



普通高等学校
电类规划教材



电路分析基础

第2版

◎周围 主编

◎徐昌彪 管春 副主编

- 淡化根据电路形式和结构对电路的分类，强调根据分析方法对电路的分类
- 新增近代电路理论的最新发展内容
- 提供 PPT 课件，习题答案，教学大纲，教学进度表等丰富配套资源



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



普通高等学校
电类规划教材

电路分析基础

第2版

◎周围 主编

◎徐昌彪 管春 副主编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电路分析基础 / 周围主编. — 2版. — 北京: 人民邮电出版社, 2019.9
普通高等学校电类规划教材
ISBN 978-7-115-50515-6

I. ①电… II. ①周… 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(2019)第024847号

内 容 提 要

本书比较系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。

全书共 11 章。内容包括: 基础知识、等效变换分析法、线性网络的一般分析方法、网络定理、动态电路的瞬态分析——时域经典分析法、动态电路的瞬态分析——复频域分析法、正弦稳态电路分析、耦合电感与变压器、线性电路的频率响应特性、双口网络、简单非线性电阻电路分析。每章有丰富的例题和习题, 并附有相应习题答案。

本书适用于通信、电子、计算机、自控类及相关专业本科教学使用, 也可供有关科技人员参考。

◆ 主 编 周 围
副 主 编 徐昌彪 管 春
责任编辑 刘 博
责任印制 陈 巍

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
山东百润本色印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 22 2019 年 9 月第 2 版
字数: 535 千字 2019 年 9 月山东第 1 次印刷

定价: 59.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

前言 (第2版)

结合多年来的教学实践体会和广大读者的反馈意见,我们对《电路分析基础》第1版进行了较为全面的修订,以适应新的教学大纲和教学要求。

本版继承了第1版的主要体系和结构,同时对内容进行了凝练,并结合了近代电路理论的最新发展。主要修订如下。

(1) 修订了第1版中的一些错误或疏漏,包括图文印刷排版错误,语言文字表达不准确、不严谨之处等。

(2) 对部分章节的结构和内容做了适当的调整,使条理更清楚。

(3) 对部分章节的例题、习题进行了增加或精简,提高了其代表性;部分章节增加了一定的思考题。

(4) 撰写风格上,在注重电路理论和方法的科学性、严谨性的同时,增加了一些与实际应用相结合的具体功能电路实例,力争做到电路理论的严谨性、抽象性和实际电路的工程性以及学习的趣味性的有机结合。

(5) 增加了英文专业词汇和术语。

(6) 增加了工程中商用电阻器、电感器、电容器及其规范介绍;第3章一般分析方法中增加了支路分析法(2b法)、支路电流分析法和支路电压分析法;第4章网络定理部分增加了(直流电路)最大功率传输定理、特勒根定理,并且互易定理增加了证明;第6章新增了基于拉普拉斯变换的动态电路的复频域分析法,作为不单独开设“信号与系统”课程的专业选学;第7章正弦稳态部分增加了功率表及功率测量相关内容。为了跟上近代电路理论的发展,让读者对前沿理论有一定了解,本书在介绍完传统的三种基本元件——电阻 R 、电感 L 、电容 C 后,在5.2节尝试引入了忆阻元件的简介,该元件被称为“缺失”的第4种基本元件,属近代电路理论发展的前沿领域,可作为课外了解内容。此外,近年来,非线性学科领域的一个分支——混沌系统的研究成为前沿热点,我们在11.5节增加了非线性电路中混沌现象的介绍,此内容可以作为课外选读内容。

本版中,周围教授/博士负责第1、3、4、5、11章的撰写及修订,徐昌彪教授/博士负责第6、9、10章的撰写和修订,管春副教授/博士负责第2、7、8章的撰写和修订。周围为本书的主编,负责各章内容的修改、统稿和定稿,徐昌彪和管春担任副主编。本书的修订得到了重庆邮电大学各级领导及人民邮电出版社出版基金的大力支持。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,诚望各位读者及专家指正。

编者

2018年11月于重庆邮电大学

前言 (第1版)

“电路分析基础”是高校电类相关专业的一门重要的专业基础课程,其基本理论已非常成熟。但是,一方面,近代电路理论仍在不断发展;另一方面,当今时代是知识“爆炸”的时代,新的学科领域和新的学科分支不断涌现,高校学生的知识结构已经发生变化,使得高校讲授本门课程所允许的学时数普遍削减。因此,有必要调整传统教材的内容,以适应新的教学大纲和教学要求。

编者多年来一直从事“电路分析基础”“电工学”“电路与信号分析”“信号与系统”“电子电路”及“电路的计算机辅助分析”等课程的本、专科教学工作,结合长期的教学体会和教学经验,编写了本教材。

在本教材的编写过程中,编者紧密结合通信技术,力图体现一些信息学科的特色。在教材内容的安排上,既尊重传统的教学习惯和方法,又希望体现一些教学改革的精神和思路;在继承传统基本内容的同时,力求反映近代电路理论的最新发展和最新特点。教材中第1章至第7章是电路分析的基础部分;第8章双口网络可供不单设“网络理论”课程的专业学生选学;第9章非线性电阻电路分析是进一步学习“电子电路”的基础,可以作为与“电子电路”课程衔接的内容。另外,随着大规模集成电路和计算机技术的迅猛发展,对大规模电路的分析与设计变得非常重要,因此第10章引入了电路的拓扑理论和电路的计算机辅助分析,并介绍了一些计算机辅助分析的算法。这些部分是加深的内容,可作为选学内容。

本书始终以“循序渐进,讲透概念原理,打好电路基础”为宗旨,在讲授思路上淡化传统的根据电路形式和结构分类(如直流、交流电路,一阶、二阶电路)的讲授方法,强调根据分析方法分类(如两类约束关系、等效化简分析法、时域经典法及基本频域法——相量法等),避免了同一种电路(如一阶电路、二阶电路)由于工作条件不同(激励信号不同,暂态和稳态不同等)要采用不同的分析方法或不同电路(直流与交流)却可采用同样的一般分析方法(节点分析法与网孔法)所带来的概念上的混淆,从而更体现了“掌握基本分析方法”的教学要求,避免了电路结构方面的过多讨论,抓住了主要矛盾(分析方法)。

本书经集体讨论后,分工执笔。周围编写了第1章和第4章,杨晓非编写了第5章和第6章,李实秋副教授编写了第3章和第9章,郑丹玲编写了第2章和第7章,徐昌彪博士编写了第8章和第10章。周围为本书的主编,负责各章内容的修改、统稿和定稿,杨晓非和李实秋担任副主编。阙采兰副教授担任主审,汪载生教授、王继森副教授也参加了本书的审阅,并提出了许多宝贵意见。在此向以上各位专家及同事表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,诚望各位读者及专家指正。

编者

2002年12月

目录

第1章 基础知识	1	2.1.4 含受控源的单口电阻网络等效化简	34
1.1 电路与电路模型	1	2.2 实际电源的两种电路模型及其等效变换	35
1.1.1 电路	1	2.2.1 实际电源的电压源模型	35
1.1.2 电路的形式与功能	2	2.2.2 实际电源的电流源模型	36
1.1.3 电路模型与集中参数电路	3	2.2.3 两种电源模型间的等效互换	36
1.2 电路分析的基本变量	4	2.3 含源单口网络的等效化简	38
1.2.1 电流及其参考方向	4	2.3.1 几种简单独立源电路的等效	38
1.2.2 电压及其参考方向	5	2.3.2 含源单口网络的等效化简(不含受控源)	39
1.2.3 功率及其参考方向、功率正负号的意义	6	2.3.3 含源单口网络的等效化简(含受控源)	40
1.2.4 能量	8	2.3.4 等效变换分析法在电路中的应用	41
1.3 电阻元件	8	2.4 电源分裂(转移)法	43
1.3.1 理想电阻元件	8	2.5 T- π 变换	44
1.3.2 工程中的电阻器	10	习题二	47
1.4 独立电源元件	14	第3章 线性网络的一般分析方法	51
1.4.1 理想电压源	14	3.1 支路分析法	51
1.4.2 理想电流源	15	3.1.1 2b法	51
1.5 基尔霍夫定律	16	3.1.2 支路电流分析法(1b法)	53
1.5.1 基尔霍夫电流定律	17	3.1.3 支路电压分析法(1b法)	54
1.5.2 基尔霍夫电压定律	19	3.2 节点电位分析法	54
1.5.3 电路中电位的概念及计算	20	3.2.1 节点电位	54
1.6 受控源	21	3.2.2 节点方程及其一般形式	55
1.7 两类约束关系及其应用	24	3.2.3 节点方程的特殊处理方法	58
习题一	25	3.3 回路电流分析法	61
第2章 等效变换分析法	30	3.3.1 回路电流	61
2.1 单口电阻网络的等效	30	3.3.2 回路方程及其一般形式	61
2.1.1 串联电阻电路	30		
2.1.2 并联电阻电路	31		
2.1.3 混联电阻电路	32		

3.3.3 回路方程的特殊处理方法	63	5.4.2 求解齐次方程的通解	122
3.4* 割集分析法	66	5.4.3 写出电路的全解	123
3.4.1 树的概念	67	5.5 一阶电路的零输入响应	123
3.4.2 割集与基本割集	68	5.5.1 具有初始储能的电容器通过 电阻放电	124
3.4.3 割集分析法	69	5.5.2 具有初始储能的电感通过 电阻放电	126
习题三	71	5.6 一阶电路的零状态响应	127
第4章 网络定理	74	5.6.1 RC 电路接通直流电压源	127
4.1 叠加定理	74	5.6.2 RL 电路接通直流电压源	129
4.2 替代定理	78	5.7 一阶电路的全响应	130
4.3 戴维南定理与诺顿定理	81	5.8 恒定激励下一阶电路的三要 素法	132
4.3.1 戴维南定理	82	5.9 正弦信号激励下的一阶电路	135
4.3.2 诺顿定理	87	5.10 阶跃信号与阶跃响应	138
4.4 最大功率传输定理	89	5.10.1 单位阶跃信号	138
4.5* 特勒根定理	91	5.10.2 单位阶跃响应及其应用	140
4.6 互易定理	94	5.11 微分电路与积分电路	142
4.6.1 互易定理的三种形式及其 证明	94	5.11.1 微分电路	142
4.6.2 互易定理的应用	96	5.11.2 积分电路	143
4.7* 对偶原理	97	5.11.3 脉冲序列作用下的 RC 电路	144
4.7.1 电路的对偶性	97	5.12 二阶电路的瞬态分析	146
4.7.2 对偶原理	98	5.12.1 RLC 串联电路的零输入 响应	147
习题四	98	5.12.2 RLC 串联电路的零状态 响应	151
第5章 动态电路的瞬态分析—— 时域经典分析法	101	5.13* 电路中发生强迫跃变时的 瞬态分析	153
5.1 电容元件与电感元件	101	5.13.1 冲激信号	153
5.1.1 理想电容元件	101	5.13.2 发生强迫跃变的电路结构	156
5.1.2 理想电感元件	104	5.13.3 强迫跃变后初始值的确定	157
5.1.3 工程中的电容器和电感器	107	5.13.4 瞬变过程分析举例	160
5.2* “缺失”的第4类基本 元件——忆阻元件简介	115	习题五	161
5.2.1 忆阻元件的预言	115	第6章 动态电路的瞬态分析—— 复频域分析法	169
5.2.2 忆阻器研究的发展过程	116	6.1 拉普拉斯变换	169
5.3 换路定律与初始值的计算	117	6.1.1 拉普拉斯变换的定义	169
5.3.1 过渡过程的产生	117	6.1.2 典型信号的拉普拉斯变换	169
5.3.2 换路定律及其在初始值 求解中的应用	118		
5.4 一阶电路的自由响应和强制 响应	121		
5.4.1 求解非齐次方程的特解	121		

6.2 拉普拉斯变换的基本性质	170	7.5.2 节点电位分析法的相量形式	212
6.2.1 线性性	170	7.5.3 戴维南定理的相量形式	214
6.2.2 比例性 (尺度变换)	170	7.5.4 正弦稳态电路的相量图求解法	215
6.2.3 时移性	171	7.6 正弦稳态电路的功率	216
6.2.4 频移性	171	7.6.1 单口网络的功率	216
6.2.5 时域微分性	172	7.6.2 正弦稳态电路中的最大功率传输定理	224
6.3 拉普拉斯反变换	173	7.7 三相电路	228
6.3.1 $F(s)$ 的极点均为单极点	173	7.7.1 三相电源与三相负载	229
6.3.2 $F(s)$ 含重极点	174	7.7.2 基本连接方式	230
6.4 拉普拉斯变换在微分方程求解中的应用	175	7.7.3 对称三相电路的正弦稳态分析	231
6.5 电路的复频域模型及复频域分析法	176	7.7.4 三相电路的功率	235
6.5.1 电阻元件的复频域模型	176	习题七	237
6.5.2 电感元件的复频域模型	176	第 8 章 耦合电感与变压器	244
6.5.3 电容元件的复频域模型	177	8.1 耦合电感	244
6.5.4 复频域分析法	177	8.1.1 耦合电感的伏安关系	245
习题六	178	8.1.2 耦合线圈的同名端	247
第 7 章 正弦稳态电路分析	179	8.1.3 耦合电感的储能	249
7.1 正弦信号	179	8.2 耦合电感电路分析	249
7.1.1 周期信号	179	8.2.1 耦合电感的相量模型	249
7.1.2 正弦信号	180	8.2.2 耦合电感的串联和并联	251
7.2 正弦信号的相量表示法	185	8.2.3 耦合电感的去耦等效电路	255
7.2.1 复数及其运算	185	8.2.4 耦合电感电路分析	257
7.2.2 正弦信号的相量表示法	186	8.3 空芯变压器	259
7.3 正弦稳态电路的相量模型	189	8.3.1 空芯变压器的电路方程	259
7.3.1 基本电路元件的正弦稳态特性	189	8.3.2 空芯变压器的初级等效电路	260
7.3.2 基尔霍夫定律的相量形式	197	8.3.3 空芯变压器的次级等效电路	262
7.4 阻抗与导纳	199	8.4 理想变压器	264
7.4.1 RLC 串联电路及其阻抗	199	8.4.1 理想变压器的电压、电流和功率	265
7.4.2 GCL 并联电路及其导纳	202	8.4.2 理想变压器的阻抗变换性质	267
7.4.3 无源单口网络的阻抗和导纳	204	8.4.3 含理想变压器电路的计算	269
7.4.4 阻抗与导纳的串联、并联与混联	206	8.5 铁芯变压器	270
7.5 正弦稳态电路的相量分析法	211		
7.5.1 回路电流分析法的相量形式	211		

8.5.1 铁芯变压器的工作原理	270	10.3 双口网络的基本连接	306
8.5.2 铁芯变压器的等效电路	273	10.3.1 双口网络的串联	306
习题八	275	10.3.2 双口网络的并联	306
第9章 线性电路的频率响应特性	279	10.3.3 双口网络的级联	307
9.1 网络函数与电路的频率特性	279	10.4 双口网络的输入输出阻抗、 影像阻抗与传输常数	308
9.2 RC电路的频率特性	280	10.4.1 双口网络的输入输出阻抗	308
9.2.1 RC低通电路	280	10.4.2 双口网络的影像阻抗	309
9.2.2 RC高通电路	281	10.4.3 双口网络的传输常数	310
9.2.3 RC带通电路	282	10.5 回转器与负阻抗变换器	311
9.2.4 RC带阻电路	283	10.5.1 回转器	311
9.2.5 RC移相电路(又称全通 电路)	283	10.5.2 负阻抗变换器	312
9.3 RLC串联谐振电路	284	习题十	313
9.3.1 RLC串联电路的谐振条件	284	第11章 简单非线性电阻电路分析	315
9.3.2 RLC串联电路的谐振特性	284	11.1 含一个非线性电阻元件电路的 分析	315
9.3.3 RLC串联电路的频率特性	286	11.1.1 非线性电阻元件及其分类	315
9.3.4 RLC串联谐振电路的 通频带	288	11.1.2 非线性电阻电路解析法	316
9.4 GLC并联谐振电路	289	11.1.3 非线性电阻电路图解法	317
9.5 非正弦周期信号激励下的稳态 分析	291	11.2 非线性电阻的串联、并联和 混联	318
9.5.1 非正弦周期信号表示为傅里叶 级数	292	11.3 含理想二极管电路的分析	321
9.5.2 非正弦交流电路的稳态 响应	292	11.3.1 理想二极管的伏安特性	321
9.5.3 周期信号的有效值和功率	294	11.3.2 戴维南等效在含理想二极管 电路分析中的应用	321
习题九	296	11.3.3 转移特性曲线的求取	322
第10章 双口网络	299	11.4 小信号分析	324
10.1 双口网络方程与网络参数	299	11.4.1 小信号模型	325
10.1.1 双口网络概述	299	11.4.2 小信号分析法	326
10.1.2 双口网络方程	299	11.5* 非线性电路中的混沌现象	327
10.1.3 网络参数	300	11.5.1 混沌现象及其主要特征	327
10.2 双口网络的等效电路	305	11.5.2 混沌电路	329
10.2.1 Z参数等效电路	305	习题十一	330
10.2.2 Y参数等效电路	305	部分习题参考答案	332
10.2.3 H参数等效电路	306	参考资料	342

电路理论包括电路分析和电路综合两大方面。电路分析的主要任务是依据电气装置和电子设备中所产生的电磁现象和电磁过程来分析电路中的电流、电压以及它们之间的关系,研究电路定律、定理和电路的分析方法。这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。电路综合则主要研究在给定输入和输出关系的要求下,寻求可以实现的电路结构和元件参数。本书主要学习电路分析方面的内容。

由电阻、电容、电感等集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。本书只对集中参数电路进行分析。

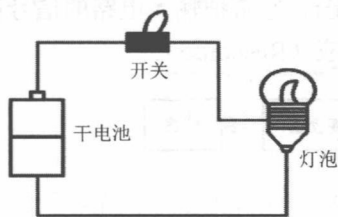
电路分析的理论基础是两类约束关系:一类是取决于元件性质的电压、电流之间的约束关系,称为元件的伏安关系约束;另一类是确定电路结构和连接方式的拓扑约束关系——基尔霍夫定律。本章回顾电流、电压及电功率等基本概念,并介绍组成电路的基本元件及它们的伏安关系,以及电路的基本定律(KCL、KVL)和受控源。

1.1 电路与电路模型

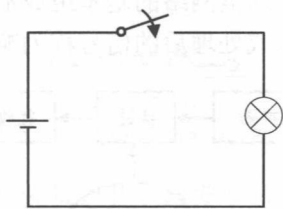
1.1.1 电路

“电路”概念我们并不陌生。在广泛用电的今天,电路可以说是随处可见,举目皆是,任何一个电气装置和电子设备都构成一种功能不同的电路。

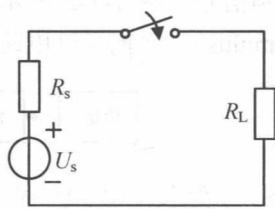
一个干电池,一个灯泡,一个开关,三根导线,按照图 1-1-1 (a) 的方式连接起来,这就组成了一个简单的实际的手电筒电路。由此可对电路作如下定义:若干个电气设备(Electric Equipment)或器件(Device),按照一定的方式连接起来构成的电流的通路就称为电路(Circuit),或网络(Network)。



(a) 实际电路



(b) 电气图



(c) 电路模型（电路图）

图 1-1-1 手电筒电路

在电路理论中，“电路”与“网络”这两个术语并无严格的区别，今后可以混用。

各种实物电器件可以用图形符号来表示，图 1-1-1（b）是将图 1-1-1（a）图中各实物用图形符号表示后的连接图，称为电气图（Electric Diagram）。表 1-1-1 给出了我国国家标准中的部分图形符号。

表 1-1-1 部分电气图用图形符号（根据国家标准 GB/T 4728）

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		电感器、绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁芯变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
直流电压表		电池		直流电动机	

1.1.2 电路的形式与功能

电路的形式多种多样，小的如将数以千计的电阻、电容、电感及晶体管集中在几个平方毫米内的集成电路；大的如现代电话网、现代通信网、数据信息网和计算机网，乃至延伸到几百上千公里以外的传输线路，它们都可以构成形式不同的电路，完成复杂的功能。

电路的功能基本上可以分成两大类。一类是实现电能的转换、传输和分配，例如电力系统。发电厂的发电机把热能或水能转换成电能，通过变压器、输电线等输送给各用电单位，用电单位又把电能转换成机械能、光能和热能等，这样构成一个极为复杂的电路或网络。人们常把供给电能的设备称为电源（Source），而把用电设备称为负载（Load）。电路的另一类功能则是在信息网络中，产生、存储、传递、加工和处理各种电信号，如语音信号、图像信号和控制信号。图 1-1-2 所示的是通信网的基本组成框图。通常把输入电路的信号称为激励（Stimulus），而把经过电路传输或处理后的信号称为响应（Response）。

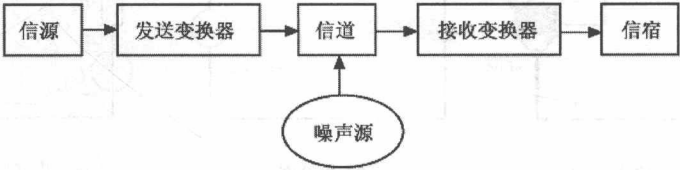


图 1-1-2 通信网的基本组成框图

1.1.3 电路模型与集中参数电路

构成电路的设备和器件统称为电路部件，常用的电路部件有电池、发电机、信号发生器、电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管及集成电路等。电路一旦接通有电流通过时，每个部件都会同时出现好几种电磁现象。例如，当通过电池的电流增大时，电池的端电压会降低，电池会发热；电阻器通电后会发热，同时还有磁场产生；电流通过电感器时会产生磁场，电感器也要发热，匝间还有电场；当电容器极板间电压变化时，电容器中有变化的电场和变化的磁场，介质中还有热损耗等。上述这些电磁现象对于每一个器件来说都是交织在一起的，连续分布在整個部件中，不能从空间上相互分开。因此，直接分析由电路部件组成的实际电路是比较复杂的，而在工程上也没有这样精确的必要。为此，我们必须在一定的条件下对电路部件抽象，加以理想化，忽略它的次要特性，用一个足以表征其主要性能的元件模型 (Model) 来表示，这种元件模型称为电路的理想元件。

电路分析的对象是由理想元件组成的电路模型，不是实际电路。图 1-1-1 (c) 所示的是图 1-1-1 (a) 所示实际电路的电路模型 (电路图)。它将实际电路中的灯泡看作一个理想电阻元件，忽略其极微小的电感效应；新的干电池的内阻远小于灯泡电阻，把它看作恒定的理想电压源，干电池用久了会发热变软，可以考虑其内阻；三根导线很短，其电阻完全可以忽略不计，看作理想导体；实际开关若动作足够快，可看作理想开关 (认为开和关不需要时间)。于是，理想电阻元件就构成了灯泡的模型，理想电压源串联内阻就构成了干电池的模型，理想导体则构成了连接导线的模型，而理想开关构成了实际开关的模型。

为了进一步描述和研究电路中出现的电磁现象，在这里还需要引入电路参数的概念。基本的电路参数有 3 个，即电阻、电容和电感。其中，电阻是用以表征消耗电能的电路参数，电容是用以表征形成电场和储存电场能的电路参数，电感则是用以表征形成磁场和储存磁能的电路参数。

有了电路参数的概念之后，对所谓电路部件的“理想化”就可以理解为：假设上述几种电磁现象可以分别研究，并将具有空间分布特性的电路参数集中起来，构成集中参数元件 (Lumped Parameter Element) 模型，这样每一种集中参数元件就只表示一种电磁特性，且其电磁特性还可以用数学方法精确地定义出流过它的电流和端钮间电压的关系。基本的集中参数元件有电阻元件、电感元件和电容元件，分别用图 1-1-3 (a) ~ 图 1-1-3 (c) 来表示，图中标注的“R”“L”和“C”既是元件的代表符号，也是元件的参数。在构成电路模型时，我们还需要两种理想电源元件——电压源元件和电流源元件，上述元件都具有两个端钮，称为二端元件 (或单口元件)。除二端元件外，本书还将介绍四端元件 (双口元件)——受控源、耦合电感和理想变压器等。

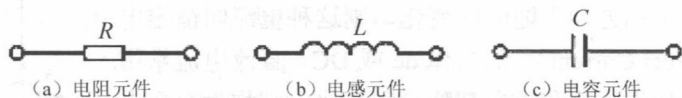


图 1-1-3 三种基本的集中参数元件

对于实际的电路，由它的电路特性构建其电路模型的过程，称为电路的建模 (Modeling)。有的电路的建模较简单，如上面的手电筒电路。有的器件或系统的建模则需要深入分析其中的物理现象才能做出它的电路模型。例如对交流发电机、半导体晶体管，便需要分别运用有

关知识去建模,这是相应的专门课程的课题。

由集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。

实际电路要能用集中参数电路去近似,需要满足以下条件:电路的几何尺寸 l 必须远小于电路的工作频率所对应的电磁波的波长 λ , 即

$$l \ll \lambda \quad \lambda = c / f \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

例如工业用电的频率为 50Hz, 其波长为 6000km, 对于电子电路, 其尺寸与这一波长相比都可以忽略不计, 因此, 可以采用集中参数概念。而远距离的通信线路和电力输电线则不满足上面的条件, 就不能用集中参数来分析。

本书只对集中参数电路进行分析。集中参数条件是电路分析的重要假设, 后面所讨论的电路的基本定律以及以基本定律为基础的各种分析方法都必须满足这一假设。

1.2 电路分析的基本变量

在电路分析中, 电路的工作状态通常可以用电荷、磁链、电流、电压、功率和能量这一组变量来描述, 电路分析的任务在于解得这些变量。这些变量中最常用到的便是电流、电压和功率, 物理课中对它们已有详细的讨论, 在这里只做简要的复习, 着重说明电压、电流和功率的真实方向、参考方向以及功率正、负的意义。

1.2.1 电流及其参考方向

电子和质子都是带电的粒子, 电子带负电荷, 质子带正电荷。带电粒子在外电场作用下定向移动形成电流 (Current)。在电路分析中, 电流不仅是一种能够通过热效应或磁效应觉察到的物理现象, 而且是一个可以定量计算的物理量 (在物理学中这个物理量一般称为电流强度)。电流用符号 i 表示, 电流强度定义为: 单位时间内通过导体横截面的电荷量, 或者说电流是电荷对时间的变化率。其表达式是

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中 q 代表电荷量, 在国际单位制 (SI) 中, 电荷的单位是库 (仑), 符号为 C; t 表示时间, 单位为秒, 符号为 s; 电流的单位是安 (培), 符号为 A, 1 安=1 库/秒。

在电信技术中常用的电流单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA)。1mA=10⁻³A, 1 μA =10⁻⁶A。

电路中电流可以具有两个不同的方向, 当带负电的电子在导体中沿某一方向做定向运动时, 导体中的正电荷沿相反的方向运动。历史上把电流的方向规定为正电荷沿导体运动的方向 (与负电荷运动方向相反), 沿用至今。

如果电流的大小和方向不随时间变化, 则这种电流叫恒定电流, 简称直流 (Direct Current), 简写作 dc 或 DC, 直流电流常用大写字母 I 表示。如果大小和方向都随时间变化, 则称为交变电流, 简称交流 (Alternating Current), 简写作 ac 或 AC。

在简单电路中, 例如图 1-1-1 所示电路, 不难根据电源电压的极性直接在电路图中标出电流的方向。但对于复杂一些的电路, 例如图 1-2-1 所示的电路, 就难以确定 R 支路中电流的真实方向。

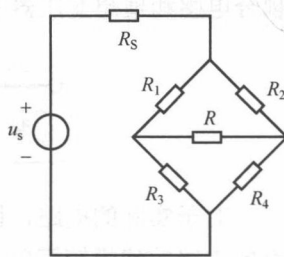


图 1-2-1 说明电流方向用图

此外,如果电路中电流的实际方向不断随时间改变,那就更不可能用一个固定的箭头来表示真实方向。这样的困难可用选定参考方向(Reference Direction)的办法来解决。参考方向是人为指定的,因为电流是代数量,可以是正值或负值。我们规定:当电流的实际方向与参考方向相同时,电流取正值;若相反,则取负值。这样,一旦指定了参考方向,就可以通过电流值的“正”或“负”来说明电流的实际方向。不言而喻,在没有指定参考方向的情况下,电流的“正”“负”是没有意义的。由于电流的参考方向就是电流取“正”值的方向,所以也称为假定正方向。注意:参考方向一经指定,在计算过程中就不能改变了。

电流参考方向在电路图中的标注方法如图 1-2-2 所示。在计算式中,电流的参考方向可用带有下标的电流符号表示。 I_{ab} 表示 I 的参考方向由 a 指向 b,而 I_{ba} 则表示 I 的参考方向由 b 指向 a。同一实际电流若指定的参考方向不同,计算结果差一个“-”号。即

$$I_{ab} = -I_{ba} \quad (\text{交流: } i_{ab} = -i_{ba}) \quad (1-2-2)$$

【例 1-2-1】 如图 1-2-2 所示电路,设每秒有 5C(库仑)的正电荷由 a 端移到 b 端。

① 若电流的参考方向由 a→b,求 i ?

② 若电流的参考方向由 b→a,求 i ?

③ 若为负电荷,结果又如何?

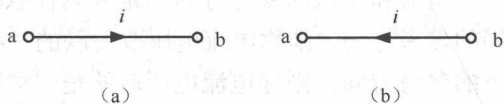


图 1-2-2 电流的参考方向

解 ① 因参考方向与正电荷的运动方向

一致,故电流应取正值,即 $i=5\text{A}$ 。

② 参考方向与正电荷的运动方向相反,故电流应取负值,即 $i=-5\text{A}$ 。

③ 负电荷由 a 转移到 b,相当于等量的正电荷由 b 转移到 a,因此,当参考方向由 a→b 时, $i=-5\text{A}$;而当参考方向由 b→a 时, $i=5\text{A}$ 。

1.2.2 电压及其参考方向

电路中的电荷具有电位(势)能。电荷只有在电场力的作用下才能做有规则的定向移动,形成电流。电场力对电荷做功能力的大小是用电压(Voltage)来衡量的,因此,电压是电路分析中的另一个重要的物理量。电路中 a 点对 b 点的电压,在数值上等于电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所做的功,也就是该单位正电荷在此过程中获得或失去的电势能。电压用符号 u 表示,其定义式为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-3)$$

式中 q 是被移动的正电荷的电量。 w 是电场力把正电荷 q 由 a 点移到 b 点所做的功,单位为焦(耳),符号为 J。 u 是 a、b 两点间的电压,单位为伏(特),符号为 V。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)及微伏(μV)。

$$1\text{kV}=10^3\text{V}; 1\text{mV}=10^{-3}\text{V}; 1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}。$$

若正电荷从 a 点移到 b 点失去电势能,则电位(势)降低,即 a 点的电位(势)高于 b 点。反之,若正电荷从 a 点移到 b 点获得电势能,则电位(势)升高,即 a 点的电位(势)低于 b 点。所以正电荷在电路中移动时,电势能的失去或获得体现为电位的降低或升高。

规定把电位降低的方向作为电压的实际方向。

大小和方向(或极性)都不随时间变化的电压称为直流电压,用大写字母 U 表示,其定义为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-2-4)$$

如同电流需要指定参考方向一样,电压也需要指定参考方向(或参考极性)。

指定了电压参考方向之后,如果计算得到的电压为正值,说明电压的实际方向与参考方向一致;若计算得到的电压为负值,就说明电压的实际方向与参考方向相反。

电压参考方向在电路中的标注方法如图 1-2-3 所示。图 1-2-3 (a) 和图 1-2-3 (b) 都表示电压参考方向由 a 指向 b。

在计算式中,电压参考方向可用带有双下标的电压符号表示,如 u_{ab} 表示电压 u 的参考方向由 a 指向 b。当指定的参考方向相反时,同一电压互为负值。即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (U_{ab} = -U_{ba}) \quad (1-2-5)$$

电流和电压的参考方向都是人为任意指定的,彼此可以互不相关。若电流与电压采用相同的参考方向,则称电流电压取关联的(Associated)参考方向;反之,若电流与电压采用相反的参考方向,则称电流电压取的是非关联(Non-associated)参考方向。图 1-2-4 (a) 所示为关联参考方向,图 1-2-4 (b) 所示为非关联参考方向。在关联参考方向下,只需标出电流的参考方向或电压的参考方向。

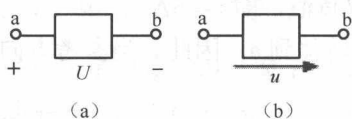


图 1-2-3 电压参考方向标注方法

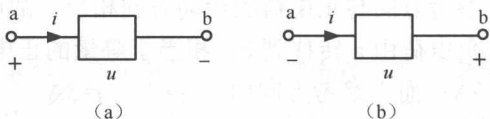


图 1-2-4 u 、 i 关联与非关联参考方向

1.2.3 功率及其参考方向、功率正负号的意义

能量的传输和转换是电路的基本物理现象之一。电功率(简称功率)(Power)是衡量电路中能量变化速率的物理量。其定义式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-2-6)$$

式中 w 为能量, t 为时间。它说明功率在数值上等于单位时间内变化的能量。式 (1-2-6) 还可以进一步写为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-2-7)$$

此式说明:一段电路的功率等于这段电路的电压与电流的乘积。在国际单位制中,功率单位是瓦(特),符号为 W。常用的功率单位还有毫瓦(mW)、微瓦(μ W)及千瓦(kW)。

若电路中 u 与 i 都是随时间变化的,则功率也将随时间变化,此时称为瞬时功率,用小写字母 p 表示。在直流电路中,功率与电流、电压均不随时间变化,式 (1-2-7) 可写成

$$P = UI \quad (1-2-8)$$

当用式 (1-2-7) 或式 (1-2-8) 进行功率计算时,由于 u 、 i 或 U 、 I 都是代数量,可正可

负，因而功率值也可正可负。那么，功率取正值或负值有什么意义呢？它与电压、电流的参考方向有关。

先考虑 u 与 i 用关联参考方向的情况，这时功率正、负号的意义如图 1-2-5 所示。

设 $p>0$ ，则 u 与 i 的符号必然相同。在关联参考方向下， u 与 i 符号相同表示 u 与 i 的实际方向相同。由于电流的方向代表正电荷移动的方向，电压的方向代表电位降方向，两者实际方向相同，说明正电荷在通过这个电路元件（或这段电路）时，电位降低了。电位降低表示正电荷失去了电势能，或者说，能量被该段电路吸收（或消耗）。于是得到 $p>0$ ，表示这段电路吸收功率（能量流入该电路）。

反之，若 $p<0$ ，必然是 u 与 i 符号相反。在关联参考方向下， u 与 i 符号相反意味着它们的实际方向相反，正电荷在通过这段电路时电位提高，电势能增加。由此可以推断，该电路释放或者产生功率（能量流出该段电路）。

当 u 与 i 采用非关联参考方向时，若仍用 $p=ui$ 来计算功率，得到的功率其正、负含义与关联参考时得到的含义刚好相反，即 $p>0$ 表示发出功率， $p<0$ 表示吸收功率。

实际电路中，除非非常简单的电路，在计算之前一般并不知道某部分是吸收还是发出功率，即不知道其充当负载还是电源作用。此时可以预先假定一个功率流向（功率参考方向），然后计算功率并通过功率的正、负符号来反映功率的真实流向与假定参考方向是否一致。

实际中常常假设功率的参考方向为流入该电路，即默认计算的是吸收功率。

在 u 与 i 关联参考取向时，首先用 $p_{\text{吸收}} = ui$ 计算出吸收功率。若 $p_{\text{吸收}} > 0$ ，则表明该电路确实是吸收功率；若 $p_{\text{吸收}} < 0$ ，则表明该电路实际是发出功率。

由于 u 与 i 取关联和非关联参考方向时，功率正、负含义刚好相反，实际中常引起混乱。为此，可以先将功率正、负的含义统一起来，只是当 u 与 i 采用非关联参考方向时，计算吸收功率的公式改为

$$p_{\text{吸收}} = -ui \quad (\text{或 } P_{\text{吸收}} = -UI) \quad (1-2-9)$$

按式 (1-2-9) 计算所得的功率正负号的意义仍与前面的说明相同，如图 1-2-5 所示。

【例 1-2-2】 在图 1-2-6 所示的电路中，电压与电流参考方向已经指定，并知 $U_1=3\text{V}$ ， $U_2=1\text{V}$ ， $U_3=2\text{V}$ ， $U_4=-2\text{V}$ ， $I_1=2\text{A}$ ， $I_2=-3\text{A}$ ， $I_3=1\text{A}$ ，试计算每个元件上的功率，并说明这些功率是产生的，还是吸收的。

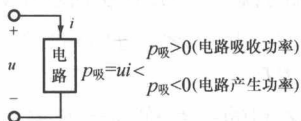


图 1-2-5 功率正、负号的意义

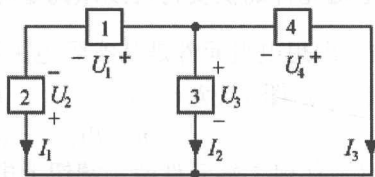


图 1-2-6 【例 1-2-2】电路

解 元件 1，3 的电流、电压取关联参考方向，其功率按式 (1-2-8) 计算，分别为

$$P_{1\text{吸收}} = U_1 I_1 = 3 \times 2 = 6\text{W} > 0 \quad (\text{实为吸收功率})$$

$$P_{3\text{吸收}} = U_3 I_2 = 2 \times (-3) = -6\text{W} < 0 \quad (\text{实为产生功率})$$

元件 2，4 的电流、电压取非关联参考方向，应用式 (1-2-9) 计算吸收功率。即

$$P_{2\text{吸收}} = -U_2 I_1 = (-1) \times 2 = -2\text{W} < 0 \quad (\text{实为产生功率})$$

$$P_{4\text{吸收}} = -U_4 I_3 = -(-2) \times 1 = 2\text{W} > 0 \quad (\text{实为吸收功率})$$

从本例可看到, 在电压与电流采用关联与非关联两种情况下, 为了使功率正、负号的意义一致, 必须采用不同的计算公式。为了避免这种情况, 应尽可能采用关联参考方向。

由本例还可以看到, 电路中各吸收功率元件吸收功率的总和为 $P_1 + P_4 = 8\text{W}$, 而产生功率元件产生功率的总和为 $|P_2 + P_3| = 8\text{W}$, 二者正好相等, 这并不是偶然现象, 而是因为根据能量守恒原理, 电路中吸收的总功率必然要等于产生的总功率, 这称为功率平衡。

1.2.4 能量

能量 (Energy) 是功率对时间的积分。将式 (1-2-6) 两边从 $-\infty$ 到 t 积分, 可得电路吸收的能量:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-2-10)$$

上式表示电压、电流取关联参考方向时, 从 $-\infty$ 到 t 时间内流入电路的总能量。

对某一元件, 若任意时刻 t , 均有式 (1-2-10) 中 $w(t) \geq 0$ 成立, 即到任何观察时刻 t 为止, 流入该元件的总能量总是非负的, 则称其为无源 (Passive) 元件。

反之, 任何不满足如上条件的元件称为有源 (Active) 元件。

常见的无源元件有电阻元件、电感元件、电容元件、互感元件和理想变压器; 常见的有源元件有独立电压源、独立电流源、受控电源和理想运算放大器等。

如上关于有源和无源的定义, 不仅适用于单一元件, 也适用于任何网络。

1.3 电阻元件

电阻元件 (Resistor) 是最简单且常用的无源元件之一, 本节将先对理想电阻元件的伏安特性和功率做简单的介绍, 然后介绍工程中电阻器的分类、商用规范及常用标注方法。

1.3.1 理想电阻元件

1. 理想电阻元件的伏安特性及欧姆定律

如前所述, 理想电阻元件是从实际电阻器抽象出来的模型。在中学物理中, 学过由欧姆定律 (Ohm's law), 即

$$u = Ri \quad (\text{或 } U = RI) \quad (1-3-1)$$

来定义电阻元件。任何二端元件两个端钮上电压与电流之间的关系称为伏安关系或伏安特性。欧姆定律所表示的是电阻元件的伏安特性。电阻元件的端电压 u 与通过它的电流之比

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-3-2)$$

就是电阻元件的参数值, 称为电阻。式中若 u 的单位用伏, i 的单位用安, 则电阻 R 的单位是欧 (姆), 符号是 Ω 。高值电阻常以千欧 ($\text{k}\Omega$) 或兆欧 ($\text{M}\Omega$) 为单位。

电阻元件的伏安特性也可写成