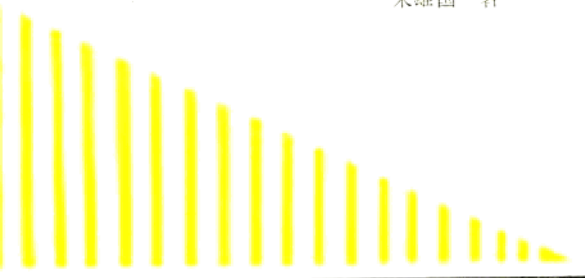
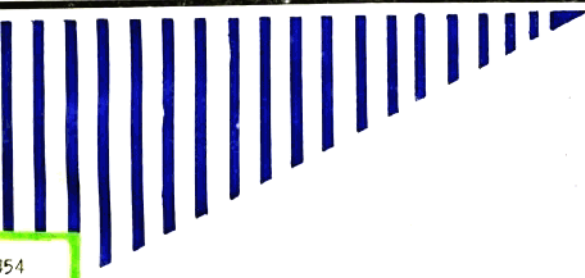


朱雄国 著



微波反馈理论及其应用



154

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书系我国“信号、电路与系统”学科第一位博士、电子科技大学副教授朱雄国的遗作。他创造性地提出了一种新的、完整的微波反馈电路的分析与设计理论，填补了目前国内外在这个领域中之不足。作者提出了以端口描述微波电路的方法，定义了描述微波电路的不定散射矩阵，并描述了其基本性质，提出了分析微波电路的新方法——“元件插入法”，建立了单环及多环反馈电路理论，发展了一种微波反馈电路反馈优化设计的CAD方法并给出设计实例。

附录中收集了其他九篇论文的题目、提要及出处，以便读者查阅。

本书可供从事微波电路与系统工作的教师、科技工作者、研究生阅读、参考。

微波反馈理论及其应用

朱雄国 著

电子科技大学出版社出版发行
中国成都建设北路二段四号
四川省青神县印刷厂印刷

开本 850×1168 $1/32$ 印张 3.9375 字数 102千字

版次 1990年3月第一版 印次 1990年3月第一次印刷

印数 1-1000册

中国标准书号 ISBN 7-81016-226-8/TN·58

(15452·96) 定价：1.70元

感谢 奉献 怀念

本书是我丈夫的遗作……

此书能在我丈夫去世后短短几个月正式出版，首先要感谢大力支持出版此书的电子科技大学的领导、许多为此书出版而奔走呼号的友人、同事、以及电子科技大学出版社的领导和编辑！感谢黄老师为它写序。

在那痛彻肺腑的日子里，面对一堆遗稿，我深深地感到不能让 它 成为一堆废纸，应该出版一本代表他生命的书。其目的首先是以此答谢一直关怀和爱护他及他的家人的领导、导师和全国各地的友人；其次，将他的心血和汗水最后一次奉献给同行，最后一次作一块铺路石，以实践他的遗愿；最后的目的，作为他的妻子以此来永远怀念我的丈夫。

本书的核心部分是作者的博士论文原文，故以博士论文的题目为书名。附录中我收集、列出了其他九篇论文（其中两篇以朱雄国为作者，其余七篇朱雄国为第一作者）的标题、提要及出处，以备同行查阅。

让我和我的家人再次感谢关怀我们的
领导、导师、友人！

愿我的丈夫安息！

陈嘉玉

一九八九年十月
于电子科技大学

序 言

本书作者朱雄国副教授，湖南辰溪人，1966年毕业于成都电讯工程学院遥测遥控专业。1978年考取电子科技大学（原成都电讯工程学院）“信号、电路与系统”学科硕士研究生，在我的指导下从事宽频带微波电路CAD的研究工作。1981年以优异成绩获工学硕士学位。1983年考取电子科技大学“信号、电路与系统”学科的博士研究生，在前任院长、博士生导师顾德仁教授和我的指导下，继续从事宽频带微波电路与系统的理论和设计的研究工作。在此期间我与作者申请了“宽频带大功率固体微波电路研究”的国家自然科学基金。1986年底作者完成了博士论文《微波反馈理论及其应用》，该论文获得了国内同行专家的好评，天津大学校长吴咏诗教授、重庆大学前任校长江泽佳教授、东南大学吴伯修教授等都认为朱雄国的论文是一篇有创造性的高水平论文，填补了目前国内外在这个领域中的不足。1987年3月朱雄国通过了博士学位论文答辩，获得工学博士学位，成为我国“信号、电路与系统”学科第一位博士。在攻读博士期间，朱雄国同志还参与了《宽带匹配网络》和《网络分析与综合导论》两书的编写工作，《有源网络与反馈放大器理论》（美国陈惠开教授）的翻译工作，并在《电子学报》、《通信学报》等刊物上发表了多篇论文。1988年我们完成了国家自然科学基金项目，并荣获1988年度四川省科技进步一等奖。由于他在教学与科研工作中有突出的成绩，1987年12月被电子科技大学电子工程系聘为副教授。但朱雄国同志因长期超负荷工作，积劳成疾，不幸于1989年5月病逝，终年只有45岁。对朱雄国同志的过早去世，我们感到万分悲痛与惋惜！为了使他的研究成果为后续研究者提供前进的基础，我们将他的博士论文整理成册，由电子科技大学出版社出版。

本书主要论述宽频带微波电路的设计理论与计算机辅助设计(CAD)方法。众所周知,微波电路与系统是通信、雷达、航天和资源勘测等一系列高技术应用电子系统的重要部分。近期以来,国内外对微波电路的固体化与集成化的研究十分活跃。但在作者的研究工作以前,对工作于宽频带及引入负反馈条件下的微波集成电路的设计理论及方法尚不成熟,更不系统,仅有一些针对具体电路的处理技术,或经过简化的处理方法。本书提出了较系统的微波电路的设计理论和新颖的设计方法,在复杂微波集成电路的设计方面取得了重要进展。下面扼要地介绍作者有创新意义的工作:

(一)建立了一种新的描述矩阵,即不定散射(S)矩阵。作者突破了传统的以端口描述微波电路的方法,提出了以端子描述的思想。由此定义了描述微波电路的不定 S 矩阵。这种描述方法适合平面结构微波集成电路的特点,并且便于处理电路内部各种可能的连接方式。作者详细论述了不定 S 矩阵的基本性质,利用不定 S 矩阵的等余子式和矩阵的性质,导出了微波有源器件(例如晶体管)三口 S 参数与双口 S 参数的互换关系,这些关系在微波电路分析与设计,特别是微波反馈电路的分析与设计中之甚为有用。

(二)研究了将反馈技术引入微波电路的分析与设计问题,初步建立了基于 S 参数的微波反馈的统一理论。在微波电路中采用反馈技术可减小电路性能离散性,实现宽频带与超宽频带传输特性,降低输入输出驻波比等等。因此自1978年第一篇关于在微波电路中引入反馈以改善宽带性能的报导问世以来,立刻吸引了微波工作者的极大兴趣。但是至今我们还未见到一种适应微波反馈电路分析与设计的较完整的理论。本书作者在这个问题上取得了重大进展。首先,作者以功率波定义了反馈,抛弃了传统反馈理论用电流或电压定义反馈的方式,从而使微波反馈量具有可测性。由此作者导出了环路增益的 S 参数表达式和单环反馈放大器分析与设计的基本表达式,以及一系列新的概念。

(三)基于上述的不定 S 矩阵的描述方法,作者建立了相应的

一般微波电路的CAD方法，叫作“元件插入法”。这种方法 将任意一个微波电路的分析过程看成是在一个“接线板网络”上相继插入电路元件的过程。这种新方法在很大程度上克服了现行采用端口描述法费工费时的缺陷，并大大简化了电路拓扑的输入描述。

这本专著可以说是朱雄国同志一生心血与汗水的结晶，我相信它的出版必为微波电路与系统学科领域的科技发展作出贡献，为社会主义祖国的四化建设作出贡献。朱雄国同志在天之灵也会感到安慰吧！值此成书之际，抱着万分惋惜心情写了以上序言，以志对作者深切的怀念！

黄香毅

1989年40周年国庆前夕

目 录

提 要	(1)
第 1 章 导论	(3)
第 2 章 不定散射矩阵	(7)
2.1 定义及性质	(7)
2.2 回路基不定散射矩阵	(14)
第 3 章 利用不定 S 矩阵的微波电路分析	(19)
3.1 端子封禁变换	(19)
3.2 有源器件的描述	(21)
3.3 微波电路分析的“元件插入法”	(24)
第 4 章 单环微波反馈理论	(32)
4.1 环路增益定义的新观念	(32)
4.2 环路增益的 S 参数表达	(35)
4.3 单环微波反馈放大器分析	(42)
4.4 环路增益的测量	(48)
第 5 章 一般微波反馈理论	(50)
5.1 微波反馈电路的特点与波德理论的困难	(50)
5.2 适用于混合集成的微波反馈计算	(52)
5.3 适用于单片集成微波反馈电路的反馈计算	(56)
第 6 章 微波集成反馈放大器的设计	(59)
6.1 引言	(59)
6.2 微波反馈放大器的反馈优化算法	(59)

6.3 微波(反馈)放大器优化设计程序	
《FEMMIA》简介	(72)
6.4 设计实例	(83)
结语及鸣谢	(107)
附 录	(112)
电路与系统理论的 Hilbert 方法	(112)
不定散射矩阵与等余子式和矩阵	(112)
微波晶体管三口 S 参数与双口 S 参数的互换	(113)
一种新的微波电路分析方法	(113)
一种新的微波反馈理论	(114)
微波集成放大器的一种 CAD 方法	(114)
微波集成电路中的反馈技术	(115)
复数阻抗间宽带匹配网络的一种简单算法	(115)
宽带匹配的简单实频数据算法及应用	
晶体管放大器设计	(116)

提 要

微波集成技术的产生及其迅速发展,导致传统的微波电路分析与设计方法概念性的更新。不仅出现了将经典网络理论引入无源传输系统分析与设计的所谓微波网络分析方法,近年来更出现将它们引入到微波功率产生及放大的有源微波电路分析与设计的尝试,其中特别是作为强有力设计手段的反馈技术;至今,已有一系列利用反馈以改善电路性能的技术性工作见于报道。然而,一种适应于微波集成电路高技术生产环境的微波反馈电路设计理论却尚未得见。

本文将经典网络理论与微波集成电路设计与生产的环境相结合,建立了一种完整的微波反馈理论,以弥补国内外关于微波反馈电路设计理论的不足。本文的基本贡献包括以下四个方面:

(1) 首次提出了微波电路端子描述的思想。

适应微波集成电路主要是以非对称带线及两端或三端有源器件为电路组件的特点,我们突破了传统的以端口描述分析微波电路的方法,提出了端子描述的思想。为此,定义了一种微波网络新的描述矩阵——不定散射矩阵。对不定散射矩阵在微波分析的最一般条件——实频复数归一化下的性质进行了研究,导出了基本性质定理,同时,为适应不定散射矩阵对不同反馈组态分析的需要,给出了回路阻抗基下它的定义、性质及相互转换关系式。

(2) 提出了一种新的微波电路分析方法:“元件插入法”。

这种方法与现有的面向计算机辅助分析的 S 参数分析方法相比,可以简化电路拓扑的描述及输入的人工干预,具有方便、直观的特点;而与借用低频 Y 参数为桥梁的分析方法相比,则可不需要参数的反复转换,从而节省机时,并且具有建立在可测性上的坚实实验基础。因而可以认为这是一种分析微波集成电路的较为理想的方法。

(3) 建立了单环及多环微波反馈电路理论。

我们首先抛弃了传统反馈理论用电流或电压定义反馈的方式，引入了反馈的功率波定义方法，从而使微波反馈量具有了可测性，并由此导出了环路增益的 S 参数表达式，单环放大器分析与设计的基本表达式以及一系列新的概念；由于微波电路的特点，每一个反馈电路在严格意义下都是一种多环结构。为此，将波德理论以必要的改造，建立了分别适合于单片集成与混合集成的回归差的 S 参数表达式。由此便可研究微波反馈电路的各种性能并进行敏感度的分析。

(4) 发展了一种微波反馈电路反馈优化设计的CAD算法。

该算法可根据不同的设计目的，利用反馈来获得匹配、单向化或平坦的增益等。利用这一算法，我们开发了一个适合于各种反馈组态微波集成放大器设计的通用设计程序《FEMMIA》。该程序已在成都电讯工程学院计算中心的VAX-11/780机上运行，取得了数个设计实例，并对其中的两个设计进行了（混合）集成实现。

上述四个方面构成一个完整的微波反馈理论。它可为任何一本关于微波电路的教科书添上新的一章。

该项研究工作得到国家自然科学基金（原中国科学院科学基金）及电子工业部科技司博士点资助经费的支持。

第1章 导 论

近年来，作为微电子工业的一个重要的分支，微波集成电路技术也正以惊人的速度向前发展。由于微波电路与系统在航天、卫星通讯、现代雷达与电子设备等军事及民用电子系统中的重要地位，以及微波有源器件与集成工艺的不断改进，使得这一分支的前景变得引人注目。

随着微波集成工业的异军突起，传统的面向波导及同轴传输线结构的微波电路分析的场解方法对于分析主要是以非对称带线作为传输线的微波集成电路越来越不相适应。将经典的电路理论引入微波传输系统分析的方法，即所谓的“微波网络”理论早已为微波理论工作者所采用^[1-3]。因而随着微波集成技术的发展，特别是单片电路设计的需要，经典电路理论的许多设计技术也必然向微波有源电路的分析与设计方法中渗透。采用反馈技术以改善电路性能和实现具有规定特性的可靠设计，一直是经典电路理论的一个强有力的手段^[3-4]。然而由于传统微波电路形象的影响，直到1976年，在微波电路中引入反馈对于微波工程师们来说还是难于想像的^[5]。基于平面带线及集成工艺的微波集成电路的出现，使得采用反馈技术成为可能。自1978年第一篇关于在微波电路中引入反馈，以改善宽带反射性能的报道问世以来，立刻吸引了微波工程师的极大兴趣。近几年来，相继有不少关于采用反馈技术以实现各类微波功能电路的工作见于报道^[7-14]。这些工作表明，采用反馈可望取得如下的一些效益^[15]：

(1) 减小电路性能对器件参数改变的依赖关系，即低敏感度 (Sensitivity)。这对微波集成电路生产的成品率及工作的稳定性都是至关重要的。

(2) 宽带及超宽带特性。

(3) 低输入、输出驻波比 (VSWR)。

(4) 匹配元件参数集中, 尺寸相对减小, 便于集成。

(5) 改善稳定性 (放大器) 或易于起振 (反馈振荡器)。

微波反馈的上述效益, 表明反馈技术在微波集成电路设计中具有十分重要的意义。但是我们发现, 尽管关于微波反馈技术的应用已有不少的报道, 但关于反馈电路分析与设计的方法却往往都是避而不提, 或仅仅局限于采用低频反馈分析方法的直接沿用, 这就使设计难免带有微波工程师惯于采用的试探法的痕迹。换言之, 至今我们还没有见到一个适应于微波反馈电路分析与设计的完整理论。

微波集成电路, 无论是混合集成 (HMIC) 还是单片集成 (MMIC), 其分析与设计都既不同于传统的波导-同轴线电路, 又不同于低频集成电路。其设计要求: ①面向性能优异的自动网络分析仪测试的实测 S 参量 (CAM); ②面向高速电子计算机和优化数学的计算机分析与计算机辅助设计 (CAA、CAD)。因此, 一个适应于微波电路设计的理论必须是适应上述的高技术设计环境。

本文的目的便是试图建立一种这样的理论。

首先, 我们放弃对微波电路采用端口描述的传统方式, 引入了一种端子描述方法。即对于一般的 n 口微波网络, 引入一种新的 $(n+1)$ 端网络的描述矩阵——不定散射矩阵。这样处理是以下列两点为基础的。其一, 以平面带线及平面固态微波器件为主要构件的微波集成电路, 在结构上使得关于端口的概念变得模糊。对于这种电路, 采用端子描述较之采用端口描述更方便、直观; 其二, 由于对微波电路进行分析与综合的需要, 要求将电路元件中的某些元件 (例如有源器件) 作为“黑箱”描述, 而对另一些元件则要求作为网络拓扑映射的描述 (例如匹配元件)。这种双重性的描述功能正好为不定散射矩阵所具有, 因为它是电路不定导纳矩阵的一种双线性映射。

接着, 利用不定散射矩阵建立了一种适用于一般微波电路

S参数域分析的分析方法——“元件插入法”。在S参数域内直接对微波电路进行分析相对于利用其它低频参数（例如Y参数）作桥梁的分析方法而言，其优越性决不仅限于可减少参数反复转换而带来的计算时间以及精度的损失，更为重要的是S参数是可以由实际微波测量得到的，这就为微波电路的自动分析和设计铺平了道路。在另一方面，与采用端口描述的S参数分析方法相比，利用不定散射参数分析则可以简化电路拓扑描述，减少人工干预。

在一般微波电路描述与分析方法建立之后，我们便可讨论微波反馈电路的分析问题。一般地说，微波反馈电路都应当作为一种多环反馈结构来处理。但是由于简单的反馈拓扑目前仍然是微波电路中主要采用的形式，而对于这种简单反馈电路而言，采用单环分析方法在工程上仍具有很重要的价值。因此我们首先建立了单环微波反馈电路的环路增益理论。为了与直接可测的功率波量相联系，放弃了传统的用电流、电压这两个物理量定义环路增益的方法，直接利用功率波量定义反馈，在此基础上导出了环路增益的S参数表达式，并利用已建立起来的结果，对常用的基本反馈电路——串联与并联微波反馈放大器进行了详细的分析，导出了一系列尚未见于报道的有用的结果及一些新的概念。

对于一般微波反馈电路，波德的数学表达虽然是我们分析的出发点，但由于它要求一张精确的电路图以及该图对应的节点导纳矩阵，因而不能直接应用。利用不定S矩阵与不定导纳矩阵的关系，我们导出了分别适用于混合集成和单片集成的微波反馈电路回归差的表达式，从而可分析微波反馈电路的各种性质以及进行敏感度设计。由于回归差是以S参数表达的，因此就不必依赖一张难于获得的等效电路图，而且也便于利用测量来校核反馈量。

微波反馈电路设计由于需考虑各种因素因而变得不可捉摸。这常常使习惯于采用试探法的微波工程师产生一种对CAD的不信任感；但是，事实恰恰相反，由于上述的复杂性，微波电路CAD已成为微波电路设计的唯一出路。由于微波集成电路的小批量（相对

于低频集成电路)及多样化,因此发展一种通用的软件系统似乎并非是一种最合理的考虑。相反,各种面向用户的专用软件更具有吸引力。我们在上面理论分析的基础上,提出了一种用于反馈电路优化设计的算法。该算法可供工程师根据采用反馈的目的而优化反馈电路的元件值。本文利用该算法设计反馈放大器,开发了一个用于微波集成放大器其中包括各种反馈放大器设计的通用软件《FEMMIA》,经初步使用表明是非常有效的。

微波反馈电路设计的另一特点是几乎无例外的都需要设计匹配网络,这是由于反射本身也是影响微波电路稳定性的一个重要因素。因此,必须在微波反馈电路的设计中引入宽带匹配技术,因为微波反馈电路常常是作宽带或超宽带的应用。但限于本文的宗旨,关于宽带匹配的理论及CAD方法将不在此作讨论。相关的内容可以在我们其它的一些工作中找到。

第2章 不定散射矩阵^[16]

2.1 定义及性质

定义1

设有 n 端线性非时变网络 N (图1), 其归一化到 n 个复数导纳

$$\underline{y} = \text{diag} (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (1)$$

的实频复归一化入射波及反射波矢量为

$$\underline{a} = \frac{1}{2} \underline{g}^{-1/2} [\underline{y} \underline{V} + \underline{I}] \quad (2a)$$

$$\underline{b} = \frac{1}{2} \underline{g}^{-1/2} [\underline{y}^* \underline{V} - \underline{I}] \quad (2b)$$

其中 $\underline{V}$ 、 $\underline{I}$ 分别是端子电压、电流矢量, 而

$$\underline{g} = \frac{1}{2} [\underline{y} + \underline{y}^*] \quad (3)$$

是 $\underline{y}$ 的实部矩阵 ($\underline{y}^*$ 表示 $\underline{y}$ 的厄密矩阵), 则方程

$$\underline{b} = \underline{S}^i \underline{a} \quad (4)$$

的系数矩阵 $\underline{S}^i$ 叫做网络 N 的不定散射矩阵, 或简称为不定 S 矩阵。

由于网络 N 的 n 个端子的电流不是独立的, 它们之间必须满足

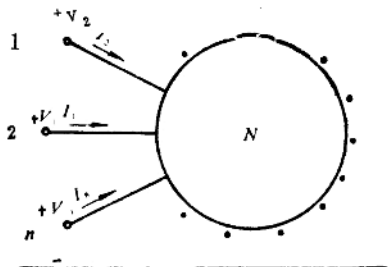


图1 n 端网络及其端子电流、电压参考方向

克希霍夫电流定律的约束, 因此可以预料由式(4)定义的不定S矩阵的 n^2 个元素也不是独立的, 它们必须服从于某种约束关系。对此, 我们有下面的关于不定S矩阵性质的定理。

定理 I 性质定理

一个线性非时变 n 端网络的不定矩S阵 $\underline{S}$, 其元素必满足下列方程

$$\sum_{k=1}^n S'_{kl} (g_k/g_l)^{-1/2} (y_l/y_k)^* = 1, \quad l=1, 2, \dots, n \quad (5a)$$

$$\sum_{l=1}^n S'_{kl} (g_l/g_k)^{1/2} (y_k/y_l)^* = 1, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (5b)$$

为了证明该定理, 我们先引入下面的定义及引理。

定义 2

设 $\underline{S}$ 是网络 N 的不定S矩阵, 定义

$$\underline{S}^r = \underline{\Delta}^{-1/2} \underline{S} \underline{g}^{1/2} \quad (6)$$

由定义1、2, 我们可得

$$\underline{S}^r = (\underline{y} + \underline{Y}_i)^{-1} (\underline{y}^* - \underline{Y}_i) \quad (7)$$

式中 $\underline{Y}_i$ 是网络 N 的不定导纳矩阵。

对于 $\underline{S}^r$ 我们有下面的引理。

引理 1

设 $\underline{Y}_i$ 是一个线性非时变 n 端网络的不定导纳矩阵, $\underline{y}$ 是由式(1)表达的参考导纳矩阵, 则式(7)定义的矩阵 $\underline{S}^r$ 的元素必满足