

微波电路的 计算机辅助设计

[印度] K.C.格普塔 R.加格 R.查德哈 著
科学出版社

73.8723A
483

微波电路的计算机辅助设计

[印度] K. C. 格普塔 R. 加格 R. 查德哈 著

冯忠海 温俊鼎 蒋叙仁 杨乃恒 译



科学出版社

1986

8610768

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了微波电路计算机辅助设计的有关概念和方法。首先从微波电路的发展历史引出微波电路计算机辅助设计的必然性和必要性,然后介绍了微波电路的定模、分析和最优化技术中所涉及的各种元件、电路结构和与计算机辅助设计有关的数学方法;最后给出了通用的多端口网络与矩阵分析程序,以及微波放大器、无源网络、匹配电路、滤波器等市售计算机辅助分析与设计程序。

本书可作为微波专业大学高年级学生和研究生专业教材,也可供从事微波技术的科研和工程技术人员参考。

DE 57 / 13

K. C. Gupta R. Garg R. Chadha

COMPUTER-AIDED DESIGN OF MICROWAVE CIRCUITS

Artech House, 1981

微波电路的计算机辅助设计

[印度] K. C. 格普塔 R. 加格 R. 查德哈 著

冯忠华 温俊鼎 蒋叙仁 杨乃恒 译

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京中关村大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年7月第一版 开本: 850×1168 1/32

1986年7月第一次印刷 印张: 16 3/8

印数: 0001—8,900 字数: 424,000

统一书号: 15031·730

本社书号: 4749·15-7

定价: 4.60 元

2850132

致 中 国 读 者

1979—1981 年间,我和印度理工学院的两位同事以教材为主要基础,写成了《微波电路的计算机辅助设计》一书。自从 1981 年出版以来,此书受到世界各地微波领域读者的广泛欢迎。最近正在准备出版俄译本。现在能为中译本写序,我深感高兴。我本人并代表两位合作者加格博士和查德哈博士热望中国读者在研读本书时有所裨益,希望本书能帮助你们提高微波电路的机助设计(CAD)技术。

任何微波通信、微波仪器或雷达系统中,微波电路都是关键元件,而 CAD 则已成为微波电路精确和优化设计中一种必不可少的工具。从 1981 年以来(本书于当年在美国出版),市售微波 CAD 程序包显著增多。据《微波系统新闻》(MSN)杂志最近报道,出售的各类软件包已多达六种。此外,几家主要微波公司还在开发其它许多家用微波 CAD 程序包。微波 CAD 近来重新掀起热潮,原因之一是人们对制备在砷化镓半导体衬底上的、以砷化镓金属-半导体场效应晶体管(MESFET)作为主要电路元件的单片微波集成电路(MIC)的兴趣越来越大。对于单片 MIC,电路实际上不允许作任何修整或调节,电路的改进十分费钱耗时。就象低频单片电路一样,CAD 在微波频率的单片电路设计中也是一种主要工具。

目前,微波电路 CAD 尚需在若干方面提高水平。传输结构几何图形的不连续性所引起的寄生电抗,其定模技术还远不能令人满意。大多数现有模型在较高微波频率不再准确,辐射损耗也未加考虑。另一方面,对于诸如混频器、振荡器和大信号放大器等非线性微波电路设计中的 CAD 程序包,人们仍需要付出巨大努力。要把这些非线性电路元件结合到单片 MIC 中去,还需要我们扩充

CAD 技术,使非线性元件的定模和分析方法包括在内。此外,近年来微带 CAD 技术方面最令人感兴趣的是数据率很高的 VLSI (超大规模集成)数字电路设计。传统的数字计算机电路和常规微波电路一向被认为是电子工程学科广阔领域中两个完全无关的方面。然而,随着数据率进入千兆比特范围,高速计算机电路模型的设计师开始体验到芯片接线之间存在的脉冲反射(失配引起)和串扰(互耦引起)问题。而微波工程师则已经同这类问题打了数十年交道。由此可见,高速数字芯片的接线应该作为微带线之类加以定模,数字 CAD 设计程序包中则应将微带 CAD 技术结合在一起考虑。

对于上述微波电路 CAD 中的现存问题,我们预期本书的一些中国读者会去尝试解决。希望本书能为这一努力提供一定帮助,或至少给予一些启发。我们衷心感谢对本书的反应和批评意见。

K.C. 格普塔

1984 年 11 月

于美国科罗拉多州鲍尔德城

译 者 的 话

印度理工学院教授 K. C. 格普塔对于从事微波理论 and 技术的读者来说,应该是不陌生的。最近十年来他在微波电路机助设计、微波集成电路、民用微波技术等方面发表了数十篇论文,并在美国出版了四册微波方面的专著。

与低频电路相比,微波电路的机助设计虽然起步较晚,应用还不够普遍,但随着微带电路、微波半导体工艺以及混合和单片微波集成电路的迅速发展,对机助设计的需要日益迫切,从而促使这一微波设计手段在七十年代特别是近十年来获得了迅速发展。

本书第一次全面而系统地介绍了微波电路机助设计的有关概念和方法。首先从微波电路的发展历史引出微波电路机助设计的必然性和必要性,然后介绍了微波电路的定模、分析和最优化技术中所涉及的各种元件、电路结构和与机助设计有关的数学方法,最后两章作为实例给出一个通用的多端口网络与矩阵分析程序,以及微波放大器、无源网络、匹配电路、滤波器等市售机助分析与设计程序。全书特点是概念清晰,数学上只给出主要结果,力避冗长的推导。每章末都附有较全面的参考文献。

原书内容除曾在印度理工学院研究生班讲授外,作者还应邀在加拿大、美国、瑞士、丹麦等国的一些大学的研究生院作为客座教授讲授过本书部分内容或全部内容。读者除了应有的高等数学、微波技术的基本知识外,还需要掌握一定的算法语言知识。

前 言

随着混合微波集成电路 (MIC) 的出现, 计算机辅助设计 (CAD) 方法已经成为微波电路设计人员的一种必备工具。今天, 可用于微波频率的有源与无源元件品种繁多, 电路设计过程变得日益复杂; 同时, 现代微波系统也越来越复杂, 要求电路和分系统的设计更加准确精密。而就混合 MIC 技术本身而言, 在电路制成后加以修整或调节的可能性是很有限的。

电路的计算机辅助设计, 包括微波电路的机助设计, 近年来发展得甚为迅速。出现了很多低频电子电路方面的书籍, 但还没有讨论微波电路 CAD 问题的著作。因此, 在微波电路的 CAD 已趋成熟的情况下, 有必要出版一本这方面的专著。本书目的即在于此, 希望向读者详尽介绍微波电路的机助分析以及设计中的各种概念和方法。

任何 CAD 过程都包含三个基本步骤: (1) 确定模型; (2) 分析; (3) 最优化。本书将针对微波电路阐述这三方面内容, 讨论各种微波电路基本元件的定模问题, 其中包括传输线、不连续性、集总元件、平面元件和半导体器件等。书中介绍了便于分析的网络表示法和分析微波电路的矩阵技术, 叙述了灵敏度分析和各种最优化方法。

全书共分五个部分。

第一部分包括两章。第一章介绍微波电路的发展过程, 引入机助设计概念。第二章回顾了微波电路所用的各种表示法。

任何电路设计, 有源和无源元件的定模都是关键步骤。本书第二部分以八章篇幅讨论这一问题。在微波频率工作时, 不仅各组成元件本身, 而且连附带的寄生电抗在内, 都需要准确表征。书内有七章这方面内容, 介绍各种传输结构、不连续性、集总元件、平

面元件和半导体器件的特性表征。各种元件的灵敏度对于电路的容差分析和最优化十分有用,我们用一章叙述传输结构的灵敏度特性。有些元件(如半导体器件)的准确表征要通过测量有关频带内的 S 参量来实现,通常采用结合网络分析仪的机助测量技术,我们专用一章讨论这些方法,包括六端口网络测量技术。

机助设计方法中最重要的一步是电路分析,本书第三部分即介绍各种分析方法。微波电路一般借助 S 参量进行分析,这部分的前四章用来处理这方面内容,包括由已知的各元件 S 矩阵求取整个网络的 S 矩阵、灵敏度分析、容差分析、时域分析等。这些分析方法都涉及到求解矩阵方程式问题,我们用单独一章讨论这一解题技术。

微波电路最优化可用不同方法实现,已经采用的有直接搜索法和梯度法。第四部分以三章讨论最优化的基本概念、单参量最优化和多参量最优化等,述及的方法有模式搜索法, Rosenbrock 方法,单纯形法, Newton-Raphson 法, Davidon-Fletcher-Powell 法,以及使最小二乘方目标函数最优化的方法。

第五部分以两章讨论 CAD 程序。先介绍印度理工学院提出的微波电路分析程序 MCAP。接着,美国 Compact Engineering 公司 L. Besser 先生撰写的最后一章评述了一些现有的市售程序。

本书第十三章以后各章中涉及到几种算法,都是用 ALGOL 语言写的。不熟悉这一语言的读者,初读时可以跳过这些内容。

本书是由一组讲稿演化而来的,最初为 1978 年春季在印度理工学院开设微波电路 CAD 方面的研究生课程而写。部分内容又用在后来的微波电路课程中。此外,印度理工学院进行的微波集成电路 CAD 方面的工作,已成为印度政府电子学部(新德里)资助的一项研究课题的组成部分,也纳入本书内容之中。1979 年苏黎世工程技术学院举行的一组讨论会上采用过本书的一些材料,并由该校微波实验室内部出版。

作者感谢 L. Besser 先生写了第二十章。感谢印度理工学院和苏黎世工程技术学院一些同行们讨论了书中的有关内容。感

谢印度理工学院电气工程系和电子系统高级中心提供了各种方便。C. M. Abraham 先生出色地打印了全部原稿，R. K. Bajpai 和 J. C. Verma 两位先生完成了全书插图。并感谢印度理工学院质量改进程序中心在原稿准备过程中的大力支持。

作者还要感谢 H. E. Green 博士和 Academic Press 出版公司允许我们在表 5.1 中引用他们的出版资料。

K. C. 格普塔

R. 加格

R. 查德哈

目 录

第一部分 导论

第一章 微波电路和计算机辅助设计	1
1.1 微波电路的发展过程	1
1.2 计算机辅助设计方法	5
1.3 全书内容概述	9
第二章 微波网络表示法	13
2.1 $ABCD$ 参量	14
2.2 散射参量	17
2.2.1 定义和一般特性	17
2.2.2 S 矩阵与其它表示法的关系	19
2.3 传递散射矩阵表示法	21
附录 2.1 一些常用二端口网络的 $ABCD$ 矩阵、 S 矩阵和 T 矩阵	23

第二部分 电路元件的定模

第三章 传输结构的特性表征	27
3.1 同轴线	29
3.2 波导	31
3.2.1 矩形波导	31
3.2.2 圆波导	33
3.3 带状线	34
3.4 微带线	37
3.5 槽线	41
3.6 共面线	43
3.7 耦合带状线	47
3.8 耦合微带线	50
第四章 传输结构的灵敏度	57

4.1 引言	57
4.1.1 定义	57
4.1.2 灵敏度分析的应用	58
4.1.3 传输线容差分析	58
4.2 同轴线	60
4.3 波导	62
4.4 带状线和微带线	64
4.4.1 带状线	64
4.4.2 微带线	66
4.5 槽线和共面线	69
4.5.1 槽线	69
4.5.2 共面线	73
4.6 耦合带状线和耦合微带线	77
4.6.1 耦合带状线	77
4.6.2 耦合微带线	81
第五章 不连续性的特性表征 (I): 同轴线和波导	85
5.1 引言	85
5.2 同轴线不连续性	86
5.2.1 同轴线容性隙	86
5.2.2 同轴线阶梯	89
5.2.3 同轴线容性窗	90
5.2.4 同轴线T形接头(短截线)	92
5.3 矩形波导不连续性	92
5.3.1 波导中的销钉	94
5.3.2 波导中的金属条带	100
5.3.3 波导中的膜片和窗孔	104
5.3.4 波导中的阶梯	109
5.3.5 波导直角弯头	114
5.3.6 T形接头	116
5.3.7 波导中的圆形或椭圆形孔	119
第六章 不连续性的特性表征 (II): 带状线和微带线	123
6.1 带状线不连续性	124
6.1.1 开路端	126
6.1.2 圆孔	126

6.1.3 隙缝	127
6.1.4 宽度阶梯	127
6.1.5 弯头	128
6.1.6 T形接头	129
6.2 微带不连续性	131
6.2.1 开路端	131
6.2.2 隙缝	132
6.2.3 槽口	133
6.2.4 宽度阶梯	133
6.2.5 直角弯头	135
6.2.6 T形接头	136
6.2.7 十字接头	137
第七章 微波电路中的集总元件	139
7.1 基本考虑	139
7.2 集总元件设计	140
7.2.1 电感器和电阻器	140
7.2.2 电容器	145
7.3 集总元件参数的测量	151
第八章 二维平面电路	155
8.1 基本概念	156
8.2 格林函数法	161
8.3 格林函数的计算	165
8.3.1 镜象法	165
8.3.2 用本征函数展开格林函数	166
8.3.3 各种结构的格林函数	167
8.4 分块法和补块法	172
8.5 分析任意形状平面电路的数值方法	173
8.6 适用于平面电路的比例缩放法	176
8.6.1 频率缩放法	176
8.6.2 阻抗缩放法	177
8.6.3 根据微带型平面电路设计带状线型平面电路(或反之)	177
第九章 微波半导体器件模型	179
9.1 肖特基势垒二极管和点接触二极管	180
9.2 变容二极管	181

9.3 PIN 二极管	182
9.4 双极晶体管和金属-半导体场效应晶体管	183
9.4.1 双极晶体管	183
9.4.2 金属-半导体场效应晶体管	188
9.5 耿氏二极管和崩越二极管	194
9.5.1 耿氏二极管	194
9.5.2 崩越二极管	197
第十章 定模中的测量技术	201
10.1 微波网络分析仪	201
10.1.1 网络分析仪	201
10.1.2 自动网络分析仪	205
10.1.3 六端口网络分析仪	207
10.2 系统误差的测量和修正	211
10.2.1 一般考虑	211
10.2.2 一端口器件的测量	213
10.2.3 二端口网络的测量	215
10.2.4 三端口和多端口网络的测量	217
10.2.5 接头特性的表征	219
10.3 数据还原技术	221

第三部分 分 析

第十一章 电路特性的计算	223
11.1 由二端口元件组成的电路	223
11.1.1 对称性用于电路分析	224
11.1.2 级联二端口网络的分析	225
11.1.3 任意连接的二端口元件的分析	229
11.2 任意连接的网络	230
11.2.1 用连接散射矩阵分析	230
11.2.2 多端口连接方法	233
11.2.3 一个实例	235
11.2.4 子网络增长法	238
11.3 由二维平面元件组成的电路	243
11.3.1 分块法	243
11.3.2 补块法	248

第十二章 微波电路的灵敏度分析	256
12.1 有限差分法	257
12.2 伴随网络法	258
12.2.1 波变量的特勒根定理	258
12.2.2 伴随网络	260
12.2.3 和直接法比较	263
12.2.4 子网络增长法的梯度计算	264
12.3 微分散射矩阵的计算	269
12.3.1 散射矩阵的灵敏度不变式	269
12.3.2 典型元件的微分 S 矩阵	273
12.4 计算灵敏度的一个例子	274
12.5 大变化的灵敏度	278
第十三章 容差分析	284
13.1 最坏情况分析	284
13.2 统计容差分析	298
13.2.1 矩量法	298
13.2.2 蒙特-卡洛 (Monte-Carlo) 分析	300
附录 13.1 一些概率论和统计学结果	301
第十四章 微波电路的时域分析	304
14.1 传输线的瞬态分析	304
14.2 拉普拉斯变换法	310
14.3 友模法	318
14.4 状态变量法	323
第十五章 矩阵解法	325
15.1 高斯消去法	325
15.2 主元选择	329
15.3 L - U 因式分解和 F - B 代换法	331
15.3.1 L - U 分解	332
15.3.2 正消和回代	335
15.4 稀疏矩阵技术	338
15.4.1 方程的改组	338
15.4.2 关于改组的数据结构	344
15.4.3 L - U 因式分解和 F - B 代换	348

15.4.4 稀疏矩阵技术述评	354
-----------------------	-----

第四部分 最 优 化

第十六章 最优化引论	355
16.1 基本概念和定义	356
16.2 用于电路最优化的目标函数	363
16.2.1 一般考虑	363
16.2.2 最小第 p 次逼近	364
16.2.3 极小极大逼近	365
16.3 约束	368
16.3.1 约束的变换	368
16.3.2 关于违背约束的罚函数	369
16.3.3 序列无约束极小化方法	370
16.4 一维最优化方法	371
16.4.1 淘汰法	372
16.4.2 插值法	377
第十七章 直接搜索最优化方法	386
17.1 模式搜索法	386
17.1.1 虎克-吉弗斯法	387
17.1.2 鲍威尔法	389
17.1.3 雷佐尔搜索法	391
17.2 旋转坐标法	392
17.3 单纯形法	395
第十八章 梯度最优化方法	403
18.1 最速下降法	403
18.2 广义牛顿-拉夫逊法	405
18.3 DFP 法	406
18.4 最小平方目标函数的最优化	410

第五部分 计算机辅助设计程序

第十九章 微波电路分析程序	413
19.1 程序说明	413
19.1.1 框图	413

19.1.2 子程序说明.....	414
19.1.3 实例	417
19.2 用户须知.....	419
19.3 程序.....	426
第二十章 微波电路的 CAD 程序.....	450
20.1 引言.....	450
20.2 设计和制造的协同系统概念.....	451
20.3 微波 CAD 程序介绍.....	455
20.3.1 HANDY-COMPACT [®] , 利用 HP-41C 袖珍式计算器进行 电路分析	456
20.3.2 MICRO-COMPACT [®] , 用 HP-9845B/T 台式计算机进行电 路最优化	456
20.3.3 SUPER-COMPACT [®]	459
20.3.4 用 AMPSYN 进行集总元件匹配综合	465
20.3.5 用 CADSYN 综合传输线匹配网络	469
20.3.6 FILSYN.....	469
参考文献.....	475
汉英名词索引.....	501

第一部分 导 论

第一章 微波电路和计算机辅助设计

1.1 微波电路的发展过程

在很长的一段时间里,“微波电路”就是“波导电路”的同义词。人们早在三十年代初期就认识到,对于微波频率来说,波导是一种很有用的传输结构。在这方面,应当提及贝尔电话实验室的 Southworth 等人的工作^[1]。学者们很早就发现一小节波导经过适当修改后,可以作为辐射器或电抗元件来使用。Southworth 在一篇早期论文^[2]中就曾谈到谐振腔和喇叭天线。现代波导电路发展过程中,一开始就致力于使微波功率能从微波源有效地传送到波导传输线,并能在接收端有效地回收,从而要求相应的发射机元件和接收机元件。这一努力导致了行波检波器、波长计、终端负载等元件的出现。1934年,微波实验常常利用光学实验台进行^[3],由此可以想见当年所用技术之一斑。国际无线电工程师协会(IRE)会刊在其五十周年纪念专集中^[4]发表了一篇回顾微波技术发展历史的文章,其中就有几幅当年所用设备的照片。

在微波技术发展的过程中,不连续性的多次反射原理和相应的腔体谐振原理起着重要的作用。在某些场合下,人们用这些原理使微波功率源与波导匹配;另一些场合又用来使波导与接收机匹配,如晶体检波器;还有时利用它们使某个频带的信号顺利通过电路。总之,这些原理构成了微波电路的基础。

微波电路的基本特点之一是通过波导内部的螺钉、膜片(以至压缩尺寸)凭经验对其特性进行调整或调谐。起初,这仅是一种试凑方法,后来发展成所谓“波导管工程法”。在很长时间内,它是微

• 1 •

8610768