



高等学校“十二五”精品规划教材

# 电 工 学

主 编 陈春玲



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



高等学校“十二五”精品规划教材

# 电 工 学

主 编 陈春玲

副主编 丁文彦 胡 博 姜凤利

主 审 朴在林



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是高等学校“十二五”精品规划教材之一。主要有电路、电子和电气设备三部分，其内容包括：直流电路、单相交流电路、三相交流电路、变压器、电动机、电气控制线路、供电与安全用电、基本半导体器件、基本放大电路和集成运算放大器、直流电源、逻辑代数基础、门电路和组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路等。

本书可作为高等农业、林业、水利水电院校或其他院校非电专业的教材，也可供电气工程技术人员参考和自学。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工学 / 陈春玲主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2011.2  
高等学校“十二五”精品规划教材  
ISBN 978-7-5084-8415-0

I. ①电… II. ①陈… III. ①电工学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第022812号

书 名	高等学校“十二五”精品规划教材 <b>电工学</b>
作 者	主编 陈春玲
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 17.5印张 415千字
版 次	2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>32.00元</b>

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

《电工学》是高等学校“十二五”精品规划教材之一。该书的基本内容符合高等学校精品课规划教材研究会审定的《电工学》教学大纲，适用于高等农业、林业、水利水电院校或其他院校的非电专业教材以及电气工程技术人员参考和自学。

在本教材编写过程中，作者总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验，注重理论的系统性和实用性，删除了以往不适合的内容，增加了新的知识和对一些问题的分析思路以及解题方法，使之更适合组织教学和学生自学。书中例题、习题丰富，图形、符号均采用最新国家标准。书后附有全书绝大部分课后练习题的答案。本书参考学时为50~90学时。

参加本书编写的单位有：沈阳农业大学、河北农业大学、西北农林科技大学等院校以及相关电力工程实践部门。

本书编写人员：陈春玲、丁文彦、胡博、姜凤利、王俊、黄蕊、周玉宏、张宁。全书由朴在林教授主审。

由于作者水平和时间有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2011年1月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 直流电路</b> .....	1
第一节 电路及基本物理量 .....	1
第二节 电压源与电流源及其等效变换 .....	5
第三节 基尔霍夫定律及支路电流法 .....	8
第四节 节点电压法 .....	11
第五节 叠加定理 .....	12
第六节 等效电源定理 .....	14
第七节 受控源 .....	17
小结 .....	18
习题 .....	18
<b>第二章 单相交流电路</b> .....	21
第一节 正弦交流电的基本概念 .....	21
第二节 正弦量的表示方法 .....	25
第三节 单一参数的交流电路 .....	30
第四节 RLC 串联交流电路 .....	38
第五节 RLC 并联交流电路 .....	41
第六节 电路中的谐振 .....	46
第七节 复杂正弦电路的相量分析 .....	48
小结 .....	52
习题 .....	52
<b>第三章 三相交流电路</b> .....	55
第一节 三相交流电源 .....	55
第二节 对称三相电路 .....	57
第三节 不对称三相电路 .....	61
第四节 三相电路的功率 .....	63
小结 .....	65
习题 .....	65
<b>第四章 变压器</b> .....	67
第一节 变压器的基本结构和工作原理 .....	67

第二节	变压器的运行特性及变压器绕组极性与测定 .....	71
第三节	三相变压器及特殊用途变压器 .....	74
小结	.....	77
习题	.....	78
<b>第五章</b>	<b>电动机</b> .....	79
第一节	三相异步电动机的结构和工作原理 .....	79
第二节	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性 .....	85
第三节	三相异步电动机的使用 .....	90
第四节	单相异步电动机 .....	100
第五节	直流电机 .....	103
第六节	伺服电动机 .....	107
第七节	步进电动机 .....	112
小结	.....	114
习题	.....	115
<b>第六章</b>	<b>电气控制线路</b> .....	117
第一节	常用控制电器 .....	117
第二节	继电器与接触器控制的基本电路 .....	123
第三节	电气控制的基本方法 .....	126
小结	.....	133
习题	.....	134
<b>第七章</b>	<b>供电与安全用电</b> .....	135
第一节	电力系统概述 .....	135
第二节	保护接地和保护接零 .....	137
第三节	防雷保护 .....	141
第四节	安全用电 .....	143
小结	.....	146
习题	.....	147
<b>第八章</b>	<b>基本半导体器件</b> .....	148
第一节	半导体基本知识 .....	148
第二节	半导体二极管 .....	150
第三节	晶体三极管 .....	155
第四节	场效应管 .....	161
小结	.....	164
习题	.....	164
<b>第九章</b>	<b>基本放大电路和集成运算放大器</b> .....	166
第一节	基本放大电路 .....	166
第二节	放大电路的分析方法 .....	167
第三节	集成运算放大器简介 .....	176

第四节	具有负反馈的线性集成运算放大器 .....	178
第五节	集成运算放大器的应用 .....	185
小结	.....	191
习题	.....	192
<b>第十章</b>	<b>直流电源</b> .....	196
第一节	单相桥式整流电路 .....	196
第二节	滤波电路 .....	198
第三节	稳压管稳压及串联型稳压电路 .....	202
小结	.....	205
习题	.....	206
<b>第十一章</b>	<b>逻辑代数基础</b> .....	207
第一节	数字电路概述 .....	207
第二节	数制和编码 .....	208
第三节	逻辑代数 .....	211
第四节	逻辑函数的化简方法 .....	215
小结	.....	219
习题	.....	219
<b>第十二章</b>	<b>门电路和组合逻辑电路</b> .....	220
第一节	基本门电路 .....	220
第二节	CMOS 集成门电路 .....	223
第三节	TTL 集成门电路 .....	226
第四节	组合逻辑电路的分析与设计 .....	228
第五节	编码器 .....	231
第六节	译码器和数码显示 .....	233
小结	.....	236
习题	.....	236
<b>第十三章</b>	<b>触发器及时序逻辑电路</b> .....	238
第一节	双稳态触发器 .....	238
第二节	寄存器 .....	243
第三节	计数器 .....	246
第四节	电平转换电路 .....	252
第五节	555 定时器 .....	255
第六节	D/A 转换和 A/D 转换的基本概念 .....	259
小结	.....	263
习题	.....	264
<b>部分习题答案</b>	.....	266
<b>参考文献</b>	.....	272

# 第一章 直流电路

电路是电工技术和电子技术的基础。学好电路，特别是掌握电路的分析方法，为后面所要学习的电子电路、电机电路及电气控制、电气测量打下坚实的基础。本章主要介绍电路模型、电压和电流参考方向的概念、基尔霍夫电流电压定律以及各种电路的分析和计算方法等。

## 第一节 电路及基本物理量

### 一、电路模型

电路是电流流通的路径，是为某种需要由若干电气元件按一定方式组合起来的整体，主要用来实现能量的传输和转换或实现信号的传递和处理。

电路的结构形式，按所实现的任务不同而多种多样，但无论是哪种电路，均离不开电源、负载和必要的中间环节这三个最基本的组成部分。电源是提供电能的设备，如发电机、电池、信号源等；负载就是指用电设备，如电灯、电动机、空调和冰箱等；中间环节是用作电源与负载相连接的，通常是一些连接导线、开关、接触器等辅助设备。

在对实际电路进行分析时，需要在一定条件下将实际元器件以理想化形式表示，即将电路中元器件看作理想元件，所组成的电路称为电路模型，简称为电路，这是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在今后学习中，所接触的电感元件、电容元件和电源元件等，若没有特殊说明，均表示为理想元件，分别由相应的参数来描述，用规定的图形符号来表示。

### 二、电流和电压的参考方向

当元器件中有了电流通过，其流动方向总是从高电位一端流向低电位的一端，这是电流流动的实际方向；或者当知道了电流流动的实际方向，也能判别出元器件两端的电位高低。然而，当分析较为复杂的电路时，往往很难知道电流的实际流动方向，特别是交流电路，由于电流的实际流动方向随时间变化，其实际流动方向难以在电路中标注。因此引入“参考方向”的概念，参考方向又称正方向，它是分析和计算电路的基础。

电流的实际方向是指正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向。电流的参考方向是指在分析与计算电路时，任意假定某一个电流的方向。当所假定的电流方向与实际方向一致时，则电流为正值 ( $I > 0$ )；当所假定的电流方向与实际方向相反时，则电流为负值 ( $I < 0$ )。由此可见参考电流的值是个代数量，有正负之分，只有其参考方向被假定后，电流的值正负才有意义。

电流的参考方向用箭头标注，也可用双下标表示。如  $I_{ab}$  表示电流的参考方向是由 a



点流向 b 点。

电压在分析电路时也有方向性，电压的正方向规定为从高电位端指向低电位端，即电位降低的方向。电压的参考方向和电流的参考方向一样，也是任意指定的。在分析电路时，假定某一方向是电位降低的方向，如所假定的电压方向与实际方向一致时，则电压为正值 ( $U > 0$ )；电压参考方向与实际方向相反时，则电压为负值 ( $U < 0$ )。因此，参考电压的值也是个代数量，有正负之分，同样只有参考方向被假定后，电压的值正负才有意义。

电压的参考方向可以用“+”、“-”极性表示外，还可以用双下标表示，如：a、b 两点间的电压  $U_{ab}$ ，它的参考方向是由 a 指向 b，即 a 点的参考极性为“+”，b 点的参考极性为“-”；若参考方向选为由 b 指向 a，则为  $U_{ba}$ ，且  $U_{ba} = -U_{ab}$ 。

在电路图中所标注的电流、电压方向，通常均为参考方向，它们的值为正还是为负，与所假定的参考方向有关，如图 1-1 和图 1-2 所示。

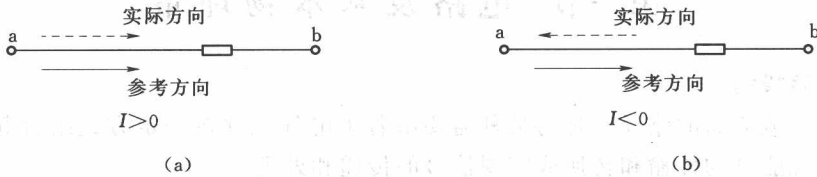


图 1-1 电流的参考方向与正负值



图 1-2 电压的参考方向与正负值

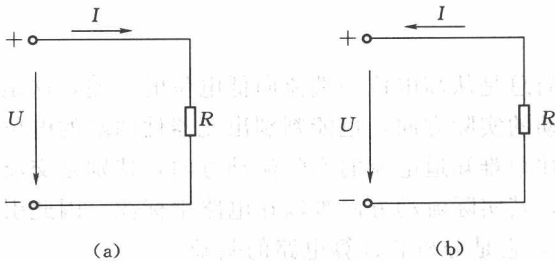


图 1-3 参考方向的一致性

(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

此外，由于电流的参考方向和电压的参考方向的标注均具有任意性，所以在计算电路时有必要规定二者的参考方向要取得一致，即电流的参考方向是从电压的“+”极性端流入，从“-”极性端流出，并称此时二者参考方向是关联的（或称负载惯例），否则就是非关联的。在电路的分析与计算中，非关联参考方向时就需将其中一个物理量加负号。以电阻为例，关联参考方向时，

$U = IR$  或  $I = \frac{U}{R}$ ，而非关联参考方向时， $U = -IR$  或  $I = -\frac{U}{R}$ ，如图 1-3 所示。

【例 1-1】 求图 1-4 中所示电路的电流  $I$ 。

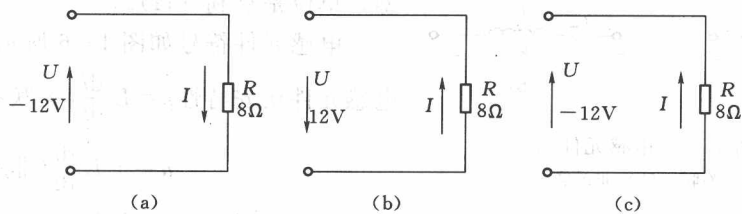


图 1-4 例 1-1 电路

解 在图 1-4 (a) 中,  $U$ 、 $I$  为非关联正方向

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{-12}{8} = 1.5(\text{A})$$

注意公式的正负号与电路物理量本身的正负值不要相混淆。

在图 1-4 (b) 中,  $U$ 、 $I$  为非关联正方向

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{12}{8} = -1.5(\text{A})$$

在图 1-4 (c) 中,  $U$ 、 $I$  为关联正方向

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-12}{8} = -1.5(\text{A})$$

### 三、电阻、电感和电容

#### 1. 电阻元件

线性电阻 (linear resistance) 元件的电压与电流的关系 (伏安特性) 是一条过原点的直线, 否则称为非线性电阻 (nonlinear resistance)。

线性电阻

$$R = \frac{u}{i}$$

线性电阻符号如图 1-5 所示。

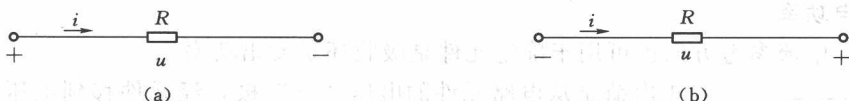


图 1-5 电阻元件

(a) 关联; (b) 非关联

线性电阻伏安特性

$$u = Ri \quad (\text{关联参考方向})$$

$$u = -Ri \quad (\text{非关联参考方向})$$

电阻的倒数称为电导 (conductance), 也是一个常用物理量, 用  $G$  表示, 单位为西门子 (S)。电导与电阻的关系为

$$G = \frac{1}{R}$$

#### 2. 电感元件

电感 (inductance) 元件是一种能够贮存磁场能量的元件, 是实际电感器的理想化模



图 1-6 电感元件  
(a) 关联; (b) 非关联

型, 单位是亨利 (H)。

电感元件符号如图 1-6 所示。

电感元件伏安特性  $u = L \frac{di}{dt}$  (关联参考方向)

$$u = -L \frac{di}{dt} \text{ (非关联参考方向)}$$

只有电感上的电流变化时, 电感两端才有电压。在直流电路中, 电感上即使有电流通过, 但  $u = 0$ , 相当于短路。

电感元件存储能量

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

### 3. 电容元件

电容 (capacitance) 元件是一种能够贮存电场能量的元件, 是实际电容器的理想化模型, 单位是法拉 (F)。

电容元件符号如图 1-7 所示。

电容元件伏安特性

$$i = C \frac{du}{dt} \text{ (关联参考方向)}$$

$$i = -C \frac{du}{dt} \text{ (非关联参考方向)}$$

只有电容上的电压变化时, 电容两端才有电流。在直流电路中, 电容上即使有电压, 但  $i = 0$ , 相当于开路, 即电容具有隔直作用。

电容元件存储能量

$$W = \frac{1}{2} Cu^2$$

## 四、电功率

电压、电流参考方向也可用于确定元件是吸收还是发出功率。

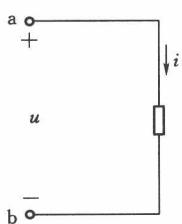


图 1-8 电功率

正电荷是从电路元件的电压“+”极, 经元件移到电压“-”极, 是电场力对电荷做功的结果, 这是元件吸收能量。相反地, 正电荷是从电路元件的电压“-”极经元件移到电压“+”极, 元件向外发出能量。电路元件吸收或发出能量对时间的变化率就是电功率, 有时简称为功率。

图 1-8 中的方框为电路的一部分, 如果通过它的电流是  $i$ , 它两端的电压是  $u$ , 设二者的参考方向是关联的。根据电压的定义可知, 当正电荷  $dq$  由  $a$  点移到  $b$  点时, 这部分电路吸收的能量为

$$dw = u dq$$

$$dq = i dt$$

$$dw = u i dt$$

又因  
故

这是这部分电路在时间  $dt$  内所吸收的电能。

在单位时间内这部分电路的电功率，用字母  $p$  表示，可得

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

在国际单位制中，电功率的单位是瓦特，简称瓦 (W)。

式 (1-1) 中， $p$  是电路吸收的功率。即在关联参考方向下， $p = ui$ ，若电压和电流在非关联参考方向下，则  $p = -ui$ 。当  $p > 0$  时表示这部分电路吸收 (消耗) 功率，而  $p < 0$  时则表示这部分电路发出 (供给) 功率。

## 第二节 电压源与电流源及其等效变换

一个电源可以用两种不同的电路模型来表示。用电压形式表示的称为电压源，用电流形式表示的称为电流源，两种形式是可以相互转化的。

### 一、电压源

电压源是一个二端元件，其输出电压恒定不变，含义是指其输出电压为给定数值或为给定的时间函数，分别代表直流电压源和交流电压源。其端电压  $U_s$  由电源本身确定，而与流过电压源的电流无关，也与外接电路无关，但其输出电流  $I$  及输出功率则由外电路决定。交流电压源在下章学习，本节学习直流电压源。其图形符号如图 1-9 (a) 所示。元件的  $U$ 、 $I$  关系称为伏安特性或外特性，表示  $U-I$  关系的图形称为伏安特性曲线。直流电压源的伏安特性如图 1-9 (b) 所示。例如，当电源设备对外电路提供电能时，若它本身的功率损耗可以忽略不计时，就可近似认为该电源为理想电源，它的特性可抽象为理想电源元件。

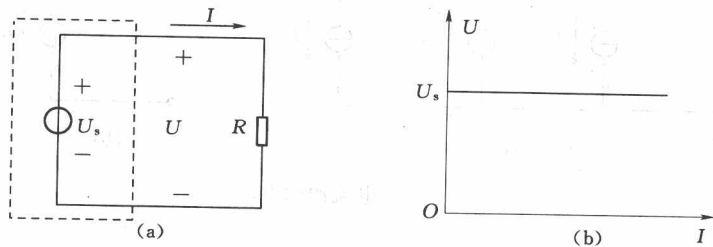


图 1-9 电压源及其伏安特性

### 二、电流源

电流源也是一个二端元件，其输出电流恒定不变，含义是指其输出电流为给定数值或为给定的时间函数，即分别代表直流电流源和交流电流源。其电流  $I_s$  由电源本身确定，而与电源两端的电压无关，也与外接电路无关，但它的端电压及功率由其所连接的外电路决定。直流电流源图形符号和伏安特性曲线如图 1-10 所示。

### 三、电源的串并联

当多个电压源串联向外电路提供电能时，可用一个电压源等效代替，如图 1-11 所示。等效电压源的电压  $U_s$  等于各串联电压源电压的代数和，即

$$U_s = U_{s1} + U_{s2} + \dots + U_{sn}$$

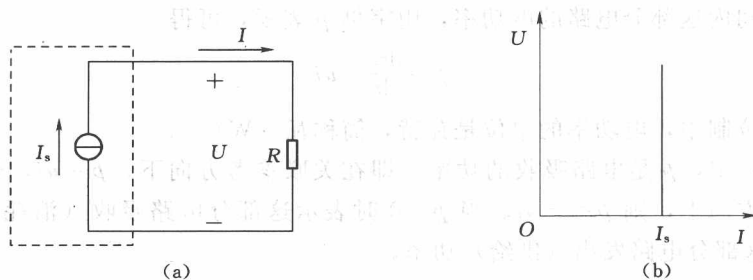


图 1-10 电流源及其伏安特性

与等效电压源电压  $U_s$  的参考方向相反的各电压源的电压应取负值。

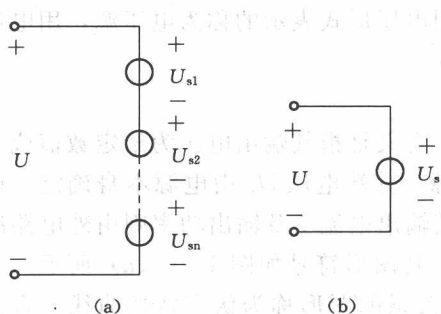


图 1-11 电压源的串联

当多个电流源并联时,亦可用一个电流源来等效替代,如图 1-12 所示。等效电流源的电流  $I_s$  等于各并联电流源的代数和,即

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + \dots + I_{sn}$$

与等效电流源  $I_s$  的参考方向相反的各并联电流源的电流应取负值。

以上两种等效是对电源以外的电路等效变换,即电源向外电路提供的电压和电流不变,对电源的内部并不等效。

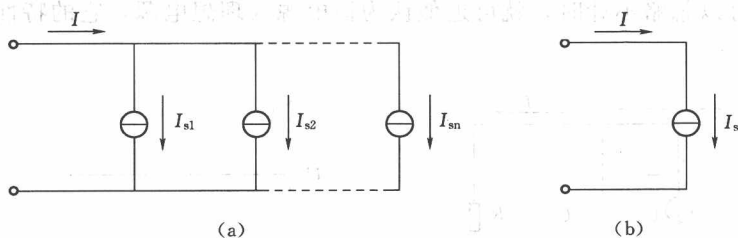


图 1-12 电流源的并联

应该注意:

(1) 只有电压相等的电压源才允许并联;只有电流相等的电流源才允许串联。

(2) 一个电压源与若干电路元件并联,对外仍等效为一个电压源,即与电压源并联的元件在等效过程中视为开路。这是因为无论电压源外部并联多少元件,都不会影响其端电压的大小。

(3) 一个电流源与若干个电路元件串联,对外仍等效为一个电流源,即与电流源串联的元件在等效过程中视为短路。因为无论与电流源串联多少元件,都不会改变其输出电流的大小。

#### 四、电压源电路与电流源电路的等效变换

任何一个电源设备,如电池或发电机都能输出恒定电压,但其内部又存在一定的损耗时,所以应该用一个电压源和一个电阻串联的电路来表示这个电源,该电路称电压源电路,

电路如图 1-13(a)所示。 $U$  为电源端电压,  $I$  是输出电流,  $U_s$  是电压源电压,  $R_0$  是电源内阻。它们之间的关系, 根据基尔霍夫电压定律确定电路方程式  $U = U_s - IR_0$ , 伏安特性曲线如图 1-13(c)所示。

如果一个电源(如光电池)能提供恒定电流, 但其内损耗又不能忽略时, 可用一个电流源和一个电阻的并联电路来表示, 这个电路称电流源电路。电路如图 1-13(b)所示。 $I_s$  为电流源。根据 KCL 定律确定电路方程式  $I = I_s - \frac{U}{R_0}$ , 伏安特性曲线也如图 1-13(c)所示。

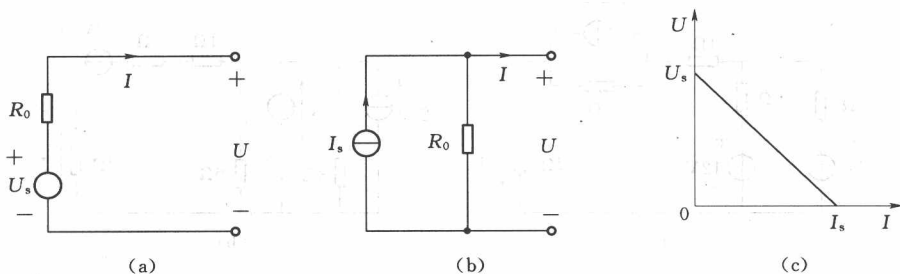


图 1-13 电源的等效变换

实际电源可以模拟为电压源  $U_s$  和内阻  $R_0$  串联的形式, 也可模拟为电流源  $I_s$  和内阻  $R_0$  并联的形式。如果是同一个实际电源, 那么这两种形式所反映的外特性是相同的, 所以这两种形式之间必然可以对外电路等效变换, 等效条件为:  $U_s = I_s R_0$ ,  $I_s = \frac{U_s}{R_0}$ , 且两种电源模型的内阻相等, 只是连接方式不同。

等效变换时应注意的问题:

(1) 等效变换时电流源的电流流出端应与电压源的正极端相对应。

(2) 电压源与电流源之间不存在等效变换关系, 只有电压源电路与电流源电路之间才能等效变换。

(3) 等效变换是对外电路等效时成立, 对电源内部是不等效的, 例如当外电路开路时电压源模型中是无电流的, 而电流源模型中仍有内部电流。

【例 1-2】 求图 1-14(a)中的端电压  $U_{ab}$  = ?

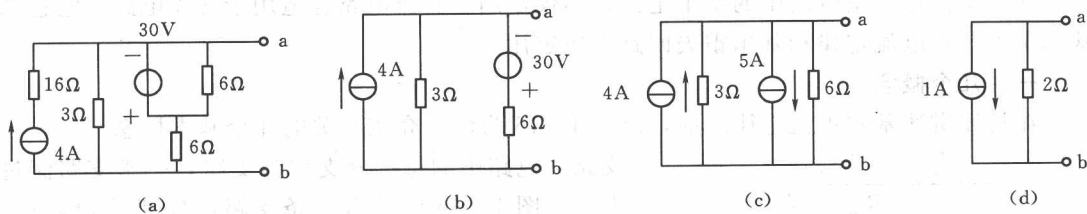


图 1-14 例 1-2 电路

解 从电源模型分析, 与电压源串联的电阻以及与电流源并联的电阻才相当于电源的内阻。在图中与 30V 恒压源并联的  $6\Omega$  电阻并非它的内阻。因为这个并联电阻的大小以及存在与否, 并不影响其本身的端电压, 其值恒为 30V, 因此这个电阻可以去掉。

同样,  $16\Omega$  这个电阻也可以去掉, 这样图 1-14(a) 可以等效为图 1-14(b)。再将  $30\text{V}$  的恒压源与  $6\Omega$  电阻串联视作电压源并且等效变换成电流源, 得到图 1-14(c), 其中激励电流  $I_{s1} = 30/6 = 5(\text{A})$ 。合并电流源, 并将并联电阻化为等效电阻, 得到图 1-14(d), 所以

$$U_{ab} = -(1 \times 2) = -2(\text{V})$$

**【例 1-3】** 试用电压源电路与电流源电路等效变换的方法计算图 1-15 (a) 中  $2\Omega$  电阻的电流  $I$ 。

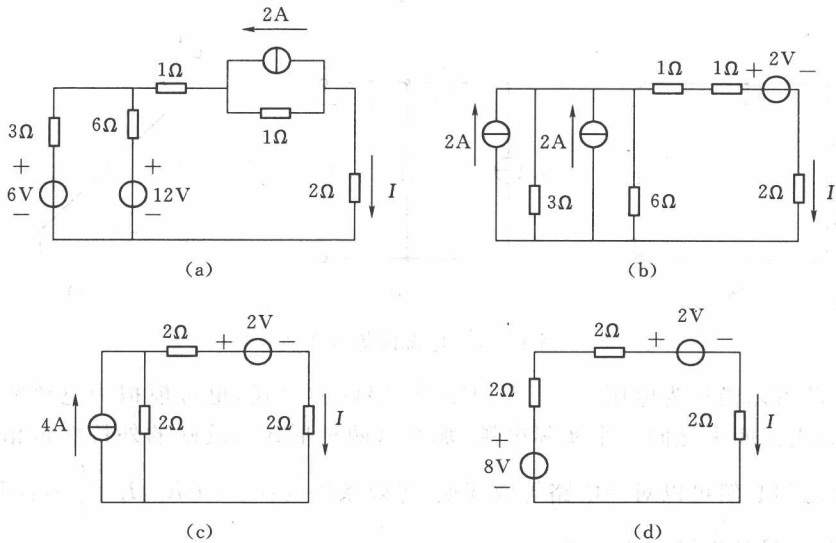


图 1-15 例 1-3 电路

解 将原电路通过几次等效变换后变为图 1-15 (d) 电路, 由此可得

$$I = \frac{8-2}{2+2+2} = 1(\text{A})$$

### 第三节 基尔霍夫定律及支路电流法

基尔霍夫定律是电路中的基本定律, 不仅适用于直流电路也适用于交流电路。它包括基尔霍夫节点电流定律和基尔霍夫回路电压定律。

#### 一、几个概念

在具体讲述基尔霍夫定律之前, 以图 1-16 为例, 介绍有关的几个基本概念。

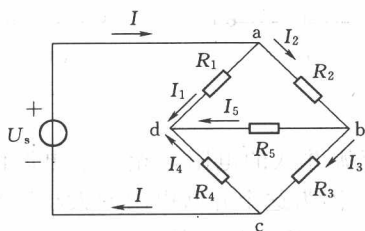


图 1-16 电路图例

**支路:** 电路中的每一分支称为支路, 一条支路流过一个电流。图 1-16 中共有 6 条支路, 分别是  $ab$ 、 $bc$ 、 $cd$ 、 $da$ 、 $ca$ 、 $bd$ 。

**节点:** 电路中 3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点。图 1-16 中共有 4 个节点, 分别是节点  $a$ 、节点  $b$ 、节点  $c$  和节点  $d$ 。

**回路:** 电路中的任一闭合路径称为回路。图 1-16

中共有 7 个回路，分别是 abda、dbcd、adca、abdca、adbca、abcda、abca。

网孔：电路中无其他支路穿过的回路称为网孔。图 1-16 中共有 3 个网孔，分别是 abda、dbca、adca。

## 二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL)：对于电路中的任一节点，在任一瞬间流入（或流出）该节点电流的代数和为零。可以选择电流流入时为正，流出时为负；也可以设流出时为正，流入时为负。电流的这一性质也称为电流连续性原理，是电荷守恒的体现。KCL 用公式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-2)$$

式 (1-2) 称为节点的电流方程。由此也可将 KCL 理解为流入某节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

下面以图 1-16 电路中的节点 a、b 为例，假设电流流入为正，流出为负，列出节点的电流方程。

对于节点 a 有

$$I - I_2 - I_1 = 0 \text{ 或 } I_2 + I_1 = I$$

对于节点 b 有

$$I_2 - I_3 - I_5 = 0 \text{ 或 } I_2 = I_3 + I_5$$

KCL 不仅适用于电路中的任一节点，也可推广到包围部分电路的任一闭合面（因为可将任一闭合面缩为一个节点）。可以证明流入或流出一任一闭合面电流的代数和为零。图 1-17 中，当考虑虚线所围的闭合面时，应有

$$I_a - I_b - I_c = 0$$

## 三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL)：对于电路中的任一回路，在任一瞬间沿该回路任意绕行方向，则组成该回路的各段支路上的元件电压的代数和为零。可任意选择顺时针或逆时针作为回路绕行方向，各元件电压的正、负与绕行方向有关。一般规定当元件的电压的方向与所选的回路绕行方向一致时为正，反之为负。KVL 用公式表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 称为回路的电压方程。下面以图 1-18 电路为例，列出相应回路的电压方程。注意当选择了某一个回路时，在回路内画一个环绕箭头，表示选择的回路的绕行方向。图 1-18 中，在两个网孔中分别选择了顺时针和逆时针的绕行方向。

对于回路 1，电压的数值方程为

$$20I_1 + 10I_3 - 100 = 0$$

对于回路 2，电压的数值方程为

$$25I_2 + 10I_3 - 200 = 0$$

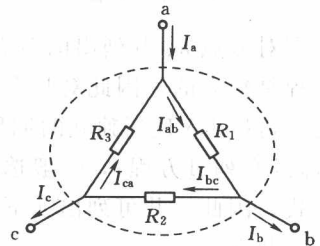


图 1-17 电路的闭合面

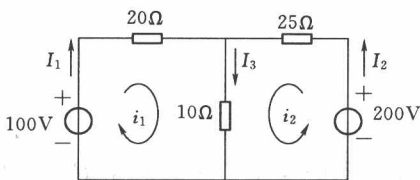


图 1-18 电路图例



上式也可写为  $25I_2 + 10I_3 = 200$

其意义为，在直流电路里 KVL 又可以表述为回路中电阻的电压之和（代数和）等于回路中的电压源电压之和（代数和），写成公式即

$$\sum RI = \sum U_s$$

注意此时等号右侧的  $U_s$  的方向与所选的回路绕行方向相反时为正，反之为负。

应用 KVL 时，首先要标出电路各元件电流、电压的参考方向。列电压方程时，一般约定电阻的电流方向和电压方向一致。

KVL 不仅适用于闭合电路，也可推广到结构不闭合的回路。

#### 四、支路电流法

支路电流法是求解电路最基本的方法。这种方法是以前支路电流为未知量，直接应用 KCL 和 KVL 分别对各节点和各回路列出所需要的方程组，然后联立求解出各支路的未知电流。

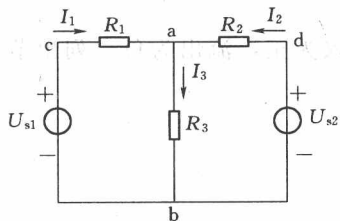


图 1-19 电路图例  
(支路电流法)

现以图 1-19 所示电路为例，说明支路电流法的求解过程。

该电路中有三条支路 ( $b=3$ )，两个节点 ( $n=2$ )，有三个回路 ( $i=3$ )。首先在电路图中选取各支路电流的参考方向和回路绕行方向。因为有三条支路则有三个未知电流，需要列出三个独立方程才能得到唯一解。应用 KCL

分别对节点 a、b 列出的节点电流方程实际上是相同的，即 a、b 节点中只有一个节点电流方程是独立的，因此对具有  $n$  个节点的电路，只能列出  $n-1$  个独立的 KCL 方程。

再按 KVL 列独立的回路电压方程，每个方程式中至少要包含一条未曾使用的支路（即没有列过方程），一般选择网孔作为独立回路。在图 1-19 中只有两个独立回路电压方程式，因此一共可列出如下三个独立的方程式：

节点 b

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

abca 回路

$$I_3 R_3 + I_1 R_1 = U_{s1}$$

adba 回路

$$-I_2 R_2 - I_3 R_3 = -U_{s2}$$

上式称为支路电流方程式，联立求解，便可求得支路电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$ ，由支路电流就可求出相应元件的电压和功率。

应用支路电流法求解电路的步骤可归纳如下：

- (1) 假定各支路电流的参考方向。
- (2) 用 KCL 列出  $(n-1)$  个节点电流方程。
- (3) 用 KVL 列出  $b-(n-1)$  独立回路方程。
- (4) 联立各方程，求出各支路的未知电流。

**【例 1-4】** 在图 1-19 所示电路中，已知  $U_{s1} = 250V$ ， $U_{s2} = 239V$ ， $R_1 = 1\Omega$ ， $R_2 = 0.5\Omega$ ， $R_3 = 30\Omega$ ，试求各支路电流，并进行验算。

**解** 将已知数据代入前述方程组得

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 + 30I_3 = 250$$