

SPICE 通用电路 模拟程序用户指南

[美]阿·弗拉吉米列斯科 等编

田淑清 译 章开和 校

5.871

06760

清华大学出版社

SPICE通用电路 模拟程序用户指南

田淑清 译

章开和 校

JS440/08

SPICE通用电路模拟程序用户指南

(1981.8.10 2G 版本)

[美]阿·弗拉吉米列斯科, 章开和等编

田淑清 译 章开和 校



清华大学出版社出版

北京 清华园

北京海淀印刷厂印刷

新华书店北京社发行所发行各地书店经售



开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: $2\frac{5}{8}$ 字数: 56 (千字)

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷

印数1—25000

统一书号: 15235·82 定价: 0.40元

译 者 的 话

此用户指南是由美国加利福尼亚大学伯克莱分校电机工程和计算机科学系的A.VLADIMIRESCU, 章开和, A.R. NEWTON, D.O.PEDERSON, A.SANGIOVANNI—VINCENTELLI等编写的。原文是通过计算机从磁带上打印得到的。

中文本由清华大学计算中心田淑清翻译, 复旦大学电子工程系章开和在访美期间参加了本书的编写工作, 回国后又为中译本进行了校对, 并对收敛性一章作了修改和翻译了附录B与附录C。

目 录

前言.....	(1)
第一章 分析的类型.....	(2)
§ 1.1 直流分析	(2)
§ 1.2 交流小信号分析	(3)
§ 1.3 瞬态分析	(4)
§ 1.4 不同温度时的电路分析	(4)
第二章 收敛性.....	(6)
第三章 输入格式.....	(8)
第四章 电路描述.....	(9)
第五章 标题卡、结束卡和注释卡.....	(11)
§ 5.1 标题卡	(11)
§ 5.2 结束卡	(11)
§ 5.3 注释卡	(11)
第六章 元件卡.....	(12)
§ 6.1 电阻	(12)
§ 6.2 电容和电感	(13)
§ 6.3 耦合互感	(14)
§ 6.4 无损耗传输线	(15)
§ 6.5 线性受控源	(16)
§ 6.6 线性电压控制电流源	(16)
§ 6.7 线性电压控制电压源	(16)
§ 6.8 线性电流控制电流源	(17)
§ 6.9 线性电流控制电压源	(17)

§ 6.10 独立源	(18)
第七章 半导体器件	(22)
§ 7.1 结型二极管	(23)
§ 7.2 双极型晶体管	(24)
§ 7.3 结型场效应晶体管	(25)
§ 7.4 MOS场效应晶体管	(25)
§ 7.5 模型卡	(26)
§ 7.6 二极管模型	(27)
§ 7.7 NPN和PNP双极型晶体管模型	(28)
§ 7.8 N沟和P沟结型场效应晶体管模型	(32)
§ 7.9 N沟和P沟MOS场效应晶体管模型	(33)
第八章 子电路	(38)
§ 8.1 子电路卡片	(38)
§ 8.2 中止卡	(39)
§ 8.3 子电路调用	(39)
第九章 控制卡	(40)
§ 9.1 温度卡	(40)
§ 9.2 宽度卡	(40)
§ 9.3 可选项卡	(41)
§ 9.4 工作点卡	(44)
§ 9.5 直流卡	(44)
§ 9.6 节点电压设置卡	(45)
§ 9.7 初始条件卡	(45)
§ 9.8 转移函数卡	(46)
§ 9.9 灵敏度卡	(47)
§ 9.10 交流卡	(47)

§ 9.11 失真卡	(48)
§ 9.12 噪声卡	(49)
§ 9.13 瞬态分析卡	(49)
§ 9.14 富利叶分析卡	(51)
§ 9.15 打印卡	(51)
§ 9.16 绘图卡	(53)
附录A 数据卡片组举例	(54)
§ A.1 电路 1	(54)
§ A.2 电路 2	(55)
§ A.3 电路 3	(56)
§ A.4 电路 4	(58)
§ A.5 电路 5	(64)
附录B 非线性受控源	(65)
§ B.1 电压控制电流源	(67)
§ B.2 电压控制电压源	(68)
§ B.3 电流控制电流源	(69)
§ B.4 电流控制电压源	(69)
附录C 双极型晶体管模型方程	(71)
§ C.1 直流模型	(71)
§ C.2 交流模型	(73)
§ C.3 超相移	(74)
§ C.4 温度效应	(75)
§ C.5 噪声模型	(76)

前 言

SPICE是一个通用电路模拟程序，可用它对电路进行非线性直流分析，非线性瞬态分析和线性交流分析。所分析的电路中，可包括电阻、电容、电感、互感、独立电压源和独立电流源、四种类型的受控源、传输线，以及四种最通用的半导体器件：二极管、双极型晶体管、结型场效应管和 MOS 场效应管

SPICE中具有自建的半导体器件模型，用户只要给出恰当的模型参数值就行。双极型晶体管采用的是GUMMEL—POON 的积分电荷控制模型。然而，如果用户不指定 GUMMEL—POON 模型参数，则模型就简化为较简单的 EBERS—MOLL模型。在这两种情况中，都包括了电荷贮存效应，欧姆电阻以及与电流有关的输出电导。二极管模型既适用于结型二极管，也适用于肖特基势垒二极管。结型场效应管采用了 SHICHMAN—HODGES 的场效应管模型。SPICE 中还具有三种 MOS 场效应管模型：MOS1是由平方律 $I-V$ 特性来描述的，MOS2是一个解析模型，而 MOS3 是一种半经验模型。MOS2和MOS3包括二级效应，例如沟道长度调制效应，次阈值导电效应，有限散射速度引起的饱和效应，小尺寸效应和电荷控制的电容等。

第一章 分析的类型

§ 1.1 直流分析

SPICE的直流分析部分用来决定电路的直流工作点，这时，电路中的电感短路而电容开路。在进行瞬态分析之前，SPICE程序自动地先进行直流分析，用以决定瞬态的初始条件，同样，在交流小信号分析之前，也先自动地进行直流分析，以便决定非线性器件的线性化小信号模型参数。如果需要，传输函数的直流小信号值（输出变量和输入源之比），输入电阻和输出电阻也将作为直流解的一部分被计算出来。也可用直流分析来产生直流转移曲线：即在用户规定的范围内直流输出变量值与某个指定的独立电压源或电流源步进变化之间的对应关系曲线。SPICE程序也能求出指定输出变量对于电路参数的直流小信号灵敏度，不同直流分析的取舍由.DC、.TF、.OP和.SENS等控制卡来规定。

如果人们想要知道非线性器件的小信号模型参数以及瞬态分析的工作点，那就必须提供.OP卡。虽然对于每种情况，直流偏置条件都是相同的。但在计算瞬态初始条件时，不打印出完整的工作点的信息。

§ 1.2 交流小信号分析

SPICE程序的交流小信号分析部分，把交流输出变量作为频率的函数计算出来。程序首先计算电路的直流工作点，并确定电路中的所有非线性器件的线性化小信号模型参数。然后，在用户指定的频率范围内对这个线性化的电路进行分析。交流小信号分析所希望的输出，通常是一个转移函数（电压增益、传输阻抗等）。如果电路只有一个交流输入，可以很方便地把该输入幅度设为1，相位设为零，这样，输出变量的值就是输出对输入的转移函数的值。

电阻和半导体器件产生的白噪声，也可用SPICE的交流小信号分析部分来模拟。等效的噪声源值可以自动地由电路的小信号工作点来确定。每个噪声源产生的噪声，都在指定的求和点相加。SPICE计算出每个频率点上总的输出噪声电平及其等效的输入噪声电平。输出和输入噪声电平，都对噪声带宽的平方根进行归一，因而单位是伏特/ $\sqrt{\text{赫芝}}$ 或安培/ $\sqrt{\text{赫芝}}$ 。输出噪声和等效的输入噪声可以打印和绘制出来，其格式与其它输出变量的格式相同。对这种分析不需要其它附加的输入数据。

若在相应的器件模型卡片中加进KF和AF参数，则可在噪声分析中，对闪烁噪声源加以模拟。

小信号模式时，电路的失真特性可以作为交流小信号分析的一部分加以模拟。这种分析是假定把一个或两个信号频率加在输入端的情况下完成的。

频率范围、噪声分析参数和失真分析参数，在.AC、

.NOISE和.DISTO控制卡中进行说明。

§ 1.3 瞬态分析

SPICE程序的瞬态分析部分，是在用户规定的时间间隔内计算瞬态输出变量，它是作为时间的函数。初始条件由直流分析部分自动确定。所有与时间无关的源（如供电电源）都置成它们的直流值。对于大讯号正弦模拟，可以对输出波形进行富利叶分析，从而得到频率域的富利叶系数。瞬态分析的时间间隔，和富利叶分析的取舍，由.TRAN和.FOURIER控制卡规定。

§ 1.4 不同温度时的电路分析

SPICE程序的所有输入数据都被认为是在27℃ (300°K)下测得的。模拟也假定是在27℃这一标称温度下进行的。只要使用.TEMP控制卡，电路就可以在其它指定温度下进行模拟。

在双极型晶体管和二极管模型公式中，温度参数在指数项中出现。另外，饱和电流本身又与温度有关。在双极型晶体管模型中，饱和电流和温度的关系由下式决定：

$$IS(T_1) = IS(T_0) \cdot ((T_1/T_0)^{XTI}) \cdot \exp(Q \cdot EG \cdot (T_1 - T_0) / (K \cdot T_1 \cdot T_0))$$

此处K是玻尔茨曼常数，Q是电子电荷，EG是禁带宽度，它是一个模型参数，XTI是饱和电流温度指数（也是一个模型参数，通常等于3）。正向和反向BETA的温度关系如下式：

$$\text{BETA}(T_1) = \text{BETA}(T_0) \cdot (T_1/T_0)^{\cdot\cdot} \text{XTB}$$

此处， T_1 和 T_0 的单位是绝对温度单位，XTB 是用户提供的模型参数。温度对 BETA 的影响是通过适当调整 BF，ISE，BR 和 ISC 的值来实现的。在结型二极管模型中，饱和电流与温度的关系由下式决定：

$$\text{IS}(T_1) = \text{IS}(T_0) \cdot ((T_1/T_0)^{\cdot\cdot} (\text{XTI}/N)) \cdot \text{EXP}(Q \cdot \text{EG} \cdot (T_1 - T_0) / (K \cdot N \cdot T_1 \cdot T_0))$$

此处，N 是发射系数，它是一个模型参数，其它的符号和上面公式中的意义相同。应当注意，对于肖特基势垒二极管，饱和电流温度指数 XTI 的值通常为 2。

对于所有的器件模型，温度出现在结电势 PHI 值中。它与温度的依赖关系由下式决定：

$$\text{PHI}(\text{TEMP}) = K \cdot \text{TEMP} / Q \cdot \text{LOG}(N_A \cdot N_D / N_I \cdot (\text{TEMP})^{\cdot\cdot 2})$$

此处，K 是玻尔茨曼常数，Q 是电子电荷， N_A 是受主杂质浓度， N_D 是施主杂质浓度， N_I 是本征浓度，EG 是禁带宽度。

对 MOS 场效应晶体管模型，温度出现在表面迁移率 UO 值中。温度关系由下式决定：

$$UO(\text{TEMP}) = UO(TNOM) / (\text{TEMP}/TNOM)^{\cdot\cdot (1.5)}$$

而温度对电阻的影响由下式模拟：

$$\text{VALUE}(\text{TEMP}) = \text{VALUE}(TNOM) \cdot (1 + \text{TC1} \cdot (\text{TEMP} - TNOM) + \text{TC2} \cdot (\text{TEMP} - TNOM)^{\cdot\cdot 2})$$

此处，TEMP 是电路的温度，TNOM 是标称温度，TC1 和 TC2 是一次项和二次项温度系数。

第二章 收敛性

直流解和瞬态解都是通过迭代过程得到的，当以下两个条件同时满足时，迭代就结束。

1) 非线性支路电流收敛到容差为 0.1 % 或 1 微微安这两者中较大的一个。

2) 节点电压收敛到容差为 0.1 % 或 1 微伏这两者中较大的一个。

虽然 SPICE 中采用的算法是非常可靠的，但在有些情况下，仍会发生求解不收敛的现象。这时，程序将打印出最后一次迭代的节点电压，并终止作业。这时打印出的电压未必正确，甚至未必接近正确的解。

直流分析时的不收敛，经常是由于规定的电路连接、元件值或模型参数值有错而造成的。另外，双稳态电路，无稳态电路，再生开关电路，具有正反馈的电路以及某些运放电路也可能在直流分析和初始瞬态分析时遇到不收敛问题。在 SPICE 中可以有以下五种方法克服这问题：

- 1) 采用 .NODESET，即节点电压设置卡。
- 2) 采用非线性器件卡上的 OFF 可选项。
- 3) 在器件卡上设定初始条件，即 IC =。
- 4) 采用 .IC，即初始条件设置卡，但在 .TRAN 卡中不再设定 UIC 可选项。
- 5) 在器件卡上设定初始条件或采用 .IC 卡设定初始条

件，同时在 .TRAN 卡中使用 UIC 可选项。

下面分别对以上各种方法加以说明，关于 .NODESET 卡，.IC 卡，.TRAN 卡的格式可参阅第九章。

1) 采用 .NODESET 卡，用户可以设定电路中某些节点或者所有节点的初始电压。在分析过程中，SPICE 将首先在这些节点上连接上等于初始设定电压值的电压源，并进行迭代过程，直至收敛。然后把这些电压源去掉，继续迭代，直至达到新的工作点。因此，.NODESET 卡中设置的节点电压值并不影响最终的直流工作点，而仅仅起到帮助收敛的作用。

2) 在采用非线性器件卡的 OFF 可选项时，直流解首先是在假定所有这些被设定的器件都是截止时得到的。在收敛后再允许这些器件中有电流流通以使与它们的端电压相符。然后，继续进行迭代直至得到最终解。因此与 .NODESET 卡相同，OFF 可选项的设定并不影响最终的直流工作点。

3) 在器件卡上设定初始条件可选项，而在 .TRAN 卡中没有设定 UIC 时，直流解的第一次迭代是以这些初始条件作为这些被设定器件的工作点开始的，在完成第一次迭代以后，这些初始条件将不再对电路节点电压有任何约束。因此，迭代的最终解仍是由电路的固有特性决定的，与其它几种方法比较，这种方法对解的收敛过程的约束力最弱。

4) 采用初始条件设置卡，但在 .TRAN 卡中不设定可选项 UIC。类似于 .NODESET 卡，用户可以设定电路中某些节点或所有节点的初始电压。SPICE 也将首先在这些节点上连接上等于初始设定电压值的电压源。但与 .NODESET 卡不同的是，由此得到的解将作为迭代过程的最终解。而在

接下去的瞬态分析过程中，人为地加上去的这些电压源将被去掉，而瞬态分析将以这些电压源去掉以前电路的解为起始条件。当 .IC 卡中设置的电压值与电路中固有的工作点有偏离时，就可能需要若干次的迭代才能最终达到电路的固有工作点。利用这种方法，用户可以精确地设定电路中某些节点的初始条件。而对于未被设定的电路节点，其工作点将与被设定的电路节点电压协调。

5) 最后一种方法，是用 .IC 卡设定初始条件，并在 .TRAN 卡中同时使用 UIC 可选项。在这种情况下，.IC 卡上设定的节点电压值将被用于计算出所有连接到这些节点上的器件的端电压值。这些电压值再加上在器件卡上设定的可选项 IC =，将成为瞬态分析中第一次迭代时的初始条件。SPICE 将不再进行寻找瞬态分析初始条件的直流分析。这个方法的优点是它完全避开了直流分析的过程。当遇到某个电路确实很难实现直流收敛时，可以用这方法设定全部节点的精确直流工作点，然后直接进行瞬态分析。

第三章 输入格式

SPICE 的输入格式是一种自由格式。卡片上的每个字段，由一个或多个空格、逗号、等号 (=)、或左括号、右括号所隔开，多余的空格忽略不计。可以在下一张卡片的第一列上打一个“+”号来表示这张卡片是上一张卡片的继续，这时，SPICE 从第二列开始继续读入。



名字段的第一个字符必须是字母 (A-Z)，而且不能和任何定义符相同。名字中，只有前八个字符是有用的。

数字段可以是整数 (如: 12, -44)，和浮点数 (如 3.14159)，浮点数还可以用整数或浮点数后面跟一个整数指数 (如 $1\text{E}-14$, $2.65\text{E}3$) 的形式表示。或者用整数或浮点数后面跟比例因子的形式表示。比例因子有 T、G、MEG、K、MIL、M、U、N、P、F 十种，它们分别代表如下的值：

$T = 1\text{E}12$ $G = 1\text{E}9$ $\text{MEG} = 1\text{E}6$ $K = 1\text{E}3$ $\text{MIL} = 25.4\text{E}-6$

$M = 1\text{E}-3$ $U = 1\text{E}-6$ $N = 1\text{E}-9$ $P = 1\text{E}-12$
 $F = 1\text{E}-15$

紧接在数字后面，但不是比例因子的字符被忽略不计，紧接在比例因子后面的字符也忽略不计。因此，10、10V、10VOLTS 和 10HZ 都表示同一个数，M、MA、MSEC 和 MMHOS 都代表同一个比例因子。应该注意： 1000 、 1000.0 、 1000HZ 、 $1\text{E}3$ 、 $1.0\text{E}3$ 、 1KHZ 和 1K 都表示同一个数。

第四章 电路描述

送入 SPICE 程序进行分析的电路，由一组元件卡片和一组控制卡片来进行描述。用元件卡片来指定电路的拓扑关系和元件值；用控制卡片来规定模型参数和运行的控制。输入的第一张卡片必须是标题卡，最后一张卡片必须是结束卡 (END 卡)。其余卡片的顺序是任意的 (当然继续卡必须

紧接在被继续的卡片后面)。

电路中的每个元件由一张元件卡来说明,该卡片应包括元件名、元件连接的电路节点和决定元件电学特性的参量值。元件名的第一个字母说明该元件的类型。SPICE对元件类型的格式将在后面给出。字符串XXXXXXX、YYYYYYY和ZZZZZZZ代表任意的字母数字串。例如一个电阻名必须以字母R开头,可以包括一至八个字符。因此,R、R1、RSE、ROUT和R3AC2ZY都是有效的电阻名。

在本说明书中括在一对尖括号‘< >’中的数据段,表示是可选的项目。所有用作标识的标点符(如括号、等号)都是必需的。有关支路电流和支路电压,SPICE一律采用常用的习惯标准(电流按电压降方向流动)。

节点必须是正数,不能为负,但不必在数字上连续。接地点必须指定为零节点。电路不能包含一个闭环的电压源和(或)电感,也不能包含一个隔断的电流源和(或)电容。电路中的每个节点都必须有到地的直流通路。除了传输线节点(对于无终端传输线)和MOS场效应管的衬底节点(它总是有两个内连接处),至少有两个元件连接到每一个节点上。