



普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

电路与模拟电子电路 PSpice仿真分析及设计

◎ 杨维明 谌雨章 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

电路与模拟电子电路 PSpice 仿真分析及设计

杨维明 谌雨章



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

内 容 简 介

本书从电路与模拟电子电路的计算机辅助分析与设计的基本概念出发,系统介绍用 PSpice 仿真软件分析与设计电子电路的技术及方法;以电路理论与模拟电子电路课程中的基本定律和典型单元电路为例,介绍具体电路的描述方法及性能指标的仿真方法与步骤;电路仿真时采用以 SPICE 文本输入仿真为主,文本输入法和 Capture 电路图输入法相结合的方式进行,对采用电路图输入法仿真的实例同时给出对应的 PSpice 仿真程序,并对仿真结果进行理论分析;在此基础上,以运算放大器及其应用电路设计为例,详细讨论模拟电路的综合仿真设计与优化方法。

全书共 6 章,主要包括:概论,电路元器件描述,电路特性分析与点命令,电路基础仿真分析,线性电子电路仿真分析,电子线路 PSpice 仿真设计。本书提供配套电子课件、仿真程序代码等。

本书可供物理类、电子信息类专业的本、专科生使用,也可供从事电路分析、模拟电路分析与设计的工程技术人员学习、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

电路与模拟电子电路 PSpice 仿真分析及设计/杨维明, 谌雨章主编. —北京: 电子工业出版社, 2016.6

电子设计系列规划教材

ISBN 978-7-121-28607-0

I. ①电… II. ①杨…②谌… III. ①电子电路—计算机仿真—程序设计—应用软件—高等学校—教材
②模拟电路—计算机仿真—程序设计—应用软件—高等学校—教材 IV. ①TN702②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 081356 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 12 字数: 307 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版

印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: (010)88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

在电路与模拟电路实验中，引入 PSpice 仿真软件进行虚拟仿真实验，可大大节省实验成本，缓解实验室建设经费紧张的矛盾；同时可增强实践平台的灵活性，淡化硬件设计和软件设计的界线，优化知识结构。

掌握 PSpice 电路仿真方法，有利于拓宽思路、开阔视野，不断提高电子设计与创新能力。但是，若以介绍电路仿真软件的操作方法与步骤为主线来讨论电路仿真，不利于深入理解电路与模拟电路的原理及应用；另一方面，若仅讨论电路仿真分析方法，缺少电子电路的综合仿真设计与优化示例，不利于学生掌握电子电路设计及应用技术，也不利于学生综合设计能力的培养。

在理论教学实践中，编者发现不少学生在学习模拟电路时感觉到困难，主要原因是电路基础理论没有掌握好，不能将电路基础理论及电路分析方法应用到模拟电路的学习中。实验课程教学中，我们发现若单纯介绍模拟电路的仿真方法，缺少对电路直流分析、交流分析、瞬态分析三大电路特性分析原理与内涵的介绍，也不利于学生对电路分析本质的理解。在开设模拟电路仿真实验课之前，先开设电路基础仿真实验课，是一种选择方案。但本人在多年的实验教学中也发现，“电路基础仿真实验”与“模拟电路仿真实验”课程横跨两个学期，会导致不少学生不能将两门课程知识有效地衔接，影响了实验教学效果。

若将“电路理论”与“模拟电路”两门课程整合，实现贯通教学，或许能解决这一实际问题。在这方面，教育部电工电子基础课程教学指导委员会主任委员、东南大学王志功教授率先进行了改革和探索，编写了《电路与电子线路基础》教材，起到了示范效应，也收到了良好的教学效果。编者认为，电路与模拟电路作为一门技术基础课程，在实验环节进行整合也是必要和可行的。

基于以上考虑，我们编写了这本 PSpice 仿真实验教材，将电路基础与模拟电路仿真分析实验整合，实行贯通教学。全书以电子电路的分析与设计为主线，通过典型实例，介绍基于 PSpice 仿真软件的模拟电子电路的仿真分析与设计方法：第 1 章主要介绍电子电路仿真软件的组成原理，以及电路仿真的方法和基本流程，指出 PSpice 仿真软件包含 Capture 电路图输入和 SPICE 语言文本输入两种仿真方法；第 2 章和第 3 章是 PSpice 文本输入仿真程序设计基础，第 2 章主要介绍基于 SPICE 语言文本格式的电路描述方法，第 3 章主要介绍基于 SPICE 语言的电路仿真命令格式；由于电路理论是模拟电路分析的基础，因此本书在介绍模拟电路仿真分析（第 5 章）之前，先介绍电路基础仿真分析方法（第 4 章），第 4 章主要以电路图输入仿真分析为主，第 5 章则根据电路的结构特点选择文本输入或电路图输入仿真，所有以电路图输入仿真的实例，都同时给出对应的 SPICE 文本仿真程序代码；为提高学生的设计应用能力，第 6 章增加了集成运算放大器的设计和仿真优化，以及微弱信号放大、音频识别电路、晶体管多级放大电路等内容，其篇幅与第 5 章相当。

本书的编写，一方面使学生掌握集成电路和电子电路计算机辅助分析与设计工具的操作和使用方法，掌握利用 PSpice 进行电子电路辅助分析与设计的一般方法，另一方面，帮助学

生更深入地学习和理解电路与模拟电子电路课程中各章节内容的原理、特点及应用,提高分析问题和解决问题的能力,扩展知识面,通过逼真的特性曲线更全面地理解书本上很抽象的概念,使电路理论与模拟电子电路理论的学习达到事半功倍的效果,为今后从事集成电路和系统设计打下良好的基础。

本教材的特点如下。

1) 电路图输入和文本描述两种仿真方式兼顾。因为当今流行的 IC 设计工具涉及图形和文本两种电路描述方式,仿真编译结果均以文本格式的网单文件给出,因此在这本专业基础教材中以介绍文本输入仿真方法为主,文本输入和电路图输入两种仿真模式兼顾。

2) 将电路与模拟电子电路实验内容整合,使教材内容前后衔接更好、更系统。

3) 模拟电路分析与设计并重。电路分析是设计的基础,而缺乏设计与仿真实例,也不利于学生更好地掌握模拟电路基础理论及提高设计应用能力。

4) 推导了 BJT 和 MOS 器件的等效电路模型,并对其 SPICE 模型参数进行了说明,因为这两种器件模型是放大电路仿真分析与设计的重要基础。

5) 增加了行为级仿真分析实例,为读者在进行电路设计方案选择时提供快捷的参考。

6) 突出实际应用,强调电路性能指标的分析与设计。书中无论是单元电路分析实例,还是综合设计仿真实例,都与实际应用紧密结合;仿真时强调电路性能指标分析与仿真方法相结合,性能指标设计与仿真优化相结合。

7) 遵循循序渐进规律。内容安排上,先介绍电路基础仿真,再介绍模拟电路仿真;仿真方式上,先介绍电路图输入仿真,再介绍 SPICE 文本输入仿真;循序渐进,逐步深入,符合学生知识结构和认知发展规律。

虽然本书主要介绍电路理论和模拟电子电路的 PSpice 仿真分析与设计方法,但必须指出,PSpice 仿真软件也可用于数字电路和高频电路课程的仿真实验。如今,已有专门针对数字电路仿真和高频电路仿真的 EDA 软件,这已经超出了本书讨论的主题。

全书共含 6 章。第 1 章、第 2 章、第 3 章由杨维明编写;第 4 章由谌雨章编写;第 5 章、第 6 章由杨维明和谌雨章共同编写。编者感谢在本书编写过程中提供帮助和指导的有关企业专家和工程师,他们是武汉博而硕微电子有限公司总裁张轶伟高工、武汉滨湖电子有限责任公司杨武韬工程师等。本书提供配套电子课件、仿真程序代码等,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载,也可联系本书编辑(wangxq@phei.com.cn)索取。

由于编者的知识水平有限,书中难免存在不妥之处,诚恳希望读者批评指正。

编者邮箱: 20040416@hubu.edu.cn

编者

2016 年 6 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 传统的电子电路设计	1
1.2 电子电路 CAD 技术	1
1.2.1 电子电路 CAD 流程	1
1.2.2 电子电路 CAD 技术优势	2
1.2.3 电子电路仿真程序的构成	3
1.3 OrCAD/PSpice 软件简介	4
1.3.1 SPICE 发展历程	4
1.3.2 OrCAD/PSpice 支持的元器件类型与电路分析特性	4
本章小结	8
习题	8
第 2 章 电路元器件描述	9
2.1 PSpice 输入描述语句	9
2.2 常用无源器件的描述	12
2.3 常用有源器件的描述	16
2.3.1 二极管模型及描述	16
2.3.2 双极型晶体管 (BJT) 模型及描述	19
2.3.3 MOSFET 模型及描述	25
2.3.4 结型场效应管描述	32
2.3.5 GaAs MESFET 描述	33
2.4 电源的描述	35
本章小结	39
习题	39
第 3 章 电路特性分析与点命令	40
3.1 直流分析	40
3.1.1 基本原理	40
3.1.2 点命令	40
3.1.3 灵敏度分析	45
3.2 交流小信号分析	47
3.2.1 基本原理	47
3.2.2 点命令	47
3.2.3 噪声分析	50
3.3 瞬态分析	52

3.3.1	基本原理	52
3.3.2	点命令	53
3.3.3	傅里叶分析	55
3.4	温度分析	56
3.5	任选项	56
3.6	容差分析	57
3.6.1	蒙特卡罗分析	58
3.6.2	最坏情况分析	61
3.7	通用参数扫描分析 (.STEP)	62
3.8	函数定义语句	64
3.9	分析放大电路主要性能指标的方法	65
3.9.1	增益的点命令设置方法	65
3.9.2	输入电阻、输出电阻	65
3.9.3	最大不失真输出幅值	65
3.9.4	功率	66
3.9.5	频带	66
	本章小结	66
	习题	66
第4章	电路基础仿真分析	68
4.1	电路基本定理仿真分析	68
4.1.1	基尔霍夫定律应用与仿真分析	68
4.1.2	叠加定理应用与仿真分析	71
4.1.3	戴维南定理仿真分析	75
4.1.4	诺顿定理仿真分析	78
4.2	电路暂态仿真分析	81
4.2.1	一阶 RC 电路的零输入响应	81
4.2.2	一阶 RC 电路的零状态响应	84
4.2.3	一阶线性电路的全响应 (三要素法) 分析	87
4.3	正弦交流电路仿真分析	89
4.3.1	低通 RC 电路的频率响应	89
4.3.2	高通 RC 电路的频率响应	92
	本章小结	95
	习题	95
第5章	线性电子电路仿真分析	99
5.1	共射放大电路分析	99
5.2	差分放大电路分析	104
5.3	集成运算放大器应用	114
5.3.1	有源积分电路	114

5.3.2	比较器电路	116
5.3.3	简易信号发生器	118
5.3.4	比例运算电路设计	121
5.4	MOS 电路分析	122
5.4.1	单管 MOS 放大电路	122
5.4.2	CMOS 单级放大电路	124
5.4.3	CMOS 差分放大电路	127
5.5	直流稳压电源设计和仿真分析	130
5.5.1	整流滤波电路	130
5.5.2	串联反馈式稳压电路	131
5.6	负反馈放大电路仿真分析	134
5.6.1	晶体管负反馈放大电路仿真分析	134
5.6.2	综合负反馈放大电路仿真分析	139
	本章小结	142
	习题	143
第 6 章	电子线路 PSpice 仿真设计	147
6.1	微弱信号放大器设计	147
6.2	CMOS 运算放大器设计与仿真	153
6.2.1	MOS 电流镜基本原理	154
6.2.2	CMOS 运算放大器设计	155
6.2.3	CMOS 运算放大器仿真	159
6.3	晶体管多级放大电路设计	163
6.4	高频微弱声音识别电路设计	167
6.5	PSpice 辅助电路优化设计	171
6.5.1	优化设计原理	171
6.5.2	优化设计实例	173
	本章小结	178
	习题	178
	参考文献	182

第1章 概 论

1.1 传统的电子电路设计

传统的电路设计过程主要有三个过程：（1）设计人员根据实际需要及具体要求提出设计指标；（2）参考有关资料并凭借经验，初步确定电路方案和元器件参数；（3）将电路及元器件模型进行简化，根据已知的参数对电路指标进行检验。检验的方法多采用解析法、物理模拟法或二者结合法。解析法就是用“纸和笔”的方法来进行数学模拟。先画出等效电路图，在图上标出有关数据。然后根据电路理论列出电路方程组，并借助于计算器等计算工具进行人工求解。求解后得到初始设计电路的性能参数，将它与设计要求进行比较。这种方法仅适用于规模小、元器件类型少、计算精度不高的电路设计。物理模拟法是指设计者根据初始设计方案，用实际元器件搭接电路进行实验。然后利用仪器仪表对电路性能参数进行测试，以此来检验设计的正确性。如果所测参数与实际数据偏离较大，需要修改元器件参数或电路结构反复进行测试检验，直到电路性能满足指标要求为止。这种方法一是在元器件的等效电路和模型做了大量近似和简化的理想条件下，忽略了寄生参数的影响，从而使得实验结果和实验性能之间偏离较大。二是为了检验设计方案的合理性还需要进行样机试制，进一步修改方案和再次进行检验，并对设计方案的性能进行评定。在此基础上进行小批量生产，检验产品性能和合格率，最后才能经过标准化定型投产，实验时间往往很长。三是它不能模拟某些破坏性故障，也无法进行容差分析和最坏情况分析，从而无法保证产品的可靠性。

总之，传统的设计方法效率低、周期长。特别是随着电子技术的飞速发展，电子系统日趋复杂，电路规模日益扩大，集成度越来越高，对它们的准确度、稳定性和可靠性有了越来越高的要求，这样传统的方法已不能满足设计要求。

传统的电路装配、调试过程，一般均采用面包板或专门的焊接板，通过手工连线装配，检查无误后，进行电路测量，最后评估电路性能。若性能与设计值不符时，需调换参数并重新调试测量，直至符合设计要求为止。但是，当电路非常复杂时，采用插接板或焊接板组装电路时所产生的连线错误、器件损坏等人为错误，常会造成人力、财力、时间的浪费及错误的性能评估。尤其是集成电路的设计，器件在插接板上就无法组合成像集成电路内部那样紧密复杂的电子电路，装配板上的寄生参数与集成环境中的完全不同，因此，在装配板上测试的特性将无法准确地描述集成电路的真实特性，所以，电子电路的传统设计方法已经不适应当前电子技术发展的要求，这就要借助计算机完成电子电路的辅助设计，即电子电路CAD技术。

1.2 电子电路 CAD 技术

1.2.1 电子电路 CAD 流程

20世纪70年代，随着中小规模集成电路的出现和应用，传统的手工制图设计印制电路板和集成电路的方法已无法满足设计精度和效率的要求。由于计算机的迅速发展及广泛应用，

人们开始将产品设计过程中高重复性的繁杂劳动，如布图、布线等工作用二维平面图形编辑与分析的 CAD 工具代替，电子线路设计发生了根本性的变化，即出现了计算机辅助设计 (CAD)。

CAD 包括电子工程设计的全过程，如系统结构模拟、电路特性分析、绘制电路图和制作 PCB 等。电路的计算机辅助设计 CAD 的引入从根本上改革了电路的设计方式，它不仅发展了经典的电路理论，而且将计算机的高速运算、优良的数据处理能力与人的创造性思维有机地结合起来。采用 CAD 技术模拟电路的各种特性，无须任何实际元器件，利用各种功能的计算机应用程序代替实验中的各种仪器仪表，计算机根据设计人员的指令执行各种数据分析和模拟实验过程，并输出结果。这种设计方法简单、快捷，而且直观。

电路的计算机辅助设计包括电路的计算机辅助分析 (Computer-Aided Analysis, CAA) 和电路的最优化设计，其设计流程如图 1-1 所示。电路的 CAD 是以 CAA 为基础的，根据所要求的电路特性，依靠所具有的专业知识、经验和相应的资料，画出电路的拓扑结构和元器件初值，加上必要的约束条件，通过计算机对电路的反复迭代计算，最后优化出逼近于电路性能、满足约束条件的电路结构和元器件参数。由于不同的电路有不同的电路结构，电路的复杂程度也不尽相同，电路的节点数也就不同。当电路的节点数达到几百、几千甚至几万时，人工计算已经不现实，只有借助于计算机才能对电路进行有效的分析和设计。不同性质的电路，对它进行分析的内容和分析的方法不同。即使对同一内容进行分析，也会有多种分析方法。计算机辅助电路分析的内容很丰富，针对不同类型的电路有不同的分析方法。

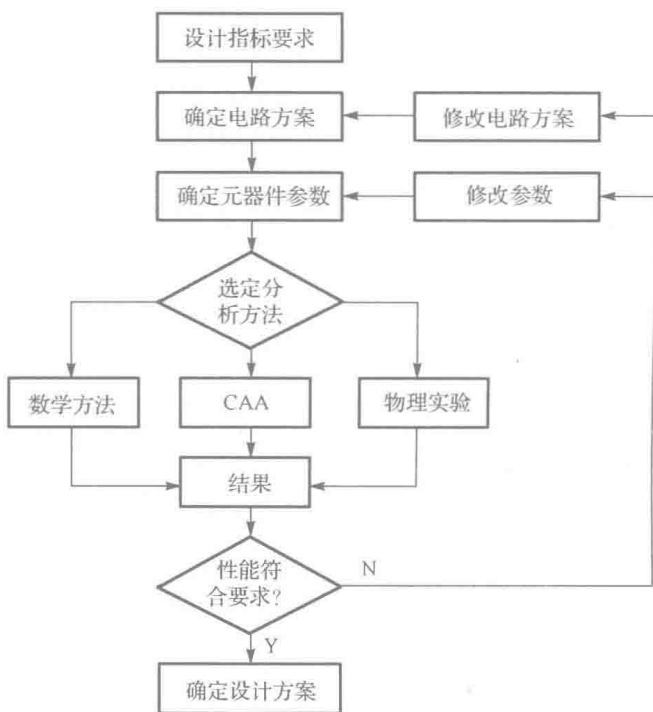


图 1-1 电子电路 CAD 流程

1.2.2 电子电路 CAD 技术优势

CAD 在电子电路设计中发挥了不可替代的重要作用，主要体现在三个方面。

(1) 验证电路方案设计的正确性。当要求的系统功能确定之后，首先采用系统仿真或结

构模拟的方法验证系统方案的可行性，这只要确定系统各环节的传递函数（数学模型）便可实现。对构成系统的各电路结构进行模拟分析，以判断电路结构设计正确性及性能指标的可实现性。

(2) 电路特性的优化设计。器件参数的容差和工作环境温度将对电路工作的稳定性产生影响。传统的电路设计方法很难对这种影响进行全面的分析和了解，因而也很难实现电路的优化设计。电路 CAD 技术中的温度分析和统计分析功能，既可以分析各种恶劣温度条件下的电路特性，也可以对器件容差的影响进行全面的计算分析。其内容包括：①对不同的容差特性进行规定次数的跟踪分析（蒙特卡罗分析）；②单独分析每一器件容差对电路的影响量（灵敏度分析）；③分析全体器件容差对电路性能的最大影响量（最坏情况分析）。采用统计分析方法，便于确定最佳元器件参数、最佳电路结构及适当的系统稳定裕度，真正做到电路的优化设计。

(3) 实现电路特性的模拟测试。电子电路的设计过程中，大量的工作是各种数据测试及特性分析。但是，受测试手段及仪器精度所限，有些测试项目实现困难。例如，超高频电路中的弱信号测量及噪声测量、某些功率输出电路中具有破坏性质的器件极限参数测量，如高温、高电压、大电流等。采用电子 CAD 方式，可以方便地实现全功能测试，也可以直接模拟各种恶劣工作环境及各种极限条件下的电路特性而无器件或电路损坏之虞，比传统设计方式要经济得多。

1.2.3 电子电路仿真程序的构成

从电子线路 CAD 的全过程可以看出，电子线路计算机辅助分析（CAA）是关键，CAA 大致分为三步。（1）构造数学模型，选择计算方法。实际电路由电阻、电容、电感、双极型晶体管、场效应管、变压器、传输线等元器件构成，首先应按电路的应用条件和电路分析的要求，来建立它们的器件模型，在此基础上将一个实际的电路用一整套数学方程来描述，即用计算机自动地建立电路方程，然后选择方法简单、计算量小、并能保证精度要求的计算方法，求解电路方程。（2）设计程序框图，编写应用程序。电路拓扑结构和元器件参数等原始信息、电路方程及求解方程的步骤一起构成分析问题的一个完整过程。为了将这一过程描述出来，可先进行框图设计，然后用算法语言编写出应用程序。（3）使用应用程序，解决实际问题。使用者只要输入原始数据，执行运行文件，就能得到计算结果，分析计算结果，就可以找到电子线路优化设计的途径。

应用程序的使用比较容易，但编制应用程序相当复杂。对大多数使用者来说，只需了解应用程序的功能及使用方法就可以了。了解电路仿真应用程序工作的特点、解题过程，有利于正确应用软件进行电子线路仿真分析与设计，同时通过软件仿真可加深对电子线路的理解和整体概念。一般电路仿真程序构成框图如图 1-2 所示。

由图 1-2 看出，工程数学、计算机编程与电路理论是进行电子线路仿真的基础。我们在加强实践动手能力培养的同时，不要忽视基础理论课的学习，要注重理论与实践的结合。

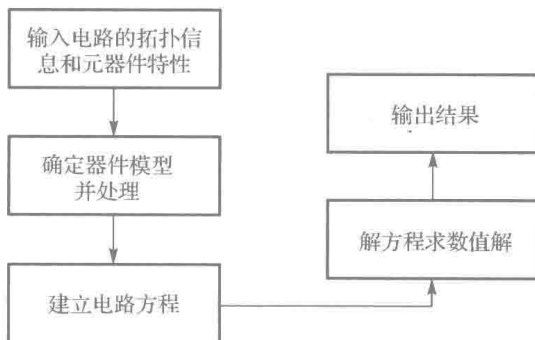


图 1-2 电路仿真程序构成框图

1.3 OrCAD/PSpice 软件简介

PSpice 软件是典型的电路仿真设计软件,是 MicroSim 公司 20 世纪 80 年代中期推出的基于 PC 机的通用电路模拟分析软件,可进行模拟分析、数字分析、模拟/数字混合分析、参数优化等,应用面很广。现在的很多分析软件都以 PSpice 为内核、经过历年来多次改版,以其强大的功能和高度的集成性而成为个人计算机上最受欢迎的电路仿真软件。

1.3.1 SPICE 发展历程

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 由美国加州大学伯克利 (Berkeley) 分校电工和计算机科学系分校开发,1972 年首次推出。1983 年 OrCAD 公司推出可在 PC 机上运行的 PSpice 1 (P 即代表运行于 PC 机的版本)。目前微机上广泛使用的 PSpice 是由美国 MicroSim 公司开发并于 1984 年 1 月首次推出的。1988 年 SPICE 被定为美国国家工业标准。目前国际上享有盛誉的模拟电路设计工具都是以 SPICE 为基础实现的,如 MicroSim 公司的 PSpice、Meta Software 公司的 HSpice,以及 Analogy 公司的 Saber 等。

PSpice 是由 SPICE 发展而来的用于微机系列的通用电路分析程序,能进行模拟电路分析、数字电路分析和模拟/数字混合电路分析,现已成为微机级电路模拟标准软件。PSpice 5.0 及以前的版本都为 DOS 版,而 PSpice 5.1 及以后的各种版本均为窗口版。PSpice 软件分为工业版 (Production Version) 和教学版 (Evaluation Version)。1998 年 1 月, MicroSim 公司与 OrCAD 公司合并,称为 OrCAD 公司。两公司强强联合后,相继推出一系列基于 PC 机的 EDA 软件系统。1998 年 11 月推出的 OrCAD/PSpice 9,是有相关中文参考书的版本。OrCAD 软件覆盖了电子设计中的 4 项核心任务:电路原理图输入及器件信息管理系统 OrCAD/Capture CIS,模拟、数字及模拟/数字混合电路分析与优化设计 OrCAD/PSpice A/D,可编程逻辑设计 OrCAD/Express Plus,印制电路板 (PCB) 设计 OrCAD/Layout Plus。

与 SPICE 相比,OrCAD/PSpice 并不只是单纯将 SPICE 移植到 PC 机,而是在以下方面有重大变革。(1) 不仅可以对模拟电路进行直流、交流、瞬态等基本电路特性分析,而且可进行蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 统计分析、最坏情况分析 (Worst-Case Analysis, Wcase)、优化设计等复杂的电路特性分析。(2) 不仅可对模拟电路进行计算机辅助分析,而且可对数字电路、数字/模拟混合电路进行计算机模拟。为突出这一功能特点,新版本的软件称为 PSpice A/D。(3) 一改批处理运行模式,可在 Windows 环境下,以人机交互方式运行。绘制好电路图后,即可直接进行电路模拟,无须编制繁杂的输入文件。在模拟过程中,可以随时分析观察模拟结果,并在电路图上修改设计。经过 25 年的发展和应用,OrCAD/PSpice 实际上已成为微机级电路模拟的标准软件。

1.3.2 OrCAD/PSpice 支持的元器件类型与电路分析特性

1. OrCAD/PSpice 支持的元器件类型

PSpice 可模拟下述 6 类最常用的电路元器件:(1) 基本无源元器件,如电阻、电容、电感、互感、传输线等;(2) 常用的半导体器件,如二极管、双极型晶体管、结型场效应晶体

管、MOS 场效应晶体管、GaAs 场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等；(3) 独立电压源和独立电流源，可产生用于直流 (DC)、交流 (AC)、瞬态 (TRAN) 分析和逻辑模拟所需的各种激励信号波形；(4) 各种受控电压源、受控电流源和受控开关；(5) 基本数字电路单元，包括常用的门电路、传输门、延迟线、触发器、可编程逻辑阵列、RAM、ROM 等；(6) 常用单元电路，特别是像运算放大器一类集成电路，可将其作为一个单元电路整体出现在电路中，而不必考虑该单元电路的内部电路结构。电路模拟的精度很大程度上取决于电路中代表各种元器件特性的模型参数值是否精确。为方便用户使用，PSpice A/D 提供的模型参数库中包括：超过 11300 种半导体器件和模拟集成电路产品的模型参数，1600 多种数字电路单元产品的参数，其中包括最新的 GaAs 器件和 IGBT 器件模型参数，对 MOSFET 器件还提供了 6 种不同级别的模型，适用于先进的亚微米工艺器件。PSpice A/D 为不同类别的元器件赋予不同的字母代号，如表 1-1 所示。电路图中不同元器件编号的首字母必须按照字母代号选取。

表 1-1 PSpice A/D 支持的元器件类别及其字母代号

字母代号	元器件类别	字母代号	元器件类别
B	GaAs 场效应晶体管	N	数字输入
C	电容	O	数字输出
D	二极管	Q	双极型晶体管
E	受电压控制的电压源	R	电阻
F	受电流控制的电流源	S	电压控制开关
G	受电压控制的电流源	T	传输线
H	受电流控制的电压源	U	数字电路单元
I	独立电流源	U STIM	数字电路激励信号源
J	结型场效应晶体管 (JFET)	V	独立电压源
K	互感 (磁心)，传输线耦合	W	电流控制开关
L	电感	X	单元子电路调用
M	MOS 场效应晶体管 (MOSFET)	Z	绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)

N 器件和 O 器件，是为混合电路中对数/模接口型节点进行接口电路转换而引入的等效器件。

2. OrCAD/PSpice 分析的电路特性

1) 直流分析

包括电路的静态工作点分析、直流小信号传递函数值分析、直流扫描分析与直流小信号灵敏度分析。分析结果以文本文件方式输出。直流小信号传递函数值是电路在直流小信号下的输出变量与输入变量的比值，输入电阻和输出电阻也作为直流解析的一部分被计算出来。进行此项分析时，电路中不能有隔直电容。分析结果以文本方式输出。

直流扫描分析可作出各种直流转移特性曲线。输出变量可以是某节点电压或某节点电流，输入变量可以是独立电压源、独立电流源、温度、元器件模型参数和通用 (Global) 参数 (在电路中用户可以自定义的参数)。直流小信号灵敏度分析是分析电路各元器件参数变化时，对电路特性的影响程度。灵敏度分析结果以归一化的灵敏度值和相对灵敏度形式给出，并以文本方式输出。

2) 交流小信号分析

包括频率响应分析和噪声分析。在用户所指定的频率范围内对电路进行仿真分析。频率响应分析能够分析传递函数的幅频响应和相频响应，亦即可以得到电压增益、电流增益、互

阻增益、互导增益、输入阻抗、输出阻抗的频率响应。分析结果均以曲线方式输出。PSpice 用于噪声分析时，可计算出每个频率点上的输出噪声电平及等效的输入噪声电平。

3) 瞬态分析

瞬态分析即时域分析，包括电路对不同信号的瞬态响应，时域波形经过快速傅里叶变换 (FFT) 后，可得到频谱图。通过瞬态分析，也可以得到数字电路的时序波形。另外，PSpice 可以对电路的输出进行傅里叶分析，得到时域响应的傅里叶分量（直流分量、各次谐波分量、非线性谐波失真系数等）。这些结果以文本方式输出。

4) 灵敏度分析

灵敏度分析是计算电路指定的输出变量对电路元器件参数的小信号灵敏度值。

5) 温度特性分析

PSpice 通常是在 27°C 情况下进行各种分析和仿真的，如果用户指定电路的工作温度，则可以进行不同温度下的电路特性分析。

6) 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 分析和最坏情况 (Worst Case) 分析

蒙特卡罗分析是分析电路元器件参数在它们各自的容差（容许误差）范围内，以某种分布规律随机变化时电路特性的变化情况，这些特性包括直流、交流或瞬态特性。最坏情况分析与蒙特卡罗分析都属于统计分析，所不同的是，蒙特卡罗分析是在同一次仿真分析中，参数按指定的统计规律同时发生随机变化；而最坏情况分析则是在最后一次分析时，使各个参数同时按容差范围内各自的最大变化量改变，以得到最坏情况下的电路特性。

3. OrCAD/PSpice 软件包的软件模块

OrCAD 软件包中进行电路模拟分析的核心软件是 PSpice A/D。为更快更好地进行模拟工作，OrCAD 软件包中还提供了 5 个配套软件（模块），它们之间的相互关系如图 1-3 所示，主要包括 Capture（电路图输入程序）、PSpice A/D（仿真分析程序）、Probe（图形后处理程序）、Stimulus Editor（信号源编辑程序）、Parts（元器件）模型参数提取程序、Optimizer（电路优化程序）等 6 个软件包。

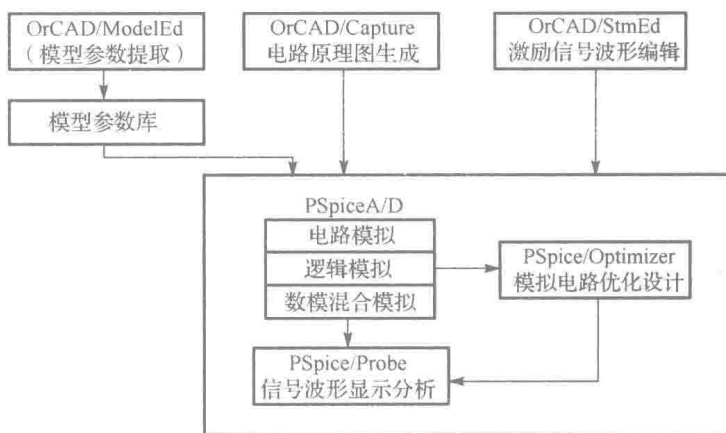


图 1-3 PSpice 软件包组成

1) Schematics 图形编辑程序

PSpice 的输入基本上是有电路原理图和网单文件两种形式。电路元器件符号库中备有绘电原理图所需的元器件符号，用户从符号图形库中调出所需的电路元器件符号，组成电路图，

由原理图编辑器自动将原理图转化为电路网单文件，并标上节点号，提供给仿真工具进行仿真。如果用户熟悉仿真程序的输入语言，又没有将原理图存档的需求，可以直接输入电路网单文件。

2) PSpice A/D 仿真分析程序

PSpice A/D 是 PSpice 软件包中的分析程序，完成对模拟或数字电路的仿真分析，PSpice A/D 程序的输入文件是由电路编辑程序根据输入电路图自动生成以.CIR 为后缀的文件，或由用户直接输入的电路描述文件，PSpice A/D 程序的输出文件是以.DAT 为后缀的数据文件（供 Probe 使用）和以.OUT 为后缀的文本文件（可从 Schematics 中显示）。

3) Probe 图形后处理程序

Probe 程序是 PSpice 软件包中的图形后处理程序，它可将 PSpice A/D 程序仿真分析后的结果在屏幕或打印设备上以数据形式或以数据相关的图形形式显示出来，Probe 程序的输入文件是电路经 PSpice A/D 程序分析计算后所生成的以.DAT 为后缀的数据文件。

4) Stimulus Editor 信号源编辑程序

编辑 PSpice 运行过程中瞬态分析需要的脉冲、分段线性、调幅正弦、调频和指数信号等信号波形。编辑逻辑模拟需要的时钟信号。编辑各种形状脉冲信号及总线信号波形。

5) Parts 元器件模型参数提取程序

将来自厂家的器件数据信息或用户自定义的器件数据转换为 PSpice 中所用的模型参数，并提供它们之间的关系曲线及相互作用，确定元器件的精确度。

6) Optimizer 电路优化程序

在电路的性能已经基本满足设计功能和指标的基础上，为了使电路的某些性能更为理想，在一定的约束条件下，对电路的某些参数进行调整，直到电路的性能达到要求为止。

4. OrCAD/PSpice 电路模拟的基本步骤

采用 OrCAD EDA 软件系统进行电路模拟的基本过程共分 8 个阶段，如图 1-4 所示。

1) 新建设计项目 (Project)

OrCAD 软件包对设计任务按项目 (Project) 实施相关管理。开始一个新的项目设计时，首先要调用 OrCAD/Capture 软件中的项目管理模块建立相应的项目名称，并确定有关的设置。

2) 电路图生成

项目名称确定后，在电路图绘制软件 OrCAD/Capture 环境下，将确定的电路设计方案以电路原理图形式输入计算机；或者在 PSpice A/D 环境下，将确定的电路设计方案以 PSpice 程序文本形式输入计算机。

3) 电路特性分析类型和分析参数设置

生成电路图以后，需根据电路设计任务确定要分析的电路特性类型，并设置与分析有关的参数。

4) 电路模拟

完成上述三项工作后，调用 PSpice A/D 程序对电路进行模拟分析。

5) 模拟结果的显示和分析

完成电路模拟分析后，可调用 PSpice/Probe 模块，显示和分析模拟电路的计算结果及信号波形。

6) 优化设计

对于模拟电路,可在结果分析的基础上确定是否调用 PSpice A/D 中的优化模块 (Optimizer) 对电路进一步进行优化设计,以提高设计质量。

7) 设计修正

在电路模拟过程中,如果电路设计方案不合适,或者电路图生成过程中出现差错或分析参数设置不当,PSpice A/D 都会因检测出错误而不能正常运行,或显示出运行不收敛和运行结果不满足设计要求。这时用户可以通过波形显示分析窗口 (Probe 窗口) 分析问题所在,采取相应措施,或修改电路设计,或纠正电路图生成中的错误,或重新设置分析参数,然后从第 2) 或第 3) 阶段开始,重复设计模拟过程,直至得到满足要求的电路设计。

8) 设计结果输出

得到符合要求的电路设计后,可以调用 OrCAD/Capture 输出全套电路图纸,也可根据需要 将电路设计图传送到 OrCAD/Layout,进行印制电路板设计,如图 1-4 所示。

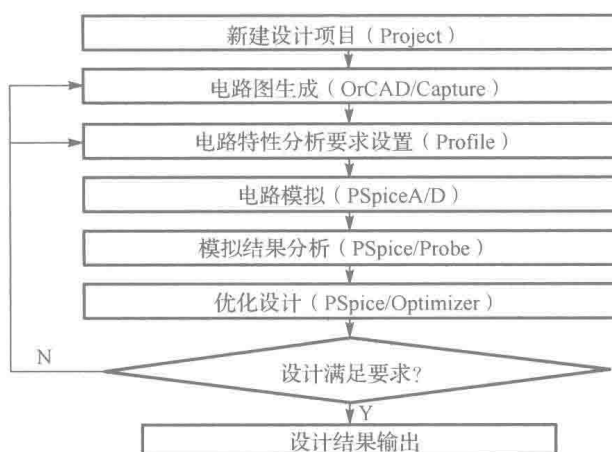


图 1-4 电路模拟的基本过程

本章小结

本章首先比较了传统电子电路设计与计算机辅助电路设计的差异,指出了电子电路 CAD 的优势;介绍了电路仿真的一般过程及电路仿真程序的一般构成;在此基础上,介绍了 PSpice 电路仿真软件的组成、功能特点及进行电路仿真分析与设计的基本过程。让读者对电子电路的计算机辅助分析与设计过程及 PSpice 电路仿真软件有初步了解。

习 题

- 1-1 传统的电子电路设计过程是怎样的?它有哪些缺点?
- 1-2 电子电路 CAD 与传统电子电路设计方法相比有哪些优点?
- 1-3 电路仿真程序一般包含哪几部分?设计电子电路仿真程序需要哪些专业知识和技能作为基础?
- 1-4 PSpice 电路仿真软件的组成、功能特点有哪些?利用 PSpice 软件进行电子电路仿真分析与设计的基本步骤是怎样的?

第2章 电路元器件描述

2.1 PSpice 输入描述语句

PSpice 的文本输入任务是构造一个文本输入文件，文件名后缀为.CIR。输入文件的第一行可以是任意说明文本，但不能省略。最后一行必须是.END 命令。其他各行的顺序是任意的，对分析结果没有影响。描述语句中，空格数量没有要求，逗号、Tab 与空格等同。“*”后面加说明文字，不参与执行。一行描述语句未完，用“+”接续，要紧跟前一行。PSpice 输入文件中，任何语句大小写等同。

1. 输入描述语句构成

标题语句：描述文件的第一行，SPICE 将第一行作为标题行打印，而不作为电路的一部分进行分析，这一行必须设置。

注释语句：一般形式是“*”后加字符串，注释语句不参与电路的模拟仿真，可以存在于输入文件除第一行和最后一行之间的任何位置。

电路的描述语句：定义电路拓扑结构和元器件类型及其数值、半导体器件、电路描述语句等，可以出现在文件的第二行到末行结束语句之间的任何位置。

电路特性分析和控制语句：选择要分析的电路特性及输出的控制语句。

结束语句：标志着电路描述语句的结束，格式为“.END”，位于描述语句文件的最后一行。

2. 节点、元器件单位及元器件描述的首字母

1) 节点

PSpice 规定节点 0 为地节点，其他节点的编号可以是任意数字或字符串。不允许有悬浮节点，即每个节点对地均要有直流通路。当这个条件不满足时，通常是接一个大电阻（如 $1\text{G}\Omega$ ）使该悬浮节点具有直流通路。另外，每个节点至少应连接两个元器件，不能有悬空节点存在。

2) 元器件单位名称

元器件节点后跟随元器件值，元器件值有两个后缀，前一个为数量级，后一个为单位名称。数量级后缀全为大写，PSpice 规定 9 种比例因子： $F=1\text{E}-15=1\times 10^{-15}$ ， $P=1\text{E}-12=1\times 10^{-12}$ ， $N=1\text{E}-9=1\times 10^{-9}$ ， $U=1\text{E}-6=1\times 10^{-6}$ ， $M=1\text{E}-3=1\times 10^{-3}$ ， $K=1\text{E}3=1\times 10^3$ ， $\text{MEG}=1\text{E}6=1\times 10^6$ ， $G=1\text{E}9=1\times 10^9$ ， $T=1\text{E}12=1\times 10^{12}$ ；对于单位后缀，PSpice 规定如下： $V=\text{Volt}$ ， $A=\text{amp}$ ， $\text{Hz}=\text{hertz}$ ， $\text{OHM}=\text{ohm}$ ， $H=\text{henry}$ ， $F=\text{farad}$ ， $\text{DEG}=\text{degree}$ 。单位后缀可以忽略，例如，电感值是 $15\mu\text{H}$ ，可以写为 15U 。

3) 电路元器件描述首字母

电路元器件和电源用名称的第一个字母作为标志（关键字），其后可以是任何数字或字母，整个名称长度不超过 8 个字符。表 2-1 列出了 PSpice 中元器件名称的首字母。