

面向 **21** 世纪

高等学校信息工程专业系列教材

# 电路理论基础

*Fundamentals of Circuit Theory*

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类专业系列教材

# 电路理论基础

Fundamentals of Circuit Theory

卢元元 王 晖 主编

胡庆彬 高建波 骆剑平 参编

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等。本书各章均配有较丰富的典型例题和习题,并附有参考答案。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教材,也可供有关科技人员参考。

★ 本书配有电子教案和多媒体辅助教学软件,有需要的老师可与出版社联系,免费索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础=Fundamentals of Circuit Theory/卢元元,王晖主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2004.2

(面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1335-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 114812 号

策 划 马晓娟

责任编辑 曹华 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

<http://www.xduph.com>

E-mail: [xdupfxb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfxb@pub.xaonline.com)

经 销 新华书店

印刷单位 西安兰翔印刷厂

版 次 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19

字 数 447 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 20.00 元

ISBN 7-5606-1335-7/TN·0251(课)

**XDUP 1606001-1**

\* \* \* 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,相应地教学计划、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学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、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学科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类的教学计划和课程大纲,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,这套教材预计在 2004 年全部出齐。

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、优中选优、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发能力。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

2002 年 8 月

# 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

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院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）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、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（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、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、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

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（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

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

# 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《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,对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。

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

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 电路模型和基尔霍夫定律</b> .....  | 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 .....               | 7   |
| 1.5 简单电路分析 .....                | 15  |
| 习题 .....                        | 19  |
| <b>第 2 章 电阻电路的等效变换</b> .....    | 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 .....    | 25  |
| 2.3 实际电源的两种模型及其等效变换 .....       | 28  |
| 2.4 电阻星形连接与三角形连接的等效变换 .....     | 31  |
| 习题 .....                        | 34  |
| <b>第 3 章 线性电阻电路的一般分析法</b> ..... | 38  |
| 3.1 KCL、KVL 方程的独立性 .....        | 38  |
| 3.2 支路分析法 .....                 | 42  |
| 3.3 节点分析法 .....                 | 44  |
| 3.4 网孔分析法和回路分析法 .....           | 50  |
| 习题 .....                        | 56  |
| <b>第 4 章 电路定理</b> .....         | 60  |
| 4.1 叠加定理 .....                  | 60  |
| 4.2 替代定理 .....                  | 64  |
| 4.3 戴维南定理和诺顿定理 .....            | 65  |
| * 4.4 特勒根定理 .....               | 71  |
| * 4.5 互易定理 .....                | 72  |
| 习题 .....                        | 75  |
| <b>第 5 章 电容元件与电感元件</b> .....    | 78  |
| 5.1 电容元件 .....                  | 78  |
| 5.2 电感元件 .....                  | 86  |
| * 5.3 一阶线性常系数微分方程的求解 .....      | 91  |
| * 5.4 二阶线性常系数微分方程的求解 .....      | 93  |
| 习题 .....                        | 96  |
| <b>第 6 章 一阶电路</b> .....         | 97  |
| 6.1 线性与时不变性 .....               | 97  |
| 6.2 一阶电路的零输入响应 .....            | 99  |
| 6.3 恒定电源作用下一阶电路的零状态响应 .....     | 103 |

|                 |                              |     |
|-----------------|------------------------------|-----|
| 6.4             | 恒定电源作用下一阶电路的全响应和叠加定理 .....   | 105 |
| 6.5             | 复杂一阶电路的分析方法 .....            | 108 |
| 6.6             | 阶跃函数和阶跃响应 .....              | 114 |
| * 6.7           | 正弦信号激励下一阶电路的响应 .....         | 116 |
|                 | 习题 .....                     | 118 |
| <b>第 7 章</b>    | <b>二阶电路</b> .....            | 121 |
| 7.1             | $RLC$ 串联电路的零输入响应 .....       | 121 |
| 7.2             | 恒定电源作用下 $RLC$ 串联电路的全响应 ..... | 127 |
| * 7.3           | 恒定电源作用下 $GLC$ 并联电路的全响应 ..... | 130 |
|                 | 习题 .....                     | 132 |
| <b>第 8 章</b>    | <b>相量法基础</b> .....           | 134 |
| 8.1             | 正弦电压和电流 .....                | 134 |
| 8.2             | 正弦量的相量表示 .....               | 137 |
| 8.3             | 基尔霍夫定律的相量形式 .....            | 140 |
| 8.4             | 电路元件伏安特性的相量形式 .....          | 142 |
|                 | 习题 .....                     | 145 |
| <b>第 9 章</b>    | <b>正弦电流电路的分析</b> .....       | 147 |
| 9.1             | 阻抗与导纳及相量模型 .....             | 147 |
| 9.2             | 正弦电流电路的相量分析法 .....           | 150 |
| 9.3             | 正弦电流电路的功率 .....              | 157 |
| * 9.4           | 三相电路 .....                   | 163 |
|                 | 习题 .....                     | 171 |
| <b>第 10 章</b>   | <b>电路的频率响应</b> .....         | 178 |
| 10.1            | 电路的频率响应与网络函数 .....           | 178 |
| 10.2            | 串联谐振电路 .....                 | 180 |
| * 10.3          | 并联谐振电路 .....                 | 187 |
| 10.4            | 非正弦周期电流电路的分析 .....           | 191 |
|                 | 习题 .....                     | 196 |
| <b>第 11 章</b>   | <b>耦合电感和理想变压器</b> .....      | 200 |
| 11.1            | 耦合电感元件 .....                 | 200 |
| 11.2            | 含耦合电感的电路 .....               | 204 |
| 11.3            | 理想变压器 .....                  | 211 |
| * 11.4          | 变压器的电路模型 .....               | 214 |
|                 | 习题 .....                     | 217 |
| <b>* 第 12 章</b> | <b>二端口网络</b> .....           | 221 |
| 12.1            | 二端口网络的方程和参数 .....            | 221 |
| 12.2            | 二端口网络的等效网络 .....             | 227 |
| 12.3            | 二端口网络的互连 .....               | 230 |
| 12.4            | 有载二端口网络 .....                | 232 |
| 12.5            | 二端口网络的特性阻抗 .....             | 234 |
|                 | 习题 .....                     | 235 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| <b>* 第 13 章 非线性电阻电路简介 .....</b>      | <b>240</b> |
| 13.1 非线性电阻元件 .....                   | 240        |
| 13.2 含一个非线性元件的电阻电路的分析 .....          | 243        |
| 13.3 非线性电阻的串联和并联 .....               | 244        |
| 13.4 分段线性化方法 .....                   | 245        |
| 13.5 小信号分析法 .....                    | 247        |
| 习题 .....                             | 249        |
| <b>* 第 14 章 网络方程的矩阵形式 .....</b>      | <b>251</b> |
| 14.1 基本回路和基本割集 .....                 | 251        |
| 14.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵 .....            | 253        |
| 14.3 节点分析法和节点方程的矩阵形式 .....           | 259        |
| 14.4 回路分析法和回路方程的矩阵形式 .....           | 262        |
| 14.5 割集分析法和割集方程的矩阵形式 .....           | 263        |
| 习题 .....                             | 265        |
| <b>* 第 15 章 利用 MATLAB 计算电路 .....</b> | <b>268</b> |
| 15.1 MATLAB 概述 .....                 | 268        |
| 15.2 MATLAB 程序设计基础 .....             | 270        |
| 15.3 电路的传递函数及频率特性 .....              | 273        |
| 15.4 非线性直流电路计算 .....                 | 274        |
| 15.5 非正弦电路计算 .....                   | 276        |
| 15.6 过渡过程的时域解 .....                  | 278        |
| 习题 .....                             | 284        |
| <b>部分习题参考答案 .....</b>                | <b>285</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                    | <b>294</b> |

## 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连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，电网系统则完成电能的传送与分配，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他能量。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。电路中所有器件如都用电路模型表示，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的近似结果，有一定的适用范围。如电感线圈在高频电路和低频电路中所采用的模型是不同的。

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。严格说,实际电路中的能量损耗和电场、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向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

带电粒子的定向移动便形成了电流。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而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。

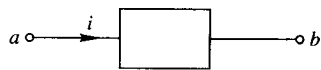


图 1-1 电流的参考方向

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,则电流实际方向与参考方向相同;若为负,则电流实际方向与参考方向相反。如图 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  $a$  的;若  $i(t) = 2 \sin t \text{ A}$ ,电流值是随时间正负交变的,这说明其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选定电流的参考方向。参考方向可以任意选定,一旦选定,求解过程中就不能再改变。

### 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称为两点间的电压,用符号  $u$  表示,即

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

式中  $dq$  为由  $a$  点到  $b$  点的电荷,  $dw$  是该电荷所发生的能量变化,  $u$  是两点间的电压。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  $w$  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  $a$  点到  $b$  点时能量增加,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而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,例如  $u_{ab}$  表示  $a$ 、 $b$  间的电压,其参考方向由  $a$  点指向  $b$  点。

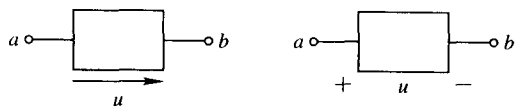


图 1-2 电压的参考方向

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,例如  $u_{ab}$  表示  $a$ 、 $b$  间的电压,其参考方向由  $a$  点指向  $b$  点。

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代数值一起给出了电压的完整解答。因此,求解电路前也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。图 1-3 中有两种选法: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。

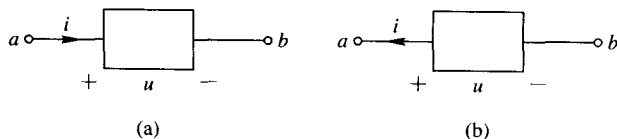


图 1-3 关联参考方向和非关联参考方向

### 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,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。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,其中方框表示某种器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。设  $t$  时刻起,在  $dt$  时间内,由  $a$  点移到  $b$  点的正电荷  $dq$  失去的(即由该段电路元件吸收的)电能为  $d\omega$ ,则  $t$  时刻该电路吸收的功率为

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

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吸收了功率;若求得  $p(t)$  为负值,则表明该段电路在这一时刻实际上供出了功率。

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,这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,则该段电路确实在供出功率;否则,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  $u=2\text{ V}$ ,  $i=-0.5\text{ A}$ , 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  $0\sim 1$  秒时间内吸收的电能。

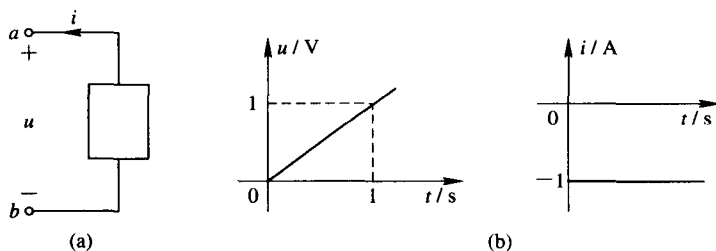


图 1-4 例 1-1 题图

**解** (1)  $u$ 、 $i$  的参考方向为非关联参考方向且其乘积为负值,该二端电路实际吸收的功率为

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

(2)  $u$ 、 $i$  的参考方向为非关联参考方向,该电路吸收的功率为

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

该二端电路在  $0 \sim 1$  秒时间内吸收的电能为

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

## 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,各元件的电压则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。基尔霍夫电压定律和电流定律统称为基尔霍夫定律,是分析求解电路的基本依据。

下面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(例如,串联的电阻)看作一条支路。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。

**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。

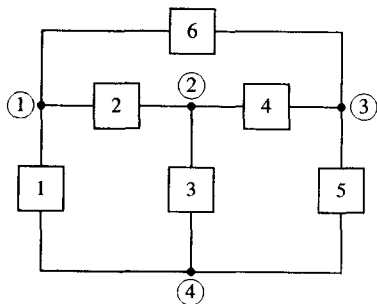


图 1-5 电路的支路、节点、回路示例

### 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条支路电流。

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为正号,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。

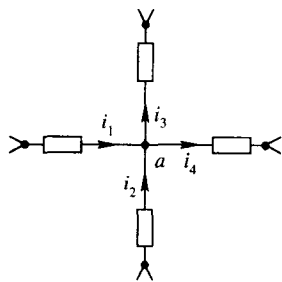


图 1-6 基尔霍夫电流定律的示意图

由于在参考方向下各电流均是代数量, 把它们代入方程时, 应注意保留其正负号。如图 1-6 所示, 若已知  $i_1 = 5 \text{ A}$ ,  $i_2 = -4 \text{ A}$ ,  $i_4 = -7 \text{ A}$ , 代入式(1-5)有

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

可求得

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

基尔霍夫电流定律是电荷守恒自然规律的体现, 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所有支路电流的代数和为零。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。

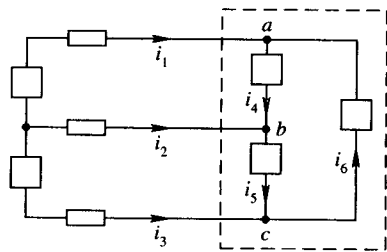


图 1-7 基尔霍夫电流定律用于闭合面

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL, Kirchhoff's 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条支路电压。

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

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

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

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

可求得

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

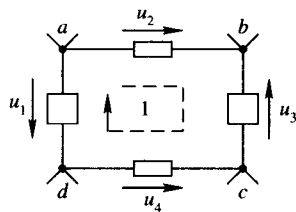


图 1-8 基尔霍夫电压定律的说明

基尔霍夫电压定律是集总参数电路中能量守恒自然规律的体现。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压升之和等于电压降之和, 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。如图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 $abca$ 看作一个回路,其KVL方程为

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

也可将 $adca$ 看作一个回路,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的代数和,它是单值的,与计算路径无关。这正是基尔霍夫电压定律实质所在。

将KCL(1-4)式与KVL(1-6)式比较可见,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,这两个方程所描述的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他对偶现象。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。

## 1.4 电阻电路的元件

本书所指的电路均为电路模型。电路模型由各种理想元件构成。理想元件简称为元件,它们具有严格的数学定义,每种元件反映着电路中的某种物理现象。电路元件分为无源元件和有源元件两大类。若某一元件接在任意电路中,从最初时刻到任意时刻所吸收的总能量不为负,或者说从最初时刻到任意目前时刻,它不对外提供能量,则称为无源元件;反之,则称为有源元件。

电路中若不含储能元件(如电感、电容等),则称为电阻性电路(简称电阻电路)。电阻电路没有记忆功能,电路中的电流、电压关系均为代数方程,每时刻的响应仅与该时刻的激励有关。构成电阻电路的元件主要有电阻元件、独立源、受控源及理想运算放大器。

### 1.4.1 电阻元件

一个二端元件,若其端电流 $i$ 和端电压 $u$ 的关系为一代数方程,则称之为电阻元件。根据其 $u$ 、 $i$ 关系方程是否是线性方程及是否与时间 $t$ 有关,电阻元件可分为线性电阻与非线性电阻,时变电阻与非时变电阻。本书内容仅涉及非时变电阻,这里先介绍非时变线性电阻,非线性电阻将在第13章介绍。

非时变线性电阻应用广泛,通常简称为电阻元件,它是满足欧姆定律的二端元件。电阻元件的电路符号如图1-9(a)所示。在关联参考方向下,其端电压 $u(t)$ 和端电流 $i(t)$ 的关系(称为伏安特性或 $u-i$ 特性)为

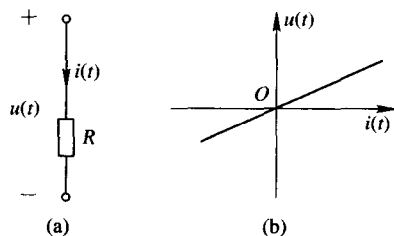


图1-9 线性电阻元件及其 $u-i$ 特性

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

式中  $R$  为正的常数, 称为电阻元件的电阻。 $u-i$  特性可用图 1-9(b) 表示, 它是过原点且斜率为  $R$  的直线。

(1-10) 式可改写为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-11)$$

其中,  $G=1/R$  称为电阻元件的电导。(1-10) 式和 (1-11) 式是欧姆定律的两种数学表述式。

国际单位制中, 电阻的单位是欧姆(简称欧, 符号为  $\Omega$ ), 1 欧姆=1 伏特/安培。电导的单位为西门子(简称为西, 符号为 S)。电导反映了电阻元件导电能力的大小, 电阻则反映电阻元件对电流的阻力。

(1-10) 式和 (1-11) 式是关联参考方向下电阻元件  $u-i$  特性的数学表达式, 若采用图 1-10 所示非关联参考方向, 则其  $u-i$  特性应改写为

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-12)$$

$$i(t) = -Gu(t) \quad (1-13)$$

关联参考方向下, 电阻元件吸收的瞬时功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = Gu^2(t) \quad (1-14)$$

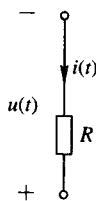


图 1-10  $u, i$  为非关联参考方向

可见, 任一时刻电阻吸收的功率非负, 即电阻是无源元件而且是耗能元件。工程上选用电阻器件时, 除要选择合适的电阻值外, 还要考虑其额定功率, 若电阻器件工作时所消耗的功率大于其额定功率, 就有可能因过热而损坏。

若电阻元件的  $R \rightarrow \infty (G=0)$ , 则其电流恒为零, 其伏安特性曲线与  $u$  轴重合, 此时电阻元件相当于断开的导线, 称为“开路”; 若电阻元件的  $R=0 (G \rightarrow \infty)$ , 则其端电压恒为零, 其伏安特性曲线与  $i$  轴重合, 此时电阻元件相当于一段理想导线, 称为“短路”。

电阻元件伏安特性的两种数学表达式 (1-10)、(1-11) 是对偶的,  $R$  与  $G$  是对偶参数, 元件电流和电压是对偶变量, 将两式中的对偶参数及对偶变量互换, 可由一式得到另一式。显然, 短路支路 and 开路支路是对偶支路。

### 1.4.2 独立电源

独立电源又称为激励源, 分为电压源和电流源。独立电源是有源元件。

#### 1. 电压源

电压源是理想的二端元件, 其端电压为一恒定值(直流电压源)或者为某一给定的时间函数(时变电压源), 与其端电流无关。电压源的符号如图 1-11(a) 所示, 其中虚线部分是电压源连接的任意外电路。电压源符号中,  $u_s(t)$  为电压源的电压函数,  $u(t)$  为电压源的端电压。若  $u(t)$  与  $u_s(t)$  的参考方向相同, 则对于任意端电流  $i(t)$ , 电压源的特性方程为

$$u(t) = u_s(t) \quad (1-15)$$

在任一时刻  $t$ , 电压源的  $u-i$  特性如图 1-11(b) 所示, 它是一条平行于  $i$  轴的直线, 即任一时刻电压源的端电压均与其端电流无关。