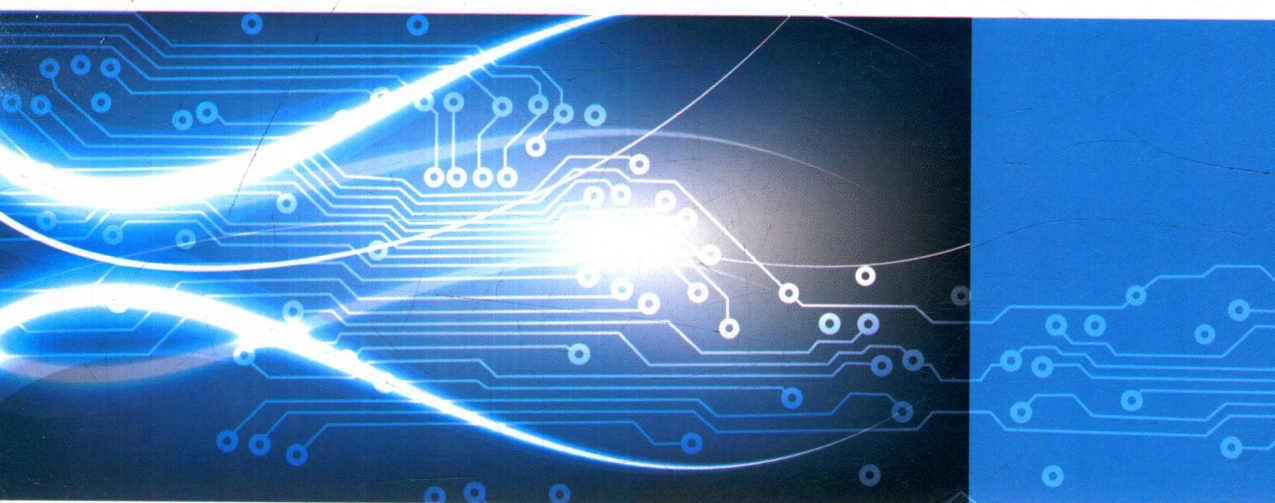


电路分析基础

席志红 主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

电路分析基础

主 编 席志红

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要以教授电路基本概念、定理和分析解决问题的方法为目的,采取先直流后交流、先单相后三相、先单频后多频、先稳态后动态的编写顺序,由浅入深、逐层深入地介绍了直流电路、正弦电路、谐振电路、周期性非正弦电路、动态电路、复频域分析、双口网络、非线性电路和计算机辅助电路分析等内容。

本书即可作为大学本科电子信息工程、通信工程、电子科学技术、自动化和电气工程等专业的教材,也可供工程技术人员参考和自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/席志红主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2016. 8
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1343 - 6

I. ①电… II. ①席… III. ①电路分析 - 高等学校 -
教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 193017 号

选题策划 付梦婷
责任编辑 张忠远 付梦婷
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江龙江传媒有限责任公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 26
字 数 640 千字
版 次 2016 年 8 月第 1 版
印 次 2016 年 8 月第 1 次印刷
定 价 52.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

本书编委会名单

主编 席志红

编委 (以姓氏笔画为序)

王 伞 王霖郁 付永庆 刘庆玲

项建权 黄丽莲 康维新

前 言

本书是在 2008 年付永庆主编的《电路基础》(上、下册)的基础上,针对我校 2014 版新版教学计划重新编写的,内容涵盖了 2012 年教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的《电路理论基础课程教学基本要求》的主要内容。

我校“电路基础”课程自 2009 年以来经过 2 次重大改革,于 2014 年确定为现行的 64 学时理论课,外加 16 学时实验课,课程教学内容相对于原教材内容缩减了很多。针对现行的教学计划,编写一本适合于课程教学,并能与流行的新教学手段相结合的教材,是目前急需的。

本书以电信号处理与利用为目标,重新梳理了课程内容,是教材内容更倾向于电子信息工程、通信工程的弱电类工科专业需求。同时,本书对教材所附例题与习题也进行了重新编写和梳理,使各级题目的设计更利于学生的自主探索式学习;对教材内容分节设计了思考与练习题,以此配合重点内容,供学生加深对其的理解并能牢固掌握单元知识。此外,教材收录了计算机辅助分析软件 Multisim,对如何利用该软件对本课程所学内容进行分析求解做了比较详细的介绍,学生通过学习能很快掌握本行业最常用的计算机辅助分析工具,帮助学生完成本课程的课后练习与分析计算。为配合教学和指导学生工程实践的需要,在附录中还列入了当今主流电路元器件的相关国家标准及主要参数介绍。

本书第 1 章与第 3 章由刘庆玲讲师编写;第 2 章由项建弘副教授编写;第 4 章由席志红教授编写;第 5 章与第 7 章由王霖郁副教授编写;第 6 章、第 8 章及附录 B 与附录 C 由王伞讲师编写;第 9 章第 1 至 7 节由付永庆教授编写,第 8、9、10 节由项建弘副教授编写;第 10 章由康维新教授编写;第 11 章与附录 A 由黄丽莲教授编写;本书的编写规则和框架设计以及全书的统稿由席志红负责,付永庆教授为本书编写工作的启动以及最终落实出版做出很大贡献。

本书是“哈尔滨工程大学 2016 年本科生教材立项”重点资助教材,还配有实验课教材,另行出版,有关实验教学部分的内容可参阅实验指导教程。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有欠缺之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2016 年 5 月

目 录

第 1 章 电路模型和电路定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电流与电压及其参考方向	3
1.3 电功率和能量	6
1.4 基尔霍夫定律	8
1.5 电路元件	12
本章习题	36
第 2 章 电阻电路的等效变换和化简	39
2.1 等效电路的概念	39
2.2 电阻的串联和并联	40
2.3 电阻的星形和三角形连接及其等效互换	45
2.4 电源的串联和并联	49
2.5 含源电阻电路的等效变换	51
2.6 简单电阻电路的分析	57
本章习题	61
第 3 章 网络分析方法和网络定理	65
3.1 支路电流法	65
3.2 回路电流法*	68
3.3 节点电压法	73
3.4 叠加定理	82
3.5 替代定理	87
3.6 戴维南定理与诺顿定理	88
3.7 特勒根定理*	95
3.8 特勒根定理的应用·互易定理*	99
本章习题	103
第 4 章 正弦稳态交流电路	107
4.1 正弦量及其相量表示法	107
4.2 基尔霍夫定律和电路元件方程的相量形式	114
4.3 复阻抗与复导纳	121
4.4 正弦稳态电路相量分析	126
4.5 正弦电路的功率	139
4.6 最大功率传输	149
本章习题	152
第 5 章 互感电路	156
5.1 互感系数和耦合系数	156

5.2	互感电压及同名端	158
5.3	互感元件的连接和去耦等效电路	165
5.4	具有互感的正弦电路的分析	169
5.5	变压器原理	174
	本章习题	179
第6章	三相电路	181
6.1	对称三相电源	181
6.2	对称三相电路的计算	185
6.3	不对称三相电路的概念	191
6.4	三相电路的功率及其测量	194
	本章习题	199
第7章	谐振电路	201
7.1	串联谐振	201
7.2	串联电路的谐振曲线和通频带	204
7.3	并联电路的谐振	208
7.4	互感耦合电路的谐振	213
	本章习题	218
第8章	非正弦周期电路	220
8.1	周期函数的傅里叶级数展开式	220
8.2	非正弦周期电压和电流的有效值	225
8.3	非正弦周期电路的平均功率	227
8.4	线性电路对非正弦周期激励的稳态响应	228
8.5	滤波电路的概念	232
	本章习题	235
第9章	电路暂态过程时域分析	236
9.1	动态电路的换路与初始条件	236
9.2	任意一阶电路的全响应·零输入响应·零状态响应	240
9.3	恒定输入激励下一阶电路的全响应	244
9.4	正弦输入激励下一阶电路的全响应	249
9.5	三要素法	251
9.6	阶跃响应和冲激响应	260
9.7	卷积积分	269
9.8	电容电压和电感电流的跃变*	272
9.9	RLC 串联二阶电路的零输入响应	276
9.10	RLC 串联二阶电路对恒定输入的响应*	285
	本章习题	289
第10章	暂态电路的复频域分析法	295
10.1	拉普拉斯变换及性质	295
10.2	拉普拉斯反变换的部分分式展开法	301
10.3	电路定律及模型的运算形式	304

10.4 拉普拉斯变换的运算法	309
10.5 网络函数与网络特性*	314
本章习题	317
第 11 章 双口网络	321
11.1 双口网络概述	321
11.2 双口网络的方程及参数	322
11.3 双口网络的互联	334
11.4 双口网络的开路阻抗和短路阻抗	341
11.5 对称双口网络的特性阻抗	343
11.6 线性无源双口网络的等效电路	345
11.7 回转器	348
11.8 负阻抗变换器	350
本章习题	353
附录 A 非线性电路	355
A.1 非线性电阻元件及其约束关系	355
A.2 非线性电阻元件的串联与并联	357
A.3 非线性电阻电路的图解分析法	358
A.4 非线性电阻电路及其解的存在唯一性	359
A.5 小信号分析法	360
A.6 分段线性化方法	363
A.7 一阶分段线性电路	365
A.8 非线性振荡电路	367
A.9 混沌现象与混沌电路	368
本章习题	370
附录 B 电阻、电容、电感元件值的国家标准和标识	373
B.1 电阻元件值的国家标准和电阻器色码	373
B.2 电容元件值的国家标准和电容器色码	374
B.3 电感元件值的国家标准和电感线圈色码	376
B.4 常用贴片电阻的封装及标识	377
B.5 常用贴片电容封装及标识	381
B.6 常用贴片电感封装及标识	383
附录 C Multisim 10 应用简介	385
C.1 Multisim 10 仿真软件简介	385
C.2 Multisim 创建仿真电路的基本操作	393
C.3 Multisim 电路分析方法及实例	396
参考文献	404

第 1 章 电路模型和电路定律

本章主要介绍有关电路的基本知识,具体内容包括电路的基本概念、电压与电流的参考方向、电功率、电压和电流在电路中分布需服从的基本规律——基尔霍夫定律,以及常用的基本电路元件。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路

一个实际的电路(electric circuit),是为实现某一功能由一些电的设备和器件相互连接组成的总体。用两根导线(wire)把一个小灯泡和一节干电池(cell)连接起来便构成了一个最简单的实际电路,如图 1-1(a)所示,其原理如图 1-1(b)所示。

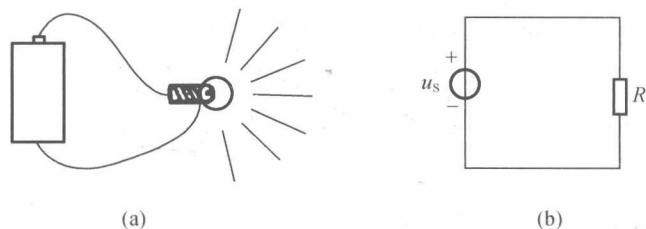


图 1-1 简单的实际电路

(a) 实物连线图;(b) 电路模型

实际电路的作用大致有两种:一种用于实现电能的传输、分配以及转换,例如电力系统、照明系统等;另一种用于产生、变换和处理某种电信号(signal),例如通风系统、信号放大电路等。

实际电路的组成有简单的,也有复杂的。无论简单还是复杂,一个实际电路一定要包含以下三个基本的部分:

(1) 产生并提供电能的设备或器件,如电池、发电机等,是将其他形式的能量转变为电能,为电路提供能源,称为电源(source);

(2) 吸收或消耗电能的设备或器件,如灯泡、电炉、扬声器(喇叭)等,是将电能转变为其他形式的能量,称为负载(load);

(3) 连接导线,用来连接各种电路设备或器件使之形成一个完整的电路,并在其中引导电流(current),传输能量。

此外,为了安全和方便,电路中可能有各种控制和保护设备或装置,如开关、继电器和熔断器等。

研究和分析各种电路问题也就是研究和分析发生在电路中的各种物理过程和电磁现象(electromagnetic phenomena)。每一种实际的电路设备或器件都可能同时产生几种电磁现象。为了方便,通常会把实际电路用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件(circuit element)的组合代替,构成电路模型(circuit model)。理想电路元件则指具有某种特定的只反映一种电磁性质的假想元件,即在一定条件下的理想化模型。例如,将电路中能够将电能转换成热能、光能等形式的能量且不能再逆转回来的物理过程的电路器件用电阻元件(resistor)来表示。这样一来,像各种电阻器、电炉、电灯等实际的电路器件都可以用电阻元件这一理想电路元件来代替,像干电池、蓄电池等对外提供一定电压(voltage)的电路器件可用一个保持一定电压的理想电压源(source)元件来代替。

当电路工作时,因存在电压和电流,在电路周围会产生电场和磁场。而电场和磁场都具有能量,为描述这些电磁性质,我们把反映电场储能性质的电路器件用电容元件(capacitor)来表示,把反映磁场储能性质的电路器件用电感元件(inductor)来表示。

因电路中的能量损耗、电场储能和磁场储能均呈连续分布特性,故当组成实际电路的元件及连接导线的最大尺寸可以和沿电路周围空间传播的电磁波波长(与电路工作频率相对应的波长)相比较时可发现,电路参数的分布性会影响电路性能。我们把能反映电磁波沿电路分布规律的电路元件称为分布参数元件(distributed element),把由它们组成的电路称为分布参数电路;反之,当电路的尺寸远远小于电路的工作波长时,电路参数的分布性对电路性能的影响就不明显。因此,可把理想电路元件的电磁过程看成是集中在其内部进行的,即认为电磁波通过该元件所需的时间可以忽略。这意味着,在任一时刻,流出二端元件一端的电流一定等于流入其另一端的电流。我们把这样的元件称为集中参数元件(lumped element),由它们及其组合构成的电路称为集中参数电路(lumped circuit)。本书主要讨论集中参数电路。

1.1.2 电路模型

用理想的电路元件及其组合来代替实际的电路,便可构成与之相对应的电路模型。例如对图 1-1(a)所示的实际电路,如果用电阻元件 R 代替小灯泡,用电压源 u_s 代替干电池,用线段代替连接导线(导线电阻忽略不计),就可以得到与之对应的电路模型,如图 1-1(b)所示。这种由理想电路元件组成、反映实际电路连接关系的电路模型图,又叫电路图(circuit diagram),通常简称为电路(circuit)。本书中所说的电路,即本书所研究和分析的对象,均指这种电路(模型),而不是实际电路。

1.1.3 概念和术语

结构比较复杂的电路又称(电)网络(network)。电路和网络在本书中没有严格的区别,可以通用。关于电路或网络有一些常用的概念或术语,现分别简单介绍如下。

1. 支路和节点

网络中由一个元件或多个元件组成的一段电路称为支路(branch),两条或两条以上支路的连接点称为节点(node)。按照这样的定义,在图 1-2 所示的网络中,共有五条支路和 A, B, C, D 四个节点。

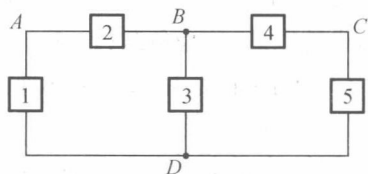


图 1-2 简单网络图

应该指出,支路和节点的定义不是唯一的。有时为了简化电路,也可以定义多个二端元件为一条支路。若按这种定义,把图 1-2 中的 1,2 支路和 4,5 支路各看作为一条支路后,则电路将有三条支路和 B, D 两个节点。

2. 回路

网络中由若干条支路组成的闭合路径(path)称为回路(loop)。图 1-2 所示的电路共有三个不同的回路,分别是 $ABDA$ 、 $ABCD$ 和 $BCDB$ 。

3. 平面网络

如果将一个网络展开在平面上,经过适当地调整可以使其所有支路均互不交叉,则称该网络为平面网络(planar network),否则为非平面网络。显然,图 1-2 所示网络是一个平面网络。可以证明,四个及少于四个节点(节点的定义为前者)的网络均为平面网络。

4. 网孔

在平面网络中,内部或外部不含支路(没有被支路穿过)的回路被称为网孔(mesh)。网孔是一种特殊的回路。图 1-2 网络所含的三个回路都是网孔,其中 $ABDA$ 和 $BCDB$ 称为内网孔; $ABCD$ 称为外网孔。此外,只对平面网络才有网孔的概念;对非平面网络,只有回路的概念而没有网孔的概念。

1.2 电流与电压及其参考方向

描述电路性能的物理量统称为电路变量,如电荷 q 、磁链 ψ 、电流 i 、电压 u 、功率 p 和能量 w 等。其中常用的是电压和电流。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷的有序运动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。一般情况下,电流可用单位时间内通过载导体横截面的电荷量来表示,即

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

式中,电荷 q 的单位是库仑(C);时间 t 的单位是秒(s);电流 $i(t)$ (简记 i ,以下均同)的单位是安培(A)。

实际计算中,还可以使用电流的分数或倍数单位,如 $1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \text{ }\mu\text{A}$,或者 $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ 等。

电流的大小和方向都会直接影响电路的工作状态,因此在研究和分析电路时二者要同时给出或同时确定,否则就不能完整准确地描述电流。流经电路中某一具体支路的电流,其实际方向只有两种可能,非此即彼,这使实际电路分析中判定电流的真实方向带来了一定的困难。为了便于分析,要事先指定一个电流方向,当然这一方向不一定是电流的实际方向。我们把这一事先任意指定的电流方向称为电流的参考方向(reference direction)。

指定参考方向后,电流的数值将有正负之分。当电流的实际方向与参考方向一致时,电流为正值;反之,电流为负值。例如对图 1-3 所示的一段电路,假设电流的实际方向是由 A 流向 B ,如图中虚线箭头所示,大小为 2 A 。则当指定的参考方向如图(a)时,电流 $i = 2 \text{ A}$;如指定的参考方向如图(b)所示,则电流 $i = -2 \text{ A}$ 。显然,在引入参考方向之后,电流是一

个代数数量。在指定参考方向下,根据电流数值的正或负,就可以确定电流的实际方向。参考方向的选取是任意的,选取不同,只影响其值的正负号,不影响问题的实际结论。电流的参考方向一般就直接标在其所在的支路上,如图 1-3(b) 所示。

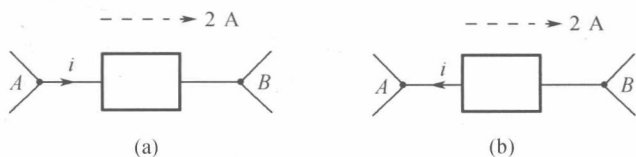


图 1-3 电流参考方向示意图

(a) 参考方向向右; (b) 参考方向向左

1.2.2 电压及其参考方向

电位的数值是相对于选定的参考点的。电位参考点是规定其电位能为零的点,可以任意指定,通常会选取电路中接地或接机壳的公共端为参考点。电位用字母 v 表示,如 A 点的电位就用 v_A 来表示。当 A 点的电位高于参考点时, $v_A > 0$; 反之,则 $v_A < 0$ 。电路中某点的电位随参考点选取的不同而不同。但参考点一旦确定,电路中各点的电位都是唯一的确定值。电位的这一性质称为电位的单值性。

电路中某两点之间的电位之差,称为这两点之间的电压,用字母 u 来表示。如图 1-3(a) 所示, A, B 两点之间的电压为 $u = v_A - v_B$ 。

图 1-4 中假定 A 点的电位高于 B 点的电位,分别用“+”“-”极性符号来加以标记。在电源以外的电路中,正电荷总是在电场力的作用下由高电位端移向低电位端。因此,习惯上就把这一方向规定为电压的方向,即在电场力的作用下正电荷移动的方向,也就是由高电位端指向低电位端的方向(所以电压又称电位降)。随着电荷的移动,正电荷所具有的电位能在减少,减少的能量则被这段电路所吸收。因此,电路中某两点之间的电压也可以说成是单位正电荷在电场力的作用下由一点移到另一点的过程中所失去的电位能,即

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

式中, dw 为电荷 dq 在由 A 点移到 B 点的过程中所失去的总电位能。

电位和电压的单位相同。当电位能的单位为焦耳(J), 电荷量的单位为库仑(C)时,电压的单位为伏特(V)。实际计算中,还可以使用电压的分数或倍数单位,如 $1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \text{ } \mu\text{V}$, 或者 $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ 等。

与电流相似,电路中某两点之间的电压的实际方向也有两种可能。为分析方便,可以指定其中任一方向为电压的参考方向,同时把电压看作代数数量。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压值为正,反之为负。指定参考方向之后,同样可以根据电压数值的正、负来确定电压的实际方向。

在电路中,电压的参考方向一般用“+”“-”极性来加以标示,称其为参考极性(reference polarity),如图 1-4(a) 所示,此时电压的参考方向即为由“+”指向“-”的方向;电压的参考方向也可以在两点之间的电路旁用箭头标示,如图 1-4(b) 所示。

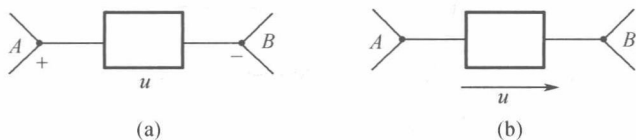


图 1-4 电压参考方向示意图

(a)用极性符号表示;(b)用有向线段表示

电压的参考方向还可以用双下标来表示,如 u_{AB} 表示电压参考方向为由 A 指向 B 。显然 u_{AB} 与 u_{BA} 是不同的,虽然它们都表示 A 和 B 两点间的电压,但由于参考方向不同,两者之间相差一个负号,即 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的,其值与参考点的选取有关;电压则是对电路中某两点而言的,其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压,实际上是指该点与参考点之间的电压。此时,它与该点的电位是一致的。

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。在对任何具体电路进行实际分析之前,都应先指定各有关电流和电压的参考方向,否则分析将无法进行。原则上,电流与电压的参考方向可以各自独立地任意指定;参考方向选取不同,只影响其值的正、负,不影响问题的实际结论。习惯上,同一段电路的电流和电压常常选取相互一致的参考方向,如图 1-5 所示,我们称这样选取的参考方向为关联参考方向。若两者方向选取不一致,则称为非关联参考方向。

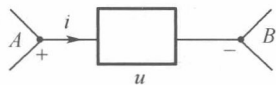


图 1-5 关联参考方向

这里需强调一下,今后我们在谈到电流和电压的方向时,如无特别声明,指的都是图中标示的参考方向,而不是其实际方向。初学者必须特别注意并逐步适应这一点。

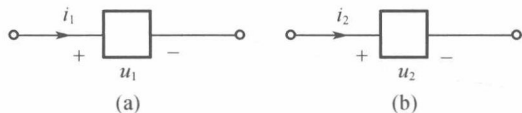
本节思考与练习题

1-2-1 描述电路性能的物理量都有哪些?

1-2-2 参考方向的概念是什么?参考方向的选取,是否会影响电路变量的真实方向?

1-2-3 某段支路的电流的参考方向已确定,在关联参考方向下,其电压的参考方向是确定的吗?

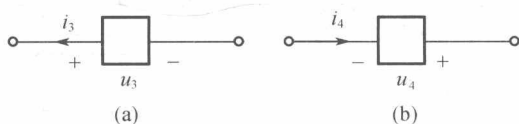
1-2-4 题 1-2-4 图中方框代表一段电路,参考方向已给定,求电路中电压和电流的实际方向。已知: $u_1 = 6\text{ V}$, $i_1 = 2\text{ A}$; $u_2 = 6\text{ V}$, $i_2 = -20\text{ mA}$ 。



题 1-2-4 图

1-2-5 题 1-2-5 图中各方框代表一段电路,在图示参考方向下,求出各段电路电

压、电流的实际方向。已知： $u_3 = -6 \text{ V}$ ， $i_3 = 3 \text{ A}$ ； $u_4 = -6 \text{ V}$ ， $i_4 = -0.5 \text{ A}$ 。



题 1-2-5 图

1.3 电功率和能量

1.3.1 电功率

根据 1.2 节关于电压的讨论可知，正电荷在电场力的作用下通过一段电路（电压、电流取关联参考方向，图 1-6 所失去的电位能可表示为

$$dw = u dq$$

显然，正电荷失去的能量完全被这段电路吸收。因此，由能量对时间的变化率可得到这段电路所吸收的电功率为

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

式(1-3)说明，在关联参考方向下，一段电路所吸收的功率为其电压和电流的直接乘积。

当电压和电流的参考方向为非关联方向时，此段电路吸收的功率为

$$p = -ui$$

式中，负号与 u, i 中的任一变量相结合，相当于将该变量的方向倒过来，于是两变量仍相当于取关联参考方向。

以上两式所计算的功率是以吸收为前提的。若计算结果为 $p > 0$ ，表明该段电路的确是吸收功率的；若 $p < 0$ 则表明该段电路实际上是发出功率的。

一段电路功率的计算若以发出为前提，则计算公式正好与上述相反，为

$$p' = \begin{cases} -ui & (\text{关联方向}) \\ ui & (\text{非关联方向}) \end{cases}$$

若计算结果 $p' > 0$ ，表明该段电路的确是发出功率的；若 $p' < 0$ 则表明该段电路实际是吸收功率的。

功率的单位是瓦特(W)，1 瓦特相当于 1 焦耳/秒(J/s)。实际计算中，还可以使用功率的分数或倍数单位，如 $1 \text{ W} = 10^3 \text{ mW} = 10^6 \mu\text{W}$ ，或者 $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ 等。

1.3.2 能量

在时间区间 $t_0 \sim t_1$ 内，通过对式(1-3)求积分，可得到参考方向如图 1-6 所示的一段电路吸收的电能量为

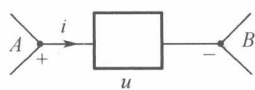


图 1-6 一段电路

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^{t_1} u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4)$$

若 $w > 0$, 则表明该电路从外电路吸收能量, 即消耗电能; 若 $w < 0$, 则表明该电路向外电路提供能量, 即发出电能; 显然, 当 $w = 0$ 时, 该电路既不消耗能量也不发出能量。

能量的单位是焦耳(J)。工程上常用瓦秒或千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)作为电能的单位, 1 千瓦时又被称为 1 度电。

例 1-1 图 1-7 中 $u = 2 \text{ V}$, $i = 3 \text{ A}$, 求该电路吸收的功率和在 5 s 内消耗的能量。

解 因该电路采用关联参考方向, 故吸收的功率为

$$p = ui = 2 \times 3 = 6 \text{ W}$$

电路消耗的能量为

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p dt = \int_0^5 6 dt = 6 \times 5 = 30 \text{ J}$$

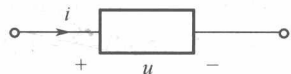


图 1-7 例 1-1 图

例 1-2 图 1-8 中, $t \geq 0$ 时, $u = 4e^{-t} \text{ V}$, $i = 5e^{-t} \text{ A}$, $t < 0$ 时, $u = i = 0$ 。求该电路发出的功率和在初始工作的 2 s 内所提供的能量。

解 因该电路采用非关联参考方向, 故 $t \geq 0$ 时电路发出的功率为

$$p = ui = 4e^{-t} \times 5e^{-t} = 20e^{-2t} \text{ W}$$

在初始工作期间内电路所提供的能量为

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p dt = \int_0^2 20e^{-2t} dt = 20 \times \left. \frac{e^{-2t}}{-2} \right|_0^2 = 10 \times (1 - e^{-4}) \approx 0.9817 \text{ J}$$

若对上例按关联参考方向计算, 则 $t \geq 0$ 时电路吸收的功率为

$$p = -ui = -4e^{-t} \times 5e^{-t} = -20e^{-2t} \text{ W}$$

因 $p < 0$, 电路实际为发出功率。由此可见, 不论以吸收还是发出为前提进行计算, 最后的结果都是一样的。

例 1-3 根据实验数据(Williams 1988), 典型雷电的平均放电电流是 $2 \times 10^4 \text{ A}$, 持续期是 0.1 s, 云与大地之间的电压为 $5 \times 10^8 \text{ V}$, 求一次典型的雷电放电传送到地面的总电荷及其释放的总能量。

解 雷电放电传送到地面的总电荷为

$$Q = \int_0^{0.1} i dt = \int_0^{0.1} 2 \times 10^4 dt = 2 \times 10^3 \text{ C}$$

释放的总能量为

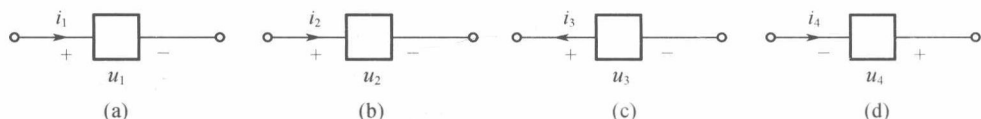
$$w = \int_0^{0.1} u i dt = \int_0^{0.1} (5 \times 10^8) \times (2 \times 10^4) dt = 10^{12} \text{ J} = 1 \text{ TJ}$$

本节思考与练习题

1-3-1 请写出电功率和能量的表达式。

1-3-2 一段电路中, 电功率实际是吸收还是发出, 与参考方向的选取是否有关?

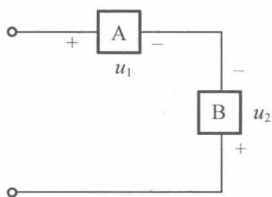
1-3-3 计算题 1-3-3 图中各段电路吸收的功率, 并说明实际是吸收还是发出。已知 $u_1 = 6 \text{ V}$, $i_1 = 2 \text{ A}$; $u_2 = 6 \text{ V}$, $i_2 = -20 \text{ mA}$; $u_3 = -6 \text{ V}$, $i_3 = 3 \text{ A}$; $u_4 = -6 \text{ V}$, $i_4 = -0.5 \text{ A}$ 。



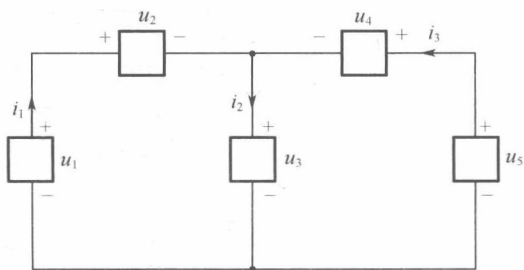
题 1-3-3 图

1-3-4 在题 1-3-4 图所示电路中,已知元件 A 的电压 $u_1 = 10\text{ V}$,吸收功率 $p_1 = 20\text{ W}$;元件 B 的电压 $u_2 = 20\text{ V}$,求元件 B 的功率。

1-3-5 题 1-3-5 图中每一方框都代表着一个电路元件,在图示参考方向下求得各元件电流、电压分别为: $i_1 = 5\text{ A}$, $i_2 = 3\text{ A}$, $i_3 = -2\text{ A}$; $u_1 = 6\text{ V}$, $u_2 = 1\text{ V}$, $u_3 = 5\text{ V}$, $u_4 = -8\text{ V}$, $u_5 = -3\text{ V}$ 。计算各元件吸收的功率,并验证所得答案是否满足功率守恒关系。



题 1-3-4 图



题 1-3-5 图

1.4 基尔霍夫定律

在集中参数电路中,各元件的电流和电压受到两个方面的约束:一是元件本身的特性所形成的约束,即元件特有的电压电流关系(VCR);二是元件相互之间的连接所构成的约束。基尔霍夫定律(Kirchhoff's Laws)就反映了这方面的约束关系。

基尔霍夫定律是集中参数电路的最基本定律,是分析各种电路问题的基础。本书逐步介绍的各种分析方法和网络定理都是以基尔霍夫定律为基础推导得出的。

基尔霍夫定律由电流定律和电压定律两部分组成,前者揭示了电路中各支路电流应服从的分布规律,后者揭示了电路中各支路电压应服从的分布规律。

1.4.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,缩写为 KCL)又称基尔霍夫第一定律。该定律指出:对于任一电路中的任一节点,在任一时刻,流出该节点的所有支路电流的代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-5)$$

在具体应用 KCL 之前,要先指定各电流的参考方向,根据其参考方向决定取和过程中的电流的正和负。若规定流出节点的电流为正,则流入节点的电流为负(当然也可以作相

反的规定)。例如对于图 1-9 所示的电路,各支路电流的参考方向已经设定。

将 KCL 应用于节点②,可得

$$-i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

该式称为节点电流方程,它反映了汇集于节点②的各支路电流之间的约束关系。给定其中任意两个电流,第三个电流便可随之确定。这说明汇集于某节点的所有支路电流中有一个是不独立的,可由其余电流来决定。

如果把流出和流入节点的电流分别写在方程的两边,则上式可以改写成

$$i_5 = i_3 + i_4$$

此式表明,流出节点②的电流之和等于流入该节点的电流之和。因此,KCL 也可以理解为:在任一时刻,流出电路某节点的电流之和等于流入该节点的电流之和,即有

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (1-6)$$

KCL 通常应用于节点,但对包围若干个节点的闭合面也是适用的。例如对图 1-9 中虚线所示的闭合面 S ,若设穿出闭合面的电流为正,穿入闭合面的电流为负(也可以作相反的假设),应用 KCL 可得

$$i_1 + i_2 + i_4 - i_5 - i_8 = 0$$

事实上,只要将闭合面内包围的③④二个节点处的节点电流方程

$$-i_5 - i_6 - i_7 - i_8 = 0$$

$$i_1 + i_2 + i_4 + i_6 + i_7 = 0$$

相加,便可得到上面的结果。这说明,穿过一个闭合面的各支路电流的代数和总是等于零,也可以说成穿出某闭合面的电流之和等于穿入该闭合面的电流之和。如对上述闭合面 S 应用 KCL 定律也可以写成

$$i_1 + i_2 + i_4 = i_5 + i_8$$

KCL 定律反映了电流的连续性,是电荷守恒性的体现。有关电荷守恒性可从电荷与电流间存在的积分关系获得解释。

需要指出的是,基尔霍夫电流定律与元件的性质无关,即 KCL 方程的具体形式仅与节点与支路的连接关系和支路电流的参考方向有关。

1.4.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, KVL),又称基尔霍夫第二定律。该定律指出,对于任一电路中的任一回路,在任一时刻,沿该回路绕行一周途经各元件或支路电压之代数和等于零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-7)$$

在具体应用 KVL 之前,需先任意指定一个回路的绕行方向,并要指定各支路电压的参考方向,然后根据各电压方向与回路方向是否一致来决定取和过程中的电压的正和负。若元件或支路电压参考方向与回路绕行方向相同就取正号,相反则取负号。如对图 1-10 的

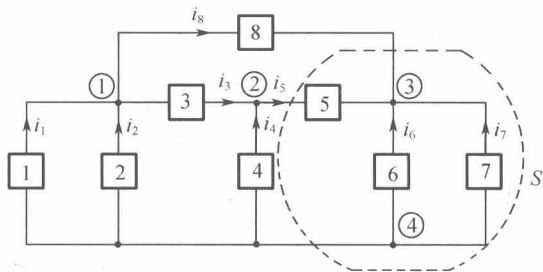


图 1-9 某一电路的图