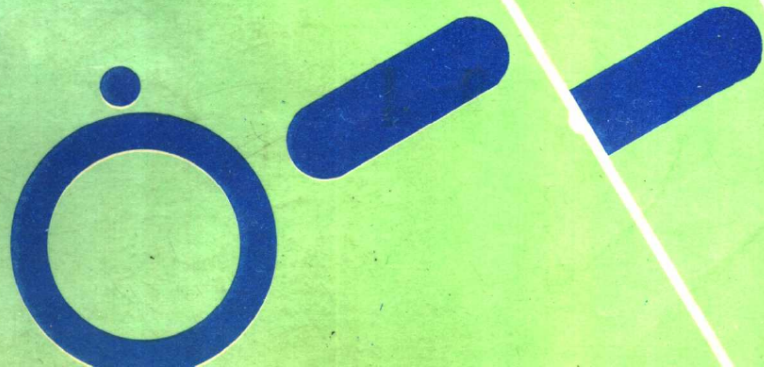


电路计算机辅助设计

王玉卿 毛清峰 编著
张淑琴 赵泉柱



电路计算机辅助设计

王玉卿 毛清峰 编著
张淑琴 赵泉柱

东北大学出版社

1993·沈阳

(辽)新登字第8号

内 容 提 要

本书系统地阐述了电路计算机辅助设计的基本理论和方法。全书除概论外分为8章,内容包括线性电路分析方程的建立和求解、稀疏矩阵技术、频域分析、时域分析、非线性电路分析、灵敏度分析和容差分配,并以相当篇幅介绍了电路仿真程序SPICE的结构特点及其内建的半导体器件模型,以及语法规则和一些应用实例。

本书内容丰富,叙述简明扼要,条理清楚,结合实例,深入浅出,所有程序都经过上机实践,可作为高等学校电子类、通讯类各专业本科生教材或教学参考书,也可供有关的科学技术人员阅读和参考。

电路计算机辅助设计

王玉卿 主编

东北大学出版社出版

东北大学出版社发行

(沈阳·南湖)

沈阳市公路印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32

印张: 11.25

字数: 253千字

1993年6月第1版

1993年8月第1次印刷

印数: 1~1000册

责任编辑: 王金邦

责任校对: 张德喜

封面设计: 唐敏智

责任出版: 高志武

ISBN 7-81006-602-1/TP·28

定价: 9.80元

前 言

电路的计算机辅助设计,是近二三十年迅速发展起来的综合性学科,现在已成为电气电子工程师必备的知识,很多大学都把它列入了教学计划.本书是为工科电类各专业本科高年级学生编写的教材,但有部分内容(概论的一部分及 5.4, 5.5, 7.3, 7.4 节)超出对本科生的要求,在教学中可以略去,但考虑到知识的系统性和完整性,这部分内容仍保留下来.本课程参考学时 60 小时,含上机 20 小时.

本书是以原有教学讲稿为基础,结合近几年的科研成果,参考国内外有关资料,加工整理而成.由王玉卿主编并撰写了概论和第一、五、六、七、八章,毛清峰撰写了第二章,张淑琴撰写了第三章,赵泉柱撰写了第四章.此外参加编写的还有王欣然、吴忠民、简明和李桂兰,主要工作是在 PC 机上调试通过全部程序,搜集和整理资料等.

沈阳工业大学校长王尔智教授、副校长王成元教授对本书的出版给予热情的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢.

由于作者水平有限,书中谬误之处在所难免,敬请读者批评指正.

编著者

1993.6

目 录

概论	1
第一章 线性网络分析方程的建立	7
1.1 网络拓扑矩阵及其计算机形成	7
1.2 节点电压方程的形成	14
1.2.1 标准支路和支路导纳矩阵	14
1.2.2 节点电压方程	18
1.3 直接建立节点电压方程	25
1.4 回路分析方程和割集分析方程	29
1.5 混合方程法和稀疏表法	32
1.6 改进节点法	35
第二章 线性代数方程组的求解和稀疏矩阵技术	51
2.1 求逆矩阵解法	51
2.2 求线性方程组解的克莱姆法	53
2.3 高斯消去法	55
2.4 高斯约当消去法	59
2.5 LU 分解法	59
2.5.1 克劳特 LU 分解	59
2.5.2 多列特 LU 分解	63
2.5.3 用克劳特 LU 分解法的 FORTRAN 程序	64
2.6 乔列斯基分解法	66
2.7 迭代法	67

2.7.1 高斯雅可比法	68
2.7.2 高斯塞得尔迭代	68
2.7.3 迭代改进解的准确度	69
2.8 稀疏矩阵的压缩存储	69
2.9 主元的选取与方程的排序	76
2.10 矩阵的图形表示	79
2.10.1 用无向图表示结构对称矩阵	80
2.10.2 用有向图表示不对称矩阵	80
2.11 对称阵的填入和长运算次数的图形解释	81
2.12 不对称阵消元时的填入和长运算次数	86
第三章 交流稳态分析	90
第四章 非线性电路的仿真	99
4.1 非线性电路方程组的建立	100
4.1.1 一个未知量的单个非线性方程	100
4.1.2 多个未知量的非线性节点方程组	101
4.1.3 非线性混合方程组	102
4.2 非线性代数方程的求解	105
4.2.1 匹卡德迭代法	105
4.2.2 解单个非线性方程的牛顿拉夫逊法	107
4.2.3 用牛顿拉夫逊法解非线性代数方程组	110
4.3 非线性元件的线性化伴随模型	113
4.3.1 二极管的伴随模型	113
4.3.2 双极型晶体管的直流伴随模型	116
4.3.3 MOSFET的直流伴随模型	119
第五章 时域分析	123

5.1	数值积分方法	125
5.2	数值解法的误差和稳定性	128
5.2.1	向前欧拉法	130
5.2.2	后退欧拉法	132
5.2.3	梯形法	132
5.3	储能元件时间离散化的伴随模型	133
5.3.1	线性电容	133
5.3.2	线性电感	137
5.3.3	线性互感	138
5.3.4	非线性电容	140
5.4	龙格-库塔方法	144
5.4.1	二阶龙格库塔法	144
5.4.2	三阶龙格库塔法	147
5.4.3	显式R级龙格库塔方法	150
5.5	多步数值积分方法	155
5.5.1	多步积分方法的约束条件	157
5.5.2	亚当斯, 巴斯弗斯数值积分公式	158
5.5.3	亚当斯, 英尔顿数值积分公式	161
5.5.4	吉尔(Gear)积分法	164
第六章 灵敏度分析		169
6.1	灵敏度分析的意义	169
6.2	灵敏度的定义和求灵敏度的方法	171
6.2.1	灵敏度的定义	171
6.2.2	直接法求灵敏度	172
6.2.3	差商法	174
6.2.4	求灵敏度的系统方法	176

6.3 伴随网络法	177
6.3.1 特勒根定理	177
6.3.2 伴随网络的形成及灵敏度计算	180
6.4 增量网络法	192
6.4.1 增量网络的形成	192
6.4.2 增量网络的节点方程	198
6.5 最坏情况分析和容差分配	201
6.5.1 最坏情况分析	201
6.5.2 统计分析法	203
6.5.3 容差分配	204
第七章 SPICE 程序	206
7.1 SPICE 程序的简单介绍	206
7.2 SPICE 的内部结构	209
7.2.1 READIN 模块	211
7.2.2 ERRCHK 模块	212
7.2.3 SETUP 模块	212
7.2.4 DCTRAN 模块	212
7.2.5 DCOP 模块	213
7.2.6 ACAN 模块	213
7.2.7 OVTPVT 模块	214
7.2.8 SPICE2 的根程序	214
7.3 SPICE 的动态存储分配	216
7.4 SPICE 的内建器件模型	223
7.4.1 二极管模型	224
7.4.2 双极型晶体管模型	227
7.4.3 结型场效应晶体管模型	240

7.4.4 MOS 场效应管模型	244
第八章 用 SPICE 进行电路仿真	262
8.1 SPICE 输入语言的语法规则	262
8.2 电路元器件的描述	265
8.2.1 电阻	267
8.2.2 电容	268
8.2.3 电感	269
8.2.4 耦合互感	270
8.2.5 压控电流源	270
8.2.6 压控电压源	272
8.2.7 流控电流源	274
8.2.8 流控电压源	275
8.2.9 独立电压源	276
8.2.10 独立电流源	282
8.2.11 二极管	283
8.2.12 双极型晶体管(BJT 卡)	284
8.2.13 结型场效应晶体管(JFET 卡)	286
8.2.14 MOS 场效应晶体管(MOSFET 卡)	286
8.2.15 无损耗传输线	287
8.2.16 子电路调用卡	288
8.2.17 砷化镓场效应器件卡	289
8.3 SPICE 的模型卡的子电路卡	289
8.3.1 模型卡	291
8.3.2 子电路卡	292
8.4 控制卡	293
8.4.1 一般控制类	293

8.4.2 分析类型类	296
8.4.3 输出方式类	306
8.4.4 有关收敛的控制卡	311
8.5 用 SPICE 进行电路仿真的实例	314
8.5.1 在晶体管 BC 结有无 SBD 钳位 对 RTL 倒相器开关过程的影响	314
8.5.2 差分放大器	317
8.5.3 有无负反馈二级低频电压放大器的仿真	323
8.5.4 模拟晶体管振荡器的起振过程	326
8.5.5 多谐振荡器	328
8.5.6 功率放大电路的模拟	330

附录

附表 A 半导体器件模型卡中用的模型参数	333
附表 A1 二级管的模型参数	333
附表 A2 双级晶体管模型参数	334
附表 A3 JFET 模型参数	338
附表 A4 MOSFET 的模型参数	339
附表 A5 MESFET 的模型参数	342
附表 B SPICE 的可选项	343
附表 C 三种多步积分公式系数分布	345
参考文献	347

概 论

随着电子计算机技术的开发并被广泛地使用,自60年代起逐渐形成了一门新的学科:计算机辅助设计(Computer Aided Design).这种技术现在已经成功地用于汽车、飞机、船舶、建筑、机械及电力系统,以及电子线路和集成电路等的设计与制造中,引起了设计领域的根本变革.特别是80年代开始的以计算机为核心的信息技术和以大规模集成电路(LSI)为主导的微电子技术,又掀起了新的工业革命,正迅速地改变着传统的设计方式和生产方式,也对未来的工程师提出了新的要求. CAD 技术是现代工程技术人员必备的知识 and 技能.

先回顾一下传统的电子线路设计方法:以前的电路和系统设计者是根据市场上能买到的元器件品种和系列,按照设计指标要求,参考有关资料,凭借个人经验,初步拟定出电路方案;再以简单的线性模型代替器件,对电路进行简化,并用解析方法进行手工估算;根据估算的结果,如果觉得方案可行,则准备元件,在实验室里搭模拟试验板,用电子仪器反复进行测试,并分析测量结果,若不符合要求,需要修改元件参数,甚至改变电路方案,再重新估算和搭模拟,直到电路性能基本满意,才最后确定电路结构和元件参数值;然后在印刷线路板上组装电路和系统,做出样机.设计成功

与否很大程度上取决于设计者的经验。

现在，借助于先进的 CAD 技术和计算机系统，无需任何实际元件，以计算机程序取代大量的仪表，计算机本身就是一个现代化的实验室，设计者通过与计算机“纸上谈兵”，进行设计方案优选、故障模拟和设计规则检查，以及使用计算机绘图等手段，在几天或几周之内就完成了过去要几十个，甚至几百个人年完成的设计任务，使设计周期大大缩短，既提高了设计质量，也使设计成本大大下降。特别是对于超大规模集成电路（VLSI），由于设计工作复杂，发现错误和改正错误极其困难。可以说，没有 CAD 技术的发展，VLSI 的设计和制造是根本不可能的。

随着微电子技术的发展，超微细加工技术的使用，VLSI 技术已日臻成熟，一个芯片上可集成上亿个元件，完全能在一个芯片上集成一个复杂的系统，使原来从事电路和系统设计的电子工程师，也要从选择通用的分立元件和集成电路，在印刷电路板（PCB）上组装和调试电路，逐步地转到从事专用集成电路（ASIC）掩膜版（MASK）的设计上来，直接在计算机工作站上模拟或验证自己设计的系统，最后拿出供集成电路工厂生产 VLSI 用的数据磁带。因此，对于所有的电子工程师，都有必要了解集成电路计算机辅助设计（IC CAD）的基本思想和主要方法。

电路设计的目的是确定满足电性能要求的电路结构和元器件参数值，同时还应考虑对成品率和可靠性有重大影响的电源电压允许变化范围、温度变化范围、元器件参数分散情况以及制作工艺误差可能引起的电路性能的变化。自动的设计和自动生产出合格的产品是人们多年来追求的目标。但

是，由于电路种类繁多，性能千差万别，除了有源滤波器等少量线性电路，在设计人员给定电路结构后，可以由计算机自动地确定出满足电路性能要求的元件值外，一般地，想在满足电路中元件的某些约束，如给定晶体管模型参数的取值范围的前提下，让计算机自动地设计出符合规范的电路，目前还有困难。

这实质上是一个规划问题，即要确定目标函数 $f(x)$ 在约束条件 $x \in S \subset X$ 下的极值。其中 X 为被研究的对象空间， S 为 X 的子集，即允许被研究对象存在的空间。如何确定目标函数，用何种算法确定目标函数的最优解，即设计自动化 (Design Automation)，目前还是众多的专家正在努力研究的课题。当前能在实践中应用的还是处于计算机辅助设计 (CAD) 水平。当然，完全自动化的版图设计在某些方面不是不可能的，如 PLD 方法，可根据布尔方程或状态表自动地生成版图，硅编译器 (Silicon Compiler) 能直接把行为级描述转换成版图。但是，把这样设计出的集成电路和人工介入的设计相比，在适用面、产品性能、芯片面积以及电路规模上仍有相当大的差距。

现在主要的还是先由电路工程师根据已有资料和经验设计电路，再通过电路仿真程序进行模拟验证或者确定如何改进设计方案。设计人员以仿真软件能接受的语言，输入表示电路拓扑结构和元件特性的参数、模拟要求、输出方式和要输出的内容，即由计算机进行分析 (Analysis) 计算，再由人来进行综合 (Synthesis)。设计人员根据计算机模拟的结果，确定如何修改电路，然后再重新模拟，直到完全满意为止。

使用通用软件，譬如用 SPICE 进行电路仿真的过程是：

- (1) 画电路草图，并标明节点号和元件名等；
- (2) 用电路描述语言写出输入文件；
- (3) 在终端上调用编辑软件把输入文件在键盘上敲入，并存入磁盘中；
- (4) 调用 SPICE 来编译并运行已存在磁盘中的文件；
- (5) 打印输出结果，并进行分析研究。

为了让计算机进行模拟，除了使用键盘输入电路描述语言以外，现代的 CAD 工作者往往使用工作站 (ENGINEERING WORKSTATION 简称 EWS，或叫 DESIGNER'S WORK STATION 简称 DWS)，它与一般计算机的区别是荧光屏多为 19 英寸以上高分辨率的彩色屏幕，以适应画图的需要；磁盘容量很大，以便存储大量的数据和支持软件；外部设备也齐全。主机是 16 位或 32 位超小型机，并有时与大型计算机联网，共享数据库资源。使用工作站进行仿真或绘图很方便，以鼠标器 (Mouse) 或电笔 (Stylus) 在图形输入板 (Tablet) 上移动，则光标随之在彩色图形终端上移动，按着在功能键盘上选择的命令，或在图形输入板上指定部位定义的菜单 (Menu) 可以画出图形或发出模拟命令。图形窗口的网格可以显示，也可以隐去。有的系统可在 CRT 上的任意位置开任意大小的多个窗口菜单。菜单的内容可以用户自己定义和修改，以适应不同的需要。模拟的结果可以直接在工作站的 CRT 上显示图形或数据，也可以在绘图机或打印机上输出。使用工作站进行计算机辅助设计是发展方向。

大多数电气工程师是使用现成的软件和系统，对自己设计的电路进行仿真分析，CAD 仅仅是作为一个工具来使用。工程技术人员只要参考系统说明书或程序手册，遵守其语法规

则，通过足够的上机实践是不难掌握的。但是要想用的更好快，发挥使用计算机的优越性，则需要了解不同软件的编写原理及其长处和局限性，从而可以选择更适合自己的需要的软件，或者结合自己的工作需要，对现有程序进行扩充或完善。这就需要下很多工夫，研究各种分析模拟的特点，考虑采用哪种计算方法好，进而读懂程序，改进程序。

电路的计算机仿真主要包括如下几个方面：

- (1) 线性电路和非线性电路的直流工作点分析；
- (2) 线性电路的交流稳态模拟，即分析其频域特性；
- (3) 线性和非线性动态电路的瞬态分析，或叫时域模拟；
- (4) 线性和非线性电路的传递特性；
- (5) 噪声分析；
- (6) 灵敏度分析，容差分配和最坏情况分析；
- (7) 失真分析；
- (8) 温度变化模拟，功耗计算；
- (9) 零极点分析；
- (10) 失效分析；
- (11) 统计分析。

通用的电路仿真软件都包括下列功能：

- (1) 输入处理；
- (2) 建立方程；
- (3) 解方程；
- (4) 输出结果。

核心是(2)和(3)项。建立方程的方法很多，适用场合，执快慢各有不同。建立方程时也需考虑器件模型的处理。

本书从较简单而基本的线性电路直流的流稳态分析方程的建立入手，全面地研究了各种建立方程的方法，比较其长

短，进而推广到交流稳态分析（频域模拟）、时域分析、非线性分析和灵敏度分析方程的建立。各种模拟中建立的方程，经过数值方法处理，都成为线性代数方程组。由于迅速准确地求解线性代数方程组至关重要，本书第二章专门讨论各种求解方程组的方法，特别是介绍了稀疏矩阵技术。最后两章讨论了广泛应用的 SPICE 程序的特点、功能和使用方法，并给出若干仿真实例。

第一章 线性网络分析方程的建立

1.1 网络拓扑矩阵及其计算机形成

线性电路中每个元件对应有向图中一条支路，支路的编号和方向可任意指定，而不影响问题的实质。对每个节点都可按克希霍夫电流定律(KCL)写出一个方程。当选定一个节点为参考点后，去掉与之对应的方程，余下的 $n-1$ 个 KCL 方程是独立的，写成矩阵形式

$$A I_b = 0 \quad (1.1)$$

对于 n 个节点 b 个支路的网络， A 是 $(n-1) \times b$ 的关联矩阵，其每一行对应一个非接地节点，每一列对应一条支路。

$$A = \{a_{ij}\}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当节点 } i \text{ 是支路 } j \text{ 的起点(电流流出节点,叫源)} \\ -1 & \text{当节点 } i \text{ 是支路 } j \text{ 的终点(电流流入节点,叫漏)} \\ 0 & \text{当节点 } i \text{ 与支路 } j \text{ 不相连} \end{cases}$$

由于每条支路只有一个起点终点，故 A 的每列最多有一个 1 和一个 -1，其余为 0，若支路的一个端点已指定为参考点，则对应该支路的列就只有一个非零元素了。 I_b 是 b 个元素的支路电流列矢量。如果选定一组树，把 A 矩阵按先树