

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

电工基础

Diangongjichu

胡 钊 主编



为继续教育（函授）量身定做



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科系列教材

电工基础

主编 胡钊

参编 李海 樊亚东 李晓萍



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书基于系统性强、通俗易懂的编写原则,介绍了电路理论的基本概念、定理、各种基本分析方法以及磁路的基本内容。

全书共分12章,其内容涵盖了电类各专业电路课程教学的基本内容。各章配有多类习题,书末附有习题答案。

本书可作为电类各专业专升本、专科、函授或成人教育学生学习电路基本内容的教材,也可供全日制本科或其他专业的学生或工程技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工基础/胡钊主编. —北京:中国电力出版社,2008
[“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)专科系列教材]
ISBN 978-7-5083-8007-0

I. 电… II. 胡… III. 电工学-函授大学-教材 IV. TM1
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 152190 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年3月第一版 2009年3月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 21.125印张 478千字
定价 35.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材

参 编 学 校

华中科技大学
武汉大学
华北电力大学
东北电力学院（大学）
三峡大学
上海电力学院
长沙理工大学
武汉电力职业技术学院

电气与电子工程学院
电气工程学院
电气工程学院
电气工程学院
电气工程学院
电力与自动化工程学院
电气与信息工程学院

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材

编 委 会

主 任：尹项根

副主任：陈柏超 熊 蕊 刘克兴

委 员：（按姓氏笔画排序）

丁坚勇	王义军	尹项根	朱 凌	刘克兴	齐 俊
关根志	严国志	李天云	李裕能	何发斌	应敏华
张元芳	张丽静	张步涵	张 哲	张新国	陈 坚
林碧英	赵 玲	袁兆强	聂宏展	殷小贡	梁文朝
韩学军	辜承林	喻剑辉	程乃蕾	舒乃秋	鲁方武
鲁铁成	曾克娥	曾祥君	谢自美	谭 琼	熊信银
熊 蕊	魏涤非				

编者按语

根据《中国教育改革与发展纲要》中“要大力发展成人高等教育”的精神，由华中科技大学电气与电子工程学院和武汉大学电气工程学院牵头，组织华北电力大学电气工程学院、东北电力学院（大学）电气工程学院、三峡大学电气工程学院、上海电力学院电力与自动化工程学院、长沙理工大学电气与信息工程学院、武汉电力职业技术学院等单位，成立了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组，于2003年11月在武汉，就国家在新形势下对人才的需求及“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的现状、特点和人才供需状况，对“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教学计划、课程体系和使用教材现状进行了充分地研讨，制定了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次的指导性教学计划。在此基础上研究了本专业的教材建设问题，大家一致认为函授教材要遵循自学和面授相结合、理论和实践相结合的原则，体现市场经济和科技发展对继续教育知识更新和理念更新的要求。针对目前“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次尚缺乏系统性教材的现状，决定组织各学院有经验的教授和专家编写这两个层次的教材。我们希望这两套系列教材能为规范本专业的教学内容和提高本专业的教学质量起到积极的推动作用。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教材建设，现在只是开头，需不断改进和完善。因此，在使用过程中敬请读者随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。

“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)教学工作协作组
“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)系列教材编委会

2008年8月

前言

电路是电类专业的第一门技术基础课，通过本课程的系统学习，可以为牢固掌握后续课程提供必要的电路基础理论知识，因而其重要性显而易见。

本书是根据电路理论的基本体系，并参考了目前国内外多数院校使用的众多电路理论教材编写而成的，在内容的涵盖面及深度上，尽量做到适用于多专业。

本书以线性电路最基本的三大内容，即电阻电路分析、动态电路的正弦稳态分析和暂态分析为主体，系统地介绍了基本电路理论和电路的基本分析方法，力求做到概念准确、重点突出、论述清晰细致，可读性好、便于自学。通过精心编排的大量典型例题，进一步帮助读者深入理解、牢固掌握并能灵活应用电路的基本理论和分析方法。考虑到某些专业的教学需求，本书还编入了磁路的基本内容。

本书共分 12 章，其中第 1、3、8、9 章由胡钊教授编写，第 4、5、12 章由李海副教授编写，第 6、10、11 章由樊亚东副教授编写，第 2、7 章由李晓萍副教授编写。全书由胡钊教授统稿。武汉大学电气工程学院电工新技术研究所李裕能教授、孔峰讲师等全体同仁在本书的编写过程中，提出了许多有益的建议，谨在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平和经验，书中恐有疏漏和谬误，恳请广大同仁和读者批评指正。

编 者
2008 年 7 月

目 录

编者按语

前言

1 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 实际电路和电路模型	1
1.2 电流、电压变量及其参考方向	4
1.3 电功率与电能	8
1.4 电路元件的特性和分类	11
1.5 基本电路元件	12
1.6 基尔霍夫定律 (KL)	33
1.7 电路中电位的计算	41
习题	43
2 等效电路	50
2.1 电阻的串联、并联和混联	50
2.2 电阻星形连接和三角形连接的等效变换	54
2.3 电压源和电流源的串联和并联	57
2.4 实际电压源和实际电流源的等效变换	59
2.5 无源一端口网络的输入电阻	62
习题	64
3 电路的一般分析方法	67
3.1 支路变量法	67
3.2 选取最少电路变量的原则	71
3.3 网孔分析法	72
3.4 回路分析法	80
3.5 节点分析法	83
习题	92
4 电路的基本定理	96
4.1 叠加原理	96
4.2 替代定理	99
4.3 戴维南定理和诺顿定理	100
4.4 最大功率传输定理	104

习题	106
5 正弦交流电路	108
5.1 正弦量交流电压和电流	108
5.2 正弦量的相量表示	111
5.3 三种基本元件伏安关系的相量形式	114
5.4 基尔霍夫定律的相量形式	117
5.5 复阻抗与复导纳	118
5.6 正弦稳态分析的相量法	124
5.7 正弦交流电路的功率	129
5.8 正弦交流电路的最大功率传输	136
习题	138
6 三相电路	142
6.1 三相电路概述	142
6.2 负荷 Y 连接对称三相电路的分析	146
6.3 负荷 Δ 连接对称三相电路的分析	149
6.4 不对称三相电路的分析	151
6.5 三相功率及其测量	153
习题	157
7 具有耦合电感的电路	160
7.1 交流电路中的磁耦合	160
7.2 具有耦合电感电路的分析	163
7.3 变压器	168
7.4 实际变压器及其模型	171
习题	175
8 正弦稳态交流电路的频率响应	177
8.1 正弦稳态网络函数与频率响应	177
8.2 频率响应的类型	181
8.3 典型一阶 RC 电路的频率特性	183
8.4 RLC 谐振电路	189
习题	222
9 非正弦周期电流稳态电路的分析	225
9.1 非正弦周期量	225
9.2 周期函数的傅里叶级数展开	226
9.3 周期函数的频谱	229
9.4 对称波形周期函数的谐波分析	230

9.5 非正弦周期电流和电压的有效值、平均值和平均功率	236
9.6 非正弦周期电流稳态电路的分析计算	240
习题	245
10 一阶电路	249
10.1 电路中的过渡过程与换路定律	249
10.2 一阶电路的零输入响应	253
10.3 一阶电路的零状态响应	259
10.4 一阶电路的全响应和三要素法	265
10.5 阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	270
10.6 冲激函数和一阶电路的冲激响应	273
10.7 卷积积分	278
习题	279
11 二阶电路	283
11.1 二阶电路的零输入响应	283
11.2 二阶电路的零状态响应及阶跃响应	289
11.3 二阶电路的全响应	295
习题	296
12 磁路和铁芯线圈	298
12.1 磁路基本概念和基本规律	298
12.2 铁磁物质的磁化特性	299
12.3 磁路计算的基本概念	301
12.4 非线性恒定磁通磁路计算	304
12.5 非线性交变磁通磁路	309
12.6 交流铁芯线圈的电路	315
习题	317
习题参考答案	319
参考文献	327

1

电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

本章介绍电路的基本概念和基本定律，其中包括实际电路和电路模型、电流和电压及其参考方向的概念、电功率与电能、电路元件的特性和分类、电阻、电感、电容、独立电源和受控电源以及基尔霍夫定律。

1.1 实际电路和电路模型

1.1.1 实际电路的构成与功能

在现代科学研究、工程技术以及日常生活中，人们广泛地使用各种电气电子设备和仪器，如发电机、电动机、信号发生器、电视机和计算机等，它们合称为实际电路。一个较为简单的例子就是手电筒电路，它是用三根导线分别将一个干电池、一个灯泡和一个开关顺次连接起来组成的一个实际照明电路，如图 1-1(a)所示，更为复杂的有诸如超大规模集成电路等。

实际电路是为了实现预期目的将一些实际电路元件，即构成电路的设备或器件按照特定的方式用导线连接起来所构成的一个整体，概括起来，大致可以分为电源或信号源、中间环节和负荷三个部分。电源或信号源的作用是向负荷提供电能或信息，例如发电机、信号发生器等；中间环节是用来将电源和负荷连接起来完成特定任务的部件，例如变压器、放大器等；负荷则是消耗电能或接收信息的部分，例如电动机、晶体管收音机等。

实际电路的形式各不相同、种类繁多，小的有集中数以万计的电路元件在几平方毫米内的集成电路，大的有现代通信网、数据信息网、计算机网乃至长达数百上千公里的电力输电线。然而，它们所完成的功能却可以大致分为两类：一类是实现电能的产生、传输、

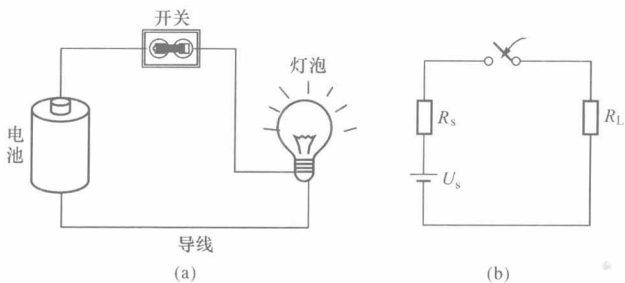


图 1-1 手电筒照明电路及其电路模型
(a) 手电筒照明电路；(b) 手电筒照明电路的电路模型

分配和转换,这方面比较典型的例子就是电力系统。发电机组将热能、水能或原子能等其他形式的能量转换成电能,通过变压器、输电线这些中间环节传输给各类用电负荷,再由这些负荷将电能转换成机械能、热能或光能等;再一类则是在信息网络与控制系统中,完成各种电信号(例如语音信号、控制信号和图像信号等)的产生、传递、储存、变换、加工处理与控制,常见的例子有收音机、电视机电路等。

1.1.2 电路元件模型和电路模型

一个实际电路在工作时所发生的物理过程是十分复杂的,其中的每一个元件中一般都会同时出现几种电磁现象,例如,当通过电池的电流增大时,电池的端电压会降低,电池会发热;当电阻器中的电流变化时,周围会伴随着电磁场的变化;当电流通过电感器时会产生磁场,电感器也会发热,匝间还存在着电场;当电容器极板间的电压发生变化时,电容器中有变化的电场和变化的磁场,介质中还有热损耗等,上述这些现象同时发生在这些实际电路元件和导线之中,彼此交织在一起,连续分布在整个元件中,不能从空间上相互分开。

显然,直接对这种由具体电路元件组成的实际电路进行分析和研究是相当复杂和困难的,有时甚至是不可能的。事实上,在工程实际中也没有这样精确分析的必要。因此,可以像力学等其他成熟学科一样,采用科学的抽象分析方法,在一定条件下对实际电路元件进行抽象处理,即忽略它的次要特性,用能足够准确地反映其主要电磁性能的元件模型来表示,这种元件模型称之为理想(化)电路元件。每一种理想电路元件只表示一种电磁现象,因而各具有某种确定的电磁性能。例如,电阻元件只消耗电能,电容元件只储存电场能量,电感元件只储存磁场能量。实际电路元件本身所固有的电磁性能可以用电路参数来表示,基本的电路参数有三个,它们是电阻、电容和电感,其中电阻是用来反映电路元件电能量损耗性质的;电容和电感则分别是反映电路元件形成电场并储积电场能和形成磁场并储积磁场能的电路参数。

引入了电路参数的概念以后,所谓电路元件的“理想化”就是假定同时发生在整个电路元件之中的电能消耗以及电能、磁能的储存现象可以分别加以研究,并且这些具有连续分布特性的电磁过程以及反映它们的三种电路参数可以分别集中起来构成集总参数元件模型。这样,每一种集总参数元件就只反映一种电磁特性,即其内部只发生一种电磁过程。因此“理想化”又可称为“集总化”,相应地,理想电路元件亦称为集总参数元件(简称为集总元件)。

理想电路元件的电磁特性可以用数学方法精确地加以定义,它们作为一种数学模型,在实际中并不存在,而是一种没有几何尺寸,并视其参数集中于一点(无几何大小的点)的模型化元件,但这并不意味着它们是理论脱离实际的无用之物;相反,这种理想化的模型在电路理论分析中是一种必不可少的基本要素。实践证明,在一定条件下建立起来的集总参数元件模型符合实际情况,因而是可行的,正如力学中所建立的“质点”和“刚体”模型能够很好地描述实际物体机械运动的规律一样。

理想电路元件概括起来可以分为三类:其一是理想负荷元件,主要有电阻元件、电容

元件和电感元件，它们是基本的集总参数元件，分别用来模拟以消耗电能为主的电阻器、电炉等，以储存电场能为主的实际电容器等所反映的电场现象和以储存磁场能为主的实际电感器等所表现的磁场现象；其二是理想电源元件，即理想电压源和理想电流源，用来反映实际电源等提供能量的情况；其三是理想耦合元件，有受控电源、耦合电感器、理想变压器和回转器等，用来描述实际电路元件之间在物理过程上的相互关联关系。有关这些元件的详细介绍将在后续章节里陆续给出。

对于图 1-1(a)所示的实际电路，可以认为灯泡的电感极其微小，故把它看成一个理想电阻元件；而一个新的电池，其内阻与灯泡电阻相比完全可以忽略不计，故把它看成是输出恒定电压的理想电压源，电路的连接导线在长度较短时，它的电阻也可完全忽略，故可看作理想导体。这时，用这理想电阻元件构成了小灯泡的模型，用理想电压源去构成了电池的模型，用理想导线去构成连接导线的模型。这样，实际电路图 1-1(a)即可转变为图 1-1(b)所示的电路模型，即电路图。因此，电路课程中对电路进行理论分析所采用的通常都不是实际电路，而是电路模型。

如何用理想电路元件去模拟实际电路元件，这主要依据实际电路元件的工作条件以及对模型精确度的不同要求，有以下两个特点：①在一定的应用条件下，采用同一种理想电路元件模型可以表示一类具有相同的主要电磁性能的不同实际电路元件，例如电阻器、电炉和照明器件在低频情况下应用时，它们中储存的电能、磁能与它们所消耗的电能相比很微小，可以忽略不计，因而都可以用电阻元件来表示。②同一个实际电路元件在不同的应用条件下，其模型的形式各不相同。这是由于实际电路元件中的电磁性能是多种多样的，在一种情况下应用时，其某种电磁性能占主导地位，在另一种情况下应用时，它们的另一些电磁性能又可能占主导地位。例如，一个实际电感线圈是在一个骨架上用良好的金属导线绕制而成的，如图 1-2(a)所示。在恒定直流情况下，它所表现出的电磁性能主要是耗能，而所储藏的电能、磁能与其消耗的电能相比都很小，可以忽略不计，这时它的模型可以用图 1-2(b)所示的理想电阻元件来表示；如果应用在低频交流电路中，其突出的电磁性能主要是储存磁能，它所消耗的电能和储藏的电能与前者相比达到仍可忽略的程度，在这种情况下，其模型可以用图 1-2(c)所示的理想电感元件来表示；如果应用在高频交流电路中，就需要考虑到绕制该线圈的导线所消耗的电能，它所储藏的电能仍然可以忽略不计。这样，该实际电感器就可以用反映电能消耗的理想电阻元件与体现磁能储存的理想电感元件的串联组合来模拟，如图 1-2(d)所示。如果这个实际电感器用在更高频率交流的电路中，则它所储藏电能的分布电容的影响也需要考

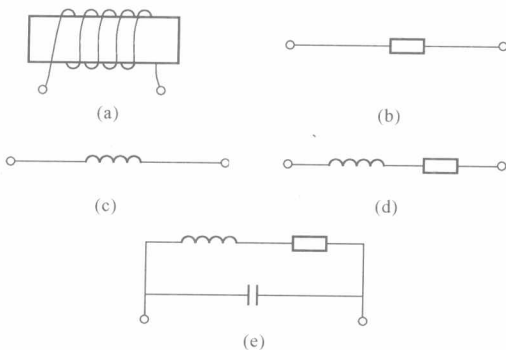


图 1-2 实际电感线圈在四种不同应用条件下的模型表示

- (a)实际电感线圈；(b)通过直流时的模型；
(c)通过低频交流时的模型；(d)通过高频交流时的模型；
(e)通过更高频交流时的模型

虑,那么这种情况的实际电感器模型则可以用图 1-2(e)所示的理想电阻元件与理想电感元件串联后再与理想电容元件并联来表示。

由理想的(集总参数的)电路元件组成的电路称为电路模型称为集总参数电路。一个实际电路要能用集总参数电路去模拟或者说采用集总化方法为实际电路元件建模需要满足下列条件(称为集总化电路条件或集总化假设):实际电路的最大几何尺寸 d 必须远远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ , 即有 $d \ll \lambda$ ($\lambda = c/f$, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), 如果用光速 c 除以该不等式两边, 则可得到集总化电路条件的另一种表述形式: $\tau \gg T$, 其中 τ 是电信号(电压或电流)从电路的一端到达另一端所需的时间, T 为信号的周期。显然, 电路信号的频率越高, 波长越短, 若要求电路满足集总参数电路的条件, 则需要其尺寸越小。例如, 我国电力用电的频率为 50Hz, 对应的波长为 6000km, 对于以此为工作频率的电子电路来说, 其尺寸与这一波长相比可以忽略不计, 因而完全可以作为集总参数电路来处理, 但是对于远距离的通信线路和电力传输线来说, 由于不满足上述条件, 所以就必须要考虑到电场、磁场沿电路分布的现象, 不能用集总参数而要用所谓的分布参数来表征。另外, 一般的计算机电路, 其工作频率可达到 500MHz 以上, 若以 500MHz 为例, 假设电路尺寸只有 0.5m, 则 $\lambda = 0.6\text{m}$, 显然 d 与 λ 在同一数量级上, 并且数值相差很小。因此, 用集总参数电路来处理就很不理想, 严格地说是不能用的。

集总假设从本质上来说, 就是将在空间中交织在一起的电场和磁场分割开来考虑, 即认为这两种场之间不存在着相互作用。但是, 电场与磁场间的相互作用产生电磁波及能量辐射, 一部分能量将通过辐射损失掉。因此, 只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总的概念, 这就要求电路满足所谓集总(化)条件。由此可以得到集总参数电路的下列特征: ①电流在集总参数电路中流动不需要时间, 即可以忽略不计空间因素, 所有电量仅是时间的函数。②没有任何电、磁能量辐射, 即电磁能量的消耗与储存都集中在元件内部进行。③集总元件端子上的电位和端子间的电压在任一时刻都有完全确定的值。④在任何时刻, 流入理想二端元件某一端的电流恒等于流出其另一端的电流。

1.2 电流、电压变量及其参考方向

在电路分析中, 为了定量地描述电路的工作状态或元件特性, 需要一组可以表示为时间函数的物理量。这组物理量可以分为基本变量和复合变量两类, 基本变量共有四个: 电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 、电荷 $q(t)$ 和磁链 $\Psi(t)$; 复合变量只有两个: 功率 $p(t)$ 和能量 $w(t)$ 。选定上述四个变量作为电路的基本变量, 其原因在于采用它们完全可以描述电路中各种变化的电和磁现象。复合变量可以由基本变量表示, 用以反映电路中功、能的传递情况。

在电路分析中较为常用的是可以实际测量的两个基本变量: 电流和电压及其复合变量功率。

1.2.1 电流变量及其参考方向

电荷有规则的定向流动形成电流, 其大小或强弱用物理量电流强度(简称电流) $i(t)$

来表示,在数值上定义为在单位时间内通过电路某横截面的电荷量,即

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

运动的电荷可以是导体或半导体中的电子,也可以是空穴或电解质中的正负离子以及真空中的电子或离子等。电流强度的定义可以用图 1-3 加以说明。

电流的 SI 单位为安[培](A), $q(t)$ 的单位为库[仑](C)。若电荷以 1C/s 的速率流动,则电流的大小为 1A。此外,各种应用场合常用的电流单位还有兆安(MA)、千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)和纳安(nA),它们之间的换算关系为: 1MA=10⁶ A, 1kA= 10³ A, 1mA=10⁻³ A, 1 μ A=10⁻⁶ A, 1nA=10⁻⁹ A。

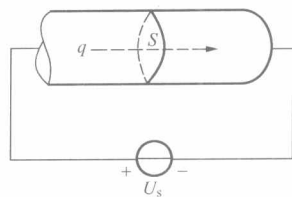


图 1-3 电流强度的定义说明

电流 $i(t)$ 既表示电荷流动这种物理现象,又代表反映这种现象的物理量,它不仅有大小,而且有方向。历史上,将正电荷运动的方向人为地规定为电流的实际方向。但是现代科学表明,电流事实上是负电荷或电子的定向移动而形成的,其实际方向与人们规定的恰好相反。如果电流的大小和/或方向随时间变化,则称其为时变电流,用符号 $i(t)$ 或用 i 表示。大小和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流称为交流电流(alternating current),简记为 ac 或 AC。如果电流的大小和方向均不随时间变化,则称为恒定电流,通常称为直流电流(direct current),简称直流,也记为 dc 或 DC,一般用大写字母 I 表示,由于直流是时变电流的特例,所以直流电流也可以用小写字母 i 表示。

在对电路进行分析计算时,经常需要知道电流的实际流向,这对一些简单的直流电路,还是容易做到的,例如在图 1-1(b)中,当开关闭合后,电流的实际方向显然是从电源的正极流向其负极;但是对于比较复杂的直流电路,例如图 1-4 所示的直流电桥电路,电阻 R_x 上电流的实际方向就不能一目了然了。依据图 1-4 中电阻参数大小的不同情况,电流会有三种可能性:①从 a 流向 b;②从 b 流向 a;③无流向可言,因为这时电桥平衡, R_x 上的电流为零。此外,在交流电路中,电流的实际方向分时间段交替改变,因而就更不可能在这样的电路中用一个固定的方向标示出电流的实际方向。由于这两方面的原因,对于复杂电路很难采用实际方向进行分析计算。

通过上面的分析可以知道,电流作为一种物理现象具有代数量(标量)的特征:大小和正负(方向),因而是代数量。因此,可以采用代数量问题的研究方法人为地选定电流的正方向,即在分析电路之前在电路图中任意指定电流流动的正方向,称作参考正方向,一般简称为参考方向。在电路理论中,假定正电荷运动的方向为电流的参考方向,它有两种表示方法:①用一个带实线段的箭头表示;②用双下标表示。例如,图 1-5 中的电流参考方向除了可以用带实线段的箭头表示外,也可以分别用 i_{ab} 和 i_{ba} 表示电流的参考方向是由 a 指向 b 和由 b 指向 a 的。显然,电路中任一处的电流都有两种可能的参考方向,因此当对同一处的电流指定相反的参考方向时,对应的电流表达式应相差一个负号。例如,若图 1-5(a)和图 1-5(b)中为同一段电路上的电流,则由于指定的参考方向相反,所以两者符号

相反。对于这种情况，采用双下标写法则可以表示为

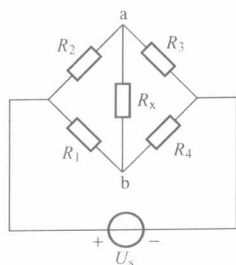


图 1-4 直流电桥电路

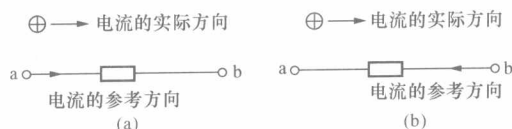


图 1-5 由事先假定的电流参考方向和计算所得
电流的正、负共同确定电流的实际方向

(a) 实际方向与参考方向一致；(b) 实际方向与参考方向相反

$$i_{ab} = -i_{ba}$$

这样，便可以以所设定的电流参考方向作为电路分析计算的依据列出电路方程，如果计算所得的电流值 $i(t) > 0$ ，表明该时刻电流的实际方向与参考方向相同；如果电流值 $i(t) < 0$ ，则表明该时刻电流的实际方向与参考方向相反。这种由电流计算结果的正或负与其参考方向二者共同确定电流实际方向的原则示于图 1-5 中。电流的实际方向也采用与参考方向完全相同的两种表示方法。

应该强调指出，对于时变电流 $i(t)$ ，其参考方向是指电流在时刻 t 这一瞬间的方向。另外，电流值的正与负只有在设定其参考方向的前提下才有明确的物理意义，否则讨论电流的正与负是毫无意义的。电流的参考方向可以任意选定，但一经确定，在电路分析计算的过程中不宜再随意更改，以免造成混乱。这种任意选择性不会影响到计算结果，因为参考方向相反时，计算出的电流值仅相差一负号，参考方向的最后得到的实际结果仍然是相同的。

1.2.2 电压变量及其参考方向

在物理学中已经知道，电荷在电场中会受到电场力的作用，若将无穷远处选作参考点，将单位正电荷从电场中某一点沿任意路径移动至参考点，电场力所做功的大小称为该点的电位，电场中任意两点 a、b 之间的电位差便是这两点间的电压(降)，它是描述电场力对电荷做功大小的物理量，定义为将单位正电荷自场中 a 点移至 b 点电场力做功的大小。这虽然是从电场的概念出发所得出的电位与电压的概念，但是，由于在电路中，同样也存在着电荷受电场力作用而移动的现象，即也有电场力做功电场能量增加或减少的问题，所以电场中的电位、电压及其相互关系的概念同样适用于电路，只不过电路中的参考点是选择在其中的某一点而非无穷远点。因此，如果设一定量的正电荷 $dq(t)$ 从电路中的 a 点移动到 b 点时电场力所做的功为 $dW(t)$ ，则电路中 a、b 两点间的电压定义为

$$u(t) = \frac{dW(t)}{dq(t)} \quad (1-2)$$

式(1-2)中 $dW(t)$ 即为正电荷量 $dq(t)$ 在移动过程中所失去或获得的电能，在 SI 单位制中， $dW(t)$ 的单位为焦[尔](J)，电压 $u(t)$ 的单位是伏[特](V)。若将 1C 的电荷从电场中的 a 点移动到 b 点需要做 1J 的功，则这两点间的电压大小为 1V。常用的电压单位还有兆伏

(MV)、千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)，它们之间的换算关系为： $1\text{MV}=10^6\text{V}$ ， $1\text{kV}=10^3\text{V}$ ， $1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$ ， $1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$ 。

式(1-2)表明，将正电荷量 $dq(t)$ 从 a 点移至 b 点，可以有两种完全相反的情况：①当电场力做正功，即 $dW(t)>0$ 时，有 $u(t)>0$ ，这说明 a 点电位高于 b 点的电位， $dq(t)$ 在 a 点时所具有的电位能高于其在 b 点时所具有的电位能， $dq(t)$ 在移动过程中所失去(释放)的这部分电位能被 a-b 这段电路所吸收(或消耗)，如图 1-6(a)所示；②反之当电场力做负功， $dW(t)<0$ 时，有 $u(t)<0$ ，这说明 a 点电位低于 b 点电位， $dq(t)$ 在 a 点时所具有的电位能低于其在 b 点时所具有的电位能，电荷 $dq(t)$ 在移动过程中所获得(吸收)的这部分电位能由 a-b 这段电路所供出，如图 1-6(b)所示，这种情况发生在电源内部。这样，电荷在电路中转移时电能的得或失只是表现为电位的升高或降低，即电压升或电压降，其实是电荷在电路中移动时和电路(元件)进行能量交换的结果：电荷在电路的某些元件(如电源)处获得能量，而在另外一些元件(如电阻)处失去能量。因此，电压的物理意义是电荷在电路中移动时所获得或失去的电位能。

如果电压的大小和/或方向(极性)随时间变化，则称其为时变电压，用符号 $u(t)$ 或小写字母 u 表示，它包括交变电压或交流电压；如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称其为恒定电压，或直流电压，一般用大写字母 U 表示，也可以用小写字母 u 表示。

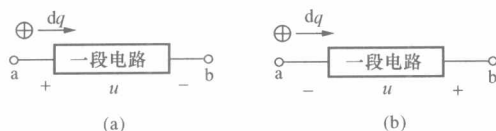


图 1-6 电压的定义、实际方向及其物理意义

(a) dq 失去 dW ; (b) dq 获得 dW

沿用传统习惯，电压的实际方向规定为由高电位点指向低电位点，或者说由“+”极指向“-”极，即电位真正降低之方向，如图 1-6 所示。

与电流的情况类似，在对电路进行分析计算时，往往也需要知道电压的实际方向或极性，这对于较为复杂的电路一般是无法做到的。例如图 1-4 中 R_x 两端电压的实际方向就难于判别，而且在交流电路中，两点间电压的实际方向是分时间段交替改变的。

由于电压也是一个代数量，为了表明其真实方向或极性，也可以在进行电路分析之前预先对其任意假设参考正方向，简称为参考方向或参考极性，它是假设的电位降低之方向，共有三种表示方法：①用一个带实线段的箭头表示；②用正负极性标出，即用一对“+”，“-”符号表示；③用双下标字母表示。例如，在图 1-7(c)中， u_{ab} 表示 a 点为假设电压参考方向的正极性端“+”，b 点则为假设电压参考方向的负极性端“-”，即双下标字母的前后顺序表示所假定电压降的方向。类同与电流时的情况，对于同一段 a-b 电路上的电压，采用双下标写法时，有

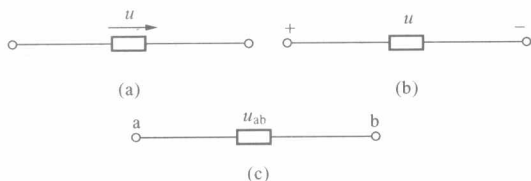


图 1-7 电压参考方向的三种表示形式

(a) 箭头表示；(b) 正负极性表示；(c) 双下标字母表示

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

表示为之指定的两个参考方向是相反的。

电压的实际方向也采用与参考方向完全相同的三种表示方法。