

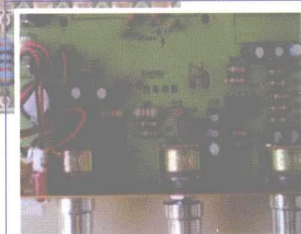
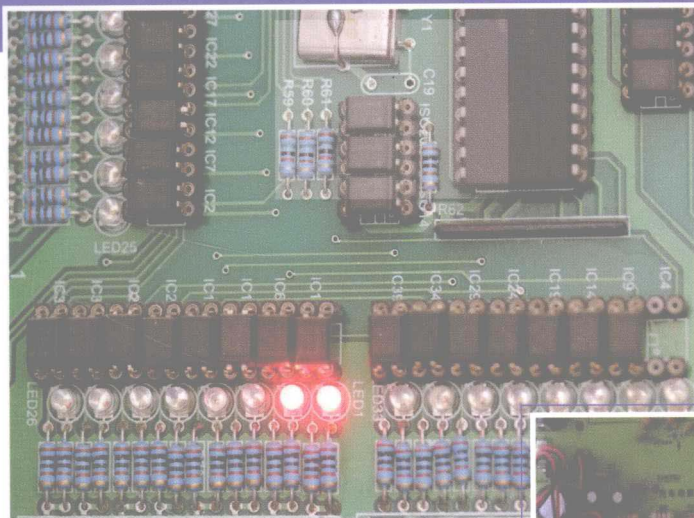


高等学校应用型特色规划教材



电路基础

蔡启仲 主 编
梁奇峰 崔雪英 徐剑琴 副主编



免费赠送电子课件

注意各部分内容的内在联系和融会贯通，前后章节内容相呼应。

重发挥电路分析方法理论严密、逻辑性强的特点，以便培养学生的辩证思维能力。

逐步深入阐述电路理论的基本概念、基本规律和基本方法，力求符合学生的认知规律，
于教学的实施。



清华大学出版社

内 容 简 介

“电路”课程是自动化、电子信息工程等电气类专业的一门重要的专业基础课。它的任务是通过本课程的学习,掌握电路的基本理论、电路分析的基本方法和进行实验的初步技能,为后续的课程准备必要的电路知识。

本书共分 14 章,主要内容有:电路模型及电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路定理、相量法基础、正弦交流电路的分析、耦合电感与理想变压器、频率响应及信号的频谱、二端口网络、线性动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、网络函数、大规模电路分析方法基础、非线性电阻电路。

本书可供高等学校电子与电气信息类专业师生作为电路课程的教材使用,也可供有关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/蔡启仲主编;梁奇峰,崔雪英,徐剑琴副主编. —北京:清华大学出版社,2013
(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-29430-6

I. ①电… II. ①蔡… ②梁… ③崔… ④徐… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 161356 号

责任编辑:李春明 郑期彤

封面设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23.25

字 数:564 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.00 元

产品编号:038504-01

前 言

电子、自动化、测量、计算机等学科领域的学习研究均建立在电路理论基础上。电路理论主要研究电路分析、综合和设计的基本规律,它与数学、物理和拓扑学相结合形成了工程方法,即电路分析方法。“电路”课程的主要任务是学习基本的电路理论和电路分析方法。本书围绕本科人才培养目标,注重学生学习能力和知识应用能力培养,尽可能将理论学习与应用相结合,力求成为一本在应用型人才培养中具有一定特色的本科教材。为保证电路分析的基础性,又要适应科学技术发展的需要,本书对于传统内容的继承与创新进行了谨慎的处理;并在保持电路理论的基本体系下,试图处理好其与相邻学科的关系,力求点到为止;在理论阐述上,本书注重理论与实际融会贯通,力求注入工程意识。编者根据多年的教学经验,并在吸取国内外同类教材精华的基础上,编写了本书。

编写本书的基本指导思想体现在以下几方面。

(1) 设计新的内容框架、结构。本书知识内容安排遵循由浅到深、循序渐进的原则,基本思路是:先直流,后交流;先稳态,后动态;先线性,后非线性等。逐步深入阐述电路理论的基本概念、基本规律和基本方法,力求符合人的认识规律,便于教学实施。

(2) 强调掌握、理解基本概念、基本规律和基本方法。本书注重电路基本概念、理论和分析方法的阐述,注意物理、数学知识为电路分析基础及应用。直流电路分析部分强调线性代数为数学基础;正弦稳态电路分析部分强调复数运算为数学基础;动态电路分析部分强调微分方程和拉普拉斯变换求解为数学基础等。

(3) 注重发挥电路分析方法理论严密、逻辑性强的特点,培养学生的辩证思维能力。本书安排较多的例题,通过例题的分析与求解,力求培养学生的观察能力、分析能力、逻辑能力、综合能力及知识应用能力,注意一题多解,训练学生的发散思维能力。

(4) 注意各部分知识内容的内在联系和融会贯通,前后章节内容相呼应。本书强调以电路元件的电压电流关系(VCR)和基尔霍夫定律(KCL、KVL)两类约束关系为主线,贯穿全书各章节,内容通俗易懂。

(5) 保证基础,兼顾深度。本书作为本科教学使用,可根据专业特点和培养目标取舍内容,全书建议安排 90~100 教学学时较为适宜。如果作为学习电路分析基础的教材使用,则可选择第 1 章至第 10 章(一阶电路部分)为教学内容,建议安排 60~70 教学学时。

本书由蔡启仲教授任主编并负责全书的统稿,梁奇峰、崔雪英、徐剑琴任副主编。具体编写分工如下:李晓军(广西科技大学)编写第 1 章和附录 B,徐剑琴(广西科技大学)编写第 2、5、6、10 章,梁奇峰(广西科技大学)编写第 3、7、11、14 章和附录 A,崔雪英(安徽铜陵学院)编写第 4、9 章,游青松(安徽铜陵学院)编写第 8 章,鲍尚东(安徽铜陵学院)编写第 12、13 章。

由于时间仓促以及作者水平有限,书中难免有不当或错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 电路模型及电路定律..... 1	2.2.3 电阻的串并联.....31
1.1 电路及电路模型.....1	2.3 电阻的 Y 连接和 Δ 连接的等效变换...33
1.1.1 电路的作用.....1	2.4 电源的等效变换.....36
1.1.2 电气图及电路模型.....1	2.4.1 电源的串并联.....36
1.1.3 集总元件与集总假设.....2	2.4.2 两种电源模型的等效变换.....39
1.2 电路变量.....3	2.5 输入电阻和等效电阻.....43
1.2.1 电流.....3	2.5.1 一端口(二端)网络.....43
1.2.2 电压.....4	2.5.2 输入电阻.....43
1.2.3 参考方向.....4	本章小结.....45
1.2.4 电功率.....5	习题.....47
1.3 电路元件.....6	第 3 章 电阻电路的一般分析方法.....51
1.3.1 电阻元件.....6	3.1 电路中的基本概念.....51
1.3.2 电容元件.....8	3.2 $2b$ 法与 $1b$ 法.....52
1.3.3 电感元件.....10	3.2.1 支路法($2b$ 法)简介.....52
1.3.4 独立电压源.....12	3.2.2 支路电流法.....53
1.3.5 独立电流源.....13	3.3 网孔电流法与回路电流法.....54
1.3.6 受控源.....14	3.3.1 网孔电流法.....54
1.4 基尔霍夫定律.....15	3.3.2 回路电流法.....56
1.4.1 KCL 定律.....16	3.4 节点电压法.....58
1.4.2 KVL 定律.....18	本章小结.....61
1.4.3 电路中 KCL、KVL 方程的 独立性.....19	习题.....62
1.5 电路中电位的计算.....20	第 4 章 电路定理.....65
1.5.1 电位.....20	4.1 叠加定理.....65
1.5.2 简化电路.....21	4.1.1 定理内容.....65
1.5.3 简化电路的分析方法.....22	4.1.2 关于定理的说明.....67
本章小结.....22	4.1.3 线性电路的齐次性与可加性.....69
习题.....23	4.2 替代定理.....71
第 2 章 电阻电路的等效变换.....27	4.2.1 定理内容.....71
2.1 概述.....27	4.2.2 关于定理的说明.....73
2.2 电阻的串联和并联.....28	4.3 戴维南定理和诺顿定理.....73
2.2.1 电阻的串联及分压公式.....28	4.3.1 戴维南定理.....74
2.2.2 电阻的并联及分流公式.....29	4.3.2 诺顿定理.....76
	4.3.3 关于这两个定理的说明.....77



4.3.4 最大功率传输定理.....	78
*4.4 特勒根定理.....	80
4.4.1 特勒根功率定理.....	80
4.4.2 特勒根拟功率定理.....	82
*4.5 互易定理.....	83
4.5.1 定理的形式一.....	83
4.5.2 定理的形式二.....	84
4.5.3 定理的形式三.....	84
*4.6 对偶定理.....	85
本章小结.....	87
习题.....	88
第5章 相量法基础.....	92
5.1 数学基础.....	92
5.1.1 复数基础.....	92
5.1.2 正弦量.....	94
5.2 相量法的基本思想.....	97
5.2.1 正弦量的相量表示.....	97
5.2.2 正弦量的计算.....	99
5.3 电路定律的相量形式.....	101
本章小结.....	105
习题.....	106
第6章 正弦交流电路的分析.....	109
6.1 阻抗和导纳.....	109
6.1.1 阻抗(导纳)的定义.....	109
6.1.2 阻抗(导纳)的串联和并联.....	112
6.2 正弦交流电路的分析.....	114
6.3 正弦交流电路的功率分析.....	119
6.3.1 瞬时功率.....	119
6.3.2 平均功率、视在功率与功率 因数.....	120
6.3.3 无功功率.....	121
6.3.4 复功率.....	123
6.3.5 正弦电流电路的最大功率 传输.....	125
6.4 三相电路.....	126
6.4.1 三相电源及三相电路的基本 概念.....	126
6.4.2 三相电路的分析.....	129
6.4.3 三相电路的功率.....	135
本章小结.....	137
习题.....	140
第7章 耦合电感与理想变压器.....	145
7.1 互感.....	145
7.2 含有耦合电感电路的分析.....	148
7.2.1 直接列写方程法.....	148
7.2.2 去耦等效法.....	148
7.3 空心变压器和理想变压器.....	151
7.3.1 空心变压器.....	151
7.3.2 理想变压器.....	153
本章小结.....	156
习题.....	157
第8章 频率响应及信号的频谱.....	160
8.1 谐振.....	160
8.1.1 RLC 串联谐振.....	160
8.1.2 RLC 并联谐振.....	163
8.2 频率特性.....	165
8.2.1 幅频特性与幅频特性曲线.....	166
8.2.2 相频特性与相频特性曲线.....	169
8.2.3 通频带.....	170
8.2.4 滤波器.....	171
8.3 非正弦周期信号电路与频谱.....	172
8.3.1 正弦稳态的叠加.....	172
8.3.2 非正弦周期函数的傅里叶 分解与信号的频谱.....	173
8.3.3 非正弦周期函数的有效值 与平均功率.....	175
8.3.4 频谱.....	177
本章小结.....	178
习题.....	179
第9章 二端口网络.....	182
9.1 概述.....	182
9.1.1 N 端网络与 N 端口网络.....	182
9.1.2 研究对象的特性.....	183
9.1.3 二端口网络的变量与方程.....	184
9.2 二端口参数及方程.....	184

9.2.1 流控型参数——开路阻抗 参数 Z	184
9.2.2 压控型参数——短路导纳 参数 Y	186
9.2.3 混合型参数 H	188
9.2.4 传输型参数 T	190
9.3 二端口参数之间的关系	191
9.3.1 参数之间的转换方法一	191
9.3.2 参数之间的转换方法二	192
9.4 二端口网络的等效电路	194
9.4.1 T 形等效电路	194
9.4.2 Π 形等效电路	195
9.5 含二端口网络的电路分析	196
9.5.1 涉及的概念	196
9.5.2 二端口网络的转移函数	198
9.6 二端口网络的连接	200
9.7 典型二端口元件模型	204
9.7.1 正阻抗变换器	204
9.7.2 负阻抗变换器	204
9.7.3 回转器	206
本章小结	207
习题	207

第 10 章 线性动态电路的时域分析 211

10.1 动态电路分析的经典方法	211
10.2 电路的初始条件	212
10.2.1 几个概念	212
10.2.2 换路计算的规律	213
10.3 一阶电路的响应	215
10.3.1 一阶电路的零输入响应	215
10.3.2 一阶电路的零状态响应	221
10.3.3 一阶电路的全响应	226
10.3.4 三要素法	228
10.4 阶跃函数与阶跃响应	231
10.4.1 阶跃函数	231
10.4.2 单位阶跃响应	232
10.5 冲激函数与冲激响应	235
10.5.1 冲激函数	235
10.5.2 冲激响应	236

10.6 二阶电路的零输入响应	240
10.6.1 二阶电路中的能量振荡	240
10.6.2 二阶电路微分方程求解	241
10.6.3 二阶电路特征根讨论	242
10.7 二阶电路的零状态响应和全 响应	247
10.8 二阶电路的阶跃响应与冲激 响应	250
10.8.1 二阶电路的阶跃响应	250
10.8.2 二阶电路的冲激响应	251
本章小结	253
习题	254

第 11 章 线性动态电路的复频域 分析 260

11.1 拉普拉斯变换法基础	260
11.1.1 拉普拉斯变换的定义	260
11.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	261
11.1.3 拉普拉斯反变换的计算	265
11.2 应用拉普拉斯变换分析线性电路	270
11.2.1 基尔霍夫定律的复频域 形式	271
11.2.2 电路元件的复频域模型—— 运算电路模型	271
11.2.3 线性动态电路的复频域 分析	274
本章小结	280
习题	281

第 12 章 网络函数 284

12.1 网络函数简介	284
12.2 网络函数的零点与极点	285
12.2.1 零点和极点的定义	285
12.2.2 零极点图	285
12.3 极点与冲激响应	286
12.4 极点与频率响应	288
12.4.1 频率响应	288
12.4.2 极点与频率响应	288
12.5 从网络函数看滤波器分析简介	290



本章小结.....	291	习题.....	326
习题.....	291		
第 13 章 大规模电路分析方法基础.....	294	附录 A 均匀传输线.....	329
13.1 电网络图论的基本概念.....	294	A.1 分布参数模型.....	329
13.1.1 网络的图.....	294	A.2 均匀传输线电路模型及其方程.....	330
13.1.2 树及其基本回路和基本割集.....	295	A.3 均匀传输线方程的正弦稳态解.....	331
13.1.3 关联矩阵与降阶关联矩阵.....	296	A.4 均匀传输线的参数和传播特性.....	334
13.1.4 回路矩阵和割集矩阵.....	297	A.5 均匀传输线上的行波和波的反射.....	336
13.2 支路方程的矩阵形式.....	299	A.6 终端接有负载的传输线.....	338
13.3 节点分析法.....	302	A.6.1 终端接有特性阻抗的传输线.....	339
13.4 回路分析法.....	304	A.6.2 终端接任意负载阻抗的传输线.....	340
13.5 割集分析法.....	305	A.7 无损传输线.....	341
本章小结.....	307	附录 B 电路分析软件 Multisim 简介.....	346
习题.....	307	B.1 Multisim 软件界面介绍.....	346
第 14 章 非线性电阻电路.....	311	B.1.1 主窗口.....	346
14.1 非线性电阻元件.....	311	B.1.2 命令菜单.....	347
14.1.1 压控型、流控型及单调型非线性电阻.....	311	B.1.3 命令工具栏.....	350
14.1.2 双向性、单向性电阻和静态、动态电阻.....	312	B.2 软件基本操作.....	352
14.2 非线性电阻的串联与并联等效.....	314	B.2.1 创建电路.....	352
14.2.1 非线性电阻的串联等效.....	314	B.2.2 虚拟仪器使用.....	353
14.2.2 非线性电阻的并联等效.....	317	B.3 Multisim 的电路分析方法.....	356
14.3 常用的非线性电阻电路分析法.....	318	B.3.1 直流(静态)工作点分析.....	357
14.3.1 图解法.....	319	B.3.2 交流频率分析.....	358
14.3.2 分段线性化法.....	321	B.3.3 瞬态分析.....	359
14.3.3 小信号分析法.....	323	B.3.4 参数扫描分析.....	359
本章小结.....	326	B.3.5 直流小信号传递函数分析.....	360
		B.3.6 傅里叶分析.....	361
		参考文献.....	363

第 1 章 电路模型及电路定律

教学目标

- (1) 理解电路模型, 理解电压、电流、参考方向、电功率和额定值的意义。
- (2) 掌握理想电路元件(如电阻、电容、电感、电压源和电流源)的电压电流关系。
- (3) 掌握基尔霍夫定律、电位的概念及计算。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的作用

电路指电流所通过的路径, 也称回路或网络, 是由电气设备和元器件按一定方式连接起来, 以实现特定功能的电气装置。

在电力、通信、计算机、信号处理、控制等各个电气工程技术领域, 都使用大量的电路来完成各种各样的任务。电路的作用大致可分为以下两方面。

(1) 电能的传输和转换。例如电力供电系统、照明设备、电动机等。此类电路主要利用电的能量, 其电压、电流、功率相对较大, 频率较低, 也称为强电系统。

(2) 信号的传递和处理。例如电话、扩音机电路用来传送和处理音频信号, 万用表用来测量电压、电流和电阻, 计算机的存储器用来存放数据和程序。此类电路主要用于处理电信号, 其电压、电流、功率相对较小, 频率较高, 也称为弱电系统。

实际电路虽然多种多样, 功能也各不相同, 但它们都受共同的基本规律支配。正是在这种共同规律的基础上, 形成了“电路理论”这一学科。通过对“电路”课程的学习, 可掌握电路的基本理论和基本分析方法, 为进一步学习电路理论及电气类相关课程打下基础。

1.1.2 电气图及电路模型

实际电路要工作, 首先要由电源或信号源提供电能或电信号, 向电路输入电压、电流后, 推动用电设备(也称负载)工作以实现特定的功能。电源或信号源又称为激励, 由激励在电路中各部分引起的电压和电流输出称为响应。

人们日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路, 它由干电池、灯泡、手电筒壳(连接导体)组成, 如图 1-1(a)所示。

干电池是将非电能(此处为化学能)转换为电能的设备, 称为电源; 灯泡是将电能转换成非电能(此处为光能)的设备, 称为负载; 开关是接通或断开电路, 起控制电路作用的元件; 连接导体负责把电源与负载连接起来。一个完整的电路是由电源(或信号源)、负载和中间环节(如开关、导线等)三个基本部分组成的。各种实际电路的种类和作用不同, 规模也相差很大, 小到硅片上的集成电路, 大到高低压输电网, 但都可以分解成以上三大部分。



各种电路中随着电流的流动, 都在进行着不同形式能量之间的转换。

在实际应用中, 为了便于分析, 通常用电路图来表示电路。在电路图中, 各种电气元件都不需要画出原有的形状, 而是采用统一规定的图形符号来表示。图 1-1(b)所示就是图 1-1(a)所示手电筒的电路原理图。

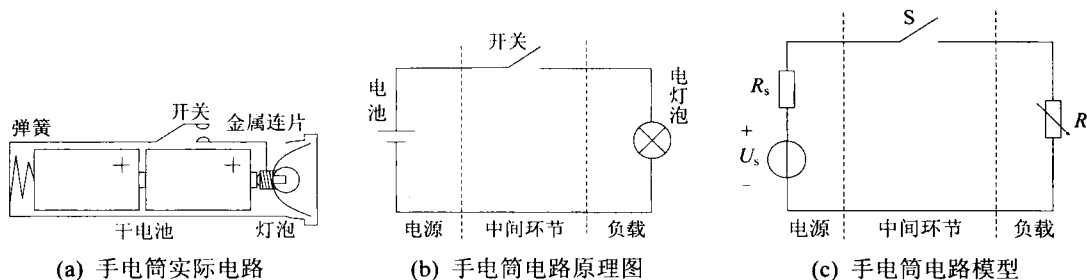


图 1-1 电路模型

为便于理论研究, 常用与实际电气设备和元器件相对应的理想化元器件构成电路, 并用统一规定的符号表示作为实际电路的“电路模型”, 如图 1-1(c)所示。本书在进行理论分析时所指的电路, 均指这种电路模型。

人们设计制作某种元器件是要利用它的某种物理性质, 譬如说, 制作一个电阻器是要利用它的电阻, 即对电流呈现阻力的性质; 制作一个电源是要利用它的两极间能保持有一定电压的性质; 制作连接导体是要利用它的优良导电性能, 使电流顺利流过。但是, 事实上不可能制造出只表现出某一性质的器件, 也就是说, 不可能制造出完全理想的器件, 例如:

- (1) 一个实际的电阻器在有电流流过的同时还会产生磁场, 因而还兼有电感的性质。
- (2) 一个实际电源总有内阻, 因而在使用时不可能总保持一定的端电压。
- (3) 连接导体总有一点电阻, 甚至还有电感。

这样往往给分析电路带来了困难, 因此, 必须在一定条件下对实际器件加以理想化, 忽略它的次要性质, 用一个足以表征其主要性能模型来表示。例如:

- (1) 灯泡的电感是极其微小的, 把它看作一个理想的电阻元件是完全可以的。
- (2) 一个新的干电池, 其内阻与灯泡的电阻相比可以忽略不计, 把它看作一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的。
- (3) 在连接导体很短的情况下, 导体的电阻完全可以忽略不计, 可看作理想导体。

于是这个理想电阻元件就构成了灯泡的模型, 理想电压源就构成了电池的模型, 而理想导体则构成了连接导体的模型。

各种实际元器件都可以用理想模型来近似地表征它的性质, 只有对这样用理想模型表征的元器件所构成的电路模型, 人们才有可能进行定性和定量的研究分析。电路理论分析的对象是电路模型, 而非实际电路。

1.1.3 集总元件与集总假设

1. 电路研究的理想化假设

实际的电路元器件在工作时, 其电和磁现象同时存在, 且发生在整个元器件中, 复杂

地交织在一起。为了方便分析,在一定的条件下,假定电路中的电磁现象可以分别研究,用“集总参数元件”(简称集总元件)来构成模型,每一种集总元件均只表现一种基本现象,且可以用数学方法精确定义。如电阻表示只消耗电能的元件,电容表示只存储电场能量的元件,电感表示只存储磁场能量的元件,电压源和电流源均表示只提供电能的元件,等等。

上述元件的一个共同特点是都只有两个端钮,故称为二端元件(或称单口元件)。除二端元件外,往往还需要四端元件(或称双口元件),如受控源、理想变压器、耦合电感等。

2. 集总假设的适用条件

上述“集总”的含义是:元器件中的电场和磁场可以分隔,并分别加以表征和研究,即元器件中交织存在的电场和磁场之间不存在相互作用。但实际上,若电场与磁场间存在相互作用时将产生电磁波,这样电路中的一部分能量将通过辐射而损失掉。

由此可见,上述集总假设的使用是有条件的,只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总假设,即当实际电路元件或部件的外形尺寸远比通过它的电磁波信号的波长小得多,可以忽略不计时,方可采用集总假设。

这种元件和部件称为集总元件,是抽象的理想元件模型,由集总元件构成的电路模型,称为集总电路。

例如,我国电力用电的频率为 50Hz,对应的波长为 6000km。对一般的用电设备和其中的元器件而言,其尺寸与这一波长相比完全可以忽略不计,因此集总假设的概念是完全适用的。但对远距离输电线来说,就必须考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用分布参数来表征。

1.2 电路变量

电路的电性能可以用一组表示为时间函数的变量来描述,最常用到的是电流、电压和电功率。本书中各电量单位都采用国际单位制。

1.2.1 电流

自然界中存在正、负两种电荷,在电源的作用下,电路中形成了电场,在电场力的作用下,处于电场内的电荷发生定向移动,形成电流,习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

电流的大小称为电流强度(简称电流),是指单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

式中,电荷 q 的单位为库[仑](C);时间 t 的单位为秒(s);电流 i 的单位为安[培](A)。除了 A 外,常用的单位有毫安(mA)、微安(μ A),它们之间的换算关系如下:

$$1\text{A} = 10^3\text{mA}$$

$$1\text{mA} = 10^3\mu\text{A}$$

如果电流的大小和方向不随时间变化,这种电流称为恒定电流,简称直流,一般用大写字母 I 表示。

如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流,一般用小写字母*i*表示。本书中的小写字母也可能表示恒定量,读者要根据上下文确定。

1.2.2 电压

电压是指电场中两点间的电位差(电势差),电压的实际方向规定为从高电位指向低电位, a、b 两点之间的电压在数值上等于电场力驱使单位正电荷从 a 点移至 b 点所做的功,即

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

式中, dq 为由 a 点转移到 b 点的正电荷量,单位为库[仑](C); dW 为转移过程中电场力对电荷 dq 所做的功,单位为焦[耳](J); 电压 $u(t)$ 的单位为伏[特](V)。

如果正电荷由 a 点转移到 b 点,电场力做了正功,则 a 点为高电位,即正极, b 点为低电位,即负极;如果正电荷由 a 点转移到 b 点,电场力做了负功,则 a 点为低电位,即负极, b 点为高电位,即正极。

如果正电荷量及电路极性都随时间变化,则称为交变电压或交流电压,一般用小写字母 u 表示;若电压大小和方向都不变,称为直流(恒定)电压,一般用大写字母 U 表示。

1.2.3 参考方向

在实际问题中,电流和电压的实际方向事先可能是未知的,或难以在电路图中标出,例如交流电流,就不可能用一个固定的箭头来表示其实际方向,所以引入参考方向的概念。参考方向可以任意选定,在电路图中,电流的参考方向用箭头表示;电压的参考方向(也称参考极性)则在元件或电路的两端用“+”、“-”符号来表示,“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端;有时也用双下标表示,如 u_{AB} 表示电压参考方向由 A 指向 B。

如果电流或电压的实际方向(虚线箭头)与参考方向(实线箭头或“+”、“-”)一致,则用正值表示;如果两者相反,则为负值,如图 1-2 所示。这样,可利用电流或电压的正负值结合参考方向来表明实际方向。

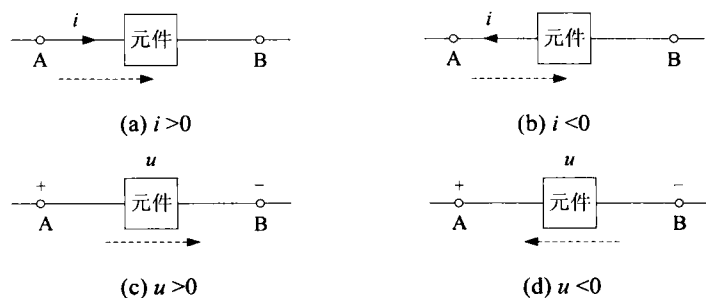


图 1-2 参考方向

在分析电路时,应先设定好合适的参考方向,在分析与计算的过程中不再任意改变,最后由计算结果的正、负值来确定电流和电压的实际方向。

如果指定流过某元件(或电路)的电流参考方向是从标以电压的正极性的一端指向负极

性的一端,即两者的参考方向一致,则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向;当两者不一致时,称为非关联参考方向,如图1-3所示。

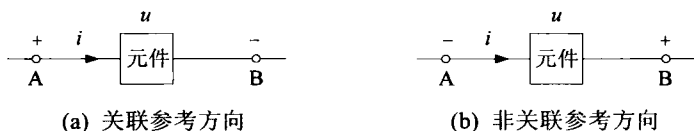


图 1-3 关联参考方向

在分析计算电路时,对无源元件常取关联参考方向,对有源元件则常取非关联参考方向。

1.2.4 电功率

电功率表示电路或元件中消耗电能快慢的物理量,定义为电流在单位时间内所做的功,即

$$p(t) = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

当时间 t 的单位为秒(s),功 W 的单位为焦[耳](J)时,功率 p 的单位为瓦[特](W)。

设定电流和电压为关联参考方向时,由式(1-2),有 $dW = u(t)dq$,再结合式(1-1),有

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

此时把能量传输(流动)的方向称为功率的方向,若 $p(t) > 0$,表示此电路(或元件)吸收能量,此时的 $p(t)$ 称为吸收功率;若 $p(t) < 0$,表示此电路(或元件)发出能量,此时的 $p(t)$ 称为发出功率。

对于 $p(t) = u(t)i(t)$,当设定电流和电压为非关联参考方向时,若 $p(t) > 0$,表示此电路(或元件)发出能量,此时的 $p(t)$ 称为发出功率;若 $p(t) < 0$,此电路(或元件)吸收能量,此时的 $p(t)$ 称为吸收功率。

根据能量守恒定律,对于一个完整的电路来说,在任一时刻各元件吸收的电功率的总和应等于发出电功率的总和,或电功率的总代数和为零。

【例 1-1】图 1-4 所示电路中已标出各元件上电流、电压参考方向,已知 $i = 2\text{A}$, $u_1 = 3\text{V}$, $u_2 = -8\text{V}$, $u_3 = 5\text{V}$,试求各元件吸收或发出的功率,并验证整个电路的电功率是否平衡。

解:对元件 1 和元件 2,其上的电压和电流为关联参考方向,有

$$p_1 = u_1 i = 2 \times 3\text{W} = 6\text{W} > 0 \text{ (吸收功率)}$$

$$p_2 = u_2 i = 2 \times (-8)\text{W} = -16\text{W} < 0 \text{ (发出功率)}$$

对元件 3,其上的电压和电流为非关联参考方向,有

$$p_3 = u_3 i = 2 \times 5\text{W} = 10\text{W} > 0 \text{ (吸收功率)}$$

电路吸收的总功率为

$$p_{\text{吸}} = p_1 + p_3 = 6\text{W} + 10\text{W} = 16\text{W}$$

电路发出的总功率为

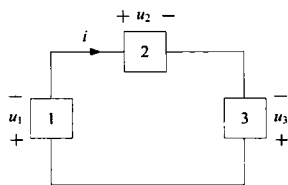


图 1-4 例 1-1 图



$$P_{\text{发}} = P_2 = 16\text{W}$$

可见 $P_{\text{发}} = P_{\text{吸}}$ ，总功率平衡。

功率平衡的规律可用于电路设计或求解电路的结果验证。

在电压、电流选定关联参考方向时，电路从 t_0 到 t 时间内所吸收的电能 W 为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t P(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-5)$$

电能的单位是焦[耳](J)，在电力系统中，电能的单位通常用千瓦时(kW·h)来表示，也称为度(电)，它们之间的换算关系为

$$1 \text{ 度(电)} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

注意，实际的电气设备都有额定的电压、电流和功率限制，使用时不要超过规定的额定值，否则易使设备损坏。超过额定功率称为超载，低于额定功率称为欠载。

1.3 电路元件

在电路理论中，实际的元件是用理想化的电路元件的组合来表示的。理想的电路元件有二端元件和多端元件之分，又有有源、无源的区别。本书所涉及的无源理想二端元件有电阻、电感和电容，无源理想多端元件有晶体管、运算放大器、变压器等；有源元件有理想电压源和理想电流源。

每一个理想电路元件的电压 u 或电流 i ，或者电压与电流之间的关系都有着确定的规定，例如电阻元件上的电压与电流关系为 $u = f(i)$ 。这种规定充分地表征了此电路元件的特性，称为元件的约束。有时，在元件约束里也用到电荷 q 和磁通 Φ (或磁通链 ψ) 等，如电容元件上电荷与电压的关系为 $q = f(u)$ ，电感元件上磁通链与电流的关系为 $\psi = f(i)$ 。

如果表征元件特性的代数关系为线性关系，对应的元件称为线性元件；否则称为非线性元件。

如果元件参数是时间 t 的函数，对应的元件称为时变元件；否则称为时不变元件，元件参数为常数。

本书所涉及的元件大部分为线性时不变元件，且大多为二端元件。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是从实际物体中抽象出来的理想模型，表示物体对电流的阻碍和将电能转化为热能的作用，如模拟灯泡、电热炉等电器。

1. 电阻元件的伏安特性

任何一个二端元件，如果在任意时刻的电压和电流之间存在代数关系(即伏安关系，Voltage Current Relation, VCR)，不论电压和电流的波形如何，它们之间的关系总可以由 $u-i$ 平面上的一条曲线(伏安特性曲线)所决定，则此二端元件称为电阻元件，简称电阻。

伏安特性曲线过原点且为直线的电阻元件称为线性电阻元件，如图 1-5 所示。

设电流和电压参考方向相关联，电阻元件两端的电压和电流遵守欧姆定律：

$$u = Ri \quad (1-6)$$

式中, u 为电阻元件两端的电压, 单位为伏[特](V); i 为流过电阻元件的电流, 单位为安[培](A); 电阻 R 是电阻元件的参数, 为正实常数, 单位为欧[姆](Ω), 电阻 R 的大小与直线的斜率成正比, R 不随电流和电压大小而改变; u 、 i 可以是时间 t 的函数, 也可以是常量(直流)。

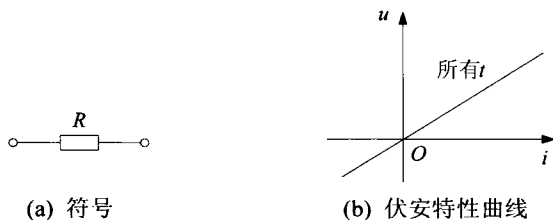


图 1-5 线性电阻元件

定义电阻的倒数为电导 G , 即 $G = \frac{1}{R}$, 式(1-6)可写为

$$i = Gu \quad (1-7)$$

电导的单位是 S(西[门子])。

如果电流和电压参考方向非关联, 则有

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu$$

电阻元件还可分为非线性、时不变、时变等几类。非线性电阻元件符号及各类电阻伏安特性曲线如图 1-6 所示。

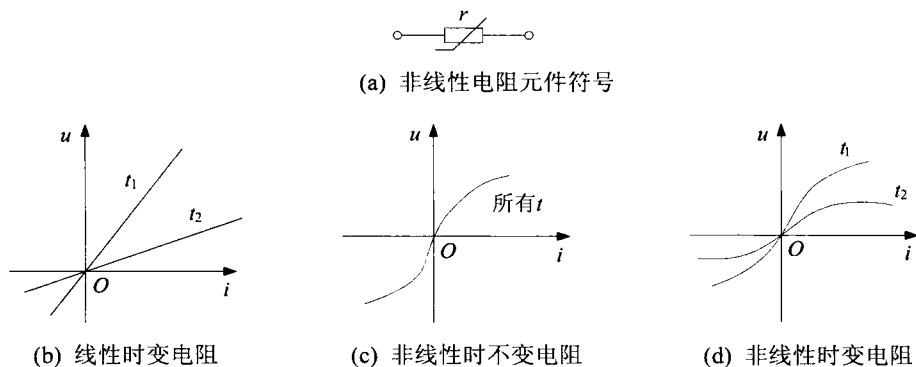


图 1-6 非线性电阻元件符号及各类电阻伏安特性曲线

根据电阻元件的一般定义, 在 u - i 平面上用一条斜率为负的特性曲线来表征的元件也属电阻元件, 这种元件称为负电阻元件或负电阻, 即 $R < 0$ 。

在本书中, 除非专门说明, 电阻均指线性时不变的正值电阻。

2. 电阻元件的功率

对于任意线性时不变的正值电阻, 即 $R = \frac{u(t)}{i(t)} > 0$, 因此 $p(t) = u(t)i(t) > 0$, 也就是说, 这种电阻元件始终吸收(消耗)功率, 为耗能元件, 也称无源元件。

电阻元件从 t_0 到 t 时间内产生的热量即为这段时间内消耗的电能, 有



$$Q = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi)d\xi$$

1.3.2 电容元件

电容元件是一种表征电路元件储存电荷特性的理想元件, 简称电容。电容的原始模型为由两块金属极板中间用绝缘介质隔开的平板电容器, 当在两极板上加上电压后, 极板上分别积聚了等量的正、负电荷, 在两极板之间产生电场。积聚的电荷越多, 所形成的电场就越强, 电容元件所储存的电场能也就越大。

电容(或称电容量)是表示电容元件容纳电荷能力的物理量, 人们把电容器的两极板间的电势差增加 1V 所需的电荷量, 称为电容器的电容, 记为 C 。 C 是一个正实常数, 单位是法[拉](F), 其定义为

$$C = q/u \quad (1-8)$$

除了 F 外, 电容常用的单位还有微法(μF)、皮法(pF), 它们之间的换算关系如下:

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} \quad 1\mu\text{F} = 10^6\text{pF}$$

电容元件也有线性、非线性、时不变和时变的区分, 本书只讨论线性时不变二端电容元件。

任何一个二端元件, 如果在任意时刻的电荷量和电压之间的关系总可以由 $q-u$ 平面上一条过原点的直线所决定, 则此二端元件称为线性时不变电容元件, 如图 1-7 所示。

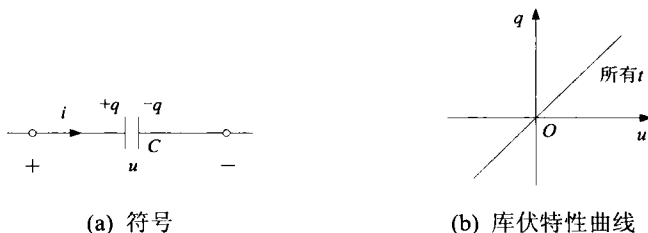


图 1-7 线性电容元件

线性电容 C 不随其上的 q 或 u 情况变化。对于极板电容而言, 其大小只取决于极板间介质的介电常数 ϵ 、电容极板的正对面积 S 及极板间距 d , 即

$$C = \epsilon S / d$$

1. 电容元件的伏安特性

由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 而 $q = Cu$, 所以电容的伏安($u-i$)关系为微分关系, 即

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$

由此可见, 电路中流过电容的电流大小与其两端的电压变化率成正比, 电压变化越快, 电流越大, 而当电压不变时, 电流为零。所以, 电容元件有隔断直流的作用。

而其($u-i$)关系为积分关系, 即

$$q = \int_{q_1}^{q_2} dq = \int_{t_1}^{t_2} i dt$$

$$\int_{q_1}^{q_2} dq = q_2 - q_1 = \int_{t_1}^{t_2} i dt$$

$$q_2 = q_1 + \int_{t_1}^{t_2} i dt$$

两边同时除以 C , 有

$$\frac{q_2}{C} = \frac{q_1}{C} + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$

$$u(t_2) = u(t_1) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$

如果取初始时刻 $t_1 = 0$, 则有

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (1-10)$$

由此可见, 电容元件某一时刻的电压不仅与该时刻流过电容的电流有关, 还与初始时刻的电压大小有关。可见, 电容是一种电压“记忆”元件。

2. 电容元件的功率

对于任意线性时不变的正值电容, 其功率为

$$p = u(t)i(t) = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-11)$$

那么从 t_0 到 t 时间内, 电容元件吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)C \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi)$$

$$= \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0)$$

则从 t_1 到 t_2 时间内, 电容元件吸收的电能为

$$W = \frac{1}{2} Cu_2^2 - \frac{1}{2} Cu_1^2 \quad (1-12)$$

式(1-12)表明, 当 $u_2 > u_1$ 时 $W > 0$, 电容从外部电路吸收能量, 为充电过程; 反之, 当 $u_2 < u_1$ 时 $W < 0$, 电容向外部电路释放能量, 为放电过程。电容可以储存电能, 但并没有消耗掉, 所以称为储能元件。而电容释放的电能也是取之于电路, 它本身并不产生能量, 所以它是一种无源元件。

【例 1-2】 图 1-8(a)所示电容 $C=1\text{F}$, 电容电压的波形图如图 1-8(b)所示, 试求电容电流的表达式, 并绘出对应波形图。

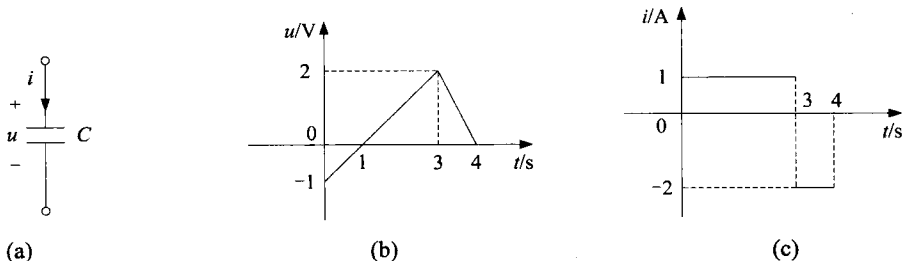


图 1-8 例 1-2 图



解: 由图 1-8(b) 列出对应的电压表达式为

$$u(t) = \begin{cases} t-1 & 0 \leq t \leq 3\text{s} \\ -2(t-4) & 3\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases}$$

根据 $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$ 求 $i(t)$, 即

$$0 \leq t \leq 3\text{s} \text{ 时, } u(t) = t-1, \quad i(t) = 1 \times \frac{d(t-1)}{dt} = 1\text{A}$$

$$3\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \text{ 时, } u(t) = -2(t-4), \quad i(t) = 1 \times \frac{d(-2t+8)}{dt} = -2\text{A}$$

所以, 电容电流为

$$i(t) = \begin{cases} 1\text{A} & 0 \leq t \leq 3\text{s} \\ -2\text{A} & 3\text{s} \leq t \leq 4\text{s} \end{cases}$$

电容电流对应波形图如图 1-8(c) 所示。

1.3.3 电感元件

电感元件的原始模型为由绝缘导线(如漆包线、纱包线等)绕制而成的圆柱线圈。当线圈中通以电流 i 时, 在线圈中就会产生磁通量 Φ , 并储存能量。线圈中变化的电流和磁场可使线圈自身产生感应电压。磁通量 Φ 与线圈的匝数 N 的乘积称为磁通链 $\psi = N\Phi$, 磁通链的单位是韦[伯](Wb)。

表征电感元件(简称电感)产生磁通、存储磁场能力的参数称为电感, 用 L 表示。它在数值上等于单位电流产生的磁通链, 即

$$L = \psi / i \quad (1-13)$$

电感 L 也称自感系数, 基本单位是亨[利](H)。1H = 1Wb/A, 常用的单位还有毫亨(mH)和微亨(μH), 它们之间的换算关系如下:

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} \quad 1\text{mH} = 10^3\mu\text{H}$$

本书只讨论线性时不变二端电感元件。

任何一个二端元件, 如果在任意时刻的磁通链和电流之间的关系总可以由 $(\psi-i)$ 平面上一条过原点的直线所决定, 则此二端元件称为线性电感元件, 如图 1-9 所示。



图 1-9 线性电感元件

线性电感 L 不随电路的 ψ 或 i 变化。对于密绕长线圈而言, 其 L 的大小只取决于磁导率 μ 、线圈匝数 N 、线圈截面积 S 及长度 l 。