



北京大学信息科学技术学院系列教材

电路分析原理

Principle of Circuit Analysis

胡薇薇 编著

清华大学出版社





北京大学信息科学技术学院系

电路分析原理

Principle of Circuit Analysis

胡薇薇 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是为配合北京大学信息科学技术学院本科生主干基础课、北京市精品课程“电路分析原理”课堂教学而编写。

为了使学生们在学习和选择参考书时减少困惑,本书力图体现如下特点:力图阐述得更清楚、更简明、更有条理、更容易理解和掌握;力图以简明、清晰、条理、渐进、渊源的方式说明和强调基本概念、基本方法和基本定理;配合双语教学,书中的标题和一些必要的名词、术语、概念、原理均辅以英文书写,各章练习题以中英双语书写;习题三星分级,辅以自学自测。

本书可作为高等学校电类基础课“电路分析”的教材,并可供其他相关人员参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路分析原理/胡薇薇编著.--北京:清华大学出版社,2014

北京大学信息科学技术学院系列教材

ISBN 978-7-302-37294-3

I. ①电… II. ①胡… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 159499 号

责任编辑:梁颖 薛阳

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:21.25 彩 插:1 字 数:440千字

版 次:2014年10月第1版

印 次:2014年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元



余道衡先生是我的教学导师，是我职业生涯的明灯



李瀚荪先生是我的教学偶像，他的书是我职业生涯的起点

序 一

我很高兴应胡薇薇教授之邀，为她的新书《电路分析原理》作序。我在北京大学电子学系讲授“电路分析原理”课二十多年，2002年退休后，由胡老师接班至今。十多年来，我仍关心着这门课程的改革与发展，对胡老师的讲课风格和特色，以及新书成书的过程都有比较清楚的了解。

“电路分析原理”是北大电子学系的一门主干基础课，又是面对外系的大类平台课，努力体现北大“加强基础、尊重选择”的原则。我觉得新书作为相应的教材，继承了北大电子学系几十年来这门课程的理论框架，在《电路分析》和《电路分析方法》两书的基础上，在十多年的教学实践和研究国内外同类优秀教材的过程中，不断发展和创新，逐步形成了比较严格的理论体系，是一本适合北大教学的有特色的优秀教材。

在内容选取和论述方面，新书与诸多教材有不少不同之处，具有比较鲜明的理科特色，例如：

(1) 注重数学的严密性，几乎所有定理都给出数学证明。

(2) 把数学解析方法与等效电路方法、图式方法对照进行分析，物理概念清楚。

(3) 保持内容的完整性，重视无源电路与有源电路的综合，时域分析与频域分析的结合；线性电路与非线性电路的结合；低频电路与高频电路的结合。

(4) 把二极管、三极管、场效应管、运算放大电路的等效电路模型引入电路分析中，扩大了电路分析的应用范围。

(5) 用受控源的概念分析负阻、忆阻、回转器等重要器件的特性，使内容更加深化。

(6) 把阻抗和等效电源概念推广到拉氏变换域中，给出了有初值电感和有初值电容的等效电路，方便地处理这类比较难于计算的电路。

(7) 把戴维南定理，诺顿定理推广到变换域电路中，扩大了应用范围。

(8) 把双口网络分析方法推广到无源传输线电路中，深入分析了入射、反射、匹配、吸收等概念和求阶跃响应的方法，可以容易地求出传输线电路的一些重要

性质。

(9) 关于电路 Q 值、负阻的概念，新书的论述和分析也有新意。

在合理组织教学和引导学生自主学习方面，新书有明显的体现，例如：

(1) 每章开头都列出相应的提纲；每章结尾都有精炼的小结，便于学生自主钻研。

(2) 在每个重要概念或方法后都配有精选的例题，帮助学生正确理解和应用。

(3) 在每章中都提出一些富有启发性的“想一想”问题，引导学生深入思考。

(4) 每章附有适量的针对性强的习题，采用“三星分级”并给出部分答案，满足不同程度学生的需要，帮助学生拓宽思路，提高分析问题和解决问题的能力，增强学好本课程的信心。

(5) 书中的许多问题和习题很有新意，是胡老师在十多年的教学过程中，结合讲授、答疑、讨论，精心设计、精心选择的，在提高教学质量方面起到了重要作用。这些问题和习题都是珍贵的资料，很有参考价值。

看了书稿还有两点感想：

(1) 北大电子学系历来主张，学生不仅要深入研读教材，还要阅读几本不同风格的参考书，了解不同观点和见解，才能开阔思路，深入思考，学好基础课。

北大的教材应该是写作严谨，质量上乘，突显自己的特色和风格，既是适应北大教学要求的优秀指导书，又是能引导学习兴趣、培养正确方法，启发深入思考，激励自主钻研的参考书。胡老师的新书正是努力体现这种写书理念的一本好书。

(2) 要能写出一本好教材，作者的学术背景很重要。教师具有高的科学水平和研究经历，才能对教材内容有深刻的掌握。教师热爱教学、热爱学生，有长期丰富的教学实践，才能对教学方法有灵活体现。胡老师具备了两方面的实力和品格，为她完成新书奠定了坚实基础。

我相信新书的出版对北大电子学系电路分析原理课教学质量的提高会有重要作用。新书对于国内外同行也会有一定的参考价值。我祝贺新书早日问世。

余道衡

2014年4月于北大燕北园

序 二

近闻北京大学胡薇薇教授撰写的《电路分析原理》初稿，感到很有特色、与众不同。足见胡教授对书稿是费了不少精力的。最大亮点在习题部分。习题是教材的重要组成部分，关系到教材是否好用这一基本问题。重正文、轻习题，是不少教材的通病！被认为是小问题的，在教学中往往迁到大困难！在这本初稿中，胡教授根据不同要求、难易程度，把习题三星分级。习题有与正文密切配合者，旨在加强对所学基本原理的理解和运用（如习题9-24）；有从科研课题中提炼而来者（如习题5-23），旨在拓宽学生思路，联系科研背景；有一般联系实际者（如习题4-13），旨在提高学生学习兴趣。可供教师、学生选用。目前、国内外的电路课程教材都注重联系实际问题，方法各异，通过习题来解决不失为一种好办法。自由选用，不致与学生水平、学习内容相差太远。另外，习题中、英文对照也为双语教学提供一条切实可行的道路，不

致影响课程的教学任务，值得推广。

书稿的另一特色是它的“亲民(学生)性”，对学生的亲切关心和指导，“体贴入微”，跃然纸上。这对提高学生学习的主动性会起很大作用的。

书稿以不大的篇幅覆盖了从集中参数到分佈参数电路、从线性到非线性电路的内容。体现了作者归纳、组织教学内容的能力，稿中还提出一些作者的观点，如“源”的概念：“三大基本分析方法”的概念等，很有见解。

书稿经修改后，业已付梓，即将出版。胡教授是王楚教授、余道衡教授的高足，年富力强、基础雄厚、踏实肯干，可謂是后继有人。均值得祝贺，故乐为之序。

李瀚荪

2014.7.20

前 言

Preface

1. 定位

本书配合北京市 2008 年精品课程、北京大学本科生主干基础课“电路分析原理”课堂教学,是在原教材(王楚、余道衡,《电路分析》,北京:北京大学出版社,2000 年 9 月;胡薇薇、陈江,《电路分析方法》,北京大学出版社,2009 年 4 月)基础之上编写的,作为学生学习的配套或辅助教材使用。本书也可作为高等院校电子与信息科学类专业学生的教材或参考书选用,也可供相关专业的研究生、教师及专业技术人员参考。

2. 特点

国内外电路分析的教科书已出版许多,为了使学生们在学习和选择参考书时减少困惑,本书力图提供一本具有如下特点的电路分析教材:

- 以简明、清晰、条理、渐进、渊源的方式说明和强调三基(基本概念、基本方法、基本定理)内容,对比较难理解的概念和原理,以及比较有争议的内容给以特别关注,力图阐述更清楚明了、更容易理解和掌握。
- 配合双语教学,书中的标题和一些必要的名词、术语、概念、原理均辅以英文书写,各章练习题以中英文书写。
- 习题三星分级,辅以自学自测参考答案。一颗星“*”表示理解和掌握三基的简单练习;两颗星“**”表示掌握和运用学习内容的习题,可以检查学生对章节知识的理解程度,增进内容掌握,顺利进入后续学习;三颗星“***”表示一些拓宽思路或是有一定难度的习题,有些习题的内容可能在章节知识层面上未有涉及,但却是检查学生理解和运用所学原理程度的小“窍门”,有些题目选自高年级学生或研究生的研究课题,读者可以根据自己的兴趣或是不同深度需求去选择,从而拓宽知识、加深对原理的理解。

3. 致谢

特别感谢德高望重的余道衡先生和李翰荪先生,认真、严谨、细致地审阅了初稿全文,提出了非常重要的修改意见和建议,使本书质量得到很大的提升。

余道衡先生:课程顾问,初稿阅读,问题、意见和建议回馈。

蒋伟:课程主讲,历年试题共同编写,初稿阅读,问题、意见和建议回馈。

王志军、盖伟新、陈江、马猛、杜朝海、鲁文高:小班课程主讲,初稿阅读,问题、意

见和建议回馈。

陈特：习题英文翻译。

张诚、杨暉健、杨筱舟、陈特、刘成、徐晓帆、王达、刘永强、马思鸣：部分三星习题编写。

北京大学信息科学技术学院 2009 级选课本科生(孙宇翔、薛萍、谈仲伟、潘多、陈佳华)、2010 级选课本科生(刘笑尘、侯冠荣、张航、高翔、张泓亮、卢海昌、袁昊琛、张玮、葛大伟、邹恺衡、张萌、徐袁媛、阮恒心、贾韬、王然、崔一凡、曹萱、牛玉泽、吴俊东)、2011 级选课本科生(魏明、刘利俊)、2012 级选课本科生(杨雨成、柳毓、任哲学、李琪)、2013 级选课本科生(张爽、金纪成、何娴)：初稿阅读,问题、意见和建议回馈。

笔者一直认为有特色的好教材才有编写的必要,应该是好的教学与好的科研合力而为。执笔前曾贪心地希望写一本迄今为止最有特色的电路分析课程教材,为此博览国内外同类优秀教材、追觅现代科技发展脚步,结合在中国科学技术大学、北京大学几十年的教学经验和体会,并潜心听取老师和同学们的建议、意见。然执笔后深感愚心拙笔,限于水平,书中错误或不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,来信请寄至北京大学信息科学技术学院(100871),或电邮至 wwhu@pku.edu.cn。

胡薇薇

2014 年 8 月于北大燕园

目 录

Contents

引子——人类认识电的历史	1
第 1 章 线性电路分析基础 Introduction & Basic Analysis of Linear Circuit	5
1.1 线性电路基本概述/Basic Introduction to Linear Circuit	6
1.1.1 基本单位/Units and Scales	6
1.1.2 集总假设及集总电路模型/Lumped-Parameter Circuit	8
1.1.3 基本参数、变量和参考方向/Basic Components、Parameters and Reference Direction	10
1.1.4 基本定律/Basic Laws	13
1.2 常见电路元件模型及其约束方程/Elements and Element Constraints	16
1.2.1 元件的分类/Kinds of Components	16
1.2.2 电阻元件/Resistor	17
1.2.3 理想独立电压源与理想独立电流源/Independent Sources	20
1.2.4 电容元件/Capacitor	22
1.2.5 电感元件/Inductor	23
1.2.6 理想受控源/Controlled Source or Dependent Source	25
1.3 典型源信号和响应信号/Basic Signals and Functions	28
1.4 线性二端(单口)网络的等效/Equivalence of One-Port Network	32
1.4.1 等效的定义/Definition of Equivalence	32
1.4.2 电阻电路的等效/Equivalence of Resistive Circuits	33
1.4.3 具有初始储能(初始值)的动态元件的等效/Equivalence of Dynamic Connections	35
1.4.4 源电路的等效/Equivalence of Sources	36
总结与回顾 Summary and Review	42
练习与习题 Exercises and Problems	43

第 2 章 线性电路的时域分析 Basic Analysis of Linear Circuit in Time-domain	52
2.1 动态电路的暂态过程和起始状态/Introduction of Transient Analysis	53
2.1.1 静态电路与动态电路/Static and Dynamic Circuit	53
2.1.2 静态电路分析/Resistive Circuit	54
2.1.3 动态电路的换路、起始状态和暂态过程/Switch and Initial State	55
2.2 一阶动态电路分析/Analysis of First-Order Circuit	56
2.2.1 RL 或 RC 电路分析/ RL or RC Circuit	56
2.3 动态电路的零状态响应/Zero State Response	61
2.3.1 复指数信号及正弦信号激励的零状态响应/Sinusoidal Excitation	61
2.3.2 单位阶跃响应 $s(t)$ 和单位冲激响应 $h(t)$ /Unit-Step Response and Unit Impulse Response	62
2.3.3 任意信号激励的零状态响应/Arbitrary Excitation	63
2.4 二阶及高阶动态电路分析/Second-Order Circuits and High-Order Circuits	65
2.4.1 响应的求解/Functions and Solutions	65
2.4.2 电路的稳定性分析/Stability Analysis	66
总结与回顾 Summary and Review	67
附录 A 一元 n 次常参量微分方程的求解/Solution of Linear Differential Equations	67
A.1 一阶线性常参量微分方程的求解/First Order	67
A.2 n 阶微分方程的求解/ n Order	68
练习与习题 Exercises and Problems	69
第 3 章 正弦稳态电路分析 Sinusoidal Steady-State Analysis	76
3.1 正弦稳态电路分析/Sinusoidal Steady-State Analysis	77
3.1.1 正弦信号的复数表示——相量/Phasors	77
3.1.2 电路中的复数表示——相量模型/Phasor Model in Circuit	79
3.1.3 正弦稳态电路分析/Sinusoidal Steady-State Analysis	83
3.2 正弦稳态功率/Powers	84
3.3 网络函数与频率响应/Network Functions and Frequency Responses	88
3.4 滤波器/Filter	91
3.4.1 一阶滤波器/First-Order Filter(Low-Pass, High-Pass)	92

3.4.2 二阶滤波器/Second-Order Filter(Band Pass,Bandstop)	95
总结与回顾 Summary and Review	97
练习与习题 Exercises and Problems	97
第4章 电路的变换域分析——拉普拉斯变换 Laplace Transform	104
4.1 拉普拉斯变换/Laplace Transform	105
4.1.1 变换域分析/Transform Analysis	105
4.1.2 拉氏变换定义/Definition of the Laplace Transform	106
4.1.3 拉氏变换的基本性质/Basic Theorems for the Laplace Transform	108
4.1.4 拉氏反变换——分解定理/Inverse Laplace Transform	115
4.2 线性电路的 s 域求解/Circuit Analysis in the s-Domain	118
4.2.1 元件的 s -域模型/Components in the s -Domain	118
4.2.2 定律的 s 域形式/Laws in the s -Domain	120
4.2.3 线性电路的 s 域求解/Circuit Analysis in the s -Domain	123
4.3 网络函数的 s 域描述/Network Function in the s-Domain	126
4.3.1 定义/Definition	126
4.3.2 网络函数的特性/Characteristic Analysis	127
总结与回顾 Summary and Review	130
练习与习题 Exercises and Problems	130
第5章 信号的变换域分析——傅里叶变换 Fourier Analysis	138
5.1 傅里叶级数/The Fourier Series	139
5.1.1 周期信号的傅氏级数表示/Three Forms of the Fouries Series	139
5.1.2 周期信号的对称性与傅氏级数之间的关系/Symmetry of Fourier Series	147
5.1.3 常见周期信号的傅氏级数/Some Useful Fourier Series	149
5.1.4 周期信号的平均功率和有效值/Average Power and Effective Values of Periodic Functions	150
5.1.5 周期信号作用于线性电路的稳态响应/Steady-State Responses	151
5.2 傅氏变换：非周期信号的频谱分析/Fourier Transform	152
5.2.1 从傅氏级数到傅氏变换/From Fourier Series to Transform	152
5.2.2 傅里叶变换与反变换/Some Useful Fourier Transform Pairs	152
5.2.3 傅氏变换的基本性质与定理/Basic Theorems of the Fouries Transform	155
5.2.4 傅氏变换与拉氏变换/Fouries Transform and Laplace Transform	157
5.3 信号通过常参量线性电路/Signal Forcing in Linear Circuits	159
5.3.1 信号通过电路的波形失真/Wave Distortion	159

5.3.2 电路的因果律与理想滤波器/Causal Circuit and Ideal Filter	159
* 5.4 采样定理/Sampling Theorem	160
总结与回顾 Summary and Review	161
练习与习题 Exercises and Problems	162
第 6 章 网络的拓扑分析 Network Topology Analysis——Mesh and Nodal Analysis	171
6.1 支路电流法 / Branch Current Analysis	172
6.2 网络拓扑分析的基本知识/An Introduction to Network Topology	174
6.2.1 图论分析中的名词/Some Definitions in Network Topology Analysis	174
6.2.2 基本公式与推论/Formula and Conclusions	177
6.3 网孔电流法与回路电流法/Mesh Current Analysis and Loop Current Analysis	179
6.3.1 回路电流法/Loop Current Analysis	180
6.3.2 网孔电流法/Mesh Current Analysis	180
6.3.3 含电流源支路的处理/Solution Involving Current Sources	183
6.4 节点分析法/Nodal Analysis	185
6.4.1 节点电压法/Nodal Voltage Analysis	185
6.4.2 含电压源支路的处理/Solution Involving Voltage Sources	187
* 6.5 大网络拓扑分析/Topology Analysis	189
6.5.1 节点分析/General Nodal Analysis	189
6.5.2 回路分析/Loop Analysis	193
总结与回顾 Summary and Review	195
练习与习题 Exercises and Problems	195
第 7 章 网络定理 Theorems in Circuit Analysis	203
7.1 存在和唯一性问题/Existence and Uniqueness	204
7.2 置换定理/Substitution Theorem	205
7.3 叠加定理/Superposition Theorem	207
7.4 戴维南定理和诺顿定理/Thévenin's Theorem and Norton's Theorem ...	210
7.5 互易定理/Reciprocity Theorem	213
7.6 特勒根定理/Tellegen's Theorem	217
总结与回顾 Summary and Review	220
练习与习题 Exercises and Problems	220

第 8 章 双口网络分析 Two-Port Network Analysis	227
8.1 双口网络参量概述/Introduction	229
8.1.1 双口网络参量及其相互转换/Parameters Transformation Between Two-Port Network	229
8.1.2 双口网络参量与网络连接/Two-Port Network Connections	230
8.2 Z 参量和 Y 参量/Z and Y Parameters	237
8.2.1 Z 参量的定义/Z Parameters	237
8.2.2 T 形等效电路/T-type Equivalent Circuit	239
8.2.3 Y 参量的定义/Y Parameters	240
8.2.4 π 形等效电路/ π -type Equivalent Circuit	241
8.3 混合参量/Hybrid Parameters	242
8.3.1 H 参量的定义/H Parameters	243
8.3.2 G 参量的定义/G Parameters	243
8.3.3 等效电路/Equivalent Circuit	244
8.4 传输参量/Transmission Parameters	244
8.5 有端接的双口网络/Two-Port Network with Input and Output	247
8.5.1 网络函数/Network Functions	248
8.5.2 阻抗变换和阻抗匹配/Impedance Transform and Impedance Matching	248
* 8.6 有源双口网络/Active Two-Port Network	250
总结与回顾 Summary and Review	251
练习与习题 Exercises and Problems	252
第 9 章 均匀无耗传输线 The Uniform Lossless Transmission Line	261
9.1 分布参数电路/Distributed Parameter Circuit	262
9.2 传输线方程/Transmission Line Equations	264
9.2.1 传输线的分布参数模型/Circuit Model	264
传输线方程/Line Equations	265
9.2.3 传播常数、入射波和反射波/Propagation Constant, Incident Wave and Reflected Wave	266
9.2.4 特性阻抗与无限长传输线/Characteristic Impedance and Infinite-Length Line	268
9.2.5 双口网络等效/Two-Port Network Equivalence	270
9.3 均匀无耗传输线上的波动/Wave on Lossless Line	271
9.3.1 双口网络方程/Two-Port Network Equation	271

9.3.2	电压和电流反射系数/Reflection Coefficient	272
9.3.3	终端负载与反射波/Load and Reflected Wave	273
9.3.4	终端负载与阻抗匹配/Load and Impedance Matching	276
9.4	均匀无耗传输线的阶跃响应/Step Response	277
9.5	微波双口网络的散射参量/Scattering Parameters	280
	总结与回顾 Summary and Review	281
	练习与习题 Exercises and Problems	282
第 10 章	非线性电路分析简介 Nonlinear Circuit Analysis	292
10.1	非线性电路的分析方法/Introduction to Nonlinear Circuit Analysis ...	293
10.1.1	解析法/Analytical Analysis	293
10.1.2	图解法/Graphical Method	294
10.1.3	折线法/Piecewise-linear Technique	295
10.2	非线性器件的双口网络分析/Two-Port Network of	
	Nonlinear Devices	298
10.2.1	三极管的小信号模型/Small-Signal Model of Transistor	298
10.2.2	运算放大器/Operational Amplifier	301
	总结与回顾 Summary and Review	307
	练习与习题 Exercises and Problems	307
中英文索引	319
英中文索引	321
参考文献	323

引子——人类认识电的历史

“电”把人类引入了一个亦真亦幻的奇妙的新世界。今天，在电力、电子、通信、计算机、自动化、航空航天等诸多领域，我们每天都享受着人类通过对它的不断认识与发现而创造的现代文明。

人类从石器时代发展到今天，经历沧海桑田、千年巨变。在开始学习电的基本理论之前，让我们一起用几分钟的时间，回溯人类与电的千年辉煌。

1. 渊源

距今 5 亿~7 亿年前，地球上产生了生命。

距今 300 万~200 万年前，劳动创造了人。

公元前约 300 年(战国后期)，我国祖先用磁石制成了罗盘针(指南针，我国古代四大发明之一)，为人类最早的电磁发明。

公元 3 世纪(东汉时期)，王充在《论衡》一书中记载“顿牟掇芥”，即摩擦琥珀能吸引轻小物体的摩擦起电现象。

公元 10 世纪(宋朝)，世界史上最早记录了我国航海家使用指南针。

1600 年，吉尔伯特(W. Gilbert, 1540—1603, 剑桥医学博士)的《磁石论》问世，他根据希腊文“琥珀”一词的词根，定义了一个新词——“电”。

2. 初期

1732 年，富兰克林(Franklin, 1706—1790, 美国科学家)定义“正电”和“负电”，主张电是一种流质。

1746 年，彼得·冯·慕欣布罗克(Pieter Von Musschenbroek, 莱顿大学教授)发明莱顿瓶，将摩擦电收集到瓶中，诞生了电学史上第一个保存电荷的容器。

1752 年，富兰克林(Franklin, 1706—1790, 著名的费城风筝实验)证明雷和摩擦起电性质相同，进而发明避雷针，并将“天电”收集到莱顿瓶中。

1785 年，库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806, 法国科学家)得出最早的电学定律——库仑定律。使人类对电现象的研究从定性迈向定量。

1800 年，伏特(A. Volta, 1745—1827, 意大利物理学家)发明了第一种化学电源——铜锌电池。

1820 年，奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1851, 丹麦物理学家)发现电流的磁效应。

1825 年，安培(A. M. Ampere, 1775—1836, 法国科学家)提出著名的安培定律。