



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 电路分析基础

主编 金波  
主审 张雪英



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 电路分析基础

主 编 金 波

主 审 张雪英

西安电子科技大学出版社

2008

## 内 容 简 介

本书全面论述了电路的基本理论和基本分析方法。全书共 13 章, 具体内容包括: 电路分析的基本知识、简单电阻电路、电路的等效变换、电路方程、电路定理、一阶电路、二阶电路、正弦稳态分析、正弦稳态电路的功率、三相电路、磁耦合电路、选频电路和双口网络。

本书适应工科电工电子类课程体系的改革需要, 注重基础知识和计算机方法的应用。特点是用 MATLAB 和 EWB 作为计算机辅助教学工具, 把注意力集中到对概念、理论和分析方法的掌握上, 从而提高学生运用计算机解决相关问题的能力。

本书可作为本科生、专科生和高等职业技术教育的教材, 也可供相关人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/金波主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 7

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2036-7

I. 电… II. 金… III. 电路分析—高等学校—教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 057325 号

策 划 寇向宏

责任编辑 寇向宏

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb001@163. com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 27

字 数 640 千字

印 数 1~4000 册

定 价 38.00 元

ISBN 978-7-5606-2036-7/TN·0422

**XDUP 2328001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

**西安电子科技大学出版社**  
**高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材**  
**编审专家委员会名单**

**主任:** 杨震 (南京邮电大学校长、教授)

**副主任:** 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

**通信工程组**

**组长:** 张德民 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

**电子信息工程组**

**组长:** 秦会斌 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

**项目策划:** 毛红兵

**策划:** 曹映 寇向宏 杨英 郭景

# 前 言

近年来,我国高等教育发展迅速,高等教育从过去的精英化教育发展到现在的大众化教育,我国从计划经济国家发展为新兴的市场经济国家,高等教育也要不断改革以适应我国的社会经济的发展。为此,越来越多的高校实行了按大类学科招生,教育体系和课程设置都发生了变化。因此,将电路分析基础和信号与系统两门理论性强的课程、模拟电子技术和数字电子技术两门技术性强的课程均列为电气信息学科的学科基础平台课程。

本书编写的目的是要适应知识更新和课程体系改革的需要,使其既满足教育部电工电子基础课程教学指导委员会颁布的《电路分析基础课程教学基本要求》,又能适应我国高等工程教育的实际情况。

全书共 13 章。第 1、2 章介绍电路的基本知识和简单电阻电路的计算。第 3、4、5 章介绍电路分析的方法,讨论电路的等效变换、电路方程和电路定理。第 6、7 章介绍动态电路的时域分析,讨论一阶和二阶电路的分析方法。第 8 章是正弦稳态分析,讨论一般正弦稳态电路的相量分析法。第 9 章介绍正弦稳态电路的功率以及两个应用,即功率因数提高和最大功率传输。第 10、11、12 章介绍正弦稳态电路中的特殊电路,即三相电路、磁耦合电路和选频电路。第 13 章介绍双口网络,讨论双口网络的参数以及分析方法。

“电路分析基础”课程的教学改革从来没有间断,随着电子信息技术的发展,与信息技术有关的新知识、新概念、新硬件和软件不断更新,“电路分析基础”课程的教材也在发生较大的变化。经过多年的教学实践和教学改革,教师和学生都希望有一本符合他们实际情况、既满足教学基本要求又有加深拓宽的内容、对强电专业和弱电专业都适用的加强工程实践能力的培养的教材。本书就是本着这一基本原则编写的。其编写的指导思想是“立足基础,精选内容,便于自学,利于教学”,使之成为满足一般院校实用的有特色的本科教材。在编写过程中力争处理好以下关系:教学基本要求与加深扩展内容、本课程与其它课程的衔接、一般教学与计算机辅助教学等,并尽量参考国外优秀教材,选用其中的习题,使之与国际接轨。读者将会看到本书结构、叙述方法和习题都比较新颖。

编写本书的过程中,力争使本书具有特色。其主要特色是:

(1) 选用 MATLAB 作为辅助电路计算工具,选用 EWB 仿真软件作为电路仿真工具。原因很简单,在国内外的工程课程中,广泛使用科学计算软件 MATLAB 和仿真软件 EWB。将软件工具应用与电路理论教学结合有很多好处,学生可以利用计算机完成大量繁琐的计算并把分析结果可视化,能直观呈现电路的输入和输出波形。这利于对电路性质及概念的理解和掌握。

(2) 纵观国外教材,一般书较厚、起点低、注重基础、便于自学。本书作者结合自己 30 年的教学经验和体会,在结构和叙述方法上与国内教材有一些不同。主要是:其一,开辟第 2 章简单电阻电路的分析,以加强电路中串联与分压、并联与分流、电位、开路、短路等

基本知识的学习。其二，在讲述网孔方程和节点方程时，国内教材均采用自电阻、互电阻和自电导、互电导的公式化方法。这种列方程的方法学生学习入门难、容易忘、解决特殊问题时技巧性强。而本书采用最原始的方法即基尔霍夫定律，对特殊问题的处理采用国外教材流行的“超网孔”和“超节点”方法。其三，在讲述引入相量时，采用相量变换与反相量变换的概念，这一概念与后续课程“信号与系统”中的傅氏变换、拉氏变换相呼应。同时叙述也简单得多。其四，在选频电路一章中，引入多频率电路的计算，而回避了傅氏级数。这是因为在“信号与系统”中傅氏级数要详细论述。

(3) 为了便于自学，本书例题较多，在每小节后都有自测题，以测试本节内容的掌握程度。采用的题型是选择题或填空题。在精选习题时，本书采用分层次递进的结构将习题分为三个层次：基本练习题，这是大多数学生必须会做的习题，这种层次的习题应在考试中占70%左右；复习提高题，这种题有些难度，不必要求人人会做，是给学有余力的学生提供的，特别是要考研的同学；用计算机分析和仿真练习题，是供学生选用的，一般不要求。

讲授全书内容约64学时。本书标有“\*”号内容为选讲内容，这些内容往往比较深入。另外，书中有关MATLAB和EWB的内容可以让学生自学，由于学时有限可在课外讨论。跳过这些内容并不影响本书的连续性。与本书配套的资源有：

(1) 由西安电子科技大学出版社出版的《电路分析实验教程》。其内容包括误差分析与数据处理，电路基础实验，电路的EWB仿真和电路的MATLAB计算。

(2) 作者制作的两套多媒体课件。一套背景是深蓝色，另一套背景是淡黄色，可供不同教师在不同的设备上使用。若读者需要可与作者联系。

(3) 作者研制多年的电路分析题库，若读者需要可与作者联系。

(4) 本书书末附有部分习题参考答案。

本书的编写参考了许多国内外教材。在编写过程中，为便于学生自学，教材宜细不宜粗。一要精选内容，二是要阐述透彻。对分析方法的应用要多举各方面的示例，教会学生从不同的角度来理解和解决问题。“电路分析基础”这门课的特点就是一个“活”字，它既没有很深的数学推导，也没有很深的物理电磁学知识。这门课较难掌握就是因为电路的分析方法灵活多变，同一个问题有多种解决方案。因此多“练”就显得很重要，本书在这方面的做法是每小节有自测题。根据这门课“活”的特点，采用多“练”的方法，然后就是“想”。所谓“想”，就是将所学的内容总结归纳，就是思考电路分析的实质问题，只有抓住了电路分析方法的本质，才能对付其中的“活”。因此，本书每章后都有小结和思考题，它是对本章内容的高度概括，以便于学生掌握本章内容的核心。

本书由太原理工大学张雪英老师审阅，她提出了一些好的修改意见，在此我们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。欢迎提出宝贵意见。

[jinbo@yangtzeu.edu.cn](mailto:jinbo@yangtzeu.edu.cn) 或 [jinbo@yaho.com.cn](mailto:jinbo@yaho.com.cn)

编者

2008年2月于长江大学

# 目 录

<b>第 1 章 电路分析的基本知识</b> .....	1
1.1 电路分析与电气信息学科 .....	1
1.1.1 电气信息学科概述 .....	1
1.1.2 电路分析 .....	2
1.1.3 电路分析与设计 .....	2
1.1.4 电路及其分类 .....	3
1.2 电路变量 .....	4
1.2.1 电流及其参考方向 .....	4
1.2.2 电压及其参考方向 .....	5
1.2.3 功率和能量 .....	5
1.2.4 国际单位制 .....	7
1.3 基尔霍夫定律 .....	8
1.3.1 一些有关的电路术语 .....	8
1.3.2 基尔霍夫电流定律 .....	9
1.3.3 基尔霍夫电压定律 .....	10
1.4 电路元件 .....	12
1.4.1 电阻元件 .....	12
1.4.2 独立电压源 .....	14
1.4.3 独立电流源 .....	15
1.4.4 受控电源 .....	17
本章小结 .....	19
思考题 .....	19
习题 1 .....	20
<b>第 2 章 简单电阻电路</b> .....	24
2.1 串联电路 .....	24
2.1.1 电阻的串联 .....	24
2.1.2 单回路电路 .....	26
2.1.3 电位的概念 .....	27
2.2 并联电路 .....	29
2.2.1 电阻的并联 .....	29
2.2.2 单节点电路 .....	32
2.2.3 电路中的开路和短路 .....	34
2.3 串-并联电路 .....	35
2.3.1 串-并联电路的等效电阻 .....	35
2.3.2 分压公式和分流公式的应用 .....	37
2.3.3 梯形网络的计算 .....	39
2.3.4 分压器的负载效应 .....	41
本章小结 .....	43
思考题 .....	44
习题 2 .....	44
<b>第 3 章 电路的等效变换</b> .....	50
3.1 电源等效变换 .....	50
3.1.1 实际电源的模型 .....	50
3.1.2 两种电源模型的等效变换 .....	52
3.1.3 独立电源的串联和并联 .....	55
3.1.4 独立电源与其他元件的 串联和并联 .....	56
* 3.1.5 电源的转移 .....	60
3.2 含受控源电路的等效变换 .....	62
3.3 电阻的 Y- $\Delta$ 等效变换 .....	65
3.4 平衡电桥电路 .....	68
* 3.5 对称网络 .....	70
本章小结 .....	73
思考题 .....	73
习题 3 .....	74
<b>第 4 章 电路方程</b> .....	80
4.1 支路分析 .....	80
4.1.1 电路的 $2b$ 方程 .....	80
4.1.2 支路电流法 .....	81
4.1.3 支路电压法 .....	81
4.2 网孔分析 .....	82
4.2.1 网孔分析的一般方法 .....	82
4.2.2 网孔分析的特殊方法 .....	84
* 4.2.3 网孔分析的直观方法 .....	87
4.3 节点分析 .....	89
4.3.1 节点分析的一般方法 .....	89
4.3.2 节点分析的特殊方法 .....	91
* 4.3.3 节点分析的直观方法 .....	93
* 4.3.4 弥尔曼定理 .....	95
4.4 含运放电路的节点分析 .....	97
4.4.1 运算放大器及其等效电路 .....	97

4.4.2 理想运算放大器的特点	98	6.5 全响应的分解特性	178
4.4.3 节点分析	98	6.5.1 零输入响应和零状态响应	178
* 4.5 节点列表法	102	6.5.2 自由响应和强迫响应	179
4.5.1 关联矩阵和 KCL、KVL 的 矩阵形式	102	6.6 一阶电路的阶跃响应	182
4.5.2 节点列表法电路方程的推导	103	6.6.1 阶跃函数	182
* 4.6 电路方程的计算机解	104	6.6.2 阶跃响应	184
本章小结	106	* 6.7 计算机仿真	185
思考题	107	6.7.1 电感元件和电容元件的 伏安关系	185
习题 4	107	6.7.2 动态电路的瞬态分析	186
<b>第 5 章 电路定理</b>	113	本章小结	188
5.1 线性性质	113	思考题	188
5.2 叠加定理	115	习题 6	189
5.3 戴维南定理	120	<b>第 7 章 二阶电路</b>	197
5.4 诺顿定理	128	7.1 二阶电路微分方程的建立	197
* 5.5 戴维南和诺顿定理的证明	129	7.1.1 无源 RLC 串联电路	197
5.6 最大功率传输定理	130	7.1.2 无源 RLC 并联电路	199
* 5.7 特勒根定理	134	7.1.3 固有频率	200
* 5.8 互易定理	136	7.2 RLC 串联电路的零输入响应	201
* 5.9 对偶原理	140	7.2.1 过阻尼的零输入响应	202
* 5.10 计算机仿真	143	7.2.2 临界阻尼的零输入响应	204
5.10.1 叠加定理的验证	143	7.2.3 欠阻尼的零输入响应	205
5.10.2 戴维南定理的验证	144	7.2.4 无阻尼的零输入响应	206
本章小结	145	7.3 RLC 串联电路的全响应	208
思考题	146	7.4 RLC 并联电路的全响应	212
习题 5	146	* 7.5 微分方程的计算机解	213
<b>第 6 章 一阶电路</b>	153	本章小结	216
6.1 电感元件和电容元件	153	思考题	217
6.1.1 电感元件	153	习题 7	217
6.1.2 电容元件	155	<b>第 8 章 正弦稳态分析</b>	221
6.1.3 电感和电容的串并联	157	8.1 引言	221
6.2 动态电路和换路定律	159	8.2 正弦波与相量	222
6.2.1 动态电路的特点	159	8.2.1 正弦信号	222
6.2.2 换路定律	160	8.2.2 复数运算	223
6.2.3 初始值的确定	161	8.2.3 相量	225
6.3 无源一阶电路	164	8.3 频域下的三个基本元件	227
6.3.1 无源 RC 电路	164	8.3.1 电阻元件	228
6.3.2 时间常数	166	8.3.2 电感元件	228
6.3.3 无源 RL 电路	168	8.3.3 电容元件	229
6.4 直流电源激励的一阶电路	172	8.4 频域下的电路定律	231
6.4.1 电源作用于 RC 电路	172	8.4.1 阻抗	232
6.4.2 电源作用于 RL 电路	175	8.4.2 导纳	232



8.4.3 阻抗与导纳的关系 .....	234	本章小结 .....	311
8.4.4 KVL 和 KCL 的相量形式 .....	234	思考题 .....	311
8.5 RLC 串联与 RLC 并联电路 .....	237	习题 10 .....	312
8.5.1 RLC 串联电路 .....	237	<b>第 11 章 磁耦合电路</b> .....	316
8.5.2 RLC 并联电路 .....	240	11.1 互感 .....	316
8.6 简单电路的分析 .....	245	11.1.1 互感系数 .....	316
8.7 复杂电路的分析 .....	249	11.1.2 同名端 .....	317
8.8 相量图分析 .....	252	11.1.3 耦合系数 .....	320
* 8.9 正弦稳态电路的计算机分析 .....	257	11.2 含耦合电感电路的分析 .....	321
本章小结 .....	258	11.2.1 网孔分析法 .....	321
思考题 .....	259	11.2.2 去耦等效电路法 .....	322
习题 8 .....	260	11.3 空芯变压器电路的分析 .....	324
<b>第 9 章 正弦稳态电路的功率</b> .....	267	11.3.1 原边等效电路 .....	324
9.1 正弦稳态电路的功率 .....	267	11.3.2 副边等效电路 .....	325
9.1.1 瞬时功率 .....	267	11.4 理想变压器电路的分析 .....	328
9.1.2 平均功率 .....	268	11.4.1 理想变压器的伏安关系 .....	328
9.1.3 无功功率 .....	269	11.4.2 理想变压器的阻抗变换作用 .....	330
9.1.4 视在功率和功率因数 .....	270	* 11.4.3 含理想变压器电路的计算 .....	332
9.1.5 复功率 .....	271	* 11.5 计算机仿真 .....	334
9.2 功率因数及其提高 .....	276	本章小结 .....	334
9.2.1 提高功率因数的意义 .....	276	思考题 .....	335
9.2.2 提高功率因数的措施 .....	276	习题 11 .....	335
9.2.3 电容值的计算 .....	277	<b>第 12 章 选频电路</b> .....	341
9.3 最大功率传输 .....	279	12.1 电路的频率响应 .....	341
* 9.4 计算机分析 .....	282	12.2 串联谐振电路 .....	343
本章小结 .....	283	12.2.1 串联谐振的特点 .....	343
思考题 .....	285	12.2.2 串联谐振的品质因数 .....	345
习题 9 .....	285	12.3 并联谐振电路 .....	349
<b>第 10 章 三相电路</b> .....	290	12.3.1 并联谐振的特点 .....	349
10.1 三相电路的基本概念 .....	290	12.3.2 并联谐振的品质因数 .....	350
10.1.1 三相电源 .....	290	12.3.3 线圈与电容器并联谐振 .....	351
10.1.2 三相负载的 Y 形接法 .....	292	12.4 多频率电路 .....	353
10.1.3 三相负载的 $\Delta$ 形接法 .....	293	12.4.1 多频率电路的平均功率和 有效值 .....	353
10.2 对称三相电路的计算 .....	295	12.4.2 多频率电路的分析 .....	355
10.2.1 Y-Y 连接的对称三相电路 .....	295	* 12.5 频率特性的计算机绘制 .....	358
10.2.2 $\Delta$ 负载的对称三相电路 .....	297	本章小结 .....	359
10.2.3 复杂对称三相电路的计算 .....	299	思考题 .....	360
10.3 不对称三相电路的计算 .....	301	习题 12 .....	361
* 10.4 三相电路的功率及测量 .....	305	<b>第 13 章 双口网络</b> .....	366
10.4.1 三相电路的功率 .....	305	13.1 双口网络的基本概念 .....	366
10.4.2 三相电路功率的测量 .....	307	13.2 阻抗参数 .....	367
* 10.5 计算机分析 .....	309		

13.3 导纳参数 .....	370	附录 A EWB 仿真软件简介 .....	386
13.4 传输参数 .....	373	附录 B MATLAB 软件简介 .....	393
13.5 混合参数 .....	374	附录 C 电路分析程序简介 .....	403
13.6 双口网络的互联 .....	376	部分习题参考答案 .....	411
* 13.7 计算机分析 .....	378	参考文献 .....	421
本章小结 .....	380		
思考题 .....	381		
习题 13 .....	381		

# 第1章 电路分析的基本知识

本章讨论电路分析的基本概念,主要介绍电路分析的涵义、电路模型的概念、电路变量、基尔霍夫定律以及几个电路元件。电路分析是建立在电路模型基础上的,电路变量是电路分析的对象,基尔霍夫定律是分析电路的基本依据。掌握电路元件的基本性质是进行电路分析的前提。线性非时变电路是我们主要的研究对象。

## 1.1 电路分析与电气信息学科

### 1.1.1 电气信息学科概述

当今世界上迅速发展的电气信息学科,越来越大地影响着人们的生活方式和工作方式。

电气信息学科与生产、传送、测量、控制、处理电信号的系统有关。电气信息学科的五個主要分支是:通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统、信号处理系统。

通信系统是产生、传送、分配信息的电子系统,包括电视系统、定位飞机航线的雷达系统、移动电话和固定电话系统等。

计算机系统用电信号处理信息,包括文字处理和数学计算。

控制系统用电信号控制生产过程,例如炼油厂里的温度、压力和流速的控制器,电梯中电机、门和灯光的控制装置,能自动完成对机械部件进行加工的数控机床,能帮助飞机飞行和着陆的自动导航及自动着陆系统。

电力系统产生和分配电力。电力是信息社会的基础,通常是将发电厂(核能发电、火力发电、水力发电)产生的电能,通过跨越全国的电力网分配、传输到各个用电部门。电力系统的自动化运行和对突发事件的智能处理,是保证国民经济和人民正常生活的关键。

信息处理系统对表现信息的电信号进行处理。通过处理,使信号所包含的信息成为更合适的形式。生物医学信号处理的目的是从生物信号中提取信息,帮助我们诊断和治疗疾病。地震勘探资料处理系统的目的是从地震信号中找出有用的信息,帮助我们寻找地下矿产。另外,信息处理还涉及到诸如 CD 机、语音识别、图像增强等领域。

五类系统之间实际上是相互联系和相互作用的。例如,通信工程师会用计算机来控制信息的流动。计算机中包含控制系统,而控制系统中也包含计算机。电力系统需要规模巨大的通信系统来安全可靠地调整系统的运行。信号处理系统中也会包含通信、计算机和控制系统。

作为电气信息学科领域的大学生,不仅要学习本专业的知识,而且还要熟悉与这一领域相关的其他领域的知识。因此,电气信息学科领域的各专业是最具有挑战性的。

### 1.1.2 电路分析

电气信息学科领域涉及的面较广，它的各个分支有着共同的基础，这就是电路理论。电路分析是电气信息学科的基础课程，是电气信息学科各专业的先导课程，而且是主要的必修课程。

“电路”通常是指实际电气系统抽象得到的电路模型。也就是说，

电路模型是由理想化的电路元件所组成的。理想电路元件表征了实际元件的主要物理特性。

如电阻元件、电感元件、电容元件以及理想电源元件等，这些理想化的电路元件，是在一定的条件下，表征了实际元件的主要物理特征，它是实际元件的一种近似。如一个电感线圈在直流稳定状态下，可抽象为一个电阻；在交流低频情况下，可抽象为电阻和电感的串联；在高频情况下，还需考虑线圈匝间分布电容，此时可抽象为电阻和电感串联后再与电容并联。所以

电路分析就是对电路模型进行分析。电路理论是建立在电路模型的基础之上的。

电路也称“网络”。电路理论是一门研究电路分析和电路综合或设计的基础工程学科，电路分析是探讨电路的基本定律和定理，讨论不同类型电路的各种计算方法。

需要指出的是，电路理论是研究静止和运动电荷的电磁理论的特例。物理学中的电磁理论研究的是电气元件内部的电磁现象，而电路理论研究的是电气元件的外部特征。

### 1.1.3 电路分析与设计

一般的电路问题可以用图 1-1 中的三部分表示。一是电路(网络)部分，它由电阻、电感和电容等电路元件连接而成；二是输入部分，即电路的输入信号，也称为电路的激励；三是输出部分，即电路中的待求量(电流或电压)，也称为电路的响应。



图 1-1 电路框图

在已知电路的结构及电路元件参数的条件下，当激励给出后求响应或当响应已知时求激励，这都属于电路分析的范畴。

若已知响应和激励，要求电路的结构和参数，这就属于电路设计的范畴，如表 1-1 所示。本书将主要研究电路分析，在适当场合也会讨论电路设计问题。

表 1-1 电路分析与设计说明

网络	激励	响应	研究范围
√	√	?	电路分析
√	?	√	电路分析
?	√	√	电路设计

分析和设计之间的一个关键区别是，在分析电路时，电路响应有一个唯一的答案，而电路设计一般没有唯一的方案。例如，让几个人设计一座房子，有人可能用砖，有人用木材，有人会设计成二层楼房，还有人会选择简易的平房。

电路设计离不开电路分析，电路分析在电路设计中起着什么作用？图 1-2 是电路设计的示意图。所有电路设计都开始于提出的需求，根据需求确定电路的性能指标即设计要求。根据工程师的教育程度和经验可以草拟电路模型，再用电路分析的方法来预测电路模型的特性。通过比较设计要求与电路分析得到的结果，进行电路模型的改进。一旦期望特性和预测特性一致，实际电路就构成了。

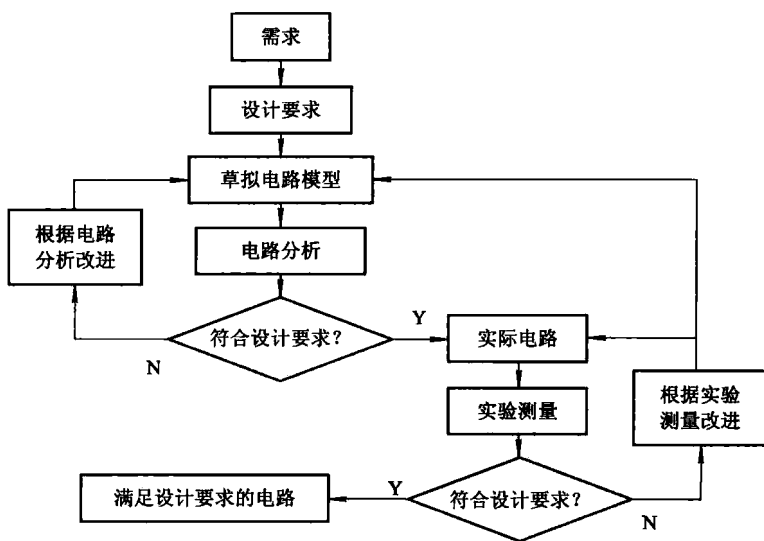


图 1-2 电路设计示意图

从以上描述中可以看出，设计过程中的电路分析起着非常重要的作用。

### 1.1.4 电路及其分类

电路是由若干电气设备或器件组成的总体，通常其间有电流通路。有些电路很复杂，如超高压电力网络、大规模集成电路和高级生物的神经网络等。但有的电路非常简单，如手电筒就是一个最简单的电路。差别如此大的电路要用相同的电路分析方法来分析是不可能的。

电路分为两大类：集总参数电路和分布参数电路。

当电路的几何尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时，就属于集总参数电路。

可以用电路理论来分析它的特性。怎样来定义远小于呢？好的标准是十分之一。如果电路尺寸是最高工作频率所对应的波长的  $1/10$ ，则就可以作为集总参数电路。例如，我国电网的频率为  $50\text{ Hz}$ ，则对应的波长为

$$\text{波长}(\lambda) = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$$

因此,对以此为工作频率的用电设备来说,其尺寸远小于这一波长,可以按集总参数电路处理。而对远距离输电线来说,就必须用分布参数电路的分析方法来处理。

无线电信号的传播频率规定为  $10^9$  Hz,因此波长为 0.3 m,使用十分之一的标准,发送或接收无线电信号的通信系统的相应尺寸必须小于 3 cm 才能作为集总参数系统。如果研究中的电路尺寸与信号的波长接近,则就必须按分布参数电路来处理。

本书只讨论集总参数电路的分析。集总参数电路分为两大类:线性电路和非线性电路。

由线性元件和独立电源组成的电路称为线性电路。

由非线性元件和独立电源组成的电路称为非线性电路。本书研究的是线性电路的分析。

在实际中,我们遇到的几乎都是非线性电路,例如电视和收音机信号的接收和解码;微处理器中每秒百万次的运算;电话中语音到电信号的转换。既然非线性电路如此广泛,我们为什么要学习线性电路呢?一是线性电路的分析比非线性电路的分析要容易得多,并且理论上比较成熟;二是有许多非线性电路在一定的条件下可以近似地用线性电路来处理。

线性电路又可分为时变的和非时变的。如

若线性元件的电阻值  $R$ 、电感量  $L$ 、电容量  $C$  不随时间变化,始终是一个常数,则称它们是线性非时变元件。由这种线性非时变元件和电源组成的电路就称为线性非时变电路。

## 1.2 电路变量

电路分析中研究的对象就是电路变量。电路变量主要是指电路中的电流、电压和功率。

### 1.2.1 电流及其参考方向

电荷运动引起的电现象取决于电荷流动的速率。电荷流动的速率通称为电流,表示为

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

其中,  $i$  是电流,单位为 A(安培);  $q$  是电荷量,单位为 C(库仑);  $t$  是时间,单位为 s(秒)。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。遗憾的是,直到后来才意识到这个被广泛使用的定义是不正确的,实际上电流是由负电荷而不是正电荷的流动产生的。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流称为恒定电流,简称直流(简写为 DC),用  $I$  表示。若电流的大小和方向随时间变化(或周期性),则简称交流(简写为 AC),用  $i$  表示。

虽然正电荷运动的方向规定为电流的方向,但在实际问题中,特别是交流电路,电流

的方向是随时变化的, 电流的真实方向事先是很难确定的, 需要假定一个参考方向, 作为计算的标准。当  $i > 0$  时, 表示电流真实方向与参考方向一致; 当  $i < 0$  时, 表示电流真实方向与参考方向相反。图 1-3 中表示了相同电流的两种表示方法。

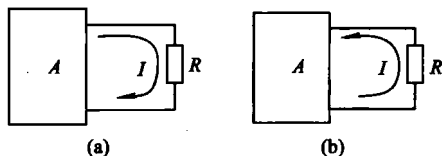


图 1-3 电流的两种等效表示

值得注意的是:

分析计算电路时必须先设定电流的参考方向, 参考方向一经设定就不可随意改动。在未标出电流参考方向的情况下, 电流的正负是毫无意义的。

### 1.2.2 电压及其参考方向

在图 1-4 中, 假定直流电流进入 A 端, 通过元件又从 B 端回来。同时, 假定推动电荷流过元件需要消耗能量, 所以在两个端点之间存在电压(或电位差)。这时称 A 点为高电位, 即正极, B 点为低电位, 即负极。电荷流过元件消耗能量表现为电压降。

端点 A、B 间的电压是推动电荷流过元件所需做功的度量。电压的单位是 V(伏特), 用  $U$  表示直流电压,  $u$  表示瞬时电压。

如同需要为电流规定参考方向一样, 也需要为电压规定参考方向(极性)。

电流的参考方向用箭头表示, 电压的参考方向则用“+”、“-”符号来表示。“+”表示高电位, “-”表示低电位。图 1-5 中表示了相同电压的两种表示方法。

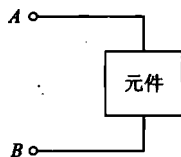


图 1-4 一般两端元件

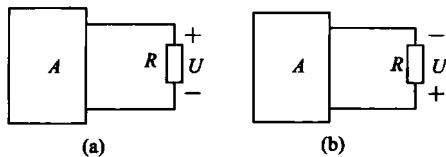


图 1-5 电压的两种等效表示

与电流的参考方向一样, 在电路图中, 对元件所标的电压参考方向也可以任意选定, 不一定代表电压的真实极性, 它们配合着电压的正值或负值, 表明电压的真实极性。

### 1.2.3 功率和能量

如果设定流过元件的电流的参考方向是从高电位流向低电位, 即两者的参考方向一致, 则我们把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向, 如图 1-6 所示。当两者不一致时, 称为非关联参考方向。

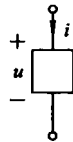


图 1-6 关联参考方向

电流的参考方向是从高电位流向低电位的方向, 称为关联参考方向。

在同一电路中, 有的是关联参考方向, 有的则是非关联参考方向。在如图 1-7 的电路

中,对电阻元件  $R$  来说,  $U$  与  $I$  是关联参考方向;而对电源元件  $E$  来说,  $U$  与  $I$  则是非关联参考方向。

功率与电流和电压及其参考方向密切相关。当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时,元件消耗能量;当正电荷从电压的“-”极经元件运动到电压的“+”极时,元件向外释放能量。功率则是能量消耗的速率。因此,在如图 1-8 所示的关联参考方向下,网络消耗的功率可写为

$$p = ui \quad (1-2)$$

其中,  $p$  是功率,单位为 W(瓦特);  $i$  是电流,单位为 A;  $u$  是电压,单位为 V。

当  $p > 0$  时,网络消耗功率;当  $p < 0$  时,网络产生功率。但对整个网络而言,功率总是平衡的,即消耗的功率等于产生的功率。

在非关联参考方向下,网络消耗的功率可写为

$$p = -ui \quad (1-3)$$

**【例 1-1】** 已知  $U=4\text{ V}$ ,  $I=-3\text{ A}$ , 求图 1-9 所示电路中的功率。

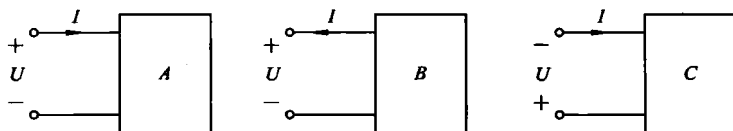


图 1-9 网络 A、B、C 及关联方向

**解** 对于网络 A,电压和电流采用关联参考方向,其功率为

$$P = UI = 4(-3) = -12\text{ W}$$

表示网络 A 产生功率 12 W。

对于网络 B,电压和电流采用非关联参考方向,其功率为

$$P = -UI = -4(-3) = 12\text{ W}$$

表示网络 B 消耗功率 12 W。

对于网络 C,电压和电流采用非关联参考方向,其功率为

$$P = -UI = -4(-3) = 12\text{ W}$$

表示网络 C 消耗功率 12 W。

在关联参考方向下,功率  $P=UI$ ;在非关联方向下,功率  $P=-UI$ 。 $P$  为正时,表示电路消耗功率; $P$  为负时,表示电路产生功率。

在关联参考方向下,功率和能量的关系是

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-4)$$

网络消耗能量的速率就是功率。在  $0 \sim t$  的时刻内,网络消耗的能量为

$$\omega = \int_0^t p(\xi) d\xi \quad (1-5)$$

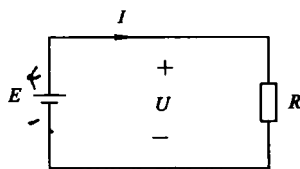


图 1-7 说明关联参考方向用图

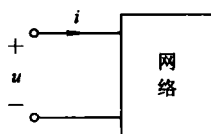


图 1-8 网络及关联方向



能量  $w$  的单位是 J(焦耳)。若功率  $p(t)=P$  为常数, 则有

$$W = Pt$$

电力工程中常用“千瓦时”(单位符号  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ) 作为电量的单位,  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  就是通常所说的 1 度电。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \times 3600 = 3.6 \text{ MJ}$$

### 1.2.4 国际单位制

世界范围内的主要工程学会和大多数工程师都采用国际单位制(缩写为 SI), 所以本书也采用国际单位制。

SI 制以六个定义量为基础, 见表 1-2。另外, 还导出了一些常用物理量的单位和符号, 见表 1-3。在许多情况下, SI 制不是太大就是太小不便于使用, 因此经常将 10 的幂的标准前缀应用到基本单位中, 如表 1-4 所示。

表 1-2 国际单位制(SI)

量	基本单位	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
发光强度	坎德拉	cd

表 1-3 SI 导出单位

量	单位名称	符号
频率	赫兹	Hz
能量	焦耳	J
功率	瓦特	W
电荷量	库仑	C
电压	伏特	V
电阻	欧姆	$\Omega$
电导	西门子	S
电容	法拉	F
磁通量	韦伯	Wb
电感	亨利	H

表 1-4 部分 SI 前缀

幂	前缀	符号
$10^9$	吉	G
$10^6$	兆	M
$10^3$	千	k
$10^{-3}$	毫	m
$10^{-6}$	微	$\mu$
$10^{-9}$	纳	n
$10^{-12}$	皮	p

自测题 1-1 在图 1-10 中, 发出 15 W 功率的是图\_\_\_\_\_。

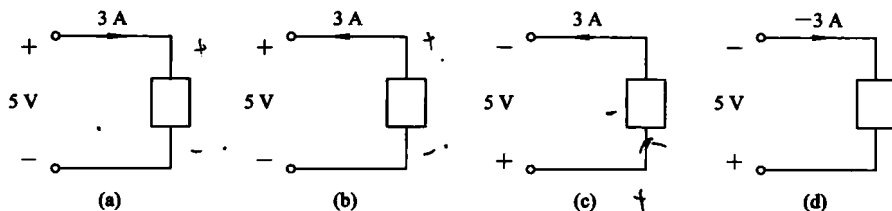


图 1-10 自测题 1-1 的电路