

网络的计算机辅助设计

合肥工业大学

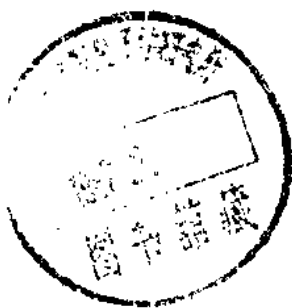
国防工业出版社



网络的计算机辅助设计

合肥工业大学

张莫成 杨作慎 编
钱源诚 姚栋义



国防工业出版社

1105527

内 容 简 介

本书着重讨论了利用电子计算机对电网络进行分析和设计的理论和方法。全书共分十二章，内容包括：绪论，器件模型，网络拓扑学，网络方程式的建立，网络的稳态交直流分析，网络的瞬态分析，稀疏矩阵技术，灵敏度计算和容差分析，最优化方法和网络优化设计，通用分析程序简介和典型电路的计算机辅助设计，信号处理的几种快速算法介绍等。书中介绍了几个典型的通用分析程序，和各种算法和程序框图。通过对本书的学习，使读者能掌握其中基本理论和分析方法，具有用电子计算机对电网络进行分析和设计的能力。本书为无线电技术专业高年级学生和研究生用教材，也可以供相近专业师生及从事电路和系统分析设计的科技工程技术人员参考。

前 言

本教材是根据 1978 年 3 月高等学校工科电子类专业教材编写会议计算机辅助设计小组讨论修改的“网络的计算机辅助设计”教材编写大纲编写的。供无线电技术专业及其相近类型专业的高年级学生和研究生作为选修课程教材使用,也可作为从事电路及系统分析与设计的科研和工程技术人员参考。

全书共分十章,外加绪论。在绪论中叙述计算机辅助设计的含义和特点,以及设计的内容和步骤。第一章讨论组成电网络的各种元器件的模型。第二章就作为网络设计的理论基础的网络拓扑问题进行了讨论。第三章列举了建立网络方程组的方法以及在计算机上建立这些方程组的算法。第四章讨论了网络的直流和交流稳态分析问题,并列出了两个直流和交流稳态分析的通用程序。第五章叙述了网络的瞬态分析,列出了线性网络瞬态分析通用程序。第六章就网络机助分析和设计中的稀疏矩阵技术有关问题进行了讨论。第七章叙述了网络机助分析与设计中灵敏度计算和容差分析等问题。第八章讨论了最优化方法和网络的优化设计问题。第九章对网络机助设计国内外现有主要的通用程序作了简单介绍,并列举了几个常用电路的计算机辅助分析的实例。最后一章介绍了数字信号正交变换的几种快速算法。

书中除了直流、交流和瞬态分析三个通用程序外,还列举了一些针对某个电路的分析程序和一些常用算法的程序。程序按 *BASIC* 和 *FORTRAN* 两种语言编写。为了适应不同机器,书中着重介绍算法和框图。通过对本课程的学习与实践,使学生能够掌握网络计算机辅助设计的基本理论和基本分析方法,具有用计算机对一般电路进行分析和设计的能力。在学习本课程以前,学生应先修过“电路分析基础”、“信号及线性电路”、“计算方法”、“电子线路”、“计算机原理和算法语言”等课程。

教材内容按 100 学时左右编写,对新计划中所列的两门选修课程“电子电路计算机辅助分析”和“电子电路计算机辅助设计”来说,可以按 60 学时挑选其中内容。例如前者可选第六章以前的不带 * 号的各节。而对后者来说,可以选第六章以后内容,并结合前几章有关内容讲授。书中带 * 号内容适合于研究生选读。

本书由合肥工业大学电子工程系张奠成副教授负责主编和全书修改和定稿工作。钱源诚副教授编写第十章和参加第一章初稿编写工作。杨作慎副教授参加第二、六和八章初稿编写工作。姚栋义同志编写第九章和负责几个通用程序的编写和上机调试工作。许鲁生同志负责第十章中程序编写和上机调试工作。

本书由复旦大学许时明同志负责主审,参加审稿的有成都电讯工程学院、南京邮电学院、南京工学院、南京大学、西安交通大学、西安电讯工程学院、华中工学院、上海机械学院、中国科技大学、安徽大学、安徽电子工程学院。审稿同志本着认真负责精神,对本书初稿提出了许多宝贵意见和建议。在编写和审稿过程中,合肥工业大学芮坤生教授、安徽省电子局王家骥教授和合肥工业大学潘孟贤同志,对教材内容安排和编写组织工作,都给予大力帮助和支持。合肥工业大学邱耐丽和蒋博堃同志参加了有关工作。上海无线电三厂王春

志提供了有关资料。编者对所有这些同志谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，本书难免存在不少缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见，以便今后修改时参考。

编 者

1981 年 6 月于合肥

目 录

绪论	(1)
第一节 引言.....	(1)
第二节 电子电路 CAD 技术的发展及其特点	(2)
第三节 电路计算机辅助分析和设计的内容和步骤.....	(4)
第一章 器件模型	(12)
第一节 概述.....	(12)
第二节 基本电路元件模型.....	(13)
第三节 电子器件模型.....	(15)
一、晶体管低频线性模型.....	(16)
二、晶体管直流非线性模型.....	(19)
三、半导体器件的物理模型.....	(21)
四、稳压管模型.....	(24)
五、单结晶体管模型.....	(25)
六、结型场效应管模型.....	(26)
七、MOS 场效应管模型	(28)
第四节 电路机助分析与设计中的宏模型.....	(30)
第二章 网络拓扑学	(34)
第一节 引言.....	(34)
第二节 图论的基本概念.....	(34)
第三节 拓扑矩阵.....	(37)
一、支路列表与节点列表.....	(37)
二、关联矩阵.....	(38)
三、截集矩阵.....	(43)
四、回路矩阵.....	(44)
五、支路变量间的基本关系.....	(45)
六、拓扑矩阵的转换关系.....	(46)
*第四节 在计算机中找图形树和形成拓扑矩阵的算法	(48)
一、找图形树的算法 (一)	(48)
二、找图形树的算法 (二)	(49)
三、用计算机自动形成拓扑矩阵的算法.....	(52)
(1) 形成关联矩阵的算法.....	(52)
(2) 由关联矩阵按优先次序形成图形树的算法.....	(53)
(3) 根据图形连接表按优先次序形成图形树的算法.....	(55)

(4) 由关联矩阵变换为截集矩阵的算法·····	(57)
(5) 由图形中树枝和链枝信息直接形成截集矩阵的算法·····	(59)
第三章 网络方程式的建立 ·····	(62)
第一节 概述·····	(62)
第二节 元件特性方程式·····	(64)
第三节 采用标准支路的节点网络方程组·····	(67)
一、标准支路仅含独立电源的节点网络方程组·····	(67)
二、标准支路含有非独立电源的网络方程组·····	(69)
三、受控电压源支路的转换·····	(78)
四、理想电压源、理想受控电压源和短路支路的处理·····	(79)
五、互感支路的处理·····	(81)
第四节 混合网络方程组的建立·····	(82)
一、改进节点法·····	(82)
二、混合网络方程组的建立方法·····	(83)
三、处理非线性电阻元件支路的混合网络方程组·····	(87)
第五节 网络方程组的列表法·····	(96)
一、节点列表法·····	(96)
二、2b列表法·····	(99)
*第六节 网络方程组的一般表示式·····	(102)
*第七节 网络方程组的简化和变换·····	(104)
第八节 状态变量方程组·····	(113)
一、引言·····	(113)
二、状态变量方程组的建立问题·····	(114)
三、用计算机自动形成状态变量方程组·····	(121)
四、利用混合网络法建立状态变量方程组·····	(125)
五、利用网络拓扑原理形成状态变量方程组的算法·····	(126)
第四章 网络的直流和交流稳态分析 ·····	(138)
第一节 概述·····	(138)
第二节 线性代数方程组的求解·····	(140)
一、克莱姆法·····	(140)
二、高斯消去法·····	(140)
三、高斯约当消去法·····	(147)
四、LU 分解法·····	(149)
五、复数系数的线性方程组的解法·····	(151)
第三节 线性网络的直流分析程序·····	(153)
第四节 网络的交流小信号分析程序·····	(172)
一、程序简介·····	(172)
二、程序清单说明·····	(187)

第五节 非线性网络的直流分析·····	(194)
一、引言·····	(194)
二、非线性元件特性表示法·····	(195)
三、非线性网络方程组的建立·····	(197)
四、非线性网络方程组的求解·····	(200)
五、非线性电阻网络的迭代线性化模型·····	(209)
第五章 网络的瞬态分析·····	(213)
第一节 概述·····	(213)
第二节 常微分方程的数值解法·····	(216)
一、前向欧拉法·····	(216)
二、后向欧拉法·····	(218)
三、梯形公式·····	(222)
四、龙格—库塔公式·····	(228)
五、多步积分公式·····	(233)
第三节 网络瞬态分析的离散化电路模型·····	(246)
第四节 线性网络的瞬态分析·····	(251)
第五节 非线性网络的瞬态分析·····	(281)
第六章 稀疏矩阵技术·····	(295)
第一节 引言·····	(295)
第二节 稀疏矩阵的行列优化排序算法·····	(297)
一、按网络图形节点重序法·····	(298)
二、按新增非零元素最少为判据来选矩阵行列次序·····	(301)
三、以最少乘除操作数为判据来选主元次序·····	(305)
四、行列排序时其它方面的考虑·····	(307)
第三节 稀疏矩阵的存贮技术和编程问题·····	(309)
第四节 求解稀疏线性方程组的一种算法举例·····	(322)
*第五节 稀疏矩阵技术的其它方面·····	(326)
第七章 灵敏度计算与容差分析·····	(332)
第一节 引言·····	(332)
第二节 增量网络法·····	(334)
第三节 伴随网络法·····	(344)
第四节 大变化灵敏度的计算·····	(367)
第五节 容差分析·····	(368)
一、最坏情况分析·····	(369)
二、容差设计问题·····	(370)
三、统计分析·····	(371)
第八章 网络机助设计与最优化·····	(376)
第一节 引言·····	(376)

第二节	目标函数	(378)
第三节	最优化策略	(382)
第四节	直接搜索法	(386)
一、	Hooke-Jeeves 模式搜索法	(386)
二、	转轴法	(389)
三、	单纯形方法	(392)
第五节	利用目标函数导数法	(395)
一、	一阶法	(396)
二、	牛顿法	(398)
三、	共轭梯度法和变尺度法	(399)
第六节	一维最优化方法	(405)
一、	黄金分割法	(405)
二、	立方插值法	(406)
第七节	带约束最优化方法	(406)
一、	拉格朗日乘子法	(407)
二、	边界追随法	(409)
三、	多重梯度求和法	(410)
四、	可行方向法	(411)
五、	梯度投影法	(412)
六、	罚函数法	(415)
第八节	网络的优化设计	(417)
一、	网络的频域最优化设计	(417)
二、	S 平面最优化设计或零极点设计	(426)
三、	直流问题的最优化设计	(431)
四、	网络的时域最优化设计	(432)
第九章	网络机助设计通用程序简介和电路分析程序应用举例	(434)
第一节	电子电路计算机辅助设计程序的发展历史	(434)
第二节	国内外主要电路分析程序	(436)
第三节	电源电路的机助设计举例	(448)
第四节	放大器的机助设计举例	(454)
第五节	有源滤波器的机助设计举例	(464)
第十章	数字信号正交变换的几种快速算法	(468)
第一节	引言	(468)
第二节	离散付里叶变换	(468)
一、	周期序列的表示式—离散付里叶级数	(469)
二、	有限长序列的付里叶表示式—离散付里叶变换	(470)
第三节	离散付里叶变换的快速算法	(471)
一、	问题的提出	(471)

二、FFT 算法的基本概念	(473)
三、信号流程图	(475)
四、FFT 计算机程序流程图	(480)
五、FFT 的 FORTRAN 程序	(482)
六、举例	(484)
七、时间分解 FFT 算法	(487)
八、频率分解 FFT 算法	(495)
九、任意基数的 FFT 算法	(499)
十、IDFT 的运算方法	(502)
第四节 沃尔什变换及其快速算法	(503)
一、引言	(503)
二、离散沃尔什函数的表示式	(510)
三、沃尔什级数及沃尔什变换	(512)
四、快速沃尔什变换 (FWT)	(514)
五、广义变换	(527)
六、计算机程序举例	(528)

绪 论

第一节 引 言

在计算技术、应用数学和模拟理论的基础上发展起来的计算机辅助设计（简称 CAD）是电子计算机应用的一个重要方面，自六十年代初开始到现在已成为一门新的科学技术分支，已成功地用于电子电路、飞机汽车船舶工业、建筑业、光学系统、管道布局、道路桥梁、城市供水排水运输等系统等多方面的设计工作，引起设计领域的根本变革。计算机辅助设计就其实质而言，是设计人员的创造性和计算机的高效率相结合以便更有效地获得合理的设计方案。设计工作的进行，首先根据设计要求，参考有关资料，由设计者运用自己的经验和构思，提出初步设计方案和模型，然后进行分析和计算，以评价初始方案的正确与否，再进行修改和重新分析。在分析过程中，为了求得设计的合理性，还必须进行优化计算，以便对设计产品的性能及其可靠性、经济性和工艺性等多方面指标进行综合平衡，最后得出合理的方案。有时为了获得更可靠的性能参数和简化设计过程中繁复的解析计算工作，还须进行物理模拟试验分析，反复修正调试，以决定最后的设计方案。所以设计是一个反复分析的过程，其中既包括设计者的创造性的脑力劳动，也包括大量的重复进行的计算和逻辑推理的工作。而作为传统设计的辅助工具，是设计用的图表、手册和资料，计算和制图工具，以及进行物理模拟的设备和测试仪器等等。这样，在一项新产品的生产周期中，设计作业的工作量和所占时间的比例是很大的。由于生产和技术的发展，所要求设计的设备或系统日益复杂，规模不断扩大，对精度、质量和可靠性等的要求也愈来愈高。这样一来，传统的设计方法已不能适应新的要求，设计作业已成为产品更新换代的主要难题，因而要求有更高的设计技术。电子数字计算机的出现，以它神速的运算能力和非凡的记忆效果和奇特的逻辑推理功能，一开始就被引用为设计工作者的有利助手。计算机能以每秒钟上千次万次甚至亿次的速度进行运算，能在短时间内完成以前需要以人年计的设计计算工作量。计算机能在很小的空间中，存贮大量的信息，并能很快地进行存取，这不仅代替了设计中人工的检索工作，而且大大地扩大了传统设计作业中所用情报检索的范围和能力。利用计算机的逻辑推理能力，可以代替设计过程中大量的历来由设计者来完成的判断推理等非创造性的劳动。这样利用计算机作为辅助工具，使设计者从大量的非创造性的繁琐的工作中解放出来，而集中力量去从事那些创造性的设计作业。这不仅摆脱了传统设计方法所面临的困境，而且将设计技术提高到一个新的水平，形成了设计领域中的一次技术革命。CAD 技术也是从初级向高级发展的，最初人们只是将计算机作为一个计算工具，这与一般科学计算没有什么区别。但是设计终究是一个反复分析的过程，用计算机辅助设计者有效地进行设计作业，首先要求解决人机联系问题。早期是用计算机加上电传打字机和快速打印机等必要的外部设备，配以适当软件以进行人机联系。通过电传打字机输入或输出各种临时信息，计算所得数据和结果通过输出设备以清单或曲线形式表示出来，供设计者进行分析和判断，以便进行修改，这便是非对话式或非

1105837

交互式 CAD 技术。六十年代初期, 研制成功了图形人机联系系统, 利用光电过程进行信息传输, 设计者可以通过光笔和按钮向计算机输入信息, 计算结果可以通过屏幕显示, 这就是对话式或交互式 CAD 技术。与前者相比, 操作方便, 直观迅速, 并能用光笔及时地对屏幕上图形进行修改, 并能作三维图形的旋转和透视。这不仅能使人机之间进行实时对话, 高速度、高质量地完成各种复杂的设计作业, 而且还为普及 CAD 技术提供了条件。总之, CAD 技术是一门还年轻但发展却非常迅速的学科, 随着计算技术的发展, 它不仅促进设计领域的革命, 而且将大大地影响整个工业技术和组织。深信随着我国四个现代化的向前发展, CAD 技术也将起着愈来愈重要的作用。

第二节 电子电路CAD技术的发展及其特点

电路的 CAD 是 CAD 技术中发展较早和较成熟的一个方面, 它是在传统的电路理论、应用数学和计算技术的基础上产生的。而随着电子产品的日新月异而发展。反过来, 它的发展又推动着电子产品的迅速更新换代。早在三十年代, 人们就开始采用网络分析器作为电路分析的工具。四十年代出现了模拟计算机, 很快就用来进行电路和系统的模拟和分析。从四十年代开始, 电子数字计算机出现, 经历了真空管、晶体管、SLI、MSI 和 LSI 阶段, 运算速度和存储容量的增长, 给电路设计提供了有力的辅助工具, 已成为发展 LSI 和 VLSI 不可缺少的手段。在 LSI 和 VLSI 的设计和生产过程中, 诸如单元电路设计、逻辑功能模拟、印刷板及芯片布局和布线设计、芯片的制板、以及测试程序设计等, 都借助于电子计算机这有力的工具。从六十年代到七十年代, 发展了用于电路分析和设计的大量的计算机通用程序, 例如美国 IBM 公司于七十年代初发展起来的 *ASTAP* 电路分析程序, 包括了各种器件的模型, 能对电路进行多种分析和模拟, 是该公司分析和设计大多数电路的有用工具。

为了说明电路 CAD 的特点, 我们来讨论图 0-1 所示的电路设计的流程图。设计者根据设计要求, 凭借自己的经验, 参考有关资料和样机, 了解新技术的现状, 对设计要求进行分析, 提出电路框图, 再进行电路结构设计和元件参数的确定, 最后得出初步的设计方案。为了检验这方案是否可行, 可以采用解析法或实验法进行复核分析。从原则上讲, 解析法可以适用于任何电路。这时, 画出等效电路图, 根据电路理论列出电路方程组, 用解析法求解后得到初始设计电路的性能参数, 再与设计要求进行比较, 看是否符合要求。这种方法实际上只能用于较小规模的简单电路, 因为如果没有有效的计算工具, 即使求解规模不大的电路方程组, 也是相当费时费事的。因此传统的设计方法, 大都采用实验法, 设计者根据初始设计方案, 用实际元件在实验室搭接成试验板, 使用一整套仪器仪表对电路进行测试, 以检验其性能参数与设计要求的偏离程度, 然后再进行框图、电路结构或元件参数的修改, 如此反复检验, 最后得出一个可行的初始设计方案。由于解析法和实验法是在理想的和近似的条件下进行的, 为了检验设计方案的合理性, 还必须进行样机试制, 以便进一步进行设计方案的性能评定, 对方案进行再一次检验和修改。然后投入小批量生产, 以检验产品性能和合格率的估算, 最后经过标准化定型以后投入正式生产。这是传统的由初始设计到生产的流程。很明显, 这种传统的设计方法存在着严重的缺点。首先是设计效率低, 从方案选择到样机调试, 周期长, 这与电子产品日新月异的飞速发展很不相适应。其次由于受到计算工具、仪器

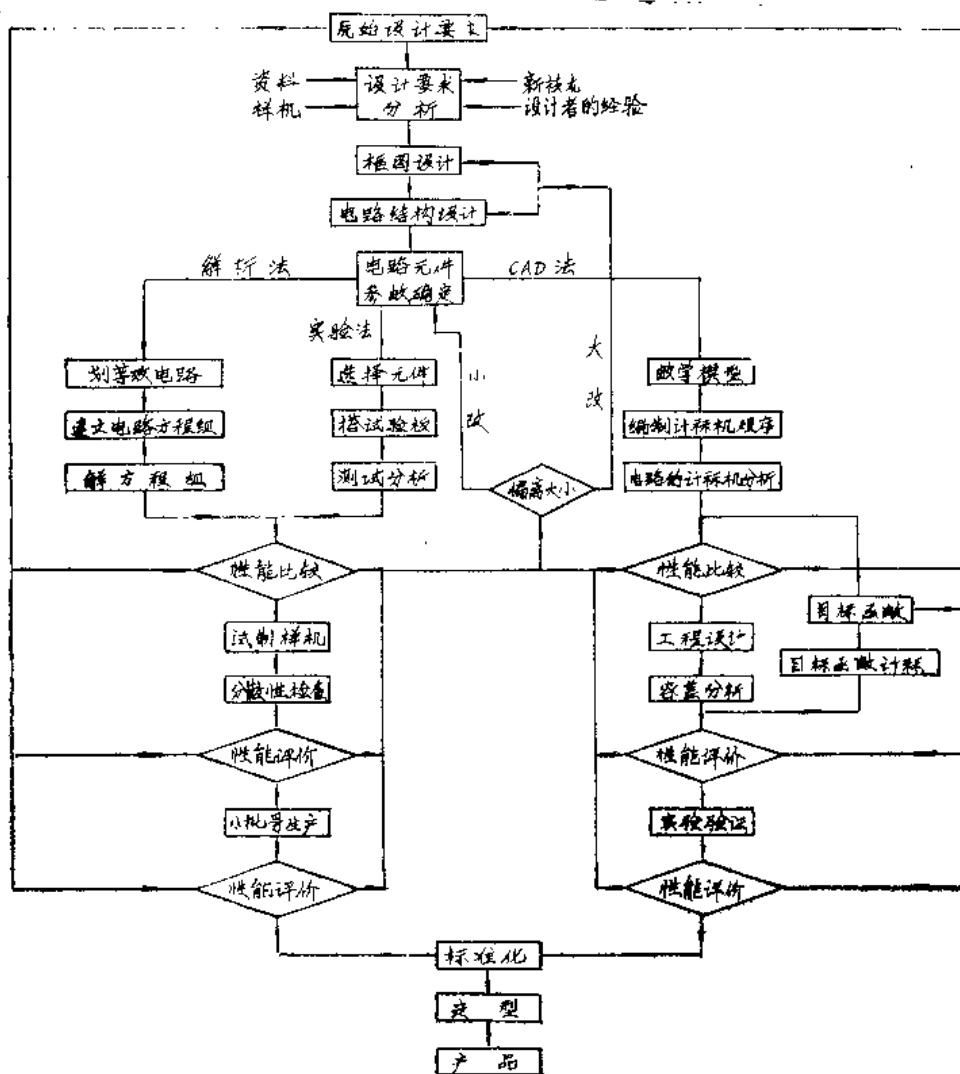


图 0-1 电路设计流程图

表、元件的获得以及等效电路必须简化等条件的限制，设计方案很难保证其全面合理性，更谈不上进行多种方案的比较以求得最优结果了。再其次，传统设计方法无法进行容差分析和极限条件的检验，这只有通过样机试验和小批量生产的抽样检查来进行。最后，更有甚者，随着电路规模的扩大，集成度的增长，用解析法则由于时间和人力的限制，无法进行，而实验法也很难作到最粗浅的近似模拟，这时传统设计方法遇到了不可逾越的障碍。CAD 技术的出现大大地改变了这种现状。CAD 的流程，如图 0-1 中右边所示，由于采取数学模拟的方法，因而可以利用计算机高效率的特点，根据电路理论，模拟各种线路功能而无需任何实际元件。各种功能的应用程序取代了大量的仪器仪表，可以对电子线路进行各种分析、计算和模拟。这样计算机本身就相当于一个现代化的实验室，可以在其中进行逼真的电路分析模拟。因此在电子领域采用 CAD 技术，具有传统设计方法所不具备的优点。

一、设计效率高、设计周期短

由于计算机的高效率,传统设计方法中需要耗时甚长的反复分析过程,在CAD技术中可以在很短的时间内完成。传统方法的样机试制和小批量生产过程可以由容差分析和优化设计来代替。这样就大大地提高了设计效率,缩短了设计周期。

二、提高了设计质量

利用CAD技术可以方便地进行多种方案的比较,从而选取最好的方案。可以取更复杂更精确和更接近实际的电路模型,可以模拟传统方法无法模拟的多种寄生参量的影响,可以避免传统设计方法中因仪器仪表的接入而引起的各种插入误差。这样一来,就使设计结果比较准确和合理,并且容易达到最优化。

三、提高了产品的性能和合格率

利用CAD技术,可以进行产品指标离散性的模拟分析,合理选取元件的公差范围,从而确保产品批量生产的合格率。可以方便地模拟各种极限条件的试验,从而保证了产品的性能。

四、降低了设计成本

由于不需要实地模拟试验,样机试制甚至小批量生产,这样就大大地节约了原材料、仪器设备和人力。CAD技术还可以根据设计要求和成本的因素,自动选择最优方案,从而最大限度地减少返工浪费,降低设计成本,取得最大的技术经济效果。

五、提高了设计人员的创造性

在设计工作中采用CAD技术,可以把过去那种以实验为主的传统设计方式,改变以理论分析为主,以实验验证为辅的现代设计方式。这样,就使得设计人员能够从繁杂的估算、查曲线、绘图和反复试验等事务性工作中解放出来,把精力更集中地用到关键性问题和创造性环节上去。

第三节 电路计算机辅助分析 和设计的内容和步骤

从电路分析和设计方面的内容来说,可以分为电路分析、电路设计和电路综合等三个方面。电路分析是在给定电路结构和元件参数的条件下,计算电路的性能指标。电路设计是在给定电路结构和有关性能指标条件下,求电路中各元件的最佳值。电路综合是在给定各项性能指标条件下,求电路的合理结构和元件的最佳值。由于电路结构的多样性,要完全作到各种电路的综合是比较困难的,一般只能用于某些像滤波器一样的典型电路。

如上所述,设计是建立在反复分析的基础上的,计算机辅助分析简称CAA,它是CAD的主体,我们首先来讨论电路的CAA问题。

电路分析问题按不同类型电路可以分为下列内容,

一、线性网络

1. 直流分析——求线性电阻性网络的直流响应。
2. 交流分析——求线性动态网络的频率响应。
3. 瞬态分析——求线性动态网络的瞬态响应。

4. 噪声分析——以噪声源作为输入的交流和瞬态分析。
5. 容差分析——灵敏度计算和最坏情况分析以及统计分析。
6. 求传输函数的零极点位置。
7. 产生形式网络函数。

二、非线性电阻性网络

1. 工作点分析——求非线性电阻性网络的直流响应。
2. 求网络策动点特性参数，即求策动点电流和策动点电压间的关系。
3. 求网络传输特性，即求输出电压或电流对输入电压或电流之间的关系。
4. 求输入时间函数产生的输出波形。

三、非线性动态网络

1. 初始条件、偏置或平衡状态分析，此时使电容开路 and 电感短路，然后进行工作点分析。
2. 瞬态分析——在指定的初始条件下和带输入或不带输入情况下求输出波形。
3. 稳态分析——在有输入或无输入的情况下求稳态周期解。
4. 非线性畸变分析——求谐波、调制和介调畸变。

怎样用计算机作为辅助工具来分析各种电路问题呢？首先我们从手算法来看电路分析的步骤。如图 0-2a 所示为工作于交流小信号输入情况下的晶体管电路图，我们需要求其频率响应。首先我们取晶体管小信号模型，构成等效电路图如图 0-2b 所示，其次根据电路理论列出电路方程式，例如根据节点电流法我们可得出下列方程组：

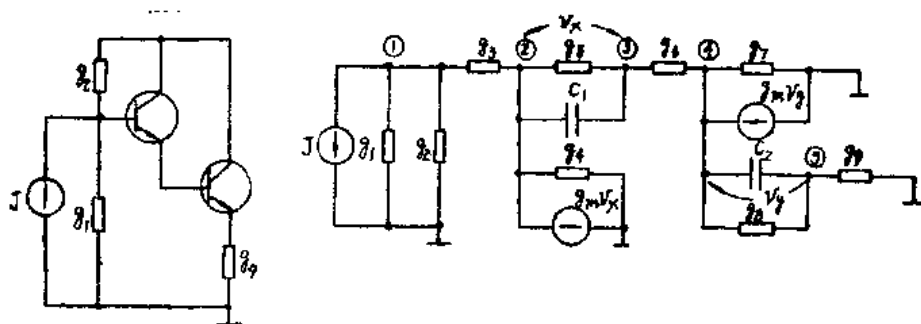


图 0-2 晶体管电路 (a) 及其等效电路图 (b)

$$\begin{aligned}
 \text{节点 1. } & g_1 v_1 + g_2 v_1 + g_3 (v_1 - v_2) = J \\
 \text{节点 2. } & g_4 v_2 - g_3 (v_1 - v_2) + g_5 (v_2 - v_3) + j\omega c_1 (v_2 - v_3) - g_m (v_2 - v_3) = 0 \\
 \text{节点 3. } & -g_5 (v_2 - v_3) - j\omega c_1 (v_2 - v_3) + g_6 (v_3 - v_4) = 0 \\
 \text{节点 4. } & -g_6 (v_3 - v_4) + g_7 v_4 + g_8 (v_4 - v_5) + j\omega c_2 (v_4 - v_5) - g_m (v_4 - v_5) = 0 \\
 \text{节点 5. } & -g_8 (v_4 - v_5) - j\omega c_2 (v_4 - v_5) + g_9 v_5 = 0
 \end{aligned}$$

经过整理后，上述方程组可化为矩阵式：

$$\begin{bmatrix} g_1+g_2+g_3 & -g_3 & 0 & 0 & 0 \\ -g_3 & g_3+g_4+g_5+j\omega c_1-g_m & g_m-g_5-j\omega c_1 & 0 & 0 \\ 0 & -g_5-j\omega c_1 & g_5+j\omega c_1+g_6 & -g_6 & 0 \\ 0 & 0 & -g_6 & g_6+g_7+g_8+j\omega c_2-g_m & -g_8-j\omega c_2+g_m \\ 0 & 0 & 0 & -g_8-j\omega c_2 & g_8+g_9+j\omega c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

写作简化形式如下:

$$Y(j\omega)v_n = J \quad (0-1)$$

下一步就是运用求解线性方程组的算法解上述方程组, 求不同频率值下各节点的电压值。用计算机作辅助工具进行电路分析时, 其步骤也是如此。不过要使计算机协助工作, 必须向计算机输入数据和程序。如果我们只要求计算机求解方程组 (0-1), 则只需向计算机输入系数矩阵 Y 和向量 J 以及某种求解线性方程组算法的程序。如果我们还需要计算机自动建立电路方程式, 则需要输入说明电路结构和元件参数的数据以及建立方程式的程序。这样, 电路分析与计算机的工作关系如图 0-3 所示, 而针对上述例题的程序框图如图 0-4 所示。

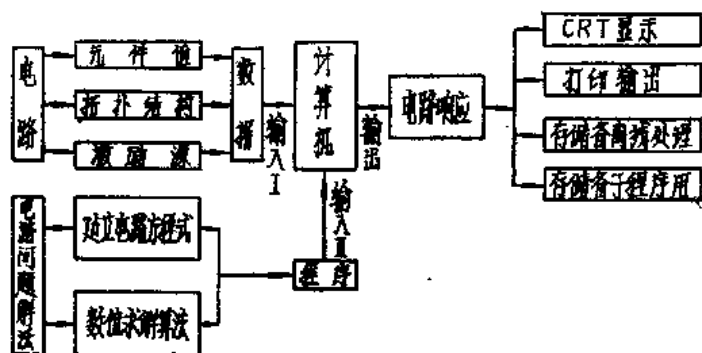


图 0-3 计算机进行电路分析的工作关系图

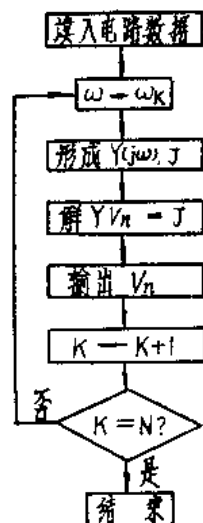


图 0-4 求解图 0-2 电路的流程图

如上所述, 电路 CAD 的步骤与电路工作者处理分析电路的过程完全相同, 但 CAD 的中心问题是编制有效的分析和设计程序, 程序中应包括的问题如下:

一、器件模型的建立

在计算机中进行电路分析时, 首先必须构造电路元器件的数学模型, 但构成电路的元器件是多种多样的, 为了分析方便起见, 一般是定义一组基本电路元件, 然后用这些基本电路元件去模拟其它器件。器件模型在很大程度上决定着设计的精度和速度, 因此采用什么样的模型, 要根据使用条件和分析目的来确定。如果要求在所有情况下都能普遍地正确反映器件的特性, 则往往要求有很复杂的模型。而复杂的模型需要多的机器存储容量, 且导致计算时间的增加, 且也不一定能获得最有效的结果。由于在实际情况下, 往往是对某一种工作状态

进行分析,因此可以分别用比较简单的模型,代表不同工作状态下的性能。以双极型晶体管为例,在小信号线性分析时可以用 π 型模型,在开关电路瞬态分析中可以用电荷控制模型,其中非线性二极管特性可以用分段线性近似方法来表示。建立器件模型分确定模型结构和元件参数测量两部分。合理的器件模型必须:(1)能正确反映器件的性能,(2)易于计算机作电路分析,(3)模型中各个参数要与器件的工艺设计有明确的对应关系,或者能以某种方式测量得出。有两种构成器件模型的方法,一种是从反映器件物理原理的方程出发构成模型。第二种是根据器件输入输出外特性参数建立起来的模型,两种模型构成方法各有其优缺点。随着集成电路的发展,电路不再是单个有源器件和元件组成,而是由多个固体组件构成。这时为了减少电路分析的规模,就以组件为基本单元构成模型,这种组件级模型称为宏模型,已经提出了运算放大器和比较器的宏模型。

二、电路方程式的建立

电路分析程序中,必须包括电路方程式的建立方法,以便计算机根据输入数据自动地建立方程式。建立电路方程式的目的就是写出描述网络中支路上电压电流关系的方程式以及描述克希荷夫电压电流定律的拓扑约束方程式。从传统的电路分析方法来看,最早的有回路电流法、支路电流法和节点电压法,其后又发展了截集方程法、状态变量法和混合方程法等。这些方程的差异只是在于选择不同变量,而推导过程都是从原始数据出发,以网络拓扑方程和元件特性方程为基础,再经过方程变换,即得出不同变量为基底的各种线路方程组,但它们都是反映同一电路的两种特性(结构特性和元件特性)。选用那一种方程组时,总的要求是易于建立和易于求解。传统的电路分析方法都是观察法建立方程,用手算法求解。因此一般总是希望方程式的数目愈少愈好,方程式数目的减少就意味着计算工作量的减少。从这种观点出发,则应当认为状态变量法是网络时域分析的最好途径,它还能以常微分方程组的形式来描述线路的暂态过程。它的缺点在构造状态方程时所需的工作量太大。开始时必须将线路支路进行分类,然后构成图形正规树,将支路区分为树支与链支,再根据电路原理构成方程式,最后还必须消去状态变量以外的其它变量。尤其当线路中存在电容回路和电感节点时,建立过程更显得复杂。由计算机来构成线路方程式时,节点电位法比较简单,这时只需要组成节点电导矩阵和连续求各节点上支路电流的总和,这可以利用扫描原始信息表来完成。节点法的缺点是:只容许电路中有电压控制电流源和非零值电阻支路,因此遇上其它非独立源和理想独立电压源时,必须进行转换。混合法克服了节点法的局限性,它可将网络的支路用阻抗或导纳形式来表示,这样线路方程的变量可以是电流也可以是电压,它容许网络中存在电流和电压控制的非线性电阻、独立源和四种受控源,这种方法应用范围就比较广泛。七十年代初,由于数值计算技术的进展使人们打破了电路方程式数目愈少愈好的传统观念,提出一种新的分析和设计的途径。在这种方法中,将所有网络方程,即电流电压定律方程和支路特性方程以及有关的附加方程列在一起形成一组数目较多的方程式,建立这种方程组的方法非常简捷,而由于方程组系数构成稀疏矩阵,因而可以充分利用稀疏矩阵技术,从而得到从方程式的建立到求解整个过程都有效的办法。这种处理方法在许多电路分析程序中得到广泛使用。

三、电路方程组的求解

从电路机助分析和设计技术一开始就从两个方向去寻找求解方法。一种是解析法,它是