

989

TN1133-43
D72

电路分析教程

窦建华 编著

中国科学技术大学出版社

2001·合肥

内 容 简 介

在“电路分析”课程的教学学时大幅度削减的情况下,为适应新的教学计划要求,并考虑到与后续课程的衔接,本书对电路教学的内容进行了精心的选择。与同类教材相比,它删繁就简,强化了基础知识,突出了重点,便于教师教学和学生自学。

本书主要适用于高等院校计算机、电子、通信等专业和学习电路理论的读者。另外,本书还配有多媒体教学软件和学习指导书,可供教师和学生选用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析教程/窦建华编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2001.8
ISBN 7-312-01274-4

I. 电… II. 窦… III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 14940 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,230026)
合肥学苑印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 16.25 字数: 406 千
2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷
印数: 1—6000 册
定价: 25.80 元

前 言

为全面体现“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”的时代精神,全面贯彻落实党和国家的教育方针,坚持教育要适应改革开放和社会主义经济建设的实际需要,加强大学生的文化素质教育,培养适应 21 世纪社会主义现代化建设需要的德、智、体全面发展,基础扎实、知识面宽、能力强、素质高,富有创新精神的高级专门人才,新的教学计划在保证人才基本规格的前提下,对相关课程的教学学时都进行了修订。“电路分析”课程的教学学时也进行了大幅度的削减。

为适应新教学计划的要求,并保证与后续课程的衔接,作者在参考电路分析经典教材的基础上,咨询了多位专家的意见,结合本人多年的教学经验,编写成此书。在编写过程中,作者始终贯彻了精选内容、删繁就简、强化基础、突出重点、丰富例题的思想,所以本书与同类教材相比,具有易学易懂的特点,特别适用于教学学时大幅度删减的情况。

本书主要供高等院校计算机、电子、通信等专业使用。另外,本书还配有多媒体教学软件(曾获全国首届网络课程与多媒体课件大奖赛优秀奖)和学习指导书,供使用此书的教师和学生选用。

合肥炮兵学院朱安常教授担任本书的主审,对全书进行了认真细致的审阅,并提出了许多修改意见。在编写过程中,作者参考和引用了李瀚荪教授编著的《电路分析基础》(第 3 版)(高等教育出版社,1998 年)、秦曾煌教授编著的《电工学(上册)》(第 4 版)(高等教育出版社,1998 年)、邱关源教授编著的《电路(上册)》(第 3 版)(高等教育出版社,1998 年)、王佩珠教授编著的《电路与模拟电子技术》(南京大学出版社,1996 年)等教材的部分内容以及相关的例题和习题,为本书的编写带来了很大的方便。另外,合肥工业大学计算机与信息学院的董素勤、丁志中、陈新老师和合肥炮兵学院的卢胜老师都给予了大力支持,并提出了许多宝贵意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误在所难免,恳请使用本书的师生及读者批评指正。

编 者

2001 年 2 月

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

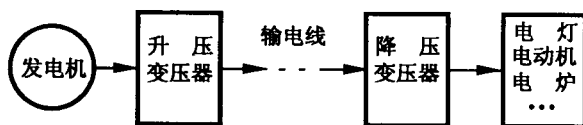
电路的基本概念与基本定律是电路分析的重要基础,本章主要介绍电路模型、理想电路元件、电路的基本物理量以及电路的基本定律。

1-1 电路和电路模型

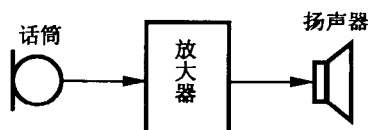
1-1-1 电路

在电子通信、自动控制、计算机、电力等各个领域,人们使用不同的电路来完成各种任务。不同的电路具有不同的功能,电路的基本功能在于传输、变换、处理、存储电能或电信号等。例如,供电电路用来转换、传输电能;整流电路可以将交流电变成直流电;放大电路能把微弱的信号变成强信号;滤波电路能通过有用的信号,而滤除不需要的信号;计算机中的存储器电路能存储原始数据、中间结果和最终结果……电路虽然多种多样,功能也各不相同,但它们都受共同的电路基本规律支配,从而形成了“电路理论”这一学科。

电路是由各种电器元件按一定的方式连接起来所构成的电流通路。电路主要由电源、负载和中间环节组成。在如图 1-1(a) 所示的电力系统中,发电机是电源,是供应电能的设备,它可以把热能、水能或原子能转换为电能;电灯、电动机、电炉等都是负载,是取用电能的设备,它们分别把电能转换为光能、机械能、热能等;变压器和输电线是中间环节,是联接电源和负载的部分,它们起传输和分配电能的作用。图 1-1(b) 为扩音机电路,它的作用是传送和处理信号,话筒把语言或音乐转换为电信号,即相当于电源(或称信号源);放大器为中间环节,它把话筒输出的微弱电信号加以放大,以推动负载扬声器发音。有关信号传送和处理的例子很多,如收音机和电视机电路等。



(a) 电力系统



(b) 扩音机

图 1-1 电路示意图

人们通常把推动电路工作的电源或信号源的电压或电流称为激励,而把激励在电路中所产生的电压或电流称为响应。电路分析就是在已知电路结构和元件参数的条件下,讨论电路激励与响应之间的关系。

1-1-2 电路模型

实际电路都是根据需要选用多种电器元件,如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管、电源等连接而成的。手电筒电路就是一个最简单的实际电路,如图 1-2(a) 所示,它是由干电池、灯泡、手电筒壳(相当于导线)、开关组成的。

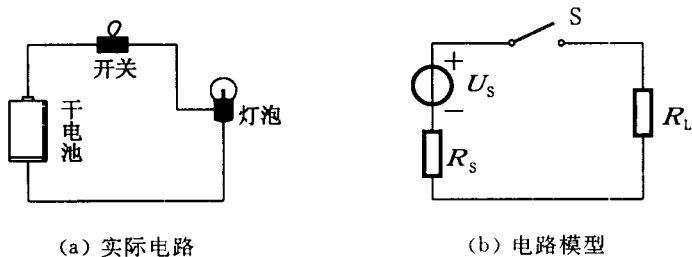


图 1-2 手电筒电路

为了便于对实际电路进行分析和用数学公式描述,常将实际元件理想化(或称模型化),即在一定的条件下突出元件的主要性质,忽略其次要因素,把它近似地看作理想电路元件。例如,一个实际的电阻器中有电流流过时,它除了对电流呈现阻力的性质外,还会产生磁场,即电感的性质,但由于此电感量极其微小,可忽略不计,所以可把它看成是一个理想的电阻器。又如,一个实际的电源可看成是一个理想的电源,而把电源内阻看成是一个理想电阻。诸如此类的例子很多,我们不一一列举了。由理想电路元件组成的电路就是实际电路的电路模型。

理想电路元件主要包括电阻、电感、电容和电源等,这些元件分别由相应的参数来表征。如图 1-2(b) 所示是手电筒电路的电路模型,其中,灯泡是电阻元件,其参数为电阻 R_L ;干电池是电源元件,其参数为电压源 U_s 和内阻 R_s ,筒体是联接干电池与灯泡的导线,其内阻可忽略不计,可认为是一个无电阻的导体。

以后我们所研究的电路都是指从实际电路中抽象出来的理想的电路模型。电路分析的任务就是研究电路的电流、电压和功率这些电路变量间的关系。

1-2 电路变量

1-2-1 电流

电流是由电荷有规则的定向运动形成的。电流在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,定义为电流强度,即

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

式中, q 表示电荷量, dq 为微小的电荷量, dt 为极短的时间。

如果电流的大小和方向随时间变化, 则称之为交变电流, 简称交流 (Alternating Current, 简写为 ac 或 AC), 常用小写字母 i 表示。如果电流的大小和方向不随时间而变化, 即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流 (Direct Current, 简写为 dc 或 DC), 常用大写字母 I 表示。所以, (1-1a) 式可写为

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

式中, q 是在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制中, 电流的单位是安培 (A), 简称安。对于很小的电流, 可以用毫安 (mA)、微安 (μA) 甚至纳安 (nA) 作单位, 它们的关系是

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

电流的方向定义为正电荷移动的方向。但在实际问题中, 有时电流的真实方向很难确定。为了解决这个问题, 我们引用一个重要的概念——参考方向。参考方向可以任意选定, 但一经选定后, 就不要随意改变。

在求解电路中的电流时, 我们必须先假设一个电流正方向, 即参考方向, 并在图上用箭头表示, 如图 1-3 所示。然后再根据已经假设好的电流参考方向进行计算, 如果计算出的电流为正值, 说明假设的电流正方向与实际电流方向相同; 如果计算出的电流为负值, 说明假设的电流正方向与实际电流方向相反。所以, 电路图中标出的电流方向都是电流参考方向, 不一定是电流的真实方向。我们所假设的电流正方向与实际电流方向是否一致, 对我们求解实际问题没有什么影响。所以, 当我们计算出的电流为负值时, 也无需改动原先假设的电流参考方向。应该注意, 若不标出电流参考方向, 则讨论电流的正负是没有意义的。必须养成在着手分析电路时先标出电流参考方向的习惯。

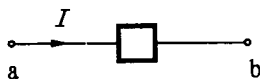


图 1-3 电流参考方向的表示

例 1-1 在图 1-4(a) 中, 设 1A 的电流由 a 向 b 流过图中的元件, 试问如何表示这一电流?

解 有两种表示方式:

(1) 用图 1-4(b) 所示的 I_1 表示, 此时 $I_1 = 1\text{A}$, 这是因为 I_1 的参考方向与电流的真实方向一致。

(2) 用图 1-4(c) 所示的 I_2 表示, 此时 $I_2 = -1\text{A}$, 这是因为 I_2 的参考方向与电流的真实方向相反。

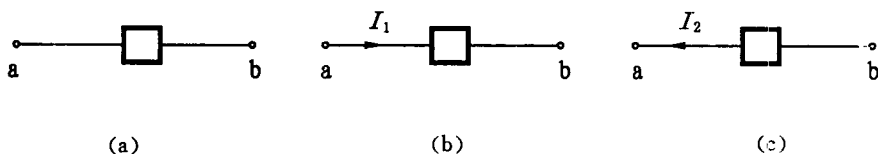


图 1-4 例 1-1

显然, 这两种表示方式之间的关系为 $I_1 = -I_2$ 。

必须注意,在测量电流时,应该把电流表串接到电路中去,如图 1-5(a) 或(b) 所示。如果电路中的实际电流方向与参考方向一致,电流表的“+”、“-”极就应该像图 1-5(a) 那样联接。如果电路中的实际电流方向与参考方向相反,电流表的“+”、“-”极还是像图 1-5(a) 那样联接的话,电流表的指针就会反向偏转,这时需要把电流表的“+”、“-”极调换位置,像图 1-5(b) 那样联接。初学者经常犯的错误是将电流表并在元件两端去测电流,如图 1-5(c) 所示,这样是不对的。

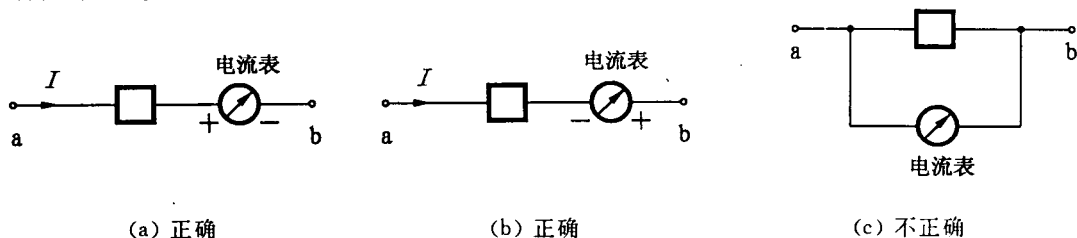


图 1-5 电流表的接法

1-2-2 电压

电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功称为 a、b 两点间的电压(或称电位差)。电压用 u 或 U 表示,即

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

式中, dq 为由 a 点移到 b 点的电量, dw 为移动过程中电荷 dq 所获得或失去的能量。

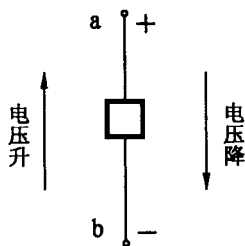


图 1-6 电压的升降

如果正电荷由 a 点移到 b 点后获得能量,则 a 点为低电位,即为负极,b 点为高电位,即为正极。如果正电荷由 a 点移到 b 点后失去能量,则 a 点为高电位,b 点为低电位。正极指向负极的方向称电压降,负极指向正极的方向称电压升,如图 1-6 所示。

如果电压的大小和极性都不随时间而变化,这样的电压就叫做直流电压,用符号 U 表示。如果电压的大小和极性都随时间变化,则称之为交流电压,用符号 u 表示。

同电流一样,我们也需要为电压规定参考极性。电压的参考极性是在元件或电路两端用“+”表示高电位,用“-”表示低电位,如图 1-7 所示。由“+”指向“-”的方向称为电压的参考方向或正方向。

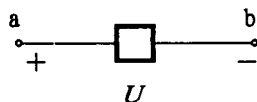


图 1-7 电压参考极性的表示

与电流参考方向一样,电压的参考极性也可以任意假设。一旦假设好以后,就应根据假设的参考极性进行计算,如果算得的电压为正值,说明电压的真实极性与假设的参考极性相同,即 a 点电位高于 b 点电位;如果算得的电压为负值,则说明电压的真实极性与参考极性相反,即 a 点电位低于 b 点电位。同样,若不标出电压的参考极性,谈论电压的正负也是没有意义的。

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),简称伏。电压还可以用千伏(kV)、毫伏(mV)、

微伏(μV)等表示,它们的关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, \quad 1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

在测量电压时,电压表应并接在元件或电路两端,如图1-8所示。测量时要注意电压表“+”、“-”极的接法,如果电压表的“+”、“-”极与电路中电压的“+”、“-”极相反,电压表的指针就会反向偏转,这时只需将电压表的“+”、“-”极换接即可。

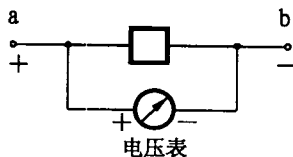


图 1-8 电压表的接法

例 1-2 如图1-9(a)所示,元件两端的电压为1V。若已知正电荷由该元件的a点移到b点后获得能量,试标出电压的参考极性。

解 有两种表示方式:

(1) 电压的参考极性用图1-9(b)表示,此时 $U_1 = 1\text{V}$,因为 U_1 的真实极性与参考极性相同。

(2) 电压的参考极性用图1-9(c)表示,此时 $U_2 = -1\text{V}$,因为 U_2 的真实极性与参考极性相反。

由此可见,参考极性选择不同,电压表示式差一负号。

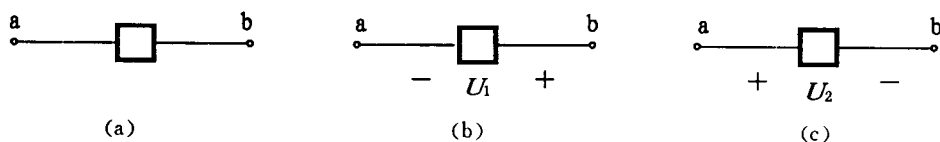


图 1-9 例 1-2

1-2-3 关联参考方向

在分析电路时,电流和电压都要假设参考方向,而且可以任意假设,互不相关。但为了分析方便,我们常采用关联参考方向,即把元件上的电压参考极性与电流参考方向取为一致,也就是电流从电压标“+”号的端钮流入,如图1-10(a)所示。在采用关联参考方向的定义后,电路图上只需标出电流的参考方向或电压的参考极性中的任意一种即可,如图1-10(b)或(c)所示。

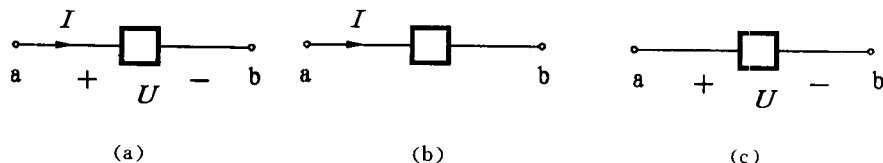


图 1-10 关联参考方向的各种表示

如果电流、电压的参考方向取的不一致,则为非关联参考方向,如图1-11所示。

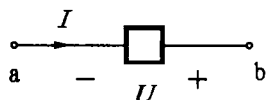


图 1-11 非关联参考方向

1-2-4 功率

单位时间内吸收或产生的电能称为功率,即

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

在电路中,功率可以用电压和电流的乘积来表示,即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-3b)$$

在直流情况下,则为

$$P = U \cdot I \quad (1-3c)$$

在国际单位制中,电压的单位为伏特(V),电流的单位为安培(A),则功率的单位为瓦特(W),简称瓦。同样,功率还可用千瓦(kW)、毫瓦(mW)、微瓦(μ W)等表示,它们的关系是

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}, \quad 1\text{W} = 10^3\text{mW} = 10^6\mu\text{W}$$

在电压、电流为关联参考方向时,计算功率的公式为 $p = u \cdot i$ 或 $P = U \cdot I$,当算得的功率 p (或 P) > 0 时,为吸收功率,或称消耗功率;当 p (或 P) < 0 时,为产生功率。当电压、电流为非关联参考方向时,计算功率的公式应为 $p = -u \cdot i$ 或 $P = -U \cdot I$,算得的功率仍然是当 p (或 P) > 0 时为吸收功率,当 p (或 P) < 0 时为产生功率。

例 1-3 计算图 1-12 中各元件的功率,并指出是产生功率还是吸收功率。

解 图 1-12(a) 中,电压、电流为关联参考方向,由 $P = U \cdot I$,得

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

由于 $P < 0$,故为产生功率。

图 1-12(b) 中,电压、电流为关联参考方向,由 $P = U \cdot I$,得

$$P = (-2) \times (-2) = 4(\text{W})$$

由于 $P > 0$,故为吸收功率。

图 1-12(c) 中,电压、电流为非关联参考方向,由 $P = -U \cdot I$,得

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

由于 $P < 0$,故为产生功率。

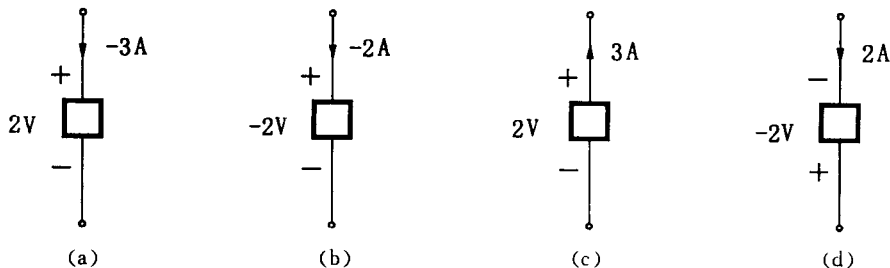


图 1-12 例 1-3

图 1-12(d) 中,电压、电流为非关联参考方向,由 $P = -U \cdot I$,得

$$P = -(-2) \times 2 = 4(\text{W})$$

由于 $P > 0$,故为吸收功率。

练习题

1-1 电路图如图 1-13 所示。

- (1) 元件 A 吸收功率 30W, 求 I_1 ;
- (2) 元件 B 吸收功率 15W, 求 I_2 ;
- (3) 元件 C 产生功率 10W, 求 I_3 。

1-2 某元件的电压、电流参考方向如图 1-14 所示。

- (1) 若元件产生 10mW 功率, $I = 1\text{mA}$, 求 V ;
- (2) 若元件吸收 10mW 功率, $I = -1\text{mA}$, 求 V 。

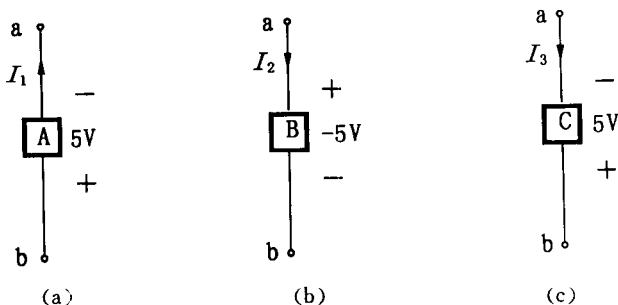


图 1-13 练习题 1-1

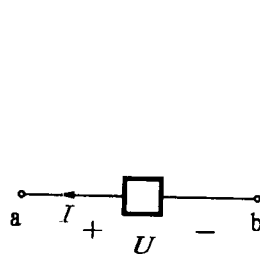


图 1-14 练习题 1-2

1-3 基尔霍夫定律

在电路理论中,我们把元件的伏安关系称为元件的约束方程,这是元件的电压、电流必须遵守的规律,它表征了元件本身的性质。当各元件联接成一个电路以后,电路中的电压、电流除了必须满足元件本身的约束方程以外,还必须同时满足电路结构的约束。这种约束体现为基尔霍夫的两个定律,即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。所以,电路中各个元件的电压、电流要受到两种约束,一种是元件性质的约束,一种是电路结构的约束,这两种约束关系是进行电路分析的基本依据。

在讨论基尔霍夫定律之前,先介绍几个有关电路的名词:

(1) 支路(branch)

每一个二端元件视为一条支路。在如图 1-15 所示的电路中,元件 1、2、3、4、5 分别为 5 条支路。流经元件的电流和元件的端电压称为支路电流和支路电压。为方便起见,常把流过同一种电流的各个元件的串联组合称为一条支路。在如图 1-15 所示的电路中,元件 4 和元件 5 可看成是一条支路。

(2) 节点(node)

2 条或 2 条以上支路的联接点称为节点。在如图 1-15 所示的电路中,有 5 条支路,3 个节

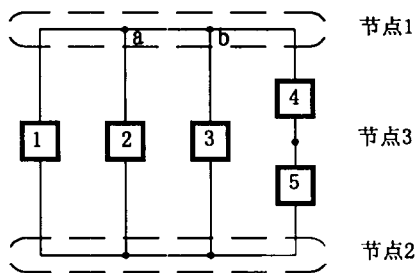


图 1-15

点。如果把元件 4 和元件 5 看成是一条支路,则节点 3 就不存在了。所以,为方便起见,通常把 3 条或 3 条以上支路的联接点称为节点。初学者常把图 1-15 中的 a 点和 b 点看成是两个节点,这是不对的。

(3) 回路(loop)

电路中的任一闭合路径称为回路。在如图 1-15 所示的电路中,元件 1、2,元件 2、3,元件 3、4、5,元件 1、3,元件 2、4、5,元件 1、4、5 分别构成 6 个回路。所以,当电路中有电流流通时,至少有 1 个回路。

(4) 网孔(mesh)

内部不包含支路的回路称为网孔。在如图 1-15 所示的电路中,元件 1、2,元件 2、3,元件 3、4、5 分别构成 3 个网孔。

(5) 网络(network)

网络指由较多元件组成的电路。至少含有一个电源的电路称为含源网络,不含任何电源的电路称为无源网络。通常,网络与电路这两个名词没有严格的区别,可以通用。

1-3-1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,缩写为 KCL)表明电路各节点中支路电流必须遵守的规律。

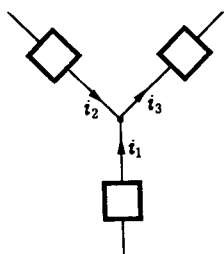


图 1-16 电路中的一个节点

KCL 可以表述为:对于电路中的任一节点,在任一时刻,流出(或流入)该节点的所有支路电流的代数和为零。其数学表示式为

$$\sum_{k=1}^K i_k(t) = 0 \quad (1-4)$$

式中, $i_k(t)$ 为流出(或流入)节点的第 k 条支路的电流, K 为节点处的支路数。

图 1-16 所示为电路中的一个节点,与该节点相接的各支路的电流分别为 i_1 、 i_2 和 i_3 ,参考方向如图中所示。流入该节点的电流的代数和为 $i_1 + i_2 - i_3$,故

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

KCL 还可以表述为:流出某一节点的电流等于流入该节点的电流。其数学表示式为

$$\sum i_{\text{流入}} = \sum i_{\text{流出}} \quad (1-5)$$

所以,图 1-16 中节点的电流表示式又可写为

$$i_1 + i_2 = i_3$$

KCL 原本是运用于节点的,我们也可以把它推广运用于电路中任一假设的闭合面。例如,在如图 1-17 所示的封闭面内包含 3 个元件,有 3 条支路与电路的其余部分(未画出)相联接,其电流分别为 i_1 、

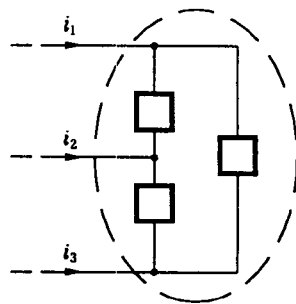


图 1-17 KCL 运用于电路中的一个封闭面

i_2 和 i_3 , 于是, 对于闭合面的电流方程为 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 。由此看来, 我们是把闭合面看成一个节点来写出它的电流方程。所以, KCL 的另一表述为: 流出(或流入) 封闭面的电流的代数和为零。

在列写 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可任意假设。若选流入节点的电流为正, 则流出节点的电流为负; 若选流入节点的电流为负, 则流出节点的电流就为正, 两种选取方法是等效的。

另外, KCL 只限定每个节点上流入和流出的电流相等, 而对支路上元件的性质并无要求, 所以 KCL 与支路元件的性质是无关的。

例 1-4 图 1-18 表示某一复杂电路中的一个节点 a, 已知 $i_1 = 5\text{A}$, $i_2 = 2\text{A}$, $i_3 = -3\text{A}$, 试求流过元件 A 的电流 i_4 。

解 设电流 i_4 的参考方向如图 1-18 中所示, 并设流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负。根据 KCL, 得

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0 \quad (1-6)$$

即

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

代入已知数据, 得

$$i_4 = -(5) + (2) + (-3) = -6(\text{A}) \quad (1-7)$$

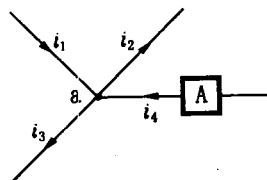


图 1-18 例 1-4

解得 i_4 为负值, 说明 i_4 的实际方向与参考方向相反, 但此时不必把图中标注的 i_4 的参考方向反过来。如果将 i_4 的参考方向反过来, i_4 就应改成 6A 。因为 i_4 的参考方向反过来后, (1-6) 式就应写成 $i_1 - i_2 - i_3 - i_4 = 0$, 按此式算出的 i_4 应为 6A 。

通过上述例题, 我们看出, 在运用 KCL 时常和两套符号打交道。一是方程中各项电流前的正、负号, 其取决于电流参考方向对节点的相对关系, 如以流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负, 则利用 (1-6) 式表示; 二是电流本身的正、负号, 如 (1-7) 式中各括弧内所表示的值, 两者不可混淆。

1-3-2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, 缩写为 KVL) 表明电路中各支路电压必须遵守的规律, 之间这个规律体现在电路的各个回路中。

KVL 可以表述为: 对于电路中的任一回路, 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

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

式中, $u_k(t)$ 为回路中的第 k 条支路电压, K 为回路中的支路数。

图 1-19 所示为某个电路中的一个闭合回路, 支路电压的极性已标出。根据 KVL, 该回路内的各支路电压降之和必为零。

先设绕行方向如图中所示, 于是 KVL 方程为

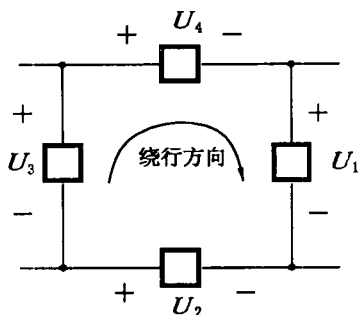


图 1-19

选取。

KVL 的另一表述为:在电路的任一回路中,沿某一方向的支路电压降的总和等于电压升的总和。其数学表达式为

$$\sum \text{电压降} = \sum \text{电压升} \quad (1-10)$$

根据(1-10)式,图 1-19 中电路的 KVL 方程为

$$U_4 + U_1 = U_2 + U_3 \quad (1-11)$$

可以看出,此式与(1-9)式是等价的。

在以上的讨论中,同样,对各支路中的元件并无要求。这就是说,不论电路中的元件如何,KVL 总是成立的。KVL 与电路中元件的性质无关。

例 1-5 图 1-20 表示某一复杂电路中的一个回路,已知 $U_1 = U_6 = 2\text{V}$, $U_2 = U_3 = 3\text{V}$, $U_4 = -7\text{V}$, 试求 U_5 。

解 设 U_5 的参考极性如图中所示。从 a 点出发,沿顺时针方向绕行一周,由 KVL 可得

$$-U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - U_5 - U_6 = 0 \quad (1-12)$$

式中,参考极性所表示的电压降方向与绕行方向一致者取正号,如 U_2 、 U_3 和 U_4 ; 否则取负号,如 U_1 、 U_5 和 U_6 。

将已知数据代入(1-12)式,得

$$-(2) + (3) + (3) + (-7) - U_5 - (2) = 0 \quad (1-13)$$

解得

$$U_5 = -5(\text{V})$$

U_5 为负值,说明 U_5 的实际极性与图中假设的极性相反。

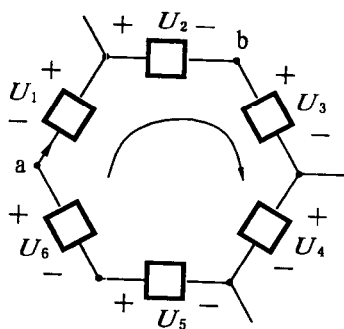


图 1-20 例 1-5

从本例题可以看出,在运用 KVL 时也需要和两套符号打交道。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(1-12)式中所示。在将数值代入时,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(1-13)式中各括弧内所示。

例 1-6 试求图 1-20 所示电路中 a、b 两点间的电压。

解 a、b 两点间的电压用 U_{ab} 表示,下标 ab 表示由 a 点到 b 点的电压降,即 a 点为电压参考“+”极处,b 点为电压参考“-”极处。求 U_{ab} 有两条路径:

(1) 沿元件 1、2 的路径计算:

$$U_{ab} = -U_1 + U_2 = -(2) + (3) = 1(\text{V})$$

(2) 沿元件 6、5、4、3 的路径计算:

$$U_{ab} = U_6 + U_5 - U_4 - U_3 = (2) + (-5) - (-7) - (3) = 1(\text{V})$$

从计算结果可以看出,任意两点间的电压与计算时所选的路径无关。

通过以上讨论,已知 KCL 和 KVL 与元件的性质无关,故不论是线性电路还是非线性电路,这两个定律都适用。

练习题

1-3 图 1-21(a) 所示电路中 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 、 $u_3(t)$ 的波形是否可能如图 1-21(b) 所示?为什么?

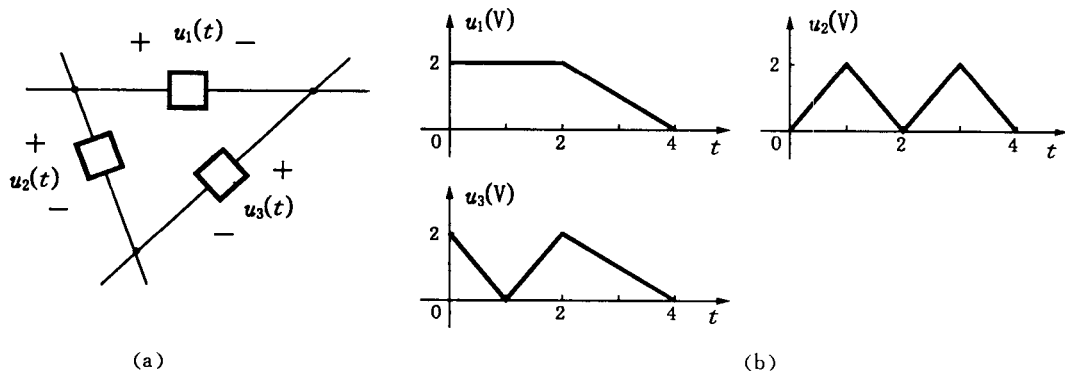


图 1-21 练习题 1-3

1-4 图 1-22 所示的节点处有 4 个支路电流,在不同时刻,其中 3 个电流的数值如下表中所示,试填写该表中所缺各项。

[1.5, 3, 3; 4, 4; 2, 5, 5]

i_1	i_2	i_3	i_4	实际流出节点的总电流	实际流入节点的总电流
2	2	5	5	7	7
-1		0.5	3		
	-4	1	-3		
-5	-2	-1			

1-5 在图 1-23 所示电路中,A、B、C 为 3 个元件,电压、电流的参考方向已设定,如图中所示。已知 $I_1 = 3\text{A}$, $U_1 = 12\text{V}$, $U_2 = 4\text{V}$ 。

(1) 试求 I_2 和 I_3 为何值?

(2) 试求 U_3 为何值?

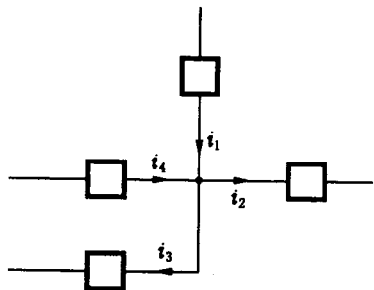


图 1-22 练习题 1-4

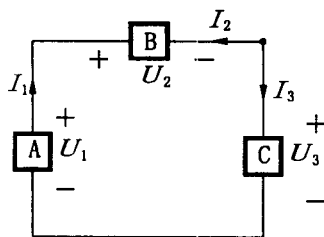


图 1-23 练习题 1-5

1-4 电阻元件

电阻元件是电路的基本元件之一,它是从实际电阻器中抽象出来的模型。

可以由欧姆定律

$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (1-14)$$

来定义电阻元件,此式也称为电阻的伏安关系(Volt Ampere Relation,缩写为VAR)。式中, 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,也可以是常数(直流电),从而 $U = R \cdot I$ 。

电阻上的电流与电压降的真实方向总是一致的,所以,只有在关联参考方向的前提下,如图 1-24(a) 所示,才可运用(1-14)式。如为非关联参考方向,如图 1-24(b) 所示,则为

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-15)$$



图 1-24

如果把电阻元件的电压取为纵坐标,电流取为横坐标,可绘出 $i-u$ 平面上的曲线,称为电阻元件的伏安特性曲线。显然,线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线,如图 1-25 所示,电阻值可由直线的斜率来确定。非线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1-26 所示

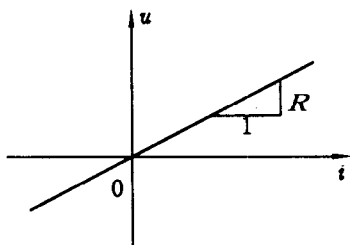


图 1-25

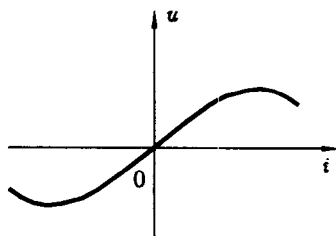


图 1-26

示,电阻值随电压或电流的大小甚至方向而改变,电阻值不是常数。它的特性要由整条伏安特性曲线来表征,而不能笼统地说它有多少欧姆的电阻值。我们在“电路分析”课程中主要研究线性电阻。

在国际单位制中,电阻的单位为欧姆(Ω)。通过1欧姆电阻的电流为1安培时,该电阻两端的电压为1伏特。对于阻值很大的电阻,可用千欧($k\Omega$)或兆欧($M\Omega$)等表示,它们的关系是

$$1M\Omega = 10^3k\Omega = 10^6\Omega$$

我们已知电压与电流是电路中的变量,由欧姆定律(1-14)式又可知,线性电阻元件用它的电阻 R 来表征其特性,因此 R 是一种“电路参数”。

电阻元件还可以用另一个参数——电导来表征,电导用符号 G 表示,其定义为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-16)$$

在国际单位制中,电导的单位是西门子(S),简称西。用电导表征线性电阻元件时,欧姆定律为

$$u(t) = \frac{1}{G}i(t) \quad (1-17)$$

或

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-18)$$

通过以上分析,我们定义电阻元件为:任何一个二端元件,如果在任一时刻的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 之间存在代数关系,亦即这一关系可以由 $u-i$ 平面上的一条曲线所决定,不论电压或电流的波形如何,此二端元件就称为电阻元件。

需要指出的是,电阻元件在任何时刻的电压(或电流)完全取决于该时刻的电流(或电压),与过去时刻的电流(或电压)无关。这种性质称为无记忆性,故电阻是一种无记忆性元件。

线性电阻有两种值得注意的特殊情况,即开路和短路。一个电阻元件,不论其电压 u 是多大,其电流恒等于零,则此电阻元件称为开路。开路的伏安特性曲线如图 1-27 所示,即开路时 $R = \infty$ 。类似地,一个电阻元件,不论其电流 i 是多大,其电压恒等于零,则此电阻元件称为短路。短路的伏安特性曲线如图 1-28 所示,即短路时 $R = 0$ 。

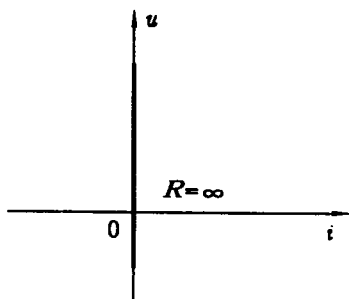


图 1-27 开路的特性

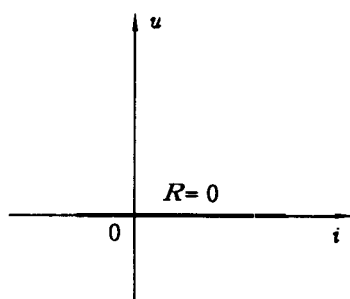


图 1-28 短路的特性

最后,我们讨论电阻元件的功率问题。在电压和电流的关联参考方向下,有

$$p(t) = u \cdot i = Ri^2(t) = \frac{i^2(t)}{G} \quad (1-19)$$

或

$$p(t) = \frac{u^2(t)}{R} = u^2(t)G \quad (1-20)$$

式中, $i(t)$ 是流过电阻 R 的电流, $u(t)$ 是电阻 R 两端的电压。若 $R \geq 0$, 则 $p(t) \geq 0$, (1-19) 式或 (1-20) 式算得的结果即为该电阻所消耗的功率。因此, 若 $R \geq 0$, 则电阻元件是一种耗能元件。大多数电阻都属于这种情况。

功率的计算是电路分析中的一个重要内容, 对理想电阻元件来说, 功率数值的范围不受限制; 但对于任意一个实际电阻器, 使用时都不得超过所标明的功率。因为电流流过实际电阻时, 都要发热而使其温度升高, 超过一定范围就会烧坏电阻器。因此, 各种电器设备, 如电灯、电炉及各种电阻器等, 都规定了额定功率、额定电压和额定电流, 使用时都不得超过其额定值, 以保证安全工作。由于功率、电压和电流之间存在一定的关系, 故器件的额定功率、额定电压和额定电流不需要全部给出。例如, 灯泡只给出额定电压和额定功率(如 220V, 40W), 电阻器只标明电阻值和额定功率(如 $1\text{k}\Omega, \frac{1}{2}\text{W}$)。各种电气设备的额定值一般都标在产品的铭牌上, 使用前必须认真阅读。

例 1-7 有一个 $100\Omega, 1\text{W}$ 的电阻用于直流电路, 求在使用时电流、电压不得超过的最大数值?

解 因为 $P = I^2 \cdot R$, 故

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = \frac{1}{10}(\text{A}) = 100(\text{mA})$$

$$U = RI = 100 \times 100 \times 10^{-3} = 10(\text{V})$$

所以, 在使用时电流不得超过 100mA, 电压不得超过 10V。

练习题

1-6 求图 1-29(a)、(b)、(c)、(d) 所示电路中的 U_{ab} 以及图 1-29(e) 所示电路中的 I_3 、 U_{ab} 、 U_{bc} 和 U_{ac} 。

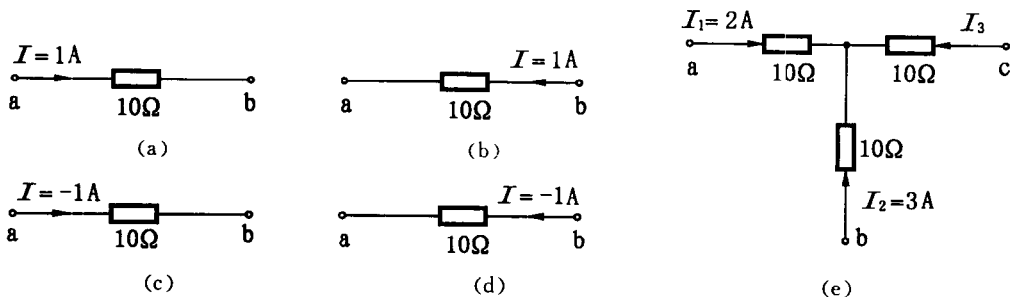


图 1-29 练习题 1-6

1-7 一个 $40\text{k}\Omega, 10\text{W}$ 的电阻, 使用时最大能容许多大的电流和电压?

1-8 在如图 1-30 所示的电路中, 已知 $U_{be} = -2\text{V}$, $U_{cd} = 4\text{V}$, $U_{de} = -9\text{V}$, $U_{ef} = 6\text{V}$, $U_{af} = 10\text{V}$, 求 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 以及 I_1 、 I_2 和 I_3 。
[6V, 3V, -9V, 3A, -1A, -2A]