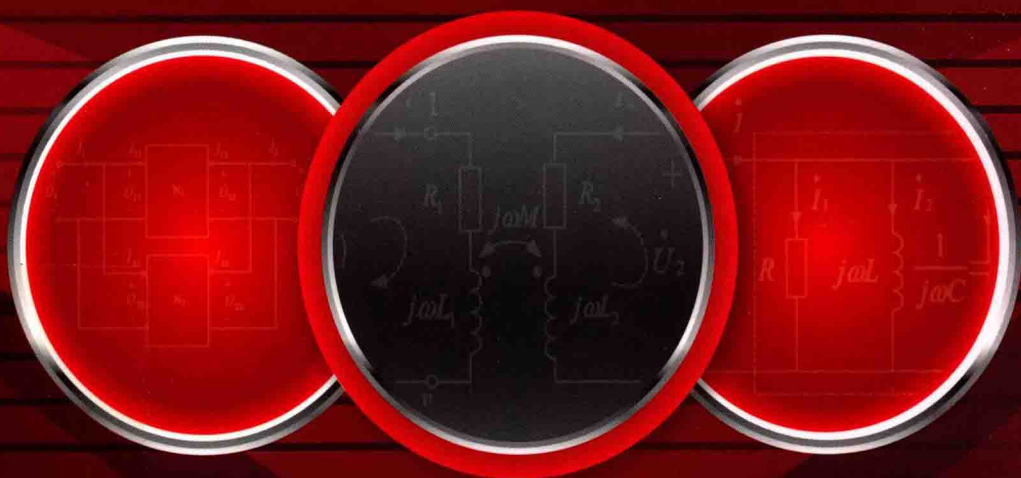


普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析基础

于宝琦 孙 禾 于桂君 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析基础

于宝琦 孙 禾 于桂君 主编

陈亚光 王 静 王燕锋 副主编

中国标准书号 CIP 数据核字 (2012) 第 050021 号

责任编辑：关 颖

责任编辑：王淑娟
封面设计：吴 静

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区黄根大街16号）

印刷：北京中农印刷有限公司（北京市丰台区南四环西路188号）

装订：北京市通州区梨园镇大街11号

875mm×1092mm 1/16 印张 13 1/16 印数 1 000 000

联系电话：010-64918888（传真）010-64918888 电子邮箱：cipc@126.com

网址：http://www.cip.com.cn



化学工业出版社

定价：30.00元

· 北京 ·

30.00元

本书注重电路的基本理论和基本分析方法的系统讲述,在保证基础的前提下,突出理论在实践中的应用,使学生在电路分析方面获得基本的知识和技能,并为以后学习各专业课程、科学研究和接受更高层次的学习打下良好的基础。

全书共 11 章,主要包括电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电路的基本分析方法、正弦稳态电路的分析、三相交流电路、非正弦周期电流电路的分析、互感耦合电路与变压器、动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、二端口网络、磁路与铁芯线圈。为了使读者更好地掌握和理解课程内容,书中配有较多贴近实际的例题、习题;本书最后附有部分习题的参考答案。另外,还有与本书配套的《电路实验指导》教材(书号:978-7-122-23230,化学工业出版社出版)。

本书可作为高等工科院校电气、电子信息类和部分非电类专业本科生、专科生的教材,也可供相关专业工程技术人员学习使用。

电路分析基础

主编 于宝琦 孙禾 于桂君
副主编 王燕 王 鑫 王 兴亚

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/于宝琦,孙禾,于桂君主编. —北京:
化学工业出版社, 2015. 3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-22902-1

I. ①电… II. ①于…②孙…③于… 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 (2015) 第 020021 号

责任编辑:王听讲
责任校对:吴 静

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 390 千字 2015 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前言

电路分析基础是高等工科院校电气、电子信息类专业的一门重要的技术基础课，是一门理论性和实践性很强的课程。本书在编写的过程中本着以“必需、够用”的原则，针对应用型本科和高职高专院校的教学实际情况，注重电路分析课程的基本理论和基本分析方法的系统讲述，在保证基础的前提下，突出理论在实践中的应用，使学生在电路分析方面获得基本的知识和技能，并为以后学习各专业课程、科学研究和接受更高层次的学习打下良好的基础。

全书共 11 章，主要包括电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电路的基本分析方法、正弦稳态电路的分析、三相交流电路、非正弦周期电流电路的分析、互感耦合电路与变压器、动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、二端口网络、磁路与铁芯线圈。为了使读者更好地掌握和理解课程内容，书中配有较多贴近实际的例题、习题；本书最后附有部分习题的参考答案。另外，还有与本书配套的电路实验指导教材。书中标有“*”号的部分为选讲内容，教师可根据学时或专业需要自行取舍。

本书可作为高等工科院校电气、电子信息类和部分非电类专业本科生、专科生的教材，也可供相关专业工程技术人员学习使用。我们将为使用本书的教师免费提供电子教案等教学资源，需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

本书由辽宁科技学院的于宝琦、孙禾、于桂君担任主编，并负责全书内容的组织和定稿；由辽宁科技学院的陈亚光、王静和湖州师范学院的王燕锋担任副主编，辽宁科技学院的符永刚、辽宁对外经贸学院的毕丛娣也参加了编写工作。第 1、10 章由陈亚光编写；第 2、6 章由孙禾编写；第 3、5 章由王静编写；第 4、7 章由于宝琦编写；第 8、9 章由于桂君编写；第 11 章由王燕锋和于宝琦编写。

东北大学的吴春俐老师审阅了全书，对全书的内容提出了许多宝贵意见。此外，本书在编写过程中得到了辽宁科技学院和湖州师范学院许多领导和老师的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有错漏之处，恳请广大读者批评指正，以便帮助我们不断改进和提高。

编者

2015 年 1 月

目 录

第1章 电路的基本概念与定律	1	3.3 节点电压法	34
1.1 电路及电路模型	1	3.4 叠加定理和齐次定理	37
1.1.1 电路的组成与功能	1	3.4.1 叠加定理	37
1.1.2 电路模型	2	3.4.2 齐次定理	39
1.2 电路的主要物理量	2	3.5 戴维南定理和诺顿定理	41
1.2.1 电流及其参考方向	2	3.6 最大功率传输定理	46
1.2.2 电压及其参考方向	3	3.7 互易定理	48
1.2.3 电功率和电能	4	本章小结	51
1.3 电路的基本定律	5	习题3	53
1.3.1 欧姆定律	5	第4章 正弦稳态电路的分析	57
1.3.2 基尔霍夫电流定律	5	4.1 正弦交流电的基本概念	57
1.3.3 基尔霍夫电压定律	6	4.1.1 正弦交流电的“三要素”	57
1.4 基本电路元件	7	4.1.2 周期、频率和角频率	57
1.4.1 电阻元件	7	4.1.3 瞬时值、最大值、有效值	58
1.4.2 电感元件	9	4.1.4 相位、初相位、相位差	59
1.4.3 电容元件	10	4.2 正弦量的相量表示法	60
1.4.4 独立电源	11	4.2.1 复数	60
1.4.5 受控电源	12	4.2.2 正弦量的相量表示法	61
本章小结	13	4.3 单一参数电路元件的交流电路	62
习题1	13	4.3.1 纯电阻正弦交流电路	63
第2章 电阻电路的等效变换	16	4.3.2 纯电感正弦交流电路	64
2.1 电路等效变换的基本概念	16	4.3.3 纯电容电路	66
2.1.1 一端口网络	16	4.4 基尔霍夫定律的相量形式	68
2.1.2 等效电路与等效变换	16	4.5 阻抗和导纳	70
2.2 电阻的等效变换	17	4.5.1 阻抗	70
2.2.1 电阻的串、并联	17	4.5.2 导纳	71
2.2.2 平衡电桥的特点及分析方法	19	4.5.3 阻抗和导纳的串联与并联	73
2.2.3 电阻Y连接和 Δ 连接的 等效变换	20	4.6 正弦稳态电路的分析	74
2.3 电源网络的等效变换	22	4.7 正弦稳态电路的功率	75
2.3.1 理想电源网络的等效变换	22	4.7.1 正弦稳态电路的功率	75
2.3.2 实际电源的两种模型及 其等效变换	23	4.7.2 功率因数的提高	77
2.3.3 受控源的等效变换	25	4.8 电路的谐振	78
本章小结	25	4.8.1 串联谐振	78
习题2	26	4.8.2 并联谐振	79
第3章 电路的基本分析方法	30	本章小结	80
3.1 支路电流法	30	习题4	81
3.2 网孔电流法	32	第5章 三相交流电路	83
		5.1 三相电源	83
		5.2 对称三相电路的计算	86

5.2.1 负载星形连接	87
5.2.2 负载三角形连接	89
5.3 不对称三相电路的计算	90
5.4 三相电路的功率	94
5.4.1 三相功率的计算	94
5.4.2 三相功率的测量	95
本章小结	97
习题 5	98

第 6 章 非正弦周期电流电路的

分析	101
6.1 非正弦周期信号的谐波分析	101
6.1.1 非正弦周期量的傅里叶级数分解	101
6.1.2 非正弦周期信号的频谱	103
6.2 非正弦周期信号的平均值、有效值及其电路的平均功率	103
6.2.1 非正弦周期信号的平均值	103
6.2.2 非正弦周期信号的有效值	103
6.2.3 非正弦周期信号电路的平均功率	104
6.3 非正弦周期信号电路的谐波分析法	105
本章小结	106
习题 6	107

第 7 章 互感耦合电路与变压器

7.1 互感及互感电压	109
7.1.1 互感现象	109
7.1.2 互感电压	109
7.1.3 互感线圈的电压、电流关系	110
7.1.4 互感线圈的同名端	111
7.2 含有耦合电感电路的分析	113
7.2.1 耦合电感的连接方式及去耦等效电路	113
7.2.2 含有耦合电感电路的分析	117
7.3 空心变压器	119
7.4 理想变压器	121
本章小结	122
习题 7	122

第 8 章 动态电路的时域分析

8.1 电路的过渡过程和换路定律	125
8.1.1 过渡过程的产生	125
8.1.2 换路定律	125
8.2 一阶电路的零输入响应	127

8.2.1 RC 电路的零输入响应	127
8.2.2 RL 电路的零输入响应	129
8.3 一阶电路的零状态响应	131
8.3.1 RC 电路的零状态响应	132
8.3.2 RL 电路的零状态响应	134
8.4 一阶电路的全响应和三要素法	136
8.4.1 一阶电路的全响应	136
8.4.2 三要素法	137
8.5 一阶电路的阶跃响应	139
8.5.1 阶跃函数	139
8.5.2 一阶电路的阶跃响应	140
8.6 二阶电路的时域分析	142
本章小结	147
习题 8	148

第 9 章 线性动态电路的复频域

分析	152
9.1 拉普拉斯变换的定义	152
9.2 拉普拉斯变换的基本性质	153
9.3 拉普拉斯反变换	157
9.3.1 拉普拉斯反变换	157
9.3.2 部分分式展开法	157
9.4 复频域中的电路定律和电路模型	161
9.4.1 基尔霍夫定律的复频域形式	161
9.4.2 电路元件的复频域分析	161
9.5 线性动态电路的复频域分析	165
本章小结	166
习题 9	166

第 10 章 二端口网络

10.1 二端口网络基本概念	169
10.2 二端口网络的方程和参数	170
10.2.1 Y 参数	170
10.2.2 Z 参数	172
10.2.3 T 参数	174
10.2.4 H 参数	175
10.2.5 二端口网络参数间的关系	176
10.3 二端口网络的连接和等效电路	177
10.3.1 二端口网络的连接	177
10.3.2 二端口网络的等效电路	179
10.4 二端口网络的输入输出阻抗	180
10.4.1 输入阻抗	180
10.4.2 输出阻抗	181
本章小结	181
习题 10	182

第 1 章

电路的基本概念与定律

●【内容提要】●

本章介绍了电路、电路模型以及电路中的基本物理量，阐述了电路的基本概念及基本定律，定义了电阻、理想电压源、理想电流源并讨论了它们的特性，最后介绍了受控电源。

在生活中，人们可以看到各种各样的电路，例如照明电路、电视机、手机、计算机等，这些电路都是由物理实体组成的，作用和特性都各不相同，这样的电路称为实际电路。下面讨论一下电路的相关问题。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的组成与功能

实际电路是指由电工、电子器件或一些电气设备按一定方式连接起来，能完成某种特定任务的电流通路。复杂的电路也称为网络。

有些实际电路特别复杂，例如传输、分配电能的电力电路；转换、传输信息的通信电路；它们都是非常庞大而复杂的电路；而有些电路又特别简单，例如手电筒的照明电路，如图 1-1(a) 所示。无论电路是复杂还是简单，都可以分成 3 部分，即电源、负载及中间环节。

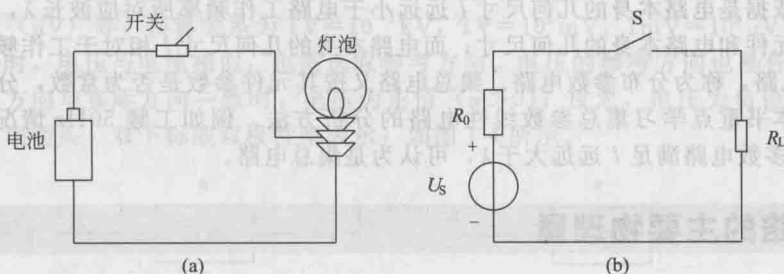


图 1-1 手电筒照明电路及电路模型

向电路提供电能或电信号的发生器称为电源，如发电机、蓄电池等；用电设备称为负载，如照明灯、电视机等；将电源和负载连接起来构成电路或控制电路的部分称为中间环节，如导线、开关、保护装置等。由于在电源的作用下，电路才会产生电压、电流，因此电源又称为激励，由激励所产生的电压和电流统称为响应。根据激励与响应之间的因果关系，有时把激励称为输入，把响应称为输出。

在生产和生活中，实际电路的种类繁多。根据电路的作用，可以大致分为两类：一类是实现能量的转换和传输，如电力网络，传输、分配和使用电能；另一类是实现信号的传递和处理，如由信源、信号处理装置、通信电缆等构成的通信网络，将信号进行传输、变换和处理。

1.1.2 电路模型

分析实际电路时有两种办法,一种办法是用电工仪表对实际电路进行测量;另一种办法是将实际电路抽象为电路模型,然后用电路理论进行分析计算。将实际电路抽象为电路模型,需要将实际电路中各组成部分的电磁性能进行科学的抽象和概括。

由于实际电路的情况非常复杂,所以其电磁性能也十分复杂。例如,给一个 N 匝线圈通入交流电时,线圈将电能转换为磁场能量储存,同时线圈的电阻又会使其发热,线圈匝间还存在电容。因此,分析实际电路时,首先抓住其主要的电磁性能,在一定条件下忽略其次要的电磁性能。而理想电路元件正是将实际电路的主要电磁性能进行科学抽象后得到,简称元件。例如,用电阻元件来反映电路消耗电能的电磁性质,如图 1-2(a) 所示;用电感元件来反映电路储存磁场能量的电磁性质,如图 1-2(b) 所示;用电容元件来反映电路储存电场能量的电磁性质,如图 1-2(c) 所示;用电源元件(电压源和电流源)来反映电能量,分别如图 1-2(d)、(e) 所示。

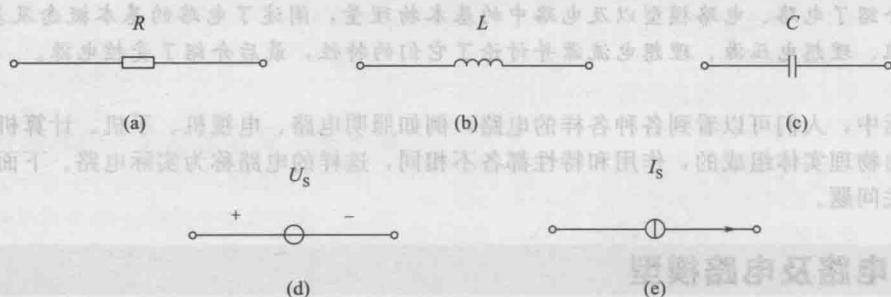


图 1-2 理想电路元件

理想电路元件及其组合的相互连接就构成了实际电路的电路模型。电路理论中研究的电路是电路模型的简称。图 1-1(a) 所示的电路模型如图 1-1(b) 所示。若无特殊说明,本书所提到的元件均为理想电路元件,电路即为电路模型。

值得注意的是,用电路模型近似地表示实际电路是有条件的,如果条件变了,电路模型也要做相应的改变。理想电路元件是抽象的模型,没有体积大小,其特性集中表现在空间的一个点上,因而称为集总参数元件。由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路,简称集总电路。确定集总电路的依据是电路本身的几何尺寸 l 远远小于电路工作频率所对应波长 λ ,所以在分析电路时可以忽略元件和电路本身的几何尺寸;而电路本身的几何尺寸 l 相对于工作频率所对应波长 λ 不可忽略的电路,称为分布参数电路。集总电路又按其元件参数是否为常数,分为线性电路和非线性电路。本书重点学习集总参数线性电路的分析方法。例如工频 50Hz 情况下,波长 $\lambda=6000\text{km}$,因而多数电路满足 l 远远大于 λ ,可认为是集总电路。

1.2 电路的主要物理量

电路中的主要物理量有电流、电压、电功率、电能以及磁通等,其中常用的是电流、电压和电功率等基本物理量。

1.2.1 电流及其参考方向

带电粒子有规则地定向移动形成了电流,如导体中的自由电子、电解液和电离气体中的自由离子、半导体中的电子和空穴,都属带电粒子。电流大小用电流强度来表示。在工程上,电流强度简称电流,等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流或直流电流,简称为 DC,即

$$I = \frac{Q}{t}$$

大小或方向随时间变化的电流称为变动电流。若变动电流在一个周期内电流的平均值为零，则又称为交变电流，简称交流，简写为 AC。

在国际单位制 (SI) 中，电流的单位是安培，简称安 (A)。此外，电流的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等，换算关系为 $1\text{A}=10^{-3}\text{kA}$, $1\text{A}=10^3\text{mA}$, $1\text{mA}=10^3\mu\text{A}$ 。

电路中，习惯上把正电荷运动的方向作为电流的实际方向。但在电路分析中，有时不容易直接判断电流的方向，比如复杂的直流电路，交流电路等；而要计算电流的大小，必须先确定电流的方向，所以引入了电流的参考方向这个概念。

电流的参考方向，是人们任意假定的电流方向，在电路图中用箭头或双下标表示。引入参考方向后，电流就变成代数量。当电流的参考方向与实际方向一致，电流为正值 ($i>0$)；反之，电流为负值 ($i<0$)，如图 1-3 所示。

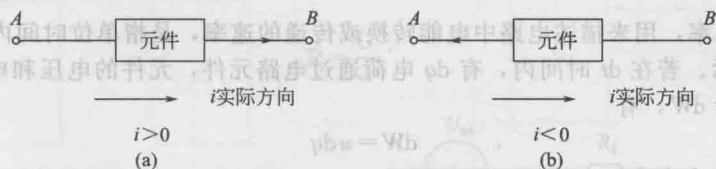


图 1-3 电流的参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

电场力将单位正电荷从某点移动到另一点所做的功定义为两点间的电压，若电荷 dq 在电路

中从某一点移到另一点电场力所做功为 dW ，则两点间的电压为

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

恒定电压或直流电压可表示为

$$U = \frac{W}{Q}$$

在 SI 中，电压的单位是伏特，简称伏 (V)。此外，电压的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 等，换算关系为 $1\text{V}=10^{-3}\text{kV}$, $1\text{V}=10^3\text{mV}$, $1\text{mV}=10^3\mu\text{V}$ 。

分析电路时，电压与电流相似，也需选取参考方向。电压的参考方向也是任意指定的方向，当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正值 ($u>0$)；反之，电压为负值 ($u<0$)。电压的参考方向可用箭头、双下标或双极性来表示，如图 1-4 所示。

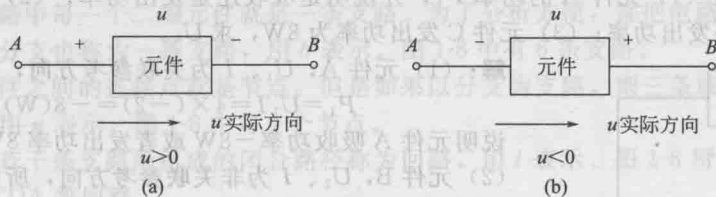


图 1-4 电压的参考方向

电压和电流的参考方向可以分别选定。通常情况下，采用关联参考方向，即将一条支路或元件的电压和电流的参考方向选择一致。换句话说，就是电流从电压的“+”参考极性流入，从“-”参考极性流出，如图 1-5 所示。若二者方向相反，则称为非关联参考方向。

参考方向是人为选定的，电压（电流）的正负值都是对应于所选定的参考方向而言的，不说明参考方向而谈论电压（电流）为正或负是没有意义的。参考方向的概念同样适用于表示电动势。

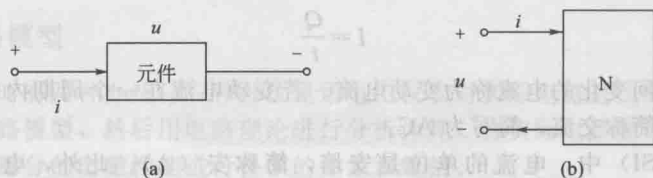


图 1-5 关联参考方向

1.2.3 电功率和电能

在电路分析中，常用到的物理量是电功率。

在实际电路中，当正电荷从元件电压的正极经过元件运动到负极时，即从高电位移动到低电位，相应的电场力对电荷做功，电荷的电势能减少，元件吸收功率。反之，电路元件应发出功率。

电功率简称功率，用来描述电路中电能转换或传递的速率，是指单位时间内电场力做功的大小，用符号 p 表示。若在 dt 时间内，有 dq 电荷通过电路元件，元件的电压和电流分别为 u 、 i ，则其能量的改变为 dW ，有

$$dW = u dq$$

则电功率 p 的大小为

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

当元件的电压、电流为关联参考方向时，用式 (1-3) 所求功率 p 为吸收功率。当 $p > 0$ 时，电路实际吸收功率；当 $p < 0$ 时，电路实际发出功率。反之，若电压、电流为非关联参考方向时，用式 (1-3) 所求的功率 p 为发出功率。当 $p > 0$ 时，电路实际发出功率；当 $p < 0$ 时，电路实际吸收功率。一个元件吸收 10W 功率，也可以认为该元件发出 -10W 的功率。根据能量守恒定律，整个电路的功率代数和为零，或者说发出的功率和吸收的功率相等，即功率平衡。

在 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-4)$$

在 SI 中，功率的单位是瓦特，简称瓦 (W)。此外，功率的单位还有千瓦 (kW)、兆瓦 (MW) 等，换算关系为 $1W = 10^{-3}kW$ ， $1kW = 10^{-3}MW$ 。电能的单位是焦耳，简称焦 (J)。常用单位有千瓦时 ($kW \cdot h$)，简称度。

$$1kW \cdot h = 10^3W \times 3600s = 3.6 \times 10^6(J)$$

【例 1-1】如图 1-6 所示为某电路中的一部分，3 个元件中流过相同电流， $I = -2A$ ， $U_1 = 4V$ ， $U_2 = 5V$ 。求：(1) 元件 A 的功率 P_1 ，并说明是吸收还是发出功率；(2) 元件 B 功率 P_2 ，并说明是吸收还是发出功率；(3) 元件 C 发出功率为 8W，求 U_3 。

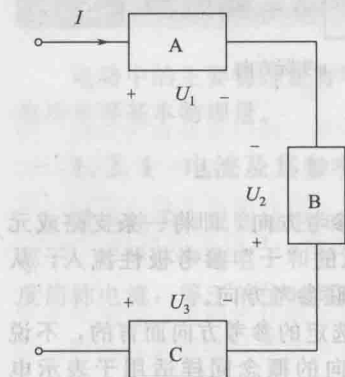


图 1-6 例 1-1 图

解：(1) 元件 A， U_1 、 I 为关联参考方向，所以

$$P_1 = U_1 I = 4 \times (-2) = -8(W)$$

说明元件 A 吸收功率 -8W 或者发出功率 8W。

(2) 元件 B， U_2 、 I 为非关联参考方向，所以

$$P_2 = U_2 I = 5 \times (-2) = -10(W)$$

说明元件 B 吸收功率 10W 或者发出功率 -10W。

或者 U 、 I 关联参考方向前提下， U_2 、 I 为非关联参考方向时，

$$P_2 = -U_2 I = -5 \times (-2) = 10(W)$$

因为 $p > 0$ ，所以元件 B 吸收功率 10W。

(3) 元件 C， U_3 、 I 为非关联参考方向，所以

$$U_3 = \frac{P_3}{I} = \frac{8}{-2} = -4(V)$$

1.3 电路的基本定律

欧姆定律和基尔霍夫定律是电路的基本定律,是电路分析计算的基础和依据。电路构成的元件性质不同,因而有线性、非线性,时变、非时变之分。由独立电源、线性时不变元件和受控源构成的电路称为线性非时变电路。除非特别说明,本书所涉及的电路均属线性非时变电路。

1.3.1 欧姆定律

对电阻元件来说,流过其电流与其端电压成正比,这就是欧姆定律。欧姆定律确定了电阻元件的电压与电流的关系,如图 1-7 所示,在关联参考方向下,有

$$I = \frac{U}{R}$$

或

$$R = \frac{U}{I}$$

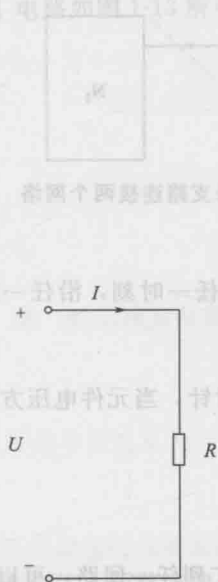


图 1-7 欧姆定律

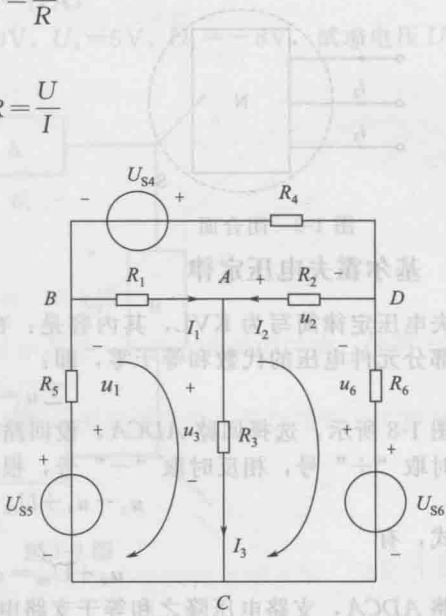


图 1-8 基本术语

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。基尔霍夫电流定律描述了针对电路中某节点的各支路电流之间的关系,基尔霍夫电压定律描述了针对电路中某回路的各部分电压之间的关系。在介绍基尔霍夫定律之前,先了解电路的一些基本术语,电路如图 1-8 所示。

(1) 支路: 电路中每一个二端元件就是一条支路。为了分析方便,常把电路中流过同一电流的几个元件构成的分支也称为一条支路,用 b 表示。图 1-8 中有 6 条支路。

(2) 节点: 元件之间的连接点就是节点。但是如果以分支为支路,则三条或三条以上支路的连接点称为节点,用 n 表示。图 1-8 中有 4 个节点。

(3) 回路: 由若干条支路所组成的闭合路径称为回路,用 l 表示。图 1-8 所示电路中有 AB-CA、ACDA、ABCD 等回路。

(4) 网孔: 平面电路中,内部不包含其他支路的回路称为网孔,用 m 表示。图 1-8 所示电路中有 3 个网孔: ABCA、ACDA、ABDA。

1.3.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律简称为 KCL,其内容是:在集总电路中,任一时刻,对任一节点,所有支路电流的代数和恒等于零,即

$$\sum i = 0$$

(1-5)

电路如图 1-8 所示, 规定流入节点电流为正, 流出节点电流为负, 根据 KCL, 对节点 A, 有

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \tag{1-6}$$

整理式 (1-6), 有

即对节点 A, 流入节点的电流等于流出节点的电流。推广到任一节点, 可以写成

$$\sum i_{\text{流入}} = \sum i_{\text{流出}} \tag{1-7}$$

KCL 是电流连续性的表现, 不仅适用于电路的节点, 还可以推广应用到电路中任意假设的闭合面, 电路如图 1-9 所示。若用图中虚线所示的闭合面将电路包围起来, 根据 KCL, 可得

若两个网络之间只有一条连接线, 如图 1-10 所示, 则该连接线上的电流必为零。这说明了两个网络之间输送电能, 至少要有两根导线, 只有这样才能形成回路。

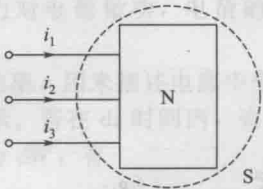


图 1-9 闭合面

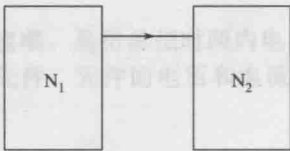


图 1-10 一条支路连接两个网络

1.3.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律简称为 KVL, 其内容是: 在集总电路中, 任一时刻, 沿任一闭合回路绕行一周, 各部分元件电压的代数和等于零, 即:

$$\sum u = 0 \tag{1-8}$$

电路如图 1-8 所示, 选择回路 ADCA, 设回路绕行方向为顺时针, 当元件电压方向与回路绕行方向一致时取 “+” 号, 相反时取 “-” 号, 根据 KVL, 有

$$u_2 - u_6 + U_{S6} - u_3 = 0$$

整理上式, 有

$$u_2 + U_{S6} = u_3 + u_6$$

对于回路 ADCA, 支路电压降之和等于支路电压升之和。推广到任一回路, 可以写成

$$\sum u_{\text{升}} = \sum u_{\text{降}} \tag{1-9}$$

KVL 是电位单值性在电路中的体现, 不仅适用于闭合回路, 还可应用于电路中的虚拟回路。电路如图 1-11 所示, 设回路绕行方向为顺时针, 根据 KVL 列方程, 整理可得

$$U = U_{S1} - U_{S2} - u_1$$

总而言之, 基尔霍夫定律与构成电路的元件性质无关, 只与电路的连接方式有关, 这种连接关系称为拓扑约束。

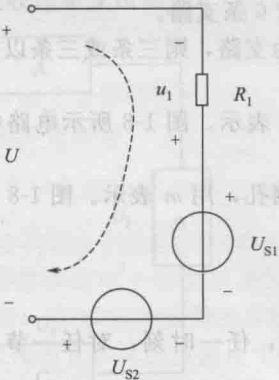


图 1-11 虚拟回路

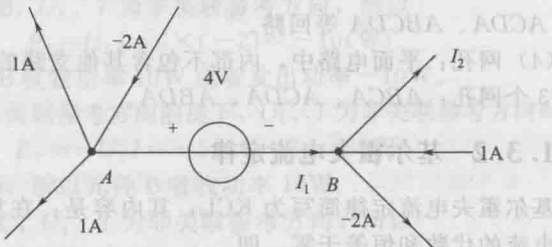


图 1-12 例 1-2 图

【例 1-2】电路如图 1-12 所示，求电流 I_1 、 I_2 。

解：根据 KCL，对节点 A，有 $-I_1 + (-2) - 1 - 1 = 0$

$$\text{或} \quad I_1 + 1 + 1 = -2$$

$$\text{解得} \quad I_1 = -4(\text{A})$$

同理，对节点 B，有 $I_1 + 1 = I_2 + (-2)$

$$\text{解得} \quad I_2 = -1(\text{A})$$

【例 1-3】电路如图 1-13 所示，若 $U_1 = -10\text{V}$ ， $U_3 = 5\text{V}$ ， $U_4 = -8\text{V}$ ，试求电压 U_2 。

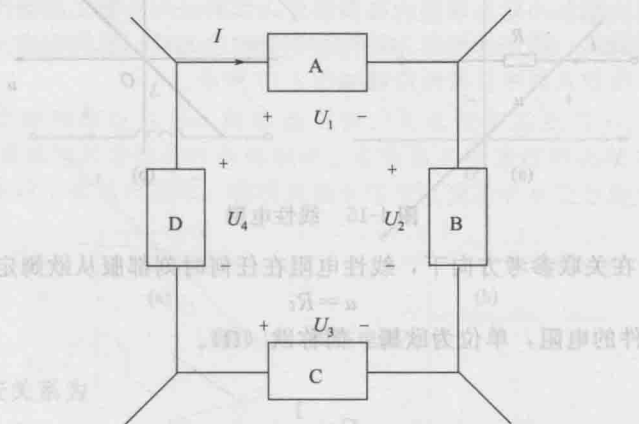


图 1-13 例 1-3 图

解：根据 KVL，回路方向选择顺时针，有

$$U_2 = U_3 + U_4 - U_1$$

$$\text{解得} \quad U_2 = 7(\text{V})$$

1.4 基本电路元件

电路元件是实际电气元件的理想模型，掌握电路元件的特性是研究电路的基础，本节仅介绍电阻元件、独立电源和受控电源。

1.4.1 电阻元件

电路中，有两个端子与外部相连的元件称为二端元件。若一个二端元件在任一时刻的电压与电流的关系，可由 $u-i$ 平面的一条曲线确定，则此二端元件称为二端电阻元件，即电阻元件。 $u-i$ 平面上的电压-电流关系曲线也称为伏安特性曲线。

若电阻元件的伏安特性曲线不随时间变化，则该元件为时不变电阻，否则为时变电阻；若电阻元件的伏安特性曲线为一条经过原点的直线，则称为线性电阻，否则为非线性电阻。二端非线性电阻、线性时变电阻和非线性时变电阻的伏安特性曲线分别如图 1-14(a)、(b)、(c) 所示。本书主要讨论的是二端线性时不变电阻元件，简称电阻元件。

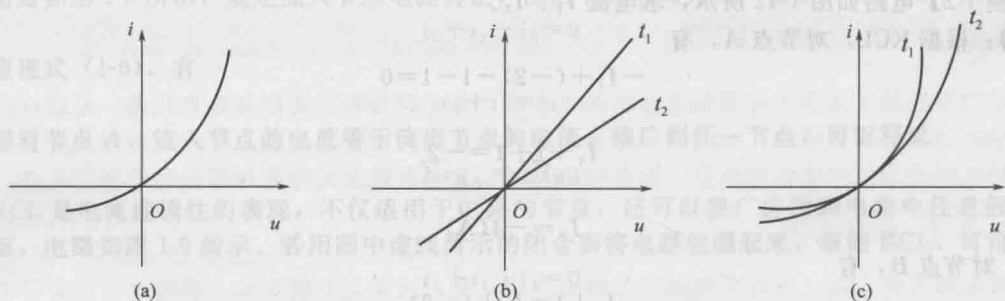


图 1-14 电阻的伏安特性

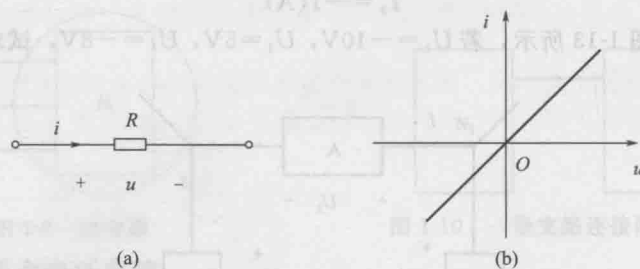


图 1-15 线性电阻

如图 1-15 所示, 在关联参考方向下, 线性电阻在任何时刻都服从欧姆定律, 有

$$u = Ri \quad (1-10)$$

式中, R 称为元件的电阻, 单位为欧姆, 简称欧 (Ω)。

令

$$G = \frac{1}{R}$$

式 (1-10) 可变为

$$i = Gu$$

G 称为元件的电导, 单位为西门子, 简称西 (S)。

在非关联参考方向下, 有

$$u = -Ri$$

$$i = -Gu$$

R 和 G 均为电阻元件的参数。

当一个电阻元件的端电压无论为何有限值时, 电流恒等于零, 此时电阻元件处于开路状态, $R = \infty$ 或 $G = 0$ 。当一个电阻元件的电流无论为何有限值时, 端电压恒等于零, 此时电阻元件处于短路状态, $R = 0$ 或 $G = \infty$ 。这是电阻元件的两种极限状态。

关联参考方向下, 电阻元件吸收的功率为

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

或

$$p = ui = Gu^2 = \frac{i^2}{G}$$

式 (1-11) 表明: 无论是关联参考方向, 还是非关联参考方向, 电阻元件的功率 p 总是正值, 所以电阻元件总是吸收功率, 因此电阻元件既是耗能元件, 也是无源元件。

电阻元件从 t_1 到 t_2 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-12)$$

电阻元件是耗能元件的理想化模型,但在某些特定场合,电阻元件又有其特定的用途。如利用某些材料的电阻值随温度变化的特性通过测量阻值来测量温度、通过测量电阻应变片的阻值来得到物体因受力而发生应变的程度等;不仅如此,某些电子器件(例如运算放大器等)构成的电子电路可以实现负电阻,其伏安特性位于二、四象限,电压和电流的实际方向总是相反,发出功率,它向外提供的能量来自电子电路工作时所需的电源。

1.4.2 电感元件

电感元件是表征磁场储能的一种理想电路元件。

在任一时刻,如果一个二端元件的磁通链 ψ 与通过它的电流 i 之间的关系(韦安关系)可用 ψ - i 平面上的一条曲线来确定,则此二端元件称为电感元件。如果 ψ - i 平面上的特性曲线是通过原点的一条直线,且不随时间变化,该元件称为线性时不变电感元件,简称电感元件。

电感元件的图形符号、参数及其韦安特性曲线如图 1-16 所示。

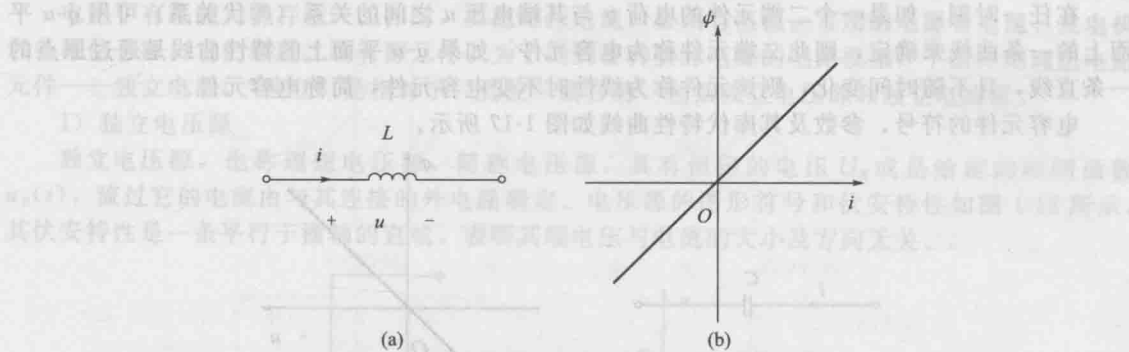


图 1-16 线性电感元件

电感元件的韦安关系为

$$L = \frac{\psi}{i} \tag{1-13}$$

式(1-13)表明磁通链与电流的比值为正常数,称为自感系数或电感系数,简称自感或电感;所以 L 既表示电感元件,又表示电感元件的参数。

在 SI 中,电感的基本单位是亨利,简称亨(H)。常用的单位还有毫亨(mH)和微亨(μH),换算关系为 $1\text{H}=10^3\text{mH}$, $1\text{mH}=10^3\mu\text{H}$ 。

当通入电感的电流 i 随时间变化时,磁通链 ψ 也相应发生变化,于是在电感两端会产生感应电压。若电压和电流取关联参考方向、电流和磁通的参考方向符合右手螺旋定则,根据电磁感应定律,可得电感元件的伏安关系为

$$u = -e = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \tag{1-14}$$

式(1-14)中, e 为电流 i 变化时,在电感两端产生的感应电动势。电感电压的大小与其电流变化率成正比,与电流大小无关,体现了电感元件的动态特性,所以电感元件也称为动态元件。在直流稳态情况下,电感中电流恒定,则其电压为零,相当于短路。如果某时刻电感的电压为有限值,则其电流变化率必然为有限值,即电流在该时刻必然连续,而不能跃变。

同样,已知电感电压可求得电流

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi \tag{1-15}$$

式(1-15)中, $i(t_0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\xi$ 称为电感的初始电流。式(1-15)说明电感元件在 t 时刻的电流与 t 时刻以前电压变化的全部历史有关,即电感元件的电流记录了电压变化的全部信息,所以电感元件也称为记忆元件。

关联参考方向下,电感元件的瞬时功率为

$$p=ui=L\frac{di}{dt}$$

根据式 (1-4), 电感元件从 t_1 到 t_2 时间段内存储的能量为

$$W_L=\int_{t_1}^{t_2} p dt=\int_{t_1}^{t_2} L \frac{di}{dt} i dt=\int_{i(t_1)}^{i(t_2)} L i di=\frac{1}{2} L i^2(t_2)-\frac{1}{2} L i^2(t_1)$$

若 $i(t_0)=0$, 即电感无初始储能, 从 t_0 到 t 这段时间内电感吸收的电能为电感的储能, 电感元件也称储能元件。值得注意的是, 电感能够释放的能量总是等于它原来储存的能量, 因此电感元件也是无源元件。

1.4.3 电容元件

电容元件是表征电场储能的一种理想电路元件。

在任一时刻, 如果一个二端元件的电荷 q 与其端电压 u 之间的关系 (库伏关系) 可用 $q-u$ 平面上的一条曲线来确定, 则此二端元件称为电容元件。如果 $q-u$ 平面上的特性曲线是通过原点的一条直线, 且不随时间变化, 则该元件称为线性时不变电容元件, 简称电容元件。

电容元件的符号、参数及其库伏特性曲线如图 1-17 所示。

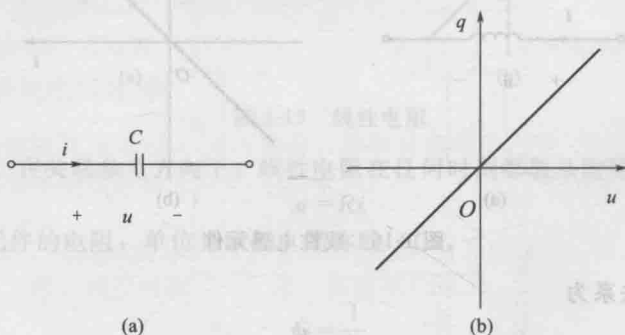


图 1-17 线性电容元件

电容元件的库伏关系为

$$C=\frac{q}{u} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 表明电荷与电压的比值为正常数, 称为电容; 所以 C 既表示电容元件, 又表示元件的参数。

在 SI 中, 电容的基本单位是法拉, 简称法 (F)。常用的单位还有微法 (μF) 和皮法 (pF), 换算关系为 $1\text{F}=10^6\mu\text{F}$, $1\mu\text{F}=10^6\text{pF}$ 。

关联参考方向下, 电容元件的伏安关系为

$$i=\frac{dq}{dt}=C\frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 表明, 电容电流的大小与其电压的变化率成正比, 与电压的大小无关, 体现了电容元件的动态特性, 所以电容元件也称为动态元件。在直流稳态情况下, 电容上电压恒定, 则其电流为零, 相当于开路。如果某时刻电容的电流为有限值, 则其电压变化率必然为有限值, 即电压在该时刻必然连续, 而不能跃变。

同样, 已知电容电流可求得电压

$$u=\frac{1}{C}\int_{-\infty}^t i d\xi=\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t_0} i d\xi+\frac{1}{C}\int_{t_0}^t i d\xi=u(t_0)+\frac{1}{C}\int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-18)$$

式 (1-18) 中, $u(t_0)=\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t_0} i d\xi$ 称为电容的初始值。式 (1-18) 说明电容元件在 t 时刻的电压与 t 时刻以前电流变化的全部历史有关, 即电容元件的电压记录了电流变化的全部信息, 所以电容