

电工 技术基础

DIAN GONG JI SHU JI CHU

■ 韩东宁 主编



南开大学出版社

电工技术基础

主 编 韩东宁

副主编 张立东 杨中雨

于秀明 李居尚

南开大学出版社

天 津

图书在版编目(CIP)数据

电工技术基础 / 韩东宁主编. —天津: 南开大学出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-310-05177-9

I. ①电… II. ①韩… III. ①电工技术 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 177232 号

版权所有 侵权必究

南开大学出版社出版发行

出版人: 刘立松

地址: 天津市南开区卫津路 94 号 邮政编码: 300071

营销部电话: (022)23508339 23500755

营销部传真: (022)23508542 邮购部电话: (022)23502200

*

北京楠海印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

260 × 185 毫米 16 开本 14.375 印张 267 千字

定价: 42.00 元

如遇图书印装质量问题, 请与本社营销部联系调换, 电话: (022)23507125

内容介绍

《电工技术基础》是面向非电类专业基础课教材。为满足应用型人才培养的教学要求,依据教育部颁发的《高等学校本科电工技术课程教学基本要求》,结合多年教师实践经验编写的,以适应不同专业学科的教学要求。本书概念清晰、重点突出、讲解透彻、通俗易懂,理论与实际结合紧密。

全书共分为七章,包括电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、电路的暂态分析、二阶电路、异步电动机等内容。

本教材可作为高等学校非电类本科、高职高专、成人教育的教学用书,也可作为电工类领域相关学科工程技术人员的参考书。

前 言

《电工技术基础》是一门重要的专业基础课,为适应独立学院教学改革的需要,体现教材与时俱进的特点,在原有教材的基础上,根据我院现行教学大纲和几年教学改革的实践经验编写的。

本书是为满足应用型人才培养的教学需求,依据应用型人才培养的教学特点而编写的。总结了多年的教学经验,在内容上针对独立学院学生的特点,以经典电路理论知识为主,适当编入一些近代电路理论知识。本书注重理论联系实际,提高了对独立学院学生教学的针对性和适应性,为满足专业教学的需要,本书增加了电机、三相电路等内容。还选编了较丰富的例题和习题,以利于完成对学生分析能力的基本训练。

本书由长春理工大学光电信息学院韩东宁主编,张立东、杨中雨、于秀明、李居尚等老师共同参与编写。具体写作分工如下:韩东宁负责全书的修改和定稿,张立东负责编写第五章,杨中雨负责编写第一章和第二章,于秀明负责编写第三章、第六章和第七章,李居尚负责编写第四章,此外冷严松老师参与完成了制图工作。

本书由韩东宁副教授统稿,对书稿进行了认真细致的审校,并提出了许多宝贵意见,本书在编写过程中参考了大量的国内外资料,特此对这些文献的作者表示感谢。本书在编写过程中还得到了长春理工大学光电信息学院各级领导和相关部门的大力支持和帮助,在此向他们表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免出现错误和不足,诚恳希望读者批评指正。

编者

长春理工大学光电信息学院

目 录

第1章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路的作用与组成部分	1
1.2 电路模型	2
1.3 电路的基本物理量及参考方向	3
1.4 电路的基本定律	6
1.5 电阻元件	11
1.6 电容元件与电感元件	20
1.7 电压源和电流源	26
1.8 受控源	30
习题	32
第2章 电路的分析方法	39
2.1 支路电流法	39
2.2 网孔电流法	41
2.3 节点电压法	45
2.4 叠加原理	49
2.5 戴维南定理及诺顿定理	51
习题	57
第3章 正弦交流电路	62
3.1 正弦交流电的基本概念	62
3.2 正弦量的相量表示法	66
3.3 单一参数元件的正弦响应	71
3.4 RLC 串联交流电路	81
3.5 RLC 并联交流电路	87
3.6 复阻抗的串联与并联	90
3.7 复杂正弦交流电路的分析与计算	95

3.8	交流电路的频率特性	96
3.9	功率因数的提高	105
	习题	109
第4章	三相电路	114
4.1	三相电源	114
4.2	负载星形联结的三相电路	119
4.3	负载三角形联结的三相电路	125
4.4	三相电路的功率和测量	129
4.5	安全用电技术	135
	习题	145
第5章	电路的暂态分析	149
5.1	换路定则与电压和电流初始值的确定	150
5.2	RC 电路的响应	154
5.3	一阶线性电路暂态分析的三要素法	167
5.4	微分电路与积分电路	169
5.5	RL 电路的响应	173
	习题	181
第6章	二阶电路	185
6.1	RLC 串联电路的零输入响应	185
6.2	RLC 串联电路的全响应	192
6.3	RLC 并联电路的响应	193
	习题	195
第7章	异步电动机	196
7.1	三相异步电动机	196
7.2	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	204
7.3	三相异步电动机的起动	207
7.4	三相异步电动机的调速、反转与制动	211
7.5	异步电动机的铭牌	214
7.6	三相异步电动机的保护控制	216
7.7	异步电动机的单相运行及单相异步电动机	217
	习题	219
参考文献	221

第1章 电路的基本概念和基本定律

本章主要讨论组成电路的基本元件及其基本物理量、电路的基本定律、电路的工作状态以及电压和电流的参考方向等,这些内容都是分析与计算电路的基础。其中有些内容虽然已在物理课中讲过,但是为了加强理论的系统性和满足电工技术的需要,仍列入本章中,以便读者对这些内容的理解能进一步巩固和加深。

1.1 电路的作用与组成部分

电路是电流的通路,它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的,日常生活中使用的手电筒电路就是一个最简单的电路,它是由于电池、灯、开关、手电筒壳(充当连接导体)组成的,电路中的各种部、器件可以用图形符号表示,采用此种符号可绘出表明各部、器件相互连接关系的电气图,手电筒的电气图如图 1-1(a)所示。

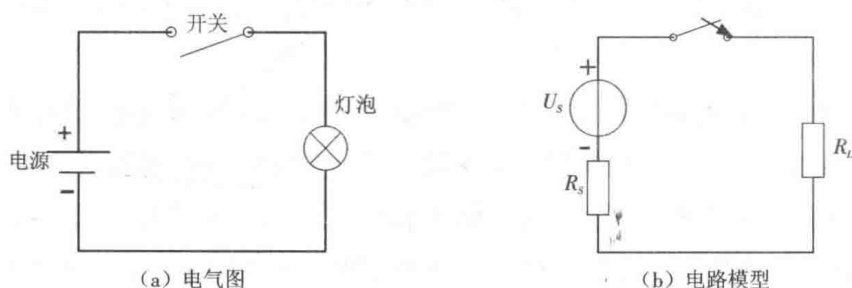


图 1-1 手电筒电路

电路的另一种作用是传递和处理信号,常见的例子如扩音机,其电路示意图如图 1-2所示。先由话筒把声音(通常称为信息)转换为相应的电压和电流,它们是电信号。而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原成声音信号。由于由话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,因此中间还要用放大器来放大。信号的这种转换和放

大,称为信号的处理。

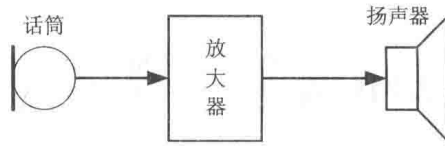


图 1-2 扩音机电路示意图

在图 1-2 中,话筒是输出信号的设备,称为信号源,相当于电源,但与电池这种电源不同,信号源输出的电信号(电压和电流)的变化规律是取决于所加的信息的。扬声器是接受和转换信号的设备,也就是负载。

不论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或电流称为激励,它推动电路工作。由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路结构和元件参数的条件下,讨论电路的激励和响应之间的关系。

1.2 电路模型

实际电路都是由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件所组成,诸如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等,它们的电磁性质较为复杂。最简单的例如一个白炽灯,它除具有消耗电能的性质(电阻性)外,当通有电流时还会产生磁场,说明它还具有电感性,但电感微小,可忽略不计。于是可认为白炽灯是一电阻元件。

为了便于对实际电路进行分析和用数学描述,将实际元件理想化(或称模型化),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,可以用几种“集总参数元件”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,忽略其次要因素,把它近似地看作理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型,它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在理想电路元件(以后本书中理想两字略去不写)中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等。这些元件分别由相应的参数来表征。例如常用的手电筒,其实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,电路模型如图 1-1(b)所示。

今后我们所分析的都是指电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件用规定的图形符号表示。不论电能的传输和转换,或者信号的传递和处理,都要通过电流、电

压和电动势来实现,所以在分析与计算电路之前,首先讨论一下电路的这几个基本物理量。

1.3 电路的基本物理量及参考方向

1.3.1 电流

电流是由电荷(带电粒子)有规则的定向运动而形成的。电流在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。设在极短的时间 dt 内通过导体横截面 S 的微小电荷量为 dq ,则电流为

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

式(1-1)表示电流是随时间而变化的,是时间的函数。

如果电流不随时间而变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$,则这种电流称为恒定电流,简称直流。直流常用大写字母 I 表示,所以式(1-1)可改写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中 q 是在时间 t 内通过导体横截面 S 的电荷量。

我们习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向(实际方向)。电流的方向是客观存在的。但在分析较为复杂的直流电路时,往往难于事先判断某支路中电流的实际方向;对于交流信号来讲其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭标来表示它的实际方向。为此,在分析与计算电路时,常可任意选定某一方向作为电流的正方向,或称为参考方向。所选的电流的正方向并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与其正方向一致时,则电流为正值[如图 1-3(a)];反之,当电流的实际方向与其正方向相反时,则电流为负值[如图 1-3(b)]。因此,在正方向选定之后,电流之值才有正负之分。

本书中电路图上所标示的电流方向都是正方向。

电流的正方向除用箭标表示外,还可以用双下标表示。如图 1-3 中的电流可以表示为 I_{ab} ,即正方向是由 a 指向 b 的电流。如果正方向选定为由 b 指向 a ,则为 I_{ba} ,两者之间相差一个负号,即

$$I_{ab} = -I_{ba} \quad (1-3)$$

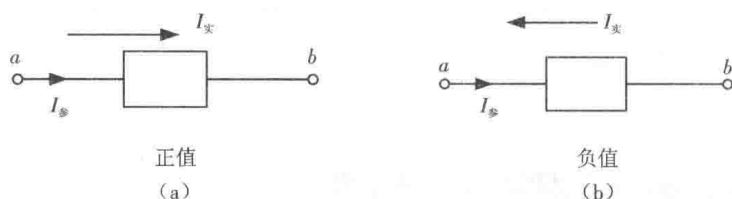


图 1-3 电流的正方向

我国法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。在国际单位制中,电流的单位是安培(A)。当1 s(秒)内通过导体横截面的电荷量为1 C(库仑)时,则电流为1 A。计量微小的电流时,以毫安(mA)或微安(μA)为单位。1 mA 是千分之一安(10^{-3} A), 1 μA 是百万分之一安(10^{-6} A)。

1.3.2 电压与电动势

为便于研究问题,在分析电路时引用“电压”这一物理量,电压有时也称为“电位差”,用符号 u 表示。 a 、 b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,也就是单位正电荷从 a 点(高电位)移到 b 点(低电位)所失去的能量,即

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

在电场内两点间的电压也常称为两点间的电位差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

式中 V_a 为 a 点的电位, V_b 为 b 点的电位。

正电荷在电场的作用下,从高电位向低电位移动。这样,电极 a 因正电荷的减少而使电位逐渐降低,电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高,其结果是 a 和 b 两电极的电位差逐渐减小到等于零。与此同时,联接导体中的电流也相应地减小到等于零。

为了维持电流不断地在联接导体中流通,并保持恒定,则必须使 a 、 b 间的电压 U_{ab} 维持恒定,也就是要使电极 b 上所增加的正电荷经过另一路径流向电极 a 。但由于电场力的作用,电极 b 上的正电荷不能逆电场而上,因此必须要有另一种力能克服电场力而使电极 b 上的正电荷流向电极 a 。电源就能产生这种力,我们称它为电源力。例如在发电机中,当导体在磁场中运动时,导体内便出现这种电源力;在电池中,电源力存在于电极与电解液的接触处。我们用电动势这个物理量衡量电源力对电荷做功的能力。电源的电动势 E_{ab} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经由电源内部(也是导体)移到高电位端 a 所做的功,也就是单位正电荷从 b 点(低电位)移到 a 点(高电位)所获得的电能。在电源力的作用下,电源不断地把其他形式的能量转换为电能。

电压和电动势都是标量,但在电路分析时,和电流一样,我们也说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位端指向低电位端,即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端,即为电位升高的方向。

如同需要为电流规定参考方向一样,也需要为电压规定参考极性。电流的参考方向用箭头表示,电压的参考极性则在元件或电路的两端用“+”、“-”符号来表示。“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端,如图1-4所示。

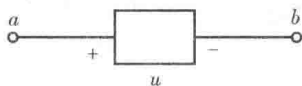


图1-4 电压参考极性的表示方式

综上所述,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,彼此原是可以独立无关地任意假定的,但为了方便起见,常采用关联的参考方向:电流参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向一致,即电流与电压降参考方向一致,如图1-5(a)所示。这样,在电路图上就只需标出电流的参考方向、电压的参考极性中的任何一种,如图1-5(b)、(c)所示。

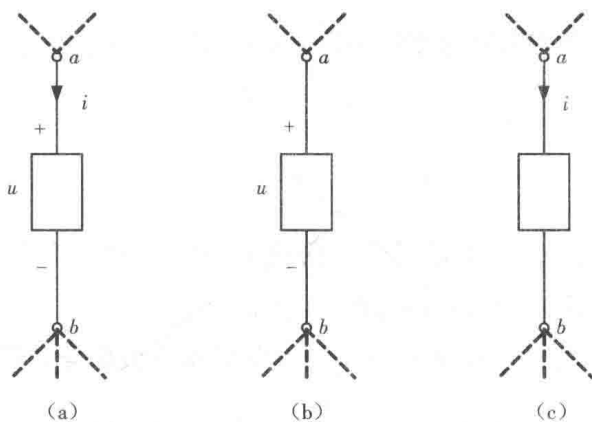


图1-5 关联的参考方向

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V)。当电场力把1 C的电荷量从一点移到另一点所做的功为1 J(焦耳)时,则该两点间的电压为1 V。计算微小的电压时,则以毫伏(mV)或微伏(μV)为单位。计量高电压时,则以千伏(kV)为单位。

电动势的单位也是伏特。

1.3.3 功率与能量

电路中存在着能量的流动,现在来讨论电路中的某一段所吸收或提供能量的速率

即功率的计算。功率用符号 p 表示。如图 1-6 所示为电路的一部分,它可能是产生电能的电源,也可能是取用电能的负载。



图 1-6 功率与电流电压参考方向的关系

在单位时间内电路吸收的电功,叫作电功率,常简称为功率,用 P 表示。在电压与电流关联参考方向下,有

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-6)$$

若功率是时间的函数,则电路吸收的瞬时功率的表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

电功率的单位是瓦特,简称瓦,用符号 W 表示。

当电压、电流采用关联参考方向时,如图 1-6(a)所示,可用式(1-6)、(1-7)计算吸收功率。

当采用非关联参考方向时,如图 1-6(b)所示,则计算吸收功率的公式应为

$$P = -UI \quad (1-8)$$

或

$$p = -ui \quad (1-9)$$

若算得的功率为正值,表示确是吸收的功率,电路元件是负载;若算得的功率为负值,表示是产生(或发出)功率,电路元件是电源。

在图 1-6(a)所示的参考方向下,在 t_0 到 t 的時刻内该部分电路吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-10)$$

在国际单位制中,能量的单位为焦耳,简称焦(J)。

1.4 基尔霍夫定律

集总电路由集总元件联接而成,电路中的各个支路电压和支路电流必然要受到两类约束。一类是元件的特性对本元件的电压和电流造成的约束,例如线性电阻元件的电压和电流必须满足欧姆定律,这种只取决于元件性质的约束,称为元件约束;另一类

是元件的联接给各支路电压和支路电流带来的约束,也就是网络结构决定的约束,与元件性质无关,所以也叫拓扑约束,表示这类约束关系的是基尔霍夫定律。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,它们是集总电路中分析和研究的对象。我们一般将流经同一电流的看作一条支路。

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。支路的连接点称为节点。在如图 1-7 所示电路中有 5 条支路,3 个节点。显然节点是二条或二条以上支路的连接点。初学者往往把图中的 a 点与 b 点看成是两个节点,这是不对的,因为 a 点与 b 点是用理想导体相连的,从电的角度来看,它们是相同的端点,可以合并成一点,电路图可以改画,只要保证各元件间的连接关系不变即可。按照将流经同一电流的看成一条支路,把图中的元件 4 和元件 5 作为一条支路,这样,连接点 3 就不算作节点。可以将节点的定义总结为三条或三条以上支路的连接点。那图 1-7 电路中就应该有 4 条支路,2 个节点。我们在解决电路问题时,常如此处理。电路中的任一闭合路径称为回路,图 1-7 中电路有 6 个回路。在回路内部不另含有支路的回路称为网孔,例如,图 1-7 中电路有 3 个网孔。

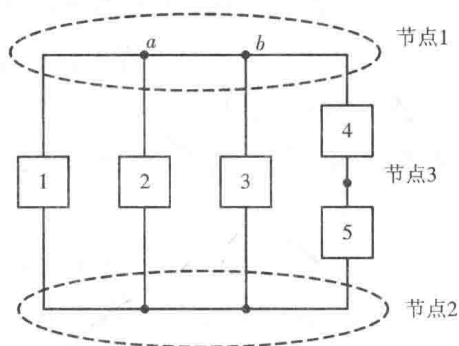


图 1-7 具有三个节点的电路

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律,它包括电流定律和电压定律。

1.4.1 基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL)

在集总电路中,任何时刻,对任一节点,所有支路电流的代数和恒为零。即

$$\sum i = 0 \quad (1-11)$$

例如,对图 1-8 中节点 a ,在图示参考方向下应用 KCL,有

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

上式可以改写成

$$i_1 + i_2 = i_3。$$

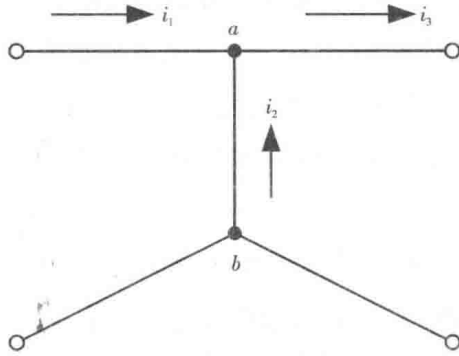


图 1-8 基尔霍夫电流定律

此式表明:任何时刻,流入任一节点的支路电流必定等于流出该节点的支路电流。这是电流连续性的表现。

式(1-11)中,若流出节点的电流前面取“+”号,则流入节点的电流前面取“-”号。这里,首先应当指出,KCL中电流的流向本来是指它们的实际方向,但由于采用了参考方向,所以式(1-11)中是按电流的参考方向来判断电流是流出节点还是流入节点的。其次,式中的正、负号仅由电流是流出节点还是流入节点来决定的,与电流本身的正、负无关。至于电流本身的正、负,完全是由于采用了参考方向而造成的,也就是在运用电流定律时,往往需要和两套符号打交道。其一是方程中各项前的正负号,取决于电流的参考方向与节点的相对关系,流出的为正,流入的为负;其二是电流本身数值的正负号,取决于电流的实际方向与参考方向是否一致,一致的为正,相反的为负。今后在应用KCL时,将均按电流的参考方向来写。

例如,图 1-8 中所示各电流的参考方向已定,并已知 $i_1 = -5 \text{ A}$, $i_3 = 3 \text{ A}$,则按 KCL 有 $-i_1 - i_2 + i_3 = 0$,故 $i_2 = i_3 - i_1 = 3 - (-5) = 8 \text{ A}$ 。所以,从 i_1 、 i_2 和 i_3 的正负又能看出,实际流进节点的电流为 3 A ,流出节点的电流也是 3 A 。

电流定律虽然是对节点而言的,但也适用于电路中的任一闭合面,如图 1-9 所示的电路中,闭合面 S 内有三个节点 1、2、3。在这些节点处,应用 KCL(电流的参考方向如图 1-9 中所示)分别有:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{12} - i_{31}, \\ i_2 &= i_{23} - i_{12}, \\ i_3 &= i_{31} - i_{23}。 \end{aligned}$$

将上面三个式子相加,便得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

或

$$\sum i = 0。$$

这就证明了通过任一闭合面的电流的代数和也总是等于零。

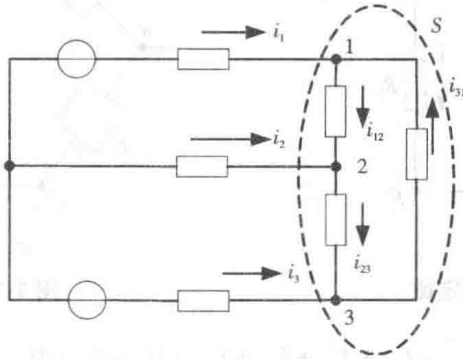


图 1-9 基尔霍夫电流定律的推广

1.4.2 基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)

在集总电路中,任何时刻,沿任一回路内所有支路或元件电压的代数和恒等于零。

即

$$\sum u = 0 \quad (1-12)$$

在应用上式时,首先需要指定一个回路绕行的方向。凡电压的参考方向与回路绕行方向一致者,在式中该电压前面取“+”号;电压参考方向与回路绕行方向相反者,则前面取“-”号。

同理,KVL中电压的方向本应指它的实际方向,但由于采用了参考方向,所以式(1-12)中的代数和是按电压的参考方向来判断的。

图 1-10 给出某电路的一个回路,绕行的方向如图所示。按图中所指定的各元件电压的参考方向及回路绕行方向,式(1-12)可以写为

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{R3} - u_{S3} - u_{S4} - u_{R4} = 0,$$

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{R3} = u_{S4} + u_{R4} + u_{S3}。$$

上式表明,电路中两节点间的电压值是确定的。不论沿哪条路径,两节点间的电压值是相同的。所以,基尔霍夫电压定律实质上是电压与路径无关这一性质的反映。

【例 1-1】如图 1-11 表示一个复杂直流电路中的一个回路。已知各元件的电压为 $U_1 = U_6 = 2 \text{ V}$, $U_2 = U_3 = 3 \text{ V}$, $U_4 = -7 \text{ V}$,试求 U_5 。

解:设 U_5 的参考极性如图中所示。从 a 点出发,顺时针方向绕行一周,由式(1-12)可得

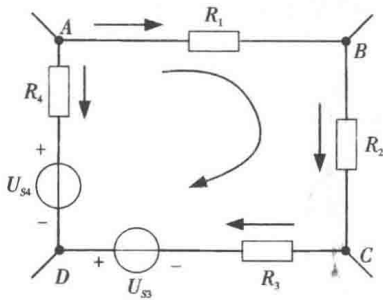


图 1-10 基尔霍夫电压定律

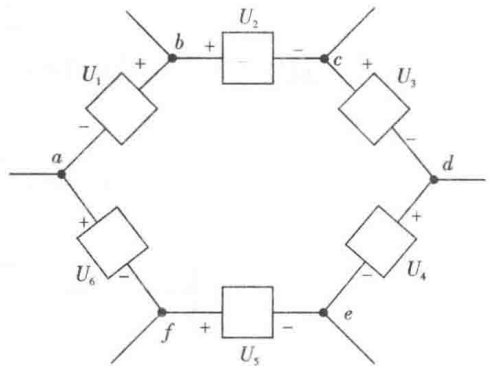


图 1-11 例 1-1 图

$$-U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - U_5 - U_6 = 0 \quad (1-13)$$

将已知数据代入式(1-13)得

$$-(2) + (3) + (3) + (-7) - U_5 - (2) = 0 \quad (1-14)$$

解得

$$U_5 = -5 \text{ V}。$$

U_5 为负值说明其实际极性与图中所假设的参考极性相反。

从本题可以看出,在运用 KVL 时也需和两套符号打交道。方程中各项前的符号,其正负取决于各元件电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,如式(1-13)中所示。在以数值代入时,每项电压本身还有符号,取决于电压降的实际方向与参考方向是否一致,如式(1-14)各括号内所示。

在电路分析中,各元件电压和电流的约束关系 (VCR) 以及基尔霍夫定律 (KCL、KVL) 起着重大的作用。

【例 1-2】在图 1-12 所示的直流电路中,A、B 两点间开路。已知 $U_1 = 6 \text{ V}$, $U_2 = 10 \text{ V}$, $U_3 = 5 \text{ V}$ 。求 U_{AB} 。

解:假定电压的参考方向如图所示,因为基尔霍夫电压定律也是电位单值性的表现,所以它不仅适用于实有回路,而且也适用于假想回路。在图 1-12 中,A、B 两点间虽然断路,但有电压 U_{AB} ,可以假想沿 ABCDFHA 回路绕行一周,由公式(1-12)可列出此假想回路的电压方程式为

$$U_{AB} + U_3 - U_{R_3} - U_2 - U_{R_1} = 0。$$

移项可得

$$U_{AB} = -U_3 + U_{R_3} + U_2 + U_{R_1}。$$

因为

$$U_{R_1} = U_1 - U_2 = 6 - 10 = -4 \text{ V}，$$

所以