



21世纪高职系列教材
SHIJI GAOZHI XILIEJIAOCAI

电路基础

主编 / 李 研 主审 / 崔西武

哈尔滨工程大学出版社



21世纪高职系列教材

SHIJI GAOZHI XILIE JIAOCAI

电 路 基 础

主编 / 李 研 副主编 / 周耀辉 蔡新梅 主审 / 崔西武

江苏工业学院图书馆
藏书章

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以线性电路最基本的三部分内容,即电阻电路分析、电路的正弦稳态分析和动态电路分析为主体,介绍基本电路理论及电路的基本分析方法,力求做到概念准确、内容精练、重点突出,同时注重理论联系实际、注重基本思路与方法的介绍。在讲解上,力求做到通俗易懂,便于自学。书中有典型例题,每节有思考题,每章有丰富的习题,以帮助学生掌握和巩固所学知识。

本书可作为高职院校电类专业教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/李妍主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.9

ISBN 978 - 7 - 81073 - 385 - 4

I . 电… II . 李 III . 电路理论 - 高等学校 - 教材
IV . TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 119360 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 15.25
字 数 315 千字
版 次 2007 年 8 月第 1 版
印 次 2007 年 8 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

《电路基础》符合当前我国高职教育课程教学内容与课程体系改革的实际。力图在体现高职培养目标和改革教学指导思想两个方面有所突破。同时妥善地处理了经典内容与现代科学成就的关系,先进性与教学适用性的关系,传授知识与培养学生能力的关系。

本教材具有以下特点。

1. 结合对本课程教学内容和体系改革研究的成果,更新教材体系和内容,使之适应现代科技发展和培养 21 世纪人才的需要。

2. 降低理论深度,拓宽知识面,加强工程应用知识,以适应大多数专业基础课学时减少的趋势。

3. 本书精选例题、练习题;每一节后均附有“思考题”,内容结合实际、题量适度,能起到复习、巩固、拓宽知识和加强能力培养的作用。

4. 我国加入世贸后,各行各业与国际社会接触更为密切,为了满足培养 21 世纪国际型人才的要求,在教材附录中增加了电路中专业词汇的英汉对照表。

全书共分九章,分别为基本电路元件、电路的基本定律、线性电阻电路的分析方法、正弦稳态电路的分析、互感耦合电路、三相电路、非正弦周期电流电路、一阶动态电路的分析、二端口网络。教材内容着眼于电工技术的基础性、应用性和先进性,以电路的基本概念、基本理论和基本分析方法为重点,以这些理论、方法和技术应用为主导,融入电工领域的新技术、新成果,以增强教材的活力和生命力。

本教材由渤海船舶职业学院李妍任主编,周耀辉、蔡新梅任副主编。具体分工如下:李妍编写了第一至第三章,蔡新梅编写了第四至第七章,周耀辉编写了第八章、第九章及附录部分。

尽管我们在探索电路基础教材方面做出了许多努力,但由于作者的水平和教学经验有限,书中内容难免有疏漏之处,恳请各相关教学单位和读者在使用本教材的过程中给予关注,并将意见和建议及时反馈给我们,以便修订时改进。

编 者

2007 年 4 月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本元件	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路的基本物理量	2
第三节 电阻元件	6
第四节 电容元件	13
第五节 电感元件	16
第六节 独立电源	19
第七节 受控电源	22
小 结	23
习 题	24
第二章 电路的等效变换和基本定理	27
第一节 基尔霍夫定律	27
第二节 电阻电路的等效变换	31
第三节 电源的等效变换	37
第四节 叠加定理	40
第五节 替代定理	44
第六节 戴维南定理与诺顿定理	45
小 结	50
习 题	50
第三章 线性电阻电路的分析方法	54
第一节 线性网络方程的独立性	54
第二节 支路分析法	55
第三节 回路电流法	58
第四节 结点电压法	62
小 结	67
习 题	68
第四章 正弦稳态电路的分析	71
第一节 正弦量	71
第二节 正弦量的相量表示及相量运算	74
第三节 电路基本定律及基本元件伏安特性的相量形式	77
第四节 阻抗与导纳	85
第五节 正弦稳态电路的相量图	90
第六节 正弦稳态电路分析	92
第七节 正弦稳态电路的功率及功率因数的提高	95
第八节 串联谐振电路	102
第九节 并联谐振电路	106

小 结	109
习 题	110
第五章 互感耦合电路	115
第一节 磁路的基本知识	115
第二节 铁芯线圈	122
第三节 互感及互感电压	127
第四节 互感线圈的联结及去耦等效电路	130
第五节 含互感的正弦电路的分析	136
第六节 变压器	138
小 结	144
习 题	145
第六章 三相电路	148
第一节 三相电路	148
第二节 对称三相电路的分析与计算	152
第三节 不对称三相电路的分析	157
第四节 三相电路的功率	160
小 结	164
习 题	165
第七章 非正弦周期电流电路	168
第一节 非正弦周期信号及其分析	168
第二节 非正弦周期电路中的有效值、平均值、平均功率	173
第三节 非正弦周期电路的计算	176
第四节 滤波器	179
小 结	181
习 题	182
第八章 一阶动态电路的分析	184
第一节 电路的动态过程与换路定律	184
第二节 一阶电路的零状态响应	187
第三节 一阶电路的零输入响应	191
第四节 一阶电路的全响应	193
第五节 一阶电路的三要素法	195
第六节 一阶电路的阶跃响应	198
第七节 一阶电路的冲激响应	202
第八节 积分电路和微分电路	204
小 结	206
习 题	207

第九章 二端口网络	210
第一节 二端口网络的概念	210
第二节 二端口网络参数方程	211
第三节 二端口网络的等效电路	218
第四节 二端口网络的连接	220
小 结	221
习 题	221
附 录	224
部分习题答案	228

第一章 电路的基本概念和基本元件

第一节 电路和电路模型

一、实际电路

人们在工作 and 生活中时常会遇到一些实际电路。实际电路是为完成某种预期的目的而设计、安装、运行的,它由电气设备按一定方式连接起来而形成的电流通路。例如手电筒就是一个简单的电路,它由电池、开关、灯泡、导线等组成一个电流的通路;又如电力系统、电视机、通信系统、计算机等则是比较复杂的电路,它们由许多的电路元件连接组成。因使用目的和需要的不同,电路的种类很多,作用也各不相同。

作用一是实现电能的传输和转换。在图 1-1 所示的电力系统中,发电机是电源,是供给电能的设备,它可以把热能、水能、原子能等其他形式的能量转换为电能;变压器、输

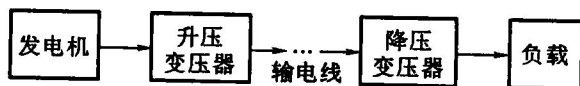


图 1-1 电力系统结构示意图

电线路将电能输送给工厂、农村和千家万户的用电设备;电灯、电动机、电热设备等是负载,是消耗电能的设备,它们把电能转换为光能、机械能、热能等其他形式的能量。

作用二是实现信号的传递和处理。例如电视接收天线接收到的含有声音和图像信息的高频电视信号,通过高频传输线送到电视机中,这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理后,恢复出原来的声音和图像信息,在扬声器发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。这里高频电视信号就是信号源,扬声器和显像管是负载。

综上所述,一个完整的电路应包括电源、传输环节和负载三个部分,是由发生、传送和应用电能(或电信号)的各种部件组成的总体。电源是提供电能或电信号的设备,常指发电机、蓄电池、整流装置、信号发生装置等设备;传输环节用于传输电能和电信号,常指输电线、开关和熔断器等传输、控制和保护装置,或放大器等信号处理电路;负载是使用电能或输出电信号的设备,如日光灯、电动机等用电设备。电压和电流是在电源的作用下产生的,因此电源又称为激励源。由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。有时,根据激励和响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。

实际电路按电路参数可分为“集中参数电路”和“分布参数电路”两大类。当一个实际电路的几何尺寸远小于电路中电磁波的波长时,就称其为集中参数电路,否则就称为分布参数电路。集中参数电路可用有限个理想元件构成其电路模型,电路中的电磁量仅仅是时间的函数。而分布参数电路情况比较复杂,其电磁量不仅是时间的函数,而且还是空间距离的函数。集中参数电路理论是电路的最基本理论,本书讨论的电路都是集中参数电路。

二、理想电路元件与电路模型

实际电路器件在工作时的电磁性质是比较复杂的,绝大多数器件具备多种电磁效应,给

分析问题带来困难。为了使问题得以简化,以便于探讨电路的普遍规律,在分析和研究具体电路时,对实际器件加以理想化,只考虑其中起主要作用的某些电磁属性,而将其他电磁属性忽略。例如,连接在电路中的白炽灯,通电后消耗电能而发光、发热,并在其周围产生磁场(电流周围会产生磁场),但是由于后者的作用微弱,只需考虑灯泡消耗电能的性能,而将其视为电阻元件。

我们将实际电路器件的主要电磁属性进行科学抽象后得到理想电路元件,简称为电路元件。每一种电路元件体现某种基本现象,具有某种确定的电磁性质和精确的数学定义。常用的有电阻元件、电容元件、电感元件、电压源元件和电流源元件等。

电路元件按其 与电路其他部分相连接的端钮数可以分为二端元件与多端元件。二端元件通过两个端钮与电路其他部分连接,多端元件通过三个或三个以上端钮与电路其他部分连接。

由理想电路元件互相连接组成的电路称为电路模型。电路模型是实际电路的抽象和近似,应当通过对电路的物理过程的观察分析而确定一个实际电路用什么样的电路模型表示。模型取得恰当,对电路的分析与计算的结果就与实际情况接近。本书所说的电路均指由理想电路元件构成的电路模型。理想电路元件及其组合虽然与实际电路元件的性能不完全一致,但在一定条件下,工程上允许的近似范围内,实际电路完全可以用理想电路元件组成的电路代替,从而使电路的分析与计算得到简化。

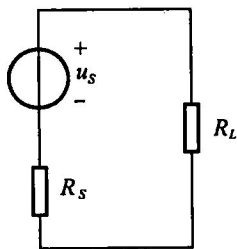


图 1-2 一个简单电路图

用规定的电路符号表示各种理想元件而得到的电路模型图称为电路原理图,简称电路图。电路图只反映电器设备在电磁方面相互联系的实际情况,而不反映它们的几何位置等信息。图 1-2 就是一个按规定符号画出的简单电路图,其中的 u_s 是一种称为电压源(如干电池)的电路元件,电阻元件 R_L 表示一个实际负载(如电灯),两根连接导线消耗电能很少以致可忽略,就用两根无电阻的短路线表示。

第二节 电路的基本物理量

无论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,都体现在电路中电流、电压和电功率的大小和它们之间的关系上,因此在讨论电路的分析和计算方法之前,首先概略地阐述一下这几个基本物理量。

一、电流及其参考方向

1. 电流

带电粒子或电荷在电场力的作用下作定向运动,形成电流。电流的强弱用电流强度来衡量,简称为电流,在数值上等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量,即

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

国际单位制(SI)中,电流的单位是安培(A),简称安。当每秒通过导体横截面的电量为 1 库仑(C)时,电流为 1 A。根据实际需要,电流的单位还可用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等表示,它们和安的关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} \quad 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。在外电场的作用下,正电荷将沿着电场方向运动,而负电荷将逆着电场方向运动,电流的实际方向总是和外电场的方向一致。

一般地,电流是时间的函数,随时间而变化。我们将大小和方向都随时间而变化的电流称为交流电流(AC),用小写字母表示,如图 1-3(a)、(b)所示。

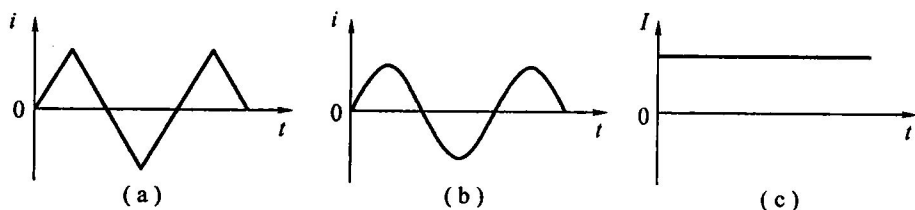


图 1-3 电流波形

如果电流的大小和方向不随时间而变化,称为直流电流(DC),用大写字母表示,如图 1-3(c)所示。对于直流电流,若在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 Q ,则电流为

$$I = \frac{Q}{t}$$

2. 电流的参考方向

当电路比较复杂时,在得出计算结果之前,判断电流的实际方向很困难,而进行电路的分析与计算,又必须确定电流的方向。对于交流电流,电流的方向随时间而改变,无法用一个固定的方向表示,因此我们引入电流的“参考方向”这一概念。

任意规定某一方向作为电流数值

为正的,称为电流的参考方向。它是一个任意假定的电流方向,用箭头表示在电路图上,并标以符号 i 。规定了电流的参考方向以后,电流就变成了代数量而且有正有负,根据电流的参考方向和计算结果中的正、负

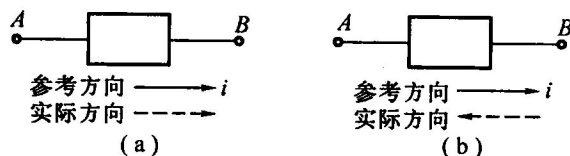


图 1-4 电流的参考方向

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

号,就可以知道电流的实际方向。如果电流 $i > 0$,则电路中电流实际方向与电流参考方向一致,如图 1-4(a)所示;如果电流 $i < 0$,则电路中电流实际方向与电流参考方向相反,如图 1-4(b)所示。需要注意的是,未规定电流的参考方向时,电流的正负没有任何意义。

二、电压及其参考方向

1. 电压

物理学中讲过,电场力把单位正电荷从 A 点经外电路(即电源以外的电路)移到 B 点所做的功,叫做 A, B 两点之间的电压,用字母 u_{AB} 表示,电压是衡量电场力做功能力的一个物理量。

若电场力做功 dW_{AB} ,使电荷 dq 由 A 点移动到 B 点,则 u_{AB} 为

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-2)$$

可以证明电场力做功与路径无关,因此上式定义的电压也与路径无关,仅取决于始末点位置,由此得出结论:电路中任意两点间的电压有确定的数值。由于电场力把正电荷从高电位点移向低电位点,因此规定电压的实际方向是从高电位点指向低电位点,即电位降的方向。

国际单位制(SI)中,电压的单位是伏特(V),简称伏。当电场力把1 C(库仑)的电量从一点移动到另一点所做的功为1 J(焦耳)时,这两点间的电压为1 V。电压常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV),它们和伏的关系是

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

2. 电压的参考方向

和电流一样,电路中各电压的实际方向往往不能事先确定,在分析电路时,必须规定电压的参考方向,只有在已经标定参考方向之后,电压的数值才有正、负之分。一般地,在元件或电路两端用符号“+”、“-”分别标定正负极性,由正极指向负极的方向为电压的参考方向,也可以用箭头表示。如果计算出的电压 $u > 0$,则实际方向与参考方向一致;如果计算出的电压 $u < 0$,则实际方向与参考方向相反。

3. 关联与非关联参考方向

一个元件的电压或电流的参考方向可以独立地任意假定。如果指定流过元件的电流参考方向是从标以电压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;反之称为非关联参考方向。

在分析计算复杂电路时,关于电流和电压的参考方向,还有以下几点说明:

(1) 电流、电压的参考方向可以任意选定。但是一经选定,在电路分析计算过程中就不应再改变;

(2) 今后计算电路,一般要先标出参考方向再进行计算,在电路图中,所有标有方向的电流、电压均可以认为是电流、电压的参考方向,而不是指实际方向;

(3) 在直流电路中,如果已经知道电流、电压的实际方向,则取它们的参考方向与实际方向一致;对于不能确定实际方向的直流电路或交流电路,则一般采用关联参考方向;

(4) 用双下标脚注表示电压的参考方向,例如 u_{AB} 表示电路中A、B两点间电压的参考方向是从A点指向B点,而 u_{BA} 则表示电压的参考方向是从B点指向A点,显然 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

4. 电位

为了便于分析电路,常在电路中任意指定一点作为参考点,假定该点电位是零(用符号“ $\perp$ ”表示),则由电压的定义可以知道,电路中的a点与参考点间的电压即为a点相对于参考点的电位,因此我们可以用电位的高低(大小)来衡量电路中某点电场能量的大小。

电位实质上就是电路中某点相对于参考点的电压,其单位也是伏特(V)。

电路中参考点的位置原则上可以任意指定,参考点不同,各点电位的高低也不同,但是电路中任意两点间的电位差(即电压)与参考点的选择无关。在实际电路中,常以大地或仪器设备的金属机壳(或底板)作为电路的参考点,参考点又常称为接地点。

例 1-1 如图 1-5 所示的电路中,已知 $U_1 = 12 \text{ V}$, $U_2 = -14 \text{ V}$, $U_3 = 8 \text{ V}$,试求 U_{ab} 。

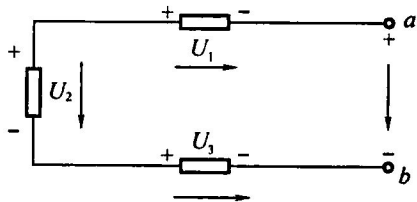


图 1-5

解 标定 a, b 两点间电压的参考方向如图 1-5 所示, 则

$$U_{ab} = -U_1 + U_2 + U_3 = -12 \text{ V} + (-14 \text{ V}) + 8 \text{ V} = -18 \text{ V}$$

U_{ab} 为负值, 表明电压的实际方向由 b 点指向 a 点, 即 b 点是高电位点。

三、电动势

相对于电源外部正负两极间的外电路而言, 通常把电源内部正负两极间的电路称为内电路。在电场力的作用下, 正电荷源源不断地从电源正极经外电路到达负极, 于是正极上的正电荷数量不断减少。如果要维持电流在外电路中流通, 并保持恒定, 就要使移动到电源负极上的正电荷经过电源内部回到电源正极。电源力把单位正电荷从电源负极经电源内部移到电源正极所做的功, 叫做该电源的电动势, 用字母 e 表示。

$$e = \frac{dW_{BA}}{dq} \quad (1-3)$$

式中 dW_{BA} 表示电源力将 dq 的正电荷从 B 移到 A 所做的功。显然电动势与电压有相同的单位伏特(V)。电动势是衡量电源力克服电场力做功能力的物理量, 它把正电荷从低电位点(电源负极)移向高电位点(电源正极), 故电动势的方向是从低电位点指向高电位点, 即电位升的方向。

在电源力的作用下, 电源不断地把其他形式的能量转换为电能。在各种不同的电源中, 产生电源力的原因是不同的, 例如, 在电池中是由于电解液和金属极板之间的化学作用, 在发电机中是由于电磁感应作用, 在热电偶中是由于两种不同金属连接处的热电效应等。

四、电功率和电能

1. 电功率

正电荷从一段电路的高电位端移到低电位端是电场力对正电荷做了功, 该段电路吸收了电能; 正电荷从电路的低电位端移到高电位端是外力克服电场力做了功, 即这段电路将其其他形式的能量转换成电能释放了出来。把电流通过电路时传输或转换电能的速率, 即单位时间内电路吸收或释放的电能称为电功率, 简称为功率, 用符号 p 表示。

设在 dt 时间内电路转换的电能为 dW , 则

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-4a)$$

对式(1-4a)进一步推导可得

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4b)$$

上式表明, 任一瞬时电路的功率等于该瞬时的电压与电流的乘积。对于直流电路, 有

$$P = UI \quad (1-4c)$$

当电压、电流为非关联参考方向时, 式(1-4a)、(1-4b)、(1-4c)应增加一个负号。

在国际单位制(SI)中, 功率的单位是瓦特(W), 简称瓦。常用单位还有千瓦(kW)和毫瓦(mW)。照明灯泡的功率用瓦作单位, 动力设备如电动机则多用千瓦作单位, 而在电子电路中往往用毫瓦作单位。

由于电压与电流均为代数量, 因而功率也可正可负。若 $p > 0$, 则表示元件实际吸收或消耗功率; 若 $p < 0$, 则表示元件实际发出或提供功率。



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,即整个电路的功率是平衡的。

2. 电能

电路在一段时间内吸收的能量称为电能。根据式(1-4a),在 t_0 到 t 时间内,电路所吸收的电能为

$$W = \int_0^t p dt \quad (1-5a)$$

直流时

$$W = P(t - t_0) \quad (1-5b)$$

在国际单位制(SI)中,电能的单位是焦耳(J),它表示 1 W 的用电设备在 1 s 内消耗的电能。电力工程中,电能常用“度”作单位,它是千瓦时(kW·h)的简称,1 度等于功率为 1 kW 的用电设备在 1 小时内消耗的电能,即

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

例 1-2 计算图 1-6 中各元件的功率,指出是吸收还是发出功率。已知电路为直流电路, $U_1 = 4 \text{ V}$, $U_2 = 8 \text{ V}$, $U_3 = 6 \text{ V}$, $I = 2 \text{ A}$ 。

解 在图 1-6 中,元件 1 电压与电流为关联参考方向,由式(1-4c)得

$$P_1 = U_1 I = 4 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 8 \text{ W}$$

$P_1 > 0$,故元件 1 吸收功率。

元件 2 和元件 3 中电压与电流是非关联参考方向,所以得

$$P_2 = -U_2 I = -(-8 \text{ V}) \times 2 \text{ A} = 16 \text{ W}$$

$$P_3 = -U_3 I = -6 \text{ V} \times 2 \text{ A} = -12 \text{ W}$$

$P_2 > 0$,故元件 2 吸收功率; $P_3 < 0$,元件 3 发出功率。

本例中,元件 1 和元件 2 的电压与电流实际方向相同,二者吸收功率;元件 3 的电压与电流实际方向相反,发出功率。由此可见,当电压与电流的实际方向一致时,电路一定是吸收功率的;反之则是发出功率的。电阻元件的电压与电流的实际方向总是一致的,其功率总是正值;电源则不然,它的功率可能是负值,也可能是正值,这说明它可能作为电源提供电能,发出功率;也可能被充电,吸收功率。

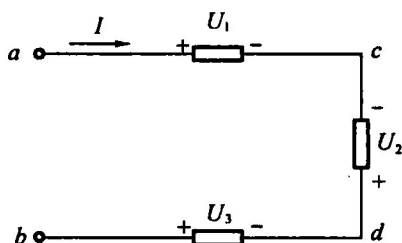


图 1-6

思考题

1-2-1 为什么要规定电流、电压的参考方向,什么是电流与电压的关联参考方向?

1-2-2 在关联参考方向下,某一电路元件上的电压和电流分别为 $u = 12 \text{ V}$, $i = -2 \text{ A}$,求该元件的功率,并说明它是吸收还是发出功率?

1-2-3 在例 1-2 电路中,若 b 为参考点,试求 a, c, d 三点的电位。

第三节 电阻元件

任何一个电路都是由电路元件连接而成的,电路分析的一个主要内容,便是确定电路中

各处电压、电流之间的关系,因此必须认识电路元件的电压和电流的关系。对于一个二端元件,其特性可用端钮电流、端钮间电压(常称为元件电流、元件电压)的关系表示。因为电压与电流在国际单位制(SI)中的单位是 V 和 A,所以常称电压与电流的关系为伏安特性(VCR),在 $u-i$ 坐标平面上,表示元件电压与元件电流关系的曲线称为伏安特性曲线。本章后几节将分别介绍常用的电路元件及其伏安特性。

一、电阻元件

电阻元件是一种常见的、用来反映电能消耗的一种理想的二端元件,在任意时刻元件的电压与电流的关系可以用一条确定的伏安特性曲线描述,并且这条曲线可通过实验获得。

由于耗能元件电压与电流的实际方向总是一致的,即电流流向电压降落的方向,因此当选取电压与电流的方向为关联参考方向时,电阻元件的伏安特性曲线是位于 I、III 象限的曲线,电压与电流呈现某种代数关系。

若电阻元件的电压与电流关系不随时间变动,称为时不变电阻元件;否则称为时变电阻元件。例如电阻式传声器在有语音信号时,就是一个时变电阻,其电压与电流关系随时间发生变化。

若电阻元件的伏安特性曲线是通过原点的直线,则该电阻元件被称为线性电阻元件;否则称为非线性电阻元件。例如白炽灯相当于一个线性电阻元件,二极管是一个非线性电阻元件。

综上所述,电阻元件可以分为四类:线性时变电阻、线性时不变电阻、非线性时变电阻和非线性时不变电阻。图 1-7 给出了时不变电阻元件在线性与非线性两种情况下的伏安特性曲线及电路符号。

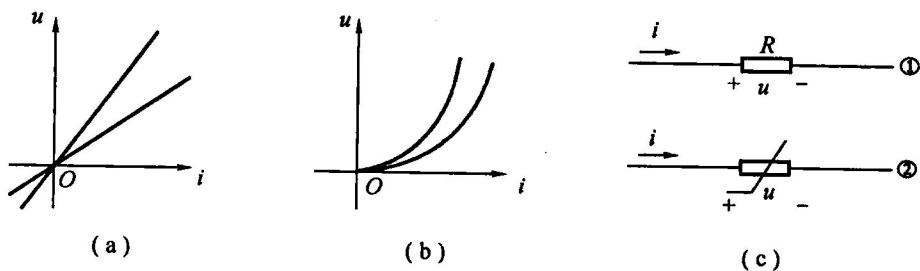


图 1-7 电阻元件的伏安特性曲线和电路符号

(a)线性时不变电阻的伏安特性曲线;(b)非线性时不变电阻的伏安特性曲线

(c)①线性时不变电阻电路符号;②非线性时不变电阻电路符号

二、线性电阻元件

1. 欧姆定律

对于线性电阻元件,由图 1-7(a)可以知道,在关联参考方向下,流过线性电阻元件的电流与电阻两端的电压成正比,若令比例系数为 R ,则表达式为

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

这就是欧姆定律,比例系数 R 是一个反映电路中电能损耗的参数,称为电阻。可见,欧姆定律用于表达一段电阻电路上的电压与电流的关系。若电压与电流为非关联参考方向时,则式(1-6a)应当变为

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

2. 电阻与电导

式(1-6a)中,国际单位制(SI)中电压的单位是伏(V),电流的单位是安(A),电阻的单位是欧姆(Ω),简称欧。当流过电阻的电流是1 A、电阻两端的电压是1 V时,电阻元件的电阻为1 Ω 。常用单位还有千欧(k Ω)或兆欧(M Ω),即

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega \quad 1 \text{ M}\Omega = 10^3 \text{ k}\Omega = 10^6 \Omega$$

实验证明,金属导体的电阻值不仅和导体材料的成分有关,还和导体的几何尺寸及温度有关。一般地,横截面积为 S 、长度为 L 的均匀导体,其电阻

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-7)$$

式中 ρ 为电阻率,单位是欧姆·米($\Omega \cdot \text{m}$)。

导体温度不同时,其电阻值一般不同,可用下式计算

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-8)$$

式中 R_1 是温度为 t_1 时导体的电阻值; R_2 是温度为 t_2 时导体的电阻值; α 是材料的电阻温度系数,即导体温度每升高1 $^{\circ}\text{C}$ 时,其电阻值增大的百分数,单位是每摄氏度($1/^{\circ}\text{C}$)。材料的 α 值愈小,电阻的阻值愈稳定。

为了方便分析,有时利用电导来表征线性电阻元件的特性。电导就是电阻的倒数,用 G 表示,它的单位是西门子(S)。引入电导后,欧姆定律在关联参考方向下还可以写成

$$i = Gu \quad (1-9)$$

3. 实际电阻

常用的导电材料中,铜和铝的电阻率很小,是良导体,应用最为广泛。铝和铜相比,导电性能虽略差,但铝资源丰富,价格便宜,质量轻,因而目前强电系统(输电线、变压器和交流电动机等)大量采用铝线,以铝代铜。康铜和锰铜的电阻率大,电阻温度系数小,温度稳定性比铜和铝高800倍,常用来制造精密电阻(线绕电阻、金属膜电阻等)及直流电工仪表中的分压器、分流器(一般只用锰铜制作)等。镍铬合金和铝铬合金不但电阻率高,并且能长期承受高温,常用于制造各种电热器的发热电阻丝。

实际中使用的电阻器、白炽灯和电炉等器件,伏安特性或多或少是非线性的,但在一定条件下,这些器件(特别是像金属膜电阻器、线性电阻器)的伏安特性曲线近似为一条直线,因此可以用线性电阻元件作为电路模型,而不至于引起明显的偏差。实际中碳膜、金属膜、线绕和敏感电阻器使用较多。

国家标准规定的电阻器的图形符号如图1-8所示。



图1-8 电阻器的图形符号

(a)固定电阻器;(b)敏感电阻器;(c)微调电阻器;(d)电位器

电阻器的主要参数有标称阻值、误差值和额定功率等。表1-1给出了电阻器标称阻值系列。

表 1-1 常用电阻器标称阻值系列

误差	系列代号	电阻器标称系列值
$\pm 20\%$	E6	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8
$\pm 10\%$	E12	1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.4 2.7 3.3 3.6 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2
$\pm 5\%$	E24	1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1

电阻器的标注采用直接标注法、文字符号标注法和色彩环绕法三种方法。直接标注法是在电阻器表面用数字、单位符号和百分数标出电阻器的阻值和允许误差,如图 1-9(a)所示。文字符号标注法是用数字和单位符号按一定规律组合表示阻值(如 5Ω 表示 5.1Ω , $4k3$ 表示 $4.3 k\Omega$),允许误差用字母表示(J 为 $\pm 5\%$, K 为 $\pm 10\%$, M 为 $\pm 20\%$),如图 1-9(b)所示。色彩环绕法使用颜色环表示阻值及允许误差,这种标注方法醒目清晰,不易褪色,安装、维修、调试都非常方便。一般地,普通电阻器采用四色环法,精密电阻器采用五色环法。棕色、红色、橙色、黄色、绿色、蓝色、紫色、灰色、白色、黑色分别代表数字 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0, 如图 1-9(c)所示。

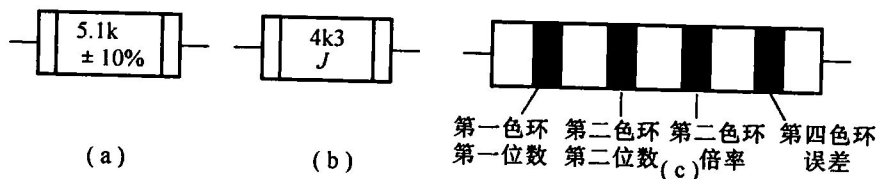


图 1-9 电阻器阻值标注法

(a)直接标注法;(b)文字符号标注法

4. 功率

在关联参考方向下,线性电阻元件吸收(消耗)的功率可由式(1-4b)和式(1-6a)计算得到

$$p = ui = Ri^2 = i^2 G \quad (1-10a)$$

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-10b)$$

可见,当电阻值一定时,电阻消耗的功率与电流(或电压)的平方成正比。电阻元件吸收的电能为

$$W = \int_0^t Ri^2 dt = \int_0^t \frac{u^2}{R} dt \quad (1-11a)$$

在直流情况下

$$W = RI^2(t - t_0) \quad (1-11b)$$

三、非线性电阻元件

非线性电阻元件,当流过不同电流或加上不同电压时,就有不同的电阻值,它的电压与

电流之比不是常数,伏安特性曲线不是直线。普通的二极管就是一个非线性时不变电阻元件,其电阻不仅和电压、电流的大小有关,还和电压、电流的方向有关,其正向电阻和反向电阻相差十分悬殊,如图1-7(b)所示。非线性电阻元件的伏安特性曲线一般通过实验逐点测出数据后描绘,或用图示仪直接显示。分析含有非线性电阻元件的电路,可采用图解法或实验方法。

在本书中,如无特别声明,电阻元件指线性电阻元件,简称为电阻。

四、电阻元件的串并联

1. 串联等效电阻及分压公式

如果电路中有两个或更多个电阻首尾依次顺序相连,而且中间无任何分支,这样的连接方式就称为电阻的串联。串联电路中,各元件(电阻)中通过同一电流,其端电压是各元件电压之和。图1-10(a)是两个电阻串联的电路,对电阻串联电路应用欧姆定律式(1-6a),得

$$u_1 = iR_1, u_2 = iR_2$$

则

$$u = u_1 + u_2 = iR_1 + iR_2 = i(R_1 + R_2) = iR$$

其中

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-12a)$$

上式中的 R 称作串联电路的等效电阻,图1-10(a)中两个串联电阻可用图1-10(b)中的一个等效电阻来代替,它等于该电路在关联参考方向下,端电压与端电流的比值,此比值等于两个串联电阻阻值之和。同理可得到 n 个电阻串联的等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-12b)$$

式(1-12b)说明线性电阻串联的等效电阻等于各元件的电阻之和,也等于该电路在关联参考方向下,端电压与电流的比值。由等效电阻的定义可知,第 k 个元件的端电压为

$$u_k = iR_k = R_k \frac{u}{R} = \frac{R_k}{R} u \quad (1-13)$$

式(1-13)说明各电阻上的电压是按电阻的大小进行分配的,称为电阻串联电路的分压公式。它说明第 k 个电阻上分配到的电压取决于这个比值,这个比值称为分压比。尤其要说明的是,当其中某个电阻与其他电阻相比很小时,这个小电阻两端的电压也较其他电阻上的电压低很多,因此在工程估算中,小电阻的分压作用就可以忽略不计。

利用电路的分压原理,可以制成多量程电压表。很多电子仪器和设备中,也常采用电阻串联电路从同一电源上获取不同的电压。

例1-3 弧光灯的额定电压为40V,正常工作时通过的电流为5A,因为日用照明电路电源的额定电压是220V,它不能直接接入电路。为此,利用电阻串联电路的分压原理,选取一个电阻 R 与弧光灯串联,使弧光灯上的电压恰好为额定电压40V。

解 这时两端的电压应为

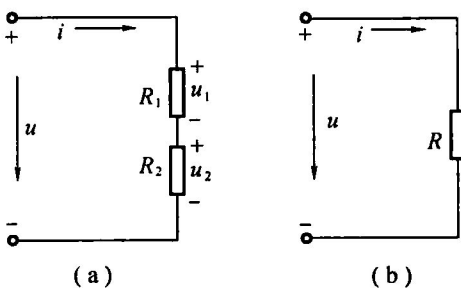


图1-10 两个电阻串联