

高等学校教材

计算机辅助电路 分析与设计

张佑生 编著

兵器工业出版社

计算机辅助电路分析与设计

张佑生 编著

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书比较详细地讨论了计算机辅助电路分析与设计中的各种基本问题,包括电路元器件模型、电路方程组的自动建立、方程组的求解、直流与交流稳态线性分析、直流非线性分析、瞬态分析、灵敏度计算与容差分析、稀疏矩阵技术、最优化设计等。书中内容丰富、条理清楚、结合实例、深入浅出。在主要的几章中都列出了相应的分析计算程序,并对程序设计的有关问题作了介绍,旨在提高读者的程序设计能力。各章还选列了一定数量的习题或复习思考题。

本书可作为大专院校电子技术、无线电技术、工业自动化等专业的必修或选修课教材,也可供有关工程技术人员参考。

计算机辅助电路分析与设计

张佑生 编著

*

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京通县向阳印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.375 字数:397千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数:1—2400 定价:4.28元

ISBN 7-80038-363-6/TP·28(课)

前 言

本教材系由机电部兵工类专业教学指导委员会评选推荐作为高等学校教材,并经机电部兵工教材编审室审定出版。合肥工业大学张佑生担任主编,沈阳建筑工程学院刘国定担任主审。编审工作的依据是电路CAD课程教学大纲。

本教材的主要内容是应用计算机进行电路分析、设计的有关算法原理和程序。全书共分十章。第一章对电路CAD技术作简要介绍;第二章讨论电路元器件模型;考虑到不少学校的电类专业可能未将图论、计算方法课程列为必修课,本书在第三、四章中分别对网络拓扑学基本原理和求解线性方程组的算法作了介绍(第四章中标注“*”的§4.4、§4.5、§4.7三节可不讲授,作为参考);第五章至第九章对电路的计算机辅助分析的主要问题作了比较详细的讨论,是全书的主要章节;第十章对电路的计算机辅助设计作了一般性介绍。在各章末尾都选列了一定数量的习题或思考题,以便学生复习和加深理解课程内容。在主要的几章中都列出了相应的实验程序,并结合所学的算法比较详细地介绍了程序设计问题。在讲授这几章时可安排上机实习,让学生使用已有程序分析实际电路,或辅导学生自编程序来解决某些电路的计算问题。

编者希望通过本课程的教学,不但使学生掌握电路CAD技术的各种算法,能应用现有的程序进行电路分析与设计,而且使学生具备一定的程序设计技能,可以针对具体问题设计小型专用的电路分析程序。

本课程的参考学时数为50学时,另加上机12学时。

本教材要求读者具备较好的电路分析基础、电子线路、线性代数、算法语言(FORTRAN IV、FORTRAN-77等)方面的基础。读者如果已有网络拓扑学知识,可跳过第三章,如果已学过计算方法课程,可跳过第四章。

谢莹和陈一可两同志参加了本教材的编写工作,编写了部分实验程序和习题,并对有关章节的编写提出了宝贵意见。

沈阳建筑工程学院的兰瑞生同志参加了审稿工作,对本教材提出了十分珍贵的意见。

合肥工业大学的“网络的计算机辅助设计”一书是本教材的主要参考文献,该书的几位作者,特别是张奠成教授和钱源诚教授对本教材的编写给予了热情关心、帮助和指导。在此,谨向他们表示衷心的感谢。沈阳工业学院的李新教授,合肥工业大学的潘孟贤、周煦两位副教授,对本教材的编写和出版给予了大力支持与帮助,作者对他们谨致深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1990年3月

目 录

第一章 概论	(1)
§1.1 CAD技术及其发展.....	(1)
§1.2 电路CAD的特点.....	(1)
§1.3 电路CAD的内容.....	(3)
§1.3.1 器件模型的建立.....	(3)
§1.3.2 电路方程组的建立.....	(4)
§1.3.3 电路方程组的求解.....	(4)
§1.3.4 灵敏度计算和容差分析.....	(4)
§1.3.5 电路的最优化设计.....	(5)
§1.4 关于电路分析程序.....	(6)
复习思考题.....	(7)
第二章 器件模型	(8)
§2.1 概述.....	(8)
§2.1.1 器件模型的重要性.....	(8)
§2.1.2 构造模型的方法.....	(8)
§2.1.3 宏模型.....	(8)
§2.2 基本元件模型.....	(9)
§2.3 无源元件的交流等效模型.....	(10)
§2.3.1 互感线圈.....	(10)
§2.3.2 理想变压器.....	(11)
§2.4 半导体器件模型.....	(12)
§2.4.1 半导体二极管和双极晶体管的特性分段线性化模型.....	(12)
§2.4.2 双极晶体管的线性增量模型.....	(15)
§2.4.3 半导体二极管和双极晶体管的物理模型.....	(16)
§2.4.4 稳压管模型.....	(19)
§2.4.5 场效应晶体管的模型.....	(20)
习题.....	(26)
第三章 网络拓扑学原理简介	(28)
§3.1 概述.....	(28)
§3.2 图论的基本概念.....	(28)
§3.2.1 图(Graph).....	(29)
§3.2.2 树(tree).....	(29)
§3.2.3 基本回路和基本回路组.....	(29)
§3.2.4 基本截集和基本截集组.....	(29)

§3.3 拓扑矩阵	(30)
§3.3.1 增广关联矩阵 A_e	(30)
§3.3.2 关联矩阵 A	(30)
§3.3.3 基本截集矩阵 C	(31)
§3.3.4 基本回路矩阵 B	(31)
§3.4 网络拓扑图的基本关系	(32)
§3.4.1 网络变量间的相互关系	(32)
§3.4.2 拓扑矩阵之间的转换关系	(34)
习题	(35)
第四章 线性方程组的解法和解的精度	(37)
§4.1 概述	(37)
§4.2 消去法	(37)
§4.2.1 高斯消去法	(37)
§4.2.2 约当消去法	(40)
§4.2.3 选主元	(42)
§4.3 LU 分解法	(43)
*§4.4 追赶法	(46)
*§4.5 迭代法	(47)
§4.5.1 雅可比迭代法	(47)
§4.5.2 高斯-塞德尔迭代法	(47)
§4.5.3 超松弛法	(48)
§4.5.4 迭代过程的收敛性	(48)
§4.6 各种算法之比较	(48)
*§4.7 关于解的精度问题	(49)
§4.7.1 向量和矩阵的范数	(49)
§4.7.2 方程组的性态	(51)
§4.7.3 解的精度分析	(52)
习题	(53)
第五章 线性网络的直流和交流稳态分析	(55)
§5.1 概述	(55)
§5.2 线性网络方程组的建立	(56)
§5.2.1 标准支路及其特性方程	(56)
§5.2.2 节点电压方程组的建立	(58)
§5.2.3 网络混合方程组的建立	(71)
§5.3 线性网络的直流分析	(76)
§5.3.1 LDC实验程序简介	(76)
§5.3.2 LDC实验程序的使用说明	(80)
§5.3.3 LDC实验程序清单	(83)
§5.4 线性网络的交流稳态分析	(89)

§5.4.1 等价实数型方程组的建立与求解	(90)
§5.4.2 用实数运算直接求解复数方程组	(93)
习题	(94)
第六章 非线性网络的直流分析	(96)
§6.1 概述	(96)
§6.2 非线性网络方程组的建立	(96)
§6.3 非线性网络方程组的求解	(99)
§6.3.1 简单迭代法	(100)
§6.3.2 牛顿-拉夫森方法	(101)
§6.3.3 割线法	(105)
§6.3.4 牛顿-拉夫森方法的改进	(106)
§6.3.5 收敛准则	(110)
§6.4 非线性元器件的迭代伴随模型	(110)
§6.4.1 二极管的迭代伴随模型	(110)
§6.4.2 非线性电阻元件的迭代伴随模型	(111)
§6.4.3 非线性受控源的迭代伴随模型	(112)
§6.4.4 双极晶体管 EM 模型的迭代伴随模型	(112)
§6.5 非线性直流分析举例	(114)
§6.6 非线性直流分析实验程序介绍	(117)
习题	(127)
第七章 网络的瞬态分析	(129)
§7.1 概述	(129)
§7.2 数值积分方法(一)	(130)
§7.2.1 前向尤拉法	(130)
§7.2.2 后向尤拉法	(131)
§7.2.3 两种尤拉方法的几何解释	(131)
§7.2.4 梯形法	(132)
§7.2.5 数值积分的稳定性问题	(134)
§7.2.6 刚性方程组及刚性稳定	(135)
§7.2.7 举例	(137)
§7.3 数值积分方法(二)	(138)
§7.3.1 龙格-库塔方法	(138)
§7.3.2 吉尔方法	(140)
§7.3.3 反向求导公式	(144)
§7.4 网络的瞬态离散化模型	(148)
§7.4.1 电容、电感相应于 BEA 公式的离散模型	(148)
§7.4.2 电容、电感相应于梯形公式的离散模型	(149)
§7.4.3 电容、电感相应于 BDF 的离散模型	(149)
§7.5 线性网络的瞬态分析	(151)

§7.5.1 算法应用举例	(151)
§7.5.2 线性瞬态分析实验程序介绍	(153)
§7.6 非线性网络的瞬态分析	(169)
习题	(171)
第八章 灵敏度计算与容差分析	(173)
§8.1 概述	(173)
§8.2 增量网络法	(175)
§8.2.1 增量网络法原理	(175)
§8.2.2 增量网络法的应用	(177)
§8.3 伴随网络法	(180)
§8.3.1 Tellegen定理	(180)
§8.3.2 伴随网络的构成	(182)
§8.3.3 线性网络灵敏度的计算	(186)
§8.3.4 伴随网络方程组的形成	(190)
§8.3.5 非线性电阻网络的伴随网络	(192)
§8.4 容差分析	(195)
§8.4.1 最坏情况分析	(195)
§8.4.2 统计分析	(196)
习题	(197)
第九章 稀疏矩阵技术	(200)
§9.1 概述	(200)
§9.2 稀疏矩阵的压缩存贮方案	(200)
§9.2.1 连接表法	(201)
§9.2.2 双重连接表法	(201)
§9.2.3 结构对称化存贮方案	(203)
§9.3 减少填入量的措施	(204)
§9.3.1 填入及确定填入的方法	(204)
§9.3.2 稀疏矩阵的预排序	(205)
§9.3.3 预排序算法简介	(207)
§9.3.4 关于参考节点的选取	(210)
§9.4 关于计算精度	(211)
§9.5 稀疏矩阵实验程序	(212)
§9.5.1 结构对称化存贮方案的实现	(212)
§9.5.2 预排序子程序	(220)
§9.5.3 数值求解子程序	(227)
习题	(230)
第十章 网络的最优化设计	(231)
§10.1 概述	(231)
§10.2 目标函数	(232)

§10.3 最优化方法简介.....	(234)
§10.3.1 直接搜索法——单纯形法.....	(234)
§10.3.2 解析法.....	(238)
§10.3.3 线性搜索方法.....	(243)
§10.4 电路的计算机辅助设计举例.....	(246)
§10.5 有约束优化问题的转换.....	(250)
习题.....	(250)
参考文献.....	(251)

第一章 概 论

§1.1 CAD技术及其发展

计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称CAD)是人们利用计算机这一强有力的工具进行工程分析、模拟、设计和绘图等技术工作的总称,是计算机应用的一个十分重要的方面。CAD技术的发展始于50年代,近20多年来,发展十分迅速,现在已广泛地应用于电子、机械、建筑、纺织等行业和飞机、汽车与船舶制造业,引起了设计领域的根本变革。计算机用于结构分析方面比较早,在一段时期内,CAD几乎是有限元结构分析的同义词。后来,重点转到了计算机辅助绘图方面。到70年代初,CAD技术比较集中于交互式图形系统的研究与开发,以计算机图形学(Computer Graphics)为其核心内容。从70年代后期起,由于计算机科学的新进展,特别是硬件方面的光栅扫描显示器和软件方面的数据库理论和技术的日臻完善,使CAD系统进入了以数据库为核心的新阶段,交互式图形系统的实时响应速度及生成图形的逼真性(如彩色的浓淡、光线的明暗和形体表面的质感等)都有了极大的改进。同时,计算机在方案设计、零部件优化设计与造型方面的应用愈来愈广泛。

在我国,CAD技术也有了较大的发展。在第六个五年计划期间,引进了某些CAD系统和大型实用软件包,经过消化与二次开发,为我国CAD技术的发展打下了基础。在第七个五年计划期间,国家投入了较多的经费,大力发展CAD方面的理论和技术,包括CAD支撑软件和某些机械产品、设备的CAD系统的研究与开发。现在,优化设计,有限元分析、计算机绘图等技术愈来愈广泛地应用于有关行业与单位。

§1.2 电路CAD的特点

电路的计算机辅助分析和设计是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、应用教学和计算技术的基础上产生和发展起来的。早在50年代的第一代计算机时期,就有人用计算机进行象滤波器这样的线性网络的设计。在60年代和70年代,出现很多用于电路分析模拟的通用程序,比较有名的有ECAP,ASTAP和SPICE等等,能够对电路进行各种分析模拟。随着中、大规模集成电路(MSI,LSI)特别是超大规模集成电路(VLSI)的发展,电路CAD技术的重要性更加突出。现在,计算机作为一种强有力的辅助工具,已成功地应用于复杂网络的分析、单元电路的设计、逻辑功能的模拟、印刷电路板和集成电路芯片的布局和布线设计、芯片的制板、集成电路的测试以及测试程序的设计等方面。

电路CAD通常包含电路的计算机辅助分析和最优化设计两个方面。为了了解它们的特点和在设计过程中所起的作用,下面简单介绍一下电子产品的设计过程。首先,必须根据实际需要与技术上实现的可能性提出产品的性能指标,作为设计的依据。设计者从指标要求出发,参

考有关资料与样机,了解先进技术水平,结合自身的经验,对所提出的指标进行分析,拟定电路框图和原理图,确定元件类型及参数,从而得到初步的设计方案。为了使设计的电路满足性能指标要求,必须对初步设计方案进行分析和调整。在计算机出现以前,采用解析法对电路进行分析是很费事的,即使是规模不大的电路,列方程与求解的工作量也是很大的,且不可能得出很精确的计算结果。为了调整电路元件参数或电路结构所需的反复多次的分析,简直无法用手工完成。因此,解析法实际上只用来对整个网络的某些部分进行局部的分析与估算。而元件参数的调整、总体设计方案的分析与修改、整机电路性能的检测,往往采用实验法。所谓实验法,是一种物理的模拟方法,即在实验板上按电路原理图搭接一个实验电路,使用信号源、电压表和示波器等仪器对电路的性能进行测试,并根据与指标比较所得的偏差,适当调整有关元件的类型与数值,必要时对电路的结构作些修改。在得到基本满足性能指标要求的设计方案以后,还要安装样机作进一步的测试与修改,再经过小批量试产的检验,最后将设计方案确定下来。

传统设计方法的缺点是:

- (1)设计周期长,当电路比较复杂时,元件参数的调整是很复杂和很细致的工作,往往很费时间,也需要较多的实际工作经验,样机测试和小批量试产的检验所需的时间也很长;
- (2)一般只能得到基本满足性能指标的设计方案,不可能求得元件参数的最佳值,更谈不上方案上的优化;
- (3)不能进行容差分析和极限条件的试验;
- (4)对于集成度较高的中、大型规模集成电路,连最粗略的近似模拟也变得不可能。

图1-1 表示出传统的电子电路的设计过程。由图可见,传统的设计方法通常要经历初步设计、实验测试与修改、样机测试、小批量试产四个阶段,元件参数的调整往往要反复多次,电路结构有时需要修改,整个设计方案的修改也是有可能的。

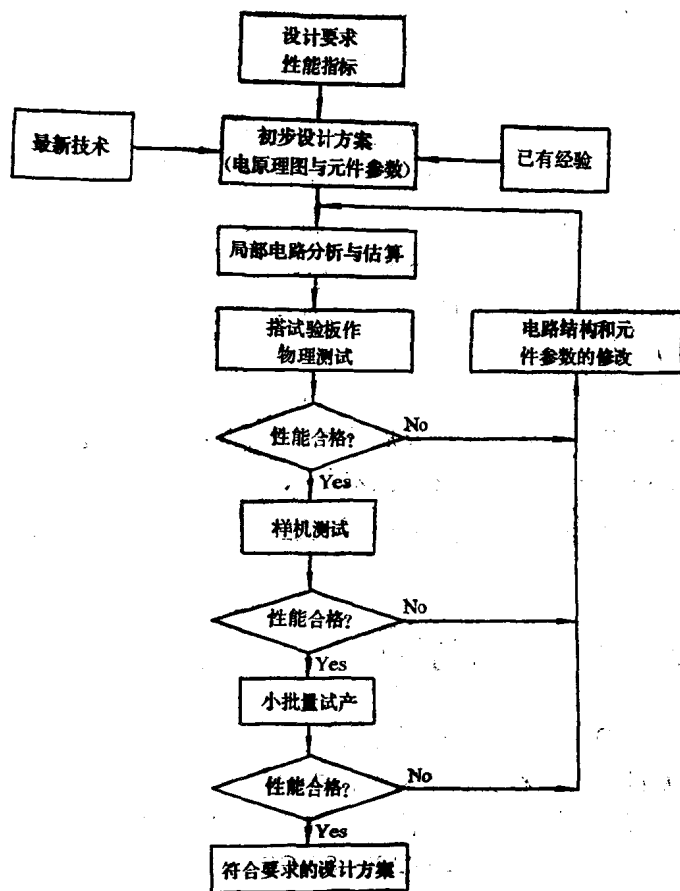


图1-1 传统电路设计流程

能的。这实质上是一个以实验为主,定性分析与定量估算为辅的设计过程。从这一过程得到的一般是一个可以满足指标要求的设计方案,然而并非最佳方案。

CAD技术的应用,不但使电路的分析计算变得简单而迅速,使能够精确进行分析的电路规模大大增加,而且可以代替传统的物理模拟过程,对元件参数和电路结构进行快速的反复调整,得到最佳的设计方案,还可以进行容差分析、最坏情况分析、统计分析和故障分析。这就能

大大提高设计质量,提高产品的合格率,缩短设计周期。

图 1-2 示出了采用 CAD 技术的电路设计过程。与图 1-1 相比可以看出,这里的计算机辅助电路分析代替了传统设计法中的局部电路的手工分析估算,目标函数的优化过程代替了实验板的物理测试、元件参数的调整、电路结构的修改的过程。实践证明, CAD 技术可以大大提高设计效率,加速电子产品的更新换代,提高产品的性能,降低成本。企业的竞争能力与应变能力可因此而大为增强。可以说,电路 CAD 技术的发展和广泛应用是电路设计的一次大变革。

虽然,利用计算机进行电路设计具有很大优越性,但是目前还不能实现全自动化设计,在设计中还需要设计师的智慧与经验,设计者对于电路结构,数学模型和计算方法的选择,往往起主导和决定性的作用。计算机在整个设计过程中作为一种有力的工具起辅助作用,这正是“CAD”的含义。随着智能化 CAD 系统的出现和发展,计算机将愈来愈多地起到设计师的主导与决策作用,设计自动化的程度和水平将不断提高。

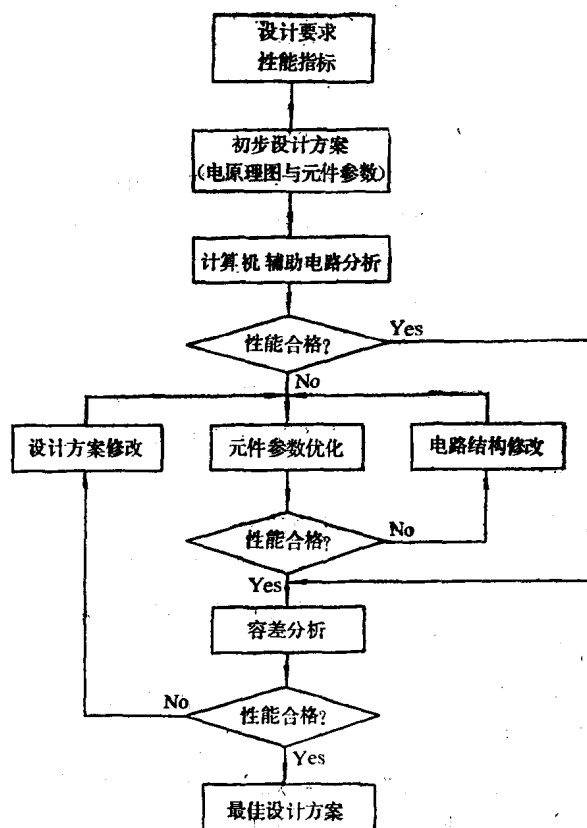


图1-2 计算机辅助电路设计流程

§1.3 电路CAD的内容

电路 CAD 技术可以分为电路的计算机辅助分析 (Computer Aided Analysis, 简称 CA $\dot{A}$) 和计算机辅助设计 (Computer Aided Design, 简称 CAD) 两个方面。为了对 电路 CAD 技术有一个轮廓的了解, 下面介绍一下它所涉及的主要问题。

§1.3.1 器件模型的建立

为了用计算机进行电子电路的分析计算, 首先要构造电路元器件的模型, 即用数学公式或等效电路来代替或模拟各种元器件。由于元器件的种类繁多, 有的比较简单, 有的相当复杂, 因此一般先定义一组基本电路元件模型, 再用它们来组成所有其它比较复杂的器件模型。器件模型在很大程度上决定着电路分析的速度和计算结果的精度。一般说来, 采用比较复杂的模型能得到较高的分析精度, 但过于复杂的模型将使整个电路的节点数和元件数大幅度增加, 所需存贮空间和分析时间也显著增加, 计算结果未必一定精确。因此, 对于比较复杂的器件, 可先将所有内部影响因素都加以考虑, 得到细致的模型, 再在具体工作状态下作适当简化, 得到各种不同的比较简单的模型。例如, 对于双极型晶体管, 在小信号线性分析时可采用 π 模型, 在开关电路的瞬态分析时可用其电荷控制模型。

合理的器件模型,必须正确反映器件的性能,便于进行计算机辅助电路分析,模型参数也不难确定。

有两种构造模型的基本方法,一种是从反映器件物理特性的方程出发构造模型;另一种是根据器件的输入输出特性来建立模型。用前一种方法建造的模型叫物理模型,用后一种方法建立的模型叫外特性模型。

利用元器件的模型,可以将给定的原理电路转换成它的等效电路,再将等效电路的拓扑结构数据和各基本元件参数送入计算机,运行电路分析程序即可得到分析结果。由于电子器件(如晶体管等)的等效电路往往比较复杂,电子电路中这类器件的数目往往很多,从给定电路到等效电路的转换通常是很费事的,也容易产生错误,经转换所得等效电路的规模常常比原电路大得多,所需输入的数据量很大。因此,比较好的CAA程序把构造等效电路的任务交给计算机来完成。操作人员只要输入元器件的名称、型号和某些特定参数,计算机根据这些数据找出预先存入的相应的模型及约定参数来建立方程组。这就大大提高了电路分析的效率。现有许多典型的电路分析程序都带有专门的数据库——模型库,存贮了各类常用电子元器件模型及其典型参数。

§1.3.2 电路方程组的建立

建立电路方程组是电路分析中的十分重要的步骤。对于一个比较复杂的电路,用手工来建其方程组是一件十分繁琐的事情,也很容易出错。因此,比较好的电路分析、设计的程序都具有自动建立电路方程组的功能。

建立电路方程组的方法有回路电流法、支路电流法、节点电压法、截集方程法、状态变量法、混合变量法和列表法等。在编写电路分析程序时,这些方法都可采用。一般说来,节点电压法是一种比较方便的方法,建立起来的电路方程组的方程数目比较少,用得比较多。不过,这种方法只能处理电流源和有限导纳(或非零值阻抗)支路,当电路中有电压源和零值阻抗支路时,须预先加以适当处理。混合变量法,也叫改进节点法,是从节点电压法的基础上提出来的,它克服了节点电压法的局限性,但所建立的方程组的方程数目比较多。列表法简单地将电流定律方程、电压定律方程、支路特性方程和某些附加方程列在一起,所构成的电路方程组的方程数目更多,但算法十分简便。

混合变量法,特别是列表法,所建立的电路方程组的系数矩阵具有稀疏性,其中的非零元素仅占很小的百分比。为了提高计算机求解这类方程组的空间与时间效率,应当采用稀疏矩阵技术,只存贮系数矩阵中的非零元素,求解过程也基本上只对这些非零元素进行处理。

在建立电路方程组时,计算机首先读入用户准备的包括元器件参数和电路拓扑结构信息等数据的数据文件,然后依据某种建立电路方程组的方法,将有关数据填入方程组系数矩阵和右端向量之中。这些都是在程序引导下自动完成的。

§1.3.3 电路方程组的求解

在电路CAA中,存在三种类型的方程组的求解问题:线性方程组、非线性方程组和微分方程组。线性方程组的求解是计算机辅助分析和设计中最基本的问题之一,不但线性网络的直流分析和交流稳态分析需要求解线性方程组,非线性网络的直流分析和动态网络的瞬态分析也往往归结为线性代数方程组的反复求解过程。

§1.3.4 灵敏度计算和容差分析

灵敏度计算就是求电路元件参数的变化对电路性能参数的影响。灵敏度的大小可作为选

取不同容差级别元件的依据,适当选取元件的容差可以较好地解决产品合格率与成本之间的折中问题。容差分析是在指定的容差范围内随机地选取元件参数并计算电路性能参数的变化范围,由此可以估计所设计的电路在大批量投产中可能出现的废品率。

§1.3.5 电路的最优化设计

电路的计算机辅助设计一般指的就是最优化设计。这是电路CAD技术中的一个重要内容。为了进行最优化设计,首先要确定作为设计判据的目标函数,其次要拟定初始电路的结构、各个元器件的类型、各元件参数的初值。通过电路分析得到电路的实际响应特性,并与所给的指标参数进行比较,求得目标函数值。采用有效的最优化方法寻求使目标函数最小的一组电路元件参数,采用适当的调整电路结构的策略,在必要时修改电路结构,使目标函数进一步减少,这是最优化问题的关键。

以上的前四点都属于CAA的范围,而最后的最优化设计也是通过反复进行的电路分析来实现的,可见,CAA是电路CAD技术的主体。CAA可以分为以下几类:

1) 线性网络分析

(1) 直流分析

线性网络的直流分析是指计算线性电阻性网络的直流响应。

(2) 交流分析

线性网络的交流分析是指计算小信号工作状态下的动态网络幅频特性和相频特性等。

(3) 瞬态分析

线性瞬态分析是指计算线性动态网络的瞬态响应特性。

(4) 噪声分析

噪声分析是以噪声源作为输入信号的交流分析或瞬态分析,也可以是网络的内部噪声或信噪比的计算。

(5) 容差分析

容差分析是对网络进行灵敏度计算、最坏情况分析和统计分析。

(6) 符号分析

网络的符号分析是要产生网络的符号网络函数表达式,这种表达式以复频率为自变量,并包含一个或多个影响较大的元件符号作为参变量。

2) 非线性电阻性网络分析

(1) 工作点分析

工作点分析即计算网络中晶体管等器件的直流工作状态。

(2) 策动点特性分析

策动点特性分析即计算表征网络策动点电流、电压之间关系的参数如输入阻抗或导纳。

(3) 传输特性分析

传输特性分析即计算表征网络输出电压(电流)与输入电压(电流)之间的关系的参数如传输阻抗(导纳),电压(电流)放大倍数等。

3) 非线性动态网络分析

(1) 工作点分析

在只接通直流电源的情况下,动态网络中的电容相当于开路,电感相当于短路,故晶体管等器件的直流工作状态的确定与电阻性网络的工作点分析相同。

(2) 瞬态分析

非线性网络的瞬态分析与线性网络的情况差不多,但计算过程比较复杂。

(3) 稳态分析

稳态分析是指在有输入或无输入的条件下计算网络的稳态周期解。

(4) 非线性畸变分析

非线性畸变分析是指对信号通过网络时所产生的谐波的计算。

§1.4 关于电路分析程序

应用计算机进行电路分析,必须有实用的程序。电路分析程序可分为通用和专用两种。通用电路分析程序具有很强的功能,能进行多种电路分析模拟。因此,人们首先考虑的是应用通用程序来解决问题。但是,如果因条件限制不能应用通用程序时,就有必要使用已有的专用程序或针对具体问题设计专用程序。与通用程序相比,专用程序所需内存小,就是在档次较低的微型机上也有可能运行。而且,由于可以有针对性地采用某些高效率的算法,专用程序往往可以收到运行速度快、结果精度高的效果。不过,专用程序的局限性比较大,功能有限,应用范围小。

编程问题往往比较复杂,不但要求熟练掌握有关算法和程序设计语言,而且需要有较多的经验和技巧。对于初学者来说,往往感到它比掌握原理困难得多。尽管专用程序的规模一般比较小,结构也比较简单,但也需要精心设计并经过反复调试、试用和修改的过程,才能达到实用要求。下面提出一些在设计电路分析程序中应当注意的事项。

1) 注意提高计算精度

计算机辅助电路分析是在计算机上进行数值计算的过程,数值计算中的误差是不可避免的。产生误差的根源有:(1)在建立数学模型时,往往加上许多限制,忽略一些次要因素,这样得到的“理想化”的数学模型只是实际问题的一种近似描述,于是引起描述误差;(2)一些复杂器件(如晶体管等)的模型,其结构和参数不能完全精确地反映器件的电性能,导致器件模型误差;(3)许多数学运算(如超越函数 $\exp(x)$ 、微积分等运算)是通过极限来定义的,而实际只能计算有限次,由此产生截断误差;(4)计算机的字长有限,引起舍入误差,虽然每一步的舍入误差是微不足道的,但在计算过程中经过传播和积累,可能产生严重影响。

为了使计算机辅助电路分析的结果准确可靠,并具有较高的精度,在设计程序时必须认真考虑各种误差的来源,在选择算法和模型方面多动脑筋。

2) 注意提高计算效率

提高计算效率,节省机时,是选择算法、编写程序的基本出发点之一。它不但关系到节省经费和时间,还直接影响计算精度。为了提高计算效率,就要注意计算机中的运算特点,如做乘(除)法比较慢,一次乘(除)法运算的时间一般是一次加(减)法运算的十倍,选择计算方法时应尽量减少乘除运算次数。此外,还要采用合理的数据结构,因为这也是提高计算效率的一个重要途径。这一点将在第九章中讨论。

3) 注意节省存储单元

计算机的内存容量是有限的,特别是现在广泛应用的中、低档微机,内存比较小,如何利用现有的计算机资源来扩大可能分析的电路的规模,是程序设计的重要问题。可供采用的措施

有：(1) 合理使用内存单元,对于某些可安排重复使用的数组和变量、应尽可能多次使用；(2) 注意减少源程序的长度,如用DATA语句给变量赋初值,而不用赋值语句；(3) 采用覆盖技术,将大程序分段从磁盘调入内存运行；(4) 利用FORTRAN语言的等价语句和公用语句等手段；(5) 将大批的数据放在外存(磁盘、磁带)中,当程序执行中用到这些数据时才分批调入内存,同时将运算的中间结果随时送入外存中存放；(6) 采用稀疏矩阵等一些求解大型网络的技术。

4) 注意提供友好的用户界面

数据的准备和数据输入的操作应尽可能简单,修改参数时不应要求重新输入所有的数据。此外,还可采用屏幕提示或菜单以简化操作,使用户能简单而方便地应用程序求解问题。

复习思考题

1.1 试述计算机辅助电路设计过程中人和计算机的作用,并说明这种设计方法相对于传统电路设计方法的优点。

1.2 试述电路CAD技术所涉及的主要问题。

1.3 编制电路分析程序应注意哪些问题？

1.4 简述建立器件模型的方法和建立模型时应注意的事项。

1.5 列举你认为比较好的建立电路方程组的方法,并说明它们的优缺点。

第二章 器件模型

§ 2.1 概 述

§2.1.1 器件模型的重要性

电路是由元器件组成的。实际的元器件种类繁多,有线性的,也有非线性的,有二端的,还有多端的。为了便于用计算机来分析电路,必须用各种等效模型对不同种类的元器件加以描述。模型的正确性和精度对电路分析结果的正确性和精度起着决定性作用,同时,模型的复杂程度对整个等效电路的规模有着直接的影响。因此,对各类元器件建立既能正确反映其电性能并具有相当高的精度、又不过于复杂的模型,具有极大的重要性。

§2.1.2 构造模型的方法

采用一组理想的基本元件作为模型的基本构件,由它们的不同联接来构造各类比较复杂器件的等效电路模型,是传统电路分析所采用的方法。电路 CAD 技术也采用这种方法,不过在构造模型时,可以适当多考虑一些有影响的因素,以提高模型精度,而且对于某些器件可以采用数学模型,即将某些反映器件内部物理过程的表达式直接参加计算。

可以从器件内部物理特性出发来构造物理模型,模型参数从器件的物理结构和材料特性得到;也可以从器件的外端口特性来构造模型,得到外特性模型,尽管模型参数是对外特性进行模拟所得到的,没有明确的物理意义,但正确地反映了器件的输入输出特性和传输特性,且可以进行精确测量。

为了在具体应用条件下使模型得到简化,可以根据信号的幅度和频率范围的不同对模型进行分类。根据信号幅度的大小不同,器件可分别用总体模型、局部模型和线性增量模型来描述。在大信号条件下,晶体管等类器件呈现出典型的非线性特性,其模型必须全面反映出截止、放大和饱和等不同工作状态,这就是总体模型。局部模型是在器件特性曲线的某一个较小的范围内模拟器件的性能,可能是线性的,也可能是非线性的。线性增量模型是在器件工作点附近很小的范围内模拟器件的特性,例如,在小信号状态下的晶体管和二极管都可以用线性等效电路来表示其特性,这种线性等效电路即为线性增量模型,模型参数可根据工作点附近的微变特性来计算或用实验测量。

根据频率范围的不同,器件模型可分为直流模型和交流模型两大类,而交流模型又可进一步分为低频模型、中频模型和高频模型。通常,低频模型可用于音频范围,中频模型可用于 20kHz 到 50MHz,在 50MHz 以上采用高频模型。随着频率的提高,模型变得复杂起来,因为器件内部的极间电容、分布电容甚至引线电感的影响将变得愈来愈显著。

§2.1.3 宏模型

集成电路组件,如集成运算放大器等,包含有大量的阻容元件、二极管和晶体管等,如果用基本元件来构造其模型,模型本身就是一个相当复杂的网络,整个电路的等效网络及相应的电