



普通高等教育“十二五”电子电气基础课程规划教材

电路理论

孙亲锡 张新建 李海华 李爱传 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子电气基础课程规划教材

电 路 理 论

孙亲锡 张新建 李海华 李爱传 编著
黄冠斌 主审



机械工业出版社

本书是为满足应用型人才培养的教学需求,依据应用型人才培养的教学特点而编写的。本书共15章,内容包括:电路的基本概念、常用的电路元件、电路的基本定律及等效分析法、电路的方程分析方法、电路的定理分析法、动态电路的时域分析、正弦交流电路和相量、单相正弦稳态电路的分析、三相电路、周期性非正弦稳态电路的分析、含有耦合电感电路的分析、动态电路的复频域分析、网络函数、电路的矩阵分析法、二端口网络。每章之前的引入介绍言简意赅,正文通俗易懂,每章讲解后附有习题,书后附有部分习题的参考答案,这些都力求起到有效引导学生学习,便于学生课后练习和自学的作用。

本书概念清晰、重点突出、讲解透彻、通俗易懂、例题丰富,可作为高等院校的电气工程与自动化、电子信息工程、通信技术、机电、计算机应用等电类专业应用型人才培养的教材,也可作为职工大学、函授大学相关专业的教材,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论/孙亲锡,张新建,李海华编著. —北京:机械工业出版社, 2011.4

普通高等教育“十二五”电子电气基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-33719-5

I. ①电… II. ①孙… ②张… ③李… 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(2011)第040091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:闫晓宇 责任编辑:王士东

责任校对:李秋荣 封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·393千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33719-5

定价:32.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

电路理论是高等院校电气信息类专业的重要专业基础课程，既具有较强的理论性，又具有广阔的工程应用背景，是电气信息类专业素质培养的重要组成部分。本书在内容选材上立足于“加强基础、够用适用、突出实用”的原则，在内容编排上以学生认知规律为出发点，在文字叙述上力求做到思路清晰，语言通俗易懂，方便学生自主学习及教师授课。

本书涵盖了基本电路元件和电路的完整基本知识，教材内容安排上注意了与后续模拟电子、电机学、电力电子学等专业课程的衔接。在每章内容的开始都以介绍一个在电学发展历程上有重要影响力的伟人开始，希望以此来陶冶学生情操，激励学生的创新意识和勇攀科学高峰的信心。

本书每一章的后面都配备了适量的习题，以加强对基本概念等基础知识的掌握，并在书后给出了部分习题的答案，方便学生自学自检。此外，本书也配备了相关的电子学习资源，可登录小扳凳网站 (<http://www.xiaobandeng.com>) 获取。

本书由孙亲锡、张新建、李海华、李爱传编著，黄冠斌主审。第1~4、6章由张新建编写，第5章由孙亲锡编写，第7~8、11~14章由李海华编写，第9、10、15章由八一农垦大学李爱传编写。孙亲锡负责全书的统稿、修改、定稿。

本书的出版得到了机械工业出版社、华中科技大学文华学院教务处的大力支持，华中科技大学文华学院的范娟、鲁艳旻、唐萃、张亚兰等对本书也提出了大量宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

本书若有不妥和错误之处，敬请专家和读者批评指正。联系方式：孙亲锡 (sqinxi1228@163.com)、张新建 (zhangxinjian@xiaobandeng.com)、李海华 (lihaihua_80@163.com)。

编 者

目 录

前言

| | |
|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 电路的基本概念 | 1 |
| 1.1 电路概述及其解决问题的一般步骤 | 1 |
| 1.1.1 电路概述 | 1 |
| 1.1.2 解决电路问题的一般步骤 | 1 |
| 1.2 国际单位制与词头 | 2 |
| 1.2.1 国际单位制 | 2 |
| 1.2.2 词头 | 2 |
| 1.3 电路和电路模型 | 3 |
| 1.4 电压和电流 | 4 |
| 1.4.1 电压及其参考方向 | 4 |
| 1.4.2 电流及其参考方向 | 4 |
| 1.4.3 关联参考方向 | 5 |
| 1.5 功率和能量 | 5 |
| 1.5.1 功率 | 5 |
| 1.5.2 能量 | 5 |
| 习题 1 | 6 |
| 第 2 章 常用的电路元件 | 7 |
| 2.1 电阻器 | 7 |
| 2.2 电容器和电感器 | 8 |
| 2.2.1 电容器 | 8 |
| 2.2.2 电感器 | 9 |
| 2.3 独立电源 | 10 |
| 2.3.1 独立电压源 | 10 |
| 2.3.2 独立电流源 | 11 |
| 2.4 受控源 | 12 |
| 2.5 集成电路运算放大器 | 13 |
| 习题 2 | 15 |
| 第 3 章 电路的基本定律及等效分 析法 | 17 |
| 3.1 欧姆定律 | 17 |
| 3.2 基尔霍夫定律 | 18 |
| 3.2.1 基尔霍夫电压定律 | 18 |
| 3.2.2 基尔霍夫电流定律 | 19 |
| 3.3 电路的等效 | 19 |
| 3.4 电阻的连接和输入电阻 | 20 |
| 3.4.1 电阻的串联 | 20 |
| 3.4.2 电阻的并联 | 21 |
| 3.4.3 电阻的 Δ -Y 联结及其等效变换 | 22 |
| 3.4.4 输入电阻 | 24 |
| 3.5 实际电源的两种模型及其等效变换 | 25 |
| 3.5.1 实际电压源模型 | 25 |
| 3.5.2 实际电流源模型 | 26 |
| 3.5.3 等效变换 | 26 |
| 习题 3 | 27 |
| 第 4 章 电路的方程分析法 | 30 |
| 4.1 支路电流分析法 | 30 |
| 4.2 网孔电流分析法 | 31 |
| 4.3 节点电压分析法 | 34 |
| 习题 4 | 37 |
| 第 5 章 电路的定理分析法 | 40 |
| 5.1 叠加定理 | 40 |
| 5.1.1 叠加定理及其证明 | 41 |
| 5.1.2 应用举例 | 42 |
| 5.1.3 应用叠加定理分析含受控源的 电路 | 44 |
| 5.2 替代定理 | 44 |
| 5.3 戴维南定理 | 45 |
| 5.3.1 戴维南定理及其证明 | 45 |
| 5.3.2 应用举例 | 47 |
| 5.3.3 应用戴维南定理分析含受控源 的电路 | 50 |
| 5.4 诺顿定理 | 51 |
| 5.5 互易定理 | 54 |
| 习题 5 | 56 |
| 第 6 章 动态电路的时域分析 | 61 |
| 6.1 换路定理及初始值的计算 | 61 |
| 6.2 一阶电路的零输入响应 | 64 |
| 6.2.1 RC 电路的零输入响应 | 64 |
| 6.2.2 RL 电路的零输入响应 | 66 |
| 6.3 一阶电路的零状态响应 | 67 |
| 6.4 一阶电路的全响应 | 68 |
| 6.4.1 全响应的分解 | 69 |
| 6.4.2 一阶电路过渡过程的三要素求 | |

| | | | |
|--------------------------------|-----|---|-----|
| 解法 | 69 | 9.1 三相电路的基本概念 | 134 |
| 6.5 一阶电路的阶跃响应和冲激响应 | 70 | 9.1.1 对称三相电源、对称三相负载 | 134 |
| 6.5.1 单位阶跃响应 | 70 | 9.1.2 三相电路的联结方式 | 135 |
| 6.5.2 单位冲激响应 | 72 | 9.2 对称三相电路分析 | 137 |
| 6.6 二阶电路 | 73 | 9.2.1 对称三相电路线量与相量的 关系 | 137 |
| 习题 6 | 75 | 9.2.2 Y-Y 联结对称三相电路的计算 | 140 |
| 第 7 章 正弦交流电路和相量 | 79 | 9.2.3 Δ - Δ 联结对称三相电路的 计算 | 141 |
| 7.1 正弦量的概念 | 79 | 9.2.4 复杂对称三相电路的计算 | 144 |
| 7.1.1 正弦电压和电流 | 79 | 9.3 不对称三相电路分析 | 144 |
| 7.1.2 正弦交流电的要素 | 80 | 9.4 三相电路的功率及其测量 | 148 |
| 7.1.3 正弦交流电的有效值 | 81 | 9.4.1 三相电路的功率 | 148 |
| 7.2 正弦量的相量表示 | 83 | 9.4.2 三相电路功率的测量 | 150 |
| 7.2.1 相量和相量图 | 83 | 习题 9 | 151 |
| 7.2.2 相量式 | 84 | 第 10 章 周期性非正弦稳态电路的 分析 | 154 |
| 7.3 RLC 元件上电压电流的相量关系 | 86 | 10.1 周期性非正弦信号的实际存在 | 154 |
| 7.3.1 电阻元件 | 87 | 10.2 周期性非正弦信号的傅里叶分解 | 155 |
| 7.3.2 电感元件 | 88 | 10.3 周期性非正弦量的有效值和平均 功率 | 157 |
| 7.3.3 电容元件 | 89 | 10.4 周期性非正弦稳态电路的计算 | 159 |
| 7.4 阻抗和导纳 | 91 | 习题 10 | 161 |
| 7.4.1 阻抗 | 91 | 第 11 章 含有耦合电感电路的分析 | 163 |
| 7.4.2 导纳 | 94 | 11.1 耦合电感 | 163 |
| 7.4.3 阻抗和导纳的关系 | 97 | 11.2 含有耦合电感电路的计算 | 168 |
| 7.5 电路的相量图 | 98 | 11.3 空心变压器 | 175 |
| 7.6 电路定律的相量形式 | 101 | 11.4 理想变压器 | 177 |
| 习题 7 | 103 | 习题 11 | 180 |
| 第 8 章 单相正弦稳态电路的分析 | 106 | 第 12 章 动态电路的复频域分析 | 185 |
| 8.1 复杂交流电路的分析 | 106 | 12.1 拉普拉斯变换的定义 | 185 |
| 8.1.1 网孔分析法 | 106 | 12.2 拉普拉斯变换的基本性质 | 187 |
| 8.1.2 节点电压分析法 | 108 | 12.3 拉普拉斯反变换 | 189 |
| 8.1.3 电路定理分析法 | 110 | 12.4 运算电路 | 193 |
| 8.2 正弦稳态电路的功率 | 112 | 12.5 线性电路的运算分析法 | 196 |
| 8.2.1 瞬时功率 | 112 | 习题 12 | 199 |
| 8.2.2 有功功率 | 113 | 第 13 章 网络函数 | 202 |
| 8.2.3 无功功率 | 114 | 13.1 网络函数的定义 | 202 |
| 8.2.4 视在功率 | 115 | 13.2 $H(s)$ 和 $h(t)$ 之间的关系 | 204 |
| 8.3 复功率及功率守恒 | 118 | 13.3 零点、极点与零极点图 | 204 |
| 8.4 功率因数的提高 | 120 | 13.4 卷积定理 | 205 |
| 8.5 最大功率传输 | 122 | 习题 13 | 207 |
| 8.6 谐振电路 | 124 | | |
| 8.6.1 串联谐振 | 124 | | |
| 8.6.2 并联谐振 | 127 | | |
| 习题 8 | 129 | | |
| 第 9 章 三相电路 | 134 | | |

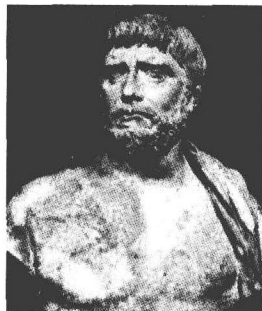
| | | | |
|---|-----|---------------------------|-----|
| 第 14 章 电路的矩阵分析法 | 209 | 第 15 章 二端口网络 | 232 |
| 14.1 电路的图 | 209 | 15.1 二端口网络的定义 | 232 |
| 14.2 有向图的矩阵表示 | 214 | 15.2 二端口参数 | 233 |
| 14.3 矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系 | 221 | 15.3 二端口网络的互连 | 237 |
| 14.4 回路电流方程的矩阵形式 | 222 | 习题 15 | 238 |
| 14.5 节点电压方程的矩阵形式 | 224 | 部分习题参考答案 | 240 |
| 14.6 割集电压方程的矩阵形式 | 227 | 参考文献 | 248 |
| 习题 14 | 229 | | |

第 1 章 电路的基本概念

历史人物小传

泰勒斯（公元前 624 年 ~ 前 547），出生于古希腊小亚细亚米利都城的一个贵族家庭，古希腊哲学家、自然科学家。

泰勒斯发现了琥珀摩擦后能够吸引小物体这一现象并把自己的观察如实记录了下来，对后人研究电和磁的关系起到了重要的启蒙作用，为开启电气时代作出了伟大贡献。



泰勒斯

1.1 电路概述及其解决问题的一般步骤

1.1.1 电路概述

走进大学的课堂会发现电气工程是一个令人非常感兴趣的专业。因为在过去的一百多年里，电气工程的发展改变了生活的一切，各种各样的电器都离不开电气工程。而电路理论是电气工程的基石之一，因此对于电气工程专业的学生来说，这门课程的学习是开始电气工程探索的第一步。

电路是电气工程各个分支的共同部分，是实际电气系统的近似数学模型，为继续深入学习电气工程提供了非常重要的基础。电路理论研究电路中发生的电磁现象，并用电压、电荷、电流、磁通等物理量描述其中的过程。这一过程的描述，如果使用电磁理论会非常复杂，而使用电路理论则主要用于计算电路中各器件的端子电流和端子间的电压，不涉及内部发生的物理过程，就可以获得简单地而足够准确的解决。这里要注意的是，用电路理论去描述的实际电路的本身尺寸要远小于其处理电信号所对应的波长，这样的电路称为集中参数电路，如果本书没有特别强调，探讨的电路均为集中参数电路。

1.1.2 解决电路问题的一般步骤

电路的主要内容就是电路分析，电路分析的基本任务是：给定某一电路结构和这一结构中的元器件参数及电源参数，求出这个电路部分支路或所有支路的电压、电流或功率。电路结构可以非常复杂，元器件参数和电源参数也可以各种各样，情况不同，求解的过程也就不同。这里首先阐述一般电路问题的分析解答步骤，以便初学者能够快速而准确地解决问题。

(1) 首先明确已知条件及要求解的量 在解答问题时,首先要明确求解的对象,并找出所有已知条件。这里要特别注意,有些已知条件在题目中并没有明确给出具体的量,可能是某一常识,也可能通过上下文关系间接地表达出来,需要认真阅读找出所有已知条件。

(2) 确定计算所采用的电路模型并进行适当的变换 要根据已知条件和待求量进行适当变换并画出新的等效电路,并标注清楚计算过程中所使用的各个参数。

(3) 确立合适的解决方法 题目的求解方法不同,求解的难易程度可能就会差别很大。如人们走路要到达某一个目的地,选择的路不同,所走的路的长度及需要的时间或花费的成本就不同。当一种方法求解比较繁琐时,可以考虑换一种方法,采用合适的方法有助于快速而准确地解决问题。

(4) 求解出待求量 按照已经确定的电路模型,选择合适的解决方法后列出正确的方程并计算出最终的正确答案。

(5) 检验 做完了上面的工作后,要验证答案是否合理,是否和实际相符合、数量级是否正确、单位是否合理化等。

1.2 国际单位制与词头

1.2.1 国际单位制

研究任何问题都离不开准确的测量,而只有以与基本物理常数紧密联系的单位系统为基础的测量才是准确的。国际单位制的建立和采用,标志着计量制度的一大进步。在国际单位制中,每一种物理量只有一个主单位,物理量的物理意义明确,避免了纷繁复杂的单位换算。

目前通用的国际基本单位共有 7 个,见表 1-1。

表 1-1 国际基本单位制

| 量的名称 | 单位名称 | 单位符号 |
|-------|---------|------|
| 长度 | 米 | m |
| 质量 | 千克 [公斤] | kg |
| 时间 | 秒 | s |
| 电流 | 安 [培] | A |
| 物质的量 | 摩 [尔] | mol |
| 发光强度 | 坎 [德拉] | cd |
| 热力学温度 | 开 [尔文] | K |

基本单位的定义现在仍在发展中,人们正在探索更好的定义基本单位的方法。如准备用普朗克常数重新定义质量的单位千克 (Kg),准备用基本电荷 e 重新定义电流的单位安培 (A) 等。也许在不久的将来,会有更加精密、准确、简便易行的定义问世。

1.2.2 词头

回顾一下日常生活中所使用的单位,如千克—克—毫克,千米—米—毫米等,它们都有

一个共同规律，即都是由一个单位前面附上一个词头构成的。上面列举的这些词头是国际单位制的标准词头中的一部分。一般情况下，各个词头之间的倍数关系都是 10^3 。如1米 = 10^3 毫米，1毫米 = 10^3 微米。表1-2列出了一些常用的国际单位词头及其名称。

表 1-2 国际单位词头、表示符号及其对应的10的幂

| 国际单位词头 | 词头符号 | 10的幂 |
|--------|-------|------------|
| 皮 | p | 10^{-12} |
| 纳 | n | 10^{-9} |
| 微 | μ | 10^{-6} |
| 毫 | m | 10^{-3} |
| 千 | k | 10^3 |
| 兆 | M | 10^6 |
| 吉 | G | 10^9 |
| 太 | T | 10^{12} |

1.3 电路和电路模型

实际电路是由若干电气设备或电器件按照一定方式连接起来构成的电流通路，这些电路按其应用一般可分为电力和信息两大领域。在人们日常生活和实际工程中，会遇到如发电机、变压器、输电线和用户构成的电网，进行能量传输、分配和使用电能的电力电路，也会遇到如收音机、计算机、手机等进行信号的处理、传输、储存和运算的信息电路等。

无论是复杂的电路还是简单的电路，它们都由不同的电气器件组成，这些器件一般都分为四个部分：电源、负载、连接导线和开关。实际电气器件在应用时所对应的电磁过程是比较复杂的，这样在讨论实际电气器件组成的电路时就会给电路分析带来困难。因此在对实际电路进行分析时，在一定条件下，需要把实际电气器件理想化，忽略其次要性质，用一个足以表征其主要性能的理想元件来表示。如电阻器、灯泡、电炉等，它们的电感较小，均为耗能器件，可以用一个理想电阻元件来表征所有具有耗能特征的实际电气器件。同理，对于涉及到电场储存能量的可以用一个理想电容器来表征，对于涉及储存磁场能量的，可以用一个理想电感元件来表示等。因此，理想元件可以描述为能精确定义并足以表征实际电气器件主要电磁性质的一种理想化元件。

任何一个实际电路都可抽象地由足以表征其电磁性质的理想元件所组成的电路来描述，这种由理想电路元件组成并反映实际电路主要性质的电路称为电路模型。在本文中，如没有特别说明，该电路即为电路模型。由此可以看出，电路理论分析的对象是电路模型而非实际电路。

需要说明的是，电路模型的建立与其实际应用条件相关。同一个实际电气器件在不同的应用条件下，它对应的模型可以有不同的形式。如图1-1a所示，如果把干电池看做理想电压源，其等效电路如图1-1b所示，如果考虑其内阻，则等效电路如图1-1c所示。

有了理想电路元件组成的电路模型，就可以利用这些理想电路元件之间的关系列出对应数学方程式。为了利用这些数学方程，必须弄清楚电路模型的基本参量，通过这些基本参量

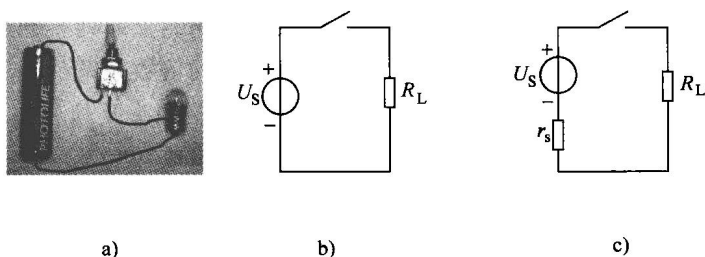


图 1-1 一个简单的电池灯泡电路

a) 实际电路 b) 等效电路 (不考虑内阻) c) 等效电路 (考虑内阻)

的求解来预测实际电路的性质。这些基本参量中最常用的就是电压、电流及功率。

1.4 电压和电流

在电路中，最受关注的两个基本物理量就是电压和电流。

1.4.1 电压及其参考方向

将单位正电荷从电路中 a 点移到电路中 b 点，电场力做功的大小称为这两点之间的电压。在图 1-2 中，假设有单位正电荷 dq ，在电场力作用下由 a 点移动到 b 点，若电场力作的功为 dW ，则 a 点到 b 点之间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-1)$$

式中， u_{ab} 为电压，单位是伏特 (V)，工程上也会用到千伏 (kV)、兆伏 (MV) 等单位；

W 为能量，单位是焦耳 (J)； q 为电荷量，单

位是库伦 (C)。随时间变化的电压 (交流电压) 一般用小写字母 u 来表示，有时也用字母 v 来表示；不随时间变化的电压 (直流电压) 一般用大写斜体字母 U 或 V 来表示。

电压的真实方向或正方向习惯上规定为从高电位指向低电位，即电位降落的方向。如当 $u_{ab} > 0$ ，则表示电压的真实方向由 a 指向 b。在实际电路中，电压的真实方向往往难以确定，为了解决这个问题，在电路图中还需要规定电压的参考方向，一般用“+”号和“-”号来表示，也可以用箭头来表示，如图 1-2 所示，它不一定是电压的真实方向，参考方向的选取是任意的。参考方向确定后，如果电压真实方向和参考方向一致，电压值为正，否则为负。这里要注意的是，在电路图中未标明参考方向的情况下，计算电压的正负是没有任何意义的。

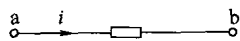
1.4.2 电流及其参考方向

电流是单位时间内通过导体横截面的电荷量。在图 1-3 中，若单位时间 dt 内，流过导体横截面的电荷量为 dq ，在流过该导体的电流为

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

式中， i 为电流，单位是安培 (A)，工程上也会用到千安 (kA)、兆安 (MA) 等单位； q

为电荷量，单位为库伦 (C)； t 为时间，单位是秒 (s)。



同电压一样，电流也必须指定参考方向，一般用箭头来表示。图 1-3 电流的参考方向如果电流的真实方向和参考方向一致，则电流为正值，否则为负。

1.4.3 关联参考方向

由于电压和电流的参考方向选取是任意的，那么在一个电路模型中，电压和电流的参考方向就有两种可能。

当电流参考方向从电压的“+”指向“-”方向时，就称其为关联参考方向，如图 1-4 所示。否则，称其为非关联参考方向，如图 1-5 所示。

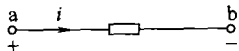


图 1-4 电压电流的关联参考方向

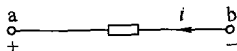


图 1-5 电压电流的非关联参考方向

1.5 功率和能量

1.5.1 功率

各种各样的电器设备铭牌上面除了电压、电流外，还标有一个量，那就是功率。功率表明了在一个规定时间内，这个电器设备做了多少功。能量是做功的能力，而功率是能量传递的速率。在电路分析和设计中，功率和能量是非常重要的，因为在实际中，各种设备及连接线都有功率限制。

根据电压和电流的定义，可以得出

$$dq = idt \text{ 及 } dW = udq$$

由此可得

$$dW = uidt$$

这就是单位时间内此电路所吸收的电能量，功率的定义是

$$p = ui \tag{1-3}$$

式中， p 为功率，单位是瓦特 (W)，工程上也会用到千瓦 (kW)、兆瓦 (MW) 等单位。

在推导上面公式时要注意电压和电流的参考方向，如图 1-4 所示，电流是从电压的“+”流向“-”，为关联参考方向。此时的功率的计算结果若为正值，则表明该电路吸收功率，如果计算结果为负，则表明该电路为发出功率。

当电压和电流的参考方向是非关联时，如图 1-5 所示，则其功率表达式为

$$p = -ui \tag{1-4}$$

此时，其所表示的意义和式 (1-3) 完全一致。

1.5.2 能量

相对于功率，能量反映的是做功的能力，即在一段时间内做了多少功。功率再大，但如果做功时间非常短，相对于负载来说，做功也为 0。比如一个电动机，功率 p 很大，但是作用于负载的时间为 0，那么它对于负载传递的能量为 0，作用时间越长，传递的能量越大。

$$W = pt$$

(1-5)

式中, W 的单位是焦耳 (J), 工程上也会用到千焦 (kJ)、兆焦 (MJ) 等单位。

习 题 1

1-1 5 毫安的电流正确表示是 (), 最好表示成 ()

- A. 5MA B. 0.005A C. 5kA D. 5mA

1-2 电压的单位是 ()

- A. 伏特 B. 欧姆 C. 安培 D. 秒

1-3 电流的单位是 ()

- A. 亨利 B. 焦耳 C. 瓦特 D. 安培

1-4 10000 瓦正确表示是 (), 最好表示为 ()

- A. $10\mu\text{W}$ B. 10mW C. 10kW D. 0.001MW

1-5 能量的单位是 ()

- A. 焦耳 B. 赫兹 C. 欧姆 D. 开尔文

1-6 下列哪种情况可能导致电路中没有电流? ()

- A. 开关断开 B. 导线上的电压为零 C. 开关闭合

1-7 下列情况中不可能发生的是? ()

- A. 有电压有电流 B. 有电压无电流 C. 无电压无电流 D. 无电压有电流

1-8 下列情况中, 哪一个不可能是能量源? ()

- A. 干电池 B. 水轮发电机 C. 导线 D. 风力发电机

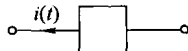
1-9 某元件在 10s 之内消耗了 200J 的能量, 求该元件的功率。

1-10 家里的一盏灯泡, 额定功率为 60W, 按每天亮 8 小时计算, 求其一个月 (30 天) 消耗的能量是多少?

1-11 图 1-4 中, 如果电压和电流参考方向都反向, 那么电压和电流是关联还是非关联?

1-12 对电流参考方向或电压参考极性假设的任意性是否影响计算结果的正确性?

1-13 如图 1-6 所示, 若已知通过元件的电流 $i(t) = 50e^{-5t}\text{A}$, $t > 0$; 且 $q(t) = 0$, $t < 0$, 则电荷 $q(t)$ 的表达式应为 _____ C。



1-14 设通过某元件的电荷波形如图 1-7 所示。若单位正电荷由 a 移至 b 时失去的能量为 5J, 求流过元件的电流 $i(t)$ 及元件的功率 $p(t)$, 并画出 $i(t)$ 与 $p(t)$ 的波形。

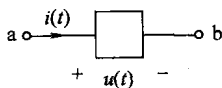
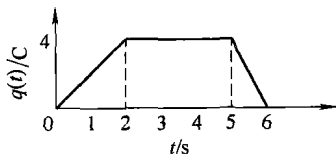


图 1-7 题 1-14 图

1-15 如图 1-8 所示, 已知元件 A 的电压 $U_A = -5\text{V}$, 提供功率 10W , 元件 B 的电流 $I_B = 2\text{A}$, 吸收功率 10W , 试求出 I_A 与 U_B 的值。

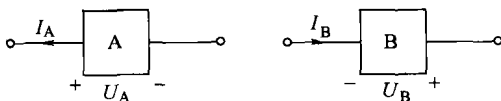


图 1-8 题 1-15 图

第 2 章 常用的电路元件

历史人物小传

欧姆 (1787 ~ 1854), 出生于德国巴伐利亚州, 电学家。

欧姆在 1826 年专攻物理学, 并于同年 5 月提出了欧姆定律, 为电学的研究做出了卓越的贡献。1841 年被伦敦皇家学会授予欧姆科普利奖章。人们为了纪念欧姆, 把电阻的单位以欧姆命名。



欧 姆

各种各样的电路, 其组成离不开一些基本电路元件, 常用的电路元件包括电阻、电感、电容、电压源、电流源和集成运算放大器等。

2.1 电阻器

从实际生活中知道电流必须有一定的闭合路径才可以流动, 很多物质对电流是起阻碍作用的, 比如空气、干燥的木棒等, 物质对电流的阻碍作用就称之为电阻, 利用这种阻碍性质制作而成的电路元件就称之为电阻器, 其表示符号如图 2-1 所示, 电阻由两根引线端引出, 因此也可以看做一个二端元件。

电阻器是最常见且应用最广的一种电路元件, 其最基本的作用是用来进行电压、电流的转换, 分压和限流, 并产生能量的消耗。这种能量的消耗在很多场合是非常有益的, 比如很多的加热器、电炉等就是利用电阻器会发热的性质制作而成的。

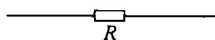


图 2-1 电阻元件的表示符号

电阻元件种类很多, 根据其两端的电压电流关系, 可以分为线性和非线性, 也可以根据其特性是否随时间变化分为时变和时不变, 如没有特别交代, 本文中所讨论的电路元件均指线性时不变元件。按照这个分类方法, 电阻也可以分为线性时不变电阻和线性时变电阻, 此外也可以根据其阻值是否固定分为定值电阻和可调电阻, 如碳膜电阻、线绕电阻、贴片电阻等是具有固定数值大小的电阻, 又有如滑变电阻器、电位器等是数值大小可调的电阻器。

为了对电阻所组成的电路进行分析, 要首先确定电阻上电压和电流的参考方向, 这里有两种可能性, 如图 2-2 所示。如果选择图 2-2a, 则电阻上电压和电流的关系为关联参考方向, 此时有

$$u = iR \quad (2-1)$$

如果选择图 2-2b, 则电阻上电压和电流的关系为非关联参考方向, 此时有

$$u = -iR \quad (2-2)$$

式 (2-1)、式 (2-2) 就是著名的欧姆定律, 欧姆定律描述了电阻的电压和电流之间的代数关系, 其中 u 为电阻两端的电压 (V), i 为流过电阻的电流 (A), R 的单位为欧姆 (Ω)。

电阻的倒数称之为电导, 用符号 G 来表示, 单位为西门子 (S), 电阻和电导是反映同一电阻元件的特性性能并互为倒数的两个参数。同电阻的定义相对应, 电导描述的是一个电阻元件导电能力的强弱, 显然, G 越大, 导电能力越强, G 越小, 导电能力越弱, 这与电阻的特性是一致的。

在电路分析中, 很多时候也关心电阻所消耗的功率, 在图 2-2a 所示的关联参考方向下, 电阻器上的功率计算公式为

$$p = ui \quad (2-3)$$

如果参考方向选择图 2-2b 的非关联参考方向, 则电阻器上的功率计算公式为

$$p = -ui \quad (2-4)$$

分别将式 (2-1) 代入式 (2-3), 式 (2-2) 代入式 (2-4), 得到

$$p = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (2-5)$$

由式 (2-5) 可知, 无论电阻的电压和电流参考方向如何选取, 电阻上消耗的功率均为正值, 即电阻总是用来消耗功率的, 这类器件也称之为无源器件。反之, 能够对外提供功率的称之为有源器件。

例 2-1 如图 2-2a 所示, 若流过电阻的电流大小为 3A, 电阻两端的电压为 6V, 求该电阻的大小。

解: 由欧姆定律可得, $R = U/I = 6/3\Omega = 2\Omega$

2.2 电容器和电感器

一旦进入讨论电压与电流变化的范围, 就离不开两个非常有用的元件: 电容器和电感器。

2.2.1 电容器

简单地理解, 电容器就是一种储存电能的容器, 最基本的电容器就是由两个平行的金属板中间夹有绝缘物质构成的。本文提到的电容器是一种理想化的模型, 用来模拟实际电容器或其他实际器件的电容特性。电容器的图形符号如图 2-3 所示。

电容器最基本的特性就是储存电荷。当电容器两个极板上的电荷量为 q (单位是 C), 两端的电压为 u (单位是 V) 时, 电容的大小可以用式 (2-6) 来表示:

$$C = \frac{q}{u} \quad (2-6)$$

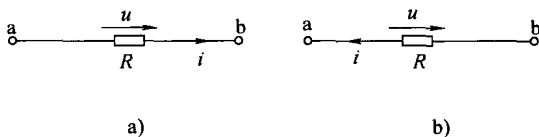


图 2-2 电阻元件端电压和电流参考方向的选择

式(2-6)中, C 指电容元件的参数, 单位为F(法拉, 简称法)。法这个单位很大, 实际应用中, 电容器的电容常介于皮法(pF)和微法(μF)之间, $1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^9\text{nF} = 10^{12}\text{pF}$ 。

在对电路进行分析时, 要用到电容的电压和电流关系($u-i$ 特性), 如果电容的电压电流取关联参考方向, 如图2-4所示。当电容极板上电压发生变化时, 其极板上的电荷量随之也发生改变, 从而电荷的位移也随时间改变, 产生位移电流。



图2-3 电容器的图形符号



图2-4 电容指定电压和电流的参考方向

在电容两端位移电流不同于传导电流, 电流大小为

$$i_c = \frac{dq}{dt} \quad (2-7)$$

把式(2-6)代入式(2-7)可得线性时不变电容(电容大小不随时间变化)两端电压和电流的关系:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (2-8)$$

当电容的电压和电流参考方向为非关联参考方向时, C 前要加负号。式(2-8)中, i 的单位为A, C 的单位为F, u 的单位为V, t 的单位为s。式(2-8)表明: 电容的电流 i 与电压的变化率 $\frac{du_c}{dt}$ 成正比, 这个特性称之为电容的动态特性, 因此电容 C 是一种动态元件。当电容两端的电压没有变化, 如所加电压为直流电压时, 则电流 i 为零, 相当于开路, 因此电容具有通交流隔直流的功能。通过今后的学习还将了解, 电容具有滤波、稳压、储能、信号转换及无功补偿等功能。

对式(2-8)两端进行积分, 可以得到电容两端电压和电流关系的另外一种表达方式

$$u_c(t) = u_c(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt \quad (2-9)$$

由此可以看出, 电容的电压不仅与 t_0 时刻以后的电容电流 i_c 有关系, 还与其初始电压有关, 因此电容 C 是一种记忆性元件。电容上的电压与其电流在很多实际应用中, 初始时间为0, 即 $t_0 = 0$, 则式(2-9)可变为

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (2-10)$$

式中, $u_c(0)$ 为电容的初始电压, 由此可得到电容的功率和能量之间的关系

$$W = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t u_c i_c dt = \int_{-\infty}^t u_c C \frac{du_c}{dt} dt = \frac{1}{2} C u_c^2(t) \quad (2-11)$$

2.2.2 电感器

简单地理解, 电感器就是由导线绕制而成的线圈, 也称为电感线圈, 简称电感。本文讲到的电感器是一种理想化的电路模型, 用来模拟实际电感器和其他实际器件的电感特性, 电感的图形符号如图2-5所示。

电感最基本的特性就是储存磁场能量，当电感线圈中通过时变电流时，电流就会在其周围建立磁场，以磁场的形式储存能量，在电感两端产生一个正比于电流对时间变化量的电压，采用关联参考方向如图 2-6 所示。



图 2-5 电感的图形符号

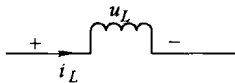


图 2-6 电感指定电压和电流的参考方向

电感两端的电压可表示为

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-12)$$

式中， L 为电感的大小，单位是亨利（H，典型值为 μH ）。从式中可以看出，电感线圈两端的电压 u 正比于电流对时间的变化量 $\frac{di_L}{dt}$ ，这个特性称之为电感的动态特性，因此电感也是一种动态元件。当通过电感线圈的电流是直流时，电感两端的电压为 0，相当于短路，因此电感具有通直流扼制交流的功能。通过今后的学习，还将了解电感具有滤波、稳流、储能、信号转换、机电能量转换及无功补偿等功能。

对式 (2-12) 进行积分可得

$$i_L = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L dt \quad (2-13)$$

由式 (2-13) 可以看出，电感的电流不仅与 t_0 时刻以后的电感电压 u_L 有关系，还与其初始电流有关，因此电感 L 也是一种记忆性元件。电感上的电压与其电流在很多实际应用中，初始时间为 0，即 $t_0 = 0$ ，则式 (2-13) 可变为

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt \quad (2-14)$$

式中， $i_L(0)$ 为电感的初始电流。由此可得到电感的功率和能量之间的关系

$$W = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t u_L i_L dt = \int_{-\infty}^t L \frac{di_L}{dt} i_L dt = \frac{1}{2} L i_L^2(t) \quad (2-15)$$

2.3 独立电源

在任何实际电路中，各种用电设备都需要电源向其提供能量。实际的电源种类很多，内部机理也很复杂，本书所提到的电源在没有特别说明时，均指独立电源。

独立电源是从某些实际电路抽象出来的一种理想模型，能够提供与外接电路无关的特定电压或电流的一种有源二端元件。独立电源包括两种类型：独立电压源和独立电流源。

2.3.1 独立电压源

独立电压源是具有两个引出端的黑匣子，不论外接负载大小如何，其总能保持两端电压为特定值，且与流过负载电流的大小无关，其图形符号如图 2-7a 所示。当 $u_s(t)$ 为一恒定值 U_s 时，就为直流电压源，当其值为正弦函数时，就是交流电压源。当其为直流电压源时，其两端电压电流关系 (u - i 特性曲线，即伏安特性曲线) 如图 2-7b 所示。