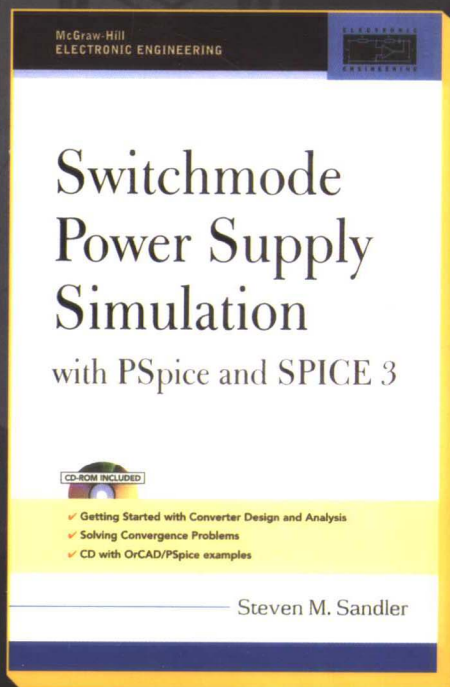


# 开关电源仿真

## PSpice和SPICE 3应用

### Switchmode Power Supply Simulation with PSpice and SPICE 3

[美] Steven M. Sandler 著  
尹华杰 等译



**TURING**

图灵电子与电气工程丛书

# 开关电源仿真

## PSpice和SPICE 3应用

### Switchmode Power Supply Simulation with PSpice and SPICE 3

[美] Steven M. Sandler 著  
尹华杰 等译

Switchmode  
Power Supply  
Simulation  
with PSpice and SPICE 3

CD-ROM INCLUDED

- ✓ Getting Started with Converter Design and Analysis
- ✓ Solving Convergence Problems
- ✓ CD with OrCAD/PSpice examples

Steven M. Sandler

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源仿真: PSpice 和 SPICE 3 应用 / (美) 桑德勒 (Sandler, S.M.) 著; 尹华杰等译. —北京: 人民邮电出版社, 2007.10

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-16449-0

I. 开… II. ①桑…②尹… III. 电路—计算机仿真—应用软件, PSpice, SPICE 3 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 093267 号

## 内 容 简 介

本书完整阐释了建模的基础及 SPICE 仿真的方法, 内容涵盖了电路仿真技术的各个方面, 包括磁性器件的 SPICE 建模、EMI 滤波器设计、Buck 拓扑变换器、反激变换器、低压降线性调压器、DC-AC 变换、功率因数校正、Boost 和 Sepic 变换器、仿真性能的改进, 以及仿真收敛性问题的解决等, 并提供了许多仿真实例。

本书可作为从事电路、电力电子仿真与设计的工程技术人员和相关专业高校师生的参考书。

图灵电子与电气工程丛书

### 开关电源仿真

### PSpice 和 SPICE 3 应用

- 
- ◆ 著 [美] Steven M. Sandler
  - 译 尹华杰 等
  - 责任编辑 朱 巍
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
  - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
  - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
  - 北京铭成印刷有限公司印刷
  - 新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 700×1000 1/16
  - 印张: 14
  - 字数: 291 千字 2007 年 10 月第 1 版
  - 印数: 1—4 000 册 2007 年 10 月北京第 1 次印刷
  - 著作权合同登记号 图字: 01-2007-2671 号
  - ISBN 978-7-115-16449-0/TM
- 

定价: 45.00 元

读者服务热线: (010) 88593802 印装质量热线: (010) 67129223

# 版 权 声 明

Steven M. Sandler, *Switchmode Power Supply Simulation with PSpice and SPICE 3*, ISBN 0-07-146326-7.

Copyright © 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and POSTS & TELECOM PRESS. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SARs and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司合作出版。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾地区)销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律制裁。

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。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

# 译者序

在最近 10 多年里,电力电子技术在国内外蓬勃发展,相应的仿真方法和软件也大量出现,并得到了广泛应用。与此相应,国内出版了许多关于仿真的好书,大大方便了从事电力电子开发和研究的人。但美中不足的是,这类书籍的内容往往限于介绍仿真的方法及仿真软件的操作,这对于采用常规结构和参数、使用常用器件的成熟电路的仿真与设计可能是足够的,但对于需要深入研究的电路的仿真,对于采用新参数、新结构、新器件的电路的仿真,可能就远远不够了。因为在这类仿真中,往往会出现许多使仿真难以进行下去的问题,往往有些新器件缺少现成的或精确的模型。在许多介绍仿真的书籍中,难以找到这类问题的解答。

与我有同感的人应该感谢 Steven M. Sandler 先生,他在 1996 年就出版了 *SMPS Simulation with SPICE 3* 一书,该书可以解答人们在应用 SPICE 进行电力电子仿真时遇到的大部分问题。10 余年过去了,电力电子技术取得了长足进展,仿真技术和软件也有了新的发展,Sandler 先生通过对旧版的更新、扩充,终于推出了本书。

本书主要有三个特色;一是教读者如何为各种器件建立(及选择)精确的或快速的仿真模型,这是一般的仿真书籍所没有的;二是提供了大量的仿真心得体会和可行的操作步骤,教读者在遇到各种仿真问题时,如何由简到繁、按部就班地进行处理,并最终解决问题;三是提供了许多来自实际工程的仿真实例<sup>①</sup>,让读者不枉读此书。

本书的中文翻译工作得到了 Sandler 先生本人及 AEi Systems 公司资深工程师 Danny Chow 先生的协助。Sandler 先生解答了译者的一些疑问,并为中文简体版撰写了“致中国读者”提供了更准确的图片;Chow 先生对译稿进行了校阅,并提出了许多宝贵的修改意见。华南理工大学电力学院雅达实验室的王志强副教授审阅了中文译稿;研究生胡君、黄志、超明、张治涛、郭建龙、王向臣、林炯康、王世闻、曹少泳、李金安、刘增磊、肖如晶、周艳青、韦立学、罗永吉等试读了译稿,对部分译文提出了修改意见。藉此机会,译者对他们的工作表示衷心感谢。

译者才疏学浅,译词失当、疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

尹华杰 于广州华南理工大学

2007 年 2 月 1 日

---

① 本书实例及附带资源请登录图灵公司本书配套网页免费下载。——编者注

## 致中国读者

I was very pleased when I learned that this book would be translated into Chinese. This made it clear that SPICE was of global interest and more importantly that SPICE crossed the language barriers. Though we, as individuals may speak different languages, we can communicate our ideas and we can each act as both teachers and students; all learning from each other and all teaching each other.

It is my hope that you will find this book to be helpful and that you will use what you learn from it in your future experiences. I also hope that you will build upon it, adding your own experiences and knowledge that you will offer back to the engineering community so that it will evolve over time.

Please feel free to share your questions, ideas and criticisms so that the next generation will be even better.

当得知本书即将出版中文简体版时,我非常高兴。这不仅表明 SPICE 是一个全球性的工具,更重要的是,它表明 SPICE 跨越了语言的障碍。尽管我们语言不通,但我们可以交流思想,可以彼此既做老师又做学生,互相学习,互相指点。

我衷心希望本书将对你有所帮助,也希望你在未来的实践中,能够用到书中的知识,并用所积累的经验 and 知识扩充本书。

请将你的疑问、想法或批评无所保留地反馈给我,以使本书的下个版本变得更好。

Steven M. Sandler

# 前 言

本书的前一版出版于 1996 年,到如今,有些事情发生了变化,有些事情却依旧未变。

在未曾变化的事情中,有两件最值得提及,一是对更好模型的渴望,二是对更快仿真速度的需求。我最初进行仿真是在自己“超快速的”133MHz 计算机上。当时我想,如果有一台更快的计算机,那么 SPICE 中存在的所有问题不都将迎刃而解了吗?今天,虽然在具有 2.6GHz 处理器、512MB 内存的计算机上进行仿真,但我仍然会埋怨仿真速度太慢。不错,计算机技术在发展,仿真模型也在发展,1996 年我们仿真的是 100kHz 的变换器,而今天常见的是 1MHz~2MHz 的功率变换器。

另一个未曾变化的事情是,我仍然经常接到类似“我们没有时间仿真”、“仿真结果无法提供精确的解答”之类的抱怨。

自本书的前一版本出版以来,许多事情也发生了变化。设计周期缩短了,性能要求却变得更加难以满足。相比 1996 年的器件,今天的单片器件集成更多的技术,拥有更多的功能和特征。由于这些原因,我主张必须将 SPICE 或其他仿真工具的能力发挥到可能的极限。

另一个变化是,许多元件制造商加入了 SPICE 的行列。许多半导体制造商发布其器件的 SPICE 模型,电容器制造商和电感器制造商也是如此。许多集成电路制造商也发布了 SPICE 模型,有些甚至提供基于因特网的仿真工具,其中预置了他们的器件模板。器件模型在精度方面总体来说得到了提高,但需要注意的是,仍然有许多很不好的模型在不断地发布。

为使本书尽可能实用,本书在前一版本基础上做了多处改变。首先,更新了一些实例电路,以反映当前的技术水平,并为许多实例电路添加了实测结果。这些实例证明,如果从精确的模型入手,SPICE 将可以提供十分精确的结果。其次,扩展了线性调压器这一章。这类设备看似简单且技术含量“低”,然而我在这类设备的设计中仍然发现了许多问题。可以预期的是,这些新增内容将增进人们对这类设备的运行情况及围绕它们的问题的理解。最后,增加了专门讲述有源功率因数校正(PFC)的一章。PFC 已经成为广泛应用的一种技术,我希望这些新增内容可以对读者很有用。

最后祝各位仿真开心。

Steven M. Sandler

# 目 录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                    | 1  |
| 1.1 为何仿真 .....                           | 1  |
| 1.2 本书中采用的 SPICE 语法 .....                | 1  |
| 1.3 PSpice、SPICE 3 及其他 SPICE<br>扩展 ..... | 2  |
| 1.4 非线性非独立源(B、E、G 元件) ...                | 3  |
| 1.5 数字逻辑函数 .....                         | 5  |
| 1.6 开关元件(S/W 元件) .....                   | 6  |
| 1.7 本书附带资源 .....                         | 10 |
| 1.8 本书使用的基于 SPICE 的分析<br>类型 .....        | 11 |
| <b>第 2 章 磁性器件的 SPICE 建模</b> ...          | 15 |
| 2.1 简介 .....                             | 15 |
| 2.2 SPICE 中的理想元件 .....                   | 17 |
| 2.3 PSpice 耦合电感器模型 .....                 | 19 |
| 2.4 磁阻模型与物理模型 .....                      | 21 |
| 2.5 饱和磁芯建模 .....                         | 31 |
| 2.6 兼容 SPICE 2 的磁芯模型 .....               | 31 |
| 2.7 磁芯模型的工作原理 .....                      | 32 |
| 2.8 计算磁芯参数 .....                         | 35 |
| 2.9 饱和磁芯模型的使用和验证 .....                   | 38 |
| 2.10 兼容 SPICE 3 的磁芯模型 .....              | 39 |
| 2.11 铁氧体磁芯 .....                         | 44 |
| 2.12 构建变压器模型 .....                       | 48 |
| 2.13 高频线圈效应 .....                        | 51 |
| <b>第 3 章 EMI 滤波器设计</b> .....             | 55 |
| 3.1 基本要求 .....                           | 55 |
| 3.2 确定负电阻 .....                          | 55 |
| 3.3 确定谐波含量 .....                         | 56 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 3.4 衰减元件 .....                       | 61  |
| 3.5 四阶滤波器 .....                      | 65  |
| 3.6 浪涌电流 .....                       | 70  |
| 3.7 MPP 电感器 .....                    | 71  |
| 3.8 浪涌电流的限制 .....                    | 76  |
| <b>第 4 章 Buck 拓扑变换器</b> .....        | 79  |
| 4.1 滞后开关调压器 .....                    | 79  |
| 4.2 平均(状态空间)模型与开关层次<br>瞬态模型的对比 ..... | 80  |
| 4.3 平均法建模实例 .....                    | 81  |
| 4.4 采用 SG1524A 的 Buck 调压器 ...        | 83  |
| 4.5 非连续导通模态的仿真 .....                 | 89  |
| 4.6 改进的 Buck 子电路 .....               | 89  |
| 4.7 加入斜率补偿 .....                     | 92  |
| 4.8 电压模式控制 .....                     | 93  |
| 4.9 改进的 SG1524A Buck 调压器 ...         | 93  |
| 4.10 瞬态模型 .....                      | 96  |
| <b>第 5 章 反激变换器</b> .....             | 100 |
| 5.1 反激变换器的子电路 .....                  | 100 |
| 5.2 音频敏感性 .....                      | 104 |
| 5.3 前馈改进 .....                       | 105 |
| 5.4 反激变换器的瞬态响应 .....                 | 107 |
| 5.5 电压调整率的仿真 .....                   | 110 |
| 5.6 时域模型 .....                       | 112 |
| 5.7 加入斜率补偿 .....                     | 114 |
| 5.8 电压模式控制 .....                     | 115 |
| <b>第 6 章 低压降线性调压器</b> .....          | 116 |
| 6.1 瞬态响应 .....                       | 118 |
| 6.2 纹波抑制 .....                       | 119 |
| 6.3 控制环的稳定性 .....                    | 120 |

|                                    |     |                            |     |
|------------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| <b>第 7 章 DC-AC 转换</b> .....        | 132 | <b>第 9 章 仿真性能的改进</b> ..... | 175 |
| 7.1 使用 SPICE 生成正弦波 ROM<br>位码 ..... | 132 | 9.1 建立电路模型 .....           | 175 |
| 7.2 XSPICE 中的状态机建模 .....           | 136 | 9.2 简化模型 .....             | 176 |
| 7.3 使用正弦参考信号驱动功率级 .....            | 139 | 9.3 输出级的复杂度 .....          | 181 |
| 7.4 非线性负载的供电 .....                 | 143 | 9.4 .OPTIONS .....         | 183 |
| 7.5 三相正弦参考信号 .....                 | 146 | 9.5 状态机模型 .....            | 184 |
| 7.6 谐波中和的全桥逆变器 .....               | 153 | 9.6 硬件考虑 .....             | 184 |
| 7.7 谐波中和的半桥逆变器 .....               | 156 | <b>第 10 章 求解的收敛性及其他</b>    |     |
| 7.8 PWM 逆变器 .....                  | 157 | <b>仿真问题</b> .....          | 186 |
| <b>第 8 章 功率因数校正</b> .....          | 160 | 10.1 快速解决仿真收敛性问题 .....     | 186 |
| 8.1 单相变压器整流器 .....                 | 160 | 10.2 反复仿真或开关仿真 .....       | 186 |
| 8.2 三相变压器整流器 .....                 | 162 | 10.3 仿真收敛性 .....           | 187 |
| 8.3 非连续导通反激式功率因数校正器 .....          | 165 | 10.4 总体讨论 .....            | 188 |
| 8.4 临界导通功率因数校正器 .....              | 168 | 10.5 DC 收敛性的解决措施 .....     | 188 |
| 8.5 Boost 模式功率因数校正器 .....          | 171 | 10.6 瞬态收敛性的解决措施 .....      | 190 |
|                                    |     | 10.7 建模技巧 .....            | 192 |
|                                    |     | <b>推荐书目</b> .....          | 193 |
|                                    |     | <b>索引</b> .....            | 202 |

# 第 1 章 绪 论

计算机建模与仿真领域的技术正快速发展,随着计算机速度的提高、计算能力的增强,新软件也随之提供了更加强大的功能。对于设计工程师以及从事设计的公司来讲,技术上的这种进步具有极大的益处。本书旨在讲述如何利用计算机的建模能力,以及如何进行功率电路的仿真。

## 1.1 为何仿真

我曾不止一次被问及(通常是被我的上司问及),为什么总是要用更新、更快的计算机及软件?为什么要在参加会议和培训班上花费许多宝贵的经费?在对这些问题进行了深入思考之后,我得出了以下结论。

### ☐ 仿真节省经费

在生产期之前未能发现的设计缺陷有可能延迟计划,从而显著增加产品成本,仿真则有助于这类错误的早期发现。Monte Carlo 仿真及最坏情况仿真可以帮助获得最高的生产率。在仿真的帮助下,昂贵的部件和系统可以在不被损坏的情况下得到有效的跟踪和调试。

### ☐ 仿真节省时间

在计算机上对电路进行仿真,比建造、调试实际的电路要快得多。

### ☐ 仿真使不可测成为可测

计算机仿真允许工程师以最坏情况值或恶劣环境条件对电路进行评估。但要建造实际的电路并使其包含所有最坏情况的元件值,或者要测量太阳耀斑对电路性能的影响之类的任务,则是极具挑战性的,而仿真则可以很容易地对这类条件进行评估。

1

### ☐ 仿真提高安全性

仿真允许对故障状态进行评估,这类故障也许是对人身有危险的。飞行员要花费相当多的时间来进行紧急状态仿真,而不是制造实际的事故来获得锻炼。

## 1.2 本书中采用的 SPICE 语法

本书假定读者已经掌握了进行 SPICE 基本操作的知识,特别是掌握 Cadence De-

sign Systems 公司的 PSpice, 如果没有这些知识, 建议读者先浏览 SPICE 软件附带的手册。在 Cadence Design Systems 公司的网站 [www.orcad.com](http://www.orcad.com) 或 [www.ema-eda.com](http://www.ema-eda.com) 上, 有一个 Demo 版的 PSpice 可供下载。本书使用的语法总体上遵从 SPICE 2 或 SPICE 3, 但在建模过程中利用了 SPICE 语言的几个关键 PSpice 扩展, 这些扩展极大地增强了仿真的效率以及对功率 IC 运行的不同方面进行建模的能力(具体请参考 1.3 节)。

本书旨在帮助读者将 SPICE 应用于设计与分析过程中, 强烈建议读者运行仿真实例, 以便很好地理解该软件的功能以及建模技术。本书的所有实例电路, 都是为了在 OrCAD 的 Capture 及 PSpice 环境下进行仿真而设计的, 当然, 它们也可以用在与 PSpice 兼容的其他 SPICE 版本下。经过少许修改(在下一节讲述), 几乎任何 SPICE 软件都可以用来进行仿真。另外, 这里介绍的设计和建模技术对许多不同种类的仿真器都是适用的。为了读者的方便, 附带的资源中包含了本书的部分电路、电路原理图和 SPICE 的网表。

我之所以选用 Cadence/OrCAD PSpice, 有以下几个原因。

- ☐ PSpice 仿真器将最新的技术引入了模拟与混合信号设计软件之中。
- ☐ 它是电力电子及相关应用最好的 SPICE 仿真器。该仿真器所带的库包含了大量的功率半导体模型, 包括 IGBT、SCR、triac(三向可控硅)、功率 MOSFET 和功率 BJT 等。所有这些模型都具有非加密的 ASCII 文本文件格式, 很容易进行编辑。
- ☐ 在 Cadence/OrCAD 提供的众多功能模块中, 有一个是软件建模工具, 该工具可使读者根据制造商提供的数据表参数轻松地建立自己的元件模型。
- ☐ 所有的功率器件都采用成熟的子电路结构, 因此可以描述十分逼真的行为。PSpice 的行为建模工具十分强大, 应用极其广泛。
- ☐ Cadence/OrCAD 致力于改善其产品, 不断地增强其软件的功能、加入提高生产率的特性。
- ☐ Cadence/OrCAD 拥有一批学识渊博的技术支持人员, 他们注重与工程师在工作上密切配合, 尽可能提高其软件的生产效率。
- ☐ PSpice 是当今占主导地位的、基于 SPICE 的仿真器。

### 1.3 PSpice、SPICE 3 及其他 SPICE 扩展

本书的大部分模型及电路元件采用 SPICE 2G.6 语法。在任何可能的情况下, 都采用基本语法, 以使模型可以在不同的仿真器中使用。但有些关键元件的建模采用了 PSpice 定义的(或 Berkeley 的)SPICE 3 语法扩展。SPICE 3 拥有一种任意非独立源(或称 B 元件), 它使得所用的电压、电流和其他物理量可以用数学公式表示。PSpice 则对 E-和 G-受控源元件的语法做了更进一步的扩展, 以加入大量的行为建模结构, 包括数学表达式、逻辑 If-Then-Else 表达式等。PSpice 和 SPICE 3 都可以创建具有(或不

具有)滞后特性的开关,这类开关的使用同样十分广泛。

新的 SPICE 3 元件具备更大的灵活性和更高的性能,后面将对这类元件的语法、行为和其他一些 SPICE“扩展”进行简单介绍。读者可以从文献[5]中获得更多的信息。

在对功率器件中常见的非线性大信号行为进行模拟时,需要用到任意的 X-Y 传递函数。尽管 SPICE 2 中的多项式数学特征描述方法得到了普遍接受,但却存在极大的局限性,因此,Berkleley 的 SPICE 3 所提供的更为灵活的行为数学表达式得到了广泛应用。此外,偶尔也要用到程序类的行为,为了产生这种功能,PSpice 使用了 If-Then-Else 语法。在某些版本的 SPICE 中,这一“语法扩展”也被加入到了 Berkeley SPICE 3 的 B—元件中,但并非所有的 SPICE 版本都如此。有些 SPICE 供应商提供一个表格类型的函数,采用一系列 X-Y 数据点来定义传递函数。PSpice 也支持表函数,但 If-Then-Else 语法具有一个优越于表模型的地方,即在 If-Then-Else 语法中,传递函数在各 X-Y 数据点之间可以是非线性的,而表模型仅仅支持点之间的线段插值。

3

非线性 PWM 集成芯片的模型需要用到锁存器、触发器等基本的数字逻辑函数。这些函数在 PSpice 中可以用好几种方法进行有效的建模,但若使用 SPICE 2 的多项式语法建模,也许就过于复杂了。所以,另一个 PSpice 语法扩展——布尔逻辑表达式,被用于对数字函数进行建模。

如果仿真器支持 SPICE 3 的函数,并等效支持 PSpice 的扩展,那么就可以轻易地翻译本书所用的语法。

PSpice 是以 Berkeley 的 SPICE 为基础的,然而在仿真算法、图形用户界面、高级多任务分析以及模型支持等方面,它相对原始的 Berkeley 版本已经有了显著的增强。

下面给出了 Berkeley SPICE 3 元件的语法和 PSpice 行为扩展的语法,同时用一些例子来说明如何将这些语法扩展翻译到其他 SPICE 仿真器。

## 1.4 非线性非独立源(B、E、G 元件)

### 1.4.1 数学表达式

任意非独立源(B 元件)的作用是用数学表达式来表示瞬时传递函数。这里,B 元件是标准的 Berkeley SPICE 3 元件。其中的[EXPR],即给 V 和 I 赋值的表达式,可以是任何节点电压和任何元件电流的任意函数,或者是传统的数学函数的变种。在 PSpice 中,则用 E-和 G-受控源元件来实现这种功能。

**格式:** Bname N+ N- [I = EXPR] [V = EXPR]

**SPICE 3 实例:** B1 0 1 I = sqrt(cos(v(1)/(v(2,3))))

B4 outp outn V = exp(i(vdd)^2)

B1 1 0 V = V(2) \* abs(I(V1)) + V(3)

B3 1 2 V = I(R1)

$$B2\ 2\ 3\ I = \{V(7) * \sin(\text{Time})\}^*$$

注意:部分 SPICE 仿真器(但决不是全部)允许在 B 元件表达式中使用关键词 Time、Freq 或 Temp。

4

格式:  $Ename\ N+ \ N- \ Value = \{EXPR\}$

$Gname\ N+ \ N- \ Value = \{EXPR\}$

PSpice 的等效实例:  $G1 \quad 0 \quad 1$

$value = \{\sqrt{\cos(v(1)/(v(2,3)))}\}$

$E4\ outn\ outn\ value = \{\exp(pwr(I(vdd), 2))\}$

$E1\ 1\ 0\ value = \{V(2) * \text{abs}(I(V1)) + V(3)\}$

$E3\ 1\ 2\ value = \{I(R1)\}$

$G2\ 2\ 3\ value = \{V(7) * \sin(\text{Time})\}$

在 Berkeley SPICE 3 的语法中,任意源的语法都以字母 B 开始。 $N+$  和  $N-$  分别表示正节点和负节点; $V$ 、 $I$  参数的值则分别表示器件两端的电压和流过器件的电流。与 PSpice 不同,在 B 元件中,电流控制源(G 元件)和电压控制源(E 元件)没有区别。若给定的是“ $I =$ ”,则输出的为电流源;若给定的是“ $V =$ ”,则输出的为电压源。在这两个参数中,必须给定一个,且只能给定一个。

### 1.4.2 PSpice 中的 If-Then-Else 实例

在前面数学表达式中出现的[EXPR]里,也可以包含一个特殊的 If-Then-Else 逻辑表达式。在后面的 PSpice 实例中将会看到,这种结构在功率 IC 的建模中最为常用,然而许多 SPICE 供应商却没有等效的语法来支持这一特性。

格式:  $Ename\ N+ \ N- \ Value = \{IF(Evaluation, Output\_Value\ 1\ or\ Expression, Output\_Value\ 2\ or\ Expression)\}$

简化格式:  $Ename\ N+ \ N- \ Value = \{if(Evaluation\ is\ true, then\ V(N+, N-) = Output\_Value\ 1, else\ v(N+, N-) = Output\_Value\ 2)\}$

其中,  $Evaluation$ 、 $Output\_value$ 、 $Expression$  可以包含 1.4.1 节中讨论过的任何数学表达式,或包含布尔运算。实质上,这里对可以使用的表达式的长度和复杂性没有提出任何限制。 $Evaluation$  表达式可以使用大于(>)或小于(<)测试,但不允许使用相等测试。

### 1.4.3 If-Then-Else 实例

#### 1. 用户自定义电平的 3 输入与非门

PSpice:  $e1\ 4\ 0\ value = \{if(v(1) > 1.5, if(v(2) > 1.5, if(v(3) > 1.5, 0.3, 3.5), 3.5), 3.5)\}$

Translation: If  $v(1)$  is greater than 1.5, then if  $v(2)$  is greater than 1.5, then if  $v(3)$  is greater than 1.5, then  $v(4) = 0.3$ ; else  $v(4) = 3.5$

5

## 2. 3 区域限幅器

**PSpice:** el 4 0 value = {if (v(1)<.5, v(1)\*.5+.25, if (v(1)>1.53, 1.54, v(1)))}

Translation: If v(1) is less than .5, then v(2) = v(1)\*.5 + 2.5; else if v(1) is greater than 1.53, then v(2) = 1.54; else v(2) = v(1)

## 3. 比较器

**PSpice:** el 3 0 value = {if(v(1,2)<0,5,.2)}

Translation: If voltage difference v(1)-v(2) is less than 0, then v(3) =5; else v(3) =.1

## 4. 电压控制决策

**PSpice:** el 2 0 value={if(v(vctrl)<0, v(3), v(4))}

Translation: If vctrl is less than 0, then v(2)=v(3); else v(2)=v(4)

# 1.5 数字逻辑函数

PSpice 的 If-Then-Else 元件扩展可用于创建数字逻辑函数模型,这是通过在[EX-PR]函数中使用电平测试以及布尔运算来实现的。PSpice 是一个真正本地化的混合模式仿真器,其程序中嵌入了全数字的逻辑仿真器。PSpice 中也包含了不同逻辑器件家族的数字模型,以及精确的晶体管表示或 IBIS(I/O 缓冲接口规范)表示。由于布尔逻辑方法的高效性和简单性,PSpice 选用了二值逻辑方法来进行数字逻辑函数建模,而没有选用其他两种数字仿真方法。

E/G 元件的表达式[EXPR]可以由布尔运算及“数学表达式”一节中的任意函数组成。实际上,这里对可以使用的表达式的长度或复杂性没有任何限制。逻辑运算包括以下运算:

& - And | - Or

## 1.5.1 PSpice 实例

ENand 5 0 Value={If((V(1)>800mV)&(V(2)>800mV)&(V(3)>800mV),0,5)}

EOr 5 0 Value = {If ((V(1)>800mV) | (V(2)>800mV), 5, 0)}

Elnv 3 0 Value = {IF (V(1)>800mV, 0, 5)}

## 1.5.2 PSpice 实例的 FFLOP 网表

.SUBCKT FFLOP1875 1 2 11 12 5 6

\* CLK D R S QB Q

X1 7 4 2 8 NAND31875\_0

X2 8 3 10 9 NAND31875\_0

6

```

X3 1 8 10 7 NAND31875_1
X4 4 9 1 10 NAND31875_0
X5 4 7 6 5 NAND31875_1
X6 5 10 3 6 NAND31875_0
X7 11 4 INV1875
X8 12 3 INV1875
.ENDS FFLOP1875
*
.SUBCKT NAND31875_0 1 2 3 4
* Nand Gate with 0V initial output voltage, Node 4
E 1 5 0 VALUE={IF((V(1)>800mV)&(V(2)>800mV)&(V(3)>800mV),0,5)}
R1 5 4 40
C1 4 0 50P IC = 0
.ENDS NAND31875_0
*
.SUBCKT NAND31875_1 1 1 2 3 4
* Nand Gate with 5V initial output voltage, Node 4
E 1 5 0 VALUE = {IF ((V(1)>800mV) & (V(2)>800mV) & (V(3)>
800mV), 0, 5 )}
R1 5 4 40
C1 4 0 50P IC = 5
.ENDS NAND31875_1
*
.SUBCKT INV1875 1 2
E 1 3 0 VALUE = {IF (V(1)>800mV, 0, 5)}
R1 3 2 10
C1 2 0 20P IC = 5
.ENDS INV1875

```

### 1.5.3 PSpice 实例——采用数学公式实现与非门时的网表

```

.SUBCKT X_gate A B out
R1 A B 1meg
E1 3 0 Value={ (1+tanh(1000*(1.5-v(A))))*(1+tanh(1000*(1.5-v(B))))}
R2 3 4 1
C1 4 0 1n
.ENDS

```

## 1.6 开关元件(S/W 元件)

开关是大多数功率电子仿真的关键部件,为了加快仿真速度,开关常用来替换半导体器件。PSpice 中有三种类型的开关,依据不同的特性,分别适合于不同的应用。

最常用的一种是具有滞后特性的开关,如果仿真器支持所有的标准 Berkeley SPICE 3 元件,那么这个开关可以直接使用而无需改变任何语法。这类开关只是在最近才作为基本元件加入到 PSpice 中的。

### 1. SPICE 3 语法

格式: *Sname* *N+N-NC+NC-modelname*[ON][OFF]

格式: *Wname* *N+N-vname modelname*[ON][OFF]

实例: S1 1 2 3 4 switch1

. Model switch1 SW Ron = 0.1 Roff = 1G

Vt = 1 Vh = 0.5

实例: W1 1 2 Vsense switch1

. Model switch1 CSW H Ron = 1m Roff = 1G

It = 1 Ih = 0.5

在 SPICE 3 中,电压控制开关以字母 S 开头。N+ 和 N- 表示至开关端口的连接;节点 NC+ 和 NC- 分别代表正控制点和负控制点。设备的模型名(modelname)是必需的,但初始条件是可选的。ON 或 OFF 确定 DC 工作点计算时的开关状态。电流控制开关则以字母 W 开头,相应的语句定义了一个电压源,其电流用于控制开关。在其他方面,两者的模型参数及运算是相同的。

为了描述开关的特性,每个开关需要一个 . Model 语句,且模型的类型参数必须是 SW。Ron 是导通电阻,Roff 是关断电阻,Vt 是阈值电压,Vh 则是滞后电压。

在 PSpice 中,不论开关的类型是具有滞后特性的,还是具有平滑转换区的,都采用 . Model 语句中的模型参数来定义。在 PSpice 中,滞后开关的设置方法如下所述。

### 2. PSpice 语法——具有滞后特性的开关

格式: *Sname* *N+N-NC+NC-modelname*

格式: *Wname* *N+N-vname modelname*

实例: S1 1 2 3 4 switch1

. Model switch1 VSWITCH Ron = 1m Roff = 1G

Vt = 1 Vh = 0.5

实例: W1 1 2 3 4 switch1

. Model switch1 ISWITCH Ron = 0.1m Roff = 1G

It = 1 Ih = 0.5

在较老版本的 PSpice 中没有提供具有滞后特性的开关,作为替代,可以使用一个子电路表示来创建这个函数,并用传递参数替换模型参数。

### 3. PSpice 子电路语法——具有滞后特性的开关

. Subckt SWhyste NodeMinus NodePlus Plus Minus PARAMS:

```

+ RON = 1 ROFF = 100MEG VT = 1.5 VH = .5
S5 NodePlus NodeMinus 8 0 smoothSW
EBctrl 8 0 Value = {IF (V(plus)-V(minus)>V(ref), 1, 0)}
EBref ref1 0 Value = {IF (V(8)>0.5, {VT-VH}, {VT + VH})}
Rdel ref1 ref 70
Cdel ref 0 100p IC = {VT+VH}
Rconv1 8 0 10Meg
Rconv2 plus 0 10Meg
Rconv3 minus 0 10Meg
. Model smoothSW VSWITCH (RON = {RON} ROFF = {ROFF}
+ VON = 1 VOFF = 0)
. Ends SWhyste

```

开关模型使得 PSpice 可以描述近乎理想的开关,然而,这种开关不是完全理想的,即其电阻不能从零跳变到无穷大,而必须始终取有限的正值。如果开通电阻和关断电阻选择恰当的话,那么同电路中的其他阻抗相比,二者可以等效于 0 或无穷大。开关的滞后特性是用  $V_h$  参数来描述的,例如,在  $V_t+V_h$  时,电压控制型的开关处于开通状态,电阻为  $R_{on}$ ;而在  $V_t-V_h$  时,则处于关断状态,电阻为  $R_{off}$ 。

开关这样的高非线性理想元件的使用,将会引起电路节点电压产生很大的不连续性。伴随着开关状态的变化,阻抗迅速变化,将引起数值的取舍或收敛问题,这将引起错误的结果或导致时间步长选择困难。因此往往采用以下的步骤来改善开关的行为特性。

- ☐ 以电路的其他元件参数做参照,将开关的阻抗值设置得仅仅够高或够低,从而可以忽略即可。如果选择接近于所有场合下“理想”值的开关阻抗,将加重不连续问题。当然,在对 MOSFET 等实际器件建模时,开通电阻应该调节到实际的水平(该值取决于被建模器件的尺寸)。
- ☐ 如果必须使用大范围的开通/关断电阻比值( $R_{off}/R_{on} > 1E+12$ ),在进行瞬态分析时应该减小误差的容限,这可以通过将 .OPTION TRTOL 参数设置成小于其默认值 7.0 来实现。出现开关跨接在电容器两端的情况时,参数 .OPTION CHGTOL 的值也应该降低,这两个参数的建议值分别为 1.0 和  $1E-16$ 。这些变化告知 PSpice 在开关点附近运行时需更加小心,从而避免因电路响应的迅速变化而产生误差。

#### 4. 平滑转换开关

除滞后开关外,还有另外两种十分有用的开关模型,这两种开关的优点是,在 ON 和 OFF 状态之间,其转换区域更加可控、更加平滑,这对仿真的收敛性大有帮助,因此,在开关不要求有滞后特性时,推荐采用这类开关。