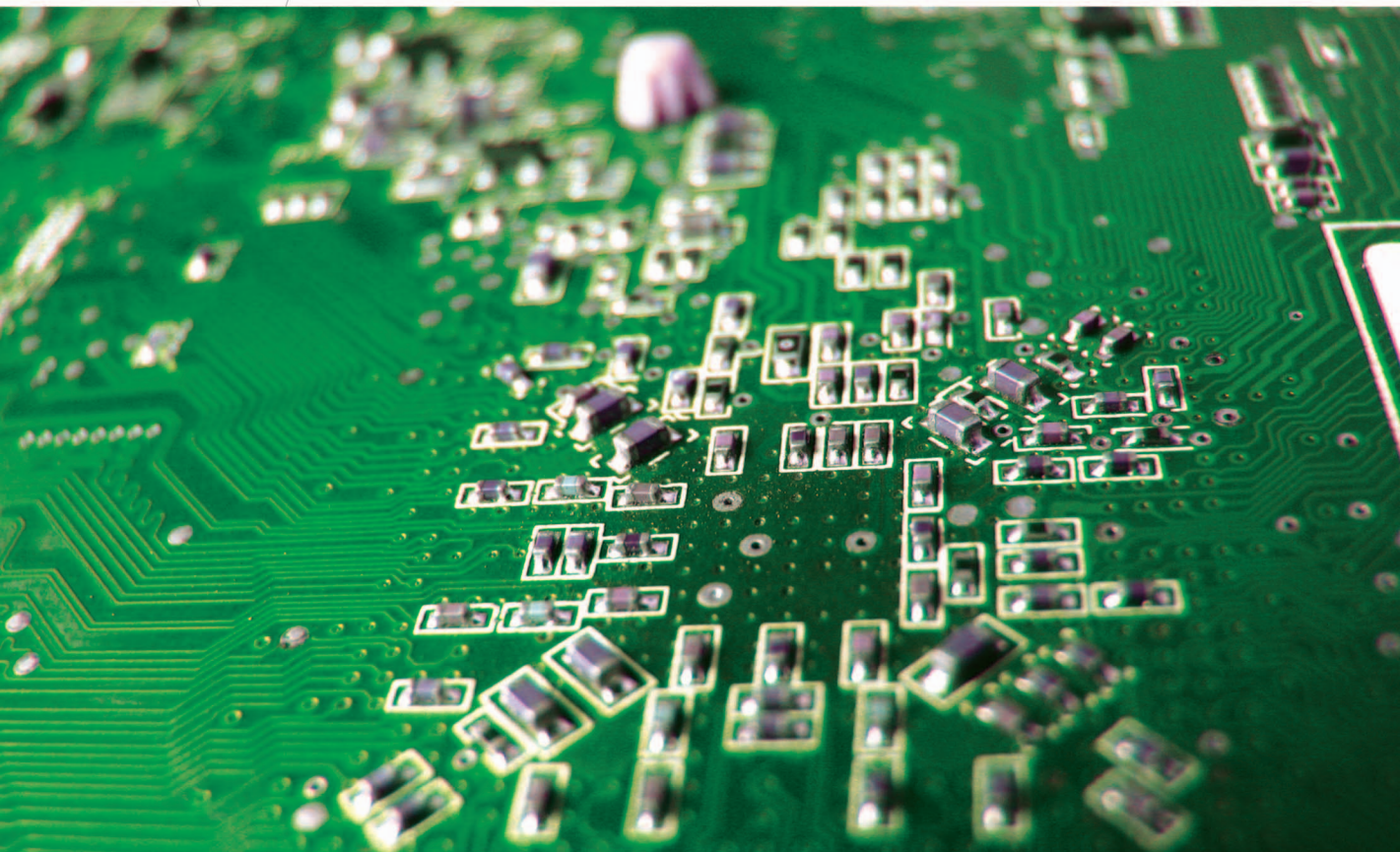


CIRCUIT

DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

★ 刘正光 戴冬冰 主编 ★



天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

电路分析基础

刘正光 戴冬冰 主编

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

编者名单

主 编	刘正光	戴冬冰	
副 主 编	王雅君	姜亚萍	
编写人员	戴冬冰	王雅君	姜亚萍
	孙业萍	冯 芳	冯冬梅
	万丽丽	董 晶	

前言

《电路分析基础》是按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路分析基础”课程教学基本要求进行编写的,全书共七章,分别为“电路的基本概念和定律”“单口网络及等效电路”“电阻电路分析的一般方法”“一阶电路分析”“二阶动态电路”“正弦稳态电路的分析”“耦合电感和理想变压器”,本书适用对象为应用型大学本科学生。

“电路分析基础”课程是电气信息学科的学科基础课程,也是电气信息类各专业的平台课程,是学习信号与系统、电子技术、电力电子技术等课程的先修课程和第一门专业基础课程。

经过多年的教学实践和教学改革,应用型本科学校逐步形成了各自独特的教学理念及教学方法,而传统教材尚缺乏与此很好的契合,教学中教师和学生都希望编写符合实际情况,既满足教学基本要求,又能够精简教学内容、突出重点、便于自学的教材。本书就是基于这一思想进行编写的,在编写的过程中参考了大量国内外优秀教材,并结合了应用型本科院校实际情况,使读者学习起来很容易上手。

本书的主要特点如下。

- (1) 强调基本理论、基本概念和基本方法而不过于着重知识的深广度。
- (2) 在保持科学性、系统性的前提下,努力实现对学生具有启发性,便于学生阅读。
- (3) 在易于理解和接受的前提下,尽量联系实际,精选习题和例题,体现应用型本科教材特色。

本书由刘正光和戴冬冰主编,刘正光教授对全书的编写工作进行了总体思路的把握,戴冬冰、王雅君、姜亚萍、孙业萍、冯芳、冯冬梅、万丽丽、董晶参与编写,此外,戴冬冰拟定编写大纲并负责统稿,王雅君、姜亚萍进行校稿,孙业萍完成绘图工作。

本书承天津天狮学院李文英教授审阅,她对本书初稿进行了详细阅读并提出了很多宝贵的意见,在此编者表示衷心地感谢。天津天狮学院图书馆杨宁莉馆长在本书的编写过程中也给予了很大的帮助,在此一并表示感谢。此外,本书编写过程中还参阅了部分国内外优秀教材,也对这些教材的作者致以谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。欢迎提出宝贵意见。

编 者

2013 年 1 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律	1
1.1 电路和集总电路模型	1
1.2 电流、电压及电功率	2
1.3 基尔霍夫定律	5
1.4 电阻元件	10
1.5 电压源和电流源	13
1.6 受控源与运算放大器	16
习题一	20
第 2 章 单口网络及等效电路	23
2.1 单口网络的概念及电压电流关系	23
2.2 等效电路的概念	25
2.3 电阻的串联、并联等效	26
2.4 实际电压源、电流源的等效变换	31
2.5 含受控源电路的等效变换	35
2.6 一些简单的等效规律和公式	36
2.7 T 形网络和 Π 形网络的等效变换	40
习题二	44
第 3 章 电阻电路分析的一般方法	47
3.1 两类约束 KCL、KVL 方程的独立性	47
3.2 支路电流法	49
3.3 网孔电流法	52
3.4 节点电压法	55
3.5 叠加原理	59
3.6 置换定理	63
3.7 戴维南定理	65
3.8 诺顿定理	69
3.9 最大功率传输定理	71
习题三	72

第4章 一阶电路分析	77
4.1 电容元件	77
4.2 电感元件	80
4.3 换路定律	83
4.4 零输入响应	85
4.5 零状态响应	90
4.6 全响应	93
4.7 三要素法	96
4.8 阶跃函数和阶跃响应	98
4.9 瞬态和稳态	101
习题四	103
第5章 二阶动态电路	106
5.1 LC 电路中的正弦振荡	106
5.2 RLC 串联电路的零输入响应	108
5.3 RLC 串联电路的全响应	114
习题五	115
第6章 正弦稳态电路的分析	117
6.1 正弦激励的过渡过程和稳态	117
6.2 正弦量的基本概念	119
6.3 正弦交流电的相量表示	122
6.4 阻抗与导纳	127
6.5 正弦稳态电路的分析	131
6.6 正弦稳态电路的功率	137
6.7 谐振电路	146
6.8 三相电路	151
习题六	162
第7章 耦合电感和理想变压器	166
7.1 耦合电感的基本概念	166
7.2 耦合电感的等效电路分析	171
7.3 空芯变压器电路的分析	177
7.4 理想变压器的伏安关系	183
7.5 实际变压器	187
习题七	191
参考文献	194

第 1 章 电路的基本概念和定律

本章首先介绍电路模型、电压、电流、功率的概念以及集总电路中电压、电流应遵循的基本定律,然后介绍电阻、电压源、电流源、受控源和运算放大器等电路元件及其电压、电流之间的关系。

1.1 电路和集总电路模型

电在日常生活和工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。电路(circuit)是指电流流经的通路,是为了某种需要由一些电器设备或器件按一定的方式连接起来构成的通路。电路种类繁多,应用广泛,在电子信息、通信工程、自动化等领域用来完成各种各样的任务。各种电路都是由电阻、电感、电容、晶体管、变压器等部件组成,而有些电路十分复杂,为了对电路进行计算、分析,必须将实际部件加以近似化、理想化,用一个足以代表其主要特性的“模型”来表示电路元器件,所谓理想化,是指假定在器件中发生的电、磁现象可以分别研究。

当实际电路的尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时,可以用“集总参数元件”(lumped parameter element)来构成实际部、器件的模型。每一种集总参数元件(以后简称为元件)只反映一种基本电磁现象,且可以由数学方法加以定义。例如,电阻元件只涉及消耗电能的现象;电容元件只涉及与电场有关的现象;电感元件只涉及与磁场有关的现象;电场、磁场被认为只集中在相应元件的内部。

由集总元件组成的电路,称为实际电路的集总电路模型——集总电路,简称电路。电路理论分析的对象是电路模型而不是实际电路。各理想元件也可用图形符号表示,绘成电路图,电路图并不反映实际电路的大小,在分析集总电路的问题时,器件与电路的尺寸是无关紧要的。图 1-1 所示为手电筒的实际电路。用电阻元件 R_L 来代替灯泡,用电压源 U_S 和电阻元件(内阻) R_0 的串联代替干电池,就得到了图 1-2 所示的手电筒电路模型。

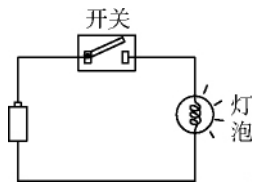


图 1-1 实际电路图

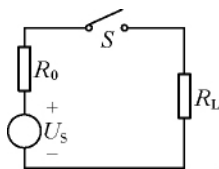


图 1-2 手电筒电路模型

各种部、器件可以用图形符号表示,表 1-1 列举了一些我国国家标准中的电气图形符号。采用这些符号可以绘出表明各部、器件互相连接关系的电气图(electric diagram)。

表 1-1 常用的电路图形符号(根据国际 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈、绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁芯变压器	
灯		电池		直流发电机	
电压表		运算放大器		直流电动机	
理想独立 电流源		理想独立 电压源		回转器	

电路模型是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅计算过程大为简化,而且能更清晰地反映电路的物理实质。

1.2 电流、电压及电功率

电路分析的主要目的是分析电路的模型,得出电路的电性能,电性能常用一组随时间变化的量——变量(variable)来描述。电流、电压和功率是最基本的变量。因此,分析求解这些变量成为电路分析的主要任务。

1. 电流

(1) 电流的概念

电荷在电场力的作用下运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量,电流强度等于单位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度通常简称为电流,用符号 i 来表示,即

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

式(1-1)中, q 表示电量,单位为库仑(用字母C表示)。电流的单位是安培(简称安,用A表示), $1A = 1C/s$ 。

电流的方向规定为正电荷移动的方向。大小和方向都不随时间的变化而变化的电流称为恒定电流,简称直流(direct current,简写为DC,可以用符号I表示)。大小或方向随时间变化而变化的电流称为时变(time varying)电流。若时变电流的大小和方向都随时间做周期性变化则称为交变电流(alternating current, AC),简称交流。

在国际单位制中,电流的基本单位为安培。电流常用的单位还有kA(千安),mA(毫安), μA (微安),及nA(纳安)等,且有

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}, 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}, 1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$$

(2) 电流的参考方向

实际电路中电流的真实方向往往难以在电路图中标出。对于简单的电路来说,电流的实际流向就是正电荷的运动方向,但对于复杂电路或方向不断变化(如日常用的 50Hz 交流电)的交变电流来说,事前辨认出它们的方向是相当困难的。为解决这样的困难,引入参考方向(reference direction)这一概念。

在分析计算时,在计算之前先任意选定某一方向作为电流的参考方向(假设方向、标出方向),将参考方向用带方向的箭头标于电路图中,在参考方向之下计算电流。若电流的计算结果为正值,表明电流的真实方向与参考方向一致;若计算结果为负值,表明电流的真实方向与参考方向相反。

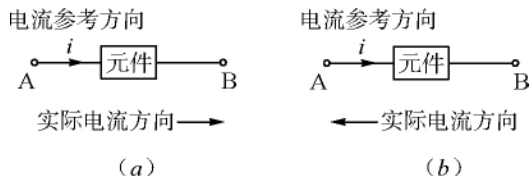


图 1-3 电流的参考方向

例如,图 1-3 是电路的一部分,方框用来泛指元件。图 1-3(a) 中选定的参考方向与实际电流方向一致, $i > 0$ 。图 1-3(b) 中选定的参考方向与实际电流方向不一致, $i < 0$ 。利用电流的正负值结合参考方向来表明电流的实际方向。在未标注参考方向的情况下,电流的正负毫无意义。

2. 电压

(1) 电压的概念

电压也常被称为电压差或电压降。在电路中两点的电压表明了单位正电荷由一点转移到另一个点时所获得的或失去的能量,用 u 来表示,即

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

电压的极性(方向)规定为电压降低的方向,即由高电位端指向低电位端。如果电压的大小和方向不随时间变化而变化,这样的电压称为恒定电压(直流电压);如果电压的大小和方向随时间变化而变化,则称为时变电压,若变化为周期性的则称为交变电压(交流电压)。

在国际单位制中,电压的单位是 V。常用的单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)、 μV (微伏)等。

(2) 电压的参考方向

与电流一样,电压的真实极性在计算之前也很难确定,与电流的参考方向类似,电压也可以假定参考极性(参考方向)。我们可以任意选定一点的极性为“+”,另一点的极性为“-”。电路中某元件上或任意两点间人为假定的电压降方向称为电压的参考方向。如果选定的参考方向与实际电压方向一致,那么电压为正值;反之,电压为负值。在图 1-4(a) 中选定的参考方向与实际电压方向一致, $u > 0$; 图 1-4(b) 中选定的参考方向与实际电压方向不一致, $u < 0$ 。

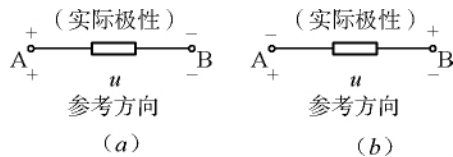


图 1-4 电压的参考极性

电压的参考方向也可以用双下标表示,如 u_{AB} 表示 A 点为高电位, B 点为低电位,其参考方向是由 A 指向 B。

3. 关联参考方向

电压和电流的参考方向可以独立地任意假定,当电流的参考方向从标以电压参考极性的“+”端流入,而从标以电压参考极性的“-”端流出时,如图 1-5(a) 所示,称电流与电压为关联参考方向(associated reference directions);而当电流的参考方向从标以电压参考极性的“-”端流入,而从标以电压参考极性的“+”端流出时,如图 1-5(b) 所示,称电流与电压为非关联参考方向。为了方便计算,常采用关联参考方向。

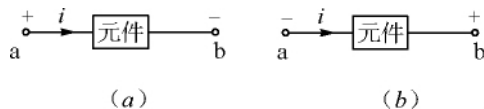


图 1-5 元件的关联参考方向和非关联参考方向

4. 电功率

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这是因为一方面电路在工作情况下总伴随有电能与其他形式的能量的相互转换;另一方面,电器设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,或是不能正常工作。

单位时间内电场力所做的功,叫做电功率,用字母 p 表示,即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-3)$$

由于

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq}, i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-4)$$

则

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{dw(t)}{dq} \frac{dq(t)}{dt} = u(t) i(t) \quad (1-5)$$

在国际单位制中,电功率的单位是 W(瓦特,简称瓦)。

在应用时, u 、 i 可任意单独假设方向,当 u 、 i 为关联参考方向时, $p(t) = u(t) i(t)$ 表示电路(或元件)吸收功率,若实际计算出 $p > 0$,表示确实吸收功率,若 $p < 0$,表示实际产生功率(释放功率)。当 u 、 i 为非关联参考方向时,功率表达式 $p(t) = u(t) i(t)$ 表示电路(或元件)产生的功率,若实际计算出 $p > 0$,表示确实产生功率,若 $p < 0$,表示实际吸收功率。若一段电路(或元

件) 吸收的功率为 100W , 也可以说产生的功率为 -100W , 两种说法等效。

为方便起见, 当 u, i 为非关联参考方向时, 功率表达式可用 $p(t) = -u(t)i(t)$ 计算。计算出 $p > 0$, 表示实际吸收功率, 计算出 $p < 0$, 表示实际产生(释放)功率。

例 1-1 电路如图 1-6 所示, (1) 如图(a) 中, 若 $i = 1\text{A}$, $u = 6\text{V}$, 求元件吸收的功率 p ; (2) 如图(b) 中, 若 $i = 1\text{A}$, $u = 6\text{V}$, 求元件吸收的功率 p 。

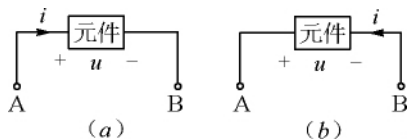


图 1-6 例 1-1

解: (1) 由图(a) 知, 元件的电压与电流为关联参考方向, 吸收的功率为

$$p = ui = 6\text{W}$$

(2) 由图(b) 知, 元件的电压与电流为非关联参考方向, 产生的功率为

$$p = ui = 6\text{W}$$

表明吸收的功率为 -6W 。

吸收的功率也可以用下式计算:

$$p = -ui = -6\text{W}$$

上面介绍了电压、电流、功率等变量, 使用的都是国际单位制(SI), 在实际使用这些单位时, 有时太大, 有时太小。为了方便, 常常在这些单位之前加上一个以 10 为底的正幂次或负幂次的词头, 构成辅助单位。常用的国际单位制规定的词头如表 1-2 所示。

表 1-2 部分 SI 词头

因数	词头名称		符号
	原文(法)	中文	
10^9	giga	吉	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p

1.3 基尔霍夫定律

在集总电路中, 任何时刻流经元件的电流以及元件的端电压都是明确的物理量。集总电路由各种元件通过理想导体连接而成, 若将每一个二端元件视为一条支路, 这样, 流经元件的电流和元件的端电压便分别称之为支路电流和支路电压, 他们是集总电路中分析和研究的对

象。集总电路的基本规律也将用支路电流和支路电压来表述。

为了表达电路的基本规律,先介绍几个名词。支路的一般含义已如上所述。两条或两条以上支路的连接点称为节点(或结点)(node)。例如,在如图1-7所示电路中共有5条支路,3个节点。需要注意的是图中 a 点和 b 点为一个节点,因为 a 点与 b 点是用理想的导线相连的,从电的角度来看,它们是相同的端点,可以合并成一点。电路中由支路构成的任一闭合路径称为回路,在图中元件1、2,元件1、4、5均构成回路,该电路有6个回路。在回路内部不另含有支路的回路称为网孔,图中元件1、2,元件2、3均构成网孔,该电路有3个网孔。

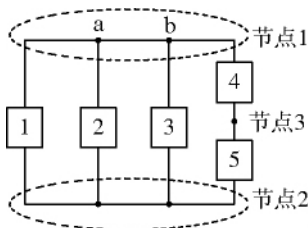


图 1-7 具有三个节点的电路

1. 基尔霍夫电流定律

由于电路中电流的连续性,电路中任一点(包括节点)都不能堆积电荷,而一个电路中电荷是守恒的,电荷既不能创造也不能消失。

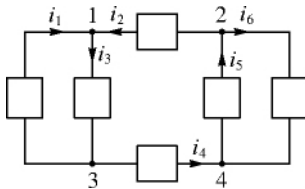


图 1-8 具有四个节点的电路

在如图1-8所示的电路中,方框代表元件,以图中的节点1为例,与各节点相连的各支路电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ,流进该节点的支路电流代数和为 $i = -i_1 - i_2 + i_3$ (设流出节点电流为正),故知流进该节点电荷的速率可表示为

$$\frac{dq}{dt} = -i_1 - i_2 + i_3 \quad (1-6)$$

式中 q 为节点处的电荷。但是,节点只是理想导体的汇合点,不可能积累电荷,而电荷既不能创造,也不能消失,所以节点处的 $\frac{dq}{dt}$ 必须为零,即

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0 \quad (1-7)$$

这表明流进(或流出)该节点的所有支路电流的代数和为零。

综上所述,基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)可表述为:

对于任一集总电路中的任一节点,在任一时刻,流进(或流出)该节点的所有支路电流的代数和为零。其数学表示式为

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0 \quad (1-8)$$

式(1-8)称为基尔霍夫电流方程(KCL方程),式中 K 为节点处的支路数, $i_k(t)$ 为流入(流出)节点的第 k 条支路的电流。“代数和”中的正、负号根据支路电流的参考方向是流入节点还是流出节点判断,流出节点的电流前取“+”号,流入节点的电流前则取“-”号。

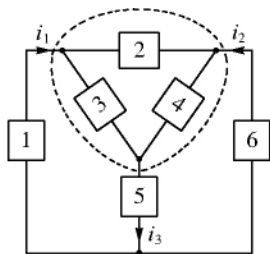


图1-9 基尔霍夫电流定律的推广

KCL也可以描述为:在集总参数电路中,对于任意一个节点来说,任一时刻流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。KCL与元件的性质无关,可以推广为任一假设的闭合面(又称高斯面、广义节点)上,即在任何瞬间流入闭合面的电流等于流出闭合面的电流。对图1-9所示电路,用虚线表示的闭合面内有3个节点,把封闭面看成一个节点,KCL方程为

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

例1-2 在图1-10所示某复杂电路的一个节点处,已知 $i_1 = 6\text{A}$, $i_2 = 3\text{A}$, $i_3 = -4\text{A}$,试求流过原件A的电流 i_4 。

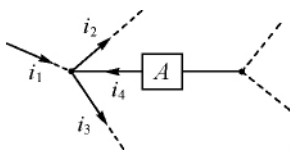


图1-10 例1-2

解: 分析: i_1 、 i_2 、 i_3 和 i_4 是汇集于该节点的所有支路电流,满足 KCL,线性相关,已知其中任何三个电流,即可确定另一电流。

在列 KCL 方程时,应先标出所有电流的参考方向。已知电流的参考方向常是给定的,未知电流的参考方向则可以任意假定。设 i_4 的参考方向如图1-10所示,由 KCL 可得

$$-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0 \quad (1-9)$$

即

$$i_4 = -i_1 + i_2 + i_3 \quad (1-10)$$

带入已知数据得

$$i_4 = -(6\text{A}) + (3\text{A}) + (-4\text{A}) \quad (1-11)$$

得

$$i_4 = -7\text{A}$$

其中,负号表示 i_4 的实际方向与参考方向相反。

通过以上例题可以看到,在运用 KCL 解题时常需和两种符号打交道。一种是方程中各项前的正、负符号,其正、负取决于电流参考方向与节点的相对关系,如以流出为正、流入为负,则

如(1-9)式所示。另一种是电流本身数值的正负号,如(1-11)式中各括弧内所示,两者不要混淆。

如以流入为正、流出为负来列 KCL,仍可求得 $i_4 = -7\text{A}$,结果一致。

2. 基尔霍夫电压定律

在任一电路中,若在某段时间内电路中各元件得到的能量有所增加,则其他一些元件的能量必须有所减少,保持能量的“收支”平衡。这一情况对电路中的支路电压间的关系有着重大的影响。

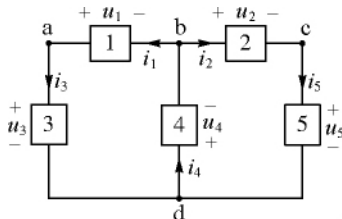


图 1-11 具有三个回路的电路

如图 1-11 所示电路,若在某一时间段内各元件得到的能量分别为: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 ,则由能量守恒可知:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 0 \quad (1-12)$$

对(1-12)式微分可得

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 0 \quad (1-13)$$

(1-13)式中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 分别为各元件的功率。上式表明在每一瞬间电路中所有元件获得的功率的总和为零。如以电压、电流来表示各元件的功率,则得

$$\begin{aligned} p_1 &= -u_1 i_1 \\ p_2 &= u_2 i_2 \\ p_3 &= u_3 i_3 \\ p_4 &= u_4 i_4 \\ p_5 &= u_5 i_5 \end{aligned} \quad (1-14)$$

于是(1-13)式可改写为

$$-u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 + u_4 i_4 + u_5 i_5 = 0 \quad (1-15)$$

又由 KCL 得

$$\begin{aligned} i_4 &= i_1 + i_2 \\ i_3 &= i_1 \\ i_5 &= i_2 \end{aligned} \quad (1-16)$$

将(1-16)式代入(1-15)式得

$$(-u_1 + u_3 + u_4) i_1 + (u_2 + u_4 + u_5) i_2 = 0 \quad (1-17)$$

由于 i_1 、 i_2 不满足 KCL,线性无关,所以,式(1-17)要成立, i_1 和 i_2 前的系数必须为零。即

$$-u_1 + u_3 + u_4 = 0 \quad (1-18)$$

$$u_2 + u_4 + u_5 = 0 \quad (1-19)$$

将(1-18)式代入(1-19)式得

$$-u_1 + u_3 - u_2 - u_5 = 0 \quad (1-20)$$

从图1-11可见:元件1、3、4形成一个回路,元件2、4、5形成一个回路,元件1、3、5、2也形成一个回路,(1-18)(1-19)(1-20)式分别表明每个回路中各个支路电压降的代数和为零。

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)可表述为:

对于任一集总电路中的任一回路,在任一时刻,沿着该回路的所有支路电压降的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = 0 \quad (1-21)$$

(1-21)式称为基尔霍夫电压方程(KVL方程)。式中K为回路中的支路数, $u_k(t)$ 为回路中第k条支路的电压。“代数和”根据支路电压的参考极性判断。应用公式时,应先指定回路的绕行方向,当支路电压的参考极性与回路的绕行方向一致时,该支路电压前取“+”号,当支路电压的参考极性与回路的绕行方向相反时,该支路电压前取“-”号。

KCL是电荷守恒法则运用于集总电路的结果;KVL是能量守恒法则和电荷守恒法则运用于集总电路的结果。前者反映电路中各支路电流间的约束关系;后者反应电路中各支路电压间的约束关系。这两个定律仅与元件的相互连接有关,与元件的性质无关。不论元件是线性的还是非线性的、时变的还是时不变的,KCL和KVL总是成立的。

KVL描述的是闭合路径的电压降的情况,我们现在来分析一下非闭合路径的两点之间的电压的求取。

例1-3 电路如图1-12所示,其中 $u_1 = 2V$, $u_2 = 4V$,试求电路中a、b两点间的电压。

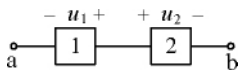


图1-12 例1-3

解: 求解两点间的电压时,常采用双下标记法,如 u_{ab} 、 u_{ac} 等,双下标字母即表示计算电压时所涉及的两点,其前后次序则表示计算电压降时所遵循的方向。例如双下标 ab 表示由a点到b点计算电压降,即a点为电压参考“+”极处,b点为电压参考“-”极处,采用双下标记法,就可不必在a、b点分别标以“+”号及“-”号,避免符号间混淆不清。

双下标的前后次序是任意选定的,但一经选定,即应以此法为准去求两点之间路径上全部电压降的代数和。本题中

$$\begin{aligned} u_{ab} &= -u_1 + u_2 \\ &= -(2V) + (4V) = 2V \end{aligned}$$

在计算时,若参考极性所表示的电压降方向与选定的有a到b的计算电压降的方向一致则取正号,如 u_2 ,否则取负号,如 u_1 。而括号内的正负号则表明电压本身数值的正、负,来源于各元件电压降的实际方向与参考方向是否一致。

例1-4 图1-13所示电路,方框代表元件,各支路的元件是任意的,已知 $u_{12} = 6V$, $u_{24} = -4V$, $u_{31} = -7V$,试求: u_{34} 、 u_{14} 。

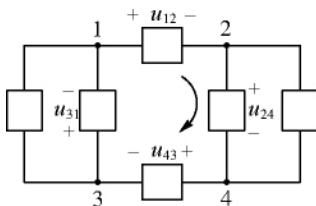


图 1-13 例 1-4

解: 由基尔霍夫电压定律得

$$u_{12} + u_{24} + u_{43} + u_{31} = 0$$

即

$$u_{43} = -u_{12} - u_{24} - u_{31} = [-6 - (-4) - (-7)] \text{ V} = 5 \text{ V}$$

$$u_{34} = -u_{43} = -5 \text{ V}$$

沿 1、2、4 节点所在支路有

$$u_{14} = u_{12} + u_{24} = [6 + (-4)] \text{ V} = 2 \text{ V}$$

沿 1、3、4 节点所在支路有

$$u_{14} = u_{13} + u_{34} = -u_{31} + u_{34} = [-(-7) + (-5)] \text{ V} = 2 \text{ V}$$

可见, 两点间的电压与路径无关。

从本题可以看到, 在运用 KVL 时也需要和两种符号打交道。一种是方程中各项前的符号, 其正、负取决于各元件压降的参考方向与所选的绕行方向是否一致, 一致取正号, 反之取负号。另一种是每项电压本身的符号, 这取决于电压降的实际方向与参考方向是否一致, 一致取正, 反之取负。

1.4 电阻元件

上节讨论了各支路电流之间及各支路电压之间应遵循的定律。电路是由各元件组成的, 而各元件都有精确的定义, 由此可以确定每一元件电压与电流之间的关系, 电压电流关系简称为 VCR (voltage current relation)。元件的 VCR 连同基尔霍夫定律构成了集总电路分析的基础。本节讨论电阻元件。

电阻元件 (resistor) 是从实际电阻器抽象出来的模型, 只反映电阻器对电流呈现阻力的性能。

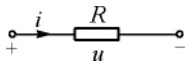


图 1-14 电阻元件

如图 1-14 所示, 电阻元件两端的电压为 u (单位为 V), 流过的电流为 i (单位为 A), 且 u 与 i 为关联参考方向, 根据欧姆定律有

$$R = \frac{u(t)}{i(t)}$$

即

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-22)$$

式中 u 为电阻元件两端的电压,单位为伏(V); i 为流过电阻元件的电流,单位为安(A); R 为电阻,单位为欧(Ω)。 R 为常数,故 u 与 i 成正比。所以,由欧姆定律定义的电阻元件称为线性电阻元件。 u 、 i 可以是时间 t 的函数,也可以是常量(直流)。

令 $G = \frac{1}{R}$, G 称为电导,此时(1-22)式可写为

$$u(t) = \frac{1}{G}i(t)$$

即

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-23)$$

当 u 的单位为伏(V), i 的单位为安(A)时, G 的单位为西门子(S)。

欧姆定律体现了电阻元件对电流呈现阻力的本质。既然对电流有阻力,电流要流过,就必须消耗能量,因此,沿电流流动方向就必然会出现电压降,欧姆定律表明这一电压降的大小,其值为电流与电阻的乘积。

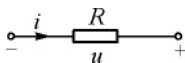


图 1-15 电阻元件

如果电阻元件的电压参考方向与电流参考方向不一致,如图 1-15 所示,则(1-22)式应改为

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-24)$$

所以,公式必须与参考方向配套使用。

习惯上将一个电阻元件称为电阻。

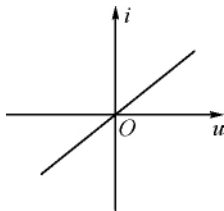


图 1-16 伏安特性曲线

如果将电阻元件的伏安特性关系式用曲线画出,称为伏安特性曲线,如图 1-16 所示,横坐标为 u (或 i),纵坐标为 i (或 u), u 、 i 取关联参考方向。(1-22)式对应的伏安特性曲线是一条经过原点的直线。直线的斜率与元件的阻值 R 有关。图 1-16 所示伏安特性曲线关于原点对称,说明元件对不同方向的电路或不同极性的电压表现一样。这种性质称为双向性,是所有线性电阻元件具备的。因此在使用线性电阻时,两个端钮没有任何区别。

由(1-22)式或图 1-16 可知:在任一瞬间线性电阻的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)所决定,而与该时刻以前的电流(或电压)的各种值无关。也就是说,线性电阻的电压(或电流)不能“记忆”电流(或电压)在“历史”上所起的作用。这种无记忆的性质不只