



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

电路与电工技术

陆国和 主编



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

电路与电工技术

陆国和 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材,依据教育部最新制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》编写而成。全书在编排上分为三大部分:直流电路与暂态分析;交流电路;电工技术。在内容上有传统经典的原理和分析方法,同时加强了电工技术中与生产实践相贴近的内容,对继电-接触器控制线路的构成作了详尽的介绍和阐述。

本教材编写中在保持系统性和完整性的基础上尽量压缩、简化理论上的推导过程,而增加一些实用性较强、与生产实践相近的实例,并力求通俗易懂,以适应高职高专学生的学习需求,为学习“电工实训”、“模拟电子”、“数字电子”等后续课程打下基础,并为学生对小产品、小制作和创新的实践能力培养打下基础。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的电子、电气、电子信息、计算机类专业的技术基础课程的教材,也可以作为非电类专业的公共基础课程的教学用书,还可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电工技术 / 陆国和主编. —北京:高等教育出版社,2001

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-04-009965-9

I. 电… II. 陆… III. ① 电路-高等学校:技术学校-教材② 电工技术-高等学校:技术学校-教材
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 051425 号

电路与电工技术

陆国和 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

电 话 010-64054588

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 17.5

字 数 420 000

版 次 2001 年 8 月第 1 版

印 次 2001 年 8 月第 1 次印刷

定 价 15.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前言

高等职业技术教育是近几年发展起来的一种新的高等教育形式。其培养目标是:生产、管理、服务第一线的高等技术应用性专门人才。这类人才的主要作用是将已成熟的技术和管理规范变成现实的生产服务,在第一线从事管理和应用工作。这种教育要求我们在教学中必须加强实践环节的训练和对实践能力的培养,把学生培养成为既有一定的理论知识、又有较强的实践操作能力的劳动者。这就对教材的选用,内容的安排、实践能力的培养提出了新的更高的要求。

经过三年多的探索和实践,我们感到:对于电子、电气、信息、计算机类专业的学生,除了必修“电路”基础知识外,还必须加强“电工技术”基础知识的学习。同时,从学生就业后情况来看,即使非电类的学生,在生产岗位上也需要有一定电的基础知识。因此,学生除了学习一些必要的理论知识以外,还必须使学生对一般的工厂、企业所需要的能力得到培养和训练。我们把教学实践过程中所讲述的内容、学生在学习过程中遇到的问题进行整理和提炼,编写了这本教材。

由于电路理论涉及的内容广泛,因此在编写中不可能做到面面俱到,只能突出重点、保留其精华、以“够用”为原则,点到为止,压缩理论的证明和公式推导过程,加强实验和实训环节,注重操作能力的培养和训练。

在编写中,除了“电路”的基本内容之外还加强了“电工技术”的内容。例如,对继电—接触器控制线路的设计方法、可编程控制器在生产流水线上的应用等作了详尽的介绍和阐述,使内容尽可能贴近生产实际,方便学生后续课程的学习,并使学生在踏上工作岗位后很快适应岗位的要求。

为了便于各专业对教学内容的选择,本书的部分内容作“*”号处理。如:*1.7 受控源电路的分析、*1.8 非线性电阻电路、*2.6 LC 振荡电路、*5.5 继电—接触器控制线路的逻辑设计等等,各专业可根据要求自行增删。

本书的教学参考时数为72学时,其中讲课54学时,实验18学时。各专业也可根据需要对讲课时数稍作调整,但最多不超过72学时,实验必须保证不低于18学时。本书也可以删去“*”部分后作为非电专业的公共课程教材。

本书由上海第二工业大学陆国和(编写第1章、第5章1~4节),上海大学浦珠华(编写第2章、第3章1~6节),上海应用技术学院臧雯老师(编写第4章),上海第二工业大学项建荣(编写第3章7~9节,第5章5、6节)和郑璞(编写第6章)编写,全书由陆国和副教授统稿并担任主编,上海交通大学朱承高教授主审。由于时间仓促,水平有限,书中难免会出现不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

编者 2001.2.

目 录

前言

第 1 章 电路的基本定律与基本分析

方法	1
1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 电路的组成和功能	1
1.1.2 电路模型和电路图	2
1.2 电路的基本物理量及参考方向	3
1.2.1 电路的基本物理量	3
1.2.2 参考方向及选择原则	6
1.3 电路的基本定律与工作状态	7
1.3.1 欧姆定律	7
1.3.2 电路的工作状态	8
1.3.3 基尔霍夫定律	13
1.4 电路的等效变换	17
1.4.1 电阻的串并联	17
1.4.2 电阻的 Y— Δ 变换	21
1.4.3 电压源与电流源模型及其等效变换	23
1.5 电路的基本分析方法	29
1.5.1 支路电流法	29
1.5.2 网孔电流法	30
1.5.3 结点电压法	32
1.5.4 叠加定理	34
1.5.5 戴维宁定理	37
1.6 电路中电位的计算	42
* 1.7 受控源电路的分析	44
* 1.8 非线性电阻电路	48
习题	50
第 2 章 电路的暂态分析	56
2.1 电路暂态的基本概念及换路定则	56
2.1.1 电路的稳态与暂态	56
2.1.2 储能元件	57
2.1.3 产生暂态过程的原因	62
2.1.4 换路定则	63
2.2 RC 电路的暂态分析	65
2.2.1 RC 电路的放电	65

2.2.2 RC 电路的充电	67
2.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法	69
2.4 RC 暂态电路的应用	72
2.4.1 微分电路	72
2.4.2 积分电路	75
2.5 RL 电路的暂态分析	75
2.5.1 RL 电路的短接	75
2.5.2 RL 电路接通直流电源	78
* 2.6 LC 振荡电路	79
2.6.1 LC 振荡电路	79
2.6.2 自由振荡的物理过程	80
2.6.3 振荡频率与临界电阻	80
习题	83
第 3 章 正弦交流电路	85
3.1 正弦电压与正弦电流	85
3.2 正弦量的表示法	88
3.3 单一参数的交流电路	93
3.3.1 纯电阻交流电路	94
3.3.2 纯电感交流电路	96
3.3.3 纯电容交流电路	98
3.4 R、L、C 串联交流电路	102
3.4.1 电压与电流的关系	102
3.4.2 R、L、C 串联电路的功率	104
3.4.3 串联谐振	108
3.5 复阻抗的串联、并联及混联	110
3.5.1 复阻抗的串联	111
3.5.2 复阻抗的并联	111
3.5.3 复阻抗的混联	114
3.6 功率因数的提高	116
3.7 三相电源	119
3.7.1 三相交流电动势的产生	119
3.7.2 三相电源的联结方法	120
3.8 三相电路的分析与计算	122
3.8.1 三相负载的星形联结	122
3.8.2 三相负载的三角形联结	125
3.8.3 三相功率	127

3.9 三相电力系统	130	5.3 电动机的正反转	198
3.9.1 发电、输电、配电概况	130	5.3.1 电动机的正反转控制	198
3.9.2 导线的选择	131	5.3.2 电动机的行程控制	200
3.9.3 安全用电	134	5.4 电动机的顺序控制及时间控制	201
习题	136	5.4.1 电动机的顺序起动	201
第4章 变压器和异步电动机	141	5.4.2 电动机的时间控制	203
4.1 磁路及磁性材料	141	*5.5 继电-接触器控制线路的逻辑设计	206
4.1.1 磁场的基本物理量	141	5.5.1 逻辑代数的基本运算	207
4.1.2 磁性材料的主要特性	142	5.5.2 逻辑设计的基本概念	210
4.1.3 磁路及磁路欧姆定律	144	5.5.3 检测元件的状态表	211
4.1.4 铁心线圈电路	145	5.5.4 继电器逻辑函数的列写	213
*4.1.5 电磁铁	148	5.5.5 无记忆功能执行元件逻辑函数 的列写	215
4.2 变压器	150	*5.6 继电-接触器控制线路逻辑设计 方法	218
4.2.1 变压器的基本结构	150	5.6.1 继电器的设置方法	218
4.2.2 变压器的工作原理	151	5.6.2 逻辑设计方法的步骤	221
4.2.3 变压器的特性和额定值	156	习题	223
4.2.4 三相变压器和特殊变压器	157	第6章 可编程控制器	227
4.2.5 变压器同名端的判断	161	6.1 可编程控制器的组成及工作原理	228
4.3 异步电动机及其特性	162	6.1.1 可编程控制器的组成	228
4.3.1 三相异步电动机的结构	162	6.1.2 可编程控制器的基本工作原理	229
4.3.2 三相异步电动机的工作原理	164	6.1.3 可编程控制器的特点和技术 性能	230
4.3.3 三相异步电动机的运行特性	167	6.1.4 可编程控制器的 I/O 及内部寄存器 配置	232
*4.3.4 单相异步电动机	171	6.2 可编程控制器的编程方法	234
4.4 三相异步电动机的使用	174	6.2.1 基本逻辑指令及其编程方法	235
4.4.1 三相异步电动机的技术数据 和选用	174	6.2.2 编程举例	243
4.4.2 三相异步电动机的起动	176	6.3 可编程控制器的应用举例	246
4.4.3 三相异步电动机的制动	179	6.3.1 交通红绿灯的控制	246
4.4.4 三相异步电动机的调速	182	6.3.2 机械手运动控制	247
习题	183	习题	251
第5章 继电-接触器控制线路及 逻辑设计	185	附录一 手持编程器的使用	252
5.1 低压控制电器	185	附录二 计算机编程软件的使用	258
5.1.1 开关电器	186	附录三 常用电机、电器的图形符号	263
5.1.2 主令电器	188	部分习题答案	264
5.1.3 执行电器	189	参考文献	269
5.1.4 保护电器	194		
5.2 电动机的正转、点动及两地控制	195		
5.2.1 电动机的正转	196		
5.2.2 电动机的点动和两地控制	197		

第 1 章

电路的基本定律与基本分析方法

电路理论是学习电工技术和电子技术的基础。本章包含了电路的基本物理量,基本定律、定理,以及电路分析的基本方法等内容。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成和功能

电路是泛指能够提供电流途径,由电源、电子元器件或电工设备所组成的总体。在电路中既有可以把其他形式的能量(热能、风能、水位能、太阳能等)转换成电能的电源元件,也有可以把电能转换成其他形式的能量的用电器。

电路具有两个主要功能:其一,在电路中随着电流的流动,它能实现电能与其他形式能量的转换、传输和分配。例如,发电厂把热能(通过煤粉或油的燃烧)转换成电能,再通过变压器、输电线送到各用户,各用户把它们再转换为光能(照明)、热能(加热电器)和机械能(电动机)加以使用。其二,电路可以实现信号的传递和处理。通过电路可以把输入的信号变换或“加工”成其他所需要的输出。例如,一台半导体收音机或者电视机,其天线接收到的是一些很微弱的电信号,这些很微弱的信号必须通过调谐环节选择到你所需要的某个频率信号,再经过一系列的放大环节,最后从输出端重现能满足工作需要的信号(图像、声音)。

电路的结构有简单的也有复杂的,种类繁多。

但不管电路的结构是怎样简单或复杂,电路必定由电源、负载和中间环节三大部分组成。图 1.1.1 就是一个最简单的手电筒电路。电路的左边是电源(电池),它是提供电能的装置;电路的右边是负载(小灯泡),它是消耗电能的装置;电路的中间部分称为中间环节,它是联接电源和负载的部分,具有输送、分配、控制电路通断的功能。中间环节的结构根据工作需要既有简单的也有复杂的。图 1.1.1 中的中间环节由一个开关和导线组成;收音机的中间环节由调谐、变频、中频放大、检波、低频放大、功率放大等几部分组成。

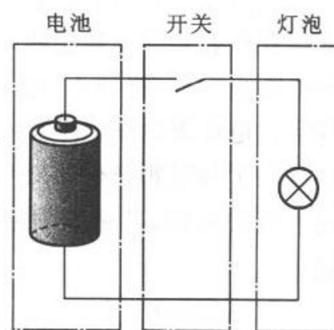


图 1.1.1 手电筒电路

1.1.2 电路模型和电路图

实际电路是由一些电工设备、器件和电路元件所组成的。为便于分析和计算,往往把这些器件和元件理想化并用国家统一的标准符号来表示。这样,电工设备和器件在电路原理图中,就成为一种用抽象的电路模型形式表示的电路元件。这种电路模型表征了这些设备在电路中所表现出的主要电气特性,所以,由电路模型构成的电路原理图能够代表实际电路图,从电路原理图中得到的分析结论能够适用于实际电路。这样,实际电路的分析就得到了简化。

一、电路的理想电路元件

为了表征电路中某一部分的主要电磁性能以便进行定性、定量分析,可以把该部分电路抽象成一个电路模型,即用理想的电路元件来代替这部分电路。因此,能表征电路的特征,并且具有单一电磁性质的假想元件被称之为理想电路元件。所谓单一电磁性质是指突出该部分电路的主要电或磁的性质,而忽略了次要的电或磁的性质。因此,可以用理想电路元件以及它们的组合来反映实际电路元件的电磁性质。

例如,电感线圈是由导线绕制而成的,它既有电感量又有电阻值,在考虑其主要电磁性质时往往忽略了线圈的电阻性质,而突出了它的电磁性质,把它表征为一个储存磁场能量的电感元件。同样,电阻丝是用金属丝一圈一圈绕制而成的,那么,它也既有电感量也有电阻值,在实际分析时往往忽略电阻丝的电感性质,而突出其主要的电阻性质,把它表征为一个消耗电能的电阻元件。

二、理想电路元件的分类及符号

按经典电路理论,理想电路元件共有五种:电阻、电感、电容、电压源、电流源。

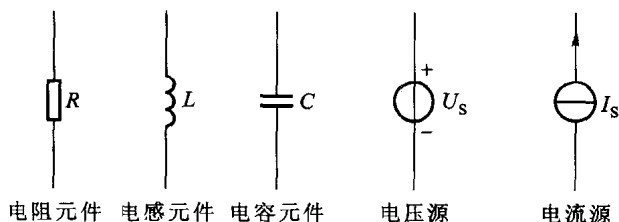


图 1.1.2 理想电路元件名称及符号

电阻元件是一个耗能元件,它消耗电能并把电能转化为热能和光能,用符号 R 表示。电感元件和电容元件都是储能元件,也称为动态元件。电感元件能把电能转化为磁场能量储存在电感线圈当中,用符号 L 表示。电容元件能把电能转化为电场能量储存在电容器当中,用符号 C 表示。电压源也称为理想电压源,它两端的电压固定不变,且所通过的电流可以是任意值,其大小取决于与它相联接的外电路,用符号 U_s 表示。电流源也称为理想电流源,它向外提供一个恒定不变的电流,其两端的电压可以是任意值,其大小取决于与它相联接的外电路,用符号 I_s 表示。

三、电路图

用理想电路元件(即电路模型)构成的理想化电路图,称为电路原理图,简称电路图。在电路图中,各种电路元件必须使用国家统一标准的图形和符号表示。

1.2 电路的基本物理量及参考方向

1.2.1 电路的基本物理量

一、电流

带电质点有规律运动的物理现象称为电流。带电质点在金属导体中是指带负电的自由电子,在电介质中是指带正电或负电的正、负离子。这些带电质点除了作不规则运动之外,还在电场作用下作定向运动,即正电荷顺电场方向运动、负电荷逆电场方向运动。电流的实际方向是指正电荷的运动方向。

衡量电流大小、强弱的物理量称为“电流强度”。电流强度的数值是指:在电场作用下,单位时间里通过导体某一截面 S 的电荷量,如图 1.2.1 所示。

设在极短的时间 dt 内通过导体某截面 S 的电荷量为 dq ,则电流强度为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

在一般情况下,电流强度 i 是随时间而变化的,是时间 t 的函数。如果电路中电流的大小、方向都不随时间 t 而变化,则称为恒定电流,简称直流电流,用大写字母 I 表示,即

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

按国际单位制规定,电流的单位是:库[仑]/秒,即安[培],简称“安”用符号“A”表示。在电力系统中电流都比较大,常以千安(kA)作为电流强度的计量单位,而在电子线路中电流都比较小,常以毫安(mA)、微安(μ A)作为电流强度的计量单位,它们之间的换算关系是

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

在物理学中电流与电流强度的概念是不同的,但在电路与电工技术中这两者可以不必严格区别,为了简便起见统称为“电流”,它也代表了一个物理量。

电流方向的表示方法有两种:(1)用箭头表示电流的方向,如图 1.2.1 中的 i 方向。(2)用双下标表示。如 I_{ab} (表示电流从 a 流向 b)、 I_{ba} (表示电流从 b 流向 a)。由上可知:电流不但有大小,而且有方向。电路分析时,在电流实际方向不能确定的情况下,可以人为选定其参考方向,又称为正方向。在正方向选定的情况下,电流值有正、负之分。例如,电流选定的正方向是从 a 流向 b ,经计算后得到 $I_{ab} = 3 \text{ A}$,则表示电流的实际方向的确是从 a 流向 b ,若经计算得到 $I_{ab} = -3 \text{ A}$,则表示电流的实际方向是从 b 流向 a 。

二、电压

图 1.2.2 所示为电池中的两个电极, a 是正极带正电荷, b 是负极带负电荷。在 a 、 b 两极之间产生了一个均匀而且恒定的电场,其方向是从 a 指向 b 。如果用导体将 a 、 b 两极连接起来,那么在电场作用下,电极 a 中的正电荷将通过导体移动到电极 b 。由于正电荷在电场中被移动了一段距离,电场力对正电荷做了功。我们把电场力将单位正电荷 q 从 a 点移动到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点之间的电压,记为

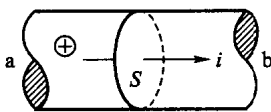


图 1.2.1 电流的示意图

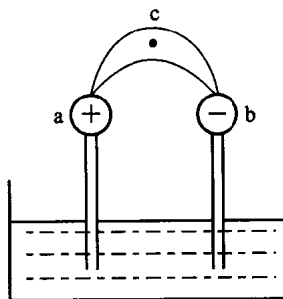


图 1.2.2 电压的示意图

$$U_{ab} = \frac{W_{q,ab}}{q} \quad (1.2.2)$$

大小和方向随时间变化而变动的电压称为交变电压,用小写字母 u 表示;如果电压的大小和方向都不随时间变动,则称为恒定电压或直流电压,用大写字母 U 表示。由恒定电压产生的电场是恒定电场,在恒定电场中,任意两点 a 、 b 之间的电压只与 a 、 b 两点的位置(起点与终点)有关,而和电荷移动的路径无关。

按国际单位制规定:电压单位是:焦[耳]/库[仑],即伏[特],用符号“V”表示。在各个类型电路中计量电压的单位可以不同,有伏(V)、毫伏(mV)、微伏(μ V),它们之间的换算关系是

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

三、电位

为了便于分析,在恒定电场中选取某一点 O 为参考点,电场力把单位正电荷 q 从电路中任意一点 a 移动到参考点 O 电场力所做的功,称为 a 点的电位,记为 V_a 。

在此规定下,参考点 O 本身的电位为零,即 $V_O = 0$,那么,参考点 O 就被称为电位参考点。参考点的选择完全是任意的,选取不同的参考点,电场中各点的电位数值也就不同。但是,参考点一旦选定后,电场中各点的电位就只能有一个数值,这就是电位的“单值性”。

由于 a 点的电位 $V_a = U_{aO}$, b 点的电位 $V_b = U_{bO}$,那么,任意两点 a 、 b 之间的电压就等于 a 、 b 两点的电位之差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2.3)$$

因此,一旦 a 、 b 两点位置确定,不管其参考点如何变更, a 、 b 两点之间的电压只有一个数值,这就是电压的“绝对性”。

同时,正电荷在电场的作用下总是从高电位端指向低电位端。

【例 1.2.1】 在图 1.2.2 中设 $U_{ab} = 5 \text{ V}$, $U_{ac} = 3 \text{ V}$,如分别以 a 、 b 为参考点,求 V_a 、 V_b 、 V_c 。

【解】 以 b 为参考点,则 $V_b = 0$

$$\text{因为 } U_{ab} = V_a - V_b$$

$$\text{所以 } V_a = U_{ab} + V_b = (5 + 0) \text{ V} = 5 \text{ V}$$

$$\text{又 } U_{ac} = V_a - V_c$$

$$\text{所以 } V_c = V_a - U_{ac} = (5 - 3) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$\text{以 } a \text{ 为参考点,则 } V_a = 0$$

$$\text{因为 } U_{ab} = V_a - V_b$$

$$\text{所以 } V_b = V_a - U_{ab} = (0 - 5) \text{ V} = -5 \text{ V}$$

$$\text{又 } U_{ac} = V_a - V_c$$

$$\text{所以 } V_c = V_a - U_{ac} = (0 - 3) \text{ V} = -3 \text{ V}$$

从上面的例子分析可以得到这样的结论:电位的数值与参考点的选择有关,而电压的数值与参考点的选择无关。

四、电动势

电动势是一个专门描述电源内部特性的物理量。在图 1.2.2 中可见,由于电场力的作用,正电荷不断的从 a 极经过导体移动到 b 极,其结果势必会改变电荷的分布。a 极的正电荷数不断减少、电位逐渐下降,而 b 极不断的得到从 a 极移来的正电荷、电位不断升高。随着时间的推移,a、b 两极之间的电位差将越来越小,它所产生的电场也就越来越弱,一旦 a、b 两极的电位相等时,导体中不再有电荷的移动。为了维持导体中电荷源源不断的移动,必须要有一种外力克服电场力的作用从另一条途径源源不断地把正电荷从低电位端(b 极)移到高电位端(a 极),使 a 极的电位升高,以保持导体中正电荷不断移动。在电源内部就存在着这种外力。外力把正电荷从低电位端 b 经过电源内部移动到高电位端 a 所做的功称为电源的电动势,用 E 表示。

在国际单位制中,电动势的单位也是伏[特]。

必须注意:在电源内部电动势 E 的方向规定为从低电位端指向高电位端。换句话说,当电动势是正时,电动势的方向是电位升高的方向。其次,电动势 E 的大小在数值上与电源的开路电压相等。因为当电源处于开路状态时,电源中没有电荷的移动,这时电场力与外力相平衡,电场力和外力对正电荷做功的能力相等。

【例 1.2.2】在图 1.2.3 中电动势 $E_1 = 20 \text{ V}$, $E_2 = 10 \text{ V}$,方向已在图中标明,求 U_{AB} 及 U_{BA} 的大小。

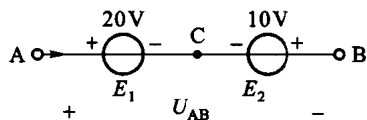


图 1.2.3 例 1.2.2 图

【解】假设电压降的方向为 U_{AB} (即箭头方向),显然 U_{AC} 、 U_{CB} 的方向与 U_{AB} 的方向一致,也就是说 A、B 两点间的电压是该支路上各段电压降(U_{AC} 、 U_{CB})的代数和。所以

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} = E_1 + (-E_2) = (20 - 10) \text{ V} = 10 \text{ V}$$

则 $U_{BA} = -U_{AB} = -10 \text{ V}$

五、电功率

电功率是电路分析中常用的另一个物理量。在电气工程中,电功率简称为功率。电功率是用来衡量每单位时间内所消耗电能大小的。

在图 1.2.4 所示的电路中 a、b 两点间的电压为 U ,流过的电流为 I ,根据电压的定义可知,当正电荷 q 在电场的作用下通过电阻 R 从 a 点移到 b 点,电场所做的功为

$$W = U \cdot q = U \cdot I \cdot t \quad (1.2.4)$$

这个功也就是电阻 R 在 t 时间内所吸收的电能,对于电阻来说吸收的电能全部转换成热能,其大小为

$$W_R = U \cdot I \cdot t = RI^2t$$

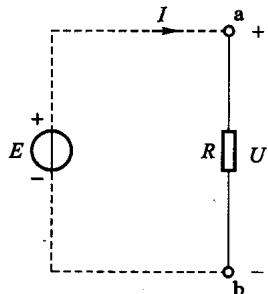


图 1.2.4 电阻吸收功率

在国际单位制中,电能、热能的单位是焦[耳],用字符 J 表示。

电阻吸收的功率可定义为:单位时间里能量的转换率。其数学表达式为

$$P = \frac{W_R}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = RI^2 \quad (1.2.5)$$

在国际单位制中,功率的单位是“瓦”,用字符 W 表示,还可以用 kW、mW 作单位,它们之间的换算关系为

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

式(1.2.4)表示电阻上的电压与电流的实际方向是相同的。我们也可以把功率的计算 $P = UI$ 用于任何一段有源电路。计算得到的功率 P 有正、负号,所得功率为正,说明该段电路吸收(消耗)功率,反之则是发出(提供)功率。

1.2.2 参考方向及选择原则

在电路分析或计算之前,很难对电路中某一段电路电流的流向和电压的极性立刻作出判断,因此,必须对待求的电流假定一个流向和对待求的电压假定一个极性或电位的高低,这种假定被称为电流和电压的参考方向,又称电流和电压的正方向。参考方向的选择是任意的。当参考方向选定以后在计算过程中就不可再作变更,电路中的电压或电流必须按照选定的参考方向列写电路方程式。

由于电压、电流的参考方向不一定是它们的实际方向,所以,此时的电压、电流就成为有正、负值之分的代数量。经过分析计算,若电压、电流的数值为正,则说明电压、电流的实际方向与参考方向一致;若为负值,则说明实际方向与参考方向相反,如图 1.2.5(a)、(b)、(c)、(d)所示。

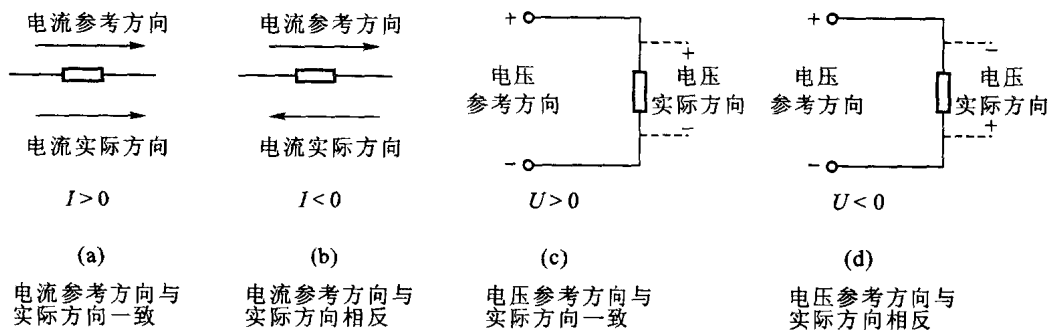


图 1.2.5 电流、电压的参考方向

另外,电路方程式中的正、负号与代数量本身的正、负值必须严格区别,不可混淆。

【例 1.2.3】 电路中有四个元件按图 1.2.6 的方式联接,每个元件上电压的方向如图中所示,且 $U_1 = -100 \text{ V}$, $U_2 = -50 \text{ V}$, $U_3 = 80 \text{ V}$ 。求 U_4 及 U_{CD} 的数值。

【解】 先设定电压 U_{AB} 的参考方向,根据已假设的参考方向列写电路方程式

$$U_{AB} = -U_1 + U_2$$

将已知数据代入,可得

$$U_{AB} = [-(-100) + (-50)] \text{ V} = (100 - 50) \text{ V} = 50 \text{ V}$$

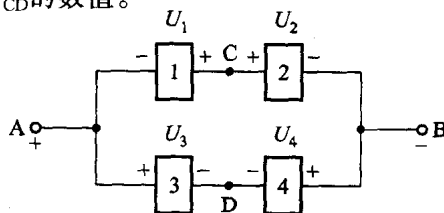


图 1.2.6 例 1.2.3 图

注意：括号里的“-”表示代数量为负值，括号外的正、负号是电路方程式的正负号，表示参考方向间的关系，二者之间不能混淆。

因为电路中任意两点的电压与路径无关，所以 $U_{AB} = U_3 - U_4$ 将 $U_{AB} = 50 \text{ V}$ 代入

可解得
$$U_4 = U_3 - U_{AB} = (80 - 50) \text{ V} = 30 \text{ V}$$

$$U_{CD} = U_2 + U_4 = (-50 + 30) \text{ V} = -20 \text{ V}$$

或
$$U_{CD} = U_1 + U_3 = (-100 + 80) \text{ V} = -20 \text{ V}$$

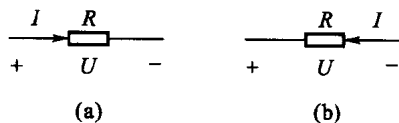
1.3 电路的基本定律与工作状态

1.3.1 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，用来确定电路各部分的电压、电流之间的关系，也称为电路的 VCR (Voltage Current Relation)

一、欧姆定律的一般形式

欧姆定律表明流过线性电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比。从图 1.3.1 中可写出它们之间的关系表达式为



$$U = \pm RI \quad (1.3.1)$$

U, I 参考方向相同 U, I 参考方向相反

图 1.3.1 欧姆定律

当电压、电流参考方向一致时[图(a)所示]，欧姆定律的表达式应取“+”；当电压、电流的参考方向相反时[图(b)所示]，欧姆定律的表达式应取“-”。式(1.3.1)中的比例常数称为电路的电阻，用符号 R 表示。它一方面表示电阻是一个消耗电能的理想电路元件，另一方面它也代表这个元件的参数。

电阻的单位是欧[姆]，用符号 Ω 表示。对大电阻则常以“千欧”(k Ω)、“兆欧”(M Ω)为单位。

电阻的大小与金属导体的有效长度、有效截面积及电阻率有关，它们之间的关系可写为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.3.2)$$

电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，其单位是“西[门子]”(S)即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.3)$$

如果电阻是一个常数，与通过它的电流无关，这样的电阻称为线性电阻，线性电阻上电压、电流的相互关系遵守欧姆定律。当流过电阻上的电流或电阻两端的电压变化时，电阻的阻值也随之改变，这样的电阻称为非线性电阻。显然，非线性电阻上的电压、电流是不遵守欧姆定律的。本章所阐述的电阻如无特殊说明则均指线性电阻。

二、含源支路的欧姆定律

如果在电路的某一条支路中不但有电阻元件，而且含有电动势 E ，那么，这条支路就称为含源支路，如图 1.3.2 所示。在含源支路 ab 中有二个电阻 R_1, R_2 和二个电动势 E_1, E_2 。首先设定

该支路电压、电流的参考方向(如图示),按设定的参考方向列出 a、b 两点之间的电压

$$U_{ab} = R_1 \cdot I + E_1 + R_2 \cdot I - E_2$$

经整理后可得

$$I = \frac{U_{ab} + (E_2 - E_1)}{R_1 + R_2}$$

如果含源支路中含有多个电阻及多个电动势,那么,就可以写出

$$I = \frac{\pm U \pm E}{\Sigma R} \quad (1.3.4)$$

式(1.3.4)中的分母是含源支路中所有电阻的代数和;分子是该含源支路两端的电压和含源支路中所有电动势的代数和。当端电压 U 与电流 I 的参考方向一致时,端电压取“+”,反之取“-”;当电动势 E 与电流 I 的参考方向一致时,电动势取“+”,反之取“-”。

三、闭合电路的欧姆定律

含源支路的两端 a、b 用一根导线连接起来,就形成了一个闭合回路,如图 1.3.3 所示。闭合回路中的电压、电流之间的关系也必须遵守欧姆定律,即

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R} \quad (1.3.5)$$

式(1.3.5)中分母是该闭合回路中所有电阻的代数和;分子是闭合回路中所有电动势的代数和,当电动势 E 与电流 I 的流动方向一致时,电动势取“+”,反之取“-”。

1.3.2 电路的工作状态

电路在不同的工作条件下会处于不同的工作状态,也有不同的特点,充分了解电路不同的工作状态和特点对安全用电和正确使用各种电气设备是十分有益的。现以最简单的直流电路(如图 1.3.4 所示)来分析电路的有载、开路、短路三种工作状态。

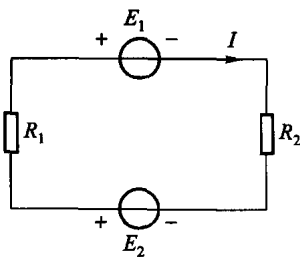


图 1.3.3 闭合回路欧姆定律

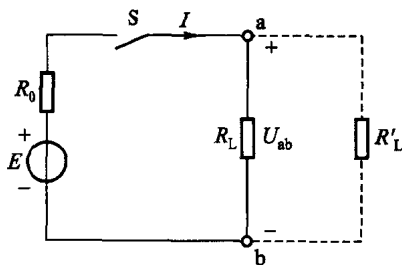


图 1.3.4 电路的有载工作状态

一、有载状态

把开关 S 合上,接通电源和负载 R_L ,电路中产生了电流 I ,电路处于有载状态。

1. 电压、电流与功率

在电源一定的前提下,电路中电流 I 的大小取决于负载的大小,根据闭合回路欧姆定律,可列出

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1.3.6)$$

负载两端的电压

$$U_{ab} = E - I \cdot R_0 \quad (1.3.7)$$

上式中电动势 E 与内阻 R_0 是常数, 根据式(1.3.7)可画出电源端口电压 U_{ab} 与输出电流 I 之间关系的 $U-I$ 曲线, 如图 1.3.5 所示。

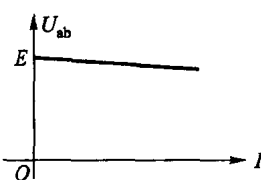


图 1.3.5 电路的有载工作状态的 $U-I$ 曲线

从 $U-I$ 曲线中可见, 当负载电流逐渐增加时电源端口电压 U_{ab} 将逐渐减小, 电路只要接上负载, 电源的端口电压总是小于电动势 E 。显然, 负载越大则端口电压越小。必须注意: 一般所指的负载大小是指负载电流的大小、负载功率的大小, 而不是指负载电阻阻值的大小。

电源的内阻 R_0 一般很小, 即 $R_0 \ll R_L$, 所以在内阻 R_0 上的电压降很小, 负载两端的电压 $U_{ab} \approx E$, 说明电路的带负载能力较强。

将式(1.3.7)两边乘以电流 I , 得

$$U_{ab} \cdot I = E \cdot I - I^2 \cdot R_0 \quad (1.3.8)$$

即

$$P_L = P_E - \Delta P$$

上式中 $P_E = E \cdot I$ 表示电源发出的功率, $\Delta P = I^2 \cdot R_0$ 表示电源内阻上消耗的功率, $P_L = U_{ab} \cdot I$ 表示负载上得到的功率。

负载上消耗的电能可按式(1.2.4)进行计算, 在工程上常用千瓦小时(或千瓦时)来作为计量电能的实用单位, 通常电度表上显示的读数 1 度电就是表示功率为 1 千瓦的电气设备使用 1 小时所消耗的电能, 可记为

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

【例 1.3.1】 有一个 220 V、40 W 的台灯, 接到 220 V 的电源上, 求通过电灯的电流和在工作电压下的电阻。若每晚使用 3 小时, 每月将消耗几度电?

$$\text{【解】 } I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} \text{ A} \approx 0.182 \text{ A}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1210 \Omega$$

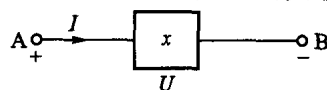
$$W = Pt = 40 \times 3 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

一个月的用电量是 3.6 度。

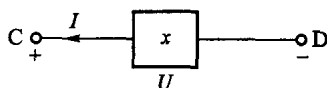
2. 电源与负载的判别

一个电路由多个电路元件所组成, 判别这些元件在电路中是起到电源作用还是起到负载作用, 也是电路分析的目的之一。

如果某一段电路 AB 两端的电压 U 与流过的电流 I 参考方向一致, 如图 1.3.6(a) 所示。应用公式 $P = UI$ 经计算得到的功率 $P > 0$, 则说明该段电路在消耗电能、吸收功率, x 是负载元件。若经计算得到的功率 $P < 0$, 则说明该电路在向外供电发出功率, x 实际上是电源元件。



(a) U 、 I 参考方向一致



(b) U 、 I 参考方向相反

图 1.3.6 负载或电源的判别

如果电路 AB 两端的电压 U 与流过的电流 I 参考方向相反,

如图 1.3.6(b)所示。经计算得到的功率 $P < 0$, 则说明该段电路在消耗电能、吸收功率, x 是负载元件。若经计算得到的功率 $P > 0$, 则说明该段电路在向外供电发出功率, x 实际上是电源元件。

· 换言之, 对于一个电源来说, 当电压 U_S 和电流 I 的实际方向相反时, 电流从电源的“+”端流出, 那么此电源是发出功率, 处于向外供电状态, 如图 1.3.7(a)所示。反之, 如果 U_S 和 I 的实际方向相同, 电流从电源的“+”端流入, 那么此电源是吸收功率, 处于充电状态, 如图 1.3.7(b)所示。

【例 1.3.2】 在图 1.3.8 中, 已知 $I_1 = 4 \text{ A}$, $I_2 = 2 \text{ A}$, $I_3 = -2 \text{ A}$, 其他参数及参考方向如图所示。试确定电路元件 x 是电源还是负载, x 元件两端电压 U_x , 并通过计算确定此电路的功率是否平衡?

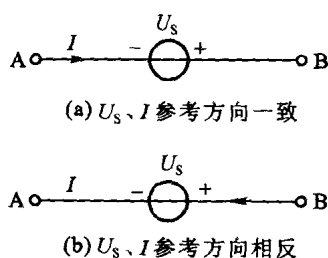


图 1.3.7 电源的充放电状态

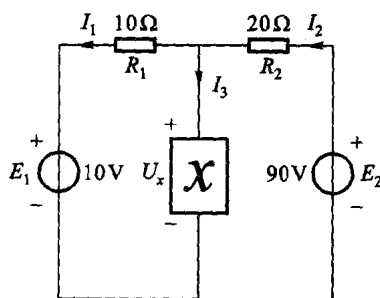


图 1.3.8 例 1.3.2 图

【解】 根据欧姆定律可得

$$\begin{aligned} U_x &= R_1 \cdot I_1 + E_1 \\ &= (10 \times 4 + 10) \text{ V} = 50 \text{ V} \\ P_x &= U_x \cdot I_3 = 50 \times (-2) \text{ W} \\ &= -100 \text{ W} \end{aligned}$$

因为 U_x 与 I_3 参考方向一致, 但 $P < 0$, 根据前面所讲述的内容可以确定电路元件 x 实际上是电源。

$$P_{R_1} = R_1 \cdot I_1^2 = 10 \times 16 \text{ W} = 160 \text{ W} \quad (\text{消耗电能})$$

$$P_{R_2} = R_2 \cdot I_2^2 = 20 \times 4 \text{ W} = 80 \text{ W} \quad (\text{消耗电能})$$

对于电源来说 E_1 与 I_1 方向相反

$$P_{E_1} = -E_1 \cdot I_1 = -10 \times 4 \text{ W} = -40 \text{ W} \quad (\text{电源处充电状态})$$

E_2 与 I_2 参考方向一致

$$P_{E_2} = E_2 \cdot I_2 = 90 \times 2 \text{ W} = 180 \text{ W} \quad (\text{电源向外供电})$$

电路中总的电源功率

· 10 ·