

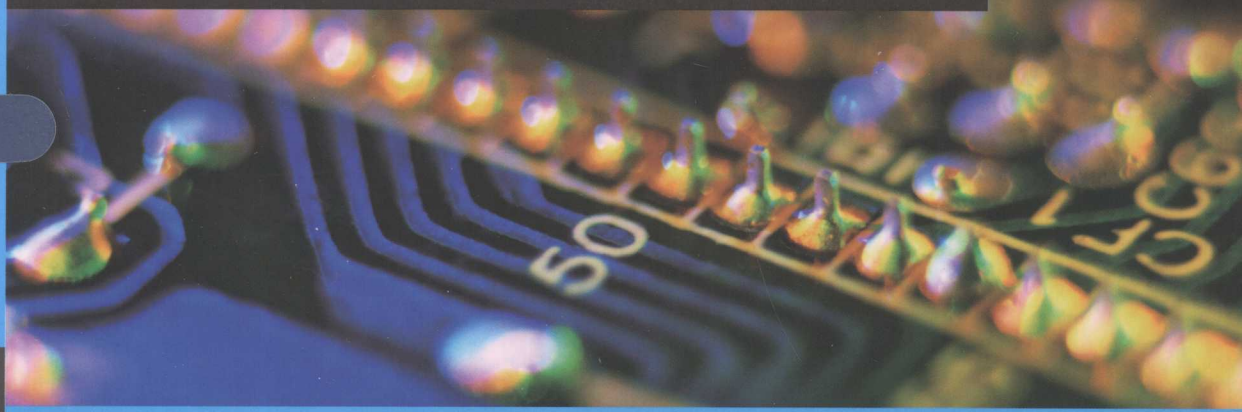


21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Electric Circuits

电路基础

— 刘长学 成开友 主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

014013177

TM13-43
110



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Electric Circuits

电路基础

刘长学 成开友 主编



人民邮电出版社
北京

TM13-43
110

图书在版编目(CIP)数据

电路基础 / 刘长学, 成开友主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2014.2
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-33499-2

I. ①电… II. ①刘… ②成… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第288549号

内 容 提 要

本书是根据教育部电路课程的教学基本要求编写的简明教材。主要内容有电路的基本概念和基本定律、电阻电路的等效分析法、电路定理、电阻电路的一般分析方法、稳恒交流电路分析、含有互感的正弦电路、三相交流电路、二端口网络参数、电路的暂态分析、磁路和铁芯线圈。

本书可作为电类本科生教材, 也可作为相关工程技术人员参考书。

-
- ◆ 主 编 刘长学 成开友
责任编辑 李海涛
责任印制 彭志环 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.75 2014年2月第1版
字数: 370千字 2014年2月河北第1次印刷
-

定价: 35.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前言

电路课程是电类各专业重要的专业基础课,通过本课程的学习掌握电路的基本概念、基本定律和线性电路的基本分析方法,为后续课程的学习打下良好的理论基础。

随着高等教育大众化的进一步深入,各高校对教材的层次性要求越来越高。本书主要面向普通本科院校的电类各专业,在符合教育部电路课程教学基本要求的基础上,结合学生的特点,以够用为度的原则组织相关内容,且语言深入浅出,通俗易懂。

本书共9章,前4章介绍稳态直流电阻电路的分析方法。第5章~第8章介绍稳态交流电路的分析方法,第9章介绍一阶、二阶电路的时域分析方法以及复频域分析方法。为了使后续课程中包含电机学等专业课程的学生具有磁路相关基础知识,在本书的附录中,增加了“磁路与铁芯电感线圈”一章。

与其他同类教材相比本书对有些内容作了一些调整。第3章电路定理,只介绍线性电路分析常用的3个定理,即叠加定理、替代定理和等效电源定理。删去了用得相对较少的特勒根定理和互易定理。第4章电路的一般分析方法中,只介绍支路电流法、网孔电流法和结点电压法。删去了涉及拓扑学图论知识的回路电流法和割集电压法。理想运算放大器部分内容在电专业的另外一门专业基础课“模拟电子技术”中有详细研究,所以本书将这部分内容放在本章的最后,作为结点电压法分析直流电阻电路的应用来介绍。周期非正弦电流电路分析要用到周期信号的傅里叶级数分解的知识,这部分内容放到电专业另外一门必修课“信号系统”中学习。因为在信号系统课程中对电路、系统的复频域分析方法要作详细的分析和研究,所以拉普拉斯变换分析动态电路这部分内容只在本书的第9章“电路的暂态分析”中用一节的篇幅作简单介绍。这样做不仅节省了学时,又减轻了学生学习的负担。

为了使学生能更好地理解、运用所学的基本概念和分析方法,本书精选了较多的例题和习题。在本书的附录中还给出了习题的参考答案。

本书由刘长学和成开友编写,其中刘长学负责第1章、第2章、第5章、第8章和附录中内容的编写,并提供本书习题的答案以及完成整个全书的统稿工作。成开友负责第3章、第4章、第6章、第7章和第9章内容的编写。

本书的编写和出版得到了盐城工学院教材出版基金的资助,得到了盐城工学院电气

工程学院全体同仁的支持和帮助，学院的胡国文、王长勇、何坚强院长以及顾春雷主任对本教材的编写工作提出了不少宝贵建议，南京航空航天大学的黄文新教授在审稿时也给出了很多宝贵的意见，在此一并表示衷心的感谢。

书中一定还存在许多不足，欢迎读者批评指正。

编者

2013年10月

目 录

第 1 章 电路及其基本定律	1
1.1 电路及其模型	1
一、电路的组成	1
二、电路的作用	1
三、电路中的理想元件	2
四、实际元件的理想化模型	3
五、电路的理想化模型	3
六、集总电路与分布参数电路	3
1.2 电路中的主要物理量	4
一、电流	4
二、电位	5
三、电压	5
四、电功率	6
五、电功	8
1.3 电阻元件与欧姆定律	9
一、电阻元件	9
二、欧姆定律	9
三、电阻元件的电导值	10
四、电阻元件消耗的功率	10
五、实际电阻器的额定量	10
1.4 理想电源	11
一、独立源	11
二、受控源	13
1.5 基尔霍夫定律	14
一、电路中几个常见的名词术语	15
二、基尔霍夫电流定律 (KCL)	15
三、基尔霍夫电压定律 (KVL)	16
习题	19
第 2 章 电阻电路的等效分析法	24
2.1 电路的等效	24
2.2 串、并联电阻电路的等效电路	25
一、电阻的串联及分压公式	25
二、电阻的并联和分流公式	26
三、电阻混联电路	27
2.3 Y 形和 Δ 形电阻网络的等效变换	29
2.4 独立电源间的串联和并联等效	32
一、理想电压源的串联	32
二、理想电流源的并联	32
三、电压源与电流源的串联和并联	33
2.5 电源模型及其等效变换	34
一、实际电源的两种模型	34
二、电源模型之间的等效变换	35
2.6 含受控源二端网络的等效变换	37
一、含受控源的无源二端网络	37
二、含受控源的有源二端网络	38
习题	40
第 3 章 电路定理	44
3.1 叠加定理	44
3.2 等效电源定理	48
一、戴维南定理	48
二、诺顿定理	50
三、最大功率传输	52
3.3 替代定理	55
习题	57
第 4 章 电阻电路的一般分析方法	59
4.1 支路电流法	59
4.2 网孔电流法	60
4.3 结点电压法	63
4.4 含运算放大器电路的分析	68
习题	71
第 5 章 稳恒交流电路分析	74
5.1 正弦量	74
一、正弦量的三要素	74
二、同频率正弦量之间的相位差	75
三、正弦量的有效值	76
5.2 相量	77
一、复数的表示	78
二、复数间的运算	79
三、相量	81
5.3 储能元件	83
一、电感元件	83
二、电容元件	85

5.4 电路元件伏安特性的相量形式.....	87	习题	148
一、电阻元件.....	87	第 8 章 二端口网络参数	150
二、电感元件.....	88	8.1 二端口网络的方程及其参数	150
三、电容元件.....	89	一、二端口网络的 Z 参数.....	150
5.5 电路定律的相量形式.....	89	二、二端口网络的 Y 参数.....	154
一、欧姆定律的相量形式.....	89	三、二端口网络的 H 参数.....	156
二、基尔霍夫定律的相量形式.....	90	四、二端口网络的 T 参数.....	157
5.6 阻抗和导纳.....	93	8.2 二端口网络的等效电路模型	159
一、三个基本元件的阻抗和导纳.....	93	8.3 二端口网络的连接	162
二、无源二端网络的阻抗和导纳.....	93	一、串联和并联	162
三、阻抗的串联和并联.....	95	二、二端口网络的级联	164
5.7 稳恒正弦交流电路分析.....	99	习题	165
5.8 正弦电路的功率.....	101	第 9 章 电路的暂态分析	169
一、瞬时功率.....	101	9.1 电路的过渡过程及其初始条件	169
二、有功功率.....	102	9.2 一阶电路的零输入响应	172
三、无功功率.....	103	一、RC 电路的零输入响应	172
四、视在功率.....	105	二、RL 电路的零输入响应	174
五、复功率.....	106	9.3 一阶电路的零状态响应	176
5.9 最大功率传输问题.....	107	一、RC 电路的零状态响应	177
5.10 功率因数的提高.....	108	二、RL 电路的零状态响应	178
5.11 谐振.....	110	9.4 一阶电路的全响应	180
一、RLC 串联电路的谐振.....	110	9.5 一阶电路的阶跃响应	184
二、GLC 并联电路的谐振.....	114	一、单位阶跃函数和延时阶跃函数	184
三、实际电感线圈与电容的 并联谐振.....	115	二、阶跃响应	185
习题.....	117	9.6 一阶电路的冲激响应	186
第 6 章 含有互感的正弦电路	125	一、单位冲激函数和延时冲激函数	186
6.1 互感元件.....	125	二、单位冲激响应	187
6.2 互感线圈的串联和并联.....	127	9.7 二阶电路的暂态响应	190
6.3 含互感元件电路的分析方法.....	130	一、二阶电路的零输入响应	190
6.4 空心变压器.....	133	二、二阶电路的阶跃响应	194
6.5 理想变压器.....	135	三、二阶电路的冲激响应	195
习题.....	136	9.8 暂态电路的复频域分析	196
第 7 章 三相交流电路	139	一、拉普拉斯变换	196
7.1 三相电路.....	139	二、电路的复频域分析	201
7.2 对称三相电路的分析方法.....	141	习题	204
7.3 不对称三相电路的分析方法.....	143	附录 A 磁路与铁芯电感线圈.....	208
7.4 三相电路的功率及其测量.....	145	附录 B 习题参考答案.....	223
一、三相电路的功率.....	145	参考文献	229
二、三相电路功率测量.....	146		

第

1

章

电路及其基本定律

本章介绍电路及其模型、电路中的理想元件，电路的几个基本物理量，电阻元件的伏安特性，结点上各支路电流的约束关系以及回路中各元件电压间的约束规律。

1.1 电路及其模型

电路是由电气元件相互连接而构成的电流流通的路径。通常把具有一定功能的电路称为电系统或电网络。

一、电路的组成

组成电路的主要部件有电源、负载、连接导线以及开关、测量仪表等。

1. 电源

电源是将其他形式的能量转换成电能的装置。在实际生活中，干电池、蓄电池、太阳能电池、各种发电机等都属于电源。

2. 负载

在电路中将电能转换成其他形式能的元件或设备都被称为负载。常见的负载有灯泡、电炉、电动机等。

需要说明的是，电源元件在电路中不全部充当提供电能的“电源角色”。就拿手机电池来说，在正常使用手机时，手机电池为手机电路提供能量，它是手机电路的能量源，是电源；但是如果把手机电池放到其充电器中充电，则电池通过充电器吸收外界能量，并将电能转变成化学能存储在电池中，显然，电池在这种状态下角色就变成了吸收能量的负载。

3. 导线

电路中将电能传递给负载的连接线称为导线。导线通常由导电能力极强的金属材料制成。

电路中除了电源、负载和导线之外，还有用于控制、测量等功能的电单元，如开关、仪表等。图 1-1 所示为手电筒的电路。

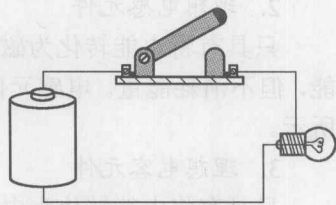


图 1-1 手电筒的电路

二、电路的作用

电路的作用有能量的传输、分配、转换和储存，信号的传递、变换、处理、控制等。

1. 进行能量的传输、分配、转换和储存

通过电路很容易实现能量的远距离传输、分配、转换和储存，典型的例子如电力系统。在这个系统中，发电机是电源，它把其他形式的能（机械能）转化为电能。电能通过变压器升压、输电线的远距离传送，再经过变压器的降压，将电能送给千家万户的负载。负载把电能转换成其他形式的能，比如光能（灯泡）、机械能（电动机）、热能（电炉）。用户可以用充电电路把部分电能存储到蓄电池中以备用。

2. 实现信号的传递、变换、处理和控制

通过电路很容易实现电信号的传输、变换、处理和控制。就拿收音机电路来说，天线将空间的电磁波信号接收进来，调谐电路完成调制波的频率的选择（选台），高频放大电路将高频载波信号的幅度放大到检波节需要的大小，检波电路将音频信号从高频载波中分离出来，前置音频信号放大电路用来将音频信号放大以便能够驱动后级放大器，电位调整电路实现音量的大小控制，功率放大电路将音频信号的功率转换到足以驱动扬声器的功率信号，最后由扬声器将音频电信号转变成声音信号。

现代信号处理的过程一般是这样的：首先将非电信号通过换能器电路转换为连续的电信号，再经过模/数转换电路把连续的电信号变成数字电信号，然后采用数字信号处理电路对数字信号进行处理，处理后的信号再经过数/模转换电路转换成连续的电信号，最后通过换能器把电信号还原成非电信号。

三、电路中的理想元件

一般来说，实际电路元件的电性能都比较复杂，研究起来较为麻烦。在电路分析时，常常以理想化的元件取代它们进行电路分析。所谓理想元件就是电特性单一的元件。常见的理想元件包括理想电阻、理想电感、理想电容、理想电压源、理想电流源元件等。

1. 理想电阻元件

只具有将电能转化为热能本领的元件，称为理想电阻元件。理想电阻元件既不储存电场能也不储存磁场能。理想电阻元件是二端元件，文字符号用“ R ”表示，图形符号如图 1-2 (a) 所示。

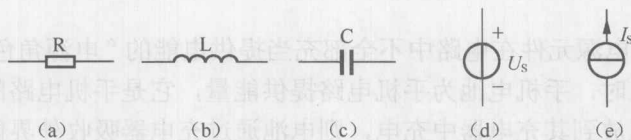


图 1-2 理想元件的符号

2. 理想电感元件

只具有将电能转化为磁场能本领的元件，称为理想电感元件。理想电感元件只存储磁场能，但不消耗能量。电感元件也是二端元件，文字符号用“ L ”来表示，图形符号如图 1-2 (b) 所示。

3. 理想电容元件

只具有将电能转化为电场能本领的元件，称为理想电容元件。理想电容元件只存储电场能，也不消耗能量。电容元件也是二端元件，文字符号用“ C ”表示，图形符号如图 1-2 (c) 所示。

图 1-2 (d) 和图 1-2 (e) 所示分别为理想电压源和理想电流源的图形符号。至于它们的特性,将在后面电源部分详细介绍。

由于本书中涉及的电路元件都是理想元件,所以习惯上常不提“理想”二字,比如“理想电阻元件”就简称为“电阻元件”。

四、实际元件的理想化模型

实际元件的特性一般都比较复杂,为了便于研究由实际元件构成的电路,通常用和实际元件具有相同外部电特性的“电路单元”去替代电路中的实际元件。组成这些“电路单元”的全部是电特性单一的理想元件。通常把由理想元件构成的用来模拟实际元件电特性的“电路单元”称为实际元件的理想化模型。

整流器是日光灯电路的一个重要器件,它的核心部分是一个铁芯线圈,所以它的主要特性表现为电感的特性。那么,它是不是一个纯电感器件呢?显然不是,当我们让日光灯电路正常工作一段时间后,发现整流器会发热!这说明整流器还包含电阻所具有的特性。于是我们就用一个理想电感元件和一个理想电阻元件的串联结构,作为整流器电特性的“电路单元”。这就是整流器工作在低频电路中的理想化模型,如图 1-3 所示。



图 1-3 整流器工作在低频电路中的理想化模型

当然,在日常生活中也有些器件的特性相对来说“比较单一”,就拿白炽灯、电炉来说,它们的主要特性就是将电能转化为热能,其他特性几乎可以忽略,所以,通常把白炽灯看成理想电阻元件来对待。

五、电路的理想化模型

电路中的实际元件都用其理想模型代替,这样构成的电路称为原电路的理想化模型。本教材中遇到的电路都是这种理想化模型。为了分析电路方便起见,常用元件符号构成的图形来表述电路的工作原理,这种图叫电路原理图,简称电路图。手电筒电路的电路图如图 1-4 所示。

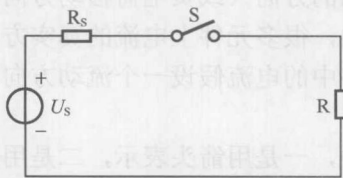


图 1-4 手电筒电路的原理图

电路理想化模型中的导线都是理想导线,理想导线的内电阻值为零。将一根实际导线建立理想化模型时,如果导线电阻不可忽略,可以用理想导线上串一个电阻的方法来实现。

六、集总电路与分布参数电路

如果元件的特性与元件的尺寸无关,这种元件称为集总元件或点元件。由集总元件构成的电路,称为集总电路。反之,如果电路元件的特性与元件尺寸有关,则这样的元件为分布参数元件,由分布参数元件构成的电路,称为分布参数电路。上面介绍的理想元件都属于集

总元件, 本教材中研究的电路都是集总参数电路。

相对来说, 集总参数电路的分析要比分布参数电路的分析简单一些。实际电路能否当作集总参数电路来研究, 要看其工作时信号的波长。如果电路中元件的尺寸和波长相比拟, 电路元件就不能当成集总参数的元件, 电路也不能当成集总电路去研究; 相反, 如果电路的尺寸远小于信号的波长, 那么电路中的元件就可以看成集总元件, 电路就可以当成集总电路研究。我国工频交流电频率为 50Hz、波长达 6 000km。这波长远远大于一般电路的尺寸, 因此工作于工频交流电下的大部分电路都可以当成集总电路来分析研究。

1.2 电路中的主要物理量

电路分析中涉及的主要物理量有电流、电压、电位、电功率、电功、电荷、磁通量等, 下面就几个主要的物理量作一一解释。

一、电流

电荷在电场的作用下定向移动而产生电流, 电流的强弱是用电流强度来描述的。

1. 电流强度

电流强度变量用 i 表示, 在电路中导体上电流强度定义为

$$i = \frac{dq}{dt}$$

即通过导体某横截面上电量随时间的变化率。式中, q 是电量, 单位为库仑 (C), t 是时间, 单位为秒 (s)。

当电流强度不随时间变化时, 称这种电流为稳恒直流电流, 电流强度符号一般用 I 表示, 即单位时间通过导体某横截面的电量值。电流强度的单位是安培 (A)。

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

2. 电流的真实方向与参考方向

习惯上把导体中正电荷移动的方向 (或负电荷移动方向的反方向) 定义为电流的真实方向。但是, 在实际的电路分析中, 很多元件上电流的真实方向是无法直接判断定的。为了分析电路问题方便, 可以先给电路中的电流假设一个流动方向, 这种假设的电流方向我们称之为电流的参考方向。

参考方向的表示方法有两种, 一是用箭头表示, 二是用元件端点字母做电流变量的下标来表示。如图 1-5 中用箭头描述了电流 I 的参考方向: 从 A 流向 B, 这种描述方法形象直观。用端点字母作下标时, 写在前面的表示流出端, 写在后面的表示流入端。如果将图 1-5 中电流变量写成 I_{AB} , 就表示电流的参考方向是自 A 流向 B。反之, I_{BA} 代表电流的参考方向是自 B 流向 A。显然: $I_{AB} = -I_{BA}$ 。需要注意的是, 如果 AB 间有两条以上支路时一般不采用下标表示法, 因为这样标很难说清楚这个参考方向究竟指的是那一条支路电流的参考方向。

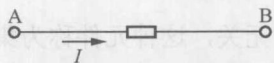


图 1-5 电流的参考方向

有了参考方向概念之后, 电流数值的正负就都有特定的意义了。正值表示电流的真实方向与所标的参考方向一致; 负值表示电流的真实方向与所标的参考方向相反。

举个例子, 在图 1-5 中, 如果 $I=1\text{A}$, 说明电流的真实方向是 $A\rightarrow B$; 若 $I=-1\text{A}$ 则表示电流的真实方向是 $B\rightarrow A$ 。

显然, 只有在建立参考方向的概念之后, “负电流”才有了实际的意义, 否则负电流将失去意义。对于正弦电流也要设定参考方向, 因为当相角 ωt 位于第二、第三象限角时, 正弦电流 $i=I_m \cos \omega t$ 数值也是负值, 若不设参考方向, 负值电流也将没有意义。所以, 大家在电路分析的过程中, 别忘了给电路中每个电流假设一个参考方向。

二、电位

1. 电位的定义

电路中之所以能产生电流, 是因为电路中存在电场。如果电路中某点 A 处有一个电量为 q 的电荷, 电荷具有的能量为 W_A , 则定义电路中点 A 处的电位数值为

$$U_A = \frac{W_A}{q}$$

其中, 能量 W_A 单位是焦耳 (J), 电量 q 的单位是库仑 (C), 电位 U_A 的单位为伏特 (V)。

2. 零电位参考点

在计算电场中某点电位的时候, 通常首先要给电场选定一个参考点, 并设其电位数值为零, 这个点叫“零电位参考点”。对于点电荷产生的场, 常把离该电荷无穷远处定义为零电位参考点。在电路分析中, 可以将电路中的任意一结点选作参考点。

需要注意的是, 如果电路中已经有了参考点就不能随意假设新的参考点。因为两个零电位参考点之间可视为短接。

同一个电路, 零电位参考点选取不一样, 电路中同一点的电位值也会不一样。所以在计算电路各点的电位时, 必须有明确的零电位参考点。

大地的电位通常被定义为零, 所以多数教材选用接地符号 ($\perp$) 来注明电路中零电位参考点的位置。图 1-6 中点 “O” 为零电位参考点。

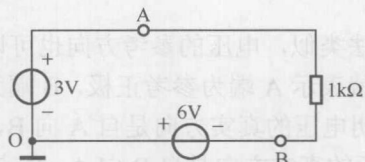


图 1-6 电路的零电位参考点

3. 负值电位的含义

有了参考点的定义之后, 电位的数值便可正可负。图 1-6 中, $U_O=0$ (参考点), $U_A=3\text{V}$, $U_B=-6\text{V}$ 。A 点电位数值大于零, 说明 A 点的电位比零电位参考点 O 的电位高。B 点电位数值小于零, 表明该点的电位比零电位参考点的电位低。

三、电压

1. 电压的定义

电路中如果点电荷 q 从 A 点移动到 B 点电场力做的功为 W_{AB} , 则定义 AB 之间的电压为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{W_A}{q} - \frac{W_B}{q} = U_A - U_B$$

由此可以看出, A、B 两点的电压等于 A、B 两点的电位之差。

显然:

$$U_{AB} = U_A - U_B = -(U_B - U_A) = -U_{BA}$$

电压与电位的单位相同, 都是伏特 (V)。

2. 电压的真实方向与参考方向

电压的数值只能反映电路元件间电压的大小, 而不能反映两端电位的相对高低。为了解决这个问题, 通常在元件两端打上极性符号。打“+”符号的端代表高电位端, 打“-”符号的端代表低电位端, 如图 1-7 (a) 所示。另外, 在习惯上把元件高电位端指向低电位端的方向定义为元件电压的真实方向。真实方向的表示也可以用箭头, 如图 1-7 (b) 所示。

在复杂的电路分析过程中, 有些元件两端电压的方向未知, 但分析的过程中又需要用到这些电压的方向信息。这时, 需要在元件上任意标出一个方向来帮助列写电路方程, 这个在元件上标出的电压方向就是电压的参考方向。当一个元件电压的参考方向标定之后, 电压的真实方向就可以通过参考方向和电压的数值来判断。如果电压的数值为正值, 则表示电压的真实方向与所标参考方向相同; 如果电压的数值为负值, 则说明电压的真实方向与参考方向相反。图 1-8 (a) 中, 电压的大小为 $3V > 0$, 表示真实方向与所标参考方向相同, 即 A 端为真实高电位端、B 端为低电位端; 而图 1-8 (b) 中, 电压的数值为 $-3V$, 负号表示这个电压真实方向与所标的参考方向相反, 即真实的高电位端是 B 端, A 端实为低电位端。

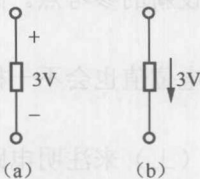


图 1-7 电压方向的两种图形表示方法

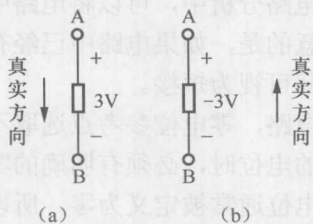


图 1-8 电压的参考方向与真实方向

与电流的参考方向标注方法类似, 电压的参考方向也可以用元件两端的端点字母作电压变量的下标来表示。比如 U_{AB} 就表示 A 端为参考正极, B 端为参考负极, 电压的参考方向是 A 指向 B。如果 $U_{AB} > 0$, 则表明电压的真实方向是自 A 向 B, A 点为高电位端, B 点为低电位端。如果 $U_{AB} < 0$, 则表明电压的真实方向是自 B 向 A, B 点为高电位端, A 点为低电位端。

必须提醒的是, 虽然电流、电压的参考方向是可以任意假设的, 但在电路分析的过程中参考方向一旦设定就不要随便更改, 以免引起混乱。另外, 如果没有特别说明, 电路图中标出的电流、电压的方向都指的是参考方向。

四、电功率

1. 参考方向的关联与非关联

对于一个二端元件 (或二端网络) 来说, 如果所选的电压参考方向与电流参考方向一致, 则称该元件电压、电流的参考方向是关联的, 否则称为非关联。图 1-9 (a) 中, 电压参考方向与电流参考方向相同, 所以两个参考方向的关系属于关联; 图 1-9 (b) 中, 元件的电压和

电流的参考方向是相反的, 因此两个参考方向的关系属于非关联。

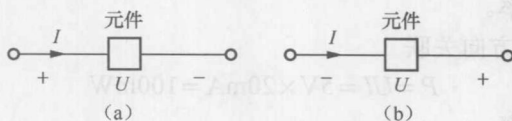


图 1-9 U 、 I 参考方向的关联与非关联

2. 电功率的计算公式

功率等于单位时间内元件吸收的能量, 用字母 p 来表示。即

$$P = \frac{dW}{dt}$$

对于电流、电压不随时间变化的稳恒直流电路, 功率的公式为

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = U \frac{\Delta Q}{\Delta t} = UI$$

由于 U 、 I 的数值可以是正值, 也可以是负值, 因此元件吸收的功率 P 既可以是正值, 也可以是负值。接下来研究一下元件功率正负号的含义。

在关联参考方向下, 如果元件的 $U > 0$, $I > 0$ 或者 $U < 0$, $I < 0$, 则 $P > 0$, 由于这两种情况下正电荷移动的方向与电场力方向一致, 所以电场力对电荷做功, 这个过程是将电能转化为其他形式的能, 元件消耗功率, 该元件在电路中扮演负载角色。如果元件的 $U > 0$, $I < 0$ 或者 $U < 0$, $I > 0$, 则 $P < 0$, 这时正电荷移动的方向与电荷所受电场力的方向相反, 需要外力对电荷做功才能实现。外力将其他形式的能量转化为电能, 该元件是在发出功率, 它在电路中扮演电源角色。

在非关联参考方向下, 情况就正好相反, 当 $P > 0$, 该元件发出功率, 元件在电路中扮演电源角色; 当 $P < 0$, 该元件消耗功率, 元件在电路中扮演负载的角色。

如果我们在关联参考方向下计算功率用公式 $P = UI$, 而在非关联参考方向下用公式 $P = -UI$, 那么, 计算结果 $P > 0$ 都代表该元件在电路中消耗功率, $P < 0$ 代表该元件在电路中发出功率。

电功率的单位是瓦特 (W)。实验室中用于直接测量功率的仪表是瓦特表。

例 1.1 计算图 1-10 所示各个元件的功率, 并说明它在电路中是发出功率还是吸收功率。

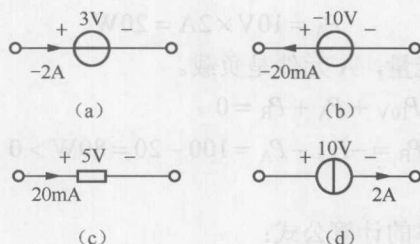


图 1-10 例 1.1 图

解: 图 1-10 (a) 中 U 、 I 参考方向关联

$$P = UI = 3V \times (-2A) = -6W$$

$P < 0$, 所以该元件发出功率。

图 (b) 中 U 、 I 参考方向非关联

$$P = -UI = -(-10\text{V}) \times (-20\text{mA}) = -200\text{mW}$$

$P < 0$, 所以该元件发出功率。

图(c)中 U 、 I 参考方向关联

$$P = UI = 5\text{V} \times 20\text{mA} = 100\text{mW}$$

$P > 0$, 所以该元件消耗功率。

图(d)中 U 、 I 参考方向关联

$$P = UI = 10\text{V} \times 2\text{A} = 20\text{W}$$

$P > 0$, 所以该元件消耗功率。

在交流电路中, 元件的功率随时间变化:

$$P(t) = u(t)i(t) \quad (\text{关联})$$

$$P(t) = -u(t)i(t) \quad (\text{非关联})$$

$P(t) > 0$ 时的时间段, 元件在吸收功率, 而对应 $P(t) < 0$ 的时间段, 元件在发出功率。也就是说, 在交流电路中, 有些器件在电路中时而扮演负载的角色, 时而扮演电源的角色。

对于一个完整(独立)的电路来说, 所有元件吸收功率的代数和等于 0。换句话说, 电路中电源产生的功率总是等于负载消耗的功率, 这称为能量守恒或功率守恒。

例 1.2 求图 1-11 所示电路中各元件的功率, 并计算 B 元件的电流 I 。

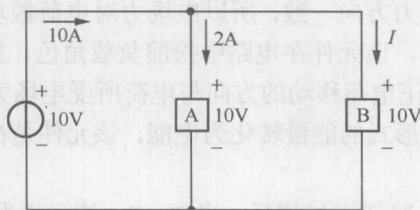


图 1-11 例 1.2 图

解: 电压源元件吸收的功率:

$$P_{10\text{V}} = -10\text{V} \times 10\text{A} = -100\text{W}$$

所以, 电压源元件在电路中产生 100W 的电功率, 是电源。

A 元件吸收的功率:

$$P_A = 10\text{V} \times 2\text{A} = 20\text{W}$$

所以, A 元件在电路中消耗能量, A 元件是负载。

根据能量守恒,

$$P_{10\text{V}} + P_A + P_B = 0$$

$$P_B = -P_{10\text{V}} - P_A = 100 - 20 = 80\text{W} > 0$$

B 元件吸收功率, 是负载。

根据关联参考方向下功率的计算公式:

$$P_B = 10 \times I = 80$$

得: $I = 8\text{A}$ 。

五、电功

电功是指元件在一段时间内消耗或产生的电能量, 用字母 W 表示。稳恒直流电路中:

$$W = P \Delta t$$

这里 Δt 是时间, 单位为秒 (s)。

电功的单位是焦耳 (J)。

$$1\text{J} = 1\text{W} \times 1\text{s}$$

电功的另外一个常用单位是度 (kWh), 即千瓦时。

$$1\text{kWh} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

如果元件消耗或产生的功率是时间的函数, 那么在 $t_1 \sim t_2$ 这段时间内消耗或产生的能量为:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

测量居民用电多少的仪表叫电度表。

1.3 电阻元件与欧姆定律

一、电阻元件

电阻元件是实际电阻器的理想化模型。电阻元件电压与电流的关系称为电阻元件的伏安特性 (VCR)。这种关系可用电流、电压坐标中的曲线来表示, 即电阻元件的伏安特性曲线。关联参考方向下, 电阻元件的伏安特性曲线如图 1-12 所示, 其中图 1-12 (a) 中的伏安特性曲线是过原点的直线, 这类电阻元件称为线性电阻元件, 直线的斜率称为这个电阻的电阻值; 图 1-12 (b) 的伏安特性曲线为一条过原点的曲线, 具有这样特性的电阻元件称为非线性电阻元件, 非线性电阻元件的阻值随着电压、电流的变化而变化。本教材中主要研究由线性电阻元件构成的电路。

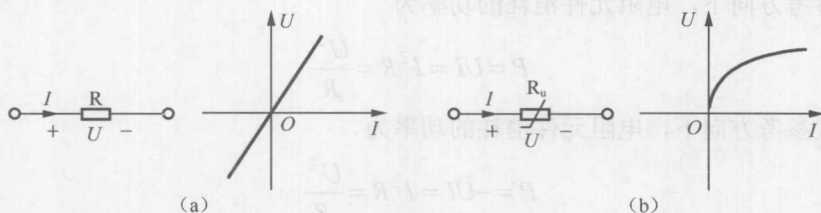


图 1-12 电阻元件的符号及其伏安特性

无论是线性的还是非线性的电阻元件, 其伏安特性都经过坐标原点, 说明电阻上电压为零时, 电流一定为零; 反之, 电流为零时, 电压也一定为零。电阻元件是一种即时元件或静态元件。

二、欧姆定律

线性电阻元件在关联参考方向下的伏安特性可以用函数表达式表示为

$$U = RI \quad (1-1)$$

即电阻两端的电压与流过它的电流成正比, 这就是我们熟知的欧姆定律。其中, 比例系数 R 是电阻的电阻值, 它与构成电阻的材料、尺寸有关, 而与加在它两端的电压、流过它的电流大小没有关系。

电阻值的单位是欧姆 (Ω), $1\Omega=1\text{V}/1\text{A}$ 。

在非关联参考方向下, 线性电阻元件的伏安特性为

$$U = -RI$$

由 $I = U/R$ 可知, 在一定的电压下, 电阻的阻值越大, 流过该电阻的电流就越小, 因此电阻值的大小反映了该元件阻碍电流流通的能力。

三、电阻元件的电导值

一个电阻元件的特性除了可以用电阻值的大小之外, 还可以用其电导值来描述。在关联参考方向下, 定义电阻元件的电导值为

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

显然, 一个电阻元件的电阻值越大, 其电导值越小, 导电能力越差; 电阻值越小其电导值就越大, 导电能力就越好。所以, 电导值是从电阻元件导通电流能力上去描述电阻特性的。

当一段材料的电导值极小而趋于零时, 我们称之为绝缘体; 当一段材料的电导值趋于无穷大时, 我们称之为超导体。

电导的单位为西门子 (S)。

$$1\text{S}=1/1\Omega$$

有了电导的概念之后, 电阻元件的伏安特性可以有另外一种表达方式, 即

$$I = GU \quad (\text{关联参考方向})$$

$$I = -GU \quad (\text{非关联参考方向})$$

四、电阻元件消耗的功率

在关联参考方向下, 电阻元件消耗的功率为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

在非关联参考方向下, 电阻元件消耗的功率为

$$P = -UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

线性电阻的 $R > 0$, 所以无论 U 、 I 的数值是正是负, P 总是大于零, 这表明电阻元件总是耗能元件。

五、实际电阻器的额定量

电阻元件吸收能量之后, 将电能转变成热能。实际电阻器在一段时间内产生的热能如果不能及时、有效地散发出去, 那么电阻器的温度就会越来越高, 最后必定导致电阻器的烧毁。所以, 每个实际电阻器都有它的安全使用范围, 这便是电阻器的额定量。电阻器的额定量有额定电压 U_n 、额定电流 I_n 和额定功率 P_n 。当然它们之间具有 $P_n = U_n I_n$ 的关系。

例如, 标有“220V100W”字样的白炽灯, 即表示该白炽灯的额定电压是 220V、额定功率 100W。含义: 当给灯泡加 220V 的电压的时候, 灯泡消耗功率 100W, 且能在规定的寿命内正常工作。