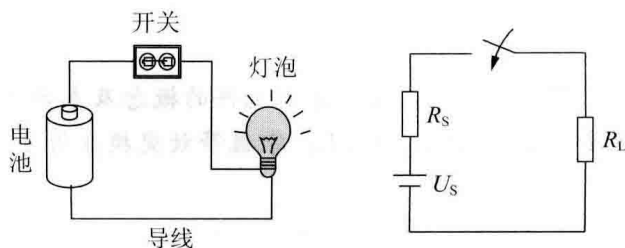


图 1-1 实际电路与电路模型示例

2. 理想电路元件

常见的理想电路元件有电阻、电感、电容、电源等，模型符号如图 1-2 所示。电阻元件能表示消耗电能的器件；电感元件能表示各种电感线圈产生磁场、储存磁能的作用；电容元件能表示各种电容器产生电场、储存电能的作用；电源元件能表示各种诸如发电机、电池等器件将其他形式的能量转换成电能的作用。

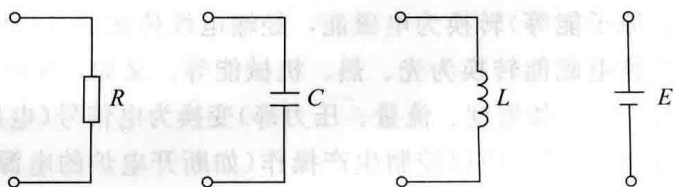


图 1-2 理想电阻、电容、电感、电源元件模型

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立其模型，简称建模。建模时必须考虑工作条件，并按不同准确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象和功能反映出来。例如，一个线圈的建模：在直流情况下，它在电路中仅反映为导线内电流引起的能量消耗，因此，它的模型就是一个电阻元件；在电流变化的情况下，线圈电流产生的磁场会引起感应电压，故电路模型除电阻元件还应包含一个与之串联的电感元件；当电流变化较快时，则还应计及线圈导体表面的电荷作用，即电容效应，所以其模型中还需要包含电容元件。可见，同一实际电路部件在不同的应用条件下，它的模型也可以有不同的形式，如图 1-3 所示为实际电感器在各种应用条件下对应的模型；不同的实际电路部件，只要具有

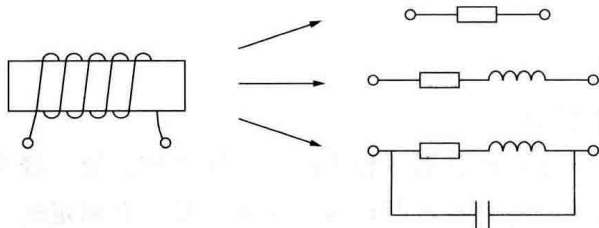


图 1-3 实际电感元件在不同应用条件下对应的模型



相同的主要电磁性能,在一定条件下可用同一模型表示,如灯泡、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用电阻表示。

3. 集总参数电路

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,用电流、电压等参量来描述其中的过程。我们只关心各器件端的电流和端子间的电压,而不涉及器件内部的物理过程。这只有在满足集中化假设的条件下才是合理的。

实际的器件、连接导线以及由它们连接成的实际电路都有一定的尺寸,占有一定的空间,而电磁能量的传播速度($c=3\times 10^8\text{ m/s}$)是有限的,所以电磁能量从元件的一端到达另一端存在时间差,从而在同一时刻元件两端流过电流可能不相同,端口间电压也无法确定。如果电路尺寸 l 远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ ($\lambda=c/f$),则可以认为传送到实际电路各处的电磁能量是同时到达的。这时,与电磁波的波长相比,电路尺寸可以忽略不计。从电磁场理论的观点来看,整个实际电路可看作电磁空间的一个点,这与经典力学中把小物体看作质点相类似。

当实际电路的几何尺寸远小于工作波长时,我们可以用能足够精确反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际元件,这种理想化的电路元件称为集总参数元件,它们有确定的电磁性质和确切的数学定义。对于这些具有二端子的集总参数元件,可用其流经端子的电流和二端子间的电压来描述它们的电磁性能,而端电流和端子间的电压仅是时间的函数,与空间位置无关,在任一时刻,它们都是单值的量。

用理想化的模型模拟实际电路总有一定的近似性,也就是说,用电路元件互连来模拟实际电路,只是近似地反映实际电路中所发生的物理过程。不过,大量实验表明,只要电路模型选取适当,按理想化电路分析计算的结果与相应实际电路的观测结果是一致的。当然,如果电路模型选取不当,则会造成较大的误差,有时甚至得出互相矛盾的结果。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

单位时间内通过导体横截面的电荷量 q 定义为电流强度,简称电流,表示为

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

其中, i 是电流,单位为A(安培); q 是电荷量,单位为C(库仑); t 是时间,单位为s(秒)。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在具体电路中,电流的实际方向常常随时间变化,即使不随时间变化,对较复杂电路中电流的实际方向有时也难以预先断定,因此,往往很难在电路中标明电流的实际方向。

在分析电路时,先指定某一方向为电流方向,称为电流的参考方向,用箭头表示,如图1-4中实线箭头所示。如果电流的参考方向与实际方向(虚线箭头)一致,则电流 i 为正值($i>0$),如图1-4(a)所示;如果电流的参考方向与实际方向相反,则电流取负值($i<0$),

如图 1-4(b)所示。在指定的电流参考方向下，电流值的正或负反映了电流的实际方向。显然，在未指定参考方向的情况下，讨论电流值的正或负是毫无意义的。

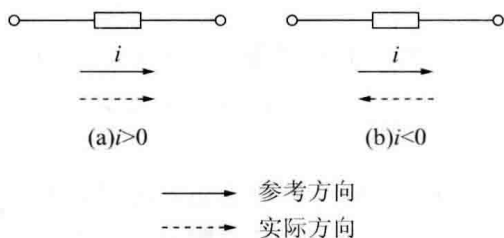


图 1-4 电流的参考方向

分析计算电路时必须先设定电流的参考方向，参考方向是任意指定的，但一经设定就不可随意改动。电流的参考方向一般用箭头表示，有时也用双下标表示，如 i_{ab} 表示其参考方向为由 a 指向 b。

1.2.2 电压

在物理学中，我们已经了解到，将单位正电荷自某一点 a 移动到参考点(物理学中习惯选无穷远处作参考点)时电场力做功的大小称为 a 点的电位。在电路中，电位的物理意义同物理静电场中所讲的电位是一样的，只不过电路中某点的电位是将单位正电荷沿电路所约束的路径移至参考点(习惯选电路中的某点而不选无穷远)时电场力所做功的大小。

电路中，电场力将单位正电荷从某点移到另一点所做的功定义为该两点之间的电压。可见，两点间的电压即是两点间的电位之差，故也称作电位差，表示为

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

式中，功 ω 的单位为 J(焦耳)，电荷量 q 的单位为 C(库仑)，电压 u 的单位为 V(伏特)。

通常，两点间电压的高电位端为“+”极，低电位端为“-”极。

如同需要为电流规定参考方向一样，也需要为电压规定参考极性(也称参考方向，为“+”极到“-”极的方向)。在分析电路问题时，先指定电压的参考极性，“+”号表示高电位端，“-”号表示低电位端，如图 1-5(a)所示。如果电压的参考极性与实际极性一致，则电压 $u > 0$ ；如果参考极性与实际极性相反，则电压 $u < 0$ 。

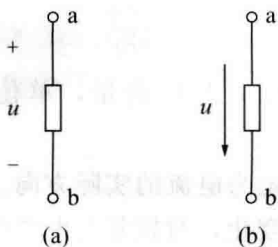


图 1-5 电压的参考极性

电压的参考极性是任意指定的，一般用“+”“-”极性表示；有时也用箭头表示参考极性，如图 1-5(b)所示，箭头由“+”极指向“-”极；也可用双下标表示，如 u_{ab} 表示 a 点为



“+”极，b点为“-”极。

在电路分析特别是在电子电路中，常选取电路的某一点作为参考点，并将参考点电位规定为零，用符号“ \perp ”来表示，则其他点与参考点之间的电压就称为该点的电位。

选取不同的参考点时，电路中各点的电位会发生变化，但是任意两点间的电压不随参考点选取的不同而变化。

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如果电流的参考方向和电压参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图1-6(a)所示；当两者不一致时，称为非关联参考方向，如图1-6(b)所示。

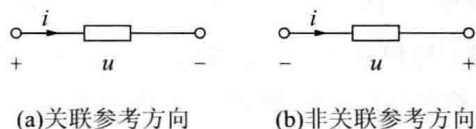


图 1-6 参考方向

在任意瞬时 t 的电流、电压分别用 $i(t)$ 、 $u(t)$ 表示，也常简写为 i 、 u 。如果它们的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流、直流电压，用大写字母 I 、 U 表示。

在实际应用中，上述电流、电压的数值有时过小或过大，这时可在各单位前加适当的词头，形成十进倍数单位和分数单位，例如， $1\mu\text{A}$ (微安) = 10^{-6}A ， 1mV (毫伏) = 10^{-3}V 等。部分常用国际单位制词头见表1-1。

表 1-1 部分国际单位制(SI)词头

因数	词头		符号	因数	词头		符号
	中文	英文			中文	英文	
10^{12}	太[拉]	Tera	T	10^{-3}	毫	milli	m
10^9	吉[咖]	Giga	G	10^{-6}	微	micro	μ
10^6	兆	Mega	M	10^{-9}	纳[诺]	nano	n
10^3	千	Kilo	k	10^{-12}	皮[可]	pico	p

► 1.2.3 功率和能量

在电路的分析和计算中，能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换；另一方面，电气设备、电路部件本身都有功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值，过载会使设备或部件损坏，或是不能正常工作。

电功率与电压和电流密切相关。当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时，与此电压相应的电场力要对电荷做功，这时元件吸收能量；反之，正电荷从电压的“-”极经元件运动到电压“+”极时，与此电压相应的电场力做负功，元件向外释放电能。

功率定义为释放或吸收的能量对时间的导数，用数学公式表示为



$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

式中，功率 p 的单位为 W(瓦特)，能量 ω 的单位为 J(焦耳)，时间 t 的单位为 s(秒)。

根据式(1-1)和式(1-2)可推出：

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dq}\right) \left(\frac{dq}{dt}\right) = ui \quad (1-4)$$

式(1-4)表示功率等于元件上流过的电流和元件上的电压的乘积。

从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的能量为

$$W(t) = \int dW = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-5)$$

式(1-5)中，为避免积分上限 t 与积分变量 t 相混淆，将积分变量换成 ξ 。

在指定电压和电流的参考方向后，应用式(1-4)求功率 p 时应当注意：当电压和电流的参考方向为关联参考方向时，乘积“ ui ”表示元件吸收的功率，当 p 为正值时，表示该元件确实吸收功率。如果电压和电流的参考方向为非关联参考方向时，乘积“ ui ”表示元件发出的功率，此时，当 p 为正值，则该元件确实发出功率。一个元件若发出功率 -100W ，则表明元件实际吸收功率 100W ；同理，一个元件若吸收功率 -100W ，则相当于该元件实际发出功率 100W 。

例 1-1 图 1-7 是由 A 和 B 两个元件构成的电路，已知 $u=3\text{V}$ ， $i=-2\text{A}$ 。求元件 A 和 B 分别吸收的功率。

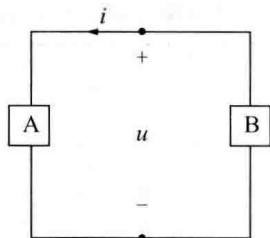


图 1-7 例 1-1 图

解：对元件 A 来说， u 与 i 为关联参考方向；对元件 B 来说， u 与 i 为非关联参考方向。因此有

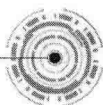
$$p_{A\text{吸}} = ui = 3 \times (-2)\text{W} = -6\text{W}$$

$$p_{B\text{吸}} = ui = -3 \times (-2)\text{W} = 6\text{W}$$

1.3 电阻元件和欧姆定律

1.3.1 电阻元件

电流在实际电路中流动并不是畅通无阻的。例如，在金属材料绕制的电阻器中，电流是由电子的定向移动形成的。电子受电场力作用作定向运动过程中，必然会碰撞到金属内部存在的原子、离子，这种碰撞对电流呈现一定的阻力，当然也就有能量的损耗。电阻元



件即是用来反映电能消耗的理想化元件。电阻是表征材料(或器件)对电流呈现阻力, 损耗能量的一种参数。

电阻值不随其上电压或电流数值变化的电阻, 称为线性电阻。阻值不随时间 t 变化的线性电阻, 称为线性时不变电阻。一般实际中使用的诸如碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等都近似看作这类电阻。今后如无特殊说明, 电阻一词就指线性时不变电阻, 我们只讨论这类电阻。

► 1.3.2 欧姆定律

欧姆定律(Ohm's Law, OL)是电路分析中重要的基本定律之一, 它说明流过线性电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系, 反映了电阻元件的特性。图 1-8(a)是理想电阻模型, 设电压、电流参考方向关联, 图 1-8(b)是它的伏安特性(Volt-Ampere Relationship, VAR), 也有写为电压电流关系 VCR(Voltage Current Relation), 后面将不再区分 VAR 或 VCR。为 $u \sim i$ 平面上一条通过原点的直线。该直线的数学解析式为

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-6)$$

此式即为欧姆定律公式。电阻 R 的单位为 Ω (欧姆)。

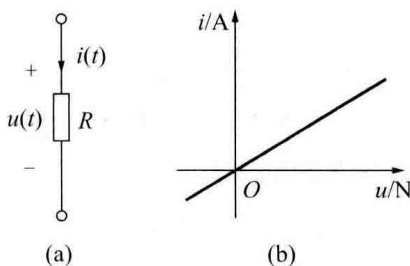


图 1-8 理想电阻模型及伏安特性

电阻的倒数称电导, 以符号 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

电导 G 的单位为 S(西门子)。电导是反映材料导电能力强弱的参数。应用电导参数来表示电流和电压之间关系时, 欧姆定律形式可写为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-8)$$

应当明确:

- 1) 欧姆定律只适用于线性电阻电路。
- 2) 如果电阻 R 上的电流、电压参考方向非关联, 则欧姆定律公式中应冠以负号, 即

$$u(t) = -Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = -Gu(t)$$

- 3) 由电阻的特性关系可知, 在电阻值不等于零、不等于无穷大时, 电流与电压是同时存在、同时消失的。或者说, 在这样的电阻、电导上, t 时刻的电压(或电流)只决定于 t 时刻的电流(或电压)。这说明电阻、电导上的电压(或电流)不能记忆电阻、电导上的电流(或电压)在“历史”上(t 时刻以前)所起过的作用。所以说电阻、电导元件是无记忆性元件, 又称即时元件。

当一个线性电阻元件的端电压无论为何值时，流过它的电流恒为零值，就把它称为“开路”。开路的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上与电压轴重合，它相当于 $R=\infty$ 或 $G=0$ ，如图 1-9(a) 所示。当一个线性电阻元件上流过的电流无论为何值时，它的端电压恒为零值，就把它称为“短路”。短路的伏安特性曲线在 $u-i$ 平面上与电流轴重合，它相当于 $R=0$ 或 $G=\infty$ ，如图 1-9(b) 所示。

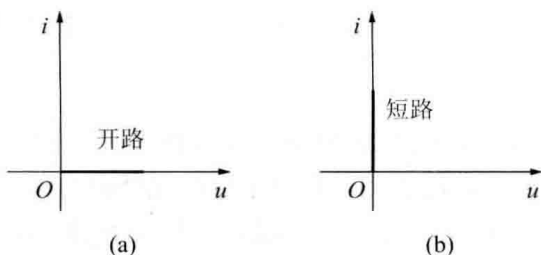


图 1-9 开路和短路的伏安特性曲线

▶ 1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量

电阻元件在任一时间消耗的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} = u^2 G \quad (1-9)$$

可见，对于 $R > 0$ 的电阻元件，它在电路中总是消耗功率的。

电阻元件从 t_0 到 t 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-10)$$

电阻元件一般把吸收的电转换成热能或其他能量。

实际用电器具的额定值是指制造厂家所给出的电压、电流或功率的限制数值，是为了保证用电器具的安全、正常使用。例如，一只灯泡上标明 220V、40W，即说明这样的含义：这只灯泡接 220V 电压，消耗功率为 40W。如果所接电压超过 220V，灯泡消耗功率大于 40W，就有可能将灯泡烧坏(不安全)；如果所接电压低于 220V，灯泡消耗功率小于 40W(灯光较暗)，应用不正常，是“大材小用”，显然，这样使用也是不合理的。市售的碳膜、金属膜电阻，除标明电阻值以外，通常还标有 1/8、1/4、1/2 及 2W 各挡，线绕电阻额定功率较大。在实际设计装配电路时，不但应按所需电阻值大小来选电阻，还应根据电阻在电路中所消耗的功率适当选择电阻型号。

▶▶▶ 1.4 电压源与电流源

电源是一种能将其他形式的能量(如机械能、热能、光能、化学能等)转换为电能的装置或装备。电源给电路提供某种形式的“输入”或“激励”。发电机、蓄电池、干电池等是一些常见的实际电源。电压源和电流源是从实际电源抽象得到的理想化电路模型，它们是二端有源元件。电源又可分为独立电源和非独立电源(受控源)两类。