



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

电子电路的计算机辅助 分析与设计方法 (第2版)

Computer Aided Analysis and
Design Methods of Electric Circuits
(Second Edition)

杨华中 罗嵘 汪蕙 编著
Yang Huazhong Luo Rong Wang Hui

清华大学出版社



普通高等教育“十五”

TN710.902/1=2

2008

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

电子电路的计算机辅助 分析与设计方法 (第2版)

Computer Aided Analysis and
Design Methods of Electric Circuits
(Second Edition)

杨华中 罗嵘 汪蕙 编著
Yang Huazhong Luo Rong Wang Hui



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面地介绍了计算机辅助电路设计的基本理论和算法。全书分 10 章,内容包括:电路方程的建立和求解,稀疏矩阵技术,半导体器件模型与宏模型,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。本书在注重讲述基本概念和基本原理的同时,还结合当前纳米集成电路的特点,介绍了 BSIM3V3.2 模型、遗传算法、混合仿真技术等新技术。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本科生和研究生的教材,也可供从事电路设计和计算机辅助设计软件开发的科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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/杨华中,罗嵘,汪蕙编著.—2 版.—北京:清华大学出版社,2008.2

(清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列)

ISBN 978-7-302-15003-9

I. 电… II. ①杨… ②罗… ③汪… III. 电子电路—计算机辅助分析—高等学校—教材 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 048335 号

责任编辑:陈国新

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:21.5 字 数:440 千字

版 次:2008 年 2 月第 2 版 印 次:2008 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:008116-01

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任: 郑大钟

副 主 任: 蔡鸿程 胡事民 任 勇 覃 征

王希勤 王 雄 汪 蕙 余志平

编 委: 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵

萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里

郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书: 王 娜

责任编辑: 陈国新 马瑛珺 王一玲

出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网络计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

Preface

全书分 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 章阐述电路 CAD 的基础知识: 建立电路方程的方法和求解方法。第 3 章以电路中以有源器件为核心给出二极管、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电路的直流分析方法, 它是电路 CAD 中所有其他分析功能的基础。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 3 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 3 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设计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。

本书继承了汪蕙、王志华编著的1996年版本的大部分内容,刘润生、范崇治、王寒伟、王和民等老师对1996年版本提出了许多宝贵的建议,谢源为附录中的C语言教学程序做了不少工作,在此对他们的帮助表示感谢;许多读者和使用过1996年版本的教师在使用此书的过程中也曾提出过许多很好的建议。正是他们的无私奉献促使我们完成了本书,在此谨对他们表示由衷的谢意。

限于水平,书中仍难免有错误及不当之处,望读者予以指正。

编者

2006年11月于清华园

目 录

Contents

1	绪论	1
1.1	电子设计自动化的发展概况	1
1.2	模拟电路 CAD 的发展概况	3
1.2.1	模拟集成电路的特点和设计自动化方法	3
1.2.2	模拟集成电路的设计工具	4
1.3	数字系统设计流程的演变	8
2	电路方程的建立和求解方法	14
2.1	建立电路方程的常用方法	14
2.1.1	表矩阵法	15
2.1.2	拓扑矩阵法	18
2.1.3	节点法	21
2.1.4	改进节点法	24
2.1.5	双图法	31
2.2	线性代数方程组的数值解法	35
2.2.1	高斯消去法	36
2.2.2	LU 分解法	39
2.2.3	稀疏矩阵技术	41
2.2.4	复数方程组解法	53
	习题	54
3	半导体器件模型	59
3.1	二极管模型	60

3.2	双极型晶体管模型	63
3.2.1	EM1 模型	64
3.2.2	EM2 模型	67
3.2.3	EM3 模型	70
3.2.4	GP 模型	75
3.3	结型场效应晶体管模型	75
3.4	长沟道 MOS 场效应晶体管模型	77
3.4.1	非线性电流源 I_{DS}	79
3.4.2	电荷存储效应	80
3.5	短沟道 MOS 场效应晶体管模型	83
3.5.1	阈值电压	84
3.5.2	$I-U$ 特性的统一模型	85
3.5.3	MOS 电容的统一模型	90
3.5.4	噪声模型	96
3.5.5	MOS 二极管模型	97
3.6	宏模型	101
3.6.1	宏模型的建立方法	101
3.6.2	运算放大器的宏模型	103
3.6.3	其他一些模拟电路单元的宏模型	110
3.7	分段线性模型	115
	习题	120
4	直流分析	122
4.1	线性直流分析	123
4.1.1	直流分析功能	123
4.1.2	线性直流分析流程	124
4.1.3	线性直流分析实例	125
4.2	非线性直流分析的数值方法	129
4.2.1	简单迭代法	129
4.2.2	牛顿-拉夫森方法	130
4.3	非线性器件的直流伴随模型	133
4.3.1	二极管直流伴随模型	133

4.3.2	双极型晶体管的直流伴随模型	135
4.3.3	MOS 场效应晶体管的直流伴随模型	137
4.4	N-R 方法的收敛性	138
4.5	改进的 N-R 方法	139
4.5.1	“横取”N-R 方法	139
4.5.2	“四象限”算法	140
4.5.3	阻尼算法	141
4.5.4	高阶校正法	142
4.6	其他改善收敛性的算法	143
4.7	直流非线性分析流程和分析实例	145
	习题	148
5	瞬态分析	152
5.1	引言	152
5.2	常用的数值积分方法	155
5.2.1	向前欧拉法	155
5.2.2	向后欧拉法	157
5.2.3	梯形法	159
5.2.4	多步法	161
5.3	储能元件的瞬态离散化模型	161
5.3.1	电容的离散化电路模型	162
5.3.2	电感的离散化电路模型	163
5.3.3	互感的离散化电路模型	164
5.4	局部截断误差与稳定性	165
5.4.1	局部截断误差的计算	165
5.4.2	变步长策略	168
5.4.3	起步与导数不连续点的处理	170
5.4.4	绝对稳定和 stiff 稳定	172
5.5	基尔算法	173
5.6	瞬态分析程序及分析实例	177
5.6.1	瞬态分析程序介绍	177
5.6.2	分析实例	178

习题	182
6 频域分析	185
6.1 交流小信号分析	185
6.1.1 元器件的交流小信号模型	185
6.1.2 交流小信号分析流程与实例	190
6.2 零极点分析	194
习题	200
7 灵敏度分析	202
7.1 引言	202
7.2 伴随网络法	203
7.2.1 特勒根定理和伴随网络的构成	203
7.2.2 线性网络的伴随网络法	205
7.2.3 非线性网络的伴随网络法	210
7.2.4 伴随网络方程的建立及求解	212
7.3 网络灵敏度的应用	215
7.3.1 寄生参数的灵敏度	215
7.3.2 对于频率的灵敏度	217
7.3.3 SPICE 程序中的直流灵敏度分析	219
7.4 导数网络法	223
7.4.1 线性网络的导数网络法	224
7.4.2 非线性网络的导数网络法	228
7.4.3 导数网络方程的建立与求解	230
习题	234
8 容差分析	236
8.1 引言	236
8.2 器件参数的统计分布规律	237
8.2.1 随机变量及其描述方法	237
8.2.2 随机变量的数字特征	239
8.2.3 几种常用器件参数的统计分布	240

8.3	多个器件参数变化对电路性能的影响	243
8.4	最坏情况分析	244
8.5	蒙特卡罗分析	250
8.5.1	随机数的产生	251
8.5.2	随机变量的抽样	253
8.5.3	蒙特卡罗法在电路仿真中的应用	257
习题		259
9	大规模电路的仿真技术	261
9.1	引言	261
9.2	撕裂法	263
9.2.1	支路撕裂法	263
9.2.2	节点撕裂法	266
9.3	松弛技术	268
9.3.1	线性松弛方法	269
9.3.2	非线性松弛方法	270
9.3.3	波形松弛方法	271
9.4	多级牛顿算法	273
9.5	混合仿真技术	275
10	优化设计	282
10.1	概述	282
10.2	电路优化问题的特点	284
10.3	收敛判据	286
10.4	正交设计法	286
10.4.1	正交拉丁方与正交表	287
10.4.2	正交表与正交优化设计	288
10.5	下降单纯形法	290
10.6	拟牛顿算法	292
10.7	模拟退火算法	294
10.7.1	基本思想	294
10.7.2	算法要素	296

10.7.3	算法实例	299
10.8	进化计算法	300
10.8.1	适应值函数	301
10.8.2	交叉算子	302
10.8.3	变异算子	303
10.8.4	选择算子	304
10.8.5	进化计算的高级策略	305
10.8.6	进化计算实例——遗传算法	307
10.9	小结	308
	习题	309
附录 A 教学软件		311
参考文献		324

1 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,并已成为一个独立的产业。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,甚至只有一二年时间。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,高效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四个阶段。

20 世纪 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。

20 世纪 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。

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、光通信电子系统等。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 20 世纪 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,能够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及其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: Synopsys, Cadence, Magma 和 Mentor Graphics 公司。

1.2 模拟电路 CAD 的发展概况

1.2.1 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、图像等信号皆为模拟信号,即使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 1.2.1 给出了在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