

高等教育机电类规划教材

电工技术

(电工学 I)

高福华 主编

第4版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等教育机电类规划教材

电 工 技 术

(电 工 学 I)

第 4 版

高福华 主编

孙立功 戴 燕 副主编



机 械 工 业 出 版 社

本套教材是为适应 21 世纪电工、电子技术课程教学改革的需要而编写的,分《电工技术》、《电子技术》两册出版。

《电工技术》共十一章,分别是:电路的基本知识,电路的分析方法,正弦交流电路,三相电路,电路的频域分析,电路中的暂态过程,磁路、铁心线圈电路与变压器,电动机,电动机的继电器-接触器控制,电工测量,可编程控制器。每章均有小结、习题,且在大部分节后配有练习思考题。本书符号一律采用现行的国家标准,并附有常用电工元器件的图形符号、文字代号、技术数据等。书后有部分习题答案。

本书读者对象是机电类专业的大学生,亦可供其他非电专业的大学生使用,并可作为工程技术人员系统学习电工技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术(电工学 I)/高福华主编. —4 版. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

高等教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-27878-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 130171 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:曾红 责任编辑:曾红 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009 年 8 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17 印张·418 千字

0 001—5 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27878-8

定价:29.00 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) 88379734

封面无防伪标均为盗版

《电工技术》、《电子技术》教材编审组成员

组 长：	高福华	吉林大学	教授
副组长：	罗会昌	合肥工业大学	教授
	周新云	江苏大学	副教授
	孙立功	河南科技大学	副教授
	戴 燕	长春理工大学	副教授
组 员：	范振铨	沈阳工业大学	教授
	陈正传	江苏大学	教授
	刘朝阳	华北工学院	教授
	李秀芬	长春理工大学	教授
	赵不赅	江苏大学	教授
	邵敏权	长春工业大学	教授
	陈万忠	吉林大学	教授
	丛玉良	吉林大学	教授
	蒋 中	安徽建筑工业学院	教授
	闫保定	河南科技大学	教授
	常通义	河南科技大学	副教授
	杨晓萍	吉林大学	副教授
	李炳彦	西安理工大学	副教授
	马红杰	合肥工业大学	副教授
	刘 春	合肥工业大学	副教授
	江 萍	合肥工业大学	副教授
	李玉长	合肥工业大学	副教授
	黄知超	桂林电子工业学院	副教授
	孙向文	河南科技大学	讲师
	尹均萍	合肥工业大学	讲师
	陈 山	江苏大学	讲师
	罗 珣	合肥工业大学	讲师

前 言

《电工技术》和《电子技术》是一套两册教材。第1版都是1987年出版的，后来修订过两次，于2004年出了第3版，截至2007年共印刷过12次。这套教材编写的指导思想、内容取舍的原则以及完整体系的建立，都是由原机械电子工业部部属高等院校电工技术、电子技术课程协作组组织部内外各院校的教师，经过多次研讨和反复审校后确定的，所以该套教材实际上是多所高等院校电工技术、电子技术课程教师的集体成果。

电工技术是一门重要的技术基础课。为适应21世纪教学内容改革的需要，体现教材与时俱进的特点，现在修订出版此书的第4版。这一版除对部分章节有所修改或从不同的角度予以阐述外，增加了“绪论”部分，“电工测量”一章修改的篇幅也较大。在“绪论”中编进了电工技术发展简史与我国古代在磁学方面的贡献，目的是希望学生读后能进一步激发他们热爱科学技术和自立自强的爱国主义精神。本书的使用对象是机电类专业的大学生和其他非电专业的大学生，亦可供工程技术人员学习使用。

我们认为，传授一门课程不应仅仅局限在对本门课程的认知上。基于这样的考虑，在编写本教材时，如果某些方法和理论是自然界的普适规律在电工领域的具体应用，我们就会强调一下这些规律的普适性，并简略地介绍它们在其他领域的应用。这虽然只是多说了很少的几句话，但意义深远。一方面有助于学生认知自然界的和谐统一，使辩证唯物主义的方法论和认识论能够潜移默化地融进学生的思维意识中，同时也扩大了他们的知识视野，对他们综合素质的提高会有所裨益。

本书是按照教育部（原国家教育委员会）1995年颁发的“电工技术（电工学Ⅰ）”教学基本要求〔60~70学时类型（含实验学时）〕编写的。教学中讲课与实验的比例约为5:2。

本着“精选内容、打好基础、加强实验、培养能力”的宗旨，编者把教材的重点放在基本理论、方法、概念和电工元器件的外部特性及其应用知识等方面，并适当提高了起点，避免与物理学中的有关内容产生不必要的重复。为了兼顾不同专业的需要，尽量接近工程实际，书中编进了一些选修内容（标题前注*号），教学时可根据需要选用。本书的电路图形符号和文字代号均采用现行的国家标准。

由于原来参加本书编写的人员中有的工作有所变动，经过协商，此次修订再版时，作了一些调整。本书共分十一章。绪论、第六章由吉林大学高福华编写，第一章和第五章由长春理工大学戴燕编写，第二章、附录由吉林大学丛玉良编写，第三章由河南科技大学孙立功编写，第四章由合肥工业大学马红杰编写，第七章由吉林大学杨晓萍、陈万忠编写，第八章由长春工业大学邵敏权编写，第九章由河南科技大学孙向文编写，第十章由江苏大学陈山编写，第十一章由吉林大学杨晓萍编写。全书由高福华担任主编，孙立功和戴燕担任副主编。由合肥工业大学罗会昌、江苏大学赵不赓担任主审。参加本书审稿的还有沈阳工业大学范振

铨、华北工学院刘朝阳、长春理工大学李秀芬、河南科技大学常通义、北京机械工业学院毕绍光、桂林电子工业学院黄知超。主审和审稿者认真审阅了书稿，并提出了许多宝贵建议，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一章 电路的基本知识	3
-------------------	---

第一节 电路及其模型	3
第二节 电路分析中的若干规定	5
第三节 电阻、电感和电容	8
第四节 电压源和电流源	13
第五节 基尔霍夫定律	16
第六节 电路中电位的计算	19
小 结	20
习 题	20

第二章 电路的分析方法	25
-------------------	----

第一节 支路电流法	25
第二节 电压源与电流源的等效变换	26
第三节 弥尔曼定理	28
第四节 叠加原理	29
第五节 戴维南定理	31
* 第六节 γ - Δ 联结电路的等效变换	34
第七节 含受控源电路的分析	35
第八节 非线性电阻电路及其分析方法 简介	37
小 结	39
习 题	40

第三章 正弦交流电路	44
------------------	----

第一节 正弦交流电的基本概念	44
第二节 正弦量的相量表示法及其运算	46
第三节 单一参数元件的正弦响应	50
第四节 R 、 L 、 C 串联电路的正弦 响应	57
第五节 复阻抗的串联和并联	61
第六节 功率因数的提高	65
第七节 相量图在电路分析中的 应用	67
第八节 复杂正弦交流电路的分析 方法及举例	69
小 结	71
习 题	72

第四章 三相电路	76
----------------	----

第一节 三相电源	76
第二节 负载 γ 联结的三相电路	78
第三节 负载 Δ 联结的三相电路	82
第四节 三相电路的功率	86
第五节 安全用电技术	88
小 结	92
习 题	92

第五章 电路的频域分析	95
-------------------	----

第一节 R 、 C 电路的频域分析	95
第二节 谐振电路	98
第三节 非正弦周期信号的谐波分析	103
小 结	109
习 题	110

第六章 电路中的暂态过程	112
--------------------	-----

第一节 概述	112
第二节 电压、电流初始值和稳态 值的确定	114
第三节 R 、 C 串联电路中的暂态过程	116
第四节 求解一阶电路的三要素法	122
第五节 R 、 C 串联电路对矩形波电压的 响应	124
第六节 R 、 L 串联电路中的暂态过程	127
* 第七节 拉普拉斯变换	131
* 第八节 运算法	135
小 结	141
习 题	142

第七章 磁路、铁心线圈电路与变	
-----------------	--

压器	145
----------	-----

第一节 磁路的基本知识	145
第二节 直流铁心线圈	149
第三节 交流铁心线圈	150
第四节 变压器	153
第五节 电磁铁	161
小 结	163
习 题	163

第八章 电动机	166
---------------	-----

第一节	三相异步电动机的基本构造	166	第四节	电动系测量机构和功率的测量	220
第二节	三相异步电动机的转动原理	167	第五节	电阻的测量	224
第三节	三相旋转磁场	169	第六节	电感和电容的测量	227
第四节	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	171	第七节	万用表	228
第五节	三相异步电动机的铭牌和技术数据	175	小 结	231	
第六节	三相异步电动机的起动、反转、调速和制动	177	习 题	232	
* 第七节	单相异步电动机	183	第十一章 可编程序控制器	233	
* 第八节	直流电动机	185	第一节	可编程序控制器的基本结构	233
* 第九节	他励直流电动机的机械特性	186	第二节	可编程序控制器技术性能介绍	234
* 第十节	他励直流电动机的起动、反转和调速	188	第三节	FP1 可编程序控制器的基本指令	237
* 第十一节	电动机的选择	190	第四节	可编程序控制器的基本应用	243
* 第十二节	控制电机	192	小 结	247	
小 结	196	习 题	247		
习 题	197	附录	250		
第九章 电动机的继电器-接触器控制	200	附录 A	常用电动机、电器、电源的图形符号与文字代号	250	
第一节	常用控制电器与电气图形符号	200	附录 B	异步电动机常用型号说明	251
第二节	电动机的基本控制环节和保护环节	203	附录 C	CJ20 系列交流接触器主要技术数据	251
第三节	电动机的基本控制原则	206	附录 D	JR20 系列热继电器主要技术数据	252
第四节	电气原理图的阅读要点	211	附录 E	RL1 和 RC1 型熔断器的技术数据	253
小 结	212	附录 F	JS7 系列空气式时间继电器技术数据	254	
习 题	212	附录 G	JLXK1 系列行程开关的技术数据	254	
第十章 电工测量	214	附录 H	LA19 系列按钮的技术数据	254	
第一节	基本知识	214	附录 I	Y 系列三相异步电动机 (部分型号) 技术数据	255
第二节	磁电系测量机构和直流电流、直流电压的测量	218	部分习题答案	256	
第三节	电磁系测量机构和交流电流、交流电压的测量	219	参考文献	263	

绪 论

电工技术是研究电能、电学量信息在科技领域中应用的科学，它是一门非电专业的技术基础课。

一、电能的应用

电能的应用极其广泛。随着时代的前进、科技的发展，它在国民经济领域中还会获得更加广泛的应用，它所占的地位将会变得越来越重要。事实上，工农业生产、国防科技、医药卫生乃至人们的日常生活中的衣、食、住、行、文化娱乐无一能离开电能。21 世纪是个信息时代，而信息的转换、传输和处理几乎都是用电学量来进行的。所以，电工技术的重要性是不言而喻的。大学生是将来振兴中华、建设祖国的主力队员，因此不可以不懂得电工技术知识，不可以不会应用电工技术知识。

二、电能的优越性

电能所以能获得如此广泛的应用，是由它本身固有的优越性决定的。

1. 容易转换

电能可以较容易地从其他形式的能量，诸如机械能、热能、化学能、原子能、光能、风能等转换而来，也可以很容易地转换成其他形式的能量。就电能自身而言，高压和低压、交流和直流、各种不同波形之间的转换也都是较为容易的。作为新兴学科并获得迅速发展的传感技术也几乎都是把非电量（长度、温度、时频、声、光、放射线、力学量和物理化学量等）和电学量之间的相互转换作为其工作的基础。

2. 便于传输分配

能源的产生地和能源的用户通常并不在同一个地方。城市、工厂、广大农村等都需要电能，而水力资源、煤、石油、天然气等的产地往往相对集中并与之相距甚远。上述集中和分散的矛盾利用远距离输电和配电得到了很好的解决。电能传输迅速、效率高、分配容易，这就是电力网纵横交错布满世界各地的原因。

电能也是信息的载体。图像、声音等都是靠电磁波作为载体来传输的。

3. 控制自如

电学量具有传递迅速、处理方便等许多优点。正因为这样，复杂的生产机械、数控加工中心、柔性系统等都是用电学量进行控制的。而管理过程的自动化、遥控遥测、远程通信等也几乎全是以电学量作为信息载体来进行的。

三、我国古代在磁学方面的贡献

相传轩辕黄帝大战蚩尤于涿鹿之野，黄帝靠指南车战胜了蚩尤的雾阵（见《太平御览》）。但这只是神话传说，无可稽考。然而远在春秋战国时代，我国对磁学的认识就已有明确的记载了。例如《吕氏春秋·精通篇》就写有：“磁石召铁，或引之也”，说明当时已经知道磁石的吸铁作用。而管子在其《地数篇》中指出：“上有磁石者，下有铜金”，则已晓得各种矿藏间的联系。韩非子的《有度篇》：“故先王立司南，以端朝夕”；汉代王充的《论衡·是应篇》：“司南之勺，投之于地，其柄指南”。二者明确地指出了磁石的制物——

司南在定时、定向方面的应用。

宋代沈括的《梦溪笔谈》中谈到了地磁偏角的存在，说“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常偏东，不全南也”。这和我们现在知道的磁偏角的方向一致。《武经总要》曾记载人造磁石的方法：“鱼法以薄片剪裁，长二寸，阔五寸，首尾锐如鱼形，置炭火中烧之，候通赤，以铁钤钤鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没尾数分则止，以密器收之。用时置水碗于无风处，平放鱼于水中，令浮，其首常向午也”。这种方法很合乎近代科学的道理。在航海定向方面，宋代朱彧在其《萍州可谈》中写道：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针”，说明已把指南针用于航海方面的定向了。到了明代，三保太监郑和七下西洋，南至苏门答腊、爪哇，西到红海口的亚丁、非洲的索马里和肯尼亚，如果没有罗盘的定向，那是很难想象的。

现在，我国在磁学方面的地位变得不那么领先了。但是我们相信，在振兴中华、构建和谐社会的鼓舞下，通过我们的拼搏、奋斗，不久的将来我们还是会走在世界科技前列的。

四、电工技术发展简史

电工技术和其他科技一样也是由于生产科研的需要而得到迅速发展的。它的发展史可以说是一部宏伟的生产史和科技史。总的说来，电工技术的发展可以大致分成以下三个阶段。

1. 从对电学、磁学的初步研究到电能作为动力在工业生产中开始应用

在这段时间里，人们经历了一个对电学和磁学的朦胧认识到揭露了它们本质的过程。这中间具有重大意义的事件有：库仑（C. A. Coulomb）根据电荷之间相互作用力，于1785年对电荷的荷电量进行了标定；安培（A. M. Ampere）发现载流线圈与磁铁有相同的特性，从而揭示了磁现象的本质；法拉第（M. F. Faraday）于1831年发现了电磁感应现象，奠定了电工技术的重要理论基础；在电磁感应定律的基础上，雅可比（Б. С. Якоби）于1834年创造了世界上第一台电动机；而至今在电力系统中占统治地位的三相异步电动机、三相变压器和三相输电系统都是由多里沃-多布罗沃里斯基（М. О. Доливо-Добровольский）发明的。

2. 电磁波理论与无线电技术的发展与应用

麦克斯威（C. Maxwell）在法拉第等人研究工作的基础上，于1864~1873年间总结出了电磁波理论，为无线电技术的发展奠定了理论基础。1888年，赫兹（Hertz）用实验证实了电磁波的存在，之后马可尼（Marconi）和波波夫（А. С. Попов）分别独立研制成功了无线电收发机，并进行了通信试验。通信等系统需要检波、放大，于是在爱迪生（Edison）发现热电子效应的基础上，弗莱明（Fleming）和德·弗雷斯特（De. Forest）先后发明了电子二极管和电子三极管。1948年第一个晶体管问世。由于其体积小、重量轻、寿命长、耗电少、制造容易、成本低等一系列优点，晶体管很快在通信及科技、生产的各个领域获得了广泛的应用。

3. 集成电路及电子计算机的广泛应用

1958年，世界上出现了第一个集成电路，实现了材料、元件、电路三者的统一。之后，集成度越来越高，它可以使上亿个晶体元件集成在一个极其微小的芯片上。电子计算机的问世与普及，把国民经济、科技、卫生以及生产管理等各个领域推向以前难以企及的高度。随着将来人工智能计算机与生物计算机的问世与普及，人类生存、生活的前景必将更加美好。

第一章 电路的基本知识

电路理论是电工技术的理论基础，它着重研究电路的基本分析方法。为了系统地分析各种实际电路，必须先将实际电路进行科学的抽象处理，即将实际电路用电路模型来表示，从而通过对电路模型的分析，找出分析计算电路的一般性规律。电路分析的侧重点不是元件内部的物理过程而是其外部特性，即元件端口上的伏安关系和能量关系，以及由元件组成电路整体之后各部分电压、电流和能量间的约束关系。基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）是分析电路的基本定律，深入理解这两个定律的内容并熟练掌握各种理想元件的特性，是学好电路分析方法的基础。从电路分析的需要，本章还将引入电流、电压的“参考方向”等一些新的概念。

第一节 电路及其模型

一、电路的组成与功能

电路就是电流流通的路径，它是由一些电路元件或设备组成的，是能够传输电能、转换电能或者能够采集电信号、传递和处理电信号的有机整体。图 1-1a 所示的荧光灯电路能把电能转换为光能，图 1-1b 为其电路模型；图 1-2 为用系统框图表示的一个复杂电路，它能把广播电台发送的无线电信号转换成声音重放出来，这些都是电路的实例。

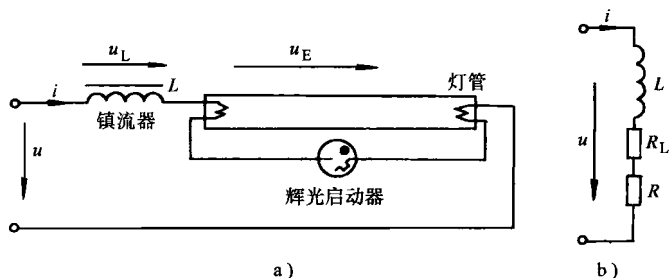


图 1-1 荧光灯电路图

传输能量或传输信号的区别在于所达到的目的不同。当然，传输信号也伴随着能量的传送，但它以获取信息为主要目的。

电路繁简不一，然而作为电路的基本组成部分则必须具有电源（或信号源）、负载和中间环节。最简单的中间环节是两根连接导线和一个开关，但图 1-2 所示的收音机电路，其中间环节就比较复杂。

用现代电路理论来分析电路时，常将具有一定功能的电路视为

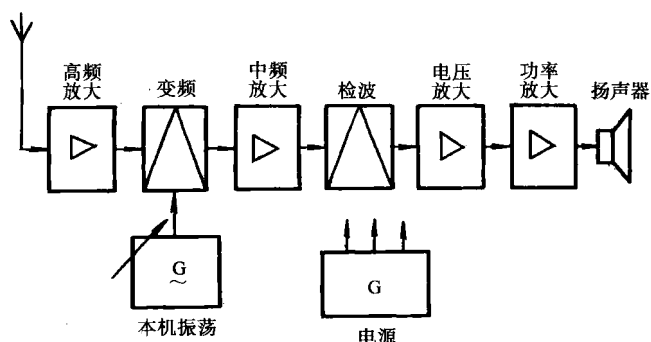


图 1-2 半导体收音机电路的框图

一个系统。从一般的意义上讲，系统是由若干互相关联的单元或设备所组成，并用来达到某种目的的有机整体。例如，由发电、输电、配电、用电等多种设备组成的电网可视为一个系统。图 1-1a、图 1-2 所示的电路也可视为系统。图 1-3 是利用电桥平衡原理来测量温度的电路图，其中 R_1 、 R_2 为电桥的比例臂， R_3 为标准电阻， R_0 为热敏电阻。当在某一温度下把电桥调节平衡后，如果温度发生变化，则 R_0 的阻值发生变化，电桥失去平衡，在对角线上输出电压信号，这个电压的极性和大小就反映出温度的升降数值。该电路就是一个温度检测系统，也称为温度信号变换系统，因为它能把温度的改变变换成相应的电信号。

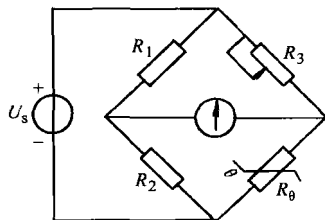


图 1-3 用电桥构成的温度检测系统

对一个电气系统而言，电源（或信号源）的作用称为激励，由激励引起的结果（如某个元件上的电流、电压）称之为响应。激励和响应的关系就是作用和结果的关系，亦即因果关系，它往往对应着输入与输出的关系。任何系统均可用图 1-4 所示的框图来描述，其中的 $e(t)$ 为激励， $r(t)$ 为响应。分析一个电气系统或一个具体电路的任务通常是在已知激励、电路结构和参数的情况下求其响应。

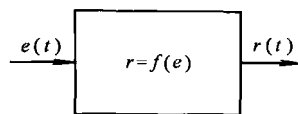


图 1-4 系统的框图表示

二、电路模型

电路模型是将实际电路中的各种元件按其主要物理性质分别用一些理想电路元件来表示时所构成的电路图。电路元件的物理性质是指电流通过元件时进行能量转换的性质。

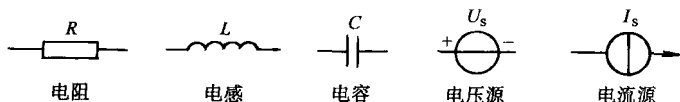


图 1-5 电路的基本模型

理想的电路元件是指只进行某一种能量转换的元件。例如，电阻 R 是将电能转换为热能的理想电路元件，凡是当电流通过某元件发生电能转换为热能，而别的能量转换可以忽略时，该元件就可用一个电阻元件 R 来表示。除了理想电阻元件之外，还有理想电感元件 L 、理想电容元件 C 以及理想电源等。图 1-5 是它们的电路模型图形符号。这些理想元件称为电路结构的基本模型，由这些基本模型构成电路的整体模型。

例如图 1-1 中的荧光灯电路，就其灯管的性质而言，可近似用一个电阻 R 来表示，而镇流器接入电路时将发生电能转换为磁场能量及电能转换为热能两种过程，所以用一个电感 L 和电阻 R_L 的串联组合来表示。这样就可画出图 1-1a 荧光灯电路的电路模型，如图 1-1b 所示。

由此可见，电路模型就是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路，不仅使计算过程大为简化，而且能更清晰地反映该电路的物理本质。这种研究问题的方法，实际上早已运用在物理学中了，只是没有提出“模型”这个概念而已。现在突出电路模型的概念是为了更自觉地运用科学抽象的方法来解决复杂的实际电路问题。为此，我们一方面将深入地研究物理学中已学过的一些理想电路元件的性质，另一方面还要学习一些新的理想电路元件，如理想电流源、理想受控源等。有了这些基础就可以为更多的实际电路建立模型，如用电流

控制电流源来表示一个晶体管的电流放大作用；用电压控制电压源来表示运算放大器等，从而使我们能更好地掌握电路分析的方法。

第二节 电路分析中的若干规定

一、关于电路参数及变量的文字符号

在电路模型中， R 、 L 、 C 的值是影响电路响应的电路结构因素，称其为电路的参数；而电流、电压、电动势等则称为电路分析中的变量，所以描述电路性态的数学模型是由电路参数与变量组成的代数方程或微分方程。例如，电阻元件的伏安关系就是一个代数方程 $U = RI$ 。

进行电路分析时必须遵守一些规定。电路参数的文字符号必须用大写斜体字母表示。变量的文字符号规定为：恒定的直流量用大写斜体字母表示，时变量用小写斜体字母表示。小写的斜体字母也表示广义变量，即所描述的数学模型对直流和时变量都适用时，也用它来表示。在一些特殊情况下变量还有特殊的规定。

变量与参数的单位都必须用国际上通用的文字符号，而不准用汉字。单字母表示的单位必须用大写正体字母表示，如 A、V 等；复合字母表示的单位，其第一个字母用大写正体，第二个及以后的字母必须小写，如 Hz、Wb 等。

二、电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势的方向在物理学中已作过明确的规定，即电路中电流的方向是指正电荷流动的方向，电路中两点之间电压的方向是从高电位指向低电位的方向，电动势的方向是在电压源内由低电位指向高电位的方向。图 1-6a 电路中分别标出了电流、电压、电动势的方向。

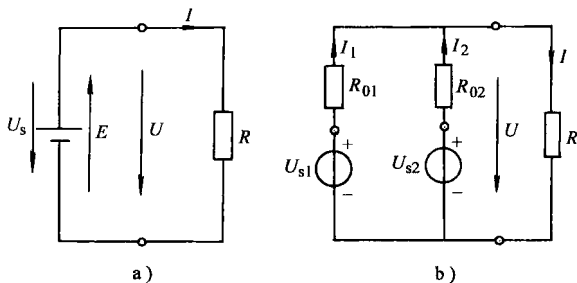


图 1-6 U 、 I 、 E 的实际方向与参考方向图

电流、电压的参考方向是人为假设的方向。为了区别起见，我们把物理学中定义的电流、电压的方向称为电流、电压的实际方向。

为什么要假设参考方向呢？因为在分析复杂电路时往往不能预先确定某段电路上电流、电压的实际方向。如图 1-6b 所示的电路，在 $U_{s1} \neq U_{s2}$ 、 $R_{01} \neq R_{02}$ 的情况下是否可以肯定 I_1 、 I_2 都是由电源正极流出的呢？否！不作具体的分析计算是不能给出确切答案的。但是分析计算电路又必须以已知其电流的方向为先决条件。为解决这一矛盾，就采用事先假设电流参考方向的办法。在图 1-6b 电路中所标注的电流 I_1 、 I_2 、 I 及电压 U 的方向就是假设的参考方向。

当按参考方向来分析、计算电路时，得出的电流、电压值可能为正，也可能为负。正值表示所设电流、电压的参考方向与实际方向一致，负值则表示二者方向相反。

一般来说，参考方向的假设完全可以是的任意的。但应注意：一个具体电路一旦假设了参考方向之后，在电路的整个求解过程中就不允许再作改动。

参考方向除了图 1-6a 中用箭头表示的标注方法以外，电压还可以用“+”、“-”号标注。如图 1-6b 中的电源端电压 U_{s1} 、 U_{s2} ，其中“+”表示高电位，“-”表示低电位。也可以用给电流、电压加注脚的方法来表示，如图 1-7 中的电压 U_s 也可表示为 U_{bd} ，电流 I_s 也

可表示为 I_{bd} 等。

在交流电路中，电流、电压的方向在周期性地改变，应以标注的参考方向为正。

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时，则称它们为关联的参考方向，如图 1-8a 所示。在分析电路时，尤其是分析电阻、电感、电容等元件上的电流、电压关系时，经常采用关联参考方向。例如，在图 1-8a 中，电流和电压间采用了关联的参考方向，这时端电压为

$$U = RI$$

若采用非关联参考方向，如图 1-8b 所示，则电阻 R 两端的电压为

$$U = -RI$$

其他物理量，如电动势、电位、磁通等，在进行电路分析计算时，也要选定参考方向。

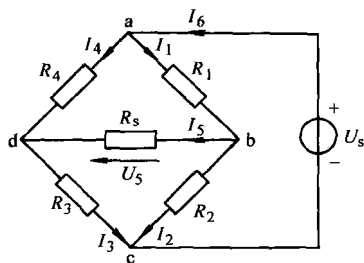


图 1-7 参考方向的表示法

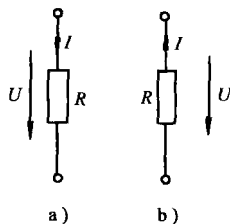


图 1-8 参考方向的关联性

三、功率计算的规范化方法

从物理学中我们已经知道，一个元件上的电功率等于该元件两端的电压与通过该元件电流的乘积，即

$$P = UI$$

如果电压和电流都是时变量时，则瞬时功率写成

$$p = ui$$

由于小写斜体字母亦表示广义变量，则 $p = ui$ 也可以是广义的，因此 $P = UI$ 也可以看成是 $p = ui$ 中 u 和 i 都是恒定直流的特殊情况。当电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A) 时，功率的单位为瓦特 (W)。

元件上的电功率有吸收和发出两种可能，用功率计算值的正负相区别，以吸收功率为正。我们进行电路分析时，电流和电压采用的都是参考方向，其中有关联的参考方向，也有非关联的参考方向。在这种情况下，应该怎样计算功率呢？可作如下处理：

(1) 当电流、电压取关联的参考方向时

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \\ p &= ui \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(2) 当电流、电压取非关联参考方向时

$$\left. \begin{aligned} P &= -UI \\ p &= -ui \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

在此规定下，电流和电压的正负号如实代入公式，如果计算结果为 $P > 0$ (或 $p > 0$) 时，表示元件吸收功率，它是负载；反之，当 $P < 0$ (或 $p < 0$) 时，表示元件发出功率，它

是电源。

现在以图 1-9 所示的蓄电池充电电路为例进行说明。图中的 U_s 为理想电压源的源电压。

【例 1-1】 已知蓄电池充电电路如图 1-9 所示，其中， $U_s = 20\text{V}$ ，求当蓄电池端电压 $U_2 = 12\text{V}$ 时的充电电流 I 和各元件的功率，设电阻 $R = 2\Omega$ 。

解 首先选定电流参考方向并标于图中，电路中的电流

$$I = \frac{U_s - U_2}{R} = \frac{(20 - 12)\text{V}}{2\Omega} = 4\text{A} (> 0)$$

电流为正值，说明电流参考方向与实际方向一致。

根据前面对计算功率时的规定，即根据式 (1-1) 和式 (1-2)，可得

$$\text{电源功率} \quad P_s = -U_s I = -20\text{V} \times 4\text{A} = -80\text{W} (< 0)$$

$$\text{蓄电池功率} \quad P_2 = U_2 I = 12\text{V} \times 4\text{A} = 48\text{W} (> 0)$$

$$\text{电阻功率} \quad P_R = I^2 R = (4\text{A})^2 \times 2\Omega = 32\text{W} (> 0)$$

或 $P_R = U_R I = (U_s - U_2) I = 8\text{V} \times 4\text{A} = 32\text{W} (> 0)$

计算表明，电源发出功率，电阻和蓄电池吸收功率，即电阻和蓄电池是电路的负载，这与蓄电池处于充电状态的事实相符合。

由这个例子还可以看到：电源发出的功率等于各个负载吸收的功率之和，即

$$80\text{W} = 48\text{W} + 32\text{W}$$

按照能量守恒定律，对所有的电路来说，上述结论均成立，记为

$$\Sigma P = 0 \quad (1-3)$$

或

$$\Sigma p = 0$$

即任一瞬间电路中各元件上功率的代数和均等于零。式 (1-3) 称为功率平衡方程式。

式 (1-1) 和式 (1-2) 也适用于具有两个出线端的局部电路的功率，不管所述的局部电路内有电源或没有电源都正确。

【例 1-2】 在图 1-10 所示的电路中，已知 $U_1 = 14\text{V}$ ， $I_1 = 2\text{A}$ ， $U_2 = 10\text{V}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $U_3 = -4\text{V}$ ， $I_4 = -1\text{A}$ ，求各方框电路中的功率，并说明是吸收功率还是发出功率。

解 直接按式 (1-1)、式 (1-2) 计算功率

$$\text{方框 1 功率} \quad P_1 = -U_1 I_1 = -14\text{V} \times 2\text{A} = -28\text{W}$$

$$\text{方框 2 功率} \quad P_2 = U_2 I_2 = 10\text{V} \times 1\text{A} = 10\text{W}$$

$$\text{方框 3 功率} \quad P_3 = -U_3 I_1 = -(-4\text{V}) \times 2\text{A} = 8\text{W}$$

$$\text{方框 4 功率} \quad P_4 = -U_2 I_4 = -10\text{V} \times (-1\text{A}) = 10\text{W}$$

结果表明，方框 1 中所代表的局部电路是发出功率，其余均为吸收功率。

最后，我们来验算一下是否满足功率平衡，有

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = -28\text{W} + 10\text{W} + 8\text{W} + 10\text{W} = 0$$

满足 $\Sigma P = 0$ ，说明计算结果无误。

验证功率是否平衡是验证计算结果正误的有效方法，不满足功率平衡，就肯定有错。

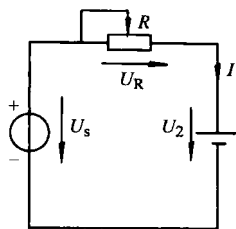


图 1-9 例 1-1 图

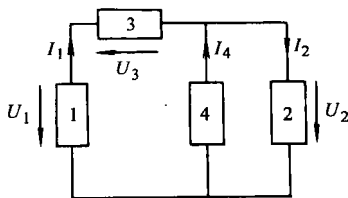


图 1-10 例 1-2 图

【练习与思考】

1-2-1 某白炽灯的电压为220V，功率是100W，问此时电流是多大？电阻是多大？

1-2-2 图1-6a中，如果电阻上 U 、 I 选用非关联参考方向时，计算结果电流应该是正值还是负值？这时功率应该怎么计算？

1-2-3 在图1-7的电路中，设 $I_s = 1\text{A}$ ，则 $I_{ab} = (\quad)$ 。

a. $+1\text{A}$; b. -1A

第三节 电阻、电感和电容

电阻 R 、电感 L 和电容 C 是三种具有不同物理性质的电路元件，也称电路结构的基本模型。

元件的基本物理性质是指当把它们接入电路时，在元件内部将进行什么样的能量转换以及表现在元件外部的特征。从电路分析的角度看，我们最感兴趣的是元件的外部特性，而其中最主要的就是元件端点上的伏安关系和能量关系。

一、电阻

电阻有线性电阻和非线性电阻之分，我们这里只讨论**线性电阻**。

所谓线性电阻，是指电阻元件的阻值 R 是个常数，加在该电阻元件两端的电压 u 和通过该元件中的电流 i 之间成正比例，即

$$u = Ri \quad (1-4)$$

如果在直角坐标系中纵坐标以伏特 (V) 为单位表示电压，横坐标以安培 (A) 为单位表示电流，则图 1-11a 所示电阻上的电压和通过它的电流之间的伏安特性曲线如图 1-11b 所示，这是一条通过坐标原点的直线，线性电阻的名称即由此而来。图 1-11c 还画出了一种非线性电阻的伏安特性。

式 (1-4) 可改写成

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-5)$$

就是说，线性电阻两端的电压与电流的比值是常数，这就是**欧姆定律**。从式 (1-4) 或式 (1-5) 中都可看出，电阻具有阻碍电流的作用。

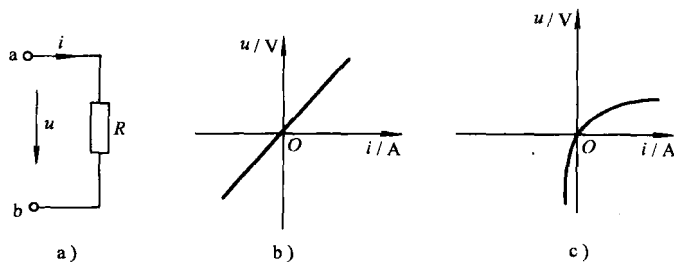


图 1-11 电阻元件及其伏安特性曲线

电流通过电阻要产生热效应，即在电阻元件里电能会转换成热能。而热能向周围空间散去，不可能再直接转换为电能回到电源。可见，电阻中的能量转换过程是不可逆的。电阻上的功率 $P = Ri^2$ ，只能是正值。因此，电阻是耗能元件。

电阻元件中流过电流时会因为消耗电能而发热。电阻炉、白炽灯、电子电路中的电阻元件以及用导线（具有一定电阻值）绕制而成的变压器、电动机等用电设备或元器件，在使用过程中，如果电流过大，发热使温度过高，就有被烧坏的危险。为了保证它们安全可靠的工作，制造厂都给它们标上了电压、电流或功率的限额，如某电阻炉为 220V、1kW 等。这些**限额称为额定值**，是使用时的根据。

由于电阻元件两端的电压变化时，其中的电流将立即随之按同样规律变化（反之亦

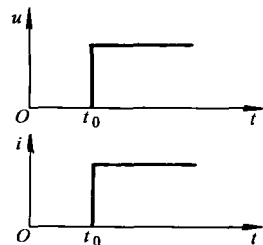
然), 故称电阻元件为“即时”元件。图 1-12 表示当电压 u 作阶跃变化时, 电流 i 也随之作阶跃变化的情况。在这里, 作阶跃变化的电压、电流称为阶跃电压和阶跃电流。

二、电感

线圈是典型的实际电感元件。当忽略线圈导线的电阻时, 它就成为一个理想的电感元件。

当有电流 i 通过线圈时, 线圈中就会建立磁场。设磁通为 Φ , 线圈匝数为 N , 则与线圈相交链的磁链 ψ 为

$$\psi = N\Phi \quad (1-6) \quad \text{图 1-12 线性电阻元件上的阶跃电压和阶跃电流}$$



讨论电感元件的特性时, 有关时变量的参考方向通常按下述原则选取: 磁通 Φ 与电流 i 之间、自感电动势 e_L 与磁通 Φ 之间的参考方向均由右手螺旋定则确定, 如图 1-13 所示; u 与 i 之间则取关联的参考方向。

电感线圈中的电流与磁链之间的关系用韦安直角坐标系中的曲线表示, 简称为韦安特性。电感 L 定义为

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-7)$$

L 又称自感系数或电感系数。当 ψ 的单位是韦伯 (Wb)、 i 的单位是安培 (A) 时, 电感 L 的单位是亨利 (H)。

图 1-14 画出理想电感元件的电路符号和它的韦安特性曲线, 其中图 1-14a 中 i 、 u 、 e_L 的参考方向标注与图 1-13 的规定一样。在电感的符号图中不反映线圈的绕向, 一切计算根

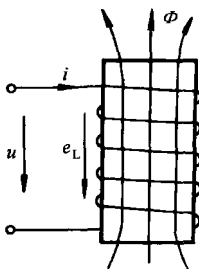


图 1-13 电感线圈

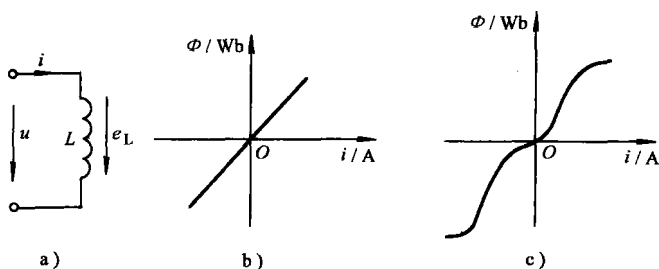


图 1-14 电感元件及其韦安特性曲线

据电压、电流、自感电动势的参考方向进行。图 1-14b 的韦安特性是一条过原点的直线, 具有这种特性的电感元件称为**线性电感元件**, 其电感值 L 是个常数, 与电感中电流的大小无关。空心线圈是一种实际的线性电感元件。图 1-14c 所示韦安特性曲线不是过原点的直线, 电感 L 随电流 i 的大小而变化, 称之为**非线性电感元件**。带有铁心的线圈就是一种常见的非线性电感元件。本书主要讨论线性电感, 当不加说明时, “电感”一词指的就是线性电感。

当电感 L 中的电流 i 发生变化时, 由它建立的磁链 ψ 也随之变化。根据电磁感应定律, 磁链随时间变化就要在电感线圈中引起感应的电动势 e_L , 而且 e_L 总是阻碍电流 i 的变化。按照图 1-14a 所规定的 u 、 i 和 e_L 的参考方向, 电磁感应定律的数学表达式是

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-8)$$

这样, 当电流 i 减小时, 磁链 ψ 也减小, ψ 的变化速率 $d\psi/dt$ 为负, e_L 为正, 即感应电动