



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

电路分析基础

主 编 吴舒辞
张发生
刘金华



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

电路分析基础

主 编	吴舒辞	张发生	刘金华
副主编	万芳瑛	桂 玲	
参 编	刘 帅	王明芳	
	刘华根	周慧英	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

作为信息类专业的基础课程教材,本书覆盖了高等工科院校电路分析课程教学大纲所要求的内容。本书被列入湖南省高等教育精品课程建设项目。

本书由电阻电路、动态电路、正弦稳态电路三大模块构成,全面系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分12章,内容包括:电路的基本概念和基尔霍夫定律、电路的等效变换、线性电路的基本分析方法、电路定理、相量法基础、正弦电流电路分析、一阶电路、二阶电路、含有耦合电感的电路、三相电路、二端口网络及利用MATLAB计算电路。每章前面均设有、教学要点和引例,每章后面均安排了阅读材料和习题,以便读者阅读及巩固基础知识,并附有习题答案。

本书可作为高等院校信息类各专业(电子、自动化、通信工程、电子科学与技术、计算机等)本科生的教材,也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/吴舒辞,张发生,刘金华主编. —北京:北京大学出版社,2012.6

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-20505-1

I. ①电… II. ①吴…②张…③刘… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第066982号

书 名: 电路分析基础

著作责任者: 吴舒辞 张发生 刘金华 主编

策 划 编 辑: 程志强 郑 双

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-20505-1/TM·0044

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 三河市北燕印装有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 19.5印张 450千字

2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷

定 价: 38.00元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“电路分析基础”课程是电子信息工程、自动化、通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术等相关信息类专业必修的一门重要的专业基础课程。本书依据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会颁布的《高等学校电路分析教学基本要求》，结合编者多年的教学经验，为适应工程应用型的本科院校电子信息类专业教学需要而编写。

本书在内容选材上立足于“加强基础、精选内容”的原则，在编写过程中注意与“高等数学”、“大学物理”等课程及“模拟电子技术”、“信号与系统”等后续课程衔接和配合。在编写风格和文字叙述上力求做到思路清晰、重点突出、简洁明了、深入浅出、重视工程应用。在内容的编排上着眼于方便教师上课和有利于学生的阅读及自学，突出物理概念和物理背景，书中减少了冗余的定理、性质、公式的数学证明与推导，加强了计算机技术在电路中的使用，专门编写了利用 MATLAB 软件计算电路一章。本书还结合各章的知识点，精心选编了较多的例题和习题。此外，每章前设有教学要点和引例，在每章后安排了阅读材料和习题，以便学生阅读及基础知识的巩固。

本书共分 12 章，由吴舒辞教授、张发生副教授、刘金华副教授任主编，负责全书的组织、统稿和改稿工作。吴舒辞教授编写了第 1 章，张发生副教授编写了第 2 章、第 3 章，周慧英副教授编写了第 4 章，万芳瑛副教授编写了第 5 章、第 6 章，桂玲讲师编写了第 7 章、第 8 章，刘华根讲师编写了第 9 章，刘帅讲师编写了第 10 章、第 11 章，王明芳讲师编写了第 12 章。

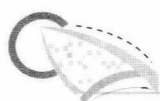
鉴于作者水平有限以及其他各种原因，书中不妥之处在所难免，敬请同行和广大读者批评指正！

编 者

2012 年 2 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和		第 4 章 电路定理	74
基尔霍夫定律	1	4.1 叠加定理	75
1.1 电路与电路模型	2	4.2 替代定理	80
1.2 电路变量	5	4.3 戴维南定理和诺顿定理	81
1.3 电阻元件	8	4.4 特勒根定理	88
1.4 电容元件	11	4.5 互易定理	91
1.5 电感元件	13	4.6 对偶原理	93
1.6 理想电源	15	4.7 小结	95
1.7 受控电源	19	阅读材料	95
1.8 基尔霍夫定律	20	习题	95
1.8.1 基尔霍夫电流定律	20	第 5 章 相量法基础	100
1.8.2 基尔霍夫电压定律	22	5.1 引言	102
1.9 小结	23	5.2 正弦量	103
阅读材料	23	5.2.1 正弦量的三要素及	
习题	24	相位差	103
第 2 章 电路的等效变换	28	5.2.2 有效值	107
2.1 等效二端网络的概念	29	5.3 正弦量的相量表示	108
2.2 无源一端口网络的等效变换	30	5.3.1 复数表示及运算	108
2.3 电阻的 Y 型连接和 Δ 形连接的		5.3.2 正弦量的相量表示及	
等效变换	37	运算	111
2.4 电压源、电流源的串联和并联	42	5.4 电路元件以及无源二端网络伏安	
2.5 实际电源的两种模型及其		关系的相量形式	113
等效变换	43	5.4.1 单个电路元件伏安关系的	
2.6 等效电阻、输入电阻	48	相量形式以及阻抗和	
2.7 小结	49	导纳	114
阅读材料	49	5.4.2 RLC 串联电路伏安关系的	
习题	50	相量形式及阻抗和导纳	118
第 3 章 线性电路的基本分析方法	53	5.4.3 无源二端网络的等效阻抗和	
3.1 线性电路的基本分析方法概述	54	等效导纳	120
3.2 支路电流法	55	5.5 基尔霍夫定律的相量形式	121
3.3 节点电压法	57	5.6 小结	121
3.4 网孔电流法	61	阅读材料	122
3.5 回路电流法	65	习题	123
3.6 小结	68	第 6 章 正弦电流电路分析	127
阅读材料	69	6.1 正弦电流电路的相量分析法	131
习题	70	6.1.1 阻抗(导纳)的串联和	
		并联	131



6.1.2 相量分析法的一般步骤	132	第8章 二阶电路	194
6.1.3 相量图	133	8.1 二阶电路的零输入响应	195
6.1.4 复杂正弦电流电路的 相量分析	136	8.2 二阶电路的零状态响应和 阶跃响应	201
6.2 正弦电流电路的功率	138	8.3 二阶电路的冲激响应	203
6.2.1 二端网络的瞬时功率和 平均功率以及功率因数	139	8.4 小结	204
6.2.2 无功功率和视在功率	140	阅读材料	204
6.2.3 复功率	142	习题	205
6.3 功率因数的提高	144	第9章 含有耦合电感的电路	207
6.4 最大功率传输定理	145	9.1 互感	208
6.5 正弦电流电路的谐振	147	9.2 含有耦合电感电路的计算	211
6.5.1 串联谐振	147	9.2.1 电感的串联	211
6.5.2 并联谐振	149	9.2.2 电感的并联	213
6.6 小结	151	9.3 空心变压器	215
阅读材料	151	9.4 理想变压器	218
习题	152	9.5 小结	220
第7章 一阶电路	160	阅读材料	220
7.1 动态电路的方程及其初始条件	161	习题	221
7.1.1 动态电路的过渡过程	162	第10章 三相电路	225
7.1.2 动态电路初始值的计算	163	10.1 三相电路	226
7.1.3 动态电路初始值的确定 方法	164	10.1.1 三相电源	226
7.2 一阶电路的零输入响应	165	10.1.2 三相电源的连接 方式	227
7.2.1 一阶 RC 电路的零输入 响应	165	10.1.3 三相负载的连接 方式	228
7.2.2 一阶 RL 电路的零输入 响应	167	10.2 线电压(电流)与相电压(电流)的 关系	229
7.3 一阶电路的零状态响应	170	10.3 对称三相电路的计算	230
7.3.1 一阶 RC 电路的零状态 响应	170	10.3.1 对称三相四线制电路的 分析与计算	230
7.3.2 一阶 RL 电路的零状态 响应	171	10.3.2 对称负载三角型连接 三相电路分析与计算	232
7.4 一阶电路的全响应	173	10.4 不对称三相电路的概念	234
7.4.1 一阶 RC 电路的全响应	173	10.5 三相电路的功率	236
7.4.2 三要素法求解一阶电路 全响应	174	10.6 小结	239
7.5 一阶电路的阶跃响应	178	阅读材料	239
7.6 一阶电路的冲激响应	181	习题	240
7.7 小结	185	第11章 二端口网络	243
阅读材料	186	11.1 二端口网络的方程和参数	244
习题	187	11.1.1 二端口网络的概念	244

11.1.2 二端口网络的基本 方程和参数.....	245	习题.....	259
11.2 二端口网络的等效网络.....	251	第 12 章 利用 MATLAB 计算电路	263
11.2.1 无源二端口网络的 T 型 等效电路.....	251	12.1 MATLAB 的概述	264
11.2.2 无源二端口网络的 π 型 等效电路.....	252	12.2 MATLAB 程序设计基础	266
11.2.3 含源二端口网络的 等效电路.....	253	12.2.1 MATLAB 操作 界面.....	266
11.3 二端口网络的互联.....	254	12.2.2 程序控制结构.....	270
11.3.1 二端口的级联.....	254	12.3 电路的传递函数及频率特性.....	274
11.3.2 二端口的串联.....	255	12.4 MATLAB 在基本电路中的 应用举例.....	275
11.3.3 二端口的并联.....	255	12.4.1 直流电路计算.....	275
11.4 有载二端口网络.....	256	12.4.2 正弦稳态电路分析.....	277
11.4.1 输入阻抗和输出 阻抗.....	256	12.4.3 暂态电路分析.....	278
11.4.2 传输函数.....	257	12.5 小结.....	279
11.5 二端口网络的特性阻抗.....	258	阅读材料.....	279
11.6 小结.....	258	习题.....	280
阅读材料.....	259	参考答案	282
		参考文献	297

第 1 章

电路的基本概念和基尔霍夫定律

电路模型是电路分析的基础。电流和电压是电路中的基本变量。各电流、电压间的约束关系分为两种：一种是各理想元件的伏安关系(VCR)；另一种是与元件性质无关的反映电路连接特点的基尔霍夫定律。这些是电路理论的基本概念，是本章阐述的主要内容。本章是全书的基础。



教学要点

知识要点	掌握程度
电路和电路模型	(1) 理解电路和电路模型的概念 (2) 了解集中参数电路的概念
电压、电流和功率	(1) 理解电压、电流和功率的概念 (2) 掌握参考方向的使用方法
电路元件	(1) 理解电阻、电容和电感元件的伏安特性 (2) 理解理想电源特性
基尔霍夫定律	熟练地掌握基尔霍夫定律的使用方法



1.1 实际电路组成与功能

当今正处在一个高速发展的信息时代，而电路构成了形形色色的电子产品和设备，且人们每天都不得不与实际电路打交道。实际电路是为完成某种预期的目的而设计、安装、运行的，由电路器件(如晶体管)和电路部件(如电容器、电阻器等)相互连接而成，具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。在实际电路中，电能或电信号的发生器称为电源，用电设备称为负载。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励源。由于激励而在电路中产生的电压和电流称为响应。有时根据激励和响应之间的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。

有些实际电路十分复杂。例如，在图 1.0(a)所示的一汽奥迪 A4L “舒适型”汽车外形中就能看到很多电子设备和电路的影子；在图 1.0(b)中显示汽车的驾驶室内，能粗略地看到电子通信设备、行车控制设备等。毫无疑问，这些设备都是由各种电子器件、实现

特定功能的电路所构成的。当前,集成电路的应用已渗透到许多领域,集成电路芯片可能比指甲还小,但它是由成千上万个晶体管相互连接构成的。当今,超大规模集成电路的集成度越来越高,就是说在同样大小的硅片上可容纳的器件数目越来越多,可达数百万或更多。前面所谈电路,无论尺寸大小都是比较复杂的,但也有些电路非常简单,例如,手电筒就是一个很简单的电路。



(a) 外观



(b) 驾驶室

图 1.0 一汽奥迪 A4L “舒适型” 汽车

1.1 电路与电路模型

电在人们的日常生活和工农业生产等各个领域的应用日益广泛,以至于人们对电产生了相当的依赖性,甚至到了没有它就无法正常生活和工作的程度,电的重要性由此可见一斑。电是通过实际电路提供的,它的应用又是依靠各种各样的电路实现的。因其功能不同,所以实际电路千差万别,但不同的电路都遵循着基本的电路定律。

电路就其作用可分为两大类。其一是以传输、分配、转换电能为目的的供配电系统,因其功率、电流、电压的值较大,故也称为强电系统。在供配电系统中,人们关心的是怎样减少能量损耗,以提高系统的效率。其二是以传送、处理、储存信号为目的的电子电路,因其功率、电流、电压的值较小,而称为弱电系统。在弱电系统中,人们主要关心怎样减小信号在传送、处理、储存过程中的失真。

电路的结构按大小来看也相差甚远。大到跨省界、国界、洲界的供配电系统,小到在纽扣大小的芯片上集成上百万或更多元件的集成电路。显然,上述大、小两类电路在结构上都是非常复杂的。但无论是简单电路,还是复杂电路,就其组成而言不外乎 3 个部分:电源、中间环节、负载。

人们把提供电能的装置称为电源,因其在电路中起激励作用,所以,又称为激励。把转换电能的装置称为负载。连接电源与负载的环节,称为中间环节。最简单的中间环节由导线和开关组成,复杂的中间环节可能是一个非常庞大的网络。在强电系统中,中间环节的作用是传输、分配、供给电能以及控制电能的输送。在弱电系统中,中间环节的作用是传送、处理信号。激励在电路中产生的电流和电压称为响应,有时又称为输出。电路分析就是在已知激励和电路结构、参数的情况下求响应。若已知激励和响应,要确定电路的结构和参数,就称为电路综合。本章主要讲述电路分析,探讨电路的基本定律和定理及各种计算方法,为学习后续电类课程打下基础。



电路分析中所指的电路，不是实际电路，而是从实际电路中抽象出来的、由理想元件所组成的电路模型。要建立实际电路的电路模型，首先应该将实际电路元件理想化，把实际的电阻元件、电感元件、电容元件理想化为理想电阻、理想电感和理想电容。实际电路元件及理想电路元件的图形符合如图 1.1 所示。理想电路元件是具有单一电磁性质的假想元件，具有精确的数学定义。除上述理想元件外，还有理想电源和理想受控源等。引入理想电路元件后，则实际电路元件或实际电路在一定条件下就可以用理想元件或其组合来模拟，此即为实际电路元件或实际电路的理想化模型。根据理想元件端子的数目，理想电路元件可分为二端、三端、四端元件等。

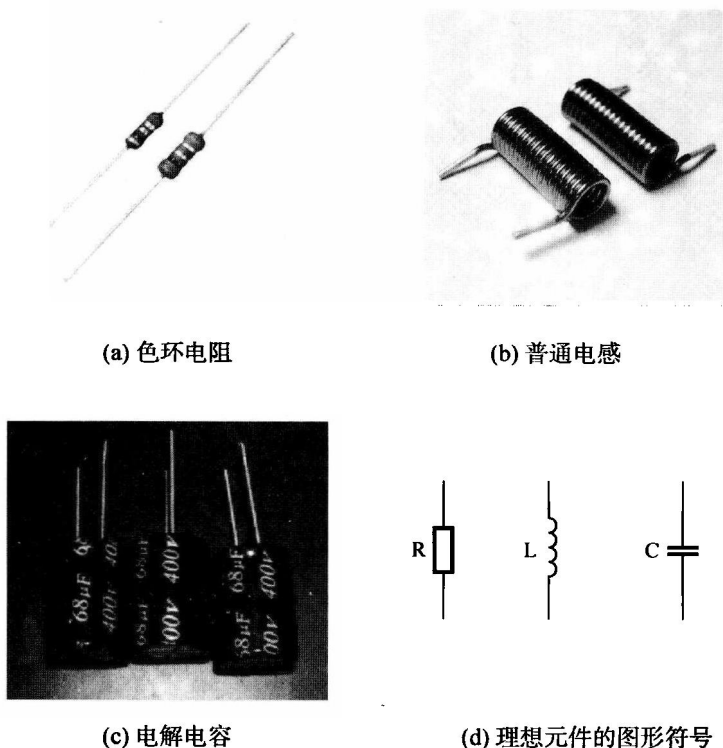
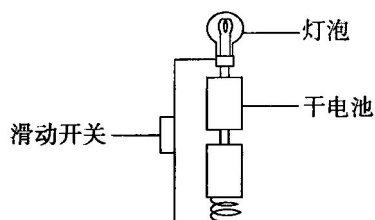
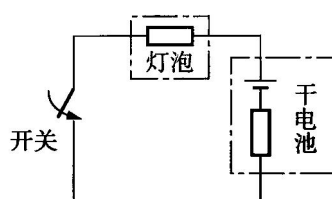


图 1.1 实际电路元件及理想电路元件的图形符号

图 1.2(a)为实际手电筒电路，图 1.2(b)为其电路模型，图 1.2(c)、图 1.2(d)分别为干电池和手机电池。小白炽灯用理想电阻 R 来模拟，干电池用理想电压源 U_s 和电阻 R_s 的串联组合来模拟。在电路模型中，导线和开关也是理想的。实际电路模型的建立不是本书主要讨论的问题，但在建立电路模型时要注意，同一个实际元件在不同的条件下，可能采用不同的模型。同样地，同一个实际电路，在不同的条件下，也可能采用不同的电路模型。在建立模型时，不能考虑得过细，否则会导致主次不分，致使模型过于复杂，给电路分析带来不必要的困难。而应在满足工程精度要求的前提下，尽可能忽略一些次要因素，抓住主要因素，建立起既简单又足以反映其电磁性质的电路模型。恰当的、符合实际的电路模型既可以使电路分析得到简化，又能满足工程需要。



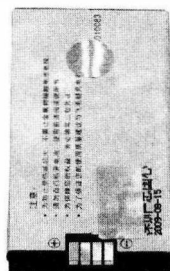
(a) 实际手电筒电路



(b) 电路模型



(c) 干电池



(d) 手机电池

图 1.2 手电筒电路及其电路模型与一些常用电池

在上述的电路模型中，实际电路的尺寸大小已被忽略。例如：较大的手电筒和较小的手电筒，其电路模型均如图 1.2(b) 所示。在这里是用集中的作用代替分散的作用。例如：对分散存在的输电线的阻抗作用，常用一个集中的阻抗作用来表示等。对于这些集中作用的理想元件，认为其电磁作用都集中在元件的内部。电路理论中把这样的理想元件称为集总参数元件，由集总参数元件组成的电路模型称为集总参数电路，或称为集总电路。

如前所述，在集总电路中，认为电磁现象都发生在元件内部，这就意味着不考虑电场和磁场之间的相互作用。根据电磁场理论，电场和磁场的相互作用将产生电磁波。当电路的几何尺寸与电路工作频率所对应的波长可以相比拟时，电磁波的辐射将显著加强。电路中的部分能量将随电磁波辐射到空间。这与能量的消耗都发生在电阻元件内部的假设不符。因此，只有当实际电路由于电磁波的辐射而产生的能量损失可以忽略不计时，才能按集总电路对待。电磁理论和实践均证明，当实际电路的几何尺寸 l 远小于电路工作频率所对应的波长 λ 时，电磁波辐射的能量小到可以忽略不计，实际电路可按集总参数电路对待。电路工作频率所对应的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中： $c=3 \times 10^8$ m/s 为光速； f 为电路的工作频率。我国工业用电频率为 $f=50$ Hz，则对应波长为

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{50} \text{ m} = 6000 \text{ km}$$



因此,对于几何尺寸远小于 6000km 的供电网络,都可以按集总参数电路进行处理。因 λ 值随着电路工作频率 f 的增高而减小,故在高频电路中,甚至对尺寸仅为几米的电路,也不能按集总电路对待。

如上所述,当电路的几何尺寸可以和电路工作频率所对应的波长相比拟时,这个电路就不能按集总参数电路对待,而要用分布参数电路或电磁场理论来分析。本书只涉及集总参数电路的分析与计算。

1.2 电路变量

电路分析的任务是得到电路的电性能,即用一组表作为时间函数的变量。这些变量中最常见的是电流、电压和功率。

1. 电流

在电场力的作用下,电荷的定向移动就形成了电流。电流是看不见、摸不着的,但电流的强弱可以间接地通过其他手段知道。例如,流过手电筒的电流和流过汽车灯的电流的强弱是不一样的,这就知道了电流的存在并且知道了电流存在的大小。

用 i 表示随时间变化的电流,用 I 表示恒定电流(或称为直流)。电流的定义为:在单位时间内,通过导体横截面的电荷量代数和称为电流,即

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

在国际单位制中,电流、电荷和时间的基本单位是安培(简称安,用 A 表示)、库仑(简称库,用 C 表示)和秒(用 s 表示)。在实际应用中,电流有时也常用其辅助单位:千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A),其换算关系为

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}; 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}; 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

规定正电荷移动的方向电流的方向。在简单电路中,电流的实际方向很容易确定,但当电路比较复杂时,电流的实际方向往往不易直观确定,例如,在图 1.3 所示的桥式电路中, R_5 中的实际电流方向就难以确定。另外,在交流电路中,电流的方向随时间而变化,不便在电路图中标出。因此,为求解电路方便,须预先规定电流的参考方向。电流的参考方向是人为假设的方向,在电路图中用箭头表示,如图 1.4 所示。

在规定的电流参考方向下电流是代数量,求解的结果可能为正也可能为负。如果电流为正值,则电流的实际方向与参考方向一致;如果电流为负值,则电流的实际方向与参考方向相反。在图 1.4 中,如果求得 $i = -3\text{A}$,则说明电流的实际方向是由 b 指向 a 的;如果 $i = 3\sin(314t)\text{A}$,即电流值是随时间正负交变的,这说明其实际方向随时间交变。在其为正的时间内,其实际方向由 a 指向 b;在其为负的时间内,其实际方向由 b 指向 a。

电流的参考方向和其带有正(或负)号的代数值一起给出了电流的完整解答,既给出了电流的大小,又反映了电流每一时刻的实际方向。仅有数值而没有参考方向的电流是无意义的,因此,在求解电路前一定要先选定电流的参考方向。参考方向可以任意选定,但一旦选定,在求解整个过程中就不能再改变。

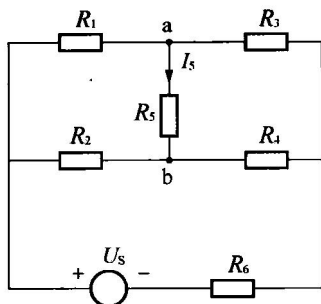


图 1.3 桥式电路

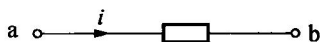


图 1.4 电流的参考方向

2. 电压

为了便于研究问题，在分析电路时引用“电压”这一物理量。电压有时也称“电位差”，用符号 u 表示。电路中 a、b 两点间的电压描述了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

$$u(t) = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中： dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷，单位为库(仑)(C)； dW 为转移过程中，电荷 dq 所获得或失去的能量，单位为焦(耳)(J)。电压的单位为伏(特)(V)。这些都是国际单位制单位。在实际应用中，电压有时也常用其辅助单位：千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V)，其换算关系为

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

如果正电荷由 a 点转移到 b 点，获得能量，则 a 点为低电位，即负极，b 点为高电位，即正极。如果正电荷由 a 点转移到 b 点，失去能量，则 a 点为高电位，即正极，b 点为低电位，即负极。正电荷在电路中转移动时电能的得或失表现为电位升高或降落，即电压升或电压降。

电压也可按照变化规律分为直流电压(Direct Voltage, DV)和交流电压(Alternating Voltage, AV)。如果电压的大小和方向不随时间变化，则称为直流电压；如果电压的大小和方向都随时间变化，则称为交流电压。

如同电流需要规定参考方向一样，电压也需要规定参考方向。两点之间的电压参考方向可以用正(+)、负(-)极性表示，正极指向负极的方向就是电压的参考方向，如图 1.5 指定电压的参考方向后，电压就成为一个代数量。在图 1.5 中，如果 A 点电位高于 B 点电位，即电压的实际方向是由 A 到 B，两者的方向一致，则 $u > 0$ 。如果 B 点电位高于 A 点，两者相反，即 $u < 0$ 。有时为了图示方便，可用一个箭头表示电压的参考方向(图 1.5)。还可使用双下标表示电压，如 U_{AB} 表示 A 和 B 之间电压，参考方向由 A 指向 B。

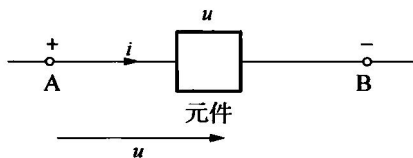


图 1.5 电压参考方向

对于同一段电路或同一个元件, 由于其电流、电压的参考方向可以任意选定, 所以就会出现两种情况: 第一种情况为电压、电流的参考方向选得相同, 称为关联参考方向; 第二种情况为电压、电流的参考方向选得相反, 称为非关联参考方向, 如图 1.6 所示。在电路分析中, 许多公式的正、负号都与参考方向的关联与否有关, 应用时要特别注意。

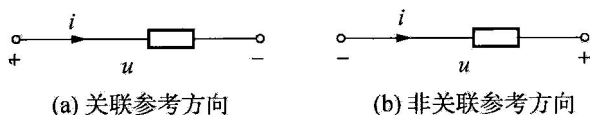


图 1.6 关联与非关联参考方向

注: 本书中所采用的电压、电流的方向, 未说明的均指关联参考方向。

3. 功率

电路中存在着能量的流动, 将电路中某一段所吸收或产生能量的速率称为功率(power), 用符号 p 表示。

设在 dt 时间内电荷 dq 由 a 点转移到 b 点, 且 a 点到 b 点的电压降为 u , 则根据式(1-3)可知, 在电荷转移过程中 dq 失去的能量为

$$dW = u dq \quad (1-4)$$

电荷失去的能量被这段电路吸收, 从而使能量由电路的其他部分输送到这一部分, 则功率的计算公式为

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u(t) \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (1-5)$$

对直流电路

$$P = UI \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 功率的单位为瓦(特)(W)。其辅助单位有: 兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW)和微瓦(μ W), 其换算关系为

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}; 1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}; 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}; 1 \mu\text{W} = 10^{-6} \text{ W}$$

当 u 、 i 为关联参考方向时, 式(1-5)和式(1-6)表示元件(或电路)吸收的功率。当 u 、 i 为非关联参考方向时, 采用下式计算功率

$$p(t) = -\frac{dW}{dt} = -u(t) \cdot \frac{dq}{dt} = -u(t) \cdot i(t) \quad (1-7)$$

对直流电路

$$P = -UI \quad (1-8)$$

上述两式计算的功率亦是元件(或电路)吸收的功率。

采用式(1-5)或式(1-7)计算功率时, 若 $p > 0$, 则表明元件(或电路)吸收功率; 若 $p < 0$, 则表明元件(或电路)发出功率。

【例 1.1】 计算图 1.7 所示各元件的功率, 并判别哪些元件是电源, 哪些元件是负载?

解: 因为 U 、 I 为关联参考方向, 故用式(1-6)计算, 则

$$P = UI = (-6) \times 3 \text{ W} = -18 \text{ W}$$

$P < 0$, 说明元件发出功率, 为电源。

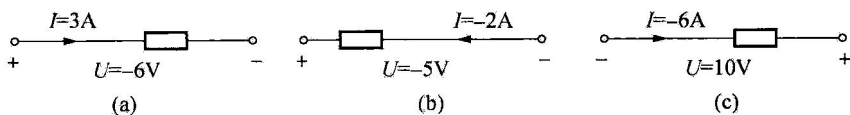


图 1.7 例 1.1 图

【例 1.2】 在图 1.8 所示电路中, 网络 N_1 提供 200 W 功率, u 为 20 V, 求电流 i 。

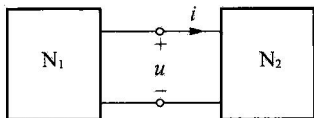


图 1.8 例 1.2 图

解: 对于 N_1 , u 、 i 为非关联参考方向, 因此, 用式(1-7)计算功率

$$p_1 = -ui$$

故求出

$$i = \frac{p_1}{-u} = \frac{-200}{-20} \text{ A} = 10 \text{ A}$$

本章所说的电路元件是指理想的电路元件, 包括: 电阻 R 、电感 L 和电容 C 。本章将介绍这 3 种电路元件的有关电磁特性及伏安关系(VCR), 即电路分析中两类约束关系之一: 元件约束关系。

1.3 电阻元件

电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可以用二端线性电阻元件模拟(以后各章主要讨论二端元件, 故将略去“二端”两字)。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

$$u = Ri \quad (1-9)$$

线性电阻元件的图形符号如图 1.9(a)所示。式(1-9)中 R 称为元件的电阻, R 是一个正实常数。当电压单位用 V, 电流单位用 A 表示时, 电阻的单位为欧姆(简称欧)。

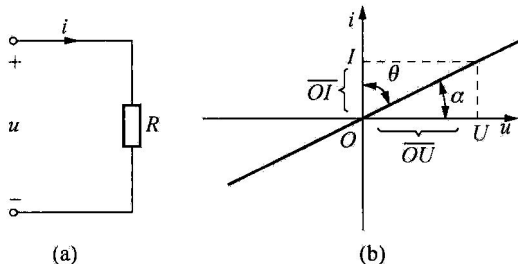


图 1.9 电阻元件及其伏安特性

令 $G = \frac{1}{R}$, 式(1-9)变成

$$i = Gu \quad (1-10)$$

式中: G 称为电阻元件的电导。电导的单位是 S(西门子, 简称西)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

由于电压和电流的单位是 V 和 A, 因此电阻元件的特性称为伏安特性。图 1.9(b)画出线性电阻元件的伏安特性, 它是通过原点的一条直线。直线的斜率与元件的电阻 R 有关。如果在作图时, 电压坐标的标尺为 m_u (坐标轴上每单位长度代表的电压值), 电流坐标的标尺为 m_i (坐标轴上每单位长度代表的电流值), 则有

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u \overline{OU}}{m_i \overline{OI}} = \frac{m_u}{m_i} \tan \theta$$

$$G = \frac{i}{u} = \frac{m_i \overline{OI}}{m_u \overline{OU}} = \frac{m_i}{m_u} \tan \alpha$$

式中: $\overline{OU}$ 、 $\overline{OI}$ 分别为电压 u 与电流 i 相应的 u 轴和 i 轴上的线段长度。

图 1.10(a)、图 1.10(b)画出 $R=1\Omega$ 时电阻的伏安特性, 其中电流标尺均取 $m_i=1\text{A/cm}$; 图 1.10(a)中 $m_u=1\text{V/cm}$, 而图 1.11(b)中 $m_u=0.5\text{V/cm}$, 可得出图 1.10(a)中 $\tan\theta = m_i R / m_u = 1$, 故 $\theta=45^\circ$, 而图 1.10(b)中, $\tan\theta'=2$, $\theta'=63.4^\circ$ 。

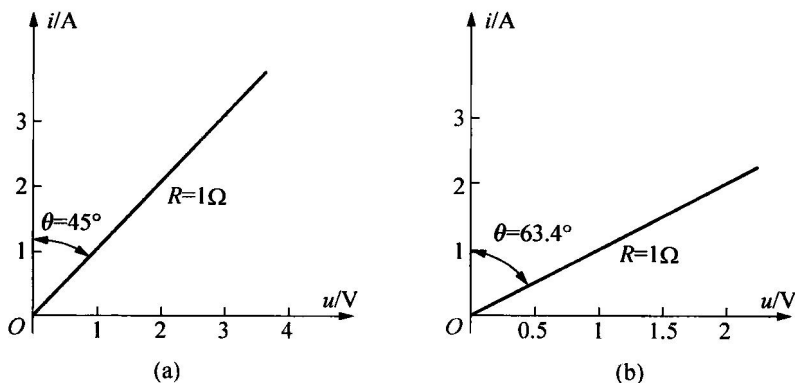


图 1.10 不同标尺时电阻的伏安特性

当一个线性电阻元件的端电压不论为何值时, 流过它的电流恒为零值, 就把它称为“开路”。开路的伏安特性在 $u-i$ 平面上与电压轴重合, 它相当于 $R=\infty$ 或 $G=0$, 如图 1.11(a)所示。当流过一个线性电阻元件的电流不论为何值时, 它的端电压恒为零值, 就把它称为“短路”。短路的伏安特性在 $u-i$ 平面上与电流轴重合, 它相当于 $R=0$ 或 $G=\infty$, 如图 1.11(b)所示。如果电路中的一对端子 $1-1'$ 之间呈断开状态, 如图 1.11(c)所示, 这相当于 $1-1'$ 之间接有 $R=\infty$ 的电阻, 此时称 $1-1'$ 处于“开路”。如果把端子 $1-1'$ 用理想导线(电阻为零)连接起来, 称这对端子 $1-1'$ 被短路, 如图 1.11(d)所示。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时, 电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-11)$$

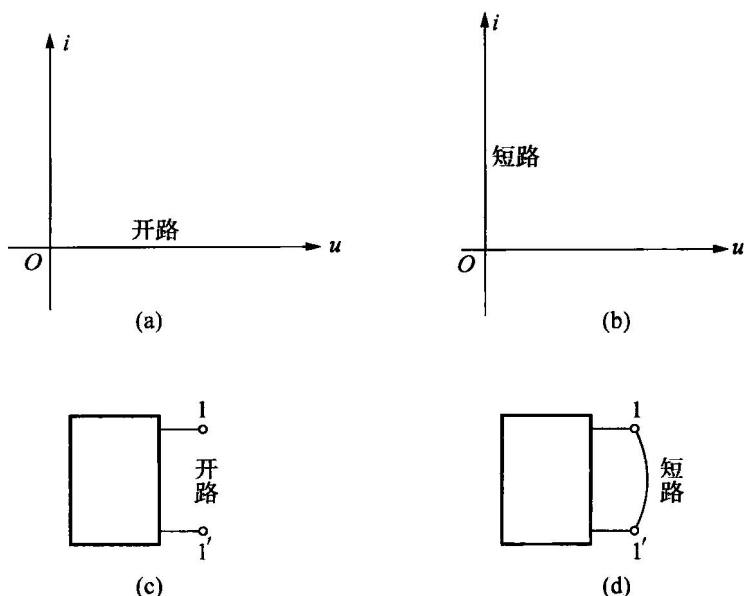


图 1.11 开路和短路的伏安特性

由于 R 和 G 是正实常数, 故功率 p 恒为非负值。所以线性电阻元件是一种无源元件。电阻元件从 t_0 到 t 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-12)$$

电阻元件一般把吸收的电能转换成热能消耗掉。

由于制作材料的电阻率与温度有关, (实际)电阻器通过电流后因发热会使温度改变, 因此, 严格来说, 电阻器带有非线性因素。但是在一定条件下, 许多实际部件如金属膜电器、线绕电阻器等, 它们的伏安特性近似为一条直线。所以用线性电阻元件作为它们的理想模型是合适的。

非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线。非线性电阻元件的电压电流关系一般可写为

$$u = f(i) \text{ (或 } i = h(u) \text{)}$$

如果一个电阻元件具有以下的电压电流关系

$$u(t) = R(t)i(t) \text{ (或 } i(t) = G(t)u(t) \text{)}$$

这里 u 与 i 仍是比例关系, 但比例系数 R 是随时间变化的, 则称其为时变电阻元件。

线性电阻元件的伏安特性位于第一、三象限。如果一个线性电阻元件的伏安特性位于第二、四象限, 则此元件的电阻为负值, 即 $R < 0$ 。线性负电阻元件实际上是一个发出电能的元件。如果要获得这种元件, 一般需要专门设计。

注: 为了叙述方便, 今后把线性电阻元件简称为电阻, 所以本书中“电阻”这个术语以及它的相应符号 R 一方面表示一个电阻元件, 另一方面也表示此元件的参数。