

高等学校电子信息学科“十二五”规划教材

电路分析基础

施娟 周茜 编著

013023689

TM133-43
65

高等学校电子信息学科“十二五”规划教材

电路分析基础

施娟 周茜 编著

TM-133-43
65

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会的电路分析教学基本要求编写而成,条理清楚,系统性强,联系实际,深入浅出。其先修课程为“高等数学”和“大学物理”。全书共14章,主要内容包括电路理论概述、电路定律、电路基本分析方法、网络的VAR和电路的等效、网络定理、电容元件与电感元件、一阶电路分析、二阶电路分析、正弦交流电路、正弦稳态电路的功率、电路的频率特性、三相电路、耦合电感和理想变压器以及双口网络等。此外,本书的每章节均安排有大量精选的例题和思考与练习,并在附录中给出了所有思考与练习的参考答案。

本书既可作为通信工程、信息工程、自动化和计算机类有关专业的教材,也可供相关专业的本科生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/施娟,周茜编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.2

高等学校电子信息学科“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2996-4

I. ①电… II. ①施… ②周…

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024947号

策划编辑 马乐惠

责任编辑 买永莲 马乐惠

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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 中铁一局印刷厂

版 次 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18

字 数 424千字

印 数 1~3000册

定 价 31.00元

ISBN 978-7-5606-2996-4/TM

XDUP 3288001-1

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。

前 言

“电路分析基础”是高等工科院校电子、通信、计算机、电气及自动化等电子信息类专业本科生的一门重要专业基础课程。其内容是研究非时变集总参数电路的基本理论和分析方法。通过本课程的学习使学生掌握电路分析的基本概念和基本原理，培养学生的电路分析计算能力和基本的实验能力，建立工程设计的基础知识，为后续课程的学习打好基础。

随着电子技术和信息处理技术的迅猛发展，更多的新知识、新技术需要在本科阶段学习，因此，电路课程的学时压缩成为许多高校的现状。另一方面，为适应 21 世纪电子技术人才的培养需要，又需要更多的实用技术的加入。在这种情况下，如何在较短的时间内完成电路分析基本知识的学习，对这门课程的教学提出了更高的要求，需要在教学内容、教学方法与手段、教材编写等诸多方面改进。为此，我们根据多年教学经验和体会，遵循“精简理论，加强实用”的基本原则，编写了本书。

本书编写的特点是，确保基本概念、基本定律和基本方法的完整性，在内容选材上立足于“加强基础，精选内容，例题典型，重点突出，实用新颖”的原则，以满足培养创新型、实用型人才的要求。本书在文字叙述上力求简洁明了、通俗易懂，以利于教师教学和学生学习；在内容组织上循序渐进，从静态电路到动态电路，从直流电路到正弦交流电路，符合学习规律。同时，书中还精选了多个应用实例和实验、实训以及较多的典型例题、思考与练习(附有答案)，以供参考。

本书由桂林电子科技大学信息与通信学院微电子系的教师们，积 20 余年教学经验，根据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会的“电路分析教学基本要求”编写而成。参考学时为 56~72 学时(通常另设实验 16 学时)。

本书由施娟和周茜共同编著。其中，施娟编写了第 1~8 章；周茜编写了第 9~14 章并编写了全部的思考与练习及答案。

本书在编写的过程中，得到了信息与通信学院领导的关注与支持以及所在系全体同仁的大力协助，在此对他们表示衷心的感谢。

另外，本书的编写还参考了许多国内外优秀的教材，从中汲取了宝贵的经验，在此也向各位著、编、译者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，殷切希望读者不吝赐教。

编著者

2012 年 10 月

目 录

第 1 章 电路理论概述	1
1.1 电路的概念	1
1.2 电路的分类	1
1.3 实际电路和电路模型	2
1.4 电路仿真软件简介	3
思考与练习	4
第 2 章 电路定律	5
2.1 基本变量	5
2.2 基尔霍夫定律	8
2.3 电阻元件	11
2.4 电阻器	14
2.5 独立电源	16
2.6 受控电源(受控源)	19
思考与练习	22
第 3 章 电路基本分析方法	27
3.1 支路分析法	27
3.2 网孔分析法	30
3.3 节点分析法	35
3.4 回路分析法	40
3.5 电路的对偶特性与对偶电路	41
思考与练习	45
第 4 章 网络的 VAR 和电路的等效	50
4.1 单口网络的 VAR	50
4.2 单口网络(二端网络)的等效	53
4.3 简单的等效规律和公式	54
4.4 电源模型的等效变换	56
4.5 T- Π 变换	59
思考与练习	63
第 5 章 网络定理	68
5.1 叠加定理	68
5.2 置换定理(替代定理)	72
5.3 戴维南定理	74
5.4 诺顿定理	76

5.5 最大功率传输定理	78
思考与练习	79
第 6 章 电容元件与电感元件	86
6.1 电容元件	86
6.2 电感元件	89
6.3 电容器和电感器	91
6.4 电感器和电容器的电路模型	95
思考与练习	96
第 7 章 一阶电路分析	98
7.1 换路定理及初始值计算	99
7.2 一阶电路的零输入响应	101
7.3 一阶电路的零状态响应	107
7.4 一阶电路的全响应	111
7.5 阶跃函数与阶跃响应	117
思考与练习	120
第 8 章 二阶电路分析	127
8.1 LC 电路中的正弦振荡	127
8.2 RLC 串联电路的零输入响应	128
8.3 GLC 并联电路的零输入响应	132
8.4 一般二阶电路的分析	132
思考与练习	134
第 9 章 正弦交流电路	136
9.1 正弦交流信号	136
9.2 正弦 RC 电路分析	138
9.3 正弦信号的相量表示	140
9.4 KCL 和 KVL 的相量形式	144
9.5 R 、 L 、 C 元件 VAR 的相量形式	145
9.6 阻抗和导纳	149
9.7 正弦稳态电路的相量法分析	152
思考与练习	162
第 10 章 正弦稳态电路的功率	167
10.1 二端网络的功率	167
10.2 无源二端网络及元件的功率	171
10.3 元件的储能及电路的功率守恒	173
10.4 正弦稳态最大功率传输定理	174
10.5 正弦稳态功率的叠加	177
思考与练习	182
第 11 章 电路的频率特性	187
11.1 电路的频率响应	187

11.2	一阶 RC 电路的频率特性	190
11.3	RLC 串联谐振电路	192
11.4	并联电路的谐振	197
	思考与练习	203
第 12 章	三相电路	207
12.1	多相电路概述	207
12.2	三相电路的基本概念	208
12.3	三相电源和负载的连接	209
12.4	对称三相电路分析	211
12.5	不对称三相电路分析	214
	思考与练习	218
第 13 章	耦合电感和理想变压器	221
13.1	耦合电感元件	221
13.2	耦合电感的去耦等效电路	226
13.3	耦合电感电路的初次级等效	232
13.4	理想变压器	235
13.5	实际变压器模型	240
13.6	变压器器件	242
13.7	双调谐电路	244
	思考与练习	246
第 14 章	双口网络	253
14.1	双口网络的基本概念	253
14.2	双口网络的端口方程和网络参数	254
	思考与练习	259
附录	思考与练习参考答案	263
	参考文献	279

第 1 章 电路理论概述

【内容提要】 本章介绍电路理论的基本概念，内容包括电路的概念、电路的分类、电路模型的概念、电路分析的对象和分析方法等。

1.1 电路的概念

电路就是由电器件互连而成的电流通路，即电源和负载通过电器件连接构成的电路。电路可以实现电能和电信号的技术应用。如图 1-1 所示就是一个手电筒电路。

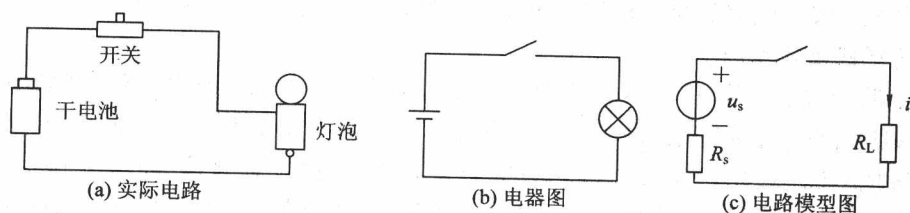


图 1-1 手电筒电路

电路理论是研究电路普通规律的一门学科，其理论和方法在许多领域都得到了广泛应用。电路理论主要有两个分支：电路分析和电路综合。前者的核心内容是在已知电路结构及元件性质参数的条件下，找出输入（激励）与输出（响应）之间的关系，并分析和求解输出（响应）。其研究的课题可用图 1-2 所示的框图表示。对图 1-1 所示的手电筒电路，如果已知 u_s 、 R_s 、 R_L ，求流过灯泡（负载）的电流 i 和它消耗的功率 P_L 就属此范畴。后者则是在已知输入和输出的条件下，求得电路的结构及工作参数。

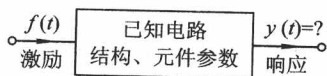


图 1-2 电路研究示意图

1.2 电路的分类

按照不同的分类方法，可将电路分为不同类型。例如，按照电路传输、处理的信号是数字信号还是模拟信号，将电路分为数字电路和模拟电路。在电路理论中，通常将电路分为以下三种类型。

1. 集总参数电路和分布参数电路

在一般的电路分析中，电路的所有参数，如阻抗、容抗、感抗都集中于空间的各个点

上、各个元件上,各点之间的信号是瞬间传递的,这种理想化的电路模型称为集总参数电路。

这类电路所涉及电路元件的电磁过程都集中在元件内部进行。用集总电路近似实际电路是有条件的,即实际电路的尺寸要远小于电路工作时的电磁波长。

集总(参数)元件假定:在任何时刻,流入二端元件的一个端子的电流一定等于从另一端流出的电流,且两个端子之间的电压为单值量。由集总元件构成的电路称为集总电路,或称具有集总参数的电路。

集总假设是本书中最主要的假设,以后所述的电路基本定律均须在这一假设的前提下使用。

在实际电路中,参数具有分布性,必须考虑参数分布性的电路,即分布参数电路。这种电路又称为高速电路,是指传输线的长度与工作波长可相比拟,需用分布参数电路来描述的电路。典型的分布参数电路是传输线(transmission line)。

2. 线性电路和非线性电路

参数与电压、电流无关的元件称为线性元件。由电源和线性元件组合而成的电路,属于线性电路。线性电路的数学模型是线性代数方程或线性微分(积分)方程。线性电路已有非常成熟的理论和分析方法。

若电路中包含非线性元件,则为非线性电路,非线性电路不能用线性方程来描述其特性。非线性电路近年来有很大的发展,成为非常活跃的研究领域。半导体二极管和三极管皆为非线性元件,应当采用非线性电路的分析方法进行分析。需要指出的是,在一定的条件下,非线性元件也可用线性电路模型来代替,从而可按照线性电路的分析方法进行分析。

3. 时变和非时变(时不变)电路

若电路元件参数、电路结构和连接方式不随时间而改变,则该电路为非时变电路,也称为时不变电路。反之,则为时变电路。我们所涉及的大多数电路一般都可近似为非时变电路,而时变电路又是一个专门的研究领域。

本书所研究的电路为集总参数、线性时不变电路。

1.3 实际电路和电路模型

实际电路是由各电器按一定方式连接而成的电流通路,它的主要功能是实现电能和电信号的产生、传输、转换与处理。

由于构成电路的实际部件种类繁多,不具有单一的电气特性(例如,一个实际的电源总有内阻,在使用时不能总保持一定的端电压等),难于定量描述,因此,我们必须在一定条件下对实际部件加以理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征它的主要性能的理想电路元件(电路模型)来表示。

理想电路元件(电路模型)是用数学关系严格定义的假想元件。每一种元件都可以表示实际部件具有的一种主要电磁性能。理想元件的数学关系反映实际部件的基本物理规律。

图 1-3 所示为三种基本的理想电路元件的图形符号。其中,理想电阻元件仅表示消耗电能并转变成非电能的特征;理想电容元件仅表现储存或释放电场能量的特征;理想电感元件仅表现储存或释放磁场能量的特征。它们分别是实际电路中电阻器、电容器和电感器

在一定条件下的近似化、理想化。

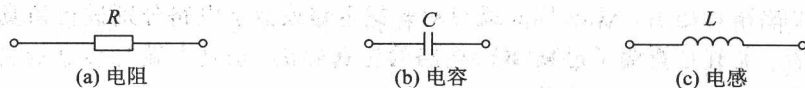


图 1-3 三种基本的理想电路元件的图形符号

上述三种理想电路元件均具有两个端钮，故称为二端元件，又称单口元件。除二端元件外，还有多端元件。如受控源、耦合电感、变压器等为四端元件。

理想元件或理想元件的组合称为电路模型。今后所提到的电路，除特别指明外均系电路模型，所提到的元件均为理想元件。

电路理论所研究的对象不是实际电路，而是它的数学模型——电路模型。

1.4 电路仿真软件简介

电路仿真，顾名思义就是将设计好的电路图通过仿真软件进行实时模拟，模拟出实际功能，然后通过对其分析改进，从而实现电路的优化设计。这是 EDA(电子设计自动化)的一部分。计算机仿真与虚拟仪器技术可以很好地解决理论教学与实际动手实验相脱节这一老大难问题。学生可以很方便地把刚刚学到的理论知识用计算机仿真真实地再现出来，更好地理解电路的特性，这也是我们今后设计电路必不可少的一个关键环节。现在比较常用的电路仿真软件有 MultiSim、Protel、Pspice 等。MultiSim 主要是模拟器件和一些分离器件的仿真，仿真的手段和实际相符，易学易用。Protel 主要用于 PCB 的设计，也可以用来仿真，对初学者来说则有些难度。Pspice 好学易懂，但元件封装和实际的引脚有点不一样，仿真实现简单。

MultiSim 是一个紧密集成的软件包，具有电路图输入、元件数据库和 Spice 仿真 3 种功能，且有以下特点：

(1) 直观的图形界面。整个操作界面就像一个电子实验工作台，绘制电路所需的元器件和仿真所需的测试仪器均可直接拖放到屏幕上，轻点鼠标即可用导线将它们连接起来，同时，软件仪器的控制面板和操作方式都与实物相似，测量数据、波形和特性曲线也如同在真实仪器上看到的一样。

(2) 丰富的元器件库。MultiSim 大大扩充了元器件库，包括基本元件、半导体器件、运算放大器、TTL 和 CMOS 数字 IC、DAC、ADC 及其他各种部件，且用户可通过元件编辑器自行创建或修改所需元件模型，还可通过 LIT 公司网站或其代理商获得元件模型的扩充和更新服务。

(3) 丰富的测试仪器。除数字万用表、函数信号发生器、双通道示波器、扫频仪、数字信号发生器、逻辑分析仪和逻辑转换仪外，MultiSim 还新增了瓦特表、失真分析仪、频谱分析仪和网络分析仪，所有仪器均可多台同时调用。

(4) 完备的分析手段。除了直流工作点分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析、噪声分析、失真分析、参数扫描分析、温度扫描分析、极点—零点分析、传输函数分析、灵敏度分析、最坏情况分析和蒙特卡罗分析外，MultiSim 还新增了直流扫描分析、批处理分析、用户定义分析、噪声图形分析和射频分析等，基本上能满足一般电子电路的分析设

计要求。

(5) 强大的仿真能力。MultiSim 既可对模拟电路或数字电路分别进行仿真,也可进行数模混合仿真,尤其是新增了射频(RF)电路的仿真功能。仿真失败时会显示出错信息,并提示可能出错的原因,而仿真结果可随时储存和打印。

思考与练习

1-1 试判断下列说法是否正确:

- (1) 电路理论中所研究的电路是实际电路。()
- (2) 电路理论中所研究的电路是电路模型。()
- (3) 电路图是用图形表达的实际电路的模型。()
- (4) 电路图是用图形表达的实际电路。()

1-2 自学 MultiSim 软件,并对图 1-1 的手电筒电路进行仿真。

第2章 电路定律

【内容提要】 本章介绍电路的基本变量电压、电流及其参考方向的概念，功率的计算方法，电阻、独立电源和受控电源等电路元件及基尔霍夫定律。

集总参数电路的各支路电压和支路电流既要受到元件特性造成的约束——元件约束，又要受由基尔霍夫定律体现出来的结构约束——拓扑约束。这两种约束关系是编写电路方程的基本依据，因此，只有深刻理解和掌握这两种约束关系，才能正确编写方程和求解响应。

2.1 基本变量

电流、电压、电荷、磁链、功率和能量是描述电路工作状态和元件工作特性的6个变量，它们一般都是时间的函数。其中电流和电压是电路分析中最常用的2个基本变量。本节着重讨论电流、电压及其参考方向问题，以及如何用电压、电流表示电路的功率和能量。

1. 电流及其参考方向

电子和质子都是带电的粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。所带电荷的多少称为电荷量，用 q 表示。在国际单位制(SI)中，电荷量的单位是库仑(符号是C， 6.24×10^{18} 个电子所具有的电荷量等于1库仑)。带电粒子的定向运动形成电流。为了表征和描述电流的大小，我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流，用符号 $i(t)$ ^①表示，即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (2-1)$$

电流是一个有方向的物理量。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向，也称为电流的真实方向。

如果电流的大小和方向都不随时间改变，这种电流称为恒定电流，简称直流，一般用大写字母 I 表示，但通常为了方便起见，也用小写字母 i 表示。在这种情况下，通过导体横截面的电荷量与时间成正比，即

$$i = I = \frac{q}{t} = \text{常数} \quad (2-2)$$

在国际单位制中，电流的单位为安培(简称“安”，符号为A，1安=1库/秒，即1A=1C/s)。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μ A)作为电流单位。它们的关系是

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

^① 本书通常把 $i(t)$ 、 $u(t)$ 、 $p(t)$ 等简写为 i 、 u 、 p 等。

在电路分析中,电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。但是对于一个给定的电路,要直接给出某一电路元件中电流的真实方向是十分困难的。如在交流电路中,电流的真实方向经常会改变,即使在直流电路中,要指出复杂电路中某一电路元件电流的真实方向也不是一件容易的事。在进行电路分析时,为了编写电路方程的需要,我们常常需要预先假设一个电流方向,这个预先假设的电流方向称为参考方向。如图 2-1 所示,箭头所表示的方向即电流 i 的参考方向。电流的参考方向可以任意选定,但一经选定,就不再改变。经过计算若求得 $i > 0$,则表示真实方向与参考方向一致; $i < 0$ 则表示真实方向与参考方向相反。

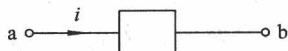


图 2-1 电流的参考方向

如图 2-1 所示,当 $i = 5 \text{ A}$ 时,表示电流的真实方向为 $a \rightarrow b$;当 $i = -5 \text{ A}$ 时,表示电流的真实方向为 $b \rightarrow a$ 。

在进行电路分析时,必须先标出电流的参考方向,方能正确进行方程的编写和求解,一般题目给出的电流方向均为参考方向。

只有规定了参考方向,电流的正负值才有意义,离开参考方向谈电流的正负值是无意义的。

2. 电压及其参考方向

电荷在电路中流动,就必然和电路元件进行能量交换,电荷在电路的某些部件(如电源)处获得能量,而在某些部件(如电阻元件)处失去能量。为描述和表征电荷与元件间交换能量的规模、大小,引入了“电压”这一物理量。

单位电荷由 a 点移动到 b 点,失去或得到的能量(电场力所作的功)称为 a 、 b 两点间的电位差,或 a 、 b 间的电压,即

$$u(t) = \frac{d\omega(t)}{dq(t)} \quad (2-3)$$

电压也是一个有方向的物理量。我们规定:当 dq 正电荷由 a 点移动到 b 点,若失去 $d\omega$ 的能量(电场力作正功),则 a 高 b 低,即 a 端为正、 b 端为负,如图 2-2(a)所示;反之,当 dq 正电荷由 a 点移动到 b 点,若得到 $d\omega$ 的能量(电场力作负功),则 a 低 b 高,即 a 端为负, b 端为正,如图 2-2(b)所示。

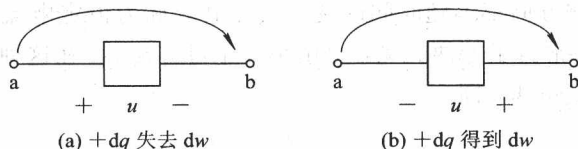


图 2-2 电压的定义

习惯上把电压降落的方向(从高电位指向低电位)规定为电压正方向,或电压的真实方向。通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极,也称为电压的真实极性。

如果电压的大小和方向都不随时间改变,则这种电压称为恒定电压或直流电压,一般用大写字母 U 表示,同样为了方便起见,也用小写字母 u 表示。在这种情况下,电场力所

作的功(交换的能量)与电荷量成正比,即

$$u = U = \frac{w}{q} = \text{常数} \quad (2-4)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏特(简称“伏”,符号为 V,1 伏=1 焦耳/库,即 1 V=1 J/C)。

同电流一样,为编写电路方程的需要,引入参考方向——预先假设的电压方向(也称参考极性)。电压参考方向的表示可以在电路图两端分别标上“+”、“-”极,如图 2-3 所示。也可用字母的下标表示,如 u_{ab} 表示电压的参考方向是 a 为“+”、b 为“-”。

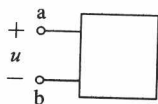


图 2-3 电压的参考方向

同理,若求解得到的 $u > 0$,则表示真实方向与参考方向一致;若 $u < 0$,则表示真实方向与参考方向相反。

在求解电路时,对一个二端元件而言,既要标注电流的参考方向,又要标注电压的参考方向,常常显得较为烦琐。为方便起见,我们常常采用关联参考方向,如图 2-4 所示,即沿着电流的参考方向就是电压从正到负的参考方向。本书若无特别说明,均采用关联参考方向。这样在电路中就只需要标出电流的参考方向或电压的参考极性,如图 2-5 所示。

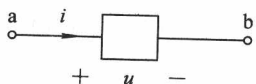


图 2-4 关联参考方向

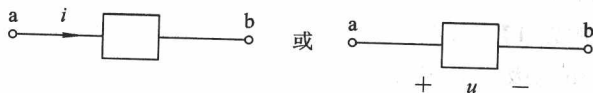


图 2-5 图 2-4 的简化图

与关联参考方向相反的称为非关联参考方向,如图 2-6 所示。

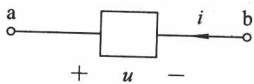


图 2-6 非关联参考方向

在今后的计算中,采用关联参考方向和非关联参考方向,公式中常差一个“-”号,这是应该特别注意的。

3. 功率

电路的基本功能之一是实现能量传输。为了描述和表征电荷和元件交换能量的快慢(速率),引入功率这个物理量。

单位时间内电荷得到或失去的能量称为功率,用 p 表示,即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (2-5)$$

由式(2-1)和式(2-3)得

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (2-6)$$

对图 2-7 所示的二端元件，电压、电流为关联参考方向，可用式(2-6)计算元件吸收的功率。

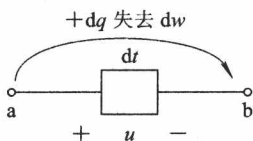


图 2-7 二端元件的功率

若二端元件的电压、电流采用图 2-6 的非关联参考方向，功率的计算公式应改写为

$$p(t) = -u(t) \cdot i(t) \quad (2-7)$$

若求出的功率值为正值，表示该二端元件吸收了功率；若求出的功率为负值，表示该二端元件提供了功率。

功率的计算式，即式(2-6)或式(2-7)，与元件的性质(线性或非线性、时变或非时变)和类型(电阻、电容、电感、独立电源)无关，因为在推导过程中并未涉及元件的性质和类型。

若二端电路为直流电路，则电路吸收的功率不随时间改变，式(2-6)和式(2-7)可分别改写为

$$p = ui = UI \quad (2-8)$$

$$p = -ui = -UI \quad (2-9)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特(简称“瓦”，符号为 W，1 瓦=1 焦耳/秒=1 伏·安，即 1 W=1 J/s=1 V·A)。

【例 2-1】 如图 2-8 所示，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 三部分电路吸收的功率 p_1 、 p_2 、 p_3 。

解

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

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

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

$p_1 + p_2 + p_3 = 0$ ，可见功率守恒。

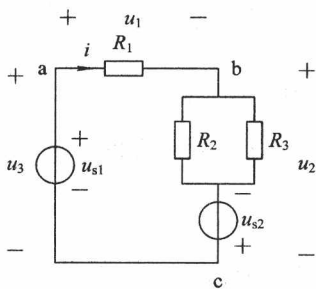


图 2-8 例 2-1 图

2.2 基尔霍夫定律

集总参数电路由集总元件相互连接而成，在阐述拓扑约束关系的基尔霍夫定律之前先来介绍支路、节点、回路和网孔等概念。

(1) 支路：电路中一个二端元件称为一条支路。

(2) 节点：电路中 2 条或 2 条以上支路的连接点称为节点。如图 2-9 所示电路共有 6 条支路，4 个节点。两节点间必有元件。注意 b 和 c 是同一个节点，e、f、g 和 h 也是同一个节点。

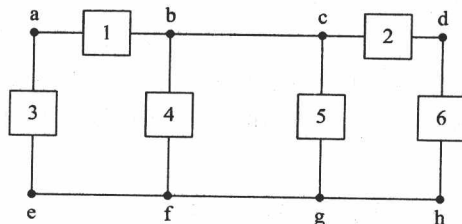


图 2-9 支路、节点的电路图

为了方便起见，也可以把几个串联元件合并在一起定义为一条支路；把 3 条或 3 条以上这样的支路连接点定义为节点。按此定义，图 2-9 中只有两个节点(b、e)，而 a 和 d 就不再是节点。

如果不特别注明，本书中的节点是指 3 条或 3 条以上支路的连接点。

(3) 回路：电路中任一闭合路径称为回路。如图 2-9 所示电路，共有 6 个回路，元件 1、3、4 和元件 1、3、6、2 均构成回路。

(4) 网孔：在平面电路中，内部不含支路的回路称为网孔。例如，元件 1、3、4 构成的回路是网孔，而元件 1、2、6、3 构成的回路就不是网孔，因为内部含有支路 4、5。

电路各支路电压、支路电流受到两种约束。一是元件本身特性对支路电压和电流的约束，如线性电阻的电压和电流必定满足欧姆定律，称为元件的伏安关系(VAR)约束，简称元件约束。二是元件连接方式、电路结构给各支路电压和支路电流带来的约束，这类约束与元件性质无关，称为拓扑约束。描述这类关系的就是基尔霍夫定律。上述两类约束关系是编写电路方程的基本依据。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律是指在集总参数电路中，任一时刻流入任一节点的所有支路电流的代数和等于零。它反映了集总参数电路中任一节点上各支路电流间的相互约束关系。

如图 2-10(a)所示，有

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (2-10)$$

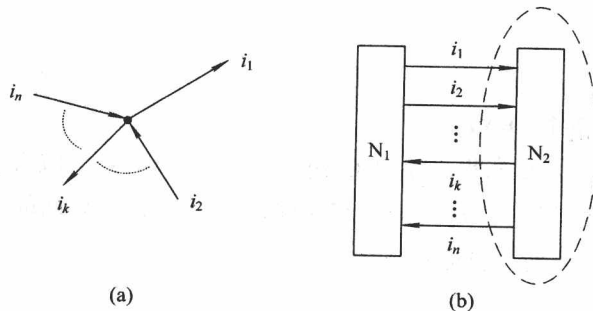


图 2-10 KCL 用图

KCL 实质上是电荷守恒定律在集总参数电路节点上的一种体现(节点上既不会有电荷的堆积,也不会有新的电荷产生)。可以将 KCL 从节点推广到任意闭合曲面上,如图 2-10 (b)所示,该闭合曲面可看成广义节点。此时式(2-10)同样成立。

在编写 KCL 方程时,首先要标出各支路电流的参考方向,若以流出节点的电流为正,则流入节点的电流为负。因此,在 KCL 方程中存在两套符号:一是方程每项电流系数的正负号(由电流参考方向是流入还是流出来决定);二是电流本身数值的正负号(由电流参考方向是否与真实方向一致决定)。所以建议初学者应该养成先列电路方程,再代入数值的习惯。

【例 2-2】 如图 2-11 所示电路,已知 $i_1 = 4 \text{ A}$, $i_2 = 7 \text{ A}$, $i_4 = 10 \text{ A}$, $i_5 = -2 \text{ A}$, 求 i_6 。

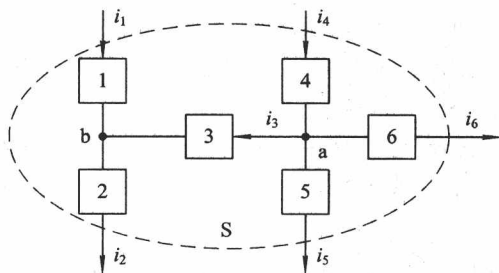


图 2-11 例 2-2 图

解 方法一 由节点 b 有 KCL:

$$i_1 + i_3 - i_2 = 0$$

故

$$i_3 = i_2 - i_1 = 7 - 4 = 3 \text{ A}$$

由节点 a 有 KCL:

$$i_4 - i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

故

$$i_6 = i_4 - i_3 - i_5 = 10 - 3 - (-2) = 9 \text{ A}$$

方法二 利用广义节点,作闭合曲面 S。有 KCL:

$$i_1 + i_4 - i_2 - i_5 - i_6 = 0$$

故

$$i_6 = i_1 + i_4 - i_2 - i_5 = 4 + 10 - 7 - (-2) = 9 \text{ A}$$

2. 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律是指在集总参数电路中,任时刻沿任一回路的所有支路电压降的代数和等于零。它反映了集总参数电路中任一回路中各支路电压间的相互约束关系。

如图 2-12 所示,其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (2-11)$$