



普通高等教育“十一五”规划教材

电工电子技术

Diangong Dianzi Jishu

上册

肖志红 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM/202

:1

2010

普通高等教育“十一五”规划教材

电工电子技术

上册

主 编 肖志红

副主编 吴银川

参 编 张 欣

机械工业出版社

本教材分上下两册,共15章。编写的指导思想是:精选内容,注重基础,突出内容的先进性,同时注重应用,突出工程背景。

上册共8章,内容包括:电路的基本概念与基本定律、电路常用分析方法、暂态电路分析、正弦交流电路、磁路与变压器、交流电动机、电气控制技术、工厂用电与安全用电。每章配有难度适中的习题及部分习题参考答案。部分章节配有工程应用举例及 Multisim 仿真实例。

本书可作为高等院校工科非电类本科生、大专生及成人教育学生的教材或参考书,还可作为自学考试或相关工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 yu57sh@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术.上册/肖志红主编. —北京:机械工业出版社, 2010.5

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-30144-8

I. ①电… II. ①肖… III. ①电工技术-高等学校-教材
②电子技术-高等学校-教材 IV. ① TM② TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 048517 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:张世琴 责任校对:李锦莉

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·13.25 印张·326 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30144-8

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电工电子技术”是普通高等学校理工科非电类专业的一门非常重要的技术基础课，是一门关于电学科的综合性和导论性、实践性的课程。本课程的中心任务是使非电类专业学生获得电工电子学科方面的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课程及将来从事工程技术工作和科学研究工作打下基础。

本套教材是以教育部 2005 年颁发的“高等学校电工学基础课程教学基本要求”为依据，并充分考虑各院校新教学计划学时数及现代电工电子技术的发展趋势，结合教师多年的教学、科研经验编著的。全套教材分上下两册，共 15 章。

本教材编写的指导思想是：精选内容，注重基础，突出内容的先进性，同时注重应用，突出工程背景。对于非电类专业来说，电工电子技术基础内容多，学时少。因此，在编写教材时，我们注重基础内容的精选、突出电工电子技术的基本概念、基本理论、基本分析方法。在传统理论的基础上，本教材注重理论与实际的结合，大部分章节含有与之内容相适应的工程应用举例以及仿真实例，为理论和方法的学习奠定实际背景基础，同时充分利用软件仿真技术，最大化地提高教学效果。本书可作为普通高等学校理工科非电类专业教材，还可作为自学考试或相关工程技术人员的参考用书。

本教材上册由西安石油大学肖志红主编并统稿，吴银川为副主编，其中第 1 章、第 2 章、第 6 章、第 7 章由肖志红编著，第 3 章、第 4 章、附录由吴银川编著，第 5 章、第 8 章由上海医疗器械高等专科学校张欣编著，中英文名词对照及部分习题参考答案由肖志红、吴银川及张欣共同整理、编写。

西安石油大学沈金根教授在本书的编写过程中给予大量的帮助，并提出了许多宝贵意见；西安石油大学电子工程学院各位领导以及电工电子技术教学组胡长岭副教授、严正国副教授、宋久旭老师也对本书给予了大力支持；同时在本书的编写过程中作者吸取了参考文献中多位专家、学者的经验，受益匪浅。在此，对帮助过我们的老师、参考资料的作者、机械工业出版社、西安石油大学教务处、电子工程学院一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，不妥和错误之处在所难免。敬请使用本教材的教师、同学以及广大读者提出宝贵意见。

编 者
2010 年 2 月

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路模型	1
1.2 电路变量	3
1.3 基尔霍夫定律	7
1.4 电阻元件	10
1.5 电压源与电流源	16
1.6 受控源	21
1.7 电路中电位的计算	24
习题	26
第2章 电路常用分析方法	31
2.1 等效变换法	31
2.2 支路电流法	36
2.3 叠加定理	38
2.4 节点电压法	41
2.5 戴维宁定理与诺顿定理	44
2.6 最大功率传递定理	49
习题	50
第3章 暂态电路分析	56
3.1 电容元件与电感元件	56
3.2 换路定则	58
3.3 一阶电路的响应	61
3.4 一阶动态电路的三要素法	67
3.5 工程应用举例	68
3.6 暂态电路的仿真	70
习题	71
第4章 正弦交流电路	75
4.1 正弦交流电的概念	75
4.2 正弦量的相量表示	77
4.3 电阻、电容、电感元件伏安关系的相量形式	80
4.4 正弦交流电路分析	81
4.5 正弦交流电路的功率	87
4.6 电路的谐振	91
4.7 三相交流电路	93
4.8 非正弦交流电路	99

4.9 工程应用举例	101
4.10 串联谐振电路的仿真	103
习题	105
第5章 磁路与变压器	109
5.1 磁场与磁路	109
5.2 磁性材料	114
5.3 交流铁心线圈电路	118
5.4 变压器	119
习题	130
第6章 交流电动机	132
6.1 三相异步电动机的基本结构	132
6.2 三相异步电动机的转动原理	134
6.3 三相异步电动机的机械特性	140
6.4 三相异步电动机的使用	142
习题	150
第7章 电气控制技术	151
7.1 常用低压电器	151
7.2 笼型异步电动机的常用控制电路	162
7.3 可编程序控制器	168
7.4 工程应用举例	175
习题	178
第8章 工厂供电与安全用电	180
8.1 发电输电概述	180
8.2 工业企业配电	181
8.3 安全用电	182
8.4 急救与防护措施	184
8.5 节约用电	185
习题	186
附录	187
附录A Multisim 10 简介	187
附录B Y系列三相异步电动机技术数据	198
中英文名词对照	199
部分习题参考答案	202
参考文献	207

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

本章是全书的基础，主要介绍电路模型、电路的基本物理量及参考方向，电路的基本定律、电阻元件、电压源与电流源，以及电位的概念及计算。

1.1 电路模型

在现代人类生产与生活的各个领域，充满着各种各样的电器设备，如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等。这些电器设备尽管用途不同，性能各异，但几乎都是由各种基本电路组成的。那么什么是电路？电路的作用是什么？

1.1.1 电路的定义

电路 (Circuit) 是指为了某种需要，由一些电工设备或元器件按一定方式连接起来的电流的通路。电路也可称为网络。在电路理论中，“电路”与“网络”这两个术语并无严格的区别，使用时，含义是相同的。

图 1-1 是手电筒照明电路示意图。电路由三部分组成：

1) 干电池，它是提供电能的装置，简称电源 (Source)，它的作用是将其他形式的能量转换为电能 (图中，干电池是将化学能转换为电能)。

2) 灯泡，是用电装置，称为负载 (Load)，它将电源供给的电能转化为其他形式的能量 (图中，当开关闭合时，电流从电源的正极通过导线流过灯泡中的灯丝，并回到电源负极。当灯丝有电流流过时，就将电能变成了热能和光能)。

3) 手电筒的筒体，即连接电源与负载的中间环节。中间环节的作用是将电源和负载连接起来形成闭合电路，在电路中起着传送电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节可以仅仅是连接导线，而复杂的中间环节则可以是具有控制、保护、检测等功能的由许多元器件组成的系统。

日常生活中，虽然实际电路种类繁多，大到跨省界、国界、洲界的供配电系统，小到在纽扣大小的芯片上集成上百万或更多元器件的集成电路，但无论是简单电路，还是复杂电路，从本质上来说，都是由电源、负载和中间环节三部分组成，因此它们又称为组成电路的三要素。

1.1.2 电路的作用

电路的组成方式很多，但就其功能来说可概括为两个方面。其一，是实现电能的传输和转换。典型的例子是电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量

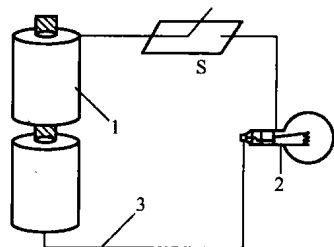


图 1-1 手电筒照明电路示意图

1—干电池 2—灯泡 3—手电筒筒体

(热能、水的势能、核能、太阳能等) 转换成电能, 通过变压器、输电线输送给各个用户, 在那里又把电能转换成机械能 (如负载是电动机)、光能 (如负载是照明工具)、热能 (如负载是电炉、电烙铁等), 为人们生产、生活所利用。其二, 是实现信号的产生、传递、变换、处理与控制。这方面典型的例子有电话, 它就是把语音转变为电信号, 通过电路传送给接收方的。还有, 例如收音机、电视机电路等, 接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后, 通过接收机电路把输入信号变换或处理为人们所需要的输出信号, 送到扬声器或显像管, 再还原为语言、音乐或图像。收音机电路示意图如图 1-2 所示。

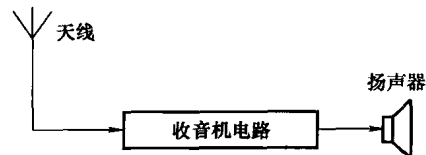


图 1-2 收音机电路示意图

电路多种多样, 不论是电能的传输和转换电路, 还是信号的传递与处理电路, 其中电源 (或信号源) 的电压和电流称为激励 (Excitation), 由激励引起的结果 (如某个元器件上的电流、电压) 称之为响应 (Response)。激励和响应的关系就是作用和结果的关系, 往往对应着输入与输出的关系。所谓分析电路, 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。

1.1.3 理想元件与电路模型

实际电路是由具体的元器件组成, 常用的元器件有电阻器、电容器、电感器、晶体管、集成电路、电动机、发电机等。电路元器件种类繁多, 但一些元器件在电磁方面有着共同的特性。例如, 电阻器和电炉丝, 它们的共同特性是消耗电能, 虽然当它们有电流流过时, 还会产生磁场, 具有电感性, 但在低频状态下, 电感微小, 可以忽略不计。因此, 可以用一个具有两个端钮的理想电阻元件来反映它们消耗电能的特性。这样就抽掉了这些实际元器件的其他次要性质, 而抓住了它们所表现的主要共性——消耗电能。

1. 理想元件

在分析电路时, 没有必要把元器件的全部物理特性都加以考虑, 使问题复杂化。为了便于对实际电路进行分析和数学表述, 常常将实际电路元器件理想化 (模型化), 即在一定条件下突出其主要的电磁性质, 忽略其次要性质, 把它近似地看作理想元件。理想元件, 是假想出来的、只具有单一物理特性的元件。理想元件又可称为实际元器件的理想化模型。基本的理想元件有: 理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件和理想电源等。图 1-3 所示为理想电阻、电容、电感元件的电路图形符号。

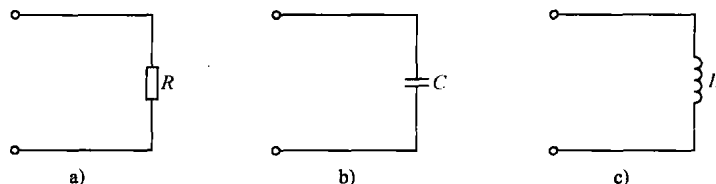


图 1-3 理想电阻、电容、电感元件的电路图形符号

a) 电阻元件 b) 电容元件 c) 电感元件

理想元件只具有某种确定的电磁性能, 如理想电阻元件只消耗电能; 理想电容元件只储存电场能; 理想电感元件只储存磁场能。理想元件在实际中并不存在。

不同的实际电路元器件，只要具有相同的主要电磁性能，在一定条件下都可用同一个模型表示，如灯泡、电炉丝、电阻器这些不同的实际电路元器件在低频电路里都可用电阻元件 R 表示。

同一个实际电路元器件在不同的应用条件下，可以有不同的模型。实际元器件如何近似和抽象、如何建立模型，与具体的应用有关。例如一个电感器，如图 1-4a 所示，它在直流情况下可用一根理想导线或一个阻值很小的电阻元件作为它的模型，如图 1-4b 所示；在工作频率比较低时，可以用一个电感元件或电阻元件和电感元件的串联作为模型，如图 1-4c、d 所示；在工作频率比较高时还需考虑电容效应，所以，其模型还应包含电容元件，如图 1-4e 所示。

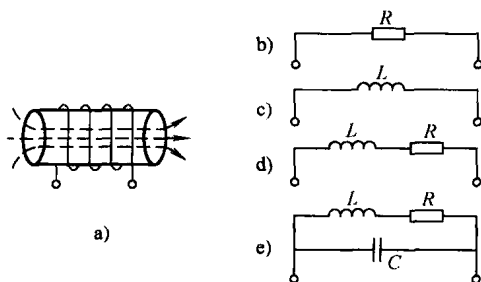


图 1-4 实际电感元件在不同应用条件下的模型

2. 电路模型

由一些理想元件所组成的电路就是实际电路的电路模型 (Circuit model)。今后如果不作特殊说明，所研究的元件都是理想元件 (今后涉及的一般均为理想元件，故往往略去“理想”二字，简称元件)，所分析的电路都是电路模型，简称电路。

电路模型都有一定的适用条件，同一个实际电路在不同的使用场合和不同的精度要求下，会得出不同的电路模型。

将实际电路中各元器件用理想元件图形符号表示，这样画出的电路图称为实际电路的电路模型图，也称作电路原理图。手电筒电路的电路模型图如图 1-5 所示。图中， R_L 表示灯泡； S 表示开关； E 表示电池电动势； R_0 表示电池的内阻；手电筒筒体用理想开关和没有电阻的理想导线来表示。

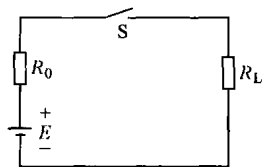


图 1-5 手电筒电路的电路模型图

1.2 电路变量

电路的特性主要由电流、电压、电动势和功率等物理量描述。本节重点介绍电流、电压、电动势的概念和参考方向，以及功率的计算。

1.2.1 电流

带电粒子有秩序的定向移动形成电流 (Current)。它的大小用电流强度来描述。单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，简称电流，用符号 i 表示，即

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

如果电流的大小和方向都不随时间而变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，这种电流称为直流电流 (Direct Current, dc 或 DC)，用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间而变化，则称为交流电流 (Alternating Current, ac 或 AC)，用小写字母 i 表示。

电流这个物理量的单位是安培 (库仑每秒)，简称安，用大写字母 A 表示。大电流用千

安 (kA), 小电流用毫安 (mA) 或微安 (μA) 表示。

习惯上, 正电荷定向移动的方向称为电流的实际方向。在简单电路中, 电流的实际方向很容易确定, 但当电路比较复杂时, 电流的实际方向往往难以预先知道, 例如在图 1-6 所示的电路中, R_3 中的实际电流方向需经过计算才能确定。因此, 为了方便起见, 必须在计算和分析电路之前, 给电流任意选定一个方向, 作为参考方向或正方向。

假定正电荷运动的方向称为电流的参考方向 (Reference Direction)。在电路中, 电流的参考方向可以用箭头标在电路图上, 如图 1-7a、b 所示; 也可以用双下标表示, 例如 i_{ab} 。今后若无特殊说明, 电路图上所标电流方向是电流的参考方向。在分析电路的时候, 参考方向可以任意选定, 并以此为准进行计算, 若经计算得出电流为正值, 说明所设参考方向与实际方向一致; 若经计算得出电流为负值, 说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负, 在设定参考方向的前提下才有意义。对电路中电流设参考方向还有另一方面的原因, 那就是, 在交流电路中电流的实际方向分时间段在交替改变, 因此很难在这样的电路中标清楚电流的实际方向, 而引入电流的参考方向可解决这一难题。

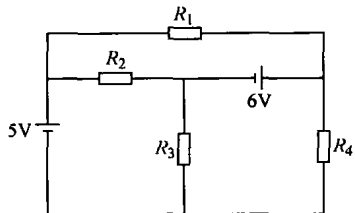


图 1-6 含两个电源的直流电路

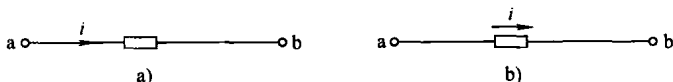


图 1-7 电流的参考方向

例 1-1 图 1-8a 中的方框用来泛指元件。设 1A 的电流由 a 向 b 流过图中所示元件, 试问如何表示这一电流?

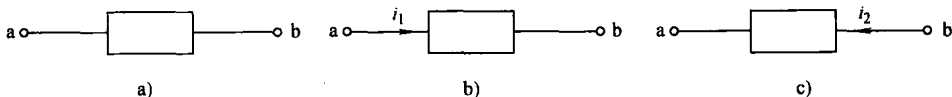


图 1-8 例 1-1 图

解: 有两种表示方式。

(1) 用图 1-8b 表示: $i_1 = 1\text{A}$ 。这是因为电流的参考方向与实际方向一致。

(2) 用图 1-8c 表示: $i_2 = -1\text{A}$ 。这是因为电流的参考方向与实际方向相反。

1.2.2 电压与电动势

电荷在电路中移动, 就会有能量的交换发生。电荷在电路的某些部分 (例如电源处) 获得能量而在另一些部分 (如电阻元件处) 失去能量。为了便于分析能量的互换, 引入“电压”、“电动势”的概念。

1. 电压

电压 (Voltage) 是描述电场力对电荷做功大小的物理量。在电路中, 任意两点之间的电位差称为这两点的电压。a、b 两点的电压即电场力把单位正电荷由电路中 a 点移到 b 点所做的功, 即

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

式(1-2)中, dw 是单位正电荷由电路中 a 点移到 b 点所获得或失去的能量。当 $u > 0$ 时, 说明 a 点的电位高于 b 点的电位, 正电荷 dq 在移动中失去能量。当 $u < 0$ 时, 说明 b 点的电位高于 a 点的电位, 正电荷 dq 在移动中获得能量。

电压分直流电压和交流电压, 直流电压用 U 表示, 交流电压用 u 表示。电压的单位是伏特, 简称伏, 用符号 V 表示。高电压可以用千伏 (kV) 表示, 低电压可以用毫伏 (mV) 表示, 也可以用微伏 (μV) 表示。

电压的实际方向是由高电位点指向低电位点, 即电压降的方向。在进行电路分析时, 正电流需要假设参考方向一样, 电压也需要假设参考方向。

电压的参考方向为假设电位真正降低的方向。可用“+”、“-”表示参考极性, 如图 1-9 所示, “+”表示假定的高电位端, “-”号表示假定的低电位端。图 1-9 中, 方框用来泛指元件, 如果 U 为正值, 表示 a 点电位高, b 点的电位低, 电压的参考方向和真实方向相同; 如果 U 为负值, 表示 a 点电位低, b 点的电位高, 电压的参考方向和真实方向相反。

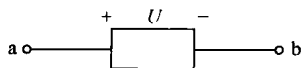


图 1-9 电压的参考方向

注意: 在未标出参考极性的情况下电压的正负毫无意义。

电压的参考方向还可使用双下标表示, U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 指向 b, 脚标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端, 第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

电源内部通过电源力建立的电场正极与负极之间的电位差, 称为电动势 (Electromotive Force)。用 E 或 e 表示, 单位也为伏特。电源内部借助外力 (例如干电池的化学能产生的力, 也可称为电源力) 使正负电荷分开, 正电荷聚集一端 (正极), 负电荷聚集另一端 (负极), 于是电源内部建立起电场。当电路接通时, 电流通过外电路由电源正极流向负极, 外电路中电场力做功, 将电能转换为非电能。同时电源内部电源力做功, 将非电能转换为电能, 重新建立起电场, 使电流持续不断, 电源内部电流从低电位流向高电位。

电压的方向从高电位指向低电位, 是电场力作用的方向。电动势的方向定义为电源力作用的方向, 由低电位指向高电位。电动势反映的是电源内部的物理过程, 电源电压是电源端钮的外在表现。

2. 关联参考方向

电压和电流的参考方向可以分别选定, 但为了方便起见, 常将一段电路的电压、电流参考方向选得一致, 即电流的参考方向使得电流从电压的“+”参考极性流入, 从“-”参考极性流出。这种电压、电流参考方向选得一致的情况称为关联参考方向 (关联正方向), 可简称为电压电流关联; 反之, 电流、电压的参考方向相反称为非关联参考方向。如图 1-10 所示, 图 a 中电压、电流为关联参考方向, 图 b 中电压、电流为非关联参考方向。

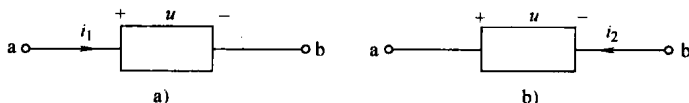


图 1-10 电压电流的关联参考方向

关于电压和电流的参考方向, 需注意:

1) 电流、电压的实际方向是客观存在的, 而参考方向是人为选定的。当电流、电压的参考方向与实际方向一致时, 电流、电压值取正号; 反之取负号。

2) 在求解电路时, 必须遵循“先标参考方向, 后计算”的原则。否则计算得出的电压、电流正负值是没有意义的。虽然参考方向的指定具有任意性, 但一经指定, 在求解过程中不应改变。

3) 一般来说, 同一段电路的电压和电流的参考方向可以各自选定, 但为了分析方便, 常采用关联参考方向。当采用关联参考方向时, 两个参考方向中只标出任一个即可。

1.2.3 功率

单位时间做功大小称为功率 (Power), 或者说做功的速率称为功率。在电路中所说的功率即是电场力做功的速率, 以符号 $p(t)$ 或 p 表示

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

功率的单位是瓦特, 简称瓦, 符号是 W, $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。

在电路中, 人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系。

由式(1-1)、式(1-2)可得到元件的功率与电流、电压之间的关系为

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

直流电路中

$$P = UI$$

对一完整的电路来说, 它产生的功率与消耗的功率总是相等的, 即电路中电源产生的功率等于负载取用的功率和电源内阻消耗的功率之和, 这称为功率平衡。这一点由能量守恒定律很容易理解。

在实际电路中, 正电荷经过某个元件从高电位移到低电位, 电荷的电势能减少, 根据能量守恒定律, 电路元件应吸收功率; 反之, 正电荷从低电位移到高电位, 电势能增加, 该电路元件应发出 (产生) 功率。据此可有结论: 若一段电路, 其实际电压、电流同方向, 则该段电路吸收功率; 若实际电压、电流反方向, 则该段电路产生功率。因此在计算一段电路的吸收功率时会有以下两个公式:

当电压、电流选用关联参考方向时

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

当电压、电流选用非关联参考方向时

$$p = -ui \quad (1-6)$$

当 $p > 0$ 时, 电路实际吸收功率; 当 $p < 0$ 时, 电路实际发出功率。若计算一段电路的产生功率, 无论 u 、 i 参考方向关联或非关联情况, 所用公式与计算吸收功率时的公式恰恰相反, 即 u 、 i 参考方向关联, 产生功率用 $p = -ui$ 计算; u 、 i 参考方向非关联, 产生功率用 $p = ui$ 计算。这是因为“吸收”与“发出”二者就是相反的含义, 所以计算吸收功率与发出功率的公式符号相反是理所当然的事。

当元件吸收功率大于零时, 此元件在电路中起负载作用, 当元件产生功率大于零时, 此元件在电路中起电源作用。

练习与思考题

1-2-1 图 1-11 中方框表示电路元件, 设 $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = 3\text{A}$, $I_4 = 4\text{A}$, $U_1 = 1\text{V}$,

$U_2 = -2\text{V}$, $U_3 = 3\text{V}$, $U_4 = -4\text{V}$ 。(1) 计算元件1、2吸收的功率 P_1 、 P_2 ; (2) 计算元件3、4产生的功率 P_3 、 P_4 。(1W, -4W, 9W, -16W)

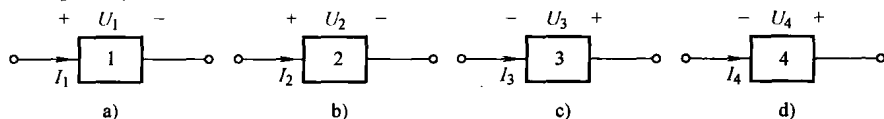


图 1-11 练习与思考题 1-2-1 图

1-2-2 图 1-12 所示一段直流电路 N, 电流参考方向如图中所示, 已知直流电压表读数为 5V, 并知 N 吸收功率为 10W, 求电流 I 。(-2A)

1-2-3 图 1-13 所示一段直流电路 N, 已知电流表读数为 2mA, 并知 N 产生的功率为 6mW, 求电压 U 。(-3V)

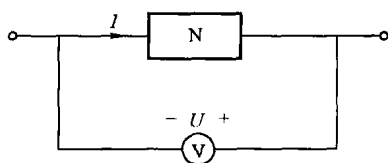


图 1-12 练习与思考题 1-2-2 图

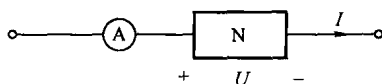


图 1-13 练习与思考题 1-2-3 图

1.3 基尔霍夫定律

研究电路首先要了解电路的基本规律, 电路的基本规律包括两方面的内容, 一是电路作为一个整体要遵循什么基本规律, 二是电路的各元件有什么表现, 即元件特性如何? 这两方面都是不可缺少的, 因为电路是由元件组成的, 整个电路表现如何, 既要看这些元件怎样构成一个整体, 又要看各个元件各有何特点。

本节要讨论的基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 就是电路作为一个整体要遵循的基本规律。

1.3.1 几个电路名词

为了表达电路的基本规律, 先介绍几个名词。

支路 (Branch): 电路中每一个二端元件 (有两个端钮的元件) 就叫一条支路。但为了分析方便, 往往用分支定义支路, 即流过同一电流的几个元件的串联组合作为一条支路。图 1-14 中, 若以二端元件来定义支路, 电路中共有六条支路, 若以分支来定义支路, 电路中共有四条支路。

节点 (Node): 支路的连接点称为节点 (结点)。图 1-14 中, 若以二端元件来定义支路, 电路中共有四个节点, 若以分支来定义支路, 电路中共有两个节点。初学者往往将 a、b、c、d 看成四个节点, 这会给今后分析电路带来麻烦, 在电路

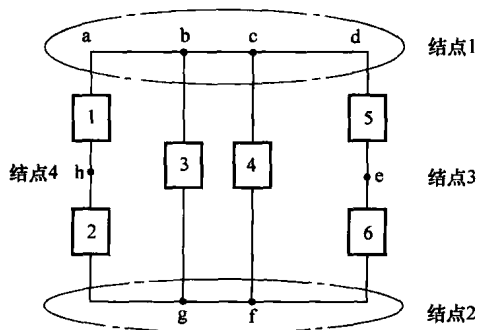


图 1-14 支路、结点示意图

理论中, a、b、c、d 以理想导线相连, 从电的角度来看, 是相同的端点, 是一个节点。

回路 (Loop): 电路中任一闭合的路径称为回路, 图 1-14 中有六个回路。

网孔 (Mesh): 内部不含有任何支路的回路。图 1-14 中共有 abgha、bcfgb、cdefc 三个网孔。网孔是回路, 但回路不一定是网孔。

1.3.2 基尔霍夫电流定律与基尔霍夫电压定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)。它反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的规律, 是分析电路的基本定律。基尔霍夫定律与元件特性构成了电路分析的基础。

1. 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律用来确定连接在同一节点的各支路电流之间的关系。它表明了电路中各支路电流之间必须遵守的规律。

KCL 的理论依据是电荷守恒及电流连续性。

KCL 的内容: 对于电路中的任意节点, 在任意时刻, 流出 (或流入) 该节点电流的代数和等于零, 即

$$\sum_{k=1}^n i_k(t) = 0 \quad (1-7)$$

式中, $i_k(t)$ 表示流入或流出该节点的第 k 条支路的电流; n 为与节点相连的支路数。

在图 1-15 中, 对于节点 A, 各支路的电流存在的关系为

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0 \quad (1-8)$$

在列方程时, 如设流入节点的电流参考方向为正, 那么流出该节点的电流参考方向为负, 反之亦然。可将式 (1-8) 改写成

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

即对于任一电路中的任一节点, 在任一时刻, 流向某一节点的电流代数和应该等于由该节点流出的电流代数和, 即

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-9)$$

KCL 表达了电路中支路电流之间的关系, 这是一个线性关系, 图 1-15 说明 KCL 的图连接于同一节点各支路电流线性相关。

KCL 不仅适用于节点, 可推广应用于电路中包围部分电路的任一假设的闭合平面 (亦称广义节点)。即流入和流出任意假想闭合平面的电流的代数和为零。在图 1-16 中, $i_1 - i_2 + i_3 = 0$ 。

应用 KCL 应注意的问题:

- 1) 列写 KCL 方程前必须先标出各支路电流的参考方向。
- 2) KCL 是对节点处支路电流所加的约束, 具有普遍性, 与支路上连接的元件特性无关, 即适用于任意时刻、任意元件构成的电路。

- 3) 注意两套符号问题。运用 KCL 时, 时常需和两套符号打交道, 其一是方程中各项前的正、负符号, 其正负取决于电流参考方向对节点的相对关系; 另一是电流本身数值的正负号, 反映

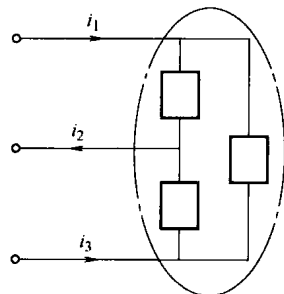
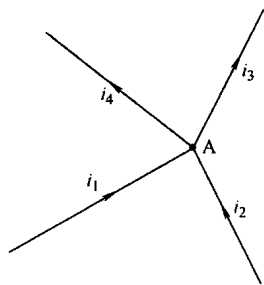


图 1-16 KCL 的推广应用

了电流参考方向与实际方向是否相同。

例 1-2 如图 1-17a 所示, 已知 $I_1 = -18\text{A}$, $I_2 = 3\text{A}$, $I_3 = 10\text{A}$, $I_4 = 10\text{A}$, $I_6 = -2\text{A}$, 求 I_5 及流过电阻的电流。

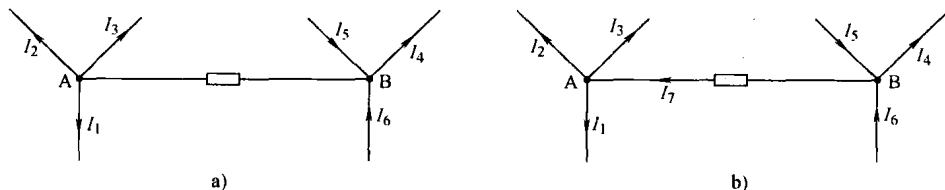


图 1-17 例 1-2 图

解: 首先应设出流过电阻元件的电流参考方向, 如图 1-17b 所示, 然后利用 KCL 列节点 A、B 的方程。

节点 A: 根据 KCL 列方程可得 $I_7 - I_2 - I_1 - I_3 = 0$
代入数据后解得 $I_7 = -5\text{A}$

节点 B: 根据 KCL 列方程可得 $I_5 + I_6 - I_4 - I_7 = 0$
代入数据后解得 $I_5 = 7\text{A}$

2. 基尔霍夫电压定律

上面讲述的基尔霍夫电流定律, 它表明了电路中各支路电流之间必须遵守的规律, 这规律体现在电路中的各节点上。另外一条基尔霍夫电压定律, 表明电路中各支路电压之间必须遵守的规律, 这规律体现在电路中的各个回路中。KVL 是以能量守恒、电荷守恒为理论依据。

KVL 的内容: 任一时刻, 沿任一回路, 在任意绕行方向上各段电路电压降或电压升的代数和恒等于零, 即

$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0 \quad (1-10)$$

式中, $u_k(t)$ 表示回路中第 k 个元件或支路的电压; n 为回路包含的元件或支路数。

在应用 KVL 列方程时, 首先应标明回路中各元件电压参考方向, 然后选定回路绕行方向, 顺时针或逆时针都可。在图 1-18 所示回路中, 若选各电压的参考方向和绕行方向如图所示, 从 a 点开始绕行, 可得

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

在列方程时, 如果选定绕行方向上元件电压降为正, 那么电压升为负, 反之亦然。

KVL 也可推广适用于电路中任一假想的回路, 如在图 1-19a 中, 该电路未形成闭合回路, 但仍可应用 KVL 列方程, 即将其想象成图 1-19b 所示电路, 按图 1-19b 所示绕行方向, 列方程: $u_3 - u_2 - u_1 = 0$ 。

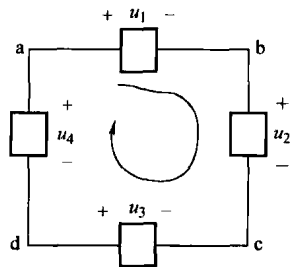


图 1-18 说明 KVL 的图

应用 KVL 时应注意的问题:

1) KVL 是对回路中的支路电压所加的约束, 与回路各支路上连接的是什么元件无关, 与电路是线性还是非线性无关。

2) KVL 方程是按电压参考方向列写, 与电压实际方向无关。

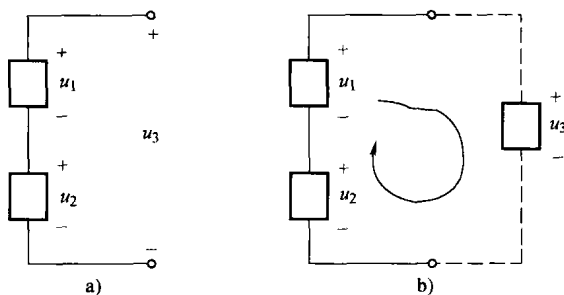


图 1-19 KVL 的推广应用

练习与思考题

1-3-1 图 1-20 所示电路中, 已知电流 $i_1 = 1\text{A}$, $i_2 = 2\text{A}$, $u_1 = 3\text{V}$, $u_3 = 5\text{V}$, 求 i_3 及 u_2 。
(-3A , 8V)

1-3-2 图 1-21 中 A、B、C 三元件分别代表电源或负载, 电流、电压的参考方向如图所示。已知 $I_A = -2\text{A}$, $I_B = 3\text{A}$, $U = 10\text{V}$, 试判断哪个元件是电源? 哪个元件是负载? (A 为电源, B 为电源, C 为负载)

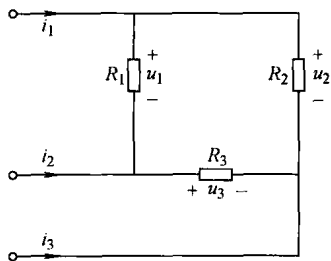


图 1-20 练习与思考题 1-3-1 图

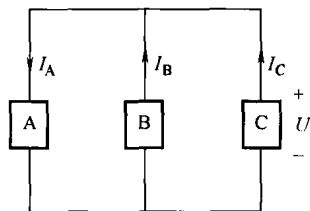


图 1-21 练习与思考题 1-3-2 图

1.4 电阻元件

电阻元件 (Resistor) 是电路的基本元件之一, 是从对电流呈现阻力的实际元器件中抽象出来的理想元件, 就电磁性能讲它只消耗电能。

1.4.1 电阻元件与欧姆定律

1. 电阻元件

电阻元件的一般定义: 一个二端元件, 如果在任意时刻, 其端电压 u 与流经它的电流 i 之间的关系 (Voltage Current Relation, VCR, 或称为伏安关系, Volt Ampere Relation, VAR), 能用 $u-i$ 平面或 $i-u$ 平面上的一条曲线描述, 就称为电阻元件。若该曲线是通过原点的直线, 则称为线性电阻元件, 否则称为非线性电阻元件。若曲线不随时间变化, 则称为时不变电阻元件, 否则称为时变电阻元件。线性电阻元件的显著特点是阻值不随其上电压或电流数值变化; 时不变电阻元件的显著特点是阻值不随时间变化。本书主要涉及线性时不变电阻元件。今后如无特殊说明, 电阻元件一词就指线性时不变电阻元件。一般实际中使用的诸如碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻元件等都可近似看作是这类电阻元件。

一组电阻元件的 VCR 曲线如图 1-22 所示。

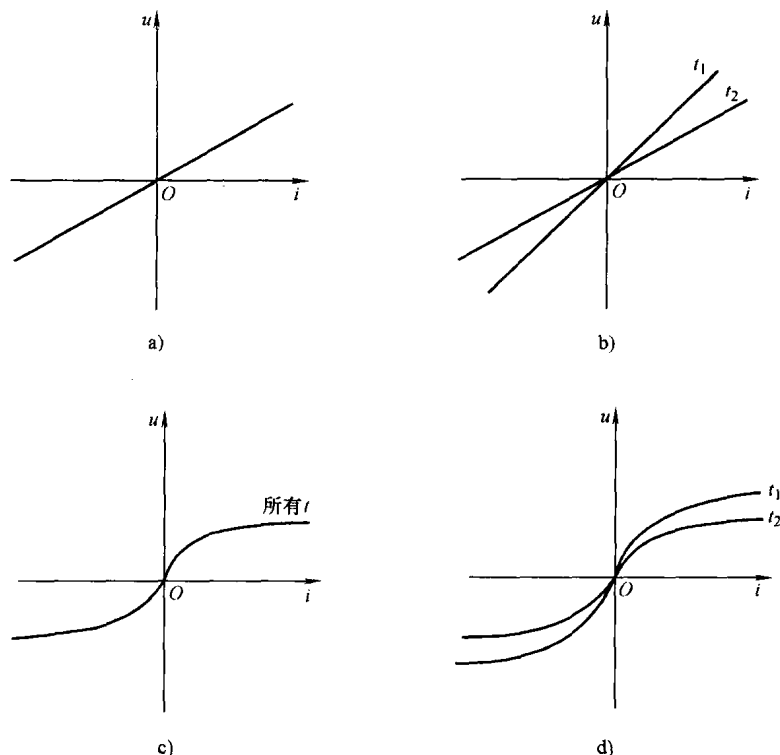


图 1-22 电阻元件的 VCR 曲线

- a) 线性时不变电阻元件的 VCR 曲线 b) 线性时变电阻元件的 VCR 曲线
c) 非线性时不变电阻元件的 VCR 曲线 d) 非线性时变电阻元件的 VCR 曲线

电阻元件电压和电流的比值称为电阻，电阻是电阻元件的电路参数，反映材料导电能力的强弱，用 R 表示。电阻的单位为欧姆 (Ω)，简称欧，计量高电阻时，以千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 为单位。线性电阻元件的电路图形符号如图 1-23 所示。电阻值与其工作电压、电流无关，是一个常数。习惯上电阻元件称为电阻。

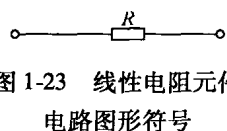


图 1-23 线性电阻元件
电路图形符号

2. 欧姆定律

线性电阻元件伏安关系为欧姆定律 (Ohm's Law)，欧姆定律是分析电路的基本定律之一。

对于图 1-24a 中所示电阻，欧姆定律用下式表示：

$$u = Ri \quad (1-11)$$

欧姆定律体现了电阻元件对电流呈阻力的本质，电流要流过就必然要消耗能量，因此沿电流流动方向就必然会出现电压降，由于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，才可运用式 (1-11)。



如果电阻 R 上的电流、电压参考方向非关联，如图 1-24b 所示，则欧姆定律公

图 1-24 欧姆定律

式中应冠以负号

$$u = - Ri \quad (1-12)$$

电阻的倒数称为电导 (Conductance), 用 G 表示, $G = \frac{1}{R}$ 。

在国际单位制中, 电导的单位是西门子 (S), 简称西。从物理概念上看, 电导也是反映材料导电能力强弱的参数。电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一材料特性的两个电路参数, 应用电导参数来表示电流和电压之间关系时, 欧姆定律形式可写为

$$i = Gu \quad (1-13)$$

电阻元件的电压 (或电流) 是由同一时刻的电流 (或电压) 决定的。这就是说电阻元件的电压 (或电流) 不能“记忆”电流 (或电压) 在“历史”上起过的作用, 把电阻的这种特性称为无记忆性。

3. 电阻元件的功率

由功率的定义及欧姆定律, 电阻元件任意时刻的瞬时功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-14)$$

对于电阻元件来说, 其上所吸收的功率总是大于等于零, 属于耗能元件 (Dissipative Element)。

4. 开路与短路的概念

开路 (Open Circuit) 与短路 (Short Circuit) 是电路中两个值得注意的特殊情况。

开路又称为断路: 一个二端元件不论其电压是多大, 其电流恒等于零, 则此元件为开路, 可认为 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 。

短路: 一个二端元件不论其电流多大, 其电压恒等于零, 则此元件称为短路, 可认为 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 。

例 1-3 已知各电阻的端电压和电流如图 1-25 所示, 求各电阻值。

图 1-25a 中, 流过电阻的电流与其端电压

参考方向关联, 于是有 $R = \frac{8}{2} \Omega = 4 \Omega$ 。

图 1-25b 中, 流过电阻的电流与其端电压

参考方向非关联, 于是有 $R = -\frac{8}{-2} \Omega = 4 \Omega$ 。

图 1-25c 中, 流过电阻的电流与其端电压

参考方向非关联, 于是有 $R = -\frac{-8}{-2} \Omega = 4 \Omega$ 。

图 1-25d 中, 流过电阻的电流与其端电压参考方向关联, 于是有 $R = \frac{-8}{-2} \Omega = 4 \Omega$ 。

应用欧姆定律时注意两套符号的问题。公式前的符号, 取决于电流、电压参考方向是否关联; 电压或电流本身的正负号, 取决于实际方向与参考方向是否一致。

例 1-4 电路如图 1-26a 所示, E_1 、 E_2 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均已知, 求电压 U 。

解: 如图 1-26b 所示, 因为 a、b 之间断开, 电源 E_1 和电阻 R_4 上没有电流流过, $I_1 = 0$, $I_4 = 0$, 所以可得出 $I_2 = I_3$ 。

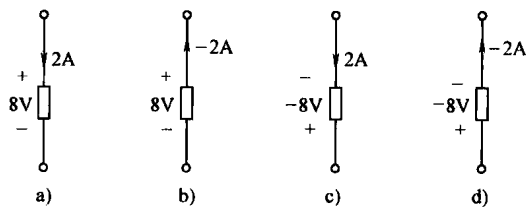


图 1-25 例 1-3 图