

高职高专公共基础课规划教材

GAOZHIGAOZHUANGONGGONGJICHUKEGUIHUAJIAOCAI



电路

瞿红 禹红 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专公共基础课规划教材
GAOZHIGAOZHUANGONGGONGJICHUKEGUIHUAJIAOCAI



电路

■ 主编 瞿 红 禹 红
■ 编写 孙爱东 熊木兰 谢小乐 钟永安
■ 主审 曾令琴



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



林慧俊陈新强基共公专高思高

IAOQAILAUHUIHUEKXUJILONGONGHONGHUAHUZOUHICAG

内 容 提 要

本书为高职高专公共基础课规划教材。

全书共分七章，主要内容包括电路的基本概念和基本定律、电阻电路、正弦交流电路、三相电路、线性电路的过渡过程、磁路和变压器、技能训练。书后附有Multisim软件简介、复数的基本知识和部分习题参考答案。每章针对相应的重点和难点给出了丰富的例题和习题，并引入计算机辅助电路的分析方法，加入了EDA现代教学内容，融入了安全用电、实验、实训等实用知识。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业、自动化类专业及其他相关专业“电路”课程教材，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路/瞿红，禹红主编. —北京：中国电力出版社，2008

高职高专公共基础课规划教材

ISBN 978-7-5083-8223-4

I. 电… II. ①瞿…②禹… III. 电路—高等学校：技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第203526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

*

2008年12月第一版 2008年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 266千字

定价17.60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

本书根据高职高专教育的教学要求而编写,论述了电路的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共分七章:电路的基本概念和基本定律、电阻电路、正弦稳态电路、三相电路、线性电路的过渡过程、磁路和变压器、技能训练。书后附有 Multisim 软件简介、复数的基本知识和部分习题参考答案。每章针对相应的重点和难点给出了丰富的例题和习题,并引入计算机辅助电路的分析方法,加入了 EDA 现代教学内容,融入了安全用电、实验、实训等实用知识。

本书的主要特色有:

(1) 简明易学。内容以“必需够用”为度,注重基本概念、基本原理和基本方法的阐述,避免繁琐的数学分析,删除不必要的推导与计算。对重点内容和学习时易出错的地方予以提示,力求深入浅出、通俗易懂。

(2) 注重应用。紧密联系工程实际,突出理论知识的实用性,注重实践能力和创新精神的培养。

(3) 例题丰富。解题方法详细,有些题目给出多解,以启发和培养学学生的发散型思维能力。每节后附有思考题,每章后有习题以及计算机仿真分析实例,在这些题目的选择中,强调基本概念和基本分析方法的应用,适当淡化手算技巧,以期培养学生分析问题和解决问题的能力。

(4) 引入先进的电路分析方法及工具软件。在全书每章中都穿插了计算机分析电路的方法和利用虚拟测试仪器对电路进行仿真实验的内容,目的是使学生学会现代电路分析中先进的分析方法并会使用现代的工具软件,以提高学生解决工程问题的能力,适应现代电路分析、设计工作的需要。

(5) 便于教师采用现代化的教学手段进行教学。本书配有各章节的教学课件、计算机仿真分析实例和 EDA 仿真实验,读者如需要可与出版社联系。

本书由江西电力职业技术学院瞿红、湖南水利水电职业技术学院禹红主编,山西电力职业技术学院孙爱东,江西电力职业技术学院熊木兰、谢小乐、钟永安参编。其中,禹红编写了第一章一~六节、第二章一~三节,孙爱东编写了第三章一~七节、附录 A、附录 B,谢小乐编写了第四章一~五节,瞿红编写了第五章、第一章的第七节、第二章的第四节、第三章的第八节、第四章的第六节,熊木兰编写了第六章,钟永安编写了第七章。全书由瞿红统稿,并制作各个章节的教学课件。

黄河水利职业技术学院的曾令琴教授对本书进行了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2008年9月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路的主要物理量	2
第三节 基尔霍夫定律	7
第四节 电阻元件	9
第五节 独立源	13
第六节 受控源	18
第七节 应用 Multisim 软件进行简单电路仿真分析	19
习题	23
第二章 电阻电路	26
第一节 节点法	26
第二节 叠加定理	31
第三节 戴维宁定理	34
第四节 应用 Multisim 软件进行直流电路仿真实验	37
习题	41
第三章 正弦交流电路	43
第一节 正弦量的基本概念	43
第二节 正弦量的相量表示	47
第三节 电阻、电感、电容元件的伏安关系	49
第四节 正弦稳态电路的相量分析法	55
第五节 正弦稳态电路的功率	59
第六节 谐振	63
第七节 含耦合电感的正弦稳态电路	66
第八节 应用 Multisim 软件进行正弦稳态电路仿真实验	74
习题	76
第四章 三相电路	81
第一节 对称三相正弦量	81
第二节 三相电源和三相负载的连接	83
第三节 对称三相电路的计算	85
第四节 不对称三相电路	87

第五节 三相电路的功率	89
第六节 应用 Multisim 软件进行三相电路仿真实验	91
习题	95
第五章 线性电路的过渡过程	97
第一节 换路定律与初始条件	97
第二节 RC 电路的过渡过程	99
第三节 RL 电路的过渡过程	105
第四节 三要素法	109
第五节 二阶电路的零输入响应	113
第六节 运算法	116
第七节 应用 Multisim 软件进行动态电路仿真分析	121
习题	126
第六章 磁路和变压器	129
第一节 磁场的主要物理量	129
第二节 铁磁物质的磁性能	130
第三节 磁路的基本定律	132
第四节 铁心线圈	133
第五节 变压器及其使用	136
习题	139
第七章 技能训练	140
实训一 安全用电	140
实训二 常用电工仪器仪表的使用	144
实训三 基尔霍夫定律的验证	147
实训四 戴维宁定理的验证	149
实训五 日光灯电路及功率因数的提高	150
实训六 三相交流电路	151
实训七 一阶电路的响应	153
附录 A Multisim 软件简介	155
附录 B 复数的基本知识	160
附录 C 部分习题参考答案	162
参考文献	170

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

一、电路的作用

为了某种需要将某些电工设备和电路元器件按照一定的方式连接成的回路,称为电路或网络,实质上电路就是电流的通路。

电路有多种形式,他们功能各异。电路按照其完成的基本功能可以分为两类:一类是能够进行电能的传输和分配,并将电能转化为其他形式能量的电路。例如,日常生活中的照明电路,它将电能传输、分配到各个电灯,电灯又将电能转化为光能和热能。另一类是能够实现信号的产生、传递和处理的电路。以收音机为例,收音机在接收到各个发射台发出的电波信号后,从中专门选择出所需要的信号,将它转化为电信号并放大再转化为声音信号输出,使我们能收听各个广播电台的节目。

二、电路的组成

对于一个完整的电路,无论它是实现能量的传输、分配和转换,还是实现信号产生、传递和处理,它总是由电源(或者信号源)、中间环节和负载组成。产生电能或电信号的设备称为电源,如电池、发电机等。消耗电能或输出电信号的设备称为负载,如电灯、电动机等。连接电源和负载、传输和分配电能、控制或者处理电信号的设备称为中间环节,如导线、开关等。

不论电路是实现了电能的转换、分配和传输,还是实现了信号的产生、传递和处理,电源都起到了推动电路工作的作用,因而电源(或信号源)上的电压或电流称为激励。激励的作用是在电路各部分产生电压和电流,在电路各部分产生的电压和电流则称为响应。进行电路分析,就是在已知电路结构和元件参数的条件下,讨论电路激励与响应之间的关系。本教材就是讨论如何进行电路分析。

三、电路模型

实际电路是指由一些实际电路元器件按需要组成的电路,如电动机、变压器、电池、各种电阻器等。实际元器件物理过程是十分复杂的,很难用一个简单的数学表达式来表示出其物理过程。为了简化分析,常将其物理过程近似化、理想化,用一个简单的数学式来描述。这种经过简化的器件称为理想元件或元件模型。例如,消耗电能的元件用理想电阻元件表示;储存电场能量的元件用理想电容元件表示;储存磁场能量的元件用理想电感元件表示;产生电能的设备用理想电源表示。

本书所涉及的理想元件有电阻元件、电容元件、电感元件、电压源元件、电流源元件、受控源元件和耦合电感元件等。每种元件都将有自己精确的数学形式的定义,为简便起见,本书省略理想二字,所指元件都是理想元件。

一个实际电路可以由多个理想元件的组合来模拟,这样的电路称为电路模型。本书所讨论的电路都是指电路模型,而不是指实际电路。

有了理想元件和电路模型的概念,对图 1-1 (a) 所示的实际手电筒电路,可以用电阻元件 R 表示灯泡,用直流电压源 U_S 表示电池,实际手电筒的电路模型如图 1-1 (b) 所示。

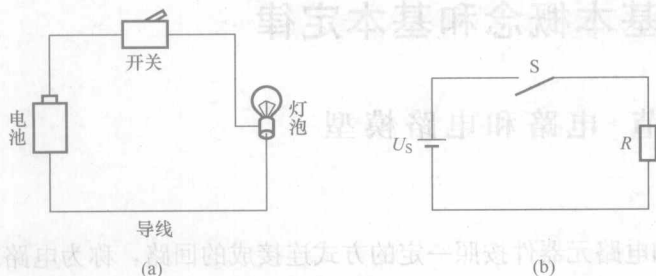


图 1-1 实际电路与电路模型

(a) 实际手电筒电路; (b) 实际手电筒的电路模型

如图 1-1 所示,元件都是通过引出端钮互相连接的。具有两端钮的元件称为二端元件,具有两个以上端钮的元件称为多端元件。在电路分析中,常把电路中的一部分作为一个整体来看待,如果这个整体只有两个端钮与外部连接,则称为二端网络或单口网络。一个二端元件就是一个最简单的二端网络。

思考题

1-1-1 电路由几部分组成? 各部分的作用是什么?

1-1-2 什么是理想电路元件?

第二节 电路的主要物理量

一、电流

1. 电流的定义

电流是由电荷(带电粒子)有秩序地运动形成的。

电流的大小用电流强度来描述。电流强度是指单位时间内通过某一导体横截面的电荷量,简称电流,用符号 i 表示,即

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

式中, dq 为 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。因此可以说电流强度就是流过导体横截面的电荷量对时间的变化率。

在国际单位制中,电荷量的单位为 C (库仑),时间的单位为 s (秒),电流的单位为 A (安培)。电流常用的单位还有 kA (千安)、mA (毫安)、 μ A (微安) 等,它们之间的换算关系为

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

习惯上将正电荷的运动方向规定为电流的实际方向。

如果电流的大小或者方向随时间变化,则称为交流电流(AC)。如果电流的大小和方向均不随时间变化,则称为直流电流(DC),直流电流常用大写字母 I 表示。如果在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 Q , 则

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

2. 电流的参考方向

电流的实际方向是客观存在的。但在分析较为复杂的电路时，往往事先难以判断某条支路中电流的实际方向。尤其是交流电流，其方向随时间而变，也无法用一个箭头标出它的实际方向。通常在分析电路时，先任意指定某一方向为电流的参考方向，用实线箭头（如图 1-2 中实线箭头）或者双下标表示。采用双下标时，电流的参考方向为由下标第一位流向第二位，例如， I_{ab} 表示电流的参考方向是由 a 指向 b。

指定某一电流的参考方向后，若该电流的参考方向与实际方向一致，则电流为正值，如图 1-2 (a) 所示；若电流的参考方向与实际方向相反，则电流为负值，如图 1-2 (b) 所示。由此可见，对同一电流，参考方向选择不同，则其大小相等、符号相反，即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-2)$$

在指定的电流参考方向的情况下，电流值的正或负，就反映了电流的实际方向。显然，在未指定电流参考方向的情况下，电流值的正或负是没有意义的。

【例 1-1】 试分别指出图 1-3 所示各元件中电流的实际方向。

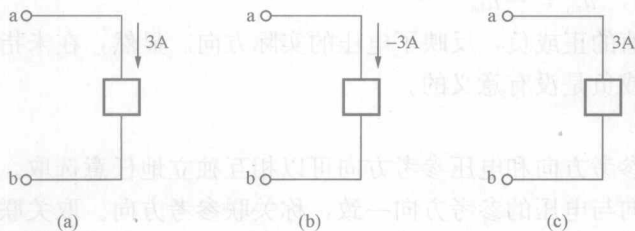


图 1-3 [例 1-1] 图

参考方向，所以电流实际方向无法确定。

二、电压

1. 电压的定义

电压是用来描述电场力做功的物理量，电路中 a、b 两点之间的电压是指单位正电荷在电场力作用下由 a 点移动到 b 点时所减小的电位能，用 u 表示，即

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

式中： $d\omega$ 为移动过程中电荷所减少的电位能； dq 为由 a 点移动到 b 点电荷的电量。

规定电压的实际方向为正电荷所具有的电位能减小的方向。例如，正电荷在 a 点时所具有的电位能大于在 b 点时所具有的电位能，则电压的实际方向为由 a 指向 b。

在国际单位制中，电压的单位为 V（伏特），简称伏。常用的电压单位还有 kV（千伏）、mV（毫伏）、 μ V（微伏）等，它们之间的换算关系为

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

如果电压的大小和方向均不随时间变化，则称为直流电压，常用大写字母 U 表示。

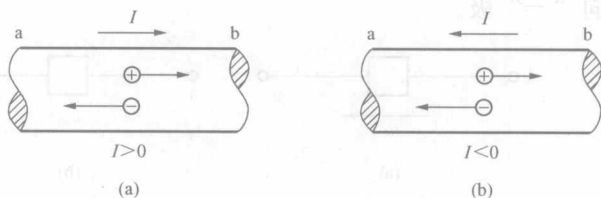


图 1-2 电流的参考方向

(a) 参考方向与实际方向一致；(b) 参考方向与实际方向相反

解：图 (a) 中电流值为正，表示电流实际方向与参考方向一致，所以电流实际方向为由 a 流向 b；

图 (b) 中电流值为负，表示电流实际方向与参考方向相反，所以电流实际方向为由 b 流向 a；

图 (c) 中因为未标明电流的

2. 电压的参考方向

与电流一样,在复杂电路中,电压的实际方向很难看出来,为了分析电路方便,我们可以先任意选定一个方向为电压的参考方向。电压的参考方向通常用实线箭头,如图 1-4 (a) 所示、双下标或“+”、“-”参考极性表示。采用双下标时,如图 1-4 (b) 所示,电压的参考方向为由下标第一位指向第二位,例如,电压 u_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b;采用“+”、“-”参考极性表示时,如图 1-4 (c) 所示,电压的参考方向为由“+”极指向“-”极。

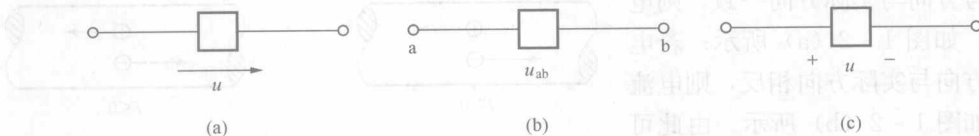


图 1-4 电压的参考方向

(a) 用实线箭头表示; (b) 用双下标表示; (c) 用“+”、“-”参考极性表示

指定了某电压的参考方向后,若该电压的参考方向与实际方向一致,则电压为正值;若电压的参考方向与实际方向相反,则电压为负值。由此可见,对同一电压,参考方向选择不同,则其大小相等,符号相反,即

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

在指定的电压参考方向下,电压值的正或负,反映了电压的实际方向。显然,在未指定电压参考方向的情况下,电压值的正或负是没有意义的。

3. 关联参考方向

对于同一元件或同一支路,电流参考方向和电压参考方向可以相互独立地任意选取。但为了方便起见,常选取电流的参考方向与电压的参考方向一致,称关联参考方向。取关联参考方向时,电流的参考方向是从电压的“+”极流向“-”极,如图 1-5 (a) 所示。电流与电压的参考方向如果不一致,即电流的参考方向是从电压的“-”极流向“+”极,则称为非关联参考方向,如图 1-5 (b) 所示。

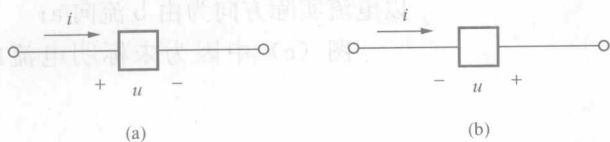


图 1-5 关联参考方向与非关联参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

三、电位

在分析电子电路时经常会用到电位这个物理量。在电路中任取一点为参考点,电路中某一点到参考点的电压称为该点的电位。例如,在电路中选择 o 点为参考点,则 a 点的电位为

$$V_a = U_{ao}$$

电位用具有单下标的符号表示,例如 V_a 表示 a 点的电位。电位的单位与电压相同,为 V (伏特)。

电路中任意两点间的电压等于这两点的电位差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

若 a 点电位高于 b 点电位,即 $V_a > V_b$, 则 $U_{ab} > 0$, 这表明电压的实际方向与参考方向一致,

是从 a 指向 b。也就是说,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,所以电压又称为电位降。

参考点可以任意选取,通常选择大地、设备外壳或者接地点作为参考点。在一个电路中只能选择一个参考点,参考点的电位为零。

【例 1-2】 如图 1-6 所示,已知 $U_{ab}=5\text{V}$, $U_{bc}=2\text{V}$ 。若选择 c 点为参考点,各点电位为多少? 电压 U_{ac} 为多少? 若选择 b 点为参考点,各点电位又为多少? 电压 U_{ac} 又为多少?

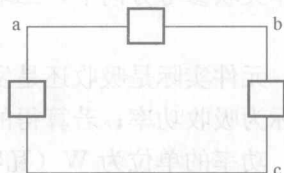


图 1-6 [例 1-2] 图

解: (1) 选取 c 点为参考点, 各点电位和电压 U_{ac} 为

$$V_c = 0$$

$$V_b = U_{bc} = 2\text{V}$$

$$V_a = U_{ab} + U_{bc} = 5 + 2 = 7(\text{V})$$

$$U_{ac} = V_a = 7\text{V}$$

(2) 选取 b 点为参考点, 各点电位和电压 U_{ac} 为

$$V_b = 0$$

$$V_a = U_{ab} = 5\text{V}$$

$$V_c = U_{cb} = -U_{bc} = -2\text{V}$$

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = 5 + 2 = 7(\text{V})$$

由此可见选取不同的参考点, 同一点的电位将随着参考点变化而变化, 即电位的大小与参考点的位置有关。但任意两点之间的电压则不随参考点变化而变化, 即电压的大小与参考点的位置无关。

四、电动势

在电路中为了维持连续的电流, 在电源中正电荷必须从低电位移动到高电位。电动势就是衡量电源克服电场力把单位正电荷从电源负极搬运到正极所做的功的物理量, 电动势等于单位正电荷在非电场力作用下由电源负极经电源内部移动到正极时所增加的电位能, 用 e 表示, 即

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

式中: dw_s 为移动过程中电荷所增加的电能; dq 为移动的电荷量。

电动势的单位与电压相同, 为 V (伏特)。电动势的实际方向与电压实际方向相反, 规定为由负极指向正极, 即电位升的方向。对于一个实际电源来说, 当没有电流流过, 内部没有电能消耗时, 其电动势和端电压的大小相等、方向相反。

在分析电路时, 可任意取定一个方向为电动势的参考方向, 电动势的参考方向通常用实线箭头、双下标或“+”、“-”参考极性表示。若实际方向与参考方向相同, 则电动势为正值, 若不同则为负值。

五、电功率

我们知道电压的实际方向为正电荷所具有的电位能减小的方向, 电流的实际方向为正电荷的运动方向。所以当二端元件的电压与电流的实际方向相同时, 正电荷从高电位点移动到了低电位点, 其电位能减小, 将电能转化成其他形式的能, 消耗了电能。反之, 当一个二端元件的电压与电流的实际方向相反时, 则将其其他形式的能转化成电能, 发出了电能。

电能转换的速率称为电功率, 简称功率, 用 p 表示。在关联参考方向下, 二端元件吸

收的功率为

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

在直流情况下, 选取关联参考方向, 二端元件吸收的功率为

$$P = UI \quad (1-7)$$

在非关联参考方向下, 二端元件吸收的功率为

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1-8)$$

元件实际是吸收还是发出功率, 由功率的正负来确定。若算得的功率为正值, 表示元件实际为吸收功率; 若算得的功率为负值, 表示元件实际为发出功率。

功率的单位为 W (瓦特)。常用的功率单位还有 MW (兆瓦)、kW (千瓦)、mW (毫瓦) 等。它们之间的换算关系为

$$1\text{MW} = 10^6\text{W}, 1\text{kW} = 10^3\text{W}, 1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$$

任一瞬间, 在同一电路中, 吸收电能的各元件的功率之和等于发出电能的各元件的功率之和, 即各元件吸收功率的代数和为零, 这一结论称为电路的功率平衡。

【例 1-3】 求图 1-7 所示的各个二端元件吸收的功率。

解: 图 (a) 中 U 与 I 为关联参考方向

$$P = UI = 1 \times 2 = 2(\text{W}) \text{ (吸收功率)}$$

图 (b) 中 U 与 I 为非关联参考方向

$$P = -UI = -1 \times 2 = -2(\text{W}) \text{ (发出功率)}$$

图 (c) 中 U 与 I 为关联参考方向

$$P = UI = 1 \times 2 = 2(\text{W}) \text{ (吸收功率)}$$

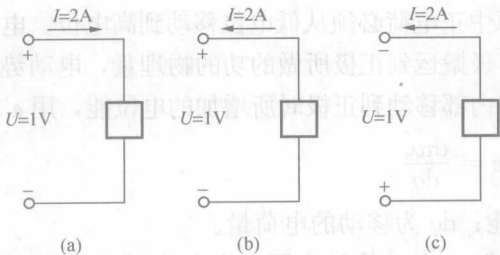


图 1-7 [例 1-3] 图

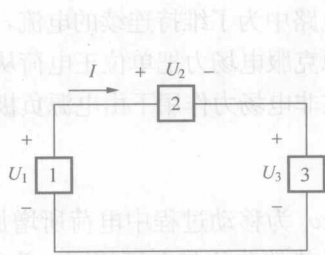


图 1-8 [例 1-4] 图

【例 1-4】 如图 1-8 所示, $I=1\text{A}$, $U_1=10\text{V}$, $U_2=6\text{V}$, $U_3=4\text{V}$ 。试求各元件功率, 指出各元件的性质, 并分析电路的功率平衡关系。

解: 元件 1: 非关联参考方向, $P_1 = -U_1 I = -10 \times 1 = -10 (\text{W})$, $P_1 < 0$, 发出 10W 功率, 电源元件。

元件 2: 关联参考方向, $P_2 = U_2 I = 6 \times 1 = 6 (\text{W})$, $P_2 > 0$, 吸收 6W 功率, 负载元件。

元件 3: 关联参考方向, $P_3 = U_3 I = 4 \times 1 = 4 (\text{W})$, $P_3 > 0$, 吸收 4W 功率, 负载元件。

$\therefore P_1 + P_2 + P_3 = -10 + 6 + 4 = 0$, $\therefore$ 功率平衡。

六、电能

由式 (1-6) 得到在 dt 时间内元件吸收或发出电能为 $dW = p dt$ 。从 t_1 到 t_2 时间内元件吸收或发出的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (1-9)$$

直流情况下, 从 t_1 到 t_2 时间内, 元件吸收或发出的电能为

$$W = P(t_1 - t_2) = UI(t_1 - t_2)$$

在国际单位制中, 能量的单位为 J (焦耳)。在实际应用中还采用 kW·h (千瓦·时) 作为电能单位, 它是等效为功率为 1kW 的用电设备在 1h 内所消耗的电能, 俗称为 1 度电, 换算关系为

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

思考题

1-2-1 为什么要在电路图上规定电压、电流的参考方向? 试说明参考方向与实际方向的关系。

1-2-2 电压、电位、电动势有什么区别与联系?

1-2-3 在图 1-9 中, 在 0.001s 时间内, 有 $2 \times 10^{-4} \text{C}$ 的正电荷从右向左通过横截面 S, 同时有 $3 \times 10^{-4} \text{C}$ 的负电荷从左向右通过 S。试决定通过 S 的电流大小和方向。

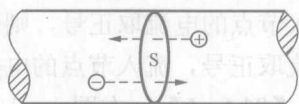


图 1-9 思考题 1-2-3 图

1-2-4 有人认为电流大的负载功率一定大。一个 220V、40W 的灯泡, 显然比手电筒的小电珠 (2.5V、0.3A) 要亮得多, 那么 40W 灯泡中的电流是否一定比小电珠的电流大? 计算出 40W 灯泡中的电流及小电珠的电功率, 并进行比较。

1-2-5 求图 1-10 所示各二端网络发出或吸收的功率。

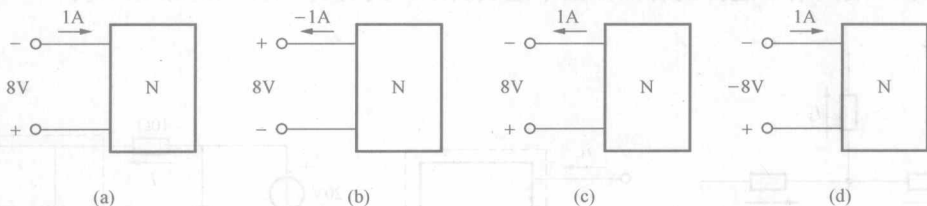


图 1-10 思考题 1-2-5 图

第三节 基尔霍夫定律

一、电路的几个基本概念

支路: 电路中流过同一个电流的一段分支称为一条支路。图 1-11 所示电路示例中, 元件 1、元件 2 组成一条支路, 元件 3、元件 4 组成一条支路, 元件 5 为一条支路, 共有三条支路。

节点: 三条或者三条以上支路的连接点称为节点, 图 1-11 所示电路中有 b、d 两个节点。

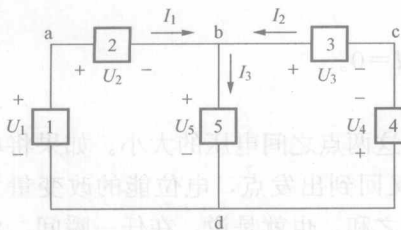


图 1-11 电路示例

回路：电路中任一闭合路径称为回路，图 1-11 所示电路中有 abda、abcda 和 bcdb 三个回路。

二、基尔霍夫电流定律 (KCL)

电荷有秩序地运动形成电流，由于电荷既不能被创造也不能被消灭，只能从一地方转移到另一个地方，所以流进某处多少电流，必然同时从该处流出多少电流。对于电路中的一个节点来说，在任一瞬间，流入节点的所有电流之和等于从该节点流出的所有电流之和。例如图 1-11 所示电路中的节点 b，与之相连的三条支路电流的关系为

$$I_1 + I_2 = I_3$$

上式又可写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明，在任一瞬间，与电路中任一节点相连的各支路电流的代数和为零。这就是基尔霍夫电流定律，式 (1-10) 为其数学表达式。应用此式时，若规定参考方向为流入节点的电流取正号，则流出节点的电流取负号。当然也可以规定参考方向为流出节点的电流取正号，流入节点的电流取负号。

【例 1-5】 在图 1-12 所示电路中， $I_1 = -5\text{A}$ ， $I_2 = 6\text{A}$ ， $I_3 = -4\text{A}$ 。试求 I_4 。

解：根据 KCL 可得

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 = I_1 + I_2 - I_3 = -5 + 6 - (-4) = 5(\text{A})$$

基尔霍夫电流定律还可推广应用于电路中的任一假设的闭合面（广义节点）。例如，图 1-13 所示二端网络，选择闭合面如图中虚线所示，则有 $i_1 - i_2 = 0$ ，即 $i_1 = i_2$ 。

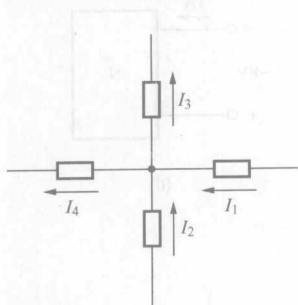


图 1-12 [例 1-5] 图

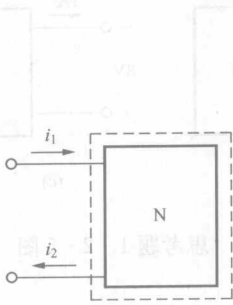


图 1-13 二端网络

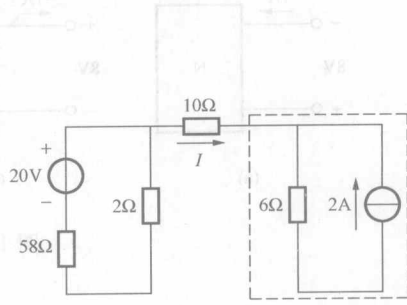


图 1-14 [例 1-6] 图

【例 1-6】 试求在图 1-14 所示电路中的电流 I 。

解：选择闭合面如图 1-14 中虚线所示，由 KCL 得 $I = 0$ 。

三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

单位电荷从一点移动到另外一点时电位能的改变量为这两点之间电压的大小。如果将单位电荷从电路中的某一点出发，沿着一个回路绕行一周又回到出发点，电位能的改变量为零，因此在一个回路中，所有电位升之和等于所有电位降之和。也就是说，在任一瞬间，任一回路中各段电压的代数和为零，这就是基尔霍夫电压定律，其数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1-11)$$

应用式(1-11)时,先选定一个绕行方向,参考方向与绕行方向一致的电压取正号,参考方向与绕行方向相反的电压则取负号。例如,图1-11所示电路中,从a点出发,选取顺时针绕行方向,回路abda中各段电压关系为

$$U_2 + U_5 - U_1 = 0$$

【例1-7】在图1-11所示电路中,已知 $U_2=15\text{V}$, $U_3=-6\text{V}$, $U_4=-24\text{V}$,试求 U_1 和 U_5 。

解:选取回路abcda,根据KVL可得

$$U_2 + U_3 - U_4 - U_1 = 0$$

$$U_1 = U_2 + U_3 - U_4 = 15 + (-6) - (-24) = 33(\text{V})$$

选取回路bcdcb,根据KVL可得

$$U_3 - U_4 - U_5 = 0$$

$$U_5 = U_3 - U_4 = -6 - (-24) = 18(\text{V})$$

思考题

1-3-1 试求图1-15所示各电路中的未知电流。

1-3-2 图1-16所示电路中有几条支路?几个节点?并求出 I_1 、 I_3 、 I_5 、 U_2 、 U_4 、 U_5 。

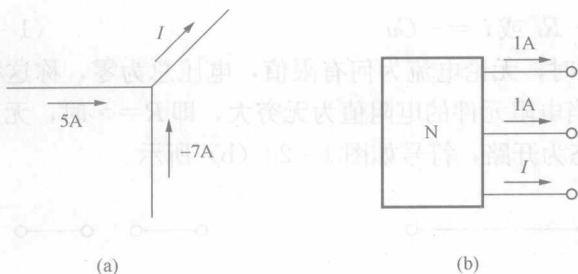


图1-15 思考题1-3-1图

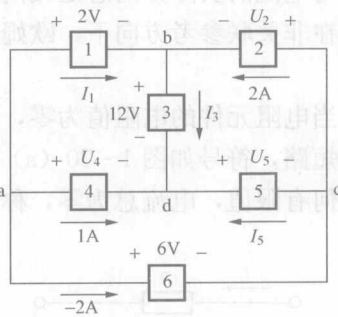


图1-16 思考题1-3-2图

第四节 电阻元件

一、电阻元件

电阻元件是反映电路元器件消耗电能这一特性的理想元件,它是从一些实际的电阻元器件(如白炽灯、电炉等)抽象而来的一种理想电路元件。

元件的电压与电流关系称为元件的伏安特性,其电压与电流的关系曲线称为元件的伏安特性曲线。如图1-17所示,伏安特性曲线是一条通过原点的直线的电阻元件称为线性电阻元件,否则称为非线性电阻元件。在本书中如不加说明均指线性电阻元件,简称电阻元件。电阻元件在电路中的符号如图1-18所示。

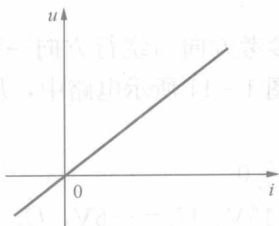


图 1-17 线性电阻元件的伏安特性

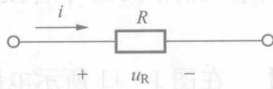


图 1-18 电阻元件的符号

二、欧姆定律

由于电阻元件是反映电路元器件消耗电能这一特性的，所以电阻元件的电压与电流的实际方向总是相同的。如选择关联参考方向，如图 1-18 所示，当电流的实际方向与参考方向相同，即电流为正值时，电压的实际方向也与参考方向相同，也为正值。反之，若电流为负值，则电压也为负值。因此在关联参考方向下，电阻元件的电压、电流总是同号的。由于线性电阻元件的伏安特性曲线是一条通过原点的直线，其电压与电流的大小成正比，所以在关联参考方向下，电阻元件的电压与电流的关系为

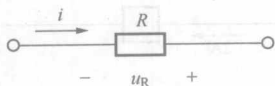
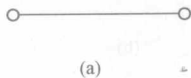
$$u = Ri \quad (1-12)$$

这就是欧姆定律。式中 R 为电阻元件的电阻，其单位为 Ω (欧姆)。电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示， $G=1/R$ ，其单位为 S (西门子)。

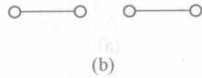
如果电阻元件的电压、电流选择非关联参考方向 (如图 1-19 所示)，因为电阻元件的电压与电流的实际方向总是相同的，所以在这种情况下，电阻元件的电压、电流总是异号。因此在非关联参考方向下，欧姆定律应写成

$$u = -Ri \text{ 或 } i = -Gu \quad (1-13)$$

当电阻元件的电阻值为零，即 $R=0$ 时，无论电流为何有限值，电压总为零，称这种状态为短路，符号如图 1-20 (a) 所示。当电阻元件的电阻值为无穷大，即 $R=\infty$ 时，无论电压为何有限值，电流总为零，称这种状态为开路，符号如图 1-20 (b) 所示。

图 1-19 电阻元件的电压、
电流选择非关联参考方向

(a)



(b)

图 1-20 短路和开路的符号

(a) 短路; (b) 开路

三、电阻元件的功率

在关联参考方向下，电阻元件 R 吸收的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-14)$$

可见电阻元件吸收的功率总为正值，电阻元件总是吸收功率，为耗能元件。

如果电阻把吸收的电能转化为其他形式能量，从 t_0 到 t 时间内，电阻元件消耗的电能 W 为从 t_0 到 t 对它吸收的功率作积分，即

$$W = \int_{t_0}^t p(t) dt = \int_{t_0}^t ui dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t \frac{u^2}{R} dt$$

若电阻中流过的是直流电, 则

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

式中, T 为电流通过电阻的总时间, 即 $T = (t - t_0)$ 。

【例 1-8】 利用欧姆定律求解图 1-21 (a)、(b) 中电阻元件的电阻值。

解: 图 (a) 中选取的是关联参考方向, 由式 (1-12) 得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{8}{0.5} = 16(\Omega)$$

图 (b) 中选取的是非关联参考方向, 由式 (1-13) 得

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-0.3} = 20(\Omega)$$

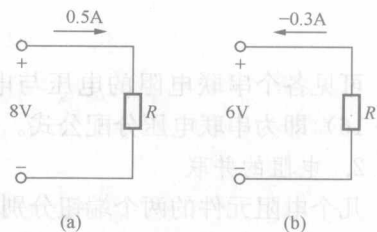


图 1-21 [例 1-8] 图

四、电阻元件的串联、并联和混联

1. 电阻的串联

几个电阻元件依次首尾相连, 流过同一个电流, 这种连接方式称为电阻的串联。如图 1-22 (a) 所示, 电阻 R_1 与 R_2 串联, 由 KVL 得

$$U = U_1 + U_2$$

由于各电阻的电流相等, 都等于 I , 各个电阻的电压分别为 $U_1 = R_1 I$ 、 $U_2 = R_2 I$ 所以有

$$U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$

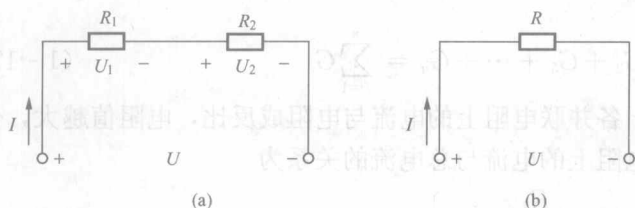


图 1-22 电阻的串联及其等效电路

(a) 两个电阻串联; (b) 等效电路

令 $R = R_1 + R_2$, 则 $U = RI$ 。根据 $U = RI$ 画出图 1-22 (b) 所示电路, 此电路与图 1-22 (a) 所示电路的伏安关系相同。如果两个二端网络的伏安关系相同, 则这两个网络接上任意相同的外电路时, 其端口的电压、电流分别相等, 称这两个网络为等效网络或等效电路, 对

外部电路而言, 它们可以等效互换。因此图 1-22 (a) 电路与图 1-22 (b) 电路是等效电路。

从以上分析可知, 两个电阻串联可以用一个电阻等效替代, 其电阻值等于两个串联电阻的电阻值之和, 即 $R = R_1 + R_2$, 称之为等效电阻。同理, n 个电阻串联也可以用一个等效电阻替换, 等效电阻的大小等于所有串联电阻的电阻值之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1-15)$$

电阻串联时电流相等, 各串联电阻上的电压与电阻成正比, 电阻值越大, 分得的电压也越大。当两个电阻串联时则各电阻上的电压与总电压的关系为

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$