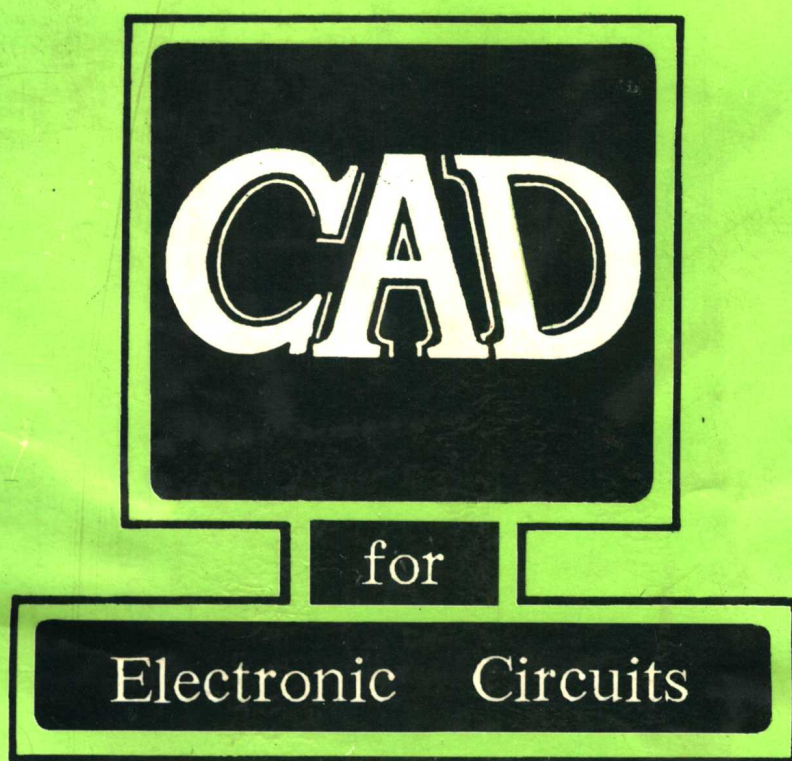


电子线路计算机辅助设计

鲍顺光



东南大学出版社

电子线路计算机辅助设计

鲍 顺 光 编著

东南大学出版社出版

内容提要

本书从电路分析的基本原理和计算方法两方面系统地论述了应用计算机解决电路分析和设计的问题。全书共分10章,内容包括:概论、电路描述、线性定常电路的分析方法、线性代数方程组的计算机解法、线性定常电路的直流和正弦稳态分析、非线性电路直流分析、网络的瞬态分析、灵敏度计算与容差分析、大规模电路的分析技术和电子线路计算机辅助设计。配合正文,作者还精选了适量的例题和习题。书末附有部分习题解答。附录中给出了两个典型分析程序。

本书可作为无线电技术类专业本科高年级必修或选修课教材,也可供从事电路设计的工程技术人员和科研工作者参考。

电子线路计算机辅助设计

鲍顺光 编著

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销

东南大学激光照排中心照排

南京新中彩色印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 22.125 字数 511 千

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

印数:1-4000册

ISBN 7-81050-050-3/TN 7

定价:20.00(元)

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

本书是在作者 1985 年出版的《电子线路计算机辅助设计》教材的基础上改写而成的,原教材出版后曾在几十所兄弟院校中使用,由于原出版社编辑、印刷的质量问题给兄弟院校有关教师的教学工作带来一些麻烦,深表歉意。我们虽在该教材第二次印刷中作了一些订正,但终因错误太多无法全面改正。1989 年以来,我陆续收到 10 多所兄弟院校寄来求援教材的信件,由于出版社没有再版,无法满足同行们的要求,深感遗憾。1990 年 10 月在黄山举行中国电子学会第九届电路与系统年会期间,我应部分兄弟院校教师的要求,组织了一次“电子线路计算机辅助设计”课程教学研讨会,出席会议的有 10 多所兄弟院校的代表,会上交流了各校关于本课程的教学情况,讨论了在教学过程中实践性环节和学时分配等方面所遇到的困难与解决办法,同时也谈到今后的教材问题。会上我提出准备改编原教材的设想,并承与会同行们提出了许多关于改编教材的意见。黄山会议后,我即着手改编这份教材,于 1992 年 6 月完成了讲义的编写。修改后的教材具有下列特点:①其内容深度反映了 80 年代后期的国际水平,书中不仅包含了第二代电路模拟的主要内容,也包含了第三代电路模拟的一些基本内容;②采用伪代码描述典型程序编制的一些主要算法,具有较强的适应性和通用性;③章节安排上比原编教材更为合理;④按照软件工程的要求,在附录中给出了目前常用的三种高级语言(FORTRAN,PASCAL,C)编制的两个典型程序,利于采用不同高级语言教学的兄弟院校参考。本书从电路分析的基本原理和计算方法两方面论述了应用计算机解决电路分析和设计的问题。全书共分 10 章,前 9 章介绍电子线路计算机辅助分析(CAA)的内容,最后一章对电子线路计算机辅助设计(CAD)作了一般性介绍,书中用 * 加以注明的部分内容是供学有余力的同学阅读的。本课程的参考教学时数为 48 学时(含实验)。

为了使學生能加深理解課程內容,在各章中都列選了適量的習

题,书后并给出了部分习题答案。

学习本课程前必须具备算法语言、电路分析基础、电子线路、向量和矩阵代数等课程的基础知识。

本书的出版得到东南大学出版社的大力帮助,在编写过程中瞿旭红和陆杰二位硕士研究生为我全书的插图和程序做了不少工作,鲍勇敏同学为我抄写全部书稿,我的老师孙文治教授为我全书作了文字润色,使我的书能如期出版,在此向他们表示深深的谢意。我还要特别感谢我的老师管致中教授,本书的出版始终得到他的热情鼓励和关心。

由于作者水平有限,加之编写、出版时间匆促,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

鲍顺光 于东南大学
1995. 6.

目 录

1 概论	(1)
1.1 电子线路计算机辅助设计的内容和意义	(1)
1.2 电子线路计算机辅助分析的过程和发展概况	(3)
1.3 电子线路计算机辅助分析程序编制的基本要求	(5)
习题	(7)
2 电路描述	(8)
2.1 电路元件模型	(8)
2.2 常用器件的模型	(9)
2.3 电路的拓扑描述.....	(21)
2.4 电路描述语言.....	(26)
习题.....	(29)
3 线性定常电路的分析方法.....	(30)
3.1 概述.....	(30)
3.2 节点电位法.....	(30)
3.3 改进节点分析法.....	(35)
* 3.4 双图法.....	(41)
习题.....	(50)
4 线性代数方程组的计算机解法.....	(53)
4.1 概述.....	(53)
4.2 高斯(Gauss)消去法	(53)
4.3 LU 分解法	(57)
4.4 稀疏矩阵技术.....	(66)
习题.....	(89)
5 线性定常电路的直流和正弦稳态分析.....	(92)
5.1 直流分析.....	(92)
5.2 正弦稳态分析	(108)
习题	(122)
6 非线性电路直流分析	(124)
6.1 概述	(124)
6.2 非线性电阻电路方程组的建立	(124)
6.3 非线性代数方程组的求解	(129)

6.4	非线性电阻元件的线性化模型	(134)
6.5	非线性电路直流分析的程序	(140)
* 6.6	非线性电阻网络的分段线性分析法	(147)
	习题	(154)
7	网络的瞬态分析	(157)
7.1	概述	(157)
7.2	常微分方程组的数值解	(158)
7.3	线性网络瞬态分析的伴随离散模型法	(179)
7.4	时变电源的处理	(183)
7.5	非线性网络的瞬态分析	(184)
	习题	(190)
8	灵敏度计算与容差分析	(193)
8.1	概述	(193)
8.2	灵敏度分析的伴随网络法	(195)
8.3	大变化灵敏度的计算	(209)
8.4	容差分析	(211)
	习题	(213)
9	大规模电路的分析技术	(215)
9.1	概述	(215)
9.2	撕裂法	(217)
9.3	松弛技术	(226)
	习题	(234)
10	电子线路计算机辅助设计	(235)
10.1	概述	(235)
10.2	目标函数	(236)
10.3	最优化方法简介	(237)
10.4	电子线路计算机辅助设计实例	(250)
	习题	(255)
附录一 改进节点法直流分析程序		(257)
附录二 改进节点法非线性直流分析程序		(279)
附录三 描述算法所用伪代码的几点说明		(330)
部分习题解答		(332)
参考文献		(346)

1 概 论

1.1 电子线路计算机辅助设计的内容和意义

计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称CAD)是电子计算机在工程技术上的一项重要应用,而电子线路CAD是CAD技术中发展较早和比较成熟的一个方面。

为了对电子线路的传统设计和CAD作一比较,我们先来讨论一下图1.1所示的电子线路设计过程框图。

由图中左半边示出的电子线路传统设计框图可知,传统的电子线路设计通常要经历初步设计、实验试制、小批量生产、正式投产四个阶段,而且还须经过这四个阶段的不断反复才能完成,因为这种设计过程实质上是以实验为主,辅以定性分析和定量估算的一种设计过程。传统的电子线路设计一般以典型电路的分析为基础,设计者根据已有的公式、图表等依靠手算和简单的计算工具进行计算,因此,既难以跳出固有框框的限制,又难以进行复杂的计算分析。计算时一般要对元、器件的等效电路和数学模型作大量的近似和简化处理,且要忽略一些寄生参量的影响,这就使得计算结果与实际性能往往差距很大,需要通过费时颇长的实验调试反复凑试来修正原有的设计。由于手算无法对电路进行灵敏度和统计分析,使得设计者不可能规定元件容差的合理范围,常造成电路中元件的互换性差,产品合格率低。另外,传统的设计方法不便于模拟电子线路中的某些故障分析,因而难以确保产品的可靠性。这些矛盾随着电子线路的日益复杂而日趋尖锐。再有,传统的设计方法无法胜任大规模和超大规模集成电路的设计工作。

图中右边部分为利用CAD进行电子线路设计的框图。由于采用了数学模拟的方法,因而可利用电子计算机运算速度快、存贮容量大的特点,把它当作一个“现代化的实验装置”。在它上面可根据电路理论,采用更为精确的元、器件的等效电路或模型来直接模拟电路的功能,而无需任何实际的元、器件来进行各种“数值实验”。其特点是快速、准确,可以任意改变元、器件的参数,可以模拟各种极限试验。而且还可以利用各种分析程序来取代大量的仪器仪表,因而可以节约原材料和少用仪器设备,降低了设计成本。利用计算机进行电子线路设计,便于进行电子线路的统计分析和故障分析,因而可大大提高产品的合格率和可靠性。此外,可以方便地进行多种方案的比较,因此运用计算机实现电子线路CAD,是对传统的电路设计进行的一场技术革命。它不仅大大缩短设计的综合、实验分析和试生产阶段的时间,降低设计费用和加快设计进程,而且还可以更加全面、仔细、深入地分析整个设计,从而获得传统方法所无法得到的高质量的精确设计。

目前,计算机已应用于电子线路设计的许多阶段。诸如:在方案设计阶段,计算机可用

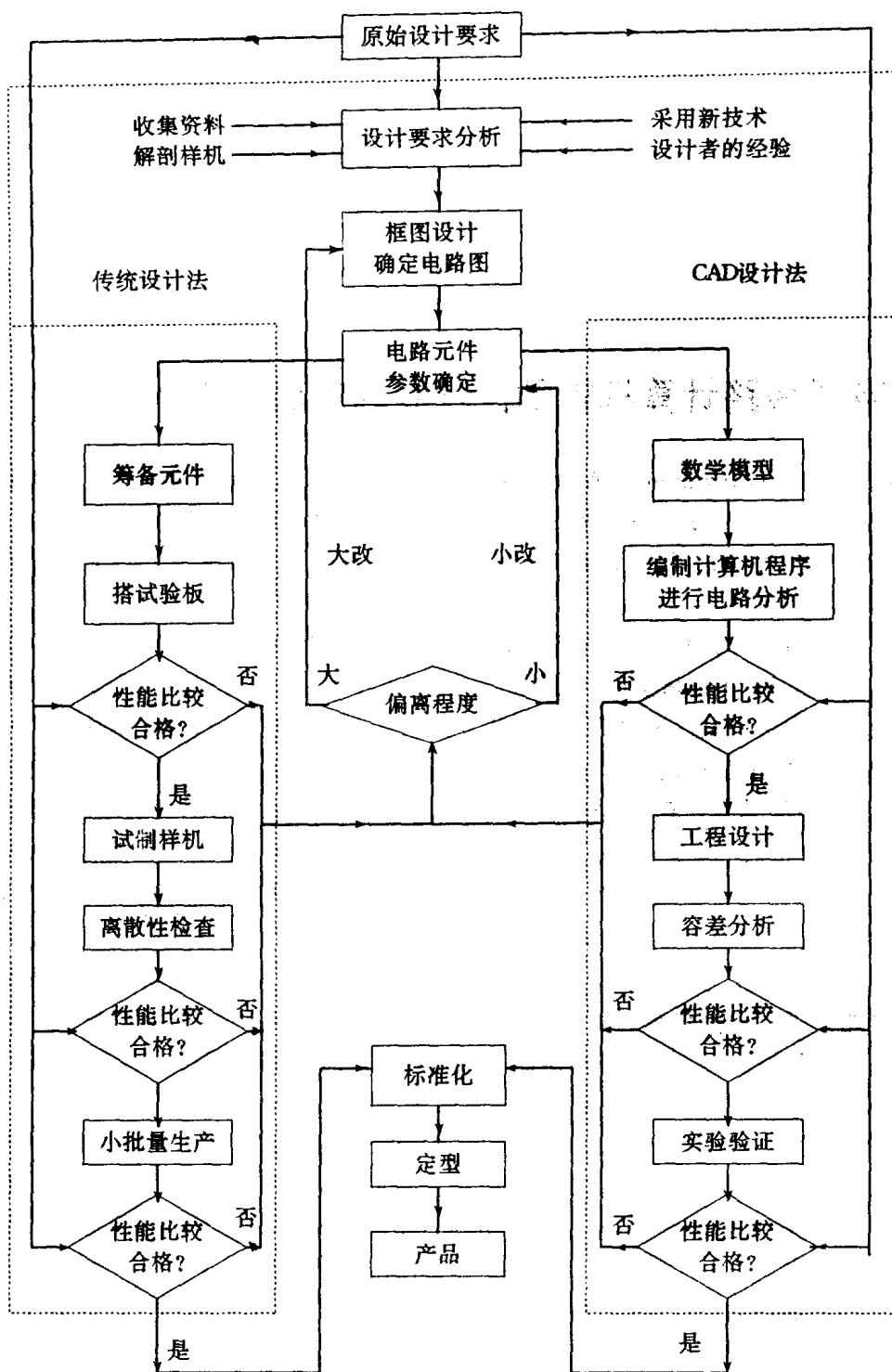


图1.1 电子线路设计过程框图

来对各种预选的电子线路方案进行分析与比较,选取最佳方案;在方案设计成功后,计算机可进行印刷线路板和集成电路制板的布线设计;在试验测量阶段,计算机可完成对测量数据的处理和分析,等等。但是利用计算机对电子线路进行设计虽具有上述优点,目前却

不能用以实现对电子线路的完全自动化设计。一般说来,这种设计过程还是要依赖于人的智慧和劳动,依赖于设计者对计算机的妥善使用。总之,在此过程中,设计者的思考和意图仍占主导地位,而计算机仅仅作为一种有效的设计工具。因此人们把上述过程称为计算机辅助电子线路设计。

至此,我们可以对电子线路 CAD 作一简单的概括:它是设计电子线路的一种方法,在该方法中,人们利用自己设计的各种程序在电子计算机上完成电子线路的设计任务。

1.2 电子线路计算机辅助分析的过程和发展概况

在电子线路 CAD 的过程中包含着大量的电子线路计算机辅助分析(Computer Aided Analysis,简称 CAA),故电子线路 CAA 是电子线路 CAD 的基础,其过程如图 1.2 所示,大致可按如下各节所述分为三步。

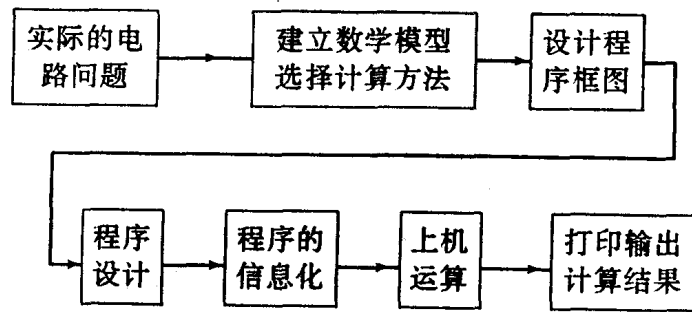


图1.2 电子线路CAA的过程

1.2.1 构造数学模型、选择计算方法

大家知道,一般的电子线路分析方法都是以理想元件构成的电路为对象的,因而对于实际电路中的各种元、器件,首先要根据它们的特性和使用条件,作出由其理想元件构成的等效电路,然后建立描述它们特性的数学关系式,亦即它们的数学模型。在电子线路分析中,电子器件(如晶体管)的等效电路是很复杂的,如果每次都必须由人来完成从给定电路到等效电路的转换,无疑要耗费大量时间。另外,元件的等效电路往往随条件的改变(如工作点、温度等)而变化,需要在计算时作自动的更换。因而在近年来电子线路 CAA 中均把这一工作作为分析程序的一部分,即电子线路分析程序具有把典型电路元件自动转换成它们的等效电路的能力,人们只要指明这些元件的所有特性参数即可。不仅如此,许多典型的电子线路分析程序还附有专门的数据库,贮存各种类型常用元件的典型特性参数,对于符合数据库中的元件,人们只要指出其类别、型号及少数参数(如温度等),分析程序就可以从数据库中调出该元件的全部数据,并通过它们建立相应的等效电路,从而给分析者带来极大的方便。

数学模型建立后,还得选择方法简单、计算量少,并能保证精度要求的计算方法。这个问题包括两个方面: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。随着机助分析的应用和发展,电路分析方法也相应地发展、变化,如早已形成的网络图论的一

些方法长期以来在手算分析中原已很少采用,但现在却成为机助分析的主要方法之一,人们在克服节点法的缺点的基础上提出了改进节点法。在电路瞬态分析中曾经盛行一时的状态变量法目前已为改进节点法所代替,等等。另一方面,计算数学的研究成果已为机助分析提供了大量行之有效的办法。例如选主元的高斯消去法和 LU 分解法,都是求解线性方程组的有效手段。稀疏矩阵技术的应用,大大增大了计算机的解题规模和提高计算效率。另外,各种非线性方程的求解方法、元件灵敏度与容差的计算方法以及各种最优化方法等,均已得到了广泛的应用。由上述可知,《电路理论》和《计算数学》已成为电子线路 CAA 的两门基础学科。

1.2.2 编写应用程序

在确定了计算方法后,下一步就是编出执行计算过程的分析程序,一般的电子线路分析程序大致应包括下列四个步骤:

- (1)输入原始数据和对它们进行相应的处理;
- (2)建立电路方程组;
- (3)求解电路方程组;
- (4)输出所需计算结果(数据、曲线等)。

程序编写通常分两步进行:1)将整个程序分解为若干模块,给出各模块的算法(或给出框图);2)编写源程序。对于较简单的分析程序,源程序可仅由一个主模块构成;对于较复杂的分析程序,可先分成若干子模块(如子程序),然后再编出包含各个子模块的完整程序。

为了使计算机实现上述过程,常用高级语言把上述过程描述出来,目前比较流行的高级语言有 FORTRAN, PASCAL 和 C 语言等,至于使用哪种语言可由编程者自行选择决定。本书为了适应使用不同高级语言编程,将运用伪代码的形式来描述其算法,并在附录中给出了用三种不同高级语言编制的两个典型程序,供读者参考。

程序的编制是比较复杂和费时的,对于 CAA 和 CAD 的初学者来说,往往感到比之掌握原理还要困难得多。这固然与程序设计技术的掌握程度有很大关系,但经验证明,程序的失败大多是由于对整个计算过程缺乏周密细致的分析和考虑所致。所以,要编制出一个正确的程序,必须(1)熟悉与精通所采用的电路分析方法和计算方法;(2)周详考虑分析计算的整个过程;(3)对电路计算过程中可能出现的各种情况作出相应的对策;(4)熟练地掌握编写程序时所使用的语言;(5)熟悉所使用的计算机性能。当然一个复杂的通用程序往往需要经过多次反复的运算和修改才能获得成功。

1.2.3 上机运算

为了使编写好的程序能够分析和计算具体问题,必须先将程序及有关数据信息化后输入计算机,亦即先按照一定的编码系统将源程序及数据编成相应的代码,然后通过穿孔纸带、穿孔卡片、键盘或光笔输入计算机,再由计算机内的编译系统将上述源程序翻译成机器语言表示的目标程序,最后计算机则根据目标程序的指令逐条执行,将分析结果输出。

至此我们已介绍了电路 CAA 的全过程,实际上,一旦程序编好并证明是有效的,则对于使用者来说,只要了解程序的功能及其使用方法,而对程序编制原理,程序结构及采用的方法均可不必理会。因为源程序通常是贮存在计算机的外部设备(如磁带、磁盘)中,用户只要通过输入设备输入有关问题的数据,经运算就可输出计算结果,因此使用是十分方便的。

随着电路理论、计算方法及计算机的发展,电子线路分析程序可按其发展阶段分为如下三代:

第一代 1962 年美国 IBM 公司 Branin 首先介绍的第一个通用电路分析程序 TAP (Transistor Analysis Program),以及于 1964 年至 1965 年相继出现的 ECAP (Electronic Circuit Analysis Program)等构成了第一代电路分析程序,其主要弱点是:(1)未考虑电路方程系数矩阵的稀疏性,用满阵方法求解线性代数方程组,既费机时又费内存,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,既费时又不稳定;(3)缺乏非线性分析能力,多数非线性直流分析不收敛,求不出工作点。

第二代 这一代分析程序有 ECAP I, SPICE2 (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)等。它们的特点是:(1)采用改进节点法,克服了节点法存在的局限性;(2)采用改进的牛顿-雷扶生法求解非线性代数方程,大大提高了收敛性;(3)采用变阶变步长的隐式积分算法求解微分方程,提高了解题的速率和稳定性;(4)采用稀疏矩阵技术,扩大了电路分析的规模。

第三代 随着大规模和超大规模集成电路的发展,需要进行分析的电路规模之大,已远非第二代电路分析程序所能完成。所以从 70 年代后期至今陆续推出了一些能够胜任大规模电路分析的 MOTIS, RELAX 等程序,也就是第三代电路分析程序。这一代程序的改进主要体现在:(1)采用了撕裂法,将一个大规模电路分解成若干个子电路,对这些子电路采用既分散又联合的方法并行或串行地进行计算;(2)采用宏模技术,用宏模型代替原网络模型以减少电路的变量数;(3)采用松弛技术,将电路规模过大的方程组松弛成为若干规模较小的子方程组,对应的解变量也相应地划分成若干组,用迭代法求解这些子方程组;(4)采用潜伏技术,对复杂电路(特别是数字电路)作瞬态分析时,在某一时间段内某些子电路的电压和电流变化极微,亦即这些子电路几乎处于不活动状态,因而在该时间段内可不必要计算这些子电路的工作状态。

1.3 电子线路计算机辅助分析程序编制的基本要求

1) 计算要准确

计算机辅助电路分析跟任何计算一样,都是会有误差的,其误差主要来源有:(1)建立数学模型时将问题作理想化处理所导致的描述误差;(2)对元、器件参数测量时所造成的测量误差;(3)实际计算中因遇超越计算(例如求 $\exp(-3.5)$ 的值),只取其有限项而导致的计算误差;(4)因计算机的有限字长在运算中所导致的舍入误差;(5)因采用不同的算法而引起的算法误差或截断误差。所以,为了提高计算准确性我们必须根据上述造成误差的原因,在程序设计中周密考虑计算方法和元件模型的选取等问题。

2) 运算速度要快

提高计算效率,节省机器时间是编制计算机分析程序时选择计算方法的基本出发点之一。因为它可以节约经费,减小机器误差,提高运算精度。提高计算速度的途径之一是提高计算中数学运算的特点,在计算机中作四则运算时,加、减的速度最快,乘法次之,除法最慢,一般说乘、除运算比加、减运算速度要慢约十倍。所以在选择计算方法时应尽可能减少乘、除运算的次数。提高运算速度的另一个重要途径是采用合理的数据结构,对此将在第④章中详细讨论。

3) 存贮单元要节约

由于计算机的内存容量是有限的,如何利用有限的内存来发挥其最大的功能,使内存使用合理,扩大算题规模,是设计分析程序的重要课题之一。节约内存容量有下述许多途径:

(1)合理使用内存单元,例如有的数组所占的内存单元在开始运算时是需要的,但在后期运算时并无必要保存,则可在程序设计时另作别用;

(2)尽量减小源程序的长度,如用 DATA 语句给变量赋初值,而不用赋值语句;

(3)对于过长的程序,可采用分段的办法,利用外存实行覆盖;

(4)利用调外存的办法节约使用内存单元,将某些数据放在外存(磁盘、磁带)中仅在程序执行中用到这些数据时才分批调入内存,同时可将内存中的部分运算结果随时送到外存去;

(5)利用 FORTRAN 语言本身提供的手段,如利用等价语句,公用语句等;

(6)采用稀疏矩阵技术。由于在电子线路 CAA 中,所建立的方程组的系数矩阵中存在着大量的零元素,且电路规模愈大,系数矩阵中所含零元素也愈多,利用稀疏矩阵技术,仅需存贮系数矩阵中的非零元素和必要的检索信息,从而可以大量节约内存空间。

4) 输入力求简单

程序设计要使输入格式十分简便,以便不具备电路分析和计算机方面知识的用户,也能使用该程序进行解题运算。

5) 能够自动修改参数

参数的改变不应要求重新输入数据,而只需输入需要改变的某些参数,这样有利于利用计算机分析程序进行各种数值实验,有利于进行容差分析。

6) 模型可变

在电路分析中,对于实际元件采用何种等效电路是十分重要的,为了满足一定的运算精度,对于每一种非线性元件(如晶体管)最好在程序中能可以提供可以选择的多种等效电路模型。

7) 输出可选择

对于通用程序,往往可以输出的项目很多,而真正要求的输出反而不易寻找,因此程序设计中应该具备选择必要的输出数据的能力。

除了上述基本要求外,还要力求所编程序简单、明了,避免不必要的重复。对于综合性分析程序,还要求有方便的输入格式以及有对于各种错误、故障作出诊断并输出错误诊断信息的能力。

习 题

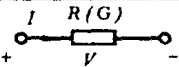
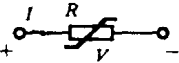
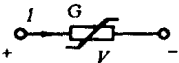
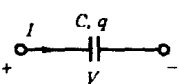
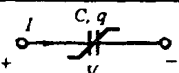
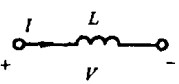
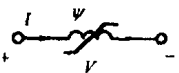
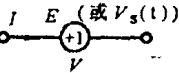
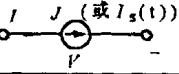
- 1.1 传统的电子线路设计的过程是怎样的,它有哪些缺点?
- 1.2 电子线路 CAD 有哪些特点? 与传统的电子线路设计方法相比有哪些优点?
- 1.3 电子线路 CAA 大致可分为哪几步? 编制通用电路分析程序一般应包括哪几个部分?
- 1.4 在编制通用的电路分析程序时,应考虑哪些基本要求?
- 1.5 电子线路 CAA(又称电路模拟)大致可分成几个阶段? 各阶段的电路分析手段有何特点?

2 电路描述

2.1 电路元件模型

在分析电路时通常将实际电路元件用理想化的电路元件来等效。我们把理想化的电路元件称为基本的电路元件模型,而把由电路元件模型组成的电路称为模型电路。一般电

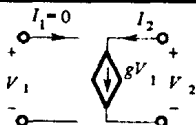
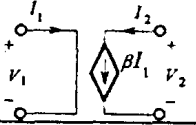
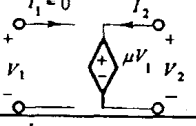
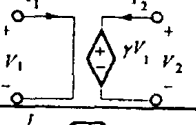
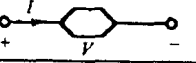
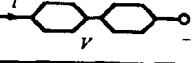
表2.1 基本的二端元件模型及元件特性方程

元件类型	模型	元件特性方程
线性电阻(或电导)		$V = RI$ 或 $I = GV$
流控型非线性电阻		$V = f(I)$
压控型非线性电阻		$I = g(V)$
线性电容		$I(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$ 或 $V(t) = V_0(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$ V_0 为初始电压
非线性电容		$q = f(v), i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{df(v)}{dt}$
线性电感		$V(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ 或 $I(t) = I_0(t) + \frac{1}{L} \int_0^t V(\tau) d\tau$ I_0 为初始电流
非线性电感		$\psi = g(I), V(t) = \frac{d\psi}{dt} = \frac{dg(I)}{dt}$
独立电压源		$V = E$ (或 $V = V_s(t)$)
独立电流源		$I = J$ (或 $I = I_s(t)$)

路分析的任务都是针对模型电路来进行的,当用模型等效表示实际电路元件时,应当突出反映实际电路中所发生的处于支配地位的物理过程。因此,同一实际电路元件,当电路激励源频率或其它条件不同时,往往需用不同的理想元件的组合来表示,才能正确反映其中所进行的物理过程的实质,将实际电路模型化,是一种在工程中广泛应用的科学方法。只要模型处理得当,就可以获得与工程实际相当一致的效果,下面给出基本的电路元件模型及其元件特性方程。

表 2.1 给出了基本的二端元件的模型及元件特性方程,而表 2.2 给出了基本的双口网络的模型及元件特性方程。

表 2-2 基本的双口网络的模型及元件特性方程

元件类型	模型	元件特性方程
电压控制电流源 VCCS		$I_1 = 0 \quad I_2 = gV_1$
电流控制电流源 CCCS		$V_1 = 0 \quad I_2 = \beta I_1$
电压控制电压源 VCVS		$I_1 = 0 \quad V_2 = \mu V_1$
电流控制电压源 CCVS		$V_1 = 0 \quad V_2 = \gamma I_1$
零口器 (nullator)		$V = 0, I = 0$
非口器 (norator)		$V = K_1, I = K_2$ (K_1, K_2 为任意值)

2.2 常用器件的模型

2.2.1 概述

在电子线路中,常用的电子器件有二极管、双极型晶体管、结型场效应管和 MOS 管等。在电路分析时,为了精确地反映这些器件的物理行为及它们对外部电路的影响,通常要将它们用前面所述的基本电路元件模型来构造这些实际器件的等效电路,即电路模型,这就叫做器件的建模。电路分析的可信程度,与器件模型的优劣密切相关。一般说来,模型复杂一些,器件的物理本质就反映得全面一些,然而愈复杂的模型所要求计算机的存贮

量就愈大,分析运算耗费的机时也就愈多,因而人们总是期望模型既足够精确,又较为简便,而模型参数具有较明确的物理意义且易于测量。由于上列要求是相互矛盾和互相制约的,所以电路分析工作者的责任是根据分析任务的不同,对上述要求作出平衡和取舍,使得电路模型既符合实际情况,又节省计算机时空资源。

必须指出:器件模型与其使用条件关系极为密切,例如温度、偏置、激励信号的振幅与频率等都会直接影响元、器件的工作特性,要使模型正确地反映出各种情况下不同的性能,模型参数乃至结构就一定要相应改变。由此可见,一个给定的器件可以有許多不同的电路模型。比如根据模型所能适用的信号幅度范围,模型可分为全局、局部和线性增量三种类型。全局模型是在整个端电压和端电流的可测量范围内对器件的模拟,这种模型总是非线性的,它至少包含有一个非线性(电阻、电容或电感)元件。局部模型是在某个工作区内对器件的模拟,它可能是非线性的也可能是线性的,取决于它所能适用的工作区域的大小;线性增量模型是在某个预定的工作点附近对器件的模拟,它总是线性的。又如根据工作信号频率的不同,可将器件模型分为直流模型和交流模型。直流模型是纯电阻的,用它来模拟器件在直流到某个低频(典型值在 10kHz 以下)信号范围内的特性。随着信号频率的增加、器件中的储能效应(即电抗部分)开始起着越来越显著的作用,特别当信号频率很高时,即使很小的引线电感和分布电容也必须收集到模型中去,以取得所要求的模型精度。因此,有时又将交流模型进一步细分为低频、中频和高频三种模型。关于频率高低的划分,一般认为低频是指 20kHz 以下,中频是指 20kHz~50MHz,高频是指 50MHz 以上的频率。图 2.1 给出了各类模型间的关系。

目前常用的建模方法有物理法和黑箱法。用物理法所得模型称为物理模型;用黑箱法所得模型称为黑箱模型。

所谓物理法,就是把给定器件的物理结构和工作机理变换成模型。用这种方法建立的模型中元件与给定器件内部结构通常有一一对应的关系。在器件的物理结构和工作机理十分清楚的情况下,运用此法十分可靠。例如二极管和晶体三极管模型的建立,一般都用物理法。但是,由于很多器件,特别是在高频和大功率工作状态下,它们内部的工作机理至今尚未完全清楚,而且即使搞清楚了,为了划分器件内部的物理结构也必须作许多简化和理想化的假设,因此,物理法并非总是有效的。此外,物理模型参数的测定比较复杂。

所谓黑箱法,并不需要了解器件内部的物理结构和工作机理,而把器件视为黑箱,以其外特性来作出模型这是它的突出优点。由于黑箱模型中每个元件的作用与器件外部特性曲线的对应关系非常明确,因此用户很容易从测量到的器件外部特性曲线中来确定模型的参数。在黑箱法中,人们首先从建立直流全局模型入手,使模型与器件的端口特性一致,然后在一个或多个关键位置上增加电容和电感。对于直流全局模型的建立,用电阻性网络来模拟器件的外部特性曲线,已经有了成熟而系统的方法;但在把直流全局模型扩充为交流全局模型时,黑箱法就仅仅适用于准电阻器件(储能效应只需用一些很小的寄生电容和电感来模拟),受到了一定的限制,这是黑箱法的主要缺点。黑箱法广泛应用于除二极管和晶体三极管以外的元、器件的建模。