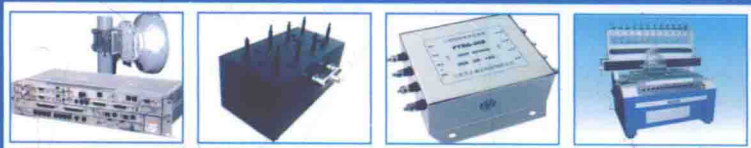


WILEY

微波与射频滤波器的设计技术及实现



[法] Pierre Jarry 著
[美] Jacques Beneat 著
张永亮 译



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

微波与射频滤波器的设计技术及实现

ADVANCED DESIGN TECHNIQUES
AND REALIZATIONS OF MICROWAVE
AND RF FILTERS

[法] Pierre Jarry 著
[美] Jacques Beneat 著
张永亮 译

西安电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微波与射频滤波器的设计技术及实现 = ADVANCED DESIGN TECHNIQUES AND REALIZATIONS OF MICROWAVE AND RF FILTERS: 英文名/[法]皮埃尔·雅里(Pierre Jarry), [美]雅克·本尼特(Jacques Beneat)著. 张永亮译. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4340 - 3

I. ①微… II. ①皮… ②雅… ③张… III. ①滤波器—设计 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268883 号

Advanced design techniques and realizations of microwave and RF filters

Pierre Jarry, Jacques Beneat.

ISBN: 978 - 0 - 470 - 18310 - 6(cloth)

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予西安电子科技大学出版社。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记图字: 25 - 2016 - 0198 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.5

字 数 380千字

印 数 1~2000册

定 价 55.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4340 - 3/TN

XDUP 4632001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

内 容 简 介

微波与射频滤波器在通信系统中起重要作用,随着雷达、卫星和移动无线系统的发展,迫切需要能够满足日益提高的精度、可靠性以及缩短设计时间等要求的设计方法。本书全面论述了微波滤波器的基本理论、综合、设计、实现等相关问题,主要讲述了滤波器分析与设计的基本概念与方法,对滤波器设计中的基本元件(如阻抗变换器和导纳变换器)及其应用进行了详细的阐述,给出了滤波器的分类、设计流程、应用场合等。本书理论充实,工程指导性强,与其他大多数同类书籍相比更强调工程实践性,可使读者对滤波器的设计流程有更清晰的认识。

本书是一本面向电子设计工程师和产品负责人的具有实用价值的参考书,同时也可作为相关专业本科生及研究生的教学指导用书。

序

应邀为《微波与射频滤波器的设计技术及实现》一书审稿感到非常荣幸。本书的书名很好地反映了该书的焦点及内容。

滤波器作为一种重要的无源器件，在射频与微波子系统及设备中能够获得精确的频率响应。在滤波器发展的早期，波导与平面 TEM 滤波器得到了长足的发展。在过去二十多年中，滤波器技术在军用和商业市场应急通信方面显示出其优越性。滤波器技术的主要发展包括：性能提高，CAD 工具的发展，全波分析，新结构、新材料及其相应技术的发展。新材料技术，诸如高温超导衬底、微机械、多层集成、低温共烧陶瓷和液晶高分子都应用在现代滤波器技术上。近期出现的滤波器新应用包括双通带通信，诸如局域无线网络和超宽带通信及成像。

本书的研究内容能够指导平面及波导结构的现代滤波器设计，提高设计精度与可靠性，缩短设计时间并快速求得精确解，具体包括阶梯和桥式滤波器的分析、设计、模型、加工和实际因素的考虑。本书所讨论的现代设计技术适用于多种滤波器，包括综合分析和结构的模型等效，这些内容从实际的角度出发，强调细节，互相融合。本书以方程、表格、图的形式分析了更多设计细节，并且给出了求解实例，以完成滤波器设计从指标到产品的实现；通过简单的设计方程和计算实例以简化现代滤波器的设计；从理论、设计和实际角度出发，满足各种应用。本书适用于学生、教师、科研人员及工程师。

整体而言，本书为滤波器设计者很好地平衡了与滤波器设计相关的研究内容。祝贺本书的作者能够写出如此出色的著作，我坚信该著作能够对射频和微波领域作出重要贡献。

INDER BAHL 博士

Roanoke, Virginia

2007 年 11 月

译者序

《微波与射频滤波器的设计技术及实现》是一本适用于高年级本科生和研究生使用的教材。这本教材近年来在行业内非常流行，在西安电子科技大学出版社的大力支持下，我决定翻译此书。本书中出现的矩阵和向量形式以及参考文献的格式均与原著中一致，以方便读者与原文对照。

本书的推荐理由如下：

滤波器作为一种重要的无源器件，在射频与微波子系统及设备中能够获得精确的频率响应。在滤波器发展早期，波导与平面 TEM 滤波器得到了长足的发展。在过去二十年中，滤波器技术在军用和商业市场应急通信显示出了其优越性。滤波器技术的主要发展包括：性能的提高，CAD 工具的发展，全波分析的实现，新结构、新材料及相应技术的推出。新材料技术诸如高温超导衬底、微机械、多层集成、低温共烧陶瓷和液晶高分子都已应用在现代滤波器技术上。近期出现的滤波器新应用包括双通带通信，诸如局域无线网络和超宽带通信及成像。

本书的研究内容能够指导平面及波导结构的现代滤波器设计，提高设计精度的要求和可靠性，缩短设计时间并获得有效的解，具体包括阶梯和桥式滤波器的分析、设计、建模、加工以及实际因素的考虑。所讨论的现代设计技术适用于滤波器的种类很宽泛，包括综合分析和结构的模型等效。这些内容从实际的角度出发，强调细节，互相融合；以方程、表格、图的形式体现出更多设计细节，并且给出了实例求解过程。本书适用于高年级本科生及研究生、教师、科研人员及工程师。

全书由内蒙古大学张永亮翻译，在翻译过程中得到了内蒙古大学交通学院的领导与同事的支持。特别感谢内蒙古大学电子信息工程学院的周润景教授、翁智副教授的指导。

本书出版得到了内蒙古大学高层次人才引进项目(22200—5145149)、内蒙古大学博士后流动站启动项目(21200—5152606)、内蒙古自然科学基金(21200—5153108)、国家自然科学基金(61161001, 61561037)的资助。

内蒙古大学

张永亮

前 言

微波与射频滤波器在通信系统中起着重要作用，随着雷达、卫星和移动无线系统的发展，迫切需要能够满足日益提高的精度、可靠性以及缩短设计时间等要求的设计方法。本书提供了现代滤波器大量设计技术，通过简洁明了的方法对滤波器综合与设计的基本原理进行了回顾。关于滤波器设计的10章内容中，每一章都提供了微波结构的分析与模型等效方法，同时对设计流程进行了总结并给出了设计实例及其测量响应，以便于射频工程师根据其应用需求选择相应的滤波器。本书除了介绍理论知识外，还列举了20种以上的滤波器设计实例。本书内容来源于作者自己的科研与教学实践，风格鲜明，易于阅读。

本书适用于科研工作者、射频与微波工程师，同时也适用于相关领域的高年级研究生。而且，书中内容也可作为滤波器设计课程的主要内容。

本书分为四部分。第I部分包含前四章，内容为微波滤波器分析与设计的基本概念及方程。第1章包含了双端口网络的散射参数及 $ABCD$ 参数的定义与实例，回顾了微波滤波器设计中的基本元件，如阻抗变换器与导纳变换器等，给出了微波滤波器综合中非常有用的理论——等分定理。第2章总结了滤波器近似与综合，给出了滤波器幅度响应近似函数，如巴特沃斯函数、切比雪夫函数、椭圆函数和准椭圆函数等，以及用来近似滤波器相位响应的贝塞尔函数与罗德等距函数，并给出了这些函数集总阶梯实现的细节；最后介绍了阻抗、导纳变换器的性质及其实现形式。第3章回顾了矩形波导、图形波导、平面传输线和分布电路。第4章归纳了微波滤波器。

第II部分包含第5~8章，对应四个最小相位滤波器的分析与设计。第5章分析了利用悬置线实现的电容间隙滤波器分析与模型，介绍了直接设计流程及其物理实现，给出了滤波器的窄带及宽带测量响应，频率范围为8~16 GHz。本章中的初步结果推广到了毫米波滤波器，并给出了35 GHz悬置线滤波器的设计实例。为确保滤波器性能优良，频率越高，电磁分析就越严格。第6章给出了消逝模滤波器的设计方法。消逝模滤波器包含矩形波导和圆形波导两类，波导中有介质块插入。这类型滤波器比传统波导滤波器体积要小，因为波导的截止频率可以提高，即使主模在部分结构中会消失。本章给出了工作频率在14 GHz处的滤波器设计实例。为了减小该类滤波器的成型因子，引入了折叠型消逝模波导滤波器。通过工作在8.4 GHz和14.6 GHz两种滤波器来进行阐述。第7章中给出了交指型滤波器的设计方法，并通过流图来等效其结构。因为交指线的频率周期特性，设计方法基于低通原型电路。利用悬置线实现了频率分别为1 GHz和2 GHz的滤波器。第8章给出了梳状线滤波器的设计流程，并设计了工作在1.2 GHz的悬置线滤波器。

第Ⅲ部分包含第9章和第10章，分别对应两种设计非最小相位对称响应的技术。在对称响应的情况下，等分定理的应用可减小设计方法的复杂性。本章中的滤波器主要侧重其相位特性。非最小相位条件会导致阶数的增大，多余的阶数可用于对滤波器幅度响应的调整，但要求微波结构能够满足非最小相位条件，这使得设计技术更加复杂。第9章列举了利用额外阶数的滤波器设计实例。第10章中给出了单模 TE_{011} 模式的窄带圆波导，引入了群时延优化的方法，给出了 14.5 GHz 单模滤波器的设计和实现方法。

第Ⅳ部分包含第11~14章，主要内容是非最小相位非对称响应滤波器。滤波器在给定传输零点数目后，具有广义切比雪夫和准椭圆带通响应。对于非对称响应，低通原型电路是虚数的，等分定理与传统的频率变换不再适用。微波结构必须能够产生传输零点。第11章给出了电容间隙耦合线滤波器，其能够产生切比雪夫非对称响应；利用悬置线实现的三阶非对称响应在通带右端具有一个传输零点。第12章给出了直线型双模矩形波导结构的滤波器，其谐振模式为 TE_{102} 和 TE_{301} 模式，在频率 12 GHz 处对应两种实现形式。第13章中介绍了具有非对称响应的双模圆波导滤波器，同时给出了频率在 8.5 GHz 附近的一些设计实例，并通过响应证明了传输零点的位置可以是任意的。第14章引入了非最小相位微波滤波器的设计概念。滤波器由矩形波导单元块组成，其设计过程利用强有力的优化算法实现(遗传算法)。利用该方法可设计矩形多模广义切比雪夫多模滤波器。

本书的架构如图 P1 所示。设计滤波器由第Ⅰ部分的基本概念和方程开始。读者可以在阅读完第Ⅱ部分最小相位滤波器的综合后停止；也可以直接阅读更多关于滤波器的知识，如非最小相位滤波器。第Ⅲ部分介绍了非最小相位对称响应滤波器的设计方法。第Ⅳ部分介绍了非最小相位非对称滤波器的设计方法。后两种滤波器的类型取决于低通原型网络。

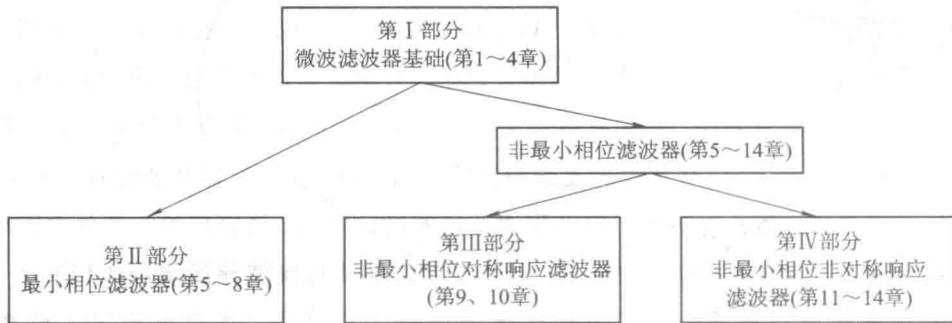


图 P1 本书的架构

Pierre Jarry
Jacques Beneat

致 谢

首先感谢 Inder J. Bahl 教授, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering 杂志的主编。没有他的帮助,这本书就无法完成,在此致以诚挚的谢意。

感谢 Wiley-Interscience 出版社的 George Telecki 和审稿人的大力帮助,特别感谢 Rachel Witmer 和 Melissa Valentine。

Pierre Jarry 对他的同事——Pascal Fouillat 教授、Eric Kerherve 教授、Andr'e Touboul 教授和 Yves Garault 教授深表感谢。还要感谢妻子 Roselyne 和儿子 Jean-Pierre 的支持。

Jacques Beneat 非常感谢 Norwich University——一个催人向上的地方。感谢 Ronald Lessard 教授和 Steve Fitzhugh 教授在编写概述过程中给予的支持。感谢学术委员会副主席 Bjong Wolf Yeigh 的支持。

感谢我们已毕业和在读的研究生为本书做出的贡献。特别感谢来自巴西的 Humberto Abdalla Junior 教授和 Horacio Tertuliano 教授,来自法国的 G. Tanne 教授、J. F. Favennec 副教授和 F. Le Pennec 副教授,来自非洲的 C. Djoub,来自加拿大的 M. Lyakoubi 工程师,来自法国的 N. Boutheiller、CL. Guichaoua、E. Hanna、M. Lecouve、D. Lo Line Tong 和 O. Roquebrun 等工程师。

本书是在在欧洲航天局、法国通讯研究院、国家空间研究中心等单位的支持下完成的。该工作包含 2 项欧洲航天局的专利,还有其他将近 16 项单位专利。

Pierre Jarry
Jacques Beneat

目 录

第 I 部分 微波滤波器基础

第 1 章 散射参数与 $ABCD$ 矩阵	2
1.1 引言	2
1.2 双端口网络散射矩阵	2
1.2.1 定义	2
1.2.2 S 参数的计算	3
1.2.3 S 参数的性质	6
1.3 双端口网络的 $ABCD$ 矩阵	7
1.3.1 基本元件的 $ABCD$ 矩阵	7
1.3.2 $ABCD$ 矩阵的级联与相乘性质	8
1.3.3 双端口网络的输入阻抗	9
1.3.4 阻抗变换器与导纳变换器	10
1.3.5 $ABCD$ 参数的性质	12
1.4 S 参数与 $ABCD$ 参数的互相转换	12
1.5 对称网络的等分定理	13
1.6 本章小结	15
本章参考文献	15
第 2 章 电路网络近似与综合	16
2.1 引言	16
2.2 理想低通滤波特性	16
2.3 理想低通滤波特性幅度响应的函数近似	17
2.3.1 巴特沃斯函数	17
2.3.2 切比雪夫函数	17
2.3.3 椭圆函数	18
2.3.4 广义切比雪夫(准椭圆)函数	20
2.4 理想低通滤波特性相位响应的函数近似	21
2.4.1 贝塞尔函数	21
2.4.2 罗德等距线性相位函数	22
2.5 低通集总阶梯原型	22
2.5.1 一般综合技术	22
2.5.2 归一化低通阶梯网络	25
2.6 阻抗与频率缩放	28
2.6.1 阻抗缩放	28
2.6.2 频率缩放	28
2.7 LC 滤波器实例	29
2.8 阻抗与导纳变换器阶梯网络	29

2.8.1 低通原型	29
2.8.2 缩放的灵活性	30
2.8.3 带通阶梯网络	31
2.8.4 滤波器实例	32
2.9 本章小结	33
本章参考文献	33
第3章 波导与传输线	35
3.1 引言	35
3.2 矩形波导与谐振腔	35
3.2.1 矩形波导	35
3.2.2 矩形波导腔	36
3.3 圆形波导与谐振腔	37
3.3.1 圆形波导	37
3.3.2 圆形波导腔	39
3.4 消逝模	40
3.5 平面传输线	40
3.6 分布电路	43
3.7 本章小结	45
本章参考文献	45
第4章 微波滤波器的分类	47
4.1 引言	47
4.2 最小相位微波滤波器	47
4.2.1 一般设计步骤	47
4.2.2 最小相位滤波器实例	49
4.3 非最小相位对称响应微波滤波器	49
4.3.1 一般设计步骤	49
4.3.2 非最小相位对称响应滤波器实例	51
4.3.3 微波线性相位滤波器	52
4.4 非最小相位非对称响应微波滤波器	52
4.4.1 一般设计步骤	52
4.4.2 非最小相位非对称响应滤波器实例	55
4.4.3 优化方法设计多模滤波器	56
4.5 本章小结	56
本章参考文献	57

第Ⅱ部分 最小相位滤波器

第5章 毫米波电容带隙滤波器	60
5.1 引言	60
5.2 电容带隙滤波器	60
5.2.1 电容带隙滤波器结构	60
5.2.2 设计步骤	61

5.2.3 逐步设计实例	64
5.2.4 滤波器实现过程	65
5.3 毫米波段推广	67
5.3.1 毫米波技术	67
5.3.2 35 GHz 五阶切比雪夫电容带隙滤波器	69
5.4 悬置线电磁特性	70
5.5 本章小结	72
本章参考文献	72
第 6 章 带有介质插入的消逝模波导滤波器	74
6.1 引言	74
6.2 消逝模波导滤波器	74
6.2.1 结构的散射参数与 $ABCD$ 参数	75
6.2.2 结构的等效电路参数	77
6.2.3 滤波器设计流程	81
6.2.4 设计实例与物理实现	82
6.3 折叠型消逝模波导滤波器	85
6.3.1 附加元件的散射参数与 $ABCD$ 参数	86
6.3.2 滤波器设计流程	87
6.3.3 设计实例与物理实现	87
6.4 本章小结	89
本章参考文献	90
第 7 章 交指型滤波器	93
7.1 引言	93
7.2 交指型滤波器	93
7.3 设计方法	96
7.3.1 原型电路	96
7.3.2 等效电路	97
7.3.3 输入输出	99
7.3.4 窄带滤波器情况	100
7.3.5 频率变换	100
7.3.6 交指型滤波器的物理参数	101
7.4 设计实例	103
7.4.1 宽带实例	103
7.4.2 窄带实例	105
7.5 滤波器的物理实现与测量响应	106
7.6 本章小结	108
本章参考文献	108
第 8 章 悬置线实现梳状线滤波器	109
8.1 引言	109
8.2 梳状线滤波器	109
8.3 设计方法	111
8.3.1 原型电路	111

8.3.2 等效电路	112
8.3.3 输入/输出	113
8.3.4 可实现性	115
8.3.5 梳状线结构的物理参数	115
8.4 设计实例	117
8.5 滤波器的物理实现与测量响应	119
8.6 本章小结	120
本章参考文献	120

第Ⅲ部分 非最小相位对称响应滤波器

第9章 幅度相位限定的广义交指型滤波器	122
9.1 引言	122
9.2 广义交指型滤波器	122
9.3 同步幅度与相位函数	124
9.3.1 最小线性相位函数	124
9.3.2 幅度与相位同步非最小相位函数	125
9.3.3 幅度与相位同步非最小相位函数的综合	126
9.4 设计方法	129
9.4.1 偶模等效电路	129
9.4.2 频率变换	132
9.4.3 交指型结构的物理参数	132
9.5 设计实例	135
9.6 实现与测量响应	138
9.7 本章小结	139
本章参考文献	140
第10章 温度稳定窄带单模 TE_{011} 线性相位滤波器	141
10.1 引言	141
10.2 TE_{011} 滤波器	141
10.3 低通原型	142
10.3.1 幅度	142
10.3.2 时延	142
10.3.3 低通原型的综合	143
10.4 设计方法	144
10.4.1 耦合匹配	144
10.4.2 腔体选择	146
10.4.3 耦合定义	148
10.5 设计实例	149
10.6 实现与测量响应	151
10.6.1 幅度与相位性能	151
10.6.2 温度性能	152
10.7 本章小结	155

第IV部分 非最小相位非对称响应滤波器

第 11 章 非对称电容间隙耦合线滤波器	158
11.1 引言	158
11.2 电容间隙耦合线滤波器	158
11.3 非对称广义低通切比雪夫滤波器的综合	158
11.3.1 直线型网络	161
11.3.2 直线型网络的分析	161
11.3.3 直线型网络的综合	163
11.3.4 频率变换	165
11.4 设计方法	166
11.5 设计实例	170
11.6 CGCL 滤波器的实现	175
11.7 本章小结	175
本章参考文献	176
第 12 章 具有传输零点的厚矩形窗口耦合直线型 TE_{102}/TE_{301} 非对称双模滤波器	177
12.1 引言	177
12.2 TE_{102}/TE_{301} 滤波器	177
12.3 非对称广义低通切比雪夫滤波器的综合	177
12.3.1 基本元件	178
12.3.2 直线型网络的分析	178
12.3.3 直线型网络的综合	181
12.3.4 频率变换	182
12.4 设计方法	183
12.4.1 单模与双模腔体的等效电路	183
12.4.2 最优化方法	184
12.5 设计实例	187
12.6 滤波器的加工与测量性能	191
12.6.1 具有一个有限传输零点的三阶滤波器	191
12.6.2 具有两个有限传输零点的四阶切比雪夫滤波器	192
12.7 本章小结	194
本章参考文献	194
第 13 章 具有传输零点的非对称圆波导双模滤波器	196
13.1 引言	196
13.2 双模圆波导滤波器	196
13.3 非对称广义低通切比雪夫滤波器的综合	197
13.3.1 交叉耦合原型的综合	197
13.3.2 由链式矩阵提取元件	199
13.3.3 拓扑结构与频率变换	201
13.4 设计方法	203

13.4.1	矩阵旋转	203
13.4.2	十字型膜片	205
13.4.3	膜片的物理参数	208
13.5	物理实现与测量响应	209
13.5.1	一个传输零点在通带左端的四阶滤波器	209
13.5.2	两个传输零点在通带右端的四阶滤波器	211
13.5.3	一个传输零点在通带右端的六阶滤波器	212
13.6	本章小结	213
	本章参考文献	213
第 14 章	利用遗传算法设计非对称多模矩形波导块滤波器	215
14.1	引言	215
14.2	多模矩形波导滤波器	215
14.3	基于优化的设计技术	217
14.3.1	遗传算法	217
14.3.2	实例	221
14.4	物理实现	225
14.4.1	具有两个传输零点的四阶滤波器	225
14.4.2	具有四个传输零点的七阶滤波器	227
14.4.3	具有六个传输零点的十阶滤波器	229
14.5	本章小结	231
	本章参考文献	231
附录	233
附录 1	无耗系统	233
附录 2	冗余元件	234
附录 3	波导阶梯不连续性的模式分析	235
附录 4	具有单位变换器的三角形结构	241
附录 5	多模矩形波导的参考场及其散射矩阵	242

第 I 部分 微波滤波器基础

第 1 章 散射参数与 ABCD 矩阵

1.1 引言

本章主要对微波滤波器设计时需了解的一些重要特性进行回顾^[1,1]，如散射参数和 ABCD 参数。散射参数是从微波结构的电磁推导得出的，而 ABCD 参数在网络级联方面非常便于使用，且研究相当深入。为了更好地理解两种形式之间的关系，我们引入了一些例子。等分定理在解决对称网络问题时非常有用，本章对其也进行了简要介绍。

1.2 双端口网络散射矩阵

1.2.1 定义

如图 1.1 所示，源端入射波为 a_1 ，反射波为 b_1 ，负载端入射波为 a_2 ，反射波为 b_2 ，源内阻为 R_G ，负载电阻为 R_L 。对于微波器件结构来说，使用入射波与反射波变量远比电压、电流变量合适。

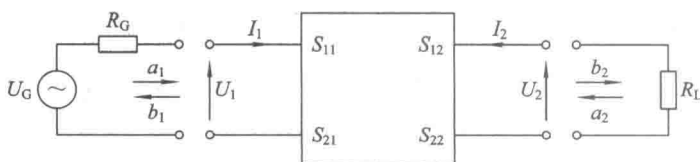


图 1.1 双端口网络散射矩阵的示意图

对双端口网络而言，S 参数与入射波和反射波的关系为

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (1.2-1)$$

方程(1.2-1)可以写为矩阵的形式：

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1.2-2)$$

参数 S_{11} 称为输入端反射系数，是在输出端匹配的情况下，输入端反射波与入射波的比值。

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (1.2-3)$$

参数 S_{11} 反映了网络输入端入射波未到达输出端所返回的量值。对微波滤波器而言，