



中国高等学校电子教育学会黑龙江省分会“十三五”规划教材

电路基础

DIANLU JICHU

主 编 孙 杰 马玉志

HEUP 哈尔滨工程大学出版社



中国高等学校电子教育学会黑龙江省分会“十三五”规划教材

电路基础

DIANLU JICHU

主 编 孙 杰 马玉志
副主编 宿文玲 刘继峰 唐 磊

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了电路理论和电路分析基础。全书分为10章,内容包括电路模型和基本定律、电阻电路的等效变换、电路的一般分析方法和基本定理、含有运算放大器的电路、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、耦合电感电路的分析、三相电路、非正弦周期电路分析和二端口网络。本书内容简洁,重点、难点突出,思维逻辑清晰。每章后配有大量习题,便于教师有针对性地布置作业,书后附有习题答案。

本书可作为高等院校电子类专业本科生“电路基础”等课程教师教学参考书,也可供工程技术人员和电路爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/孙杰,马玉志主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2018.2(2018.7重印)
ISBN 978-7-5661-1782-3

I. ①电… II. ①孙… ②马… III. ①电路理论
IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第021578号

选题策划 田 婧
责任编辑 张忠远 周一瞳
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街145号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 18.25
字 数 478千字
版 次 2018年2月第1版
印 次 2018年7月第2次印刷
定 价 42.80元

<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

为了适应现代电子信息科学技术迅猛发展的需要,本书针对信息类学生必修的基础课程“电路基础”的内容和体系进行有机的整合,形成新的教材体系。“电路基础”课程是高等学校信息类专业重要的基础课。该课程对培养学生电路的基础知识、基本能力和综合素质具有其他任何电类课程不能替代的重要作用,对实现专业人才培养目标具有承上启下的关键作用,其教学质量和水平的高低将直接对专业课程的学习和人才培养产生重大而深远的影响。

学生通过“电路基础”课程的学习,可获得电工、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能,获得电工与电子技术的基本分析方法和应用技巧,并培养出初步的实践能力。

本书从适应高等院校信息类理工科应用型人才培养需求出发,力求以尽可能少的学时阐明电路的基本内容。编者在多年教学改革与实践的基础上,结合应用型人才的培养需求,吸收当前一些改革教材中的先进经验编写本书,在课程内容的选择上,重点突出基本概念、基本理论、基本原理和基本分析方法,尽量减少过于复杂的分析与计算,强调知识的渐进性,兼顾知识的系统性和学科体系的完整性,注重理论联系实际,时代特色鲜明,同时展现了近年来电工电子技术领域出现的新技术。

全书分为10章,内容包括电路模型和基本定律、电阻电路的等效变换、电路的一般分析方法和基本定理、含有运算放大器的电路、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、耦合电感电路的分析、三相电路、非正弦周期电路分析和二端口网络。本书力求做到知识简明,概念清晰,条理清楚,讲解到位,插图规范,易教易学。教学中,可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合,也可适当进行扩充。

本书由哈尔滨信息工程学院教师编写。书中第2章、第3章、第7章由孙杰编写,第1章、第4章由马玉志编写,第5章、第9章由刘继峰编写,第6章由唐磊编写,第8章、第10章由宿文玲编写,全书由孙杰最后统稿并定稿。

受编者学识水平所限,书中难免有错漏或不妥之处,恳请广大读者在使用过程中提出宝贵意见。

编 者
2017年9月

目 录

第 1 章 电路模型和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路的基本变量	2
1.3 电路的基本元件	7
1.4 电源	10
1.5 基尔霍夫定律	15
习题 1	17
第 2 章 电阻电路的等效变换	22
2.1 电路等效变换的概念	22
2.2 无源网络的等效变换	23
2.3 电源的等效变换	28
2.4 输入电阻	32
习题 2	34
第 3 章 电路的一般分析方法和基本定理	40
3.1 支路电流法	40
3.2 节点电压法	41
3.3 回路电流法	47
3.4 齐次性和叠加原理	52
3.5 替代定理	57
3.6 戴维南定理与诺顿定理	58
3.7 最大功率传输定理	66
习题 3	68
第 4 章 含有运算放大器的电路	75
4.1 运算放大器的电路模型	75
4.2 含有理想运算放大器的电路分析	78
4.3 实际运放应用时的考虑	82

习题4	83
第5章 动态电路的时域分析	86
5.1 动态电路方程的建立	86
5.2 一阶电路的零输入响应	90
5.3 一阶电路的零状态响应	96
5.4 一阶电路的全响应	103
习题5	110
第6章 正弦稳态电路的分析	114
6.1 正弦量的基本概念	114
6.2 正弦稳态电路的相量模型	123
6.3 正弦稳态电路的分析	127
6.4 正弦稳态电路的功率	142
6.5 最大功率传输定理	149
6.6 电路的谐振状态	152
习题6	155
第7章 耦合电感电路的分析	160
7.1 互感	160
7.2 含有耦合电感电路的计算	164
7.3 变压器	169
习题7	176
第8章 三相电路	181
8.1 三相电路的基本概念	181
8.2 对称三相电路的分析与计算	193
8.3 不对称三相电路的分析与计算	198
8.4 三相电路的功率	202
8.5 三相电供电与用电	206
8.6 三相电用电安全	209
习题8	212
第9章 非正弦周期电路分析	215
9.1 非正弦周期电流和电压	215

9.2 周期函数分解为傅里叶级数	216
9.3 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	222
9.4 非正弦周期电流的稳态分析	226
习题9	232
第10章 二端口网络	236
10.1 二端口网络的概念	236
10.2 二端口网络的参数和方程	238
10.3 二端口网络的等效电路	257
10.4 二端口网络的连接	258
10.5 二端口网络的网络函数	261
10.6 互易二端口网络	264
10.7 其他二端口网络器件	264
习题10	272
参考答案	275
习题1 答案	275
习题2 答案	275
习题3 答案	276
习题4 答案	276
习题5 答案	277
习题6 答案	277
习题7 答案	279
习题8 答案	280
习题9 答案	280
习题10 答案	281

第 1 章 电路模型和基本定律

本章的内容是贯穿全书的重要理论基础。本章介绍电路模型及电路的一些基本概念，电路中常用的基本物理量——电流、电压参考方向的概念，作为进行电路分析基本依据的元件伏安关系——基尔霍夫定理。通过学习本章内容，掌握基尔霍夫定理应用及电压、电流参考方向在电路分析中的作用。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的组成及作用

1. 电路及其组成

实际电路通常由各种电气设备和电路元器件（如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、二极管、晶体管、仪表等）相互连接组成，每种电路元器件都具有各自不同的电磁特性和功能。按照人们的需要，把相关电气设备和电路元器件按一定方式进行组合，就构成了一个可供电流流通的通路，即电路。手电筒电路、单个照明灯电路是在实际应用中较为简单的电路。如图 1-1 所示的手电筒照明电路中，电池作为电源，白炽灯作为负载，导线和开关作为中间环节，将白炽灯和电池连接起来。而电能的产生、输送和分配是通过发电机、升压变压器、输电线等完成的，它们形成了一个庞大而复杂的电路，如图 1-2 所示。

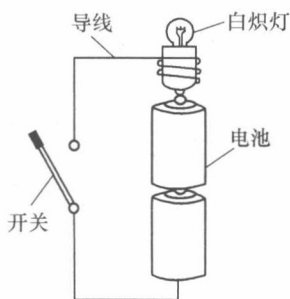


图 1-1 手电筒照明电路

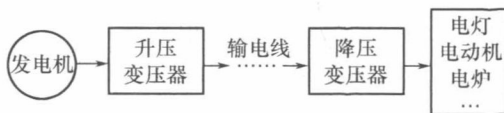


图 1-2 电能输送示意图

不论是简单还是复杂的电路，其基本组成部分都离不开三个基本环节：电源、负载和中间环节。电源（source）是向电路提供电能或电信号的设备，它可以将其其他形式的能量如化学能、热能、机械能、原子能等转换为电能。在电路中，电源是“激励”，是激发和产生电流、电压（称为响应）的因素。负载（load）是取用电能的设备，其作用是把电能转换为其他形式的能量（如机械能、热能、光能等）。通常，在生产与生活中经常用

到的白炽灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传递电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线，一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置，复杂的中间环节可以是由许多电路元器件组成的网络系统。

2. 电路的作用

实际电路具有如下两方面作用。

一是对能量传输、转换的应用，如电力系统。发电机将其他形式的能源转换为电能，再通过变压器和输电线路将电能输送给企业生产线、办公场所及千家万户的用电设备，这些用电设备再将电能转换为机械能、热能、光能或其他形式的能量。具有这种功能的电路一般被称为电力电路。

二是实现信号的处理、转换和传输，如收音机或电视机电路，将接收到的电信号经过调谐、滤波、放大等处理，使其成为人们所需要的其他信号。通信系统则是建立在信息的发送者和接收者之间用来完成信息的处理和传递的实际电路，这样的电路一般被称为电子电路。电路的这种作用在现代自动控制技术、通信技术和计算机技术中都得到了广泛的应用。

1.1.2 理想元件及电路模型

人们设计制作某种器件，是要利用它的某种物理性质。例如，制作一个电阻器，要利用它对电流呈现阻力的性质，然而，当电流通过时还会产生磁场，因而兼有电感的性质。其他器件也有类似的或更复杂的情况，这为分析电路带来了困难。因此，必须在一定条件下，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性能的模式（model）表示。把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化的电路就是电路模型（circuit model），电路模型与实际电路的关系是前者只在一定程度上反映后者的本质性状。要建立电路模型，先要把最基本的电器件、部件的本质特征抽象成理想化电路元件（circuit element）。实际电路的电路模型由理想电路元件相互连接而成，理想元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定电磁性质并有精确数学定义的基本结构。在一定的工作条件下，理想电路元件及他们的组合足以模拟实际电路中部件、器件中发生的物理过程。本书所涉及电路均指由理想电路元件构成的电路模型，电路又常常称为网络（network），同时，将理想化电路元件简称为电路元件。

1.2 电路的基本变量

电路分析使我们能够得出给定电路的电性能。电路的电性能通常可以用一组表示为时间函数的变量来描述，电路分析的任务在于解得这些变量。电路的主要变量有电流、电压、功率和能量等。

1.2.1 电流

带电粒子的定向移动形成电流。电流（current）是单位时间内通过导体横截面的电

荷量, 用符号 $i(t)$ 表示。根据定义有

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

当电流 i 的大小和方向均不变时, 称为直流电流, 简称为直流 (DC), 常用符号 I 表示, 则

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

随时间作周期性变动且平均值为零的电流称为交流电流, 简称为交流 (AC)。

本书中的物理量采用国际单位制 (SI) 单位, 电量 q 的单位是库仑 (C), 时间 t 的单位是秒 (s), 电流 i 的单位是安培 (A)。电流还有较小的单位, 如毫安 (mA)、微安 (μA) 和纳安 (nA), 它们之间的换算关系为

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A} = 10^9 \text{ nA}$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在实际问题中, 电流的实际方向可能是未知的, 也可能是随时间变动的。为了解决这个问题, 引入参考方向 (reference direction) 的概念, 又称为电流的正方向。在电路图中, 电流的参考方向可以任意指定, 一般用箭头表示, 也可用双下标表示, 例如, i_{AB} 表示参考方向是由 A 到 B, 而 i_{BA} 表示参考方向是由 B 到 A, 显然有 $i_{AB} = -i_{BA}$ 。本书统一规定: 如果电流的实际方向和参考方向一致, 电流为正值; 如果两者相反, 电流为负值, 如图 1-3 所示。



图 1-3 电流的参考方向

(a) $i > 0$; (b) $i < 0$

1.2.2 电压

电压为单位正电荷从电路的一点 a 移动到另一点 b 时所获得或失去的能量, 用符号 u 表示, 即

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

式中 dq ——由 a 点移到 b 点的电荷量, 单位为库仑 (C);

dw ——转移过程中电荷 dq 所获得或失去的能量, 单位为焦耳 (J)。

在国际单位制中, 电压的单位为伏特 (V), 有时, 也取千伏 ($1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$)、毫伏 ($1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$) 作单位。

单位正电荷在电场力的作用下由 a 移到 b。若消耗电能, 则 a 点是高电位点, 称为正极, 用符号 “+” 表示; b 点为低电位点, 称为负极, 用符号 “-” 号表示。电荷转移失去电能表现为电压降落, 即电压降。通常, 电路中两点之间的电压方向可用电压极性或电压降方向表示。

若电压的大小和极性均不随时间变动,则这样的电压称为恒定电压或直流电压,可用符号 U 表示。若电压的大小和极性均随时间变化,则称为交变电压或交流电压,用符号 $u(t)$ 表示。

电路两点之间的电压如同电流一样,在计算时也需要假定参考极性或参考方向。在图 1-4 (a) 中,如果假定 a 点的电位高于 b 点的电位,则 a 点为“+”极性,b 点为“-”极性。若实际中 a 点的电位高于 b 点的电位,则电压 $u > 0$,这表示元件两端的电压实际极性与参考极性相同,或者说电压实际方向与参考方向一致。如果 $u < 0$,说明电压的参考方向与实际方向相反,如图 1-4 (b) 所示。



图 1-4 电压的参考极性

1.2.3 电位

在电路中任选一点为参考点,则该电路中某一点的电位为该点与参考点之间的电压。电位用 φ 表示,也称为电势。电位和电压的单位完全相同。参考点的电位为零,也称为零电位点。在生产实践中,把地球作为零电位点,凡是机壳接地的设备,机壳电位即为零电位。有些设备或装置的机壳并不接地,而是把许多元件的公共点作为零电位点。为了方便分析问题,参考点用符号“ $\perp$ ”表示。电路中其他各点相对于参考点的电压就是各点的电位,因此,任意两点间的电压等于这两点的电位之差,即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-4)$$

电路中各点电位的高低是相对的,参考点不同,各点电位的高低也不同,但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中,凡是比参考点电位高的各点电位都是正电位,比参考点电位低的各点电位都是负电位。

【例 1-1】 电路如图 1-5 所示,已知 $u_{ab} = 8 \text{ V}$, $u_{bc} = 2 \text{ V}$,试确定在分别以 c、b 作为参考点时 a、b、c 的电位值。

解 如图 1-5 (a) 所示,选 c 点为参考点,则 $\varphi_c = 0$, $\varphi_a = u_{ac} = u_{ab} + u_{bc} = 10 \text{ V}$;如图 1-5 (b) 所示,选 b 点为参考点,则 $\varphi_b = 0$, $\varphi_a = u_{ab} = 8 \text{ V}$, $\varphi_c = u_{cb} = -2 \text{ V}$ 。

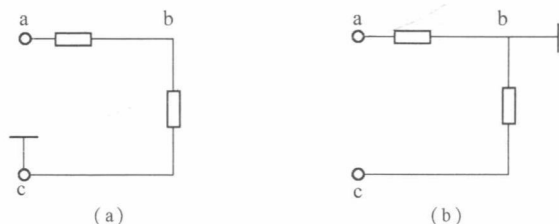


图 1-5 例 1-1 图

1.2.4 关联、非关联方向

由前面叙述知,在电路分析时,既要为元件或电路的电流假设参考方向,也要为它们标注电压的参考极性,二者是可以独立无关地任意假定的。但为了下一步分析问题的方便,引入关联参考方向和非关联方向的概念。当电流参考方向是从电压参考方向的正极流入负极流出时,称为电压和电流的参考方向是关联的 (associated); 反之,称为非关联的 (no - associated), 如图 1-6 所示。

图 1-6 中, N 代表元件或电路的一部分, 并且所谓关联还是非关联一定是对某一个元件或电路而言的。如图 1-7 所示, 电压 u 、电流 i 的参考方向对 A 是非关联的, 对 B 是关联的。

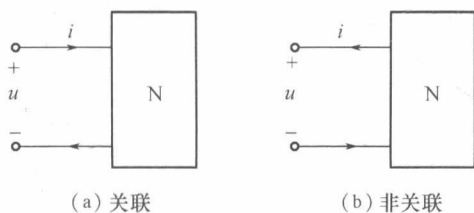


图 1-6 电压电流参考方向

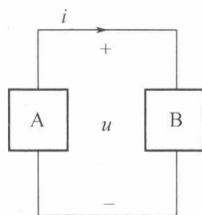


图 1-7 关联元件的针对性

1.2.5 电功率和能量

电流通过电路时传输或转换电能的速率即单位时间内电场力所做的功, 称为电功率, 简称功率 (power), 数学描述为

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

式中 p ——功率。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特 (W), 规定元件 1 s 内提供或消耗 1 J 能量时的功率为 1 W。常用的功率单位还有千瓦 (kW), $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$ 。

将式 (1-5) 等号右边的分子、分母同乘以 dq 后, 变为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

可见, 元件吸收或发出的功率等于元件上的电压乘以元件中的电流。

电功率按时间累积就是电路吸收 (消耗) 的电能, 根据式 (1-7), 从 t_0 到 t 时间内电路吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-7)$$

若时间的单位为秒 (s), 功率的单位为瓦 (W), 则电能的单位为焦耳 (J), 它等于功率 1 W 的用电设备在 1 s 内所消耗的电能。在实际应用中, 还采用千瓦·时 (kW·h) 作为电能的单位, 它等于功率 1 kW 的用电设备在 1 h 时间内所消耗的电能, 简称为 1 度电, 有

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \times 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

在电路分析中,电功率有正负之分:当一个电路元件上消耗的电功率为正值时,表明这个元件是负载,它向电路吸收电能;当一个电路元件上消耗的电功率为负值时,则表明这个元件在起电源作用,元件向电路提供电能。为此,我们给出电功率的两种计算式。当元件的电压、电流选取相同的参考方向时,即关联参考方向如图 1-8(a) 所示时,有

$$p = ui \quad (1-8)$$

当元件的电压、电流选取不同的参考方向时,即非关联参考方向如图 1-8(b) 所示时,有

$$p = -ui \quad (1-9)$$



图 1-8 功率的计算图

无论关联或非关联参考方向,都有:当算得的功率为正值即 $p > 0$ 时,则元件吸收(消耗)功率;当算得的功率为负值即 $p < 0$ 时,则元件发出(产生)功率。

根据能量守恒原理,一个电路中,一部分元件或电路发出的功率一定等于其他部分元件或电路吸收的功率。或者说,整个电路的功率是守恒的。

【例 1-2】电路如图 1-9 所示,已知 $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -6 \text{ V}$, $U_3 = -4 \text{ V}$, $U_4 = 5 \text{ V}$, $U_5 = 10 \text{ V}$; $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$, $I_3 = 4 \text{ A}$, $I_4 = -1 \text{ A}$, $I_5 = -3 \text{ A}$ 。试求各元件的功率,并判断实际是吸收功率还是发出功率。

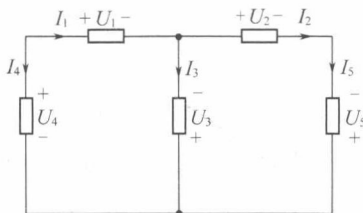


图 1-9 例 1-2 图

解 根据已知条件得出如下结论。

(1) U_1 、 I_1 关联参考方向,则

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 1 \text{ W} > 0$$

实际电路元件吸收 1 W 功率。

(2) U_2 、 I_2 关联参考方向,则

$$P_2 = U_2 I_2 = (-6 \text{ V}) \times (-3 \text{ A}) = 18 \text{ W} > 0$$

实际电路元件吸收 18 W 功率。

(3) U_3 、 I_3 非关联参考方向, 则

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-4) \text{ V} \times 4 \text{ A} = 16 \text{ W} > 0$$

实际电路元件吸收 16 W 功率。

(4) U_4 、 I_4 关联参考方向, 则

$$P_4 = U_4 I_4 = 5 \text{ V} \times (-1) \text{ A} = -5 \text{ W} < 0$$

实际电路元件发出 5 W 功率。

(5) U_5 、 I_5 非关联参考方向, 则

$$P_5 = -U_5 I_5 = -(-10 \text{ V}) \times (-3 \text{ A}) = -30 \text{ W} < 0$$

实际电路元件发出 30 W 功率。

1.3 电路的基本元件

电路元件是构成电路的基本单元。元件按一定方式进行互连而组成电路, 这种连接是通过元件端子实现的。元件就其端子的数目而言, 可分为二端元件和多端元件。具有两个以上端子的元件称为三端、四端、 $\cdots$ 、 n 端元件, 统称为多端元件。

元件的主要电磁特性通过端子间的有关变量来描述, 不同变量间的特定关系反映了不同元件的性质。元件的这种关系可用一条曲线、一个或一组方程表示, 该曲线称为元件的特性曲线, 该方程或方程组称为元件的定义 (或特性) 方程或方程组。通常, 在电路分析中, 用元件端电压与电流的关系 (voltage current relation, VCR) 表征元件的特性。VCR 方程也称为元件的特性方程或元件的约束方程。

1.3.1 电阻元件

电阻 (resistance) 是一种最常见的、用于反映电流热效应的二端电路元件, 如图 1-10 所示。电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类, 如无特殊说明, 本书所涉及的电阻元件均指线性电阻元件。在实际交流电路中, 白炽灯、电阻炉、电烙铁等均可看成是线性电阻元件。

图 1-11(a) 为电阻元件的电路模型, 取其端口电压 u 和端口电流 i 为关联参考方向, 其端口的伏安关系为

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

式中 R ——常数, 用来表示电阻及其数值。

式 (1-10) 表明, 凡是服从欧姆定律的元件都是线性电阻元件。

电阻及其数值将电阻元件端口电压和端口电流在直角坐标系上描绘曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。对于线性电阻元件来说, 它的伏安特性曲线是经过原点的一条直线, 如图 1-11(b) 所示。

在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆 (Ω), 规定当电阻电压为 1 V、电流为 1 A 时的电阻值为 1 Ω 。此外电阻的单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。电阻的倒数称为电导, 用 G 表示, 即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-11)$$

电导的单位为西门子 (S)。

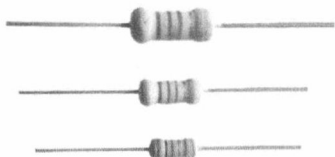


图 1-10 常见电阻元件

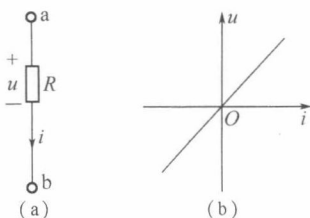


图 1-11 电阻元件的电路模型

(a) 电阻电路模型; (b) 电阻伏安特性曲线

电阻是一种耗能元件。当电阻通过电流时,就会发生电能转换为热能的过程。热能向周围扩散后,不可能再直接回到电源而转换为电能。电阻吸收的功率为

$$P = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-12)$$

在直流电路中

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-13)$$

对于线性电阻,当 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 时,称为开路,此时无论端电压为何值,其电流恒为零;当 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 时,称为短路,电阻元件相当于一段理想导线,此时无论其电流为何值,其端电压恒为零。

1.3.2 电容元件

电容器种类很多,但从结构上都可看成是由中间夹有绝缘材料的两块金属极板构成的。电容器在工程技术中广泛应用。实际电容器如图 1-12 所示。电容元件 (capacitance) 是实际的电容器即电路元件的电容效应的抽象,用于反映带电导体周围存在电场,是能够储存和释放电场能量的理想化电路元件。它的符号及规定的电压和电流参考方向如图 1-13(a) 所示。线性电容元件的元件特性为

$$q = Cu \quad (1-14)$$

式中 C ——电容元件的参数,称为电容。

如图 1-13(b) 所示为线性电容元件的伏库特性。在国际单位制中,当电荷和电压的单位分别为库仑 (C) 和伏特 (V) 时,电容的单位为法拉 (F)。

当电容接上交流电压 u 时,不断被充电、放电,极板上的电荷也随之变化,电路中出现了电荷的移动,形成电流 i 。若 i 为关联参考方向,则有

$$i_c = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu_c)}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (1-15)$$

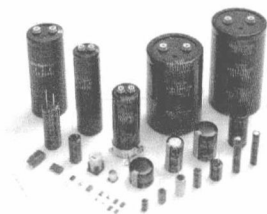


图 1-12 实际电容器示例

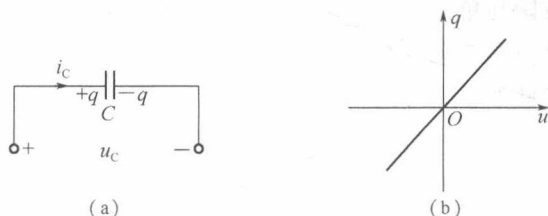


图 1-13 线性电容元件

(a) 线性电容元件的电路模型; (b) 线性电容元件的伏库特性曲线

式(1-15)表明电容的电流与电压的变化率成正比。电容电压变化得越快(也就是 dq/dt 很大),电流越大。如果电压为恒定的电压(即常数),电流为零。因此,在直流电路中电容相当于开路,因此,电容具有“隔直通交”的作用。

在关联参考方向下,电容元件吸收的功率为

$$P = ui = uC \frac{du}{dt} = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-16)$$

则电容器在 $0 \sim t$ 时间内,其两端电压由 0 V 增大到 U 时,吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^U C u du = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-17)$$

式(1-17)表明,对于同一个电容元件,当电场电压高时,它储存的能量就多;对于不同的电容元件,当充电电压一定时,电容量大的储存的能量就多。从这个意义上说,电容 C 也是电容元件储能本领大小的标志。

当电压的绝对值增大时,电容元件吸收能量,并转换为电场能量;当电压的绝对值减小时,电容元件释放电场能量。电容元件本身不消耗能量,同时,也不会放出多于它吸收或储存的能量,因此,电容元件也是一种无源的储能元件。

在工程实际中,常常用到不同容量的电容,可以像电阻的串并联一样,将电容元件串并联得到需要的等效电容。电容并联时,等效电容等于各并联电容之和;电容串联时,等效电容等于各串联电容倒数之和的倒数。如果在并联或串联前电容有初始储存能量(电场能量),则除了需计算等效电容外还需计算等效电容的初始电压。

1.3.3 电感元件

根据普通物理学知识可知,载流导体的周围会产生磁场。如果将导线绕制成线圈,如图1-14(a)所示,当通以电流时,线圈中将会产生较强的磁场。电感元件(inductance)是实际线圈的一种理想化模型,它能够储存和释放磁场能量。空心电感线圈常可抽象为线性电感,用如图1-14(b)所示的符号表示。

假设电感线圈的匝数为 N ,当按如图1-14所示方向通以电流 i 时,可按右手螺旋关系确定磁通 Φ 的方向,若磁通 Φ 与 N 匝线圈交链,则线圈所交链的总磁通量用磁链 Ψ 表示,磁链 $\Psi = N\Phi$ 。对于线性电感,有

$$\Psi = Li \quad (1-18)$$

式中 L ——该元件的自感(系数)或电感,是一个正实常数。

在国际单位制中,磁通和磁链的单位是韦伯(Wb),当电流单位为安培(A)时,电感的单位是亨利(H)。

线性电感元件的韦安特性是 $\Psi-i$ 平面上的一条过原点的直线,如图 1-14(c)所示。

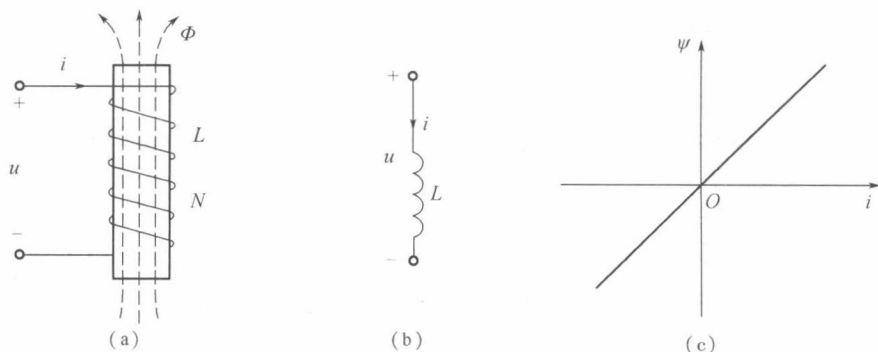


图 1-14 线圈、电感符号及特性

根据电磁感应定律,当磁链随时间变化时,将在线圈中产生感应电压 u 。如果线圈电流 i 的参考方向与磁通链 Ψ 的参考方向成右手螺旋关系,则有

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

式(1-19)表明,电感元件上任一瞬间的电压大小与这一瞬间电流对时间的变化率成正比。如果电感元件中通过的是直流电流,稳定时因电流的大小不变,即 $di/dt = 0$,那么,电感上的电压就为零,所以稳定时电感元件对直流可视为短路。

在电压、电流关联参考方向下,电感元件吸收的功率为

$$P = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-20)$$

则电感线圈在 $0 \sim t$ 时间内,线圈中的电流由 0 变化到 I 时,吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^I L i di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-21)$$

即电感元件在一段时间内储存的能量与其电流的平方成正比。当通过电感的电流增加时,电感元件就将电能转换为磁能并储存在磁场中;当通过电感的电流减小时,电感元件就将储存的磁能转换为电能释放给电源。因此,电感是一种储能元件,它以磁场能量的形式储能。同时,电感元件也不会释放出多于它吸收或储存的能量,因此,它是一个无源的储能元件。

1.4 电 源

将各种实际电源发出电能特性抽象为电压源元件和电流源元件,有的实际电源需要用电压源元件表示其特性,而有的实际电源需要用电流源元件表示其特性。

1.4.1 理想电压源

有些实际电源在工作时提供的端电压是基本稳定的,如干电池、蓄电池、直流发电