



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

www.cmpedu.com

电路理论基础

陈晓平 殷春芳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气信息类规划教材

电路理论基础

陈晓平 殷春芳 主编
李长杰 徐培凤 孙月平 韩守义 参编



机械工业出版社

本书是根据教育部电子电气基础课程教学指导分委员会制订的高等工业学校电路课程教学的基本要求,并充分考虑普通高等院校及各高校独立学院的培养计划和学生特点,为电气信息类专业学生编写的教材。本书内容包括:电路基本概念和电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的分析方法、电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路分析、电路的频率响应、互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的复频域分析、电路方程的矩阵形式、二端口网络等。

本书基本概念讲述清楚,易于读者理解;基本分析方法归类恰当、思路清晰、步骤明确、易于读者掌握。为了很好地帮助读者理解基本内容,书中配有丰富的例题及详尽的解题步骤。

本书可作为普通高等学校电气信息类各专业的电路、电路分析基础课程的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 2399929378, 电话: 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/陈晓平,殷春芳主编. —北京:机械工业出版社,2013.9
普通高等教育电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-43417-7

I. ①电… II. ①陈…②殷… 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(2013)第 165728 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:时 静 责任编辑:时 静 崔利平

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英 肖 琳

责任印制:李 洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27 印张·669 千字

0001—3500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-43417-7

定价: 57.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

电路课程是高等工科院校电类各专业的一门重要技术基础课程。教学实践表明,学生对技术基础课程掌握得好坏,直接影响后续专业课程的学习。因此,引导学生掌握电路理论的基本概念和基本分析方法,培养学生科学的思维能力,提高分析问题和解决问题的技能是本书编写的宗旨。

本书立足专业培养要求,在内容上遵守了“加强基础、精选内容,结合实际、逐步更新,突出重点、利于教学”的原则进行选材,在结构上遵循了“先易后难、循序渐进”的方法进行编排,采用了先“直流电路分析”后“交流电路分析”、先“时域分析”后“复频域分析”、先“基本概念介绍”后“具体电路分析”的框架结构。为克服传统电路教材缺乏与实际工程应用联系的不足,本教材在每章开始通过引入大家熟知的、生活实际经常遇到的“应用实例”,唤起读者对相关知识内容的探索欲望,并在每章的末尾前后呼应,应用本章所学的知识对“应用实例”进行分析计算,形成完整的工程实例引出与分析。

本书在文字叙述方面,力求突出重点,分散难点,由浅入深,通俗易懂,注意逻辑性和合理性。为了使读者能更好地掌握电路理论的基本内容及分析方法,本教材还精心选编了大量的例题和习题,并配备了习题参考答案,使之与正文有机结合,融为一体,有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

考虑到大学的教学特点,在编写本教材时注意教材的教学适用性,总体结构上力求简明,章节内容安排上既注意了课程体系的连贯性,又保持了一定的独立性,可适应于不同学时教学要求和教学计划。

本教材是作者在总结多年教学实践的基础上,参考已出版的同类优秀教材编写而成的。参加本书编写工作的有江苏大学电气信息工程学院殷春芳、孙月平(第1、2、3、4、5章),陈晓平、徐培凤(第6、7、8、9章),李长杰、韩守义(第10、11、12、13章),本书由陈晓平教授、殷春芳副教授担任主编,负责全书的统稿。由于编者水平有限,书中难免出现不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电路基本概念和电路定律	1	变换	30
1.1 电气工程与电路理论	1	2.2.1 星形联结与三角形联结	30
1.2 电路和电路模型	2	2.2.2 星形-三角形联结之间的等效 变换	31
1.2.1 实际电路	2	2.3 电源的等效变换	35
1.2.2 电路模型	2	2.3.1 电压源、电流源的串联和并联	35
1.3 电流、电压的参考方向	3	2.3.2 实际电源的两种模型及其等效 变换	37
1.3.1 电流的参考方向	4	2.4 习题	39
1.3.2 电压的参考方向	5	第 3 章 电阻电路的分析方法	44
1.3.3 电压与电流的关联参考方向和 非关联参考方向	6	3.1 电路的图	45
1.3.4 国际单位制(SI)中变量的 单位	6	3.1.1 电路的图的基本概念	45
1.4 电功率和能量	6	3.1.2 电路的图的有关名词	46
1.4.1 电能	6	3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数	48
1.4.2 功率	7	3.2.1 KCL 的独立方程数	48
1.5 电阻元件	8	3.2.2 KVL 的独立方程数	48
1.5.1 电阻和电导	9	3.3 支路法与支路电流法	50
1.5.2 电阻元件的伏安特性	9	3.3.1 支路法	50
1.5.3 电阻元件的开路和短路	10	3.3.2 支路电流法	51
1.5.4 电阻元件的功率和电能	10	3.4 网孔电流法与回路电流法	54
1.6 电压源和电流源	11	3.4.1 网孔电流法	54
1.6.1 电压源	11	3.4.2 回路电流法	57
1.6.2 电流源	12	3.5 结点电压法	62
1.7 受控电源	13	3.6 习题	68
1.8 基尔霍夫定律	14	第 4 章 电路定理	72
1.8.1 基尔霍夫电流定律	15	4.1 叠加定理和齐次定理	72
1.8.2 基尔霍夫电压定律	16	4.1.1 叠加定理	73
1.9 运算放大器	19	4.1.2 齐次定理	77
1.10 习题	21	4.2 替代定理	78
第 2 章 电阻电路的等效变换	25	4.3 戴维宁定理和诺顿定理	81
2.1 简单电阻电路的等效变换	25	4.3.1 戴维宁定理	81
2.1.1 电路等效变换的概念	25	4.3.2 诺顿定理	91
2.1.2 电阻的串联	26	4.4 最大功率传输定理	93
2.1.3 电阻的并联	27	4.4.1 负载获得最大功率的条件及最大 功率的计算	93
2.1.4 电阻的混联	29	4.4.2 传输效率	97
2.2 电阻的星形联结和三角形联结的等效			

4.5 习题	98	6.6.4 最大功率传输	213
第5章 动态电路的时域分析	103	6.7 习题	216
5.1 电容元件和电感元件	104	第7章 电路的频率响应	223
5.1.1 电容元件	104	7.1 网络函数与频率响应的基本概念	223
5.1.2 电感元件	109	7.1.1 网络函数	224
5.1.3 电容与电感的串并联等效变换	113	7.1.2 网络函数的频率响应	225
5.2 换路定律和初始值的确定	116	7.2 滤波器电路	226
5.2.1 换路定律	116	7.2.1 一阶 RC 低通滤波器	227
5.2.2 初始值的确定	117	7.2.2 一阶 RC 高通滤波器	229
5.3 一阶电路的动态响应	119	7.2.3 RC 带通滤波器	230
5.3.1 一阶电路的零输入响应	120	7.2.4 RC 带阻滤波器	231
5.3.2 一阶电路的零状态响应	127	7.2.5 RC 全通滤波器	232
5.3.3 一阶电路的全响应	135	7.2.6 RC 有源滤波器	233
5.4 一阶电路的三要素法	137	7.3 RLC 串联电路的频率响应	235
5.5 一阶电路的阶跃响应	142	7.4 RLC 串联谐振电路	237
5.5.1 阶跃函数	142	7.4.1 串联谐振条件	238
5.5.2 阶跃响应	144	7.4.2 串联谐振频率	238
5.6 二阶电路的动态响应	147	7.4.3 谐振阻抗、特性阻抗与品质 因数	239
5.6.1 二阶电路的零输入响应	148	7.4.4 串联谐振电路的特征	239
5.6.2 二阶电路的零状态响应	157	7.4.5 串联谐振电路的频率特性	242
5.6.3 二阶电路的全响应	160	7.4.6 选择性与通频带	245
5.7 习题	163	7.4.7 电感、电容电压的频率特性	247
第6章 正弦稳态电路分析	169	7.5 RLC 并联谐振电路	248
6.1 正弦量及其相量表示	170	7.5.1 简单 RLC 并联电路	249
6.1.1 正弦量	170	7.5.2 电感线圈与电容并联电路	250
6.1.2 正弦量的相量表示	174	7.6 串并联谐振电路	254
6.2 电路定律及电路元件的相量形式	181	7.7 习题	257
6.2.1 基尔霍夫定律的相量形式	182	第8章 互感电路	260
6.2.2 电阻元件的相量模型	182	8.1 互感电路的基本概念	261
6.2.3 电感元件的相量模型	183	8.1.1 互感现象	261
6.2.4 电容元件的相量模型	183	8.1.2 耦合电感的伏安关系	262
6.3 复阻抗与复导纳	187	8.1.3 互感线圈的同名端及耦合电感的 电路模型	262
6.3.1 复阻抗	187	8.1.4 耦合因数	264
6.3.2 复导纳	189	8.2 互感电路的计算	265
6.3.3 复阻抗与复导纳间的等效变换	191	8.2.1 耦合电感的串联	266
6.3.4 复阻抗(复导纳)的串、 并联	192	8.2.2 耦合电感的并联	267
6.4 电路的相量图法	193	8.2.3 耦合电感的三端连接	269
6.5 正弦稳态电路的分析	195	8.3 空心变压器	270
6.6 正弦稳态电路的功率	202	8.3.1 空心变压器的电路模型及方程	271
6.6.1 正弦稳态一端口电路的功率	202	8.3.2 空心变压器的等效电路及引入 阻抗	272
6.6.2 复功率	208		
6.6.3 功率因数的提高	210		

8.3.3 空心变压器的去耦等效分析	273	10.5 习题	324
8.4 理想变压器	275	第11章 动态电路的复频域分析	328
8.4.1 理想变压器的电路模型及方程	275	11.1 拉普拉斯变换及其基本性质	329
8.4.2 理想变压器的阻抗变换作用	276	11.1.1 拉普拉斯变换的定义	329
8.5 习题	277	11.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	330
第9章 三相电路	281	11.2 拉普拉斯反变换的部分分式展开法	335
9.1 三相电路的基本概念	281	11.2.1 $F(s)$ 的极点均为单极点的情况	336
9.1.1 三相电源的产生	281	11.2.2 $F(s)$ 有复数极点的情况	337
9.1.2 对称三相电路的连接方式	283	11.2.3 $F(s)$ 有多重极点的情况	338
9.1.3 线电压(电流)与相电压(电流)之间的关系	285	11.3 动态电路的复频域模型	340
9.2 对称三相电路的计算	287	11.3.1 基尔霍夫定律的复频域形式	340
9.2.1 星形—星形系统	287	11.3.2 电阻元件的复频域形式	340
9.2.2 星形—三角形系统	288	11.3.3 电感元件的复频域形式	340
9.2.3 三角形—星形系统	289	11.3.4 电容元件的复频域形式	341
9.2.4 三角形—三角形系统	290	11.3.5 耦合电感的复频域形式	342
9.2.5 复杂的对称三相电路	290	11.3.6 其他电路元件的复频域形式	342
9.3 不对称三相电路的分析	291	11.3.7 RLC 元件串联的复频域模型	343
9.4 三相电路的功率及测量	296	11.4 动态电路的复频域分析	343
9.4.1 三相电路的功率	296	11.5 习题	348
9.4.2 三相电路的瞬时功率	297	第12章 电路方程的矩阵形式	352
9.4.3 三相电路功率的测量	298	12.1 割集	352
9.5 习题	302	12.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	353
第10章 非正弦周期电流电路	307	12.2.1 关联矩阵	354
10.1 非正弦周期信号的谐波分析	307	12.2.2 回路矩阵	355
10.1.1 非正弦周期信号	307	12.2.3 割集矩阵	357
10.1.2 周期函数分解为傅里叶级数	309	12.3 回路电流方程的矩阵形式	360
10.1.3 非正弦周期信号的频谱	311	12.3.1 采用回路电流法的电路中不含受控源和互感的情况	360
10.1.4 傅里叶级数与波形对称性的关系	312	12.3.2 采用回路电流法的电路中含有耦合电感的情况	361
10.2 非正弦周期信号的有效值和平均值	314	12.3.3 采用回路电流法的电路中含有受控电压源的情况	362
10.2.1 非正弦周期电流和电压的有效值	314	12.4 结点电压方程的矩阵形式	365
10.2.2 非正弦周期电流和电压的平均值	316	12.4.1 采用结点电压法的电路中不含受控源和互感的情况	366
10.3 非正弦周期电流电路的平均功率(有功功率)	317	12.4.2 采用结点电压法的电路中含有耦合电感的情况	368
10.4 非正弦周期电流电路的计算	318	12.4.3 采用结点电压法的电路中含有受控电流源的情况	369
10.4.1 非正弦周期信号激励时电路的响应	318	12.5 割集电压方程的矩阵形式	372
10.4.2 不同频率正弦电源共同作用下电路的分析	320	12.6 习题	375

第 13 章 二端口网络	378	13.3.1 二端口网络的级联	397
13.1 二端口网络及其参数方程	379	13.3.2 二端口网络的并联	398
13.1.1 Y 参数	381	13.3.3 二端口网络的串联	400
13.1.2 Z 参数	384	13.4 二端口网络的实例	401
13.1.3 T 参数	387	13.4.1 回转器	401
13.1.4 H 参数	390	13.4.2 负阻抗变换器	402
13.2 二端口网络的等效电路	392	13.5 习题	404
13.2.1 互易二端口网络的等效电路	393	部分习题参考答案	409
13.2.2 一般二端口网络的等效电路	395	参考文献	424
13.3 二端口网络的连接	397		

第 1 章 电路基本概念和电路定律

本章主要内容提示

- 电路和电路模型
- 电流、电压的参考方向
- 功率和能量
- 集总参数元件
- 基尔霍夫定律

引言及应用实例

电路在现代生活中随处可见,例如日常生活中常用的手电筒、半导体收音机、通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统以及信号处理系统等各个方面都离不开电路。那么什么是电路,如何分析流过电灯泡的电流(手电筒照明电路如图 1-0-1 所示),学完本章内容便可得到解答。

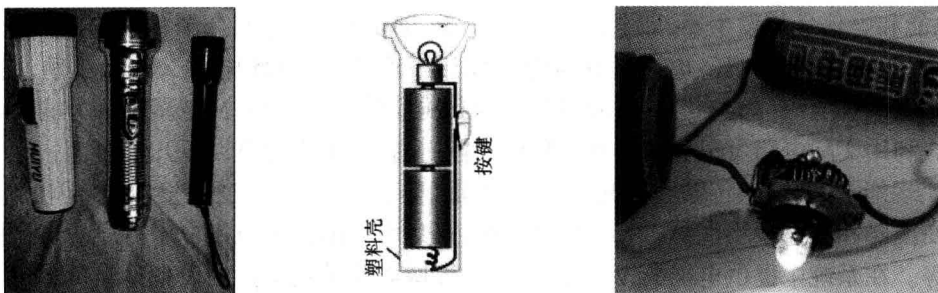


图 1-0-1 手电筒照明电路

1.1 电气工程与电路理论

随着社会的不断进步和科学技术的飞速发展,电作为一种优越的能量形式和信息载体成为当今经济建设和社会生活中不可或缺的重要部分。在过去的一个半世纪,电气工程已经在改变人们的生活方式和工作方式方面扮演了重要的角色,在生活中非常普及,广泛出现在通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统以及信号处理系统中。

电气工程领域涉及面非常广泛,这些不同的领域是否有共同的部分呢? 这共同的部分就是电路。电路是实际电气系统特性的近似数学模型,是跨越各个工程学科、有着广泛应用的电路理论的结晶,为学习电气工程提供了重要的基础。

电路理论是研究静止和运动电荷的电磁理论的分支,尽管广义的电磁理论似乎是研究电信号的出发点,但是在应用的时候不仅麻烦,而且需要使用高深的数学知识,解决方案非常复

杂,而使用电路理论则能获得简单而又足够精确的解决方案,其重要作用显而易见。

可以肯定地说,模型、数学技术和电路将成为构建工程系统的三大基本框架,在未来的工程学探索中将发挥日益强大的作用。

1.2 电路和电路模型

1.2.1 实际电路

为了实现电能或电信号的产生、传输、加工及利用,人们将各种所需要的电器元件或设备,按一定方式连接起来而构成的集合称为(实际)电路,也称电网络。

日常生活中经常接触到的电器元件或设备有各种电源、电阻器、电感器、电容器、变压器、电子管、晶体管、固体组件等,而由这些元件或设备通过连接构成的实际电路也遍布在我们生活的各个领域。有些实际电路十分庞大、复杂,可以延伸到数百乃至上千千米之外,例如由发电机、变压器、输电线及各种用电负载组成的电力系统,或现在迅速发展的通信系统等。而有些电路则可以被局限在非常微小的面积之内,例如,虽然只有指甲盖大小的芯片却可以由成千上万个晶体管相互连接集成一个复杂的电路或系统。前述的电路无论尺寸大小,都是比较复杂的,也有些实际电路是非常简单的,例如手电筒就是一个简单的电路。

无论实际电路的尺寸与复杂程度如何,我们都可以把它们看成由三个基本部分组成:供电装置(电能和电信号的发生器,即电源)、用电设备(即负载)和中间环节(即连接导线、控制开关等)。由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的,因此电源又称为激励,而由它作用产生的电压和电流称为响应。有时根据激励和响应的因果关系,又把激励称为输入,响应称为输出。利用实际电路可以实现各种各样的功能,概括起来主要有以下几个方面:

1) 实现能量的转换、传输和分配。例如,水能、热能、核能等先通过发电机转化成电能,然后通过变压器和输电线将电能进行传输和分配,最后将电能转换成用户所需要的机械能、光能和热能等。在系统中提供电能的设备称为电源,而吸收和消耗电能的设备称为负载。

2) 实现各种电信号的传输和处理,如话音信号、图像信号等。利用一定的电路设备,可对给定信号进行放大、滤波、调制和解调,以获得所需的信号(输出)。

3) 实现信息的储存、数学运算和设备运行的控制等。计算机中的寄存器和 CPU 就是典型的信息储存和数学运算电路,而实现控制功能的电路更是举不胜举。

1.2.2 电路模型

电路理论的主要任务是研究电路中发生的电磁现象,用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程。由于研究电路的目的通常是计算电路中各元件的端子电流和端子间的电压,一般不考虑元件内部发生的物理过程,因此可以根据各元件端部主要物理量间的约束关系对电路中的实际元件进行理想化处理,引入一些抽象化的理想元件模型,再根据电路的实际连接情况将这些理想元件加以连接,就可以建立实际电路的模型。通常将由理想元件所构成的电路称为实际电路的电路模型,简称电路模型。电路模型的建立可以简化对电路的分析和计算,本书讨论的电路均为电路模型。

建立电路模型的首要任务是必须引入能客观地反映实际元件基本性质的理想电路元件,

这些理想电路元件是组成电路模型的最小单元,具有精确的数学定义,能够反映实际电路中的电磁现象,表征其电磁性质。例如,用理想电阻元件表示消耗电能的元件;理想电感元件表示各种电感线圈产生磁场、储存磁能的作用;理想电容元件表示各种电容器产生电场、储存电能的作用;电源元件表示将其他形式的能量转换成电能的作用,诸如发电机、电池等元件。将这些理想元件适当地连接起来,便可构成实际电路的模型。根据理想电路元件与电路其他部分连接的端子数目可划分为二端、三端、四端元件等。

实际电路用途各异,种类繁多,几何尺寸也相差很大。如果构成电路的元件以及电路本身的尺寸远远小于电路以最高频率工作时电磁波的波长,或者说电磁波通过电路的时间认为是瞬间的,则可以用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的元件。如上面所述的电阻、电感、电容等,都分别集总地表现实际电路中的电场或磁场的作用。如果二端元件中有确定的电流,端子间有确定的电压,则这样的元件称为集总(参数)元件,由集总(参数)元件构成的电路称为集总(参数)电路。本书只考虑集总电路。

图 1-2-1a 所示为手电筒的实际简单电路,用两根导线将灯泡和干电池连接起来形成闭合通路,使灯泡发光,用来照明。其电路模型如图 1-2-1b 所示。用理想直流电压源 U_s 和反映干电池内部损耗的电压源内电阻 R_s 的串联组合来等效表示原实际电路中作为电源的干电池,灯泡作为消耗能量的负载用电阻 R 来等效,连接导线用理想导线(其电阻为零)或线段表示。

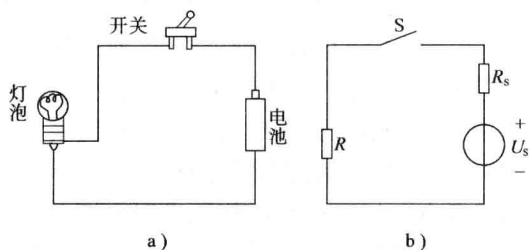


图 1-2-1 实际电路与电路模型
a) 实际电路 b) 电路模型

用理想电路元件或它们的组合模拟实际元件就是建立其模型,简称建模。有的电路的建模比较简单,例如上述手电筒的例子。有的元件或系统在建模时需要考虑其工作条件,工作条件不同,同一实际元件可能采用不同的模型;有的元件或系统在建模时则需要深入分析其中的物理现象才能得到它们的电路模型。模型取得恰当,对电路的分析和计算结果就与实际情况接近;反之则会造成很大的误差,甚至出现自相矛盾的结果。模型取得太复杂就会造成分析和计算的困难,太简单则不足以反映所求解的实际情况。建模问题需要运用有关的知识专门研究,这里不作进一步阐述。

需要强调的是,今后本书中所说的电路一般均指由理想电路元件构成的电路模型,并非实际电路,而(电路)元件则为理想电路元件。

电路理论课程的主要内容是分析电路中的电磁现象和过程,研究电路定律、定理和电路分析方法,并讨论各种计算方法,这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。

1.3 电流、电压的参考方向

描述电路工作情况的物理量主要有电流、电压、电荷、磁通、磁通链、电功率和电能量,称为电路的基本变量,通常分别用 i 、 u 、 q 、 Φ 、 Ψ 、 p 和 W 表示。其中运用最多的是电流和电压这两个变量,它们的意义已经在物理课程中讲过,本节主要介绍它们的方向或极性的标注方法,即

参考方向问题。

在电路分析中,当涉及某个元件或部分电路的电流或电压时,有必要指定电流或电压的参考方向,因为电流或电压的实际方向可能是未知的,也可能是随时间变动的,而确定变量的参考方向可以使实际问题的求解简单化。

1.3.1 电流的参考方向

电荷的有规则运动形成了电流,习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流定义为 dt 时间内通过导体横截面的电荷量 dq ,即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

式中, i 称为电流,单位是 A(安培,简称安)。

电流的大小和方向对电路的工作状态都有影响,所以在描述一个电流时要同时给出电流的大小和方向。图 1-3-1 代表电路的一部分,其中方框代表某一个二端元件。电流 i 流过该元件时,其实际方向只有两种可能性,或是从 A 到 B,或是从 B 到 A,这时可选定其中任一方向作为电流的参考方向,它不一定是电流的实际方向。一旦指定了电流的参考方向,电流 i 便成为了代数量。一般电路图中用实线箭头代表电流 i 的参考方向,虚线箭头代表电流 i 的实际方向,在图 1-3-1a 中,电流的参考方向与实际方向相同,此时电流 i 为正值,即 $i > 0$;在图 1-3-1b 中,电流的参考方向与实际方向相反,此时电流 i 为负值,即 $i < 0$ 。电流的参考方向除了用实线箭头表示之外,也可以用双下标表示。例如 i_{AB} 代表电流的参考方向是由 A 到 B,如图 1-3-2 所示。

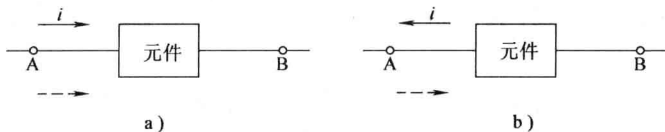


图 1-3-1 电流的参考方向
a) $i > 0$ b) $i < 0$

这样,在设定了电流的参考方向下,就可以根据电流 i 的正负来判断实际方向。在图 1-3-3a 中,设元件电流的参考方向是从 A 指向 B,电流的波形如图 1-3-3b 所示。在前半个周期中,即 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时,由于 $i \geq 0$,所以电流的实际方向与参考方向一致,即此时电流 i 的实际方向由 A 指向 B;在后半个周期中,即 $t_2 \leq t \leq t_3$ 时,由于 $i < 0$,所以电流的实际方向与参考方向相反,即电流 i 的实际方向此时由 B 指向 A。

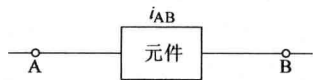


图 1-3-2 电流参考方向的双下标表示法

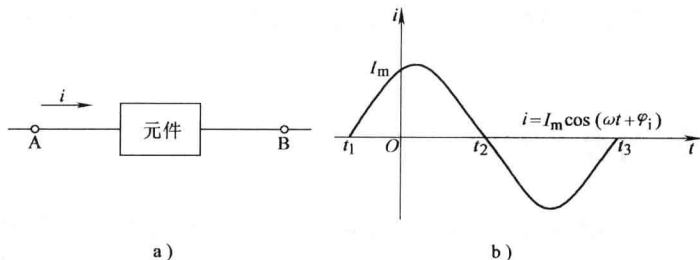


图 1-3-3 电流实际方向的判断

1.3.2 电压的参考方向

在电磁学中已经知道,电荷在电场中受到电场力的作用,当把电荷由电场中的一点移到另一点时,电场对电荷做功。处在电场中的电荷具有电位(势)能,恒定电场中的每一点有一定电位,由此引入重要的物理量——电压与电位。

电场中某两点 A、B 间的电压(或称电压降) U_{AB} 等于将点电荷 q 由 A 点移至 B 点电场力所做的功 W_{AB} 与该电荷 q 的比值,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

在电场中可取一点作为参考点,记为 P,设此点的电位为零。电场中的一点 A 至 P 点的电压 U_{AP} 规定为 A 点的电位,记为 φ_A ,即

$$\varphi_A = U_{AP}$$

在电路问题中,可以任选电路中的一点作为参考点,例如取“地”作为参考点。两点间的电压不随参考点的不同而改变。用电位表示 A、B 两点间的电压,就有

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

显然又有

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = -U_{AB}$$

即两点间沿两个相反方向(从 A 到 B 和从 B 到 A)所得到的电压符号相反。

电位和电压是两个既有联系又有区别的概念。电位是对电路中某点而言的,其值与参考点的选取有关;电压则是对电路中某两点而言的,其值与参考点的选取无关。有时提到电路中某点的电压,实际上是指该点与参考点之间的电压,此时它与该点的电位是一致的。

与电流相似,电路中某两点间的电压的实际方向也有两种可能,为了分析方便,同样可以指定其中任意方向为电压的参考方向,同时把电压看成代数量。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压值为正,反之为负。指定电压参考方向之后,同样可以根据电压数值的正、负来确定电压的实际方向。

电压 $u(t)$ 的参考方向(或参考极性)一般用“+”、“-”极性来加以标示,此时电压的参考方向由“+”指向“-”的方向,即为电位降(potential drop)的方向;电压的参考方向也可以在两点之间的电路旁用箭头表示,箭头的指向即为电压降的方向;电压的参考方向还可以用双下标来表示,如 u_{AB} 表示该电压的参考方向为由 A 指向 B。显然 u_{AB} 与 u_{BA} 是不同的,虽然它们都表示 A、B 两点之间的电压,但是由于参考方向不同,两者之间相差一个负号,即 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

与电流一样,当选定了电压的参考方向后,电压 u 就成为了代数量。若电压的参考方向与实际方向相同,电压值为正值,即 $u > 0$;反之,若电压的参考方向与实际方向相反,电压值为负值,即 $u < 0$ 。这两种情况如图 1-3-4 所示,其中实箭头代表电压参考方向,虚箭头代表电压实际方向。

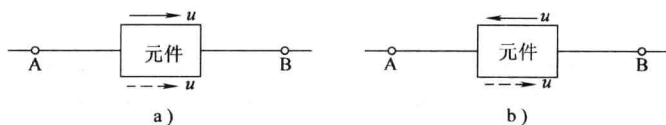


图 1-3-4 电压的参考方向

a) $u > 0$ b) $u < 0$

1.3.3 电压与电流的关联参考方向和非关联参考方向

电流和电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。在对任何具体电路进行实际分析之前,都应该先指定有关电流和电压的参考方向,否则分析将无法进行。原则上,电流和电压的参考方向可以独立地任意指定,参考方向选取的不同,只影响其值的正、负,而不会影响问题的实际结论。但在习惯上,同一段电路的电压和电流的方向通常选取相互一致的参考方向,即电流的参考方向从电压的正参考极性端流入,从负参考极性端流出,如图 1-3-5a 所示,称电压和电流为关联参考方向;若两者参考方向选取不一致,则称为非关联参考方向,如图 1-3-5b 所示。

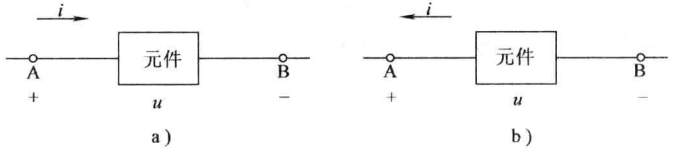


图 1-3-5 电压电流的关联和非关联参考方向

这里需要强调的是,今后在谈到电流和电压的方向时,如无特殊声明,一般指的都是图中标注的参考方向,而不是实际方向。

1.3.4 国际单位制(SI)中变量的单位

在国际单位制(SI)中,电流的单位是 A(安培,简称安),电荷的单位是 C(库仑,简称库),电压和电位的单位是 V(伏特,简称伏)。在处理实际问题时,常常会碰到有时很大或很微小的量值,就需要引入相关的单位来处理。在 SI 单位中规定的用来构成十进倍数和分数单位的词头通常有以下几种:

词头符号	T	G	M	k	m	μ	n	p
词头名称词	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
倍率	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

例如: $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$, $10\text{kV} = 10 \times 10^3\text{V}$ 。

1.4 电功率和能量

除了电压和电流,在电路的分析和计算中,功率和能量的概念和计算也是十分重要的,这是因为电路在工作状态下总伴随着电能和其他形式能量之间的相互转换,同时,电气设备、电路部件在工作时都有着对功率的限制问题,即在使用时要注意其电压和电流是否超过其额定值,过载(超过额定值)会使设备或部件烧毁,反之,欠载则不能使设备正常工作。

1.4.1 电能

电路中伴随着电荷的移动进行着能量的转换。当正电荷在电场力的作用下从元件的正极经过元件运动到负极时,电场力对电荷做正功,正电荷将失去一部分电位能,而这部分能量被元件所吸收。反之,当正电荷从元件的负极经过元件运动到正极时,电场力做负功,正电荷获得一部分电位能,而这部分能量由元件发出。

在电磁学中已经知道:电场中某两点 A、B 间的电压(或称电压降)等于将单位正电荷由 A 点移至 B 点时电场力所做的功,即

$$u = \frac{dW}{dq}$$

可得

$$W = \int u dq$$

则从 t_0 到 t 时间内,元件吸收的电能为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4-1)$$

式中, u 和 i 都是时间的函数,并且是代数量,因此电能 W 也是时间的函数,且是代数量。设 u 和 i 为关联参考方向,当 $W > 0$ 时,元件吸收电能;当 $W < 0$ 时,元件释放电能。

1.4.2 功率

功率是能量对时间的导数,即

$$p(t) = \frac{dW}{dt}$$

由式(1-4-1)可知

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-4-2)$$

式(1-4-2)表明,元件在某瞬间吸收的功率等于该瞬间作用在该元件上的电压和流过该元件的电流的乘积,而与元件本身的特性无关。

当电流单位为 A,电压单位为 V,时间单位为 s 时,电能的单位为 J(焦耳,简称焦),功率的单位为 W(瓦特,简称瓦)。

值得一提的是,实际中电能常用千瓦时(kW·h,俗称度)来表示,且有

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

在具体的电路中,有些元件吸收功率,另一些则发出功率,在应用式(1-4-2)求功率时应注意下列原则:

1) 当元件上电压和电流的参考方向取为关联参考方向时, p 表示元件吸收的功率。当 $p > 0$ 时,表示该元件确实吸收功率;反之,当 $p < 0$ 时,表示该元件发出功率。

2) 当元件上电压和电流的参考方向取为非关联参考方向时, p 表示元件发出的功率。当 $p > 0$ 时,表示该元件确实发出功率;反之,当 $p < 0$ 时,表示该元件吸收功率。

若一个元件吸收功率为 100W,也可以表述为其发出功率为 -100W。同理,一个元件发出功率为 100W,也可以表述为其吸收功率为 -100W,这两种说法是一致的。

例 1-4-1 求图 1-4-1 所示各元件或电路的功率。图中 $u_1 = 4\text{V}$, $i_1 = 0.2\text{A}$; $u_2 = 6\text{V}$, $i_2 = -0.5\text{A}$; $u_3 = 3\text{V}$, $i_3 = 2\text{mA}$ 。

解 对于图 1-4-1a,该元件上的电压和电流为关联参考方向,所以元件吸收的功率为

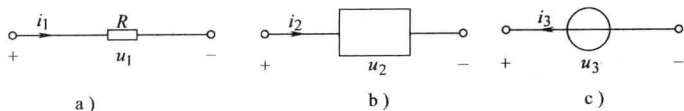


图 1-4-1 例 1-4-1 电路图

$$p = u_1 i_1 = 4 \times 0.2 \text{ W} = 0.8 \text{ W}$$

由于 $p > 0$, 所以该元件确实吸收 0.8 W 的功率。

对于图 1-4-1b, 该元件上的电压和电流为关联参考方向, 所以元件吸收的功率为

$$p = u_2 i_2 = 6 \times (-0.5) \text{ W} = -3 \text{ W}$$

由于 $p < 0$, 所以该元件发出 3 W 的功率。

对于图 1-4-1c, 该元件上的电压和电流为非关联参考方向, 所以元件发出的功率为

$$p = u_3 i_3 = 3 \times (2 \times 10^{-3}) \text{ W} = 6 \times 10^{-3} \text{ W} = 6 \text{ mW}$$

由于 $p > 0$, 所以该元件发出 6 mW 的功率。

例 1-4-2 两个表示为盒 A 和盒 B 的电路如图 1-4-2 所示方式连接, 连线中, 电流 i 的参考方向和电压 u 的参考极性已在图中给出。根据下面规定的数值, 计算连接后的功率, 并说明功率的流向。

(1) $u = 20 \text{ V}, i = 15 \text{ A}$ 。

(2) $u = 100 \text{ V}, i = -5 \text{ A}$ 。

(3) $u = -50 \text{ V}, i = 4 \text{ A}$ 。

(4) $u = -25 \text{ V}, i = -16 \text{ A}$ 。

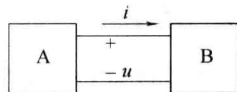


图 1-4-2 例 1-4-2 电路图

解 对于(1): $p = ui = 20 \times 15 \text{ W} = 300 \text{ W}$, 连接后的功率大小为 300 W 。

盒 A 上的电压 u 和电流 i 为非关联参考方向, 所以盒 A 电路释放功率, 即功率从 A 流向 B; 可以验证, 盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 确实为吸收功率。

对于(2): $p = ui = 100 \times (-5) \text{ W} = -500 \text{ W}$, 连接后的功率大小为 500 W 。

盒 A 上的电压 u 和电流 i 为非关联参考方向, 所以盒 A 电路吸收功率, 即功率从 B 流向 A; 可以验证, 盒 B 的电压 u 和电流 i 为关联参考方向, 确实为发出功率。

同理, 对于(3): $p = ui = -50 \times 4 \text{ W} = -200 \text{ W}$, 连接后的功率大小为 200 W , 功率从 B 流向 A; 对于(4): $p = ui = -25 \times (-16) \text{ W} = 400 \text{ W}$, 连接后的功率大小为 400 W , 功率从 A 流向 B。

1.5 电阻元件

电路元件是组成电路的最基本单元, 它通过端子与外部相连接, 元件的特性则通过与端子有关的物理量描述。每种元件都反映某种确定的电磁性质, 具有精确的数学定义和特定的表示符号以及不同于其他元件的独有的特性。

电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端或四端元件等, 此外, 电路元件还可以分为有源元件和无源元件、线性元件和非线性元件、时不变元件和时变元件等。

电路分析中, 二端元件主要有理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想电压源、理想电流源。本节将介绍二端线性电阻元件, 其他元件将在相关的后续章节中陆续讲述。为了方便, 今后将省略“理想”二字, 未加特殊说明, 一切元件均指理想电路元件。

1.5.1 电阻和电导

电阻元件是电路中应用最广的无源二端元件,许多实际的电路器件如电阻器、电热器、灯泡等在一定条件下均可以用二端线性电阻元件来表示(本节以后将二端线性电阻元件简称为电阻元件)。电阻元件的电磁性质就是消耗电能,把电能转化成热能。

电阻元件的精确定义是:元件端子间的电压和电流取关联参考方向下,如图 1-5-1a 所示,在任何时刻它两端的电压和电流关系服从欧姆定律,即有

$$u = Ri \quad (1-5-1)$$

式中, R 称为电阻,是一个常数。当电压的单位为 V,电流的单位为 A 时,电阻 R 的单位是 Ω (欧姆,简称欧)。

令 $G = \frac{1}{R}$, 式(1-5-1)变成

$$i = Gu \quad (1-5-2)$$

式中, G 称为电阻元件的电导。电导的单位是 S (西门子,简称西)。

电阻 R 和电导 G 是反映电阻元件性能而互为倒数的两个参数。如果说电阻反映一个电阻元件对电流的阻力,那么电导就是一个衡量电阻元件导电能力强弱的参数。

电阻元件的图形符号如图 1-5-1a 所示。

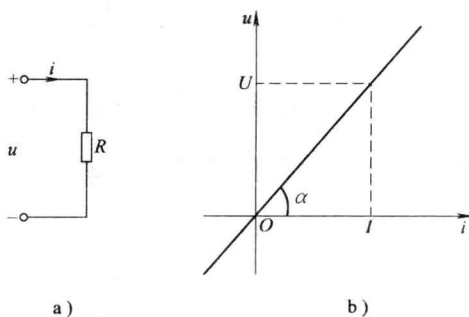


图 1-5-1 电阻元件及其伏安特性

1.5.2 电阻元件的伏安特性

式(1-5-1)表示电阻元件的电压和电流关系(Voltage Current Relation, VCR)为线性关系,即电压和电流成正比例,由于电压和电流的单位是 V 和 A,因此电阻元件的这种特性称为伏安特性。线性电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面上是一条通过原点的直线,如图 1-5-1b 所示。直线的斜率 $\tan\alpha$ 为电阻元件的电阻 R ,即有

$$\tan\alpha = R = \frac{U}{I}$$

由图 1-5-1b 可知,直线上每点的电阻等值,为常数,即电阻 R (或 G) 是与 u 、 i 无关的常数。给定电阻元件的电阻值(或电导值)后,其电流和电压便有了确定的关系,所以用它们作为表征元件性质和作用的参数。

线性电阻元件的伏安特性位于第一、三象限,且关于原点对称,具有双方向性。如果一个线性电阻元件的伏安特性位于第二、四象限,则此元件的电阻值为负值,即 $R < 0$,实际上是一个发出电能的元件,这种元件一般需要专门设计。

当电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线时,称该电阻元件为非线性电阻元件,其电压电流关系一般可以写为

$$u = f(i) \quad [\text{或 } i = h(u)]$$

由于制作材料的电阻率与温度有关,电阻器通过电流后会因发热使电阻率发生改变,因此,严格地说,电阻器带有非线性。但是,在一定条件下,许多实际部件如金属膜电阻器、线绕