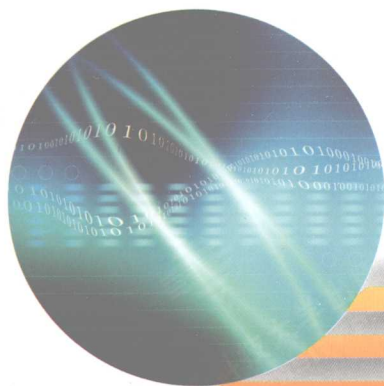
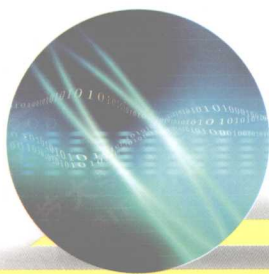




高等职业技术教育电子电工类专业“十一五”规划教材

# 电工基础

主编 郭宗智 副主编 马仲智



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪

高等职业技术教育电子电工类专业“十一五”规划教材

# 电 工 基 础

主 编 郭宗智

副主编 马仲智

参 编 彭 丽 姚剑英 林雪玲

主 审 白乃平

西安电子科技大学出版社

2008

## 内 容 简 介

本书是依据教育部高教司制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》编写的机电类专业的基础理论教材。本书注重理论联系实际,讲练结合。全书共分7章,主要内容包括直流电路、电路的暂态过程分析、正弦交流电路、三相正弦交流电路、磁路与铁芯线圈、非正弦交流电路、常用电工仪表与测量等。每节后有练习与思考题,每章后有小结和习题,书后还附有习题参考答案。

本书可作为高等职业技术学院电子电工类专业的教材,也可供机电类专业或相近专业使用,还可作为相关专业师生、工程技术人员的参考用书。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工基础/郭宗智主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.11  
面向21世纪高等职业技术教育电子电工类专业“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-5606-2083-1

I. 电… II. 郭… III. 电工学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 106961 号

策 划 马乐惠

责任编辑 徐德源 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008年11月第1版 2008年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 12.875

字 数 294千字

印 数 1~4000册

定 价 19.00元

ISBN 978-7-5606-2083-1/TN·0444

**XDUP 2375001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

面向 21 世纪高等职业技术教育  
电子电工类专业“十一五”规划教材

编委会名单

主任委员：唐政平

副主任委员：周 雪 白乃平 王 瑛 郭宗智 张慧玲

委 员：(按姓氏笔画排列)

马安良 方 彦 冯彦炜 毕恩兴

朱晓红 张凌云 肖志锋 吴生有

苏生荣 郭继文 程民利

# 前 言

本书是依据 1999 年 8 月教育部高教司制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》的精神,参照陕西省职业技术教育学会电子电工教学委员会组织讨论并确定的高等职业院校电子电工类专业“电工基础”教学大纲编写的,供高等职业院校电子电工类和机电类专业使用,也可供相近专业选用。

根据高职学生的学习特点以及教学经验,在编写本教材时,我们按照严格把握深度、难度和广度的总体思路,力求在保持知识系统性和完整性的基础上,对有关内容进行了整合,尽量压缩、简化理论上的推导过程,而增加一些实用性和应用性内容,力求概念清晰,深入浅出,通俗易懂,以便于学生学习。

本书每章前有引入,每章后有小结,并在每节后编写有练习与思考题。每章末都选用了较多数量的习题,覆盖了要求理解和掌握的内容,以便于学生选择练习,巩固基本概念和提高分析问题、解决问题的能力。书中带“\*”号的内容可根据实际情况选学。

本书第 1 章由姚剑英、林雪玲编写,第 2、4 章由郭宗智编写,第 3 章由彭丽编写,第 5、6、7 章由马仲智编写。全书由郭宗智、马仲智统稿。白乃平老师审阅了全稿,在此谨表谢意。

限于作者编写水平,书中难免有不妥之处,恳请批评指正。

编 者

2008 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 直流电路</b> .....	1
1.1 电路的基本概念 .....	1
1.1.1 电路的组成与功能 .....	1
1.1.2 理想电路元件 .....	1
1.1.3 电路模型 .....	2
练习与思考题 .....	2
1.2 电路的基本物理量及电流、电压的参考方向 .....	2
1.2.1 电流及其参考方向 .....	2
1.2.2 电压及其参考方向 .....	3
1.2.3 电位 .....	4
1.2.4 电动势 .....	4
1.2.5 电功和电功率 .....	5
练习与思考题 .....	6
1.3 电路的工作状态与基本定律 .....	6
1.3.1 电路的工作状态 .....	6
1.3.2 欧姆定律 .....	6
1.3.3 基尔霍夫定律 .....	8
练习与思考题 .....	9
1.4 电路的等效变换 .....	10
1.4.1 电阻的串联、并联与混联 .....	10
1.4.2 电阻的 Y— $\Delta$ 变换 .....	13
1.4.3 电压源与电流源模型及其等效变换 .....	14
练习与思考题 .....	16
1.5 电路的基本分析方法 .....	16
1.5.1 支路电流法 .....	16
1.5.2 网孔电流法 .....	18
1.5.3 节点电压法 .....	19
1.5.4 叠加定理 .....	21
1.5.5 戴维南定理 .....	23
练习与思考题 .....	24
1.6 用电位的概念分析电路 .....	25
1.6.1 电位及其参考点 .....	25
1.6.2 电位的计算 .....	25
练习与思考题 .....	26
* 1.7 受控源电路 .....	26
练习与思考题 .....	26

本章小结 .....	26
习题 1 .....	28
<b>第 2 章 电路的暂态过程分析</b> .....	33
2.1 电路暂态过程的基本概念和储能元件 .....	33
2.1.1 电路暂态过程的概念 .....	33
2.1.2 储能元件 .....	34
练习与思考题 .....	40
2.2 换路定则与初始值的计算 .....	40
2.2.1 产生暂态过程的原因分析 .....	40
2.2.2 换路定则 .....	41
2.2.3 初始值的计算 .....	41
练习与思考题 .....	43
2.3 RC 电路的暂态过程分析 .....	44
2.3.1 RC 电路的放电 .....	44
2.3.2 RC 电路的充电 .....	47
练习与思考题 .....	48
2.4 RL 电路的暂态过程分析 .....	49
2.4.1 RL 电路的短接 .....	49
2.4.2 RL 电路接通直流电源 .....	52
练习与思考题 .....	54
2.5 一阶线性电路暂态分析的三要素 .....	54
练习与思考题 .....	57
* 2.6 LC 振荡电路分析 .....	57
2.6.1 LC 振荡电路 .....	57
2.6.2 电磁振荡的物理过程 .....	58
2.6.3 振荡频率与临界电阻 .....	59
练习与思考题 .....	60
本章小结 .....	60
习题 2 .....	62
<b>第 3 章 正弦交流电路</b> .....	65
3.1 正弦交流电的基本概念 .....	65
3.1.1 正弦交流电的产生 .....	65
3.1.2 正弦交流电的特征量 .....	66
练习与思考题 .....	70
3.2 正弦量的相量表示法 .....	70
3.2.1 复数及其四则运算 .....	70
3.2.2 正弦量的相量表示法 .....	73
3.3 单一参数交流电路 .....	75
3.3.1 纯电阻交流电路 .....	75
3.3.2 纯电容电路 .....	77
3.3.3 纯电感电路 .....	79
练习与思考题 .....	82
3.4 RLC 串联电路 .....	82

3.4.1	电压与电流的关系	82
3.4.2	RLC 串联电路的性质	83
3.4.3	阻抗的串联	84
3.4.4	RLC 串联电路的功率	85
	练习与思考题	89
3.5	RLC 并联电路	89
3.5.1	电流与电压的关系	89
3.5.2	RLC 并联电路的性质	90
3.5.3	多阻抗的并联	91
	练习与思考题	92
3.6	正弦量的相量分析法	92
	练习与思考题	93
3.7	功率因数的提高	94
3.7.1	提高功率因数的意义	94
3.7.2	提高功率因数的方法	94
	练习与思考题	96
3.8	谐振	96
3.8.1	串联谐振	96
3.8.2	并联谐振	99
	练习与思考题	101
	本章小结	101
	习题 3	104
<b>第 4 章 三相正弦交流电路</b>		110
4.1	三相交流电源	110
4.1.1	三相交流电动势的产生	110
4.1.2	三相电源的连接	111
	练习与思考题	114
4.2	三相负载的连接	114
4.2.1	三相负载的星形(Y)连接	114
4.2.2	三相负载的三角形( $\Delta$ )连接	119
	练习与思考题	121
4.3	三相电路的功率	121
	练习与思考题	124
*4.4	三相电力系统	124
4.4.1	发电、输电和配电概况	124
4.4.2	工厂供电概述	125
4.4.3	安全用电	126
	练习与思考题	130
	本章小结	130
	习题 4	132
<b>第 5 章 磁路与铁芯线圈</b>		135
5.1	铁磁性材料	135
5.1.1	磁场的基本物理量	135



5.1.2	铁磁性材料的磁化及主要特性	137
5.1.3	铁磁性材料的分类及用途	139
	练习与思考题	140
5.2	磁路和磁路定律	140
5.2.1	磁路	140
5.2.2	安培环路定律	141
5.2.3	磁路的欧姆定律	143
	练习与思考题	143
5.3	铁芯线圈电路	144
	练习与思考题	146
5.4	互感	146
5.4.1	互感现象	146
5.4.2	互感线圈同名端及其判定	148
5.4.3	互感线圈的串联与并联	150
	练习与思考题	153
5.5	电磁铁	153
5.5.1	直流电磁铁	154
5.5.2	交流电磁铁	154
	练习与思考题	155
	本章小结	155
	习题 5	158
<b>第 6 章 非正弦交流电路</b>		160
6.1	非正弦周期交流电的表示与分解	160
6.1.1	非正弦交流电压和电流的产生	160
6.1.2	非正弦交流电的表示	161
6.1.3	非正弦交流电的分解	161
	练习与思考题	163
6.2	非正弦交流电的有效值、平均值和平均功率	163
6.2.1	非正弦交流电的有效值	163
6.2.2	非正弦交流电的平均值	164
6.2.3	非正弦交流电的平均功率	164
	练习与思考题	165
6.3	非正弦周期电流电路的计算	165
	练习与思考题	166
	本章小结	167
	习题 6	167
<b>第 7 章 常用电工仪表与测量</b>		169
7.1	电工仪表的一般知识	169
7.1.1	仪表的误差和准确度	169
7.1.2	仪表的灵敏度和表面标记	171
	练习与思考题	172
7.2	常用电工仪表的类型及工作原理	173
7.2.1	常用电工仪表的基本结构	173

7.2.2 常用电工指示仪表的类型及工作原理 .....	174
练习与思考题 .....	177
7.3 常用电工仪表的使用 .....	177
7.3.1 电压表、电流表及电压、电流的测量 .....	177
7.3.2 功率表及功率的测量 .....	178
7.3.3 万用表的使用 .....	180
7.3.4 兆欧表的使用 .....	183
7.3.5 直流电桥 .....	185
练习与思考题 .....	187
习题 7 .....	187
<b>习题参考答案</b> .....	188
<b>参考文献</b> .....	193

# 第1章 直流电路

本章主要介绍电路的基本概念和描述电路的基本物理量，电流、电压的参考方向；重点阐述了电阻元件、电压源、电流源的元件特性及电路的基本定律和分析方法。

## 1.1 电路的基本概念

### 1.1.1 电路的组成与功能

#### 1. 电路及组成

电路是由电气设备和元件按一定方式连接而成的，它为电流的流通提供通路。复杂的电路呈网状，称为网络。

实际中的电路形式多种多样，把在电路中流过的电流大小和方向恒定不变的电路称为稳恒直流电路，这就是本章研究的对象。直流电路中的各电学量用大写英文字母表示。

图 1-1(a) 所示是一种简单的实际电路，它由电池、开关、灯泡和导线连接而成。

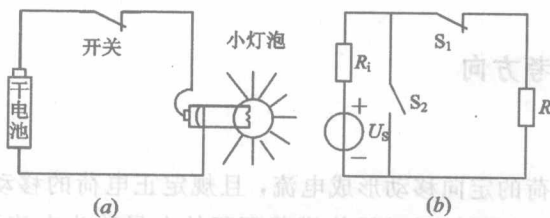


图 1-1 手电筒电路模型

#### 2. 电路的功能

不同的电路结构，功能也不相同，但总体上可以概括为以下两点：

(1) 传输和转换能量。各类电力系统就是典型实例。在图 1-1(a) 中，当开关闭合时，灯泡发光，将电能转换为光能。本课程主要研究这种功能的电路。

(2) 传输和处理信号。收音机和电视机就是这类电路的实例。这类电路，我们将在电子技术课程中去研究。

### 1.1.2 理想电路元件

组成电路的实际电气元件多种多样，其电磁性能也各不相同。为了分析问题方便，常常在一定条件下对实际元件加以理想化，只考虑主要因素，忽略次要现象。例如图 1-1(a)

所示的电路中,在电流的作用下,灯泡不但发光和发热耗能,而且还产生微弱的磁场。但在实际分析中,可只考虑其消耗能量的性能而忽略其微弱的磁场效应。对闭合的开关和导线则只考虑导线性能而忽略其本身的电能损耗。

综上所述,我们可以用反映主要电磁性能的元件来模拟实际电路中的元器件,并将其称为理想电路元件。理想电路元件是一种理想化的模型,简称为电路元件。每一种电路元件只表示一种电磁现象。例如,电阻元件是表示消耗电能的元件;电感元件是表示其周围空间存在着磁场且可以储存磁场能量的元件;电容元件是表示其周围存在电场且可以储存电场能量的元件。

### 1.1.3 电路模型

实际电路可以用理想电路元件经导线连接起来进行模拟,这就是电路模型。图 1-1(b)是图 1-1(a)这个实际电路的电路模型。它只表示实际电路的接法,不反映实际电路的尺寸和实际元器件的形状。在实际中,电路模型也称做电路原理图,简称电路。

## 练习与思考题

1. 什么叫电路模型? 建立电路模型时应注意什么问题?

2. 结合自己所熟悉的家用电器,谈谈对电路功能的理解。

## 1.2 电路的基本物理量及电流、电压的参考方向

### 1.2.1 电流及其参考方向

#### 1. 电流

从物理学知道,电荷的定向移动形成电流,且规定正电荷的移动方向为电流方向,其大小用电流强度衡量。单位时间通过导体横截面积的电量称为电流强度,简称电流,用  $I$  表示,即

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-1)$$

式中,  $q$ ——电量(C);

$t$ ——时间(s);

$I$ ——电流(A)。

常用的电流单位还有毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ ),它们之间的换算关系是

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

#### 2. 电流的参考方向

在复杂电路中,电流的实际方向很难判断,为了分析问题方便,可以任意规定某一方向为电流方向,并用箭头表示在电路图上,将此称为电流的参考方向。如图 1-2 所示,如

电流的实际方向与参考方向一致，则电流为正值，如图 1-2(a)所示；如果两者相反，则电流为负值，如图 1-2(b)所示。

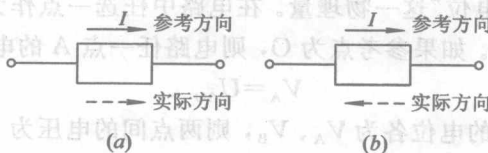


图 1-2 电流的参考方向

### 1.2.2 电压及其参考方向

#### 1. 电压

由物理学知道，电路中 A、B 两点的电压是将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时电场力所做的功。电压用  $U$  表示，即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-2)$$

式中， $q$ ——电荷电量(C)；

$W_{AB}$ ——电荷由 A 点移至 B 点电场力所做的功(J)；

$U_{AB}$ ——A、B 两点间的电压(V)。

常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu$ V)，它们之间的换算关系是

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

#### 2. 电压的参考方向

与电流类似，在电路分析中也要规定电压的参考方向，通常有 3 种表示方法：

(1) 采用正(+)、负(-)极性表示，称为参考极性，如图 1-3(a)所示。这时，从正极性端指向负极性端的方向就是电压的参考方向。

(2) 采用实线箭头表示，如图 1-3(b)所示。

(3) 采用双下标表示， $U_{AB}$ 表示电压的参数方向由 A 指向 B。

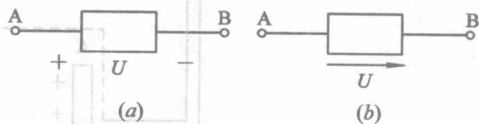


图 1-3 电压的参考方向

电压的参考方向规定之后，当电压的实际方向与参考方向一致时，电压为正值；反之，电压为负值。

任一元件的电流参考方向和电压参考方向可以分别独立规定，但为了分析方便，常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致，称为关联参考方向，如图 1-4 所示。



图 1-4 电流和电压的关联参考方向

### 1.2.3 电位

分析电路时常用到“电位”这一物理量。在电路中任选一点作为参考点，用符号“ $\perp$ ”表示，规定该点的电位为零。如果参考点为  $O$ ，则电路任一点  $A$  的电位为

$$V_A = U_{AO}$$

如果已知  $A$ 、 $B$  两点的电位各为  $V_A$ 、 $V_B$ ，则两点间的电压为

$$U_{AB} = U_{AO} + U_{OB} = U_{AO} - U_{BO} = V_A - V_B \quad (1-3)$$

即  $A$ 、 $B$  两点间的电压等于这两点的电位差，所以电压又叫电位差。

电压和电位都是非常抽象的物理量，它们之间既有区别又有联系。电路某点的电位与参考点有关，即参考点不同，电路中同一点的电位不同，但电路中任意两点间的电压与参考点的位置无关。

### 1.2.4 电动势

电路中要有电流通过，就必须在电路两端保持电压，电路中的电源就是完成这一任务的设备，它的工作实质就是将其他形式的能量转化为电能。

图 1-5 是电源工作的示意图。虚线内为电源， $A$  是电源的正极， $B$  是电源的负极， $R$  为用电器。

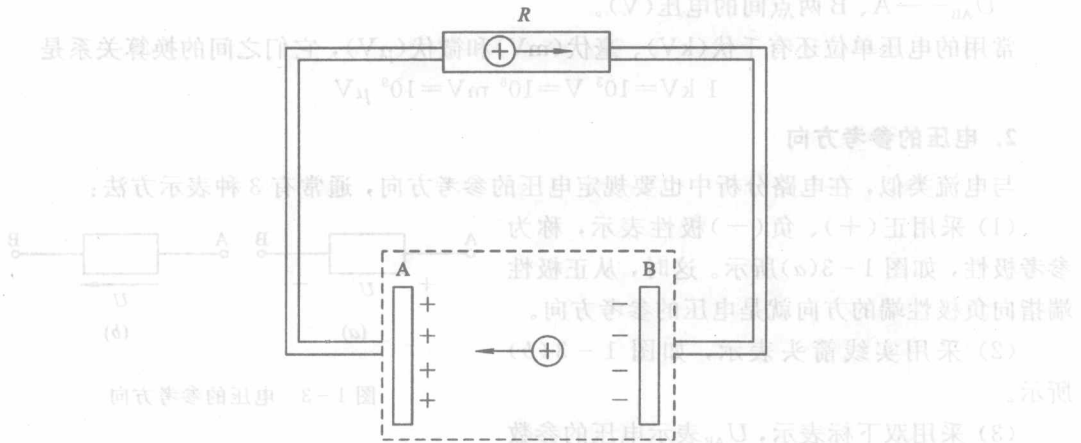


图 1-5 电源工作示意图

电源的工作就是把正电荷从  $B$  极通过电源内部移动到  $A$  极，或者把负电荷从  $A$  极移动到  $B$  极。在这个过程中外力要克服电场力做功，而将其他形式的能转化成电能。不同的电源这种做功的本领大小不同。电源的这种本领，我们用“电动势”这个物理量来表示。

外力把正电荷通过电源内部从  $B$  极移动到  $A$  极所做的功为  $W$ ，与所移动电荷量  $q$  的比值，称为电源的电动势。规定电动势的方向从电源负极指向正极。

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

式中， $W$ ——功(J)；

$q$ ——电量(C)；

$E$ ——电动势(V)。

## 1.2.5 电功和电功率

## 1. 电功

我们在物理中已学过电功和电功率。利用电场的有关概念可以更好地理解电功和电功率。

在导体两端加上电压，导体内建立了电场，电场在推动自由电子定向移动时要做功。设导体两端电压为  $U$ ，通过导体横截面的电量为  $q$ ，那么，电场力所做的功为  $W=qU$ ，由于  $q=It$ ，所以

$$W = UI t \quad (1-5)$$

式中  $W$ 、 $U$ 、 $I$ 、 $t$  的单位分别是焦耳(J)、伏特(V)、安培(A)、秒(s)。电场力做的功常常称为电流做的功，简称电功或电能。在实际生活中还采用千瓦时(kW·h)作为电能的单位，它等于功率为 1 kW 的用电设备在 1 小时(3600 s)所消耗的电能，简称为 1 度电。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \times 3600 = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

## 2. 电功率

电流所做的功与完成这些功所需时间的比值称为电功率，用  $P$  表示，在图 1-6(a)中，电流、电压为关联参考方向时，由式(1-5)可知：

$$P = IU \quad (1-6)$$

在图 1-6(b)中，电流、电压为非关联参考方向时

$$P = -IU \quad (1-7)$$

式中， $P$ ——电功率(W)；

$U$ ——电压(V)；

$I$ ——电流(A)。

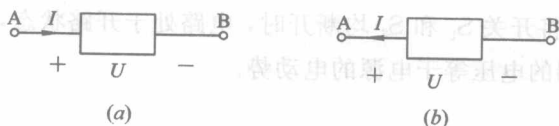


图 1-6 电流、电压关联与非关联参考方向

一段电路，若  $P > 0$ ，表明该段电路吸收功率；若  $P < 0$ ，则表明该段电路供出功率。应特别注意，根据电流、电压参考方向是否关联，选择相应的计算公式。

**【例 1.1】** 在图 1-7 中，方框代表电源或电阻，各电压、电流的参考方向均已设定。已知  $I=2 \text{ A}$ ， $U_1=-2 \text{ V}$ 。

(1) 求元件 1 的功率  $P_1$ ，并说明是吸收功率还是供出功率。

(2) 元件 2 供出功率 10 W，元件 3 吸收功率为 12 W，求  $U_2$  和  $U_3$ 。

**【解】** (1) 由于元件 1 的电压、电流为非关联方向，故

$$P_1 = -U_1 I = -(-2) \times 2 = 4 \text{ W (吸收功率)}$$

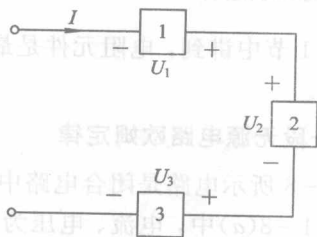


图 1-7 各元件电压、电流的关联参考方向

(2) 由于元件 2 和元件 3 的电压、电流均为关联方向, 故

$$P_2 = U_2 I = -10 \text{ W}$$

$$U_2 = \frac{-10}{I} = \frac{-10}{2} = -5 \text{ V}$$

$$P_3 = U_3 I = 12 \text{ W}$$

$$U_3 = \frac{12}{I} = \frac{12}{2} = 6 \text{ V}$$

## 练习与思考题

1. 试分析电位和电压的区别与联系。
2. 什么叫电路的功率平衡?

## 1.3 电路的工作状态与基本定律

### 1.3.1 电路的工作状态

#### 1. 有载状态

在图 1-1(b)中, 将开关  $S_1$  接通,  $S_2$  断开时, 电路便处于有载状态。此时, 电源的输出电流取决于负载的大小。

#### 2. 开路状态

在图 1-1(b)中, 将开关  $S_1$  和  $S_2$  均断开时, 电路处于开路状态, 这时电源空载, 电路中电流为零, 电源两端的电压等于电源的电动势。

#### 3. 短路状态

在图 1-1(b)中, 若将开关  $S_2$  闭合, 则电路处于短路状态。这时, 电路中的电流极大, 会将电源烧坏。在实际工作中, 应绝对防止电路短路故障, 以避免造成火灾等事故。

### 1.3.2 欧姆定律

在 1.1 节中讲到, 电阻元件是最基本的电路元件, 它两端的电压及流过它的电流服从欧姆定律。

#### 1. 一段无源电路欧姆定律

图 1-8 所示电路是闭合电路中的一部分, 电阻  $R$  上的电压、电流参考方向如图 1-8 所示。在图 1-8(a)中, 电流、电压为关联方向, 则欧姆定律表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-8)$$

在图 1-8(b)中, 电流、电压参考方向为非关联, 则欧姆定律表达式为

$$I = -\frac{U}{R} \quad (1-9)$$



式中,  $U$ ——电阻  $R$  两端电压(V);

$R$ ——电阻( $\Omega$ );

$I$ ——流过电阻  $R$  的电流(A)。

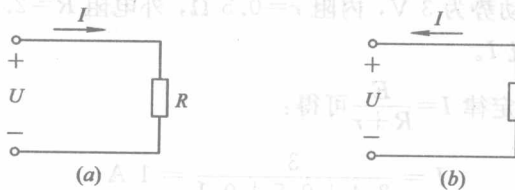


图 1-8 一段电阻电路

**【例 1.2】** 有一电阻炉, 其电阻  $R=88\ \Omega$ , 接在电压为  $220\ \text{V}$  的电路中, 求电阻炉中通过的电流。

**【解】** 本题为一段电阻电路, 则由式(1-8)可得到电阻的电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{88} = 2.5\ \text{A}$$

## 2. 一段含源电路欧姆定律

图 1-9 所示为一段含有电源的电路, 电流、电压参考方向如图所示, 此时欧姆定律可以表达为

$$I = \frac{U_{AC} + E}{R} \quad (1-10)$$

若将电源  $E$  调换极性, 请同学们自己考虑。

**【例 1.3】** 如图 1-9 所示,  $R=2\ \Omega$ ,  $U_{AC}=4\ \text{V}$ ,  $E=2\ \text{V}$ , 求  $I$ 。

**【解】** 本题为一段含源电路,  $R$  两端电压为  $U_{AC}+E$ , 故

$$I = \frac{U_{AC} + E}{R} = \frac{-4 + 2}{2} = -1\ \text{A}$$

图 1-9 一段含源电路

## 3. 全电路欧姆定律

图 1-10 所示为最简单的闭合电路, 其中  $r$  为电源的内阻,  $E$  为电源的电动势,  $R$  为外电阻, 电路中的电流为  $I$ 。由式(1-4)知电源做的功为

$$W = Eq = EIt$$

由于只有电阻耗能, 根据式(1-5)和式(1-8)可知, 电流通过电阻  $R$  及电源内阻  $r$  时做的功分别为

$$W_1 = I^2 R t$$

$$W_2 = I^2 r t$$

由能量守恒定律可得  $W=W_1+W_2$ , 即

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (1-11)$$

我们把该式称为全电路欧姆定律。令  $IR=U$  为端电压,  $Ir=U_0$  为电源内阻消耗的电压(内