

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

军队院校优质课程配套教材

电路

Circuit

主 编 王向军

副主编 单潮龙 何 芳

参 编 嵇 斗



“三五”国家重点出版物出版规划项目
工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)
军队院校优质课程配套教材

电 路

王向军 主 编
单潮龙 何 芳 副主编
嵇 斗 参 编



机械工业出版社

本书是依据“立足基础，精简理论，循序渐进，联系实际”的编写原则，为适应电气工程、自动化等专业领域知识面宽广的特点而编写的，主要内容包括电路模型和基尔霍夫定律、电阻电路的等效化简、电路的系统分析方法、电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态交流电路分析基础、互感器和变压器、谐振电路、三相电路、非正弦周期电流电路、二端口网络、动态电路的复频域分析等。每章都以应用电路实例引入，以分析实例相关电路结束，注重结合工程实际，启发学生思路，加深学生对相关理论的理解。

本书可作为高等学校电气类专业本科教材，也可作为电子信息类、计算机类专业阅读教材，以及供有关专业技术或工程应用人员阅读。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师发邮件至 jinacmp@163.com 索取，或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路/王向军主编. —北京: 机械工业出版社, 2018. 6

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业 军队院校优质课程配套教材

ISBN 978-7-111-59235-8

I. ①电… II. ①王… III. ①电路-高等学校-教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 036135 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: 吉玲 责任编辑: 吉玲 周金峰 王荣 刘丽敏

责任校对: 王明欣 封面设计: 鞠杨

责任印制: 张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.5 印张·498 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59235-8

定价: 47.00 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: 010-88379649

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

封面无防伪标均为盗版

前 言

电路课程是电气类、电子信息类、计算机类专业的重要基础课程，本书侧重电气工程专业教学。电气工程专业是现代科技领域中的核心学科之一，从某种意义上讲，电气工程的发达程度代表着国家的科技进步水平。因此，电气工程的教育在国家高等教育教学中一直占据着十分重要的地位。传统的电气工程定义为用于创造产生电气与电子系统的有关学科的总和，而今天的电气工程则涵盖了几乎与电子、光子有关的所有工程行为。电气工程领域知识宽度的巨大增长，要求我们重新检查甚至重新构造电气工程的学科方向、课程设置、教材及教学内容，以使电气工程学科能有效地满足学生需求和社会需求。

国内院校电路课程是电气类、电子信息类、计算机类专业学科必修的基础课，课程名称多为“电路原理”“电路基础”“电路分析基础”等。一般而言，“电路原理”侧重电路理论性、系统性，主要针对电气类强电专业，通常两学期授课；“电路分析基础”更侧重工程应用，主要针对电子信息类、计算机类等弱电专业，一学期授课。学习电路课程之前，需要进行大学物理（电磁部分）、高等数学（微积分、线性方程）等先导课程内容的学习。本书依据“立足基础，精简理论，循序渐进，联系实际”的编写原则，注重理论性、系统性，强调实用性、工程化。本书共 12 章，涵盖了电路分析的主要内容，书中标“*”号部分作为扩展内容供选修。为帮助读者学习相关理论并联系实际应用，每章开篇总括了该章的内容和要点，再以与该章节知识相关的实例引出问题，每章内容后附有实例应用，与导读思考相呼应，并附有每章小结和习题。

本书在编写过程中汲取了参考文献中各位专家、学者的许多经验，受益匪浅，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，本书结构和体系的安排、内容的取舍和叙述等方面恐有疏漏和不当之处，恳请读者指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电路模型和基尔霍夫定律 1

[章前导读] 1

[导读思考] 1

1.1 电路与电路模型 2

1.1.1 电路的功能和电路的构成 2

1.1.2 电路模型 2

1.1.3 线性非时变集总参数电路 2

1.2 电流、电压及其参考方向 4

1.2.1 电流 4

1.2.2 电压 5

1.2.3 功率和能量 5

1.3 基尔霍夫定律 6

1.3.1 基尔霍夫电流定律 7

1.3.2 基尔霍夫电压定律 7

1.4 无源电路元件 8

1.4.1 电阻元件 9

1.4.2 电容元件 10

1.4.3 电感元件 13

1.5 有源电路元件 15

1.5.1 独立电源 15

1.5.2 受控源 18

[实例应用] 20

本章小结 20

习题 1 21

第 2 章 电阻电路的等效化简 25

[章前导读] 25

[导读思考] 25

2.1 单口网络等效化简的概念 26

2.1.1 端口 26

2.1.2 单口网络 26

2.1.3 单口网络的伏安特性 27

2.1.4 单口网络的等效电路 29

2.2 无源单口网络的等效化简 30

2.2.1 电阻串联的等效化简 30

2.2.2 电阻并联的等效化简 31

2.2.3 电阻混联的等效化简 34

2.3 电阻的 Υ 联结和 Δ 联结的等效变换 36

2.3.1 Υ 和 Δ 联结 36

2.3.2 Υ 和 Δ 联结的等效互换 37

2.3.3 电桥电路及电桥平衡 39

2.4 有源单口网络的等效化简 42

2.4.1 独立电源串并联的等效化简 43

2.4.2 多余元件的概念 43

2.4.3 实际电源的两种模型及其等效

变换 44

2.5 含受控源电路的等效化简 46

2.5.1 含受控源单口网络的等效电路 47

2.5.2 受控源单口网络两种电源形式的

等效变换 48

[实例应用] 49

本章小结 50

习题 2 50

第 3 章 电路的系统分析方法 53

[章前导读] 53

[导读思考] 53

3.1 2b 法和支路法 53

3.1.1 2b 法 54

3.1.2 支路电流法 55

3.1.3 支路电压法 57

3.1.4 独立方程的选取 58

3.1.5 支路电流法的基本步骤 59

3.2 网孔法和回路法 60

3.2.1 网孔电流 61

3.2.2 网孔电流方程的列写 61

3.2.3 回路法 64

3.2.4 含有受控源的电阻电路回路方程列 写法	65	5.2 一阶电路的零输入响应和零状态 响应	117
3.3 节点法和改进的节点法	66	5.2.1 RC 和 RL 电路的零输入响应	117
3.3.1 节点电压	66	5.2.2 RC 和 RL 电路的零状态响应	122
3.3.2 节点法	67	5.3 一阶电路全响应和三要素法	125
3.3.3 改进的节点法	70	5.3.1 全响应	125
3.3.4 含有受控源的电阻电路节点方程列 写法	71	5.3.2 三要素法	126
3.3.5 节点法与其他方法比较	73	*5.4 一阶电路在正弦激励作用下的 响应	127
[实例应用]	73	5.5 阶跃响应和冲激响应	129
本章小结	74	5.5.1 阶跃函数与冲激函数	129
习题3	74	5.5.2 阶跃响应	131
第4章 电路定理	78	5.5.3 冲激响应	132
[章前导读]	78	*5.6 应用卷积积分法计算零状态响应	134
[导读思考]	78	*5.7 二阶动态电路的响应	139
4.1 叠加定理	79	5.7.1 二阶电路的零输入响应	139
4.1.1 叠加定理的内容	79	5.7.2 二阶电路的零状态响应和全 响应	147
4.1.2 叠加定理的应用	81	[实例应用]	151
4.1.3 齐次性定理	84	本章小结	151
4.2 替代定理	85	习题5	151
4.2.1 替代定理的内容	85	第6章 正弦稳态交流电路分析 基础	156
4.2.2 替代定理的证明	86	[章前导读]	156
4.2.3 替代定理的要求	87	[导读思考]	156
4.2.4 替代定理的应用	88	6.1 正弦量的基本概念	157
4.3 戴维南定理和诺顿定理	89	6.1.1 正弦量的三要素	157
4.3.1 戴维南定理	89	6.1.2 正弦量的相位差	158
4.3.2 诺顿定理	93	6.1.3 正弦量的有效值	160
4.3.3 有源线性电阻单口网络的等效 电路	95	6.2 正弦量的相量表示	161
4.3.4 最大功率传输定理	97	6.2.1 复数的表示形式及运算	161
4.4 特勒根定理和互易定理	100	6.2.2 正弦量和相量	163
4.4.1 特勒根定理	100	6.2.3 同频率正弦量的运算	165
4.4.2 互易定理	103	6.3 基尔霍夫定律和元件特性的相量 形式	166
*4.5 补偿定理	107	6.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	166
[实例应用]	109	6.3.2 元件特性方程的相量形式	167
本章小结	109	6.4 阻抗与导纳	171
习题4	110	6.4.1 阻抗	171
第5章 动态电路的时域分析	114	6.4.2 导纳	172
[章前导读]	114	6.4.3 阻抗和导纳的关系	174
[导读思考]	114	6.5 正弦交流电路的分析	176
5.1 一阶电路的基本概念和换路定则	115	6.6 正弦交流电路的功率及最大功率	
5.1.1 一阶电路的基本概念	115		
5.1.2 换路定则与初始值的确定	115		

传输	182	[章前导读]	236
6.6.1 正弦交流电路的功率	182	[导读思考]	236
6.6.2 最大功率传输	185	9.1 对称三相电路	236
6.7 功率因数的提高	186	9.1.1 对称三相电源	236
[实例应用]	189	9.1.2 对称三相负载	239
本章小结	189	9.1.3 对称三相电路的计算	240
习题 6	190	9.2 不对称三相电路	242
第 7 章 互感器和变压器	195	9.2.1 不对称三相电路概述	242
[章前导读]	195	9.2.2 不对称三相电路的一般计算方法	244
[导读思考]	195	9.3 三相电路的功率及测量方法	245
7.1 互感现象和耦合电感的伏安特性	196	9.3.1 三相电路的功率	245
7.1.1 互感现象和耦合系数	196	9.3.2 三相电路功率的测量方法	246
7.1.2 同名端与耦合电感的伏安特性	198	[实例应用]	249
7.1.3 正弦稳态条件下耦合电感元件的伏安特性	199	本章小结	249
7.2 含耦合电感电路的分析	201	习题 9	250
7.2.1 耦合电感的串联	201	第 10 章 非正弦周期电流电路	251
7.2.2 耦合电感的并联	203	[章前导读]	251
7.2.3 耦合电感的 T 形等效	204	[导读思考]	251
7.2.4 含耦合电感元件一般电路的分析	205	10.1 非正弦周期信号的傅里叶分解	251
7.3 空心变压器和理想变压器	206	10.1.1 傅里叶级数的三角形式	252
7.3.1 空心变压器	206	10.1.2 对称性的应用	254
7.3.2 全耦合变压器	209	10.1.3 频谱图	255
7.3.3 理想变压器	211	10.2 非正弦周期信号的有效值、平均值和功率	255
[实例应用]	215	10.2.1 有效值	255
本章小结	216	10.2.2 平均功率	256
习题 7	216	10.3 非正弦周期电流电路的分析	258
第 8 章 谐振电路	222	[实例应用]	261
[章前导读]	222	本章小结	261
[导读思考]	222	习题 10	262
8.1 串联谐振电路	223	第 11 章 二端口网络	264
8.1.1 RLC 串联谐振电路	223	[章前导读]	264
8.1.2 频率响应	225	[导读思考]	264
8.1.3 通频带	227	11.1 二端口网络的方程与参数	265
8.2 并联谐振电路	227	11.1.1 二端口网络参数与方程	265
8.2.1 GCL 并联谐振电路	227	11.1.2 各组参数间的互换	271
8.2.2 实用的并联谐振电路	230	11.2 二端口网络的等效与组合	272
[实例应用]	232	11.2.1 二端口网络的等效电路	272
本章小结	233	11.2.2 二端口网络的联结方式	273
习题 8	233	11.3 接负载的二端口网络	275
第 9 章 三相电路	236	11.3.1 策动点阻抗	275
		11.3.2 转移函数	276

11.4 回转器和负阻抗变换器	278	12.2.7 复频移性质	290
11.4.1 回转器	278	12.3 拉普拉斯反变换	291
11.4.2 负阻抗变换器	279	12.3.1 象函数的两种形式	292
[实例实用]	279	12.3.2 部分分式展开法求拉普拉斯反 变换	293
本章小结	280	12.4 应用拉普拉斯变换分析线性时不变 电路	299
习题 11	280	12.4.1 基尔霍夫定律的复频域形式	299
第 12 章 动态电路的复频域分析	283	12.4.2 电路元件伏安关系的复频域 形式	300
[章前导读]	283	12.4.3 复频域阻抗与复频域导纳	303
[导读思考]	283	12.4.4 线性时不变电路的复频域 分析法	304
12.1 拉普拉斯变换	284	12.4.5 网络定理在复频域分析中的 应用	312
12.1.1 傅里叶变换在应用上的 局限性	284	[实例应用]	315
12.1.2 从傅里叶变换到拉普拉斯 变换	285	本章小结	315
12.1.3 拉普拉斯变换存在的条件与 收敛域	286	习题 12	315
12.2 拉普拉斯变换的基本性质	288	附录	317
12.2.1 线性性质	288	附录 A 法定单位	317
12.2.2 延时性质	288	附录 B 拉普拉斯变换表	318
12.2.3 时域微分性质	289	参考文献	319
12.2.4 时域积分性质	289		
12.2.5 时域卷积定理	290		
12.2.6 尺度变换 (时频展缩) 性质	290		

第1章

电路模型和基尔霍夫定律

【章前导读】

本章主要介绍电路模型的概念、电压和电流的参考方向、基尔霍夫定律（包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律）和基本电路元件（包括电阻、电感、电容、电压源、电流源以及受控源）。电路理论主要研究的是电路模型，基尔霍夫定律和电路元件的特性是电路分析的基本依据。

【导读思考】

提到高电压，人人都知道高电压危险要远离，但是否人接触到高电压，就一定会触电呢？触电的关键在于人体的不同部位之间是否有电压，能否构成回路，是否有电流流过。

流过人体的电流大小、通电时间长短、频率高低及流过的身体部位都会对人体产生不同的影响。当电流只流过骨骼和肌肉时，会引起人体暂时麻痹，神经信号停止或产生不自觉的肌肉收缩，一般没有生命危险。当电流流过控制大脑供氧的神经和肌肉时，人体暂时麻痹可能会造成呼吸停止，突然的肌肉收缩会造成大脑供血暂停。这时必须紧急救援，否则几分钟内会引起死亡。对于电流和通电时间，国际电工委员会（IEC）通过测试，把30mA作为一个评判是否安全的界限。为安全起见，接触人体的电气设计一般将电流限制在几个毫安以内。表1-1是一篇医学报告经过严格测试后，做出的不同电流下人体生理反应的实验数据。

表 1-1 不同电流下人体的生理反应

电流/mA	生理反应
3~5	仅仅能感觉
35~50	极端痛苦
50~70	肌肉麻痹
500	心跳停止

我们平常多说36V“安全电压”，为什么我们生活中常常提到的是“安全电压”而不是安全电流呢？因为通过人体的电流实在是既不好测量也不好计算，在实际应用中非常不方便。安全电压的提出是把人体看作一段电阻，建立电阻电路模型，遵循欧姆定律，有了电流作为上限，再根据人体电阻计算出来的。

如何建立电路模型？如何计算安全电压？学习电路模型及最基本的电路定律以后，在本章的实例应用中会给出详细的计算方法和答案。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路的功能和电路的构成

电路也称电网络，它是电流的通路，是由一些电器元件相互连接而成的。每个电路都有其特定的功能。

电路的结构形式和所能完成的任务多种多样，但其功能可以归结为两类，一类是实现电能的传输和转换，典型的例子是电力系统；另一类是传递和处理信号，常见的例子如测量炉温的热电偶温度计、收音机、电视机等。不论电路的结构多么复杂，它们都由三大部分组成：电源或信号源、中间环节和负载。在传输和转换电能的电路里，电源是发电机或电池等，它们把其他形式的能量转换成电能；负载是电动机、电灯或电炉等，它们把电能转换成其他形式的能量；变压器和输电线是中间环节，是连接电源和负载的部分，它起传输和分配电能的作用。在传递和处理信号的电路中，信号源是热电偶、接收天线等，它们把温度、电磁波等信息转变成电压信号，而后通过中间环节（放大、调谐、检波、变频等各种电路）对信号进行传递和处理，最后送到负载（如毫伏计、扬声器、显像管等）还原为原始信息。

不论是用于电能的传输和转换，还是传递和处理信号，通常把电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。根据激励与响应之间的因果关系，有时又把激励称为输入，响应称为输出。

1.1.2 电路模型

实际电路都是由一些起不同作用的实际电路元件或器件所组成，如电阻器、电容器、线圈、开关、发电机、变压器、电动机、晶体管等，它们的电磁性质较为复杂。为了便于对实际电路进行分析和用数学方法对其特性进行描述，将实际元件理想化（或称模型化），即在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略次要因素，把它近似地看作理想电路元件（简称电路元件或元件）。如一个器件的主要效应表现为电能损耗，就可以用电阻元件来表示；对于主要效应表现为磁场能量储存的器件，可以用电感元件来表示；而对于主要效应表现为电场能量储存的器件，就可以用电容元件来表示。这样，电阻元件、电感元件和电容元件就是抽象化了的理想电路元件。

由一些理想电路元件所组成的电路，就是实际电路的电路模型。例如，图 1-1a 是一个蓄电池通过连接导线向一白炽灯供电的装置，是一个实际的电路，可以用图 1-1b 所示的电路作为它的电路模型。在这个模型中，蓄电池用一个电压为 U_S 的电源和一个与它串联的内阻 R_i 表示，白炽灯用一个电阻 R 表示。

1.1.3 线性非时变集总参数电路

1. 线性电路

仅由线性元件组成的电路称为线性电路。线性电路最基本的特性是它具有叠加性（可加性）和均匀性（齐次性）。叠加性和均匀性的含

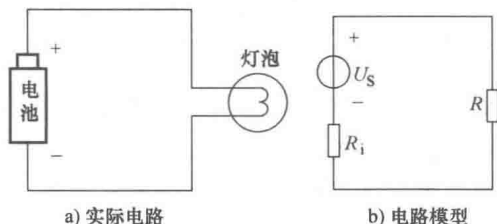


图 1-1 电路和电路模型图

义可以用图 1-2 来说明。

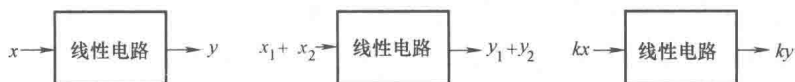


图 1-2 叠加性和均匀性说明图

图 1-2 中的方框表示电路， x 表示加在电路上的输入信号或称激励； y 表示电路对该输入信号产生的输出或称响应。叠加性的含义是：若激励 x_1 产生的激励为 y_1 ，激励 x_2 产生的激励为 y_2 ，则当 x_1 与 x_2 共同作用于电路时产生的响应为 $y_1 + y_2$ 。均匀性的含义是：若激励 x 作用于电路产生的响应为 y ，则激励 kx 作用于电路产生的响应必为 ky ， k 为一常数。换句话说，线性电路在各个激励共同作用下的响应是各个激励所产生响应的加权之和。

严格地说，真正的线性电路在实际中是不存在的。但是大量的实际电路在一定条件下都可以近似视为线性电路。在电路理论中，对线性电路的研究已经有了相当长的历史，有了成熟的理论和方法。电路课程作为电路理论的入门课程，主要研究线性电路。

2. 非时变电路

组成电路的元件的参数不随时间变化的电路称为非时变电路，或者称为具有非时变特性的电路。所谓元件的非时变特性，是指函数 $y=f(x)$ 在 $y-x$ 平面上的特性曲线的位置不随时间而改变。对于非时变线性电路，若激励 $x(t)$ 的波形延迟一段时间 τ ，则响应 $y(t)$ 的波形也只是延迟了一段时间 τ ，如图 1-3 所示。

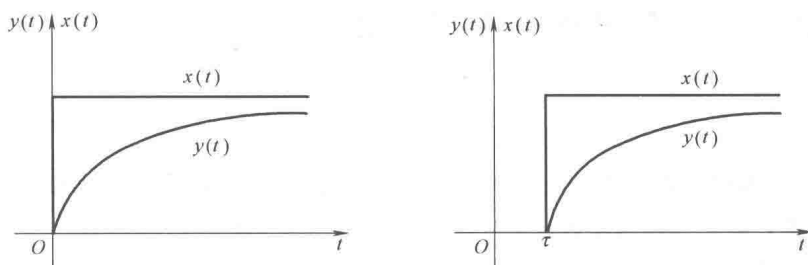


图 1-3 非时变特性说明图

3. 集总参数电路

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象，用电流、电压（有时还用电荷、磁通）等电量来描述其中的过程。我们通常只关心各器件上流过的电流和端子间的电压，而不涉及器件内部的物理过程。这只有在满足集总化假设的条件下才是合理的。

实际器件、连接导线以及由它们连接成的实际电路都有一定的尺寸，占有一定的空间，而电磁能量的传播速度（ $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）是有限的，如果电路尺寸 l 远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ （ $\lambda=c/f$ ），可以认为传送到实际电路各处的电磁能量是同时到达的。这时，与电磁波的波长相比，电路尺寸可以忽略不计。在这种假定条件下，可以证明在任意时刻流入各器件任一端子的电流和任意两个端子之间的电压都将是单值的量。在这种近似条件下，我们用足以反映其电磁性质，但几何尺寸又可忽略不计的理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。这种理想化的电路元件称为集总参数元件。

由集总参数元件连接组成的电路称为集总参数电路。通常所说的电路图是用“理想导线”将一些电路元件符号按一定规律连接组成的图形。电路图中元件符号的大小、连线的

长短和形状都是无关紧要的，只要能正确地表明各电路元件之间的连接关系即可。

实际电路的几何尺寸相差甚大。对于电力输电线，其工作频率为 50Hz，相应的波长为 6000km，因而 30km 长的输电线只有波长的 1/200，可以看作是集总参数电路，而远距离输电线可长达数百乃至数千公里，就不能看作是集总参数电路。对于电视天线及其传输线来说，其工作频率为 10^8 Hz 的数量级，譬如某电视频道的工作频率约为 200MHz，其相应的工作波长为 1.5m，这时 0.2m 长的输电线也不能看作是集总参数电路。对于非集总参数电路，需要用分布参数电路理论或电磁场理论来研究。

综合起来，具有线性非时变集总参数元件并用理想导线连接的电路模型称为线性非时变集总参数电路。

本书只讨论集总参数电路。

1.2 电流、电压及其参考方向

电路的电性能通常用一组可表示为时间函数的变量来描述，这些变量中最常用的是电流、电压和功率。在学习本节内容时要注意弄清楚电流电压的参考方向，这是一个重要概念。

1.2.1 电流

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流，用符号 i 表示，即

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

式中， q 为通过导体横截面的电荷量。当电流的大小和方向不随时间变化时，称为直流（恒定）电流，习惯上用大写字母 I 表示。

在国际单位制（SI）中，电荷量的单位是库仑（C），时间的单位是秒（s），电流的单位是安培（A）。

早期的科学家规定，电流的正方向是正电荷流动的方向。这个规定沿用至今。后来，科学家发现电流本质上是电子的定向运动，而电子是带负电荷的。因此，电流的正方向是与电子运动的方向相反的。但在具体电路中，电流的实际方向常常随时间不断变化；即使不随时间变化，某段电路中电流的实际方向也很难预先断定，因此，往往很难在电路中标明电流的实际方向。这就有必要引入电流“参考方向”的概念。

参考方向是任意假设的方向，也称为正方向。在电路图中以带箭头的实线表示电流的参考方向，如图 1-4 所示。参考方向选定后，电流就成为代数量。当参考方向与电流的实际方向（图 1-4 中带箭头的虚线）一致时，电流取正值（ $i > 0$ ）；反之，电流取负值（ $i < 0$ ）。这样，在指定电流参考方向下，通过电流值的正或负，就可判断出电流的实际方向。显然，在未指定参考方向的情况下，电流值的正或负是没有意义的。表示电流参考方向的箭头通常标示于导线上，如图 1-4c 所示。

电流的参考方向也可用双下标表示，如 i_{ab} ，表示其参考方向为 a 指向 b。今后在电路图中只标明参考方向。

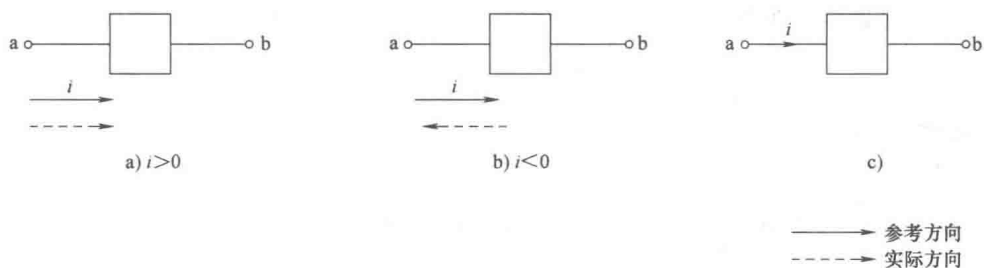


图 1-4 电流的参考方向图

1.2.2 电压

电路中，电场力将单位正电荷从某点移动到另一点所做的功定义为该两点之间的电压，也称电位差，用 u 表示，即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

当电压的大小和方向不随时间变化时，称为直流（恒定）电压，通常用大写字母 U 表示。

如同电流一样，在分析电路时，也要预先假定电压的参考方向。在电路图中常用参考极性符号“+”“-”表示，电压的参考方向由“+”极端指向“-”极端，电压的参考方向也可用带箭头的实线表示，如图 1-5 所示。参考方向一旦选定，电压也就成为代数量，有正负之分。当参考方向与电压的实际方向一致时，电压取正值 ($u > 0$)；反之，则电压取负值 ($u < 0$)。电压的参考方向也可用双下标表示，如 u_{ab} ，表示 a 点为“+”极，b 点为“-”极。



图 1-5 电压的参考方向图

在国际单位制 (SI) 中，电压的单位是伏特 (V)。

电流、电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。电流、电压是代数量，既有数值又有与之相应的参考方向才有明确的物理意义。只有数值而无参考方向的电流、电压是没有意义的。

一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向可以分别独立地任意指定，如果其电流的参考方向和电压的参考方向取得一致时，称为关联参考方向，如图 1-6a 所示。反之，则为非关联参考方向，如图 1-6b 所示。

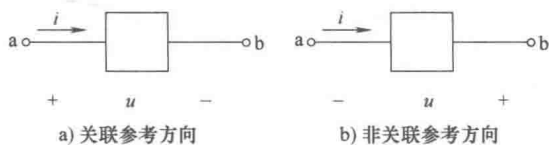


图 1-6 参考方向图

1.2.3 功率和能量

功率与电压和电流密切相关。正电荷从电路元件上电压的“+”极移到“-”极是电场力对电荷做功的结果，这时元件吸收能量；反之，当正电荷从电路元件上电压的“-”极移

到“+”极，则必须由外力（化学力、电磁力等）对电荷做功以克服电场力，这时电路元件发出能量。

根据式 (1-2)，从 t_0 到 t 时间内，元件吸收的能量 w 为

$$w = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

在关联参考方向的情况下，由式 (1-1) 可得该元件吸收的能量为

$$w = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-3)$$

式中， u 、 i 都是时间的函数，并且是代数量，因此， w 也是时间的函数，也是代数量。

能量相对于时间的变化率称为电功率，简称功率。于是，电路元件吸收的功率 p 为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-4)$$

需要注意的是，式 (1-4) 是在电流、电压为关联参考方向（见图 1-6a）的情况下推得的。如果 $p > 0$ ，表示元件吸收功率；如果 $p < 0$ ，表示元件吸收的功率为负值，实际上它将发出功率。如果电流、电压为非关联参考方向，如图 1-6b 所示，式 (1-4) 应当改写为

$$p = -ui \quad (1-5)$$

在这种情况下，计算出的 $p > 0$ 时，元件也是吸收功率； $p < 0$ 时，元件还是发出功率。

在国际单位制 (SI) 中，能量的单位是焦耳 (J)，功率的单位为瓦特 (W)。

1.3 基尔霍夫定律

电路是由一些电路元件相互连接构成的总体。电路中各个元件的电压和电流受到两类约束。一类是元件的相互连接给元件电流之间和元件电压之间带来的约束，称为拓扑约束，这类约束由基尔霍夫定律体现。另一类是元件的特性形成的约束，即每个元件上的电压与电流自身存在一定的关系，称为元件约束。本节先讨论前者，元件约束在后面几节讨论。

基尔霍夫定律是分析集总参数电路的重要定律，是电路理论的基石。为了便于对定律进行阐述，先介绍几个有关的电路术语。

(1) 支路 电路的任何一个分支称为支路。一条支路可以是一个元件，也可以由几个元件串联组成。一条支路上的各元件都流过同一个电流。如图 1-7 所示的电路中共有 5 条支路。

(2) 节点 电路中三条或三条以上支路的连接点，称为节点。如图 1-7 所示的电路中，1、2、3 均是节点，共有 3 个节点。

(3) 回路 电路中由若干条支路构成的闭合路径，称为回路。如图 1-7 所示的电路中共有 7 个回路。例如闭合路径 1321 是回路，43214 也是回路，其他回路请读者自行找出。

(4) 网孔 平面电路中没有支路穿过其中的回路，称为网孔。如图 1-7 所示的电路中共有 3 个网孔。

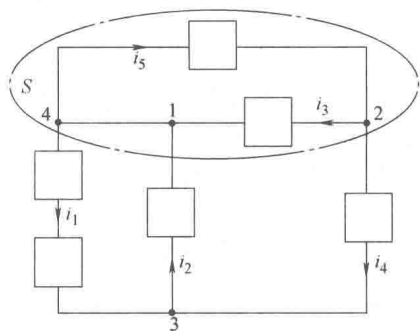


图 1-7 术语解释电路图

属于回路，但回路不一定是网孔。例如闭合路径 43214 是回路，但它不是网孔。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 可表述为：对于集总参数电路中的任一节点，在任意时刻，流出该节点的电流之和等于流入该节点的电流之和，即

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1-6)$$

例如，对图 1-7 所示电路中的节点 1，列出 KCL 方程为

$$i_2 + i_3 = i_1 + i_5$$

若规定流入节点的电流取“+”号，流出节点的电流取“-”，则上述方程可改写为

$$i_2 + i_3 - i_1 - i_5 = 0$$

因而，KCL 又可描述为：对于集总参数电路中的任一节点，在任意时刻，所有连接于该节点的支路电流的代数和恒等于零，即

$$\sum i = 0 \quad (1-7)$$

KCL 通常用于节点，它也可推广用于包括数个节点的闭合曲面（可称为广义节点）。KCL 是电荷守恒的体现。在图 1-7 中，对于闭合曲面 S ，有

$$i_1 + i_2 - i_4 + i_6 = 0$$

例 1-1 如图 1-8 所示的电路，已知 $i_1 = 5\text{A}$ ， $i_2 = -1\text{A}$ ， $i_6 = -2\text{A}$ ，求 i_4 。

解：为求得 i_4 ，对于节点 b ，根据 KCL 有 $i_3 + i_4 = i_6$ ，即

$$i_4 = i_6 - i_3$$

为求出 i_3 ，可利用节点 a ，由 KCL 有 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ，即

$$i_3 = -i_1 - i_2 = -5\text{A} - (-1)\text{A} = -4\text{A}$$

将 i_3 代入 i_4 的表达式，得

$$i_4 = i_6 - i_3 = -2\text{A} - (-4)\text{A} = 2\text{A}$$

或者，取闭合曲面 S ，如图 1-8 中的虚线所示，根据 KCL，有

$$i_1 + i_2 - i_4 + i_6 = 0$$

可得

$$i_4 = i_1 + i_2 + i_6 = 5\text{A} - 1\text{A} - 2\text{A} = 2\text{A}$$

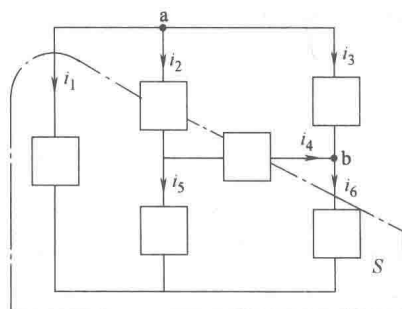


图 1-8 例 1-1 图

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) 可表述为：集总参数电路中的任一回路，在任意时刻，沿该回路绕行一周的全部电压的代数和等于零，即

$$\sum u = 0 \quad (1-8)$$

注意：式 1-8 取和时，需要任意指定一个回路的绕行方向，凡支路电压的参考方向与回路的绕行方向一致时，该电压前面取“+”号；支路电压的参考方向与回路的绕行方向相反时，该电压前面取“-”号。

例如，对图 1-9 中的回路，以顺时针为回路绕行方向建立 KVL 方程为

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

式中, u_1 和 u_3 的参考方向与回路绕行方向一致, 取“+”号; u_2 和 u_4 参考方向与回路绕行方向不一致, 取“-”号。

KVL的应用还可推广到求解任意两点间的电压, 譬如求取图 1-9 中 a、c 之间的电压 u_{ac} 。在图 1-9 中, $u_{ab} = u_1$, $u_{bc} = -u_2$, $u_{cd} = u_3$, $u_{da} = -u_4$, 而回路 KVL 方程为

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0$$

亦即

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} + u_{da} = 0$$

将上式中的后两项移到等号右边, 考虑到 $u_{cd} = -u_{dc}$, $u_{da} = -u_{ad}$, 可得

$$u_{ab} + u_{bc} = u_{ad} + u_{dc}$$

上式等号左端是沿路径 a、b、c 的电压 u_{ac} , 即

$$u_{ac} = u_{ab} + u_{bc} = u_1 - u_2$$

而等号右端是沿路径 a、d、c 的电压 u_{ac} , 即

$$u_{ac} = u_{ad} + u_{dc} = u_4 - u_3$$

二者相等。

以上结果表明, 在集总参数电路中, 任意两点 (譬如 p 和 q) 之间的电压 u_{pq} 等于沿从 p 到 q 的任一路径上所有支路电压的代数和, 即

$$u_{pq} = \sum_{\substack{\text{沿由 p 到 q 的} \\ \text{任一路径}}} u \quad (1-9)$$

例 1-2 如图 1-10 所示的电路, 已知 $u_1 = 10\text{V}$, $u_2 = -2\text{V}$, $u_3 = 3\text{V}$, $u_7 = 2\text{V}$ 。求 u_5 、 u_6 和 u_{cd} 。

解: 由图可见, $u_5 = u_{bc}$, 沿 b、a、c 路径, 得

$$u_5 = u_{ba} + u_{ac} = -u_1 + u_3 = -10\text{V} + 3\text{V} = -7\text{V}$$

又 $u_6 = u_{ad}$, 沿 a、b、e、d 路径, 得

$$u_6 = u_{ad} = u_{ab} + u_{be} + u_{ed} = u_1 + u_2 - u_7 = 10\text{V} - 2\text{V} - 2\text{V} = 6\text{V}$$

$$u_{cd} = u_{ca} + u_{ad} = -u_3 + u_6 = 3\text{V}$$

或者沿 c、a、b、e、d 路径, 得

$$u_{cd} = u_{ca} + u_{ab} + u_{be} + u_{ed} = -u_3 + u_1 + u_2 - u_7 = -3\text{V} + 10\text{V} - 2\text{V} - 2\text{V} = 3\text{V}$$

基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律是集总参数电路的基本定律。KCL 描述了电路中任一节点处, 各支路电流的约束关系; KVL 描述了在电路的任一回路中, 各支路电压的约束关系。KCL 和 KVL 仅与电路中元件的相互连接形式有关, 而与元件自身的特性无关, 它是元件互连的拓扑约束关系。KCL 和 KVL 不仅适用于线性电路, 也适用于非线性电路; 不仅适用于非时变电路, 也适用于时变电路。

1.4 无源电路元件

在集总参数电路中, 电路元件是构成电路的基本单元, 是实际器件的理想化模型, 应有严格的定义。本节和下节将定义几种基本的电路元件及其元件的约束方程。

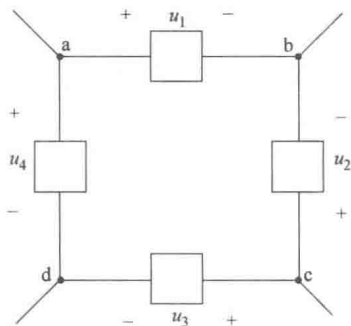


图 1-9 KVL 用于回路图

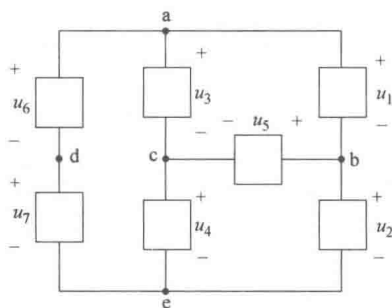


图 1-10 例 1-2 图

1.4.1 电阻元件

1. 电阻的定义

电阻是表示电路中阻碍电流流动和表示能量损耗大小的参数。电阻元件是用来模拟电能损耗或电能转换为热能等其他形式能量的理想元件。电阻元件习惯上简称为电阻 (Resistor), 故“电阻”一词有两种含义, 应注意区别。从元件特性上电阻可分为线性、非线性、非时变和时变电阻; 从功率的发出或吸收角度, 可分为有源和无源电阻; 从端子数上讲, 又可分为二端电阻和多端电阻。下面给出二端电阻的定义, 其概念可推广至多端电阻元件。

若一个二端元件在任意时刻其端电压 u 和流过的电流 i 之间的关系可由 $u-i$ 平面上一条曲线来确定, 则此二端元件称为二端电阻元件。该曲线称为电阻的伏安特性曲线, 它反映了电阻的电压与电流的关系 (Voltage Current Relationship, VCR)。

2. 线性电阻元件

线性电阻元件的伏安特性曲线是 $u-i$ 平面上一条通过原点的直线, 电阻值的大小等于直线的斜率。斜率不随时间变化时称为线性时不变电阻 (简称电阻), 否则称为线性时变电阻。图 1-11 所示为线性电阻的伏安特性曲线及元件的符号。

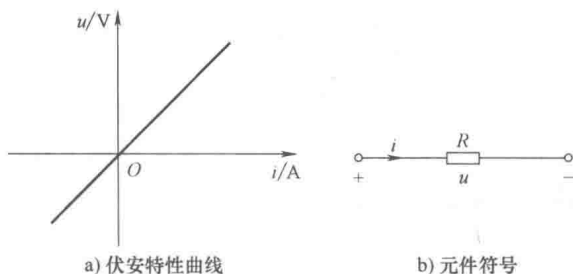


图 1-11 线性电阻的伏安特性曲线及元件的符号

由特性曲线可知, 线性电阻是双向元件, 即改变电压极性时, 电流方向也同时改变。在任何时刻, 线性电阻两端的电压与流过的电流的关系都服从欧姆定律。在电压与电流为关联参考方向时, 电压和电流的关系为

$$u = Ri \quad (1-10)$$

或

$$i = Gu \quad (1-11)$$

式中, 电阻 R 是与电流和电压无关的常数; 电导 G 是电阻的倒数, 即 $G = 1/R$ 。在国际单位制中, 电阻的基本单位为欧姆 (Ω), 电导的基本单位为西门子 (S)。

需要特别注意的是, 当电阻元件两端的电压与流过的电流为非关联参考方向时, 欧姆定律应改为

$$u = -Ri \quad (1-12)$$

或

$$i = -Gu \quad (1-13)$$

3. 开路和短路

有两种特殊的电阻值得注意: 开路和短路。当一个二端元件 (或电路) 的端电压不论为何值时, 流过它的电流值恒为零, 就把它称为开路, 开路可看成一个阻值为 ∞ 的电阻。当流过二端元件 (或电路) 的电流不论为何值时, 它的电压值恒为零, 就把它称为短路, 短路可看成一个阻值为零的电阻, 或看成理想导线。