



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

电路分析基础

陈长兴 李敬社 段小虎 编著

高等教育出版社



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

电路分析基础

D i a n l u F e n x i J i c h u

陈长兴 李敬社 段小虎 编著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会新制定的《电路分析基础课程教学基本要求》，为适应近代电路理论的发展和课程体系改革的需要，结合编者多年的实际教学经验编著而成。全书内容共7章：电路的基本概念和定律、电阻电路分析、动态电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和理想变压器、线性电路的频率特性及双口网络等内容。每章后均有一定数量的习题，书末附有部分参考答案。

本书可作为高等学校电子信息类专业本科生“电路分析基础”课程或“电路”课程教材，也可作为其他专业学生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础 / 陈长兴, 李敬社, 段小虎编著. —
北京: 高等教育出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 039452 - 8

I. ①电… II. ①陈… ②李… ③段… III. ①电路分
析 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 056400 号



策划编辑 杜 炜 责任编辑 平庆庆 封面设计 赵 阳 版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹 责任校对 陈旭颖 责任印制 刘思涵

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	煤炭工业出版社印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	24.75	版 次	2014年6月第1版
字 数	560千字	印 次	2014年6月第1次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	36.00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 39452 - 00

前 言

“电路分析基础”是我国高等学校电子信息类专业的一门重要的技术基础课程。它主要研究电路的基本理论和方法,是学习后续技术基础课程和专业课程的基础。因此,引导学生理解电路理论的基本概念,培养科学的思维能力,提高对电路的分析、设计和应用开发的能力是本书编著的宗旨。

本书根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会新制定的《电路分析基础课程教学基本要求》,为适应近代电路理论的发展和课程体系改革的需要,结合编者多年的实际教学经验编著而成。

在编著过程中,坚持传授知识、发展智力和培养能力相统一的教学原则,充分考虑了教材的教学适应性。在内容安排上,既遵循电路理论本身的系统和结构,又注意适应学生的认知规律;在内容组织、习题选取方面注重学生思维能力和分析解决问题能力的培养;在内容叙述上力求做到概念清晰、论述简明、数据准确、图表齐全,注重阐述分析问题和解决问题的方法。书中配有较多的例题和习题,对一些概念较强的典型例题,给出几种不同解法,通过相互比较和验证,以期加深学生对电路基本概念的理解,扩展解题思路,提高解决问题的能力。

全书共分为7章,包括电路的基本概念和定律、电阻电路分析、动态电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和理想变压器、线性电路的频率特性及双口网络等内容。考虑到本课程与高等数学、普通物理等课程的衔接与配合,本课程提高了起点,对学生已学过的内容只做必要的说明,并在此基础上加深和提高。对有些在后续课程中使用较多的内容,如运算放大器、频率特性等内容作了适度的扩充。本书在每一章中增加知识拓展与实际应用的内容,引入大量工程应用实例,突出实际应用性特征。本书在总体上力求简明,章节内容安排上既注重课程体系的连贯性,又保持一定的独立性,进行适当的内容剪裁,便于适应不同层次的教学要求。每章均配有大量习题供读者选用。

参加本书编著工作的有陈长兴、李敬社、段小虎等同志。全书由陈长兴教授统筹定稿。本书的编写得到了全军电工电子基础课程教学协作联席会及空军工程大学理学院的支持与指导。在此对给予指导性建议的西安电子科技大学张永瑞教授、空军工程大学王曙钊教授及其他给予热情帮助和支持的空军工程大学同事表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请指正。作者 E-mail: xachenchangxing@126.com. lrcljs@163.com

编著者

2013年12月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律	1	第 2 章 电阻电路分析	38
1.1 电路及电路模型和集总假设	1	2.1 电阻电路的等效变换	38
1.1.1 电路及电路模型概述	1	2.1.1 电阻的串联和并联	38
1.1.2 集总假设概述	2	2.1.2 电阻电路的分压和分流	42
1.2 电路变量	3	2.1.3 电源的等效变换	50
1.2.1 电流	3	2.1.4 T 形电阻电路与 Π 形电阻 电路的等效变换	58
1.2.2 电压	4	2.2 支路分析法	63
1.2.3 功率	6	2.2.1 电路的两类约束	63
1.3 基尔霍夫定律	8	2.2.2 支路电流法	63
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	9	2.2.3 支路电压法	65
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	10	2.3 网孔电流法	66
1.4 电路元件	11	2.3.1 网孔电流	66
1.4.1 电阻元件	11	2.3.2 网孔电流法	66
1.4.2 电源元件	14	2.3.3 网孔电流法的应用	68
1.4.3 受控源	19	2.4 结点电位法	70
1.5 运算放大器	22	2.4.1 结点电位	70
1.5.1 运算放大器的电路模型	22	2.4.2 结点电位法	70
1.5.2 理想运算放大器	23	2.4.3 结点电位法的应用	73
1.5.3 理想运算放大器的电阻 电路分析	24	2.4.4 弥尔曼定理	74
1.5.4 理想运算放大器的 非线性应用	26	2.4.5 电路的简化画法	75
1.6 知识拓展与实际应用	27	2.5 叠加定理和齐次定理	77
1.6.1 电路设计与故障诊断	27	2.5.1 叠加定理	77
1.6.2 实际应用——人体电路模型 与用电安全	29	2.5.2 齐次定理	79
本章小结	30	2.6 置换定理	81
思考与练习 1	31	2.7 等效电源定理	82
		2.7.1 戴维宁定理	82
		2.7.2 诺顿定理	83
		2.7.3 求解等效电阻的方法	83

2.7.4 等效电源定理的应用	87	3.4.1 <i>RLC</i> 串联电路的零输入 响应	176
2.8 最大功率传输定理	95	3.4.2 <i>RLC</i> 串联电路的完全 响应和零状态响应	184
2.8.1 最大功率传输定理	95	3.4.3 <i>GCL</i> 并联电路	185
2.8.2 功率传输效率	100	3.4.4 一般二阶电路	187
2.9 互易定理和电路的对偶性	101	3.5 知识拓展与实际应用	190
2.9.1 互易定理	101	3.5.1 一阶电路的应用实例	190
2.9.2 电路的对偶性	105	3.5.2 二阶电路的应用实例	193
2.10 知识拓展与实际应用	105	本章小结	194
2.10.1 电路设计与故障诊断	105	思考与练习 3	196
2.10.2 实际应用——D/A 转换 电路与 A/D 转换电路	108		
本章小结	110		
思考与练习 2	113		
第 3 章 动态电路分析	125	第 4 章 正弦稳态电路分析	205
3.1 动态元件	125	4.1 正弦量及正弦量的相量表示	205
3.1.1 电容元件	125	4.1.1 正弦电压与电流	205
3.1.2 电感元件	132	4.1.2 有效值与相位差	206
3.1.3 电容、电感元件的串、 并联	137	4.1.3 同频正弦量之和	208
3.2 过渡过程的产生和电路初始值的 计算	139	4.1.4 正弦稳态响应	209
3.2.1 过渡过程的产生	139	4.1.5 正弦量的相量表示	209
3.2.2 微分方程的建立	140	4.2 相量模型	211
3.2.3 电路初始值的计算	141	4.2.1 基尔霍夫定律的相量 形式	211
3.3 一阶电路分析	145	4.2.2 元件 VCR 的相量形式	212
3.3.1 一阶微分方程及其解	145	4.2.3 阻抗与导纳	214
3.3.2 一阶电路的零输入响应	149	4.2.4 相量模型 (Phasor Model) 应用	215
3.3.3 一阶电路的零状态响应	152	4.3 正弦稳态电路的相量分析	216
3.3.4 一阶电路的完全响应	155	4.3.1 相量模型的等效	216
3.3.5 三要素法	156	4.3.2 简单正弦稳态电路的 相量分析	219
3.3.6 微分电路和积分电路	170	4.3.3 复杂正弦稳态电路的 分析	222
3.3.7 由运算放大器构成的微分 电路和积分电路	174	4.4 正弦稳态电路的功率	225
3.4 二阶电路	175	4.4.1 基本概念	226
		4.4.2 复功率	228

4.4.3 最大功率传递定理	230	5.5.1 全耦合变压器	277
4.5 三相电路	231	5.5.2 自耦变压器	279
4.5.1 平衡三相电源	231	5.5.3 实际变压器的模型	279
4.5.2 三相电路的连接形式	234	5.6 知识拓展与实际应用	281
4.5.3 三相电路的计算	234	5.6.1 远距离输电	281
4.6 多频率正弦稳态电路的计算	238	5.6.2 实际变压器的特性	281
4.6.1 正弦稳态的叠加	238	5.6.3 钳形电流表	284
4.6.2 非正弦量的有效值 和功率	241	本章小结	284
4.7 知识拓展与实际应用	243	思考与练习 5	286
4.7.1 移相器电路	243	第 6 章 线性电路的频率特性	291
4.7.2 功率因数的校正	244	6.1 网络函数和频率特性	291
4.7.3 日光灯电路分析	248	6.1.1 网络函数	291
4.7.4 三相电路平均功率的 测量	249	6.1.2 频率特性	293
本章小结	250	6.2 几种常用 RC 电路的频率特性	294
思考与练习 4	252	6.2.1 RC 串联电路	294
第 5 章 耦合电感和理想变压器	260	6.2.2 RC 串并联电路	296
5.1 耦合电感元件	260	6.2.3 有源 RC 低通电路	296
5.1.1 耦合电感	260	6.3 选频电路	298
5.1.2 耦合电感的 VCR	262	6.3.1 RLC 串联选频(调谐) 电路	298
5.2 耦合电感的去耦等效	264	6.3.2 RLC 并联选频电路	302
5.2.1 耦合电感的 T 形等效	264	6.3.3 复杂并联谐振回路	306
5.2.2 耦合电感的串联等效	266	6.4 对数频率特性曲线——波特图	311
5.2.3 耦合电感的并联等效	267	6.4.1 对数频率特性的含义	311
5.3 空芯变压器电路的分析	269	6.4.2 基本因子的波特图	313
5.3.1 一次侧等效电路	269	6.4.3 网络函数的波特图	318
5.3.2 二次侧等效电路	271	6.5 知识拓展与实际应用	320
5.4 理想变压器元件	272	6.5.1 低音音量控制电路	320
5.4.1 理想变压器元件的 VCR	272	6.5.2 信号分离电路	322
5.4.2 理想变压器元件的阻抗 变换特性	274	6.5.3 声频视频信号分离电路	323
5.4.3 理想变压器电路的分析	275	6.5.4 无线电接收机的调谐 电路	324
5.5 实际变压器模型	277	6.5.5 电路设计	325
		本章小结	326

思考与练习 6	327	7.2.4 应用实例和电路设计	361
第 7 章 双口网络	332	7.3 复合双口网络	362
7.1 双口网络的方程及其参数	332	7.3.1 双口网络的级联	362
7.1.1 Z 参数方程和 Z 参数	333	7.3.2 双口网络的串联	364
7.1.2 Y 参数方程和 Y 参数	337	7.3.3 双口网络的并联	367
7.1.3 H 参数方程和 H 参数	342	7.4 知识拓展与实际应用	368
7.1.4 T 参数方程和 T 参数	344	7.4.1 回转器	368
7.1.5 双口网络各种参数之间 的关系	346	7.4.2 回转器实现	369
7.2 双口网络端口特性的分析	349	7.4.3 回转器的阻抗变换特性	370
7.2.1 方程法	350	本章小结	371
7.2.2 等效法	355	思考与练习 7	372
7.2.3 双口网络的特性阻抗及 端口匹配	360	习题答案	376
		参考文献	385

第 1 章 电路的基本概念和定律

电路是由电气器件按一定方式连接组成的整体。学习“电路分析基础”课程主要是掌握电路的基本规律和分析计算方法。本章从实际电路出发,建立电路模型的概念;介绍电路变量、电路元件;重点讨论电路中电压、电流应服从的基本规律,即电路元件的电压、电流约束关系(元件约束)和基尔霍夫定律(拓扑约束)。

1.1 电路及电路模型和集总假设

在现代工农业生产、国防建设、科学研究及日常生活中,使用着各种各样的电器设备,如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机等,广义上说,这些电器设备都是实际中的电路。

1.1.1 电路及电路模型概述

实际电路是由电气器件(例如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电池、发电机等)按一定的方式相互连接组成,完成一定的功能。电路有各种各样的形式,但就其主要功能而言,可以分为两类:一类是进行能量转换和传输的电路,例如由发电机、变压器及输电线等设备组成的输电网;另一类电路的功能是传输、变换、储存和处理电信号,例如电视机、计算机等电路。电路就其各部分作用而言,可由三部分组成:第一部分是供电设备,其作用是提供能量;第二部分是传输或处理电路,其作用是将电能传输给用电设备或将信号进行预定的处理;第三部分是用电设备,其作用是将电能转换成其他形式的能量或将电信号传输给其他电路。供电设备是提供电磁能的设备,称其为电源;用电设备是使用电磁能的设备,称其为负载。在电源的作用下,电路中产生电压和电流。因此,电源又称为激励源,由激励在电路中产生的电压和电流统称为响应。

手电筒的电路是一种最简单的实际照明电路,图 1.1.1(a)所示是手电筒的电路图,它由三部分组成:提供电能的电源——干电池;使用电能的负载——灯泡;连接电源和负载的导线。电源、负载和导线是实际电路不可缺少的三个组成部分。

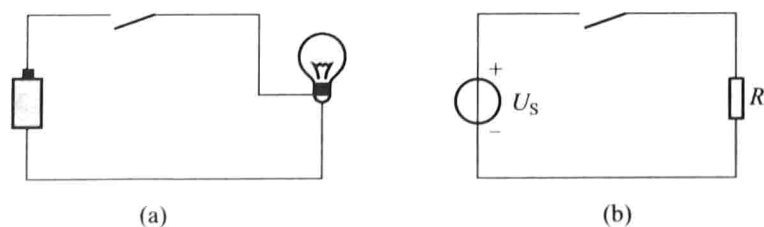


图 1.1.1 手电筒电路及其电路模型

将实际电路中各个电路器件用其模型符号表示,这样画出的图称为实际电路的电路模型图。如图 1.1.1(b)所示电路就是图 1.1.1(a)实际电路的电路模型。

在实际电路中,虽然电路器件的种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方。根据它们的共性,可以用一些简单的符号来代表。例如,用理想电阻元件来表征白炽灯、电炉、电暖气等消耗电能的电器,简称电阻,其模型符号如图 1.1.2(a)所示;用理想电容元件来表征储存电能的电器,简称电容,其模型符号如图 1.1.2(b)所示;用理想电感元件来表征储存磁能的电器,简称电感,其模型符号如图 1.1.2(c)所示。

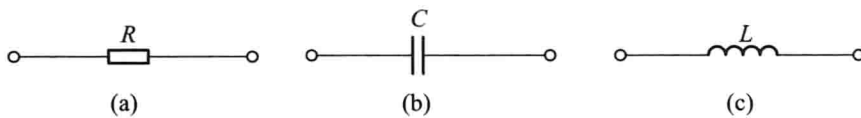


图 1.1.2 理想电阻、电容、电感元件模型

有了上述的理想元件模型,任何一种实际电路器件都可以用这些模型的恰当组合来表示。以实际电感器为例,当加在其上的信号频率较低时,其消耗的电能与实际储存的磁能相比是非常小的,可以忽略不计,其电路模型可用理想电感元件模型表示,如图 1.1.3(a)所示;当频率较高时,其消耗的电能需要考虑,其电路模型可用理想电感元件与理想电阻元件的串联来表示,如图 1.1.3(b)所示。当频率更高时,其消耗的电能、储存的电能都不能忽略,其电路模型就需用图 1.1.3(c)所示的模型表示。这说明一个实际电路器件在不同的工作条件下,它的电路模型可以是不同的。

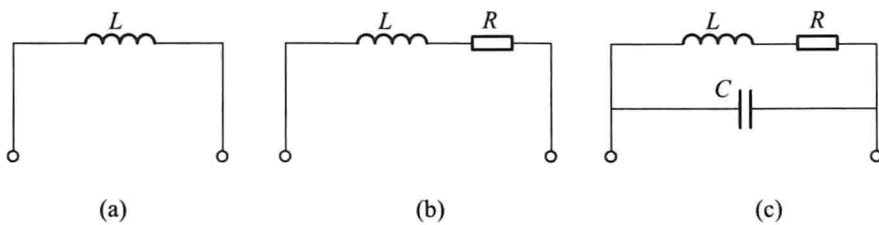


图 1.1.3 电感在不同条件下的模型

电路的理想元件模型抛弃了实际电路器件的外形、尺寸的差异,突出了它们所表现出来的主要电磁特性,使得数学分析更加方便。因此,电路理论研究的对象不是实际电路,而是理想元件组成的电路模型。

1.1.2 集总假设概述

由于实际电路器件在工作时,所发生的电磁现象是交织在一起的,在空间上无法将它们分离,而且这些电磁现象连续分布在电路器件中。为了便于分析,在理想化的电路模型中,通常假设器件的电磁现象总是发生在各元件模型的内部,并且每一个元件都只表示一种基本现象,这样的假设称为集总假设,这样的元件称为集总参数元件(Lumped Parameter Element)。由集总参数

元件构成的电路称为集总参数电路。

应用集总假设必须满足实际电路的尺寸(长度)远远小于电路工作时电磁场波长的要求。如果不满足这个条件,实际电路不能按集总参数电路来处理。本书只讨论集总参数电路。

1.2 电路变量

在电路分析中,电流、电压和功率是常用的电路物理变量。电路对信号的传输和处理通常是用电流、电压的波形变化表现的,而电路完成能量传输和分配的能力用功率的大小衡量。所以讨论和理解这三个电路变量的物理概念是十分重要的。

1.2.1 电流

电流是描述电路性能的基本物理量之一,是电路的基本变量。在外电场作用下带电粒子的定向移动即形成电流。在金属导体中,带电的自由电子作无规则的运动,故形成不了电流。如果金属导体的两端接上电源,带负电荷的自由电子将逆电场方向运动,于是形成电流。

每单位时间内通过导体任一横截面的电荷量定义为电流,用以衡量电流的大小,用符号 $i(t)$ 表示,即

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

式中, $dq(t)$ 是 dt 时间内通过导体横截面的电荷量,单位为库[仑](C),是时间 t 的函数。电流的单位是安[培](A)。通常使用的单位还有千安(kA),毫安(mA)和微安(μA),其换算关系为

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ }\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

一、电流的方向

习惯上,人们将正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。对于简单的电路,根据物理知识容易判断正电荷运动的方向,从而确定电流的实际方向。对于一些复杂电路,要确定某元件上电流的实际方向就比较困难,另外如果电流的方向随时间变化,那就更无法标明它的实际方向了。为了解决这一问题,引入参考方向(Reference Direction)的概念。

所谓参考方向就是预先任意假设的电流方向。参考方向的选取无非带来两种结果,一是与实际方向相同,另外是与实际方向相反。与实际方向相同时,参考方向的电流为正值;与实际方向相反时,参考方向的电流为负值。因此,可根据计算的结果判断实际方向与参考方向的关系,即运算结果得正,则参考方向与实际方向一致;运算结果得负,则参考方向与实际方向相反。

电路分析所涉及的电流均指具有参考方向的电流。在分析计算电路时,必须在电路中标明电流的参考方向,否则,计算结果的正负是毫无意义的。

二、电流的分类

电流可分为直流电流和交流电流两大类。

大小和方向均不随时间变化的电流称为恒定电流,又称直流电流(Direct Current)。直流电流用大写字母 I 表示,即

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.2.2)$$

否则称为时变电流。若时变电流的大小和方向都随时间作周期性变化,则称交流电流(Alternating Current)。交流电流用小写字母 $i(t)$ 表示,其表达式同式(1.2.1)。若交流电流按正弦规律变化时,称为正弦电流或正弦交流电。

【例 1.1】 如图 1.2.1 所示,正电荷 $q(t) = \left(\frac{1}{2}t^2 - 2t\right)\text{C}$,由 a 经元件流到 b。试分别求 $t = 1\text{ s}$ 和 $t = 3\text{ s}$ 时通过元件电流的大小,并说明电流的实际方向。

解 由电流的定义式可求得(参考方向由 $a \rightarrow b$)

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}t^2 - 2t \right) = (t - 2)\text{ A}$$

当 $t = 1\text{ s}$ 时, $i(t) = (1 - 2)\text{ A} = -1\text{ A}$

当 $t = 3\text{ s}$ 时, $i(t) = (3 - 2)\text{ A} = 1\text{ A}$

由计算结果可知,当 $t = 1\text{ s}$ 时,参考方向的电流值为负,故电流的参考方向与实际方向相反,即实际方向为 $b \rightarrow a$ 。当 $t = 3\text{ s}$ 时,电流值为正,故电流的参考方向与实际方向一致,即实际方向为 $a \rightarrow b$ 。

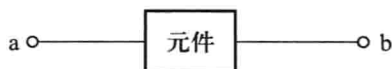


图 1.2.1 例 1.1 图

1.2.2 电压

电压也是描述电路性能的基本物理量,是电路的基本变量。从物理学知识可知,电荷在电场中要受到电场力的作用。正电荷沿着电场的方向移动,负电荷逆着电场的方向移动,这是电场对电荷做功的表现。为了反映电场对电荷做功能力的大小,故引入电压的概念。

一、电压的概念

电场力将单位正电荷从电路中的 a 点移动到 b 点所做功的大小称为 a、b 两点间的电压,用 $u_{ab}(t)$ 表示,即

$$u_{ab}(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.2.3)$$

式中, $dq(t)$ 是移动的电荷量,单位为库[仑](C); $dw(t)$ 是为移动电荷 $dq(t)$ 电场力所做的功,单位为焦[耳](J),它们都是时间 t 的函数。

电压的单位为伏[特](V)。通常使用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV),其换算关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \text{ } \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$$

在电路分析中,有时也涉及电位这个物理量。在物理学中,把单位正电荷由电场中的某一点 a 移动到参考点(无限远处),电场力所做的功叫做 a 点的电位,用 u_a 表示。在电路中,电位参考点可选电路中的任意一点(通常习惯于选取公共连接点为参考点,也叫接地点,用符号 \perp 表示)。这样,电路中某点的电位即指该点到参考点的电压。电位是一个代数量,当其值大于零时,表明该点电位高于参考点的电位(参考点电位为零);当其值小于零时,表明该点电位低于参考点的电位。

从电压、电位的定义可知,电压是对电路中任意两点而言,电位是对电路中的一点而言(相对参考点)。电路中各点电位的高低与参考点的选取有关,而任意两点间的电压保持不变,即与参考点无关。电压和电位的关系是:电路中任意两点间的电压等于这两点间的电位差,即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1.2.4)$$

二、电压的方向

电压不但有大小也有方向。电压的实际方向规定为电场力对正电荷做正功的方向。该方向就是电位实际降落的方向。对电压而言,两点中具有较高电位的一端为正极,用符号“+”表示,而具有较低电位的一端为负极,用符号“-”表示。这样,电压的实际方向就是由“+”极性端指向“-”极性端。

在电路中,当两点间的实际方向不易判别或随时间不断变化时,可以任意假定其中的一点为“+”极性端,另一点为“-”极性端。这样假定的极性叫电压的参考极性。由“+”指向“-”的方向叫电压的参考方向。电压的参考方向与实际方向的关系是:电压的参考方向与实际方向相同时,参考方向的电压为正值,反之为负值。在假定参考方向之后,根据电路进行分析计算,若求得参考方向的电压为正时,说明该两点间电压的实际方向与参考方向相同;若为负,则电压的实际方向与参考方向相反。本书以后所提及的方向均指参考方向。

三、关联参考方向

在电路中电流的参考方向和电压的参考方向都是任意选取的,那么对于同一元件上的电流和电压的参考方向,它们之间有什么关系呢?就本质意义上讲,二者是彼此独立的,没有任何限制。然而,为了分析问题方便,常把同一元件上电流、电压的参考方向设定为关联参考方向。所谓关联参考方向是指同一元件上电流、电压的参考方向一致,即电流的参考方向就是电位降落的参考方向,如图 1.2.2 所示。与此相反的参考方向称为非关联参考方向。

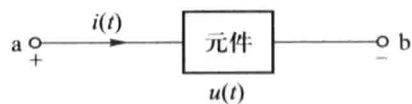


图 1.2.2 电压、电流的关联参考方向

四、电压的分类

电压的分类和电流的分类相同,也可分为直流电压和交流电压两大类。

大小和方向均不随时间变化的电压称为直流电压,用字母 U 表示。其表达式为

$$U = \frac{\Delta W}{\Delta Q} \quad (1.2.5)$$

从能量关系上讲,在电路中 a、b 两点之间,当 $U_{ab} > 0$ 时,表明单位正电荷从 a 点至 b 点时电场力做了正功,电荷的能量(位能)减少,也就是这段电路吸收了能量。当 $U_{ab} < 0$ 时,表明单位正电荷经过这段电路时电场力做了负功,电荷的能量增加,也就是这段电路提供了能量。所以电压也是一个代数量。

大小和方向均随时间周期性变化的电压称为交流电压,用 $u(t)$ 表示。其表达式为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1.2.6)$$

若交流电压按正弦规律变化时,称为正弦交流电压。

【例 1.2】 如图 1.2.1 所示,若 $U_{ab} = -5 \text{ V}$ 。

(1) 求 U_{ba} , 并指明电压的实际方向。

(2) 若以 b 为参考点, U_a 为多少? 若以 a 为参考点, U_b 为多少?

解 (1) 由 $U_{ab} = -5 \text{ V}$ 可知,该元件电压参考方向是 a 为“+”, b 为“-”。 $U_{ab} < 0$ 说明参考方向与实际方向相反,所以电压实际方向是 $b \rightarrow a$, 数值为 5 V , 即 $U_{ba} = 5 \text{ V}$ 。

(2) 若以 b 作为参考点, 即 $U_b = 0$, 则

$$U_{ab} = U_a - U_b = U_a$$

故 $U_a = U_{ab} = -5 \text{ V}$ (a 点电位比 b 点电位低 5 V)

若以 a 作为参考点, 即 $U_a = 0$, 则

$$U_{ab} = U_a - U_b = -U_b$$

故 $U_b = -U_{ab} = 5 \text{ V}$ (b 点电位比 a 点电位高 5 V)

计算结果表明,参考点改变,各点电位改变,但 a、b 两点之间的电压未变。

1.2.3 功率

功率也是电路理论中经常研究的对象。在电路中,当正电荷从电路元件上的“+”极移动到“-”极,电场力对电荷做功,这时该元件吸收能量;当正电荷从电路元件上的“-”极移动到“+”极,外力对电荷做功,这时该元件释放能量。元件吸收能量或释放能量的多少由功率来衡量。

在电路中,单位时间电场力做功的大小称电功率,简称功率。功率是能量转换的速度,是能量对时间的变化率,用符号 $p(t)$ 表示,即

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1.2.7)$$

对于一个元件或一段电路来说,如果选电压、电流为关联参考方向,则该元件或该段电路吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{dw(t)}{dq(t)} \cdot \frac{dq(t)}{dt} = u(t)i(t) \quad (1.2.8)$$

由于电压、电流都是代数量,因而功率也是代数量。当 $p(t) > 0$ 时,说明元件吸收了正功率;当 $p(t) < 0$ 时,说明元件吸收了负功率(实际为发出了正功率)。

在非关联参考方向下,元件吸收功率的表达式为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1.2.9)$$

发出(释放)功率与吸收功率的情况正好相反,因而要计算发出功率只需在吸收功率的表达式右边加一个“-”号,且在 $p(t)$ 的下角注一“发”即可。若无特殊说明,本书今后所涉及的功率均指吸收功率。

根据能量守恒原理,在电路中,其发出的功率与吸收的功率总是相等的,即在完整的电路中,功率的代数和为零,这称为功率守恒,可表示为

$$\sum p(t) = 0 \quad (1.2.10)$$

功率的单位是瓦[特](W),简称“瓦”。通常使用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)、微瓦(μW),其换算关系为

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

$$1 \mu\text{W} = 10^{-6} \text{ W}$$

【例 1.3】 在图 1.2.3 中,若各元件上的功率均为 10 W,电压均为 5 V,电压、电流的参考方向如图所示,求各元件上的电流。

解 图 1.2.3(a) 所示电路中,电流、电压为关联参考方向,因此

$$p = ui = 10 \text{ W}$$

所以
$$i = \frac{p}{u} = \frac{10}{5} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

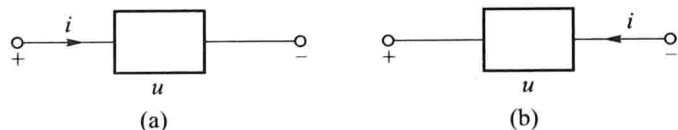


图 1.2.3 例 1.3 图

图 1.2.3(b) 所示中,电流、电压为非关联参考方向,因此

$$p = -u \cdot i = 10 \text{ W}$$

所以
$$i = -\frac{p}{u} = -\frac{10}{5} \text{ A} = -2 \text{ A}$$

【例 1.4】 在图 1.2.4 中,两个方框分别代表两个元件,各元件的电压、电流已标于图中。试问:

(1) 元件 1 的电压 u 、电流 i_1 是否为关联参考方向? 元件 2 又如何?

(2) 设某时刻 $u = 4 \text{ V}$, $i_1 = 2 \text{ A}$, 求元件 1 在该时刻吸收的功率 p_1 是多少? 该时刻元件 2 的电流 i_2 又如何?

解 (1) 根据关联参考方向的定义可知,元件 1 的电流和电压是非关联参考方向,元件 2 的电流和电压是关联参考方向。

(2) 元件 1 的吸收功率为

$$p_1 = -ui_1 = -4 \times 2 \text{ W} = -8 \text{ W}$$

元件 2 的吸收功率 $p_2 = ui_2$

根据功率守恒,有

$$p_1 + p_2 = -ui_1 + ui_2 = -8 + 4i_2 = 0$$

所以

$$i_2 = \frac{8}{4} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

本题中 $p_1 = -8 \text{ W} < 0$,说明元件 1 在该时刻吸收了 -8 W 的功率,实际上它发出了 8 W 的功率。

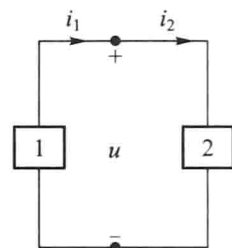


图 1.2.4 例 1.4 图

1.3 基尔霍夫定律

在集总参数电路中遵循着一定的规律,这些规律分为两类。一类是仅仅取决于电路逻辑结构的约束关系,称为拓扑约束(Topological Constraints)关系,这一约束关系由基尔霍夫定律来描述。另一类是取决于电路中各部分电磁特性的约束关系,称为元件约束(Element Constraints)关系。这类约束关系将电路中同一部分的电压和电流紧紧联系在一起,因而又称为电压电流关系,简称为 VCR(Voltage Current Relation)。这两类约束关系是分析电路问题的基本依据。本节将介绍拓扑约束关系,即基尔霍夫定律。在叙述该定律之前,先介绍电路模型中常用的一些名词。

支路 电路中流过同一电流的一条分支叫支路(Branch)。支路可以是一个元件,也可以是多个元件串联的形式。例如图 1.3.1 共有 4 条支路,其中 1、2、3 支路分别是单个元件,而元件 4 和元件 5 串联组成第 4 条支路。流经支路的电流和支路两端的电压称为支路电流和支路电压,它们是集总参数电路中分析和研究的对象,集总参数电路的基本定律由支路电压和支路电流表达。

结点 电路中支路的连接点称为结点(Node)。在图 1.3.1 中共有两个结点,即结点 1 和结点 2。初学者往往将 a、b、c、d 都看成结点,这是不对的。在电路理论中,e、a、b、g 是用理想导线连接,它们是相同的端点,可以合并成一点,即结点 1,同理,f、c、d、h 也可以合并成一点,即结点 2。有时为了分析、证明的需要,也可将每一个元件看成一条支路,在这种定义下,图 1.3.1 也可以认为有 5 条支路,其中元件 4 和元件 5 分别是两条支路,同时也可以认为元件 4 与元件 5 之间存在结点 3。

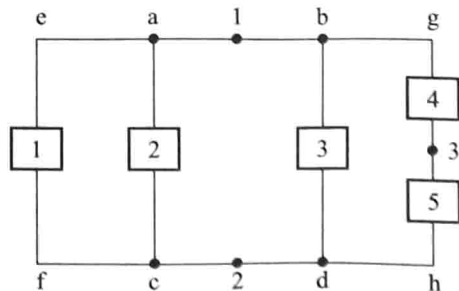


图 1.3.1 支路结点示意图

回路 电路中任一闭合路径称为回路(Loop)。在

图 1.3.1 中,元件 1 和元件 2,元件 1、元件 4 和元件 5,元件 1 和元件 3 均构成回路,该电路有 6 个回路。

网孔 在回路内部不另含有支路的回路称为网孔(Mesh)。网孔一定是回路,但回路不一定是网孔。例如在图 1.3.1 中,元件 1 和元件 2,元件 2 和元件 3,元件 3、元件 4 和元件 5 均构成网孔,而元件 1 和元件 3 构成回路,但不构成网孔。

网络 一般将元件较多的电路称为电网络(Network),简称为网络。实际上,电路与电网络这两个名词并无本质的区别,经常可以混用。

基尔霍夫定律来源于自然界的电荷守恒和能量守恒定律,它包含两个基本定律,即基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,简称为 KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law,简称为 KVL)。

1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

KCL 是描述电路中与结点相连的各支路电流之间约束关系的定律,它的基本内容是:对于集总参数电路中的任一结点,在任一时刻流入该结点的支路电流之和等于流出该结点的支路电流之和。KCL 可表示为

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad (1.3.1)$$

例如图 1.3.2 所示电路中,根据 KCL 对结点 a 有

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = i_4(t)$$

若规定流入结点的支路电流为正,流出结点的支路电流为负,则 KCL 亦可表述为:任一时刻,对电路中的任一结点,流入或流出该结点的各支路电流的代数和等于零,即

$$\sum_k i_k(t) = 0 \quad (1.3.2)$$

KCL 不仅适用于结点,也适用于电路中任一假设的封闭曲面,这样的假设封闭曲面称为电路的广义结点。例如图 1.3.3(a)所示,假设的封闭曲面为 S,根据 KCL 有

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

对于图 1.3.3(b)所示的封闭曲面 S,有 $i=0$ 。

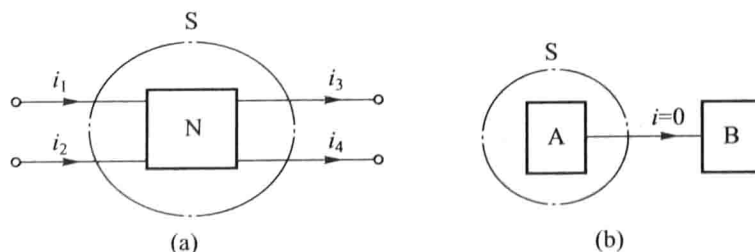


图 1.3.2 KCL 示例

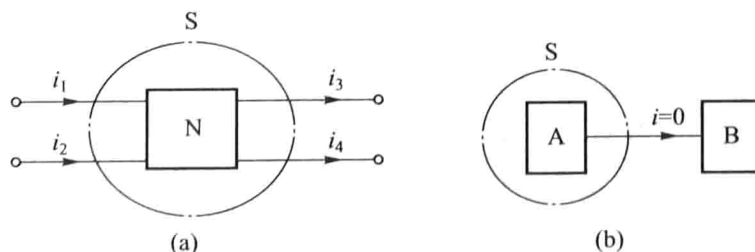


图 1.3.3 KCL 用于封闭曲面