

通用电路模拟技术 及软件应用 SPICE 和 PSpice

姚立真 主编

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书从电子线路的计算机辅助分析和设计的基本概念出发,系统地介绍了用 SPICE 和 PSpice 软件进行电路模拟的方法和技术。全书共分十一章,主要内容有:电路模拟的基本概念;软件使用中的各种语句、命令和方法;软件应用技术;模型和建模;器件级及系统级的模拟。

本书可作为从事电路与系统设计的科技人员的技术参考书,可作为高等学校有关专业高年级学生或研究生的教材或参考书,也可作为进行电路模拟的培训教材。

通用电路模拟技术及软件应用

SPICE 和 PSpice

姚立真 主编

陈 松 审阅

责任编辑:陈晓莉

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市顺新印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 17.875 字数: 478 千字

1994 年 5 月第一版 1994 年 5 月北京第一次印刷

印数: 5.000 册 定价: 22.5 元

ISBN 7-5053-2290-7/TP·635

前 言

电路分析和设计方法自七十年代以来由于采用了计算机辅助设计 (Computer Aided Design 简称 CAD) 技术而得到了飞速的发展。目前在发达国家的研究所、学校等, 在电路分析和设计的场合, 已看不到计算器、电烙铁、面包板等传统的工具, 采用的是 CAD 技术。

电路设计采用 CAD 技术可以用计算机对不同的设计方案迅速地进行模拟分析, 在电路形式基本确定后可进行灵敏度分析、最坏情况分析、中心值优化设计, 从而保证了设计的质量, 提高了成品率。采用 CAD 技术极大地减轻人工劳动, 缩短了设计周期, 降低设计成本。特别对电路规模大、性能指标要求高, 考虑元器件的寄生效应时, 电路设计就必须采用 CAD 技术了。随着微机的普及和 workstation 使用, 为推广应用电路的 CAD 技术提供了良好的条件, 国内在改革开放的形势下, 科技人员正在为电子产品的占领市场和更新换代, 为国民经济信息化而努力, 并普遍认识到谁先掌握的 CAD, 谁就拿到了市场的金钥匙。所以在研究所、工厂及学校学习、使用 CAD 的浪潮日益高涨。

电路模拟首先要有良好的软件。经 30 年来的发展, 电路分析软件已日益完善, 其中国内外流行最广的当属 SPICE。SPICE 目前已发展成一个家族, 在计算机, 各种工作站及微机上被繁衍成各种系列和版本, 它们具有功能强、精度高、容量大、速度快、使用方便和价格低廉等特点。目前国内已普遍使用 SPICE 并取得了不少成果。但尚存在“门外汉”或初浅的使用等现象。为使电路设计人员、高校师生能在使用 SPICE 时使软件发挥出应有的作用, 从而提高我国现有的电子整机产品直至集成电路的设计水平, 普及推广工作是极其重

要的。我们在十几年从事电子线路 CAD 的教学和单片、混合集成电路科研的基础上,在 SPICE 的广泛使用中,总结写成此书。

本书可供从事电路和系统设计的工程技术人员参考,也可作为电子类本科生和研究生的教材和参考书。为此本书注意体现以下特点:

1. 从由浅入深的认识和使用电子线路 CAD 出发,不涉及 CAD 的理论问题,但阐述清楚使用电路 CAD 时所必须掌握的基本概念。在此基础上介绍 CAD 软件的具体使用方法。对缺乏 CAD 基础而又想迅速掌握 CAD 技术的人员,本书将是较好的入门读物,而又起到教科书和软件使用手册的作用。

2. 为使读者能用好、用足软件,本书将系统的介绍 SPICE 的各方面知识,包括软件功能、命令、注意事项及使用技巧等。为通俗易懂,书中加以必要实例。书后附有按字母顺序排列的语句索引,便于读者作为用户手册备查阅。

3. 为提高使用 SPICE 的水平,本书介绍了使用 SPICE 的方法和技巧。结合我们和国内外的研究成果,给出典型实例供参考。当然作为工具使用是“熟能生巧”,本书的目的是引导和启发读者用好 CAD 工具。

本书内容共分十一章,第一章介绍电路 CAD 技术的基本概念和入门,第二章至第五章介绍 SPICE 和 PSPICE 电路模拟的基本概念,各种语句命令和软件使用。第六章至第十章着重介绍 SPICE 应用技巧、注意事项及新的领域。第九章是数字电路模拟技术。第十一章为电路模拟实例。最后在索引中列出了 SPICE(PSpice)全部的语句和命令。

本书第一章至第十一章由姚立真教授编写,其中第五章由于建华和林德健编写,第九章由林德健和于建华编写。全书由姚立真教授主编,陈松审阅。陈松和林德健还提供了部分例子。参加整个编写工作的还有杨锐,易婷,王宏宇,姜庆祥和田冲等。书中有些内容也来自研究生的工作。所以本书也受惠于这些富于创造性和有才华的同事和学生。编写过程中也得到郝跃教授、贾新章教授及诸多老师的帮助与支持。编写中也承电子工业出版社陈晓莉编辑的

目 录

第一章 概 论	(1)
§ 1.1 什么是计算机辅助电路分析	(1)
§ 1.2 电路模拟的主要内容	(2)
§ 1.3 电路分析软件的基本组成和使用	(6)
§ 1.4 SPICE 和 PSpice	(8)
一、通用电路模拟程序 SPICE 简介	(8)
二、PSpice 的特点	(12)
§ 1.5 SPICE 和 PSpice 软件的运行	(15)
§ 1.6 程序使用举例	(18)
第二章 电路的描述语句	(27)
§ 2.1 输入描述语句和规定	(27)
一、输入描述语句的构成及规定	(27)
二、输入描述语句分类	(29)
三、标题语句、注释语句和结束语句	(29)
§ 2.2 元件描述语句	(30)
一、电阻器 R	(31)
二、电容和电感	(31)
三、互感(电感耦合器)K	(33)
四、无损耗传输线 T	(34)
五、电压控制开关	(35)
六、电流控制开关	(36)
§ 2.3 半导体元器件描述语句	(37)

一、结型二极管 D	(38)
二、双极型晶体管 Q	(38)
三、结型场效应晶体管 J(JFET)	(39)
四、MOS 场效应晶体管 M(MOSFET)	(39)
五、MESFET(SPICE3 所特有) Z	(40)
六、半导体电阻器 R(SPICE3 所特有)	(41)
七、半导体电容器 C(SPICE3 所特有)	(41)
八、均匀分布的 RC 传输线 U(有损耗)(SPICE3 所特有)	(42)
九、砷化镓(GaAs)场效应晶体管 B(PSpice 所特有)	(42)
十、数字电路器件 U(PSpice 所特有)	(43)
§ 2.4 电源描述语句	(44)
一、独立电压源 V 和独立电流源 I	(44)
二、线性受控源	(52)
三、非线性受控源	(54)
§ 2.5 模型、子电路的描述语句和库文件的调用语句 ..	(58)
一、模型描述语句	(58)
二、子电路描述语句	(60)
三、库文件调用语句(PSpice 所特有)	(62)
§ 2.6 模型、子电路和库的使用	(65)
一、.MODEL 语句	(67)
二、.SUBCKT 语句	(67)
三、.LIB 语句	(68)
第三章 电路特性分析和控制语句	(72)
§ 3.1 分析类型语句	(72)
一、直流工作点分析 .OP	(72)
二、直流扫描分析 .DC	(73)

三、交流特性分析 . AC	(75)
四、小信号传输函数 . TF	(76)
五、直流小信号灵敏度 . SENS	(77)
六、噪声分析 . NOISE	(78)
七、瞬态特性分析 . TRAN	(79)
八、付里叶分析 . FOUR	(80)
九、失真分析 . DISTO (SPICE 所特有)	(80)
十、温度特性分析 . TEMP	(81)
§ 3.2 设置初始状态语句	(82)
一、节点电压设置语句 . NODESET	(82)
二、初始条件语句 . IC	(83)
§ 3.3 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 分析 . MC (PSpice 所特有)	(84)
§ 3.4 灵敏度/最坏情况分析 . WCASE (PSpice 所特有)	(87)
§ 3.5 参数、函数定义语句和参数分析语句 (PSpice 所特有)	(89)
一、分布参数定义语句 . DISTRIBUTION	(89)
二、函数定义语句 . FUNC	(90)
三、包括文件语句 . INC	(91)
四、参数及表达式定义语句 . PARAM	(92)
五、参数分析语句 . STEP	(93)
§ 3.6 输出控制语句和输出变量	(94)
一、打印语句 . PRINT	(94)
二、绘图语句 . PLOT	(95)
三、探针显示语句 . PROBE	(97)
四、输出变量	(98)
§ 3.7 格式固定的输出和运行统计	(102)

一、电路描述的输出	(102)
二、直接输出	(103)
三、运行统计	(104)
§ 3.8 任选项语句 .OPTIONS	(106)
一、无值任选项	(107)
二、有值任选项	(108)
第四章 元器件模型	(111)
§ 4.1 元件模型	(111)
一、电阻模型	(111)
二、电容模型	(113)
三、电感模型 (PSpice 所特有)	(116)
四、均匀分布 RC 传输线模型 (SPICE3 所特有)	(119)
五、电感耦合器 (PSpice 所特有)	(120)
六、开关模型	(121)
§ 4.2 二极管模型	(125)
一、二极管的模型参数	(125)
二、二极管的直流电流和电压关系	(125)
三、二极管的电容	(128)
四、温度模型	(130)
五、噪声模型	(130)
六、集成电路中的二极管	(131)
§ 4.3 NPN 和 PNP 双极型晶体管模型	(133)
一、EM 模型和 GP 模型	(134)
二、双极晶体管模型参数	(137)
三、晶体管的直流模型	(146)
四、晶体管的电容模型	(148)
五、晶体管温度模型	(150)

六、晶体管噪声模型	(152)
七、晶体管的典型参数	(153)
§ 4.4 MOS 效应晶体管模型	(159)
一、MOSFET 的模型和直流特性	(159)
二、MOSFET 模型的模型参数	(176)
三、MOSFET 的电容模型	(189)
四、MOSFET 的温度模型	(194)
五、MOSFET 的噪声模型	(196)
六、MOSFET 的典型参数	(197)
§ 4.5 砷化镓场效应晶体管(GaAsFET)模型	(206)
一、模型和模型参数	(206)
二、GaAsFET 的直流模型	(209)
三、GaAsFET 的电容模型	(212)
四、GaAsFET 的温度模型	(213)
五、GaAs FET 的噪声模型	(214)
§ 4.6 结型场效应晶体管(JFET)模型	(214)
一、模型和模型参数	(215)
二、JFET 的直流模型	(217)
三、JFET 的电容模型	(218)
四、JFET 温度模型	(218)
五、JFET 噪声模型	(219)
六、JFET 的典型器件参数	(219)
§ 4.7 模拟集成电路宏模型	(220)
一、运算放大器宏模型	(222)
二、电压比较器宏模型	(228)

第五章 菜 单

§ 5.1 PSPICE 的控制壳 (Control shell)	(230)
---	-------

一、引言	(230)
二、控制壳的启动功能	(231)
§ 5.2 PSPICE 的 FILES 菜单	(243)
一、指定当前文件 Current File	(243)
二、编辑当前文件 Edit	(245)
三、存贮修改结果和新建立的文件 Save File	(245)
四、Browse 显示输出结果	(246)
五、利用外部编辑文件对当前电路文件编辑的编辑器 X—External Editor	(247)
六、利用外部编辑观查输出结果 R—External Editor	(249)
§ 5.3 PSPICE 的 Circuit 菜单	(249)
§ 5.4 PSPICE 的 StmEd 菜单	(251)
一、波形产生器 StmEd 菜单的运行和使用方法	(252)
二、进入模拟座标图主菜单 Edit	(254)
三、进入 Command File 子菜单	(268)
四、进入 Log to File 子菜单:	(268)
§ 5.5 PSPICE 的 Analysis 菜单	(268)
一、进入 Analysis 主菜单	(268)
二、子菜单 Run PSPICE (Start)	(269)
三、设置分析参数—AC & Noise 子菜单	(270)
四、设置分析参数—DC Sweep 子菜单	(272)
五、设置分析参数 Transient	(274)
六、设置分析参数—Parametric 子菜单	(275)
七、设置分析参数—Specify Temperature 子菜单	(275)
八、设置分析参数的功能—Monte Carlo 子菜单	(275)
九、确定和执行—Change Options 子菜单	(276)
§ 5.6 Display 主菜单的运行和使用	(276)

§ 5.7 Probe 主菜单的运行和使用	(276)
一、PSPICE 的后处理工具 PROBE 的运行	(277)
二、PROBE 菜单的命令	(282)
三、ProBe 各层子菜单的功能和执行方法	(283)
第六章 模型参数提取技术和程序	(312)
§ 6.1 器件模型参数的测定	(314)
一、双极晶体管 GP 模型参数的测定	(314)
二、MOSFET 的 MOS1 模型参数的测定	(317)
§ 6.2 由器件电参数优化提取模型参数	(317)
§ 6.3 由工艺和版图数据文件自动提取模型参数	(319)
一、DEGBAIC 器件产生器	(319)
二、由工艺和版图数据文件提取 GP 模型参数	(324)
§ 6.4 PSPICE 中的模型参数提取程序 PARTS	(328)
一、PARTS 程序的运行	(328)
二、二极管模型参数提取	(337)
三、双极晶体管模型参数提取	(341)
四、结型场效应晶体管(JFET)的模型参数提取	(347)
五、功率 MOS 场效应晶体管模型参数提取	(353)
六、运算放大器宏模型的模型参数提取	(358)
七、电压比较器宏模型的模型参数提取	(362)
§ 6.5 PSpice 中的器件模型参数库	(364)
一、模拟部分 Analog Parts	(364)
二、数字部分 Digital Parts	(366)
第七章 器件特性模拟和新增器件模型	(368)
§ 7.1 非线性器件特性的模拟	(368)
一、多项式	(369)

二、函数	(373)
三、查表	(375)
四、构造模型	(377)
§ 7.2 线性器件传输函数的模拟	(380)
一、拉普拉斯变换	(381)
二、频率响应表	(384)
三、频域器件的瞬态分析问题	(385)
§ 7.3 修改和新增器件模型	(390)
一、修改器件模型	(391)
二、增加一个新的器件模型	(394)
三、器件方程的重新编译和连接	(439)
§ 7.4 器件和系统的特性模拟技术	(401)
一、模拟器的扩展	(401)
二、器件建模	(404)
三、状态特性建模	(406)
四、系统建模	(408)
第八章 电路的灵敏度和容差分析	(411)
§ 8.1 灵敏度分析	(413)
§ 8.2 容差分析和蒙特卡罗分析法	(416)
一、蒙特卡罗(monte carlo)分析法	(416)
二、容差	(420)
三、多次运行	(424)
四、输出	(425)
五、二点建议	(427)
§ 8.3 最坏情况分析	(428)
一、最坏情况分析方法	(429)
二、PSpice 中的 .WCASE 语句	(435)

第九章 数字电路模拟	(437)
§ 9.1 引 言	(437)
§ 9.2 数字电路文件(Digital Files)	(438)
一、输入文件格式	(438)
二、输出文件格式	(442)
三、数字/模拟混合电路模拟实例	(446)
9.3 数字模拟(Digital Simulation)	(454)
一、数字节点和逻辑状态	(454)
二、数字电路器件	(456)
 第十章 应用技术和问题讨论	 (477)
§ 10.1 模拟中出现错误信息的解决办法.....	(477)
一、浮动节点	(477)
二、电压源和电感器回路	(478)
三、电压控制电源	(479)
四、其它错误	(480)
§ 10.2 收敛性问题.....	(480)
一、直流偏置点	(481)
二、直流扫描和转移特性	(484)
三、瞬态分析	(485)
§ 10.3 时间步长问题.....	(487)
一、减小模拟时间	(487)
二、设置 TMAX	(487)
三、设置 ITL4	(488)
四、重置 METHOD 和 MAXORD 项	(488)
五、重置 TRTOL	(488)
六、放宽误差容限	(488)

七、增加寄生电容	(489)
八、增加输入波形的上升和下降时间	(489)
§ 10.4 任选项中有项的选取	(489)
一、分析精度	(489)
二、ACCT 选项和大规模电路	(490)
三、长的瞬态运行	(491)
四、任选项选取的综合考虑	(491)
§ 10.5 功能扩展举例—辐射效应的模拟	(492)
一、剂量率的效应	(493)
二、电离粒子辐射效应	(496)
三、总剂量辐射效应	(497)
§ 10.6 其它模型和模拟方法	(498)
一、电压控制器件	(498)
二、简单的运算放大器	(499)
三、石英晶体振荡器模型	(500)
四、模拟肖特基(Schottky)二极管	(501)
五、自激振荡器	(502)
六、高 Q 值电路的瞬态分析	(503)
七、功率电路的模拟	(504)
八、缓冲(Snubbing)电阻器的运用	(505)
九、多功能开关的模型及应用	(506)
十、非线性磁性材料模型	(513)
§ 10.7 PSpice 和 SPICE 应用中的比较	(516)

第十一章 电路模拟举例..... (518)

§ 11.1 LC 低通滤波器	(518)
一、电路图	(518)
二、电路模拟输入语句	(519)

三、输出结果	(519)
§ 11.2 5 μ m CMOS 反相器	(520)
一、电路图	(520)
二、电路模拟输入语句	(520)
三、输出结果	(522)
§ 11.3 传输线反相器	(524)
一、电路图	(524)
二、电路模拟输入语句	(524)
三、输出结果	(525)
§ 11.4 拾音器前置放大器	(525)
一、电路图	(525)
二、电路模拟输入语句	(526)
三、输出结果	(526)
§ 11.5 1.2 μ m GaAs MESFET	(527)
一、电路图	(527)
二、电路模拟输入语句	(528)
三、输出结果	(529)
§ 11.6 2 μ m CMOS 的九级反相器链	(529)
一、电路图	(529)
二、电路模拟输入语句	(529)
三、输出结果	(531)
§ 11.7 高压置率运算放大器 HA-2510 112/115	(532)
一、电路图	(532)
二、电路模拟输入语句	(532)
三、输出结果	(537)
§ 11.8 恒温器	(537)
一、电路图	(538)
二、电路模拟输入语句	(538)

第一章 概 论

§ 1.1 什么是计算机辅助电路分析

在电路设计的始末,设计者总要对所设计的电路的性能进行预计,判定和校验,过去常用的方法是数学的和物理的两种方法:

1. 数学方法:常用的是用两个基尔霍夫定律和元件特性方程对设计的电路列方程,并由人工或借助计算器求解;

2. 物理方法:按电路图在实验板上搭成模拟电路并借助仪表测定电路的特性。

这两种方法对设计规模较小的一般电路仍然是可行的,但它有某些局限和致命的缺陷:

1. 电路的规模要简单,元器件类型要单纯,否则计算繁到无法进行。

2. 精度有限:计算的精度有限;实验的精度不高;对某些电路,特别是集成电路的寄生效应,集成元件,布线之间以及封装的分布电容,电感和耦合特性无法模拟。

我们曾用 $f_T > 1\text{GHz}$ 的晶体管等分立元件按 XD521 高速电压比较器搭电路试验板,测得其上升和下降延迟时间均在 15ns 左右,而 XD521 在集成制作时,其晶体管 f_T 仅为 700MHz 左右,但电路的上升和下降延迟时间可在 10ns 左右,这仅是小规模集成电路。

3. 时间太长:数值计算时间长,实验时间长,特别要进行方案

对比,元器件参数对电路某些特性的灵敏度计算和实验等时,时间更是长到不能忍受和进行,例如用分立器件和小规模集成电路搭一块 12 位 0.2 微秒的模/数换电路时其时间要超过一人年。

4. 不能进行极限状态和最坏情况分析。例如,在高温或低温的破坏性试验条件下电路特性试验是无法做的。即使勉强做了一种,整个电路也被破坏了。

5. 容差分析及优化设计很困难。例如集成电路中电阻若用扩散工艺制造时其阻值相对变化一般在 $\pm 20\%$ 左右,同时各管子特性也有起伏,为了提高集成电路成品率,应对电路作容差分析,但用物理方法或数学方法显然是极其困难的,仅就想获得精确的元件值和器件特性一时都无法解决。

随着电子工业特别是大规模集成电路的迅速发展,电路品种日新月异,规模越来越大,同时对电路的设计要求,如可靠性,性能价格比也越来越高,原来的那些方法已完全不能适应电路的要求。计算机和计算技术的发展使得利用计算机来进行电路特性分析成为可能。计算机辅助电路分析(CACA)或又称计算机辅助电路模拟就是利用计算机这种工具去分析或模拟已设计好的电路的特性。在图 1.1 中画出了电路设计的流程图,从图可见,用计算机进行辅助电路分析只是代替了原来的数学方法或物理方法。它不能代替设计者的其它工作。但由于计算机速度快,精度高,所以用 CACA 不仅完全弥补了上述方法的不足,而且更经济,更正确。目前 CACA 已成为现代化电路设计师的助手和工具。

§ 1.2 电路模拟的主要内容

电路模拟依电路的类型不同,其分析的内容也不同。从构成电路的元器件特性分类,可分成线性网络和非线性网络;从电路中是