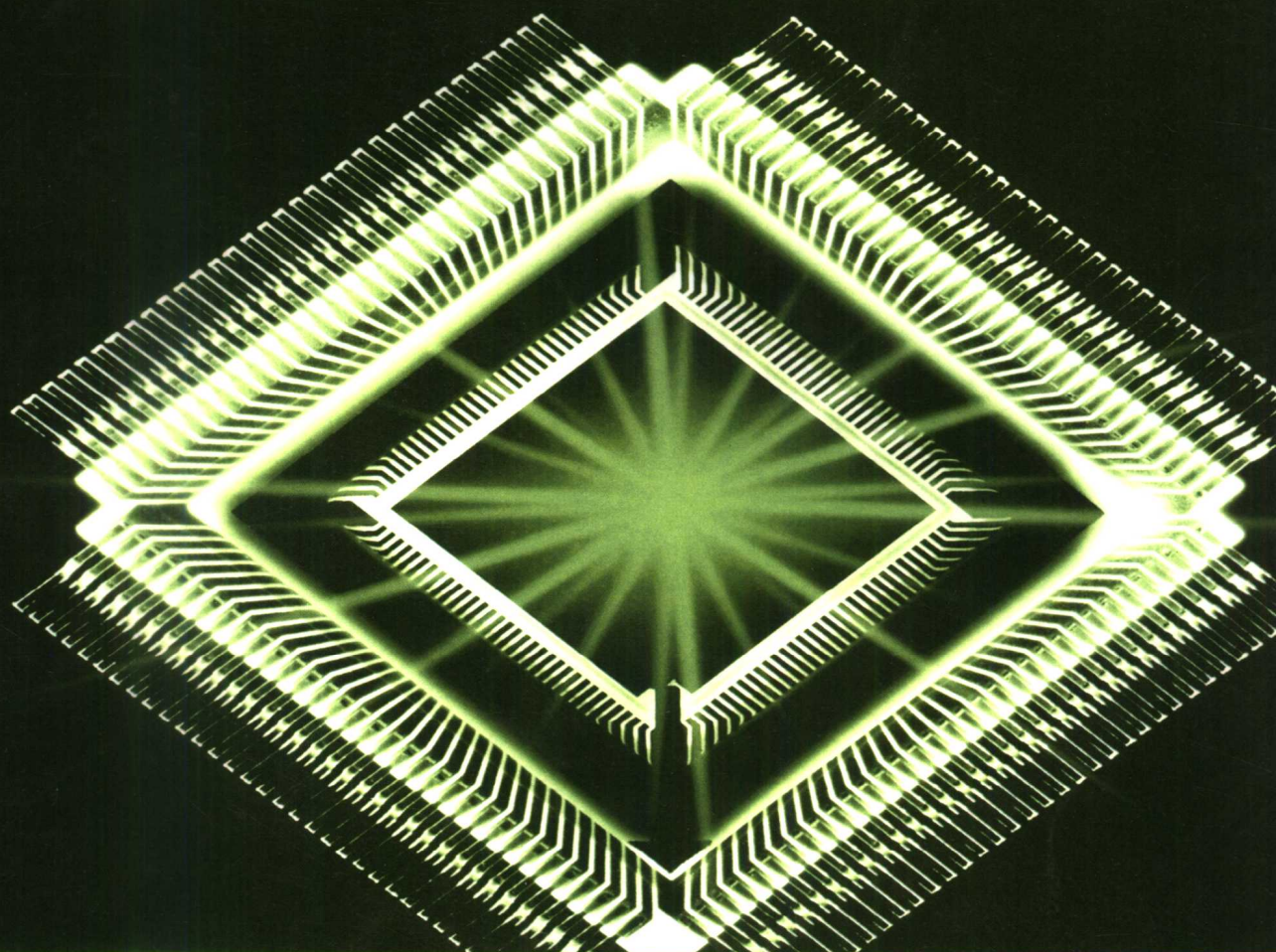


高/职/高/专/机/电/类/规/划/教/材

电工基础

第 2 版



陈菊红 主 编
陈铁牛 副主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专机电类规划教材

电 工 基 础

第 2 版

主 编 陈菊红

副主编 陈铁牛

参 编 叶 真

左全生

焦素敏

许小军

田丽鸿

主 审 钱锡源



机械工业出版社

本教材是普通高等专科教育机电类规划教材《电工基础》的修订本。基本内容符合国家教育部的高等学校工程专科电路及磁路课程教育基本要求。

本书共十三章,主要包括电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、线性网络的一般分析方法及基本定理、正弦稳态电路、互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、线性电路过渡过程的时域分析和复频域分析、二端口网络、非线性电阻电路、磁路和铁心线圈电路。

本书可作为高等工程专科学校、高等职业技术学校电气类专业的教材,也可供职业大学、业余大学、中等专业学校等各类院校的相关专业教学选用,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工基础/陈菊红主编. —2版. —北京:机械工业出版社,
2003.1

高职高专机电类规划教材

ISBN 7-111-11454-X

I. 电… II. 陈… 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 (2002) 第 107772 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:韩雪清 版式设计:霍永明 责任校对:吴美英

封面设计:陈 沛 责任印制:闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 2 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·18 印张·441 千字

44 501—50 500 册

定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

再 版 前 言

本书是普通高等专科学校教育机电类规划教材《电工基础》的修订本。为使教学内容和课程体系能更好地适应高职高专的教学特点及培养目标,修订本除了对原书进行一些必要的文字修改外,还在保证基本内容、基本原理和基本分析方法的前提下,进一步强调了实际工程应用能力的培养,突出了基本思路与方法的介绍,对一些较深的理论推导和繁复的运算进行了不同程度的筛选。特别是在习题的内容及要求上作了精选,删去了一些过分强调技巧或较繁琐的题目,力求突出概念和基本方法的掌握。

参加本书修订工作的有陈菊红、陈铁牛、叶真、焦素敏、田丽鸿,其他编写人员同第1版。全书由陈菊红统稿,由钱锡源任主审。

本书在修订中所作的一些变动及尝试,真诚地希望得到专家及广大读者的一如既往的关爱,对书中存在的不足和错误,恳请予以批评指正。意见请寄南京工程学院(东校区)电工电子教研室。

编 者

第1版前言

本教材是根据全国高等专科学校电气工程类专业教材指导委员会的决定编写的规划教材,基本内容符合国家教委的《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》,可供高等专科学校电气类专业教学使用。

本教材基本内容包括电路的基本概念和基本定律、电路模型、线性网络的一般分析方法、周期电流电路、电路的过渡过程以及磁路和铁心线圈电路等。除课程的基本要求内容外,书中还编入了一些标有*号的章节内容,可作为某些专业的选学内容。

本教材在编写过程中,考虑到了专科教学的特点,力图做到基本概念清楚,理论联系实际,语言力求简炼通畅。书中有典型例题,每节有思考题,每章有丰富的习题,书后附有习题答案,便于掌握概念和自学。

本教材承蒙承德石油高等专科学校钱锡源副教授的精心审阅,在此谨表示衷心的感谢。

参加本书编写工作的有:南京机械高等专科学校陈菊红(第一、十三章);昆明冶金高等专科学校陈铁牛(第九、十章);上海冶金高等专科学校叶真(第二、十一章);常州工业技术学院左全生(第五章);郑州工业高等专科学校焦素敏(第三、四、十二章);南京机械高等专科学校许小军(第六、七、八章)。全书由陈菊红统稿。

编写本教材时,查阅和参考了众多文献资料,得到了许多教益和启发,在此向参考文献的作者致以诚挚的谢意。

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

目 录

再版前言

第1版前言

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 2

第三节 电阻元件和欧姆定律 7

第四节 电压源和电流源 8

第五节 电路的工作状态 11

第六节 基尔霍夫定律 12

习题 16

第二章 电路的等效变换 19

第一节 电阻的串、并、混联及
等效变换 19

第二节 电阻的星形与三角形联结及
等效变换 23

第三节 电源模型的连接及等效变换 26

第四节 受控源及含受控源电路的
等效变换 30

习题 32

第三章 线性网络的一般分析

方法 36

第一节 支路电流法 36

第二节 回路电流法 38

第三节 节点电压法 42

习题 47

第四章 线性网络的基本定理 50

第一节 叠加定理 50

第二节 替代定理 53

第三节 戴维南定理与诺顿定理 54

第四节 最大功率传输定理 60

习题 62

第五章 正弦稳态电路 65

第一节 正弦量的基本概念 65

第二节 正弦量的相量表示法 68

第三节 电阻元件伏安关系的相量
形式 72

第四节 电感元件及其伏安关系的
相量形式 73

第五节 电容元件及其伏安关系的
相量形式 77

第六节 基尔霍夫定律的相量形式 80

第七节 R 、 L 、 C 串联电路及复
阻抗 82

第八节 R 、 L 、 C 并联电路及复
导纳 86

第九节 无源二端网络的等效复阻抗
和复导纳 89

第十节 实际元件的电路模型 92

第十一节 正弦电流电路的分析
计算 94

第十二节 正弦交流电路中电阻、电
感、电容元件的功率 99

第十三节 二端网络的功率 102

第十四节 功率因数的提高及有功
功率的测量 106

第十五节 串联电路的谐振 110

第十六节 并联电路的谐振 113

习题 116

第六章 互感电路 120

第一节 互感及互感电压 120

第二节 互感线圈的同名端 121

第三节 互感线圈的连接及等效
电路 124

第四节 互感电路的计算 127

第五节 空心变压器 129

习题 132

第七章 三相电路	135	第四节 用运算法分析线性网络	217
第一节 三相电源	135	习题	219
第二节 三相电源的连接	136	第十一章 二端口网络	221
第三节 三相负载的连接	138	第一节 二端口网络的概念	221
第四节 对称三相电路的计算	141	第二节 二端口网络的参数方程	222
第五节 不对称三相电路的计算	144	第三节 二端口网络的特性阻抗	230
第六节 三相电路的功率及其测量	147	第四节 二端口网络的等效电路	231
习题	151	第五节 二端口网络的连接	232
第八章 非正弦周期电流电路	154	第六节 理想变压器	234
第一节 非正弦周期信号及其分解	154	习题	236
第二节 非正弦周期电流电路中的有效值、平均值、平均功率	158	第十二章 非线性电阻电路	239
第三节 非正弦周期电流电路的计算	161	第一节 非线性电阻元件	239
第四节 滤波器	164	第二节 图解法	240
习题	166	第三节 小信号分析法	242
第九章 线性电路过渡过程的时域分析	169	第四节 折线法	244
第一节 电路的动态过程及初始值的确定	169	习题	246
第二节 一阶电路的零输入响应	173	第十三章 磁路和铁心线圈电路	248
第三节 一阶电路的零状态响应	179	第一节 磁场的基本物理量及基本性质	248
第四节 一阶电路的全响应·三要素法	184	第二节 铁磁物质的磁化	250
第五节 阶跃函数和阶跃响应	191	第三节 磁路及磁路定律	254
第六节 二阶电路的响应	197	第四节 恒定磁通磁路的计算	256
习题	203	第五节 交变磁通下的铁心损耗	259
第十章 线性电路过渡过程的复频域分析	209	第六节 交流铁心线圈中的电压、电流及磁通	261
第一节 拉普拉斯变换及其性质	209	第七节 交流铁心线圈的等效电路	265
第二节 拉普拉斯反变换	211	第八节 电磁铁	268
第三节 运算形式的电路定律	213	习题	269
		习题答案	271
		参考文献	279

第一章 电路的基本概念和基本定律

第一节 电路和电路模型

电路是各种电器设备按一定方式联接起来的整体，它提供了电流流通的路径。现代工程技术领域中存在着许多种类繁多、形式和结构各不相同的电路，但就其作用而言，不外两个方面：一是进行能量的转换、传输和分配。电力系统电路就是这样的典型例子，发电机组将其它形式的能量转换成电能，经变压器、输电线传输到各用电部门，在那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其它形式的能而加以利用。二是对电信号的处理和传递。收音机或电视机就是把电信号经过调谐、滤波、放大等环节的处理，使其成为人们所需要的其它信号。电路的这种作用在自动控制、通信、计算机技术等方面得到了广泛应用。

电路有时也称为电网络。

实际的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，对实际的电路器件，一般取其起主要作用的方面，并用一些理想电路元件来替代。所谓理想电路元件，是指在理论上具有某种确定的电磁性质的假想元件，它们以及它们的组合可以反映出实际电器元件的电磁性质和实际电路的电磁现象。这是因为，实际电路元件虽然种类繁多，但在电磁性能方面可把它们归类，例如，有的元件主要是供给能量的，它们能将非电能量转换成电能，像干电池、发电机等就可用“电压源”这样一个理想元件来表示；又如有的元件主要是消耗电能的，当电流通过它们时就把电能转换成为其它形式的能，像各种电炉、白炽灯等就可用“电阻元件”这样一个理想元件来表示；另外，还有的元件主要是储存磁场能量或储存电场能量的，就可用“电感元件”或“电容元件”来表示等等。

用抽象的理想元件及其组合近似地替代实际电路元件，从而构成了与实际电路相对应的电路模型。所谓电路模型，就是把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化了的电路。无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过理想化的电路模型充分地描述。今后所讨论的电路都是电路模型，通过对它们的基本规律的研究，达到分析研究实际电路的目的。

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 1-1 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至可忽略，就用两根无电阻的短路线表示。其它各种电路元件的表示符号将在以后逐一介绍。

实际电路可分为“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

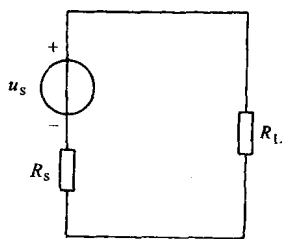


图 1-1 一个简单电路图

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则比较复杂，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。

第二节 电路的基本物理量

电路分析中常用到电流、电压、电动势、电位、功率等物理量，本节对这些物理量以及与它们有关的概念进行简要说明。

一、电流、电压及其参考方向

带电粒子的定向移动形成了电流。单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流强度，并用它来衡量电流的大小。电流强度简称为电流，用 i 表示，根据定义有

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

式中 dq 为导体截面中在 dt 时间内通过的电荷量。国际单位制 (SI) 中，电荷量的单位为库仑 (C)；时间单位为秒 (s)；电流单位为安培，简称安 (A)。有时还用千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等单位。

习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的方向。

当电流的大小和方向不随时间而变化时，就称为直流电流，简称直流 (DC)。以后对不随时间变化的物理量都用大写字母来表示，即在直流时，式 (1-1) 应写为

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

电荷在电路中运动，必定受到力的作用，也就是说力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力，引入“电压”这一物理量，并定义：电场力把单位正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功称为 A 点到 B 点间的电压，用 u_{AB} 表示。即

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中， dw_{AB} 表示电场力将 dq 的正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功，单位为焦耳 (J)；电压单位为伏特，简称伏 (V)。有时还用千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等单位。

直流时，式 (1-3) 应写为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-4)$$

由电压的定义可见，如果正电荷从 A 点移动到 B 点是电场力做功，那么正电荷从 B 点移到 A 点必定有一种外力在克服电场力做功，或者说电场力做了负功，即 $dw_{AB} = -dw_{BA}$ ，则 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。这说明，对两点间的电压必须分清起点和终点，也就是说，电压也是有方向的。电压的方向是电场力移动正电荷的方向。

以上对电流、电压规定的方向，是电路中客观存在的，称为实际方向，对于一些十分简单的电路是可以直观地确定的。但在分析计算较为复杂一些的电路时，往往很难一下就能判断出某一元件或某一段电路上电流或电压的实际方向，而对那些大小和方向都随时间而变化的电流或电压，要在电路中标出它们的实际方向就更不方便了。为此，在分析计算电路时采

用标定“参考方向”的方法。

参考方向是人们任意选定的一个方向。例如对于图 1-2a、b 所示某电路中的一个元件，其电流的实际方向虽然事先不知，但它只有两种可能，不是从 A 流向 B，就是从 B 流向 A。可以任意选定一个作为参考方向并用箭头标出。如图中选定的参考方向是从 A 指向 B 的，该方向与实际方向不一定一致。这时，将电流用一个代数量来表示，若 $i > 0$ ，则表明电流的实际方向与参考方向是一致的，如图 1-2a 所示；若 $i < 0$ ，则表明电流的实际方向与参考方向不一致，如图 1-2b 所示。于是在选定的参考方向下，电流值的正、负就反映了它的实际方向。

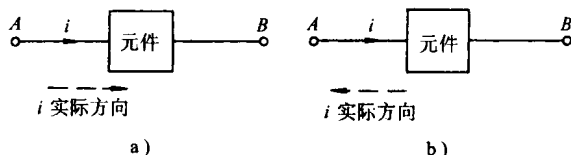


图 1-2 电流的参考方向与实际方向的关系

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

同样道理，电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向，并由参考方向和电压值的正、负来反映该电压的实际方向。

电压的参考方向可以用一个箭头表示，如图 1-3a 所示；也可以用正（+）、负

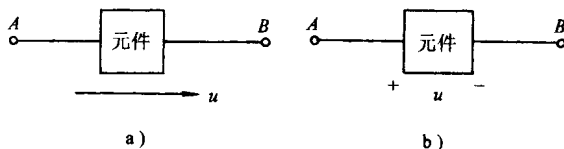


图 1-3 电压的参考方向与参考极性的表示方法

（-）极性表示，称为参考极性，如图 1-3b 所示；另外还可以用双下标表示，例如， u_{AB} 表示 A、B 两点间电压的参考方向是从 A 指向 B 的。以上几种表示方法只需任选一种标出即可。

在以后的电路分析中，完全不必先去考虑各电流、电压的实际方向究竟如何，而应首先在电路图中标定它们的参考方向，然后根据参考方向列写有关电路方程，计算结果的正负值与标定的参考方向就反映了它们的实际方向，图中也就不需再标出实际方向。参考方向一经选定，在分析电路的过程中就不再变动。

对于同一个元件或同一段电路上的电压和电流的参考方向，彼此原是可以独立无关地任意选定的，但为方便起见，习惯上常将电压和电流的参考方向选得一致，称其为关联的参考方向。为简单明了，一般情况下，只需标出电压或电流中的某一个的参考方向，这就意味着另一个选定的是与之相关联的参考方向。

参考方向并不是一个抽象的概念，在用磁电系电流表测量电路中的电流时，该表带有“+”、“-”标记的两个端钮，事实上就已为被测电流选定了从“+”指向“-”的参考方向，见图 1-4。当电流的实际方向是由“+”端流入，“-”端流出，则指针正偏，电流为正值，如图 1-4a 所示；若电流的实际方向是由“-”端流入，“+”端流出，则指针反偏，电流为负值，如图 1-4b 所示。

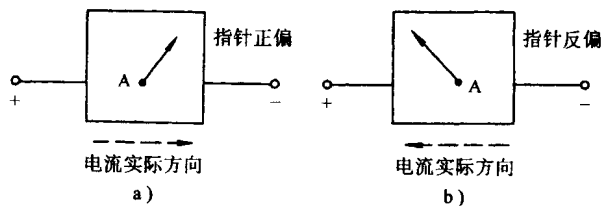


图 1-4 磁电系电流表与电流的方向

同样，磁电系电压表的“+”、“-”两端钮也为被测电压选定了参考极性。

二、电位

在电路中任选一点 O 作为参考点，则该电路中某一点 A 到参考点的电压就叫做 A 点的电位，用 v_A 表示。根据定义，有

$$v_A = u_{AO} \quad (1-5)$$

电位实质上就是电压，其单位也是伏特 (V)。

电路参考点本身的电位为零，即 $v_O = 0$ ，所以参考点也称零电位点。

电路中除参考点外的其它各点的电位可能是正值，也可能是负值，某点电位比参考点高，则该点电位就是正值，反之则为负值。

以电路中的 O 点为参考点，则另两点 A 、 B 的电位分别为 $v_A = u_{AO}$ ， $v_B = u_{BO}$ ，它们分别表示电场力把单位正电荷从 A 点或 B 点移到 O 点所做的功，那么电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功即 u_{AB} 就应该等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 O 点，再从 O 点移到 B 点所做的功的和，即

$$u_{AB} = u_{AO} + u_{OB} = u_{AO} - u_{BO}$$

$$\text{或} \quad u_{AB} = v_A - v_B \quad (1-6)$$

式 (1-6) 说明，电路中 A 点到 B 点的电压等于 A 点电位与 B 点电位的差，因此，电压又叫电位差。

参考点是可以任意选定的，一经选定，电路中其它各点的电位也就确定了。参考点选择得不同，电路中同一点的电位会随之而变，但任两点的电位差即电压是不变的。

在电路上不指明参考点而谈某点的电位是没有意义的。在一个电路系统中只能选一个参考点。至于选哪点为参考点，要根据分析问题的方便而定。在电子电路中常选一条特定的公共线作为参考点，这条公共线常是很多元件的汇集处且与机壳相联，因此在电子电路中参考点用接机壳符号“ $\perp$ ”表示。

三、电动势

图 1-5 所示有两个电极 A 和 B ， A 带正电称正极， B 带负电称负极，在 A 、 B 间的电场中具有电场力。用导线把 A 、 B 两极连接起来，在电场力作用下，正电荷沿着导线从 A 移到 B （实质上是导体中的自由电子在电场力作用下从 B 移到了 A ），形成了电流 i 。随着正电荷不断地从 A 移到 B ， A 、 B 两极间的电场逐渐减弱，以至消失，这样，导线中的电流也会减至零。为了维持连续不断的电流，必须保持 A 、 B 间有一定的电位差，即保持一定的电场。这就需要有一种力来克服电场力把正电荷不断地从 B 极移到 A 极去。电源就是能产生这种力的装置，这种力称之为电源力。例如在发电机中，导体在磁场中运动时，就有磁场能转换为电源力；在电池中，就有化学能转换为电源力。

电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功称为电源的电动势，用 e 表示，即

$$e = \frac{d\omega_{BA}}{dq} \quad (1-7)$$

式中， $d\omega_{BA}$ 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)。

按照定义，电动势的方向是电源力克服电场力移动正电荷的方向，是从低电位到高电位的方向。对于一个电源设备，例如干电池，若其电动势 e 及其两端钮间的电压 u 的参考方向选择得相反，如图 1-6a 所示，那么当电源内部没有其它能量转换时，根据能量守恒原理，应有

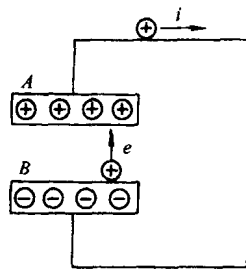


图 1-5 电源力做功的示意图

$u=e$; 如果 e 和 u 的参考方向选择得相同, 如图 1-6b 所示, 则 $u=-e$ 或 $e=-u$ 。

本书在以后论及电源时一般用其端电压 u 来表述。

例 1-1 在图 1-7 所示电路中, 已知 $V_a=50\text{V}$; $V_b=-40\text{V}$; $V_c=30\text{V}$, (1) 求 U_{ba} 及 U_{ac} ; (2) 若元件 4 为一具有电动势 E 的电源装置, 在图中所标的参考方向下求 E 的值。

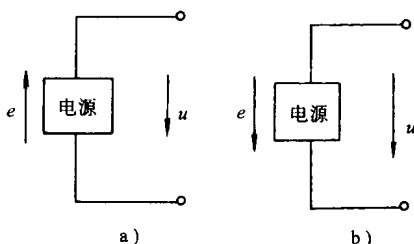


图 1-6 电源的电动势 e 与端电压 u

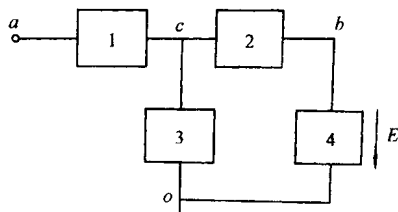


图 1-7 例 1-1 图

解 (1) 因为电压就是电位差, 所以

$$U_{ba} = V_b - V_a = (-40 - 50)\text{V} = -90\text{V}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c = (50 - 30)\text{V} = 20\text{V}$$

(2) 根据电位的定义

$$V_b = U_{bo}$$

图中, 电动势 E 的参考方向是与电压 U_{bo} 的参考方向相同, 故有关系式

$$E = -U_{bo}$$

即

$$E = -V_b = 40\text{V}$$

四、功率与电能

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, 即这段电路将其它形式的能量转换成电能释放了出来。把单位时间内电路吸收或释放的电能定义为该电路的功率, 用 p 表示。设在 dt 时间内电路转换的电能为 dW , 则

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-8)$$

国际单位制中, 功率的单位为瓦特, 简称瓦 (W)。此外还常用千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等单位。

对式 (1-8) 进一步推导可得

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-9)$$

即电路的功率等于该段电路的电压与电流的乘积。直流时, 式 (1-9) 应写为

$$P = UI \quad (1-10)$$

一段电路, 在 u 和 i 的关联参考方向下, 若 $p > 0$, 说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的, 正电荷是在电场力作用下做了功, 电路吸收了功率; 若 $p < 0$, 则这段电路上电压和电流的实际方向不一致, 一定是外力克服电场力做了功, 电路发出功率。在使用式 (1-9) 及式 (1-10) 时, 必须注意 u 和 i 的关联参考方向及各数值的正、负号的含义。

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它部分元件

或电路吸收的功率。或者说,整个电路的功率是平衡的。

式(1-8)可写为 $dw = p dt$

在 t_0 到 t_1 的一段时间内,电路消耗的电能应为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p dt \quad (1-11)$$

直流时, p 为常量,则

$$W = P(t_1 - t_0) \quad (1-12)$$

国际单位制中,电能 W 的单位是焦耳(J),它表示功率为 1W 的用电设备在 1s 时间内所消耗的电能。实用中还常采用千瓦时(kW·h)或称 1 度电的电能单位,即

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = (10^3 \times 3600) \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} \quad (1-13)$$

例 1-2 图 1-8 为某电路中的一部分,三个元件中流过相同电流 $I = -2\text{A}$, $U_1 = 2\text{V}$, (1) 求元件 a 的功率 P_1 , 并说明是吸收还是发出功率; (2) 若已知元件 b 发出功率为 10W, 元件 c 吸收功率为 12W, 求 U_2 、 U_3 。

解 (1) 对于元件 a , 电压与电流是非关联参考方向, 此时, 计算功率的公式应为

$$P_1 = -U_1 I$$

代入数据得

$$P_1 = (-2)\text{V} \times (-2)\text{A} = 4\text{W} (\text{吸收})$$

(2) 元件 b 的电压 U_2 与电流 I 是关联参考方向, 且发出功率, 则 P_2 为负值, 即

$$U_2 I = -10\text{W}$$

$$U_2 = \left(\frac{-10}{-2} \right) \text{V} = 5\text{V}$$

同样道理, 元件 c 有关系式

$$U_3 I = 12\text{W}$$

$$U_3 = \left(\frac{12}{-2} \right) \text{V} = -6\text{V}$$

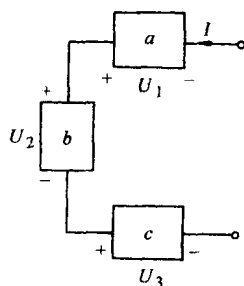


图 1-8 例 1-2 图

思考题

1-2-1 已知某电路中 $U_{ab} = -5\text{V}$, 说明 a 、 b 两点中哪点电位高。

1-2-2 图 1-9 中, 已知 $V_a = -5\text{V}$, $V_b = 3\text{V}$, 求 U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{ab} 。若改 b 点为参考点, 求 V_a 、 V_b 、 V_c , 并再求 U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{ab} 。由计算结果可说明什么道理?

1-2-3 一电路中某元件上的电压和电流在关联参考方向下分别为 $u = 5\sqrt{2} \sin(1000t + 30^\circ) \text{V}$, $i = 2\sqrt{2} \sin(1000t - 60^\circ) \text{A}$, 求 $t = 0$ 时该元件的功率, 并分析该时刻是在吸收还是发出功率。

1-2-4 试计算图 1-10 中电源装置的功率, 说明它是吸收还是发出功率。

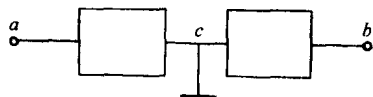


图 1-9 思考题 1-2-2 图



图 1-10 思考题 1-2-4 图

第三节 电阻元件和欧姆定律

电阻元件是反映电路器件消耗电能这一物理性能的一种理想元件。它有两个端钮与外电路相联接，这样的元件以后都称其为二端元件。

在讨论各种理想元件的性能时，重要的是要确定其端电压与电流之间的关系，这种关系称为元件约束，简称 VCR。欧姆定律反映了任时刻电阻元件的这种约束关系。在电压与电流的关联参考方向下，欧姆定律表达式为

$$u = iR \quad (1-14)$$

式中， R 为电阻元件的电阻值，SI 单位为欧 (Ω)，常用单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等。

若电阻 R 值与其工作电压或电流无关，是一个常数，那么这样的电阻元件称为线性电阻元件。线性电阻元件在电路中的符号如图 1-11a 所示。在 $u-i$ 坐标平面上画出电阻元件的电压与电流的关系曲线称为该元件的伏安特性曲线，简称伏安特性。线性电阻的伏安特性是一条通过原点的直线，如图 1-11b 所示。

应用欧姆定律时要注意电压和电流的参考方向，在电阻元件的电压及电流参考方向选择不一致时，欧姆定律应表示成

$$u = -iR \quad (1-15)$$

电阻 R 的倒数称为电导，用 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-16)$$

电导的单位为西门子 (S)。

同一个电阻元件，既可以用电阻 R 表示，也可以用电导 G 表示。引用电导后，欧姆定律可表达为

$$i = uG \quad (1-17)$$

如果电阻元件的电阻值不是一个常数，也就是说，它的数值会随着其工作电压或电流的变化而变化，那么这样的电阻元件称为非线性电阻元件，它的伏安特性就不再是一条通过原点的直线。图 1-12 所示是某二极管的伏安特性曲线，二极管是非线性电阻元件。

元件的伏安特性通常是由实验测定的。

实际的电阻器、电炉、白炽灯等元器件，或多或少都是非线性的，但这些元件，特别像线绕电阻器、金属膜电阻等，在一定的工作范围内，它们的电阻值变化很小，可以近似地看作线性电阻元件。在后面的叙述中，若无特殊说明，一般所说的电阻元件均指线性电阻元件，并简称为电阻。有关非线性电阻元件的内容将在第十二章中介绍。

图 1-11b 的伏安特性说明，在关联参考方向下，电阻元件上的电压和电流值总是同号的，由式 (1-9) 可知，其

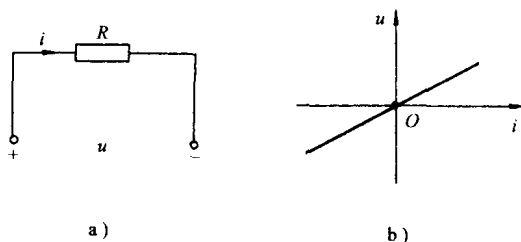


图 1-11 线性电阻元件及其伏安特性

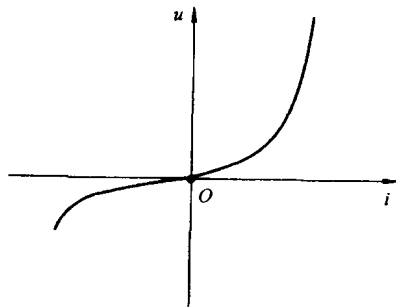


图 1-12 非线性电阻元件的伏安特性

功率 p 总是正值, 即总是在消耗功率, 所以, 电阻元件是耗能元件

将式 (1-14) 代入式 (1-9) 可得到计算电阻元件功率的另外两个公式为

$$p = i^2 R \quad (1-18)$$

$$p = \frac{u^2}{R} \quad (1-19)$$

在应用以上两式时, 一定要注意, i 必须是流过电阻 R 的电流, u 必须是电阻 R 两端的电压。

思考题

1-3-1 有时欧姆定律可写成 $u = -iR$, 说明此时电阻值是负的, 对吗?

1-3-2 求图 1-13 中的 U 或 I 。

1-3-3 求图 1-14 所示电路中的 V_a 、 V_b 、 U_{ab} 。

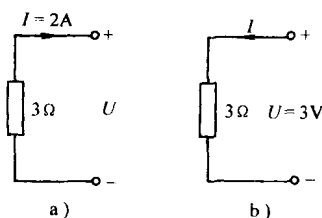


图 1-13 思考题 1-3-2 图

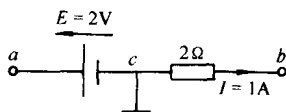


图 1-14 思考题 1-3-3 图

第四节 电压源和电流源

前已述及, 电源是能将其它形式能量转换成电能的装置, 称之为有源元件。本书介绍有源元件的两种电路模型。

一、电压源

电压源是理想电压源的简称。理想电压源是这样的一种理想二端元件: 它两端的电压是一个定值 U_s 或是一定的时间函数 u_s , 与流过它的电流无关; 而流过它的电流不全由它本身确定, 应由与之相联接的外电路共同确定。

理想电压源在电路中的图形符号如图 1-15a 所示, 其中 u_s 为电压源的电压, “+”、“-”号是其参考极性。

如果电压源的电压是定值 U_s , 则称之为直流电压源, 图 1-15b 是直流电压源的伏安特性。

根据所联接的外电路, 电压源中电流的实际方向既可从它的低电位端流向高电位端, 也可从高电位端流向低电位端, 前者是在发出功率, 起电源的作用, 而后者则是在吸收功率, 是电路的负载, 如蓄电池充电。

理想电压源实际上是不存在的。电源内部总是存在一定的电阻, 称之为内阻。例如电池是一个实际的直流电压源, 当接上负载有电流流过时, 内阻就会有能量损耗, 电流越大, 损耗也越大, 端电压就越低, 这样, 电池就不具有端电压为定值的特点。这时该实际电压源就可以用一个理想电压源 U_s 和内阻 R_s 相串联的电路模型来表示, 如图 1-16a 中的点划线框内

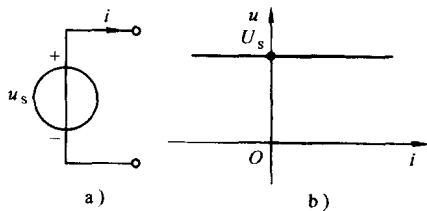


图 1-15 电压源模型及直流电压源的伏安特性

所示。图中 R_L 为负载，即电源的外电路。分析该电路的功率平衡情况，应有关系式

$$UI = U_s I - I^2 R_s$$

即

$$U = U_s - IR_s \quad (1-20)$$

上式说明，实际电压源的端电压 U 是低于理想电压源的电压 U_s 的，所低之值就是其内阻的压降 IR_s 。图 1-16b 为实际直流电压源的伏安特性曲线。可见，实际电压源的内阻越小，其特性越接近理想电压源。工程中常用的稳压电源以及大型电网等在工作时的输出电压基本不随外电路变化，都可近似地看作理想电压源。

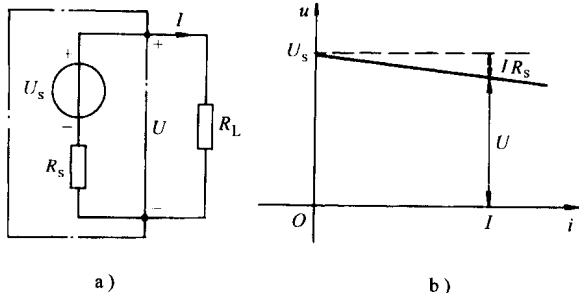


图 1-16 实际直流电压源模型及其伏安特性

二、电流源

电流源是理想电流源的简称。理想电流源也是一种理想二端元件。它向外输出定值电流 I_s 或一定的时间函数 i_s ，而与其端电压无关；它的端电压不全由它本身确定，而由与之相联接的外电路共同确定。

理想电流源在电路中的图形符号如图 1-17a 所示，其中 i_s 为电流源输出的电流，箭头标出了它的参考方向。图 1-17b 为直流电流源的伏安特性。

根据所联接的外电路，电流源端电压的实际方向可与其输出电流的实际方向相反，也可相同，前者是在发出功率，后者是在吸收功率。

理想电流源实际上也是不存在的。由于内电导的存在，电流源中的电流并不能全部输出，有一部分将在内部分流。实际电流源可用一个理想电流源 i_s 与内电导 G_s 相并联的电路模型来表示。图 1-18a 中，点划线框内所示为一实际直流电流源的电路模型。很显然，该实际电流源输出到外电路中的电流 I 小于电流源电流 I_s ，所小之值即为内电导 G_s 上的分流 $I_1 = UG_s$ ，写成表达式为

$$I = I_s - UG_s \quad (1-21)$$

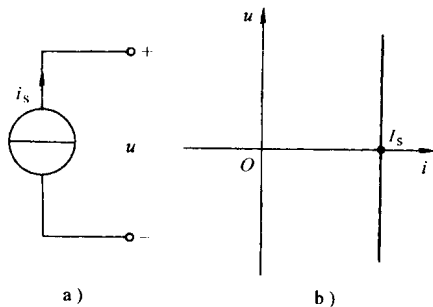


图 1-17 电流源模型及直流电流源的伏安特性

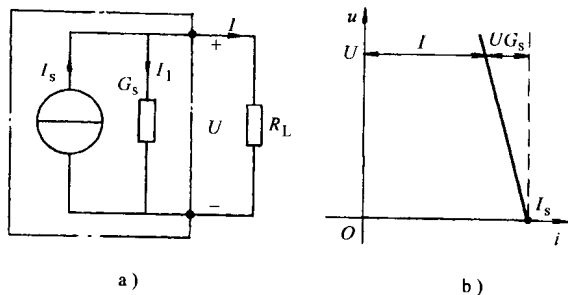


图 1-18 实际直流电流源模型及其伏安特性

图 1-18b 为实际直流电流源的伏安特性。实际电流源的内电导越小，内部分流越小，其特性就越接近理想电流源。晶体管稳流电源及光电池等器件在工作时可近似地看作理想电流源。

综上所述，电压源的输出电压及电流源的输出电流都不随外电路的变化而变化，它们都是独立电源，它们在电路中作为电源或信号源而起作用，称作“激励”。在它们的作用下，电路其它部分相应地产生电压和电流，这些电压和电流就称作“响应”。

例 1-3 求图 1-19 电路中的 I_s 及 U 。

解 电流源向外输出定值电流, 负载 R 上的电流 I 即为电流源的输出电流 I_s , 即

$$I_s = I = 2\text{A}$$

电流源的端电压由与之相联接的外电路共同决定, 此处即为电阻 R 上的电压, 所以

$$U = IR = (2 \times 2)\text{V} = 4\text{V}$$

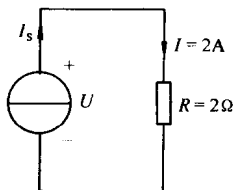


图 1-19 例 1-3 图

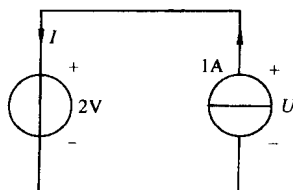


图 1-20 例 1-4 图

例 1-4 图 1-20 电路中, 一电压源与一电流源相联接, 试分析它们的功率情况。

解 流过电压源的电流由与它相联接的电流源决定, 在图示参考方向下, $I = 1\text{A}$, 电压源的功率为

$$P_1 = (2 \times 1)\text{W} = 2\text{W} \quad (\text{吸收})$$

电流源的端电压由与它相联接的电压源决定, 在图示参考方向下, $U = 2\text{V}$, 电流源的功率为

$$P_2 = (-2 \times 1)\text{W} = -2\text{W} \quad (\text{发出})$$

在一个电路中, 所谓“外电路”是相对而言的, 本例中, 电流源是电压源的外电路, 而电压源又是电流源的外电路。

思考题

1-4-1 求图 1-21 所示各电源的功率, 并说明是吸收还是发出功率。

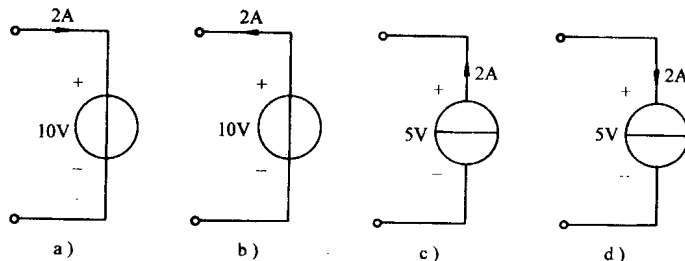


图 1-21 思考题 1-4-1 图

1-4-2 能否用图 1-22 中 a、b 两电路模型分别表示实际直流电压源和实际直流电流源?

1-4-3 求图 1-23 电路中各元件的功率。

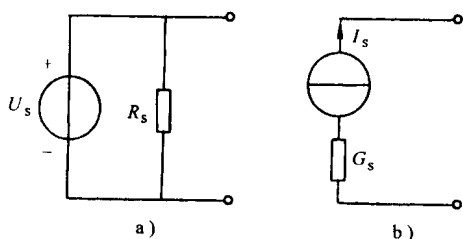


图 1-22 思考题 1-4-2 图

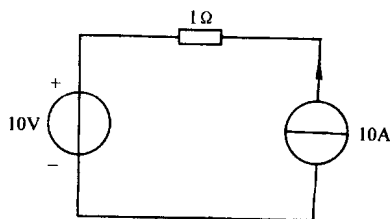


图 1-23 思考题 1-4-3 图