



北京市高等教育精品教材立项项目



国家电工电子教学基地系列教材

现代电路分析

(第2版)

Modern Circuit Analysis

◎ 杜普选 高岩 闻跃 编著

◎ 左垲 主审



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



北京市高等教育精品教材立项项目

国家电工电子教学基地系列教材

现代电路分析

(第2版)

杜普选 高 岩 闻 跃 编著
左 垚 主审

清华大学出版社
北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是国家电工电子教学基地系列教材之一,是《基础电路分析》的后续教材,2002 年被列为北京市高等教育精品教材立项项目。

本书在第 1 版的基础上做了全面的修订,分为 8 章。书中系统深入地介绍了以计算机分析为基础的现代电路分析理论,内容包括:网络拓扑理论、电路方程建立及矩阵方法、线性方程组的计算机解法及稀疏矩阵、非线性电路分析、双端口网络分析、运算放大器电路分析及有源滤波器、Multisim 和 PSpice 工具软件的应用。每章后给出习题,书后附有习题答案和参考文献。

本书可作为大学本、专科生学习电路理论的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电路分析 / 杜普选, 高岩, 闻跃编著. — 2 版. — 北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2004. 2

(国家电工电子教学基地系列教材)

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 7-81082-280-2

I. 现… II. ①杜… ②高… ③闻… 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 (2003) 第 117855 号

责任编辑: 郭 洁

出 版 者: 清 华 大 学 出 版 社 邮 编: 100084 电 话: 010 - 62776969

北京交通大学出版社 邮 编: 100044 电 话: 010 - 51686045, 62237564

印 刷 者: 北京东光印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×960 1/16 印 张: 18 字 数: 400 千字

版 次: 2002 年 3 月第 1 版 2004 年 2 月第 2 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 8 001~13 000 册 定 价: 25.00 元

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。

- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。

- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。

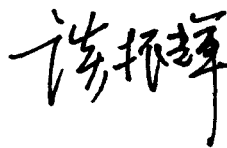
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持，在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助，在此表示衷心的感谢。

北京交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the reviewer, Chen Hui.

2004 年 1 月

第2版前言

本书所涉及的内容为现代电路理论部分,2002年出版以后,被列为北京市高等教育精品教材立项项目。在经过两届本科生教学实践和吸纳了读者意见、建议的基础上,我们对本书进行了重新修订。

本次修订充实和调整了第1、2、3、6、8章的内容。第1章增加了数值分析的概念,目的是提醒读者在利用计算机语言编程分析电路时要注意的问题,这在工程上是十分重要的。第2、3章充实了习题,增加了习题数量,并严格筛选了原来的习题,使得列入的题目全部可以使用。鉴于第6章的内容在实用上应该进一步发展,所以重新编写,增加了不少在工程中可以实际使用的内容,以培养学生解决实际问题的能力。第8章全部重新编写,主要是适应电路工具软件的升级换代,因为原来的EWB工具软件已经换代为Multisim。同时对新的工具软件的扩展功能、例题、习题进行了精心安排,以充分发挥工具软件的作用。

另外,为了使本书更加实用,特开发了配套的网络课件,并且精心制作了电子教案,同时对所有的习题编制了详尽的题解。读者对本书有什么意见和要求,请发电子邮件和作者联系,邮件地址pxdu@center.njtu.edu.cn。

感谢读者和同行对本书的关心和批评指正。

作 者
2004年1月

第1版前言

约在 35 年前，电路分析与设计很少运用计算方法。当时一个熟练的设计者只要进行少量的计算就能够综合出简单的电路，然后安装在实验板上进行测试、修改，从而获得满意的结果。

现在的情况已大不相同了。由于集成电路的出现，使得手工计算或简单的计算工具远远不能满足要求，从而使得计算机的应用越来越普遍。反过来，集成电路的发展使得计算机更可靠、更便宜，而新的计算机又使集成电路的设计更为简便，以至于许多个人均已购置了计算机。毋庸置疑，计算方法将会变得越来越重要。从另一角度看，科技发展已使一个芯片上能包含百万计的晶体管，显然这种芯片的设计不能在实验板上实现，所以必须要使用计算机来仿真。

近年来，社会对工程技术人员分析问题与解决问题的能力、综合运用基础理论的能力和工程软件的应用能力要求愈来愈高，要求技术人员既要掌握扎实的基本理论知识也要能熟练运用专业软件工具。

目前电路分析仿真软件的使用已经非常普及，已成为实际电路设计中的重要工具。引入计算机方法，将软件仿真方法作为必修内容来要求，这样做对学生的益处是：①计算机方法与理论学习相结合，可补充理论学习，加深对概念的理解；②掌握一种电路仿真软件的使用方法，为后续课程学习和实际工作做好准备；③利用仿真软件提供的更接近于实际器件的模型，接触到实际电路的知识；④利用虚拟实验，了解实际的电路搭建和测量知识。

基于上述理由，我们重新规划了电路分析的知识点，将电路分析分为两部分，即基础电路分析部分和现代电路分析部分。

本书所涉及的内容为现代电路分析部分。教材在内容选择与要求方面，强调基本概念和方法，适当淡化手工计算技巧；介绍实际应用背景，增加一些综合性分析、简单设计问题。将工程方法、计算机方法与电路理论教学有机地结合，可以促进学生对理论的理解，培养解决实际问题能力，弥补在动手试验方面的不足，激发学习兴趣和积极思考，培养分析和解决问题的能力。

本书第 1 章引入了矩阵和计算机数值方法，从而可以使用更为规范的方式来建立方程；把分析理论与数值分析方法结合起来，这就是本书第 2 章、

第3章所讨论的主要问题,即矩阵分析法和建立方程的一般方法。

本书第4章介绍了非线性电阻电路分析。除非线性电路的基本概念外,侧重讨论非线性电路线性化方法的基本思路。非线性电路的求解是非常复杂的问题,涉及大量高深的数学知识,即使使用大容量的计算机,其分析效率也十分低下。其实,在大部分仿真或模拟过程中并不一定要求非常高的精度,可以采用近似的方法来解决该类问题,即把非线性电路用分段线性电路来近似代替。

本书第5章介绍双端口网络的分析,这部分内容包括各种网络函数分析、网络的连接、传输的概念,以及分布参数网络的分析。

本书第6章专门讨论含运算放大器电路的基本分析方法及典型应用,并以较为典型的半导体器件厂商 MAXIM 的线性集成有源滤波器产品为实例来进行分析。

随着大规模集成电路和电子计算机的迅速发展,电子电路的分析与设计方法发生了重大变革。以计算机辅助分析与设计为基础的电子设计自动化技术已广泛应用于集成电路与系统的设计之中,改变了以定量估算和电路实验为基础的传统设计方法,成为现代电子系统设计的关键技术之一,是必不可少的工具与手段。

目前国内外流行最广的当属 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)。它已发展成为一个家族,具有功能强、速度快、精度高、容量大、使用方便等优点。其中 OrCAD 公司推出的、基于美国加州大学伯克利分校 Spice 的微机版本 PSpice 倍受青睐,具有广阔的应用前景。第7章介绍了 PSpice 的概况和应用。

Workbench 是另一个界面相当友好的仿真软件,该软件具有十分形象的虚拟常用仪器。利用它来分析电路,就如同置身于设备先进、齐全的现代化实验室中,可以方便、快速、准确地得到分析结果。本书第8章将加以介绍。

运用上述工具,通过电路举例与习题,系统、深入地分析计算电路课程中各章节的主要典型电路,并由计算结果,分析讨论电路(或器件)的工作原理、性能特点、技术指标、影响电路性能的主要参数以及电路设计等问题,这样就将电路分析内容与 CAA (Computer Aided Analysis)及 CAD (Computer Aided Design) 技术紧密结合在一起。通过实例分析与设计,一方面使读者具有使用集成电路和电子系统计算机辅助分析与设计工具的能力,掌握现代电路分析技术与方法;另一方面使读者更深入地学习和理解电路分析课程中各章节内容的原理、特点及应用,提高分析问题和解决问题的能力,扩展知识面,为今后从事电路和系统设计、进入电子设计自动化领域打下良好基础。这就是编写本书的主要目的,也是本书的一个特点。

本书由杜普选主编。第1、2、3、6章由杜普选编写，第4、5章由高岩编写，第7、8章由闻跃编写。全书由左垵教授主审。本书的编写得益于很多老师和研究生的支持与帮助：左垵先生虽年事已高，但认真严谨的作风令作者十分敬佩，本书的最后完成，离不开他的认真指导和鼓励。养雪琴老师为本书搜集整理了许多相关资料，张源、陈海航、李栋、陶峰同学对本书的录入及排版工作付出了辛勤的劳动，谨此表示致谢。

鉴于作者的水平有限，书中内容难免有不当之处，编排中也可能存在一些错误，敬请读者批评指正。

作 者
2002年1月

目 录

电路理论部分常用符号说明	1
第 1 章 矩阵运算的计算机方法及稀疏矩阵	1
1.1 计算数学的几个基本概念	1
1.2 高斯消元法解线性方程组	3
1.2.1 例题分析	4
1.2.2 算法说明	5
1.2.3 选主元素	7
1.3 LU 分解法解线性方程组	7
1.3.1 算法说明	8
1.3.2 例题分析	9
1.4 稀疏矩阵原理	10
1.4.1 选主元和排序	10
1.4.2 稀疏矩阵存储	13
1.5 复频率与复平面	15
习题	18
第 2 章 电路的矩阵分析	20
2.1 网络拓扑	20
2.1.1 图	20
2.1.2 树	21
2.1.3 割集	22
2.1.4 环集	24
2.1.5 对偶性	25
2.2 矩阵分析法	26
2.2.1 标准支路	26
2.2.2 割集矩阵	27
2.2.3 环集矩阵	29

2.2.4 关联矩阵	31
2.2.5 网孔分析	33
2.3 有源电路	38
2.3.1 转移阻抗耦合	38
2.3.2 互感	39
2.3.3 转移导纳耦合	40
2.3.4 普遍化	42
2.3.5 含相互耦合的四端网络元件	43
2.4 节点导纳矩阵	44
2.4.1 节点导纳矩阵的填写方法	45
2.4.2 节点电压法	46
2.4.3 归一化问题	48
习题	49
第3章 建立方程的一般方法	52
3.1 表矩阵法	52
3.1.1 表矩阵方程的建立	52
3.1.2 单图表矩阵	54
3.2 用单图建立改进的节点方程组	60
3.2.1 基尔霍夫方程的分组表示	60
3.2.2 建立单图改进的节点方程组	61
3.3 用观察法建立改进节点方程组	63
3.3.1 理想元件的改进节点法表示	63
3.3.2 观察法建立改进的节点方程	67
3.3.3 有源网络的改进节点方程	68
3.4 分离的电流和电压图	70
3.4.1 分离的电压图和电流图的规则	70
3.4.2 双图的表示方法及方程的建立	73
3.5 用 I -图和 V -图建立改进节点方程组	76
3.5.1 计算机上图的表示	76
3.5.2 双图改进的节点法	77
3.5.3 理想元件的双图表示及填入	80
3.6 建立方程组的方法总结	83
习题	84
第4章 非线性电路直流分析	86

4.1 非线性电阻电路及其方程的建立	86
4.1.1 非线性电阻元件	86
4.1.2 非线性电阻电路的电路方程	87
4.2 非线性电阻电路的图解分析法	88
4.2.1 非线性电阻的串联与并联	88
4.2.2 非线性电阻电路的图解分析法	90
4.3 非线性电阻电路的分段线性分析法	91
4.3.1 非线性电阻元件伏安特性曲线的分段线性化	92
4.3.2 用分段线性法确定非线性电阻电路的工作点	92
4.4 具有一个非线性电阻电路的牛顿迭代法	95
4.4.1 一元牛顿迭代法	95
4.4.2 非线性电阻电路的牛顿迭代分析法	96
4.4.3 牛顿迭代法的几何解释	97
4.4.4 牛顿迭代法的电路解释	98
4.5 一般非线性电路	99
4.5.1 推广的牛顿迭代法	99
4.5.2 用牛顿迭代法进行分析	100
4.5.3 非线性直流节点分析法	105
习题	106
第5章 双口网络分析	109
5.1 网络函数	109
5.1.1 策动点函数	111
5.1.2 传递函数	112
5.2 双口网络函数	113
5.2.1 Y 参数和 Z 参数	115
5.2.2 传输参数或链接参数	120
5.3 双口网络的连接	122
5.3.1 链接	122
5.3.2 并联	124
5.3.3 串联	126
5.4 特性参数及波参数理论	127
5.4.1 双口网络的特性阻抗	127
5.4.2 双口网络的传输常数	131
5.4.3 由特性参数表示的传输方程式	135

5.4.4	分析和设计举例	136
5.4.5	两端口网络的匹配链接	140
5.4.6	传输线与波参数	143
5.5	工作参数理论	149
5.5.1	输入阻抗和反射系数	150
5.5.2	插入衰减	151
5.5.3	工作衰减	152
	习题	155
第 6 章	运算放大器及有源滤波器	158
6.1	理想运算放大器及单元电路	158
6.1.1	理想运算放大器	158
6.1.2	阻抗变换器	161
6.1.3	模拟电感及频变负阻	162
6.2	用运放实现 RC 有源基本节	164
6.2.1	传递函数	164
6.2.2	归一化问题	166
6.2.3	一阶基本节	166
6.2.4	二阶单端正反馈电路	167
6.2.5	二阶无限增益多端负反馈	169
6.2.6	多运放实现的二阶基本节	170
6.3	有源滤波器实例	171
6.4	有源集成滤波器介绍	175
	习题	177
第 7 章	PSpice 电路仿真软件	181
7.1	CAD PSpice 简介	181
7.1.1	电路仿真与电子设计自动化	181
7.1.2	OrCAD PSpice 功能与组成	182
7.1.3	用 PSpice 分析电路的一般步骤	183
7.2	PSpice A/D 分析电路的基本约定	184
7.2.1	PSpice A/D 中的元件	184
7.2.2	PSpice A/D 中的数字和单位	185
7.2.3	电路图节点编号	185
7.2.4	输出变量的基本表示格式	186
7.2.5	输出变量的别名表示	186

7.3 OrCAD Capture 基本操作	188
7.3.1 Capture 软件界面	188
7.3.2 建立仿真项目	190
7.3.3 仿真项目中的资源	191
7.3.4 元件放置与修改	191
7.3.5 常用元件符号和元件库	192
7.3.6 元件的属性	193
7.3.7 导线连接和节点标号	194
7.3.8 PSpice 对电路的一些限制	196
7.4 PSpice 分析基础	196
7.4.1 PSpice A/D 和 Probe 的操作界面	196
7.4.2 直流工作点	198
7.4.3 直流小信号传输函数	200
7.4.4 直流扫描分析	201
7.4.5 交流分析	202
7.4.6 暂态分析	204
7.4.7 参数分析	207
7.5 PSpice 分析应用举例	208
7.5.1 直流小信号戴维南等效电路的计算	208
7.5.2 一阶 RC 电路 DC、AC 和暂态分析	209
7.5.3 运算放大器电路的参数分析	211
习题	213
第 8 章 Multisim 电路仿真软件	216
8.1 Multisim 软件简介	216
8.1.1 什么是 Multisim	216
8.1.2 Multisim 电路仿真原理	217
8.2 Multisim 的基本操作	219
8.2.1 Multisim 软件界面	219
8.2.2 Multisim 仿真元件模型	222
8.2.3 电路分析与仿真的主要步骤	223
8.3 使用 Multisim 的虚拟仪器	226
8.3.1 Multisim 的虚拟仪器	227
8.3.2 Multisim 虚拟测量实例	232
8.4 Multisim 电路分析	234

8.4.1 Multisim 分析功能和参数设置	234
8.4.2 直流工作点分析	236
8.4.3 直流扫描分析	237
8.4.4 交流分析	239
8.4.5 暂态分析	239
8.4.6 参数扫描分析	240
8.4.7 直流小信号传递函数分析	241
8.4.8 Fourier 分析	242
8.4.9 零极点分析	243
8.5 Multisim 电路仿真和分析实例	244
8.5.1 RLC 电路瞬态分析和零极点分析	244
8.5.2 非线性电路分析	246
8.5.3 RC 双 T 带阻滤波器频率特性分析	249
8.5.4 积分器电路	251
习题	252
部分习题答案	257
第 1 章	257
第 2 章	258
第 3 章	261
第 4 章	264
第 5 章	265
第 6 章	266
参考文献	267

第1章 矩阵运算的计算机方法及稀疏矩阵

提要 本章主要讨论对线性方程组及相应矩阵的运算方法, 包括高斯法和LU分解法。对于大型的矩阵, 如果其元素大部分为零, 则求解要用稀疏矩阵的方法, 本章也将介绍稀疏矩阵的原理和简单处理方法。为了扩展分析范围, 本章还将介绍复平面的概念。

利用基尔霍夫电流定律(KCL)、基尔霍夫电压定律(KVL)与元件约束方程结合起来建立的方程组, 大部分均为线性代数方程组。本章主要讨论对线性方程组及相应矩阵的运算方法。一般而言, 如果网络是线性网络, 那么方程式也是线性的; 非线性网络则导致非线性方程组, 但其解也是某些工作点附近、通过使这些方程式线性化来求得, 或者利用分段线性化来求解。所以, 解线性方程组的方法是解这类问题的基础。解线性方程组的方法一般分为直接法、迭代法, 在本章中仅研究直接法。对于大型的矩阵, 如果其元素大部分为零, 则求解要用稀疏矩阵的方法。不管使用什么方法, 对于计算机都存在着计算方法问题, 因此首先介绍计算方法的几个基本概念。

1.1 计算数学的几个基本概念

1. 利用计算机解决实际问题的步骤

(1) 建立数学模型, 即把实际问题抽象为一个数学问题, 它可以是一个方程组、一个函数、一个微分方程等。

(2) 选择数值方法, 要考虑所能达到的精度、计算量、方法对数据微小扰动的灵敏度。

(3) 编写程序, 上机计算。

2. 算法

从给定的已知量出发, 经过有限次的基本运算和规定的运算顺序, 能够计算出所求未知量在规定精度内的数值解, 这样构成的完整计算步骤称为算法。

3. 计算量

算法的计算工作量, 是衡量算法好坏的重要标准, 因为这关系到算法的效率问题。

例如, 计算 x^{255} , 按原型计算, 需要的计算量为 254 次浮点运算, 如改用

$$x^{255} = x \cdot x^2 \cdot x^4 \cdot x^8 \cdot x^{16} \cdot x^{32} \cdot x^{64} \cdot x^{128},$$

只需 14 次浮点运算。

再如, 设 A, B, C, D 分别是 $10 \times 20, 20 \times 50, 50 \times 1, 1 \times 100$ 的矩阵, 使用不同算法求矩阵乘积, $E = ABCD$ 。

根据矩阵乘除法的结合率, 采用下列三种算法:

- (1) $E = [(AB)C]D$, 计算量是 11 500 次浮点运算;
- (2) $E = A[B(CD)]$, 计算量是 125 000 次浮点运算;
- (3) $E = [A(BC)]D$, 计算量是 2 200 次浮点运算。

显然算法(3)的效率最高。

由于算法的效率反映的是计算工作量问题, 因此用算法的效率可以判定这个算法是否可行。例如, 用 Cramer 法则求解 n 元线性方程组, 要计算 $n+1$ 个行列式, 还要进行 n 次除法, 计算一个 n 阶行列式的计算量约为 $(n-1)(n!)$ 次浮点运算, 因此求解 n 阶线性方程组的总计算量是 $N = [(n+1)(n-1)(n!) + n]$ 次浮点运算。当 $n=20$ 时, 计算量为 9.707×10^{20} , 如果在 1 亿次运算每秒的计算机上运行, 需要 30 多万年, 显然这个算法对于高阶线性方程组是毫无实用价值的。

4. 误差的基本概念

准确值和近似值之间的差异就是所谓的误差。人们总希望得到的计算结果有令人满意的精度, 因此估计误差是计算方法的最基本的一项任务。

误差产生的来源是多方面的, 主要是以下四个来源: 模型误差、观测误差、截断误差、舍入误差。

误差又分为绝对误差和相对误差, 和误差相对应的还有有效数字的概念。

5. 良态与病态问题

如果初始数据的微小变化导致计算结果的剧烈变化, 这样的问题称之为病态问题或坏条件问题, 反之说此问题是良态的。也就是说, 一个问题的性态是该问题对初始数据敏感程度的表现, 它是问题固有的一种属性。

例如, 对 $f(x) = x^2 + x - 1150$, $f(100/3) = -5.6$, 而 $f(33) = -28$ 。

数据的变化小于 0.34, 而函数的变化确实很大, 达到 22.4, 因此在接近 $f(x)$ 的根处是一个病态问题。

再比如方程 $(x-1)(x-2)(x-3)\cdots(x-20)=0$ 的根为 $1, 2, 3, \dots, 20$, 左边展开为 $x^{20} - 210x^{19} + \cdots + 20! = 0$, 若把 -210 换为 $-210.000\,000\,119$, 其余各项不变, 再求解, 则方程的根完全改变, 例如, 根 20 将变为 20.847, 而根 18 和 19 则变为一对共轭复数 $19.502 \pm 1.940i$, 显然这是一个病态问题。

例如, 求解线性代数方程组