



高等学校信息工程类专业规划教材

电路理论基础

(第二版)

卢元元 王 晖 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程专业规划教材

电路理论基础

(第二版)

卢元元 王 晖 主编

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书依据教育部教学指导委员会颁布的《高等学校电路分析教学基本要求》而编写,系统地讲述了电路理论中的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共 15 章,主要内容包括:电路的基本概念、基本定律和基本元件,电路的等效变换,线性网络的一般分析法,电路定理;动态电路导论,一阶电路分析,二阶电路分析;正弦稳态电路的相量分析法,三相电路;电路的频率响应和谐振现象,非正弦周期电流电路;耦合电感和理想变压器,二端口网络;非线性电阻电路,网络方程的矩阵形式。本书各章均配有丰富的典型例题和习题,书末附有大部分习题的参考答案。为提高读者应用计算机分析电路的能力,本书特增加了利用 MATLAB 软件计算电路的内容。

本书适用面宽,可作为高等学校电气信息类有关专业的本科教材,也可供有关科技人员参考。

★ 与本书配套的学习指导书已经出版。本书配有电子教案,有需要的老师可在出版社网站下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/卢元元,王晖主编. —2 版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2011.1

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2483 - 9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 190338 号

策 划 马晓娟

责任编辑 马晓娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011 年 1 月第 2 版 2011 年 1 月第 5 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20

字 数 472 千字

印 数 16 001~19 000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2483 - 9/TM · 0067

XDUP 2775002—5

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电大学、西安邮电学院、重庆邮电大学、吉林大学、杭州电子科技大学、桂林电子科技大学、北京信息科技大学、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大专业的教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研究能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

高等学校计算机、信息工程类专业

规划教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电大学校长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子科技大学计算机学院教授）

孙力娟（南京邮电大学计算机学院副院长、教授）

李秉智（重庆邮电大学计算机学院教授）

孟庆昌（北京信息科技大学教授）

周娅（桂林电子科技大学计算机学院副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、教授）

胡建萍（杭州电子科技大学信息工程学院院长、教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子科技大学通信与信息工程学院副教授）

章坚武（杭州电子科技大学通信学院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电大学自动化学院院长、教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

第二版前言

本书第一版于2004年出版,在几年的教学实践中,我们感到书中仍有一些不足之处,也收到了一些教师和学生的反馈意见和建议。为进一步提高教材质量,我们于2009年秋开始,用半年多的时间对本书进行了修订。

本次修订基本保持第一版的结构和特色,在此基础上,主要从以下方面进行了完善:

(1) 在内容的编排上作了一些局部调整,以便课程的讲授能前后呼应,条理性更强。第5章中增加了“动态电路导论”,将动态电路的基本概念、电感和电容的换路定律、初始条件的求解等内容集中讲解,为后续一阶电路和二阶电路的讲授作好铺垫。第6章中增加了“分段常量信号作用下一阶电路的响应”,这是第6章稍前讲授的线性动态电路的叠加性、时不变性及阶跃响应等基本理论的实际应用。其他章节部分内容的前后顺序也作了一些调整,这里不一一介绍。

(2) 针对各章的内容,增加了一些典型例题,目的是使读者更深入地理解某些基本概念,更灵活地掌握电路的分析方法和解题技巧。

(3) 对语言文字进行了推敲修改,力求叙述更严谨和简洁。

(4) 对原版中的错误进行了订正,验算和订正了各章的习题答案。

考虑到电气信息类各专业不同学时数的要求,本教材采取分层次的方法编写。书中不带“*”号的部分为基础内容,适合计算机等专业使用,授课时数约为60学时;书中带“*”号的部分为选讲或自学内容,电子工程、通信、自动化等专业的教师可选讲其中部分或全部内容,根据所选讲内容的不同,授课时数可在80~100学时变动。

第1、2、3、4、8、9、10、11、12、14章的修订由卢元元负责,其中第11、12章的修订初稿由胡庆彬提供;第5、6、7、13、15章的修订由王晖负责,李晓滨参与了其中第5章和第6章的修订工作,并撰写了新增加的5.3和6.7两小节。

本书在修订过程中参考了国内外电路理论方面的书籍和文献,在此一并向相关作者们表示衷心的感谢。

限于编者的水平,修订版中仍难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2010年5月

第一版前言

“电路理论基础”是高等工科院校电子信息类各专业本科生的重要专业基础课,着重讲授非时变集总参数电路的基本概念、基本理论和基本分析方法,培养学生分析、计算电路的能力,并奠定学生对电路理论进行深入研究的基础。

本教材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实践,为适应我国信息类专业教学改革的新形势编写而成。全书共分15章,适合教学时数为60~100学时的专业选用。

本教材在内容选材上立足于“加强基础,精选内容”的原则,编写过程中注意与“高等数学”、“大学物理”等先修课程及“信号与系统”、“模拟电路”等后续课程的衔接和配合;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;在内容编排上着眼于方便教师授课和利于学生阅读及自学,将一些较深入的理论证明作为选学内容给出。本书还结合各章知识点,精心选编了一定数量的例题和习题,并附有参考答案,以便学生融会贯通,更好地掌握基本内容,提高分析和解决问题的能力。

考虑到电气信息类专业不同学时数的要求,本教材采取分层次的方法编写。书中不带“*”号的部分为基础内容,适合计算机等专业使用,授课时数约为60学时;书中带“*”号的部分为选讲或自学内容,电子工程、通信、自动化等专业的教师可选讲其中部分或全部内容,根据所选讲内容的不同,授课时数可在80~100学时变动。

本教材第1、2、3、4、8、9、10、14章由卢元元编写,第6、7、13章由王晖编写,第11、12章及第1、2、3、4、8、9、10章的习题由胡庆彬编写,第5章和第15章分别由高建波和骆剑平编写,高建波和骆剑平还绘制了第6、7、13章的电路图。全书由卢元元和王晖主编,其中卢元元负责修改和审定第1、2、3、4、8、9、10、11、12、14章,王晖负责修改和审定第5、6、7、13、15章。李亚明同学做了部分习题的录入工作。

本教材在编写过程中得到了深圳大学及深圳大学信息工程学院各级领导和同事的大力支持和帮助,并参考了大量的国内外电路理论方面的书籍和文献,在此一并向相关人员表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请广大同行和读者批评指正。

编 者

2003年10月

目 录

第 1 章 电路模型和基尔霍夫定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路变量	2
1.3 基尔霍夫定律	5
1.4 电阻电路的元件	8
1.5 简单电路分析	16
习题	19
第 2 章 电阻电路的等效变换	24
2.1 等效二端网络	24
2.2 电压源、电流源串并联电路的等效变换	26
2.3 实际电源的两种模型及其等效变换	29
2.4 电阻星形连接与三角形连接的等效变换	32
习题	35
第 3 章 线性电阻电路的一般分析法	39
3.1 KCL、KVL 方程的独立性	39
3.2 支路分析法	43
3.3 节点分析法	45
3.4 网孔分析法和回路分析法	51
习题	57
第 4 章 电路定理	61
4.1 叠加定理	61
4.2 替代定理	66
4.3 戴维南定理和诺顿定理	67
* 4.4 特勒根定理	75
* 4.5 互易定理	76
习题	79
第 5 章 动态元件及动态电路导论	83
5.1 电容元件	83
5.2 电感元件	91
5.3 动态电路导论	96
* 5.4 一阶线性常系数微分方程的求解	100
* 5.5 二阶线性常系数微分方程的求解	102
习题	105
第 6 章 一阶电路	106
6.1 线性与时不变性	106
6.2 一阶电路的零输入响应	108

6.3	恒定电源作用下一阶电路的零状态响应	112
6.4	恒定电源作用下一阶电路的全响应和线性动态电路的叠加定理	115
6.5	复杂一阶电路的分析方法	118
6.6	阶跃函数和阶跃响应	123
6.7	分段常量信号作用下一阶电路的响应	125
* 6.8	正弦信号激励下一阶电路的响应	128
	习题	129
第 7 章	二阶电路	132
7.1	RLC 串联电路的零输入响应	132
7.2	恒定电源作用下 RLC 串联电路的全响应	138
* 7.3	恒定电源作用下 GLC 并联电路的全响应	141
	习题	143
第 8 章	相量法基础	145
8.1	正弦电压和电流	145
8.2	正弦量的相量表示	148
8.3	基尔霍夫定律的相量形式	151
8.4	电路元件伏安特性的相量形式	153
	习题	157
第 9 章	正弦电流电路的分析	159
9.1	阻抗与导纳及相量模型	159
9.2	正弦电流电路的相量分析法	162
9.3	正弦电流电路的功率	172
* 9.4	三相电路	180
	习题	188
第 10 章	电路的频率响应	195
10.1	电路的频率响应与网络函数	195
10.2	RLC 串联谐振电路	197
* 10.3	并联谐振电路	204
10.4	非正弦周期电流电路的分析	208
	习题	213
第 11 章	耦合电感和理想变压器	217
11.1	耦合电感元件	217
11.2	含耦合电感的电路	220
11.3	理想变压器	228
* 11.4	变压器的电路模型	230
	习题	233
* 第 12 章	二端口网络	238
12.1	二端口网络的方程和参数	238
12.2	二端口网络的等效网络	244
12.3	二端口网络的互联	247
12.4	有载二端口网络	249
12.5	二端口网络的特性阻抗	250

习题	252
* 第 13 章 非线性电阻电路简介	256
13.1 非线性电阻元件	256
13.2 含一个非线性元件的电阻电路的分析	259
13.3 非线性电阻的串联和并联	260
13.4 分段线性化方法	261
13.5 小信号分析法	263
习题	265
* 第 14 章 网络方程的矩阵形式	267
14.1 基本回路和基本割集	267
14.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	269
14.3 节点分析法和节点方程的矩阵形式	274
14.4 回路分析法和回路方程的矩阵形式	277
14.5 割集分析法和割集方程的矩阵形式	279
习题	281
* 第 15 章 利用 MATLAB 计算电路	283
15.1 MATLAB 概述	283
15.2 MATLAB 程序设计基础	285
15.3 电路的传递函数及频率特性	288
15.4 非线性直流电路计算	289
15.5 非正弦电路计算	291
15.6 过渡过程的时域解	293
习题	298
部分习题参考答案	300
参考文献	310



第1章 电路模型和基尔霍夫定律

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类：一类是基尔霍夫定律，它给出各支路间电流、电压的约束关系；另一类是各理想元件本身的伏安特性。这些是电路理论的基本概念，是本章阐述的主要内容。

1.1 电路与电路模型

电路是由各种电气设备或器件联接而成的电流的通路。在人们的生产和生活实践活动中用到的电路是多种多样的，例如，有远距离输电线路，也有电视机中进行无线电信号接收和处理的电路。电路有时又称为网络，这两个名词没有严格的区分，但网络通常指较复杂的电路。

根据电路的用途大致可将其分为两类：信号处理和能量的传送与转换。例如，电视机中的电路将电视信号进行处理，电网系统完成电能传送与分配，电气传动系统完成能量的转换。

一般而言，电路是由电源或信号源、中间环节以及负载组成的。电源给电路提供电能，信号源给电路提供要处理的电信号，当然，传送信号的同时也伴随着能量的传送。从电路分析的角度，我们将这两类源都称为电源。中间环节进行电能的传送或电信号的处理，负载则将电能转变为其它能量。当闭合电路中有电源时会产生电流和电压，因此电源又称为激励源或激励，而电流和电压则称为响应。

对电路进行分析要建立其物理过程的数学描述。发生在电路中的电磁现象和能量转换情况是复杂的。例如，一个用导线绕成的线圈，当电流通过时，线圈周围会产生磁场，磁场中储存着磁场能量。在线圈各匝之间还存在电压，又形成电场，储存着电场能量。电流流过线圈的导体，又会消耗电能。在生产实践中，实际电路的组成结构是复杂、多样的，要对各种电路和种类繁多的电气设备和器件——建立其电磁性质的数学描述是非常麻烦的，也无法对电路采用系统的分析方法。

理想元件(简称为元件)是人为定义的有精确数学描述的电路元件，每种元件表示单一的一种物理性质。例如，最常用的电阻元件、电感元件及电容元件分别表示着消耗电能、储存磁场能量和储存电场能量这三种物理现象。

根据各种电气设备的物理性质，将其表示为理想元件或理想元件的组合，称为建立其电路模型。电路中所有元件都用电路模型表示，就得到了整个电路的电路模型。电路模型直观地反映出各电气设备和器件的电、磁性质。对电路模型进行分析，可采用系统的分析方法，易于求出电路的数学描述和解答。应注意，任何模型都是在一定条件下近似的结果，有一定的适用范围，同一电气设备在不同的应用场合可能有不同的电路模型。例如，工作



于低频电路的线圈,其匝间电场效应可忽略,因此可用一个电阻元件和一个电感元件的串联作为其电路模型;而在高频电路中,线圈的电容不可忽略,因此其高频模型中除了电阻元件和电感元件,还会出现电容元件。

这里所讲的理想元件是集总(集中)参数元件,模型是集总参数电路模型。在集总参数电路中,所有的电磁现象及能量转换均集中在元件内部完成,电路性质与器件及电路的尺寸大小无关。在任一时刻,集总参数电路中流过任一点的电流及任两点的电压是与空间位置无关的确定值。

采用集总参数电路模型是有条件的。严格来说,实际电路中的能量损耗及电场、磁场储能是连续分布的,因此反映电磁性质的电路参数应是分布参数。但是,当电路的器件及电路各项尺寸远小于电路工作的电磁波的波长时,电路参数的分布性对电路性能的影响很小,因此,可采用集总参数电路模型。若电路尺寸不是远小于其工作时电磁波的波长,例如远距离输电网络、微波电路等,则电路中的电流和电压与器件及电路的尺寸大小以及空间位置有关,对这种电路需用电磁场理论或分布参数电路理论进行分析研究。

本书只介绍分析集总参数电路模型的理论和方法。如无特别说明,书中所指电路均为集总参数电路模型。本书不涉及实际电路设备的模型化方法,它们将在有关专业课中讲述。

1.2 电路变量

描述电路工作状态的物理量有电流、电压、电荷、磁通、能量和功率。其中,最基本的是电流和电压,利用电流和电压可计算电路中的能量和功率。电流和电压的参考方向是重要的基本概念。

1.2.1 电流

带电粒子(电荷)的定向移动形成了电流。电流的大小用电流强度衡量,电流强度简称为电流,用符号 i 表示,定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

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,可用符号 I 表示。

在国际单位制中,电流的单位是安培(简称为安,符号为 A);电荷的单位是库仑(简称为库,符号为 C);时间的单位是秒(符号为 s)。在信息工程领域,电路中的电流一般较小,常用毫安(mA)作单位, $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ 。

规定正电荷移动的方向为电流的方向。在复杂电路中,电流的方向不易直观确定;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定的电流方向,在图中用箭头表示,如图 1-1 所示。

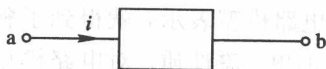


图 1-1 电流的参考方向



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。若为正, 则说明电流实际方向与参考方向相同; 若为负, 则说明电流实际方向与参考方向相反。图 1-1 中, 若求得 $i = -2 \text{ A}$, 则说明电流的实际方向是由 b 指向 a; 若求得 $i(t) = 2 \sin t \text{ A}$, 则说明电流值是随时间正负交变的, 即电流实际方向随时间交变, 在其为正值的时间内, 其实际方向由 a 指向 b, 当其值为负时, 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, 又指明了电流每一时刻的实际方向。只有数值而无参考方向的电流是无意义的, 因此求解电路前一定要先假定电流的参考方向。参考方向可以任意假定, 一旦假定, 求解过程中就不要再改变。

1.2.2 电压

电荷在电路中的流动伴随着能量的交换。单位正电荷由 a 点移到 b 点所发生的能量变化(获得或失去的能量)称为这两点间的电压, 用符号 u 表示。即

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

式中, dq 为由 a 到 b 的电荷; dE 是该电荷所发生的能量变化; u 是这两点间的电压。在国际单位制中, 电压 u 的单位是伏特(简称为伏, 符号为 V), 能量 E 的单位是焦耳(简称为焦, 符号为 J), 电荷 q 的单位是库仑。

若正电荷由 a 到 b 时能量增加, 则 b 点电位高于 a 点电位; 反之, 则 b 点电位低于 a 点电位。习惯上将电位降落的方向规定为电压的方向, 即电压的方向由高电位指向低电位。

大小和方向都不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压, 可用符号 U 表示。

在复杂电路或交流电路中, 电压的实际方向不易或不便标出。如同电流参考方向的引入, 为求解电路方便, 也须在电路中预先设定电压的参考方向。电压的参考方向是人为假定的电压方向, 在图中用箭头或“+”、“-”号表示, 如图 1-2 所示, 其中, “+”、“-”分别表示假定的高、低电位端。电压参考方向还可用双下标表示, 如 u_{ab} 表示 a 点与 b 点间的电压, 其参考方向由 a 点指向 b 点。

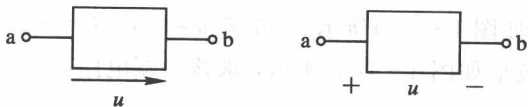


图 1-2 电压的参考方向

在规定的电压参考方向下, 电压是代数量, 求解的结果若为正值, 则电压实际方向与参考方向相同; 若为负值, 则电压实际方向与参考方向相反。电压的参考方向和其他代数值一起给出了电压的完整解答。因此, 求解电路前一定要先选定电压的参考方向。

电压和电流的参考方向可独立选择, 也可关联考虑。如图 1-3 所示有两种选法: 图 1-3(a) 中电流和电压参考方向相同, 称为关联参考方向; 图 1-3(b) 中电流和电压参考方向相反, 称为非关联参考方向。采用关联参考方向时, 可只标出电流或电压的参考方向而暗示着另一变量的参考方向。

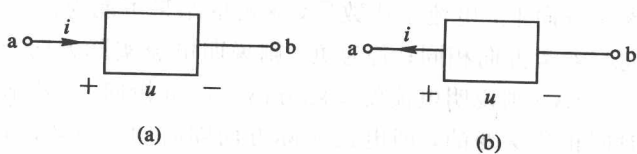


图 1-3 关联参考方向和非关联参考方向

1.2.3 功率

若正电荷通过一段电路后能量有所增加或降低,则说明该段电路的元件提供或吸收了电能。元件吸收或提供电能的速率称为功率,用符号 p 表示。功率可由电流和电压计算。

设一段电路(二端电路)如图 1-3(a)所示,其中方框表示某种元件或某些元件的组合。该段电路的电流和电压采用关联参考方向,这意味着我们假定正电荷由高电位流向低电位,即假定该段电路的元件吸收电能。在 t 时刻的微小时间段 dt 时间内,由 a 点移到 b 点的正电荷为 $dq=i(t)dt$;这些正电荷失去(该段电路元件吸收)的电能为 $dE=u(t)dq=u(t)i(t)dt$,则 t 时刻该电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dE}{dt} = \frac{u(t)i(t)dt}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-3)$$

上式表明,关联参考方向下,一段电路在任一时刻 t 吸收的功率等于该时刻其电流和电压的乘积。若求得 $p(t)$ 为正值,则说明该段电路在这一时刻确实吸收功率;若求得 $p(t)$ 为负值,则说明该段电路在这一时刻实际上是供出功率。

若二端电路的电流和电压采用非关联参考方向,如图 1-3(b)所示,则意味着我们假定该段电路是供出功率的。可推得其供出的瞬时功率等于其电流和电压的乘积,即(1-3)式为采用非关联参考方向时计算二端电路所提供瞬时功率的计算公式。若求得 $p(t)$ 为正值,则该段电路确实是供出功率;否则,是吸收功率。

国际单位制中,功率的单位为瓦特(简称为瓦,符号为 W),1 瓦=1 焦/秒=1 伏·安。

将二端电路的功率在一段时间内积分,便可求得该电路在这段时间内吸收或产生的电能。

例 1-1 二端电路如图 1-4(a)所示。(1) 若 $u=2$ V, $i=-0.5$ A, 求该二端电路的功率。(2) 若电流和电压波形如图 1-4(b)所示,求该二端电路在 $0\sim 1$ s 时间内吸收的电能。

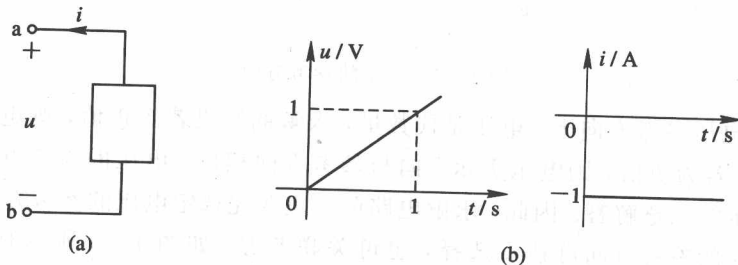


图 1-4 例 1-1 题图

解 (1)

$$p=ui=2\times(-0.5)=-1\text{ W}$$

由于 u 、 i 的参考方向为非关联参考方向且其乘积为负值,因此该二端电路实际吸收了 1 W 的功率。



(2) u 、 i 为非关联参考方向, 该电路吸收的功率为

$$p(t) = -ui = -(t) \times (-1) = t \text{ W}$$

该二端电路在 $0 \sim 1 \text{ s}$ 时间内吸收的电能为

$$E[0, 1] = \int_0^1 p(t) dt = \int_0^1 t dt = 0.5 \text{ J}$$

1.3 基尔霍夫定律

电路中, 各元件的电流要受到基尔霍夫电流定律的约束, 各元件的电压要受到基尔霍夫电压定律的约束。这两种约束与元件的特性无关, 只由元件的互联方式确定, 称为拓扑约束。基尔霍夫电压和电流定律统称为基尔霍夫定律, 是分析和求解电路的基本依据。

首先介绍几个有关电路的术语。

支路: 电路中每个二端元件称为一条支路。有时为简化电路, 也将由一些元件组合而成的一段二端电路(如串联的电阻)看做一条支路。例如, 图 1-5 中有 6 条支路。

节点: 电路中支路的连接点称为节点。例如, 图 1-5 中有 4 个节点(①、②、③和④)。

回路: 电路中由支路构成的闭合路径称为回路。例如, 图 1-5 中有 7 个回路, 支路 1、2、3 构成一个回路; 支路 1、2、4、5 构成另一个回路等。

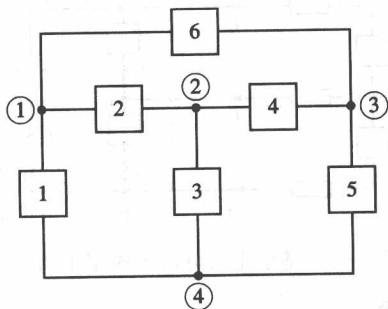


图 1-5 电路的支路、节点、回路示例

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL, Kirchhoff's Current Law): 在集总参数电路中, 任一时刻, 流入任一节点的支路电流之和等于流出该节点的支路电流之和。即任一时刻, 与任一节点相连的所有支路电流的代数和为零, 用数学式表达为

$$\sum i(t) = 0 \quad (1-4)$$

上式称为节点电流方程或 KCL 方程。对任一节点均可列出一个 KCL 方程, 它是对连接到该节点的所有支路电流的一个约束条件。注意求和时不能漏掉与该节点相连的任一支路电流。代数求和是指流入(指向)该节点的支路电流与流出(背离)该节点的支路电流取不同的正负号。例如, 对图 1-6 中的节点 a, 若流出该节点的电流取正号, 则该节点的 KCL 方程为

$$-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 = 0 \quad (1-5)$$



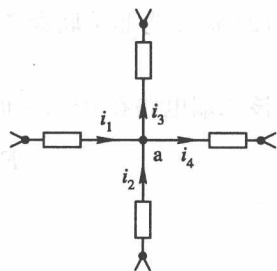
求解电路时,根据电流的参考方向列方程,即上式中各电流前的正负号由其参考方向决定。由于在参考方向下各电流均是代数量,因此把它们代入方程时,应注意保留其正负号。图 1-6 中,若已知 $i_1 = 5 \text{ A}$, $i_2 = -4 \text{ A}$, $i_4 = -7 \text{ A}$,将之代入式(1-5),有

$$-5 - (-4) + i_3 + (-7) = 0$$

可求得

$$i_3 = 8 \text{ A}$$

图 1-6 基尔霍夫电流定律的说明



基尔霍夫电流定律是电荷守恒规律的体现。电荷既不能创造也不能消灭。在集总参数电路中,节点只是理想导体的连接点,它不会积累电荷。因此,在任一时刻,流入某一节点的电荷必等于流出该节点的电荷,即流入的电流等于流出的电流。

电路中由一封闭的曲线包围的部分称为一个闭合面,或称为广义节点,如图 1-7 中虚线所示。基尔霍夫电流定律也适用于集总参数电路中的任一闭合面。即任一时刻,流入任一闭合面的支路电流之和等于流出该闭合面的支路电流之和。例如,对图 1-7 中的闭合面,有 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 。只需列出闭合面内部所有节点的 KCL 方程,再将它们相加,便可证明上述结论。

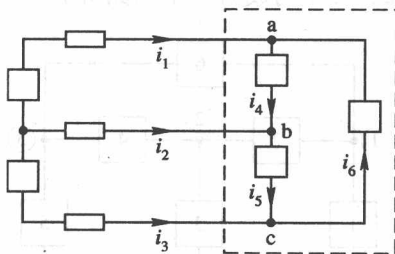


图 1-7 基尔霍夫电流定律用于闭合面

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL, Kirchhoff 'Voltage Law): 在集总参数电路中,任一时刻,任一回路的所有支路电压代数和为零。用数学式表达为

$$\sum u(t) = 0 \quad (1-6)$$

上式称为回路电压方程或 KVL 方程。对任一回路均可列出一个 KVL 方程,它是对组成该回路所有支路的电压的一个约束条件。注意求和时不能漏掉该回路中的任一支路电压。

式(1-6)是代数求和式,各项电压前冠有正号或者负号。任意选定回路的绕行方向后,支路电压参考方向与回路绕行方向一致时取正号,相反时取负号。例如,对图 1-8 中的回路 1,若选定回路绕行方向为顺时针方向,则该回路的 KVL 方程为

$$-u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0 \quad (1-7)$$

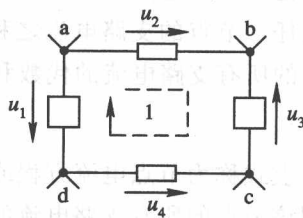


图 1-8 基尔霍夫电压定律的说明



由于参考方向下各电压均是代数量, 因此代入方程时应注意保留其正负号。图 1-8 中, 若已知 $u_1 = 6 \text{ V}$, $u_2 = -2 \text{ V}$, $u_4 = -5 \text{ V}$, 将之代入(1-7)式, 有

$$-6 + (-2) - u_3 - (-5) = 0$$

可求得

$$u_3 = -3 \text{ V}$$

基尔霍夫电压定律是集总参数电路中能量守恒规律的体现。单位正电荷从某点出发, 沿一回路绕行一周回到原出发点, 其能量变化为零。这说明单位正电荷沿途获得的能量总和与失去的能量总和相等。用电压来描述就是回路中的电位升之和等于电位降之和, 即回路中所有电压的代数和为零。

基尔霍夫电压定律不仅适用于由支路构成的回路, 也适用于不完全由支路构成的假想回路。图 1-8 中, 节点 a、c 之间并未直接接有支路, 但我们可假想 a、c 间接有一阻值为无穷大的电阻支路, 故仍可将节点序列 abca 看做一个回路, 其 KVL 方程为

$$u_2 - u_3 - u_{ac} = 0 \quad (1-8)$$

也可将 adca 看做一个回路, 可得 KVL 方程为

$$u_1 + u_4 - u_{ac} = 0 \quad (1-9)$$

利用假想回路的 KVL 方程可求出任两节点间的电压。例如, 由(1-8)、(1-9)式求得 $u_{ac} = u_2 - u_3$ 或 $u_{ac} = u_1 + u_4$ 。由(1-7)式知 $u_1 + u_4 = u_2 - u_3$ 。由此例可见, 集总参数电路中两点间的电压等于这两点间任一条路径上的支路电压之代数和, 它是单值的, 与计算路径无关。这正是基尔霍夫电压定律之实质所在。

在电路中指定某一点作为参考电位点(即零电位点), 则其余各点相对于该参考点的电压称为各点的电位。如图 1-9 电路中, 若以 d 点作为参考电位点, 则 u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_e 分别表示 a、b、c、e 各点的电位。

电路中某两点的电压等于该两点的电位之差。图 1-9 中, 有

$$u_{ab} = u_a - u_b$$

事实上, 对 abda 假想回路列出 KVL 方程, 便可推得上式。

将(1-4)式与(1-6)式比较可见, 该两式在形式上是相似的, 这种一一对应出现的事物称为对偶事物。认识事物的对偶性, 可使我们在研究问题时举一反三, 由此及彼, 提高效率。对偶现象在电路中普遍存在。如前所述, (1-4)式及(1-6)式是对偶方程, 式中对应的变量电流和电压是对偶变量。该两个方程所描述的 KCL 及 KVL 是对偶定律。在今后的学习中我们还会逐渐认识电路的其它对偶现象。电路中的对偶现象通常可通过其数学描述的相似性表现出来。换言之, 数学表达的相似性揭示了事物间的对偶性。

例 1-2 电路如图 1-10 所示, 已知 $u_2 = 10 \text{ V}$, $u_5 = -3 \text{ V}$, $u_6 = 16 \text{ V}$, $u_8 = 9 \text{ V}$, $i_3 = -2 \text{ A}$, $i_4 = 6 \text{ A}$, $i_8 = 3 \text{ A}$, 求 u_{ab} 和 i_7 。

解 从 a 点出发, 依次通过第 2、5、8、6 号支路, 到达 b 点, 这 4 条支路构成 a、b 两点间的一条路径, u_{ab} 等于这 4 条支路电压的代数和, 即

$$u_{ab} = u_2 - u_5 - u_8 + u_6 = 10 - (-3) - 9 + 16 = 20 \text{ V}$$

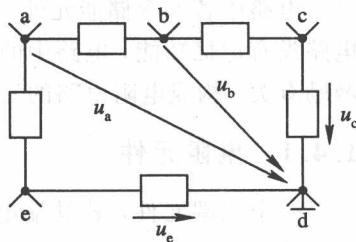


图 1-9 电位的概念