

电路原理

吴建华 李华 编著



21世纪高等院校电子信息
与电气学科系列规划教材

电路原理

吴建华 李华 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书为机械工业出版社 21 世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材, 内容符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会于 2004 年制定的“电路原理”教学大纲的要求。本书在全面介绍电路原理知识的基础上, 适当引入了有实际应用背景的电路问题, 以及与后续课程有关的电路问题的分析。

本书主要内容包括: 电路模型和基本定律, 线性电阻网络分析, 正弦稳态电路分析, 三相电路, 互感电路与谐振电路, 周期性非正弦稳态电路分析, 线性动态网络时域分析和复频域分析, 双口网络, 非线性电路, 分布参数电路及均匀传输线, 磁路。附录包括网络图论和矩阵形式网络方程, OrCAD/PSpice 在电路分析中的应用。书后还附有习题参考答案。

本书可供高等学校电子信息与电气类(强、弱电)各专业师生作为“电路原理”、“电工理论基础”课程的教材使用, 也可供有关科技人员参考。

版权所有, 侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/吴建华, 李华编著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 7
(21 世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-26126-1

I. 电… II. ①吴… ②李… 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(2009)第 009357 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 曾 珊

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.5 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-26126-1

定价: 39.80 元

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换
本社购书热线: (010)68326294

本书是按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电路原理”教学大纲的要求编写的，适合作为普通高等学校电子信息与电气学科各专业“电路原理”或“电工理论基础”课程的教材。

本书以提高师生教与学的有效性，培养学生分析问题与解决问题的能力为目标编写而成。

在教材内容的选取上，本书合理安排经典内容、传统内容与新内容的关系。对于经典内容，本书以电路的基本概念、基本理论和基本分析方法及应用为主线，贯穿全书；在传统内容的编排上，本书删繁就简，力求突出理论与方法中所体现的从“物理现象”到“数学模型及算法”，再到“工程应用”的电路问题的解决过程；本书还适当增加了新内容，如有源滤波器、计算机仿真分析等，以体现教材的时代特点。本书各章节的安排遵循由简到繁、循序渐进、难点分散的原则，采用先“静态”（直流电路分析），后“稳态”，再“动态”的教学体系，便于教学。本书力求做到论述严密、深入浅出，各章节的引言也力求突出问题驱动及前后呼应，并配有丰富的例题及习题，便于读者自学。

在编写过程中，本书重点强调了以下三个方面。

- 适当强调建立电路模型的研究方法。在分析各类元器件（如受控源、互感、理想变压器、双口网络和传输线等）时，都突出从实际器件的物理概念到建立电路模型的过程，适当体现或重现电路理论解决实际问题的过程。
- 强调应用电路的基本原理（基本定律和理想元件的电路模型）分析电路。从第1章引出电路的基本原理后，其后的各章都突出电路基本原理的应用，使学生牢固掌握电路基本原理及基本分析方法。
- 强调在应用电路的基本原理分析电路问题时，可通过演绎、归纳等手段，得到便于实际应用的分析方法，如一般分析方法（如节点方程和回路方程的系统编写法、一阶电路的三要素解法等），简化的分析方法（如互感消去法、三相化单相分析法等），以及等效的分析方法（等效电阻法、戴维南等效电路法等）等，使学生对电路理论有全面、系统的掌握。

本书加强了理论联系实际的内容，适当引入了有实际应用背景或与后续课程相关的电路实例，开阔学生分析实际问题的视野，实现了与后续课程有效衔接。

关于各章的课时安排，本书给出了教学建议，供师生参考。

本书的第1、2章由贺立红执笔，第3~6章及附录A由吴建华执笔，第7、8、12章由李华执笔，第9~11章由王安娜执笔，附录B由鲍喜荣执笔，吴建华负责全书的统筹与协调。

本书大纲承蒙清华大学的陆文娟教授审阅，得到了许多宝贵意见，谨致衷心的感谢。本书承

IV

继了东北大学“电路原理”课程教研组多年积累的教学经验，感谢郝蕴卿、殷洪义、陈绍林、孙玉琴等老师在编写教材方面提供的工作基础和经验。感谢机械工业出版社和东北大学教务处给予本书出版的支持。

由于作者的水平有限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者提出宝贵意见。作者联系方式如下：

吴建华 wujianhua@ise.neu.edu.cn

李华 lihua@ise.neu.edu.cn

作者

2009年5月于东北大学

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第1章 电路模型和基本定律	<ul style="list-style-type: none"> 了解实际电路与电路图的关系。 理解电压、电流参考方向的意义。 重点掌握无源理想电路元件(电阻、电感、电容)的特性(元件的电压电流关系)。 掌握有源理想电路元件(电压源和电流源)的特性。掌握受控源的特性。 重点掌握根据基尔霍夫定律列出电路方程的方法。 弄清电路等效变换的概念和变换方法。 掌握利用电阻电路的等效变换,实际电压源和实际电流源的等效变换,简化电路分析过程的方法。 熟练应用基尔霍夫定律和理想元件的 $u-i$ 关系对电路进行分析计算。 	8~10	8~10
第2章 线性电阻网络分析	<ul style="list-style-type: none"> 理解支路电流法的原理,着重理解独立节点、独立回路的概念及选取的方法。熟练列出支路电流方程。 着重掌握回路电流方程的列写方法,回路电流法的分析求解步骤。掌握电流源支路的处理方法。 着重掌握节点电压方程的列写方法,节点电压法的分析求解步骤。掌握电压源支路的处理方法。 着重掌握叠加原理及应用方法。 着重掌握等效电源定理及应用方法。 理解互易定理,特勒根定理及应用方法。 	8~10	6~8
第3章 正弦稳态电路分析	<ul style="list-style-type: none"> 理解正弦稳态电路及正弦稳态响应的概念和特点。 弄清正弦量的三要素表示,以及正弦量与复数的转换关系。 理解正弦量的相量表示法。 理解相量形式的理想电路元件(电阻,电感,电容)的特性(元件的电压电流关系);相量形式的电路模型。 理解相量形式的基尔霍夫定律。 理解阻抗、导纳的概念。 着重掌握用第1章和第2章学习过的电路基本分析方法和一般分析方法分析计算正弦稳态电路的相量模型电路。 了解画相量图的分析方法。 掌握正弦稳态电路的有功功率、无功功率、功率因数提高的概念和计算方法。 	8~10	6~8

教学 内容	学习要点及教学要求	课 时 安 排	
		全部讲授	部分选讲
第 4 章 三相电路	<ul style="list-style-type: none"> 了解三相正弦交流电源的产生。 弄清三相对称电路中, 电源(或负载)星形联结情况下, 线电压与相电压、线电流与相电流的固定关系。 弄清三相对称电路中, 电源(或负载)角形联结情况下, 线电压与相电压、线电流与相电流的固定关系。 着重掌握利用三相对称电路的特点将三相对称电路的计算转化成单相计算的简化方法。 了解三相不对称电路的应用。 掌握三相电路的功率计算与测量方法(1 瓦计法和 2 瓦计法)。 	4~6	2~4
第 5 章 互感电路与谐振电路	<ul style="list-style-type: none"> 了解互感现象, 理解基于电磁感应定律的互感电压的数学表示。 弄清同名端的定义和应用意义。理解基于同名端的互感电路模型, 正确写出互感电压的表示式。 掌握互感消去法。 掌握空心变压器和理想变压器的电路模型和等效电路分析方法。 了解谐振现象。弄清谐振条件, 谐振电路的品质因数等。 掌握串联谐振电路的谐振特点、谐振曲线和分析方法。 掌握并联谐振电路的谐振特点和分析方法。 	6~8	4~6
第 6 章 周期性非正弦稳态 电路分析	<ul style="list-style-type: none"> 理解非正弦周期函数的傅氏级数分解与合成。了解频谱的表示和意义。 掌握非正弦周期函数的有效值计算方法。 着重掌握分析非正弦周期电流电路的分析方法、求解步骤及迭加原理的应用。弄清阻抗的频率特性。 了解滤波电路(低通、高通、带通、带阻等电路)的特点及一般分析方法。 初步掌握三相非正弦对称电路的分析方法。 	6~8	6~8
第 7 章 线性动态网络时域分析	<ul style="list-style-type: none"> 理解动态电路和动态响应的概念。正确列出电路的微分方程。 着重掌握电路的初始条件的求取, 换路定则的应用。 着重掌握电路微分方程的暂态解, 稳态解的意义和求解方法。 着重掌握电路的零输入响应、零状态响应及全响应的意义和求解方法。熟练应用求解一阶电路的三要素法。 弄清动态响应的两种结构形式及相互关系。 着重掌握阶跃激励的特性和一阶电路阶跃响应的特点, 掌握脉冲响应的求解方法。 掌握冲击激励的特性和利用阶跃响应求解冲击响应的方法。 掌握应用三要素法求解一阶电路对正弦激励的动态响应的方法。 了解应用卷积分求解线性动态电路对任意激励的响应的方法。 掌握二阶电路微分方程的列写及求解方法。弄清二阶电路响应的三种形式及特点。 了解状态方程的列写方法。 	10	8~10

(续)

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第8章 线性动态网络 复频域分析	<ul style="list-style-type: none"> 掌握拉氏变换的意义、性质, 正变换和反变换的方法。 弄清理想电路元件(电阻, 电感, 电容)特性(元件的电压电流关系)的复频域形式, 及复频域形式的电路模型。 弄清基尔霍夫定律的复频域形式。 理解运算阻抗、运算导纳的概念。 掌握复频域分析法的求解步骤。着重掌握用第1章和第2章学习过的电路分析方法分析计算线性动态网络的复频域电路模型。 掌握网络函数的定义和求解方法, 及网络函数的极点与动态响应的关系。 	4~6	
第9章 双口网络	<ul style="list-style-type: none"> 了解双口网络的端口条件。 着重掌握双口网络的电压电流关系的表示形式, 及双口网络的Y参数、Z参数、A参数、H参数的定义和求解方法。 着重掌握含双口网络的电路的分析方法。 了解双口网络的特性阻抗。 掌握双口网络的π形和T形等效电路的求解方法。 掌握双口网络级联后的网络参数求解的简便算法。 着重掌握运算放大器的特性, 及含运算放大器电路的分析方法。 了解回转器的特性。 	6~8	4~6
第10章 非线性电路	<ul style="list-style-type: none"> 弄清非线性电阻、电感、电容元件的特性。 掌握含一个非线性电阻元件电路的列方程求解分析法。 理解非线性电阻电路的图解分析法。 了解非线性电阻电路的数值分析法。 掌握小信号分析法。 	4~6	4
第11章 分布参数电路及均匀 传输线	<ul style="list-style-type: none"> 弄清分布参数电路与集总参数电路的条件、区别和特点。 掌握均匀传输线的特点和参数的意义。 掌握均匀传输线的电路模型和微分方程形式的电压电流关系。 掌握均匀传输线正弦稳态解的形式和求解方法。 掌握行波、波阻抗的形式和表示意义。 掌握无损耗线正弦稳态解的形式和求解方法。 	6	
第12章 磁路	<ul style="list-style-type: none"> 理解磁通、磁感应强度、磁场强度、导磁系数的定义; 理解磁通连续性原理、全电流定律。 理解铁磁材料的原始磁化特性、磁滞特性、基本磁化特性。 了解磁路计算的前提条件。掌握磁路基本定律(称为磁路基尔霍夫定律和磁路欧姆定律)。 掌握恒定磁通磁路正面问题的分析计算方法, 理解反面问题的分析计算方法。 理解交变磁通磁路中的磁滞损失、涡流损失、电压电流及磁通波形畸变的分析和表示。 掌握铁心线圈的等效电路分析方法。 	4~6	

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
附录 A 网络图论和矩阵形式 网络方程	<ul style="list-style-type: none"> • 理解网络的图、连通图、回路、树、节点、割集的定义。 • 掌握利用选择树支和连支确定独立回路的方法。 • 掌握关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵的列写方法。 • 掌握复合支路的电路模型及电压电流关系。掌握支路阻抗矩阵和支路导纳矩阵的列写方法。 • 掌握利用关联矩阵、支路导纳矩阵，写出矩阵形式节点电压方程。 	2	
附录 B OrCAD/PSpice 在电路 分析中的应用	<ul style="list-style-type: none"> • 了解 OrCAD/PSpice 软件的基本使用方法。包括 Capture 工作环境的进入、电路原理图的绘制等。 • 掌握仿真参数和分析参数的设置方法。 • 掌握分析结果输出方式的设置方法，及波形处理方法。 • 掌握节点电压、支路电流和元件功率损耗值仿真计算方法；电阻值作为扫描变量的仿真分析方法；二阶电路方波响应的仿真分析方法；交流小信号分析的仿真方法。 	2	
教学总学时建议		78 ~ 98	48 ~ 64

说明：

1. 本教材为电子信息与电气学科，自动化学科等本科专业“电路原理”或“电工基础理论”课程教材，理论授课学时数为 78 ~ 98 学时(相关配套实验另行单独安排)，不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数可酌情对教材内容进行适当取舍。例如，电子信息工程、自动化、通信工程、电气自动化、测控技术等专业，教材内容原则上全讲；其他专业，可酌情对教材内容进行适当删减，如计算机专业、应用物理专业可选择 48 ~ 64 学时的内容安排。
2. 本教材理论授课学时数为 78 ~ 98 学时，其中包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。
3. 若某些电子信息与电气学科本科专业教学计划课时少于 78 学时，可部分或全部舍去第 11 章、第 12 章、附录 A 及附录 B 的内容。

CONTENTS

目 录

前言 教学建议

第1章 电路模型和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路基本变量	2
1.2.1 电流及其参考方向	2
1.2.2 电压及其参考方向	3
1.2.3 功率和能量	4
1.3 耗能元件与储能元件	5
1.3.1 电阻元件	5
1.3.2 电容元件	6
1.3.3 电感元件	8
1.4 独立电源和受控电源	10
1.4.1 独立电源	10
1.4.2 受控电源	11
1.5 基尔霍夫定律	12
1.5.1 基尔霍夫电流定律	12
1.5.2 基尔霍夫电压定律	13
1.6 电阻的联结及等效变换	17
1.6.1 电阻串并联等效	17
1.6.2 电阻星形和三角形联结的 等效变换	19
1.6.3 含受控源电路的等效 电阻分析	22
1.7 电源的联结及等效变换	22
1.7.1 电源的串联和并联	22
1.7.2 实际电源及其等效变换	23
1.8 电路基本分析方法举例	25
1.8.1 典型电路分析	26

1.8.2 实用电路分析	28
习题一	30

第2章 线性电阻网络分析	35
2.1 支路电流法	35
2.2 回路电流法	37
2.3 节点电压法	40
2.4 替代定理	44
2.5 叠加原理	45
2.6 等效电源定理	48
2.6.1 戴维南定理	48
2.6.2 诺顿定理	53
2.7 特勒根定理	55
2.8 互易定理	57
2.9 对偶原理	59
2.10 电路分析举例	60
2.10.1 系统化列写方程分析电路	60
2.10.2 应用网络定理分析电路	62
2.10.3 实用电路分析	63
习题二	66
第3章 正弦稳态电路分析	72
3.1 正弦稳态响应	72
3.2 正弦量的相量表示	73
3.2.1 正弦量	73
3.2.2 相量	76
3.3 RLC 元件伏安特性的相量形式	81
3.3.1 电阻元件伏安特性的相量 形式	81
3.3.2 电感元件伏安特性的相量 形式	82

3.3.3 电容元件伏安特性的相量形式	83	第7章 线性动态网络时域分析	168
3.4 基尔霍夫定律的相量形式及电路的相量模型	85	7.1 电路动态过程和初始条件	168
3.5 阻抗与导纳	86	7.1.1 电路的动态过程	168
3.5.1 阻抗	86	7.1.2 初始条件的确定	169
3.5.2 导纳	89	7.2 一阶电路的零输入响应	172
3.6 正弦稳态电路的计算	92	7.2.1 RC 电路的零输入响应	172
3.7 正弦交流电路的功率	99	7.2.2 RL 电路的零输入响应	174
3.7.1 RLC 元件的功率	99	7.3 一阶电路的零状态响应	177
3.7.2 无源二端网络的功率	102	7.3.1 RC 电路的零状态响应	177
3.7.3 功率因数的提高	105	7.3.2 RL 电路的零状态响应	178
3.7.4 传输最大功率	106	7.4 一阶电路的全响应	179
习题三	107	7.4.1 一阶电路全响应的两种分解形式	179
第4章 三相电路	111	7.4.2 求解一阶电路的三要素法	180
4.1 对称三相电路的特点	111	7.5 一阶电路的阶跃响应	185
4.2 对称三相电路的计算	116	7.6 一阶电路的冲击响应	188
4.3 不对称三相电路的分析	120	7.6.1 单位脉冲函数和单位冲击函数	188
4.4 三相电路的功率	121	7.6.2 冲击响应	189
习题四	126	7.6.3 电容电压、电感电流的跃变	193
第5章 互感电路与谐振电路	128	7.7 一阶电路对正弦激励的响应	195
5.1 互感电压	128	7.7.1 RL 串联电路对正弦电压激励的响应	195
5.2 有互感电路的分析	131	7.7.2 RC 并联电路对正弦电流激励的响应	196
5.3 空心变压器	134	7.8 线性动态网络对任意激励的响应	198
5.4 理想变压器	136	7.9 二阶电路的零输入响应	200
5.5 串联谐振电路	139	7.10 二阶电路的阶跃响应	207
5.6 并联谐振电路	143	7.11 状态方程	210
习题五	146	习题七	213
第6章 周期性非正弦稳态电路分析	150	第8章 线性动态网络复频域分析	217
6.1 非正弦周期量的傅里叶级数分解	150	8.1 拉普拉斯变换及其重要性质	217
6.2 非正弦周期量的有效值和平均功率	154	8.2 拉普拉斯反变换的部分分式法	221
6.3 非正弦周期电流电路的计算	156	8.3 两类约束的复频域形式	226
6.4 滤波器	158	8.4 复频域分析法	228
6.5 周期性非正弦对称三相电路的计算	162	8.5 网络函数及其应用	233
习题六	165		

8.5.1	网络函数的定义	233	10.5	非线性电阻电路的小信号 分析法	278
8.5.2	网络函数与冲击响应	235	习题十	.....	282
8.5.3	网络函数的零极点分布与 动态响应	236	第 11 章	分布参数电路及均匀传输线 ...	284
8.5.4	卷积定理	237	11.1	分布参数电路及均匀传输线的 概念	284
习题八	.....	238	11.2	均匀传输线的微分方程	284
第 9 章	双口网络	242	11.3	均匀传输线的正弦稳态解	286
9.1	双口网络的端口条件	242	11.4	行波	290
9.2	双口网络的 Y 参数和 Z 参数	242	11.5	波的反射与终端匹配的 传输线	293
9.3	双口网络的 A 参数和 H 参数	246	11.6	无损耗线的正弦稳态解	295
9.4	双口网络的转移函数	249	习题十一	.....	303
9.5	双口网络的特性阻抗	252	第 12 章	磁路	305
9.5.1	双口网络的输入阻抗与 输出阻抗	252	12.1	磁场	305
9.5.2	双口网络的特性阻抗	253	12.2	铁磁性材料的磁化曲线	306
9.5.3	固有传输常数	254	12.3	磁路及其基本定律	308
9.6	双口网络的等效电路	256	12.4	恒定磁通磁路计算	309
9.7	双口网络的联结	258	12.5	交变磁通磁路的分析	313
9.8	运算放大器	261	12.6	铁心线圈电路	319
9.9	回转器	263	习题十二	.....	324
习题九	.....	264	附录 A	网络图论和矩阵形式网络 方程	327
第 10 章	非线性电路	268	习题	.....	336
10.1	非线性元件特性	268	附录 B	OrCAD/PSpice 在电路分析中的 应用	337
10.1.1	非线性电阻元件	268	习题参考答案	351	
10.1.2	非线性电容元件	269	参考文献	360	
10.1.3	非线性电感元件	270			
10.2	非线性电阻电路的解析分析法	270			
10.3	非线性电阻电路的图解分析法	271			
10.3.1	曲线相交法	271			
10.3.2	曲线相加法	273			
10.4	非线性电阻电路的数值分析法	275			

电路模型和基本定律

内容提要：在物理电学的基础上，本章介绍了研究实际电路的模型化方法，并建立了理想元件的电路模型和数学模型，介绍了电路模型的基本定律以及应用这些基本定律分析电路问题的基本概念和基本方法。

本章重点：电流和电压参考方向的概念， R 、 L 、 C 元件的电压与电流关系，依据基尔霍夫定律列出电路方程的分析方法以及电路等效化简的方法。

1.1 电路和电路模型

电路是电流的通路，它主要由一些电气元件或电气设备联结而成，能实现能量的传输和转换，或实现信息的传递和处理。电路在日常生活和生产实际中随处可见，例如厂矿中各种电气设备和纵横几百公里的电网系统，可实现电能的转换和传输；家用电器中的音响设备、电视机，可实现信号的传递和处理。实际电路是由种类繁多的电路元件组成的，这些元件一般可分为电源、负载和传输元件等。

- 电源：是提供电能或发出电信号的设备。
- 负载：是用电或接收电信号的设备。它把电能转换成其他形式的能量。
- 传输及控制器件：是电源和负载中间的连接部分。

由于实际电路元件种类繁多，功能各异，直接对实际电路进行研究会使问题十分复杂。电路理论采用了模型化的方法研究各种实际电路元件及实际电路，通过建立能反映实际电路元件主要物理本质的模型，使问题得到简化。实际电路元件中发生的电磁现象主要是电磁能量的消耗现象和储存现象，这些现象以不同的强度交织在一起，决定了一个实际电路元件的物理特性。如果对这些电磁现象分别建立物理模型和数学模型，构造出几个理想电路元件，那么对于一个实际电器部件，根据其电磁特性，可以用理想电路元件的组合来表示。这样由理想电路元件构成的电路，称为实际电路的电路模型。电路模型是以足够的精度近似地描述实际电路，是对实际电路在一定条件下的科学抽象。显然，当抽象出的电路模型精度不够高时，会给实际电路的分析带来较大误差。

根据实际电路元件中发生的电磁能的消耗现象和储存现象，可建构三种理想电路元件，它们是：表示消耗电能的电阻元件 R ；表示储存电场能量的电容元件 C ；表示储存磁场能量的电感元件 L 。用电动势 E 表示电源的特性。当实际电路元件及实际电路的尺寸远远小于电路中电磁信号的波长时，可用等效的集总化理想电路元件构成集总参数电路模型，如将一段线路中的损耗集中起来用一个电阻表示。图 1-1 是手电筒的电路图（集总参数电路模型），其中，电阻 R 表示小灯泡整体消耗电能的特性；电阻 R_s 表示干电池内部整体消耗电能的特性；电动势 E 表示干电池发出电能的特性；开关 K 为手电筒的控制开关。

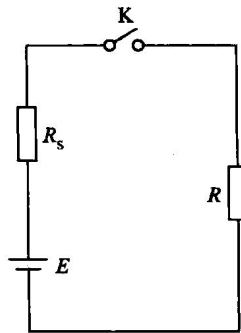


图 1-1 手电筒电路图

不同的实际电路元件，只要具有相同的电磁性能，可用同一个电路

模型表示。而一个实际电路元件在不同的条件下,电磁性能不同,它的电路模型也会有不同的形式。例如,在某一频率下,当线圈电阻的影响可以忽略时,一个线圈可以用集总电感元件作为其电路模型,如图 1-2a 所示;如果线圈电阻的影响不能忽略,则其电路模型如图 1-2b 所示,其中 R 为绕线电阻;如果线圈工作在较高频率条件下,线圈匝间电容的影响不能忽略时,则其电路模型如图 1-2c 所示,其中 C 为匝间电容。

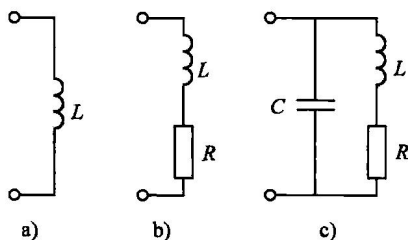


图 1-2 电感线圈模型

当线圈工作在更高频率,且不满足集总化条件时,应采用分布参数电路模型对实际电路进行描述,这部分内容安排在第 11 章学习。

电路理论的研究对象是从实际电路中抽象出来的电路模型。电路的基本定律及分析方法是建立在电路模型基础上的。

1.2 电路基本变量

电路理论中的基本物理量主要有电荷、磁通(磁通链)、电流、电压。描述电路工作状态的基本变量是电流、电压和功率,本节提出了电流、电压参考方向的概念。

1.2.1 电流及其参考方向

由物理学可知,电荷有规则的运动形成了电流,电流的大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。电流的单位是安培,简称安,用 A 表示。常用的单位还有微安(μA)、毫安(mA)、千安(kA)等。

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} \quad 1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

电流的大小和方向若不随时间变化,称为直流电流,用大写字母 I 表示;随时间变化的电流用小写字符 i 或 $i(t)$ 表示。

由于电流是有方向的,所以在分析电路中的某一电流时,需要先知道电流的方向。但对于一些较复杂的电路,电流的实际方向通常不能或不易直接判断出来。对于方向是周期性变化的交变电流,若想确定它瞬时的实际方向就更加困难。为解决这一问题,本书提出了参考方向的概念——先假设一个电流方向,称为这个电流的参考方向。

图 1-3 中电流 I_5 的实际方向不易直接判断出来,图中箭头表示了任意设定的 I_5 的参考方向。按照这个参考方向进行电路的分析计算, I_5 的计算结果会有正值或负值两种可能, I_5 的实际方向可通过 I_5 的参考方向和电流值的正、负共同确定。

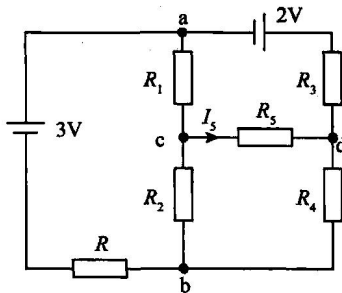


图 1-3 电流的参考方向

如果 $I_5 > 0$,说明 I_5 的实际方向与参考方向相同,因为按电流的实际方向计算时,计算结果只能是正值;如果 $I_5 < 0$,说明 I_5 的实际方向与参考方向相反。这样就解决了电流实际方向难以判断和表示的问题,使电路的分析计算得以进行。

1.2.2 电压及其参考方向

由物理学可知,电压是表征电场性质的物理量之一,它反映了电场力移动电荷做功的能力。电场力把单位正电荷从a点移动到b点做的功,在数值上等于ab两点间的电压,用 u_{ab} 表示

$$u_{ab} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1-2)$$

电压的单位是伏特,简称伏(V),常用单位还有微伏(μV)、毫伏(mV)、千伏(kV)等。

由电压定义可知,电压的实际方向是电场力对正电荷做功的方向。判断和表示电压的实际方向也和电流一样,有时会遇到困难,因此也需采用标注参考方向(或参考极性)的方法,根据参考方向进行分析计算,电压实际方向要通过电压的参考方向和电压数值的正、负共同判断。图1-4a中,若设电压 U 的参考方向是从a指向b,当计算出 $U = -3\text{V}$ 时,说明电压实际方向与参考方向相反,即由b指向a;若 $U = 3\text{V}$,说明实际方向与参考方向相同。电压的参考方向常用“+”、“-”表示极性或者用双下标表示。如图1-4b所示,电压参考方向是由“+”极指向“-”极。若用 u_{ab} 表示,则电压参考方向是由a指向b。

在电路分析中,一个元件的电流和电压的参考方向是任意选定的。若选定电流的参考方向与电压的参考方向(极性)相同,即电流从电压“+”端流入,如图1-5所示,称为关联参考方向;非关联参考方向如图1-6所示。

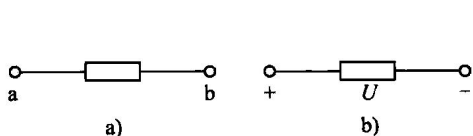


图 1-4 电压的参考方向

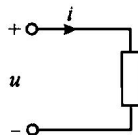


图 1-5 关联参考方向

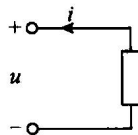


图 1-6 非关联参考方向

在电路分析中,有时使用电位的概念分析电路,或者判断电气设备的故障部位。取电路中某一点为参考点,则任一点到参考点间的电压称为该点的电位。如图1-7所示,设O点为参考点,则A点到O点间电压 U_{AO} 称为A点电位,用 U_A 表示,即

$$U_A = U_{AO}$$

电路中任意两点的电压是两点的电位差。如图1-7中A、B两点间的电压为

$$U_{AB} = U_{AO} - U_{BO}$$

在电路中,一般都把电源、输入信号和输出信号的公共端接在一起,作为参考点。有时可不画出电源的符号,而只标出其电位的极性和数值。图1-8a可画成图1-8b的形式。

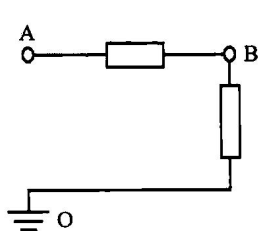


图 1-7 电位

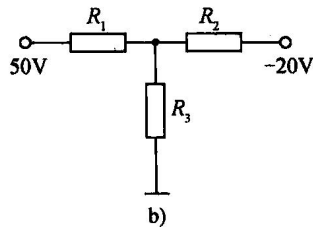
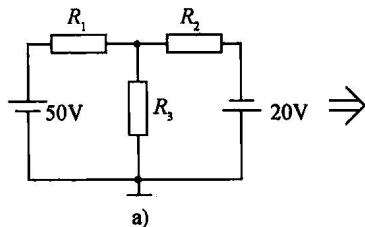


图 1-8 电路图的形式

在电路分析中,有时使用电动势表示电源。电动势是衡量外力将正电荷从低电位移动到高电位做功能力的物理量,其大小为

$$e = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

电动势的单位也是伏特(V),其实际方向规定为从低电位指向高电位。

电动势和电压的物理意义虽然不同,但二者都可表示电源元件两端电位的高低。需注意的是,电压实际方向是由高电位指向低电位,电动势实际方向是从低电位指向高电位,即二者的实际方向相反。与电压一样,电动势也需引入参考方向的表示方法,用“+”、“-”参考极性表示,电动势的电路模型如图1-9所示。

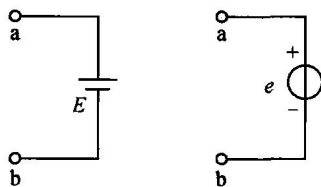


图1-9 电动势的电路模型

1.2.3 功率和能量

功率和能量的计算也是电路分析的主要内容。

电场力做功使得正电荷经电路元件(或一段电路)从高电位移到低电位(这时电压和电流的实际方向相同),此时电位能减少,说明电路元件吸收了电能;当正电荷经电路元件从低电位移到高电位(这时电压和电流的实际方向相反)则需要外力做功,此时电位能增加,说明电路元件发出了电能。电路元件吸收或发出能量 w 的速率称为功率,用 p 表示,即

$$p = \frac{dw}{dt}$$

根据电压定义

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

和电流定义

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

有

$$dw = u \cdot dq = u i dt$$

故

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-4)$$

在国际单位制中,电流单位为安培(A),电压单位为伏特(V),功率单位则为瓦特(W),简称瓦。

根据式(1-4),可得到 t_0 到 t 时间内,电路吸收或发出的能量为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-5)$$

下面讨论当电路元件的电压、电流方向用参考方向表示时,如何判断该元件是吸收功率还是发出功率。

1) 在电压、电流参考方向相同(关联方向)时,若 $p > 0$,可知 u, i 值同为正或同为负,说明 u, i 实际方向一致,即是正电荷从元件高电位移向低电位,电场力做功,元件吸收能量;若 $p < 0$,则元件发出电能。

2) 在电压与电流参考方向相反时,若 $p > 0$,说明 u, i 实际方向也相反,元件发出电能;若 $p < 0$,元件是吸收电能的。以上有关功率的讨论,不仅适合于一个元件,也适合于一段电路。

【例1-1】电路如图1-10所示,各元件电流和电压参考方向均已选定。已知: $U_1 = 1V, U_2 = -3V, U_3 =$

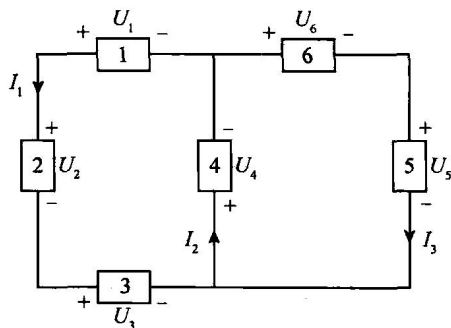


图1-10 例1-1图

8V, $U_4 = -4\text{V}$, $U_5 = 7\text{V}$, $U_6 = -3\text{V}$, $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = 1\text{A}$, $I_3 = -1\text{A}$, 试求各元件的功率, 并指出它们分别是吸收功率还是发出功率, 并验证整个电路的总功率是否满足能量守恒定律。

解 $P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 2 = 2\text{W}$, 由于 U_1 与 I_1 参考方向相反, 且 $P_1 > 0$, 故判断元件 1 发出功率。同理,

$$P_2 = U_2 I_1 = (-3) \times 2 = -6\text{W} \text{ (发出)}$$

$$P_3 = U_3 I_1 = 8 \times 2 = 16\text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_4 = U_4 I_2 = (-4) \times 1 = -4\text{W} \text{ (发出)}$$

$$P_5 = U_5 I_3 = 7 \times (-1) = -7\text{W} \text{ (发出)}$$

$$P_6 = U_6 I_3 = (-3) \times (-1) = 3\text{W} \text{ (吸收)}$$

且 $\Sigma P_{\text{发出}} = \Sigma P_{\text{吸收}}$

本题的计算结果验证了电路的功率满足能量守恒定律。

1.3 耗能元件与储能元件

在 1.1 节中介绍了实际电路中的主要电磁性能可用理想电路元件表示。本节介绍 3 种理想电路元件的电路模型及其数学模型表达式, 这些电路模型及数学表达式是分析这 3 种电路元件的理论依据。

1.3.1 电阻元件

电阻元件是表征消耗能量的理想元件, 其特性是由电阻元件的电压电流关系表征的, 称为伏安特性。从特性上, 电阻元件可分为线性电阻、非线性电阻、时不变电阻和时变电阻。

线性电阻元件的电路模型如图 1-11 所示, 电压电流的参考方向设为关联方向。在任何时刻, 线性电阻元件的电压与电流关系服从欧姆定律, 其伏安特性曲线是通过坐标原点的直线, 如图 1-12 所示。

应用欧姆定律, 图 1-11 所示电阻元件的电压电流关系式为

$$u = Ri \quad (1-6a)$$

式中, R 表示电阻值。从图 1-12 看出, 电阻值

$$R = \frac{u}{i} = \tan \alpha$$

线性电阻元件的电阻值是一个与电压 u 、电流 i 无关的常数。令 $G = \frac{1}{R}$, 称为电导, 则式(1-6a)

可写成 $i = Gu$ 。电阻的单位为欧姆(Ω), 电导的单位为西门子(S)。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向设成相反, 如图 1-13 所示, 则应用欧姆定律时, 应写成

$$u = -Ri \quad (1-6b)$$

或

$$i = -Gu$$

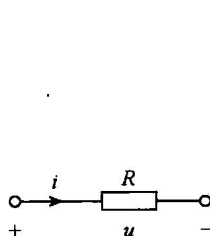


图 1-11 电阻元件

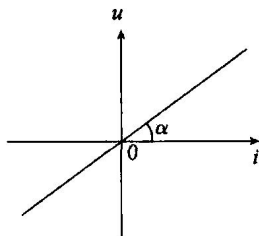


图 1-12 电阻元件伏安特性曲线

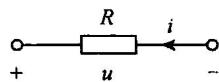


图 1-13 u, i 方向非关联