



21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

电路分析教程

(第2版)

◎左全生 主编 ◎包 蕾 王桂星 于海平 副主编 ◎张立臣 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

电路分析教程

(第 2 版)

左全生 主 编
包 蕾 王桂星 于海平 副主编
张立臣 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了电路概述, 电路的等效分析, 电路分析的基本方法, 电路分析的重要定理, 正弦交流电路的稳态分析, 含耦合电感的电路分析, 三相电路, 非正弦周期性电流电路, 无源双口网络, 网络函数和频率特性, 动态电路的时域分析, 阶跃响应、冲激响应与动态电路的复频域分析等内容。本书在编写时, 力求突出实用性, 编入了大量工程实例, 以使读者能对电路原理有更深刻、实际的理解和把握。

本书可作为电子信息、计算机、电气控制、自动化等应用型高校本科专业的电路及电路基础课程的教材, 也可供高职高专学校的相关专业选用。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析教程 / 左全生主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2010.6

(21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材)

ISBN 978-7-121-11003-0

I. ①电… II. ①左… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 100323 号

责任编辑: 柴 燕

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 18.5 字数: 473.6 千字

印 次: 2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序 言

随着世界经济一体化的进程，我国已成为世界上最大的加工基地和制造基地，尤其是长三角地区更为突出，已有近百家名列世界五百强的企业落户该地区，带动了该地区经济突飞猛进的发展，同时也为就业创造了广阔的前景。企事业单位对应用型本科人才的需求多了，但要求也提高了。这就对工程教育的发展提出了新的挑战，同时也提供了新的发展机遇。

在此形势下，国家教育部近年来批准组建了一批以培养应用型本科人才为宗旨的高等学校，同时举办了多次“应用型本科人才培养模式研讨会”，对应用型本科教育的办学思想和发展定位进行初步探讨。并于 2002 年在全国高等院校教学研究中心立项，成立了 21 世纪中国高等院校应用型人才培养体系的创新与实践课题组，有十几所应用型本科院校参加了课题组的研究，取得了多项研究成果，并于 2004 年结题验收。我们就是在这种形势下，组织了多所应用型本科院校编写本系列教材，以适应国家对工程教育的新要求，满足培养素质高、能力强的应用型本科人才的需要。

工程强调知识的应用和综合，强调方案优缺点的比较并做出论证和合理应用。这就要求我们对应用型本科人才的培养需实施与之相配套的培养方案和培养模式，采用具有自身特点的教材。同时，避免重理论、轻实践、工程教育“学术化”的倾向；避免在工程实践能力的培养中，轻视学生个性及创新精神的培养；避免工程教育在实践中与社会经济、产业的发展脱节。为使我国应用型人才培养适应社会发展的新形势，我们必须开拓进取，努力改革。

组织编写本系列教材，目的在于建设富有特色的、有利于应用型人才培养的本科教材，本系列教材的编写原则如下。

1. 确保基础

在内容安排上，本系列教材确保学生掌握基本的理论基础，满足本科教学的基本要求。

2. 富有特色

围绕培养目标，以工程应用为背景，通过理论与实践相结合，构建应用型本科教育系列教材特色。在融会贯通本科教学内容的基础上，挑选最基本的内容、方法和典型应用；将有关技术进步的新成果、新应用纳入教学内容，妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进；在保持本科教学基本体系的前提下，处理好与交叉学科的关系，并按新的教学系统重新组织；在注重理论与实践相结合的基础上，注入工程概念，包括质量、环境等诸多因素对工程的影响，突出特色、强化应用。

3. 精选编者，保证质量

参编院校根据编委会要求推荐了一批具有丰富工程实践经验和教学经验的教师参加编写工作。本系列教材的许多内容都是在优秀教案、讲义的基础上推敲编写而成的，并由主编全文统稿，以确保教材质量。

本系列教材的编写得到了电子工业出版社的大力支持。他们为编好这套教材做了大量认真细致的工作，为教材的出版提供了许多有利条件，在此深表感谢！

编 委 会

前 言

《电路分析教程(第1版)》自2006年出版以来,已经过了4年的教学实践。为适应当前教学改革形势的需求,我们在《电路分析教程(第1版)》的基础上,重新编写了《电路分析教程(第2版)》。

本教材修订的主要目的是为了适应应用型本科高校的电子信息、计算机、电气控制、自动化等本科专业的人才培养方案的改革对电路或电路基础课程教学内容的要求。本教材的修订保持了简单易学、通俗易懂的特色。

考虑到现在许多学校都压缩了《电路分析》课程的课时,而非线性电路的内容基本上在后续的《模拟电子技术》课程都有讲述。为保证在有限的课时内获得更好的教学效果,《电路分析教程(第2版)》删去了第1版中第13章“非线性电路”的内容。

考虑到有些学校有些专业不开设《信号与系统》课程,《电路分析教程(第2版)》新增加了第12章“阶跃响应、冲激响应与动态电路的复频域分析”内容,以供选用。

第2版对第6章“含耦合电感的电路分析”、第8章“非正弦周期性电流电路”、第10章“网络函数和频率特性”的内容全部更新,进行了重新编写。同时,对其他各章的内容都进行了适当修改。正弦交流电路分析用的相量符号采用了国内教材使用的通用符号。

本教材由左全生主编,参加编写工作的还有包蕾、王桂星、于海平、彭颖、张立臣等,最后由左全生统稿。

本教材在修订过程中,参考了国内许多优秀教材,我们对这些教材的所有作者表示衷心的感谢。

由于编者水平和能力有限,修改后的教材中可能还会有不足和错误之处,敬请使用本书的教师和读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电路概述	1	3.2.1 网孔电流	49
1.1 电路的基本概念	1	3.2.2 网孔方程	49
1.1.1 电路和电路模型	1	3.2.3 网孔分析法分析电路	50
1.1.2 电路的基本物理量	3	自测题	53
1.1.3 电路元件	7	3.3 节点分析法	53
自测题	15	3.3.1 节点电压	53
1.2 基尔霍夫定律	15	3.3.2 节点方程	54
1.2.1 基尔霍夫电流定律	17	3.3.3 用节点法分析电路	55
1.2.2 基尔霍夫电压定律	18	自测题	58
自测题	20	3.4 回路分析法	58
小结	21	自测题	59
习题一	21	小结	59
第 2 章 电路的等效分析	25	习题三	60
2.1 二端网络与等效	25	第 4 章 电路分析的重要定理	63
2.2 实际电源	25	4.1 叠加定理	63
2.2.1 实际电源的电路模型	26	4.1.1 线性电路的基本性质	63
2.2.2 实际电源两种模型的等效 变换	27	4.1.2 叠加定理分析电路	64
自测题	29	自测题	66
2.3 二端网络的等效化简	30	4.2 戴维南定理	66
2.3.1 线性电阻的串联和并联	30	4.2.1 戴维南定理内容	66
2.3.2 独立电源的串联和并联	34	4.2.2 戴维南等效电路	67
2.3.3 含源二端网络的等效化简	35	4.2.3 应用戴维南定理分析电路	68
自测题	37	自测题	71
2.4 电路的等效分析法	37	4.3 诺顿定理	71
自测题	39	4.3.1 诺顿定理的内容	71
2.5 线性电阻的星形联结与三角形联结	39	4.3.2 含源线性电阻二端网络的等效 电路	73
自测题	42	自测题	76
小结	42	4.4 最大功率传输定理	76
习题二	43	自测题	78
第 3 章 电路分析的基本方法	46	4.5 替代定理	78
3.1 支路电流法	46	自测题	80
自测题	48	4.6 互易定理	80
3.2 网孔分析法	49	自测题	81

小结	81
习题四	82
第 5 章 正弦交流电路的稳态分析	87
5.1 正弦交流电的基本概念	87
5.1.1 正弦电压和电流	87
5.1.2 正弦量的三要素	87
5.1.3 正弦量的相位差	88
5.1.4 周期信号的有效值	89
自测题	90
5.2 正弦量的相量表示	91
5.2.1 相量法	91
5.2.2 相量图	93
5.2.3 相量法用于正弦量的运算	93
自测题	94
5.3 基尔霍夫定律的相量形式	95
5.3.1 相量形式 KCL	95
5.3.2 相量形式 KVL	95
5.4 正弦交流电路中的电路元件	96
5.4.1 电阻元件电压与电流关系的相量形式	96
5.4.2 电容元件电压与电流关系的相量形式	96
5.4.3 电感元件电压与电流关系的相量形式	97
自测题	99
5.5 无源二端网络的阻抗和导纳	100
5.5.1 阻抗	100
5.5.2 导纳	102
5.5.3 阻抗和导纳的等效互换	104
自测题	105
5.6 正弦交流电路的分析	106
5.6.1 串、并联电路分析	106
5.6.2 一般电路分析	107
自测题	109
5.7 正弦稳态电路的功率	109
5.7.1 瞬时功率	109
5.7.2 平均功率和功率因数	110
5.7.3 复功率	112
5.7.4 最大功率传输	114

自测题	116
小结	117
习题五	117
第 6 章 含耦合电感的电路分析	121
6.1 耦合电感元件	121
6.1.1 磁耦合	121
6.1.2 同名端 (corresponding terminals)	123
6.1.3 耦合电感元件	124
自测题	125
6.2 含耦合电感元件的电路分析	126
6.2.1 正弦稳态交流电路中的耦合电感元件	126
6.2.2 含有耦合电感元件的正弦稳态交流电路的计算	127
6.2.3 耦合电感线圈的串联	128
6.2.4 耦合电感线圈的并联	129
6.2.5 T 形耦合电感线圈的去耦等效电路	131
自测题	133
6.3 空心变压器电路的分析	133
6.3.1 空心变压器的电路方程	133
6.3.2 空心变压器的初级等效电路	134
6.3.3 空心变压器的次级等效电路	136
自测题	137
6.4 理想变压器	138
6.4.1 无损耗和全耦合变压器	138
6.4.2 理想变压器的定义	139
6.4.3 理想变压器的基本性质	140
6.4.4 含理想变压器的电路分析	142
自测题	143
小结	143
习题六	143
第 7 章 三相电路	147
7.1 三相电路的基本概念	147
7.1.1 三相电源	147
7.1.2 三相正弦量的相序	148

7.1.3 三相电源的联结方式	148
7.1.4 三相电源的负载	150
自测题	150
7.2 三相电路电压和电流的分析	151
7.2.1 负载做星形联结的三相电路分析	151
7.2.2 负载做三角形联结的三相电路分析	153
7.3 三相电路的功率	155
7.3.1 对称三相电路的瞬时功率	155
7.3.2 对称三相电路的平均功率、无功功率、视在功率	155
7.3.3 三相电路功率的测量	157
自测题	159
小结	159
习题七	159
第 8 章 非正弦周期性电流电路	162
8.1 非正弦周期性函数的分解	162
8.1.1 非正弦周期性函数的分解	162
8.1.2 几种常见的周期函数的谐波分析	163
8.1.3 波形的对称性与傅里叶系数的关系	164
自测题	165
8.2 非正弦周期量的有效值和功率	166
8.2.1 根据非正弦周期量的数学表达式直接求方均根值	166
8.2.2 根据周期量的傅里叶级数计算有效值	166
8.2.3 整流平均值	167
8.2.4 非正弦周期性电流电路的功率	168
自测题	169
8.3 非正弦周期性电流电路的分析	169
自测题	172
8.4 非正弦周期性的对称三相电路分析	172
自测题	175
小结	176
习题八	176

第 9 章 无源双口网络	179
9.1 双口网络的电压、电流关系	180
9.1.1 开路阻抗参数方程	180
9.1.2 短路导纳参数方程	182
9.1.3 混合参数方程	184
9.1.4 传输参数方程	185
自测题	186
9.2 双口网络参数之间的关系及其获取方法	187
9.2.1 双口网络参数之间的关系	187
9.2.2 双口网络参数的获取方法	187
自测题	190
9.3 双口网络的等效电路	190
9.3.1 互易双口网络的等效电路	190
9.3.2 非互易双口网络的等效电路	192
自测题	193
9.4 含双口网络的电路分析	193
9.4.1 输入阻抗	194
9.4.2 戴维南等效电路	194
9.4.3 电压放大倍数和电流放大倍数	195
自测题	197
小结	197
习题九	198
第 10 章 网络函数和频率特性	202
10.1 网络函数	202
10.1.1 网络函数的定义和分类	202
10.1.2 网络函数的计算方法	203
10.1.3 网络函数与正弦稳态响应	205
自测题	205
10.2 RC 电路的频率特性	206
10.2.1 一阶 RC 低通滤波电路	206
10.2.2 一阶 RC 高通滤波电路	208
10.2.3 一阶 RC 全通滤波电路	209
10.2.4 二阶 RC 带通滤波电路	209
10.2.5 二阶 RC 带阻滤波电路	212
自测题	213
10.3 谐振电路	213

10.3.1 RLC 串联谐振电路	214
10.3.2 串联谐振电路的谐振曲线	216
10.3.3 GLC 并联谐振电路	221
自测题	223
小结	223
习题十	223
第 11 章 动态电路的时域分析	227
11.1 换路定律与初始条件	228
11.1.1 换路与换路定律	228
11.1.2 电压与电流初始值的确定	230
自测题	232
11.2 一阶电路的零输入响应	232
11.2.1 RC 电路的零输入响应	232
11.2.2 RL 电路的零输入响应	235
自测题	237
11.3 一阶电路的零状态响应	238
11.3.1 直流激励下的零状态响应	238
11.3.2 正弦激励下的零状态响应	241
自测题	242
11.4 一阶电路的全响应	243
11.4.1 全响应的组成	243
11.4.2 三要素法	244
自测题	249
11.5 二阶电路的零输入响应	249
11.5.1 二阶电路方程的建立	249
11.5.2 二阶电路零输入响应的 形式	250
自测题	254

小结	255
习题十一	256
第 12 章 阶跃响应、冲激响应与动态 电路的复频域分析	261
12.1 阶跃函数和阶跃响应	261
12.1.1 阶跃函数	261
12.1.2 阶跃函数表示开关动作	263
12.1.3 阶跃响应	263
自测题	265
12.2 冲激函数和冲激响应	265
12.2.1 冲激函数	265
12.2.2 冲激响应	266
12.2.3 冲激函数的性质	269
自测题	270
12.3 拉普拉斯变换	271
12.3.1 拉普拉斯变换和拉普拉斯反 变换	271
12.3.2 常用函数的拉氏变换	272
12.3.3 拉氏变换的基本性质	273
自测题	275
12.4 动态电路的复频域分析	276
12.4.1 复频域分析法	276
12.4.2 复频域电路模型	277
12.4.3 动态电路的复频域分析	279
自测题	281
小结	281
习题十二	282
参考文献	285

第1章 电路概述

【本章要点】 本章首先简单介绍电路发展简史，让大家了解一下对电路发展起过重要作用的科学家和一些重要事件，然后介绍电路分析中常用的物理量，接着阐述电路模型和电路元件，最后讨论基尔霍夫定律。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路和电路模型

1. 电路发展简史

1800 年，意大利物理学家伏特（A.Volti, 1745—1827 年）发明了伏特电堆（即铜锌电池，一种化学电源），伏特电堆能够把化学能不断地转变为电能，维持电荷朝单一方向持续流动，形成电流。要产生电流，除了能提供电压（或电动势）的电池外，还必须要有其他电气器件与电池相互连接所构成的闭合的电流的通路（即电路）。这一发明具有划时代的意义，从此人们对电的研究从静电领域进入电路和系统。

1820 年，丹麦物理学家奥斯特（H.C.Oersted, 1777—1851 年）发表了电流磁效应的论文，很快在科学界产生了巨大反响。他在电与磁之间架起了一座桥梁。

1825 年，法国科学家安培（A.M.Ampere, 1775—1836 年）发表了安培定律。他定义了电流并研究出测量电流的方法。他在测量电流的磁效应的实验研究中，发现了右手螺旋定则及两条平行通电导线的相互作用。安培定律成为研究电学的基本定律，并为电能转换为机械能（即电动机）的发明指明了方向。

1826 年，德国科学家欧姆（G.S.Ohm, 1787—1854 年）发表了欧姆定律，用数学方程表示了电阻上电压与电流的定量关系。

1833 年，英国物理学家法拉第（M.Faraday, 1791—1867 年）发现电磁感应现象，这一发现为机械能转换为电能（即发电机）和变压器的发明指明了方向。

1838 年，美国画家莫尔斯（S.F.B.Morse, 1792—1872 年）发明了用点和长线两种信号组成的“莫尔斯电码”。从此人们可以利用电线通信。1844 年美国政府资助建成“华盛顿—巴尔的摩”全长 40 英里的电报线。

1847 年，德国科学家基尔霍夫（G.R.Kirchhoff, 1824—1887 年）发表了基尔霍夫定律。这一定律成为电路分析的基本定律。

1876 年，美国语音学家贝尔（A.G.Bell, 1847—1922 年）制成最早的实用电话机。从此人们可以利用电线通话。

1880 年 5 月，美国发明家爱迪生（T.A.Edison, 1847—1931 年）发明了世界上第一个实用的白炽灯泡。从此人们开始用清洁、干净的电灯作为照明光源。1882 年秋天，爱迪生

在纽约华尔街创建发电所，正式向用户商业供电。

1891年，在法国的劳芬到德国的法兰克福架起了第一条三相输电线路。

综上所述，人们对于电路的研究已经200年了，特别是最近的50年，关于电路研究的理论成果和发明创造呈指数增长。

2. 电路的组成及其分类

电路是各种电气设备按一定方式连接起来的整体，它提供了电流流通的路径。电路种类繁多，形式和结构各不相同，但就其功能来说可分为两类。

一类用于进行能量的传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的输电线路。发电厂的发电机组将其他形式的能量（热能、水的势能、原子能等）转换成电能，通过变压器、输电线等输送给各用户负载。电动机、电灯、电热设备等是用户负载，是取用电能的设备，它们把电能转换成机械能、光能、热能，为人们生产、生活所利用。变压器、输电线、开关、保护装置等是中间环节，用于连接电源和负载，起传输和分配电能、保证安全供电的作用。

这类电路电压比较高，电流比较大，有时称为“强电”电路。由于电能是二次能源，工程上一般要求这类电路在电能的输送和转换过程中，电能损耗尽可能小，效率尽可能高。

另一类是实现信息的传递与处理。这方面典型的例子有移动电话机、收音机、电视机电路。接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后，通过电路把输入信号（又称激励）变换或处理为人们所需要的输出信号（又称响应），送到扬声器或显像管，再还原为语言、音乐或图像。信息处理系统中的负载也是各种各样的。针对各种负载的不同要求，需要对信号作不同的处理，如放大、整形、计数等，因而有各种不同的中间环节。

这类电路电压比较低，电流比较小，有时称为“弱电”电路。工程上一般要求这类电路在信息的传递与处理过程中，尽可能减小信号的失真，提高电路工作的稳定性等。

当然，有时这两类电路在结构上并无区别。如指挥交通的红绿灯电路是传递信号的；街道上的照明灯电路是转换能量的。它们的功能不同，但电路结构相同。

实际的电路器件、连接导线及由它们连接成的实际电路都有一定的外形尺寸，占有一定的空间。如果实际电路（器件）的几何尺寸远小于电路最高工作频率所对应的波长，可以认为电流传送到实际电路（器件）各处是同时到达的。这时，电路（器件）尺寸可以忽略不计。整个实际电路（器件）可看做是电磁空间的一个点。这种电路（器件）称为集总参数电路。与其相反的则就称为分布参数电路（器件）。

值得注意的是：区别一个电路是否是集总参数电路，并不是由电路的外形尺寸决定的。

电力输电线，其工作频率为50Hz，而电磁能量的传播速度为 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ，相应的波长为6000km，因而30km长的输电线只有波长的1/200，可以看做是集总参数电路。

假定低频放大电路所放大信号的最高频率为30kHz，信号的传播速度为 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ，相应的波长为10km，该波长远大于低频放大电路的外形尺寸，所以低频放大电路都可以看做是集总参数电路。

对于集总参数电路的研究是最基本的电路研究，本书所讨论的电路都是集总参数电路。

3. 电路模型

实际电路工作时，各个电路器件的电磁性能是多种多样、相当复杂的，要从数学上精

确描述这些电磁性能相当困难。例如，电阻器中电流变化时，周围就有电磁场的变化；电容器中既要储存电场能量，也要消耗能量；线圈中既要储存磁场能量，也要消耗能量。

工程上将实际电路抽象为电路模型，用数学方法分析计算出电路的实际特性。

电路模型是由理想电路元件组成的。每一种理想电路元件都只表示一种电磁性能，如：

电压源是一种表示提供电能（把机械能或其他能量转换为电能）的元件；

电阻元件是一种表示消耗电能（转换为热能或其他形式能量）的元件；

电感元件是一种反映电路周围存在磁场而可以储存磁场能量的元件；

电容元件是一种反映电路及其附近存在电场而可以储存电场能量的元件。

这样的电路元件实际上并不存在，但工程上有些器件在一定条件下可以用这些理想电路元件来表示。例如，电炉、白炽灯主要是消耗电能的，就可以用电阻元件表示；干电池、发电机主要是供给电能量的，可以用“电压源”这样一种理想电路元件表示。工程上更多的器件必须要用几种理想电路元件的组合来表示。例如：线圈要用电阻元件和电感元件的组合表示，电阻元件表示其消耗电能的作用，电感元件表示其储存磁场能量的作用。

每一种理想电路元件都可以用数学形式表示其电磁性能。电路模型是实际电路的数学模型。我们可以利用数学方法对电路进行深入研究。

如果描述电路性能的所有数学方程都是线性代数方程或线性微积分方程，则所描述的电路就是线性电路，否则就是非线性电路。工程上普遍应用的是非线性电路，线性电路仅仅是非线性电路在一定条件下的模拟。但线性电路的理论却是非线性电路理论的基础，本书主要讨论线性电路。

每一种理想电路元件都有自己特有的电路符号和文字符号，以示区别。

理想电路元件的外形和大小可不加考虑，理想电路元件的电磁性能与其具体位置无关，理想电路元件的电磁性能与它和别的元件的相互距离无关。

显然，电路模型与实际电路并不完全相同，它只是近似反映实际电路。电路模型的理论分析的结果与实际电路的实际运行的结果是有误差的。只要这个误差在允许的范围内，这个电路模型及其理论分析的结果就是可接受的；如果这个误差超过允许的范围，那么这个电路模型或理论分析的结果就是错误的，必须修改电路模型或理论分析。检验电路模型的理论分析的结果是否正确的唯一标准就是电路的实践测量。

大量的实践经验表明，只要电路模型选取适当，分析计算的结果与实践测量的结果就会是一致的。

模型的概念不仅在电气工程上应用，在其他科学和工程领域也都利用模型来分析。可以说，一切科学理论都是建立在模型基础之上的，没有模型就没有科学分析。电路模型一旦正确地建立起来，我们就能更深入地分析电路。今后所说的“元件”、“电路”均指理想化的集中参数的元件和电路。

1.1.2 电路的基本物理量

描述电路性能的基本物理量有电流、电压、电荷、磁通。因为电流和电压测量起来比较方便、测量精度比较高，所以电路分析时经常用；而电荷和磁通测量起来比较困难、测量精度比较低，而且它们都可以用电流、电压来表示，所以电路分析时很少用。

功率和能量虽然是复合物理量,但是许多电路的输出经常是非电气性质的,这些输出用功率和能量来表示比较合适;另外,所有实际电气元件对功率大小都有限制,因此功率和能量在工程上用得也比较多。

1. 电流

电荷有规则地定向运动,形成传导电流。金属导体中的电流是由金属原子结构最外层的电子的定向运动所产生的。例如,铜金属的晶状结构最外层的电子受原子核的约束力很小,可自由地从一个原子移到另一个原子。每立方米金属铜导体中大约有 8.5×10^{28} 个电子自由移动,但由于这些电荷的运动是杂乱无规则的,因而不形成传导电流。如果在金属导体的两端加上电场,那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动,这是有规则的定向运动,于是就形成传导电流。在其他场合,如电解溶液中的带电离子做规则定向运动也会形成传导电流。

工程上常把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度。电流强度简称为电流,1 安培 (A) 电流等于在 1 秒 (s) 内通过一定截面的电荷量为 1 库仑 (C)。电流用 $i(t)$ 表示, $q(t)$ 为通过导体横截面的电荷量。

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

习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的方向。负电荷移动的相反方向才是电流的方向。

电流的大小和方向不随时间变化,就称为直流电流,简称直流 (DC)。本书以后对不随时间变化的物理量都用大写字母表示。

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

由于每个电子的电荷量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$, 因此要产生 1A 的电流大约需要每秒 6.24×10^{18} 个电子穿过导体的一定截面。

例 1-1 一导体中通过 5A 恒定电流,试问在 1min 内有多少个电子通过导体中某一截面?

解:

$$\begin{aligned} 5\text{A} &= 5 \times 60 = 300\text{C/min} \\ \frac{300}{1.602 \times 10^{-19}} &= 1.87 \times 10^{21} \text{ 个电子/分钟} \end{aligned}$$

尽管电流由离散运动的电子组成,但是没必要单独考虑电子的运动。因为电子的数量太大了,我们将这些电子和相应的电荷看成平滑的流体,因此电流被看成为连续量。

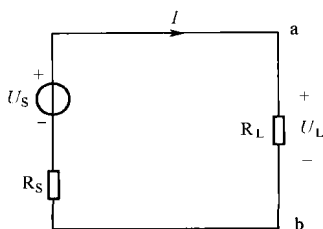


图 1-1 一个简单电路图

工程上往往很难在电路中标明电流的实际方向。有的电路的电流的实际方向常常随时间变化,有的电路中的电流的实际方向难以断定。在分析电路时,通常先指定某一方向为正的电流方向,称为电流的参考方向,用箭头表示,如图 1-1 中箭头所示。如果电流的参考方向与实际方向一致,则电流 I 为正值 ($I > 0$); 如果电流的参考方向与

实际方向相反, 则电流 I 为负值 ($I < 0$)。有了电流参考方向, 电流值的正或负, 就反映了电流的实际方向。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。

电流的参考方向是任意指定的, 有时也用双下标表示, 如 I_{ab} , 表示其参考方向为由 a 指向 b 。今后在电路图中只标明参考方向, 分析电路也将以参考方向为依据。

2. 电压

前已述及, 电荷只有在电场力的作用下才能形成电流。工程上把电场力将单位正电荷从某点移到另一点所做的功称为该两点之间的电压, 也称电位差, 用 u 或 $u(t)$ 表示。

电压的单位为伏特 (V)。1V 电压等于把 1C 正电荷从一点移到另一点做了 1J 的功。设 $W(t)$ 为电场力做的功, $q(t)$ 为移动的电荷量。

$$u(t) = \frac{dW(t)}{dq(t)} \quad (1-3)$$

电压的方向一般规定为电场力移动正电荷的方向。

电压的大小和方向不随时间变化, 就称为直流电压。对于直流电压, 有

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

工程上往往很难在电路中标明电压的实际方向。有的电路的电压的实际方向常常随时间变化, 有的电路中的电压的实际方向难以断定。在分析电路时, 通常先指定某一方向为电压方向, 称为电压的参考方向, 一般用正 (+)、负 (-) 极性表示, 如图 1-1 所示。

如果电压的参考方向与实际方向一致, 则电压 U 为正值 ($U > 0$); 如果电压的参考方向与实际方向相反, 则电压 U 为负值 ($U < 0$)。有了电压参考方向, 电压值的正或负, 就反映了电压的实际方向。显然, 在未指定参考方向的情况下, 电压值的正或负是没有意义的。

电压的参考方向是任意指定的, 有时也用箭头和双下标 (如 U_{ab}) 表示, U_{ab} 表示其参考方向为由 a 指向 b 。今后在电路图中只标明参考方向, 分析电路也将以参考方向为依据。

在电路中选定一点 b 作为参考点, 电路中其他点 (例如 a 点) 到参考点的电压叫做 a 点的电位。 a 点的电位用 U_a 表示, $U_a = U_{ab}$ 。

电位的实质就是某点到参考点之间的电压, 其单位也是伏特 (V)。

电路中任意两点的电压等于这两点的电位差。

参考点本身的电位为零。参考点可以任意选定, 一经选定; 电路中其他各点的电位也就确定了。参考点选得不同, 电路中各点的电位会随之改变, 但任意两点的电位差 (即电压) 不会改变。

在电场力的作用下, 正电荷从高电位向低电位移动, 负电荷从低电位向高电位移动。为了维持连续不断的电流, 电路中必须有电源设备。电源内部有电源力, 电源力的作用与电场力相反, 能使电源内部的正电荷从低电位向高电位移动, 负电荷从高电位向低电位移动。

电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功称为电源的电动势, 用 E 表示。

电动势的单位与电压相同, 也是伏特 (V)。但电动势的方向与电压的方向相反。

图 1-2 (a) 中电源的电压和电动势的参考方向选择得相反, $U = E$; 图 1-2 (b) 中电源

的电压和电动势的参考方向选择得相同, $U=-E$ 。

对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。图 1-1 中电压 U_L 的参考方向和电流 I 的参考方向一致, 称为关联参考方向; 电压 U_S 的参考方向和电流 I 的参考方向相反, 称为非关联参考方向。

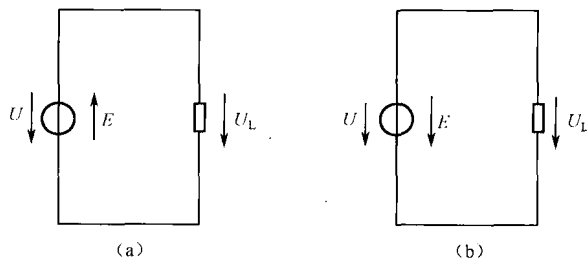


图 1-2 电源的电动势与电压

3. 功率和能量

任何一个工程系统都要研究功率和能量的问题。本书所说的功率, 是指电功率, 即某一个元件或一段电路在单位时间内所吸收或释放的电能量。功率一般用 p 表示, 单位为瓦特 (W)。

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-5)$$

把式 (1-1) 和式 (1-3) 代入式 (1-5), 可得

$$p = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

对于直流电路, 有

$$P = UI \quad (1-7)$$

对于某一个元件或一段电路, 在电压和电流取关联参考方向的情况下, 若 $p > 0$, 说明这个元件或一段电路的电压和电流的实际方向是一致的, 这个元件或一段电路吸收了电功率; 若 $p < 0$, 说明这个元件或一段电路的电压和电流的实际方向是相反的, 这个元件或一段电路输出了电功率。

本书各物理量的单位一般采用国际单位制 (SI), 国际单位制中的一些单位, 在实际应用时有时嫌大, 有时又嫌小。为避免书写大量的零, 常在基本单位前加上词头, 形成辅助单位。构成十进倍数 (含分数) 单位的部分词头见表 1-1。

表 1-1 构成十进倍数的部分词头

名 称	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	T	G	M	k	m	μ	n	p
数值	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

例如: $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$, $3\text{kV} = 3 \times 10^3\text{V}$, $5\text{MW} = 5 \times 10^6\text{W}$ 。

在 t_0 到 t_1 的一段时间内, 某一个元件或一段电路消耗的电能量 W 为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p dt = \int_{t_0}^{t_1} u i dt \quad (1-8)$$

对于直流电路, 有

$$W = p(t_1 - t_0) = UI(t_1 - t_0) \quad (1-9)$$

电能量的单位是焦耳 (J), 它表示功率为 1W 的用电设备在 1s 时间内所消耗的电能量为 1J。这个单位太小, 以致工程上几乎不用。工程上常用的电能量单位是千瓦时 (kWh), 俗称为“度”。

1 度电 = 1kWh = $10^3 \times 3600 = 3.6 \times 10^6$ J。

例 1-2 图 1-3 中已知 AB 段电路产生功率为 500W, BC、CD、DA 三段电路消耗功率分别为 50W、400W 和 50W。试根据图中标电流的方向和大小, 计算电压 U_{AB} , U_{BC} , U_{DC} , U_{DA} 。

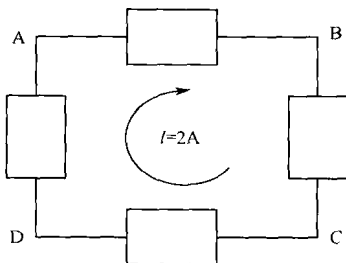


图 1-3 例 1-2 电路图

解: 因为 AB 段电路产生功率为 500W, 所以 $U_{AB} = -\frac{500}{2} = -250$ V; 因为 BC 段电路消耗功率为 50W, 所以 $U_{BC} = \frac{50}{2} = 25$ V; 因为 CD 段电路消耗功率为 400W, 所以 $U_{DC} = \frac{400}{-2} = -200$ V; 因为 DA 段电路消耗功率为 50W, 所以 $U_{DA} = \frac{50}{2} = 25$ V。

1.1.3 电路元件

在集中参数电路中, 电路元件是构成电路的基本单元。在集中参数假设条件下, 通常只关心元件端子上的特性 (称为外部特性或伏安特性), 而不注意其内部的情况。

1. 电阻元件

电阻元件是一种表示消耗电能 (转换为热能或其他形式能量) 的理想电路元件。

电阻元件的文字符号为 R, 图形符号如图 1-4 (a) 所示。电阻元件有两个端钮与其他元件相连接。当电阻元件的电压、电流取关联参考方向时, 如图 1-4 (a) 所示, 电阻元件的伏安特性曲线位于 $u \sim i$ 平面的第一、三象限, 如图 1-4 (b) 所示。该直线的斜率为 R, 与横轴的夹角 $\theta = \arctan R$ 。R 称为元件的电阻值, 其单位为欧姆 (Ω), 1Ω 意味着当电阻元件两端外加 1V 电压时, 流经电阻元件的电流为 1A。

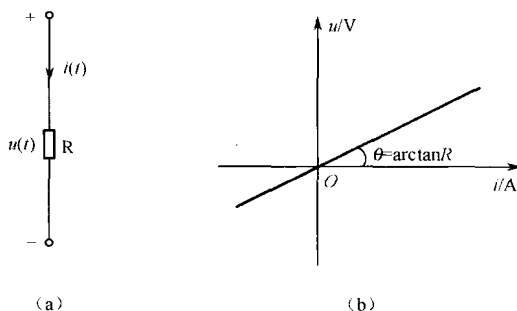


图 1-4 电阻元件图形符号及其伏安关系

对于一块截面积为 S 、长度为 L 、电阻率为 ρ 的均匀金属导体, 其电阻为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-10)$$

电阻元件的伏安关系用数学方程表示为

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-11)$$

上式即为著名的欧姆定律表达式。

电阻值 R 的倒数称为电导 G , 电导 G 的单位为西门子 (简写为 S),

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-12)$$

欧姆定律也可表示为

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

从欧姆定律可知, 在关联参考方向下有

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = i^2 R \quad (1-14)$$

电阻元件的功率总是正值。这说明电阻元件总是在消耗电功率。

当电阻元件的电压和电流取非关联参考方向时, 欧姆定律应为

$$u(t) = -Ri(t) \quad (1-15)$$

电阻效应是广泛存在的, 所有的实际电气器件都标明功率大小就说明了这一点。电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可以用电阻元件作为其模型, 但它们的电压、电流和功率都有一定的额定值。

电阻器是电路中不可缺少且使用最多的器件。一旦某个电阻出现开路或短路故障, 有关电路必然会因电流突变为零或突现短路而失去原来的正常工作状态, 甚至会造成整个电路瘫痪。在仪器、设备、家用电器故障中, 因电阻损坏所造成的故障据统计至少在 60% 以上。

随着电路对器件精度的高要求和电阻制造工艺水平的提高, 电阻的精度等级也在提高。原来规定的 10 级 (10%)、20 级 (20%) 精度的电阻产品已趋于淘汰。

2. 电感元件

电感元件是一种反映电路周围存在磁场而可以储存磁场能量的理想电路元件。

工程上为了用较小的电流产生较大的磁场, 常常把金属导线绕在某一材料制成的骨架上, 如图 1-5 所示。当线圈中通过电流 $i(t)$ 时, 通过每匝线圈的磁通为 $\phi(t)$ 。若线圈匝数为