

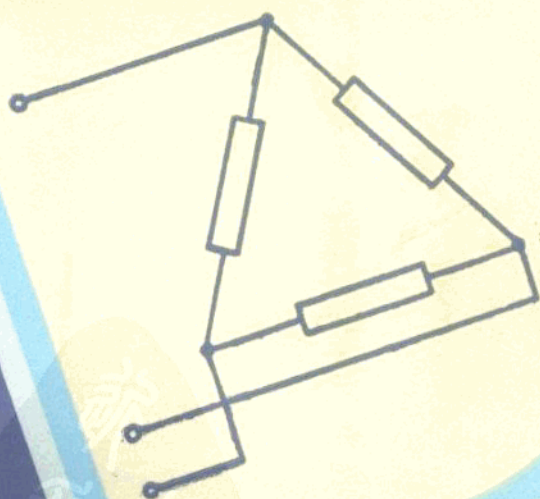
电  
工  
技  
术  
  
(第2版)

高等学校教材

# 电工技术

(第2版)

主编 叶文孙 史国栋



机械工业出版社

高等学校教材

# 电工技术

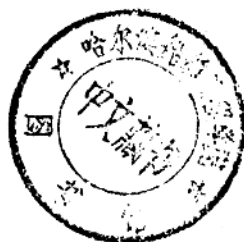
(第2版)

主 编 叶文孙 史国栋

副主编 吴显义 赵希炎

米玉芬

主 审 张英书



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书第2版是根据国家教委颁发的高等工业学校《电工技术》和《电子技术》两门课程的教学基本要求,结合农业工程类各专业的特点,在第1版多年使用的基础上,考虑到内容的继承和更新的关系而重新编写的。全套书仍分《电工技术》、《电子技术》、《电工电子实验技术》等三册。

《电工技术》的主要内容包括:直流电路的分析方法;单相交流电路;三相交流电路;电路的时域分析;磁路与变压器;异步电动机;同步电机;直流电机;电气控制线路;高低压配电共十章。同时,配备了一定数量与教材密切结合的例题和习题。

本书参考学时为55~70学时。可作为高等农业院校以及职大、夜大的《电工技术》教材,也可供农业工程技术人员参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

电工技术/叶文孙,史国栋主编.—北京:机械工业出版社,1994.10  
高等学校教材  
ISBN 7-111-04334-0

I. 电…  
II. ①叶…②史…  
III. 电工技术-高等学校-教材  
IV. TM

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第05733号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)  
责任编辑:蔡耀辉 版式设计:张世琴 责任校对:肖新民  
封面设计:姚毅 责任印制:路琳

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1991年9月第1版·1994年10月第2版·1994年10月第2次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/16·17印张·412千字

8 251—17 250册

定价:13.75元

## 前 言

本套系列教材的第1版于1991年出版。根据国家教委对高等学校工科类非电专业电类课程的要求,吸取各院校对教材的使用意见和建议,修正第1版中的疏漏和错误之处,增删部分内容,使教材更加适应农业工程类各专业的需要。全国农业院校电工学研究会主持和组织教材第2版的编写工作。其中基本教材仍分《电工技术》、《电子技术》两册,每册参考学时为55~70小时。有关实践性教学内容和部分技术资料编入配套的《电工电子实验技术》一书,这些内容不在基本教材中反映。

教材第2版的主要特点可归纳为:

1. 修正了第1版中疏漏及错误之处;
2. 更进一步突出专业特点,兼顾农业工程类各专业的需要,扩大了使用范围;
3. 删去了部分内容,增加了新知识结构,反映出电工、电子技术的新动向;
4. 教材在体系上更加严谨、系统,教材内容符合课程的教学要求,通篇叙述深入浅出,便于读者自学;
5. 精选一定数量的例题和习题,旨在除帮助读者正确理解、巩固掌握教材内容外,尚有拓宽延伸教材内容、启迪学生能力之意。

参加本套系列教材第1版修订和第2版编写的单位有沈阳农业大学、河北农业大学、安徽农业大学、河南农业大学、内蒙古农牧学院、山西农业大学、贵州农学院、东北农业大学、山东农业大学、浙江农业大学等十所院校。

本书由叶文孙、史国栋副教授任主编,吴显义教授、赵希炎、米玉芬副教授任副主编,张英书教授主审。

本书共十章。第一、二章由史国栋王其红编写;第三、四章由叶文孙编写;第五章由吴显义编写;第六章由俎云霄编写;第七章由赵希炎编写;第八章由吴桂珍编写;第九章由张曙光编写;第十章由赵希炎、米玉芬编写。

参加本书第1版编写的还有年福谦、罗仲山、赵国忠等。

由于我们水平有限,书中疏漏错误仍恐难免,恳请使用本书的教师和读者批评指正。

编 者  
1994年4月

# 目 录

|                          |    |                                     |    |
|--------------------------|----|-------------------------------------|----|
| 第一章 直流电路的分析方法 .....      | 1  | § 2-4 RLC串联交流电路 .....               | 50 |
| § 1-1 电路的组成及其基本物理量 ..... | 1  | 一、广义欧姆定律、复阻抗 .....                  | 51 |
| 一、电路的组成及功能 .....         | 1  | 二、各电物理量之间的关系 .....                  | 51 |
| 二、电路模型 .....             | 1  | § 2-5 RLC并联交流电路 .....               | 55 |
| 三、电路中的基本物理量 .....        | 2  | 一、RLC并联交流电路的相量分析 .....              | 55 |
| § 1-2 电路的工作状态 .....      | 8  | 二、复导纳 .....                         | 56 |
| 一、有载运行状态与额定值 .....       | 8  | 三、电感性电路功率因数的提高 .....                | 57 |
| 二、开路状态 .....             | 9  | § 2-6 RC电路的频率特性 .....               | 59 |
| 三、短路状态 .....             | 9  | § 2-7 电路中的谐振 .....                  | 61 |
| § 1-3 基尔霍夫定律 .....       | 10 | 一、串联谐振 .....                        | 62 |
| 一、基尔霍夫节点电流定律 .....       | 11 | 二、并联谐振 .....                        | 64 |
| 二、基尔霍夫回路电压定律 .....       | 11 | § 2-8 复杂正弦电路的相量分析 .....             | 67 |
| § 1-4 电压源与电流源的等效变换 ..... | 12 | 一、复阻抗的串联 .....                      | 67 |
| 一、实际电源的两种模型 .....        | 13 | 二、复阻抗的并联 .....                      | 67 |
| 二、电源的等效变换 .....          | 15 | 三、复阻抗的混联 .....                      | 68 |
| § 1-5 支路电流法 .....        | 17 | § 2-9 非正弦交流电路 .....                 | 72 |
| § 1-6 节点电压法 .....        | 18 | 一、周期函数分解为傅里叶级数 .....                | 73 |
| § 1-7 叠加定理 .....         | 21 | 二、非正弦周期量的有效值 .....                  | 73 |
| § 1-8 等效电源定理 .....       | 23 | 小结 .....                            | 75 |
| 一、二端网络 .....             | 23 | 习题 .....                            | 76 |
| 二、戴维南定理 .....            | 24 | 第三章 三相交流电路 .....                    | 83 |
| 三、诺顿定理 .....             | 25 | § 3-1 三相交流电源 .....                  | 83 |
| 小结 .....                 | 26 | 一、对称三相电动势的产生 .....                  | 83 |
| 习题 .....                 | 27 | 二、三相电源的联接 .....                     | 84 |
| 第二章 单相交流电路 .....         | 33 | § 3-2 负载星形联结的三相电路 .....             | 86 |
| § 2-1 正弦交流电的基本概念 .....   | 33 | 一、三相四线制电路的相量分析 .....                | 86 |
| 一、正弦量的三要素 .....          | 33 | 二、对称三相负载星形联结的三相电路 .....             | 87 |
| 二、同频率正弦量的相位差 .....       | 35 | 三、不对称三相负载星形联结的三相电<br>路及中性线的作用 ..... | 88 |
| 三、正弦量的有效值 .....          | 36 | 四、相序指示电路 .....                      | 90 |
| § 2-2 正弦量的表示方法 .....     | 38 | § 3-3 负载三角形联结的三相电路 .....            | 92 |
| 一、复数的概念及其运算 .....        | 38 | § 3-4 三相电路的功率 .....                 | 93 |
| 二、正弦量的相量表示 .....         | 41 | 小结 .....                            | 96 |
| 三、相量形式的基尔霍夫定律 .....      | 43 | 习题 .....                            | 97 |
| § 2-3 单一参数的交流电路 .....    | 43 | 第四章 电路的时域分析 .....                   | 99 |
| 一、电阻电路 .....             | 43 | § 4-1 基本概念 .....                    | 99 |
| 二、电感电路 .....             | 45 | 一、网络的时域响应 .....                     | 99 |
| 三、电容电路 .....             | 47 |                                     |    |

|                                   |     |                                                                |     |
|-----------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------|-----|
| 二、换路定则和储能电路中电流、电压<br>初始值的确定 ..... | 100 | 小结 .....                                                       | 141 |
| § 4-2 RC电路的时域响应 .....             | 102 | 习题 .....                                                       | 142 |
| 一、RC串联电路输入阶跃电压时的响应 .....          | 102 | 第六章 异步电动机 .....                                                | 143 |
| 二、RC串联电路的零输入响应 .....              | 107 | § 6-1 三相异步电动机的结构 .....                                         | 143 |
| 三、RC电路的时间常数 .....                 | 108 | 一、定子 .....                                                     | 143 |
| § 4-3 微分电路和积分电路 .....             | 110 | 二、转子 .....                                                     | 143 |
| 一、微分电路 .....                      | 110 | 三、气隙 .....                                                     | 144 |
| 二、积分电路 .....                      | 111 | § 6-2 三相异步电动机的工作原理 .....                                       | 144 |
| § 4-4 RL电路的时域响应 .....             | 112 | 一、基本工作原理 .....                                                 | 144 |
| 一、RL串联电路输入阶跃电压时的响应 .....          | 112 | 二、三相异步电动机的旋转磁场 .....                                           | 145 |
| 二、RL串联电路的零输入响应 .....              | 115 | § 6-3 三相异步电动机的电磁转矩与<br>机械特性 .....                              | 149 |
| 三、RL电路的断开 .....                   | 116 | 一、电磁转矩 .....                                                   | 149 |
| 小结 .....                          | 118 | 二、机械特性 .....                                                   | 152 |
| 习题 .....                          | 119 | § 6-4 三相异步电动机的使用 .....                                         | 154 |
| 第五章 磁路与变压器 .....                  | 122 | 一、铭牌 .....                                                     | 154 |
| § 5-1 磁路的基本概念 .....               | 122 | 二、三相异步电动机的起动 .....                                             | 156 |
| 一、磁路 .....                        | 122 | 三、三相异步电动机的反转 .....                                             | 160 |
| 二、磁路中的基本物理量 .....                 | 123 | 四、三相异步电动机的制动 .....                                             | 160 |
| 三、磁路的欧姆定律 .....                   | 123 | 五、三相异步电动机的调速 .....                                             | 161 |
| 四、铁磁物质的磁化曲线 .....                 | 124 | § 6-5 三相异步电动机的选择 .....                                         | 163 |
| 五、交流铁心线圈 .....                    | 125 | 一、类型的选择 .....                                                  | 163 |
| § 5-2 变压器的基本结构 .....              | 127 | 二、结构形式的选择 .....                                                | 163 |
| § 5-3 变压器的工作原理 .....              | 129 | 三、转速的选择 .....                                                  | 163 |
| 一、变压器的空载运行及电压变换 .....             | 129 | 四、容量的选择 .....                                                  | 163 |
| 二、变压器的负载运行及电流变换 .....             | 130 | § 6-6 单相异步电动机 .....                                            | 165 |
| 三、变压器的阻抗变换 .....                  | 131 | 一、结构特点和基本原理 .....                                              | 165 |
| § 5-4 变压器的运行特性 .....              | 133 | 二、电容分相式异步电动机 .....                                             | 167 |
| 一、变压器的外特性与电压调整率 .....             | 133 | 三、单相异步电动机的反转和调速 .....                                          | 167 |
| 二、变压器的损耗与效率 .....                 | 133 | 小结 .....                                                       | 169 |
| § 5-5 变压器绕组的极性及其测定 .....          | 133 | 习题 .....                                                       | 170 |
| 一、绕组的极性与正确联接 .....                | 133 | 第七章 同步电机 .....                                                 | 172 |
| 二、绕组极性的测定方法 .....                 | 134 | § 7-1 基本结构形式 .....                                             | 172 |
| § 5-6 三相变压器 .....                 | 135 | 一、同步电机的基本类型 .....                                              | 172 |
| 一、三相变压器绕组的联接及其电压<br>关系 .....      | 135 | 二、同步电机的基本结构 .....                                              | 172 |
| 二、变压器的额定值 .....                   | 136 | § 7-2 同步发电机的空载运行 .....                                         | 174 |
| § 5-7 特殊用途的变压器 .....              | 137 | 一、空载时的相电动势 .....                                               | 174 |
| 一、自耦变压器 .....                     | 137 | 二、同步发电机的空载特性 .....                                             | 176 |
| 二、仪用互感器 .....                     | 137 | § 7-3 对称负载时的电枢反应 .....                                         | 176 |
| 三、电焊变压器 .....                     | 139 | 一、 $i$ 与 $E_0$ 同相( $\psi = 0^\circ$ )时的电枢反应 .....              | 176 |
| § 5-8 电磁铁 .....                   | 140 | 二、 $i$ 滞后于 $E_0 90^\circ$ ( $\psi = 90^\circ$ )的电<br>枢反应 ..... | 177 |

|                                                               |     |                            |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 三、 $i$ 超前于 $E_0 90^\circ$ ( $\psi = -90^\circ$ ) 时的电枢反应 ..... | 177 | § 9-2 继电器-接触器控制的基本线路 ..... | 205 |
| 四、一般情况 ( $\psi$ 为任意值) 时的电枢反应 .....                            | 177 | 一、笼型电动机直接起停的控制线路 .....     | 205 |
| § 7-4 同步发电机的运行特性 .....                                        | 178 | 二、笼型电动机正反转的控制线路 .....      | 207 |
| 一、电压方程、相量图和等效电路 .....                                         | 178 | 三、点动控制线路 .....             | 208 |
| 二、外特性 .....                                                   | 180 | 四、次序控制线路 .....             | 208 |
| 三、调整特性 .....                                                  | 181 | § 9-3 电力拖动的基本控制方法 .....    | 209 |
| § 7-5 同步发电机的励磁方式 .....                                        | 182 | 一、行程控制 .....               | 209 |
| 一、直流励磁机 .....                                                 | 182 | 二、时间控制 .....               | 213 |
| 二、交流励磁机 .....                                                 | 182 | 三、速度控制 .....               | 215 |
| 三、三次谐波励磁 .....                                                | 183 | § 9-4 控制线路应用举例 .....       | 216 |
| 小结 .....                                                      | 183 | 一、C620 车床的自动控制线路 .....     | 216 |
| 习题 .....                                                      | 184 | 二、X53T 立式铣床升降的控制线路 .....   | 217 |
| 第八章 直流电机 .....                                                | 185 | 三、螺杆青饲切碎机的自动控制线路 .....     | 219 |
| § 8-1 直流电机的构造和工作原理 .....                                      | 185 | § 9-5 三相异步电动机的断相保护装置 ..... | 220 |
| 一、直流电机的构造 .....                                               | 185 | 一、关于断相运行 .....             | 220 |
| 二、直流电机的工作原理 .....                                             | 186 | 二、断相保护装置 .....             | 221 |
| § 8-2 直流电机的电动势和电磁转矩 .....                                     | 187 | § 9-6 继电器接触控制线路的设计 .....   | 224 |
| 一、电动势 .....                                                   | 187 | 一、控制线路设计的程序和一般原则 .....     | 224 |
| 二、电磁转矩 .....                                                  | 188 | 二、设计控制线路的基本方法和步骤 .....     | 227 |
| § 8-3 直流电机按励磁方式分类 .....                                       | 189 | 三、控制线路设计举例 .....           | 227 |
| 一、他励电机 .....                                                  | 189 | § 9-7 电气接线图 .....          | 229 |
| 二、并励电机 .....                                                  | 189 | 小结 .....                   | 230 |
| 三、串励电机 .....                                                  | 189 | 习题 .....                   | 231 |
| 四、复励电机 .....                                                  | 189 | 第十章 高低压配电 .....            | 239 |
| § 8-4 汽车、拖拉机用直流发电机 .....                                      | 189 | § 10-1 电力系统概述 .....        | 239 |
| 一、并励直流发电机 .....                                               | 190 | 一、系统组成 .....               | 239 |
| 二、硅整流交流发电机 .....                                              | 192 | 二、电压等级 .....               | 240 |
| § 8-5 汽车、拖拉机用直流串励电动机 .....                                    | 194 | 三、负荷分类 .....               | 241 |
| 一、直流串励电动机的特点 .....                                            | 194 | § 10-2 配电变压器及其选择 .....     | 241 |
| 二、串励电动机的机械特性 .....                                            | 195 | 一、配电变压器的组成 .....           | 241 |
| 小结 .....                                                      | 195 | 二、配电变压器选择原则 .....          | 242 |
| 习题 .....                                                      | 196 | § 10-3 高压配电装置 .....        | 245 |
| 第九章 电气控制线路 .....                                              | 197 | 一、高压设备 .....               | 245 |
| § 9-1 常用控制电器 .....                                            | 197 | 二、主结线 .....                | 248 |
| 一、组合开关 .....                                                  | 197 | 三、避雷器 .....                | 250 |
| 二、按钮 .....                                                    | 198 | § 10-4 低压配电盘 .....         | 250 |
| 三、交流接触器 .....                                                 | 199 | 一、低压配电盘 .....              | 250 |
| 四、中间继电器 .....                                                 | 201 | 二、接线图 .....                | 251 |
| 五、热继电器 .....                                                  | 201 | 三、导线截面的选择 .....            | 252 |
| 六、熔断器 .....                                                   | 204 | § 10-5 电力排灌站的电气布置 .....    | 254 |
|                                                               |     | 一、电气设备的总体布置 .....          | 254 |
|                                                               |     | 二、厂房内电气设备的布置 .....         | 255 |

|                        |     |            |     |
|------------------------|-----|------------|-----|
| § 10-6 节约用电与安全用电 ..... | 258 | 小结 .....   | 263 |
| 一、节约用电的意义和方法 .....     | 258 | 习题 .....   | 263 |
| 二、安全用电 .....           | 259 | 参考文献 ..... | 264 |

# 第一章 直流电路的分析方法

本章内容的介绍是在物理学、电学部分有关内容的基础上进行的。首先明确电路中的几个基本物理量，即电压、电流、电动势正方向的意义，提出了电路的几种工作状态和额定值；电源的电路模型及其等效性等基本概念。针对电工、电子技术课程的要求，重点讨论电路的基本定理、基本定律和基本分析方法。

虽然本章讨论的是直流电路，但这些基本规律和分析方法只要稍加扩展，对交流电路也是适用的。

## § 1-1 电路的组成及其基本物理量

### 一、电路的组成及功能

电路是由若干电工设备或电气元件组成的电流通路，简言之，电路即为电流所通过的闭合路径。在现代生活和生产实际的各个领域，人们常接触到许多形式和功能各异的具体电路。例如手电筒电路、拖拉机电气设备电路和各种自动控制电路。

图1-1是手电筒实物电路，它由电池、灯泡和导线、开关等组成。

任何一个实际电路，无论其复杂程度如何，都无一例外地包括电源（信号源）、负载和中间环节这三个要素。

电源是电路中电能的来源，如图1-1中的干电池。电源的基本功能是将其他形式的能量转换成电能，如电池将化学能转换成电能，发电机将机械能转换成电能。

负载是电路中接受电能、吸收电能并将电能转变为光能、热能、机械能等非电能量或电信号（电压、电流）的元件，如电灯泡、电阻炉、电动机等。在直流电路中，负载主要是电阻性的，其本质是当电流流过时呈现一定的阻力，即有一定大小的电阻，并将电能转换成热能。

中间环节主要包括连接导线和一些控制电器。它们连接于电源和负载之间，在电能的传递过程中起着调整、分配和保护作用。

电路（或网络）是由许多电气元件或设备为实现能量的转换或实现信息的传递和处理而构成的组合的总称。

### 二、电路模型

为了研究电路的基本规律，掌握电路元件的最本质的物理特性，就必须对电源、负载、中间环节中各种实际电路元件，进行科学概括与抽象，也就是说要用一些模型（理想电路元件）来代表实际电路元件的外部功能，并将这些模型元件按照一定的规则进行组合，使它在主要电磁性能上与实际元件或装置相同。需要指出的是，模型元件仅是实际元件的近似模拟，并不是实际元件本身。而电路理论要研究的正是这些经过抽象化或理想化的电路模型。

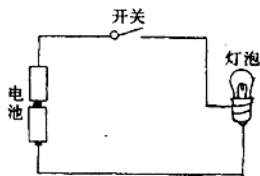
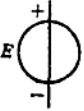


图1-1 手电筒电路

模型元件一般可分为两类：第一类是具有实际的电路元件与其对应，它是实际电路元件的理想化，如只表示消耗电能的理想电阻元件  $R$ （如白炽灯、电阻炉等）；只表示存储磁场能量的理想电感元件  $L$ ；只表示存储电场能量的理想电容元件  $C$ ，另外还有理想电压源和理想电流源等。第二类是没有直接与它们对应的实际电路元件，但将其组合后，却能反映一些比较复杂电路元件的主要特性及其外部功能，如分析电子线路的受控源元件。

模型元件在电路中用相应的符号来表示。电阻、电感和电容元件这些符号读者已熟悉。

干电池的符号是 ，理想电压源的符号则是 ，理想电流源的符号是 。

本着用电路模型替代实际电路的原则，前面我们提及的手电筒电路就可图1-2表示。

### 三、电路中的基本物理量

在电工技术中，实验和理论分析是解决电路问题的两种方法。理论分析方法是对具体电路先画出电路模型，然后作定性或定量分析计算。在进行这种分析研究时，就必须用到象电流、电压、电动势和功率等基本物理量。再根据基本电磁关系，对这些基本物理量列写方程式，其中还涉及到有关电物理量的正方向问题。正方向在电路分析中是一个极为重要的概念，它贯穿于本教材的全部内容。

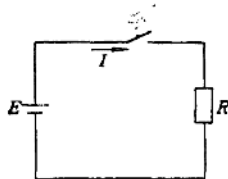


图1-2 用电路符号绘制的电路图

#### 1. 电流

##### (1) 电流的大小

电流的大小用电流强度来表示。电流强度简称电流，它是指单位时间内通过导线横截面的电荷量，表示为：

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

假如电流为恒定的，即式(1-1)的比值为常数，就称为直流电，式(1-1)可改写为：

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

##### (2) 电流的单位

在我国法定计量单位中电流的单位是安培(A)，简称安。较小的电流可采用毫安(mA)和微安( $\mu$ A)等作单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} = 10^{-3} \text{ mA} \end{aligned}$$

##### (3) 电流的方向

电荷的定向运动形成电流。习惯上规定正电荷运动的方向作为电流的实际方向。电流的方向是客观存在的，但在分析比较复杂的电路时，往往难以判断某支路电流的实际方向，而且有时电流的方向还随时间交变（如正弦交流电），更难于表示出实际方向。为了解决这一困难，我们引入正方向（参考方向）的概念。即在分析电路之前，完全不考虑实际方向，而是假设一个电流方向，这个假定的电流方向称为电流的正方向，或称为参考方向。

正方向可以任意选定，在电路中用箭头或用双下标的变量表示，如图1-3所示。图1-3 a中，电流的正方向可写为 $I_{ab}$ ，表示电流从 $a$ 点流向 $b$ 点，显然 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

我们规定：

如果电流的正方向与实际方向一致，则电流为正值；如果电流的正方向与实际方向相反，则电流为负值。这样就可利用电流的正负值并结合正方向来确定电流的实际方向。在图1-4中，电流的正方向为 $a$ 指向 $b$ 且为负值，即 $I_{ab} < 0$ ，则说明电流的正方向与实际方向相反，那么实际电流的流向为从 $b$ 流向 $a$ 。

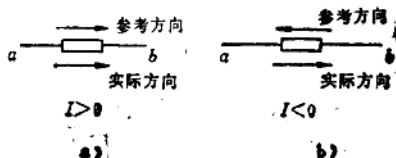


图1-3 用箭头表示电流的正方向

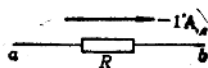


图1-4 电流实际方向的确定

在这里，将有关电流的正方向作一总结。

- (1) 在分析电路前，尽可能假设一个正方向。
- (2) 正方向可以任意选择，但正方向一经选定，电流就成为一个代数量，即有正、负之分。
- (3) 在未标定正方向的情况下，电流的正负值是毫无意义的。
- (4) 今后电路中所标注的电流方向都是正方向，不一定是电流的实际方向。

## 2. 电压与电位

### (1) 电压

在图1-5中，设正电荷 $q$ 从 $a$ 点移到 $b$ 点时，电场力所作的功为 $W$ ，则 $a$ 、 $b$ 两点之间的电压为

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-2)$$



图1-5 电压的概念

可见，电压从能量方面表示了电场力做功的能力，它总是与电路中某两点相联系。则 $a$ 、 $b$ 两点的电压，在数值上等于电场力把单位正电荷从 $a$ 点移到 $b$ 点所作的功。在我国法定计量单位中，电荷量的单位是库仑(C)，功的单位是焦耳(J)，电压的单位是伏特(V)，简称伏，还可采用微伏( $\mu V$ )，毫伏(mV)和千伏(kV)。

$$1\text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1\text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1\text{ }\mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

### (2) 电位

电场中或电路中的某一点到参考点之间的电压，称作该点的电位，它是表示电场或电路中某点性质的物理量。对电位这个概念而言，参考点是很重要的，因为参考点不同，电路中同一点的电位就不一样。参考点的选择是任意的，但在一个电路中，参考点只能选择一个。参考点的选用通常有两种方式：在电力工程中以大地为参考点，用符号“ $\perp$ ”表示；在电子电路中，常取若干导线的交汇点或机壳作为电位的参考点，用符号“ $\perp$ ”表示。人们规定参

考点的电位为零,从这个意义上参考点又称零电位点。

电路中任何一点的电位值是与参考点相比较而得出的,比其高者为正,比其低者则为负。电位与电压的单位相同,也是伏特。

电位与电压在表达形式上虽有区别,但从本质上来讲是相同的。电路中两点之间的电压就是这两点间的电位差值,而电路中某点的电位,则是该点到参考点之间的电压。电位从形式上是指一点,实质上仍然是两点,不过另一点是参考点而已。如图1-6中,选取电源的负极(C点)作为参考点,那么A、B两点的电位对C点而言,分别为 $U_A$ 和 $U_B$ ,而且 $U_A$ 的电位高于 $U_B$ 。A、B两点间的电压 $U_{AB}$ 就是 $U_A$ 与 $U_B$ 之差,即 $U_{AB} = U_A - U_B$ 。所以电压又叫电位差。电位是一个相对量,它与参考点的选取有关,而电压是一个绝对量,在电路中某两点之间的电压是一定的,它与参考点的选取无关。

### (3) 电压的正方向

电压与电流一样,也同样存在一个方向问题。电压的实际方向规定为由高电位端指向低电位端,即为电位降的方向。在分析和计算某一段电路时,电压的实际方向有时很难确定,因此同样可以任意选定该段电路电压的正方向。如图1-7所示的电路中,若选A点为高电位点,标以“+”号,则B点相对于A点为低电位点,标以“-”号,也就是说,这段电路电压的正方向是从A点指向B点。当电压的正方向与实际方向一致时,为正值;反之为负值。因此,当电压的正方向选定后,电压就成为代数量。

电压的正方向,有三种表示方法,如图1-8所示。图1-8a用“+”、“-”标号分别表示假定的高电位端和低电位端;图1-8b则用箭头的指向表示,箭头由高电位端指向低电位端;图1-8c用双下标来表示,电压的正方向即从下角标的第一个字母指向第二个字母,如 $U_{AB}$ ,即A点表示高电位点,B点表示低电位点。

以上三种表示方式其意义是相同的,可以互相代用。

### (4) 电动势

在图1-9中,从电源的外电路看,正电荷的移动是在电场力的作用下,从电源的高电位端A(正极)经过负载R,移向电源的低电位端B(负极),即按照电位降低的方向移动,这是电场力推动电荷做功的结果。为了保持正电荷连续不断地作定向移动,使电路中的电流维持恒定,就必须依靠其它非电场力(如化学力、机械力)把正电荷从电源的低电位端B(负极),经过电源内部,移到电源的高电位端A(正极),这是非电场力做功,以使得电源两端的电压保持定值。电动势这个物理量就是用来衡量电源内部非电场力对正电荷做功的能力的。在非电场力作用

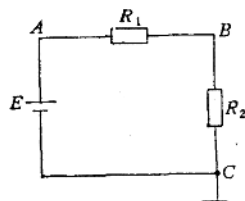


图1-6 电压与电位比较

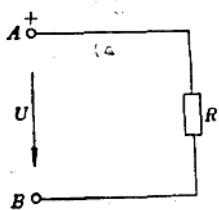


图1-7 电压的正方向

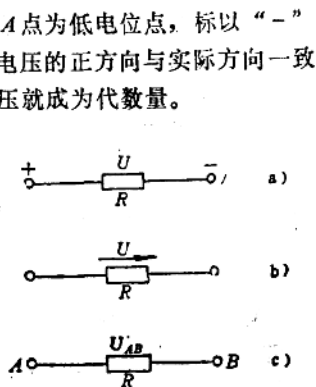


图1-8 电压正方向的三种表示方式

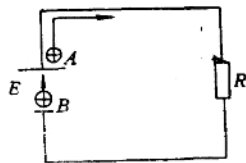


图1-9 电动势的作用

下, 电源将其它形式的能量转换为电能, 所以电动势是表示电源性质的物理量。

在数值上电动势等于非电场力把单位正电荷从负极经电源内部移动到正极时所做的功。据此, 电动势的单位也是伏特 (V)。

电动势的实际方向规定为电源力推动正电荷运动的方向, 即电位升高的方向, 所以电动势与电压的实际方向相反, 如图 1-10 所示。直流电源的正、负极分别用 “+”、“-” 表示。

#### (5) 关联正方向

电压、电流的正方向在标定时都具有任意性, 从两者之间的关系来说, 应该是彼此独立的, 没有其它限制。但为了处理问题方便, 在同一段电路中, 尽可能使电流的正方向与电压的正方向取为一致, 称为关联正方向。如图 1-11 所示, 在图中电流的正方向与电压从 “+” 极到 “-” 极的方向一致, 即电流与电压降正方向一致。如若电压与电流的正方向不一致, 则称非关联正方向, 如图 1-12 所示。

关联正方向是一个很重要的概念, 因为在电路理论中许多公式的导出均与关联正方向有关, 下面结合读者熟悉的欧姆定律作一说明:

在关联正方向条件下, 欧姆定律的表示式为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-3)$$

图 1-11 关联正方向

若为非关联正方向, 欧姆定律的表示式为

$$I = -\frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = -IR$$

负号表示当电压的正方向与实际方向一致时, 图 1-12 所示的电流正方向与电流的实际方向相反。

欧姆定律只适用于线性电阻电路, 一般不适用于非线性电阻电路, 因为非线性电阻元件的阻值是随电压、电流变化的。

从上面讨论可知, 欧姆定律的每一种表达形式是对应于一定的正方向的, 有关电路的其它定律的表达式也是如此。因此, 对于每一个公式, 除了正确理解它的意义、使用条件外, 还必须记住关联正方向的要求, 决不能生搬硬套。

**例 1-1** 求图 1-13 中所示电路的电流  $I$ 。

**解:** 在图 1-13 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物理量本身的正负号不要相混淆。

在图 1-13 b 中,  $U$ 、 $I$  为关联正方向

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

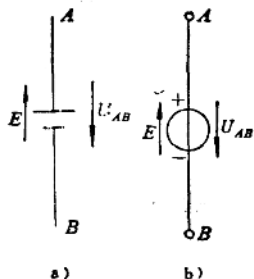


图 1-10 电动势的实际方向

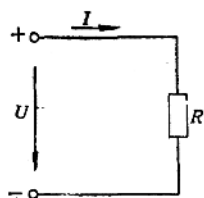


图 1-11 关联正方向

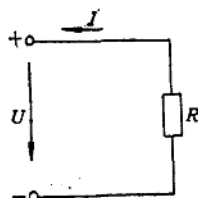


图 1-12 非关联正方向

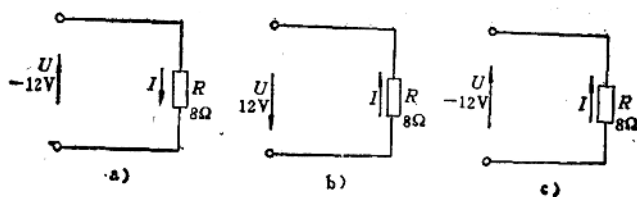


图1-13 例1-1图

在图1-13 c 中,  $U$ 、 $I$  为关联正方向

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

**例1-2** 求图1-14所示电路中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  点的电位及电阻  $R$ 。

**解:** 根据图示电路, 设  $d$  点为参考点。

$U_a = -9\text{V}$ , 即  $a$  点的电位比  $d$  点电位低  $9\text{V}$ ;

$U_b = U_a + E_2 = -9 + 3 = -6\text{V}$ , 即  $b$  点电位比  $d$  点电位低  $6\text{V}$ 。

$U_c = E_3 = 4\text{V}$ , 即  $c$  点电位比  $d$  点的电位高  $4\text{V}$ 。

$$U_{bc} = U_b - U_c = -6 - 4 = -10 \text{ V}$$

$$R = \frac{U_{bc}}{I} = \frac{-10}{-2} = 5 \text{ } \Omega$$

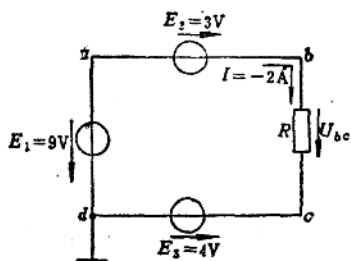


图1-14 例1-2图

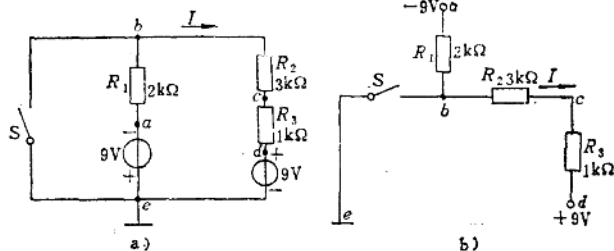


图1-15 例1-3图

**例1-3** 分别计算图1-15 a 电路中开关  $S$  打开时和闭合时  $b$  点和  $c$  点的电位。

**解:**

1) 当开关  $S$  打开时

$$I = \frac{U_{ad}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_a - U_d}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{-9 - 9}{(2 + 3 + 1) \times 10^3} = -3 \times 10^{-3} \text{ A} = -3 \text{ mA}$$

$$U_b = U_{ad} + U_d = I(R_2 + R_3) + U_d = -3 \times 10^{-3} \times (3 + 1) \times 10^3 + 9 = -3 \text{ V}$$

$$U_c = U_{ad} + U_d = IR_3 + U_d = -3 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 + 9 = 6 \text{ V}$$

2) 当开关  $S$  闭合时:

$$I = -\frac{U_{dc}}{R_2 + R_3} = -\frac{9}{(3 + 1) \times 10^3} = -2.25 \times 10^{-3} \text{ A} = -2.25 \text{ mA}$$

$$U_b = 0 \text{ V}$$

$$U_c = U_{ca} = -IR_2 = -(-2.25 \times 10^{-3}) \times 3 \times 10^3 = 6.75 \text{ V}$$

$c$  点的电位也可沿  $c \rightarrow d \rightarrow e$  路径计算

$$U_c = U_{cd} + U_{de} = IR_3 + U_{de} = (-2.25) \times 1 + 9 = 6.75 \text{ V}$$

由此可见, 沿着不同的路径分别计算  $c$  点的电位, 所得的结果相同, 这说明电路中的参考点确定之后, 电路中任一点的电位就是一个确定的值, 它与该点到参考点的路径无关。

图1-15 a 的电路可简化为图1-15 b 的电路, 不画出电源, 仅在各端标出其电位值。

#### (6) 电功率

当电路中有电流流通, 电能将转换成其它非电能量, 单位时间内所转换的电能称为电功率, 简称功率, 用  $P$  表示。

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-4)$$

在图1-16中, 电压、电流为关联正方向。当正电荷  $q$  在电场力的作用下从  $A$  点移到  $B$  点时, 根据电压的定义, 电能转换成其它形式的能量

$$W = Uq = IUt$$

这也是在时间  $t$  内电阻  $R$  吸收 (或称消耗) 的电能。而电阻  $R$  消耗的功率可用下式计算:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Uq}{t} = UI \quad (1-5)$$

若电压、电流为非关联正方向, 则

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

如果用式 (1-5)、式 (1-6) 计算,  $P > 0$  则为吸收功率 (负载);  $P < 0$ , 为发出功率 (电源)。当然对电阻元件而言, 由于其电压与电流的实际方向总是一致的, 所以电阻元件永远是吸收功率, 具体表达式为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

对于具有电动势的设备, 若  $E$  与  $I$  为关联正方向, 功率表达式为

$$P_E = EI \quad (1-7)$$

若  $E$  与  $I$  为非关联正方向, 即

$$P_E = -EI \quad (1-8)$$

在式 (1-7)、式 (1-8) 中,  $P_E > 0$ , 为发出功率 (电源);  $P_E < 0$  为吸收功率 (负载)。

我们把与电源实际方向相反的电动势称为反电动势, 例如蓄电池充电时的电动势就是反电动势, 这时蓄电池吸收功率, 将电能转换成化学能。

在我国法定计量单位中, 电压的单位是伏特 (V), 电流的单位是安培 (A), 电功率的单位是瓦特 (W), 电功率也可用 kW 或 mW 作单位。

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

在电能计量单位中, 如果电功率  $P$  的单位用千瓦 (kW), 时间  $t$  的单位用小时 (h), 则由  $W = UI t = P t$  式子可知, 电能的单位为千瓦小时 (kW·h), 习惯上称为度。电度表计量

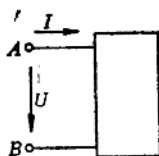


图1-16 电功率的计算

的1度就是1 kW·h。

## § 1-2 电路的工作状态

电路的工作状态通常有三种，即有载运行状态、开路状态和短路状态。

### 一、有载运行状态与额定值

在图1-17中，开关S合上，使得电路中电源与负载接通而成闭合回路，此时负载R中就有电流流过，称为有载运行状态，电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R} \quad (1-9)$$

电阻R两端的电压为

$$U = IR = E - IR_0$$

也就是说，负载时的端电压U总是小于电动势E，两者之差值就是电源内阻上的压降 $IR_0$ 。当电源内阻 $R_0$ 很小，即 $R_0 \ll R$ 时，才可认为

$$U \approx E$$

从式(1-9)可知， $E = IR_0 + IR$ ，两边同乘以电流I，即为功率平衡方程式

$$EI = I^2 R_0 + I^2 R$$

$$I^2 R = EI - I^2 R_0$$

即

$$P = P_E - P_0 \quad (1-10)$$

其中， $P = I^2 R = UI$ ，为负载消耗的功率； $P_E = EI$ ，为电源产生的总功率， $P_0 = I^2 R_0$ ，为电源内阻消耗的功率。

在一个实际电路中，功率总是平衡的，即

$$P_{\text{发出}} = P_{\text{吸收}} \quad (1-11)$$

据此，在电路计算中，可以用式(1-11)验证计算结果正确与否。

一般情况下，电源的电动势E和内阻 $R_0$ 是一定的，从式(1-9)知，电流I的大小决定于负载电阻R，R越小，电路中的电流I就越大，负载消耗功率P和电源发出功率 $P_E$ 就越大。这种情况下，我们称之为负载增大，显然负载的大小绝不是指负载电阻的大小，而是指负载电流和功率的大小。当负载电阻增大时，称负载变小，而负载电阻减小时，则为负载变大。电源输出的功率和电流取决于负载的大小，且随负载的变化而变化。

当然实际的电源和负载中所允许通过的电流值都是有限的。若电流较长时间地超过这个限度，电气设备将因过热而烧毁。

为了保证电气设备安全可靠、经济地工作，制造厂家在电气设备的铭牌上大多标出其额定值，如白炽灯泡上标出的220V、100W就是额定值。通常额定值是指：

(1) 额定电压 $U_N$ ，即为电气设备规定的正常使用电压。当电压过高或过低时，设备不能正常工作，而且有可能使绝缘击穿。

(2) 额定电流 $I_N$ ，即电气设备长期（或规定时间内）允许通过的最大电流，使用时不得超过。当电流超过额定值时称为过载，小于额定电流时称为欠载，达到额定值时称为额定工作状态。如有短时过载还可以，长时间过载是不允许的，使用时应当特别注意。

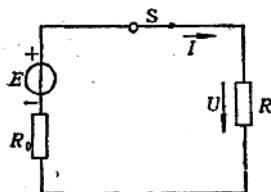


图1-17 有载工作状态

(3) 额定功率  $P_N$ , 即电气设备在额定电压时允许的最大输入或输出功率, 使用时一般不得超过。

在实际使用电气设备时, 必须遵守有关额定值的规定, 否则将会使电气设备受到损坏或毁坏。通常用熔断器对电路进行保护。

## 二、开路状态

在图1-18所示的电路中, 开关S打开, 则电源处于开路(空载状态)。

开路时电路的电阻对电源而言相当于无穷大, 故电路中电流为零, 此时电源的端电压即开路电压(空载电压)就等于电源电动势, 电源对外电路不输出功率。开路时电路特征见表1-1。

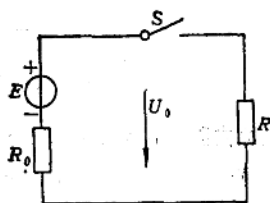


图1-18 开路状态

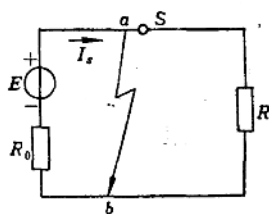


图1-19 短路状态

## 三、短路状态

如图1-19所示的电路, 当电源两端  $a$  和  $b$  由于某种原因直接连在一起, 电流不通过负载, 直接通过短路线返回电源, 此时电路处于短路状态。

一般说来, 电源内阻很小, 导线电阻可视为零, 短路电流  $I_s$  必然很大, 这时电源所发出的功率全部消耗在电阻  $R_0$  上, 产生大量的热量而烧毁电源。电源的短路状态的特征见表1-1。

表1-1 电路开路、短路时的特征

| 电 量<br>状 态 | $R$      | $I$     | $U$ | $P$       |
|------------|----------|---------|-----|-----------|
| 开 路        | $\infty$ | 0       | $E$ | 0         |
| 短 路        | 0        | $E/R_0$ | 0   | $I^2 R_0$ |

短路通常是一种事故, 应竭力避免。为了防止短路事故所引起的后果, 实际电路中应接入熔断器或断路器, 一旦发生短路能迅速将故障电路与电源自动断开。

但有时由于某种需要, 将电路中的某一部分或某一元件短路, 常称为短接, 这是人为的安排, 应该与事故短路区分开来。

**例1-4** 图1-20所示电路中, 电源的电动势  $E$  为12V, 内阻  $R_0$  为0.2Ω, 求开关S分别与1, 2, 3, 4端相接时电路中的电流和电源的端电压。

解: