

高等学校教材

电路分析基础

王应生 主编 周茜 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材

电路分析基础

王应生 主 编
周 茜 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统论述了电路分析中的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共 14 章,内容包括:电路分析的基本概念、线性电路的基本分析方法、电路的等效变换、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、交流动态电路、相量模型和相量方程、正弦稳态的功率和能量、电路的频率响应、三相电路、耦合电感和理想变压器、双口网络等,另有 4 个附录。每章节都有较多精选的例题和习题。

本书论述条理清楚,系统性强,注意联系实际,深入浅出,便于自学。

本书适用面宽,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。

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/王应生主编,周茜副主编. —北京:电子工业出版社,2003.8

高等学校教材

ISBN 7-5053-8940-8

I. 电... II. ①王...②周... III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 063634 号

责任编辑:龚立堇

印 刷:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:550 千字

版 次:2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

“电路分析基础”是高等工科院校电子信息类专业本科生的一门重要专业基础课。其内容是研究非时变集总参数电路分析的基本理论和方法。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实际动手能力,为后续课程的学习打好基础。

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,参考学时数为64学时。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”,并注意了与“高等数学”、“大学物理”等先修课程及“信号与系统”、“模拟电子电路”等后续课程的分工、衔接和配合。在文字叙述上力求简洁明了,通俗易懂。考虑到教材的通用性,本书编写了“三相电路”一章供强电类专业学生学习使用(弱电类专业可不讲)。本书每节精选了一些思考与练习题,帮助学生加深对所学内容的理解。各章都有较丰富的习题和参考答案,以利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书由桂林电子工业学院通信与信息工程系电子工程教研室的教师们,积20余年教学之经验编写而成。由王应生教授担任主编,周茜老师担任副主编。王应生教授编写了第2, 3, 4, 5, 6章;周茜老师编写了第8, 9, 10, 11, 13章;徐亚宁老师编写了第12, 14章;邓碧玲老师编写了第1, 7章;周茜老师编写了全部的思考练习题和习题,并做了全部习题和思考题答案。苏启常老师和刘超老师参加了教材编写的讨论并提供了相关的资料。全书由王应生统稿。

在本书的编写工作中,得到了通信与信息工程系领导和电子工程教研室全体教师的支持,王渝老师对本书的出版给予了关心和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中定有一些疏漏之处,恳请批评指正。

2003年6月

目 录

绪 论	1
第 1 章 电路分析的基本概念	3
1.1 实际电路和电路模型	3
1.2 电路分析中的基本变量	4
1.3 基尔霍夫定律	8
1.4 电阻元件	12
1.5 独立电源	13
1.6 受控电源(受控源)	17
习题	20
第 2 章 线性电路的基本分析方法	24
2.1 支路分析法	24
2.2 网孔分析法	27
2.3 节点分析法	31
2.4 独立电路变量的选择与独立方程的确定	35
2.5 回路分析法和割集分析法	39
2.6 电路的对偶特性与对偶电路	44
习题	46
第 3 章 电路的等效变换	53
3.1 引言	53
3.2 单口网络(二端网络)的等效概念	53
3.3 电源模型的等效变换	57
3.4 T- Π 变换	60
3.5 含运算放大器的电路分析	64
习题	69
第 4 章 网络定理	75
4.1 引言	75
4.2 叠加定理	75
4.3 置换定理(替代定理)	80
4.4 戴维南定理	83
4.5 诺顿定理	86
4.6 最大功率传输定理	88
4.7 特勒根定理	89
4.8 互易定理	92

习题	95
第 5 章 电容元件与电感元件	102
5.1 电容元件	102
5.2 电感元件	107
5.3 电容器和电感器的电路模型	109
5.4 换路定理及初始值计算	110
5.5 动态电路分析	114
习题	115
第 6 章 一阶电路分析	119
6.1 一阶电路的零输入响应	119
6.2 一阶电路的零状态响应	124
6.3 全响应	129
6.4 三要素分析法	133
6.5 阶跃函数与阶跃响应	137
习题	141
第 7 章 二阶电路分析	148
7.1 LC 电路中的正弦振荡	148
7.2 RLC 串联电路的零输入响应	150
7.3 二阶电路分析示例	154
习题	157
第 8 章 交流动态电路	160
8.1 引言	160
8.2 正弦电压和电流	160
8.3 正弦 RC 电路分析	164
8.4 正弦信号的相量表示	166
8.5 用相量法求正弦稳态响应	172
习题	173
第 9 章 相量模型和相量方程	177
9.1 KCL 和 KVL 的相量形式	177
9.2 R、L、C 元件 VAR 的相量形式	180
9.3 阻抗和导纳——相量模型	184
9.4 正弦稳态电路的分析	190
习题	200
第 10 章 正弦稳态的功率和能量	206
10.1 基本元件的功率和能量	206
10.2 二端网络的功率和能量	211
10.3 复功率和最大功率传输定理	217
10.4 正弦稳态功率的叠加	222
习题	225
第 11 章 电路的频率特性	230

11.1 电路的频率响应·····	230
11.2 一阶 RC 电路的频率特性·····	233
11.3 RLC 串联谐振电路·····	235
11.4 GLC 并联谐振电路·····	240
习题·····	242
第 12 章 三相电路 ·····	246
12.1 三相电路概述·····	246
12.2 三相电源和负载的连接·····	247
12.3 对称三相电路的分析·····	249
习题·····	253
第 13 章 耦合电感和理想变压器 ·····	256
13.1 耦合电感元件·····	256
13.2 耦合电感的去耦等效·····	262
13.3 含耦合电感电路的分析·····	269
13.4 理想变压器·····	273
13.5 实际变压器模型·····	279
习题·····	281
第 14 章 双口网络 ·····	288
14.1 双口网络的基本概念·····	288
14.2 网络的端口方程和参数·····	289
14.3 各网络参数间的关系·····	296
14.4 用网络参数进行网络分析·····	298
习题·····	300
附录 ·····	305
附录 A 线性联立方程组的求解·····	305
附录 B 复数·····	316
附录 C 三角恒等式简表·····	320
附录 D 证明 $m = b - (n - 1)$ 个网孔·····	321
部分习题答案 ·····	322
参考文献 ·····	333

绪 论

从工程技术的观点看,电是一种能量形式和信息载体,因为它具有容易变换、容易传输和容易控制的特点而倍受人们的青睐。电的理论基础是电磁学和电子学。

1820 年安培发现电磁效应,1931 年法拉第揭示了电磁感应原理为电磁学奠定了基础。到 19 世纪 60 年代,“麦克斯韦建立了统一的电磁理论。电动机出现于 19 世纪 30 年代后期,电报发明于 1837 年,电话发明于 1876 年,而无线电通信则始于 1895 年。

19 世纪末,洛伦兹建立了古典电子理论,随之而来的是电子技术的迅猛发展。从器件上说,是 1906 年出现电子三极管,1948 年发明晶体三极管;从系统上看,第一家无线电广播电台于 1920 年在匹兹堡开播,第一家电视台于 1935 年由英国广播公司(BBC)建成,第一台电子计算机 1946 年诞生于美国宾州大学。

20 世纪是电气化的世纪,特别是 20 世纪后半叶电技术的各个领域,都取得了惊人的进展,各种新型电子器件的出现和电子计算机的冲击,推动着一场技术革命的飞速发展。而在高新技术的各个领域里,电技术依然是一个重要的技术基础。

电的应用,无论是能量转换或信息处理,都要由电器来实现。其中除了电磁和电子的过程外,还涉及声、光、热、化等物理现象,但它们都与电相联系。从电的观点看,可以把电器件的特性归结为电流和电压的关系,有时还要用到磁链、电荷的概念。也就是说,电器件的特性用其外部的电流和电压(有时还用磁链和电荷)的关系来表征。实际应用的电器件种类繁多,功能各异。从其基本功能出发,把能够输出电能或电信号的器件,如电池、发电机和各种信号源等统称为电源;把要求输入电能和电信号的器件,例如电灯、电动机和各种收信设备等统称为负载。此外,还有用来传输、变换、控制和量测电能和信号的电器件,诸如电缆、变压器、开关和电表等。

电源和负载通过电器件连接构成电路,用以实现电能和电信号的技术应用。简言之,电路就是由电器件互连而成的电流通路。电的技术应用愈来愈发展,电路也愈来愈复杂,但作为电路都要分析计算其中各部分的电压与电流的关系。

电路理论是研究电路普通规律的一门科学,它的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:其一,电路分析,它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(或激励)与输出(或响应)之间的关系,并求解和分析输出(或响应)。如图 0-1 所示的手电筒电路,如果 U_s , R_s , R_L 已知,求流过灯泡(负载)的电流 I_L 和它

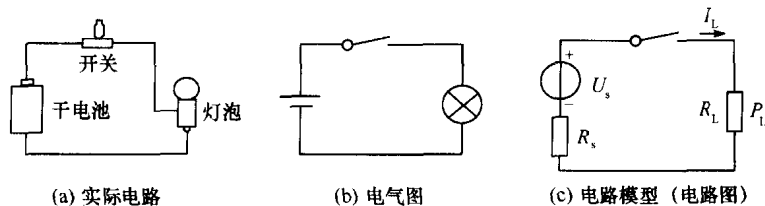


图 0-1 手电筒电路

消耗的功率 P_L 就属此范畴。电路分析所研究的课题也可用图 0-2 的框图表示。其二，电路综合，它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。本书将要研究的只是电路分析的基础理论，具体电路只涉及到线性集总参数元件所组成的非时变电路。

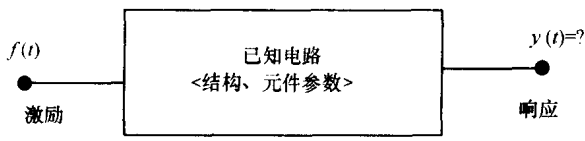


图 0-2 图 0-1 的框图表示

我们把由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路，在此电路中，任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。

应该指出，用集总电路来近似代替实际电路是有条件的，即电路器件及其整个实际电路的尺寸 l 远小于电路最高工作频率所对应的波长 λ 。可写成

$$l \ll \lambda$$

式中， $\lambda = c/f$ ； $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ (光速)。

例如，我国电力系统照明用电的频率为 50Hz，其波长为 6000km，对于大多数用电设备来说，其尺寸与之相比可忽略不计，采用集总参数概念是合适的。而对远距离的通信线路和电力输电线路则不满足上述条件，因此也就不能用集总参数来分析。又如在微波电路中，信号的波长 $\lambda = 0.1 \sim 10\text{cm}$ ，此时波长和元件尺寸属同一数量级，信号在电路中的传输时间不能忽略，电路中的电压、电流不仅是时间的函数，也是空间位置的函数(如天线)，这时应当采用分布参数或电磁场理论来分析。

集总假设是本书最主要的假设，以后所述的电路基本定律均是在这一假设的前提下才能使用的。

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。线性电路的方程是线性代数方程或线性微分(积分)方程。不能用线性方程描述其特性的电路称为非线性电路。线性电路已有比较成熟的理论，非线性电路近年来有很大进展，成为非常活跃的研究领域。另外，电路按其参数是否随时间变化又分为非时变(时不变)与时变两类。我们所涉及的大多数电路一般都可近似为非时变电路，而时变参数电路又是一个专门研究的领域。

电路分析基础是通信、信息工程、计算机、自控等电子类专业的主干技术基础课。要通过本课程的学习使学生掌握电路的基本理论、分析计算电路的基本方法和进行实验的基本技能，为后续课程准备必要的电路知识。其中许多重要概念要求透彻理解，不少基本分析方法要求牢固掌握。

该课程不仅理论体系严谨，内容引人入胜，而且会从中学会一种思维方法，养成一种科学作风，使人终生受益。

第 1 章 电路分析的基本概念

内 容 提 要

本章介绍电路模型的概念,电压、电流参考方向的概念,吸收和释放功率的表达式和计算公式。还将介绍电阻、独立电源和受控源等电路元件及基尔霍夫定律。

集总参数电路中的各条支路电压和支路电流既要受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。两种约束关系是编写电路方程的基本依据。只有深刻理解和掌握两种约束关系,才会正确编写方程和求解响应。

1.1 实际电路和电路模型

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

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,用一个足以表征其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)是用数学关系式严格定义的假想元件。每一种理想元件都可以表示实际部件所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 1-1 所示为三种基本理想电路元件的图形符号。其中,理想电阻元件仅表征消耗电能并转变成非电能的特征;理想电容元件仅表征储存或释放电场能量的特征;理想电感元件仅表征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。

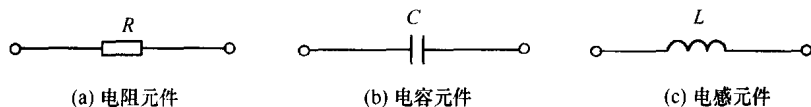


图 1-1 三种基本电路元件的图形符号

上述三种理想电路元件均具有两个端钮,称为二端元件,又称单口元件。除二端元件外,还有多端元件。以后要讲到四端元件,如受控源、耦合电感、变压器等。

理想元件或理想元件的组合称电路模型。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并不是实际电路,而是它的数学模型——电路模型。实际电路的模型化首先是实际部件的模型化。任何一种实际部件视其不同的工作条件总可用一个或几个

理想元件的组合来近似表征它，一种电路模型只在一定的条件下才适用；条件变了，电路模型也要相应改变。可见在不同的条件下，同一实际部件可能采用不同的模型。模型选取恰当，对电路的分析和计算结果就与实际情况相接近，模型选取不恰当，则会造成很大误差，有时甚至导出自相矛盾的结果。如果模型取得太复杂就会造成分析的困难。反之，如果取得太简单，就不足以反映所需求解的真实情况，所以建模问题需要注意。

思考与练习

- 1.1-1 你能说出实际电路与电路模型的区别和联系吗？
- 1.1-2 为何要建立实际电路的电路模型？建立电路模型的依据是什么？
- 1.1-3 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 电路分析中的基本变量

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、电压的参考方向问题，以及如何用电流、电压表示电路的功率和能量。

1.2.1 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。所带电荷的多少叫电量，在国际单位制(SI)中，电量的单位是库仑(符号是 C, 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于 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量定义为电流强度，简称电流，用符号 $i(t)$ 表示，即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

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。在这种情况下，通过导体横截面的电荷量 q 与时间 t 成正比，即

$$I = q/t \quad (1-2)$$

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 $1\text{A} = 1\text{C/s}$ 。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μA)作为电流单位。它们的关系是

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

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

电流是一个有方向的物理量，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，如交流电路中电流的真实方向经常在改变，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叫做参考方向,如图 1-2 所示。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 $i > 0$ 时,表示真实方向和参考方向一致; $i < 0$ 则表示真实方向和参考方向相反。

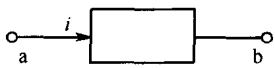


图 1-2 电流的参考方向

如图 1-2 所示,当 $i = 5\text{A}$ 时,表示电流的真实方向从(a→b);当 $i = -5\text{A}$ 时,表示电流的真实方向从(b→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,题目中给出的电流方向均是参考方向。

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。

1.2.2 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“电压”这一物理量。

单位正电荷由 a 点移到 b 点时,失去或得到的能量(或电场力所做的功)称为 a, b 两点间的电位差,即 a, b 间的电压,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

电压也是一个有方向的物理量。我们规定: dq 正电荷由 a 移到 b,若失去 dW 的能量,则 a 高 b 低,即 a 端为正, b 端为负,如图 1-3(a) 所示。反之, dq 正电荷由 a 移到 b,若得到 dW 的能量,则 a 低 b 高,即 a 端为负, b 端为正,如图 1-3(b) 所示。

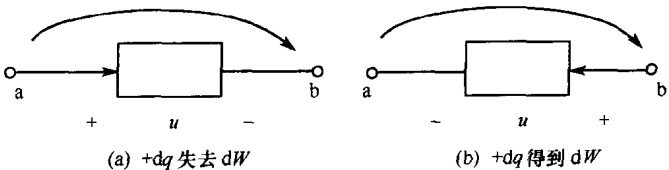


图 1-3 电压的定义

习惯上把电位降落的方向(从高电位指向低电位)规定为电压的方向。通常电压的高电位端标为“+”极,低电位端标为“-”极。

如果电位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。在这种情况下,电场力所做的功(交换的能量)与电荷量成正比,即

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏特(简称“伏”,符号为 V)。

同电流一样,为编写电路方程的需要,引入参考方向——预先假设规定的电压方向(也称参考极性)。

同样若求解得到的 $u > 0$,表示真实方向和参考方向相同;若要求解得到的 $u < 0$,表示真实方向和参考方向相反。

在求解电路时,对一个二端元件而言,即要标注电流的参考方向,又要标注电压的参考

方向，常显得较为烦琐。为方便起见，我们常常采用关联的参考方向，如图 1-4 所示。即沿着电流的参考方向就是电压从正到负的方向。这样在电路中就只需标出电流的参考方向或电压的参考极性，如图 1-5 所示。

与关联参考方向相反的是非关联参考方向，如图 1-6 所示。

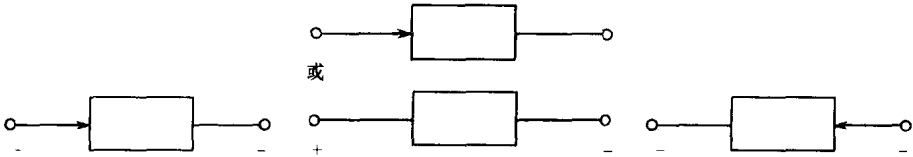


图 1-4 关联参考方向 图 1-5 图 1-4 简化 图 1-6 非关联参考方向

对独立电源，我们常采用非关联的参考方向。在今后的计算中，采用关联方向或非关联方向，公式中常差一个“-”号，这是应该特别注意的。

1.2.3 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)，我们引入功率这个物理量。

单位时间内，电荷失去或得到的能量称为功率，用 p 表示，即

$$p = \frac{dW}{dt} \tag{1-5}$$

由式(1-1)和式(1-3)，得

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \tag{1-6}$$

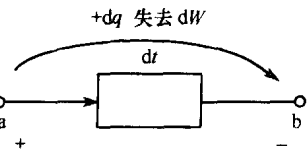


图 1-7 二端元件的功率

对图 1-7 所示的二端元件，可用式(1-6)计算元件吸收的功率。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，表示该二端电路提供(释放)了功率。

若二端元件的电压、电流采用图 1-6 所示的非关联参考方向，可把电压或电流视为关联参考方向时的负值，故

功率的计算公式应改写为

$$p = - u(t)i(t) \tag{1-7}$$

根据电压、电流是否为关联参考方向，可分别选用相应的功率计算公式(1-6)或式(1-7)，若计算出的功率为正值，均表示吸收了功率；若计算出功率为负值，均表示提供了功率。

功率的计算式(1-6)或式(1-7)与元件的类型(线性或非线性；时变或非时变)和性质(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类型和性质。

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(1-6)和式(1-7)可分别改写为

$$P = UI \tag{1-8}$$

$$P = - UI \tag{1-9}$$

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特(简称“瓦”, 符号为 W, $1 \text{ W} = 1 \text{ 焦耳} / \text{秒} = 1 \text{ 伏} \cdot \text{安}$, 即 $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ VA}$)。

[例 1-1] 电路如图 1-8 所示, 已知某时刻 ab 端钮上的电流 $i = 1 \text{ A}$, $u_1 = 3 \text{ V}$, $u_2 = 7 \text{ V}$, $u_3 = 10 \text{ V}$, 求 ab, bc, ca 三部分电路吸收的功率 p_1 , p_2 , p_3 。

解: $p_1 = u_1 \cdot i = 3 \times 1 = 3 \text{ W (吸收)}$
 $p_2 = u_2 \cdot i = 7 \times 1 = 7 \text{ W (吸收)}$
 $p_3 = -u_3 \cdot i = -10 \times 1 = -10 \text{ W (提供)}$
 $p_1 + p_2 + p_3 = 0 \text{ (功率守恒)}$

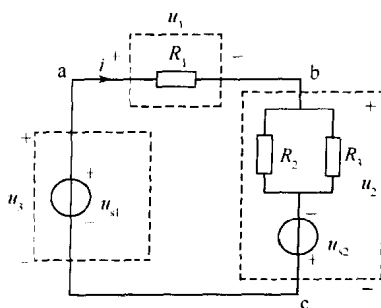


图 1-8 [例 1-1] 图

思考与练习

1.2-1 为何要对电路中的电流、电压设参考方向?

1.2-2 什么叫关联参考方向和非关联参考方向? 在 u , i 参考方向关联和非关联条件下, 你能总结出计算元件产生(释放)功率的公式吗(将之与吸收功率公式进行比较)?

1.2-3 试判断下列说法是否正确。

- (1) 对图示电路所设的电压、电流参考方向是关联的。
- (2) 对图示电路所设的电压、电流参考方向是非关联的。
- (3) 对图示电路所设的电压、电流参考方向针对于 A 来说是非关联的; 对于 B 却是关联的。

(4) 电路中两点间的电压等于该两点间的电位差。因电位是随参考点而改变的, 所以两点间的电压亦随参考点不同而改变。

(5) 电路中某点的电位虽然随参考点而改变, 但两点间的电位差是不随参考点变化而变化的, 因此两点间电压是确定值。

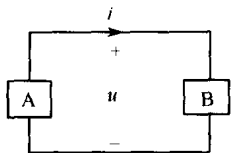
1.2-4 如图示元件 A 产生功率为 5W, 则电流 I 为

- (1) 2A (2) -2A (3) 0.5A (4) -0.5A

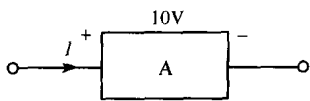
[答案:(4)]

1.2-5 图中元件的端电流为 $i = \begin{cases} 0 \text{ A} & t < 0 \\ 20e^{-500t} \text{ A} & t \geq 0 \end{cases}$, 试求进入元件上端的全部电荷。

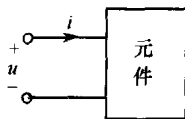
[答案: $400 \mu\text{C}$]



练习题 1.2-3 图



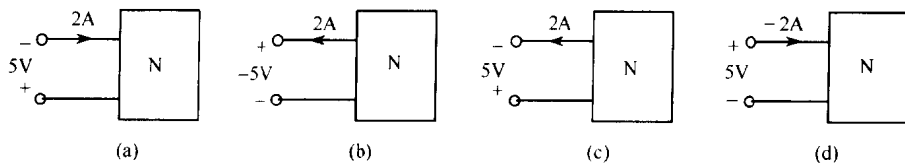
练习题 1.2-4 图



练习题 1.2-5 图

1.2-6 试求图示各网络吸收或产生的功率。

[答案:(a) 产生 10J (b) 产生 -10J (c) 产生 -10J (d) 产生 10J]



练习题 1.2-6 图

1.3 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，有必要介绍支路、节点、回路和网孔等概念。

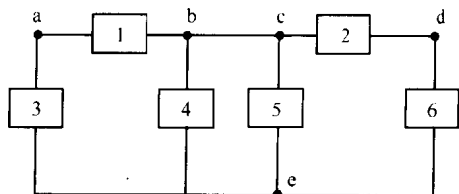


图 1-9 说明支路、节点的电路图

支路：电路中一个二端元件称为一条支路。

节点：电路中 2 条或 2 条以上支路的连接点称为节点。如图 1-9 所示电路共有 6 条支路，4 个节点。注意 b, c 是同一个节点。

为了方便，也可以把几个串联元件合并在一起定义为一条支路，把几个并联元件合并在一起定义为一条支路；把 3 条或 3 条以上这样支路的

连接点定义为节点。按此定义，图 1-9 中只有 3 条支路(1-3, 4-5, 2-6)，2 个节点(b 或 c, e)，而 a 和 d 就不再是节点。

回路：电路中任一闭合路径称为回路。如图 1-9 所示共有 6 个回路。如元件 1, 3, 4；元件 1, 3, 6, 2 均构成回路。

网孔：在平面电路中，内部不含支路的回路称为网孔，如图 1-9 所示共有 3 个网孔。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，因为内部含有元件 4, 5。

电路的性能取决于本身的几何结构和元件特性，而与支路在空间的位置无关。电路一经给定，各支路电压、支路电流必然受到两种约束。一是元件本身特性对本支路电压和电流的约束。如线性电阻元件的电压和电流必定满足欧姆定律，两者不能同时自由选择，这类约束与电路结构无关，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流和支路电压带来的约束，这类约束与元件性质无关，称为拓扑约束。描述这类约束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。

1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律反映了电路中任一节点上的各支路电流间的相互约束关系。表述如下：

在集总参数电路中，任一时刻流经任一节点的所有支路电流的代数和等于零。

如图 1-10(a) 所示，有

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

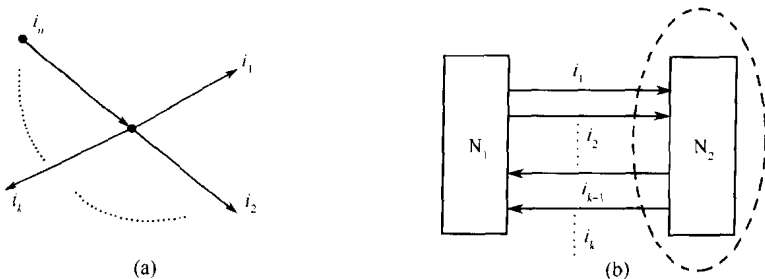


图 1-10 KCL 用图

式(1-10)表明:

(1)KCL 给节点上的支路电流加了一个线性的代数约束关系,故支路电流不是独立的变量集。

(2)KCL 与元件的性质、类型无关。

(3)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),因此可以把 KCL 从一个节点上推广到闭合曲面上,如图 1-10(b) 所示。此时式(1-10) 同样成立。

(4)要注意编写 KCL 方程中的两套符号。一类是方程每项电流系数的正负号,另一类是电流自身的正负号。

[例 1-2] 如图 1-11 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_3, i_6 。

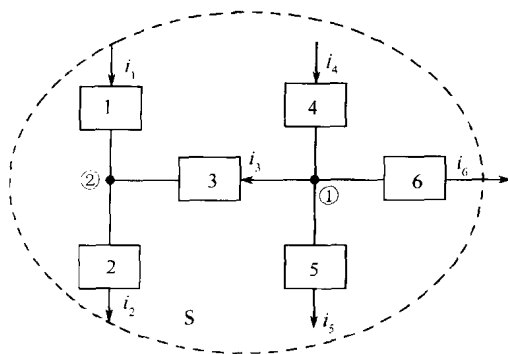


图 1-11 [例 1-2] 图

解:

对节点 ② 有

$$-i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

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

对节点 ① 有

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

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

若作封闭曲面 S, 有

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

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

1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律反映了电路中任一回路中各支路电压间的相互约束关系。表述如下:

在集总参数电路中，任一时刻沿任一回路的所有支路电压的代数和等于零。
其数学表达式为

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

式(1-11)表明：

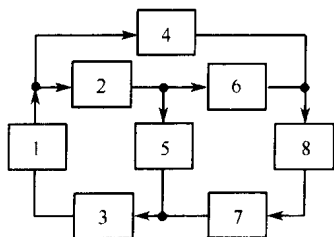


图 1-12 KVL 用图

(1) KVL 给回路中的支路电压加了一个线性的代数约束关系，故支路电压不是独立的变量集。

(2) KVL 与元件的性质、类型无关。

(3) KVL 实质上是能量守恒定律在集总参数电路中的一种体现， dq 的电荷沿闭合路径绕行一周，电荷本身既不会产生能量，也不会吸收能量。

(4) KVL 是电压的单值性定理。如图 1-12 所示，有

$$u_1 + u_2 + u_5 + u_3 = 0$$

$$u_6 + u_8 + u_7 - u_5 = 0$$

$$u_5 = -u_1 - u_2 - u_3 = u_6 + u_8 + u_7$$

即计算电路中任意两点的电压，与绕行路径无关，应学会根据 KVL，求任意两点间的电压。

(5) 要注意编写 KVL 方程中的两套符号。一类是方程每项电压系数的正负号，另一类是电压自身的正负号。

最后指出，KCL 和 KVL 确定了电路中支路电流间和支路电压间的约束关系。这种约束关系只与电路的连接方式有关而与支路元件的性质无关。所以无论电路由什么元件组成，也无论元件是线性还是非线性，时变还是非时变的，只要是集总参数电路，基尔霍夫这两个定律总是成立的。

[例 1-3] 如图 1-13 电路，求 a 点的电位 $U_a = ?$

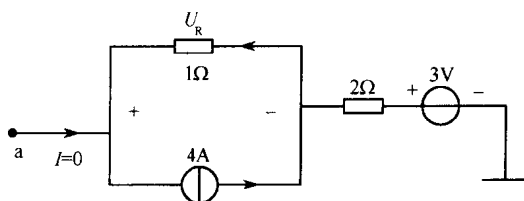


图 1-13 [例 1-3] 图

解： $U_a = -1 \times 4 + 0 + 3 = -1 \text{ V}$

[例 1-4] 如图 1-14 电路，求 $U_a = ?$

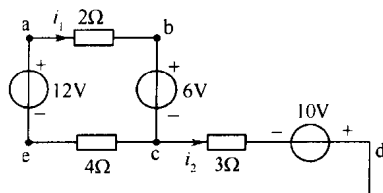


图 1-14 [例 1-4] 图

解：因为 $i_2 = 0$