



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材

电路分析基础

(第三版)

Fundamentals of Circuit Analysis

Third Edition

© 张永瑞 陈生潭 高建宁 陈 瑞 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材

电路分析基础

(第三版)

张永瑞 陈生潭 高建宁 陈瑞 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。全书共9章,主要包括:电路的基本概念与定律、电阻电路的一般分析方法、常用的电路定理、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、耦合电感与理想变压器、电路频率响应、双口网络、MATLAB用于电路分析。基本概念讲述准确透彻,常用的基本分析方法讲述步骤明确,举例类型多,结合工程实际,便于读者仿效掌握;电路定理阐述简练,应用范围、条件明确,使用中应注意的问题归纳详尽;经典内容取舍合理,新器件、新方法介绍适度;每节后配有辅助概念理解、引申问题的思考题,每章后配有小结及深浅度适中、题型搭配合理的习题,书末附有部分习题的参考答案,这些配置对教师施教、学生自学都是非常有益的。

本书可作为高等学校电子信息与电气类本科生的基础教材;对从事电子类专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

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 / 张永瑞等编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2014.2
电子信息科学与工程类专业精品教材
ISBN 978-7-121-20592-7

I. ①电… II. ①张… 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(2013)第 118145 号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京季蜂印刷有限公司印装

装 订:北京季蜂印刷有限公司印装

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20 字数:596 千字

印 次:2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第三版前言

本书第二版自 2009 年出版发行以来,已历经了 4 届本科生教学试用,使用该教材的老师和学生普遍反映:该书内容取材合理、篇幅适中,讲述概念浅显易懂,教授方法思路清晰、步骤明确,便于掌握;书中举例联系生活贴切,结合工程实际实用;讲授的新器件、新方法适度,既满足了当前教学的需要,又为后续课程的学习及课题研究打下了坚实的基础。

也有老师与同学提出了该书需要完善及改进的中肯意见:希望主要章节后给出当章内容的要点小结,便于读者章后复习,提高学习效率;书中在讲授戴维南定理表述时加了个脚注(见第二版书 P86 脚注)不好理解,请作者改版时能补充一个例子做进一步解释。

我们衷心感谢使用《电路分析基础》第二版教材的诸多老师和同学们对该书的肯定,以及所提中肯的修编意见。鉴于读者需求,也考虑我国当前高等教育通材教育的需要,对《电路分析基础》第三版我们拟形成如下修编思路:

- (1) 基本保留原《电路分析基础》第二版书的选材内容、结构体系与讲授风格;
- (2) 第 1 至第 8 章章后均增加小结,归纳当章内容要点;
- (3) 在 3.3 节中补充了带有受控源的例题,作为第二版相关内容脚注的进一步释惑;
- (4) 订正了第二版书中少量的差错。

全书主要包括:电路的基本概念与定律、电阻电路一般分析方法、常用的电路定理、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、耦合电感与理想变压器、电路频率响应、双口网络、MATLAB 工具用于电路计算共 9 章内容。使用本教材的参考学时数为 60~70 学时。

本书第 1 至第 8 章的各章小结由西安电子科技大学张永瑞同志修编,第 1、2、3 章由西安邮电大学陈瑞同志修编,第 4、5、6 章由西安电子科技大学陈生潭同志修编,第 7、8、9 章由西安电子科技大学高建宁同志修编。全书由张永瑞主编,负责统稿。

本书配有教学用多媒体电子课件,请登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 注册下载。

书稿策划与编辑中,得到了电子工业出版社陈晓莉编审的帮助,在此表示诚挚的感谢;感谢多年来使用本书作教材的老师和同学们,是他们给予了我们大力的支持;还要感谢本书参考书目中的诸位作者,他们书中好的编写理念、思想,对我们这次的修编工作很有启发。

由于编者学识水平有限,修编时间紧迫,所以书中定会存在许多缺陷或错误,敬请读者不吝赐教。

编著者
2013 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念与定律	(1)
1.1 电路模型	(1)
1.1.1 实际电路组成与功能	(1)
1.1.2 电路模型	(1)
思考题	(3)
1.2 电路变量	(3)
1.2.1 电流	(3)
1.2.2 电压	(4)
1.2.3 电功率	(6)
思考题	(8)
1.3 电阻元件与欧姆定律	(8)
1.3.1 电阻元件	(8)
1.3.2 欧姆定律	(9)
1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量	(10)
思考题	(11)
1.4 理想电源	(11)
1.4.1 理想电压源	(11)
1.4.2 理想电流源	(13)
思考题	(15)
1.5 基尔霍夫定律	(15)
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(16)
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(17)
思考题	(20)
1.6 电路等效	(20)
1.6.1 电路等效的一般概念	(20)
1.6.2 电阻的串联与并联等效	(21)
1.6.3 理想电源的串联与并联等效	(26)
思考题	(27)
1.7 实际电源的模型及其互换等效	(27)
1.7.1 实际电源的模型	(27)
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	(28)
思考题	(30)
* 1.8 电阻 Δ 形、Y形电路互换等效	(30)
1.8.1 Δ 形电路等效变换为Y形电路	(30)
1.8.2 Y形电路等效变换为 Δ 形电路	(32)
思考题	(33)

1.9 受控源及含受控源电路的等效	(34)
1.9.1 受控源	(34)
1.9.2 含受控源电路的等效	(35)
思考题	(37)
1.10 运算放大器概述	(37)
1.10.1 理想运放的图形符号及电路模型	(37)
1.10.2 理想运放三种输入方式与虚短路、虚开路概念	(38)
1.10.3 运放的两种典型运算	(39)
思考题	(40)
本章小结	(40)
习题一	(43)
第2章 电阻电路的一般分析方法	(47)
2.1 拓扑图与电路方程	(47)
2.1.1 网络(电路)的拓扑图	(47)
2.1.2 回路、割集、树	(48)
2.1.3 KCL 和 KVL 的独立方程	(50)
思考题	(52)
2.2 $2b$ 法和 b 法	(52)
2.2.1 $2b$ 法	(52)
2.2.2 b 法	(53)
思考题	(56)
2.3 回路法与网孔法	(56)
2.3.1 回路法	(56)
2.3.2 网孔法	(57)
思考题	(62)
2.4 割集法与节点法	(63)
2.4.1 割集法	(63)
2.4.2 节点法	(64)
思考题	(70)
本章小结	(70)
习题二	(72)
第3章 常用的电路定理	(75)
3.1 叠加定理和齐次定理	(75)
3.1.1 叠加定理	(75)
3.1.2 齐次定理	(78)
思考题	(79)
3.2 置换定理	(80)
思考题	(84)
3.3 戴维南定理与诺顿定理	(84)
3.3.1 戴维南定理	(84)
3.3.2 诺顿定理	(86)
思考题	(91)

3.4 最大功率传输定理	(91)
思考题	(95)
* 3.5 互易定理	(96)
思考题	(100)
本章小结	(101)
习题三	(102)
第 4 章 动态电路时域分析	(105)
4.1 动态电路元件	(105)
4.1.1 电感元件	(105)
4.1.2 电容元件	(108)
4.1.3 电感、电容的串联和并联	(110)
思考题	(111)
4.2 动态电路的方程	(112)
4.2.1 电路微分方程	(112)
4.2.2 电路量初始值的计算	(113)
思考题	(115)
4.3 一阶电路的零输入响应	(115)
4.3.1 一阶 RC 电路的零输入响应	(115)
4.3.2 一阶 RL 电路的零输入响应	(116)
思考题	(118)
4.4 一阶电路的零状态响应	(118)
4.4.1 一阶 RC 电路的零状态响应	(118)
4.4.2 一阶 RL 电路的零状态响应	(121)
思考题	(122)
4.5 一阶电路的全响应	(122)
4.5.1 全响应及其分解	(122)
4.5.2 三要素法	(124)
思考题	(129)
4.6 一阶电路的阶跃响应	(129)
4.6.1 阶跃函数	(129)
4.6.2 阶跃响应	(130)
思考题	(132)
* 4.7 二阶电路分析	(132)
4.7.1 零输入响应	(133)
4.7.2 单位阶跃响应	(136)
思考题	(136)
4.8 正弦激励下一阶电路的响应	(137)
思考题	(138)
本章小结	(139)
习题四	(141)
第 5 章 正弦稳态电路分析	(144)
5.1 正弦电流与电压	(144)

5.1.1	正弦量的三要素	(144)
5.1.2	相位差	(146)
5.1.3	有效值	(147)
	思考题	(148)
5.2	正弦量的相量表示	(148)
5.2.1	复数及其运算	(149)
5.2.2	正弦量的相量表示	(149)
	思考题	(153)
5.3	电路定律的相量形式	(153)
5.3.1	基本元件 VCR 的相量形式	(153)
5.3.2	KCL、KVL 的相量形式	(156)
	思考题	(159)
5.4	相量模型	(160)
5.4.1	阻抗与导纳	(160)
5.4.2	正弦电源相量模型	(161)
5.4.3	正弦稳态电路相量模型	(162)
5.4.4	阻抗和导纳的串、并联	(162)
	思考题	(165)
5.5	相量法分析	(165)
5.5.1	方程法分析	(166)
5.5.2	等效法分析	(169)
	思考题	(173)
5.6	正弦稳态电路的功率	(173)
5.6.1	单口电路的功率	(174)
5.6.2	最大功率传输条件	(177)
	思考题	(180)
* 5.7	三相电路	(180)
5.7.1	三相电源	(180)
5.7.2	三相电路的计算	(182)
	思考题	(186)
	本章小结	(187)
	习题五	(189)
第 6 章	耦合电感与理想变压器	(193)
6.1	耦合电感元件	(193)
6.1.1	耦合线圈	(193)
6.1.2	耦合电感的电压、电流关系	(194)
	思考题	(198)
6.2	耦合电感的去耦等效	(198)
6.2.1	耦合电感的 CCVS 去耦等效	(198)
6.2.2	耦合电感的 T 形去耦等效	(199)
	思考题	(202)
6.3	含耦合电感电路的相量法分析	(202)

6.3.1	方程法分析	(202)
6.3.2	等效法分析	(203)
	思考题	(207)
6.4	理想变压器	(207)
6.4.1	理想变压器的条件	(208)
6.4.2	理想变压器的基本特性	(208)
	思考题	(213)
6.5	实际变压器	(213)
6.5.1	全耦合变压器	(213)
6.5.2	空心变压器	(215)
6.5.3	铁心变压器	(216)
	思考题	(217)
	本章小结	(217)
	习题六	(218)
第 7 章	电路频率响应	(221)
7.1	网络函数与频率响应	(221)
7.1.1	网络函数	(221)
7.1.2	网络频响特性	(222)
	思考题	(223)
7.2	常用 RC 一阶电路的频率特性	(223)
7.2.1	RC 一阶低通电路的频率特性	(224)
7.2.2	RC 一阶高通电路的频率特性	(227)
	思考题	(228)
7.3	常用 rLC 串联谐振电路的频率特性	(229)
7.3.1	串联谐振	(230)
7.3.2	频率特性	(234)
7.3.3	通频带	(236)
	思考题	(238)
7.4	实用 rLC 并联谐振电路的频率特性	(238)
7.4.1	并联谐振	(239)
7.4.2	频率特性	(241)
7.4.3	通频带	(243)
	思考题	(246)
	本章小结	(246)
	习题七	(248)
第 8 章	双口网络	(251)
8.1	n 端网络与 n 口网络	(251)
	思考题	(251)
8.2	双口网络的方程与参数	(252)
8.2.1	Z 方程与 z 参数	(252)
8.2.2	Y 方程与 y 参数	(253)
8.2.3	A 方程与 a 参数	(255)

8.2.4 H 方程与 h 参数	(256)
思考题	(258)
8.3 双口网络的连接	(259)
8.3.1 串联	(259)
8.3.2 并联	(260)
8.3.3 级联	(260)
8.3.4 双口网络连接有效性检验	(261)
思考题	(263)
8.4 双口网络的等效	(264)
8.4.1 双口网络的 z 参数等效电路	(264)
8.4.2 双口网络的 y 参数等效电路	(265)
思考题	(266)
8.5 双口网络的网络函数与特性阻抗	(266)
8.5.1 策动网络函数	(267)
8.5.2 传输网络函数	(269)
8.5.3 特性阻抗	(271)
思考题	(273)
本章小结	(273)
习题八	(274)
第 9 章 MATLAB 用于电路分析	(278)
9.1 MATLAB 基础	(278)
9.1.1 概述	(278)
9.1.2 MATLAB 语言的特点	(278)
9.1.3 MATLAB 工作环境简介	(279)
9.1.4 学习 MATLAB 的基本方法	(281)
9.2 电阻电路计算	(282)
9.2.1 一般分析方法计算	(282)
9.2.2 常用电路定理计算	(284)
9.3 一阶动态电路时域计算	(286)
9.4 正弦稳态电路计算	(290)
9.4.1 相量图计算	(290)
9.4.2 应用戴维南定理计算	(291)
9.4.3 功率计算	(292)
9.4.4 计算参数	(293)
9.5 电路频率响应的计算	(294)
9.6 二端口电路计算	(298)
习题九	(301)
部分习题参考答案	(303)
参考文献	(310)

第 1 章 电路的基本概念与定律

学习“电路分析基础”课程主要是掌握电路的基本规律和基本分析方法。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发,重点讨论理想电源、欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效等重要概念。本章未对受控源及运算放大器新器件作适度介绍。

1.1 电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究问题中普遍使用的重要概念。例如,没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型;不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学研究中的一种模型。人们在分析、设计某一实际系统时,几乎都采用模型化的方法,即先建立能反映该系统基本特性的模型,使问题得到合理简化,然后对该模型进行定量分析,以求得该系统的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此,首先要建立电路模型,然后进行定量分析。

1.1.1 实际电路组成与功能

在现代工农业生产、国防建设、科学研究,以及日常生活中,使用着各种各样的电气设备,如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等,广义上说,这些电气设备都是实际中的电路。

图 1.1-1 是最简单的一种实际照明电路。它由三部分组成:一是提供电能的能源,简称为电源,它的作用是将其他形式的能量转换为电能(图中干电池电源是将化学能转换为电能);二是用电装置,统称为负载,它将电源供给的电能转换为其他形式的能量(图中灯泡将电能转换成光 and 热能);三是连接电源与负载传输电能的金属导线,简称为导线。图中 S 是为了节约电能所加的控制开关,需要照明时将开关 S 闭合,不需要照明时将 S 打开。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的三个组成部分。

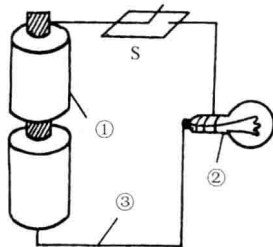


图 1.1-1 手电筒电路

实际电路种类繁多,但就其功能来说可概括为两个方面。其一,是进行能量的产生、传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(或热能、或水的势能、或原子能、或太阳能等)转换成电能,通过变压器、输电线输送给各用户负载,那里又把电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉、电烙铁等),为人们生产、生活所利用。其二,是实现信号的产生、传递、变换、处理与控制。这方面典型的例子有收音机、电视机、手机电路。如图 1.1-2 所示,接收天线将载有语言、音乐、图像信号的电磁波接收后,通过接收机电路把输入信号(又称激励)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

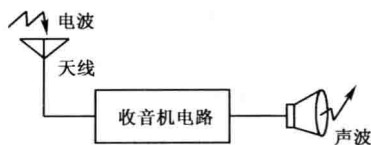


图 1.1-2 接收机电路

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气、电子元器件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁方面却有许多共同

的地方。比如,电阻器、灯泡、电炉等,它们主要是消耗电能,这样可用一个具有两个端子的理想电阻来反映消耗电能的特征,其模型符号如图 1.1-3(a)所示。类似地各种实际电容器主要是储存电能,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征,理想电容元件的模型符号如图 1.1-3(b)所示。各种实际电感器主要是储存磁能,用一个理想的二端电感元件来反映储存磁能的特征,其模型符号如图 1.1-3(c)所示。

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型,任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件,就能用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型或其组合来表示,构成实际部件的电路模型。比如,灯泡、电炉、电阻器,它们的主要电磁性能都是消耗电能,在低频应用时,它们中储藏的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小,可以忽略不计,这些实际部件的电路模型都可用图 1.1-3(a)中的理想电阻 R 来表示。这样,就抽掉了这些实际部件的外形、尺寸的差异性,而抓住了它们所表现出来共性的东西即消耗电能。再如一个实际的电感器,它是在一个骨架上用良好金属导线绕制而成的,如图 1.1-4(a)所示。如果应用在低频电路里,它所表现出的电磁性能主要是储藏磁能,它所消耗的电能与储藏的电能都很小,与储藏的磁能相比可以忽略不计,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视为图 1.1-4(b)所示的理想电感。如果应用在高频电路中,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它储藏的电能仍可忽略,那么,这种情况的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的理想电阻 r 与体现磁能储藏的理想电感 L 相串联,如图 1.1-4(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储藏的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1-4(d)来表示。

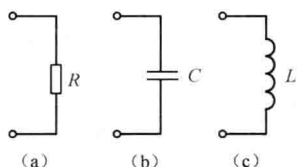


图 1.1-3 理想电阻、电容、电感元件模型

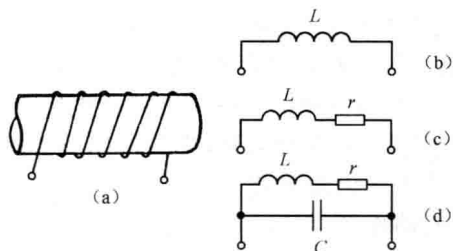


图 1.1-4 实际电感元件在不同应用条件下的模型

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里不一一列举。关于电路部件的模型概念这里再强调说明几点:① 理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件;理想电阻元件只消耗电能(既不储藏电能,也不储藏磁能);理想电容元件只储藏电能(既不消耗电能,也不储藏磁能);理想电感元件只储藏磁能(既不消耗电能,也不储藏电能)。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义,实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际,是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”,但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样,人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。② 不同的实际电路部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下可用同一个模型表示,如上所述的灯泡、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用理想电阻 R 表示。③ 同一个实际电路部件在不同的应用条件下,它的模型也可以有不同的形式,如图 1.1-4 所示为实际电感器在各种应用条件下的模型。

将实际电路中各个部件用其模型符号表示,这样画出的图称为实际电路的电路模型图,亦称作电原理图。如图 1.1-5 就是图 1.1-1 实际电路的电路模型。

还应指出,实际电路中使用的电路部件一般都和电能的消耗现象及电、磁能的储存现象有关,它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所述的“理想化”是指:假定这些现象可以分别研究,并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行,这样的元件称为集总参数元件,简称为集

总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。众所周知,电荷激发电场,电流激发磁场,一切电、磁现象的本质都应是电场、磁场的问题。集总参数电路问题是满足一定条件下的电、磁场问题的简化问题。即是说,用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的,它要求实际电路的尺寸 l (长度) 要远小于电路工作时的电磁波的波长 λ , 即

$$l \ll \lambda \quad (1.1-1)$$

集总参数电路的突出特点: 电流在集总参数电路中流动不需要时间;没有任何电、磁能量辐射,电磁能量的消耗、储存都集中在元件内部进行。

若不能满足式(1.1-1)条件,实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路。

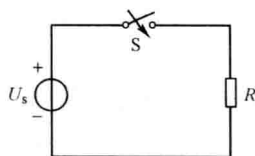


图 1.1-5 图 1.1-1
实际电路的模型图

思考题

1.1-1 20km 的电力供电线路,工程上可认为是集总参数电路吗?为什么?若改为 6000km 的供电线路呢?

1.1-2 房间内墙壁上共用天线插孔到电视机天线插孔的距离大约是 3~4m,需用电缆线将之连接,这 3~4m 电缆线,工程上可认为是集总参数电路吗?请说明理由。(假设电视机接收信号频率为 500MHz)

1.2 电路变量

在电路问题分析中,人们主要关注的物理量是电流、电压和功率,有时也涉及能量、电荷、磁通(或磁链)变量。在具体展开分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解一些重要物理量的有关基本概念是非常必要的。

1.2.1 电流

电荷有规则的定向运动,形成传导电流。我们知道,一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子,通常情况下,这些自由电子在其内部作无规则的热运动,并不形成电流;若在该段金属导体两端连接上电源,那么带负电荷的自由电子就要逆着电场方向运动,于是在该段金属导体中便形成有电流。在其他场合,如电解溶液中的带离子作规则定向运动也会形成传导电流。

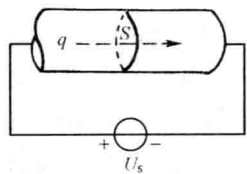


图 1.2-1 电流
定义说明图

电流,虽然人们看不见它,但可通过电流的各种效应(如磁效应、热效应)来感知它的客观存在,也就是说,电流是客观存在的物理现象。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流,如图 1.2-1 所示。电流用 $i(t)$ ^① 表示,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中 $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量,若 $dq(t)/dt$ 为常数,即是直流电流,常用大写字母 I 表示。电流的单位是安培(A),简称“安”。电力系统中因为安培单位较小,有时用千安(kA)为电流的单位。而无线电接收系统中又因为安培这个单位太大,常用毫安(mA)、微安(μA)作电流单位。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

① 时间函数 $i(t)$,也常简化书写为 i 。

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ } \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

在电路问题分析中,“电流”一词不仅表示一种物理现象,而且也代表一个物理量。

电流不但有大小,而且有方向性。规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一些很简单的电路中,如图 1.1-5 所示,电流的实际方向是显而易见的,它是从电源正极流出,流向电源负极的。但在一些稍复杂的电路里,如图 1.2-2 所示桥形电路中, R_5 上的电流实际方向就不是一看便知的。不过, R_5 上电流的实际方向只有三种可能:①从 a 流向 b;②从 b 流向 a;③既不从 a 流向 b,也不从 b 流向 a(R_5 上电流为零),别无其他。所以说,对电流这个物理现象可以用代数数量来描述它。简言之,电流是代数数量,当然可以像研究其他代数数量问题一样选择正方向,即本书中所述的参考方向。假定正电荷运动的方向为电流的参考方向,用箭头标在电路图上。今后若无特殊说明,就认为电路图上所标箭头是电流的参考方向。对电路中电流设参考方向还有另一方面的原因,那就是,在交流电路中电流的实际方向分时间段在交替改变,因此很难在这样的电路中标清楚电流的实际方向,而引入电流的参考方向也就解决了这一难题。在对电路中电流设出参考方向以后,若经计算得出电流为正值,说明所设参考方向与实际方向一致;若经计算得出电流为负值,说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负,在设定参考方向的前提下才有意义。

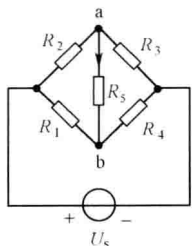


图 1.2-2 桥形电路

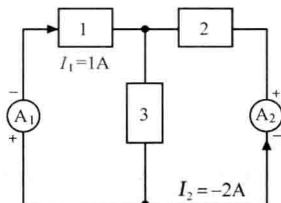


图 1.2-3 直流电流测试电路

在直流电路中,测量电流时要根据电流的实际方向将电流表串联接到待测的支路里,使电流的实际方向从直流电流表的正极流入,即如图 1.2-3 所示那样接入电路。 $\textcircled{A}_1$ 、 $\textcircled{A}_2$ 两旁所标“+”、“-”号是直流电流表的正、负极。

1.2.2 电压

物理学中我们已经知道,将单位正电荷自某一点 a 沿任意路径移动到参考点(物理学中习惯选无穷远处作参考点)电场力做功的大小称为 a 点的电位,记为 V_a 。在电路中,电位的物理意义同物理静电场中所讲电位概念是一样的,只不过电路中计算某点电位是将单位正电荷沿任一电路所约束的路径移至参考点(习惯选电路中某点而不选无穷远处)电场力所做功的大小。

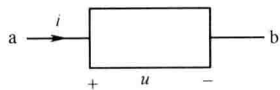


图 1.2-4 定义电压示意图

两点之间的电位之差即是两点间的电压。从电场力做功概念定义,电压就是将单位正电荷从电路中一点移至另一点电场力所做功的大小,如图 1.2-4 所示。用数学式表述为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.2-2)$$

式中, dq 为由 a 点移至 b 点的电荷量,单位为库仑; dw 是为移动电荷 dq 电场力所做的功,单位为焦耳(J)。电位、电压的单位都是伏特(V),1V 电压相当于移动 1C 正电荷电场力所做的功为 1J。在电力系统中因为伏特单位较小,有时用千伏(kV)单位。在无线电电路中因为伏特单位太

大,常用毫伏(mV)、微伏(μV)作电压单位。

从电位、电压定义可知它们都是代数量,因而也有参考方向问题。电路中,规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。但在复杂的电路里,如图 1.2-2 中 R_5 两端电压的实际方向是不易判别的,或在交流电路里两点间电压的实际方向是分时间段交替改变的,这给实际电路问题的分析计算带来不便,所以也需要对电路中两点间电压设出参考方向。所谓电压参考方向,就是假设电位降低的方向,在电路图中用“+”、“-”号标出,或用带下脚标的字母表示。如电压 U_{ab} ,其脚标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端,第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。以后如无特殊说明,电路图中“+”、“-”标号就认为是电压的参考方向。在设定电路中电压参考方向以后,若经计算的电压 U_{ab} 为正值,说明 a 点电位实际比 b 点电位高;若 U_{ab} 为负值,说明 a 点电位实际比 b 点电位低。与电流类似,两点间电压数值的正与负,在设定参考方向的条件下才是有意义的。

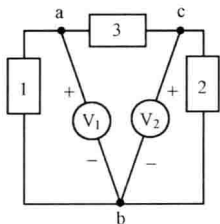


图 1.2-5 直流电压测量电路

大小、方向均恒定不变的电压称为直流电压,常用大写 U 表示。测量直流电压,应根据电压的实际方向将直流电压表并联接入电路,使直流电压表的正极接所测电压的实际高电位端,负极接所测电压的实际低电位端。比如,理论计算得 $U_{ab}=5\text{V}$, $U_{bc}=-3\text{V}$,若要测量这两个电压,电压表应如图 1.2-5 所示那样接入电路。图中 $\textcircled{V}_1$ 、 $\textcircled{V}_2$ 为电压表,两旁所标的“+”、“-”号分别为直流电压表的正、负极性端。

例 1.2-1 如图 1.2-6(a)所示电路,若已知 2s 内有 4C 正电荷均匀地由 a 点经 b 点移动至 c 点,且知由 a 点移动至 b 点电场力做功 8J,由 b 点移动到 c 点电场力做功为 12J。

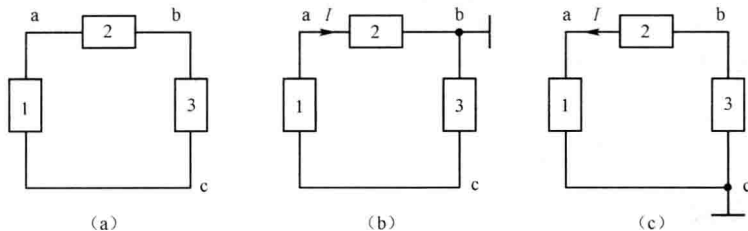


图 1.2-6 例 1.2-1 电路

(1) 标出电路中电流参考方向并求出其值,若以 b 点作参考点(又称接地点),求电位 V_a 、 V_b 、 V_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

(2) 标出电流参考方向与(1)时相反并求出其值,若以 c 点作参考点,再求电位 V_a 、 V_b 、 V_c ,电压 U_{ab} 、 U_{bc} 。

解: (1) 设电流参考方向如图(b)所示,并在 b 点画上接地符号。依题意并由电流定义得

$$I = \frac{q}{t} = \frac{4}{2} = 2 \text{ (A)}$$

由电位定义,得

$$V_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2 \text{ (V)}$$

$$V_b = 0 \text{ (b 点为参考点)}$$

$$V_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3 \text{ (V)}$$

本例题中已知 4C 正电荷由 b 点移动至 c 点电场力做功为 12J,本问是以 b 为参考点求 c 点电位,就是说,若将 4C 正电荷由 c 点移动至 b 点,电场力做功应为 -12J,〔实际上为克服电场力做功

12J,或者说外力(非电场力)做功 12J],所以计算 c 点电位时算式中要用-12。利用电压等于电位差关系,求得

$$U_{ab}=V_a-V_b=2-0=2 \text{ (V)}$$

$$U_{bc}=V_b-V_c=0-(-3)=3 \text{ (V)}$$

(2) 按题目中第(2)问要求,设电流参考方向如图(c)中所标,并在 c 点画上接地符号。由电流定义,得

$$I=-\frac{q}{t}=-\frac{4}{2}=-2 \text{ (A)}$$

电位

$$V_a=\frac{W_{ac}}{q}=\frac{8+12}{4}=5 \text{ (V)}$$

$$V_b=\frac{W_{bc}}{q}=\frac{12}{4}=3 \text{ (V)}$$

$$V_c=0 \text{ (c 为参考点)}$$

所以电压

$$U_{ab}=V_a-V_b=5-3=2 \text{ (V)}$$

$$U_{bc}=V_b-V_c=3-0=3 \text{ (V)}$$

通过这个例子,可以归纳总结出有关电流、电位、电压概念带有共性的几点重要结论:(1)电路中电流数值的正与负与参考方向密切相关,参考方向设得不同,计算结果仅差一个负号。(2)电路中各点电位数值随所选参考点的不同而改变,但参考点一经选定,那么各点电位数值就是唯一的,这就是电位的相对性与单值存在性。(3)电路中任意两点之间的电压数值不因所选参考点的不同而改变。今后在分析电路问题时,如只求电压,并不需要知道参考点选在何处,往往电路图上不标出参考点(这种情况下两点间电压的计算方法见 1.5 节);而求电位,则必须要有参考点,没有参考点,谈论电位数值大小是没有意义的。

1.2.3 电功率

单位时间做功大小称为功率,或者说做功的速率称为功率。在电路中所述的电功率即是电场力做功的速率,以符号 $p(t)$ 表示。功率的数学定义式可写为

$$p(t)=\frac{dw(t)}{dt} \quad (1.2-3)$$

式中, dw 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦(W)。1 瓦功率就是每秒做功 1 焦耳,即 $1\text{W}=1\text{J/s}$ 。

在电路中,人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系。以图 1.2-4 所示电路为例加以讨论。图中矩形框代表任意一段电路,其内可以是电阻,可以是电源,也可以是若干电路元件组合。电流的参考方向设成从 a 流向 b,电压的参考方向设成 a 为高电位端,b 为低电位端,这样所设的电流、电压参考方向称为参考方向关联(或称参考方向一致)。设 dt 时间内在电场力作用下由 a 点移动到 b 点的正电荷量为 dq ,a 点至 b 点电压 u 意味着单位正电荷从 a 点移动到 b 点电场力所做的功,那么移动 dq 正电荷电场力所做的功为 $dw=udq$ 。电场力做功说明电能损耗,损耗的这部分电能被 ab 这段电路所吸收。下面具体推导出 ab 这段电路吸收的电功率与其上电压、电流之间的关系。

由

$$u=\frac{dw}{dq}$$

得

$$dw=udq$$

再由

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

得

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

根据功率定义式(1.2-3),得

$$p(t) = ui \quad (1.2-4)$$

必须强调的是,在电压电流参考方向关联的条件下,一段电路所吸收的电功率为该段电路两端电压、电流的乘积。代入 u, i 数值,经计算,若 p 为正值,该段电路实际就是吸收功率;若 p 为负值,该段电路吸收负功率,即该段电路实际向外供出正功率,或者说产生功率。例如算得 ab 这段电路吸收功率为一 3W ,那么说成 ab 这段电路供出 3W 的功率也是正确的。如果遇到电路中电压电流参考方向非关联情况,如图 1.2-7 所示,在计算吸收功率的公式中应冠以负号,即

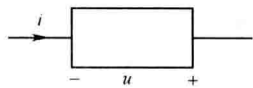


图 1.2-7 电压电流参考方向非关联情况

$$p(t) = -ui \quad (1.2-5)$$

有时,需要计算一段电路供出的功率(产生功率),无论 u, i 参考方向关联与否,所用公式与计算吸收功率时的公式均应差一个负号。即 u, i 参考方向关联,计算供出功率用 $-ui$ 计算; u, i 参考方向非关联,计算供出功率用 ui 计算。这是因为“吸收”与“供出”两者就是相反的含义,所以计算吸收功率与供出功率的公式相差一个负号是理所当然的事。

若已知元件吸收功率为 $p(t)$,并设 $w(-\infty) = 0$,则从 $t = -\infty$ 开始至时刻 t 该元件吸收的电能为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi \quad (1.2-6)$$

一个元件,若对于任意时刻 t 均有

$$w(t) \geq 0 \quad (1.2-7)$$

则称该元件为无源元件,否则称为有源元件。在电路工程中,能量单位除用焦耳之外,还常用千瓦小时($\text{kW} \cdot \text{h}$)。吸收功率为 1000W 的家用电器,加电使用 1h ,它吸收的电能(即消耗的电能)为 $1\text{kW} \cdot \text{h}$,俗称 1 度电。

例 1.2-2 如图 1.2-8 所示电路,已知 $i = 1\text{A}$, $u_1 = 3\text{V}$, $u_2 = 7\text{V}$, $u_3 = 10\text{V}$,求 ab 、 bc 、 ca 三部分电路上各吸收的功率 p_1 、 p_2 、 p_3 。

解: ab 、 bc 段上电压、电流参考方向关联,所以选用式(1.2-4)计算吸收功率,有

$$p_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3 \text{ (W)}$$

$$p_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7 \text{ (W)}$$

对 ca 段电路,电压、电流参考方向非关联,所以选用式(1.2-5)计算它吸收的功率,有

$$p_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10 \text{ (W)}$$

实际上 ca 这段电路产生功率为 10W 。

由此例可以看出

$$p_1 + p_2 + p_3 = 0$$

对一完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,这称为功率平衡。这一点由能量守恒原理是容易理解的。

以上阐述了电路分析中常用的电流、电压、功率和能量的基本概念。由于这些量可以取不同的时间函数,所以又称它们为变量。这里必须指出:对电路中电流、电压设参考方向是非常必要

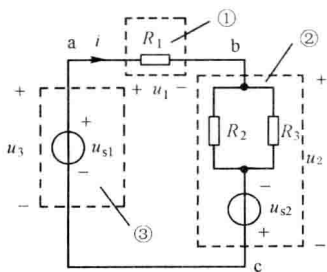


图 1.2-8 例 1.2-2 电路