

CAD



电子电路CAD 与OrCAD技术

DIANZI DIANLU CAD YU OrCAD JISHU

刘明山 主编

随书赠送的

OrCAD16.0 DEMO 光盘

其功能和规模可以满足一般
科研和教学的需要



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电子电路 CAD 与 OrCAD 技术

刘明山 主编



机械工业出版社

本书首先介绍电路 CAD 的基础知识, 然后针对 OrCAD 16.0, 着重介绍 OrCAD 软件的使用方法, 内容包括仿真图形输入模块 Capture 的使用, 经典 PSpice (直流、交流、瞬态、温度、噪声、傅里叶、数/模和数字等电路分析) 的使用, 高级 PSpice-AA (其中有灵敏度、优化、蒙特卡洛、热电应力和参数测绘仪等工具) 的使用。各部分均配以相应例题, 便于读者学习该软件。

本书配有 OrCAD 16.0 演示光盘, 它的功能和规模可以满足一般科研和教学的需要。电子工程师和相关大专院校电类、非电类的学生, 只要具备电工学的基本知识, 都能掌握 OrCAD 的操作方法, 使之成为从事教学、生产和科研的得力助手。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路 CAD 与 OrCAD 技术/刘明山主编. —北京: 机械工业出版社, 2009.6

ISBN 978-7-111-27218-2

I. 电… II. 刘… III. 电子电路-电路设计: 计算机辅助设计-应用软件 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 080765 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 吉玲 版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 马精明 责任印制: 李妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.25 印张 · 498 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-27218-2

ISBN 978-7-89451-105-8 (光盘)

定价: 43.00 元 (含 1CD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面防伪标均为盗版

前 言

随着计算机技术的飞速发展和大规模集成电路的广泛应用,电子产品不断地更新换代,电子电路计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)技术,以及在其基础上发展起来的电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)已成为电子领域的重要学科,并逐渐成为一个新兴的产业部门。电子设计自动化(EDA)软件版本更新速度加快,如 PSpice 于 1983 年 7 月推出 PSpice 1.01 版本,至 2004 年 11 月就推出了 PSpice 10.3 版本,平均每两年做一次较大的更新。其间原生产厂家 MicroSim 公司合并到 OrCAD 公司。随后,OrCAD 公司又被 Cadence 公司收购,并推出 Cadence 公司家族系列产品 OrCAD。

OrCAD 新版软件 16.0 依然分为三大部分,即内置元器件信息系统的原理图输入器(Capture CIS)、模拟和混合信号仿真(PSpice)、印制电路板设计(Layout Plus)。每一部分都有新特色及新加强的功能。其中,PSpice 新增加了一套高级分析特色工具 PSpice - Advanced Analysis (简写 PSpice - AA,简称 PSpice 高级分析),它包含五个特色工具,即灵敏度(Sensitivity)分析、参数优化(Optimizer)分析、蒙特卡洛(Monte Carlo)分析、热电应力(Smoke)分析、参数测绘仪(Parametric Plotter)分析。

这些特色工具原是针对模拟的工作平台 UNIX 环境,现在也可以用在 Windows 工作平台提供给 PSpice 使用,从而给用户一个非常好的分析与接口设计的条件。此外,还增加模拟组件 Model 到 PSpice 里来增强模拟分析。用户可在 PSpiceA/D 分析(简称标准 PSpice 分析)的基础上,再用 PSpice - AA 的五个特色工具进行分析、设计。这样,可以最大程度地提高设计电路的性能、电路的可生产性以及产品的可靠性。

为满足读者使用 OrCAD 软件新版本的需要,特编写本书。书中介绍 OrCAD 时侧重介绍 PSpice。本书以具体电路为前导,逐步介绍电路 CAD 的一些理论知识和 OrCAD 的具体使用方法。随书所附光盘 OrCAD 16.0 (Demo 版)可以满足大学本科生的入门教学需要。

本书分为三篇:

第 1 篇:电子电路 CAD 技术基础。

第 2 篇: Cadence OrCAD EE 简明教程。介绍 OrCAD 的原理图输入器、模拟和混合信号仿真、PSpice 高级分析特色工具等部分的功能、特点及菜单命令的操作使用。

第 3 篇: Cadence OrCAD EE 应用实例。对软件中的典型应用作了详尽的介绍,为从实例中学习 OrCAD 创造条件。

本书由刘明山主编,同时王辅春、迟海涛、周原、雷治林也参加了具体编写工作。

目 录

前言	1	2.3.3 元器件约束关系	25
第1篇 电子电路 CAD 技术基础		第3章 电路方程的建立与编程	26
第1章 PSpice 程序	2	3.1 稀疏表格法	26
1.1 SPICE 简介	2	3.2 节点分析法	28
1.2 程序设计准则	3	3.2.1 无受控源电路的节点方程	29
1.2.1 易用性	3	3.2.2 含受控源电路的节点方程	30
1.2.2 有效性	4	3.3 改进的节点法	35
1.2.3 比较法	5	3.4 直接列出节点电导矩阵的直流分析程序	36
1.3 程序结构	5	第4章 电路的优化设计	53
1.3.1 程序结构框图	5	4.1 灵敏度分析	53
1.3.2 动态存储管理	7	4.1.1 灵敏度	54
1.4 元器件模型化的途径	7	4.1.2 灵敏度的重要性	54
1.4.1 物理法	7	4.1.3 灵敏度的定义	54
1.4.2 黑箱法	10	4.1.4 最坏情况分析	55
1.5 分析子程序	10	4.1.5 灵敏度分析工作流程	55
1.6 线性方程组的解法选择	12	4.2 电路优化设计	56
1.6.1 线性直流分析	12	4.2.1 优化设计工具的工作流程	57
1.6.2 线性方程组的解法	14	4.2.2 设计变量	58
1.6.3 线性交流分析	15	4.2.3 目标函数和约束条件	59
1.7 非线性方程组的解法选择	15	4.2.4 建立目标函数	60
1.7.1 列写方程	16	4.2.5 单目标函数的优化	63
1.7.2 非线性方程组的解法	17	4.3 蒙特卡洛法	64
1.8 数值积分法的选择	17	4.3.1 蒙特卡洛法简介	64
第2章 网络图论基础	19	4.3.2 蒙特卡洛工具的工作流程	66
2.1 网络图	19	第2篇 Cadence OrCAD EE 简明教程	
2.1.1 网络的图	19	第5章 Cadence OrCAD Capture CIS 简介	70
2.1.2 树	20	5.1 Cadence OrCAD Capture CIS 的功能	70
2.1.3 基本回路	20	5.2 Cadence OrCAD Capture CIS 的工作环境	71
2.1.4 基本割集	20	5.2.1 Cadence OrCAD Capture CIS 结构关系	71
2.2 关联矩阵、回路矩阵和割集矩阵	20	5.2.2 Cadence OrCAD Capture CIS 的用户界面	72
2.2.1 关联矩阵	21	5.3 Cadence OrCAD Capture CIS 的配置	78
2.2.2 回路矩阵	21		
2.2.3 割集矩阵	22		
2.3 两种约束关系	23		
2.3.1 KCL 的矩阵形式	23		
2.3.2 KVL 的矩阵形式	24		

第 6 章 使用 OrCAD Capture CIS 绘制	
电路图	81
6.1 创建新电路图文件	81
6.2 绘制电路原理图	84
6.2.1 加载元器件库	84
6.2.2 取放元器件	88
6.2.3 放置偏置电源和接地符号	88
6.2.4 连接线路和放置节点	89
6.2.5 元器件属性编辑	90
6.2.6 设置网络连线节点名称	91
6.2.7 放置说明文字	91
第 7 章 直流分析	93
7.1 运行 PSpice 的基本步骤	93
7.1.1 电路原理图输入方式	93
7.1.2 创建新仿真文件	95
7.1.3 执行 PSpice 程序	101
7.1.4 输出窗口的常用操作	101
7.2 例题	104
7.3 二次扫描	107
7.4 静态工作点分析	111
第 8 章 交流分析	114
8.1 例题	114
8.2 交流的输出格式	118
8.3 游标的功能	118
8.4 噪声分析	120
第 9 章 瞬态分析	123
9.1 例题	123
9.2 瞬态源的类型	126
9.3 傅里叶分析	129
第 10 章 温度分析、参数分析与测量性能分析	134
10.1 温度分析	134
10.1.1 电路图的绘制	134
10.1.2 分析参数的设定	134
10.1.3 执行 PSpice 程序	135
10.1.4 查看文字输出文档	136
10.2 参数分析	137
10.2.1 电路图的绘制	137
10.2.2 分析参数的设定	137
10.2.3 执行 PSpice 程序	139
10.3 测量性能分析	139
10.3.1 电路性能分析	140
10.3.2 创建测量函数	143
10.4 参数分析例题	144
第 11 章 最坏情况分析和蒙特卡洛分析	147
11.1 最坏情况分析	147
11.1.1 电路图的绘制	147
11.1.2 分析参数的设定	148
11.1.3 执行 PSpice 程序	149
11.1.4 查看文字输出文档	150
11.2 蒙特卡洛分析	151
11.3 直方图的使用方法	153
11.3.1 电路图的绘制	154
11.3.2 分析参数的设定	155
11.3.3 执行 PSpice 程序, 创建直方图	156
第 12 章 仿真行为模型及模型的创建	159
12.1 受控源	159
12.2 仿真行为模型	162
12.3 编辑和创建模型	166
12.3.1 元器件模型的编辑	167
12.3.2 创建新元器件模型	168
第 13 章 数字电路分析	174
13.1 数字电路的基本分析方法	174
13.2 数字信号源	177
13.2.1 数字信号源类型	177
13.2.2 数字信号发生器描述格式	177
13.2.3 时钟型信号源	178
13.2.4 基本型信号源	179
13.2.5 文件型信号源	181
13.2.6 图形编辑型信号源	184
13.3 数字电路最坏情况逻辑模拟分析	186
13.3.1 数字电路模型	186
13.3.2 最坏情况逻辑模拟分析	188
13.4 数字电路的自动查错功能	190
13.5 数字电路分析例题	191
13.6 Cadence OrCAD PSpice A/D 分析	195
小结	195
第 14 章 PSpice - AA 模型参数库	199
14.1 查找 PSpice - AA 模型参数库	199
14.2 查找元器件	200
14.3 设置高级分析参数	203
14.3.1 高级分析的元器件参数	203
14.3.2 设计变量表	204

第 15 章 灵敏度分析工具的使用	207	18.1 降额设计	248
15.1 电路原理图设计及电路模拟仿真	207	18.2 Smoke 工具的工作流程	248
15.1.1 电路原理图设计	207	18.3 无源元器件的 Smoke 参数设置及 电路模拟仿真	249
15.1.2 电路模拟仿真	208	18.3.1 无源元器件的 Smoke 参数 设置	249
15.2 确定电路特性参数	209	18.3.2 电路模拟瞬态仿真	249
15.3 调入、运行灵敏度分析工具	211	18.4 调用、运行 Smoke 分析工具	250
15.3.1 电路特性函数调整区	211	18.5 标准降额和自定义降额方法的 使用	253
15.3.2 Parameters 元器件数据 显示区	213	18.5.1 标准降额条件的使用方法	253
15.4 灵敏度结果的分析	216	18.5.2 自定义降额文件条件的使 用方法	254
第 16 章 优化工具的使用	219	18.6 有源元器件的 Smoke 参数和设 置方法	255
16.1 优化设计引擎	219	第 3 篇 Cadence OrCAD EE 应用实例	
16.2 启动 Optimizer 工具	220	第 19 章 电路的计算机分析例题	258
16.3 调整元器件参数	221	19.1 直流分析例题	258
16.3.1 设计变量	221	19.2 交流分析例题	261
16.3.2 调整设计变量——在 Parameters 表格区调整	222	19.3 瞬态分析例题	266
16.3.3 调整目标函数——在 Specifications 表格区调整	225	19.4 交流分析和瞬态分析的比较	271
16.3.4 误差图	226	第 20 章 拉普拉斯变换、傅里叶变换和 非线性电路	278
16.3.5 优化的最佳结果	228	20.1 拉普拉斯变换	278
16.3.6 运用离散引擎确定参数值	229	20.2 傅里叶变换	279
16.4 曲线拟合分析	231	20.3 非线性电路简介	281
16.4.1 电路原理图设计及电路模拟 仿真	231	第 21 章 模拟电路分析	286
16.4.2 曲线拟合参考文件的设置	232	21.1 常用半导体器件	286
16.4.3 曲线拟合规范的曲线参数设置—— 在 Curve Fit 表格区调整	233	21.1.1 二极管	286
16.4.4 优化结果的分析	235	21.1.2 双极结型晶体管	287
第 17 章 蒙特卡洛工具的使用	239	21.1.3 场效应晶体管	290
17.1 蒙特卡洛分析参数设置	239	21.2 模拟电路分析例题	292
17.1.1 分布参数的设置	239	第 22 章 运算放大器、数字逻辑电路 分析	297
17.1.2 与蒙特卡洛分析相关参数的 设置	240	22.1 运算放大器	297
17.1.3 确定电路特性函数	240	22.2 逻辑电路分析	301
17.2 运行蒙特卡洛的结果分析	242	附录	304
17.2.1 查看电路特性函数蒙特卡洛分析 统计数据	242	附录 A Cadence OrCAD PSpice 提供的电路 特性函数	304
17.2.2 查看 PDF、CDF 图	244	附录 B 常用元器件及其参数	306
17.2.3 蒙特卡洛统计结果的分析 处理	246	参考文献	315
第 18 章 热电应力工具的使用	248		

第1篇 电子电路 CAD 技术基础

1.1 SPICE 简介

电子电路计算机辅助设计(简称CAD)领域中,又属最早,发展最迅速和最广泛的设计计算机辅助分析(简称CAA)。而在另一方面,其代表性的电路分析程序是SPICE和ASTAR。ASTAR是美国IBM公司的专利,用户只能租用而见不到源程序,又如它最常用到表格(也称2b表)方法,利用前缀字母技术(简称SPICE)的SPICE(Simulation Program for Integrated Circuit Emphasis)是美国加州斯坦福大学伯克利(Berkeley)分校研制的。它是使用改进的节点电压法列定方程的。从1972年第一版问世以来,由于它采取完全开放的政策,只要少量修改,就可以应用到新器件,所以迄今已有多个版本在世界各地使用。SPICE本身也在广泛的应用中不断地修改,不断完善。

以1981年8月10日推出的SPICE2G2版本为开端,SPICE开始在我国流行。SPICE2G2版本是用Roman字母书写的,1989年7月推出SPICE3E1版本,微处理器已能用C语言进行了改写,在电路方程的列写求解方法上又根本性的变化。

随着PC的广泛使用,SPICE的微机版本发展很快,SPICE是由美国Microsim公司出版的软件。1983年7月推出的Spice1.01版本,操作则更趋简单。1989年7月推出Spice4.02版本,分析功能在原来只能进行频域分析的基础上增加了数字电路分析。半导体器件模型上又有增加,完全可以用于科学计算。1991年推出Spice2.00版本,增加了混合电路分析,上述软件曾是DOS版本,在其后推出的Spice6.00版本和Spice7.1版本与Windows版本,并采用图形输入方式,这更加符合人们的习惯和设计的习惯。1998年1月Microsim公司与O-CAD公司合并成为O-CAD Enterprise,1999年9月推出O-CAD 9.0版本,其中Spice A/D 9.0版本中增加了混合设计。IBM, NEC, SHARP, SONY等公司都广泛使用这个软件。2000年3月O-CAD公司又与Cadence公司合并(更名为O-CAD a Cadence product family公司),O-CAD软件成为拥有最大规模的软件包之一。公司以“世界上最大的EDA公司”,自然是“EDA行业的英特尔”,它是世界上使用最广泛的EDA软件。每天都有上百万的由于工程而在使用它。在国内,EWB(原名是Multisim)等软件应用较广。

SPICE(即Spice)可对模拟电路进行非线性直流分析、瞬态分析、线性交流分析,不同层次分析和容差分析等分析,高级版本还可以对数字电路和数字逻辑电路进行分析和优化;而分析电路图中,包括了各种常用的电子电路元件,如电阻、电容、电感、

第 1 章 PSpice 程序

本章从编写程序出发,并以 SPICE 为例,介绍模拟程序的结构、输入/输出方式、如何选择建立方程的方法和求解方程的方法等有关问题,以便从整体和理论上对 SPICE 等软件包的编程方法,有个“知其然,亦(大致)知其所以然”的了解,从而减少使用程序的盲目性并开阔视野。

1.1 SPICE 简介

在大规模电路计算机辅助设计(简称 CAD)领域中,发展最早、最成熟和使用最广泛的是计算机辅助分析(简称 CAA)。而在这方面最具代表性的电路分析程序是 SPICE 和 ASTAP。ASTAP 是美国 IBM 公司的专利,用户只能租用而见不到源程序,仅知它是使用列表法(也称 2b 表格法)列写方程,利用稀疏矩阵技术压缩存储。SPICE (Simulation Program for Integrated Circuit Emphasis) 是美国加利福尼亚州大学伯克利(Berkeley)分校研制的。它是使用改进的节点电压法列写方程的。从 1972 年第一版问世以来,由于它采取完全开放的政策,只要少量款项,就可以复制到源程序,所以到如今已有多个版本在世界各地使用。SPICE 本身也在广泛的应用中不断地修改、充实和完善。

以 1981 年 8 月 10 日推出的 SPICE.2G5 版本为开端,SPICE 开始在我国流行,SPICE.2G5 版本是用 Fortran 语言书写的,1989 年 7 月推出 SPICE.3C1 版本,源程序已经用 C 语言进行了改写,在电路方程的列写求解方法上无根本性的变化。

随着 PC 的广泛应用,SPICE 的微机版本发展很快,PSpice 是由美国 MicroSim 公司发行的软件。1983 年 7 月推出的 PSpice 1.01 版本,操作则更为简便。1989 年 7 月推出 PSpice 4.02 版本,分析功能在原来只能进行模拟电路分析的基础上增加了数字电路分析。半导体器件模型上又有增加,完全可以用于科学研究,1991 年推出 PSpice 5.00 版本,增加了数/模混合电路分析,上述软件皆是 DOS 版本。在其后推出的 PSpice 6.00 版本和 PSpice 7.1 版本是 Windows 版本,并采用图形输入方式,这更加符合人们分析和设计电路的习惯。1998 年 1 月 MicroSim 公司与 OrCAD 公司合并成为 OrCAD Enterprise,1999 年 9 月推出 OrCAD 9.0 版本,其中 PSpice A/D 9.0 版本中增加了优化设计。IBM、NEC、SHARP、SONY 等公司都已使用这个软件,2000 年 3 月 OrCAD 公司又与 Cadence 公司合并(更名为 OrCAD a Cadence product family 公司),OrCAD 软件成为很有实力的大型软件包之一。公认“世界上最大的 EDA 公司”,自称是“EDA 行业的英特尔”。它是世界上使用最广的 EDA 软件,每天都有上百万的电子工程师在使用它。在国内,Protel、EWB(现名为 Multisim)等软件应用较广。

SPICE(和 PSpice)可对模拟电路进行非线性直流分析和瞬态分析、线性交流分析、不同温度分析和容差分析等多种分析,高版本还可以对数字电路和数字/模拟混合电路进行分析和优化;所分析的电路中,包括了各种常用的电子电路元器件,如电阻、电容、电感、二

极管、双极结型晶体管、场效应晶体管以及各种数字元器件。所以说, SPICE 是一个多功能的电路模拟实验台, 已在 1988 年被美国定为工业标准工具。

1.2 程序设计准则

作为一个良好的电子电路模拟程序, 应该具有哪些条件? 这可从 SPICE 程序设计的准则中找到答案。SPICE 程序设计的准则是: 使程序易用、有效、简洁和通用。设计目标是: 使之成为一个多功能的电路模拟实验台。

1.2.1 易用性

很显然, 由于多数电路设计者不可能是程序员, 所以程序的易用性对程序的实用化极为重要。应使每个用户稍加训练即能使用程序进行设计。

SPICE 初期是采用文本(网表)文件方式输入, 近来多是采用电路原理图输入方式进行输入, 这种方式灵活方便, 更加符合人们分析和设计电路的习惯。

例 1-1 图 1-1 所示为无阻尼振荡电路。已知 $u_C(0) = 1V$, $i_L(0) = 1A$ 。试求: $u_C(t) = ?$, $i_L(t) = ?$

解 1: 编写输入(网表)文件如下:

```
tran - 1
c1 1 0 4 ic = 1
l1 1 0 1/16 ic = 1
. tran 0. 1us 6us uic
. print tran v (1) I (l1)
. plot tran v (1) l (l1)
. probe
. end
```

其中, 第 1 条语句为标题语句; 第 2 条语句为描述电容元件 C 的, 它连接在节点 1 和参考点之间, 其值为 $4F$, 初始值 $u_C(0) = 1V$; 第 3 条语句为描述电感元件 L 的, 意义与第 2 条相仿。我们知道, 连接的节点号信息是为建立拓扑约束关系, 元器件参数是进行各种分析必需的数据信息。第 4 条语句是控制分析类型语句, 说明作瞬态分析, 终止时间为 $6\mu s$, 步长为 $0.1\mu s$, uic 是使用初始条件的关键字; $. print$ 、 $. plot$ 、 $. probe$ 为描述输出用语句; 最后用 $. end$ 表示网表文件的终止。

标题和终止语句之间的语句不分先后并可交叉, 是一种自由格式, 即每个字段由一个或多个空格、逗号、等号或括号隔开, 多余的空格忽略不计。有关数字字段可以是整数和浮点数, 1000 、 1000.00 、 $1000Hz$ 、 $1E3$ 、 $1.0E3$ 、 $1kHz$ 和 $1k$ 都可以表示同一个频率。对用户十分友好、宽容。有了输入(网表)文件就可上机运行。

解 2: 目前多用电路原理图输入方式, 如图 1-2 所示, 更加直观、形象。另外, 加上如示波器、扫频仪的输出变量探针, 就可观察分析结果。

画好电路图, 随后给出元器件参数。这和手工搭接电路相仿, 然后, 加信号、设置分析类型和分析时间等(见图 1-3), 就可运行了。其结果如图 1-4 所示。

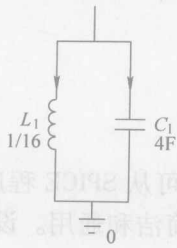


图 1-1 无阻尼振荡电路

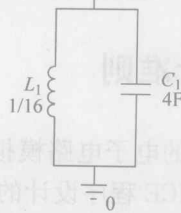


图 1-2 无阻尼振荡电路图输入方式和输出探针

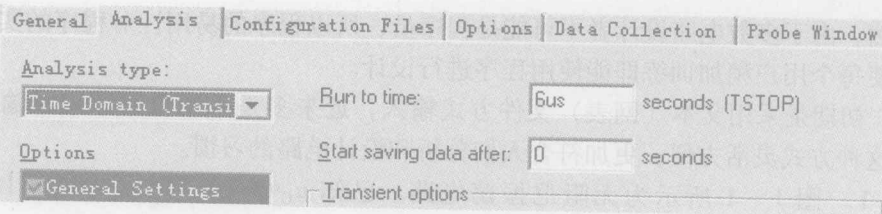


图 1-3 设置分析类型和分析时间

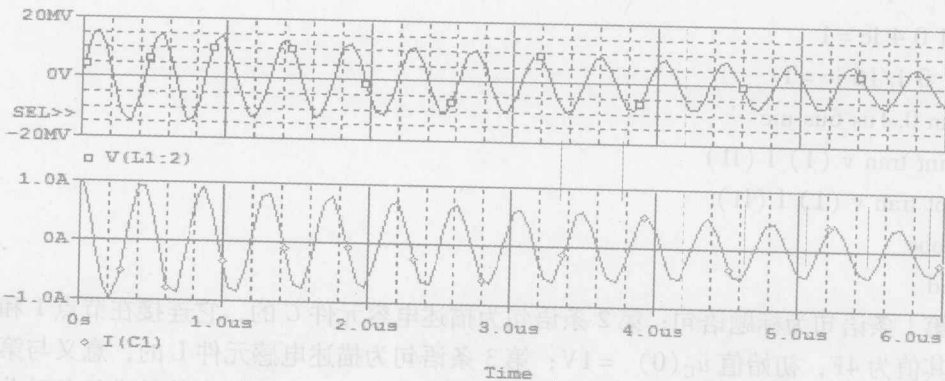


图 1-4 运行结果

从上述例题可以看出，输入和输出方式对程序的易用性是十分重要的。另外，电路图输入方式初看与文本（网表）文件输入方式很不相同，其实是程序本身替你你将电路图输入方式“翻译”成网表文件了，查看其输出文档（见图 1-5）即可了解这一点。

1.2.2 有效性

输入和输出程序决定了整个模拟程序的易用性和简洁性，而分析程序则在有效性和通用性方面起重要作用。需要指出的是，在分析程序中采用的算法比起输入和输出等其他部分程序更复杂。所以，为设计一个良好的模拟程序皆致力于采用可靠、有效的算法上。因此，分析程序是程序的核心，发展的关键。也是本篇学习的重点。

```

*Analysis directives:
.TRAN 0 6us 0
.PROBE V(alias(*)) I(alias(*)) W(alias(*)) D(alias(*)) NOISE(alias(*))
.INC "..\SCHEMATIC1.net"

* Netlist Files:
.INC " SCHEMATIC.net"
**** INCLUDING SCHEMATIC1.net ****
* source 1-3
L_L1      0  N00067  1/16 IC=1a
C_C1      N00067  0  4F IC=1v
**** RESUMING bias.cir ****
.END

```

图 1-5 输出文档 (部分)

简洁性是指模拟程序采用的算法, 应尽可能简单以保证它易于修改、增强和理解。而那些高深复杂的程序算法, 只有它们在有效性和通用性有着相当强的功能时才被采用。简洁性的另一含义是指程序占用中央存储器极少和运行时间较短。程序的通用性是指模拟程序的分析功能与使用范围, 当然是越通用越好。但是, 通用性与简洁性有时是相矛盾的。SPICE 更着重于有效性与通用性。PSpice 则在易用性上有长足的进步。

总之, 作为一个良好的电子电路模拟程序, 应该具有良好的易用性、有效性、简洁性和通用性。

1.2.3 比较法

程序设计的标准确定后, 对各种算法如建立方程组的方法、求解线性和非线性方程组的方法以及数值积分方法等应如何选择? SPICE 是采用比较法。也就是将各种方法, 都对相同的 10 个或 15 个标准电路 (本书从略) 进行计算, 对各种算法的有效性与通用性、占用中央存储器的体积多少和 CPU 运行时间长短等一一加以比较, 经过这样大量的反复实验, 然后才加以取舍。因此, 所选定的算法, 无论是建立方程组还是求解方程组的方法, 都是比较优秀的, 因为它经过了比较, 经过了实验。

1.3 程序结构

1.3.1 程序结构框图

尽管电路模拟 (仿真) 程序在长短和功能方面有较大差异, 但大多数仿真程序的结构是很相似的, 如图 1-6 所示。程序通常包含五个部分 (或子程序): 输入 (INPUT)、建立 (SETUP)、分析 (ANALYSIS)、输出 (OUTPUT) 和控制 (CONTROL), 这些子程序是通过存储在程序共用存储单元区 (UTILITY) 的数据结构来相互作用的。

INPUT: 输入子程序读入网表文件, 从而构成数据结构, 并检查用户明显的错误。在输入状态结束后, 数据结构就含一个完全自协调的电路描述 (拓扑结构、元器件参数)。

SETUP: 建立 (方程) 子程序构成一个满足分析子程序的附加数据结构。在 SPICE 中, 建立 (方程) 子程序是构成一个供分析子程序中稀疏矩阵子程序使用的指针系统。

ANALYSIS: 分析子程序是模拟程序的主要组成部分, 它完成由输入文件所规定的电路分析, 把分析结果 (SPICE 是存于 .data 后缀文件中) 存储在记忆装置中, 供后面的输出子程序使用。

OUTPUT: 输出子程序产生由用户规定的输出结果。

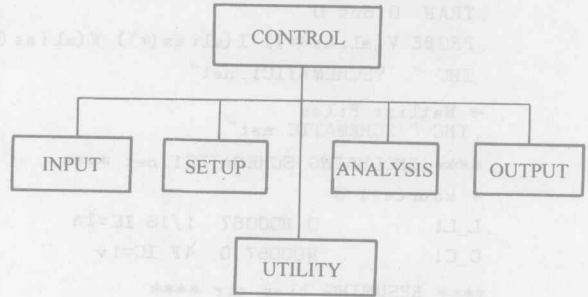


图 1-6 电路仿真程序结构的框图

以 SPICE. 2G5 程序为例, 剖析一下模拟程序的结构。SPICE. 2G5 程序是用 Fortran 语言编写的, 共有 17 510 条语句, 119 个子程序, 总存储量为 1MB。SPICE. 2G5 由 7 个主要的覆盖程序组成, 如图 1-7 所示。

SPICE 2 ROOT						
READIN	ERRCHK	SETUP	DCTRAN	DCOP	ACAN	OUTPUT
BLANK COMMON (公共区)						

图 1-7 覆盖程序

下面简要说明程序调用过程:

SPICE2 是根 (ROOT): 包含程序的主控部分, 由 SPICE2 依次调用其他的程序来完成一些特殊任务。程序首先赋初始值, 它以标题语句作为任何输入文件的第 1 条语句, 然后覆盖程序 READIN, 继续读入其他输入文件, 最后以出现 .END 语句作为覆盖程序 READIN 结束的标志, 即是任何输入文件最后一条语句。

在 READIN 读入输入文件时, 电路的数据结构也被建立起来, 同时公共块变量也被建立起来, 以便指出分析类型。

在 READIN 执行结束时, 接着调用 ERRCHK 覆盖程序来检索公共用户的错误, 该覆盖程序还包含打印电路表格、元器件模型参数表和节点表。

接着调用 SETUP 覆盖程序, 建立 DCTRAN (直流与瞬态分析用) 和 ACAN (交流分析用) 所使用的是整型数指针结构, 该覆盖程序还生成机器代码, 去解决线性的直流和瞬态方程问题。

在 SETUP 覆盖程序执行后, 即开始电路分析, 主分析回路重复执行用户指定的每一个温度值, 完成后打印作业统计表, 并读入下一个输入行。

主分析回路是由三个部分组成的: 直流转移 (传输) 曲线分析、直流工作点与交流分析、瞬态分析, 它们依次被执行。

直流转移曲线分析: 先调用 DCTRAN 完成直流转移曲线的分析, 最后调用 OUTPUT 建立直流转移曲线分析所要求的表格。

直流工作点与交流分析: 调用 DCTRAN 来计算直流工作点, 以便确定交流小信号分析

的线性模型参数, 调用 DCOP 来打印线性元器件模型参数, 再调用 ACAN 进行交流分析, 最后调用 OUTPUT 建立链表和交流分析所需的输出打印表。

瞬态分析: 第 1 次调用 DCTRAN 来确定瞬态分析的初始值 (条件), 再调用 DCOP 打印非线性元器件的工作点, 第 2 次再调用 DCTRAN 进行瞬态分析, 最后调用 OUTPUT 生成链表结构和瞬态分析所需的打印表等。

1.3.2 动态存储管理

在 SPICE1 中所用的输入元器件参数的存储数组长度都是固定长, 即静态分配。这样做虽然简单, 但并不能有效地使用所有可用的存储量。例如, 原开辟存放电阻的数据区可存放 100 个电阻, 但某电路中只有几个电阻则造成数据区浪费, 而超过 100 个电阻时又将无法进行存储。

SPICE2 是采用动态分配。它在事先并不规定各类元器件在内存中的存放位置, 而是在读入过程中动态地加以确定。程序逐一扫描输入文件, 每扫描一个元器件语句, 就根据其类型计算出应分配的存储单元数, 然后进行存储, 直至所有的语句都输入完毕。这样做, 就可以不管电路的特点和规模有多大的差别, 输入数据在内存中都占有一连续的存储区, 内存空间得到了充分的利用。这是 SPICE2 对输入数据的动态存储分配和管理的突出特点。其后的 SPICE (包括 PSpice) 版本都是采用这种动态分配、存储和管理方法, 并被其他程序采用。

1.4 元器件模型化的途径

分析子程序是完成电路数学化后的数值解法, 是模拟程序的重要组成部分。电路数学化主要是元器件的模型化, 即实际的元器件由反映元器件的本质特性的理想元器件组成的等效电路来表示, 可以说没有模型化就没有电路分析。

简单的元器件, 如电阻、电容和电感等, 只需要一个或几个参数就可以描述其电学性能。而各种半导体器件的模型, 则要求很多的参数值才能予以精确描述。

1.4.1 物理法

元器件模型化的途径大体可分为两种: 一种是物理法, 即以描述元器件的物理性能的方程为出发点去构成模型; 另一种是黑箱 (black box) 法, 即把元器件看作黑箱, 着眼于端口的工作特性, 用它构成模型。本节介绍用物理法构成双极结型晶体管模型。双极型晶体管模型都是以 Ebers - Moll 模型作为基础。可按不同的复杂程度分为 EM1、EM2、EM3 和 GP 模型。

EM1 是原始的 Ebers - Moll 模型。仅仅是一个非线性直流模型。EM1 形式上非常简单, 如图 1-8 所示。只用两个背靠背的二极管和一个受控源表示, 而且只需要 5 个参数: I_S 、 β_F 、 β_R 、 T_{nom} 、 E_g 。它们分别为饱和电流、正向放大倍数、反向放大倍数、室温和半导体材料的有效能隙 (单位为 eV)。后两项为温度变化的参数。在 EM1 中不考虑电荷存储特性, 但是 EM1 仍然是十分精确的。它不仅对分析直流有用, 而且对一个“理想的”双极结型晶体管也一样有用。

EM2 是二级模型, 如图 1-9 所示。它以 EM1 为基础, 构成包括非线性电荷存储效应以

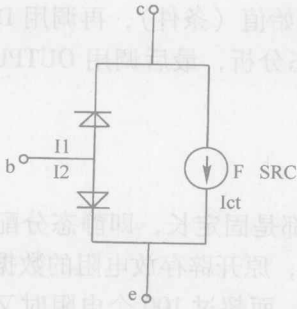


图 1-8 EM1 模型 (非线性混合 II 模型)

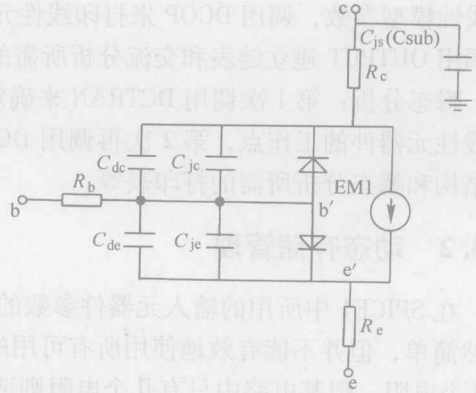


图 1-9 EM2 模型

及欧姆的一级模型。从图中可以看出 EM2 比 EM1 增加三个欧姆体电阻 R_b 、 R_c 、 R_e ；增加三个非线性结电容 C_{jc} 、 C_{je} 、 C_{js} ；增加两个非线性扩散电容 C_{dc} 、 C_{de} ；增加一个衬底电容 C_{cs} (图中与 C_{js} 画在一起)。对于大多数用途 (特别是数字电路) 来说, EM2 在精确度、建立模型的简易性、分析速度以及分析结果方面皆有良好的综合性能, 是最常用的模型。SPICE 使用了 EM2 模型, 若用户对其中参数都不予以规定, 就回到 EM1 (理想的) 模型。

EM3 是三级模型, 其效应与 GP (Gummd - Poon) 模型基本等价。GP 模型, 如图 1-10 所示, 它更精确、更完整, 然而 GP 模型更加数学化, 不大直观, 而且要求的输入参数多, 也不便于使用, 只有在精确度要求非常高时才

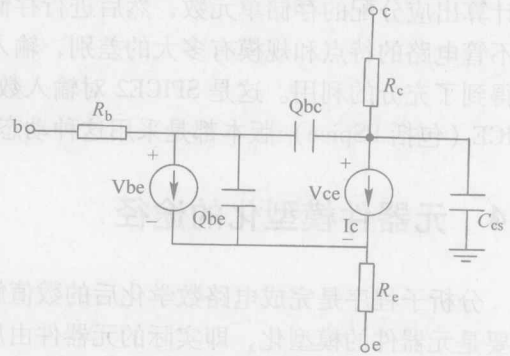


图 1-10 GP 模型

有必要采用 EM3 和 GP 模型。EM1、EM2 和 GP 在 PSpice 中得到了应用。

双极结型晶体管的模型参数如表 1-1 所示。

表 1-1 双极结型晶体管的模型参数

参数	单位	默认值	意义
I_s	A	$1e-16$	反向饱和电流
E_g	V	1.11	硅的带隙能量
X_{ti}		3	饱和电流的温度指数
B_f		100	正向电流放大系数
N_f		1	正向电流发射系数
V_{af}	V	inf	正向欧拉电压
I_{kf}	A	inf	正向 Beta 大电流时的滑动拐点
I_{sc}	A	inf	b-e 极间的泄漏饱和电流
N_e		1.5	b-e 极间的泄漏发射系数
B_r	1	1	理想反向电流放大系数
N_r	1	1	反向电流发射系数

(续)

参数	单位	默认值	意义
V_{ar}	V	inf	反向欧拉电压
I_{kr}	A	inf	反向 Beta (r) 大电流时的滑动拐点
I_{sc}	A	0	b-c 极间的泄漏饱和电流
N_c		2.0	b-c 极间的泄漏发射系数
R_b	Ω	0	偏压时的基极电阻
I_{rb}	A	inf	基极电阻下降到 R_{bm} 值一半时的电流
R_{bm}	Ω	R_b	最小基极电阻
R_e	Ω	0	发射结电阻
R_c	Ω		集电极电阻
C_{je}	F	0	b-e 结零偏压时的耗尽电容
V_{je}	V	0.75	b-e 结内建电动势
M_{je}		0.33	b-e 结指数因子
C_{jc}	F	0	b-c 结零偏压时的耗尽电容
V_{jc}	V	0.75	b-c 结内建电动势
M_{jc}		0.33	b-c 结指数因子
X_{cje}		1	b-c 结耗尽电容连接到内部节点百分数
C_{js}	F	0	集-衬底间零偏压时的耗尽电容
V_{js}	V	0.75	集-衬底间结内建电动势
M_{js}		0	集-衬底间结——梯度因子
F_c		0.5	正向偏压时的耗尽电容系数
T_f	s	0	正向渡越时间
X_{tf}		0	正向渡越时间随偏置变化的系数
I_{tf}	A	0	正向渡越时间随 V_{be} 变化的参数
P_{tf}	Deg	0	正向渡越时间随 I_c 变化时的超前相位
T_r	s	0	反向渡越时间
X_{tb}		0	电流放大系数的温度系数
K_f		0	闪烁噪声系数
A_f		1	闪烁噪声指数
A_{rea}			相对发射结面积的比值

注：若需要双极结型晶体管的 V_{be} 电压为 0.7V，则可以设置 $V_{je} = 0.7V$ 。

模型参数用 . Model 语句调用，一般形式为

Qname NC NB NE Modelname

. Model Modelname NPN < $I_s =$, $R_s = \dots$ >

其中，Q 为双极结型晶体管的关键字；Qname 为双极结型晶体管的名称；NC、NB、NE 为其 c、b、e 极节点号；Modelname 为双极结型晶体管模型名。

举例：

Q1 2 10 0 MOD3

. Model MOD3 PNP (BF = 100 CJO = 2P CJD = 3P)