

电路的计算机辅助分析与设计

任良 甘淑贞 编

北京理工大学出版社

电路的计算机辅助分析与设计

任 艮 甘淑贞 编

北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 简 介

本书较全面地介绍了电路的计算机辅助分析和设计的基本理论、方法及其程序实现,并适当地吸收了这方面的一些新方法和内容,如改进节点分析法方面新近发展的一些方法和灵敏度分析方面的一些系统理论和方法等。全书共七章,包括:概论,线性电路的稳态分析,非线性电路的直流分析,电路的瞬态分析,稀疏矩阵技术,灵敏度分析和电路的计算机辅助设计。书中主干部分都给出了较详细的框图和程序,便于读者学以致用。除第一、七章外每章均附有适量习题。

本书可作为高等院校电子工程和自动控制类大学生及研究生的基本教材及有关专业师生的教学参考书,亦可供从事电路与系统分析和设计的科技人员或工程技术人员参考之用。

电路的计算机辅助分析与设计

任 良 甘淑贞 编

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

三河县潮河印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.5 印张 434千字

1989年5月第一版 1992年10月第二次印刷

ISBN7-81013-172-9/TN·13

印数: 3701—4700册 定价: 4.55元

前 言

本书是在原北京工业学院电子线路CAD组1980年所编《电子线路的计算机辅助分析》教材的基础上重新改写的。上述教材是当时为尽快在我校电子工程系及自动控制系的高年级本科学生及研究生中,开设《电子线路计算机辅助分析》这门课程而集体编写的。

自1981年以来,我们曾先后给历届有关专业的研究生及本科生(选修)开设了《电子线路的计算机辅助分析》或《电路的计算机辅助设计》等课程,学时为40~60,曾以电路的计算机辅助分析和设计方面的内容为题,指导过几届学生的毕业设计,指导研究生在这方面进行了一定的工作,本教材的重写就是以这些教学和科研的实践为基础的。

为使本书能更加适应本学科教学的需要,我们删去了一些与先修课程重复的内容和实际上不常用的分析方法,并引入了近年来出现的一些较成熟的有效分析方法。同时增加了电路的计算机辅助设计方面的内容。

全书共七章。第一章介绍电路计算机辅助设计的基本内容、意义和计算机辅助分析的过程、要求等,其目的在于使读者对本课题所要解决问题的概貌有所了解。第二章从节点分析法出发,着重介绍了以改进节点分析法为主的各种计算机辅助电路分析的方法。阐述了直接形成线性电路稳态方程的原理,并以改进节点分析法的稳态分析为例,介绍了框图及程序的编写过程,以便引导读者初步掌握编程方法。最后还介绍了采用电流图和电压图的改进节点法和简化改进节点法及稀疏表格法。第三章介绍非线性电路的直流分析,包括半导体器件模型、非线性电阻电路改进节点方程的形成。关于这类方程的求解方法,介绍了比较有效的N-R算法及其若干改进算法和分段线性迭代法。同时还介绍了伴随模型法,它是把电路中非线性元件线性化后,再列写线性化代数方程,并进行迭代求解的一种方法。最后介绍了一个非线性电路(含二极管、晶体管)的直流分析程序框图。第四章电路的瞬态分析,首先,介绍了求解电路中常微分方程和刚性常微分方程组的数值积分法、变阶算法及向后差分(BDF)算法;其次,介绍利用离散化伴随模型和线性化等效模型,把线性和非线性动态电路的瞬态分析,化为时间迭代和线性化迭代的线性化方程组,然后进行求解的方法,并辅之以程序框图及参考程序。这里还叙述了关于时变电源的处理方法。第五章稀疏矩阵技术,这里首先安排了线性代数方程组的数值解法一节,其中部分内容是本章所需要的,而另一部分(基本内容)系供读者参考之用,因本书在前面的章节中未安排此项内容,而它却是求解所必不可少的。该节中介绍的 $3n$ 因子LU分解法是稀疏矩阵求解程序中所要用到的。然后重点介绍了稀疏矩阵中常用的两种选主元算法(局部填入量最少和局部长操作数最少法)和常用的数据结构。最后,介绍了一个较典型的求解稀疏矩阵的框图及参考程序。第六章灵敏度分析,首先介绍一种建立在特勒根定理基础上的,目前应用较广的伴随网络法,及其在频域、时域和非线性电阻电路灵敏度分析中的应用;接着介绍的是一种非常简练的建立在直接微分系统方程和输出方程的基础之上的伴随系统(或转置系统)法,以及它们在电网络中的应用。最后介绍一种大变化灵敏度的原理及用之于对微分灵敏度的计算。第七章是电路的计算机辅助设计,在这里介绍了电路计算机辅助设计的主要过程及最优化的基本方法。较全面地叙述了搜索法的优化数学方法,

并对其中梯度类的各种主要方法指出其思路。还介绍了利用电路的灵敏度来计算目标函数梯度的方法，此乃优化能否在电路设计中广泛付诸实现的重要问题之一。

本书着重于基本原理和必要算法的介绍。为使读者通过学习不仅能较好掌握原理和算法，还能自己编写程序、书中对程序的编制原理和方法给予了足够的重视，因之，对一些通用的程序配有较详细的框图。这对于掌握任何一种算法语言的读者来说，编程都是易于实现的。本书附录中给出了三个用FORTRAN语言编写的通用程序，以备读者参考和使用，这些程序均已运行于IBM-PC/XT机上。书中除第一、七章外，每章后均附有适量习题，以便于读者深入掌握书中的内容和做到学以致用。

该书作为教材使用时，按40学时考虑，上机及参考程序的使用，可由教师根据具体条件和需要灵活掌握。阅读本书需具有微积分、线性代数、电路理论、模拟电子线路、算法语言及程序设计等方面的基本知识。

本书由任 昆主编，其中的第一、五、六、七章由任 昆编写，第二、三、四章由甘淑贞编写。

全书由华东工学院孙锦涛副教授审阅，并对书稿提出了宝贵的修改意见，谨致以衷心的感谢。本书的编写、出版得到了许多同志的热情支持、鼓励和帮助，在此一并向他们表示深切的谢意。

我们希望本书能对从事电路的计算机辅助分析和设计的广大读者有所帮助，但由于该领域发展十分迅速，应用范围相当广泛，而鉴于作者的水平有限、经验不足，且编写时间仓促，书中难免存在不少错误和不妥之处，殷切希望读者批评指正。

编者

1988年2月于北京理工大学

目 录

第一章 概 论

§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 电路计算机辅助设计的基本内容	(2)
§ 1.3 电路计算机辅助分析的过程	(4)
§ 1.4 电路计算机辅助分析和设计的发展概况	(6)

第二章 线性电路的分析方法

§ 2.1 概述	(9)
§ 2.2 节点分析法	(9)
2.2.1 组合支路	(9)
2.2.2 节点分析法	(11)
2.2.3 节点方程的直接形成	(13)
§ 2.3 改进节点分析法	(15)
2.3.1 含有独立恒压源支路的电路	(15)
2.3.2 含有CCCS支路的电路	(16)
2.3.3 含有VCVS支路的电路	(17)
2.3.4 含有CCVS支路的电路	(17)
§ 2.4 线性电路正弦稳态分析程序	(23)
§ 2.5 采用电流图和电压图的改进节点分析法	(29)
2.5.1 I-图和V-图	(29)
2.5.2 用I-图和V-图列写改进节点方程	(29)
§ 2.6 简化改进节点分析法	(33)
§ 2.7 稀疏表格法	(36)
习题	(41)

第三章 非线性电路的直流分析

§ 3.1 概述	(45)
§ 3.2 非线性器件的直流模型	(45)
3.2.1 二极管的直流模型	(45)
3.2.2 双极型晶体管(BJT)的直流模型	(46)
§ 3.3 非线性电阻电路方程的建立	(47)
3.3.1 含有电压控制型非线性电导支路的电路	(48)
3.3.2 含有电流控制型非线性电阻支路的电路	(49)
§ 3.4 非线性代数方程组的数值解法	(51)
3.4.1 牛顿-拉夫逊算法	(52)
3.4.2 改进的牛顿-拉夫逊算法	(54)
3.4.3 用牛顿-拉夫逊算法求解非线性节点方程组	(55)

§ 3.5 伴随模型法	(57)
3.5.1 二极管的线性化模型	(57)
3.5.2 双极型晶体管的线性化模型	(53)
3.5.3 采用线性化模型进行非线性直流分析	(59)
§ 3.6 包含二极管和双极型晶体管的非线性电路的直流分析程序	(61)
§ 3.7 分段线性迭代法	(64)
3.7.1 分段线性模型(piece-wise model)	(65)
3.7.2 分段线性的katznelson算法	(67)
习题	(71)

第四章 电路的瞬态分析

§ 4.1 概述	(74)
§ 4.2 电路分析中的数值积分算法	(77)
4.2.1 几种常用的数值积分算法	(77)
4.2.2 各种算法稳定性分析	(81)
§ 4.3 刚性(stiff)微分方程的隐式解法	(84)
4.3.1 刚性常微分方程简介	(84)
4.3.2 吉尔刚性稳定多步算法	(86)
4.3.3 变阶变步长的策略	(87)
§ 4.4 向后差分法——BDF法	(89)
4.4.1 向后差分公式中系数的确定	(90)
4.4.2 预报牛顿-拉夫逊迭代初始值	(92)
4.4.3 向后差分法的局部截断误差	(93)
4.4.4 向后差分法解题步骤	(93)
§ 4.5 线性动态电路的伴随模型法	(93)
4.5.1 动态元件的离散化伴随模型	(93)
4.5.2 用伴随模型法对线性动态电路进行瞬态分析	(97)
§ 4.6 时变电源的处理	(101)
4.6.1 时变电源的函数表达式	(102)
4.6.2 时变电源的表格形式	(102)
§ 4.7 非线性动态电路的瞬态分析	(102)
4.7.1 二极管和双极型晶体管的瞬态模型	(102)
4.7.2 非线性电容和电感的伴随模型	(103)
4.7.3 非线性动态电路的瞬态分析举例	(105)
习题	(108)

第五章 稀疏矩阵技术

§ 5.1 概述	(111)
§ 5.2 线性代数方程组的数值解法	(112)
5.2.1 高斯消去法(Gauss Elimination Method)	(113)
5.2.2 列主元高斯消去法及其程序的编写	(115)
5.2.3 三角形分解法	(117)
5.2.4 列主元LU分解法及其程序的编写	(123)
§ 5.3 稀疏矩阵中主元的选择	(125)

5.3.1 主元顺序对矩阵稀疏性的影响及其图形表示	(126)
5.3.2 几种选主元的方法	(129)
5.3.3 局部填入量最少算法及程序框图	(132)
5.3.4 局部长操作数最少算法及程序框图	(135)
5.3.5 阈值选主元法	(136)
§ 5.4 稀疏矩阵的数据结构	(139)
5.4.1 线性表	(139)
5.4.2 链接表	(141)
§ 5.5 具有稀疏系数矩阵的线性(或线性化)方程组求解的实现	(147)
5.5.1 稀疏矩阵方程的求解过程及程序框图	(147)
5.5.2 符号和数值LU分解及求解的实现	(149)
§ 5.6 一个适合于电子线路求解的稀疏矩阵程序	(153)
习题	(154)

第六章 灵敏度分析

§ 6.1 概述	(157)
6.1.1 灵敏度(Sensitivity)定义	(157)
6.1.2 灵敏度的用途	(157)
6.1.3 计算灵敏度的方法	(158)
§ 6.2 伴随网络法(Adjoint-Network Approach)	(161)
6.2.1 特勒根(Tellegen)定理	(161)
6.2.2 伴随网络的构成	(164)
6.2.3 用伴随网络法计算频域灵敏度	(174)
6.2.4 用伴随网络法计算非线性电阻性网络的灵敏度	(177)
6.2.5 用伴随网络法计算时域灵敏度	(179)
§ 6.3 伴随系统法	(184)
6.3.1 线性系统的灵敏度方程	(184)
6.3.2 伴随系统的数值解法	(187)
6.3.3 适用于电网络的伴随系统法	(188)
6.3.4 伴随系统法的应用及举例	(190)
§ 6.4 大变化灵敏度的原理及计算	(197)
6.4.2 大变化灵敏度	(193)
6.4.2 利用 $\mathcal{P}$ 矩阵计算微分灵敏度	(203)
习题	(206)

第七章 电路的计算机辅助设计

§ 7.1 概述	(209)
§ 7.2 目标函数	(210)
7.2.1 均方目标函数	(210)
7.2.2 最大值目标函数	(212)
§ 7.3 求最小值的方法	(212)
7.3.1 函数的极值点与最小(值)点	(212)
7.3.2 求极小值的方法	(214)
7.3.3 通用最小化算法	(216)

§ 7.4 一维搜索法	(216)
7.4.1 二次插值法 (抛物线法)	(217)
7.4.2 三次插值法	(218)
§ 7.5 无约束极小化方法	(219)
7.5.1 最速下降法	(219)
7.5.2 共轭梯度法	(221)
7.5.3 牛顿法	(224)
7.5.4 变尺度法	(224)
7.5.5 阻尼最小二乘法	(225)
§ 7.6 约束极小化问题	(228)
§ 7.7 电路的最优化设计	(231)
7.7.1 目标函数梯度的计算	(231)
7.7.2 放大器的优化设计举例	(233)
7.7.3 电路的多目标优化问题举例	(234)
附录一 线性电路正弦稳态分析程序	(237)
附录二 非线性动态电路分析程序	(243)
附录三 稀疏矩阵求解程序	(255)
参考文献	(268)

第一章 概 论

§ 1.1 引 言

计算机一经问世,人们就设法将其用于工程设计的分析计算中,以加速设计进度,提高计算精度。故在40年代末至50年代初就出现了“计算机辅助设计”(CAD——Computer Aided Design)这一名词。但这个时期的CAD技术,只不过是数值计算的一种应用,没有什么特色。

随着计算机硬、软件和外部设备的发展,以及人们在实践中经验的积累,计算机辅助设计才逐渐形成为一门新的学科,其主要特点是“人机配合,取长补短”。

人机配合的设计过程是由计算机辅助人来完成的,可以用图1-1的简单设计流程方框图来描述。如图中第2框技术资料的调查研究(包括查阅手册和参看类似设计图纸等)工作,就可由计算机来完成,因有关的

技术资料可以用数据库的形式存贮于磁盘中,通过数据库管理系统随时查阅或调用,这就发挥了计算机存贮与检索的特长。第4框可以发挥计算机高速运算的特长,对设计的部件或系统进行分析计算、数值模拟并对方案作出评价,这可以省去或减少人在设计中的数值运算、甚至制作样机和反复测试等工作。第7框表明:大量的设计图纸,可由计算机自动绘出,即减轻了人的劳动,又能获得所需要的、不易出错的图纸资料,其优越性十分明

显。人机配合的关系还在发展,计算机的辅助功能还在继续增加,例如对设计方案作出判断和进行修改等方面的优化设计。

因此,计算机辅助设计是利用计算机协助设计人员设计产品及从事绘图、提供必要的资料。在人机配合执行设计任务时,人仍然是设计的主导方面,但是把计算机的快速性、准确性、大容量及易检索等特点和人的思维、综合能力及富有经验、创造性等特长结合起来,从而加快设计进程、提高设计质量、加速产品更新换代、提高产品竞争能力,因此具有显著的经济效益和广阔的发展前途,而被誉为工业生产与设计中的一项革命性变革。目前CAD已应用于电子、汽车、飞机、船舶、石油、建筑等工业领域,但发展较早和比较成熟的是电路

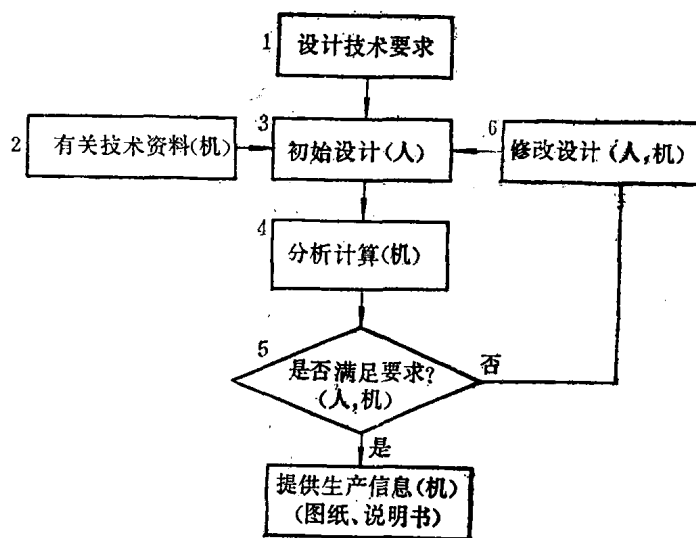


图1-1 设计流程示意图

CAD, 即CACD (Computer Aided Circuit Design)。其内容包括逻辑模拟与划分、电路性能分析与参数优化等。本书限于篇幅, 只介绍计算机辅助电路设计的基本理论、方法和程序实现。

§ 1.2 电路计算机辅助设计的基本内容

下面介绍图1-2所示电路设计典型过程的流程图, 以此来说明CACD的基本内容和意义。

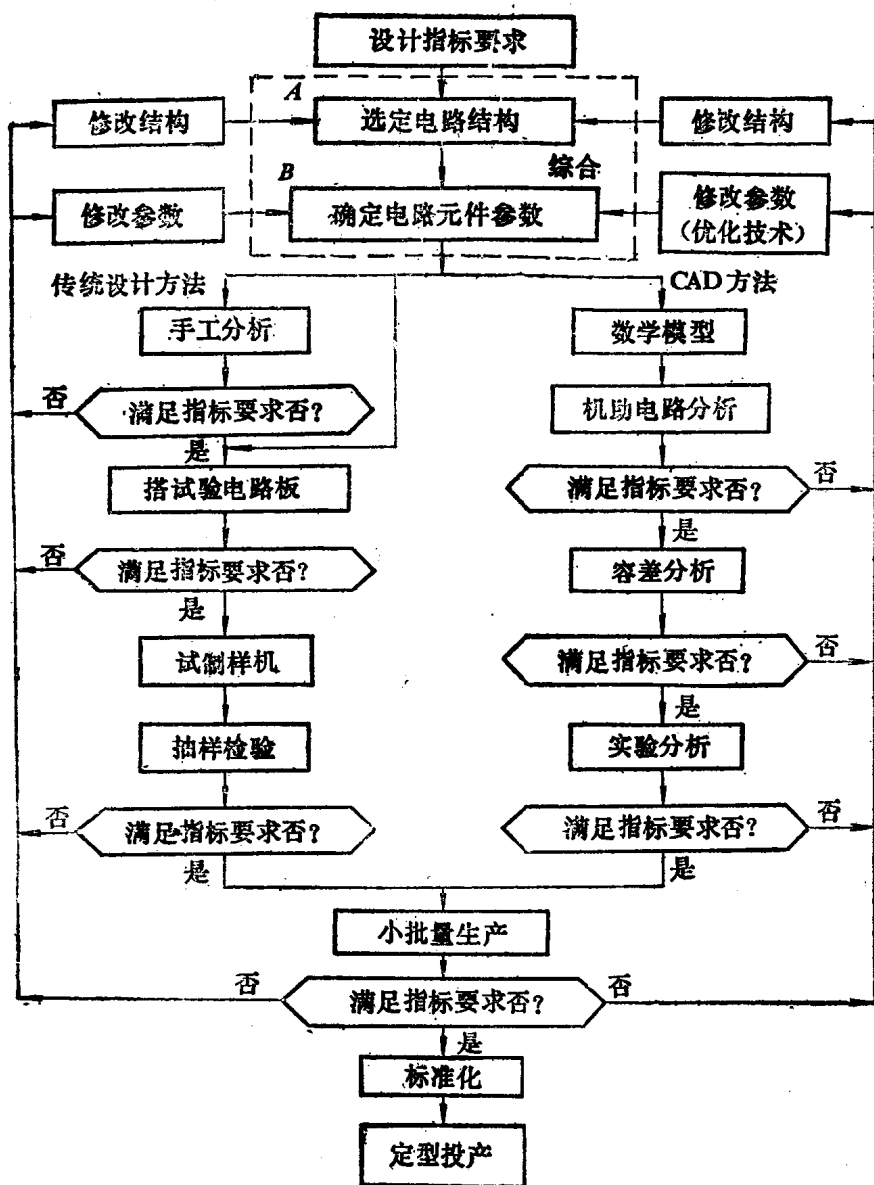


图1-2 电路设计的流程图

一般要设计一个电路，总是从电路的设计指标出发，设计人员根据经验，分析电路的性能指标和收集整理资料（包括考虑新技术的采用等），提出若干方案，进行比较，从中选出较好的方案。这就是方案选择阶段，亦即网络综合的内容。在初始方案（包括电路结构及元件参数）选定的基础上，进行电路精细设计，一般包括确定电路的直流工作点、功耗大小、电路的频率响应、瞬态响应和其它特性的确定，即在元件参数为标称值的情况下进行电路分析；调整电路元器件参数（考虑温度变化及元件容差的影响等）使电路性能尽可能达到最佳，这里包括容差分析和最优化技术的应用。此外，在正式投产前，如工厂还想知道电路性能指标的分布情况，以便把握生产过程中的关键环节，确保产品质量，则还需进行统计分析和可靠性设计。

我们还是从传统的电路设计谈起。传统的电路设计工具是纸、笔、计算器具、图表、手册、实验电路板等。由图1-2可见，在制定初始方案后，就进入精细设计阶段。传统设计方法是首先进行近似计算（基本是手算），故需对元器件模型作大量的近似和简化，并忽略寄生参量和元件容差等的影响，分析结果往往与实际情况不符，因而必须搭实验电路，进行测量，经反复凑试后才能达到指标要求。也有的连近似计算过程都省略。由于传统设计是一种以搭试验电路进行凑试为主的设计方式，很明显，其缺点是：周期长、人力物力耗费大、产品合格率低、成本高和可靠性差。

随着科学技术的飞速发展，电路及设备系统的规模和复杂程度不断扩大，对性能指标（可靠性、稳定性及精度等）的要求越来越高。要用传统方法设计出一个高质量、高可靠性而又经济的小型化电路或系统是很困难的，甚至是不可能的。例如大规模集成电路的设计，就不可能通过搭试验电路来完成。因为这时元件间的寄生效应和元件的匹配特性是很难用分立元件来准确模拟的，容差分析也因器件参数不可能改变而无法进行。此外，如果用其他工具（手工计算）求解成百上千个方程式，不仅效率低，结果也不准确。而且，即使知道性能不符合要求，也难于判明原因和找出关键元部件之所在，因而修改就带盲目性。

现代电路设计——CADC是以电子计算机为主要工具的。计算机的运用，改变了电路设计的方式。首先，由于计算机的计算能力强，有可能采用较精确的模型，自动建立电路或系统方程，并用它分析、计算电路的性能指标，如不满足，还可自动修改参数，使所设计电路达到最优化的目的。其次，电子计算机可用于直接模拟电路的各种功能，用功能程序代替大量的仪器仪表，对电路进行各种分析、计算和模拟，而不需要任何实际元件。因此，有人称计算机为“现代化实验室”。可见，电子计算机这一强有力的工具，使设计过程由搭试验电路进行凑试为主的方式，改变为以计算机进行分析计算和最优化为主的设计方式。

由于CAD把电子计算机的快速、高精度、存储容量大、严格的逻辑判断和优良的数据处理能力与人的创造性思维能力充分结合起来，因而，比传统的电路设计方法优越得多。具体体现在下述几个方面：

- （1）设计效率高，使设计周期大大缩短。
- （2）设计质量和产品合格率大大提高。
- （3）可节约原材料和仪器仪表等，从而降低了成本。
- （4）可模拟各种极限情况，如超低频、大功率、高温、低温等。
- （5）代替人的重复性劳动，节约人力资源。

在电路设计过程的初始方案选择阶段（即图1-2中A、B两框的内容），包括根据设计要

求收集资料、利用已往的经验及考虑新技术的采用等过程。这里除有关技术资料的收集可利用计算机来快速查阅和调用外,由于可满足设计要求的电路结构是多种多样的,目前还不能利用计算机直接综合出一个接近实际的合理电路,这一过程只能由设计人员来完成。也就是计算机只能辅助设计人员对设计过程中的一些主要步骤进行处理。这就是电路计算机辅助设计名称的由来。可见,在CACD中计算机主要是在电路分析和最优化方面发挥作用。这两者是电路设计过程中的重要组成部分,而前者是后者的基础,也可以说,设计过程是在反复分析、反复优化的过程中完成的。由于优化数学是一个专门的学科,在本书中只讨论如何把优化方法与电路分析相结合以实现电路参数优化的过程。正因为电路机助分析(CACA)是电路机助设计(CACD)的主体部分和基础,在下节中将着重介绍CACA的基本内容。

不同性质的电路,要分析的内容不尽相同,分析的方法也可能有所不同。即使对同一电路,分析相同的内容,也有多种方法,应择其优者而从之。从构成电路的元件类型来看,有电阻型和贮能型之分;按元件的性质划分,则有线性的和非线性的。各种类型电路需要解决的电路分析问题,大致可归纳为表1-1所列的项目。在所有的分析中,最基本的是直流(DC)、交流(AC)和瞬态(TR)分析,其它的分析都是在这三种分析的基础上进行的。

表1-1 各种电路分析问题

电路类型	要分析的问题
线性电阻电路和线性动态电路	(1)DC分析(求线性电阻电路的直流解) (2)AC分析(求线性动态电路的频率特性) (3)瞬态分析(求线性动态电路的瞬态特性) (4)噪声分析(把噪声源作为输入,求AC或瞬态解) (5)容差分析(灵敏度或最坏情况分析)
非线性电阻电路	(1)工作点分析(求非线性电阻电路的直流解) (2)驱动点特性的确定(求驱动点电流和电压间的关系) (3)传输特性的确定(求输出电压、电流与输入电压、电流间的函数关系)
非线性动态电路	(1)初始条件、偏置或平衡状态分析(在把所有电容作为开路、电感作为短路处理后求工作点) (2)瞬态分析(在用户或程序指定的初始条件下,求有输入或无输入情况下的输出波形) (3)稳态分析(求有输入或无输入情况下的稳态周期解) (4)非线性失真分析

§1.3 电路计算机辅助分析的过程

前面已经指出,电路计算机辅助分析是电路CACD的重要组成部分和基础。其过程大致包括:准备、编程及上机三个阶段。

第一是准备阶段。主要进行两方面的工作:

(1)作出等效电路,建立数学模型。由于一般的电路分析方法都是建立在由理想元件构成的电路基础之上的,因而对于实际电路中的各种元器件,首先需要根据它们的特性和使用条件,作出由理想元件构成的等效电路,然后建立描述其特性的数学表达式,即它们的数学模型。而电子器件(如晶体管、运算放大器等)的等效电路很复杂,这是人所共知的。如果从给定电路到等效电路的转换工作每次都必须由人来完成,这不仅工作量大,而且很烦

琐，更何况元器件的等效电路有时是随工作条件（如工作点、频率、温度等）变化的，因而在计算过程中需作相应的变更。故近些年来已发展为把这种转换归属于分析程序的一部分，即电路分析程序具有把一些典型的电路元器件自动转换为等效电路的能力。而且许多通用的电路分析程序还建有专门的模型库，贮存着各种类型常用元器件的典型模型的特性参数。这样，人们使用时只要指出元器件模型的名称、类别、型号、其端子接在何处等少量参数，分析程序就可以从模型库中调出它的全部参数，并自动建立相应的数学模型。这就给电路描述工作带来极大的方便。

还需指出，由于我们所计算的电路响应是通过求解电路的数学模型来实现的，因此计算结果所反映的是数学模型的响应，而不是实际电路预期的响应。而数学模型赖以建立的元器件模型，则是根据对可用于同类设计差别不大的一组元器件中有代表性的元器件作出的，故它能在允许容差范围内预测实际元器件的特性。然而，一般适用的模型往往不止一个，因此，恰当地选择元器件模型对于分析的成败是极为重要的。通常可以根据从端点测量来确定模型参数是否方便以及编制程序方面的考虑来进行选择。此外，为了适应计算机辅助分析的需要，各种元器件的等效电路和数学模型，与手算分析时所用的可能有所不同。例如对包含电感、电容这类动态元件的电路进行瞬态分析时，其数学模型在手算分析时，是用微分方程来描述的，而在计算机辅助分析时，则有时采用相应的差分方程来描述。

（2）计算方法的选择。计算方法的选择是机助分析的关键问题之一。方法的选择原则是：要求方法简单，计算量少，并能保证精度要求。其目的不外乎达到计算速度快，计算结果精确。

计算方法的选择包括两个方面：一是选择适当的电路分析方法，二是选择适当的数值计算方法。随着机助分析的发展和应用，电路分析方法也有相应的发展变化，如在克服节点法缺点的基础上形成了改进节点法；在手算分析中很少直接使用由KCL、KVL和元件特性构成方程组的方法，随着稀疏矩阵技术在CACA中的应用，它就发展为机助分析的一种重要方法，即稀疏表格法；早已存在的一些网络图论的方法，也是如此。而曾在电路瞬态分析中风行一时的状态变量法，如今几乎被改进节点法和稀疏表格法所取代，等等。另一方面，计算数学的研究成果已为CACA提供了大量行之有效的方法。例如，对于电路线性方程组求解的方法就有很多，最常用的有高斯主元消去法、LU分解法、稀疏矩阵技术等。其中稀疏矩阵计算方法是为解决线性规划问题时提出来的，随后用之于解大电路问题，因而推动了计算数学这一分支的迅速发展，而它在CACA中的应用又扩大了电路可解问题的规模和计算效率的提高。对于非线性电路方程组的求解，这虽是没有完全解决的一类数学问题，但仍提供了许多可用的方法，目前使用较多的是N-R（Newton-Raphson）迭代法。为解决N-R迭代过程中较常遇到的不收敛和振荡问题，又发展了多种改进的N-R算法。常用的有各种简单限界法、阻尼法、组合算法以及分段线性算法等。在电路的瞬态分析中，有各种显式及隐式的数值积分方法，而在求解“刚性”电路常微分方程这一最关键的问题中，应用较多的是一、二阶Adams-Moulton积分方法、Gear积分方法和向后差分法。此外各种优化算法在CACD中也得到广泛的应用。因此，对于不同问题，在不同条件下合理地选择计算方法是至关重要的。

第二是编制分析过程的程序。这一阶段包括两个步骤。首先，用一些符号及文字说明等来描绘出分析过程的轮廓，即框图设计。接着进行程序设计，即用算法语言来描述分析过

程。一般的电路分析程序包括如下五个部分:

(1) 把电路的拓扑信息和元件参数转化为计算机的输入数据;

(2) 电路元器件的模型化处理;

(3) 按选定的分析方法(如节点法、改进节点法等)列写电路方程(建立数学模型)。这里方程的列写由计算机自动完成;

(4) 按选定的计算方法,对方程组求解;

(5) 把计算结果按一定方式(表格、曲线等)输出。

编写一个好的程序是比较复杂和费时的,而一旦编好后,应用程序来进行电路分析就变得十分简便,而且节约时间。例如一个并不复杂的放大器,要用手工计算它的频率响应(如算50个频率点),是件令人望而生畏的事,如果用现成的计算机程序来完成,则变得轻而易举了。对于用户,只须了解程序的功能和使用方法,这是不难掌握的。所以程序的编写(包括通用和专用的,特别是前者)是推广应用CACD的重要环节。而当今CACD的发展和应用状况又是衡量一个国家科学技术水平高低的重要标志之一。

第三是程序信息化及上机调试、执行阶段。用算法语言编出的程序是源程序。为使源程序能用来分析计算具体电路问题,需将它及有关数据信息化后输入计算机,即按一定的编码系统将源程序及数据编成代码,然后通过卡片、穿孔纸带、键盘或光笔等某种方式输入计算机。计算机的编译系统对其进行语法检查,并翻译成用机器语言表示的目标程序。经上机调试证实所编程序有效后,用户只要输入有关问题的数据,执行目标程序,最后就能输出计算结果。

§ 1.4 电路计算机辅助分析和设计的发展概况

我们知道,电路的计算机辅助设计是随着计算机技术的发展而发展的。早在第一代计算机问世并开始投入应用时,就被从事网络设计的专业人员将其作为设计滤波器的计算工具来使用。这是因为相对于其它各种具体网络来说,滤波器(特别是线性时不变集总参数的滤波器)的合成设计理论成熟较早,但它的实际计算工作量却相当大,而且复杂。当时即使是对于滤波器的设计一般也仅限于假设元件是理想的。而实际情况并非如此,例如线圈就有损耗及分布电容,故用经典法设计出的实际性能与所要求的指标往往相距甚大。只有在充分考虑寄生参量等因素的前提下,设计才有实用价值。可是,经典法对于这类问题,只能起到修补作用,效果不显著。

1956年Aaron发表“最小二乘法在系统设计中的应用”。他首先建议用最小二乘法误差判别式(目标函数)作为逼近措施来改进经典的合成法,这是一个突破。随后,1961年有Desoer和Mitra按上述思路对梯子形滤波器用瞎子爬山法(原始的梯度法)来调整不理想的元件参数,使其逼近所要求的传输特性。随之各种优化方法(如各种直接搜索法和牛顿迭代法等)不断作为网络优化设计的手段,并取得不少成果。至1965年Smith和Temes进一步采用了Remez迭代法来调节低通和带通滤波器传输函数的各极点以满足技术指标,从而在滤波器优化设计方面迈出了非常有效的一步。同年Calahan发展了一种适用于任何线性网络的优化设计步骤,他系采用网络拓扑学上的一些原理。但这阶段的程序仅限于对一些标准设计方法的实现,而不具备通用的分析能力。

1962年美国IBM公司的Branin介绍了第一个通用电路分析程序TAP(Trasistor Analysis Program),它采用拓扑矩阵法建立方程,能用来对最多含20个晶体管的开关电路进行直流和瞬态分析。由于当时所用的计算方法比较落后,解题时间过长,很快被淘汰,但它却为其它程序的发展奠定了基础。因此,于1964至1965年出现一批新的分析程序,如ECAP(Electronic Circuit Analysis Program)是最早用节点法列写方程的通用分析程序之一,CORNAP(Cornell Analysis Program),NET1均是以状态变量法为基础的网络分析程序,等等。这些是早期的电路分析通用程序,它们的致命弱点主要在计算方法上,表现为:

(1) 未考虑电路方程系数矩阵的稀疏性。用满矩阵法求解线性代数方程组,既费机时又不能有效利用存贮空间,因此,限制了可解问题的规模。

(2) 解微分方程大都采用显式积分方法,耗费机时太多。特别用于解“刚性”微分方程(系指在电路中最大和最小时间常数相差很大的情况下,所列出的微分方程),这时不仅耗费的机时达到惊人的程度,而且方程不稳定。

(3) 缺乏通用非线性分析能力。对多数非线性直流分析,求不出直流工作点,即非线性迭代不收敛。

此外,在元器件模型方面精度不够(特别是对于半导体器件模型),也未建立模型库,在电路描述语言方面功能也较差。

与此同时,数学界在不少方面也作出了开拓性的贡献。像稀疏矩阵技术的发展迅速^[4],刚性常微分方程的求解问题,自1968年以来Gear等人提出Stiff稳定的概念及多步隐式积分法之后,得以解决。随后,又有人提出了比Gear法更加灵活的BDF(Backward Differentiation Formulas)法;优化方法方面,1963年Fletcher和Powell发表的“求最小值的最速收敛下降法”的论文中,提出应改进原始梯度法。他们的优化方法称为变尺度法或DFP(Davidon-Fletcher-Powell)法,此法效率很高,对网络优化的发展起了很大的促进作用。1964年Fletcher和Reeves进一步发展了另一种称为共轭梯度法的优化方法,此法比DFP法在节省计算机存贮量方面有很大改进,如此等等,这些均促进了电路技术的发展。此外,集成电路的发展也对之提出更高的要求,因其规模大,元件的数学模型及非线性分析等方面均更复杂,所以这一时期发展起来的通用分析程序都采用了稀疏矩阵技术、隐式积分算法及改进的N-R迭代法等。如ECAP II, CANCER和SLIC等程序。

此外,在分析方法方面,1971年Hachtel等提出稀疏表格法和1975年C.W.Ho等人的改进节点法等。此后出现了一批解题能力较强的分析程序,如美国最流行的ASTAP(Advanced Statistic Analysis Program)和SPICE程序。前者是IBM公司发展的,它用稀疏表格法列写方程并具有统计分析能力;后者是美国加州大学贝克莱(Bekeley)分校研制的,由CANCER程序发展而来的。SPICE2^[6]用改进节点法列写方程,用改进的N-R算法进行非线性分析,用变阶变步长的隐式积分法进行瞬态分析,和用稀疏矩阵技术求解线性代数方程组。它主要用于分析集成电路。

伴随着分析程序的高速进展,优化程序方面在上述基础上也有相应的进展。1965至1966年期间就有几篇著名论文是研究如何把网络设计作为非线性规划问题来处理的。它们采用了高效的DFP法和共轭梯度法来进行优化。但这些优化方法都基于梯度法的原理,而梯度法均需计算梯度,这是很花时费力的。1967年Rohrer在Proc. IEEE上发展的“用数字计算机进行全自动网络设计”的文章中,使用了一种十分有效的伴随网络法(Adjoint Network Method)来计

算梯度，从而大大缩减了梯度法优化程序的运算时间。1969年Director和Rohrer又利用特勒根（Tellegen）定理推导出梯度及灵敏度的算法，它是一个比较有效的方法，既可用于频域分析又可用于时域分析，这在一定程度上促进了梯度法的应用。这几方面的同时发展，就促成了七十年代初期电路CAD新高潮的出现，优化程序得以进一步推广应用。最近十多年来，在全域最优、约束优化及统计设计等方面均取得进一步进展；与此同时，通用分析程序也在不断发展、完善，如前述的SPICE2程序新版本的不断出现，就是明证。如今进行各种电路设计时，CAA、CAD已成为不可缺少的辅助手段。

国内于七十年代开始研制电路分析程序，由于有国外的经验可资借鉴，不少程序一开始就使用了隐式积分法和稀疏矩阵技术等。如科学院计算所的DFX-3程序就有较强的功能。不少高等院校也先后研制出了电路分析程序，如复旦大学的FD和清华大学的GCAP程序等。

随着超大规模集成电路的迅猛发展，微型计算机系统得到相应的发展，由于其价廉，这对于计算技术的推广应用和普及工作非常有利。目前，我国关于CAD在微机上的开发应用工作正方兴未艾。可以预期电路的计算机辅助设计，必将成为现代电路设计中不可缺少的手段。