



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电路及磁路

(第三版)

蔡元宇 朱晓萍 霍 龙 编



高等教育出版社
Higher Education Press



清华大学出版社
Tsinghua University Press
(北京清华大学学研大厦A座)
(北京100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

电路及磁路

第2版 阎石 蔡美彪 主编

清华大学出版社
Tsinghua University Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路及磁路

(第三版)

蔡元宇 朱晓萍 霍龙 编

高等教育出版社

00-52825 号球牌

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育），是2000年出版的《电路及磁路》（第二版）的修订版，适用于电气技术、电力技术类各专业。

本书以工程实践中正在使用的电工技术基础理论为主，本次修订中力求基本概念清楚，条理清晰，结论明确，理论联系实际。全书共分11章，内容为：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、线性电路过渡过程的时域分析、均匀传输线的正弦稳态分析、磁路和铁心线圈电路。为便于学生学习及复习，每节后有思考题与练习题，各章后有基本要求与内容提要、习题，书后有全书的习题答案。

本书可供高职高专院校、本科院校附设的学院、职业大学等作为电工基础课程的教材使用，也可作为在职培训教材选用或供工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电路及磁路/蔡元宇，朱晓萍，霍龙编.—3版.—北京：
高等教育出版社，2008.5

ISBN 978-7-04-023662-0

I. 电… II. ①蔡… ②朱… ③霍… III. ①电路—
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（2008）第 035745 号

策划编辑 孙杰 责任编辑 孙薇 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉
版式设计 王艳红 责任校对 杨凤玲 责任印制 毛斯璐

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 100120
总机 010-58581000
经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京机工印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开本 787×1092 1/16
印张 20.75
字数 500 000

版次 1992年1月第1版
2008年5月第3版
印次 2008年5月第1次印刷
定价 26.00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

物料号 23662-00

第三版序言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育），是2000年出版的《电路及磁路》（第二版）的修订版，本次修订重点做了以下工作：

1. 精选教学内容

为了适应高职高专人才培养目标及本课程教学要求，考虑学生入学的水平，教学内容以掌握物理概念、强化应用为重点。使取材合适，深度适宜，分量恰当。

课程内容由浅入深，由线性到非线性，由直流激励到正弦激励，由稳态到瞬态，由集总参数到分布参数，由电路到磁路，正确阐述本学科的科学理论和概念，完整地表达了本课程应包含的知识体系，并反映其相互联系及发展规律。精选有助于建立概念，掌握方法，联系实际的例题、习题。

简化过繁的公式推导，增加物理概念的阐述与讨论，侧重电路理论与工程实际的联系。

能反映本学科国内外科研和教学先进成果，处理好电路内容的更新问题。

本版删去了第二版第十一章（线性电路过渡过程的复频域分析），同时把磁路和铁心线圈电路改为第十一章；第十章（均匀传输线的正弦稳态分析）为不同专业选学的内容。保留了第二版的部分例题和习题，同时补充了一些新例题和习题，题目总量略有减少。

2. 优化教学方法

各章节目的要求明确，主次分明，条理清晰，便于教学。各章引言部分，概括地介绍本章的主要内容及研究方法，起到引导作用，使学生了解本章内容在课程中的地位和重要性及前后联系，激发学习兴趣和热情。对于一些较为复杂的内容尽量改用通俗易懂的方式来阐述，由浅入深，结合启发性的例题加以说明，以便于学生理解与应用。精选各章的思考题与练习题、习题，以培养学生分析与应用的能力。各章后面增加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，以利于记忆。

本书着重基本物理概念的阐述，注意应用能力的培养，适用于要求电气知识面较宽的专业，有利于学生创新应用。

本书第一版获第三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。第三版的修订工作是在第一、二版的基础上进行，第三版由蔡元宇、朱晓萍、霍龙编写，其中第一~三、五、十章由朱晓萍教授执笔，第四、六~九、十一章由霍龙教授执笔，蔡元宇教授负责全书统稿。本书由陈才贤教授主审，陈老师提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中不妥及错误之处难免，殷切希望读者批评指正。

编者

2008年2月

第二版序言

教育部于1997年组织修订了《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》(适用于不设“信号与系统”作为后续课的电类各专业),修订后的教学基本要求适当调整了理论部分的深度,降低了受控源、二端口网络、线性电路过渡过程的复频域分析等内容的教学要求,对各知识点的教学要求度作出较明确的规定,进一步体现了基本理论应以应用为目的,以必需够用为度的原则。

本教材第一版曾获教育部普通高校优秀教材一等奖,为了主动适应高等工程专科教学改革的需要,高等教育出版社组织了教材的修订。本书是1991年版的修订本,除按修订后的教学基本要求对内容作适当调整外,还删除了一些未列入教学基本要求的内容,如电路的图和树的概念、回路分析法等。为适应某些专业的教学要求,仍保留某些供选学的内容,在目录上标以*号。对文字作了修改,对部分章节进行了改写,力求基本概念清楚,条理清晰,理论联系实际,使用顺手,以进一步体现专科教材的特色。

电路及磁路是电类专业的一门重要技术基础课,其任务是使学生掌握电工基础理论及分析计算的基本方法,为学习后续课程及从事专业技术工作准备必要的基础。学好本课程的关键是加强平时的消化理解与练习,因而本书修订时除了削枝强干外,补充了各节的思考题与练习题,编写了各章的基本要求与内容提要,更换了部分习题,以帮助学生复习巩固。各章的基本要求是按照《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》编写的,分为“深刻理解、牢固掌握”、“理解、掌握”、“了解”三类,最后一类也可选学其中的一部分。

本教材的编写大纲曾经教育部普通高等工程专科电工课程教学委员会审定,由张洪让审阅。此次编写分工与上版相同,编写练习题时参考了张洪让编《电工基础》,在此一并表示感谢。

编者

1999年8月

第一版序言

本教材是根据国家教育委员会 1990 年组织制订的《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》编写的，供高等学校工程专科电类各专业教学使用。参考学时范围为 126 ~ 144 学时（含实践性环节）。

本教材包含了有关电路及磁路的基本内容：电路的物理量和模型、电阻电路、周期电流电路、电路的过渡过程以及磁路和铁心线圈等。教材中也编入了一些供选学的内容，用小号字排版，目录上标以 * 号，如均匀传输线等，以供某些专业的教学需要。通过本教材的学习，要求掌握电路的基本概念、基本定律和初步分析计算方法，理解磁路的特点，会计算较简单的磁路，为学习后续课程准备必要的电路及磁路知识，并为从事本专业工作打下基础。

高等学校工程专科教育的目的是培养应用型高级专门人才，它与大学本科侧重理论研究能力的培养目标不同，而侧重于培养解决生产实际问题的能力，因而在教学中以掌握概念、强化应用为重点。基于这些想法，本书编入的内容以工程实践中正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主。同时，也要使学生对技术基础理论领域的新发展有一般了解。在编写中，力求做到基本概念清楚，理论能应用于实际，而不过分强调学科理论体系的完整性与推导论证的缜密性。本书还编入一些典型例题、思考题和适量的习题，以加深理解，提高分析问题和解决问题的能力及使用计算工具进行运算的能力。

本书的编审工作是在国家教委高等学校工程专科电工基础课程教材编审小组的主持下进行的。全书经俞大光教授主审，张洪让、韩继生、刘琴芳、郭辉、张铁岩以及高教出版社电工编辑室的楼史进、崔万胜等同志参加了审稿会议，他们对提高本书质量作出了贡献。本书经编审小组审定为全国通用教材。参加本教材编写工作的有：蔡元宇（第一至第五章、第十二章）、陈永祥（第十、十一章）和杨其允（第六章至第九章）同志。蔡元宇同志任主编。限于编者水平，错误和不恰当之处在所难免，请广大读者提出宝贵意见，以便再版时修订。

编者

1990 年 7 月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电路的主要物理量	4
§ 1-3 基尔霍夫定律	9
§ 1-4 电阻元件	12
§ 1-5 独立源	15
§ 1-6 受控源	18
§ 1-7 单回路电路分析	21
基本要求与内容提要	23
习题一	25
第二章 电阻电路	28
§ 2-1 电阻的串联、并联	28
§ 2-2 电阻的星形联结与三角形联结的等效变换	34
§ 2-3 电源模型的等效变换和电源支路的串并联	38
§ 2-4 支路分析法	43
§ 2-5 网孔分析法	45
§ 2-6 结点分析法	48
§ 2-7 叠加定理	53
§ 2-8 替代定理	56
§ 2-9 戴维宁定理和诺顿定理	58
§ 2-10 含受控源电路的分析计算	64
基本要求与内容提要	69
习题二	71
第三章 正弦电流电路	76
§ 3-1 正弦量	76
§ 3-2 正弦量的相量表示法	83
§ 3-3 基尔霍夫定律的相量形式	89
§ 3-4 正弦电流电路中的电阻	90
§ 3-5 电感元件·正弦电流电路中的电感	92
§ 3-6 电容元件·正弦电流电路中的电容	98

§ 3-7 电阻、电感、电容串联电路	104
§ 3-8 电阻、电感、电容并联电路	108
§ 3-9 阻抗的等效变换及串并联	112
§ 3-10 正弦电流电路中的功率	116
§ 3-11 一般正弦电流电路的分析计算	125
基本要求与内容提要	129
习题三	131
第四章 耦合电感和谐振电路	135
§ 4-1 耦合电感元件	135
§ 4-2 含有耦合电感的正弦电流电路	140
§ 4-3 串联谐振	147
§ 4-4 并联谐振	151
基本要求与内容提要	155
习题四	157
第五章 三相电路	159
§ 5-1 对称三相正弦量	159
§ 5-2 三相电源和三相负载的连接	161
§ 5-3 对称三相电路的特点和计算	169
§ 5-4 不对称星形联结负载	173
§ 5-5 三相电路的功率	175
基本要求与内容提要	178
习题五	180
第六章 二端口网络	182
§ 6-1 二端口网络	182
§ 6-2 二端口网络的导纳参数和阻抗参数	183
§ 6-3 二端口网络的传输参数和混合参数	189
§ 6-4 互易二端口网络的等效电路	194
§ 6-5 理想变压器	196
基本要求与内容提要	198
习题六	199
第七章 非正弦周期电流电路	201
§ 7-1 非正弦周期电流	201

§ 7-2 周期函数分解为傅里叶级数	202	* 第十章 均匀传输线的正弦	
§ 7-3 对称波形的傅里叶级数	204	稳态分析	264
§ 7-4 非正弦周期电流电路的计算	207	§ 10-1 均匀传输线方程	264
§ 7-5 非正弦周期电流电路中的有效 值和有功功率	210	§ 10-2 均匀传输线方程的正弦稳态解	267
基本要求与内容提要	214	§ 10-3 均匀传输线的行波	272
习题七	215	§ 10-4 均匀传输线的副参数	276
第八章 非线性电阻电路	217	§ 10-5 终端接特性阻抗的均匀传输线	278
§ 8-1 非线性电阻元件	217	§ 10-6 均匀传输线的 Π 形等效电路	280
§ 8-2 分析非线性电阻电路的图解法	219	基本要求与内容提要	281
基本要求与内容提要	224	习题十	283
习题八	225	第十一章 磁路和铁心线圈电路	284
第九章 线性电路过渡过程的 时域分析	227	§ 11-1 磁场的主要物理量和基本性质	284
§ 9-1 换路定律和初始条件的计算	227	§ 11-2 铁磁性物质的磁化曲线	286
§ 9-2 一阶电路的零输入响应	230	§ 11-3 磁路及磁路定律	289
§ 9-3 一阶电路的零状态响应	235	§ 11-4 恒定磁通磁路的计算	292
§ 9-4 一阶电路的全响应	241	§ 11-5 交流铁心线圈中的波形畸变和 功率损耗	297
§ 9-5 阶跃函数和一阶电路的阶跃 响应	246	§ 11-6 交流铁心线圈的电路模型	300
§ 9-6 RLC 串联电路的零输入响应	250	基本要求与内容提要	306
基本要求与内容提要	258	习题十一	308
习题九	259	部分习题答案	310
		参考文献	320

第一章

电路的基本概念和基本定律

“电路及磁路”课程是电工技术专业的一门重要技术基础课，其任务是使学生掌握电工基础理论及其分析计算的基本方法，为学习后续课程及从事实际工作准备必要的基础。

电路理论研究的对象是电路模型，电路的研究系建立在对电路元件及其互连规律的研讨基础上。所以本章的内容包括四部分：(1) 电路及其模型的构成；(2) 电路的一些物理量，引入电流、电压的参考方向的概念；(3) 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）；(4) 电阻、电压源、电流源、受控源等电路元件及其电压电流关系（电路的元件约束）。这些都是本书的重要基础知识，贯穿全书。

最后设单回路电路分析一节，以引导学生将所学的一些基础理论知识应用于电路的分析计算，在理论结合实际方面及早得到锻炼。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

电路（circuit）是指为了某种需要由一些电气器件按一定方式连接起来的电流的通路。比较复杂的电路呈网状，常称为网络（network）。实际上，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，功能也各不相同，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。图 1-1（a）是一个简单的实际电路，它由干电池、开关、小灯泡和连接导线等电气器件组成。当开关闭合后，在这个闭合的通路中便有电流通过，于是小灯泡发光。其中，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

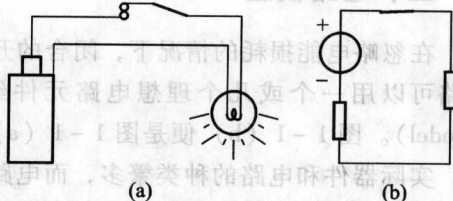


图 1-1 一个简单的实际电路及其电路模型

提供电能；小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；开关及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。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。

由此可见，电路主要由电源、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；负载是用电或输出信号的设备；传输环节用于传输电能和电信号。

二、电路元件

组成电路的实际电气器件往往比较复杂，其电磁性能的表现可能是多方面交织在一起的。但在研究时，为了便于分析，常常在一定条件下对实际器件加以理想化，所谓理想化就是只考虑其中起主要作用的某些电磁现象，而忽略其他现象，或者将一些电磁现象分别表示。例如在图 1-1 (a) 的例子中，小灯泡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，其内部也有一定电能损耗（消耗电能），但可以将其提供电能的性能与内部电能损耗分别表示；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。

由此，可以定义一些理想化电路元件，简称为电路元件（circuit element）。每一种电路元件体现某种基本现象，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，用这些元件或它们的组合模拟实际电路的器件。例如，电阻元件是一种只表示消耗电能（转换为热能或其他能量）的元件；电感元件是反映电路周围存在着磁场而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而可以储存电场能量的元件等。电阻元件消耗电能，而电感元件及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（un-source element）。

在图 1-1 (a) 中，用电阻元件表示小灯泡，用电压源元件和电阻元件的组合表示干电池。电压源元件及以后将介绍的电流源元件合称为有源元件（source element），它们也是电路元件。

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，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视为理想导线（电阻为零）。实际电路可以用一个或几个理想电路元件经理想导线相连接来模拟，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。

实际器件和电路的种类繁多，而电路元件却只有有限的几种，用电路元件建立的电路模型给实际电路的分析带来了方便，大大简化了电路的分析。

建立电路模型时应使其外特性与实际器件及实际电路的外特性尽量接近，但两者的性能并不一定也不可能完全相同。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表示。例如，一个线圈在频率较低时可以只考虑其中的磁场和耗能，甚至可以只考虑磁场，但当频率较高时则应考虑电场的影响，频率甚低或通过定值电流时就只需考虑耗能了。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。所以建立电路模型一般应指明它们的工作条

件，如频率、电压、电流和温度范围等。

四、集总参数和集总参数电路

在以上分析中假定电磁现象可以分开研究，每一种电路元件只表示一种基本现象，这就是所谓集总（lumped）参数元件。在任何时刻，从具有两个端钮的电路元件的某一端钮流入的电流恒等于从另一端钮流出的电流，并且元件两个端钮间的电压值也是完全确定的，这样的二端元件被称为集总参数元件。由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。

集总意味着把电路中的电场和磁场分开，磁场只与电感元件相关，电场只与电容元件相关，两种场之间不存在相互作用。因此，只有在器件和整个电路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，才可以采用集总的概念。除第十章外，本书研究的都是集总参数电路，以后不另加说明。

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充分地描述。电路模型也简称为电路。

五、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。在图 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：一些二端元件成串相连、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。

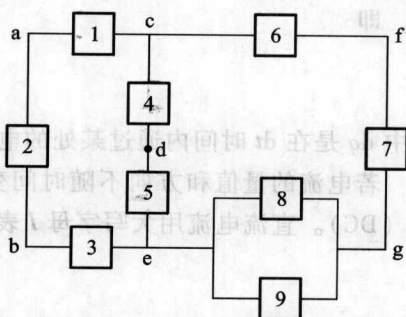


图 1-2 电路名词说明

(2) 支路和结点：每一个二端元件称为一条支路（branch），两条或两条以上支路的连接点称为结点（node）。图 1-2 所示电路中共有九条支路，a、b、…、g 七个结点。

支路还有其引申的定义。例如，有时把几个二端元件串联成的组合作为一条支路。这样看来，图 1-2 中只有五条支路：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，a、b、d、f 不再作为结点，只有 c、e、g 三个结点。

流过支路的电流称为支路电流，支路两端间的电压称为支路电压。

(3) 回路和网孔：由几条支路组成的闭合路径称为回路（loop）。例如图 1-2 电路中元件 8、9 组成一个回路，元件 1、4、5、3、2 组成另一个回路等。

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。图 1-2 所示电路中共有 3 个网孔，例如元件 1、4、5、3、2 组成的回路为网孔，而元件 1、6、7、8、3、2 组成的回路不是网孔。

思考题与练习题

- 1.1.1 电路的作用有哪些？电路由哪些部分组成？
- 1.1.2 本节介绍了哪些电路元件？它们各代表哪种电磁现象？
- 1.1.3 说明下列名词的意义：网络、激励、响应、无源元件、集总参数元件。
- 1.1.4 说明下列名词的意义：串联、并联、支路、结点、回路、网孔。

§ 1-2 电路的主要物理量

一、电流

1. 电流

带电粒子（电子、离子等）的有序运动形成电流（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


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

式中 dq 是在 dt 时间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动，则这种电流称为直流电流（direct current），简称直流（DC）。直流电流用大写字母 I 表示，即


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

式中 q 是在时间 t 内通过某处的电荷量。

周期性变动且平均值为零的电流称为交变电流③（alternate current），简称交流（AC）。

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。电流的常用单位还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）等。它们之间的关系为

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 10^6 \text{ mA} = 10^9 \mu\text{A}$$

2. 电流的参考方向

电路中一条支路的电流只可能有两个方向，如某条支路的两个端钮分别为 a、b，则其电流的方向不是从 a 到 b，就是从 b 到 a。电流的方向是客观存在的，但在分析较为复杂的电路时，往往难于事先判定支路中电流的方向；对于交流量，其方向随时间而变，无法用一个固定方向表示它的方向。为此，在分析与计算电路时，可任意设定某一方向作为电流数值为正的方向。

① 本书用小写字母表示随时间变动的量，例如 i ，有时也写成 $i(t)$ ，用大写字母表示恒定量。

② 符号 def 表示“按定义等于”。

③ 详见第三章。

④ 本书文字方括号内为省略的字，省略后为简称。

向, 称为参考方向 (reference direction), 用箭头表示在电路图上 (箭头一般画在支路旁边, 也可画在支路上) 并标以电流符号 i , 如图 1-3 (a) 所示。设定了参考方向以后, 电流就是一个代数量, 若电流为正值, 则电流的方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则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明电流的方向。

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。

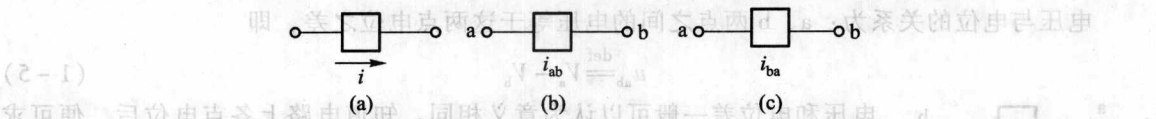


图 1-3 电流的参考方向

电流的参考方向除用箭头表示外, 还可以用双下标表示, 如图 1-3 (b) 的 i_{ab} 表示电流参考方向为由 a 到 b, 图 1-3 (c) 的 i_{ba} 表示电流参考方向为由 b 到 a, 显然

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-3)$$

二、电压、电位及电动势

1. 电压

正电荷在电场力的作用下由 a 点转移到 b 点, 电场力所作的功与电荷量的比值, 称为电压 (voltage), 用符号 u_{ab} 表示, 即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

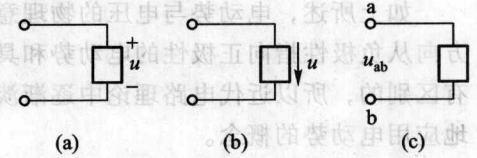
式中 dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷量, dW 为转移过程中电场力所作的功。

在转移过程中正电荷具有的电位能减少, 电位能减少意味电位的降低 (从高电位点到低电位点), 所以电位降低的方向为电压的方向。

与电流类似, 在分析计算时, 把电压看做是一个有正负值的代数量, 也必须事先设定某一方向作为其数值为正的参考方向。若电压为正值, 则电压的方向与参考方向一致; 若电压为负值, 则电压的方向与参考方向相反。这样, 就可以利用电压的参考方向和正负值来表明电压的方向。电压的参考方向可任意设定, 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, 并标以电压符号 u , 如图 1-4 (a) 所示, 电压的参考方向从正 (+) 极性指向负 (-) 极性。

(2) 采用箭头表示, 并标以电压符号 u , 如图 1-4 (b) 所示, 箭头表示电压的参考方向, 箭头一般画在支路旁边。



(3) 采用双下标表示, 如图 1-4 (c) 所示, u_{ab} 表示电压的参考方向是从 a 指向 b。

图 1-4 电压的参考方向

电压的 SI 单位是伏 [特] (volt), 符号为 V。当

1 C 的正电荷在电场力作用下由一点转移到另一点, 减少的电能为 1 J (焦 [耳]) 时, 则该两点间的电压为 1 V。其他常用单位有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 等, 其换算关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 10^6 \text{ mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

2. 电位

若任取一点 o 作为参考点, 则由某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 称为 a 点的电位^① (potential), 用 V_a 表示。电位参考点可以任意选取, 在电气工程中常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。在一个连通的系统中只能选择一个参考点, 并用 “ $\perp$ ” 符号标记。参考点电位为零。电位的量值与参考点的选择有关。

电压与电位的关系为: a 、 b 两点之间的电压等于这两点电位之差, 即

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

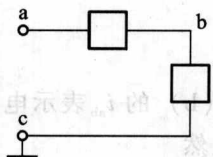


图 1-5 电位的计算

电压和电位差一般可以认为意义相同。知道电路上各点电位后, 便可求得各段的电压; 在电路中选定参考点后, 也可由电路各段电压求得电路各点的电位。例如图 1-5 中, 已知 $u_{ab} = 5 \text{ V}$, $u_{bc} = 3 \text{ V}$, 若选 c 点为参考点, 则 $V_c = 0 \text{ V}$, $V_b = V_c + u_{bc} = 3 \text{ V}$, $V_a = V_b + u_{ab} = 8 \text{ V}$ 。

电位也可以是一个有正负值的代数量; 电位的 SI 单位与电压一样是伏[特], 符号为 V 。

3. 电动势

在电场力作用下, 正电荷一般总是从高电位点向低电位点运动。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, 并把其他能量转换成电能。例如在发电机中, 当导体在磁场中运动时, 导体内存在这种电源力; 在电池中, 电源力存在于两电极之间。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, dW_s 为转移过程中正电荷增加的电能。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 1-6 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。由能量守恒定律得知: 若不考虑电源内部还可能还有其他形式的能量转换, 则电动势 e 在量值上应等于电压 u 。

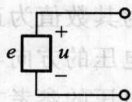


图 1-6 电源电动势与电压

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淡化了电动势这个量。但在电力工程和专业课程中还广泛地应用电动势的概念。

按电压和电动势随时间变化的情况, 它们可分为直流的和交流的。如果电压和电动势的量值与方向都不随时间而变动, 则称为直流电压和电动势, 分别用符号 U 和 E 表示。

在采用电动势的概念分析各种物理现象时, 也必须事先设定电动势的参考方向。同样也有三种表示方式:

^① 在物理学课程中, 电位被称为电势。

(1) 用参考极性表示时, 电动势的参考方向是从负 (-) 极性端指向正 (+) 极性端, 并标以电动势符号 e 。

(2) 用箭头表示时, 箭头表示电动势的参考方向, 并标以电动势符号 e 。

(3) 用双下标 e_{ab} 表示时, 电动势的参考方向是由 a 指向 b 。

电动势的 SI 单位与电压一样是伏[特], 符号为 V。

4. 使用电流、电压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, 但往往难于事先判断。参考方向是人为设定的电流、电压数值为正的方向, 在分析问题时需要先设定参考方向, 然后根据设定的参考方向列写方程。

(2) 参考方向一经设定, 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电压的值为正或负是没有意义的。

(4) 参考方向可以任意设定而不会影响计算结果, 参考方向相反时, 解出的电流、电压值相差一个负号, 最后得到的实际结果仍然相同。

(5) 电流参考方向和电压参考方向可以分别独立地设定。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, 而从它的负极性端流出, 如图 1-7 所示。

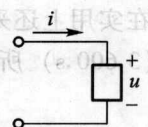


图 1-7 电压和电流
关联参考方向

此后, 如无声明, 电流、电压都是对应于所设定的参考方向而言的。它们在各瞬间的值称为瞬时值, 符号用小写字母。表达瞬时值随时间变化规律的数学式称为解析式, 用 $i(t)$, $u(t)$ 等表示, 表示瞬时值随时间变化规律的图形称为波形。

三、电功率和电能

1. 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 ab 间电压为 u , 则可知在转移过程中 dq 转换的电能为

$$dW = u dq \quad (1-7)$$

电能转换的速率称为电功率, 简称为功率 (power)。功率 p 、电能 W 和电路中电压 u 、电流 i 的关系为

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-8)$$

直流时

$$P = UI \quad (1-9)$$

对电路进行功率计算时, 必须注意电压、电流的参考方向。当电压与电流为关联参考方向时, 则以上两式右端为正, 即

$$p = ui \quad \text{和} \quad P = UI \quad (1-10)$$

当电压与电流为非关联参考方向时, 则以上两式右端为负, 即

$$p = -ui \quad \text{和} \quad P = -UI \quad (1-11)$$

由式 (1-10) 或者由式 (1-11), 代入电压、电流的数据 (代数数量), 计算所得的功率若为正值, 则表示这部分电路吸收 (消耗) 功率; 若为负值, 则表示这部分电路提供 (产生) 功率。

功率的 SI 单位是瓦 [特] (watt), 符号为 W。其他常用单位有兆瓦 (MW)、千瓦 (kW) 和毫瓦 (mW), 其换算关系为

$$1 \text{ MW} = 10^3 \text{ kW} = 10^6 \text{ W} = 10^9 \text{ mW}$$

2. 电能

根据式 (1-8), 从 t_0 到 t 时间内, 电路吸收或提供的电能 [量] 为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-12)$$

直流时

$$W = P(t - t_0) \quad (1-13)$$

电能的 SI 单位是焦 [耳] (joule), 符号为 J, 它等于功率 1 W 的设备, 工作 1 s 所消耗的电能。

在实用上还采用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 作为电能的单位, 它等于功率为 1 kW 的设备, 工作 1 h (3 600 s) 所消耗的电能, 简称为 1 度电, 即

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3\,600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

3. 额定值

诸如白炽灯、电烙铁、电阻器等各种电气器件都有一定的量值限额, 称为额定值, 包括额定电压、额定电流和额定功率。许多器件在额定电压下才能正常、合理、可靠地工作, 电压过高时器件容易损坏, 过低时则功率不足, 不能正常工作 (白炽灯变暗、电烙铁温度较低等)。使用电气器件时不应超过其额定电流或额定功率, 否则时间稍长就可能因过热而烧坏。由于功率、电压和电流之间有一定的关系, 所以在给出额定值时, 没有必要全部给出。例如对白炽灯、电烙铁等通常给出额定电压和额定功率, 而对于电阻器除给出电阻值外, 只给出额定功率。

例 1-1 图 1-8 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 的电压与电流为关联参考方向, 故应用公式 (1-10), 得

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

计算所得的功率为正值, 故这部分电路为吸收 (消耗) 功率。

元件 2 和元件 3 的电压与电流为非关联参考方向, 故应用公式 (1-11), 得

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

$$P_3 = -U_3 I = -6 \times 2 \text{ W} = -12 \text{ W} \text{ (为提供功率)}$$

整个电路的功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (8 + 16 - 12) \text{ W} = 12 \text{ W} \text{ (为吸收功率)}$$

此功率由外电路所提供。

例 1-2 已知某实验室有额定电压 220 V、额定功率 100 W 的白炽灯 12 盏, 另有额定电压 220 V、额定功率 2 kW 的电炉两台, 都在额定状态下工作。试求: 总功率、总电流和在 2 h

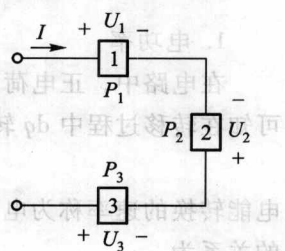


图 1-8 例 1-1 电路