



普通高等教育“十一五”规划教材

# 电路分析

董维杰 白凤仙 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”规划教材

# 电 路 分 析

董维杰 白凤仙 主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了电路的基本概念、基本定律及基本分析方法,涵盖直流电路分析(第1~4章)、正弦稳态电路分析(第5~9章)、动态电路分析(第11~12章)和非线性电路分析(第13章)四部分。在介绍基本电路元件电压、电流关系基础上,以线性直流电路为依托,讲解简单电路的等效变换分析法、一般电路的回路电流分析法、节点电压分析法以及应用电路定理等分析方法。正弦稳态电路部分重点介绍了相量分析法,进一步介绍了相量分析法在谐振电路、耦合电路、三相电路和非正弦电路等典型正弦稳态电路分析中的应用。动态电路分析部分介绍了时域分析法和复频域分析两种方法。非线性电路部分介绍了图解法、分段线性化和小信号分析等方法。双口网络(第10章)涉及直流电路、正弦电路和动态电路,从系统观点出发讨论双口网络方程、连接等。作者力图将抽象的电路理论与实际应用相结合,每章有一节与本章内容相关的应用。

本书是理工科高等院校教材,可作为电子工程、自动化、电气工程和计算机等专业的本科生教材,也可作为相关专业的专科、成人教育和工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路分析/董维杰,白凤仙主编. —北京:科学出版社,2007

(普通高等教育“十一五”规划教材)

ISBN 978-7-03-019768-9

I. 电 II. ①董… ②白… III. 电路分析-高等学校-教材

IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 132000 号

责任编辑:段博原 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

**科学出版社出版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**双青印刷厂印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—3 500 字数:419 000

**定价:30.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

# 前 言

电子、通信、控制、电力、测量、计算机和自动化等学科领域都建立在电路理论基础上,电路理论研究电路分析、综合与设计基本规律。电路理论与数学、物理和拓扑学相结合形成了工程方法,即电路分析方法,本课程的主要内容是学习基本电路理论和电路分析方法。作者总结多年的教学经验,吸取国内外同类教材的精华,编写了这本书。

编写本书的指导思想体现在以下几方面:

(1) 强调掌握、并充分理解基本概念、基本定律和基本方法。十分注重电路基本概念、理论和分析方法的讲解,尤其注意指出与已学物理和数学知识的联系。直流电路分析部分强调线性代数为数学基础;正弦稳态电路分析部分强调复数运算为数学基础;动态电路分析部分以微分方程求解为数学基础。

(2) 注重培养学生的工程实践能力,注重理论和方法的应用。内容讲解注意联系工程实际;例题和习题尽量来自实际问题,采用实际中的数值;每章最后一节是本章相关知识在实际工程中的应用举例。

(3) 注意发挥电路分析方法理论严密、逻辑性强的特点,注重培养学生的辩证思维能力,通过例题的透彻讲解和精心设置的习题,试图培养学生的多种能力,如观察能力、计算能力、理论联系实际能力、解决问题能力、逻辑思维能力、综合与创新能力,注意一题多解,训练学生的发散思维能力。

(4) 注意各部分内容的内在联系和融会贯通,注意前后章节内容的呼应,强调以欧姆定律、基尔霍夫电流定律和电压定律为主线。

(5) 本书附录中附有常用数学公式,每章习题后面紧接着本章习题答案,方便查阅。

书中标有“\*”号的章节属于参考内容,可以根据实际需要取舍。

参加本书编写的有董维杰(第1~4章)、白凤仙(第5~9章)、解永平(第10章)、王贻月(第11、12章)、周惠巍(第13章)。

敬请读者和同行对本书批评指正,电话 0411-84706009-2405。

编者

2007年5月8日于大连

# 目 录

## 前 言

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| <b>第 1 章 电路的基本概念和基本定律</b> .....   | (1)  |
| 1.1 电路及电路模型 .....                 | (1)  |
| 1.2 电路变量 .....                    | (4)  |
| 1.3 基尔霍夫定律.....                   | (10) |
| 1.4 电阻元件及欧姆定律.....                | (13) |
| 1.5 独立电源元件.....                   | (15) |
| 1.6 含源支路的欧姆定律.....                | (19) |
| 1.7 受控源.....                      | (20) |
| 1.8 简单电路分析.....                   | (22) |
| 1.9 应用——用电安全.....                 | (23) |
| 习题及部分习题答案 .....                   | (25) |
| <b>第 2 章 电阻电路的等效变换分析法</b> .....   | (33) |
| 2.1 等效及等效变换的概念.....               | (33) |
| 2.2 不含独立源的单口网络的等效.....            | (34) |
| 2.3 Y 形和 $\Delta$ 形电阻网络的等效变换..... | (39) |
| 2.4 含独立源单口网络的等效.....              | (40) |
| 2.5 应用——电阻应变片测力的电桥电路.....         | (44) |
| 习题及部分习题答案 .....                   | (45) |
| <b>第 3 章 线性电路的基本分析方法</b> .....    | (51) |
| 3.1 独立变量和独立方程.....                | (51) |
| 3.2 回路电流法和网孔法.....                | (54) |
| 3.3 节点电压法.....                    | (60) |
| 3.4 应用——计算机辅助电路分析.....            | (65) |
| 习题及部分习题答案 .....                   | (67) |
| <b>第 4 章 线性网络定理</b> .....         | (71) |
| 4.1 齐性定理和叠加定理.....                | (71) |
| 4.2 替代定理.....                     | (75) |
| 4.3 戴维南定理和诺顿定理.....               | (77) |

---

|            |                       |              |
|------------|-----------------------|--------------|
| 4.4        | 最大功率传输定理              | (83)         |
| 4.5        | 特勒根定理                 | (85)         |
| 4.6        | 互易定理                  | (86)         |
| 4.7        | 对偶原理                  | (89)         |
| 4.8        | 应用——运算放大器电路分析中叠加定理的应用 | (92)         |
|            | 习题及部分习题答案             | (96)         |
| <b>第5章</b> | <b>正弦稳态电路</b>         | <b>(104)</b> |
| 5.1        | 储能元件                  | (104)        |
| 5.2        | 正弦量                   | (111)        |
| 5.3        | 正弦量的相量表示法             | (116)        |
| 5.4        | 电路的相量模型               | (119)        |
| 5.5        | 阻抗、导纳、相量图             | (125)        |
| 5.6        | 正弦稳态电路的功率             | (132)        |
| 5.7        | 最大功率传输                | (138)        |
| 5.8        | 正弦稳态电路的分析             | (140)        |
| 5.9        | 应用——试电笔原理             | (144)        |
|            | 习题及部分习题答案             | (144)        |
| <b>第6章</b> | <b>频率特性与谐振电路</b>      | <b>(149)</b> |
| 6.1        | 网络函数及频率特性             | (149)        |
| 6.2        | 谐振电路                  | (152)        |
| 6.3        | 谐振电路的频率特性             | (157)        |
| 6.4        | 串并联谐振电路               | (159)        |
| 6.5        | 应用——双音频电话及滤波器         | (160)        |
|            | 习题及部分习题答案             | (161)        |
| <b>第7章</b> | <b>含有耦合电感的电路</b>      | <b>(164)</b> |
| 7.1        | 耦合电感的伏安关系             | (164)        |
| 7.2        | 含耦合电感的电路分析            | (167)        |
| 7.3        | 空心变压器的电路分析            | (172)        |
| 7.4        | 理想变压器                 | (174)        |
| *7.5       | 一般变压器的模型              | (178)        |
| 7.6        | 应用——各类电磁变压器简介         | (181)        |
|            | 习题及部分习题答案             | (183)        |
| <b>第8章</b> | <b>三相电路</b>           | <b>(187)</b> |
| 8.1        | 对称三相电源                | (187)        |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 8.2 对称三相电路分析及计算 .....         | (189) |
| * 8.3 不对称三相电路分析与计算 .....      | (196) |
| 8.4 三相电路的功率及其测量 .....         | (200) |
| 8.5 应用——三相五线制介绍 .....         | (203) |
| 习题及部分习题答案 .....               | (205) |
| <b>第9章 非正弦周期电流电路</b> .....    | (208) |
| 9.1 非正弦周期信号 .....             | (208) |
| 9.2 非正弦周期信号分解为傅里叶级数 .....     | (209) |
| 9.3 非正弦周期量的有效值、平均功率 .....     | (213) |
| 9.4 非正弦周期电流电路的计算 .....        | (214) |
| 9.5 应用——谐波在供电系统的危害 .....      | (220) |
| 习题及部分习题答案 .....               | (222) |
| <b>第10章 双口网络</b> .....        | (225) |
| 10.1 双口网络概述 .....             | (225) |
| 10.2 双口网络的方程和参数 .....         | (226) |
| * 10.3 有载双口网络 .....           | (234) |
| 10.4 双口网络的连接 .....            | (236) |
| 10.5 回转器 .....                | (240) |
| 10.6 应用——模拟电感 .....           | (244) |
| 习题及部分习题答案 .....               | (246) |
| <b>第11章 线性动态电路的时域分析</b> ..... | (250) |
| 11.1 动态电路及其方程 .....           | (250) |
| 11.2 一阶电路的三要素分析 .....         | (253) |
| 11.3 一阶电路的典型题分析 .....         | (259) |
| 11.4 一阶电路的阶跃响应和冲激响应 .....     | (264) |
| 11.5 二阶电路的动态过程 .....          | (270) |
| 11.6 应用——单片机复位电路 .....        | (273) |
| 习题及部分习题答案 .....               | (274) |
| <b>第12章 动态电路的复频域分析</b> .....  | (281) |
| 12.1 拉普拉斯变换 .....             | (281) |
| 12.2 拉普拉斯变换的基本性质 .....        | (282) |
| 12.3 拉普拉斯反变换 .....            | (287) |
| 12.4 线性定常网络的复频域模型及电路定律 .....  | (292) |
| 12.5 线性定常网络的复频域分析 .....       | (295) |

---

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| 12.6 网络函数、零点与极点·····      | (299)        |
| 习题及部分习题答案·····            | (303)        |
| <b>第 13 章 非线性电路</b> ····· | <b>(308)</b> |
| 13.1 非线性器件模型·····         | (308)        |
| 13.2 非线性网络方程的编写·····      | (316)        |
| 13.3 电阻性非线性电路图解法·····     | (321)        |
| 13.4 分段线性分析法·····         | (324)        |
| 13.5 小信号分析法·····          | (328)        |
| 习题及部分习题答案·····            | (331)        |
| <b>参考文献</b> ·····         | <b>(335)</b> |
| <b>附录 常用公式</b> ·····      | <b>(336)</b> |



# 第1章 电路的基本概念和基本定律

## 基本要求

- ◆ 理解电压、电流的参考方向概念
- ◆ 熟练运用关联和非关联方向下的欧姆定律
- ◆ 掌握独立电压源、独立电流源和受控源的电压与电流关系
- ◆ 牢固掌握基尔霍夫定律,熟练运用基尔霍夫定律分析简单电路
- ◆ 正确计算电路元件的功率

## 1.1 电路及电路模型

在电子工程中,为了把能量或信息从一点传递到另一点,必须通过一些相互连接的电气设备才能实现。按照一定方式相互连接起来的若干电气设备或器件构成了电路,这些电气设备或器件被称为电路元件。电路又称为网络,两个词有时混用。

在日常生活、工农业生产、科学研究以及国防等各个方面都离不开电和电路。通过以下几大类型的电路系统可以了解电路及电路的功能:

(1) 通信系统。该类系统是产生、传送、分配信息的电系统,如电视、电话、发报机、接收机、雷达系统等。

(2) 计算机系统。该类系统用电信号存储和处理文字信息、图像信息以及进行数学运算,如计算器、个人计算机和计算机网络系统。

(3) 控制系统。该类系统用电信号控制其他形式的能量,如化工过程中的温度、压力和流量等的控制器,电梯中电机、门和灯光的控制装置。

(4) 电力系统。该类系统是产生、传输和分配电能的系统,包括发电、输变电和用电等环节。

(5) 信号处理系统。该类系统是对表现信息的电信号进行处理,如各种选频电路、滤波电路、放大电路、语音压缩编/解码器等。

上述五类系统之间又存在联系和相互作用。通信工程师会用计算机来控制信息的流动;计算机中包含控制系统;控制系统中也包含计算机;电力系统需要通信系统来安全可靠地调整系统的运行;信号处理系统中会包括通信、计算机和控制系统。

统。这种相互联系使得电路系统的功能越来越强大和复杂。

实际电路的几何尺寸相差很大,电力系统和通讯系统可跨越省界、国界,覆盖几百公里。集成电路在不到  $50\text{mm}^2$  的硅芯片上可集成 200 万只以上晶体管,集成电路的线宽做到  $90\text{nm}$  以下。

### 1.1.1 电路元件

实际电路中使用各种电气、电子元器件,如干电池、蓄电池、发电机、信号发生器、电阻器、电感线圈、电容器、晶体管和变压器等。虽然实际电路元件品种繁多,技术指标、尺寸和形状千差万别,但它们可以被分成几类,每一类元器件在电磁方面有许多共同点。比如,电阻器、照明工具、电炉等,它们主要消耗电能,其次其电流变化时周围伴随有微弱的电磁场的变化;各种电解电容器、陶瓷电容器、贴片电容器等,它们主要储存电场能量,其次也会发热而消耗少量能量;各种干电池、蓄电池和信号发生器,它们主要维持稳定的电压,但是它们内部也会发热而消耗少量能量。

为了用数学的方法从理论上判断电路的主要性能,必须将实际电路器件在一定条件下按其主要性质加以理想化,每一种理想电路元件只体现单一的电磁现象,从而得到一系列理想化元件。这些理想元件称为实际器件的模型,它们都有严格的数学定义,这样就便于用电路方程确切地分析其电性能。理想的电路元件有:

#### (1) 理想的负载元件。

电阻元件,消耗电磁能量,将其转换为其他形式能量,电路符号如图 1-1(a)。

电容元件,只储存电场能量,不储存磁场能量,也不消耗电磁能,电路符号如图 1-1(b)。

电感元件,只储存磁场能量,不储存电场能量,也不消耗电磁能,电路符号如图 1-1(c)。

#### (2) 理想的电源元件。

独立电压源,两端的电压始终保持规定值,电路符号如图 1-1(d)。

独立电流源,流过的电流始终保持规定值,电路符号如图 1-1(e)。

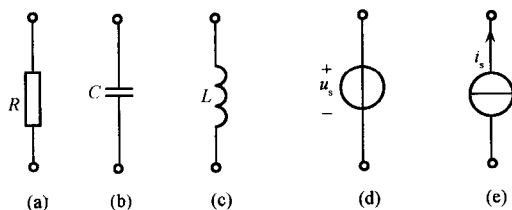


图 1-1 理想电路元件符号

(3) 理想的耦合元件。

包括受控源、耦合电感、变压器和回转器。

理想负载元件和理想电源元件都是二端子元件,理想耦合元件是四端子元件。

### 1.1.2 电路模型

在电路理论中,用电阻、电容、电感、电压源和电流源等理想电路元件的组合可以近似地表征成千上万的实际电气装置。由若干理想电路元件组成的电路称为电路模型,这种电路模型又称为集总参数电路。由电路模型所得的计算结果是对实际电路的一种近似,但必须能够反映实际电路的主要物理性质。图 1-2(a)所示为由电池、小灯泡、开关和导线组成的照明电路实例。小灯泡的模型是理想电阻元件,其微小电感可忽略;新干电池的内阻与灯泡电阻相比可忽略不计,它的模型是电压恒定的理想电压源;导线短的情况下可视为理想导体,电阻为零。所以,其电路模型如图 1-2(b)所示。



图 1-2 简单电路实例及其电路模型

建立电路模型时,应当根据电路的实际工作条件和工程精度要求选取合适的模型。图 1-3(a)所示为一个实际线圈,用金属导线绕制而成。如果应用在低频电路中,它所表现的电磁性能主要是储存磁能,电路模型是理想电感,如图 1-3(b)所示;如果应用在高频电路中,建模时需要考虑绕制该线圈的导线所消耗的电能,它的电路模型应取理想电阻与理想电感串联,如图 1-3(c)所示;如果应用在更高频率的电路中,还需考虑线圈导体表面的电荷,即电容效应,此时其电路模型如图 1-3(d)所示。

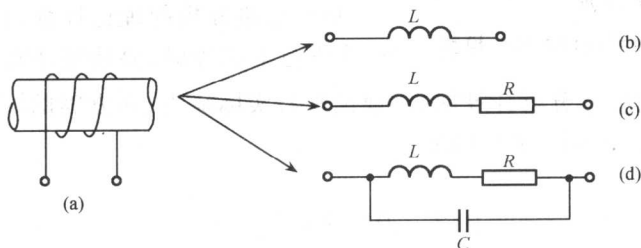


图 1-3 实际电感器在不同精度等级下的电路模型

电路分析的对象不是平时能看得见和摸得着的一些实际装置,而是经过抽象所得的理想电路元件模型以及由它们相互连接所构成的各种电路。模型的概念不仅在电路理论中应用,在其他科学领域也都利用模型分析具体事物。一切科学理论都建立在模型理论之上,没有模型就没有科学分析。

只有当实际电路尺寸远小于电路中电磁波波长时,可以认为电流是同时传送到电路各处的,整个电路可看成是电磁空间的一个点,此时电路才可用集总参数电路模型来模拟。例如,我国电力系统的工作频率为 50Hz,电压电流近似以光速 ( $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ) 传播,那么电磁波波长为 6000km。如果某电力系统物理尺寸远小于 6000km,就可以将它当作集总参数系统。在微波电路中,如电视天线和雷达天线等,它们的工作波长 ( $\lambda<1\text{m}$ ) 一般与电路的尺寸相当,这些电路中的电压、电流不仅是时间的函数,而且也是位置的函数,要用电磁场理论去分析,采用分布参数电路模型。

### 1.1.3 本课程的任务

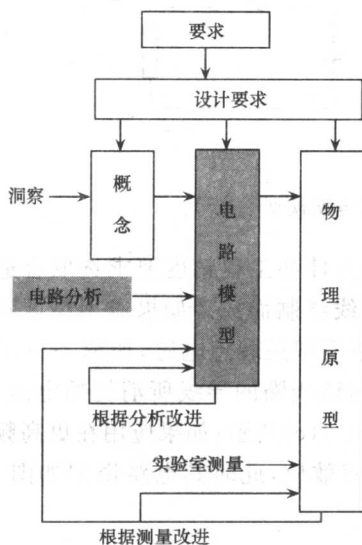


图 1-4 电气工程设计概念模型

本课程的主要任务是:掌握基本电路定律和定理,掌握电路的基本概念,学会应用各种电路分析方法分析各种类型的电路,为后续有关专业课程奠定必要的电路基础知识。

电路分析是电路综合与工程设计必需的中间步骤,在整个电气工程设计过程中,电路分析所处的位置如图 1-4 所示。由图可见,电路模型是联系设计概念和电路原型的桥梁,电路分析的对象是结构和元件参数已知的电路模型,通过求解电路模型的电压和电流,了解电路的特性和改进设计。往往满足设计要求的设计方案有多个,设计人员要从中选择电路性能好、成本低、可靠性高的设计方案。

由于电路分析的理论性强、思辨性强,因此,在学习本课程时,要始终注意对抽象思维能力、发散思维能力、分析计算能力、理论联系实际能力、多方案的评估与选择能力、归纳总结等能力的培养与训练。

## 1.2 电路变量

电路分析的目的是获得给定电路的电性能,电流  $i$ 、电压  $u$ 、电荷  $q$  和磁通  $\Phi$  这

四个基本物理量可描述电路的各种电磁现象。在此基础上,还经常用功率  $p$  和能量  $w$  来反映电路的能量传递情况。电路分析中最常用到的是电流  $i$ 、电压  $u$  和功率  $p$  三个基本变量。

### 1.2.1 电流及其参考方向

电荷(charge)是双极性的,有正电荷和负电荷之分。电荷量是离散量,是电子电荷量  $1.6022 \times 10^{-19} \text{C}$  的整数倍。电荷的定向移动形成电流,所以,电流是既有大小又有方向的物理量。

电流的大小定义为单位时间通过导体横截面的电荷量,即

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

其中,电流  $i(t)$  的单位为安培(A);电荷  $q(t)$  的单位为库仑(C)。

规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。

电流在导线中或者两端元件中流动的实际方向只有两种可能,而在复杂电路中常常很难直观地判断出到底是哪一种可能方向;况且当电流的实际方向不断改变时,始终跟踪其实际方向是不现实的,因此引入了电流参考方向。电流的参考方向就是假定的正电荷运动方向,用箭头标注在电路图上,如图 1-5 所示。

在分析电路之前,首先要任意假定各个电流的方向,即参考方向;然后在这些假定方向下求电流的大小。若求出的电流大小为正值,说明实际方向与电流参考方向相同,如图 1-5(a)所示;若电流的大小为负值,则说明实际方向与电流参考方向相反,如图 1-5(b)所示。由此可见:根据电流参考方向和电流大小的正、负值,能够唯一确定实际电流的方向和大小;因参考方向不同,同一电流有两种不同的表示法;若电路中不标出参考方向,则电流的正、负毫无意义。

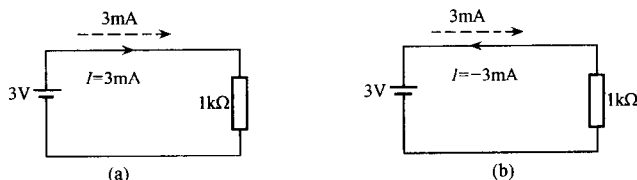


图 1-5 电流的参考方向(虚线箭头为实际方向,实线箭头为参考方向)

总之,电路分析前必须指定电路中所有电流的参考方向,参考方向的指定是任意的(如果能够明显地观察出来电流的实际方向时,尽量与实际方向一致);一旦指定了参考方向,在计算过程中就不能随意更改。

### 1.2.2 电压及其参考方向

电压的概念涉及功。电荷能够在阻力作用下流动,必然受到电场力做功。

$a$ 、 $b$  两点间的电压等于电场力将单位正电荷由  $a$  点移动到  $b$  点所做的功。

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

或者

$$u_{ab} = \int_a^b E \cdot dl \quad (1-3)$$

其中,电压  $u_{ab}$  的单位为伏特(V),功  $w$  的单位为焦耳(J), $E$  为库仑电场强度, $l$  为由  $a$  到  $b$  的路径。

任选电路中的一点为零参考点,电路中某点与参考点之间的电压称为该点的电位。一般选大地为参考点,对于机壳接大地的电气设备,机壳就是参考点;对于机壳不接大地的电气设备,一般选支路汇集的一个节点作参考点。

有了电位的概念,两点之间的电压就是这两点之间的电位差。

电压也是既有大小又有方向的物理量。规定电位降低的方向为电压的实际方向,所以电压又可叫做电压降、电位降。

两点之间的电压的实际方向也有两种可能,要正确地判断出电位高低有时也是很困难的。在电路分析前,像电流参考方向一样,也对两点之间的电压设出参考方向。电压参考方向就是假设的电位降低的方向,用一对“+、-”号表示。“+”表示假设的高电位,“-”表示假设的低电位,如图 1-6 所示。

图 1-6 中, $a$  点电位为 5V, $b$  点的电位为 3V, $a$ 、 $b$  间电压的实际方向是由  $a$  指向  $b$ 。图 1-6(a)中,设  $a$  点为高电位、 $b$  点为低电位,则  $U=5-3=2(\text{V})>0$ ,说明电压的实际方向与参考方向相同;反过来,图 1-6(b)中,假设  $a$  点为低电位、 $b$  点为高电位,则  $U=3-5=-2(\text{V})<0$ ,说明电压的实际方向与参考方向相反。可见,虽然所设参考方向不同,但是得出的电压大小都是 2V、实际电压方向都是由  $a$  指向  $b$ 。因此,根据所设电压的参考方向和求得数值的正、负,电压的大小和实际方向就唯一确定了。

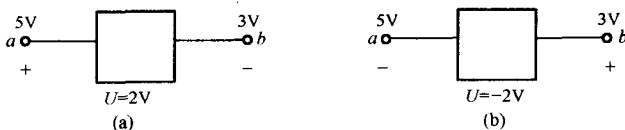


图 1-6 电压的参考方向

大学物理里介绍过保守力和保守场,库仑电场力和重力都是保守力,库仑电场和重力场都是保守场。保守力做功与物体运动所经过的路径无关,只与运动物体的起点和终点位置有关。库仑电场力移动单位正电荷从一点到另一点所做的功,只与两点之间的位置有关,而与移动电荷的路径无关。所以,两点之间的电压只与两点之间的位置有关,与路径无关。

### 1.2.3 电压和电流的分类与测量

电压和电流都是可以用仪表测量的,测量时要同时注意电压和电流的大小和方向。如果电压和电流的大小和方向均不随时间变化,则称为“直流电压”和“直流电流”,如图 1-7(a),习惯上用大写字母  $U$  和  $I$  表示。直流电压表可以测量直流电压,测量时需要记住:黑表笔接触的点相当于电压参考方向的低电位点,红表笔相当于电压的高电位点,直流电压表的示数即为该假定方向下的电压大小。直流电流表可以测量直流电流,表的示数为电流的大小,而电流的方向是从红表笔流向黑表笔。直流电压和电流的测量如图 1-8 所示,图中元件两端的电压  $U=12\text{V}$ ,电流  $i_1$  方向由右向左,大小为  $2\text{A}$ 。

如果电压和电流的大小随时间变化或方向随时间变化,则称为“时变电压”和“时变电流”,如图 1-7(b)、(c)所示,时变电压和电流的瞬时波形只能用示波器等仪器观测,注意所测电压或电流的方向也是按示波器的接线端子规定的方向。图 1-7(c)中电压和电流按照正弦规律变化,称为“正弦电压”和“正弦电流”,当只关心正弦电压或正弦电流相当于多大的直流电压或电流,而不关心其方向和瞬时值时,可以用万用表的交流电压挡或交流电流挡测量有效值。

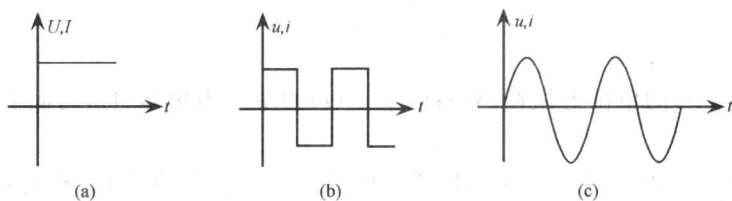


图 1-7 直流电压、电流和时变电压、电流

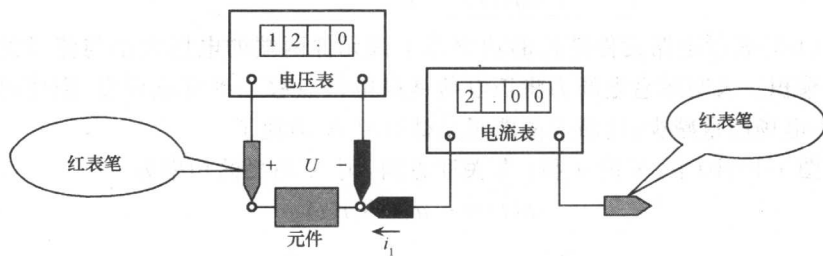
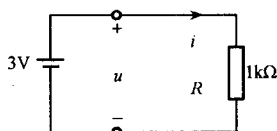


图 1-8 直流电压、电流的测量

### 1.2.4 电压和电流的关联参考方向

电路分析前必须先假定电流和电压的参考方向。在给出的电路图中,所有标

出的电压、电流方向均可认为是参考方向,而不是指实际方向。虽然同一段电路的电压和电流的参考方向可以各自选定,不必强求一致,但为了分析方便,常选定某些元件的电压和电流的参考方向一致,即电流从电压“+”极性端流入该元件而从电压“-”极性端流出。这种参考方向称为关联参考方向(passive sign convention)。



在关联参考方向下,当画出电流的参考方向后,可不用再画电压参考方向了。

**注意** 谈到关联参考方向时,一定要弄清楚是关于哪部分电路关联。在图 1-9 中, $u, i$  关于 3V 电压源

图 1-9 关联与非关联参考方向 是非关联参考方向,关于电阻  $R$  是关联参考方向。

### 1.2.5 功率

各种电气设备都有一定的电流限额、电压限额和功率限额,在使用时不能超过这些额定值,否则会损坏设备。所以,在电路分析和网络设计中仅计算电压和电流是不够的,功率计算也是非常重要的。况且,电路系统的有效输出经常是非电气的,这种输出用功率和能量来表示比较合适。

吸收或产生电能量的速率叫做**功率**(electric power),即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-4)$$

其中,功率  $p(t)$  的单位为瓦特(W);能量  $w(t)$  的单位为焦耳(J);时间  $t$  的单位为秒(s)。

在图 1-10(a)中, $N$  为一个元件或一段电路, $u$  和  $i$  关联方向,根据式(1-1)和式(1-2)电流、电压定义,可以得到  $N$  消耗的功率为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (1-5)$$

式(1-5)表示电路元件消耗的功率等于该元件两端的电压大小与流过的电流大小的乘积。表明库仑电场力将正电荷从高电位点移动到低电位点,因而电场力做正功,电场能量减少,这减少的能量是被电路  $N$  消耗了。

在图 1-10(b)中, $N$  的  $u$  和  $i$  非关联方向,则  $N$  消耗的功率为

$$p(t) = -u(t) \cdot i(t) \quad (1-6)$$

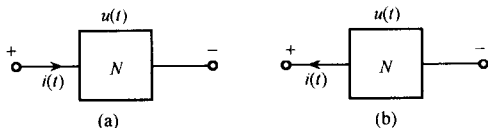


图 1-10 功率计算示意图



式(1-6)实际表示  $N$  产生的功率为  $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ , 这里的物理含义是: 非库仑电场力做正功, 将正电荷由低电位点搬运到高电位点, 结果使电场能量增加, 这增加的能量由电路  $N$  释放出来。

利用式(1-5)或式(1-6)计算功率时, 若  $P > 0$ , 表明电路  $N$  消耗功率; 若  $P < 0$ , 表明电路  $N$  实际上是产生功率。计算时, 要根据所得数值的正负指明电路到底是消耗功率还是产生功率。当电压和电流是直流时, 通常将相应的  $u$  和  $i$  变为  $U$  和  $I$ 。

**例 1-1** 电路各元件电压和电流的参考方向如图 1-11 所示。已知  $U_1 = U_4 = 10\text{V}$ ,  $U_2 = -12\text{V}$ ,  $I_1 = 1\text{A}$ ,  $I_2 = I_3 = 1.5\text{A}$ ,  $I_4 = -0.5\text{A}$ 。计算各个元件的功率, 并验证是否符合能量守恒定律。

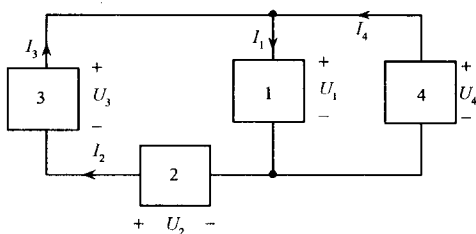


图 1-11 电路元件未知情况下计算功率

**解** 根据两点之间电压与路径无关, 有  $U_3 = U_1 - U_2 = 22\text{V}$ , 则

元件 1 消耗的功率  $P_1 = U_1 I_1 = 10 \times 1 = 10(\text{W})$ ;

元件 2 消耗的功率  $P_2 = U_2 (-I_2) = -12 \times (-1.5) = 18(\text{W})$ ;

元件 3 产生的功率  $P_3 = U_3 I_3 = 22 \times 1.5 = 33(\text{W})$ ;

元件 4 产生的功率  $P_4 = U_4 I_4 = 10 \times (-0.5) = -5(\text{W})$ , 实际消耗  $5\text{W}$ 。

电路消耗的功率  $= 10 + 18 + 5 = 33(\text{W})$ , 电路产生的功率  $= 33\text{W}$ , 消耗的功率等于产生的功率, 所以, 电路中的功率是平衡的, 符合能量守恒定律。

**评注** 电路元件的功率分为吸收功率和产生功率两种情况, 所以, 计算功率时必须指明是吸收还是产生功率, 否则仅仅一个数量, 例如,  $-5\text{W}$ , 是没有意义的。本题并未指明电路中具体元件是什么, 这表明功率只取决于电压、电流两个量, 与具体元件无关。

**本节小结:** 本节主要讲述了电压、电流和功率这三个基本物理量; 在求解电路时, 必须先假定所求电压和电流的参考方向, 参考方向一经选定在计算过程中不能改变; 电路或电路元件的功率分为消耗和产生两种情况, 要根据电压和电流的方向来判断。对于以后几节要介绍的每一种电路元件, 都要从电压、电流约束关系以及功率计算方面来掌握每个元件的特性。