

校 企 共 建 教 材

新世纪电子信息与电气类系列规划教材

XINSHIJI

DIANZI XINXI YU DIANQILEI XILIE GUIHUA JIAOCAI

电路分析

主编◎田丽鸿 许小军



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

校 企 共 建 教 材
新世纪电子信息与电气类系列规划教材

电 路 分 析

主 编 田丽鸿 许小军
副主编 刘 勤 郑胜男 陈敏聪
参 编 华琴娣

内容摘要

本书为本科规划教材,也为校企共建教材。全书共 10 章,系统阐述了电路分析的基本概念、基本定理和基本方法。本书的主要内容包括电路分析的基本概念和基本定律、电路分析的等效变换法、线性电路的一般分析方法、线性电路的基本定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、电路的频率响应、非正弦周期电流电路稳态分析、二端口网络、简单非线性电阻电路等。此外,本书配有大量例题、思考题、习题及参考答案,同时结合实际应用,编写“知识拓展”部分,引入实用性知识和实例。本书内容全面,难易适中,叙述清楚,语言精练,结合实际,便于教师教授和学生自学。

本书可作为电子、通信、计算机及相关专业本科学生的教材,也可供其他专业和有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 田丽鸿, 许小军主编. — 南京: 东南大学出版社, 2016. 12

新世纪电子信息与电气类系列规划教材

ISBN 978-7-5641-6879-7

I. ①电… II. ①田… ②许… 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(2016)第 294448 号

电路分析

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社址 南京市四牌楼 2 号

邮编 210096

经销 全国各地新华书店

印刷 南京京新印刷厂

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 18.5

字数 480 千字

版次 2016 年 12 月第 1 版

印次 2016 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—3000 册

书号 ISBN 978-7-5641-6879-7

定价 45.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

前 言

为适应应用型本科教学改革的发展,培养高素质的应用型人才,更好地将工程教育理念融入教学中,我们依据国家教育部关于“本科电子与通信专业电路分析教学基本要求”编写了本部教材,本教材为应用型本科规划教材。

“电路分析”课程是大学本科电类专业重要的技术基础课。通过本课程的学习,不仅可使学生获得有关电路的基本知识、基本理论和基本分析方法,还可为后续课程的学习和从事相关专业技术工作打下坚实的基础。

在本教材编写过程中,着重考虑了应用型本科院校的教学特点和要求,力图做到:

(1) 内容紧凑、深入浅出、详略得当,语言简练通畅,紧扣实际应用,强调“学以致用”。

(2) 体现应用型本科特色。教材在注重基本知识、基本理论和基本分析方法的阐述,强调培养学生分析问题和解决问题的能力同时,强化工程教育理念,在例题、思考题、习题的选择及课外拓展、校企共建等内容的编写中,通过工程实际应用中的各类电路问题介绍及分析,提高学生分析和解决实际电路问题的能力。

(3) 习题紧扣学习要求,题目类型灵活,难度适中,数量合理,帮助学生掌握分析方法;思考题帮助学生巩固基础,拓展思维,联系实际。

(4) 紧跟学科发展,增加较新仿真软件 Multisim 介绍并提供实例分析,培养学生借助仿真软件进行电路分析与设计,提高解决电路问题的实际能力。

(5) 体现校企共建思想,邀请企业技术人员参与教材编写,对当前比较新的实际应用仪器、电气设备及测试技术进行介绍。

(6) 扩大教材信息量,提升教材可读性。教材增加“知识拓展”专题,对电路分析过程中需要掌握的一些实用知识进行介绍,旨在使学生通过自行学习,扩大知识量,感受电路分析理论与实际生活的密切联系,从而提高学习兴趣。

本教材中标注“*”的内容可根据需要选择学习。

本教材适用于高等院校电子、通信、计算机及相关专业的学生使用,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

全书由南京工程学院教师编写。全书共 10 章,其中,第 1、2、8 章由田丽鸿编写;第 5、7 章由许小军编写,秦进平参与第 5 章编写;第 4、6 章由刘勤编写;第 3、9 章由郑胜男编写;第 10 章由陈敏聪编写。本书由田丽鸿、许小军担任主编并统稿。陈菊红副教授担任主审,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

本教材的出版得到了东南大学出版社的大力支持和帮助,此外,在本书编写过程中查阅和参考了众多文献资料,获得许多启发,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中的疏漏和失误在所难免,敬请读者指正,以便不断完善。

编者
2016 年 8 月

目 录

1	电路分析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	(1)
1.1.2	电路模型	(1)
1.2	电路分析的基本变量	(2)
1.2.1	电流、电压及其参考方向	(2)
1.2.2	电位	(4)
1.2.3	电动势	(5)
1.2.4	电功率与电能	(6)
1.3	电路的主要组成元件	(8)
1.3.1	电阻元件	(8)
1.3.2	独立电源	(9)
1.3.3	受控电源	(12)
1.4	基尔霍夫定律	(13)
1.4.1	与拓扑约束有关的几个名词	(14)
1.4.2	基尔霍夫电流定律	(14)
1.4.3	基尔霍夫电压定律	(15)
1.5	电路的工作状态	(16)
1.5.1	开路	(16)
1.5.2	短路	(17)
1.5.3	额定工作状态	(17)
	知识拓展	(17)
	本章小结	(23)
	习题 1	(24)
2	电路分析的等效变换法	(27)
2.1	无源电阻网络的等效变换	(27)
2.1.1	电阻的串联	(27)
2.1.2	电阻的并联	(28)
2.1.3	电阻的混联	(29)
2.1.4	电阻的星形与三角形连接	(30)

2.2 含独立源网络的等效变换	(33)
2.2.1 理想电压源的连接与等效	(33)
2.2.2 理想电流源的连接与等效	(34)
2.2.3 两种实际电源模型间的等效变换	(34)
2.2.4 含独立源网络的等效变换	(35)
2.3 含受控源网络的等效变换	(37)
2.3.1 含受控源的无源二端网络	(37)
2.3.2 含受控源的有源二端网络	(38)
知识拓展	(39)
本章小结	(44)
习题2	(45)
3 线性电路的一般分析方法	(48)
3.1 支路电流法	(48)
3.2 回路电流法	(50)
3.3 节点电压法	(54)
知识拓展	(58)
本章小结	(59)
习题3	(60)
4 线性电路的基本定理	(63)
4.1 叠加定理	(63)
4.2 替代定理	(67)
4.3 等效电源定理	(68)
4.3.1 戴维南定理	(68)
4.3.2 诺顿定理	(73)
4.4 最大功率传输定理	(76)
4.5 特勒根定理	(78)
4.5.1 特勒根定理1(特勒根功率定理)	(78)
4.5.2 特勒根定理2(特勒根似功率定理)	(78)
4.6 互易定理	(79)
4.6.1 互易定理第一形式	(79)
4.6.2 互易定理第二形式	(80)
4.6.3 互易定理第三形式	(80)
知识拓展	(81)
本章小结	(87)
习题4	(89)

5	动态电路的时域分析	(93)
5.1	储能元件	(93)
5.1.1	电容元件	(93)
5.1.2	电感元件	(96)
5.2	换路定则与初始值的确定	(98)
5.2.1	换路定则	(98)
5.2.2	初始值的确定	(98)
5.3	一阶电路的零输入响应	(100)
5.3.1	RC 电路的零输入响应	(100)
5.3.2	RL 电路的零输入响应	(103)
5.4	一阶电路的零状态响应	(105)
5.4.1	RC 电路的零状态响应	(105)
5.4.2	RL 电路的零状态响应	(107)
5.5	一阶电路的全响应、三要素法	(109)
5.5.1	线性动态电路的叠加原理	(109)
5.5.2	一阶电路的三要素分析法	(111)
5.6	一阶电路的阶跃响应	(115)
5.6.1	单位阶跃信号的定义	(115)
5.6.2	一阶电路的阶跃响应	(116)
5.7	一阶电路的冲激响应	(118)
5.7.1	冲激信号的定义	(118)
5.7.2	冲激信号的性质	(118)
5.7.3	一阶电路的冲激响应	(119)
5.8	二阶电路的响应	(120)
5.8.1	RLC 串联电路的零输入响应	(121)
5.8.2	GLC 并联电路的零状态响应	(123)
	知识拓展	(125)
	本章小结	(127)
	习题 5	(129)
6	正弦稳态电路分析	(133)
6.1	正弦量概述	(133)
6.1.1	正弦量的基本概念	(133)
6.1.2	正弦量的三要素	(133)
6.2	正弦量的相量表示法	(136)
6.2.1	复数及其运算	(136)
6.2.2	正弦交流电的相量表示	(138)

6.3 正弦稳态电路的相量模型	(140)
6.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	(140)
6.3.2 单一参数元件电路的相量模型	(141)
6.4 阻抗和导纳	(146)
6.4.1 无源二端网络的阻抗和导纳的定义	(146)
6.4.2 RLC 串联电路及阻抗	(147)
6.4.3 GLC 并联电路及导纳	(150)
6.4.4 阻抗(导纳)的串联和并联	(151)
6.5 正弦稳态电路分析	(154)
6.5.1 相量分析法	(154)
6.5.2 相量法应用举例	(154)
6.6 正弦稳态电路的功率	(157)
6.6.1 单一参数元件的功率	(157)
6.6.2 二端网络的功率	(160)
6.7 耦合电感与变压器电路	(165)
6.7.1 藕合电感	(166)
6.7.2 变压器	(168)
6.8 三相电路分析	(172)
6.8.1 三相电源与三相负载	(173)
6.8.2 对称三相电路的分析	(175)
6.8.3 三相电路的功率	(180)
知识拓展	(182)
本章小结	(186)
习题 6	(188)
7 电路的频率响应	(194)
7.1 无源双端网络的频率特性与网络函数	(194)
7.1.1 RC 电路	(195)
7.1.2 RL 电路	(197)
7.1.3 无源双端网络	(198)
* 7.1.4 波特图	(198)
7.2 RLC 串联谐振电路	(199)
7.2.1 谐振频率	(199)
7.2.2 串联谐振电路的特点	(200)
7.2.3 频率响应	(201)
7.2.4 实现谐振的方法	(203)
7.3 并联谐振电路	(204)

7.3.1 GLC 并联谐振	(204)
7.3.2 实用简单的并联谐振电路	(206)
7.3.3 复杂谐振电路	(208)
7.4 无源滤波器	(209)
知识拓展	(212)
本章小结	(216)
习题 7	(217)
8 非正弦周期电流电路稳态分析	(220)
8.1 非正弦周期信号及其傅里叶级数的分解	(220)
8.1.1 非正弦周期信号的傅里叶级数	(220)
8.1.2 对称周期信号的傅里叶级数	(221)
8.2 非正弦周期电流电路的常用参数	(224)
8.2.1 有效值	(224)
8.2.2 平均值	(225)
8.2.3 平均功率	(225)
8.3 非正弦周期电流电路的稳态分析	(227)
知识拓展	(231)
本章小结	(237)
习题 8	(238)
9 二端口网络	(241)
9.1 二端口网络概述	(241)
9.2 二端口网络的参数方程	(242)
9.2.1 Z 参数方程	(242)
9.2.2 Y 参数方程	(243)
9.2.3 H 参数方程	(245)
9.2.4 A 参数方程	(247)
9.2.5 各类参数之间的相互转换	(248)
9.3 二端口网络的等效电路	(250)
9.3.1 T 型等效电路	(250)
9.3.2 π 型等效电路	(251)
9.3.3 含受控源的等效电路	(252)
9.4 具有端接的二端口网络	(252)
9.4.1 单端接的二端口网络	(253)
9.4.2 双端接的二端口网络	(253)
9.5 二端口网络的特性阻抗	(256)
9.6 二端口网络的连接	(257)

9.6.1 二端口网络的串联	(257)
9.6.2 二端口网络的并联	(258)
9.6.3 二端口网络的级联	(259)
知识拓展	(260)
本章小结	(263)
习题 9	(263)
10 简单非线性电阻电路	(267)
10.1 非线性电阻元件	(267)
10.1.1 非线性电阻元件的伏安特性	(267)
10.1.2 静态电阻与动态电阻	(268)
10.2 非线性电阻电路的分析方法	(268)
10.2.1 图解法	(268)
10.2.2 小信号分析法	(270)
10.2.3 折线法	(272)
知识拓展	(272)
本章小结	(276)
习题 10	(276)
习题答案	(278)
参考文献	(285)

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,通过电流、电压等物理量描述其中的物理现象和过程,包括电路分析与电路综合(或电路设计)两部分。电路分析的主要任务是根据已知的电路结构和元件参数,在外加激励确定的情况下,分析计算电路的响应。电路综合(或电路设计)的主要任务是在给定输入、输出的条件要求下,综合(或设计)满足给定条件的电路(包括电路结构与元件参数)。本书主要讨论电路的基本规律与电路的各种分析计算方法。

1.1 电路与电路模型

电路是各种电工、电子器件以及一些电气设备按一定方式连接起来的整体,它提供了电流流通的路径。

电路应用于能量与信息两大领域。如电力系统中,电路的主要作用是进行能量的转换、传输和分配。而收音机或电视机系统中,电路的主要作用是对电信号进行处理、变换和传递,这种作用在自动控制、通信、计算机技术等方面得到了广泛应用。

1.1.1 实际电路

最简单的电路是由电源、负载和连接导线组成的,其中供给电路电能的装置称为电源;消耗电能的装置称为负载;连接电源与负载的中间部分称为导线。显然,电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的。图 1.1(a)所示是一个最简单的照明电路示意图。

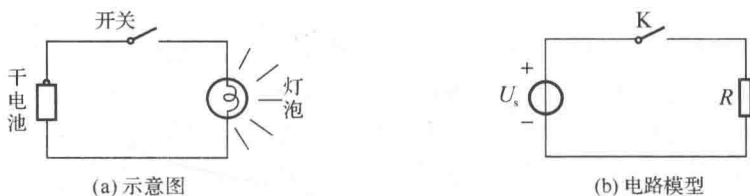


图 1.1 一个简单电路及其电路模型示例

1.1.2 电路模型

实际元件在工作时由于其电磁性质比较复杂,给分析带来了困难。为解决这个问题,更好地讨论电路的普遍规律,在研究和分析具体电路时,一般根据电路的具体条件和电磁特性,取其起主要作用的性质并用理想化的电路元件模型来代替,即往往需要建立电路模型。

用抽象的理想元件及其组合近似代替实际电路元件,从而把实际电路的本质特征反映出来的理想化电路叫电路模型。今后所讨论的电路都是电路模型,通过对电路模型的基本规律的研究,达到分析实际电路的目的。

用规定的电路符号表示各种理想元件所得到的电路模型图称为电路原理图,简称电路图。值得注意的是,电路图只反映电器设备在电磁方面相互联系的实际情况,而不反映它们的几何位置等信息。图 1.1(b)所示是图 1.1(a)所示电路的电路(模型)图。

实际电路可分为“集中参数电路”和“分布参数电路”两大类。当实际电路的几何尺寸远远小于电路最高工作频率所对应的电磁波波长时,可作为集中参数电路分析。我国电力系统生活用电的工频为 50 Hz,其对应波长为 6 000 km,因此大多数用电设备都可以采用集中参数电路进行分析。分布参数电路模型比较复杂,其描述电路的电磁量不仅是时间的函数,同时还是空间的函数(例如微波电路和远距离的通信电路和电力输电线)。本书讨论的电路只限于集中参数电路。

思考题

- (1) 理想化的电路元件是否等同于实际电路元件? 为什么?
- (2) 是否可以说“电路的尺寸越小,就越可以用集中参数电路表示”? 为什么?
- (3) 同一实际电路元件的理想化元件是否只有一种? 为什么?

1.2 电路分析的基本变量

电路分析中常用到电压、电流、功率等物理量,它们一般是时间的函数。本节对这些物理量以及与它们有关的概念进行简要说明。

1.2.1 电流、电压及其参考方向

1) 电流

带电粒子的定向移动形成了电流。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称为电流,用 i 表示。根据定义有:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

式(1.1)中, dq 为导体截面中在 dt 时间内通过的电量。在国际单位制(SI)中,电荷量的单位为库仑(C),时间单位为秒(s),电流单位为安培,简称安(A),常用单位有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等。通常将正电荷移动的方向规定为电流的方向。

当电流的大小和方向不随时间而变化时,称为直流电流,简称直流(DC)。本书对不随时间变化的物理量都用大写字母来表示,即式(1.1)在直流时,应写为:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

2) 电压

电压是电场力移动单位正电荷时所做的功。因电荷在电场力作用下在电路中运动,即电场力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力,引入“电压”这一物理量。由电压定义, A 、 B 两点之间的电压 u_{AB} 可表示为:

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} \quad (1.3)$$

式(1.3)中, dw_{AB} 表示电场力将 dq 的正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功。 dw_{AB} 单位为焦耳(J);电压单位为伏特,简称伏(V),常用单位为千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等。

在电压的大小和方向不随时间而变化(即直流电压)时,式(1.3)应写为:

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1.4)$$

由电压的定义可见,如果正电荷从 A 点移动到 B 点是电场力做功,那么正电荷从 B 点移动到 A 点必定有一种非电场力(如化学电池中的情况)在克服电场力做功,或者说此时电场力做了负功,即 $dW_{AB} = -dW_{BA}$,则 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。这说明,对两点间的电压必须分清楚起点和终点,也就是说,电压也是有方向的。通常规定电压的方向是电场力移动正电荷的方向。

3) 电压与电流的参考方向

以上对电流、电压规定的方向,是电路中客观存在的实际方向。在一些简单的电路中,其实际方向可以直观地确定;但在分析计算一些复杂电路时,往往很难直接判断出某一段电路上电流或电压的实际方向;而对那些大小和方向都随时间变化的电流或电压,要标出它们的实际方向就更困难了,为此,在分析计算电路时采用标定“参考方向”的方法。

参考方向是人们任意选定的一个方向。如图 1.2(a)、(b)所示某电路中的一个元件,现指定电流的参考方向,用实线箭头表示。如电流的实际方向(虚线箭头)与参考方向一致,则电流 i 为正值,即 $i > 0$,如图 1.2(a)所示;如电流的实际方向(虚线箭头)与参考方向相反,则电流 i 为负值,即 $i < 0$,如图 1.2(b)所示。于是在选定的参考方向下,电流值的正、负就反映了它的实际方向。

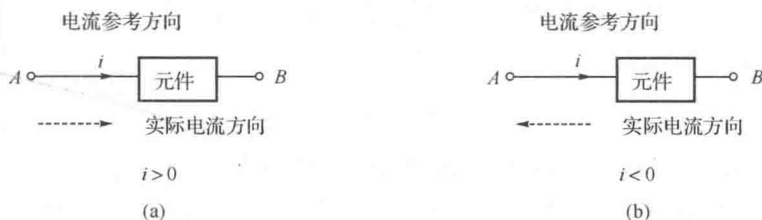


图 1.2 电流的参考方向

同样道理,电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向,并由参考方向和电压值的正、负来反映该电压的实际方向。显然,只有数值而无参考方向的电压、电流是没有意义的。电压的参考方向可以用一个箭头表示,也可以用正(+)、负(-)极性表示(实线箭头和符号),称为参考极性,如图 1.3(a)、(b)所示;另外还可以用双下标表示,例如 u_{AB} 表示 A 、 B 两点间电压的参考方向是从 A 指向 B 的。因此电压的参考方向在以上几种表示方法中任选一种标出即可。

综上所述,在以后的电路分析中,完全不必先去考虑各电流、电压的实际方向究竟如何,而应首先在电路图中标定它们的参考方向,然后根据参考方向进行分析计算,由结果的正负值与标定的参考方向确定它们的实际方向,因而图中不需要标出实际方向。需要注意的是参考方向一经选定,在分析电路的过程中不能再变动。



图 1.3 电压的参考方向

对于一个元件或一段电路上的电压和电流的参考方向,可以分别独立地任意选定,但为方便起见,常将电压和电流的参考方向选得一致,称其为关联参考方向。一般情况下,只标出电压

或电流中的某一个的参考方向,这就意味着另一个选定的是与之关联的参考方向。当选择电流、电压的参考方向相反时称为非关联参考方向。

值得注意的是:参考方向并不是一个抽象的概念,在用磁电式电流表测量电路中的电流时,该表带有“+”、“-”标记的两个端钮,事实上就已被被测电流选定了从“+”指向“-”的参考方向,如图 1.4 所示。当电流的实际方向是由“+”端流入,“-”端流出,则指针正偏,电流读数为正值,如图 1.4(a)所示;若电流的实际方向是由“-”端流入,“+”端流出,则指针反偏,电流读数为负值,如图 1.4(b)所示。

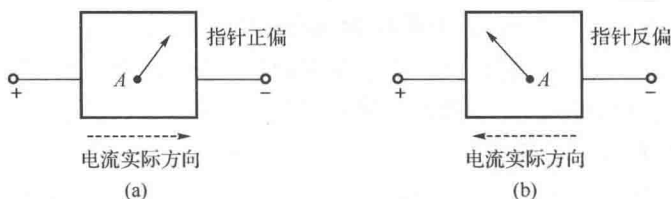


图 1.4 磁电式电流表与电流参考方向

同样,磁电式电压表的“+”、“-”两端钮也为被测的电压选定了参考方向。

1.2.2 电位

在电路中任选一点 O 作为参考点,则该电路中某一点 A 的电位为 A 点与 O 点之间的电压,用 V_A 表示。即

$$V_A = U_{AO} \quad (1.5)$$

显然,电位与电压的单位完全相同,也是用伏特(V)计量。

因电路参考点的电位为零,即 $V_0 = 0$,所以参考点也称零电位点。

除参考点外,电路中其他各点的电位可能是正值,也可能是负值。若某点电位是正值,则该点电位比参考点高,反之则该点电位比参考点低。

以电路中的 O 点为参考点,则另两点 A 、 B 的电位分别为 $V_A = U_{AO}$ 、 $V_B = U_{BO}$,它们分别表示电场力把单位正电荷从 A 点或 B 点移到 O 点所做的功,那么电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功即 U_{AB} 就应该等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 O 点,再从 O 点移到 B 点所做的功的和,即

$$U_{AB} = U_{AO} + U_{OB} = U_{AO} - U_{BO}$$

或

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.6)$$

式(1.6)说明,电路中 A 、 B 两点间的电压是 A 点与 B 点电位之差,因此电压又叫电位差。

【例 1.1】 在图 1.5 所示电路中,已知 $V_a = 40 \text{ V}$, $V_b = -10 \text{ V}$, $V_c = 0 \text{ V}$ 。要求:①计算 U_{ba} 及 U_{ac} ;②若选择 b 点为参考点,试求其他两点的电位。

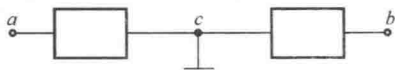


图 1.5 例 1.1 图

解 ①因为电压就是电位差,所以

$$U_{ba} = V_b - V_a = (-10 - 40) \text{ V} = -50 \text{ V}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c = (40 - 0) \text{ V} = 40 \text{ V}$$

②若选 b 点为参考点, 根据电位的定义

$$U_{ba} = V_b - V_a = 0 - V_a = -V_a$$

由①已知

$$U_{ba} = -50 \text{ V}$$

则

$$V_a = 50 \text{ V}$$

而

$$U_{ac} = V_a - V_c = 50 - V_c$$

得

$$V_c = 10 \text{ V}$$

从例题可见, 参考点是可以任意选定的, 当电路参考点一经选定, 电路中其他各点的电位也就确定了。当参考点选择不同时, 电路中同一点的电位会随之变化, 但任意两点的电位差即电压是不变的。

在电路图中不指明参考点而研究某点的电位是没有意义的。注意: 在一个电路系统中只能选取一个参考点。至于选哪一点为参考点, 要以分析问题的方便为依据进行选择。在电子电路中常选一条特定的公共线作为参考点, 这条公共线常常是很多元件的汇集处且与机壳相连, 因此在电子电路中参考点用接机壳符号“ $\perp$ ”表示。

1.2.3 电动势

如图 1.6 所示是一个蓄电池, 两个带正、负电荷的电极 A 和 B, A 称正极, B 称负极, 两极间具有电场。用导线把 A、B 两极连接起来, 在电场力作用下, 正电荷沿着外部导线从 A 移到 B (实质上是导体中的自由电子在电场力作用下从 B 移到 A), 形成了电流 i 。随着正电荷不断地从 A 移到 B, A、B 两极间的电场逐渐减弱, 以至消失, 导线中的电流也会减至为零。为了维持电流, 则需在 A、B 间保持一定的电场 (即电位差), 将电荷连续不断地从 B 极移到 A 极去。电源就是产生这种力的装置, 故将这种力称之为电源力。如化学电池中化学能转换为电能、发电机中机械能转换为电能等, 这些电能产生了电源力。

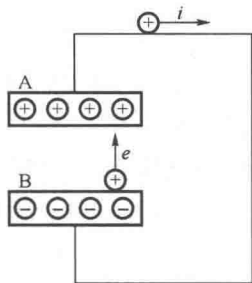


图 1.6 电源力做功

电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功, 称为电源的电动势, 用 e 表示, 即

$$e = \frac{dw_{BA}}{dq} \quad (1.7)$$

式(1.7)中, dw_{BA} 表示电源力将 dq 的正电荷从 B 移到 A 所做的功。显然, 电动势也有与电压相同的单位伏特(V)。

按照定义, 电动势的方向是电源力克服电场力移动正电荷的方向, 是从低电位指向高电位的方向。对于一个电源设备而言, 如干电池, 在电源内部, 其电动势是由负极指向正极, 为电位升; 而在电源外部, 其呈现的端电压则由高电位指向低电位, 为电位降。因此, 若电源的电动势 e 及其两端钮间的电压 u 的参考方向选择相反时, 如图 1.7(a) 所示, 那么当电源内部没有其他能量转换时, 根据能量守恒原理, 应有 $u = e$

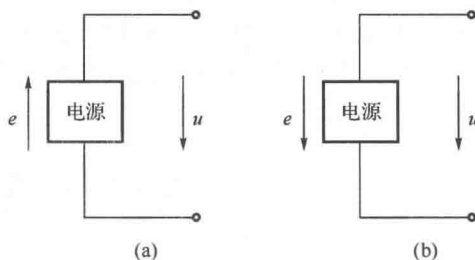


图 1.7 电源的电动势 e 与端电压 u

(电场力所做的功与非电场力所做的功相等); 如果 e 和 u 的参考方向选择相同时, 如图 1.7(b) 所示, 则 $u = -e$ 或 $e = -u$ 。本书在以后论及电源时一般不涉及电源内部的细节, 即通常用电源的端电压 u 描述。

1.2.4 电功率与电能

1) 电功率

单位时间内某电路吸收或释放的电能称为该电路的功率,用 p 表示。设在 dt 时间内电路转换的电能为 $d\omega$,则

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.8)$$

进一步推导式(1.8),可得:

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.9)$$

即电路的功率等于该段电路的电压与电流的乘积。在直流时,式(1.9)应写为:

$$P = UI \quad (1.10)$$

国际单位制中,功率单位为瓦特,简称瓦(W),常用单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。

功率 p 的结果可为正值也可为负值,其正负号也具有实际物理意义。若 $p > 0$,说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的,正电荷在电场力作用下做了功,电路吸收了功率;若 $p < 0$,则这段电路上电压和电流的实际方向不一致,一定是有外力克服电场力做了功,电路发出功率,也可以说电路吸收了负功率。

考虑到电压和电流的参考方向,在计算某一段电路的功率时,推荐采用下面的公式:

$$p = \pm ui \quad (1.11)$$

式(1.11)中,当 u 和 i 取关联参考方向时,选择 $p = ui$ 进行计算;当 u 和 i 取非关联参考方向时,选择 $p = -ui$ 进行计算。计算结果的正负和前面关于 p 的分析一致(即若 $p > 0$,则该段电路吸收功率,等效为负载;若 $p < 0$,则该段电路发出功率,等效为电源)。在使用式(1.11)时,必须注意 u 和 i 的参考方向是否关联及各数值的正、负号的含义。

由能量守恒原理可推出,一个电路中,一部分元件或电路发出的功率一定等于其他部分元件或电路吸收的功率,即整个电路的功率是平衡的。

2) 电能

当正电荷从一段电路的高电位点移动到低电位点时,电场力对正电荷做了功,该段电路吸收了电能;而当正电荷从电路的低电位点移到高电位点时,非电场力克服电场力做了功,即这段电路将其他形式的能量转换成电能释放了出来。由式(1.8)可得:

$$d\omega = p dt \quad (1.12)$$

在 $t_0 \sim t_1$ 的一段时间内,电路消耗的电能应为:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p dt \quad (1.13)$$

直流时, p 为常量,则

$$W = p(t_1 - t_0) \quad (1.14)$$

在国际单位制中,电能 W 的单位是焦耳(J),它表示功率为 1 W 的用电设备在 1 s 时间内

所消耗的电能。实际中还常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)(俗称度)的电能单位,即

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

【例 1.2】 图 1.8 为某电路的一部分,已知三个元件流过相同电流 $I = -1 \text{ A}$, $U_1 = 4 \text{ V}$ 。要求:①计算元件 1 的功率 P_1 ,并说明是吸收还是发出功率;②若已知元件 2 发出功率为 10 W ,元件 3 吸收功率为 6 W ,求 U_2 、 U_3 。

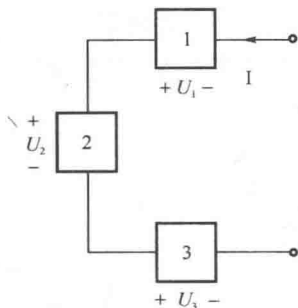


图 1.8 例 1.2 电路图

解 ①元件 1

由于该元件电压与电流是非关联参考方向,此时,计算功率的公式应为:

$$P_1 = -U_1 I$$

代入数据得 $P_1 = -(4 \text{ V}) \times (-1 \text{ A}) = 4 \text{ W}$ (吸收)

②元件 2 与元件 3

因元件 2 的电压 U_2 与电流 I 是关联参考方向,且发出功率,则 P_2 为负值,即

$$P_2 = U_2 I = -10 \text{ W}$$

可得:
$$U_2 = \left(\frac{-10}{-1} \right) \text{ V} = 10 \text{ V}$$

同理,元件 3 吸收功率为 6 W ,即

$$P_3 = U_3 I = 6 \text{ W}$$

可得:
$$U_3 = \left(\frac{6}{-1} \right) \text{ V} = -6 \text{ V}$$

思考题

(1) 说明电压、电位、电动势三者之间有何异同。

(2) 图 1.9 所示电路中,已知 $V_a = -5 \text{ V}$, $V_b = 3 \text{ V}$,求 U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{ab} 。若改 b 点为参考点,求 V_a 、 V_b 、 V_c ,并再求 U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{ab} 。以上计算结果可说明什么道理?



图 1.9 思考题(2)电路图

(3) 电路中某元件上的电压和电流在关联参考方向下分别为 $u = 5\sqrt{2}\sin(100t + 30^\circ) \text{ V}$, $i = 2\sqrt{2}\sin(100t - 60^\circ) \text{ A}$,求 $t = 0$ 时该元件的功率,并分析该元件此时是在吸收还是发出功率。