



普通高等教育“十二五”规划教材



微电子与集成电路设计系列规划教材

模拟集成电路EDA 技术与设计 ——仿真与版图实例

◎ 陈莹梅 胡正飞 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

含光盘1张

014032426

TN431.1-43
07

普通高等教育“十二五”规划教材
微电子与集成电路设计系列规划教材

模拟集成电路 EDA 技术与设计 ——仿真与版图实例

陈莹梅 胡正飞 编著



P
TN431.1-X3

07

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING



北航

C1720665

35458010

内 容 简 介

本书是微电子与集成电路设计系列规划教材之一, 全书遵循模拟集成电路全定制设计流程, 介绍模拟集成电路设计过程中的一系列相关软件的应用与设计实例。全书共8章, 主要内容包括: SPICE数模混合仿真程序介绍、HSPICE模拟集成电路仿真实例、PSPICE模拟集成电路仿真实例、ADS射频集成电路仿真实例、Spectre模拟集成电路仿真工具、Spectre模拟集成电路仿真实例、版图设计和Cadence模拟集成电路设计实例。本书提供配套光盘, 光盘内容包括Cadence公司提供的PSPICE学生版软件、HSPICE和PSPICE工具的电路实例、ADS工具的电路实例、Spectre前仿真实例、版图设计及后仿真与版图验证实例等。

本书可作为高等学校电子信息、微电子等专业高年级本科生和研究生的教材, 也可供集成电路设计工程师学习参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路 EDA 技术与设计: 仿真与版图实例 / 陈莹梅, 胡正飞编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.3
微电子与集成电路设计系列规划教材

ISBN 978-7-121-22426-3

I. ①模… II. ①陈… ②胡… III. ①模拟集成电路—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 017532 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 文字编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.25 字数: 339 千字

印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 39.90 元 (含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

电子设计自动化 (EDA) 是利用计算机作为工作平台进行自动化设计的一项技术。EDA 相对于传统的计算机辅助设计 (CAD) 工具, 其提供的电路依靠标准的程序化模型或模型库的支持, 图形的背后具有深层次的物理含义。20 世纪 90 年代, EDA 技术开始渗透到电子设计和集成电路 (IC) 设计各领域, 当前, 深亚微米、纳米工艺和 SoC 设计对集成电路 EDA 技术提出更高要求。在集成电路 EDA 技术中, 对于数字系统设计主要采用分层次设计流程, 采用高级硬件描述语言描述硬件结构、参数和功能, 具有系统级仿真和综合能力; 而模拟集成电路设计基本上是全定制设计, 因为其性能指标复杂, 拓扑结构变化无穷, 电路性能对器件尺寸、工艺及系统级的串扰非常敏感。设计者需要在设计过程中综合考虑各项性能指标, 深入考虑加工工艺、工作环境和各种因素, 合理选择电路拓扑结构, 反复优化器件尺寸, 精心设计物理版图。

本书按照模拟集成电路全定制设计流程, 介绍模拟集成电路设计过程中一系列相关软件的应用, 并基于各种软件平台, 选用一些典型的模拟集成电路, 进行设计示范。具体内容按照 SPICE 仿真程序介绍与仿真实例、ADS 射频集成电路仿真工具与实例、Cadence 平台 Spectre 集成电路仿真、Virtuoso 版图设计、Calibre 和 Assura 版图验证与后仿真的顺序展开。通过本书的学习, 使读者能够掌握全定制模拟集成电路设计的基本方法及其相关系列工具软件的应用技术, 提升在模拟集成电路设计方面的实践能力。

本书选用的模拟集成电路典型实例有: 缓冲驱动器、跨导放大器、低噪声放大器、混频器、共源放大器、运算放大器、压控振荡器和限幅放大器等, 通过设计实例, 介绍模拟 IC 的直流分析、交流分析、瞬态分析、失调分析、压摆率分析和相位噪声分析等各种仿真方法。本书还通过设计实例介绍了射频集成电路的 S 参数仿真和线性度仿真的方法, 最后对模拟集成电路的版图设计与版图验证进行了介绍。

为增强教材的实用性, 方便读者对本书的仿真实例进行练习, 本书配有一张光盘, 内容包括 Cadence 公司提供的 PSPICE 学生版软件、第 2 章 HSPICE 和第 3 章 PSPICE 工具的电路实例、第 4 章 ADS 工具的电路实例、第 5 章 Spectre 集成电路仿真工具、第 6 章 Spectre 前仿真实例、第 8 章版图设计、后仿真与版图验证实例。

本书的第 1~3 章和第 7~8 章由东南大学陈莹梅主持编写, 第 4~6 章由南京邮电大学胡正飞主持编写, Cadence 公司中国区 AE 总监陈春章博士对 PSPICE 软件提供了大力支持, 东南大学射频与光电集成电路研究所的研究生付佳伟、王津飞、张俊、李艳伟、韩景鹏、何小飞、唐攀和南京邮电大学研究生张磊、王庆林、张莉、黄敏娣为软件实例做了部分前期准备工作。电子工业出版社的王羽佳和王晓庆编辑在组织出版和编辑工作中给予了很大的支持。在此对以上各方人士表示衷心的感谢!

本书中介绍的 Cadence 等软件均为大型 EDA 软件, 具有全面而强大的功能, 每款软件的教程均可独立成书, 由于篇幅所限, 本书只能对与设计实例相关的部分进行简要介绍, 书中的错误在所难免, 恳请读者对本书进行批评和指正。

作 者

2014 年 3 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



北航

C1720665

目 录

第 1 章 SPICE 数模混合仿真程序介绍··· 1	
1.1 SPICE 的语句格式····· 1	
1.2 电路特性分析语句····· 9	
1.3 电路特性控制语句····· 12	
思考题····· 14	
本章参考文献····· 14	
第 2 章 HSPICE 模拟集成电路	
仿真实例····· 15	
2.1 HSPICE 简介····· 15	
2.2 MOS 管特性分析····· 16	
2.3 HSPICE 缓冲驱动器设计····· 18	
2.3.1 直流传输特性分析····· 19	
2.3.2 时序特性分析····· 20	
2.3.3 驱动能力分析····· 21	
2.4 HSPICE 跨导放大器设计····· 22	
2.4.1 直流工作点分析····· 23	
2.4.2 直流扫描分析····· 24	
2.4.3 交流扫描分析····· 26	
2.4.4 噪声分析····· 28	
2.4.5 失调分析····· 28	
2.4.6 压摆率分析····· 30	
2.4.7 模型 corner 仿真····· 31	
2.4.8 温度分析····· 33	
思考题····· 35	
本章参考文献····· 35	
第 3 章 PSPICE 模拟集成电路	
仿真实例····· 36	
3.1 PSPICE 简介····· 36	
3.2 PSPICE 缓冲驱动器设计····· 38	
3.2.1 直流传输特性分析····· 38	
3.2.2 多级反相器直流传输 特性分析····· 40	
3.2.3 时序特性分析····· 41	
3.2.4 驱动能力分析····· 41	
3.3 PSPICE 跨导放大器设计····· 42	
3.3.1 直流工作点分析····· 42	
3.3.2 直流扫描分析····· 43	
3.3.3 交流扫描分析····· 44	
3.3.4 噪声分析····· 46	
3.3.5 压摆率分析····· 47	
3.3.6 温度分析····· 47	
思考题····· 48	
本章参考文献····· 48	
第 4 章 ADS 射频集成电路仿真实例··· 49	
4.1 ADS 简介····· 49	
4.2 ADS 基本使用····· 50	
4.3 低噪声放大器设计····· 54	
4.4 混频器设计····· 72	
思考题····· 80	
本章参考文献····· 80	
第 5 章 Spectre 模拟集成电路	
仿真工具····· 81	
5.1 Cadence 设计环境····· 81	
5.2 Spectre 原理图编辑····· 81	
5.3 Spectre 原理图仿真····· 85	
5.4 仿真结果显示与处理····· 94	
5.5 电路优化····· 105	
5.6 工艺角分析····· 111	
思考题····· 120	
本章参考文献····· 120	
第 6 章 Spectre 模拟集成电路	
仿真实例····· 121	
6.1 MOS 管特性分析····· 121	
6.2 共源放大器仿真····· 126	

6.2.1	直流特性仿真	126
6.2.2	交流特性仿真	128
6.2.3	瞬态特性仿真	129
6.3	两级运算放大器仿真	130
6.3.1	电路设计与指标分析	130
6.3.2	直流扫描分析	131
6.3.3	失调电压分析	136
6.3.4	输入共模范围仿真	138
6.3.5	输出动态范围仿真	139
6.3.6	频率特性仿真	140
6.3.7	共模抑制比仿真	142
6.3.8	电源抑制比仿真	144
6.3.9	瞬态参数仿真	145
	思考题	148
	本章参考文献	148
第 7 章	版图设计	149
7.1	版图几何设计规则	149
7.2	Virtuoso 版图编辑与验证	151
7.3	CMOS 反相器版图设计	155
7.4	差分放大器版图设计	157
7.5	芯片的版图布局	160
7.6	版图设计注意事项	161

	思考题	163
	本章参考文献	164
第 8 章	Cadence 模拟集成电路设计实例	165
8.1	压控振荡器设计	165
8.1.1	压控振荡器前仿真	165
8.1.2	压控振荡器版图设计	174
8.1.3	压控振荡器 Calibre 工具版图验证	176
8.1.4	压控振荡器 Calibre 工具后仿真	180
8.2	限幅放大器设计	181
8.2.1	限幅放大器电路设计	181
8.2.2	限幅放大器前仿真	185
8.2.3	限幅放大器版图设计	192
8.2.4	限幅放大器 Assura 工具版图验证	195
8.2.5	限幅放大器 Assura 工具后仿真	200
	思考题	205
	本章参考文献	205

第 1 章 SPICE 数模混合仿真程序介绍

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 最早由美国加州大学伯克利分校 (UCB) 开发成功应用在电路设计领域, 在 1988 年被定为美国国家标准。由于源码开放, 出现了许多类 SPICE 模拟软件, 这些产品大都源自伯克利 SPICE, 如 HSPICE、Spectre、PSPICE、SmartSpice 等, 所以基本语法相同。目前, 几乎所有的电路仿真应用软件都是以 SPICE 为内核的, 或者是在 SPICE 基础上的扩充, SPICE 已经成为事实上的工业标准, SPICE 已经成为 EDA 的语言基础。

SPICE 将计算机技术、数值分析方法和晶体管建模很好地结合在一起, 可以验证电路设计和预测电路的行为。设计从给定的技术指标出发, 首先根据掌握的系统和电路知识, 确定电路的初始方案, 确定电路元件参数, 然后生成 SPICE 电路描述和分析指令文件。SPICE 有语句和图表两种 SPICE 电路描述文件形式。语句描述形式是最原始、最基本、互通性最好的形式, 所以本章重点介绍这种文件形式的语句格式。图表描述形式具有直观易懂的优点, 但不同的商用软件有不同的操作方式, 这将在语句描述形式之后简单进行概括性介绍。

1.1 SPICE 的语句格式

SPICE 的集成电路设计流程如图 1.1 所示, 首先根据设计指标要求确定电路初始方案, 根据指标计算出电路元件初始方案; 然后画出电路图, 对元件命名, 对节点编号, 编写输入文件; 以语句描述形式生成 SPICE 电路描述和分析指令文件。接下来调用 SPICE 模拟程序进行电路性能分析, 打印输出结果。通过检查输出数据和观察图形, 对结果是否满足技术指标做出判断。不满足时, 或改变元件参数, 或从根本上改变电路结构, 进行下一轮分析过程。如此反复, 直到电路性能满足技术指标, 才给出最终电路设计结果。不论采用何种形式, 输入的数据都必须符合 SPICE 程序规定的格式。

作为一个用途广泛的模拟软件, SPICE 可以处理电子电路的绝大多数元件 (电阻、电容、电感、互感、传输线、各种受控源和独立源) 及 4 种类型的半导体器件 (二极管 D、双极型三极管 BJT、结型场效应管 JFET 和 MOSFET)。它们的电路拓扑和参数信息必须按照规定的格式输入到 SPICE 的执行程序中。

SPICE 中电路节点的描述有如下规定:

- 使用数字或字符串来表示 (如 data1、n5、5);
- 0 节点总是地 (Gnd);
- 地可以用 0、Gnd、!Gnd 表示;
- 以数字开头的节点中的字符会被忽略, 如 5A=5B=5;
- 所有节点指的都是局部节点, 而不是全局节点;
- 全局节点可以使用 Global 语句描述。

电阻、电容、电感、互感、理想传输线、受控源和独立源等基本元件的输入格式如下。

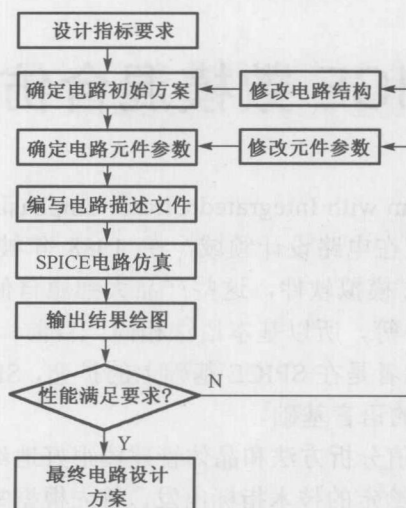


图 1.1 SPICE 的集成电路设计流程

1. 电阻 R

格式:

RXXX N1 N2 VALUE <mname> <M=val> <L=val> <W=val> <C=val> <TC=TC1,<TC2>>

例句:

R1 2 10 10k

语句中 N1 和 N2 是电阻在电路中连接的两个节点。VALUE 是电阻值，单位为 Ω ，可正可负，但不能为 0。可选给出的 TC1 和 TC2 是温度系数。作为温度函数给出的电阻值为：

$VALUE(TEMP) = VALUE(TNOM) * (1 - TC1 * (TEMP - TNOM) - TC2 * (TEMP - TNOM)^2)$

2. 电容 C 和电感 L

格式:

CXXXXXXXX N+N-VALUE <IC=INCOND>

LXXXXXXXX N+N-VALUE <IC=INCOND>

例句:

CBYPASS 10 0 1UF

COSCI 2 3 100PF IC=3V

LTUNE 35 5 1UH

LSHUNT 20 10 1N IC=1MA

语句中，N+和N-分别是元件在电路中连接的正负节点。VALUE 是单位为 F 的电容值，或单位为 H 的电感值。

对于电容，可选的初始条件是初始 ($t=0$) 的电容电压，单位为 V。对于电感，可选的初始条件是初始 ($t=0$) 的电感电流，单位为 A，从 N+流向 N-。注意，给出的初始条件只有在瞬态分析 TRAN 语句中给出 UIC 定义时才是有效的。

非线性电容 C 和电感 L 定义格式如下:

```
CXXXXXXX N+N- POLY C0 C1 C2 ... <IC=INCOND>
LXXXXXXX N+N- POLY L0 L1 L2 ... <IC=INCOND>
```

C0, C1, C2, ... (L0, L1, L2, ...) 为元件多项式表达的系数。电容表达为两端电压 V 的函数, 电感表达为通过电流 I 的函数, 即:

```
VALUE= C0+C1*V+C2*V**2+...
VALUE= L0+L1*I+L2*I**2+...
```

3. 互感 M

格式:

```
KXXXXXXX LYYYYYYY LZZZZZZZ VALUE
```

例句:

```
K43 L3 L4 0.99
KOUT LPRI LSEC 0.85
```

语句中 LYYYYYYY 和 LZZZZZZZ 是两个耦合电感的名称。VALUE 是互感系数 K , 它必须大于 0, 小于等于 1。应用 “.” 约定, “.” 放在每个电感的 N+ 节点上。

4. 理想传输线

格式:

```
TXXXXXXX N1 N2 N3 N4 Z0=VALUE <TD=VALUE> <F=FREQ <NL=NRMLEN>> + <IC=V1,
I1, V2, I2>
```

例句:

```
TIN 1 0 2 0 Z0=50 TD=100PS
```

N1 和 N2 是端口 1 的节点, N3 和 N4 是端口 2 的节点。Z0 是特征阻抗。传输线长度可从两种输入形式中任选一种: ①传输线延迟 TD, 例句中的 TD=100PS; ②频率 F 加归一化电长度 NL。如果给出了 F, 省略了 NL, 程序认定 NL=0.25, 即给定频率对应波长的 1/4。

可选的初始条件由两个端口的电压和电流组成。同样, 这些初始条件只有在瞬态分析 TRAN 语句中给出 UIC 定义时才是有效的。

执行电路分析时, 应当保证瞬态步长不超过最小传输线延迟的一半, 太短的传输线会导致难以预料的机器运行时间。

5. 二极管

格式:

```
Dxxxx N+N- 模型名 <面积因子> <OFF> <IC=端电压初始值>
```

例句:

```
D5 a b DMOD 3.0 IC=0.2
```

二极管 D5 接在节点 a 与 b 之间, 使用 DMOD 模型; 面积因子为 3.0, 表示 D5 的面积为模型 DMOD 所定义的器件面积的 3 倍; D5 的端电压初始条件取 0.2V。

6. 双极型晶体管

格式:

Qxxxx nc nb ne <ns> 模型名 <面积因子> <OFF> <IC=Vbe 初值, Vce 初值>

nc、nb、ne、ns 分别为集电极、基极、发射极和衬底的端点, 若衬底端点不给出, 则认为它是接地的。

例句:

Q10 a b c QMOD3 IC=0.6, 5.0

7. 结型场效应管

格式:

Jxxxx nd ng ns 模型名 <面积因子> <OFF> <IC=端电压初始值>

nd、ng、ns 分别为漏极、栅极、源极的端点。

例句:

J1 a b c JMOD

8. MOS 场效应管

格式:

Mxxxx nd ng ns nb 模型名 <W=w> <L=l> <AD=ad> <AS=as> <PD=pd> <PS=ps>
<NRD=nrd> <NRS=nrs> <OFF> <IC=Vds 初值, Vgs 初值, Vbs 初值>

例句:

M1 a b c VDD PMOS L=0.2u W=0.42u

nd、ng、ns 和 nb 分别指漏极、栅极、源极和衬底的端点。w 和 l 分别为沟道的宽度和长度, ad 和 as 分别为漏和源的扩散区面积, pd 和 ps 分别为漏区和源区周长。nrd 和 nrs 表示漏源扩散区等效方块数目。一般情况下, 进行普通的行为仿真实验, 只需要确定 MOS 管的长宽比即可。

MOSFET 源漏两端的电容如图 1.2 所示。

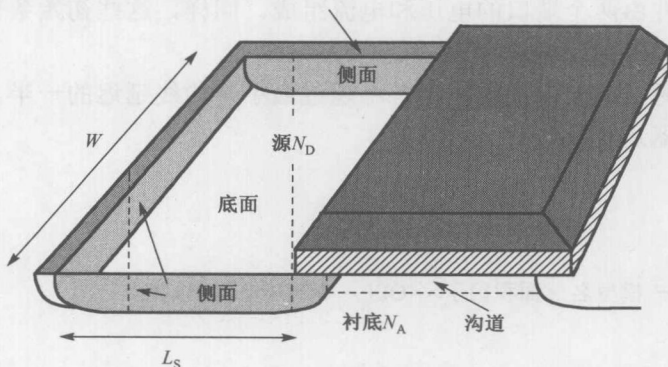


图 1.2 MOSFET 源漏两端的电容

由图 1.2 可以得出:

$$C_{\text{diff}} = C_{\text{bottom}} + C_{\text{sw}} = C_j \times \text{AREA} + C_{\text{jsw}} \times \text{PERIMETER} \\ = C_j L_S W + C_{\text{jsw}} (2L_S + W)$$

式中, C_j 为单位面积的面电容, C_{jsw} 为单位长度的长度电容。

9. 线性电压控制电流/电压源

线性电压控制电流源 G 和线性电压控制电压源 E 有类似的语句格式, 分别为:

```
GXXXXXXX N+N-NC+NC-VALUE
EXXXXXXX N+N-NC+NC-VALUE
```

例句:

```
G1 2 0 4 0 0.1MS
E1 2 3 10 0 2.0
```

N+和 N-是受控源的正负节点, NC+和 NC-是控制端口的正负节点。G 的 VALUE 是单位为 S 的跨导值, E 的 VALUE 是无量纲的电压增益。

10. 线性电流控制电流/电压源

线性电流控制电流源 F 和线性电流控制电压源 H 有类似的语句格式, 分别为:

```
FXXXXXXX N+N-VNAM VALUE
HXXXXXXX N+N-VNAM VALUE
```

例句:

```
F1 10 5 VSENSOR 5
HX 8 15 VZ 0.5K
```

N+和 N-分别是受控源的正负节点, 电流从 N+流向 N-。VNAM 是控制电流支路电压源名称, 电流方向从正节点通过电压源流向负节点。F 的 VALUE 是无量纲的电流增益, H 的 VALUE 是单位为 Ω 的跨阻值。

11. 独立源

独立电压源 V 和电流源 I 的格式分别为:

```
VXXXXXXX N+N- <(DC) DC/TRAN VALUE> <AC <ACMAG <ACPHASE>>>
IXXXXXXX N+N- <(DC) DC/TRAN VALUE> <AC <ACMAG <ACPHASE>>>
```

例句:

```
VCC 100 0 DC 5V
VIN 10 2 0.5 AC 0.5 SIN(0 1 1MEG)
ISRC 20 21 AC 0.3 45.0 SFFM(0 1 10G 5 1MEG)
VMEAS 12 13 DC 0
```

N+和 N-分别是电源的正负节点。注意, 电压源不一定要接地。正电流方向规定从正节点通过电源流向负节点。正值的电流源是强制电流从正节点流出, 从负节点流入。电压源除用做激励外, 在 SPICE 中可以用做电流表。此时, 例句 4 表示 0 值电压源 VMEAS 插入到断开节点为 12 和 13 的支路中, 用于测试该支路的电流, 由于电压源内阻为 0, 相当于短路线, 故对电路不产生影响。

DC/TRAN 是电源的直流值和瞬态值。如果两值均为 0，则可省略。如果电源值不变，其 DC 标识符则可可有可无。

ACMAG 和 ACPHASE 分别是 AC 信号的幅度与相位，它们用于电路的 AC 分析。如果在 AC 标识符后省略 ACMAG，它的值就假定为 1；如果省略 ACPHASE，它的值就假定为 0。如果该电源不是一个交流小信号输入，则 AC、ACMAG 和 ACPHASE 均省略。

任何一个电源均可设定为时变信号源，用于瞬态分析。此时，时间等于 0 时的值就用于 DC 分析。有 5 种时变电源，它们的描述在电源标识符的正负节点后给出，分别描述如下。

(1) PULSE (脉冲)

格式：

V/IXXXXX N+N-PULSE (V1 V2 TD TR TF TW PER)

其参数、默认值和单位如表 1.1 所示。

表 1.1 脉冲参数、默认值和单位

参 数	意 义	默 认 值	单 位
V1	初始值		V/A
V2	脉冲值		V/A
TD	延迟时间	0.0	s
TR	上升时间	TSTEP	s
TF	下降时间	TSTEP	s
TW	脉冲宽度	TSTOP	s
PER	周期	TSTOP	s

TSTEP 是打印时间步长，TSTOP 是分析终止时间，它们都在 TRAN 语句中给出。

例句：

VIN 3 0 PULSE (1 3.3 0.1NS 0.2NS 0.2NS 0.3NS 1NS)

其波形如图 1.3 所示。

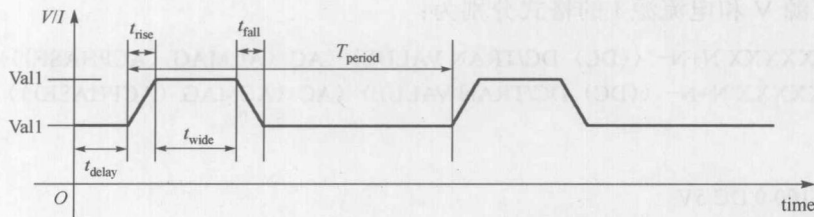


图 1.3 PULSE 信号的波形

(2) SIN (正弦波)

格式：

V/IXXXXX N+N-SIN (VO VA FREQ TD THETA)

例句：

VIN 4 0 SIN (0 1 10G 1PS 0)

其参数、默认值和单位如表 1.2 所示。

表 1.2 正弦波参数、默认值和单位

参 数	意 义	默 认 值	单 位
VO	偏移值		V/A
VA	幅值		V/A
FREQ	频率	1/TSTOP	Hz
TD	延迟时间	0.0	s
THETA	衰减系数	0.0	1/s

例如，一个正弦脉冲波形描述如表 1.3 所示。

表 1.3 正弦脉冲波形描述

时 间	0~TD	TD~TSTOP
值	VO	$VO=VA*\exp(-(t-TD)*THETA)*\sin(2\pi*FREQ*(t-TD))$

(3) EXP (指数波)

格式:

V/IXXXXX N+N-EXP (V1 V2 TD1 TAU1 TD2 TAU2)

例句:

VIN 5 0 EXP (4 1 2NS 30NS 60NS 40NS)

其参数、默认值和单位如表 1.4 所示。

表 1.4 指数波参数、默认值和单位

参 数	意 义	默 认 值	单 位
V1	初始值		V/A
V2	脉冲值		V/A
TD1	上升延迟时间	0.0	s
TAU1	上升延迟常数	TSTEP	s
TD2	下降延迟时间	0.0	s
TAU2	下降延迟常数	TSTEP	s

例如，一个指数波形时间描述如表 1.5 所示。

表 1.5 指数波形时间描述

时 间	0~TD1	TD1~TD2	TD2~TSTOP
值	V1	$V1=(V2-V1)*(1-\exp(-(t-TD1)/TAU1))$	$V1=(V2-V1)*(1-\exp(-(t-TD1)/TAU1))=$ $(V1-V2)*(1-\exp(-(t-TD2)/TAU2))$

(4) PWL (分段线性)

格式:

V/IXXXXX N+N-PWL (T1 V1 (T2 V2 T3 V3 T4 V4...))

例句:

ICL 6 0 PWL (0 0 100P 0 300P 10M 600P 10M 800P 0 1.1N 0 1.3N 10M)

语句中的 PWL 之后每一对 (T_i, V_i) 值表示在 $t=T_i$ 时的一个电压或电流值。介于 T_i 和 T_{i+1} 之间的值通过线性插值求出。

(5) SFFM (单频调频波)

格式:

V/IXXXXX N+N-SFFM (VO VA FC MDI FS)

例句:

VIN 8 0 SFFM (0 1M 20MEG 5 1M)

其参数、默认值和单位如表 1.6 所示。

表 1.6 单频调频波参数、默认值和单位

参 数	意 义	默 认 值	单 位
VO	偏移值		V/A
VA	幅值		V/A
FC	载波频率	1/TSTOP	Hz
MDI	调制指数		
FS	信号频率	1/TSTOP	Hz

例如，一个单频调频波的波形为:

VALUE=VO=VA*sin((2π*FC*t)=MDI*sin(2π*FS*t))

12. 子电路

采用子电路的方法可以使电路设计模块化、层次化和简单化。

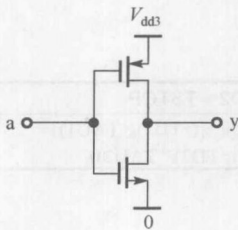
格式:

.SUBCKT NAME N1 N2
...
.ends

调用方法:

X1 N1 N2 NAME

下面以 CMOS 反相器为例，简述子电路的应用。图 1.4 所示为 CMOS 反相器，其电路的输入、输出端口分别为 a 和 y，可以表述成名为 INV 的子电路。



.SUBCKT INV a y
Mp1 y a vdd3 vdd3 cmosp l=0.24u w=6u
Mn1 y a 0 0 cmosn l=0.24u w=2u
.ends

调用方法:

...
X1 n1 n2 INV
...

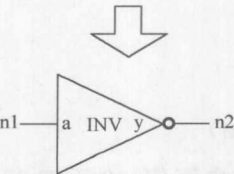


图 1.4 CMOS 反相器

13. 设置参数

巧妙地利用参数设置可以使设计变得格外灵活方便，可以利用参数设置对晶体管的尺寸和电阻的阻值等进行扫描。

```
...
R1 1 2 rx
MN1 1 2 3 4 CMOSN L=0.24u W=w1
.param rx=1k w1=6u
.st rx 1k 10k 1k; 参数扫描
```

还可以利用参数设置对子电路的尺寸进行灵活设置:

```
.subckt INV a y param: a=1
Mp1 y a vdd3 vdd3 cmosp l=0.24u w='1.8u*a'
Mn1 y a 0 0 cmosn l=0.24u w='0.6u*a'
.ends
Xinv1 1 2 INV a=1
Xinv2 2 3 INV a=2.5
```

1.2 电路特性分析语句

电路特性的分析指令语句包括指定分析类型, 如直流、交流、瞬态、噪声、温度和失真分析等。分析控制语句包括初始状态设置、参数分析、输出格式和任选项语句。所有的分析指令和控制语句都以“.”开头。各语句的次序无关, 且可多次设置, 但程序对同一类语句只执行最后一句, 如写有:

```
.TRAN 1NS 100NS
.TRAN 1NS 100NS 5NS
```

则程序只执行第二句, 即进行瞬态分析, 打印或绘图开始时间将从 5NS 开始。

1. 直流工作点分析

在电路中电感短路和电容开路的情况下计算电路的静态工作点。SPICE 在进行瞬态分析、交流分析前自动进行直流工作点分析, 以确定瞬态分析的初始条件、交流分析的非线性器件线性化小信号模型。其格式为.OP。

如果输入中有.OP 语句, SPICE 将打印输出以下内容:

- (1) 所有节点的电压;
- (2) 所有电压源的电流及电路的直流总功耗;
- (3) 所有晶体管各极的电流和电压;
- (4) 非线性受控源的小信号(线性化)参数。

否则, 只打印输出(1)的内容。

2. 直流扫描分析

定义对电路进行直流扫描的扫描源及扫描限制, 其格式为:

```
.DC SRCNAM VSTART VSTOP VINCR <SRC2 START2 STOP2 INCR2>
```

其中, SRCNAM 是用于扫描的独立电压源或电流源, VSTART 是扫描电压(或电流)的起始值, VSTOP 是扫描电压(或电流)的结束值, VINCR 是增量值。尖括号 <> 内是可选的第二个扫描源, 若进行了设置, 则对第二个扫描源内的每一个扫描值, 第一个扫描源都在其范围内进行一次扫描。这经常用于测试半导体器件的输出特性。

例句:

```
.DC VIN 1 5 0.25
```

本例表示要作直流分析,以电压源 VIN 为输入激励源。该激励源从 1V 开始,以 0.25V 为增量,扫描到 5V 为止。对应激励源的每一个扫描值,求出电路的响应。

3. 小信号传输函数

定义直流小信号分析的输入和输出。SPICE 在电路的偏置点附近将电路线性化后,计算电路的直流小信号传输函数值、输入阻抗和输出阻抗,其格式为:

```
.TF OUTVAR INSRC
```

其中,OUTVAR 是小信号输出变量,INSRC 是小信号输入电压或电流源。

4. 交流特性分析

计算电流在给定的频率范围内的频率响应,格式为:

```
.AC DEC ND FSTART FSTOP
```

```
.AC OCT NO FSTART FSTOP
```

```
.AC LIN NP FSTART FSTOP
```

例句:

```
.AC DEC 100 1 100G
```

```
.LET ac vmd=vm(dout) vpd=vp(dout)/pi
```

其中,DEC、OCT、LIN 是频率变化的方式,分别对应于十倍频、倍频和线性变频;ND、NO、NP 是扫描点数;FSTART、FSTOP 分别是起始频率和结束频率。在电路中,需要至少指定一个独立源为交流源,此分析才起作用。

5. 直流或小信号交流灵敏度分析

SPICE 在电路的偏置点附近将电路线性化后,计算在电感短路、电容开路的情况下所观测变量 OUTVAR (节点电压或电压源支路的电流)对电路中所有非零器件参数的灵敏度,格式为:

```
.SENS OUTVAR
```

```
.SENS OUTVAR AC DEC ND FSTART FSTOP
```

```
.SENS OUTVAR AC OCT NO FSTART FSTOP
```

```
.SENS OUTVAR AC LIN NP FSTART FSTOP
```

其中,OUTVAR 是观测变量,AC 后的参数定义与.AC 语句相同。

例句:

```
.TRAN 0.1ns 200ns
```

```
.SNS tran v(dout) to xbuf.mn7(w) arg=30ns
```

6. 噪声分析

计算指定节点的噪声输出电压,产生两个输出,一是噪声频谱密度曲线,二是指定频段的全部积分噪声,格式为:

```
.NOISE OUTVAR SRC DEC ND FSTART FSTOP
```