

普通高等教育“十二五”规划教材

电工技术

第2版

薛毓强 李少纲○编



Electrical Technology



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 技 术

第 2 版

薛毓强 李少纲 编
蔡金锭 主审



机械工业出版社

本书根据高等院校“电工技术”教学的要求,系统地介绍了电工技术的基本概念、基本理论、基本方法及其在实际中的应用。全书共分10章,主要内容包括电路的基本概念和定律、电路的基本分析方法、交流电路分析、非正弦周期电流电路分析、三相电路、交流电路功率测量、一阶动态电路分析、磁路与变压器、电动机的工作原理与运行控制、继电接触器控制系统、可编程控制器及其应用、供电与安全用电等。

全书叙述简明、概念清楚、重点突出、习题丰富,书后附有习题参考答案。教学参考学时为50~70学时,各校在教学时可根据专业实际情况适当取舍。

本书可供高等理工科院校机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用,也可供高职高专院校相关专业选用和有关工程技术人员阅读。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书做教材的老师登陆 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/薛毓强,李少纲编. —2版. —北京:机械工业出版社,2015.6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-50438-2

I. ①电… II. ①薛…②李… III. ①电工技术-高等学校-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第120255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:贡克勤 责任编辑:贡克勤
版式设计:赵颖喆 责任校对:程俊巧
封面设计:陈沛 责任印制:乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2016年1月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·15印张·368千字
标准书号:ISBN 978-7-111-50438-2
定价:32.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379469

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

“电工技术”是理工科高等学校非电类专业一门重要的技术基础课程。本书是根据教育部电工学课程教学指导小组拟定的“电工技术”课程教学基本要求和培养目标编写的，是机械工业出版社组织编写的普通高等教育“十二五”规划教材。

在修订过程中，编者根据多年的教学经验与体会，总结和吸收了各院校教学和教学改革有益经验，在教材风格的定位、章节安排和内容取舍上组织多次讨论，认真审视课程体系的知识结构，注重理论的科学性、系统性、完整性，力求反映新技术、新动向，以适应电工技术发展和变化的需要。为了使教材的内容与生产实践更加紧密结合，注重工程案例的引入，突出应用特色，培养学生理论联系实际和解决工程实际问题的能力，使教材具有较高的质量和实用性。本版教材与第1版相比，在总体结构和内容上做了如下调整和更新：

1. 在教材结构上进行了调整。将“一阶动态电路分析”移到“交流电路分析”和“三相电路”之后，这样在动态电路分析时，教学内容更加丰富，使读者对交流电源的动态电路的过渡过程也有了一定的认识。

2. 增加了电位的概念、最大功率传输、交流电路功率测量等内容。

3. 充实了三相异步电动机变频调速的内容。

4. 补充介绍了常用低压配电系统的接线型式和应用领域。

5. 结合课程内容，增加了一些应用实例，帮助读者学习和理解。

全书共分10章，由福州大学薛毓强、李少纲编写。薛毓强负责全书的组织、修改和定稿工作。书中例题、习题丰富，图形、符号均采用最新国家标准。

本版教材由福州大学蔡金锭教授审阅并提出了宝贵的意见和修改建议。本书在编写过程中还得到福州大学电气学院领导和同事的大力支持。通过第1版教材的使用，许多教师和读者对第2版的修订工作也提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。在此还要对本书引用的参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平和时间所限，本书难免有些内容处理不当，书中疏漏和不妥之处在所难免，希望广大读者，特别是使用本教材的教师和同学们积极提出批评和改进意见，以便今后修订提高。

编 者

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和定律 1

第一节 电路的基本概念 1

一、电路的组成和电路模型 1

二、电路的基本物理量 1

三、电功率 4

第二节 电阻元件和电源元件的伏安关系 5

一、电阻元件 5

二、理想电压源 6

三、理想电流源 6

第三节 基尔霍夫定律及应用 6

一、基尔霍夫电流定律 6

二、基尔霍夫电压定律 7

第四节 电路的工作状态 9

一、空载状态 9

二、负载状态 9

三、短路状态 10

习题 10

第二章 电路的基本分析方法 16

第一节 电阻电路的等效变换 16

一、电阻的串联 16

二、电阻的并联 17

第二节 实际电压源和实际电流源及其等效变换 17

一、实际电压源 17

二、实际电流源 18

三、实际电压源与实际电流源的等效变换 18

第三节 复杂电路的分析方法 20

一、支路电流法 20

二、节点电压法 21

第四节 电路定理 23

一、叠加定理 23

二、戴维南定理 25

第五节 含受控源电阻电路的分析 27

一、受控源的种类 28

二、含受控源电路的分析方法 28

习题 29

第三章 交流电路分析 35

第一节 正弦交流电路的基本概念 35

一、瞬时值、幅值与有效值 35

二、周期、频率和角频率 36

三、相位和初相位 36

四、同频率正弦量的相位差 37

第二节 正弦量的相量表示方法 38

一、复数的概念及运算 38

二、正弦电压电流量的相量表示 39

第三节 KCL 和 KVL 的相量形式 40

第四节 RLC 元件的交流电路 41

一、电阻元件的交流电路 41

二、电感元件的交流电路 42

三、电容元件的交流电路 44

第五节 简单交流电路分析 46

一、 RLC 串联交流电路 46

二、 RLC 并联交流电路 48

三、正弦电路的功率 50

四、单相功率的测量 54

五、功率因数的提高 55

第六节 电路的谐振 57

一、 RLC 串联电路的谐振 57

二、 RLC 并联电路的谐振 59

第七节 非正弦周期电流电路的计算 61

一、周期函数分解为傅里叶级数 62

二、非正弦周期电压电流的有效值及电路的平均功率 62

三、非正弦周期电流电路的计算 62

习题 64

第四章 三相电路 70

第一节 三相电源 70

一、三相电源的构成 70

二、三相电源的连接 71

第二节 三相交流电路的计算 71

一、负载星形联结的三相电路 72

二、负载三角形联结的三相电路	75	第七章 电动机	132
三、三相电路的功率	76	第一节 三相异步电动机的结构	132
四、三相电路功率的测量	78	一、定子	132
习题	80	二、转子	133
第五章 一阶动态电路分析	83	第二节 三相异步电动机的转动原理	134
第一节 动态电路的方程及初始条件	83	一、定子的旋转磁场	134
一、动态电路的方程	83	二、旋转磁场的转向	135
二、换路的基本概念	83	三、旋转磁场的转速	136
三、换路定则	84	四、电动机的转动原理	137
四、初始值的确定	84	五、转差率	138
第二节 一阶电路的零输入响应	86	第三节 三相异步电动机的电路分析	138
一、RC 电路的零输入响应	86	一、定子电路	139
二、RL 电路的零输入响应	89	二、转子电路	139
第三节 一阶电路的零状态响应	90	第四节 三相异步电动机的电磁转矩与	
一、RC 电路的零状态响应	90	机械特性	140
二、RL 电路的零状态响应	93	一、转矩公式	141
第四节 一阶电路的全响应	96	二、机械特性曲线	141
第五节 一阶线性电路动态分析的三要		第五节 三相异步电动机的起动	144
素法	97	一、起动性能	144
习题	99	二、起动方法	144
第六章 磁路与变压器	105	第六节 三相异步电动机的制动	147
第一节 磁路及其分析方法	105	一、能耗制动	147
一、磁场的基本物理量	106	二、反接制动	147
二、磁性材料的磁性能	106	三、发电反馈制动	148
三、恒定磁通磁路的分析	107	第七节 三相异步电动机的调速	148
第二节 交流铁心线圈电路	110	一、变频调速	148
一、交流铁心线圈的电磁关系	111	二、变极调速	149
二、铁心线圈的功率损耗与等效电路	112	三、变转差率调速	149
第三节 单相变压器	113	第八节 三相异步电动机的选择与使用	150
一、变压器的工作原理	114	一、三相异步电动机的铭牌	150
二、变压器的外特性	118	二、三相异步电动机的选择	152
三、变压器的损耗与效率	118	第九节 单相异步电动机	154
第四节 三相变压器	118	一、电容分相式异步电动机	154
一、三相变压器的结构	119	二、罩极式异步电动机	154
二、变压器的额定值	120	第十节 直流电动机	155
三、变压器绕组的同极性端及其测定	121	一、直流电动机的结构及分类	155
第五节 特殊变压器	123	二、直流电动机的工作原理和机械	
一、自耦变压器	123	特性	157
二、电流互感器	123	三、直流电动机的运行与控制	158
三、电压互感器	124	习题	160
四、电焊变压器	125	第八章 继电器接触器控制系统	162
五、电磁铁	126	第一节 常用控制电器	162
习题	129	一、开关电器	162

二、熔断器	164	三、硬件设计	203
三、主令电器	165	四、软件设计	203
四、交流接触器	167	五、系统调试	203
五、继电器	167	习题	207
第二节 三相异步电动机的基本控制		第十章 供电与安全用电	208
电路	170	第一节 电力系统概述	208
一、点动控制	171	一、系统组成	208
二、直接起动控制	172	二、电压等级和供电质量	209
三、正反转控制	172	三、负荷分类	209
四、多地控制	174	四、常用低压配电系统	209
五、顺序控制	174	第二节 配电变压器的选择	211
六、行程控制	175	一、配电变压器的负荷计算	211
七、时间控制	175	二、配电变压器的选择原则	213
第三节 应用举例	177	第三节 工业企业配电	214
一、水位控制	177	一、配电连接方式	214
二、加热炉自动上料控制	180	二、配电线路导线截面的选择	215
习题	182	第四节 安全用电	216
第九章 可编程序控制器及其应用	185	一、触电种类	216
第一节 可编程序控制器的结构和工作方式	185	二、电流对人体的作用	216
一、可编程序控制器的结构及各部分的作用	185	三、触电方式	217
二、可编程序控制器的工作方式	187	四、接地和接零	217
三、可编程序控制器的主要技术性能	188	五、接地装置和接零装置	220
四、可编程序控制器的主要功能和特点	189	六、触电现场急救	221
第二节 可编程序控制器的程序编制	189	第五节 防雷保护	221
一、可编程序控制器的编程语言	190	一、防雷措施	221
二、可编程序控制器的编程原则和方法	192	二、防雷设备	222
第三节 可编程序控制器应用举例	202	第六节 漏电开关	223
一、确定控制对象及控制内容	202	一、漏电开关的工作原理	223
二、PLC 机型选择	202	二、漏电开关的选择	224
		三、漏电开关的安装与维护	224
		习题	225
		附录 部分习题答案	226
		参考文献	232

第一章 电路的基本概念和定律

第一节 电路的基本概念

电能的应用是人类重要的生产活动之一，无论是输送电能或是传递电信号，都要由一些电气设备或元件构成各种各样的电路来完成。因此电路的基本理论是电工技术的基础。本章以恒定直流稳态电路为研究对象，讨论电路的基本物理量、基本元件、基本分析方法。这些分析方法只要稍加技术处理即可用于交流电路等的分析计算。

一、电路的组成和电路模型

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，具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算功能。在实际电路中，电能或电信号的发生器称为电源，用电设备称为负载。电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的，因此又把电源又称为激励源，所产生的电压和电流称为响应。有时根据激励和响应之间的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。

有些实际电路十分复杂。例如，电能的产生、输送和分配是通过发电机、变压器、输电线等完成的，形成一个庞大而复杂的电路或系统。而集成电路芯片可能小到不大于指甲，但在上面有成千上万个晶体管相互连接成为一个电路。但有些电路非常简单，例如手电筒就是一个很简单的电路。不同的电路在尺寸大小和复杂程度方面相差较大。

本书讨论的电路不是实际电路而是它们的电路模型，并且不涉及器件内部发生的物理过程。实际电路的电路模型是由理想电路元件相互连接而成，理想电路元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定的电磁性质的假想元件，它是一种理想化的模型并具有精确的数学定义。在电路模型中各理想元件是通过“理想导线”连接起来的。因此电路模型要能按不同的精度要求，把实际电路在给定工作条件下的主要物理现象和功能反映出来。

图 1-1 为电力系统电路示意图，图 1-2 为手电筒实际电路与电路模型。



图 1-1 电力系统电路示意图

二、电路的基本物理量

电路的特性是由电流、电压和电功率等物理量来描述的。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和电功率。

1. 电流及其参考方向

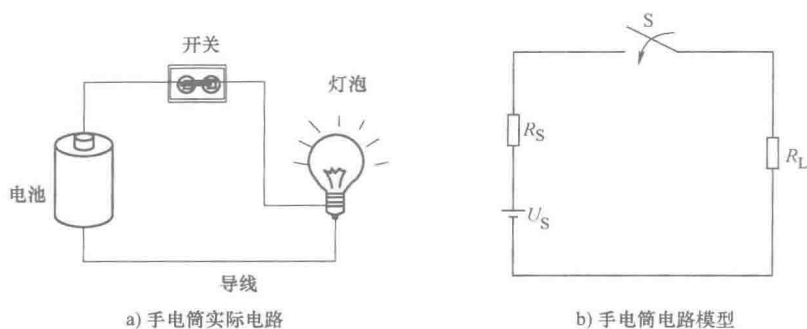


图 1-2 手电筒实际电路与电路模型

电荷的定向移动形成电流, 电荷用符号 q 表示。单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流, 用符号 i 表示, 其数学表达式为

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

在国际单位制 (SI) 中, 电流 i 的单位为 A (安培, 简称安), 电荷的单位为 C (库仑, 简称库)。

符号 i 表示电流的量值和方向是随时间变化的, 这样的电流称为时变电流; 量值和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流称为交流 (ac 或 AC)。电流的量值和方向均不随时间变化, 这样的电流称为恒定电流, 简称直流 (dc 或 DC), 用符号 I 表示, 式 (1-1) 可改写为

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。但在分析复杂电路时, 由于很难事先确定某条支路在某一时刻电流的实际方向, 为此在分析电路时可以任意选定一个参考方向作为电流正方向, 也就是“假定的实际方向”, 一般用箭头表示。箭头可以标注在导线上, 也可以标注在导线旁。电流参考方向有时也可以用双下标表示, 如 I_{AB} 表示电流参考方向由 A 到 B, 但当 A、B 两点间有并联支路时, 不容易说明究竟是哪条支路的电流, 因此一般不用这种标注方法。电流的参考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参考方向一致时, 则 $I > 0$ (见图 1-3a); 反之, 当电流的实际方向与参考方向相反时, 则 $I < 0$ (见图 1-3b)。因此, 在参考方向选定之后, 电流值才有正负之分, 可以根据电流的参考方向以及电流量值的正、负来确定电流的实际方向。

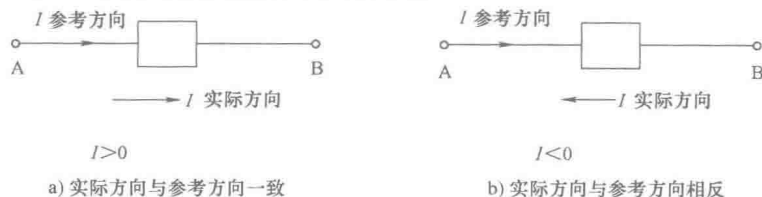


图 1-3 电流的参考方向

2. 电压及其参考方向

单位正电荷由电路中 A 点移动到 B 点所获得或失去的能量, 称为 A、B 两点的电压, 用

符号 u 表示, 其数学表达式为

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

式中, dq 为由 A 点移动到 B 点的电荷量; dw 为电荷移动过程中获得或失去的能量, 单位为 J (焦耳); 电压的单位为 V (伏特, 简称伏)。

因为正电荷在电场力作用下是由高电位移到低电位的, 所以电压的实际方向是电位降低的方向。

与电流一样, 符号 u 表示量值和方向随时间变化的时变电压; 量值和方向作周期性变化且平均值为零的时变电压称为交流电压。量值和方向均不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压, 用符号 U 表示, 式 (1-3) 可改写为

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

将电路中任一点选作参考点, 则参考点的电位为零。电路图中用符号 “ $\perp$ ” 表示参考点。电位值有正、负之分。若某点电位为正, 表明该点电位比参考点高; 若某点电位为负, 表明该点电位比参考点低。电位参考点可以任意选取, 一经选定, 电路中各点的电位也随之确定, 在一个连通的电路中只能选择一个参考点。实际应用中常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。选择不同的参考点, 电路中各点的电位也随之改变。电路中两点间的电压等于这两点的电位差。如图 1-4 所示, 0 点为参考点, A 点和 B 点的电位 V_A 、 V_B 分别为

$$V_A = V_{A0}, \quad V_B = V_{B0}$$

则 A 点和 B 点间的电压 U_{AB} 为

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

若 $U_{AB} > 0$, 即 $V_A > V_B$, 说明 A 点电位比 B 点高。任意两点间的电位差 (电压) 是不会随参考点的改变而改变的, 且元件端钮间的电压与路径无关, 仅与起点和终点位置有关。

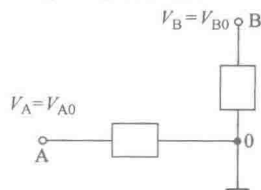


图 1-4 电位表示图

电压的实际方向是高电位指向低电位, 将高电位称为正极, 低电位称为负极。和电流一样, 在分析电路时事先也很难确定两点间电压的实际方向, 因此也要假设电压的参考方向。电压的参考方向就是假定高电位指向假定低电位的方向, 可以有三种表示方式, 如图 1-5 所示: ①用 “+”、“-” 符号表示, 如图 1-5a 所示, 说明电压的参考方向是从 “+” 极性端指向 “-” 极性端的; ②用一个箭头表示, 箭头的方向即电压的参考方向, 如图 1-5b 所示; ③用双下标表示, 如图 1-5c 所示, U_{AB} 表示 A 和 B 之间电压的参考方向由 A 指向 B。在分析问题, 只要选用其中一种来表示电压的参考方向就可以了。

图 1-5 电压的参考方向是假定 A 点电位比 B 点电位高, 如果 A 点的电位确实高于 B 点电位, 即电压的实际方向是由 A 到 B, 与参考方向一致, 则 $U > 0$ 。当实际电位是 B 点高于 A 点, 电压的实际方向与参考方向相反, 则 $U < 0$ 。因此, 在参考方向选定之后, 电压值才有正负之分, 可以根据电压的参考方向以及电压量值的正、负来确定电压的实际方向。

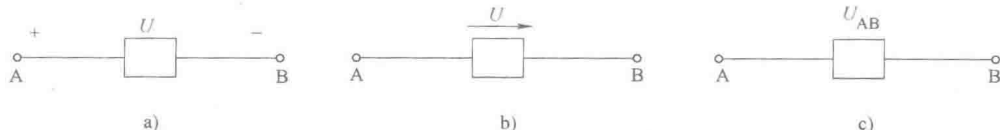


图 1-5 电压的参考方向

综上所述,在分析电路前,要先在电路中标注电流、电压的参考方向。电流和电压的参考方向可以任意指定,如果两者的参考方向一致时,则把电流电压的这种参考方向称为关联方向,如图 1-6a 所示。当两者不一致时,称为非关联方向,如图 1-6b 所示。参考方向一经选定,在计算过程不再改变。

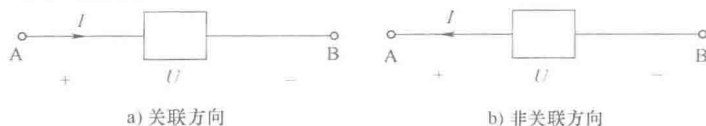


图 1-6 电流电压的关联方向和非关联方向

三、电功率

在电路的工作过程中,电路元件不断进行能量的转换,电源把非电能量转化为电能,负载把电能转化为其他形式的能量。

电功率与电压、电流密切相关。单位时间 (1s) 内元件发出或吸收的电能为电功率 (简称为功率)。功率用符号 P 表示,单位是 W (瓦特)。元件的功率可写为

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

应用式 (1-5) 求功率时应注意:如果元件的电压和电流的参考方向为关联方向时,式 (1-5) 表示元件吸收的功率,当 P 为正值时,表示该元件确实吸收功率,如果 P 为负值,该元件吸收了负功率,说明该元件实际是发出功率;如果元件的电压和电流的参考方向为非关联方向时,式 (1-5) 表示元件发出的功率,当 P 为正值时,表示该元件确实发出功率,如果 P 为负值,该元件发出了负功率,说明该元件实际是吸收功率。一个元件若吸收功率 100W,也可以认为它发出功率 -100W;同理,一个元件若发出功率 100W,也可以认为它吸收功率 -100W。这两种说法是一致的。

根据能量守恒定律,在一个完整的电路中存在功率平衡关系,即各元件发出功率的总和等于吸收功率的总和。吸收功率也称消耗功率。

在图 1-7 中,已知某元件两端的电压 U 为 5V, A 点电位高于 B 点电位;电流 I 的实际方向为自 A 点到 B 点,其值为 2A。根据图 1-7a 中选定的参考方向, U 和 I 为关联参考方向, $U=5\text{V}$, $I=2\text{A}$,由式 (1-5) 可得 $P=10\text{W}$,此元件吸收的功率为 10W。如果根据图 1-7b 选定的参考方向, U 和 I 的参考方向为非关联参考方向, $U=-5\text{V}$, $I=2\text{A}$,由式 (1-5) 可得 $P=-10\text{W}$,即此元件发出的功率为 -10W,说明此元件实际上吸收的功率为 10W,与按图 1-7a 求得结果一致。

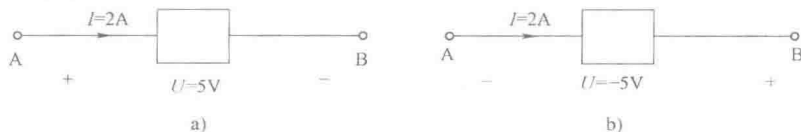


图 1-7 元件的功率

例 1-1 求图 1-8 电路中各框所代表的元件吸收或发出的功率。

已知: $U_1=1\text{V}$, $U_2=-3\text{V}$, $U_3=8\text{V}$, $U_4=-4\text{V}$, $U_5=7\text{V}$, $U_6=-3\text{V}$, $I_1=2\text{A}$, $I_2=1\text{A}$, $I_3=-1\text{A}$ 。

解

$$P_1 = U_1 I_1 = 2\text{W} (\text{发出})$$

$$P_2 = U_2 I_1 = -6\text{W} (\text{吸收})$$

$$P_3 = U_3 I_1 = 16\text{W} (\text{吸收})$$

$$P_4 = U_4 I_2 = -4\text{W} (\text{吸收})$$

$$P_5 = U_5 I_3 = -7\text{W} (\text{吸收})$$

$$P_6 = U_6 I_3 = 3\text{W} (\text{吸收})$$

满足元件吸收的功率等于元件发出的功率的关系。

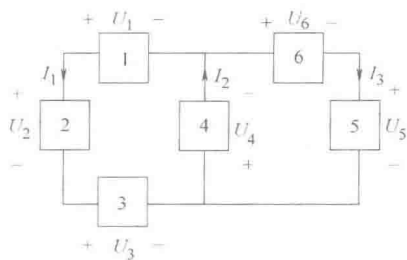


图 1-8 例 1-1 图

第二节 电阻元件和电源元件的伏安关系

电路是由各种元件组成的, 为了分析电路, 必须掌握电路元件的电压和电流之间的关系, 即伏安关系。元件的伏安关系只与元件本身的性质有关, 与电路的结构无关, 它们是分析电路的基本依据之一。常用的电路元件有电阻元件、电源元件、电容元件、电感元件、受控源元件等, 本章先介绍电阻元件、电源元件。电容元件和电感元件的介绍见第三章交流电路分析。受控源元件的介绍将结合电路的分析计算在第二章中进行介绍。

一、电阻元件

电阻元件是反映消耗电能这一物理现象的电路元件。线性电阻的伏安关系为过原点的一条直线, 如图 1-9 所示, 电路符号如图 1-10 所示。

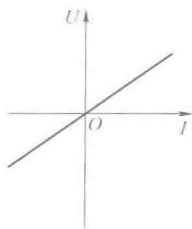


图 1-9 线性电阻的伏安关系

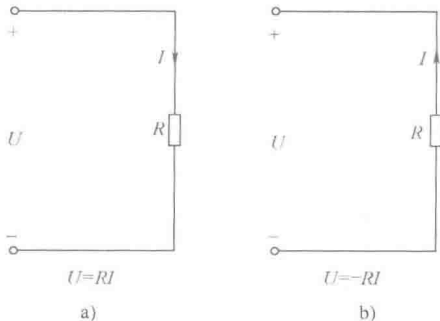


图 1-10 电阻元件电路符号

在电压和电流为关联参考方向时, 如图 1-10a 所示, 线性电阻元件的电压与电流成正比, 即

$$U = RI$$

电阻元件的这种伏安关系称为欧姆定律, 比例常数 R 称为电阻, 是表征电阻元件的特性参数。当电压单位为 V、电流的单位为 A 时, 电阻的单位为 Ω (欧姆), 简称欧。

当电压和电流为非关联参考方向时, 如图 1-10b 所示, 欧姆定律改写为

$$U = -RI$$

电阻元件的功率为

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

二、理想电压源

理想电压源是一种能产生并能维持一定输出电压的理想电源元件。理想电压源的符号如图 1-11a 所示, 其中 u_s 为理想电压源电压, 是确定的时间函数, 与流过的电流无关。

如果理想电压源的电压是定值 U_s , 称之为直流恒压源, 其伏安特性曲线如图 1-11b 所示。恒压源中流过的电流可为任意值, 其值由与之相连的外电路决定。恒压源不能短路, 否则流过的电流为无限大。

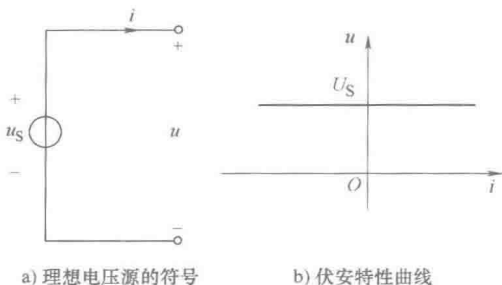


图 1-11 理想电压源

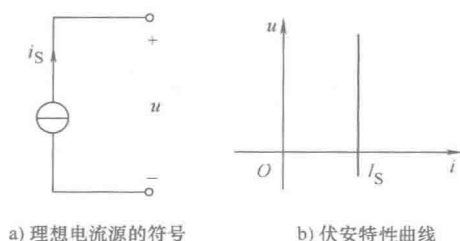


图 1-12 理想电流源

三、理想电流源

理想电流源是一种能产生并能维持一定输出电流的理想电源元件。理想电流源的符号如图 1-12a 所示, 其中 i_s 为理想电流源电流, 是确定的时间函数, 与两端的电压无关。

如果理想电流源的电流是定值 I_s , 称之为直流恒流源, 其伏安特性曲线如图 1-12b 所示。恒流源中两端的电压可为任意值, 其值由与之相连的外电路决定。恒流源不能开路, 否则其两端的电压为无限大。

第三节 基尔霍夫定律及应用

除欧姆定律外, 分析与计算电路的基本定律还有基尔霍夫电流定律和电压定律。基尔霍夫定律是反映电路中电流、电压必须遵循的规律。在讨论它的具体内容之前, 先介绍几个名词。

(1) 支路 电路中的每一分支称为支路。支路流过的电流称为支路电流。

(2) 节点 三条或三条以上支路的连接点称为节点。

(3) 回路 电路中任一闭合路径称为回路。

如图 1-13 所示电路中, 有三条支路 ($R_1, U_1; R_2, U_2; R_3$), 支路电流分别为 I_1, I_2, I_3 。该电路有两个节点 (a、b), 三个回路 ($U_1 R_1 R_3; U_2 R_2 R_3; U_1 R_1 R_2 U_2$)。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 又称节点电流定律, 其内容是: 任一瞬时流入某节点电流之和必定等于流出该节点电流之和, 即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

在图 1-13 电路中, 对节点 a 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

上式可改写成

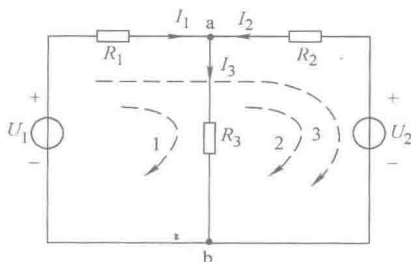


图 1-13 电路举例

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

或

$$\sum I = 0$$

因此基尔霍夫电流定律也可以这样描述：任一瞬时，任一节点上电流的代数和恒等于零。此处电流的代数和是根据电流是流出节点还是流入节点判断的。若流入节点的电流取正号，则流出节点的电流取负号，电流是流入节点还是流出节点，均根据电流的参考方向判断。

基尔霍夫电流定律通常用于节点，也可以推广应用于包围部分电路的任意假设的闭合面，该闭合面可以认为是广义节点。如图 1-14 虚线所示的闭合面，该闭合面包围着三个节点，应用基尔霍夫电流定律可以写出

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

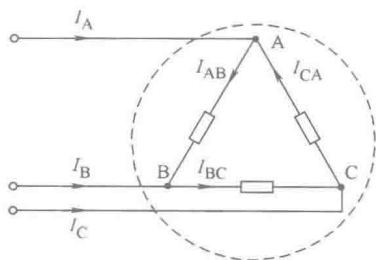


图 1-14 KCL 推广应用于闭合面

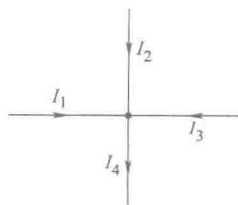


图 1-15 例 1-2 图

例 1-2 在图 1-15 中， $I_1 = 2\text{A}$ ， $I_2 = -3\text{A}$ ， $I_3 = -2\text{A}$ ，试求 I_4 。

解 由基尔霍夫电流定律可列出

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 - I_4 &= 0 \\ I_4 &= I_1 + I_2 + I_3 \end{aligned}$$

得

$$I_4 = [2 + (-3) + (-2)]\text{A} = -3\text{A}$$

由本例可见，式中有两套正负号， I 前的正负号是由基尔霍夫电流定律根据电流的参考方向确定的，括号内数字前的则表示电流本身数值的正负。

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 又称回路电压定律，其内容是：任何时刻，沿任一闭合回路，所有支路电压的代数和为零，即

$$\sum U = 0$$

从回路中任一点出发，按某一绕行方向（顺时针或逆时针）绕行一周，凡支路电压的参考方向与绕行方向一致时取正，反之取负。如图 1-16 的 cbdac 回路，现从 c 点出发逆时针绕行，则有

$$U_1 - U_2 + U_4 - U_3 = 0$$

基尔霍夫电压定律也可以这样描述：任一回路中，任一瞬时从回路中任一点出发，按某一绕行方向绕行一周，在这个方向上的电位升之和等于电位降之和，回到原出发点，该点的电位是不变的。

基尔霍夫电压定律是对回路内各支路电压的约束，而与支路元件的性质无关。它不仅适

用于实际的闭合回路,也可以推广到假想的闭合回路,假如图 1-16 中回路的右边没有元件连接(见图 1-17),而这两端的电压为 U_{ab} ,回路按逆时针方向绕行,根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_1 - U_{ab} - U_3 = 0$$

或

$$U_1 - U_{ab} - RI = 0$$

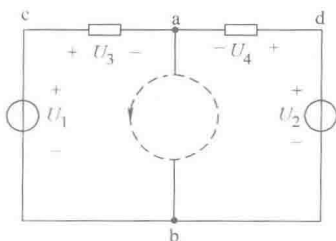


图 1-16 KVL 应用例图

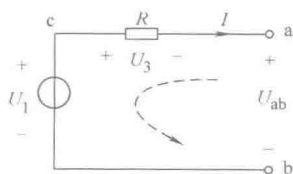


图 1-17 KVL 推广应用于假想闭合回路

例 1-3 有一闭合回路,如图 1-18 所示,各支路的元件是任意的,已知: $U_{AB} = 5\text{V}$, $U_{BC} = -4\text{V}$, $U_{DA} = -3\text{V}$,试求: (1) U_{CD} ; (2) U_{CA} 。

解 (1) 由 KVL 可列出

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$$

即

$$U_{CD} = -(U_{AB} + U_{BC} + U_{DA}) = 2\text{V}$$

(2) ABCA 不是闭合回路,也可用 KVL 列出

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0$$

得

$$U_{CA} = -(U_{AB} + U_{BC}) = -1\text{V}$$

例 1-4 在图 1-19 所示电路中,已知 $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $U_1 = 6\text{V}$, $U_2 = 6\text{V}$, $U_3 = 10\text{V}$,试求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 及 U_2 电源发出的功率 P_2 。

解 应用 KVL 对右网孔列出回路电压方程

$$U_3 - U_2 + R_2 I_2 = 0$$

故

$$I_2 = -\frac{U_3 - U_2}{R_2} = -0.2\text{A}$$

再对左网孔列出回路电压方程

$$U_1 - R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_2 = 0$$

故

$$I_1 = \frac{U_1 - R_2 I_2 + U_2}{R_1} = 1.6\text{A}$$

应用 KCL 对节点 a 列出节点电流方程

$$I_2 - I_1 - I_3 = 0$$

故

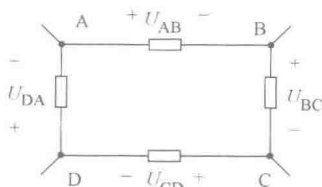


图 1-18 例 1-3 图

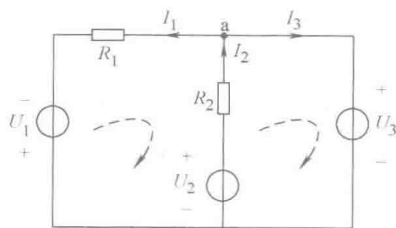


图 1-19 例 1-4 图

$$I_3 = I_2 - I_1 = -1.8\text{A}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = -1.2\text{W}(\text{发出})$$

可见在这一电路中, U_2 电源成为其他电源的负载, 实际是吸收功率的。

第四节 电路的工作状态

图 1-20 所示电路为一个完整的电路, 电路中实际电源由理想电压源 U (简称电压源) 和电源内电阻 R_0 组成, 负载电阻为 R_L 。当 S 合上时, 电路电流为

$$I = \frac{U}{R_0 + R_L} \quad (1-6)$$

电路在使用时可能出现三种状态:

一、空载状态

图 1-20 电路中若开关 S 断开, 电路就处于空载状态, 也称开路状态, 电源空载 ($I=0$)。由于 S 断开, 外电路的电阻为无穷大, 电路中的电流 $I=0$, 此时电源的端电压 U_0 称为开路电压 (或称空载电压)。由于 R_0 无电流流过, 故 R_0 无电压降, 则 U_0 等于电压源电压 ($U_0=U$)。空载状态时电源不输出功率, 负载也没有获得功率 ($P=U_0 I=0$)。

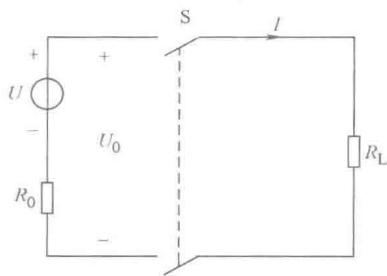


图 1-20 电路的负载和空载

二、负载状态

如图 1-20 所示, 开关 S 闭合, 此时电路处于负载状态, 电源向负载输出电功率。电路中电流 I 可根据负载电阻 R_L 的大小由式 (1-6) 计算出来。显然, 负载电阻 R_L 值越小, 则电路的电流越大, 电源输出的功率也越大, 这时我们说电路的负载增大。就是说, 电源输出的功率和电流决定于负载的大小。

为了使各种电气设备能在给定的工作条件下正常运行, 因此对各种电气设备的电压、电流及功率都规定了正常工作的容许值——额定值。根据制造电气设备时所用绝缘材料在正常寿命下允许的温升, 所有电气设备都规定了一个额定电流, 用符号 I_N 表示。电气设备还根据绝缘材料的耐压等情况, 规定了正常工作时的电压, 称为额定电压, 用符号 U_N 表示。与 I_N 、 U_N 相应的还有额定功率 P_N 和其他额定值。

电气设备在使用时, 电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。负载状态中, 视负载电流的大小可以分为满载 ($I=I_N$)、轻载 ($I<I_N$) 和过载 ($I>I_N$) 三种工作状态。究其原因, 一个是受外界的影响, 例如电源的额定电压为 220V, 但电源电压经常波动, 稍低于或稍高于 220V, 额定值为 220V、40W 的电灯上所加的电压不是 220V, 实际功率也就不是 40W 了。另一个原因如上所述, 在一定电压下电源输出的功率和电流取决于负载的大小, 所以电源通常不一定处于额定工作状态, 但是一般不应超过额定值, 对于电动机也是这样, 它的实际功率和电流也决定于它轴上所带的机械负载的大小, 通常也不一定处于额定工作状态。

从经济性、可靠性、寿命等多种因素考虑, 我们应该让电路尽可能工作在额定状态。长期轻载则设备利用率不高, 电气性能不好; 过载也只能在规定的范围内, 否则会使电气设备的寿命大大缩短甚至烧坏。例如, 对电灯及各种电阻器来说, 当电压过高或电流过大时, 其

灯丝或电阻丝也将被烧毁。

电气设备或元器件的额定值常标在铭牌上或在其他说明中,在使用时应充分考虑额定数值。例如,一把电烙铁,标有 220V、50W,这是额定值,使用时不能接到 380V 的电源上。

例 1-5 有一个 220V、2000W 的电热水器,接在 220V 的电源上,试求电热水器的电阻和通过它的工作电流。如果电热水器每天使用 3h,问一个月消耗电能多少?

$$\begin{aligned} \text{解} \quad I &= \frac{P}{U} = 9.09 \text{ A} \\ R &= \frac{U}{I} = 24.2 \Omega \end{aligned}$$

也可用 $R = \frac{P}{I^2}$ 或 $R = \frac{U^2}{P}$ 计算。一个月用电

$$W = Pt = 2000 \text{ W} \times (3 \times 30) \text{ h} = 2 \text{ kW} \times 90 \text{ h} = 180 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

也就是用了 180 度电。

例 1-6 有一个额定值为 5W、500Ω 的线绕电阻,其额定电流为多少?在使用时电压不得超过多大的数值?

解 根据瓦数和欧姆数可以求出额定电流,即

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = 0.1 \text{ A}$$

在使用时电压不得超过

$$U = RI = 50 \text{ V}$$

因此,在选用时不能只提出欧姆数,还要考虑电流有多大,而后提出瓦数。

三、短路状态

在图 1-20 电路中,若电源的外部端子被短接,则电源处于短路状态,如图 1-21 所示。此时外电路的电阻接近零值,电路中只剩下数值不大的电源内阻。

电路的电流为

$$I_s = \frac{U}{R_0}$$

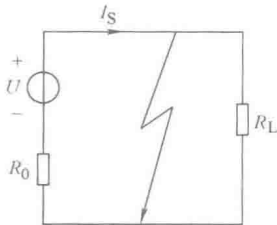


图 1-21 电源短路

此电流称为短路电流,其数值比额定电流大得多。短路是一种故障,如不及时排除短路状态,则会使电源、导线严重发热而被烧毁,甚至引起火灾。为尽快切除故障电路,电路中通常接入熔断器、断路器等保护电器,一旦发生短路,它们能迅速切断电路,从而保证电路的安全。

习 题

1-1 请根据图 1-22 求各电路的电压 U_{ab} 和电流 I_{ab} 的值。

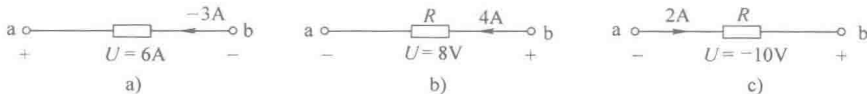


图 1-22 习题 1-1 图