



普通高等教育规划教材

电路分析

许小军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

电 路 分 析

主 编 许小军

副主编 秦进平 陈代娱

参 编 韩 萍

主 审 吴新余

机 械 工 业 出 版 社

本书是根据全国应用型本科电子与通信类专业教材编审委员会决定编写的规划教材。

本书符合国家教育部的“高等学校工程本科电路分析基础课程教学基本要求”，内容包括电路的模型和基本定律、电路的等效变换、线性网络的一般分析方法及基本定理、线性电路的时域动态分析、正弦稳态电路的分析、线性电路的频率响应、非正弦周期电流电路的分析、线性系统的复频域分析、双端口网络、非线性电阻电路以及附录 PSpice 简介。

本书可作为电子、通信、计算机、自控类专业“电路”或“电路分析基础”课程的教材，也可供其他相关专业选用，或供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析/许小军主编. —北京: 机械工业出版社, 2004.7

普通高等教育规划教材

ISBN 7 - 111 - 14706 - 5

I. 电... II. 许... III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 057488 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: 王保家 闫晓宇 责任编辑: 卢若薇 版式设计: 冉晓华

责任校对: 贾卫东 封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 15 印张 · 368 千字

定价: 21.00 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

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材

编 审 委 员 会

主 任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委 员：(按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
姜炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)
童幸生 江汉大学

电子与通信类专业分委员会名单

主任：鲍 泓 北京联合大学
副主任：张立臣 常州工学院
 李国洪 华北航天工业学院
委员：（按姓氏笔画排序）
 邓 琛 上海工程技术大学
 叶树江 黑龙江工程学院
 李金平 北京联合大学
 沈其聪 总参通信指挥学院
 杨学敏 成都理工大学
秘书长：何希才 北京联合大学

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入 WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据 IMD1998 年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第 36 位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于 2001、2002 年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并作出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息科学的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础,确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标, 以工程应用为背景, 通过理论与工程实际相结合, 构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针: 知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为: “精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上, 挑选出最基本的内容、方法及典型应用; “新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容, 以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容, 并将这些内容按新的教学系统重新组织; “广”指在保持本学科基本体系下, 处理好与相邻以及交叉学科的关系; “用”指注重理论与实际融会贯通, 特别是要注入工程意识, 包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点, 合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设, 并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设, 力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验, 又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务, 以确保教材质量。

我们相信, 本套系列教材的出版, 对我国工程应用型人才培养质量的提高, 必将产生积极作用, 会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光, 高瞻远瞩, 及时提出并组织编写这套系列教材, 他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作, 并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件, 在此深表衷心感谢!

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

前 言

随着我国经济的飞速发展,为满足地方经济与行业对人才需求的要求,国内兴办了一批应用型本科院校。为适应这一新型人才培养模式的要求,特组成了“普通高等教育应用型人才培养规划教材编审委员会”。本书是根据“应用型本科电子与通信类专业教材”编审委员会的研讨方案,依据国家教育部“本科电子与通信专业电路分析教学基本要求”编写的,是全国应用型本科的规划教材。

在编写本教材过程中,着重考虑了应用型本科院校的教学特点,力图做到:

1. 内容由浅入深,叙述简明扼要,紧扣实际应用,语言简练通畅。
2. 应用性有所突破。电路分析理论之所以受到普遍重视,除了理论的日渐完美性和广泛的实用性外,更重要的是它的工程应用性。在选择各章例题、思考题和习题过程中,举一些工程实际应用的电路问题,让学生通过研究工程电路问题掌握电路分析基本理论,提高学生分析和解决实际电路问题的能力。
3. 促进“电路分析”这门课程的教学改革,学生除掌握传统的电路分析方法外,电路的计算机辅助分析与设计方面的知识已成为电类专业学生必须掌握的知识。引入电路仿真知识贯穿全书各章节,培养学生计算机电路辅助分析的能力。

4. 书中有典型例题,每节有思考题,每章有丰富的习题,便于掌握与自学。

由于学时的限制,书中将有关 PSpice 等内容标注“*”号,读者可根据需要选择学习。

本教材可供电子与通信类及相关专业的师生使用,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有:南京工程学院许小军(第一、二、三、七、八、九章、附录),黑龙江工程学院秦进平(第五、十、十一章),成都理工大学陈代娱(第六章),成都理工大学韩萍(第四章),成都理工大学的李大军编写了第六章的习题。全书由许小军任主编并统稿。

机械工业出版社和编委会对编写大纲进行了仔细审查,并提出了宝贵的意见与建议。南京邮电学院的吴新余教授在百忙之中精心审阅了全书,提出了许多宝贵的修改意见与建议,并提供了丰富的参考资料,在此谨表示衷心的感谢。

编写本教材时,查阅和参考了众多文献资料,获得许多教益与启发,尤其得到南京工程学院陈菊红副教授的大力帮助,在此一并表示感谢。

限于编者的水平,书中的缺点与错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编者

目 录

序

前言

第一章 电路的模型与基本定律 1

第一节 电路的组成与电路模型 1

第二节 电路的基本物理量 3

第三节 电阻元件和欧姆定律 8

第四节 独立电源 10

第五节 基尔霍夫定律 13

习 题 16

第二章 双端网络的等效变换 19

第一节 电阻的串、并、混联及等效电阻 19

第二节 独立电源的连接及等效变换 23

第三节 受控源及含受控源电路 的等效变换 26

习 题 28

第三章 电阻电路的分析方法 31

第一节 支路电流法 31

第二节 网孔电流法与回路电流法 33

第三节 节点电压法 38

* 第四节 计算机辅助电路分析 41

习 题 44

第四章 线性电路的基本定理 46

第一节 叠加定理 46

第二节 替代定理 49

第三节 等效电源定理 51

第四节 最大功率传输定理 59

习 题 61

第五章 动态电路的时域分析 64

第一节 储能元件 64

第二节 一阶电路的零输入响应 69

第三节 一阶电路的零状态响应 73

第四节 一阶电路的全响应、三要素法 76

第五节 一阶电路的阶跃响应 82

第六节 一阶电路的冲激响应 84

第七节 二阶电路 RLC 的响应 87

习 题 91

第六章 正弦稳态电路的分析 94

第一节 正弦量的基本概念 94

第二节 正弦量的相量表示法 96

第三节 电路元件伏安关系的 相量形式 98

第四节 无源双端网络的等效电路 103

第五节 正弦稳态交流电路的分析 111

第六节 正弦稳态电路的功率 115

第七节 三相电路 120

第八节 变压器电路 127

习 题 133

第七章 电路的频率响应 137

第一节 无源双端网络的频率响应 137

第二节 串联电路的谐振 141

第三节 并联谐振电路 146

第四节 无源滤波器 151

第五节 电路频率响应的应用 154

习 题 156

第八章 非正弦周期电流电路 159

第一节 非正弦周期信号及其分解 159

第二节 对称波形的傅里叶级数 162

第三节 与非正弦周期电流电路 有关的参数 165

第四节 非正弦周期电流电路的分析 168

习 题 170

第九章 电路与系统的复频域分析 173

第一节 拉普拉斯变换 173

第二节 拉普拉斯逆变换 176

第三节 线性系统的复频域分析法 180

第四节 系统函数及其应用 185

习 题 188

第十章 双端口网络 190

第一节 双端口网络概述 190

第二节 双端口网络的参数方程 191

第三节 具有端接的双端口网络 197

第四节 双端口网络的等效电路 200

第五节 互易双端口网络 203

第六节 双端口网络的连接	205	习 题	218
习 题	208	部分习题答案	219
第十一章 简单非线性电阻电路	210	附录 PSpice 简介	224
第一节 非线性电阻元件	210	参考文献	229
第二节 非线性电阻电路的分析方法	213		

第一章 电路的模型与基本定律

本章要点

本章主要讨论电路的组成与模型，阐述描述电路工作状态的基本物理量（电压、电流、电动势、电位、电功率等）的概念、电路基本定律（基尔霍夫定律）及建立电路电量（电压、电流等）参考方向的概念。此外，还讨论了无源电阻元件、独立电源的特性。

第一节 电路的组成与电路模型

电路是各种电工、电子器件以及一些电气装置按一定方式连接起来的整体，它提供了电流流通的路径。从工程技术领域来看，电路的应用可分为能量与信息两大领域。如电力系统的电路，发电机组将其他形式的能量转换成电能，经变压器、输电线传输到各用电部门，在那里又把电能转换成光能、热能、机械能等其他形式的能而加以利用。电路所实现的是能量的转换、传输和分配。而收音机或电视机电路，是将接收的电信号经过调谐、滤波、放大等环节的处理，使其成为人们所需要的其他信号。电路所实现的是对电信号的处理、变换和传递，这种作用在自动控制、通信、计算机技术等方面得到了广泛应用。

首先，分析一个最简单的电池、灯泡电路，其电路器件连接如图 1-1a 所示。按示意图连线，合上开关，灯泡就发光。可见上述最简单的电路是由三个部分所组成的：一是电池，它是供给电路电能的装置，称为电源；二是灯泡，它是消耗电能的装置，称为负载；三是导线，它是连接电源与负载的中间部分，因此电源、负载、连接导线是电路组成的基本元件。显然，电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为“激励”。由激励在电路中产生的电压、电流，称为电路的“响应”。有时，根据激励与响应的因果关系，将激励称为输入，响应称为输出。

实际电路器件在工作时的电磁性质是比较复杂的。任何一个实际电路器件在电压、电流作用下，均有消耗电能、储存电场能量、储存磁场能量的基本效应，这些多种电磁效应交织在一起，给分析问题带来了困难。为了使问题简化，以便于探讨电路的普遍规律，在分析和研究具体电路时，需要建立电路模型。电路模型是在一定的条件下对实际电路的科学抽象与近似描述，能够足够准确反映实际电路的电磁现象与性质。

电路模型由各种理想电路元件组成，每种理想电路元件是只具有单一电磁性质的假想元件，具有精确的定义与相应的数学模型，并且用规定的图形符号表示。实际电路器件虽然种类繁多，但在电磁性能方面可将它们归为两类，一类是电路的有源元件，如干电池、发电机等，它们将非电能量转换成电能，所以可用“电压源”这样一个理想元件来表示。另一类是无源元件，如电炉主要是消耗电能的，所以可用电阻元件来表示，其他主要是储存磁场能量或储存电场能量的，就可用“电感元件”或“电容元件”来表示等等。

用抽象的理想元件及其组合近似地替代实际电路器件，从而构成了与实际电路相对应的电路模型。无论简单的还是复杂的实际电路，都可以通过理想化的电路模型充分地进行描述。

用规定的电路符号表示各种理想元件而得到的电路模型图称为电路原理图，简称电路图。电路图只反映电气设备在电磁方面相互联系的实际情况，而不反映它们的几何位置等信息。图 1-1b 就是一个按规定符号画出的图 1-1a 的电路图，其中的 U_s 是称为电压源（干电池）的电路元件，电阻元件 R_L 表示一个实际负载（灯泡），两根连接导线消耗电能很少以至可忽略，就用两根无电阻的短路线表示，其他各种电路元件的表示符号将在以后逐一地加以介绍。

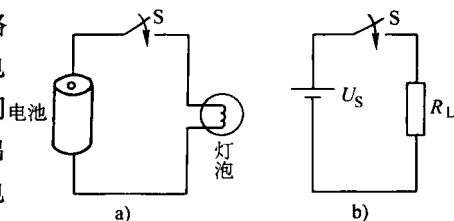


图 1-1 简单电路
a) 示意图 b) 电路图

需要指出的是：理想电路元件不完全等同于电路器件，而一个电路器件在不同的条件下的电路模型也可能不同。如电炉主要是消耗电能转变为热能，一般用电阻元件表示，但若分析精度提高、电路电源频率增大，则电炉内的电阻丝产生的磁场能量就不能忽略，其模型也不能只用一个电阻元件表示，而需包含电感效应了。可见，一个实际电路器件的模型可能是理想电路元件，也可能是理想电路元件的组合，一般来说，实际电路器件的模型化是一个相当复杂的问题，本书不涉及如何建立实际电路的电路模型问题。经过大量实践证明：只要电路模型建立得恰当，对电路的分析结果与实际电路的测试结果就会基本一致。今后我们讨论的电路均为理想电路元件组成的电路模型，而非实际电路；提到的电路元件均为理想电路元件，而非电路器件。

实际电路可分为“集中参数电路”和“分布参数电路”两大类。由集中参数元件组成的电路称为集中参数电路，简称为集中电路。所谓集中参数元件是：在任何时刻，流入元件任意一端钮的电流和元件任意端钮之间的电压是单值的物理量，集中参数元件有确定的电磁性质和确切的数学定义，可用端电流与端子间电压来描述它们的电磁性能，而这些电流与电压仅仅是时间的函数，与空间位置无关。实际电路只要符合下面的条件即可认为是集中电路：一个实际电路的整体几何尺寸远远小于该电路正常工作频率对应的信号波长。如：音频信号（频率为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ），对应信号波长为 $(15000 \sim 15\text{km})$ ，因此实验室的常用电路完全可看成是集中电路模型。但是，对于长达数百公里的电力系统的传输线而言，显然不能采取集中电路模型，而要用分布参数电路模型。分布参数电路模型比较复杂，描述电路的电磁量不仅是时间的函数，而且还是空间的函数。集中参数电路理论是电路的最基本理论，本书讨论的电路只限于集中参数电路。

电路理论主要是研究电路中发生的电磁现象，用电流、电压等物理量描述其中的物理过程。电路理论是研究电路分析、电路综合或电路设计的一门基础工程学科。电路分析的任务是根据已知的电路结构和元件参数，在一定的外加激励下，求解电路的响应。电路综合或电路设计是在已知输入、输出的条件下，综合、设计满足条件的电路结构与参数。电路理论内容丰富、应用广泛，本书主要讨论电路的基本规律与电路的各种分析计算方法。

思考题

- 1-1-1 是否可以说：“电路的尺寸越小，就越可以用集中参数电路表示”，为什么？
- 1-1-2 白炽灯泡常用电阻元件表示，为什么？是否在任何情况下都用一个电阻来表示？
- 1-1-3 电路图上的电路元件与实际工程中的电路器件有何不同？

第二节 电路的基本物理量

电路分析中常用到电压、电流、功率等物理量,其中电压、电流、电荷、磁链作为基本变量,功率和能量作为复合变量,一般它们是时间的函数。本节对这些物理量以及与它们有关的概念进行简要说明。

一、电流、电压及其参考方向

1. 电流

带电粒子的定向移动形成了电流。单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流强度,简称为电流,用 i 表示。根据定义有

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

式中, dq 为导体截面中在 dt 时间内通过的电量。

国际单位制 (SI) 中,电荷量的单位为库仑 (C);时间单位为秒 (s);电流单位为安培,简称安 (A),有时还用千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等单位。

通常规定正电荷移动的方向为电流的方向。

当电流的大小和方向不随时间而变化时,称为直流电流,简称直流 (DC)。本书对不随时间变化的物理量都用大写字母来表示,式 (1-1) 在直流时,应写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

2. 电压

电压是电场力移动单位正电荷时所做的功。因电荷在电场力的作用下,在电路中运动,电场力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力,引入“电压”这一物理量。由定义, A、B 两点之间的电压 u_{AB} 可表示为

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

式中, dw_{AB} 表示电场力将 dq 的正电荷从 A 点移动到 B 点所做的功。 dw_{AB} 的单位为焦耳 (J);电压单位为伏特,简称伏 (V),常用千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等单位。

在直流时,式 (1-3) 应写为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-4)$$

由电压的定义可见,如果正电荷从 A 点移动到 B 点是电场力做功,那么正电荷从 B 点移动到 A 点必定有一种非电场力 (如化学电池中的情况) 在克服电场力做功,或者说此时电场力做了负功,即 $dw_{AB} = -dw_{BA}$, 则 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。这说明,对两点间的电压必须分清楚起点和终点,也就是说,电压也是有方向的。通常规定电压的方向是电场力移动正电荷的方向。

以上对电流、电压规定的方向,是电路中客观存在的实际方向。在一些简单的电路中,其实际方向是可以直观地确定的;但在分析计算一些复杂电路时,往往很难直接判断出某一

段电路上电流或电压的实际方向；而对那些大小和方向都随时间变化的电流或电压，要在电路中标出它们的实际方向就更困难了。为此，在分析计算电路时采用标定“参考方向”的方法。

参考方向是人们任意选定的一个方向。如图 1-2a、b 所示，对于电路中的一个元件，现指定电流的参考方向，用实线箭头表示。如电流的实际方向（虚线箭头）与参考方向一致，则电流 i 为正值（ $i > 0$ ，如图 1-2a 所示）；如电流的实际方向（虚线箭头）与参考方向相反，则电流 i 为负值（ $i < 0$ ，如图 1-2b 所示）。于是在选定的参考方向下，电流值的正、负就反映了它的实际方向。

同样道理，电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向，并由参考方向和电压值的正、负来反映该电压的实际方向。显然，只有数值而无参考方向的电压、电流是没有意义的。电压的参考方向可以用一个箭头表示，如图 1-3a 所示；也可以用正（+）、负（-）极性表示，称为参考极性，如图 1-3b 所示；另外还可以用双下标表示，例如， u_{AB} 表示 A、B 两点间电压的参考方向是从 A 指向 B 的。因此，电压的参考方向用以上几种表示方法中任选一种标出即可。

在以后的电路分析中，完全不必先去考虑各电流、电压的实际方向究竟如何，而应首先在电路图中标定它们的参考方向，然后根据参考方向进行分析计算，由结果的正负值与标定的参考方向确定它们的实际方向，图中也就不需标出实际方向。当然，参考方向一经选定，在分析电路的过程中就不再变动。

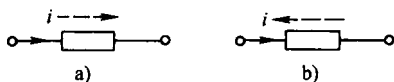


图 1-2 电流的参考方向

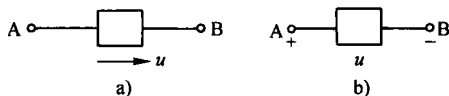


图 1-3 电压的参考方向

对于一个元件或一段电路上的电压和电流的参考方向，可以分别独立无关地任意选定，但为方便起见，常将电压和电流的参考方向选得一致，称其为关联的参考方向。一般情况下，只标出电压或电流中的某一个的参考方向，这就意味着另一个选定的是与之关联的参考方向。当选择电流、电压的参考方向相反时，称为非关联参考方向。

参考方向并不是一个抽象的概念，在用磁电式电流表测量电路中的电流时，该表带有“+”、“-”标记的两个端钮，事实上就已为被测电流选定了从“+”指向“-”的参考方向，如图 1-4 所示。当电流的实际方向是由“+”端流入，“-”端流出，则指针正偏，电流读数为正值，如图 1-4a 所示；若电流的实际方向是由“-”端流入，“+”端流出，则指针反偏，电流读数为负值，如图 1-4b 所示。同样，磁电式电压表的“+”、“-”两端钮也为被测的电压选定了参考方向。

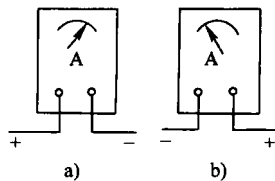


图 1-4 磁电式电流表与电流参考方向

二、电位

在电路中任选一点 O 作为参考点，则该电路中某一点 A 点的电位，为 A 点与 O 点之间的电压，用 v_A 表示。即

$$v_A = u_{AO} \quad (1-5)$$

显然, 电位与电压的单位完全相同, 也是用伏特 (V) 计量。

因电路参考点的电位为零, 即 $v_O = 0$, 所以参考点也称零电位点。

电路中除参考点外的其他各点的电位可能是正值, 也可能是负值。若某点电位是正值, 则该点电位比参考点高, 反之则该点电位比参考点低。

以电路中的 O 点为参考点, 则另两点 A、B 的电位分别为 $v_A = u_{AO}$ 、 $v_B = u_{BO}$, 它们分别表示电场力把单位正电荷从 A 点或 B 点移到 O 点所做的功, 那么电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功即 u_{AB} 就应该等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 O 点, 再从 O 点移到 B 点所做的功的和, 即

$$u_{AB} = u_{AO} + u_{OB} = u_{AO} - u_{BO}$$

$$u_{AB} = v_A - v_B \quad (1-6)$$

或

式 (1-6) 说明, 电路中 A 点、B 点间的电压是 A 点与 B 点电位之差, 因此, 电压又叫电位差。

【例 1-1】 在图 1-5 所示电路中, 已知 $V_a = 40\text{V}$ 、 $V_b = -10\text{V}$ 、 $V_c = 0\text{V}$ 。(1) 求 U_{ba} 及 U_{ac} 。(2) 选择 b 点为参考点, 试求其他两点的电位之值。

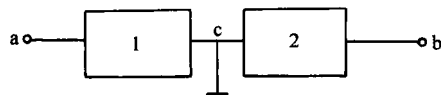


图 1-5 例 1-1 图

解 (1) 因为电压就是电位差, 所以

$$U_{ba} = V_b - V_a = (-10 - 40)\text{V} = -50\text{V}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c = (40 - 0)\text{V} = 40\text{V}$$

(2) 若选 b 点为参考点, 根据电位的定义

$$U_{ba} = V_b - V_a = 0 - V_a = -V_a$$

即

$$V_a = 50\text{V}$$

而

$$U_{ac} = V_a - V_c = 50 - V_c$$

得

$$V_c = 10\text{V}$$

从例题可见, 参考点是可以任意选定的, 电路参考点一经选定, 电路中其他各点的电位也就确定了。当参考点选择得不同时, 电路中同一点的电位会随之而变, 但是任意两点的电位差即电压则是不变的。

在电路中不指明参考点而谈某点的电位是没有意义的。注意: 在一个电路系统中只能选取一个参考点, 至于选哪一点为参考点, 要依据分析问题的方便而定。在电子电路中常选一条特定的公共线作为参考点, 这条公共线常常是很多元件的汇集处且与机壳相联, 因此, 在电子电路中参考点用接机壳符号“⊥”表示。

三、电动势

图 1-6 所示是一个蓄电池, 两个带正、负电荷的极板 A 和 B, A 称正极, B 称负极, 两极板间具有电场。用导线把 A、B 两极连接起来, 在电场力作用下, 正电荷沿着外部导线从 A 移到 B (实质上是导体中的自由电子在电场力作用下从 B 移到 A), 形成了电流 i 。随着正电荷不断地从 A 移到 B, A、B 两极间的电场逐渐减弱, 以至消失, 这样, 导线中的电流也会减至为零。为了维持电流, 则需在 A、B 间保持一定的电场 (即电位差), 以将电荷连续

不断地从 B 极移到 A 极去。电源就是产生这种力的装置, 这种力称之为电源力。如在化学电池中, 就由化学能转换为电能, 在发电机中, 导体运动而切割磁力线, 就将机械能转换为电能。这些电能也就产生了电源力。

电源力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功, 人们将其称为电源的电动势, 用 e 表示, 即

$$e = \frac{dw_{BA}}{dq} \quad (1-7)$$

式中, dw_{BA} 表示电源力将 dq 的正电荷从 B 移到 A 所做的功。显然, 电动势也与电压有相同的单位伏特 (V)。

按照定义, 电动势的方向是电源力克服电场力移动正电荷的方向, 是从低电位指向高电位的方向。对于一个电源设备而言, 如干电池, 在电源内部是由负极指向正极为电位升, 而在电源外部, 则由高电位指向低电位。因此, 若其电动势 e 及其两端钮间的电压 u 的参考方向选择相反时, 如图 1-7a 所示, 那么当电源内部没有其他能量转换时, 根据能量守恒原理, 应有 $u = e$ (电场力所做的功与非电场力所做的功相等)。如果 e 和 u 的参考方向选择得相同时, 如图 1-7b 所示, 则 $u = -e$ 或 $e = -u$ 。本书在以后论及电源时一般不涉及电源内部的细节而用其端电压 u 来描述。

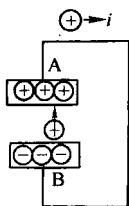


图 1-6 电源力做的功

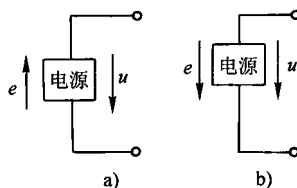


图 1-7 电源的电动势 e 与端电压 u 的关系

四、功率与电能

正电荷从一段电路的高电位点移到低电位点是电场力对正电荷做了功, 该段电路吸收了电能; 正电荷从电路的低电位点移到高电位点是非电场力克服电场力做了功, 即这段电路将其他形式的能量转换成电能释放了出来。把单位时间内电路吸收或释放的电能定义为该电路的功率, 用 p 表示。设在 dt 时间内电路转换的电能为 dw , 则

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-8)$$

国际单位制中, 功率单位为瓦特, 简称瓦 (W), 常用单位还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等。

进一步推导式 (1-8), 可得

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

即电路的功率等于该段电路的电压与电流的乘积。在直流时, 式 (1-9) 应写为

$$P = UI \quad (1-10)$$

一段电路, 在 u 和 i 取关联参考方向下, 若 $p > 0$, 说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的, 正电荷在电场力作用下做了功, 电路吸收了功率; 若 $p < 0$, 则这段电路上

电压和电流的实际方向不一致,一定是有外力克服电场力做了功,电路发出功率,也可以说电路吸收了负功率。在使用式(1-9)及式(1-10)时,必须注意 u 和 i 的关联参考方向及各数值的正、负号的含义。

根据能量守恒原理,一个电路中,一部分元件或电路发出的功率一定等于其他部分元件或电路吸收的功率。或者说,整个电路的功率是平衡的。

式(1-8)又可写为

$$dw = p dt$$

在 t_0 到 t_1 的一段时间内,电路消耗的电能应为

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p dt \quad (1-11)$$

直流时, p 为常量,则

$$W = P(t_1 - t_0) \quad (1-12)$$

国际单位制中,电能 W 的单位是焦耳(J),它表示功率为 1W 的用电设备在 1s 时间内所消耗的电能。实用中还常用千瓦时(kW·h)(俗称度)做电能单位,即

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} \quad (1-13)$$

【例 1-2】 图 1-8 为某电路中的一部分,三个元件中流过相同电流 $I = -1 \text{ A}$, $U_1 = 4 \text{ V}$ 。(1) 求元件 1 的功率 P_1 ,并说明是吸收还是发出功率。(2) 若已知元件 2 发出功率为 10W,元件 3 吸收功率为 6W,求 U_2 、 U_3 。

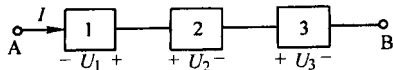


图 1-8 例 1-2 电路图

解 (1) 对于元件 1:

由于该元件电压与电流是非关联参考方向,此时,计算功率的公式应为

$$P_1 = -U_1 I$$

代入数据得

$$P_1 = [- (4)] \text{ V} \times (-1) \text{ A} = 4 \text{ W (吸收)}$$

(2) 对于元件 2:

因电压 U_2 与电流 I 是关联参考方向,且发出功率,则 P_2 为负值,即

$$U_2 I = -10 \text{ W}$$

$$U_2 = \left(\frac{-10}{-1} \right) \text{ V} = 10 \text{ V}$$

同理,对于元件 3,功率为

$$U_3 I = 6 \text{ W}$$

$$U_3 = \left(\frac{6}{-1} \right) \text{ V} = -6 \text{ V}$$

思考题

1-2-1 一电话线通过 $20 \mu\text{A}$ 的电流,经多长时间传送 15C 的电荷?

1-2-2 一铅酸蓄电池可充电达 160Ah, (1) 若电池的充电时间是 40h,则充电电流是多少? (2) 若电池以 1mA 的电流放电,则放电的时间是多少天?