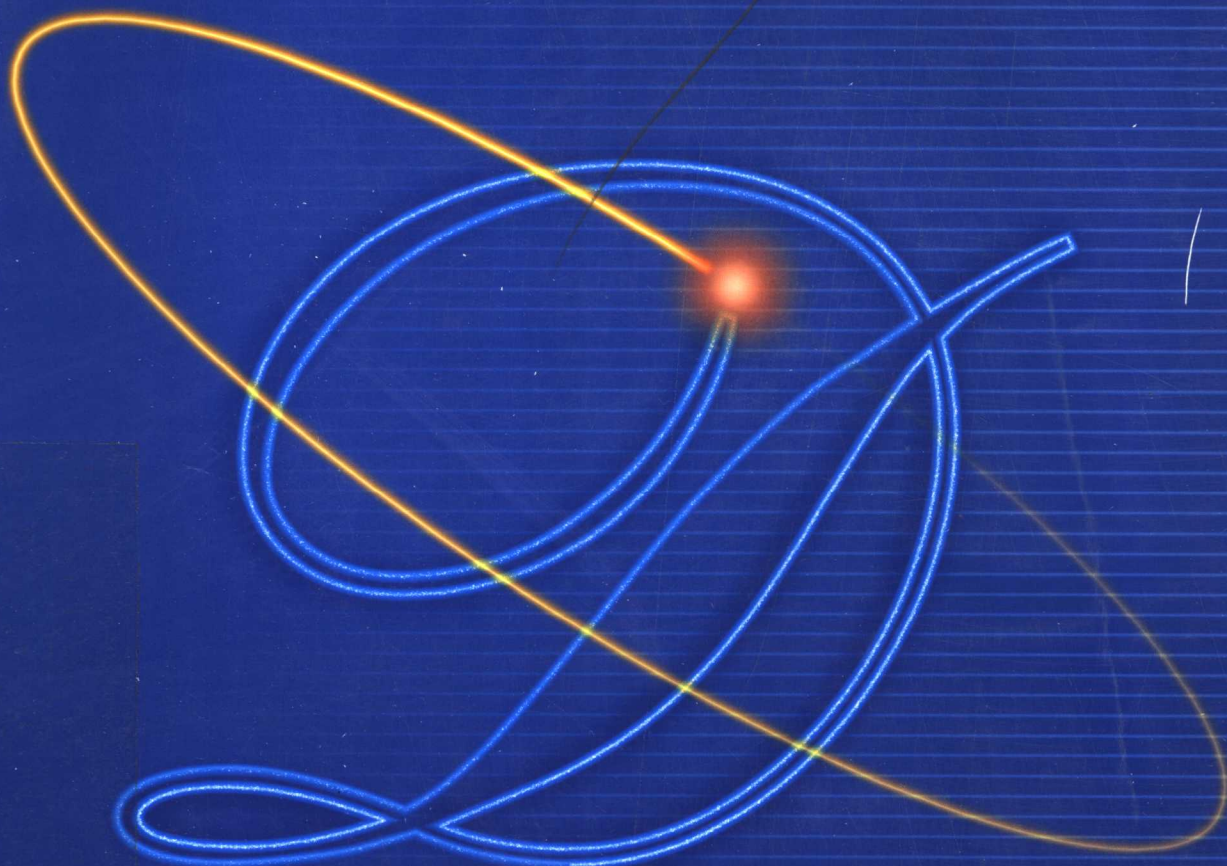




普通高等教育“十一五”规划教材

# 电路理论基础

李 芳 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



本书是根据教育部颁布的高等工科院校“电路分析课程教学基本要求”编写的，主要有以下内容：电路基本概念和基本定律，电阻电路的一般分析，动态电路的时域分析，正弦稳态电路分析，含有耦合电感的电路分析，三相电路，非正弦周期电流电路分析，动态电路的复频域分析，网络图论与网络方程的矩阵形式，二端口网络，均匀传输线的正弦稳态分析及附录。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取。索取邮箱：[EdmondYan@sina.com](mailto:EdmondYan@sina.com) 或 [EdmondYan@hotmail.com](mailto:EdmondYan@hotmail.com)

本书的几位作者长期从事电路理论的教学与研究，结合自己多年的教学经验并本着以学生为本的宗旨，从初学者入门的角度深入浅出地介绍了电路的基本原理、基本方法。本书包含丰富的例题和习题，可作为高等院校包括电子信息类在内的电类各专业的本科生教材，也可作为高职、电大、职大的教材和有关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电路理论基础/李芳主编. —北京: 机械工业出版社, 2007. 8  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-111-21844-9

I. 电... II. 李... III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 102885 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: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉  
封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦  
北京四季青印刷厂印刷 (三河市胜利装订厂装订)  
2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 18 印张 · 441 千字  
标准书号: ISBN 978-7-111-21844-9  
定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010) 68326294  
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010) 88379711  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

“电路”是电类专业的专业基础课。编写教材的依据是“高等工科院校电路分析课程教学基本要求”。为了便于学生学习，作者本着以学生为本的宗旨，从初学者入门的角度结合自己的教学实践经验深入浅出地介绍了电路的基本原理、基本方法。本书遵循从简到繁、从易到难的原则，在体系上采用先静态、后动态、再稳态的安排，力求使难点分散，便于教学。

全书共分11章和两个附录。主要有以下内容：电路基本概念和基本定律，电阻电路的一般分析，动态电路的时域分析，正弦稳态电路分析，含有耦合电感的电路分析，三相电路，非正弦周期电流电路分析，动态电路的复频域分析，网络图论与网络方程的矩阵形式，二端口网络，均匀传输线的正弦稳态分析。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取。索取邮箱：[EdmondYan@sina.com](mailto:EdmondYan@sina.com)或 [EdmondYan@hotmail.com](mailto:EdmondYan@hotmail.com)

本书经集体讨论，分工执笔。第1、10章由郑莉平编写，第2、7章由侯浩录编写，第3、5章由李婕编写，第4章由张焱编写，第6、11章及附录由王馨梅编写，第8、9章由李芳编写并任主编。全书承北京机械工业学院刘小河教授、西安交通大学马西奎教授、西安理工大学崔杜武教授仔细审阅，并提出许多宝贵意见，谨致以衷心的感谢！

本书在编写过程中还参阅了大量教材、著作和资料，同时还得到了许多方面的支持和帮助，在此对各位文献作者以及给予本书帮助的各位老师谨致诚挚的谢意。

由于我们的水平有限，难免有错误和不妥之处，热诚欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 电路基本概念和基本定律····· 1

- 1.1 电路和电路模型····· 1
- 1.2 电路的基本物理量····· 2
  - 1.2.1 电流····· 2
  - 1.2.2 电压····· 3
  - 1.2.3 电功率····· 4
- 1.3 基尔霍夫定律····· 5
  - 1.3.1 基尔霍夫电流定律····· 6
  - 1.3.2 基尔霍夫电压定律····· 7
- 1.4 电阻元件····· 8
- 1.5 独立电源····· 9
  - 1.5.1 电压源····· 9
  - 1.5.2 电流源····· 10
- 1.6 受控源····· 11
- 1.7 电阻电路的等效变换····· 13
  - 1.7.1 电路等效的概念····· 13
  - 1.7.2 电阻电路的串并联化简····· 14
  - 1.7.3 电阻的星形联结和三角形联结的等效变换····· 16
  - 1.7.4 输入电阻····· 18
- 1.8 电源的等效和变换····· 19
  - 1.8.1 电压源、电流源的串联与并联····· 19
  - 1.8.2 实际电源模型的等效转换····· 20
- 习题····· 23

## 第 2 章 电阻电路的一般分析····· 29

- 2.1 电路的图····· 29
- 2.2 KCL 和 KVL 的独立方程数····· 30
  - 2.2.1 KCL 方程····· 30
  - 2.2.2 KVL 方程····· 30
- 2.3 支路电流法····· 32
- 2.4 网孔电流法····· 35
- 2.5 节点电压法····· 37

- 2.6 叠加定理····· 41
- 2.7 替代定理····· 44
- 2.8 戴维南定理和诺顿定理····· 46
- 2.9 最大功率传输定理····· 51
- 习题····· 52

## 第 3 章 动态电路的时域分析····· 57

- 3.1 动态元件····· 57
  - 3.1.1 电容元件····· 57
  - 3.1.2 电感元件····· 60
  - 3.1.3 电容、电感的串联和并联····· 62
- 3.2 一阶电路····· 64
- 3.3 经典法求解一阶电路····· 65
  - 3.3.1 一阶电路的微分方程····· 65
  - 3.3.2 一阶电路微分方程的求解····· 66
  - 3.3.3 三要素法····· 67
- 3.4 一阶电路全响应的分类····· 71
  - 3.4.1 固有响应与强迫响应····· 71
  - 3.4.2 稳态响应与暂态响应····· 72
  - 3.4.3 零输入响应与零状态响应····· 72
- 3.5 一阶电路的阶跃响应····· 81
  - 3.5.1 阶跃函数····· 81
  - 3.5.2 阶跃响应····· 82
- 3.6 一阶电路的冲激响应····· 83
  - 3.6.1 冲激函数····· 83
  - 3.6.2 冲激响应····· 84
- 3.7  $RLC$  串联电路的零输入响应····· 86
- 习题····· 90

## 第 4 章 正弦稳态电路分析····· 95

- 4.1 正弦电压和电流····· 95
  - 4.1.1 周期信号····· 95
  - 4.1.2 正弦量····· 95
- 4.2 相量法基础····· 97
  - 4.2.1 复数····· 97
  - 4.2.2 正弦量的相量表示法····· 99

4.3 两类约束的相量形式 .....	101	6.2.2 Y- $\Delta$ 、 $\Delta$ -Y 或 $\Delta$ - $\Delta$ 对称电路的 计算 .....	153
4.3.1 基尔霍夫定律的相量形式 .....	101	6.3 不对称三相电路的概念 .....	154
4.3.2 电路元件 VCR 的相量形式 .....	102	6.4 三相电路的功率 .....	156
4.4 阻抗与导纳 .....	105	6.4.1 对称三相电路的功率计算 .....	156
4.4.1 阻抗 .....	105	6.4.2 三相电路的功率测量 .....	158
4.4.2 导纳 .....	106	习题 .....	159
4.4.3 阻抗与导纳的关系 .....	107	<b>第 7 章 非正弦周期电流电路分析</b> .....	161
4.5 正弦稳态电路分析 .....	109	7.1 非正弦周期信号 .....	161
4.5.1 相量分析法 .....	109	7.2 周期函数分解为傅里叶级数 .....	162
4.5.2 相量图法 .....	111	7.2.1 周期函数的分解 .....	162
4.6 正弦稳态电路的功率 .....	113	7.2.2 周期信号的频谱 .....	163
4.6.1 功率的定义 .....	113	7.2.3 波形的对称性与傅里叶系数 关系 .....	165
4.6.2 功率因数提高 .....	116	7.3 非正弦周期量的有效值 .....	166
4.6.3 最大功率传输 .....	117	7.3.1 有效值 .....	166
4.7 谐振电路 .....	119	7.3.2 平均功率 .....	167
4.7.1 RLC 串联谐振 .....	119	7.4 非正弦周期电流电路的计算 .....	169
4.7.2 RLC 并联谐振 .....	121	习题 .....	173
习题 .....	123	<b>第 8 章 动态电路的复频域分析</b> .....	176
<b>第 5 章 含有耦合电感的电路分析</b> .....	128	8.1 拉普拉斯变换 .....	176
5.1 耦合电感元件及其 VCR .....	128	8.2 拉普拉斯变换的性质 .....	177
5.1.1 耦合线圈 .....	128	8.3 拉普拉斯反变换 .....	181
5.1.2 耦合电感的伏安关系 .....	130	8.4 电路定律的复频域形式 .....	185
5.2 含有耦合电感电路的分析 .....	132	8.5 应用拉普拉斯变换分析线性电路 .....	187
5.2.1 耦合电感的相量模型 .....	132	8.6 网络函数 .....	189
5.2.2 耦合电感的 CCVS 去耦等效 .....	132	习题 .....	194
5.2.3 耦合电感的去耦等效电路 .....	133	<b>第 9 章 网络图论与网络方程的矩阵 形式</b> .....	198
5.3 空心变压器 .....	137	9.1 图的基本概念 .....	198
5.4 理想变压器 .....	139	9.2 关联矩阵、基本割集矩阵和基本回路 矩阵 .....	201
5.4.1 理想变压器的条件 .....	139	9.2.1 关联矩阵 .....	201
5.4.2 理想变压器的伏安特性 .....	139	9.2.2 基本回路矩阵 .....	202
5.4.3 理想变压器的变换阻抗的 特性 .....	141	9.2.3 基本割集矩阵 .....	203
习题 .....	144	9.3 节点方程的矩阵形式 .....	203
<b>第 6 章 三相电路</b> .....	148	9.4 改进节点法 .....	211
6.1 三相电源和负载 .....	148	9.5 状态方程 .....	212
6.1.1 三相电源 .....	148	习题 .....	214
6.1.2 三相负载 .....	150		
6.2 对称三相电路的计算 .....	151		
6.2.1 Y-Y 对称电路的计算 .....	151		

<b>第 10 章 二端口网络</b> .....	217	11.2 均匀传输线及其方程 .....	235
10.1 二端口网络的定义 .....	217	11.3 均匀传输线方程的正弦稳态解 .....	237
10.2 二端口的方程和参数 .....	217	11.4 正向行波与反向行波 .....	241
10.2.1 $Y$ 参数 .....	218	11.5 均匀传输线的副参数 .....	244
10.2.2 $Z$ 参数 .....	220	11.6 波的反射与终端匹配的均匀 传输线 .....	246
10.2.3 $H$ 参数 .....	222	11.6.1 波的反射 .....	246
10.2.4 $A$ 参数 .....	224	11.6.2 终端匹配的均匀传输线 .....	248
10.3 二端口的等效电路 .....	226	11.7 无损耗传输线 .....	249
11.3.1 $Z$ 参数等效电路 .....	226	习题 .....	253
11.3.2 $Y$ 参数等效电路 .....	226	<b>附录</b> .....	254
10.4 二端口网络的连接 .....	228	附录 A Multisim 使用简介 .....	254
习题 .....	231	附录 B MATLAB 软件与电路分析 .....	261
<b>第 11 章 均匀传输线的正弦稳态   分析</b> .....	234	<b>部分习题参考答案</b> .....	270
11.1 分布参数电路概述 .....	234	<b>参考文献</b> .....	279

# 第 1 章 电路基本概念和基本定律

本章讨论电路分析的基本概念和基本定律。从介绍电路模型和电路的基本物理量等基本问题出发，着重介绍了基尔霍夫定律、电阻元件、独立源、受控源及等效变换等重要概念。

## 1.1 电路和电路模型

在日常生活和工程实际中，会遇到各种各样的电路，如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机电路等，这些电路按其功能可分为两大类：一类是进行能量传输、分配和使用电能的电路，如发电机、电源变压器、输电线和用户构成的电力网等；另一类是信号的处理、传输、存储和运算的电路，如收音机、电视机、计算机和示波器等。

无论它是复杂电路还是最简单的手电筒电路，一个电路要正常工作，一般都由电源、负载及传输控制器件三部分组成。凡能向电路提供电能或电信号的器件称为电源，如电池、电力网、电视台等；凡在电路中吸收电能或接受电信号的器件称为负载，如荧光灯、电动机、收音机等；而电路中连接导线和开关等则称为传输控制器件。在电源的作用下，电路中产生电压和电流，因此，电源又称为激励（这里的激励是指外加电源和信号源输入），由激励在电路中产生的电流和电压统称为响应。已知激励求响应，称为电路的分析；已知响应求激励，称为电路的综合或设计。

由于实际电路的结构是错综复杂的，为了便于对电路进行分析、计算、归纳电路的共性、规律，总是用一些理想电路元件组成的电路模型来替代具体的实际电路。所谓理想电路元件，就是把电路中的实际元件加以理想化，即在一定的条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素。如电路中电能的消耗用电阻元件表示，其图形符号如图 1-1a 所示；电场能的储存用电容元件表示，其图形符号如图 1-1b 所示；磁场能的储存用电感元件表示，其图形符号如图 1-1c 所示。电阻元件、电容元件和电感元件均为理想电路元件。

有些实际器件在某种条件下的模型可由一种理想元件构成，例如灯泡、电炉、电阻器，它们的主要电磁性能都是消耗电能，在低频应用时，它们中储存的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小，可以忽略不计，这些实际器件可用图 1-1a 中的理想电阻  $R$  来表示。再如一个实际的电感器，它是用金属导线绕制而成的，如果应用在低频电路里，它所表示的电磁性能主要是储存磁能及绕制该线圈的导线所消耗的电能，它所储存的电能很小，可以忽略不计，它的模型可以看作理想电感  $L$  与理想电阻  $R$  的串联，如图 1-2a 所示。如果这个实际电感器应用在高频电路中，它储存的电能也需要考虑，那么这种情况下的电路模型如图 1-2b 所示。

本书所说电路一般均指由理想电路元件构成的电路模型，而非实际电路。日常生活用的手电筒电路的电路模型如图 1-3 所示。

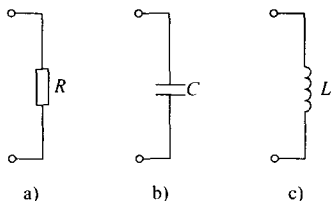


图 1-1 电阻、电容、电感元件图形符号

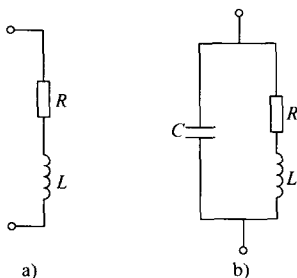


图 1-2 实际电感器在不同应用条件下的电路模型

还应指出, 实际电路中使用的电路器件一般都和电能的消耗现象及电、磁储存现象有关, 它们交织在一起并发生在整个器件中。如果假设这些现象可以分别研究, 并认为一种现象集中在一种元件之中, 这样的元件称为“集总”参数元件, 这一假设称为“集总”假设, 由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

集总假设是有条件的, 只有当实际部件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长时, 集总假设才成立。例如电力网的工作频率是  $50\text{Hz}$ , 对应的波长为  $6000\text{km}$ , 这对实验室中的设备来说, 其尺寸与波长相比可忽略不计, 因而可用集总参数电路进行分析。

由于电路通常具有网络状结构, 因此也称电路为网络。

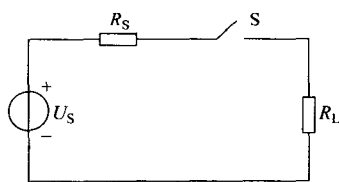


图 1-3 手电筒电路模型

## 1.2 电路的基本物理量

描述电路的基本物理量有电荷、电流、电压和电功率, 有时也涉及到能量、磁通 (或磁链) 变量, 本节主要讨论电流、电压和电功率。

### 1.2.1 电流

从物理学知道, 在电场力作用下, 正电荷 (质子) 沿着电场力方向运动, 负电荷 (电子) 逆着电场力方向运动。电荷量是带电粒子所带电荷多少和带电极性的表征。电荷量的单位为库仑 (用  $C$  表示),  $1$  库仑相当于  $6.25 \times 10^{18}$  个电子所带电荷量, 电荷量用符号  $q$  或  $Q$  表示。

带电粒子在电场力作用下, 作定向运动形成电流。单位时间内穿过导体或半导体横截面的电荷量定义为电流, 用符号  $i(t)$  表示, 其数学表达式为

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

如果电流的大小和方向随时间而变化, 称为时变电流, 记为  $i(t)$ , 或简写为  $i$ , 如果电流的大小和方向不随时间变化, 则称为恒定电流, 简称直流, 用大写字母  $I$  表示 (本书有时



也采用小写字母表示恒定的变量，具体情况可根据上、下文判断)。

电流的单位是安培 (A)，实际中常用千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 ( $\mu\text{A}$ )。它们的换算关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

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

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

电流不但有大小，而且有方向，我们规定正电荷的运动方向就是电流的实际方向 (真实方向)。在一些简单电路中，如图 1-4 所示，电流的真实方向是很容易判别的，它是由电源正极经过电阻流向电源负极。但在分析较复杂的电路时，如图 1-5 所示，电路中电流  $i_R$  的真实方向就难以判断。为了解决这个问题，我们引入电流参考方向的概念。在分析计算电路时，首先假定电流  $i_R$  的方向，如图 1-5 中所示，然后根据此假定方向计算出电流  $i_R$  的数值，如果  $i_R$  为正值，则电流的真实方向与参考方向一致；如果  $i_R$  为负值，则两者相反。我们将该假定方向称为电流的参考方向，在电路图中用箭头表示。

需要注意的是：①在电路计算时，必须首先指定参考方向，否则计算无效；②参考方向可以任意指定，但某电流参考方向一经指定，则在整个电路的计算中不得随意变动；③电路中只标电流参考方向，而不标电流真实方向。

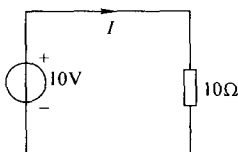


图 1-4 简单电路

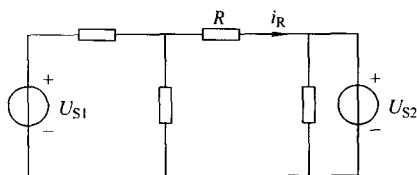


图 1-5 复杂电路

## 1.2.2 电压

电压是衡量库仑场对电荷做功本领的物理量。将单位正电荷由  $a$  点移到  $b$  点电场力所作的功定义为  $a$ 、 $b$  两点间的电压。在图 1-6 中，设有正电荷  $dq$ ，在电场力作用下，由  $a$  移到  $b$  点，若所作的功为  $dw$ ，则  $a$  点到  $b$  点的电压为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq}$$

电压的单位为伏特 (V)， $1\text{V} = 1\text{J/C}$ ，常用的单位有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 ( $\mu\text{V}$ )。

电路中，规定电压的真实方向为库仑场推动正电荷做正功的方向，如当  $dq > 0$ 、 $dw > 0$  时， $u_{ab} > 0$ ，即电压的真实方向是由  $a$  指向  $b$ 。

和电流一样，电压也有正有负，我们也要为电压指定参考方向，电压的参考方向在电路图中可用箭头表示，也可用“+”“-”极性或双下标表示，如图 1-7 所示。当  $u > 0$  时，电压的真实方向与参考方向一致；当  $u < 0$  时，电压的真实方向与参考方向相反，在不指定参考方向时，电压的正、负是毫无意义的。

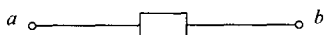


图 1-6 电压定义示意图

与电流参考方向的选取一样，电压的参考方向也可以任意指定。对于指定参考方向的电压，经过计算得到其数值，此数值的正负结合参考方向就可以确定电压的真实方向。

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

以上讨论了电流参考方向和电压参考方向，它们都是独立地任意指定的，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，即两者的参考方向一致，则把电压、电流的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1-8 所示；当两者不一致时，则称电压、电流的参考方向是非关联参考方向。

**例 1-1** 图 1-9 所示电路中，电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向是否关联？

**解** 在考察电压和电流的参考方向是不是关联时，要看对哪一部分而言。对电路  $A$  而言，流过的电流  $i$  的参考方向是从电压  $u$  的负极性指向正极性，对电路  $A$  来说是非关联的参考方向；对电路  $B$  而言，电流  $i$  的参考方向则是从  $u$  的正极性指向负极性，对电路  $B$  来说关联的参考方向。

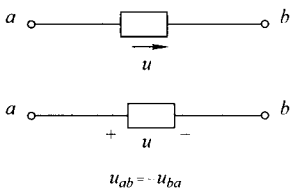


图 1-7 电压的参考方向

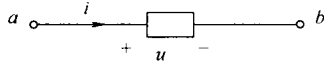


图 1-8 关联参考方向

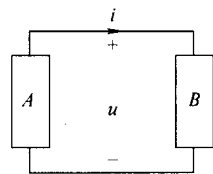


图 1-9 例 1-1 电路

### 1.2.3 电功率

在电路分析中，除电压和电流外，电功率也是一个重要的物理量。电功率定义为单位时间内电路各部分吸收或发出的电能，也就是各个部分进行能量转换的速率。即

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

功率的单位为瓦特 (W)。

在电路中，人们更关注的是功率与电压、电流之间的关系。为了得到它们的具体关系，我们设电路的某一部分如图 1-10 所示，图中矩形框代表任意一段电路，它可以是电阻，可以是电源，也可以是多个元件的组合。首先设该段电路电压、电流为关联参考方向，如图 1-10 所示。若在  $dt$  时间内，有正电荷  $dq$  由  $a$  移到  $b$ ，根据参考方向，在此过程中电场力对正电荷作正功，亦即电场失去电能，或该段电路吸收电能。吸收的电能为

$$dw = u dq$$

因此，吸收的电功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-2)$$

若电压、电流为非关联方向，则按式 (1-2) 计算的功率表示该段电路发出的功率，其理由请读者自己分析。

需要强调的是：当  $u$ 、 $i$  为关联方向时，式 (1-2) 定义一段电路吸收的电功率；当  $p > 0$  时，该电路实际吸收功率；当  $p < 0$  时，该电路吸收负功率，即该电路实际发出功率。当  $u$ 、

$i$  为非关联方向时, 式 (1-2) 定义一段电路发出的电功率; 当  $p > 0$  时, 该电路实际发出功率; 当  $p < 0$  时, 该电路发出负功率, 即该电路实际吸收功率。如说某电路或元件吸收的功率为  $-10\text{W}$ , 则也可认为它发出的功率为  $10\text{W}$ 。

**例 1-2** 如图 1-11 所示电路, 已知  $i = 1\text{A}$ ,  $u_1 = 3\text{V}$ ,  $u_2 = 7\text{V}$ ,  $u_3 = 10\text{V}$ , 求  $ab$ 、 $bc$  和  $ca$  三部分电路上各吸收的功率  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 。

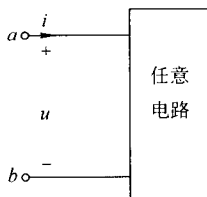


图 1-10 电功率与电压电流关系

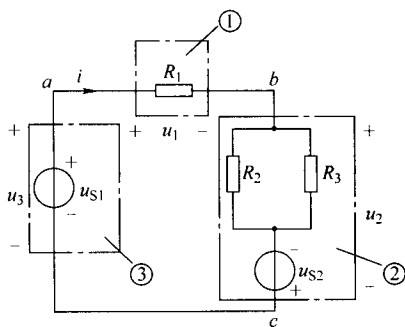


图 1-11 例 1-2 图

**解** 对  $ab$ 、 $bc$  两部分, 电压、电流为关联方向, 因此吸收的功率为

$$p_{ab} = u_1 i = (3 \times 1)\text{W} = 3\text{W}$$

$$p_{bc} = u_2 i = (7 \times 1)\text{W} = 7\text{W}$$

对  $ca$  部分, 电压、电流为非关联参方向, 因此发出的功率为

$$p_{ca} = u_3 i = (10 \times 1)\text{W} = 10\text{W}$$

由此例可以看出

$$P_{ab\text{吸}} + P_{bc\text{吸}} = P_{ca\text{发}}$$

即整个电路中吸收的电功率等于发出的电功率。这就是功率守恒原理。

### 1.3 基尔霍夫定律

电路是元件按照一定的方式连接而成, 因而电路中的电压和电流受到电路连接方式的约束, 即电路结构的约束 (可称为拓扑约束), 拓扑约束关系具体表现为基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, 缩写为 KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, 缩写为 KVL), 它们是分析和计算电路的基本依据, 是电路理论中重要的基本定律。

在具体讲述基尔霍夫定律之前, 先介绍几个有关的电路术语。

#### 1. 支路

具有两个端子的元件称为二端元件, 电路中每个二端元件称为一条支路, 图 1-12 中有 5 条支路。也可将电路中流过同一电流的一个分支称为一条支路, 如图 1-12 中, 元件 1 和 2 与元件 4 和 5 可分别看作一条支路, 故图 1-12 中有 3 条支路。

#### 2. 节点

两条或两条以上支路的连接点称为节点。图 1-12 中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  都是节点, 如果按分支划分支路,  $a$ 、 $c$  就不算作节点, 称它们为可消节点。

### 3. 回路

电路中由支路组成的任一闭合路径称为回路。如图 1-12 中,  $abcd$ 、 $abda$ 、 $bcdb$  都是回路。

### 4. 网孔

平面电路的一个网孔是它的一个自然的“孔”, 它限定的区域内没有支路。如图 1-12 所示平面电路中,  $abda$ 、 $bcdb$  为网孔, 而  $abcd$  不是网孔。

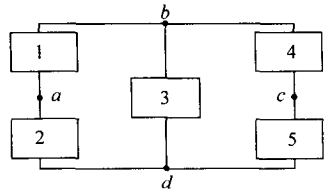


图 1-12 电路的支路、节点和回路

## 1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 表述为: 对于集总参数电路的任一节点, 在任一时刻, 流入 (或流出) 该节点的所有支路电流的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中,  $n$  为连接到该节点的支路数。这里“支路电流代数和”是以连接在该节点上的支路电流的参考方向来判断是流入节点还是流出节点, 如果流入节点, 该支路电流之前取“+”号, 否则取“-”号。

在图 1-13 中, 假定各支路电流的参考方向如图中所示, 对节点  $a$  应用 KCL 可得

$$-i_1 + i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

上式又可写成

$$i_2 + i_4 = i_1 + i_3 + i_5$$

因此 KCL 又可表述为: 对于集总参数电路的任一节点, 在任一时刻, 流入该节点的支路电流等于流出该节点的支路电流。

基尔霍夫电流定律的物理本质就是电荷守恒定律。因为电荷既不能自行产生, 也不能自行消灭, 所以, 在任一时刻流入任一节点的电流必然等于同一时刻流出该节点的电流。

可以证明, KCL 既适用于节点, 也适用于包围几个节点的封闭面  $S$  (又称广义节点)。

如图 1-14 所示电路, 用虚线表示的封闭面  $S$  包围了三个节点, 即节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。对其中每个节点分别应用 KCL 有

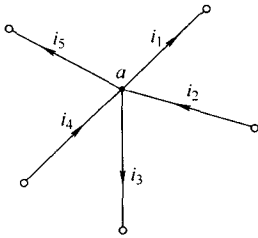


图 1-13 KCL 举例

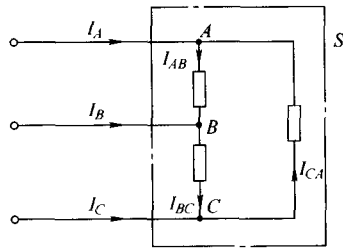


图 1-14 广义节点

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

将上述三式相加得

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

这说明, 流入(或流出)电路中任一封闭面的各支路电流代数和恒等于零。

在以上讨论过程中, 均未涉及各支路元件的性质与参数。可见, KCL 与电路中的元件性质无关; 与支路电流的变化规律无关; 仅与电路的连接方式有关。

**例 1-3** 图 1-15 所示为某一局部电路, 已知  $I_1 = 6\text{A}$ ,  $I_2 = -3\text{A}$ ,  $I_5 = 4\text{A}$ ,  $I_6 = -2\text{A}$ ,  $I_7 = 1\text{A}$ 。求电流  $I_3$ 、 $I_4$ 。

**解** 对于包含节点  $b$ 、 $c$ 、 $d$  的封闭面列 KCL 方程为

$$I_4 - I_5 + I_6 + I_7 = 0$$

将数值代入方程, 得

$$I_4 - 4 + (-2) + 1 = 0$$

求得

$$I_4 = 5\text{A}$$

对节点  $a$  列 KCL 方程

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

即

$$6 - (-3) - I_3 - 5 = 0$$

求得

$$I_3 = 4\text{A}$$

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 表述为: 对于集总参数电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿着该回路的任一绕行方向, 回路中所有支路电压的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中,  $n$  为该回路所含的支路数。建立 KVL 方程时, 必须首先任意指定一个回路的绕行方向, 当  $u_k$  的参考方向与回路绕行方向一致时,  $u_k$  前取 “+”, 反之取 “-”。

例如, 在图 1-16 中, 从  $a$  点出发, 沿  $abcda$  回路绕行一周, 写出 KVL 方程为

$$-u_1 + u_4 - u_5 + u_2 = 0$$

因此,  $d$ 、 $a$  两点间的电压为

$$u_{da} = u_2 = u_1 - u_4 + u_5$$

由此可得 KVL 的另外一种表述方式: 集总参数电路中的任意两点间的电压等于该两点间任一路径上所有电压的代数和。

同 KCL 一样, KVL 与电路中元件的性质与参数无关;

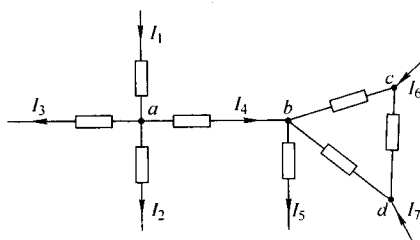


图 1-15 例 1-3 图

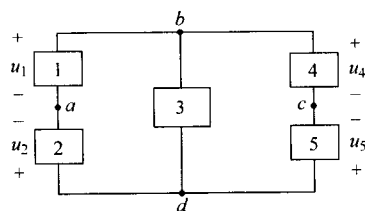


图 1-16 KVL 举例

也与支路电压的变化规律无关；仅与电路的连接方式有关。应特别强调指出，KCL 和 KVL 仅适用于集总参数电路。

**例 1-4** 图 1-17 所示电路，已知  $u_1 = u_3 = 1\text{V}$ ， $u_2 = 4\text{V}$ ， $u_4 = u_5 = 2\text{V}$ ，求  $u_x$ 。

**解** 对回路 I 与回路 II 列写 KVL 方程分别为（支路的参考方向和回路的参考方向见图 1-17）

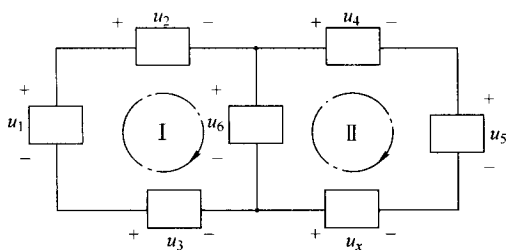


图 1-17 例 1-4 图

$$-u_1 + u_2 + u_6 - u_3 = 0$$

$$-u_6 + u_4 + u_5 - u_x = 0$$

将两个方程相加消去  $u_6$ ，得

$$u_x = -u_1 + u_2 - u_3 + u_4 + u_5 = (-1 + 4 - 1 + 2 + 2)\text{V} = 6\text{V}$$

## 1.4 电阻元件

电路中消耗电能的现象用电阻元件来模拟。电阻元件是实际电阻器的理想化模型。常用的实际电阻器有金属膜电阻器、碳膜电阻器、线绕电阻器以及白炽灯和电炉等。

电阻元件的定义表述为：如果在任一时刻，一个二端元件的电压  $u(t)$  与电流  $i(t)$  之间的关系（Voltage Current Relation，缩写为 VCR）能用  $u \sim i$  平面上的一条曲线描述，就称之为电阻元件。 $u \sim i$  平面上的曲线又称为电阻元件的伏安特性曲线。若该曲线是过原点的直线，则称为线性电阻，否则称为非线性电阻。

线性电阻元件的电路符号如图 1-18 所示。

当线性电阻元件的电压和电流为关联参考方向时，元件上的 VCR 为

$$u = Ri \quad (1-5)$$

式 (1-5) 就是欧姆定理的公式。 $R$  是线性电阻元件的电阻，是一个正实常数，其值由伏安特性曲线（为一条直线）的斜率所决定。 $R$  的单位为欧姆 ( $\Omega$ )。

式 (1-5) 也可以改写成

$$i = Gu$$

式中， $G = \frac{1}{R}$ ， $G$  称为电阻元件的电导， $G$  的单位是西门子，简称西 (S)。 $R$  和  $G$  都是电阻元件的参数。

如果线性电阻元件的电压与电流为非关联参考方向，如图 1-19 所示，则有

$$u = -Ri$$

$$i = -Gu$$

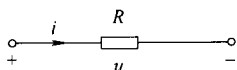


图 1-18 线性电阻元件符号

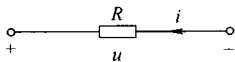


图 1-19 非关联参考方向

由式 (1-5) 还可看出，线性电阻元件的 VCR 是代数关系，VCR 是代数关系的元件称

为静态元件。又由于在任何时刻，线性电阻元件的电压（或电流）完全由同一时刻的电流（或电压）所决定，而与该时刻以前的电流（或电压）值无关。所以，有时也把电阻元件说成是一种无记忆的元件。

在关联参考方向下，线性电阻元件吸收的电功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R}$$

由于  $R$ 、 $G$  均为正实常数，故  $p$  与  $i^2$  或  $u^2$  成正比，并总是大于或等于零。这就说明在任何时刻电阻元件绝不可能发出电能，它是一种无源元件。

今后，为了叙述方便，将线性电阻元件简称为电阻。这样，“电阻”一词以及相应的符号  $R$ ，一方面表示一个线性电阻元件，另一方面也表示这个元件的参数。

非线性电阻元件的伏安特性不是一条过原点的直线。根据伏安特性曲线的形状，非线性电阻元件的电压电流关系一般可写为

$$u = f(i)$$

或

$$i = g(u)$$

如果一个电阻元件的电压电流关系为

$$u(t) = R(t)i(t)$$

或

$$i(t) = G(t)u(t)$$

这里  $u$  与  $i$  仍是比例关系，但比例系数  $R$  随时间变化，故称为线性时变电阻元件。

本书所讨论的电阻元件，其参数值均不随时间而改变，故称为时不变电阻元件。今后无特殊说明，所言电阻元件均是指线性时不变电阻元件。

## 1.5 独立电源

实际电源有干电池、蓄电池、光电池、发电机及信号源等。电源是从实际电源抽象得到的理想化模型，是二端有源元件。电源可分为独立电源和非独立电源（受控源）两类。独立电源有电压源和电流源两种。

### 1.5.1 电压源

电压源的定义为：若一个二端元件，无论其中电流值如何变化，其两端电压始终保持为一确定的时间函数  $u_s(t)$ ，则称此二端元件为理想电压源，简称电压源。

电压源的电路符号如图 1-20a 所示，其中  $u_s(t)$  为电压源的电压，“+”、“-”号为  $u_s(t)$  的参考方向。如果  $u_s(t)$  为一恒定值，即  $u_s(t) = U_s$ ，这种电压源称为直流电压源，其电路符号如图 1-20b 所示。

由于电压源的电流可为任意值，仅端电压是确定值，因而电压源的特性方程为

$$u = u_s(t) \quad (1-6)$$

当  $t = t_0$  时， $u = u_s(t_0) = \text{常数}$ ，此时刻电压源的伏安特性曲线在  $u \sim i$  平面上是一条平行于  $i$  轴的直线，如图 1-20c 所示。

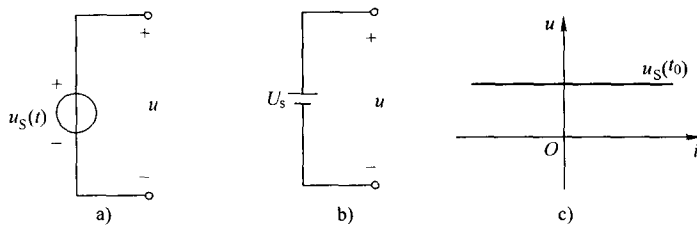


图 1-20 电压源

由定义知，电压源具有以下特性：

- 1) 端电压总为给定值  $u_S(t)$ ，与外部电路无关。
- 2) 电压源流过的电流由电压源及外部电路共同决定，也就是说电压源的输出电流随外电路的不同而不同，可以等于任意值。
- 3) 根据外电路的不同，电流可以不同的方向流过电压源，因此电压源可以对电路提供能量（起电源作用），也可以从外电路吸收能量（处于负载状态），这要由流过电压源电流的实际方向而定。从理论上讲，当电流为无穷大时，电压源可以提供无穷大能量，也可以吸收无穷大能量。

### 1.5.2 电流源

电流源的定义为：若一个二端元件，无论其端电压值如何，其电流始终保持为一确定的时间函数  $i_S(t)$ ，则称此二端元件为理想电流源，简称电流源。

电流源的电路符号如图 1-21a 所示，其中  $i_S(t)$  为电流源的电流，箭头为  $i_S(t)$  的参考方向， $i$  表示电流源的输出电流。如果  $i_S(t)$  为一恒定值，即  $i_S(t) = I_S$ ，这种电流源称为直流电流源。

由于电流源的端电压可为任意值，仅电流值是确定的，因此，电流源的特性方程为

$$i = i_S(t) \quad (1-7)$$

当  $t = t_0$  时， $i = i_S(t_0) = \text{常数}$ ，此时刻电流源的伏安特性曲线在  $u \sim i$  平面上是一条平行于  $u$  轴的直线，如图 1-21b 所示。

由定义知，电流源具有以下特性：

- 1) 电流为给定值  $i_S(t)$ ，与外部电路无关。
- 2) 电流源的端电压由电流源及外部电路共同决定。
- 3) 根据外电路的不同，其端电压的极性可以不同，因此电流源既可以对电路提供能量，也可以从外电路吸收能量，这要视电流源端电压的真实极性而定。从理论上讲，当端电压为无穷大时，电流源可以提供无穷大能量，也可以吸收无穷大能量。

电压源和电流源是理想的电路元件，实际上是不存在的，但当某些常用电源的内部损耗

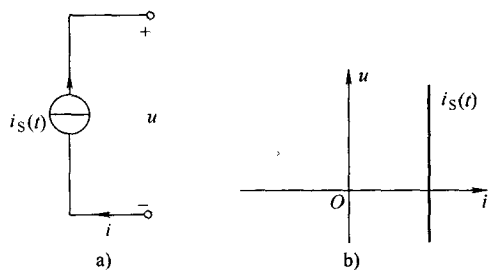


图 1-21 电流源



可以忽略时, 它们的特性接近于理想电源的特性, 这时就可用理想电源作为它们的模型。例如, 当蓄电池的工作电流较小时, 可用电压源作为它的模型; 当光电池的工作电压较小时, 可用电流源作为它的模型。

**例 1-5** 在图 1-22 所示电路中, 已知  $I_S = 1\text{A}$ ,  $U_S = 1\text{V}$ ,  $R = 1\Omega$ , 求各元件吸收的功率。

**解** 因为

$$U = U_S = 1\text{V}$$

则

$$P_R = \frac{U^2}{R} = 1\text{W}$$

$I_S$  吸收的功率为

$$P_1 = UI_S = 1\text{W}$$

$U_S$  吸收的功率为

$$P_2 = -U_S I = -U_S (I_R + I_S) = -2\text{W}$$

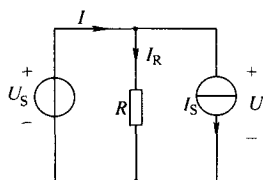


图 1-22 例 1-5 图

## 1.6 受控源

在有些实际电路中, 某支路的电压或电流可能受另一支路的电压或电流所控制。例如图 1-23 所示的晶体管中, 它的集电极电流  $i_c$  就是受基极电流  $i_b$  所控制 ( $i_c = \beta i_b$ )。这种控制作用无法用以上介绍的二端元件来模拟。因此, 在电路分析中, 还需引入另一种理想元件——受控源。

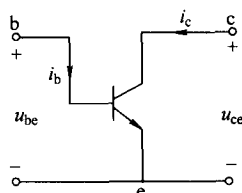


图 1-23 晶体管

受控源的定义为: 若某电源向外提供的电压或电流受电路中其他电压或电流控制, 则该电源称为受控电源, 简称受控源。受控源是具有两条支路的多端元件, 一条支路是控制支路, 其中的电压或电流称为控制量, 当电压作为控制量时 (其电流等于零), 控制支路为开路, 当电流作为控制量时 (其电压等于零), 控制支路为短路; 另一条支路是受控支路, 其中的电压或电流称为受控量, 当受控量是电压时, 受控支路为一受控压源, 当受控量是电流时, 受控支路为一受控流源。

根据控制量 (电压或电流) 和受控量 (电压和电流) 的不同组合, 受控源可分为电压控制电压源 (VCVS)、电压控制电流源 (VCCS)、电流控制电流源 (CCCS) 和电流控制电压源 (CCVS)。这 4 种受控源的电路符号如图 1-24 所示。为了与独立源相区别, 受控源用菱形符号来表示。

VCVS 的控制关系为

$$u_2 = \mu u_1 \quad (1-8)$$

式中,  $\mu$  称为转移电压比, 或电压放大系数, 如图 1-24a 所示。

CCVS 的控制关系为

$$u_2 = r i_1 \quad (1-9)$$

式中,  $r$  称为转移电阻, 如图 1-24b 所示。