

电路

分析

基础



主 编 李华中
副主编 吴开兴 王振涛

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/李华中主编. - 北京:冶金工业出版社,
1999.9

ISBN 7-5024-2341-9

I. 电… II. 李… III. 电路分析 IV. TN711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 09175 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张 卫 美术编辑 李 心 责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 9 月第 1 版,1999 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;22.5 印张; 550 千字;361 页;1~3000 册

35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64044283

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书是根据高等工业学校电工课程教学基本要求,并兼顾培养应用型人才的需要而编写的。

在本书编写中,尽量选择经典的电路理论为主要内容,考虑到与后续课程的衔接与需要,以及为拓宽学生的知识面,适当增加了部分内容。如在周期性非正弦电路一章中,给出了信号频谱的概念;把电路的频率特性与谐振部分专门作为一章设置。在教材内容的组织与讲解方面,力求做到符合学习、思维规律,贴近实用,突出主要概念,并结合多年教学、科研方面的体会,加强对有关内容的整理与归纳,增强学生对所学知识的系统性、连续性的认识。在第一章中,将独立电源一节提前,以利于对“一段含源电路”内容的学习;为突出等效变换的概念,对电阻的串、并联等学生在中学就已基本掌握的内容,从等效变换的角度重新加以表述;含受控源电路的分析,一般是电路课程教学中的难点之一,我们试图以一个基本的分析思路和方法贯穿在相关内容之中,使学生有一个较为清晰的学习思路。同时,为加强后续课程的联系,增加了一些电子电路中应用的例题。为便于自学,本书讲解较为详细,例题丰富,并在各章节之后,一般安排有练习与思考题和习题。

全书可按60~70学时(不含实验)安排教学,根据教学需要可增删有关内容。本书可作为高等工业学校本科电类专业少学时《电路》课程、高等专科电类专业、机电一体化类专业的教材或教学参考书,也很适合夜大、函大等相应专业使用。

在本书编写中,得到了许多专家学者的热情指导。王宗信教授仔细、认真地审阅了本书的初稿,并提出了许多很好的修改意见,在此表示衷心的感谢。

本书第1章、第2章由李华中编写;第3章由廖薇编写;第4章、第10章由王振涛编写;第5章及第7章的5、6节由谢万新编写;第6章和第7章的1、2节及习题由贺洪江编写;第8章和第7章的3、4节由王华编写;第9章、第11章由吴开兴编写。全书由李华中统稿。

限于编者水平,本书在内容取舍、编写方面,存在的不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1999年1月

于河北建筑科技学院

目 录

第1章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路与电路模型	(1)
1.2 电路分析中的基本变量	(2)
1.2.1 电流及其参考方向	(3)
1.2.2 电压及其参考方向	(3)
1.2.3 关联与非关联参考方向	(4)
1.2.4 电功率	(5)
1.3 独立电源	(6)
1.3.1 电压源	(6)
1.3.2 电流源	(7)
1.4 电阻元件及其一段含源电路的伏安特性方程	(9)
1.4.1 电阻元件	(9)
1.4.2 一段含源电阻电路的伏安特性方程	(10)
1.5 电感元件和电容元件	(11)
1.5.1 电感元件	(11)
1.5.2 电容元件	(15)
1.6 基尔霍夫定律	(18)
1.6.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(19)
1.6.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	(20)
1.7 电路中电位的计算	(23)
习题	(25)
第2章 电路的等效变换	(31)
2.1 等效一端口网络的概念	(31)
2.2 无源一端口网络的等效变换	(32)
2.2.1 电阻串联电路	(32)
2.2.2 电阻并联电路	(34)
2.2.3 电阻混联电路	(37)
2.2.4 电容、电感的串并联	(38)
2.3 星形联接与三角形联接网络的等效变换	(40)
2.4 两种实际电源模型的等效变换	(42)
2.4.1 实际电压源模型	(43)
2.4.2 实际电流源模型	(44)
2.4.3 两种实际电源模型的等效变换	(44)
2.5 简单含源一端口网络的等效变换	(46)

2.5.1 电源的串、并联	(46)
2.5.2 实际电源串联电路的等效变换	(47)
2.5.3 实际电源并联电路的等效变换	(49)
2.6 等效电阻、输入电阻和输出电阻	(51)
2.6.1 等效电阻	(51)
2.6.2 输入电阻	(51)
2.6.3 输出电阻	(51)
2.7 受控源及含受控源简单电路的分析	(52)
2.7.1 受控源	(52)
2.7.2 含受控源电路的分析	(54)
习题	(58)
第3章 线性电路的一般分析方法和定理	(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	(78)
3.5 替代定理	(83)
3.6 戴维南定理和诺顿定理	(86)
3.6.1 戴维南定理	(86)
3.6.2 诺顿定理	(90)
3.6.3 等效电路参数的计算方法	(92)
3.7 最大功率传输定理	(97)
习题	(99)
第4章 正弦交流电路	(107)
4.1 交流电的基本概念	(107)
4.1.1 周期电压和电流	(107)
4.1.2 正弦交流电	(108)
4.2 正弦量的三要素	(108)
4.2.1 正弦量的三要素	(108)
4.2.2 正弦量的有效值	(111)
4.3 复数	(112)
4.3.1 复数的基本概念	(112)
4.3.2 复数的运算	(113)
4.4 正弦交流电的相量表示法	(115)
4.5 单一参数电路中的正弦电流	(118)
4.5.1 电阻中的正弦电流	(118)
4.5.2 电感中的正弦电流	(120)
4.5.3 电容中的正弦电流	(122)
4.6 基尔霍夫定律的相量形式	(125)

4.6.1 基尔霍夫电流定律(KCL)的相量形式	(125)
4.6.2 基尔霍夫电压定律(KVL)的相量形式	(125)
4.7 R 、 L 、 C 的串联、复阻抗	(126)
4.8 R 、 L 、 C 的并联、复导纳	(129)
4.9 复阻抗(复导纳)的串联与并联	(131)
4.9.1 复阻抗的串联、并联	(132)
4.9.2 复导纳的串联、并联	(133)
4.10 复阻抗与复导纳的等效互换	(134)
4.11 正弦交流电路中的功率及功率因数	(135)
4.11.1 瞬时功率	(135)
4.11.2 平均功率和功率因数	(136)
4.11.3 无功功率	(136)
4.11.4 视在功率	(137)
4.11.5 复功率	(137)
4.11.6 功率因数的提高	(140)
4.12 复杂交流电路的计算	(143)
习题	(148)
第5章 耦合电感电路与理想变压器	(154)
5.1 耦合电感元件及伏安特性	(154)
5.1.1 互感系数与耦合系数	(154)
5.1.2 互感电压	(155)
5.1.3 同名端	(157)
5.2 含有耦合电感的电路分析	(160)
5.2.1 耦合电感串联电路分析	(161)
5.2.2 耦合电感并联电路分析	(162)
5.2.3 耦合电感T形电路分析	(164)
5.3 空心变压器	(168)
5.4 理想变压器	(173)
5.4.1 电压变换与电流变换特性	(174)
5.4.2 阻抗变换特性	(176)
习题	(181)
第6章 三相电路	(185)
6.1 对称三相电源及其连接方式	(185)
6.1.1 对称三相电源	(185)
6.1.2 三相电源的连接方式	(186)
6.2 对称三相负载及其连接方式	(189)
6.2.1 负载的星形接法	(189)
6.2.2 负载的三角形接法	(190)
6.3 三相电路的计算	(193)

6.3.1 对称三相电路的计算	(193)
6.3.2 不对称三相电路的概念	(197)
6.4 三相电路的功率及其测量	(201)
6.4.1 三相电路的功率	(201)
6.4.2 三相电路的瞬时功率	(202)
6.4.3 三相电路功率的测量	(203)
习题	(208)
第7章 周期性非正弦电路与信号的频谱	(210)
7.1 周期性非正弦电流和电压	(210)
7.2 周期性非正弦量的分解	(211)
7.2.1 傅里叶级数的三角函数表达式	(211)
7.2.2 傅里叶系数的求解	(212)
7.3 周期性非正弦量的有效值、平均值和功率	(217)
7.3.1 周期性非正弦量的有效值	(217)
7.3.2 周期性非正弦量的平均值	(218)
7.3.3 周期性非正弦量的功率	(220)
7.4 周期性非正弦电路的计算	(222)
7.5 傅里叶级数的指数形式与周期信号的频谱	(225)
7.5.1 傅里叶级数的指数形式	(225)
7.5.2 周期信号的频谱	(226)
7.6 傅里叶变换与非周期信号的频谱	(227)
7.6.1 傅里叶变换	(227)
7.6.2 非周期信号的频谱	(229)
习题	(232)
第8章 电路的频率特性	(234)
8.1 频率特性的概念	(234)
8.2 频域中的网络函数	(235)
8.2.1 频域中网络函数的定义	(235)
8.2.2 网络函数的类型	(236)
8.3 简单一阶网络的频率特性	(239)
8.3.1 一阶低通网络的频率特性	(239)
8.3.2 一阶高通网络的频率特性	(241)
8.4 串联谐振电路及其频率特性	(242)
8.4.1 串联谐振电路	(243)
8.4.2 串联谐振电路的频率特性	(247)
8.5 并联谐振电路及其频率特性	(252)
8.5.1 简单 R 、 L 、 C 并联谐振电路	(252)
8.5.2 实际电感线圈和电容并联的谐振电路	(253)
习题	(257)

第 9 章 电路的暂态分析	(260)
9.1 电路的暂态过程与换路定则	(260)
9.1.1 电路的暂态过程	(260)
9.1.2 换路定则	(261)
9.2 稳态值与初始值的确定	(261)
9.3 一阶电路的零输入响应	(263)
9.3.1 RC 电路的零输入响应	(263)
9.3.2 RL 电路的零输入响应	(265)
9.4 一阶电路的零状态响应	(267)
9.4.1 RC 电路的零状态响应	(267)
9.4.2 RL 电路的零状态响应	(270)
9.5 一阶电路的全响应	(272)
9.5.1 RC 电路的全响应	(272)
9.5.2 RL 电路的全响应	(273)
9.6 一阶电路的三要素法	(274)
9.7 一阶电路的阶跃响应	(279)
9.8 一阶电路的冲激响应	(284)
9.8.1 RC 电路的单位冲激响应	(285)
9.8.2 RL 电路的单位冲激响应	(287)
9.9 几种典型的 RC 电路	(294)
9.9.1 RC 微分电路	(295)
9.9.2 RC 积分电路	(296)
9.9.3 RC 耦合电路	(297)
9.9.4 RC 加速电路	(297)
9.10 R 、 L 、 C 串联电路的零输入响应	(299)
习题	(306)
第 10 章 线性电路的复频域分析法	(310)
10.1 拉普拉斯变换的定义	(310)
10.1.1 拉普拉斯变换的定义	(311)
10.1.2 几个常用函数的拉普拉斯变换	(311)
10.2 拉普拉斯变换的基本性质	(312)
10.3 拉普拉斯反变换	(317)
10.3.1 $D(s) = 0$ 含有 n 个单根的情况	(318)
10.3.2 $D(s) = 0$ 含有复根的情况	(318)
10.3.3 $D(s) = 0$ 含有重根的情况	(319)
10.4 线性电路的 s 域模型	(321)
10.5 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	(323)
10.6 网络函数	(327)
习题	(329)

第 11 章 二端口网络	(331)
11.1 二端口网络概述	(331)
11.2 二端口网络的方程和参数	(332)
11.2.1 二端口网络的 Z 参数	(332)
11.2.2 二端口网络的 Y 参数	(334)
11.2.3 二端口网络的 A 参数	(336)
11.2.4 二端口网络的 H 参数	(338)
11.3 二端口网络的联接	(339)
11.3.1 二端口网络的级联	(340)
11.3.2 二端口网络的并联	(341)
11.3.3 二端口网络的串联	(342)
11.4 二端口网络的特性阻抗	(342)
11.5 含二端口网络电路的分析	(345)
习题	(349)

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

本章是全书内容的理论基础。学习中要注意掌握和理解以下内容:

- (1) 了解电路的组成和作用;
- (2) 理解和掌握电流、电压的参考方向, 注意参考方向下欧姆定律的运用和功率的计算, 并理解功率正负的意义;
- (3) 熟练掌握 R 、 L 、 C 三种基本电路元件的伏安特性;
- (4) 建立并理解电压源和电流源的概念;
- (5) 熟练掌握基尔霍夫定律;
- (6) 掌握电位的概念和计算。

1.1 电路与电路模型

电在现代工农业生产和日常生活中, 有着极为广泛的应用, 人们用各种各样的电路来完成不同的任务。例如, 放大电路可以将语言、图像等转换的微弱电信号放大; 通信电路可以使人们实现远距离的信息交流; 计算机电路可部分代替人脑的功能。概括起来, 电路具有两方面的作用: 一是电能的传输、分配及转换。如由发电机、变压器、输电线路和用户组成的电力网; 各种用电设备可以把电能转换成光能、热能和机械能等。二是信号的传输、处理和储存。最典型的就是一种通信电路。尽管实际电路种类繁多, 千变万化, 但都有一个共同点, 即要依赖于电流(电压)的流通来传递能量和信号。因此, 一般可以这样说, 电路就是电流流通的路径。

电路又称为电网络, 简称网络。习惯上使用“网络”一词时所指较为抽象, 使用“电路”一词时所指则较为具体。但一般的说, 二者在含义上没有本质的区别。

图 1-1a 所示的手电筒电路是一个最简单的电路。电路中包括了任何一个电路都具有的四个基本组成部分: 电源、负载、控制元件和连接导线。各种实际电路都是由许多不同的电子、电气器件按某种要求相互连接而成的。实际电路中用到的各种器件元件种类繁多, 性能各异。随着科学技术的发展, 新器件还在不断的出现。人们设计制造的各种器件, 是要利用它的主要物理性质, 概括起来主要是: 提供电能和消耗电能; 储存电场能量和磁场能量。一个器件, 在表现出主要物理性质的同时, 还会表现出一些次要的物理性质。例如, 对实际电阻元件, 利用的是它对电流呈现出来的阻力性质, 但当电流流过电阻元件时会有一定的电场和磁场效应; 实际电感元件的主要物理性质是储存磁场能量, 但也会表现出电阻和电容的特性。在分析电路时, 如果把器件的全部物理特性都加以考虑, 一是工程上一般没有这样精确的必要; 二是即使必要, 要在一个器件上同时考虑多种物理特性, 势必使分析复杂化。为了得到适合分析的各种电磁现象, 同时也为了简化电路分析, 可以从实际电路元件中抽象出一些理想电路元件来近似、模拟实际电路元件。所谓理想电路元件, 是假想出来的、只具有单一物理特性的元件。基本的理想电路元件有三种: 理想电阻、理想电感和理想电容。分别

用符号 R 、 L 、 C 表示。各元件的图形符号如图 1-2 所示。以后没有特别说明, 电路元件均指理想电路元件。除这三种基本电路元件之外, 还有理想电源、理想耦合电感元件、理想变压器以及理想受控源等。

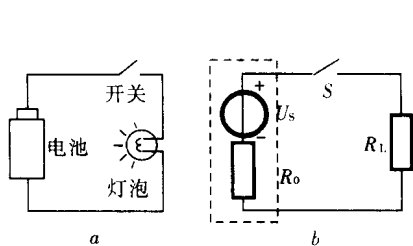


图 1-1 手电筒电路

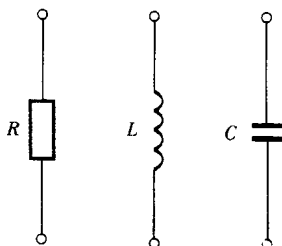


图 1-2 三种基本电路元件的图形符号

一个电路元件若有两个端钮, 称为二端元件, 具有三个及三个以上端钮的称为多端元件。三种基本电路元件属于无源二端元件。理想电源属于有源二端元件。耦合电感元件、理想变压器和受控源属于多端元件。用理想电路元件和理想导线组成的电路称为电路模型。电路模型是实际电路的抽象。在本书中, 如果没有特别说明, 所讨论的电路都是电路模型, 简称电路。图 1-1b 就是手电筒电路的电路模型。

理想电路元件的引入, 使得在所讨论的电路中, 所有的电磁现象都只能集总(集中)在元件的内部发生。即能量的消耗发生在电阻元件的内部, 电场和磁场的储存发生在电容和电感元件的内部。所以, 理想电路元件又称为集总参数元件。用集总参数元件构成的电路, 称为集总参数电路。由于在集总参数电路中, 电磁现象都集总在元件内部发生, 这就出现了电场和磁场相互作用的分离。根据电磁场理论, 电场和磁场的相互作用将产生电磁波。当电路的几何尺寸与电路工作频率所对应的波长可相比拟时, 电磁波的辐射将显著加强。电路中的部分能量将随电磁波辐射到空间。这与能量的消耗都发生在电阻元件内部的假设不符。因此, 一个实际电路要按集总参数电路对待, 就必须忽略由于电磁波的辐射而带来的能量损失。即作为集总参数电路, 必须满足电路的几何尺寸 l 要远小于电路工作频率所对应的波长 λ , 即

$$l \ll \lambda$$

式中 $\lambda = c/f$, c 为光速, f 为电路的工作频率。在集总参数电路中, 在任一时刻流出一个二端元件一端的电流, 等于该时刻从另一端流入的电流, 即电流通过电路不需要时间。

当电路的几何尺寸可以和电路工作频率所对应的波长相比拟时, 这个电路就不能按集总参数电路对待, 而要用分布参数电路或电磁场理论来分析。本书只讨论集总参数电路。

在电路分析中, 把作用在电路上的电源或信号称为激励, 也叫做输入; 由于激励, 电路中出现的电压或电流称为响应, 也叫做输出。所谓电路分析, 是指在已知电路结构和元件参数的条件下, 讨论、寻求激励与响应的关系。如果已知激励和响应, 去寻求电路结构和元件参数, 在电路理论中属于“电路综合”。本书只讨论电路分析方面的问题。

1.2 电路分析中的基本变量

电路分析的主要问题之一, 就是为了了解和决定电路的工作状态, 即求解电路中各元件上的电流和电压。电流和电压是电路分析中的两个基本变量。所谓基本变量, 是指用它们

可以方便地表示出电路中的其他物理量。例如,电功率就是电流和电压复合引伸出的一个基本物理量。除了电流和电压之外,电荷和磁链也是基本变量。在电路分析中最常用的是电流和电压,以及由它们引伸出的电功率。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷在电场力的作用下,做有规律的定向移动就形成了电流。电荷移动的速率即电流的大小定义如下:

在单位时间内,通过导体横截面电荷量的代数和,称为电流。用符号 i 表示,即

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

电流以及符号 i ,既用来描述电荷做定向运动这一物理现象,又用来表示其量值大小。对于大小和方向随时间变化的电流,即时变电流用小写字母“ i ”表示;对于恒定电流即直流电流用大写字母“ I ”表示。

在国际单位制中,电流、电荷和时间的基本单位名称分别是安培(简称安,用 A 表示),库仑(简称库,用 C 表示)和秒(用 s 表示)。在实际应用中,电流有时也常用其辅助单位:千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A),其换算关系是:

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

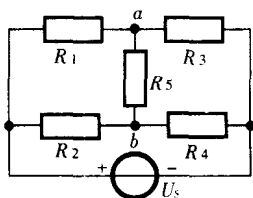


图 1-3 桥式电路

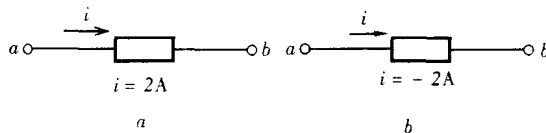


图 1-4 电流的参考方向

由于历史的原因,电流的实际方向被定义为正电荷移动的方向。在简单直流电路中(如图 1-1 所示电路),电流的实际方向很容易判别。但是当电路比较复杂时,就难以判别电流的实际方向。例如图 1-3 所示的桥式电路。电阻 R_5 中的电流是从 a 流向 b ,还是从 b 流向 a ,或者电流为零,必须通过计算才能知道。而计算时又要求标出各元件上电流的方向,这就造成了困难。另外,在交流电路中,电流的方向是随时间而变化的,无法标出其实际方向。为了便于计算,引入“参考方向”这一概念。对于电流这个在二端元件上只有两个可能方向的物理量,可以任意选择一个方向作为电流的参考方向。电流的参考方向用箭头表示。电路计算结果或给定的电流值如果大于零,说明参考方向与实际方向相同;如果小于零,则说明参考方向与实际方向相反。如图 1-4a 中,电流为正值,说明参考方向与实际方向相同,即电流确实是从 a 流向 b 。在图 1-4b 中,电流为负值,说明实际方向是从 b 流向 a 。电流的参考方向也可以用双下标表示,如“ i_{ab} ”,表示所设参考方向是从 a 流向 b ,显然, $i_{ba} = -i_{ab}$ 。引入参考方向以后,电流就成了代数量。

1.2.2 电压及其参考方向

电压是描述电场力对电荷做功大小的一个物理量。电场力把单位正电荷从电路中一点

移到另一点所作的功,叫做这两点之间的电压,即

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

小写字母 u , 表示电压的大小和方向随时间而变化, 即时变电压。对于恒定电压, 即直流电压, 用大写字母“ U ”表示。电路中两点之间的电压, 也是单位正电荷从一点移到另一点所失去或所获得的能量。如果正电荷在移动中失去能量, 则电位降低; 如果获得能量, 则电位升高。所以电压又称为电位差或电压降。电压的单位是伏特, 用符号“ V ”表示。其辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV), 换算关系是:

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

电压的实际方向, 是高电位指向低电位。但如同需要假设电流的参考方向一样, 在电路计算时, 也要先在元件或一段电路上假设电压的参考方向。电压的参考方向(或称为参考极性),

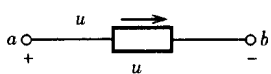


图 1-5 电压的参考方向

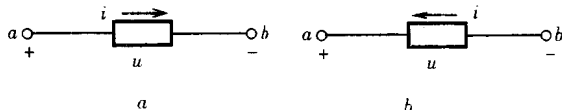


图 1-6 关联与非关联参考方向

可以用箭头、正负号或双下标表示。如图 1-5 所示。使用双下标表示参考方向时, 如 u_{ab} 表示 a 为参考正极, b 为参考负极; 或电压的参考方向是从 a 指向 b 。在参考方向下, 电压也变成了代数量。如果电压大于零, 说明参考方向与实际方向相同; 如果电压小于零, 说明参考方向与实际方向相反。例如, 图 1-5 中若 u 或 u_{ab} 为“ $5V$ ”, 则电压的实际极性为 a 正 b 负; 若为“ $-5V$ ”, 则电压的真实极性为 a 负 b 正。

1.2.3 关联与非关联参考方向

引入参考方向的概念以后, 在一个元件或一段电路上, 电流和电压的参考方向就会出现两种情况。当电流和电压的参考方向相同时, 称为关联参考方向; 相反时称为非关联参考方向, 如图 1-6a、b 所示。

在电路分析中, 负载上一般设定为关联参考方向; 电源上设定为非关联参考方向。同时约定: 当为关联参考方向时, 只需标出电流或电压其中一个参考方向; 当为非关联参考方向时, 则需要将电流、电压的参考方向全部标出。后续内容中许多重要的公式和结论都是在关联参考方向下导出的。在应用时, 对参考方向要给予充分注意。

需要强调, 在分析计算电路时, 必须首先假设电流、电压的参考方向。没有参考方向, 电流和电压的正、负将毫无意义。另外, 所谓关联与非关联参考方向, 是针对某一具体元件或一段电路来说的。谈到这个问题时, 必须说明在哪一个元件或哪一段电路上, 电压和电流为关联或非关联参考方向。

例 1-1 在图 1-6a 中, $i = -2A$, $u = 6V$, 试指出实际方向。 u_{ba} 和 i_{ba} 分别是多少?

解: 由于 i 为负值, 所以电流的实际方向是从 b 流向 a 。 u 为正值, 所以电压的实际方向和参考方向相同, 即 a 指向 b 。由电压 u 的参考方向和给定的电压值可知

$$u_{ab} = 6\text{V} \quad u_{ba} = -u_{ab} = -6\text{V}$$

同理:

$$i_{ab} = -2\text{A} \quad i_{ba} = -i_{ab} = 2\text{A}$$

1.2.4 电功率

电功率是单位时间内元件(或电路)所转换的电能量,即

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

根据电压和电流的定义

$$dW = u dq; \quad i = \frac{dq}{dt}$$

代入式 1-3 得到

$$p = ui \quad (1-4a)$$

对于直流电路

$$P = UI \quad (1-4b)$$

可以看到,电功率(以下简称功率)是由电压和电流的乘积表示的,是一个基本复合变量。在国际单位制中,功率的基本单位名称是瓦特,简称瓦,用符号 W 表示。辅助单位有:兆瓦(MW),千瓦(kW),毫瓦(mW)和微瓦(μW),其换算关系是:

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

由于电流和电压都是代数量,功率也就有了正负之分。在关联参考方向下,功率的计算应用式 1-4;在非关联参考方向下,式 1-4 则需要加一负号,即

$$p = -ui \quad (1-5a)$$

在直流电路中

$$P = -UI \quad (1-5b)$$

无论是式 1-4, 还是式 1-5, 计算结果若大于零, 表明元件或电路在消耗(吸收)功率, 相当于一个负载; 若计算结果小于零, 表明元件或电路在对外提供(释放)功率, 相当于一个电源。

下面以电阻元件为例, 说明其正确性。

如前所述, 电阻是反映能量消耗这一物理现象的元件模型。在电阻元件上, 电压和电流的实际方向永远是相同的。在关联参考方向下, 电阻上电压和电流的值必定全为正值或全为负值。应用式 1-4 计算功率时, 其值将大于零; 如果电阻上的电压和电流为非关联参考方向, 电压和电流的值必定是一正一负, 应用式 1-5 计算功率时, 其值也将大于零。这与电阻的物理特性是一致的。

例 1-2 各电路如图 1-7 所示。已知: (a) $U = -2\text{V}; I = 5\text{A}$; (b) $U = -8\text{V}; I = 2\text{A}$; (c) $U = 5\text{V}; I = 4\text{A}$ 。求各元件吸收的功率, 并判别哪些元件是电源, 哪些元件是负载。

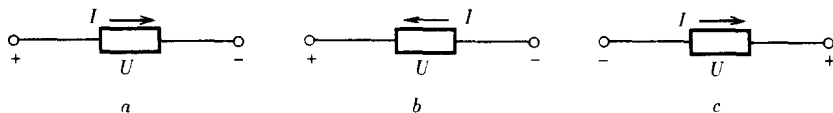


图 1-7 例 1-2 图

解: (a) 因为电压和电流为关联参考方向, 故用式 1-4, 有

$$P = UI = (-2) \times 5 = -10(\text{W}) \quad P < 0, \text{元件为电源};$$

(b) 元件上电压和电流为非关联参考方向, 用式 1-5, 有

$$P = -UI = -(-8) \times 2 = 16(\text{W}) \quad P > 0, \text{元件为负载};$$

(c)同理,用式 1-5 有

$$P = -UI = -(5 \times 4) = -20(\text{W}) \quad P < 0, \text{元件为电源。}$$

例 1-3 电路如图 1-8 所示。已知: $u_{ac} = 10\text{V}$, $u_{ab} = 4\text{V}$, $u_{cb} = -6\text{V}$, $i_1 = -2\text{A}$, $i_2 = -1\text{A}$, $i_3 = 1\text{A}$ 。求各元件吸收的功率并计算各元件吸收的总功率。

解: 根据元件上电流和电压的参考方向,和给定的各值,元件上的功率分别为

$$\text{元件 1:} \quad p_1 = u_{ac}i_1 = 10 \times (-2) = -20(\text{W}) \quad \text{提供功率}$$

$$\text{元件 2:} \quad p_2 = -u_{ac}i_2 = -10 \times (-1) = 10(\text{W}) \quad \text{吸收功率}$$

$$\text{元件 3:} \quad p_3 = u_{ab}i_3 = 4 \times 1 = 4(\text{W}) \quad \text{吸收功率}$$

$$\text{元件 4:} \quad p_4 = -u_{cb}i_3 = -(-6) \times 1 = 6(\text{W}) \quad \text{吸收功率}$$

由计算结果可以看出,电路中只有元件 1 提供了 20W 功率(注意,不是提供了 -20W),其他三个元件都是在吸收功率,总计也是 20W 。这说明:在任何瞬间电路提供的总功率等于此刻电路消耗的总功率,这称为功率平衡。

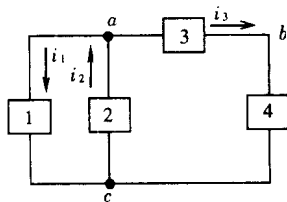


图 1-8 例 1-3 图

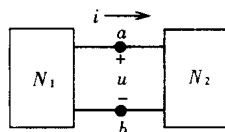


图 1-9 练习与思考题 1-2-1 图

练习与思考题

1-2-1 在图 1-9 中, N_1 和 N_2 是两个网络。如果有人说,端钮 a 、 b 之间 u 、 i 为关联参考方向,这种说法对吗? 应该如何表述两个网络的参考方向?

1-2-2 已知图 1-9 中, N_1 提供 100W 功率, u 为 10V , 请列出求解电流 i 的表达式并求出 i (答案: $i = -10\text{A}$)。

1.3 独立电源

能够独立向外电路提供能量的电源称为独立电源。独立电源是实际电源的理想化模型。按照其特性的不同可以分为电压源和电流源。

1.3.1 电压源

如果一个二端元件两端的电压,与流过这个元件的电流无关,是一个恒定值 U_s , 或是一个确定的时间函数 $u_s(t)$, 则这个二端元件就称为电压源, 又称为恒压源。其图形符号如图 1-10 所示。

图 1-10a 表示直流电压源, 用符号 U_s 表示; 交流(时变)电压源用图 1-10b 所示符号表示; 在工程上对于直流电压源如用于电池或蓄电池供电时, 也常用图 1-10c 所示符号表示, 长线段表示电压源的正极, 短线表示负极。图形符号给出的电压方向(或称电压极性)都是

参考方向,其实际方向同样要依据给定电压值的正负判定。

由电压源的定义可以看出,电压源有两个重要特点:一是电压源两端的电压与流过电源的电流无关;二是流过电压源的电流大小和方向取决于电压源所联接的外电路。这说明电压源的值和极性是由电源本身确定的,与外电路无关,电流可以以不同的方向和大小流过电压源。因此,电压源可以作为电源向外部提供能量,也可以作为负载从外部吸收能量。人们熟悉的充电电池就具有这两种工作状态。

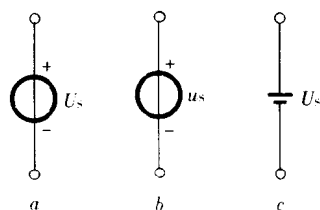


图 1-10 电压源的图形符号

根据以上的讨论,对图 1-11a 所示电路可以写出电压源两端电压电流的特性方程为

$$u = u_s \quad (1-6)$$

直流电压源可以看成是交流电压源的一个特例,即电压与时间无关。无论是直流还是交流电压源,在任一瞬间,电压源的电压与电流无关。这一点对了解交流电压源的特性尤为重要。图 1-11b、c 所示的就是电压源的伏安特性曲线。伏安特性又称为伏安关系。图 b 是直流电压源的特性;图 c 定性标出了某三个时刻交流电压源的伏安特性。从图中可以看出,虽然电压的大小和方向在随时间变化,但在任何瞬间,其伏安特性曲线是与电流轴平行的直线。

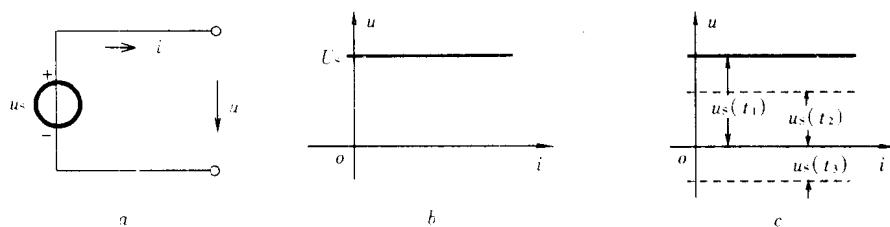


图 1-11 电压源的伏安特性

理想电压源可以吸收或提供近于无穷大的功率,也就是电流可以近于无穷大。但电压源两端不允许短路,即正负极之间的电阻不得为零。

1.3.2 电流源

如果一个二端元件的输出电流,与这个元件两端的电压无关,是一个恒定值 I_s ,或是一个确定的时间函数 $i_s(t)$,则这个二端元件就是一个理想电流源,简称电流源。又称为恒流源。

电流源是实际电流源的理想化模型。实际电流源一般是由电子器件和电子电路构成的。例如:光电池在一定照度下可以产生一定值的电流;利用晶体管的输出特性设计制作的可以输出一定电流值的电子电路。

图 1-12a、b 所示是电流源的图形符号,箭头表示电流源电流的参考方向。如果电流源的电流是一个恒定值,这是一个直流电流源;如果电流源的电流可用一个确定的时间函数来描述,则是一个交流电流源。从电流源的定义可以知道:无论是直流还是交流电流源,它们

的输出电流都与电流源两端电压无关。所以电流源的伏安特性方程可以写为：

$$i = i_s \quad (1-7)$$

电流源两端的电压大小取决于与电流源相联接的外电路。图 1-12c 是直流电流源的伏安特性曲线。对交流电流源来说,虽然它输出电流的大小和方向在随着时间的变化而变化,但在任一瞬间,电流源的电流值与两端电压无关。

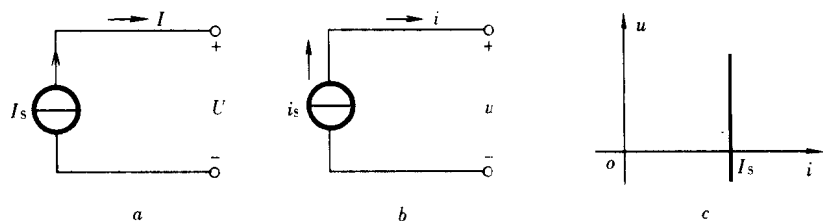


图 1-12 电流源的图形符号与伏安特性

与电压源相同,根据电流源两端电压的不同,电流源可以作为电源对外部提供功率,也可以作为负载吸收功率,电流源提供或吸收的功率可以接近无穷大。理想电流源不允许开路。

练习与思考题

1-3-1 在图 1-13 所示的两个电路中,如果电路 *a* 中 R_1 取任意的非零值,电路 *b* 中 R_2 取任意的非无穷大值,是否会影响图 *a* 中负载电阻 R_L 上的电压和图 *b* 中 R_L 上的电流? 为什么?

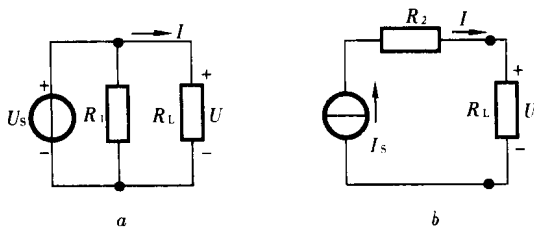


图 1-13 练习与思考题 1-3-1 图

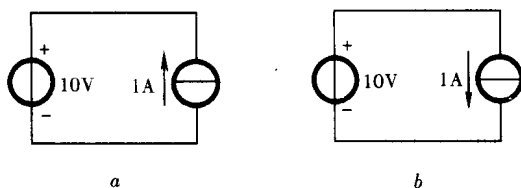


图 1-14 练习与思考题 1-3-3 图