

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

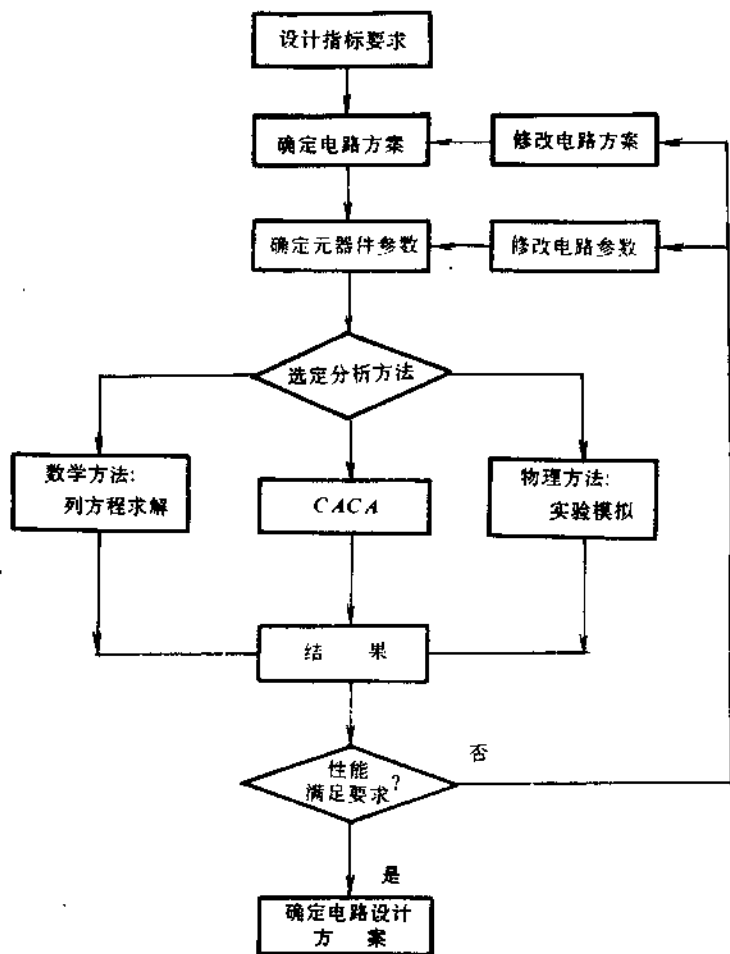


图 1.1 电路设计的流程图

否包含电容、电感等储能元件分类,又有电阻网络和动态网络。因而网络类型有线性网络、线性动态网络、非线性电阻网络和非线性

动态网络。除特别说明外一般泛指电阻网络时就包含线性和非线性电阻网络,而泛指动态网络时也包含了线性动态和非线性动态网络,当泛指线性网络或非线性网络时都包含了电阻网络和动态网络。显然最复杂的网络是非线性动态网络。若软件对该电路能进行分析,则对由它简化而得到的其它网络均可进行分析了。如在小信号下将非线性元件线性化,就将非线性化网络问题,变成了小信号工作下的线性网络了。

随着微电子技术和元器件的发展,构成电路的元器件类型不断增多,为了能满足电路模拟的需要,电路分析软件不断扩展着自己的模型库,甚至用户可提取模型参数或自定义模型,使电路模拟能适用于各种情况。对各种网络电路模拟的主要内容可见表 1.1。

表 1.1 各种网络的电路分析主要内容

分析的描述	分析的内容(方法)
直流分析	求线性电阻网络的直流解,给出节点及支路的电压和电流值,给出直流功耗。
工作点分析	求出非线性网络的静态工作点,对动态网络求出初始条件、偏置或平衡状态下的工作点(将网络中所有电容开路,电感短路得到的)。这些也是非线性网络的直流解。
驱动点分析	求出非线性电阻网络的驱动点电流和驱动点电压之间的关系,这也是网络的直流解。
传输函数分析	求出电阻网络的输出电压或电流和输入电压或电流之间的关系,也可得到网络的输入阻抗和输出阻抗。这也是网络的直流解。

续 表

分析的描述	分析的内容(方法)
交流分析	求出线性网络的频率响应特性,即频域分析。对非线性网络进行小信号交流特性分析(将非线性元件在工作点处线性化,然后分析这个被线性化电路的稳态交流响应)。可得到网络的幅频特性与相频特性,得到在给定频率下的输入与输出阻抗等。对非线性动态网络可求出有输入或无输入时的稳态周期解。
瞬态分析	对动态网络进行时域分析,求出其瞬态响应。(在用户或程序确定的初始条件下,在有或无输入信号时,求出随时间变化的输出波形)
噪声分析	对线性网络进行频域或时域的等效输入噪声和输出噪声特性分析(将噪声源作为输入而求这时的交流解或瞬态解)
温度特性分析	求出在各种温度下网络的各种特性
灵敏度分析	计算电路中元件参数变化时对输出量的影响。灵敏度分析可在直流工作情况下进行,如对 SPICE 或 PSpice,而 SPICE 家族中有的软件可在交流和瞬态工作条件下进行灵敏度分析。
容差分析	在元件参数各自的容差范围内求出对电路特性的影响。PSpice 中可用蒙特卡罗分析对直流,交流和瞬态特性进行容差分析。
最坏情况分析	求电路特性的极端情况(在电路元件参数取最坏的极端值求电路的特性)。
付里叶分析	在给定频率下对网络进行瞬态分析,将得到的输出波形再做频谱分析求出输出变量的基频和谐波分量。
失真分析	求电路在小信号条件下的失真特性。

§ 1.3 电路分析软件的基本组成和使用

一、计算机辅助电路分析的基本组成

电路计算机模拟程序的主要构成参见图 1.2,它由五部分组成:

1. 输入处理部分

较好的通用电路模拟程序其输入部分包含以下功能:

(1)用户可将电路结构和文件参数的输入语言用字母和数字等组成的“自由格式”语句写成源程序(输入文件),用户也可自行定义子程序以说明模型数据。这些程序均能接受和执行。此外程序还备有模型库,允许用户调用。有的程序采用电路设计者习惯使用的电路图,以人机交互方式输入电路信息,用户可对电路图做图形编辑。程序根据电路图及用户确定的模型、输出等自动转换成电路模拟的输入文件。这种方式更直观方便。

(2)将输入源程序的各类数据分类加工处理。

(3)进行错误检查。对输入文件中的错误做全面检查,包括:输入文件的语法、语义错误,电路拓扑结构的不完整及错误等。

2. 器件模型处理

通用电路模拟程序备有常用的各种器件模型,如二极管,BJT(双极型晶体管),MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管),JFET(结型场效应晶体管)等,只要给出必要的模型参数就可直接调用。在用户未给出参数值时,程序本身有隐含值备用。程序有多种嵌套功能,在输入语句中如子电路这种语句。

在用户确定器件模型并输入了模型参数值以后,程序就将非

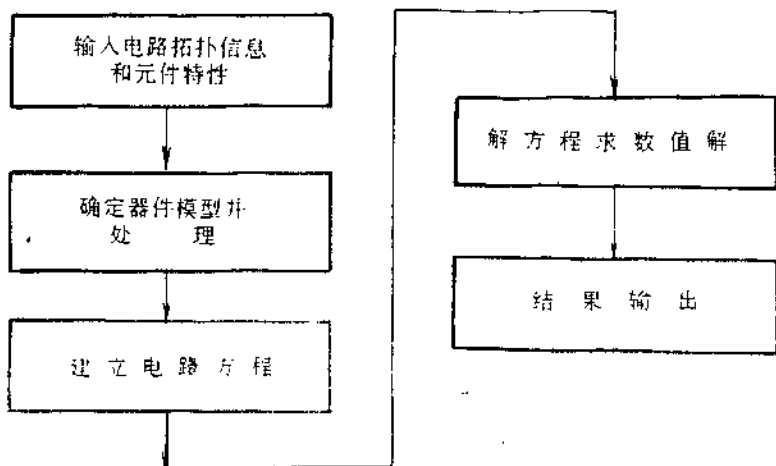


图 1.2 电路的计算机模拟程序的主要构成

线性的元件特性进行数学处理,电路模拟的精度主要取决于模型的精度,电路模拟的时间主要用在计算模型和等效电路上。

3. 建立电路方程

电路模拟程序根据输入的数据,参数和分析要求,用基尔霍夫电流和电压定律和支路特性方程自动建立电路方程。目前常用的方法是改进的节点法。

4. 解方程求数值解

电路分析程序按电路特性分析要求建立方程后,其数值解法主要有三种:

(1)线性代数方程组求解:采用改进节点法列出方程组,严格主元消去法或 LU 分解法是常用的算法,但建立电路的拓扑矩阵非零元素很少,所以为减少计算机存储和运算工作量还采用稀疏矩阵求解技术。

(2)非线性代数方程组求解:采用改进的牛顿—拉夫逊方法,其具有牛顿—拉夫逊法收敛速度快,精度高等优点,又克服了初始值选取不当使解不收敛的缺点。

(3)常微分方程组求解,采用变阶变步长的隐式积分法。隐式积分法比显式积分法易保证数值的稳定性,而变阶变步长的技术又使反复迭代求解线性代数方程组的时间缩短。

5. 输出

通用电路模拟程序有多种输出选择,其输出内容可有直流工作点,幅频和相频特性、瞬态特性、传输特性、噪声特性等,输出方式可以是数据、表格和曲线,可由打印机输出,也可带动绘图仪工作。

二、电路分析程序的使用

用户使用一般电路分析程序的大致步骤如图 1.3 所示。一个好的通用电路分析程序其电路描述语言是按人们通常习惯加以整理规定的,所以输入源程序的缩写是十分容易的。对未上过机和未学过算法语言的人也只需几天就能掌握。输出结果不仅易懂而且其精度和分析范围远远超过了过去的数学分析方法和物理分析方法。本章后面以通用电路分析程序 SPICE 为例说明电路分析程序的具体使用。

§ 1.4 SPICE 和 PSpice

一、通用电路模拟程序 SPICE 简介

SPICE 是 Simulation Program with IC Emphasis 的缩写,该程序是由美国加利福尼亚大学柏克莱分校电工和计算机科学系开发的,主要用于集成电路的电路分析程序。其第一版本于 1972 年完

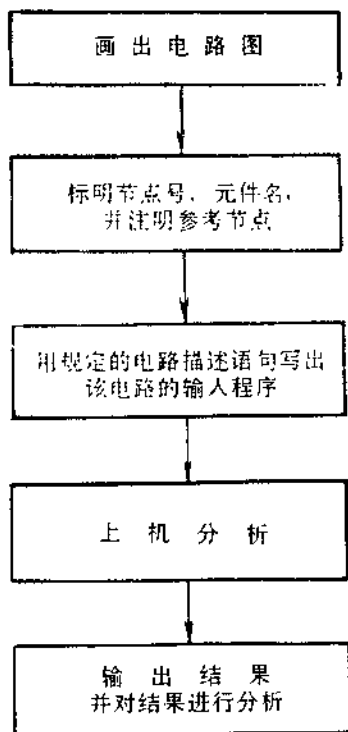


图 1.3 使用电路分析程序的步骤

成,第二版本在 1975 年完成,1981 年 SPICE2G.5 版本由近一万五千条 FORTRAN 语句组成,开始运行在 CDC6400 计算机上,由于程序采用完全开放的政策,用户可按自己需要进行修改,加之实用性好,薄利的推广,并又移植到 IBM,UNIVAX, RCA 及 PDP 等型号计算机上,所以在全世界广为应用。

从 SPICE 问世以来,其版本的更新是持续不断的。1985 年 3 月推出了 SPICE 3,1986 年 5 月推出了 SPICE3A.7 版本,这是一种交互式的电路模拟程序。其优点是用户在运行输入语句后,SPICE 3 再执行用户所要求的分析。用户需分析的语句可随时用人机对话方式输入,使电路分析更灵活。SPICE 3A 版本是用 C 语言写成,在图形功能方面得到增强。SPICE 目前有 SPICE3C 和 SPICE3E 等版本,版本的更新主要在于电路分析功能的扩充、算法的完善和元器件模型的更新和增加。但从 2G.5 版本至现在的每个版本都尚属于局部的变动。SPICE 在 1988 年已定为美国国家工业标准。

1. SPICE 可模拟的内容

(1) 直流分析:包括非线性电路的直流分析

①电路的直流工作点:分析时电路中的电感全部短路,电容全部开路,得到电路的每一节点的电流和电压(相对参考点)值。在瞬态分析时,SPICE 自动先进行直流工作点分析并将其值作为瞬态迭代求解的初始值。在交流小信号分析之前也先自动地进行直流分析,以便决定其直流工作点,取得非线性器件在该点的线性化小信号模型参数。

②直流小信号传输函数值:传输函数的直流小信号值为直流小信号工作下的输出变量和输入变量之比,输入电阻和输出电阻也作为直流解析的一部分被计算出来。

③直流转移曲线:SPICE 可在用户指定的范围内,逐步改变指定的独立电压或电流源,对每一个电源值的变化,都得到存贮的输出变量。

④灵敏度分析:求出指定输出变量对于电路参数的直流小信号灵敏度。电路参数包括电路中所有的元件,器件参数,直流电源的直流输入电平。晶体管则视用户规定的模型,对模型中每个参数都作为电路参数。直流小信号灵敏度给出的是相对灵敏度和归一化的灵敏度值。

(2)交流小信号分析:SPICE 程序将交流输出变量作为频率的函数计算出来。先计算电路的直流工作点,决定电路中所有非线性器件的线性化小信号模型参数,然后在用户所指定的频率范围内对该线性化电路进行分析。

①频域分析:在用户规定的频率范围内完成电路的交流分析。期望交流小信号分析以转移函数(电压增益,传输阻抗等)输出时,可将仅有一个交流输入的幅度规定为 1,相位为零,这时得到的输出值就是输出对输入的转移函数。

②噪声分析:SPICE 可计算每个频率点上总的输出噪声电平及其等效输入噪声电平。噪声电平都以噪声带宽的平方根进行归一化。所以其单位是伏特/(赫兹) $^{\frac{1}{2}}$ 或安培/(赫兹) $^{\frac{1}{2}}$ 。对元器件的白噪声其等效噪声源值可自动由电路小信号工作点确定,每个噪声源产生的噪声都在指定的求和点相加,若分析的器件采用的模型考虑了闪烁噪声源,程序也能进行分析。

③失真分析:计算电路交流小信号工作下电路的失真特性,分析时是在输入端加有一个或两个频率的信号,在用户给定的输出负载电阻时,求出在该负载上的输出失真功率。

(3)瞬态分析

①瞬态响应:是从时间为零开始,到用户规定的时间范围内进行电路的瞬态特性分析,用户可规定输出的开始到终止的时间和分析的步长,初始值可由直流分析部分自动确定,所有与时间无关的源(如电源),用它们的直流值,也可以在用户规定的各元件上的电平值作为初始条件进行瞬态分析。

②大信号正弦模拟:可以对输出波形进行傅里叶分析,得到在用户指定的基频及时间间隔范围的傅里叶系数。

(4)电路的温度特性分析

SPICE 程序在用户未说明时,是在 27℃(300°K)的标称温度下进行各种模拟的。当用户指定电路在什么温度下工作时,SPICE 也

能进行不同温度下的电路特性分析,在温度低于 -273°C 时不予模拟。

2. SPICE 程序可输入的元器件和电源

(1)元件:包括电阻,电容,电感,耦合互感,无损耗传输线,SPICE3 中还加了开关。

(2)半导体器件:结型二极管,双极型晶体管,结型场效应晶体管,MOS 场效应晶体管.SPICE3 中还加了半导体电阻器,半导体电容器,均匀分布 RC 传输线(有损耗)和 MESFET。

(3)电源:独立电流源,独立电压源,线性电压控制电流源,线性电压控制电压源,线性电流控制电流源,线性电流控制电压源等 4 种线性受控源以及相应的 4 种非线性受控源,其中独立源除直流电源外还有脉冲源,交流正弦源,分段线性源,调幅信号(正弦)源,调频信号(输出频率调制)源等。

(4)子电路:SPICE 程序中允许用户用定义器件模型相似的形式自行定义一组元器件作为子电路。子电路的大小没有限制,子电路中还可嵌套子电路,这样使用户在模拟含有较多重复单元电路(子电路)的较大规模电路时更为方便。

二、PSpice 的特点

PSpice 是 SPICE 电路模拟器家族的一员,是首先用于 IBM-PC 机上,基于 SPICE 的模拟器。由美国 MicroSim 公司开发并在 1984 年 1 月首次推出。

PSpice 3.00 版本以及后来的版本全部都是用 C 语言对模拟器重写的,而不是用 C 语言写的 U. C. Berkeley SPICE3 版本。尽管模拟算法和数字结果与 SPICE2、SPICE3 的一样。但用 C 语言重写的模拟器允许更快速的开发、修改和扩充。

PSpice 和其它 SPICE 的两个主要区别在于收敛性和性能上,

在 Microsoft 公司推出 FORTRAN3.0 版本后,在 1985 年左右,一些 SPICE 程序可以在 IBM-PC 机上使用了。但这类只是不同程度的对 U. C. Bekeley 源码进行微小修改。使用标准检测电路方法可得出 PSpice 比那些模拟快 1.3—30 倍。就改进的收敛性而言,PSpice 领先了二年。PSpice 的用户比所有其它 SPICE 的用户多,因而收到的反馈信息也较多,这促进了版本的更新。

PSpice 除包含有 SPICE 的全部仿真功能外,在 4.XX 版本后还具有如下新的性能。

1. 新的菜单控制:PSpice 建立了良好的人机界面。以下拉式菜单方式对输入,输出及各个模拟工作过程提供了很方便的工具。如用菜单的第一个字母来唤醒 Probe, Patrs, StmEd 等菜单,然后用 '→', '←' 光标键来选择等,各过程都有在线提示。所以对用户使用很方便。

2. 能力的扩展

(1)扩展了 DC 分析时的全部参数扫描,SPICE 规定扫描参数参量为独立电流源或电压源的值,不允许对模型参数或温度作为扫描参量,不允许对数直流扫描,PSpice 提高了参数分析能力。

(2)在 .PRINT 和 .PLOT 语句中,SPICE 仅允许如 $V(x)$ 或 $V(x,y)$ 的电压和通过电源的电流,不允许其它如 $IC(Q8)$ 表示 Q8 器件 C 端点的电流等,而且没有给出群延迟。

(3)SPICE 要求输入文件必须大写。PSpice 无大、小写的限制。

(4)SPICE 要求节点是整数,不允许用名字,PSpice 可随意。

3. 新的分析功能:

(1)PSpice 增加了统计分析(Monte Carlo 选项)和最坏情况分析,在用户指定元件参数的概率分布规律后,对电路进行直流、交流和瞬态特性的统计容差分析。可进行电路特性的最坏情况分析。

(2)数字模拟和数模混合模拟。有通用逻辑模拟器文件接口(Digital Files 选项)和模拟/数字混合电路的模拟(Digital Simulator

选项)。

4. 激励编辑器(Stimulus Editor)

PSpice 中的 StmEd 模块,可以用菜单提示建立激励(输入)波形所必要的参数或利用鼠标作出信号波形图,并进行编辑。

5. 图形的后处理(Probe 选项)

Probe 具有分析结果的“探测”能力,相当是万用表、示波器和扫频仪等的输入探头。Probe 控制屏幕存贮和重复显示,也控制硬拷贝外设上显示各种模拟结果。多次显示可用文件名存起来,在分析类型相同而要显示各种不同的模拟结果时,可进行反复显示波形的重复操作。

6. 模型品种增加,精度提高

①增加了砷化镓场效应模型,横向 PNP(LPNP)晶体管模型,非线性磁性元件(变压器)模型,电压控制和电流控制开关模型。

②增加了 SPICE MOSFFT 模型中没有的模型参数:RG,RDS,L,W 和 WD 等,还增加了 MOSFET 的 4 级模型。

③增加了电感和电容的温度系数,电阻的指数温度系数。

7. 库文件(.LIB 选项)

PSpice 建立了模型库,用 .LIB 语句可直接调用库中各种器件的模型参数及电路的宏模型参数。目前在库中包含有 3000 多个模拟器件库,有各种二极管,各种晶体管和场效应晶体管,功率 MOSFET,运算放大器,光隔离器,磁芯,模/数接口电路,石英晶体振荡器等。库中还包含有 1200 多个数字器件库,有各种 TTL 和 CMOS 数字电路等。

8. 模型参数的提取(PARTS)选项和器件模型的修改

使用 PARTS 程序可将元器件及模拟电路产品的电参数值提取成相应的模型参数,其结果可用于电路模拟和建库。PSpice 还允许用户自己修改已有的模型参数或器件的方程,即可重新建模。

9. 输入和输出文件的格式

在输入和输出文件规则上 PSpice 与 SPICE2G.5 基本一样,部分区别为

①无失真分析:PSpice 认为 SPICE 的失真分析有误差,而建议失真分析在运行瞬态分析后用 PROBE 的付里叶变换得出输出频谱。

②如果无 .op 语句,PSpice 不打印工作点及器件参数。

③如果不将 .TRAN 语句换成 .TRAN/OP 则 PSpice 不打印瞬态分析的偏置点小信号参数。

10. PSpice 可在 IBM-PC 带有 640Kb 内存的 DOS 系统及兼容机上运行,还有在下列系统上运行的版本:有扩充内存的 DOS 系统;Microsofr/IBM OS/2 操作系统;NEC(日本版)个人计算机(PC 机);Applo Macintosh II PC 机;HP/Apoll0 2000,3000 和 4000 系列工作站;SUN3,SUN4,SPARC 工作站;DEC 2100,3100,5000 工作站;VAX/VMS(包括 Micro VAX)计算机。

§ 1.5 SPICE 和 PSpice 软件的运行

一、SPICE3 的运行

SPICE3 和 SPICE 运行相同,仅多了名为 Nutmeg 的后处理器,其作用是将分析的数据在终端上以图形表示出来,Nutmeg 的命令在第五章介绍。这里介绍 SPICE 的运行。为启动 SPICE3,键入
SPICE

这时 SPICE 启动,但未装入电路。若键入

SPICE<输入文件名>

这时 SPICE 启动并装入了电路,若输入文件中有如: .OP,

.DC, .AC 或 .TRAN 任一电路分析语句,则再敲

RUN

SPICE 就执行所要求分析,分析完毕后将按输入文件中的要求给出分析打印的结果或绘制出曲线。

如输入文件未加后缀,SPICE 将自动加上隐含后缀符 .CIR,并在未定义输出文件名时,SPICE 将输入文件名自动加以 .OUT 后缀作为输出文件备用。

二、PSpice 的使用

1. 系统要求

PSpice4.xx 正如上节说过的其版本很多,可适用于不同的系统,这里是对其 IBM-PC(DOS)版本作介绍。使用 PSpice4.xx 在 IBM80286/386/486 或兼容机上,要求有 640Kb 内存,一个硬盘(驱动器),配有一个 8087/287/387 浮点协处理器,有 1.2Mb $5\frac{1}{4}$ 英寸或 1.44Mb $3\frac{1}{2}$ 英寸的软盘驱动器,操作系统为 MS-DOS 3.0 或更新版本。单色,彩色图形显示器均可,打印机不限。

2. 安装及说明

在 PSpice 的一套软盘中,有一个标有“Diskette1”装有 README.DOC 和 INSTALL.DOC 等文件的磁盘。还有装有程序文件、库文件和其它的磁盘。安装 PSpice 主要是拷贝这些文件。

开始安装之前先读 README.DOC 文件,该文件里含有最新的信息。安装时读 INSTALL.DOC 文件,该文件里含有当前版本软件的安装信息。

PSpice 是个程序有 PSpice.EXE 和一些外层文件 PS4OX.OVL 等。您可以把 .EXE 文件装在硬盘或所选定的目录里。尽管这些文件有许多种排布方法,但在您熟悉本程序之前最好按下述介绍的

方法去做。

先在根目录下建立 CONFIG.SYS 文件,系统中已有时不必重建。为了 PSpice 的正常运行,要求设置 BUFFERS=20 和 FILES=20。CONFIG.SYS 设置完成,则将 PSpice 完整的拷贝到适当的硬盘目录下,如果不在硬盘的主目录下则必须用 PATH 设置路径。

如果 PSpice 产生 PROBE.DAT 文件,伴随 Probe(PROBE.BAT)的命令文件是让 Probe 在 PSpice 执行后自动运行。

3. PSpice 的运行

运行 PSpice 可用下面格式

```
PSpice <输入文件名> [<输入文件名>]  
+ [<PROBE 文件名>][/B][/ps=<com port>]
```

其中 *<com port>* 是 COM1, COM2, COM3 和 COM4 串口 (RS232) 之一,或串口的地址,该选项通常并不需要。在以上格式中 *[]* 表示可省略。由于输入文件有隐含的扩展名 .CIR,输出文件有隐含的扩展名 .OUT, PROBE 有扩展名为 .DAT,所以如输入文件名为 EXAMPLE1,则下列命令是完全等效的:

```
PSpice EXAMPLE1  
PSpice EXAMPLE1.CIR  
PSpice EXAMPLE1.CIR EXAMPLE1  
PSpice EXAMPLE1.CIR EXAMPLE1.OUT  
PSpice EXAMPLE1.CIR EXAMPLE1.OUT PROBE.DAT
```

也可以用系统打印机的名字来命名输出文件名。如:

```
PSpice EXAMPLE1.PRN
```

选项 */B* 是为检查软盘而选择第二磁盘驱动器(不一定是 B 驱动器)。

可执行的 PSpice 很直观。文件 PSpice.BAT 必须在隐含的索引目录里或包含在前边的 PATH 命令目录里(参看您的 DOS 用户手册或 PATH 命令)。执行 PSpice 先用 PSpice.BAT,然后如果有 PROBE,再调用 PROBE.EXE。PSpice1.EXE 产生一些动态文件,为