

微波与射频技术

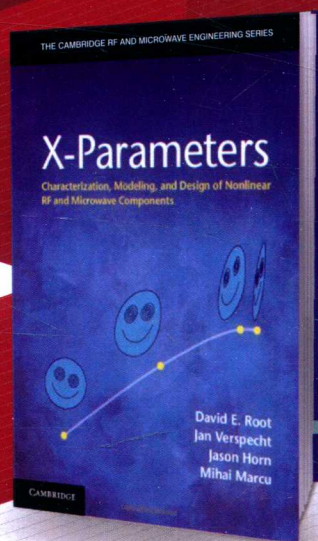
非线性射频和微波器件 表征、建模和设计 ——X参数理论基础

**X-Parameters: Characterization, Modeling, and
Design of Nonlinear RF and Microwave Components**

【美】 David E. Root Jan Verspecht 著
Jason Horn Mihai Marcu

林茂六 苟元潇 卢 鑫 孙金龙 译
林茂六 审校

X-Parameters: Characterization, Modeling,
and Design of Nonlinear RF and Microwave Components



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·微波与射频技术

非线性射频和微波器件表征、建模 和设计——X 参数理论基础

X-Parameters: Characterization, Modeling, and
Design of Nonlinear RF and Microwave Components

[美] David E. Root
Jan Verspecht
Jason Horn
Mihai Marcu



林茂六 苟元潇 卢鑫 孙金龙 译

林茂六 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书由浅入深、系统地介绍了非线性静态与动态 X 参数的概念和原理以及它们的测量、建模和设计应用实例。全书共 6 章。第 1 章对线性 S 参数理论做了简明回顾；第 2、3、4 章系统介绍在大信号单音激励下，静态非线性 X 参数的基本理论、数学形式及参数的物理意义，测量与仿真平台，以及模型参数提取方法和应用实例；第 5 章介绍在大信号双音和多音激励下，静态非线性 X 参数的基本理论、数学形式及参数的物理意义；第 6 章介绍如何将静态非线性 X 参数扩展到动态非线性 X 参数理论，及其实验方案、模型记忆、辨识实例和有效性检验手段。

本书适合电气工程高年级本科生或研究生用做教材，或作为从事 RF（射频）和微波工程前沿研究的研发人员、工程师、科学家的参考书。

X-Parameters: Characterization, Modeling, and Design of Nonlinear RF and Microwave Component 9780521193238 by David E. Root, Jan Verspecht, Jason Horn, Mihai Marcu first published by Cambridge University Press 2013. All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

Copyright © Cambridge University Press & Publishing House of Electronics Industry 2016.

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

This edition is authorized for sale in China Mainland.

本书原版由 Cambridge University Press 出版。

本书中文简体翻译版由 Cambridge University Press 授权电子工业出版社。

Copyright © Cambridge University Press 和电子工业出版社 2016。

未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2015-6971

图书在版编目（CIP）数据

非线性射频和微波器件表征、建模和设计：X 参数理论基础/（美）鲁特（Root, D. E.）等著；林茂六等译。—北京：电子工业出版社，2016.1

（经典译丛·微波与射频技术）

书名原文：X-Parameters: Characterization, Modeling, and Design of Nonlinear RF and Microwave Components
ISBN 978-7-121-27602-6

I. ①非… II. ①鲁… ②林… III. ①非线性—射频—介绍 ②微波元件—程序设计 IV. ①O45 ②TN61
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 277604 号

策划编辑：杨 博

责任编辑：杨 博

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：三河市皇庄路通装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：13.5 字数：346 千字

版 次：2016 年 1 月第 1 版

印 次：2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

A Letter to Chinese Reader

Dear readers,

My co-authors and I highly appreciate your interest in our book on X-parameters. We are honoured by the fact that the book is now available in Mandarin. The short term goal of this book is to demystify X-parameter technology and to introduce its use to the RF and microwave engineers.

But even more important is the goal on the long term. We hope that this book inspires you to perform further research in the field of measurements and modelling for high-frequency active devices.

It has been a long journey from inventing X-parameters to having the book on the topic published in the People's Republic of China. I presented the first paper on the technology in October 1996 at the 4th International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeterwave Circuits (Duisburg, Germany). This milestone paper was entitled "Black Box Modelling of Power Transistors in the Frequency Domain". It introduced the necessary theory, hardware and software to make X-parameters work: a theory on linearization coefficients for multi-harmonic spectral mapping operators, a hardware setup with the capability to measure the phase of harmonics and to excite the device-under-test simultaneously with large signal as well as small signal tones (now available as the NVNA option for the PNA-X of Keysight Technologies), and a software link to run the resulting behavioural model in a harmonic balance simulator environment (now available in the Advanced Design System simulator available from Keysight Technologies). Several conference and journal papers soon followed. In 2001 I was offered the opportunity to present this work at the Harbin Institute of Technology (HIT). I was received with the utmost honour by Prof. Lin Mao Liu and his colleagues and I have fond memories from my trip to the People's Republic of China. A couple of years later my co-authors, their colleagues at Agilent Technologies and myself started development efforts towards a commercial product. In 2008 the technology was commercially introduced by Agilent Technologies under the name "X-parameters" (registered trademark of Keysight Technologies). By that time information on the

technology was scattered across many different scientific papers. Throughout the years many different naming conventions and mathematical notations had been used to explain and even extend the technology. As such there was a need for a book as a single complete, actual and coherent source of information. The book was first published in 2013. In 2015 we were honoured to learn that there was a demand to translate the book into Mandarin. We are very grateful to Prof. Lin Mao Liu for providing help with this effort and for finding and correcting a couple of minor errors that went undetected in the original English edition.

We wish you a great reading and a very successful continuation of your career in electrical engineering!

Dr. Jan Verspecht, IEEE Fellow

致中国读者的一封信

亲爱的读者：

欣闻 X 参数一书的中文版即将出版，我们深感荣幸。本人及合著同仁借此机会，对关心此书的各位读者致以衷心的感谢。

编撰此书的最初目的旨在向射频和微波工程师揭开 X 参数技术的神秘面纱并介绍其功能。但是我们更看重的长远目标是：希望此书能够激发读者在高频有源器件的测量和建模领域中创造出更多的研究成果。

从发明 X 参数到在中国用中文出版此书经历了漫长的过程。本人于 1996 年 10 月在德国杜伊斯堡举行的第四届集成非线性微波与毫米波电路国际研讨会上发表了第一篇关于该技术的论文。这篇里程碑式的论文的题目是 *Black Box Modelling of Power Transistors in the Frequency Domain*。该论文提出了进行 X 参数研究时所必要的理论、硬件和软件：关于多谐波频谱映射算子的线性化系数理论；一种具有能同时用大信号和小信号激励被测器件和测量谐波相位能力的硬件装置 [现在作为是德科技有限公司（2014 年成立于原安捷伦科技电子测量事业部，现独立运营）的 PNA-X 的 NVNA 选件]；在谐波平衡仿真环境下运行得到最终行为模型的软件链接 [现可从是德科技有限公司的先进设计系统（ADS）仿真器中获得]。不久之后，发表了一系列的会议和期刊论文。

2001 年，我非常荣幸地收到了哈尔滨工业大学（HIT）林茂六教授及其同仁的访问邀请。这为我提供了一次在哈尔滨工业大学介绍该成果的机会。那次中国之旅给我留下了美好的回忆。

几年之后，本书的合著者和他们在安捷伦科技公司的同事以及本人开始致力于商用产品开发。2008 年，安捷伦科技有限公司以“X 参数”命名（现为是德科技有限公司注册商标）将这项技术做商业化推介。此时，有关这项技术的信息发表在多个不同的科技论文中。

多年来，许多不同的命名惯例和数学符号被用于解释甚至扩充这项技术。鉴于此，需要一本书作为唯一完整的、准确的、条理清晰的信息源头。本书英文版于 2013 年出版。2015 年，我们很荣幸地获悉，有把这本书翻译成中文的需求。

我们对林茂六教授为此所做出的努力以及他发现并更正了在英文原版书中被疏忽的若干小错误，深表感激。

祝愿你们阅读愉快并在电气工程中更成功地谱写自己的职业生涯。

Jan Verspecht 博士，IEEE 会士

译者序

正像 20 世纪 70 年代 S 参数曾使线性射频和微波电路工程发生革命性的变革一样，今天 X 参数将使非线性射频和微波电路工程设计发生更为深刻的革命性变革。

本书是英国剑桥大学出版社出版的射频和微波工程系列图书之一。

本书的撰稿人共 4 位。他们都是原安捷伦科技有限公司 Worldwide Process and Technology 中心的科学家，David E. Root 和 Jan Verspecht 又都是 IEEE 会士，是非线性射频和微波元件及其子系统的新规范——X 参数的原创发明者。这一发明从理念提出、模型建立、测量平台构建、模型有效性检验、工程应用到专著出版经历了 17 年。中国有句古语叫“十年磨一剑”。而 X 参数的发明可谓“二十年磨一剑”！

全书共 6 章。第 1 章对线性 S 参数理论进行简明回顾。第 2 章至第 4 章由浅入深、系统地介绍在大信号单音激励下，表征射频和微波二端口网络谐波失真的静态非线性 X 参数的基本理论、数学形式及参数（能量相互转换）的物理意义，X 参数与传统的 S 参数的相互联系，静态 X 参数测量与仿真平台和模型参数的提取方法，在射频微波功率器件和无线基站设计中的应用实例。第 5 章系统地介绍在大信号双音（two-tone）和多音（multi-tone）激励下，表征射频和微波多端口网络（如调制解调器）互调失真的静态非线性 X 参数的基本理论、数学形式及参数（能量相互转换）的物理意义。第 6 章介绍如何将静态非线性 X 参数扩展到考虑了射频微波器件强非线性和长期记忆效应的动态非线性 X 参数理论、实验方案、模型记忆核辨识实例及有效性检验手段，并介绍消除或降低记忆效应的射频微波功率器件和无线基站设计中的应用实例。

本书内容新颖、理论严谨、应用背景明确、条理清晰、图文并茂。所有图表和曲线都能很好地帮助读者理解物理概念，所用数学难度适中。本书既注重基本原理和基本理论的阐述，又注重实验测量与实践应用的相结合，其应用实践与现代通信技术的研发联系十分紧密。因此，这是一部学习 X 参数理论基础的权威著作。对推动我国电气工程高年级本科生或研究生教学改革，提升从事射频微波工程和现代通信技术前沿研究的研发人员、工程师、科学家的创新能力有重要参考价值。

在翻译过程中，译者对原著中的极少数笔误和疏漏之处进行了修正。为了保留英文原

版的写作风格，防止增加不必要的错误，本书的部分符号与原著保持一致。

本书由林茂六教授翻译第 1 章、第 6 章和附录 A、C、D、E，苟元满博士翻译第 4 章和第 5 章，卢鑫博士翻译第 2 章，孙金龙博士翻译第 3 章和附录 B。林茂六教授负责全书的审校。

完成这种全新理论专著翻译的挑战大大超越了我们的预想。为此，在翻译过程中，为尽量确保译文精准，我们曾致函本专著第二作者、译者的老朋友 Jan Verspecht 博士，就一些非线性 X 参数的新概念、新思想和某些精巧实验方案设计予以请教，Jan Verspecht 博士都及时为我们解答。更让我们高兴的是，在本书中文版即将出版之际，他于百忙中，抽时间专门为中文读者写了一封热情洋溢的致读者信。在此，谨致以最衷心的感谢！

鉴于时间仓促、译者水平有限，译文中错误与不妥之处在所难免，敬祈广大读者批评指正，不胜感谢。

前 言

在高频上对于非线性电子元器件表征、建模和设计的严谨而实用的理论框架的需求已经是刻不容缓的事实了。通信革命正无情地迫使有源器件进入越来越强的非线性工作区工作。为了节省功率，延长电池寿命，且使冷却设备最小化，人们不得不追求更高的效率以应对越来越严峻的压力与挑战。所谓的非线性意味着必须研发新的测量仪器设备、新的模型和新的设计方法学，这些远远超越了线性 S 参数的框架。可喜的是，如今有了一种可交互操作并将这项难题无缝地组合于一体的新规范，这种规范称为 X 参数^①，而 X 参数正是本书所论及的全部内容。

本书将对 X 参数做综合性介绍。本书的目标是面向具有较广基础知识的读者。这是一项相当具有挑战性的任务。本书面向微波工程师、器件模型工程师和科学家，开发仿真算法的 CAE（计算机辅助工程）专家，以及研发用于非线性宽范围表征应用的新一代高速仪器的微波及 RF 的专业人士。

X 参数这种内在的多个学科的特性是让我们试图吸引更多广大读者的主要原因。过去几年由产业界采纳的基于 X 参数的多种实用解决方案都与这些领域有关。考虑到读者的多样性，我们选择了这样一种顺序来引入主题：以众所周知的时不变线性理论，即 S 参数的简要回顾作为本书的开篇，选择为多数读者所熟悉的背景来介绍更多的新概念，这对于本书的其他读者来说将是有益的。第 2 章介绍 X 参数，它是基于在谐波频率栅格（grid）上定义的多音非线性频谱映射来展开的，并对有关时不变的应用与受限情况进行了详尽描述。第 3 章对 X 参数的简便且实用的形式进行了一般的简化讨论。这种简便形式是基于应用频谱线性理论的，即一种有用的近似方法，从而大大降低了 X 参数形式的复杂性而又能满足实际应用。进而对这些最简单的 X 参数举出几个实例说明其功能、实用性和相对简单性。在频谱近似中，对共轭项的来源也进行了讨论。第 4 章集中介绍如何测量 X 参数，以及从电路仿真的广度如何计算（生成）X 参数，还对主要仪器——非线性矢量网络分析仪（NVNA）的功能框图进行了介绍，并对使用脉冲发生器相位参考来获得关键 X 参数量值的测量用途

^① X 参数是是德科技有限公司（Keysight Technologies, Inc.）的一个注册商标，是德科技有限公司于 2014 年由原安捷伦（Agilent）电子测量事业部独立运营成立。

做了评述。由于在处理许多混频器设计中，带相位的互调分量以及功率放大器作为输入功率，和由于大的失配产生的反射电气信号返回进入该器件所产生的大信号响应，都必须涉及，这超过了第 3 章中频谱线性化的近似，故第 5 章论及将 X 参数的处理扩展到多个大信号与多个端口。最后，第 6 章将 X 参数的处理扩展到动态“记忆效应”，例如，在实际高速器件对宽带通信信号的响应中呈现的重要现象。本书附有若干个附录，包括了对书中某些部分的进一步阐述、公式推演、标准符号和标记的定义等，可作为在此领域的科技工作者的参考资料。

本书也适合作为电气工程专业高年级本科生或研究生教材。事实上，我们认为：将 X 参数作为电气工程总课程的标准内容组成部分非常必要。本书对于跨越电气专业，致力于对各种非线性系统的应用进行严谨而实用的基础研究的应用数学家和应用科学家也有很好的参考价值。

本书读者所需的背景知识包括一学年的微积分学、基本电路理论和简单的傅里叶分析。对于具有电子功率放大器与晶体管、 S 参数基础、差分方程、电路设计和仿真初步知识的读者，本书会非常有帮助。

目 录

第 1 章 S 参数的简要回顾	1
1.1 引言	1
1.2 参数	1
1.3 波变量	2
1.4 S 参数的测量	6
1.5 S 参数是一种频谱映射	7
1.6 叠加	8
1.7 S 参数所描述元件的时不变性	9
1.8 级联性	10
1.9 直流工作点	12
1.10 非线性器件的 S 参数	12
1.11 S 参数的附带优势	15
1.11.1 S 参数适合高频上的分布参数元件	15
1.11.2 在高频上 S 参数易于测量	15
1.11.3 二端口 S 参数的解释	15
1.11.4 用 S 参数进行分层行为设计	16
1.12 S 参数的局限性	16
1.13 总结	17
习题	17
参考文献	18
补充阅读材料	18
第 2 章 X 参数的基本概念	19
2.1 概述	19
2.2 非线性行为和非线性频谱映射	19
2.3 多谐波频谱映射	21
2.4 负载和源失配效应	23
2.5 级联 DUT	24
2.6 实例：两个带有独立偏置的 RF 功率放大器的级联	26
2.7 与谐波平衡的关系	28
2.8 交叉频率相位	28

2.8.1	同量信号	28
2.8.2	交叉频率相位的定义	29
2.9	多谐波多端口激励的基本 X 参数	32
2.9.1	$F_{p,k}(\cdot)$ 函数的时不变性及相关特性	33
2.9.2	X 参数的定义和行为模型	34
2.9.3	实例: X 参数集	35
2.10	基本 X 参数的物理含义	36
2.10.1	参考激励和响应	36
2.10.2	物理含义	37
2.11	使用 X 参数行为模型	37
2.11.1	实例: 源和负载失配的放大器	38
2.12	总结	41
	习题	41
	参考文献	42
	补充阅读材料	42
第 3 章	频谱线性化近似	43
3.1	微弱失配时基本 X 参数的简化	43
3.1.1	非解析映射 (Non-analytic Maps)	44
3.1.2	大信号工作点 (Large-signal Operating Point)	46
3.2	加入小信号激励 (非线性频谱映射线性化)	48
3.2.1	小信号交互: 射频项	49
3.2.2	小信号交互: 直流项	50
3.3	小信号交互项的物理含义	52
3.4	讨论: X 参数和频谱的雅可比 (Jacobian) 行列式	57
3.5	X 参数是 S 参数的超集	57
3.6	两级放大器设计	62
3.7	大信号激励下的放大器匹配	65
3.7.1	输出匹配及 hot- S_{22}	65
3.7.2	输入匹配	74
3.8	实例: 一个 GSM 放大器	76
3.9	总结	79
	习题	80
	参考文献	82
	补充阅读材料	82
第 4 章	X 参数的测量	83
4.1	硬件测量平台	83

4.1.1	硬件测量要求	83
4.1.2	基于混频器的测量系统	83
4.1.3	基于采样器的测量系统	86
4.1.4	激励信号要求	87
4.2	校准	88
4.2.1	标量损耗修正	88
4.2.2	S 参数校准	89
4.2.3	NVNA 校准	90
4.3	相位参考	91
4.3.1	相位参考信号	92
4.3.2	测量注意事项	93
4.3.3	实际相位参考信号	94
4.4	测量技术	95
4.4.1	大信号响应测量	95
4.4.2	小信号响应测量	96
4.4.3	实际测量考量	98
4.4.4	基于仿真的 X 参数提取	100
4.5	X 参数文件	100
4.5.1	结构	100
4.5.2	命名规则	101
4.5.3	文件实例	102
4.6	总结	104
	参考文献	104
	补充阅读材料	104

第 5 章 多音及多端口 X 参数

5.1	引言	105
5.2	同量信号——大信号 $A_{1,1}$ 和 $A_{2,1}$: 负载相关 X 参数	106
5.2.1	时不变、相位归一化及同量双音大信号工作点	107
5.2.2	频谱线性化	108
5.3	利用负载调谐器建立大信号工作点: 无源负载牵引	109
5.4	同量信号的其他考虑事项	111
5.4.1	在受控负载下提取 X 参数函数	111
5.4.2	谐波叠加原理	111
5.4.3	无源负载牵引下负载相关 X 参数的局限性	111
5.4.4	三射频自变量空间定义的参考大信号工作点采样	112
5.4.5	负载相关 X 参数硬件测量平台	112
5.4.6	校准修正不可控谐波阻抗	113

5.5	GaAs 工艺 FET 晶体管在任意阻抗下的负载相关 X 参数	113
5.5.1	GaN 工艺 HEMT 的负载相关 X 参数模型: 估计单独调谐 谐波阻抗的影响	115
5.6	设计实例: Doherty 功率放大器的设计与有效性检验	121
5.6.1	Doherty 功率放大器	121
5.6.2	晶体管的 X 参数表征	122
5.6.3	X 参数模型的有效性检验	123
5.6.4	利用 X 参数设计 Doherty 功率放大器	126
5.6.5	设计结果	128
5.7	非同量信号	129
5.7.1	非同量双音 (two-tone) X 参数的符号	129
5.7.2	非同量双音 X 参数的时不变性	130
5.7.3	参考大信号工作点	132
5.7.4	频谱线性化	132
5.7.5	讨论	134
5.7.6	负频率互调成分	134
5.7.7	混频器的 X 参数模型	135
5.8	总结	137
	习题	138
	参考文献	138
	补充阅读材料	139
第 6 章	记忆效应和动态 X 参数	140
6.1	引言	140
6.2	已调信号: 包络域	140
6.3	在包络域中的准静态 X 参数的估计	141
6.3.1	从静态单音 X 参数模型描述准静态双音 (two-tone) 互调失真	142
6.3.2	利用准静态法估计 ACPR	147
6.3.3	静态法的一些局限性	149
6.3.4	数字调制中准静态 X 参数的优点	149
6.4	记忆效应的表现	150
6.5	记忆效应的起因	151
6.5.1	自热	151
6.5.2	偏置调制	152
6.6	记忆效应的重要性	155
6.6.1	调制引入的基带记忆和载波记忆	155
6.6.2	动态 X 参数	156
6.6.3	记忆核辨识: 概念的起因	159

6.6.4	记忆核的阶跃响应	160
6.6.5	应用于真实放大器	161
6.6.6	记忆模型的有效性检验	163
6.6.7	动态 X 参数的解释	167
6.6.8	宽带 X 参数 (XWB)	168
	参考文献	173
	补充阅读材料	174
附录 A	符号和通用定义	175
A.1	集合	175
A.2	矢量和矩阵	175
A.3	信号表示	176
A.3.1	时域信号 (实信号)	176
A.3.2	复表示 (复包络信号)	176
A.4	傅里叶分析	177
A.5	波定义	178
A.5.1	广义功率波	178
A.5.2	电压波	180
A.6	线性网络矩阵描述	180
A.6.1	S 参数	181
A.6.2	Z 参数	181
A.6.3	Y 参数	181
附录 B	X 参数和 Volterra 理论	182
B.1	引言	182
B.2	数学符号与问题定义	182
B.3	Volterra 理论的应用	183
B.4	麦克劳林级数的推导	184
B.5	直流输出的麦克劳林级数	185
B.6	结论	186
附录 C	并行 Hammerstein 模型的对称性	187
附录 D	宽带记忆近似	189
附录 E	习题解答	191

第 1 章 S 参数的简要回顾

1.1 引言

本章对 S 参数进行简要介绍，主要目的是为更通用的 X 参数表达形式推导做铺垫。为了在后文中使 X 参数更容易广义化，本章还将介绍时不变和频谱映射概念。S 参数的阐述是按照校准测量、被测器件（DUT）的本征特性、知识产权安全（IP-secure）的元件行为模型和线性系统设计的构成规则依次展开的。将两级线性 S 参数元件进行级联，以此作为一个实例，考察后面的通用化非线性表达形式。这里使用了简单的非线性器件模型的晶体管 S 参数计算，以此作为一个实例引入静态工作点和小信号工作条件的概念，而这二者在处理 X 参数时都必须广义化。

1.2 参数

自 20 世纪 50 年代以来，S 参数或散射参数已成为整个微波理论与技术的最重要基础。

用矢量网络分析仪（VNA）在高频测量 S 参数是很容易的，校准后测量的 S 参数代表了 DUT 的本征特性，而与表征它的 VNA 系统本身无关。校准过程^[1]消除了系统测量误差，且能将属于该器件的真实数值从整个测量值中分离出来，而与用于表征它的测量系统本身无关。这些 DUT 的性能（增益、损耗、反射系数等）是通用、直观且极为重要的^[2]。S 参数的另一个关键特性是：一个组合系统的 S 参数完全由构成部分元件的 S 参数和它们的通用性所确定。S 参数提供了一个线性元件怎样对任意激励信号产生响应的完整技术性能。因此用 S 参数设计线性系统的性能是绝对可预测的。S 参数在外部的端口接面上完整地定义了该线性元件的行为描述，而与该元件的物理工艺或实现过程无关。S 参数能在它的提供商与系统集成者之间自由共享，而不会使得元件实现过程被破解，从而保护了知识产权（IP），提供了共享和再利用的空间。读者可能要问这样一个问题：“S 参数是测量的还是建立的一个模型？”答案是：两者都是。

S 参数不必仅来自于测量。它们可根据物理表示或通过求解麦克斯韦方程，或通过半导体