



21世纪高职高专规划教材·电子信息系列

电路分析基础教程

曹泰斌 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

21 世纪高职高专规划教材·电子信息系列

电路分析基础教程

曹泰斌 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容:电路基本概念和定律、线性电阻电路的分析、正弦电流电路的分析、互感与谐振、三相电路、二端口网络、非正弦周期电流电路、线性电路过渡过程的时域分析、线性电路过渡过程的复频域分析等。文字通俗易懂,便于自学。每章前有本章内容介绍,每节后附有训练与思考题,每章后有本章小结、习题等。

本书是按照高职高专教育的教学要求而编写的,注重实践能力的培养。本书可作为高职高专院校电气类和电子信息等专业的“电路分析”课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础教程/曹泰斌主编. —北京:电子工业出版社,2003. 1

21 世纪高职高专规划教材·电子信息系列

ISBN 7-5053-8437-6

I. 电… II. 曹… III. 电路分析—高等学校:技术学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 001427 号

责任编辑:束传政 特约编辑:孙志明

印 刷:北京人卫印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:406 千字

版 次:2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:22.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

本教材是根据教育部 1999 年制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》编写而成,兼顾了电气类和电子信息类各专业的教学要求,可供高职高专院校相关各专业作为教材和教学参考书。全书共分九章,内容包括电路的基本物理量和模型、直流电路、正弦周期电流电路、非正弦周期电流电路、电路的过渡过程、二端口网络等,理论教学的参考学时为 76~94 学时。可根据各专业对电路理论要求的不同,对本书内容进行取舍。

高职高专院校的培养目标是培养技术应用性高等专门人才,基础理论以必须够用为度。本书作者一直在高职高专院校从事电路课程的教学工作,基于多年的教学实践,本书编写力求体现高职高专特色。即注重基本理论的理解、基本方法的掌握,忽略复杂的推导过程,只给出结论即可。文字通俗易懂,便于自学。在每章的前面有内容介绍,每节有训练与思考题,每章的后面有本章小结、习题等。

本书第 1、2、6、8、9 章由太原大学曹泰斌编写,第 3、5 章由长治职业技术学院王旭斌编写,第 4、7 章由长治职业技术学院唐纪荣编写,曹泰斌任主编,负责全书的统稿。太原理工大学电工基础教研室主任侯锐老师审阅了全书,提出了许多宝贵的意见,在此表示谢意。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处恐难避免,请使用本书的师生提出宝贵意见。

编者

2003 年 1 月

目 录

第 1 章 电路基本概念和定律	(1)
1.1 电路、电路元件、电路模型	(1)
1.1.1 电路	(1)
1.1.2 电路元件	(1)
1.1.3 电路模型	(2)
1.2 电路的基本物理量	(2)
1.2.1 电流及其参考方向	(2)
1.2.2 电压、电动势及其参考方向	(3)
1.2.3 电功率及其电能的吸收与释放	(5)
1.3 电阻元件及欧姆定律	(6)
1.3.1 电阻元件	(6)
1.3.2 欧姆定律	(7)
1.4 电压源与电流源	(8)
1.4.1 电压源元件	(9)
1.4.2 电流源元件	(9)
1.5 受控源	(10)
1.6 基尔霍夫定律	(12)
1.6.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	(12)
1.6.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	(13)
1.7 简单电路的求解	(15)
本章小结	(17)
习题 1	(18)
第 2 章 线性电阻电路的分析	(21)
2.1 电阻及无源网络的等效	(21)
2.1.1 等效的概念	(21)
2.1.2 电阻串联网路的等效	(21)
2.1.3 电阻并联网络的等效	(22)
2.1.4 电阻混联网路的等效	(23)
2.1.5 电阻星形与三角形联接网络的等效变换	(24)
2.2 两种电源模型及等效变换	(27)
2.2.1 实际电源的电压源模型	(27)
2.2.2 实际电源的电流源模型	(27)
2.2.3 实际电源两种模型的等效互换	(28)
2.2.4 电源元件的串并联	(29)

2.3	支路分析法	(31)
2.3.1	支路分析法概述	(31)
2.3.2	应用支路分析法的步骤	(32)
2.4	网孔分析法	(33)
2.4.1	网孔分析法概述	(33)
2.4.2	应用网孔分析法的步骤	(34)
2.4.3	网孔分析法的几种特殊情况	(34)
2.5	节点分析法	(36)
2.5.1	节点分析法概述	(36)
2.5.2	应用节点分析法的步骤	(37)
2.5.3	节点分析法的几种特殊情况	(37)
2.6	叠加定理	(39)
2.6.1	叠加定理概述	(39)
2.6.2	应用叠加定理要注意的问题	(40)
2.7	戴维南定理和诺顿定理	(42)
2.7.1	戴维南定理和诺顿定理概述	(42)
2.7.2	戴维南定理和诺顿定理的应用	(43)
2.8	最大功率传输定理	(46)
2.9	含运算放大器的电阻电路分析	(47)
2.9.1	运算放大器的外特性	(47)
2.9.2	含运算放大器的电阻电路——线性应用	(48)
	本章小结	(51)
	习题2	(52)
第3章	正弦电流电路	(58)
3.1	正弦量	(58)
3.1.1	正弦量的三要素	(58)
3.1.2	相位差	(59)
3.1.3	有效值	(61)
3.2	电容元件和电感元件	(63)
3.2.1	电容元件	(63)
3.2.2	电感元件	(66)
3.2.3	电容元件和电感元件的串并联	(68)
3.3	正弦量的相量表示	(71)
3.3.1	复数的概念	(72)
3.3.2	正弦量的相量表示	(73)
3.3.3	正弦量的叠加	(75)
3.4	单一元件伏安关系的相量形式	(76)
3.4.1	电阻元件伏安关系的相量形式	(76)
3.4.2	电感元件伏安关系的相量形式	(79)
3.4.3	电容元件伏安关系的相量形式	(81)

3.5	基尔霍夫定律的相量形式及简单正弦电路的计算	(84)
3.5.1	基尔霍夫定律的相量形式	(84)
3.5.2	简单正弦电路的计算	(84)
3.6	复阻抗、复导纳及其等效变换	(86)
3.6.1	复阻抗	(86)
3.6.2	复导纳	(88)
3.6.3	阻抗与导纳的等效互换	(90)
3.6.4	阻抗和导纳的串并联	(91)
3.7	正弦电路的功率及功率因数	(95)
3.7.1	二端网络的平均功率和功率因数	(95)
3.7.2	二端网络的无功功率和复功率	(97)
3.7.3	功率因数的提高	(99)
3.8	正弦电流电路的分析	(100)
	本章小结	(105)
	习题 3	(106)
第 4 章	互感与谐振	(111)
4.1	互感和互感电压	(111)
4.1.1	互感与互感元件	(111)
4.1.2	互感电压与同名端	(112)
4.1.3	互感元件的伏安关系	(113)
4.1.4	互感线圈的耦合系数	(114)
4.2	具有互感的正弦电流电路的计算	(115)
4.2.1	互感线圈的串联	(115)
4.2.2	互感线圈的并联	(116)
4.3	空心变压器	(120)
4.4	理想变压器	(123)
4.4.1	理想变压器模型及其参数	(123)
4.4.2	理想变压器的等效电路	(125)
4.5	串联电路的谐振	(127)
4.5.1	串联谐振的条件及电流、电压特性	(127)
4.5.2	串联谐振的能量特性	(129)
4.5.3	串联谐振的频率特性	(130)
4.6	并联电路的谐振	(134)
4.6.1	并联谐振的条件及电流、电压特性	(134)
4.6.2	并联谐振的品质因数	(135)
	本章小结	(137)
	习题 4	(139)
第 5 章	三相电路	(142)
5.1	三相电源与三相负载	(142)
5.1.1	三相电源	(142)

5.1.2 三相负载	(145)
5.2 对称三相电路的分析	(146)
5.2.1 负载星形接法的三相电路	(146)
5.2.2 负载三角形接法的三相电路	(148)
5.3 三相电路的功率	(151)
5.3.1 三相功率的计算	(151)
5.3.2 三相功率的测量	(154)
本章小结	(156)
习题 5	(157)
第 6 章 二端口网络	(159)
6.1 二端口网络的概念	(159)
6.2 导纳参数和阻抗参数	(160)
6.2.1 导纳参数	(160)
6.2.2 阻抗参数	(162)
6.3 传输参数和混合参数	(164)
6.3.1 传输参数	(165)
6.3.2 混合参数	(166)
6.4 互易二端口网络的等效电路	(170)
6.4.1 Π 形等效电路	(170)
6.4.2 T 形等效电路	(170)
6.5 二端口网络的级联	(171)
本章小结	(173)
习题 6	(174)
第 7 章 非正弦周期电流电路	(176)
7.1 非正弦周期电流	(176)
7.2 周期函数分解为傅里叶级数	(177)
7.2.1 周期函数的傅里叶级数	(177)
7.2.2 波形对称性与傅里叶系数的关系	(179)
7.3 非正弦周期电流电路的计算	(182)
7.4 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	(185)
7.4.1 非正弦周期量的有效值	(185)
7.4.2 非正弦周期量的平均值	(187)
7.4.3 非正弦周期电流电路的平均功率	(188)
本章小结	(189)
习题 7	(189)
第 8 章 线性电路过渡过程的时域分析	(193)
8.1 过渡过程的基本概念	(193)
8.2 换路定律和初始值计算	(194)
8.2.1 换路和换路定律	(194)
8.2.2 初始值计算	(194)

8.3	一阶电路的零输入响应	(196)
8.3.1	RC 电路的零输入响应	(196)
8.3.2	RL 电路的零输入响应	(199)
8.4	一阶电路的零状态响应	(201)
8.4.1	RC 电路的零状态响应	(201)
8.4.2	RL 电路的零状态响应	(204)
8.5	一阶电路的全响应	(206)
8.5.1	全响应的两种分解	(206)
8.5.2	一阶电路的三要素分析法	(209)
8.6	阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	(214)
8.6.1	阶跃函数	(214)
8.6.2	一阶电路的阶跃响应	(215)
8.7	二阶电路的零输入响应	(217)
8.7.1	RLC 典型二阶电路零输入响应的方程	(217)
8.7.2	典型二阶电路零输入响应方程的解	(218)
	本章小结	(223)
	习题 8	(225)
第 9 章	线性电路过渡过程的复频域分析	(229)
9.1	拉普拉斯变换及基本性质	(229)
9.1.1	拉氏变换	(229)
9.1.2	拉氏反变换	(229)
9.1.3	拉氏变换的主要性质	(230)
9.2	部分分式法进行拉普拉斯反变换	(232)
9.2.1	单根的情况	(232)
9.2.2	共扼复根的情况	(233)
9.2.3	重根的情况	(234)
9.3	线性电路的复频域解法	(235)
9.3.1	用拉氏变换求解描述线性电路的微分方程	(235)
9.3.2	电路元件的复频域模型	(236)
9.3.3	基尔霍夫定律的复频域形式	(238)
9.3.4	线性电路的复频域解法	(238)
	本章小结	(241)
	习题 9	(242)
	参考文献	(244)

第 1 章 电路基本概念和定律

本章介绍

基本概念：电路、电路模型、电路元件；

基本物理量：电流、电压、电功率；

基本元件：电阻、电压源、电流源、受控源；

基本定律：欧姆定律、基尔霍夫定律。

1.1 电路、电路元件、电路模型

1.1.1 电路

电路是指由若干实际的电气装置和器材，按照一定的规则连接起来，能形成电流通路的物质实体。电路根据它们的自身功能可以分成两大类，一类以传输电能及实现电能的转换为主，这类电路大到全国性的输、配电网络，小到一个手电筒电路；另一类以电作为载体，实现信号的处理为主，这类电路复杂到巨型电子计算机，简单到一个半导体收音机。

虽然各种电路的功能和组成不同，但它们都是由最基本的三部分构成，即电源（或信号源）、负载和中间环节。例如：输、配电网络的电源是各个发电厂的发电机组，而负载是各用户的电气设备，输、配电线路和有关的设备则是中间环节。收音机的信号源是电磁波谐振后的调幅波，而负载是扬声器，检波、放大电路则是中间环节。由此可见，电源或信号源是提供电能或电信号的装置，负载是用电或输出信号的装置，中间环节是对电能进行传输或变换的装置。

1.1.2 电路元件

实际的电路千差万别，其内部电磁关系繁纷复杂。为了对实际的电路进行准确的定量分析和计算，在实际的工程研究中，我们常常采用的方法是突出被研究对象的主要矛盾，忽略一些次要的因素，建立起一组既便于定量研究，又能代表对象特性的物理的或数学的模型，利用一套通用的方法进行分析，从而得到定量分析和计算的结果。电路理论就是对实际的电路进行一定程度的抽象，将它们理想化，建立起一组模型，我们称为电路模型，以便于对实际的电路进行分析研究。

为了建立实际电路的模型，首先要对组成实际电路的电气装置和器材进行抽象，获得理想化的电路元件。为简单起见，我们要求这些电路元件只包含单一的电磁关系，即每个元件仅有一个电磁约束关系，且电磁过程均发生在元件内部，我们称之为集中参数元件，也可称为集总参数元件。实际电气装置根据分析计算精确程度要求的不同，可用一个电路元件或多个电路元件的组合来表示其电磁关系。

下面，我们以一个手电筒电路为例，讨论如何将实际电路的电气装置或器材抽象成电路元件。

手电筒电路的示意图如图 1-1 所示, 灯泡是电路中的负载。当电路接通后, 电流流过灯丝, 消耗电能而产生热量并发光, 同时也在其周围产生微弱的磁场。但其主要的作用是消耗电能, 所产生的磁场可忽略, 故可将灯泡抽象为一个电阻元件, 这种元件的电磁特性就是消耗电能。电池是电路中的电源, 电路接通后, 将电能提供给灯泡, 主要的作用是保持电池两个电极之间固定的电压, 故可将电池抽象为一个电压源元件, 这种元件的电磁特性就是保持恒定电压。开关、导线则是电路的中间环节, 闭合后电阻很小, 我们只保留其导电特性而忽略电阻, 可抽象为理想化的连线。经过以上的抽象, 图 1-1 所示的手电筒电路示意图就变成图 1-2 所示的电路模型。

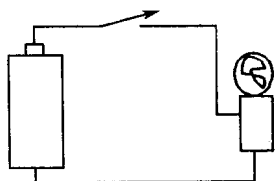


图 1-1 手电筒电路示意图

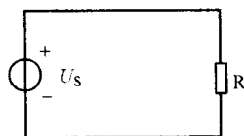


图 1-2 手电筒电路模型

1.1.3 电路模型

电路模型是由若干个电路元件按一定规则用理想化连线联接起来的电流通路, 电路模型图由规定的电路元件符号和理想化的连线构成。再次强调, 本课程所研究的对象是电路模型 (尽管也常简称为电路), 而不是实际电路。由于电路元件是从实际电气装置和器材中抽象得出, 故组成的电路模型比较准确地表征了实际电路主要的电磁关系。又由于电路元件种类很少, 使得我们才有可能建立一套分析计算的方法, 从而对电路模型进行研究。因为人们对实际电路的电磁关系认识程度不同和分析计算所要求的精确程度不同, 所以同一个实际电路可能会得出不同的电路模型, 所以电路模型都有一定的适用条件。不同的使用场合和不同的精度要求, 需要相适应的电路模型。关于如何建立电路模型, 不属本课程讨论的内容。

训练与思考题

1-1-1 观察你周围的电气设备, 将所熟悉的几种分析一下, 试指出电源 (信号源)、负载和中间环节各是什么。

1.2 电路的基本物理量

电流、电压、电功率是电路的基本物理量, 电路分析的任务就是求解电路方程, 计算电路中的电流、电压、电功率。

1.2.1 电流及其参考方向

物理学中, 将电荷有规则地定向运动的现象称为电流。描述这种现象强弱的物理量为电流强度, 也常简称为电流, 在数值上等于单位时间内通过导体任一截面的电荷量, 用符号 i 表示, 即

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

当电荷量 q 的单位取库仑 (C)，时间 t 的单位取秒 (s)，则电流 i 的单位为安培，用符号 A 表示。也有较小的单位，如毫安和微安，分别用符号 mA， μ A 表示。

当电流 i 的大小和方向均不变时，称为直流电流，可用大写的 I 表示，相应地有

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

电流是有方向的，习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。由于实际电路中的导体主要是金属，而金属导体的导电机理是带负电荷的自由电子，故电流的实际方向是这些自由电子运动的反方向。但是人们无法看到电荷的运动方向，也就无法确定电流的实际方向。为此，我们在计算之前，可任意假定一个方向为电流的正方向，称为电流的参考方向，在电路模型图中用箭头或带下标的变量标出，如图 1-3 所示。

确定参考方向后，电流就成为一个代数量。若电流的参考方向与实际方向一致，则电流为正值，若不一致，则电流为负值。故据预先任意选定的电流参考方向和计算出的带正负号的数值，便可确定电流的实际方向。至于如何得到正确的正负号，是由电路定理、定律、分析方法所保证的。

由于参考方向有箭头和下标两种表示方法，显然，在图 1-3 中有

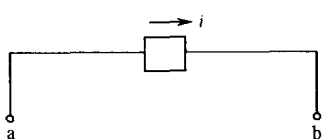
$$i = i_{ab}, \quad i = -i_{ba} \quad (1-3)$$


图 1-3 电流及其参考方向

1.2.2 电压、电动势及其参考方向

电荷在电场力作用下，顺着或逆着电场力的方向运动，电场力做功，将电能转变为其他形式的能量。电压是用来描述电场力做功的物理量。电路中 a, b 两点之间的电压，用符号 u_{ab} 表示，在数值上等于电场力将单位正电荷由 a 点移动到 b 点所做的功，也就是所减少的电势能，即

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-4)$$

电压也有方向，它的实际方向习惯上规定为电势能减少的方向。若 a 点电势能高，标“+”号，称为电压正极，则 b 点电势能低，标“-”号，称为电压负极。电压的实际方向为正极指向负极。

所谓电压，一定是两点之间的电压，某一点的电压不存在。但若将一点（例如 b 点）取为参考点，则另一点（例如 a 点）与参考点之间的电压 u_{ab} ，就称为该点的电位 v_a 。电位高的点比电位低的点电势能大，常将参考点本身的电位取为零。取不同的参考点，同一点的电位值将不同，而两点之间的电压与参考点的位置无关。当一个电路有惟一的参考点时，任意两点之间的电压就等于这两点的电位差，即

$$u_{ab}=v_a-v_b \quad (1-5)$$

在电路的分析计算中常取连接元件较多的点作为参考点，实际电路中常取大地、机壳、接地点作为参考点。

要使电荷在电路中连续流动，仅靠电场力是不行的，因为它只能使电荷向着电势能减小的单一方向运动，不能形成电流的闭合路径，故还需要另外一个力，能将被电场力从高电势能点移动到低电势能点的电荷，再移动到高电势能点。即需要反抗电场力做功，将其他形式的能量转换成电能，这个力就是电源力。电场力做功是将电能转化为其他形式的能量，电源力做功是将其他形式的能量转化为电能，故电源力存在于电源之中。描述电源力做功的物理量是电动势，用 e 表示。它在数值上等于电源力将单位正电荷由电源负极经电源内部移动到电源正极所做的功，也即增加的电势能，即

$$e = \frac{dw_s}{dq} \quad (1-6)$$

电动势的实际方向习惯上规定为电势能增大的方向，即电位升高的方向，也即由电源的负极指向正极。对于一个实际电源来说，当内部没有电能消耗时，其电动势和端电压（正负极之间的电压）必定是大小相等，方向相反，例如电源开路时就是如此。

当电压 u 或电动势 e 的大小和方向均不变时，称为直流电压、直流电动势，分别用大写的 U 或 E 表示，相应地有

$$U_{ab} = \frac{W}{Q}, \quad E = \frac{W_s}{Q} \quad (1-7)$$

当电势能 w ， w_s 的单位取焦耳 (J)、电荷量 q 的单位取库仑 (C)，则电压 u 、电动势 e 的单位为伏特，用符号 V 表示。较大的单位有千伏，用符号 kV 表示；较小的单位有毫伏、微伏，分别用符号 mV， μ V 表示。

同理，人们也无法看到电势能孰高孰低，也就无从确定电压、电动势的实际方向。为此，我们在计算之前，可任意假定一个方向为电压、电动势的正方向，称为电压、电动势的参考方向，在电路模型图中用箭头、下标或正负极性标出，如图 1-4 所示，也称为参考极性。

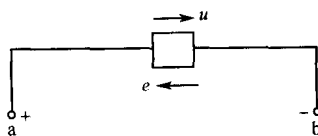


图 1-4 电压、电动势及其参考方向

确定参考方向后，电压、电动势就成为代数量。若参考方向与实际方向一致，则电压、电动势为正值；若不一致，则电压、电动势为负值。故据预先任意选定的电压、电动势参考方向及带正负号的数值，便可确定电压、电动势的实际方向。至于如何得到正确的正负号，也是由电路定理、定律、分析方法所保证的。

由于参考方向有箭头、正负号和下标三种表示方法，显然，在图 1-4 中有

$$\begin{aligned} u &= u_{ab}, & u &= -u_{ba} \\ e &= e_{ba}, & e &= -e_{ab} \end{aligned} \quad (1-8)$$

对于同一个开路的电源，当端电压、电动势取相反的参考方向时（如图 1-4 所示），有

$$u = e, \quad u_{ab} = e_{ba}$$

而当端电压、电动势取相同的参考方向时，有

$$u = -e, \quad u_{ab} = -e_{ba} \quad (1-9)$$

对于电流、电压和电动势的关系，可以用一个形象化的比喻（不一定很确切）来说明：幼儿园小朋友玩滑梯，站在上面的小朋友相对于地面有较高的“地势能”。当地球力做功时，可以使小朋友滑下来，在滑梯上形成“人流”。要有连续不断的“人流”，必须源源不断地把滑下来的小朋友送上去，单靠地球力是不可能做到的，必须要有老师的力做功，反抗地球力把小朋友送上去，即要有“地动势”，其方向是向上的，而“地压”的方向是向下的，二者大小相等，方向相反。

1.2.3 电功率及其电能的吸收与释放

电功率是用来表示电路中电能转换快慢的物理量，数值上等于电路中电能转换的速率，用符号 p 表示，即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-10)$$

电功率大意味着电路中电能转换快，在同样时间内电能转换的规模大、数量多。故电功率的按时间累积就是电路吸收或释放的电能，可得出在 $t_0 \sim t_1$ 时间内电路吸收或释放的电能为

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p dt = \int_{t_0}^{t_1} u \cdot i dt \quad (1-11)$$

当直流电路时，有

$$P = UI, \quad W = P(t_1 - t_0) = Pt \quad (1-12)$$

若电压的单位取伏特 (V)，电流的单位取安培 (A)，则电功率的单位为瓦特，用符号 W 表示。较小的单位有毫瓦，用符号 mW 表示，较大的单位有千瓦、兆瓦，分别用符号 kW，MW 表示。若时间的单位取秒，功率的单位取瓦，则电能的单位为焦耳，用符号 J 表示。焦耳等于 1 瓦的用电设备在 1 秒内所消耗的电能。实际中常采用千瓦时 (kW·h) 作为电能的单位，等于 1 千瓦的用电设备在 1 小时内所消耗的电能。1 千瓦时也就是我们常说的 1 度电。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \times 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

我们在分析电路时不但要知道电功率、电能的大小，还需知道这些电能是被元件所吸收、还是由元件里释放出来。为区别起见，习惯上我们规定：元件吸收电能时功率为正，元件释放电能时功率为负。为此，我们给出电功率的两种计算式。当元件的电压、电流取相同的参考方向时，即关联参考方向，如图 1-5 (a) 所示时，有

$$p = u \cdot i \quad (1-13)$$

当元件的电压、电流取不同的参考方向时，即非关联参考方向如图 1-5 (b) 所示时，有

$$p = -u \cdot i \quad (1-14)$$

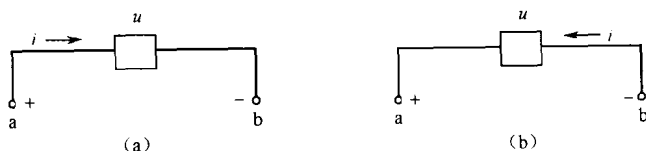


图 1-5 关联和非关联参考方向

无论关联或非关联参考方向，都有：若 $p>0$ ，则元件吸收功率；若 $p<0$ ，则元件释放功率。

例 1-1 在图 1-5 (a) 中， $U=2\text{V}$ ， $I=-3\text{A}$ ，求电功率 P ，并指出该元件是吸收还是释放电能，若在图 1-5 (b) 中情况又会怎么样？

解：图 1-5 (a) 中电压电流为关联参考方向，故

$$P=UI=2\times(-3)=-6(\text{W})$$

因电功率为负，故该元件释放电能。实际上，因电压为正，说明实际方向为由 a 到 b；而电流为负，说明实际方向为 b 到 a，显然是电源力做功，这是电源的特性，故为释放电能。

图 (b) 中电压电流为非关联参考方向，故

$$P=-UI=-2\times(-3)=6(\text{W})$$

因电功率为正，故该元件吸收电能。实际上，因电压为正，说明实际方向为 a 到 b；而电流为负，说明实际方向也为 a 到 b，显然是电场力做功，这是负载的特性，故为吸收电能。

**训练
与
思考题**

1-2-1 为什么要规定电流与电压的参考方向，参考方向与实际方向有何关系？

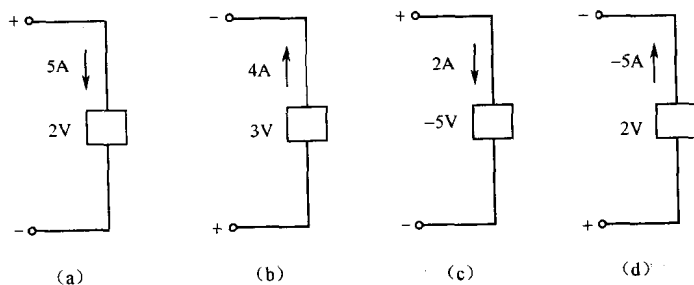
1-2-2 由 a 端流入 b 端流出的一段电路的电荷量为

$$q(t)=10\text{e}^{-2t}\sin\frac{\pi}{4}t(\text{C})$$

试分别求 $t=0\text{s}$ ， 2s ， 3s 时的电流值，并指出电流的实际方向。

1-2-3 电量为 2C 的负电荷由 a 点移到 b 点，若电荷失去 10J 能量或得到 10J 能量，求两种情况下的 U_{ab} 。

1-2-4 计算下图各电路的功率，并指出是吸收功率还是释放功率。



题 1-2-4 图

1.3 电阻元件及欧姆定律

我们将所有实际电气设备或器材消耗电能的特性抽象为电阻元件。电阻元件是电路中最常用的元件之一。欧姆定律反映了电阻元件的特性。

1.3.1 电阻元件

电阻元件的定义：若一个二端元件在任意时刻的电压 u 和电流 i 的关系（我们称为伏安关系）惟一地由 $u-i$ 平面的一族曲线所确定，如图 1-6 (a) 所示，则该元件称为电阻元件。

若一族曲线演变成一条过原点的直线，如图 1-6 (b) 所示，则称为线性时不变电阻，该直线的斜率就是电阻元件的电阻值，用 R 表示。本课程主要研究的就是线性时不变电阻。电阻元件的符号如图 1-6 (c) 所示。

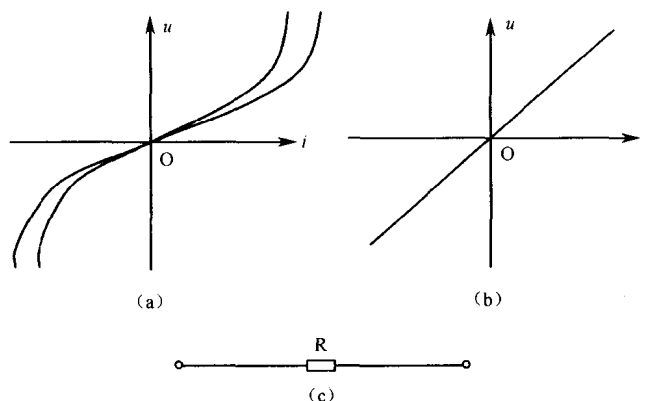


图 1-6 电阻元件的伏安关系及符号

1.3.2 欧姆定律

电阻作为消耗电能的元件，总是电场力做功，故实际的电流总是从高电位端流向低电位端，即电流的方向与电压的方向一致。故在电流电压都为实际方向时，伏安关系曲线总是在 $u-i$ 平面的第一、三象限。欧姆定律正是反映了电阻元件的伏安关系。

当电阻元件的电压、电流取关联参考方向时， u 、 i 之间的关系为

$$u = R \cdot i \quad \text{或} \quad i = \frac{u}{R} \quad (1-15)$$

当电压、电流取非关联参考方向时， u 、 i 之间的关系为

$$u = -R \cdot i \quad \text{或} \quad i = -\frac{u}{R} \quad (1-16)$$

其中 R 为电阻元件的电阻，式 (1-15) 和式 (1-16) 称为欧姆定律。要注意这里的正负号，它正确地表示了电流通过电阻元件时是电场力做功，在两个端钮之间产生电压降的特性。当电流的单位取安培，电压的单位取伏特时，电阻值的单位为欧姆，用符号 Ω 表示，电阻值是电阻元件的参数。

电阻元件的参数除电阻外，还有另一个参数称电导，以 G 表示，数值上为电阻的倒数，单位为西门子，用符号 S 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-17)$$

当电阻元件的参数用电导表示时，式 (1-15) 和式 (1-16) 变成

$$i = G \cdot u \quad \text{或} \quad u = \frac{i}{G}$$

$$i = -G \cdot u \quad \text{或} \quad u = -\frac{i}{G}$$

下面讨论电阻元件的功率。我们知道，电阻元件总是消耗电能的，而不可能释放电能。

当电阻元件的电压电流取关联参考方向时, 电阻元件的功率为

$$p = u \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{i^2}{G}$$
$$p = u \cdot i = \frac{u^2}{R} = G \cdot u^2 \quad (1-18)$$

由式(1-18)可见, p 恒正, 且这一结果与电阻元件的电压电流是否为关联参考方向无关, 故电阻元件总是吸收电能, 故被称为耗能元件。实际的电阻器(包括消耗电能的一切电气设备和器材)将所吸收的电能转换为热能, 使温度升高, 过高的温度下, 电阻器有烧坏的危险。所以, 通常在电阻器上除了标明电阻值外, 还标有额定功率或额定电流, 使用时不可超过所规定的额定值。另外, 虽然实际的电阻器都有或多或少的非线性特性, 但大多数情况下当做线性电阻进行分析计算是可以满足工程需要的。

为简便起见, 我们将线性时不变电阻元件简称为电阻。这样电阻就有两个含义, 既指元件, 也指参数。另外, 我们也常将实际电阻器称为电阻, 但要注意二者的本质区别。

例 1-2 一个标有“220V, 40W”的白炽灯泡, 正常发光时通过灯丝的电流是多少? 灯丝的电阻是多少? 工作 10h 耗电多少? 若接到 110V 的电源上, 其实际功率是多少?

解: 正常工作时的电流, 由 $P = U \cdot I$ 可得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0.1818 (\text{A})$$

灯丝电阻 R , 由 $P = \frac{U^2}{R}$ 可得

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} = 1210 (\Omega)$$

工作 10h 的耗电为

$$W = Pt = 40 \times 10^{-3} \times 10 = 0.4 (\text{kW} \cdot \text{h})$$

若接到 110V 的电源上, 实际功率为

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{110^2}{1210} = 10 (\text{W})$$

额定功率为 40W 的负载, 当工作电压为额定电压的一半时, 实际功率只有 10W, 即额定功率的四分之一。可见, 负载只有在额定电压下工作, 才能达到额定的功率。

训练 与 思考题

1-3-1 一个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻, 允许通过的最大电流是 10mA, 求电阻的最大允许功率和电导。

1-3-2 一个标有“ $510\text{k}\Omega$, $1/2\text{W}$ ”的电阻器, 使用时允许的最大电压是多少? 允许通过的最大电流是多少?

1.4 电压源与电流源

我们将各种实际电源发出电能的特性抽象为电压源元件和电流源元件。有的实际电源需要用电压源元件表示其特性, 而有的实际电源需要用电流源元件表示其特性。