

SPICE—II

通用电路

分析程序
使用方法及其应用

USAGE &
APPLICATION OF
A GENERAL CIRCUIT
SIMULATION PROGRAM
SPICE—II

东南大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍SPICE-Ⅱ通用电路分析程序的使用方法,并有具体应用实例。全书分为:电路CAD概述;SPICE-Ⅱ的使用方法;半导体器件模型及其模型参数提取;SPICE-Ⅱ的应用;问题讨论,共五章。

本书可作为电类专业本科生或研究生教材,亦可供从事电路设计工作的人员参考。同时,作为用户手册,案备一册,上机查阅,有长期使用和保存的价值。

SPICE-Ⅱ 通用电路分析程序 使用方法及其应用

王国裕 陆明莹 编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 大丰县印刷二厂印刷

开本 787×1092毫米 1/32 印张 6.25 字数 136千字

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数: 1-5,000册

ISBN 7-81023-087-5

TP·4 定价: 1.65元

责任编辑 陈天授

责任校对 吕 岚

前 言

SPICE-Ⅰ是国际上流行最广的通用电路分析程序。在电路设计中,已经并正在发挥重要的作用。据了解,美国集成电路设计人员大都熟悉SPICE程序,电类专业的学生都要掌握这种程序的用法。SPICE的发源地是美国加州大学伯克莱分校,SPICE的使用量达60000次/年或160次/日。

近年来国内在近百台计算机上装配并成功地运行了SPICE-Ⅰ程序,但使用情况并不令人满意,特别是众多的电路设计人员对它仍感陌生。即使在高校中,接触该程序的师生也是少数。但是,如果能使已有的SPICE程序发挥应有的作用,可望在近期内使我国现有的集成电路设计水平在原有基础上提高一步,因而,普及推广工作极为重要。为此,我们以近两年所用自编教学讲义和为外单位举办讲座的讲稿为基础,写成此书,奉献给读者。

本书可作为非CAD专业的电子类本科生或研究生教材,亦可供从事电路分析设计的技术人员参考。为了适应各类读者的需要,本书注意体现以下特点:

1. 本书从用户的角度来写(因为我们自己也仅仅是用户而已),以使用和应用为目的,注意选材适当,叙述清楚,通俗易懂,简明实用。本书并不过多地涉及CAD理论问题,不要求读者学习过专门的CAD课程。因此,对于希望掌握电路CAD技术而又缺乏CAD知识的读者,本书是较好的入门读物。

2. 从实用出发,本书取材较全,基本上包括了与使用SPICE有关的各方面的知识。并强调一些应注意的问题。

本书对输入源程序的写法和半导体器件模型都作了详细的介绍。给出若干规定、公式、表格和参数以供查阅。对上机操作和参数提取等技术问题亦予以介绍。因此,本书可作为上机手册经常查阅。

3. 为了强调 SPICE 的应用。本书介绍了用 SPICE 解决实际问题的思路、过程、方法和技巧。并以我们的研究工作为背景给出典型的应用实例以供参考,还对应用中需注意的问题进行了讨论。其目的是引导读者将 SPICE 用好用活,以便在其它课程的学习和今后的工作中发挥作用。

由于以上的特点,使本书不仅可作为专题 CAD 技术课程的主要内容,也可在电路分析和电路设计等专业课程中作为一章来讲授,或包括在《电子技术》等专业基础课中。应该看到,在上述课程中引进 CAD 内容是一个很有意义的尝试,根据我们对研究生开设《模拟电路》课教学中的体会,增加 CAD 内容至少有两方面的好处:对学生,能够独立完成较大型的作业,培养独立设计的能力;对教师,可使一些繁杂的计算问题变得简明,亦可删除一些能够用 CAD 技术取而代之的陈旧内容,使课程更为精练。

本书也适合从事电子产品开发研制的技术人员阅读。书中若干内容曾先后在为一些厂、所举办的讲座中讲授过,根据教学情况,这次又作了相应修改。

本书承蒙童勤义教授和屠念祖教授审阅,并提出宝贵意见,在此谨表谢意。

由于水平有限,书中不当之处恳请批评指正。

编 者

于南京工学院微电子中心

1987.3.

目 录

第一章 电路CAD概述	1
1.1 电路CAD技术的重要性及其历史回顾	1
1.2 电路分析程序的基本组成	2
1.3 通用电路分析程序的含义及指标	8
1.4 重要的问题在于应用	10
第二章 SPICE-Ⅱ的使用方法	12
2.1 SPICE-Ⅱ的功能	12
2.2 SPICE-Ⅱ的输入源程序	14
2.3 上机运行	40
2.4 输出内容介绍	47
第三章 半导体器件模型及其模型参数提取	50
3.1 二极管模型	50
3.2 双极型晶体管模型	56
3.3 MOS场效应管模型	73
3.4 结型场效应管模型	103
3.5 模型参数的提取	108
第四章 SPICE-Ⅱ的应用	116
4.1 电路功能和各项性能指标的模拟分析	116
4.2 电路最佳设计的实现	120
4.3 低噪声MOS运放设计——模拟功能与电路设计理论 结合实例	122
4.4 低压高速CMOS倒相器速度指标模拟——寄生参数的 考虑及模型参数选取实例	125
4.5 高速ECL门电路设计——“对比优选法”实例	129
4.6 PTAT源温度指标分析——温度特性及亚阈值特性 模拟实例	131

4.7 16K NMOS-SRAM 的设计——VLSI 设计实例和 二级模型参数的提取	133
第五章 问题讨论	140
5.1 模拟准确性问题	140
5.2 收敛性问题	141
5.3 模拟能力及费用考虑	144
5.4 MOS 器件 $1/f$ 噪声模型修正	145
5.5 开关电容滤波器的频率特性模拟	147
5.6 二极管击穿模型	150
附录一 非线性电容、非线性电感和非线性受控源 ..	153
附录二 半导体器件模型参数	155
附录三 任选项参数及意义	159
附录四 SPICE 运行操作和屏幕显示	161
附录五 CMOS 运放模拟实例打印内容	163
附录六 电荷守恒模型电容公式	193

第一章 电路CAD概述

1.1 电路 CAD 技术的重要性 及其历史回顾

电路的计算机辅助设计 (Computer Aided Design, 简称 CAD) 是七十年代以来得到迅速发展的一门新技术, 它给传统的电路设计技术带来了新的生命力。

传统的电路分析与设计方法主要依靠人工计算和实验室工作。从基尔霍夫于十九世纪末创立电路分析的基本定律以来, 电路理论不断发展, 已经形成较为完整的体系。但是对于规模较大的电路, 由于人工计算能力的限制, 在电路理论与实际问题之间存在一条“鸿沟”。例如, 用节点法求解电路问题, 从理论上讲, 不论电路规模多大总是可行的。而实际上求解 10 个节点的电路方程组, 人工计算就相当困难。对于小规模集成电路, 其节点数往往在数百个以上, 因而人工计算是不可能的, 更不用说大规模和超大规模集成电路了。

人们自然而然地想到用计算机在电路理论与实际问题之间架起一座桥梁。早在五十年代, 当第一台计算机出现并开始应用时, 就有人尝试用计算机作为工具来解决滤波器的设计问题。六十年代初, 已经开始出现通用电路分析程序, 能进行最多为 20 个左右晶体管开关电路的直流分析和瞬态分析。进入七十年代, 集成电路的飞跃发展, 对电路分析技术

提出了更高的要求。集成电路不但网络规模大，而且在元件的数学模型，非线性分析方面都更加复杂。集成电路的飞跃推动了数学分析方法的进展，促进了电路分析技术的发展。稀疏矩阵技术和隐式积分法被广泛用于程序设计之中，“稀疏表格法”和“改进节点法”等新方法也先后问世。美国加州大学伯克莱分校于1972年推出了SPICE-I版本，于1975年推出了SPICE-II版本，IBM公司也于1973年推出了ASTAP程序。这些程序由于具有较强的功能和通用性，不仅在美国很快流行，在国际上也得到广泛的承认和推广，已经发挥了并正在发挥着重要作用。

在电路设计中采用CAD技术，不仅可以提高设计精度，减少人工劳动，而且可以缩短设计周期，降低设计成本，保证设计的质量，并提高电路的可靠性。特别是对于集成电路设计，由于规模大以及设计定型后难以改动（掩膜版制成后的任何改动都意味着从头开始）的特点，使得CAD技术成为必不可少的设计手段。国外电路设计水平较高，是与CAD技术的广泛应用分不开的。目前在一些技术先进的国家内，可以说几乎没有对CAD技术一无所知的电路设计人员。国内从八十年代初就开始移植了SPICE-II程序，目前已有近百台计算机上装有该程序并成功运行，充分发挥这些程序的作用将会使国内的电路设计水平在现有基础上大大提高一步。

1.2 电路分析程序的基本组成

一个计算机电路分析程序大体上包括五个部分：输入处理，器件模型处理，建立电路方程，求数值解和输出处理。本节结合通用电路分析程序SPICE-II的算法和软件技术，对这五部分的功能和处理的内容作简要介绍，作为初学者的

预备知识。

1.2.1 输入处理

电路分析程序在运行之前，先要接受用户的输入文件，得到运行所必须的数据和信息：电路的拓扑结构，元件参数，分析类型，输出内容和运行环境等等。因此，电路分析程序必须设计一套供用户使用的输入语句格式。用户应按照格式书写输入文件（或称为“输入源程序”）。

目前较多采用的是一种称为“自由格式”的输入语句格式。这种格式不要求按计算机语言的输入格式，而是面向用户，用符合电路设计人员习惯的格式书写输入源程序，因而比较直观，容易掌握，书写简单，不易出错。但计算机不能直接认识这种格式，需要专门编制一套编译程序，对“自由格式”的输入源程序进行编译处理，将它翻译为计算机所能“读懂”的格式。编译程序将逐句对输入源程序进行词法和语法检查，进行分类、分配内存、建立合适的数据结构、为自动建立电路方程作好准备。

对于用户来说，了解输入源程序的格式是使用电路分析程序的第一步。本书将在第二章详细介绍 SPICE-Ⅱ 的输入源程序的书写。

1.2.2 器件模型处理

电路分析程序所能处理的各类元件都要有相应的数学模型来描述。这就是用计算机能够进行计算和处理的数学表达式或参数数组来表示各类元器件的电学特性。线性元件的模型比较简单。器件模型处理主要是指非线性元件，特别是半导体器件的处理。

构成半导体器件模型的方法可以粗分为两种：一种是根据器件物理建立模型，也就是以物理机理为基础，从解析公

式出发构成模型；另一种是从器件的电学特性出发构成模型而不涉及其物理机理，也就是把器件看作“黑箱”，从端点的工作特性出发建立模型。

由上述两种方法所建立的模型表达式可以有多种不同的表示形式。但要注意两点：一是要适宜在计算机上作数值解，二是要正确反映器件电学特性，处理好精度与计算时间的矛盾。

电路分析的精度很大程度取决于模型的精度。器件模型精度越高，则模型越复杂，计算机计算时间就增加。所用模型的精度和复杂性应该根据实际计算要求而定。

模型表达式所要求的参数中有许多参数可由用户赋值，这些参数称为模型参数。通过选取不同的模型参数，可以具体地表达不同材料、不同工艺、不同几何尺寸器件的电学特性。针对具体的器件选取合适的模型参数，是保证模型精度的又一个重要因素。

对于用户来说，正确理解器件模型和模型参数的意义并掌握模型参数的选取是非常重要的，否则就不能保证模拟的精度，本书将在第三章详细讨论 SPICE-Ⅱ 的器件模型和模型参数的选取。

1.2.3 建立电路方程

电路分析程序根据输入源程序所给的电路拓扑结构、元件参数、分析类型和模型参数等信息自动建立电路方程。建立方程可以有不同的方法，节点法是最早采用也是用得最广泛的方法，它以 N 个节点电压为未知量，得到一个 N 阶电路方程组，其矩阵形式为：

$$G \cdot U_n = I_n \quad (1-1)$$

式中 G 为节点导纳矩阵， U_n 为未知节点电压向量， I_n 为节

点等效电流源向量。

节点法是列电路方程的最简单的方法，但它不便处理以电压为变量的元件，对于含有电压源或受控电压源等元件的电路，处理起来十分麻烦。另外它也不能直接在节点方程中将未知的电流量作为未知量。因此，人们提出了改进节点法。它除了以节点电位为未知量外，还引进电压源电流、受控元件的控制电流、电感电流和需要求解的其它支路电流作为未知量。

对于含有 n 个未知节点电压， m 个未知电流的电路，改进节点法的方程组的矩阵表示为：

$$\begin{pmatrix} Y_R & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ V_m \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

Y_R 为 $n \times n$ 的节点导纳矩阵， B 、 C 、 D 为电流未知量关系式矩阵，分别为 $n \times m$ 、 $m \times n$ 和 $m \times m$ 阶矩阵。 I_n 为 n 维未知电流向量， V_m 为 m 维电压向量。

无论是节点法或是改进节点法，各元件在系数矩阵和右端项向量中的填值是有规律的。程序则按其规律性逐一扫描每个元件，并根据每个元件的连接关系和元件值，在系数矩阵和右端项向量中相应位置填上相应数值。扫描完毕，系数矩阵与右端项向量便形成。

SPICE-Ⅰ采用改进节点法建立电路方程。

在电路中，与某一节点相连的元件数毕竟有限，因而，列出的系数矩阵中零元素很多，这样的矩阵称为稀疏矩阵。随着矩阵的阶数增加，稀疏性加大。当处理 100 个节点规模的电路时，系数矩阵中零元素多达 95% 以上。为了节省内存空间，并避免解方程时零元素的运算。在形成系数矩阵时，往往采用稀疏矩阵技术，只存贮矩阵中的非零元素。SPICE-Ⅰ采用了双链表数据结构来描述系数矩阵。双链表

记录了非零元素的位置指针以便于查找、插入和互换，非零元素数值存于 $L\ V\ N$ 数组之中。

电路方程的建立是在程序内部自动进行的，不具有这方面知识的用户仍然可以使用电路分析程序。

1.2.4 求数值解

求数值解包含三类问题：线性代数方程组解法、非线性方程组解法和常微分方程组解法。

线性元件直流分析所建立的电路方程组是线性代数方程组，这时 (1-2) 式系数矩阵中每个元素都是常数。这样的方程组通过矩阵运算可以一次求得其解。

计算机中通常采用高斯消去法或 LU 分解法求解线性方程组，运算量比逆矩阵方法节约 $2/3$ ，但仍是 $O(n^3)$ 数量级。采用稀疏矩阵技术，避免零元素的运算，可使计算工作量下降到 $O(n)$ 数量级。

SPICE-Ⅱ 采用了稀疏矩阵技术。

非线性元件的直流分析所建立的方程组为非线性方程组，这样的方程组用迭代法求解。首先，由迭代公式求出非线性元件的“伴随模型”。即用线性化的迭代伴随模型代替非线性元件。经过线性化处理后，程序才能自动列出如 (1-2) 式所示的电路方程，该方程组的系数矩阵及右端项向量中的元素不全是常数，其中有些元素为未知量的函数。迭代求解过程如下：先假定一组初值 x_0 ，由初值可求出系数矩阵和右端项向量中的非常数项数值，求解 (1-2) 式可得一组 x_1 ；再以 x_1 作为新的猜值，重复上述过程，可得一组 x_2 ；如此反复，直到 x_{k+1} 与 x_k 之差小于所规定的误差容限，便认为迭代收敛，迭代过程结束，并以 x_{k+1} 作为非线性方程组的解。

牛顿-拉夫森迭代方法收敛速度快，精度高，对牛顿-拉夫森方法作改进，还可进一步改善其收敛性。SPICE-Ⅱ 采

用了牛顿-拉夫森的改进算法,

瞬态分析所建立的是一个非线性常微分方程组,计算机只能求其数值解。通常将时间区间 $[t_0, T]$ 分解成若干个离散点 $[t_0, t_1, \dots, t_n]$,然后,在这些时间点上将微分方程用差分方程代替,并逐点求解差分方程。

求解的方法有显式积分法和隐式积分法两种。由于电路方程往往是刚性(Stiff)方程,显式积分法容易引起不稳定。隐式积分法虽然需要反复迭代求解线性方程组,但它的数值稳定性好。隐式积分法可以是单步法,如后向欧拉法、梯形法,也可以是多步法,如基尔法。

SPICE-Ⅱ采用了隐式积分法,并可由用户决定采用梯形法,还是采用基尔法。若采用基尔法其最大阶数也可由用户决定。在求解过程中,程序还自动采用了变阶变步长技巧。由于求解过程可以在程序内部自动完成,虽然允许用户通过选择项(详见第二章)进行干预(如重置迭代次数,误差容限,选择积分方法)。但并不要求所有的用户都具备本节的知识。

1.2.5 输出处理

电路分析程序应具有各种可选择输出(包括输出内容和输出方式的选择)。输出内容与分析类型相对应,可以是直流值输出、交流值输出、瞬态值输出、噪声值输出等。亦可输出有关节点的电位,还可以输出有关支路的电流。输出方式可以是数据输出和绘图。SPICE-Ⅱ由用户在输入源程序中选择输出内容和输出方式。

用户要了解程序所有的输出内容和输出数据的格式,才能合适地选择内容和格式,并正确地整理、分析众多的输出数据。

1.3 通用电路分析程序的 含义及指标

人们称 SPICE- I 等程序为通用电路分析程序，其含义是什么呢？所谓“通用电路分析程序”，是指这样的一类程序，它能够进行各种基本的电路分析（直流分析、交流分析、瞬态分析等）能够处理常用的无源和有源元器件，能自动地根据用户所提出的分析要求，列出方程并求解。通用电路分析程序只要求用户按照一定的格式给出输入源程序，程序将自动完成全部的模拟过程，输出计算结果。

在通用电路分析程序出现以前，对每一个电路模拟都要专门编制一个程序。这要包括输入处理、建立元件模型、列电路方程并求解以及输出处理全部内容。这就涉及到电路理论、半导体器件物理、数值分析和程序设计等多方面的知识。而且，耗费时间长、工作量大。可见，让电路设计人员自己动手编制程序困难是很大的。因而希望能有“通用电路分析程序”，即能够接受并自动处理不同电路的电路分析程序。

对于用户来说，通用电路分析程序就如同一只“黑箱”，用户无须了解其内部结构，只要与其端子发生关系（这是通过一套输入语句来实现的）。通用电路分析程序的出现，使得电路设计人员不必自己动手编制程序便可进行电路的计算机模拟。因以，他可以不去研究算法和软件技术等专门的 CAD 理论，而把注意力集中在用好、用活已有的程序上。通用电路分析程序的出现，也为那些已经具有相当的电路和集成电路设计理论与实践经验，而苦于缺乏计算机知识的人们打开了直接进入 CAD 领域的大门。

怎样评价一个通用电路分析程序的优劣呢？主要有功能、精度和速度等指标。

作为通用程序，首先功能要强，这包括两个方面：一是要能作各种分析，二是要能处理各类元器件。以 SPICE-Ⅱ 为例，除了一般的直流、交流和瞬态分析以外，还可进行灵敏度分析、噪声分析、失真分析、付里叶分析、温度特性分析等共十种分析。可以处理电阻、电容、电感、独立源、受控源和半导体器件等近二十类元器件。因而，可以满足集成电路及一般电子线路的模拟分析的需要。

当然通用性总是相对的，并不可能包罗万象。在另一方面，与通用性相对应，也出现了许多“专用”电路分析程序。专用程序不必象通用程序那样面面俱到，而着眼于某些方面，可以只进行某一种分析，也可以只处理部分元器件。专用程序可以在某些方面更加深入，采用更为精确的器件模型，因而，在某些方面具有更强的功能。专用程序也可以专门解决通用程序所未包括的问题，例如近年来随着开关电容技术的迅速发展，相应出现了一些用于开关电容网络分析的专用电路分析程序。

电路分析程序的精度取决于模型和算法两个方面。就 SPICE-Ⅱ 而言，总的来说它的模型比较好，算法比较可靠，精度较高。因此，目前国内外新开发的电路软件常常以 SPICE-Ⅱ 的模拟结果作为比较的标准。

收敛性问题是目前电路程序还未能完全解决的问题。SPICE-Ⅱ 在收敛性方面已较 SPICE-Ⅰ 作了若干改进，总的来说比较可靠，但也会出现不收敛现象。影响收敛问题的因素较多，本书将在第五章作具体讨论。

由于电路规模越来越大，通用电路分析程序的速度问题越来越突出。一般来说，在目前的计算机和软件技术的水平下，电路级的模拟速度不能满足大规模和超大规模集成电路的需要。当电路网络很复杂时，瞬态分析的求解时间成为主

要矛盾。以 SPICE-Ⅱ 为例，由于速度的限制，其电路规模被限制在几百个元器件以下。因此，在对较复杂网络进行模拟时，要予以分割或采取一些技巧，这些将在第五章予以说明。

现在，快速求解方法的研究引起广泛的兴趣，已经提出了 latency 理论，宏模型概念和波形松弛技术等。另一方面，也出现了专门用于时域分析的程序和混合分析程序，如美国的 MOTIS 程序和 SPLICE 程序。

1.4 重要的问题在于应用

有了好的电路分析程序，正如有了一台好设备一样，只有在应用中才能发挥其作用。目前国内拥有中、大型计算机并已移植了 SPICE-Ⅱ 程序的单位已经为数不少，现在的问题在于如何充分发挥它们的作用。

目前国内多数电路设计人员还是习惯于传统的人工设计方法，不会使用已有的电路分析程序；而从事 CAD 研究人员往往只注意了算法与软件技术的研究，忽略应用研究。CAD 技术应用方面的不足，是国内目前电路设计能力较差的重要原因之一。因以，推广 SPICE 程序的应用，至关重要。

对于读者和用户来说。要注意培养解决具体设计问题的能力，不断提高应用水平。具体说来，要加强两方面的训练；一是会提出问题，二是会分析利用输出结果。所谓会提出问题，就是要能够将 SPICE 的功能与所要解决的实际问题有机地联系起来，想到并知道怎样选用哪些功能来解决哪些问题；所谓会分析结果，就是要能够理解、整理大量的输出数据，判断数据是否可靠，说明什么问题，把输出数据与集成电路的性能参数有机地联系起来。这就要求用户不仅要熟悉

SPICE 的功能、模型、打印内容及若干规定，还要有较强的电路理论和器件物理基础，并不断地实践和总结。

许多设计实例已经表明，SPICE 是进行电路设计的强有力的工具。希望读者学了就用，在应用中取得成绩。