


钟文耀 郑美珠:CMOS 电路模拟与设计——使用 Hspice

ISBN:957-21-5064-2

 全华科技图书股份有限公司

原著于 2006 年 3 月出版发行

本书中文简体字版由台湾全华科技图书股份有限公司授权科学出版社独家出版,仅限于中国大陆地区出版发行,不含台湾、香港、澳门。

未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。本书封底贴有全华科技图书股份有限公司防伪标签,无标签者不得销售。

电路设计与仿真

CMOS 电路模拟与设计 ——基于 Hspice

钟文耀 郑美珠 编著

科学出版社

北京

图字：01-2007-1207 号

内 容 简 介

本书系“电路设计与仿真”丛书之一。本书采取循序渐进的编排方式，将 Hspice 强大的功能与应用，由浅入深地介绍给读者，内容包括 Hspice 使用指引，Hspice 基础分析与范例探讨，Hspice 在元件、集成电路及系统中的模拟，元件模型化与特性化的主要考虑，频率响应与极/零点分析，类比与数字电路元的特性化，蒙特卡罗及最坏情况分析，从实践中学习 Hspice 等。本书的最大特色是除了利用 Synopsys 公司所提供的电路模拟实例外，将作者多年在半导体领域积累的经验融入各章，可使读者通过实例说明及练习，深刻地了解各功能的意义及应用领域。

本书可供电子系统设计、开发人员和电路设计爱好者阅读，也可作为高等院校电子类专业的教材或实验参考书。

图书在版编目(CIP)数据

CMOS 电路模拟与设计：基于 Hspice/钟文耀，郑美珠编著. —北京：科学出版社，2007

(电路设计与仿真)

ISBN 978-7-03-019069-7

I. C… II. ①钟…②郑… III. ①互补 MOS 集成电路-模拟程序-程序设计②互补 MOS 集成电路-电路设计 IV. TN432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083467 号

责任编辑：杨 凯 崔炳哲 / 责任制作：魏 谨

责任印制：赵德静 / 封面设计：李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张：22

印数：1—4 000 字数：433000

定 价：42.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换(科印))

修订版序言

随着集成电路技术的日益进步与各大院校在半导体产业相关人才教育的投入, SPICE 软件已成为集成电路设计产业相关工程师的核心工具。近几年来,随着作者在中原大学与龙华科技大学所开设课程与实习内容的资源累积,我们决定对《CMOS 电路仿真与设计——基于 Hspice》的初版进行修订,期盼能够为集成电路设计领域的读者提供更完整的参考内容。

修订版的编排,主要是在原来的各章增加了适合实习的内容与范例,使读者借助更多的电路分析案例以增强 SPICE 撰写的能力。虽然 SPICE 开发至今已超过 20 年,然而其重要性并未随着制程的进步而降低。我们在第 2 章增加了 .DC 与 .TF 的分析范例,并特别比较了商用的 SPICE 仿真软件, Hspice 与 Pspice 之间的异同点,使读者借助过去已建立的 SPICE 使用经验,可以迅速地掌握 Hspice 的指令特色。在第 3 章安排了各种单晶体管放大器的模拟分析,使学生可搭配电子学与电子实验等课程以体会计算机辅助电路分析软件的强大功能和手计算阶段的相互验证。在第 4 章提供了模拟电路设计关键子电路的仿真分析,其中包括振荡电路、带隙或带差电路(bandgap circuit)、低漂移稳压电路等。第 5 章更增加了各类放大器的分析讨论与基本反馈应用,使读者可在放大器组态与频率响应上有更深入的了解。在第 6 章数字电路元的特性化部分,我们也强调了数字电路栅延迟时间分析。我们将初版的第 8 章所探讨的蒙特卡罗及最坏情况分析范例移至第 7 章,使读者能更熟悉蒙特卡罗统计分析在电路性能参数变化的效应。在第 8 章中增加了电流镜、CMOS 反相器的静态特性、A741 放大器行为模型(behavior model)的特性分析。我们相信,只要读者好好体会与学习这些新增章节的范例分析和指令灵活运用概念,必可使其在所投入的设计相关领域中有更好的成果。

为使读者更方便有效地学习本书内容,我们提供了所有范例程序代码,读者可通过科学出版社网站(<http://www.sciencep.com>)下载,期盼读者能淋漓尽致地发挥 Hspice 的功能,以增强其在各类集成电路产品中的设计与分析能力。本书以最严谨的态度撰写,也花了无数之假日时光才完成。增加的范例部分,均采自作者在中原大学电子系开设的“CMOS 电路仿真与设计”课程实习内容与参考答案,以及作者在龙华科技大学电子技术系开设的“计算机辅助电路分析与模拟”课程实习内容。在此对

所有给予支持的各位学生表示感谢,也感谢全华科技图书公司邀稿之热心与耐心。作者才疏学浅,不完善之处在所难免,望各界前辈不吝指正,使本书内容更加充实完善。

钟文耀 中原大学电子工程系

郑美珠 龙华科技大学电子工程系

Web.Site:<http://globe.el.cycu.edu.tw>

序 言

随着集成电路技术的日益进步,使得计算机辅助设计工具日趋成熟,同时也促进了线路设计与系统应用的计算机化。而各类模拟软件的加入,更加速了设计的过程。近几年来,虽然制程技术已进入深亚微米(Deep Sub-micron)的新硅世纪,但是在集成电路设计上,仍以晶体管层次的线路模拟软件——SPICE 软件为主。

虽然 SPICE 开发至今已超过 20 年,然而其重要性并未随着制程的进步而降低。就国内的设计环境而言,商用的 SPICE 模拟软件主要有 Hspice、Pspice、SBTspice、SmartSPICE 与 Tspice 等。由于 Hspice 其内建元件模型齐全,各类电路模拟与分析功能完整,故有很多的集成电路产品利用 Hspice 辅助线路的设计与模拟,而有极好的成果呈现。然而,关于 Hspice 的参考文献,除了原公司所发布的使用手册外,市面上很难找到相关的参考书籍。笔者曾于 1994 年编著《集成电路模拟与应用——Hspice》一书,由廷康资讯公司出版,目前在市面上已看不到此书的踪迹,反而是在学生之间,关于 Hspice 的使用,出现了代代相传的影印版本,继续学习 Hspice 模拟软件。由于晶片设计中心(Chip Implementation Center)多年来的努力,已使大学及技术学院在集成电路设计领域有极好的硬软件与学习环境。笔者过去十年,曾多次支援 CIC、交大亚微米培训中心、清华自强基金会半导体培训中心、台积电、合泰半导体、普诚科技、立生半导体及华邦电子等公司讲授 SPICE 相关课程。

笔者自 1985 年开始使用 SPICE,于 1991~1995 年担任 Meta-Software 公司在台代理商——廷康资讯公司有关 Hspice 软件产品的技术顾问与课程讲师,承蒙廷康资讯公司之邀请,美国 Meta-Software 公司之支持,特将个人多年使用 SPICE 的经验,结合 Hspice 功能的特色与应用,于 1994 年提笔完成了此书的第一版内容。时过境迁,本书重新编撰之际,针对目前应用最广的计算机辅助线路设计软件——Hspice,就其原理、结构、元件模型、各种基本与进阶分析、应用实例作一深入介绍,也希望此书能提供给国内外所有集成电路的使用者有价值的参考。

本书采取循序渐进的章节编排方式,将 Hspice 强大的功能与应用,由浅入深地介绍给读者认识。本书最大特色是除了利用 Synopsys 公司所提供的电路模拟实例外,将作者多年在半导体领域积累的经验融入各章之中,使读者可以经由实例的说明及练习,深刻地了解各功能的意义及应用领域。Hspice 功能极广泛,为了满足大多

数使用者的需要,本书不涉及 Hspice 有关光电领域的模拟、高频电路与传输线的设计和应用。基于集成电路设计上所需的知识与 Hspice 使用技巧,本书共分八章,兹将各章概要分述如下:

第 1 章 Hspice 使用指引

本章主要介绍 Hspice 的发展过程,各项分析功能,程序结构,以及图形资料后处理器 Meta wave 及 AvanWaves 的基本使用指引与模拟实例的说明,以减少使用者学习使用的摸索时间,使其对 Hspice 模拟软件有进一步的了解。

第 2 章 Hspice 基础分析与范例探讨

本章主要介绍 Hspice 基本的交直流、暂态分析功能以及语法描述,并用模拟实例来说明,方便使用者以最短的时间来学习基础分析之精华。

第 3 章 Hspice 在元件、集成电路及系统中的模拟

本章主要探讨 Hspice 在电子领域中各层次模拟的特点,其目的是使读者在不同工作领域中,了解 Hspice 可发挥的功能。例如线路设计者,对于往下到元件层次,以及往上到系统层次,都该注意 Hspice 在各层次的使用技巧,以达到周全的设计考虑。

第 4 章 元件模型化与特性化的主要考虑

本章探讨元件模型化与特性化的主要理念,各时代 FET 元件模型的演变,并介绍 Hspice 所衍生的 LEVEL 28 模型的特点以及特别参数撷取与测试电路验证,亦对电路设计及产品研发与最坏模型化方法的相关性进行完整的分析。

第 5 章 频率响应与极/零点分析

本章将介绍 Hspice 中特有的极/零点分析功能,此特色对于类比电路设计者尤其重要。本章亦会以一典型的二级 CMOS 放大器为例,说明 Hspice 在类比电路设计上的应用。

第 6 章 类比与数字电路元特性化

本章将引导读者利用 Hspice 的特殊功能与指令,完成自动化的类比及数字电路元特性化(circuit cell characterization)与标准元库(standard cell library)的建立,此功能对于电路元库的设计工程师格外重要。另外,对 Hspice 内建的双区间逼近(Bi-section Search)方法进行介绍,此种方法适合用于正反器在设定时间(setup time)、维持时间(hold time)以及时脉最小宽度(minimum pulse width)的特性分析。

第 7 章 蒙特卡罗及最坏情况分析

本章是 Hspice 功能的精华部分。最坏情况分析对线路设计者而言,可提供“恰到好处”的设计而避免产品利润的损失。另外,蒙特卡罗分析,则是产品测试及元件分析工程师对产品功能及可靠性了解的最重要依据。读者如想进入此类领域发展,更应熟读本章。

第 8 章 从实践中学习 Hspice

本章将以实例的形式使读者从实践中学习 Hspice,熟悉 Hspice 的电路基本特性模拟,了解 MOS 元件的实际特性、各类输入波形、多项式输入形态等分析与应用。本章内容的编排与前面各章相呼应,按部就班研读,可使读者掌握集成电路设计的基本功法,有潜力往日趋重要的混合信号 IC 设计产业迈进。

本书由于篇幅原因,对于 Hspice 的最佳化功能、噪声与失真分析等内容于日后有机会再探讨。另外,如您为初次接触 Hspice 的读者,则可由第 2 章入手。在了解 SPICE 基本指令的叙述、电路范例及各类分析形态后,再由前面各章循序渐进、逐一研读,无论是初学者,还是已使用 Hspice 的有经验者,本书都可使您对 Hspice 有一完整的概念,帮助您完成各类集成电路产品的设计。

本书以最严谨的态度撰写,花了无数假日时光才完成,在此感谢中原大学育成中心张志杰先生、何福顺与林佳宗等同学的协助;同时,对全华科技图书公司邀稿之热心与耐心也一并感谢。作者才疏学浅,不完善之处在所难免,望各界前辈不吝指正,使本书内容更加充实完善。

钟文耀 中原大学电子工程系

郑美珠 龙华科技大学电子工程系

Web.Site:<http://globe.el.cycu.edu.tw>

目 录

第 1 章 Hspice 使用指引

| | | |
|--------|----------------------------|----|
| 1.1 | Hspice 简介 | 3 |
| 1.1.1 | 直流分析 | 3 |
| 1.1.2 | 暂态分析 | 4 |
| 1.1.3 | 交流小信号分析 | 4 |
| 1.1.4 | 执行 Hspice 所需存储器空间的预估 | 6 |
| 1.1.5 | Hspice 核心功能特色 | 6 |
| 1.2 | Hspice 特殊功能探讨 | 7 |
| 1.2.1 | 极佳的收敛性 | 7 |
| 1.2.2 | 电路应用的考虑 | 8 |
| 1.2.3 | 各类模型的提供 | 8 |
| 1.2.4 | 元件及模型参数调整(SCALING) | 9 |
| 1.2.5 | 蒙特卡罗分析 | 9 |
| 1.2.6 | 参数化电路元的特性化 | 9 |
| 1.2.7 | 元件及电路元的特性 | 10 |
| 1.2.8 | 传输线的应用 | 10 |
| 1.2.9 | 最优化 | 10 |
| 1.2.10 | 元件及 IC 模型库 | 10 |
| 1.2.11 | 图形化的处理 | 11 |
| 1.2.12 | 极/零点分析 | 11 |
| 1.2.13 | 新的半导体元件模型 | 11 |
| 1.2.14 | 模型化及分析技巧应用 | 11 |
| 1.3 | Hspice 实例说明 | 12 |
| 1.3.1 | Hspice 输入程序结构 | 12 |
| 1.3.2 | 电源应用的实例说明 | 14 |

| | | |
|-----|----------------------|----|
| 1.4 | AvanWaves 使用指引 | 20 |
| 1.5 | 纯电阻网络 | 28 |
| 1.6 | 小结与参考文献 | 36 |

第 2 章 Hspice 基础分析与范例探讨

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 2.1 | SPICE 程序结构探讨 | 39 |
| 2.1.1 | 节点、元件及模型 | 40 |
| 2.1.2 | 标题、注释与结束叙述 | 48 |
| 2.1.3 | 资料叙述 | 48 |
| 2.1.4 | 控制叙述 | 49 |
| 2.1.5 | 输出叙述 | 50 |
| 2.2 | SPICE 的基础分析 | 54 |
| 2.2.1 | 直流与灵敏度分析 | 54 |
| 2.2.2 | 暂态分析与时域响应 | 57 |
| 2.2.3 | 交流与频率响应分析 | 62 |
| 2.3 | SPICE 辅助电路分析实例 | 64 |
| 2.3.1 | 基本 RL 电路 | 64 |
| 2.3.2 | 理想放大器电路 | 65 |
| 2.4 | .DC 与 .TF 分析探讨 | 67 |
| 2.4.1 | .DC 与元件变化同时执行的扫描分析 | 67 |
| 2.4.2 | 直流转移函数 .TF 分析 | 73 |
| 2.4.3 | 讨论 | 80 |
| 2.5 | 子电路与交流分析 | 82 |
| 2.6 | SPICE 辅助分析的应用探讨 | 93 |
| 2.6.1 | 子电路的应用 | 93 |
| 2.6.2 | 收敛性的问题与解决途径 | 95 |
| 2.7 | 参考文献 | 98 |

第 3 章 Hspice 在元件、集成电路及系统中的模拟

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 3.1 | 简介 | 101 |
| 3.2 | 元件、集成电路及系统模拟特性 | 101 |
| 3.2.1 | 元件模拟特性 | 101 |

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 3.2.2 | 集成电路模拟特性 | 102 |
| 3.2.3 | 系统模拟特性 | 102 |
| 3.3 | 模拟技巧探讨 | 102 |
| 3.4 | 集成电路设计层次的考虑 | 104 |
| 3.4.1 | 基本假设 | 104 |
| 3.4.2 | IC 设计者使用环境 | 104 |
| 3.4.3 | 电路层次的模块化 | 106 |
| 3.5 | 系统设计层次的考虑 | 109 |
| 3.5.1 | 基本假设 | 109 |
| 3.5.2 | 系统设计者使用环境 | 110 |
| 3.5.3 | 系统层次的模块化 | 110 |
| 3.6 | 电路及模型温度考虑 | 111 |
| 3.7 | 电路实例探讨 | 112 |
| 3.8 | 共源极放大器 | 114 |
| 3.9 | 共漏极放大器 | 117 |
| 3.10 | 共栅极放大器 | 120 |
| 3.11 | 使用有源负载的共漏极放大器 | 122 |
| 3.12 | 使用有源负载的共源极放大器 | 124 |
| 3.13 | 小结与参考文献 | 126 |

第 4 章 元件模型化与特性化的主要考虑

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 4.1 | 引 言 | 129 |
| 4.2 | FET 元件模型各时代探讨 | 130 |
| 4.2.1 | 第一代元件模型探讨 | 130 |
| 4.2.2 | 第二代元件模型探讨 | 131 |
| 4.2.3 | 第三代元件模型探讨 | 132 |
| 4.3 | 模型例子(LEVEL 28)探讨 | 136 |
| 4.3.1 | BSIM1(LEVEL 13)的缺点 | 136 |
| 4.3.2 | LEVEL 28 的特点 | 137 |
| 4.4 | 特别参数撷取与测试电路验证 | 138 |
| 4.4.1 | 测试电路验证 | 138 |
| 4.5 | 最坏情况模型化方法 | 138 |
| 4.5.1 | 最坏情况模型化特点 | 139 |

| | | |
|-------|-----------------------------|-----|
| 4.5.2 | 模型选择与电路设计的相关考虑 | 139 |
| 4.5.3 | 最坏情况模型的漂移参数 | 140 |
| 4.6 | 振荡器电路 | 142 |
| 4.7 | 带隙电路(Bandgap Circuit) | 144 |
| 4.8 | 低漂移稳压器(LDO) | 146 |
| 4.9 | 小结与参考文献 | 148 |

第 5 章 频率响应与极 / 零点分析

| | | |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 5.1 | 引 言 | 153 |
| 5.2 | 拉普拉斯转换分析 | 153 |
| 5.2.1 | 频率响应概述 | 153 |
| 5.2.2 | 奈氏临界频率的抉择 | 154 |
| 5.2.3 | 拉普拉斯转换叙述 | 155 |
| 5.2.4 | 拉普拉斯带阻滤波器模拟 | 156 |
| 5.3 | 极/零点分析 | 157 |
| 5.3.1 | 极/零点理论 | 157 |
| 5.3.2 | 极/零点指令叙述 | 158 |
| 5.3.3 | 极/零点分析例子 | 159 |
| 5.4 | CMOS 运算放大器特性及测试 | 162 |
| 5.4.1 | 典型的 CMOS 放大器组态 | 162 |
| 5.4.2 | 放大器特性探讨 | 164 |
| 5.4.3 | 放大器测试模拟 | 167 |
| 5.5 | 叠接式放大器 | 170 |
| 5.6 | 串接式放大器 | 171 |
| 5.7 | 差动放大器 | 174 |
| 5.8 | 串接运算放大器 | 180 |
| 5.9 | 反馈——Feedback cascade amplifier | 182 |
| 5.10 | 输入波形与输出波形 | 185 |
| 5.11 | 小结与参考文献 | 188 |

第 6 章 类比与数字电路元特性化

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 6.1 | 引 言 | 191 |
| 6.2 | 标准元设计方法简介 | 191 |
| 6.2.1 | 标准元的基本定义 | 191 |
| 6.2.2 | 标准元设计方法 | 192 |
| 6.3 | 产品资料表参数的设定 | 194 |
| 6.3.1 | 数字电路元主要特性探讨 | 194 |
| 6.3.2 | 数字逻辑栅延迟时间分析 | 198 |
| 6.3.3 | 类比电路主要特性探讨(以放大器为例) | 202 |
| 6.4 | 数据导引分析 | 204 |
| 6.5 | 电路元特性化实例说明 | 205 |
| 6.6 | 双区间逼近方法简介 | 211 |
| 6.6.1 | 设定时间分析实例 | 212 |
| 6.6.2 | 时脉最小宽度分析实例 | 216 |
| 6.6.3 | Pin to Pin 延迟时间分析实例 | 218 |
| 6.7 | 小结与参考文献 | 221 |

第 7 章 蒙特卡罗及最坏情况分析

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 7.1 | 引 言 | 225 |
| 7.1.1 | Hspice 良率分析法则 | 225 |
| 7.1.2 | 基本统计演算 | 225 |
| 7.2 | 蒙特卡罗分析简介 | 226 |
| 7.2.1 | 蒙特卡罗分析的统计分布 | 226 |
| 7.2.2 | Hspice 蒙特卡罗分析设定 | 227 |
| 7.3 | 蒙特卡罗分析实例 | 228 |
| 7.4 | 最坏情况分析简介 | 233 |
| 7.4.1 | 模型漂移参数的加入分析 | 233 |
| 7.4.2 | 最坏情况分析实例 | 236 |
| 7.5 | 蒙特卡罗及最坏情况分析实例 | 239 |
| 7.6 | 小结与参考文献 | 248 |

第 8 章 从实践中学习 Hspice

| | |
|---|-----|
| 8.1 Hspice 基本分析实例 | 251 |
| 8.1.1 直流、暂态及受控电源的应用 | 251 |
| 8.1.2 直流灵敏度 .SENS 分析与温度设定 的练习 | 256 |
| 8.2 MOS 元件特性化实例 | 257 |
| 8.2.1 单一 NMOS 元件情况 | 257 |
| 8.2.2 反相器子电路情况 | 262 |
| 8.3 CMOS 反相器的直流与交流特性 | 271 |
| 8.3.1 直流特性 | 271 |
| 8.3.2 交流特性 | 281 |
| 8.4 暂态分析与基本电路元探讨 | 289 |
| 8.4.1 基本数字逻辑门的时间特性分析 | 289 |
| 8.4.2 t_{plh} , t_{rise} , t_{fall} 的时间参数模拟 | 295 |
| 8.5 基本电路元特性化实例 | 299 |
| 8.6 运算放大器特性化实例 | 306 |
| 8.7 时脉信号产生器设计实例 | 310 |
| 8.8 电流镜分析 | 314 |
| 8.8.1 有源电阻 | 314 |
| 8.8.2 电流镜 | 317 |
| 8.8.3 叠接结构的电流镜 | 319 |
| 8.8.4 威尔森电流镜 | 321 |
| 8.9 $\mu A741$ 放大器特性分析 | 325 |
| 8.10 参考文献 | 333 |



第 1 章

Hspice 使用指引

- 1.1 Hspice简介
- 1.2 Hspice特殊功能探讨
- 1.3 Hspice实例说明
- 1.4 AvanWaves使用指引
- 1.5 纯电阻网络
- 1.6 小结与参考文献

1.1 Hspice 简介

Hspice 线路模拟软件在早期是美国 Meta-Software 公司根据 Berkeley SPICE2G.6、SPICE3 及其他线路模拟软件所发展的工业级线路分析软件。Hspice 在基本功能部分和其他 SPICE 软件相似,可应用于下列领域的电子电路研发,即稳态(直流分析)、暂态(时间分析)及频率(交流分析)等领域。由于 Meta-Software 公司在集成电路制程技术持续进步与元件尺寸缩小下,对于 MOSFET 模型的适用性与精确性的不断耕耘,以及该公司对元件与电路最佳化、罗特卡罗与最坏状况分析等进阶级的模拟应用亦有自我突破,使得 Hspice 逐渐脱颖而出,超过 PSPICE、Is-SPICE 等软件,成为在集成电路设计上最普遍及最佳的晶体管层次线路模拟软件。1997 年,计算机辅助设计软件大厂 Avant! 公司购并了 Meta-Software 公司,Hspice 也成为 Avant! 公司众多设计软件之一,并改称为 STAR-Hspice。2002 年,计算机辅助设计软件大厂 Synopsys 公司购并了 Avant! 公司。本书为简洁起见,仍以 Hspice 来说明。

SPICE 是“Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis”之意,原先的目的是为电子系统中集成电路的模拟与设计而发展的软件。然而,随着电子领域应用面的扩大,Hspice 也因为 Synopsys 公司的持续研发,而具有其特色与功能。因此,Hspice 已成功地用在直流到高频操作的电子电路设计。

本节,将对 Hspice 特色与其可执行的各类分析——直流分析、暂态分析(包括傅里叶分析)、交流信号分析(包括噪声特性和失真特性)作一概略性介绍,随后章节则会逐项做详细的说明。

1.1.1 直流分析

直流分析是 SPICE 软件的核心分析,通常在暂态或小信号分析之前都要自动进行直流分析,并可列印输出变量对每个电路参数的小信号直流灵敏度。直流分析可用于产生直流转移特性曲线(DC transfer curves),先由直流分析解出电路的节点电压、分支电流及确立操作点等,然后进行其他后续的分析。

Hspice 共有五个主要的直流分析叙述,即 .DC、.OP、.SENS、.PZ 及 .TF。这些叙述中的“.”代表控制叙述之意,而各叙述的特点即是以电路的直流等效模型为基础进行各种与直流相关的分析。各叙述的主要作用如下所述:

(1) .OP:计算在特定时间或多时间点条件下的操作点情况(包括节点电压及各分支电流)。

(2) .DC:设定电源、温度、参数值及直流转移曲线的扫描(sweep)范围。

(3) .PZ:极/零点分析(主要用于频率响应)。

(4) .SENS:计算电路中指定的输出变量相对于线路其他元件参数的直流小信号敏感程度。

(5) .TF:计算特定输出变量对于输入源的直流小信号转移函数。此叙述会在输出结果中自动印出相对增益值、输入及输出阻抗。

在实际电路设计及模拟应用中,.DC的重要性显而易见。现今电子系统或产品有各种电源,如计算机相关产品有 $0\sim 5\text{V}$ 、 $0\sim 3.3\text{V}$ 及 $0\sim 3\text{V}/2.5\text{V}/1.5\text{V}$ 的应用,BJT 类比电路产品在电源供应上,有高至 $+/-12\sim +/-15\text{V}$ 的应用等,所以,.DC扫描提供了同时进行多次不同电源值的分析功能,增加了模拟的效率。其次,.SENS 只可对直流电路作敏感度分析,因此,如拟在暂态或频域中观察各线路参数对特定输出变量的影响,则需使用罗特卡罗分析作模拟,此部分将于第 7 章详细探讨。而.TF也只是用作直流稳态小信号转移函数的计算,并不适合于频率扫描变化的情况,故交流输出、输入阻抗与增益的变化须作交流分析才可得到正确值。

1.1.2 暂态分析

Hspice 中主要的暂态(或瞬态)分析叙述为 .TRAN 与 .FOUR。 .TRAN 主要是在指定时间范围中计算电路的解,即所谓的时间扫描分析。由于 SPICE 软件具有多元性功能,因此从最简单的功能观之,其亦可视为软件形态或虚拟信号产生器与示波器(software signal generator and oscilloscope),即它能够利用软件产生各类信号输入,并允许在频域与时域中产生可观察的结果。而 .TRAN 最普遍的应用即是数字电路在时域方面的功能分析。由于 Hspice 中所建立的元件模型极完整,故可得到较准确的暂态响应,对数字电路设计工程师将会有很大的帮助。

.FOUR 属于暂态分析的一部分,可使 Hspice 执行线路的傅里叶分析,其分析在一段时间间隔中($T_{\text{stop}}-T_{\text{fperiod}}$, T_{stop})执行。其中, T_{stop} 在 .TRAN 中设定,而 T_{fperiod} 是基频的倒数。故傅里叶分析是在拟观察时间中,取 $T_{\text{fperiod}}=1/f$ 基频时间中最后的 101 点作暂态分析,例如 .FOUR 100k V(5),此叙述即是对节点 5 的电压 V(5)作傅里叶分析,而 100kHz 为基频。

1.1.3 交流小信号分析

交流分析是探讨电路的频率响应,在复变频域中作分析。Hspice 中主要的交流分析叙述为 .AC、.DISTO、.NOISE、.SAMPLE 及 .NET。这些叙述使 Hspice 计算出线路在指定频率范围内的交流输出变量。Hspice 执行时首先解出线路的直流操作点,然后确定电路中非线性元件与线性化、模型化参数,并产生小信号模型,在使用者指定的频率范围内,对此线性化电路作频域交流分析。

交流分析允许下列各项扫描:

- 频率。
- 元件值。
- 温度参数值。
- 模型参数值。
- 罗特卡罗的乱数变化。
- 最佳化及交流设计研析。

另外, Hspice 也可在频率变化中提供下列应用:

- 噪声分析。
- 失真分析。
- 网络分析。
- 取样分析。

上述分析分别说明如下:

1. . AC 分析

. AC 叙述主要是定义出使用者在电路分析时所指定的扫描频率范围(f_{START} , f_{STOP})、扫描取样形态与点数(DEC, OCT, LIN, POI), 以及罗特卡罗分析次数<SWEEP MONTE=VAL>等。

基本举例如下:

```
. AC DEC 10 1HZ 1MEGHZ SWEEP MONTE=30
```

此式说明了从 1 Hz 到 1 MHz 的频率扫描分析, 且每十进位进行 10 点取样, 并伴随着 30 次蒙特卡罗分析。

2. . DISTO 分析

此分析叙述的目的是计算线路在交流弦式稳态分析下的失真特性, 其设有一个或两个信号频率(f_1 , f_2)。Hspice 会依据上述条件计算下列五个合成频率在指定负载电阻上的失真大小(振幅及相角), 包括 $f_1 - f_2$, $2f_1 - f_2$, $2f_1$, $3f_1$, $f_1 + f_2$ 等特定合成频率。

3. . NOISE 分析

在 Hspice 的噪声基于电路直流操作点的条件下, 用来计算交流节点电压复数值。其中, 噪声是假设噪声贡献源, 与其他电路噪声源无关, 并且作个别计算, 总输出噪声电压是各噪声贡献的均方根之和, 即如下式所述:

$$\text{ONNOISE} = \sum_{n=1}^n |Z_n I_n|^2 \quad (1.1)$$

其中, ONNOISE 代表全部的输出噪声; I 表示由热噪声(thermal noise)、散噪声(shot noise), 以及闪烁噪声(flicker noise)产生的等效电流; Z 代表噪声源与输出之间的等效转换阻抗; N 代表所有电阻、二极管、JFET、MOSFET 及 BJT 元件的噪声源数目。

而等效输入噪声电压等于全部输出噪声除以电路增益或转换函数,输入及输出噪声大小可以相对于噪声频宽的平方根常态化,而具有 $\text{UNIT VOLTS}/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $\text{AMPS}/\sqrt{\text{Hz}}$ 单位。

至于 MOSFET 元件较为重要的闪烁噪声(flicker noise),可在适当元件模型叙述中包含 KF 及 AF 等参数,以供噪声分析模拟。

4. .SAMPLE 分析

在类比信号资料的撷取过程中,通常也需要对资料取样噪声进行分析,.SAMPLE 可使 Hspice 在输出节点执行简单的噪声叠分析(noise folding analysis)。此类分析常用在取样/保持放大器及滤波器的设计中。

5. .NETWORK 分析

此分析属于 AC 交流分析的一部分,.NET 叙述可计算阻抗矩阵 $-Z$, 导纳矩阵 $-Y$, 混合矩阵 $-H$ 及散射矩阵 $-S$ 参数等。另外,输入、输出阻抗及导纳亦可被计算。

1.1.4 执行 Hspice 所需存储器空间的预估

以 Meta-Software 公司早期开发的 Hspice 软件版本所能模拟的电路大小的计算,主要是根据晶体管总数(no. of transistors)对应的存储器参数(“memory” parameter)及可运算空间(swap space)来预估的,其中存储器参数被定义为每晶体管需 400 字(words),根据实际电路中晶体管的数目来计算所需的“memory”,因此执行 Hspice 时所需的工作量大小(job size)可写成如下公式:

$$4 \text{ MB} + \text{“memory”} \times 8 (\text{可执行的 RAM 大小}) \quad (1.2)$$

由此可知,若一电路有 300 个晶体管,则 Hspice 所需要的可运算存储器空间为 “ 300×400 ” $\times 8 + 4 \text{ M} \approx 5 \text{ M MB/swap space}$ 。

综上所述,Hspice 可模拟的电路大小,只受到计算机的虚拟存储器(virtual memory)的限制。

1.1.5 Hspice 核心功能特色

就目前集成电路的复杂度与产品应用面的广阔而言,在设计模拟过程中,如能借助模拟软件提供关键项目的分析与验证,将有助于晶片下线制作的成功率。因此,对于 Hspice 核心功能之特色可利用图 1.1 来说明。

(1) 最佳化功能(Optimization)可提供从元件层次至电路元的最佳化,如利用晶片上的测试元件及测试键(test key),借助外接仪器(如 HP4155、HP4284)的测量与 Hspice 最佳化功能之间的作用,可向集成电路厂商或使用者提供准确的 SPICE 元件参数与模型。

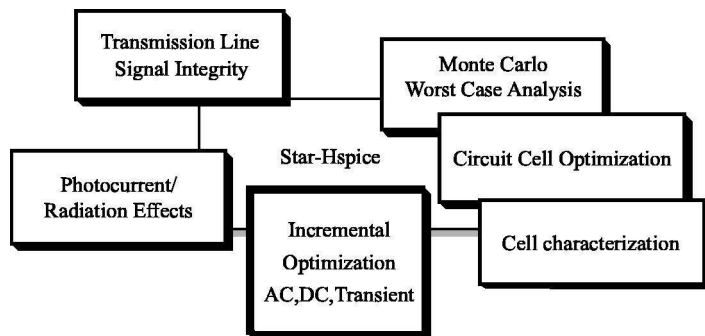


图 1.1 Star-Hspice 核心功能特色

(Copyright property of Synopsys. Reprinted by permission)

(2) 在层次化设计(hierarchical design)过程中,取得各阶段(如开关或晶体管层次)所处理信号的一致性(signal integrity)是保证电路设计成功的依据。

(3) 深亚微米制程中连接导线(interconnection)造成的信号延迟与元件响应参数大小相近,在模拟过程中,如增加传输线(transmission line)的模型,将更能预估集成电路的实际效能。

(4) 晶圆制造服务厂商(foundry service)为能掌握制程参数的稳定性,对于每个制作批次(lot)都利用测试键来进行元件关键参数的测量与统计分析。这些数据资料将有助于设计工程师在电路模拟上进行 Hspice 可执行的罗特卡罗与最坏状况分析,进而提供产品良率(yield analysis)的预估。

(5) 光电领域的模拟与辐射效应的思考。对于有源元件,如结面二极管与场效应晶体管等,都很容易受到光照射与辐射效应的影响,因此, Hspice 提供了两项主要的光电效应模型(photocurrent effect model),包括由光辐射总离子化量(total ionizing dose)所造成的永久性元件功能退化,以及在 p-n 结面暂态的光电效应。

1.2 Hspice 特殊功能探讨

本节将对 Synopsys 公司在 Hspice 软件所研发的各项功能进行一整体性的介绍,而 Hspice 语法描述、示范例子及说明,会在下一节提出。至于在集成电路设计过程中所用到的各项主要功能,会在后面的章节讨论。Hspice 主要的增强功能将在下列各节中逐一说明。

1.2.1 极佳的收敛性

Synopsys 公司借助修正元件模型、方程式及演算法(algorithm)来改善计算机程

序求解时的收敛性。常用的金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor FET, MOSFET)在早期的 SPICE 模型中,如图 1.2 的 $I-V$ 特性曲线所示,在 level_2 模型的引用下,其电路在饱和区和线性区的操作方程式在两区交界点处并不连续,但在实际中元件的特性是连续的,故会造成不收敛情况。Hspice 有多项设定选择,可产生极好的收敛性。

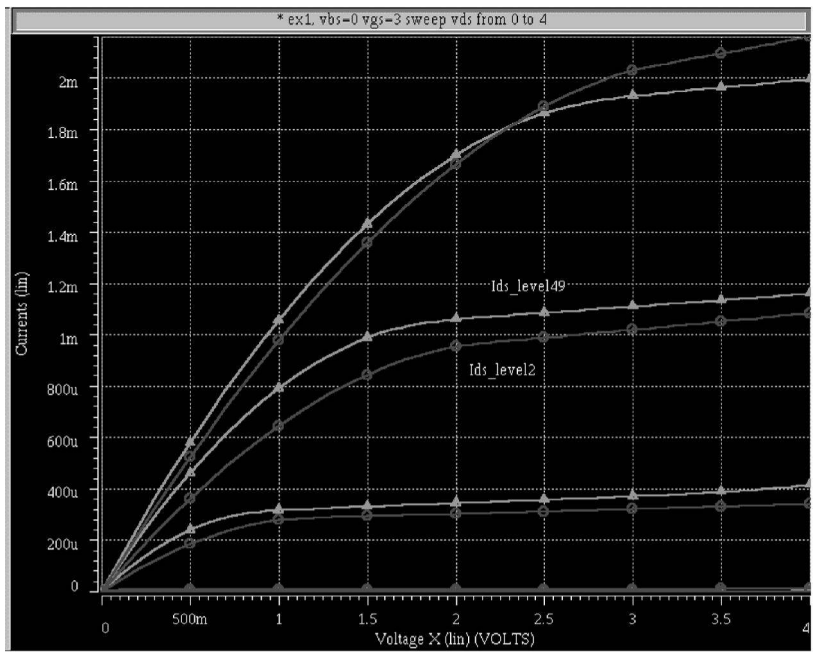


图 1.2 MOSFET 典型的 $I-V$ 特性曲线(Level_2○与 Level_49△模拟值)

1.2.2 电路应用的考虑

由于电子电路设计的多元性,Hspice 可同时适用于单一电路或多电路模拟的应用。其中单一电路主要是指单晶片集成电路设计(on-chip design)。此时,电路上所有晶体管元件共用一制程,故元件参数的变化方向是一致的。而多电路是指印制电路板上的元件,包括集成电路、电阻、电容等是来自不同的制程或制造厂商,故在模拟及设计过程中,Hspice 可允许有不同的参考与应用,包括个别的元件温度、变化参数等。

1.2.3 各类模型的提供

由于 VLSI 制程的进步,各集成电路厂商除了制造设备更新外,亦使得元件进入

亚微米或纳米时代。因此,在电路模拟上对元件模型的准确性与应用有更严格的要求。如以 MOSFET 元件模型与制程相关性来探讨,可作下表的概略区分。

| MOSFET 元件通道长度 | 适用的 SPICE 模型 |
|-------------------------|----------------------------|
| 5 μm 以上的制程 | LEVEL 2 |
| 3 μm 以上的制程 | LEVEL 3 |
| 1.0 μm 以上的制程 | LEVEL 6、13(BSIM1)、LEVEL 28 |
| Sub-half micron 的制程 | LEVEL 28、LEVEL 49(BSIM3V3) |
| Deep-sub micron 的制程 | LEVEL 9、LEVEL 49(BSIM3V3) |

Synopsys 基于各类制程的需求,而有不同层次元件模型的提供,以适合设计上的不同着重点。

1.2.4 元件及模型参数调整(SCALING)

Hspice 利用 SCALE 及 SCALM 调整元件与模型的参数,使输入程序的处理与运算变得更加简洁,SCALE=X 可设定 MOSFET、二极管及 JFET 等元件参数的大小乘积因数(size multiplier)。这些设定使元件参数及模型参数的使用更具弹性。另外,在 Hspice 输入程序中,重要的数值字母代号与意义如下:

$$\begin{aligned}
 \text{MIL} &= 25.4\text{E-6}(\text{METERS}) & \text{FT} &= 0.305(\text{METERS}) \\
 \text{F} &= 1\text{E-15} \\
 \text{P} &= 1\text{E-12} & \text{T} &= 1\text{E12} \\
 \text{N} &= 1\text{E-9} & \text{G} &= 1\text{E9} \\
 \text{U} &= 1\text{E-6} & \text{MEG} &= \text{X} = 1\text{E6} \\
 \text{M} &= 1\text{E-3} & \text{K} &= 1\text{E3} \\
 \text{DB} &= 20 \log_{10}
 \end{aligned}$$

Hspice 使用上,不区分英文的大小写,相同字母的意义相同且代表同一件事。

1.2.5 蒙特卡罗分析

集成电路产品的效能(performance)好坏,除了设计及制程的因素外,在产品的使用或可靠性的测试等方面,都可以反应出产品品质及良率。而在 Hspice 中,可利用罗特卡罗统计分析,将后段测试资料反应到原来设计规格中,并可依此分析,进行最坏状况(worst case)模拟,以提供产品效能的评估与良率分析。罗特卡罗分析将于第 7 章详细探讨。

1.2.6 参数化电路元的特性化

任何元件或电路元都可在 Hspice 中参数化,其输入、输出都可以用代数式来描

述,并作运算。基本的参数化例子如下所示:

```
.PARAM X=5(变量参数化,parameterization)
.PARAM X='Y+3'(代数运算,algebra)
.PARAM Ro(Leff,Weff)='X*Leff*Weff-2U'
```

而代数式的运算亦可当成输出,如下所示:

```
.PRINT CGD = PAR('(X18(ML)+X19(ML))')
```

上述功能在早期的 SPICE 2G6(版本)中并不能做此运算,故减少了旧版 SPICE 的弹性应用层次。

1.2.7 元件及电路元的特性

电路元特性化分析(cell characterization)在集成电路的半客户设计(semi-custom design)方法上有其重要的地位。Hspice 在此功能中,除了可产生元件库特性所需的各项模拟资料(上升、下降、延迟时间等)外,亦可用来修正其他逻辑模拟器,如 VERILOG, Synopsys 等工具所描述的高阶模型。此类应用将在第 6 章中介绍。

1.2.8 传输线的应用

传输线(transmission line)是一可将输入点的信号传递到远距离的输出元件。输配电线(power transmission line)、电话线(twisted pair)及波导管(wave guide)等基本上都属于传输线的范畴。其他如印制电路板、多晶片模组(multi-chip modules)及集成电路包装的电路元件,亦可视为传输线的应用。另外,在大部分电路中,如具有高速度的有源元件,应考虑传输线效应有时间延迟、相位偏移、电源耗损、失真或频宽降低等项。Hspice 所提供的传输线模型有两种,即一般 SPICE 所用的理想无耗损传输线-T 元件和较准确有耗损的传输线-U 元件的模拟,详细的介绍与应用可以参照本章末的参考文献[1]。

1.2.9 最优化

最优化(optimization)是 Hspice 的重要功能之一,主要分为元件及电路最优化两项应用。元件最优化的主要目的是萃取及求出元件 SPICE 模型参数,经比较测量值与模拟值误差大小,而得到最优化的参数集。而电路的最优化则是给定一些设计规格为最优化目标,由 Hspice 辅助,调整元件大小以得到最接近目标(target)的结果。

1.2.10 元件及 IC 模型库

在 Hspice 中,将独立元件、各厂商集成电路元件库及系统公司的输出/输入等效模型等资料都集中在一子目录中,并可利用自动电路元库选择(automatic library se-

lection)高至四十个子目录的使用。Hspice.INI 程序可设定预置的寻找路径如 `search path = '/usr/meta/h92/lib/dio'` 等,此方式在特殊应用集成电路层次或印制电路板层次的模组电路设计上有极大用处。

1.2.11 图形化的处理

在 Hspice 中,可用 AvanWaves 处理器及 .GRAPH 等功能对输出资料进行图形后处理(post processing)。其中,AvanWaves 是属于视窗处理及交谈式的方法,并可在其视窗环境下作各资料的代数运算,包括节点电压、元件电流及电路效能的分析等。.GRAPH 则是在 Hspice 输入程序中预先指定输出参数、印出图形的形式及 X-Y 轴范围等。待 Hspice 执行后,图形结果可直接送到打印机打出。此功能对于元件库最后资料的建立,可节省时间并系统化。

1.2.12 极/零点分析

此分析是 Hspice 中所特有的功能之一,对于网络分析与类比电路如放大器及滤波器的设计尤为重要。我们可利用此分析来得知网络或系统的极零点分布,以分析系统的稳定度;或者利用这些资料配合电路补偿的技巧,如改变频宽或增益,而达到设计规格的要求。极/零点分析、频率响应及放大器的模拟设计将在第 5 章说明。

1.2.13 新的半导体元件模型

对国内集成电路制程或设计环境而言,至少有 95%集中在 CMOS 产品上。虽然,Hspice 在有源元件包括 BJT,JFET 及 MOSFET 等方面皆有新开发的元件模型,但较重要的仍是集中在 MOSFET 元件模型上的研发与应用。在 Hspice 中,处理 MOSFET 模型可分①基本电流方程式模型;②扩散接面二极管的贡献,即面积计算方法(Area Calculation Method, ACM)的计算,此部分可包含进阶型元件结构,如轻掺杂漏极结构(Lightly Doped Drain, LDD)、源极或漏极共用元件的计算等;③栅极电容模型以关键字 CAPOP 分类;④温度效应的加入考虑等。这些概念将在第 3 章中引入及应用到其他各章之中。

1.2.14 模型化及分析技巧应用

Hspice 的设计功能在本书中除了光电流/辐射效应及传输线未作详细探讨外,其他的设计模拟功能将在随后各章介绍。而图 1.3 的方块还说明了 Hspice 和各类元件模型与等效电路元库的支援使用。图 1.4 的方块图列举了 Hspice 所能执行的各类分析与使用。由此图可看到罗特卡罗分析在直流、交流及暂态中的应用,而在频率响应中,S 参数的撷取则用于高频元件及电路设计中,在高频域极为重要。至于资料取代(data driven)及参数化的使用,将在暂态分析与第 6 章电路元特性化章节中

做完整的说明。

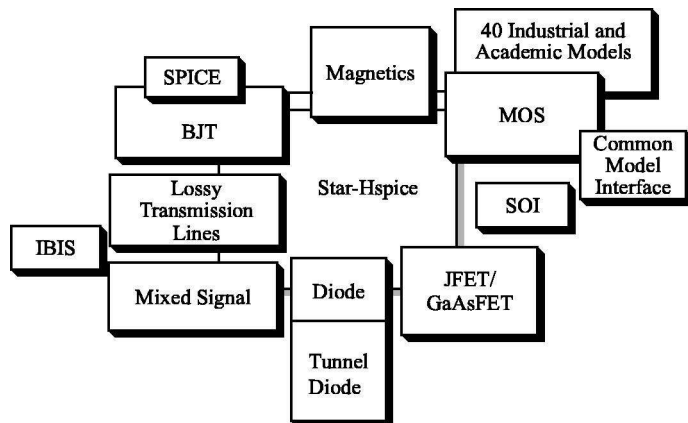


图 1.3 Hspice 的模型化技术

(Copyright property of Synopsys. Reprinted by permission)

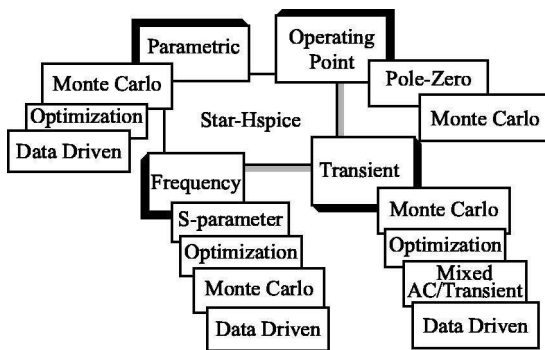


图 1.4 Hspice 可执行的各类电路分析

(Copyright Property of Synopsys. Reprinted by Permission)

1.3 Hspice 实例说明

在了解 Hspice 各项功能的特点后,本节将以实例说明 Hspice 在电路模拟上的基本应用。在该例子中,将会对各类输入波形作探讨,并以实际输出图形加以比较验证。在进行实际的输入程序叙述与说明前,我们先介绍 Hspice 输入程序的结构。

1.3.1 Hspice 输入程序结构

Hspice 的输入电路程序格式与一般 SPICE 用法基本上一致,其输入电路程序典

型格式如下：

* 标题叙述

| | | |
|------------------|--------|-------------------|
| 电 路 主 体 | 电路描述 | (* 注解叙述可安插于其内任一列) |
| | (资料叙述) | |
| | 分析形态 | |
| | (控制叙述) | |
| | (输出叙述) | |

. END (结束叙述)

为了说明 Hspice 的输入电路程序格式比一般 SPICE 更完整、更具有弹性,我们再进行以逐行列举、注解与说明的方式引导读者熟悉电路程序格式。

| 输入程序叙述 | 注解与说明 |
|--|----------------------------|
| TITLE | 隐含式的第一行,将成为输出程序每一列印页的标题 |
| * or \$ | 注解符号,用来描述线路以增加程式的可读性 |
| . OPTIONS | 设定模拟条件、参数等 |
| ANALYSIS AND TEMPERATURE | 各分析叙述以设定扫描变量,如温度等 |
| + | “+”,继续上一行未完成的叙述 |
| . PRINT/. PLOT/. GRAPH | 列印、描图及输出图形变量设定 |
| . INITIAL CONDITIONS | 设定输入状态,也可放在子电路中设定初值条件 |
| SOURCES | 设定输入电源激励(stimulus) |
| NETLIST | 电路描述 |
| . MACRO LIBRARIES (. LIBRARY 及 . INC) | 巨集指令、元件库的引入 |
| . SUBCKT | |
| NETLIST | 子电路的定义与描述 |
| . ENDS | |
| <. PROTECT> | 阻止元件模型参数集在输出的列印 |
| . MODEL LIBRARIES | 模型参数的叫入(. LIBRARY 及 . INC) |
| <. UNPROTECT> | 恢复输出的列印 |
| . ALTER | 各种状况分析的程序变换 |
| . DELETE LIB | 删除先前的元件库选择 |
| . LIB | 增加新的元件库状况 |
| . ALTER | 变换状况的分析 |
| NETLIST | 电路描述 |
| PARAMETER REDEFINITION | 参数的重新定义(资料取代) |
| ADDITIONAL ANALYSIS | 其他分析叙述 |
| . END | 结束任何的 ALTER 及模拟 |

1.3.2 电源应用的实例说明

在本节中我们将利用一些基本电路(参见图 1.5~图 1.7 的电路图),撰写 Hspice 输入电路程序,并说明各类波形在暂态分析中的应用。常用的输入波形为 PWL/PL、PULSE、SIN 及 EXP 等形态。

1. PWL/PL(Piece Wise Linear Waveform): 片段线性波形

PWL t1 v1<t2 v2 t3 v3...> <R>

或

PL v1 t1<t2 v2 t3 v3 t3...> <R>

PWL 采取 (t, x) 对,而 PL 采取 (x, t) 对的形式作电源的描述。其中, x 为 V 或 I ,如图 1.5 所示, V_3 波形的输入即属于 PWL 波形,如在 PWL/PL 叙述中,字母“R”在叙述的尾端,则说明波形可重复出现(repeat)。故 PWL 在其叙述的尾端加上“R”,实际上可取代周期脉冲(PULSE)的功能。但 PWL 比 PULSE 更具弹性,因 PWL 可描述不规则的输入波形,故适合更广泛的各类波形输入及重复出现的特殊需要。

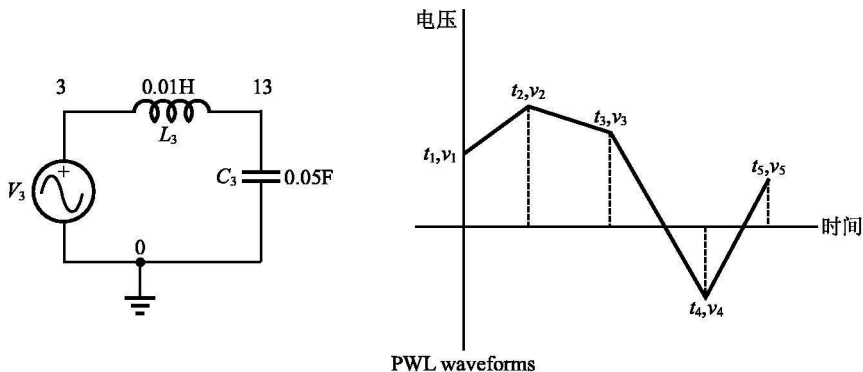


图 1.5 PWL/PL 波形的输入电路范例

Hspice 输入程序如下:

```
* Source Type Test *
.options post acct
.tran 0.1 5 $needs 5sec to settle
.print v(3) i(c3)
.plot v(13) v(3) v(3,13)
*voltage sources
v3 3 0 dc 0 ac 0 0 pwl(0 3 0.4 5 1.0 4 1.6 - 2 + 2.0 2)
.end
```

2. PULSE(PULSE Periodic Waveform): 周期脉冲波形

PULSE V1 V2 < td tr tf pw per >

包含初始电压/电流(V_1/I_1)、脉冲电压/电流(V_2/I_2)、延迟时间(t_d)、上升时间(t_r)、下降时间(t_f)、波宽(pw)及周期(per),图 1.6 所示为 V_4 输入波形的描述。

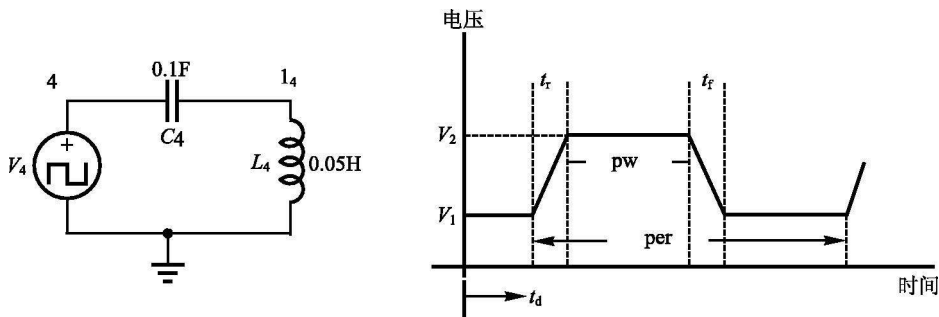


图 1.6 PULSE 波形的输入电路范例

Hspice 输入程序如下:

```
* Source Type Test *
.options post acct
.tran 0.1 5 $in-lin comments
* comments
v4 4 0 dc 0 ac 0 0 pulse 0 1 0 0.15
+ 0.15 0.4 2
C4 4 14 0.1
L4 14 0 0.05
*
.print v(4) i(L4)
.plot v(4) v(14)
.end
```

3. SIN(Sinusoidal Waveform): 正弦波形

SIN V1 V2 < freq td df phase >

包含初始电压/电流(V_1/I_1)、终值电压/电流(V_2/I_2)、频率(f)、延迟时间(t_d)、阻尼因数(df , in 1/sec)及相位延迟(θ , in degrees),即可写成 $SIN(V_1 V_2 f t_d df \theta)$,图 1.7 所示为 V_5 输入波形的说明。

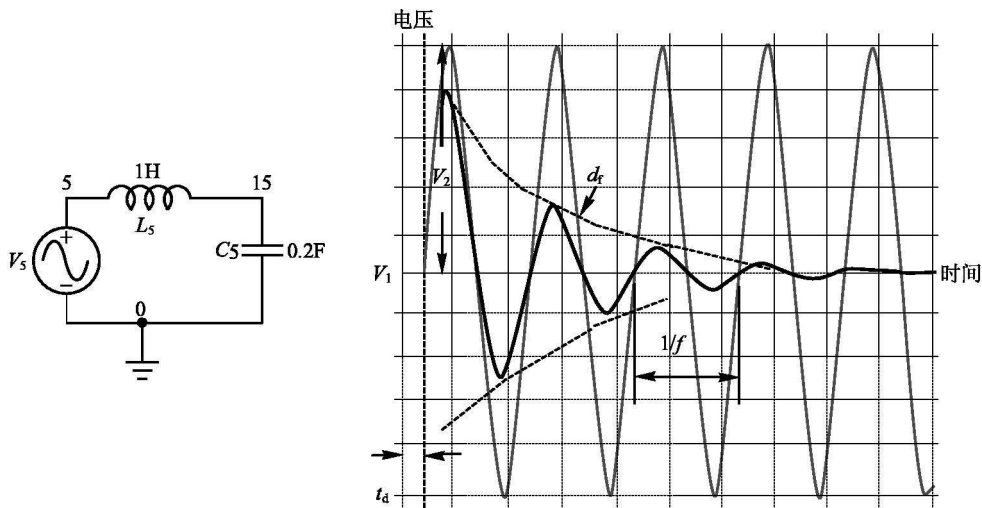


图 1.7 SIN 波形的输入电路范例

4. EXP(Exponential Waveform): 指数波形

EXP V1 V2 t_{d1} τ₁ t_{d2} τ₂

包含初始电压/电流 (V_1/I_1)、脉冲电压/电流 (V_2/I_2)、第一延迟时间 (t_{d1})、第一时间常数 (τ_1)、第二延迟时间 (t_{d2}) 及第二时间常数 (τ_2)。至于指数波形的上升、下降次序,完全决定于 V_1 及 V_2 的大小。图 1.8 所示为 $V_1 > V_2$ 的情况所产生的波形。图 1.9 则为 $V_1 < V_2$ 的情况所产生的波形。指数波形常用来分析 R-L-C 网络。

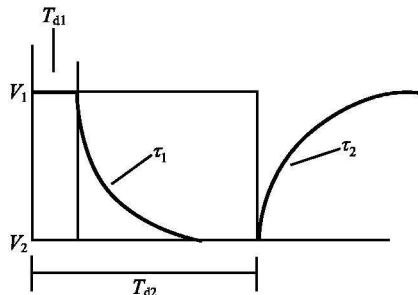


图 1.8 指数波形的输入电路范例
($V_1 > V_2$)

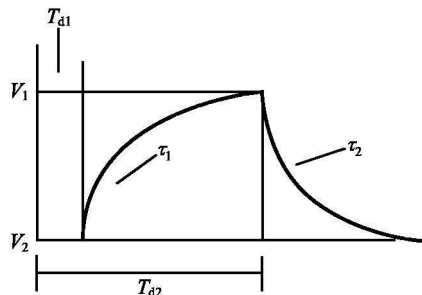


图 1.9 指数波形的输入电路范例
($V_1 < V_2$)

因此,针对上述各种信号波形态及相关电路的 Hspice 输入程序如下表所示。

| LINE NO. | 输入叙述 | 说 明 |
|----------|------------------------------|--|
| 1 | POWER. SP | 程序名称 |
| 2 | * | 注解 |
| 3 | .OPTIONS POST ACCT OPTS | 选择设定;POST 为 BINARY 档 ACCT 列出程序及执行时间的相关资料,OPTS 使参与的选择值列印 |
| 4 | .TRAN 0.1S 5S | 暂态分析时间增量为 0.1s,结束时间为 5s |
| 5 | .PLOT V(13) V(3) V(4) V(14) | (V13)、V(3)、V(4)、V(14) 及 V(5) 等的绘图列出 |
| 6 | +V(5) | |
| 7 | .GRAPH V(13) | 直接产生节点 13 的电压图形到列印机 |
| 8 | V3 3 0 AC 1 PL 0V 0, | 节点 3 到 0 中加一电压 |
| 9 | +0.4V 0.1,0.4V 0.3,0.25V 0.4 | 交流成分为 1 并具片段线性波形及作重复波形设定 |
| 10 | +0.25V 0.6,0V 0.75,0V 1 R | |
| 11 | L3 3 13 0.01 | 节点 3 到 13 中连一电感,其值为 0.01H |
| 12 | C3 13 0 0.05 | 节点 13 到 0 中连一电容,其值为 0.05F |
| 13 | * | 注解 |
| 14 | V4 4 0 DC 0 PULSE | 节点 4 与 0 接一电压,其直流成分为 0,并具一脉冲周期函数的描述 |
| 15 | +0 1 0 0.15 0.25 0.4 1 | |
| 16 | L4 14 0 0.05 | 节点 14 到 0 连接一电感值,其为 0.05H |
| 17 | C4 4 14 0.1 | 节点 4 到 14 连接一电容,其值为 0.1F |
| 18 | * | |
| 19 | V5 5 0 SIN(1 1 1 0 1) | 节点 5 到 0 接一正弦波,其中 $V_1 = 1$, $V_2 = 1$, $f_{rep} = 1S$, $t_d = 1S$ 及 $\Phi = 1S^{-1}$ |
| 20 | L5 5 15 1 | 节点 5 到 15 接一电感,其值为 1H |
| 21 | C5 15 0 0.2 | 节点 5 到 0 接一电容,其值为 0.2F |
| 22 | * | |
| 23 | V6 6 0 EXP(1 0 0.1 0.02) | 节点 6 到 0 接一电压,并具一指数波形,其中 $V_1 = 1V$, $V_2 = 0$, $t_{d1} = 0.1S$, $\tau_1 = 0.02S$, $t_{d2} = 0.6S$ |
| 24 | 24+0.6 0.2) | 及 $\tau_2 = 0.2S$ |
| 25 | L6 6 16 0.05 | 节点 6 到 16 接一电感,其值为 0.05H |
| 26 | C6 16 0 0.05 | 节点 16 到 0 接一电容,其值为 0.05F |
| 27 | R16 16 0 40 | 节点 16 到 0 接一电阻,其值为 40Ω |