



数模电路应用基础 (上册)

主 编 王莉君
副主编 董 昕 钟耀霞

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

数模电路应用基础 (上册)

主 编 王莉君
副主编 董 昕 钟耀霞

内 容 简 介

《数模电路应用基础》基于 CDIO 工程教育模式编写,主要解决我国工科教育实践中重理论轻实践的问题,帮助学生理论联系实际,以项目为主体,带动能力培养。

《数模电路应用基础》教材分为上册、中册和下册三本。本书为上册。本书中第 1 章描述集总电路分析基础;第 2 章分析电阻电路;第 3 章进行动态电路的时域分析;第 4 章分析正弦稳态电路;第 5 章介绍模拟电路基础知识。具体内容有集总电路中的两类约束关系、运用独立电流与电压变量的分析方法、叠加定理、等效变换、电容和电感元件、一阶电路、正弦稳态分析、正弦稳态的能量和功率、二极管、晶体管等。配合正文有丰富的习题,书末附有部分习题参考答案。

本书可作为高等学校电信、通信、计算机、测控等电类专业电路理论课程教材,也可供有关科技人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

数模电路应用基础. 上/王莉君主编. —北京:北京理工大学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-5682-2649-3

I. ①数… II. ①王… III. ①数字电路—高等学院—教材②模拟电路—高等学院—教材 IV. ①TN711.5②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 170671 号

出版发行 /北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 /北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 /100081

电 话 /(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 /<http://www.bitpress.com.cn>

经 销 /全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 /787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 /12

字 数 /282 千字

版 次 /2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价 /40.00 元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前

言

《数模电路应用基础》这套教材是“电路分析基础”“数字电子技术基础”“模拟电子技术基础”三门课程内容的融合。教材以 CDIO 工程教育的理念创新、优化教学内容，并突出实际工程能力，内容既注重基本概念、基本原理的介绍和讲解，又强调实际应用。

教材《数模电路应用基础》分为上册、中册、下册 3 本共 15 章。上册 5 章，内容包括集成电路分析基础、电阻电路分析、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的相量分析、模拟电路基础知识；中册 5 章，内容包括放大电路基础、放大电路中的反馈、集成运算电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路和 555 定时器及其应用；下册 5 章，内容包括数模电路基础实验、数模电路应用实验和数模电路仿真实验。

本书为上册。其中，第 1 章由董昕执笔；第 2~4 章由王莉君执笔；第 5 章由钟耀霞执笔。全部编写工作都是在董昕教授的亲自组织与具体指导下完成。

各兄弟高校提出了不少宝贵意见，谨致以衷心的感谢。在教材的试用过程中，很多教师和学生提出了有益的意见和建议，在此深表谢意。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，请读者提出宝贵意见，以便今后改进。

目 录

第 1 章 集总电路分析基础	1
1.1 实际电路和电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.2.1 电流和电流的参考方向	2
1.2.2 电压和电压的参考方向	3
1.2.3 功率	5
1.3 基尔霍夫定律	6
1.3.1 基尔霍夫电流定律	7
1.3.2 基尔霍夫电压定律	8
1.4 电阻元件	10
1.4.1 二端电阻	10
1.4.2 线性电阻	11
1.5 独立电压源和独立电流源	14
1.5.1 电压源	14
1.5.2 电流源	16
1.6 受控电源	18
实用实例	20
本章小结	21
习题一	21
第 2 章 电阻电路分析	26
2.1 分解方法及单口网络	26
2.2 电路的等效变换	27
2.2.1 不含独立源电阻单口网络的等效	28
2.2.2 含独立源电阻单口网络的等效	35
2.3 两类约束和电路方程	40
2.4 运用独立电流、电压变量的分析方法	41
2.4.1 网孔分析法	41
2.4.2 节点分析法	45
2.4.3 回路分析法	49
2.5 叠加定理	50
2.6 戴维南定理和诺顿定理	53
2.6.1 戴维南定理	53
2.6.2 诺顿定理	56

2.6.3 用单口等效电路简化电路分析	60
2.6.4 最大功率传输定理	61
实用实例	64
本章小结	66
习题二	67
第 3 章 动态电路的时域分析	73
3.1 动态元件	74
3.1.1 电容元件	74
3.1.2 电感元件	78
3.2 动态电路的方程	82
3.3 开关电路的初始条件	84
3.4 一阶电路的零输入响应	87
3.4.1 RC 电路的零输入响应	87
3.4.2 RL 电路的零输入响应	90
3.5 一阶电路的零状态响应	93
3.5.1 RC 电路的零状态响应	93
3.5.2 RL 电路的零状态响应	97
3.6 一阶电路的完全响应	100
3.6.1 完全响应	100
3.6.2 一阶电路的三要素法	102
实用实例	107
本章小结	108
习题三	108
第 4 章 正弦稳态电路的相量分析	113
4.1 正弦电压和电流	113
4.2 相量分析法基础	117
4.2.1 正弦 RC 电路的分析	117
4.2.2 正弦量的相量表示	118
4.2.3 用相量法求解微分方程的特解	120
4.2.4 复数的复习	121
4.3 两类约束的相量表达形式	125
4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	125
4.3.2 三种基本元件伏安关系的相量形式	127
4.3.3 阻抗与导纳 欧姆定律的相量形式	130
4.4 正弦稳态的相量分析	131
4.4.1 正弦稳态相量分析基础	131
4.4.2 一般正弦稳态电路分析	133

4.5 正弦稳态电路的功率	144
4.5.1 瞬时功率和平均功率	144
4.5.2 复功率	150
4.5.3 最大功率传输定理	152
实用实例	154
本章小结	155
习题四	156
第 5 章 模拟电路基础知识	161
5.1 半导体基础	161
5.1.1 本征半导体	161
5.1.2 本征半导体的导电机理	162
5.2 二极管	166
5.2.1 二极管的结构	166
5.2.2 二极管的伏安特性	167
5.2.3 二极管的等效电路	168
5.2.4 稳压二极管	170
5.3 晶体管	171
5.3.1 晶体管的结构及类型	172
5.3.2 晶体管的电流放大作用	172
5.3.3 晶体管的共射特性曲线	173
5.3.4 晶体管的主要参数	174
实用实例	176
本章小结	177
习题五	177
部分习题参考答案	180
参考文献	186

第 1 章 集总电路分析基础

本章介绍

本章介绍电路的各个电量（电流、电压、功率）和电量遵循的定律以及几种电路元器件（电流源、电压源、电阻和受控源）。重点阐明电路中电流、电压受到的两类约束，一类是来自元件互联形式的约束，即基尔霍夫定律；另一类是来自元件性质的约束，即元件的伏安关系。它们是解决集总电路问题的基本依据。

本章学习目标

1. 理解电流、电压、功率的定义与单位。
2. 掌握功率的计算，区别电路元件是吸收功率还是产生功率。
3. 掌握基尔霍夫定律。
4. 理解独立电压源和独立电流源及其主要特征。
5. 掌握欧姆定律的应用。
6. 掌握简单电路的电流、电压和功率的求解方法。

1.1 实际电路和电路模型

由电阻器、电容器、线圈等实际部件相互连接组成的电路称为实际电路。人们日常生活中常用的手电筒就是一个最简单的电路。它由干电池、灯泡、开关和连接导体（手电筒壳）组成。其实际电路如图 1-1（a）所示。干电池为电路提供电能；灯泡是用电器件，称为负载；连接导体使电流构成通路。各种电器件可以用图形符号表示，采用我国国家标准中的图形符号可以绘制出各元件联接的电气图，如图 1-1（b）所示。

实际部件除完成本身主要呈现的性能外，常常还附带表现出其他性能。例如，实际电源具有内阻，不能保持恒值电压；实际电阻器在有电流流过时会产生磁场，具有电感的性质；联接导体还具有电阻，甚至还有电感的性质。这给分析带来一定的困难。因此，对实际部件须加以理想化，忽略它的次要性质。例如，将干电池看作一个理想的电压源，内阻可以忽略不计；将灯泡看作一个理想电阻元件，忽略其电感特性；将连接导体也看作理想导体，其电阻完全可以忽略不计。于是，这些理想元件构成了手电筒电路模型，如图 1-1

(c) 所示。本课程分析的对象是模型而不是实际电路。

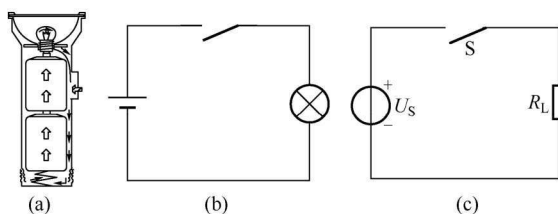


图 1-1 手电筒电路

(a) 实际电路；(b) 电气图；(c) 电路模型

电路模型由实际电路的主要性能抽象而成，构成性能单一化的元件，它近似地反映实际电路的电气特性。电路模型由一些理想电路元件用理想导线连接而成。用不同特性的电路元件按照不同的方式连接就构成不同特性的电路。由于每一个电路元件的端口电压和电流之间具有确定的数学关系，因此给出电路模型就给出了数学模型。对于电路模型，可以用简单的数学式子加以定义，再利用数学式子对电路模型进行分析计算来预测实际电压的特性，从而改进实际电路的电气特性和设计出新的电路。

实际部件能够理想化，忽略它的次要性质，这便是采用集总概念的条件。集总参数电路是满足实际器件的几何尺寸远小于正常工作频率所对应的波长（ $d \ll \lambda$ ）条件的电路。

我国电力用电的频率为 50Hz，其波长为 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} \text{ m} = 6 \times 10^6 \text{ m}$ 。对于此工作频率的实验室设备来说，器件的几何尺寸与正常工作频率所对应的波长相比可以忽略不计，因而用集总的概念是完全可以的。

需要说明的是，同一个实际器件在不同工作下，可以用一种或者几种理想电路元件近似表征。至于如何用理想电路元件构成模型的问题，不是本课程讨论的主要问题。

本书只讨论集总参数电路，以后所述电路的基本定律均在这一前提下才能使用。为了方便叙述，今后均简称为电路。电路又可称为电网络，简称网络，“电路”和“网络”这两个术语通常是相互通用的。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流和电流的参考方向

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，用以衡量电流的大小。电流强度常简称为电流，用符号 i 表示，即

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

在国际单位制中，电流的单位是安（A），其中 q （或 Q ）表示电量，单位是库（C）。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不随时间变化,这种电流简称直流(DC),可用符号 I 表示;如果电流的大小和方向都随时间变化,这种电流简称交流(AC)。

在分析较复杂的电路时,往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这样的问题,电流采用参考方向。在分析电路时,先任意假定电流的参考方向,并以此为准,对电路进行分析、计算,根据最后得到的结果来确定电流的真实方向。电流的参考方向可以任意假定,在电路图中用箭头表示。

如图 1-2 所示的二端元件中,在假定的方向下

若 $i > 0$, 则表明真实方向与参考方向一致;

若 $i < 0$, 则表明真实方向与参考方向相反。

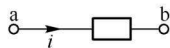


图 1-2 电流的参考方向

参考方向可任意指定,但一经指定后,在计算过程中就不要随意更改,即电流的参考方向是标注的正方向。在未标注参考方向时,电流的正、负无意义。

今后,电路图中标注的电流方向都是参考方向。

例 1-1 判断二端元件中电流的真实方向。

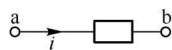


图 1-3 例 1-1 图

解: 选电流 i 的参考方向如图 1-3 所示。

若算出 $i = 2\text{A}$, 则电流的真实方向是从 a 到 b ; 若算出 $i = -2\text{A}$, 则电流的真实方向是从 b 到 a ; 电流大小相同,但参考方向选择不同时,它们之间相差一个负号。

例 1-2 在如图 1-4 所示 (a) 的二端元件中已知直流电流的方向由 a 到 b , 大小为 1A 。问: 如何表示这一电流?

解: 有两种表示法。

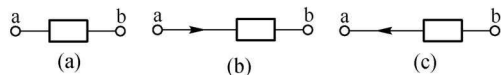


图 1-4 例 1-2 图

(1) 第一种表示法如图 1-4 (b) 所示, $I = 1\text{A}$, 表示参考方向与真实方向一致。

(2) 第二种表示法如图 1-4 (c) 所示, $I = -1\text{A}$, 表示参考方向与真实方向相反;

1.2.2 电压和电压的参考方向

电压也称“电位差”。电路中 a, b 两点间的电压,代表单位正电荷由 a 转移到 b 所失去或获得的能量,即

$$u(t) = \frac{dW}{dt}$$

在国际单位制中,电压的单位是伏(V),其中能量 W 的单位为焦耳(J)。

a, b 两点的电位有高、低之分,在元件或电路的两端用“+”和“-”符号来表示。高电位用“+”表示,低电位用“-”表示。

如果 a 点是高电位, b 点是低电位,则正电荷是从 a 转移到 b , 失去能量;从 b 转移到 a , 获得能量。正电荷在电路中转移时电能的得失,从高电位到低电位,称为“电压降”,从低电位到高电位,称为“电压升”。

如果电压的大小和极性都不随时间变化,这种电压称为直流电压,可用符号 U 表示;

如果电压的大小和极性都随时间变化, 这种电压称为交流电压。

在分析电路时, 电路中各电压的实际方向或极性往往不能事先确定。电压的极性也是采用参考极性。电压的参考方向(极性)是任意假定的, 在图中用“+”和“-”表示, 不代表电压的真实极性, 需要配合电压的正负值, 确定电压的真实极性。

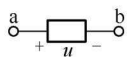


图 1-5 电压的参考极性

在如图 1-5 所示的二端元件或一段电路中, 在假定的参考方向下,

若 $u > 0$, 则真实方向与参考方向相同; 若 $u < 0$, 则真实方向与参考方向相反。

在未标示电压参考极性的情况下, 电压的正负是毫无意义的。

电压参考方向的另一种表示法为: u_{ab} 、 u_{ba} 。其中, u_{ab} 表示从 a 到 b 是电压降; u_{ba} 表示从 b 到 a 是电压降。

例 1-3 在如图 1-6 (a) 所示的电路中, a 点电位是指该点与参考点之间的电压, 参考点的电位认为是零, 在电路图中一般用符号“⊥”表示。已知 $U_a = 3V$, $U_b = 1V$, 求元件两端的电压 U 。

解: 两种结果。

(1) 设电路如图 1-6 (b) 所示, 则

$$U = U_{ab} = U_a - U_b = 2V$$

表示实际极性与参考极性一致。

(2) 设电路如图 1-6 (c) 所示, 则

$$U = U_{ba} = U_b - U_a = -2V$$

表示实际极性与参考极性相反。

在分析电路时, 既要为通过元件的电流假设参考方向, 也要为元件两端的电压假设参考极性, 彼此可以独立无关地任意假定。但是为了方便起见, 常采用关联参考方向, 即将电流方向与电压降的方向取成一致。除特别声明外, 在电路图中凡未同时标示电流、电压的参考方向时, 本书均采用关联参考方向。图 1-7 所示为二端元件电流、电压的参考方向。

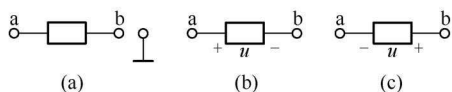


图 1-6 例 1-3 图

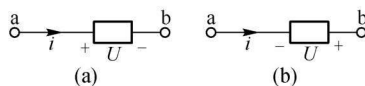


图 1-7 二端元件电流、电压的参考方向

(a) 电压与电流为关联方向; (b) 电压与电流为非关联方向

今后, 在求解电路问题时, 电路图中所标的电流方向和电压极性均为参考方向和参考极性, 它们不一定是电流的真实方向和电压的真实极性。

在今后需注意:

① 电流和电压的参考方向是电路分析中的一个十分重要的概念, 分析电路前必须选定电压和电流的参考方向(关联参考方向), 并在电路图中标注。

② 参考方向一经选定, 在计算过程中不得任意改变。

③ 参考方向不同时，其数学表达式相差一负号，但电压、电流的实际方向不变。

1.2.3 功率

本小节研究二端元件或二端网络的吸收功率 $p(t)$ 。

当电压、电流采用关联参考方向时，

$$p(t)=\frac{\mathrm{d} w}{\mathrm{d} t}=\frac{\mathrm{d} w}{\mathrm{d} q} \cdot \frac{\mathrm{d} q}{\mathrm{d} t}=u i$$

表示单位时间内该元件吸收的电能，单位为瓦（W）。

“吸收”是指，在单位时间 $\mathrm{d} t$ 内，单位正电荷 $\mathrm{d} q$ 从 a 到 b 将失去能量，这一电能消耗于元件之中，即元件吸收电能，吸收功率。 p 和 i 、 u 一样，也是代数量，可正、可负。

在分析电路时，更多是由 u 和 i 来计算 $p(t)$ ：

$p>0$ ，表示吸收功率，外电路将向该元件提供功率；

$P<0$ ，表示元件实际产生（发出）功率，即元件将向外电路提供功率。

在关联方向下， $p=ui$ ；

在非关联方向下， $p=-ui$ 。

上式中之所以有负号，是因为在非关联方向下的电流与关联方向时差一负号。

图 1-8 所示为功率的参考方向。

在今后计算 p 时需注意：

- ① 计算功率时，一定要看 u 与 i 是否为关联方向，选用相应的计算公式。
- ② 不论用哪个公式，都是按吸收功率为定义来计算的，即算出的 $p>0$ 时，该元件的确吸收功率；若 $p<0$ ，则该元件是吸收负功率，实则为产生功率。
- ③ 对同一元件，当 u 、 i 一定时，不论是选取关联，还是非关联方向，所算出的结果应该相同。
- ④ $\sum p=0$ （功率守恒）。

部分常用国际单位制的单位见表 1-1。

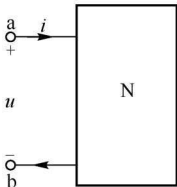


图 1-8 功率的参考方向

表 1-1 部分国际单位制的单位（SI 单位）

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	电荷 [量]	库 [仑]	C
时间	秒	s	电位、电压	伏 [特]	V
电流	安 [培]	A	电容	法 [拉]	F
频率	赫 [兹]	Hz	电阻	欧 [姆]	Ω
能量、功	焦 [耳]	J	电导	西 [门子]	S
功率	瓦 [特]	W	电感	亨 [利]	H

在实际应用中，感到这些 SI 单位太大或太小时，可以加上表 1-2 中的国际单位制的词

头, 构成 SI 的十进倍数或分数单位。

表 1-2 部分国际单位制的词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p

例 1-4 求图 1-9 所示两端元件的功率。

解: 由图 1-9 (a) 知, u 与 i 为关联参考方向, 所以

$$p = ui = 1 \times 2 \text{ W} = 2 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

由图 1-9 (b) 知, u 与 i 为非关联参考方向, 所以

$$p = -ui = -(-1) \times 2 \text{ W} = 2 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

例 1-5 已知图 1-10 所示元件产生 4W 功率, 求 u 。

解: 由图 1-10 知, u 与 i 为关联参考方向。

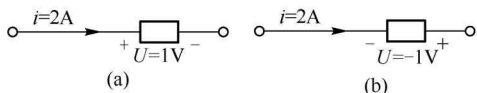


图 1-9 例 1-4 图

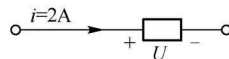


图 1-10 例 1-5 图

因为

$$p = ui = -4 \text{ W}$$

所以

$$u = -\frac{4}{2} \text{ V} = -2 \text{ V}$$

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是任何集总参数电路都适用的基本定律。电荷守恒和能量守恒是自然界的基本法则。把它们运用到集总参数电路中就得到了基尔霍夫的两个定律。

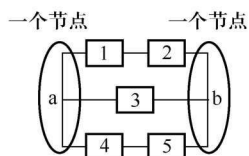


图 1-11 具有两个节点的电路

为了表达电路的几个基本规律, 先以图 1-11 所示电路介绍几个名词。

支路——一个具有两个端钮而由多个元件串联而成的组合。图示电路中共有 3 条支路。

节点——两条或两条以上支路的连接点。图示电路中, 共有 a, b 两个节点。

回路——由支路构成的闭合路径。图示电路中, $\{1, 2, 3\}$ 、 $\{3, 4, 5\}$ 和 $\{1, 2, 4, 5\}$ 都是回路, 共有 3 个回路。

网孔——内部不另含支路的回路。图示电路中, $\{1, 2, 3\}$ 、 $\{3, 4, 5\}$ 是网孔, 共有 2 个网孔。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 是一条反映连接于任意节点各支路电流间必遵循的一条定律。

对于任一集总参数电路的任一时刻, 流出 (或者流入) 任一节点的所有支路电流的代数和恒为零, 即

$$\sum_{j=1}^k i_j(t) = 0$$

列写此式时, 若规定流出的电流前取 “+” 号, 则流入的电流前取 “-” 号, 也可以规定流入的电流前取 “+”, 则流出的电流前取 “-” 号。下面以图 1-12 为例进行说明。

对于节点 a:

① 若以支路电流流出 a 节点, 则

$$-i_1+i_2-i_3-i_4=0 \text{ 即 } i_2=i_3+i_1+i_4$$

② 若以支路电流流入 a 节点, 则

$$i_1-i_2+i_3+i_4=0$$

对于节点 b:

$$i_3+i_4+i_5=0 \text{ 或 } -i_3-i_4-i_5=0$$

以流出 (或流入) a 节点或 b 节点列写两个 KCL 方程是相同的。

为了加深理解, 概括出几点说明:

- ① 式中各项前的正、负号取决于各电流的参考方向对节点的关系 (流出或是流进), 同时注意不要把电流本身的正负值和约束关系中的正负号相混淆。
- ② KCL 是对连接节点各支路电流的线性约束。
- ③ 流入 (或流出) 电路中某节点支路电流的代数和等于流出 (或流入) 电路中该节点其余支路电流的代数和。
- ④ KCL 的实质是电荷守恒。
- ⑤ KCL 与电路元件的性质无关, KCL 方程的具体形式只依赖于支路和节点的连接关系和支路电流的参考方向。
- ⑥ KCL 可推广用于电路中任意假想封闭面, 即流出 (或流入) 闭合面的电流代数和恒等于零, 如图 1-13 所示。

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

又如, 当两个单独的电路只用一条导线相连时此导线中的电流 i 必定为零, 如图 1-14 所示。

$$i=0$$

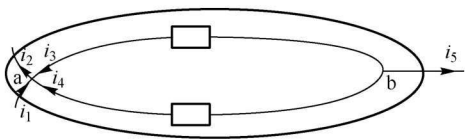


图 1-13 KCL 运用于电路中的一个封闭面

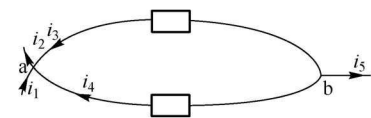


图 1-12 电路中的两个节点



图 1-14 用一条导线相连的两个电路

例 1-6 在如图 1-15 所示的具有一个节点的复杂电路中，已知 $i_1=5\text{mA}$ ， $i_2=-2\text{mA}$ ， $i_3=8\text{mA}$ ，试求流过元件 D 的电流 i_4 。

解：由 KCL 可得

$$i_1+i_2-i_3+i_4=0$$

即

$$i_4=i_3-i_2-i_1=8\text{mA}-(-2\text{mA})-5\text{mA}=5\text{mA}$$

实际流出节点的总电流为

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

实际流入节点的总电流为

$$i_1+i_2+i_4=5\text{mA}+(-2\text{mA})+5\text{mA}=8\text{mA}$$

即实际流出节点的总电流=实际流入节点的总电流。

例 1-7 求图 1-16 中的电流 I 。

解：利用 KCL 可推广用于电路中任意假想封闭面，可知：5A 和 I 流入该封闭面，而 3A 流出该封闭面。

因为

$$5+I-3=0\text{A}$$

所以

$$I=3\text{A}-5\text{A}=-2\text{A}$$

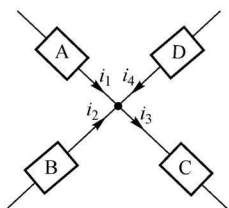


图 1-15 例 1-6 图

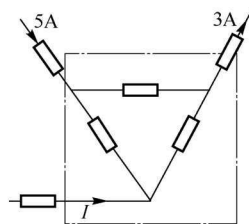


图 1-16 例 1-7 图

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) 是电路中各支路电压之间必须要遵守的规律。

对于任何集总参数电路，任一时刻沿任意回路各支路电压降的代数和恒为零，即

$$\sum_{j=1}^k u_j(t) = 0$$

在列写上式时，要先指定回路的绕行方向。

例如，在如图 1-17 所示的电路中，若沿顺时针方向绕行：

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

若沿逆时针方向绕行：

$$-U_4 + U_3 + U_2 - U_1 = 0$$

显然，这两式是相等的。

为了加深理解，概括出几点说明：

① 式中每一项前的正、负号取决于绕行方向遇到的电压极性，凡电压降取正，凡电压升取负。因此，切不可把方程中电压前的正负号和电压本身的正负值相混淆。

② KVL 是对回路各支路电压的线性约束。

③ KVL 适用于任何集总参数电路，且与元件的性质无关。

④ KVL 可推广用于任一假想回路。

如图 1-17 所示电路，可写出：

$$U_4 + U_1 - U_{ab} = 0 \text{ 或 } U_3 + U_2 - U_{ab} = 0$$

即

$$U_{ab} = U_4 + U_1 = U_3 + U_2$$

即 U_{ab} 与计算时选择的路径无关。利用这一结论，可求电路中任意两点之间的电压。

电路中任意两节点之间的电压 U_{ab} 等于从 a 点到 b 点沿任一条路径上所有元件电压降的代数和。

例 1-8 电路如图 1-18 所示，求 U_1 和 U_2 。

解：求 U_1 时，可沿 {b, a, d, e} 或者 {b, c, f, e} 路径，而 {b, c, f, e} 路径中 U_2 为未知量，所以

$$U_1 = -3V + 5V + 6V = 8V$$

求 U_2 时，可沿 {c, b, e, f} 或者 {c, b, a, d, e, f} 路径，而前者路径中支路电压量较少，方便计算。

$$U_2 = -(-5V) + 8V = 13V$$

由以上求解可以看出，在运用 KCL 和 KVL 时，要与两套符号打交道。首先视支路电流或支路电压相对于节点或回路的参考方向是取正还是取负，然后再看电流或电压本身是正值还是负值，代入具体值（有正，负之分）。

例 1-9 电路如图 1-19 所示，已知 $U_1=2V$ ， $U_2=6V$ ， $U_6=10V$ ，求 U_3 ， U_4 ， U_5 。

解：

$$U_3 = U_1 + U_2 = 2V + 6V = 8V$$

$$U_4 = U_1 - U_6 = 2V - 10V = -8V$$

$$U_5 = -U_2 - U_6 = -6V - 10V = -16V$$

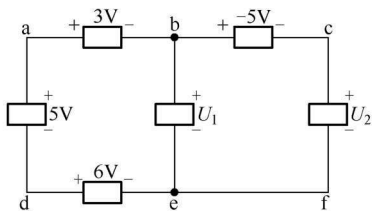


图 1-18 例 1-8 图

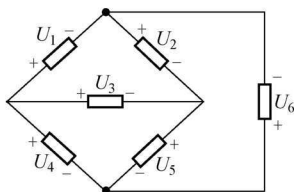


图 1-19 例 1-9 图

例 1-10 电路如图 1-20 所示, 已知 $I_1=3\text{A}$, $U_3=1\text{V}$, $P_3=-2\text{W}$ 。求 I_2 和 P_1 。

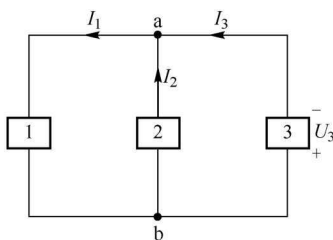


图 1-20 例 1-10 图

解: U_3 与 I_3 为关联参考方向

因为
$$P_3 = U_3 I_3 = -2\text{W} \rightarrow I_3 = \frac{P_3}{U_3} = -\frac{2}{1}\text{A} = -2\text{A}$$

对节点 a 列写 KCL 方程:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

所以

$$I_2 = I_1 - I_3 = 3\text{A} - (-2\text{A}) = 5\text{A}$$

$$P_1 = -U_3 I_1 = -1 \times 3\text{W} = -3\text{W} \quad (\text{产生 } 3\text{W})$$

顺便算出

$$P_2 = U_3 I_2 = 1 \times 5\text{W} = 5\text{W} \quad (\text{吸收 } 5\text{W})$$

因为

$$P_1 + P_2 + P_3 = (-3\text{W}) + 5\text{W} + (-2\text{W}) = 0$$

所以功率守恒。

1.4 电阻元件

1.4.1 二端电阻

集总参数电路是由若干电路元件构成的。根据与外电路连接的端子的数目, 可以将元件分为二端元件、三端元件、四端元件等; 元件还可以分为线性元件和非线性元件, 时不变元件和时变元件, 有源元件和无源元件等。

物体对电流的阻碍作用称为电阻。利用这种阻碍性质的元件称为电阻器。电阻和电阻器的概念是有区别的。线性电阻元件的工作电压、电流和功率没有任何限制, 而电阻器是在一定电压、电流和功率范围内才能且只能正常工作的。定义: 其电阻电压与电流之间的约束关系, 即伏安关系 (Voltage Ampere Relationship, VAR)。由 $u-i$ 平面上的一条曲线所确定的二端元件称为二端电阻。其数学表达式为

$$u = f(i) \text{ 或 } i = f^{-1}(u)$$

电阻元件是一个二端元件。它的基本特征是, 当其上有电压或电流通过时, 它总要消耗能量, 故电阻元件是一个耗能元件。