



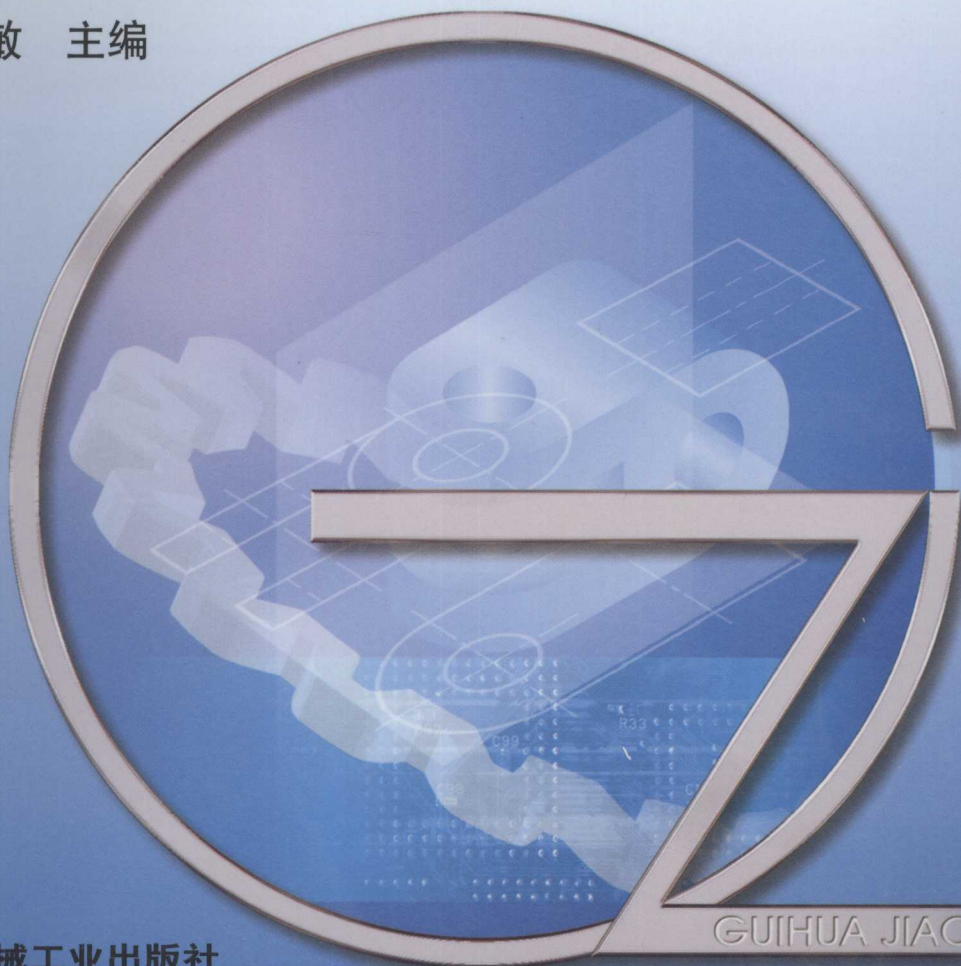
教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
专业基础课教学用书

# 电工电子技术基础

(上册 电工)

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编  
中国机械工业教育协会

邱敏 主编



GUIHUA JIAOCAI

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

gz



教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
专业基础课教学用书

# 电工电子技术基础

(上册 电工)

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编  
中国机械工业教育协会

主 编 邱 敏

副主编 吕 强 刘 江

参 编 马苗玲 于 彤

主 审 夏奇兵



机械工业出版社

《电工电子技术基础》教材分上册(电工)、下册(电子)及实验与实训三部分,本书为上册。本书共五章:第一章直流电路,第二章交流电路的分析与计算,第三章磁路与变压器,第四章电动机,第五章供电及用电。

本书可作为高职高专数控技术应用、机电技术等专业基础课教材,也可供相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术基础.上册,电工/邱敏主编. —北京:  
机械工业出版社, 2005.1

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-111-15810-5

I. 电… II. 邱… III. ①电工技术-高等学校:  
技术学校-教材②电子技术-高等学校:技术学校-教  
材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 131329 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王世刚 于奇慧

责任编辑:于奇慧 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 10.5 印张 · 253 千字

定价:15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

## 机电类高等职业技术教育教材建设 领导小组人员名单

顾问：郝广发

组长：杨黎明

成员：刘亚琴 李超群 惠新才 王世刚 姜立增  
李向东 刘大康 鲍风雨 储克森 薛涛

## 专业基础课教材编审委员会名单

苏群荣 胡家秀 薛涛 刘魁敏 杜伟明  
邱敏 夏奇兵 李怀甫 柴鹏飞 田鸣  
许文茂 赵建彬 王世刚

# 前 言

为了加强高等职业技术教育的教学改革,推进素质教育,培养面向生产、管理、服务第一线的应用型高级技术人才,根据教育部高职高专培养目标的要求,我们认真分析、研讨了五年制高等职业技术教育机电类专业教学计划,根据机电类各专业对电工电子技术的基本要求,编写了《电工电子技术基础》教材。本套教材分上册、下册及实验与实训三部分,本书为上册(电工技术部分)。

本书结合高职高专教育的特点和要求,注重以人为本的教学理念,同时结合五年制学生的生源特点,突出以能力为本位和学以致用原则,在内容的编排方面,以培养学生会思考、会学习、会应用为出发点,简明扼要,注意讲清基本概念,注重基本概念的应用,减少理论推导,力求深入浅出,分析准确,内容适度、够用,结合专业实际,结合生产、生活实际,特别在电动机和变压器以及能量转换等章节中,我们还介绍了一些电器在数控机床中的应用以及在生产、生活中的应用,不仅开拓学生视野,还为学生学习后续课程打下一定基础。在充分考虑教学需要、自学需要和从事实际工作需要的基础上,力求遵循理论联系实际、用理论指导实践的教学原则,在问题的阐述方面力求作到通俗易懂、突出实际应用。

本书主要内容包括:第一章直流电路,第二章交流电路的分析与计算,第三章磁路与变压器,第四章电动机,第五章供电及用电。

本书由辽宁机电职业技术学院的邱敏老师任主编,四川省电子工业学校的吕强老师和包头职业技术学院的刘江老师任副主编,太原理工大学长治学院的马苗玲老师和北京仪器仪表工业学校的于彤老师参编。其中第一章由刘江编写,第二章由邱敏编写,第三章由马苗玲编写,第四章由吕强编写,第五章由于彤编写。

本书由上海电机技术高等专科学校的夏奇兵副教授主审,他对全书进行了认真、仔细的审阅,提出了许多具体、宝贵的意见,谨在此表示诚挚的感谢。

由于水平有限,编写时间仓促,书中难免有错误和不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第一章 直流电路</b> .....	1	<b>第一节 磁路</b> .....	87
第一节 电路的基本概念 .....	1	<b>第二节 变压器</b> .....	95
第二节 电路的基本物理量 .....	2	<b>第三节 三相变压器</b> .....	100
第三节 电路的状态及电源 .....	7	<b>第四节 几种特殊的变压器</b> .....	102
第四节 电阻及其连接 .....	10	<b>第五节 旋转变压器及其在数控设备中的</b> <b>应用</b> .....	107
第五节 基尔霍夫定律 .....	16	<b>本章小结</b> .....	109
第六节 叠加定理 .....	18	<b>习题三</b> .....	110
第七节 戴维南定理 .....	19	<b>第四章 电动机</b> .....	112
第八节 两种电源的等效变换 .....	22	第一节 电机简介 .....	112
第九节 电位的计算 .....	23	第二节 三相交流异步电动机 .....	112
<b>本章小结</b> .....	24	第三节 三相异步电动机的起动、调速和	
<b>习题一</b> .....	26	<b>制动</b> .....	118
<b>第二章 交流电路的分析与计算</b> .....	29	第四节 单相异步电动机 .....	120
第一节 正弦交流电的基本概念 .....	29	第五节 直流电动机 .....	123
第二节 正弦信号的相量表示 .....	32	第六节 控制微电机 .....	126
第三节 纯电阻电路上电压与电流的		<b>本章小结</b> .....	130
<b>关系</b> .....	36	<b>习题四</b> .....	131
第四节 电感元件上电压与电流的关系 .....	39	<b>第五章 供电及用电</b> .....	133
第五节 电容元件上电压与电流的关系 .....	44	第一节 电能的产生、传输与分配 .....	133
第六节 相量法分析串联电路 .....	48	第二节 安全用电 .....	138
第七节 导纳法分析并联电路 .....	52	第三节 节约用电 .....	144
第八节 正弦稳态电路的相量分析法 .....	59	第四节 电能转换技术 .....	147
第九节 三相电路 .....	64	<b>本章小结</b> .....	156
第十节 一阶动态电路 .....	72	<b>习题五</b> .....	158
<b>本章小结</b> .....	78	<b>参考文献</b> .....	159
<b>习题二</b> .....	81		
<b>第三章 磁路与变压器</b> .....	87		

# 第一章 直流电路

本章与物理“电学”部分内容相衔接，从工业所用电工技术的角度出发，介绍了电路的基本概念和相关物理量以及电流、电压参考方向的概念，阐述了分析电路的基本定律——基尔霍夫定律，讲述了分析电路的几种方法——支路电流法、叠加定理、戴维南定理以及电源等效变换法，介绍了电位的计算，为学习交流电路的内容、电工技术的相关知识打好基础。

## 第一节 电路的基本概念

### 一、电路的组成及作用

电路是电流流过的路径。复杂电路呈网状，所以电路又称网络。

电路是由电源、负载和中间环节三部分构成的。电源是给电路提供电能或信号的器件或设备；负载是电路中吸收电能或输出信号的器件或设备；中间环节则根据电路作用、需要而不同，通常由起着引导和控制或测量作用的器件或设备构成。图 1-1 是最简单的电路，电源是干电池，负载是灯泡，中间环节由导线和开关构成。对电源来讲，负载和中间环节称作外电路，电源内部的电路称作内电路。

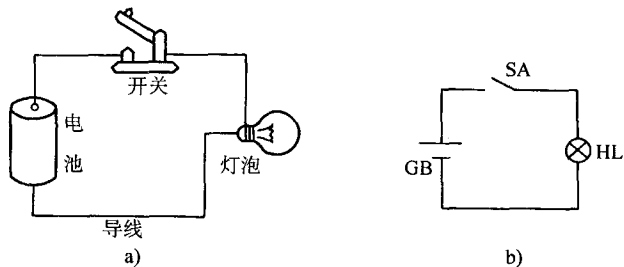


图 1-1 最简单的电路图

a) 实物接线图 b) 电原理图

电路的作用可分为两种，一种是实现电能的传输和转换，各类电力系统都属于这一类作用；另一种是实现信号的传递与处理，如电子技术中的放大器、整流电路等等。

### 二、电路图

实际中电气设备的安装和维修都是依据电原理图进行的，很少使用实物接线图。电原理图也简称为电路图，是指将实际电路中的各种器件用规定的图形符号表示之后所画出的图。图 1-1b 是图 1-1a 的电路原理图。国家颁布了统一的图形符号来规范电路图。表 1-1 为电路图中常用的图形符号。

### 三、电路的分类

根据电路中电信号种类的不同，电路可分为两大类：直流电路和交流电路。如果电路中的电流是直流量，各元件或设备上产生的电压也是直流量，这样的电路称为直流电路；若电路中的电流、电压都是交流量，这样的电路称为交流电路。本章将详细介绍直流电路的相关知识，部分结论、定理在后面学习交流电路时同样适用。

表 1-1 电气简图常用图形符号

图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号	名称
	S 或 SA	开关		FU	熔断器
	GB	蓄电池		HL	指示灯, 信号灯
	R	电阻器		C	电容器
	RP	电位器		PW	功率表
	VD	二极管		PV	电压表
	$U_S$	电压源		PA	电流表
	$I_S$	电流源		X	端子
		不连接导线			接地
		连接导线		L	电感器, 线圈, 绕组
		参考点		L	带磁心的电感器

## 思考题

简述电路各组成部分的作用。

## 第二节 电路的基本物理量

### 一、电流

我们知道, 电流是电荷的定向移动形成的。在金属导体中, 实质上能定向移动的电荷是带负电的自由电子; 在导电液体中 (如蓄电池的电解液中), 能定向移动的电荷分别是带正电的正离子和带负电的负离子。习惯上把正电荷定向移动的方向规定为电流方向。因此, 自由电子和负离子移动的方向与电流方向相反。

根据电流的变化可将电流分为直流电流和交流电流。大小随时间变化, 方向不变的电流称直流电流, 其中大小、方向都不变的称恒定电流, 简称直流 (DC, Direct Current), 如不特别说明, 本书所说的直流电均指恒定电流, 用字母  $I$  表示。大小和方向都随时间变化的电流称为交流电流, 用字母  $i$  表示。其中周期性变化的称周期交流电流, 简称交流 (AC, Alternating Current)。我国发电厂发出的交流电都是随时间按正弦规律变化的正弦交流电。如不特别说明, 本书所指的交流电都指正弦交流电。图 1-2 中画出了几种电流曲线。



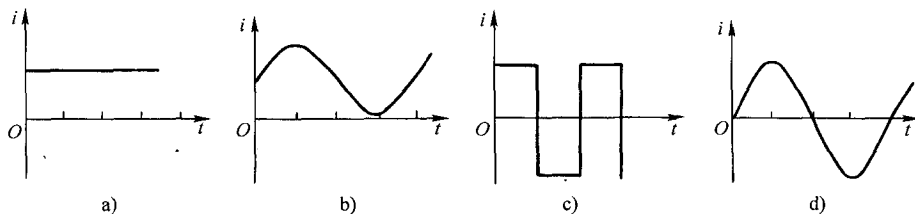


图 1-2 几种电流的曲线

a) 恒定电流 b) 变化的直流电流 c) 脉冲交流电 d) 正弦交流电

电流大小也简称为电流，是指单位时间内通过导体横截面的电量。如果时间  $t$  内匀速流过导体横截面的电量为  $q$ ，则电流是恒定的，大小为

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

若电流是不断变化的，我们可以求出某一时间段电流的平均值。如果在  $\Delta t$  时间内，通过导体横截面的电量变化了  $\Delta q$ ，则在该段时间内电流大小的平均值为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

当时间段  $\Delta t$  趋于零时，上式为

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 所求得的价值便是某一时刻电流  $i$  的大小。

国际单位制 (SI) 中，电流的单位是安培，简称安，符号为 A，则有

$$1 \text{ 安} = \frac{1 \text{ 库仑}}{1 \text{ 秒}}$$

通常使用的单位还有：千安 (kA)，毫安 (mA)，微安 ( $\mu\text{A}$ ) 等。

电路较复杂时，电流的实际方向很难判定出来，为此，在分析与计算电路时，常常可事先任意选定某一方向作为电流的参考方向，也称为正方向。当实际方向与选择的参考方向一致时，参考方向下的电流值为正数，如图 1-3a 所示；当实际方向与参考方向相反时，参考方向下的电流值为负数，如图 1-3b 所示。分析电路时，图中标的均为参考方向，用实线箭头“ $\longrightarrow$ ”表示，或用双下标表示，如  $i_{ab}$  表示  $a$  到  $b$  的电流， $i_{ba}$  表示  $b$  到  $a$  的电流， $i_{ab} = -i_{ba}$ 。电流的实际方向可用虚线箭头“ $\cdots\cdots\longrightarrow$ ”表示，如图 1-3 所示。电流参考方向的选择原则上可任意选，但若已知实际方向，则参考方向的选择尽量与实际方向一致。

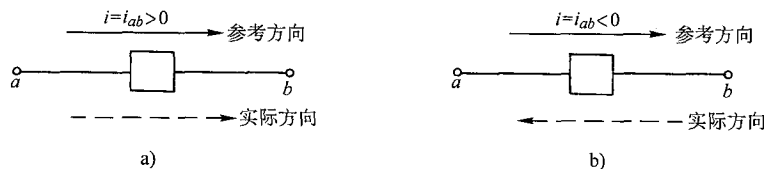


图 1-3 参考方向与实际方向的关系

**例 1-1** 图 1-4 所示方框为某一通路上的一种用电器件，试分析：

(1) 若已知该器件上的电流是从  $a$  到  $b$ ，大小为 1A，则图中电流  $I$  等于多少？

(2) 若已知该器件上的电流是从  $b$  到  $a$ , 大小为  $1\text{A}$ , 则图中电流  $I$  又等于多少?

解 (1) 电流从  $a$  到  $b$ ,  $I$  参考方向也从  $a$  到  $b$ , 与实际方向一致, 所以

$$I = 1\text{A}$$

(2)  $I$  参考方向与实际方向相反, 所以  $I = -1\text{A}$ 。

例 1-2 图 1-5 电路中,  $I_1$ 、 $I_2$  分别等于多少?

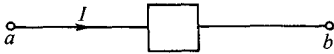


图 1-4 例 1-1 图

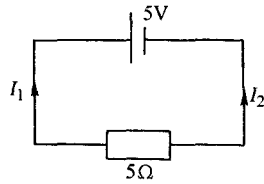


图 1-5 例 1-2 图

解 可以判断出电路中电流的实际方向是从电源出发, 经电阻  $R$  后回到电源负极, 为逆时针方向,  $I_1$  与实际方向相反,  $I_2$  与实际方向相同, 所以

$$I_1 = -\frac{5}{5}\text{A} = -1\text{A}$$

$$I_2 = \frac{5}{5}\text{A} = 1\text{A}$$

电流的大小可以用电流表直接测量。

对直流电流测量时要注意以下几点:

(1) 电流表必须与被测电路串联, 如图 1-6 所示。连接时应注意电流从表的“+”接线柱流入, 从“-”接线柱流出, 否则会损坏电流表。

(2) 使用电流表之前, 应根据被测电流的大小选择适当的量程, 在无法估计被测电流的范围时, 应选用较大的量程开始测量。

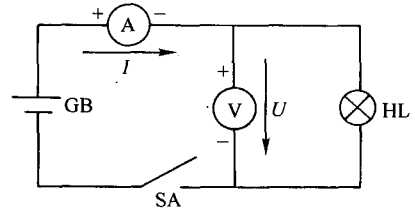


图 1-6 电流和电压的测量

## 二、电压

电路中  $a$ 、 $b$  两点间电压就是指单位正电荷  $q$  在电场力作用下由  $a$  点移到  $b$  点时, 电场力所做的功。电压用字母  $u$  或  $U$  表示, 则

$$u_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad (1-3)$$

式中  $W_{ab}$ ——单位正电荷  $q$  移动过程中能量的减少量。

电压的方向是正电荷在电场中的受力方向。例如对电源而言, 电压的方向是从电源正极到电源负极。

电压的分类与电流一样, 通常所说的直流电压均指恒定电压, 用字母  $U$  表示, 交流电压是指正弦交流电压, 用  $u$  表示。

电压的国际单位是伏特, 简称伏, 符号为  $\text{V}$ , 则有

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

通常使用的单位还有: 兆伏 ( $\text{MV}$ ), 千伏 ( $\text{kV}$ ), 毫伏 ( $\text{mV}$ ), 微伏 ( $\mu\text{V}$ ) 等。

为分析电路方便，通常在分析电压之前先选定电压的参考方向，原则上可任意选，但若已知实际电压方向，则参考方向尽量选择与实际方向一致；若已知电流参考方向，则电压参考方向的选择最好与电流参考方向一致，称关联参考；电压、电流参考方向不一致时称非关联参考。

在电路分析中，所标的电压方向均为参考方向，表示方法有三种：

- (1) 实线箭头“ $\longrightarrow$ ”表示。
- (2) 双下标  $u_{ab}$  表示  $a$  到  $b$  的电压。
- (3) “+”、“-” 极性表示，电压从正极性端到负极性端。

如图 1-7 中，三种电压参考方向的表示都是一样的。

电压是标量。我们这里所说的电压方向，实际是用正负号来区别电压的两种方向。当选定导体上电压的参考方向以后，正电压表示实际方向与参考方向相同，负电压表示实际方向与参考方向相反。

**例 1-3** 若已知图 1-8 所示电阻的电压从  $a$  到  $b$ ，大小是  $1\text{V}$ ，则  $U_1 = ?$   $U_2 = ?$   $U_{ba} = ?$

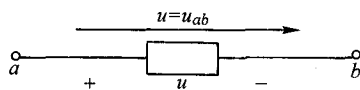


图 1-7 电压的参考方向

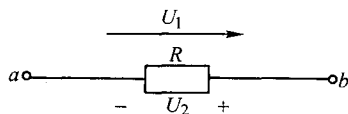


图 1-8 例 1-3 图

**解** 实际电压从  $a$  到  $b$ ， $U_1$  与实际电压方向一致， $U_2$  与实际电压方向相反， $U_{ba}$  与实际电压方向相反，所以

$$U_1 = 1\text{V}; U_2 = -1\text{V}; U_{ba} = -1\text{V}$$

电压的大小可用直流电压表直接测量，测量时要注意以下两点：

- (1) 电压表必须与被测电路并联，如图 1-6 所示。连接时应注意被测电压的实际方向与电压表的“+”、“-”接线柱一致，否则会损坏电压表。
- (2) 使用电压表之前，应根据被测电压的大小选择适当的量程，在无法估计被测电压的范围时，应选用较大的量程开始测量。

### 三、电位

电位是一个相对的概念，分析电位时必须先选定一个参考点。参考点用字母  $O$  表示，在电路中用“ $\perp$ ”符号表示。原则上参考点可任意选取，但习惯上选择地点或接机壳点或电路中连线最多的点作为参考点。

电路中某一点的电位就是该点到参考点的电压，用字母  $V$  或  $v$  表示。可见，电位的单位与电压一样，也是伏特 (V)。如图 1-9 所示， $a$  点的电位为

$$V_a = U_{ao} \text{ 或 } v_a = u_{ao} \quad (1-4)$$

参考点本身的电位为零，所以参考点又叫零电位点。

如果已知  $a$ 、 $b$  两点的电位分别为  $V_a$ 、 $V_b$ ，则  $a$ 、 $b$  两点间的电压为

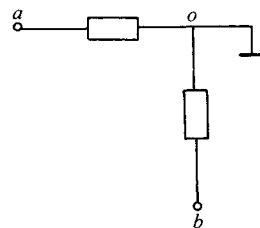


图 1-9 电位与电压的关系

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

即两点间的电压等于这两点之间的电位差，所以电压又叫电位差。

电位具有相对性，即电路中某点的电位随参考点位置的改变而改变；而电位差（也就是电压）具有绝对性，即电路中任意两点之间的电位差值与电路中参考点的位置无关。这一点将在本章第九节中进一步论证。

由式 (1-5) 可知， $U_{ab} = -U_{ba}$ 。如果  $U_{ab} > 0$ ，则  $V_a > V_b$ ，说明  $a$  点电位高于  $b$  点电位；反之当  $U_{ab} < 0$  时，则  $V_a < V_b$ ，说明  $a$  点电位低于  $b$  点电位。

**例 1-4** 已知  $V_a = 10V$ ， $V_b = -10V$ ， $V_c = 5V$ ，求  $U_{ab}$  和  $U_{bc}$  各为多少？

**解** 根据电位与电压的关系可知

$$U_{ab} = V_a - V_b = 10V - (-10V) = 20V$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = -10V - 5V = -15V$$

#### 四、电功率

电功率是电路分析中常用的一个物理量。电路传送或转换电能的速率叫做电功率，简称为功率，用  $P$  或  $p$  表示。习惯上，把发出或吸收电能说成发出或吸收功率。

分析电路的功率时，当电路的电流、电压选择关联参考时，用公式

$$P = UI \text{ 或 } p = ui \quad (1-6)$$

来计算。当电路的电流、电压选择非关联参考时，用公式

$$P = -UI \text{ 或 } p = -ui \quad (1-7)$$

来计算。对于计算结果，当  $P > 0$ （或  $p > 0$ ）时，该电路吸收（接受、消耗）功率；当  $P < 0$ （或  $p < 0$ ）时，该电路发出（释放、产生）功率。

为了使电气设备在工作中的温度不超过最高允许温度，对通过它的最大允许电流有一个限制，通常把这个限定的电流值称为电气设备的额定电流，用  $I_N$  表示。为了限制电气设备的电流以及限制绝缘材料所承受的电压，对允许加在各电气设备上的电压也有一个限制值，通常把这个限定的电压值叫做电气设备的额定电压，用  $U_N$  表示。电气设备的额定电流和额定电压的乘积就等于它的额定功率，用  $P_N$  表示。

功率的国际单位为瓦特，简称瓦，符号为  $W$ ， $1W = 1V \cdot A$ 。功率与时间的乘积为该段时间内电路转换的能量。能量的国际单位为焦耳（ $J$ ）。如果功率的单位为  $kW$ （ $= 10^3W$ ），时间的单位为小时（ $h$ ），所转换电能的单位为千瓦·小时，又称度，符号为  $kWh$ 。

一个电路中，每一瞬间吸收电能的各元件功率的总和等于发出电能的各元件功率的总和；或者说，所有元件吸收的功率总和为零，符合能量守恒定律，称“电路的功率平衡”。

**例 1-5** (1) 在图 1-10a 中，若  $I_{ab} = 1A$ ，试求该元件的功率；

(2) 在图 1-10b 中，若  $I_{ab} = 1A$ ，试求该元件的功率；

(3) 在图 1-10c 中，若元件

发出功率  $6W$ ，试求电流。

图 1-10 例 1-5 图

**解** (1) 电压、电流为关联参考，所以  $P = UI = 2V \times 1A = 2W > 0$ ，元件吸收功率  $2W$ 。

(2) 电压、电流为非关联参考，所以  $P = -UI = -(-2)V \times 1A = 2W > 0$ ，元件吸收功率  $2W$ 。

(3) 选择电流方向为  $I_{ab}$ ，则与电压非关联，所以  $P = -UI_{ab} = -2I_{ab}$ ，因元件发出功率 6W，所以  $P = -6W = -2I_{ab}$ ，求得  $I_{ab} = 3A$ ，因此元件电流方向为从  $a$  到  $b$ ，大小为 3A。

## 思考题

1. 为什么要在电路图上规定电流的参考方向？请说明参考方向与实际方向的关系。
2. 电压参考方向有哪些表示方法？
3. 电位与电压有何异同？
4. 当元件电流、电压选择关联参考方向时，什么情况下元件接受功率？什么情况下元件发出功率？

## 第三节 电路的状态及电源

### 一、电路的三种工作状态

#### 1. 通路

通路是指电源与负载构成了闭合回路，电流从电源出发，经过负载后可回到电源的状态。通路状态根据负载大小可分为以下三种情况。

- (1) 轻载 负载低于额定功率下的工作状态。
- (2) 满载 负载在额定功率下的工作状态。
- (3) 过载 负载高于额定功率下的工作状态，又叫超载。

显然，轻载没有充分利用负载设备，过载容易烧坏电器设备，前者可以将就使用，后者一般不允许长时间出现。

#### 2. 断路（开路）

断路又称开路，是指电源与负载没有接成闭合通路，负载中没有电流的状态。

断路可以分为控制性断路和故障性断路。控制性断路是人们根据需要利用开关将处于通路状态的电路断开；故障性断路是一种突发性、意想不到的断路状态。例如，在实际电路中，电源与负载之间的连接导线松脱，负载与导线金属部分接触不良，都会引起断路故障。所以在接线时要牢固可靠，尽量避免断路故障发生。

#### 3. 短路

短路是指电流从电源出发，不经负载而经导体直接回到电源的状态，如图 1-11 所示。

图中实线箭头表示  $A$ 、 $B$  间发生了短路。由于这时电路中的电阻近似为零，因此电路中的短路电流比灯丝正常发光时的电流大几十或几百倍。这样大的短路电流通过电路将产生大量的热，使导线温度迅速升高，不仅损坏导线、电源和其他电器设备，严重时还会引起火灾。所以，一般电路上都加短路保护装置，如图 1-11 所示的熔断器 FU。

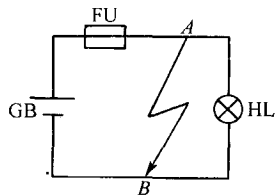


图 1-11 短路故障

### 二、电源

#### 1. 电源的电动势

电路通路中，电场力总是使正电荷从高电位处经外电路移向低电位处，而在电源内部有

一种电源力，正电荷在它的作用下，从低电位处经电源内部移向高电位处，从而保持电荷运动的连续性。电源力是由化学作用或电磁作用产生的。

电动势是电源的专用名词之一。电动势是指电源力将单位正电荷  $q$  从电源负极经电源内部移到电源正极所作的功，用字母  $E$  或  $e$  表示，方向规定为从电源负极到正极。若所作的功为  $W$ ，则有

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-8)$$

可见，与电压求法相同，电动势的大小与电源两端电压的大小相等，单位一样；也是伏特 (V)。

电源电压方向是从正极到负极，电动势的方向是从负极到正极，所以当电源开路时电源的电动势与电压大小相等，方向相反。采用参考方向时，电源电压方向与电动势的方向有如图 1-12 所示的关系。

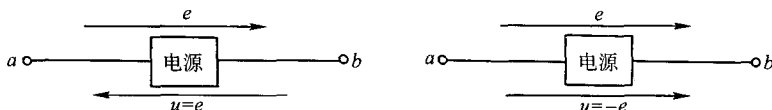


图 1-12 电源电动势与电压的关系

电动势为直流量的电源称为直流电源，电动势为交流量的电源称为交流电源。

## 2. 电源的外特性

下面以直流电源为例来说明电源的外特性。

电源的外特性就是电源处于工作状态时，其端电压  $U$  与端子电流  $I$  的关系。如图 1-13 所示，若直流电源的电动势为  $E$ ，内阻为  $R_0$ ，则其端电压  $U$  与电流  $I$  的关系满足公式

$$U = E - U_{R_0} = E - IR_0 \quad (1-9)$$

其中， $I = \frac{E}{R + R_0}$ 。对于给定的电源， $E$  和  $R_0$  是不变的。当负载电阻  $R \rightarrow \infty$  时（相当于电路断路）， $I = 0$ ， $U = E$ ，即电源的电动势在数值上等于开路电压。人们利用这一特性，用电压表来简单测量电源的电动势。当负载电阻  $R$  变小时，引起电流  $I$  变大，内阻  $R_0$  的电压降也变大，端电压  $U$  就跟着变小，其变化规律如图 1-14 所示，称电源的外特性曲线。当负载电阻  $R = 0$  时（即短路）， $I = \frac{E}{R_0}$ 。由于电源的内阻一般都很小，因而电路的电流比正常工作电流大很多，如果没有熔断器，会导致电源和导线烧坏。

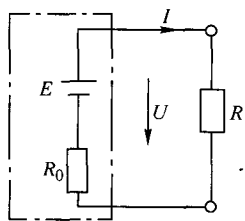


图 1-13 电源工作电路

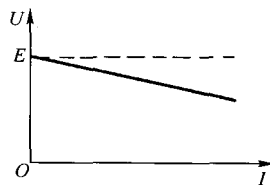


图 1-14 电源的外特性曲线

### 3. 电压源和电流源

具有较低内阻的电源称为电压源，分为直流电压源与交流电压源。大多数实际电源如干电池、铅蓄电池及一般直流发电机都可视为直流电压源。

若电源的内阻  $R_0 \approx 0$ ，可忽略不计，即认为电源供给的电压总是等于它的电动势。我们把内阻为零的电压源称为理想电压源，用  $U_S$  或  $u_S$  表示。理想的直流电压源也简称为恒压源，其外特性是  $U_S = E$  这样一条水平直线，如图 1-15 所示。电压源的符号如图 1-16a 所示，恒压源也可表示成如图 1-16b 所示的符号。

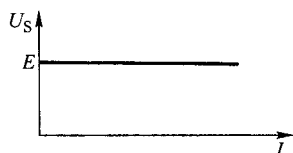


图 1-15 理想直流电压源的外特性

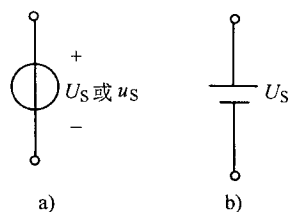


图 1-16 理想电压源的符号

恒压源只是一种理想的情况，实际电源不可能如此。电动势为  $E$ 、内阻为  $R_0$  的电压源可以等效为恒压源  $U_S = E$  和电阻  $R_0$  串联，如图 1-17 所示。

一般用电设备所需的电源，多数是需要它输出较为稳定的电压，这要求电源的内阻越小越好，也就是要求实际电源的特性与理想电压源尽量接近。

但是，并非在任何情况下都是要求电源的内阻越小越好。某些特殊场合，却要求电源具有很大的内阻，这是因为高内阻的电源能够输出一个较稳定的电流。

例如，将 60V 蓄电池串联一个  $60\text{k}\Omega$  的高内阻，如图 1-18a 所示，即构成一个最简单的高内阻电源。它对于低阻负载，基本上具有稳定的电流输出。当负载电阻  $R$  在零至几十欧姆的范围内变化时，电源输出的电流

$$I = \frac{60\text{V}}{60000\Omega + R} \approx 0.001\text{A} = 1\text{mA}$$

几乎保持不变。可见，当低电阻的负载在一定范围内变化时，具有高内阻的电源输出的电流基本上恒定，电源内阻越高，输出的电流越接近于恒定。

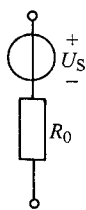


图 1-17 电压源电路

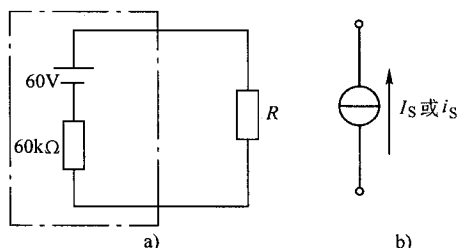


图 1-18 理想电流源

我们把内阻无限大的电源称为理想电流源，用  $I_S$  或  $i_S$  表示，符号如图 1-18b 所示。能输出恒定电流的电流源又叫做恒流源。

恒流源与恒压源都属于理想元件，其输出的电流或电压是不随外部电路变化的，又叫做独立源，实际上是不存在的。实际电流源的性能只是在一定范围内接近理想电流源。例如，晶体管工作于放大状态时就接近于恒流源。

把电流为  $I_S$  或  $i_s$  的理想电流源与电阻  $R_0$  并联的电路定义为电流源，如图 1-19 所示。电流源是实际电源的另一种表示方法，在一定条件下，电流源与电压源可等效互换，后面将要进一步学习。

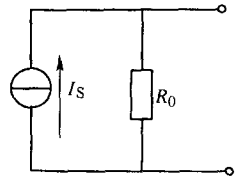


图 1-19 电流源电路

## 思考题

1. 如何区分电路的三种工作状态？
2. 简述电源电动势与电源电压的关系。
3. 恒压源的电流是怎样确定的？恒流源的电压是怎样确定的？分别举例说明。
4. 画出实际电源的两种表示电路。

## 第四节 电阻及其连接

### 一、电阻

物体对电流的阻碍作用叫做电阻作用。电阻作用使得电流流过物体时把电能转换成其他形式的能量。电阻是表示物体电阻作用大小的一个物理量，用字母  $R$  或  $r$  表示。

电阻的单位是欧姆，简称欧，符号为  $\Omega$ 。常用的电阻单位还有千欧 ( $k\Omega$ )、兆欧 ( $M\Omega$ ) 等。

电阻的倒数叫电导，用字母  $G$  表示，即  $G = \frac{1}{R}$ 。电导的单位为西门子 (S)。

电阻反映了导体的导电能力，是导体的客观属性，它的大小与导体的材料、长度以及导体横截面面积有关，还与导体所处的环境温度有关。实验证明，在一定温度下，导体的电阻与导体的长度成正比，与导体的横截面积成反比，即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-10)$$

式中  $L$ ——导体的长度，单位为 m；

$S$ ——导体的横截面积，单位为  $m^2$ ；

$\rho$ ——电阻率，是反映导体材料性质的物理量，单位为  $\Omega \cdot m$ ；

$R$ ——导体的电阻，单位为  $\Omega$ 。

电阻与温度的关系可以用电阻温度系数来表示。所谓电阻温度系数是指温度升高  $1^\circ C$  时，电阻所产生的变化量与原电阻的比值。如果温度由  $T_1$  变到  $T_2$ ，导体电阻由  $R_1$  变到  $R_2$ ，则电阻温度系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (1-11)$$

式中  $\alpha$ ——温度系数，单位为  $1/^\circ C$ 。

表 1-2 是几种材料的电阻率及温度系数。



表 1-2 几种材料的电阻率及温度系数

材料名称	电阻率 $\rho$ /( $\Omega \cdot m$ )	电阻温度系数 $\alpha$ /( $1/^\circ C$ )	材料名称	电阻率 $\rho$ /( $\Omega \cdot m$ )	电阻温度系数 $\alpha$ /( $1/^\circ C$ )
银	$1.6 \times 10^{-8}$	0.0036	铁	$10 \times 10^{-8}$	0.006
铜	$1.7 \times 10^{-8}$	0.004	碳	$35 \times 10^{-8}$	0.0005
铝	$2.9 \times 10^{-8}$	0.004	锰铜	$44 \times 10^{-8}$	0.000005
钨	$5.3 \times 10^{-8}$	0.0028	锰白铜	$50 \times 10^{-8}$	0.000005

**例 1-6** 已知电动机的绕组由铜线绕成, 在室温  $26^\circ C$  时测的电阻为  $1.25\Omega$ , 运行 3h 后测得电阻增加到  $1.5\Omega$ 。问此时电动机绕组的温度是多少?

**解** 已知  $R_1 = 1.25\Omega$ ;  $R_2 = 1.5\Omega$ ;  $T_1 = 26^\circ C$

查表  $\alpha = 0.004$ , 根据式 (1-11) 得

$$T_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \alpha} + T_1 = \left( \frac{1.5 - 1.25}{1.25 \times 0.004} + 26 \right) ^\circ C = 76^\circ C$$

答: 此时电动机绕组的温度是  $76^\circ C$ 。

## 二、欧姆定律

德国物理学家欧姆于 1827 年在大量实验的基础上总结出来关于电压、电流和电阻三者关系的定律, 称欧姆定律, 应用于计算电路中电压、电流和电阻三个物理量。

实验证明: 在一段电路中, 通过电路的电流大小与这段电路两端的电压大小成正比, 与这段电路的电阻值成反比。用公式表示为

$$|I| = \frac{|U|}{R}$$

电流流过电阻时, 将电能转换为其他形式的能量, 所以电阻上的电压与电流的方向总是是一致的。当电阻电压、电流选择关联参考时, 欧姆定律表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-12)$$

当电阻电压、电流选择非关联参考时, 欧姆定律表达式为

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -IR \quad (1-13)$$

当电阻上的电流、电压是交流值时, 式 (1-12)、式 (1-13) 中的字母  $U$ 、 $I$  应为小写字母。

欧姆定律是用金属导体做实验总结出来的, 对电解液导电也基本适用, 但对气体导电就不适用了。

**例 1-7** 列出图 1-20 所示各电路的电压、电流关系式, 并求  $R$ 。

**解** (a) 关联参考  $U = IR$ ;  $R = \frac{U}{I} = \frac{6V}{2A} = 3\Omega$

(b) 非关联参考  $U = -IR$ ;  $R = -\frac{U}{I} = -\frac{6V}{-2A} = 3\Omega$

(c) 非关联参考  $U = -IR$ ;  $R = -\frac{U}{I} = -\frac{-6V}{2A} = 3\Omega$

(d) 关联参考  $U = IR$ ;  $R = \frac{U}{I} = \frac{-6V}{-2A} = 3\Omega$