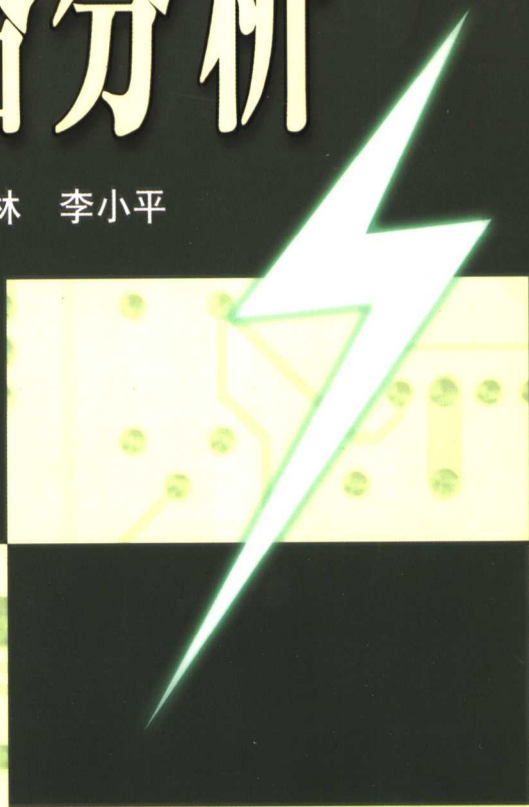


高等学校教材

电路分析

张永瑞 王松林 李小平



高等教育出版社

高等学校教材

电 路 分 析

张永瑞 王松林 李小平

高等教育出版社

内容提要

本书是根据国家教育部修订的《高等工业学校电路分析基础基本要求》,并充分考虑各院校新教学计划时数及现代电子科技新的发展趋势,为电子信息类各专业本科生编写的教材。全书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。基本概念讲述透彻;基本分析方法归类恰当、思路清晰、步骤明确;举例类型多、结合工程实际;所介绍的 OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算,对读者学习、掌握现代电路分析的方法和工具,跟上电子科技发展的潮流非常有益。本书可作为通信工程、电子信息工程、信息工程、电子科学与技术、计算机科学技术等专业的本科生教材;对从事电子类专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 张永瑞, 王松林, 李小平. —北京: 高等教育出版社, 2004.10
ISBN 7-04-014530-8

I. 电... II. ①张...②王...③李... 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 (2004) 第 094409 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 26.75
字 数 480 000

版 次 2004 年 10 月第 1 版
印 次 2004 年 10 月第 1 次印刷
定 价 30.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:14530-00

前 言

加强基础、拓宽专业口径、培养通用型人才,适应社会对人才知识结构的需求,这是各高等院校新教学计划共同的培养目标之一。而改革课程体系,科学地整合课程内容,使用现代化的教学手段与方法,这是更深层次、具体的教育内容。本书就是基于这样的时代背景,并考虑进入 21 世纪电工电子系列课程改革趋势、潮流及取得的新成果,特为通信工程、电子信息工程、探测制导与控制、计算机科学与技术、测控技术与仪器等专业的本科生编写的。

本书编写的主要特点是:

- (1) 加强基本概念,筛选经典内容,突出基本、常用的电路分析方法。
- (2) 不追求理论上的系统、完整、方方面面一应俱全,也不回顾电路理论发展的历史,但注重基础理论的应用。举例力求联系工程实际,具有典型性。
- (3) 讲述概念力求简练、准确、清晰,问题讨论重视从物理概念上讲清道理,多做定性分析,对于必需的定量数学推导,交代清楚思路,过程简捷,结论明确醒目。
- (4) 注重教学方法。作为教材应使教师教学实施方便,学生容易自学,本书融入了编者几十年在本课程教学中的经验、心得和体会。在结构安排上注重逻辑性和条理性,文字表述方面力求通俗易懂。
- (5) 引入先进的电路分析方法及工具软件。时代在前进,科学技术在日新月异地发展,人才培养的模式也应与之适应,现代电路与系统中使用 OrCAD/PSpice、MATLAB 工具软件非常普遍,在本书的第十章和第十一章安排了这两部分的内容,目的是使本科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,待毕业后走上工作岗位,能很快地适应现代电路分析、设计工作的需要。

本书由电路基本概念与定律、电阻电路一般分析法、电路定理、动态元件、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、频率特性、双口网络、非线性电阻电路、OrCAD/PSpice 用于电路分析、MATLAB 用于电路计算等十一章内容组成。编写内

容与深浅度符合教育部教学指导委员会制定的电路分析基础课程的基本要求。张永瑞同志编写一、二章,王松林同志编写三、四、五、九、十、十一章,李小平同志编写六、七、八章,全书由张永瑞主编并负责统稿。本书承蒙国家教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、西北工业大学段哲民教授审稿,段教授仔细审阅并提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢。在编写本书稿的过程中得到了作者同事们的许多帮助,在这里也一并表示衷心的感谢,还要感谢我们参阅的所有文献的作者们,是他们编著的好教材为我们提供了丰富的资料。

限于编者水平,书中定有不少缺陷和错误,敬请读者批评指正。

编者于西安电子科技大学

2004. 8

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

策划编辑 刘淑扬

责任编辑 刘 洋

封面设计 李卫青

责任绘图 朱 静

版式设计 范晓红

责任校对 朱惠芳

责任印制 杨 明

目 录

第一章 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路模型	1
1.1.1 实际电路组成与功能	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路变量	4
1.2.1 电流	5
1.2.2 电压	6
1.2.3 电功率	9
1.3 电阻元件与欧姆定律	12
1.3.1 电阻元件	12
1.3.2 欧姆定律	13
1.3.3 电阻元件上消耗的功率与能量	14
1.4 理想电源	16
1.4.1 理想电压源	16
1.4.2 理想电流源	19
1.5 基尔霍夫定律	21
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	22
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	23
1.6 电路等效	27
1.6.1 电路等效的一般概念	27
1.6.2 电阻的串联等效与并联等效	28
1.6.3 理想电源的串联等效与并联等效	36
1.7 实际电源的模型及其互换等效	37
1.7.1 实际电源的模型	38
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	39
1.8 电阻 Δ 、Y 电路互换等效	42
1.8.1 Δ 形电路等效变换为 Y 形电路	42

1.8.2 Y形电路等效变换为 Δ 形电路	44
1.9 受控源及含受控源电路的等效	47
1.9.1 受控源	47
1.9.2 含受控源电路的等效	49
1.10 运算放大器概述	52
1.10.1 理想运放的图形符号及电路模型	52
1.10.2 理想运放三种输入方式与虚短路、虚断路的概念	54
1.10.3 运放两种典型运算	55
习题一	56
第二章 电阻电路的一般分析方法	65
2.1 图与电路方程	65
2.1.1 网络(电路)的拓扑图	65
2.1.2 回路、割集、树	67
2.1.3 KCL和KVL的独立方程	69
2.2 $2b$ 法和 b 法	72
2.2.1 $2b$ 法	72
2.2.2 b 法	73
2.3 回路法与网孔法	76
2.3.1 回路法	76
2.3.2 网孔法	78
2.4 割集法与节点法	85
2.4.1 割集法	85
2.4.2 节点法	87
习题二	94
第三章 电路定理	99
3.1 齐次定理和叠加定理	99
3.1.1 齐次定理	99
3.1.2 叠加定理	101
3.2 替代定理	105
3.3 等效电源定理	107
3.3.1 戴维宁定理	108
3.3.2 诺顿定理	110
3.3.3 等效电源定理应用举例	113
3.4 最大功率传输定理	117

3.5 特勒根定理	119
3.6 互易定理	123
习题三	125
第四章 动态元件	130
4.1 电容元件	130
4.2 电感元件	135
4.3 电容与电感的串、并联等效	138
4.4 耦合电感元件	141
4.4.1 耦合线圈	142
4.4.2 耦合电感的伏安关系	143
4.4.3 耦合电感的 T 形去耦等效电路	146
4.5 变压器	147
4.5.1 理想变压器	147
4.5.2 全耦合变压器的模型	150
4.5.3 实际变压器的模型	151
习题四	152
第五章 动态电路的时域分析	157
5.1 动态电路的方程及其解	157
5.1.1 动态电路方程的建立	157
5.1.2 微分方程的经典解法	159
5.2 电路的初始值	161
5.2.1 独立初始值	161
5.2.2 非独立初始值	164
5.3 一阶电路的零输入响应与时间常数	166
5.4 一阶电路的零状态响应	170
5.5 一阶电路的全响应——三要素公式	174
5.6 一阶电路的阶跃响应	182
5.6.1 阶跃函数	182
5.6.2 阶跃响应	184
5.7 二阶电路分析	185
5.7.1 零输入响应	186
5.7.2 阶跃响应	188
5.8 正弦激励下一阶电路的响应	190

习题五	192
第六章 正弦稳态电路分析	200
6.1 正弦量	201
6.1.1 正弦量的三要素	201
6.1.2 正弦量的有效值	202
6.1.3 相位差	203
6.2 正弦量的相量表示	205
6.2.1 正弦量与相量	205
6.2.2 正弦量的相量运算	207
6.3 电路定律的相量形式	209
6.3.1 无源元件 VAR 的相量形式	209
6.3.2 KCL 与 KVL 的相量形式	215
6.4 阻抗与导纳	217
6.4.1 阻抗与导纳	217
6.4.2 正弦稳态电路相量模型	224
6.5 正弦稳态电路的相量分析法	224
6.5.1 方程法	224
6.5.2 等效法	226
6.5.3 相量图的辅助解法	229
6.6 正弦稳态电路的功率	230
6.6.1 一端口电路的功率	231
6.6.2 最大功率传输条件	236
6.7 含耦合电感与理想变压器电路的正弦稳态分析	239
6.7.1 回路法分析	240
6.7.2 一次侧、二次侧等效电路	241
6.7.3 T 形去耦等效电路	245
6.8 三相电路	248
6.8.1 对称三相电源	248
6.8.2 Y-Y 电路分析	251
6.8.3 Y- Δ 电路分析	253
习题六	256
第七章 电路的频率响应	266
7.1 频率响应的基本概念	266
7.1.1 网络函数	267

7.1.2 频率响应	267
7.2 一阶电路的频率响应	269
7.2.1 RC 一阶低通电路	270
7.2.2 RC 一阶高通电路	270
7.2.3 RC 一阶全通电路	272
7.3 RLC 二阶串联电路的频率响应	273
7.3.1 RLC 二阶串联电路的频率响应	273
7.3.2 RLC 串联谐振电路	276
7.4 RLC 二阶并联电路的频率响应	281
7.4.1 实用 RLC 并联谐振电路	281
7.4.2 RLC 二阶并联电路的频率响应	286
习题七	290
第八章 二端口网络	295
8.1 二端口网络的方程与参数	295
8.1.1 Z 参数方程和 Y 参数方程	296
8.1.2 A 参数方程	303
8.1.3 H 参数方程	304
8.1.4 各种参数之间的关系	306
8.2 二端口网络的网络函数	307
8.2.1 用 Z 参数表示网络函数	308
8.2.2 用 A 参数表示网络函数	311
8.2.3 特性阻抗	314
8.3 二端口网络的等效	315
8.3.1 二端口网络的 Z 参数等效电路	315
8.3.2 二端口网络的 Y 参数等效电路	316
8.4 二端口网络的级联	318
习题八	321
第九章 非线性电阻电路分析	326
9.1 非线性电阻元件	326
9.2 非线性电阻的串联和并联	330
9.2.1 非线性电阻的串联	330
9.2.2 非线性电阻的并联	333
9.3 非线性电阻电路分析	335
9.3.1 图解法	335

9.3.2 分段线性化法	337
9.3.3 小信号分析法	339
习题九	341
第十章 OrCAD/PSpice 用于电路分析	346
10.1 OrCAD/PSpice 软件的功能	346
10.1.1 OrCAD 的组成	346
10.1.2 OrCAD/PSpice 的功能	347
10.2 OrCAD 中与 PSpice 配套使用的软件	348
10.3 PSpice 的有关规定	349
10.3.1 PSpice 中的数字	349
10.3.2 PSpice 中的单位	349
10.3.3 PSpice 中的运算表达式和函数	349
10.3.4 电路图节点编号和输出变量表达式	349
10.3.5 OrCAD/Capture 常用元器件符号库	351
10.4 模拟电路分析的基本过程	351
10.4.1 绘制电路原理图	351
10.4.2 设置电路分析类型及其参数	358
10.4.3 电路模拟分析	360
10.4.4 电路模拟结果分析	361
10.5 PSpice 用于电路分析举例	361
10.5.1 直流分析	361
10.5.2 时域(瞬态)分析	368
10.5.3 交流分析	372
第十一章 MATLAB 用于电路计算	378
11.1 MATLAB 语言简介	378
11.1.1 MATLAB 语言的特点	378
11.1.2 MATLAB 使用入门	379
11.1.3 MATLAB 基本语法	381
11.1.4 获得 MATLAB 在线帮助	386
11.2 MATLAB 用于电路计算举例	386
11.2.1 电阻电路计算	386
11.2.2 时域电路计算	392
11.2.3 正弦稳态电路计算	397

部分习题参考答案	402
参考文献	413

第一章

电路的基本概念与定律

学习“电路分析基础”课程主要是掌握电路的基本规律和基本分析方法。本章从建立电路模型、认识电路变量等最基本的问题出发,重点讨论理想电源、欧姆定律、基尔霍夫定律、电路等效等重要概念。本章末介绍受控源与运算放大器。

1.1 电路模型

“模型”是现代自然科学、社会科学分析研究问题时普遍使用的重要概念。如,没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究的一种模型;不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学学科研究的一种模型。人们在分析、设计某一实际系统时,几乎都采用模型化的方法,即先建立能反映该系统基本特性的模型,使问题得到合理简化,然后对该模型进行定量分析,以求得该系统的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此,首先要建立电路模型(circuit model),然后进行定量分析。

1.1.1 实际电路组成与功能

在现代工农业生产、国防建设、科学研究以及日常生活中,使用着各种各样的电器设备,如电动机、雷达导航设备、计算机、电视机、手机等,广义上说,这些电器设备都是实际中的电路。

图 1.1.1 是最简单的一种实际照明电路。它由三部分组成:① 是提供电能的能源,简称电源(source),它的作用是将其他形式的能量转换为电能(图中干电池电源是将化学能转换为电能);② 是用电装置,统称为负载(load),它将电

源供给的电能转化为其他形式的能量(图中白炽灯将电能转换成光能和热能);③是连接电源与负载传输电能的金属导线,简称导线(lead)。图中,S是为了节约电能所加的控制开关,需要照明时将开关S闭合,不需要照明时将S打开。电源、负载与连接导线是任何实际电路都不可缺少的三个组成部分。

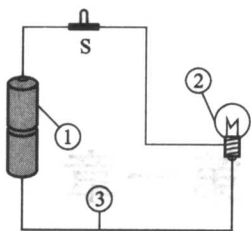


图 1.1.1 手电筒电路

实际电路种类繁多,但就其功能来说可概括为两个方面。其一,是进行能量的产生、传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(热能、水的势能、原子能、太阳能等)转换成电能,通过变压器、输电线输送给各用户负载,在那里又把电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是照明工具)、热能(如负载是电炉、电烙铁等),为人们生产、生活所利用。其二,是实现信号的产生、传递、变换、处理与控制。这方面典型的例子有电话、收音机、电视机电路。如图 1.1.2 所示,接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后,通过接收机电路把输入信号(又称激励,excitation)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应,response),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

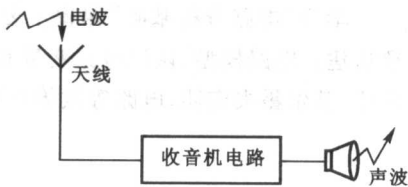


图 1.1.2 收音机电路

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气、电子元器件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感器、照明工具、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁方面却有许多共同的地方,譬如,电阻器、照明工具、电炉等,它们主要是消耗电能,这样可用一个具有两个端钮的理想电阻来反映其消耗电能的特征,其模型符号如图 1.1.3(a)所示;类似的,各种实际电容器主要是储存电能,用一个理想的二端电容来反映其储存电能的特征,理想电容元件的模型符号如图 1.1.3(b)所示;各种实际电感器主要是储存磁能,用一个理想的二端电感元件反映其储存磁能的特征,其模型符号如图 1.1.3(c)所示。

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型,任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件,就能用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型或其组合来表示,构成实际部件的电路模型。譬如,照明工具、电炉、电阻器,它

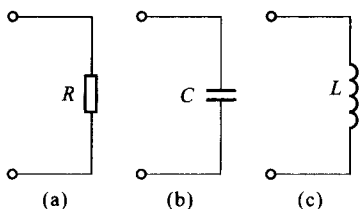


图 1.1.3 理想电阻、电容、电感元件模型

们的主要电磁性能都是消耗电能,在低频应用时,它们中储存的电能、磁能比起它们消耗的电能来说很微小,可以忽略不计,这些实际部件的电路模型都可用图 1.1.3(a)中的理想电阻 R 来表示。这样,就抽掉了这些实际部件的外形、尺寸的差异性,而抓住了它们所表现出来的共性的东西即消耗电能。再如一个实际的电感器,它是在一个骨架上用金属导线绕制而成的,如图 1.1.4(a)所示。如果应用在低频电路里,它所表现出的电磁性能主要是储存磁能,它所消耗的电能与储存的电能都很小,与储存的磁能相比可以忽略不计,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视为图 1.1.4(b)所示的理想电感。如果应用在高频电路里,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它储存的电能仍可忽略,那么,这种情况下的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的理想电阻 R 与体现磁能储存的理想电感 L 相串联,如图 1.1.4(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储存的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1.4(d)来表示。

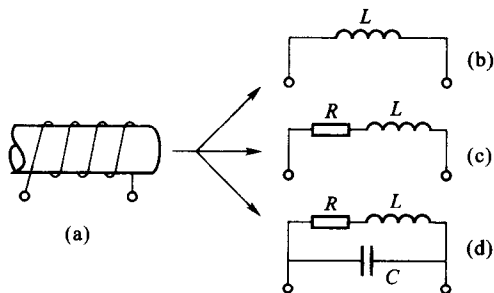


图 1.1.4 实际电感元件在不同应用条件下的模型

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里不一一列举,关于电路部件的模型概念这里再强调说明几点:

(1) 理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件:理想电阻元件只消耗电能(既不储存电能,也不储存磁能);理想电容元件只储存电能(既不消耗电能,也不储存磁能);理想电感元件只储存磁能(既不消耗电能,也不储存电

能)。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义,实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际,是无用的。这就如实际中并不存在“质点”,但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样,人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。

(2) 不同的实际电路部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下可用同一个模型表示,如上所述的照明工具、电炉、电阻器这些不同的实际电路部件在低频电路里都可用理想电阻 R 表示。

(3) 同一个实际电路部件在不同的应用条件下,它的模型也可以有不同的形式,如图 1.1.4 所示的实际电感器在各种应用条件下的模型。

将实际电路中各个部件用其模型符号表示,这样画出的图称为实际电路的电路模型图,亦称为电原理图。如图 1.1.5 就是图 1.1.1 实际电路的电路模型。

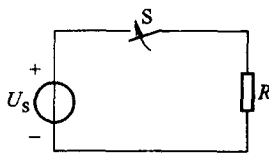


图 1.1.5 图 1.1.1 实际电路的模型图

还应指出,实际电路中使用的电路部件一般都和电能的消耗现象及电能、磁能的储存现象有关,它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所述的“理想化”是指:假定这些现象可以分别研究,并且这些电磁

过程都分别集中在各元件内部进行。这样的元件称为集总(lumped)参数元件,简称为集总元件,由集总元件构成的电路称为集总参数电路(lumped circuit)。众所周知,电荷激发电场,电流激发磁场,一切电磁现象的本质都应是电场、磁场的问题。集总参数电路问题是满足一定条件下的电场、磁场问题的简化问题。即是说,用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的,它要求实际电路的尺寸 l (长度)要远小于电路工作时的电磁波的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda \quad (1.1.1)$$

集总参数电路的突出特点:电流在集总参数电路中流动不需要时间;没有任何电、磁能量辐射,电磁能量的消耗、储存都集中在元件内部进行。

若不能满足式(1.1.1)条件,实际电路便不能按集总参数电路模型来处理。本书只讨论集总参数电路。

1.2 电路变量

在电路问题分析中,人们主要关注的物理量是电流、电压和功率,有时也涉