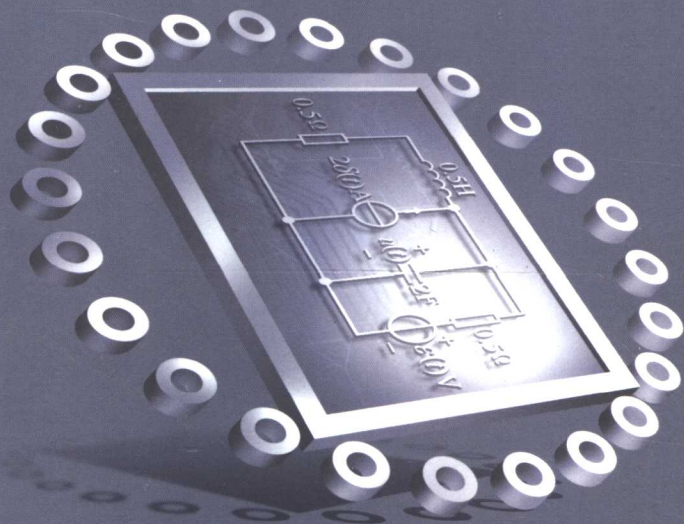


江苏省高等教育精品教材重点立项项目



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电路原理

孙玉坤 陈晓平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



江苏省高等教育精品教材重点立项项目
21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电 路 原 理

孙玉坤 陈晓平 主编
刘西健 李长杰 傅海军 温军玲 殷春芳 参编
黄锦安 主审



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,并充分考虑各院校新的教学计划及现代科技发展趋势,为电子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、非线性电路、利用 MATLAB 进行电路计算、基本 OrCAD/PSpice 的电路分析。

本书基本概念讲述清楚,易于读者接受理解;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,并将先进的计算软件 MATLAB、OrCAD/PSpice 应用于电路的计算分析,这对掌握现代电路分析方法和工具的使用是非常有益的。

本书可作为普通高等学校电子电气信息类各专业的电路、电路分析基础等课程的教材,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/孙玉坤,陈晓平主编. —北京:机械工业出版社, 2006.8

(21 世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 7-111-19657-0

I. 电… II. ①孙…②陈… III. 电路理论-高等学校-教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084481 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:时 静 陈振虹 赵丽欣

版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云 张莉娟

责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·27.75 印张·686 千字

0 001—5 000 册

定价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步,整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展,社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中,电气信息类(Electrical and Information Science and Technology)包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等专业。这些专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时,也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下,只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去,才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要,机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的,期间,与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨,旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程,定位准确,注重理论与实践、教学与教辅的结合,在语言描述上力求准确、清晰,适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

“电路原理”是高等工科院校电气信息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的好坏，直接影响后续专业课程的学习，因此，引导学生掌握电路原理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编写的，在内容选材上应定于“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，并注意了与“高等数学”、“大学物理”等先修课程及“信号与系统”、“电子技术”等后续课程的分工、衔接和配合，做到对先修课程巩固加深和为后续课程打好基础。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。在结构安排上注意逻辑性和原理性。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。时代在前进，科学技术在发展，为了使学生在大学学习阶段就基本学会现代电路分析中先进的分析方法并会使用现代的工具软件，本教材在两个附录中分别介绍了MATLAB、OrCAD/PSpice在电路理论中的计算与分析，进一步拓宽了学生思路，满足了现代电路分析、设计工作的需要。

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，在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，以适应不同的教学要求和教学计划便于对本书内容进行剪裁。

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。参加本书编写的有江苏大学电气信息工程学院孙玉坤（第7、8、9章）、陈晓平（第4、5章）、李长杰（第3章、附录A、附录B）、傅海军（第11、14章）、温军玲（第12、13章）、殷春芳（第1、2章）以及长安大学电气工程系刘西健（第6、10章），其中附录C由对应章节作者共同完成。本书由孙玉坤、陈晓平教授担承主编，负责全书的统稿。南京理工大学黄锦安教授仔细审阅了全书的初稿，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不足与错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

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	13
1.7.2 基尔霍夫电压定律	15
1.8 运算放大器	17
1.9 习题	18

第 2 章 电阻电路的等效变换 23

2.1 简单电阻电路的等效变换	23
2.1.1 电路等效变换的概念	23
2.1.2 电阻的串联	24
2.1.3 电阻的并联	24

2.1.4 电阻的混联	26
2.2 电阻的星形联结和三角形联结的等效变换	28
2.2.1 星形联结与三角形联结	28
2.2.2 星形—三角形联结之间的等效变换	29
2.3 电源的等效变换	32
2.3.1 电压源、电流源的串联和并联	32
2.3.2 实际电源的两种模型及其等效变换	34
2.4 习题	36

第 3 章 电阻电路的分析方法 40

3.1 电路的图	40
3.1.1 电路的图的基本概念	40
3.1.2 电路的图的有关名词	41
3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数	43
3.2.1 KCL 的独立方程数	43
3.2.2 KVL 的独立方程数	44
3.3 支路电流法	46
3.3.1 支路法 (2b 法)	46
3.3.2 支路电流法	47
3.4 回路电流法	50
3.4.1 网孔电流法	50
3.4.2 回路电流法	53
3.5 结点电压法	57
3.6 含理想运算放大器电路的分析	62
3.7 习题	64

第 4 章 电路定理 70

4.1 叠加定理和齐次定理	70
4.1.1 叠加定理	70
4.1.2 齐次定理	74
4.2 替代定理	75
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	78
4.3.1 戴维宁定理	78

4.3.2 诺顿定理	85	6.2.1 电阻元件中电压与电流的 相量形式	176
4.4 最大功率传输定理	87	6.2.2 电感元件中电压与电流的 相量形式	177
4.4.1 负载获得最大功率的条件	87	6.2.3 电容元件中电压与电流的 相量形式	178
4.4.2 负载获得最大功率的计算	88	6.2.4 基尔霍夫定律的相量形式	180
4.4.3 传输效率	90	6.3 阻抗和导纳	182
4.5 特勒根定理	91	6.3.1 阻抗与导纳	182
4.6 互易定理	94	6.3.2 阻抗及导纳的串并联	186
4.7 对偶原理	97	6.4 正弦稳态电路的分析	192
4.8 习题	99	6.5 正弦稳态电路的功率	195
第 5 章 动态电路的时域分析	105	6.5.1 瞬时功率	195
5.1 电容元件和电感元件	105	6.5.2 有功功率	196
5.1.1 电容元件	105	6.5.3 无功功率	196
5.1.2 电感元件	110	6.5.4 视在功率	199
5.1.3 电容及电感的等效变换	114	6.5.5 功率因数的提高	200
5.2 换路定律和初始值的确定	116	6.5.6 复功率	203
5.2.1 换路定律	116	6.5.7 最大功率传输	205
5.2.2 初始值的确定	117	6.6 习题	208
5.3 一阶电路的动态响应	118	第 7 章 谐振电路	215
5.3.1 一阶电路的零输入响应	119	7.1 串联谐振电路	215
5.3.2 一阶电路的零状态响应	125	7.2 并联谐振电路	225
5.3.3 一阶电路的全响应	130	7.2.1 简单 RLC 并联电路	226
5.4 一阶电路的三要素法	132	7.2.2 电感线圈与电容并联电路	227
5.5 一阶电路的阶跃响应	137	7.3 串并联谐振电路	231
5.5.1 阶跃函数	137	7.4 习题	235
5.5.2 阶跃响应	139	第 8 章 互感电路	237
5.6 一阶电路的冲激响应	142	8.1 互感电路的基本概念	237
5.6.1 冲激函数	142	8.1.1 互感现象	237
5.6.2 冲激响应	144	8.1.2 耦合电感的伏安关系	238
5.7 二阶电路的动态响应	148	8.1.3 互感线圈的同名端及耦合电感 的电路模型	239
5.7.1 二阶电路的零输入响应	148	8.1.4 耦合因数	241
5.7.2 二阶电路的零状态响应和 全响应	156	8.2 互感电路的计算	241
5.8 习题	160	8.2.1 耦合电感的串联	242
第 6 章 正弦交流电路的稳态分析	167	8.2.2 耦合电感的并联	243
6.1 正弦量及其相量表示	167	8.2.3 耦合电感的三端连接	244
6.1.1 正弦量的三要素	167	8.3 空心变压器	246
6.1.2 相位差	168	8.3.1 空心变压器的电路模型及 方程	246
6.1.3 有效值	169		
6.1.4 复数的运算	171		
6.1.5 正弦交流电的相量表示	173		
6.2 电路定律的相量形式	176		

8.3.2 空心变压器的等效电路及引入阻抗	247	10.4.2 不同频率正弦电源共同作用下电路的分析	287
8.4 理想变压器	249	10.4.3 滤波器的基本概念	289
8.4.1 理想变压器的电路模型及方程	249	10.5 习题	289
8.4.2 理想变压器的阻抗变换作用	250		
8.5 习题	251		
第 9 章 三相电路	255	第 11 章 动态电路的复频域分析	293
9.1 三相电路的基本概念	255	11.1 拉普拉斯变换及其基本性质	293
9.1.1 对称三相电源	255	11.1.1 拉普拉斯变换的定义	293
9.1.2 对称三相电路的连接方式	257	11.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	295
9.1.3 线电压(电流)与相电压(电流)之间的关系	258	11.2 拉普拉斯反变换的部分分式展开	300
9.2 对称三相电路的计算	259	11.2.1 当 $F(s)$ 的极点均为单极点时	301
9.2.1 星形—星形系统	259	11.2.2 $F(s)$ 有复数极点的情况	302
9.2.2 星形—三角形系统	261	11.2.3 $F(s)$ 有多重极点的情况	303
9.2.3 三角形—星形系统	262	11.3 动态电路的复频域模型	305
9.2.4 三角形—三角形系统	262	11.3.1 基尔霍夫定律的复频域形式	305
9.2.5 复杂的对称三相电路	262	11.3.2 电阻元件的复频域形式	305
9.3 不对称三相电路的分析	264	11.3.3 电感元件的复频域形式	305
9.4 三相电路的功率及测量	265	11.3.4 电容元件的复频域形式	306
9.4.1 三相电路的功率	265	11.3.5 耦合电感的复频域形式	306
9.4.2 三相电路的瞬时功率	266	11.3.6 RLC 元件串联的复频域形式	307
9.4.3 三相电路功率的测量	267	11.4 动态电路的复频域分析	307
9.5 习题	270	11.5 网络函数	311
第 10 章 非正弦周期电流电路	274	11.5.1 网络函数的定义	311
10.1 非正弦周期信号的谐波分析	274	11.5.2 网络函数的极点和零点	314
10.1.1 非正弦周期信号	274	11.5.3 极点和零点与冲激响应	316
10.1.2 周期函数分解为傅里叶级数	275	11.5.4 极点和零点与频率响应	318
10.1.3 非正弦周期信号的频谱	278	11.6 习题	321
10.1.4 傅里叶级数与波形对称性的关系	278		
10.2 非正弦周期信号的有效值和平均值	281	第 12 章 电路方程的矩阵形式	326
10.2.1 非正弦周期电流和电压的有效值	281	12.1 割集	326
10.2.2 非正弦周期电流和电压的平均值	282	12.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	327
10.3 非正弦周期电流电路的功率	283	12.2.1 关联矩阵	327
10.4 非正弦周期电流电路的计算	284	12.2.2 回路矩阵	329
10.4.1 非正弦周期信号激励时电路的响应	284	12.2.3 割集矩阵	331
		12.3 回路电流方程的矩阵形式	332
		12.3.1 电路中不含电感和受控源的情况	333
		12.3.2 电路中含有互感的情况	334
		12.3.3 电路中含有受控源的情况	335
		12.4 结点电压方程的矩阵形式	337
		12.4.1 电路中不含互感和受控源的情况	337
		12.4.2 电路中含有互感的情况	339

12.4.3 电路中含有受控源的情况	339	13.4.3 二端口网络的串联	372
12.5 割集电压方程的矩阵形式	341	13.5 二端口网络的实例	373
12.6 状态方程	343	13.5.1 回转器	373
12.6.1 状态变量与状态方程	343	13.5.2 负阻抗变换器	374
12.6.2 直观法列写状态方程	344	13.6 习题	375
12.6.3 系统法列写状态方程	345		
12.7 习题	347	第 14 章 非线性电路	380
第 13 章 二端口网络	351	14.1 非线性元件	380
13.1 二端口网络及其参数方程	351	14.1.1 非线性电阻	380
13.1.1 Y 参数 (短路导纳参数)	352	14.1.2 非线性电容	383
13.1.2 Z 参数 (阻抗参数)	355	14.1.3 非线性电感	384
13.1.3 T 参数 (传输参数)	357	14.2 非线性电阻电路分析	385
13.1.4 H 参数 (混合参数)	360	14.2.1 含一个非线性元件的电路	386
13.2 二端口网络的等效电路	362	14.2.2 图解法	386
13.2.1 线性无源二端口网络的等效 电路	362	14.2.3 小信号分析法	389
13.2.2 一般二端口网络的等效电路	364	14.2.4 分段线性化法	391
13.3 二端口网络的网络函数	366	14.3 习题	393
13.3.1 策动点阻抗	366	附录	395
13.3.2 转移函数	367	附录 A 利用 MATLAB 进行电路计算	395
13.4 二端口网络的连接	369	附录 B 基于 OrCAD/PSpice 的电路分析	406
13.4.1 二端口网络的级联	369	附录 C 部分习题参考答案	418
13.4.2 二端口网络的并联	370	参考文献	434

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本学科，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，还将在后续章节中陆续进行介绍其使用方法。

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。

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（其和电信号的发生器，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器件的端子电流和端子间的电压, 一般不考虑器件内部发生的物理过程, 因此可以根据各元器件端部主要物理量间的约束关系对电路中的实际元器件进行理想化处理, 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器件加以连接, 就可以建立实际电路的模型。通常将由理想元器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器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器件; 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、电池等器件。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。如果构成电路的器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器件。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器件就是建立其模型, 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。有的器件或系统在建模时需要考虑其工作条件, 工作条件不同, 同一实际器件可能会采用不同的模型; 有的器件或系统在建模时则需要深入分析其中的物理现象。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需求解的实际情况。建模问题需要运用有关的知识专门研究, 这

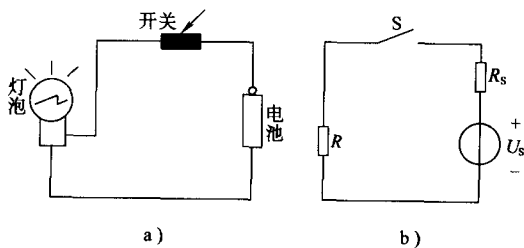


图 1-1-1 实际电路与电路模型

a) 实际电路 b) 电路模型

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。

1.2 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

电荷的有规则运动就形成了电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向，设 dt 时间内通过电路横截面的电荷量为 dq ，则有

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

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。

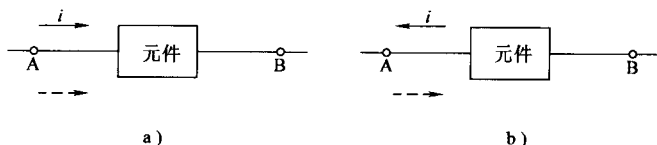


图 1-2-1 电流的参考方向

a) $i > 0$ b) $i < 0$

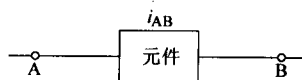


图 1-2-2 电流参考方向的双下标表示法

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。

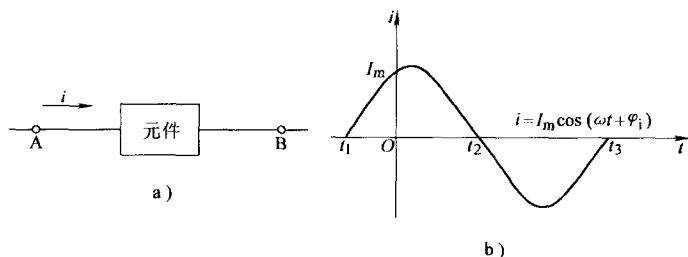


图 1-2-3 电流实际方向的判断

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 $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

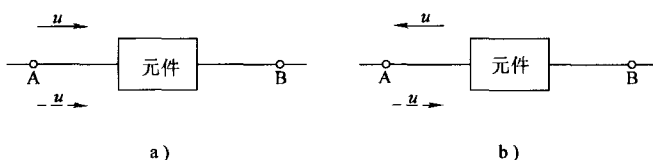


图 1-2-4 电压的参考方向

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

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 $u < 0$ 。这两种情况见图 1-2-4，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；

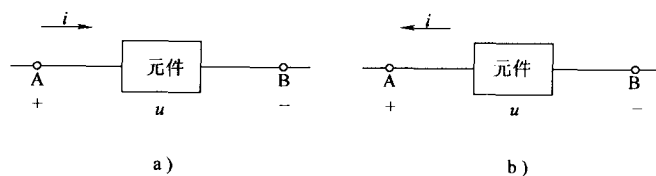


图 1-2-5 电压电流的关联和非关联参考方向

a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

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。

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常用的有以下几种：

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

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

上式表明，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 100W , 也可以表述为其发出功率 -100W 。同理, 一个元件发出功率为 100W , 也可以表述为其吸收功率 -100W , 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 0.8W 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 3W 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 6mW 的功率。

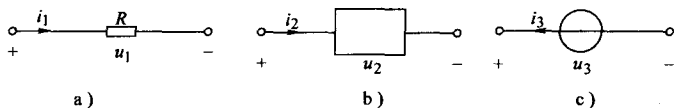


图 1-3-1 例 1-3-1 电路图

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, 许多实际的电路器件如电阻器、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

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

或

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

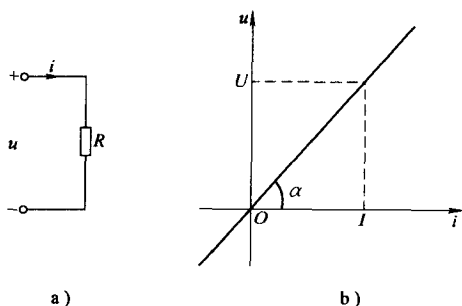


图 1-4-1 电阻元件及其伏安特性

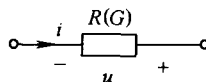


图 1-4-2 非关联参考方向下的欧姆定律

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。