



高等学校精品规划教材

# 电 工 学

(少学时适用)

郭 永 主编

DIANGONGXUE



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

高等学校精品规划教材

# 电 工 学

(少学时适用)

郭 永 主编



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

## 内 容 提 要

本书是根据《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》文件精神要求,针对高等农业院校各类非电专业的特点组织编写的。本书分为电工技术和电子技术两大部分,共十一章。主要内容包括:直流电路;正弦交流电路;三相交流电源;变压器;异步电动机及其电气控制;半导体基本知识及半导体二极管;半导体三极管及放大电路;集成运算放大器;直流电源;晶闸管和可控硅整流电路;数字电路。每章均有例题、小结和习题。本书内容深入浅出,不仅注重基本概念与基本理论的介绍,同时注重对学生基本技能的培养。

本书适用于食品工程、汽车运输、水利工程、给排水工程、环境工程、木材科学与工程、森林工程等各类非电专业学习使用,亦可作为其他工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工学/郭永主编. —北京:中国水利水电出版社,  
2005

高等学校精品规划教材. 少学时适用

ISBN 7-5084-2552-9

I. 电... II. 郭... III. 电工学—高等学校—教材  
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 126878 号

书 名	高等学校精品规划教材 <b>电工学</b> (少学时适用)
作 者	郭 永 主 编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	787mm×1092mm 16开本 11.5印张 273千字
版 次	2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	<b>18.00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

# 目 录

## 上篇 电 工 技 术

<b>第一章 直流电路</b> .....	1
第一节 电路的基本概念 .....	1
一、电路的组成及电路模型  二、电路的基本物理量及其正方向	
第二节 基尔霍夫定律 .....	4
一、基尔霍夫电流定律 (KCL)  二、基尔霍夫电压定律 (KVL)	
第三节 电路的基本分析方法 .....	6
一、支路电流法  ※二、结点电压法  三、叠加原理	
第四节 电路的基本定理.....	11
一、戴维南定理  ※二、诺顿定理	
第五节 电压源和电流源及等效变换 .....	14
一、电源的两种模型  二、电源的等效变换	
小结 .....	18
习题 .....	18
<b>第二章 正弦交流电路</b> .....	22
第一节 正弦交流电的基本概念 .....	22
一、正弦量的三要素  二、同频率正弦量的相位差  三、正弦量的有效值	
第二节 正弦量的相量法.....	24
一、正弦量的相量表示法  二、正弦量的相量计算法  三、相量形式的基尔霍夫定律	
第三节 单一参数的交流电路 .....	27
一、电阻元件的正弦交流电路  二、电感元件的正弦交流电路  三、电容元件的正弦交流电路	
第四节 RLC 串、并联电路及功率因数的提高.....	32
一、RLC 串联电路  二、RLC 并联电路  三、功率因数的提高	
小结 .....	38
习题 .....	39
<b>第三章 三相交流电路</b> .....	42
第一节 三相交流电源 .....	42
一、对称三相电动势的产生  二、三相电源的联接	

第二节 三相负载的连接方法 .....	44
一、三相负载的星形联接 二、三相负载的三角形联接	
第三节 三相电路的功率 .....	48
小结 .....	49
习题 .....	50
<b>第四章 变压器</b> .....	<b>52</b>
第一节 变压器的基础知识 .....	52
一、磁路基础 二、变压器的基本结构 三、变压器的铭牌数据	
第二节 变压器的工作原理及运行性能 .....	54
一、变压器的空载运行 二、变压器的负载运行 三、变压器的运行性能	
第三节 电源变压器及特殊变压器 .....	60
一、电源变压器 二、特殊变压器	
※第四节 三相变压器 .....	64
小结 .....	65
习题 .....	66
<b>第五章 异步电动机及其电气控制</b> .....	<b>67</b>
第一节 三相异步电动机的结构及工作原理 .....	67
一、三相异步电动机基本结构 二、铭牌数据 三、工作原理	
第二节 三相异步电动机的特性 .....	74
一、定子电路 二、转子电路 三、电磁转矩特性 四、机械特性	
第三节 三相异步电动机的起动、调速和反转 .....	80
一、起动 二、调速 三、反转	
第四节 三相异步电动机继电器接触器控制 .....	83
一、常用低压控制电器 二、电动机的常用控制电路	
第五节 三相异步电动机可编程控制器控制 .....	90
一、可编程控制器组成部分 二、可编程控制器的编程方式	
小结 .....	95
习题 .....	96

## 下篇 电子技术

<b>第六章 半导体基本知识及半导体二极管</b> .....	<b>97</b>
第一节 半导体的基本知识 .....	97
一、半导体的导电特性 二、半导体的共价键结构 三、本征半导体及杂质半导体	
第二节 PN结与半导体二极管 .....	98
一、PN结的形成 二、PN结的单向导电性及伏安特性 三、半导体二极管的基本结构和符号	
四、二极管的主要参数 五、特殊二极管简介	
小结 .....	101

习题 .....	101
<b>第七章 半导体三极管及放大电路</b> .....	<b>103</b>
第一节 半导体三极管 .....	103
一、三极管的结构 二、三极管的电流分配和放大原理 三、三极管的特性曲线 四、主要参数	
第二节 基本放大电路 .....	106
一、基本放大电路的组成 二、放大电路的静态分析 三、放大电路的动态分析	
四、静态工作点的稳定	
第三节 射极输出器 .....	114
一、电路的组成 二、电路分析	
第四节 放大电路的负反馈 .....	116
一、反馈的概念 二、负反馈的类型 三、负反馈对放大电路工作性能的影响	
※第五节 功率放大电路 .....	120
一、对功率放大电路的基本要求 二、互补对称放大电路	
小结 .....	122
习题 .....	122
<b>第八章 集成运算放大器</b> .....	<b>126</b>
第一节 差分式放大电路 .....	126
一、工作原理 二、输入和输出方式	
第二节 集成运算放大器简介 .....	128
一、集成运算放大器的组成 二、理想运算放大器 三、运算放大器的应用	
小结 .....	133
习题 .....	134
<b>第九章 直流电源</b> .....	<b>137</b>
第一节 半导体二极管整流及滤波电路 .....	137
一、单相桥式全波整流电路 二、滤波电路	
第二节 稳压电路 .....	140
一、稳压管稳压电路 二、串联型稳压电路 ※ 三、三端集成稳压器	
小结 .....	142
习题 .....	142
<b>※ 第十章 晶闸管和可控硅整流电路</b> .....	<b>144</b>
第一节 晶闸管 .....	144
一、晶闸管的基本结构及符号 二、晶闸管的工作原理 三、晶闸管的伏安特性及主要参数	
第二节 可控整流电路 .....	146
一、单相半波可控整流电路 二、单相半控桥式整流电路	
第三节 单结晶体管触发电路 .....	147
一、单结晶体管 二、单结晶体管触发电路 三、单结晶体管触发电路的应用	
第四节 应用举例 .....	151

小结 .....	152
习题 .....	152
<b>第十一章 数字电路</b> .....	<b>154</b>
<b>第一节 组合逻辑电路</b> .....	<b>154</b>
一、基本门电路 二、逻辑代数及基本定律 三、组合逻辑电路的分析和设计	
<b>第二节 时序逻辑电路</b> .....	<b>160</b>
一、触发器 二、寄存器 三、计数器	
<b>第三节 555 集成定时器</b> .....	<b>166</b>
一、电路的组成 二、集成定时器应用举例	
<b>第四节 数字显示电路</b> .....	<b>169</b>
一、数码管 二、数字显示电路	
小结 .....	170
习题 .....	171
<b>参考文献</b> .....	<b>175</b>

# 上篇 电 工 技 术

## 第一章 直 流 电 路

本章是电工学课程的理论基础，其中所介绍的基本概念、基本定律和基本定理，以及电路的分析与计算方法都具有普遍适用性。因此，本章对学好整个电工学课程是非常重要的，读者应充分重视。

### 第一节 电路的基本概念

#### 一、电路的组成及电路模型

电路是由各种元器件联接而成的，是为电流提供的通路。实际电路都是为完成某种预期的目的而设计、安装、运行的，具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。根据电流性质的不同，电路有直流电路和交流电路之分。复杂的电路称为电网络，简称电网。例如城乡的供电线路就是一种交流电网。

电路的基本组成部分是电源、负载和连接导线。

电源是将其他形式的能量（机械能、化学能等）转换为电能的设备，是电能或电信号的发生器。作为直流电源的有干电池、蓄电池、直流发电机、整流电源等。交流电源一般是由交流电网提供的，其来源是交流发电机。如图 1-1 所示为电源的电气图形符号，其中图 1-1 (d) 和图 1-1 (e) 为理想电源的符号。

负载是将电能转换为其他能量的设备。例如，把电能转换成机械能的电动机、转换成光能的电灯、转换成热能电炉等用电设备都是电路中的负载。

导线是用来使电路中的各种元器件之间有电的联系，以便传送电能或传递电的信息。导线通常是由包着绝缘层的铜线或铝线制成的。导线的电阻很小，在分析计算一般电路问题时，导线的电阻往往可以忽略不计。

此外，电路中还有开关、熔断器以及测量用的电表等电路元件。

电路中的电源、负载等器件都是电路元件。在电路中能提供电能的如电池、发电机等称为电源元件；不能提供电能的称为无源元件。无源元件中又分为耗能元件和储能元件，

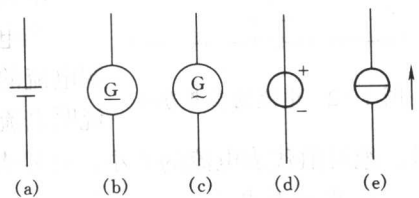


图 1-1 电源的图形符号

- (a) 原电池或蓄电池；(b) 直流发电机；  
(c) 交流发电机；(d) 理想电压源；  
(e) 理想电流源



前者如电阻器，后者如电感器和电容器。

由理想元件组成的电路叫做电路模型。所谓理想元件就是对实际元件的抽象和概括，即把不占主导地位的因素全都忽略不计，而只考虑它最主要的电气参数。把元件理想化的目的是为了突出其主要的电磁特性，有利于电路的分析和计算。在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”联接起来的。

## 二、电路的基本物理量及其正方向

### 1. 电流

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度为单位时间内通过导体任一横截面的电量，工程上简称电流。电流不仅表示一种物理现象，而且还是一个物理量，常以字母  $i$  或  $I$  表示。电流的单位是安培 (A)，简称安。

若设在  $\Delta t$  时间内通过导体横截面的电量  $\Delta q$ ，则电流表示为  $i = \Delta q / \Delta t$ 。

若电荷运动的速率是随时间变化的，此时电流是时间的函数，这种随时间变化的电流叫变动电流，瞬时值表示成  $i = dq / dt$ 。

如果此电流随时间的变化是周期性的，则称其为周期电流，若周期电流满足  $i = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0$ ， $T$  为周期电流的周期，则称为交流电流，简称交流。

若电流不随时间变化，即在相同的时间间隔内通过的电量相等，则这种电流称为恒定电流，简称直流。直流电流的表示式为  $I = Q / t$ ，式中  $Q$  为电量，单位是库仑 (C)，简称库。

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

在电路分析中，某个元件或部分电路的电流实际方向可能是未知的，也可能是随时间变动的。为此，在分析计算电路问题时，必须先指定电流的参考方向（正方向）。

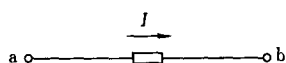


图 1-2 电流的参考方向

电流的参考方向一般用箭头表示，如图 1-2 所示。

当电流的参考方向确定后，如果计算出的电流为正值，说明电流的实际方向与参考方向一致；若计算出的电流为负值，说明电流的实际方向与参考方向相反。因而，电流是一个代数量，绝对值代表电流的大小，符号表示方向。

### 2. 电位及电压

电位是相对于确定的参考点来说的。电路中某点的电位是指单位正电荷在电场力作用下，自该点沿任意路径移动到参考点所做的功。电位用  $V$  表示。

对电位来说，参考点是至关重要的。第一，电位是相对的物理量，不确定参考点，讨论电位就没有意义。第二，在同一电路中当选定不同的参考点时，同一点的电位值是不同的。在分析电路时，电位的参考点只能选取一个。参考点选定后，各点的电位值就确定了，这就是所说的“电位单值性”。

电路中两点之间的电位差称为这两点间的电压，用符号  $u$  或  $U$  表示。电压的单位是伏特 (V)，简称伏。例如电路中 A、B 两点之间的电压为

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-1)$$

电路中两点之间电压的方向，是从高电位端指向低电位端的方向，即电位降的方向。

在分析电路问题时，和电流一样，我们也要假定电压的参考方向。一般电压的参考方向用正（+）、负（-）极性符号表示，有时还用双下标形式表示，如图 1-3 所示。

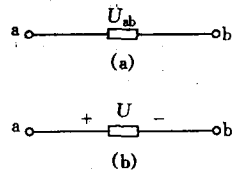


图 1-3 电压的参考方向

图 1-3 (a)、(b) 中两种表示方法都是指：由假定的高电位端 (a 端) 指向底电位端 (b 端)。当电压的参考方向确定后，分析计算出的电压若为正值，说明电压的实际方向与参考方向一致；若为负值，说明电压的实际方向与参考方向相反。因而，电压也是一个代数量。

需要说明的是：原则上讲一个元件的电流或电压的参考方向可以独立的任意指定。但对于电阻元件来说，电压是从高电位端指向低电位端；电流是从高电位端流入，低电位端流出。因此，为了分析、计算的方便，一般情况下，负载元件选取电压的参考方向与电流的参考方向一致，这就是电压、电流关联参考方向。而电源元件选取电压、电流的参考方向不一致，即非关联参考方向。

### 3. 电动势

电动势是指单位正电荷在电源力作用下，自低电位端经电源内部移动到高电位端所做的功。例如，电池是利用化学作用而产生的，发电机是利用电磁感应作用而产生的。

电动势的方向是指电位升高的方向，即从低电位指向高电位的方向，刚好与电压的方向相反。

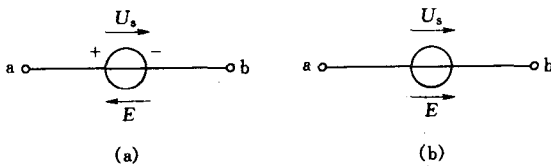


图 1-4 电压与电动势的关系

作为分析与计算电路的一种方法，同样也可以为电动势假定一个参考方向。因此，它和电压、电流一样也是代数量。如果选取电压  $U_s$  的参考方向与电动势  $E$  的参考方向相反，则  $U_s = E$ ；若两者参考方向相同，则  $U_s = -E$ ，如图 1-4 所示。

### 4. 电功率和电能

电气设备在单位时间内消耗（实际是转换）的电能称为电功率。电功率简称功率，用  $p$  或  $P$  表示，单位为瓦特 (W)，简称瓦。

电功率与电压和电流密切相关。当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时，电场力对电荷作正功，元件吸收能量；反之，正电荷从电压的“-”极经元件运动到电压的“+”极时，电场力作负功，元件向外释放电能。

从  $t_0$  到  $t$  的时间内，元件吸收的电能可根据电压的定义 (A、B 两点的电压在量值上等于电场力将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时所做的功) 求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于  $i = \frac{dq}{dt}$ ，所以

$$W = \int_0^t u i dt \quad (1-2)$$

当电流的单位为安培，电压的单位为伏特时，能量的单位为焦耳 (J)，简称焦。

功率是能量对时间的导数，能量是功率对时间的积分。由式 (1-2) 可知，元件吸收的电功率可写为

$$p = ui \quad (1-3)$$

当  $p > 0$  时，元件吸收功率；当  $p < 0$  时，元件释放电能即发出功率。

在直流电路中，电功率的公式为  $P = UI$ ，电气设备在工作时间内消耗的电能  $W = UI t$ ，式中  $t$  为时间。若设备的功率为 1kW，使用时间为 1h，则耗电量为 1kWh，即为 1 度电，或写成

$$1 \text{ 度} = 1000\text{Wh} = 1\text{kWh}$$

## 第二节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律所阐述的是电路中电流和电压遵循的基本规律，是分析和计算电路问题的基础，具有十分重要的作用。在叙述基尔霍夫定律之前有必要介绍几个名词术语。

结点是指电路中 3 个或 3 个以上电路元件的联接点。联接两个结点之间的电路则称为支路。回路是指按任意路径闭合的电路。内部不含有支路的回路称为网孔。如图 1-5 所示，a、b、c 三点重合，d、e、f 3 点也重合，所以共有 b、e 两个结点。abcdefa、abefa、bcdeb 各点围起来的三个回路，支路有三条。

### 一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫第一定律应用于结点上电流分配，故称为电流定律 (KCL)。内容为：电路中任一结点，在任一瞬间，流入结点的电流总和等于流出该结点的电流总和，其数学表达式为

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}} \quad (1-4)$$

如图 1-5 所示，流入结点 b 的电流为  $I_1$  和  $I_2$ ，从结点 b 流出的电流为  $I_3$ ，故得

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

因此，基尔霍夫电流定律也可表达为：在任一结点上，各电流的代数和等于零，或写成

$$\sum I = 0 \quad (1-5)$$

式 (1-5) 中，可以认为流入结点的电流为正，流出结点的电流为负，也可以反之，这并不影响定律的正确性。

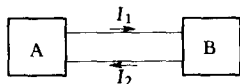


图 1-6 例 1-1 图

**【例 1-1】** 图 1-6 中的 A 和 B 是两个任意电路，证明当  $I_2 = 0$  时， $I_1 = 0$ 。

**【解】** 把电路 A 和 B 看成是两个广义的结点。应用基尔霍夫

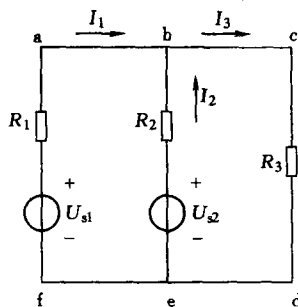


图 1-5 两个电源供电的电路

夫电流定律可得结点 A 或 B 的电流方程为  $I_1 = I_2$ 。因此，若  $I_2 = 0$ ，则  $I_1 = 0$ 。

【例 1-2】 图 1-7 所示电路中，已知  $I_1 = 10\text{mA}$ ， $I_2 = 20\text{mA}$ ， $I_3 = 15\text{mA}$ ，电流的参考方向如图中箭头所示，求其余支路的电流。

【解】 设待求电流  $I_4$ 、 $I_5$ 、 $I_6$  的方向如图 1-7 中箭头所示。

从结点 a 得  $I_6 = I_1 + I_3 = 10 + 15 = 25 \text{ (mA)}$

从结点 b 得  $I_5 = I_1 - I_2 = 10 - 20 = -10 \text{ (mA)}$

从结点 d 得  $I_4 = I_3 + I_5 = 15 + (-10) = 5 \text{ (mA)}$

其中  $I_5$  为负值，表示实际方向与参考方向相反。

## 二、基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫第二定律用于确定回路中电压的关系，故称为电压定律 (KVL)。该定律指出，从电路的任意一点出发，沿回路绕行一周回到原点时，在绕行方向上，各部分电位升的和等于各部分电位降的和。其数学表达式为

$$\sum U_{\text{电位升}} = \sum U_{\text{电位降}} \quad (1-6)$$

在列写回路电压方程时，首先必须假定各支路电流的参考方向及回路电压降的绕行方向。

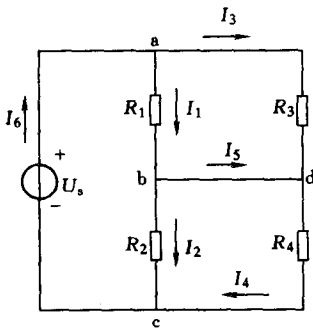


图 1-7 例 1-2 图

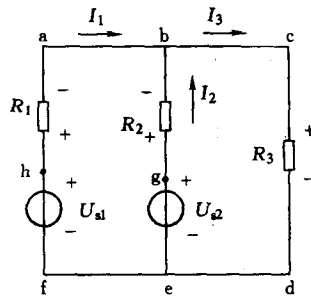


图 1-8

现在用图 1-8 中的回路 fhabgef 来说明。已知电压  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  的极性如图所示，符号 (+) 和 (-) 分别表示高电位端和低电位端。电阻两端的电位高低可根据各电流的方向标出，即电流流入电阻的一端为高电位端，从电阻流出的一端为底电位端。如图中所示。

假定从电路的 f 点出发，按顺时针方向沿上述回路绕行一周回到 f 点。在绕行方向上各部分的电位变化如下：

f→h: 电位升高，升高的值为  $U_{s1}$ 。

h→a: 电位降低，降低的值为  $R_1 I_1$ 。

a→b: 无电位变化。

b→g: 电位升高，升高的值为  $R_2 I_2$ 。

g→e: 电位降低，降低的值为  $U_{s2}$ 。

e→f: 无电位变化。

把回路中各部分电位的升高和降低根据基尔霍夫电压定律分别写在等式的两边，有

$$U_{s1} + R_2 I_2 = R_1 I_1 + U_{s2}$$

将上式移项，得

$$R_1 I_1 + U_{s2} - U_{s1} - R_2 I_2 = 0 \quad (1-7)$$

写成一般式为

$$\sum U = 0 \quad (1-8)$$

因此，基尔霍夫电压定律也可表示为：从电路的某一点出发，沿回路绕行一周回到原点时，在绕行方向上各部分电压降的代数和等于零。

如果用电动势  $E_{s1}$  和  $E_{s2}$  分别代替  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$ ，则从式 (1-7) 还可得到该定律的另一种常用的表达式

$$E_{s1} - E_{s2} = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

写成一般式为

$$\sum E = \sum RI \quad (1-9)$$

即回路中，在绕行方向上各电动势的代数和等于各电阻上电压降的代数和。式 (1-9) 中正负符号是这样确定的，在绕行方向上电动势的极性若是从低电位端升向高电位端（电位升），则电动势取正值，否则取负值；电阻两端的电位若按绕行方向下降（电位降），则该电位取正值，否则取负值。

【例 1-3】 在图 1-9 中已知  $U_{s1} = 6V$ ， $U_{s2} = 12V$ ， $R_1 = 10\Omega$ ， $R_2 = 20\Omega$ 。求电流  $I$ 。

【解】 因为 cd 之间开路，所以只有回路 fabef 中有电流。假设电流的参考方向如图中箭头所示，由此可标出各电阻上电压的极性。

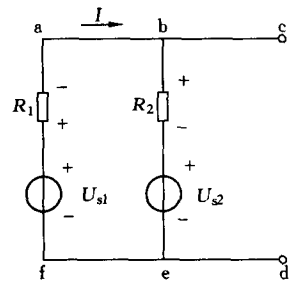


图 1-9 例 1-3 图

如果按顺时针方向绕行，则电压降  $U_{s2}$  为正，电压降  $U_{s1}$  为负，根据式 (1-8) 得

$$U_{s2} - U_{s1} + R_1 I + R_2 I = 0$$

$$\text{则} \quad I = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{R_1 + R_2} = \frac{6 - 12}{10 + 20} = -0.2 \text{ (A)}$$

求出的电流为负值，故其实际方向与参考方向相反。

### 第三节 电路的基本分析方法

#### 一、支路电流法

支路电流法以基尔霍夫定律为基础，是分析、计算复杂电路的基本方法。所谓复杂电路是指多回路的电路，不能简单的用串联或并联的方法简化成为单回路。

用支路电流法解题的步骤，以图 1-10 电路为例，说明如下：

(1) 在电路中标出各支路电流的参考方向。参考方向是假定方向，故可任意设定。

(2) 根据基尔霍夫电流定律列电流方程。对于图 1-10 中的结点 a 和 b 有：

$$\text{结点 a} \quad I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-10)$$

$$\text{结点 b} \quad I_3 = I_1 + I_2 \quad (1-11)$$

这是两个相同的方程。这是因为，对于  $n$  个结点的电路只能列出  $(n-1)$  个独立的电流方程，最后那个结点的电流方程式可由前  $(n-1)$  个电流方程推出来，不是独立的方程式。

(3) 根据基尔霍夫电压定律列出回路电压方程。在图 1-10 中有两个单孔回路，一个双孔回路，得回路电压方程为：

$$\text{回路 feabf} \quad -U_{s1} + R_1 I_1 - R_2 I_2 - U_{s2} = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{回路 bacdb} \quad U_{s2} + R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0 \quad (1-13)$$

$$\text{回路 feacdbf} \quad -U_{s1} + R_1 I_1 + R_3 I_3 = 0 \quad (1-14)$$

然而式 (1-14) 可由式 (1-12) 和式 (1-13) 相加后得出，所以式 (1-14) 不是独立的。

一般在列回路电压方程时总是选用单孔回路，因为根据单孔回路列出的电压方程总是独立的。

图 1-10 中，如果已知各电压和各电阻的值，利用支路电流法，代入式 (1-10)、式 (1-12) 和式 (1-13) 中，可求得  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

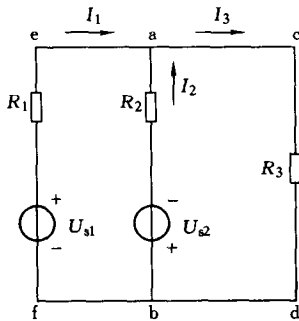


图 1-10 支路电流法

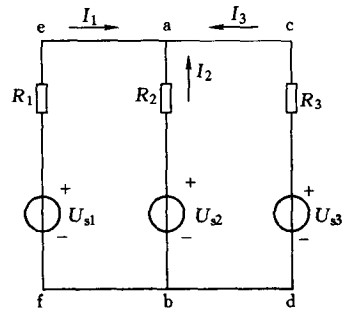


图 1-11 例 1-4 图

**【例 1-4】** 在图 1-11 中，已知  $U_{s1} = 10\text{V}$ ， $U_{s2} = 6\text{V}$ ， $U_{s3} = 30\text{V}$ ， $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 60\text{k}\Omega$ ， $R_3 = 30\text{k}\Omega$ 。求  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

**【解】** (1) 设各电流的参考方向如图中所示，对结点 a 列电流方程

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

(2) 选定单孔回路 feabf 和 bacdb 列电压方程如下

$$-U_{s1} + R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{s2} = 0$$

$$-U_{s2} + R_2 I_2 - R_3 I_3 + U_{s3} = 0$$

(3) 将已知数据代入各方程式，整理后得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\ 20 \times 10^3 I_1 - 60 \times 10^3 I_2 - 4 = 0 \\ 60 \times 10^3 I_2 - 30 \times 10^3 I_3 + 24 = 0 \end{cases}$$

解方程组得  $I_1 = -0.3\text{mA}$ ， $I_2 = -0.17\text{mA}$ ， $I_3 = 0.47\text{mA}$ 。

## ※二、结点电压法

结点电压法以结点电压为求解变量，对独立结点根据基尔霍夫电流定律建立方程，用结点电压表达有关支路电流，解出各结点电压，最后由支路电压、电流关系求出各支路电流。

用结点电压法解题的步骤，以图 1-12 所示的电路为例加以说明。

在图 1-12 中，有 3 个结点，选 c 点为参考点，各支路电流的参考方向如图所示。

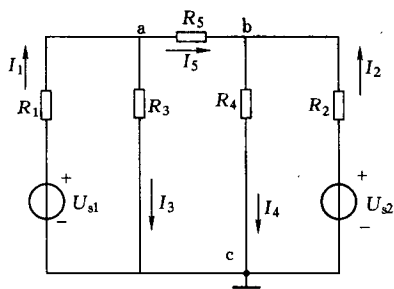


图 1-12 结点电压法

(1) 根据基尔霍夫电流定律列写方程：

$$\text{结点 a} \quad I_1 - I_3 - I_5 = 0$$

$$\text{结点 b} \quad I_5 + I_2 - I_4 = 0$$

各支路电压、电流关系的表达式为

$$U_{ac} = U_{s1} - R_1 I_1$$

$$U_{ac} = R_3 I_3$$

$$U_{bc} = R_4 I_4$$

$$U_{bc} = U_{s2} - R_2 I_2$$

$$U_{ac} - U_{bc} = R_5 I_5$$

(2) 各支路电流为

$$I_1 = \frac{U_{s1} - U_{ac}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{s2} - U_{bc}}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U_{ac}}{R_3}, \quad I_4 = \frac{U_{bc}}{R_4}, \quad I_5 = \frac{U_{ac} - U_{bc}}{R_5}$$

(3) 将各支路电流分别代入结点 a、b 的电流方程并整理得：

$$\text{结点 a} \quad \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) U_{ac} - \frac{1}{R_5} U_{bc} - \frac{U_{s1}}{R_1} = 0 \quad (1-15)$$

$$\text{结点 b} \quad -\frac{1}{R_5} U_{ac} + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) U_{bc} - \frac{U_{s2}}{R_2} = 0 \quad (1-16)$$

应用式 (1-15) 和式 (1-16) 解出结点电压  $U_{ac}$  和  $U_{bc}$ 。

(4) 图 1-12 中各支路的电流，由支路电压、电流关系的表达式不难算出。

**【例 1-5】** 应用结点电压法计算例 1-4 中的电流。

**【解】** 例 1-4 为两结点电路，根据图 1-11 列出结点电流方程为

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

各支路电压、电流关系的表达式为

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{s1} - R_1 I_1 \\ U_{ab} = U_{s2} - R_2 I_2 \\ U_{ab} = U_{s3} - R_3 I_3 \end{cases}$$

求得各电流后代入结点电流方程，可得

$$\frac{U_{s1} - U_{ab}}{R_1} + \frac{U_{s2} - U_{ab}}{R_2} + \frac{U_{s3} - U_{ab}}{R_3} = 0$$

整理并代入数据后,可求得结点电压为

$$U_{ab} = \frac{\frac{U_{s1}}{R_1} + \frac{U_{s2}}{R_2} + \frac{U_{s3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{10}{20 \times 10^3} + \frac{6}{60 \times 10^3} + \frac{30}{30 \times 10^3}}{\frac{1}{20 \times 10^3} + \frac{1}{60 \times 10^3} + \frac{1}{30 \times 10^3}} = 16 \text{ (V)}$$

图 1-11 中各支路的电流为

$$I_1 = \frac{U_{s1} - U_{ab}}{R_1} = \frac{10 - 16}{20 \times 10^3} \text{ A} = -0.3 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{U_{s2} - U_{ab}}{R_2} = \frac{6 - 16}{60 \times 10^3} \text{ A} = -0.17 \text{ mA}$$

$$I_3 = \frac{U_{s3} - U_{ab}}{R_3} = \frac{30 - 16}{30 \times 10^3} \text{ A} = 0.47 \text{ mA}$$

### 三、叠加原理

叠加原理的内容为:在有多电源作用的线性电路中,任意支路的电流或电压,等于各电源分别单独作用时在该支路中产生的电流或电压的代数和。

下面通过图 1-13 对叠加原理加以说明。

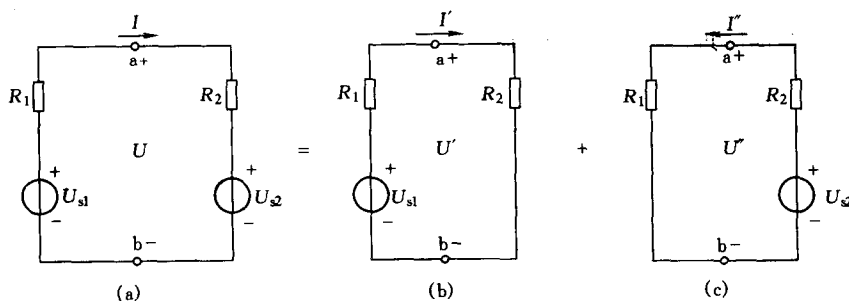


图 1-13 叠加原理

#### 1. 电流的叠加

在图 1-13 (a) 中,有

$$I = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{R_1 + R_2} = \frac{U_{s1}}{R_1 + R_2} - \frac{U_{s2}}{R_1 + R_2} = I' - I'' \quad (1-17)$$

式中

$$I' = \frac{U_{s1}}{R_1 + R_2}, \quad I'' = \frac{U_{s2}}{R_1 + R_2}$$

可以看出,电流  $I$  可分为  $I'$  和  $I''$  两部分,其中  $I'$  为  $U_{s1}$  单独作用时产生,  $I''$  为  $U_{s2}$  单独作用时产生,与之相应的电路如图 1-13 (b)、(c) 所示,图 1-13 (a) 可看作是该二图的叠加。在式 (1-17) 中,  $I'$  取正值,因为  $I'$  的参考方向与  $I$  一致;  $I''$  取负值,因为  $I''$  的参考方向与  $I$  相反。

#### 2. 电压的叠加

在图 1-13 (a) 中,  $ab$  两点的电压为



$$U = U_{s1} - R_1 I$$

将  $I = I' - I''$  代入上式得

$$U = U_{s1} - R_1(I' - I'') = (U_{s1} - R_1 I') + R_1 I'' = U' + U'' \quad (1-18)$$

式中

$$U' = U_{s1} - R_1 I', \quad U'' = R_1 I''$$

可见, 图 1-13 (a) 中的电压  $U$  也可看作是两部分电压的叠加, 一部分是电源  $U_{s1}$  单独作用时在  $ab$  端产生的电压  $U'$ , 见图 1-13 (b); 另一部分是电源  $U_{s2}$  单独作用时在  $ab$  端产生的电压  $U''$ , 见图 1-13 (c)。式 (1-18) 中的  $U'$  和  $U''$  都取正, 因为它们在图中的参考方向与  $U$  的参考方向相同。

### 3. 叠加原理的应用范围

(1) 叠加原理只适用于线性电路, 即电路中各元件的电压、电流关系为线性。

(2) 只有一个电源单独作用是指, 假设令其他的电压源的电动势  $E=0$  (即理想电压源短路); 其他电流源的电流  $I_s=0$  (即理想电流源开路)。

(3) 叠加原理只适用于电流和电压的叠加, 不能用来计算功率, 因为功率与电流 (电压) 之间是平方关系。

**【例 1-6】** 图 1-14 (a) 中, 已知  $U_{s1} = 110V$ ,  $U_{s2} = 90V$ ,  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $R_3 = 20\Omega$ , 用叠加原理求各支路的电流。

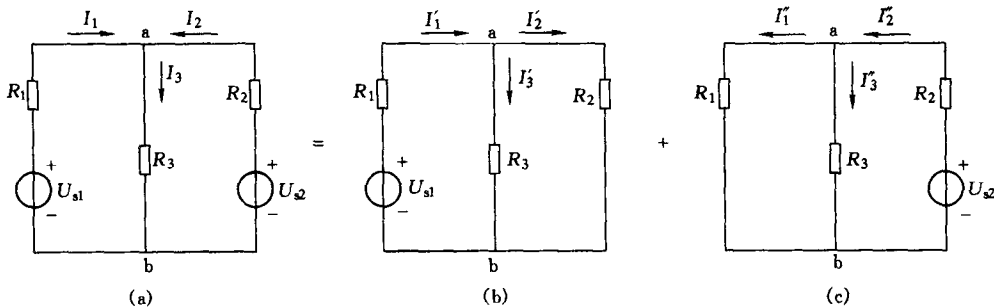


图 1-14 例 1-6 图

**【解】** 图 1-14 (a) 电路的工作状态, 根据叠加原理, 相当于电压源  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  分别单独作用于电路时的工作状态 [图 1-14 (b) 和 (c)] 的叠加。

各电流及其参考方向的规定, 如图 1-14 所示, 则在图 1-14 (b) 中有

$$I'_1 = \frac{U_{s1}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{110}{1 + \frac{2 \times 20}{2 + 20}} = 39 \text{ (A)}$$

$$I'_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I'_1 = \frac{20}{2 + 20} \times 39 = 35.5 \text{ (A)}$$

$$I'_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I'_1 = \frac{2}{2 + 20} \times 39 = 3.55 \text{ (A)}$$

在图 1-14 (c) 中