



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电工基础

李玉清 主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电工基础

主 编 李玉清  
编 写 肖 曼 韩宏亮 徐金雄  
主 审 王 浩



中国电力出版社

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



## 内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分 11 章，主要内容包括电路的基本概念、定律、定理及分析方法，一阶电路，正弦稳态电路，含耦合电感的电路的分析，三相交流电路，非正弦周期电流电路的分析，磁路和铁芯线圈电路等。本书注重内容的先进性和实用性，理论联系实际，简明扼要，图文并茂，通俗易懂，便于教学和自学。

本书主要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“电工基础”课程的教材，也可供相关工程技术工作人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电工基础/李玉清主编. —北京: 中国电力出版社, 2009  
全国电力职业教育规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5083 - 9067 - 3

I. 电… II. 李… III. 电工学—职业教育—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 121509 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

\*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 273 千字

定价 18.00 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

---

本书是为高职高专院校电力技术类、自动化类及其他相关专业而编写的教材。教学经验告诉我们，对于高职高专电气技术类专业的教学要突出实用性和针对性，要符合高职、高专教育的特点，理论知识的学习要以应用为目的，以“必须、够用”为度。通过多年的高职教学研究，对高职电气技术类专业，我们的教学思路是围绕专业培养目标，科学制订教学计划，正确确立课程体系，合理构建知识、能力和素质结构，不断优化理论教学体系和实践教学体系。在这样的基础上我们经过了几年时间的策划，决定编写这本教材。

全书分为 11 章。每章均有重点和难点的提示，便于读者把握各章节纲线而使学习效果事半功倍。本教材建议理论教学 64~90 学时，各专业可根据各自需求安排学时和内容。

本书在编写设计上，充分考虑了高职教学的特点，目的是要让学生掌握基本的电工理论，注重电工理论的实际应用，理论部分以电路和电路元件、基本电路分析等与实际应用联系紧密的内容为重点。内容选取贴近实际应用，内容整合后避免了教学中重复教授的弊端，强调基本理论以“必须、够用”为度，贯彻“少而精”的原则。

本书注重基本理论的讲解，降低了对电磁学、高等数学等基础理论学科的依赖，根据高职高专培养目标和学生的实际情况，简化了理论性较强的分析方法和繁琐的公式推导，加强物理概念的阐述，力求简明扼要、深入浅出、通俗易懂，以便读者阅读。

本书编写的原则是“注重基础、精选内容、明晰概念、推陈出新、联系实际、侧重实用”。目的在于保证学生把基本内容学到手的基础上，培养学生分析、处理实际问题的能力。

本书的编写人员均是来自于高职高专院校从事电工、电路教学的第一线教师，具有丰富的教学经验。本书提供了必要的典型例题和习题，以便读者掌握基本内容，提高分析和解决问题的能力。

本书由三峡电力职业学院的李玉清担任主编，肖曼、韩宏亮任副主编。其中，第 1~3 章由李玉清编写，第 4、5、11 章由肖曼编写，第 6~8 章由韩宏亮编写，其余徐金雄编写。全书由李玉清统稿，保定电力职业技术学院王浩主审。

本书的编写过程中，编者参考了很多国内外相关资料和书籍，在此向有关资料、书籍的作者表示感谢。此外，我们要特别感谢的是保定电力职业技术学院王浩老师，对于本书的审阅倾注了极大心血，其敬业精神令人钦佩，感人至深！

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。若有意见和要求可通过电子信箱 liyq163163@163.com 与作者联系。

编 者

2009 年 7 月



# 目 录

## 前 言

第 1 章 电路的基本知识和定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	4
1.3 电路的基本元件	10
1.4 电路的基本定律	17
练习题	21
第 2 章 线性电阻电路的等效变换	24
2.1 等效二端网络	24
2.2 电阻之间的等效变换	25
2.3 电源之间的等效变换	29
2.4 运用等效变换简化含受控源的电路	33
2.5 直流电路中的几个问题	35
练习题	37
第 3 章 电阻电路的一般分析方法	39
3.1 电路的图	39
3.2 两类约束及 KCL 和 KVL 的独立方程数	40
3.3 支路电流 (电压) 法	42
3.4 网孔电流法	45
3.5 节点电压法	48
练习题	53
第 4 章 电路定理	56
4.1 叠加定理	56
4.2 替代定理	59
4.3 戴维南定理和诺顿定理	60
4.4 最大功率传输定理	65
练习题	67
第 5 章 一阶电路	70
5.1 动态电路的方程及其初始条件	70
5.2 一阶电路的零输入响应	75
5.3 一阶电路的零状态响应	79
5.4 一阶电路的全响应	81
练习题	83
第 6 章 相量法基础	86
6.1 复数	86

6.2	正弦量	88
6.3	相量的应用	90
6.4	基本元件伏安特性和基尔霍夫定律的相量形式	92
	练习题	97
<b>第7章</b>	<b>正弦稳态电路的分析</b>	99
7.1	阻抗和导纳	99
7.2	阻抗(导纳)的串联和并联	103
7.3	正弦稳态电路相量模型及相量图	105
7.4	正弦稳态电路的分析	106
7.5	正弦稳态电路的功率	109
7.6	谐振电路	113
	练习题	116
<b>第8章</b>	<b>含耦合电感电路的分析</b>	120
8.1	耦合电感的伏安关系	120
8.2	含有耦合电感电路的计算	124
8.3	空心变压器	130
8.4	理想变压器	133
	练习题	134
<b>第9章</b>	<b>三相交流电路</b>	137
9.1	三相交流电路的构成	137
9.2	线电压与相电压的关系	139
9.3	对称三相电路的计算	140
9.4	不对称三相电路的概念	142
9.5	三相电路的功率	144
	练习题	145
<b>第10章</b>	<b>非正弦周期电流电路</b>	148
10.1	非正弦周期量	148
10.2	非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	150
10.3	非正弦周期交流电路的计算	153
	练习题	157
<b>第11章</b>	<b>磁路及铁芯线圈</b>	159
11.1	电流的磁效应	159
11.2	磁场的基本物理量	160
11.3	磁性材料及其磁化曲线	161
11.4	磁路的基本概念及基本定律	164
11.5	恒定磁通铁芯磁路的计算	167
11.6	交流铁芯线圈的电路分析	169
	练习题	171
	参考文献	174

## 电路的基本知识和定律

### 重点与难点

本章内容是贯穿全书的重要理论基础。重点是电流和电压的参考方向，电路元件特性和基尔霍夫定律。难点是电压、电流的实际方向和参考方向的联系和差别，理想电路元件与实际电路器件的联系和差别，独立电源与受控电源的联系和差别。

### 1.1 电路和电路模型

#### 1.1.1 电路的组成及功能

电气技术的应用十分广泛，人们在生产和生活中时常会接触到一些实际电路。这些实际电路是为了完成某种预期的目标而设计、安装、运行的，如空调器电路在夏天炎热时可制冷，电暖器电路在冬天寒冷时可取暖等。这些实际电路通常由各种实体器件（如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、三极管等）组成。每一种实体器件又具有各自不同的电磁特性和功能，按照人们的需要，把相关实体器件按一定方式进行组合，就构成了一个个电路，用来传输电能、处理信号、测量、控制、计算等。

如此说来，什么是电路？归纳之就是电流通过的路径称为电路，它是由一些电气器件或部件按一定方式连接，为完成预期的目标而构成的电流通路。如果某个电路的元器件量大且结构较为复杂时，通常又把这些电路称为网络。电路和网络这两个术语是可以通用的。应急灯电路、取暖器电路是实际应用中的较为简单的电路，而电视机电路、电力系统电路、雷达导航电路、计算机电路是较为复杂的电路，但不管简单还是复杂，电路的组成部分都离不开三个基本环节：电源、负载和中间环节。如图 1-1 所示为应急灯实际简化电路。各环节的作用如下：

**电源**——向电路提供电能（信号）的装置。它可以将其他形式的能量，如化学能、热能、机械能、原子能等转换为电能。电压和电流是在电源的作用下（激励下）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。根据激励和响应之间的因果关系，可把激励称为输入，响应称为输出。

**负载**——是电路中接收（消耗）电能的装置。在电路中，负载作为电路的输出部分，把从电源接收到的电能转换为人们需要的能量形式，如电灯把电能转换成光能和热能，电动机把电能转换为机械能，被充电的蓄电池把电能转换为化学能等。

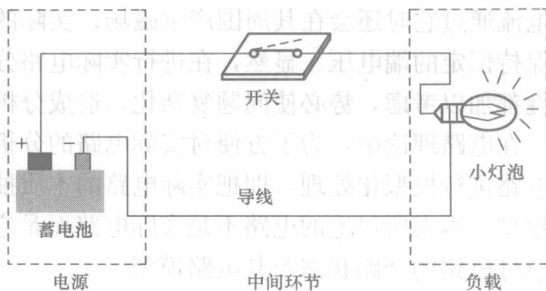


图 1-1 应急灯实际简化电路

中间环节——是传送、分配和控制电能的部分。电源和负载连通离不开传输导线，电路的通、断离不开控制开关，实际电路为了安全可靠工作还需要一些保护设备（如熔断器、热继电器等），它们在电路中起着传输和分配能量、控制和保护电气设备的作用。

工程应用中的实际电路，按照功能的不同可以分为两类：一类是为了实现能量的传输和转换，这类电路称为电力电路。特点是大功率、大电流。其主要功能是对发电厂发出的电能进行传输、分配和转换。如图 1-2 所示。

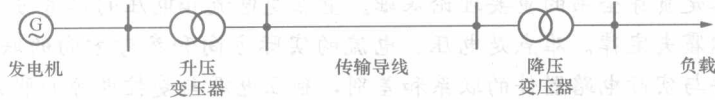


图 1-2 电力系统组成图

另一类是为了实现信号的传递和处理，这类电路称为信号电路。特点是小功率、小电流。其主要功能是实现对电信号的传递、变换、储存和处理。如图 1-3 所示。



图 1-3 声音信号处理图

电路的运行状态，相对电源而言，通常处于下列三种状态之一：负载状态、空载状态和短路状态。

负载状态时，负载与电源接通，负载中有电流通过，该电流称为负载电流。负载的大小分为满载、轻载和过载三种情况。负载在额定功率下的运行状态叫满载；低于额定功率的运行状态叫轻载；高于额定功率的运行状态叫过载。一般情况下不允许电路出现过载。

空载（或开路）状态时，负载与电源未构成闭合回路，电路中电流为零。这时电源的端电压叫做空载电压或开路电压。

短路状态是指由于某种原因使电源两端直接接通，这时电源两端的外电阻等于零，电源输出的电流仅由电源内阻限制，此电流称为短路电流。电力系统称之为短路故障，会使电路产生大量的热，温度迅速升高，可能烧坏导线，损坏电源及其他设备，影响电路的正常工作，是不容许的。

### 1.1.2 电路模型

人们设计和制作各种电路器件，是为了利用它们的主要电磁特性实现人们的需要。例如，制作一个电阻器，主要是利用它对电流呈现阻力的性质；制作一个电压源，主要是利用其能在正负极间保持一定电压的性质。但实际上电阻器不仅具有对电流呈现阻力的性质，同时电流通过它时还会在其周围产生磁场；实际的电压源也总是存在内阻的，因此使用时不可能保持恒定的端电压。显然，在进行实际电路分析和计算时，若对实际电气部件的全部电磁特性都加以考虑，势必使问题复杂化，造成分析和计算上的困难。

在电路理论中，为了方便对实际电路的分析和计算，通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理，即把实际电路的本质抽象出来所构成的理想化了的电路，称之为电路模型。本书所讨论的电路不是实际电路而是它们的电路模型。例如，图 1-4 (b) 所示为应急灯电路的开路状态及其电路模型。

由图 1-4 可看出，应急灯的实体电路较为复杂，而电路模型就清晰明了。

电路模型中的理想元件是在一定条件下对实际器件加以理想化，只考虑其中起主要作用



的某些电磁现象的元件，简称为电路元件。例如电阻器、灯泡、电炉等，这些电气设备接受电能并将电能转换成光能或热能，光能和热能显然不可能再回到电路中，因此我们把这种能量转换过程不可逆的电磁特性称之为耗能。这些电气设备除了具有耗能的电特性，当然还有其他一些电磁特性，但在研究和分析问题，即使忽略其他这些电磁特性，并不会影响整个电路的分析和计算。因此，我们就可以用一个只具有耗能电特性的理想的“电阻元件”作为它们的电路模型。

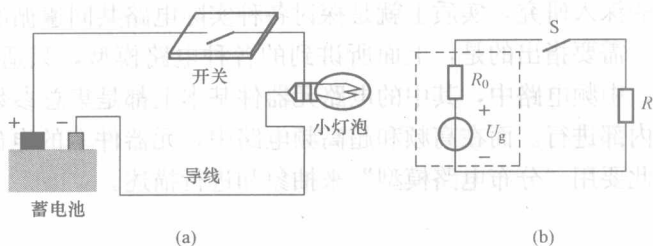


图 1-4 应急灯电路及其电路模型

(a) 应急灯电路；(b) 电路模型

同样，电感元件是表示其周围空间存在着磁场而储存磁场能量的元件；电容元件是表示其周围空间存在着电场而储存电场能量的元件等。根据端子的数目，对具有两个引出端的元件，称为二端元件；对具有两个以上引出端的元件，称为多端元件。

理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义，实际中并不存在，但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际，是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”，但“质点”这种理想模型在运动学原理分析与研究中举足轻重一样，人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。不同的实际电路器件，只要具有相同的主要电磁性能，在一定条件下可用同一个模型表示，如上述的灯泡、电炉、电阻器这些不同的实际电路器件在低频电路里都可用电阻  $R$  表示；同一个实际电路器件在不同的应用条件下，它的模型也可以有不同的形式。

实际电路器件的“电路模型”分为有源和无源两大类，如图 1-5 所示。

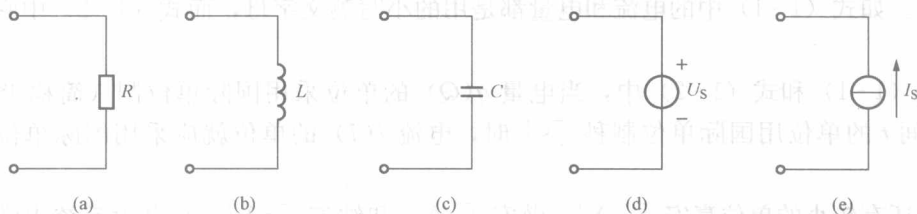


图 1-5 无源和有源的理想电路元件的电路模型

(a) 电阻元件；(b) 电感元件；(c) 电容元件；(d) 理想电压源；(e) 理想电流源

图 1-5 中的无源二端元件有电阻元件、电感元件和电容元件。由于实际器件上的电磁特性无非就是归纳为这三种抽象，因此通常把它们称为电路的三大基本元件，是实际电路器件的理想抽象，其电磁特性单一而确切。

图 1-5 中的有源二端元件有理想电压源和理想电流源。其中的“源”是指它们能向电路提供电能。如果电源的主要供电方式是向电路提供一定的电压，就是电压源，若主要供电方式是向电路提供一定的电流，就称为电流源。

电路模型具有两大特点：一是它里面的任何一个元件都是只具有单一电磁特性的理想电路元件，因此反映出的电磁现象都可以用数学方式来精确地分析和计算；二是对各种电路模

型的深入研究,实质上就是探讨各种实际电路共同遵循的基本规律。

需要指出的是,上面所讲到的各种电路模型,只适用于低、中频电路的分析,因为在低、中频电路中,其中的电路元器件基本上都是集总参数元件,其电磁过程都分别集中在元件内部进行。而在高频和超高频电路中,元器件上的电磁过程并不是集中在元件内部进行,因此要用“分布电路模型”来抽象和进行描述。

## 1.2 电路的基本物理量

电工基础中涉及的物理量主要有电流、电压、电荷、磁通、电功率和电磁能量。在电路分析中人们主要关心的物理量是电流、电压和功率。

### 1.2.1 电流及其参考方向

电荷有规则的定向移动形成电流。在直流电路中,电流的大小和方向不随时间变化;在正弦交流电路中,电流的大小和方向按正弦规律变化。

在金属导体内部,自由电子可以在原子间作无规则的运动;在电解液中,正负离子可以在溶液中自由运动。如果在金属导体或电解液两端加上电压,在金属导体内部或电解液中就会形成电场,自由电子或正负离子就会在电场力的作用下,作定向移动从而形成电流。

电流的大小是用单位时间内通过导体横截面的电量进行衡量的,称为电流强度,即

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

直流电路中,电流的大小及方向都不随时间变化时,其电流强度可表示为

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

注意:在电路理论中,一般把变量用小写的英文字母来表示,而把恒量用大写的英文字母来表示。如式(1-1)中的电流和电量都是用的的小写英文字母,而式(1-2)中它们则用大写。

在式(1-1)和式(1-2)中,当电量 $q(Q)$ 的单位采用国际单位制(简称IS)库仑[C]、时间 $t$ 的单位用国际单位制秒[s]时,电流 $i(I)$ 的单位就应采用国际单位制安培[A]。

电流还有较小的单位毫安[mA]、微安[ $\mu\text{A}$ ]和纳安[nA],在电力系统中常使用更大的单位[kA],它们之间的换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}; 1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} = 10^9\text{nA}$$

习惯上,我们规定电流的方向为正电荷的运动方向亦即电流的实际方向。

在分析计算电路时,当涉及某个元件或部分电路的电流时,有必要事先指定电流的参考方向。因为尽管我们规定了电流的实际方向,但具体电路中电流的实际方向往往是未知的,也可能是随时间变化的。

参考方向是计算复杂电路时任意假定的方向。实际电路中电流的参考方向是可以任意选定的,但一经确定就不得更改。

电流参考方向的表示方法如图1-6所示。

(1) 用实线箭头表示:箭头的指向为电流的参考方向。

(2) 用双下标表示：如  $i_{AB}$ ，电流的参考方向由 A 指向 B。



图 1-6 电流参考方向的表示

参考方向和电流实际方向的关系：

(1) 实际方向与参考方向一致时，电流值为正，大于零；实际方向与参考方向相反时，电流值为负，小于零。或者说，依据所选定的参考方向计算出来的电流值大于零，则电流的实际方向与参考方向一致；电流值小于零，则电流的实际方向与参考方向相反。如图 1-7 所示。

(2) 引入参考方向的目的在于，可以用代数量说明电流的大小和方向，代数值的绝对值表示电流的大小，正值和负值可以判定电流的实际方向。不设定参考方向而谈电流的正负是没有意义的。



图 1-7 参考方向和电流实际方向的关系

**例 1-1** 在图 1-8 中，各电流的参考方向已设定。已知  $I_1 = 10\text{A}$ ， $I_2 = -2\text{A}$ ， $I_3 = 8\text{A}$ 。试确定  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的实际方向。

**解** 由题设可知， $I_1 > 0$ ，故  $I_1$  的实际方向与参考方向相同， $I_1$  由 a 点流向 b 点。

$I_2 < 0$ ，故  $I_2$  的实际方向与参考方向相反， $I_2$  由 b 点流向 c 点。

$I_3 > 0$ ，故  $I_3$  的实际方向与参考方向相同， $I_3$  由 b 点流向 d 点。

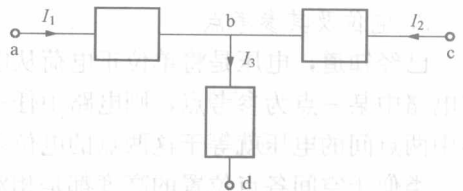


图 1-8 例 1-1 图

### 1.2.2 电压、电位和电动势

#### 1. 电压及其参考方向

根据物理学可知，电压就是将单位正电荷从电路中一点移至电路中另一点，电场力所作的功，用数学式可表达为

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

对于直流电路则为

$$U_{ab} = \frac{W_a - W_b}{q} \quad (1-4)$$

当电功的单位用焦耳 [J]，电量的单位用库仑 [C] 时，电压的单位是伏特 [V]。1V 电压相当于移动 1C 正电荷电场力所作的功为 1J。在电力系统中常用千伏 [kV]；在无线电系统中常用毫伏 [mV]、微伏 [ $\mu\text{V}$ ] 作电压单位。各种单位之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; 1\text{V} = 10^3\text{mV}$$

大小和方向都不随时间变化的电压称为直流电压,用大写字母  $U$  表示。大小和方向都随时间变化的电压称为交流电压,用小写字母  $u$  表示。

习惯上,我们规定电压的方向为电场力作用下正电荷的运动方向亦即电压的实际方向。

在分析计算电路时,当涉及某个元件或部分电路的电压时,有必要事先指定电压的参考方向。因为尽管我们规定了电压的实际方向,但具体电路中电压的实际方向往往是未知的,也可能是随时间变化的。

实际电路中电压的参考方向是可以任意选定的,但一经确定就不得更改。

电压参考方向的表示方法如图 1-9 所示。

- (1) 用实线箭头表示:箭头的指向为电压的参考方向。
- (2) 用双下标表示:如  $U_{AB}$ ,由 A 指向 B 的方向为电压(降)的参考方向。
- (3) 用正负参考极性表示:由正极指向负极的方向为电压(降)的参考方向。

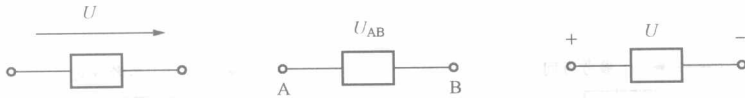


图 1-9 电压参考方向的三种表示方法

在设定电路中电压的参考方向以后,若经计算得电压  $U_{AB}$  为正值,说明电压的方向由 A 点指向 B 点;若  $U_{AB}$  为负值,说明电压的方向由 B 点指向 A 点。同电流一样,两点间电压数值的正与负在设定参考方向的条件才有意义。

## 2. 电位及其参考点

已经知道,电压是将单位正电荷从电路中一点移至电路中另一点电场力所作的功。如确定电路中某一点为参考点,则电路中任一点与参考点之间的电压就称为该点的电位。如此电路中两点间的电压就等于这两点的电位之差了。

类似于空间各点位置的高度都是相对于海平面或某个参考高度而言的道理,电路中各点的电位也具有相对性,只有先明确了电路的参考点,再讨论电路中各点的电位才有意义。电路理论中规定:电位参考点的电位取零值,其他各点的电位值均要和参考点相比。高于参考点的电位是正电位,低于参考点的电位是负电位。

理论上,参考点的选取是任意的。但实际应用中,由于大地的电位比较稳定,所以电力系统经常以大地作为电路参考点。有些设备和仪器的底盘、机壳往往需要与接地极相连,这时我们也常选取与接地极相连的底盘或机壳作为电路参考点。电子技术中的大多数设备,很多元件常常连接到一个公共点,为方便分析和研究,我们也常常把电子设备中的公共连接点作为电路的参考点。

为了区别于电压,我们把电位用单注脚的“V”表示。如果设电路中参考点的电位为零,则电路中某点 a 的电位可表示为

$$V_a = U_{a0} \quad (1-5)$$

如果已知 a、b 两点的电位各为  $V_a$ ,  $V_b$ , 则此两点间的电压等于这两点的电位差。

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

即电路中任意两点间电压,在数值上等于这两点电位之差。由此,电位的单位与电压的单位

相同,也是伏特 [V];由式(1-6)也可以看出,电压是绝对量,电路中任意两点间的电压大小,仅取决于这两点电位的差值,与参考点无关。而电压的方向则是由高电位指向低电位。

引入电位的概念后,给分析电路中的某些问题带来了不少方便。因为电位的高低正负都是相对于参考点而言的。只要电路参考点确定之后,电路中各点的电位数就是唯一确定的了,并且在数值上等于该点到参考点之间的电压。因此,在电子技术中检测电路时,常常选取某一公共点作为参考点,用电压表的负极表棒与该点相接触,而正极表棒只需点其他各点来测量它们的电位是否正常,即可查找出故障点。又如,一个电子电路中有5个不同的点,任意两点间均有一定的电压,直接用电压来讨论要涉及10个不同的电压,而改用电位讨论时,只需把其中的一个点作为电路参考点,其余只讨论4个点的电位就可以了。

### 3. 电动势

电动势是一个表征电源特征的物理量,它反映了电源内部能够将非电能转换为电能的本领。定义为“把单位正电荷从电源负极通过电源内部移到正极时,非静电力所作的功”。非静电力有不同的来源。在化学电源(干电池、蓄电池)中,非静电力是一种与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用;在温差电源中,非静电力是一种与温度差和电子浓度差相联系的扩散作用;在一般发电机中,非静电力起源于磁场对运动电荷的作用,即洛伦兹力。

如图1-10所示,非静电力克服电场力把单位正电荷 $q$ 由低电位B端移到高电位A端,所作的功 $W$ 称为电动势,用 $E$ 表示即 $E=W/q$ 。其定义式的形式与电压、电位类同,因此它们的单位相同,都是伏特[V]。如果非静电力把1C的电量从点B移到点A,所作的功是1J,则电动势就等1V。在电路分析中,电动势的方向规定为从低电位指向高电位,即由电源负极指向电源正极,即电位升高的方向。而表示同一电源时,电源电动势的方向与电源电压的方向相反。

#### 1.2.3 关联参考方向

在分析和计算电路的过程中,一个元件或部分电路的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端,即两者采用同向的参考方向称关联参考方向,如图1-11(a)所示;当两者不一致时,称为非关联参考方向,如图1-11(b)所示。为了避免麻烦,我们在假设元件是负载时,一般把元件两端电压的参考方向与通过元件中的电流的参考方向选成一致即取关联参考方向;当我们假设元件是电源时,参考方向一般选择非关联参考方向。

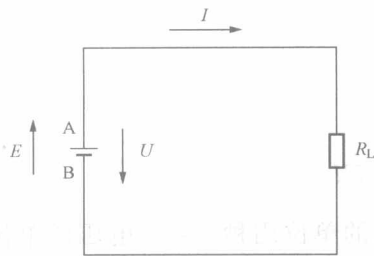


图 1-10 电动势

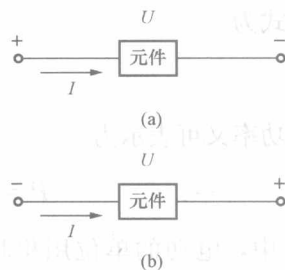


图 1-11 电压、电流参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向



在运用参考方向时要注意以下几个问题:

(1) 分析电路前必须选定电压和电流的参考方向, 并且关联。

(2) 参考方向一经选定, 必须在图中相应位置标注 (包括方向和符号), 在计算过程中不得任意改变。

(3) 同一电压或电流的参考方向选择不同时, 其结果是绝对值相等而异号, 但实际大小和方向不变。

分析和计算电路的最后结果, 当某一所求电压或电流得正值, 说明它的实际方向与参考方向相同; 若某一所求电压或电流得负值, 则说明它的实际方向与参考方向相反。

### 1.2.4 电功和电功率

#### 1. 电功

电路在工作状况下伴随有电能与其他形式能量的相互转换。当正电荷从电路元件的电压“+”极经元件运动到“-”极时, 与此电压相应的电场力对电荷做功, 这时元件吸收电能。反之正电荷从元件的电压“-”极经元件运动到“+”极时, 电场力作负功, 元件向外释放电能。电能的大小体现出电场力做功的多少, 定义为电功。

从  $t_0$  到  $t$  的时间内, 元件吸收的电能可依据电压的定义求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于  $i = \frac{dq}{dt}$ , 所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-7)$$

式中, 由于  $u$  和  $i$  是时间的函数, 并且是代数量, 因此, 电能  $W$  也是时间的函数, 且也是代数量。

在直流电路中, 电功又可表示为

$$W = UI t \quad (1-8)$$

式中, 电压的单位用伏特 [V], 电流的单位用安培 [A], 时间的单位用秒 [s] 时, 电功 (或电能) 的单位是焦耳 [J]。工程实际中, 还常常用千瓦时 [kW·h] 来作为电功 (或电能) 的单位, 1kW·h 俗称为一度电, 即  $1\text{kW}\cdot\text{h} = 1\text{kW} \times 1\text{h}$ 。

#### 2. 电功率

单位时间内电场力做的功称为电功率 (或功率), 即是电场力做功的速率。电功率用  $P$  表示, 数学表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-9)$$

在直流电路中, 功率又可表示为

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中, 电功的单位用焦耳 [J], 时间的单位用秒 [s], 电压的单位为伏特 [V], 电流的单位为安培 [A] 时, 电功率的单位是瓦特 [W]。电力系统中常用 kW。

对于电压、电流、功率概念的应用, 电力系统中所使用的电器须在铭牌上注明它的额定值 (该电器具有最佳技术和经济性能的参数) 即额定电压和额定功率, 前者说明该电器适用

的电压等级，后者是对用电设备能量转换本领的度量。例如“220V，100W”的白炽灯，说明它适用于220V电压等级，在两端加220V电压时，可在1s内将100J的电转换为光能和热能；1只“220V，40W”的白炽灯，则指它两端加220V电压时，在1秒钟内只能将40J的电转换为光能和热能，显然，“220V，100W”的白炽灯能量转换的本领大。需要注意的是：用电器实际消耗的电功率只有实际加在用电器两端的电压等于它铭牌数据上的额定电压时，才等于它铭牌上的额定功率。用电器上加的实际电压小于额定电压时，由于用电器的参数不变，则通过的电流也一定小于额定电流，因此实际功率是电压、电流的乘积，必定小于额定功率；当用电器上加的实际电压大于额定电压时，由于用电器的参数不变，则通过的电流也一定大于额定电流，因此实际功率也必定大于额定功率。

### 3. 电路吸收或发出功率的判断

由于电功率与电压和电流密切相关，其与电压和电流的关系可表达为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-11)$$

(1)  $u$ 、 $i$  取关联参考方向时 [见图 1-11 (a)]， $p=ui$  表示元件吸收的功率。

若  $p>0$  吸收正功率 (实际吸收)； $p<0$  吸收负功率 (实际发出)。

(2)  $u$ 、 $i$  取非关联参考方向时 [见图 1-11 (b)]， $p=ui$  表示元件发出的功率。

若  $p>0$  发出正功率 (实际发出)； $p<0$  发出负功率 (实际吸收)。

这表明：电路分析中，电功率也是一个有正、负之分。当一个电路元件上吸收 (有时亦说消耗) 的电功率为正值时，说明这个元件在电路中接受电能，是负载；若电路元件上吸收的电功率为负值时，说明它在向电路发出电能，起电源的作用，是电源。对一完整的电路，电源发出的功率总是等于负载吸收的功率，满足功率平衡，体现出能量守恒。

**例 1-2** 求图示电路中各方框所代表的元件吸收或发出的功率。

已知： $U_1=1V$ ， $U_2=-3V$ ， $U_3=8V$ ， $U_4=-4V$ ， $U_5=7V$ ， $U_6=-3V$ ， $I_1=2A$ ， $I_2=1A$ ， $I_3=-1A$ 。

**解** 元件 1 的电压、电流参考方向非关联，其功率为： $p_1=u_1i_1=1\times 2=2W$ ，发出功率；

元件 2 的电压、电流参考方向关联，其功率为： $p_2=u_2i_1=(-3)\times 2=-6W$ ，发出功率；

元件 3 的电压、电流参考方向关联，其功率为： $p_3=u_3i_1=8\times 2=16W$ ，吸收功率；

元件 4 的电压、电流参考方向关联，其功率为： $p_4=u_4i_2=(-4)\times 1=-4W$ ，发出功率；

元件 5 的电压、电流参考方向关联，其功率为： $p_5=u_5i_3=7\times (-1)=-7W$ ，发出功率；

元件 6 的电压、电流参考方向关联，其功率为： $p_6=u_6i_3=(-3)\times (-1)=3W$ ，吸收功率。

电路中总的发出功率为： $p_1+p_2+p_4+p_5=2+6+4+7=19W$

电路中总的吸收功率为： $p_3+p_6=16+3=19W$

两者相等说明：对一完整的电路，发出的功率等于消耗的功率。

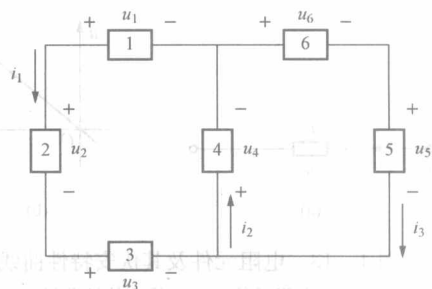


图 1-12 例 1-2 图

### 1.3 电路的基本元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。元件的特性通过与端子有关的物理量描述。每一种元件反映某种确定的电磁性质，是实际器件的理想化元件。这里所说的理想化是指：假定这些电磁性质可以分别研究，并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行；即是在任一时刻，从二端元件的一个端子流入的电流一定等于从另一端子流出的电流，两个端子之间的电压为单值量。这样的元件（电阻、电容、电感）称为集总参数元件，简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等；按是否给电路提供能量分为无源元件和有源元件；另外还可分为线性和非线性、时不变和时变元件等。

#### 1.3.1 电阻元件

线性电阻元件是这样的理想二端元件：在电压和电流取关联参考方向时，在任何时刻其两端的电压和电流服从欧姆定律

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

线性电阻元件的图形符号如图 1-13 (a) 所示。上式中  $R$  为电阻元件的参数，称为元件的电阻，是一个正实常数。当电压单位用  $[V]$ ，电流单位用  $[A]$  时，电阻的单位为  $[\Omega]$ （欧姆，简称欧）。

令  $G = \frac{1}{R}$ ，式 (1-12) 变成

$$i = Gu \quad (1-13)$$

式中， $G$  称为电阻元件的电导。电导的单位是  $[S]$ （西门子，简称西）。 $R$  和  $G$  都是电阻元件的参数。

由于电压和电流的单位分别是伏和安，因此表明电阻元件的电压、电流关系的特性称为伏安特性。图 1-13 (b) 画出线性电阻元件的伏安特性曲线，它是通过原点的一条直线。直线的斜率  $U/I$  为元件的电阻  $R$ 。

线性电阻元件经过  $u-i$  平面的直线有两个特殊的情况，一是直线与  $u$  轴重合，二是直线与  $i$  轴重合。当直线与  $u$  轴重合时，流过它的电流恒为零值，就把它称为“开路”。开路处的伏安曲线与电压轴重合，它相当于  $R = \infty$  或  $G = 0$ ，如图 1-14 (a) 所示。当直线与  $i$  轴重合时，它的端电压恒为零值，称为“短路”。短路处的伏安曲线与电流轴重合，它相当于  $R = 0$  或  $G = \infty$ ，如图 1-14 (b) 所示。

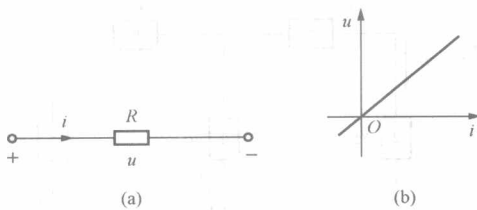


图 1-13 电阻元件及其伏安特性曲线

(a) 电阻元件；(b) 伏安特性曲线

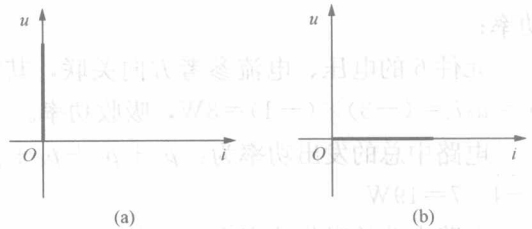


图 1-14 开路和短路的伏安特性曲线

(a) 开路；(b) 短路

当电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时, 电阻元件吸收的功率为

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

$R$  和  $G$  是正实常数, 故功率  $p$  恒为非负值。所以线性电阻元件是一种无源元件。实际电阻器的功率都有规定的限度, 超过规定值就会使电阻器因过热而损坏。所以实际使用电阻器时, 既要使电阻值大小符合要求, 又要注意消耗的功率不要超过其额定值。

电阻元件从  $t_0$  到  $t$  的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi \quad (1-15)$$

电阻元件把吸收的电能转换成热能。

非线性电阻元件的电压电流关系不满足欧姆定律, 而遵循某种特定的非线性函数关系。其伏安特性一般可写为

$$u = f(i) \text{ 或 } i = g(u) \quad (1-16)$$

如果一个电阻元件具有以下的电压电流关系

$$u(t) = R(t)i(t) \text{ 或 } i(t) = G(t)u(t) \quad (1-17)$$

这里  $u$  和  $i$  仍是比例关系, 但比例系数  $R$  是随时间变化的, 故称为时变电阻元件。

线性电阻元件的伏安特性曲线位于第一、三象限。如果一个电阻元件的伏安特性曲线位于第二、四象限, 则此元件的电阻为负值, 即  $R < 0$ , 那么就是有源的。负电阻元件实际上是一个发出电能的元件。如果要获得这种元件, 一般需要专门设计。

### 1.3.2 电容元件

电容元件是表征产生电场、储存电场能量的元件。在外电源作用下, 电容器两极板上分别带上等量异号电荷, 撤去电源, 极板上电荷仍可长久地存在下去, 其特性可用  $u-q$  平面上的一条曲线来描述, 称为库伏特性。

线性电容元件的图形符号如图 1-15 (a) 所示, 当电压参考极性与极板储存电荷的极性一致时, 线性电容元件的库伏特性可数学描述为

$$q = Cu \quad (1-18)$$

式中,  $C$  是电容元件的参数, 称为电容, 它是一个正实常数。在国际单位制 (SI) 中, 当电荷和电压的单位分别为  $C$  和  $V$  时, 电容的单位为  $[F]$  (法拉, 简称法)。在实用中, 这个单位太大, 常用微法  $[\mu F]$ 、皮法  $[pF]$  作为电容的单位,  $1\mu F = 10^{-6}F$ ,  $1pF = 10^{-12}F$ 。

图 1-15 (b) 中, 以  $q$  与  $u$  为坐标轴画出电容元件的库伏特性曲线。线性电容元件的库伏特性曲线是一条通过原点的直线。

电路分析中主要讨论电容元件的伏安关系。若电容的端电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向, 则有

(1) 伏安关系的微分形式

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-19)$$

上式表明: 电流  $i$  正比于电压  $u$  的变化率, 与  $u$  的大小无关, 因而电容是动态元件; 当  $u$  为常数 (直流) 时,  $i = 0$ , 所以在直流电路中, 电容相当于开路, 电容有隔断

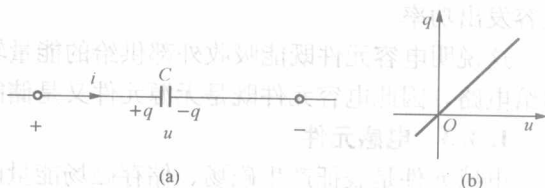


图 1-15 电容元件及其库伏特性曲线

(a) 电容元件; (b) 库伏特性曲线