

高等学校教材

电工技术

(第3版)

叶文荪 赵朝会 主编

机械工业出版社

高等学校教材

电工技术

(第3版)

主 编 叶文荪 赵朝会
副主编 柴玉华 霍利民 吴显义
主 审 张英书

机械工业出版社

本套教材第3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》教学基本要求,结合农业工程类各专业的特点,由全国农业院校电工教学研究会组织编写的,包括《电工技术》、《电子技术》和《电工电子实验技术》。

《电工技术》共分10章,内容包括直流电路、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。每章均有例题、小结和习题。

本书参考学时为50~70学时,可作为高等农林院校农业工程类各专业本科、专科以及职大、夜大的教材,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/叶文荪,赵朝会主编.-3版.-北京:机械工业出版社,1998.8

高等学校教材

ISBN 7-111-06373-2

I. 电… II. ①叶… ②赵… 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(98)第09954号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:刘文伯 版式设计:张世琴 责任校对:申春香
贺麓鑫

封面设计:姚学峰 责任印制:王国光

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年8月第3版第3次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·16印张·387千字

17251-21750册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本套教材包括《电工技术》、《电子技术》和《电工电子实验技术》，由全国农业院校电工教学研究会组织编写，适用于高等农业、农林院校或其它院校非电工类专业。前两本是基本教材，每册参考学时为 50~70 学时。后一本是配套教材。每本教材均自成体系，可以单独使用。

本套教材第 1 版于 1991 年出版。根据国家教委对高等院校工科类非电专业电类课程的要求，各院校对第 1 版、第 2 版教材的意见和建议，以及学科的发展，第 3 版删除了第 1、2 版教材中陈旧过时或不适用的内容，修正了疏漏和不足之处，增补了电工、电子及实验技术的新知识，修改了对一些问题的分析和解答方法，吸取了各院校教学改革的有益经验，更适合于组织教学和学生自学。

参加本套教材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。

本书第 2 版由叶文荪、史国栋任主编，吴显义、赵希炎、朱玉芬任副主编，张英书主审。参加编写的还有王其红、俎云霄、吴桂珍、张曙光。

本书第 3 版编审人员：

主 编：叶文荪 赵朝会

副主编：柴玉华 霍利民 吴显义

编写人员：柴玉华（第一章）

吴仕宏（第七章）

赵朝会（第二章）

朱张青、吴桂珍（第八章）

叶文荪（第三章、第四章）

蔡振江、任振辉（第九章）

吴显义、黄丽华（第五章）

郭 永、刘 杰（第十章）

霍利民（第六章）

主 审：张英书

目 录

前言

第一章 直流电路 1

§ 1-1 电路的组成及基本物理量 1

一、电路的组成和功能 1

二、电路模型 1

三、电路中的基本物理量 2

§ 1-2 电路的工作状态 7

一、有载运行状态与额定值 7

二、开路状态 8

三、短路状态 8

§ 1-3 基尔霍夫定律 9

一、基尔霍夫节点电流定律 10

二、基尔霍夫回路电压定律 10

§ 1-4 电压源与电流源的等效变换 12

一、实际电源的两种模型 12

二、电源的等效变换 14

§ 1-5 支路电流法 15

§ 1-6 节点电压法 17

§ 1-7 叠加定理 19

§ 1-8 等效电源定理 21

一、二端网络 21

二、戴维南定理 22

三、诺顿定理 23

§ 1-9 受控源 24

小结 25

习题 26

第二章 单相交流电路 31

§ 2-1 正弦交流电的基本概念 31

一、正弦量的三要素 31

二、同频率正弦量的相位差 33

三、正弦量的有效值 34

§ 2-2 正弦量的表示方法 35

一、复数的概念及运算 36

二、正弦量的相量表示 38

三、相量形式的基尔霍夫定律 40

§ 2-3 单一参数的交流电路 40

一、电阻电路 40

二、电感电路 42

三、电容电路 44

§ 2-4 RLC 串联交流电路 47

一、广义欧姆定律、复阻抗 47

二、各电物理量之间的关系 48

§ 2-5 RLC 并联交流电路 51

一、RLC 并联交流电路的相量分析 51

二、复导纳 52

三、电感性电路功率因数的提高 53

§ 2-6 RC 电路的频率特性 55

§ 2-7 电路中的谐振 57

一、串联谐振 57

二、并联谐振 60

§ 2-8 复杂正弦电路的相量分析 62

一、复阻抗的串联 62

二、复阻抗的并联 63

三、复阻抗的混联 63

§ 2-9 非正弦交流电路 67

一、周期函数分解为傅里叶级数 67

二、非正弦周期量的有效值 68

小结 70

习题 71

第三章 三相交流电路 77

§ 3-1 三相交流电源 77

一、对称三相电动势的产生 77

二、三相电源的联接 78

§ 3-2 负载星形联结的三相电路 80

一、三相四线制电路的相量分析	80	二、变压器的负载运行和电流变换	122
二、对称三相负载星形联结的三相电路	81	三、变压器的阻抗变换	123
三、不对称三相负载星形联结的三相电 路及中性线的作用	82	§ 5-4 变压器的运行特性	124
四、相序指示电路	84	一、变压器的外特性和电压调整率	124
§ 3-3 负载三角形联结的三相电路	85	二、变压器的损耗和效率	124
§ 3-4 三相电路的功率	87	§ 5-5 变压器绕组的极性及其测定	125
小结	90	一、绕组的极性与正确联接	125
习题	91	二、绕组极性的测定方法	125
第四章 电路的时域分析	92	§ 5-6 三相变压器	126
§ 4-1 基本概念	92	一、三相变压器绕组的联接及电压 关系	126
一、网络的时域响应	92	二、变压器的额定值	127
二、换路定则和储能电路中电流、电压 初始值的确定	93	§ 5-7 特殊用途的变压器	128
§ 4-2 RC 电路的时域响应	95	一、自耦变压器	128
一、RC 串联电路输入阶跃电压时的响应	95	二、仪用互感器	129
二、RC 串联电路的零输入响应	100	三、电焊变压器	130
三、RC 电路的时间常数	101	§ 5-8 电磁铁	131
§ 4-3 微分电路和积分电路	102	小结	132
一、微分电路	102	习题	132
二、积分电路	103	第六章 异步电动机	134
§ 4-4 RL 电路的时域响应	104	§ 6-1 三相异步电动机的结构	134
一、RL 串联电路输入阶跃电压时的响应	104	一、定子	134
二、RL 串联电路的零输入响应	108	二、转子	134
三、RL 电路的断开	108	三、气隙	135
小结	110	§ 6-2 三相异步电动机的工作原理	136
习题	111	一、基本工作原理	136
第五章 磁路与变压器	114	二、三相异步电动机的旋转磁场	137
§ 5-1 磁路的基本概念	114	§ 6-3 三相异步电动机的电磁转矩与 机械特性	140
一、磁路	114	一、电磁转矩	140
二、磁路中的基本物理量	115	二、机械特性	142
三、磁路的欧姆定律	115	§ 6-4 三相异步电动机的使用	144
四、铁磁物质的磁化曲线	116	一、铭牌	145
五、交流铁心线圈	117	二、三相异步电动机的启动	147
§ 5-2 变压器的基本结构	119	三、三相异步电动机的反转	150
§ 5-3 变压器的工作原理	120	四、三相异步电动机的制动	150
一、变压器的空载运行和电压变换	120	五、三相异步电动机的调速	151

§ 6-5 三相异步电动机的选择	153	第八章 直流电机	174
一、类型的选择	153	§ 8-1 直流电机的构造和工作原理...	174
二、结构形式的选择	153	一、直流电机的构造	174
三、转速的选择	154	二、直流电机的工作原理	175
四、容量的选择	154	§ 8-2 直流电机的电动势和电磁	
§ 6-6 单相异步电动机	156	转矩	176
一、结构特点和基本原理	156	一、电动势	176
二、电容分相式异步电动机	157	二、电磁转矩	177
三、单相异步电动机的反转和调速	157	§ 8-3 直流电机按励磁方式分类	178
小结	159	一、他励电机	178
习题	160	二、并励电机	178
第七章 同步电机	162	三、串励电机	178
§ 7-1 基本结构形式	162	四、复励电机	178
一、同步电机的基本类型	162	§ 8-4 汽车、拖拉机用直流发电机...	178
二、同步电机的基本结构	162	一、并励直流发电机	178
§ 7-2 同步发电机的空载运行	164	二、硅整流交流发电机	181
一、空载时的相电动势	164	§ 8-5 汽车、拖拉机用串励直流电	
二、同步发电机的空载特性	165	动机	183
§ 7-3 对称负载时的电枢反应	166	一、串励直流电动机的特点	183
一、 I 与 E_0 同相 ($\psi=0^\circ$) 时的电枢		二、串励直流电动机的机械特性	184
反应	166	小结	184
二、 I 滞后于 E_0 90° ($\psi=90^\circ$) 的电		习题	185
枢反应	167	第九章 电气控制线路	186
三、 I 超前于 E_0 90° ($\psi=-90^\circ$) 时		§ 9-1 常用控制电器	186
的电枢反应	167	一、组合开关	186
四、一般情况 (ψ 为任意值) 时的电		二、按钮	187
枢反应	167	三、交流接触器	188
§ 7-4 同步发电机的运行特性	168	四、中间继电器	190
一、电压方程、相量图和等效电路	168	五、热继电器	190
二、外特性	169	六、熔断器	192
三、调整特性	170	§ 9-2 继电器-接触器控制的基本	
§ 7-5 同步发电机的励磁方式	171	线路	194
一、直流励磁机	171	一、笼型电动机直接起停的控制线路 ...	194
二、交流励磁机	171	二、笼型电动机正反转的控制线路	195
三、三次谐波励磁	172	三、点动控制线路	196
小结	173	四、次序控制线路	197
习题	173	§ 9-3 电力拖动的基本控制方法	197

一、行程控制	198	二、电压等级和供电质量	225
二、时间控制	201	三、负载分类	226
三、速度控制	203	§ 10-2 配电变压器及其选择	226
§ 9-4 控制线路应用举例	204	一、配电变压器的组成	226
一、C620 车床的自动控制线路	204	二、配电变压器的选择	227
二、X53T 立式铣床升降的控制线路	204	§ 10-3 高压配电装置	230
三、藁杆青饲切碎机的自动控制线路	206	一、高压设备	230
§ 9-5 三相异步电动机的断相保 护装置	206	二、主结线	232
一、断相运行	206	三、避雷器	234
二、断相保护装置	207	§ 10-4 低压配电盘	235
§ 9-6 继电器-接触器控制线路的 设计	210	一、低压配电盘	235
一、控制线路设计的程序和一般原则	210	二、接线图	236
二、设计控制线路的基本方法和步骤	213	三、导线截面的选择	236
三、控制线路设计举例	213	§ 10-5 电力排灌站的电气布置	239
§ 9-7 电气接线图	215	一、电气设备的总体布置	239
小结	215	二、厂房内电气设备的布置	240
习题	216	§ 10-6 节约用电与安全用电	242
附录	219	一、节约用电的意义和方法	242
第十章 高低压配电	224	二、安全用电	244
§ 10-1 电力系统概述	224	小结	247
一、系统组成	224	习题	247
		参考文献	248

第一章 直流电路

本章首先讨论电路的基本组成、电路模型、电路的主要物理量、电路的状态、电压源与电流源及其等效变换以及电流和电压的参考方向。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,也适用于交流电路。

§ 1-1 电路的组成及基本物理量

一、电路的组成和功能

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 是手电筒电路,它由干电池、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它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。

模型元件一般可分为两类。第一类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

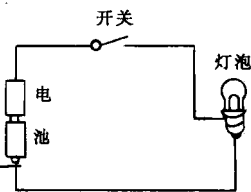


图 1-1 手电筒电路

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和外部功能。

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 $\begin{array}{c} | \\ | \\ | \end{array}$, 理想电压源的符号是

$\bigoplus$; 理想电流源的符号是 $\bigodot$ 。

按用电路模型替代实际电路元件的原则, 图 1-1 所示的手电筒电路就可用图 1-2 表示。

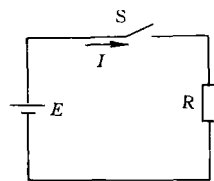


图 1-2 用电路符号绘制的电路图

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。理论分析方法是先画出具体电路的电路模型, 然后作定性的或定量的分析计算。在进行这种分析研究时, 就必须用到电流、电压、电动势和功率等基本物理量。再根据基本电磁关系, 列写这些基本物理量方程式, 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。

1. 电流

(1) 电流的大小 电流是单位时间内通过导线横截面的电荷量, 可表示为

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

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(μA)等作单位。

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

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

(3) 电流的正方向 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), 更难以表示其实际方向。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 1-3a 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 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。同时规定: 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, 即实际电流的流向为从 b 流向 a 。

下面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。

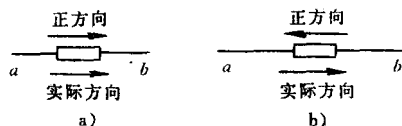


图 1-3 用箭头表示电流的正方向

a) $I > 0$ b) $I < 0$

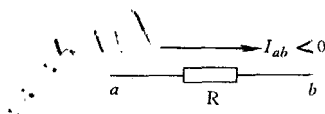


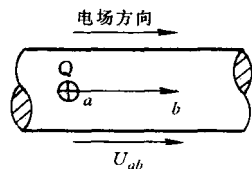
图 1-4 电流实际方向的确定

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。 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),简称库,功的单位是焦耳(J),简称焦,电压的单位是伏特(V),简称伏,还可采用微伏(μV)、毫伏(mV)和千伏(kV)。

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

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

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

(2) 电位 电场或电路中的某一点到参考点之间的电压,称为该点的电位,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,则是该点与参考点之间的电压。电位从形式上是指一点的电位,实质上仍然是两点间的电压,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 V_A 和 V_B ,而且 V_A 的电位高于 V_B 。 A 、 B 两点间的电压 U_{AB} 就是 V_A 与 V_B 之差,即 $U_{AB} = V_A - V_B$ 。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,电压为正值;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。

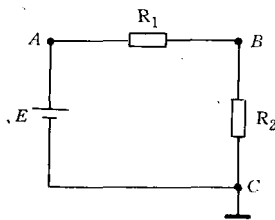


图 1-6 电压与电位比较

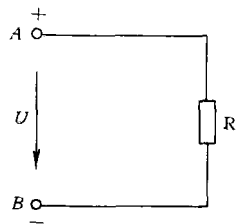


图 1-7 电压的正方向

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。

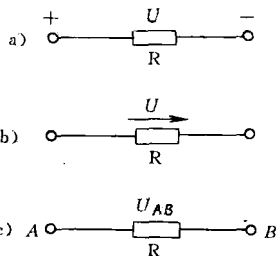


图 1-8 电压正方向的三种表示方式

(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。在非电场力作用下, 电源将其它形式的能量转换成为电能, 所以电动势是表示电源性质的物理量。

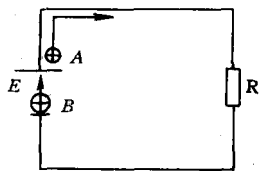


图 1-9 电动势的作用

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。

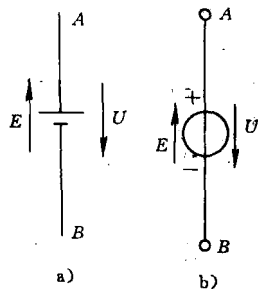


图 1-10 电动势的实际方向

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

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

若为非关联正方向,欧姆定律的表示式为

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

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。

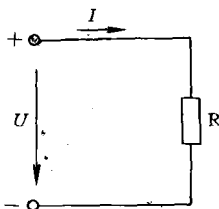


图 1-11 关联正方向

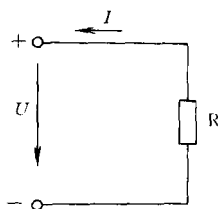


图 1-12 非关联正方向

例 1-1 求图 1-13 中所示电路的电流 I 。

解: 在图 1-13a 中, U, I 为非关联正方向

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

注意公式的正负号与电物理量本身的正负值不要相混淆。

在图 1-13b 中, U, I 为非关联正方向

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

在图 1-13c 中, U, I 为关联正方向

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

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。

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

$V_b = V_a + E_2 = -9 + 3 = -6\text{V}$, 即 b 点电位比 d 点电位低 6V ;

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

$$U_{bc} = V_b - V_c = -6 - 4 = -10 \text{ V}$$

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

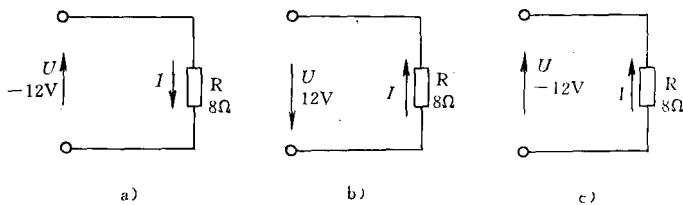


图 1-13 例 1-1 图

例 1-3 分别计算图 1-15a 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

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

$$V_b = U_{bd} + V_d = I(R_2 + R_3) + V_d = -3 \times 10^{-3} \times (3 + 1) \times 10^3 + 9 = -3 \text{ V}$$

$$V_c = U_{cd} + V_d = IR_3 + V_d = -3 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 + 9 = 6 \text{ V}$$

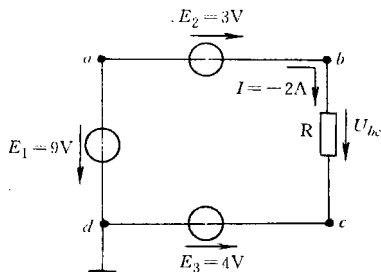


图 1-14 例 1-2 图

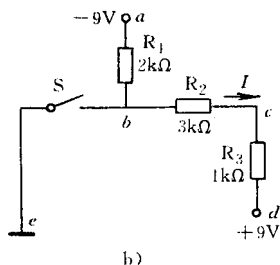
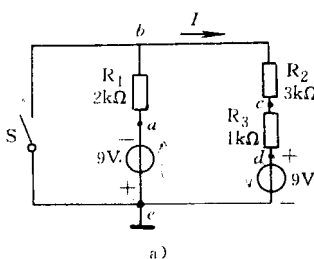


图 1-15 例 1-3 图

2) 当开关 S 闭合时

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

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

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

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

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

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

(6) 电功率 当电路中有电流流过时,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,简称为功率,用 P 表示,即

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

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为

$$W = UQ = IUt$$

图 1-16 电功率的计算

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); $P < 0$, 则为发出功率(电源)。当然对电阻元件而言,其电压与电流的实际方向总是一致的,因此电阻元件永远是吸收功率的,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,则

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

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)。

我们把与电流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), 功率的单位是瓦特(W)(简称瓦), 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, 如果功率 P 的单位用千瓦(kW), 时间 t 的单位用小时(h), 则从公式 $W = UI t = Pt$ 可知, 电能的单位为千瓦小时(kW·h), 习惯上称为度。电度表计量的 1 度就是 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

§ 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为闭合回路, 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, 有负载时的端电压 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

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

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

$$\text{即} \quad P = P_E - P_0 \quad (1-10)$$

式中 P —— 负载消耗的功率, $P = I^2 R = UI$;

P_E —— 电源产生的总功率, $P_E = EI$;

P_0 —— 电源内阻消耗的功率, $P_0 = I^2 R_0$ 。

在一个实际电路中, 功率总是平衡的, 即

$$P_{out} = P_{in} \quad (1-11)$$

式中 P_{out} —— 发出功率;

P_{in} —— 吸收功率。

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 的大小取决于负载

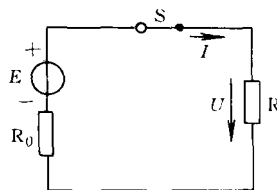


图 1-17 有载工作状态

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。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, 而且有可能损坏。

(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。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。

(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。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)。

表 1-1 电路开路、短路时的特性

状 态	电阻 R	电流 I	电压 U	功率 P
开 路	∞	0	E	0
短 路	0	E/R_0	0	$I^2 R_0$

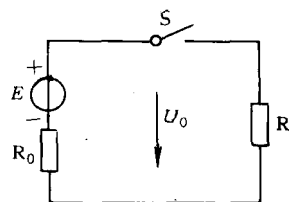


图 1-18 开路状态

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) 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。

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源内阻 R_0 上, 因此会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。

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。

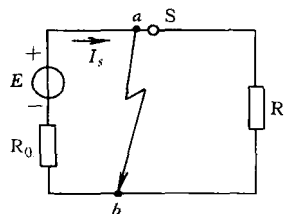


图 1-19 短路状态

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:

S 与 1 端相接时

$$I_{R1} = \frac{E}{R_0 + R_1} = \frac{12}{0.2 + 2.2} = 5 \text{ A}$$

$$U_{R1} = E - I_{R1}R_0 = 12 - 5 \times 0.2 = 11 \text{ V}$$

S 与 2 端相接时

$$I_{R2} = \frac{E}{R_0 + R_2} = \frac{12}{0.2 + 0.1} = 40 \text{ A}$$

$$U_{R2} = E - I_{R2}R_0 = 12 - 40 \times 0.2 = 4 \text{ V}$$

S 与 3 端相接时(开路状态)

$$U = E = 12 \text{ V}$$

S 与 4 端相接时(短路状态)

$$I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{12}{0.2} = 60 \text{ A}$$

$$U = E - I_s R_0 = 12 - 60 \times 0.2 = 0 \text{ V}$$

这时由于输出电压为零,故电源对外电路不做功,电源内阻上消耗的功率为

$$P_0 = I_s^2 R_0 = 60^2 \times 0.2 = 720 \text{ W}$$

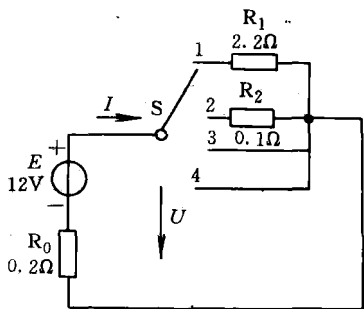


图 1-20 例 1-4 图

§ 1-3 基尔霍夫定律

在物理学中,讨论简单电路时,我们应用两条原理,即基于电荷守恒的电流连续性原理和基于能量守恒的电位单值性原理,以确定各元件的电压或电流之间的关系。比如,我们说,在某一条支路中各个元件流过同一电流,而分流以后的所有电流之和等于分流前的总电流,依据的就是电流连续性原理;又如,我们说,在并联电路中,各并联支路承受的是同一个端电压,依据的就是电位的单值性原理。

如果我们把要讨论的问题推广到更一般的情况,要确定电路中各个元件上的电压或电流之间的平衡约束关系,依据的基础仍是上述两条原理。然而为了满足电路分析的需要,则以电路定律的形式来描述,这就是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律,它仅取决于电路中各元件的连接方式,而与各元件本身的物理特性无关。

在叙述基尔霍夫定律之前,先定义几个术语:

(1) 支路 电路中通过同一电流的每个分支称为支路。图 1-21 中 ab 、 ac 、 acb 、 adb 均是支路。其中 ab 支路不含有电源,称为无源支路, acb 、 adb 支路含有电源,称为有源支路。

(2) 节点^① 电路中三条或三条以上支路的连接点称

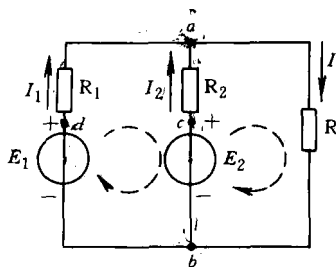


图 1-21 具有三条支路两个节点的电路

① 在一些现代网络理论书中,以每个两端元件为一支路,两条或两条以上支路的连接点为节点。