

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

电路理论

—电阻性网络

DIANLU LILUN DIANZUXING WANGLUO

主编 黄冠斌

编者 孙亲锡 谭丹

华中理工大学出版社

电路理论

——电阻性网络

主编 黄冠斌

编者 孙亲锡 谭 丹

N132117

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路理论——电阻性网络/黄冠斌主编
武汉:华中理工大学出版社, 1998年9月
ISBN 7-5609-1820-4

- I. 电…
II. ①黄…②孙…③谭…
III. 电路理论-高等学校-教材
IV. TM13

电路理论——电阻性网络

主编 黄冠斌

责任编辑 李 德

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

中国科学院武汉分院科技印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11 字数:260 000

1998年9月第1版 1998年9月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5609-1820-4/TM·73

定价:10.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是电路理论课模块化教材的基础部分。全书分七章:基尔霍夫定律和网络图论,二端电阻性元件,多端电阻性元件,简单电路的等效变换,网络分析的一般方法,网络定理,非线性电阻网络分析。书中例题与习题选题得当,书末附有习题答案。

本书可作为电类各专业本科生电路理论课基础部分(必修部分)的教材。

总 序

电路理论是一门重要的技术基础课,是工科电类、电子、通信、控制以及机电一体化等学科必备的理论基础,对大学生总体课程的学习和今后的工作起着深远的影响。

为了提高教学质量,适应 21 世纪高等工程教学内容及课程体系改革的要求,我们按照模块化的方式组织编写了这套电路理论教材。

全书分为《电阻性网络》、《时域与频域分析》、《端口网络与均匀传输线》三个模块,形成电路理论课程的三个台阶。这样,可使学生在学习过程中具有明确的阶段性,发挥他们学习的自觉性、主动性和创造性,使他们沿着这三个台阶攀登,打下深厚、坚实的电路理论基础。

为了便于自学,在一些重点章节及难以理解的地方,论述得比较详尽,同时还编有丰富的具有一定深度和难度的颇具启发性的例题分析,以启迪学生们的思路,扩大他们的视野。

本书各章都配有一定数量的习题,其中有些习题的难度较大,可以激发学生的思考,促使他们从更深的层面去理解和掌握电路理论的有关内容,可以说是各章内容的延续。为了方便学生对这些习题的自我训练,各章习题都附有参考答案,供学生对照检查。

编写本教材的作者,都是从事电路理论课程教学多年的教授、副教授,具有较丰富的教学经验。他们在教学过程中,力求在讲深讲透电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法的同时,加强对学生分析问题、解决问题的能力以及素质的培养。在本书的编写中,作者多少溶进了这方面的心血,具有一定的特色。书中有不少观点和提法是作者经过多年的教学总结和提炼出来的。

本书的内容具有一定的深度、广度和难度,在组织教学时可以根据不同的情况进行取舍。本书不仅可作为有关专业的电路理论课程的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

为了满足需要,本书以附录形式编写了“磁路与含铁心的线圈”一章。

本书《电阻性网络》由黄冠斌副教授主编,《时域与频域分析》由杨传谱副教授主编,《端口网络与均匀传输线》由陈崇源教授主编。

由于本书内容较多,范围较广,篇幅较大,可能会有一些考虑不周和错漏之处,恳请广大读者与同仁给予批评指正。

编者 1997 年 10 月于华工大

序

以变量约束的实数代数方程(组)描述的电路称为电阻性电路(网络)。电阻性电路所涉及的电路元件有电阻、独立电源、受控电源和运算放大器等。电阻性网络的分析是电路理论最基础的内容,而随着电路理论的工程背景由电力等强电技术向电子、通信及控制等弱电技术的转移,电阻性网络的分析又日益显示出它的重要性。本书就是为适应我校电工、电子课程体系和内容改革,加强基础,拓宽专业面的要求,便于分阶段和模块化组织教学而编写的。

和以往所使用的电路理论课教材相比较,本书的特点是:(1)第一章介绍了基尔霍夫电流定律与电压定律后,接着就介绍网络图论的基本知识。从基尔霍夫电流定律和电压定律与电路元件的性质无关出发,编者考虑将网络图论的内容提前不仅是可能的,而且这样做可以使学生尽早对电路的这两个基本定律所包含的深层次内容建立起严密完整的概念,例如关于KCL与KVL方程的独立性问题,电网络中的独立和完备变量等问题,以避免以往在相当长一段时间内的盲目性。(2)在“二端电阻性元件”一章,编者力图将非线性电阻元件建立在实用的电子器件上,介绍电子电路中应用较多的一些非线性电子器件的特性,如普通二极管,热敏电阻器,压敏电阻器等。(3)在“多端电阻性元件”一章中,简要介绍晶体管与场效应管的特性。这一方面是我们吸收了有关后续课程教师的意见,另一方面编者的主要意图还在于让学生更多地了解受控电源这一电路元件的一些实物背景。长期以来,运算放大器是学生学习的一个难点,本书在介绍这一电路元件时,先简要介绍实际运算放大器,并给出了一个实际运算放大器内部的分立元件等效电路。在这里我们无意要求学生在学习电路理论课程的时候就能完全看懂这一复杂的电路图,只想它能在帮助学生理解掌握运算放大器这一电路元件的特性时起到一点作用。(4)介绍网络分析的一般方法时,对于每一种分析方法都是从一个具体的简单电路入手,阐明一种分析方法的实质和导出电路方程的基本思路,紧扣电路分析的两个基本依据。在此基础上加以概括和抽象,上升到矩阵形式的电路方程,以严密的数学论证,总结归纳出用视察法列写电路方程的规则。(5)网络定理是网络重要性质的概括,在介绍各个网络定理时,编者首先是从具体的电路例子引出定理内容,然后再展开对定理的深入讨论,这样做有利于学生理解各个网络定理。编者在详尽叙述叠加定理后,附带指出了电路中的线性关系,因此不需多少篇幅,就能拓宽学生解决问题的思路。(6)本书最后一章介绍非线性电阻电路分析的一些常用方法。编者考虑到非线性电路的分析是电路理论的一个重要内容,学生在学完电路理论课程时,应初步具备分析非线性电路的知识和能力。另外在教材中写进这方面的内容,有利于和电子学课程内容的衔接。本章中对凹电阻和凸电阻的特性曲线分别给出了它们的函数表示式,这有助于用解析法解决具有分段线性特性的电流控制型或电压控制型非线性一端口电阻网络的综合问题。

本书中标有“*”的内容,教师可根据教学对象、教学时数等因素决定取舍。删去这些内容时并不影响基本内容的连贯性。

参加本书编写的有黄冠斌(第一、三、七章),孙亲锡(第二、六章),谭丹(第四、五章)。对于本书内容的安排和取舍,虽然编者在以往的教学活动中也曾经过实践,但将其正式成书对编者来说还是一次尝试,因此书中会有一些欠缺之处,编者恳请使用本书的教师和学生批评指正。

编者

1997.10 于武昌

目 录

第一章 基尔霍夫定律和网络图论	(1)
1-1 电路及电路模型	(1)
1-1-1 电路	(1)
1-1-2 理想电路元件,电路模型	(2)
1-2 电压和电流及其参考方向	(2)
1-2-1 电压和电位	(2)
1-2-2 电流	(5)
1-2-3 电流和电压的关联参考方向,功率	(6)
1-3 基尔霍夫定律	(8)
1-3-1 基尔霍夫电流定律(KCL)	(9)
1-3-2 基尔霍夫电压定律(KVL).....	(10)
1-4 网络图论的基本概念	(11)
1-5 有向图的矩阵表示	(15)
1-5-1 关联矩阵	(15)
1-5-2 网孔矩阵	(17)
1-5-3 基本回路与基本回路矩阵	(17)
1-5-4 基本割集和基本割集矩阵	(18)
1-5-5 有向图矩阵间的关系	(19)
1-6 KCL 与 KVL 方程的矩阵形式	(20)
1-6-1 KCL	(21)
1-6-2 KVL	(23)
习题	(25)
第二章 二端电阻性元件	(29)
2-1 电阻元件	(29)
2-1-1 电阻元件的定义与分类	(29)
2-1-2 线性时不变电阻元件	(29)
2-1-3 线性时变电阻元件	(30)
2-1-4 一些典型的非线性时不变电阻元件	(30)
2-1-5 电阻元件的无源性	(32)
2-2 线性电阻元件的串联、并联与混联	(33)
2-2-1 线性电阻元件的串联	(33)
2-2-2 线性电阻元件的并联	(34)
2-2-3 线性电阻元件的混联	(35)

2-3 独立电源	(37)
2-3-1 独立电压源	(37)
2-3-2 独立电流源	(37)
2-3-3 实际直流电源的两种模型	(39)
习题	(40)
第三章 多端电阻性元件	(44)
3-1 晶体三极管和场效应晶体管	(44)
3-1-1 晶体三极管的输入和输出特性	(44)
3-1-2 场效应晶体管的转移特性和输出特性	(46)
3-2 受控电源	(48)
3-2-1 四种形式的受控电源	(48)
3-2-2 含受控电源的简单电路	(50)
3-2-3 受控电源与独立电源的比较	(51)
3-3 运算放大器	(51)
3-3-1 实际运算放大器简介	(52)
3-3-2 理想运算放大器及其特性	(53)
3-3-3 含运算放大器的简单电路分析示例	(53)
习题	(56)
第四章 简单电路的等效变换	(59)
4-1 等效电路的概念	(59)
4-2 戴维南电路与诺顿电路的等效变换	(60)
4-3 电压源与支路并联的等效电路	(63)
4-4 电流源与支路串联的等效电路	(64)
4-5 平衡电桥电路,三端线性电阻网络的 Y- Δ 等效变换	(65)
4-5-1 平衡电桥电路	(65)
4-5-2 三端线性电阻网络的 Y- Δ 等效变换	(66)
4-6 线性电阻性二端网络的入端电阻	(69)
4-6-1 入端电阻的定义	(69)
4-6-2 求入端电阻的一些方法	(69)
4-7 无伴电源的等效变换	(72)
4-7-1 无伴电压源的转移	(72)
4-7-2 无伴电流源的转移	(74)
习题	(75)
第五章 网络分析的一般方法	(81)
5-1 电网络的 2b 方程	(81)
5-1-1 支路方程	(81)
5-1-2 电网络的 2b 方程	(83)
5-2 支路电流分析法	(84)

5-2-1	支路电流方程	(84)
5-2-2	含受控电源电路的支路电流方程	(87)
5-2-3	网络含无伴电流源的处理	(88)
5-3	节点电压分析法	(90)
5-3-1	节点电压方程	(90)
5-3-2	网络不含受控电源时节点电压方程的分析, 视察法	(93)
5-3-3	含受控电源网络的节点电压方程	(96)
5-3-4	网络含无伴电压源的处理	(97)
5-4	回路电流分析法	(99)
5-4-1	回路电流方程	(99)
5-4-2	网络不含受控电源时回路电流方程的分析, 视察法	(100)
5-4-3	含受控电源网络的回路电流方程	(102)
5-4-4	网络含无伴电流源的处理	(103)
* 5-5	割集分析法(树支电压分析法)	(105)
5-5-1	割集方程	(105)
5-5-2	割集方程的分析, 视察法	(107)
5-5-3	含受控电源网络的割集方程	(108)
5-5-4	网络含无伴电压源的处理	(109)
	习题	(110)
第六章	网络定理	(116)
6-1	替代定理	(116)
6-1-1	例子与定理	(116)
6-1-2	定理证明与应用	(117)
6-2	叠加定理	(118)
6-2-1	例子与定理	(118)
6-2-2	定理证明	(119)
6-2-3	应用举例	(120)
6-2-4	电路中的线性关系	(123)
6-3	戴维南-诺顿等效网络定理	(124)
6-3-1	定理内容	(125)
6-3-2	定理证明	(125)
6-3-3	定理应用	(126)
6-4	特勒根定理	(131)
6-4-1	定理内容及证明	(131)
6-4-2	应用举例	(133)
6-5	互易定理	(134)
6-5-1	互易网络 N_R	(134)
6-5-2	互易定理	(135)
6-5-3	应用举例	(136)

* 6-6	中分定理	(137)
6-6-1	对称激励的对称电路	(137)
6-6-2	反对称激励的对称电路	(138)
6-6-3	应用举例	(139)
	习题	(140)
第七章	非线性电阻电路分析	(145)
7-1	非线性电阻电路的图解法	(145)
7-1-1	非线性电阻元件串联或并联的端口特性	(145)
7-1-2	图解法确定直流工作点	(149)
7-2	非线性电阻电路的小信号分析法	(150)
* 7-3	非线性电阻电路的分段线性化分析法	(153)
* 7-4	非线性电阻电路的电路方程	(155)
	习题	(157)
附录	部分习题答案	(160)

第一章 基尔霍夫定律和网络图论

本章简要回顾描述电路特性的两个重要物理量——电流和电压,主要是强调它们的参考方向或参考极性。阐述仅与电路的几何结构有关而与电路元件性质无关的基尔霍夫电流定律和电压定律。两个定律是电路分析的基本依据之一。

从基尔霍夫定律与电路元件性质无关出发,将电路抽象为有向线图,介绍网络图论的基本知识,以深入揭示电路在几何结构方面呈现的性质(称为电路的拓扑性质),无疑这些性质对以后的电路分析是重要的。

1-1 电路及电路模型

1-1-1 电 路

实际电路是将若干电气设备或电器件按一定方式联结起来构成的电流通路。从一个完整电路的各部分所起的主要作用来看,都包含电源(或信号源)、负载以及电源至负载的中间环节三个基本部分。电池,发电机,信号发生器等是电源或信号源的实体,在电路中电源或信号源的作用是向电路提供电能或有用的电信号。各种各样的用电设备或耗能及储能器件,如电灯,电动机,扬声器,电视显像管,电阻器和电容器等,统称为负载。负载的作用是实现电能或电信号与其它形式能量或信号之间的转换,有时也可能是电能与电能之间或电信号与电信号之间的转换。中间环节包括联接导线,开关及处理设备,其作用是输送、分配电能和对电信号进行处理。因此,电路是互相联结起来的电源与负载的总体,电流能在其中流通。电路有时也称为电网络或网络。

根据电路的运行条件,有的可以按集中参数电路的观点和理论分析处理,有的则必须按分布参数电路的观点和理论分析处理。集中参数电路的观点和理论认为:电路中的电磁量,如电流和电压等,只是时间的函数,因而描述电路的方程一般是常微分方程(对电阻性电路,是实数代数方程)。分布参数电路的观点和理论认为:电路中的电磁量是时间和空间坐标的函数,因而描述电路的方程是偏微分方程。对一个实际电路,是应按集中电路的理论加以分析研究,还是应按分布参数电路的理论加以分析研究,主要是视电路的最大几何尺寸与电路运行时电流波或电压波的最高频率对应的波长相比较是否可以忽略而定。若以 λ 表示电流波或电压波最高频率对应的波长, d 表示电路的最大几何尺寸,则当 $d < 0.01\lambda$ 时,就可以作为集中参数电路加以分析研究;而当 $d \geq 0.01\lambda$ 时,就应按分布参数电路加以分析研究了。其次,即使频率较低,但如果电压很高,例如长距离直流输电线(像葛洲坝至上海的直流输电线,输电电压为500kV),也应按分布参数电路分析研究。本书只讨论集中参数电路。用集中参数电路的观点分析研究电路时,认为电路中的一些电磁现象或电磁过程,例如电能的消耗,电场能量与磁场能量的储存或释放等,只存在于电路中的某些部件上,并且都能用相应的电路元件(集中参数元件)表示在电路图中。电路的几何尺寸和空间位置是无关紧要的,在不改变电路各部分相互联接关系的前提下,可以将电路图画成看起来最习惯和最便于分析计算的形式。

1-1-2 理想电路元件,电路模型

如上所述,电路是将一些电气设备或电器件用导线联接起来构成的电流通路。为了叙述的方便,将这些电气设备或电器件统称为实际器件。实际器件都能够维持电流流动,并在其端钮间保持电压。任何一个实际器件,在电流或电压作用下都包含有能量的消耗,电场能量的储存和磁场能量的储存三个基本效应,这些基本效应互相缠绕,使实际电器件呈现很复杂的性状,以至直接分析由实际电器件组成的电路是极困难的,甚至是不可能的。另一方面,上述三种基本效应在某个电器件上的表现又不是均衡的,在一定的条件下,其中的某一种效应可能表现较强,处于主导地位,而别的效应可能表现较弱,处于次要地位,即使将其忽略,也不致使理论分析结果与实际情况有本质的差异。因此,就有必要也有可能对实际电器件加以近似,加以理想化,我们把只具备单一电磁性质的电路元件称为理想电路元件。由于没有任何一个特殊的实际器件它只呈现一种电磁性质,而能把其它电磁性质排除在外,所以具有单一电磁性质的电路元件是理想化了的,实际中是不存在的。理想电路元件简称电路元件,各种电路元件都用数学加以严格定义(所以也有把电路元件称为数学元件的),并用规定的图形符号表示。电路理论研究的是由理想电路元件互相联接组成的电路——电路模型。对于一个实际的电器件或电路,可以通过对其中发生的能量效应或电磁现象的观察分析,用一些恰当的理想电路元件按一定方式联接组成的电路模型去逼近实际情况。这里的关系正如力学中为了研究物体的受力情况就需要建立质点、刚体、理想气体等模型一样。

1-2 电压和电流及其参考方向

分析电路应有对电路的数学描述,这是由电路的一些物理量,如电流、电压、电荷、磁通链、功率和能量等来表示的,这些物理量统称为电路变量或网络变量。电流和电压是描述电路特性的两个基本变量,这是因为:电流和电压是电路中比较容易观察到的两个物理量;电路的基本定律是叙述一个电路中各部分的电流或电压之间关系的;一旦一个电路中各部分的电流和电压被确定,则这一电路的特性就被掌握了,如由已知电流和电压求功率或能量是很容易的。

1-2-1 电压和电位

一、电压的定义

库仑电场力移动单位正电荷由电场中的 a 点到 b 点所作的功称为 a、b 两点间的电压。如图 1-1 所示,设在电场力作用下,电量为 dq 的电荷由 a 点沿路径 l 被移动到 b 点时,电场力所作的功为 $d\omega$,则 a、b 两点间的电压为

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-1)$$

或根据电场强度 E 的定义,电压也可用下面的积分形式定义

$$u = \int_{ab} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-2)$$

一般情况下电压是随时间变化的。本书中电压用英文字母 u

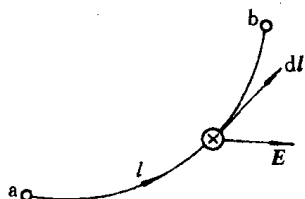


图 1-1 电压的定义

① \int_{ab} 仅表示由 a 点经过路径 l 到 b 点的线积分,并不表示积分限。

或 U 表示,并且规定小写字母表示电压是随时间变化的,大写字母表示不随时间变化的电压(直流电压)。对其它的电路变量我们也都按此规定。电压的 SI^①单位为伏[特]^②(V),实用中还常用千伏(kV),毫伏(mV)等单位计量电压,它们的关系是 $1\text{kV}=10^3\text{V}$, $1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$ ^③。

电压的定义是与做功的概念相联系的,正电荷从 a 点移动到 b 点时,库仑电场可能作正功,也可能作负功。由(1-2)式容易看出,在计算 a 、 b 之间的电压时,若所取的积分路径的走向与原来选取的走向相反,则计算结果将与原来的差一负号。这些都表明,电压是一个代数量,可正可负。

库仑电场的基本规律之一是:电场强度 E 的任意闭合线积分等于零,即

$$\oint E \cdot dl = 0 \quad (1-3)$$

根据这一基本规律,对图 1-2 应有

$$\int_{amb} E \cdot dl + \int_{bna} E \cdot dl = 0$$

$$\text{即} \quad \int_{amb} E \cdot dl - \int_{anb} E \cdot dl = 0$$

$$\int_{amb} E \cdot dl = \int_{anb} E \cdot dl$$

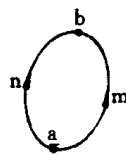


图 1-2 电压与路径无关

最后一式表明,两点间的电压与所经历的路径无关。这样 a 、 b 两点的电压就可以表示为

$$u = \int_{(a)}^{(b)} E \cdot dl \quad (4)$$

而无需指出经过的是哪个路径。电压与路径无关的基本事实是:电路中任意两点之间联接的电压表不管联接电压表的导线如何弯曲,只要联接在电路中的那两点位置不变,则电压表读数不变。在理论计算中,求两点之间的电压可能有几个路径,这时就应选择易于计算的路径。

二、电位

在两点间电压与路径无关的前提下,若在电场中任意选择一参考点 o ,如图 1-3 所示,则电场中各点与参考点 o 之间都有确定的电压,如

$$u_{ao} = \int_{(a)}^{(o)} E \cdot dl \triangleq \varphi_a \quad (5)$$

$$u_{bo} = \int_{(b)}^{(o)} E \cdot dl \triangleq \varphi_b$$

$$u_{oo} = \int_{(o)}^{(o)} E \cdot dl = 0$$

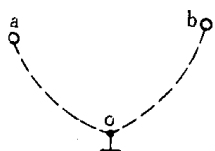


图 1-3 电位的概念

而

各点到参考的电压称为各点的电位。在电路图中参考点常用符号“ \perp ”表示。

建立了电位概念以后,如图 1-3 中 a 、 b 间的电压可以表示为

$$u_{ab} = \int_{aob} E \cdot dl = \int_{(a)}^{(o)} E \cdot dl + \int_{(o)}^{(b)} E \cdot dl = \int_{(a)}^{(o)} E \cdot dl - \int_{(b)}^{(o)} E \cdot dl = \varphi_a - \varphi_b$$

可见, a 、 b 两点间的电压就等于 a 、 b 两点的电位差。

① SI 表示国际单位制(Systeme International)

② 表示单位名称的方括号内的字可以省略,下同。

③ 表示十进倍数和分数单位的词头为 $p(10^{-12})$, $n(10^{-9})$, $\mu(10^{-6})$, $m(10^{-3})$, $k(10^3)$, $M(10^6)$ 。

④ 积分表示式中 (a) 、 (b) 不是积分限,仅表示由 a 点至 b 点。

⑤ 符号“ \triangleq ”表示定义相等。

显然,各点的电位会因参考点的选择不同而有不同的值,所以电位是相对的量。但两点之间的电位差(即电压)是一定的,与参考点的选择无关。电位参考点的选择原则上是任意的,但在同一个问题中,电位参考点一经选定,就得以此为准,而不可选取两个或两个以上的电位参考点。在电磁场理论中,通常以无限远处作为电位参考点。在电力系统中往往以大地作为电位参考点。在电子线路中多把设备的金属外壳或公共接线端作为电位参考点。在电路分析中,有时也要选择电位参考点,这种情况下一般是依怎样选择参考点才便于问题的分析而定,对此将在后面的有关章节中再具体说明。

由上面的叙述可以看出,沿任一闭合路径各部分电压的代数和等于零,或两点间的电压与所经历的路径无关,以及引入电位的概念,都是电场强度的任一闭合线积分等于零的直接结果,其实质是相同的。

三、电压的参考方向

库仑电场对电荷施力的特点总是使正电荷从电位的较高处向电位的较低处运动,这时库仑电场作正功。因此习惯规定,两点之间电压的实际方向为从高电位的一点指向低电位的一点。

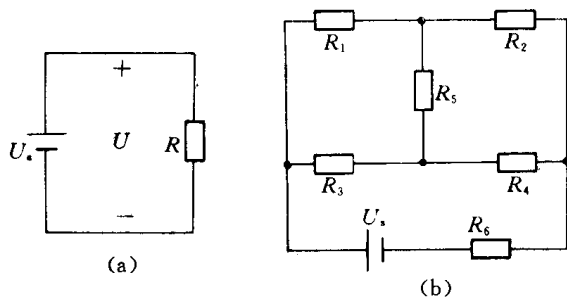


图 1-4 电压的参考方向问题

在进行电路分析时,将涉及电路各部分电压的方向。上面虽然说明了电压实际方向的习惯规定,但除了那些结构极简单的电路,例如图 1-4(a)所示的电路,可以不经分析计算就能知道电阻 R 上电压的实际方向,并在电路中标加以标注外,对于结构稍复杂一些的

电路,在分析计算以前,各部分电压的实际方向是未知的,于是也就不可能在电路图中标注各部分电压的实际方向。例如图 1-4(b)所示电路中电阻 R_5 两端电压的实际方向是怎样的呢,这在分析计算前并不能确定。另外对那些方向随时间不断变化着的所谓交流电压,就更不便于在电路图中标出它们的实际方向,即便能标出也无实际意义。为了建立电路的数学模型,我们基于两点间电压的实际方向只有两个可能,所以可以人为地为电路的各部分电压假定一个方向,这个假定的电压方向称为电压的参考方向。

本书中电压的参考方向表示方法如图 1-5 所示,即在所论及的两点分别标以“+”和“-”



图 1-5 电压参考方向的表示

符号,并在“+”与“-”间标注表示该电压的字符符号,这里所谓“方向”是指由“+”到“-”。当所论及的两点有字母或数字作为标记时,如 a 和 b ,则可以用以 ab 为下角标的字符符号 u_{ab} 表示电压及其参考方向,含义是电压的参考方向由 a 指向 b ,而省去“+”和“-”。当应用电位概念时,都隐含着参考点就是公共的“-”,其它各点相对于参考点均为“+”,从而无需另外标注电压参考方向的标记。根据电压的定义式(1-2),指定电压的参考方向相当于选取积分路径的走向。

按照预先指定的电压参考方向,例如图 1-5 中的 u ,若计算结果 $u > 0$,则意味着此电压的

实际方向正好与参考方向是相同的;若计算结果 $u < 0$,则表示此电压的实际方向与参考方向是相反的。因此,在指定了电压的参考方向以后,结合电压数值的正负,电压的实际方向是十分明确的。

电压参考方向的选择完全是任意的,它并不影响电压的实际方向。例如在图 1-5 中,若按 a 到 b 的电压参考方向计算时,有 $u_{ab} > 0$,则当按由 b 到 a 的电压参考方向计算时,必有 $u_{ba} < 0$ 。电压的实际方向并不因为参考方向的不同而改变。同时也必须指出,当一个问题开始的时候,虽然参考方向的选取是任意的,但一经选定,那么以后的分析乃至对分析结果的解释,都必须以此选取为准。

四、电动势

除了库仑电场,还存在非库仑电场,非库仑电场并不是由于电荷的存在引起的。在图 1-6 所示的化学电池内部,由化学力引起非库仑电场 E_n 。非库仑电场也能对电荷施以力的作用,只是施力的特点与库仑电场相反,非库仑电场施以力的作用总是使正电荷从电源的负极移向正极,在电池两极建立起库仑电场,维持电路中的电流连续不断。

非库仑电场移动单位正电荷从负极 b 到正极 a 所作的功,定义为电动势。如用 e 表示电动势,则

$$e = \int_{ba} E_n \cdot dl$$

显然,电动势的单位与电压相同。另外对电动势也必须指定参考方向,在图上用箭头,或“-”、“+”等符号表示,电动势的参考方向是由“-”指向“+”,与电压相反。因此,如果不考虑电池内部还有其它的能量转换,则在以上参考方向的规定下,根据能量守恒原理应有 $u = e$ 。

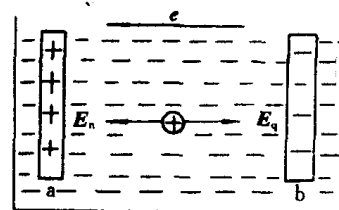


图 1-6 电动势

本书在论及电源时,多是用其端电压,即沿电源的任意外部路径计算的两极间电压表征的,而很少用电动势描述。

1-2-2 电 流

一、电流的含义

电场的作用使电荷运动或移动,大量电荷的有规则运动或移动即形成电流(电荷流)。设空间有一束电荷流(例如电荷沿某一导体的轴向运动),现任取一截面 S ,如图 1-7 所示,若在 dt 时间内,穿过截面 S 的净电荷量为 dq ,则单位时间内通过截面的电量

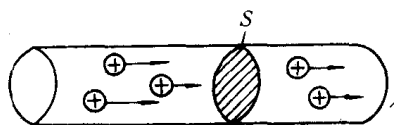


图 1-7 电流强度

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-4)$$

称为电流强度,简称电流。可见电流一词,既是一种物理现象,也是一种物理量。电流的 SI 单位为安[培](A),实用中还常用千安(kA)、毫安(mA)和微安(μA)等单位计量电流。

在某点处垂直电荷运动方向取一面元 ΔS ,设其上通过的电流为 Δi ,则定义一矢量 δ ,称为电流密度矢量,其量值为

$$\delta = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta S} = \frac{di}{dS}$$

矢量的方向为正电荷在该点的运动方向,引入了电流密度矢量,通过任意截面 S 的电流 i 就可以表示为

$$i = \int_S \delta \cdot dS \quad (1-5)$$

习惯规定,电流的实际方向为正电荷运动的方向。

二、电流的分类及电流的连续性

按电流的形成方式,可将电流分为传导电流、徙动电流和位移电流三类。

传导电流是导电媒质中自由电子或离子在电场作用下有规则的运动,例如金属导体和电解液中的电流。在线性导电媒质中,传导电流的电流密度与该点的电场强度成正比,即

$$\delta_c = \gamma E$$

式中, γ 为导电媒质的电导率。

徙动电流又称为运流电流或对流电流。这是由带电粒子在自由空间(真空中,稀薄气体中)运动形成的电流,例如真空电子管内部的电流和电晕现象。徙动电流的电流密度矢量为

$$\delta_p = \rho v$$

式中, ρ 为所论点处的体电荷密度, v 为该点的电荷运动速度。

位移电流是由于电场变化形成的电流,例如电容器内部的电流。位移电流的电流密度等于电位移矢量 D 对时间的变化率,即

$$\delta_D = \frac{\partial D}{\partial t}$$

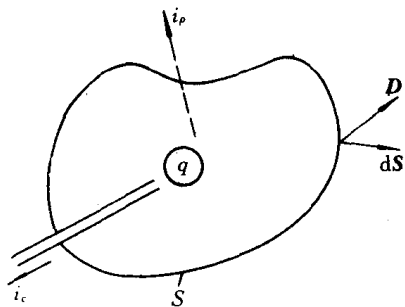


图 1-8 电流的连续性

考虑从任一封闭面流出的传导电流 i_c 和徙动电流 i_p ,如图 1-8 所示,根据电荷守恒原理,应等于闭合面内自由电荷的减少率,即

$$\oint_S (\delta_c + \delta_p) \cdot dS = - \frac{\partial q}{\partial t}$$

式中, q 表示闭合面内的自由电荷。根据高斯定理, $q = \oint_S D \cdot dS$,将这一关系代入上式,并考虑 $\delta_D = \frac{\partial D}{\partial t}$,得

$$\oint_S (\delta_c + \delta_p + \delta_D) \cdot dS = 0 \quad (1-6)$$

上式表明,流出任一封闭面的所有电流的代数和等于零,这就是全电流的连续性。

三、电流的参考方向

上面虽已说明,电流的实际方向为正电荷运动的方向,但对结构稍复杂的电路,电路中各部分电流的实际方向在分析计算前是未知的。另一方面,在一段电路上,如图 1-9 所示,电流的实际方向不是从 a 流向 b,就是从 b 流向 a,为了对电路进行分析计算,可以预先为各部分电流指定一个方向,称为电流的参考方向。电流的参考方向用箭头表示在电路上,并在箭头旁标注表示该电流的文字符号。至于电流的实际方向,也是由电流的参考方向和该电流数值的正负加以判定。



图 1-9 电流参考方向的表示

1-2-3 电流和电压的关联参考方向,功率

前面已经说明,为了对电路进行分析计算,必须为电路各部分的电流和电压指定参考方

向。就一段二端电路而言,电流和电压的参考方向本是可以互相独立选取的。如果在选取两者的参考方向时,使表示电流参考方向的箭头由表示电压参考方向的“+”指向“-”,如图 1-10 所示,一段二端电路上电流与电压参考方向符合这一关系的称为电流和电压的关联参考方向,或称一致参考方向。不符合这一关系的称为非关联参考方向。应当说明的是,所谓关联参考方向或非关联参考方向都是对某一二端电路而言的。例如在图 1-11 中,对二端电路 N_1 来说,电流和电压的参考方向是非关联的,而对二端电路 N_2 来说,两者的参考方向是关联的。



图 1-10 电流和电压的关联参考方向

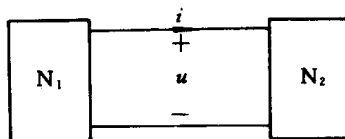


图 1-11 电流和电压的关联参考方向
是对某一二端电路而言的

当二端电路的电流和电压取关联参考方向时,考虑二者的乘积,用 P 表示,即

$$P = ui \quad (1-7)$$

将(1-1)式和(1-4)式代入,得

$$P = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = dW/dt$$

可见 P 为功率,并且根据电压和电流的概念,沿着电压的方向(由“+”到“-”)流动的电流,是库仑电场作用形成的,所以(1-7)式表示库仑电场力作功的功率。根据能量守恒原理,库仑电场力作功,将电能转化为其它形式的能量,因此我们说(1-7)式表示二端电路吸收的(电)功率。诚然,由于电压和电流均为代数量,二者的乘积 P 可正可负,只有当计算结果 $P > 0$ 时,才表明所论二端电路确实是吸收(电)功率的。相反,若计算结果 $P < 0$,则表明所论二端电路实际上是产生或提供(电)功率的(将其它形式的能量转化为电能)。

功率的 SI 单位为瓦[特](W),实用中还有用兆瓦(MW)、千瓦(kW)和毫瓦(mW)等单位计量功率的。

由(1-7)式,二端电路在任一时间 t 吸收的电能为

$$\epsilon(-\infty, t) = \int_{-\infty}^t uidt' \quad (1-8)$$

式中,“ $-\infty$ ”表示电路的能量为零时的一个抽象时间, t' 是为区别积分上限 t 引入的表示时间的变量。如果对所有时间 t 和 u, i 的可能组合,(1-8)式的积分恒大于或等于零,则称所论二端电路是无源的。反之,只要(1-8)式的积分结果有出现小于零的情况,那末所论二端电路就是有源的。可见,说一个二端电路是无源的还是有源的,只能居其一,而任何居中的回答都是不正确的。本书中约定,若组成一个电路的各部分都是无源的,则称电路为无源电路。

当二端电路上的电流和电压取非关联参考方向时,可用下式计算其功率

$$P = -ui^{①} \quad (1-9)$$

这一计算公式的含义和计算结果的解释与(1-7)式完全相同。

例 1-1 如图 1-12 所示二端电路,设在图示 u, i 参考方向下,(1) $u = 20V, i = 2A$, 求此

① 电流和电压取非关联参考方向时,也可按(1-7)式计算功率,但这时(1-7)式本身表示二端电路提供的功率。若计算结果 $p > 0$,则表明所论二端电路实际是提供功率的;若计算结果 $p < 0$,则表明所论二端电路实际是吸收功率的。可见,同样一个计算公式,由于电流和电压参考方向不同,计算公式的含义是不同的。