

729988

5002

7/4499

r. 1

Computer-
Aided

电子线路的计算机辅助分析
算法和计算技术

上册

[美] 蔡少棠 林本铭 著

黄安山 主译

陆钟辉 肖杰生 钟兆文 校

Analysis
Of
Electronic
Circuits:
Algorithms &
Computational
Techniques

上海机械学院

Electronic
Circuits:
Algorithm
Comput
Technique

499

电子线路的计算机辅助分析: 算法和计算技术

上 册

[美] 蔡少棠 林本铭 著

黄安山 主译

上海機械學院

电子线路的计算机辅助分析: 算法和计算技术

下 册

[美] 蔡少棠 林本铭 著

黄安山 主译

庄镇泉 戴英侠 王荣生 校

上海機械學院

**电子线路的计算机辅助分析、
算法和计算技术**

上册

〔美〕 蔡少棠 林本铭 著

黄安山 主译

潘中辉 肖杰生 何文 校

上海机械学院印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张20 字数480,000

1983年3月第1版 1983年5月第1次印刷

印数 1~3000

内部使用 工本费2.65元

电子线路的计算机辅助分析：
算法和计算技术

下 册

〔美〕蔡少棠 林木铭 著

黄安山 主译

庄镇泉 戴英侠 王荣生 校

上海机械学院印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 528,000

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印数 1~3000

内部使用 工本费 2.85元

中 文 版 序

晚近三十余年来，在电机工程各项进展中，对人类日常生活最有影响者莫过于微电子电路与计算机。由于集成电路制造技术之突飞猛进，电子线路之体积愈变愈小，而其内部之结构则愈趋复杂。此种电路之设计与分析，如果不用计算机辅助，专靠人力计算是无法完成的。“计算机辅助电路分析”这一门新兴学问即为达成上述目的而极受重视。关于这一门学问的专门论文，已多至车载斗量，但欲求一深入浅出，对全盘作有系统介绍的书籍，则如凤毛麟角，是为本书著作之缘由。本书之陈述次序，以及章节之选用办法，均见原序，兹不赘述。

本书之俄文本及波兰文本已分别于1980年及1981年问世，今又得以著者之母语与读者见面，著者深感欣慰。中文本系由黄安山主译。著者在此谨向所有参加翻译工作之人员，表示谢意。中文本系根据1980年英文本第二版，在英文本第一版中所发现之若干误植，均已更正。

如果此书之中文本能有助于电子专业人员之探窥门径，或因此而更求深入堂奥，使科技研究普遍生根，则著者之愿望就达到了。

蔡少棠于美国柏克莱加州大学

林本铭于美国普渡大学

一九八三年

本书译自美国柏克莱加州大学蔡少棠教授和美国普渡大学林本铭教授所著“Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits, Algorithms & Computational Techniques”一书(1980年第2版)。著者特为中译本作了序言,在翻译过程中,承林本铭教授的热情关注并给予了指导。

中译本分上册(序言、1—8章)、和下册(9—17章、索引),上册由北京大学陆钟辉、上海机械学院肖杰生、上海640研究所钟兆文三位同志校。下册由中国科技大学庄镇泉、戴英侠、王荣生三位同志校。

上海柴油机厂沈岳祥同志和上海机械学院陈离同志分别提供了第2、11、12章和第6章的译稿。

肖杰生同志为本书的出版起了很大的促进作用,谨此致谢。

由于译者水平限制,肯定存在不少错误,深望读者不吝指教。

黄安山于上海机械学院

一九八三年

电子线路的计算机辅助分析： 算法和计算技术

序 言

按照惯例，大多数电子线路的设计都是工程师凭借纸张和铅笔着手进行的。他们除受基本训练外就是用大量的设计图表、表格和诺谟图武装自己。工程师主要凭其直觉、过去的经验及知识作出接近实际的合理设计。然后进入“线路板搭试阶段”，通过反复试验调整电路元件的数值来证实或改善原始设计方案。

然而，集成电路的出现使这种局面大为改观。不但电路规模大得多而且技术要求也严格得多。当我们考虑到设计结果的准确性和完成设计所需的时间时，纸笔法已不再适用。线路板搭试也因其不可能用分立元件复现一个集成电路而作用甚微。加之，集成电路掩模的实际生产费用昂贵。即使费用多少暂且不论，上述任一方法也都不能保证容差要求和进行最坏情况的分析研究。正是在这样一种情况下，数字计算机作为一种重要的设计工具出现了。因此，我们不再使用线路板搭试来模拟电路而是通过编制计算机程序达到模拟和分析电路的目的。这种计算机辅助的电路分析是迈向自动化电路设计的第一步。另一项重要内容是有效的优化方法。今天，人们普遍认为电路模拟程序是任何复杂电路设计中必不可少的工具。

本书致力于**计算机辅助电路分析，并着重于算法和计算技术**。本书可作为电气工程四年级学生和一年级研究生的**教科书**。我们希望学生在学完本书以后，不仅对许多现有计算机模拟程序所用的基本原理和算法有透彻的了解，而且具有自编小型专用程序的能力。学习本书的**先决条件是**：（1）基本电路分析（正弦稳态分析，拉氏变换法）和（2）初等矩阵代数（乘法，求逆，分块）。这种基础对于所有电气工程四年级学生来说都是具备的。

本书之著作正是以满足上述要求为动机的。约四年前开始写这本书的时候，有关计算机辅助电路分析各方面的教科书在市场上已不下十余种。我们查阅了这些资料并发现可将其分别归入下述各类：

- （1）**内容非常窄**。有些书详细讨论了如何使用某一具体程序，但很少或没有强调基本理论。虽然它为培训恰好有这些程序的某些公司的设计师有用，但它们对于大学生显然是不合适的。
- （2）**非常浅**。这些书表面上触及了许多重要的论题，但是从未深入到足以有用的程度。举个恰当的例子来说，就是讨论状态方程的建立仅限于不带受控源的线性RLC网络。这种教科书不能满足那些求知欲很强的学生的要求。
- （3）**非常深**。这些书是专为那些在这个领域已有渊博知识的学者们写的。

(4) **汇编**。这类书似乎很流行。因为这是许多专家集中收集题材的结果,所以它可能包括了代表当时技术水平的各种课题。但另一方面,这种教科书有叙述不足、各章节之间协调不当的问题。对研究人员来说虽然是很合适的参考书,但对学生来说几乎不能算作良好的教科书。

正是在这种情况下,我们于四年前开始写现在这本书。本书以授课笔记为基础,其中部分内容已在柏克莱加州大学和在普渡大学使用过。本书引导学生由浅入深地研究问题。在新的知识领域方面以及在深度超出本书规定之处,我们指出参考文献。我们强调算法而不是实际编程的细则,因为前者具有通用性,而后者随所用程序设计语言(FORTRAN, APL等)而异。我们不是片面强调一种方法而忽视其他方法。我们注意到选材之间的平衡,本书目录和下面各章的简介可以说明这一点。

在**第一章**的前三节我们规定了要用计算机模拟程序解决的问题,描述了计算机模拟程序的主要组成部分并列举了使用这些程序的几个实例。在第一章的其余几节,我们对与许多计算机模拟程序有关的一些基本方法、特性和数值问题作了极其初步的说明,目的在于促使学生深入研究以后各章。

在**第二章**中,我们讨论了构成电子线路通用电子元、器件模型的原理。本章描述了结型二极管和双极晶体管模型。其他半导体器件模型只是提了一下,因为这个题目的详细研究显然超出了本书的范围。本章较为详细地介绍了对于综合三端器件直流电路模型具有潜在能力的**统一黑盒法**,因为此法在其他地方不易找到。尤其是,对这一方法的深入了解可使电路设计师将以前特殊的计算机模拟程序所不允许的许多电路元件转换成可接受的等效电路。本章还论及了**运算放大器“宏”电路黑盒模型**。它不仅能模拟频率和相位特性而且能模拟各种重要的非线性效应,如运算放大器的摆率限制。我们对导出这一模型所用的原理略为详细地作了介绍,这不但是因为它表明了黑盒构造法的有用性,而且因为根据想象可用这同一种方法来构成其他IC组件模型。

在**第三章**中,我们介绍了适用于电路分析的图论基础。本章的结果广泛地应用于以后各章:建立混合矩阵(第六章)、建立状态方程(第八章和第十章)、符号网络分析(第十四章)和伴随网络灵敏度分析(第十五章)。本章特别注重用计算机生成各种拓扑矩阵。

在**第四章**中,我们详细研究了线性网络的节点分析,强调了数字计算技术的应用。本章内容实际上是独立的。一种叫做NODAL的程序轮廓列于本章附录之中,这样便可将其作为学生课外自修内容的起点扩展成一套完整的程序。我们的经验表明,这种给学生布置课外自修内容的做法对于学习本书是非常有益的。

在**第五章**中,我们把节点分析法推广到非线性电阻网络。**定点算法**在此作为一种统一的概念引出。根据这一概念,后面的一些算法——**牛顿-拉夫逊算法**(5-4节),**预测-校正算法**(11-5-2节)和**周期解算法**(17-5-1节)可视为特例。本章详细讨论了求解非线性函数方程最通用的**牛顿-拉夫逊法**。非线性电阻网络的求解实际上是大多数计算机模拟程序的基础,求解过程通常称为**直流分析**。**非线性电阻网络应用牛顿-拉夫逊法来求解**,对此,我们就有关“离散的**线性电阻电路模型**”的使用作了详细论述,因为这一重要方法通常到处都有介绍但无严格证明。

在第六章中,我们描述了用计算机建立 n 端口线性电阻网络混合矩阵的方法。象第三章一样,本章材料亦用于以下几章(第七、八、十和十五章)。依据此材料的一般分析方法通常称为混合分析。虽然它不象节点分析那样为人们所熟知,但有许多电路,借助混合分析即使不是必要的但在计算上却有方便之处。例如,这种方法特别适用于分析包含非单调的电压控制的和电流控制的非线性电阻电路。它对于分析包含许多线性电阻器的非线性电路也十分有用,因为需要反复求解的非线性方程的个数等于电路中的非线性电阻器的个数。

在第七章中,我们把第六章的混合矩阵法应用于非线性电阻网络的分析。本章描述了一些求解分段-线性网络的最新算法。虽然分段-线性法在计算上不及第五章中的牛顿-拉夫逊算法有效,但它至少有两点优点。第一,对于一大类非线性网络,7—3节所述的分段-线性法保证收敛而不管初猜值如何。第二,它仍然是能够求出一个非线性电阻网络所有解的唯一方法。

第八章和第十章详细讨论了状态方程的建立,第八章适用于线性动态网络,第十章适用于非线性动态网络。第六章中的混合矩阵概念是这两章的基础。虽然就开发大型模拟程序而言,从编程和计算的观点来看,状态方程法不象表格法(17-2节)那样有吸引力,但在许多其他方面状态方程的概念和建立是十分重要的。例如,有关稳定性、瞬态衰减、两歧状态等的定性分析需要建立网络的状态方程。

第十一、十二和十三章详细讨论了状态方程数值积分法以及有关的稳定性和时间常数问题。这三章内容独立,包含常微分方程数值积分最新的研究。实际上可以取出来作为有关系统分析、建模或模拟课程的补充教材。虽然这几章涉及到的数学知识比其余各章得多,但所有结果都是用初等方法导出的。用一种统一的方法导出了三类重要的积分方法:显式Adams-Bashforth算法,隐式Adams-Moulton算法和隐式Gear算法。用一种新颖的方法导出了一种简单而通用的公式,它对所有多步算法给出了局部截断误差。这种分析导致一种有效的变阶、变步长预测-校正算法。(显式Adams-Bashforth算法在这种情况下是很好的预测法。)我们在这里不用熟知的 z 变换方法去进行稳定性分析而是采用差分方程法,因为它是更为直接的方法并且另有独到之处。特别是它生动地表明了寄生项会如何破坏用其他精确的数值积分算法获得的稳定性。

第九章讨论了只适用于线性网络的几种特殊的数值方法。本章还有用计算机确定线性电路传递函数 $H(s)$ 的内容。这个题目在第十四章也将遇到,尽管所述观点有所不同。最后,以许多说明性实例给出了高度有效的计算关联矩阵 A 的特征值的QR算法。

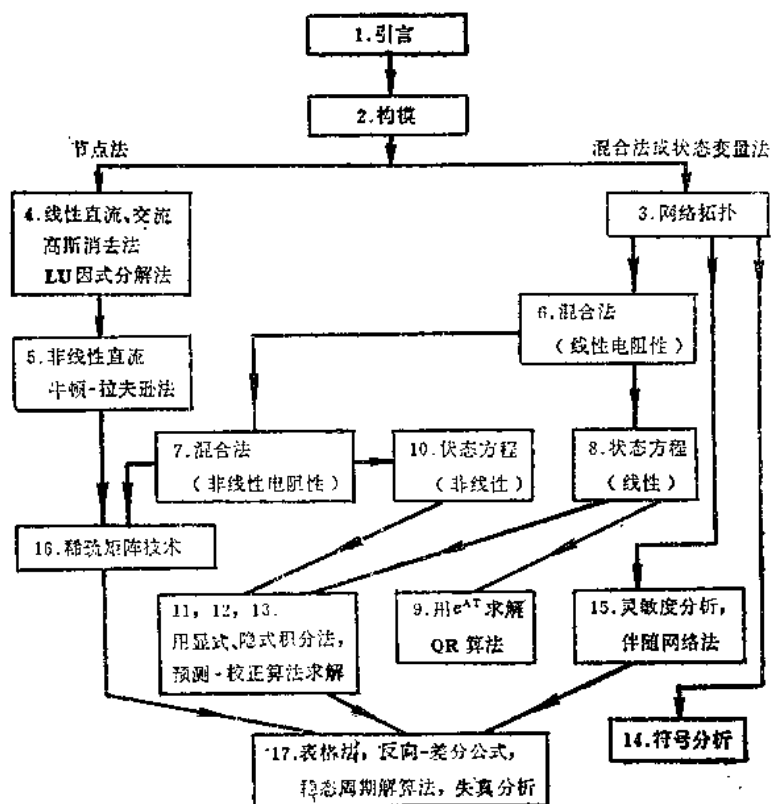
本书其余四章包括稍带专业性但也非常重要的计算机辅助电路分析课题。众所周知,分析是设计的第一步。电子线路的自动化设计,作为目前广泛研究的题目,需要一个良好的分析程序和一个良好的优化策略。大多数优化方法需要有效地计算网络函数的偏导数,而这些往往是从计算机辅助的灵敏度分析中得到的。在第十五章中,我们描述了几种灵敏度分析方法。在这里伴随网络法因其通用性和高效性而得到了充分注意。然而,作为第十四章的自然延续,也指出了符号法的潜力。在第十四章中阐明了用计算机生成符号网络函数的统一处理方法。虽然符号分析有一些严重缺点,但它对进行小型网络的综合的灵敏度研究仍是有用的。

当网络规模变得较大(一百个或更多个节点)时,就必须应用稀疏矩阵技术来解大型方程组。虽然已有许多文献,但要找出专为该领域的初学者写的文章却很困难。第十六章就是为

此而作的。稀疏矩阵技术仍是一个活跃的研究领域，所以，比本章所述有效得多的新算法必将出现，有兴趣的读者可参阅有关这个课题的近期文献。

第十七章——本书的最后一章，尽力介绍了计算机辅助电路分析的许多近期成果。其中有分析大型网络的最新的表格法，以及利用隐式反向差分公式解微分代数方程组的新的有效算法。在这一章中，还有计算由周期源激励的网络稳态周期响应的有效算法，以及计算非线性振荡器周期解的有效算法。最后这一章以介绍非线性通讯线路频谱和失真分析的最新算法作为结尾。

下面给出了各章之间关系的流程图，紧接序言之后是本书所述全部算法和计算技术的完整目录。我们相信，本书包括了与计算机辅助电路分析有关的大多数重要结果和方法。我们决定不列入任何优化技术和容差分析，因为论述这些题目会使本书篇幅增加很多。此外，这些题目实际上与计算机辅助设计更为密切，因而超出了本书的范围。



各章关系流程图

本书内容足够四年级程度的一年的课程所用。通常每章中各节以由浅入深的次序编排。事实上每章的最后两节往往包含高深的内容，如果略去不讲也不会失去连贯性。这些章节标有星号。通过谨慎选择题目（不必按各章的次序），本书也可作为两学期制的一个学期，四学期制的一个学期，两学期制的两个学期或四学期制的两个学期的课程教科书。下表列出了计

计算机辅助电路分析六种典型课程的可能的题目编排。在每一课程中，我们建议在课堂上一开始只讲解第一章的前三节阐明本课程的宗旨。其余各节可规定由学生自学，以期概括了解许多以后要进一步用到的重要概念。另一种办法是，其余各节的每一节可在适当的时候作为后一章的引子。虽然本书对大多数命题和定理给出了数学证明，但这些证明主要供定向研究的学生使用，在任何绪论课中这些内容可以不讲而着重于这些结果的解释和应用。

各章之末都附有习题，其中大多数均经过了课堂测验，以保证它们的难度和复杂程度对学生正好合适。当本书供低年级使用时，应略去那些超出基本矩阵代数范围的习题，这由指导教师决定。为避免连续多年指定相同的习题，许多习题包括几个相似的部分，它们仅仅是

课程	课程期限和水平	有 关 章 节	说 明
I	一个学期(两学期制) 15周 3 小时/周 四年级	1~6章(略去4-4和6-6节); 7-1, 7-2, 8-1, 8-2, 8-4, 9-5节;10~13章以及从15 和16章中选出的专题	包括使用节点法和状态变 量法的直流、交流和瞬态 分析; 强调隐式积分技术
II	两个学期(两学期制) 30周 3 小时/周 四年级	实际上是除17章以外的本 书全部内容	专用计算机模拟程序可指 定为学生小组计划
III	一个学期(两学期制) 15周 3 小时/周 一年级研究生	迅速复习: 1,2,3,4,9章; 讲课: 5,6,8,10,11,12, 13,15,16章以及从17章中 选出的专题	在计算机辅助电路分析方 面原已具有大学基础的研 究生可以跳过 1、2、3 和 4 章
IV	一个学期(四学期制) 10周 3 小时/周 四年级	1,2,4,5 章; 11~13 章以 及从15和16章中选出的专 题	限于使用节点法的直流、 交流和瞬态分析; 强调隐 式积分技术
V	两个学期(四学期制) 20周 3 小时/周 四年级	计划 IV, 另加 3,6,7 章; 8-1, 8-2, 8-4, 9-5节; 10章以及从15和16章中选 出的专题	第二学期包括混合法和状 态变量法, 伴随网络和稀 疏矩阵技术
VI	一个学期(四学期制) 10周 3 小时/周 一年级研究生	迅速复习: 1,2,3,4,9章; 讲课: 5,6,8,10,11,12, 13章以及从 15,16 和17章 中选出的专题	标有星号的有关编程细节 的各节可以指定为学期计 划

数值参数不同或是其他的次要细节相异。在这种情况下，指导教师应当只规定相互不重复的那些部分。

虽然本书着重算法而不是编程的细节，但我们还是列出了三种FORTRAN程序。第四章附录中的NODAL程序使用了该章的方程建立和求解方法。该程序很小，所以可为每个学生配备一组源程序穿孔卡。他可以以此为起点将其扩大成为一个完整的直流、交流和瞬态分析程序。这会使其避免从头开始编写程序行将遇到的许多挫折。

第六章附录中的HYBRID程序使用了第三章和6—6节所讨论的概念和方法。这是将理论付诸实践的极好例子。此外，因为在最一般的情况下(所有四种受控源都允许)求得混合矩阵的程序在文献中还未见报道，所以列出本程序对从事计算机辅助设计方面的学生和研究人员都是有益的。

同样由于教学上的理由，在第十六章附录中列出了SPARSE程序。在任何教科书里要找到既简单又能完全阐明稀疏矩阵本质的FORTRAN程序则是非常困难的。

(以下为致谢语，从略)

蔡少棠

加利福尼亚，柏克莱

林本铭

印第安纳，拉斐特

各章所述算法一览表

(括号中数字为章号)

- 把长方形矩阵化为阶梯形(3)
- 从关联矩阵求树(3)
- 生成基本割集和回路矩阵(3)
- 节点导纳矩阵的直接构成(4)
- 高斯消去法(4)
- Crout(LU)因式分解(4和16)
- 牛顿-拉夫逊算法(5)
- n 端口电阻网络混合矩阵的建立(6)
- 包含受控源的 n 端口电阻网络混合矩阵的建立(6)
- 对普通 n 端口电阻网络建立约束矩阵(6)
- 牛顿-拉夫逊算法的分段-线性形式(7)
- 分段-线性的Katzenelson算法(7)
- 分段-线性的组合算法(7)
- RLCM 网络状态方程的建立(8)
- 有源线性网络状态方程的建立(8)
- 有源线性网络输出方程的建立(8)
- $\exp(AT)$ 的求值(9)
- 把状态方程变成差分方程[使用 $\exp(AT)$](9)
- Souriau-Frame 算法(9)
- QR 算法(9)
- 生成其特征值为 $H(s)$ 的零点的 $\hat{A}$ 矩阵(9)
- 非线性动态网络状态方程的建立(通用法)(10)
- 非线性动态网络状态方程的建立(特别法)(10)
- 泰勒数值积分算法(11)
- 龙格-库塔算法(11)
- 隐式算法(经预测-校正)(11)
- 以标准矩阵形式表示的预测-校正算法(11)
- Adams-Bashforth 算法(12)
- Adams-Moulton 算法(12)
- 自动变阶和变步长的算法(12)

- Gear算法(13)
- 求有向图中的所有路径(14)
- 求信号流图中的所有回路(14)
- 求信号流图中的所有 n 阶回路(14)
- 求网络函数的偏导数(15)
- 求 $v_0(t_f)$ 或 $i_0(t_f)$ 关于 x 的偏导数——时域(15)
- 梯度确定——线性电阻网络(15)
- 梯度确定——线性动态网络, 频域(15)
- 梯度确定——线性动态网络, 时域(15)
- 工作点灵敏度的确定(15)
- 稀疏矩阵重排序算法(16)
- 最佳Crout算法(16)
- 用隐式方法建立通用的伴生离散电路模型的相应算法(17)
- 列表算法(17)
- 求解隐式微分-代数方程组的变步长变阶算法(17)
- 确定周期输入情况下非线性电路稳态周期解的算法(17)
- 确定非线性振荡器稳态解的算法(17)
- 高效低失真分析算法(17)

上册 目 录

序言	(1)
各章所述算法一览表	(7)
第一章 简述	(1)
1—1 线路板搭试与计算机模拟	(1)
1—2 借助计算机模拟进行电路分析的实例	(1)
1—3 计算机模拟程序剖析	(16)
1—4 用 n 端口线性网络的混合分析法建立方程	(18)
1—5 若干数值积分算法及其数值稳定性	(21)
1—6 刚性微分方程及相应的时间常数问题	(26)
1—7 数值积分算法误差分析	(31)
1—8 状态变量的选择对总误差的影响	(33)
1—9 电容器和电感器的伴生离散电路模型	(36)
1—9—1 推导线性电容器的伴生离散电路模型	(36)
1—9—2 推导线性电感器的伴生离散电路模型	(38)
1—10 灵敏度分析	(40)
1—11 电路分析中的稀疏矩阵技术	(45)
第二章 电子器件和元件的计算机电路模型	(51)
2—1 电路模型及其积木式元件——基本集合	(51)
2—2 电路模型的体系和类型	(53)
2—2—1 根据信号幅度范围的模型分类	(54)
2—2—2 根据信号带宽的模型分类	(56)
2—2—3 模型的体系	(57)
2—3 构造模型的基础	(57)
2—4 某些物理模型	(60)
2—4—1 结型二极管的物理模型	(60)
2—4—2 晶体管的物理模型	(61)
2—4—3 晶体管的高频线性增量物理模型	(64)
2—5 三端器件直流总体黑盒模型的综合	(68)
2—5—1 两段平行的 $v-i$ 曲线族的典型黑盒模型	(72)
2—5—2 任意 $v-i$ 曲线族的典型黑盒模型	(78)

2—6	直流总体黑盒模型变换为交流总体黑盒模型	(83)
2—6—1	引线电感和封装电容	(84)
2—6—2	渡越电感和电容	(85)
2—7	常用多端口电路元件和器体的黑盒模型	(87)
2—7—1	非理想二端口变压器的电路模型	(87)
2—7—2	非理想运放的电路模型	(87)
第三章	网络拓扑：用计算机建立克希荷夫定律方程的关键	(107)
3—1	何谓网络拓扑	(107)
3—2	关联矩阵	(109)
3—3	回路矩阵	(111)
3—4	割集矩阵	(115)
3—5	支路变量之间的基本关系	(118)
3—6	用计算机生成拓扑矩阵 A 、 B 和 D	(121)
3—6—1	找一个树	(122)
3—6—2	生成 B 和 D	(124)
附录3A	定理3—1的证明	(128)
附录3B	定理3—2的证明	(129)
附录3C	把长方形矩阵化为阶梯形矩阵的算法	(130)
第四章	线性网络的节点分析：算法和计算方法	(138)
4—1	引言	(138)
4—2	用计算机建立线性电阻网络的节点方程	(138)
4—3	高斯消去算法	(142)
*4—4	LU 因式分解	(148)
4—4—1	因式分解定理	(148)
4—4—2	不用互换行的 Crout 算法	(151)
4—5	用节点方程对线性网络进行正弦稳态分析	(154)
4—6	节点导纳矩阵和电流源向量的直接构成	(157)
附录4A	NODAL 程序用户指南	(161)
附录4B	NODAL 程序清单	(163)
第五章	非线性网络的节点分析：算法和计算方法	(170)
5—1	引言	(170)
5—2	用拓扑公式建立节点方程	(170)
5—3	定点迭代的概念	(174)
5—4	牛顿-拉夫逊算法	(178)
5—4—1	一个未知数一个方程的牛顿-拉夫逊 算法	(178)
5—4—2	收敛速率	(181)