

普通高等教育“十一五”规划教材

电 工 学

上册 电工技术

林 珊 陈国鼎 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材

电 工 学

上 册

电 工 技 术

林 珊 陈国鼎 编
万 频 主审



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”规划教材。该教材依据教育部颁发的工科高等学校“电工技术”课程教学基本要求，在多年实际教学过程中，通过探索、改革和总结实践经验编写而成。

全书包括电路的基本概念与基本定律、电路的常用定理及基本分析方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路及安全用电常识、磁路与变压器、交流电动机、继电器接触器控制系统等8章内容。

本书以工程实践中正在使用的电工技术基础理论为主，在突出电路的基本理论、基本分析方法的同时，注重理论联系实际。全书内容叙述上力求简明扼要，重点突出；将基本概念讲述清楚，易于读者接受理解；将基本分析方法讲解透彻，步骤明确，使读者容易掌握；分析过程更为紧凑，体系与内容均较新颖。每章节配有针对性的思考与练习及习题，形式多样，配置齐全，难易度适中。书末附有习题答案，方便学生自学和教师施教。

本书适用于高等学校工科各专业，可以作为电工学相关课程的教材。该书对工程技术人员也有重要的参考价值，也可供自学电工知识的读者阅读。

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 Edmondyan@hotmail.com 索取。
Edmondyan@sina.com

图书在版编目（CIP）数据

电工学. 上册, 电工技术/林珊, 陈国鼎编. —北京: 机械工业出版社, 2009.7

普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-27003-4

I. 电… II. ①林…②陈… III. ①电工学—高等学校—教材②电工技术—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 066866 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: 贡克勤 版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 姚毅 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15 印张·367 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-27003-4

定价: 28.00 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) 88379725

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电工学”课程是工科非电类各专业重要的专业技术基础课程，是各专业培养高技能人才必须具备的理论基础。科学技术的不断发展进一步加强了各学科之间的相互联系，电工电子技术越来越渗透到各学科，因此，“电工学”课程已不仅限于工科专业，众多理科类专业也将其作为必修课程。通过对该课程的学习，使学生获得必需的电工电子基础理论、电路分析计算能力及电工测量等基本知识与实践技能，为学习专业课程，树立理论联系实际的观点，培养实践能力、创新意识和创新能力，打下必要的基础。

近年来，我国高等教育为主动适应教育要“面向现代化、面向世界、面向未来”的需要，大力推动教学体制改革。随着教改的深化进行，作为工科非电类各专业的重要专业技术基础课程的“电工学”也发生了相当大的变化：知识点的更新、实际应用的推广、教学学时的减少、学生素质的提高等等，这些因素都显示了教学改革的首要任务是进行教材改革。本套教材就是针对新的教学大纲、新的课程体系，在多年教学实践的基础上，总结丰富的教改经验和科研成果，消化吸收国内、外优秀教材的长处确定编写而成的。

传统的电工与电子技术在课程设置上着重追求内容的完整性和系统性，但是，随着当今社会学科的发展与细化，这种课程设置已经不太适合新形势的发展。教改的思路之一就是要把以往单一的、纵向的课程设置变为纵向和横向相互交汇的形式，以整体、融合、发展和应用的理念建立新的课程内容体系，打破原来的电工和电子、模拟和数字的界限，把课程内容层次化，模块化，以适应不同专业的要求，增加了不同专业在课程内容选择方面的灵活性，使基础理论知识与应用更好地结合，较好地解决知识膨胀与课时紧张的矛盾。

本教材按新教学大纲要求对传统的教学内容进行合理的精选、改写、补充和整合。本着“够用、实用、能用”的原则，降低了理论深度，压缩了基础性的原理叙述部分，不过分强调理论的系统性、严密性和完整性。除保留基础的传统内容外，削减了陈旧的复杂理论推导和应用较少的难记公式。增加了典型实例电路剖析的内容，这些实例注重理论联系实际，搭建了从理论到应用的桥梁，突出了电工电子技术在生活、生产中的应用。既增加了学生的学习兴趣，又引导学生思考，以便加强培养学生应用所学电工电子知识解决实际问题的意识与综合能力。同时，积极吸收当代的新知识、新观点和新技术。如增加可编程控制器及其应用、大规模存储器、可编程逻辑器件、现场可编程逻辑阵列等内容。

该教材的体系结构注重基础知识的内在关系，突出基本概念和基本原理，进一步理顺教学内容之间的关系。内容的编排与同类书有较大的调整，以遵循人的认知规律，更有利于学生按照严谨的思维方式接受相关的知识点。并采用比较有效和精练的方式把问题交代清楚，便于施教与自学，力求达到学以致用。这样做更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

本套教材包括《电工学（上册）——电工技术》和《电工学（下册）——电子技术》两本书，按通用教材的要求，能满足工科各非电类专业的需要。各章节内容之间具有相对的独立性，可以针对不同专业的特点，灵活选取相应的内容进行教学，以适应不同专业的需求。

本书是《电工学（上册）——电工技术》，全书共分8章，内容由浅入深，系统介绍了电工技术的基础及应用。全书力求概念准确、内容新颖、深入浅出、语言流畅、可读性强。既注重基本原理必要的讲解，又力求突出工程上的实用性。明确指出本课程的重点和难点内容，以及学生在学习中的疑难之处与错误概念。每章配有适量的且有针对性的例题、思考与练习题、习题，方便自学、易于教学。书中标有星号（*）的内容属于加深加宽的参考内容，可根据实际需要而有所取舍。习题中也有少量是标有星号（*）的，可供选用，以便在使用时具有一定的灵活性。

本书适用于高等学校工科各专业，可以作为电工学相关课程的教材。也可作为广大自学读者学习电工学课程时的辅导参考书。同时可以作为电子爱好者自学和实践的指导性参考书，对工程技术人员有重要的参考价值，也可供电工学教师教学参考。

广东工业大学自动化学院的王钦若院长、邓则名教授，物理与光电工程学院的胡义华院长、邓颖宇副院长、苏成悦副院长，电工电子部的有关领导以及各位老师对本书的编写及出版都给予了大力的支持和帮助，在此，谨向他们致以衷心的感谢！

本书第1、2、3、8章及附录A、附录B由广东工业大学自动化学院林珊编写，第4、5、6、7章由广东工业大学物理与光电工程学院陈国鼎编写，全书由林珊统稿。本书由广东工业大学自动化学院副院长万频主审。

由于编者水平有限以及时间仓促，本书在某些方面所作的变动和尝试，以及书中的不足和不妥之处，殷切希望读者提出宝贵意见并予以批评指正，以便今后修订提高。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律 1

1.1 电路和电路模型 1

1.1.1 电路的组成、作用及工作状态 1

1.1.2 电路模型 3

1.2 电路的基本物理量 4

1.2.1 电流及其参考方向 4

1.2.2 电压、电位及电动势 5

1.3 电阻元件 10

1.3.1 电阻 11

1.3.2 电导 11

1.3.3 欧姆定律 11

1.3.4 线性电阻元件吸收的功率 13

1.4 独立电源 13

1.4.1 理想电压源 14

1.4.2 理想电流源 14

1.4.3 实际电源 15

1.5 基尔霍夫定律 16

1.5.1 基尔霍夫电流定律 17

1.5.2 基尔霍夫电压定律 18

1.6 电路中电位的计算 21

习 题 23

第2章 电路的常用定理及基本分析方法 26

方法 26

2.1 等效变换的概念 26

2.1.1 电阻的等效变换 26

2.1.2 电源的等效变换 33

2.2 等效电源定理 38

2.2.1 戴维南定理 39

2.2.2 诺顿定理 41

2.3 最大功率传输定理 43

2.4 叠加定理 46

2.5 线性电路的基本分析方法 48

2.5.1 支路电流法 49

2.5.2 结点电压法 50

2.6 含受控源电路的分析计算 53

2.7 非线性电阻电路的分析 56

习 题 59

第3章 电路的暂态分析 64

3.1 电感元件与电容元件 64

3.1.1 电感元件 64

3.1.2 电容元件 66

3.2 换路定则及初始值的确定 69

3.2.1 换路及换路定则 69

3.2.2 初始值的确定 70

3.3 一阶电路暂态过程的分析方法 73

3.3.1 一阶电路微分方程的建立 73

3.3.2 一阶电路暂态分析的三要素法 77

3.4 一阶电路的几种常见响应 80

3.4.1 一阶电路的零输入响应 80

3.4.2 一阶电路的零状态响应 84

3.4.3 一阶电路的全响应 88

习 题 91

第4章 正弦交流电路 95

4.1 正弦交流电路的基本概念 95

4.1.1 频率和周期 96

4.1.2 幅值、瞬时值和有效值 96

4.1.3 初相位 97

4.2 正弦量的相量表示法 99

4.2.1 相量与正弦量 100

4.2.2 表示法 100

4.3 电阻、电感、电容元件的正弦交流电路 102

4.3.1 电阻元件的正弦交流电路 103

4.3.2 电感元件的正弦交流电路 104

4.3.3 电容元件的正弦交流电路 106

4.4 电阻、电感与电容元件的串联交流电路 110

4.5 阻抗的串联和并联 114

4.6 复杂交流电路的分析 118

4.7 谐振电路 120

4.7.1 串联谐振 120

4.7.2 并联谐振 123

4.8 交流电路的频率特性 124

4.8.1 低通滤波器 125

4.8.2 高通滤波器 126

4.8.3 带通滤波器 127

4.9 功率因数的提高 128

4.10 非正弦周期电压和电流 130

4.10.1 非正弦周期信号的分解	130	特性	182
4.10.2 非正弦周期电流电路的有效值、 平均值和功率	131	7.2.1 三相异步电动机的电路分析	182
4.10.3 非正弦周期交流电路的计算	132	7.2.2 三相异步电动机的转矩与机械 特性	184
习 题	134	7.3 三相异步电动机的使用	188
第 5 章 三相交流电路及安全用电		7.3.1 三相异步电动机的起动	188
常识	139	7.3.2 三相异步电动机的调速	193
5.1 三相电压	139	7.3.3 三相异步电动机的制动	196
5.1.1 三相电动势的产生	139	7.3.4 三相异步电动机的铭牌和额 定值	197
5.1.2 三相电源的连接	140	7.4 单相异步电动机	199
5.2 三相电路的分析和计算	142	7.4.1 单相异步电动机的工作原理	200
5.2.1 三相负载的连接	142	7.4.2 单相异步电动机的起动方法	201
5.2.2 星形联结的三相负载及中性线的 作用	143	习 题	201
5.2.3 三角形联结的三相负载	147	第 8 章 继电接触器控制系统	203
5.3 三相电路的功率计算与测量	148	8.1 常用的控制电器	203
5.3.1 三相电路的功率计算	148	8.1.1 组合开关	204
5.3.2 三相电路的功率测量	149	8.1.2 按钮	205
5.4 安全用电常识	151	8.1.3 交流接触器	206
5.4.1 电流对人体的危害	151	8.1.4 继电器	207
5.4.2 触电方式	151	8.1.5 熔断器	210
5.4.3 接地和接零	152	8.1.6 低压断路器	211
习 题	153	8.1.7 行程开关	212
第 6 章 磁路与变压器	156	8.2 三相异步电动机的基本控制电路	213
6.1 磁路的基本概念和基本定律	156	8.2.1 三相笼型电动机直接起动控制	214
6.1.1 磁路中的基本物理量	156	8.2.2 三相笼型电动机正反转控制	215
6.1.2 磁性材料的主要特性	157	8.2.3 三相笼型电动机行程控制	217
6.1.3 磁路的基本定律	160	8.2.4 三相笼型电动机的时间控制	218
6.1.4 磁路的计算	161	8.3 应用举例	218
6.2 交流铁心线圈	162	习 题	220
6.2.1 磁通与电压、电流的关系	162	部分习题参考答案	222
6.2.2 功率损耗	163	附录	228
6.2.3 交流铁心线圈的等效电路	164	附录 A 电阻器的命名方法、标称值及功率 等级	228
6.3 变压器	165	表 A-1 电阻器的命名方法	228
6.3.1 变压器的结构和工作原理	165	表 A-2 色标的基本色码及意义	228
6.3.2 变压器的外特性与效率	169	表 A-3 电阻器的标称值系列	229
6.3.3 变压器的使用	169	表 A-4 电阻器的功率等级	229
6.3.4 特殊变压器	172	附录 B 电容器的命名方法及标称容量 系列	230
习 题	175	表 B-1 电容器的命名方法	230
第 7 章 交流电动机	177	表 B-2 固定式电容器的标称容量系列	230
7.1 三相异步电动机的结构和工作原理	177	表 B-3 电容器的工作电压系列	230
7.1.1 三相异步电动机的结构	177	参考文献	231
7.1.2 三相异步电动机的工作原理	179		
7.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械			

第1章 电路的基本概念与基本定律

电路是电工技术和电子技术的理论基础。电路理论研究的对象是由理想元件构成的电路模型。本章说明了电路的组成、作用及工作状态，重点介绍电路中的基本概念、基本物理量和基本定律，主要讨论电流和电压的参考方向、基尔霍夫定律以及电路中电位的计算等。通过本章的学习，为后续分析复杂电路打下坚实的基础。

1.1 电路和电路模型

在人们的日常生活和生产实践中，电路无处不在。从手电筒、电饭煲、电视机、电冰箱、计算机到自动化生产线等都是由实际电路构成的。当前，集成电路的应用已渗透到各个领域，集成度越来越高，在很小的芯片上容纳的部件、器件数目越来越多，可达数百万或更多，这些元器件相互连接构成了复杂的电路系统。

电路（Circuit）是为了满足某种实际需要，由一些实际器件（例如电阻器、蓄电池、电容器、晶体管、集成元件等）按一定方式相互连接、构成电流通路的装置。比较复杂的电路呈网状，常称为网络（Network）。实际上，电路与网络这两个名词并无明显的区别，一般可以通用。但是，电路理论所研究的对象并不是由实际器件构成的实际电路，而是实际电路的科学抽象——电路模型（Circuit Model）。

1.1.1 电路的组成、作用及工作状态

1. 电路的组成

实际电路的组成方式很多，结构形式多种多样，电路器件的品种千差万别、日新月异。例如，用导线和开关将电池和小灯泡连接起来组成了照明用的手电筒，就是一个十分简单的电路。而有些实际电路非常复杂，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，它们形成了一个庞大而复杂的电路系统。但是，任何一个完整的实际电路，无论结构是十分简单，还是非常复杂，通常都是由电源、负载和中间环节三个部分组成。

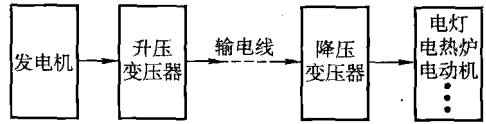
电源（Power Source）是为电路提供能量或电信号的电器设备。例如，把机械能、热能、水能或核能等其他形式的能转换为电能的发电机，将化学能转换成电能的蓄电池，将光能转换为电能的太阳能电池等，都是常见的提供电能的电源。另外，用来提供各类电信号的信号源也属于电源。负载（Load）是将电能转换为其他形式的能、并利用电能进行工作的用电设备。例如，将电能转换为光能的电灯，将电能转换为机械能的电动机，将电能转换为热能的电炉，将电能转换为声音输出的扬声器等，都是常见的负载。除了电源和负载外，电路中还有用来连接电源和负载的中间环节，它起传输、分配和控制电能和电信号的作用，例如开关、导线、控制电路中的保护设备、变压器等。

2. 电路的作用

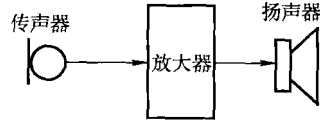
在电力系统、自动控制、电子通信、计算机以及其他各类系统中，电路的作用和功能有

不同的表现形式，但概括起来主要有两方面的作用。一方面是实现能量的转换，并实现电能的传输和分配，如图 1-1a 所示的电力系统。

首先，发电机将其他形式的能转换成电能，电能通过输电线进行传输，为了减少远距离传输过程中电能的损耗，要先利用升压变压器升压，进行高压传输。用户使用前，必须通过降压变压器降压，达到正常的工作电压后，才可以供给负载使用。显然，在电力系统整个工作过程中，通过电源、负载和中间环节三个组成部分来实现电能的转换和传输。电路另一方面的作用是实现信号的传递和处理。如图 1-1b 所示的扩音机，传声器（俗称话筒）先把语音或音乐等信息转换为相应的电压和电流，形成电信号。



a) 电力系统



b) 扩音机

图 1-1 电路示意图

显然，传声器是提供电信号的信号源。但这种电信号很微弱，必须通过中间环节——放大器进行“加工处理”，放大成足够大的电信号，然后通过电路传递到作为负载的扬声器，推动扬声器工作，把电信号还原成人们所需要的语音或音乐信号。又如收音机和电视机，它们的接收天线（信号源）把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号，然后通过电路对信号进行传递和处理（调谐、变频、检波、放大等），送到扬声器和显像管（负载），还原为原始信息。无论是扩音机、收音机还是电视机电路，都具有对信号进行转换、处理和传递的作用。

无论是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，其中推动电路工作的电源或信号源所提供的电压或电流称为激励（Excitation）。所以，电源或信号源也称为激励电源，简称激励源。由于激励源而在电路中形成的电压和电流称为响应（Response）。有时也根据激励与响应之间的因果关系，把激励源称为输入，响应称为输出。所谓电路分析，就是在已知电路的结构和元件参数的条件下，讨论电路的激励与响应之间的关系。

3. 电路的工作状态

电路可能具有三种工作状态，即通路、断路和短路。

1) 通路，也称为闭路。一般指电源与负载接通，电路构成闭合回路。电路中有电流通过，电气设备或元器件获得一定的电压和电功率，处于正常工作状态，进行能量的转换。

2) 开路，也称为断路。是指不构成闭合回路，电路中无电流流过的情况，又称为空载状态。

3) 短路，是指电路中不等电位的两点经电阻近似为零的导线直接相连的情况。

需要说明的是，开路和短路有时是人为的、正常的状态，有时可能是故障状态。当根据需要，通过控制电器切断电路，就是正常的断路，而其他偶尔的原因使电路切断则是故障状态。根据需要，将电路中某一部分短接，这是正常的短路，而由于其他意外的原因使电路的两个不同电位点短接，则是故障状态。发生短路故障时，电路中可能形成较大的短路电流，对电路的设备造成一定程度的损坏。特别是当电源两端用导线直接连接时，输出电流过大，对电源来说属于严重过载，如果没有采取保护措施，电源或电器会被烧毁，甚至发生火灾，所以通常要在电路或电气设备中安装熔断器等保险装置，以防止短路故障发生时出现不良后果。

1.1.2 电路模型

实际电路是由电磁特性相当复杂的各种实际电气器件组成的，如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等。它们在电路中工作时，所表现的物理特性并不是单一的。例如，一个实际的线绕电阻，当有电流通过时，除了对电流呈现阻碍作用之外，还在导线的周围产生磁场，因而兼有电感器的性质。同时还会在各匝线圈间存在电场，因而又兼有电容器的性质。所以，直接对由实际电气器件构成的电路进行讨论和研究，往往很困难，有时甚至无法进行计算。

为了便于分析，常常在一定条件下对实际器件加以近似化、理想化（或称模型化）。所谓理想化，就是只考虑其中起主要作用的某些电磁性质，而忽略其他次要现象，或者将一些电磁现象分别表示。例如在图 1-2a 所示的手电筒实际电路中，小灯泡不但发热而消耗电能，并且在其周围还产生一定的磁场，但是可以只考虑其消耗电能的性能而忽略其磁场；闭合的开关和较短的导线则只考虑导电性能而忽略其本身的电能损耗；干电池不仅在正负极间能保持一定的电压对外部提供电能，同时内部也有一定的电能损耗，但可以将它提供电能的性能与内部电能损耗分别表示。

因此，为了便于使用数学方法对电路进行分析，可将实际电路中的各种电器设备和元器件用一些能够表征它们主要电磁特性的理想元件模型来代替，这些定义的理想电路元件模型，简称为**电路元件**（Circuit Element）。每种电路元件体现了某种电学现象，具有某种确定的电磁性能和精确的数学定义，而对器件实际上的结构、材料、形状等非电磁特性不予考虑。

例如，电阻元件是一种反映将电能转换成热能或其他能量，即消耗电能的元件；电感元件是反映电路周围存在磁场，而且可以存储磁场能量的元件；电容元件是反映电路附近存在电场，而且可以存储电场能量的元件；电压源是一种表示以电压形式向电路提供电能的元件等。这些电路元件通过端子（Terminal）按一定的方式互相连接。具有两个端子的元件，称为**二端元件**；具有两个以上端子的元件，称为**多端元件**。在一定的工作条件下，由理想电路元件或它们的组合代替实际电路器件、按照一定的结构连接而成的电路，就是实际电路的**电路模型**。它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。（理想）电路元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定电磁性质的基本结构。电路元件及它们的组合足以模拟实际电路中发生的物理过程。将各种电路元件用统一规定的图形符号表示，并用电阻为零的“理想导线”连接各电路元件的端子，就构成电路模型图，也叫电路原理图，简称电路图或电路。电路图是进行电路分析计算的研究对象。

图 1-2a 所示为一个简单的手电筒实际电路。用导线将干电池、开关、小灯泡连接起来，为电流流通提供了路径。其电路图如图 1-2b 所示，图中的电阻元件 R 作为小灯泡的电路模型，反映了小灯泡将电能转换为光能的电磁特性。用电压源 U_s 和电阻元件 R_0 的串联组合作为干电池的电路模型，分别反映了将干电池内储存的化学能转换为电能以及电池本身消耗能量的物理过程。用线段表示连接导线，用 S 表示忽略本身电能损耗的开关。

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立其电路模型的过程，简称建模。实际器件和电路的种类繁多，而电路元件却只有有限的几种，用电路元件建立的电路模型给实际电路的分析带来了方便，大大简化了电路的分析。建立实际器件的理想元件模型时，必须考虑工作条件，并按不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理特征和现象反映出来。

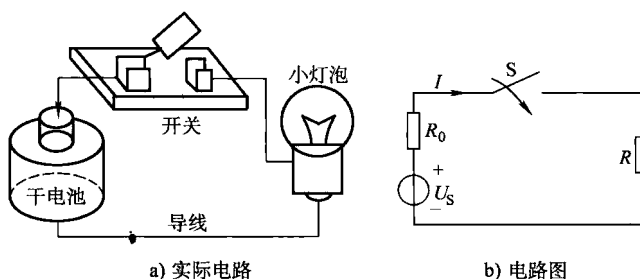


图 1-2 手电筒的实际电路及电路图

理想元件与相应的实际器件主要的电磁特性应相同或接近。为了突出主要特性、使问题简化，往往忽略实际器件的一些次要的性能，因此，理想电路元件和实际器件不一定也不可能完全相同。例如，一个线圈在直流环境下工作，就只需考虑线圈内电流引起的能量消耗，它的模型就是一个电阻元件；在电流变化的情况下（包括交变电流），线圈电流产生的磁场会引起感应电压，此时相应的电路模型除电阻元件外，还应包含一个与之串联的电感元件；当电流变化很快时（包括高频交流），则还要考虑线圈导体表面的电荷作用，即电容效应，所以其模型中还需要包含电容元件。可见，在不同的工作条件下，同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得恰当，对电路进行分析计算的结果就与实际情况接近；模型取得不恰当，则会造成很大误差，甚至导致错误的结果。如果模型取得过于复杂，则会造成分析困难；取得过于简单，则可能无法反映真实的物理现象。一般地说，对电路模型的近似程度要求越高，电路模型也越复杂。所以建立电路模型一般应指明它们的工作条件，如频率、电压、电流和温度范围等。另一方面，不同的实际器件在不同条件下，只要主要的电磁特性相同，就可以用相同的理想元件模型来代替。例如，电热炉、电烙铁、风扇等不同的电器，当只考虑它们消耗电能的电磁特性时，都可以用一个电阻元件来代替。

【思考与练习】

- 1.1.1 电路的作用有哪些？电路由哪些部分组成？具有哪几种工作状态？
- 1.1.2 在建立电路元件模型时要注意什么问题？

1.2 电路的基本物理量

实际电路常借助于电压、电流来完成传输电能或信号、处理信号、测量、控制、计算等功能。研究电路的基本规律，首先应掌握电路中的电流、电压和电功率等基本物理量。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流

带电粒子（电子、离子等）的有序运动就形成电流（Current）。电流是一种物理现象，又是一个既有大小又有方向的基本物理量。电流定义为通过导体横截面的电荷量与所需时间之比，即电流在大小上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量，用公式表示为

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

式中, i 表示电流; q 表示电荷量或电量; dq 是在 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

习惯上, 规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向作为电流的方向, 就是电路中电流的实际方向。

如果电流的大小和方向都不随时间而变, 则这种电流称为直流电流 (Direct Current), 简称直流 (DC)。直流电流用大写字母 I 表示, 式 (1-1) 改写为

$$I = \frac{q}{t}$$

式中, q 是在 t 时间内通过导体横截面的电荷量。

大小和方向均随时间变化的电流称为变化电流, 用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示。如果电流随时间按正弦或余弦规律变化, 一个周期内电流的平均值为零, 这样的变化电流称为正弦交流电流 (Alternate Current), 简称交流 (AC), 也用 i 或 $i(t)$ 表示。

国际单位制 (SI) 中, 电流 i 的单位为 A (安培)。电荷量 q 的单位为 C (库仑)。规定 1s (秒) 内通过导体横截面的电量为 1C 时, 电流为 1A。电流常用的单位还有 kA (千安)、mA (毫安)、 μ A (微安) 等。它们之间的关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

2. 电流的参考方向

电路中一条支路的电流只可能有两个方向, 如果某条支路的两个端子分别为 a 和 b, 则其电流的方向不是从 a 到 b, 就是从 b 到 a。电流的实际方向是客观存在的, 分析简单电路时, 可以由电源的极性判断电路中电流的实际方向。但在分析较为复杂的电路时, 往往事先难于判定支路中电流的方向。另外, 对于方向随时间而变的交流电流, 无法用一个固定方向表示它的实际方向。为此, 先任意假定电流的某个方向作为分析与计算时的参考, 称为电流的参考方向 (Reference Direction)。设定了参考方向以后, 电流就是一个有正负值的代数量。在参考方向下, 通过电路定律或定理求得的电流若为正值, 则电流的实际方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则电流的实际方向与参考方向相反。这样就可以根据电流值的正负以及选定的参考方向来确定电流的实际方向。应当注意, 在未规定参考方向的情况下, 电流的正负号是没有意义的。

电路中电流的参考方向一般用箭头表示在电路图上, 并标以电流符号 i 或 I , 如图 1-3a 所示。也可以用双下标表示, i_{ab} 表示电流参考方向是由 a 到 b, 如图 1-3b 所示。如果参考方向选为由 b 指向 a, 则为 i_{ba} , 如图 1-3c 所示, 显然, $i_{ab} = i_{ba}$ 。

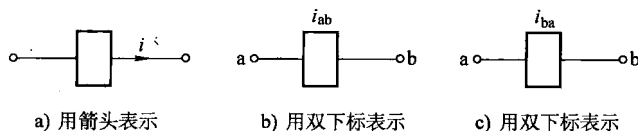


图 1-3 电流的参考方向

1.2.2 电压、电位及电动势

1. 电压及其参考方向

正电荷在电场力的作用下, 由 a 点转移到 b 点, 电场力所作的功与电荷量的比值, 称为

电压 (Voltage), 用公式表示为

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

式中, u_{ab} 表示 a、b 两点间的电压; dq 表示由 a 点转移到 b 点的电荷量; dW 为转移过程中电场力所作的功。电压反映了将单位正电荷由 a 点转移到 b 点所需要的能量。

在电场力作功的转移过程中正电荷具有的电位能减少, 电位能减少意味着从高电位点到低电位点, 所以电位降低的方向为电压的方向。电压也是既有大小又有方向 (极性) 的基本物理量。

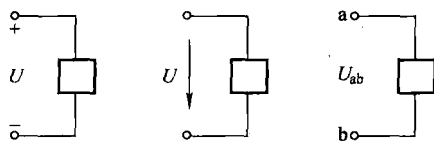
在国际单位制 (SI) 中, 电压的单位是 V (伏特)。当电场力把 1C 的正电荷从一点转移到另一点所做的功为 1J (焦耳) 时, 则该两点间的电压为 1V。计量小的电压时, 则以 mV (毫伏) 或 μV (微伏) 为单位; 计量高电压时, 则以 kV (千伏) 为单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

按电压随时间变化的情况, 可分为直流电压的和交流电压。通常, 直流电压用大写字母 U 表示, 交流电压用小写字母 u 表示。

与电流类似, 在分析电路时, 也需要先任意假定电压的参考方向。选定电压的参考方向后, 经分析计算得到的电压也成为有正、负的代数量。若电压为正值, 则电压的实际方向与参考方向一致; 若电压为负值, 则电压的实际方向与参考方向相反。这样, 就可以利用电压的正负值和假定的参考方向来确定电压的实际方向 (极性)。电压的参考方向可任意设定, 一般有三种表示方式:

(1) 参考极性表示法 在电路图上标出正 (+)、负 (-) 极性, 并标以电压符号 u 或 U 。如图 1-4a 所示, 电压的参考方向从正 (+) 极性指向负 (-) 极性。



a) 用极性表示 b) 用箭头表示 c) 用双下标表示

图 1-4 电压的参考方向

(2) 箭头表示法 采用箭头表示电压的参考方向, 由高电位端 (+ 极性) 指向低电位端 (- 极性), 并标以电压符号 u 或 U 。如图 1-4b 所示。

(3) 双下标表示法 如图 1-4c 所示, U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b。而 U_{ba} 则表示电压的参考方向是由 b 指向 a, $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

选定参考方向后, 才能对电路进行分析计算, 电压的正、负值才有意义。

关于电流、电压的参考方向, 需要注意以下几个问题:

1) 电流、电压的实际方向是客观存在的, 但往往难于事先判断。在分析问题时需要先假定电流、电压的方向, 也就是要先人为选定参考方向, 然后根据设定的参考方向进行电路分析计算, 列写关于电流、电压的方程。

2) 没标明参考方向的情况下, 电流或电压的正、负值是没有意义的。

3) 参考方向一经选定, 整个分析计算过程都以此为基准, 不能随意变动。

4) 参考方向可以任意选定而不会影响计算结果, 选择的参考方向相反时, 求解出的电流或电压值相差一个负号, 但最后实际得到的结果是相同的。

5) 电流参考方向和电压参考方向可以分别独立地任意设定。但为了分析方便, 常使同

一元件的电流参考方向与电压参考方向一致，即电流从电压的正极性（参考高电位）端流入该元件，而从它的负极性（参考低电位）端流出，如图 1-5a 所示。当同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致时，称为**关联（Associated）**参考方向。反之，当电流的参考方向与电压的参考方向相反时，则为**非关联**参考方向，如图 1-5b 所示。一般情况下，同一个元件的电流和电压的参考方向选为关联方向，可以只标注其中一个量的参考方向，另一个量的参考方向默认为相一致的关联方向，不需标注出来。

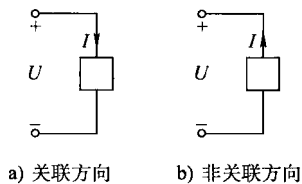


图 1-5 电流、电压的参考方向

2. 电位

在电路中任选一点 o 为**电位参考点（Reference Node）**，则某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 就称为 a 点（相对于参考点）的**电位（Potential）**，用 V_a 表示。参考点 o 的电位为零，即 $V_o = 0$ 。

电位是一个相对的量，其大小一般随着参考点的改变而变化。所以在计算电路中各点电位时，必须先选定电路中某一点作为**电位参考点**，即**参考零电位点**。电位的参考点可以任意选取，选择的参考点不同，各点电位的量值也就不同。但为了测量的方便，通常以大地为参考点，线路中所有接地的点均为零电位点。一些有金属外壳的设备，由于外壳接了地，所有与外壳相接的点也就是零电位点了。而采用塑料外壳的仪器设备的电路一般与大地没有直接连通的点，通常规定电路中多个元件汇集的公共点为零电位点。如电子线路中的“地”就是这样的公共点。任何一个电路，无论复杂程度如何，电位参考点只能选一个。参考点在电路图中标上“接地”符号，或用“ $\perp$ ”符号标记。所谓“接地”，并非都真与大地相接，只是该点为参考零电位点。

电路中任意两点 a 、 b 间的电压等于这两点电位之差，所以，电压又称**电位差**。即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

显然，电路中任意一点 a 的电位实际上就是该点与参考点 o 间的电压，即

$$U_{ao} = V_a - V_o = V_a - 0 = V_a \quad (1-4)$$

引入电位的概念之后，电压的实际方向规定为由高电位（“+”极性）端指向低电位（“-”极性）端，即为**电位降低**的方向。

根据式（1-3），可由电路上各点电位求得相应各段的电压。电压是针对电路中某两点而言的，与路径无关，与参考零电位点的选取也无关。在电路选定参考点后，也可由电路各段电压求得电路各点的电位。而电位的量值与参考点的选择有关，电位是有正负值的代数量。电路中各点电位的正、负、大、小都是相对选定的零参考点而言的，比零参考点高，电位为正；比零参考点低，电位为负。正数值愈大则电位愈高，负数的绝对值愈大则电位愈低。这就如同地球上各处的海拔高度都是相对某一海平面而言的一样。

在国际单位制（SI）中，电位的单位与电压一样，也为 V （伏特）。

3. 电动势

电路中，在电场力作用下，正电荷一般总是从**高电位点**向**低电位点**运动。为了形成连续的电流，就要求在电源中有一个**电源力**作用在正电荷上，使正电荷逆着电场力方向运动，从低电位点移到高电位点，并把其他能量转换成电能。用来描述电源将其他形式的能量转换成电能能力的物理量称为**电动势（Electromotive Force）**，它反映了单位正电荷在电源力作用下，从低电位点转移到高电位点时所增加的电能。用符号 e 表示，即

$$e = \frac{dW_s}{dq} \quad (1-5)$$

式中, dq 表示转移的电荷量; dW_s 为转移过程中正电荷增加的电能。

电能增加体现为电位从低电位点升高到高电位点, 所以电动势的方向规定为在电源内部由低电位 (“-” 极性) 端指向高电位 (“+” 极性) 端, 即为电位升高的方向。而电压 u 的方向是从高电位 (“+” 极性) 端指向低电位 (“-” 极性) 端, 即为电位降低的方向, 两者刚好相反。根据能量守恒定律, 如果不考虑电源内部还可能还有其他形式的能量转换, 则电动势 e 在量值上应与电压 u 相等。虽然电动势与电压的物理意义并不相同, 但就其对外部的效果而言, 一个电源既可以用从负极性指向正极性的电动势来表示, 也可以用正极性指向负极性的电压表示, 二者量值相同, 是没有区别的, 所以近代电路理论中逐渐淡化了电动势这个量, 但在电力工程和专业课程中, 电动势这个概念还是有广泛的应用。

与电压相同, 电动势也可分为直流、交流两大类, 分别用符号 E 和 e 表示。电动势的单位也是 V (伏特)。

当采用电动势分析电路时, 同样需要先假定电动势的参考方向。它也有三种表示方式:

(1) 参考极性表示法 电动势的参考方向是负 (-) 极性指向从正 (+) 极性, 并标以电动势符号 e 或 E 。

(2) 箭头表示法 采用箭头表示电动势的参考方向, 并标以电动势符号 e 或 E 。

(3) 双下标表示法 e_{ab} 表示电动势的参考方向是由 a 指向 b 。

4. 电功率

电路中, 设 a 、 b 两点间的电压为 u , 在电场力的作用下, 正电荷 dq 从高电位点 a 移向低电位点 b , 则在转移过程中 dq 转换的电能为

$$dW = udq \quad (1-6)$$

单位时间内, 电路元件上能量的变化称为电功率。它反映了电能转换的快慢, 简称为功率 (Power), 用字母 p 表示。在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位是 W (瓦)。规定 1s 内提供或消耗 1J 能量时的功率为 1W。常用的功率单位还有 kW (千瓦)。根据功率的定义, 有

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-7)$$

把式 (1-1) 和式 (1-6) 代入式 (1-7) 中, 整理得

$$p = ui \quad (1-8)$$

直流电路中, 功率的计算式表示为

$$P = UI \quad (1-9)$$

利用式 (1-8) 或式 (1-9) 对电路进行功率计算时, 必须注意电压、电流的参考方向为关联方向。如果电压、电流的参考方向选为非关联方向, 则功率的计算式要加一个负 (-) 号, 即

$$p = -ui \quad \text{和} \quad P = -UI \quad (1-10)$$

通过式 (1-8)、式 (1-9) 或式 (1-10), 就可以求得某元件 (或部分电路) 上的功率 p 或 P 。如果计算所得的功率为正值, 则表示该元件 (或部分电路) 吸收或消耗了功率, 称该元件 (或部分电路) 为负载; 如果功率为负值, 则表示该元件 (或部分电路) 提供或产生了功率, 称该元件 (或部分电路) 为电源。根据能量守恒定律, 在一个完整的封闭电路

中，所有电源产生的总功率等于所有负载吸收功率的总和，用公式表示为

$$\sum P_{\text{产生}} = \sum P_{\text{吸收}}$$

在电路的分析中，功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换；另外，电气设备、电路器件本身都有额定功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值。所谓额定值，就是制造厂为了使各种电气器件能在给定的工作条件下，可靠又能充分发挥性能地运行而规定的正常容许值，包括额定电压、额定电流和额定功率等参数。许多器件在额定电压或额定电流下才能正常、合理、可靠地工作，电压超过额定值过多时，器件容易损坏。也不应超过其额定电流或额定功率，否则时间稍长就可能因过热而烧坏。反之，如果电压和电流远低于其额定值，则功率不足，不仅不能正常工作，而且也不能充分利用设备的能力。例如白炽灯变暗、电烙铁温度较低等。因此，制造厂在制定产品的额定值时，要全面考虑使用的经济性、可靠性以及寿命等因素，特别要保证设备的工作温度不能超过规定的容许值。由于功率、电压和电流之间有一定的关系，所以在给出额定值时，没有必要全部给出。例如对白炽灯、电烙铁等通常给出额定电压和额定功率，而对于电阻器除给出电阻值外，只给出额定功率。电气设备或器件的额定值常标在铭牌上或写在其他说明中。额定电压、额定电流和额定功率分别用 U_N 、 I_N 和 P_N 表示。例如一把电烙铁，标有 220V、45W，则使用时不能接到 380V 的电源上。

在一定电压下，电源输出的功率和电流决定于负载的大小，就是负载需要多少功率和电流，电源就给多少，所以电源会出现波动，电气设备或器件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。所以，电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值，但要保证实际工作电压、电流或功率不应超过额定值，也不能过多地低于额定值。

例 1-1 在图 1-6a 所示电路中，有 5 个元件。每个元件流经的电流以及每个元件两端电压的参考方向如图所示。 $I_1 = -4\text{A}$ 、 $I_2 = 6\text{A}$ 、 $I_3 = 10\text{A}$ 、 $U_1 = 140\text{V}$ 、 $U_2 = -90\text{V}$ 、 $U_3 = 60\text{V}$ 、 $U_4 = -80\text{V}$ 、 $U_5 = 30\text{V}$ 。(1) 试标出各电流和各电压的实际方向（可另画一图）；(2) 计算各元件的功率，并判断哪些元件是电源？哪些是负载？(3) 电源产生的功率和负载吸收的功率是否平衡？

解：(1) 当电流或电压的数值大于零时，其实际方向与所标的参考方向相同；数值小于零时，其实际方向与所标的参考方向相反。则各电流的实际方向和各电压的实际方向如图 1-6b 所示。

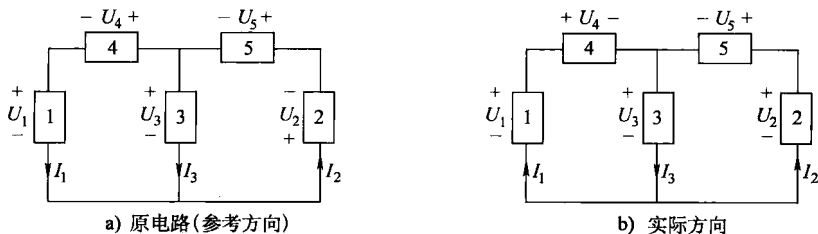


图 1-6 例 1-1 的电路

(2) 图 1-6a 中各元件的电压、电流参考方向一致，由式 (1-9) 计算关联方向下各元件的功率

$$\begin{aligned}
 P_1 &= U_1 I_1 = 140 \times (-4) \text{ W} = -560 \text{ W} && \text{产生功率, 电源} \\
 P_2 &= U_2 I_2 = (-90) \times 6 \text{ W} = -540 \text{ W} && \text{产生功率, 电源} \\
 P_3 &= U_3 I_3 = 60 \times 10 \text{ W} = 600 \text{ W} && \text{吸收功率, 负载} \\
 P_4 &= U_4 I_1 = (-80) \times (-4) \text{ W} = 320 \text{ W} && \text{吸收功率, 负载} \\
 P_5 &= U_5 I_2 = 30 \times 6 \text{ W} = 180 \text{ W} && \text{吸收功率, 负载}
 \end{aligned}$$

(3) 由 (2) 计算的结果可得

$$\Sigma P_{\text{产生}} = P_1 + P_2 = (560 + 540) \text{ W} = 1100 \text{ W}$$

$$\Sigma P_{\text{吸收}} = P_3 + P_4 + P_5 = (600 + 320 + 180) \text{ W} = 1100 \text{ W}$$

$$\Sigma P_{\text{产生}} = \Sigma P_{\text{吸收}}$$

显然, 电源产生的功率和负载吸收的功率平衡。验证了能量守恒定律。

例 1-2 图 1-7 所示的部分直流电路中, $I = 4 \text{ A}$ 、 $U_1 = 2 \text{ V}$ 、 $U_2 = -4 \text{ V}$ 、 $U_3 = 3 \text{ V}$, 试求各元件的功率 P_1 、 P_2 和 P_3 , 并求整个电路的功率 P 。

解: 元件 1 的电压与电流为关联参考方向, 由式 (1-9) 得

$$P_1 = U_1 I = 2 \times 4 \text{ W} = 8 \text{ W} \quad (\text{消耗功率})$$

元件 2 和元件 3 为非关联参考方向, 由式 (1-10) 得

$$P_2 = -U_2 I = -(-4) \times 4 \text{ W} = 16 \text{ W} \quad (\text{消耗功率})$$

$$P_3 = -U_3 I = -3 \times 4 \text{ W} = -12 \text{ W} \quad (\text{提供功率})$$

整个电路的功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (8 + 16 - 12) \text{ W} = 12 \text{ W} \quad (\text{消耗功率})$$

所消耗的这部分功率由外电路提供。

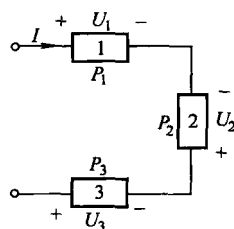


图 1-7 例 1-2 的电路

【思考与练习】

1.2.1 试分析比较电压、电位、电位差和电动势这些基本物理量之间的区别与关系。

1.2.2 在图 1-8 所示电路中, 计算各元件的功率, 并判断哪些元件是电源? 哪些是负载?

1.2.3 有人说“电路中, 没有电压的地方就没有电流, 没有电流的地方也就没有电压”。这句话对吗? 为什么?

1.2.4 把一个 36V、15W 的灯泡接到 220V 的线路上工作行吗? 把 220V、25W 的灯泡接到 110V 的线路上工作行吗? 为什么?

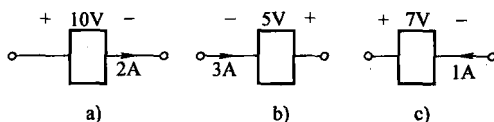


图 1-8 思考与练习 1.2.2 的电路

1.3 电阻元件

电路理论研究讨论的对象并不是由实际器件构成的实际电路, 而是实际电路的电路模型。电路模型由理想电路元件通过其端子按一定的结构相互连接而成。电路元件是电路中最基本的组成单元。研究电路必须先了解各电路元件的特性, 而元件的电学特性是通过与其端子有关的基本物理量 (电压、电流等) 来描述的。本节重点介绍理想电路元件 (简称元件) 中最主要、也是最常见电阻元件的基本电学特性。