

普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材

电工电子学

 姜学勤 主编 高德欣 副主编



化学工业出版社

普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材

电工电子学



姜学勤 主编 高德欣 副主编 王逸隆 马彩青 参编



化学工业出版社

·北京·

全书共分 14 章, 内容包括: 电路的基本概念与定律, 电路的分析方法, 一阶电路的暂态过程, 正弦稳态电路, 三相电路, 变压器与电动机, 直流电动机, 低压控制电路, 可编程控制器, 企业用电及安全用电, 电工测量以及半导体二极管和三极管, 基本放大电路。

本书采用授课式语言叙述, 内容详略得当, 基本概念讲述清楚, 分析方法讲解透彻, 难易程度适中, 每章都有本章小结和本章知识点, 方便学生自学和教师施教。

本书适合于普通高等院校工科非电类专业作教材使用, 也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子学/姜学勤主编. —北京: 化学工业出版社,
2015.7
普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-24019-4

I. ①电… II. ①姜… III. ①电工-高等学校-教材
②电子学-高等学校-教材 IV. ①TM1②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 106262 号

责任编辑: 郝英华
责任校对: 吴 静

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 399 千字 2015 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为适应教育发展的新形势，适应教育体制、教学体制及课程体制的改革，我们编写了这本教材。

“电工电子学”是一门非电专业的技术基础课，实践性较强。它的主要任务是为学生学习专业知识和从事工程技术工作打好电工电子技术的理论基础，并使他们受到必要的基本技能的训练。为此，编者在本书中对基本理论、基本定律、基本概念及基本分析方法都作了尽可能详尽的阐述，并通过实例、例题和习题来说明理论的实际应用，以此来加深学生对理论的掌握和理解，并使之了解电工电子技术的发展与生产发展之间的密切关系。

近年来，随着科学技术的迅猛发展，新知识也急剧膨胀。高校的教学观念也作出了相应调整。学习者要由被动学习转化到主动学习，教学者要做学习过程的引导者、促进者、支持者。为了适应这个变革和满足在校生以及校外自学者的需要，本书特对传统内容进行了精选，保证了必需的常用知识，删去了一些不常用的和陈旧的知识。本书注意到与普通物理课的分工，避免了不必要的重复。有些内容如欧姆定律、磁路的基本概念等，虽然已在普通物理课程中讲过，但是为了加强理论的系统性和满足电工技术的要求，仍列入本书中。使学生在温故知新的基础上，对这些内容的理解能进一步巩固和加深，并能充分地应用和扩展这些内容。

全书共 14 章，主要包括电路的基本概念与基本定律、电路的分析方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相电路、磁路与铁芯线圈电路、异步电动机、直流电动机、继电器接触器控制系统、可编程控制器及其应用、工业企业供电与安全用电、电工测量以及半导体二极管和三极管、基本放大电路。其中第 1、2 章由马彩青编写，第 4、5、7、11 章由姜学勤编写，3、12、13、14 章由王逸隆编写，第 6、8、9、10 章由高德欣编写。本书由姜学勤统稿并担任主编，高德欣担任副主编。本书的编写和出版得到青岛科技大学自动化与电子工程学院刘喜梅、赵彤、刘惠明、赵文仓及刘春第等老师的协助，在此深表谢意。

本书内容详尽，表述浅显易懂有利于学生自学使用，教师在讲授时也可灵活安排，一般应视专业的需要、学时的多少和学生的实际水平而决定所授内容的取舍。有些内容可以让学生通过自学掌握，不必全在课堂讲授。学生只要在课堂上记下一些个人的心得和疑问，课下及时答疑，并通过大量的练习巩固基础知识，拓宽思路，就能更好地掌握电工电子技术的基础知识和提高分析问题和解决问题的能力。

为方便教学，本书配套的电子教案可免费提供给采用本书作为教材的院校使用，如有需要，请发送邮件至 cipedu@163.com 索取。本书还配有实验指导书《电工学实验》（书号：9787122082107），供有需要的院校使用。

由于编者能力有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，以不断进行改进和提高。

编者
2015 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 电路的组成及作用	1
1.1.2 电路模型	1
1.1.3 电流、电压及其参考方向	2
1.1.4 电功率	3
1.2 电路的工作状态	4
1.2.1 额定值与实际值	4
1.2.2 电路的工作状态	5
1.3 电路的基本定律	8
1.3.1 欧姆定律	8
1.3.2 基尔霍夫定律	8
1.4 电位的概念	13
本章小结	15
本章知识点	15
习题	15
第 2 章 电路分析的方法	18
2.1 电阻的串并联	18
2.1.1 等效变换的概念	18
2.1.2 电阻的串并联	18
2.1.3 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的 等效变换	21
2.2 电源的两种模型及其等效变换	23
2.2.1 理想电压源	23
2.2.2 理想电流源	25
2.2.3 电源两种模型的等效变换	26
2.3 支路电流法	30
2.4 结点电压法	32
2.5 叠加定理	33
2.6 戴维宁定理与诺顿定理	35
2.6.1 戴维宁定理	35
2.6.2 诺顿定理	37
2.6.3 负载获得最大功率的条件	39
2.7 受控源	40
2.8 非线性电阻电路的分析	41
本章小结	45
本章知识点	45
习题	45
第 3 章 电路的暂态分析	48
3.1 暂态过程及换路定则	48
3.1.1 暂态过程	48
3.1.2 换路定则及初始值的确定	48
3.2 RC 电路的响应	51
3.2.1 RC 电路的零输入响应	51
3.2.2 RC 电路的零状态响应	52
3.2.3 RC 电路的全响应	54
3.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法	55
3.4 RL 电路的响应	57
3.4.1 RL 电路的零输入响应	57
3.4.2 RL 电路的零状态响应	57
3.4.3 RL 电路的全响应	58
本章小结	59
本章知识点	59
习题	59
第 4 章 正弦交流电路	62
4.1 正弦电压与电流	62
4.1.1 频率与周期	63
4.1.2 幅值与有效值	63
4.1.3 初相位	63

4.2 正弦量的相量表示法	64	4.5.2 阻抗的并联	76
4.3 单元件的正弦交流电路	67	4.6 正弦交流电路的功率及功率因数的提高	81
4.3.1 电阻元件的正弦交流电路	67	4.6.1 正弦交流电路的功率	81
4.3.2 电感元件的正弦交流电路	68	4.6.2 功率因数的提高	83
4.3.3 电容元件的正弦交流电路	70	4.7 电路的谐振	86
4.4 电路定律的相量形式及阻抗	73	4.7.1 串联谐振	86
4.4.1 基尔霍夫定律的相量形式	73	4.7.2 并联谐振	88
4.4.2 单元件电压电流关系的相量形式	73	4.8 非正弦周期信号的电路	89
4.4.3 RLC 串联的正弦交流电路	74	本章小结	91
4.5 阻抗的串并联	76	本章知识点	91
4.5.1 阻抗的串联	76	习题	91
第5章 三相电路	95		
5.1 三相电压	95	本章小结	103
5.2 负载星形连接的三相电路	97	本章知识点	103
5.3 负载三角形连接的三相电路	100	习题	103
5.4 三相功率	102		
第6章 磁路与铁芯线圈电路	105		
6.1 磁路的基本概念	105	6.3.4 特殊变压器	113
6.2 铁芯线圈电路	107	6.3.5 变压器绕组的极性	113
6.2.1 直流铁芯线圈电路	107	6.4 电磁铁	114
6.2.2 交流铁芯线圈电路	107	6.4.1 直流电磁铁	114
6.3 变压器	109	6.4.2 交流电磁铁	115
6.3.1 变压器的基本结构	109	本章小结	116
6.3.2 变压器的工作原理	109	本章知识点	116
6.3.3 变压器的主要技术指标	112	习题	116
第7章 异步电动机	117		
7.1 三相异步电动机的构造	117	7.4 三相异步电动机的铭牌数据	125
7.2 三相异步电动机的工作原理	118	7.5 三相异步电动机的使用	127
7.2.1 转动原理	118	7.5.1 三相异步电动机的启动	127
7.2.2 旋转磁场	119	7.5.2 三相异步电动机的调速	129
7.2.3 转差率	122	7.5.3 三相异步电动机的制动	130
7.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	122	7.6 单相异步电动机	131
7.3.1 电磁转矩	122	本章小结	133
7.3.2 机械特性	123	本章知识点	133
		习题	133
第8章 直流电动机	134		
8.1 直流电动机的构造	134	8.5 他励电动机的调速	138
8.2 直流电动机的基本工作原理	135	8.5.1 调磁调速	138
8.3 直流电动机的机械特性	136	8.5.2 调压调速	140
8.4 他励电动机的启动与反转	137	本章小结	141

本章知识点	141	习题	141
第 9 章 继电接触器控制系统	142		
9.1 常用低压控制电器	142	9.3.1 限位行程控制	150
9.1.1 手动电器	142	9.3.2 自动往复行程控制	150
9.1.2 自动电器	143	9.4 时间控制	151
9.2 笼型电动机的基本控制	147	9.4.1 时间继电器原理	151
9.2.1 点动控制	147	9.4.2 时间继电器控制电路	152
9.2.2 直接启停控制	147	本章小结	153
9.2.3 正反转控制	148	本章知识点	153
9.2.4 异地控制	149	习题	153
9.3 行程控制	150		
第 10 章 可编程控制器及其应用	155		
10.1 PLC 的组成及工作原理	155	10.3.3 保持指令 KEEP	163
10.1.1 PLC 的基本组成及作用	155	10.4 PLC 的应用举例	163
10.1.2 PLC 的工作原理	157	10.4.1 三相异步电动机直接启动	
10.1.3 PLC 的主要功能及特点	157	控制	163
10.2 PLC 的基本编程指令	159	10.4.2 异步电动机的正反转控制	164
10.3 PLC 的应用指令	162	本章小结	165
10.3.1 分支指令 IL/ILC	162	本章知识点	165
10.3.2 微分指令 DIFU 和 DIFD	162	习题	165
第 11 章 输配电及安全用电	167		
11.1 输电概述	167	11.3.2 触电方式	169
11.2 工业企业配电	168	11.3.3 用电保护	169
11.3 安全用电	169	本章小结	170
11.3.1 电流对人体的危害	169	本章知识点	170
第 12 章 电工测量	171		
12.1 电工测量仪表的分类	171	12.6 功率的测量	178
12.2 电工测量仪表的类型	173	12.6.1 单相交流和直流功率的测量	178
12.2.1 直读式仪表	173	12.6.2 功率表的读数	178
12.2.2 磁电系仪表	174	12.6.3 三相功率的测量	179
12.2.3 电磁系仪表	174	12.7 兆欧表	179
12.2.4 电动系仪表	175	12.7.1 兆欧表的结构和工作原理	179
12.3 电流的测量	175	12.7.2 兆欧表的使用	180
12.4 电压的测量	176	本章小结	181
12.5 万用表	176	本章知识点	181
12.5.1 磁电式万用表	176	习题	181
12.5.2 数字式万用表	177		
第 13 章 二极管、晶体管和场效应晶体管	183		
13.1 半导体的导电特性	183	13.1.2 N 型半导体和 P 型半导体	184
13.1.1 本征半导体	183	13.2 PN 结及单向导电性	184

13.3 二极管	185	13.6.1 发光二极管	194
13.3.1 基本结构	185	13.6.2 光电二极管	194
13.3.2 伏安特性	185	13.6.3 光电晶体管	194
13.3.3 理想伏安特性	186	13.7 场效应晶体管	195
13.3.4 主要参数	186	13.7.1 增强型绝缘栅场效应晶体管	196
13.4 稳压二极管	188	13.7.2 耗尽型绝缘栅场效应晶体管	197
13.5 晶体管	190	13.7.3 场效应晶体管的特性曲线与 主要参数	197
13.5.1 基本结构	190	本章小结	198
13.5.2 晶体管的工作原理	190	本章知识点	198
13.5.3 特性曲线	192	习题	198
13.5.4 主要参数	193		
13.6 光电器件	194		
第 14 章 分立元件组成的基本放大电路	201		
14.1 共发射极放大电路	201	14.3 场效应晶体管放大电路	213
14.1.1 基本放大电路的组成	201	14.3.1 静态分析	214
14.1.2 放大电路的静态分析	202	14.3.2 动态分析	215
14.1.3 放大电路的动态分析	203	14.4 多级放大电路	216
14.1.4 射极偏置电路	207	14.4.1 多级放大电路和组成	216
14.2 共集电极放大电路	211	14.4.2 级间耦合方式及其特点	216
14.2.1 共集电极放大电路的基本 组成	211	本章小结	220
14.2.2 工作原理	212	本章知识点	220
14.2.3 主要特点	213	习题	220
附录 1 电阻器标称阻值系列	223		
附录 2 常见术语中英对照	224		
部分习题参考答案	228		
参考文献	232		

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

电路的应用十分广泛，电路理论已经成为一门基础学科。本章重点讲述了电路及其模型、电压电流的参考方向、电功率、电源的工作状态、欧姆定律、基尔霍夫定律及电位的概念。这些基本概念和电路定律是研究一切电路的电磁现象和进行定量计算的依据和出发点，是后续章节的重要基础。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成及作用

电路是电流的通路，是根据不同需要由某些电工设备或元件按一定方式组合而成的，包括电源或信号源、中间环节和负载，如图 1-1 电路所示。

电路的构成形式多种多样，根据实际电路的作用可以将其归纳为两大类：

- ① 电力电路：主要实现电能的产生、传输和转换。如图 1-1(a) 所示的电力系统。
- ② 电子电路：主要实现信号的接收、传递和处理。如图 1-1(b) 所示的收音机电路。

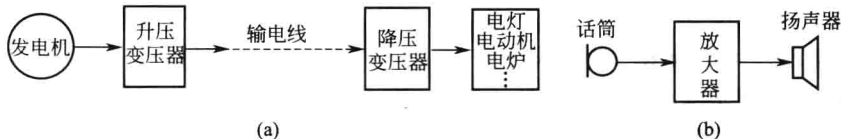


图 1-1 电路示意图

发电机是电源，是提供电能的，它可以将热能、水能或核能转换为电能。电池也是常用的电源，可将化学能或光能转化为电能。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励源，也称输入。用电设备称为负载，如电灯、电炉、电动机和电磁铁等用电器取用电能，是负载，它们分别将电能转换成光能、热能、机械能和磁场能等。由激励源在电路中（包括负载）各处产生的电流和电压称为响应，也称为输出。变压器和输电线路是中间环节，连接电源和负载，起传输和分配电能的作用。

信号的传递和处理过程也类似。接收装置感应的电信号是电源，传输导线和放大器是中间环节，扬声器将电信号还原成声音信号是负载。

1.1.2 电路模型

电路理论讨论的电路不是实际电路而是它们的电路模型。为了便于对实际电路进行分析和用数学描述，将实际电路元件理想化（或称模型化），用理想电路元件及其组合模拟替代实际电路中的器件，则这些由理想电路元件组成的电路即实际电路的电路模型。在电路模型中各理想元件的端子用“理想导线”（其电阻为零）连接起来的。理想电路元件有电阻元件、电感元件、电容元件、理想电流源和理想电压源等，其电路图形及文字符号如图 1-2 所示。

用理想电路元件及其组合模拟替代实际器件即为建模。电路模型要把给定工作条件下的主要物理现象及功能反映出来。例如，白炽灯，当其通有电流时，除主要具有消耗电能的性

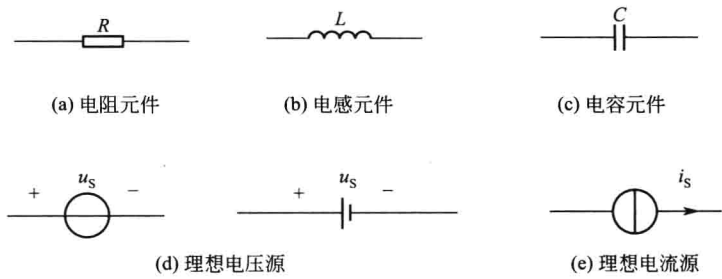


图 1-2 理想电路元件图形及文字符号

质（电阻性）外，还产生磁场，即也具有电感性，但电感微小到可忽略不计，因此白炽灯的模型可以是一电阻元件。又如，一个线圈，在直流情况下的模型可以是一电阻元件，在低频情况下其模型要用电阻和电感的串联组合代替。可见在不同的条件下，同一实际器件可能要用不同的电路模型。

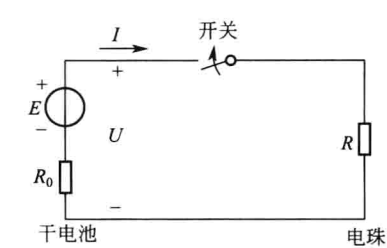


图 1-3 实际电路与电路模型示例

模型选取得当，电路的分析计算结果就与实际情况接近，反之误差会很大甚至出现矛盾的结果。本书不讨论建模问题。今后本书所说的电路一般均指实际电路的电路模型，电路元件也是理想电路元件的简称。

一个简单的手电筒电路的实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体，电路模型如图 1-3 所示。干电池是电源元件，用电动势 E 和内电阻（简称内阻） R_0 的串联来表示；电珠是电阻元件，用参数 R 表示；筒体和开关是中间环节，连接干电池与电珠，开关闭合时其电阻忽略不计，认为是一无电阻的理想导体。

1.1.3 电流、电压及其参考方向

电路中的物理量主要有电流 $i(I)$ 、电压 $u(U)$ 、电动势 $e(E)$ 、功率 $p(P)$ 、电能量 $w(W)$ 、电荷 $q(Q)$ ，磁通 Φ 和磁链 ψ 。在分析电路时，要用电压或电流的正方向导出电路方程，但电流或电压的实际方向可能是未知的，也可能是随时间变动的，故需要指定其参考方向。

(1) 电流

电流是电荷有规则地定向运动形成的，在数值上电流等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \left(i = \frac{dq}{dt} \right)$$

若电流 i 不随时间而变化，则称为直流电流，常用大写字母 I 表示。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向，它是客观存在的。但电流的实际方向往往是未知的或变动的，故在分析计算电路时，先任意选定（假定）某一方向为电流的正方向，这一方向即电流的参考方向，从而电流就可看成代数量。当电流的参考方向与其实际方向相同时，电流为正值，即 $i > 0$ ；反之电流为负值，即 $i < 0$ 。如图 1-4 所示。

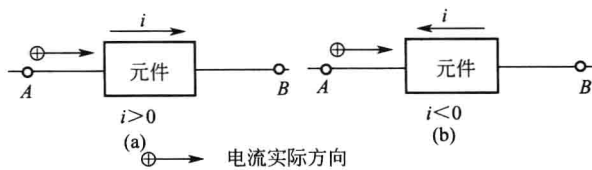


图 1-4 电流的参考方向

电流的参考方向可以用箭标表示,如图1-3所示;也可用双下标表示,如图1-4(a)中,按所选电流参考方向可写作 i_{AB} ,表示电流参考方向由A指向B。在图1-4(b)中,按所选电流参考方向可写作 i_{BA} 。对同一段电路, $i_{AB}=-i_{BA}$, $i_{BA}=-i_{AB}$ 。在国际单位制中,电流的基本单位是安[培](A),计量微小电流时也用毫安(mA)或微安(μA)做单位。 $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$ 。

(2) 电压

电压是两点间电势差(电位差)。 $u_{ab}=V_a-V_b$ 。 a, b 两点的电位分别用 V_a, V_b 表示。电压体现电场力推动单位正电荷做功的能力。电压 u_{ab} 数值上等于电场力推动单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功。为方便分析计算,习惯上规定电压的实际方向为由高电位(正极性端)指向低电位端(负极性端),即电位降低的方向。

电源电动势(以后“电源”二字常略去)体现电源力推动单位正电荷做功的能力,用 e 表示任意形式的电动势, E 表示直流电动势。电动势的实际方向规定为由电源低电位端(负极性端)指向其高电位端(正极性端),即电位升高的方向。

与电流一样,也要假定电压的参考方向(电动势的实际方向一般都给出)。电压指定了参考方向后,电压值即成代数值。如图1-5所示。电压的参考方向可以用正负极性或双下标表示。

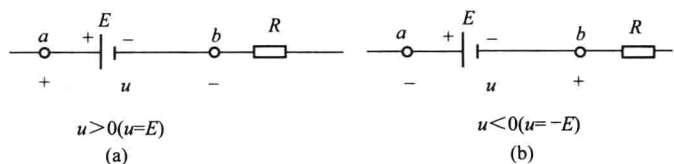


图 1-5 电压的参考方向

电压和电动势的国际单位是伏特(V)。其次还可用千伏(kV),毫伏(mV)或微伏(μV)做单位。电路图上所标出的电压或电流的方向都是参考方向。当同一电路元件或支路上的电压和电流的参考方向选取的一致时,称为关联参考方向。否则称为非关联参考方向。如图1-6所示。

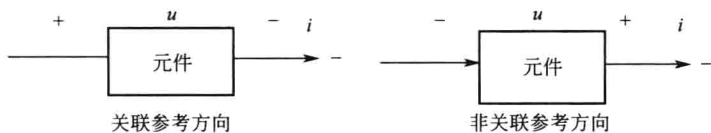


图 1-6 关联和非关联参考方向

1.1.4 电功率

电路中电路元件在单位时间内发出或吸收的电能为电功率,简称功率,用 p 来表示。

功率单位为瓦特(W)或千瓦(kW)。即 $p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui$ 。

电路中实际发出功率的是电源,实际吸收功率的是负载。分析电路时,要判断哪个电路元件是电源(或起电源作用),哪个是负载(或起负载的作用),有两种方法。

(1) 根据电压和电流的实际方向判断

元件的 u, i 实际方向相反,元件实际发出功率,是电源;元件的 u, i 实际方向相同,元件实际吸收功率,是负载。

(2) 由 $p=ui$ 及 u, i 参考方向来判别

① u, i 参考方向一致(关联)时, $p=ui$ 表示(计算)吸收功率。

$$p = ui > 0$$

负载(元件实际吸收功率)

$p=ui<0$ 电源（元件实际吸收负功率，即发出功率）

② u, i 参考方向相反（非关联）时， $p=ui$ 表示（计算）发出功率。

$p=ui>0$ 电源（元件实际发出功率）

$p=ui<0$ 负载（元件实际发出负功率，即吸收功率）

【例 1-1】 图 1-7 中 A、B、C 为三个电路元件，各元件上电流、电压参考方向的设定如图 1-7 所示。已知 $I_1=2\text{A}$ ， $I_2=I_3=-2\text{A}$ ， $U_1=20\text{V}$ ， $U_2=5\text{V}$ ， $U_3=-15\text{V}$ ，计算各元件的功率，并判断元件性质。

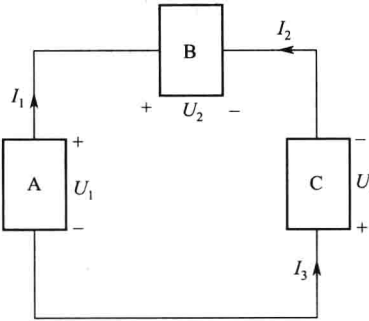


图 1-7 例 1-1 的图

解法一：根据 ui 实际方向计算和判断

元件 A 的电流 $I_1>0$ ，电压 $U_1>0$ ，所以实际电流电压方向与参考方向相同，电压电流实际方向相反，所以 A 实际发出功率 $P_A=2\text{A}\times 20\text{V}=40\text{W}$ ，A 是电源。

元件 B 的电流 $I_2<0$ ，所以实际电流方向与参考方向相反，电压 $U_2>0$ ，实际电压方向与参考方向相同。电压电流实际方向相同，所以 B 实际吸收功率 $P_B=2\text{A}\times 5\text{V}=10\text{W}$ ，B 是负载。

元件 C 的电流 $I_3<0$ ，所以实际电流方向与参考方向相反，电压 $U_3<0$ ，实际电压方向与参考方向相反。电压

电流实际方向相同，所以 C 实际吸收功率 $P_C=2\text{A}\times 15\text{V}=30\text{W}$ ，C 是负载。

解法二：根据 ui 参考方向计算和判断

元件 A 为非关联参考方向， $P_A=U_1I_1=2\text{A}\times 20\text{V}=40\text{W}$ 表示发出功率，由于 $P_A>0$ ，所以 A 发出正功率，A 是电源。

元件 B 为非关联参考方向， $P_B=U_2I_2=-2\text{A}\times 5\text{V}=-10\text{W}$ 表示发出功率，由于 $P_B<0$ ，所以 B 发出负功率，实际吸收 10W 功率，B 是负载。

元件 C 为关联参考方向， $P_C=U_3I_3=-2\text{A}\times (-15\text{V})=30\text{W}$ 表示吸收功率，由于 $P_C>0$ ，所以 C 吸收正功率，C 是负载。

1.2 电路的工作状态

1.2.1 额定值与实际值

各种电器设备的电压、电流及功率等都有一个额定值。例如，一盏白炽灯标有电压 220V、功率 60W，这就是它的额定值。额定值是制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行而规定的正常容许值。额定电流、额定电压和额定功率分别用 I_N 、 U_N 和 P_N 表示。

额定值，是全面考虑使用的经济性、可靠性、安全性及寿命，特别是工作温度容许值等因素，使产品能在给定的工作条件下正常运行而对产品规定的正常容许值。使用时应遵循而不允许偏离过多。大多数电气设备，如电机、变压器等，其寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时，绝缘材料将因发热过甚遭损坏；当所加电压超过额定值过多时，绝缘材料可能被击穿。反之，若所加电压和电流远低于其额定值，不仅设备不能正常合理地工作，而且也不能充分利用设备的能力。例如，线圈额定电压 380V 的电磁铁，若接上 220V 的电压，则电磁铁将不能正常吸引衔铁或工件。又如，电灯、电阻器，其寿命与导体熔点关系很大，当电压过高或电流过大时，其灯丝或电阻丝将被烧毁。

使用时，因电源或负载的因素，电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值。例如，额定值为 220V、40W 的电灯接在额定电压 220V 的电源上，但当电源电压因经常波

动稍低于或稍高于 220V 时, 加在电灯上的电压就不是 220V, 实际功率也不是 40W 了。

又如一台直流发电机, 标有额定值 10kW、230V, 实际使用时一般不允许所接负载功率超过 10kW, 实际供出的功率值可能低于 10kW。

在一定电压下和额定功率范围内, 电源输出的功率和电流决定于负载的大小, 就是负载需要多少电源就供多少, 电源通常不一定工作在额定工作状态; 对电动机也是这样, 它的实际功率和电流决定于其轴上所带机械负载的大小, 通常也不一定处于满载状态, 但一般不应超过额定值。电源设备工作于额定状态时称满载运行。

考虑客观因素, 使用时, 允许某些电气设备或元件的实际电压、电流和功率等在其额定值上下有一定幅度的波动, 例如 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 或短时过载。

【例 1-2】 有一额定值为 5W、500 Ω 的电阻器。其额定电流为多少? 在使用时电压不得超过多大数值?

解

$$P_N = U_N I_N = I_N^2 R$$

故

$$I_N = \sqrt{\frac{P_N}{R}} = \sqrt{\frac{5}{500}} = 0.1 \text{ (A)}$$

使用时电压不得超过

$$U_N = R I_N = 500 \times 0.1 = 50 \text{ (V)}$$

也可用 $U_N = \sqrt{P_N \cdot R}$ 计算。

1.2.2 电路的工作状态

本节以最简单的直流电路为例, 分别讨论电源电路的三种工作状态: 有载、开路和短路时的电流、电压和功率。

(1) 电源有载工作状态

如图 1-8 所示, 当开关 S 闭合, 将负载电阻与直流电源接通, 这就是电源的有载工作状态。电源有载工作时的电流, 电压和功率讨论如下。

① 电压与电流: 由欧姆定律可得电路中的电流

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-1)$$

式中, R_0 是电源内阻。负载两端的电压, 也即电源端电压

$$U = R I$$

由以上两式可得

$$U = E - R_0 I \quad (1-2)$$

由上式可见, 电源端电压小于电源电动势, 两者差为电流 I 流过内阻 R_0 所产生的电压降 $R_0 I$ 。电流 I 越大, U 下降得越多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线称为电源的外特性曲线, 如图 1-9 所示, 其斜率与 R_0 有关。内阻 R_0 一般很小, 当 $R_0 \ll R$ 时, 则

$$U \approx E$$

上式表明, 当电流 (负载) 变动时, 电源的端电压变动不大。这表明电源内阻小时带负载能力强。

② 功率及功率平衡。将式 (1-2) 两边乘以电流 I , 可得功率平衡式

$$UI = EI - R_0 I^2$$

$$P = P_E - \Delta P$$

式中, $P_E = EI$ 是电源产生的功率; $\Delta P = R_0 I^2$, 是电源内阻上损耗的功率; 而 $P = UI$ 是

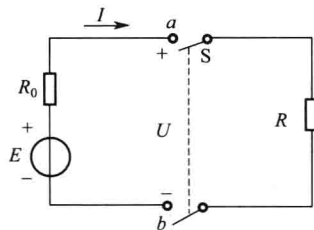


图 1-8 电源有载工作

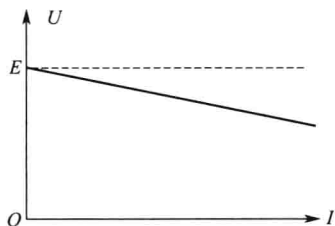


图 1-9 电源的外特性曲线

电源输出的功率，即电阻 R 上消耗的功率。

在国际单位制中，功率的单位是瓦（特）（W）或千瓦（kW）。1s 内转换 1J 的能量，则功率为 1W。

【例 1-3】 在图 1-8 中， $E=223\text{V}$ ， $R_0=0.6\Omega$ ， $R=44\Omega$ ，判断功率平衡。

解

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{223}{0.6 + 44} = 5 \text{ (A)}$$

或

$$U = E - R_0 I = (223 - 0.6 \times 5) = 220 \text{ (V)}$$
$$U = RI = 44 \times 5 = 220 \text{ (V)}$$
$$P_E = EI = 223 \times 5 = 1115 \text{ (W)}$$
$$\Delta P = R_0 I^2 = 0.6 \times 5^2 = 15 \text{ (W)}$$
$$P = UI = 220 \times 5 = 1100 \text{ (W)}$$

或

$$P = RI^2 = 44 \times 5^2 = 1100 \text{ (W)}$$
$$P_E = P + \Delta P$$

可见，在一个电路中，电源产生的功率与负载取用的功率及内阻上消耗的功率是平衡的。

(2) 电源开路

如图 1-10 所示，开关 S 断开，电源就处于开路（空载）状态。开路时，外电路的电阻对电源而言等于无穷大，因此电路中的电流为零。这时电源的端电压（称为开路电压或空载电压 U_0 ）等于电源电动势，电源不输出功率（电能）。

电源开路时的电气特征可用下列各式表示：

$$I = 0$$
$$U = U_0 = E$$
$$P = 0$$

若电路中某段电路的电流为零，但并未直接断开，在分析和计算其他部分的电流时，可将该段电路看做开路。

(3) 电源短路

如图 1-11 所示电路中，当电源的两端由于某种原因（绝缘老化或操作失误）连接在一起时，电源被短接，处于短路状态。电源短路时，外电路的电阻可视为零，电流有捷径可通，不流过负载（即使开关 S 是闭合的），此电流称为短路电流 I_S 。由于在电流的回路中仅有很小的电源内阻 R_0 ，所以这时的电流很大，有可能使电源遭受机械的（电磁力很大）与热的损伤或毁坏。此时电源产生的电能全部消耗在内阻上。

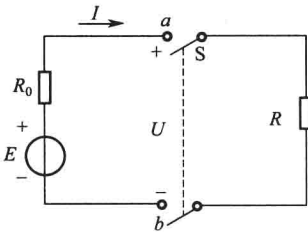


图 1-10 电源开路状态

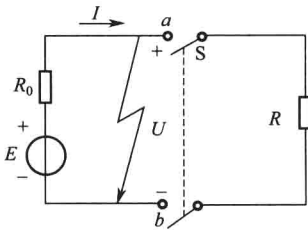


图 1-11 电源短路状态

电源短路时，因为外电路的电阻为零，所以电源的端电压亦为零，电源电动势全部降在内阻上。

电源短路时的电气特征可用下列各式表示：

$$U=0$$

$$I=I_S=\frac{E}{R_0}$$

$$P_E=\Delta P=R_0 I_S^2, P=0$$

短路也可发生在电路的负载端或其他处。

短路通常是一种严重事故，特别是电源短路应该尽力预防。绝缘损坏、接线不慎或意外事故往往是引发短路的原因，因而经常检查电气设备和线路的绝缘情况是一项很重要的安全措施；此外，为了防止和减轻短路事故所引起的后果，通常在电路中接入熔断器或自动断路器，以便发生短路时，能迅速将故障电路自动切除。但是，有时为了某种需要，可以将电路中的某一段短路（常称为短接）或进行某种短路实验。

若电路中某两点间的电压为零但并未直接连在一起，在分析计算其他部分的电压时可将该两点视为短路。

【例 1-4】 测得电源的开路电压为 12V，短路电流为 30A，试求该电源的电动势和内阻。

解 电源的电动势 $E=U_0=12\text{V}$

$$\text{电源的内阻} \quad R_0=\frac{E}{I_S}=\frac{U_0}{I_S}=\frac{12}{30}=0.4(\Omega)$$

这是由电源的开路电压和短路电流计算其电动势和内阻的一种方法（常称为开路短路法）。

【练习与思考】

1-2-1 试计算图 1-12 所示电路在开关 S 闭合和断开时的 U_{ab} 和 U_{cd} 。

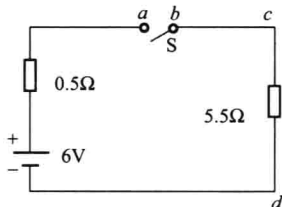


图 1-12 练习与思考 1-2-1 的图

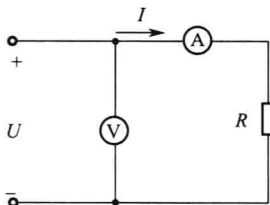


图 1-13 练习与思考 1-2-2 的图

1-2-2 如图 1-13 所示，用“伏安法”测量某直流线圈的电阻 R ，电压表读数为 220V，电流表读数为 0.7A。如果测量时误将电流表当做电压表并接在电源上，后果如何？已知电流表量程为 1A，内阻为 0.4Ω。

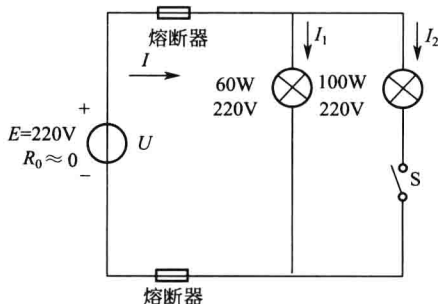


图 1-14 练习与思考 1-2-3 的图

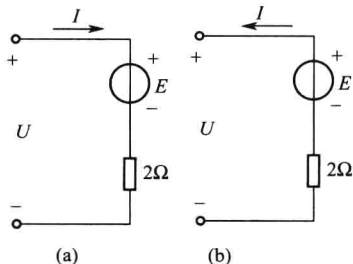


图 1-15 练习与思考 1-2-4 的图

1-2-3 如图 1-14 所示电路。① $R_0 \approx 0\Omega$ ，当 S 闭合时， I_1 是否被分去一些？②若 R_0 不能忽略，当 S 闭合时，60W 电灯中的电流 I_1 会否变动？③在 220V 电压下工作时，60W 和 100W 的电灯哪个的灯丝电

- 阻大？④如果 100W 电灯两端碰触（短路），当 S 闭合时，后果如何？100W 电灯的灯丝是否被烧毁？⑤设电源的额定功率为 125kW，端电压为 220V，当只接上一只 220V、60W 的电灯时，电灯会不会被烧毁？
- 1-2-4 图 1-15 是一电池电路，图 1-15(a) 中 $U=8V$ ， $E=6V$ ，该电池是做电源（供电）还是做负载（充电）用？图 1-15(b) 中 $U=6V$ ， $E=8V$ ，电池又做什么用？
- 1-2-5 一个电热器从 220V 的电源取用的功率是 500W，如将它接到 200V 的电源上，它取用的功率是多少？

1.3 电路的基本定律

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，它说明流过电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系，反映了电阻元件的特性。对于电阻 R 来说，欧姆定律表示流过电阻的电流 i 和电阻两端的电压 u 成正比的关系，其数学表达式为

$$u=iR \tag{1-3}$$

注意，式(1-3) 成立的条件是电压和电流的参考方向为关联。当电压和电流的参考方向为非关联时，式(1-3) 的右边必须加上一个负号，即

$$u=-iR \tag{1-4}$$

注意，欧姆定律仅适用于阻值不随通过的电流或两端电压变化而变化的电阻电路，满足欧姆定律的电路称为线性电路。对于非线性电路，欧姆定律不适用，在讨论非线性电路问题时，电流和电压之间的关系用函数来表示，该函数通常表示成 $u-i$ 平面上的曲线，该曲线称为伏 (V)-安 (A) 特性曲线。

【例 1-5】 如图 1-16 所示，已知 $R=5\Omega$ ，求电阻电压 U_{ab} 的大小，并说明电压的实际方向。

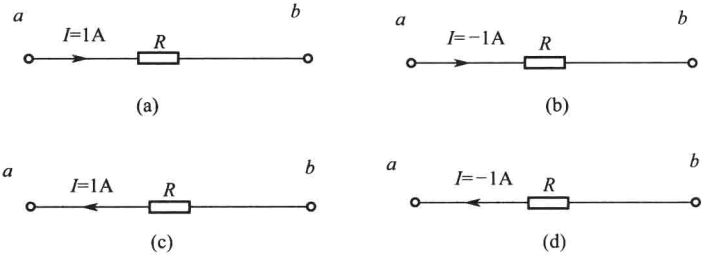


图 1-16 例 1-5 的图

解：图 1-16(a) 中，电阻电流和电压为关联参考方向，欧姆定律形式为： $U_{ab}=IR=1\times5=5\text{ (V)}$ ，因为 U_{ab} 为正，说明 U_{ab} 的实际方向与参考方向相同，从 a 指向 b 。

图 1-16(b) 中，电阻电流和电压为关联参考方向，欧姆定律形式为： $U_{ab}=IR=(-1)\times5=-5\text{ (V)}$ ，因为 U_{ab} 为负，说明 U_{ab} 的实际方向与参考方向相反，从 b 指向 a 。

图 1-16(c) 中，电阻电流和电压为非关联参考方向，欧姆定律形式为： $U_{ab}=-IR=-1\times5=-5\text{ (V)}$ ，因为 U_{ab} 为负，说明 U_{ab} 的实际方向与参考方向相反，从 b 指向 a 。

图 1-16(d) 中，电阻电流和电压为非关联参考方向，欧姆定律形式为： $U_{ab}=-IR=-(-1)\times5=5\text{ (V)}$ ，因为 U_{ab} 为正，说明 U_{ab} 的实际方向与参考方向相同，从 a 指向 b 。

1.3.2 基尔霍夫定律

任何一个电路都是由若干元件连接而成的，元件的电压电流的关系，称为元件约束。基

尔霍夫定律描述了元件相互连接时支路电流之间或支路电压之间的约束关系,称为“几何”约束或“拓扑”约束。基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律,是分析和求解电路的基本定律,既适用于线性电路,也适用于非线性电路。在叙述基尔霍夫定律之前,首先介绍几个有关的电路名词术语。

支路:二端元件或若干个二端元件串联组成不分叉的一段电路称为支路。

支路中的元件流过同一电流。图 1-17 中有 acb , ab , adb 三条支路。

结点:电路中三条或三条以上支路的连接点称为结点。图 1-17 中, a 和 b 点是三条支路的连接点,所以 a 和 b 点是结点。

回路:电路中任何一个闭合的路径称为回路。图 1-17 中有 $abca$, $abda$, $acbda$ 三个回路。

网孔:内部不含有其他支路的回路称为网孔。图 1-17 中有 $abca$, $abda$ 两个网孔。

(1) 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律应用于结点,用来确定连在同一结点上的各支路电流间的关系。在任一瞬时,流入某一结点的电流之和等于流出该结点的电流之和。这是因为电流具有连续性,电路中任何一点包括结点均不能堆积或产生电荷。

以图 1-18 所示电路为例,对结点 a 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-5)$$

或
即

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum I = 0 \quad (1-6)$$

说明:在任一瞬时,任一结点上电流的代数和恒等于零。如果规定按参考方向流入结点的电流取正号,则流出结点的电流取负号。

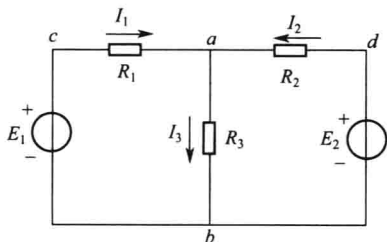


图 1-17 电路示例

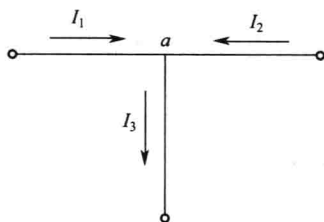


图 1-18 结点上电流

这就是基尔霍夫电流定律,式(1-5)和式(1-6)是其两种形式的表达式。

计算的结果,有些支路电流的值可能为负值,那是由于所选的电流参考方向与其实方向相反所致。

基尔霍夫电流定律可推广应用于包围部分电路的闭合面(“大结点”),即在任一瞬时,通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。

如图 1-19(a) 所示电路,闭合面包围了一个三角形电路,其中有三个结点。对闭合面应用 KCL,可得

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad \text{或} \quad \sum I = 0$$

取流入闭合面的电流为正。这可由对 A, B, C 三结点列出的 KCL 方程

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

三式相加证明。(思考: I_A , I_B , I_C 三个电流有无可能都是正值?)