



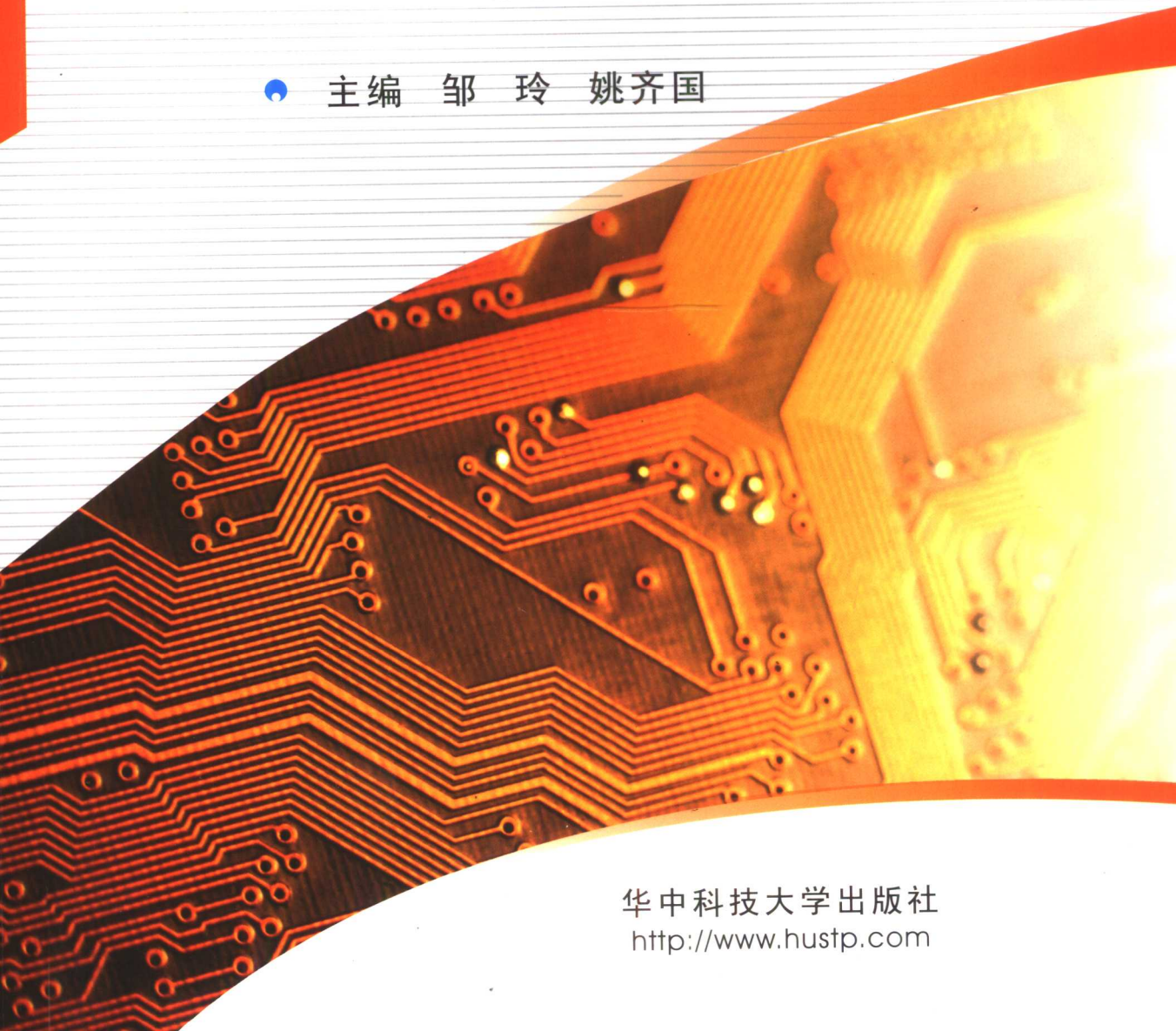
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材



21世纪电气信息学科
立体化系列教材

电路理论

● 主编 邹玲 姚齐国



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



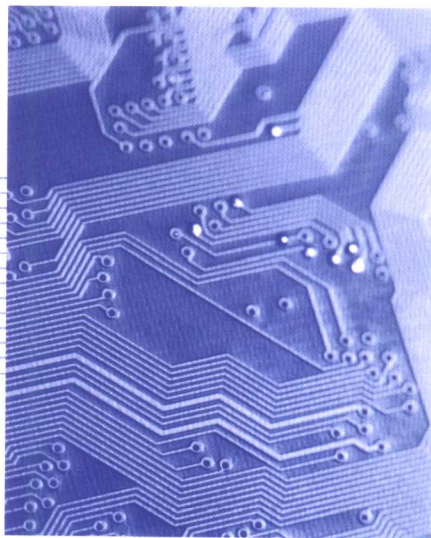
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材



21世纪电气信息学科
立体化系列教材

电路理论

主 编 邹 玲 姚齐国
副主编 金 波 刘松龄
 张志俊 罗 明



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

电路理论/邹玲 姚齐国 主编
武汉:华中科技大学出版社,2006年8月
ISBN 7-5609-3812-4

I. 电…

I. ①邹… ②姚…

II. 电路理论-高等学校-教材

N. TM13

电路理论

邹玲 姚齐国 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:余涛

责任校对:吴晗

封面设计:秦茹

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:武汉众心设计室

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:24.75 插页:2

字数:530 000

版次:2006年8月第1版

印次:2006年8月第1次印刷

定价:36.80元(含1 CD)

ISBN 7-5609-3812-4/TM·83

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



21世纪电气信息学科立体化系列教材

编审委员会

顾问：

潘 垣（中国工程院院士，华中科技大学）

主任：

吴麟章（湖北工业大学）

委员：（按姓氏笔画排列）

王 斌（三峡大学电气信息学院）

余厚全（长江大学电子信息学院）

陈铁军（郑州大学电气工程学院）

吴怀宇（武汉科技大学信息科学与工程学院）

陈少平（中南民族大学电子信息工程学院）

罗忠文（中国地质大学信息工程学院）

周清雷（郑州大学信息工程学院）

谈宏华（武汉工程大学电气信息学院）

钱同惠（江汉大学物理与信息工程学院）

普杰信（河南科技大学电子信息工程学院）

廖家平（湖北工业大学电气与电子工程学院）

内 容 提 要



本书按照教育部高等院校电路理论课程教学的基本要求,系统地介绍电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法。从培养学生分析、解决电路问题能力的目的出发,通过对电路理论课程中重点、难点及解题方法的详细论述,着力于基本内容的叙述与学习方法指导的有机结合。

本书结构合理、例题丰富,语言简洁、流畅。有的章节将 Matlab 程序用于习题解答,便于学生解题。与教材配套的光盘包括相关章节的学习指导、电子教案、典型例题精解、重难点知识解析等内容,便于学生自学。

全书共分 13 章,内容包括:电路的基本定律和电路元件;电路分析方法——等效变换法、电路方程法、运用电路定理法;正弦稳态电路分析;谐振电路与互感耦合电路;非正弦周期性稳态电路分析;双口网络;暂态分析方法——经典分析法、复频域分析法、状态变量分析法。

本书可作为高等院校电气、信息类专业电路理论课程的教材或教学参考用书,可供学生复习考研使用,也可供有关科技人员参考。

前 言

电路理论是各类高等学校电类专业的核心课程,是新世纪高等学校信息技术学科和电气工程学科学生必备的知识基础,是相关学科与工程的理论与应用基础,是新兴边缘学科的发展基础。电路理论既是电气信息学科的专业基础课程平台中的一门重要课程,也是学习后续专业课程以及今后开展工作的技术基础。

无论是强电专业或是弱电专业,大量问题都涉及电路理论知识,电路理论为研究和解决这些问题提供了重要的理论和方法。通过本课程的学习,学生可以掌握电路理论的基本定律(理)与各种分析、计算方法以及初步的实验技能,增强应用基础知识解决工程实际问题的能力,并在今后工作中受益。

本教材为了发展并完善教学体系与内容的改进、应用现代教育技术提升教学水平、拓宽电气信息学科学生的专业口径和培养需求,为了电路理论与相关学科交叉、融合并与工程实践的发展相结合,从以下七个方面致力于《电路理论》立体化教材系统的建设。

- 1) 基于“双网络大电路平台”系统的教学改革思想;
- 2) 基于获得湖北省优秀教学成果奖的“双网络大电路平台”系统;
- 3) 基于被评为 2005 年湖北省高等院校精品课程的电路理论课程;
- 4) 基于 20 多年的《电路理论》教学经验和讲义的良好使用和改进;
- 5) 基于建设立体化教材系统的思路;
- 6) 基于与其他多所高校的同类学科共同合作、资源共享;
- 7) 基于本教材成功申报普通高等院校“十一五”国家级规划教材。

湖北工业大学、中南民族大学、长江大学及武汉工程大学等组建了《电路理论》教材编写团队,多所高校发挥自身优势,资源共享。每位参编教师根据自己学校的实际教学改革经验,并参考了国内外相关资料,经过多次集体讨论,对本教材在内容上的立意和创新点达成以下共识。

- 建立本课程及平台网站与学生间的“亲和力”;
- 传承并拓展学生数学、物理的基本能力;
- 努力构建与学生主动学习相适应的教学体系,发挥学生的自学能力;
- 突出全书基本定律(理)和基本分析方法的主线索,提高学生的分析能力;
- 增长学生知识面,激发学习兴趣,构建工程观点与知识的应用能力;
- 加强和充实学生分析、解决实际问题的综合能力。

随着教学工作由以教师为中心向以学生为中心的转变,需要编写一种由主教材和各种辅助教材组成的全方位立体化教材系统供学生使用。本教材以“双网络大电路平台”为基础,建设了“电路理论”的网络课程及网站 <http://202.114.176.30/html/bkxj/jp.htm> 作为支撑平台。人机交互方式实现的习题库由子系统“在线答疑”完成。在教材配套光盘包含了学习指导、电子教案、典型例题精解、动画等几个部分。其中,学习指导包含了每章的教学目的、要求以及重难点提示,用于学生课前预习和教师在讲授每章知识点之前的系统介绍;电子教案包含每章的主要内容、全部电路图和公式,便于教师利用这些素材进行课堂教学和学生的课后自主学习;典型精解可帮助教师完成两个学时的课堂习题课。同时,我们把一些重要的和比较难以理解的知识点制成动画,让学生更加形象和深刻地理解所学知识。本教材提供的教学学时数为 48~120 学时,使用本教材的教师可自主选择章节及相关知识点进行讲授,标有“*”号的章节为选学内容,是为学有余力的学生编写的。本教材还将 Matlab 直接在相关章节进行了应用,这在国内教材上尚属首次,也算是一个初步的尝试。

本书由湖北工业大学邹玲和武汉工程大学姚齐国担任主编,分别负责全书上、下部的统稿和最后的校订工作。参加编写的有中南民族大学的刘松龄、张志俊,长江大学的金波,武汉工程大学的罗明,湖北工业大学的韦琳、王东剑、童静、周冬婉和黄石理工学院的邱霞。

具体分工为:邹玲编写第 1、4 章;张志俊编写第 2、7 章;邱霞编写第 3、13 章;罗明编写第 5、6 章;刘松龄编写第 8、9 章;金波编写第 10 章;韦琳编写第 11 章;姚齐国编写第 12 章;王东剑编写附录。周冬婉、童静参加了部分习题的编写工作。教材中的配套光盘由湖北工业大学贺章擎、王超、许正望和詹云峰制作完成。

本书在编写过程中,参阅了以往其他版本的同类教材和相关的文献资料等,在此对其表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中有不妥或错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 6 月

目 录

第 1 章 电路元件和电路定律

1.1 电路及电路模型	(1)
1.2 电路常用的基本物理量	(3)
1.3 基尔霍夫定律	(7)
1.4 电阻元件	(10)
1.5 电感元件	(16)
1.6 电容元件	(19)
1.7 独立电源	(21)
1.8 受控源	(27)
* 1.9 直流电路中入端等效电阻的求法	(29)
本章小结	(33)
习题一	(33)

第 2 章 电路的一般分析法

2.1 图的基本知识	(39)
2.2 支路电流法	(47)
2.3 回路电流法	(53)
2.4 节点电压法	(60)
2.5 含运算放大器的电阻电路	(66)
2.6 Matlab 计算	(73)
本章小结	(77)
习题二	(78)

第 3 章 电路定理

3.1 叠加定理	(83)
3.2 替代定理	(87)
3.3 特勒根定理	(89)
3.4 互易定理	(92)
3.5 戴维宁和诺顿定理	(95)
3.6 对偶原理	(101)

本章小结	(101)
习题三	(102)

第4章 正弦交流电路

4.1 相关数学知识	(107)
4.2 相量分析法	(112)
4.3 电阻、电感和电容元件的 VCR 相量形式	(117)
4.4 复阻抗与复导纳	(122)
4.5 正弦交流电路的计算	(132)
4.6 正弦交流电路的功率	(139)
4.7 谐振电路	(146)
4.8 Matlab 计算	(153)
本章小结	(156)
习题四	(158)

第5章 三相电路

5.1 三相电源	(163)
5.2 三相负载	(167)
5.3 对称三相电路的计算	(170)
5.4 非对称三相电路计算	(174)
5.5 三相电路的功率	(176)
本章小结	(180)
习题五	(181)

第6章 含耦合电感电路

6.1 耦合电感的伏安关系与同名端	(185)
6.2 耦合电感器的串联和并联	(191)
6.3 T 形去耦等效电路	(193)
6.4 含耦合电感器复杂电路的分析	(195)
6.5 空心变压器	(199)
6.6 理想变压器	(201)
本章小结	(203)
习题六	(203)

第7章 非正弦周期电流电路

7.1 非正弦周期信号	(207)
7.2 周期信号的傅里叶级数展开	(211)

7.3 有效值、平均值和平均功率	(217)
7.4 非正弦周期电流电路中的功率	(219)
7.5 非正弦周期电流电路的计算	(221)
7.6 周期性信号的频谱	(224)
7.7 低通、高通滤波器	(228)
本章小结	(232)
习题七	(233)

第8章 一阶电路

8.1 过渡过程及初始条件	(237)
8.2 零输入响应	(241)
8.3 零状态响应	(245)
8.4 一阶电路的全响应	(248)
8.5 一阶电路的阶跃响应	(251)
8.6 一阶电路的冲激响应	(253)
8.7 RC 微分电路和 RC 积分电路	(255)
本章小结	(257)
习题八	(258)

第9章 二阶电路

9.1 零输入响应	(261)
9.2 零状态响应	(267)
9.3 全响应	(270)
本章小结	(274)
习题九	(275)

第10章 动态电路的复频域分析

10.1 拉普拉斯变换	(277)
10.2 利用部分分式法求拉普拉斯反变换	(281)
10.3 运算电路与运算法	(285)
10.4 动态电路的拉普拉斯变换分析	(289)
10.5 网络函数	(293)
10.6 网络函数的零极点分布与时域响应	(295)
10.7 Matlab 的应用	(297)
本章小结	(301)

习题十	(302)
第 11 章 二端口网络	
11.1 二端口网络概述	(305)
11.2 二端口网络方程及参数	(306)
11.3 二端口网络的等效电路	(316)
11.4 二端口的连接	(321)
11.5 回转器和负阻抗变换器	(328)
11.6 Matlab 计算	(331)
本章小结	(333)
习题十一	(333)
第 12 章 网络图论与状态方程	
12.1 连通图与割集	(337)
12.2 关联矩阵 A 与基尔霍夫定律	(338)
12.3 回路矩阵 B 与基尔霍夫定律	(340)
12.4 割集矩阵 Q 与基尔霍夫定律	(340)
12.5 节点电压方程的矩阵形式	(341)
12.6 回路电流方程的矩阵形式	(344)
12.7 割集电压方程的矩阵形式	(346)
12.8 状态方程	(347)
本章小结	(350)
习题十二	(351)
第 13 章 磁路与铁芯线圈电路	
13.1 磁路及铁磁材料的磁特性	(353)
13.2 磁路的基本定律	(356)
13.3 交流铁芯线圈	(357)
本章小结	(359)
习题十三	(359)
附录 Matlab 介绍	(361)
部分参考答案	(376)
参考文献	(389)

第

1

章

电路元件和电路定律

本章主要介绍电路的基本概念、基本定律、理想电路元件以及电阻电路的等效变换,这些都是整个课程的理论基础。电路的基本概念主要包括电路组成及电路模型、集总参数电路、电压、电流、功率等。理想电路元件主要包括电阻、电感、电容、电压源、电流源和受控源等。基尔霍夫电压及电流定律是电路分析的基本定律。等效变换是对简单电阻电路进行分析和计算的方法,主要包括电阻和电源的串联、并联及混联,电源的等效变换,电阻的 Y- Δ 等效变换以及对等效电阻的计算。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路组成及作用

电路主要由三个基本部件组成:电源、负载和中间环节。一、电路:用导线将基本部件连接起来,构成可供电流流通的通路叫电路。它起着输送电能和处理电信号等作用。

电源:提供电能或电信号的设备称为电源,如发电机、信号发生器和蓄电池等。其作用是将其他形式的能量转换成电能。

负载:取用电能的设备称为负载,如电动机、电炉和电灯等。其作用是将电能转换成其他形式的能量。

中间环节:主要是指连接导线、控制设备和信号处理设备,如导线、开关和熔断器等。其作用是输送、分配、控制及处理电能。

在日常生活和生产实际中,常见的是实际电路。实际电路是由实际的电气设备或器件所构成的电路。它是为了完成某种特定的任务或目的而设计的。

实际电路的形式和作用是多多种多样的。从规模上看,实际电路有的跨越几个城市,甚至国界、洲际;有的局限在几平方毫米内,在不大于指甲的集成电路芯片上,可能有成千上万甚至数十万个晶体管集成为一个复杂的电路或系统。从电路的作用上看,滤波器电路

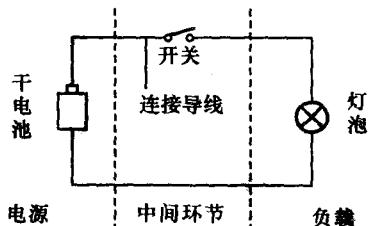


图 1-1 手电筒实际电路

的作用是把被噪声淹没了的信号提取出来;放大电路和调谐电路的功能是处理激励信号,使之成为所需要的响应;输电电路的作用是把电厂中发电机生产的电能,通过变压器等设备传输、分配到用电单位。

无论电路的形式和作用是怎样的多样化,都是由上述的三个基本部件组成的。图 1-1 所示电路是最简单的手电筒实际电路,通过它可以说明实际电路的电路模型以及理想电路元件。

1.1.2 电路模型

从组成实际电路的器件来看,它们的电磁性能比较复杂。一个实际器件往往表现出几种电磁现象,如一个实际电感线圈通过高频交流电流后,电流周围产生磁场,每个线圈匝间有电场,线圈的绕线上有电阻,因此实际电感线圈可能同时存在三种电磁特性,如图 1-2 所示。

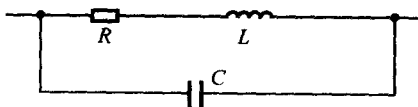


图 1-2 一个实际线圈表现的三种电磁特性

由上可知,直接对实际器件所组成的电路进行分析计算是有一定困难的。通常采用理想电路元件代替实际器件,先把实际器件作某种近似和理想化,抽象出表征其主要作用的模型。这就需要把组成这一电路的各种器件,根据它们在电路中所表现的电磁性质加以简化,并突出其主要作用,用一个或几个基本物理模型来表示实际器件。

理想电路元件:只表示一种电磁现象或物理现象的元件,通常也称为电路元件。

理想电阻元件:只表示消耗电磁能量的元件。

理想电感元件:只表示磁场现象的元件。

理想电容元件:只表示电场现象的元件。

理想电源元件:理想电压源和理想电流源,也称为独立电压源和独立电流源。

理想耦合元件:受控源、理想变压器和耦合电感器等。

电路模型:由理想电路元件代替实际器件后所构成的电路。它是实际电路的科学抽象。本书所指的电路均指电路模型,而非实际电路。

电网络:它与电路有一定区别,但有时又是能与电路通用的名词。不过电网络的含义通常更有普遍性。特别在分析复杂的系统及讨论问题的普遍规律时,常常把电路称为电网络。

集总参数元件:理想电路元件又称为集总参数元件。即在任何时刻,流入二端元件的一个端子的电流等于从另一个端子流出的电流,并且两个端子间的电压为一定值。

集总参数电路:由集总参数元件构成的电路。

图 1-3 所示的是手电筒实际电路的电路模型和数学模型。

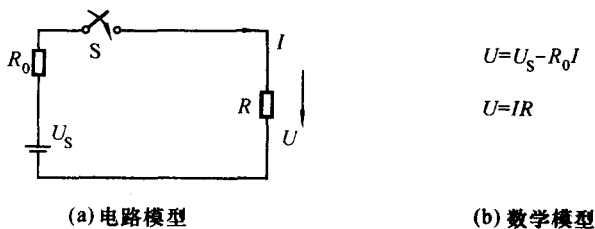


图 1-3 手电筒实际电路的电路模型和数学模型

图 1-4 表示某一个电路模型,其电路结构和电路中各元件的参数已经给定,如果给该电路外加一个激励(或输入)信号,需要计算电路中某个元件或某段电路上的电压、电流响应(或输出),即称为对该电路进行电路分析。因此电路分析的基本任务是计算电路中的三个常用的物理量:电压、电流和功率。电路理论主要探讨对电路模型进行电路分析的各种分析方法和基本定理。

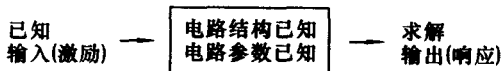


图 1-4 电路分析的基本任务

1.2 电路常用的基本物理量

1.2.1 电场强度、电压与电位

本节介绍的某些基本物理量,在普通物理课程中均有介绍,这里将从电路的角度进一步加强对电压、电位和电流等概念的学习。

1. 电场强度 E

在无限大真空中放置一个点电荷 q ,如图 1-5 所示。由库仑定律可知,该点电荷 q 在某场点所产生的电场强度为

$$E = \frac{qr_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-1)$$

式中: ϵ_0 为真空中的介电常数, $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$;

r 是点电荷到某场点的距离;

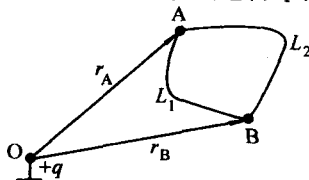


图 1-5 正电荷产生的电场

r_0 是点电荷 q 指向某场点的单位矢量。

2. 电压

如图 1-5 所示电场中某两点 A、B 间的电压(降) u_{AB} 等于将单位正电荷 q 从 A 点移至 B 点时库仑电场力所做的功 W_{AB} , 即

$$u_{AB} = W_{AB} \int_{(A)}^{(B)} E \cdot dl = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

式中: r_A 是点电荷 q 到起点 A 的距离;

r_B 是点电荷 q 到终点 B 的距离。

上式中 u_{AB} 数值仅与 A、B 两点的位置有关, 而与经过的路径 L_1 、 L_2 无关。

在电路中, 电压 u_{AB} 的一般表达式为

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-2)$$

3. 电位

选定图 1-5 恒定电场中的任意一点(O 点) 的电位为零, 称 O 点为参考点。则电场中某一 A 点到 O 点的电压 u_{AO} 称为 A 点的电位, 记为 φ_A 。

$$\varphi_A = \varphi_A - \varphi_O = u_{AO} = \int_{(A)}^{(O)} E \cdot dl \quad (1-3)$$

$$\varphi_A - \varphi_B = \int_{(A)}^{(O)} E \cdot dl - \int_{(B)}^{(O)} E \cdot dl = \int_{(A)}^{(O)} E \cdot dl + \int_{(O)}^{(B)} E \cdot dl = \int_{(A)}^{(B)} E \cdot dl = u_{AB}$$

4. 结论

1) 电路中任意两点间的电压与路径无关, $u_{AB} = \int_{L_1} E \cdot dl = \int_{L_2} E \cdot dl$ 。

2) 某点的电位就是单位正电荷在该点所具有的电能。电位是一个相对物理量, 它与参考点的选定有关, 没有选定参考点, 讨论电位就没有意义。

3) 同一个电路中, 选定的参考点不同时, 同一点的电位就有可能不同。当参考点选定后, 电路中任一点的电位即为定值, 这个特性称为电位单值性。

4) 电路中某两点的电位差即为两点间的电压。参考点的选定, 不会影响两点之间的电压值, 即电压与参考点的选择无关。

1.2.2 电流与参考方向

1. 电流

金属导体内部带电粒子和电解液中正、负离子在电场力作用下有规则的运动形成电流。电流的大小用电流强度表示。

电流强度是指在单位时间内通过导体横截面的电荷量。若在 dt 时间内穿过 S 截面的电荷为 dq , 则通过截面 S 的电流定义为

$$i \triangleq \frac{dq}{dt} \quad (\text{符号“}\triangleq\text{”表示“按定义等于”}) \quad (1-4)$$

2. 参考方向

正电荷运动的方向被规定为电流的真实方向。实际电路中的任何一段导体,电流的真实方向可能有两种,如图1-6所示。对于简单的电路分析,电流的实际方向可以由电源或电压的极性很容易地被确定下来。但是,在比较复杂的电路中,一段电路中电流的实际方向往往很难预先确定下来。另外,在交流电路中,电流的大小和方向都是随时间变化而变化的。因此,确定电路中的电流实际方向是困难的。为此,引入了参考方向的概念,参考方向又叫假定的正方向,简称为正方向。

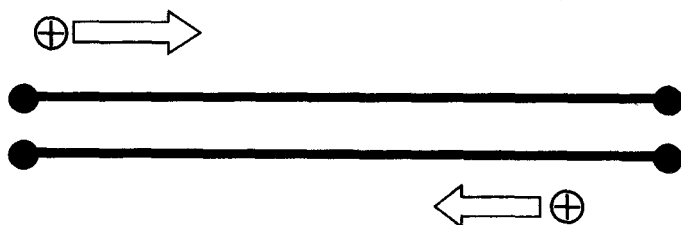


图 1-6 正电荷运动的方向被规定为电流的真实方向

电流的参考方向:任意选定电流的一个流动方向作为电流的参考方向,如图1-7所示。

当电流流动的实际方向与选定的参考方向相同时,如图1-7(a)所示,电流 i 是正值;当电流流动的实际方向与选定的参考方向相反时,如图1-7(b)所示,电流 i 是负值。

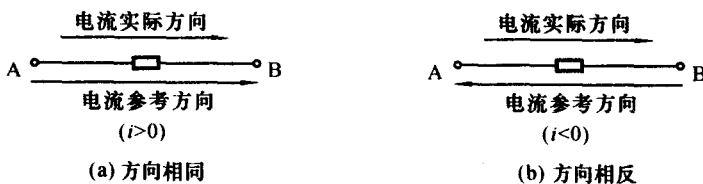


图 1-7 电流的参考方向

电流参考方向的两种表示形式如下。

- 1) 用箭头表示:箭头的指向为电流的参考方向。
- 2) 用双下标表示:如 i_{AB} ,电流的参考方向由A指向B。

参考方向是任意指定的。一个复杂的电路在未求解之前,各处电流的实际方向是未知的,必须在选定的参考方向下列写方程,再依据所求出方程解的正负值判断电流的实际方向。

电压实际方向的判断方法也是一样的。一般规定,电压的实际方向由高电位指向低电位。但是在实际电路分析中,电压的实际方向与电流的实际方向一样也是经常改变的,在电路中无法正确判断,只能先选定电压的参考方向。所以在电路分析中,参考方向是非常重要的概念。

如果假定的电压参考方向与实际方向相同时,则电压为正值;相反时,则电压为负值。

电压的参考方向有如下三种表示形式。

- 1) 用“+”、“-”符号分别表示选定的高电位点和低电位点。
 - 2) 用箭头的指向表示,由选定的高电位点指向低电位点。
 - 3) 用双下标字母表示,即用 u_{AB} 表示选定的高电位 A 点指向低电位 B 点。
- 这表示在引入了参考方向后,电压和电流都是代数量。

3. 关联参考方向

为了便于电路分析,可以把电流和电压的参考方向进行关联。图 1-8 所示的元件(或者是一段电路)上,电流取电压降的方向。若在同一元件上电压和电流选取的参考方向一致,则称此参考方向为关联参考方向。

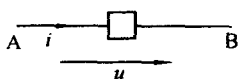


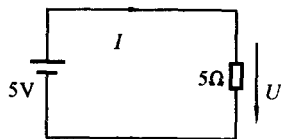
图 1-8 关联参考方向

4. 结论

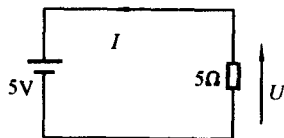
- 1) 电流、电压的真实方向是客观存在的,不能随意选择。
- 2) 规定了正方向后,电压、电流才能有正、负值之分。
- 3) 正方向一经选定,在整个分析计算中都以此为准,不允许再更改。
- 4) 有了电流与电压关联参考方向约定后,只需标出电流或电压参考方向中任何一种即可。

5. 举例

【例 1.1】 如图 1-9 所示电路中,求电压 U 和电流 I 。



(a) 电路图1



(b) 电路图2

图 1-9 例 1.1 电路图

解 图 1-9(a) 所示电路中, $U = 5V$, $I = 1A$, 表明电流和电压的实际方向分别与图 1-9(a) 所示电流和电压的参考方向一致。

图 1-9(b) 所示电路中, $U = -5V$, $I = -1A$, 表明电流和电压的实际方向分别与图 1-9(b) 所示电流和电压的参考方向相反。

【例 1.2】 如图 1-10 所示电路中, 电压值为 U_1 和 U_2 的正方向已经选定, 分别用箭头标出, 且已知 $E = 10V$, $U_2 = -2V$ 。(1) 求出电压 U_1 的值。(2) 选取 O 点为电位参考点, 计算电路中 A、B 两点的电位值。

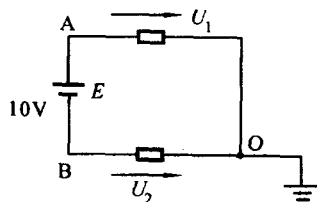


图 1-10 例 1.2 电路图

解 $E = 10V$, 而电压与路径无关, 故列写电压