

高等学校教材

SPICE2

电路模拟程序解析

沈 铎 顾世华 胡建平 编

电子工业出版社

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由〈无线电技术与信息系统〉教材编审委员会〈电路与系统〉编审小组征稿，推荐出版。责任编辑为赵国南教授。

本教材由杭州电子工业学院沈铎副教授负责编写，南京工学院沈永朝教授担任主审。

SPICE是一个久经实践考验不断改进的电路分析程序，它有许多版本，2G5是国内广为流传的较新版本，本书针对该版本进行解析。下面，我们在一般情况下不再注明版本号。

SPICE程序中备有多种元器件模型，可以对各种电路进行分析。不论是分立元件电路还是集成电路；是模拟电路还是逻辑电路；是双极型器件的电路还是MOS器件的电路，都可进行广泛的电路性能分析，得出电路的直流工作情况（工作点）、交流直流的传输特性、瞬态特性、频谱特性以及灵敏度和噪声等分析结果。调用器件模型时，还可以设定面积因子、掺杂浓度等工艺参数。这些变通方法给集成电路的模拟分析工作带来很多方便。所以说，SPICE程序最适合于集成电路的分析和设计。

本教材的主要对象是研究生和本科高年级学生。对先修课程的要求是具有电路理论、信号及线性网络、计算机辅助

电路分析及设计等课程的基本知识。书中的章节安排体现由浅入深，由表及里的顺序。通过第一章的学习，希望读者能在查阅SPICE用户指南基础上用此程序分析电路。第二章是对程序结构的概括介绍。第三章是输入语言编译程序的剖析。第四章介绍如何自动建立电路方程组。第五章是求解电路方程组的处理过程以及某些细节问题的说明。第六章器件模型，着重介绍模型参数的含意。最后，安插了五个附录。附录A是器件插值模型和砷化镓器件模型，为改造程序扩充功能提供一参考模式。附录B和C分别归纳了各种元器件的键接表，子程序索引和注释，为阅读源程序提供方便。附录D介绍了SPICE程序在长城微型计算机上的移植情况，以期该程序得到更普及的推广应用。最后的附录E，汇集了输入文件的语句格式，以供用户编写输入文件时查考。

本书的主编为沈锋同志，负责全书的编写和组织工作。顾世华同志参加了本书的编写工作，胡建平同志在后期也参加了编写。此外，还得到杭州电子工业学院CAD研究所内不少同志的支持，如提供素材，参加讨论等。在此一并表示感谢。

由于时间仓促，编者水平有限，缺点错误在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

第一章 概述

- 一、SPICE 2的输入语言 (3)
- 二、分析类型及输出格式..... (12)
- 三、直流分析..... (13)
- 四、大信号瞬态分析..... (15)
- 五、交流分析..... (16)
- 六、输出方式..... (18)
- 七、收敛性..... (20)
- 八、SPICE3A7简介..... (23)

第二章 程序结构

- 一、SPICE 2的根程序..... (26)
- 二、主分析环..... (29)
- 三、READIN程序模块 (33)
- 四、ERRCHK程序模块..... (34)
- 五、SETUP程序模块..... (35)
- 六、DCTRAN程序模块..... (35)
- 七、子程序ITER 8 (40)
- 八、DCOP及OVTFVT程序模块..... (43)
- 九、ACAN程序模块 (44)

第三章 输入语言的编译

- 一、SPICE 2的动态存储分配方式..... (45)

二、动态存贮管理的实现·····	(51)
三、动态存贮管理器的功能·····	(57)
四、SPICE 2的数据结构·····	(60)
五、SPICE 2的编译过程·····	(64)

第四章 电路方程的自动建立

一、用改进节点法建立电路方程·····	(68)
二、输入数据的预处理——ERRCHK模块 ·····	(72)
三、稀疏矩阵结构的建立——SETUP模块·····	(76)

第五章 功能详析

一、电路方程的求解 ·····	(84)
二、LOAD子程序分析·····	(91)

第六章 SPICE2的元器件模型

一、非线性受控源·····	(101)
二、二极管模型·····	(103)
三、双极型晶体管模型·····	(106)
四、结型场效应晶体管模型·····	(114)
五、MOS场效应晶体管模型·····	(118)

附录A 器件插值模型与砷化镓MESFET模型	(125)
------------------------	-------

附录B SPICE2的链接表说明·····	(132)
-----------------------	-------

附录C 子程序索引及注释·····	(160)
-------------------	-------

附录D SPICE程序在长城微机上的移植和扩展	(177)
-------------------------	-------

附录E 用户手册·····	(184)
---------------	-------

参考文献·····	(216)
-----------	---------

第一章 概 述

SPICE是Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis的缩写,即侧重于集成电路的电路模拟程序。该程序最初是由美国加州大学伯克莱分校L.Nagel等人开发,经不断实际使用和修改,发展成SPICE2G5版本。目前又推出了SPICE3A7最新版本 本书主要介绍SPICE 2G5。下面结合通用电路模拟程序的基本情况来介绍SPICE的概貌,以便使读者有一个初步的了解。

为了便于用户使用,一般的通用电路模拟程序,应为用户提供一套能方便地描述电路结构、元器件参数和分析要求的输入语言,常称“电路描述语言”,并相应地有一个编译程序,用来翻译输入语言。用户按语法规则用电路描述语言把待分析的电路写成输入文件,送入计算机后,启动SPICE2程序,编译程序便首先对输入文件逐条进行广泛的语法、语义检查,提取出用户提供的各种信息,并对它们进行分类、加工,同时分配必要的内存空间,建立起有效的数据结构,供程序中后续模块使用。目前,输入语言主要有三类。最简单的一类是“表格式”输入语言,它直接利用算法语言(如FORTRAN或BASIC)中输入语句所要求的数据格式编写。因此用户使用很不方便,也不直观,但它不需要附加“编译程序”。SPICE2采用的是“自由格式”的输入语言,它面向用户,功能强,使用灵活,直观易记。用户仅需稍事练习,即能用于解题。但它要求模拟程序中应包含相应的

编译程序。近年来出现一种“人机交互式”输入语言，SPICE3A7就是一例，它允许用户交互地输入、修改输入文件，因此它使用直观，容易修改，但编译程序更复杂。

为了完成各种分析任务，电路模拟程序还必须具有自动建立电路方程的能力。建立电路方程的方法有拓扑矩阵法、节点法、状态变量法、混合分析法和稀疏表格法等多种。SPICE2中是采用较先进的改进节点法。

作为通用的电路模拟程序，无疑应具有较强的分析功能。SPICE2能进行直流分析（包括直流工作点和非线性器件小信号模型化计算、直流转移特性分析、直流传输曲线分析和直流灵敏度分析），交流分析（包括电路噪声和失真分析）和大信号瞬态分析（包括离散富利叶分析）。进行各种类型分析时，应选择一种或若干种既可靠又有效的数值分析方法。SPICE2在权衡各种算法的优缺点后，选择了改进的牛顿—拉夫逊方法（改进N-R法）求解非线性电路方程组。用变阶变步长的吉尔法和梯形法两种方法求解常微分方程组。考虑到电路方程组系数矩阵的高度稀疏性，求解过程始终采用了稀疏矩阵技术。

模拟程序完成每一项用户指定的分析任务后，必须按用户指定的形式输出有关分析结果。SPICE2模拟程序的输出内容丰富，输出形式不仅易读、便于保存，而且便于用户检查各种错误。

综上所述，通用电路模拟程序必须包括以下四大部分，即电路输入文件的读入和编译、电路方程自动建立、各类问题的具体数值分析及分析结果输出等。此外，作为通用程序，为了方便用户，模拟程序中应备有各种常用电路元器件

模型，用户只要根据“用户手册”给出必要的模型参数就可直接调用。为了简化电路的输入文件，程序的输入语言允许定义新的电路元件，即子电路。SPICE2模拟程序允许用户嵌套地定义子电路。

在程序设计上，通用电路模拟程序应具有有效、简洁和通用性强的特点。程序的有效性关系到程序的使用价值，应采用最有效的算法，使计算时间和占用内存最少而结果可靠。结构简洁的模拟程序有良好的可扩展性和可维护性，因此，在确保有效的前提下，应采用简单的程序结构和算法，以利于今后在元器件种类、分析功能和解题效率方面进一步扩充。程序的通用性反映在可以分析各种分立元件电路和各种集成电路。当然任何程序都不是十全十美的，读者可以通过阅读本书，扩充SPICE2的功能，使之满足本单位、本部门的特殊要求。

以上介绍了通用电路模拟程序的一般要求和SPICE2的概况。下面介绍SPICE2的输入语言。

一、SPICE2的输入语言

用户使用SPICE2解题时，首先得为解题准备输入数据。SPICE2为用户提供了灵活有效而且易学的输入语言，供用户描述电路，表达分析意图和指定输出内容。为说明如何应用输入语言编制SPICE2的输入文件，我们在此先用两个例子给以说明。

例1：分析图1.1所示的简单RTE

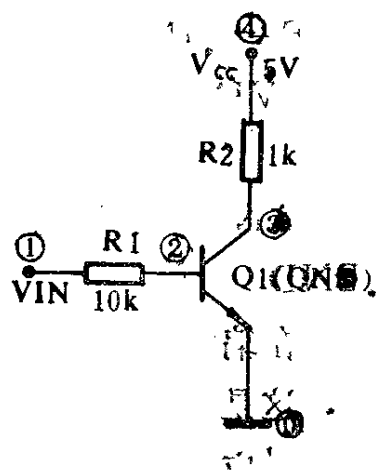


图1.1 简单RTL反相器电路

反相器。

根据电路图和分析意图，再按照输入语言的语法规则，即可编写本例的电路输入文件如下：（右边的中文说明是另外加加的）

Simple RTL In Verter	标题语句；
Vcc 4 0 5V	描述直流电源Vcc；
VIN 1 0 PULSE(0 5	指定脉冲输入源；
+ 2NS 2NS 2NS 30NS)	加号“+”在顶格为续行；
R1 1 2 10k	描述电阻R1；
Q1 3 2 0 QND	描述晶体管Q1；
R2 3 4 1k	描述电阻R2；
.PLOT DC V(3)	绘图语句；
.PLOT TRAN V(3)	绘图语句；
.PRINT TRAN V(3)	打印语句；
MODEL QND NPN(BF=20	描述晶体管模型
+ RB=70 RC=40 CJS=2pF TR=10NS	QND的模型参数；
+ TF=0.1NS CJC=2pF CJE=0.9pF)	
.DC VIN 0 5 0.1	指定要分析直流传输曲线；
.TRAN 1NS 100NS	指定分析瞬态特性；
.END	电路输入文件结束。

在编写上述电路输入文件时，首先应对电路中的节点编号，这是描述电路结构必不可少的标记。输入语言的语法规则：对应于“地”的节点应设为0，其它节点号可以任意编序，序号可以不连续。上述文件中，描述电压源Vcc的语句标

明V_{cc}跨接在节点4与“地”之间,正端接节点4而负端接地。电阻R1的描述语句标明该电阻跨接在节点1与节点2之间,阻值为10kΩ。语句“.PLOT DC V(3)”表示要求绘出节点3的电压随输入电压变化的曲线,本例中输入电压由“.DC VIN 0 5 0.1”语句指定为VIN,其变化的范围及增量也由该语句指定。它表明输入电压VIN应由0伏开始,每增加0.1伏计算一次,一直算到VIN变化到5伏为止。要求绘出瞬态特性的语句是.PLOT TRAN V(3)和
VIN 1 0 PULSE(0 5 2NS 2NS 2NS 30NS)
.TRAN 1NS 100NS

来描述的。第一句表示要求绘出节点3的瞬态特性;第二句表示进行瞬态分析时加在电源VIN两端的脉冲讯号;而第三句则表明需要绘出时间在0NS至100NS(10⁻⁷秒)范围内的瞬态特性,打印时间步长为1NS(10⁻⁹秒)。

给上述电路文件取一个文件名后调用计算机的文本编辑程序送入计算机。再调用电路模拟程序SPICE2,运行后便得如图1.2和图1.3所示的输出结果。

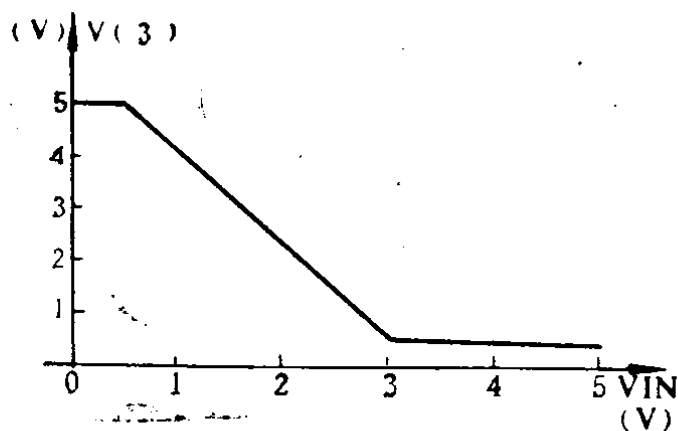


图1.2 RTL反相器的直流传输曲线

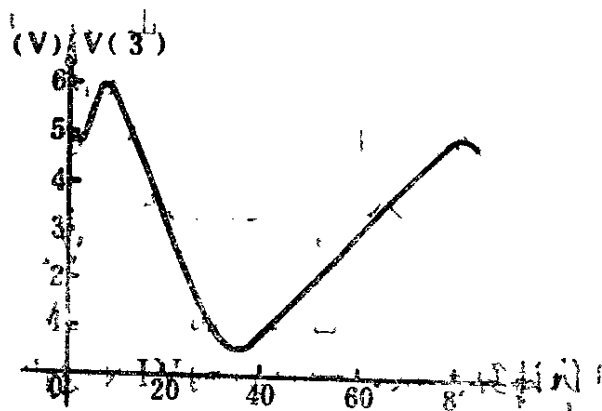


图1.3 RTL反相器的瞬态响应

例二、试分析图1.4的电路，求出：

1. 当电源电压 V_{cc} 从小到大变化时，输出电压 $V(14)$ 和流过电源的电流的变化规律。
2. 当 V_{cc} 从大变小时， $V(14)$ 和流过电源的电流的变化规律。

为了使读得的电源电流为正值，可在电路中串联一零值电压源 V_{cs} ，其极性如图1.4所示。以下各语句是电路输入文件中的内容。标号01)~38)是为了便于解释而加的，实际上在输入文件中不允许有语句标号出现。语句段01)~19)是一完整的电路输入源程序段，语句段20)~38)也是如此。前者模拟电路的情况1.，而后者则模拟情况2.。计算结果已绘成曲线，见图1.5。

例二的电路输入文件：

```

01) Example_NO.1
02) Q14 11 1 12 QN OFF
03) Q15 13 11 12 QN
04) Q16 11 15 0 QN

```

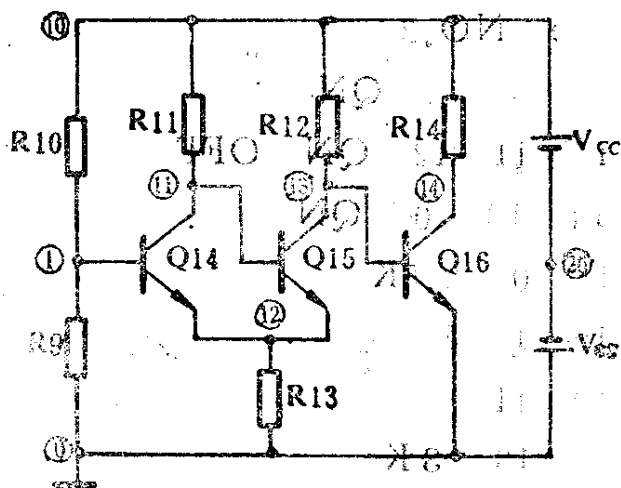


图1.4 例二中分析的电路

- 05) R9 1 0 2.5K
- 06) R10 10 1 3K
- 07) R11 10 11 3K
- 08) R12 11 13 3K
- 09) R13 12 0 200
- 10) R14 10 14 3K
- 11) VCC 10 20
- 12) VCS 0 20 0V
- 13) DC VCC 1.8 0.01
- 14) MODEL QN NPN BF=30 IS=1E-14
BR=2 RB=100
- 15) OPTIONS NOPAGL
- 16) WIDTH OUT=3
- 17) PRINT DC V (11) I (VCS)
- 18) PLOT DC V (14) I (VCS)

```

19) .END
20) Example NO.2
21) Q14 11 1 12 QN
22) Q15 13 11 12 QN OFF
23) Q16 14 13 0 QN
24) R9 1 0 2.5K
25) R10 10 1 3K
26) R11 10 11 3K
27) R12 10 13 3K
28) R13 12 0 200
29) R14 10 14 3K
30) Vcc 10 0
31) Vcs 0 20 0V
32) .DC Vcc 2.0 1.3 -0.01
33) .MODEL QN NPN BF=30 IS=IE-14 BF
    + = 2 RB=100
34) .OPTIONS NOPAGE
35) .WIDTH OUT=80
36) .PRINT DC V(14) I(VCS)
37) .PLOT DC V(14) I(VCS)
38) .END

```

上述输入文件的执行结果，得到两种输出。图1.5仅绘出.PLOT卡的结果。指定.PRINT卡的结果未列出。

由图1.5可见，直流传输曲线存在着回差，这是电路中存在的正反馈引起的。分析这种有正反馈的电路时，可能会出现电路不收敛现象。本例在模拟情况1.时使用了OFF可选项，

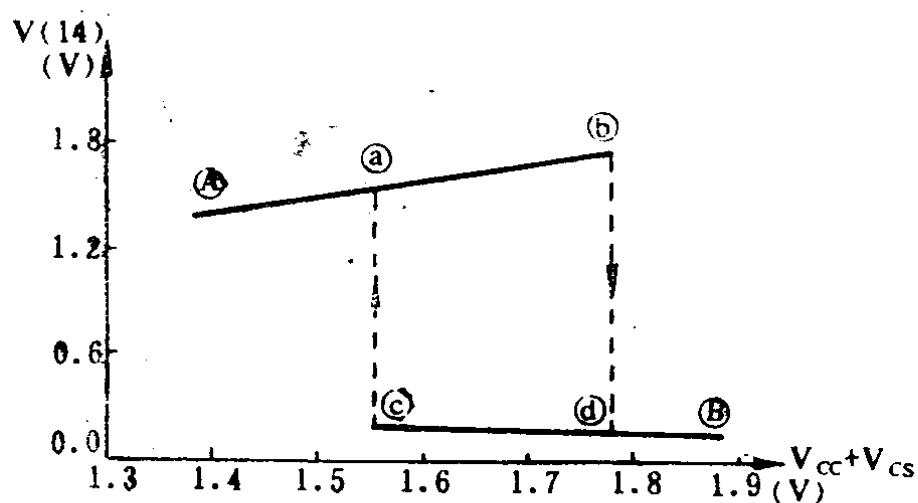


图1.5 例二的计算结果

见02)句,即让电路先在强迫Q14截止的情况下达到平衡后,再解除这种强迫性让电路自由平衡。情况2.也采用了类似的措施以帮助求解收敛。在后面将对直流分析和初始瞬态分析时的收敛问题作详细的讨论。

从上述两例可以看到,SPICE2模拟程序的电路输入文件的书写格式是:第一条语句必须是标题行,它可以是任意的字母数字串,也可以是一空行;最后一条语句必须是.END语句,表示一个电路的描述到此结束;其它语句有描述元器件的元件卡、模型卡、子电路定义卡及子电路调用语句(“卡”与“语句”同义),有指定分析项目和输出分析结果的各控制卡,最后还有用于说明的注释卡等九种;每卡(语句)占一行,一行写不完时可以另起一行接着写,但必须在接着写之前在第二行的第一列处打上加号“+”,表示本行是上面一行的续行,若还是写不完时还可以续行...;各语句的次序几乎是任意的;卡片上的每个字段(Field),分名字段和数字段两种,由一个或多个分隔符与其它字段分开,共有五种分隔符,它们是空格、逗号“,”、等于号

“=”、左括号“(“和右括号”)”，注意制表符“Tab”不是分隔符，所以在编辑电路输入文件时不要用制表符，否则可能出现比较难查的错误。名字段的第一个字符必须是字母(A~Z)，只有名字的前八个字符有区别作用；数字段可以是整型数或实型数，如14或-1.5E4。实型数还可以紧跟一个比例因子，有以下几个比例因子：

$$\begin{array}{lll} T = 10^{12} & G = 10^9 & MEG = 10^6 \\ K = 10^3 & MIL = 25.4 \times 10^{-6} & M = 10^{-3} \\ U = 10^{-6} & N = 10^{-9} & P = 10^{-12} \\ F = 10^{-15} \end{array}$$

如数字段36.4G表示 3.64×10^{10} 。另外也允许其它非比例因子的字母跟在数字段后面以照顾书写习惯，如10、10V和10VOLT都表示10。

SPICE2的电路描述方法是：用元器件说明语句(元器件卡)来说明电路的拓扑关系和所有元器件的参数。每个电路元、器件都用一元件卡说明。每个半导体器件除了用器件卡说明外，还应为其指定一个器件模型，而每个被指定的器件模型必须用模型卡加以说明其模型类型并指定必要的模型参数。每个器件模型应有一模型名字以便被半导体器件的器件卡引用。多个同类半导体器件可引用同一器件模型。电路中结构相同的单元可应用于电路定义卡和子电路引用卡说明有关电路。这样，可避免相同电路的重复描述，同时也可使书写的文件清晰而不易出错。说明分析、输出内容及运行SPICE2的条件时，用控制卡。控制卡的第一个字符必须是“.”号。

必须指出，电路节点号应为正整数，“地”点一定是节

点0，电路不可以包含一个电压源和/或电感组成的闭环，也不能包含一个隔断的电流源和/或电容。电路中每个元件都必须有到地的直流通路。

通过对以上两例的分析，可见在输入文件中，对电路中每个元器件的描述(子电路可以看作是一个宏元件)就完整地定义了一个电路。SPICE2所能模拟的电路元器件很多，可归纳如下：

A. 线性元器件

- | | |
|-----------|-----------|
| 1. 电阻 | RXXXXXXXX |
| 2. 电容 | CXXXXXXXX |
| 3. 电感 | LXXXXXXXX |
| 4. 互感 | KXXXXXXXX |
| 5. 独立电压源 | VXXXXXXXX |
| 6. 独立电流源 | IXXXXXXXX |
| 7. 线性受控源 | |
| (1) 压控电流源 | GXXXXXXXX |
| (2) 压控电压源 | EXXXXXXXX |
| (3) 流控电流源 | XXXXXXXXX |
| (4) 流控电压源 | HXXXXXXXX |

B. 非线性元器件

- | | |
|-----------|-----------|
| 1. 非线性受控源 | |
| (1) 压控电流源 | GXXXXXXXX |
| (2) 压控电压源 | EXXXXXXXX |
| (3) 流控电流源 | FXXXXXXXX |
| (4) 流控电压源 | HXXXXXXXX |
| 2. 晶体二极管 | DXXXXXXXX |
| 3. 晶体三极管 | QXXXXXXXX |
| 4. 结型场效应管 | JXXXXXXXX |