



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANGONG JICHU

电工基础

王世才 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

本书在内容选择上，以满足学生学习后续课程、培养必要的综合职业能力为依据，选择必需的、实用的内容；在内容安排上，按照本学科知识的演进顺序和逻辑顺序，力争达到组织合理、层次分明、条理清晰；在内容表现形式上，注重于把握深度，避免繁琐的数学推导和深奥的理论论证，突出基本概念、基本原理和基本方法；在语言表达方面，力求概念准确、文字严谨，同时努力做到深入浅出、通俗易懂、简洁流畅。本书阐述了电路的基本理论及磁场、磁路的基本概念。全书共分八章，主要内容为电路的基本概念和基本定律、电阻性电路的分析、单相正弦交流电路、三相正弦交流电路、含互感元件的电路、非正弦周期电流电路、动态电路的暂态分析和磁路与交流铁心线圈。每章末均附有小结和习题。

本书可作为高职高专、成人高校的电力技术类、自动化类、机械类等工科专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电工基础/王世才编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5827 - 7

I. 电... II. 王... III. 电工学—高等学校：技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 088733 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 349 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是在编者多年讲授的《电工基础》讲稿的基础上,几经修改和完善而成的。在编写过程中,编者的指导思想是:从高职高专学生的知识基础和能力结构的特点出发,以便于教师讲授和学生学习为宗旨,力求写出本教材的特色。编者力图使本教材具有下述特点:

(1) 选材恰当,安排合理。在教材内容的选择上,以培养目标为出发点,以满足学生学习后续课程及培养必要的职业能力的需要为依据,以教学学时为约束条件,选择必需的、实用的教材内容;在教材内容的安排上,从便于教学出发,按照本学科知识的演进顺序和逻辑顺序,对教材内容进行合理地安排。书中每章末附有小结和习题。小结完整、概括地归纳、总结了本章内容,描绘出本章知识的框架,引导学生认清知识的经纬。习题具有明确的针对性,为了使學生能够深刻地理解书中的基本概念,习题中选编了一定量的选择题。

(2) 层次分明,条理清晰。在内容的表现形式上,编者力求达到重点突出、层次分明、条理清晰。书中对每一节的内容都进行了明确的层次划分,每一部分都编写了简明、贴切的标题;每一段分析讨论的结果都有明确的结论;对于每一种分析方法,书中都总结出简明扼要的步骤。

(3) 深入浅出,简洁流畅。在教材内容的处理上,注重于把握深度,力求简化,尽量避免高深或繁琐的数学推导和深奥的理论论证,突出基本概念、基本原理和基本方法。对于一些定理、定律及公式,书中只给出其内容或结果,不作证明或推导,意在突出定理、定律及公式的应用。对于学生易于混淆的概念,对于一些较难理解的概念和方法,注意选择学生易于接受的表现方式来阐释,尽量应用实例加以解释和说明。在文字表述方面,力求概念准确、文字严谨,同时努力做到深入浅出、通俗易懂、简明扼要。

书中用楷体排印了部分内容。对于这部分内容,教师在讲授时,可根据专业的需要、学时的多少、学生的实际水平等决定取舍;有些内容可以让学生自学,不必全在课堂上讲授。考虑到知识的内在联系和演进顺序,本书中第八章的内容可以提前讲授,其中第一节“磁场的基本物理量”可放在第一章的第五节“电感元件”之前讲授。若该课程分两学期讲授,考虑到与《电机学》等后续课程的配合问题,也可将第八章的其余内容提前讲授。

本书由安徽电气工程职业技术学院王世才编写,由哈尔滨电力职业技术学院崔海文、李兆民主审。由于编者的学识水平所限,书中疏漏、错误和不妥之处恐所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2007年6月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路及电路模型	1
第二节 电路的物理量	3
第三节 电阻元件	9
第四节 电容元件	11
第五节 电感元件	18
第六节 电压源和电流源	22
第七节 受控电源	25
第八节 基尔霍夫定律	27
本章小结	30
习题	32
第二章 电阻性电路的分析	36
第一节 电路的等效变换	36
第二节 电阻的串联和并联	37
第三节 电阻的星形连接与三角形连接的等效变换	41
第四节 实际电源的两种模型及其等效变换	43
第五节 支路电流法	45
第六节 网孔电流法	49
第七节 节点电压法	53
第八节 叠加定理	58
第九节 戴维南定理和诺顿定理	61
本章小结	66
习题	67
第三章 单相正弦交流电路	72
第一节 正弦交流电的基本概念	72
第二节 正弦量的相量表示法	75
第三节 基尔霍夫定律的相量形式	78
第四节 正弦交流电路中的电阻元件	80
第五节 正弦交流电路中的电感元件	82
第六节 正弦交流电路中的电容元件	84
第七节 电阻、电感和电容元件串联的正弦交流电路	87
第八节 复阻抗和复导纳	89
第九节 阻抗的串联和并联	94

第十节 正弦交流电路的功率	97
第十一节 功率因数的提高	100
第十二节 正弦交流电路中的谐振	102
本章小结	105
习题	108
第四章 三相正弦交流电路	113
第一节 对称三相正弦电压	113
第二节 三相电源和负载的连接	115
第三节 三相电路中的电压和电流	117
第四节 对称三相电路的计算	122
第五节 不对称三相电路的计算示例	127
第六节 三相电路的功率	130
第七节 不对称三相电压和电流的对称分量	132
本章小结	135
习题	137
第五章 含有互感元件的电路	140
第一节 互感和互感电压	140
第二节 互感元件的串联和并联	146
第三节 具有互感元件电路的计算	149
本章小结	152
习题	153
第六章 非正弦周期电流电路	156
第一节 非正弦周期信号	156
第二节 非正弦周期函数的分解	157
第三节 非正弦周期量的有效值、平均值及非正弦周期电流电路的平均功率	161
第四节 非正弦周期电流电路的计算	163
本章小结	165
习题	166
第七章 动态电路的暂态分析	168
第一节 换路定律与初始值的计算	168
第二节 一阶电路的零输入响应	172
第三节 一阶电路的零状态响应	179
第四节 一阶电路的全响应	185
第五节 一阶电路的三要素法	187
第六节 RLC 串联电路的零输入响应	190
本章小结	196
习题	198
第八章 磁路与交流铁心线圈	202
第一节 磁场的基本物理量	202

第二节 铁磁性物质的磁化	205
第三节 磁路与磁路定律	210
第四节 交流铁心线圈	212
本章小结	219
习题	221
参考文献	223

第一章 电路的基本概念和基本定律

第一节 电路及电路模型

一、电路的组成和作用

电路是由若干电气设备或器件按照一定方式连接起来而构成的电流通路。电路广泛存在于现代社会的各个领域。电路的结构形式多种多样,它所完成的任务也各不相同。就其功能而言,电路大体上可分为两类:①传输和转换电能的电路;②传递和处理信号的电路。

用以传输和转换电能的电路由电源、负载和中间环节三个部分组成。电源是提供电能的设备,它将其其他形式的能量转换为电能;负载是取用电能的设备,它将电能转换为其他形式的能量;中间环节是连接于电源和负载之间的部分,它起着传输和分配电能等作用。

电力系统就是这一类电路最典型的例子。图 1-1 所示为一个简单电力系统的示意图。电力系统中的发电机是电源,它向系统提供电能,它将汽轮机或水轮机供给它的机械能转换为电能。系统中的电灯、电动机等用电设备为负载,它们从系统中吸取电能,电灯和电动机分别将电能转换为光能和机械能。系统中的输电线路、变压器和开关(图中未画出)等设备为中间环节,它们起传输、分配、控制电能的作用。

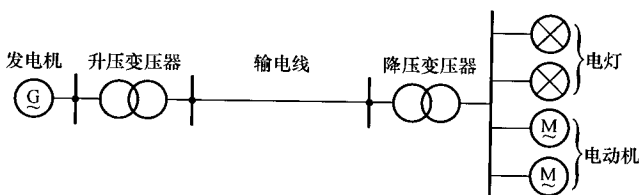


图 1-1 简单电力系统的示意图

传递和处理信号的电路由信号源、负载和中间环节三个部分组成。信号源是提供电信号的设备,它将其其他形式的信号转换为电信号;负载是接受和转换电信号的设备,它可以把电信号转换为其他形式的信号;中间环节是连接于信号源与负载之间,用以传递和处理电信号的设备。广播电视系统、通信系统、控制系统及计算机中的电路,大都是以传递和处理信号为主要目的而设置的。下面以有线电视系统为例来说明这一类电路的组成。有线电视系统主要由接收天线、放大器、传输线路、电视机等设备组成。有线电视接收站中的天线从空间接收由卫星或电视台发射出来的载有电视信号的电磁波,经过放大器放大处理后,由传输线路传送到各用户的电视机中。在电视机中,通过调谐、变频、放大、检波等环节进行一系列加工处理,最后将处理后的视频信号和音频信号分别送到显像管和扬声器。显像管将视频信号还原成图像,扬声器将音频信号还原成伴音,这样便产生了有声有色、声像并茂的电视节目。有线电视系统中的天线对于系统内的电路而言就是信号源,它为系统内电路提供电信号。电视机的显像管和扬声器就是负载,它们接受电路提供的电信号,并把它转换为光信号和音响信号。有线电视系统中接于天线与显像管、扬声器之间的各环节的电路单元及开关等器件都是中间环节。

二、电路模型

上面所说的电路是实际电路，它是由实际的电气设备或器件组成的。电路理论研究的电路是由实际电路抽象出来的理想化的电路模型，也就是由理想的电路元件按照特定方式相互连接而组成的电路。理想电路元件是具有某种确定的电磁性质，其特点能够用数学的手段来精确定义的基本模型。理想电路元件简称电路元件。理想电路元件是人们为了模拟实际电路而构想出来的理想化的基本构造单元。理想电路元件的建立渊源于对实际电路器件的分析和认识。例如，一个白炽灯通有电流时，它要消耗电能，使之变为光能及热能，这表明它具有电阻性；同时其中还会产生磁场，储存磁场能量，这说明它也具有电感性；严格地说，其中还将产生电场，储存电场能量，也就是说，它还具有电容性。但是，在通常情况下，白炽灯的电感和电容都很小，可以忽略不计。于是可以认为，白炽灯是一个具有单一电阻性的电路元件。人们正是根据白炽灯这类器件的电阻性给出了电阻元件的定义，建立了电阻元件的概念。同样，一个电感线圈在工作状态下，也将同时具有电阻性、电感性和电容性。如果在某一工作条件下其电阻和电容可以忽略，则可以认为电感线圈就是一个仅具有电感性的电路元件。于是，人们根据电感线圈的电感性建立了电感元件的概念。如此等等，正是基于对于电阻器、电感线圈、电容器、发电机、电流发生器等实际电路器件或设备的分析和认识，才建立了电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源等理想电路元件的基本概念。

在一定的工作状态下工作的实际电路都可以用一个由理想电路元件组成的电路来模拟。例如，图 1-2 (a) 所示电路是一个由干电池、开关、导线和小灯泡连接起来而构成的实际电路。我们将图 1-2 (a) 所示电路中的干电池用理想电源 U_S 与电阻元件 R_S 的串联组合来模拟，将小灯泡、连接导线（设导线电阻为零）、实际开关分别用电阻元件 R 、理想导线、理想开关来模拟，于是，就得到了一个由理想电路元件组成的电路，如图 1-2 (b) 所示。图 1-2 (b) 所示电路就是图 1-2 (a) 所示实际电路的电路模型。由以上分析可知，用理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的电气设备和器件，从而得到一个由理想电路元件组成的电路，这种由理想电路元件所组成的电路，称为对应的实际电路的电路模型。

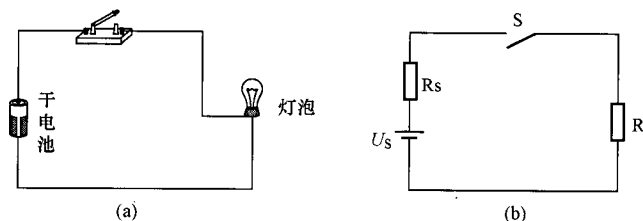


图 1-2 实际电路与电路模型

(a) 实际电路；(b) 电路模型

用理想电路元件或它们的组合模拟实际电路中的电气设备或器件，就是建立电气设备或器件的物理模型，简称为建模。建模过程是对实际电气设备或器件的抽象和概括的过程。模型是对一定的工作条件和精确度要求而言的，同样一个设备或器件，在不同的工作条件下可能采用不同的模型；在工作条件相同而精确度要求不同的情况下，所采用的模型也可能不同，这是需要注意的问题。

第二节 电路的物理量

用以描述电路性状的物理量有电压、电流、电动势、电功率、电能、电荷和磁链等。本节只讨论前五个物理量。

一、电压和电位

1. 电压的定义

处于电场中的电荷要受到电场力的作用，当电荷在电场中运动时，电场力要对电荷做功。单位正电荷在电场中从 a 点移到 b 点时电场力所作的功，称为 a、b 两点间的电压。例如，在给定点 P 处有一正电荷 q_0 ，如图 1-3 所示。设电量为 dq 的正电荷在 q_0 的电场中从 a 点经任意路径 l 移到 b 点时，电场力对它所作的功为 $d\omega_{ab}$ ，则 a、b 两点间的电压为

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

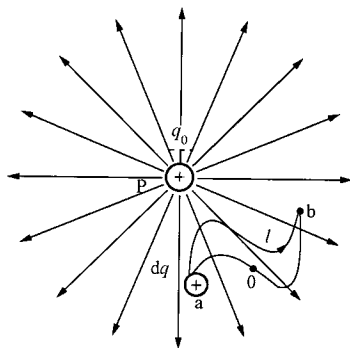


图 1-3 电压与电位

在国际单位制中，电压的单位为伏特，简称伏，用 V 表示；还可以在 V（伏）的前面加国际单位制词头，构成十进制倍数和分数单位，如 kV（千伏）、mV（毫伏）、 μ V（微伏）等。

2. 电位的定义

在电场中任选一点作为参考点，电场中某点与参考点之间的电压称为该点的电位。也就是说，电场中某一点的电位等于单位正电荷从该点移到参考点时电场力所作的功。例如，在图 1-3 中，若选取 0 点作为参考点，用 v_a 表示 a 点的电位，则有

$$v_a = u_{a0} = \frac{d\omega_{a0}}{dq} \quad (1-2)$$

式中， $d\omega_{a0}$ 为正电荷 dq 从 a 点移到 0 点时电场力对它所作的功。电位的单位与电压相同。

根据电位的定义可确定，参考点的电位为零。可见，参考点是人为规定的零电位点，也就是说，人们规定电荷在参考点处所具有的电位能为零。在参考点选定之后，电场中某点的电位就是单位正电荷在该点处所具有的电位能。参考点的选择，原则上是任意的，而在实际工作中，参考点的选择是根据处理问题的需要而定的。电位的大小决定于电场的性质、给定的位置及参考点的选择。参考点选择不同，电场中各点的电位将有不同的数值。所以说，电位是一个相对量。

3. 电压与电位的关系

当电量为 dq 的正电荷从 a 点经参考点 0 移到 b 点（如图 1-3 所示）时，电场力所作的功为

$$d\omega_{ab} = d\omega_{a0} + d\omega_{0b} = d\omega_{a0} - d\omega_{b0}$$

根据电压的定义可确定，a、b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{d\omega_{ab}}{dq} = \frac{d\omega_{a0}}{dq} - \frac{d\omega_{b0}}{dq} = v_a - v_b \quad (1-3)$$

可见，电场中任意两点间的电压等于这两点的电位之差，故电压又称电位差。

两点间的电压的大小取决于电场的性质及这两点在电场中的位置，而与参考点的选择无关。

4. 电压的实际方向和参考方向

电荷在电场中运动时，电场力可能作正功，也可能作负功，这取决于电场和电荷的性质。

当 $v_a > v_b$ 时， $u_{ab} > 0$ ，正电荷从 a 点移至 b 点的过程中，电场力作正功；当 $v_a < v_b$ 时， $u_{ab} < 0$ ，正电荷从 a 点移至 b 点的过程中，电场力作负功。可见，电压是具有正负之分的代数量，电压的正负表明了电场力作功的正负及电压所对应的两点电位的高低。电压是一个标量，而不是一个矢量。严格地说，电压是没有方向的。但是，为了简便地确定电压数值的正负，确切地表达电压数值的正负的物理意义，以便于分析和计算，人们给电压规定了方向。习惯上规定，两点间电压的方向为从高电位点指向低电位点。换句话说，如果正电荷从 a 点移动到 b 点时电场力作正功，则 a、b 两点间电压的方向就是从 a 点指向 b 点的方向。电压的方向可用“+”、“-”极性来表示。若两点之间的电压不等于零，则表明这两点电位不相等。我们将高电位点称为电压的正极，标以“+”号；将低电位点称为电压的负极，标以“-”号。电压的方向就是从“+”极指向“-”极的方向。例如，在图 1-4 中，电源两端的极性是 a 点为正极，b 点为负极，它表示电源两端电压的方向是从 a 点指向 b 点。电压的方向也可用箭头来表示，箭头的指向应从高电位点指向低电位点，例如，图 1-4 中电阻 R 旁的虚线箭头就是用以表示电阻两端电压的方向的。

对于较为复杂的电路来说，未经计算，往往难以判断出其中电压的实际方向。对于交流电路而言，其中电压的实际方向是随时间变化的，因而电压的实际方向往往无法在电路图上确切地标出。但是，分析计算电路是以已知电压、电流等物理量的方向为前提的。没有方向无法确定电路中的物理量之间的关系，无法建立描述电路性状的方程，因而也就无法分析计算。为此人们引入了参考方向这一概念。为了分析计算电路的方便，人为地给电压、电流、电动势等物理量选定一个方向，并约定：当物理量的实际方向与所选定的方向相同时，其值为正；当物理量的实际方向与所选定的方向相反时，其值为负。这个人为选定的方向称为物理量的参考方向。

电压参考方向的表示方法有三种：

(1) 用“+”、“-”极性表示。表示电压参考方向的极性称为参考极性。参考极性是人为假定的极性，它与电压的真实极性无关；“+”极表示假定的高电位点，“-”极表示假定的低电位点。电压的参考方向是从参考极性的“+”极指向“-”极。例如，图 1-4 中电阻 R 两端的“+”、“-”号就是用以表示电压 U 的参考方向的参考极性。

(2) 用箭头表示。箭头指向是从参考极性的“+”极指向“-”极。例如，图 1-4 中电阻 R 旁的两实线箭头分别表示电压 U' 和 U'' 的参考方向。

(3) 用双下标表示。例如， U_{ab} 表示电压的参考方向是从 a 指向 b。

在理解“参考方向”这一概念时，应注意以下两点：

(1) 物理量的实际方向是确定的、客观存在的，而参考方向是任意选定的，它本身并不反映电路中的真实物理状况；

(2) 物理量数值的正负及表示若干物理量之间关系的方程式都是相对一定的参考方向而言的，脱离参考方向，它们也就失去了意义。

在图 1-4 所示电路中，电源电压的数值及真实极性是已知的。根据电源电压的数值和

真实极性可以确定电阻 R 两端电压的绝对值为 3V ，其实际方向如图中虚线箭头所示。若设电阻 R 两端的电压为 U' ，选定其参考方向与实际方向相同，则 $U' = 3\text{V}$ ；若设电阻 R 两端的电压为 U'' ，选定其参考方向与实际方向相反，则 $U'' = -3\text{V}$ 。可见，参考方向选择不同，物理量数值的正负符号也不同。为了确定图 1-4 所示电路中电阻 R 上的电压与电流之间的关系，必须选择电流的参考方向。若设电流为 I ，选择其参考方向如图中箭头所示，则有 $U' = RI$ ， $U'' = -RI$ 。可见，参考方向选择不同，表示物理量之间关系的方程式将不同。

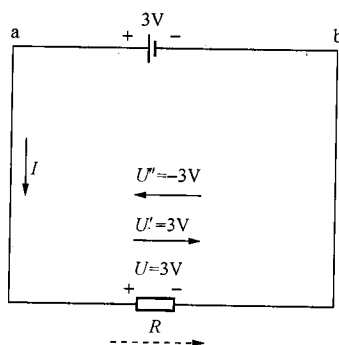


图 1-4 电压的参考方向

二、电流

1. 电流的含义

电流是指电荷有规则的定向运动。电荷定向运动是电场作用的结果。我们利用图 1-5

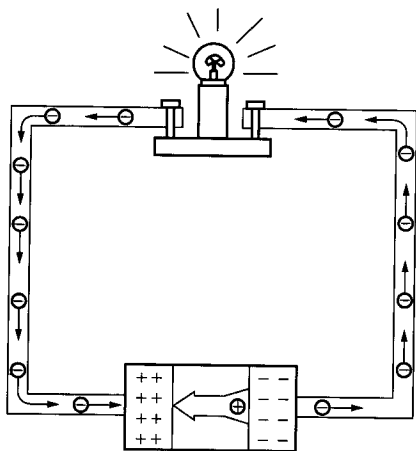


图 1-5 电流的产生

来说明产生电流的物理过程。电源内部存在着一种非静电力，通常称为电源力，它能够使电源内部的正、负电荷分离，使之聚积于电源两端。聚积于电源两端

的正负电荷在其周围空间建立电场，使电源两端产生电压。当我们用导线将负载（图中的灯泡）与电源连接起来构成通路时，金属导体中的自由电子及电源负极上的负电荷在电场力的作用下，向电源正极作定向运动，因而在电路中形成电流。到达电源正极的负电荷将与聚积于电源正极的正电荷中和。可以想象，如果仅有电场力的作用，如此下去，电源两极上的电荷将逐渐减少，电源两端的电压及导体中的电流也都将逐渐减小，直至等于零。然而，事实并非如此，因为电源内部的非静电力能够克服电场力的作用，不断地

将电源负极的正电荷经电源内部推向电源的正极，使两极上的电荷不断地得到补充，从而使电源两极的电荷维持恒定。因此，电路中能够形成持续不断的电流。

由以上分析可知，产生持续的电流（指传导电流）的条件有两个：①存在由导体构成的闭合回路；②电路中存在电源（超导体例外）。

电流的强弱用电流强度来描述。单位时间内通过导体任一横截面的电量，称为电流强度，简称电流，用 i 表示。若在 dt 时间内，通过导体任一横截面的电量为 dq （如图 1-6 所示），则电流强度为

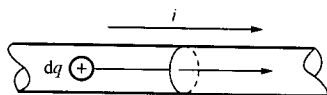


图 1-6 电流强度

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-4)$$

由以上叙述可知，“电流”这一词具有两种不同的含义，它既可以表示“电荷定向运动”这种物理现象，又可表示“电流强度”这一物理量。因此，电流的具体含义需要根据具体语境来确定。

在国际单位制中, 电流的单位为安培, 简称安, 用 A 表示; 也可以在 A (安) 的前面加国际单位制词头, 构成十进制倍数和分数单位, 如 kA (千安)、mA (毫安)、 μ A (微安) 等。

2. 电流的实际方向和参考方向

由电流的定义可知, 电流也是一个标量。严格地说, 电流是没有方向的。在电路中, 形成电流的电荷通过任意电路元件时, 存在两种可能的运动方向; 形成电流的运动电荷可能是正电荷, 也可能是负电荷, 或两者兼有。在分析计算电路时, 需要明确形成电流的具体情况。为了确切地描述电流形成的情况, 人们给电流规定了方向。习惯上规定, 正电荷定向运动的方向为电流的方向。因为负电荷沿某一方向运动与等量正电荷反方向运动所产生的电磁效应相同 (霍尔效应例外), 所以规定, 负电荷定向运动所形成的电流的方向与负电荷定向运动的方向相反。根据上述规定及电源和负载的特性可确定, 在直流电路中, 负载处的电流总是从高电位处指向低电位处, 而电源内部的电流方向总是从低电位端指向高电位端。电流方向可以用箭头来表示, 如图 1-7 中虚线箭头就是用以表示导体中电流方向的。

为了确定电流数值的正负, 并确切地描述正负号所具有的意义, 为了建立电路方程, 以便分析计算电路, 需要选定电流的参考方向。电流参考方向的表示方法有两种:

(1) 用箭头表示。例如, 图 1-7 中实线箭头表示电流 I 的参考方向。

(2) 用双下标表示。例如, I_{ab} 表示电流参考方向是从 a 点指向 b 点, I_{ba} 表示电流参考方向是从 b 点指向 a 点, 这两者之间的关系为 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

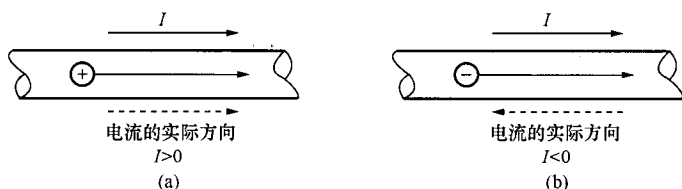


图 1-7 电流的参考方向
(a) 电流为正值; (b) 电流为负值

由参考方向的定义可知, 电流数值的正负取决于参考方向的选择, 当电流的实际方向与其参考方向一致时, 电流为正值 [如图 1-7 (a) 所示]; 当电流的实际方向与其参考方向相反时, 电流为负值 [如图 1-7 (b) 所示]。反过来, 电流数值的正负

反映着电流的实际方向与其参考方向之间的关系。若电流为正值, 则表明电流的实际方向与参考方向相同; 若电流为负值, 则表明电流的实际方向与其参考方向相反。

3. 关联参考方向和非关联参考方向

具有两个引出端钮的电路称为二端电路, 也称二端网络。二端网络的两个引出端钮构成一个端口, 故二端网络又称一端网络。网络两引出端钮之间的电压称为端口电压; 流经网络引出端钮的电流称为端口电流。对于一个二端网络来说, 其电压和电流的参考方向之间没有相互依赖和相互约束的关系, 因而它们可以独立地、任意地选定。如果电流的参考方向是从电压的参考极性的正极指向负极, 即两者参考方向一致, 则把这种电压和电流的参考方向称为关联参考方向, 如图 1-8 (a) 所示; 如果电压和电流的参考方向不一

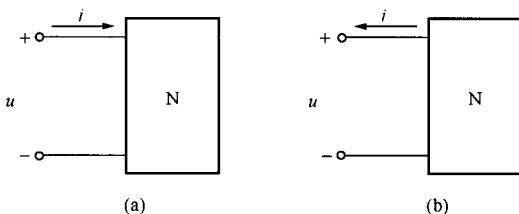


图 1-8 关联参考方向与非关联参考方向
(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

致, 则称为非关联参考方向, 如图 1-8 (b) 所示。

三、电动势

1. 电动势的定义

我们知道, 电源是提供电能的设备, 电源提供电能是通过电源内部的非静电力对运动电荷做功来实现的。从这个意义上讲, 电源就是提供非静电力的装置。在工作状态下, 在电源内部, 正电荷在非静电力的推动下从电源的负极移至电源的正极, 在这个过程中, 非静电力克服电场力做功, 从而将其他形式的能量转变为电能。电源的类型不同, 电源内部所形成的非静电力的性质也不同。在干电池、蓄电池中非静电力就是化学作用; 在光电池中非静电力就是光电作用; 在普通的发电机中非静电力就是电磁感应作用。

将单位正电荷从电源负极经电源内部移到电源正极时非静电力所作的功, 称为电源的电动势。若电源内部的非静电力将电量为 dq 的正电荷从电源负极经电源内部移到正极所作的功为 $d\omega$, 则该电源的电动势 e 可表示为

$$e = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-5)$$

电动势的单位和电压的单位相同。

2. 电动势的实际方向和参考方向

根据定义可知, 电动势也是一个标量。为了分析计算的方便, 人们也给电动势规定了方向。习惯上规定: 电动势的方向为在电源内部自电源的负极指向正极, 即电动势的方向为在电源内部由低电位端指向高电位端。

为了便于分析和计算, 需要选定电动势的参考方向。电动势的参考方向有三种表示方法:

(1) 用参考极性表示。如图 1-9

(a) 所示, 参考极性的“+”极表示假定的高电位端, “-”极表示假定的低电位端。

(2) 用箭头表示。如图 1-9 (b) 所示, 箭头指向是从参考极性的“-”极指向“+”极。

(3) 用双下标表示。如图 1-9 (c)

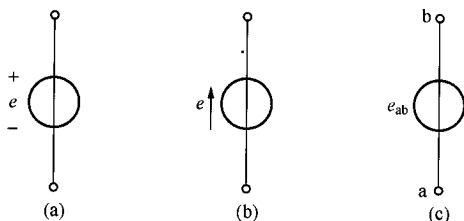


图 1-9 电动势参考方向的表示方法

(a) 用参考极性表示; (b) 用箭头表示; (c) 用双下标表示

所示, e_{ab} 表示电动势的参考方向是从 a 点指向 b 点。

如同电压、电流一样, 电动势也是一个具有正负之分的代数量。电动势为正值, 表明电动势的实际方向与参考方向一致; 电动势为负值, 表明电动势的实际方向与参考方向相反。

大小和方向均不随时间变化的电压、电流、电动势, 分别称为恒定电压、恒定电流、恒定电动势, 或分别称为直流电压、直流电流、直流电动势, 分别用大写字母 U 、 I 、 E 表示。大小或方向随时间而变的电压、电流、电动势, 分别称为时变电压、时变电流、时变电动势, 分别用小写字母 u 、 i 、 e 表示。大小和方向随时间作周期性变化的电压、电流、电动势, 分别称为周期电压、周期电流、周期电动势。在一个周期内平均值为零的周期电压、周期电流、周期电动势, 分别称为交流电压、交流电流、交流电动势, 统称为交流电。

四、电功率

当二端网络两端外加电压时, 电路中将建立电场; 在电场力的推动下, 自由电荷定向移动, 从而形成电流; 电流通过电路时, 电路内的电场对运动电荷作功。电场力对运动电荷所作的功称为电功。电场力在单位时间内对运动电荷所作的功, 称为电功率, 用 p 表示。

设在 dt 时间内, 电场力对运动电荷所作的功为 $d\omega$, 则电功率为

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-6)$$

因为电场力对运动电荷所作的功等于电场能量的变化量, 也等于运动电荷所具有电势能的变化量, 所以电功率就是电能对时间的变化率。

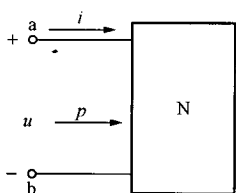


图 1-10 二端网络的功率

设二端网络的端口电压为 u , 端口电流为 i , 电压和电流取关联参考方向, 如图 1-10 所示。若在 dt 时间内, 有电量为 dq 的正电荷, 从 a 点经二端网络内部移到 b 点, 则这期间电场力所作的功为

$$d\omega = u dq$$

二端网络所吸收的瞬时功率为

$$p = \frac{d\omega}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

可见, 二端网络的瞬时功率等于网络端口电压的瞬时值与端口电流的瞬时值的乘积。

对于直流网络有

$$p = UI$$

在国际单位制中, 功率的单位为瓦特, 简称瓦, 用 W 表示; 也可在 W (瓦) 前面加国际单位制词头, 构成十进制倍数和分数单位, 如 MW (兆瓦)、 kW (千瓦)、 mW (毫瓦) 等。

一个二端网络与外电路接通时, 可能吸收功率, 也可能发出功率。若正电荷是从网络的“+”极经网络内部移到“-”极, 则电场力对电荷作正功, 正电荷所具有的电势能减少, 网络吸收电能, 电能在网络中转化成其他形式的能量。反之, 若正电荷是从网络的“-”极经网络内部移到“+”极, 则电场力对电荷作负功, 正电荷所具有的电势能增加, 网络发出电能, 在网络中其他形式的能量转化成电能。注意, 此处所说的极性都是指真实极性而不是参考极性。据此, 可得出下述结论: 当二端网络的端口电压和端口电流的实际方向一致时, 该网络吸收功率; 当二端网络的端口电压和端口电流的实际方向相反时, 该网络发出功率。

在二端网络的端口电压和端口电流的参考方向选定后, 也可根据功率 p 值的正负来确定网络是发出功率, 还是吸收功率。当电压和电流取关联参考方向时, $p = ui$ 表示网络吸收功率, 若 p 为正值, 则表明该网络确实吸收功率; 若 p 为负值, 则表明该网络实际上是发出功率。当电压和电流取非关联参考方向时, $p = ui$ 表示网络发出功率, 若 p 为正值, 则表明网络确实发出功率; 若 p 为负值, 则表明网络实际上是吸收功率。

【例 1-1】 二端网络的端口电压和端口电流的参考方向以及它们的取值如图 1-11 所示, 试求它们的功率, 并判断它们是吸收功率, 还是发出功率。

解 图 1-11 (a) 中, $p = ui = 220 \times (-10) = -2200W = -2.2kW$, 因为 u 和 i 取关联参考方向, 且 $p = ui < 0$, 所以该网络发出功率 $2.2kW$ 。

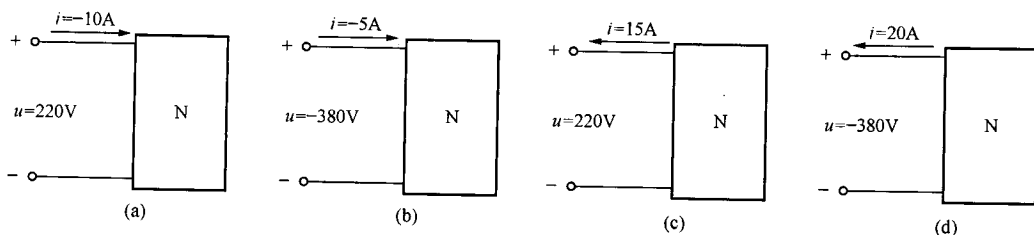


图 1-11 [例 1-1] 的图

图 1-11 (b) 中, $p = ui = (-380) \times (-5) = 1900\text{W} = 1.9\text{kW}$, 因为 u 和 i 取关联参考方向, 且 $p = ui > 0$, 所以该网络吸收功率 1.9kW 。

图 1-11 (c) 中, $p = ui = 220 \times 15 = 3300\text{W} = 3.3\text{kW}$, 因为 u 和 i 取非关联参考方向, 且 $p = ui > 0$, 所以该网络发出功率 3.3kW 。

图 1-11 (d) 中, $p = ui = (-380) \times 20 = -7600\text{W} = -7.6\text{kW}$, 因为 u 和 i 取非关联参考方向, 且 $p = ui < 0$, 所以该网络吸收功率 7.6kW 。

五、电能

电场所具有的能量称为电能。当电流通过二端网络时, 电场力对运动电荷做功, 电场力做功的过程正是能量转换和传递的过程。当电场力对运动电荷作正功时, 网络从外电路吸收电能, 在网络内部电能转换为其他形式的能量 (也可能还是电场能量); 当电场力对运动电荷作负功时, 网络向外电路发出电能, 在网络内部其他形式的能量转换为电能。因为

$$p = \frac{dw}{dt}$$

所以

$$dw = p dt$$

二端网络在 t_1 到 t_2 期间内所吸收或发出的电能 W 为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (1-8)$$

可见, 任意二端网络在 t_1 到 t_2 期间内所吸收或发出的电能等于网络的电功率在区间 $[t_1, t_2]$ 上对时间的定积分。直流电路在时间 T 内吸收或发出的电能为

$$W = pT = UIT$$

在国际单位中, 能量的单位为焦耳, 简称焦, 用 J 表示; 在工程上常用的电能单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·时), $\text{kW} \cdot \text{h}$ 俗称“度”。

第三节 电 阻 元 件

一、电阻元件的定义

电阻元件是从电阻器、白炽灯、电炉等实际器件抽象出来的理想化模型, 电阻元件的定义正是在分析认识这些实际器件的本质特性的基础上给出的。在正常工作状态下, 电阻器、白炽灯、电炉等实际器件的电感效应和电容效应很小, 可以忽略。忽略电感效应和电容效应, 这些器件所表现的物理行为是消耗电能, 即将电能转换为非电磁形式的能量。因为它们只消耗电能而不能够储存电能, 所以它们在任一时刻的电压 (或电流) 仅由同一时刻的电流 (或电压) 所决定, 而与该时刻以前的电流 (或电压) 无关。也就是说, 它们的电压 (或电

流)不能“记忆”电流(或电压)在“历史上”起过的作用。这就是这些器件所具有的本质属性,这种本质属性在数学上的表现就是它们的电压与电流存在着一种确定的代数关系。这里所谓确定的代数关系,是指两变量之间的函数关系可由坐标平面上唯一一条曲线所决定。其蕴含的意义是,两变量之间的函数关系可以用坐标平面上的曲线来表示,且曲线的形状不随变量的波形改变而改变。由此可知,对于一个忽略电感效应和电容效应的电阻器件而言,任意时刻,其电压与电流之间的关系可以用 $u-i$ 坐标平面上唯一的一条曲线来表示,该曲线的形状与电压和电流的波形无关。

电路元件是用描述其本质属性的两个电路基本变量之间的函数关系来定义的。在以上分析的基础上,我们给出电阻元件的定义:如果一个二端元件,在任意时刻,其电压 u 与电流 i 之间的关系可以由 $u-i$ 平面上的一条曲线来确定,则该二端元件称为电阻元件。

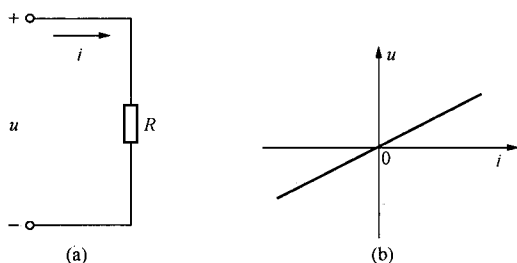


图 1-12 线性电阻元件的图形符号及其伏安特性曲线
(a) 图形符号; (b) 伏安特性曲线

如果电阻元件的电压与电流之间的关系曲线在所有时间都是 $u-i$ 平面上的一条通过原点的直线 [如图 1-12 (b) 所示], 则该电阻元件称为线性电阻元件。线性电阻元件的图形符号如图 1-12 (a) 所示。如果电阻元件的电压与电流之间的关系曲线是非线性的 [如图 1-13 (b)、(c)、(d) 所示], 则该电阻元件称为非线性电阻元件。非线性电阻元件的符号如图

1-13 (a) 所示。

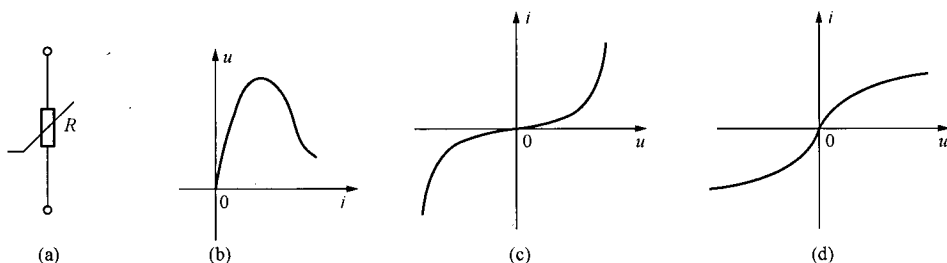


图 1-13 非线性电阻元件的图形符号及伏安特性曲线
(a) 图形符号; (b) 负温度系数热敏电阻器的伏安特性曲线;
(c) 普通二极管的伏安特性曲线; (d) 对称性压敏电阻器的伏安特性曲线

本教材只讨论线性的且参数不随时间变化的元件。参数不随时间变化的线性元件称为线性定常元件。因此, 往后不加特别说明时, 所说的元件都是指线性定常元件。

二、电阻元件的伏安关系

电路元件的电压与电流之间的关系称为元件的伏安关系, 也称为伏安特性。表示伏安关系的函数曲线称为伏安特性曲线。由线性电阻元件的定义可知, 线性电阻元件的电压与电流成正比, 线性电阻元件是满足于欧姆定律的电阻元件。电路元件的电压与电流之间的关系式与电压和电流的参考方向有关。当电压和电流取关联参考方向时, 电阻元件的伏安关系为

$$u = Ri \text{ 或 } i = Gu \quad (1-9)$$

式中, R 为电阻元件的参数, 称为电阻元件的电阻, 线性电阻元件的电阻 R 是一个正实常

数。在国际单位制中,电阻的单位为欧姆,简称欧,用 Ω 表示;也可在 Ω (欧)的前面加国际单位制词头,构成十进制倍数或分数单位,如 $M\Omega$ (兆欧)、 $k\Omega$ (千欧)等。式中 $G = \frac{1}{R}$, G 称电阻元件的电导,线性电阻元件的电导 G 也是一个正实常数,在国际单位制中,电导的单位为西门子,简称西,用 S 表示。

在电压和电流取关联参考方向的情况下,线性电阻元件的伏安特性曲线如图 1-12 (b) 所示,这是一条通过原点的,位于一、三象限的直线。

如果电阻元件的电压和电流取非关联参考方向,则它的伏安关系为

$$u = -Ri \text{ 或 } i = -Gu \quad (1-10)$$

这种情况下,线性电阻元件的伏安特性曲线是 $u-i$ 平面上的一条通过原点的,位于二、四象限的直线。

非线性电阻元件的电压 u 与电流 i 之间的关系 $u = f(i)$ 是非线性函数。非线性函数的函数图像不是直线,或是直线但不通过原点。图 1-13 (b) 所示曲线为负温度系数热敏电阻器的伏安特性曲线;图 1-13 (c) 所示曲线为普通二极管的伏安特性曲线;图 1-13 (d) 所示曲线为对称性压敏电阻器的伏安特性曲线。

三、电阻元件的功率

当电压和电流取关联参考方向时,电阻元件消耗的瞬时功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-11)$$

因为 R 和 G 是正实常数,故功率 p 恒为非负数。这表明线性电阻元件任何时刻都不会发出电能,它总是吸收电能并将所吸收的电能转换成热能而耗散掉。所以线性电阻元件是一个耗能元件。

电阻元件在 t_1 到 t_2 期间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{u^2}{R} dt$$

在直流电路中,电阻元件在 T 时间内吸收的电能为

$$W = pT = UIT = RI^2T = \frac{U^2}{R}T$$

第四节 电 容 元 件

一、电容器的电容

由两个彼此靠近、相互绝缘的导体构成的,能够储存电荷和电场能量的电路器件,称为电容器。组成电容器的两导体称为电容器的极板,两极板之间的绝缘物质称为绝缘介质,也称电介质。最简单的电容器就是平行板电容器,它是由彼此靠近、相互平行、同样大小的两块金属板组成的。

若将电容器接到直流电源上(如图 1-14 所示),在电源作用下,与电源正极相连接的电容器极板和导线中的自由电子,经电源内部移向电容器的另一极板。这样,与电

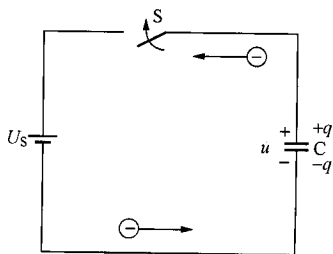


图 1-14 电容器的电容