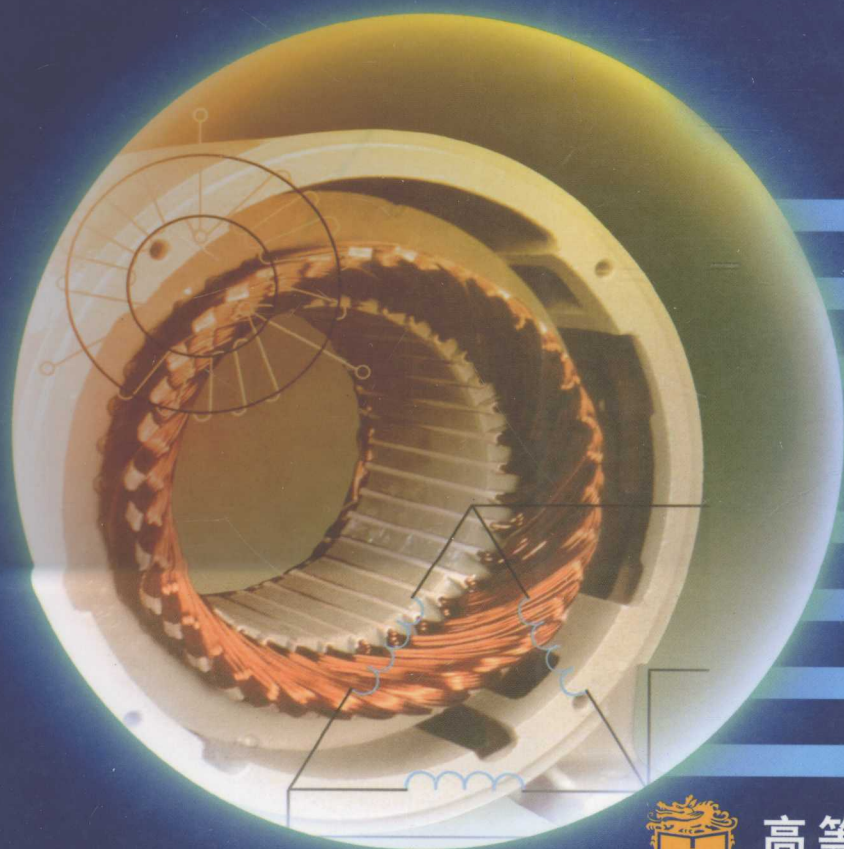




新世纪高职高专教改项目成果教材
Xinshiji Gaozhi Gaozhuan Jiaogai Xiangmu Chengguo Jiaocai

电路及磁路基础

蔡元宇 编



高等教育出版社

新世纪高职高专教改项目成果教材

13

电路及磁路基础

蔡元宇 编

高等教育出版社

内容简介

本书为新世纪高职高专教改项目成果教材,内容符合教育部“高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求”,供高职高专电类专业使用。

本书系统地讲述了:电路的基本概念和基本定律、电阻电路、正弦电流电路、耦合电感和谐振电路、三相电路、二端口网络、非正弦周期电流电路、非线性电阻电路、动态电路的时域分析、动态电路的复频域分析、磁路和铁心线圈电路。

本书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、继续教育和民办高校使用,也可供在职培训选用或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路及磁路基础/蔡元宇编. —北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7-04-014662-2

I. 电... II. 蔡... III. ①电路理论—高等学校:技术学校—教材②磁路—高等学校:技术学校—教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 044891 号

策划编辑 尹 洪 责任编辑 李葛平 封面设计 王凌波 责任绘图 朱 静
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制 杨 明

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 20

字 数 480 000

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

版 次 2004 年 7 月第 1 版

印 次 2004 年 7 月第 1 次印刷

定 价 23.10 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

为认真贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》，研究高职高专教育跨世纪发展战略和改革措施，整体推进高职高专教学改革，教育部决定组织实施《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》（教高[2000] 3 号，以下简称《计划》）。《计划》的目标是：“经过五年的努力，初步形成适应社会主义现代化建设需要的具有中国特色的高职高专教育人才培养模式和教学内容体系”。《计划》的研究项目涉及高职高专教育的地位、作用、性质、培养目标、培养模式、教学内容与课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面，重点是人才培养模式的改革和教学内容体系的改革，先导是教育思想的改革和教育观念的转变。与此同时，为了贯彻落实《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》（教高[2000] 2 号）的精神，教育部高等教育司决定从 2000 年起，在全国各省市的高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校的职业技术学院（以下简称高职高专院校）中广泛开展专业教学改革试点工作，目标是：在全国高职高专院校中，遴选若干专业点，进行以提高人才培养质量为目的、人才培养模式改革与创新为主题的专业教学改革试点，经过几年的努力，力争在全国建成一批特色鲜明、在国内同类教育中具有带头作用的示范专业，推动高职高专教育的改革与发展。

教育部《计划》和专业试点等新世纪高职高专教改项目工作开展以来，各有关高职高专院校投入了大量的人力、物力和财力，在高职高专教育人才培养目标、人才培养模式以及专业设置、课程改革等方面做了大量的研究、探索和实践，取得了不少成果。为使这些教改项目成果能够得以固化并更好地推广，从而总体上提高高职高专教育人才培养的质量，我们组织了有关高职高专院校进行了多次研讨，并从中遴选出了一批较为成熟的成果，组织编写了一批“新世纪高职高专教改项目成果”教材。这些教材结合教改项目成果，反映了最新的教学改革方向，很值得广大高职高专院校借鉴。

新世纪高职高专教改项目成果教材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、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2002 年 11 月 30 日

前 言

电路及磁路的教科书已经出版了许多种,尽管如此,学生们仍会常常感到学习这门课程比较困难。尤其是对高职高专学生,因为要增加实习训练所占的比例,分配给本门课程的课内和课外时数并不多。所以,本书的主要目标是提供一本有如下特点的电路及磁路教材:它比以前的教科书阐述得更清楚,更加条理化,而且更容易理解和掌握。本书通过以下途径实现上述目标。

1. 电路及磁路课程可能是学生第一次接触到有关电气技术方面的知识,为了帮助学生能主动地学习,各章引言部分概括地介绍本章的主要内容及研究方法,既起到引路作用,又使学生了解本章内容在课程中的地位和重要性,激发学习兴趣和热情。书中所有的原理均以清晰、条理、渐进的方式说明,以免产生概念模糊、难以理解的问题。对于一些较为深奥复杂的内容尽量采用简明易懂的方法来阐述。各章后面有基本要求与内容提要,对理论的要点和公式做简要明确的总结,也便于记忆,还附带介绍一些参考性资料——科学方法综述,以扩大视野。书中的脚注用于提示或辅助说明。

2. 每一节后面给出了例题,并且简明地说明解题过程。这些实例应该说是教材的重要组成部分,它能使更加深刻地理解课程内容。尽量选择一些贴近实际应用的例题,以示范学生应用理论解决实际问题的方法。每节有思考题与练习题,为学生提供实践的机会,学生可参照例题,从模仿开始一步一步地练习解题,提高学习兴趣,增强学习信心。每章的习题作为综合练习用,可以由学生自我检查对课程内容的理解程度。

3. 课程内容包括:以电路的连接方式和元件的电压电流关系为基本约束,介绍了电阻电路、正弦电流电路及非正弦周期电流电路的稳态分析方法,介绍了非线性电阻电路,讨论了动态电路的暂态分析,对磁路也作了简要的介绍。为了适应高职高专电类不同专业使用,即考虑了教材的通用性,并且为了适应强电专业和弱电专业相互渗透和交融的发展趋势,编入本教材的教学内容面还是比较广泛的。其中第1章~第5章和第9章为电路的基本部分,属于必修内容;其余各章可视专业需要和学生实际水平删减部分内容或安排在其他课程中讲授。本门课程需用两个学期来完成。

4. 考虑学生要学习多门课程和参加必要的课外活动,课外学习时间并不很多,所以本书对各章的练习题和习题以“必需够用”为度作了精选,学习中应认真完成,并通过解题熟练地掌握计算器的使用。

5. 教材编排顺序为由线性到非线性、由直流激励到正弦激励、由稳态到暂态、由电路到磁路,内容由浅入深,循序渐进,体现了对客观世界的认识规律,培养学生不断获取知识的兴趣,并且培养学生掌握科学的分析方法,如模型、等效、相量法、线性、非线性、时域和复频域变换等分析方法。

6. 本书采用 MATLAB 作为计算机应用软件,用最低限度的时间介绍了应用 MATLAB 的入门知识:解题的编程方法和技巧,使学生逐步熟悉 MATLAB。它不仅可为电子信息类和自动控

制类课程所应用,并且广泛地应用于各类工程计算。如果暂不讲授,也可删去 §2-9、§3-15、§9-8 三节,不会影响整个课程。

本书在《电路及磁路》第一版(获第3届普通高等学校优秀教材国家教委一等奖)、第二版(获2002年全国普通高等学校优秀教材一等奖)基础上,汲取了国内外同类教材的精华及众多同仁的丰富教学经验,努力按上述目标进行重新编写。书后附有参考书目,在此对有关出版社和作者表示衷心的感谢。

本书由沈阳工程学院陈才贤教授仔细审定,谨表谢意。

由于时间仓促,编者水平所限,错误和不妥在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2003年12月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1	§ 3-8 电容元件	100
§ 1-1 电路和电路模型	1	§ 3-9 正弦电流电路中的电容	103
§ 1-2 电流	3	§ 3-10 电阻、电感、电容串联电路	106
§ 1-3 电压、电位及电动势	5	§ 3-11 电阻、电感、电容并联电路	110
§ 1-4 电功率和电能	9	§ 3-12 阻抗的等效变换及串并联	113
§ 1-5 基尔霍夫定律	11	§ 3-13 正弦电流电路中的功率	116
§ 1-6 电阻元件	14	§ 3-14 一般正弦电流电路的计算	124
§ 1-7 独立源	17	§ 3-15 应用 MATLAB 软件进行正弦	
§ 1-8 受控源	22	电流电路分析	130
§ 1-9 简单电路的分析计算	23	基本要求与内容提要	133
基本要求与内容提要	27	习题	136
习题	29	第四章 耦合电感和谐振电路	139
第二章 电阻电路	32	§ 4-1 耦合电感	139
§ 2-1 电阻的串联与并联	32	§ 4-2 含有耦合电感的正弦电流电路	143
§ 2-2 电源模型的等效变换和电源支路		§ 4-3 串联谐振	149
的串并联	37	§ 4-4 并联谐振	153
§ 2-3 含受控源一端口网络的等效电路	41	基本要求与内容提要	156
§ 2-4 电阻的星形联结与三角形联结的		习题	157
等效变换	43	第五章 三相电路	158
§ 2-5 网孔分析法	47	§ 5-1 对称三相正弦量	158
§ 2-6 结点分析法	50	§ 5-2 三相电源和三相负载的连接	160
§ 2-7 叠加定理	54	§ 5-3 对称三相电路的特点和计算	167
§ 2-8 戴维宁定理和诺顿定理	58	§ 5-4 不对称星形联结负载	170
§ 2-9 应用 MATLAB 软件进行电阻		§ 5-5 三相电路的功率	173
电路分析	67	基本要求与内容提要	176
基本要求与内容提要	70	习题	178
习题	72	第六章 二端口网络	180
第三章 正弦电流电路	76	§ 6-1 引言	180
§ 3-1 正弦量	76	§ 6-2 导纳参数	181
§ 3-2 复数	84	§ 6-3 阻抗参数	184
§ 3-3 正弦量的相量表示法	87	§ 6-4 传输参数	187
§ 3-4 相量形式的基尔霍夫定律	91	§ 6-5 混合参数	188
§ 3-5 正弦电流电路中的电阻	92	§ 6-6 二端口网络的级联	192
§ 3-6 电感元件	94	§ 6-7 理想变压器	193
§ 3-7 正弦电流电路中的电感	96	基本要求与内容提要	195

习题	196	时域分析	249
第七章 非正弦周期电流电路	198	基本要求与内容提要	252
§ 7-1 周期函数分解为傅里叶级数	198	习题	254
§ 7-2 非正弦周期电流电路的计算	201	第十章 动态电路的复频域分析	256
§ 7-3 周期量的有效值、平均值	205	§ 10-1 拉普拉斯变换	256
§ 7-4 非正弦周期电流电路的功率	207	§ 10-2 拉普拉斯反变换	259
基本要求与内容提要	208	§ 10-3 复频域中电路的基本约束和电路 模型	262
习题	209	§ 10-4 用复频域分析法进行电路计算	265
第八章 非线性电阻电路	211	基本要求与内容提要	269
§ 8-1 非线性电阻元件	211	习题	270
§ 8-2 非线性电阻的串联与并联	213	第十一章 磁路和铁心线圈电路	271
§ 8-3 简单非线性电阻电路的图解 分析法	215	§ 11-1 磁场的主要物理量和基本性质	271
§ 8-4 小信号分析法	217	§ 11-2 铁磁物质的磁化曲线	273
基本要求与内容提要	220	§ 11-3 磁路与磁路定律	276
习题	221	§ 11-4 恒定磁通磁路的计算	279
第九章 动态电路的时域分析	222	§ 11-5 交流铁心线圈中的波形畸变和功率 损耗	283
§ 9-1 换路定则和初始条件的计算	223	§ 11-6 交流铁心线圈的电路模型	288
§ 9-2 一阶电路的零输入响应	225	基本要求与内容提要	293
§ 9-3 一阶电路的零状态响应	230	习题	294
§ 9-4 一阶电路的全响应及其分解	235	附录一 用计算器进行复数计算	296
§ 9-5 分析一阶电路的三要素法	237	附录二 MATLAB 软件简介	298
§ 9-6 阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	242	部分习题参考答案	302
§ 9-7 RLC 串联电路的零输入响应	245	参考书目	309
§ 9-8 应用 MATLAB 软件进行动态电路			

第一章

电路的基本概念和基本定律

电路理论研究的对象是电路模型。本章首先讨论电路及其模型的构成,然后介绍电路的一些物理量,引入电流、电压及其参考方向的概念,研究与电路连接方式有关的基本规律——基尔霍夫定律(电路的拓扑约束),介绍电阻、独立源、受控源等电路元件及其电压电流关系(电路的元件约束)。这些都是本书的基础知识,贯穿全书。本章最后一节将这些基础知识初步应用于简单电路的分析计算。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

为了完成某种任务,将一些电气器件按照一定的方式连接起来,形成电流的通路,称为电路(circuit)。比较复杂的电路呈网状,常称为网络(network)。电路与网络这两个名词并无明显的区别,一般可以通用。

电路的组成方式很多,功能也不尽相同,其中一种作用是实现电能的传输和转换。例如各种电力电路便是如此。图 1-1(a)是一个简单的电路,它由干电池、开关、灯泡和连接导线等电气器件组成。当开关闭合时构成通路,便有电流流过,于是灯泡发光。干电池是一种电源(power source),在其正负极间能保持一定的电压,向电路提供电能;灯泡是一种用电设备,在电路中称为负载(load),它实际上是一个电阻器,由电阻丝制成,电流通过时能发热到白炽状态而发光;开关和连接导线可使电流构成通路,为传输环节。

电路的另一种作用是实现信号的传递和处理。常见的例子如扩音机,传声器(话筒)将声音变成电信号,经过放大器的放大,送到扬声器再变成声音输出。由传声器施加的电信号称为激励(excitation),它相当于电源;扬声器得到的放大信号称为响应(response),它相当于负载。由于传声器施加的信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,需要采用传输环节对信号起传递和放大作用。

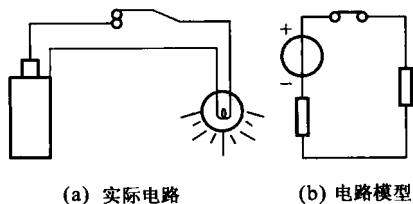


图 1-1 一个简单电路及其电路模型

由此可见,电路是由一些电气器件连接起来的电流的通路,主要由电源、负载和传输环节三

部分组成。电源是提供电能或电信号的设备;负载是用电或接收信号的设备;传输环节用于传输电能和电信号。

二、电路元件

组成电路的电气器件往往比较复杂,其电磁性能可能是多种交织在一起的。在研究时,为了便于分析,常在一定条件下,对实际器件加以理想化,只考虑其中起主要作用的电磁现象,而将其其他现象忽略,或者将一些电磁现象分开来表示^①。例如在图 1-1(a)的例子中,灯泡(电阻器)不但发热而消耗电能,并且在其周围还会产生一定的磁场,但是可以只考虑其消耗电能的性能而忽略其磁场;干电池(电源)不仅在其正负极间能保持一定的电压对外部提供电能,其内部也有一定的电能损耗,但可以将其提供电能的性能与内部电能损耗分开来表示;对闭合的开关和较短的导线则只考虑导电性能而忽略其本身的电能损耗。

这样,可以定义一些理想化的电路元件,每一种电路元件只体现某种基本性能,具有某种确定的电磁性能和精确的数学定义。在一定条件下,用这些电路元件(element)或它们的组合模拟实际电路中的器件。例如电阻元件是一种只表示消耗电能(转换为热能或其他形式能量)的元件;电感元件是反映电路周围存在着磁场可以储存磁场能量的元件;电容元件是反映电路及其附近存在着电场可以储存电场能量的元件等。电阻元件消耗电能,电感元件或电容元件不会释放出多于它吸收或储存的能量,因此这些元件称为无源元件。而对于干电池、蓄电池等电源,则可以近似地用电压源元件来表征。电压源元件及以后将介绍的电流源元件合称为有源元件。

在图 1-1(a)中,可以用电阻元件表示灯泡(电阻器),用电压源元件和电阻元件的组合表示干电池(电源)。

上述这些电路元件通过引出端钮(terminal)互相连接。具有两个端钮的元件称为二端元件,具有两个以上端钮的元件则称为多端元件。

三、电路模型

在忽略电能损耗的情况下,闭合的开关和较短的导线可以视为理想导体。实际电路可以用一个或若干个电路元件经理想导体连接起来来模拟,这便构成了电路的模型(model),图 1-1(b)便是图 1-1(a)的电路模型。电路模型用规定的图形符号来表示时称为电路图。

实际器件和电路的种类很多,而电路元件只有有限的几种,用电路元件建立电路的电路模型将使电路的分析大大简化。建立电路模型时应使其外特性与实际器件和实际电路的外特性尽量接近,但两者的性能不可能完全相同。同一器件或电路在不同条件下有时应采用不同的电路模型来表示。一般地说,对电路模型的近似程度要求越高,电路模型也越复杂。所以建立电路模型时一般应指明它们的工作条件,如频率、电压、电流、功率和温度范围等。

电路理论研究的对象是由电路元件构成的电路模型。无论简单的还是复杂的电路都可以通过电路模型来描述。电路模型往往也简称为电路。

^① 这是所谓集总(lumped)参数元件。在器件的尺寸远小于正常工作频率对应的波长,波的传递现象可以忽略时,可以采用集总的概念。

四、有关电路的一些名词

以图 1-2 所示电路为例,介绍一些有关电路的名词,作为以后学习的准备。图 1-2 中方框符号表示没有说明具体性质的二端元件。

(1) 串联和并联:一些二端元件头尾依次相连,中间没有分支时称为串联(series connection);一些二端元件的两个端钮分别连在一起时称为并联(parallel connection)。图 1-2 所示电路中,元件 1、2、3 为串联,元件 4、5 为串联,元件 6、7 为串联,元件 8、9 为并联。

(2) 支路和结点^①:每一个二端元件称为一条支路(branch),两条及两条以上支路的连接点称为结点(node)。图 1-2 电路共有九个二端元件,所以有九条支路;共有 a、b、c、d、e、f、g 七个结点。

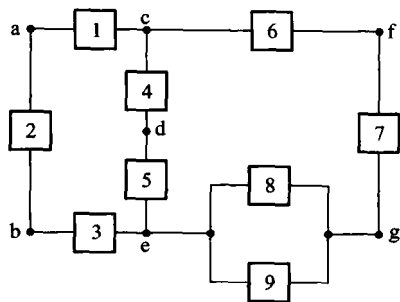


图 1-2 电路名词说明

支路还有其引申的定义。为了方便,有时把几个二端元件串联成的分支作为一条支路,三条及三条以上支路的连接点称为结点。例如在图 1-2 中,元件 1、2、3 为一条支路,元件 4、5 为一条支路,元件 6、7 为一条支路,元件 8 和元件 9 分别构成一条支路,共有五条支路;而 a、b、d、f 不再作为结点,只有 c、e、g 三个结点。

(3) 回路和网孔:由几条支路组成的闭合路径称为回路(loop)。图 1-2 电路中,元件 8、9 组成一个回路,元件 1、4、5、3、2 组成一个回路,元件 1、6、7、8、3、2 组成一个回路,等等。

网孔(mesh)是回路的一种,将电路画在平面上,在回路内部不另含有支路的回路称为网孔。如图 1-2 电路中元件 1、4、5、3、2 组成的回路称为网孔,而元件 1、6、7、8、3、2 组成的回路内部含有支路 4、5,所以不称为网孔。

思考题与练习题

- 1.1.1 什么是电路?它由哪些部分组成?
- 1.1.2 举例说明什么是电路元件。
- 1.1.3 电路模型由什么构成?电路理论研究的对象是什么?
- 1.1.4 说明下列名词的含义:电源、负载、激励、响应。
- 1.1.5 按图 1-2 举例说明下列名词:串联、并联、支路、结点、回路、网孔。

§ 1-2 电 流

电路的基本量分为基本物理量和基本复合量两类。电路的基本物理量有四个:电流、电压、电荷和磁通,其中常用的是电流和电压;基本复合量为电功率和电能两个。此外,经常使用的还有电位和电动势等物理量。以下分几节予以介绍。

^① 有些教科书称为节点。

一、电流

带电粒子(电子、离子等)的有秩序运动形成电流(current)。电流既是一种物理现象,又是一个物理量。电流在量值上等于通过某处的电荷量与所需时间之比。用符号 i ^① 表示,即^②

$$i \stackrel{\text{def}^{\text{②}}}{=} \frac{dq}{dt} \tag{1-1}$$

式中, dq 是在极短时间 dt 内通过某处的电荷量。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

若电流的量值和方向不随时间变化,即 $\frac{dq}{dt}$ 等于定值,则这种电流称为直流电流(direct current),简称直流(DC)。直流电流常用大写的字母 I 表示,所以式(1-1)可改写为

$$I = \frac{q}{t} \tag{1-2}$$

式中, q 是在时间 t 内通过某处的电荷量。

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^③ (alternate current), 简称为交流(AC)。

日常家庭用电设备,如电灯、空调、电冰箱、洗衣机等用的都是交流电。由于电池、蓄电池供电的收音机、电动车等用的是直流电。图 1-3 所示为两种最常用的电流波形,图(a)为直流电,图(b)为交流电。

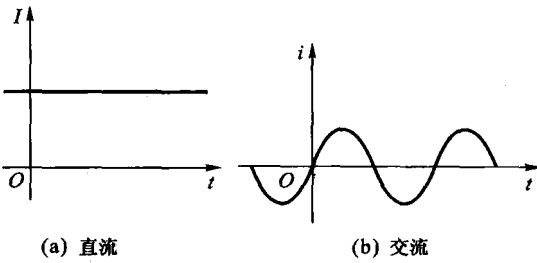


图 1-3 两种常用电流

本书中物理量采用国际单位制(SI)。电流的 SI 单位是安[培]^④ (Ampere), 符号为 A; 电荷量的单位是库[仑](Coulomb), 符号为 C。若每秒通过某处的电荷量为 1 C, 则电流为 1 A。将电流的 SI 单位冠以 SI 词头(见表 1-1), 即可得到电流的十进倍数单位和分数单位, 常用的有 kA(千安)、mA(毫安)、 μ A(微安)等。

表 1-1 常用 SI 词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	百	十	分	厘	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p

二、电流的参考方向

电路中一条支路的电流只可能有两个流动方向,如支路的两个端钮分别为 a、b,其电流流动的方向不是从 a 到 b,就是从 b 到 a。电流的方向就是指电流的流动方向,它是客观存在的,但在

① 本书用小写字母表示随时间变化的量或其普遍写法,例如 i ,有时也写成 $i(t)$;而用大写字母表示恒定量。
② 符号 def 表示“按定义”。
③ 详见第三章。
④ 本书文字中方括号内为可以省略的字,省略后为简称。

分析较为复杂的电路时,往往难于事先判定某电路中电流的方向;对于交流电,电流方向随时间变化,无法用一个固定方向表示。为此,在分析与计算电路时,可任意规定其中的一个方向作为电流数值为正的方向,称为参考方向(reference direction),用箭头表示在电路图上,并标以电流符号 i ,如图 1-4(a)所示。规定了参考方向以后,电流就是一个代数量了,若电流为正值,则表示电流的方向与参考方向一致;若电流为负值,则表示电流的方向与参考方向相反。这样就可以利用电流的参考方向和正负值来表示电流的方向。应当注意,在未规定参考方向的情况下,电流的正负号是没有意义的。

电流的参考方向除用箭头在电路图上表示外,还可以采用双下标来表示。如图 1-4(b)中已规定了端钮 a、b 的位置,则用 i_{ab} 表示电流参考方向是由 a 流向 b;用 i_{ba} 表示电流参考方向由 b 流向 a,不必另画箭头了。

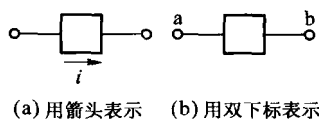


图 1-4 电流的参考方向

以后讨论的电流都是指定了参考方向的。

强调一下:电流是具有大小和方向的代数量,是标量,不是矢量。其方向是指它在电路中流动的方向,与矢量中的“方向”意义完全不同。

思考题与练习题

- 1.2.1 什么是电流?如何衡量其大小?电流的方向指的是什么?
- 1.2.2 为什么要在电路图上规定电流的参考方向?若电流为负值,说明电流的方向与参考方向的关系。

§ 1-3 电压、电位及电动势

一、电压

当导体中存在电场时,正电荷在电场力作用下运动,把电能转换为其他形式的能量。单位正电荷在电场力作用下由 a 点转移到 b 点所减少的电能称为电压(voltage),用符号 u_{ab} 表示,即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中, dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷量; dW 为转移过程中减少的电能。减少电能体现为电位^①的降低(从高电位点到低电位点),所以电压的方向是电位降[低]的方向, u_{ab} 也表示 a 点到 b 点的电位降。

与电流一样,定义恒定的电压为直流电压,用 U 表示;而随时间周期变化且一个周期内平均值为零的电压称为交流电压,用 u 表示。

再强调一下:电流总是流经元件的,而电压总是跨接在元件或两点之间的。将流经元件的电流称为元件电流,跨接元件的电压称为元件电压;将流经支路的电流称为支路电流,支路两端的电压称为支路电压。

^① 电位在物理课程中被称为电势。

二、电位

由于电压是对电路中两点而言的,因此,在分析较复杂的电路,特别是在分析电子电路时,一说明电路中每两点的电压就显得很繁琐。如果利用电位进行分析则很方便。

若任选一点 O 作为参考点,并设参考点的电位为零,则由某点 a 到参考点(零电位点)的电压 u_{aO} 称为 a 点的电位(potential),用 φ_a 表示,即

$$\varphi_a \stackrel{\text{def}}{=} u_{aO} \quad (1-4)$$

电路中参考点选得不同,则各点的电位量值也不同。

电路中任意两点 a、b 之间的电压等于这两点电位之差,即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \varphi_a - \varphi_b \quad (1-5)$$

式中, φ_a 为 a 点电位, φ_b 为 b 点电位。所以电压与电位差一般可以认为定义相同。知道电路上各点电位以后,便可求得任意两点之间的电压。这也说明,参考点不同时电路中各点的电位虽然不同,但任意两点间的电压(电位差)却保持不变。也就是说,电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关。

由式(1-5)可知,在选定参考点后,也可由电路各段的电压求得电路各点的电位。

电路中,电路的参考点可以任意选定,但在电力工程中常取大地作为参考点,并设其电位为零。因此,凡是外壳良好接地的电气设备,其机壳电位与大地相同,也为零电位。对于不接地的设备,在分析问题,常选许多元件汇集的公共点作为参考点,并用符号“ $\perp$ ”标记。

例 1-1 在图 1-5 中,已知 $u_{ab} = 5 \text{ V}$, $u_{bc} = 3 \text{ V}$,若选 c 点为参考点,试求 a、b、c 三点的电位(电位的 SI 单位与电压相同,均为 V)。

解 由于 c 为参考点,所以

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

由式(1-5)

$$\begin{aligned} \varphi_b &= \varphi_c + u_{bc} = 0 + 3 \text{ V} = 3 \text{ V} \\ \varphi_a &= \varphi_b + u_{ab} = 3 \text{ V} + 5 \text{ V} = 8 \text{ V} \end{aligned}$$

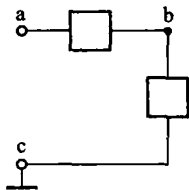


图 1-5 例 1-1 电路

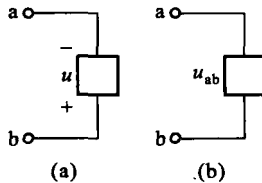


图 1-6 例 1-2 电路

例 1-2 在图 1-6(a)中, $u = 7 \text{ V}$; 图 1-6(b)中, $u_{ab} = 4 \text{ V}$ 。试分别比较 a、b 两点的电位。

解 图 1-6(a)中, b 点电位为正, a 点电位为负, $u = 7 \text{ V}$, 所以 b 点电位比 a 点高 7 V。

图 1-6(b)中, $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$, $u_{ab} = 4 \text{ V}$, 所以 a 点电位比 b 点高 4 V。

三、电动势^①

在电场力作用下,正电荷一般总是从高电位点向低电位点移动。为了形成连续的电流,在电源中正电荷必须从低电位点移到高电位点。这就要求在电源中有一个电源力作用在电荷上,使之逆电场力方向运动,并把其他能量转移成电能。例如在发电机中,当导体在磁场中运动时,导体内便出现这种电源力;在电池中,电源力存在于正负极之间。电动势(electromotive force)表明了单位正电荷在电源力作用下转移时增加的电能,用符号 e 表示,即

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_s}{dq} \quad (1-6)$$

式中, dq 为转移的电荷量, dW_s 为转移过程中电荷增加的电能。增加电能体现为电位的升高(从低电位点到高电位点),所以电动势的方向是电位升[高]的方向。

如果用正(+)极性表示电源的高电位端,用负(-)极性表示其低电位端,如图 1-7 所示,则电动势 e 的方向是从负极性指向正极性,而电压 u 的方向是从正极性指向负极性,两者刚好相反。若不考虑电源内部还可能有其他形式的能量转换,则电源电动势 e 的量值应当与其两端间的电压 u 的量值相等。当电源不与其他元件连接时,电源中没有电流,因而电源内部不存在其他形式的能量转换,这时电源处于开路状态。显然,电源开路时电动势量值与电压量值相等。

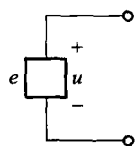


图 1-7 电源的电动势和电压

如上所述,电动势与电压的物理意义并不相同,但就其对外部的效果而言,一个电源具有方向从负极性指向正极性的电动势和具有方向从正极性指向负极性量值相同的电压,二者是没有区别的。所以近代电路理论中逐渐省略了电动势这个量。但在工程上还广泛地应用电动势的概念,所以本书仍作了阐述。

四、电压、电位和电动势的单位

电压、电位、电动势的 SI 单位都是伏[特](volt),符号为 V。当 1C(库)的电荷量在电场力或电源力作用下,由一点转移到另一点,转换(减少或增加)的电能为 1J(焦)时,则该两点间的电压或电动势为 1V(伏)。其十进倍数和分数单位常用的有 kV(千伏)、mV(毫伏)和 μ V(微伏)。

五、电压、电动势的参考方向

与电流类似,在分析与计算电路时,将电压和电动势看作是一个具有正负值的代数量,也必须先规定某一方向作为其数值为正的方向,称为参考方向。参考方向可任意规定,一般有三种表示方式。

(1) 采用参考极性表示:在电路图上标出正(+)、负(-)极性,如图 1-8(a)所示。表示电压的参考方向时,标以电压符号 u ,这时正极性指向负极性的方向就是电压的参考方向;当表示电动势的参考方向时,标以电动势符号 e ,这时负极性指向正极性的方向就是电动势的参考方向。

(2) 采用箭头表示^②:用箭头表示在电路图上,并标以电压符号 u 或电动势符号 e 。对于同

① 电动势在专业课程中简称为电势。

② 按国标,现已不用箭头表示电压或电动势的极性。

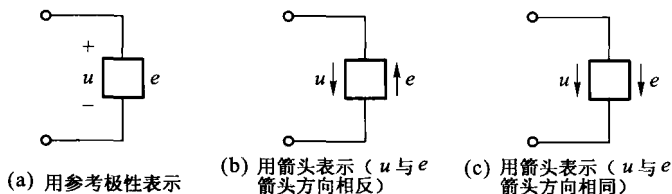


图 1-8 电压和电动势的参考方向

一个开路状态的电源设备,它的电压与电动势方向相反而量值相等。当用箭头表示参考方向时,若选择电压与电动势的箭头方向相反,如图 1-8(b)所示,则有 $u = e$;若选择电压与电动势的箭头方向相同,如图 1-8(c)所示,则有 $u = -e$ 。

(3) 采用双下标表示:如电路图上已规定了端钮 a、b 的位置,则 u_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b; e_{ab} 表示电动势的参考方向是由 a 指向 b。也可以反过来设置参考方向。

六、使用参考方向需要注意的几个问题

(1) 电流、电压的方向是客观存在的,但往往难以事先判定。参考方向是人为规定的电流、电压数值为正的方向,在分析问题时需要先规定参考方向,然后根据规定的参考方向来列写方程。

(2) 参考方向一经规定,在整个分析计算过程中就必须以此为准,不能变动。

(3) 不标明参考方向而说某电流或某电压的值为正或负是没有意义的。以后讨论的电流、电压都是规定了参考方向的。

(4) 参考方向可以任意规定而不会影响计算结果,因为参考方向相反时,解出的电流、电压也要改变正负号,最后得到的实际结果仍然相同。

(5) 电流参考方向与电压参考方向可以分别独立地规定。但为了分析方便,常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,即电流从电压的正极性端流入该元件而从电压的负极性端流出,如图 1-9 所示。这时称该元件的电流参考方向与电压参考方向一致,称为关联(associated)参考方向;反之,则为非关联参考方向。

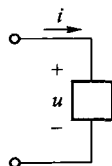


图 1-9 电流和电压的关联参考方向

思考题与练习题

1.3.1 什么是电压和电动势? 电源开路时,它的电压和电动势有什么关系?

1.3.2 按图 1.3.2(a)规定的参考极性,为什么 $u = e$? 按图 1.3.2(b)规定的参考方向,为什么 $u = -e$?

1.3.3 图 1.3.3 所示电路中,若:

- (1) b、c 两点用导线相连;
- (2) b、d 两点接地;
- (3) 两条支路不相连。

试比较 a、c 两点电位的高低。

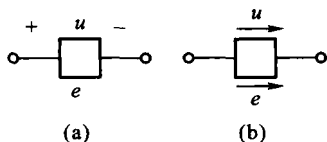


图 1.3.2

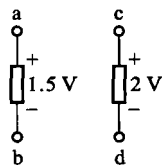


图 1.3.3

§ 1-4 电功率和电能

一、电功率

在电路中,正电荷 dq 受电场力作用从高电位点 a 流向低电位点 b , 设 a 、 b 间电压为 u , 则根据式(1-3)可知在转移过程中 dq 减少的电能为

$$dW = u dq$$

减少电能意味着电能转换为其他形式的能量,被电路所吸收(消耗)。电能转换的速率称为电功率,简称功率(power)。功率 p 、电能 W 和电路中电压、电流的关系是

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

直流时

$$P = UI \quad (1-8)$$

上述情况中,电流参考方向与电压参考方向为一致,即相关联[图 1-10(a)]。

当电流参考方向与电压参考方向为非关联[图 1-10(b)]时,则公式带负号,即

$$p = -ui \quad (1-9)$$

直流时

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

也可以归纳如下:若电流由电压正极性端流入元件,则 $p = ui$ ^①;若电流由电压负极性端流入元件,则 $p = -ui$ 。

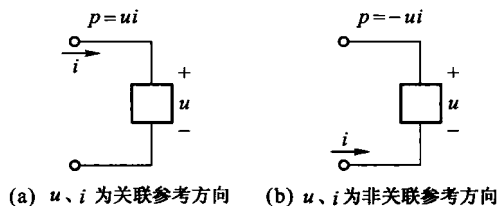


图 1-10 不同参考方向时的功率公式

不管参考方向是否关联,由式(1-7)~(1-10)计算得出的功率为正值时,表示元件吸收(消耗)功率;若为负值,则表示元件提供(产生)功率。

功率的 SI 单位为瓦[特](watt),符号为 W。功率十进倍数和分数单位常用的有 kW(千瓦)、MW(兆瓦)和 mW(毫瓦)等。在式(1-7)~(1-10)中,如电压单位为 V(伏),电流单位为 A(安),则功率单位为 W(瓦)。

例 1-3 图 1-11 所示为直流电路, $U_1 = 4\text{ V}$, $U_2 = -8\text{ V}$, $U_3 = 6\text{ V}$, $I = 2\text{ A}$, 求各元件吸收或提供的功率 P_1 、 P_2 和 P_3 , 并求整个电路的功率 P 。

解 元件 1 的电压、电流参考方向相关联,故由式(1-8)

$$P_1 = U_1 I = 4\text{ V} \times 2\text{ A} = 8\text{ W}$$

计算所得功率为正值,故元件 1 吸收功率 8 W。

元件 2 和 3 电压、电流参考方向非关联,故由式(1-10)

$$P_2 = -U_2 I = -(-8) \times 2\text{ W} = 16\text{ W}$$

计算所得功率为正值,故元件 2 吸收功率 16 W。而

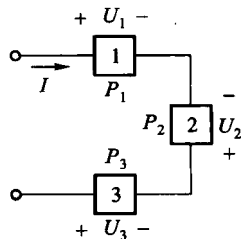


图 1-11 例 1-3 电路

^① 这相当于将其视为无源元件(负载),所以有些教材将这个结论称为无源符号规则。