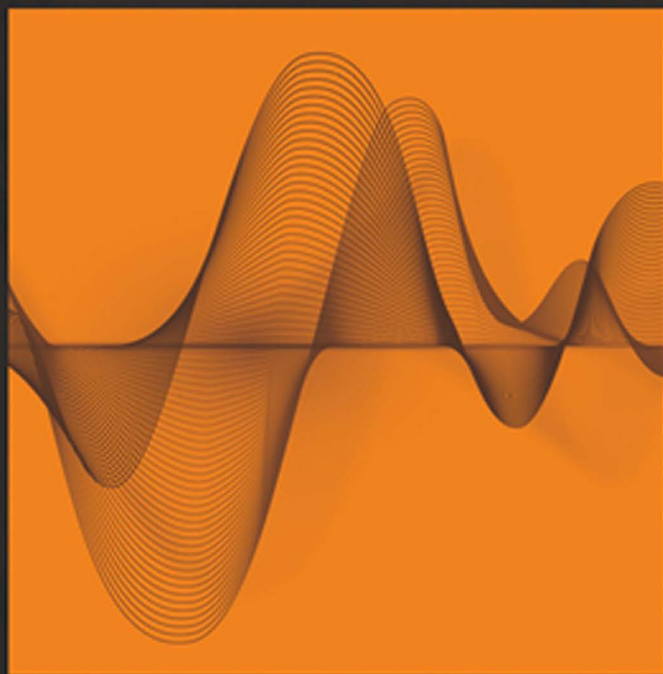


面向 21 世纪高等院校精品教材 · 电工电子基础系列

# 电路理论及应用

主 编 胡福年 黄 艳

副主编 闫俊荣 王晓燕



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 电路理论及应用

主 编 胡福年 黄 艳  
副主编 闫俊荣 王晓燕

## 内 容 简 介

本教材由电路的基本概念、电路的基本分析方法、电路定理、正弦稳态电路分析、三相电路、多频信号电路与谐振、耦合电感、理想变压器和二端口网络、动态电路的时域分析、线性动态电路的频域分析和线性电路网络的拓扑分析组成。

本教材在保持完整的电路理论体系的同时，将理论与工程应用、计算机仿真相结合，以增强其实用性。

本教材可作为电气类、电子信息类、自动化类、仪器类专业“电路”课程的教材，也可作为相关课程或全国硕士研究生统一招生考试参考书的参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电路理论及应用 / 胡福年, 黄艳主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2020. 8

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8895 - 8

I. ①电… II. ①胡… ②黄… III. ①电路理论 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 146552 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 唐山富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 23.5

字 数 / 552 千字

版 次 / 2020 年 8 月第 1 版 2020 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 59.80 元

责任编辑 / 江 立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

“电路分析”课程为电气类与电子信息类专业的技术基础课，是所有强电专业和弱电专业的必修课。它既是电气类与电子信息类专业课程体系中数学、物理学等科学基础课的后续课程，又是电气类与电子信息类专业的后续课程的基础。在电气类与电子信息类专业的人才培养方案和课程体系中起着承前启后的重要作用。

本教材由10章内容组成：电路的基本概念、电路基本分析方法、电路定理、正弦稳态电路分析、三相电路、多频信号分析与谐振、耦合电感、理想变压器和二端口网络、动态电路的时域分析、线性动态电路的频域分析、线性电路网络的拓扑分析。

“电路分析”课程的目标：通过本课程的学习，学生能够掌握电路的基本理论、分析电路的基本方法和实验的初步技能，并为后续课程准备必要的电路知识。

本教材具有以下特点。

(1) 以电路理论知识和分析方法为基础，介绍了电路定理、定律和分析方法，并进行了归纳总结，强调了分析和解决问题时的注意事项。

(2) 在理论分析过程中注重与工程实践相结合，依据各章节内容特点设置软件仿真分析和工程案例引入。

(3) 根据题目难度分层次安排课后习题。

在本教材的编写上，胡福年教授负责统筹安排、审稿以及工程案例的编写，黄艳老师负责第1章、第2章、第3章、第6章、第7章的编写，闫俊荣老师负责第8章、第9章以及第10章的编写，王晓燕老师负责第4章和第5章的编写。

<b>第 1 章 电路的基本概念</b> .....	( 1 )
1.1 电路及其物理量 .....	( 2 )
1.1.1 实际电路及其电路模型 .....	( 2 )
1.1.2 电路的基本物理量 .....	( 3 )
1.2 基尔霍夫定律 .....	( 8 )
1.2.1 电路中常用术语 .....	( 8 )
1.2.2 基尔霍夫电流定律(KCL) .....	( 9 )
1.2.3 基尔霍夫电压定律(KVL) .....	( 11 )
1.3 电路元件 .....	( 13 )
1.3.1 电阻元件 .....	( 13 )
1.3.2 电容元件 .....	( 24 )
1.3.3 电感元件 .....	( 29 )
1.4 电源元件 .....	( 33 )
1.4.1 独立电源 .....	( 33 )
1.4.2 受控源(非独立电源) .....	( 42 )
1.5 复杂电路的等效变换 .....	( 44 )
1.5.1 实际电源电路模型及其等效变换 .....	( 44 )
1.5.2 电阻的星形连接与三角形连接的等效变换(Y- $\Delta$ 变换) .....	( 50 )
1.5.3 平衡电桥 .....	( 57 )
1.6 输入电阻 .....	( 59 )
1.7 应用实例 .....	( 62 )
1.7.1 电气安全知识 .....	( 62 )
1.7.2 电桥电路的应用 .....	( 64 )
1.8 Multisim 仿真分析 .....	( 66 )
习题 .....	( 69 )
<b>第 2 章 电路的基本分析方法</b> .....	( 76 )
2.1 支路电流法 .....	( 77 )



2.1.1	KCL 和 KVL 方程的独立性	( 77 )
2.1.2	支路电流法概述	( 78 )
2.1.3	含独立电流源电路的支路电流法	( 79 )
2.1.4	含受控源电路的支路电流法	( 81 )
2.2	网孔电流法	( 82 )
2.2.1	网孔电流法概述	( 83 )
2.2.2	含独立电流源电路的网孔电流法	( 88 )
2.2.3	含受控源电路的网孔电流法	( 90 )
2.2.4	回路电流法	( 92 )
2.3	结点电压法	( 93 )
2.3.1	结点电压法概述	( 93 )
2.3.2	含独立电压源电路的结点电压法	( 98 )
2.3.3	含受控源电路的结点电压法	( 100 )
	习题	( 103 )
<b>第 3 章</b>	<b>电路定理</b>	( 107 )
3.1	叠加定理	( 108 )
3.2	戴维南定理和诺顿定理	( 113 )
3.2.1	戴维南定理	( 113 )
3.2.2	诺顿定理	( 118 )
3.3	最大功率传输定理	( 122 )
	习题	( 124 )
<b>第 4 章</b>	<b>正弦稳态电路分析</b>	( 128 )
4.1	正弦交流电路	( 129 )
4.1.1	正弦量的三要素	( 129 )
4.1.2	同频正弦量相位差	( 130 )
4.1.3	正弦量有效值	( 131 )
4.2	相量法	( 132 )
4.2.1	复数的表示形式与运算法则	( 132 )
4.2.2	正弦交流电的相量表示	( 134 )
4.3	电路基本定律与元件 VCR 的相量形式	( 136 )
4.3.1	基尔霍夫定律的相量形式	( 136 )
4.3.2	元件 VCR 的相量形式	( 136 )
4.4	无源一端口网络的阻抗和导纳	( 141 )
4.4.1	阻抗	( 141 )
4.4.2	导纳	( 143 )
4.4.3	RLC 单一元件的阻抗和导纳	( 145 )
4.4.4	RLC 串并联支路的阻抗和导纳	( 146 )



4.5	相量法分析正弦稳态电路	(147)
4.6	正弦稳态电路的功率	(150)
4.6.1	瞬时功率和平均功率	(151)
4.6.2	无功功率和视在功率	(152)
4.6.3	$RLC$ 单一元件的有功功率和无功功率	(152)
4.6.4	功率因数提高的意义与措施	(154)
4.6.5	复功率	(156)
4.7	最大功率传输	(158)
4.8	应用实例	(160)
	习题	(160)
<b>第5章</b>	<b>三相电路</b>	<b>(163)</b>
5.1	三相电路的特点	(164)
5.1.1	对称三相电路的构成特点	(164)
5.1.2	对称三相电路的连接方式	(166)
5.2	三相电路的分析	(171)
5.2.1	对称三相电路的分析计算	(171)
5.2.2	不对称三相电路的分析	(175)
5.3	三相电路的功率	(177)
5.3.1	对称三相电路的功率分析	(177)
5.3.2	三相电路的功率测量	(179)
5.4	工程应用实例	(181)
5.5	Multisim 仿真	(181)
	习题	(182)
<b>第6章</b>	<b>多频信号电路与谐振</b>	<b>(184)</b>
6.1	多频信号电路	(185)
6.1.1	非正弦周期信号和傅里叶级数	(185)
6.1.2	非正弦周期电流电路的计算	(188)
6.1.3	非正弦周期电流电路的平均值、有效值和平均功率	(190)
6.2	谐振电路	(192)
6.2.1	串联谐振	(192)
6.2.2	并联谐振	(195)
6.3	应用实例	(197)
	习题	(198)
<b>第7章</b>	<b>耦合电感、理想变压器和二端口网络</b>	<b>(201)</b>
7.1	耦合电感	(202)
7.1.1	互感	(202)



7.1.2	同名端	(204)
7.1.3	耦合电感线圈上的电压、电流关系	(204)
7.2	含耦合电感电路的分析	(205)
7.2.1	互感的去耦等效	(205)
7.2.2	含耦合电感电路的分析	(209)
7.3	理想变压器	(211)
7.3.1	变压器的理想化模型	(211)
7.3.2	理想变压器的主要性能	(212)
7.3.3	含理想变压器电路的分析	(214)
7.4	二端口网络	(215)
7.4.1	二端口网络的定义	(215)
7.4.2	二端口网络方程和参数	(216)
7.4.3	二端口网络的连接	(223)
7.4.4	二端口网络的等效电路	(227)
7.5	应用案例	(230)
	习题	(231)
<b>第8章</b>	<b>动态电路的时域分析</b>	<b>(236)</b>
8.1	动态电路的描述以及初始值的确定	(237)
8.1.1	动态电路的暂态过程	(237)
8.1.2	动态电路的方程描述	(238)
8.1.3	动态电路初始值的确定	(239)
8.2	一阶电路的零输入响应	(242)
8.2.1	RC电路的零输入响应	(242)
8.2.2	RL电路的零输入响应	(245)
8.3	一阶电路的零状态响应	(247)
8.3.1	RC电路的零状态响应	(247)
8.3.2	RL电路的零状态响应	(249)
8.3.3	阶跃函数和阶跃响应	(251)
8.4	一阶电路的全响应	(254)
8.4.1	一阶电路的全响应及其分解方式	(254)
8.4.2	一阶电路全响应的三要素法	(256)
8.4.3	微分电路和积分电路	(260)
8.5	单位冲激函数和一阶电路的冲激响应	(262)
8.5.1	单位冲激函数	(262)
8.5.2	一阶电路的冲激响应	(263)
8.6	二阶电路的零输入响应	(266)
8.7	二阶电路的零状态响应和全响应	(272)
8.7.1	二阶电路零状态响应	(272)



8.7.2 二阶电路的全响应 .....	(274)
8.8 卷积积分 .....	(275)
8.9 动态电路时域计算机仿真分析 .....	(277)
8.10 应用实例 .....	(280)
习题 .....	(282)
<b>第9章 线性动态电路的频域分析 .....</b>	<b>(287)</b>
9.1 拉普拉斯变换的定义 .....	(288)
9.2 拉普拉斯变换的基本性质 .....	(289)
9.3 拉普拉斯反变换 .....	(294)
9.4 运算电路 .....	(299)
9.4.1 $s$ 域中的基尔霍夫定律 .....	(299)
9.4.2 电路元件的电路模型 .....	(299)
9.5 线性动态电路的复频域分析 .....	(303)
9.6 网络函数的定义 .....	(307)
9.7 网络函数与冲激响应 .....	(309)
9.8 网络函数的零点和极点 .....	(311)
9.9 网络函数极点与网络的稳定性 .....	(312)
9.10 极点、零点与频率响应 .....	(314)
9.11 动态电路复频域计算机辅助分析 .....	(316)
9.12 应用实例 .....	(322)
习题 .....	(324)
<b>第10章 线性电路网络的拓扑分析 .....</b>	<b>(327)</b>
10.1 电路网络图论 .....	(328)
10.2 网络拓扑图的矩阵表示 .....	(332)
10.3 矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_f$ 、 $\mathbf{Q}_f$ 之间的关系 .....	(338)
10.4 回路电流方程的矩阵形式 .....	(339)
10.5 结点电压方程的矩阵形式 .....	(343)
10.6 状态方程 .....	(348)
10.6.1 状态方程的建立 .....	(348)
10.6.2 输出方程的建立 .....	(352)
10.7 线性网络矩阵方程的 MATLAB 辅助分析 .....	(353)
10.8 应用实例 .....	(356)
10.8.1 线性代数方程组的数值解法 .....	(357)
10.8.2 状态方程的复频域解法 .....	(360)
习题 .....	(362)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(364)</b>

# 第 1 章

## 电路的基本概念

### 章节引入

在日常生活中，人们会遇到或用到各种各样的电子产品和电器设备，它们的内部结构，都是由一些电路元器件连接而成的实际电路（见二维码 1-1）。另外，我们在电器的铭牌上也会见到一些参数，如额定电压、额定电流、额定功率等（见二维码 1-2）。那么，这些电压、电流如何产生的？如何分析电路中的电压与电流呢？这些电路的基本概念就是本章介绍的内容。



二维码 1-1  
实际电路



二维码 1-2  
电器铭牌

### 本章内容提要

本章主要介绍电路及其物理量、基尔霍夫定律、电路元件、电源元件、复杂电路的等效变换以及输入电阻。本章的最后对电气安全知识及电桥的应用进行了介绍，并利用 Multisim 软件对基尔霍夫定律进行了仿真分析。本章内容是本课程的基础，后续章节都是在这些基本概念和基本定律的基础上展开的。

### 工程意义

本章所介绍的电压、电流、功率等参数，可以用来检查系统、设备是否正常运行或出现故障，是选择设备的重要性能指标。



## 1.1 电路及其物理量

电在日常生活、工农业生产和国防科技等行业应用非常广泛，如电视机、计算机、通信系统以及电力系统等。

### 1.1.1 实际电路及其电路模型

实际电路是指为了实现某种功能，由电路元器件（如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管等）按照一定的方式相互连接构成的电流通路。实际电路的种类繁多，如自动控制系统、通信系统、电力系统和集成电路芯片等。不同的实际电路几何尺寸也相差很多，如电力系统或通信系统可能跨省跨国，而集成电路芯片小的如同指甲。这些电路的特性和功能也各不相同。总体来说，电路的作用有两种：一种是实现电能的传输、分配与转换，如电力系统；另一种是实现信号的处理、测量、控制和计算等功能，如控制系统、信号处理系统等。

在电路分析中，为了方便对实际电气装置的分析 and 研究，通常需要在一定条件下对实际电路采用模型化处理，即用抽象的理想电路元件及其组合近似地代替实际的器件，从而构成与实际电路相对应的电路模型。理想电路元件是指根据实际电路元件所具备的电磁性质所假想的具有某种单一电磁性质的元件，其电压、电流关系可用数学公式严格表示。理想的电路元件有电阻元件、电容元件、电感元件和电源元件。电阻元件是一种只消耗电能的元件，电感元件是一种能够产生磁场并储存磁场能量的元件，电容元件是一种能够产生电场并储存电场能量的元件，电源元件是一种能够将其他形式的能量转变成电能的元件。

电路模型只是近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求，应当用不同的电路模型模拟同一实际电路，这个过程称为电路的建模。实际电路由电源（信号源）、负载和中间环节构成。其中，电源（信号源）用来提供能量或信息，电源（信号源）的电压或电流称为激励（输入），它推动电路工作。由激励所产生的电压和电流称为响应（输出）。负载是指能够将电能转化为其他形式的能量，或者对信号进行处理的用电设备。中间环节将电源（信号源）与负载连接成通路。实际电路及其模型如图 1-1 所示，从 (a) 到 (b) 为建模的过程。

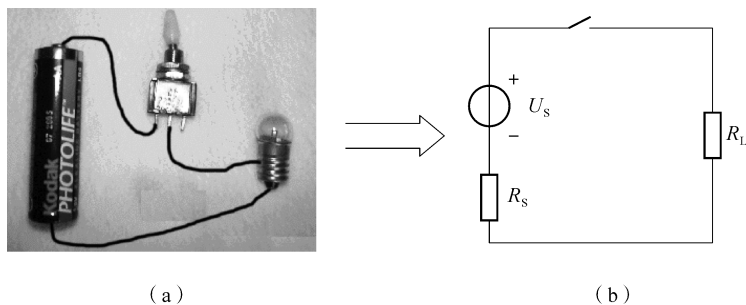


图 1-1 实际电路及其模型

(a) 实际电路；(b) 电路模型

根据实际电路的几何尺寸  $d$  与其工作信号波长  $\lambda$  的关系, 可以将电路分为两大类: 集总参数电路和分布参数电路。满足  $d \ll \lambda$  条件的电路称为集总参数电路; 不满足  $d \ll \lambda$  条件的电路称为分布参数电路。例如, 电磁波的传播速度  $v = 3 \times 10^8$  km/s, 我国电力系统的用电频率是 50 Hz, 则其对应的波长  $\lambda = \frac{v}{f} = 6000$  km, 一般电路的尺寸远远小于波长, 可以视为集总参数电路, 但电力系统的远距离传输电路, 则需要利用分布参数电路进行建模。

本书主要讨论集总参数电路, 简称电路。集总参数电路是电路基本定律 (基尔霍夫定律) 应用的前提。

## 1.1.2 电路的基本物理量

电路理论及应用中涉及的物理量主要有电流  $i(t)$ 、电压  $u(t)$ 、电荷  $q$ 、磁通  $\Phi$ 、电功率  $p(t)$  和电磁能量  $W(t)$  等。在电路分析中, 人们主要关心的物理量是电流, 电压、电位、电动势、电功率和电能。

### 1. 电流

电荷的定向移动形成电流。电流既是一种物理现象, 也是一个表征带电粒子有秩序运动强弱的物理量。电流既有大小又有方向, 我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度, 用来衡量电流的大小。电流强度简称电流, 用符号  $i$  表示, 其表达式为

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

式 (1-1) 中, 如果电荷的单位是库仑 (C), 时间的单位是秒 (s), 则电流的国际单位 (SI) 是安培 (A), 简称安。另外, 电流的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 ( $\mu\text{A}$ ) 等。它们之间的换算关系为  $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ ,  $1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA}$ ,  $1 \text{ mA} = 10^3 \mu\text{A}$ 。

如果电流的大小和方向都不随时间变化, 则称为直流电流, 用大写字母  $I$  表示; 如果电流的大小和方向随时间变化, 则称为时变电流, 用小写字母  $i$  表示; 如果时变电流的大小和方向作周期性变化且平均值为零, 则称为交流电流。常用的交流电为正弦交流电, 将会在后续章节中介绍。

电流具有三大效应: 热效应、磁效应和化学效应。热效应是指电流通过导体时会发热; 磁效应是指通过导体的电流在其周围会产生磁场; 化学效应是指电流中的带电粒子会使物质发生化学反应。

规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。因此, 元件 (导线) 中电流流动的实际方向只能是从  $A$  流向  $B$  或者从  $B$  流向  $A$ , 如图 1-2 所示。

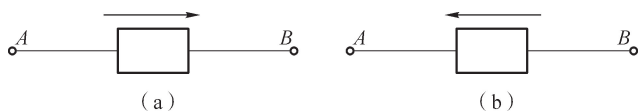


图 1-2 电流的实际流向

(a)  $A$  流向  $B$ ; (b)  $B$  流向  $A$



简单电路电流的实际方向可以由电源的极性判断出来，但对于复杂电路，特别是时变电流的实际方向又随时间不断变化，很难判断出电流的实际方向。因此，引入电流的参考方向，即在分析电路之前任意规定一个方向作为电流的参考方向，标在电路图上，参考方向可以任意设定。

电流的参考方向有两种表示方法，分别是箭头和双下标，如图 1-3 所示。通常使用电流表测量电流，电流的分类和使用见二维码 1-3。

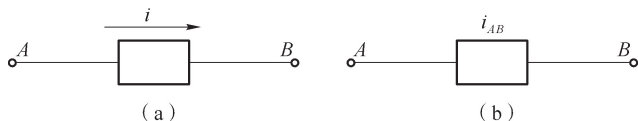


图 1-3 电流参考方向的两种表示方法

(a) 箭头表示法；(b) 双下标表示法



二维码 1-3

电流表的分类和使用

如果电流的实际方向与参考方向一致，则电流为正值， $i > 0$ 。如果电流的实际方向与参考方向相反，则电流为负值， $i < 0$ 。因此，根据电流的参考方向和电流值的正负，就可以判断出电流的实际方向。

例如，当  $i = -1 \text{ A}$  时，说明电流的实际方向与参考方向相反，当  $i = 1 \text{ A}$  时，说明电流的实际方向与参考方向相同。

在分析和计算电路时，必须先规定电流的参考方向。否则电流的正负毫无意义。

## 2. 电压、电位和电动势

### 1) 电压

电荷在电路中移动，就会交换能量。单位正电荷从  $a$  点移动到  $b$  点获得的能量或失去的能量定义为  $ab$  两点之间的电压：

$$u_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中，如果能量的单位是焦耳 (J)，电荷的单位是库仑 (C)，则电压的单位为伏特 (V)，简称伏。另外还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 ( $\mu\text{V}$ ) 等单位。它们之间的换算关系为  $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ ， $1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV}$ ， $1 \text{ mV} = 10^3 \mu\text{V}$ 。一节干电池的工作电压为  $1.5 \text{ V}$ ，家用电器的工作电压为  $220 \text{ V}$ ，安全用电电压为  $36 \text{ V}$ 。

如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电压，用大写字母  $U$  表示。如果两点间的电压随时间变化，则称为交流电压，用小写字母  $u$  表示。

习惯上认为电压的实际方向为从高电位指向低电位，即电位降低的方向。高电位用正极符号 “+” 表示，低电位用负极符号 “-” 表示。

在复杂电路或交变电路中，两点间电压的实际方向往往不易判别，这就给实际电路的分析和计算带来了困难。为了便于电路的分析和计算，我们也像电流一样，引入电压的参考方向，即在电路中任意规定两点间电压的正负极性，如果电压的实际方向与参考方向一致，则电压为正，即  $u > 0$ 。如果电压的实际方向与参考方向相反，则电压为负，即  $u < 0$ 。因此，根据电压的参考方向和电压值的正负，可以判断出电压的实际方向。

电压的参考方向有 3 种表示方法，分别是箭头、双下标和正负极性，如图 1-4 所示。

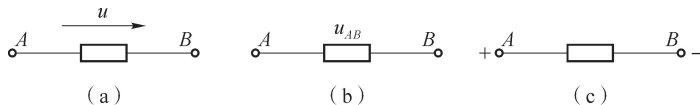


图 1-4 电压参考方向的表示方法

(a) 箭头表示法; (b) 双下标表示法; (c) 正负极性表示法

电压的测量采用电压表与被测元件或被测支路并联的方式，在测量直流电压时，应注意电压表的极性。电压表的分类和使用见二维码 1-4。



二维码 1-4

### 2) 电位

在分析电路的过程中会经常用到电位的概念，如三极管需要通过计算或测量其 3 个电极的电位来判断其工作状态。另外，在实际工程应用中也需要通过测量某些点的电位来进行设备的调试和维修。因此，在分析电路时，常常在电路中选择一点作为参考点，单位正电荷  $q$  从电路中  $a$  点移动到参考点时获得或失去的能量就定义为  $a$  点的电位，用  $\varphi_a$  表示。由于参考点的电位为 0，因此参考点也称为零电位点。在实际应用中，对于电力电气线路，一般以大地作为参考点，用“ $\perp$ ”符号表示，而对于电子电路，一般以设备的外壳或底板作为参考点，用“ $\perp$ ”符号表示。电位的单位和电压相同，用伏特 (V) 表示。因此，某一点的电位等于该点到参考点之间的电压。参考点的表示如图 1-5 所示。

电压表的分类和使用

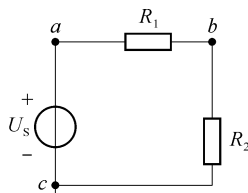


图 1-5 参考点的表示

在图 1-5 中，设  $c$  点为电位参考点，则  $\varphi_c = 0 \text{ V}$ ，根据电位和电压的定义可得

$$\varphi_a = U_{ac}$$

$$\varphi_b = U_{bc}$$

$$U_{ab} = U_{ac} - U_{bc} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可以看出：电路中任意两点间的电压等于该两点间的电位差。因此，在电路的分析和计算过程中，往往把计算某点电位的问题转化为计算该点到参考点之间电压的问题。

电路中的电位参考点可任意选择。参考点一经选定，电路中各点的电位值就是唯一的。电位的高低是相对的，与选的参考点有关。当选择不同的电位参考点时，电路中各点电位值将改变，但任意两点间电压是绝对的，保持不变。

### 3) 电动势

电动势只存在于电源的内部，由电源本身的性质决定，反映了电源力（非电场力）做功的能力，即电源把其他形式的能转化为电能的本领。电动势定义为在电源内部非电场力把单位正电荷从低电位移动到高电位做的功，用  $E$  来表示， $E = \frac{dW}{dt}$ 。方向从电源的负极“-”指向电源的正极“+”，单位为伏特 (V)。电动势与电压的关系如图 1-6 所示，其中  $R_s$  为电源的内阻。在如图 1-6 (a) 所示电路中，直流电源在没有与外电路连接的情况下，其两端电压  $U$  与其电动势  $E$  大小相等，方向相反。在如图 1-6 (b) 所示电路中，当与



外电路连接时，由于电源内部有电阻  $R_s$ ，存在压降，故其电动势  $E$  的大小会小于两端电压  $U$  的大小。

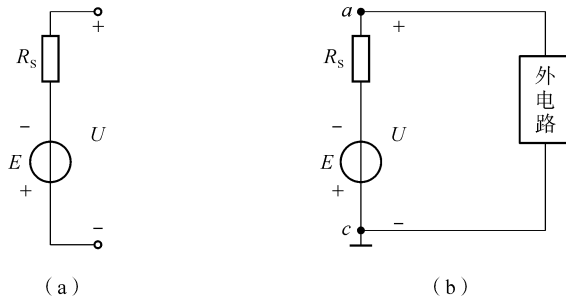


图 1-6 电动势与电压的关系

(a) 电源与外电路无连接；(b) 电源与外电路相连接

通过以上介绍可知，电压和电流的参考方向可以任意假设，且二者相互独立。对于某个二端元件、某条支路或某个二端网络来讲，如果电压的参考方向和电流的参考方向相同，则称为关联参考方向，如图 1-7 所示为关联参考方向。如果电压的参考方向和电流的参考方向不相同，则称为非关联参考方向，如图 1-8 所示为非关联参考方向。

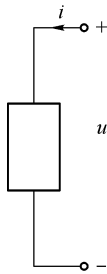


图 1-7 关联参考方向

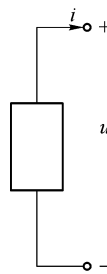


图 1-8 非关联参考方向

在分析电路时，一般采用关联参考方向。若选取关联参考方向，则只需标出一种参考方向。除特别说明外，本书均采用关联参考方向。

### 3. 电功率和电能

电路中的电流能够使电路进行工作，如可以让灯泡发光、电动机转动等，即电流能够做功且做功的同时会伴随着能量的产生和转换。另外，在实际应用中，电气设备的功率也会受到限制。在电路中，单位时间内电场力所做的功称为电功率，即

$$p = \frac{dW}{dt} \tag{1-4}$$

当电压、电流采取关联参考方向时， $i$  与  $u$  表示为

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$u = \frac{dW}{dq}$$

电功率表示为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-5)$$

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位为瓦特 (W),  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。另外, 功率的单位还有千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、毫瓦 (mW)、微瓦 ( $\mu\text{W}$ ) 等。

与电压、电流一样, 功率也是一个代数量。当元件或二端电路的电压  $u$ 、电流  $i$  取关联参考方向时,  $p = ui$  表示元件或二端电路吸收的功率。如果求得的功率  $p > 0$ , 则表示吸收正功率 (即实际吸收功率); 如果求得的功率  $p < 0$ , 则表示吸收负功率 (即实际发出功率)。当元件或二端电路的电压  $u$ 、电流  $i$  取非关联参考方向时,  $p = ui$  表示元件或二端电路发出的功率。如果此时求得的功率  $p > 0$ , 表示发出正功率 (即实际发出功率); 如果求得的功率  $p < 0$ , 表示发出负功率 (即实际吸收功率)。因此, 在计算功率时, 必须先判断待求元件或二端电路的电压和电流的参考方向是否关联。

对于同一个电路元件而言, 吸收的功率和发出的功率互为相反数, 即  $p_{\text{吸收}} = -p_{\text{发出}}$ 。根据能量守恒定律, 对于一个完整的电路, 发出的总功率等于消耗的总功率, 满足功率平衡。

变压器、电机等电气设备 (或电子元件) 在出厂时会在铭牌上标注额定电压、额定电流和额定功率等参数。额定值是指用电设备在长期、安全的工作条件下的最高限值, 其中额定功率反映了电气设备在额定条件下能量转换的本领。

**注意:** 电气设备在正常工作时, 不得超过其额定值, 否则会损害设备。

例如, 某电动机铭牌上标有“380 V, 2.2 kW”的字样, 是指当其工作电压为 380 V 时, 输出的功率为 2.2 kW; 铭牌上标有“220 V, 20 W”的电灯, 说明在其工作电压为 220 V 时, 吸收的功率为 20 W。

**【例 1-1】** 在图 1-9 所示的二端电路中, 已知  $u = 10 \text{ V}$ ,  $i = -5 \text{ A}$ 。求各二端电路的功率, 并判断实际是吸收功率还是发出功率。

**解:** 图 1-9 (a): 对于二端电路来讲, 电压  $u$  与电流  $i$  属于关联参考方向, 则

$$p_{\text{吸收}} = ui = 10 \text{ V} \times (-5 \text{ A}) = -50 \text{ W} < 0$$

因此, 二端电路实际发出功率 50 W。

图 1-9 (b): 对于二端电路来讲, 电压  $u$  与电流  $i$  属于非关联参考方向, 则

$$p_{\text{发出}} = ui = 10 \text{ V} \times (-5 \text{ A}) = -50 \text{ W} < 0$$

因此, 二端电路实际吸收功率 50 W。

一段时间内电场力做功的大小用电能来衡量, 二端元件或二端电路从  $t_0$  到  $t$  时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

在国际单位制 (SI) 中, 电能的单位是焦耳 (J)。

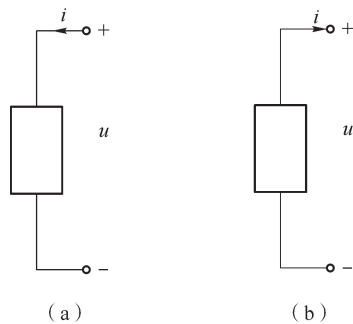


图 1-9 例 1-1 电路

(a)  $i$  流入; (b)  $i$  流出



图 1-10 电子式预付费电能表

日常生活中常用“度”来衡量电能，1 度 = 1 kW · h。即 1 kW 的设备用电 1 h 消耗的电能为 1 度。例如，功率为 40 W 的灯泡照明 25 h 使用 1 度电。

电能表是用来测量电能的仪表，也称为电度表、火表或千瓦小时表，根据工作原理可分为机械式、电子式和机电一体式。图 1-10 为电子式预付费电能表，这种电能表采用先充值购买电能再消费的方式，显示器显示购买电能的数量和剩余的电量，可以进行余量报警。

**【例 1-2】** 某电炉连接 110 V 电源，工作电流为 15 A，试计算其工作 2 h 消耗的电能。

**解：** 电炉功率为  $p = ui = 110 \text{ V} \times 15 \text{ A} = 1.65 \text{ kW}$ ；

工作 2 h 消耗电能为  $W = pt = 1.65 \text{ kW} \times 2 \text{ h} = 3.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

## 1.2 基尔霍夫定律

1845 年，德国物理学家 G. R. 基尔霍夫首次提出了基尔霍夫定律。基尔霍夫定律是任何集总参数电路都适用的基本定律，它反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的基本规律，在电路分析中具有举足轻重的地位。基尔霍夫定律与元件的伏安特性构成了电路分析的基础。

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。基尔霍夫电流定律描述了电路中各支路电流的约束关系，基尔霍夫电压定律描述了电路中各电压的约束关系。

### 1.2.1 电路中常用术语

#### 1. 支路

支路是指电路中通过同一电流的分支。通常用  $b$  表示支路数，支路上流经的电流和支路两端的电压分别称为支路电流和支路电压。

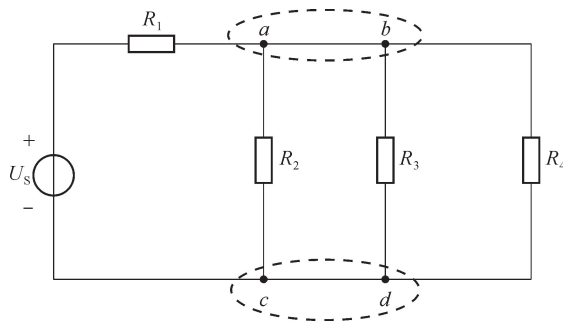


图 1-11 支路、结点和回路示例电路