

电子电路的计算机 辅助分析与设计方法

汪蕙 王志华 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书全面地介绍了电路 CAD 的基本理论和算法。全书共分 10 章,内容包括:电路方程的建立和求解,稀疏矩阵技术,元器件模型,线性和非线性电路直流、频域和时域的分析原理和计算方法,灵敏度计算,容差分析,最优化设计,以及目前大规模集成电路的一些新的分析方法。书中注重基本原理的论述,又反映了电路 CAD 领域的最新技术。书中所涉及的每一种分析方法都结合实际电路给出了相应的计算实例,并附有习题,便于读者阅读和理解。

本书适于作高等院校电类专业学生和研究生教材,也可供从事电路设计和电路 CAD 软件开发的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路的计算机辅助分析与设计方法/汪蕙,王志华编著. —北京:清华大学出版社, 1996

ISBN 7-302-02086-8

. 电... . 汪... . 王... . 电子电路-计算机辅助电路分析 电路设计: 计算机辅助设计 . TN710.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 02113 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

印刷者: 北京市清华园胶印厂

发行者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787× 1092 1/16 印张: 18 字数: 423 千字

版 次: 1996 年 6 月第 1 版 1997 年 5 月第 2 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02086-8/TN·70

印 数: 5001—9000

定 价: 15.00 元

前 言

电路 CAD(Computer Aided Design)技术是模拟电路分析与设计的有力工具。随着集成电路的迅速发展,电子产品不断地推陈出新,以集成电路 CAD 为基础的电子设计自动化(Electronic Design Automation,简称 EDA)已成为一个新兴的产业,渗入到集成电路设计的每一阶段。当前有近 50% 的集成电路设计是靠 CAD 和 EDA 工具完成的,而且这个比例还在不断地增长。为了帮助广大电路设计工作者尽快地掌握这门先进技术,指导电类专业的学生学习电路 CAD 方面的理论知识和设计工具,我们在多年教学和科研工作的基础之上编写了这本书。

全书共分 10 章。第 1 章介绍电子设计自动化和电路 CAD 技术的发展概况。第 2 章阐述了电路 CAD 的基本知识:建立电路方程的方法和求解方法。第 3 章以电路中有源器件为核心给出了二极管、BJT 晶体管和 MOS 场效应管等半导体器件模型和一些常用的集成电路宏模型。第 4 章介绍线性和非线性直流分析,它是电路 CAD 中所有其它分析功能的基础。第 5 章论述瞬态分析方法。第 6 章介绍频域分析方法。第 4 章至第 6 章是本书的重点,这三章所介绍的直流分析、频域分析和瞬态分析,是电路 CAD 中应用最为广泛的三种分析方法。第 7 章讨论如何计算电路输出变量对电路元器件参数的灵敏度值。第 8 章阐述电路的容差分析算法和功能。第 9 章介绍目前求解大规模电路的一些新进展和算法。第 10 章简要地论述在电路 CAD 中常用的最优化算法。全书中各种分析方法都给出了计算实例,并附有设计工具的应用实例,便于读者理解和掌握。

编写此书过程中,刘润生教授自始至终给予了具体的指导,提出了许多极为有益的建议和详细的修改意见。本书原稿曾在清华大学电子工程系作为教材使用多年,多次改写过程中采纳了范崇治、王寒伟、杨华中、王和民等老师的许多建议,在此对他们的帮助表示感谢。谢源为附录中的 C 语言教学程序做了不少工作,也在此表示谢意。

限于水平,书中难免有错误及不当之处,望读者予以指正。

作者

1995 年 11 月

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论..... | 1 |
| 1.1 电子设计自动化的发展概况 | 1 |
| 1.2 EDA 系统的设计工具 | 2 |
| 1.3 模拟电路 CAD 的发展概况 | 7 |
| 1.3.1 模拟集成电路的特点和设计自动化方法..... | 7 |
| 1.3.2 模拟集成电路的设计工具..... | 7 |
| 第 2 章 电路方程的建立和求解方法 | 12 |
| 2.1 建立电路方程的常用方法..... | 12 |
| 2.1.1 表矩阵法 | 13 |
| 2.1.2 拓扑矩阵法 | 16 |
| 2.1.3 节点法 | 18 |
| 2.1.4 改进节点法 | 21 |
| 2.1.5 双图法 | 27 |
| 2.2 线性代数方程组的数值解法..... | 31 |
| 2.2.1 高斯消去法 | 31 |
| 2.2.2 LU 分解法 | 34 |
| 2.2.3 稀疏矩阵技术 | 36 |
| 2.2.4 复数方程组解法 | 47 |
| 习题 | 48 |
| 第 3 章 半导体器件模型 | 53 |
| 3.1 二极管模型..... | 53 |
| 3.2 双极型晶体管模型..... | 57 |
| 3.2.1 EM1 模型 | 57 |
| 3.2.2 EM2 模型 | 60 |
| 3.2.3 EM3 模型 | 63 |
| 3.2.4 GP 模型 | 67 |
| 3.3 MOS 场效应晶体管模型 | 68 |
| 3.3.1 非线性电流源 I_{DS} | 69 |
| 3.3.2 电荷存储效应 | 70 |
| 3.4 结型场效应晶体管模型..... | 73 |
| 3.5 宏模型..... | 75 |

| | | |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.5.1 | 简化电路法 | 75 |
| 3.5.2 | 端口特性构造法 | 76 |
| 3.5.3 | 混合构造法 | 80 |
| 3.5.4 | 运算放大器宏模型的应用实例 | 81 |
| 3.6 | 分段线性模型..... | 82 |
| 3.7 | 模型参数提取..... | 87 |
| | 习题 | 89 |
| | | |
| 第 4 章 | 直流分析 | 91 |
| 4.1 | 线性直流分析..... | 91 |
| 4.1.1 | 直流分析功能 | 92 |
| 4.1.2 | 直流线性分析流程 | 92 |
| 4.1.3 | 直流线性分析实例 | 93 |
| 4.2 | 非线性直流分析的数值方法..... | 97 |
| 4.2.1 | 简单迭代法 | 97 |
| 4.2.2 | 牛顿-拉夫森方法 | 98 |
| 4.3 | 非线性器件的直流伴随模型 | 100 |
| 4.3.1 | 二极管直流伴随模型..... | 100 |
| 4.3.2 | 双极型晶体管的直流伴随模型..... | 102 |
| 4.3.3 | MOS 场效应晶体管的直流伴随模型 | 104 |
| 4.4 | N-R 方法的收敛性 | 105 |
| 4.5 | 改进的 N-R 方法 | 106 |
| 4.5.1 | “横取”N-R 方法 | 106 |
| 4.5.2 | “四象限”算法..... | 107 |
| 4.5.3 | 阻尼算法..... | 108 |
| 4.5.4 | 高阶校正法..... | 108 |
| 4.6 | 其它改善收敛性的算法 | 109 |
| 4.7 | 直流非线性分析流程和分析实例 | 111 |
| | 习题..... | 114 |
| | | |
| 第 5 章 | 瞬态分析..... | 117 |
| 5.1 | 引言 | 117 |
| 5.2 | 常用的数值积分方法 | 120 |
| 5.2.1 | 向前欧拉法..... | 120 |
| 5.2.2 | 向后欧拉法..... | 122 |
| 5.2.3 | 梯形法..... | 123 |
| 5.2.4 | 多步法..... | 125 |
| 5.3 | 储能元件的瞬态离散化模型 | 125 |

| | | |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.3.1 | 电容的离散化电路模型..... | 125 |
| 5.3.2 | 电感的离散化电路模型..... | 126 |
| 5.3.3 | 互感的离散化电路模型..... | 127 |
| 5.4 | 局部截断误差与稳定性 | 129 |
| 5.4.1 | 局部截断误差的计算..... | 129 |
| 5.4.2 | 变步长策略..... | 131 |
| 5.4.3 | 起步与导数不连续点的处理..... | 133 |
| 5.4.4 | 绝对稳定和 stiff 稳定 | 134 |
| 5.5 | 基尔算法 | 135 |
| 5.6 | 瞬态分析程序及分析实例 | 138 |
| 5.6.1 | 瞬态分析程序介绍..... | 138 |
| 5.6.2 | 分析实例..... | 140 |
| | 习题..... | 143 |
| | | |
| 第 6 章 | 频域分析..... | 145 |
| 6.1 | 交流小信号分析 | 145 |
| 6.1.1 | 元器件的交流小信号模型..... | 145 |
| 6.1.2 | 交流小信号分析流程与实例..... | 149 |
| 6.2 | 零极点分析 | 152 |
| | 习题..... | 158 |
| | | |
| 第 7 章 | 灵敏度分析..... | 160 |
| 7.1 | 引言 | 160 |
| 7.2 | 伴随网络法 | 160 |
| 7.2.1 | 特勒根定理和伴随网络的构成..... | 161 |
| 7.2.2 | 线性网络的伴随网络法..... | 162 |
| 7.2.3 | 非线性网络的伴随网络法..... | 166 |
| 7.2.4 | 伴随网络方程的建立及其求解..... | 169 |
| 7.3 | 网络灵敏度的应用 | 172 |
| 7.3.1 | 寄生参数的灵敏度..... | 172 |
| 7.3.2 | 对于频率的灵敏度..... | 173 |
| 7.3.3 | SPICE 程序中的直流灵敏度分析 | 175 |
| 7.4 | 导数网络法 | 178 |
| 7.4.1 | 线性网络的导数网络法..... | 179 |
| 7.4.2 | 非线性网络的导数网络法..... | 184 |
| 7.4.3 | 导数网络方程的建立与求解..... | 185 |
| | 习题..... | 188 |

| | | |
|--------|------------------------|-----|
| 第 8 章 | 容差分析..... | 191 |
| 8.1 | 引言 | 191 |
| 8.2 | 器件参数的统计分布规律 | 192 |
| 8.2.1 | 随机变量及其描述方法..... | 192 |
| 8.2.2 | 随机变量的数字特性..... | 193 |
| 8.2.3 | 几种常用器件参数的统计分布..... | 195 |
| 8.3 | 多个器件参数变化对电路性能的影响 | 197 |
| 8.4 | 最坏情况分析 | 199 |
| 8.5 | 蒙特卡罗分析 | 204 |
| 8.5.1 | 随机数的产生..... | 205 |
| 8.5.2 | 随机变量的抽样..... | 207 |
| 8.5.3 | 蒙特卡罗法在电路仿真中的应用..... | 210 |
| | 习题..... | 213 |
| 第 9 章 | 大规模电路的仿真技术..... | 215 |
| 9.1 | 引言 | 215 |
| 9.2 | 撕裂法 | 217 |
| 9.2.1 | 支路撕裂法..... | 217 |
| 9.2.2 | 节点撕裂法..... | 219 |
| 9.3 | 松弛技术 | 221 |
| 9.3.1 | 线性松弛方法..... | 222 |
| 9.3.2 | 非线性松弛方法..... | 223 |
| 9.3.3 | 波形松弛方法..... | 224 |
| 9.4 | 多级牛顿算法 | 226 |
| 9.5 | 混合仿真技术 | 228 |
| 第 10 章 | 电路的优化设计方法 | 235 |
| 10.1 | 电路优化设计概述..... | 235 |
| 10.2 | 目标函数..... | 237 |
| 10.3 | 单变量函数优化..... | 241 |
| 10.4 | 多变量函数优化..... | 244 |
| 10.5 | 有约束优化方法..... | 252 |
| 10.6 | 统计优化方法..... | 255 |
| 10.7 | 模拟退火法..... | 262 |
| | 习题..... | 264 |
| | 参考文献..... | 265 |
| 附录 | 教学软件..... | 268 |

第 1 章 绪 论

随着集成电路与计算机的迅速发展,以电子计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)为基础的电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)技术已成为电子学领域的重要学科,并已形成一个独立的产业部门。它的兴起与发展,又促进了集成电路和电子系统的迅速发展。当前,集成电路的集成度越来越高,电子系统的复杂程度也日益增大,而电子产品在市场上所面临的竞争却日趋激烈,产品在社会上的收益寿命越来越短,甚至只有 1 到 2 年的时间。处于如此高速发展和激烈竞争的电子世界,电路设计工作者必须拥有强有力的 EDA 工具才能面对各种挑战,不断地创造出新的电子产品。

1.1 电子设计自动化的发展概况

电子设计自动化的发展大致可分为下述三个阶段。

70 年代到 80 年代初期,电子计算机的运行速度、存储量和图形功能等方面还正在发展之中,电子 CAD 和 EDA 技术没有形成系统,仅是一些孤立的软件程序。这些软件在逻辑仿真、电路仿真和印刷电路板(PCB)、IC 版图绘制等方面取代了设计人员靠手工进行繁琐计算、绘图和检验的方式,大大提高了集成电路和电子系统的设计效率和可靠性。但这些软件一般只有简单的人机交互能力,能处理的电路规模不是很大,计算和绘图的速度都受到限制。而且由于没有采用统一的数据库管理技术,程序之间的数据传输和交换也不方便。

80 年代后期,是计算机与集成电路高速发展的时期,也是 EDA 技术真正迈向自动化并形成产业的时期。这一阶段,EDA 的主要特点是:能够实现逻辑电路仿真、模拟电路仿真、集成电路的布局和布线、IC 版图的参数提取与检验、印刷电路板的布图与检验、以及设计文档制作等各设计阶段的自动设计,并将这些工具集成为一个有机的 EDA 系统,在工作站或超级微机上运行。它具有直观、友好的图形界面,可以用电原理图的形式输入,以图形菜单的方式选择各种仿真工具和不同的模拟功能。每个工具都有自己的元件库,工具之间有统一的数据库进行数据存放、传输和管理,并有标准的 CAM(Computer Aided Manufacture)输出接口。这种 EDA 系统能有效地完成自顶向下(top-down)的设计任务,即从电原理图构思到逻辑仿真、电路仿真、版图布局布线,一直到最后形成可以交付生产的 IC 版图的这一系列的自动化设计过程。这一时期比较成功的 EDA 系统有 Mentor Graphics, Valid, Dazix 等等。

进入 90 年代以后,EDA 步入了一个崭新的时期。这个时期,微电子技术以惊人的速度发展,一个芯片上可以集成百万甚至千万个晶体管,工作速度可达到几个 GB/s。电子系统朝着多功能、高速度、智能化的趋势发展,如数字声广播(DAB)与音响系统、高清晰度电视(HDTV)、多媒体信息处理与传播、光通信等电子系统。它们对集成电路和专用集成

电路(application specific IC, ASIC)的容量、速度、频带等都提出了更高的要求。这种高难度的集成电路要在短时间内正确地设计成功,就必须将 EDA 技术提高到一个更高的水平。另一方面,由于集成度的提高,上述的一个复杂电子系统可以在一个集成电路芯片上实现,这就要求 EDA 系统能够从电子系统的功能和行为描述开始,综合设计出逻辑电路,并自动地映射到可供生产的 IC 版图,我们称之为集成电路的高层次设计。因此 90 年代的 EDA 系统应具有如下特点:

(1) 真正具有自动化设计能力,能实现电路高层次的综合和优化。用户只要给出电路的性能指标要求,EDA 系统就能对电路结构和参数进行自动化的综合,寻找最佳设计方案,通过自动布局布线功能将电路直接形成集成电路的版图,并对版图的面积及电路延时特性作优化。目前数字电路的自动化综合与优化系统已相当成熟,典型代表是美国 Synopsys 公司的 EDA 综合系统。

(2) 具有开放式的设计环境。这种环境也称为框架结构(framework)。它在 EDA 系统中负责协调设计过程和管理设计数据,实现数据与工具的双向流动。它的优点是可以将不同公司的软件工具集成到一个统一的计算机平台上,使之成为一个完整的 EDA 系统,充分发挥每个设计工具的技术优势。设计者在这种设计环境中可以更有效地运用各种工具,提高设计质量和效率。

(3) 具有丰富的元器件模型库。EDA 系统需要各种不同层次、不同种类的元器件模型库的支持,或者说在电路设计的每个阶段,采用每个工具都要有不同的库支持。例如,原理图输入时需要元器件的外形库,逻辑仿真需要有逻辑单元的功能模型库,电路仿真需要模拟单元和器件的模型库,版图生成工具需要适应不同层次不同工艺要求的底层版图库等等。每一种库又按其层次分为不同层次的单元或元素库,例如逻辑仿真的库又以其行为级、寄存器级和门级分别设库。至于 VHDL 语言输入,所需的库更为庞大和齐全,几乎包括了上述所有库的内容。因此,各种模型库的规模与功能是衡量 EDA 工具优劣的一个重要标志。

综上所述,一个 EDA 系统的组成应该是:

框架结构 + 各种 CAD 工具 + 模型库 + 算法 + 硬件支撑环境
(framework) + (tools) + (libraries) + (methodology) + (support)

目前,在国际 EDA 系统排行榜中,列于首位的几家 EDA 公司是: Mentor Graphics, Cadence, Synopsys 和 Viewlogic 公司。

1.2 EDA 系统的设计工具

一个能够完成较为复杂的 VLSI 设计的 EDA 系统至少应包括 10 ~ 20 个 CAD 工具,图 1.2.1 描绘了一个典型的自顶向下设计的 EDA 系统框图,下面我们对这个框图中所涉及的主要 CAD 工具进行简单介绍。

1. 逻辑综合与优化

逻辑综合是 90 年代电子学领域兴起的一种新的设计方法,是以系统级设计为核心的高层次设计工具,也称之为概念驱动工程。它把最新算法与工程界多年积累的设计经验结

图 1.2.1 EDA 系统框图

合起来,自动地将采用 VHDL 硬件描述语言描述的电子系统综合成为满足设计性能指标要求的逻辑电路,并对电路进行速度、面积等方面的优化,最后形成所要求工艺条件下的集成电路版图。VHDL(VHSIC hardware description language)的全称是超高速集成电路硬件描述语言,简称硬件描述语言。它是 EDA 系统的一种输入模式,支持从数字系统级到门级的多层次的硬件描述,与具体的技术和工艺无关,能够抽象出数字硬件设备的本质特性,即行为、时间关系和结构特性。这些特性使 VHDL 能在多种场合对硬件设备进行统一描述,因此,用 VHDL 所实现的仿真无论在计算速度还是在容量上都远远超过了传统的描述方式。

高层次的逻辑综合一般包括 VHDL 语言形式的设计输入,行为级至门级的仿真和综合优化,版图验证与后仿真以及测试综合。

(1) VHDL 设计输入

VHDL 硬件描述语言的输入方式是 EDA 系统的主要输入方式。统计资料表明,在 VHDL 和原理图两种输入方式中,前者约占 70% 以上,这个趋势还在继续增长。其主要原因是 VHDL 支持多种不同设计方法,而与具体技术和工艺无关。VHDL 能够实现从数字系统级行为到门级硬件的描述,并能在多种描述层次上立即进行操作,应用这些描述层次的任一组合来模拟系统,因此功能强,应用面广。例如,我们可以采用 VHDL 定义一个系统的顶层行为和结构以及它所包含的各种模块,这些模块可以是控制单元、算术逻辑单元(ALU)、RAM、ROM 或数据通道等等,VHDL 的编译器会自动将这些顶层模块描述转换成底层的功能描述。应该指出,VHDL 尚有语法繁琐、用户学习周期长、难于掌握的缺点,所以目前图形输入方式又有新的进展,出现了一种高层次的图形控制设计方法。它可以对数字系统的状态流程图、进程图、数据流程图和原理框图进行处理,将它们转化为 VHDL 文件。这为高层次的综合仿真提供了更大的方便和灵活性。

(2) 电路的综合优化

综合一词来源于英文单词 *synthesis*, 其含义是把一些抽象的对象组合为一个统一的整体。在集成电路设计中, 综合则意味着将集成电路设计中设计描述的一种形式自动地向另一种形式变换的过程。因此, 数字电路的综合是将行为级的系统描述转化为门级描述, 同时进行门级电路的优化; 甚至可以进一步将门级电路映射到某种工艺的版图, 并对版图进行优化。这后一步, 有时也称为版图综合。电路优化是在各种设计要求的约束下进行电路性能、速度方面的优化; 版图优化是在指定工艺条件下对版图面积进行优化。这两种优化过程是互相关联的, 需要通过版图的参数提取, 得到版图对电路参数影响的信息, 再对电路进行反复验证(通常称为后仿真), 最后达到电路速度和面积的整体优化。

(3) 测试综合

测试综合包括两方面: 可测性设计和自动测试矢量生成。也可以将测试综合看作是逻辑综合的一个组成部分。根据设计要求, 在逻辑综合中必须考虑可测性因素, 生成相应故障覆盖率的测试电路, 并生成测试矢量。它还可以在已设计好的电路中插入测试电路结构, 以满足故障覆盖率的要求。

2. 混合设计方法

随着集成电路复杂程度的不断提高, 各种不同学科技术、不同模式、不同层次的混合设计方法已被认为是 EDA 系统所必须支持的方法。

(1) 不同学科技术的混合方法(*mixed-discipline*), 指电子技术与各种非电学科技术的混合设计方法。例如: 电-机械, 电-化学, 电-光学, 电-应力, 电-磁, 电-热学等方面的混合设计方法。

(2) 不同模式的混合方法(*mixed-mode*), 一般是指数字电路与模拟电路的混合, 数字电路、模拟电路与数字信号处理(DSP)技术的混合, 电路级与器件级的混合方法等等。

(3) 不同层次的混合方法(*multi-level*), 指逻辑设计中行为级、寄存器级、门级, 以及开关级的混合设计方法。

目前在各种应用领域, 如数字电路、模拟电路、DSP 的专用集成电路, 多芯片模块(*multi-chip module*, 简称 MCM) 以及印刷电路板系统的设计都需要采用各种混合设计方法。

3. 集成电路版图设计方法

在自顶向下的设计过程中, 完成电路综合优化或电路仿真之后, 就进入 IC 芯片的版图设计阶段。

集成电路的版图设计方法大致可归纳为四种。

(1) 全定制设计方法(*full-custom*)

全定制设计方法一般是为满足一些特殊的要求, 而又没有现成的单元库可以借鉴的情况下采用的设计方法。这些要求可以是高速度、低功耗、最小面积, 也可能是一些特殊结构或性能等等。它需在应用版图设计工具进行设计过程中不断地插入人工干预, 以便把每一个器件位置、连接关系都安排得最紧凑、最恰当, 因此是一种特别花费人力和时间, 同时也是性能最佳的一种设计方法。对于那些生产批量很大, 使用生命力较强的计算机、通信和声象等系统的 IC 产品, 通常采用全定制设计方法来实现。

(2) 标准单元法(standard cell)

这种设计方法是以各 IC 生产厂家的单元库为基础, 根据电路要求从库中调取所需要的单元, 进行自动布局布线, 生成掩膜版图。它的目标是在满足工艺约束和电性能条件下, 使版图的面积最小。目前先进的布局布线工具可以支持多层布线, 能对版图面积进行压缩优化并保证设计规则。允许各种高度的标准单元和各种宽度的芯片管脚, 布局布线速度十分迅速, 并保证 100% 的布通率和最小芯片面积。

(3) 门阵列法(gate array)

门阵列和门海(sea of gate)是预先在 IC 芯片上生成由基本门或单元组成的阵列, 即完成了除连线以外的所有芯片的加工步骤。再根据用户的电路要求, 选择预制芯片阵列中适当的单元进行布局布线, 最后只需给出金属连线和通孔掩膜版图。这种设计方法的最大特点是设计周期短, 设计和制造成本都较低。缺点是阵列中单元利用率低, 芯片面积也较大。

(4) 可编程逻辑器件方法(programmable logic device)

可编程逻辑器件是一种通用芯片, 由逻辑单元阵列组成, 特点是“可编程”, 即可以通过编程去选择逻辑单元和互连关系, 将阵列安排成适合于逻辑功能的专用芯片。这些逻辑单元可以是门、触发器或较大的宏单元。逻辑单元之间的连线是可编程的开关系统, 一般采用 EPROM 或 E²PROM 作可编程器件, 通过它们将布局布线结果映射到逻辑阵列中, 形成芯片。例如较早打入中国市场的美国 Xilinx 公司的 FPGA 可编程芯片, 是采用先进的 CMOS 工艺制造的, 它的基本结构是由可编程逻辑模块(CLB)、输入输出模块(IOB)和可编程连线组成。每个 CLB 中包含组合逻辑电路、D 触发器和内部控制电路, 通过查表方式实现布尔逻辑功能。它的可编程连线资源是由两层栅格状金属线段构成。两层金属线段的交叉点上置有专门的连通晶体管, 每个晶体管由一位组合比特控制通断, 从而形成金属线间的可编程连接点。此外, 这种晶体管还用于构成开关阵列, 通过编程实现所选金属线段和 CLB, IOB 引脚之间的连通。

这种设计方法与前面所述的版图设计方法不同, 它所实现的不是待生产的 IC 版图, 而是可以实际应用的芯片。这种可编程逻辑器件的出现, 使设计工程师在实验室里就可以设计出自己的 ASIC 器件。其中以近几年发展起来的 EPLD(可擦除的可编程逻辑器件)和 FPGA(现场可编程门阵列)最受重视。用户只要购置了 EPLD 或 FPGA 的芯片, 并有计算机和相应的软件开发系统, 就可以自己动手设计芯片。其设计步骤是: 将电路以原理图或 VHDL 形式输入, 然后进行逻辑仿真, 保证逻辑功能正确, 接着对芯片中的逻辑单元进行布局布线, 并对布通的电路进行后仿真, 最后通过编程器和烧结器将其制成实用的 ASIC 芯片。这个过程一般只需几个小时。此外, 还有一个突出的特点是它的可擦除性。由于采用 EPROM 和 E²PROM 做为互连开关, 可以通过紫外线或电实现擦除, 即反复编程, 也就是说一个 FPGA(或 EPLD)芯片可以反复设计和使用的。这样, 不仅大大地缩短了设计周期, 减少了投片带来的高昂费用, 而且降低了设计风险。对于在实验室中进行科研项目所实现的 ASIC 及一些批量不大的 ASIC 开发产品, 采用 EPLD 和 FPGA 的形式设计芯片, 在设计成本、时间上都是十分合算的。所以, 目前越来越多的科研部门和高等院校在科研工作中采用可编程逻辑器件来实现 ASIC, 这种方法已成为设计电子系统的一个

非常重要的手段。

当前, Xilinx, AT&T, Altera, Lattice 等公司生产的 FPGA 和 EPLD 芯片及开发系统在国内应用较为广泛, 从几千门到几万门的 FPGA(EPLD), 一般价格为十几到几百美元。

4. 集成电路版图的电参数提取与校验

集成电路的版图需要通过校验才能确保其正确和可靠。这种校验一般包括: 几何设计规则检查、电规则检查、版图与电路图一致性检查以及版图的电参数提取。

采用自顶向下的设计方法, 通过自动布局布线形成的版图, 由于自动化程度高, 中间没有人工干预, 一般不会产生设计过程中的错误, 故可以不必进行前三项检验。但版图的电参数提取以及将提取出的电参数加到原始的原理图中再进行后仿真, 则是一项十分重要的检验工作。由于版图基本上是由各种不同掩膜层图形组成的, 对版图进行布局布线优化时是以版图面积最小和 100% 的布通率为目标, 但这两项指标是矛盾的, 常常采取折衷方案, 因此无论版图中单元面积大或小, 单元间连线长或短都会产生不同数量级的寄生电容、电感和电阻, 这是原电路设计中所没有的, 必须考虑这些寄生参数对电路特性的影响, 以保证电路特性的正确。版图参数提取工具从版图的几何图形中识别和提取这些寄生参数, 并通过再一次仿真检验这些寄生参数对电路的影响。如果电路性能有变化, 如速度、延迟等指标不满足, 则需进一步改善版图设计, 以确保集成电路特性的正确性。

5. 友好的设计环境

一个优秀的 EDA 设计系统必须有良好的设计环境。它包含两个方面。

(1) 友好的用户界面

友好的用户界面使用户能在灵活、易用、图文并茂的环境中应用各种不同层次的软件工具。它的主要特点是:

- 1) 图形和 VHDL 形式的输入;
- 2) 多重观察窗口, 可以同时观测同一电路在不同层次下的设计情况, 直观、便于比较;
- 3) 键盘、菜单、功能键和手绘符号等多种命令选择方式;
- 4) 元器件库和相应图表的浏览、管理;
- 5) 输出波形的处理, 既可以观察仿真现场波形, 也可以对已模拟出的波形做各种综合处理。

(2) 框架结构

框架结构是 EDA 的操作系统, 主要完成数据库、数据处理和网络通信的功能。它的主要特点是:

1) 开放性和集成化。支持统一的服务平台和独立的编辑接口, 将各种软件工具很方便地放置在一起, 并提供软件工具、硬件和网络之间的协调, 安排设计流程和策略, 创造统一的设计环境。

2) 合理的组织。框架结构简化了工具的使用, 实现了数据跟踪和数据在工具间的双向流动。允许设计项目在前台现场观察和后台处理数据同步进行, 并能及时了解任何一个环节的数据变化对整体的影响。

3) 易于使用。它给用户提供了基本的工业标准 X-Window 和灵活的用户接口, 使用户能极为方便地应用 EAD 系统。

框架结构的出现, 使国际上许多优秀的 EDA 工具合并在一个统一平台上的愿望得以实现。美国几家著名的 EDA 公司 Cadence, Mentor Graphics 等都相继采取了合并措施, 利用框架结构集各家精华于一体, 使 EDA 系统所涉及的领域更加宽广, 也为其应用开辟了更加广阔的前景。

1.3 模拟电路 CAD 的发展概况

1.3.1 模拟集成电路的特点和设计自动化方法

模拟集成电路的设计与数字电路设计有很大的区别。数字电路可以很方便地抽象出逻辑门、寄存器、加法器、减法器等不同层次的逻辑单元, 还可以用数据流图、有限状态模型等形式进行高层次描述, 并将这些逻辑单元和高层次行为描述用于不同层次的电路设计。数字电路这种结构简单、规则、易于抽象化的特点极大地促进了数字电路设计的自动化。而模拟集成电路则要复杂得多。首先, 模拟电路种类繁多, 性能通常与连续变化的变量有关。比如: 放大器的幅度与增益不仅仅是电路拓扑结构的函数, 而且与元件参数和工作频率等都有关系。其次, 模拟电路的结构也千差万别, 同样的电路特性可由不同的电路结构实现, 不同参数的同一电路结构会得到不同的电路性能。还有, 模拟电路与工艺条件、工作环境等直接相关, 同一芯片上的不同电路之间干扰也相对比较大。模拟电路的这些特点使其性能和结构的抽象提取和表述都较为困难, 从而也就给模拟电路的层次化设计, 尤其是高层次设计带来了较大困难。从前面介绍的 EDA 系统也可以看出, 集成电路的自动化设计技术始终偏重于数字电路设计, 对于数字电路, 从高层次的自动综合到最低层次的版图设计的布局布线都有成熟的实用软件工具, 而且能实现从顶到底的整体自动设计。而模拟集成电路的自动设计技术远没有数字电路的相应技术成熟, 还不能实现完善的高层次仿真, 更不用说自动综合了。但从应用角度而言, 目前对模拟集成电路需求量也在逐年增加, 尤其是在卫星通信、导航、传输等领域, 在高频、低噪声、大功率及并行处理的应用条件下, 模拟电路比数字电路更有优势。另外, 由于自然界的绝大多数信号如语音、图象等信号皆为模拟信号, 既便要作数字化处理和传输, 模拟电路也是必不可少的。但是, 由于模拟集成电路设计工具的局限性, 模拟集成电路和数字/模拟混合集成电路设计的难点就主要在模拟电路部分。在数模混合集成电路中, 模拟电路部分所占的比例往往不大, 但设计时间却可能很长。图 1.3.1 中给出了数模混合集成电路中, 数字与模拟部分所占比例和它们在设计时间上的相对关系。基于上述原因, 工业界在集成电子系统设计中急需有效的模拟电路和数模混合电路设计的 CAD 工具, 并迫切地要求模拟及数模混合集成电路设计的自动化。

1.3.2 模拟集成电路的设计工具

目前国际上各大 EDA 公司的模拟电路设计工具, 都是以美国加利福尼亚大学柏克莱(Berkeley)分校开发的 SPICE 程序为基础实现的。SPICE 程序是一个用于模拟集成电

图 1.3.1 数模混合设计中电路规模与设计时间关系示意图

路的电路分析程序,首次于 1972 年推出,是用 FORTRAN 语言写的,1975 年推出正式实用化版本。自 SPICE 问世以来,其版本不断更新,其中以 1981 年的 SPICE 2G.5 版本最为流行,是 80 年代世界上应用最广的电路设计工具,1988 年 SPICE 被定为美国国家工业标准。1985 年, Berkeley 将 SPICE 重新用 C 语言改写,称为 SPICE3, SPICE3 采用 C 语言后在数据结构和执行效率上都有很大改善。多年来, SPICE 版本更新主要体现在: 电路分析功能的扩充, 算法的改进与完善, 元器件模型的增加, 以及输入、输出界面的改善。各种以 SPICE 为核心的商用电路仿真工具, 在 SPICE 的基础上做了许多实用化工作, 例如输入是以原理图方式, 输出绘图处理更加灵活, 求解收敛性更好, 模拟功能有所扩充, 增加了宏模型, 以及备有较为丰富的元器件模型参数库等等。一些在国际上享有盛誉的 EDA 系统中都有相当强的模拟电路仿真工具, 它们是 Mentor Graphics 公司的 AccuSim, Cadence 公司的 Cadence SPICE, Analogy 公司的 Saber, 以及 Meta Software 公司的 HSPICE, Micro Sim 公司的 PSpice 等等, 这些工具在国内也颇为流行。下面我们就 Berkeley 的 SPICE3, 以及各种商用电路仿真工具中所能实现的分析功能和元器件模型种类做简单介绍。

1. SPICE 的仿真功能

(1) 直流分析

1) 计算电路的直流工作点, 即在电路中电感短路、电容开路的情况下, 求得电路的每一个节点电压和电源支路电流。

2) 计算电路的直流小信号传输函数, 即计算在直流小信号工作下的输出变量和输入变量之比。

3) 计算直流转移特性曲线, 即在用户指定范围内计算电路输出变量与指定的输入源步进变化之间的关系曲线。

同时, 直流分析是瞬态分析和交流小信号分析的基础, 通常用直流分析决定瞬态的初始条件和交流小信号分析时电路中非线性器件的小信号模型参数。

(2) 交流小信号分析

交流小信号分析是在正弦小信号工作条件下的一种频域分析, 是一种线性分析方法。

1) 频域分析, 即计算电路的幅频特性和相频特性。

2) 失真分析, 是假定输入端加有一个或两个信号频率时, 在输出负载上计算出的三次以下的小信号谐波失真功率。

3) 噪声分析,即计算每个频率点上指定输出端的等效输出噪声和指定输入端的等效输入噪声电平。

(3) 瞬态分析

瞬态分析是一种非线性时域分析方法。

1) 在用户指定的时间区间内,进行电路的瞬态特性分析。

2) 在大信号正弦激励情况下,对输出波形进行傅里叶分析,计算出基波和 2~9 次谐波系数,以及失真系数。

(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。

1) 直流灵敏度分析,是指电路直流分析时,计算出指定的输出变量对电路中所有元件参数和晶体管的所有模型参数单独变化的灵敏度值,包括绝对灵敏和相对灵敏度值。

2) 交流小信号灵敏度分析,是在指定频率范围内每个频率点上计算电路输出变量对电路全部元器件参数的灵敏度值。从 SPICE3F 版本中,才开始有交流小信号灵敏度分析能力。

(5) 零极点分析

零极点分析是计算电路的传输函数的零点和极点。通过求得的零极点分布,用户可以确定电路的频响特性、时域特性,以及判断电路的稳定特性。

(6) 容差分析

容差分析是计算电路中元器件参数偏离标称值情况下,对电路输出特性的影响。

1) 蒙特卡罗(Monte-Carlo)分析,是一种统计分析方法,在给定电路中元器件参数容差的情况下,计算电路输出变量的均值和标准偏差。如果同时指定电路输出变量的容差,还可以计算出电路输出特性的合格率及合格率的偏差。

2) 最坏情况(Worst-Case)分析,是指电路中所有元器件参数都处于其容差边界的一种最坏组合情况下,计算出电路输出特性最大偏差的上界和下界值。

大多数商用电路仿真软件中都有蒙特卡罗分析和最坏情况分析功能。

(7) 温度特性分析

通常 SPICE 程序是在标称温度(27 或 300K)情况进行各种分析和仿真的。如果用户指定电路的工作温度,则 SPICE 可以进行不同温度下的电路特性分析。

(8) 优化设计

电路的优化设计是在给定电路拓扑结构和电路性能约束的情况下,确定电路元器件的最佳参数组合。目前只有少数商用电路仿真软件具有优化能力,例如美国 Meta Software 公司的 HSPICE,具有直流、交流小信号和瞬态优化功能。

2. SPICE 的元器件模型

(1) 一般元件。指电阻,线性和非线性电容,线性和非线性电感,互感,三种形式传输线:有损和无损传输线、均匀分布 RC 传输线,以及电压和电流控制开关。

(2) 半导体器件。指结型二极管,双极型晶体管,结型场效应管,六种不同级别的 MOS 场效应管:MOS1~3、BSIM1~2 和 MOS6,砷化镓器件。

(3) 电源、信号源。电源指独立电流源,独立电压源,四种线性和非线性受控源: