

国家电工电子教学基地系列教材

现代电路分析

杜普选 高岩 闻跃 编著

左垠 主审

北方交通大学出版社

Northern Jiaotong University Press

清华大学出版社

Tsinghua University Press

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是教育部直属高校北方交通大学的国家电工电子教学基地系列教材之一，是《电路分析基础》的后续教材。作者在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。全书分为8章，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、Workbench 和 PSpice 工具软件的应用。每章后附有习题，书后附有部分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，也可以作为相关专业技术人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，翻版必究。

图书在版编目（CIP）数据

现代电路分析/杜普选，高岩，闻跃编著.—北京：北方交通大学出版社，2002.3

国家电工电子教学基地系列教材

ISBN 7-81082-031-1

.现... . 杜... 高... 闻... .电路分析-高等学校-教材 .TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 010030 号

丛 书 名：国家电工电子教学基地系列教材

书 名：现代电路分析

编 著 者：杜普选 高 岩 闻 跃

主 审：左 埏

责任编辑：郭 洁

排版制作：北京泰恒祥科技发展公司

印 刷 者：北京东光印刷厂

装 订 者：三河新伟装订厂

出版发行：北方交通大学出版社 邮编：100044 电话：010-62237564 51686045

清华大学出版社 邮编：100084

经 销：各地新华书店

开 本：787×960 1/16 印张：19 字数：350 千字

版 次：2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7 - 81082 - 031 - 1

TN · 1

印 数：5000 册

定 价：25.00 元

国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委 员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 陈后金 邹家驖 郑光信 屈 波

侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞 廖桂生

薛 质

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：

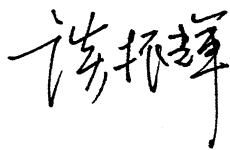
- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体;
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系以及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一;
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力;
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括：

《电路分析基础》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《数字电子技术基础》、《信号与系统》、《数字信号处理》、《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》。

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、北方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。

北方交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '高振' (Gao Zhen), written in a cursive style.

2002年2月

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: 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; 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; 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; 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,即经典理论部分和现代分析部分。

本书所涉及的内容为现代电路理论部分。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,涉及到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,并以比较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。全书由左培教授主审。本书的编写得益于很多老师和研究生的支持与帮助:左培先生虽年事已高,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

目 录

第 1 章 矩阵运算的计算机方法及稀疏矩阵.....	(1)
1.1 高斯消元法解线性方程组	(1)
1.1.1 例题分析	(1)
1.1.2 算法说明	(3)
1.1.3 选主元素	(5)
1.2 LU 分解法解线性方程组	(6)
1.2.1 算法说明	(6)
1.2.2 例题分析	(8)
1.3 稀疏矩阵原理	(9)
1.3.1 选主元和排序	(10)
1.3.2 稀疏矩阵存储	(13)
1.4 复频率与复平面	(15)
习题	(19)
第 2 章 电路的矩阵分析	(21)
2.1 网络拓扑	(21)
2.1.1 图	(21)
2.1.2 树	(22)
2.1.3 割集	(23)
2.1.4 环集	(25)
2.1.5 对偶性	(27)
2.2 矩阵分析法	(28)
2.2.1 标准支路	(28)
2.2.2 割集矩阵	(29)
2.2.3 环集矩阵	(32)
2.2.4 关联矩阵	(34)
2.2.5 网孔分析	(36)

2.3	有源电路	(42)
2.3.1	转移阻抗耦合	(43)
2.3.2	互感	(44)
2.3.3	转移导纳耦合	(45)
2.3.4	普遍化	(47)
2.3.5	含相互耦合的四端网络元件	(48)
2.4	节点导纳矩阵	(49)
2.4.1	节点导纳矩阵的填写方法	(50)
2.4.2	节点电压法	(52)
2.4.3	归一化问题	(54)
	习题	(54)
第 3 章	建立方程的一般方法	(58)
3.1	表矩阵法	(58)
3.2	用单图建立改进的节点方程组	(66)
3.3	用观察法建立改进节点方程组	(69)
3.4	分离的电流和电压图	(76)
3.5	用 I -图和 V -图建立改进节点方程组	(82)
3.6	建立方程组的方法总结	(90)
	习题	(90)
第 4 章	非线性电路直流分析	(92)
4.1	非线性电阻电路及其方程的建立	(92)
4.1.1	非线性电阻元件	(92)
4.1.2	非线性电阻电路的电路方程	(93)
4.2	非线性电阻电路的图解分析法	(94)
4.2.1	非线性电阻的串联与并联	(95)
4.2.2	非线性电阻电路的图解分析法	(96)
4.3	非线性电阻电路的分段线性分析法	(98)
4.3.1	非线性电阻元件伏安特性曲线的分段线性化	(98)
4.3.2	用分段线性法确定非线性电阻电路的工作点	(99)
4.4	具有一个非线性电阻电路的牛顿迭代法	(102)
4.4.1	一元牛顿迭代法	(102)

4.4.2	非线性电阻的牛顿迭代分析法.....	(103)
4.4.3	牛顿迭代法的几何解释.....	(105)
4.4.4	牛顿迭代法的电路解释.....	(105)
4.5	一般非线性电路.....	(107)
4.5.1	推广的牛顿迭代法.....	(107)
4.5.2	用牛顿迭代法进行分析.....	(108)
4.5.3	非线性直流节点分析法.....	(113)
	习题.....	(114)
第 5 章	双口网络分析.....	(119)
5.1	网络函数.....	(119)
5.1.1	策动点函数.....	(121)
5.1.2	传递函数.....	(122)
5.2	双口网络函数.....	(124)
5.2.1	Y 参数和 Z 参数.....	(125)
5.2.2	传输参数或链接参数.....	(132)
5.3	双口网络的连接.....	(134)
5.3.1	链接.....	(134)
5.3.2	并联.....	(136)
5.3.3	串联.....	(138)
5.4	特性参数及波参数理论.....	(139)
5.4.1	双口网络的特性阻抗.....	(139)
5.4.2	双口网络的传输常数.....	(144)
5.4.3	由特性参数表示的传输方程式.....	(148)
5.4.4	分析和设计举例.....	(149)
5.4.5	两端口网络的匹配链接.....	(154)
5.4.6	传输线与波参数.....	(157)
5.5	工作参数理论.....	(165)
5.5.1	输入阻抗和反射系数.....	(166)
5.5.2	插入衰减.....	(167)
5.5.3	工作衰减.....	(168)
	习题.....	(171)

第 6 章	运算放大器电路及有源滤波器	(175)
6.1	理想运算放大器及单元电路	(175)
6.1.1	理想运算放大器	(176)
6.1.2	阻抗变换器	(177)
6.1.3	模拟电感及频变负阻	(177)
6.1.4	归一化问题	(179)
6.2	用运放实现 RC 有源基本节	(180)
6.2.1	一阶基本节	(180)
6.2.2	二阶单端正反馈电路	(181)
6.2.3	二阶无限增益多端负反馈	(183)
6.2.4	多运放实现的二阶基本节	(185)
6.3	有源滤波器实例	(186)
6.4	有源集成滤波器介绍	(191)
	习题	(193)

第 7 章	PSpice 电路仿真软件	(195)
7.1	CAD PSpice 简介	(195)
7.1.1	电路仿真与电子设计自动化	(195)
7.1.2	OrCAD PSpice 功能与组成	(196)
7.1.3	用 PSpice 分析电路的一般步骤	(197)
7.2	PSpice A/D 分析电路的基本约定	(199)
7.2.1	PSpice A/D 中的元件	(199)
7.2.2	PSpice A/D 中的数字和单位	(200)
7.2.3	电路图节点编号	(200)
7.2.4	输出变量的基本表示格式	(201)
7.2.5	输出变量的别名表示	(201)
7.3	OrCAD Capture 基本操作	(203)
7.3.1	Capture 软件界面	(203)
7.3.2	建立仿真项目	(205)
7.3.3	仿真项目中的资源	(206)
7.3.4	元件放置与修改	(207)
7.3.5	常用元件符号和元件库	(208)
7.3.6	元件的属性	(209)

7.3.7	导线连接和节点标号	(211)
7.3.8	PSpice 对电路的一些限制	(213)
7.4	PSpice 分析基础	(214)
7.4.1	PSpice A/D (Probe) 操作界面	(214)
7.4.2	直流工作点	(216)
7.4.3	直流小信号传输函数	(218)
7.4.4	直流扫描分析	(219)
7.4.5	交流分析	(220)
7.4.6	暂态分析	(223)
7.4.7	参数分析	(225)
7.5	PSpice 分析应用举例	(227)
7.5.1	直流小信号戴维南等效电路的计算	(227)
7.5.2	一阶 RC 电路 DC、AC 和暂态分析	(229)
7.5.3	运算放大器电路的参数分析	(231)
习题	(233)

第 8 章 Electronics Workbench 软件应用

8.1	软件介绍	(237)
8.1.1	什么是 Electronics Workbench	(237)
8.1.2	EWB 的主窗口	(238)
8.1.3	EWB 的命令菜单	(239)
8.1.4	EWB 的命令工具栏	(241)
8.2	基本操作方法介绍	(243)
8.2.1	创建电路	(243)
8.2.2	常用元件参数设置	(244)
8.2.3	使用虚拟仪器	(250)
8.3	EWB 电路仿真基本方法	(254)
8.3.1	用虚拟工作台方式仿真电路	(254)
8.3.2	直流工作点分析	(257)
8.3.3	交流扫描分析	(258)
8.3.4	瞬态分析	(259)
8.3.5	参数扫描分析	(260)
8.3.6	直流小信号传递函数分析	(260)

8.3.7	Fourier 分析.....	(261)
8.3.8	零极点分析.....	(262)
8.4	EWB 电路仿真示例.....	(264)
8.4.1	RLC 电路瞬态分析和零极点分析.....	(264)
8.4.2	非线性电路分析	(267)
8.4.3	RC 双 T 带阻滤波器分析	(272)
8.4.4	积分器电路.....	(275)
	习题	(278)
	部分习题答案	(283)
	参考文献	(288)

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所有问题的基础。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。

1.1 高斯消元法解线性方程组

高斯消元法是线性方程组直接解法中优秀的解法之一，它是建立在这样一个事实基础上的，即将一个方程乘以一个常数加到另一个方程上，方程组的解不变。下面以一实例来说明该方法。

1.1.1 例题分析

[例 1-1] 试解线性方程组

$$\begin{cases} 2x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 3 \\ 5x_1 + 7x_2 + x_3 = 28 \end{cases} \quad (1-1a)$$

解：将式(1-1a)中的 式与 式对调，得到

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 3 \\ 2x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 5x_1 + 7x_2 + x_3 = 28 \end{cases} \quad (1-1b)$$

将式(1-1b)中的 式减去 式的 2 倍， 式减去 式的 5 倍，这样后两个方程中的 x_1 都被消去，得到

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 3 \\ 6x_2 - 9x_3 = 0 \\ 17x_2 - 19x_3 = 13 \end{cases} \quad (1-1c)$$

将式(1-1c)中的 式乘以 $1/6$ ，得到

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 3 \\ x_2 - \frac{3}{2}x_3 = 0 \\ 17x_2 - 19x_3 = 13 \end{cases} \quad (1-1d)$$

将式(1-1d)中的 式减去 式的 17 倍，得到

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 3 \\ x_2 - \frac{3}{2}x_3 = 0 \\ \frac{13}{2}x_3 = 13 \end{cases} \quad (1-1e)$$

式(1-1e)是一个阶梯形线性方程组，从中可以求出 $x_3 = 2$ ， $x_2 = 3$ ， $x_1 = 1$ 。过程如下：

由式(1-1e)中的 式解得 $x_3 = 2$ ，将 x_3 代入 式得到 $x_2 = 3$ ，最后将 $x_3 = 2$ ， $x_2 = 3$ 代入 式，得到 $x_1 = 1$ 。

显然，方程组(1-1a)~方程组(1-1e)都是同解方程组，因此方程组(1-1e)的解也就是方程组(1-1a)的解。这就是高斯消元法。由式(1-1a)~式(1-1e)叫做消去过程，而由方程组(1-1e)的 式、 式、 式自下而上逐个求出 x_1 、 x_2 、 x_3 的过程叫做回代过程。

1.1.2 算法说明

$$\text{线性方程组} \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{B} \quad (1-2)$$

式中, \mathbf{A} 是 $n \times n$ 维常数矩阵, \mathbf{B} 是 n 维已知向量, \mathbf{x} 为 n 维未知向量。将式(1-2)展开, 得到

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2n} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ a_{n1} & a_{n2} & \Lambda & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \text{M} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \text{M} \\ b_n \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

从形式上看, 对矩阵 \mathbf{A} 求逆可解方程组(1-3), 得到

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad (1-4)$$

如果只需要一个输出变量, 这时则用称之为克莱姆法则的方法来求得其解。

克莱姆法则可以这样来叙述, 对式(1-3)表示的方程组, 其解向量 \mathbf{x} 的第 k 个分量 x_k 是两个行列式的值之比, 其分母是 $\det \mathbf{A}$, 分子是用 \mathbf{B} 代替 \mathbf{A} 的第 k 列而得到的行列式的值。

当解小规模问题时, 克莱姆法则是可以应用的, 而且在理论研究上也是需要的; 然而它的计算量很大, 所以在计算机上很少使用。这些也同样适用于矩阵求逆。

高斯消元法是最好的算法之一, 它是建立在这样一个事实基础上的, 即将一个方程乘以常数加到另一个方程上, 方程组的解不变。

考虑式(1-3), 把它改写成方程组, 并且用 $a_{i, n+1}$ 表示右侧向量的元素 b_i , 这样简化了表示, 方程组变成

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \Lambda + a_{1n}x_n = a_{1, n+1} \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \Lambda + a_{2n}x_n = a_{2, n+1} \\ \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \quad \text{M} \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \Lambda + a_{nn}x_n = a_{n, n+1} \end{cases} \quad (1-5)$$

将式(1-5)中的第一个方程除以 a_{11} , 并把它写成为

$$x_1 + a_{12}^{(1)}x_2 + a_{13}^{(1)}x_3 + \Lambda = a_{1, n+1}^{(1)}$$

式中, $a_{12}^{(1)} = a_{12}/a_{11}$, $a_{13}^{(1)} = a_{13}/a_{11}$, Λ $a_{1, n+1}^{(1)} = a_{1, n+1}/a_{11}$ 。将其乘以 $-a_{21}$, 并且与式(1-5)中的第二个方程式相加, 则新的第二个方程的系数成为

