

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电路基础

郭 瑞 主编 程 晖 姜竹楠 副主编



中国电力出版社

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

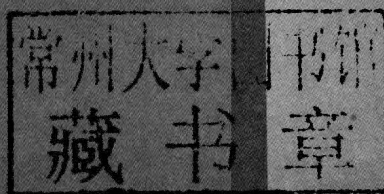
高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电路基础

主 编 郭 瑞
副主编 程 晖 姜竹楠
编 写 滕立国
主 审 瞿 红



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

全书共 11 章, 包括电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、电路分析的一般方法、电路定理、正弦电路的稳态分析、耦合电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析、二端口网络、磁路与铁心线圈。

全书力求做到内容简明、要求明确, 故在每一章章前都编有内容提要和学习要求, 章后有小结, 并配有丰富的例题、练习题, 书末附有部分习题答案。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术等专业的教材, 也可供相近专业的师生或工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路基础/郭瑞主编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 5

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0313 - 3

I. ①电… II. ①郭… III. ①电路理论—高等学校:
技术学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 066026 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 7 月第一版 2010 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 355 千字

定价 23.60 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

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材，内容符合教育部《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》，可供高职电气、控制等专业教学使用。

全书共分 11 章，主要内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、电路分析的一般方法、电路定理、正弦电路的稳态分析、耦合电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析、二端口网络、磁路与铁心线圈。书中的内容涉及面比较广，体现电路基础课程的基本脉络。

全书力求做到重点突出、要求明确，文字表述准确、严密、流畅、易懂。本书注重理论联系实际，内容和例题的选编都尽量贴近实际应用。每一章章前都编有内容提要和学习要求，使学生进一步明确学习任务和学习深度的要求；章后有小结，并配有丰富的练习题供学生练习，从而提高学生分析问题、解决问题的能力。

本教材由沈阳工程学院郭瑞老师主编，大连水产职业技术学院的程晖老师和沈阳工程学院的姜竹楠老师任副主编，大连水产职业技术学院的滕立国老师参与编写。其中，第 1、3、9、10 章由郭瑞编写，第 2、4 章由程晖编写，第 5、6、7 章由姜竹楠编写，第 8、11 章由滕立国编写。

在本书的编写过程中，沈阳工程学院电气工程系有关领导给予了充分的关心和大力支持。在此一并表示衷心的感谢。

限于作者的水平和经验，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 3 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 电路的主要物理量.....	3
第三节 基尔霍夫定律.....	9
第四节 电阻元件	11
第五节 电感元件	13
第六节 电容元件	16
第七节 理想电压源和理想电流源	18
第八节 受控源	20
本章小结	21
习题一	22
第二章 电路的等效变换	26
第一节 电路的等效变换	26
第二节 无源网络的等效变换	27
第三节 有源网络的等效变换	32
第四节 输入电阻	40
本章小结	43
习题二	44
第三章 电路分析的一般方法	46
第一节 支路电流法	46
第二节 网孔电流法	48
第三节 结点电压法	51
本章小结	56
习题三	57
第四章 电路定理	60
第一节 叠加定理	60
第二节 替代定理	63
第三节 戴维宁定理和诺顿定理	65
本章小结	70
习题四	71

第五章 正弦电路的稳态分析	74
第一节 正弦量	74
第二节 正弦量的相量表示法	79
第三节 电路定律的相量形式	83
第四节 电阻、电感、电容串联电路	86
第五节 电阻、电感、电容并联电路	89
第六节 阻抗（导纳）的串联和并联	91
第七节 正弦电路中的功率	93
第八节 正弦稳态电路的分析	98
第九节 电路的谐振	100
本章小结	105
习题五	106
第六章 耦合电路	113
第一节 耦合电感元件	113
第二节 含有耦合电感元件电路的计算	117
第三节 理想变压器	124
本章小结	127
习题六	128
第七章 三相电路	132
第一节 对称三相正弦量	132
第二节 对称三相电路的分析	137
第三节 不对称三相电路的概念	140
第四节 三相电路的功率	142
本章小结	145
习题七	146
第八章 非正弦周期电流电路	148
第一节 非正弦周期量	148
第二节 非正弦周期量的分解	148
第三节 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	154
第四节 非正弦周期电流电路的计算	158
本章小结	162
习题八	162
第九章 动态电路的时域分析	165
第一节 动态电路和初始条件	165
第二节 一阶电路的零输入响应	169
第三节 一阶电路的零状态响应	175
第四节 一阶电路的全响应	180

第五节 阶跃函数和一阶电路的阶跃响应·····	184
本章小结·····	188
习题九·····	189
第十章 二端口网络·····	193
第一节 二端口网络·····	193
第二节 二端口网络的方程和参数·····	194
第三节 二端口网络的等效电路·····	202
本章小结·····	203
习题十·····	204
第十一章 磁路与铁心线圈·····	207
第一节 磁场的基本物理量与铁磁物质·····	207
第二节 磁路及磁路定律·····	212
第三节 恒定磁通磁路的计算·····	213
第四节 交流铁心线圈·····	214
第五节 电磁铁·····	216
本章小结·····	217
习题十一·····	218
部分习题答案·····	220
参考文献·····	226

电路的基本概念和基本定律

【内容】

本章首先介绍电路的基本概念和电路中的基本物理量,引入电流、电压参考方向的概念,讨论元件、电路吸收或发出功率的计算,然后阐述基尔霍夫定律,定义基本电路元件。本章的内容是全书的基础知识。

【要求】

掌握电路模型、理想电路元件的概念。

理解电流、电压参考方向的概念。

掌握基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律。

掌握电路元件(电阻、电感、电容、电压源、电流源等元件)的电压、电流关系。

第一节 电路及电路模型

电路理论研究电路中发生的电磁现象,研究方法是根据物理实际特性建立电路模型,用数学手段分析这种电路模型。当获得分析结果后,再返回到物理实际中。电路理论的研究对象是电路模型,而不是实际的电路。

一、电路

通常的电路是指实际电路,即由电路部件(例如电阻器、电容器)和电路器件(例如晶体管、集成电路等)按照一定方式连接起来所构成的电流的通路。电路也称为网络。

人们在工作和生活中会遇到很多的实际电路。如图 1-1(a) 所示是常见的手电筒电路。它主要由电池、电珠、开关和金属连片组成。当开关闭合时,电池和电珠通过金属片连接成通路,就有电流通过电珠,使电珠发光。

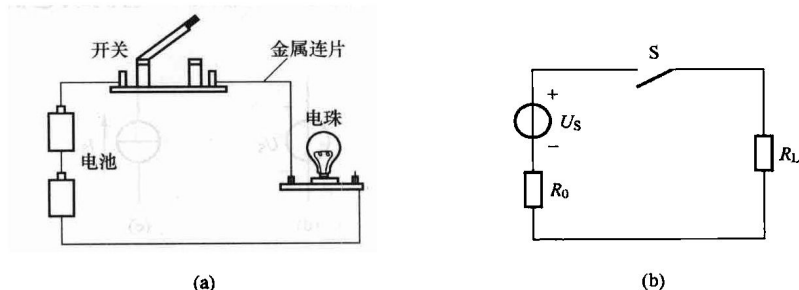


图 1-1 手电筒的实际电路和电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

1. 电路的组成

电路的形式是多种多样的,但是不论电路的具体形式和复杂程度如何,每一个完整的电

路都是由以下三个基本部分组成的。

(1) 电源。电源是提供电能的装置，它把其他形式的能转换成电能。例如干电池将化学能转换成电能，发电机将机械能、热能或原子能转换成电能。

(2) 负载。负载是消耗电能的装置，它把电能转换成其他形式的能。例如白炽灯将电能转换成光能和热能，电动机将电能转换成机械能、热能。

(3) 中间环节。中间环节用来连接电源和负载，控制电路的通、断或起保护电路的作用。

2. 电路的作用

电力系统、自动控制系统、电视机、计算机等不同的电路实现不同的功能。但总体来讲，电路的作用可以概括为两类。

(1) 实现电能的传输和转换。例如，电厂输出的电能通过传输线输送给用户，用户通过灯泡、电动机、电炉等负载将电能转换成光能、机械能、热能，这类电路称为**电力电路**，俗称强电电路。

(2) 实现信号的传递和处理。例如，电话机、电视机将信号接收下来，经过信号处理（频率变换、信号放大、去除干扰等）转换成声音或图像，这类电路称为**信号电路**，俗称弱电电路。

二、电路模型

实际电路中电气器件的种类繁多，电磁性能的表现可能是多方面交织在一起的，不便于对电路进行分析和计算。为了便于分析，需要定义一些理想电路元件。每一种元件体现某种确定的电磁特性。例如，定义“电阻”这个理想电路元件来代替电阻器、电烙铁、白炽灯等消耗电能的实际器件；定义“电感”来表示将电能转换为磁场能量并储存的元件；定义“电容”来表示将电能转换为电场能量并储存的元件等。在一定的条件下实际器件可以用一个理想元件或一些理想元件的组合来表征，将这些元件按照实际电路的连接方式构成一个整体即是实际电路的电路模型。如图 1-1 (b) 所示是手电筒电路的电路模型，图中的电珠用理想电阻元件 R_L 来代替，电池用理想电阻元件 R_0 与理想电压源 U_S 的串联组合来代替，电路模型中的导线都是理想化导体，电阻为零。本书中所讨论的电路都是电路模型。

在电路理论中，常用的理想电路元件有 5 种，如图 1-2 所示，它们或它们的组合可以用来表征千万种实际器件。

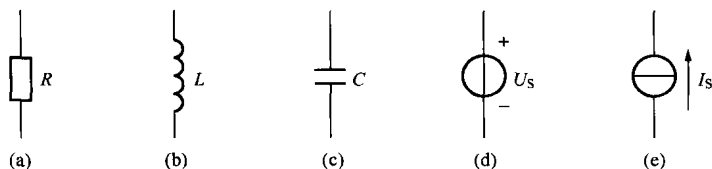


图 1-2 理想电路元件

(a) 电阻；(b) 电感；(c) 电容；(d) 电压源；(e) 电流源

常见的电路元件可以分为有源元件（如电压源、电流源等）和无源元件（如电阻、电感、电容等）；也可以根据与外部相连的端钮数分为二端元件（如电阻、电感、电容、电压源、电流源等）和多端元件（如晶体管为三端元件，理想变压器为四端元件等）。

三、有关电路的一些名词

在分析电路前，首先有必要介绍一些有关的名词。以图 1-3 (a) 为例，该图是由电压源、电流源、电阻等 7 个元件组成的。

(1) 串联：几个二端元件成串连接呈无分支电路，这种连接方式称为串联。如图 1-3 (a) 中，元件 R_1 与 U_{S1} 串联，元件 R_2 与 U_{S2} 串联。

(2) 并联：几个二端元件的两个端钮分别接在一起的连接方式称为并联。如图 1-3 (a) 中，元件 R_4 与 I_S 并联。

(3) 支路：每一个二端元件称为一条支路。有时还引申为若干元件的串联组合。如图 1-3 (a) 中，按一般定义有 7 条支路，但也可以说有 5 条支路。元件 R_1 与 U_{S1} 为一条，元件 R_2 与 U_{S2} 为一条，元件 R_3 、 R_4 、 I_S 各为一条。流过支路的电流称为支路电流，支路两端的电压称为支路电压。

(4) 结点：两条或两条以上支路的连接点称为结点，或节点。如图 1-3 (a) 中，因为支路有引申的定义，故可以说图中有 5 个结点 (a, b, 1, 2, 3)，也可说有 3 个结点 (a, b, 3)。

(5) 回路：由一条或几条支路组成的闭合路径称为回路。如图 1-3 (a) 中，a-2-b-1-a 构成一条回路，a-3-b-1-a 也构成回路，元件 R_4 、 I_S 也组成一条回路。

(6) 网孔：在平面电路中不能再分割的基本回路称为网孔。所谓平面电路，指的是可以画在平面上，各条支路除结点外不再交叉的电路。图 1-3 (a) 中共有三个网孔，如图中箭头所示。注意：网孔一定是回路，但回路不一定是网孔；同一电路中，网孔数不大于回路数。

(7) 二端网络：只有两个端点与外电路相连的电路称为二端网络或一端口网络，用 N 表示。图 1-3 (b) 是二端网络的图形符号。一个二端元件就是一个最简单的二端网络。从二端网络一端点流入的电流一定等于从另一端点流出的电流，称为端口电流；两个端点之间的电压称为端口电压。

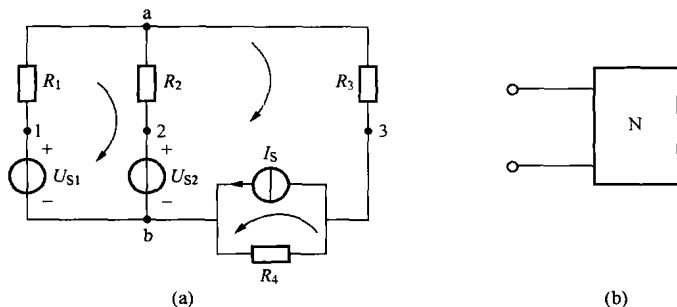


图 1-3 电路名词说明

(a) 典型电路；(b) 二端网络的图形符号

第二节 电路的主要物理量

描述电路的物理量主要有电流、电压、电荷和磁通。另外，电功率和电能也是重要的物理量。其中常用的是电压和电流。

一、电流

在电场力的作用下，带电粒子的定向移动形成电流（current）。衡量电流大小的量是电流强度，简称电流。所以电流是一种物理现象也是一个物理量。

1. 电流的大小

电流在量值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量，一般用 i 表示。若在极短的时间 dt 内通过导体横截面的电量为 dq ，则该处的电流为

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

若电流的量值和方向不随时间变动，即 dq/dt 为常数，则这种电流称为直流电流（direct current），简称直流（DC），用大写字母 I 表示，所以式（1-1）可改写为

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

式中 dq 或 q ——通过导体横截面的电荷量，单位库 [仑]，单位符号为 C；

dt 或 t ——时间，单位秒，单位符号为 s。

大小或方向随时间变化的电流称为变动电流。周期性变动且平均值为零的电流称为交变电流（alternating current），简称交流（AC），用小写字母 i 表示。

在国际单位制（SI）中，电流的单位名称是安 [培]（ampere），单位符号为 A。当每 1s（秒）内通过导体横截面的电量是 1C（库 [仑]）时，该导体中的电流为 1A（安）。常用单位：mA（毫安）， μ A（微安）。

各单位的换算关系为

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

用于构成十进倍数和分数单位的词头可参阅表 1-1。

表 1-1

SI 常用词头及符号

因数	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
词头名称	皮	纳	微	毫	厘	千	兆	吉	太
符号	p	n	μ	m	c	k	M	G	T

2. 电流的参考方向

电流的方向是客观存在的。习惯上，人们规定正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向为电流的实际方向。在简单电路中，人们很容易判断出电流的实际方向，但在分析较为复杂的电路时，某支路中的电流实际方向往往难以事先判定。另外，在交流电路中，电流是随时间变化的，无法用一个固定方向来表示它的方向。为此，在分析与计算电路时引入了“参考方向”（reference direction）的概念。

电路中一条支路的电流只可能有两个方向。任意规定某一方向作为电流数值为正的方向，称为参考方向。采用参考方向以后，电流就变为代数量（有正、有负）。若电流为正值，则电流的实际方向与参考方向一致；若电流为负值，则电流的实际方向与参考方向相反。这样就可以利用电流的参考方向和正负值来表明电流的实际方向。如图 1-4（a）、（b）所示。此后，本书电路图上标出的电流方向都是参考方向。

电流的参考方向在图上用实箭头线表示，实际方向用虚箭头线表示。有时也用双下标表

示。若支路 ab 上的电流为 I_{ab} ，表示电流参考方向选定为由 a 指向 b ，用 I_{ba} 表示电流参考方向由 b 指向 a 。显然，两者相差一个负号，即 $I_{ab} = -I_{ba}$ ，如图 1-4 (c) 所示。

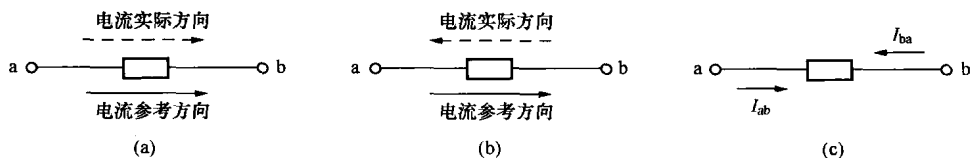


图 1-4 电流的方向

(a) $I > 0$; (b) $I < 0$; (c) $I_{ab} = -I_{ba}$

二、电压

带电粒子在电场中运动电场力必然要做功。电压 (voltage) 就是用来度量电场力做功能力的物理量。

1. 电压的大小

电路中 a 、 b 两点间的电压在数值上等于单位正电荷在电场力的作用下由 a 点移动到 b 点时电场力所做的功，用符号 u_{ab} 表示，即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中： dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量； dW 为转移过程中电场力所做的功。

电压的 SI 单位名称是伏 [特]，单位符号为 V。电压的常用单位：kV (千伏)，mV (毫伏)， μV (微伏)。各单位的换算关系为

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

根据电压是否随时间变化可分为直流电压和交流电压。

直流电压：大小和方向不随时间变化的电压，用大写字母 U 表示。

交流电压：大小和方向随时间按一定规律变化的电压称为交流电压，用小写字母 u 表示。

2. 电压的方向

若正电荷沿电力线方向运动，电场力做正功，电荷的电势能减小，则 $u_{ab} > 0$ ，此时 a 点到 b 点的电压也称为电压降。电压的实际方向即为电压降低的方向。

与电流的参考方向相似，在分析电路时电压也需选定参考方向。在标明电压参考方向之后，电压的数值就有了正、负之分。若电压为正值 ($U > 0$)，说明电压的实际方向与参考方向相同；若电压为负值 ($U < 0$)，说明电压的实际方向与参考方向相反。

表示电压的参考方向有三种方式，如图 1-5 所示。一是实线箭头；二是用双下标 (如 u_{ab}) 表示；还可以用“+”、“-”极性表示。“+”表示高电位，“-”表示低电位，代表电压参考方向从正 (+) 极性端指向负 (-) 极性端。本书中一般采用极性表示，电路图中出现的“+”、“-”都是参考极性，也就是参考方向。

分析电路之前要先标出电流和电压的参考方向，不标明参考方向而说某电流或某电压为正值或为负值是没有意义的。参考方向可以任意选定，但一经选定，在分析计算过程中不能变动。

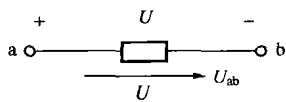


图 1-5 电压的参考方向

3. 关联参考方向

电流、电压参考方向的选择是任意的。但是为了方便起见，在电路中常常将元件上的电流和电压的参考方向选择为一致的方向，即电流的参考方向使得电流从电压的“+”极性端流入元件，从“-”极性端流出该元件。这种方式选择的电压、电流参考方向称为关联参考方向（associated reference direction）。反之，则为非关联参考方向。

在图 1-6 中，图（a）所示元件的 U 与 I 参考方向一致，为关联参考方向；图（b）所示元件的 U 与 I 参考方向不一致，为非关联参考方向；图（c）、（d）中， N 是二端网络，表示电路的一个部分。图（c）中电流 I 的参考方向自电压 U 的正极性端流入电路，从负极性端流出，两者的参考方向一致，所以是关联参考方向；图（d）所示电流和电压的参考方向是非关联的。

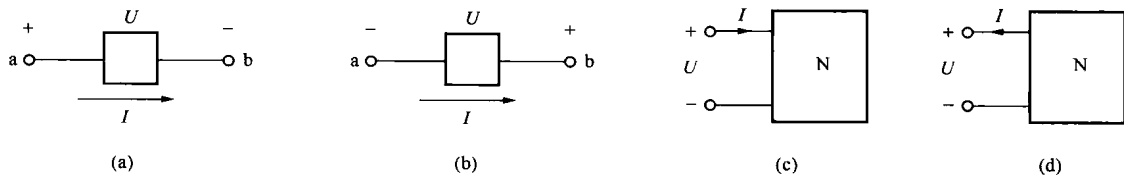


图 1-6 关联参考方向与非关联参考方向

三、电位

电位（potential）是分析电子电路常用的物理量。用电位来讨论问题，有时会给电路分析带来方便。

1. 电位与电压的关系

在电气设备的调试和检修中，经常要选择电路中的某一点作为参考点，然后测量其他各点的电位，看其是否符合设计数值。电位是度量电路中各点所具有的电位能大小的物理量，它在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所做的功。

对照电位与电压的定义可知：某点的电位即该点到参考点的电压，用符号 V 或 φ 表示。若参考点为 0，则 a 点电位为

$$\varphi_a = U_{a0} \quad (1-4)$$

若 a、b 两点的电位分别为 φ_a 、 φ_b ，则此两点间的电压为

$$U_{ab} = U_{a0} + U_{0b} = U_{a0} - U_{b0} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-5)$$

即电路中任意两点之间的电压等于这两点电位之差。

参考点本身电位为零，又称零电位点。从理论上来说，零电位点可以任意选定。在电工实用中，常选大地为电位参考点，在电路图中用图形符号“ $\perp$ ”表示。可见，要确定电路中的电位，首先要选定电位参考点。但要注意，在同一个电路中，只能选择一个电位参考点。

电位的单位：与电压的单位相同。

2. 电位的计算

电路中电位的计算实质上就是电压的计算。要计算电路中某一点的电位，就是从该点出发，沿着任选的一条路径“走”到零参考点，遇到电位降低取正值，遇到电位升高取负值，累计其代数和就是该点的电位。

例 1-1 如图 1-7 所示，已知 $U_1=8V$ ， $U_2=5V$ ， $U_3=-6V$ 。

(1) 选取 c 点为电位参考点, 求 a 点电位 φ_a 。

(2) 选取 d 点为电位参考点, 再求 a 点电位 φ_a 。

解 (1) 选取 c 点为电位参考点, 即 $\varphi_c = 0$, 则

$$\varphi_a = U_{ab} + U_{bc} = U_1 - U_2 = 8 - 5 = 3\text{V}$$

(2) 选取 d 点为电位参考点, 即 $\varphi_d = 0$, 则

$$\varphi_a = U_{ad} = U_1 - U_2 + U_3 = 8 - 5 + (-6) = -3\text{V}$$

由本例可得: 电位参考点变化时, 各点电位发生变化, 但电压的大小与电位参考点的选择无关。如何选择参考点要视分析计算问题的方便而定。电子电路中常选各有关部分的公共线作为参考点。

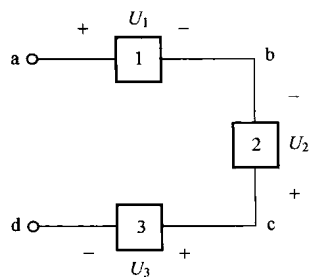


图 1-7 例 1-1 图

四、电动势

在图 1-8 所示的电路中, 在电场力的作用下, 正电荷不断地从高电位 A 端通过导线和负载流向低电位 B 端, 形成从高电位流向低电位的电流。即在电源外电路中, 电流的方向是从高电位流向低电位。为了维持导体中的电流, 必须借助外力把移动到低电位 B 端的正电荷经过另一路径回到高电位 A 端。在这个过程中外力要克服电场力做功, 这种外力称为电源力, 而反映这种外力大小的参数即为电源电动势 (electromotive force)。

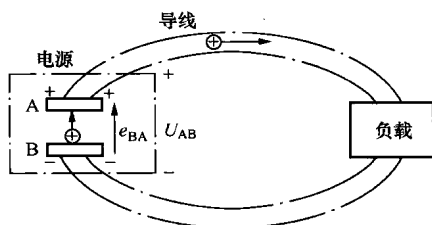


图 1-8 电源电动势和电压

电源电动势在数值上等于电源力将单位正电荷由电源负极经过电源内部移到电源正极所做的功。电动势用字母 e 表示, 即

$$e = \frac{dW_s}{dq} \quad (1-6)$$

电动势的单位与电压相同, 也是 V (伏特)。

电源电动势的实际方向是从低电位 (负极) 指向高电位 (正极), 是电位升的方向; 而电源电压的实际方向是从高电位 (正极) 指向低电位 (负极), 是电位降的方向。电动势的参考方向也可用箭头、双下标或 “+”、“-” 极性表示。

五、电功率

电功率 (power) 为电能转换的速率, 简称功率, 用符号 P 表示。

设在 dt 时间内, 正电荷 dQ 受电场力作用从高电位 A 点流向低电位 B 点减少的电能为 dW , 元件的电压和电流分别为 u 、 i , 则电功率 P 的大小

$$P = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

功率的 SI 单位名称是瓦特 (简称瓦), 单位符号为 W。其常用的单位还有 kW (千瓦), mW (毫瓦), μW (微瓦) 等, 它们之间的换算关系为

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

由于电压电流都是代数量, 故功率也是代数量, 有正、有负。那么如何利用正、负功率来判断某个元件是吸收还是发出功率呢?

在实际电路中, 当正电荷从元件上高电位经元件运动到低电位时, 电荷的电势能减少, 依据能量守恒原理, 电路元件吸收电能; 反之, 正电荷从低电位移至高电位, 电势能增加,

电路元件向外释放电能。

进行功率运算时,若电流电压取关联参考方向,则所得功率 P 应为元件吸收的功率。当 $P>0$,该元件实际吸收功率;当 $P<0$,该元件实际发出功率。反之,若电流电压取非关联参考方向,则所得功率 P 应当作元件发出的功率。当 $P>0$,该元件确实发出功率;当 $P<0$,该元件实际吸收功率。一个元件如果吸收功率为 100W ,也可认为它发出功率为 -100W ,同理,一个元件如果发出 100W 功率,也可认为吸收功率为 -100W 。这两种说法都是成立的。

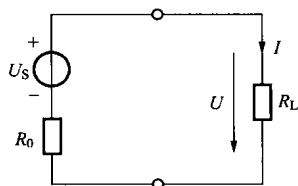


图 1-9 功率平衡

当电路接通后,电路中就有了电能和非电能的转换。根据能量转换和守恒定律,电路中电源提供的电能应该等于负载吸收电能的总和。如图 1-9 所示电路,电路中的功率关系为

$$P_S = P_L + \Delta P \quad (1-8)$$

式中 P_S ——电源电动势产生的功率 ($P_S = U_S I$);

P_L ——负载电阻吸收的功率 ($P_L = UI$);

ΔP ——电源内阻消耗的功率。

式 (1-8) 也称为电路的功率平衡方程式。其含义是:电路中电源发出的功率,等于各部分电阻吸收功率的总和。可见功率平衡方程式是能量守恒定律在电路中的具体表现。

例 1-2 在图 1-10 中,电流电压的参考方向已经标出。 $U_1 = 30\text{V}$, $U_2 = -30\text{V}$, $U_3 = 30\text{V}$, $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 4\text{A}$, $I_3 = -3\text{A}$ 。试求各元件的功率,并判断是发出功率还是吸收功率,并验证功率是否平衡。

解 元件 1: U 与 I 关联参考方向

$$P_1 = U_1 I_1 = 30 \times 1 = 30\text{W}$$

$P>0$, 故元件吸收功率,是负载。

元件 2: U 与 I 关联参考方向

$$P_2 = U_2 I_2 = -30 \times 4 = -120\text{W}$$

$P<0$, 故元件发出功率,是电源。

元件 3: U 与 I 非关联参考方向

$$P_3 = U_3 I_3 = 30 \times (-3) = -90\text{W}$$

$P<0$, 元件吸收功率,也是负载。

电路中电源提供的功率等于负载吸收的功率,功率平衡,说明计算正确。

六、电能

根据式 (1-7), 在 $t_0 \sim t$ 时间内, 电路转换的电能 (量) 为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-9)$$

直流情况下, 功率不随时间变化, 转换的电能为

$$W = P(t - t_0) \quad (1-10)$$

电能的 SI 单位名称是焦 [耳], 单位符号为 J, 它等于功率为 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。实际上常用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦·时) 作为电能单位。1 千瓦·时俗称 1 度电。单位 J 与 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的换算关系为

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

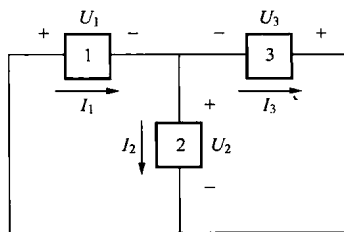


图 1-10 例 1-2 图

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff) 是 19 世纪德国物理学家。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。下面分别加以讨论。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's current law, KCL), 反映电路中任意结点各支路电流之间的关系。电荷是守恒的, 电荷在任一时刻任一结点处均不会消失, 故流入电路中任一结点的电流和总等于流出该结点的电流和。这个结论称为电流的连续性原理。

基尔霍夫电流定律的内容是: 在电路中, 任一瞬时, 连接在任一结点的各支路电流的代数和恒等于零。用数学式来表达, 即

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

应用式 (1-11) 列出的方程为基尔霍夫电流方程。在对电路中某一结点列写基尔霍夫电流方程时, 必须首先假定各支路电流的参考方向。运用 $\sum i = 0$ 时, 应规定电流的正、负号。例如, 当规定流入结点的电流为正时, 则流出结点的电流就为负。或者, 也可作相反规定, 计算结果是不受影响的。

图 1-11 所示为某电路的任意一个结点, 在图示的参考方向下, 若规定流出 (指参考方向) 结点的电流为正, 则流入该结点的电流为负, 可得 KCL 方程

$$-I_1 + I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

移项整理后得

$$I_2 + I_4 + I_5 = I_1 + I_3$$

方程的左边表示流出结点的总电流, 方程的右边表示流入该结点的总电流, 方程体现了 KCL 的本质, 即对于电路中的任一结点, 任一时刻, 流入结点电流的和等于流出该结点电流的和。

例 1-3 试写出图 1-12 电路中各电流间的关系。

解 根据 KCL
对结点 a 来说, 有

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

对结点 b 来说, 有

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

对结点 c 来说, 有

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

将上面三个等式相加, 得出

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

本例说明两点:

(1) 对于闭合面来说, 流入闭合面的电流代数和也等于零。可见, 基尔霍夫电流定律可以用于结点, 也可以推广应用于闭合面, 即任一时刻, 流入任一闭合面的所有电流代数

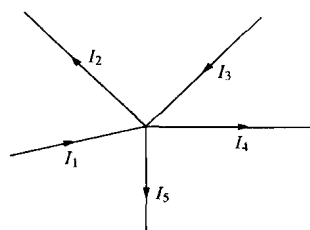


图 1-11 基尔霍夫电流定律示例

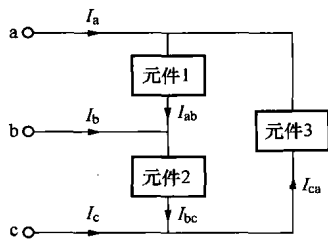


图 1-12 例 1-3 电路

和恒等于零。

(2) 基尔霍夫电流定律反映了电路中任一结点处各支路电流必须服从的约束关系, 与各支路上是什么元件无关。

例 1-4 图 1-13 所示为两个电气系统的连接, 试问两根导线中的电流 I_1 、 I_2 的关系。

解 将 A 或 B 系统视为一个闭合面, 根据基尔霍夫电流定律的推广应用可知: 用两根导线将两个电气系统联系起来以后, 不论两个电气系统内部如何复杂, 在两根导线中的电流必然存在 $I_1 = I_2$ 的关系, 即流入闭合面的电流等于流出闭合面的电流。

进一步分析可得, 如果用一条连接线连接两个网络, 如图 1-14 所示, 则该连接线上的电流 I 必为零。同时也表明了两部分电路之间传输电能, 只用一条导线连接是不行的, 至少要有两条导线来形成闭合回路。

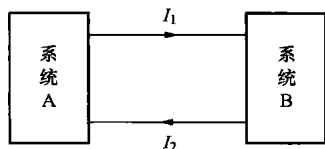


图 1-13 例 1-4 电路

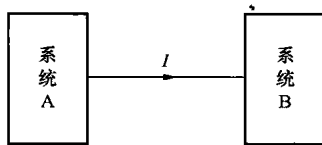


图 1-14 用一条导线连接的两个网络

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's voltage law, KVL), 反映电路中任一回路各支路电压之间的关系。沿任一闭合回路绕行一周, 电位会有升有降, 回到原出发点时, 电位的变化量应等于零。

基尔霍夫电压定律的内容是: 在电路中, 任一时刻, 沿任一回路的各支路电压代数和恒等于零, 即

$$\sum u = 0 \quad (1-12)$$

根据式 (1-12) 列写的方程为基尔霍夫电压方程。列写基尔霍夫电压方程必须首先标出电压参考方向并选定回路绕行方向 (顺时针或逆时针)。若电压参考方向与绕行方向相同, 则该电压前取 “+” 号; 若电压参考方向与绕行方向相反, 该电压前取 “-” 号。

图 1-15 所示为电路中的某一回路, 组成回路的四条支路的电压参考方向如图所示。选择顺时针方向为回路绕行方向。根据基尔霍夫电压定律 $\sum u = 0$, 列写出的电压方程为

$$-u_1 - u_2 + u_3 + u_4 = 0$$

将上式整理得

$$u_1 + u_2 = u_3 + u_4$$

方程的左边表示沿回路绕行方向的电位升高之和 (由低电位到高电位), 方程右边表示沿回路绕行方向的电位降低之和 (由高电位到低电位)。

方程体现了 KVL 方程的本质, 即任一时刻, 电路中的任一回路, 总的电位升等于总的电位降。

例 1-5 在图 1-15 中, 若 $u_1 = 8\text{V}$, $u_2 = -10\text{V}$, $u_3 = -5\text{V}$, 试求电压 u_4 。

解 选定该回路的方向如图所示, 由 KVL 得

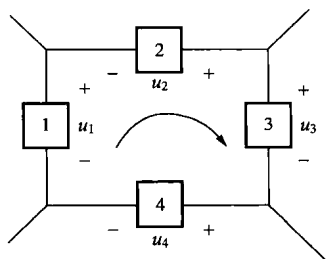


图 1-15 KVL 示例