

高职高专“十一五”机电类专业规划教材

DIANGONG JISHU

DIANGONG JISHU

电工技术

■ 劳振花 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专“十一五”机电类专业规划教材

电 工 技 术

主 编 劳振花
副主编 霍淑珍 沈 琰
参 编 丁玉华 张金德 张 文
主 审 康忠健

机械工业出版社



机械工业出版社

根据教育部高职高专培养目标和高职高专院校对本课程教学的基本要求,编写了《电工技术》这本教材。

本书的主要内容包括电路的基础知识、电路的分析方法、简单电路的过渡过程、正弦交流电路、三相正弦交流电路、磁路与变压器、三相异步电动机、直流电动机、继电器—接触器控制、安全用电和实验技能等。本教材是根据高职高专培养目标的要求,结合高职高专学生学习的特点,删减了和后续课程重合部分的内容。另外,根据高职高专的教学特点又加上了实验技能一部分的内容,突出了高职高专重实验、实训能力培养的目标。

为方便教学,本书配有免费电子课件、模拟试卷和授课进程表等教学资源。凡选用本书作为授课教材的教师均可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 免费下载。如有问题请致信 cmpgaozhi@sina.com,或致电 010-88379375 联系营销人员。

本书可作为高职高专理工科各非电类专业学生的教材,也可以作为职大、电大和网络教育学生的教材,还可以作为相关工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/劳振花主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 9

高职高专“十一五”机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-24951-1

I. 电… II. 劳… III. 电工技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 128036 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲世海

责任校对:张晓蓉

封面设计:马精明

责任印制:邓 博

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2008年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·296千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24951-1

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前言

电工技术是高职高专非电类专业的一门专业基础课,学生通过对该课程的学习,可以获得电工技术的理论知识和必要的实验实训技能训练,为以后从事工程技术工作打下良好的基础。近年来,为适应高职高专教学和教材建设的需要,不少高职高专教师认真总结自己的教学实践经验,吸取国内外电工技术教材的优点,致力于电工技术教材的建设工作,使高职高专教材建设出现了欣欣向荣的景象。劳振花副教授主编的这本教材就是在这种形式下编写的。

在编写的过程中,本教材根据教育部高职高专培养目标和高职高专院校对本课程教学的基本要求,突出了以下特点:

- 1) 本着高职高专对专业基础课程的要求,精选内容,讲清概念,注重知识的系统性而又不着力于公式的推导和理论的论证。
- 2) 注重实践和应用,突出了高职高专实验技能的培养,增添了大量的实验内容。
- 3) 每章后配有练习题和答案,帮助读者复习、消化所学知识,了解自己对本章内容的掌握情况。

综上所述,我认为,劳振花副教授主编的这本教材总结了自己的教学经验,紧密结合高职高专的培养目标,突出了高职高专学生的学习特点,阐述清晰,文字流畅,是一本便于教学的好教材。我相信,这本教材是会受到读者欢迎的。

康忠健

前言

在工业生产和科学研究等领域中,电气技术的应用十分广泛。对高职高专院校工程类专业的学生来说,电工技术是必不可少的。根据教育部高职高专培养目标和高职高专院校对本课程教学的基本要求,编写了这本《电工技术》教材。

教材的内容包括:电路基础知识、电动机与变压器、继电—接触控制、安全用电和实验等几部分。本教材取材于工程实践中所需要的电工技术的基本理论、基础知识和基本技能,遵循高职高专的培养目标,结合各位作者多年高职高专教学中的实践经验,精选内容,讲清概念,注重知识的系统性而又不着力于公式的推导和理论的论证。在本教材中,适当调整了教材的结构,把简单电路的过渡过程调到了交流电之前,使教材整体上是直流电路、交流电路、电机和控制的框架结构。考虑到高职高专院校学生操作能力培养的目标,增添了一章实验实训内容。通过对本课程的学习,为后续的可编程序控制器和电工技能实训等课程打下基础。本教材适合于机械、数控、机电和汽车维修等高职高专各非电类专业使用,同时还可以作为网络教育工程类的教学用书。参考学时为72~96学时。本教材是以非电类专业的需要为目的编写的,内容较全,能为师生提供较大的信息量。在教学中可以结合具体情况选择、取舍。

本书由劳振花副教授担任主编,霍淑珍、沈琰老师担任副主编。其中,第7、8、10章、实验、前言和附录由劳振花副教授编写;第1、2章由张文老师编写;沈琰老师编写了第7章的7.6节,并对教材的第1、2章作了修改;第3、4、5章由霍淑珍老师编写;第6章由丁玉华老师编写;第9章由张金德老师编写。全书由劳振花、沈琰和霍淑珍老师统稿。工业工程系李勇教授、电气教研室田治礼教授和张艳玲老师给予了大力的支持,在此一并表示感谢。

本书承蒙中国石油大学信息与控制学院康忠健博士审阅,并提出许多宝贵的意见,在此深表感谢。

为方便教学,本书配有免费电子课件、模拟试卷和授课进程表等教学资源。凡选用本书作为授课教材的教师均可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 免费下载。如有问题请致信 cmpgaozhi@sina.com,或致电 010-88379375 联系营销人员。

限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请使用本书的广大读者批评指正。

编者

目 录

序

前言

第1章 电路的基础知识 1

1.1 电路及其基本物理量 1

1.1.1 电路的组成及功能 1

1.1.2 电路的基本物理量 2

1.2 理想电路元件 5

1.2.1 电阻元件 6

1.2.2 电容元件 6

1.2.3 电感元件 7

1.3 基尔霍夫定律 8

1.3.1 基尔霍夫电流定律 8

1.3.2 基尔霍夫电压定律 9

1.4 电压源与电流源及其等效变换 11

1.4.1 电压源 11

1.4.2 电流源 12

1.4.3 实际电压源与电流源的等效变换 13

1.5 电路的状态及电器设备的额定值 15

1.5.1 电路的状态 15

1.5.2 电器设备的额定值 18

1.6 电阻元件的串联和并联 18

1.6.1 电阻元件的串联 19

1.6.2 电阻元件的并联 19

小结 20

习题1 22

第2章 电路的分析方法 25

2.1 支路电流法 25

2.2 网孔电流法 27

2.3 叠加定理 29

2.4 戴维南定理和诺顿定理 30

2.4.1 戴维南定理 30

2.4.2 诺顿定理 33

小结 33

习题2 34

第3章 简单电路的过渡过程 37

3.1 换路定律及换路后初始值的确定 37

3.1.1 换路定律 37

3.1.2 换路后初始值的确定 37

3.2 RC电路的过渡过程及三要素法 39

3.2.1 RC电路的零状态响应 39

3.2.2 RC电路的零输入响应 40

3.2.3 RC电路的全响应 40

3.3 RL电路的过渡过程 42

3.3.1 一阶RL电路的零输入响应 42

3.3.2 一阶RL电路的零状态响应 43

3.4 微分电路和积分电路 44

3.4.1 微分电路 44

3.4.2 积分电路 45

小结 46

习题3 46

第4章 正弦交流电路 48

4.1 正弦交流电及其三要素 48

4.1.1 正弦交流电压和电流 48

4.1.2 正弦交流电的三要素 48

4.1.3 相位差 49

4.1.4 正弦交流电的有效值 51

4.2 正弦量的相量表示 52

4.2.1 复数及其运算法则 52

4.2.2 相量表示法 53

4.3 理想电路元件的正弦交流电路 54

4.3.1 纯电阻电路 55

4.3.2 纯电容电路 55

4.3.3 纯电感电路 56

4.4 RLC串联与并联电路 57

4.4.1 复阻抗与复导纳 57

4.4.2 RLC串联电路 58

4.4.3 RLC并联电路 60

4.4.4 RLC混联电路 61

4.5 正弦交流电路的功率及功率因数 63

4.5.1 三种理想元件的功率 63

4.5.2 视在功率和复功率 64

4.5.3 提高功率因数的意义和方法 66

4.6 正弦交流电路的谐振 67

4.6.1 串联谐振	67	转差率	104
4.6.2 并联谐振	69	7.3 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	105
小结	70	7.3.1 旋转磁场对定子绕组的作用	105
习题4	70	7.3.2 旋转磁场对转子绕组的作用	106
第5章 三相正弦交流电路	73	7.3.3 三相异步电动机的电磁转矩	107
5.1 三相交流电源	73	7.3.4 三相异步电动机的机械特性	108
5.2 负载星形联结的三相电路	75	7.4 三相异步电动机的运行	109
5.3 负载三角形联结的三相电路	78	7.4.1 三相异步电动机的起动	109
5.4 三相交流电路的功率	79	7.4.2 三相异步电动机的调速	111
小结	80	7.4.3 三相异步电动机的制动	113
习题5	81	7.5 三相异步电动机的选择	114
第6章 磁路与变压器	83	7.5.1 类型的选择	114
6.1 磁场的基本物理量及磁性材料	83	7.5.2 功率的选择	114
6.1.1 磁场的基本物理量	83	7.5.3 电压和转速的选择	115
6.1.2 磁性材料的磁性	84	7.6 单相异步电动机	115
6.2 磁路及其基本定律	86	7.6.1 单相异步电动机的脉动磁场	115
6.2.1 磁路	86	7.6.2 单相异步电动机的电磁转矩	116
6.2.2 磁路基本定律	86	7.6.3 单相异步电动机的起动	117
6.3 交流铁心线圈电路	88	7.6.4 三相异步电动机的单相运行	119
6.3.1 电磁关系	88	小结	119
6.3.2 交流铁心线圈电流与磁阻的关系	89	习题7	121
6.3.3 铁心损耗	89	第8章 直流电动机	122
6.4 变压器的结构、额定值与工作原理	90	8.1 直流电动机的结构、工作原理及其励磁方式	122
6.4.1 变压器的结构	90	8.1.1 直流电动机的结构	122
6.4.2 变压器的额定值	90	8.1.2 直流电动机的工作原理	124
6.4.3 变压器的工作原理	91	8.1.3 直流电动机的励磁方式	125
6.5 变压器的运行特性	94	8.2 直流电动机的运行原理	125
6.5.1 变压器的外特性及电压变换率	94	8.2.1 直流电动机的电磁转矩及转矩平衡方程	125
6.5.2 变压器的损耗与效率	94	8.2.2 直流电动机的电枢电动势及电压平衡方程	126
6.6 常用变压器	95	8.2.3 直流电动机的功率和功率平衡方程	127
6.6.1 自耦变压器	95	8.3 直流电动机的机械特性	128
6.6.2 仪用互感器	95	8.4 直流电动机的起动与调速	129
小结	96	8.4.1 直流电动机的起动	129
习题6	97	8.4.2 直流电动机的调速	129
第7章 三相异步电动机	98	8.5 直流电动机的反转与制动	132
7.1 三相异步电动机的结构和铭牌数据	98	8.5.1 直流电动机的反转	132
7.1.1 基本结构	98	8.5.2 直流电动机的制动	132
7.1.2 铭牌数据	100	小结	133
7.2 三相异步电动机的工作原理	101		
7.2.1 旋转磁场	101		
7.2.2 三相异步电动机的转动原理和			

习题 8	133	10.4.1 触电的现场抢救措施	157
第 9 章 继电—接触控制	135	10.4.2 口对口人工呼吸法	158
9.1 几种常用的低压电器	135	10.4.3 胸外心脏压挤法	159
9.1.1 刀开关	135	10.5 防雷常识	160
9.1.2 组合开关	135	10.5.1 雷电的形成与活动规律	160
9.1.3 熔断器	136	10.5.2 雷电的种类与危害	161
9.1.4 按钮	136	小结	162
9.1.5 接触器	137	习题 10	162
9.1.6 继电器	139	实验	164
9.2 电气控制原理图及继电—接触控制的基本环节	143	实验 1 简单的电气测量	164
9.2.1 电气控制原理图	143	实验 2 戴维南定理的验证	165
9.2.2 继电—接触控制的基本环节	143	实验 3 正弦交流电路的研究	167
9.3 开关自动控制电路	147	实验 4 三相交流电路中电压与电流的测量	169
9.3.1 行程控制	147	实验 5 三相异步电动机的直接起动与点动控制	171
9.3.2 时间控制	148	实验 6 三相异步电动机的正、反转控制	172
小结	148	附录	175
习题 9	149	附录 A 主要物理量的符号及单位	175
第 10 章 安全用电	151	附录 B 用于构成十进制倍数和分数单位的词头	176
10.1 人体触电的有关知识	151	附录 C 电气图常用图形符号表	176
10.1.1 人体触电的种类和方式	151	附录 D 常用电气设备基本文字符号	181
10.1.2 电流伤害人体的因素	152	附录 E 电气设备常用辅助文字符号 (GB/T 7159—1987)	181
10.2 人体触电的安全电压	154	附录 F 电源线路和三相电气设备端的标记代号	181
10.2.1 人体电阻	154	部分参考答案	182
10.2.2 人体允许电流	154	参考文献	185
10.2.3 安全电压值	154		
10.3 触电原因及预防措施	155		
10.3.1 触电的常见原因	155		
10.3.2 预防触电的措施	155		
10.4 触电急救	156		

第1章 电路的基础知识

本章导读:

本章首先介绍电路的概念和基本物理量,其中包括电路模型以及电流和电压的参考方向与实际方向的关系,然后介绍组成电路的理想电路元件、两条基尔霍夫定律、电压源与电流源的等效变换、电路的三种工作状态以及电器设备的额定值,最后介绍电阻元件串联和并联的计算。这些内容是学习电工技术的基础。在分析时先从直流电路出发,得出一般规律,然后再将这些规律和结论扩展到交流电路中去。

本章学习要求:

- 1) 掌握电路的概念和基本物理量及组成电路的理想电路元件。
- 2) 熟练掌握基尔霍夫电压、电流定律。
- 3) 熟练掌握电压源与电流源的等效变换、电阻元件的串联和并联。
- 4) 了解电路的三种工作状态以及电器设备的额定值。

1.1 电路及其基本物理量

1.1.1 电路的组成及功能

电路泛指电流通过的路径。一般实际电路(如电视机、电子计算机等)都是由电阻、电感线圈、电容、电源、半导体管和集成电路等电路元器件组成的。

图1-1a所示是一种最简单的实际照明电路。当开关闭合时,电流通过灯泡使其发光。该电路由三部分组成:①提供电能的能源,称为电源,它的作用是将其他形式的能量转换为电能。②用电的元件,称为负载,它将电源供给的电能转换为其他形式的能量。③电路的中间部分,称为中间环节,它是连接电源和负载的部分,具有输送、分配和控制电路通断的功能。图1-1a中的中间环节由一个开关和导线组成。

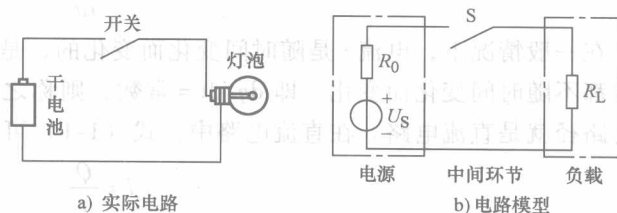


图1-1 手电筒电路

电路具有两个主要的功能:①在电路中随着电流的流动,它能实现电能与其他形式能量的转换、传输和分配。例如,发电厂把通过煤粉和油的燃烧产生的热量转换成电能,再通过变压器、输电线送到各用户,用户把电能再转换为光能(照明)、热能(加热电器)和机械能(电动机)加以使用。②电路可以实现信号的传递和处理。通过电路可以把输入的信号

变换或“加工”成其他所需要的输出。例如，半导体收音机的天线收到的是一些很微弱的电信号，这些微弱的信号必须通过调谐环节选择到所需要的某个频率信号，再经过一系列的放大环节，才能从输出端重现所需的信号（图像和声音）。

任何电路都是由实际元件组成的。实际元件的特性比较复杂，它们在电路中往往同时有热效应、电磁效应和电场效应，不便于进行分析和计算。因此常用一个或几个理想元件来代替实际元件，理想元件可以精确地定义并可准确地表述出实际元件的某一主要性质。例如，用“电阻”这个理想的电路元件来代替电阻器、电阻炉和灯泡等消耗电能的实际元件，用“电阻”和“理想电压源”相串联的理想元件组合来代替实际的电池等。用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来代替实际电路中的具体元件，称为实际电路的模型化。

由理想电路元件构成的电路称为电路模型。图 1-1b 所示为手电筒的电路模型，图中用理想电阻元件 R_L 来代替图 1-1a 中的灯泡，用理想电阻元件 R_0 和理想电压源 U_S 相串联来代替图 1-1a 中的电池。今后在电路分析中讨论的电路都是电路模型。

1.1.2 电路的基本物理量

1. 电流

带电质点有规律运动的物理现象称为电流。带电质点在金属导体中是指带负电的自由电子，在电解质中是指带正电或负电的正、负离子。这些带电质点在电场作用下做定向运动，即正电荷顺电场方向运动、负电荷逆电场方向运动。习惯上，规定正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向为电流的实际方向，如图 1-2 所示。



图 1-2 电流的方向

衡量电流大小、强弱的物理量称为电流，其数值等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。设在极短的时间 dt 内通过导体某一横截面的电荷量为 dq ，则电流为

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

在一般情况下，电流 i 是随时间变化而变化的，是时间 t 的函数。若电路中电流的大小、方向都不随时间变化而变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则称之为恒定电流，又称直流电流，它所通过的路径就是直流电路。在直流电路中，式 (1-1) 可写成

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

按国际单位制规定，电流的单位是库仑每秒（库仑/秒），即安培，简称“安”，用符号“A”表示。在电力系统中电流都比较大，常以千安（kA）作为电流的计量单位，而在电子电路中电流都比较小，常以毫安（mA）、微安（ μA ）作为电流的计量单位，它们之间的换算关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{A} = 10^3\text{mA} \quad 1\text{mA} = 10^3\mu\text{A}$$

电流的方向是客观存在的，在简单的直流电路中，很容易判断出电流的实际方向，但在复杂的直流电路中，电流的实际方向很难直观判定。另外，在交流电路中，电流是随时间变化的，在图上也无法表示其实际方向。为了解决这一问题，引入电流的参考方向这一概念。

参考方向，也称为正方向，是人为假定的方向。电流的参考方向可以任意选定，在电路

中一般用箭头表示。所以，所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当电流的参考方向与实际方向一致时，电流为正值 ($I > 0$)；当电流的参考方向与实际方向相反时，电流为负值 ($I < 0$)，如图 1-3 所示。

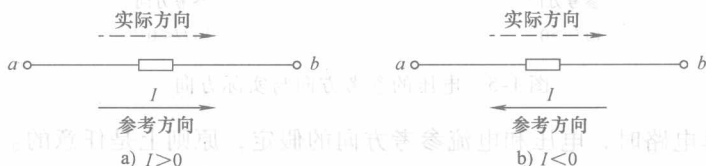


图 1-3 电流的参考方向与实际方向

这样，在分析电路时，首先要假定电流的参考方向，并据此去进行分析计算，最后再从计算结果的正负来确定电流的实际方向。例如，在图 1-3a 中，选定的电流参考方向是从 a 流向 b ，若经计算后得到 $I = 1\text{A}$ ，则表示电流的实际方向就是从 a 流向 b ；若经计算后得到 $I = -1\text{A}$ ，则表示电流的实际方向是从 b 流向 a 。

今后，本书电路图中所标出的电流方向都是指参考方向。不规定电流的参考方向，电流的正负值也就没有意义了。

2. 电压

在图 1-4 中，电池中有两个电极， a 是正极带正电荷， b 是负极带负电荷。在 a 、 b 两极之间产生了一个均匀而且恒定的电场，其方向从 a 指向 b 。如果用导体将 a 、 b 两极连接起来，那么在电场的作用下，电极 a 中的正电荷将通过导体移动到电极 b 。由于正电荷在电场中被移动了一段距离，电场力对正电荷做了功。把电场力将单位正电荷 q 从 a 极移动到 b 极所做的功，称作 a 、 b 之间的电压，记作

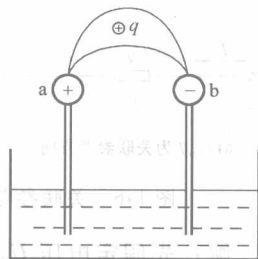


图 1-4 电压的示意图

$$U_{ab} = \frac{W_a}{q} \quad (1-3)$$

如果电压的大小和方向都随时间变化而发生变化，则称为交变电压，用小写字母 u 表示；如果电压的大小和方向都不随时间变化而变化，则称为恒定电压或直流电压，用大写字母 U 表示。由恒定电压产生的电场是恒定电场，在恒定电场中，任意两点 a 、 b 之间的电压只与 a 、 b 两点的位置（起点与终点）有关，而与电荷运动的路径无关。

按国际单位制规定，电压的单位是焦耳每库仑（焦耳/库仑），即伏特，简称“伏”，用符号“V”表示。计量微小电压时，常以毫伏（mV）、微伏（ μV ）为单位；计量高电压时，常以千伏（kV）为单位。它们之间的换算关系是

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

电压的实际方向习惯上规定为从高电位点指向低电位点，即电压降的方向。但在分析电路时，仍需选取电压的参考方向。当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正 ($U > 0$)；当电压的参考方向与实际方向相反时，电压为负 ($U < 0$)，如图 1-5 所示。

电压的参考方向可用箭头“ $\rightarrow$ ”表示，也可用双下标 ($U_{ab} = -U_{ba}$) 表示，还可使用极性“+”、“-”表示，“+”表示高电位，“-”表示低电位。多数情况下采用双下标和极性表示法。

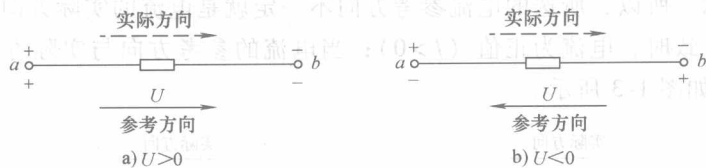


图 1-5 电压的参考方向与实际方向

在分析和计算电路时，电压和电流参考方向的假定，原则上是任意的。但为了分析电路的方便，元件上的电压和电流常取一致的参考方向，这称为关联参考方向。

如图 1-6 所示，图 1-6a 中的电压 U 与电流 I 的参考方向一致，则电压与电流的关系是 $U = RI$ ；而图 1-6b 中的 U 与 I 的参考方向不一致，则电压与电流的关系是 $U = -RI$ 。可见，在列写电压与电流的关系式时，式中的正负号由它们的参考方向是否一致来决定。

例 1-1 电路中有 4 个元件按图 1-7 所示的方式连接，每个元件上电压的参考方向如图所示，且 $U_1 = -100\text{V}$ ， $U_2 = -50\text{V}$ ， $U_3 = 80\text{V}$ ，求 U_4 及 U_{CD} 的数值。

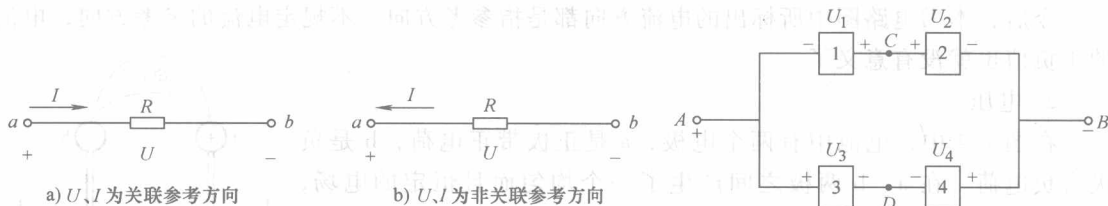


图 1-6 关联参考方向与非关联参考方向

图 1-7 例 1-1 图

解：先假定电压 U_{AB} 的参考方向，根据已经假设的参考方向列写电路方程式：

$$U_{AB} = -U_1 + U_2 = [-(-100) + (-50)]\text{V} = 50\text{V}$$

因为电路中任意两点的电压与路径无关，所以

$$U_{AB} = U_3 + (-U_4) = U_3 - U_4$$

$$U_4 = U_3 - U_{AB} = (80 - 50)\text{V} = 30\text{V}$$

$$U_{CD} = U_2 + U_4 = (-50 + 30)\text{V} = -20\text{V}$$

$$\text{或 } U_{CD} = U_1 + U_3 = (-100 + 80)\text{V} = -20\text{V}$$

3. 电动势

电动势是一个专门描述电源内部特性的物理量。由图 1-4 可见，由于电场力的作用，正电荷在电场力的作用下，不断从 a 极经过导体移动到 b 极，如果没有一种外力存在，a 极因正电荷减少而使电位逐渐降低，而 b 极因正电荷增多会使电位逐渐增高，故 a、b 之间的电位差将越来越小，直至为零时，导体中不再有电荷的移动，即导体中的电流为零。

为了维持导体中的电流，就要使导体中的电荷不断地移动，所以必须要有一种外力克服电场力的作用从另一条途径不断地把正电荷从 b 极再移到 a 极，使 a 极的电位升高，以保持导体中的正电荷不断移动。在电源内部就存在着这种外力。

这种外力把单位正电荷从低电位端 b 经过电源内部移动到高电位端 a 所做的功称为电源的电动势，用 E 表示。在国际单位制中，电动势的单位也是伏特 (V)。

在电源内部，电动势 E 的方向规定为从低电位端指向高电位端。换句话说，当电动势为正时，其方向是电位升高的方向。电动势 E 的大小在数值上与电源的开路电压相等。因

为当电源处于开路状态时, 电源中没有电荷的移动, 这时电场力与外力平衡, 电场力和外力对正电荷做功的能力相等。

4. 功率

电功率是电路分析中常用的一个物理量。在电气工程中, 电功率简称为功率。电功率是用来衡量单位时间内所消耗电能大小的物理量。

在图 1-4 所示电路中, a、b 两极的电压为 U , 流过的电流为 I , 在时间 t 内, 电荷 q 受电场力作用从 a 极 (电源正极) 移动到 b 极 (电源负极), 电场力所做的功为

$$W = Uq = UIt \quad (1-4)$$

这个功也就是电阻 R 在 t 时间内所吸收的电能, 对于电阻来说吸收的电能全部转换成热能, 其大小为

$$W_R = UIt = RI^2 t \quad (1-5)$$

在国际单位制中, 电能、热能的单位是焦耳, 简称“焦”, 用字母“J”表示。

电阻吸收的功率可定义为单位时间里能量的转换率, 其数学表达式为

$$P = \frac{W_R}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = RI^2 \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特, 简称“瓦”, 用字母“W”表示, 还可以用千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 作单位, 它们之间的换算关系为

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

在工程上常用千瓦小时 (或千瓦时, 俗称度) 作为计量电能的实用单位, 通常功率为 1kW 的电气设备使用 1h 所消耗的电能, 可记为 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

在电路分析中, 不仅要计算功率的大小, 有时还要判断功率的性质, 即该元件是产生功率还是消耗功率。根据电压和电流的实际方向可以确定电路元件的功率性质: 当电压 U 和电流 I 的实际方向相同, 即电流从“+”端流入, 从“-”端流出时, 该元件是消耗功率, 属负载性质; 当电压 U 和电流 I 的实际方向相反, 即电流从“+”端流出, 从“-”端流入时, 该元件是提供功率, 属电源性质。

由此可见, 在电路元件上电压 U 和电流 I 的参考方向选的一致的条件下, 当 P 为正值时, 表明 U 、 I 的实际方向相同, 该元件是负载性质, 消耗功率; 当 P 为负值时, 表明 U 、 I 的实际方向相反, 该元件是电源性质, 提供功率。如果 U 、 I 的参考方向选的不一致, 则情况相反, 请读者自行分析。

1.2 理想电路元件

电流的周围存在着磁场, 电荷的周围存在着电场, 磁场和电场中都储存着能量。因此, 一般来说, 电路中除了有产生电能的过程以外, 还存在着 3 种基本的能量转换过程, 即电能的消耗、磁场能的储存和电场能的储存。用来表征电路中这 3 种物理性质的理想电路元件分别称为理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件。而电能的产生则由理想电源元件来表示, 它有理想电压源和理想电流源两种形式。这样, 无论哪一种电路, 一般都可以抽象成由理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想电压源和理想电流源这 5 种理想电路元件中的一种或几种来组成的电路模型。

1.2.1 电阻元件

理想电阻元件简称为电阻元件，它是从实际电阻抽象出来的理想模型。像灯泡、电阻炉和电烙铁等实际电阻元件，当忽略其电感、电容作用时，可将它们抽象为只具有消耗电能性质的电阻元件。

在图 1-8a 中，电压 u 和电流 i 的参考方向相同， R 是理想电阻元件，由欧姆定律可知，电阻元件的伏安特性为

$$u = Ri \quad (1-7)$$

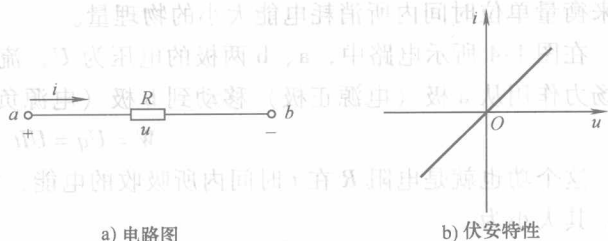


图 1-8 电阻元件

上式表示电阻元件的端电压和流过它的电流成正比。比例系数 R 称为电阻，是表示电阻元件特性的参数。图 1-8b 是其伏安特性曲线，它是一条通过原点的直线。通常把伏安特性为直线的电阻称为线性电阻。

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，用字母“ Ω ”表示。当电路两端的电压为 1V，通过的电流为 1A 时，则该端电路的电阻就是 1Ω 。较大的计量单位有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)，它们之间的换算关系为

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

电阻元件取用的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-8)$$

从上式可以看出，不论 u 、 i 是正值还是负值， p 总是大于零，这说明电阻元件总是消耗电功率的，与电压、电流的实际方向无关，故电阻是耗能元件。

从式 (1-8) 还可以看出，当电流恒定时，电功率与电阻成正比 ($p = Ri^2$)，例如电路上的电阻通常比负载的电阻小得多，电路电流主要取决于负载，当负载不变，电路电阻改变时，电路上的电流基本是恒定的，这时电路上消耗的电功率与电路电阻成正比。当电压恒定时，电功率与电阻成反比 ($p = u^2/R$)，例如在通常情况下，电路上的压降远小于负载的端电压，因此，当负载电阻改变时，由于电流变化而引起的电路压降变化相对于负载的端电压而言是很小的，可看成负载的电压基本是恒定的，故负载的电功率与负载的电阻成反比。之所以会有两种完全相反的结论，是因为前提条件不同。

1.2.2 电容元件

理想电容元件简称为电容元件，它是从实际电容抽象出来的理想化模型。实际电容通常由两块金属极板中间充满介质（如空气、云母、绝缘纸、塑料薄膜和陶瓷等）构成，电容加上电压后，两块极板上将出现等量异种电荷，并在两极板间形成电场，储存电场能。当忽略电容器的漏电阻和电感时，可将其抽象为只具有储存电场能性质的电容元件。

由电容器极板上储存的电量 q ，与外加电压 u 成正比，即

式中，比例系数 C 称为电容，是表征电容元件特性的参数。

在国际单位制中, 电容的单位是法拉, 简称“法”, 用字母“F”表示。当将电容器加上 1V 的电压时, 若极板上储存了 1C 的电量, 则该电容器的电容就是 1F。由于法拉的单位太大, 工程上一般采用微法 (μF) 或皮法 (pF) 作为电容的单位, 它们之间的换算关系是

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

当电容的端电压和通过电流的参考方向一致时, 如图 1-9 所示, 则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

上式表明, 电容元件上通过的电流, 与电容元件两端的电压对时间的变化率成正比。电压变化越快, 电流就越大。当电容元件两端加上恒定电压时, $i = 0$, 电容元件相当于开路, 故电容元件有隔直流的作用。

将式 (1-10) 两边乘上 u 并积分, 可得电容元件极板间储存的电场能量为

$$W_C = \int_0^t u i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-11)$$

上式说明, 电容元件在某时刻储存的电场能量, 与元件在该时刻所承受的电压的平方成正比。电容元件不消耗能量, 故称为储能元件。

1.2.3 电感元件

理想电感元件简称为电感元件, 它是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。当电感线圈中通以电流后, 将产生磁通, 在其内部及周围建立磁场, 储存能量。当忽略导线电阻及线圈匝与匝之间的电容时, 可将其抽象为只具有储存磁场能性质的电感元件。根据电磁感应定律, 当电感线圈中的电流 i 变化时, 磁场也随之变化, 并在线圈中产生自感电动势。若电压、电流和电动势的参考方向如图 1-10 所示, 则有

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$



图 1-9 电容元件

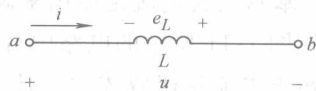


图 1-10 电感元件

上式表明, 电感元件两端的电压与通过它的电流对时间的变化率成正比。比例系数 L 称为电感, 是表征电感元件特性的参数。电流变化越快, 电感元件产生的自感电动势越大, 与其平衡的电压也越大。当电感元件中流过恒定的直流电流时, 因 $di/dt = 0$, $e_L = 0$, 故 $u = 0$, 这时电感元件相当于短路。

在国际单位制中, 电感的单位是亨利, 简称“亨”, 用字母“H”表示。当电感线圈中的电流变化率为 1A/s, 产生 1V 的感应电动势时, 电感线圈的电感为 1H。由于亨利单位太大, 工程上一般采用毫亨 (mH) 或微亨 (μH) 作为电感的单位, 它们之间的换算关系是

$$1\text{H} = 10^3 \text{mH} = 10^6 \mu\text{H}$$

将式 (1-12) 两边乘上 i 并积分, 可得电感元件中储存的磁场能量为

$$W_L = \int_0^t u i dt = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-13)$$

上式说明, 电感元件在某时刻储存的磁场能量, 与该时刻流过的电流的平方成正比。电

感元件不消耗能量，故称为储能元件。

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律（应用于节点）和基尔霍夫电压定律（应用于回路）。在介绍两条基尔霍夫定律之前，首先要熟悉一些名词。

两端元件 凡具有两个端钮，可与外部电路相连接的元件称为两端元件。电阻元件、电感元件、电容元件、电压源和电流源均为两端元件。图 1-11 所示的电路中含有 5 个两端元件，即 R_1 、 R_2 、 R_3 、 U_{S1} 、 U_{S2} 。

支路 电路中的一条分支，用字母“b”（branch）表示，在这条分支上流过的电流相同。图 1-11 所示的电路中 $b=3$ ，其中 R_1-U_{S1} 、 R_2-U_{S2} 为有源支路， R_3 为无源支路。

节点 在电路中 3 条或 3 条以上支路的会聚点称为节点，用字母“n”（node）表示。图 1-11 所示的电路中 $n=2$ ，即 B 和 E。

回路 由一条或多条支路所组成的闭合电路称为回路，用字母“l”（loop）表示。图 1-11 所示的电路中 $l=3$ ，即 ABED 回路、BCFE 回路和 ACFD 回路。

网孔 内部无支路的回路称为网孔，用字母“m”（mesh）表示。图 1-11 所示的电路中 $m=2$ ，即 ABED 回路、BCFE 回路。

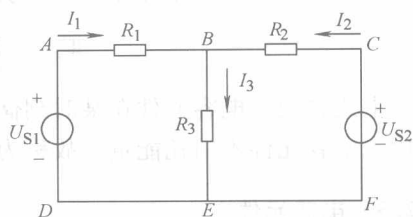


图 1-11 基尔霍夫定律示例

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's Current Law）也可称为节点电流平衡方程式，简称 KCL。基尔霍夫电流定律用来确定连接在同一节点上的各支路电流之间的相互关系。

在图 1-11 所示的电路中有 5 个两端元件、3 条支路、2 个节点、3 个回路和 2 个网孔。基尔霍夫电流定律叙述为：任一瞬时，通过电路中任一节点的各支路电流的代数和恒等于零，其数学表达式为

$$\sum I_i = 0 \quad (1-14)$$

该定律应用于电路中的某一节点时，必须首先假定各支路电流的参考方向，当假定流入节点的电流为正时，流出节点的电流为负。这里流入或流出都是根据参考方向而定的。

对节点 B:
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

或

$$I_1 + I_2 = I_3$$

对节点 E:
$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (2)$$

或

$$I_1 + I_2 = I_3$$

由上可见：

1) 在任何一个瞬间、对任何一个节点，流进节点的电流之和一定等于流出节点的电流之和，即 $\sum I_{\text{进}} = \sum I_{\text{出}}$ 。对节点 B 有 $I_1 + I_2 = I_3$ ，对节点 E 有 $I_1 + I_2 = I_3$ 。注意：流进或流出是针对所假设的电流参考方向而言的。

2) 如果在电路中有 n 个节点，则其中有 $(n-1)$ 个是独立节点。在图 1-11 所示电路

中有 2 个节点 (B 、 E)，则有 1 个独立节点 (任选一个)。在以上所列方程中，若将节点 B 的方程 (1) 乘以 -1 ，即得到节点 E 的方程 (2)，因此，这两个方程中只有一个是独立的。

3) 基尔霍夫电流定律还可以推广应用于包围部分电路的任一假想闭合面 (称为广义节点)。在任何瞬间通过任一假想闭合面的电流的代数和也恒等于零。

例 1-2 在图 1-12 所示的电路中， $I_1 = 2\text{A}$ ， $I_2 = 5\text{A}$ ， $I_3 = -3\text{A}$ ，求电流 I_4 。

解：根据 KCL 的推广，做一个假想闭合面 (如图中椭圆所圈)，切割了 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 共 4 条支路，可列方程为

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 &= 0 \\ I_4 &= -(I_1 + I_2 + I_3) \\ &= -[2 + 5 + (-3)]\text{A} = -4\text{A} \end{aligned}$$

由该例题可见，公式的正负号与代数量的正负号不能混淆，经计算后得到的电流为负值，说明电流的实际方向与假设的参考方向相反。

例 1-3 在图 1-13 所示的电路中， $I_1 = 4\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_4 = -3\text{A}$ ， $I_5 = -2\text{A}$ ，求电流 I_3 的数值。

解：根据 KCL，有 $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$

$$\begin{aligned} \text{所以} \quad I_3 &= -I_1 + I_2 + I_4 + I_5 \\ &= [-4 + 1 + (-3) + (-2)]\text{A} = -8\text{A} \end{aligned}$$

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law) 也可称为回路电压平衡方程式，简称 KVL。基尔霍夫电压定律用来确定回路中各支路电压之间的相互关系。

基尔霍夫电压定律叙述为：任一瞬时，作用于电路中任一回路的各支路电压的代数和恒等于零，其数学表达式为

$$\sum U_i = 0 \quad (1-15)$$

该定律用于电路中的某一回路时，必须首先假定各支路电压、电流的参考方向，并指定回路的循行方向 (顺时针方向或逆时针方向)。规定：支路电压的参考方向与回路循行方向一致时取“+”号，相反时取“-”号；支路电流的参考方向与回路循行方向一致时，在电阻上产生的电压降取“+”号，相反时在电阻上产生的电压降取“-”号。

前已分析，在图 1-11 所示电路中有 3 个回路 ($ABED$ 回路、 $BCFE$ 回路和 $ACFD$ 回路)，假定各支路电压的参考方向和各回路的循行方向 (取顺时针方向) 如图 1-14 所示。

根据 KVL，对 $ACFD$ 回路列写方程

$$U_{AC} + U_{CF} + U_{FD} + U_{DA} = 0$$

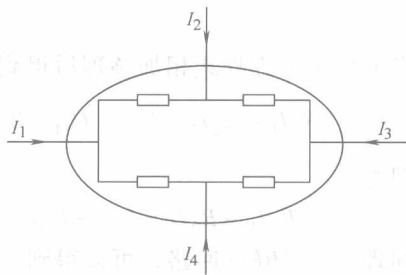


图 1-12 例 1-2 的广义节点

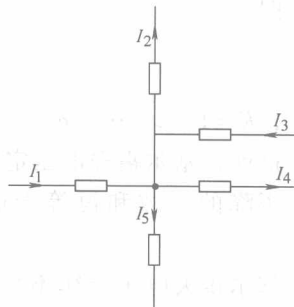


图 1-13 例 1-3 图