



全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

电 路 基 础

主编 刘莉宏
宋 鹏
杨建康

煤炭工业出版社

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

电 路 基 础

主 编 刘莉宏 宋 鹏 杨建康
副主编 郭立新 郭 娜 陆 红
主 审 许经鸾

煤 炭 工 业 出 版 社

·北 京·

内 容 提 要

本书是全国煤炭高职高专电类专业“十一五”规划教材之一。全书共十章,内容包括:电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、线性网络的基本定理、线性网络的一般分析、正弦交流电路、谐振和互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、线性动态电路的时域分析、磁路和铁芯线圈等,并配有《电路基础练习册》。

本书是高职高专院校电子信息技术、通信技术、自动控制、电气自动化、计算机应用、计算机网络、机电技术和机电一体化等电类专业电路基础课程的教材,还可作为成人高校、高级技师学院等电类专业及相关专业的教材,也可供从事相关专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/刘莉宏,宋鹏,杨建康主编. —北京:煤炭工业出版社,2008.10

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5020-3292-0

I. 电… II. ①刘… ②宋… ③杨 III. 电路理论
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 049606 号

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址:www.cciph.com.cn

北京京科印刷有限公司 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ 印张 16

字数 389 千字 印数 1—3,000

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 6097 定价 31.00 元

(附练习册)

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

全国煤炭高职高专矿山电气(自动化)类“十一五”规划教材

编审委员会

主 任: 邓开陆 訾贵昌

副 主 任: 王怀群 孔祥春 杨建康 韩 莉

委 员 (以姓氏笔画为序):

王中显 王成旺 王进野 王艳红

宋 鹏 刘莉宏 李 明 李荣生

李德俊 张 博 张名忠 张春芝

陆 红 庞元俊 周景龙 荆 珂

赵青梅 郭立新 章小印 聂国伦

高 专 蒋彦国 梁南丁 魏 良

前 言

本书是全国煤炭高职高专电类专业“十一五”规划教材之一,是由中国煤炭教育协会和中国矿业大学北京教材编审室共同组织编写的。

以素质教育为核心,注重实践能力和创新能力的培养是当今职业教育之根本。《电路基础》是工科电子信息技术、通信技术、自动控制、电气自动化、计算机应用、计算机网络、机电技术等电类专业必修的专业基础课程。按照职业教育的培养目标,遵循理论教学“必需够用”的原则,编写了这本教材,供各高等专科学校、高等职业技术学院、成人高等学校电类专业及相关专业作为教材使用,也可供工程技术人员参考。

《电路基础》的任务是使学生掌握必须具备的电路基本知识、基本理论及其分析计算的基本方法、基本技能。学习《电路基础》时,应注意培养初步的识读电路图的能力、计算电路物理量的能力、分析基本电路的能力和学习新知识新技术的能力,建立工程技术观念,奠定电工电子技术功底,扩展学生技术创新的空间,结合实践训练,逐步培养学生的专业能力,为学习后续课程和从事专业技术工作打下基础。

本书以线性电路最基本的电阻电路分析、电路的正弦稳态分析和动态电路分析、磁路和铁芯线圈四部分内容为重点,介绍基本电路理论和电路的基本分析方法,力求概念准确、内容精练、重点突出、注重理论联系实际。每章有主要内容、知识要求、能力要求、本章小结,并有《电路基础练习册》、《电类基本技能教程——电工实训》与本书配套,帮助学生掌握和巩固所学知识,提高素质与能力。

全书教学时数为70~90学时,实验时数为20学时以上,学时较少时可根据专业特点和需要适当删去一些章节。

本书由刘莉宏、宋鹏、杨建康任主编,郭立新、郭娜、陆红任副主编。编写分工如下:北京工业职业技术学院刘莉宏编写第一章,辽宁工程技术大学职业技术学院张玲玲编写第二章,山西煤炭职业技术学院郭立新编写第三章、第四章,辽源职业技术学院宋鹏编写第五章,安徽能源职业技术学校钱保健编写第六章,宁夏第一工业职业技术学校陆红编写第七章,呼伦贝尔学院工程分院蒋彦国编写第八章,河南理工大学高等职业学院郭娜编写第九章,陕西能源职业技术学院杨建康编写第十章,全书由刘莉宏、宋鹏、杨建康统稿,许经鸾主审。

本书在编写过程中,得到了各参编学校的大力支持,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中缺点错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者
2008年3月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
第一节 电路和电路模型	(1)
第二节 电路的基本物理量	(3)
第三节 电路的基本元件	(6)
第四节 电路的独立电源	(11)
第五节 电路的工作状态	(14)
第六节 基尔霍夫定律	(16)
本章小结	(19)
第二章 电路的等效变换	(21)
第一节 电阻的串联、并联等效变换	(21)
第二节 电阻的星形与三角形连接的等效变换	(25)
第三节 电源模型的连接及等效变换	(27)
第四节 受控源的等效变换	(31)
本章小结	(35)
第三章 线性网络的基本定理	(36)
第一节 叠加定理	(36)
第二节 戴维南定理与诺顿定理	(40)
第三节 最大功率传输定理 (负载获得最大功率的条件)	(45)
本章小结	(48)
第四章 线性网络的一般分析	(50)
第一节 支路电流法	(50)
第二节 回路电流法	(53)
第三节 节点电压法	(56)
本章小结	(59)
第五章 正弦交流电路	(61)
第一节 正弦量的基本概念	(61)
第二节 正弦量的相量表示	(65)
第三节 基尔霍夫定律的相量形式	(69)
第四节 电路基本元件伏安关系的相量形式	(70)
第五节 阻抗与导纳	(74)
第六节 正弦交流电路的分析计算	(82)
第七节 正弦交流电路的功率	(87)
本章小结	(97)

第六章 谐振和互感电路	(100)
第一节 谐振电路.....	(100)
第二节 互感电路.....	(105)
第三节 空心变压器.....	(111)
本章小结.....	(113)
第七章 三相电路	(114)
第一节 三相电源.....	(114)
第二节 三相负载.....	(118)
第三节 三相电路的功率.....	(124)
本章小结.....	(127)
第八章 非正弦周期电流电路	(129)
第一节 非正弦周期信号及其分解.....	(129)
第二节 对称波形的傅里叶级数.....	(131)
第三节 非正弦周期电流电路中的有效值、平均值、平均功率.....	(133)
第四节 非正弦周期电流电路中的分析计算.....	(135)
本章小结.....	(138)
第九章 线性动态电路的时域分析	(139)
第一节 电路的动态过程和动态响应.....	(139)
第二节 电路初始值的确定.....	(140)
第三节 一阶电路响应的分类.....	(142)
第四节 求解一阶电路的三要素.....	(150)
第五节 一阶电路的阶跃响应.....	(152)
本章小结.....	(156)
第十章 磁路和铁芯线圈	(158)
第一节 磁场的基本物理量.....	(158)
第二节 铁磁物质的磁化.....	(160)
第三节 磁路及磁路定律.....	(164)
第四节 恒定磁通磁路的计算.....	(167)
第五节 交变磁通下的铁芯损耗.....	(169)
第六节 交流铁芯线圈.....	(171)
第七节 电磁铁.....	(173)
本章小结.....	(175)
参考文献	(177)

第一章 电路的基本概念和基本定律

主要内容：电路和电路模型；电路的基本物理量；电路的基本元件——电阻、电容、电感；独立电压源和独立电流源；电路的工作状态和电路分析中最重要的定律——基尔霍夫定律。

知识要求：了解电路和电路模型的基本概念，掌握电路的基本物理量和电路基本元件的定义及特性，掌握独立电压源和独立电流源的特性及实际电源的两种模型，理解并掌握电路的工作状态及基尔霍夫定律。

能力要求：能够绘制电路模型和实际电源模型，能灵活运用基尔霍夫定律对电路进行分析、求解，能计算电路元件、电路的基本物理量，能分析电路工作状态。

第一节 电路和电路模型

一、电路

在现代生活中，人们广泛应用各种电路。如在电子信息、自动控制、计算机、电力工程技术领域中，应用许多电路完成各种各样的任务。电路是由一些电气器件或设备以一定的方式连接，构成电流可以流通的路径，以完成能量的传输、转换或信息的处理、传递。如图 1-1 所示为一个常见的日光灯电路，它是由 220 V 交流电源、镇流器 L 、日光灯管 R 、启辉器 Q 、电容器 C 、开关 S 及若干导线组成。

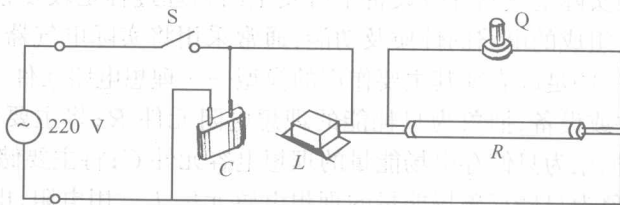


图 1-1 日光灯电路

不论是简单电路，还是复杂电路，一般都是由电源、负载及中间环节三个部分组成。电源是供给电能或发出电信号的设备，它把其他形式的能量转换成电能，或者把电能转换成某种形式的电信号；负载是用电或接收电信号的设备，它把电能转换成其他形式的能量；中间环节是传递、分配和控制电能或电信号的部分，它的一端连接电源，另一端连接负载。

为了便于画出电路，常用一些简单的图形符号代表具体的电气器件或设备，连接起来便构成了电路原理图。这种电路原理图能够清晰地表明各器件或设备之间的连接关系，它与电路的形状、大小、相对位置无关。表 1-1 列出了一些常用的电路图形符号。

表 1-1 常用的电路图形符号(根据国标 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁芯变压器	
灯		电池		直流发电机	
电压表		运算放大器		直流电动机	
理想独立电流源		理想独立电压源		回转器	

二、电路模型

由于构成电路的实际电气器件或设备中所发生的物理过程是较复杂的,为了研究这些电气器件或设备及其组成的电路的性质及功能,通常采用将实际电气器件或设备作某种近似和理想化,抽象为一些足以表征其主要作用的模型——理想电路元件。例如,将主要消耗电能的实际电气器件或设备,抽象为只耗能的理想电阻元件 R ;将主要储存电场能量的实际电气器件或设备,抽象为只储存电场能量的理想电容元件 C ;将主要储存磁场能量的实际电气器件或设备,抽象为只储存磁场能量的理想电感元件 L 。用电阻、电容、电感等理想电路元件来近似和理想化电路中的每一个实际电气器件或设备,再根据这些器件或设备在电路中的连接方式,用理想导线将它们连接起来,就得到了该电路的电路模型。如图 1-2 所示。

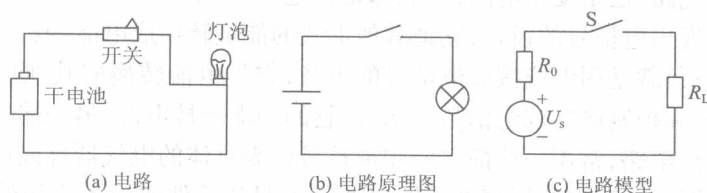


图 1-2 电路、电路原理图和电路模型

为分析电路方便,通常将理想电路元件的“理想”二字省略,称为电路元件;由理想电路元件所组成的电路模型简称为电路。

三、电路的分类

电路可分为集中参数电路和分布参数电路两种。集中参数电路是指电路本身的几何尺寸 l 相对于电路的工作频率所对应的波长小得多,以至在分析电路时可以忽略元件和电路本身的几何尺寸的电路。如工频 $f = 50 \text{ Hz}$ 时,波长 $\lambda = 6000 \text{ km}$,因而在工频情况下,多数电路本身的几何尺寸 $l \ll \lambda$,则可认为是集中参数电路。分布参数电路是指电路本身的几何尺寸相对于工作波长不可忽略的电路。集中参数电路按其元件参数是否为常数,又可分为线性电路和非线性电路。本书重点介绍集中参数线性电路的分析方法。

第二节 电路的基本物理量

一、电流

电荷有序定向的移动形成电流,其大小用电流强度表示,它在数值上等于单位时间内通过导体某一截面的电荷量。由于电流强度通常简称为电流,因此“电流”一词就有两层含义:一是指电荷有序定向移动这一物理现象;二是指电流强度这个物理量。

大小和方向都不随时间变化的电流称为恒稳电流或直流电流。其电流强度用字母 I 表示,即

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

而大小和方向都随时间周期性变化,且在一个周期内的平均值为零的电流称为交流电流。其电流强度用字母 i 表示,即

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

在国际单位制(SI)中,时间 t 的单位是秒(s),电荷量 Q 或 q 的单位是库伦(C),电流 I 或 i 的单位是安培(A)。由式(1-1)或式(1-2)可见,当在 1 s 时间内通过导体某一截面的电荷量为 1 C 时,则该处的电流是 1 A 。根据实际需要,电流的单位还可以用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)等,其与安培(A)的关系是 $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$, $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$, $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ 。

表 1-2 列出了一些常用的数量名称。

表 1-2 常用的国际单位词头

因数	名称	符号	因数	名称	符号
10^9	吉	G	10^{-2}	厘	c
10^6	兆	M	10^{-3}	毫	m
10^3	千	k	10^{-6}	微	μ
10^2	百	h	10^{-9}	纳	n
10^1	十	da	10^{-12}	皮	p

习惯上以正电荷运动的方向(负电荷或电子运动的反方向)规定为电流的实际方向。在简单的直流电路中,判定电流的实际方向并不难,但在复杂的电路中,在分析计算前却很难

判定电流的实际方向。另外,若电流是交流量,则电流的实际方向不断地随时间变化。为了便于分析、计算电路,引入电流参考方向的概念。我们可以任意选定一个方向作为正方向,也称为参考方向,并用箭头表示,以此参考方向作为分析、计算电路的依据。在设定的参考方向下,若电流为正值,则表明实际的电流方向与设定的参考方向一致;反之,若电流为负值,则表明实际的电流方向与设定的参考方向相反。如图1-3所示为电流的实际方向和参考方向的关系。

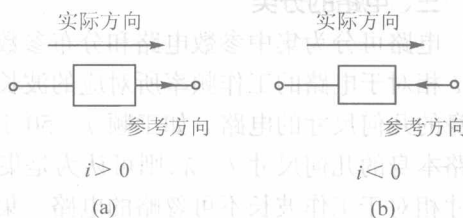


图 1-3 电流的实际方向和参考方向的关系

电流的参考方向是分析、计算电路的重要概念,在不规定参考方向的情况下,电流的正或负毫无意义。

二、电压、电位和电动势

在电场中, a 、 b 两点间的电压在数值上等于电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。

大小和极性都不随时间变化的电压称为恒稳电压或直流电压,用 U_{ab} 表示,即

$$U_{ab} = \frac{A}{Q} \quad (1-3)$$

而大小和极性都随时间周期性变化的电压称为交流电压,用 u_{ab} 表示,即

$$u_{ab} = \frac{dA}{dq} \quad (1-4)$$

如果正电荷由 a 点移到 b 点获得能量,则 a 点具有的电位能低, b 点具有的电位能高,电场力所做的功为负;如果正电荷由 a 点移到 b 点失去能量,则 a 点具有的电位能高, b 点具有的电位能低,电场力所做的功为正。正电荷在电路中移动时,能量的得失体现为电位的升高或降低。

若在电场或电路中任取一点为参考点,则由 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位,用 V_a 表示;由 b 点到参考点的电压称为 b 点的电位,用 V_b 表示。电位参考点可以任意选取,工程上常选取大地、设备外壳或接地点作为参考点,并将参考点的电位规定为零。

因此, a 、 b 两点之间的电压也等于这两点之间的电位差,即

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

当电路一定时,电路中各点之间的电压是一定的,而各点的电位则是相对的,视参考点而定。

只有在参考点选定之后,电路中各点的电位才有一定的数值。也就是说,参考点的选取不同,各点的电位也随之改变,但两点之间的电压(电位差)是不变的。在电路分析计算中,参考点一旦选定,就不再改变。

在 SI 中,功 A 的单位是焦耳(J),电压 U_{ab} (电位 V_a)的单位是伏特(V)。由式(1-3)或式(1-4)可见,当电场力将 1 C 的电量从一点移到另一点所做的功为 1 J 时,则这两点之间的电压是 1 V。与电流一样,电压的常用单位有千伏(kV)、毫伏(mV)等。

电压的实际方向是由高电位指向低电位。在电路图上,两点间电压的实际方向常用“+”、“-”表示,即在高电位点标以“+”号,在低电位点标以“-”号。与电流一样,有必要引

入电压参考方向的概念。由“+”指向“-”的方向称为电压的参考方向(用箭头表示),也可以用双下标表示,即 U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b 。当在设定的参考方向下,若电压为正值,则表示电压的实际方向与设定的参考方向一致;反之,若电压为负值,则表示电压的实际方向与设定的参考方向相反。图 1-4 所示为电压的实际方向和参考方向的关系。

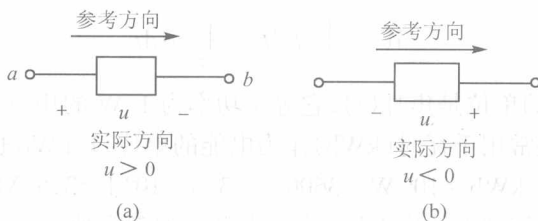


图 1-4 电压的实际方向和参考方向的关系

电流参考方向与电压参考方向的选定本是相互独立的,但为了方便起见,一般常取两者一致,即电流的参考方向由电压参考极性“+”指向“-”。电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向。一般情况下,电路中电流和电压的参考方向都按关联参考方向标定,且参考方向一经选定,在电路分析计算过程中不应改变。

需要指出,在电路中所标有方向的电流、电压,其方向均为电流、电压的参考方向,而不一定指的是实际方向。

在电源内部,外力将单位正电荷由电源的负极移到正极所做的功称为电源的电动势 e ,其单位与电压一样。由于电动势的实际方向是由负极指向正极,即由低电位指向高电位,正好与电压的实际方向相反,所以在电源两端选定的电压参考方向与电动势参考方向总是相反。如图 1-5 所示为电压、电流的关联参考方向和电动势的参考方向。

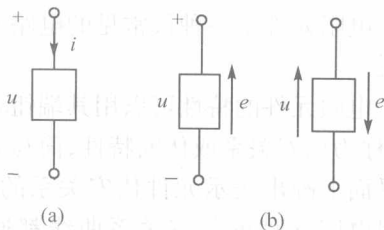


图 1-5 电压、电流的关联参考方向和电动势的参考方向

三、电功率与电能

电场力推动正电荷在电路中运动时,电场力做功,同时电路吸收(或发出)电能,电路在单位时间内吸收(或发出)的电能称为电路吸收(或发出)的电功率,简称为功率。

设有一段电路 ab ,其电流、电压的参考方向为关联参考方向,在 dt 时间内通过电路 ab 的电荷量为 $dq = idt$, dq 的电荷量由 a 端移到 b 端,电场力做的功为 $dW = u dq$,即在此过程中,电路吸收(或发出)的电能为

$$dW = u idt \quad (1-6)$$

电路吸收(或发出)的功率 p 为

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-7)$$

可见,当电流、电压取关联参考方向时,这段电路 ab 吸收的功率等于 u 与 i 两者的乘积,且若 $p > 0$,则电路实际吸收功率;若 $p < 0$,则电路实际发出功率。反之,当电流、电压的参考方向非关联时,若 $p > 0$,则电路实际发出功率;若 $p < 0$,则电路实际吸收功率。

在 SI 中,功率 p 的单位是瓦特(W)。由式(1-7)可见,当电路端电压为 1 V,通过的电流为 1 A 时,则电路吸收电功率是 1 W。工程上常用的功率单位还有兆瓦(MW)、千瓦(kW)、毫瓦(mW)等,它们与瓦特(W)的关系是 $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$, $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$, $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$ 。

电能是功率对时间的积分,由 t_0 到 t 时间内电路吸收的电能为

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

在 SI 中,电能 W 的单位是焦耳(J),它等于功率为 1 W 的用电设备在 1 s 内消耗的电能。工程上和生活中还常用千瓦时(kWh)作为电能的单位,1 kWh 也称为 1 度电。

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

各种电气设备常在铭牌上给出电压、功率或电流的额定值。电气设备工作在额定值是最经济、合理、安全、可靠的,并且能够保证电气设备的设计寿命。若超过额定值工作,则可能导致绝缘损坏,甚至会因过热而烧坏设备。

第三节 电路的基本元件

一、电阻元件

电阻元件是一种最常见的电路元件,它具有阻碍电流流动和将电能转化为热能的物理性质。

电阻元件的特性可以用其端钮处的电压—电流关系来表征。这种关系可以通过实验得到,称为伏安关系或伏安特性,简称为 VCR。通常,电压、电流取关联参考方向,在 $u-i$ 坐标平面上画出表示元件伏安关系的曲线。一般电阻元件的伏安关系曲线都通过坐标原点并处于一、三象限,如图 1-6 所示,这表明电阻元件中的电流与电压的实际方向相同。

若电阻元件的伏安关系曲线为一条过原点的直线,则说明电阻元件的电压、电流是线性关系,这种电阻元件称为线性电阻,如图 1-6(a)所示;否则为非线性电阻,如图 1-6(b)所示。

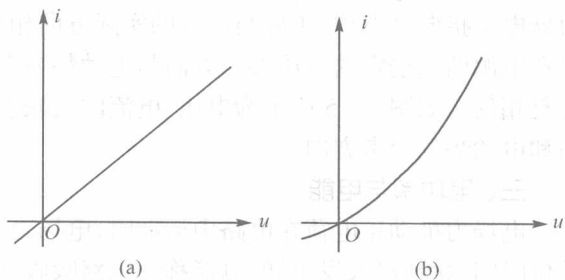


图 1-6 电阻元件的伏安关系曲线

1. 线性电阻

线性电阻作为一种理想电路元件,它在电路图中的图形符号如图 1-7 所示,图中电压、电流取的是关联参考方向。由于线性电阻的伏安关系是一条过原点的直线,所以在该直线上任意一点的电压、电流之比均等于该直线的斜率 $\tan \alpha$,它是一个与电压、电流无关的常数,把这个常数定义为线性电阻元件的电阻 R 。这一结论欧姆早在 1826 年就通过实验发现了,称为欧姆定律,其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-9)$$

或

$$i = Gu \quad (1-10)$$

式中, R 为元件的电阻, G 为元件的电导。

在 SI 中, 电阻 R 的单位是欧姆(Ω), 电导 G 的单位是西门子(S), R 和 G 的关系为 $G=1/R$ 。由式(1-9)可见, 当元件两端电压为 1 V, 通过元件的电流为 1 A 时, 则该元件的电阻为 1 Ω 。常用的电阻单位还有兆欧(M Ω)、千欧(k Ω)等。

电阻元件也常用符号 R 来表示, 这样 R 既表示电阻元件, 又表示其参数(电阻值)。

2. 线性电阻元件消耗的能量

由上节可知, 当任何一个元件的电压、电流取关联参考方向时, 该元件吸收的功率为 $p=ui$ 。所以图 1-7 所示的线性电阻元件所吸收的功率为

$$p=ui=Ri^2=\frac{i^2}{G} \quad (1-11)$$

$$\text{或} \quad p=ui=\frac{u^2}{R}=Gu^2 \quad (1-12)$$

实际的电阻器件及由此抽象而来的电阻元件总是吸收功率, 即电阻元件是耗能元件, 其消耗的能量为

$$W=\int_{t_0}^t p dt=\int_{t_0}^t Ri^2 dt=\int_{t_0}^t Gu^2 dt \quad (1-13)$$

当电阻元件通过直流时, $i=I$, 则式(1-13)可简化为

$$W=PT=RI^2T=GU^2T \quad (1-14)$$

式中, $T=(t-t_0)$ 。

例 1-1 有一手电筒灯泡, 当两端电压为 3 V 时, 电流为 300 mA。求灯泡的电阻值和功率。

解: 由式(1-9)可得灯泡的电阻值

$$R=\frac{U}{I}=\frac{3}{300 \times 10^{-3}}=10 \Omega$$

由式(1-11)或式(1-12)可得灯泡的功率

$$P=UI=3 \times 300 \times 10^{-3}=0.9 \text{ W}$$

$$\text{或} \quad P=RI^2=10 \times (300 \times 10^{-3})^2=0.9 \text{ W}$$

$$\text{或} \quad P=U^2/R=3^2/10=0.9 \text{ W}$$

例 1-2 有一个 220 V、60 W 的灯泡, 接在 220 V 的电源上。试求通过灯泡的电流和灯泡的电阻。若每晚用灯 3 h, 求一个月(按 30 天计)消耗的电能。

解: 由式(1-11)或式(1-12)可得通过灯泡的电流

$$I=P/U=\frac{60}{220} \approx 0.273 \text{ A}$$

由式(1-9)或式(1-11)、式(1-12)可得灯泡的电阻值

$$R=\frac{U}{I}=\frac{220}{0.273} \approx 806 \Omega$$

$$\text{或} \quad R=\frac{P}{I^2}=\frac{60}{0.273^2} \approx 806 \Omega$$

$$\text{或} \quad R=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{60} \approx 806 \Omega$$

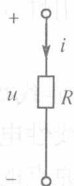


图 1-7 线性电阻元件

若每晚用灯 3 h,一个月消耗的电能由式(1-14)得

$$W = PT = 60 \times 10^{-3} \times 3 \times 30 = 5.4 \text{ kWh}$$

3. 非线性电阻

非线性电阻在电路图中的图形符号如图 1-8 所示。由于伏安关系是一条过原点的曲线,如图 1-6(b)所示,说明它的电压、电流之间不存在正比关系,即电阻不是常数,一般不能用数学式子表示。

由于非线性电阻的阻值不是常数,在分析、计算非线性电路时,一般采用图解法。

图 1-8 非线性电阻元件

二、电容元件

1. 线性电容

电容元件也是一种常用的电路元件,它具有存储和释放电场能量的物理性质。凡是带电导体与电解质存在的场合,都可以用电容元件来描述储存电场能量的物理现象。

若在电容元件两端电压 u 的参考方向给定的情况下,以 q 表示参考正电位极板上的电荷量,则电容元件的电荷量与电压之间的关系是

$$q = Cu \text{ 或 } u = \frac{q}{C} \quad (1-15)$$

式中, C 表示电容元件存储电荷能力大小的物理量,称为电容量,简称电容。当电容元件是线性元件时,电容 C 是不随 u 和 q 改变的常数,称为线性电容。其定义式为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-16)$$

在 SI 中,电容 C 的单位是法拉(F)。由式(1-16)可见,当电容元件两端电压增加 1 V,所需要的电荷量为 1 C 时,则该元件的电容为 1 F。常用的电容单位还有微法(μF)、皮法(pF)等,它们与法拉(F)的关系是 $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$, $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ 。

电容元件也常用符号 C 表示,这样 C 既表示电容元件,又表示其参数(电容量)。线性电容元件在电路中的图形符号如图 1-9 所示,其两端电压 u 和极板上的电荷 q 之间关系如图 1-10 所示。

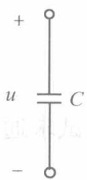


图 1-9 线性电容元件

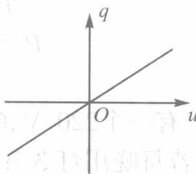


图 1-10 线性电容元件的库伏特性

2. 线性电容元件的电压、电流关系

如图 1-11 所示,电容元件的电压、电流取关联参考方向,设电压、电流为时间函数。当电压 u 变化时,极板上的电荷量 q 也随之变化,于是在电容元件 C 中产生了电流(位移电流),由式(1-2)和式(1-16)得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

式(1-17)称为电容元件的伏安特性(简称 VCR),电流的大小和方向取决于电压对时

间的变化率。当电压增大时, $du/dt > 0$, 则 $i > 0$, $dq/dt > 0$, 极板上的电荷量增加, 电容元件充电; 当电压减小时, $du/dt < 0$, 则 $i < 0$, $dq/dt < 0$, 极板上的电荷量减少, 电容元件放电; 当电压不随时间变化时, $du/dt = 0$, 则 $i = 0$, $dq/dt = 0$, 极板上电荷量不变, 这时电容元件相当于开关断开(开路), 故电容元件有隔断直流的作用。

式(1-17)还可写成

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-18)$$

3. 电容元件储存的能量

在电压、电流取关联参考方向的情况下, 任一瞬间电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-19)$$

在 dt 时间内, 电容元件吸收的能量为

$$dw = p dt = C u du$$

设 $t = 0$ 时, $u = 0$, 则从 0 到 t 时间内, 电容元件吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^u C u du = C \int_0^u u du = \frac{1}{2} C u^2$$

即

$$W = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-20)$$

在式(1-19)中, 若 $p > 0$, 说明电压、电流的实际方向相同, 电容元件在吸收能量; 若 $p < 0$, 说明电压、电流的实际方向相反, 电容元件在释放能量。所以电容元件是储能元件。

例 1-3 若电容元件的电压和电流取关联参考方向, 已知 $u = -40 \sin 100t$ V, 电容存储能量最大值为 8 J, 求电容 C 的值及 $t = \frac{2\pi}{300}$ 时的电流。

解: 电压 u 的最大值为 40 V, 所以

$$\frac{1}{2} C 40^2 = 8$$

$$C = \frac{16}{40^2} = \frac{16}{1600} = 10^{-2} \text{ F} = 0.01 \text{ F}$$

$$i = C \frac{du}{dt} = 0.01 \frac{d(-40 \sin 100t)}{dt} = -0.01 \times 40 \times 100 \cos 100t \text{ A}$$

$$t = \frac{2\pi}{300}, i = -40 \cos \frac{2}{3}\pi = -40 \times \left(-\frac{1}{2}\right) = 20 \text{ A}$$

此时电流的实际方向与参考方向相同, 而电压的实际方向与参考方向相反, 电容此时在释放能量。

三、电感元件

1. 线性电感

电感元件是实际线圈的理想化模型, 它具有储存和释放磁场能量的物理性质。凡是电流及其磁场存在的场合, 总可以用电感元件来描述存储磁场能量的物理现象。

由电磁学知识可知, 当在 N 匝线圈中通以电流 i 时, 便产生了磁通 Φ , 则线圈各匝磁通的总和称为磁链 Ψ , 即

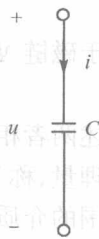


图 1-11 电容元件及电压、电流参考方向

$$\Psi = N\Phi \quad (1-21)$$

由于磁链 Ψ 是由电流 i 产生的,所以 Ψ 是 i 的函数,即

$$\Psi = Li \quad (1-22)$$

上述两者相关联的参考方向应满足右手螺旋定则。式中, L 表示线圈产生磁链能力大小的物理量,称为线圈的电感。电感是线圈的固有参数,它只与线圈的几何尺寸、匝数及线圈所包围的介质种类有关,而与电流无关。当电感元件是线性元件时,介质为非铁磁体,则电感 L 为常数,称为线性电感,其定义式为

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-23)$$

在 SI 中,磁通 Φ 和磁链 Ψ 的单位都是韦伯(Wb),电感 L 的单位是亨利(H)。由式(1-23)可见,当产生 1 Wb 磁链所需电流为 1 A 时,则该电感元件的电感为 1 H。常用的电感单位还有毫亨(mH)、微亨(μ H)等,它们与亨利(H)的关系是 $1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$, $1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$ 。

电感元件也常用符号 L 来表示,这样 L 既表示电感元件,又表示其参数(电感)。线性电感元件在电路中的图形符号如图 1-12 所示,其电流和磁链的关系如图 1-13 所示。

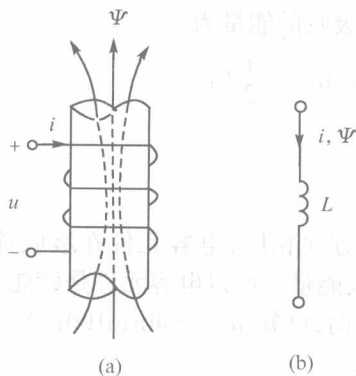


图 1-12 线性电感元件

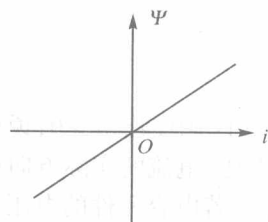


图 1-13 线性电感元件的韦安特性

2. 线性电感元件的电压、电流关系

由电磁学中电磁感应定律可知,当线圈内有电流变化时,就会引起其磁通的变化,从而在线圈内产生感应电动势,其大小和方向仍遵循电磁感应定律。楞次定律的内容此时可写成“感应电动势总是阻碍原电流的变化。”

如图 1-14 所示,线性电感元件的电流、电压取关联参考方向,电动势的参考方向与电压参考方向取一致,且它们均为时间的函数。由楞次定律可知

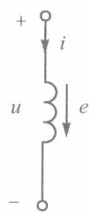


图 1-14 电感元件及各电量的参考方向

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-24)$$

根据图 1-14 所示参考方向有

$$u = -e$$

所以电感元件的电压、电流之间关系为