



高职高专“十二五”规划教材

电路分析与应用

DIANLU FENXI YU YINGYONG

沈 翊 主编
陈昌建 主审

第二版



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

电路分析与应用

第二版

沈 翊 主 编

赵素英 马智浩 副主编

陈昌建 主 审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是高职高专院校电子专业的基础理论教材。本书以应用知识为主,注重理论联系实际。全书共有九章,内容包括电路基本概念和基本定律、直流电阻电路的分析、正弦交流电路的稳态分析、谐振电路、互感耦合电路、二端口网络、非正弦周期交流电路、线性电路过渡过程的时域分析、线性电路过渡过程的复频域分析。每章前有本章内容学习目标,每章后有知识梳理与学习导航,书后还附有部分习题参考答案。

本教材编写中在注重保持知识的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。

本书可作为高职高专院校、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和有关的工程技术人员参考。

编 主 编 沈 翊
编 主 编 曹 晋 臣 英 素 斌
审 主 审 曹 昌 荆

图书在版编目(CIP)数据

电路分析与应用/沈翊主编.—2版.—北京:化学工业出版社,2015.7

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-24159-7

I. ①电… II. ①沈… III. ①电路分析-高等职业教育-教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第118434号

责任编辑:廉 静 张双进
责任校对:吴 静

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数432千字 2015年6月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

前言

本书在结构、内容安排等方面,吸收了编者多年来在教学改革、专接本辅导、教材建设等方面取得的经验,力求全面体现高等职业教育的特点,满足当前教学的需要。我们仔细地进行了电子电气行业职业岗位群技能培养需求分析、“电路基础”课程任务与教学目标分析,以及高职高专学生特征分析,以便准确地把握“电路基础”课程标准。

本书继承了前版知识内容组织得当、深浅度适宜高职高专层次教学,注重知识的应用,突出实用性,强调技能性,体现职业性等优点,具有如下特点。

① 反映产业技术升级情况,通过对电子、电气行业职业岗位群的职业技能需求分析,并对接职业标准和岗位要求,确定本教材的知识、技能及素质培养目标。教材融合电气电子强弱电技术,有利于培养知识面宽、适应性强的复合型人才。

② 教材的结构采用模块式,整体分为基础模块和选用模块两大部分。基础模块(前五章)是必学模块,其教学要求对于各类学校、不同学制、不同专业基本一致。选用模块(后四章)是在必学模块基础上向专业方向进行的拓展与加深,也可用作学生专科接本科考试的学习用书。尽量使两模块之间、各章节之间、各知识点之间构成从易到难、循序渐进的逻辑体系。

③ 根据电路基础课程教学的特点,在内容选取上,重视基本概念、基本定律、基本分析方法的介绍,淡化复杂的理论分析,如对电路的暂态分析,采用分离变量法,避免了微分方程的求解,降低了理论难度。每章都有学习目标:知识目标、技能目标、培养目标,都有学习导航,在导航中有:知识点;难点与重点;学习方法。每节之后辅以适量的思考与讨论,并精选了每章的习题。全书内容层次清晰、循序渐进,力求使学生对基本理论能系统、深入地理解,为今后的学习奠定基础,同时注重分析问题、解决问题能力的培养。

④ 强化工程技术应用能力的培养,特别注意联系实际讲应用。例如:第一章的功率计算及电源、负载的判别;第二章测量技术中常用的可以测量温度的电桥电路;第三章的三相功率的测量;第四章的谐振电路的应用;第五章的同名端的测量及变压器;第六章的电抗移向器、滤波器;第七章的非正弦周期信号的频谱图;第八章的衰减振荡器;第九章的微分电路与积分电路等。此外,教材在讲述理论时,随时引入应用实例,使得教学内容更加生动实用,体现了课程教学的职业教育特色。

⑤ 体现技能培养。教材注重将理论讲授与实践训练相结合,通过其配套的《电工技术实训教程》实现对学生的动手能力和操作能力的培养。

⑥ 文笔流畅,概念表达清楚准确,深入浅出,通俗易懂,图文并茂。特别值得一提的是在每章的前面都增加了“哲思与科学家”,内容不但呈现相关章的技术背景,还具有浓厚的人文色彩,文理渗透、启发诱导,有感染力和教义,体现素质教育。

⑦ 本书的参考学时数为60~120学时,各校、各专业可根据自己的实际情况制定教学方案。

全书共有九章,内容包括电路基本概念和基本定律、直流电阻电路的分析、正弦交流电路的稳态分析、谐振电路、互感耦合电路、二端口网络、非正弦周期交流电路、线性电路过渡过程的时域分析和复频域分析。本书由沈翊主编,副主编有赵素英、马智浩。参加编写人

员有夏晨、武玉英、梁海军。参编人员及分工如下：赵素英（编写第一、三章）；马智浩（编写第四、六章）；武玉英（编写第五章、部分习题参考答案）；夏晨（编写第七、八章）；梁海军（编写第九章、附录及所有高等数学内容）；沈翔（编写第二章并统编全书）。

本书由陈昌建教授主审，她认真仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，错误与不妥之处在所难免，恳请同行和读者指正。

编者

2015年3月

第一版前言

本书根据“高职高专学生的培养目标，强化实践能力和创新意识的培养反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段，造就技术实用型人才为立足点”的编写原则，力求使教材体现“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。本教材在编写过程中注重保持知识系统性的基础上，尽量压缩、简化理论上的推导过程，增加一些实用性较强、与生产实践相近的实例，以适应高职高专学生的学习需求，为学习后续课程打下基础，并为培养学生对小产品、小制作和创新的实践能力打下基础。全书共九章，作者根据多年来的教学实践经验，将各部分内容做如下安排：电路基本概念和定律；直流电阻电路的分析；正弦交流电路的稳态分析；谐振电路；互感耦合电路；二端口网络；非正弦周期电流电路；线性电路过渡过程的时域分析；线性电路过渡的复频域分析；附录。每章前有本章内容介绍，每章后有本章小结与习题，书后还附有部分习题参考答案。

本书由沈翊主编，副主编有赵素英、马智浩。参加编写的人员有马丽、韩志伟。全书由李志全主审。参编人员及分工如下：沈翊（编写第1、3章并统稿）；马丽（编写第2章、部分习题参考答案）；赵素英（编写第4、5章）；马智浩（编写第6、7、9章、附录）；韩志伟（编写第8章）。

尽管我们对本书尽心尽力，力求完善，但因编者水平所限，不妥之处恳请读者批评指正。

编者

2007年8月

目 录

第一章 电路基本概念和定律	2
第一节 电路和电路模型	2
第二节 电路的基本物理量	4
第三节 电阻元件和欧姆定律	8
第四节 电压源与电流源	10
第五节 基尔霍夫定律	11
第六节 电路中各点电位的分析	14
知识梳理与学习导航	18
习题一	19
第二章 直流电阻电路的分析	23
第一节 电阻的串联、并联及混联	23
第二节 电阻的星形、三角形连接及其等效变换	27
第三节 两种电源模型及等效变换	29
第四节 支路电流法	33
第五节 网孔电流法	35
第六节 节点电位法	38
第七节 叠加定理	41
第八节 戴维南定理与诺顿定理	45
第九节 负载获得最大功率的条件	48
第十节 受控源	50
知识梳理与学习导航	53
习题二	54
第三章 正弦交流电路的稳态分析	63
第一节 正弦交流电路的基本概念	64
第二节 正弦量的相量表示方法	67
第三节 电容元件和电感元件	71
第四节 单一元件伏安关系的相量形式	77
第五节 基尔霍夫定律的相量形式及简单正弦电路的分析	83
第六节 复阻抗、复导纳及其等效变换	85
第七节 正弦电路的功率及功率因数	94
第八节 三相电源	99
第九节 三相电路的分析与计算	102
知识梳理与学习导航	109
习题三	112
第四章 谐振电路	118

第一节 串联谐振.....	118
第二节 并联谐振.....	125
第三节 谐振的应用.....	129
知识梳理与学习导航.....	131
习题四.....	133
第五章 互感耦合电路	135
第一节 互感与同名端.....	135
第二节 互感线圈的连接.....	140
第三节 变压器.....	145
知识梳理与学习导航.....	150
习题五.....	152
第六章 二端口网络	155
第一节 概述.....	155
第二节 二端口网络的基本方程和参数.....	158
第三节 网络函数.....	165
第四节 网络的连接.....	168
第五节 二端口网络的特性阻抗与传输常数.....	172
第六节 常用无源二端口网络应用.....	176
知识梳理与学习导航.....	178
习题六.....	181
第七章 非正弦周期电流电路	184
第一节 非正弦周期信号.....	184
第二节 非正弦周期量的有效值和平均值.....	188
第三节 线性非正弦周期电流电路的计算.....	190
知识梳理与学习导航.....	193
习题七.....	194
第八章 线性电路过渡过程的时域分析	197
第一节 换路定律和初始值计算.....	197
第二节 一阶电路的零输入响应.....	200
第三节 一阶电路的零状态响应.....	205
第四节 一阶电路的全响应.....	209
第五节 阶跃函数和一阶电路的阶跃响应.....	215
第六节 二阶电路的零输入响应.....	217
知识梳理与学习导航.....	222
习题八.....	225
第九章 线性电路过渡过程的复频域分析	231
第一节 拉普拉斯变换及基本性质.....	231
第二节 部分分式法进行拉普拉斯反变换.....	234
第三节 线性电路的复频域解法.....	237

知识梳理与学习导航	243
习题九	244
附录	247
附录 A 线性联立方程组的求解	247
附录 B 复数	257
附录 C 三角恒等式简表	261
附录 D 证明 $m=b-(n-1)$ 个网孔	261
附录 E 部分习题参考答案	262
参考文献	270

**哲思语录：合抱之木，生于毫末；九层之台，
起于累土；千里之行，始于足下。**

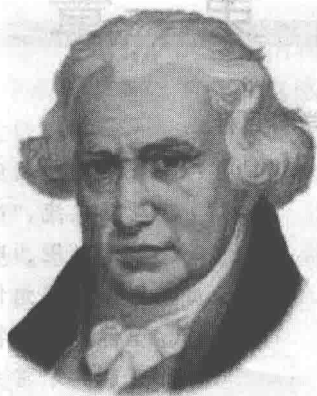
科学家简介

瓦特 (James Watt, 詹姆斯·瓦特 1736 年 1 月 19 日~1819 年 8 月 19 日), 英国皇家学会院士, 爱丁堡皇家学会院士, 是苏格兰著名的发明家和机械工程师。1776 年制造出第一台有实用价值的蒸汽机, 以后又经过一系列重大改进, 使之成为“万能的原动机”, 在工业上得到广泛应用。他发展出马力的概念以及以他名字命名的功的国际标准单位——瓦特, 瓦特是国际单位制中功率和辐射通量的计量单位。

瓦特生于英国格拉斯哥。他对当时已出现的蒸汽机原始雏形作了一系列的重大改进, 发明了单缸单动式和单缸双动式蒸汽机, 提高了蒸汽机的热效率和运行可靠性, 对当时社会生产力的发展作出了杰出贡献。他改良了蒸汽机、发明了气压表、汽动锤。美国人富尔顿发明了用瓦特蒸汽机作动力的轮船; 英国人史蒂芬逊发明了用瓦特蒸汽机作动力的火车。蒸汽机车加快了 19 世纪的运输速度: 蒸汽机→蒸汽轮机→发电机, 蒸汽为第二次工业革命即电力发展铺平了道路。在瓦特的讣告中, 对他发明的蒸汽机有这样的赞颂: “它武装了人类, 使虚弱无力的双手变得力大无穷, 健全了人类的大脑以处理一切难题。它为机械动力在未来创造奇迹打下了坚实的基础, 将有助并报偿后代的劳动。”

欧姆 (Georg Simon Ohm, 乔治·西蒙·欧姆 1787 年 5 月 16 日~1854 年 7 月 7 日) 一个天才的研究者是德国物理学家, 最主要的贡献是通过实验发现了电流公式, 后来被称为欧姆定律。为纪念其重要贡献, 人们将其名字作为电阻单位。欧姆的名字也被用于其他物理及相关技术内容中, 比如“欧姆接触”、“欧姆杀菌”、“欧姆表”等。

欧姆生于德国埃尔兰根城, 1826 年, 欧姆发现了电学上的一个重要定律——欧姆定律, 这是他最大的贡献。这个定律在我们今天看来很简单, 然而它的发现过程却并非如一般人想象的那么简单。欧姆为此付出了十分艰巨的劳动。在那个年代, 人们对电流强度、电压、电阻等概念都还不清楚, 特别是电阻的概念还没有, 当然也就根本谈不上对它们进行精确测量了; 况且欧姆本人在他的研究过程中, 也几乎没有机会跟他那个时代的物理学家进行接触, 他的这一发现是独立进行的。欧姆独创地运用库仑的方法制造了电流扭力秤, 用来测量电流强度, 引入和定义了电动势、电流强度和电阻的精确概念。1826 年, 他把研究成果写成题目为《金属导电定律的测定》的论文, 发表在德国《化学和物理学杂志》上。欧姆在 1827 年出版的《动力电路的数学研究》一书中, 从理论上推导了欧姆定律, 此外他对声学也有贡献。欧姆定律及其公式的发现, 给电学的计算, 带来了很大的方便。1841 年, 英国皇家学会授予他科普利金质奖章, 并且宣称欧姆定律是“在精密实验领域中最突出的发现”, 他得到了应有的荣誉。1854 年, 欧姆在德国曼纳希逝世。十年之后英国科学促进会为了纪念他, 决定用欧姆的名字作为电阻单位的名称。



第一章 电路基本概念和定律

☆学习目标

- ☆知识目标：
- ①理解电路与电路模型的概念；
 - ②理解电流、电压、功率的定义及其相互关系；
 - ③理解电压、电流参考方向的概念；
 - ④理解电阻元件和欧姆定律；
 - ⑤理解电源的特点及输出的电压与电流的关系；
 - ⑥理解基尔霍夫定律；
 - ⑦理解直流电路中各点电位的分析方法。
- ☆技能目标：
- ①掌握欧姆定律的应用计算方法；
 - ②掌握电压源、电流源的属性和端口对外特性（VCR）；
 - ③熟练掌握基尔霍夫定律分析计算电路；
 - ④熟练掌握功率的计算及元件状态的确定；
 - ⑤熟练掌握直流电路中电位的计算方法；
 - ⑥掌握直流电流、直流电压和直流电位的测量方法。
- ☆培养目标：
- ①培养学生自主学习的习惯；
 - ②培养学生勤于思考、做事认真的良好作风；
 - ③培养学生团队合作精神，具备与人沟通和协调的能力。

本章主要介绍了电路的基本概念和基本变量的基础上，阐明电路中电流、电压应服从的基本规律，即它们的约束关系。同时讨论电阻、电压源和电流源等常见理想电路元件，这是分析与计算电路的基础。本章介绍基本概念：电路、电路模型、电路图；基本物理量：电流、电压、电位、电功率；基本元件：电阻、电压源、电流源；基本定律：欧姆定律、基尔霍夫定律。

第一节 电路和电路模型

一、电路

人们在日常生活、生产、科研中广泛地使用着种类繁多的电路。例如，为了采光而使用的照明电路；收音机和电视机中将微弱信号进行放大的电路；从各种不同信号中选取所需信号的输入调谐电路；交通运输中使用的各种信号控制电路；传输电能的超高压输电线路；自动化生产线上有各种专门用途的电路等。总之，人们的日常生活和国民经济的发展离不开各种电路。

电路是由电器设备和元器件按一定方式连接起来，为电流流通提供了路径的总体，也叫网络。电路中供给电能的设备和器件称为电源，电路中使用电能的设备或元器件称为负载，手电筒电路（见图1-1）就是一个简单的实用电

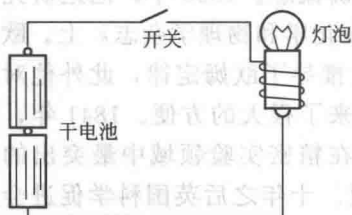


图 1-1 手电筒电路

路。这个电路是由一个电源（干电池）、一个负载（小灯泡）、一个开关和连接导体（手电筒金属壳或金属条）组成。

二、电路模型

实际电路中元件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有共同之处。有的元件主要消耗电能，如各种电阻器、电灯、电烙铁、电炉等；有的元件主要储存磁场能量，如各种电感线圈；有的元件主要储存电场能量，如各种类型的电容器；有的元件和设备主要供给电能，如电池和发电机。为了便于对电路进行分析和计算，常把实际的元件加以近似化、理想化，在一定的条件下忽略其次要性质，用足以表征其主要特征的“模型”来表示，即用理想元件来表示。例如，用“电阻元件”这样一个理想电路元件来反映消耗电能的特征，因为当电流通过电阻器时，在它内部进行着把电能转换成热能等不可逆过程。这样，在电源频率不十分高的电路中所有的电阻器、电烙铁、电炉等实际电路元器件，都可以用“电阻元件”这个模型来近似地表示。同样，在一定条件下，线圈可以用“电感元件”来近似地表示；电容器可以用“电容元件”来近似地表示。

这种由理想元件构成的电路，就称为实际电路的“电路模型”。图 1-2 就是图 1-1 的电路模型。

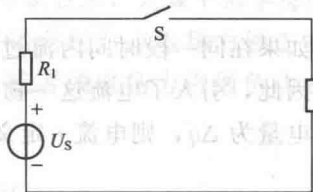


图 1-2 图 1-1 的电路模型

三、应用示例

当今，在人类社会生活的各个领域，电无处不在。在电子、电气技术的应用中，从简单到复杂，从手动到自动，从模拟到数字，电子技术越来越先进，应用也越来越广泛。如图 1-3 所示，在电力系统、洗衣机、电冰箱、汽车、电脑、手机等应用中，涉及电的技术已经相当现代化。面对各式各样的实际电路，我们如何了解电路的性能？如果出现了故障，如何把它修好？如何设计一个新电路？为了解决这些问题，作为工程技术人员，必须认真学习电路的基本知识，掌握分析电路的基本方法。

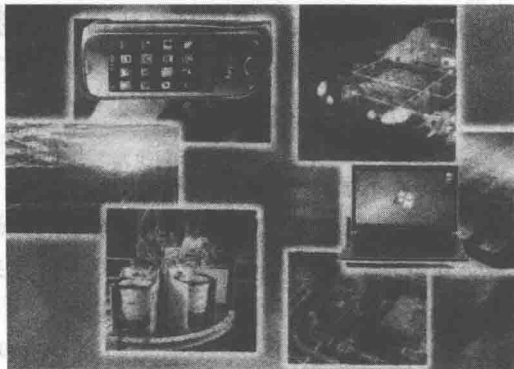


图 1-3 电的广泛应用

【思考与讨论】

1. 举一生活中的电路实例，分析它是由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
2. 绘出一个简单的实际电路模型。
3. 一个实际电路器件是否只能由一个理想电路元件来抽象？为什么？试举例说明。

第二节 电路的基本物理量

一、电流

电荷做有规则的定向运动形成电流。在金属导线中, 电流是由带负电的电子的定向运动所形成, 而在电解液和气态导体中, 电流则是由正、负离子以及电子的定向运动所形成。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。实践表明, 正电荷沿某一方向运动和等量的负电荷朝反方向运动所产生的电效应是一样的, 因此, 如果电流是由电子的定向运动形成, 那么, 该电流的实际方向可以认为是电子运动的反方向, 如图 1-4 所示。

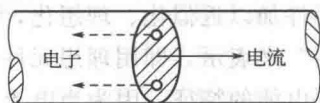


图 1-4 电荷的定向运动

如果在同一段时间内流过导体横截面的电荷量不一样, 则导体中电流的大小是不相同的, 因此, 引入了电流这一物理量来表征电流的大小。设在一段时间 Δt 内, 通过导体横截面的电量为 Δq , 则电流 i 定义为

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

式中 q —— 电荷量, C (库仑);

t —— 时间, s (秒);

i —— 电流, A (安培)。

在实际使用中, 电流强度还会用到较小一些的单位: mA (毫安) 和 μA (微安), 它们之间的换算关系如下。

$$\begin{aligned} 1\text{A} &= 1000\text{mA} \\ 1\text{mA} &= 1000\mu\text{A} \end{aligned}$$

大小和方向均不随时间改变的电流称为恒定电流, 简称直流, 常用字母 DC 来表示。显然, 对于恒定电流, 在任意相同时间间隔 Δt 内通过导体横截面的电荷量 Δq 都是相同的, 式(1-1)可以简化为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \text{恒量} \quad (1-2)$$

注意: 用大写字母 I 表示恒定电流, 小写字母 i 表示变化电流。

大小和方向随时间变化的电流叫变动电流。在变动电流中有一种呈周期性变化且一个周期内平均值为零的电流称为交变电流, 简称交流, 常用字母 AC 来表示。正弦交流是一种常见的、典型的交变电流。本书第三章将详细讨论正弦交流电路。

二、电压

从物理课中已经知道, 电荷在电场力的作用下移动, 电场力要做功。在电路中, 电场力将单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功称为 A、B 两点间的电压。设有正电荷 dq 在电场力的作用下, 从 A 点移到 B 点, 电场力做的功为 $d\omega$, 则 A、B 两点间的电压为

$$u_{AB} = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

式中, ω 的单位是 J (焦耳); q 的单位是 C (库仑); u_{AB} 的单位是 V (伏特)。在实际使用中, 电压还会用到较大的单位 kV (千伏) 和较小的单位 mV (毫伏)、 μV (微伏), 它

们之间的换算关系如下。

$$1\text{kV}=1000\text{V}$$

$$1\text{V}=1000\text{mV}$$

$$1\text{mV}=1000\mu\text{V}$$

电压的实际方向规定为正电荷在电场中受电场力作用而移动的方向。

如果电压的大小和方向均不随时间改变,则称为直流电压。显然,对于直流电压,在任何时刻电场力将电荷 q 从 A 点移到 B 点所做的功都是相同的,式(1-3)可以简化成

$$U_{AB} = \frac{w}{q} \quad (1-4)$$

与前面讨论电流时一样,用大写字母 U 代表直流电压,为了区别,小写字母 u 代表变化的电压。

电压总是对电路中两点而言,所以通常用带双下标的字母来表示,且双下标字母的顺序与计算该电压时两点之间的顺序相对应。设正电荷 q 从 A 点运动到 B 点电场力做正功 dw ,那么,该电荷从 B 点回到 A 点时将克服电场力而做功 dw_{BA} 或者说电场力将做负功 dw_{BA} 。根据物理学的知识可知, $dw_{AB} = -dw_{BA}$, 于是有

$$u_{BA} = \frac{-dw_{AB}}{q} = \frac{+dw_{BA}}{q} = -u_{AB} \quad (1-5)$$

由此可知,改变电压起点与终点的顺序,电压的数值不变,但要相差一个负号。

三、电位

在电子线路中,经常会遇到需要测量或分析电路中各点与某个固定点之间电压的情况,此时往往把该固定点称为参考点,而把电路中各点与参考点之间的电压称为各点的电位。电位通常用字母 V 表示,如 A 点的电位记作 V_A 。电位与电压的单位相同。

参考点在电路图中常用符号“ $\perp$ ”表示。当参考点选定以后,电路中各点的电位便有一固定的数值。下面来研究电路中任意两点 A 和 B 的电位 (V_A 和 V_B) 与这两点的电压 (u_{AB}) 之间的关系。设在图 1-5 所示的一段电路中取 O 点为参考点,于是有

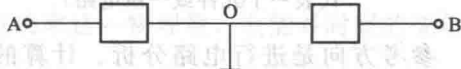


图 1-5 电位表示方法

$$V_A = u_{AO}, V_B = u_{BO}$$

A、B 两点的电位差为

$$V_A - V_B = u_{AO} - u_{BO} = u_{AO} + u_{OB}$$

这里 $u_{AO} + u_{OB}$ 就是电场力将单位正电荷从 A 点经过 O 点再移到 B 点所做的功,也就是 A、B 两点之间的电压 u_{AB} , 即有

$$u_{AB} = V_A - V_B \quad (1-6)$$

这就是说,电路中两点之间的电压等于该两点之间的电位差。在电场力的作用下,正电荷总是从高电位点移向低电位点,因此在引入了电位概念之后,也可以说,电压的实际方向是由高电位点指向低电位点。这种对电压方向的规定更加实用。

电路中各点的电位值与参考点的选择有关,当所选的参考点变动时,各点的电位值将随之变动,因此,在电路中不指定参考点而谈论各点的电位是没有意义的。另外,参考点本身的电位为零,即 $V_O = 0$, 所以参考点也叫零电位点。

四、电流与电压的参考方向

电流和电压是电路分析中通常要求解的物理量,常称为电路变量。前面对这些电路变

量的方向做了明确的规定。在简单的电路里,电流和电压的实际方向往往可以明显地预见到,但对比较复杂的电路,却很难直观地判断出它们的实际方向,有时电流、电压的方向还在不断地改变,更是无法在电路中用一个固定的箭头来表示它们的真实方向。在这种情况下,可以先任意选取一个方向作为电流(或电压)的方向并标注在电路上,根据这个方向再结合有关的电路定律进行分析、计算。这个任意选取的方向称为参考方向。若据此而求得的电流(或电压)为正值,则其实际方向与设定的参考方向相同;若求得的电流(或电压)为负值,则其实际方向与设定的参考方向相反。

参考方向在电路中一般用实线箭头表示,也可以用双下标表示,如 i_{AB} 、 u_{AB} 等,其参考方向表示由 A 指向 B。除此以外,电压参考方向还可以用“参考极性”的标注方法来表示,即在电路或元件两端标以“+”“-”符号,“+”号表示假设为高电位端,“-”号表示假设为低电位端,由高电位端指向低电位端的方向就是假设的电压的参考方向,这是较常用的一种电压参考极性的表示方法,如图 1-6 所示。

电流参考方向和电压参考方向可以任意选定,为了方便起见,往往将一段电路或一个元件上的电流和电压的参考方向选成一致,电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向,简称关联方向,电压和电流的关联参考方向如图 1-7 所示,本书中未特别说明,均采用关联参考方向。

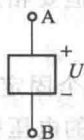


图 1-6 电压参考极性的表示方法(方框代表一个元件或一段电路)

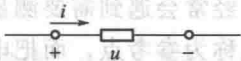


图 1-7 电压和电流的关联参考方向

参考方向是进行电路分析、计算的一个重要概念。在选取一定参考方向的前提下,电流、电压都是代数量,其实际方向由参考方向与该代数量的正、负来决定。不规定参考方向而去谈论一个电流或电压值是没有意义的。读者应注意养成习惯,每提及一个电流或电压,应同时指明其参考方向;每求解一个电流或电压,应预先设定其参考方向。

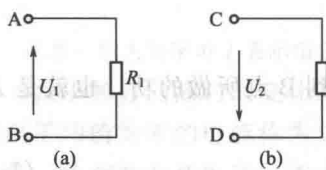


图 1-8 例 1-1 图

【例 1-1】 在如图 1-8 所示的电路中,已知 $U_1 = -100\text{V}$, $U_2 = 200\text{V}$, 求 U_{AB} 和 U_{CD} 各为多少?

解 U_1 和 U_2 是以图中箭头的方向为其参考方向,现 U_{AB} 表示的参考方向与 U_1 的箭头方向相反 [图 1-8(a)], U_{CD} 表示的参考方向与箭头方向一致 [图 1-8(b)], 故有

$$U_{AB} = -U_1 = -(-100\text{V}) = 100\text{V}$$

$$U_{CD} = U_2 = 200\text{V}$$

五、电能与电功率

1. 电能

电流通过电路元件时,电场力要做功。当有电流从元件的高电位端流入,低电位端流出,即有正电荷从元件的“+”端移到“-”端时,电场力做正功,电能转化为其他形式的能量。例如,电流流过电阻元件时电能转化为热能,或者电流流过被充电的电池时电能转换为化学能,此时元件消耗电能,见图 1-9(a)。相反,当电流从元件的低电位端流入,高电位

端流出, 即有正电荷从元件的“—”端移到“+”端时, 电场力做负功, 元件将其他形式的能量转换为电能, 例如正在供电的电源, 此时元件向外提供电能, 如图 1-9(b) 所示。

设在 dt 时间内, 有正电荷 dq 从元件的“+”端移到“—”端, 若元件两端的电压为 u , 则电场力移动电荷做的功为

$$dw = u dq = ui dt \quad (1-7)$$

即在 dt 时间内, 元件消耗了电能 dw 。如果正电荷 dq 是从元件的“—”端移到“+”端, 则电场力做负功, dw 表示元件提供电能。

在直流的情形下, 电压 U 和电流 I 都是常量, 根据式(1-7), 电场力做的功为

$$W = \int_0^t dw = \int_0^t ui dt = UI t \quad (1-8)$$

至于元件是消耗电能还是提供电能, 则要视电压与电流的实际方向而定, 在电压和电流取关联参考方向时, 若算得 $W > 0$, 说明 U 、 I 实际方向与参考方向一致, 即有电流从元件的高电位端流入、低电位端流出, 说明元件消耗电能; 若算得 $W < 0$ 则说明 U 、 I 实际方向与参考方向相反, 即有电流从元件的低电位端流入、高电位端流出, 说明元件向外提供电能。

电功的单位是 J (焦耳), 工程上也常用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时, 俗称“度”) 做单位, 它们的换算关系为

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

2. 电功率

为了表示元件消耗或提供电能的快慢, 引入了电功率这一物理量, 电能对时间的变化率叫电功率。电功率简称为功率, 用字母 p 表示, 即

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-9)$$

同样, 当 $p > 0$ 时, 说明元件消耗电能, 为吸收功率; 当 $p < 0$ 时, 则说明元件提供电能, 为输出功率, 如图 1-10 所示。

如果电流和电压为非关联参考方向时, 可将式(1-9)改写成

$$p = -ui \quad (1-10)$$

这样, $p > 0$ 仍然表示元件消耗电能, 为吸收功率; $p < 0$ 表示元件向外提供电能, 为输出功率。

电功率的单位是 W (瓦), 在实际使用中还会用到 kW (千瓦) 和 mW (毫瓦), 它们之间的换算关系如下。

$$1 \text{kW} = 1000 \text{W}$$

$$1 \text{W} = 1000 \text{mW}$$

在直流的情况下, 式(1-9)可写成

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-11)$$

即功率在数值上等于单位时间内电路 (或元件) 所提供或消耗的电能。

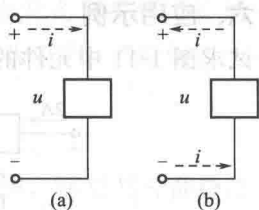


图 1-9 元件性质的确定

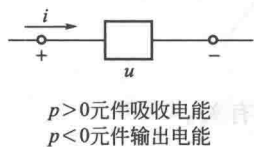


图 1-10 吸收功率与输出功率

六、应用示例

试求图 1-11 中元件的功率。

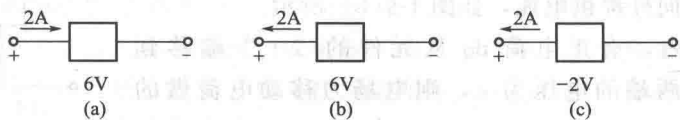


图 1-11 应用示例图

解 图 1-11(a) 为关联参考方向, $P = UI = 6\text{V} \times 2\text{A} = 12\text{W}$ ($P > 0$, 元件消耗电能);

图 1-11(b) 为非关联参考方向, $P = -UI = -6\text{V} \times 2\text{A} = -12\text{W}$ ($P < 0$, 元件提供电能);

图 1-11(c) 为非关联参考方向 $P = -UI = -(-2\text{V}) \times 2\text{A} = 4\text{W}$ ($P > 0$, 元件消耗电能)。

【思考与讨论】

1. 为什么在电路分析计算之前, 要标出各处电流、电压的参考方向?
2. 电流、电压和电动势的实际方向是如何规定的? 什么叫正方向? 为什么要规定正方向?
3. 一个完整的电路中, 有的元件吸收功率, 有的元件发出功率, 各元件吸收的功率与发出的功率应满足什么关系? 为什么?

第三节 电阻元件和欧姆定律

一、电阻元件

电阻元件是电路的基本元件之一, 研究电阻元件的规律是电路分析的基础。

物体对电流的阻碍作用称为电阻, 电阻用符号 R 表示, 单位是 Ω (欧姆), 有时还会用到 $\text{k}\Omega$ (千欧) 和 $\text{M}\Omega$ (兆欧), 换算关系为

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

物体的电阻与其本身材料的性质、几何尺寸和所处的环境温度等有关。

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-12)$$

式中 ρ ——材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ (欧·米);

l ——电流流过的路径, m (米);

S ——电流流过的横截面积, m^2 (平方米)。

电阻的倒数称为电导, 用符号 G 表示。

$$G = 1/R \quad (1-13)$$

电导的单位是 S (西门子)。

利用电阻性质所制成的实体元件叫电阻器, 实际电阻器在电路中除了电阻性质外还会表现出其他的一些电磁现象。而电阻元件则是从实际电阻器抽象出来的理想化元件, 它忽略了一些次要性质。其

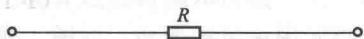


图 1-12 电阻元件的符号