

邮电高等学校教材

网络设计的计算机方法

居 悌 黄妙珍 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书较为系统而简明地介绍了网络设计中的计算机方法。全书共分十五章：网络中的基本概念，网络拓扑，线性网络分析，建立网络方程的一般方法，稀疏矩阵技术，灵敏度分析，网络函数的计算机生成，大变化灵敏度分析及其应用，线性网络的瞬态分析，数值拉氏逆变换，器件模型的建立，非线性网络的直流分析，非线性网络的瞬态分析，时域灵敏度分析与稳态解问题和网络的最优化设计。

本书为邮电高等院校电信工程和计算机应用等专业的教材，并可供从事上述专业的教师 and 科技人员阅读参考。

邮电高等学校教材
网络设计的计算机方法
居 梯 黄妙珍 编著

人 民 邮 电 出 版 社 出 版
北京东长安街27号
河 北 省 邮 电 印 刷 厂 印 刷
新华书店北京发行所发行
各 地 新 华 书 店 经 售

开本：850×1168 1/32 1991年6月第 一 版
印张：18⁴/₃₂ 页数：290 1991年6月河北第1次印刷
字数：479 千字 印数：1 — 3 900 册

ISBN7-115-04453-8/G·087

定价：5.75元

前 言

本书是邮电部邮电高校计算机类专业教学指导委员会推荐出版的教材。书中讲述了很多先进的算法,例如建立网络方程的双图法、灵敏度分析的伴随方程法、用快速傅里叶变换的符号网络分析以及瞬态分析的数值拉氏逆变换等等。

本书内容力求深入浅出、简单明了,采用尽可能短小的例题来演示算法,并使初始阶段的论述中多体现一些编程技巧。在每章的结束还备有习题,以帮助读者加深理解和应用所学得的知识。为了便于读者进一步的学习和研究,书中第一次定义的专业术语都注有英文译名,并在书的最后给出国内外的主要论著和各相关课题的主要参考文献。

本书可作为高等院校电子和信息工程、半导体和集成电路、自动控制以及计算机应用等专业的高年级本科生和研究生的教材,并可供从事上述专业的教师和科技人员阅读。

为了便于多层次学生的选题,将前十章严格限制在线性问题范围,其余各章讨论非线性和最优化设计问题。内容按60学时左右的研究生教材编写,若删除在目录中标有*号的章节,就可以作为40学时左右的高年级本科生的选修课教材。书中第一、四、七、八和第十章由黄妙珍编写,其余各章由居悌编写。

本书承蒙南京邮电学院郭祥云教授、东南大学沈永朝教授和邮电科学研究院顾学道高级工程师的精心审阅,邮电高校计算机类专业教学指导委员会的所有委员对本书的编写给予了极大的关心和支持,在此一并致以衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免有错误和疏漏,敬请读者批评指正。

居 悌 黄妙珍

1990年4月

目 录

概 述

第一章 网络中的基本概念

1.1 基本的二端元件	(3)
1.2 拉氏变换域中的电容和电感	(7)
1.3 基本的二端口网络	(10)
1.4 戴维宁和诺顿等效	(14)
1.5 网络的归一化和参数的定标	(16)
1.6 网络函数及其零极点	(18)
1.7 网络的时域响应	(22)
附录1.A 拉氏变换及其逆变换的计算	(24)
附录1.B 有理函数的部分分式展开	(27)
习题	(29)

第二章 网络拓扑

2.1 网络的图	(35)
2.2 关联矩阵	(38)
2.3 回路矩阵	(40)
2.4 割集矩阵	(43)
2.5 拓扑矩阵间的关系	(46)
2.6 网络中的独立变量	(48)
2.7 拓扑矩阵的计算机形成	(50)

附录2.A RE算法	(55)
附录2.B RE算法子程序	(57)
习题	(59)

第三章 线性网络分析

3.1 节点方程的拓扑建立	(62)
3.2 节点方程的直接形成	(66)
3.3 高斯消去法	(72)
3.4 LU 分解法	(75)
3.5 主元消去法	(82)
3.6 线性网络稳态分析程序NODAL	(86)
附录3.A 直接形成 $(Y_n: J_n)$ 的子程序	(90)
附录3.B 高斯消去法子程序	(92)
附录3.C LU 分解法子程序	(94)
附录3.D 列主元高斯消去法子程序	(95)
附录3.E 列主元 LU 分解法子程序	(98)
附录3.F 稳态分析程序NODAL主程序	(100)
习题	(102)

第四章 建立网络方程的一般方法

4.1 列表分析法	(107)
4.2 改进节点分析法	(112)
4.3 改进节点方程的直接形成	(116)
*4.4 网络的电流图和电压图	(121)
*4.5 双图的计算机描述	(125)
*4.6 双图改进节点方程的建立及其直接形成	(127)
*4.7 有源网络的节点分析法	(133)
*4.8 小结	(135)
习题	(136)

第五章 稀疏矩阵技术

5.1 问题的提出	(142)
5.2 存储稀疏矩阵的数据结构	(144)
5.3 排序算法及其程序实现	(150)
5.4 排序算法中的几个具体问题	(165)
•5.5 稀疏方程求解的程序实现	(169)
•5.6 小结	(179)
附录5.A 田尼—沃克算法程序框图	(180)
附录5.B 马柯维茨排序算法程序框图	(182)
附录5.C 矩阵填入的确定和插入程序框图	(182)
附录5.D 建立数组LUP的程序框图	(184)
附录5.E 数值 LU 分解程序框图	(184)
附录5.F 向量填入的确定和插入程序框图	(185)
习题	(186)

第六章 灵敏度分析

6.1 灵敏度定义	(190)
•6.2 对零值和无限值元件参数的灵敏度	(194)
6.3 伴随网络法	(197)
6.4 伴随方程法	(209)
•6.5 伴随方程法的应用	(214)
6.6 一般形式的输出灵敏度计算	(223)
•6.7 高阶灵敏度的计算	(230)
习题	(232)

第七章 网络函数的计算机生成

7.1 网络函数的形式	(236)
7.2 符号网络函数的生成原理	(238)

7.3	单位圆多项式插值	(239)
7.4	符号网络函数的生成算法	(242)
7.5	零极点的迭代解	(245)
*7.6	零极点的精度改进	(248)
*7.7	零极点的直接解	(252)
*7.8	QR 算法	(254)
	习题	(260)

第八章 大变化灵敏度分析及其应用

*8.1	大变化灵敏度分析	(263)
*8.2	微分灵敏度的计算	(274)
*8.3	故障诊断问题	(278)
*8.4	稀疏矩阵分解中的零主元问题	(280)
*8.5	全符号网络函数的生成	(283)
	习题	(293)

第九章 线性网络的瞬态分析

9.1	基本的数值积分算法	(296)
9.2	积分公式的阶数和截断误差	(301)
9.3	积分公式的稳定性	(305)
9.4	线性网络状态方程的建立	(310)
9.5	线性网络的时域解	(313)
9.6	瞬态分析的友网络法	(318)
	习题	(323)

第十章 数值拉氏逆变换

*10.1	数值拉氏逆变换公式	(326)
*10.2	数值拉氏逆变换的精度问题	(332)
*10.3	网络响应特征时间的快速计算	(335)

•10.4	时域灵敏度的频域法计算	(337)
•10.5	步进算法	(340)
•10.6	步进算法的稳定性	(345)
	附录10.A 有理复变函数的积分	(347)
	附录10.B 数值拉氏逆变换程序	(349)
	附录10.C 步进算法程序	(351)
	习题	(354)

第十一章 器件模型的建立

11.1	概述	(356)
11.2	二极管物理模型	(359)
11.3	双极晶体管物理模型	(361)
11.4	场效应晶体管物理模型	(371)
11.5	晶体管的黑箱模型	(375)
•11.6	模型精度等级的自动选择	(379)
•11.7	集成电路中的器件模型问题	(381)
•11.8	电路的宏模型	(385)
	习题	(392)

第十二章 非线性网络的直流分析

12.1	牛顿—拉夫森迭代算法	(395)
12.2	牛顿—拉夫森算法的变形	(399)
12.3	非线性节点方程的建立及其解	(400)
12.4	非线性列表方程的迭代求解公式	(404)
12.5	晶体管电路分析中收敛性的改进	(405)
12.6	非线性直流分析的友网络法	(407)
•12.7	非线性电阻网络的灵敏度分析	(414)
•12.8	分段线性化方法	(422)
	附录12.A 图12.5.2所示网络的求解程序	(430)

习题.....	(433)
---------	---------

第十三章 非线性网络的瞬态分析

•13.1 多步数值积分算法原理	(436)
•13.2 多步数值积分公式的性质	(446)
•13.3 两类重要的积分算法系列	(452)
•13.4 非线性网络状态方程的建立	(456)
•13.5 非线性网络的时域解	(460)
•13.6 变阶变步长算法	(463)
•13.7 瞬态分析的列表和改进节点分析法	(468)
•13.8 瞬态分析的友网络法	(472)
习题.....	(477)

第十四章 时域灵敏度分析与稳态解问题

•14.1 伴随网络法	(480)
•14.2 灵敏度网络法	(489)
•14.3 伴随方程法	(494)
•14.4 非线性网络的稳态解	(497)
•14.5 稳态解的外推法	(500)
习题.....	(503)

第十五章 网络的最优化设计

15.1 数学模型的建立	(506)
15.2 直接寻查法	(510)
15.3 梯度法	(516)
15.4 线性寻查	(522)
15.5 有约束的最优化方法	(526)
15.6 网络参数的最优化	(528)
15.7 网络结构的最优化	(535)

附录15.A 单纯形法子程序	(538)
附录15.B FP法子程序	(541)
习题	(545)
参考文献	(548)

概 述

早期, 人们所要处理的电路和网络的规模比较小, 设计时一般只进行简单的近似估算, 大量的工作是在实验板上进行调试, 以达到设计的要求。如果网络比较复杂, 这种调试工作就需要很长的时间。随着电路规模和复杂度的增大, 用这种传统方法已经无法实现精确而可靠的设计。事实上, 早在本世纪三四十年代, 人们已经开始对网络进行自动化设计的尝试, 但只是停留在象网络分析器和模拟计算机这样的水平, 仍然没有涉及更多的计算方法。直到60年代, 随着集成电路和数字计算机的迅速发展, 对网络进行自动化设计的要求越来越迫切, 而实现这种要求的条件也越来越成熟。集成电路和计算机这两大技术的发展是相辅相成、相互促进的。集成电路的发展使计算机的功能更强、体积更小、价格更便宜。反之, 一块包含成千上万个电路元件的集成电路, 必须借助于计算机才能实现精确而可靠的设计。显然, 其中除了计算机硬件以外, 还必须包含丰富而有效的数值计算方法。在计算机迅速发展并广泛普及的今天, 网络设计中的计算机方法将无疑会变得越来越重要。

网络的计算机辅助设计经历了一个由初级向高级发展的过程。最初, 人们只是将计算机作为一种计算工具, 去求解网络设计中所遇到的一些代数或微分方程。到了中级阶段, 人们开始编制各种通用程序, 用户只需将网络的拓扑信息和元件参数输入计算机, 计算机便会自动地建立和求解网络方程, 并输出用户所需要的信息。这是现阶段网络计算机辅助设计的主要形式, 也是比较成熟的阶段。当进入高级阶段时, 用户只需利用光笔在计算机显示设备上输入和修改

图形和数据，计算机就能自动进行识别和计算，最后输出设计结果。在整个发展过程中，数值计算在60年代末的四大突破对网络计算机辅助设计的发展产生了深远的影响。它们是：稀疏矩阵技术，求解代数微分方程组的多步数值积分算法，灵敏度分析的伴随网络法以及有约束的最优化方法。上述方法的进展，导致70年代出现了一批功能很强的通用电路分析程序，使网络计算机辅助设计的方法更完善、更实用。

超大规模集成电路的发展极其迅速，这促使网络设计中的计算机方法也在深度和广度上迅速发展。从70年代末起，已经出现了所谓的第三代模拟技术，其实质就是采用各种方法“撕裂”大网络，将大规模方程“松弛”分解为若干个可以独立求解的较小规模的方程，以便充分利用计算机的并行处理和任务覆盖功能，使算法所能处理的电路规模大大扩大。此外，很多课题已发展成为一些独立的理论分支，例如电路元件参数的中心值和容差设计，电路的故障诊断等。特别是电路的故障诊断，已被人们誉为网络理论中与网络综合和网络分析相并列的第三大分支。

面对网络分析和设计的这种根本性变革，为了开发新的软件和修改现成程序，网络设计师必须具备计算机辅助设计所需的基本理论知识并掌握一定的计算机方法。值得指出的是，除了数学模型上有所区别外，其中所包含的数值计算方法和处理问题的思路也同样适用于其它工程领域。特别是通过机电比拟，甚至可以将处理网络的方法直接应用于机械、结构和动力系统。综上所述，在工科院校中设置关于网络的计算机辅助设计方面的课程是非常必要的。

第一章 网络中的基本概念

在介绍网络设计的计算机方法以前，在本章中首先要复习网络中的一些基本概念。1.1节中定义了基本的二端元件，包括电阻、电容和电感，以及作为电阻特例的独立电源、开路和短路元件。1.2节中讨论了电容和电感的初始状态，定义了它们在拉氏变换域中的导纳值和阻抗值，并给出了有初始状态时电容和电感的等效电路。1.3节中定义了二端口网络，介绍了线性受控源、阻抗转换器、阻抗逆转器、变压器、零器和理想运算放大器等几种基本的二端口网络以及它们的特性。1.4节中讨论了网络的戴维宁和诺顿等效以及实现方法。1.5节中讨论了网络的归一化和参数的定标问题。网络归一化的目的是克服网络参数值大小的离散性，以利于精确、稳定的数值计算。1.6节中定义了网络函数及其零极点，讨论了零极点位置与网络特性间的关系。最后一节中介绍了如何用拉氏逆变换求线性网络的时域响应。在本章的附录1.A中给出了拉氏变换的一些重要性质，应用留数定理计算拉氏逆变换的方法以及一些基本函数的拉氏变换公式。在附录1.B中给出了有理函数的部分分式展开方法。如果将有理函数先作部分分式展开，则函数的拉氏逆变换计算就会变得十分简单。

1.1 基本的二端元件

网络中基本的二端元件有电阻、电容和电感，根据描述它们特性的函数性质又可分为线性的和非线性的两类。

非线性电阻有流控的和压控的两种，前者伏安特性中的端电压

v 是端电流 i 的单值函数，而后者的端电流 i 是端电压 v 的单值函数，它们的伏安特性分别示于图 1.1.1 中的曲线 (a) 和 (b)。线性电阻的端电压 v 和端电流 i 服从欧姆定律，即

$$v = Ri = i / G \tag{1.1.1}$$

式中， R 是单位为欧姆(Ω)的电阻值， G 是单位为西门子(S)的电导值，电压和电流的单位分别为伏特(V)和安培(A)，其伏安特性如图 1.1.2 中的曲线 (a) 所示。注意，具有线性伏安关系但不服从欧

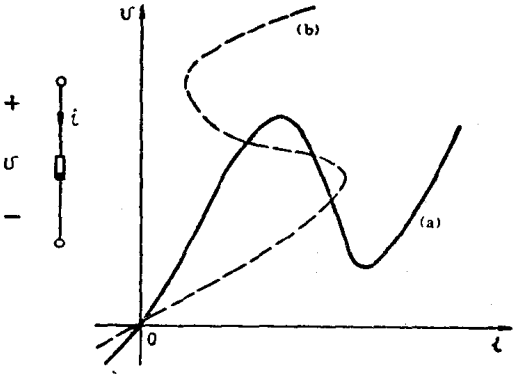


图 1.1.1 非线性电阻的伏安特性

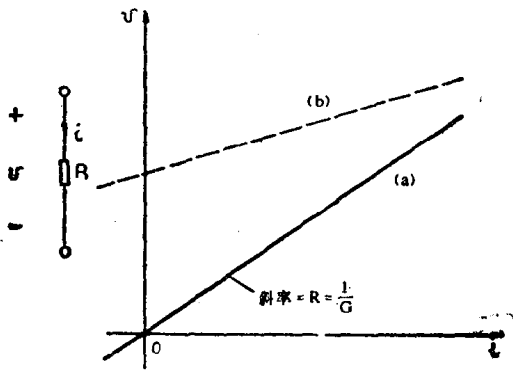
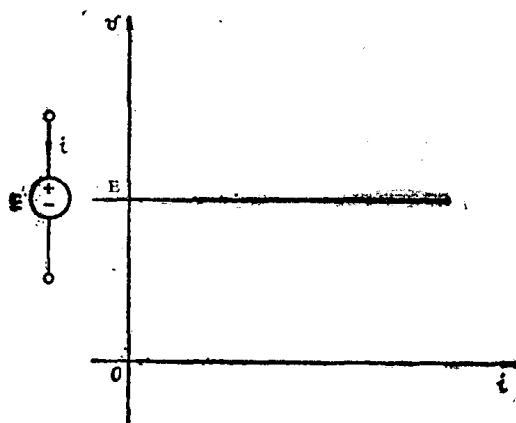
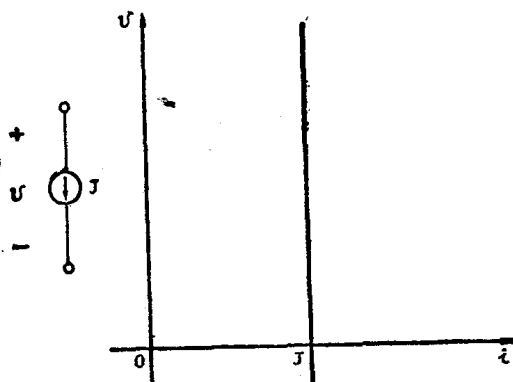


图 1.1.2 线性电阻的伏安特性



(a)



(b)

图 1.1.3 独立电压源和独立电流源的伏安特性

姆定律的电阻不是线性电阻，如图1.1.2中虚线(b)所示。从这种意义上讲，独立电压源和独立电流源都是一种特殊的非线性电阻，它们的伏安特性分别示于图1.1.3(a)和(b)。不难理解，短路和开路元件既可以分别视为 $E = 0$ 的独立电压源和 $J = 0$ 的独立电流源，又可以分别视为线性电阻在 $R = 0$ 和 $G = 0$ 情况下的特例。

非线性电容的特性可用其端电压 u 与电容电荷 q 间的函数关系来描述，即

$$q = f(v) \quad (1.1.2)$$

式中 q 的单位为库仑(C)。对于线性电容, 函数 f 是一个乘以常数 C 的简单关系, 即

$$q = Cv \quad (1.1.3)$$

式中 C 是单位为法拉(F)的电容值。又因为流过电容的电流为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.1.4)$$

所以可得描述线性电容的伏安关系式为

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.1.5)$$

或

$$v(t) = V_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1.1.6)$$

式中 V_0 是电容在时间 $t = 0$ 时的电压。

非线性电感的特性可用其端电流 i 与电感磁通 ϕ 间的函数关系来描述, 即

$$\phi = g(i) \quad (1.1.7)$$

式中 ϕ 的单位为韦伯(Wb)。对于线性电感, 函数 g 是一个乘以常数 L 的简单关系, 即

$$\phi = Li \quad (1.1.8)$$

式中 L 是单位为亨利(H)的电感值。又因为电感上的电压为

$$v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1.1.9)$$

所以可得描述线性电感的伏安关系式为

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.1.10)$$

或

$$i(t) = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (1.1.11)$$

式中 I_0 是时间 $t=0$ 时流过电感的电流。上述所有描述元件特性的伏安关系式(voltage-current relationship),以后简称为元件的VCR方程。

1.2 拉氏变换域中的电容和电感

电容和电感的VCR方程是电压与电流的微分关系。在线性时不变网络中,通过拉氏变换(Laplace transform)可以将它们转化为简单的代数关系。本节要推导线性电容和电感在拉氏变换域中的VCR方程,定义其导纳值和阻抗值,并用等效独立源来描述它们的初始状态。在这以前,首先介绍两个重要的时间函数及其拉氏变换和一个重要的拉氏变换性质。

单位阶跃函数 $u(t)$ 定义为

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2.1)$$

其拉氏变换为

$$U(s) = \frac{1}{s} \quad (1.2.2)$$

式中 $s = \sigma + j\omega$ 是复频率。在拉氏变换域中的函数用大写字母表示。

单位冲激函数 $\delta(t)$ 定义为

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad (1.2.3)$$

且满足从 $t = -\infty$ 到 $t = \infty$ 的函数积分为1,其拉氏变换为

$$\Delta(s) = 1 \quad (1.2.4)$$

若一般时间函数 $f(t)$ 的拉氏变换为 $F(s)$,并将拉氏变换对(变换及逆变换)记为