

面向 21 世纪

高等学校系列教材

电路分析基础 (第三版)

Fundamentals of Circuit Analysis

张永瑞

西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>



面向 21 世纪高等学校系列教材

电路分析基础

(第三版)

张永瑞

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共 7 章, 内容包括电路的基本概念和定律、电路的基本分析方法、常用的电路定理、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、互感与理想变压器、电路频率响应。

该书基本概念讲述清晰, 易于读者接受理解; 基本分析方法讲解透彻, 步骤明确, 读者易于掌握; 思考与练习、习题、自我检查题配置齐全, 难易度适中, 方便学生自学和教师施教。

本书可作为通信工程、电子信息工程、应用电子技术、自动控制、计算机科学与技术、测控技术与仪器等专业的大学生教材; 对从事电类专业的工程技术人员亦有重要的参考价值。

为便于教师施教和学生学习, 与本书配套的教与学指导书也将随后由西安电子科技大学出版社出版。

★ 本书配有电子教案, 需要的教师可与出版社联系, 免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/张永瑞.

—3 版. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2006. 6(2006. 12 重印)

(面向 21 世纪高等学校系列教材)

ISBN 7 - 5606 - 0607 - 5

I. 电… II. 张… 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(2006)第 016524 号

策 划 夏大平

责任编辑 夏大平

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: xdupfxb@pub. xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 1987 年 5 月第 1 版 2006 年 6 月第 3 版 2006 年 12 月第 32 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22.75

字 数 529 千字

印 数 227 001~235 000 册

定 价 28.00 元

ISBN 7 - 5606 - 0607 - 5/TM • 0011

XDUP 0877013 - 32

*** 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。

前 言

国家教育部于1998年调整了专业目录,各院校随之制订新专业教学计划并对1999年入校新生执行新专业教学计划实施培养,距今已经历了近8年,有四届本科生毕业。这期间,积累了许多值得借鉴的经验和值得吸取的教训。所以,近来各院校都在修订新一轮的教学计划,使之更加完善,以利于培养出更多的基础扎实、专业知识面宽、适应性强的通用型人才。

课程内容的调整、改革与教学计划中对课程的安排和要求紧密相关。考虑现代电子科技的发展趋势、国家电工电子基地建设中所取得的新成果以及精品课程建设中所积累的好经验,依据“电路分析基础”在修订新教学计划中的主干课程位置与要求,紧扣教育部电气电子课程教学指导委员会于2004年修订的《电路分析基础基本要求》,特修订《电路分析基础》(第二版)一书。

在听取、收集使用《电路分析基础》(第二版)作教材的老师和学生的意见的基础上,本版教材特在以下几个方面作了修订。

1. 增加“电路频率响应”一章新内容。作为通信工程、电子信息工程等专业教学计划中的后续课程“电子线路”、“通信原理”、“信号处理”等,都应用到了频率特性这一重要概念,所以在“电路分析基础”课程中建立电路频率特性的初步概念是必要的。在这一章中主要介绍电路频率特性的基本概念,一阶常用的RC低通、高通的频率特性。对于二阶电路,以应用广泛的 rLC 串联谐振电路、 rLC 并联谐振电路为例,重点讨论它们的谐振特点及带通频率特性,诸如上、下截止角频率,中心频率,通频带宽度,谐振曲线,选择性等重要概念。

2. 按照统一的思路,重写了第四、五章,更新配置了思考与练习、习题及自检题。

3. 第一、二、三、六章大体内容保持原貌,只将个别例题更新或补充若干新例题。对个别文字段落作了增加或删减。

考虑教与学的方便,在书前增加常用符号表,书末给出部分练习题、习题、自检题的参考答案。

新版书保留了原书基本概念讲述清晰、举例联系实际、分析方法步骤明确、重点突出、注重教学方法等优点,订正了原书中个别印刷错误。

本书共7章,内容包括电路的基本概念和定律、电路的基本分析方法、常用的电路定理、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、互感与理想变压器、电路频率响应。其中,第一章中的“电阻 Π 、T电路互换等效”一节(即1.8节)、

第三章中的“互易定理”一节(即 3.5 节)、第四章中的“二阶电路分析”一节(即 4.7 节)、第五章中的“三相电路概述”一节(即 5.8 节),其前面都加了 * 号,视各院校各专业教学计划的学时数等要求,施教教师可作取舍。实施完全书内容大约需 60 学时。

为了便于读者自学,教师施教,同时与此书配套出版《〈电路分析基础(第三版)〉教与学指导书和实验与题解》一书,欢迎大家选读。

本书在编辑中得到了编辑部主任夏大平副编审的热情帮助,在此表示衷心的感谢。还要特别感谢多年使用《电路分析基础》(第二版)作教材,并对本书的修编提出许多建设性意见的诸位老师!

由于编著者水平有限,又加上编写时间紧迫,所以书中难免存在不足或错误,恳请广大读者批评指正。

编著者

2006 年 1 月

第二版前言

《电路分析基础》一书自 1987 年出版以来,经应用电子技术、通信工程、电子工程、计算机应用等专业教学使用十余年,深受师生们的欢迎。他们普遍反映教材内容对大学专科的学生实用、够用,编写思想紧扣专科这一层次的教学要求,基本概念讲述清楚,对问题的讨论注重物理概念阐述、分析透彻,举例有典型性且有工程实际观点。每章后有归纳小结,思考与练习、习题、自我检查题配置齐全,方便自学,易于教学。

参照国家教委电工课程指导小组 1993 年修订的“电路分析基础”课程基本要求,面对 21 世纪电工电子系列课程改革的潮流,在听取部分使用本书师生意见的基础上,我们对该书进行了修订,力争使修订版更为完善。修订版保留了原版书的基本体系与风格,在以下几个方面作了修编:

1. 考虑大专层次学生的基础和学制短、教学时数有限的实际情况,修订版本删去了原版书的第二章附录 2-A 电路几何、第三章 § 3.7 电路的对偶性。

2. 遵照教学规律先易后难、循序渐进的原则,采纳了使用原版书部分老师提出的中肯意见,将原书第一章 § 1.5 理想电容元件、§ 1.6 理想电感元件移至第四章第一节。这样安排,使动态电路元件与动态电路时域分析的内容衔接紧凑、自然,有利于教学实施。

3. 对保留原版书的内容也作了较大的改写或重写。如讲述的电路等效概念,修改版书首先着重讲清什么是电路等效,电路等效需要满足的条件,电路等效的对象,电路等效的目的性;接着讨论两种简单的具体电路等效变换方法:电阻串、并联等效与电源串、并联等效。在讲述电阻串并联等效时,作为重点,对串、并联的判别方法做了较详细的说明,以便于初学者掌握使用。类似的重写或做较大改写的内容还有许多,这里不一一列举。

4. 更新了原版书约 1/3 的练习题、习题。将原版书每节后的“练习题”修改为“思考与练习”,增加了利于学生加深概念理解的思考题,删去了原版书中超出大专层次要求的难度大的习题,增加了利于基本概念、基本分析方法练习的习题。

修订版包括:电路的基本概念与定律,电路的基本分析方法,常用的电路定理,动态电路的时域分析,正弦电路的稳态分析,互感与理想变压器等 6 章内容。

实施本课程全部内容大约需 72 学时。

为了便于读者自学,便于读者自检本人学习效果和解题能力,同时与此书配套出版了《〈电路分析基础〉实验与题解》(第二版)一书,欢迎大家选读。

吴大正教授指导了本书的修编工作，审阅了全书并提出了许多宝贵意见。西安交通大学江慰德教授、西北工业大学范世贵教授、西安理工大学崔杜武教授、空军电讯工程学院宁德成教授以及西安电子科技大学编者的同行们，均对本书的修编提出过建设性的意见。在此，编者向他们一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点或错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

1998年1月

常用符号表

q	电荷
ϕ 或 Φ	磁通
φ	相位差
ψ 或 Ψ	磁链
ϕ	初相位
$i(t)$ 或 i	电流瞬时值
I	直流电流; 交流电流的有效值
$\dot{I}$	正弦交流电流的有效值形式相量
I_m	正弦交流电流的振幅值
$\dot{I}_m$	正弦交流电流的振幅值形式相量
$u(t)$ 或 u	电压瞬时值
U	直流电压; 交流电压的有效值
$\dot{U}$	正弦交流电压的有效值形式相量
U_m	正弦交流电压的振幅值
$\dot{U}_m$	正弦交流电压的振幅值形式相量
$p(t)$ 或 p	功率瞬时值
P	直流功率; 交流功率的平均功率或有功功率
Q	无功功率; 品质因数
$\tilde{S}$	复功率
S	视在功率
λ	功率因数
$w(t)$ 或 w	瞬时能量
W	直流能量
$W_{L_{av}}$	电感 L 的平均储能
$W_{C_{av}}$	电容 C 的平均储能
R, r	电阻
R_s	电源内阻
R_L	负载电阻
R_{in}	输入电阻
R_0	戴维宁等效电源内阻
R_o	输出电阻
G, g	电导
L	电感
C	电容

M	互感
Z	阻抗
Z_{in}	输入阻抗
Z_{out}	输出阻抗
Z_L	负载阻抗
X	电抗
X_L	感抗
X_C	容抗
X_{f1}	反映电抗
Y	导纳
Y_{in}	输入导纳
Y_{out}	输出导纳
f	频率
f_c	截止频率
f_{c1}	下截止频率
f_{c2}	上截止频率
f_0	谐振频率
ω	角频率
ω_c	截止角频率
ω_{c1}	下截止角频率
ω_{c2}	上截止角频率
BW	通频带宽度
ω_0	谐振角频率
ρ	特性阻抗
A	放大倍数
τ	时间常数
$y(t)$	电路响应; 电路输出
$y_h(t)$	自由响应
$y_p(t)$	强迫响应
$y_r(t)$	暂态响应
$y_s(t)$	稳态响应
$y_x(t)$	零输入响应
$y_f(t)$	零状态响应
$y(0_+)$	响应在换路后瞬间的数值, 即一阶电路的初始值
$y(\infty)$	响应在换路后 $t=\infty$ 时的数值, 即直流激励一阶电路的稳态值
$\varepsilon(t)$	单位阶跃函数
$g(t)$	单位阶跃响应
$H(j\omega)$	网络函数
OL	欧姆定律

KCL	基尔霍夫电流定律
KVL	基尔霍夫电压定律
KL	基尔霍夫定律
VAR	伏安关系
VCR	电压电流关系

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	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	4
1.2.2 电压	5
1.2.3 电功率	8
思考与练习	10
1.3 欧姆定律	10
1.3.1 欧姆定律	11
1.3.2 电阻元件上消耗的功率与能量	12
思考与练习	13
1.4 理想电源	14
1.4.1 理想电压源	14
1.4.2 理想电流源	16
思考与练习	18
1.5 基尔霍夫定律	19
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	20
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	21
思考与练习	25
1.6 电路等效	26
1.6.1 电路等效的一般概念	26
1.6.2 电阻的串联与并联等效	27
1.6.3 理想电源的串联与并联等效	33
思考与练习	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	37
1.7.2 电压源、电流源模型互换等效	38
思考与练习	40
1.8 电阻 Π 、T 电路互换等效	41
1.8.1 Π 形电路等效变换为 T 形电路	41
1.8.2 T 形电路等效变换为 Π 形电路	43
思考与练习	44
1.9 受控源	45
思考与练习	48
1.10 小结	49

习题一	53
自检题一	58
第二章 电路的基本分析方法	60
2.1 支路电流法	60
2.1.1 支路电流法	61
2.1.2 独立方程的列写	62
思考与练习	66
2.2 网孔分析法	66
2.2.1 网孔电流	66
2.2.2 网孔电流法	67
思考与练习	72
2.3 节点电位法	73
2.3.1 节点电位	74
2.3.2 节点电位法	74
思考与练习	80
2.4 小结	81
习题二	82
自检题二	86
第三章 常用的电路定理	88
3.1 叠加定理和齐次定理	88
3.1.1 叠加定理	88
3.1.2 齐次定理	92
思考与练习	93
3.2 置换定理	93
思考与练习	97
3.3 戴维宁定理与诺顿定理	98
3.3.1 戴维宁定理	98
3.3.2 诺顿定理	100
思考与练习	105
3.4 最大功率传输定理	106
思考与练习	109
* 3.5 互易定理	110
思考与练习	115
3.6 小结	116
习题三	117
自检题三	122
第四章 动态电路时域分析	123
4.1 动态电路元件	123
4.1.1 电感元件	123
4.1.2 电容元件	126
4.1.3 电感、电容的串联和并联等效	129
思考与练习	131

4.2 动态电路方程	132
4.2.1 电路微分方程	132
4.2.2 初始值的计算	133
思考与练习	136
4.3 一阶电路的零输入响应	137
4.3.1 一阶 RC 电路的零输入响应	137
4.3.2 一阶 RL 电路的零输入响应	138
思考与练习	141
4.4 一阶电路的零状态响应	141
4.4.1 一阶 RC 电路的零状态响应	141
4.4.2 一阶 RL 电路的零状态响应	144
思考与练习	146
4.5 一阶电路的全响应	146
4.5.1 全响应及其分解	146
4.5.2 三要素法	148
思考与练习	154
4.6 阶跃函数与电路的阶跃响应	155
4.6.1 阶跃函数	155
4.6.2 阶跃响应	157
思考与练习	159
* 4.7 二阶电路分析	159
4.7.1 零输入响应	160
4.7.2 单位阶跃响应	163
思考与练习	164
4.8 正弦激励下一阶电路的响应	164
思考与练习	166
4.9 小结	167
习题四	169
自检题四	175
第五章 正弦稳态电路分析	177
5.1 正弦交流电的基本概念	177
5.1.1 正弦交流电的三要素	177
5.1.2 相位差	180
5.1.3 有效值	182
思考与练习	183
5.2 正弦交流电的相量表示法	184
思考与练习	189
5.3 基本元件 VCR 的相量形式和 KCL、KVL 的相量形式	189
5.3.1 R 、 L 、 C 的电压、电流关系的相量形式	189
5.3.2 KCL、KVL 的相量形式	193
思考与练习	196
5.4 阻抗与导纳	196
5.4.1 阻抗与导纳的概念	197

5.4.2 阻抗和导纳的串联与并联等效	199
5.4.3 阻抗串联模型和并联模型的等效互换	200
思考与练习	206
5.5 正弦稳态电路相量分析法	207
5.5.1 串、并、混联电路的分析	207
5.5.2 网孔、节点分析法用于正弦稳态电路的分析	209
5.5.3 等效电源定理用于正弦稳态电路的分析	211
思考与练习	213
5.6 正弦稳态电路的功率	214
5.6.1 基本元件的功率和能量	214
5.6.2 一端口网络的功率	219
5.6.3 功率因数的提高	224
思考与练习	227
5.7 正弦稳态电路中的功率传输	228
5.7.1 减小损耗和高效传输问题	228
5.7.2 最大功率传输问题	229
思考与练习	232
* 5.8 三相电路概述	233
5.8.1 三相电源	233
5.8.2 对称三相电路的计算	236
5.8.3 不对称三相电路的计算	240
思考与练习	242
5.9 小结	243
习题五	245
自检题五	251
第六章 互感与理想变压器	252
6.1 耦合电感元件	252
6.1.1 耦合电感的基本概念	252
6.1.2 耦合电感线圈上的电压、电流关系	254
思考与练习	259
6.2 耦合电感的去耦等效	260
6.2.1 耦合电感的串联等效	260
6.2.2 耦合电感的 T 型等效	261
思考与练习	264
6.3 含互感电路的相量法分析	265
6.3.1 含互感电路的方程法分析	265
6.3.2 含互感电路的等效法分析	266
思考与练习	271
6.4 理想变压器	272
6.4.1 理想变压器的三个理想条件	272
6.4.2 理想变压器的主要性能	273
思考与练习	278
6.5 实际变压器模型	279

6.5.1 空芯变压器	279
6.5.2 铁芯变压器	282
思考与练习	285
6.6 小结	286
习题六	287
自检题六	292
第七章 电路频率响应	294
7.1 网络函数与频率响应	294
7.1.1 网络函数	294
7.1.2 网络频响特性	295
思考与练习	297
7.2 常用 RC 一阶电路的频率特性	297
7.2.1 RC 一阶低通电路的频率特性	297
7.2.2 RC 一阶高通电路的频率特性	301
思考与练习	303
7.3 常用 rLC 串联谐振电路的频率特性	304
7.3.1 串联谐振	305
7.3.2 频率特性	309
7.3.3 通频带	312
思考与练习	315
7.4 实用 rLC 并联谐振电路的频率特性	316
7.4.1 并联谐振	316
7.4.2 频率特性	319
7.4.3 通频带	321
思考与练习	324
7.5 小结	325
习题七	327
自检题七	331
部分练习题与习题、自检题参考答案	332
参考文献	348

第一章 电路的基本概念和定律

学习“电路分析基础”课程主要是掌握电路的基本规律和分析计算方法。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。本章末介绍了受控源。

1.1 电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究中普遍使用的重要概念。如，没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型；不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学科研究中的一种模型。人们在分析研究某一实际装置时，也常采用模型化的方法，即先建立能反映该装置基本特性的模型，使问题得到合理简化，然后对该模型进行定量分析，以求得该装置的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此，我们首先要建立电路模型，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 3 部分组成：① 是提供电能的能源，简称电源，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，统称其为负载，它将电源供给的电能转换为其他形式的能量（图中灯泡将电能转换为光和热能）；③ 是连接电源与负载传输电能的金属导线，简称导线。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 3 个组成部分。

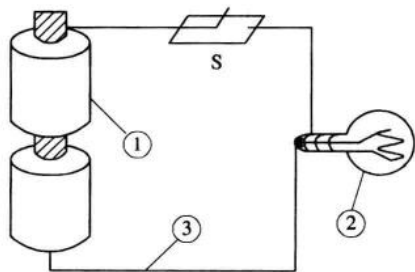


图 1.1-1 手电筒电路

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,进行能量的传输、分配与转换。典型的例子是电力系统中的输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(或热能、或水的势能、或原子能等)转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用户负载,在那里又把电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉等),为人们生产、生活所利用。其二,实现信息的传递与处理。这方面典型的例子有电话、收音机、电视机、手机等中的电路。接收天线把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后,通过电路把输入信号(又称激励)变换或处理为人们所需要的输出信号(又称响应),送到扬声器或显像管,再还原为语言、音乐或图像。

实际电路多种多样,具体的功能也各不相同,但它们有其共性,正是在这种共性的基础上,形成了电路理论这一学科。

1.1.2 电路模型

在实际电路中使用着各种电气元器件(又统称为电路部件),如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方。譬如,电阻器、灯泡、电炉等,它们主要是消耗电能的,这样我们可用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征,当电流通过它时,在它内部进行着把电能转换为其他形式能量的过程。理想电阻的模型符号如图 1.1-2(a)所示。类似地,各种实际电容器主要是储存电能的,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征,理想电容的模型符号如图 1.1-2(b)所示。用一个理想的二端电感来反映储存磁能的特征,其模型符号如图 1.1-2(c)所示。

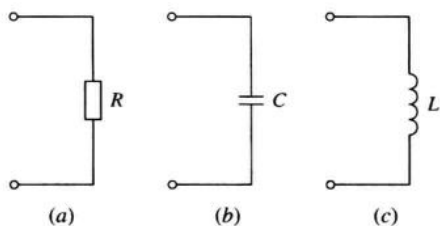


图 1.1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

有了上述定义的理想电阻、理想电容、理想电感元件模型,对于任何一个实际的电阻器、电容器、电感器部件,都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,灯泡、电炉、电阻器,它们的主要电磁性能都是消耗电能,在低频应用时,它们中储藏的电能、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 1.1-2(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、尺寸等的差异性,而抓住了它们所表现出来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良金属导线绕制而成的,如图 1.1-3(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藏磁能,它所消耗的电能与储藏的电能都很小,与储藏的磁能相比可以忽略,在这种应用条件下的实际电感器,它的模型可视作图 1.1-3(b)所示的理想电感 L 。如果应用在较高频率的电路中,绕制该线圈的导线所消耗的电能需要考虑,它储藏的电能仍可忽略,那么,这种情况的实际电感器的模型就可用体现电能消耗的电阻 R 与体现磁能储藏的电感 L 相串联表示,如图 1.1-3(c)所示。如果这个实际电感器应用在更高频率的电路中,它储藏的电能也需要考虑,那么这种情况下的实际电感器的电路模型可用图 1.1-3(d)来表示。