

内 容 简 介

本书系统地介绍微波电路计算机辅助分析与最优化设计的基本原理和方法。内容包括:微波电路的各种分析方法,灵敏度计算与容差分析,最优化方法和最优化设计,一些常用微波电路(如晶体管和场效应管放大器、混频器、PIN 管控制电路和体效应管电路等)的分析与优化设计。书中还附有以 FORTRAN 语言编写的若干程序和子程序。

本书可作高等工科院校微波技术专业或其相近专业的选修课教材,亦可供从事微波技术工作的科技人员参考。

微波电路的计算机辅助设计

*

沈楚玉 编

责任编辑:吴金生

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

北京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 14 字数: 340 千字

1985 年 11 月第 1 版 1985 年 11 月第 1 次印刷

印数: 5000 定价: 3.00 元

统一书号: 15290·191

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》。中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者,各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系高等工科院校微波技术专业统编教材(试用)之一。由电磁场与微波技术教材编审委员会微波技术编审小组评选审定,并推荐出版。

本书主要介绍微波电路计算机辅助分析与最优化设计的基本原理和方法。内容包括:微波电路的计算机辅助分析方法,灵敏度计算与容差分析,最优化方法和最优化设计,微波半导体器件模型和常用微波电路(包括晶体管和场效应管放大器、混频器、PIN管控制电路和体效应管电路)的计算机辅助分析与优化设计。最后以附录的形式对稀疏矩阵技术亦作了简要介绍。为了使读者更好掌握一些常用算法,书中还介绍若干程序和子程序。这些程序都用 FORTRAN 语言编写,并在微型机(11/B)上调试通过。

本书属于专业选修课教材,涉及到的基础知识面较广,其中除线性代数、FORTRAN 算法语言外,还有微波网络及微波器件与电路等方面的基础知识。为了避免教材内容庞杂,凡前修课程中已有的公式和结论,本书一般直接引用,不再予以推导。本教材的参考教学时数为 40~50 学时。

本教材由杭州电子工业学院赵国南教授主审,并为本书提出了许多宝贵意见,这里表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不少错误或不妥之处,殷切希望读者批评指正。

编 者

1985 年 1 月于南京工学院

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 引言	(1)
§ 1.2 机助设计的基本方法和特点	(2)
§ 1.3 程序设计中的几个主要问题	(4)
一、微波元、器件的数学模型	(4)
二、分析与计算方法的选择	(5)
三、程序的编制	(5)
第二章 微波电路的机助分析方法	(7)
§ 2.1 引言	(7)
§ 2.2 传递矩阵法	(7)
一、二端口电路的分析	(7)
二、 $2n$ 端口电路的分析	(14)
三、程序设计举例——二端口级联电路分析程序	(18)
§ 2.3 节点导纳矩阵法	(27)
一、不定导纳矩阵及其主要特性	(27)
二、微波电路中元、器件的不定导纳矩阵	(29)
三、电路导纳矩阵的建立方法	(32)
四、用节点导纳矩阵分析电路的方法	(34)
五、程序举例	(36)
§ 2.4 散射矩阵法	(52)
一、连接-散射矩阵法	(52)
二、散射矩阵的连接生长法	(56)
习题	(64)
第三章 灵敏度计算与容差分析	(67)
§ 3.1 引言	(67)
§ 3.2 灵敏度的直接计算法	(68)
§ 3.3 伴随网络法	(70)
一、伴随网络	(71)
二、伴随网络法计算灵敏度	(73)
§ 3.4 大变化灵敏度的计算	(80)
§ 3.5 容差分析	(82)
一、最坏情况分析	(82)
二、统计分析	(83)
习题	(89)

第四章 最优化方法与最优化设计	(91)
§ 4.1 引言	(91)
§ 4.2 最优化设计的基本原理和一些基本概念	(91)
一、基本原理	(91)
二、目标函数及约束条件	(92)
三、目标函数的极小和最小	(96)
§ 4.3 最优化方法概述	(98)
§ 4.4 一维搜索法	(100)
一、区间消去法的基本原理	(100)
二、菲波那西 (Fibonacci) 法	(101)
三、黄金分割法 (0.618 法)	(102)
四、插值法	(105)
§ 4.5 无约束最优化的梯度方法	(108)
一、最速下降法	(108)
二、牛顿法	(110)
三、DFP 变尺度法	(112)
四、高斯-牛顿最小二乘法	(119)
§ 4.6 无约束最优化的直接方法	(122)
一、模式法	(122)
二、单纯形法	(124)
三、共轭方向法	(128)
§ 4.7 约束最优化问题	(131)
一、参数变换法	(132)
二、外罚函数法	(133)
三、内罚函数法	(135)
§ 4.8 最优化设计中的几个具体问题	(136)
一、初始设计问题	(136)
二、目标函数	(138)
三、程序设计问题	(140)
习题	(141)
第五章 微波器件模型及一些常用微波电路的 CAD	(143)
§ 5.1 引言	(143)
§ 5.2 微波晶体管和场效应管模型及其建立方法	(143)
一、单向化等效模型	(144)
二、负镜像模型法	(146)
三、数据拟合法	(148)
§ 5.3 微波半导体二极管模型	(150)
一、一般结型二极管	(150)
二、雪崩二极管	(151)
三、体效应二极管	(153)

§ 5.4 PIN 管控制电路的分析与设计·····	(155)
一、PIN 管阵列式衰减器的分析与优化设计·····	(155)
二、微带“ π ”移相器的优化设计·····	(160)
三、宽频带滤波器型开关电路的优化设计·····	(163)
§ 5.5 宽频带微波晶体管 and 场效应管放大器的设计·····	(166)
一、宽频带晶体管放大器设计的基本原理和步骤·····	(166)
二、斜衰减特性复阻抗匹配网络的综合·····	(168)
三、宽频带场效应管放大器的设计举例·····	(173)
§ 5.6 体效应管电路的模拟与设计·····	(179)
一、宽频带反射型功率放大器的优化设计·····	(179)
二、体效应管振荡器的模拟·····	(181)
§ 5.7 微波混频器的分析·····	(184)
一、大信号分析·····	(184)
二、小信号分析·····	(188)
三、平衡混频器的分析·····	(195)
习题·····	(199)
附录 稀疏矩阵技术 ·····	(201)
主要参考资料 ·····	(215)

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

计算机辅助设计 (Computer-Aided Design 简称 CAD) 是五十年代末发展起来的一门新技术,是计算机应用的一个重要方面。所谓计算机辅助设计(以下简称机助设计),简单地说,就是利用电子计算机帮助设计人员进行设计,是把计算机和设计步骤联系起来的一种设计过程。

长期以来,人们在研究各种微波电路^①时,不断致力于对其设计方法的研究。经典的网络综合法是一种有效的设计方法,它可根据指标要求直接综合出网络结构及其元件值。但是它有很大的局限性,例如只有少数典型网络可以获得逼近函数的解析式,所以经典网络综合法一般只能用于综合象滤波器、阶梯阻抗变换器和定向耦合器等几种典型网络。就是对这些典型网络,经典综合法也只能在一定负载条件下进行,对于随频率呈任意变化的负载它是无法精确处理的,而必须对这种负载作近似等效并经多次综合,才能得到较好的结果,其计算量之大使这种方法在用人工计算时失去实际使用的价值,而必须利用计算机进行辅助综合。此外,在经典综合法中,为简便计算,尚需对其中一些元、器件模型作大量的简化与近似,并对一些分析条件作较多的假设,这会导致实际特性与预期特性有较大的差异。长期以来,许多微波电路的设计(特别是一些宽频带有源电路)不得不过多地借助于实验调试。大家知道,这是一种十分繁琐的凑试方法,它带有一定的盲目性。

随着空间开发和技术的发展,对微波设备的尺寸、能源消耗和可靠性等都提出了严格的要求,从而促进了微波集成电路由微波混合集成电路向微波单片集成电路的发展。由于单片集成电路是将整个电路集成在一块很小的半导体晶片上,设计技术和制造工艺相当复杂,且一经制成就无法调整,因此微波单片集成电路的设计更必须利用计算机。

机助设计是利用计算机的快速计算能力和逻辑判断能力,使它与人的创造性思维能力结合起来。由于在机助设计中人们只要把设计问题用数学模型来描述,并将设计过程编制成程序,具体计算可由计算机自动执行,所以设计者可采用较精确的元、器件模型,较全面地考虑各种寄生参量及工作条件的影响和采用较严格的分析方法,使设计问题的数学描述能较精确地反映电路的实际情况。一旦设计问题已归结为一个数学问题,数学上的一切成果便可充分利用。而对于一个数学问题(这里指微波电路设计中所遇到的数学问题)无论它多么繁难复杂,电子计算机凭它数百万万倍超逾人工的高速计算能力和判断能力,会有条不紊地按照人们规定的方法进行运算,能在短时间内给出设计结果,并能实现多种设计方案比较,择优选取最好的方案和对电路进行最优化设计。因此,自五十年代末提出机助设计方法以后,它便很快应用于微波电路的设计,并得到很大的发展。至今,微波电路的机助设计已成为微波技术的一个重要内容。

^①术语“电路”和“网络”在本书中含义相同,可以互用。

微波电路机助设计的内容有一个发展过程。早期的机助设计只是利用计算机的精确而又快速的计算能力,解决一些复杂的计算问题(例如网络综合设计中的一些计算问题)。随着计算技术、器件模型技术和精确的自动化测试技术的发展,使原先只能用近似模型表示的一些器件(如各种微波二极管、晶体管、环流器等),可以用实际测量中获得的精确模型来表示,从而使计算机能精确地模拟各种微波电路并进行自动分析。通过人和计算机的相互作用,设计者能方便地改变电路参数,进行各种模拟试验。这时,计算机不再仅是一种计算工具,而已成为设计者的“电子自动试验台”或“数值实验室”。人们可以利用它试验各种设计思想,直到电路满足预定的特性。后来,把最优化技术与自动分析结合起来,又促使机助设计进一步发展,使计算机能根据分析结果自动修改电路元件参数,从而使电路性能达到最优,使机助设计达到更高的阶段。至今,微波电路 CAD 的内容已包括对微波电路的各种机助分析(如频域分析、时域分析、灵敏度分析和容差分析等)和各种最优化设计(频域特性最优化、时域特性最优化、灵敏度最小化和容差最优化设计等)。

毫无疑问,微波电路的机助设计对整个微波技术的发展起着极重要的作用,它不仅为各种微波电路提供了一种快速、有效的设计方法,而且使广大的微波工程技术人员摆脱了繁重的实验调试工作,使他们有更多的精力集中于新理论和新设计方法的研究,其意义是十分深远的。

§ 1.2 机助设计的基本方法和特点

设计一个微波电路,使它满足规定的性能指标,这个问题是属于微波电路的综合问题。因此,用计算机进行微波电路的辅助设计,实质上就是用计算机进行微波电路的综合。

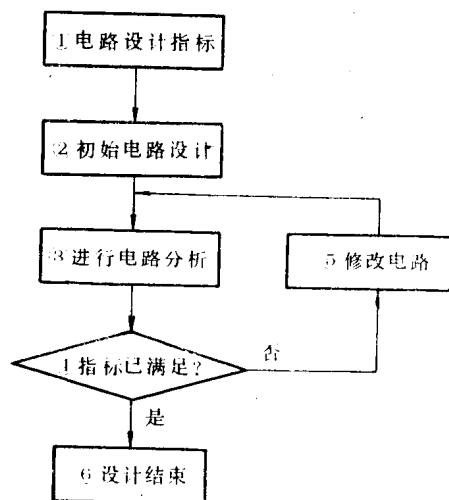


图 1-2-1 机助设计流程图

在计算机上进行电路综合通常采用迭代法。其基本原理可用图 1-2-1 说明。首先,设计者根据任务要求考虑电路的设计方案,规定电路的设计指标;设计者根据设计指标进行初步设计,确定初始电路(即初步确定电路的结构形式及元件的大致数值);然后将这个初始电路由计算机进行分析,计算出电路的各种特性指标,并将其结果与规定的电路指标(即设计指标)进行比较,判断其是否满足要求(即误差是否小于容许值)。若指标没有满足,则进行电路修改(即改变电路中有关元件的数值或电路结构),然后再由计算机对修改后的电路进行分析,并对结果重新进行比较。上述过程反复进行,直至计算的电路特性完全满足规定的

指标或不再能改进为止。

由此可见,机助设计的方法并不深奥难懂。这里所说的迭代法实质上是一种反复试探逐步逼近的方法,这种方法早为大家所熟知。只是由于计算机的运算速度很快,才使这种简单而平凡的方法显示出它惊人的效果。

从机助设计的过程可清楚地看到,整个设计工作是由人和计算机合作完成。更确切地说,是计算机辅助人完成了设计工作。根据计算机在设计中的不同辅助程度,目前对机助设计可分成几种不同的等级。如果在图 1-2-1 中,除③框由计算机完成外,其余各框都由人完成,即计算机仅辅助人进行了电路特性的分析工作,则我们称之为机助分析(Computer-Aided Analysis,简称 CAA),这时的机助设计程序实质上是个电路分析程序。如果在图 1-2-1 中,除①、②两框由人完成外,其余各框均由计算机完成,则称之为机助设计,即 CAD。这时的机助设计程序通常主要由分析程序和最优化程序组成。如果在图 1-2-1 中,除①框外,所有其余各框全部由计算机完成,则称为自动化设计。自动化设计是一种更高级的优化设计。在这种设计中,虽然全部设计工作都由计算机完成,但是计算机是按照人编写的程序进行工作的,或者说是人在人指导下完成设计任务的,因此从这个意义上讲,计算机还是辅助人进行设计工作,故自动化设计仍然属于机助设计的一种形式。

机助设计与传统设计相比,具有下列主要特点:

(1) 设计质量高。

机助设计在大多数情况下能使设计的电路同时满足所要求的各项性能指标。对于一般电路,通常有多种指标要求,而在某些指标之间可能是互相矛盾或相互制约的。例如微波晶体管(或场效应管)放大器,由于管子放大倍数是随频率的增高而逐渐减小,若同时要求增益和输入驻波比都很平坦就有一定矛盾。因为减小低端频率的增益在微波频段通常是由增大其反射信号获得的(当用无耗匹配网络时)。面对这种情况,机助设计能设法在各项指标间找出折衷方案,从而使各项指标都得到较好的满足。

(2) 设计速度快。

在计算机上进行电路分析只需要实际电路的数学模型,而并不要求有相应的实物。就是在没有优化程序的情况下,我们亦可利用分析程序和人工修改方式来模拟人对实际电路的调试。由于计算机的运算速度很快,从修改电路元件到给出分析结果,一般只需几十秒至几分钟的时间。若一个电路的设计要反复修改几十次,其设计周期也不过若干小时。而用传统设计法在实物上进行实验调试,往往需要长得多的时间(包括实验时间,修改电路的加工时间等)。

(3) 能完成传统设计难以完成和无法完成的任务。

由于人工计算难以对电路进行灵敏度计算和容差分析,设计者不可能规定元件容差和加工公差的合理数值,结果往往不是因规定公差过小而造成加工困难,使制造成本增加,便是因容差太大致使有源器件互换性差,电路性能不稳定,产品合格率低。利用计算机辅助设计,便于对电路进行灵敏度计算、容差分析和模拟故障分析,从而大大提高电路的合格率和可靠性。

(4) 节省电路研制过程中的实验器材和加工量,提高了经济效益。

以上是机助设计的主要优点。当然,事物总是一分为二的,机助设计亦有它的缺点。主要是:准备工作周折费神(需要编写程序与调试程序),稍有疏忽可能铸成大错;此外,机助设计不能保证迭代过程收敛于最佳电路,即用机助设计得到的结果往往是局部最优而并非全局最优。

§ 1.3 程序设计中的几个主要问题

计算机只能进行算术运算和逻辑运算。它之所以能完成各种复杂问题的分析计算和优化设计,是因为人们已经把这些问题准确地归结为一个能被计算机执行的数学问题。要把一个具体的设计任务转变成计算机能执行的数学问题,必须解决模型、算法和程序编制三个主要问题。

一、微波元、器件的数学模型

由计算机分析得到的电路特性并不能保证是电路的预期特性,而只是电路数学模型的特性。要使分析的特性能准确地反映电路的预期特性,必须使电路的数学模型能精确地反映实际电路的工作情况。因此,电路的数学模型在机助设计中是一个十分重要的问题,机助设计者对此必须有明确、深刻的认识。

任何一个微波电路都是由一些微波元件和器件组成,要建立电路的数学模型,首先要建立元、器件的数学模型。对模型的基本要求一般可归纳为四个字:准确、简单。首先是准确。如果电路的数学模型不能准确反映实际电路的特性,那么基于这个模型的分析与设计其结果必然是不准确的。其次是简单。因为复杂的数学模型不仅会使问题复杂化,而且会导致计算时间的增加和占用更多的内存空间。但是,简单的前提是准确,要求在保证必要的精确度的前提下简化模型。模型的准确与简单通常是有矛盾的,在实际问题中需根据设计要求,两者兼顾、折衷考虑。一般可采用下述方法来确定元、器件合适的等效电路模型:先从一个比实际需要更精确的等效电路模型出发,在计算机上分析其特性,然后忽略那些对特性影响较小的等效元件,从而得到保证一定精度又较简单的模型。

建立元、器件模型的方法常用的有两种,一是用理论分析的方法,二是用实验方法。对于一些结构简单、规则、均匀的微波元件,用理论分析方法可建立起比较精确的数学模型。其中除一些常用元件已有现成的数学模型可以直接利用外,其它元件模型的建立一般涉及电磁场边值问题的求解。对于一些结构复杂或不规则、不均匀的元件以及大多数有源器件,用理论分析方法建立精确的数学模型是十分困难的,有时甚至是不可能的。其原因可能是,这些元件的边界条件十分复杂,难以精确表示;也可能是由于对器件的某些物理本质还缺乏充分认识,或者由于生产制造中的某些因素使实际的元、器件特性有很大的离散性,难以用理论方法统一分析;此外,一般有源器件是非线性的,它的特性与具体工作条件有关。所有这些都为用理论方法建立模型造成困难。实践证明,对于这类元、器件用实验方法建立模型是十分有效的,它往往要比由理论方法建立的模型精确得多,因为后者通常需作不同程度的简化,或忽略一些不易分析的因素。近几年来,由于高精度自动化测量技术的发展,一般倾向于用测量值来表征有源器件和一些较为复杂或不均匀、不规则的无源元件。

用实验方法建立元、器件模型的基本方法是把元、器件作为一个网络,用测量方法确定它的网络参数并用它作为器件模型。由于在微波频段 S 参数比其它网络参数易于测试,所以一般都用 S 参数表征元、器件的特性。 S 参数的测量通常在有计算机控制的自动网络分析系统上进行。由于它能消除测试系统硬件造成的误差,其结果相当精确。也正因为

计算机辅助测量有较高的精度和能进行各种数据处理,机助测量在微波电路机助设计中的地位正日趋重要。

最后需要说明,微波电路中的元件种类十分繁多,它们的结构都随所用传输线的不同而有差异。例如有波导、同轴线元件,带状线和微带线元件以及其它一些传输线元件等。常见的有波导膜片、销钉、耦合孔、阶梯,同轴和微带线的间隙、拐角、各种接头、传输线段和各种耦合线节等。其中大多数元件的数学模型(或等效电路模型)需要通过求解电磁场的边值问题才能获得。研究这些元件模型显然已超出本书的范围,它们的等效电路读者可从“微波网络”及有关书籍中找到,这里不再重复。本书中所涉及的只是一些基本元件,如电阻、电容、电感、变压器、传输线和耦合传输线等,因为大多数微波元件的等效电路可认为是由这些基本元件所组成。这些基本元件的数学模型读者都已熟知,为了应用方便,将它们汇列成表,分别在有关章节给出。对于微波有源器件的模型,将集中在第五章中介绍。

二、分析与计算方法的选择

元、器件数学模型建立后,就可根据电路的拓扑结构采用合适的分析方法,建立整个电路的数学模型。例如,对线性微波电路的频域分析,在机助设计中常用的方法有传递矩阵法、节点导纳矩阵法、散射矩阵法等。其中传递矩阵法适用于分析由二端口元件组成的级联、分支和并联电路或 $2n$ 端口元件组成的级联电路;节点导纳矩阵法和散射矩阵法可以分析由任意端口元件任意连接组成的电路。对于同一电路,使用不同的分析方法可得到不同形式的电路模型(即电路方程),从而导致采用不同的计算方法,所需的计算量和内存容量也不一样。因此,根据电路情况选择合适的分析方法是机助设计中的一个重要问题。

在建立模型过程中,或在模型建立后的求解过程中,必须时刻注意选择合适的数值计算方法,力求做到既要保证计算精度又要提高计算效率。例如,选主元的高斯消去法和LU分解法都是求解线性代数方程组的有效算法;利用稀疏矩阵技术和采用消去内部端口(或节点)的方法都可加快求解方程组的速度和提高计算效率。提高计算速度的另一途径是注意计算中数字运算的特点,在计算机中作四则运算时,加减最快,乘法次之,除法最慢。一般乘、除运算要比加、减运算的时间长十倍左右,因此选择计算方法应尽量减少乘、除运算。此外,在优化设计中,目标函数的类型和优化方法的选择都直接影响优化设计的效果。

分析方法和计算方法的选择往往是机助设计中最能体现人的主观能动作用的环节,它直接影响程序的功能和效率,是机助设计能否得到正确、满意结果的关键。通常,评价所选计算方法优劣的标准是:计算量的大小、存贮量的多少和算法的逻辑结构是否简单等。

三、程序的编制

人们利用计算机进行辅助设计是通过程序来实现的,因此编写程序是机助设计中的一个很重要的环节。程序的编写通常分两步进行。第一步是将整个设计问题分解为若干较小的部分,并作出其框图。对于较复杂的问题,在作出框图后,应反复按框图中的计算

步骤和流向把自己设想成计算机去顺序地执行几遍,检查其中是否有错误、遗漏或多余的地方,最后确定一个正确的框图。对于较简单的问题,框图设计这一步可以省去。第二步是根据框图用算法语言编写源程序,常用的算法语言有 FORTRAN, ALGOL 和 BASIC 等,其中以 FORTRAN 较为常用,因此本书中用这种语言编写程序。为了提高程序质量,在编写时应综合考虑以下一些因素:

(1) 节省存贮单元和减少运算时间;

(2) 合理地组织输入、输出,使原始数据的准备不易出错,输出结果便于阅读和复制,输出量应适宜;

(3) 总体结构要合理安排,既要便于扩充和组织其它程序,又要便于编写和调试;

(4) 程序使用应方便,以利于推广。

上述各种因素有时可能会发生矛盾;这时应根据设计任务的性质、要求和所用机器的具体情况,抓住主要矛盾,权衡利弊,合理解决。

规模较大的程序编写是比较复杂费时的,稍有疏忽便会造成错误。经验证明,程序的失败往往是由于对整个计算过程缺乏周密细致的分析和考虑。只有对所采用的分析方法和计算方法彻底理解,对分析计算中的每个过程作周密细致的考虑和充分估计计算过程中可能出现的各种情况并采取相应的措施,才能编出一个正确的程序。此外,算法语言掌握的熟练程度也是编写好程序的一个重要因素。对于一个复杂程序,通常需要经过多次反复调试和修改,才能获得满意的结果。

机助设计程序的类型,一般可分专用程序和通用程序两种。专用程序是指只能用于某种固定电路结构的分析或设计的程序,而通用程序则通常是指程序能分析或设计由使用者定义的电路,即程序具有一定的通用性,能处理一定类型的各种电路结构。由于通用程序要处理各种不同的电路结构,满足不同用户的各种要求,因此程序比较复杂、庞大,编写比较困难。其优点是,一旦编制成功就能为许多用户使用,只要一个程序就能解决许多种电路的分析或设计问题,其用途较大。但是,对于那些要经常反复进行的分析或设计问题,宜编成专用程序。这样程序比较简单,又可针对具体问题采用一些高效率的算法,从而可减少运算时间和存贮空间,提高设计效率,降低设计成本。总之,专用程序和通用程序各有其优缺点,在实际中应根据任务性质和具体情况决定编制程序的类型和规模。

第二章 微波电路的机助分析方法

§ 2.1 引言

机助设计的基础是机助分析。对于绝大多数微波电路来说,其机助设计过程实质上是一个反复修改电路参数和反复分析电路特性的过程。因此,机助设计的一个重要问题是采用高效率的电路分析方法。在一般最优化设计中,为获得电路的最优信息,分析子程序往往要被调用数百次,甚至数千次。如果分析方法不好,每次分析计算就要花费较多的时间。这样,经数百、数千次计算后,其累积数字就相当可观了。所以采用高效率的分析方法是决定机助设计效率的关键。

矩阵运算很适合于计算机计算,因此机助设计中一般采用矩阵分析法。此外,还有一个重要原因是,某些微波元、器件很难从纯理论研究中建立精确的数学模型,而矩阵分析法把它们作为网络处理,直接可用测量得来的网络参数模拟这些元、器件。由于元、器件的网络参数能在实际使用的条件下进行测量,所以这样建立起来的模型是相当精确的。

任何一个微波电路都是由一些微波元、器件和微波传输线连接组成。在不涉及微波元、器件内部的详细物理机理时,微波元、器件的特性可用其等效电路来描述;连接它们的微波传输线则可等效成双导线传输线。因此,微波电路同样可用电路理论来分析。也正因为如此,微波电路的机助分析是电子线路机助分析的发展。目前广泛应用的线性微波电路机助分析方法主要有传递矩阵法、节点导纳矩阵法和散射矩阵法。本章将分别对这三种方法进行讨论。

§ 2.2 传递矩阵法

传递矩阵^①法是目前微波电路机助分析中应用最广的一种方法,它能用于二端口电路和 $2n$ (n 为正整数)端口电路的分析。

一、二端口电路的分析

众所周知,对于二端口线性网络(参考图 2-2-1),若设 $\dot{V}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_2$ 分别为输入和输出端的电压、电流,当用其输出量表示其输入量时,则得其传递方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2-2-1)$$

其中系数矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2-2-2)$$

^①传递矩阵有些书中称为 $ABCD$ 矩阵、链矩阵、或转移矩阵等,通常用符号 $\mathbf{A}$ 或 $[A]$ 表示

即为二端口网络的传递矩阵。所谓传递矩阵法,是指利用传递矩阵的特性来分析电路,并用其参数来表示电路的各种性能指标。关于传递矩阵的基本性质以及它和网络函数的关

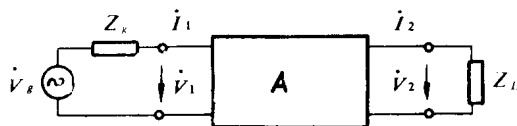


图 2-2-1 二端口网络的传递矩阵表示法

系大家都已熟知,这里不再赘述。为了叙述的方便,仅把常用的几个网络函数归纳如下(式中符号参考图 2-2-1):

输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{A_{11}Z_L + A_{12}}{A_{21}Z_L + A_{22}}$$

输出阻抗

$$Z_{out} = \frac{A_{22}Z_g + A_{12}}{A_{21}Z_g + A_{11}}$$

输入端电压反射系数

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_g^*}{Z_{in} + Z_g}$$

输出端电压反射系数

$$\Gamma_{out} = \frac{Z_{out} - Z_L^*}{Z_{out} + Z_L}$$

电压驻波比

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

电压传输系数

$$T = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_g} = \frac{Z_L}{A_{11}Z_L + A_{12} + A_{21}Z_gZ_L + A_{22}Z_g}$$

传输增益

$$G = 10 \lg \frac{4 \operatorname{Re}(Z_g) \operatorname{Re}(Z_L)}{|Z_L|^2} |T|^2$$

传输相移

$$\Phi = -\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}(T)}{\operatorname{Re}(T)} \right)$$

(2-2-3)

其中 Z_g^* 、 Z_L^* 分别为 Z_g 、 Z_L 的共轭值, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 和 $\operatorname{Im}(\cdot)$ 分别为 $(\cdot)$ 的实部与虚部。

传递矩阵法分析电路的基本原理相当简单,只要把电路的各个元件都用其 $\mathbf{A}$ 矩阵表示,然后根据电路各元件的连接情况,利用矩阵运算法则求出整个电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵。一旦整个电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵已知,便可根据式 (2-2-3) 求出电路的各种特性参数,如输入、输出阻抗,输入、输出驻波比,传输增益(或衰减)以及传输相移等。利用这一方法可方便地分析由二端口网络组成的级联、分支和并联电路,现分述如下:

1. 简单级联电路的分析

这里所说的简单级联电路是指不含有分支和并联支路的级联电路,如图 2-2-2 所示。图中 A_1 、 A_2 、 $\dots$ 、 A_n 分别表示对应二端口元件的 A 矩阵。在计算机上分析时,这种简

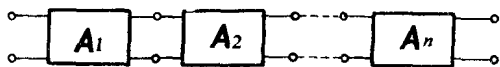


图 2-2-2 简单级联电路

单级联电路可用依次排列的元件标识符清单说明(元件标识符是用于标识元件的符号,它可以是数字也可以是字母,或者是它们的组合)。在分析时,程序从清单顶部开始对标识符逐个进行检查,首先根据第一个元件标识符的类型和元件值自动形成第一个元件的传递矩阵 A_1 ;然后再检查第二个标识符并形成该元件的传递矩阵 A_2 ,并把 A_1 、 A_2 相乘,得出第一和第二两个元件的 A 矩阵。然后再检查第三个标识符并形成 A_3 ,再将 A_3 与前两元件的 A 矩阵相乘。如此继续下去,直至最后一个元件计算完毕为止。这样便得到整个级联电路的传递矩阵,它可表示为

$$A = \prod_{k=1}^n A_k \quad (2-2-4)$$

利用上述方法可分析由二端口元件级联组成的阻抗变换器、滤波器、PIN 管电调衰减器、移相器和晶体管放大器等电路。

2. 分支电路的分析

分支电路可分串联型和并联型两种,它们分别如图 2-2-3(a) 和 (b) 所示。其中图 (a) 为串联型,图 (b) 为并联型。在图 2-2-3 中, A_1 、 $\dots$ 、 A_n 表示主传输线中各元、器件的 A 矩阵; A_{s1} 、 $\dots$ 、 A_{sm} 和 A_{p1} 、 $\dots$ 、 A_{pn} 分别表示串联分支和并联分支中各元、器的 A 矩阵; Z_{in} 为分支支路的输入阻抗。

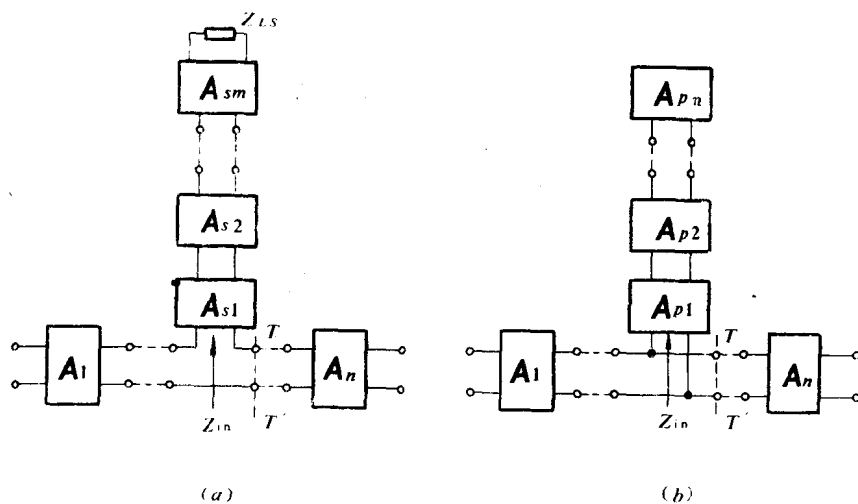


图 2-2-3 串联型和并联型分支电路

对于串联型分支电路,先按简单级联电路分析法,求出从输入端至分支接头处这部分电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵,并令其为 $\mathbf{A}_k$ 。然后再按简单级联电路那样处理分支支路,计算出支路的 $\mathbf{A}$ 矩阵,并从中求出支路的输入阻抗。如果串联支路的 $\mathbf{A}$ 矩阵为

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} A_{11i} & A_{12i} \\ A_{21i} & A_{22i} \end{bmatrix},$$

串联支路的负载阻抗为 Z_{Li} , 则串联支路的输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{A_{11i}Z_{Li} + A_{12i}}{A_{21i}Z_{Li} + A_{22i}}$$

然后再形成 Z_{in} 的 $\mathbf{A}$ 矩阵为

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & Z_{in} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

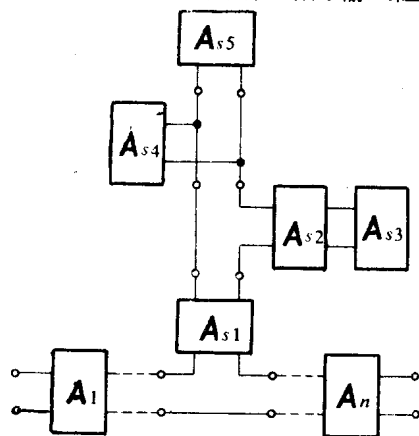


图 2-2-4 多重分支电路

并把 $\mathbf{A}_k$ 矩阵与 $\mathbf{A}_i$ 矩阵相乘,得到参考面 $T-T'$ 以左电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵 $\mathbf{A}_T$ 。然后再按简单级联电路那样将 $\mathbf{A}_T$ 矩阵与 $T-T'$ 参考面以右电路的各元件 $\mathbf{A}$ 矩阵相乘,最后得到整个电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵。对于并联型分支,可采用类似的分析方法。

显然,上述方法可用于分析多个分支和多重分支的电路。所谓多重分支电路是指分支上再有分支的电路,如图 2-2-4 所示。这种由多个分支和多重分支组成的电路从主传输线向外延伸,形状像树枝一样,所以有时将这种电路称为“树”结构电路。

3. 并联电路的分析

并联电路的形式如图 2-2-5 所示。对这种电路进行分析时,先分别算出并联支路 1 和 2 的 $\mathbf{A}$ 矩阵 $\mathbf{A}_p^{(1)}$ 和 $\mathbf{A}_p^{(2)}$, 它们分别为

$$\mathbf{A}_p^{(1)} = \prod_{k=1}^m \mathbf{A}_{pk}^{(1)}$$

$$\mathbf{A}_p^{(2)} = \prod_{k=1}^n \mathbf{A}_{pk}^{(2)}$$

然后将它们转换成对应的导纳矩阵 $\mathbf{Y}_p^{(1)}$ 和 $\mathbf{Y}_p^{(2)}$, 相加后得到合成的 $\mathbf{Y}_p$ 矩阵。再将 $\mathbf{Y}_p$ 矩阵转换成 $\mathbf{A}_p$ 矩阵,于是可得图 2-2-5 所示的整个并联电路的 $\mathbf{A}$ 矩阵为

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_k \mathbf{A}_p \mathbf{A}_j$$

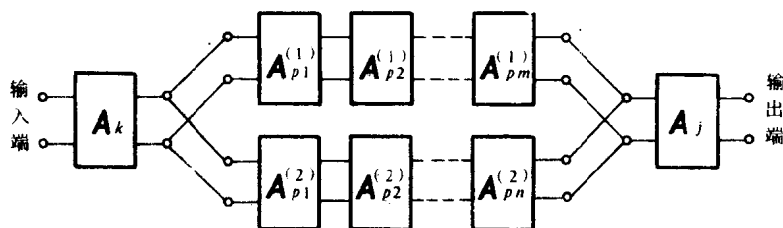


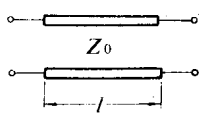
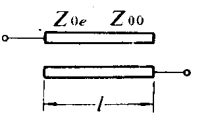
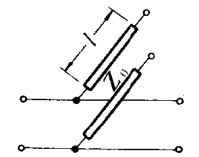
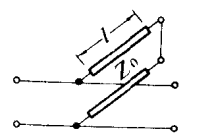
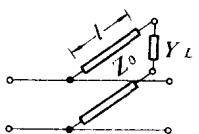
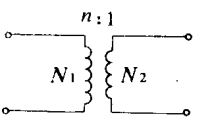
图 2-2-5 并联电路

显然,用上述方法同样可处理多个并联电路的级联和多重并联电路。由于并联电路的计算与分支电路的计算可分别进行处理,因此传递矩阵法可以处理分支上有并联电路

和并联电路上再有分支的拓扑结构。从理论上讲,分支和并联电路的个数以及它们的组合可以是任意的,所以传递矩阵法基本上能分析实际中所能遇到的由二端口元件组成的任何线性电路。由于这些电路包含了各种分支和并联连接,在计算机上分析时为使机器能识别电路,除需定义元件标识符对元件类型说明外,还需定义各种连接标识符,用以说明电路的各种连接方式。

微波电路中一些常用二端口网络的 A 矩阵列于表 2-1。对于那些无法直接由理论分析导出其 A 参数的二端口元、器件,可用测量方法先测出其 S 参数,然后按表 2-2 转换成 A 参数。

表 2-1 一些常用二端口网络的 A 矩阵

名 称	电 路 图	A 矩 阵	备 注
有 耗 传 输 线		$\begin{bmatrix} \text{ch } \gamma l & Z_0 \text{ sh } \gamma l \\ \frac{\text{sh } \gamma l}{Z_0} & \text{ch } \gamma l \end{bmatrix}$	$\gamma = \alpha + j\beta$ α 为单位长度衰减 β 为相移常数
平 行 耦 合 线		$\begin{bmatrix} \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \text{ch } \gamma l & \frac{4Z_{0e}Z_{0o} \text{ch } \gamma l + (Z_{0e} - Z_{0o})^2 \text{sh } \gamma l}{2(Z_{0e} - Z_{0o}) \text{sh } \gamma l} \\ \frac{2 \text{sh } \gamma l}{Z_{0e} - Z_{0o}} & \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \text{ch } \gamma l \end{bmatrix}$	
并联开路 短 截 线		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_0 \text{cth } \gamma l} & 1 \end{bmatrix}$	Z_0 为短截线特性阻抗
并联短路 短 截 线		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_0 \text{th } \gamma l} & 1 \end{bmatrix}$	Z_0 为短截线的特性阻抗
并联有载 短 截 线		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{Y_L + Y_0 \text{th } \gamma l}{1 + Y_L Z_0 \text{th } \gamma l} & 1 \end{bmatrix}$	Y_L 为负载导纳 $Y_0 = 1/Z_0$
理 想 变 压 器		$\begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{bmatrix}$	$n = \frac{N_1}{N_2}$