



高等院校精品课程系列教材 ● 国家级
江苏省高等学校精品教材

JINGPIN
KECHENG

电路原理

第③版

陈晓平 李长杰 主编



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校精品课程系列教材·国家级

江苏省高等学校精品教材

电 路 原 理

第 3 版

陈晓平 李长杰 主编
傅海军 殷春芳 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定的高等工业学校电路课程教学的基本要求,并充分考虑各院校新的教学计划及电路理论自身特点,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、正弦交流电路的稳态分析、谐振电路、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。为了更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,并将每章内容的基本知识点和重点与难点进行归纳,通过简明扼要提炼各章的知识要点,帮助读者理解电路理论的主要概念、基本理论和基本方法,促进读者对电路理论的掌握。

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。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/陈晓平,李长杰主编.—3版.—北京:机械工业出版社,2018.5

高等院校精品课程系列教材

ISBN 978-7-111-59434-5

I. ①电… II. ①陈… ②李… 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(2018)第050794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

责任校对:刘志文 责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018年5月第3版第1次印刷

184mm×260mm·28印张·686千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-59434-5

定价:69.80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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

江苏大学“电路”课程是国家精品课程及国家精品资源共享课,《电路原理》教材是“电路”课程的主干教材,并于2007年12月获评江苏省高等学校精品教材。该教材正确阐述了电路理论、概念及分析方法,努力做到理论联系实际,符合认知规律,具有启发性,使读者能很好地学习并掌握电路理论知识,为后继课程打好坚实的基础。

本书系《电路原理》的第3版,与第2版对比,在每一章的后面增加了电路理论基本知识点和重点与难点的归纳,其目的是让读者在学习完本章内容之后能清楚了解本章主要针对什么样的知识点而展开的讨论,这些知识要点在实际工程中能解决什么样的问题,运用这些知识点需要什么样的条件,如何使用这些知识要点等等,通过简明扼要提炼各章的知识要点,帮助读者理解电路理论的主要概念、基本理论和基本方法,促进读者对电路理论的掌握。本书删除了第2版中的MATLAB软件及应用、非线性电路、无源滤波器和有源滤波器等内容,这些内容的删减不会影响后继课程教学,合理优化内容体系在有限的授课学时内突出和强化电路理论的主要内容,以满足电气信息类各专业人才培养的整体要求。

合理的知识体系对学生理解一门课程的内容起到十分重要的作用。本书保留了第2版大部分内容与例题,满足电气信息类各专业的培养要求,适合多层次、多类别的电路课程教学,兼顾与先修课程及后续课程的衔接与配合。依据多年教学实践经验,将电路课程知识体系进行了合理的调整与编排,以强化学生对电路基础理论的掌握,形成了先“直流电路分析”后“交流电路分析”、先“基本概念介绍”后“具体电路分析”、先“时域分析”后“复频域分析”的框架结构。该体系兼顾了经典电路理论和现代电路理论,体现了电路理论在不同电路应用的相对独立和相互渗透的特点,有利于学生理解和掌握电路理论的基础核心内容。

本书是在第2版的基础上,参考已出版的同类优秀教材而开展的修订工作。参加本书编写工作的有江苏大学电气信息工程学院陈晓平教授、李长杰副教授、傅海军副教授、殷春芳副教授。本书由陈晓平教授、李长杰副教授承担主编,负责全书的统稿。由于编者的水平有限,书中的不足与错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2018年1月

目 录

前 言

第1章 电路基本概念和电路定律 1

1.1 电路和电路模型 1

1.1.1 实际电路 1

1.1.2 电路模型 2

1.2 电流和电压的参考方向 3

1.2.1 电流的参考方向 3

1.2.2 电压的参考方向 4

1.2.3 电压与电流的关联参考方向和非关联参考方向 5

1.2.4 国际单位制 (SI) 中变量的单位 5

1.3 电功率和能量 6

1.3.1 电能 6

1.3.2 功率 6

1.4 电阻元件 7

1.4.1 电阻和电导 7

1.4.2 电阻元件的伏安特性 8

1.4.3 电阻元件的开路和短路 9

1.4.4 电阻元件的功率和电能 9

1.5 电压源和电流源 9

1.5.1 电压源 10

1.5.2 电流源 10

1.6 受控电源 11

1.7 基尔霍夫定律 13

1.7.1 基尔霍夫电流定律 (KCL) 13

1.7.2 基尔霍夫电压定律 (KVL) 15

1.8 运算放大器 17

1.9 本章小结 19

1.9.1 本章基本知识点 19

1.9.2 本章重点与难点 22

1.10 习题 23

第2章 电阻电路的等效变换 28

2.1 简单电阻电路的等效变换 28

2.1.1 电路等效变换的概念 28

2.1.2 电阻的串联 29

2.1.3 电阻的并联 29

2.1.4 电阻的混联 31

2.2 电阻的星形联结和三角形联结的等效变换 33

2.2.1 星形联结与三角形联结 33

2.2.2 星形—三角形联结之间的等效变换 34

2.3 电源的等效变换 37

2.3.1 电压源、电流源的串联和并联 37

2.3.2 实际电源的两种模型及其等效变换 39

2.4 本章小结 41

2.4.1 本章基本知识点 41

2.4.2 本章重点与难点 43

2.5 习题 44

第3章 电阻电路的分析方法 48

3.1 电路的图 48

3.1.1 电路的图的基本概念 48

3.1.2 电路的图的有关名词 49

3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数 51

3.2.1 KCL 的独立方程数 51

3.2.2 KVL 的独立方程数 52

3.3 支路电流法 54

3.3.1 支路法 (2b 法) 54

3.3.2 支路电流法 55

3.4 回路电流法 58

3.4.1 网孔电流法 58

3.4.2 回路电流法 61

3.5 结点电压法 65

3.6 含理想运算放大器电路的分析 70

3.7 本章小结 72

3.7.1 本章基本知识点 72

3.7.2 本章重点与难点	74	5.6.2 冲激响应	159
3.8 习题	75	5.7 二阶电路的动态响应	163
第4章 电路定理	80	5.7.1 二阶电路的零输入响应	163
4.1 叠加定理和齐次定理	80	5.7.2 二阶电路的零状态响应和 全响应	171
4.1.1 叠加定理	80	5.8 本章小结	175
4.1.2 齐次定理	84	5.8.1 本章基本知识点	175
4.2 替代定理	85	5.8.2 本章重点与难点	179
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	88	5.9 习题	179
4.3.1 戴维宁定理	88	第6章 正弦稳态电路分析	187
4.3.2 诺顿定理	95	6.1 正弦量及其相量表示	187
4.4 最大功率传输定理	97	6.1.1 正弦量	187
4.4.1 负载获得最大功率的条件	97	6.1.2 正弦量的相量表示	190
4.4.2 负载获得最大功率的计算	98	6.2 电路定律及电路元件的相量形式	197
4.4.3 传输效率	101	6.2.1 基尔霍夫定律的相量形式	197
4.5 特勒根定理	102	6.2.2 电阻元件的相量模型	197
4.6 互易定理	104	6.2.3 电感元件的相量模型	198
4.7 对偶原理	108	6.2.4 电容元件的相量模型	199
4.8 本章小结	110	6.3 复阻抗与复导纳	202
4.8.1 本章基本知识点	110	6.3.1 复阻抗	202
4.8.2 本章重点与难点	112	6.3.2 复导纳	203
4.9 习题	114	6.3.3 复阻抗与复导纳间的等效变换	205
第5章 动态电路的时域分析	120	6.3.4 复阻抗(复导纳)的串、并联	206
5.1 电容元件和电感元件	120	6.4 正弦稳态电路的分析	207
5.1.1 电容元件	120	6.5 正弦稳态电路的功率	214
5.1.2 电感元件	125	6.5.1 正弦稳态一端口电路的功率	214
5.1.3 电容与电感的等效变换	129	6.5.2 复功率	220
5.2 换路定律和初始值的确定	131	6.5.3 功率因数的提高	222
5.2.1 换路定律	131	6.5.4 最大功率传输	225
5.2.2 初始值的确定	132	6.6 本章小结	227
5.3 一阶电路的动态响应	133	6.6.1 本章基本知识点	227
5.3.1 一阶电路的零输入响应	134	6.6.2 本章重点与难点	233
5.3.2 一阶电路的零状态响应	140	6.7 习题	233
5.3.3 一阶电路的全响应	145	第7章 谐振电路	240
5.4 一阶电路的三要素法	147	7.1 串联谐振电路	240
5.5 一阶电路的阶跃响应	152	7.2 并联谐振电路	251
5.5.1 阶跃函数	152	7.2.1 简单RLC并联电路	251
5.5.2 阶跃响应	153	7.2.2 电感线圈与电容并联电路	252
5.6 一阶电路的冲激响应	157	7.3 串并联谐振电路	257
5.6.1 冲激函数	157		

7.4 本章小结	260	9.3 不对称三相电路的分析	298
7.4.1 本章基本知识点	260	9.4 三相电路的功率及测量	301
7.4.2 本章重点与难点	262	9.4.1 三相电路的功率	301
7.5 习题	262	9.4.2 三相电路的瞬时功率	302
第8章 互感电路	265	9.4.3 三相电路功率的测量	303
8.1 互感电路的基本概念	265	9.5 本章小结	306
8.1.1 互感现象	265	9.5.1 本章基本知识点	306
8.1.2 耦合电感的伏安关系	266	9.5.2 本章重点与难点	310
8.1.3 互感线圈的同名端及耦合电感的电路模型	267	9.6 习题	310
8.1.4 耦合因数	269	第10章 非正弦周期电流电路	315
8.2 互感电路的计算	270	10.1 非正弦周期信号的谐波分析	315
8.2.1 耦合电感的串联	270	10.1.1 非正弦周期信号	315
8.2.2 耦合电感的并联	272	10.1.2 周期函数分解为傅里叶级数	316
8.2.3 耦合电感的三端连接	273	10.1.3 非正弦周期信号的频谱	319
8.3 空心变压器	274	10.1.4 傅里叶级数与波形对称性的关系	319
8.3.1 空心变压器的电路模型及方程	274	10.2 非正弦周期信号的有效值和平均值	322
8.3.2 空心变压器的等效电路及引入阻抗	275	10.2.1 非正弦周期电流和电压的有效值	322
8.4 理想变压器	277	10.2.2 非正弦周期电流和电压的平均值	323
8.4.1 理想变压器的电路模型及方程	277	10.3 非正弦周期电流电路的功率	324
8.4.2 理想变压器的阻抗变换作用	278	10.4 非正弦周期电流电路的计算	325
8.5 本章小结	280	10.4.1 非正弦周期信号激励时电路的响应	325
8.5.1 本章基本知识点	280	10.4.2 不同频率正弦电源共同作用下电路的分析	328
8.5.2 本章重点与难点	283	10.4.3 滤波器的基本概念	330
8.6 习题	284	10.5 本章小结	331
第9章 三相电路	288	10.5.1 本章基本知识点	331
9.1 三相电路的基本概念	288	10.5.2 本章重点与难点	333
9.1.1 对称三相电源	288	10.6 习题	334
9.1.2 对称三相电路的连接方式	290	第11章 动态电路的复频域分析	337
9.1.3 线电压(电流)与相电压(电流)之间的关系	292	11.1 拉普拉斯变换及其基本性质	337
9.2 对称三相电路的计算	293	11.1.1 拉普拉斯变换的定义	337
9.2.1 星形—星形系统	293	11.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	339
9.2.2 星形—三角形系统	295	11.2 拉普拉斯反变换的部分分式展开	344
9.2.3 三角形—星形系统	296	11.2.1 $F(s)$ 的极点均为单极点的情况	345
9.2.4 三角形—三角形系统	296		
9.2.5 复杂的对称三相电路	296		

11.2.2 $F(s)$ 有复数极点的情况	347	12.5 割集电压方程的矩阵形式	393
11.2.3 $F(s)$ 有多重极点的情况	348	12.6 状态方程	394
11.3 动态电路的复频域模型	349	12.6.1 状态变量与状态方程	394
11.3.1 基尔霍夫定律的复频域形式	349	12.6.2 直观法列写状态方程	395
11.3.2 电阻元件的复频域形式	350	12.6.3 系统法列写状态方程	396
11.3.3 电感元件的复频域形式	350	12.7 本章小结	398
11.3.4 电容元件的复频域形式	350	12.7.1 本章基本知识点	398
11.3.5 耦合电感的复频域形式	351	12.7.2 本章重点与难点	400
11.3.6 RLC 元件串联的复频域形式	352	12.8 习题	404
11.4 动态电路的复频域分析	352		
11.5 网络函数	356	第13章 二端口网络	409
11.5.1 网络函数的定义	356	13.1 二端口网络及其参数方程	409
11.5.2 网络函数的极点和零点	359	13.1.1 Y 参数 (短路导纳参数)	410
11.5.3 极点和零点与冲激响应	360	13.1.2 Z 参数 (开路阻抗参数)	413
11.5.4 极点和零点与频率响应	363	13.1.3 T 参数 (传输参数)	415
11.6 本章小结	367	13.1.4 H 参数 (混合参数)	417
11.6.1 本章基本知识点	367	13.2 二端口网络的等效电路	420
11.6.2 本章重点与难点	371	13.2.1 线性无源二端口网络的等效 电路	420
11.7 习题	372	13.2.2 一般二端口网络的等效电路	422
第12章 电路方程的矩阵形式	377	13.3 二端口网络的网络函数	423
12.1 割集	377	13.3.1 策动点阻抗	424
12.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	378	13.3.2 转移函数	425
12.2.1 关联矩阵	378	13.4 二端口网络的连接	426
12.2.2 回路矩阵	380	13.4.1 二端口网络的级联	427
12.2.3 割集矩阵	382	13.4.2 二端口网络的并联	428
12.3 回路电流方程的矩阵形式	384	13.4.3 二端口网络的串联	429
12.3.1 电路中不含互感和受控源的情况	384	13.5 二端口网络的实例	430
12.3.2 电路中含有互感的情况	385	13.5.1 回转器	430
12.3.3 电路中含有受控源的情况	386	13.5.2 负阻抗变换器	431
12.4 结点电压方程的矩阵形式	388	13.6 本章小结	432
12.4.1 电路中不含互感和受控源的情况	388	13.6.1 本章基本知识点	432
12.4.2 电路中含有互感的情况	390	13.6.2 本章重点与难点	435
12.4.3 电路中含有受控源的情况	391	13.7 习题	436
		参考文献	440

第1章 电路基本概念和电路定律

电路的应用十分广泛,电路理论已经成为一门基础学科,学习电路课程的主要任务是掌握电路的基本规律并学会分析电路。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发,重点讨论了电路和电路模型,电压、电流的参考方向,电功率和能量,理想电阻元件、理想电流源、理想电压源、受控源及运算放大器的概念和特性;还重点讲述了由于电路元件的相互连接对电路中电流、电压分布所形成的约束,即基尔霍夫定律。这些电路基本概念及电路定律是研究一切电路的电磁现象和进行定量计算的依据和出发点,在后续章节中还将陆续介绍其使用方法。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 实际电路

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。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,而由这些元器件或设备通过连接构成的实际电路也遍布生活的各个领域。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,某些芯片虽然只有指甲盖大小,却是由成千上万个晶体管相互连接集成的一个复杂的电路或系统。前述的电路无论尺寸大小,其内部结构都是比较复杂的,也有些实际电路非常简单,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其进行传输和分配,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(如语音信号、图像信号等)的传输和处理。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在日常生活中更是举不胜举。

1.1.2 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，用电压（电荷）、电流（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引入能客观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 1-1-1a 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 1-1-1b 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。

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，同一实际元件可能会采用不同的模型；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。模型建得恰当，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。模型建得太复杂就会造成分析和计算的困难，太简单则不足以反应所求解的实际情况。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。

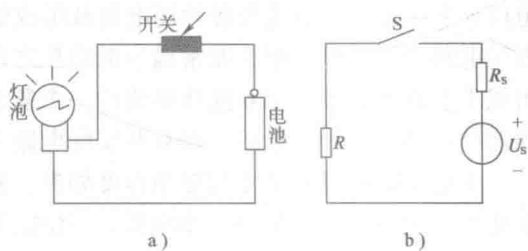


图 1-1-1 实际电路与电路模型

a) 实际电路 b) 电路模型

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。

1.2 电流和电压的参考方向

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,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。

1.2.1 电流的参考方向

电荷的有规则运动形成了电流。电流的正方向是正电荷流动的方向。科学家发现电流本质上是电子的定向运动,而电子是带负电荷的。因此,电流的正方向是与电子运动的方向相反的。电流定义为 dt 时间内通过电路横截面的电荷量 dq ,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

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1-2-1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1-2-1a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1-2-1b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1-2-2所示。

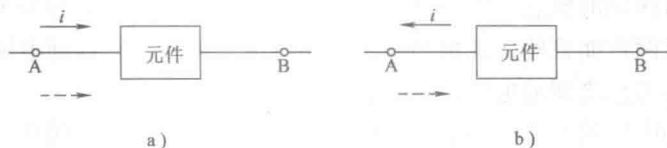


图 1-2-1 电流的参考方向
a) $i > 0$ b) $i < 0$



图 1-2-2 电流参考方向的双下标表示法

这样,在设定了电流的参考方向后,就可以根据电流 i 的正负来判断实际方向。在图 1-2-3a 中,设元件电流的参考方向是从 A 指向 B,电流的波形如图 1-2-3b 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。

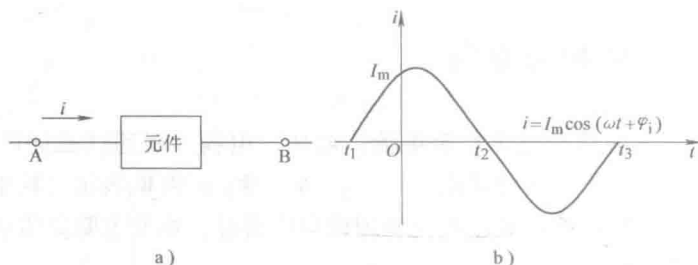


图 1-2-3 电流实际方向的判断

1.2.2 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 点电场力所作的功 W_{AB} 与该电荷 q 的比值,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-2-2)$$

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参考方向也有两种可能,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。

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“-”,即为电位降的方向;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1-2-4所示,

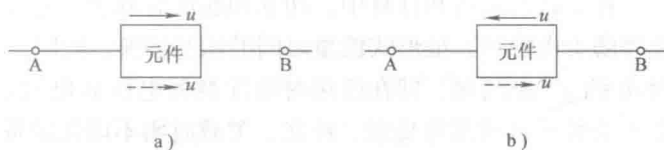


图 1-2-4 电压的参考方向

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

其中实线箭头代表电压参考方向,虚线箭头代表电压实际方向。

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。

1.2.3 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1-2-5a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1-2-5b所示。

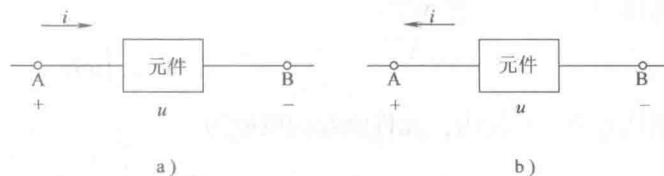


图 1-2-5 电压电流的关联和非关联参考方向

a) 关联参考方向 b) 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。

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

1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,功率和能量的概念是十分重要的,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,欠载时则不能使设备正常工作。

1.3.1 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 间的电压等于将单位正电荷由 A 点移至 B 点时电场力所作的功,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

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-3-1)$$

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。

1.3.2 功率

功率是能量对时间的导数,即

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

由式(1-3-1)可知

$$p(t) = u(t) i(t) \quad (1-3-2)$$

式(1-3-2)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($\text{kW} \cdot \text{h}$, 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(1-3-2)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 100 W ,也可以表述为其发出功率为 -100 W 。同理,一个元件发出功率为 100 W ,也可以表述为其吸收功率为 -100 W ,这两种说法是一致的。

例 1-3-1 求图 1-3-1 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 1-3-1a,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

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

由于 $p > 0$,所以该元件确实吸收 0.8 W 的功率。

对于图 1-3-1b,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 1-3-1c,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。

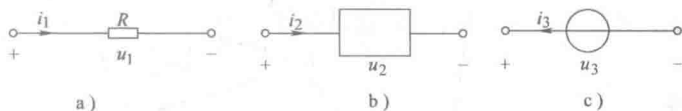


图 1-3-1 例 1-3-1 电路图

1.4 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。每种元件都反应某种确定的电磁性质,都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。

1.4.1 电阻和电导

电阻元件是电路中应用最广的无源二端元件,许多实际的电路元件如电阻器、电热器、灯泡等在一定条件下均可以用二端电阻元件来表示。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 1-4-1a 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

$$u = Ri \quad (1-4-1)$$

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）。电阻元件的图形符号见图 1-4-1a。

令 $G = \frac{1}{R}$ ，式 (1-4-1) 变成

$$i = Gu \quad (1-4-2)$$

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。

值得强调的是，如果电阻（电导）上的电压、电流为非关联参考方向，如图 1-4-2 所示，则欧姆定律公式中应冠以负号，即

$$u = -Ri \quad (1-4-3)$$

$$\text{或} \quad i = -Gu \quad (1-4-4)$$

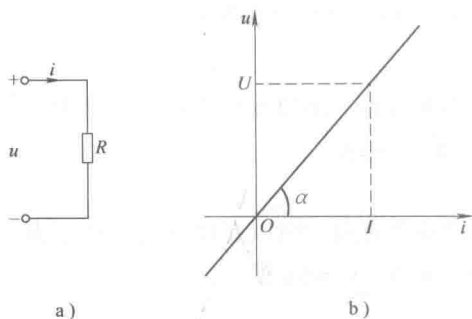


图 1-4-1 电阻元件及其伏安特性

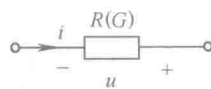


图 1-4-2 非关联参考方向下的欧姆定律

1.4.2 电阻元件的伏安特性

式 (1-4-1) 表示电阻元件的电压和电流关系（Voltage Current Relation，记为 VCR），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 1-4-1b 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 1-4-1b 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。还有另一类非线性电阻元件，它们

的伏安特性不是直线而是曲线，如半导体二极管的伏安特性曲线。

本节以后将二端线性电阻元件简称为电阻元件。

1.4.3 电阻元件的开路和短路

如果当一个电阻元件两端的电压无论为何值，流过它的电流恒为零值时，称电阻元件“开路”。开路时电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面上与电压轴重合，相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$ ，如图 1-4-3a 所示。如果电路中一对端子 1-1' 之间呈断开状态，如图 1-4-3b 所示，这相当于 1-1' 之间接有 $R = \infty$ 的电阻，此时称 1-1' 处于“开路”。

如果当流过一个电阻元件的电流无论为何值，它两端的电压恒为零值时，称电阻元件“短路”。短路时电阻元件的伏安特性在 $u-i$ 平面上与电流轴重合，它相当于 $R = 0$ 或 $G = \infty$ ，如图 1-4-4a 所示。如果电路中一对端子 1-1' 之间用理想导线连接起来，如图 1-4-4b 所示，这相当于 1-1' 之间接有 $R = 0$ 的电阻，此时称 1-1' 处于“短路”。

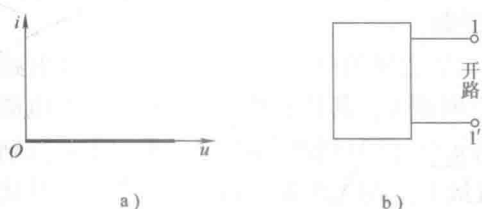


图 1-4-3 电阻元件开路的伏安特性及电路的开路状态

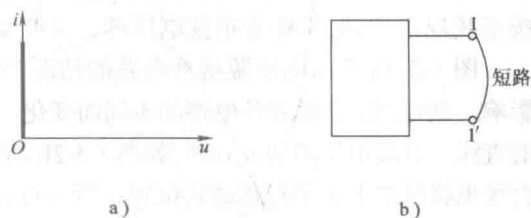


图 1-4-4 电阻元件短路的伏安特性及电路的短路状态

1.4.4 电阻元件的功率和电能

当电阻元件的电压 u 和电流 i 取关联参考方向时，电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-4-5)$$

式中， R 和 G 都是正实常数，所以功率 p 总是大于或等于零的。故电阻元件是一种无源元件和耗能元件。

电阻元件从 t_0 到 t 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi) d\xi$$

电阻元件把吸收的电能一般转化成热能消耗掉。

为了叙述方便，后面将把线性电阻元件简称为电阻，这样，“电阻”这个术语以及它相应的符号“ R ”，既用来表示一个电阻元件，也用来表示该元件的参数。

1.5 电压源和电流源

一般的电路中都有电源，电源可以在电路中产生电流，为电路提供电能。实际的电源有许多种，如蓄电池、发电机、光电池等。在电路理论中，根据电源元件的不同特性可以得到