

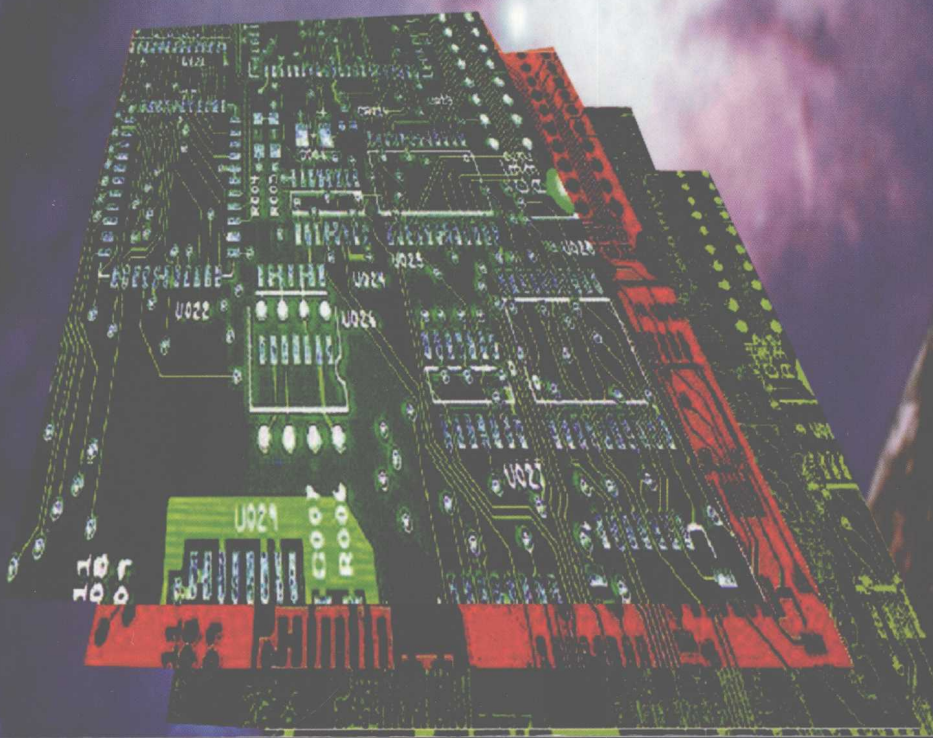
电工原理

(原书名：电路基础)

(第二版)

王定中 林继尧 梁振权 江勋兰 编

华南理工大学出版社



电 工 原 理

(原书名:电路基础)

(第 二 版)

王定中 林继尧 编
梁振权 江勋兰

华南理工大学出版社
• 广州 •

内 容 简 介

本书是根据最新高等教育自学考试“《电工原理》自学考试大纲”编写的。全书分为电阻电路、正弦稳态电路、动态电路和磁路 4 部分共 11 章,根据电路元件电压和电流的关系、电路电流定律和电压定律,由浅入深地阐明电路分析与计算的方法,以及有关定理的应用;阐明磁的基本概念及基本规律,介绍磁路及带铁心线圈电路的分析方法。书中有丰富的例题和练习题,每章配有总习题。

本书可作为高校、成人高校、电大、大专、高职、中专学校电类各专业的教材及参加全国自学考试人员的参考书,也可供科技人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工原理/王定中,林继尧,梁振权,江勋兰编. —2 版. —广州:华南理工大学出版社, 1999.4 (2006.12 重印)

ISBN 7-5623-0595-1

I. 电… II. ①王…②林…③梁…④江… III. 电工 IV. TM①

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn

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

责任编辑:傅穗文 詹志青

印刷者:广州华南理工大学印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.5 字数:387 千

版次:1999 年 4 月第 2 版 2006 年 12 月第 8 次印刷

印数:32001~33000 册

定价:22.00 元

版权所有 盗版必究

第二版前言

本书系《电路基础》(1994年2月出版)的修订本,根据全国自学考试指导委员会1998年审订的电工电子与信息类各专业课程设置,增加了“磁路及铁芯线圈”一章,更名为《电工原理》,作为电工电子与信息类各专业的教材出版。在修订的过程中,对原有内容作了认真的校对和个别的修改;保持了原书简明扼要,通俗易懂,说理清楚,逻辑性强的风格。并相应地编写了该书的学习辅导教材。

李于凡教授主审本书,对本书的修改提出了宝贵的意见。编者在此表示衷心的感谢。

参加修订工作的有:王定中、林继尧、江勋兰和梁振权。

编 者

1998年12月

前 言

本教材是根据全国自学考试委员会审定的电子技术专业电路基础教学大纲(1991年修订)编写的。可供电类各专业大专生教学使用。

在编写时,力求做到简明扼要,通俗易懂,说理清楚,逻辑性强。每章开始就指出了该章的基本要求,便于读者自学。每节后附有练习题,每章后有总习题,着重基本概念的理解和基本方法的训练,以利于读者有针对性地复习和练习。

参加本教材编写工作的有:王定中(第一章至第四章),梁振权(第五、六章),江勋兰(第七、八、九章)和林继尧(第十章)。本书承陈国荣教授仔细审阅,并提出了宝贵意见,对本书的进一步修改帮助很大,在此谨表示衷心的感谢。

编 者



1 电路元件和电路定律..... 1	5.4 正弦量的相量表示法 85
1.1 电路模型和电路元件概述..... 1	5.5 RLC 元件伏安关系的相量形式 90
1.2 电流和电压的参考方向..... 2	5.6 阻抗 98
1.3 功率..... 3	5.7 导纳..... 103
1.4 基尔霍夫定律..... 4	5.8 阻抗与导纳的等效变换..... 107
1.5 电阻元件..... 7	5.9 正弦电流电路中的功率..... 112
1.6 电压源..... 9	5.10 正弦电流电路的稳态计算 120
1.7 电流源 12	5.11 最大功率传输 126
1.8 受控电源 13	5.12 非正弦周期电流电路的计算 129
1.9 结束语 16	习题 5 133
习题 1 16	6 三相电路..... 136
2 简单电阻电路的分析 18	6.1 三相电路..... 136
2.1 网络等效的定义 18	6.2 对称三相电路的计算..... 140
2.2 简单电阻电路的计算 19	6.3 不对称三相电路的计算..... 145
2.3 星形网络与三角形网络的等效变换 24	6.4 三相电路的功率及其测量..... 147
2.4 实际电源的两种模型 27	习题 6 151
2.5 含源支路的串并联 29	7 耦合电感和理想变压器..... 153
2.6 含受控源电路的等效变换及化简 32	7.1 耦合电感的伏安关系..... 153
习题 2 35	7.2 含有耦合电感元件电路的分析..... 157
3 线性电阻电路的一般分析方法 38	7.3 空芯变压器电路的反映阻抗..... 160
3.1 KCL 和 KVL 方程的独立性 38	7.4 理想变压器..... 162
3.2 支路电流法 41	习题 7 164
3.3 回路电流法 44	8 谐振电路..... 166
3.4 节点电压法 50	8.1 串联谐振电路..... 166
习题 3 53	8.2 串联谐振电路的谐振曲线和选择性 168
4 线性电路的几个定理 56	8.3 并联谐振电路..... 171
4.1 叠加定理 56	习题 8 174
4.2 戴维南定理 60	9 双口网络..... 176
4.3 诺顿定理 65	9.1 双口网络及其端口条件..... 176
4.4 最大功率传递定理 67	9.2 双口网络的方程和参数..... 177
4.5 替代定理 69	9.3 有载双口网络..... 182
4.6 互易定理 70	9.4 双口网络的等效电路..... 184
习题 4 72	习题 9 185
5 正弦电流电路和相量法 75	10 动态电路的时域分析 187
5.1 交变电流 正弦量 75	10.1 动态电路及其方程 187
5.2 正弦量的三要素 76	10.2 初始条件的确定 188
5.3 复数 81	

10.3 一阶电路的零输入响应	191	11 磁路及铁心线圈	213
10.4 一阶电路的零状态响应	196	11.1 磁场与磁感应强度	213
10.5 一阶电路的全响应 三要素法	201	11.2 磁通和磁通连续性原理	214
10.6 单位阶跃函数和一阶电路的阶跃 响应	205	11.3 磁场强度 安培环路定律	215
10.7 RLC 串联二阶电路的零输入响应	207	11.4 铁磁物质及其磁性能	216
习题 10	210	11.5 磁路及磁路的基本定律	219
		11.6 简单磁路的计算	223
		11.7 交流作用下的铁心线圈	226
		附录 练习题和习题答案	233
		参考文献	242

1 电路元件和电路定律

本章介绍电路模型和电路元件,包括电阻元件、独立电源和受控电源;引入电流、电压的参考方向,进一步阐明基尔霍夫定律是集总参数电路的基本定律。

本章的内容是本课程的基础,虽然有些内容已在物理学中接触过,但现在要从电路的角度深入理解其含义。由于本章的内容与以后各章的内容密切相关,而有些概念也要在学习了后面各章的内容后才能深入理解,因此,在以后的学习中尚需经常复习本章的内容。

1.1 电路模型和电路元件概述

各种实际电路是由实际部件(例如电阻器、线圈、电容器、晶体管、变压器等)相互联接而构成的。有一些实际电路可用来传输能量和变换能量。如一个电力系统,可以把发电厂发电机组产生的电能,通过变压器、输电线输送到用户。有一些实际电路可用来对电信号进行处理。如一部收音机,能把接收到的微弱信号进行放大、变换(如变频、检波),最后以声音的形式从喇叭输出。尽管实际电路的形式和功能是多种多样的,均可用不同的电路去完成各自的任務,然而,它们之间存在着共同的规律。电路理论这门学科正是在这种共同的基础上发展的。电路分析的目标是计算电路中各部件的端电压和电流。

电路理论和其他学科一样,使用理想化的模型来描述所研究的物理系统——实际电路。各种实际部件的电磁现象,按其性质可分为:消耗电能、供给电能、储存磁场能量、储存电场能量等等。而对各种性质的电磁现象,分别用一理想元件来表征。例如:消耗电能的用理想电阻元件来表征;储存磁场能量的用理想电感元件来表征;储存电场能量的用理想电容元件来表征;等等。当然,实际部件的电磁现象是很复杂的。例如:电阻器、电烙铁、电炉丝等,除消耗电能的特性外,还有磁场和电场方面的特性,不过消耗电能的特性是主要的。为此,忽略次要因素,用理想电阻元件来作电阻器、电烙铁、电炉丝等部件的模型。与此同时,对于每一种理想元件,用一定的数学关系来表征它。因此,把模型看作是系统物理特性的数学抽象,是物理系统的一种近似。显然,电路模型也就是一种数学模型。

虽然理想元件是从实际电路部件中抽象出来的假想元件,但反过来,又能用理想元件或其组合来表示实际部件的主要电磁特性,即用来构造部件的模型。因此,可以认为:为了构造部件的模型(如模拟电子技术课程中讲到晶体管小信号等效电路,即晶体管模型),在电路理论中,明确定义了一批电路元件,这些电路元件是理想元件,或称为假想元件。这样,在电路理论中所用的全部元件都是有严格定义的,每一种元件同时用一种电路符号来表征。本书所介绍的各种元件以及电路中的元件都是指假想元件,而不是实际元件,今后一律简称元件。

定义元件、构造实际部件的模型,这实际上已经是作了集总的假设。即只考虑了实际部

件的电磁性质,而没有考虑部件的尺寸和大小。因此,所讨论的元件是集总参数元件,由这些元件互相联接而组成的电路称为集总参数电路。画出的电路图,不反映实际电路的几何尺寸,联接导线无电阻,联线的长短、形状均无关紧要。

顺便指出,用模型来表示实际电路,不可避免会带来误差。一个部件的模型是根据具体情况来构成的。显然,模型越简单,分析和计算也就越容易,但误差较大;反之,模型愈精确,分析和计算也就愈复杂。因此,该部件的模型不是唯一的。在讨论到具体工程问题时,如何协调得失,选择最佳方案是重要的,但这不是本课程的任务。本课程的任务是在选择模型之后,分析和计算由模型构成的电路,即所分析和计算的电路是由理想元件构成的电路。因此,在本书中出现诸如电流或电压为无限大的说法,对于实际电路是不可能出现的,而对于由电路元件构成的电路来说是允许的。

1.2 电流和电压的参考方向

电路元件有很多种,具有两个引出端钮的叫做二端元件,有三个或三个以上端钮的叫做多端元件。

设有一个任意的二端元件,其端钮分别记为 a 和 b,如图 1-1 所示。

图中方框用来泛指元件,暂且不考虑元件本身的性质,视为一条支路。

下面来说明支路电流和元件端电压的参考方向。

在物理学中,把单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流强度,简称电流,用数学式子表示为

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。

电流在二端元件中流动,它有两种可能的流动方向。然而,对于一般的电路来说,在求解之前通常并不知道电流的实际流动方向。因此,在求解之前,先设定电流的参考方向(参考方向是任意设定的方向),然后根据电路的基本定律求出电流。若求得电流为正值,则表明电流的实际方向与所设的参考方向一致;若所得电流为负值,则表明电流的实际方向与所设参考方向相反。在电路中,电流的参考方向用箭头表示(如图 1-1)。

今后将会看到,在交流电路的计算中,设定电流参考方向的必要性就更明显了。事实上,任何具有正负值的物理量都需要规定其数值正、负的含义,否则无法用数学函数表达,也无法进行运算和研究。在没有设定参考方向的情况下,讨论电流的正、负是没有意义的。

和电流一样,电压也需要预先设定参考方向。在电路图中,电压的参考方向用“+”和“-”符号表示。“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端,如图 1-1 所示。有时也用双下标表示参考方向,如 U_{ab} ,下标的第一个字母 a 为高电位端,下标的第二个字母 b 为低电位端,下标的次序决不可搞错。

电流和电压的参考方向都可以任意选定,它们彼此可以独立设定,不过为了方便起见,常常选用所谓关联参考方向,即:如果电流从标有“+”号的端钮流入,从标有“-”号的端钮流出,即电流与电压降参考方向一致,如图 1-1 所示。这样,在电路图上就只需标出电流的参

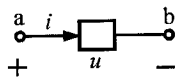


图 1-1 二端元件

考方向或电压的参考极性中任何一种。

1.3 功率

从物理学已知,功率也是一个重要的物理量,用来衡量能量转换的速率。用小写英文字母 p 表示功率*, w 表示能量;在数值上,功率等于单位时间内转换的电能,即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt}$$

设图 1-2 所示的方框是电路的一部分(可能是一个元件,或是多个元件的组合), $u(t)$ 和 $i(t)$ 的参考方向如图(a)所示。设在 dt 时间内,在电场力的作用下,由端钮 a 转移到端钮 b 的正电量为 $dq(t)$,由 a 到 b 的电压为 $u(t)$,在转移过程中电荷失去的能量为

$$dw(t) = u(t)dq(t)$$

电荷失去的电能为该部分电路所吸收,因此该部分电路吸收的功率为

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

由于电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 都是具有正负值的物理量,因而 $p(t)$ 的值可正可负,由功率的定义式(1-1)可知,当 $u(t)$ 、 $i(t)$ 的参考方向一致时(如图 1-2(a)),若 $p(t) > 0$,即电场力作正功,则电路消耗电能,亦即电路消耗(吸收)功率;若 $p(t) < 0$,即电场力作负功,由式(1-1)所得的功率为电路发出(产生)的功率,或者说电路消耗负功率。

如果电压参考方向与电流参考方向相反,如图 1-2(b)所示,依然用公式(1-1)计算功率,则由于参考方向改变($u(t)$ 和 $i(t)$ 的参考方向由一致变为相反),因而上述结论也要调换,即是说:若 $p(t) > 0$,则电路发出功率;若 $p(t) < 0$,则电路吸收功率。在图 1-2(b)所示的参考方向下,也可以把计算功率的公式改写为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-2)$$

此时若 $p(t) > 0$,则电路消耗(吸收)功率;若 $p(t) < 0$,则电路发出(产生)功率。尽管几种说法表面上不同,但它们表述的本质是一致的,这里包含了对参考方向的正确理解。

在国际单位制中,电压的单位为伏,用 V 表示;电流的单位为安,用 A 表示;则功率的单位为瓦特,简称瓦,用符号 W 表示。

例 1-1 试计算图 1-3 所示各元件吸收或产生的功率。

解 在图(a)中,电流、电压的参考方向相同,应用式(1-1)计算

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

$p < 0$,表明元件产生功率。

在图(b)中,电流、电压的参考方向相反,应用式(1-2)计算

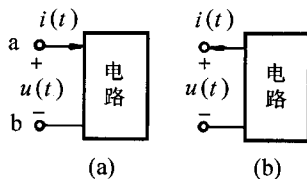


图 1-2 电路的一部分

* 大写字母 P 用于表示直流电路的功率和交流电路的平均功率。

$$p = -(-3)(2) = 6 \text{ W}$$

$p > 0$, 元件吸收功率。

在图(c)中, 电流、电压的参考方向相反, 应用式(1-2)计算

$$p = -(2)(-3) = 6 \text{ W}$$

$p > 0$, 元件吸收功率。

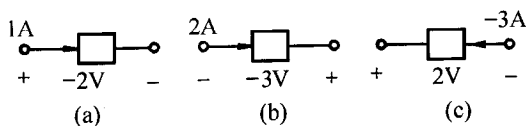


图 1-3 例 1-1

练习题

1-1 在图 1-4 所设参考方向下, 若按式(1-1)计算功率得正值, 该元件发出的功率是正还是负? 消耗的功率是正还是负?

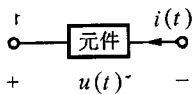


图 1-4 练习题 1-1

1-2 两电路相联接, 如图 1-5 所示, 已知 $i(t) = 1\text{A}$, $u(t) = 2\text{V}$, 试分别求出电路 A 和 B 发出的功率。

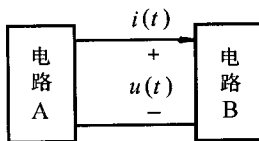


图 1-5 练习题 1-2

1.4 基尔霍夫定律

本节将研究集总参数电路中两个基本定律——基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, 简记 KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, 简记 KVL)。这两个定律已在物理学中提到过, 它们是基尔霍夫于 1848 年首先提出的。

在叙述定律之前, 以图 1-6 所示的电路为例, 介绍几个以后将经常用到的名词。

集总参数电路是由元件联接而成的, 至于各元件在空间放置的位置, 是无关紧要的。各元件间的连线看作是理想的(即连线看作是没有电阻的, 其长短和形状无关紧要)。一般来说, 电路中的每一个二端元件称为一条支路, 但有时为了分析和计算方便, 也可以把两个或多个串联的元件(如两个电阻串联或电阻与电压源串联)合并当作一条支路。把支路互相联接起来的点, 如图 1-6 电路中的①、②、③和④, 称为节点。电路中的任一闭合路径称为回路。例如图中元件 1、4、2 和元件 1、6、3 均构成回路, 该电路共有七个回路。在回路内部不另含有支路的回路, 称为网孔。例如图中元件 1、4、2, 元件 2、5、3 和元件 4、5、6 均构成网孔, 该电路共有三个网孔。显然, 网孔是回路的一种特殊情况。元件 1、4、5、3 构成的回路, 回路内部有元件 2, 所以它不是网孔。

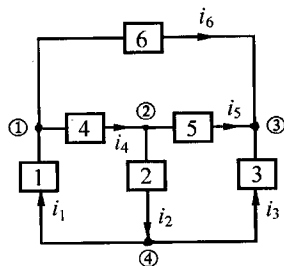


图 1-6 说明 KCL 的示意图

在图 1-6 电路中, 已标出各支路电流的参考方向, 元件的端电压称为支路电压。

首先说明 KCL。

根据电荷守恒原理, 流入某节点的电荷不能在该节点堆积, 而必将流出去。例如图 1-6 电路中的节点①, 流入节点的电流 i_1 等于流出节点的电流 i_4 和 i_6 之和, 即

$$i_1 = i_4 + i_6$$

上式也可以写成

$$i_1 - i_4 - i_6 = 0 \quad \text{或} \quad -i_1 + i_4 + i_6 = 0$$

这表明流出(或流入)节点①的电流的代数和等于零。至此,可以将 KCL 表述如下:

对于电路中任一节点,在任一时刻,流出(或流入)该节点的所有支路电流的代数和恒为零。其数学式是

$$\sum_K i_K = 0 \quad (1-3)$$

若规定流出节点的支路电流取正号,流入节点的电流取负号,图 1-6 电路中四个节点可列出四个电流方程如下:

$$\text{节点①} \quad -i_1 + i_4 + i_6 = 0$$

$$\text{节点②} \quad i_2 - i_4 + i_5 = 0$$

$$\text{节点③} \quad -i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

$$\text{节点④} \quad i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

应该注意到,支路电流的方向是指参考方向,而不是实际方向,因而电流的值是代数量,可正可负。

例 1-2 图 1-7 所示电路中,支路电流的参考方向已在图中标出。已知 $i_1 = 5\text{A}$, $i_2 = 2\text{A}$, $i_3 = -3\text{A}$ 。试求 i_4 。

解 根据(1-3)式,流出节点 A 的支路电流取正号,流入节点的支路电流取负号,可得

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

以已知数据代入,得

$$-(5) + (2) + (-3) - i_4 = 0 \quad (1-4)$$

解之得 $i_4 = -6\text{A}$

i_4 得负值说明 i_4 的实际方向与参考方向相反。在这种情况下,不需改图中所标的方向,因为所标的参考方向配合着 $i_4 = -6\text{A}$,已足以说明 i_4 的实际方向。

通过这个例题可以看到,在列写 KCL 方程时,常常要和两套符号打交道,其一是方程中各项前的正、负号,这取决于电流参考方向对节点的相对关系。按我们的规定,参考方向离开节点,电流 i 前冠以正号;参考方向指向节点,电流 i 前冠以负号。其二是电流本身数值的正负号,如式(1-4)中各括弧内所示,其正负取决于支路电流的参考方向与实际方向之间的关系,参考方向与实际方向一致时为正值,相反时为负值。

此外,还可以把 KCL 推广到电路中的任一假想的闭合曲面,如图 1-8 所示的电路中,对节点①、②和③可写出 KCL 方程如下:

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

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

$$-i_6 - i_2 - i_3 = 0$$

三式相加,得

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

由此可见,对于任一假想闭合曲面,流出(或流入)该闭合曲面的所

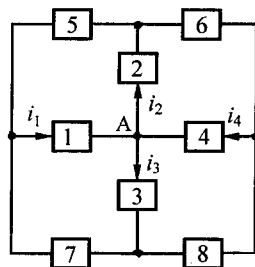


图 1-7 例 1-2

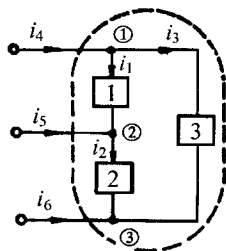


图 1-8 广义节点

有支路电流的代数和为零。也就是说, $\sum_K i_K = 0$ 也适用于闭合曲面。闭合曲面又可以称为广义节点。

又如图 1-9 中, 两部分电路 A 和 B 之间只有一条导线相联接, 则流过该导线的电流必然为零。只要我们作一闭合曲面 S 包围电路 B, 如图所示, 根据闭合曲面列写 KCL, 就容易证明 $i = 0$ 的结论。由此得出一个重要的结论: 电流只能在闭合的电路内流通。如果两部分电路 A 和 B 之间有两条导线相联接, 那末它们之间是会有电流流通的。

其次, 说明 KVL。

KVL 可表述如下:

对于任意一个回路, 按设定的方向沿回路绕行一周时, 任一时刻各支路电压的代数和恒为零。其数学式是

$$\sum_K u_K(t) = 0 \quad (1-5)$$

以图 1-10 为例来说明 KVL。图中画出了 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 四个回路的绕行方向, 绕行方向是任意选取的。支路电压参考方向如图所示。这里规定: 支路电压参考方向与回路绕行方向一致时, 支路电压前冠以正号, 相反时冠以负号。回路 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 的 KVL 方程如下:

$$\begin{aligned} l_1: & \quad u_1 + u_2 + u_4 = 0 \\ l_2: & \quad -u_4 - u_5 + u_6 = 0 \\ l_3: & \quad -u_2 - u_3 + u_5 = 0 \\ l_4: & \quad u_1 - u_3 + u_6 = 0 \end{aligned}$$

不难看出, 上述 4 个方程并不是彼此独立的。由前 3 个方程之和可以得出第 4 个方程。顺便指出, 图 1-10 除已标出的 4 个回路外, 还有 3 个回路, 它们是 1652、1453 和 4632。也就是说, 该图共有 7 个回路, 可列出 7 个 KVL 方程, 但只有三个方程是独立的。在列写方程时, 保证方程的独立性是很重要的, 这将在第三章中讨论。

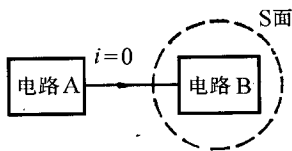


图 1-9 两部分电路间只有一条导线联接

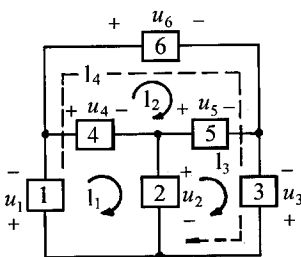


图 1-10 说明 KVL 的示意图

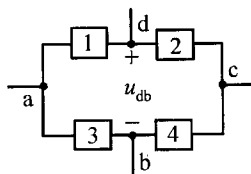


图 1-11 假想回路

KVL 也可以推广用于电路中的假想回路。例如在图 1-11 中, 可以假想有回路 $bcd b$, 其中 bd 两节点间并没有支路。对于这个假想回路, 如从节点 d 出发, 顺时针方向绕行一周, 有

$$u_{dc} + u_{cb} - u_{db} = 0 \quad \text{或} \quad u_{db} = u_{dc} + u_{cb}$$

为了强调一下, 把 KCL 和 KVL 主要特点归纳如下:

KCL 是支路电流之间的线性约束, KVL 是支路电压之间的线性约束, 在数学上表现为线性代数方程组。这些约束与元件的性质无关。因此, 这两条定律能用于任何集总参数电路

(包括线性和非线性,时变和时不变,含源和无源电路)。

例 1-3 电路如图 1-12 所示,已知 $i_1 = 2\text{A}$, $i_3 = -3\text{A}$, $u_1 = 10\text{V}$, $u_2 = 5\text{V}$ 。试计算其他的支路电流和电压。

解 已设定支路电流和电压的参考方向,依据式(1-3),列出节点 a 的 KCL 方程为

$$i_1 + i_3 + i_4 = 0$$

代入数值 $2 + (-3) + i_4 = 0$

得 $i_4 = 1\text{A}$

依据式(1-5), l_1 和 l_2 两个回路的 KVL 方程为

$$u_1 - u_3 - u_2 = 0$$

$$u_3 + u_4 = 0$$

代入数值 $10 - u_3 - 5 = 0$

解得 $u_3 = 5\text{V}$, $u_4 = -u_3 = -5\text{V}$

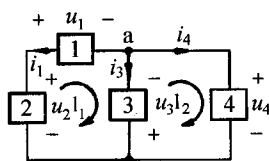


图 1-12 例 1-3

练习题

1-3 已知图 1-13 电路中, $i_1 = 2\text{A}$, $i_2 = 1\text{A}$, $i_3 = -4\text{A}$, $i_4 = 3\text{A}$, 求所有其他支路电流。

1-4 求图 1-14 所示电路中电流 i 和 i_7 的值。

1-5 求图 1-15 所示电路中电压 u 的值。

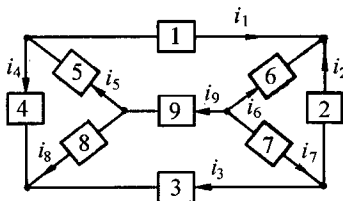


图 1-13 练习题 1-3

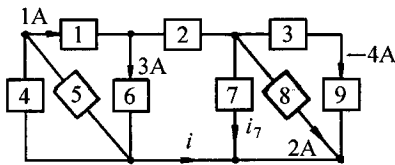


图 1-14 练习题 1-4

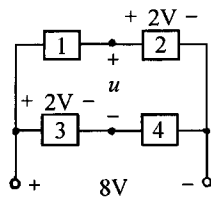


图 1-15 练习题 1-5

1.5 电阻元件

前已述及,电路理论研究的对象是电路模型,而不是实际电路,电路模型的基本单元是电路元件。从本节起,将定义一个线性时不变无源元件(电阻元件),2个独立电源和4个受控电源,共7个元件。本节讨论电阻元件。

线性时不变电阻元件是一个二端元件,在任何时刻它两端的电压与电流的关系服从欧姆定律。电阻元件的电路符号如图 1-16 所示。

设定电流和电压的参考方向,欧姆定律可以写成如下形式:

对于图 1-16(a)(关联方向)

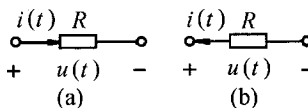


图 1-16 线性电阻元件

(a) 关联方向; (b) 非关联方向

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-6)$$

对于图 1-16(b)(非关联方向)

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-7)$$

显而易见,由于图 1-16(b)中的电流 $i(t)$ 与图 1-16(a)中 $i(t)$ 的参考方向不同,故式(1-6)与式(1-7)相差一个负号。因此,公式必须与电路图及其参考方向配套使用。

式(1-6)可以写成

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

式中 $G = \frac{1}{R}$ 。 R 称为电阻, G 称为电导。电阻的单位是欧姆,简称欧,用符号 Ω 表示;电导的单位是西门子,简称西,用符号 S 表示。线性电阻元件可以用 R 或 G 来表征它的特性,因此 R 或 G 是线性电阻元件的参数。时不变是指参数值与时间无关(不随时间改变)。

如果将欧姆定律表示的伏安关系式(1-6)在直角坐标中用曲线表示,这一关系曲线称为伏安特性曲线。由于欧姆定律反映出电阻元件两端电压与电流之间的线性关系,线性电阻元件的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线(图 1-17)。若横轴与纵轴坐标比例尺相同,则有

$$R = \frac{u}{i} = \tan\alpha$$

式中, α 是伏安特性曲线与电流轴线之间的夹角。特性曲线斜率大,则 R 大。

电阻元件有两种特殊情况:第一, $R = \infty$ 或 $G = 0$, 此时不论电阻元件两端的电压值是多少,流过电阻支路的电流恒为零,即 $i = Gu = 0$ 。这种情况称为开路,其伏安特性曲线如图 1-18 所示,此时特性曲线与 u 轴重合。第二, $R = 0$ 或 $G = \infty$, 此时不论电流值为多少,电阻元件两端的电压值恒为零,即 $u = Ri = 0$ 。这种情况称为短路,其伏安特性曲线如图 1-19 所示,此时特性曲线与 i 轴重合。

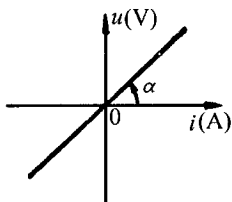


图 1-17 线性电阻元件的伏安特性

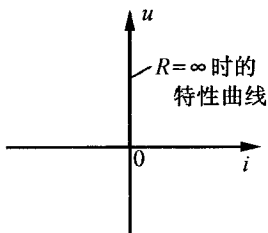


图 1-18 开路时特性曲线与 u 轴重合

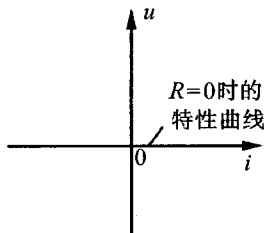


图 1-19 短路时特性曲线与 i 轴重合

下面讨论电阻元件消耗的功率。设电阻的 u, i 参考方向关联(图 1-20)。将式(1-6)代入式(1-1),可得电阻元件消耗(吸收)功率的计算公式

$$p(t) = Ri^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} \quad (1-8)$$

可见,电阻元件总是消耗功率的。

例 1-4 设电阻元件参数为 R , 元件两端电压 $u(t) = U_m \sin \omega t$ V。试求流过电阻元件的电流 $i(t)$ 及电阻元件消耗的功率 $p(t)$ 。

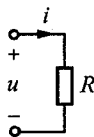


图 1-20 电阻元件

解 设 u, i 参考方向关联(如图 1-20), 按式(1-6), 流过元件的电流

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \text{ A}$$

元件消耗的功率

$$p(t) = \frac{U_m^2}{R} \sin^2 \omega t \text{ W}$$

顺便指出, 实际元件电阻器, 允许流过它的电流或能承受的功率是有限制的, 通常把限制值称为额定值。电阻器的额定值用功率表示, 并同时标出标称电阻值, 如 $1/4\text{W}, 200\Omega$ 。电灯泡的额定值用功率和电压表示, 如 $40\text{W}, 220\text{V}$ 。

例 1-5 一个 $200\Omega, 1/8\text{W}$ 的碳膜电阻, 用于直流电路。试问在使用时电流和电压不得超过多大的数值?

解 据式(1-8)

$$p = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

故有

$$|i| = \sqrt{\frac{p}{R}} = \sqrt{\frac{0.125}{200}} = 25 \text{ mA}, \quad |u| = \sqrt{pR} = \sqrt{0.125 \times 200} = 5 \text{ V}.$$

答: 电流不超过 25mA , 电压不超过 5V 。

例 1-6 一个 $220\text{V}, 40\text{W}$ 的灯泡, 接在 220V 直流电源上, 通过灯泡灯丝的电流是多少?

解 据式(1-1)有

$$i = \frac{p}{u} = \frac{40}{220} = 0.1818 \text{ A}$$

练习题

1-6 一个 $10\text{k}\Omega, 1/8\text{W}$ 的电阻器, 使用时至多能容许多大的电流流过? 至多能容许加多大的电压?

1-7 有一个手电筒的小灯泡, 额定电压为 3V , 允许流过它的最大电流是 300mA , 小灯泡的额定功率是多少?

1.6 电压源

电路中有电流流动时, 电阻元件就要消耗能量, 电路中必须要有能量的来源——电源。

电源可分为独立电源与非独立电源(或称受控电源)两类。

独立电源有独立电压源和独立电流源两种元件, 习惯上把“独立”一词省去, 简称电压源和电流源, 而“非独立”或“受控”之词保留, 以示区别。本节先介绍电压源。

如果一个二端元件接通一个任意电路后, 不论流过该二端元件的电流值为多少, 其端电压总是保持定值 u_s 或为某给定时间函数 $u_s(t)$, 则此二端元件就叫做电压源。它的电路符号如图

1-21(a)所示, 数学模型是

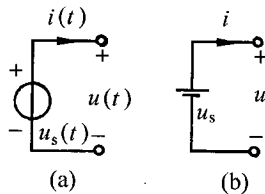


图 1-21 电压源的电路符号

$$u(t) = u_s(t)$$

如果电压源的电压 $u_s(t)$ 等于常数, 这种电压源为直流电压源。直流电压源也可以用图 1-21(b) 所示的电路符号表示(历史上用这一符号表示电池, 并一直延用至今); 图中长线段表示电压源的高电位端, 短线段表示低电位端。直流电压源的伏安特性曲线如图 1-22(a) 所示。由图可见, 无论 i 的大小如何, 是正还是负, u 始终为定值, $u = u_s$, 特性曲线形象地表示出电压源的性质。当 $u_s = 0$ 时, 零值电压源的伏安特性曲线如图 1-22(b) 所示, 曲线与 i 轴重合。不难发现, 零值电压源的伏安特性曲线[图 1-22(b)]与零值电阻元件的伏安特性曲线(图 1-19)一样。此时, 不论流经电压源的电流等于多少, 电压源端电压恒为零。零值电压源实际上是一条短路线。

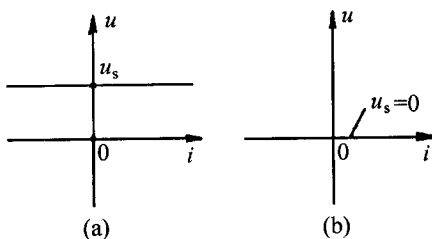


图 1-22 直流电压源的伏安特性曲线

例 1-7 电路如图 1-23 所示, 已知 $u_{s1} = 6\text{ V}$, $u_{s2} = 12\text{ V}$, $R_1 = 6\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, 试求 i_1 和 i_2 。

解 设定电流和电压的参考方向如图所示。由于 R_1 与电压源 u_{s1} 并联, 按照电压源的定义, 不论流过 u_{s1} 的电流为多少, 其电压 u 恒等于 u_{s1} , 即

$$u = u_{s1} = 6\text{ V}$$

据欧姆定律, 有 $i_1 = \frac{u}{R_1} = \frac{6}{6} = 1\text{ A}$

据 KVL, 有

$$u_{s2} + R_2 i_2 - u = 0$$

解得 $i_2 = \frac{u - u_{s2}}{R_2} = \frac{6 - 12}{4} = -1.5\text{ A}$

i_2 为负值, 说明 i_2 的实际方向与图中所设的参考方向相反。

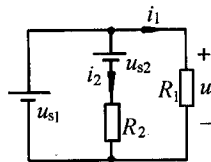


图 1-23 例 1-7

从上例可以看出, 电压源的性质决定了 $u = u_{s1}$, R_1 支路的电压 u 和电流 i_1 与 R_2 支路的参数 (u_{s2} , R_2) 的大小无关。

例 1-8 电路如图 1-24 所示, 已知 $u_{s1} = 6\text{ V}$, $u_{s2} = 12\text{ V}$, $R = 6\ \Omega$, 试求电流 i 及各电压源产生的功率。

解 设电流 i 的参考方向如图所示, 并设定回路绕行方向。依据 KVL, 有

$$Ri + u_{s1} - u_{s2} = 0$$

代入数值, 解得

$$i = \frac{u_{s2} - u_{s1}}{R} = \frac{12 - 6}{6} = 1\text{ A}$$

在计算电压源产生功率时, 既要知道电压源电压与流过它的电流的数值, 又要判明它们的参考方向。对于 u_{s1} , u_{s2} 与 i 的参考方向关联, 按式 (1-1) 计算, 有

$$p_1 = u_{s1} i = 6 \times 1 = 6\text{ W}$$

表明 u_{s1} 吸收 6 W 功率, 即产生 -6 W 功率。对于 u_{s2} , u_{s2} 与 i 的参考方向非关联, 仍按式 (1-1)

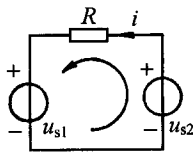


图 1-24 例 1-8