

电子工程与
计算机科学系列

EECS

电路理论 基础

田社平 ©编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



电子工程与计算机科学系列 **EECS**

电路理论 基础

田社平 ©编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书围绕电路分析方法,全面介绍了电路分析的基本概念、基本原理和基本方法。主要内容为:电路的基本概念及基本规律、电路的基本分析方法、电路的端口分析、电路定理、电路的图论分析、非线性电阻电路分析、一阶电路与二阶电路的时域分析、正弦稳态电路的相量分析、三相电路、非正弦周期稳态电路的分析、动态电路的复频域分析。书后附有部分习题答案。全书每一节均配有丰富的例题、思考与练习题,每一章后面配有丰富的习题。

本书可作为高等学校电类各专业“电路理论”、“电路分析”、“电路”课程教材使用,也可供研究生、工程技术人员和电路爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/田社平编著. —上海:上海交通大学出版社,2016

ISBN 978-7-313-15109-4

I. ①电… II. ①田… III. ①电路理论—高等学校—教材

IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 128131 号

电路理论基础

编 著: 田社平

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海颀辉印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 618 千字

版 次: 2016 年 8 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-15109-4/TM

定 价: 49.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 24.5

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-57602918

前 言

电路理论课程是电类专业的一门重要的专业基础课程。通过本课程的学习,可使读者掌握电路的基本理论、基本分析方法和进行电路实验、仿真的初步技能,并为后续课程准备必要的电路理论知识和分析方法。

当前,电气、电子信息科学技术的迅猛发展,对电类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了更高的要求。本书在作者多年从事电路理论教学的基础上编写而成,内容符合教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会颁布的“电路理论基础教学基本要求”,术语和符号符合国家标准 GB/T 2900.74—2008《电工术语 电路理论》和国家标准 GB/T 4728—2005《电气简图用图形符号》的规范。在编写过程中,着重考虑了以下问题:

(1) 在内容叙述上以电路的分析方法为主线,以电路系统为副线,先介绍电路的一般分析方法(1~6章),再介绍电路的时域分析方法、相量分析方法,最后以电路的复频域分析方法作结;先以电阻电路介绍电路的分析方法,再讨论动态电路、稳态电路的分析方法。叙述尽可能简明,有较强可读性。

(2) 充分注意电路分析的理论性和应用性的结合。电路是一门理论性和工程性都非常强的学科,其应用涉及工程领域和日常生活的各个方面。为此,本书有针对性地选择了80余例电路应用例子,以正文、例题、习题的形式均匀分布在本书的内容之中,这些应用实例要么是工程领域中常见的,要么是有明确的实际应用背景的,其分析方法涉及电路理论中各类分析方法。因此,认真理解、研习这些例子对读者掌握电路理论的内容和培养工程应用意识大有助益。

(3) 除通过选取与配置合适的例题以帮助读者更好地掌握电路理论的基本方法之外,每节配置了丰富的思考与练习题,通过这些思考与练习题,读者可进一步巩固和掌握电路的基本知识和基本分析方法(思考与练习题以随书电子版形式提供)。每章配有类型众多的习题,以进一步锻炼读者的电路分析能力。考虑到读者进一步深造的需求,在习题中编入了部分有一定难度的分析和设计题。

(4) 为辅助教学,本书配有《电路理论基础教学指导》一书,其中提供所有习题的解答以及各类拓展专题,如电路理论简史、概论及学习方法、计算机辅助电路分析、电路应用实

例列表等。此外,本书还配有教学课件。

(5) 考虑到不同高校在电路课程教学中对知识点的不同需求,以及不同的教学学时数,本教材对部分较难、较深的内容标以“※”号,在教学中略去这部分内容,并不影响授课的连续性与系统性。

本书承蒙清华大学陆文娟教授、浙江大学倪光正教授、孙盾副教授仔细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。这些意见大部分都被采纳。作者在此致以衷心的感谢。

感谢上海交通大学教学发展中心对作者在电路课程教改项目的持续支持,项目成果在书中得到体现。

上海交通大学电子信息与电气工程学院陈洪亮教授与张峰教授对作者在教学上总是给予大力支持和帮助;作者所在的电路课程组老师和作者所教的学生对本书的编写亦有帮助,同时本书的编写参考了国内外许多优秀的教材和文献,在此一并表示感谢。

承蒙上海交通大学出版社的大力支持,使得本书得以顺利出版,特别是与徐建梅编辑的合作,使得本书的写作成为一次愉快的经历。在此深表谢意。

受编写时间及作者水平所限,书中存在的缺点与不足之处,敬请读者批评指正。意见或建议请发至作者的 Email 信箱:sptian@sjtu.edu.cn。

作 者

2015 年 12 月

本书配套思考与练习、教师用授课 PPT 等电子资料可搜索下述 QQ 群号或扫描 QQ 群二维码获得。



群名称: 电路理论基础-田社平

群 号: 575725786

目 录

1 电路的基本概念及基本规律	001
1.1 电路与电路图	001
1.1.1 实际电路与电路模型	001
1.1.2 集中参数电路与分布参数电路	003
1.2 电路变量	003
1.2.1 电流、电压及其参考方向	004
1.2.2 功率与能量	006
1.3 基尔霍夫定律	007
1.3.1 电路的拓扑结构	007
1.3.2 KCL	008
1.3.3 KVL	010
1.4 二端电路元件	012
1.4.1 电路元件的科学抽象	012
1.4.2 独立源	013
1.4.3 电阻元件	015
1.4.4 电容元件	018
1.4.5 电感元件	022
1.5 二端口电路元件	023
1.5.1 受控源	024
1.5.2 耦合电感	027
1.5.3 理想变压器	029
习题 1	032
2 电路的基本分析方法	038
2.1 电路的基本类型	038
2.2 支路分析法	039
2.3 回路分析法	040
2.3.1 回路电流	040
2.3.2 回路分析法	042
2.4 节点分析法	045
2.5 含运算放大器的电阻电路分析	049
2.5.1 运算放大器的理想化模型	049

2.5.2 含理想运算放大器电路的分析	051
习题 2	054
3 电路的端口分析	058
3.1 端口电路及其等效的概念	058
3.2 一端口电路的端口特性	060
3.3 一端口电路的等效变换	063
3.3.1 电阻、电容、电感的串联与并联	063
3.3.2 含独立源电路的等效变换	070
3.3.3 含受控源电路的等效变换	076
3.3.4 含等电位节点/零电流支路电路的等效变换	078
3.4 T形电路和 Π 形电路的等效变换	080
3.4.1 T形和 Π 形电路的等效变换	080
3.4.2 耦合电感的T形和 Π 形去耦等效电路	082
3.5 二端口电路的端口特性	084
3.5.1 二端口电路的VCR	084
3.5.2 二端口电路各参数间的关系	091
3.6 具有端接的二端口电路	093
3.7 二端口电路的互连	096
习题 3	102
4 电路定理	111
4.1 齐次定理和叠加定理	111
4.1.1 齐次定理	111
4.1.2 叠加定理	113
4.2 替代定理	116
4.3 戴维南定理和诺顿定理	119
4.3.1 戴维南定理	120
4.3.2 诺顿定理	124
4.4 最大功率传输定理	127
4.5 特勒根定理	129
4.6 互易定理	130
4.7 对偶原理	136
习题 4	139
5 电路的图论分析	147
5.1 图论的基本概念	147
5.1.1 电路的图	147
5.1.2 基本回路和基本割集	149
5.2 关联矩阵与基尔霍夫定律	151

5.2.1	关联矩阵	151
5.2.2	基尔霍夫定律的关联矩阵形式	152
5.3	基本回路矩阵与基尔霍夫定律	154
5.3.1	基本回路矩阵	154
5.3.2	基尔霍夫定律的基本回路矩阵形式	154
5.4	基本割集矩阵与基尔霍夫定律	156
5.4.1	基本割集矩阵	156
5.4.2	基尔霍夫定律的基本割集矩阵形式	156
5.4.3	A 、 B 、 Q 矩阵之间的关系	157
5.5	广义支路及其 VCR 的矩阵形式	159
5.6	电路分析的矩阵方法	161
5.6.1	节点分析的矩阵方法	161
5.6.2	基本回路分析的矩阵方法	162
※5.6.3	基本割集分析的矩阵方法	164
※5.6.4	矩阵方法的计算机编程	165
习题 5		167
6	非线性电阻电路分析	171
6.1	非线性电阻电路的方程	171
6.2	图解分析法	173
6.3	分段线性化分析法	175
6.4	小信号分析法	178
※6.5	数值分析法	180
习题 6		183
7	一阶电路的时域分析	189
7.1	动态电路的方程及其初始条件	189
7.1.1	瞬态过程与换路	189
7.1.2	动态电路方程	190
7.1.3	初始条件的确定	191
7.2	零输入响应	192
7.3	零状态响应	196
7.4	全响应	201
7.4.1	全响应的分解	201
7.4.2	三要素法	203
7.5	阶跃响应和冲激响应	207
7.5.1	阶跃响应	207
7.5.2	冲激响应	210
※7.6	卷积积分	213
7.7	正弦电源激励下的过渡过程和稳态	215

习题 7	217
8 二阶电路的时域分析	225
8.1 RLC 电路的零输入响应	225
8.2 RLC 电路的零状态响应	230
8.3 RLC 电路的全响应	235
※8.4 动态电路的状态变量分析	237
习题 8	240
9 正弦稳态电路的相量分析	245
9.1 相量及其基本性质	245
9.1.1 正弦量及其描述	245
9.1.2 相量的基本概念	247
9.1.3 相量变换的基本性质	250
9.2 基尔霍夫定律的相量形式	252
9.3 电路元件 VCR 的相量形式	253
9.3.1 一端口电路元件 VCR 的相量形式	253
9.3.2 二端口电路元件 VCR 的相量形式	256
9.4 阻抗与导纳	257
9.4.1 阻抗与导纳的定义	257
9.4.2 相量模型	258
9.4.3 一端口电路的阻抗与导纳	259
9.4.4 二端口电路的参数矩阵	263
9.5 正弦稳态电路的分析	263
9.5.1 相量分析法	263
9.5.2 相量分析法的应用	264
9.6 频率响应与谐振电路	268
9.6.1 正弦稳态网络函数与频率特性	268
9.6.2 RLC 串联电路的频率特性	271
9.6.3 谐振电路	274
9.7 正弦稳态电路的功率	282
9.7.1 正弦稳态一端口电路的功率	282
9.7.2 功率因数的提高	286
9.7.3 复功率 复功率守恒	288
9.7.4 正弦稳态最大功率传输定理	290
习题 9	293
10 三相电路	302
10.1 三相电路的基本原理	302
10.2 三相电路的基本接法	305

10.3 对称三相电路的分析	308
※10.4 非对称三相电路的分析	312
10.5 三相电路的功率	315
10.5.1 三相电路的功率	315
10.5.2 三相电路功率的测量	318
习题 10	322
11 非正弦周期稳态电路的分析	327
11.1 非正弦周期量的傅里叶级数展开	327
11.1.1 非正弦周期量的分解	327
11.1.2 非正弦周期量的有效值和平均值	330
11.2 非正弦周期稳态电路的分析	332
11.3 非正弦周期稳态电路的功率	335
※11.4 傅里叶变换简介	337
习题 11	339
12 动态电路的复频域分析	343
12.1 拉普拉斯变换及其性质	343
12.1.1 拉普拉斯变换的定义	343
12.1.2 拉普拉斯变换的性质	345
12.2 拉普拉斯反变换	349
12.3 基尔霍夫定律及电路元件 VCR 的复频域形式	353
12.3.1 基尔霍夫定律的复频域形式	353
12.3.2 电路元件 VCR 的复频域形式	353
12.4 线性非时变动态电路的复频域分析	355
12.4.1 广义阻抗与广义导纳	355
12.4.2 线性非时变动态电路的分析步骤	357
12.5 网络函数	360
12.5.1 网络函数的定义	360
12.5.2 网络函数的极点与零点	362
12.5.3 网络函数与冲激响应	363
※12.5.4 网络函数与正弦稳态响应	365
习题 12	366
部分习题答案	371
参考文献	379

1 电路的基本概念及基本规律

本章介绍电路的基本概念及基尔霍夫定律。电路理论是研究电路普遍规律的一门学科,它通过把种类繁多、功能各异的实际电路的本质特征抽象出来建立理想化的电路模型,通过研究电路模型的规律指导实际电路的分析与设计。本书重点研究的是集中参数电路模型,简称电路,它由各种具有单一电磁特性的理想化的电路元件组成。用这些理想化的电路元件可以代表实际电路器件、装置和设备的主要电磁特性。描述电路元件的常用变量为电压和电流。电路中的电压和电流分别满足基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律。基尔霍夫定律是电路理论的基石。

电路元件可分为二端电路元件和二端口元件。基本的二端电路元件包括电阻元件、独立源、电容元件及电感元件等;基本的二端口电路元件包括受控源、理想变压器及耦合电感元件等。电路元件可以用确定的电压-电流关系(VCR)加以描述。如果电路元件的VCR是代数方程,则称该元件为电阻性元件;如果电路元件的VCR是微分方程,则称该元件为动态元件。

1.1 电路与电路图

1.1.1 实际电路与电路模型

电路(electric circuit)是由电气器件互连而成的电的通路。电路是电应用的重要形式之一。各种实际电路都是由电阻器、电容器、电感器等**部件**(component)和晶体管、运算放大器等**器件**(device)组成的,以实现人们所需要的功能。随着微电子技术的发展,已可将若干部件、器件制作在一块硅片上,在电气上相互连接,在结构上形成一个整体,即所谓的**集成电路**(integrated circuit)。可以认为,实际电路是指由若干电气器件按照特定目的互相连接而成的总体,在这个总体中具有电流赖以流通的路径。

日常生活和工程实际中使用的实际电路随处可见,手电筒电路、照明电路、电子手表电路、数码照相机电路以及计算机电路等都是实际电路的例子。这些电路的功能各异,结构的复杂程度也千差万别。图 1.1.1(a)是一个非常简单的照明电路,而像大型电网、彩色电视机、计算机中的电路,其结构就相当复杂。从电路的尺寸来看,大的电路可以跨越几个城市,甚至国界、洲际;小的电路可以局限在几个平方毫米内,在不大于指甲的集成电路芯片上,可能有数千、数万甚至数十万个晶体管集成为一个复杂的电路或系统。

人们设计和使用电路,是为了满足一定的功能要求。输电电路将电厂发电机生产的电能,通过变压器、传输线等设备传输、分配到用电单位,这是为了使用电的能量为我们服务,其中涉

及的主要是电的能量形式;信号处理电路的作用是对电信号进行变换和处理,得到所需要的有用信号,这是利用了电具备携带信息的特性,其中涉及的主要是电的信号形式。电的能量形式和信号形式是电的应用的两种基本形式。

为了研究的方便,我们往往将实际电路中的部件、器件用电气图形符号来表示。表 1.1.1 列举了一些我国国家标准中的电气图形符号。发电机、电动机、变压器、变阻器、线圈、电容器、二极管、运算放大器等就是这些电气器件的实物。采用这些符号可以简便地绘出实际电路的连接关系,称为**电气图**(electric diagram)。例如,图 1.1.1(a)的电气图如图 1.1.1(b)所示。

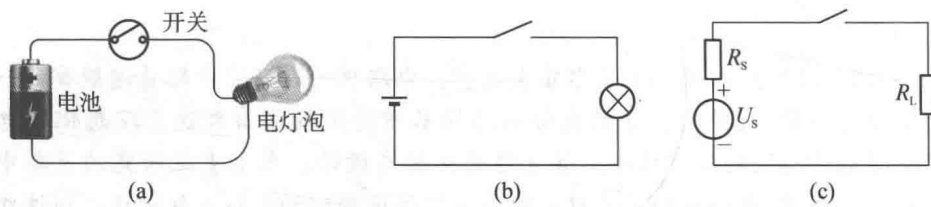


图 1.1.1 一个简单的电路
(a) 实际电路; (b) 电气图; (c) 电路图(电路模型)

表 1.1.1 部分电气图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		电流表		电阻器	
连接的导线		传声器		可变电阻器	
接地		扬声器		电容器	
接机壳		二极管		电感器、绕组	
开关		稳压二极管		变压器	
熔断器		隧道二极管		铁心变压器	
灯		晶体管		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	

实际电路在通电后,其用作电气连接的外伸端子和电路内部都会出现各种电磁过程,其表现也相当复杂。这是因为实际电路中的器件,如电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器、运算放大器和电源设备等,在实际电流、电压和环境条件下的性能复杂多变。比如电阻器中电流变化时,周围就伴随着电磁场的变化;电容器中不但储存电场能量,还要消耗能量;器件内部经常伴有热效应、化学效应和机械效应等。要在数学上精确描述这些现象相当困难。

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这三种基本效应,这些基本效应互相交织在一起,使实际电气器件呈现很复杂的性状。然而,上述三种基本效应在某个电气器件上的表现又是不均衡的,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。为了研究实际电路的普遍规律,将组成

实际电路的电气器件在一定条件下按其主要电磁性质加以理想化,用一个足以表征其主要性能的**模型(model)**来表示,从而得到一系列理想化元件,如电阻元件、电容元件和电感元件等。

由于没有任何一种特殊的实际器件只呈现一种电磁性质,而能把其他电磁性质排除在外,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。通常把呈现主导的单一电磁性质的电路元件称为**理想电路元件(ideal circuit element)**。这些理想元件称为实际器件的模型,它们都可以用严格的数学关系加以定义。这样,就可以通过电路模型间接而较准确地分析实际电路的主要电气性能。通常所说的**电路分析(circuit analysis)**,就是对由理想元件组成的电路模型的分析。虽然分析结果仅是实际电路的近似值,但它是判断实际电路电气性能和指导电路设计的重要依据。

一般情况下,实际的电路或器件要用多个理想元件的组合才能较好地表达其特性。例如,图 1.1.1(a)所示电路中干电池模型可以用理想电压源元件与电阻元件(反映电池的内阻)的串联来表示,如图 1.1.1(c)所示。电路模型常常简称为电路。

1.1.2 集中参数电路与分布参数电路

根据实际电路的特性,可以建立两种类型的电路模型:集中参数电路和分布参数电路。当实际电路的尺寸远小于其工作时最高工作频率(frequency)所对应的波长(wavelength)时,电磁波沿电路传播的时间几乎为零。在这种情况下,可以定义出**集中参数元件(lumped parameter element)**,用来构成实际电路的模型。例如,上面提到的电阻元件、电容元件和电感元件等都是集中参数元件。每一种集中参数元件只表示单一的电磁特性。例如,用电阻元件表示消耗电能;用电容元件和电感元件分别表示电场储能和磁场储能。由集中参数元件组成的电路,称为实际电路的集中参数电路模型或简称为**集中参数电路(lumped parameter circuit)**。对集中参数电路而言,电路中的电磁量,如电压和电流等,只是时间的函数,因而描述电路的方程一般是代数方程或微分方程。图 1.1.1(c)所示的电路就是一个集中参数电路。如果电路中的电磁量是时间和空间的函数,使得描述电路的方程是以时间和空间为自变量的代数方程或偏微分方程,则这样的电路模型称为**分布参数电路(distributed parameter circuit)**。

一般认为,当电路的尺寸小于其使用时最高工作频率所对应波长的 $1/10$ 时,该电路为集中参数电路。例如,我国电力用电的频率是 50 Hz ,则该频率对应的波长为 $\lambda = c/f = (3 \times 10^8/50)\text{ km} = 6\,000\text{ km}$ 。显而易见,对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸远小于这一波长,它能满足集中化条件;而对于数量级为 10^3 km 的远距离输电线来说,则不满足集中化条件,不能按集中参数电路处理。又如,一个中波段收音机电路,假设其工作信号的最高频率为 $1\,600\text{ kHz}$,对应的波长为 $\lambda = c/f = [3 \times 10^8/(1.6 \times 10^6)]\text{ m} = 187.5\text{ m}$ 。收音机电路的实际尺寸远远小于此波长,收音机电路能满足集中化条件,可按集中参数电路进行分析。

本书主要讨论集中参数电路的分析问题。如果不作另外说明,本书将集中参数电路一概简称为电路。

1.2 电路变量

分析电路就是要对电路进行数学描述,这种描述是用电路的一些物理量来表示的。描述电路的基本变量有 4 个:电流、电荷、电压、磁通量。在这 4 个基本变量中,电压和电流是电路中比较容易观察到的两个物理量,同时电路的基本定律大多叙述一个电路中的电压或电流之

间的关系,因此电压和电流是电路中最常用到的两个变量。由电压和电流还可导出功率的概念,它也是电路中经常要用到的一个变量。

1.2.1 电流、电压及其参考方向

1) 电流

电场的作用是使电荷运动或移动,电荷的有规则运动或移动即形成电流(电荷流)。电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷。将所带电荷的多少称为电量,在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑(其符号为C)。电量用符号 q 或 Q 表示。

单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度,用以衡量电荷流的大小。电流强度常简称为**电流**(current),用 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

电流的SI单位名称为安[培](A)。借助国际单位制(SI)词头可以得到更大或更小的电流单位,电流的单位还常用千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)等。

一段电路中的电流可以有两个不同的方向。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。电流的方向既可用箭标“ $\rightarrow$ ”表示,也可用双下标表示,并规定由前一个字母指向后一个字母。例如,图1.2.1中电流可从a流向b或者相反,则可用 i_{ab} 或 i_{ba} 表示,该图中的方框表示一个元件或若干元件的组合。

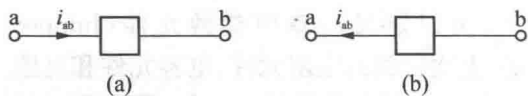


图 1.2.1 电流的方向

如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流称为**恒定电流**或**直流电流**(direct current),简称为dc或DC,可用符号 I 表示;否则称为**时变**(time varying)电流,可用符号 i 表示。若时变电流对时间作周期性变化而其直流分量为零(或者可以忽略),则称为**交流电流**(alternating current),简称为ac或AC。

在分析简单的直流电路(支路电流为直流电流)时,可以确定电流的实际方向。但在分析复杂的电路时,对于某条支路电流的实际方向往往事先难以判断,即使是简单的交流电路(支路电流为交变电流),其交变电流的方向也是随时间变化的,所以它的实际方向也就很难确定。为此,在分析电流时可以先设定一个方向,称之为**参考方向**(reference direction)。电流的参考方向通常用带有箭标的线段表示,箭标所指方向表示电流的流动方向。当电流的实际方向与参考方向一致时,电流的数值就为正值(即 $i > 0$),如图1.2.2(a)所示。图中带箭标的实线段为电流的参考方向,虚线段为电流的实际方向(下同)。反之,当电流的实际方向与参考方向相反时,则电流的数值为负值(即 $i < 0$),如图1.2.2(b)所示。由此可知,在参考方向设定之后,电流就有了正值和负值之分,电流值的正负符号反映了电流的实际方向。



图 1.2.2 电流的实际方向与参考方向的关系

(a) 实际方向与参考方向一致; (b) 实际方向与参考方向相反

在未标示电流参考方向的情况下,电流的正负是没有意义的。在本书电路图中所标示的电流方向箭标都是参考方向箭标。

对于集中参数元件,通过其中的电流仅仅是时间的函数,因此,在任一时刻流入二端元件任一端子的电流等于从另一端流出的电流,如图 1.2.2 所示。为了方便起见,电流的参考方向只需标示于元件的一侧即可。

2) 电压

库仑电场力移动单位正电荷由电场中的 a 点到 b 点所做的功称为 a、b 两点间的电压(voltage),用 u 表示。设在电场力作用下,电量为 dq 的电荷由 a 点移动到 b 点时,电场力所做的功为 $d\omega$,则 a、b 两点间的电压为

$$u = \frac{d\omega}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中: dq 的单位名称为库仑(C); $d\omega$ 表示转移过程中电荷 dq 所获得或失去的能量,单位名称为焦耳(J)。电压的单位名称为伏[特](V)。这些单位都是 SI 单位。同样,借助国际单位制(SI)词头可以得到更大或更小的单位,如千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μ V)等。

由电压的定义式(1.2.2)可知,如果正电荷由 a 移动到 b 获得能量,即有 $d\omega < 0$, $dq > 0$, 则 $u < 0$, 因此 a 点为低电位,即负极, b 点为高电位,即正极。相反,如果正电荷由 a 转移到 b 失去能量,则 a 点为高电位,即正极, b 点为低电压,即负极。正电荷在电路中转移时电能的得或失表现为电位的升或降,即电压升或电压降。习惯上规定电压的实际方向为正极指向负极。

如果电压的大小和极性不随时间变化,则这种电压称为**直流电压**(direct voltage)或恒定电压,可用符号 U 表示;否则称为时变电压,可用符号 u 表示。如果时变电压对时间作周期性变化而其直流分量为零(或者可以忽略),则称为**交流电压**(alternating voltage)。

为了便于分析和计算,也为电压设定参考方向。电压的参考方向可以任意设定,通常采用“+”、“-”极性符号表示,也可以采用双下标字母表示,并规定由前一个字母指向后一个字母,如图 1.2.3 所示。若电压参考方向设定由 b 点指向 a 点,则电压应写成 u_{ba} ,且 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。显然,在未标识参考方向的情况下,电压的正负也是毫无意义的。

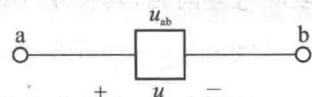


图 1.2.3 电压参考极性的表示方法

对于集中参数元件,其两端的电压仅仅是时间的函数,因此,在任一时刻任一元件两端的电压为确定值,两个端子上对选定的参考节点(reference point)(或称基准点,其电位规定为零)的电位均为确定值。

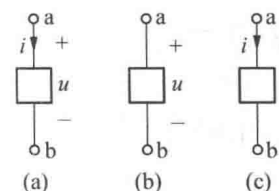


图 1.2.4 关联参考方向

综上所述,在分析电路时,既要为通过元件的电流设定参考方向,也要为元件两端的电压设定参考方向,它们彼此可以独立无关地任意设定。但为了方便起见,常常采用**关联**(associated)参考方向,即电流参考方向与电压“+”极到“-”极的参考方向一致,如图 1.2.4(a)所示。这样一来,在电路图上只需标出电压参考方向或电流参考方向即可,如图 1.2.4(b)、(c)所示。关联参考方向也常称为**一致**(consistent)参考方向。

必须强调的是,在分析电路时对电路中电压、电流设定参考方向是必需的。不设电压、电流的参考方向,电路中基本定律就无法应用,电路的分析计算就无法进行。习惯上凡是一看便

知电压、电流实际方向的,可设参考方向与实际方向一致。对于不易看出实际方向的,也不必花费时间去判别,只需在这些支路上任意设定一个参考方向。为简洁表示和方便使用电路图,常常把元件上电压、电流参考方向设成关联参考方向,一个元件只需设定电压或电流一个量的参考方向。

1.2.2 功率与能量

电路中存在能量的流动。某一段电路提供或吸收的能量,以及提供或吸收能量的速率即功率,也是电路分析中两个重要的电路变量。

电路中的功率(power)是指某一段电路吸收或提供能量的速率,用符号 p 表示,其表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.3)$$

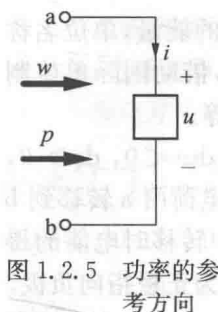


图 1.2.5 功率的参考方向

式中: dw 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位名称为瓦[特](W)。

下面以图 1.2.5 所示电路为例来讨论功率的计算。图中矩形框代表任意一段电路,其内可以是电阻、电源,也可以是若干电路元件的组合。电压的参考方向设定为 a 点为“+”极, b 点为“-”极,电流的参考方向设定为从 a 点流向 b 点,即取关联参考方向。设在 dt 时间内由 a 点转移到 b 点的正电荷量为 dq ,则电压 u 意味着单位正电荷从 a 移至 b 电场力所做的功。显然移动 dq 正电荷电场力做的功为 $dw = udq$ 。电场力做功说明电能损耗,损耗的这部分电能被 ab 这段电路所吸收。

由式(1.2.2)可知正电荷量为 dq 的电荷在转移过程中失去的能量为 $dw = udq$,再由式(1.2.1)可知 $dq = idt$,因此由式(1.2.3)可知,当任意一个二端电路元件的电压和电流取关联参考方向时,其吸收(即外界输入)的功率为

$$p = ui \quad (1.2.4)$$

如同电流、电压作为代数量处理一样,也可为功率设定参考方向,当功率的实际方向与参考方向一致时,功率为正,否则,功率为负。一段电路在电压、电流取关联参考方向的情况下,功率的参考方向指定为进入该电路,三者之间的关系如图 1.2.5 所示。在电路分析中,常常仅标识电流、电压的参考方向,此时如果电流、电压的参考方向为关联参考方向,则电路所吸收的功率为该段电路两端电压、电流之乘积。此时若 p 为正值,该段电路吸收正功率;若 p 为负值,该段电路吸收负功率,即该段电路向外输出功率,或者说发出功率。例如,算得 ab 这段电路吸收功率为 -5 W ,那么说 ab 段电路发出 5 W 的功率也是正确的。如果遇到电路中电压、电流取非关联参考方向的情况,在计算吸收功率的公式中应冠以负号,即

$$p = -ui \quad (1.2.5)$$

如图 1.2.5 所示的关联参考方向下,在 t_0 到 t 的时间内该部分电路吸收的能量(energy)为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1.2.6)$$

能量的 SI 单位名称为焦[耳](J)。

从本质上讲,电荷的概念是描述一切电现象的基础,即所有电效应都与电荷有关。一般来说,电荷的测量非常困难,而电荷的运动或移动会产生电流,运动或移动过程中如果对电荷做

