

21 世纪高等院校规划教材

DIANLU YU DIANZI JISHU  
JICHU

# 电路与电子技术基础

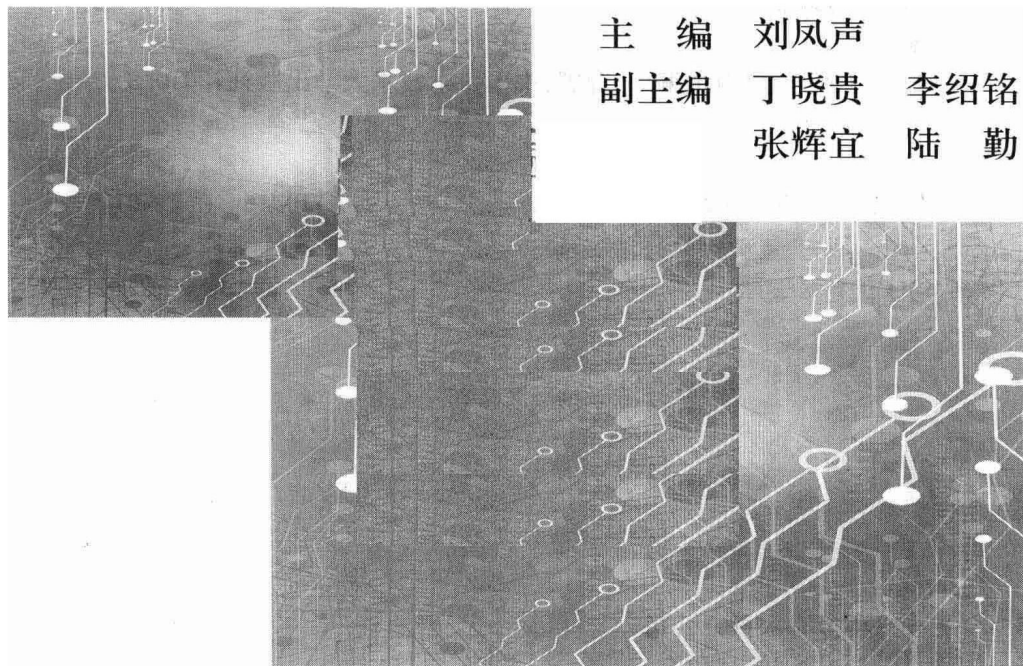
刘凤声 主编

中国科学技术大学出版社

21 世纪高等院校规划教材

DIANLU YU DIANZI JISHU  
JICHU

# 电路与电子技术基础



主 编 刘凤声  
副主编 丁晓贵 李绍铭  
张辉宜 陆 勤

中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书是针对计算机专业的教学要求编写的教材。全书分为电路分析和模拟电子技术两部分内容。电路分析部分包括:电路分析的基本概念、电路分析定理和基本方法、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、互感与理想变压器;模拟电子技术部分包括:半导体器件基础、半导体三极管放大电路、集成运算放大电路、波形发生电路、直流稳压电源。为了让读者了解和掌握现代电子电路分析和设计的手段,还安排了“现代电子电路系统分析与设计环境”一章。每章都有例题,除最后一章外,在每章内容的后面都针对性地附有相关习题。本书图文并茂,讲解全面,实例典型,侧重应用。

本书适合作为高等学校应用型本科电气、电子、通信等专业的教科书,还可作为非电类专业相关课程教材,对于专业技术人员来说,也是一本很好的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术基础/刘凤声主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.8  
ISBN 978-7-312-02706-2

I. 电… II. 刘… III. ①电路理论 ②电子技术 IV. ①TM13 ②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 136103 号

**出版** 中国科学技术大学出版社  
地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,邮政编码:230026  
网址:<http://press.ustc.edu.cn>  
**印刷** 合肥义兴印务有限责任公司  
**发行** 中国科学技术大学出版社  
**经销** 全国新华书店  
**开本** 787 mm×1092 mm 1/16  
**印张** 18.25  
**字数** 467 千  
**版次** 2010 年 8 月第 1 版  
**印次** 2010 年 8 月第 1 次印刷  
**印数** 1—4000 册  
**定价** 29.00 元

# 前 言

本书是根据教育部最新制定的《高等学校电路电子技术课程教学基本要求》编写的,是高等学校应用型本科院校计算机、电气、电子、通信等专业的教科书,同时可作为非电类专业的相关课程教材,对于专业技术人员来说,也是一本很好的参考书。

在 21 世纪,不同学科领域的技术相互融合,并不断开拓出新的学科领域。因此,面对新世纪的挑战,对电路电子技术课程必须不断地进行改革。课程改革的关键之一在于教材。众所周知,“电路分析”和“模拟电子技术”是计算机学科各专业不可缺少的硬件基础课,是“数字电路与数字逻辑”、“微机原理与接口技术”、“计算机组成原理”、“单片机原理与应用”等课程的先导课程。但是,随着教学改革的深化,学时数在不断压缩,受总学时数的限制,计算机学科中的有些专业不可能同时开设这两门课程。因此,我们将这两门课程整合成一体,称为“电路与电子技术基础”,并专门编写了本书。此外,本书也适用于电类及非电类的相关专业使用。

本书是作者在总结多年教学经验的基础上,参考了已出版的同类优秀教材,根据教学改革的要求,精选了传统内容,并适当提高难度而编写的。电路分析部分更注重对电路分析思路的把握,加强了知识的实用性;模拟电子技术部分在精讲基础理论的同时,加强了对新器件、新技术和新应用的介绍,为了让学生了解和掌握现代电子电路分析和设计的手段,增加了“现代电子电路系统分析与设计环境”一章。此外,电路与模拟电子技术是一门实践性很强的课程,它的任务是要让学生学习和掌握电路与电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的综合能力。为此,在每章内容的后面都针对性地附有相关习题以便让学生熟练掌握;同时也可用电路分析和设计软件 Multisim 对电路进行分析和仿真,以培养学生理论联系实际、分析解决实际问题的能力。

本书主要面对 48~100 学时的电路电子技术课程编写。编写过程中力求文字简明、概念清晰、条理清楚、讲解到位、通俗易懂、例题经典、习题丰富、理论联系实际,真正做到教师易教,学生易学。

本书由刘凤声主编和统稿。其中第 1、5 章由王小林执笔,第 2、11 章由刘凤声执笔,第 3、4 章由李绍铭执笔,第 6、10 章由张辉宜执笔,第 7 章由丁晓贵执笔,第 8、9 章由陆勤执笔。另外,对关心此书大纲论证和教材编写的其他人员,在此一并表示衷心的感谢。

本书由于编写时间较短,疏漏之处在所难免,敬请各方面的读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者  
2010 年 7 月

# 目 录

前言	( i )
<b>第 1 章 电路分析的基本概念</b>	( 1 )
1.1 电路及电路模型	( 1 )
1.2 电路分析的基本物理量	( 3 )
1.3 基尔霍夫定律	( 7 )
1.4 电路元件	( 10 )
1.5 理想电源	( 12 )
1.6 受控源	( 13 )
习题	( 14 )
<b>第 2 章 电路分析定理和基本方法</b>	( 18 )
2.1 网络化简及等效变换法	( 18 )
2.2 支路和网孔电流法	( 28 )
2.3 节点电压法	( 32 )
2.4 叠加原理	( 34 )
2.5 等效电源定理	( 35 )
2.6 最大功率传输定理	( 38 )
2.7 替代定理	( 40 )
2.8 含受控源电路的分析方法	( 41 )
习题	( 43 )
<b>第 3 章 动态电路的时域分析</b>	( 49 )
3.1 储能元件	( 49 )
3.2 动态电路的方程及其解	( 52 )
3.3 一阶动态电路的零输入响应	( 56 )
3.4 一阶动态电路的零状态响应	( 61 )
3.5 一阶动态电路的全响应	( 62 )
习题	( 66 )
<b>第 4 章 正弦稳态电路分析</b>	( 72 )
4.1 正弦量的基本概念	( 72 )

4.2	电路定律的相量形式·····	( 77 )
4.3	阻抗和导纳·····	( 80 )
4.4	阻抗(导纳)的串联和并联·····	( 82 )
4.5	正弦稳态电路分析·····	( 84 )
4.6	正弦稳态电路的功率·····	( 87 )
4.7	三相电路·····	( 92 )
4.8	线电压(电流)、相电压(电流)之间关系·····	( 94 )
4.9	三相电路的计算·····	( 96 )
	习题·····	(101)
<b>第 5 章</b>	<b>互感与理想变压器</b> ·····	(106)
5.1	互感及互感电压·····	(106)
5.2	耦合电感的串联和并联·····	(109)
5.3	理想变压器·····	(111)
	习题·····	(113)
<b>第 6 章</b>	<b>半导体器件基础</b> ·····	(116)
6.1	半导体基本知识·····	(116)
6.2	半导体二极管·····	(119)
6.3	半导体三极管·····	(125)
6.4	场效应管·····	(135)
	习题·····	(139)
<b>第 7 章</b>	<b>半导体三极管放大电路</b> ·····	(142)
7.1	共射极放大电路·····	(142)
7.2	共集电极和共基极放大电路·····	(150)
7.3	静态工作点稳定电路·····	(153)
7.4	场效应管放大电路·····	(156)
7.5	多级放大电路·····	(159)
7.6	差分放大电路·····	(162)
7.7	功率放大电路·····	(169)
	习题·····	(174)
<b>第 8 章</b>	<b>集成运算放大电路</b> ·····	(183)
8.1	集成电路概述·····	(183)
8.2	集成运算放大器的基本组成及功能·····	(184)
8.3	理想运算放大器·····	(190)
8.4	放大电路中的反馈·····	(192)
8.5	集成运算放大器的应用·····	(210)

---

习题 .....	(224)
<b>第 9 章 波形发生电路 .....</b>	<b>(229)</b>
9.1 正弦波发生器 .....	(229)
9.2 非正弦波发生器 .....	(237)
习题 .....	(243)
<b>第 10 章 直流稳压电源 .....</b>	<b>(246)</b>
10.1 直流电源结构及其参数 .....	(246)
10.2 单相整流电路 .....	(247)
10.3 电容滤波电路 .....	(249)
10.4 稳压电路 .....	(250)
习题 .....	(256)
<b>第 11 章 现代电子电路系统分析与设计环境 .....</b>	<b>(260)</b>
11.1 Multisim 2001 简介 .....	(260)
11.2 Multisim 2001 窗口界面 .....	(262)
11.3 主要操作 .....	(271)
11.4 Multisim 2001 中虚拟仪器介绍 .....	(274)
11.5 仿真分析方法 .....	(277)
11.6 Multisim 在模拟电子线路中的应用 .....	(278)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(282)</b>

# 第 1 章 电路分析的基本概念

本章主要介绍电路的基础知识,包括电路及电路模型、电路中的物理量、常用元件等基本概念,重点讨论了基尔霍夫定律、理想电源等,并对受控源进行了简单介绍。

## 1.1 电路及电路模型

电路是人们为了实现电能或电信号的产生、传输、处理及利用,由电器元件或设备,按一定方式连接起来而构成的电流的通路。我们日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路,它是由干电池、灯泡、开关、手电筒壳(连接导体)组成的,如图 1.1(a)所示。

电路模型是为了方便分析研究电路,在一定的条件下对实际电器元件加以理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要性能的模型(Model)来表示,如图 1.1(b)所示就是手电筒电路模型。

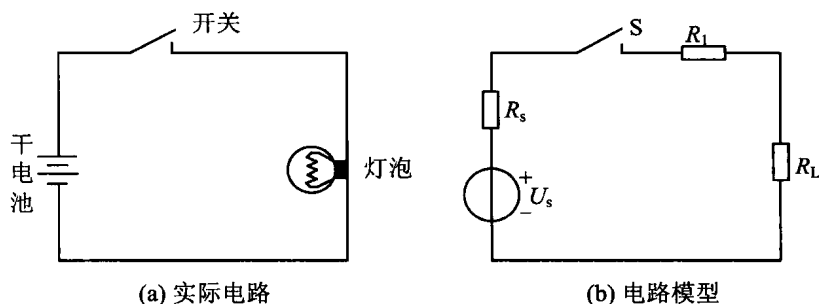


图 1.1 简单实际电路及其电路模型

### 1.1.1 实际电路作用及其组成

电在日常生活、农业生产、科研以及国防等方面都有广泛的应用。在通信、自动控制、计算机、电力等电技术领域,都要使用许多电路来完成各种各样的任务。可以说,只要用电的物体,其内部都含有电路,只是电路的结构各异,特性和功能也不相同。

实际电路的作用按强、弱电区分,主要体现在以下两个方面:

- ① 实现电能的产生、传输与转换(强电,电力电子);
- ② 信号的产生、传递与处理(往往针对弱电),如收音机、选频电路、检波电路、放大电路、扬声器驱动电路等。



实际电路的主要组成部分包括电源(信号源、激励)、负载、传输节点 3 大部分。电源是用于提供电能或电信号的设备。负载是用于耗电或输出信号的设备。传输节点是用于传输电能和电信号的中间环节。在现代信息化社会中使用的各种各样的电器设备,如电视机、手机、计算机、电动机等,广义上讲都是实际生活中的电路。

### 1.1.2 理想化的电路模型

本课程并不是研究一个个具体的实际电路,而是研究经过理想化的电路模型。大家知道,有电压就会存在电场,有电流就有磁场,即电路周围伴有电场、磁场能量,或存在电磁波,它使电路伴有以下 3 种效应:

- ① 载流导体因发热而耗能等效为电阻  $R$ ;
- ② 电场储能等效为电容  $C$ ;
- ③ 磁场能量等效为电感  $L$ 。

这 3 种效应一般是交织在一起的(如  $R$  含  $L$ ,  $L$  含  $R$ 、 $C$  等),但根据主次的不同,在某些条件下可以被理想化,即将  $R$ 、 $L$ 、 $C$  这 3 种效应分开,假定电磁交换过程集中在元件内部进行,没有能量的辐射,使实际器件等效为理想元件  $R$ 、 $L$ 、 $C$  或(及)其组合。

#### 1. 电路模型

实际的电器元件和设备的种类是很多的,如各种电源、电阻、晶体管、固体组件等等,它们发生的物理过程是很复杂的。因此,为了研究分析电路的特性和功能,突出电路中器件的主要特性,忽略其次要性质,必须进行科学的抽象,用一些模型来代替实际电器元件和设备的外部功能,这种模型称为电路模型。

图 1.1(a)所示为一个实际的简单电路。它由干电池、连接导线、开关、小灯泡 4 部分组成。电池产生电能,连接导线传输电能,小灯泡消耗电能。它的模型如图 1.1(b)所示。其中,电阻  $R_L$  代表负载(小灯泡),干电池则用电压源  $U_s$  和电阻  $R_s$  的串联组合表示,电阻  $R_l$  代表连接导线的总电阻。

将电路模型画在平面上所形成的图称为电路图。图 1.1(b)即为图 1.1(a)电路的电路图。电路图只反映各理想电路元件在电路中的作用及其相互连接方式,并不反映实际设备的内部结构、几何形状及相互位置。

#### 2. 集总假设

集总假设是电路理论中的一个重要假设,集总假设是有条件的。当电路元件的尺寸远小于电路周围电磁波的波长时,则这个器件或部件称为集总参数器件和部件。由集总参数元件互连而成的电路定义为集总参数电路。凡是电路的尺寸不满足上述集总化假设条件的,就称为分布参数电路。本书只讨论集总参数电路,集总参数电路是电路基本定律(基尔霍夫电流定律和电压定律)的应用前提。例如,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km,而对实验室设备以此为工作频率来论,其尺寸远小于这一波长。因而用集总的概念是完全可以的,但对远距离输电线来说,就必须考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用分布参数表征。

## 1.2 电路分析的基本物理量

电路的电性能通常可以用一组表示时间函数的物理量来描述,电路分析的任务在于给定电源(激励)解得这些物理量(响应)。从根本上说,电荷与能量是描述电现象的最基本物理量或原始物理量,为便于描述电路,从电荷和能量角度引入电路的3个基本物理量:电流、电压和功率。

### 1.2.1 电流

电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷,所带电荷的多少叫电量,在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑(国际代号C), $6.24 \times 10^{18}$ 个电子所具有的电量等于1库仑。我们用符号 $q$ 表示电量,1库=1安·秒。

电荷有规则的定向运动,形成传导电流。金属导体中的大量自由电子在外电场的作用下逆电场方向运动而形成电流,电解液中带电离子做规则定向运动也形成电流。计算电流大小的物理量是电流强度。

#### 1. 电流强度的定义

单位时间内通过导体横截面的电荷量。用 $i(t)$ 可表示为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在SI中,电流的单位是安培(中文代号为安,国际代号为A),即A(安培)。也用kA、mA、 $\mu$ A表示。

$$1 \text{ kA} = 1000 \text{ A}$$

$$1 \text{ A} = 1000 \text{ mA}$$

$$1 \text{ mA} = 1000 \mu\text{A}$$

#### 2. 电流的实际方向

习惯上把正电荷的运动方向定为电流的实际方向,又称真实方向。如果电流的大小和方向都不随时间变化,则这种电流称为恒定电流,简称直流(Direct Current, DC),可用符号 $I$ 表示,否则称为时变电流。如果时变电流的大小和方向都随时间进行周期性变化,则称为交变电流,简称交流(Alternating Current, AC)。

#### 3. 电流的参考方向

在实际问题中,电流的真实方向在电路图中难以判断。如图1.2所示,电阻 $R$ 的电流实际方向不是一看便知的,但它的实际方向无非是:从 $a$ 流向 $b$ 或从 $b$ 流向 $a$ 。

因此,可以像其他代数量问题一样任意假设正电荷的运动方向,即参考方向(Reference Direction),用箭头标在电路图上,或用双下标表示,如 $i_{ab}$ 表示电流从 $a$ 点流向 $b$ 点,并以此为准

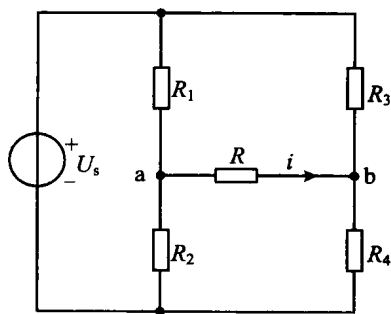


图 1.2 电流参考方向

分析计算。经计算后根据电流的正、负可判断其实际方向。如果计算所得电流为正值,说明实际方向与所设参考方向一致;如果计算所得电流为负值,说明实际方向与所设参考方向相反。

**注意:** 电流值的正、负,只在设定参考方向的前提下才有意义。因此,选用电流变量时一定要标出其参考方向。正因为从参考方向可以判定其实际方向,故本书在电路图中所标出的电流方向都可以认为是参考方向。

**【例 1.1】** 接于某一电路的 ab 支路如图 1.3 所示,在图示参考方向下,若  $i(t) = 4\cos(2\pi t + \frac{\pi}{4})$  A, 试问:

- (1)  $i(0), i(0.5)$  的实际方向?
- (2) 若电流参考方向与图 1.3 中标示相反,则  $i(0), i(0.5)$  的实际方向有无变化?

**【解】** (1)  $i(0) = 4\cos\frac{\pi}{4} = 2\sqrt{2}$  (A)  $> 0$ , 故实际方向和图示参考方向一致,是  $a \rightarrow b$ ;  $i(0.5) = 4\cos(\pi + \frac{\pi}{4}) = -2\sqrt{2}$  (A)  $< 0$ , 故该电流实际方向和图 1.3 参考方向相反,是  $b \rightarrow a$ 。



图 1.3 例 1.1 图

(2) 电流的参考方向可以任意假设,但实际方向由该支路与外电路确定,故实际方向不会因参考方向的选择而改变。事实上,在该题条件下  $i'(t) = -4\cos(2\pi t + \frac{\pi}{4})$  A, 故实际方向和(1)完全一致。

### 1.2.2 电压

电荷在电路中流动,就必然发生能量的交换。电荷可能在电路的某处获得能量而在另一处失去能量。因此,电路中存在着能量的流动,电源一般提供能量,有能量流出;电阻等元件吸收能量,有能量流入。为便于研究问题,计算电场力做功的能力,引用“电压”这一物理量。

#### 1. 电压的定义

单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功称为 ab 两点间的电压,又称电位差(或电势差)。用  $u(t)$  可表示为

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \tag{1.2}$$

式中,电荷的单位是库[仑](C),功的单位是焦[耳](J),电压的单位是伏[特](V),也用 kV、mV、 $\mu$ V 表示。

$$1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}, \quad 1 \text{ V} = 1000 \text{ mV} \quad 1 \text{ mV} = 1000 \mu\text{V}$$

#### 2. 电压的实际方向

习惯上把电位降落的方向称为电压的实际方向,又称实际极性。如果电压的大小和方向不

随时间变化,则这种电压称为恒定电压,否则称为时变电压。

### 3. 电压的参考方向

同需要为电流选定参考方向一样,也需要为电压选定参考方向。通常在电路图上用“+”表示参考方向的高电位端,“-”表示参考方向的低电位端,如图 1.4 所示。或用双下标表示电压的参考方向,如  $u_{ab}$  表示电压参考方向从 a 点指向 b 点。电压实际方向的判定与电流类似。

### 4. 电位的概念及计算

在电路中,某点的电位是将单位正电荷沿一路径移至参考点(选定电路中的参考点,用符号“ $\perp$ ”表示)电场力做的功。将参考点的电位定为零,则所求点的电位就是该点到参考点的电压。所以计算电位的方法与计算电压的方法完全相同。

在电路分析中引入了电位,可以简化分析,方便计算。如图 1.5(a)所示电路,为求各电阻元件的电压,当选 d 为参考点时,只需以 b 点电位为变量,列出有关电路方程求得该电位,各电阻电压即为电阻两端电位之差。

对于电路图的表示形式,对如图 1.5(a)所示用电位表示的电路图,还可将其改画成用电位的极性代替电压源的形式,如图 1.5(b)所示。在电子电路课程中,把这种画法称为“习惯画法”。

显然,没有参考点,谈论电位数值的大小是没有意义的。

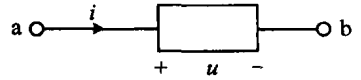
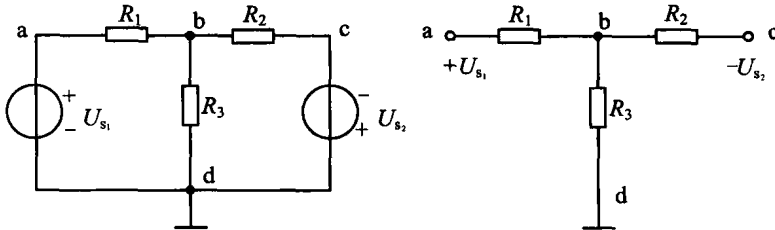


图 1.4 电压参考方向



(a) 电位表示的电路图

(b) 电路图的习惯画法

图 1.5 电路图的表示形式

### 5. 关联的电压与电流参考方向

在电路分析中,电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。但为了方便起见,常采用关联参考方向:电流参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向一致,即电流与电压参考方向一致,如图 1.4 所示,图中电流  $i$  和电压  $u$  是关联的,否则称非关联。

## 1.2.3 功率

由于电路中存在着能量的传输,为了讨论能量传输的快慢,特引入“功率”这一物理量。

### 1. 功率的定义

单位时间内电场力所做的功或电路所吸收的能量。用  $p$  表示, 即有

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.3)$$

式中, 功的单位是焦[耳](J), 时间的单位是秒(s), 功率的单位是瓦[特](W), 也用 kW、mW。

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}, \quad 1 \text{ W} = 1000 \text{ mW}$$

### 2. 功率的计算

对于某一元件或局部电路, 如图 1.4 所示, 采用关联的电压、电流参考方向, 则该元件或局部电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1.4)$$

**结论:** 在电压  $u$ 、电流  $i$  参考方向关联的条件下, 一段电路所吸收的功率为该段电路两端电压与电流的乘积。显然, 若  $u$ 、 $i$  参考方向非关联, 则计算吸收功率的公式中应冠以负号, 即

$$p(t) = -ui$$

据此, 代入  $u$ 、 $i$  数值, 若计算的  $p$  为正值, 该段电路实际就是吸收功率(或消耗功率); 若  $p$  为负值, 该段电路实际向外提供功率(或产生功率)。

### 3. 能量的计算

在电压、电流参考方向关联时, 从  $t_0$  到  $t$  时刻内该部分电路吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \quad (1.5)$$

**【例 1.2】** 图 1.6(a)所示电路中, 已知  $I_1 = 3 \text{ A}$ 、 $I_2 = -2 \text{ A}$ 、 $I_3 = 1 \text{ A}$ , 电位  $U_a = 8 \text{ V}$ 、 $U_b = 6 \text{ V}$ 、 $U_c = -3 \text{ V}$ 、 $U_d = 8 \text{ V}$ 。

- (1) 欲验证电流数值是否正确, 直流电流表应如何接入电路? 并标明电流表的极性。
- (2) 求电压  $U_{ac}$ 、 $U_{db}$ , 要测量这两个电压, 应如何连接电压表? 并标明电压表的极性。
- (3) 求元件 1、3、5 上的吸收功率。

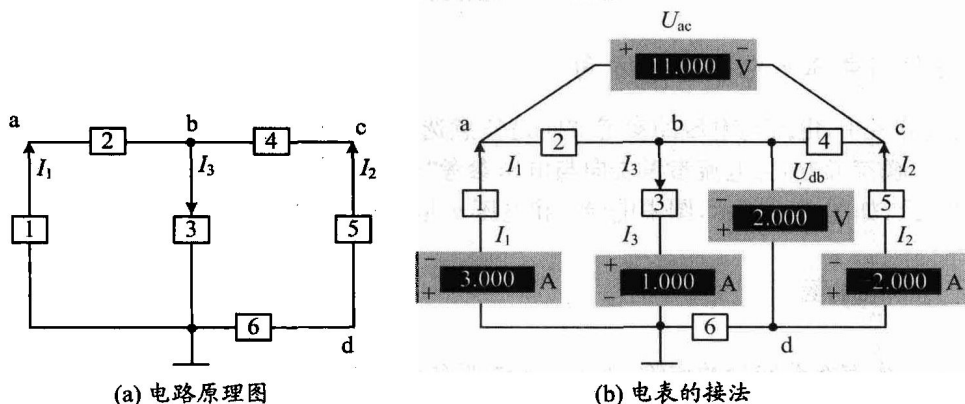


图 1.6 例 1.2 图

**【解】** (1) 根据各支路电流的正负值, 电流表应按图 1.6(b) 所示接入各支路。

(2)  $U_{ac} = U_a - U_c = 8 + 3 = 11$  (V),  $U_{db} = U_d - U_b = 8 - 6 = 2$  (V)。电压表的接法如图 1.6(b) 所示。

(3) 设元件 1、3、5 上吸收的功率分别为  $P_1$ 、 $P_3$ 、 $P_5$ , 则

$$P_1 = -U_a I_1 = -8 \times 3 = -24 \text{ (W)}$$

$$P_3 = U_b I_3 = 6 \times 1 = 6 \text{ (W)}$$

$$P_5 = U_{dc} I_2 = (U_d - U_c) I_2 = (8 + 3) \times (-2) = -22 \text{ (W)}$$

## 1.3 基尔霍夫定律

### 1.3.1 名词介绍

下面以图 1.7 所示的电路为例来介绍几个相关名词。

#### 1. 支路

按狭义定义, 把通过同一电流的电流路径称为支路。该电路共有 3 条支路: 支路 b1a 和 b2a 中既有电阻又有电源, 称为有源支路; 支路 a3b 只有电阻而无电源, 称为无源支路。

#### 2. 节点

按狭义定义, 3 条和 3 条以上支路的连接点称为节点, 电路有两个节点 a 和 b。

#### 3. 回路

由支路构成的闭合路径称为回路, 共有 3 个回路, 即 a2b1a 回路、a3b2a 回路、a3b1a 回路。

#### 4. 网孔

内部不包含支路的回路称为网孔, 共有 2 个网孔, 即 a2b1a 网孔、a3b2a 网孔, 网孔一定是回路, 但回路并不一定是网孔。

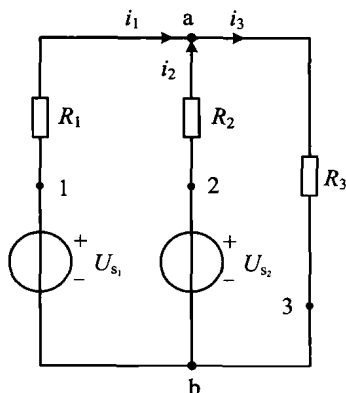


图 1.7 基尔霍夫定律名词解释示例图

### 1.3.2 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law), 简称为 KCL。它是描述电路中各支路电流之间相互关系的定律, 陈述为: 对于任一集总电路中的任一节点, 在任一时刻  $t$ , 流入(或流出)该节点所有支路的电流的代数和为零。其数学表示式为

$$\sum_{k=0}^n i_k(t) = 0 \quad (1.6)$$

式中,  $i_k(t)$  为流入(或流出)节点的第  $k$  条支路的电流,  $n$  为节点处的支路数。

例如, 对于图 1.7 所示电路, 设定各支路电流的大小和参考方向如图 1.7 所示, 则对该 a 点有

$$i_1 + i_2 = i_3 \quad (1.7)$$

将式(1.7)改写为

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0 \quad (1.8)$$

式(1.8)的物理意义是, 流入流出节点 a 的电流的代数和等于零。这里流出的电流规定取正号, 则流入的电流即取负号。式(1.7)再改写为

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \quad (1.9)$$

式(1.8)、式(1.9)两式是 KCL 的另一种叙述法。它们在本质上是一样的, 区别只在列写方程时是把流出节点的电流规定为正, 还是把流入节点的电流规定为正。

式(1.8)、式(1.9)两式写成一般形式为  $\sum i_k(t) = 0$ , 即集中在任一节点上的各支路电流的代数和恒为零。

**注意:** 在写方程时, 如把流出节点的电流视为正, 则流入节点的电流即须取为负; 反之亦然。

**推广:** KCL 原是运用于节点的, 但把它加以推广, 也可用于包围几个节点的闭合面。在如图 1.8 所示电路中, 闭合面 S 内有 3 个节点 1、2、3。当设定各支路电流的大小和参考方向如图中所示时, 则对此 3 个节点即可列出 KCL 方程

$$i_1 = i_{12} - i_{31}$$

$$i_2 = i_{23} - i_{12}$$

$$i_3 = i_{31} - i_{23}$$

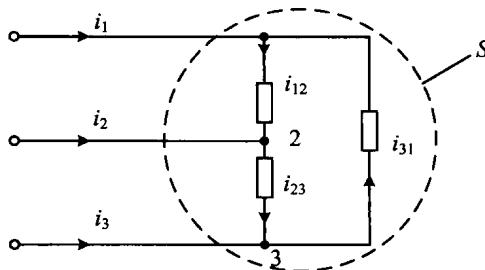


图 1.8 KCL 推广于闭合面

把以上 3 式相加得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

或

$$\sum_{k=1}^3 i_k(t) = 0$$

即流入(或流出)一个闭合面的支路电流的代数和恒等于零, 此即广义的 KCL。

**注意:** 在写方程时, 如把流出闭合面的电流视为正, 则流入闭合面的电流即须取为负; 反之亦然。

### 1.3.3 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law),简称为 KVL。它是描述回路中各支路电压之间相互关系的定律,陈述为:对于任一集总电路中的任一回路,在任一时刻  $t$ ,沿着该回路的所有支路电压降的代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0 \quad (1.10)$$

式中  $u_k(t)$  为回路中第  $k$  条支路电压,  $n$  为回路中的支路数。

在写此方程时,应首先为回路设定一个绕行方向,凡电压的参考极性从“+”到“-”与回路绕行方向一致者,则该电压前取“+”号,否则取“-”号。

例如,对于图 1.9 所示电路,设定各元件电压的参考极性和回路的绕行方向如图中所示,则有

$$u_1 + u_2 + u_3 + U_{s_3} - U_{s_4} - u_4 = 0 \quad (1.11)$$

将式(1.11)改写为

$$-u_1 - u_2 - u_3 - U_{s_3} + U_{s_4} + u_4 = 0 \quad (1.12)$$

式(1.12)意味着把回路的绕行方向设定为与前者相反。

由此可见,回路绕行方向的设定直接影响着方程中各项正负号的确定,但不影响方程的本质,故可以任意设定。

若电路中的电阻均为线性电阻元件,则上述的 KVL 方程还可改写为另一种表述方法,即

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 + U_{s_3} - U_{s_4} - R_4 i_4 = 0$$

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_4 i_4 = -U_{s_3} + U_{s_4}$$

$$\sum_{k=1}^4 R_k i_k = \sum_{k=3}^4 U_{s_k} \quad (1.13)$$

式(1.13)指出,任一回路中电阻上电压降的代数和恒等于回路内电压源电压升的代数和。凡电流参考方向与回路绕行方向一致者,上式等号左端  $R_k i_k$  前取“+”号,不一致者,  $R_k i_k$  前取“-”号;凡电压源电压的极性从“-”到“+”与绕行方向一致者,式(1.13)等号右端  $U_{s_k}$  前取“+”号,不一致者,  $U_{s_k}$  前取“-”号。

### 1.3.4 拓扑约束的概念

基尔霍夫电流定律(KCL)描述了电路中各支路电流之间的关系,基尔霍夫电压定律(KVL)描述了电路中各支路电压之间的关系,它们都与电路元件的性质无关,而只取决于电路的连接方式。所以把这种约束关系称为连接方式约束或拓扑约束,而把根据它们写出来的方程分别称为 KCL 约束方程和 KVL 约束方程。

至此,已经引入了两种约束的概念:元件约束与拓扑约束。它们贯穿于电路课程的始终。

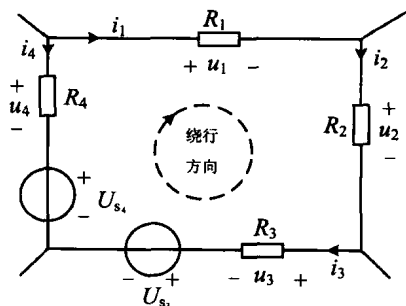


图 1.9 电路中的一个回路



## 1.4 电路元件

这里主要讨论电阻元件,电容、电感元件将在第3章的3.1节中讨论。

### 1.4.1 定义

电阻元件(Resistor)是从实际电阻器抽象出来的模型,是二端电路元件,如图1.10(a)所示。

若二端元件的电压、电流关系是由  $u-i$  平面(或  $i-u$  平面)上通过坐标原点的直线来描述,则这种二端元件即称为线性电阻元件,如图1.10(b)所示。若是一条经过坐标原点的曲线,则这种二端元件称为非线性电阻元件,如图1.10(c)所示。这条曲线称为电阻元件的伏安关系,也称元件约束,通常用函数表示,即

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

元件约束与电路的连接方式无关。这里主要讨论线性电阻及其电路。

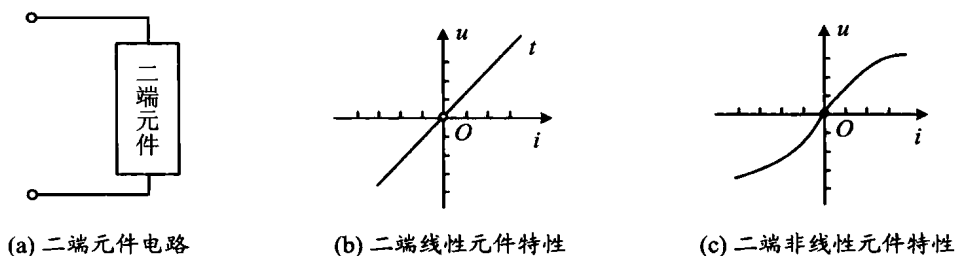


图 1.10 二端元件

### 1.4.2 线性电阻元件

若电阻元件的伏安关系是通过  $u-i$ (或  $i-u$ )平面上坐标原点的直线,且此直线的位置(亦即直线的斜率)不随时间变动,则称为线性定常电阻元件或称时不变电阻元件,如图1.11(a)所示。它有如下特点:

① 直线的斜率即为其电阻值  $R$ ,即  $\tan(\alpha) = R$ ,且  $R$  值为定值(即不随时间而变)。这样即可用一个定常电阻  $R$  或定常电导  $G$  来构成线性定常电阻元件的电路模型,如图1.11(b)所示,  $R$  的单位为欧[姆]( $\Omega$ ),  $G$  的单位为西[门子]( $S$ ),且有  $G = 1/R$  或  $R = 1/G$ 。

② 伏安关系曲线关于坐标原点对称,即为奇函数。这说明线性定常电阻元件对不同方向的电流或不同极性的电压,其伏安关系是完全相同的。这种性质称为双向性,也称可逆性。因此在使用线性定常电阻元件时,它的两个端钮是没有任何区别的,在电路中可以任意连接。

③ 伏安关系服从欧姆定律。若设  $u$  与  $i$  之间参考方向如图1.11(b)所示,则有

$$u = Ri \tag{1.14}$$