



高等院校
通信与信息专业规划教材

电子设计 自动化技术

臧春华 郑步生 魏小龙 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校通信与信息专业规划教材

电子设计自动化技术

臧春华 郑步生 魏小龙 编著



机械工业出版社

本书不局限于 EDA 软件的介绍与使用,而是注重 EDA 技术的系统性与广泛性,从理论、方法到工具进行了较为全面的阐述。主要内容包括模拟与数字电路仿真原理、模拟与数字可编程器件、印制电路板设计原理以及专用集成电路设计技术,并从实用角度介绍了相关 EDA 工具 Multisim、MAX+plus II、PAC-Designer、Protel 99 和 Microwind 的使用方法,使读者能全面了解和掌握 EDA 的常用技术与工具。

本书可作为高等院校通信与信息工程专业及其他相近专业的教材,也可作为相关工程技术人员的实用参考书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电子设计自动化技术/臧春华等编著. —北京:机械工业出版社,2004.2
(高等院校通信与信息专业规划教材)

ISBN 7-111-13859-7

I. 电... II. 臧... III. 电子电路—电路设计:计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 002960 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策 划:胡毓坚

责任编辑:时 静

责任印制:李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm·1092mm^{1/16}·16.25 印张·396 千字

0 001—5 000 册

定价:23.00 元

凡购本图书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新			
编委会副主任	张文军	张思东	杨海平	徐澄圻
编委会委员	王金龙	冯正和	刘增基	李少洪
	邹家禄	吴镇扬	赵尔沅	南利平
	徐惠民	彭启琮	解月珍	
秘书长	胡毓坚			
副秘书长	许晔峰			

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业规划教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

电子设计自动化 (EDA) 是一个广泛的概念, 凡在电子设计过程中用到计算机辅助手段的相关步骤都可作为 EDA 的组成部分。当前, EDA 技术得到了高度的重视和广泛的应用, 并在深度和广度上不断发展。电子系统的设计已经无法脱离 EDA 工具的支持, 并且依赖性越来越强。掌握 EDA 技术已经成为电子设计的基本技能。因此, 开展关于 EDA 技术的相关教学相当重要。

电子系统的设计分为多个层次, 由上至下依次为系统级 (算法级)、功能级 [寄存器传输级 (RTL)]、逻辑 (门) 级、电路级和物理级 (版图级)。电子系统的设计过程包括设计、验证与实现三大方面, 而 EDA 技术也正是围绕这几个方面发展起来的。

仿真 (Simulation) 又称为模拟, 是为满足对电子系统的验证而首先出现的 EDA 技术。电子系统的仿真就是用计算机模仿电子系统的实际工作情况。仿真有助于在进行下层设计或制作电路前发现设计错误, 从而节省时间, 避免经济损失。

集成电路技术的发展使电子系统的实现方式发生了很大的变化。20 世纪 60 年代之前, 电子系统都由分立元件构成; 20 世纪 60~70 年代电子系统主要采用通用的集成电路; 20 世纪 80~90 年代电子系统逐步采用半定制的专用集成电路——可编程器件; 进入 21 世纪, 全定制和定制专用集成电路正成为新的发展热点。专用集成电路的设计与应用必须依靠专门的 EDA 工具。

综合 (Synthesis) 即合成, 是计算机进行自动设计的一种方法。电子系统的综合是将较高层次的描述转换为由低层次便于实现的模块所装配成的统一实体。EDA 综合工具的出现, 使电子系统的设计者将主要精力集中在系统级设计与优化上, 摆脱了繁杂的低层次设计, 从而大大提高了设计效率。

电子系统的实现除了器件的支持, 还需要制作印制电路板 (PCB), 因此 PCB 的设计与制作也成为 EDA 技术的一个方面。

本教材将围绕 EDA 技术的主要领域: 仿真、综合和实现展开讨论, 注重 EDA 技术的系统性, 从理论、方法到工具进行较为全面的阐述。为力求反映 EDA 技术的全貌, 本书从电子系统的各层次仿真、综合到各种常用的实现方法都加以论述。

全书分为 4 篇。第 1 篇由第 1、2 章组成, 讨论电子系统的仿真。内容包括模拟电路的计算机辅助分析、数字电路的逻辑模拟、数模混合仿真、元器件模型, 以及电路仿真工具 Multisim 的应用。

第 2 篇由第 3、4 章组成, 讨论可编程器件。内容包括可编程逻辑器件 (CPLD 和 FPGA) 及其开发平台 MAX+plusII、可编程模拟电路 (PAC) 及其开发工具 PAC-Designer, 并简要介绍数模混合可编程单片系统。

第 3 篇由第 5 章组成, 介绍印制电路板的构成与设计方法、自动布局布线, 以及 PCB 设计工具 Protel99SE 的使用方法。

本书的最后两章构成第 4 篇, 介绍集成电路制造工艺、全定制电路设计方法与设计过程,

以及教学用集成电路设计工具 Microwind 的使用方法。

各章均附有一定量的习题，用于巩固所学概念和掌握相应的 EDA 工具。除概念题外，绝大部分设计题均需用 EDA 工具进行设计描述，并通过仿真验证设计的正确性。若条件许可，与可编程器件有关的设计题还可以下载实现。

编者在撰写本书时，参考了大量的 EDA 文献资料，并引用了一些专家和学者的研究成果，以力求内容新颖、丰富和实用，如数模混合仿真技术、最新的可编程器件和数模混合可编程单片系统以及集成电路设计工具等。在 EDA 工具的讲解方面，突出重点、难点，并以典型实例引导读者尽快入门。

本书所采用的逻辑符号部分是国外流行符号，其与我国国家标准的对照请参阅附录。

本书由臧春华任主编。第 1 篇由郑步生执笔，第 2、4 篇及 5.2 节由臧春华执笔，第 3 篇（除 5.2 节外）由魏小龙执笔。张君、王海涛、肖健、俞鑫、余亮明、张晴川、黄磊、张翔、丁丁等参加了例题试做、书稿录入、插图绘制等工作。

本书的编写大纲承蒙北京邮电大学解月珍教授审阅，并提出了宝贵的修改意见，在此表示感谢。

特别感谢沈嗣昌和蒋璇两位教授，是他们开创了南京航空航天大学 EDA 的科研与教学工作。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

引论 1

第 1 篇 电子电路的仿真技术

第 1 章 计算机辅助电路分析 6

1.1 模拟电路仿真原理 6

1.1.1 输入方式 7

1.1.2 元器件模型 8

1.1.3 电路方程的建立与求解 8

1.1.4 模拟电路分析方法 9

1.1.5 图形的后处理 11

1.2 数字电路的逻辑模拟 12

1.2.1 逻辑模拟的过程 12

1.2.2 逻辑模拟的模型 13

1.2.3 逻辑模拟的算法 17

1.3 数模混合仿真技术 18

1.3.1 顺序模拟 18

1.3.2 混合模拟 19

1.4 常用的电路级仿真工具与
半导体元器件模型 20

1.4.1 OrCAD (Pspice) 9.2 20

1.4.2 EWB 5.x 21

1.4.3 半导体元器件模型的建立 23

1.5 习题 32

第 2 章 电路仿真工具 Multisim
及其应用 34

2.1 主界面及其设置 34

2.1.1 Multisim 2001 的主界面 34

2.1.2 用户界面设置 36

2.2 电原理图的创建 37

2.2.1 元器件选取 37

2.2.2 线路的连接 38

2.2.3 电原理图的编辑处理 38

2.2.4 子电路 (Subcircuit) 的
创建与调用 39

2.3 虚拟仪表的使用方法 40

2.3.1 数字万用表 (Multimeter) 40

2.3.2 函数信号发生器
(Function Generator) 41

2.3.3 瓦特表 (Wattmeter) 41

2.3.4 示波器 (Oscilloscope) 42

2.3.5 波特仪 (Bode Plotter) 43

2.3.6 字信号发生器
(Word Generator) 44

2.3.7 逻辑分析仪
(Logic Analyzer) 45

2.3.8 逻辑转换器
(Logic Converter) 47

2.3.9 失真分析仪
(Distortion Analyzer) 48

2.4 基本分析方法 49

2.4.1 直流工作点分析
(DC Operating Point
Analysis) 50

2.4.2 交流分析 (AC Analysis) 51

2.4.3 瞬态分析
(Transient Analysis) 51

2.4.4 傅里叶分析
(Fourier Analysis) 52

2.4.5 噪声分析 (Noise Analysis) 53

2.4.6 失真分析
(Distortion Analysis) 54

2.4.7 直流扫描分析
(DC Sweep Analysis) 55

2.4.8 灵敏度分析
(Sensitivity Analysis) 56

2.4.9 参数扫描分析

(Parameter Sweep Analysis)	56
2.4.10 温度扫描分析 (Temperature Sweep Analysis)	58
2.4.11 极点-零点分析 (Pole-Zero Analysis)	58
2.4.12 传输函数分析 (Transfer Function Analysis)	59
2.5 仿真结果的后续处理	60
2.5.1 Analysis Graphs 窗口设置	60
2.5.2 后处理器 (Postprocessor) 的基本操作方法	64
2.6 仿真实例	67
2.6.1 晶体管单管放大电路特性的测量	68
2.6.2 公-铁交叉道口交通控制器的设计	72
2.6.3 蔡氏电路中混沌现象的观察研究	76
2.7 习题	80

第 2 篇 电子系统的可编程设计技术

第 3 章 可编程逻辑器件 (PLD) 的原理与应用

3.1 简单可编程逻辑器件 (SPLD) 的原理与组成	85
3.1.1 PLD 的基本结构	85
3.1.2 PLD 内部电路的表示方法	85
3.1.3 SPLD 的编程方法	86
3.1.4 可编程只读存储器 (PROM)	87
3.1.5 可编程逻辑阵列 (PLA)	89
3.1.6 可编程阵列逻辑 (PAL)	90
3.1.7 通用阵列逻辑 (GAL)	91
3.2 高密度可编程逻辑器件 CPLD/FPGA 的构成	95
3.2.1 阵列扩展型 CPLD	95
3.2.2 现场可编程门阵列 (FPGA)	97
3.2.3 连线确定的 FPGA	100

3.2.4 CPLD/FPGA 编程技术	103
3.3 常用可编程逻辑器件及其开发工具	109
3.3.1 Lattice 公司的 CPLD/FPGA 及其开发工具	109
3.3.2 Altera 公司的 CPLD/FPGA 及其开发工具	110
3.3.3 Xilinx 公司的 CPLD/FPGA 及其开发工具	111
3.3.4 用于 CPLD/FPGA 的 IP 核	112
3.4 Altera 可编程器件的开发工具 MAX+plus II	113
3.4.1 用 MAX+plus II 进行设计的一般过程	113
3.4.2 逻辑设计的输入方法	114
3.4.3 编译与网络表提取	119
3.4.4 设计实现	119
3.4.5 仿真验证	121
3.4.6 时序分析	122
3.4.7 底层图编辑	124
3.4.8 下载	125
3.4.9 MAX+plus II 中的库元件	126
3.5 设计实例	128
3.5.1 四位快速乘法器设计	128
3.5.2 十字路口交通控制器设计	129
3.6 习题	133

第 4 章 可编程模拟电路 (PAC) 的原理及应用

4.1 可编程模拟电路概述	136
4.1.1 可编程模拟电路的分类	136
4.1.2 基于可编程模拟电路的设计流程	137
4.2 ispPAC 系列器件的结构及原理	138
4.2.1 ispPAC10 的组成与应用	138
4.2.2 ispPAC20 的结构与组成	141
4.2.3 ispPAC80/81 的结构与组成	144
4.3 ispPAC 器件开发工具 PAC-Designer	145

4.3.1	概述	145
4.3.2	设计输入	146
4.3.3	电路仿真	147
4.3.4	器件编程	149
4.3.5	其他重要功能	150
4.4	设计实例	150
4.4.1	整数增益放大器设计	150
4.4.2	带小数增益放大器设计	151
4.4.3	分数增益放大器设计	152
4.4.4	双二次滤波器设计	153
4.5	数模混合可编程单片系统简介	154
4.5.1	概述	154
4.5.2	可配置模拟电路块	154
4.5.3	可编程逻辑电路	155
4.5.4	动态可重配置技术	155
4.5.5	片内处理器系统	156
4.5.6	软件调试与系统引导程序	156
4.6	习题	156

第3篇 印制电路板设计技术

第5章 印制电路板(PCB)

	设计及其工具	159
5.1	印制电路板基本知识	159
5.1.1	印制电路板简介	159
5.1.2	印制电路板设计方法与原则	161
5.1.3	印制电路板设计工具	163
5.2	自动布局布线	163
5.2.1	自动布局算法	164
5.2.2	自动布线算法	166
5.3	Protel99SE 概述	168
5.3.1	Protel99SE 的组成及特点	168
5.3.2	文件管理及其基本操作	170
5.3.3	设计组管理	173
5.3.4	界面概览	174
5.4	用 Protel99SE 设计原理图	176
5.4.1	原理图设计下拉菜单与环境设置	176

5.4.2	原理图库	187
5.4.3	原理图的设计要素与绘制方法	189
5.4.4	原理图设计举例	190
5.5	用 Protel99SE 设计印制电路板	190
5.5.1	电路板图设计下拉菜单与环境设置	191
5.5.2	电路板图的设计要素与放置方法	201
5.5.3	网络表与电路板	202
5.5.4	电路板设计过程	203
5.5.5	电路板设计举例	204
5.6	习题	206

第4篇 专用集成电路设计技术

第6章 集成电路制造工艺与专用

	集成电路设计	207
6.1	集成电路制造工艺简介	207
6.1.1	IC 制造的基本工艺	208
6.1.2	双极型 IC 制造过程	209
6.1.3	MOS IC 制造过程	211
6.1.4	CMOS 版图设计规则	213
6.2	CMOS 基本单元电路	214
6.2.1	MOS 管的开关特性	214
6.2.2	基本门电路与逻辑模块	215
6.3	专用集成电路设计过程	217
6.3.1	全定制电路设计过程	218
6.3.2	深亚微米电路设计	219
6.4	专用集成电路设计的 EDA 技术	220
6.4.1	设计输入	221
6.4.2	设计验证	221
6.4.3	设计综合	224
6.4.4	EDA 工具简介	225
6.5	习题	227

第7章 集成电路设计工具

	Microwind 与 DSCH	228
7.1	Microwind 的主要功能	228

7.1.1 工艺文件与设计规则	228	7.2.1 基于公式的版图综合	237
7.1.2 版图绘制	230	7.2.2 基于 Verilog 的版图综合	237
7.1.3 版图的检查与分析	234	7.3 习题	245
7.1.4 电路的提取与仿真	236	附录 逻辑符号对照表	246
7.1.5 文件格式	236	参考文献	247
7.2 Microwind 的版图综合	237		

引 论

0.1 电子设计自动化概述

电子设计的历史可以追溯到 19 世纪,但直到 20 世纪 50 年代,电子设计一直都采用手工方法,当时的设计效率和设计水平较低。在 20 世纪 60 年代,随着集成电路的出现,一方面,计算机的规模与功能有了长足的进步,其应用越来越广;另一方面,设计大规模集成电路和复杂电子系统的需求日益迫切,从而出现了用计算机提高电子设计效率与水平的研究热潮。

集成电路版图设计方面,20 世纪 70 年代起就出现了基于门阵列和标准单元的计算机辅助设计工具。

系统设计方面,20 世纪 70 年代出现了计算机辅助电路分析工具和逻辑综合与优化工具,以及简单可编程逻辑器件;20 世纪 80 年代出现了印制电路板(Printed Circuit Board,简称 PCB)自动布局布线工具、标准的硬件描述语言(Hardware Description Language,简称 HDL)及其仿真工具,以及复杂可编程逻辑器件;20 世纪 90 年代出现了可编程模拟电路,以及标准 HDL(VHDL 和 Verilog HDL)的综合工具,电子设计才真正进入了自动化时期,上述设计技术统称为电子设计自动化(Electronic Design Automation,简称 EDA)技术。

进入 21 世纪,又出现了可编程片上系统,标志着 EDA 技术不断地向前发展。

电子系统的设计分为多个层次,由上至下依次为系统级(算法级)、功能级[寄存器传输级(RTL)]、逻辑(门)级、电路级和物理级(版图级)。从系统级到逻辑级各层次的描述可以是行为描述,也可以是结构描述。行为描述给出电路功能;结构描述给出电路组成。

严格来说,HDL 仿真与综合工具出现前的 EDA 技术只能称为“计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称 CAD)”技术,因为当时人们只能借助计算机进行逻辑级和电路级的仿真与优化,而从系统级到逻辑级的设计基本上还是手工进行。HDL 综合工具出现后,设计师只需在系统级进行设计,将设计思想与设计方案用 HDL 描述出来,进行仿真验证,然后借助综合工具,自动产生逻辑级至物理级的设计结果。

集成电路技术和计算机技术是 EDA 技术发展的基础。反过来,EDA 技术为电子设计提供了强有力的支持,不仅使电子系统的规模日益复杂,而且使电子产品的周期不断缩短,从而又推动了集成电路和计算机技术以更快的速度发展。这种相互依存、相互促进的关系使得电子技术在 20 世纪后 30 年中成为发展最为迅速的领域。

集成电路技术和 EDA 技术的发展使电子设计的理念和方法以及电子系统的实现方式都发生了很大的变化。20 世纪 60 年代之前,电子系统都由分立元件构成,设计与制板都是手工方式;20 世纪 60~70 年代电子系统主要采用通用的集成电路,设计方式仍以手工为主,但可借助计算机对设计结果进行仿真验证;20 世纪 80~90 年代电子系统逐步采用半定制的专用集成电路——可编程器件,设计方式转为用 HDL 描述系统设计,借助可编程器件开发

工具进行自动综合，PCB 设计与制作几乎全部采用计算机进行。进入 21 世纪，采用数模混合可编程器件或定制专用集成电路的电子系统单芯片集成（System-On-Chip，简称 SOC）已成为新的发展方向。

电子设计自动化是电子技术发展的必然结果。为适应电子产品复杂性越来越高、设计周期越来越短的要求，作为电子设计的基本技能，现代电子工程设计人员必须掌握常用的 EDA 技术。

0.2 电子系统的仿真、综合与实现

当前，EDA 技术主要包括电子系统的仿真、综合与实现三个方面。“仿真”是为了在各个不同的设计阶段和设计层次验证设计的正确性，以便及早发现错误，修改设计。“综合”是将高层次（如系统级或功能级）的设计描述自动转换成低层次（如逻辑级或物理级）的设计结果，它可以将设计师从繁琐的设计任务中解脱出来，减少设计错误，提高设计效率。“实现”是指电子系统的最终载体。实现载体不同，电子设计的方法、过程和所用的 EDA 工具就可能不同。

仿真（Simulation）又称为模拟。电子系统的仿真就是用计算机模仿电子系统的实际工作情况。因此，仿真时要在计算机上建立电子元件和模块的功能模型，还要将系统（电路）的构成描述给计算机。此外，设计师还要为被仿真的电路设计适当的输入信号，在计算机模拟结果出来后要对其进行分析，从而判定电路正确与否。根据设计验证的不同层次和要求，仿真分为系统仿真、逻辑仿真、时序仿真、电路仿真等。仿真有助于在进行下层设计或制作电路前发现设计错误，从而节省时间，避免经济损失。因此，电子设计过程中有相当多的时间都是在做仿真，仿真器的效率直接关系到设计的效率。但仿真并不一定能百分之百地发现问题，这在很大程度上取决于仿真时输入信号设计的好坏。一般来说，仿真有问题，设计一定有问题；但仿真未发现问题，并不代表设计一定正确。

电子系统的实现方式通常有通用集成电路、可编程器件和定制集成电路三种方式。它们对 EDA 工具的依赖程度依次增强。第一种方式存在集成度低、器件多、功耗大、成本高、可靠性差等缺点。第三种方式虽然设计成本高、设计周期长，但其性能优、功耗低、可靠性高，且大批量生产时成本低，因此一般用于大批量成熟产品的生产。可编程器件方式具有集成度高、现场可编程、可反复修改重用、设计效率高等优点，近年来正得到广泛应用。它除了可替代大部分通用集成电路外，还常作为定制集成电路开发初期的硬件仿真器件使用。

综合（Synthesis）即合成，是计算机进行自动设计的一种方法。电子系统的综合是将较高层次的描述转换为由低层次便于实现的模块所装配成的统一实体。综合分高层综合、逻辑综合和版图综合。高层综合是从系统级（算法级）的行为（功能）描述产生 RTL 的结构描述。逻辑综合是将 RTL 描述转化为逻辑（门）级的描述。版图综合是在逻辑综合完成后，由门级和电路级向物理版图描述的转换，完成最终的布局布线。电子系统的不同实现方式，需要不同的综合方式。通用集成电路实现方式无需版图综合，而另两种实现方式则需要版图综合。但两者的版图综合又有区别。对可编程器件方式，由于其综合是在已有的物理结构上进行，所以布局只是将待实现电路映射到器件内部已有的物理资源上，而布线只是将各部分电路间的连线映射到可编程连线资源（开关矩阵）上。

电子系统的实现除了器件的支持，往往还需要制作 PCB，因此 PCB 的设计与制作也成为 EDA 技术的一个方面。PCB 设计工具除了要提供元器件封装图形库和元器件摆放及连线等图形编辑功能外，一般还应具有根据电路网表进行自动布局和布线的的能力。因此，自动布局布线技术既是面向集成电路版图的综合，又是面向 PCB 的综合。



第 1 篇 电子电路的仿真技术

我们知道，客观世界中的许多物理系统和物理现象都可以用数学方程来描述。例如 RLC 二阶电路的动态过程，可以用二阶微分方程来描述；又如十字路口红、绿、黄三色交通灯的变化顺序及其相互之间的约束关系可以用逻辑关系式来描述。也就是说，客观世界中任何连续系统、离散事件系统或连续 / 离散事件混合系统，在一般情况下，都可以建立数学模型。同时，计算机是一种解算工具，它可以快速、方便地从数学模型中解算出所需的各种变量值。建立相应物理系统的数学模型在计算机上解算的过程就是仿真（又称为模拟）。

电子电路的仿真就是根据电子电路中各种元器件各自存在的物理现象，建立起对应的元器件数学模型，然后根据电路的拓扑结构和所进行的分析要求，建立起特定的数学方程。借助于计算机技术，对这些方程进行计算和求解，从得出的数值参数中了解到实际电路中可能出现的各种电磁现象及变化趋势，为实际电路的设计提供分析计算、验证判断等指导性工作。

电子电路的仿真是随着计算机的发展而发展的。早在 20 世纪 50 年代，第一代计算机出现并开始应用不久，就有人开始尝试用计算机作为工具来设计滤波器这样的线性网络。1956 年美国人 Aaron 借助于计算机用最小二乘法去解决滤波器的设计问题。1962 年 IBM 公司的 Branin 开发出了第一个通用电路分析程序——晶体管分析程序（Transistor Analysis Program，简称 TAP），它用拓扑矩阵法建立直流分析时的方程组，能进行最多 20 个晶体管开关电路的直流分析和瞬态分析。1965 年美国的 Pottle 提出了以状态变量法为基础的计算机网络分析程序（Computerized Network Analysis Program，简称 CORNAP）。1966 年 Katznelson 发表了具有某些非线性分析能力的（Automated Engineering Design of Network，简称 AEDNET）程序（元件的非线性特性是通过表格或子程序来描述）。1972 年美国加州大学伯克利分校推出了用于集成电路仿真的 Spice（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）通用电路分析程序（1975 年应用 Chung Wen Ho 等人提出了改进节点法，升级为 Spice2，1989 年又升级为 Spice3）。1973 年 IBM 公司发表了基于稀疏表格法列方程的高级统计分析程序（Advanced Statistic Analysis Program，简称 ASTAP），它具有统计分析能力……在我国国内也曾出现过中国科学院计算机研究所的 DFX、复旦大学的 FD、清华大学的 GCAP 等电路分析程序。

在众多的电路仿真软件中，Spice 程序以其所具有的源程序开放、元器件模型便于扩充、分析功能和算法完善、分析精度高等突出优点，逐步成为当今电路仿真设计的标准（1988 年被确定为美国国家工业标准）。目前享有盛誉的 EDA 公司的电路仿真工具，无一不是以 Spice 为基础实现的。如 Meta-Software 公司的 Hspice、GTRI（Georgia Tech Research Institute）的 Xspice、NCSS 公司的 I-Spice、Microsim 公司的 Pspice、IIT（Interactive Image Technologies）公司的 EWB（Electronics Workbench）/ Multisim、MicroCode 公司的 CircuitMaker、Ivex 公司的 Ivex Spice，OrCAD 公司的 OrCAD……这些仿真工具在 Spice 基础上做了许多实用化

工作，如改善了人机交互界面、扩充了部分仿真功能（特别是 Spice 所没有的数字电路仿真功能）、更加灵活的输出图形处理方式等等。随着 PC 技术的发展，许多原本需要在工作站运行的电路仿真程序，绝大多数已移植到 PC 上。总之，现今的电子电路仿真技术越来越成熟，功能越来越强大，使用越来越方便。

第 1 章 计算机辅助电路分析

人们习惯上将电子系统分为模拟电路和数字电路两种。这是因为模拟器件所组成的模拟电路，一般研究的是电路中各处电流、电压等模拟变化量之间的关系，其输入输出结果大多数是波形或数值；而由各式各样的逻辑门和功能块组成的数字电路，则主要研究的是信号彼此之间的逻辑关系，其输入输出结果是 0、1 和 x 等电平。因此用计算机仿真分析这两种电路的方法有些不同。本章首先讨论这两种电路的计算机辅助分析机理，然后简要介绍两种常用的具有代表性的电子电路仿真工具（OrCAD/Pspice 和 EWB）的功能与特点，最后介绍一些常用半导体元器件仿真模型的相关知识。

1.1 模拟电路仿真原理

模拟电路的仿真分析是以电路理论、数值计算方法和计算机技术为基础实现的。它借助于计算机的计算、存储和图形处理的高速和高效率，采用特定的数学模型和仿真算法，用预先设计出的各种仿真分析的应用程序对电路进行各种分析、计算和验证。

模拟电路的仿真过程可用图 1-1 表示。

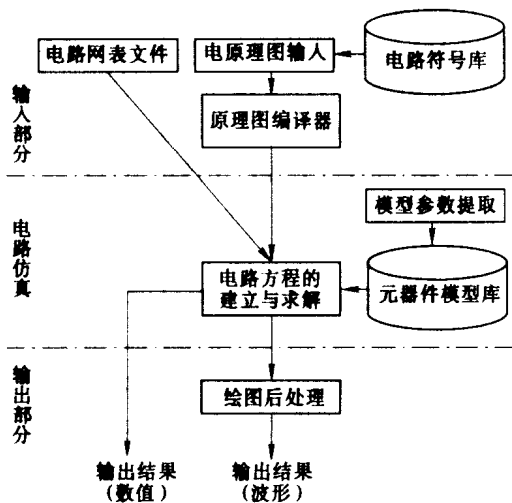


图 1-1 模拟电路的仿真过程

从图 1-1 中可以看出，模拟电路的仿真分析由这几个部分组成：输入部分（输入电路结